平成３０年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業
地質環境長期安定性評価技術高度化開発

【　付　録　集　】

平成３１年３月

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
一般財団法人電力中央研究所

【 付録１ 】
地質環境の長期安定性評価に係る地形・地質・断層調査技術の高度化に関する共同研究
国立大学法人京都大学
pp.1～pp.32

【 付録２ 】
断層内物質の年代測定による断層活動性評価手法に関する研究
石川県公立大学法人石川県立大学
pp.33～pp.44

【 付録３ 】
機械学習に基づいた断層の活動性評価手法の開発に関する共同研究
国立大学法人富山大学
pp.45～pp.80

【 付録４ 】
岩石・年代学的手法を用いた自然現象の影響評価手法の高度化に関する研究
国立大学法人山形大学
pp.81～pp.101

【 付録５ 】
地質環境長期安定性評価技術高度化開発委員会の開催実績
国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・一般財団法人電力中央研究所
pp.102～pp.108

【 付録６ 】
最新知見を踏まえた隆起・侵食データマップの整備 侵食速度データ一覧
国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
pp.109～pp.120

【 付録７ 】
A. 岩石風化模擬実験に係るデータ集
B. 段丘の対比・編年の高精度化に関わる文献調査収集文献一覧
pp.121～pp.285

本付録は、経済産業省資源エネルギー庁からの委託事業として、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構及び一般財団法人電力中央研究所が実施した「平成 30 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業（地質環境長期安定性評価技術高度化開発）」に関する共同研究の成果及び実施された委員会の議事録などを取りまとめたものである。

【 付録１ 】

地質環境の長期安定性評価に係る
地形・地質・断層調査技術の高度化に関する共同研究

平成 30 年度共同研究報告書

平成 31 年 1 月

国立大学法人京都大学

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
核燃料・バックエンド研究開発部門　東濃地科学センター
地層科学研究部　ネオテクトニクス研究グループ

目　次

1. 概要 4
1.1 共同研究件名 4
1.2 共同研究先 4
1.3 研究目的 4
1.4 研究内容 5
1.5 実施場所 5
1.6 研究期間 5
2. 地質温度計と熱年代による深部流体の温度・滞留時間の検討 6
2.1 研究手法 6
2.2 試料採取 8
2.3 まとめと今後の展望 10
3. 粘土鉱物の K-Ar 年代測定に基づいた断層帯の活動性の検討 11
4. 地質温度圧力計と U-Pb 年代測定法を用いた侵食史の推定 12
4.1 研究手法 12
4.2 研究試料 13
4.3 分析方法 13
4.4 岩石記載 14
4.5 地質温度計圧力計の適用 14
4.6 まとめと今後の展望 16
5. 熱年代学、宇宙線生成核種法、地形解析による山地の隆起・侵食過程の検討 17
5.1 熱年代学による山地の隆起・侵食過程の検討 17
5.1.1 熱年代学の概要 17
5.1.2 研究試料 17
5.1.3 分析手法と測定結果 19
5.1.4 まとめと今後の展望 20
5.2 宇宙線生成核種を用いた地形の隆起・侵食過程の検討 20
5.3 地形解析による山地の隆起・侵食過程の検討 24
5.3.1 手法 25
5.3.2 予察的結果 27
5.3.3 まとめと今後の展望 29
6. まとめ 29

図 目 次

図 2-1 気液二相の流体包有物の相図模式図 7
図 2-2 様々な熱年代計の年代が若返る温度と時間 8
図 2-3 本研究の検討項目と試料採取戦略 8
図 2-4 試料採取地点位置図 10
図 3-1 Sample locations 11
図 4-1 試料採取地点 13
図 4-2 斜長石の BSE 像 14
図 4-3 角閃石の BSE 像 14
図 4-4 試料 KRG16-101 に対して求めた温度圧力条件 15
図 4-5 試料 KRG16-101 に対して求めた固結温度・深さ条件 16
図 5-1 種々の隆起・侵食・埋積の条件における海成段丘の岩盤中の ^{10}Be 濃度の深度分布 23
図 5-2 異なる堆積速度条件下での岩盤表面における ^{10}Be 濃度の時間変化 24
図 5-3 Locations of the points where uplift rate was imposed 27
図 5-4 Synthetic and reconstructed data of uplift rate of Tohoku Japan Arc. 28
図 5-5 Reconstructed spatial and temporal variation in uplift rate of Tohoku Japan Arc ranging from 0.6 Ma to present day at 0.2 Ma intervals 28

表 目 次

表 2-1 代表的な熱年代計の閉鎖温度 7
表 2-2 採取試料リスト 9
表 2-3 鉱物分離結果 10
表 5-1 鉱物分離結果一覧 18
表 5-2 年代測定結果一覧 20
表 5-3 The averaged value of the uplifting rate of each river system for past 120,000 years 26

1. 概要

1.1 共同研究件名

地質環境の長期安定性評価に係る地形・地質・断層調査技術の高度化に関する共同研究

1.2 共同研究先

国立大学法人京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻

1.3 研究目的

日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構）では、経済産業省資源エネルギー庁から受託した「平成 30 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業（地質環境長期安定性評価技術高度化開発）」において、地層処分に適した地質環境の選定に係る自然現象の影響把握及びモデル化に関連する研究課題として示された火山・火成活動、深部流体、地震・断層活動、隆起・侵食に対し、地質学、地形学、地震学、地球年代学などの各学術分野における最新の研究を踏まえた技術の適用による事例研究を通じて、課題の解決に必要な知見の蓄積や調査・評価技術の高度化を総合的に進めている。

このうち深部流体に関しては、深部流体及び非火山性熱水に関する形成・移動メカニズムなどの把握のために、これらの熱水活動に伴う熱影響の定量的な検討事例の蓄積が課題として挙げられる。同じく、地震・断層活動については、上載法の適用が困難な断層の活動性の評価方法の整備、隆起・侵食については、隆起量・侵食量の評価に反映するための、地形学的手法や堆積物の年代測定に基づく評価方法の整備が、それぞれ技術開発課題として挙げられている。

国立大学法人京都大学（以下、京都大学）と実施する本共同研究では、地形学、地質学、地球年代学などの手法を総合的に用いることで、これらの課題に係る検討を行う。非火山性熱水の熱影響については、地質温度計と熱年代学の手法を組み合わせることにより、熱水の温度、滞留時間、活動時期、加熱範囲などの推定を行う。上載法の適用が困難な断層の活動性については、断層帯物質の年代測定による活動性評価手法の高度化を検討する。隆起量・侵食量の評価手法の整備については、近年発達した年代測定法の導入や、既存の地形・地質学的手法の組み合わせ、あるいは数値標高モデルを用いた地形解析によって、これまでは隆起量・侵食量の評価が困難だった地域・条件下にも適用可能な手法の整備を図る。

共同研究先である京都大学は、地形学、地質学、地球年代学などの諸分野における国内最高峰の専門家がそろっており、多くの研究実績を有している。また、原子力機構は、これらの分野における各種分析に必要な最新の装置を数多く有しており、国内でも有数の分析環境を備えている。そのため、本共同研究を行うことにより、上記のような多様な課題に対して総合的かつ効果的に進めることができる。本共同研究を通じて、京都大学は原子力機構が有する様々な分析装置を利用し、各種の年代測定や化学分析を行うことにより、地形学、地質学、地球年代学などの研究をより効果的に進めることができ、原子力機構は地形学、地質学、地球年代学などに関する技術的支援を得て深部流体による熱影響の評価、断層の活動性評価手法の高度化、隆起量・侵食量の評価手法の整備を図ることができる。

なお、本共同研究は、原子力機構が経済産業省資源エネルギー庁から受託した「平成 30 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業（地質環境長期安定性評価技術高度化開発）」の一環として行うものである。

1.4 研究内容

本共同研究では、以下に示す作業を行い、成果を取りまとめる。

(1) 地質温度計と熱年代による深部流体の温度・滞留時間の検討

非火山性の深部起源の高温流体による熱影響（温度、滞留時間など）の検討を目的として、地質温度計や熱年代を用いた検討に適した地域・地点の選定や、試料の採取、予察的分析を行う。

(2) 粘土鉱物の K-Ar 年代測定に基づいた断層帯の活動性の検討

断層破砕帯の粘土鉱物の K-Ar 年代測定に基づいて、断層帯の活動性や活動時期について検討する。本検討においては、原子力機構が所有する試料などを用いる。

(3) 地質温度圧力計と U-Pb 年代測定法を用いた侵食史の推定

熱年代学の手法による侵食史の検討が困難な地熱地域を対象に、地質温度圧力計と U-Pb 年代測定法を用いた侵食史の推定を行う。また、同手法の適用性について検討する。本検討においては、原子力機構が所有する試料を用いる。

(4) 熱年代学、宇宙線生成核種法、地形解析による山地の隆起・侵食過程の検討

熱年代学、宇宙線生成核種法、地形解析を複合的に適用することにより、様々な時空間スケールにおける山地の隆起・侵食過程について検討する。

(5) 取りまとめ

上記(1)～(4)における実施・検討内容を取りまとめた報告書を作成する。

1.5 実施場所

・京都大学大学院 理学研究科
・京都大学防災研究所 地盤災害研究部門
・原子力機構 東濃地科学センター

1.6 研究期間

契約締結日～平成 31 年 1 月 31 日

2. 地質温度計と熱年代による深部流体の温度・滞留時間の検討

深部流体起源の熱水活動の温度や滞留時間などの検討を目的として、地質温度計と熱年代を用いた検討を行う。対象地域としては、和歌山県田辺市本宮町平治川で確認された熱水脈の露頭を選択した。平成 30 年度は、試料の採取を主に実施した。以下に概要を述べる。

2.1 研究手法

地質温度計は、相平衡、化学平衡、化学反応速度における温度依存性の強さを利用して、地質現象の温度を推定する手法の総称である（金沢ほか, 2005）。地質温度計としてよく用いられる手法の一つに、石英や方解石などに含まれる流体包有物の均質化温度を用いた手法が知られている（例えば、佐脇, 2003）。気液二相の流体包有物を含む薄片試料を加熱冷却台で加熱していくと、液相が膨張する一方、気相が収縮し、最終的に液相一相のみとなる。この時、流体包有物の内部圧力と温度は、図 2-1 の沸騰曲線（BPC; boiling point curve）に沿って変化する。この液相一相のみになった時の温度を均質化温度（T_h）と呼ぶが、液相一相の流体包有物の内部圧力は温度にしたがって図 2-1 のアイソコアに沿って変化するため、流体の塑性に応じた適当な圧力補正を均質化温度に加えることで、流体包有物の形成温度（T_f）を決定できる。

熱年代学は、放射年代測定の応用分野の一つで、加熱に伴う娘核種の散逸などによって起こる年代値の若返りを基に、試料が経験した熱履歴を推定する学問領域である。年代値が若返る温度は閉鎖温度と呼ばれ、Dodson (1973)によれば以下の数学的モデルで記述される：

$$\frac{E}{RT_c} = \ln\left(-\frac{ART_c^2\, D_0/a^2}{E\, dT/dt}\right)$$

ただし、E は活性化エネルギー、R は気体定数、T_c は閉鎖温度、A は幾何定数（球は 55、円柱は 27、平板は 8.7）、D_0 は拡散係数、a は拡散ドメイン、dT/dt は冷却速度である。閉鎖温度の値は、用いる熱年代計の種類、すなわち核種と鉱物の組み合わせに固有である。一般に用いられる主な熱年代計の閉鎖温度を表 2-1 に示す。一般に引用される閉鎖温度の値は、10^6～10^7 年間の加熱に対して、年代が若返る温度であるが、より短時間の加熱に対しては、さらに高い温度が年代の若返りには必要となる（図 2-2）。本研究では、対象とする熱水活動の熱影響の大きさを考慮して、フィッション・トラック（FT）法と(U-Th)/He 法の適用を検討する。

本研究では、地質温度計と熱年代計を組み合わせ、熱水脈を形成した昔の熱水活動について、到達温度、滞留時間（加熱の継続時間）、活動時期、加熱の影響範囲について検討する（図 2-3）。熱水活動の到達温度については、熱水脈から採取した試料に地質温度計を適用することで推定する。例えば、流体包有物の均質化温度を利用する。滞留時間、すなわち加熱の継続時間については、熱年代計を利用する。上述の通り、熱年代計の若返りの程度は、加熱温度と加熱時間の二つのパラメータによって決定される。熱水脈直近の母岩試料について熱年代計を適用すれば、その年代値の若返りは熱水活動の到達温度と滞留時間によって決まる。ここで、熱水活動の到達温度は地質温度計によって別途推定されているため、熱年代の若返りからは、滞留時間を制約することが可能である。例えば、到達温度が 300℃の場合、ジルコン FT 年代が完全にリセットされるには約 100 万年、同じくジルコン(U-Th)/He 年代のリセットには数 1000 年、アパタイト FT 年代のリセットには数 100 時間の加熱時間が必要となる（図 2-2）。熱水活動の時期については、完全にリセットされた年代値が示す時代から推定することができる。アパタイト FT 法は比較的閉鎖温度が低いため、熱水活動によって年代が完全にリセットしていることが期待できる。熱的影響の空間分布については、熱水脈から距離を置いて採取した母岩試料に対して、熱年代解析を実施

することで推定できる。

表 2-1　代表的な熱年代計の閉鎖温度

壊変系	鉱物	閉鎖温度 (℃)	活性化エネルギー (kJ/mol)
(U-Th)/Pb	ジルコン	>900	550
	チタナイト	550~650	330
	モナザイト	~700	590
	アパタイト	425~500	230
$^{40}Ar/^{39}Ar$	角閃石	400~600	270
	黒雲母	350~400	210
	白雲母	300~350	180
	カリ長石	150~350	170~210
FT	チタナイト	240~300	440~480
	ジルコン	330~350	300~350
	アパタイト	90~120	190
(U-Th)/He	チタナイト	160~220	190
	ジルコン	160~200	170
	アパタイト	55~80	140

（Reiners et al., 2005 を改変）

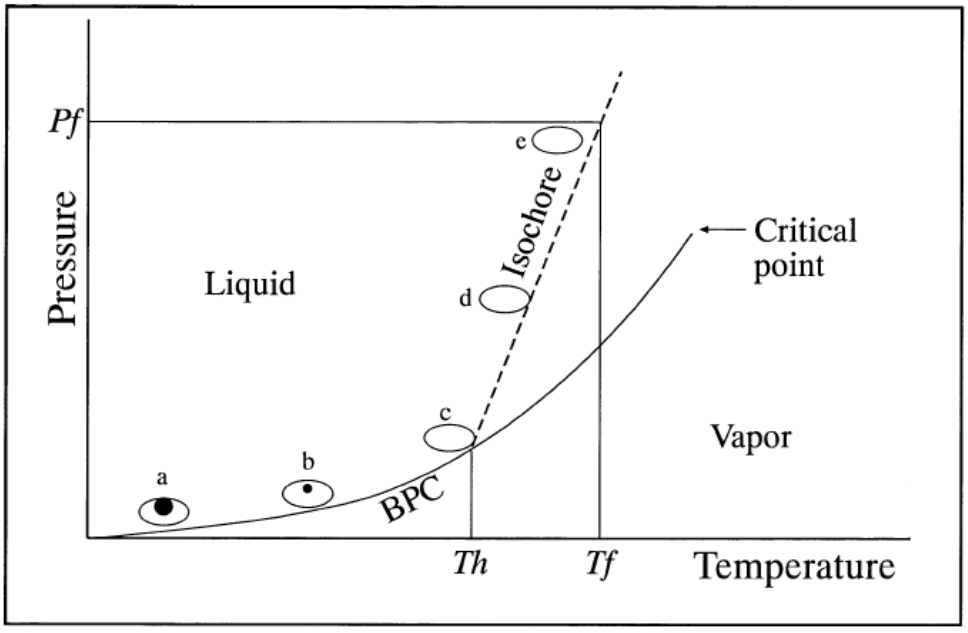


図 2-1　気液二相の流体包有物の相図模式図（佐脇, 2003）

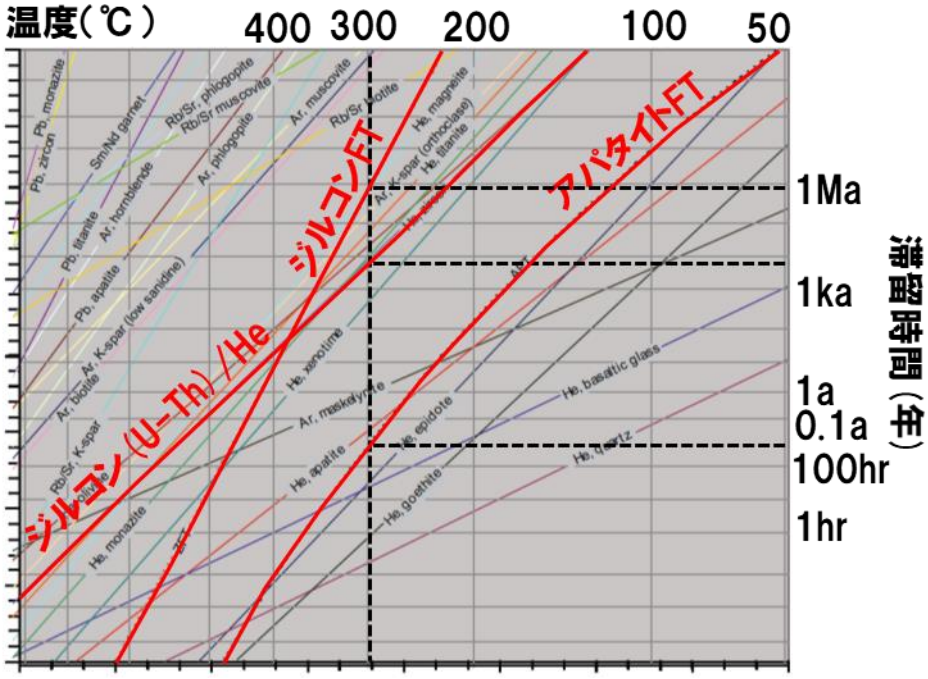


図 2-2　様々な熱年代計の年代が若返る温度と時間（Reiners, 2009 に加筆）

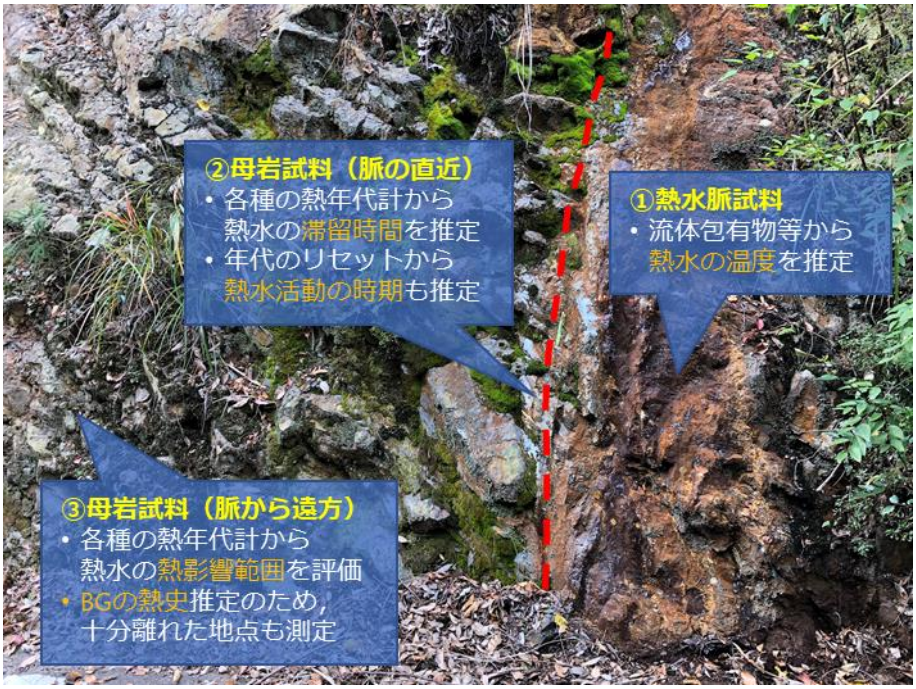


図 2-3　本研究の検討項目と試料採取戦略

2.2　試料採取

試料の採取は、和歌山県田辺市本宮町平治川で実施した。研究地域となる紀伊半島の地質は、中央構造線から南に向かって、主に三波川帯、秩父帯、四万十帯といった付加体から成る。中でも特に広範囲に分布するのは四万十帯で、北から南に向かって、上部白亜系の日高川層群、暁新統～中部始新統の音無川層群、中部始新統～下部中新統の牟婁層群に細分され、チャート、緑色

岩類、泥岩、砂岩、礫岩、砂岩泥岩互層から成る（吉松ほか，1999）。また、局所的には、中新世の火成岩類（熊野酸性岩類、大峰酸性岩類など）や堆積岩類（熊野層群、田辺層群）が分布する。熊野酸性岩類は、神ノ木流紋岩、流紋岩質凝灰岩、加工斑岩の三つの岩相に分けられる（吉松ほか，1999）。

本研究で試料採取を実施した熱水脈の露頭は三か所である。加えて、近くに分布している熊野酸性岩の岩脈による熱影響を評価するために、熊野酸性岩の露頭一か所からも試料を採取した（図 2-4）。熱水脈の露頭からは、熱水脈本体から流体包有物の均質化温度の測定用試料を 1 点、母岩部分から熱年代測定用の試料を 4～5 点採取した。採取位置は、熱水脈からの距離に応じて決定した（表 2-2）。母岩は四万十帯白亜系の砂岩優勢砂岩泥岩互層で、その中から砂岩優勢の部分を選んで採取した。これは、熱年代解析に適した粒径の大きな（数 10μm 以上）鉱物が含まれている箇所を採取するためである。熱水脈は、黄銅鉱や黄鉄鉱が濃集しており、褐色の沈殿物の沈積が認められた。

熱年代測定用の 13 試料について鉱物分離を実施した。分離の対象鉱物はアパタイトとジルコンである。鉱物分離は、原子力機構から株式会社京都フィッション・トラックに依頼して実施した。岩石試料は粉砕、ふるい掛けの後、重液や磁石を用いて対象鉱物を濃集した。鉱物分離結果は表 2-3 の通りである。ジルコンについては、全 13 試料から、熱年代解析に十分な量の粒子数が得られた。アパタイトについては、粒子数が全体的にやや少なく細粒ではあるものの、HJG4-0mを除く全ての試料でアパタイトの含有が確認できた。したがって、鉱物分離に供する母岩の量を増量することにより、熱年代解析に必要な量の対象鉱物が十分に確保できる見込みである（一般に、FT 法や(U-Th)/He 法の実施には、数 1000 粒子程度の対象鉱物があることが望ましい）。

表 2-2　採取試料リスト

地点名	試料名	母岩／熱水脈	用途	脈からの距離
HJG1	HJG1-F	熱水脈	流体包有物	-
	HJG1-0m	母岩（四万十帯砂岩）	熱年代	0 m
	HJG1-1m	母岩（四万十帯砂岩）	熱年代	1.1 m
	HJG1-3m	母岩（四万十帯砂岩）	熱年代	3.1 m
	HJG1-10m	母岩（四万十帯砂岩）	熱年代	9.9 m
	HJG1-20m	母岩（四万十帯砂岩）	熱年代	17.1 m
HJG2	HJG2-F	熱水脈	流体包有物	-
	HJG2-0m	母岩（四万十帯砂岩）	熱年代	0 m
	HJG2-1m	母岩（四万十帯砂岩）	熱年代	0.7 m
	HJG2-3m	母岩（四万十帯砂岩）	熱年代	2.3 m
	HJG2-10m	母岩（四万十帯砂岩）	熱年代	10.2 m
HJG3	HJG3-UPb	母岩（熊野酸性岩類）	U-Pb 年代測定	-
HJG4	HJG4-F	熱水脈	流体包有物	-
	HJG4-0m	母岩（四万十帯砂岩）	熱年代	0 m
	HJG4-1m	母岩（四万十帯砂岩）	熱年代	1.2 m
	HJG4-3m	母岩（四万十帯砂岩）	熱年代	4.2 m
	HJG4-10m	母岩（四万十帯砂岩）	熱年代	11.7 m

表 2-3　鉱物分離結果

#	試料名	母岩処理量 (kg)	分離結果		
			アパタイト粒子数（個）	ジルコン粒子数（個）	備考
1	HJG1-0m	0.20	100（細粒）	5,000（淡褐色）	Anatase, Py
2	HJG1-1m	0.20	800（細粒）	10^4（淡紫色）	Py
3	HJG1-3m	0.20	1,000（細粒）	10^4（淡紫色）	Py
4	HJG1-10m	0.20	700（細粒）	10^4（淡紫色）	Py
5	HJG1-20m	0.20	100（細粒）	>10^4（紫色）	Py 多し
6	HJG2-0m	0.20	300（細粒）	10^4（淡紫色）	Py 多し
7	HJG2-1m	0.20	100（細粒）	10^4（紫色）	Py 多し
8	HJG2-3m	0.20	1,500（細粒）	>10^4（紫色）	Py 多し
9	HJG2-10m	0.20	30~40（細粒）	10^4（紫色）	Py 多し
10	HJG4-0m	0.20	不明（細粒）	10^4	Py 多し
11	HJG4-1m	0.20	500（細粒）	10^4（紫色）	Py 多し
12	HJG4-3m	0.20	800（細粒）	10^4	Py 多し
13	HJG4-10m	0.20	1,000（細粒）	>10^4（紫色）	

図 2-4　試料採取地点位置図

2.3 まとめと今後の展望

深部流体起源の熱水活動の温度や滞留時間などの検討を目的として、紀伊半島の和歌山県田辺市本宮町平治川の熱水脈露頭において岩石試料を採取した。採取した試料からは、概ね良質な対象鉱物が得られている。今後は、これらの試料を用いて、流体包有物の均質化温度を用いた地質温度計や、FT 法や(U-Th)/He 法といった熱年代学的手法の分析を進める予定である。

3. 粘土鉱物の K-Ar 年代測定に基づいた断層帯の活動性の検討

Recent studies of the thermal, mechanical and hydrothermal effects of Nobeoka drilling core samples (NOBELL) indicate distinctive changes in the illite crystallinity between the footwall, main fault zone and hanging wall (Fukuchi et al., 2014). Detailed illite crystallinity investigations of the core samples provide a unique framework to constrain timing of authigenic illite formation within an ancient tectonic boundary thrust system. The main aim of this project to investigate the robust isotopic memory of neo-crystallized authigenic illite as its crystal structure includes H (as OH) and K, enabling to constrain fluid sources through hydrogen isotope analysis and timing through K- Ar dating. This study will investigate the timing of brittle fault formation by dating of authigenic illite separated from 2 fresh non-weathered fault core, 3 footwall and 2 hanging wall core samples. The sample locations are shown in 図 3-1.

Sample #	Type	Depth [mbgs]
1	Hanging wall	~ 30
2	Hanging wall	~ 35
3	Fault zone	~ 41.3
4	Fault zone	~ 41.8
5	Foot wall	~ 45
6	Foot wall	~ 49
7	Foot wall	~ 80

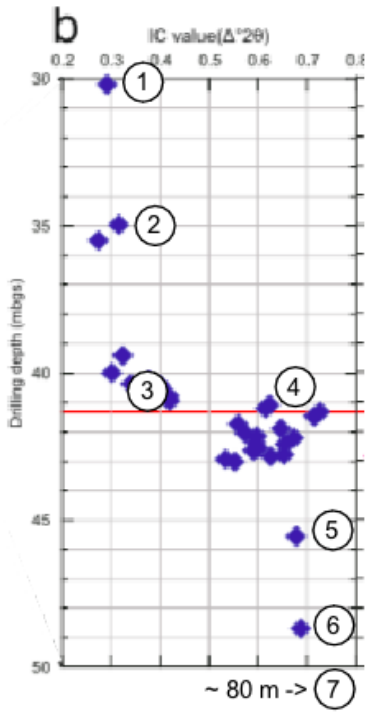


図 3-1: Sample locations

The proposed seven core samples were obtained on 19/11/2018 at the JAMSTEC core library Kochi. Preliminary SEM investigations were carried out on 17 and 18/01/2019 at the JAEA Tono geoscience center. All obtained samples contain K rich clay mineral phases with different morphologies and will be investigated in year 2 of the project (2019) as outlined in the project proposal.

4. 地質温度圧力計と U-Pb 年代測定法を用いた侵食史の推定

地質温度圧力計を利用して花崗岩体の固結深度を決定すると同時に、岩体固結時の絶対年代を、ジルコンの U-Pb 年代測定によって決定する。これを研究対象地域で複数の岩体について行うことで、侵食量の上限を制約するとともに、条件がそろえば侵食史を推定できる。

4.1 研究手法

本研究で用いる地質温度圧力計は、Al-in-Hbl 圧力計（角閃石圧力計）と角閃石—斜長石温度計である。まず、Al-in-Hbl 圧力計の原理について、Hoillister et al. (1987)及び Schmidt (1992)に基づいた、高橋(1993)の解説をもとに簡単に述べる。

花崗岩の全岩化学組成は、SiO_2, Al_2O_3, TiO_2, MgO, FeO, Fe_2O_3, CaO, Na_2O, K_2O, H_2O の 10 成分で近似できる。ウェット・ソリダス上における構成鉱物が、角閃石、黒雲母、斜長石、カリ長石、石英、（チタン石、磁鉄鉱、チタン鉄鉱）のうち 2、メルト、H_2O であるとすると、10 成分 9 相共存で自由度は 3 になる。角閃石を含む花崗岩質メルトのウェット・ソリダスは、2kbar 以上でほぼ一定温度（700℃）であること及び多くの花崗岩体で斜長石リムの化学組成はほぼ一定であることから、自由度が 2 減って 1 になり、圧力だけが変数になる。このときの反応式は

2 石英 + 2 アノーサイト + 黒雲母 ＝ 角閃石 + カリ長石

を考えればよい。角閃石をチェルマク閃石と考えると

$$2SiO_2 + 2CaAl_2Si_2O_8 + KMg_3AlSi_3O_{10}(OH)_2 = Ca_2Mg_3Al_2Si_6Al_2O_{22}(OH)_2 + KAlSi_3O_8$$

と表記できるが、このとき角閃石は MgSi = AlAl のチェルマック置換が可能で、これが圧力の指標となる（Hoillister et al., 1987; Schmidt, 1992; 高橋, 1993）。圧力と Al 量の相関には、斜長石置換（NaSi = CaAl）も関わっているが影響は小さい（Schmidt, 1992）。実際には、Si□ = Al(Na,K) のエデナイト置換（□は空隙）によっても角閃石中の Al 量は変動するため、正確な圧力見積もりにはエデナイト置換の評価が欠かせない（Andersen and Smith, 1995）。Al-in-Hbl 圧力計の改良は現在も続いており、様々なキャリブレーションがある（例えば Mutch et al., 2016）。本研究では、エデナイト置換を考慮に入れた Andersen and Smith (1995)によるキャリブレーション

$$P\ (\pm 0.6\ kbar) = 4.76Al\text{-}3.01\text{-}\{[T(℃)\text{-}675]/85\}*\{0.53Al+0.005294[T(℃)\text{-}675]\}$$

及び、より低圧まで適用可能な Mutch et al. (2016)のキャリブレーション

$$P\ (kbar) = 0.5+0.331(8)*Al_{tot}+0.995(4)*Al_{tot}^2 \quad \cdots ①$$

を用いた。こうして求まった圧力は、上述の原理と整合的であること、すなわちウェット・ソリダス上に位置していることが必要である。その検証のため、圧力見積もりに用いた角閃石とそれに隣接する斜長石の組成に対して、シリカに飽和した岩石中で斜長石と共存する角閃石の Al^{iv} 量を用いた角閃石—斜長石温度計（Blundy and Holland, 1990）を適用し、求まった温度圧力条件がウェット・ソリダス上の条件として適当であるか否かも検証した。これらのチェックを通過したデータを用いて、花崗岩の固結深度を見積もった。

4.2 研究試料

本研究では、King et al. (2018)で採取・分析された黒部川花崗岩の 15 地点から採取済みの岩石試料を用いた（図 4-1）。これらから 35 枚のダイアモンド研磨岩石薄片を作成し、偏光顕微鏡による鉱物同定を行った。岩石薄片の作成は東濃地科学センターで行い、一部薄片については京都大学でも再研磨を行った。偏光顕微鏡観察は主として京都大学で行い、Al-in-Hbl 圧力計が適用可能な鉱物組合せを持つかどうかの検討を行った。検討が偏光顕微鏡だけでは不十分なものに関しては、京都大学設置のエネルギー分散型 X 線検出器（EDAX PHOENIX Ver3.2）を備えた走査型電子顕微鏡 Hitachi S3500-H を用いて鉱物同定を行った。15 試料の中には角閃石を含まないものが多く、角閃石の熱水変質も多くみられた。そのため、Al-in-Hbl 圧力計が適用可能な鉱物組合せを持つ試料は 2 試料に限られた。こうして Al-in-Hbl 圧力計が適用可能な鉱物組合せを持つことが明らかとなった 1 試料 2 薄片について、京都大学設置の波長分散型電子線マイクロアナライザーJEOL JXA-8105 を用いて角閃石や斜長石をはじめとする造岩鉱物の化学分析を行った。

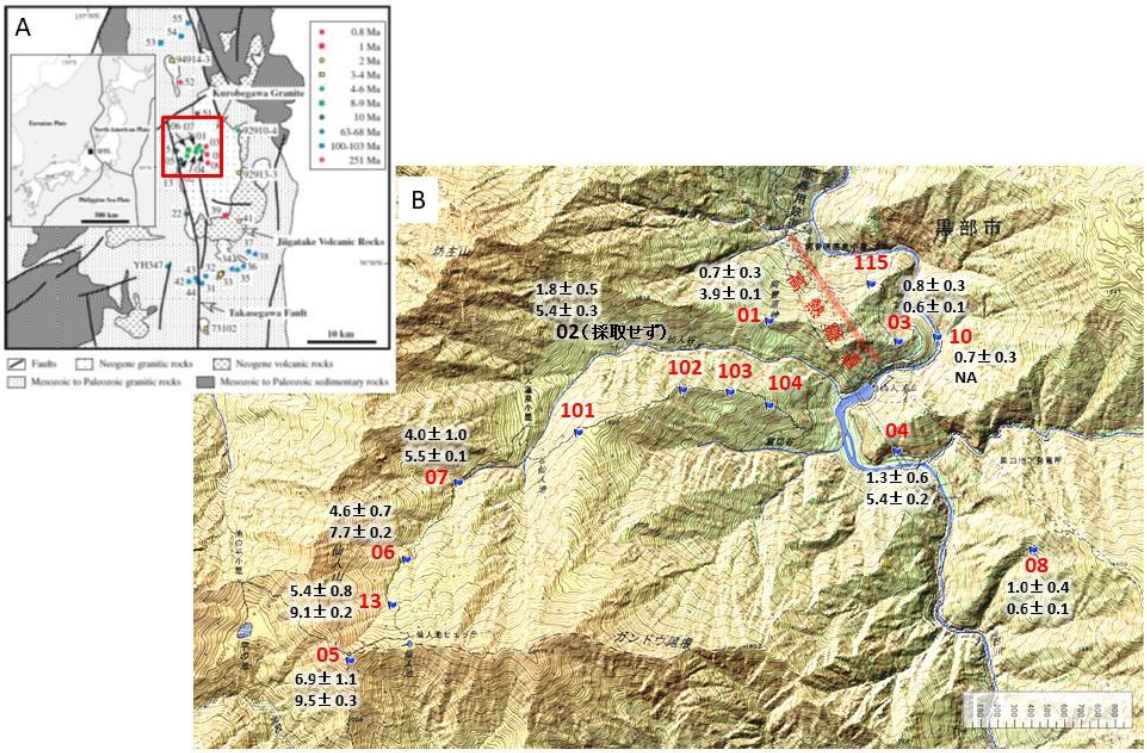


図 4-1　試料採取地点

A. Ito et al. (2013) の試料採取地点。これらの地域のうち、赤四角内を拡大した地図を B に示す。B. 本研究で用いた提供試料の採取地点。King et al. (2018)によって採取された試料の採取地点。黒の数字は，既報の ZFT 年代とジルコン U-Pb 年代（Ma）±2σ（Yamada, 1996; Ito et al., 2013）。本研究試料は 101 から得られた。

4.3 分析方法

京都大学設置の波長分散型電子線マイクロアナライザーJEOL JXA-8105 による鉱物化学分析は、ダイアモンド研磨した試料を C 蒸着後、加速電圧 15.0kV、電流値 10nA、ビーム径 3μm で行った。標準試料には Astimex 社製 MINM25-53 及びその他の天然及び合成鉱物を用い、濃度計算にあたっては ZAF 補正を適用した。ピークとバックグラウンドの計測時間は、F についてはそれぞれ 60 秒と 30 秒、Cl については 30 秒と 15 秒、他の元素については 10 秒と 5 秒とした。

4.4 岩石記載

平成 30 年度に解析した試料 KRG16-101 は花崗閃緑岩質であり、粗粒のカリ長石が自形の角閃石・斜長石・黒雲母を包有する組織が見られる。主要鉱物組合せは角閃石＋黒雲母＋斜長石＋石英＋カリ長石であり、これに磁鉄鉱＋チタン石＋ジルコン＋燐灰石＋褐簾石が副成分鉱物として加わる。二次的な緑泥石や緑簾石が少量存在する。チタン石には緑泥石や緑簾石と共存する二次的なものもあるが、単独で粒間に産するものもある。

斜長石は BSE 像下で、コアが明るく、リムが暗い。このことから An 値で累帯構造をしており、リムで An 値が下がることがわかる（図 4-2）。マトリクスで角閃石と接する斜長石のリム組成は An14-26 程度である。一方、斜長石中に角閃石が包有される場合、角閃石と接する斜長石部分は An39-52、An39-41、An16-17 と様々である。リムに角閃石を包有する斜長石も存在するが、そのような斜長石リムのうち、角閃石と直接接している部分の組成は An17-18 である。マトリクスの斜長石のうち、ミルメカイト的な組織を呈する斜長石の組成は An18 であった。

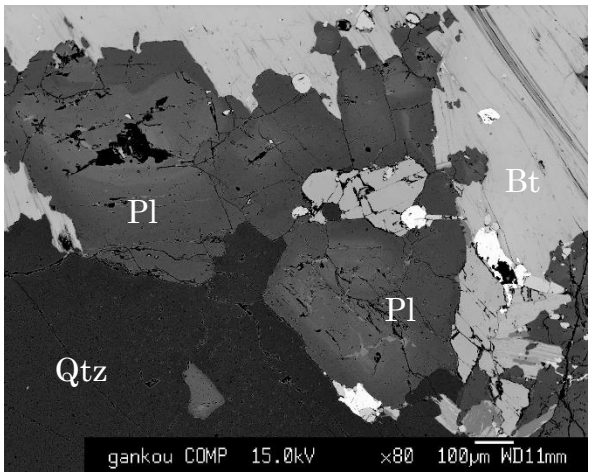


図 4-2　斜長石の BSE 像

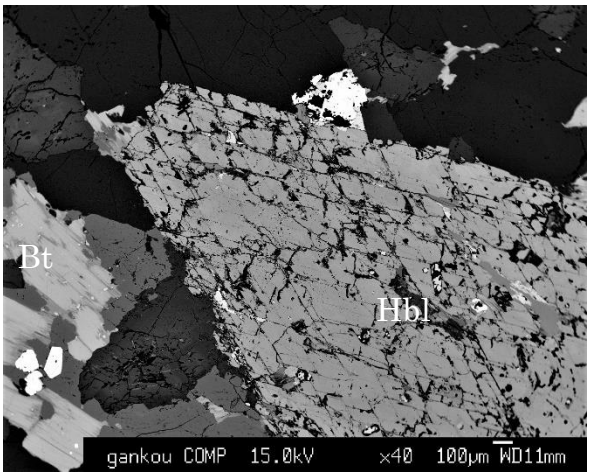


図 4-3　角閃石の BSE 像

角閃石は BSE 像下で、コアが暗く、リムが明るい累帯構造を示す（図 4-3）。角閃石は大部分が magnesio-hornblende に分類される組成を持つ。しかしリムにも、へき開ないしはクラックに沿って BSE 像で暗く見える部分が存在する。そのような BSE 像で暗い部分は、magnesio-hornblende のほか、一部は actinolitic-hornblende や actinolite に分類される。

4.5 地質温度計圧力計の適用

4.1.で述べたように、Al-in-Hbl 圧力計の適用には、マトリクスで前述の 9 相が共存することが条件となる。その際には、組成累帯構造をもつ角閃石及び斜長石のリム同士が平衡共存することになる。しかし一方で、リムはサブソリダスの流体活動による化学組成改変を受けやすい。そのような二次的な流体活動の存在は、本試料でも二次的な緑泥石や緑簾石の成長などとして認識される。角閃石のリム組成のうち、actinolitic-hornblende や actinolite 組成に分類される部分は二次的な組成改変を受けた部分と判断される。このような二次的な組成改変を受けたと推定される部分を除き、マトリクスに産する角閃石のリムと、そこに直接接する斜長石のリムのペアの組成に対して Andersen and Smith (1995)及び Blundy and Holland (1990)を適用した。求めた温度圧力条件を図 4-4A に示す。水色の点が、マトリクスで接する斜長石リムと角閃石リムのペアから得られた、信頼できる固結温度圧力条件を与えていると思われる点である。2.0 kbar から 3.5

kbar の間に分布しているが、700℃弱の一定温度を示しており、ウェット・ソリダス上に配列していると解釈して矛盾がない。

一方、オレンジ色の点は、斜長石中に包有される角閃石と、その角閃石と接するホスト斜長石の組成から産出した温度圧力条件、灰色の点は直近に産しながらも直接接していない斜長石と角閃石の組成ペアから求めた温度圧力条件、黄色の点は斜長石がミルメカイト的組織を示しているペアから求めた温度圧力条件である。4.4.で述べたように、斜長石に角閃石が包有される場合には、ホストの斜長石組成がマトリクスの斜長石リムとほぼ同じ組成を示す場合がある。そのため、水色の温度圧力条件に近い結果を示している場合もある。しかし全体としては、斜長石が角閃石を包有したタイミングが花崗岩質マグマの結晶化再末期でない限り、Al-in-Hbl 圧力計適用の前提である 9 相共存が達成されないため、得られた温度圧力条件は解釈不可能な値となってしまう。灰色の点が示すように、近隣の鉱物であっても、直接接していない斜長石と角閃石のペアから産出した温度はウェット・ソリダスよりはかなり高温を与えることが多く、これも不適切な組成ペアを用いた結果であろう。

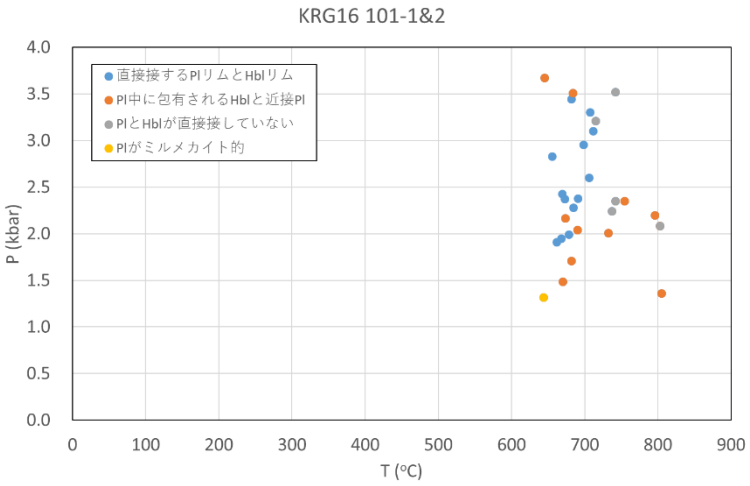


図 4-4A
試料 KRG16-101 に対して Al-in-Hbl 圧力計(Andersen and Smith, 1995)及び角閃石—斜長石温度計(Blundy and Holland, 1990)を適用して求めた温度圧力条件

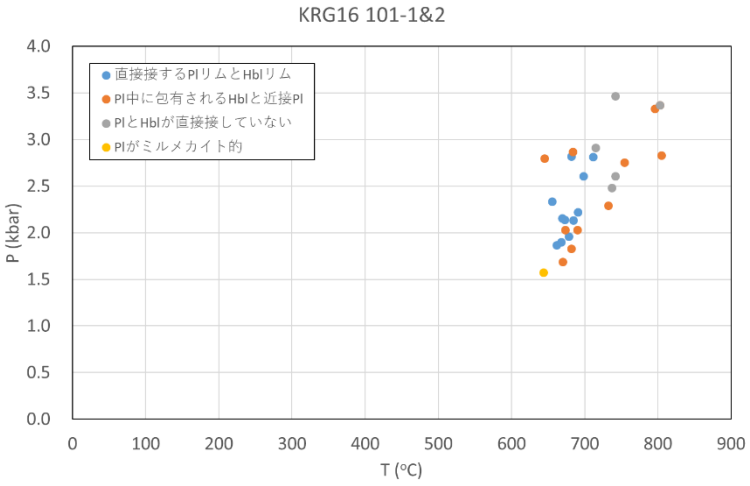


図 4-4B
試料 KRG16-101 に対して Al-in-Hbl 圧力計(Mutch et al. 2016)及び角閃石—斜長石温度計(Blundy and Holland, 1990)を適用して求めた温度圧力条件

同じデータセットに Mutch et al. (2016)及び Blundy and Holland (1990)を適用した結果を示したのが図 4-4B である（式①に付随した誤差は各点の中に含まれる）。Andersen and Smith (1995)を適用した場合の結果と比べ、推定される温度圧力条件に変化があるが、水色の点が 700℃弱の一定温度を示す点は変わらない。また、Andersen and Smith (1995)に比べ、推定される圧力

の幅が小さくなっている。

花崗岩体の上に存在する岩石の平均密度を 2700 kg/m³ とし、静岩圧を仮定したときに、図 4-4 を固結深度として表現したのが図 4-5 である。本研究で解析した試料 KRG16-101 の固結深度は水色点で示されるように Andersen and Smith (1995)による見積もりでは約 7.2-13.0 km、Mutch et al. (2016)による見積もりでは約 7.1-10.9 km と推定される。

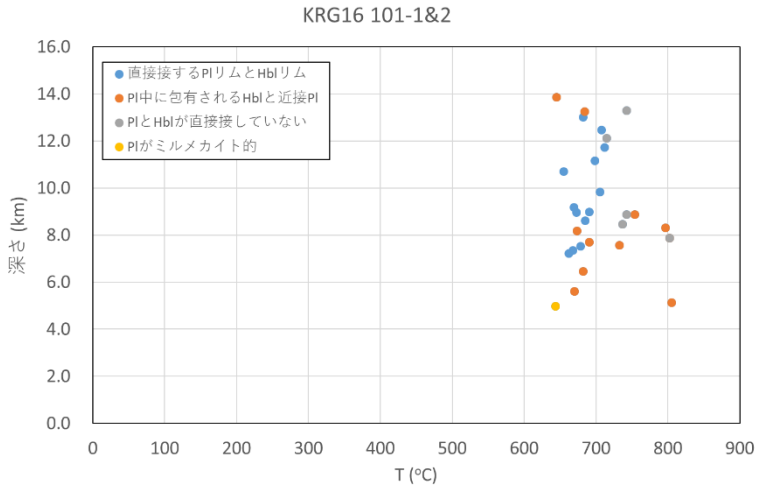


図 4-5A
試料 KRG16-101 に対して Al-in-Hbl 圧力計(Andersen and Smith, 1995)及び角閃石—斜長石温度計(Blundy and Holland, 1990)を適用して求めた固結温度・深さ条件

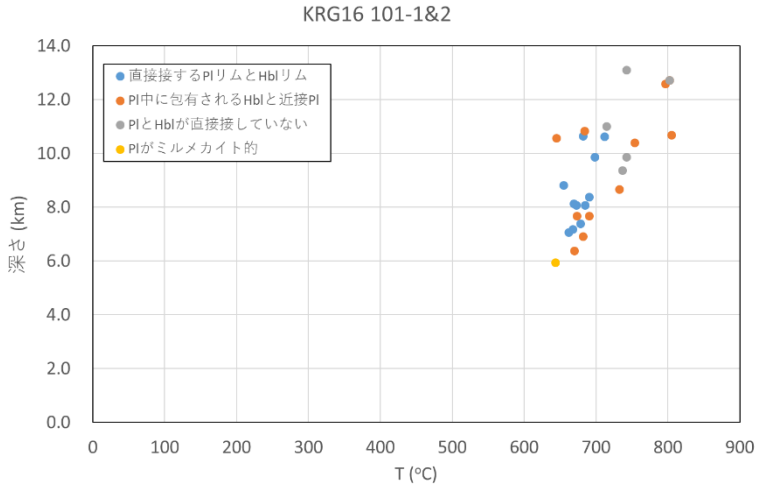


図 4-5B
試料 KRG16-101 に対して Al-in-Hbl 圧力計(Mutch et al. 2016)及び角閃石—斜長石温度計(Blundy and Holland, 1990)を適用して求めた固結温度・深さ条件

4.6 まとめと今後の展望

このように、黒部川花崗岩は二次的な流体活動の影響が強いために、詳細な岩石学検討のうえで適切な組成ペアを選ぶ必要があるが、Al-in-Hbl 圧力計と角閃石—斜長石温度計を用いた固結温度圧力条件を見積もることが可能であることがわかった。地域の侵食史に制約を加えるには、さらに多くの試料が必要である。今後は現地調査によって、二次的な流体活動の影響の少ない角閃石含有試料を採取し、広域的に解析数を増やしていくことが必要である。また、固結深度推定ができた試料について、ジルコン U-Pb 年代測定を実施していく。

5. 熱年代学、宇宙線生成核種法、地形解析による山地の隆起・侵食過程の検討

5.1 熱年代学による山地の隆起・侵食過程の検討

東北日本弧前弧域を対象として、地質学的タイムスケール（＞$10^{6\sim7}$年）における熱史及び削剥史の推定を目的に、熱年代学を用いて検討を実施した。平成 30 年度は、主に北上山地及び阿武隈山地に分布する白亜紀花崗岩類から、京都大学が他プロジェクトにて別途採取した 16 地点の岩石試料を用いて、鉱物分離を実施した。その後、各山地のサンプルに対して、アパタイト(U-Th)/He（以下 AHe と略）法、アパタイトフィッション・トラック（AFT）法、ジルコン U-Pb（ZrU-Pb）法の三つの熱年代計を適用した。詳細を以下に述べる。

5.1.1 熱年代学の概要

熱年代学とは、放射年代測定で求める年代と、その手法と鉱物組み合わせに固有の閉鎖温度の二つの情報を利用し、鉱物あるいは岩石の温度時間履歴（＝熱史）や熱イベントの時期を推定する学問領域である。放射年代測定は、不安定な放射性親核種が他の物理現象に依らず、一定の時間で安定な娘核種へと遷移する放射壊変という現象に基づいており、親/娘の量比から年代を算出することができる。この時、親核種や娘核種が外界への流出/流入のない系（＝閉鎖系）を仮定しているが、娘核種は高温では系外へ散逸してしまうため、系の開放/閉鎖は温度に強く依存する。ある温度以下の場合に閉鎖系と見做せるとき、この温度を閉鎖温度と呼ぶ。Dodson (1973)による数学的モデルの開発により、これまでに様々な手法—鉱物組み合わせの閉鎖温度が実験的に決定されてきた。一般に普及している熱年代計の閉鎖温度は、手法と鉱物組み合わせに依存して大きく異なる(Reiners et al., 2005)。そのため、対象とする現象の時間スケールや熱イベントに応じた熱年代計を選択する必要がある。逆に閉鎖温度の違いを利用して、同一の試料に対して複数の熱年代計を適用すると、各閉鎖温度に対応して時間目盛りを入れられるため、連続的な熱履歴の復元も可能である。最近では、アニーリング挙動の理解の深化と、計算ソフトウェアの開発・発達により、高精度な熱史の逆解析が可能となってきている。

このように、熱年代学では温度変化を伴う現象を検出可能なため、石油の熟成度評価や断層の活動度推定など、応用分野は多岐にわたる。中でも、本研究で対象とするような山地における上昇冷却史の推定に関する研究は、1970 年代のヨーロッパアルプスでの研究以降、ヒマラヤやアンデスなど現在まで世界の主要な造山帯において実施されてきた。単純化のため閉鎖温度を閾値として考えるとき、地下の温度構造を仮定することで閉鎖温度を深度情報に読み替えることができる。閉鎖深度から地表まで移動した経過時間が試料の年代値として得られるため、ある地点における岩石ひいては山地の平均の削剥速度を計算することができる。今回は、地殻浅部の熱史/削剥史の推定を目的に、比較的閉鎖温度が低い領域にある AHe 法と AFT 法（それぞれ 50～80℃、90～120℃）を適用した。また、岩石の形成年代の指標となる ZrU-Pb 法(閉鎖温度＞900℃)の適用も併せて実施した。

5.1.2 研究試料

東北日本弧前弧域に位置する山地の熱史/削剥史復元のため，北上山地及び阿武隈山地に分布する白亜紀花崗岩類から採取された岩石試料を用いた。岩石試料はいずれも、本共研とは異なる別の目的で京都大学が採取したものである。熱年代学では主に試料として花崗岩類を対象とするが、その理由として、①測定対象に適した自形かつ透明度の高い鉱物が豊富に産出すること(1,000 粒以上)、②鉱物組成が比較的均質、③ある熱年代計に対応した閉鎖温度付近では共通の熱史を持つこと、などが挙げられる。また、試料の年代が削剥による若返りであることを仮定するために、第四紀火山や地熱地帯などの高温地域や岩脈の貫入や熱水活動などのローカルな熱影響を避ける

必要がある。本研究で対象とする北上山地及び阿武隈山地には第四紀火山の存在は知られておらず、さらに東北日本弧では最も広範囲に花崗岩類が露出する地域であり、研究対象として適当であると考えられる。

本研究では、北上山地で 5 点、阿武隈山地で 11 点の計 16 点の試料（表 5-1）について、鉱物分離を実施した。今回はアパタイトとジルコンを対象とし、分離作業は原子力機構から株式会社京都フィッション・トラックに依頼した。岩石試料は粉砕及びふるい掛けの後、重液や磁石を用いて対象鉱物を濃集させた。鉱物分離の結果を表 5-1 に示す。ジルコンに関しては、全 16 地点で測定に十分な量の粒子数を確認できた。アパタイトに関しては、1,000 粒以下の試料が 6 地点見られるが、他の 10 地点では十分な量の粒子数が得られた。ただし、比較的粒子数が少ない 6 地点でも、粉砕処理量を追加することで必要な粒子数が得られる見込みがある。

表 5-1 鉱物分離結果一覧

試料名	採取位置（北緯，東経）（°）		粉砕処理量(kg)	アパタイト粒子数(個)	ジルコン粒子数(個)
FST18-6	37.84788	139.39147	0.20	500	10^5
FST18-7	37.84887	139.44137	0.20	300	＞10,000
FST18-8	37.94128	139.65896	0.20	500	10^5
FST18-9	37.93622	140.26065	0.20	8,000	10^5
FST18-10	37.93187	140.23775	0.20	50	5,000
FST18-11	37.89951	140.64834	0.20	＞10,000	10,000
FST18-12	37.91346	140.66539	0.20	10,000	100,000
FST18-13	37.91497	140.68531	0.20	10,000	＞10,000
FST18-14	37.93592	140.70706	0.20	200	＞10,000
FST18-15	37.98434	140.84883	0.20	5,000	100,000
FST18-16	37.44033	140.50729	0.20	10,000	＞10,000
FST18-17	37.44099	140.59650	0.20	10,000	100,000
FST18-18	37.44412	140.67189	0.20	100,000	＞10,000
FST18-19	37.45711	140.73065	0.20	1,000	10,000
FST18-20	37.41756	140.79281	0.20	10,000	＞10,000
FST18-21	37.40399	140.87470	0.20	10,000	＞10,000

5.1.3 分析手法と測定結果

16 地点の鉱物分離結果から、まずはアパタイトが比較的豊富に産出した 8 地点を選出し、三つの熱年代学的手法の適用を試みた。まず始めに試料の年代傾向を把握する意味で、一度に多数の粒子の分析が可能な AFT 法による分析を実施し、その後 AHe 法、ZrU-Pb 法の分析を行った。現在までの進捗状況を表 5-2 に示す。次項より、各手法における簡単な原理と年代値算出までの流れを紹介し、測定結果を報告する。

(1) AFT 年代測定

FT 年代の算出のためには、親核種である ^{238}U 濃度と、娘核種に相当するトラック数を計測領域の面積で除算したトラック密度を計測する必要がある。試料の年代の傾向を把握する目的で、8 地点すべてにおいて AFT 法の適用を行った。年代値算出までの実験手順の流れとして、試料の選別、試料の固定（マウント）、研磨、化学処理(エッチング)といった試料準備を経て、トラック密度の測定、U 濃度の測定を行う。試料準備及びトラック密度の測定は、京都大学大学院理学研究科で実施し、U 濃度の測定は金沢大学理工学域に設置されたレーザーアブレーション型誘導プラズマ質量分析装置(LA-ICP-MS)を使用した。

結果として、阿武隈山地の試料(#1～5)で 87.0～40.5 Ma、北上山地の試料(#6~8)では 66.8~39.1 Ma の AFT 年代がそれぞれ得られた。ただし、誤差範囲が大きい試料(例えば、#4)も見受けられ、その原因として①計測トラック数が少ない、②粒子の U 濃度のばらつきが比較的大きいこと、などが起因していると考えられる。しかしながら、全体的に得られた AFT 年代値は先行研究の年代と整合的な値である(後藤 2001; Ohtani et al. 2004; Fukuda et al. in press)。

(2) AHe 年代測定

He 法はウラン・トリウム系列の α 壊変によって放出する ^{4}He 原子核を娘核種とした年代測定法である。AFT 年代が得られた 8 地点のうち、北上山地及び阿武隈山地のそれぞれ 3 試料ずつに対して AHe 法を実施した。AHe 法の分析手順は、鉱物の選別、粒子サイズの測定、パケットへの封入までを試料準備とし、He 濃度測定、その後、結晶を硝酸で溶解させ U、Th、Sm 濃度を測定して AHe 年代を計算する。試料準備及び分析はメルボルン大学に設置された装置を使用し、He 濃度は LA-ICP-MS、U、Th、Sm に関しては溶液 ICP-MS を使用して濃度を測定した。

阿武隈山地の試料(#2, 3, 5)では 75.9～46.1 Ma、北上山地の試料(#6~8)では 51.2～36.1 Ma の AHe 年代が得られた。これらの年代値は 1 地点あたり三つないし四つの単粒子年代の加重平均によって求められるが、全地点で比較的再現性が良く、全ての単粒子年代を採用して計算している。年代値は、先行研究の AHe 年代（Sueoka et al. 2017; Fukuda et al. in prep.）と概ね調和的な値を示している。ただし、2 地点(#2, 5)において 2σ の範囲で AFT 年代との逆転が認められ，AFT 年代も含めて今後の追加分析及び検討課題とする。

(3) ZrU-Pb 年代測定

U-Pb 法は、ウラン系列の放射壊変と、その最終生成物である鉛同位体の比を利用した年代測定法である。分析手順は、エッチングとトラック数測定を行わない点以外では AFT 法とほとんど同一である。測定には、日本原子力研究開発機構東濃地科学センターの LA-ICP-MS を使用して行った。現在分析中であるが、既に結果の得られた阿武隈山地の 2 地点(#3, 5)について紹介する。

結果として、110～105 Ma といった値が得られ、阿武隈山地の花崗岩の形成年代として知られる 120～100 Ma (例えば、Yokoyama et al. 2016)と調和的な値であるが、2σ の誤差範囲を考慮してもコンコーディア上にプロットされず、鉛の混入の可能性も含め原因究明が今後の課題である。

5.1.4 まとめと今後の展望

東北日本弧の前弧域において、地質学的タイムスケールの熱史及び削剥史の推定を目的に、北上山地及び阿武隈山地において、三手法の熱年代計による年代測定を実施した。分析に十分量の鉱物が得られ、年代分析も概ね順調に進行中である。今後は、年代値の精度/確度の改善のための追加分析や、未測定地点での分析、また、宇宙線生成核種を利用した手法など、新たな手法の導入も予定している。

表 5-2　年代測定結果一覧

#	試料名	AFT 年代±2σ(Ma)	AHe 年代±2σ(Ma)	ZrU-Pb 年代±2σ(Ma)
1	FST18-11	45.2±8.2	N/A	N/A
2	FST18-12	40.5±6.6	60.1±6.0	N/A
3	FST18-13	61.0±10.8	46.1±4.7	105.4±1.8（core）
4	FST18-15	87.0±84.4	N/A	N/A
5	FST18-16	47.5±9.6	75.9±7.7	110.3±2.1
6	FST18-18	66.8±20.8	51.2±5.2	N/A
7	FST18-20	39.1±11.0	40.8±4.9	N/A
8	FST18-21	65.8±20.8	36.1±5.7	N/A

5.2 宇宙線生成核種を用いた地形の隆起・侵食過程の検討

平成 30 年度は、地形の隆起・侵食過程の復元において鍵となる侵食段丘面の形成年代の決定法について、宇宙線生成核種を用いた方法の適用性について検討した。化石化した地形である段丘面の年代決定ができれば、現成の地形との比高をもって、その場の侵食速度や隆起速度を見積もることができる。しかし、一般に侵食段丘面上では形成時期推定の手掛かりとなる被覆物を欠くことが多く、その場合には絶対年代の決定が困難となる。宇宙線生成核種を用いた手法は、地形を構成する岩盤そのものが分析対象となるため、こうした従来の問題を解決でき、任意地点における侵食段丘面の年代決定を可能にするものと期待される。ここでは、シナリオとして形成史を設定しやすい隆起地域の海成段丘を考え、離水後に薄い風成堆積物に覆われることを想定して、岩盤中の宇宙線生成核種濃度の時間変化を計算し、手法の適用性を検証する。

侵食を受けている岩盤における造岩鉱物中の宇宙線生成核種濃度 C（atoms g^{-1} yr^{-1}）の時間変化は次式で表される。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = P_0 e^{-\frac{\rho x}{\Lambda}} - C\lambda + \frac{D}{\rho}\frac{\partial C}{\partial x}$$

ここで、 t は侵食開始からの時間（yr）、P_0 は地表における核種生成率（atoms g^{-1} yr^{-1}）、ρ は岩盤の密度（g m^{-3}）、Λ は宇宙線の平均減衰長（g m^{-2}）、D は岩盤の削剥速度（g m^{-2} yr^{-1}）、λ は核種の壊変定数（yr^{-1}）である。右辺第一項は、深度方向への指数関数的なフラックスの減衰を持つ宇宙線による核種の生成、第二項は放射壊変による核種の損失、第三項は地表の侵食に伴う物質移動による核種の損失を表す。ここでの削剥速度はマスフラックスの形をとっており、これを地盤構成材料の密度で除した値が地表面の低下速度にあたる。核種の生成率の項は、中性子に

よる核破砕反応、負電荷ミューオン捕獲、高エネルギーミューオン相互作用の三つの核種生成パスを反映して、実際には、それぞれの地表での核種生成への寄与率や、核種生成に関わる粒子の減衰長を用いた指数関数の線型結合で表現される（松四ほか, 2007）。以下に示す方程式の解においても、この線型結合の形が現れる。実際の計算はその式形を用いて行っているが、ここでは表記の簡略化のため、単純な指数関数の形で表わしたもので論を進めることにする。

侵食速度が時間変化しないものとし、初期条件（$C|_{t=0}=0$）を与え、境界条件を $C|_{x=\infty}=0$ とすると、この式は解析的に解けて、宇宙線生成核種の濃度の時空間変化は、

$$C = \frac{P_0 \mathrm{e}^{-\frac{\rho x}{\Lambda}}}{\frac{D}{\Lambda}+\lambda}\left[1-\mathrm{e}^{-\left(\frac{D}{\Lambda}+\lambda\right)t}\right]$$

と書ける。これが、定常的な侵食を受けている地表面下における、核種濃度の深度分布を表す解である。汀線付近の地形が海進時に波食を受けているとき、地下の核種濃度の深度分布はこの式で表すことができる。

次に、波食を受けていた基盤岩が離水後、風成物に覆われて埋没してゆく過程を考える。堆積が定常的に進行する場合、基盤岩中における核種濃度の時間変化は、

$$\frac{\partial C}{\partial t} = P_0 \mathrm{e}^{-\frac{\rho x+St}{\Lambda}} - C\lambda$$

と書ける。ここで x は埋没する基盤上面からの深度（m）、S は被覆物の堆積速度（g m^{-2} yr^{-1}）、t は堆積開始からの経過時間（yr）である。堆積速度が時間変化しないとするとき、この式も解析的に解け、埋没前の基盤岩の深度 x における初期核種濃度を C_0 とすると、

$$C = C_0 \mathrm{e}^{-\lambda t} + \frac{P_0 \mathrm{e}^{-\frac{\rho x}{\Lambda}}}{\lambda - \frac{S}{\Lambda}}\left[\mathrm{e}^{-\frac{S}{\Lambda}t} - \mathrm{e}^{-\lambda t}\right]$$

前述の式で表されるような侵食環境下にある岩盤中の核種濃度を、この式の初期値として用いることで、離水後に風成物に埋没してゆく過程での基盤岩における核種の蓄積を計算することができる。

次に、海成段丘形成のシナリオを設定する。海洋酸素同位体ステージ（MIS: Marine Isotope Stage）に基づく高海水準期に段丘が形成されることを想定し、ここでは MIS1（6 ka）、MIS5e（117 ka）、MIS7e（232 ka）、MIS9（320 ka）に、それぞれ離水した波食面が、隆起しつつ風成物による埋積を受けることを考えよう（括弧内の数字は計算において設定した離水時期である。ka: 千年前）。単純化のために、海食崖の後退に伴う深部岩盤の露出を想定して初期核種濃度はゼロとする。また、離水以前は海進期の 5,000 年間、波食台として露出しつつ、隆起速度と等しい速度で波食を受けていたものとし、離水時には、波食岩盤面を 0.2 m の厚さの砂礫層が覆って、侵食が止むものとする。ここでは、隆起速度すなわち離水前の侵食速度は、100 mm kyr^{-1} あるいは 500 mm kyr^{-1} とした。離水後の風成物の堆積速度は、10 mm kyr^{-1} あるいは 50 mm kyr^{-1} の 2 パターンを考える。また、岩盤、砂礫層、風成物の密度はそれぞれ、2.5, 1.5, 1.0 g cm^{-3} とした。

図 5-1 に石英中の宇宙線生成核種 ^{10}Be の蓄積量の計算結果を示す。隆起速度すなわち離水前の侵食速度が、100 mm kyr^{-1} の場合（図 5-1 の A 及び B）と 500 mm kyr^{-1} の場合（図 5-1 の C 及び D）では、結果に大差はないが、離水後の風成物の堆積速度が、10 mm kyr^{-1} の場合（図 5-1 の A あるいは C）と、50 mm kyr^{-1}（図 5-1 の B あるいは D）とを比較すると明瞭な差が認められる。

風成物の堆積速度が 10 mm kyr^{-1} と小さい、すなわち、風成ロームの被覆が長期間薄い状態を保っていると、宇宙線生成核種の蓄積が進み、それゆえ、MIS7e に形成された段丘でも年代推定が可能であることがわかる。この場合、核種濃度が 10 分の 1 程度にまで減衰する、埋没岩盤表面下 2 m 程度までの試料を複数深度で採取して分析し、得られたデータにモデルカーブをフィッティングさせれば、シナリオの妥当性の検証とともに、段丘形成の年代が得られることになる。

一方、風成物の堆積速度が 50 mm kyr^{-1} と大きい、すなわち、厚い風成ロームの被覆により、早い段階で岩盤面が深くに埋没してしまうと、その遮蔽効果によって低減した宇宙線生成核種の生成率と放射壊変がバランスして、10 万年程度で放射平衡に達してしまう。これは、それよりも古い時期に形成された段丘の年代測定が不可能であることを意味する。

すなわち、離水後の風成ロームの埋没速度が、年代決定の遡及可能性を支配する要因であるといえる。これは、侵食地形面に対して、侵食速度の大小が、露出年代測定の限界を規定するのと同様である。一般に、5 m よりも厚い風成ロームに覆われた海成段丘の岩盤中の宇宙線生成核種濃度からその形成年代を推定するのは困難であるといえよう。

図 5-2 に、種々の風成物の堆積速度の条件下での埋没岩盤表面での ^{10}Be 濃度の時間変化を示す。図中で、モデルカーブが上に凸型になっている場合は、その頂部平坦域に差し掛かった時点で、年代測定が不可能になることを意味する。地形の年代測定に対する宇宙線生成核種の援用は、侵食と埋没の両方に規定されることが理解されよう。

今回は単純化したモデルケースを対象に検討を行ったが、海岸域の隆起量が小さい場の条件では、波食面は海退時に一旦風成物の埋没を受けたのち、海進期に再び侵食されるということが生じる。その場合には、複数回の露出－埋没履歴が積分されることになり、岩盤中の核種濃度は、ミューオンの寄与の増大を反映して、深部であまり低減しない分布を示すことになる。すなわち、測定によって得られるデータが、図 5-1 に示すようなモデルカーブと整合しない深度分布となる。これは、モデルで想定していないような核種の生成シナリオを新たに計算に追加しなければならないことを意味する。これを逆手にとって利用することが、当然できる。すなわち、深さ方向にデータの測定点を増やすことによって、海水準変動曲線などの他の独立的情報と組み合わせ、複雑な地形形成史をもつ場所においても、海成地形面の発達過程を復元できる。宇宙線生成核種を用いた地形の形成史復元は、核種濃度データそれ単体のみで成立するのではなく、試料採取の戦略からモデルの立案、データへの当てはめとシナリオの妥当性検証までが一体となった総合的な論考にのっとって実施されて初めて意味を成すものだということができる。

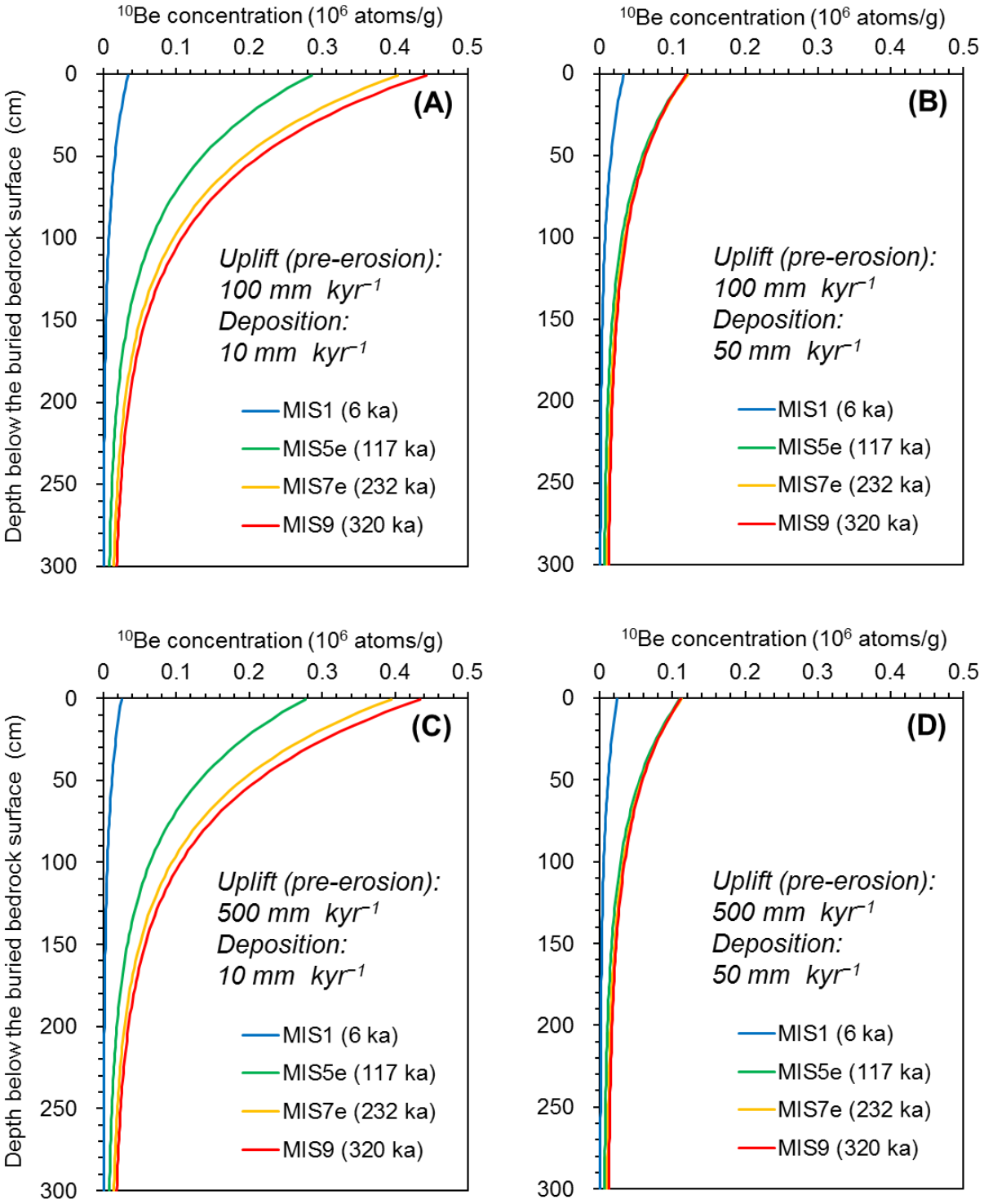


図 5-1 種々の隆起・侵食・埋積の条件における海成段丘の岩盤中の ^{10}Be 濃度の深度分布

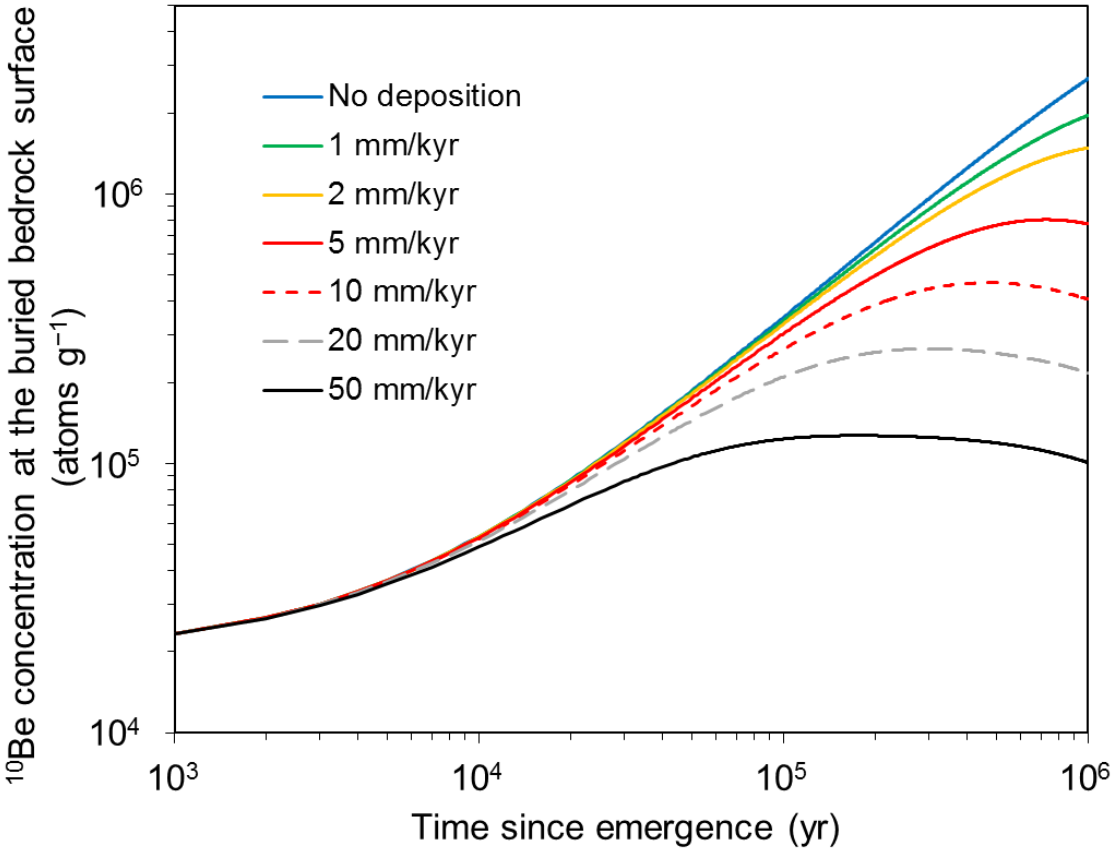


図 5-2 異なる堆積速度条件下での岩盤表面における ^{10}Be 濃度の時間変化

5.3 地形解析による山地の隆起・侵食過程の検討

地形（河川の縦断形）を解析することで、東北日本弧の第四紀における隆起速度履歴を復元することが可能かどうか、山地の隆起・侵食過程を検討した。近年になって、Pritchard et al.（2009）により、河床縦断形の逆解析から長期的かつ広域的なスケールにおける地殻隆起速度履歴を推定する手法が考案された。河床縦断形は地殻の隆起速度変動によって勾配が変化し、河床勾配の変化する点（傾斜変換点）は河川の上流側へと移動しつつ、隆起速度変動の証拠として河床中に保存される。この河川による岩盤侵食作用は数値モデルによって再現できる。そこで、モデルに様々な隆起速度を与え、計算によって得られる河床縦断形の予測値と実際の地形観測値との差を最小化する隆起速度分布を探索する逆解析を行えば、過去の地殻隆起速度を推定することが可能となるだろう。この手法は、隆起速度の短期的な分布や局所的な変化ではなく、面的な広がりを持った分布履歴が得られるというメリットがある。

本研究では、この手法を変動帯である東北日本弧へ初めて適用した。本研究では、まず、既存研究による隆起速度の推定値を用いて、本手法に必要である河川侵食パラメーターの較正を行った。次に、本手法のテストの為に、仮想的な隆起速度履歴を与えて人工的に河床縦断形を作成し、このデータの逆解析を行った。その結果、あらかじめ設定した隆起速度履歴が、地形データの逆解析によって適切に復元されることが確認された。このことは、フォワードモデルが適切であれば、本手法によって変動帯の過去の隆起速度履歴を読み取ることができることを示している。

5.3.1 手法

山地隆起速度の逆解析を行うため、まず東北日本弧の数値標高モデル（DEM）から ArcGIS を用いて河床縦断形の抽出を行った。次に、それぞれの流系の最上流部（勾配 10%以上）のデータを除去した。これは、後述する本研究のフォワードモデルが水流による土砂輸送が岩盤河川の侵食を起こすことを仮定しており、土石流が卓越する領域は解析に不適切となるためである (Sklar and Dietrich, 1998)。この地形解析には、ArcGIS を用いた。

次に、得られた地形に対して逆解析を行った。この逆解析手法は、主として Roberts and White (2010) 及び Rudge et al. (2015)に基づいているが、既存研究が最適化計算手法として共役勾配法を採用しているのに対し、本研究では L-BFGS-B 法を用いている点が異なる。河床縦断形の発達過程を扱うフォワードモデルとしてはストリームパワーモデルを使用し、解析期間中は流路の位置が側方には大きく変化しないことを仮定した(Howard and Kerby, 1983)。ストリームパワーモデルは古くより広く用いられてきた河床侵食モデルであり、岩盤河川の下刻速度が水流のストリームパワーに比例することを仮定している。このモデルでは、河床縦断形の標高の時間変化 $\partial z/\partial t$ は以下の式で与えられる：

$$\frac{\partial z}{\partial t} = U(x,t) + E(x,t) \tag{1}$$

ここで、 x は流路に沿って測った河口からの距離であり、t は時間、U は基盤岩の隆起速度、 E は侵食速度である。隆起速度と侵食速度は時間と空間の関数であり、この場合の侵食速度は常に負の値となる。Whipple and Tucker (1999) と Rosembloom and Anderson (1994) によると、侵食速度は以下のように河床勾配のべき乗と流量の積に比例した項及び河床高の拡散項の和として得られる：

$$E(x,t) = -v_0 Q^m \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^n + \kappa\left(\frac{\partial^2 z}{\partial x^2}\right) \tag{2}$$

ここで、v_0 は基盤岩侵食速度に関する係数であり、Q は河川流量、m と n は経験的な定数、κ は拡散係数である。指数 n については、既存研究より 2/3 から 1 の値をとる (Howard and Kerby, 1983)。本研究では 1 を採用した。一方、流量 Q の値を求めることは難しいため、Whipple and Tucker (1999)にしたがって以下の近似を行う：

$$Q = PA(x) \tag{3}$$

ここで、 P は平均降水量、 A は流路沿いの各地点での流域面積である。この近似により、式(2)は以下のように変形される：

$$E(x,t) = -v A^m \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^n + \kappa\left(\frac{\partial^2 z}{\partial x^2}\right) \tag{4}$$

ここで、定数 m はどの地域でもおおよそ 0.5 となることが知られている (e.g. Sklar and Dietrich,

1998)。κ は堆積物の侵食・運搬・堆積作用にかかわる拡散係数であり、やはり経験的に求めるべきパラメーターである。本研究では、Robert and White (2010)にしたがい、$\kappa = 10^4$ とした。最後に、$v = v_0 P^m$ は侵食に関する経験的係数 (m^{1-2m}/Myr)であり、基盤岩強度と降水量、植生などの関数となる。本研究では、河川の最下流部では隆起と侵食がほぼつり合いの状態にあることを仮定して、以下の式により経験的にこのパラメーターを求めた：

$$v = \frac{U_{present}}{A^m \left(dz/_{dx} \right)^n} \tag{5}$$

ここで、$U_{present}$ は段丘などからわかる現世の地殻隆起速度である。以下に、本研究で求めた v の値を表 5-3 で示す。

表 5-3　The averaged value of the uplifting rate of each river system for past 120,000 years.

river name	uplift rate (m/Myr)
Abukuma River	375
Omono River	321
Kitakami River	396
Koyoshi River	264
Mabuchi River	373
Mogami River	378
Yoneshiro River	369

Data are from Tanaka et al. (1997).

さらに、山地の隆起速度の履歴を逆解析するためには、地殻隆起速度 U(x,t) の時空分布を比較的少数のパラメーターで表現しなくてはならない。本研究では、隆起速度の空間変化を 17 地点に離散化し、流路沿いの各地点での隆起速度はこれらの離散化地点で設定した値からの二次元 cubic spline 補間によって求めた。また、隆起速度の時間変化は 80 万年前から 20 万年間隔で離散化し、各年代における隆起速度の値はやはり spline 補間によって計算した。結果として、東北地方の地殻隆起速度の時空変化は 17×5=85 個の数値で表現できるということになる（図 5-3）。

最後に、フォワードモデルの計算結果と実際に観測される地形が最も一致するような地殻隆起速度値を探索する最適化計算を行った。その際に設定した目的関数は以下の通りである：

$$H = \sqrt{\frac{1}{NM} \sum_{n,m=1}^{N,M} (z_{nm}^o - z_{nm}^c)^2} + W_1 \left[\frac{1}{M-1} \sum_{k=2}^{M} \left(\frac{U_k - U_{k-1}}{\delta t} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} + W_2 \left[\frac{1}{M} \sum_{k=1}^{M} \left(U_k'' \right) \right] + \frac{W_3}{M} \sum_{k=1}^{M} f \tag{6}$$

ここで、z^o と z^c はそれぞれ観測及び計算によって得られた地形標高である。N はデータ店の数、W_1、W_2、W_3 は正則化項の重み係数である。U_k'' は U の 2 階の導関数であり、最後の項は

$$f = \begin{matrix} \cosh(U_k) - 1 : U_k < 0 \\ 0 \qquad\quad : U_k \geq 0 \end{matrix} \tag{7}$$

と定義される。この目的関数が最小となるような隆起速度の時空変化履歴を準ニュートン法の一種である L-BFGS によって求めた。計算には Python で作成した独自のプログラムを使用した。

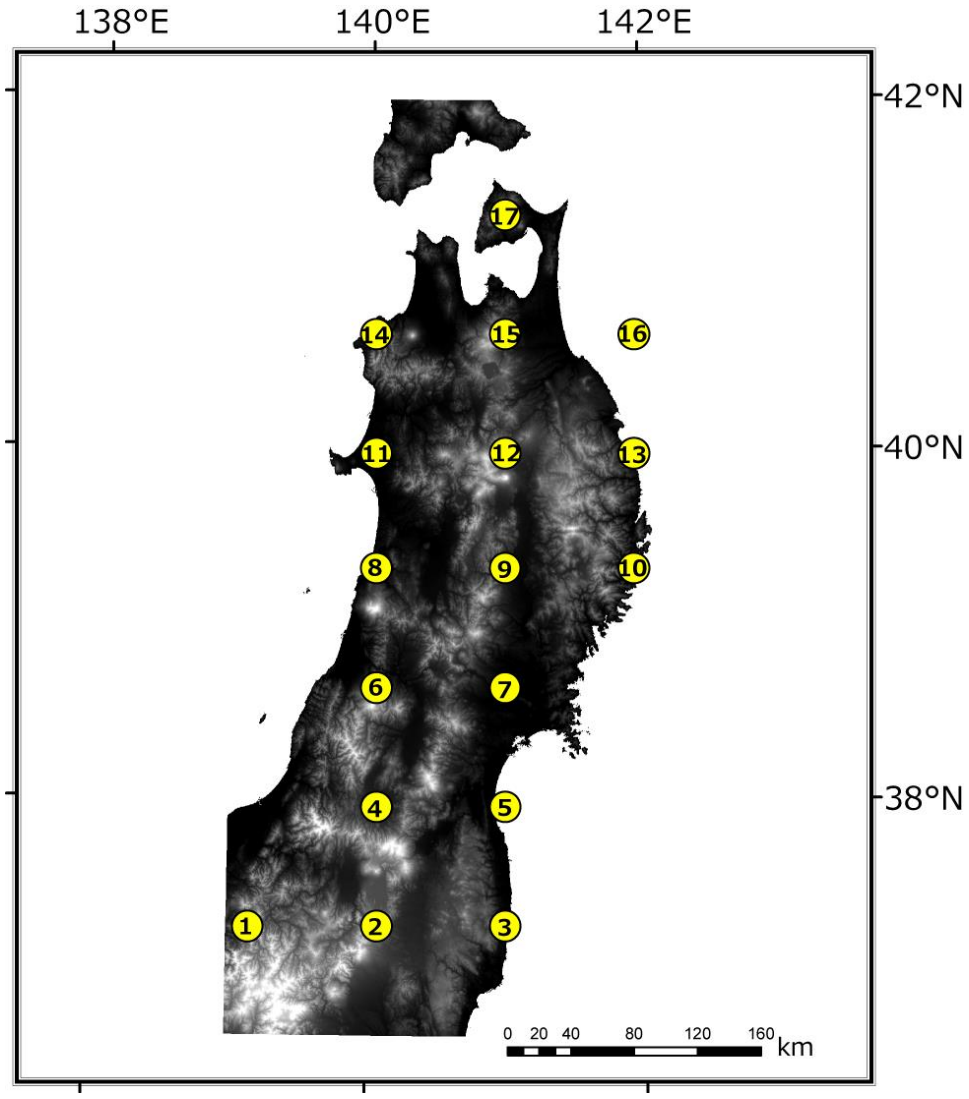


図 5-3: Locations of the points where uplift rate was imposed (numbered circles). Spatial distribution of uplift rate was calculated from positions and values at these points, and was given to the model.

5.3.2 予察的結果

まず、手法の検証として、人工データの逆解析を行った。東北地方の実際の流系に対して人工的に隆起速度履歴を与え（図 5-4A）、まずフォワードモデルによって河床縦断形を生成した。次に、人工的に生成した河床縦断形を逆解析し、地殻隆起履歴が河川地形のみから十分に復元でき

るかどうかを検証した。結果として、本研究の手法により隆起履歴は、過去 60 万年間にわたって極めて正確に人工データと一致した（図 5-4B）。ただし、80 万年前の隆起速度分布は一致せず、60-80 万年前が東北地方における復元の限界となる年代であることが推定された。

次に、本手法を実際の東北地方の河床縦断形に適用した。その結果、東北地方の中軸部で隆起速度が高く、周辺部で低いとする結果が得られた（図 5-5）。この解析結果からは、日本海側と太平洋側で隆起開始のタイミングに違いがあるか否かについては読み取ることができなかった。

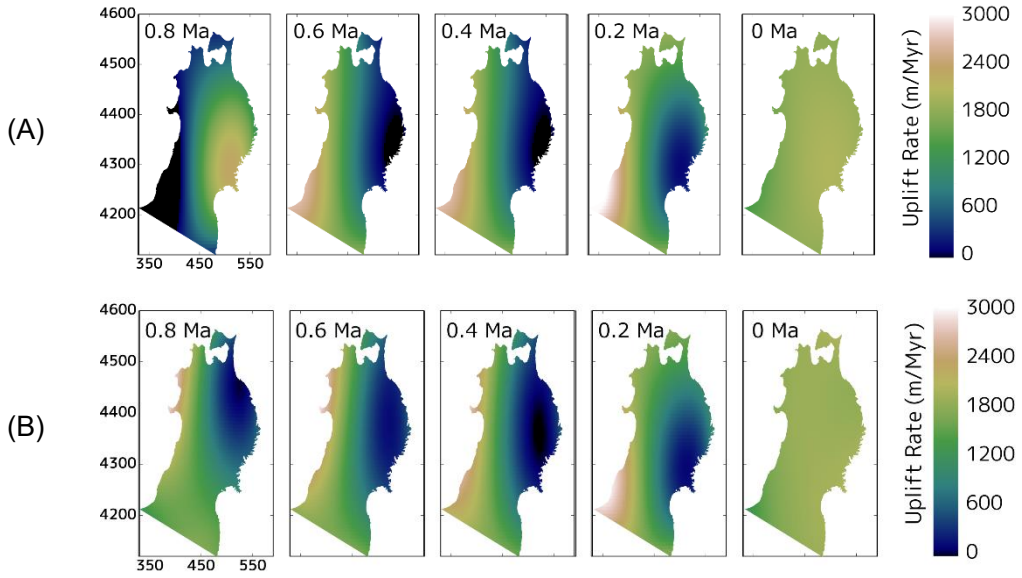


図 5-4: Synthetic and reconstructed data of uplift rate of Tohoku Japan Arc. A. Synthetic data of variation in uplift rate of Tohoku Japan Arc. B. Spatial and temporal variation in uplift rate reconstructed from the river profiles that were produced from synthetic data ranging from 0.8 Ma to present day at 0.2 Ma intervals

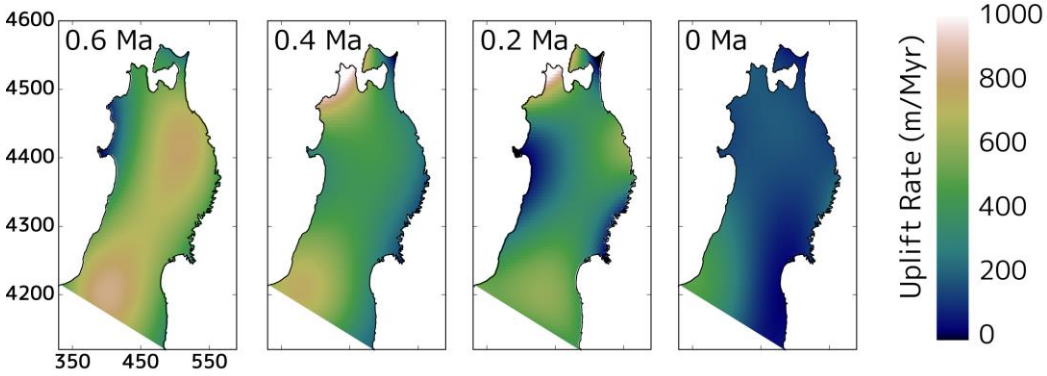


図 5-5: Reconstructed spatial and temporal variation in uplift rate of Tohoku Japan Arc ranging from 0.6 Ma to present day at 0.2 Ma intervals.

5.3.3 まとめと今後の展望

近年になって提案された河床縦断形の逆解析による地殻隆起速度推定手法を東北地方に適用したところ、おおむね妥当と思われる結果を得た。しかしながら、現時点では手法に二つの問題がある。一つは、海水準変動の影響がフォワードモデルで考慮されていないこと、もう一つは基盤岩強度が一定と近似されていることである。これらの問題は、日本列島のような変動帯の解析においては大きな影響を及ぼす可能性がある。そのため、今後はこれら二つの要素をモデルに取り込み、新しい逆解析手法を開発していくことが必要である。また、熱年代学など他の隆起速度手法と組み合わせることでパラメーターの佼成手法を高精度化し、今後はより信頼性の高い復元手法を確立すべきであろう。

6. まとめ

「地質温度計と熱年代による深部流体の温度・滞留時間の検討」では、深部流体起源の熱水活動の温度や滞留時間などの検討を目的として、平成 30 年度は、紀伊半島の和歌山県田辺市本宮町平治川の熱水脈露頭を対象として岩石試料の採取を実施した。採取した試料は鉱物分離を実施し、概ね良質な対象鉱物が得られることが確認できた。今後は、これらの試料を用いて、流体包有物の均質化温度を用いた地質温度計や、FT 法や(U-Th)/He 法といった熱年代学的手法の分析を進める予定である。

「粘土鉱物の K-Ar 年代測定に基づいた断層帯の活動性の検討」では、脆性変形の時期の推定を目的として、延岡断層のボーリングコアにおいて、K-Ar 年代測定用の自生イライト試料の採取を実施した。試料は、上盤側が 2 試料、断層帯が 2 試料、下盤側が 3 試料の計 7 試料である。予察的な SEM 観察の結果、カリウムに富んだ様々な形状の粘土鉱物相が確認できた。今後は、K-Ar 年代測定を実施予定である。

「地質温度圧力計と U-Pb 年代測定法を用いた侵食史の推定」では、黒部川花崗岩の 1 試料 2 薄片について Al-in-Hbl 圧力計と角閃石―斜長石温度計を用いて固結温度・深さ推定を行った。その結果、Andersen and Smith (1995)による圧力見積もりでは固結深度が約 7.2-13.0 km、Mutch et al. (2016)による圧力見積もりでは約 7.1-10.9 km と推定された。

「熱年代学、宇宙線生成核種法、地形解析による山地の隆起・侵食過程の検討」では、以下の三つの検討を行った。

「熱年代学による山地の隆起・侵食過程の検討」では、東北日本弧の前弧域（北上山地、阿武隈山地）において、地質学的タイムスケールの熱史・削剥史の推定のため、三手法の熱年代計による年代測定を実施した。アパタイト FT 年代が 8 点、アパタイト He 年代が 6 点、ジルコン U-Pb 年代が 2 点得られ、概ね既報年代と調和的な結果が得られた。今後は、年代値の精度・確度の改善のための追加分析、未測定試料の分析などを予定している。

「宇宙線生成核種を用いた地形の隆起・侵食過程の検討」では、海成段丘を構成する岩盤中での宇宙線生成核種の濃度の深度分布やその時間変化を計算し、手法の適用性を検討した。段丘面を覆う風成物の堆積速度は、宇宙線生成核種を用いた地形の形成年代測定の限界を規定しており、一般に、5 m よりも厚いロームに覆われる場では、この手法の援用は困難である。手法の適用には、分析対象となる岩盤が、有意な宇宙線の照射を受ける程度の地表近傍に存在し続けることが重要である。宇宙線への暴露さえ持続していれば、複数回の露出－埋没過程を経るような、複雑な地形発達史を持つ場合でも、深度プロファイルを取ることで、段丘形成史を復元できるものと期待される。

「地形解析による山地の隆起・侵食過程の検討」では、河床縦断形の逆解析による地殻隆起速度推定手法を東北地方に適用したところ、おおむね妥当と思われる結果が得られた。しかし、海

水準変動の影響がフォワードモデルで考慮されていないこと、基盤岩強度が一定と近似されていることなどの問題点が残っている。今後の課題としては、これらの要素のモデルへの組み込みや、熱年代ほかの隆起・侵食速度データに基づいたモデルパラメータの高精度化などが挙げられる。

引用文献

Andersen. J.L. and Smith, D.R., The effects of temperature and fO2 on the Al-in-hornblende barometer. American Mineralogist, vol.80, pp.549-559, 1995.

Blundy, J.D. and Holland, T.J.B., Calcic amphibole equilibria and a new amphibole-plagioclase geothermometer. Contributions to Mineralogy and Petrology, vol.104, pp.208-224, 1990.

Dodson, M.T., Closure temperature in cooling geochronological and petrological systems, Contributions to Mineralogy and Petrology, vol.40, pp.259-274, 1973.

Fukuchi, R., Fujimoto, K., Kameda, J., Hamahashi, M., Yamaguchi, A., Kimura, G., Hamada, Y., Hashimoto, Y., Kitamura, Y. and Saito, S., Changes in illite crystallinity within an ancient tectonic boundary thrust caused by thermal, mechanical, and hydrothermal effects: an example from the Nobeoka Thrust, southwest Japan. Earth, Planets and Space, vol.66:116. 2014.

Fukuda, S., Sueoka, S., Hasebe, N., Tamura, A., Arai, S. and Tagami, T., Thermal history analysis of granitic rocks in an arc-trench system based on apatite fission-track thermochronology: A case study of the Northeast Japan Arc, Journal of Asian Earth Sciences: X, in press.

後藤　篤, 日本列島の隆起準平原の平坦化の時期 : フィッション・トラック年代学からのアプローチ, 平成 10 年度～平成 12 年度科学研費補助金（基盤研究（B）(2)）研究成果報告書, 課題番号 10440144, 2001.

Hollister, L.S., Grissom, G.C., Peters, E.K., Stowell, H. and Sisson, V.B., Confirmation of the empirical correlation of Al in hornblende with pressure of solidification of calc-alkaline plutons. American Mineralogist, vol.72, pp.231-239, 1987.

Howard, A.D. and Kerby, G., Channel changes in badlands, Geological Society of America Bulletin, vol.94, pp.739-752, 1983.

Ito, H., Yamada, R., Tamura, A., Arai, S., Horie, K. and Hokada, T. Earth's youngest exposed granite and its tectonic implications: the 10–0.8 Ma Kurobegawa Granite. Scientific Reports, vol.3, 1306, 2013.

金沢　淳, 富山眞吾, 及川輝樹, 梅田浩司, 地質温度計による熱履歴の調査手法について, サイクル機構技報, vol.26, pp.1-18, 2005.

King, G.E., Sueoka, S., Tsukamoto, S., Herman, F., Ahadi, F., Gautheron, C., Delpech, G. and Tagami, T., Sub-Quaternary exhumation rates changes in the Hida range of the Japanese Alps: A climatic control?, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会講演要旨, MGI25-P03.

松四雄騎, 若狭　幸, 松崎浩之, 松倉公憲, 宇宙線生成核種 ^{10}Be および ^{26}Al のプロセス地形学的応用, 地形, vol. 28, pp.87-107, 2007.

Mutch, E.J.F., Blundy, J.D., Tattitch, B.C., Cooper, F.J. and Brooker, R.A., An experimental study of amphibole stability in low-pressure granitic magmas and a revised Al-in-hornblende geobarometer. Contributions to Mineralogy and Petrology, vol.171, 85, 2016.

Ohtani, T., Shigematsu, N., Fujimoto, K., Tomita, T. and Iwano, H., Geochronological constraint on the brittle-plastic deformation along the Hatagawa Fault Zone, NE Japan, Earth, Planets and Space, vol.56, pp.1201-1207, 2004.

Pritchard, D., Roberts, G.G., White, N.J. and Richardson, C.N., Uplift histories from river profiles, Geophysical Research Letters, vol.36, L24301, doi:10.1029/2009GL040928, 2009.

Reiners, P.W., Ehlers, T.A. and Zeitler, P.K., Past, present, and future of thermochronology,

Reviews in Mineralogy and Geochemistry, vol.58, pp.1-18, 2005.

Reiners, P.W., Nonmonotonic thermal histories and contrasting kinetics of multiple thermochronometers, Geochimica et Cosmochimica Acta, vol.73, pp.3612-3629, 2009.

Roberts G.G. and White, N., Estimating uplift rate histories from river profiles using African examples, Journal of Geophysical Research, vol.115, B02406, doi:10.1029/2009JB006692, 2010.

Rosenbloom, N.A. and Anderson, R.S., Evolution of the marine terraced landscape, Santa Cruz, California, Journal of Geophysical Research, vol.99, pp.14013-14030, 1994.

Rudge, J.F., Roberts, G.G., White, N.J. and Richardson, C.N., Uplift histories of Africa and Australia from linear inverse modeling of drainage inventories, Journal of Geophysical Research: Earth Surface, vol.120, pp.894–914, doi:10.1002/2014JF003297, 2015.

佐脇貴幸, 流体包有物—その基礎と最近の研究動向—, 岩石鉱物科学, vol.32, pp.23-41, 2003.

Schmidt, M.W., Amphibole composition in tonalite as a function of pressure: an experimental calibration of the Al-in-hornblende barometer. Contributions to Mineralogy and Petrology, vol.110, pp.304-310, 1992.

Sklar, L . and Dietrich, W.E., River longitudinal profiles and bedrock incision models: Stream power and the influence of sediment supply, in Rivers Over Rock: Fluvial Processes in Bedrock Channels, Geosphys. Monogr. Ser., vol.107, edited by Tinkler, K.J. and Wohl, E.E., pp. 237-260, AGU, Washington D.C., 1998.

Sueoka, S., Tagami, T. and Kohn, B.P., First report of (U–Th)/He thermochronometric data across Northeast Japan Arc: implications for the long-term inelastic deformation, Earth, Planets and Space, vol.69, 79, 2017.

田中和広, 遠田晋次, 上田圭一, 千木良雅弘, 我が国の地質環境の長期的変動特性評価（その 2）—隆起・沈降特性評価手法の提案と適用性検討—, 電力中央研究所報告, U96028, 1997.

高橋裕平, 角閃石中の Al 量—花崗岩類に有効な地質圧力計. 地質調査所月報, vol.44, pp.597-608, 1993.

Whipple, K.X. and Tucker, G.E., Dynamics of the stream-power river incision model: Implications for height limits of mountain ranges, landscape response timescales, and research needs, Journal of Geophysical Research, vol.104, pp.17661-17674, 1999.

Yamada, R., Fission track thermochronology: Thermal characteristics of fission tracks in zircon, and cooling history analysis of the granitic bodies around the northern Alps, central Japan, Doctoral Dissertation of Kyoto University, 1996.

Yokoyama, K., Shigeoka, M., Otomo, Y., Tokuno, K. and Tsutsumi, Y., Uraninite and thorite ages of around 400 granitoids in the Japanese Islands, Memoirs of the National Museum of Nature and Science, vol.51, pp.1-24, 2016.

吉松敏隆, 中屋志津男, 児玉敏孝, 寺井一夫, 原田哲朗, 紀伊半島の地質と温泉, アーバンクボタ, no.38, 56p, 1999.

断層内物質の年代測定による
断層活動性評価手法に関する研究

平成 30 年度共同研究報告書

平成 31 年 1 月

石川県公立大学法人石川県立大学

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
核燃料・バックエンド研究開発部門　東濃地科学センター
地層科学研究部　ネオテクトニクス研究グループ

目　次

1. 概要 35
1.1 共同研究件名 35
1.2 研究目的 35
1.3 実施期間 35
2. 研究内容 36
2.1 はじめに 36
2.2 IRSL 測定のための試料採取及び試料調製 36
2.3 年間線量 36
2.4 IRSL 測定装置 37
2.5 測定皿の材質の検討 37
2.6 IRSL 測定とフェーディング測定 38
2.7 飽和線量とフィッティング曲線の検討 39
2.8 IRSL フェーディング補正 41
2.9 IRSL の年代測定結果 41
2.10 テストドーズによる感度変化について 42
2.11 断層ガウジの粒径分析 42
3. まとめ 43

図　目　次

図 2.4-1　石川県立大学に設置された蛍光測定装置の概要 37
図 2.5-1　Ti 及び Ag 皿の加熱による TL 発光強度の比較 38
図 2.7-1　TS_BS2L_AF5 の発光曲線 40
図 2.7-2　TS_BS2L_AF5 の成長線 40
図 2.8-1　アノーマラス・フェーディング（g 値）の TS_BS2L_AF5 の測定例 41
図 2.9-1　TS6b 及び TS_BS2L の IRSL（IR50）と p-P-IR225 の年代分布 41
図 2.10-1　TS6b 及び TS_BS2L の SAR 測定中の感度変化 42
図 2.11-1　断層ガウジと砂層の粒度分布 43

表　目　次

表 2.6-1　SAR 法による IRSL と p-P-IR225 測定手順 39
表 2.6-2　g 値の測定手順 39
表 2.7-1　IRSL 測定の各種測定結果と年代測定結果 40

1. 概要

1.1 共同研究件名

断層内物質の年代測定による断層活動性評価手法に関する研究

1.2 研究目的

日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構）では、経済産業省資源エネルギー庁から受託した「平成 30 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業（地質環境長期安定性評価技術高度化開発）」において、地層処分に適した地質環境の選定に係る自然現象の影響把握及びモデル化に関連する研究課題として示された火山・火成活動、深部流体、地震・断層活動、隆起・侵食に対し、地質学、地形学、地震学、地球年代学などの各学術分野における最新の研究を踏まえた技術の適用による事例研究を通じて、課題の解決に必要な知見の蓄積や調査・評価技術の高度化を総合的に進めている。

このうち地震・断層活動に関しては、断層変位の有無の判定に係る年代既知の被覆層（上載地層）がない場合の断層の活動性評価が課題の一つとして挙げられている。この場合、断層内物質に着目した評価手法が考えられるが、これまでは主に定性的な特徴（鉱物粒子の形状など）に基づく検討が主体であった。断層内物質を対象とした年代測定（カリウム・アルゴン（K-Ar）法、電子スピン共鳴（ESR）法、熱ルミネッセンス（TL）法、光ルミネッセンス（OSL）法など）に基づく検討も進められてきているが、これらの年代測定に基づく断層の活動性評価の信頼性を確保するためには、各手法の適用範囲の拡充や精度の向上が大きな課題となっている。そこで本共同研究では、断層活動性評価手法の高度化を目的として、断層内物質を対象とした年代測定に係る検討を行う。

共同研究先である石川県公立大学法人石川県立大学（以下、石川県立大学）は、TL 法や OSL 法などの年代測定についての高度な技術を有し、これらの手法の断層内物質への適用性検討に先駆的に取り組んできている。原子力機構は、地震・断層活動の活動性及び影響の調査・評価技術に関する多くの研究実績を有し、K-Ar 法などによる断層内物質の年代測定手法の開発に取り組んでいる。そのため、本共同研究を行うことにより、石川県立大学は、地震・断層活動に関し原子力機構が有する知見を取り入れることでTL法やOSL法などの年代測定における適用対象の範囲の拡充を効果的に進めることができるとともに、原子力機構においては、地層処分に適した地質環境の選定に係る調査・評価において課題となっている上載地層がない場合の断層の活動性評価に関する調査技術の高度化を効果的に進めることができる。

なお、本共同研究は、原子力機構が経済産業省資源エネルギー庁から受託した「平成 30 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業（地質環境長期安定性評価技術高度化開発）」の一環として行うものである。

1.3 実施期間

平成 30 年 8 月 27 日～平成 31 年 1 月 31 日

2. 研究内容

2.1 はじめに

本共同研究では、断層の活動性評価手法の高度化を目的として、断層内物質の OSL 法や ESR 法などによる年代測定の適用性の検討を行う。平成 30 年度の共同研究では、既往研究によって既に記載されている活断層露頭から採取された試料を対象として、赤外線励起による長石のルミネッセンス（IRSL）による検討を行った。

2.2 IRSL 測定のための試料採取及び試料調製

測定試料は北海道教育大学にて、2016年5月に採取された岐阜県中津川市田瀬に位置する阿寺断層の断層ガウジ試料（試料名：TS6B）とその下盤側に露出する砂層試料（試料名：TS-BS2L）の2種類を用いた。本露頭では、阿寺断層が北西走向・北傾斜で分布し、白亜紀後期の苗木－上松花崗岩が第四紀後期の砂礫層に衝上している（遠田ほか, 1994）。TS6Bは断層に沿って分布する幅約30 cmの断層ガウジ内で最も南西側（砂礫層側）の端に位置する厚さ約5 cmのガウジである。ガウジは粘土～砂質基質中に断層の引き擦りで引き延ばされたような形状を持つ乳白色花崗岩レキを含む特徴を持つ。TS-BS2Lは、断層の南西側に露出するほぼ水平な不鮮明な層理面を持った砂層である。分布が極めて限られており、地質情報については未詳細な堆積物である。

IRSL測定のための長石分離は次の手順で行った。まず、試料全体を水洗し、IRSL測定に一般的に用いられる粒径125–250 μmの粒子を得るために篩分けを行った。次に比重分離を行った。分離に使用した薬品は塩酸（HCl）10%、水酸化ナトリウム水溶液（NaOH）1mol/L、ポリタングステン酸ナトリウム（SPT）（重液）である。手順は次のとおりである。①試料の水洗、乾燥、篩分け、②塩酸で15分撹拌し、炭酸塩鉱物の除去、③水酸化ナトリウム水溶液で有機物の除去、④比重2.60のSPT溶液で試料の撹拌、⑤約24時間の放置、⑥浮遊部（アルカリ長石）と沈殿部（重鉱物、石英）の回収、⑦沈殿部鉱物の比重2.68のSPT溶液での撹拌、⑧約24時間の放置、⑨浮遊部（石英）の回収。以上の工程から測定に十分な石英及びアルカリ長石を得ることができた。特に石英はESR測定に用いるために必要な重量、1.2–6.1 gを回収することができた。

2.3 年間線量

年間線量は測定鉱物の年間被曝量で、比較的寄与率の小さいRbを除いたK、U、Thで計算されることが多い。加えて、鉱物内にKを含有するアルカリ長石の場合、内部線量と外部線量との合計を年間線量とする。

試料の放射性元素を定量するため、日本原子力研究開発機構東濃地科学センターに設置された株式会社リガク製の蛍光X線分析装置ZSX PrimusⅡを利用し、清水ほか（2017）に従い、以下のように進めた。まず、試料2 g、融剤4 gを目標値として両者を混合し、東京科学株式会社製ビード&フューズサンプラ（高周波溶融装置：TK-4100型）で溶融してガラスビードを作製した。溶融条件は初段加熱が860℃で120秒、本加熱溶融が1050℃で360秒、揺動加熱が1050℃で240秒である。引き続き、ガラスビードに対して蛍光X線分析を行った。分析時のX線管球の加速電圧と電流はそれぞれ50 kV、60 mAで出力3 kWとし、主要元素、微量元素とも同一とした。その結果、各元素量は以下のように定量された。TS6bでは、U=6.67 ppm、Th=34.3 ppm、K=3.87%、TS-BS2Lでは、U=5.96 ppm、Th=25.03 ppm、K=3.64%である。

年間外部線量はこれらの値と新コンバージョンファクターによるβ線の透過率から求めた。また、試料（TS6b、TS-BS2L）の含水率は0.19と0.31（(含水重量－乾燥重量）／含水重量）であった。さらに、北緯40度、海水準面の宇宙線量（0.185 mGy/年）から得られた試料採取地点の宇宙線量は0.12 mGy/年であった。その結果、年間外部線量として3.82 mGy及び4.74 mGyの値が

得られた。

また、内部線量については北海道教育大学・日本原子力研究開発機構（2017）に準じて求めた。その際、カリ長石のK_2O量として13.06 %を用いた。この値とdose rate value値（0.782）及び粒径依存による β 線吸収率（0.0797）を用いて得られたカリ長石の内部線量は0.69 mGy/年であった。したがって年間線量はTS6bで4.51 mGy、TS-BS2Lで5.42 mGyとなった。

2.4 IRSL 測定装置

IRSLを測定するため、石川県立大学に設置された3号機装置を用いた（図2.4-1）。この装置は励起光としてネオアーク社製の赤外線レーザーLFP-08381000-3mを採用し、発振中心波長は830±10 nmで、光ファイバ出射出力は1000 mWである。発振器の前面にはロングパスフィルターRG780（3mm）（Schott）を2枚重ね、725 nmより低波長の波長をカットしている。また、受光部には紫外～青領域の受光に優れた光電子増倍管（PMT：浜松ホトニクス社製R585S）を採用した。フィルターとしてBG39（Schott）+7-59（Corning）を用いた。また、鉱物から放出される微小な蛍光の受光感度を上げるため、PMTの前面にガラスロッドを配置した。

さらに、SAR測定を可能とするため小型X線（Varian社：VF-50）を搭載し、X線照射部前面にアルミ箔をシールドし低エネルギー部をカットしている。X線強度は13.7 Gy/mである。連続10試料の測定が可能である。また、紫外線領域（受光中心波長：340 nm）のルミネッセンスを測定するため、IRSL/OSL測定のため制御プログラムを開発し、測定目的に応じた様々な動作の組み合わせを可能としている。

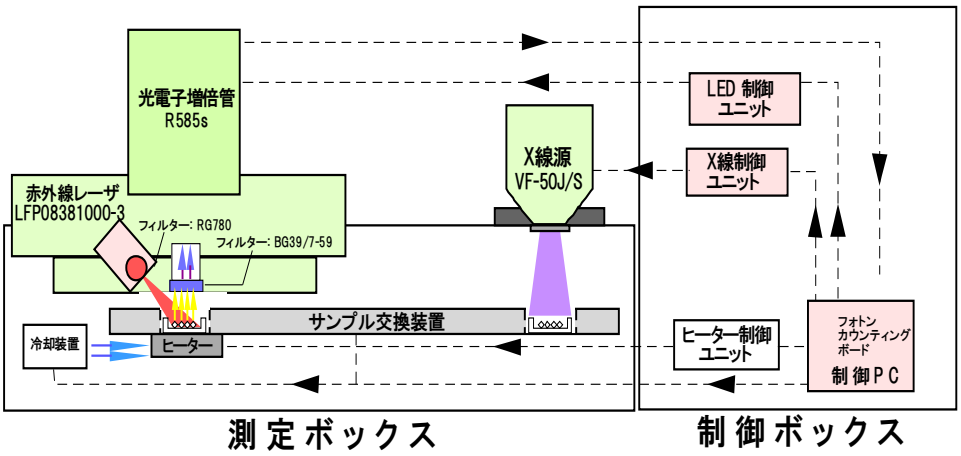


図 2.4-1 石川県立大学に設置された蛍光測定装置の概要

2.5 測定皿の材質の検討

IRSL測定に用いる測定皿の材質について検討を加えた。IRSL測定にはアルミやステンレスが使用され、赤TLの測定には銀皿が用いられてきた。銀が高騰しているので、コスト面から金属中で赤外線放射率の低いチタンに注目した。その際、純粋な銀製皿（JIS1種）とこれまで測定を繰り返し表面酸化が進んだ銀皿との赤外線放射の比較を行った。加熱は1℃/秒の速度で最大450℃まで行った。受光PMTは浜松ホトニクス社のR649である。特に注意した点は、IRSL測定ではやや高温の225℃や場合によっては290℃で測定皿を100秒程度加熱するため、この温度領域での発光数に注意を払った。ただし、IRSLの受光波長は紫外線領域（UV-A）を対象としているので赤外線放射効果は極めて小さい。実験の結果、銀皿（Ag-2）の赤外線放射が最も抑えられ、酸化銀

（Used Ag-2）、チタン（Ti-2）の順であった（図2.5-1）。この結果により、IRSL測定に際してチタン皿を利用するには大きな問題がなくコストパフォーマンスに優れるが、今後断層年代測定実験に赤TLを利用するのであれば、表面酸化を除去した銀皿を利用すればより良い精度の信号が得られることが示された。

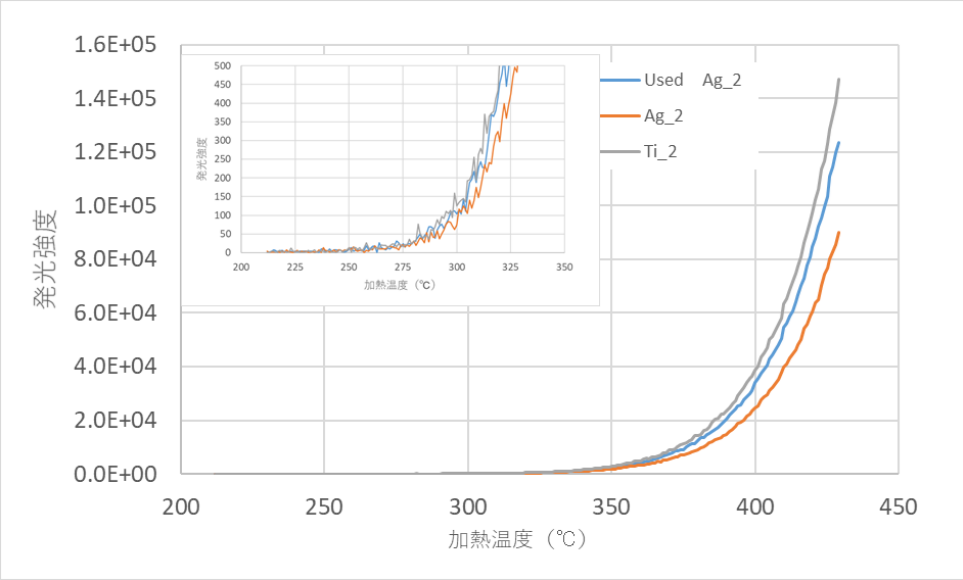


図 2.5-1　Ti 及び Ag 皿の加熱による TL 発光強度の比較

2.6 IRSL 測定とフェーディング測定

長石の IRSL 測定のため、測定時のアシスト温度を 50℃と 225℃で SAR 法から試料の蓄積線量（De）を求めた（表 2.6-1）。前者を IRSL、後者を p-P-IR225 と呼ぶ。測定では飽和曲線（D0）とルミネッセンス上限強度（Imax）を明らかにするため、照射線量の最大値を 400 Gy に設定した。

また、IRSL 測定の場合、時間とともに信号が減衰するアノーマラスフェーディング（以下、フェーディング）に留意が必要である。一般には、IRSL でも p-P-IR225 でも 2～10%/decade のフェーディング（g 値）が報告されている（Huntley and Lamothe, 2001）。そのため、Buylaert et al.（2009）に基づいてフェーディング補正を行った（表 2.6-2）。データの信頼度を高めるため待機時間を 7 段階に設定し、最長待機時間を TS_BS2L では約 2 週間（412 h）、TS6b では約 4 週間（706 h）に設定した。その実験方法を表 2.6-2 に示した。平成 30 年度の実験では、IRSL 測定の測定条件の設定や測定データの傾向を明らかにすることを主目的としたので、測定試料皿数は 5 皿とした。

表 2.6-1　SAR 法による IRSL と p-P-IR225 測定手順

step A	Treatment	Observation
1	Dose(N, 100, 0, 200, 300, 400, 100 Gy)	
2	Preheat at 250℃, 60s	
3	IRSL measurement 50℃, 100s	Lx IR50
4	IRSL measurement 225℃, 100s	Lx pIR225
5	Give test dose (5Gy)	
6	Preheat at 250℃, 60s	
7	IRSL measurement 50℃, 100s	Tx IR50
8	IRSL measurement 225℃, 100s	Tx pIR225
9	Hot bleach 290℃, 40s + IR laser	
10	Return 1	

表 2.6-2　g 値の測定手順

step B	Treatment	Observation
1	Dose(30 Gy)	
2	Preheat at 250℃, 60s	
3	Waiting (0, 1, 3.5, 10, 35, 100, 412h or 706h)	
4	IRSL measurement 50℃, 100s	Lx IR50
5	IRSL measurement 225℃, 100s	Lx pIR225
6	Give test dose (5Gy)	
7	Preheat at 250℃, 60s	
8	IRSL measurement 50℃, 100s	Tx IR50
9	IRSL measurement 225℃, 100s	Tx pIR225
10	Hot bleach 290℃, 40s + IR laser	

2.7　飽和線量とフィッティング曲線の検討

蓄積線量（De）を求めるために行った TS_BS2L_AF5 の SAR 測定の IRSL 及び p-P-IR225 の発光曲線の一例を図 2.7-1 に示した。 天然シグナル及び再生照射シグナルは IRSL（IR50）、p-P-IR225 ともに強い発光を示し、前者では天然シグナルで 68 × 10^4 /0.1s の強い発光シグナルを、後者でも 30 × 10^4 /0.1s のシグナル強度を示す。発光パターンは前者で急速に減衰するが、後者でやや緩慢な減衰傾向を示す。そこで、シグナル強度の積算は前者で 1 秒、後者で 3 秒とした。図 2.7-2 はテストドーズによる感度補正後の成長線である。飽和程度を示す Imax（信号強度の上限）及び 2D0（飽和線量）は TS_BS2L_AF5 の場合、IRSL ではそれぞれ 32.2、364 Gy を示し、p-P-IR225 では 31.2、372 Gy を示した。また、成長線を作成する際、実測強度は標準成長曲線（Robert and Duller, 2004）と統計的なフィッティングを行い、最も近似となる Imax と 2D0 を決定し、標準成長曲線に基づく De を計算した。その結果、TS_BS2L_AF5 の De は IR50 で 288 Gy、p-P-IR225 で 207 Gy が得られた。

他の試料についても同様な SAR 法による IR 測定と標準成長曲線に基づく成長線の評価を行い、Imax 及び 2D0 を明らかにした後 De の決定を行った。その一覧を表 2.7-1 に示した。このうち、2D0 に注目すると、TS6b は 500–600 Gy 程度、TS_BS2L のそれは 350–400 Gy 程度である。それぞれの年間線量が 4.51 mGy、5.42 mGy であるので、測定上限年代はおおよそ 110–130 ka、75–85 ka 程度と推定される。

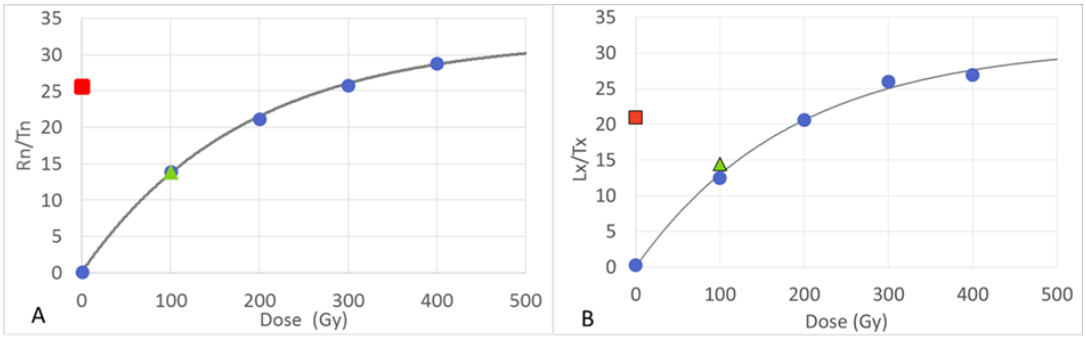


図 2.7-1　TS_BS2L_AF5 の発光曲線
A: IRSL (IR50), B: p-P-IR225

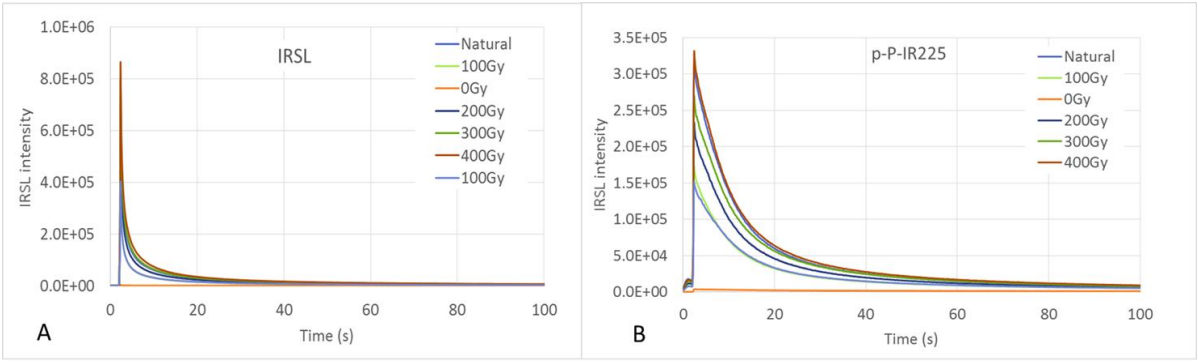


図 2.7-2　TS_BS2L_AF5 の成長線
A: IRSL (IR50), B: p-P-IR225

表 2.7-1　IRSL 測定の各種測定結果と年代測定結果

TS6b　Da=4.51mGy

IR50	AF1	AF2	AF3	AF4	AF5	Ave	STD
De(Gy)	509	413	236	382	411	392	99
Natural	44.9	38.31	31.6	57.9	35.9	37.7	4.8
Imax	52.3	44.1	49.7	45.0	44.1	47.6	3.6
Do(Gy)	260	249	234	191	245	247	9
2Do(Gy)	520	498	468	382	490	494	19
De/2D0	0.98	0.83	0.50	1.00	0.84	0.79	0.17
Recycl.ratio	1.01	0.88	1.05	0.87	0.85	0.95	0.08
g-value	3.04	0.00	9.22	12.7	0.96	3.30	3.59
age (ka)	113	92	52	887	91	87	22
True age (ka)	124	92	70	1881	94	95	19

TS6b

IR225	AF1	AF2	AF3	AF4	AF5	Ave	STD
De(Gy)	327	254	237	539	351	342	108
Natural	33.4	29.0	24.2	42.3	27.3	31.2	6.3
Imax	56.2	29.0	51.0	56.9	35.9	45.8	11
Do(Gy)	362	127	369	396	247	300	101
2Do(Gy)	724	254	738	792	494	600	201
De/2D0	0.45	1.00	0.32	0.68	0.71	0.63	0.23
Recycl.ratio	0.97	0.94	1.16	1.01	0.94	1.00	0.08
g-value	9.99	0.00	6.31	3.51	0.00	3.96	3.83
age (ka)	73	56	53	120	78	76	24
True age (ka)	102	56	63	134	78	87	28

TS-BS2L　Da=5.42mGy

IR50	AF1	AF2	AF3	AF4	AF5	Ave	STD
De(Gy)	218	241	210	222	288	236	28.0
Natural	23.9	25.9	21.6	22.6	25.6	23.9	1.7
Imax	33.1	35.9	29.7	30.3	32.2	32.2	2.2
Do(Gy)	170	190	163	162	182	173	10.9
2Do(Gy)	340	380	326	324	364	347	21.9
De/2D0	0.64	0.63	0.64	0.69	0.79	0.68	0.1
Recycl.ratio	0.95	0.94	0.98	1.00	1.02	0.98	0.0
g-value	4.55	3.03	2.75	2.96	0.30	2.72	1.4
age (ka)	40	44	39	41	53	43	5
True age (ka)	45	48	42	44	54	47	4

TS-BS2L

IR225	AF1	AF2	AF3	AF4	AF5	Ave	STD
De(Gy)	125	266	259	251	207	222	52
Natural	14.5	21.8	21.4	21.8	20.9	20.1	3
Imax	30.1	33.8	26	28.9	31.2	30.0	3
Do(Gy)	192	257	149	179	186	193	35
2Do(Gy)	384	514	298	358	372	385	71
De/2D0	0.33	0.52	0.87	0.70	0.56	0.59	0
Recycl.ratio	1.02	1.16	1.05	0.95	0.96	1.03	0
g-value	3.28	4.51	2.35	2.16	3.70	3.20	1
age(T)	23	49	48	46	38	41	10
True age (ka)	25	56	51	49	42	44	11

2.8 IRSL フェーディング補正

表 2.6-2 で示した測定手順からフェーディング（g 値）を明らかにした。TS_BS2L_AF5 の測定例を図 2.8-1 に示した。g 値は IRSL（IR50）で 0.30%/decade、p-P-IR225 では 3.70%/decade を示した。測定試料から明らかにされた g 値は TS_BS2L で IRSL（IR50）と p-P-IR225 ともにおおむね 4.5%以内にあるが、TS6b では偏差が大きく、いずれの測定でも最大 9%を超えた試料もある（表 2.7-1）。

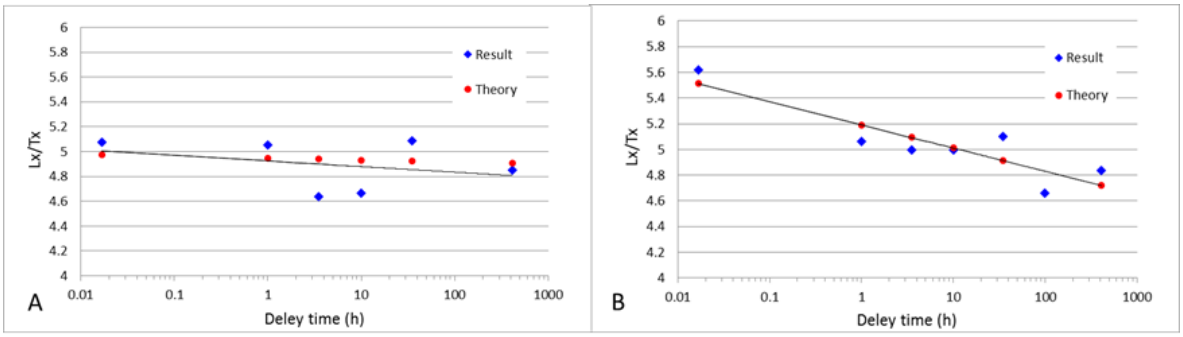


図 2.8-1　アノーマラス・フェーディング（g 値）の TS_BS2L_AF5 の測定例

2.9 IRSL の年代測定結果

SAR 法によって得られた De 値と年間線量値から SAR 年代を決定した。さらにこれをフェーディング（g 値）で補正し、真の年代（True age）を求めた（表 2.7-1）。表のうち、TS6b_AF4 の IRSL（IR50）と TS6b_AF2 の p-P-IR225 は飽和に達しており、年代評価から除いた。これらを除外した平均年代は、TS6b では IRSL（IR50）で 95±19 ka、p-P-IR225 で 87±28 ka であった。また、TS_BS2L では、それぞれ 47±4 ka、44±11 ka であった。試料間には明らかな年代差が認められるが、各試料内の IRSL 年代は一定のまとまりを示す（図 2.9-1）。このことから、IRSL 法を阿寺断層を構成する地質体に用い、その年代から何らかの情報を引き出すことは十分可能であると考えられる。

測定試料の年代解釈として、TS6b は飽和年代に近く、年代の標準偏差もやや大きいので、断層内の異なる地質履歴を持つ鉱物の集合体と解釈できる。また、TS_BS2L は堆積層（段丘堆積物？）であるので、太陽ブリーチ（程度は不明）を受けた後の年代を示すのかもしれない。その場合、この堆積物は MIS3 に相当することになる。

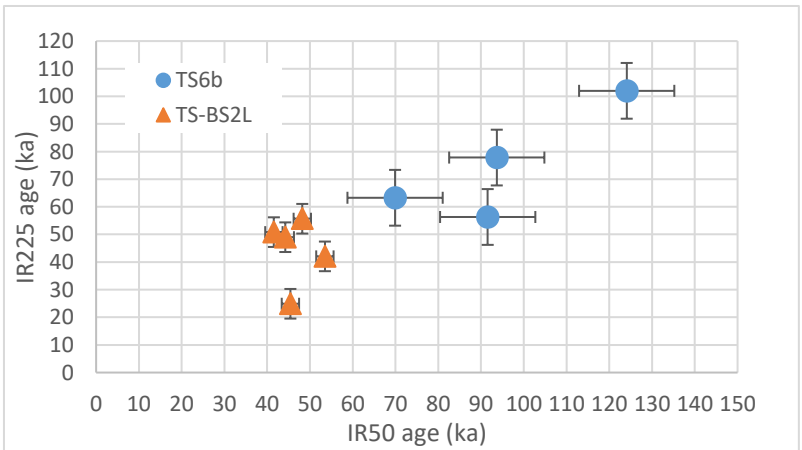


図 2.9-1　TS6b 及び TS_BS2L の IRSL（IR50）と p-P-IR225 の年代分布

2.10 テストドーズによる感度変化について

SAR 法による IRSL 測定は、同一試料に対し繰り返し加熱と強い人工放射線照射を行うため、鉱物のシグナル発光に際して感度変化が引き起こされる。天然試料の場合、岩体定着後安定な温度と低レベル放射線下で保存されるので、感度は安定していると考えられる。しかしもし断層運動などで、加熱などのストレスを与えられた場合、感度は変化しやすくなるかもかもしれない。こうした視点から、予察的に測定試料の SAR 測定中の感度変化をモニターした（図 2.10-1）。このうち、TS6b の IRSL（IR50）の感度変化だけが他と比べて、大きな感度変化パターンを示す。IRSL 年代は IRSL（IR50）と p-P-IR225 で違いは見られないが、断層試料の低温測定の条件に特異なパターンが見られる点が注目される。

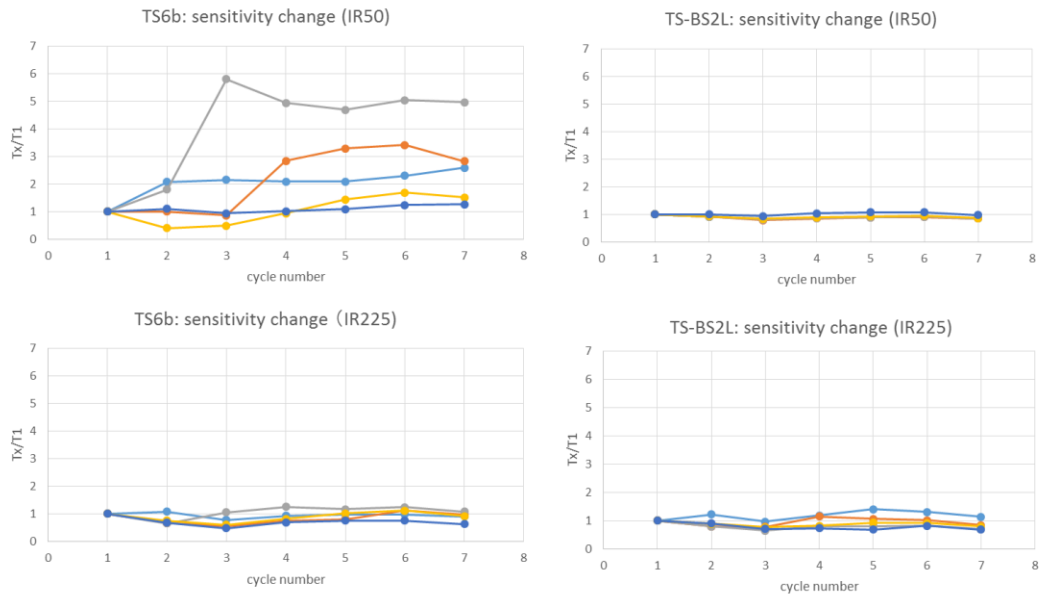


図 2.10-1　TS6b 及び TS_BS2L の SAR 測定中の感度変化

2.11 断層ガウジの粒径分析

IRSL では試料の取り扱いやすさやカリ長石だけを分離しやすい利点から粗粒粒子（125–250 μm）で測定を行うことが多い。しかし、破砕の進んだ断層ガウジは粘土質であることが多く、断層活動をより顕著に受けた細粒の粒径サイズも測定対象とした方がよいと思われる。そこで、レーザー回折／散乱式粒子径分布測定装置（HORIBA Partica LA-950V2）を用いて、本実験で用いた IRSL 試料（TS6b 及び TS_BS2L）とガウジと接する未測定の砂層（TS_CS2S1）、断層ガウジ（TS3）の粒度分析を行った。その結果を図 2.11-1 に示した。いずれの試料でも 10–15 μm に最大頻度を持ち、70–120 μm にサブピークを持つ。今後の測定にあたっては、この二つの粒径を対象とした IRSL 測定が課題となる。

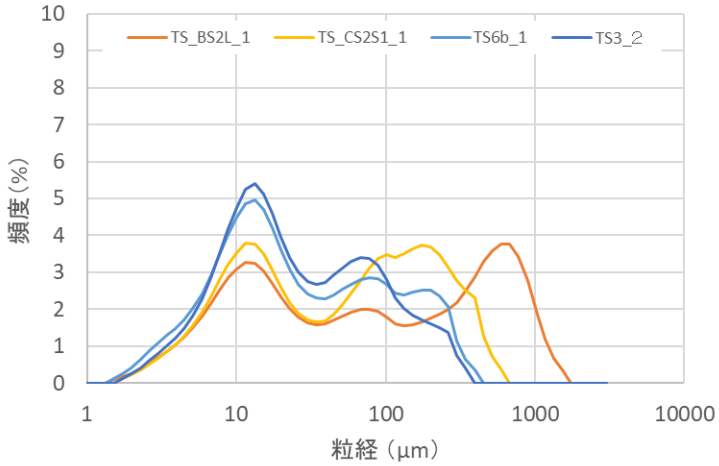


図 2.11-1　断層ガウジと砂層の粒度分布

3. まとめ

平成 30 年度の共同研究では、主に IRSL 測定に関して、試料分離の手法確立、IRSL 測定装置の調整、実験環境の確保など基礎的な整備と実験を進めた。IRSL 測定では、測定方法の改善やデータ分析の改良を通して、より精度の高いデータが得られるようにした。こうした改良を通して、阿寺断層の断層ガウジ（TS6b）及び断層と接する第四紀堆積物（砂層：TS_BS2L）の試験的な測定を行い、年代測定の上限値や感度変化についての基礎データを蓄積することができた。以下、成果の主要な点を述べる。

- IRSL 測定の飽和程度を明らかにするため最大 400 Gy の照射を行い、カリ長石の Imax（信号の強度の上限）及び 2D0（飽和線量）を明らかにした。その結果、TS6b と TS_BS2L では Imax、2D0 で異なる値が示された。
- フェーディング補正の平均 g 値は、試料及び測定条件（IR50、p-P-IR225）にかかわらず 2.72～3.90 でほぼ類似の値を示したが、TS6b の偏差が大きい。
- フェーディング補正年代（IR50、p-P-IR225）は、TS6b で 95±19 ka、87±28 ka、TS_BS2L で 47±4 ka、44±11 ka を示した。ともに測定条件の差異にかかわらず同程度の年代を示したが、試料間では明瞭な年代差が認められた。

引用文献

Buylaert, J.P., Murray, A.S., Thmsen, K.J., Jain, M., Testing the potential of an elevated temperature IRSL signal from K-feldspar, Radiation Measurements, Vol.44, pp.560-565, 2009.

北海道教育大学・日本原子力研究開発機構, 放射線損傷を用いた断層破砕帯の活動性評価手法に関する研究, 北海道教育大学・日本原子力研究開発機構平成 28 年度共同研究報告書, 7p, 2017.

Huntley, D.J., Lamothe, M., Ubiquity of anomalous fading in K-feldspars and the measurement and correction for it in optical dating, Canadian Journal of Earth Sciences, Vol.38, pp.1093-1106, 2001.

Robert, H.M., Duller, G.A.T., Standardised growth curves for optical dating of sediment using multiple-grain aliquots, Radiation Measurements, Vol.38, pp.241-252, 2004.

清水麻由子・佐野直美・柴田健二, 東濃地科学センターにおける蛍光 X 線分析装置を用いた岩石試料の主要元素および微量元素の定量分析, JAEA-Testing 2016-004, 27p, 2017.

遠田晋次・井上大栄・高瀬信一・久保内明彦・冨岡伸芳, 阿寺断層の最新活動時期：1586 年天正地震の可能性, 地震第 2 輯, Vol.47, pp.73-77, 1994.

機械学習に基づいた
断層の活動性評価手法の開発に関する共同研究

平成 30 年度共同研究報告書

平成 31 年 1 月

国立大学法人富山大学

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
核燃料・バックエンド研究開発部門　東濃地科学センター
地層科学研究部　ネオテクトニクス研究グループ

目　次

1. 概要 48
1.1 共同研究件名 48
1.2 共同研究先 48
1.3 研究目的 48
1.4 研究内容 49
1.5 研究期間 49
2. データベースの作成 50
2.1 文献収集 50
2.2 整理結果 51
3. 既往試料の化学分析 53
3.1 手法 53
3.2 結果 53
4. 機械学習による検討作業 54
4.1 解析手法 54
4.1.1 概要 54
4.1.2 解析の流れとツール 56
4.2 結果 61
4.2.1 変数選択 61
4.2.2 線形判別分析 63
5. 考察 66
5.1 線形判別分析に寄与する元素に関する考察 66
5.2 得られた一次式に関する考察 69
6. まとめと今後の課題 69

図　目　次

図 4-1　機械学習の活用例 54
図 4-2　結果図の例（17 元素全ての結果） 60
図 4-3　主成分の寄与率 61
図 4-4　線形判別分析の結果図 64
図 4-5　線形判別分析の結果図 65
図 5-1　線形判別分析の結果図 67
図 5-2　線形判別分析の結果図 68

表　目　次

表 2-1　収集文献一覧 50
表 2-2　既往報告書一覧 51
表 2-3　化学組成データベースの分類一覧 51
表 2-4　化学組成データベースの例① 52
表 2-5　化学組成データベースの例② 52
表 2-6　化学組成データベースの例③ 52
表 2-7　化学組成データベースの例④ 52
表 2-8　化学組成データベースの例⑤ 52
表 2-9　化学組成データベースの例⑥ 52
表 2-10　化学組成データベースの例⑦ 52
表 3-1　分析試料一覧 53
表 4-1　予測を目的とした多変量解析の手法 55
表 4-2　解析の流れと使用ツール 56
表 4-3　入力データの概要 56
表 4-4　解析対象試料の一覧 57
表 4-5　線形判別分析ケースと元素の組合せ 62
表 4-6　各元素の因子負荷量の平均値（降順） 62
表 5-1　判別得点の計算結果 69

1. 概要

1.1 共同研究件名

機械学習に基づいた断層の活動性評価手法の開発に関する共同研究

1.2 共同研究先

国立大学法人富山大学大学院理工学研究部

1.3 研究目的

わが国においては、従来から、高レベル放射性廃棄物の地層処分の安全評価において重要となる、放射性核種が地下水を介して生物圏へ移行するという「地下水シナリオ」に係る評価の信頼性向上に資するための要素技術開発が進められている。平成 30 年 3 月に公開された「地層処分研究開発に関する全体計画（平成 30 年度～平成 34 年度）」では、地層処分に適した地質環境の選定及びモデル化において自然現象の影響を把握することの重要性が示されるとともに、火山・火成活動、深部流体、地震・断層活動、隆起・侵食に関する調査・評価技術の高度化に関する研究開発課題が整理されている。

日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構）では、経済産業省資源エネルギー庁から受託した「平成 30 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業（地質環境長期安定性評価技術高度化開発）」において、これらの自然現象の影響に関連して示された研究課題に対して、地質学、地形学、地震学、地球年代学といった各学術分野における最新の研究を踏まえた技術の適用による事例研究を通じて、課題の解決に必要な知見の蓄積や調査・評価技術の高度化を総合的に進めている。

このうち、地震・断層活動に関しては、上載地層がない場合の断層の活動性評価手法の開発が技術開発課題として提示されている。国立大学法人富山大学（以下、富山大学）と実施する本共研では､断層帯物質である断層粘土の化学成分などの分析結果と機械学習を組み合わせることで、活断層と非活断層を効率的に区別可能なパラメータの組み合わせを抽出し、上載地層が存在しない断層に適用可能な活動性評価手法の整備を試みる。その際、原子力機構が保有する地質試料データも活用する。

共同研究先である富山大学は、応用地質学と地震地質学における多くの研究実績と関連する情報を有している。また、原子力機構は、これらの分野における各種分析に必要な最新の装置を数多く有しており、国内でも有数の分析環境を備えている。そのため、本共同研究を行うことにより、上記のような課題に対して効果的に進めることができる。

なお、本共同研究は、原子力機構が経済産業省資源エネルギー庁から受託した「平成 30 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業（地質環境長期安定性評価技術高度化開発）」の一環として行うものである。

1.4 研究内容

本共同研究では、以下に示す作業を行い、成果を取りまとめる。

(1) データベースの作成
日本国内の断層岩の全岩化学組成が掲載された公表文献を取集し、それらのデータを取りまとめたデータベースを作成する。

(2) 既往試料の化学分析
機械学習のためのデータベースの充実に向けて原子力機構が保有ないしは提供を受けた既往試料を対象に化学分析を実施し、全岩化学成分などを明らかにする。

(3) 機械学習による検討作業
上記(1)と(2)で得られたデータに対して、多変量解析などを用いた機械学習を適用し、活断層と非活断層の効率的な判別手法について検討する。

(4) 取りまとめ
上記(1)～(3)における実施・検討内容を取りまとめた報告書を作成する。

1.5 研究期間

平成 30 年 6 月 29 日～平成 31 年 1 月 31 日

2. データベースの作成

日本国内の断層岩の全岩化学組成が掲載された公表文献を収集し、それらのデータを取りまとめたデータベースを作成した。

2.1 文献収集

文献収集は、国内の活断層及び非活断層の断層ガウジの化学組成分析値が掲載されている文献を対象として行った。表 2-1、表 2-2 に収集した文献の一覧を示す。表 2-1 は論文として公表されているものの一覧である。論文の収集にあたっては、分析対象が活断層か非活断層かが明記されていること、付加体、花崗岩質岩など多様な基盤岩を持つことに留意した。表 2-2 は原子力機構において、上載地層法により活断層か非活断層かが明らかになっている花崗岩質岩中の断層を分析対象とした既往の報告書である。

表 2-1　収集文献一覧

通番	著者名	発行年	論文タイトル	雑誌名	巻	号	頁	分析対象活断層	分析対象非活断層	データベース化した化学組成の表No.
1	R. Sugisaki, H.Anno, M. Adachi and H. Ui	1980	Geochemical features of gases and rocks along active faults	Geochemical Journal	14		101–112	跡津川断層, 牛首断層, 根尾谷断層, 飯田断層, 富草断層	中央構造線	Table 3a, Table 3b
2	K. Fujimoto, H. Tanaka, T. Higuchi, N. Tomida, T. Ohtani and H. Ito	2001	Alteration and mass transfer inferred from the Hirabayashi GSJ drill penetrating the Nojima Fault, Japan	The Island Arc	10		401–410	野島断層	—	Table 1
3	T. Matsuda, T. Arai, R. Ikeda, K. Omura, K. Kobayashi, H. Sano, T. Sawaguchi, H. Tanaka, T. Tomita, N. Tomida, S. Hirano and A. Yamazaki	2001	Examination of mineral assemblage and chemical composition in the fracture zone of the Nojima Fault at a depth of 1140 m: Analyses of the Hirabayashi NIED drill cores	The Island Arc	10		422–429	野島断層	—	Table 1, Table 2
4	Y. Hashimoto, A. Nikaizo and G. Kimura	2009	A geochemical estimation of fluid flux and permeability for a fault zone in Mugi mé lange, the Cretaceous Shimanto Belt, SW Japan	Journal of Structural Geology	31		208–214	—	地質境界断層	Table 1
5	長友晃夫・吉田英一	2009	断層と割れ目系およびその充填鉱物を用いた阿寺断層の地質的履歴解析	地質学雑誌	115	10	512–527	阿寺断層	—	Table 1
6	加藤尚希・廣野哲朗・石川剛志・大谷具幸	2015	阿寺断層田瀬露頭における断層ガウジの鉱物学的・地球化学的特徴	活断層研究	43		1–16	阿寺断層	—	Table 2
7	M. Niwa, Y. Mizuochi and A. Tanase	2015	Changes in chemical composition caused by water–rock interactions across a strike–slip fault zone: case study of the Atera Fault, Central Japan	Geofluids	15		387–409	阿寺断層	—	Table 3

表 2-2　既往報告書一覧

通番	報告書名	年度	分析対象活断層	分析対象非活断層	データベース化した化学組成の表
1	22耐震工学 陸域断層の活動性評価に資する断層破砕部の調査・分析	平成22年度	五助橋断層, 下蔦木断層	—	表3.3.6-1, 表3.3.6-2
2	23耐震工学 陸域断層の活動性評価に資する断層破砕部の調査・分析	平成23年度	六甲断層	—	表3.3.6-1
3	24耐震工学 陸域断層の活動性評価に資する断層破砕部の調査・分析	平成24年度	—	六甲蓬莱峡	表3.5.7-1
4	25耐震工学 陸域断層の活動性評価に資する 断層破砕部の調査・分析	平成25年度	—	—	—
5	26耐震工学 陸域断層の活動性評価に資する断層破砕部の調査・分析	平成26年度	—	—	—

2.2 整理結果

ここでは、2.1 で収集した文献に掲載されている化学組成の分析値を抽出し、化学組成データベースを作成した。分析値の転記に当たっては、ミスを避けるため、転記後に印刷しダブルチェックを行った。このデータベースには、各試料の試料名と分析値のほか、表 2-3 に示す二つの分類を与えた。これらの分類は文献中の記載にしたがって付与したものである。表 2-4～表 2-10 に作成した化学組成データベースの一部を例として示す。なお、化学組成データベースは別途電子ファイルで納品した。

表 2-3　化学組成データベースの分類一覧

Type 1	説明
AF	活断層
NF	非活断層
R	母岩

Type 2	説明
AFB	活断層・断層角礫
AFC	活断層・カタクレーサイト
AFG	活断層・断層ガウジ
AFW	活断層・弱変形
NFB	非活断層・断層角礫
NFC	非活断層・カタクレーサイト
NFG	非活断層・断層ガウジ
NFW	非活断層・弱変形
R	母岩

表 2-4　化学組成データベースの例①

連番	文献番号	Sample	type1	type2	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5
1	8	GSB-C01	AF	AFC	71.46	0.22	13.19	1.37	1.88	0.09	0.45	2.12	3.01	2.60	0.12
2	8	GSB-C09	AF	AFG	70.87	0.19	12.84	1.92	0.98	0.04	0.45	1.07	2.29	2.79	0.05
3	8	GSB-C10	AF	AFG	71.29	0.20	13.04	2.61	0.04	0.06	0.44	1.12	2.40	2.63	0.05
4	8	GSB-C11	AF	AFG	68.80	0.24	13.02	2.29	0.62	0.10	0.45	3.18	2.64	2.64	0.08
5	8	GSB-C02	AF	AFG	70.39	0.21	12.59	1.78	1.21	0.07	0.43	2.42	2.43	2.78	0.06
6	8	GSB-C03	AF	AFG	70.20	0.21	12.92	2.20	0.55	0.08	0.44	2.75	2.64	2.66	0.06
7	8	GSB-C04	AF	AFC	70.09	0.22	13.06	2.32	0.51	0.10	0.46	3.05	2.72	2.63	0.05
8	8	GSB-C05	AF	AFC	69.52	0.21	12.89	2.70	0.17	0.08	0.44	2.55	2.49	2.69	0.06
9	8	GSB-C06	AF	AFG	68.34	0.21	12.80	2.70	0.12	0.05	0.45	2.85	2.43	2.65	0.06
10	8	GSB-C07	AF	AFG	69.41	0.21	13.40	1.21	1.40	0.06	0.46	2.86	2.86	2.65	0.05

表 2-5　化学組成データベースの例②

連番	文献番号	Sample	type1	type2	Cr_2O_3	SrO	BaO	LOI	H_2O+	H_2O-	Li	Be	F	S
1	8	GSB-C01	AF	AFC				2.16	1.60	0.90		2		
2	8	GSB-C09	AF	AFG				5.18	2.30	2.90		2		
3	8	GSB-C10	AF	AFG				4.86	2.00	2.40		2		
4	8	GSB-C11	AF	AFG				5.30	1.80	1.90		2		
5	8	GSB-C02	AF	AFG				3.74	2.10	1.10		2		
6	8	GSB-C03	AF	AFG				4.13	2.10	1.20		2		
7	8	GSB-C04	AF	AFC				4.29	1.70	1.50		2		
8	8	GSB-C05	AF	AFC				4.92	2.30	1.70		2		
9	8	GSB-C06	AF	AFG				5.64	1.70	2.10		2		
10	8	GSB-C07	AF	AFG				4.63	2.10	1.40		2		

表 2-6　化学組成データベースの例③

連番	文献番号	Sample	type1	type2	Cl	K	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu
1	8	GSB-C01	AF	AFC			6		13	20		3	20	40
2	8	GSB-C09	AF	AFG			6		9	20		2	20	10
3	8	GSB-C10	AF	AFG			6		12	20		2	20	10
4	8	GSB-C11	AF	AFG			8		11	20		2	20	10
5	8	GSB-C02	AF	AFG			7		8	20		2	20	10
6	8	GSB-C03	AF	AFG			6		10	20		3	20	20
7	8	GSB-C04	AF	AFC			6		11	20		2	20	20
8	8	GSB-C05	AF	AFC			7		11	20		3	20	10
9	8	GSB-C06	AF	AFG			6		11	20		1	20	10
10	8	GSB-C07	AF	AFG			6		12	20		3	20	10

表 2-7　化学組成データベースの例④

連番	文献番号	Sample	type1	type2	Zn	Ga	Ge	As	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo
1	8	GSB-C01	AF	AFC	60	17	2	12	77	215	25	136	7	2
2	8	GSB-C09	AF	AFG	80	17	2	5	88	127	23	135	8	2
3	8	GSB-C10	AF	AFG	70	17	1	5	87	144	26	132	8	2
4	8	GSB-C11	AF	AFG	70	17	1	5	79	153	32	161	9	2
5	8	GSB-C02	AF	AFG	70	16	2	5	79	153	25	154	8	2
6	8	GSB-C03	AF	AFG	60	16	2	5	81	226	27	133	8	2
7	8	GSB-C04	AF	AFC	50	17	1	5	80	222	26	130	7	2
8	8	GSB-C05	AF	AFC	70	17	2	5	82	172	28	150	8	2
9	8	GSB-C06	AF	AFG	70	16	2	5	80	208	27	148	8	2
10	8	GSB-C07	AF	AFG	70	16	1	12	79	227	26	145	8	2

表 2-8　化学組成データベースの例⑤

連番	文献番号	Sample	type1	type2	Ag	In	Sn	Sb	Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd
1	8	GSB-C01	AF	AFC	1	0	3	0	3	663	30	60	6	25
2	8	GSB-C09	AF	AFG	1	0	3	0	4	669	30	50	6	26
3	8	GSB-C10	AF	AFG	1	0	5	0	5	694	29	60	6	27
4	8	GSB-C11	AF	AFG	1	0	3	0	4	636	31	59	6	28
5	8	GSB-C02	AF	AFG	1	0	2	0	4	666	25	48	5	22
6	8	GSB-C03	AF	AFG	1	0	4	0	3	924	29	56	6	25
7	8	GSB-C04	AF	AFC	1	0	2	0	3	765	29	56	6	24
8	8	GSB-C05	AF	AFC	1	0	2	0	4	721	31	66	6	27
9	8	GSB-C06	AF	AFG	1	0	2	0	4	704	30	55	6	26
10	8	GSB-C07	AF	AFG	1	0	2	0	4	858	30	58	6	26

表 2-9　化学組成データベースの例⑥

連番	文献番号	Sample	type1	type2	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
1	8	GSB-C01	AF	AFC	5	1	5	1	4	1	3	0	3	0
2	8	GSB-C09	AF	AFG	5	1	4	1	4	1	2	0	3	0
3	8	GSB-C10	AF	AFG	5	1	5	1	4	1	3	0	3	0
4	8	GSB-C11	AF	AFG	5	1	5	1	5	1	3	0	3	0
5	8	GSB-C02	AF	AFG	4	1	4	1	4	1	2	0	2	0
6	8	GSB-C03	AF	AFG	5	1	4	1	4	1	2	0	2	0
7	8	GSB-C04	AF	AFC	5	1	4	1	4	1	2	0	2	0
8	8	GSB-C05	AF	AFC	5	1	5	1	5	1	3	0	3	0
9	8	GSB-C06	AF	AFG	5	1	5	1	5	1	3	0	3	0
10	8	GSB-C07	AF	AFG	5	1	4	1	4	1	3	0	3	0

表 2-10　化学組成データベースの例⑦

連番	文献番号	Sample	type1	type2	Hf	Ta	W	Tl	Pb	Bi	Th	U
1	8	GSB-C01	AF	AFC	4	1	1	1	15	2	9	1
2	8	GSB-C09	AF	AFG	4	1	1	1	21	1	9	1
3	8	GSB-C10	AF	AFG	4	1	1	0	19	0	9	1
4	8	GSB-C11	AF	AFG	5	1	1	1	18	0	8	2
5	8	GSB-C02	AF	AFG	4	1	1	1	18	0	8	1
6	8	GSB-C03	AF	AFG	4	1	1	1	17	2	8	1
7	8	GSB-C04	AF	AFC	4	1	1	1	14	2	8	1
8	8	GSB-C05	AF	AFC	4	1	1	1	21	1	8	1
9	8	GSB-C06	AF	AFG	4	1	1	0	20	2	8	1
10	8	GSB-C07	AF	AFG	4	1	1	1	18	1	8	2

3. 既往試料の化学分析

3.1 手法

化学分析は、表 3-1 に示す 13 試料について実施した（Type 1、Type 2 は表 2-3 に同じ）。ボーリングコア試料、ブロックサンプリング試料からの採取部位などは、付録 A に示すほか、各文献を参照されたい。

採取試料は、東濃地科学センター設置の高速粉砕機（安井器械株式会社製マルチビーズショッカーPV1001(S)）を用いて粉砕した。試料への異質物の混染を防ぐため、試料はポリカーボネイト製の粉砕容器に入れ、粉砕にはめのう製のコーンを用いた。

全岩化学組成の分析は東濃地科学センター設置の蛍光 X 線分析装置（株式会社リガク製 ZSX PrimusⅡ）を使用し、希釈率 1：2 のガラスビードにて行った。ガラスビードの作成方法及び分析方法は清水ほか（2017）に従った。分析は、主要元素（SiO_2、TiO_2、Al_2O_3、Fe_2O_3、MnO、MgO、CaO、Na_2O、K_2O、P_2O_5 の 10 元素）と微量元素（Ba、Ce、Cl、Co、Cr、F、Ga、Nb、Ni、Pb、Rb、S、Sc、Sr、Th、U、V、Y、Zr の 19 元素）について行った。分析条件、分析誤差などについては、清水ほか（2017）に準ずる。

表 3-1　分析試料一覧

試料名	母岩	Type 1	Type 2	参照
1602	江若花崗岩	NF	NFG	日本原子力研究開発機構（2013）
1603	江若花崗岩	NF	NFG	日本原子力研究開発機構（2013）
2301	江若花崗岩	NF	NFG	日本原子力研究開発機構（2014）
2504	江若花崗岩	NF	NFG	―
2602	江若花崗岩	NF	NFG	―
2603	江若花崗岩	NF	NFG	―
3-202	江若花崗岩	AF	AFG	日本原子力研究開発機構（2013）
3-203	江若花崗岩	AF	AFG	日本原子力研究開発機構（2013）
3-204	江若花崗岩	AF	AFG	日本原子力研究開発機構（2013）
Hr-10A①	広島花崗岩	NF	NFG	植木ほか（2016）
Hr-10A②	広島花崗岩	NF	NFG	植木ほか（2016）
Ko9-4-2②	江若花崗岩	NF	NFG	植木ほか（2016）
Ko9-4-2③	江若花崗岩	NF	NFG	植木ほか（2016）

3.2 結果

全岩化学組成の分析結果を付録 B に示す。微量元素については、分析下限未満のものを表中に灰色で示す。粘土状破砕部（断層ガウジ）試料は粘土鉱物のような含水鉱物を含むため、Total が 100 wt.%未満となり、Ig（Ignission Loss）が 5 wt.%以上である。

4. 機械学習による検討作業

本章では、2. で作成した化学組成データベースに 3. 既往試料の化学分析で得られたデータを加えたものに対して、多変量解析を用いた機械学習を適用し、活断層と非活断層の効率的な判別手法について検討した。

多変量解析は、複数の変数からなるデータを統計的に扱う手法であり、地球科学分野でも応用が進んできている。例えば、Kuwatani et al.（2014）は、2011 年東北地方太平洋沖地震時の津波堆積物と非津波堆積物の化学組成（18 元素）を説明変数として、多変量解析手法の一つである SVM（サポートベクターマシン）を用いて両者が高確率で分けられることを示すとともに、18 元素から最も判別率の良い元素の組合せを探索した（図 4-1）。図 4-1d は、最適な組合せ（11 元素）の結果を示している。

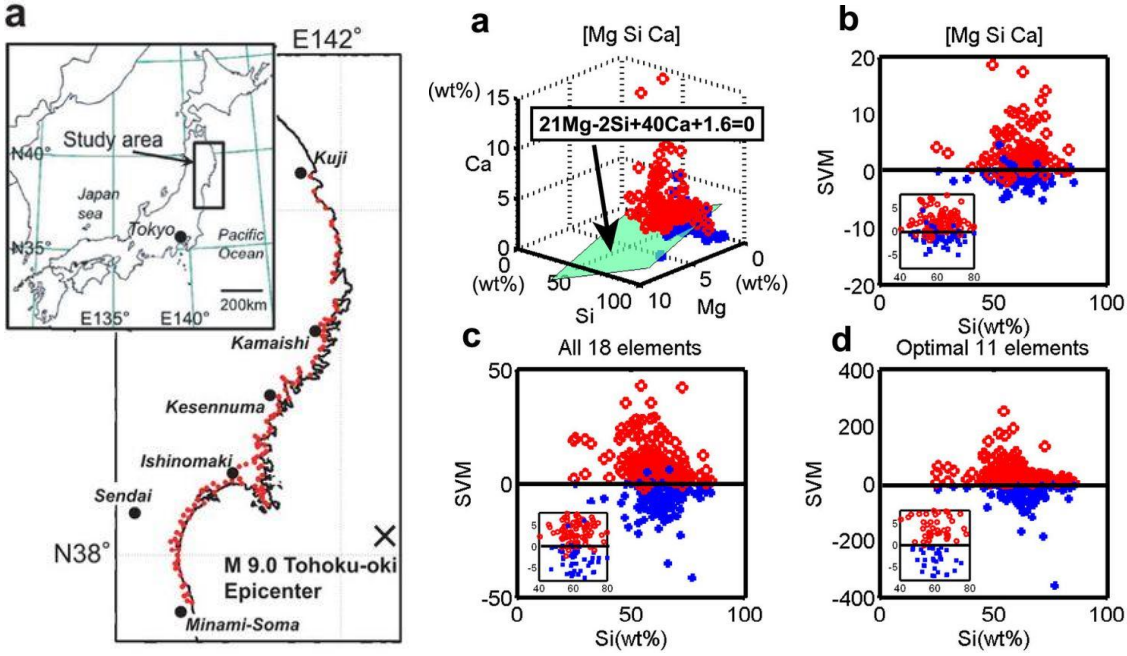


図 4-1　機械学習の活用例　（Kuwatani et al., 2014 Figure 1 and Figure 2 より）

4.1 解析手法

4.1.1 概要

多変量解析には様々な方法があるが、目的とデータの質によって採用する方法が決まる。多変量解析の目的には大きく「予測」と「要約」の二種類があり、本研究の目的は、「①断層帯物質である断層粘土の化学成分などの分析結果から、②活断層と非活断層を効率的に区別可能なパラメータの組み合わせを抽出すること」であることから、「予測」に当てはまる。表 4-1 に予測を目的とした場合の多変量解析の手法を挙げる。

表 4-1　予測を目的とした多変量解析の手法

結果 / 原因		目的変数	
		量的変数	質的変数
説明変数	量的変数	重回帰分析	判別分析、ロジスティック回帰分析
		身長から体重を予測	身長、体重から性別を予測
	質的変数	数量化Ⅰ類	数量化Ⅱ類
		体格の良し悪しと 食べ物の好き嫌いから マラソンのタイムを予測	体格の良し悪しと 食べ物の好き嫌いから 体育大学の合否を予測

株式会社 ALBERT ホームページをもとに作成
https://www.albert2005.co.jp/knowledge/statistics_analysis/multivariate_analysis/multivariate_method

ここで、表 4-1 の「説明変数」は入力データ、「目的変数」は出力データである。すなわち、本研究の場合、説明変数は量的変数である断層粘土の化学組成、目的変数は質的変数である断層性状となる。この組合せで多変量解析を行う場合、判別分析かロジスティック回帰分析が採用される（表 4-1）。ロジスティック回帰分析は大まかに分かれている 2 群を確率的に表現するが、本研究のように明確に分かれるはずの 2 群を分けるためには判別分析が良い。判別分析には線形判別分析と重判別分析の二種類があるが、重判別分析は目的変数が 3 群以上となる場合に採用される。このため、本研究では線形判別分析を適用した。なお、前述の Kuwatani et al.（2014）で適用された SVM は線形判別分析に類似した手法の一種である。

線形判別分析は、2 群が正規分布すること、等分散性を持つことを前提として、2 群が最も良く分かれる直線（一次式）を求める手法である。この時、基準となるのは多次元における 2 群の中心点である。今回のように元素を説明変数とした場合、一次式の形は以下のようになる。

一次式：　$Y = \beta_1 \times SiO_2 + \beta_2 \times TiO_2 + \cdots - \alpha$

ここで、α と β は判別係数である。得られた一次式に 2 群のどちらか不明な試料の化学組成を代入すると、どちらのグループに属するかが判別できる。判別の精度は、データ数が多ければ多いほど高くなる。

4.1.2 解析の流れとツール

解析の流れと使用したツールを表 4-2 に示す。

表 4-2 解析の流れと使用ツール

順番	作業	ツール
①	入力データの整理	Microsoft Excel (https://products.office.com/ja-jp/excel)
②	変数選択	R (https://www.r-project.org)
③	線形判別分析	
④	結果図作成	GMT (https://www.soest.hawaii.edu/gmt/) Wessel and Smith (1991)

(1) 入力データの整理

入力データは 2. で作成した化学組成データベースに 3. 既往試料の化学分析で得られたデータを加えたものを元としている。これを、Microsoft Excel を用いて整理し、CSV（コンマ区切りテキスト）形式に変換した。

線形判別分析において必要な情報は、2 群の分類とそれに付随する多変量である。今回の解析では、2 群の分類として表 2-3 の AFG 及び NFG（活断層／非活断層の断層ガウジ）を選択した。本研究の説明変数は化学分析結果であるが、2. の化学組成データベースに収録した試料は、必ずしも同じ元素が測定されている訳ではないので、できるだけ試料数を減らさないよう最大公約数を取って取捨選択した。ただし、樹脂で固めた試料を分析した白木–丹生断層の試料（3-202、3-203、3-204）は樹脂の化学組成への影響が不明であるため解析対象から除外した。なおこの 3 試料については、解析の結果得られた一次式の検定の際に使用した。表 4-3 に入力データの概要を、表 4-4 に解析対象試料の一覧を示す。

表 4-3 入力データの概要

解析対象試料	試料の数	解析に使用した元素	ファイル
表 2-3 の AFG 及び NFG （3-202，3-203，3-204 を除く）	計 57 試料 (AFG41, NFG16)	SiO_2, TiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3*, MnO, MgO, CaO, Na_2O, K_2O, P_2O_5, Rb, Sr, Y, Nb, Ba, Pb, Th （17 元素）	wMinor57.csv

表 4-4　解析対象試料の一覧

通番	試料名	タイプ	通番	試料名	タイプ	通番	試料名	タイプ
1	GSB-C09	AFG	21	F99-1	AFG	41	IT5	AFG
2	GSB-C10	AFG	22	114-1	AFG	42	HRK-C05	NFG
3	GSB-C11	AFG	23	FG01-1	AFG	43	HRK-C09	NFG
4	GSB-C02	AFG	24	FG01-2	AFG	44	HRK-C13	NFG
5	GSB-C03	AFG	25	FG03-1	AFG	45	HRK-C14	NFG
6	GSB-C06	AFG	26	FG05-1	AFG	46	HRK-C15	NFG
7	GSB-C07	AFG	27	FG06-1	AFG	47	ML7	NFG
8	GSB-C08	AFG	28	FG02-A	AFG	48	1602	NFG
9	GSB-C12	AFG	29	FG02-B	AFG	49	1603	NFG
10	GSB-C13	AFG	30	AU1b	AFG	50	2301	NFG
11	GSB-C14	AFG	31	AU5	AFG	51	2504	NFG
12	STK-C02	AFG	32	AU6	AFG	52	2602	NFG
13	STK-C03	AFG	33	AU8a	AFG	53	2603	NFG
14	STK-C07	AFG	34	AU8b	AFG	54	Hr10A_1	NFG
15	STK-C08	AFG	35	AU9	AFG	55	Hr10A_2	NFG
16	STK-C09	AFG	36	Ne3	AFG	56	Ko9-4-2_2	NFG
17	FSW-C08	AFG	37	Ne4	AFG	57	Ko9-4-2_3	NFG
18	FSW-C09	AFG	38	Ne5	AFG			
19	FSW-C10	AFG	39	Ne6	AFG			
20	F98-10	AFG	40	IT3	AFG			

岩石学における化学組成の検討では、酸化物の総和を 100%として規格化されることも多い。この場合、吸着水（H_2O^-）や構造水（H_2O^+）及び強熱減量（LOI ; loss of ignition）などは無視されることになる。また、鉄の酸化物については、目的により、Fe_2O_3 と FeO とが湿式分析を用いて分けて定量される場合や、全鉄を Fe_2O_3 もしくは FeO として機器分析で定量される場合がある。文献により、これらの扱いは様々であるものの、本研究の目的に照らせば、極力簡単な作業で活断層と非活断層が区別される可能性を追求することが必要である。したがって、化学組成の文献表示の 100%規格化は行わず文献値をそのまま採用する。主要元素については各酸化物の重量%、微量元素については各元素の ppm の数値である。さらに鉄については湿式分析を不要とすべく、全鉄を Fe_2O_3 換算することとした。具体的には、文献に Fe_2O_3、FeO それぞれの重量%が掲載されている場合、FeO の値を 1.1114 倍して Fe_2O_3 の値と足し合わせる岩石学の一般的取り扱いに則った。

(2) 変数選択

入力データの説明変数は表 4-3 の通り 17 個の元素である。これは本来、100 に満たないデータ数では到底分けられない次元とみなされる。一般に、説明変数の数（＝次元）が増えると、個別のデータの差異は小さくなっていく（これを次元の呪いと呼ぶ）。また、説明変数が増えた結果、分類が細分化し、解析に用いたデータに特化した一次式となってしまう場合がある。その結果、線形判別分析の結果得られる一次式の汎化性能が低下する。さらに、17 個の元素の組合せは約 13 万通りとなり、判別に適した元素の組合せの候補が膨大な量となることが予想される。これを回避するためには、データ数を可能な限り増やすか、説明変数の数を減らす必要がある。そこで、線形判別分析を行う前に、判別に適した元素を選択することを目的として、赤池情報量規準（AIC、Akaike, 1973）と主成分分析の二つの方法を使って変数選択を行った。二つの方法はどちらもオープンソースの統計解析プログラミング言語である R で実行した。R 及び CRAN と呼ばれる R の計算ライブラリの信頼性は高く、FDA（アメリカ食品医薬局）における薬事申請・報告での使用が公式に認められている。

AIC は、複数の統計的モデルの良さを比較評価するための規準であり、AIC= −2×(モデルの最大対数尤度)＋2×(モデルの自由パラメータ数) の値が小さいほど予測精度の高いモデルであるとしたものである（二宮，1999)。R で実装されているものは、変数の組合せを変えて AIC を逐次評価し、最も低い値を出したものを最良モデルとする。以下に R における AIC の一連のコードを解説とともに示す。このコードを実行すると、最適な元素の組合せが計算過程とともに aic.txt というテキストファイルに出力される。

```
#入力データ（wMinor.csv）の読み込み．このファイルは試料名やタイプの列を削除し、タイプを数値化した Z という列を追加している．
> data<-read.csv("wMinor.csv",header = T)
#重回帰分析（目的変数 Z を説明変数候補である元素 17 個でどの程度説明できるか）
> eq1<-
lm(Z~SiO2+TiO2+Al2O3+Fe2O3+MnO+MgO+CaO+Na2O+K2O+P2O5+Rb+Sr+Y+Nb+Ba+Pb+Th)
#AIC の出力ファイルの用意
> sink("aic.txt")
#説明変数を一つずつ減らして上記の重回帰分析を行い、AIC が改善されれば次の変数に進む
> step(eq1)
#出力ファイルを閉じる
> sink()
```

主成分分析は、多種のデータの持つ情報をできるだけ損なわずに低次元化する（＝要約する）手法であり、判別分析と同様に、対象の違いを最大化するように説明変数を合成した一次式とその寄与率（どのくらい違いを説明できるか）を次元の数だけ作成するものである。また、得られた一次式に対し、説明変数がどの程度寄与しているか（＝因子負荷量）も数値化することができる。以下に R における主成分分析の一連のコードを解説とともに示す。このコードを実行すると、一次式の寄与率と各元素の因子負荷量がテキストファイルで出力される。

```
#入力データ（wMinor.csv）の読み込み
> data<-read.csv("wMinor.csv",header = T)
#試料名の読み込み
> name<-data[,1]
#多変量列の読み込み（17 元素）
> com<-data[4:20]
#解析データ整形
> learn.data<-data.frame(cbind(name,com),row.names = 1)
#主成分分析
> rpca<-prcomp(x=learn.data,scale = T)
#合成式の寄与率
> sum<-round(summary(rpca)$importance,digits = 3)
#寄与率の出力
> write.table(sum,file="summary.txt",quote = F)
#各元素の因子負荷量
> sw<-sweep(rpca$rotation,MARGIN = 2,rpca$sdev,FUN = "*")
#因子負荷量の出力
> write.table(round(sw,digits = 3),file="sw.txt",quote = F)
```

(3) 線形判別分析

変数選択で決定した元素の組合せで線形判別分析を行った。分析は変数選択と同じく R で行った。以下に解析の一連のコードを解説とともに示す。このプログラムを実行すると、解析結果が三つのテキストファイルとして出力され、トレースバックが可能になる。

```
#コメント
#線形判別分析用のライブラリの読み込み
> library("MASS",
+lib.loc="/Library/Frameworks/R.framework/Versions/3.4/Resources/library")
#入力データ（wMinor.csv）の読み込み
> data<-read.csv("wMinor.csv",header = T)
#2 群の分類データ列の読み込み（AFG/NFG）
> type<-data[,3]
#多変量列の読み込み（17 元素）
> com<-data[4:20]
#分類データ列と多変量列の結合（教師データ作成）
> learn.data<-cbind(type,com)
#線形判別分析
> Z<-lda(type~ ., data=learn.data)
#各試料の判別結果
> class<-predict(Z)$class
#一次式の係数β
> scaling<-Z$scaling
#一次式の係数α
> aa<-apply(Z$means%*%Z$scaling,2,mean)
#判別得点
> si<-learn.data[,"SiO2"]
> ti<-learn.data[,"TiO2"]
> al<-learn.data[,"Al2O3"]  #...他の元素も同様に処理する
> f<-function(si,ti,al,fe,mn,mg,ca,na,k,p,rb,sr,y,nb,ba,pb,th) scaling["SiO2",]*si + scaling["TiO2",]*ti +
scaling["Al2O3",]*al + scaling["Fe2O3",]*fe + scaling["MnO",]*mn + scaling["MgO",]*mg +
scaling["CaO",]*ca + scaling["Na2O",]*na + scaling["K2O",]*k + scaling["P2O5",]*p +
scaling["Rb",]*rb + scaling["Sr",]*sr + scaling["Y",]*y + scaling["Nb",]*nb + scaling["Ba",]*ba +
scaling["Pb",]*pb + scaling["Th",]*th - aa
> score <- f(si,ti,al,fe,mn,mg,ca,na,k,p,rb,sr,y,nb,ba,pb,th)
#出力ファイル名決定
> file.name <- sprintf("wMinor_d.txt", i)
#判別得点，判別結果，教師データの出力
> write.table(cbind(x,class,learn.data),file=file.name,row.names = F,quote = F)
#出力ファイル名決定
> file.name2<-sprintf("wMinor_c.txt",i)
#一次式の係数βの出力
> write.table(scaling,file=file.name2,quote = F)
#出力ファイル名決定
> file.name3<-sprintf("wMinor_a.txt",i)
#一次式の係数αの出力
> write.table(aa,file=file.name3,quote=F)
```

(4) 結果図作成

線形判別分析の結果を判断しやすくするため、R のグラフ描画ライブラリ ggplot2 を用いて図 4-2 のような結果図を作成した。

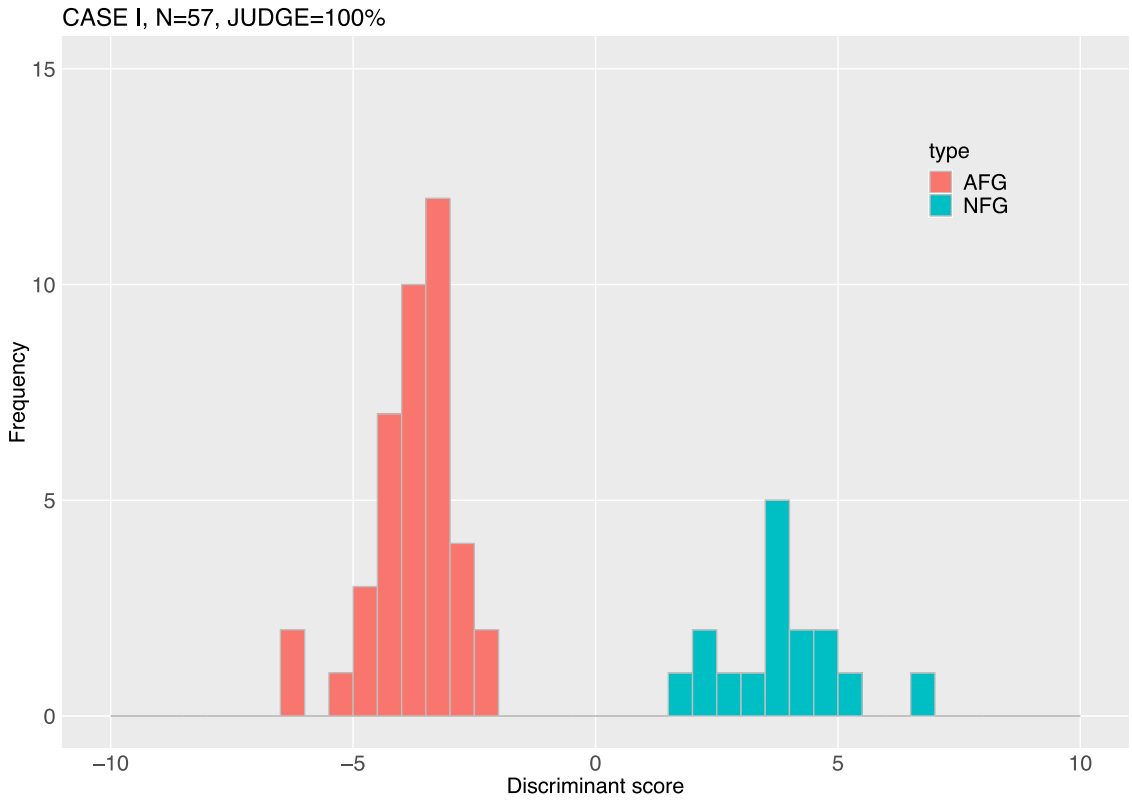


図 4-2　結果図の例（17 元素全ての結果）

結果図のプロットは判別得点のヒストグラムであり、横軸が判別得点を、縦軸が頻度を表す。図中赤色の棒が活断層（AFG）のデータ、緑色の棒が非活断層（NFG）のデータである。プロットのタイトルは、以下の情報を示す。

CASE I, N=57, JUDGE=100%
　　①　　②　　③

① 分析ケースの番号を示す。分析ケースと元素の組合せについては表 4-5 を参照。
② 線形判別分析に用いた試料の数を示す。
③ 判別結果の正答率を示す。

4.2 結果

4.2.1 変数選択

(1) AIC

AIC の結果、17 個の元素から SiO_2、TiO_2、Al_2O_3、Fe_2O_3、MgO、CaO、Na_2O、P_2O_5、Sr、Y、Nb、Ba、Pb の 13 個の元素が最適な組合せとして抽出された。AIC の計算過程と結果を以下に示す。Start 時点での元素の数は 17 個で、AIC は-199.54 である。Step ごとに元素の数が一つずつ減り、AIC が改善されている。最後の Step では前述の 13 個の元素が残り、AIC は-204.18 となった。

```
Start:  AIC=-199.54
Z ~ SiO2 + TiO2 + Al2O3 + Fe2O3 + MnO + MgO + CaO + Na2O + K2O + P2O5 + Rb + Sr + Y + Nb + Ba
    + Pb + Th

Step:  AIC=-201.54
Z ~ SiO2 + TiO2 + Al2O3 + Fe2O3 + MnO + MgO + CaO + Na2O + P2O5 + Rb + Sr + Y + Nb + Ba + Pb +
    Th

Step:  AIC=-202.94
Z ~ SiO2 + TiO2 + Al2O3 + Fe2O3 + MnO + MgO + CaO + Na2O + P2O5 + Sr + Y + Nb + Ba + Pb + Th

Step:  AIC=-203.76
Z ~ SiO2 + TiO2 + Al2O3 + Fe2O3 + MgO + CaO + Na2O + P2O5 + Sr + Y + Nb + Ba + Pb + Th

Step:  AIC=-204.18
Z ~ SiO2 + TiO2 + Al2O3 + Fe2O3 + MgO + CaO + Na2O + P2O5 + Sr + Y + Nb + Ba + Pb

Call:
lm(formula = Z ~ SiO2 + TiO2 + Al2O3 + Fe2O3 + MgO + CaO + Na2O + P2O5 + Sr + Y + Nb + Ba + Pb)
```

(2) 主成分分析

主成分分析の結果、17 個の一次式（主成分）が得られた。図 4-3 に各主成分の寄与率と累積寄与率を示す。第 1 主成分（PC1）は試料の違いを約 30%説明し、第 2 主成分（PC2）は約 20%説明する。累積寄与率は PC3 までで 65%、PC5 までで 80%を、PC8 までで 90%を超える。

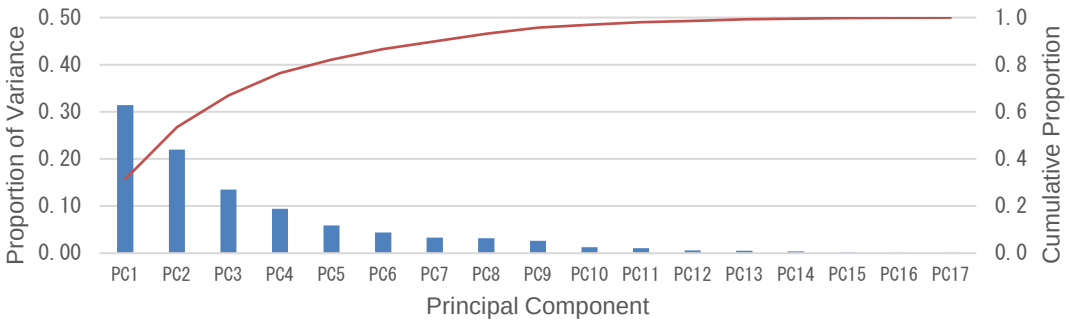


図 4-3　主成分の寄与率

第 1 主成分から第 3 主成分まで（PC3)、第 1 主成分から第 5 主成分まで（PC5)、第 1 主成分から第 8 主成分まで（PC8）の各元素の因子負荷量の平均値を降順で表 4-6 に示す。第 3 主成分までの因子負荷量の平均値は、TiO_2、MnO、Nb が高く、Ba、K_2O、Pb が低い。第 5 主成分まででは、Al_2O_3、TiO_2、MgO が高く、Y、SiO_2、Sr が低い。第 8 主成分まででは、Al_2O_3、MgO、P_2O_5 が高く、SiO_2、Fe_2O_3*、Y、Nb が低い。第 5 主成分までと第 8 主成分までは類似した結果となった。なお、表 4-6 には参考として第 17 主成分までの平均値も記載した。このように、主成分が増えると平均値の差が減少する。

表 4-5　線形判別分析ケースと元素の組合せ

CASE	CASE I	CASE II	CASE III	CASE IV	CASE V
NOTE	Base	AIC	PC3	PC5	PC8
ELEMENTS	17	13	10	10	10
SiO_2	●	●	●		
TiO_2	●	●	●	●	●
Al_2O_3	●	●		●	●
Fe_2O_3*	●	●	●	●	
MnO	●		●		
MgO	●	●		●	●
CaO	●	●	●		●
Na_2O	●	●	●	●	●
K_2O	●				●
P_2O_5	●	●	●	●	●
Rb	●		●	●	●
Sr	●	●			
Y	●	●			
Nb	●	●	●	●	
Ba	●	●		●	●
Pb	●	●			●
Th	●		●	●	

表 4-6　各元素の因子負荷量の平均値（降順）

順位	PC3まで		PC5まで		PC8まで		PC17まで（参考）	
1	TiO_2	0.524	Al_2O_3	0.384	Al_2O_3	0.328	P_2O_5	0.177
2	MnO	0.492	TiO_2	0.380	MgO	0.300	Al_2O_3	0.172
3	Nb	0.461	MgO	0.369	P_2O_5	0.299	Rb	0.169
4	Rb	0.438	Rb	0.360	K_2O	0.293	CaO	0.169
5	P_2O_5	0.435	Na_2O	0.357	Rb	0.285	K_2O	0.166
6	Na_2O	0.434	P_2O_5	0.346	Pb	0.281	Ba	0.164
7	Fe_2O_3*	0.433	Ba	0.337	CaO	0.279	Th	0.163
8	Th	0.430	Fe_2O_3*	0.328	TiO_2	0.277	Na_2O	0.162
9	CaO	0.429	Th	0.328	Ba	0.274	Sr	0.162
10	SiO_2	0.411	Nb	0.326	Na_2O	0.267	Pb	0.159
11	MgO	0.372	MnO	0.325	Sr	0.256	MnO	0.152
12	Al_2O_3	0.362	CaO	0.323	Th	0.252	MgO	0.152
13	Y	0.325	Pb	0.311	MnO	0.240	Nb	0.150
14	Sr	0.307	K_2O	0.304	Nb	0.239	TiO_2	0.146
15	Pb	0.288	Sr	0.299	Y	0.237	Y	0.146
16	K_2O	0.271	SiO_2	0.287	Fe_2O_3*	0.224	SiO_2	0.131
17	Ba	0.259	Y	0.264	SiO_2	0.211	Fe_2O_3*	0.130

4.2.2 線形判別分析

変数選択の結果から、17 元素全て、AIC で抽出された 13 元素、及び主成分分析で因子負荷量の平均値が高くなった元素の組合せで線形判別分析を行った。各分析ケースにおける元素の組合せを表 4-5 に示す。

17 元素全て（CASE I）で線形判別分析を行った結果を図 4-2 に示す。正答率は 100%で、判別得点の分布は AFG が-6.5～-2.0、NFG が 1.5～7.0 で 2 群とも正規分布に近い分布を示す。特に AFG は集中度が高く、ほとんどが-4.5～-3.0 となる。このように、2 群の判別得点の分布が明確に分かれる結果となった。

AIC で抽出された 13 元素（SiO_2、TiO_2、Al_2O_3、Fe_2O_3、MgO、CaO、Na_2O、P_2O_5、Sr、Y、Nb、Ba、Pb）の組合せ（CASE II）で線形判別分析を行った結果を図 4-4 上に示す。正答率は 100%で、判別得点の分布は AFG が-6.5～-2.0、NFG が 1.0～7.0 と、CASE I と遜色ない。

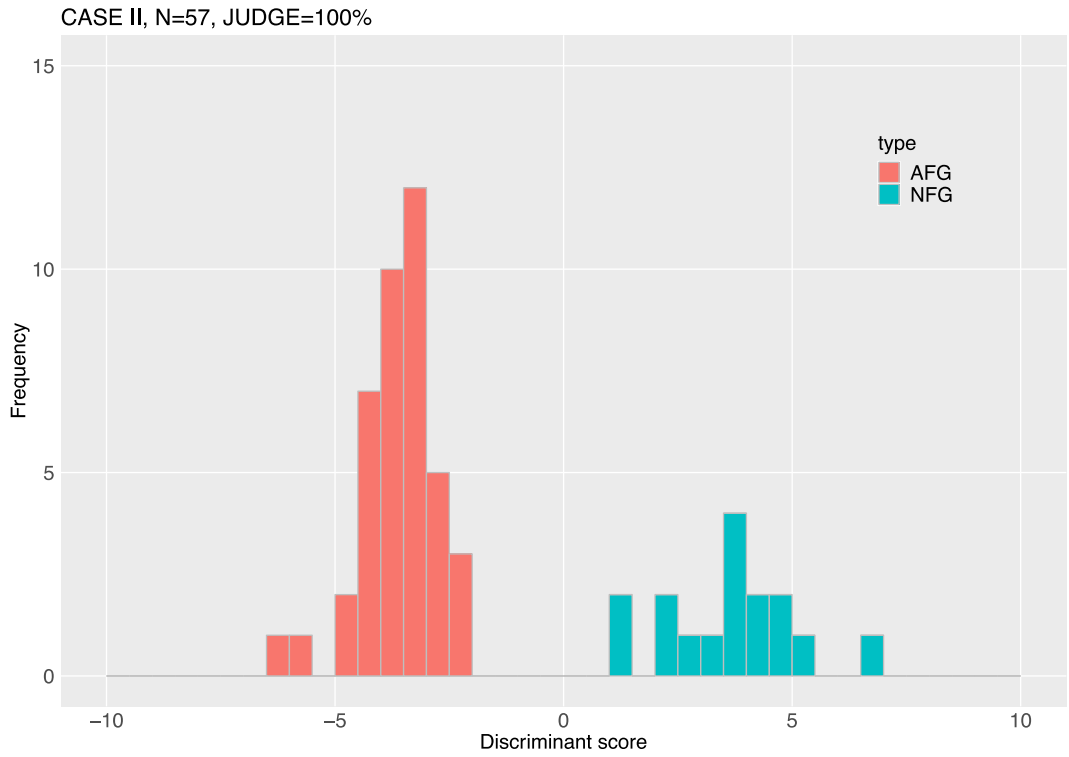
次に、主成分分析で因子負荷量の平均値が高くなった元素の組合せで線形判別分析を行った結果を示す。まず、表 4-6 に示した第 3 主成分まで（CASE III、全体の 65%を説明する）、第 5 主成分まで（CASE IV、同じく 80%）、第 8 主成分まで（CASE V、同じく 90%）の因子負荷量の平均値が上位 10 位となる元素で分析を行った。

第 3 主成分までの平均値が上位 10 位に入る元素は SiO_2、TiO_2、Fe_2O_3、MnO、CaO、Na_2O、P_2O_5、Rb、Nb、Th である。線形判別分析の結果、正答率は約 93%で、57 試料中 4 試料が不正解となった（図 4-4 下）。判別得点の分布も、AIC の結果と違って 2 群が分かれず、2 群を合わせて正規分布するような形となっている。

第 5 主成分までの平均値が上位 10 位に入る元素は TiO_2、Al_2O_3、Fe_2O_3、MgO、Na_2O、P_2O_5、Rb、Nb、Ba、Th である。線形判別分析の結果、正答率は約 100%で、判別得点の分布は AFG が-5.0～-1.0、NFG が 0.0～4.0 とこれまで示した結果の中で最も狭い（図 4-5 上）。ただし、2 群の境界の間隔が狭まっており、AFG は NFG 側に分布のピークが偏っている。

第 8 主成分までの平均値が上位 10 位に入る元素は TiO_2、Al_2O_3、MgO、CaO、Na_2O、K_2O、P_2O_5、Rb、Ba、Pb である。線形判別分析の結果、正答率は約 100%で、判別得点の分布は AFG が-5.5～-1.5、NFG が 0.5～5.0 で、AFG は正規分布に近く、AIC と第 5 主成分までの結果との中間のような形をとる（図 4-5 下）。2 群の境界の間隔は CASE IV より広く、分布が改善されている。

以上の通り、線形判別分析の結果、17 元素全て（CASE I）、AIC で抽出された 13 元素（CASE II）、主成分分析の第 5 主成分までの因子負荷量平均値 1～10 位の元素（CASE IV）、同じく第 8 主成分までの因子負荷量平均値 1～10 位の元素（CASE V）の四つの組み合わせにおいて正答率 100%となる一次式が得られた。



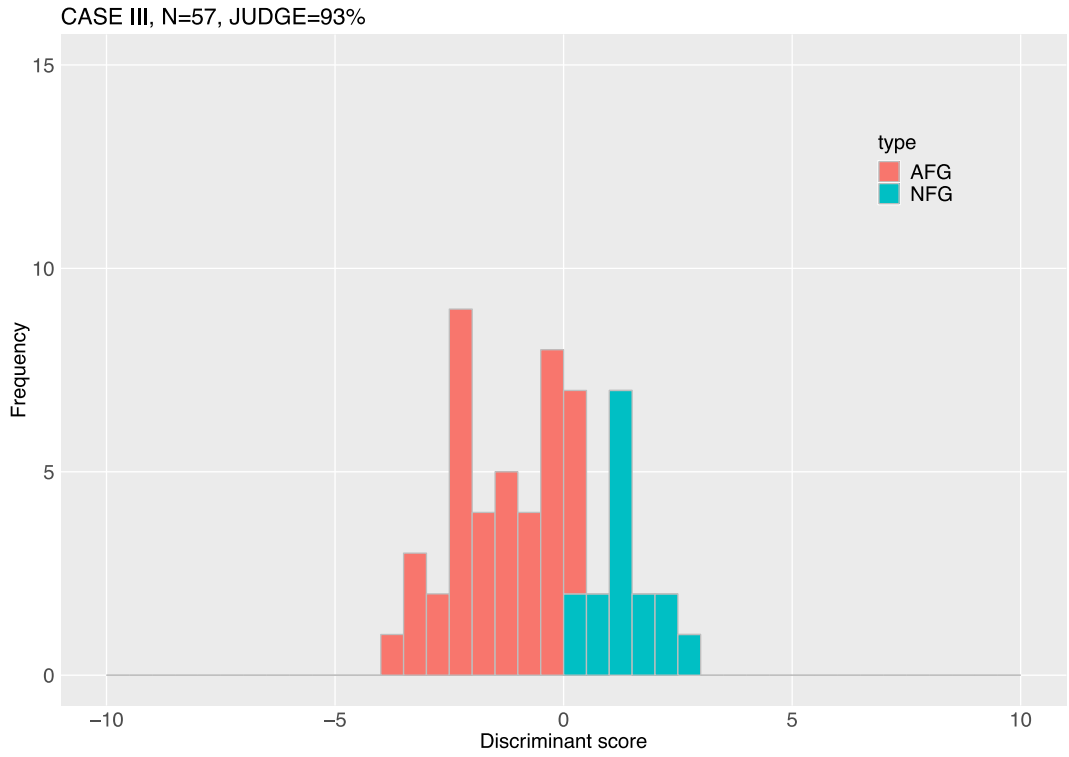


図 4-4　線形判別分析の結果図
上：AIC の 13 元素、下：第 3 主成分までの因子負荷量の平均値上位 10 元素

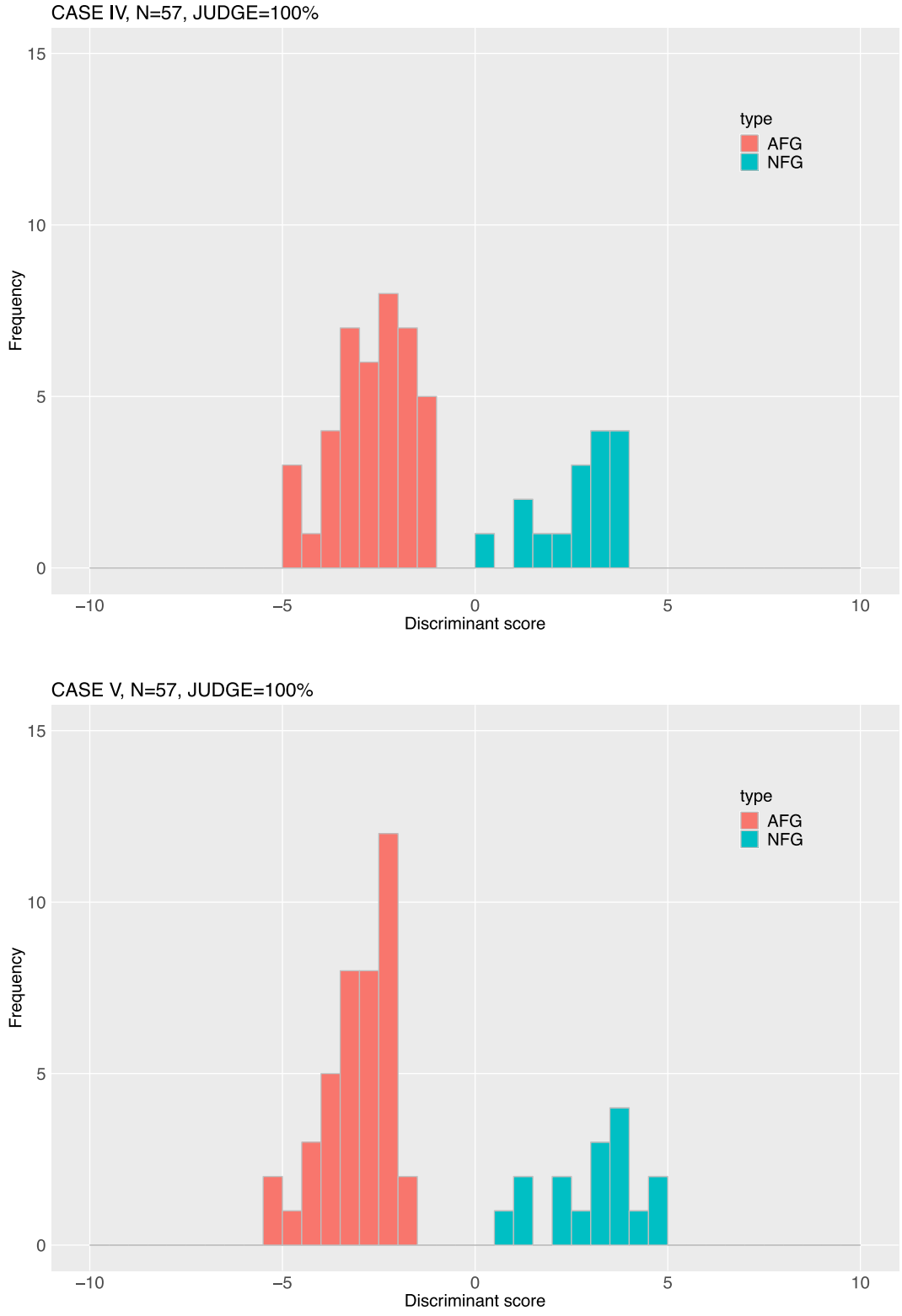


図 4-5　線形判別分析の結果図

上：第 5 主成分までの因子負荷量の平均値上位 10 元素、下：同じく第 8 主成分まで

5. 考察

5.1 線形判別分析に寄与する元素に関する考察

4. の分析の結果、正答率 100%となる一次式が複数得られた。ここでは、どの元素が判別に寄与しているのかについて考察する。まず、正答率が 100%となった分析の元素の組合せを以下に示す。共通する元素は TiO_2、Al_2O_3、MgO、Na_2O、P_2O_5、Ba の 6 元素である。

① 正答率が 100%となった分析の元素の組合せ（10 元素 ver.）

CASE II（AIC）: SiO_2, TiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, MgO, CaO, Na_2O, P_2O_5, Sr, Y, Nb, Ba, Pb

CASE IV（PC5、10 元素）: TiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, MgO, Na_2O, P_2O_5, Rb, Nb, Ba, Th

CASE V（PC8、10 元素）: TiO_2, Al_2O_3, MgO, CaO, Na_2O, K_2O, P_2O_5, Rb, Ba, Pb

CASE VI（共通する元素）: TiO_2, Al_2O_3, MgO, Na_2O, P_2O_5, Ba

次に、主成分分析で因子負荷量の平均値が高くなった元素の組合せのうち、正答率 100%となった第 5 主成分まで（CASE IV）と第 8 主成分まで（CASE V）を対象に、上位 10 位から下位のものを一つずつ除いて線形判別分析を行った。その結果、第 5 主成分までの上位 7 元素、第 8 主成分までの上位 9 元素での分析が正答率 100%となった（CASE VII と CASE VIII、図 5-1）。どちらの結果も、上位 10 元素での分析と傾向は変わらないが、第 5 主成分までのものは 2 群の境界の間隔がさらに狭まっている。この結果を踏まえた①と同様のものを以下に示す。共通する元素は①から Na_2O が抜け、TiO_2、Al_2O_3、MgO、P_2O_5、Ba の 5 元素となった。

② 正答率が 100%となった分析の元素の組合せ（最少 ver.）

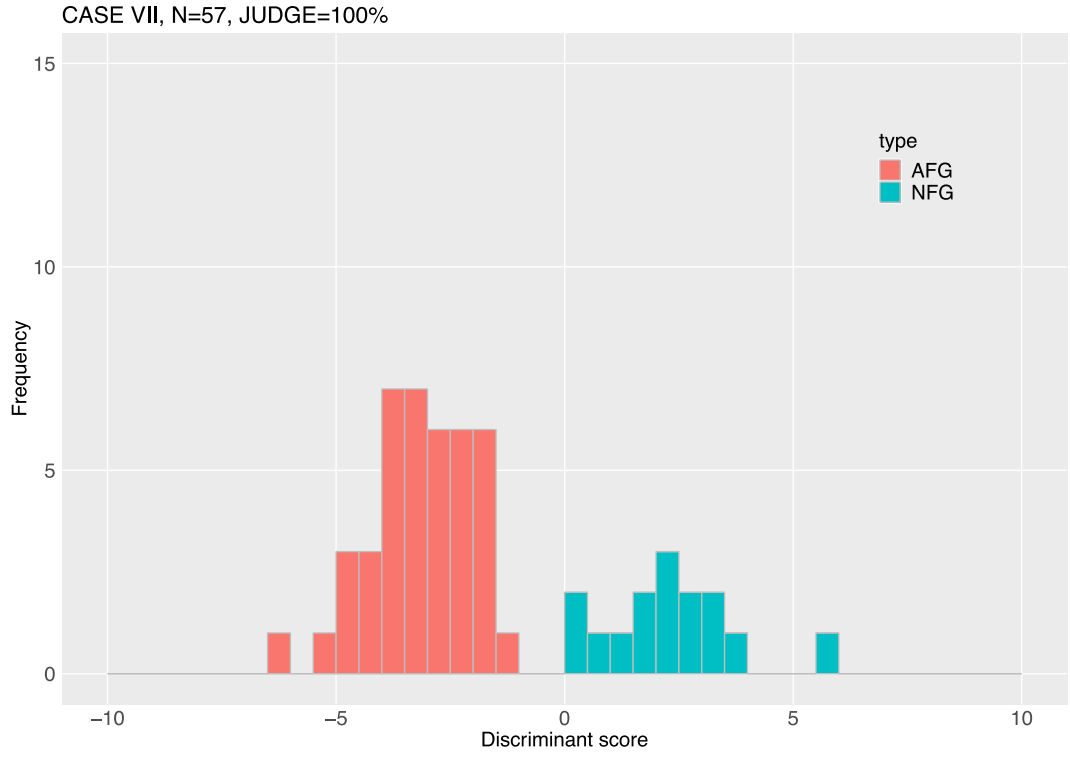
CASE II（AIC）: SiO_2, TiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, MgO, CaO, Na_2O, P_2O_5, Sr, Y, Nb, Ba, Pb

CASE VII（PC5、7 元素）: TiO_2, Al_2O_3, MgO, Na_2O, P_2O_5, Rb, Ba

CASE VIII（PC8、9 元素）: TiO_2, Al_2O_3, MgO, CaO, K_2O, P_2O_5, Rb, Ba, Pb

CASE IX（共通する元素）: TiO_2, Al_2O_3, MgO, P_2O_5, Ba

①と②に共通する 5 元素及び 6 元素は、異なる手法あるいはフィルターで選ばれたものであることから、AFG と NFG の判別への寄与度が高い元素であると考えられる。そこで、これらの元素を用いて線形判別分析を行った。その結果、①に共通する 6 元素（CASE VI）では正答率が 100%となり、②に共通する 5 元素（CASE IX）では正答率が約 84%となった（図 5-2）。CASE VI では 2 群が正規分布に近い分布を示す。この結果から、現時点では、TiO_2、Al_2O_3、MgO、Na_2O、P_2O_5、Ba の 6 元素が判別への寄与度が高い元素と判断する。



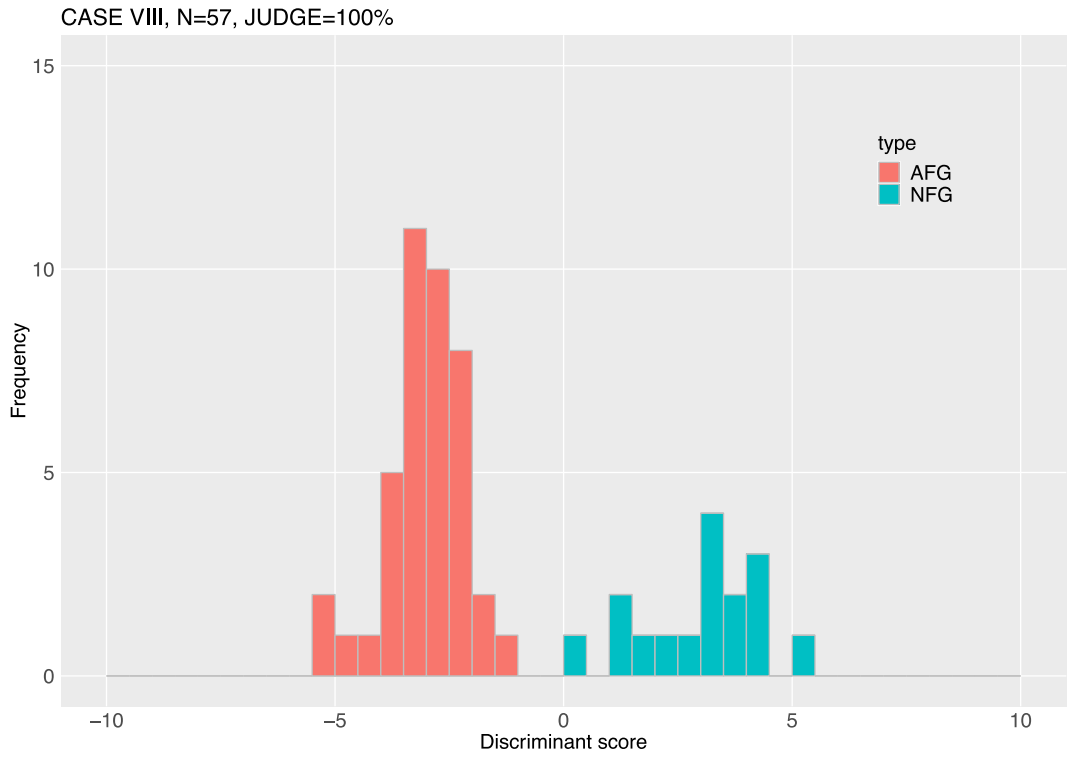


図 5-1　線形判別分析の結果図
上：第 5 主成分までの因子負荷量の平均値　上位 7 元素
下：第 8 主成分までの因子負荷量の平均値　上位 9 元素

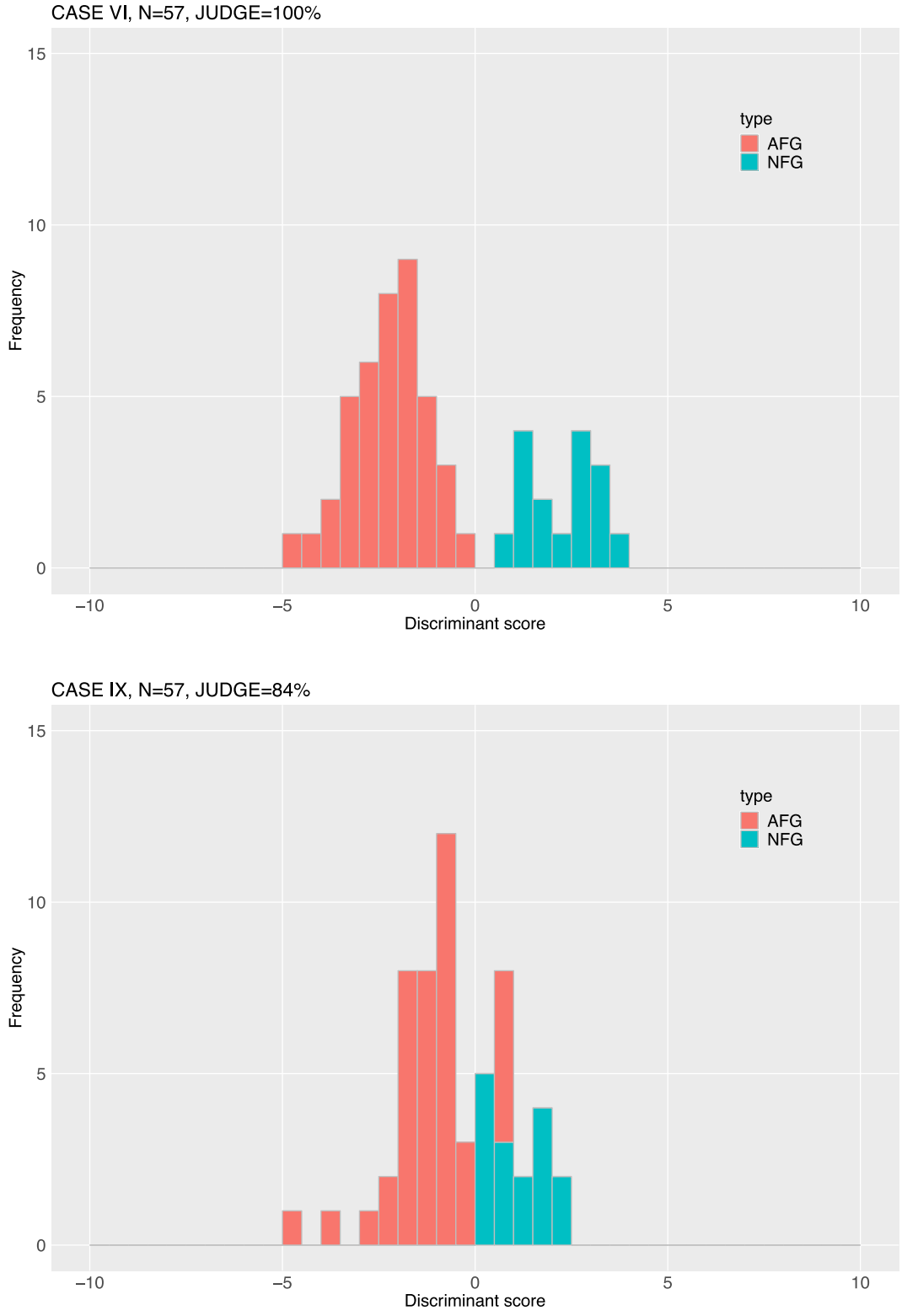


図 5-2　線形判別分析の結果図
上：5.1①に共通する元素（6 元素）
下：5.1②に共通する元素（5 元素）

5.2 得られた一次式に関する考察

4. 及び 5.1 の分析の結果、正答率 100%となる一次式が 7 つ得られた。ここでは、これらの一次式に線形判別分析から除外した試料の化学組成を入力し、その判別得点から一次式の判別精度について考察する。化学組成を入力した試料は、3.で分析した白木–丹生断層の AFG 試料（3-202、3-203、3-204）と、表 2-1 の文献 4 の Fault gouge、同じく文献 7 の K-19、K-20 である。なお、Fault gouge 及び K-19、K-20 は測定元素が元素の組合せを満たすケースのみ計算した。表 5-1 に判別得点の計算結果を示す。判別は、得点が 0 を超えていれば NFG、0 未満ならば AFG である。

表 5-1 判別得点の計算結果

		CASE I	CASE II	CASE IV	CASE V	CASE VI	CASE VII	CASE VIII
Sample	Type	Base_17	AIC_13	PC5_10	PC8_10	Common_6	PC5_7	PC8_9
3-202	AFG	3.096	2.245	1.880	1.611	2.007	1.873	1.930
3-203	AFG	5.219	4.119	2.073	1.999	2.020	1.928	2.801
3-204	AFG	2.017	0.883	1.493	1.577	1.410	1.454	0.825
Fault gouge	NFG	-	-	-4.628	-	-4.283	-4.161	-
K-19	AFG	-	-	-0.810	-	-0.527	-0.869	-
K-20	AFG	-	-	-0.741	-	0.499	-0.542	-

計算の結果、白木–丹生断層の 3 試料は全ケースで、Fault gouge も測定元素を満たす全ケースで誤判別となった。7 つの一次式の未知試料に対する正答率は 0～33%であり、総じて低いが、CASE IV ないし CASE VII は K-19 及び K-20 試料を正しく判別しており、現時点ではこのうち元素数の少ない CASE VII が最良の一次式と判断する。なお、正答率が低くなった原因として、まず 4. で述べた一次式の汎化性能の低下現象が起きている可能性がある。また、白木–丹生断層の 3 試料については、試料の保存状態が化学組成に影響を与えたことが考えられる。

6. まとめと今後の課題

断層ガウジの化学組成を用いた線形判別分析により、活断層（AFG・41 試料）と非活断層（NFG・16 試料）の 2 群を、化学組成から正確に分ける一次式が複数得られた。それとともに、主成分分析の結果は線形判別分析の結果と相関があることが分かった。さらに、これらの一次式に共通する元素の組合せから、AFG と NFG の違いを表す元素を 6 つに絞ることができた。このような成果は、今後「なぜ活断層と非活断層の断層ガウジの化学組成が異なるのか」という本質的議論の鍵となる可能性がある。

しかし、この方法の未知の試料に対する適用性には疑問が残る結果となった。具体的には、判別分析に用いる元素をさらに減らすことで、より汎化性能の高い一次式（＝機械）を得られる可能性がある。本研究では AIC と主成分分析という要約の手法で選択した変数（元素）群を、判別分析による予測に使用したが、今後は他の要約手法との比較などを行い、最適な（そしてより少ない）元素の組合せを追求することが必要である。また、本研究では二つのデータ群が正規分布しているという仮定を置いて線形判別分析を用いたが、この仮定の不要な方法（例えば、サポートベクターマシン）の導入を考慮すべきかもしれない。さらに、地質や断層タイプなどの質的データを多変量として与えることで、より詳細な分類ができるようになる可能性がある。同時に、この方法の信頼度を向上させるため、データベースの強化、すなわち、活断層と非活断層の断層破砕帯の化学組成データの追加が必要である。

その他の課題を以下に列挙する。

- 活断層と非活断層の違いを表す元素が他に存在する可能性。本研究ではより多くの試料を用いて分析を行うため、共通して測定された元素を選定した経緯がある。したがって、他の元素が両者の違いを反映している可能性は十分にある。
- どこを活断層の断層ガウジとするかという認定の問題。本研究では、文献の記載にしたがって断層タイプを分類したが、「本当にそこが活断層の断層ガウジと言い切れるのか」という疑問は残る。
- 試料の保存状態が化学組成に影響を与える可能性。特に、一次式の検証に用いた白木–丹生断層の試料は樹脂で固めたものであり、その化学組成が自然状態と同じかどうかについては注意が必要である。できれば自然状態の試料の化学組成分析を行い、両者を比較することが望ましい。

引用文献

Akaike, H., "Information theory and an extension of the maximum likelihood principle", Proceedings of the 2nd International Symposium on Information Theory, Petrov, B. N., and Caski, F. (eds.), Akadimiai Kiado, Budapest: p. 267-281, 1973.

原子力規制委員会, 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構もんじゅの敷地内破砕帯の評価について, http://www.nsr.go.jp/data/000161557.pdf（最終閲覧日, 2019 年 1 月 29 日）

Kuwatani, T., Nagata, K., Okada, M., Watanabe, T., Ogawa, Y., Komai T. and Tsuchiya, N., Machine-learning techniques for geochemical discrimination of 2011 Tohoku tsunami deposits. Scientific Reports volume 4, Article number: 7077, 2014.

日本原子力研究開発機構, 高速増殖原型炉もんじゅ 敷地内破砕帯の追加地質調査報告書, 126p, 2013.

日本原子力研究開発機構, 高速増殖原型炉もんじゅ 敷地内破砕帯の追加地質調査 全体とりまとめ報告 補足資料, 83p, 2014.

二宮正士, AIC(赤池情報量規準:Akaike Information Criterion), 日本食品科学工学会誌, 46, 1, p.37-38, 1999.

清水麻由子, 佐野直美, 柴田健二, 東濃地科学センターにおける蛍光 X 線分析装置を用いた岩石試料の主要元素および微量元素の定量分析, JAEA-Testing 2016-004, 40p, 2017.

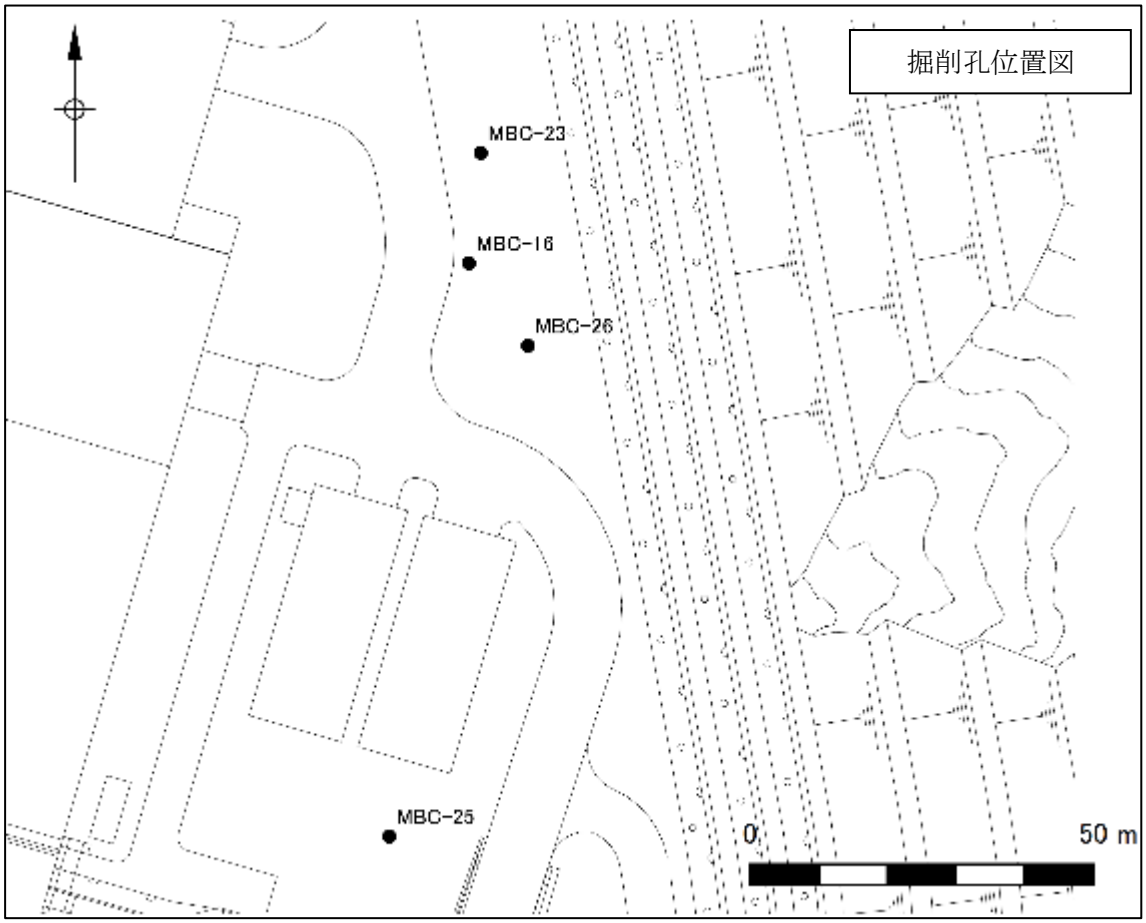
杉山雄一・山本博文・村上文敏・宇佐見琢哉・畠山一人・島崎裕行, 柳ヶ瀬・関ヶ原断層帯主部北方延長域（坂井市沖～福井市沖）における活断層の分布と活動性, 活断層・古地震研究報告, No.13, p.145-185, 2013.

植木忠正, 田辺裕明, 丹羽正和, 石丸恒存, 島田耕史, 花崗岩中に発達する粘土脈の観察・分析データ, JAEA-Data/Code 2016-010, 292p, 2016.

Wessel, P. and W. H. F. Smith, Free software helps map and display data, EOS Trans. AGU, 72, 441, 1991.

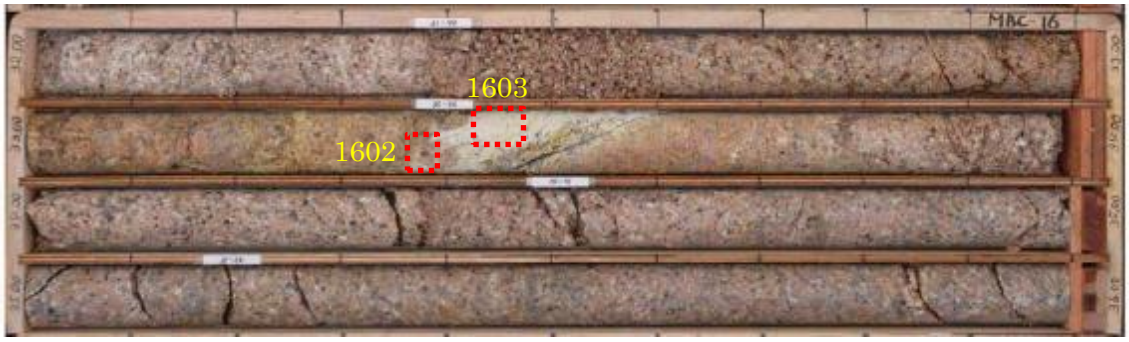
付録Ａ　試料採取位置

（１）もんじゅ破砕帯コア（非活断層ボーリングコア）

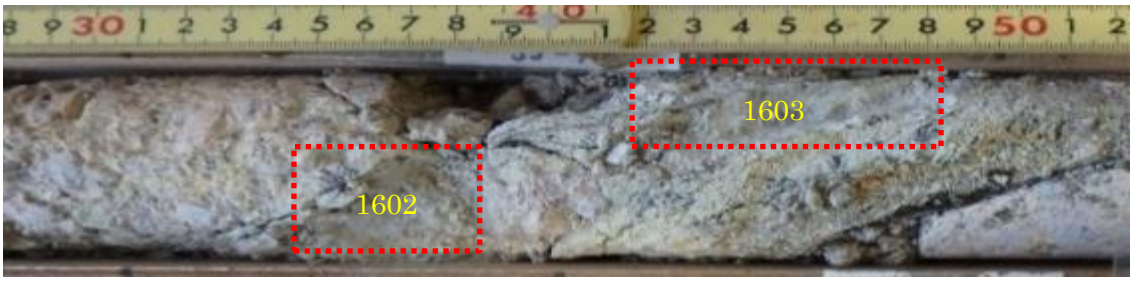


（日本原子力研究開発機構（2013）より）

・MBC-16 孔　GL-32～36m コア



【試料採取部】



1602：33.35～33.38m 粘土状破砕部（非活断層・断層ガウジ）
1603：33.42～33.45m 粘土状破砕部（非活断層・断層ガウジ）

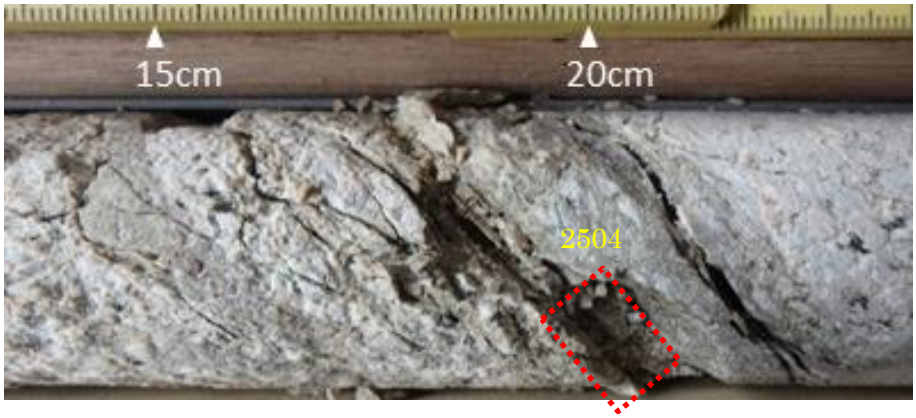
・MBC-23 孔　GL-9～15m コア

【試料採取部】

2301：11.85～11.875m 粘土状破砕部（非活断層・断層ガウジ）

・MBC-25 孔　GL-90～96m コア

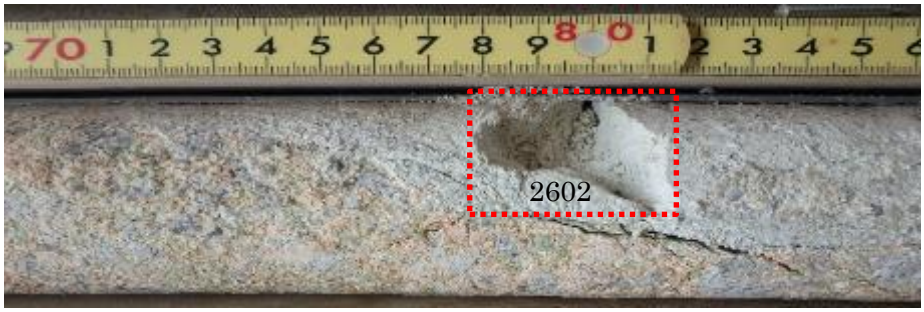
【試料採取部】



2504：93.20～93.21m 粘土状破砕部（非活断層・断層ガウジ）

・MBC-26　36～39m コア

【試料採取部】



2602：36.775～36.815m 粘土状破砕部（非活断層・断層ガウジ）
2603：37.00～37.06m 粘土状破砕部（非活断層・断層ガウジ）

（２）白木-丹生断層コア（活断層ボーリングコア）

・Loc3-2 孔　21～26m コア

【断層中軸部周辺の半割研磨試料（24.00～24.23m）】

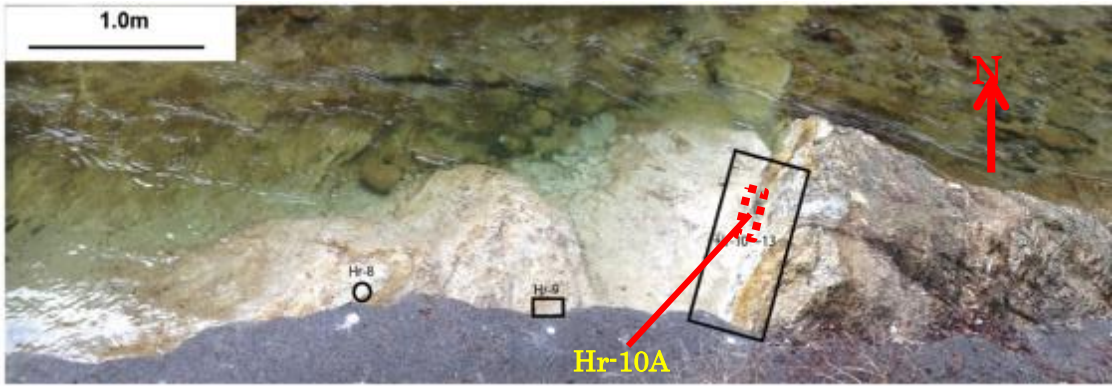
3-202：24.165m 断層中軸部（濃灰色；活断層・断層ガウジ）

3-203：24.17m 断層下盤側（淡灰色；活断層・断層ガウジ）

3-204：24.175m 断層上盤側（暗褐色；活断層・断層ガウジ）

（３）広島花崗岩断層試料（非活断層ブロックサンプリング試料）

・Hr10A（断層粘土）ブロックサンプリング試料



【試料採取部】

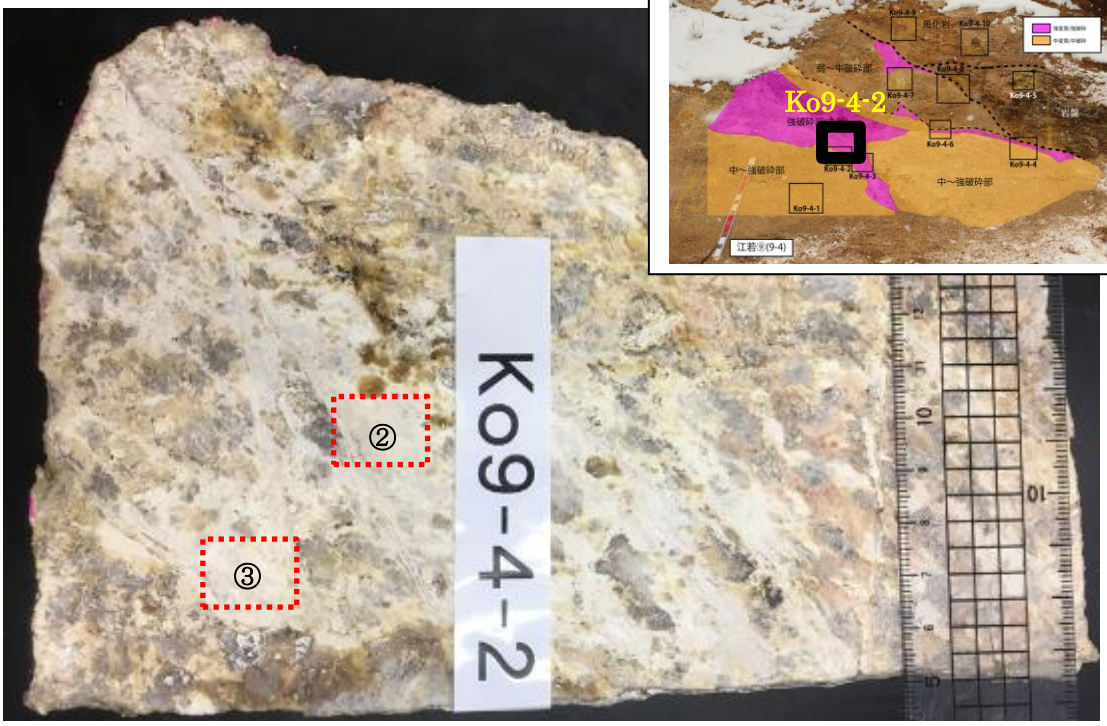
Hr10A①：灰白色粘土（非活断層・断層ガウジ）

Hr10A②：灰色粘土（断層中軸部；非活断層・断層ガウジ）

（４）江若花崗岩断層試料（非活断層ブロックサンプリング試料）

・Ko9-4-2（断層破砕帯）ブロックサンプリング試料

【試料採取部】



Ko9-4-2②：粘土状破砕部（非活断層・断層ガウジ）

Ko9-4-2③：粘土状破砕部（非活断層・断層ガウジ）

（植木ほか（2016）より）

付録 B　　全岩化学組成分析結果

試料名	MBC-16 1602 粘土状破砕部	MBC-16 1603 粘土状破砕部	MBC-23 2301 粘土状破砕部	MBC-25 2504 粘土状破砕部	MBC-26 2602 粘土状破砕部	MBC-26 2603 粘土状破砕部	Loc.3-2 3-202 断層中軸部	Loc.3-2 3-203 断層下盤側	Loc.3-2 3-204 断層上盤側	Hr Hr10A① 断層ガウジ	Hr Hr10A② 断層ガウジ(中軸)	Ko9 Ko9-4-2② 粘土状破砕部	Ko9 Ko9-4-2③ 粘土状破砕部
SiO_2(wt.%)	75.03	80.98	77.28	72.56	77.59	78.85	73.84	67.83	72.75	80.33	77.41	75.90	75.42
TiO_2	0.08	0.05	0.05	0.07	0.07	0.08	0.05	0.04	0.06	0.05	0.05	0.06	0.06
Al_2O_3	12.13	8.59	11.15	11.87	10.95	9.95	12.06	11.13	11.72	8.27	8.89	14.00	13.91
Fe_2O_3	1.88	1.88	1.01	1.07	1.73	1.80	1.49	1.22	1.58	1.60	2.27	1.36	1.11
MnO	0.13	0.03	0.03	0.06	0.03	0.02	0.16	0.13	0.44	0.01	0.01	0.02	0.02
MgO	0.56	0.51	0.63	0.58	0.62	0.63	0.59	0.48	0.57	0.25	0.31	0.15	0.11
CaO	0.62	0.60	0.55	2.34	0.71	0.69	0.65	0.54	0.58	0.35	0.54	0.01	0.02
Na_2O	0.63	0.10	0.43	1.21	0.12	0.11	0.85	0.90	1.19	0.41	0.19	0.67	0.51
K_2O	3.53	2.16	3.82	4.57	2.56	2.29	3.60	3.48	3.54	3.53	3.14	2.97	3.99
P_2O_5	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Total	94.61	94.90	94.95	94.33	94.39	94.42	93.30	85.75	92.44	94.81	92.81	95.14	95.14
Trace													
Ba(ppm)	144	149	127	211	174	127	97	81	94	145	135	110	98
Ce	88	9	24	61	28	11	34	27	43	33	72	40	52
Cl	25	0	13	23	32	ND	47	453	91	36	122	23	29
Co	2	1	2	3	2	3	1	1	2	2	4	1	0
Cr	1	4	3	1	3	8	4	7	3	6	3	5	3
F	519	446	583	409	578	744	528	460	666	634	804	212	ND
Ga	19	14	16	15	17	16	17	16	17	15	15	17	18
Nb	15	13	15	12	16	14	18	18	18	15	15	19	24
Ni	4	3	3	4	4	5	3	5	3	3	4	5	3
Pb	28	13	20	17	9	6	26	18	42	10	11	19	20
Rb	228	156	218	207	192	194	205	195	204	261	231	153	222
S	15	9	2	4	6	11	7	39	79	ND	ND	64	42
Sc	2	2	1	5	4	3	4	3	2	3	5	1	2
Sr	23	23	22	26	23	23	22	19	29	25	30	11	10
Th	28	17	23	26	22	20	32	29	30	25	35	27	30
U	9	9	14	4	8	14	15	12	12	26	51	4	3
V	5	7	5	8	9	12	5	4	3	9	17	5	4
Y	118	89	127	228	56	130	92	82	100	118	241	95	55
Zr	96	73	81	89	80	80	92	83	93	90	106	97	94
Ig(wt.%)	5.3	5.0	4.9	5.5	5.5	5.4	6.6	14.1	7.4	5	7	5	5

は定量下限未満の測定値。

岩石・年代学的手法を用いた
自然現象の影響評価手法の高度化に関する研究

平成 30 年度共同研究報告書

平成 31 年 1 月

国立大学法人山形大学

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
核燃料・バックエンド研究開発部門　東濃地科学センター
地層科学研究部　ネオテクトニクス研究グループ

目　次

1. 概要 83
1.1 共同研究件名 83
1.2 研究目的 83
1.3 実施期間 83
2. 研究内容 84
2.1 研究概要 84
2.2 共同研究内容 84
3. 研究手法 85
3.1 試料選定 85
3.2 分析手法と分析地点 85
4. 研究成果 86
4.1 ジルコンの内部構造 86
4.2 ジルコン U-Pb 年代の検討 87
4.3 ジルコン中のチタン濃度定量の検討 88
4.4 ジルコンの物理化学条件に基づく隆起史・侵食史の初期条件の制約 99
5. まとめ 100

図　目　次

図 3-1 対象試料の温度時間履歴 85
図 3-2 土岐花崗岩体中のジルコンの CL 像 86
図 3-3 内部構造に基づき決定された U-Pb 年代とチタン濃度のペア 86
図 4-1 DH6-2 の 6 粒子の組成（BSE）像と SEM-CL 像 89
図 4-2 DH9-10 の 6 粒子の組成（BSE）像と SEM-CL 像 90
図 4-3 DH13-2 の 5 粒子の組成（BSE）像と SEM-CL 像 91
図 4-4 DH6-2 と DH9-10 の U-Pb 年代測定点 93
図 4-5 DH6-2 の U-Pb 年代と測定地点 94
図 4-6 DH9-10 の 5 粒子の U-Pb 年代と測定地点 95
図 4-7 DH13-2 の 5 粒子の U-Pb 年代と測定地点 96
図 4-8 三つの試料における低輝度コア領域とオシラトリーゾーニング領域の年代 99

表　目　次

表 3-1 本共同研究で対象とする岩石試料 85
表 4-1 DH6-2 と DH9-10 の U-Pb 年代測定データ（分析照射径 10 μm） 92
表 4-2 DH6-2 と DH9-10 の U-Pb 年代測定データ（分析照射径 20 μm） 97
表 4-3 DH13-2 の U-Pb 年代測定データ（分析照射径 20 μm） 98
表 4-4 各試料の低輝度コア及びオシラトリーゾーニング領域の加重平均年代 99

1. 概要

1.1 共同研究件名

岩石・年代学的手法を用いた自然現象の影響評価手法の高度化に関する研究

1.2 研究目的

わが国においては、従来から、高レベル放射性廃棄物の地層処分の安全評価において重要となる、放射性核種が地下水を介して生物圏へ移行するという「地下水シナリオ」に係る評価の信頼性向上に資するための要素技術開発が進められている。平成 30 年 3 月に公開された「地層処分研究開発に関する全体計画（平成 30 年度～平成 34 年度）」では、地層処分に適した地質環境の選定及びモデル化において自然現象の影響を把握することの重要性が示されるとともに、火山・火成活動、深部流体、地震・断層活動、隆起・侵食に関する調査・評価技術の高度化に関する研究開発課題が整理されている。

日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構）では、経済産業省資源エネルギー庁から受託した「平成 30 年度高レベル放射性廃棄物などの地層処分に関する技術開発事業（地質環境長期安定性評価技術高度化開発）」において、これらの自然現象の影響に関連して示された研究課題に対して、地質学、地形学、地震学、地球年代学といった各学術分野における最新の研究を踏まえた技術の適用による事例研究を通じて、課題の解決に必要な知見の蓄積や調査・評価技術の高度化を総合的に進めている。このうち隆起・侵食については、隆起量・侵食量の評価に反映するための、熱年代学的手法などを用いた隆起・侵食評価手法の整備が、技術開発課題として提示されている。

国立大学法人山形大学（以下、山形大学）と原子力機構が実施する本共同研究では、岩石学、地球年代学などの手法を融合的に用いることで、隆起量・侵食量の評価方法の整備に関する課題の検討を行う。深成岩体を伴う地域の隆起量・侵食量の評価には地球年代学的（熱年代学的）な手法が有用である。また鉱物の組織的特徴や化学組成は、鉱物生成時の環境や温度条件を把握するための手がかりとなる。これらの岩石学的手法と地球年代学的な手法の融合は、マグマの貫入・定置に関する情報などの、熱年代学のみでは得られない、隆起史・侵食史の解明に資する地質情報の取得が期待できる。これらの手法を通じて隆起量・侵食量評価に寄与する自然現象の影響評価手法の高度化へ向けた整備を試みる。

山形大学は、岩石学や地球年代学などの多くの研究実績を有している。また、原子力機構は、これらの分野における各種分析に必要な最新の装置を数多く有しており、国内でも有数の分析環境を備えている。そのため、本共同研究を行うことにより、上記のような課題に対して総合的かつ効果的に取り組むことができる。

なお、本共同研究は、原子力機構が経済産業省資源エネルギー庁から受託した「平成 30 年度高レベル放射性廃棄物などの地層処分に関する技術開発事業（地質環境長期安定性評価技術高度化開発）」の一環として行うものである。

1.3 実施期間

平成 30 年 8 月 27 日～平成 31 年 1 月 31 日

2. 研究内容

2.1 研究概要

平成 30 年度高レベル放射性廃棄物などの地層処分に関する研究開発事業（地質環境長期安定性評価技術高度化開発）においては、研究開発課題の一項目として「隆起・侵食の調査・評価技術の高度化」が実施されている。これは、地形学的手法や年代測定などを用いた過去百万年～数十万年前以前からの隆起・侵食を把握するための技術の拡充を目指すものである。この背景の中で、本共同研究では、岩石学、地球年代学などの手法を融合的に用いることで、隆起量・侵食量の評価方法の整備に関する課題の検討を実施する。

深成岩体を伴う地域の隆起量・侵食量の評価には地球年代学的（熱年代学的）な手法が有用である（例えば、末岡ほか，2015; Yuguchi et al., 2018）。また鉱物の組織的特徴や化学組成は、鉱物生成時の温度条件や環境を把握するための手がかりとなる（Yuguchi et al., 2018）。これらのことから、岩石学的手法と地球年代学的な手法の融合は、マグマの貫入・定置に関する情報などの、熱年代学のみでは得られない、隆起史・侵食史の解明に資する地質情報の取得が可能となる。これらの手法の構築を通じて隆起量・侵食量評価に寄与する自然現象の影響評価手法の高度化に向けた整備を実施する。

2.2 共同研究内容

平成 30 年度の本共同研究では、ジルコンの U-Pb 年代に基づく結晶化年代、及びカソードルミネッセンス観察に基づく成長様式の解明を通じて、ジルコン成長の物理化学条件の決定手法の構築を行う。加えて、ジルコンの結晶化温度の決定に資するチタン濃度の定量手法の検討を実施した。ジルコンの結晶化プロセスは、マグマ溜りの貫入・定置から深成岩体の結晶固化までのプロセスを反映する（Yuguchi et al., 2016）。つまりジルコンの物理化学条件は、マグマの貫入・定置・固化の物理化学条件を反映するものとなる。このことは深成岩体を利用した隆起史・侵食史の評価にあたり、初期条件を与えることを意味する。

平成 30 年度の研究内容・手順を以下に示す。

(1) 計画立案・情報整理
平成 30 年度の研究計画を立案するとともに、既往情報を整理し、分析を行う試料の選定基準や数量を決定する。

(2) 試料選定
(1)で決定した選定基準をもとに分析対象とする鉱物試料を選定する。

(3) 鉱物試料の分析及び結果の解釈
(2)で選定した鉱物に対して前処理を行った後、組織的特徴を観察、化学組成の取得、地球年代学的データの取得を実施する。これらの結果に基づき、得られた地質情報の解釈を行い、自然現象の影響評価手法の高度化に向けた検討を行う。

(4) 取りまとめ
上記(1)～(3)における実施・検討内容を取りまとめた報告書を作成する。

3. 研究手法

3.1 試料選定

土岐花崗岩体の 3 試料（DH6-2、DH9-10、DH13-2）を研究対象とする（表 3-1）。これらの試料は、Yuguchi et al. (2016)や Yuguchi et al. (2018)に用いられた試料であり、温度時間履歴（t-T path）に関する情報が既に得られている（図 3-1）。これらの試料に対して、ジルコンの成長構造、U-Pb 年代、及びチタン濃度を取得するための検討を実施した。

表 3-1 本共同研究で対象とする岩石試料（Yuguchi et al., 2018）

Sample Name	Location and elevation			
	X(northing)	Y(easting)	Depth (mabh)*1	Altitude (masl)*2
DH6-2	-66,630.9	978.7	1,010.8	-691.5
DH9-10	-66,857.4	5,511.2	500.1	-224.7
DH13-2	-65,324.7	8,625.8	530.0	-252.5

*1 Depth from the ground surface: meters along borehole (mabh).
*2 Altitude: meters above sea level (masl).

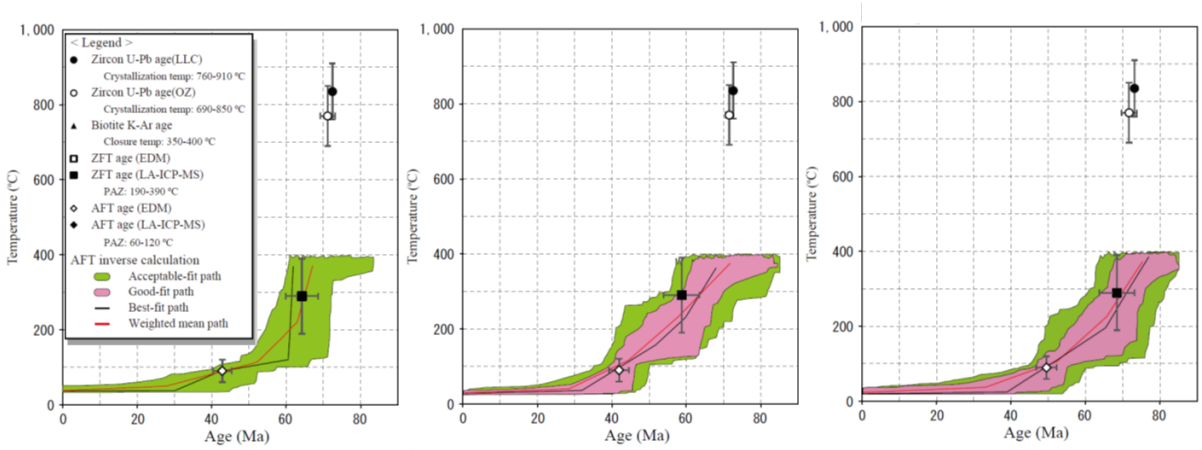


図 3-1 対象試料の温度時間履歴（t-T path）（左：DH6-2、中央：DH6-2、右：DH13-2）

3.2 分析手法と分析地点

ジルコンの成長構造の把握には、電子顕微鏡によるカソードルミネッセンス（SEM-CL）を用いる。カソードルミネッセンス（CL）とは、電子顕微鏡で電子線を鉱物に照射した際に発する光を像としたものである。鉱物中の微量元素や格子欠陥などにより変化する。CL 像観察により、ジルコンの内部構造を可視化でき、どの部分からどの方向へ成長しているといった成長様式を捉えることができる。SEM-CL 像観察には山形大学理学部に設置された SEM-CL 装置（JEOL IT-100A + Gatan Mini CL）を使用した。U-Pb 年代測定には、レーザーアブレーション ICP 質量分析法(Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry: LA-ICP-MS)を用いた。またチタン濃度の定量には、上述の LA-ICP-MS とともに電子線マイクロアナライザ（Electron Probe Micro Analyzer: EPMA）を用いた検討を行った。

本研究では、原子力機構・東濃地科学センター・土岐地球年代学研究所に設置された LA-ICP 質量分析装置（LA 装置: Photon-Machines Analyte G2; ICP 質量分析装置: Thermo Fisher Scientific NEPTUNE-*plus*）及び EPMA（JEOL JXA-8530F）を使用した。Yuguchi et al. (2016)では、U-Pb 年

代測定は LA-ICP-MS、チタン濃度の定量は EPMA を用いてデータの収集を行ったが、それぞれの年代データ、温度データと成長構造を関連づけることは未解明の課題であった（図 3-2）。本研究での分析点は、図 3-3 のように、U-Pb 年代を内部構造に基づき決定する。特にコアからリムまでの年代変化を捉えることを目指す。加えてこの年代値とペアとなるような温度条件を決定するため、チタン濃度の定量分析に関する検討を実施した。

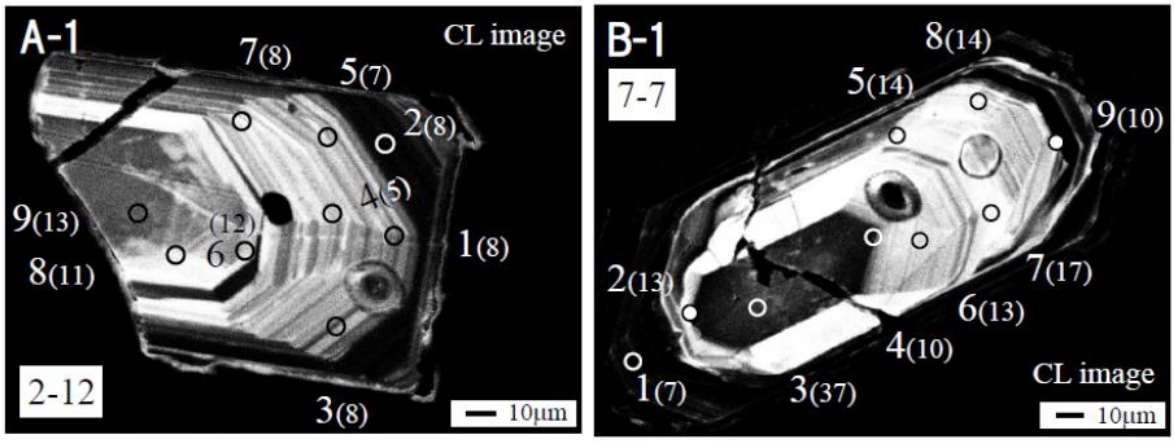


図 3-2 土岐花崗岩体中のジルコンの CL 像（Yuguchi et al., 2016）

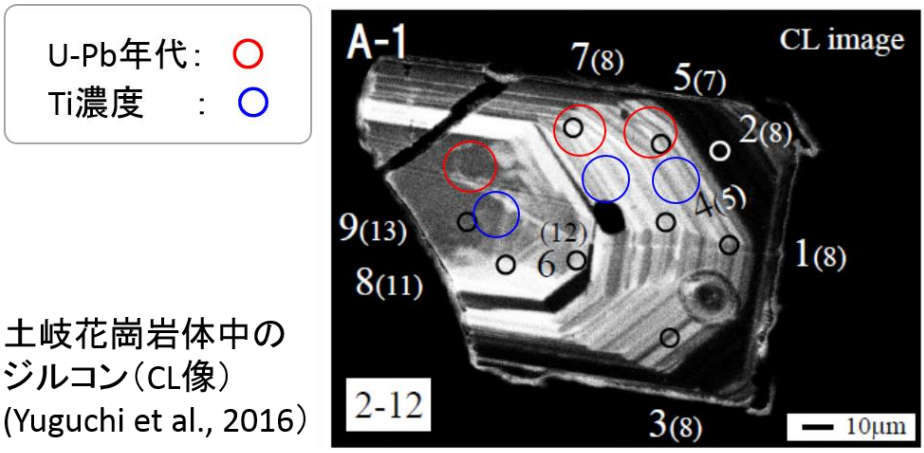


図 3-3 内部構造に基づき決定された U-Pb 年代とチタン濃度のペア
（Yuguchi et al. (2016) に加筆）

4. 研究成果

平成 30 年度に取得した研究成果を本章に記す。4.1 章でジルコンの内部構造の取得を、4.2 章でジルコン U-Pb 年代測定の結果を、4.3 章ではチタン濃度測定に関する検討を、4.4 章においてジルコンの物理化学条件に基づく隆起史・侵食史の初期条件の制約に関する検討を示す。

4.1 ジルコンの内部構造

研究対象としたジルコンは、DH6-2 の 6 粒子（DH6-2-1、-5、-6、-10、-15、-18）、DH9-10 の 6 粒子（DH9-10-1、-4、-10、-11、-23、-24）、DH13-2 の 5 粒子（DH13-2-3、-9、-17、-25、-27）である。それぞれの SEM-CL 画像を図 4-1 から図 4-3 に示す。SEM-CL 画像から、ジルコンの内部

構造を三つの領域に区分することができる（Yuguchi et al., 2016）。一つは低輝度コア、二つ目はオシラトリーゾーニング領域、三つ目は外来性コア(inherited core)である。多くのジルコン粒子は、低輝度コアとそれを囲むオシラトリーゾーニング領域からなる。この構造は、低輝度コアがオシラトリーゾーニング領域よりも、早いタイミングかつ高温条件で形成されたことを示している。また、DH6-2-18 及び DH9-10-10 のジルコン粒子において、外来性コアとそれを囲むオシラトリーゾーニング領域が観察された。また特異な構造として、DH9-10-4 では、ジルコン粒子全体でオシラトリーゾーニングが発達する。CL 像からジルコン粒子の下方向から上方向への成長が予測される。

4.2 ジルコン U-Pb 年代の検討

まず分析条件の検討を行った。分析照射径 15 μm、レーザー繰り返し周波数 3 Hz、エネルギー密度 4.0 J/cm^2、165 shots（55 秒分析）で U-Pb 年代分析を実施した。ICP 質量分析装置の検出器の組み合わせは ^{202}Hg, ^{204}Pb, ^{206}Pb, ^{207}Pb, ^{208}Pb が二次電子増倍管もしくはコンパクトダイノードによるイオン計数、^{232}Th, ^{238}U についてはファラデーカップによる検出とした。この分析条件にて DH6-2 の全 6 粒子及び DH9-10 の 2 粒子（DH9-10-1、-4）に対して年代測定を行った。分析照射径 15 μm の分析点を図 4-4 に示す。また各分析点の U-Pb 年代測定データを表 4-1 に示す。この結果、各分析点の年代値に対する誤差が 1,000 から 2,000 万年と比較的大きい。これは Pb 同位体分析精度が±10%程度であることに起因する。粒子内での年代差を高精度で議論するためには、誤差の小さな年代値の取得が重要となる。このため、より年代誤差の小さくなる分析条件の検討を行った。

次に試行した条件は以下の通りである。分析照射径 20 μm、レーザー繰り返し周波数 10 Hz、エネルギー密度 4.0 J/cm^2、160 shots（10 秒分析）で 50 点程度の分析を実施した。感度を最大化するため、照射径を 5 μm 広げ、周波数も大きくしたが、質量分析の積算時間を短くすることにより（0.262 s → 0.066 s）、同位体比取得数(ratio の数)はほとんど変えない条件とした。ICP-MS の検出器の組み合わせは、先の分析と同様に ^{202}Hg, ^{204}Pb, ^{206}Pb, ^{207}Pb, ^{208}Pb が二次電子増倍管もしくはコンパクトダイノードによるイオン計数、^{232}Th, ^{238}U についてはファラデーカップによる検出とした。これらの分析条件の検討により、Pb 同位体分析精度が±10%程度であったのが、±5%程度まで向上し、年代値の誤差は 5-10 Ma 程度となった。この分析条件を用いて U-Pb 年代測定を実施した。分析照射径 20 μm と決定したことに伴い、ジルコン 16 粒子の年代測定点の設定を行った。SEM-CL 画像を図 4-5 から図 4-7 に径 20 μm の分析点を示す。照射径が大きくなると、ジルコン粒子内で取得できるデータ数が減少するため、ジルコン成長を捉えるうえでの分解能は低下する。一方、先に示したように照射径を小さくすると、感度低下やアブレーションによって掘削深度が大きくなることで元素分別の影響が大きくなり（downhole fractionation）、データの誤差が大きくなるというデメリットを伴う。これらの効果を慎重に検討した結果、本研究では分析照射径 20 μm を選択した。各分析点の U-Pb 年代測定データ（分析照射径 20 μm）を表 4-2 及び表 4-3 に示す。これらの値を用いて CL 像が示す成長構造と年代との関連について検討を行った。図 4-5 から図 4-7 には分析地点に加えて、U-Pb 年代を示す。

分析条件の改善に伴い、年代値の誤差は著しく減少した。一方で、低輝度コアとオシラトリーゾーニング領域から得られた年代は多くのジルコン粒子で誤差の幅で一致する。DH6-2 No.5 のジルコンのように、中央値のみを比較すると低輝度コアの年代が古く、オシラトリーゾーニング領域の年代が若いという傾向は散見されるが、1 点 1 点のデータから直接比較することはできない。

このため、次に各試料の低輝度コア及びオシラトリーゾーニング領域の年代データから加重平均年代（weighted mean age）を算出した。この際、外来性コアの年代データ、二つの領域（低輝度コアとオシラトリーゾーニング領域、外来性コアとオシラトリーゾーニング領域）にまたが

っている年代データは除外した。表 4-4 は各試料の低輝度コア及びオシラトリーゾーニング領域の加重平均年代を示したものである。各試料において、低輝度コアとオシラトリーゾーニング領域の加重平均年代には有意差は見られない。さらに、3 試料の間にも有意差は認められない。このことは、試料を採取した地点での貫入・定置・結晶化年代に大きな相違がない可能性を示唆するものである。

4.3 ジルコン中のチタン濃度定量の検討

ジルコンの結晶化温度を決定するために、LA-ICP-MS と EPMA を用いてチタン濃度の定量分析条件の検討を行った。DH6-2、DH9-10、DH13-2 のジルコンを扱った既存研究（Yuguchi et al., 2016）において、EPMA の分析によりチタン濃度は数 ppm から数十 ppm の範囲を取ることが既知である。この範囲のチタン濃度を定量するために、まず LA-ICP-MS において分析照射径 15 μm、レーザー繰り返し周波数 5 Hz、エネルギー密度 4.0 J/cm^2、100 shots（20 秒分析）の条件で分析を行った。チタン濃度定量のためにモニターする同位体は ^{49}Ti とした。濃度の違う標準ガラス 3 種（NIST 610, 612, 614）を未知試料分析の前後で分析し、得られた検量線からチタン濃度を定量した。また、30 セットの分析（31 本の検量線）から、分析精度の評価を行ったが、チタンの検量線に関しては再現性が悪く、信頼できる定量範囲は概ね数百 ppm 程度、かつ検量線の不安定を考慮した場合、定量値に対する誤差は 50%程度であることが判明した。単純にカウント数から見積もることのできる誤差は 5%程度に留まるが、分析全体を通しての精度が確保できず、数 ppm の違いで温度の違いをみて議論するのは困難である。次に、S/N 比を稼ぐ目的で分析照射径 20 μm へと増大させた。レーザー繰り返し周波数 5 Hz、エネルギー密度 4.6 J/cm^2、100 shots（20 秒分析）の条件で検討を行ったが、結果的に十分な精度を確保するのが困難であった。特に数 ppm の領域では、S/N 比が悪く定量できず、数百 ppm 程度が本条件下での定量の限界と考えられる。このため、数 ppm から数十 ppm が予測される DH6-2、DH9-10、DH13-2 のジルコンに対しての LA-ICP-MS を用いたチタン濃度の定量は、現在の条件からでは困難であるという結論に至った。

次に EPMA を用いてチタン濃度の定量分析条件の検討を行った。分析条件は Yuguchi et al. (2016) に倣い、分光結晶には三つの PET 結晶を用い、加速電圧 25 kV、電流値 500 nA、ビーム径 5-8 μm、測定時間 1,200 秒（ピーク 600 秒　バックグラウンド(-)300 秒　バックグラウンド(＋)300 秒）の条件で実施した。ジルコン中で 10 点ほどのテスト分析を実施したが、チタンのピークカウントがバックグラウンドレベルであった（一部はバックグラウンド補正後の計数率はマイナスを示した）ため、分析を断念した。リアルタイムでシグナル主にターすると、チタンのピークはバッグランドの振幅の中に収まっており、現在の装置の分析環境では少なくとも 100 ppm 以下のチタン定量分析は困難であると判断した。今後の課題として、LA-ICP-MS あるいは EPMA を用い、数 ppm から数十 ppm の範囲のチタン濃度を定量するための条件を見出す必要がある。

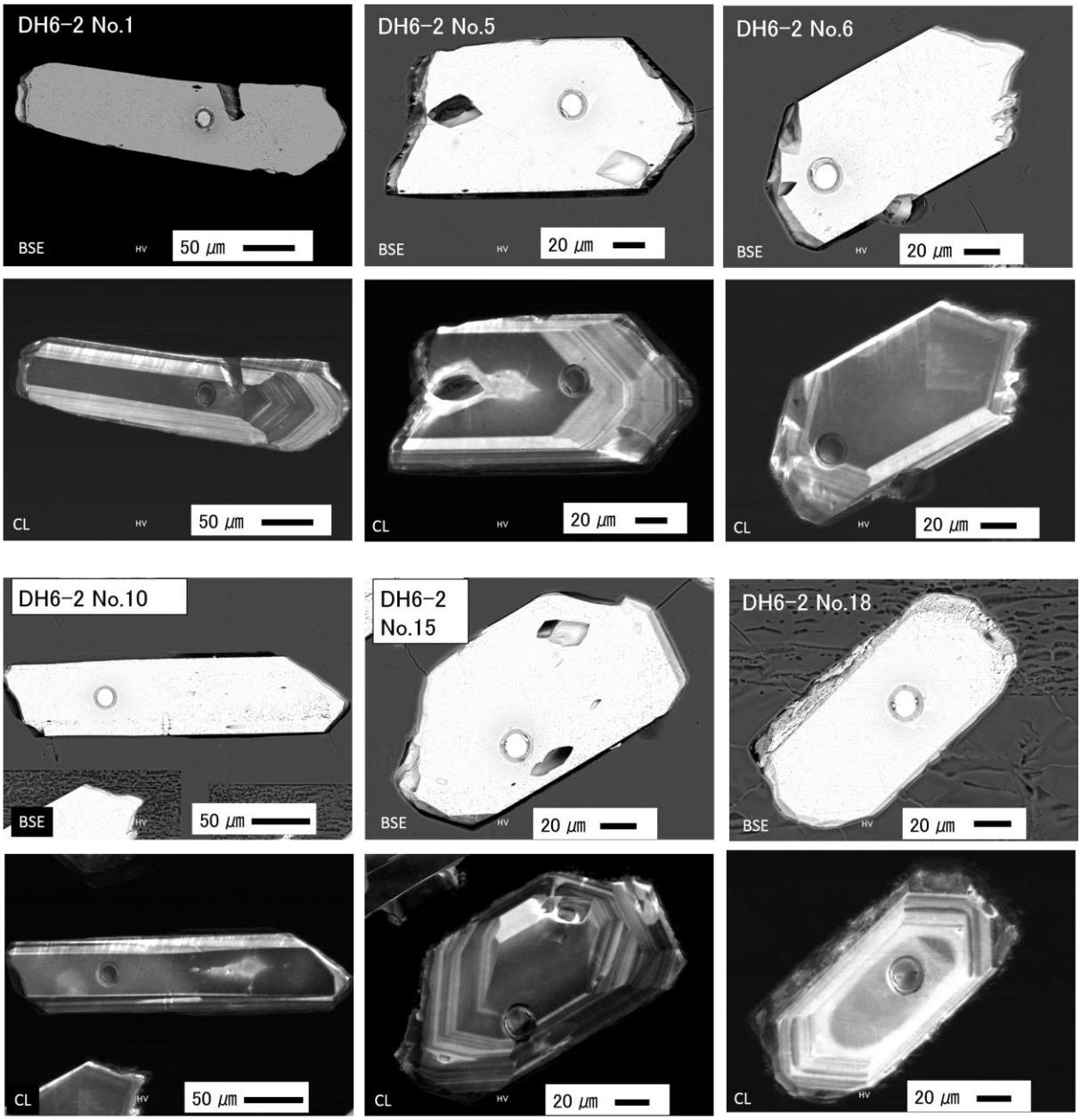


図 4-1 DH6-2 の 6 粒子（DH6-2-1, -5, -6, -10, -15, -18）の組成（BSE）像と SEM-CL 像

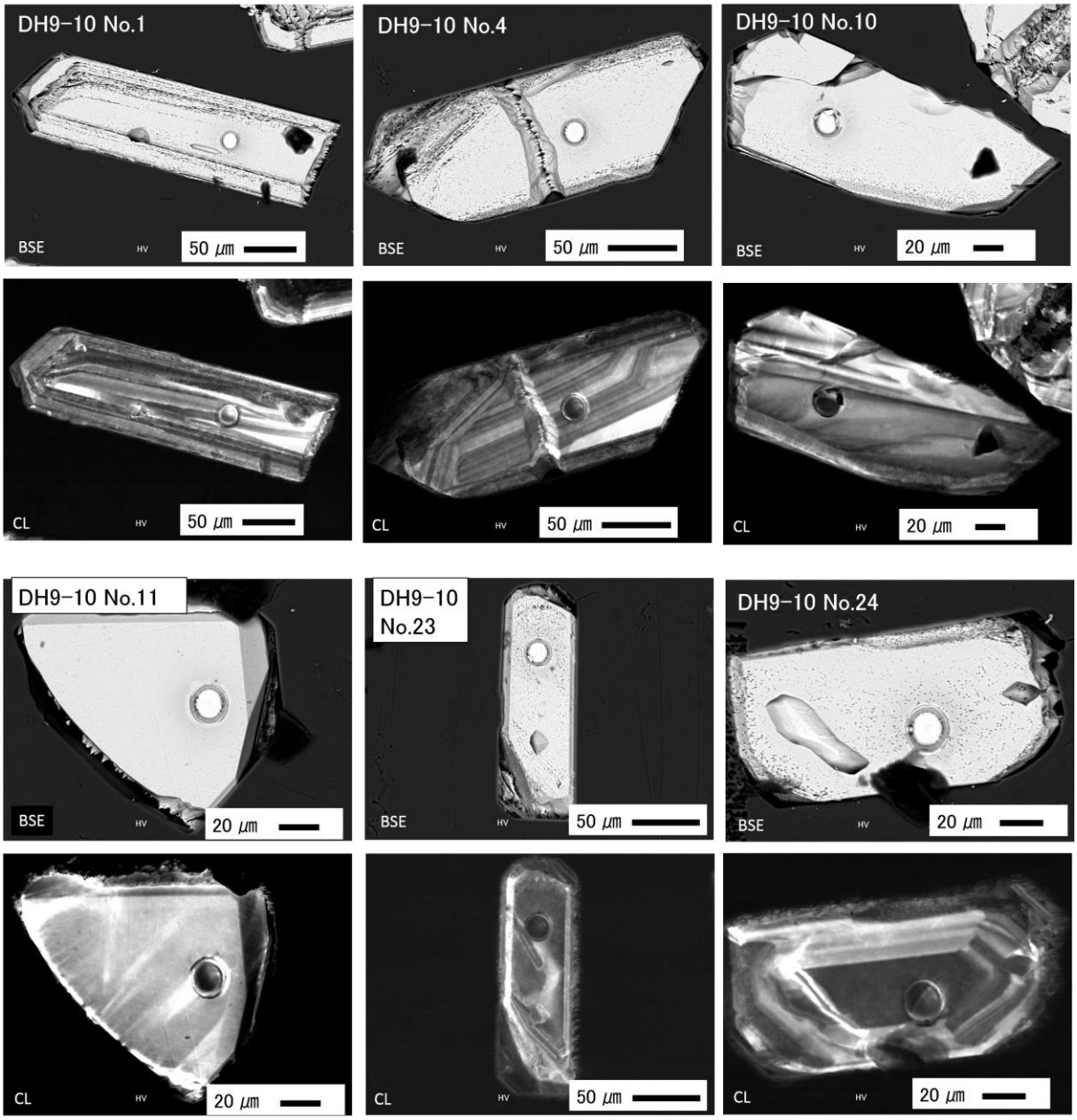


図 4-2 DH9-10 の 6 粒子（DH9-10-1, -4, -10, -11, -23, -24）の組成（BSE）像と SEM-CL 像

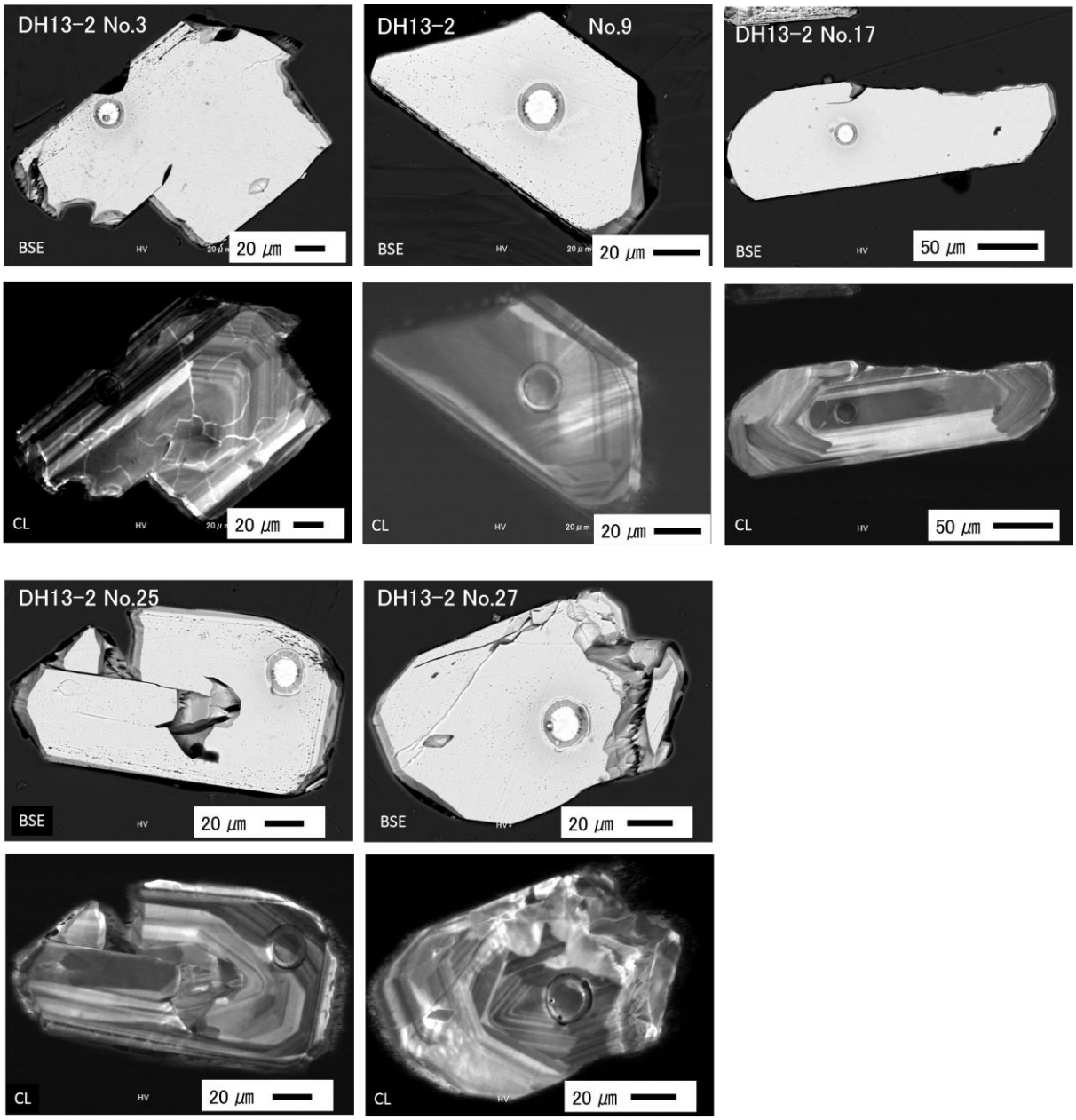


図 4-3 DH13-2 の 5 粒子（DH13-2-3, -9, -17, -25, -27）の組成（BSE）像と SEM-CL 像

表 4-1 DH6-2（DH6-2-1, -5, -6, -10, -15, -18）と DH9-10（DH9-10-1, -4）の U-Pb 年代測定データ（分析照射径 10 μm）

Sample No. / name	Grain description		Isotopic ratios			Age (Ma)	
	Grain No.	Location*2	$^{207}Pb/^{206}Pb$ ± Error (1σ)	$^{206}Pb/^{238}U$ ± Error (1σ)	$^{207}Pb/^{235}U$ ± Error (1σ)	^{238}U-^{206}Pb age ± Error (2σ)	^{235}U-^{207}Pb age ± Error (2σ)
1. DH6-2	1-1	LLC	0.0472 ± 0.0048	0.01264 ± 0.00140	0.0822 ± 0.0123	80.9 ± 18.0	80.2 ± 24.9
	1-2	LLC	0.0474 ± 0.0044	0.01255 ± 0.00136	0.0820 ± 0.0118	80.4 ± 17.6	80.1 ± 23.7
	1-3	OZ	0.0479 ± 0.0051	0.01275 ± 0.00129	0.0843 ± 0.0123	81.7 ± 16.7	82.2 ± 24.9
	1-4	OZ	0.0485 ± 0.0094	0.01265 ± 0.00179	0.0845 ± 0.0203	81.0 ± 23.0	82.4 ± 40.8
	1-5	OZ	0.0476 ± 0.0053	0.01296 ± 0.00127	0.0851 ± 0.0127	83.0 ± 16.3	82.9 ± 25.6
	5-1	LLC	0.0467 ± 0.0077	0.01241 ± 0.00130	0.0799 ± 0.0156	79.5 ± 16.8	78.0 ± 31.3
	5-2	OZ	0.0478 ± 0.0097	0.01233 ± 0.00140	0.0812 ± 0.0189	79.0 ± 18.0	79.3 ± 38.1
	5-3	OZ	0.0489 ± 0.0085	0.01241 ± 0.00135	0.0837 ± 0.0172	79.5 ± 17.3	81.6 ± 34.5
	6-1	LLC	0.0475 ± 0.0053	0.01195 ± 0.00124	0.0782 ± 0.0120	76.6 ± 16.0	76.4 ± 24.2
	6-2	LLC	0.0474 ± 0.0059	0.01203 ± 0.00122	0.0785 ± 0.0127	77.1 ± 15.8	76.8 ± 25.6
	6-3	LLC	0.0478 ± 0.0061	0.01201 ± 0.00141	0.0791 ± 0.0137	77.0 ± 18.1	77.3 ± 27.6
	6-4	OZ	0.0479 ± 0.0049	0.01127 ± 0.00096	0.0743 ± 0.0099	72.2 ± 12.4	72.8 ± 20.1
	10-1	LLC	0.0478 ± 0.0118	0.01124 ± 0.00112	0.0740 ± 0.0197	72.1 ± 14.4	72.5 ± 39.6
	10-2	LLC	0.0476 ± 0.0105	0.01125 ± 0.00115	0.0739 ± 0.0180	72.1 ± 14.8	72.4 ± 36.2
	10-3	LLC	0.0481 ± 0.0067	0.01163 ± 0.00126	0.0772 ± 0.0136	74.6 ± 16.3	75.5 ± 27.4
	15-1	LLC	0.0471 ± 0.0083	0.01113 ± 0.00106	0.0722 ± 0.0144	71.4 ± 13.7	70.8 ± 29.1
	15-2	OZ	0.0475 ± 0.0082	0.01123 ± 0.00129	0.0735 ± 0.0152	72.0 ± 16.6	72.0 ± 30.7
	15-3	OZ	0.0481 ± 0.0052	0.01141 ± 0.00119	0.0757 ± 0.0114	73.2 ± 15.3	74.1 ± 23.1
	18-1	IHC	0.0500 ± 0.0037	0.02786 ± 0.00349	0.1921 ± 0.0279	177.1 ± 44.9	178.4 ± 56.0
	18-2	OZ	0.0496 ± 0.0031	0.02836 ± 0.00398	0.1939 ± 0.0298	180.3 ± 51.2	180.0 ± 59.7
	18-3	OZ	0.0495 ± 0.0046	0.02807 ± 0.00364	0.1917 ± 0.0305	178.5 ± 46.8	178.1 ± 61.0
2. DH9-10	1-1	LLC	0.0475 ± 0.0040	0.01216 ± 0.00119	0.0796 ± 0.0103	77.9 ± 15.3	77.8 ± 20.9
	1-2	OZ	0.0474 ± 0.0081	0.01197 ± 0.00119	0.0783 ± 0.0154	76.7 ± 15.3	76.5 ± 31.0
	4-1	OZ	0.0480 ± 0.0115	0.01226 ± 0.00120	0.0812 ± 0.0210	78.6 ± 15.4	79.3 ± 42.2
	4-2	OZ	0.0483 ± 0.0057	0.01150 ± 0.00102	0.0766 ± 0.0114	73.7 ± 13.2	74.9 ± 23.0
	4-3	LLC	0.0481 ± 0.0052	0.01159 ± 0.00101	0.0769 ± 0.0107	74.3 ± 13.0	75.2 ± 21.5

*1 Internal structure in zircon crystal is categoried into LLC (low-luminescence core), OZ (oscillatory zonination),and IHC (inherited core).

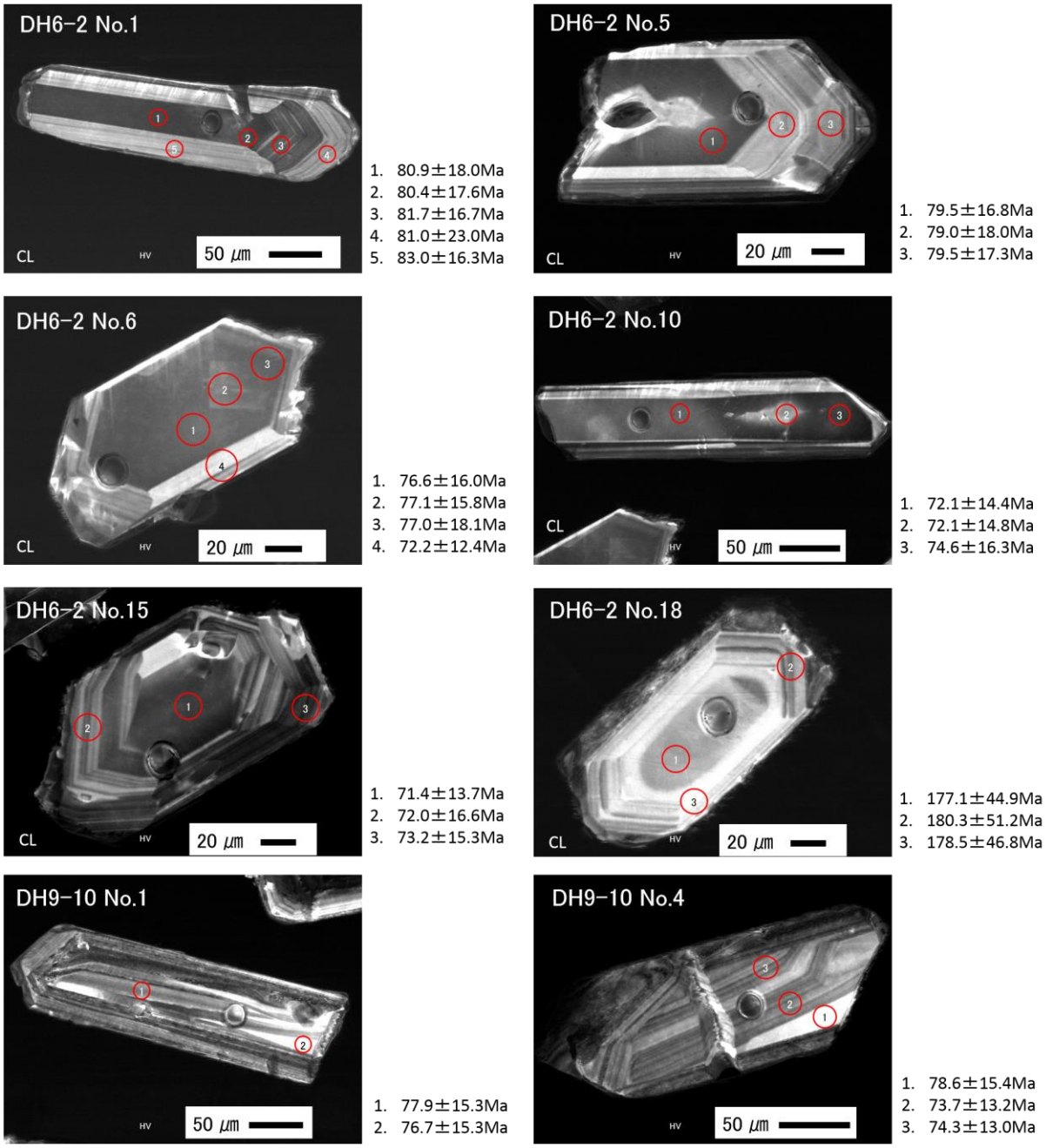


図 4-4 DH6-2（DH6-2-1, -5, -6, -10, -15, -18）と DH9-10（DH9-10-1, -4）の
U-Pb 年代測定点（分析照射径 10 μm）

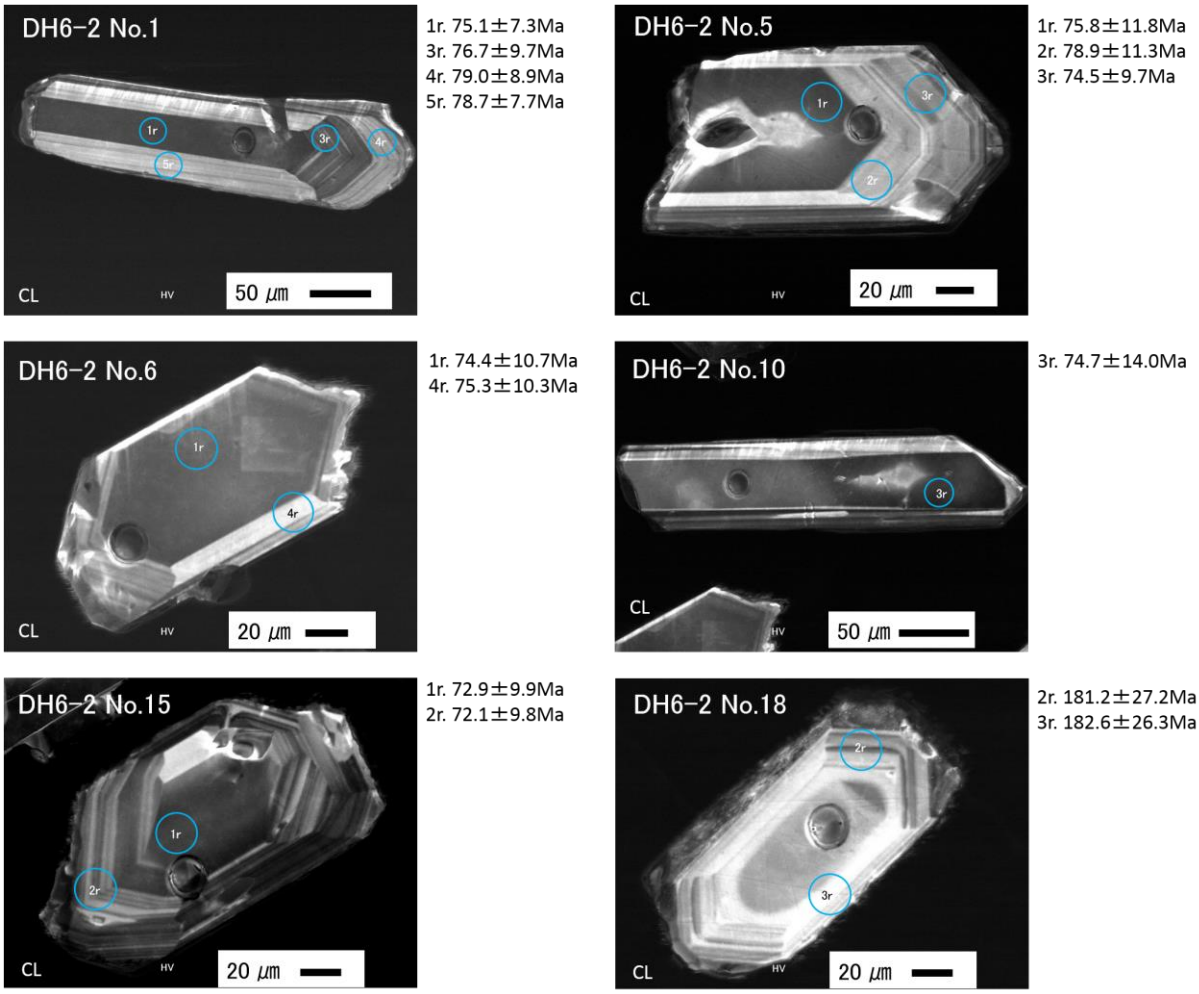


図 4-5 DH6-2（DH6-2-1, -5, -6, -10, -15, -18）の U-Pb 年代と測定地点（分析照射径 20 μm）

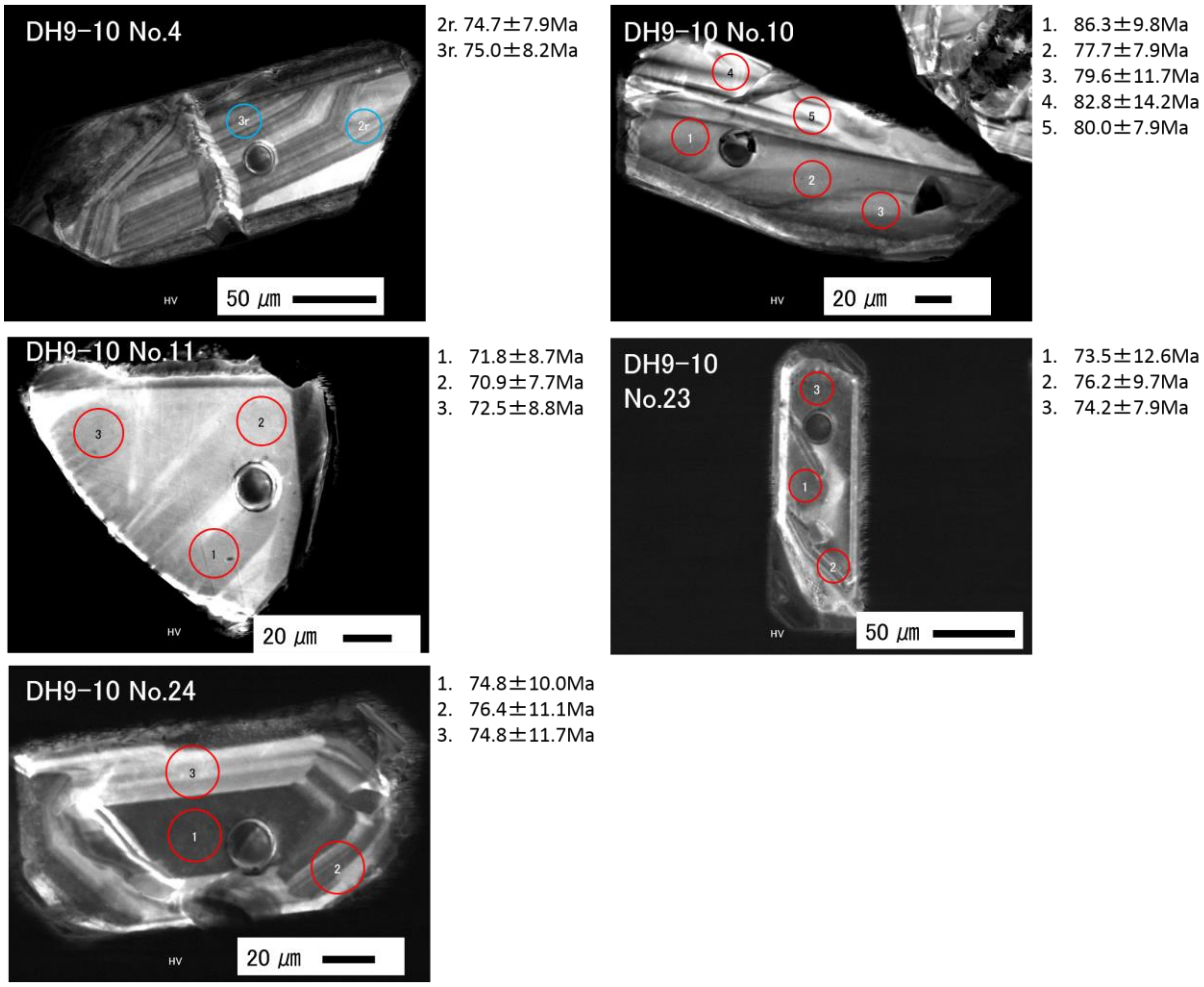


図 4-6 DH9-10 の 5 粒子（DH9-10-4, -10, -11, -23, -24）の U-Pb 年代と測定地点
（分析照射径 20 μm）

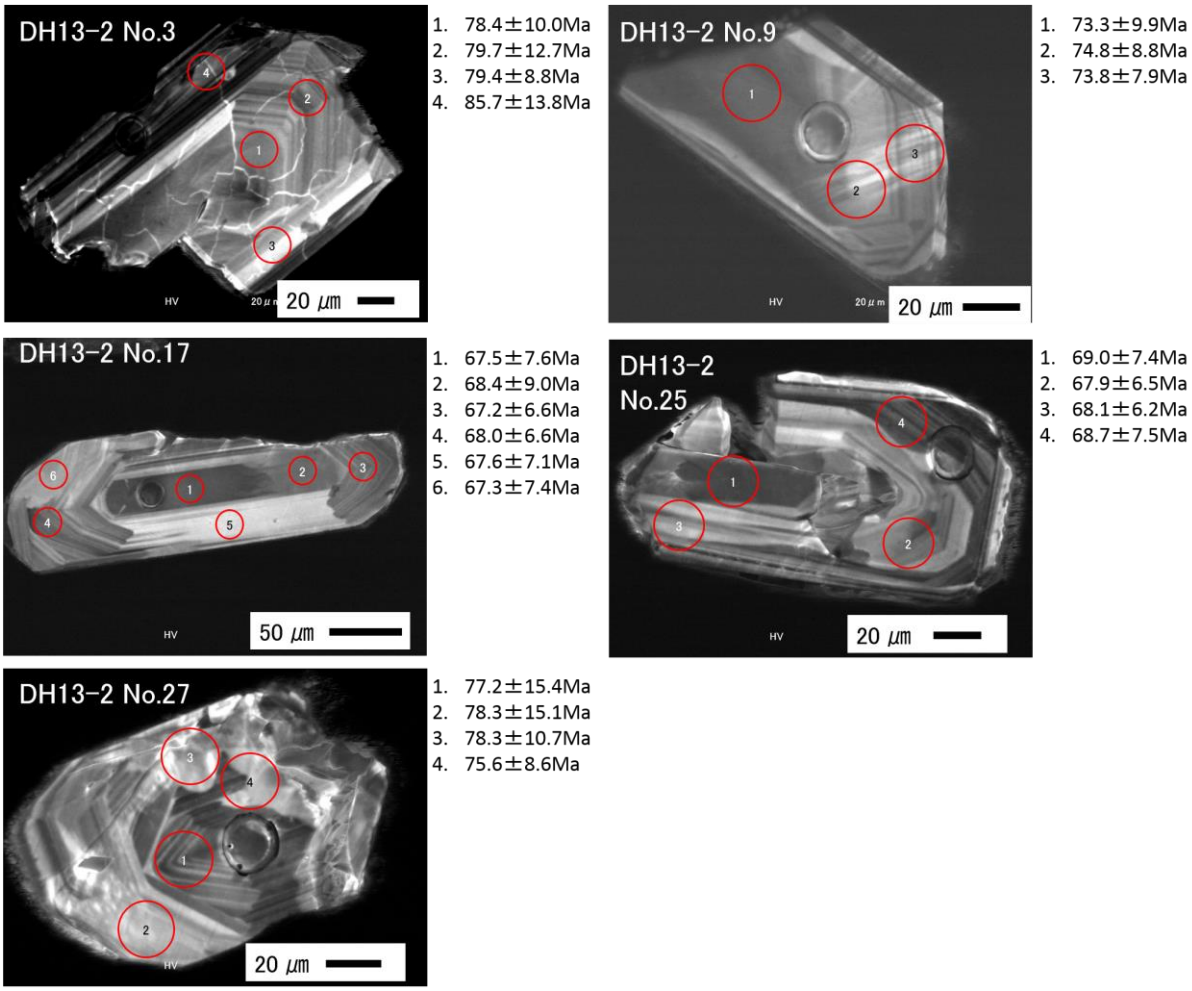


図 4-7 DH13-2 の 5 粒子（DH13-2-3, -9, -17, -25, -27）の U-Pb 年代と測定地点
（分析照射径 20 μm）

表 4-2 DH6-2 と DH9-10 の U-Pb 年代測定データ（分析照射径 20 μm）

Sample No. / name	Grain description		Isotopic ratios			Age (Ma)	
	Grain No.	Location*[1]	$^{207}Pb/^{206}Pb$ ± Error (1σ)	$^{206}Pb/^{238}U$ ± Error (1σ)	$^{207}Pb/^{235}U$ ± Error (1σ)	^{238}U-^{206}Pb age ± Error (2σ)	^{235}U-^{207}Pb age ± Error (2σ)
1. DH6-2	1-1r	LLC	0.0473 ± 0.0018	0.01254 ± 0.00076	0.0818 ± 0.0058	80.3 ± 9.8	79.8 ± 11.8
	1-3r	OZ	0.0475 ± 0.0020	0.01213 ± 0.00061	0.0794 ± 0.0053	77.7 ± 7.9	77.6 ± 10.7
	1-4r	OZ	0.0474 ± 0.0017	0.01243 ± 0.00091	0.0813 ± 0.0066	79.6 ± 11.7	79.4 ± 13.3
	1-5r	OZ	0.0468 ± 0.0035	0.01293 ± 0.00110	0.0835 ± 0.0095	82.8 ± 14.2	81.4 ± 19.1
	5-1r	LLC	0.0471 ± 0.0016	0.01248 ± 0.00061	0.0811 ± 0.0049	80.0 ± 7.9	79.2 ± 9.9
	5-2r	OZ	0.0471 ± 0.0035	0.01121 ± 0.00068	0.0727 ± 0.0070	71.8 ± 8.7	71.3 ± 14.2
	5-3r	OZ	0.0470 ± 0.0025	0.01106 ± 0.00060	0.0716 ± 0.0054	70.9 ± 7.7	70.2 ± 10.9
	6-1r	LLC	0.0471 ± 0.0033	0.01131 ± 0.00068	0.0734 ± 0.0068	72.5 ± 8.8	71.9 ± 13.8
	6-4r	LLC-OZ	0.0477 ± 0.0022	0.01147 ± 0.00098	0.0755 ± 0.0073	73.5 ± 12.6	73.9 ± 14.8
	10-3r	LLC	0.0479 ± 0.0015	0.01189 ± 0.00075	0.0785 ± 0.0056	76.2 ± 9.7	76.7 ± 11.3
	15-1r	LLC	0.0488 ± 0.0018	0.01157 ± 0.00061	0.0780 ± 0.0050	74.2 ± 7.9	76.2 ± 10.1
	15-2r	OZ	0.0480 ± 0.0018	0.01167 ± 0.00078	0.0773 ± 0.0059	74.8 ± 10.0	75.6 ± 12.0
	18-2r	IHC-OZ	0.0478 ± 0.0016	0.01192 ± 0.00086	0.0786 ± 0.0062	76.4 ± 11.1	76.8 ± 12.6
	18-3r	IHC-OZ	0.0481 ± 0.0021	0.01168 ± 0.00091	0.0774 ± 0.0069	74.8 ± 11.7	75.7 ± 14.0
2. DH9-10	4-2r	OZ	0.0472 ± 0.0024	0.01224 ± 0.00078	0.0797 ± 0.0065	78.4 ± 10.0	77.9 ± 13.2
	4-3r	OZ	0.0467 ± 0.0033	0.01244 ± 0.00098	0.0801 ± 0.0085	79.7 ± 12.7	78.3 ± 17.1
	10-1	IHC	0.0471 ± 0.0024	0.01239 ± 0.00069	0.0805 ± 0.0060	79.4 ± 8.8	78.6 ± 12.2
	10-2	IHC	0.0471 ± 0.0019	0.01338 ± 0.00107	0.0869 ± 0.0078	85.7 ± 13.8	84.6 ± 15.8
	10-3	IHC	0.0461 ± 0.0024	0.01143 ± 0.00077	0.0727 ± 0.0062	73.3 ± 9.9	71.2 ± 12.6
	10-4	OZ	0.0462 ± 0.0034	0.01167 ± 0.00068	0.0743 ± 0.0070	74.8 ± 8.8	72.8 ± 14.1
	10-5	OZ	0.0469 ± 0.0028	0.01152 ± 0.00061	0.0744 ± 0.0059	73.8 ± 7.9	72.9 ± 12.0
	11-1	LLC	0.0456 ± 0.0036	0.01053 ± 0.00059	0.0662 ± 0.0064	67.5 ± 7.6	65.1 ± 12.9
	11-2	LLC	0.0458 ± 0.0032	0.01067 ± 0.00070	0.0674 ± 0.0064	68.4 ± 9.0	66.2 ± 13.0
	11-3	LLC	0.0459 ± 0.0031	0.01048 ± 0.00052	0.0663 ± 0.0055	67.2 ± 6.6	65.2 ± 11.2
	23-1	LLC	0.0459 ± 0.0027	0.01060 ± 0.00057	0.0671 ± 0.0053	68.0 ± 7.4	66.0 ± 10.7
	23-2	LLC	0.0468 ± 0.0041	0.01054 ± 0.00055	0.0679 ± 0.0069	67.6 ± 7.1	66.8 ± 14.0
	23-3	LLC-OZ	0.0440 ± 0.0051	0.01050 ± 0.00057	0.0637 ± 0.0081	67.3 ± 7.4	62.7 ± 16.5
	24-1	LLC	0.0458 ± 0.0034	0.01076 ± 0.00058	0.0680 ± 0.0063	69.0 ± 7.4	66.8 ± 12.7
	24-2	OZ	0.0461 ± 0.0028	0.01058 ± 0.00051	0.0672 ± 0.0052	67.9 ± 6.5	66.1 ± 10.6
	24-3	OZ	0.0470 ± 0.0024	0.01062 ± 0.00048	0.0688 ± 0.0047	68.1 ± 6.2	67.5 ± 9.6

*[1] Internal structure in zircon crystal is categoried into LLC (low-luminescence core), OZ (oscillatory zonination),and IHC (inherited core).

表 4-3 DH13-2 の U-Pb 年代測定データ（分析照射径 20 μm）

Sample No. / name	Grain description		Isotopic ratios			Age (Ma)	
	Grain No.	Location*[1]	$^{207}Pb/^{206}Pb$ ± Error (1σ)	$^{206}Pb/^{238}U$ ± Error (1σ)	$^{207}Pb/^{235}U$ ± Error (1σ)	^{238}U-^{206}Pb age ± Error (2σ)	^{235}U-^{207}Pb age ± Error (2σ)
3. DH13-2	3-1	LLC	0.0472 ± 0.0017	0.01072 ± 0.00058	0.0698 ± 0.0045	68.7 ± 7.5	68.5 ± 9.2
	3-2	OZ	0.0526 ± 0.0183	0.01204 ± 0.00119	0.0874 ± 0.0316	77.2 ± 15.4	85.0 ± 63.2
	3-3	OZ	0.0460 ± 0.0028	0.01223 ± 0.00117	0.0776 ± 0.0088	78.3 ± 15.1	75.8 ± 17.8
	3-4	OZ	0.0491 ± 0.0033	0.01222 ± 0.00083	0.0828 ± 0.0079	78.3 ± 10.7	80.8 ± 16.1
	9-1	LLC	0.0498 ± 0.0028	0.01180 ± 0.00067	0.0810 ± 0.0065	75.6 ± 8.6	79.1 ± 13.2
	9-2	OZ	0.0475 ± 0.0021	0.01171 ± 0.00057	0.0766 ± 0.0050	75.1 ± 7.3	75.0 ± 10.2
	9-3	OZ	0.0471 ± 0.0019	0.01198 ± 0.00075	0.0777 ± 0.0058	76.7 ± 9.7	76.0 ± 11.8
	17-1	LLC	0.0471 ± 0.0022	0.01232 ± 0.00069	0.0801 ± 0.0058	79.0 ± 8.9	78.2 ± 11.8
	17-2	LLC	0.0476 ± 0.0019	0.01228 ± 0.00060	0.0805 ± 0.0051	78.7 ± 7.7	78.6 ± 10.4
	17-3	OZ	0.0472 ± 0.0034	0.01183 ± 0.00092	0.0769 ± 0.0081	75.8 ± 11.8	75.2 ± 16.4
	17-4	OZ	0.0470 ± 0.0035	0.01231 ± 0.00087	0.0797 ± 0.0081	78.9 ± 11.3	77.9 ± 16.5
	17-5	OZ	0.0456 ± 0.0031	0.01163 ± 0.00075	0.0731 ± 0.0069	74.5 ± 9.7	71.7 ± 14.0
	17-6	OZ	0.0482 ± 0.0021	0.01160 ± 0.00083	0.0771 ± 0.0065	74.4 ± 10.7	75.4 ± 13.1
	25-1	LLC	0.0475 ± 0.0019	0.01176 ± 0.00080	0.0770 ± 0.0060	75.3 ± 10.3	75.3 ± 12.2
	25-2	OZ	0.0482 ± 0.0030	0.01166 ± 0.00109	0.0774 ± 0.0087	74.7 ± 14.0	75.7 ± 17.5
	25-3	OZ	0.0489 ± 0.0020	0.01137 ± 0.00077	0.0767 ± 0.0061	72.9 ± 9.9	75.0 ± 12.4
	25-4	OZ	0.0475 ± 0.0024	0.01124 ± 0.00076	0.0736 ± 0.0062	72.1 ± 9.8	72.1 ± 12.5
	27-1	OZ	0.0489 ± 0.0018	0.02850 ± 0.00211	0.1922 ± 0.0160	181.2 ± 27.2	178.5 ± 32.2
	27-2	OZ	0.0489 ± 0.0017	0.02873 ± 0.00204	0.1937 ± 0.0154	182.6 ± 26.3	179.8 ± 31.0
	27-3	OZ	0.0478 ± 0.0021	0.01166 ± 0.00062	0.0769 ± 0.0053	74.7 ± 7.9	75.2 ± 10.6
	27-4	OZ	0.0472 ± 0.0020	0.01170 ± 0.00064	0.0762 ± 0.0053	75.0 ± 8.2	74.6 ± 10.7

*[1] Internal structure in zircon crystal is categoried into LLC (low-luminescence core), OZ (oscillatory zonination),and IHC (inherited core).

表 4-4 各試料の低輝度コア及びオシラトリーゾーニング領域の加重平均年代

	LLC	OZ
DH6-2	**75.0±3.3Ma** MSWD=0.15, probability=1.00	**76.8±3.1Ma** MSWD=0.31, probability=0.99
DH9-10	**73.7±2.9Ma** MSWD=0.18, probability=0.99	**77.8±4.4Ma** MSWD=0.26, probability=0.96
DH13-2	**70.5±3.8Ma** MSWD=0.96, probability=0.43	**70.9±2.5Ma** MSWD=1.20, probability=0.24

4.4 ジルコンの物理化学条件に基づく隆起史・侵食史の初期条件の制約

CL 像に基づくジルコンの成長構造と U-Pb 年代より、両者の関連を 4.2 節で論じた。今回ジルコンのチタン濃度の定量を断念したため、結晶化温度の導出はできないが、Yuguchi et al. (2016) により、土岐花崗岩体の他地点から採取したジルコンの低輝度コア領域の結晶化温度は 760～910℃、オシラトリーゾーング領域では 690～850℃であることが分かっている。この値を引用すると、DH6-2 試料において低輝度コア領域の U-Pb 年代 75.0±3.3 Ma は 760～910℃に対応し、オシラトリーゾーング領域の U-Pb 年代 76.8±3.1 Ma は 690～850℃に対応する（表 4-4）。三つの試料において低輝度コア領域とオシラトリーゾーング領域の年代は誤差の範囲で一致する（図 4-8）。これらの年代が花崗岩質マグマの貫入・定置・結晶化を示しており、隆起史・侵食史の初期条件とみなすことができる（図 4-8）。チタン濃度の定量化を実現させることで、より詳細な温度時間履歴を決定することができ、隆起史・侵食史の初期条件のさらなる制約が可能になると考えられる。

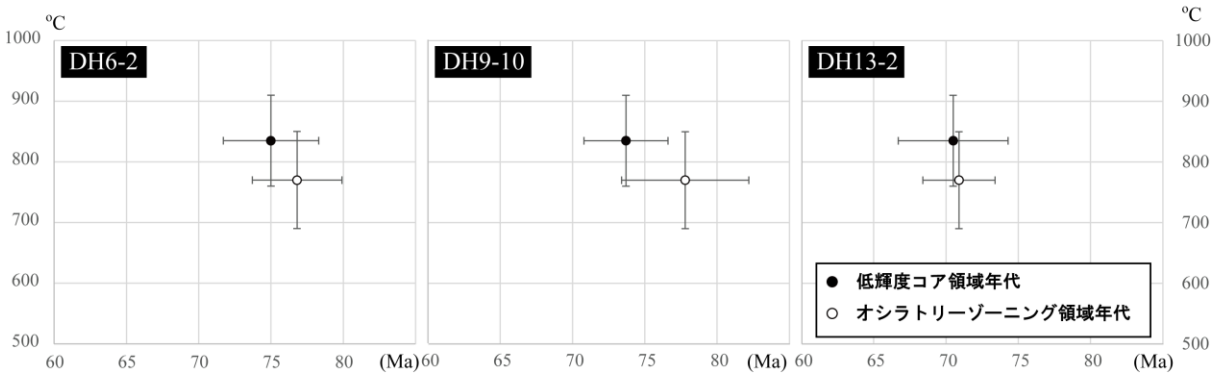


図 4-8 三つの試料（DH6-2, DH9-10, DH13-2）における
低輝度コア領域とオシラトリーゾーング領域の年代

5. まとめ

深成岩体を伴う地域の隆起量・侵食量の評価には地球年代学的（熱年代学的）な手法が有用である。この地球年代学的手法と岩石学的手法の融合により、マグマの貫入・定置に関する情報などの、熱年代学のみでは得られない、隆起史・侵食史の解明に資する地質情報の取得が可能となる。これらの手法の構築を通じて隆起量・侵食量評価に寄与する自然現象の影響評価手法の高度化に向けた整備を実施した。

平成 30 年度の共同研究では、ジルコンの U-Pb 年代に基づく結晶化年代、及びカソードルミネッセンス観察に基づく成長様式の解明を通じて、ジルコン成長の物理化学条件の決定手法の構築を行った。加えて、ジルコンの結晶化温度の決定に資するチタン濃度の定量手法の検討を実施した。研究対象としたジルコンは、DH6-2 の 6 粒子（DH6-2-1、-5、-6、-10、-15、-18）、DH9-10 の 6 粒子（DH9-10-1、-4、-10、-11、-23、-24）、DH13-2 の 5 粒子（DH13-2-3、-9、-17、-25、-27）である。SEM-CL 画像観察から、ジルコンの内部構造を三つの領域に分類した。一つは低輝度コア、二つ目はオシラトリーゾーニング領域、三つ目は外来性コアである。低輝度コア領域はオシラトリーゾーニング領域に取り囲まれており、低輝度コア領域はオシラトリーゾーニング領域よりも古い年代かつ高温条件で形成したことを示している。

今回のジルコン U-Pb 年代測定には分析照射径 20 μm、レーザー繰り返し周波数 10 Hz、エネルギー密度 4.0 J/cm^2、160 shots（10 秒分析）の分析条件を採用した。分析照射径が大きくなると、ジルコン粒子内で取得できるデータ数が減少するため、ジルコン成長を捉えるうえでの分解能は低下する。一方、照射径を小さくすると、データの誤差が大きくなるというデメリットを伴う。これらの効果を慎重に検討した結果、本研究では分析照射径 20 μm を選択した。低輝度コアとオシラトリーゾーニング領域から得られた年代については、多くのジルコン粒子において有意差が見られないため、U-Pb 年代 1 点ごとの評価は難しい。次に各試料の低輝度コア及びオシラトリーゾーニング領域の年代データから加重平均年代を算出した。それぞれの試料において、低輝度コアとオシラトリーゾーニング領域の加重平均年代には有意差が見られない。さらに、三つの試料間での有意差も認められない。このことは、試料を採取した地点での貫入・定置・結晶化年代に大きな相違がない可能性を示唆するものである。

ジルコンの結晶化温度を決定するために、LA-ICP-MS と EPMA を用いてチタン濃度の定量分析条件の検討を行った。両装置を用いて DH6-2、DH9-10、DH13-2 のジルコンに対しての最適な分析条件の検討を行ったが、平成 30 年度に使用した装置の分析条件では少なくとも 100 ppm 以下のチタン定量分析は困難であると考えられる。今後の課題として、LA-ICP-MS あるいは EPMA を用い、数 ppm から数十 ppm の範囲のチタン濃度を定量するための条件を見出す必要がある。

今回は、ジルコンのチタン濃度の定量を断念したため、各ジルコン粒子に対応する結晶化温度の導出はできないが、Yuguchi et al. (2016) により、土岐花崗岩体の他地点から採取したジルコンの低輝度コア領域の結晶化温度は 760～910℃、オシラトリーゾーング領域では 690～850℃であることが分かっている。この値を引用すると、それぞれの低輝度コア領域の U-Pb 年代は 760～910℃に対応し、オシラトリーゾーング領域の U-Pb 年代は 690～850℃に対応し、これらの年代が花崗岩質マグマの貫入・定置・結晶化を示している。これらの U-Pb 年代は隆起史・侵食史の初期条件とみなすことができる。今後は、チタン濃度の定量化を実現させることにより、より詳細な温度時間履歴を決定することができ、隆起史・侵食史の初期条件のさらなる制約が可能になると考えられる。

引用文献

末岡 茂, 堤 浩之, 田上高広, 低温領域の熱年代学の発展と日本の山地の隆起・削剥史研究への応用, 地球科学, vol.69, pp.47-70, 2015.

Yuguchi, T., Iwano, H., Kato, T., Sakata, S., Hattori, K., Hirata, T., Sueoka, S., Danhara, T., Ishibashi, M., Sasao, E. and Nishiyama, T., Zircon growth in a granitic pluton with specific mechanisms, crystallization temperatures and U-Pb ages: Implication to the 'spatiotemporal' formation process of the Toki granite, central Japan. Journal of Mineralogical and Petrological Sciences. vol. 111, pp.9-34, 2016.

Yuguchi, T., Sueoka, S., Iwano, H., Izumino, Y., Ishibashi, M., Danhara, T., Sasao, E., Hirata, T. and Nishiyama, T., Position-by-position cooling paths within the Toki granite, central Japan: Constraints and the relation with fracture population in a pluton. Journal of Asian Earth Sciences, vol. 169, pp.47-66, 2019.

地質環境長期安定性評価技術高度化開発委員会の開催実績

A.　第 1 回委員会開催実績
B.　第 2 回委員会開催実績

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
一般財団法人電力中央研究所

A. 第 1 回委員会開催実績

日　　時		平成 30 年 9 月 3 日（月）　13 時 00 分～17 時 00 分
場　　所		JAEA 東京事務所　第 1 会議室
審　議　事　項		平成 30 年度の計画について説明し、その適切性の観点から検討を行っていただく。
主なコメント	全体	研究対象とする深度と処分深度の関係（処分サイトへの影響）を各テーマにおいて明確にできるとよい。
		網羅的で抜け落ちがないようにテーマ設定されていると思われるが、各テーマは非常に個別的に感じる。カバーできていない部分や、見落としが生じていないか、事業を進める上で注意されたい。
		個々のテーマは基礎的な内容であり、成果が実際の処分事業にどの程度適用できるかはまだよく分からないが、5 年間で明確にしていくように留意されたい。
		個々のテーマで得られるデータがどのように一般化できるか現時点では判然としないが、一般化できる種は多いと思われるので今後に期待している。
		過去起こってきたことがこれから先も続いていくという前提で話をしているが、その前提について説明できるような根拠が示せるように研究を進めていく必要がある。
		時間スケールを語る上で、年代学・熱年代学は重要である。年代測定の結果、想定と異なる数字が出てくることはままあると思うが、その際に「使えない数値」で終わりではなく、その数値が出てくる理由について検討する基礎研究も行っていただきたい。事業への反映の観点からは、基礎研究に基づき、各手法の適用限界を明確にすることも重要である。
	火山・火成活動に関する調査・評価技術	本研究のスタート地点は、研究の現状を知ることだが、将来的に現在の火山・火成活動がどのように変化しうるのかを検討する事項があってもよい。
	深部流体に関する調査・評価技術	熱水活動は背弧側ではどこでも生じうるが、前弧側で生じるためには何らかの条件が必要であると考えられる。そうした条件を明らかにしていく必要がある。

主なコメント（続き）	深部流体に関する調査・評価技術（続き）	処分深度以深にあるものが将来的に処分環境に影響を与える可能性があるが、その時間・空間スケールが不明確である。それらを明確にすることを念頭に、今後、課題設定や研究計画の立案を進めてほしい。
		深部流体の研究については、移行経路に加え、移動速度に関する検討も重要である。
	地震・断層活動に関する調査・評価技術	九州南部の地殻変動は火山活動や熱水活動、深部流体など様々な要因の影響を被っており複雑である。だが、ポジティブに考えると、各要因による地殻変動への影響を分類・比較できる良好な事例研究対象地域といえる。
		活断層は見いだされていないが地震が発生している地域において、GNSS 観測の精度向上によって歪の集中をとらえ、活断層を推定できることを期待したい。地表で変形が見えにくい地域では、細かい断層が多く存在していてそれらが少しずつ運動することにより全体として撓むような変形をしている可能性がある。細かい断層を初めから把握することは難しいので、まずは地球物理学的手法により大まかに把握するというアプローチでもよい。詳細に調査する際には航空レーザー測量による詳細 DEM を用いると良い。
		成果をとりまとめる際に、処分地選定の各段階で必要となる調査の規模についても検討し、提示できると良い。
		研究実施の前提（既往研究で残っている課題や研究の必要性）と、それを踏まえた研究のゴール（高度化の達成目標）を明確にしながら研究開発を進めていただきたい。
		断層内物質の K-Ar 年代の評価方法を確立するためには、更なる基礎実験の蓄積が必要である。
		OSL 年代は、対象物質に光が当たることでリセットされる。これまで海外では、断層運動に伴い変位した被覆層である堆積物等に対して OSL 年代測定が適用されてきたが、日本ではそのような堆積物等が残っていないことが多いため、断層内物質に直接適用しようという機運がある。しかしその場合、光に曝されることにより年代がリセットされているわけではないため、断層破砕帯の中で OSL 信号がどのように変化するかといった事柄について基礎的な実験等が必要である。
		断層内物質の化学成分は母岩や水質の影響を強く受けていると思われるので、統計学的手法のみで活断層と非活断層とを切り分けることができるかどうか、十分に注意して検討されたい。
		地震に伴う湧水について、松代群発地震は全国的に見てもかなり特殊な事例なので、得られた成果のアウトカムを示す際に留意されたい。

主なコメント（続き）	隆起・侵食に関する調査・評価技術	侵食には気候変動が大きく影響する。これまでの 10 万年間に起こった事象をこれからの 10 万年間に直接当てはめてよいのか。将来の事象は過去とは全く違ったものになる可能性もある。各地形や地域別の最大の侵食速度は本研究から明らかになると思うので、処分地選定の際には、それを当てはめても支障ない地域を選んでいくというアプローチが現実的かもしれない。
		河川縦断形は気候の変化に伴って大きく変動する。安定大陸の 1 億年という時間スケールでは気候変動の影響はさほど大きくないかもしれないが、日本列島に適用する場合には考慮に入れた方がよい。
		河川縦断形の数値地形解析に基づく隆起量の復元は日本でも適用例があるが、間接的な手法のため信頼性は低いと思われるので、年代測定等に重点を置いた方がよい。
		熱年代は離散的なデータなので、モデリング等でその間をうまく繋げられるとよい。
		ダムの堆砂速度から求められた侵食速度は、実際よりも大きく見積もられている可能性がある。そのため、本事業においては、より長期のスケールでの侵食速度に関する情報が収集・整理できるとよい。
		基本的には、段丘がある隆起域と堆積物の厚い沈降域とでそれぞれ隆起・沈降速度を求め、両者を補間することにより境界域の隆起・沈降速度が推定される。限られたボーリングにより境界域をピンポイントで特定するのは難しいと思われるので、ボーリングコアの記載・分析のとりまとめにあたっては注意されたい。
		処分地の選定に役立てる研究であるという前提を踏まえると、隆起域と沈降域の境界域の移動に着目するよりも、境界域付近における堆積・削剥史を明らかにすることができればよい。
		日本の段丘編年はテフラに依存しすぎているため、他の手法の適用も含めてもう少しきちんと研究する必要がある。
		河成段丘の離水時期の年代指標としてフラッドロームが使える。
		段丘礫の風化の度合いは、ローカルな条件によって大きく変わる可能性がある。ローカルな影響をどれだけ被るかということや、風化が進みやすい条件を明らかにしていくとよい。
		海底段丘はこれまであまりきちんと研究されてこなかったが、かなり重要な研究対象であると考えられる。

	隆起・侵食に関する調査・評価技術（続き）	地表の高さを変化させるのは風化ではなく侵食である。岩石の風化速度と侵食速度とのリンクも将来的なテーマとして検討していただきたい。

B. 第 2 回委員会開催実績

日時及び場所		平成 31 年 3 月 7 日（木）13 時 00 分～15 時 30 分 徳島大学総合科学部 平成 31 年 3 月 8 日（金）13 時 00 分～16 時 00 分 金沢大学角間キャンパス 平成 31 年 3 月 15 日（金）13 時 30 分～16 時 00 分 地震予知総合研究振興会 平成 31 年 3 月 15 日（金）13 時 50 分～15 時 50 分 北海道大学総合博物館
審議事項		平成 30 年度の実施内容・成果について報告し、その適切性の観点から検討を行っていただく。
主なコメント	全体	最終目的を達成するために各項目に関して具体的に実施する内容及びその達成度（どこまで済んでいるか）がわかる進捗状況管理ダイアグラムを整備し、定期的に確認できると良い。
	火山・火成活動に関する調査・評価技術	流体分布の推定（地震波トモグラフィ）に必要な地震データの蓄積においては、P 波、S 波だけでなく、後続波の併用が有効である可能性がある。
		火山の分布と地下深部の低比抵抗体との位置関係についての一般的な傾向を議論するためには、MT 法の解析事例を今後とも増やしていくことが重要である。
	深部流体に関する調査・評価技術	溶存物質を用いた深部流体の起源の判別図は、全国で一様に扱うのは難しい可能性がある。スラブやマントルウェッジの組成はどこでも同じという訳ではない。
		沈み込み帯における地球化学的トレーサーとして近年 Li、B の同位体が用いられており、それらの測定についても検討してみると良い。
		粘土鉱物の圧密にかかわる実験的検討は事例が少ない。今後の進展に期待している。

主なコメント（続き）	深部流体に関する調査・評価技術（続き）	今後、本研究で取り扱われる元素比や同位体比が基礎実験（圧縮抽水実験）に基づいて解釈されると大変説得力が増すと感じる。同位体分別が大きく影響する軽元素同位体比（リチウムやヘリウムの同位体比）についてもこのような実験が適用できると良い。
		S 波異方性解析の結果と熱水脈の分布や走向傾斜の比較を行ってみると良い。
	地震・断層活動に関する調査・評価技術	リニアメントが密集する領域において、破砕帯の幅のデータがあれば、リニアメントの分布と比較してみると良い。
		侵食により、実際にずれが起こった位置とリニアメントは若干ずれているかもしれない。
		活断層と非活断層の分類の際には、母岩の種類によって物理的・化学的特徴が異なることが考えられるため、岩種ごとに検討するのも重要である。
		一つの断層帯にも複数の活動履歴があるので、石英水和層による年代測定手法の開発などの際は、そのような複雑な発達史についても考慮する必要がある。
		断層中の石英は変形しているものが多い。欠陥構造が水和層厚さに影響を与える可能性があるため、格子欠陥を多く持つ石英でも水熱実験を行う必要がある。
		水理学的影響については、湧水とは別に、水が枯れて長期間そのままになっている例についても調べてみると良いかもしれない。
	隆起・侵食に関する調査・評価技術	環流旧河谷のコア中の砂が、本当に現河床の砂と対応しているのか確認するため、粒度等の測定も行ってみると良い。
		環流旧河谷内において旧河床の河成堆積物が侵食で失われている可能性もあるが、そういったことも先行研究が無いので実際にやってみないとわからない。環流旧河谷の埋積発達史がわかるだけでも事業として大事な成果である。
		風化実験における μX 線 CT 観察について、CT 値から密度に換算して結果を比較すると良い。
		風化実験について、SEM 観察結果から、基質部の変質が効いていることが分かるので、XRD 分析の際には、水簸などで基質部を濃集させた試料で分析を行うと良い。粘土鉱物組成の変化などの詳しい情報が分かることが期待される。

	隆起・侵食に関する調査・評価技術（続き）	風化実験について、硝酸で溶かすなどの実験の方法が、風化を模擬できているのかどうか、風化とは異なる現象を再現している可能性がないか、既往研究なども参考によく確認する必要がある。

最新知見を踏まえた隆起・侵食データマップの整備
侵食速度データ一覧

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

1. 概要

ダム堆砂量データ、宇宙線生成核種法（TCN 法）及び熱年代法を用いた既往研究を収集し、侵食速度を算出した。各手法における侵食速度解析及び地形解析の結果を 2 章に示す。なお、侵食速度解析の具体的な作業手順については、報告書本文を参照されたい。

2. 侵食速度解析及び地形解析の結果

表 2-1 ダム堆砂量に基づく流域の平均侵食速度（1）

年鑑No.	貯水池名	集水面積 (km^2)	総貯水量 ($1000m^3$)	堆砂率	年堆砂量 ($1000m^3$)	年堆砂速度 (mm/年)	侵食速度 (mm/年)
14	富村	167.1746	2900	0.69	50.94	0.305	0.213
26	幌満川第3	141.5366	15380	0.391	20.39	0.144	0.101
42	岩知志	560.3868	5040	0.887	30.93	0.055	0.039
56	新中野（再）	17.3377	3340	0.049	5.35	0.309	0.216
166	大夕張（元）	434.0829	87205	0.211	373.48	0.86	0.602
192	下湯	62.3523	12600	0.037	15.88	0.255	0.178
196	川内	48.3013	16500	0.025	13.36	0.277	0.194
217	日向	21.1494	5700	0.008	2.41	0.114	0.08
226	綱取	82.5136	15000	0.015	6.56	0.08	0.056
233	入畑	38.9708	15400	0.092	71.3	1.83	1.281
254	御所	635.8766	65000	0.111	224.08	0.352	0.247
326	真野	66.1905	36200	0.007	10.09	0.152	0.107
365	目屋（元）	170.5534	39000	0.12	78.26	0.459	0.321
380	早口	48.1791	6550	0.14	20.3	0.421	0.295
386	萩形	85.9842	14950	0.126	37.86	0.44	0.308
403	岩見	73.5375	19300	0.042	25.99	0.353	0.247
446	木地山	62.3978	8200	0.177	22.32	0.358	0.25
466	高坂	68.5413	19050	0.142	60.56	0.884	0.618
467	白川	205.5423	50000	0.054	72.54	0.353	0.247
478	新鶴子	55.7849	31500	0.023	27.39	0.491	0.344
489	荒沢	163.3513	41420	0.112	78.49	0.48	0.336
494	温海川	31.2252	5700	0.075	15.37	0.492	0.345
513	早出川	83.0268	14900	0.125	42.89	0.517	0.362
518	日中	40.5912	24600	0.009	9.43	0.232	0.163
552	深山	53.9396	25965	0.048	27.1	0.502	0.352
563	東荒川	14.0925	6100	0.063	17.85	1.267	0.887
587	下久保	323.3288	130000	0.077	215.62	0.667	0.467
611	矢木沢	165.4433	204300	0.112	125.36	0.758	0.53
636	草木	256.0138	60500	0.089	122.61	0.479	0.335
637	相俣	110.7159	25000	0.069	29.27	0.264	0.185
709	小河内	259.3249	189100	0.033	123.77	0.477	0.334
730	三保	156.7663	64900	0.145	251.51	1.604	1.123
737	荒川	71.7387	10800	0.063	23.41	0.326	0.228
738	塩川	85.5337	11500	0.028	15.36	0.18	0.126
741	広瀬	75.3447	14300	0.106	15.99	0.212	0.149
742	大門	52.4736	3600	0.056	6.43	0.123	0.086
749	雨畑	98.3619	13650	1.185	258.19	2.625	1.837
750	柿元	33.3347	7622	0.233	30.48	0.914	0.64
757	赤石	47.1697	3090	0.564	55.46	1.176	0.823
762	畑薙第一	321.5839	107400	0.578	1040.5	3.236	2.265
802	水窪	56.4837	29981	0.325	194.69	3.447	2.413
902	高根第一	124.5974	43568	0.076	64.29	0.516	0.361
955	加治川治水	89.7579	22500	0.087	54.66	0.609	0.426
959	内の倉	48.3479	24800	0.046	42.14	0.872	0.61
962	奥裾花	63.9942	5400	0.521	39.17	0.612	0.428
970	高瀬	130.2498	76200	0.297	565.49	4.342	3.039
989	奈川渡	373.9307	123000	0.11	176.38	0.472	0.33
1000	刈谷田川	24.1048	4450	0.065	8.26	0.343	0.24
1019	二居	107.3782	18300	0.103	42.57	0.396	0.278
1097	朝日小川	28.9471	5280	0.11	18.53	0.64	0.448

表 2-1 ダム堆砂量に基づく流域の平均侵食速度（2）

年鑑No.	貯水池名	集水面積 (km^2)	総貯水量 ($1000m^3$)	堆砂率	年堆砂量 ($1000m^3$)	年堆砂速度 (mm/年)	侵食速度 (mm/年)
1108	上市川第2	39.5232	7800	0.246	49.25	1.246	0.872
1131	熊野川	39.6646	9100	0.068	21.96	0.554	0.388
1138	室牧	84.0829	17000	0.167	60.88	0.724	0.507
1147	境川	37.5331	59900	0.026	78.02	2.079	1.455
1165	和田川	29.8741	3070	0.129	7.86	0.263	0.184
1168	刀利	45.5949	31400	0.066	26.16	0.574	0.402
1172	臼中	13.5945	6950	0.038	6.65	0.489	0.342
1201	小屋	12.7147	3050	0.025	3.09	0.243	0.17
1230	犀川	56.1564	14300	0.118	28.54	0.508	0.356
1234	内川	34.9362	9567	0.055	10	0.286	0.2
1242	大日川	56.3785	27200	0.028	16.03	0.284	0.199
1254	龍ヶ鼻	30.8545	10200	0.028	11.58	0.375	0.263
1308	三瀬谷	314.4141	13100	0.373	93.64	0.298	0.208
1315	宮川	126.8121	70500	0.072	80.6	0.636	0.445
1341	椿山	395.1391	49000	0.141	203.22	0.514	0.36
1346	二川	229.3382	30100	0.207	104.5	0.456	0.319
1436	布目	69.9861	17300	0.035	24.93	0.356	0.249
1476	青蓮寺	102.1943	27200	0.076	83.5	0.817	0.572
1486	比奈知	75.6087	21366	0.048	57.01	0.754	0.528
1565	長谷	15.0163	9428	0.004	2.23	0.149	0.104
1643	布部	69.5158	7100	0.221	17.44	0.251	0.176
1648	三成	117.3022	3438	0.637	18.85	0.161	0.112
1684	浜田（元）※	32.1886	5000	0.071	9.03	0.281	0.196
1758	黒木	49.0582	6000	0.111	16.45	0.335	0.235
1782	津川	17.7023	5999	0.01	2.82	0.159	0.112
1788	久賀	62.3502	4400	0.076	7.04	0.113	0.079
1810	旭川	885.0227	57382	0.06	30.46	0.034	0.024
1854	千屋	88.7045	28000	0.025	21.81	0.246	0.172
1864	河本	226.066	17350	0.187	23.92	0.106	0.074
1965	魚切	38.8783	8460	0.059	12.52	0.322	0.225
2042	富郷	97.9754	52000	0.016	44.67	0.456	0.319
2060	別子	15.17	5628	0.081	8.56	0.564	0.395
2062	正木	94.1566	15671	0.13	52.49	0.557	0.39
2063	小見野々	268.7316	16750	0.558	163.04	0.607	0.425
2080	魚梁瀬	100.5793	107870	0.095	177.17	1.761	1.233
2082	平鍋	219.9838	4210	0.542	24.867	0.113	0.079
2104	鏡	80.2919	8310	0.126	20.54	0.256	0.179
2107	面河第3	610.4813	6218	0.345	74.24	0.122	0.085
2112	津賀	378.5288	19300	0.254	40.08	0.106	0.074
2123	坂本	83.1348	3780	0.013	21.66	0.261	0.182
2197	黒瀬	99.7542	36000	0.116	114.26	1.145	0.802
2303	芦川	119.0975	27500	0.052	25.98	0.218	0.153
2337	北川	180.0414	41000	0.141	40.86	0.227	0.159
2342	祝子	45.5637	5774	0.175	22.72	0.499	0.349
2351	諸塚	40.4642	3484	0.306	15.52	0.384	0.268
2368	立花	39.4102	10000	0.156	24.36	0.618	0.433
2379	岩瀬	357.7943	57000	0.154	208.54	0.583	0.408
2383	綾南	86.5147	38000	0.057	37.32	0.431	0.302
2384	田代八重	131.6927	19270	0.121	128.22	0.974	0.682
2503	日向神	83.5824	27900	0.052	22.11	0.265	0.185

※印は 1967 年の最大堆砂量が前後の値よりも 1000 倍大きいので、このデータを除外して堆砂率を計算した。

表 2-2　TCN 法に基づく流域の平均侵食速度（1）

No.	試料名	試料位置(WGS84)		宇宙線核種	^{10}Beによる侵食速度		^{26}Alによる侵食速度		標高	地形特徴				文献番号
		緯度	経度	の種類	mm/年	1σ	Mm/年	1σ	(m)	流域面積(km^2)	平均標高(m)	高度分散量(m)	平均傾斜(度)	
38	RK-4	34.729250	135.219167	^{10}Be	0.60	0.09	—	—	213	1.118	511.0	79.1	34.3	3
39	RK-5	34.743111	135.247944	^{10}Be	0.50	0.08	—	—	302	1.114	632.8	74.8	28.7	3
40	RK-6	34.754389	135.258000	^{10}Be	0.80	0.18	—	—	410	0.708	651.5	78.6	32.8	3
41	RK-7	34.772083	135.281528	^{10}Be	0.37	0.05	—	—	500	0.523	693.6	70.3	30.9	3
42	AB-10	37.298083	140.662944	^{10}Be	0.09	0.01	—	—	440	4.148	598.2	51.4	20.1	3
43	AB-12	37.286556	140.653722	^{10}Be	0.08	0.01	—	—	450	0.686	534.4	34.7	20.3	3
44	AB-13	37.272444	140.654111	^{10}Be	0.08	0.01	—	—	450	0.516	510.1	28.8	20.6	3
45	AB-14	37.258444	140.659389	^{10}Be	0.10	0.01	—	—	446	0.637	492.1	23.8	19.5	3
46	AB-15	37.272444	140.721833	^{10}Be	0.08	0.01	—	—	553	1.005	637.5	32.1	18.3	3
47	AB-20	37.292583	140.760139	^{10}Be	0.12	0.02	—	—	527	0.939	630.6	26.8	15.0	3
48	AB-21	37.319444	140.790194	^{10}Be	0.10	0.01	—	—	456	5.261	597.9	28.8	16.0	3
49	AB-22	37.300528	140.834333	^{10}Be	0.10	0.01	—	—	404	0.922	512.2	31.8	20.7	3
50	AB-23	37.267778	140.832167	^{10}Be	0.08	0.01	—	—	469	1.269	614.3	36.7	19.7	3
51	TK-1	36.519751	137.781236	^{10}Be,^{26}Al	0.45	0.06	0.36	0.06	895	2.209	1263.6	111.9	36.4	4
52	TK-2	36.493366	137.739737	^{10}Be,^{26}Al	1.25	0.21	1.49	0.24	1008	1.690	1477.3	143.6	44.6	4
53	TK-3	36.493953	137.723268	^{10}Be,^{26}Al	0.48	0.06	0.51	0.07	1059	1.717	1748.3	189.7	43.5	4
54	TK-4	36.477494	137.678379	^{26}Al	—	—	6.91	1.75	1313	4.285	2092.8	165.6	39.9	4
55	TK-5	36.477341	137.683743	^{26}Al	—	—	6.05	1.26	1280	7.311	1913.5	166.6	42.5	4
71	ABK-R1	37.431000	140.754000	^{10}Be,^{26}Al	0.12	0.01	0.11	0.02	463	7.426	647.2	49.8	17.9	5
72	ABK-R3	37.450000	140.807000	^{10}Be,^{26}Al	0.17	0.02	0.18	0.03	339	104.775	556.3	34.3	17.2	5
73	Be-1	37.424400	140.778100	^{10}Be	0.12	0.00	—	—	559	114.433	547.9	33.6	17.3	6
74	Be-2	37.312000	140.914500	^{10}Be	0.19	0.01	—	—	455	24.138	449.8	53.0	25.9	6
75	Be-3	37.350400	140.884500	^{10}Be	0.12	0.00	—	—	510	32.394	488.5	39.3	22.0	6
76	Be-4	37.332800	140.780100	^{10}Be	0.13	0.00	—	—	623	138.861	624.9	36.8	16.4	6
77	Be-5	37.407100	140.887700	^{10}Be	0.13	0.00	—	—	487	15.737	492.2	43.6	23.6	6
78	Be-6	37.669000	140.730300	^{10}Be	0.08	0.00	—	—	539	101.167	536.8	30.8	14.0	6
79	Be-11	37.454800	140.795500	^{10}Be	0.12	0.00	—	—	524	226.652	524.8	40.3	19.4	6
80	Be-14	37.652100	140.757000	^{10}Be	0.08	0.00	—	—	526	174.730	524.2	37.4	16.6	6

表 2-2　TCN 法に基づく流域の平均侵食速度（2）

No.	試料名	試料位置(WGS84)		宇宙線核種	^{10}Beによる侵食速度		^{26}Alによる侵食速度		標高	地形特徴				文献番号
		緯度	経度	の種類	mm/年	1σ	Mm/年	1σ	(m)	流域面積(km^2)	平均標高(m)	高度分散量(m)	平均傾斜(度)	
38	RK-4	34.729250	135.219167	^{10}Be	0.60	0.09	—	—	213	1.118	511.0	79.1	34.3	3
39	RK-5	34.743111	135.247944	^{10}Be	0.50	0.08	—	—	302	1.114	632.8	74.8	28.7	3
40	RK-6	34.754389	135.258000	^{10}Be	0.80	0.18	—	—	410	0.708	651.5	78.6	32.8	3
41	RK-7	34.772083	135.281528	^{10}Be	0.37	0.05	—	—	500	0.523	693.6	70.3	30.9	3
42	AB-10	37.298083	140.662944	^{10}Be	0.09	0.01	—	—	440	4.148	598.2	51.4	20.1	3
43	AB-12	37.286556	140.653722	^{10}Be	0.08	0.01	—	—	450	0.686	534.4	34.7	20.3	3
44	AB-13	37.272444	140.654111	^{10}Be	0.08	0.01	—	—	450	0.516	510.1	28.8	20.6	3
45	AB-14	37.258444	140.659389	^{10}Be	0.10	0.01	—	—	446	0.637	492.1	23.8	19.5	3
46	AB-15	37.272444	140.721833	^{10}Be	0.08	0.01	—	—	553	1.005	637.5	32.1	18.3	3
47	AB-20	37.292583	140.760139	^{10}Be	0.12	0.02	—	—	527	0.939	630.6	26.8	15.0	3
48	AB-21	37.319444	140.790194	^{10}Be	0.10	0.01	—	—	456	5.261	597.9	28.8	16.0	3
49	AB-22	37.300528	140.834333	^{10}Be	0.10	0.01	—	—	404	0.922	512.2	31.8	20.7	3
50	AB-23	37.267778	140.832167	^{10}Be	0.08	0.01	—	—	469	1.269	614.3	36.7	19.7	3
51	TK-1	36.519751	137.781236	^{10}Be,^{26}Al	0.45	0.06	0.36	0.06	895	2.209	1263.6	111.9	36.4	4
52	TK-2	36.493366	137.739737	^{10}Be,^{26}Al	1.25	0.21	1.49	0.24	1008	1.690	1477.3	143.6	44.6	4
53	TK-3	36.493953	137.723268	^{10}Be,^{26}Al	0.48	0.06	0.51	0.07	1059	1.717	1748.3	189.7	43.5	4
54	TK-4	36.477494	137.678379	^{26}Al	—	—	6.91	1.75	1313	4.285	2092.8	165.6	39.9	4
55	TK-5	36.477341	137.683743	^{26}Al	—	—	6.05	1.26	1280	7.311	1913.5	166.6	42.5	4
71	ABK-R1	37.431000	140.754000	^{10}Be,^{26}Al	0.12	0.01	0.11	0.02	463	7.426	647.2	49.8	17.9	5
72	ABK-R3	37.450000	140.807000	^{10}Be,^{26}Al	0.17	0.02	0.18	0.03	339	104.775	556.3	34.3	17.2	5
73	Be-1	37.424400	140.778100	^{10}Be	0.12	0.00	—	—	559	114.433	547.9	33.6	17.3	6
74	Be-2	37.312000	140.914500	^{10}Be	0.19	0.01	—	—	455	24.138	449.8	53.0	25.9	6
75	Be-3	37.350400	140.884500	^{10}Be	0.12	0.00	—	—	510	32.394	488.5	39.3	22.0	6
76	Be-4	37.332800	140.780100	^{10}Be	0.13	0.00	—	—	623	138.861	624.9	36.8	16.4	6
77	Be-5	37.407100	140.887700	^{10}Be	0.13	0.00	—	—	487	15.737	492.2	43.6	23.6	6
78	Be-6	37.669000	140.730300	^{10}Be	0.08	0.00	—	—	539	101.167	536.8	30.8	14.0	6
79	Be-11	37.454800	140.795500	^{10}Be	0.12	0.00	—	—	524	226.652	524.8	40.3	19.4	6
80	Be-14	37.652100	140.757000	^{10}Be	0.08	0.00	—	—	526	174.730	524.2	37.4	16.6	6

表 2-2　TCN 法に基づく流域の平均侵食速度（3）

＊引用文献

1, Korup O., Hayakawa Y., Alexandru T. C., Matsushi Y., Saito H., Oguchi T. and Matsuzaki H., Japan's sediment flux to the Pacific Ocean revisited, Earth-Science Reviews, vol.135, pp.1-16, 2014.

2, Matsushi Y. and Matsuzaki H., Denudation rates and threshold slope in a granitic watershed, central Japan, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, B268, pp.1201-1204, 2010.

3, 松四雄騎, 松崎浩之, 牧野久識, 宇宙線生成核種による流域削剥速度の決定と地形方程式の検証, 地形, vol.35(2), pp.165-185, 2014.

4, 松四雄騎, 松崎浩之, 千木良雅弘, 宇宙線生成核種による山地流域からの長期的土砂生産量の推定, 応用地質, vol.54(6), pp.272-280, 2014.

5, Nakamura A., YokoyamaY., Shiroya K., Miyairi Y. and Matsuzaki H., Direct comparison of site-specific and basin-scale denudation rate estimation by in situ cosmogenic nuclides: an example from the Abukuma Mountains, Japan, Progress in Earth and Planetary Science, 1:9, P.11, 2014.

6, Regalla C., Cenozoic forearc tectonics in northeastern japan: relationships between outer forearc subsidence and plate boundary kinematics, PhD thesis, Pennsylvania State University, P.207, 2013.

表 2-3　熱年代データに基づく平均侵食速度（阿武隈山地と飛騨山地の事例）

No.	試料名	フィッション・トラック年代				(U-Th)/He年代				地温勾配（℃/km）	地表面温度（℃）	被り厚補正	閉鎖深度(m)								侵食速度(mm/年)							
		アパタイト		ジルコン		アパタイト		ジルコン					AFT		ZFT		AHe		ZHe		AFT		ZFT		AHe		ZHe	
		Ma	±1σ	Ma	±1σ	Ma	±1σ	Ma	±1σ				105℃	±15℃	280℃	±0℃	67.5℃	±12.5℃	180℃	±20℃	AFT	±1σ	ZFT	±1σ	AHE	±1σ	ZHE	±1σ
1	KGRMj	51.8	6.5	70.4	2.0	–	–	–	–	30.078	21.0	0	2793	499	8611	0	–	–	–	–	0.0539	0.0118	0.1223	0.0035	–	–	–	–
2	KGRSh	45	4.6	59.6	3.4	–	–	–	–	29.629	18.9	0	2905	506	8812	0	–	–	–	–	0.0646	0.013	0.1478	0.0084	–	–	–	–
3	KGRSh2	33.7	4.0	58.4	2.1	–	–	–	–	29.629	19.0	0	2901	506	8808	0	–	–	–	–	0.0861	0.0182	0.1508	0.0054	–	–	–	–
4	KGRK1	20.8	3.3	53	1.9	–	–	–	–	24.724	21.5	0	3377	607	10455	0	–	–	–	–	0.1624	0.0389	0.1973	0.0071	–	–	–	–
5	KGRK2	–	–	–	–	–	–	–	–	26.349	22.0	0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
6	KGRK3	30.8	4.5	58.1	3.3	–	–	–	–	26.014	22.0	0	3189	577	9916	0	–	–	–	–	0.1035	0.0241	0.1707	0.0097	–	–	–	–
7	IID1	4.6	0.4	–	–	3.4	0.7	–	–	58.825	19.6	0	1452	255	–	–	814	212	–	–	0.3156	0.0619	–	–	0.2394	0.0796	–	–
8	A02ST01	66	4.4	–	–	49.6	1.5	–	–	58.061	22.1	0	1428	258	–	–	782	215	–	–	0.0216	0.0042	–	–	0.0158	0.0044	–	–
9	A02ST02	–	–	–	–	64.3	4.8	–	–	39.576	20.9	0	–	–	–	–	1178	316	–	–	–	–	–	–	0.0183	0.0051	–	–
10	A02ST03	79.5	8	–	–	57	16.8	–	–	49.172	19.9	0	1731	305	–	–	968	254	–	–	0.0218	0.0044	–	–	0.017	0.0067	–	–
11	A02ST04	29.8	7.7	–	–	9.9	1.3	39.6	3.8	89.12	20.9	0	943	168	–	–	522	140	1785	224	0.0317	0.0099	–	–	0.0528	0.0158	0.0451	0.0071
12	A02ST05	5.8	1.0	–	–	1.5	0.0	14.8	3.9	41.896	19.1	0	2050	358	–	–	1155	298	3840	477	0.3534	0.0867	–	–	0.7697	0.1989	0.2594	0.0756
13	A02ST06	5.5	1.5	–	–	2.3	2.3	31	3.8	47.63	19.7	0	1792	315	–	–	1004	262	3366	420	0.3258	0.1057	–	–	0.4367	0.4514	0.1086	0.019
14	A02ST07	19.1	2.4	–	–	10.3	0.3	27.2	1.7	45.758	18.9	0	1881	328	–	–	1061	273	3520	437	0.0985	0.0212	–	–	0.103	0.0267	0.1294	0.018
15	A02ST08	13.4	3.4	–	–	6.8	0.4	55.5	4.8	52.059	20.7	0	1619	288	–	–	898	240	3059	384	0.1208	0.0374	–	–	0.1321	0.0362	0.0551	0.0084
16	A02ST09	16.8	9.7	–	–	9.6	1.6	11	1.2	45.841	18.6	0	1885	327	–	–	1067	273	3522	436	0.1122	0.0677	–	–	0.1112	0.0339	0.3201	0.0528
17	A02ST12	–	–	–	–	12.3	3.1	–	–	42.472	20.3	0	–	–	–	–	1112	294	-	-	-	-	–	–	0.0904	0.033	-	-
18	A02ST13	10.1	2.9	–	–	5.6	1.3	27.9	12.5	33.858	20.6	0	2494	443	–	–	1386	369	4709	591	0.2469	0.0834	–	–	0.2475	0.0875	0.1688	0.0785
19	A02ST15	17.6	6.6	–	–	10.5	2.7	30	2.4	32.252	19.8	0	2641	465	–	–	1479	388	4967	620	0.1501	0.0622	–	–	0.1408	0.0517	0.1656	0.0246
20	CK7	–	–	93.4	3.6	–	–	–	–	6.603	17.3	0	–	–	39785	0	–	–	–	–	–	–	0.426	0.0164	–	–	–	–
21	CK11	100	4.9	90.1	3.2	–	–	–	–	17.508	16.9	0	5032	857	15027	0	–	–	–	–	0.0503	0.0089	0.1668	0.0059	–	–	–	–
22	CK13	88.6	3.5	–	–	–	–	–	–	32.289	15.5	0	2771	465	–	–	–	–	–	–	0.0313	0.0054	–	–	–	–	–	–
23	CK30	–	–	–	–	–	–	–	–	7.589	18.4	0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
24	CK32	–	–	–	–	–	–	–	–	7.589	18.6	0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
25	CK53	87.1	4.1	–	–	–	–	–	–	19.762	18.3	0	4386	759	–	–	–	–	–	–	0.0504	0.009	–	–	–	–	–	–
26	KTK1	–	–	–	–	–	–	–	–	29.082	20.2	0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
27	KTK2	–	–	–	–	–	–	–	–	22.355	19.6	0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
28	KTK3	–	–	–	–	–	–	–	–	19.762	18.3	0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

表 2-4 事例山地流域（10 山地）の k_{sn} と χ 値（1）

山地	河川数	ID	河川長（km）	χ値	K_{sn}					χ値 x1000	χ値 のσ
					Seg.1	Seg.2	Seg.3	Seg.4	Seg.5		
全域	139	—	40.3	0.0522	—	—	—	—	—	50.6	15.7
北上山地	12	101	55.7	0.0339	23.8	47.2	—		—	30.8	7.4
		102	88.5	0.0406	10.7	25.3	53.1	45.9	—		
		103	93	0.0341	25.3	47.9	—	—	—		
		104	28.5	0.04	37.6	47.7	—	—	—		
		105	50	0.0272	40.4	50.5	36.3	—	—		
		106	46.4	0.0247	27.4	33.2	26	—	—		
		107	86.8	0.0268	33.2	26.9	—	—	—		
		108	40.3	0.0339	81.4	51.1	—	—	—		
		109	38.1	0.0381	63.7	57.2	—	—	—		
		110	58.1	0.0286	34.6	34	49.7	—	—		
		111	21.6	0.0147	34.5	14	—	—	—		
		112	29.4	0.0269	33.1	27.9	—	—	—		
朝日・飯豊山地	7	201	26	0.044	70.6	57.2	—	—	—	46.7	12
		202	36.8	0.0426	76.2	75.3	22.7	—	—		
		203	38.9	0.0648	86.3	116.8	31.8	—	—		
		204	37.9	0.0371	23.7	71	56.6	39.8	—		
		205	75.1	0.0293	80.1	56.1	—	—	—		
		206	40.9	0.0549	75	86.8	15.1	—	—		
		207	26.6	0.0539	80.1	76.6	—	—	—		
阿武隈山地	17	301	25.8	0.0302	10.3	24.9	23.5	67.5	—	24	6
		302	38	0.0229	12.2	15.9	9.6	40.7	—		
		303	40.5	0.0216	5.4	7.1	7	6.7	77.8		
		304	22.8	0.0297	30.8	17.1	36	—	—		
		305	40.1	0.0305	12.3	17.1	35.6	—	—		
		306	29	0.0305	36.7	27	25.9	42.4	—		
		307	45.3	0.0253	12	30.3	8	6.6	45.9		
		308	30	0.0247	10.4	5.3	17	31.1	—		
		309	23.8	0.024	6.2	17.4	16.4	33.3	—		
		310	55.7	0.0279	3.5	14.9	43.2	—	—		
		311	36.1	0.0114	8.4	5.3	5.2	21.9	—		
		312	64.2	0.0182	9.8	26	16.3	—	—		
		313	42.8	0.0184	17	16.7	—	—	—		
		314	35.6	0.0184	12.9	10.6	23.7	—	—		
		315	34.9	0.0338	7.4	11.9	15	27.9	96.8		
		316	39.8	0.0231	38	51.4	21.9	—	—		
		317	30.7	0.0174	23.9	9.4	8	29.3	—		

表 2-4 事例山地流域（10 山地）の k_{sn} と χ 値（2）

山地	河川数	ID	河川長（km）	χ値	K_{sn}					χ値 x1000	χ値 のσ
					Seg.1	Seg.2	Seg.3	Seg.4	Seg.5		
関東山地	11	401	62.7	0.0268	59.7	109.2	21.5	—	—	60.9	23
		402	85.3	0.0542	106.9	81.9	—	—	—		
		403	70.5	0.0569	69.8	112.9	36.7	—	—		
		404	42.1	0.0347	56	60.6	—	—	—		
		405	89.7	0.0831	115.5	—	—	—	—		
		406	34.7	0.0882	59.1	87	93.7	100.1	—		
		407	33.5	0.0955	91.2	—	—	—	—		
		408	29.1	0.0787	33.6	64.8	112	—	—		
		409	28.9	0.0381	58.3	62	42.1	—	—		
		410	28.5	0.0636	31.7	77.8	108.4	52.8	—		
		411	43.2	0.0507	64.9	116.6	53.3	63.4	—		
赤石山地	17	501	33.2	0.0775	94.9	106.6	—	—	—	64.1	26
		502	79.4	0.0344	63.5	55.8	—	—	—		
		503	38.3	0.0608	57.1	93.3	—	—	—		
		504	47.1	0.0547	42.6	89.5	75.9	—	—		
		505	28	0.0464	21.5	25.7	80.4	37.2	—		
		506	163	0.0554	63.3	108.2	61.7	—	—		
		507	237.9	0.0809	92.9	111.8	—	—	—		
		508	43.3	0.1036	101.7	148.9	—	—	—		
		509	43.9	0.0523	19.6	43.5	84.5	—	—		
		510	32.8	0.0557	91.7	117.6	69	—	—		
		511	16.7	0.0534	4.8	4.3	36.4	91.9	—		
		512	58	0.0824	76.2	113.1	—	—	—		
		513	22.6	0.1257	156.4	168.5	—	—	—		
		514	25.4	0.0875	44.3	128.1	—	—	—		
		515	12.2	0.0538	75.7	101.3	60.3	—	—		
		516	17.4	0.0202	26.4	38.2	28.2	26.5	—		
		517	52.8	0.0448	109.3	29.1	—	—	—		
木曽山地	13	601	13.2	0.1209	31.8	33.6	177.6	—	—	91.8	22.9
		602	11.4	0.1144	160.5	—	—	—	—		
		603	14.6	0.1056	98.6	157.6	—	—	—		
		604	23.1	0.0736	43.4	89.6	109.5	—	—		
		605	29	0.0649	35.3	99.2	85.7	—	—		
		606	16.6	0.0518	33	64.9	—	—	—		
		607	15.5	0.0681	72.4	101	—	—	—		
		608	25.8	0.0981	63.4	137.4	—	—	—		
		609	10.5	0.1183	168.8	—	—	—	—		
		610	14.5	0.0773	110.7	—	—	—	—		
		611	19.8	0.0942	63.4	139.3	—	—	—		
		612	11.8	0.0905	64	123.8	—	—	—		
		613	13.8	0.1152	66.1	147.9	—	—	—		

表 2-4 事例山地流域（10 山地）の k_{sn} と χ 値（3）

山地	河川数	ID	河川長（km）	χ値	K_{sn}					χ値 x1000	χ値 のσ
					Seg.1	Seg.2	Seg.3	Seg.4	Seg.5		
飛騨山地	20	701	14.4	0.1065	54.5	122.4	146.3	—	—	91.8	21.3
		702	35.2	0.1074	28.1	117.2	158.2	—	—		
		703	16	0.0857	17.4	65.2	125.6	91.4	—		
		704	9.2	0.1202	112.8	163.9	—	—	—		
		705	13.4	0.0828	68.3	117.5	—	—	—		
		706	15.6	0.1203	75	159.4	—	—	—		
		707	36.9	0.0894	79.4	136.5	121.3	—	—		
		708	37.01	0.0602	113	38.9	90.2	—	—		
		709	32.9	0.0891	73.6	123	135	—	—		
		710	30.5	0.104	18.1	115.2	—	—	—		
		711	20.5	0.0756	69.5	120.6	80.1	67.1	147.6		
		712	29.6	0.1276	49	127.6	—	—	—		
		713	23.8	0.095	107.3	149.5	—	—	—		
		714	24.2	0.0966	130.8	129.7	—	—	—		
		715	17.2	0.0501	56.7	40.4	105.7	—	—		
		716	13.1	0.075	40.6	64.3	104.8	99.7	—		
		717	85.6	0.0739	106.2	92.1	—	—	—		
		718	19.1	0.0881	79.7	136.1	—	—	—		
		719	22.8	0.0683	117	114.5	67	—	—		
		720	20.2	0.1192	30.9	142.1	—	—	—		
鈴鹿山地	17	801	7	0.0331	29.7	54.8	43.6	—	—	32	11.7
		802	7	0.048	41.4	58.4	72.4	—	—		
		803	6.6	0.0484	26.4	52.5	77.4	—	—		
		804	20.4	0.058	49.6	78.8	—	—	—		
		805	10.8	0.0263	25.7	37.4	23.5	—	—		
		806	15.5	0.0207	12.6	36.8	23.9	—	—		
		807	14.9	0.0337	8.5	17	42.5	49.5	23.1		
		808	27.8	0.0372	67.6	35.8	—	—	—		
		809	27.5	0.0187	21.7	21.1	—	—	—		
		810	4	0.0262	41.9	38.2	22.5	—	—		
		811	37.1	0.0352	28.2	49.9	43.7	—	—		
		812	18.6	0.0302	4.1	38.8	—	—	—		
		813	14.4	0.026	18.6	28.5	26	34.3	—		
		814	16.6	0.0372	79.4	61.8	28	—	—		
		815	23.5	0.0297	34.8	20.7	48.5	—	—		
		816	34.4	0.0115	8.5	28.4	14.7	15.8	—		
		817	12	0.0241	11.8	20.3	31.6	22.5	—		
吉備高原	10	901	54.5	0.0324	6.8	11.4	48	44.6	—	28.1	7.4
		902	36.9	0.0252	35.3	30	—	—	—		
		903	42	0.0388	24.2	41.7	53.2	—	—		
		904	59.5	0.0379	24.2	55.1	33.6	—	—		
		905	106.3	0.0312	23.7	52	20	—	—		
		906	134.9	0.0221	25.9	28.3	27.7	—	—		
		907	40.5	0.0169	7.1	23.1	—	—	—		
		908	96.8	0.0221	18.3	9.2	28.9	—	—		
		909	115.3	0.0226	25.9	28.3	27.8	—	—		
		910	26.8	0.0322	33.8	33	42.2	—	—		

表 2-4 事例山地流域（10 山地）の k_{sn} と χ 値（4）

山地	河川数	ID	河川長（km）	χ値	K_{sn}					χ値 x1000	χ値 のσ
					Seg.1	Seg.2	Seg.3	Seg.4	Seg.5		
九州山地	15	1001	39.3	0.0112	38.4	14.7	12.4	10.9	—	35.4	19.8
		1002	37.4	0.0127	19.3	7	7.4	4.1	30.8		
		1003	35	0.0737	50.1	48.9	65.8	—	—		
		1004	24.8	0.0471	47.2	116.7	28.4	—	—		
		1005	102.5	0.0353	73.6	53.3	47	—	—		
		1006	22.8	0.077	36.3	103.6	—	—	—		
		1007	50.7	0.0222	42	—	—	—	—		
		1008	74.9	0.0253	70	76.3	34.2	32.2	—		
		1009	19.2	0.0362	63.5	—	—	—	—		
		1010	107.5	0.0432	70.7	36.6	—	—	—		
		1011	73	0.0379	49.7	58.5	21.2	—	—		
		1012	34.9	0.0296	36.7	37.1	—	—	—		
		1013	52.8	0.027	37.6	52.7	40.4	27.1	47.8		
		1014	86.6	0.0113	28.6	11.3	15.4	—	—		
		1015	31.4	0.0419	83.5	88.4	27.4	64.8	—		

A. 岩石風化模擬実験に係るデータ集

一般財団法人電力中央研究所

目　次

1. 岩石風化模擬実験に係る文献収集 127
1.1 収集文献一覧 127
2. 岩石風化模擬実験の分析結果 135
2.1 試料性状 135
2.2 光学顕微鏡観察 138
2.3 目視観察 144
2.4 X 線分析顕微鏡測定 148
2.5 マイクロフォーカス X 線 CT スキャン 171
2.6 分光測色 179
2.7 SEM 観察 183
2.8 XRD 分析 247
2.9 水銀ポロシメータ測定 260
2.10 溶液の ICP-OES 分析 273

表　目　次

表 1.1-1　収集文献の一覧(1) 127
表 1.1-2　収集文献の一覧(2) 128
表 1.1-3　収集文献の一覧(3) 129
表 1.1-4　収集文献の一覧(4) 130
表 1.1-5　収集文献の一覧(5) 131
表 1.1-6　収集文献の一覧(6) 132
表 1.1-7　収集文献の一覧(7) 133
表 1.1-8　収集文献の一覧(8) 134
表 2.1-1　浸漬前の試料の寸法・重量・密度の測定結果 135
表 2.1-2　浸漬後の試料の寸法・重量・密度の測定結果 135
表 2.4-1　X 線分析顕微鏡の測定条件 148
表 2.5-1　マイクロフォーカス X 線 CT スキャンの測定条件 171
表 2.5-2　低密度帯の厚さの測定結果 178
表 2.6-1　分光測色条件 179
表 2.6-2　15 日浸漬試料の浸漬前後での分光測色の結果 180
表 2.6-3　30 日浸漬試料の浸漬前後での分光測色の結果 181
表 2.6-4　45 日浸漬試料の浸漬前後での分光測色の結果 182
表 2.7-1　SEM の観察条件 183
表 2.8-1　XRD 分析の測定条件 247
表 2.8-2　浸漬前の鉱物組み合わせ 247
表 2.9-1　水銀ポロシメータの測定条件 260
表 2.9-2　KY-1 のポロシメータ測定結果 261
表 2.9-3　KY-2 のポロシメータ測定結果 263
表 2.9-4　KY-3 のポロシメータ測定結果 265

表 2.9-5　KY-5 のポロシメータ測定結果 267
表 2.9-6　KY-8 のポロシメータ測定結果 269
表 2.9-7　TN-1 のポロシメータ測定結果 271
表 2.10-1　ICP-OES による定量分析結果 273

図　目　次

図 2.1-1　浸漬前後の試料観察面のスキャン画像(1) 136
図 2.1-2　浸漬前後の試料観察面のスキャン画像(2) 137
図 2.2-1　試料 KY-1（砂岩）の薄片写真 138
図 2.2-2　試料 KY-2（砂岩）の薄片写真 139
図 2.2-3　試料 KY-3（砂岩）の薄片写真 140
図 2.2-4　試料 KY-5（溶結凝灰岩）の薄片写真 141
図 2.2-5　試料 KY-8（泥岩）の薄片写真 142
図 2.2-6　試料 TN-1（溶結凝灰岩）の薄片写真 143
図 2.3-1　15 日浸漬試料の浸漬中目視観察結果 144
図 2.3-2　30 日浸漬試料の浸漬中目視観察結果 145
図 2.3-3　45 日浸漬試料の浸漬中目視観察結果(1) 146
図 2.3-4　45 日浸漬試料の浸漬中目視観察結果(2) 147
図 2.4-1　X 線分析顕微鏡による Al のマッピング結果(1) 149
図 2.4-2　X 線分析顕微鏡による Al のマッピング結果 150
図 2.4-3　X 線分析顕微鏡による Ca のマッピング結果(1) 151
図 2.4-4　X 線分析顕微鏡による Ca のマッピング結果(2) 152
図 2.4-5　X 線分析顕微鏡による Fe のマッピング結果(1) 153
図 2.4-6　X 線分析顕微鏡による Fe のマッピング結果(2) 154
図 2.4-7　X 線分析顕微鏡による K のマッピング結果(1) 155
図 2.4-8　X 線分析顕微鏡による K のマッピング結果(2) 156
図 2.4-9　X 線分析顕微鏡による Mg のマッピング結果(1) 157
図 2.4-10　X 線分析顕微鏡による Mg のマッピング結果(2) 158
図 2.4-11　X 線分析顕微鏡による Mn のマッピング結果(1) 159
図 2.4-12　X 線分析顕微鏡による Mn のマッピング結果(2) 160
図 2.4-13　X 線分析顕微鏡による Na のマッピング結果(1) 161
図 2.4-14　X 線分析顕微鏡による Na のマッピング結果(2) 162
図 2.4-15　X 線分析顕微鏡による P のマッピング結果(1) 163
図 2.4-16　X 線分析顕微鏡による P のマッピング結果(2) 164
図 2.4-17　X 線分析顕微鏡による S のマッピング結果(1) 165
図 2.4-18　X 線分析顕微鏡による S のマッピング結果(2) 166
図 2.4-19　X 線分析顕微鏡による Si のマッピング結果(1) 167
図 2.4-20　X 線分析顕微鏡による Si のマッピング結果(2) 168
図 2.4-21　X 線分析顕微鏡による Ti のマッピング結果(1) 169
図 2.4-22　X 線分析顕微鏡による Ti のマッピング結果(2) 170
図 2.5-1　KY-1（砂岩）の測定結果 172

図 2.5-2　KY-2（砂岩）の測定結果 173
図 2.5-3　KY-3（砂岩）の測定結果 174
図 2.5-4　KY-5（溶結凝灰岩）の測定結果 175
図 2.5-5　KY-8（泥岩）の測定結果 176
図 2.5-6　TN-1（溶結凝灰岩）の測定結果 177
図 2.6-1　分光測色の測定箇所 179
図 2.7-1　KY-1（砂岩）15 日浸漬前後の SEM 観察結果(1) 184
図 2.7-2　KY-1（砂岩）15 日浸漬前後の SEM 観察結果(2) 185
図 2.7-3　KY-1（砂岩）30 日浸漬前後の SEM 観察結果(1) 186
図 2.7-4　KY-1（砂岩）30 日浸漬前後の SEM 観察結果(2) 187
図 2.7-5　KY-1（砂岩）30 日浸漬前後の SEM 観察結果(3) 188
図 2.7-6　KY-1（砂岩）30 日浸漬前後の SEM 観察結果(4) 189
図 2.7-7　KY-1（砂岩）45 日浸漬前後の SEM 観察結果(1) 190
図 2.7-8　KY-1（砂岩）45 日浸漬前後の SEM 観察結果(2) 191
図 2.7-9　KY-1（砂岩）45 日浸漬前後の SEM 観察結果(3) 192
図 2.7-10　KY-1（砂岩）45 日浸漬前後の SEM 観察結果(4) 193
図 2.7-11　KY-1（砂岩）45 日浸漬前後の SEM 観察結果(5) 194
図 2.7-12　KY-2（砂岩）15 日浸漬前後の SEM 観察結果(1) 195
図 2.7-13　KY-2（砂岩）15 日浸漬前後の SEM 観察結果(2) 196
図 2.7-14　KY-2（砂岩）15 日浸漬前後の SEM 観察結果(3) 197
図 2.7-15　KY-2（砂岩）30 日浸漬前後の SEM 観察結果(1) 198
図 2.7-16　KY-2（砂岩）30 日浸漬前後の SEM 観察結果(2) 199
図 2.7-17　KY-2（砂岩）30 日浸漬前後の SEM 観察結果(3) 200
図 2.7-18　KY-2（砂岩）45 日浸漬前後の SEM 観察結果(1) 201
図 2.7-19　KY-2（砂岩）45 日浸漬前後の SEM 観察結果(2) 202
図 2.7-20　KY-2（砂岩）45 日浸漬前後の SEM 観察結果(3) 203
図 2.7-21　KY-2（砂岩）45 日浸漬前後の SEM 観察結果(4) 204
図 2.7-22　KY-3（砂岩）15 日浸漬前後の SEM 観察結果(1) 205
図 2.7-23　KY-3（砂岩）15 日浸漬前後の SEM 観察結果(2) 206
図 2.7-24　KY-3（砂岩）15 日浸漬前後の SEM 観察結果(3) 207
図 2.7-25　KY-3（砂岩）30 日浸漬前後の SEM 観察結果(1) 208
図 2.7-26　KY-3（砂岩）30 日浸漬前後の SEM 観察結果(2) 209
図 2.7-27　KY-3（砂岩）30 日浸漬前後の SEM 観察結果(3) 210
図 2.7-28　KY-3（砂岩）30 日浸漬前後の SEM 観察結果(4) 211
図 2.7-29　KY-3（砂岩）45 日浸漬前後の SEM 観察結果(1) 212
図 2.7-30　KY-3（砂岩）45 日浸漬前後の SEM 観察結果(2) 213
図 2.7-31　KY-3（砂岩）45 日浸漬前後の SEM 観察結果(3) 214
図 2.7-32　KY-5（溶結凝灰岩）15 日浸漬前後の SEM 観察結果(1) 215
図 2.7-33　KY-5（溶結凝灰岩）15 日浸漬前後の SEM 観察結果(2) 216
図 2.7-34　KY-5（溶結凝灰岩）15 日浸漬前後の SEM 観察結果(3) 217
図 2.7-35　KY-5（溶結凝灰岩）30 日浸漬前後の SEM 観察結果(1) 218

図 2.7-36　KY-5（溶結凝灰岩）30 日浸漬前後の SEM 観察結果(2)..... 219
図 2.7-37　KY-5（溶結凝灰岩）30 日浸漬前後の SEM 観察結果(3)..... 220
図 2.7-38　KY-5（溶結凝灰岩）45 日浸漬前後の SEM 観察結果(1)..... 221
図 2.7-39　KY-5（溶結凝灰岩）45 日浸漬前後の SEM 観察結果(2)..... 222
図 2.7-40　KY-5（溶結凝灰岩）45 日浸漬前後の SEM 観察結果(3)..... 223
図 2.7-41　KY-5（溶結凝灰岩）45 日浸漬前後の SEM 観察結果(4)..... 224
図 2.7-42　KY-8（泥岩）15 日浸漬前後の SEM 観察結果(1)..... 225
図 2.7-43　KY-8（泥岩）15 日浸漬前後の SEM 観察結果(2)..... 226
図 2.7-44　KY-8（泥岩）30 日浸漬前後の SEM 観察結果(1)..... 227
図 2.7-45　KY-8（泥岩）30 日浸漬前後の SEM 観察結果(2)..... 228
図 2.7-46　KY-8（泥岩）30 日浸漬前後の SEM 観察結果(3)..... 229
図 2.7-47　KY-8（泥岩）45 日浸漬前後の SEM 観察結果(1)..... 230
図 2.7-48　KY-8（泥岩）45 日浸漬前後の SEM 観察結果(2)..... 231
図 2.7-49　KY-8（泥岩）45 日浸漬前後の SEM 観察結果(3)..... 232
図 2.7-50　TN-1（溶結凝灰岩）15 日浸漬前後の SEM 観察結果(1)..... 233
図 2.7-51　TN-1（溶結凝灰岩）15 日浸漬前後の SEM 観察結果(2)..... 234
図 2.7-52　TN-1（溶結凝灰岩）15 日浸漬前後の SEM 観察結果(3)..... 235
図 2.7-53　TN-1（溶結凝灰岩）15 日浸漬前後の SEM 観察結果(4)..... 236
図 2.7-54　TN-1（溶結凝灰岩）30 日浸漬前後の SEM 観察結果(1)..... 237
図 2.7-55　TN-1（溶結凝灰岩）30 日浸漬前後の SEM 観察結果(2)..... 238
図 2.7-56　TN-1（溶結凝灰岩）30 日浸漬前後の SEM 観察結果(3)..... 239
図 2.7-57　TN-1（溶結凝灰岩）30 日浸漬前後の SEM 観察結果(4)..... 240
図 2.7-58　TN-1（溶結凝灰岩）30 日浸漬前後の SEM 観察結果(5)..... 241
図 2.7-59　TN-1（溶結凝灰岩）45 日浸漬前後の SEM 観察結果(1)..... 242
図 2.7-60　TN-1（溶結凝灰岩）45 日浸漬前後の SEM 観察結果(2)..... 243
図 2.7-61　TN-1（溶結凝灰岩）45 日浸漬前後の SEM 観察結果(3)..... 244
図 2.7-62　TN-1（溶結凝灰岩）45 日浸漬前後の SEM 観察結果(4)..... 245
図 2.7-63　TN-1（溶結凝灰岩）45 日浸漬前後の SEM 観察結果(5)..... 246
図 2.8-1　KY-1 の浸漬前後の XRD 測定結果比較..... 248
図 2.8-2　図 2.8-1 の拡大..... 249
図 2.8-3　KY-2 の浸漬前後の XRD 測定結果比較..... 250
図 2.8-4　図 2.8-3 の拡大..... 251
図 2.8-5　KY-3 の浸漬前後の XRD 測定結果比較..... 252
図 2.8-6　図 2.8-5 の拡大..... 253
図 2.8-7　KY-5 の浸漬前後の XRD 測定結果比較..... 254
図 2.8-8　図 2.8-7 の拡大..... 255
図 2.8-9　KY-8 の浸漬前後の XRD 測定結果比較..... 256
図 2.8-10　図 2.8-9 の拡大..... 257
図 2.8-11　TN-1 の浸漬前後の XRD 測定結果比較..... 258
図 2.8-12　図 2.8-11 の拡大..... 259
図 2.9-1　KY-1 の間隙径分布..... 262

図 2.9-2　KY-2 の間隙径分布 264
図 2.9-3　KY-3 の間隙径分布 266
図 2.9-4　KY-5 の間隙径分布 268
図 2.9-5　KY-8 の間隙径分布 270
図 2.9-6　TN-1 の間隙径分布 272

岩石風化模擬実験に係るデータ集

本研究では、地質年代スケールで段丘礫に生じる化学的風化についての現象理解を目的に、岩石風化過程の模擬実験を実施した。本付録では、実験デザインの参考として収集した既往文献及び実験における分析手法とその分析結果について記す。

1. 岩石風化模擬実験に係る文献収集

1.1 収集文献一覧

岩石風化模擬実験に係る既往文献を収集し、必要に応じて読み込み、今回の実験をデザインする上での参考とした。収集した文献を表 1.1-1 から表 1.1-8 に示す。

表 1.1-1　収集文献の一覧(1)

No.	著者	発行年	表題	雑誌･書籍名	巻	号	頁
1	Ioannis Rigopoulos, Anna L. Harrison, Andreas Delimitis, Ioannis Ioannou, Eric H. Oelkers	2018	Carbon sequestration via enhanced weathering of peridotites and basalts in seawater	Applied Geochemistry	91	－	197-207
2	Nicolas C. M. Marty, Adeline Lach, Catherine Lerouge, Sylvain Grangeon, Joachim Tremosa	2018	Weathering of an argillaceous rock in the presence of atmospheric conditions: A flow-through experiment and modelling study	Applied Geochemistry	96	－	252-263
3	Yael Levenson, Uri Ryb, Simon Emmanuel	2017	Comparison of field and laboratory weathering rates in carbonate rocks from an Eastern Mediterranean drainage basin	Earth and Planetary Science Letters	465	－	176-183
4	Jong Sub Lee, Hyung Koo Yoon	2017	Characterization of rock weathering using elastic waves: A Laboratory-scale experimental study	Journal of Applied Geophysics	140	－	24-33
5	松倉公憲	2017	地形学からみた風化研究の問題点と今後の課題	地学雑誌	126	3	271-296
6	八反地剛, 松倉公憲	2017	土壌中における炭酸塩岩の風化速度とその制約条件－野外風化実験からのアプローチ－	地学雑誌	126	3	355-367
7	三嶋 渉, 山本順司, 在田一則, 加藤義典, 田中公教, 鳥本淳司, 高畑幸平, 日下 葵, 寺西辰郎	2017	凍結融解による岩石の風化を理解させるためのモデル実験におけるモルタルの利用可能性	地学教育	70	1	15-22
8	小口千明	2017	風化変質層の発達速度に関する一考察－風化皮膜，風化殻，ロックバーニッシュの研究史から－	地学雑誌	126	4	473-485
9	Yael Levenson, Simon Emmanuel	2016	Quantifying micron-scale grain detachment during weathering experiments on limestone	Geochimica et Cosmochimica Acta	173	－	86-96
10	丹羽萌子, 寺門靖高	2016	1A08　水と花崗岩の反応実験における元素挙動と風化過程の検討	日本地球化学会年会講演要旨集	63	－	－

表 1.1-2　収集文献の一覧(2)

No.	著者	発行年	表題	雑誌・書籍名	巻	号	頁
11	Ling Si xiang, Wu Xi yong, Sun Chun wei, Liao Xin, Ren Yong, Li Xiao ning	2016	Experimental Study of Chemical Damage and Mechanical Deterioration of Black Shale Due to Water-Rock Chemical Action（中国語）	JOURNAL OF EXPERIMENTAL MECHANICS	31	4	511-524
12	Christian Mavris, Gerhard Furrer, Dennis Dahms, Suzanne P. Anderson, Markus Egli	2015	Decoding potential effects of climate and vegetation change on mineral weathering in alpine soils: An experimental study in the Wind River Range (Wyoming, USA)	Geoderma	255-256	–	12-26
13	横山 正	2015	化学風化の速度論：流紋岩風化の野外調査，室内実験および理論解析	岩石鉱物科学	44	1	45-51
14	三嶋 渉, 山本順司, 在田一則, 鳥本淳司, 田中公教, 酒井 実, 高畑幸平	2015	凍結融解による岩石の風化を理解させるための実験手法の開発	地学教育	68	2	59-67
15	Cherith Moses, David Robinson, John Barlow	2014	Methods for measuring rock surface weathering and erosion: A critical review	Earth-Science Reviews	135	–	141-161
16	Wu Xiyong, Liao Xin, Zhao Siyuan, Ling Sixiang, Zhu Baolong	2014	Experimental Study of the Water-rock Chemical Reaction in Black Shale（中国語）	Diqiu Xuebao	35	5	573-581
17	Tadashi Yokoyama	2013	Characterization of the reaction and transport properties of porous rhyolite and its application to the quantitative understanding of the chemical weathering rate	Geochimica et Cosmochimica Acta	118	–	295-311
18	A. Voinot, D. Lemarchand, C. Collignon, M. Granet, M. P. Turpault	2013	Experimental dissolution vs. transformation of micas under acidic soil conditions: Clues from boron isotopes	Geochimica et Cosmochimica Acta	117	–	144-160
19	Beatriz Menéndez, Christian David	2013	The influence of environmental conditions on weathering of porous rocks by gypsum: a non-destructive study using acoustic emissions	Environmental Earth Sciences	68	6	1691-1706
20	Hiroaki IZUMIYAMA, Daizo TSUTSUMI, Masaharu FUJITA	2012	Effect of Freeze-Thaw Action on Porosity Change and Destruction of Weathered Bedrock in Different Lithology and Development of Destruction Model	International Journal of Erosion Control Engineering	5	1	103-112

表 1.1-3　収集文献の一覧(3)

No.	著者	発行年	表題	雑誌･書籍名	巻	号	頁
21	CHELO S. PASCUA, HIROHISA YAMADA	2012	LOW-TEMPERATURE FORMATION OF CLAY MINERALS : CORRELATING LABORATORY EXPERIMENTS WITH NATURAL FIELD-SCALE PROCESSES	Clay Science	16	2	25-32
22	Aleš Lapanje, Celine Wimmersberger, Gerhard Furrer, Ivano Brunner, Beat Frey	2012	Pattern of Elemental Release During the Granite Dissolution Can Be Changed by Aerobic Heterotrophic bacterial Strains Isolated from Damma Glacier (Central Alps) Deglaciated Granite Sand	Microbial Ecology	63	4	865-882
23	Roland Hellmann, Richard Wirth, Damien Daval, Jean-Paul Barnes, Richard L. Hervig	2012	Unifying natural and laboratory chemical weathering with interfacial dissolution-reprecipitation: A study based on the nanometer-scale chemistry of fluid-silicate interfaces	Chemical Geology	294-295	–	203-216
24	Anna NeubeckNguyen Thanh DucDavid BastvikenPatrick CrillNils G Holm	2011	Formation of H_2 and CH_4 by weathering of olivine at temperatures between 30 and 70˚C	Geochemical Transactions	12	1	1-10
25	Jong-Sik Ryu, Andrew D. Jacobson, Chris Holmden, Craig Lundstrom, Zhaofeng Zhang	2011	The major ion, $\delta^{44/40}$Ca, $\delta^{44/42}$Ca, and $\delta^{26/24}$Mg geochemistry of granite weathering at pH=1 and T=25˚ C: power-law processes and the relative reactivity of minerals	Geochimica et Cosmochimica Acta	75	20	6004-6026
26	高屋康彦	2011	花崗岩の化学的風化における変質特性に関する実験的研究	地理学評論	84	2	131-144
27	鹿園直建, 吉田直樹, 中田正隆	2010	北海道幌延地域の水-堆積岩反応実験による水質変化, とくにpH変化要因の解明	応用地質	51	3	112-121
28	須藤孝一, 米田剛, 小川泰正, 山田亮一, 井上千弘, 土屋範芳	2010	竜の口層の堆積岩における重金属類の溶出挙動および形態変化に及ぼす風化の影響	応用地質	51	4	181-190
29	鹿園 直建, 原田 広康, 池田 則夫	2009	CO_2地中貯留への適用のための玄武岩質岩石の溶解実験－反応実験による溶解速度定数の推定－	Journal of MMIJ	125	3	106-114
30	高屋康彦, 廣瀬 孝	2009	花崗岩の化学的風化における溶解特性に関する実験的研究	地理学評論	82	5	389-401

表 1.1-4　収集文献の一覧(4)

No.	著者	発行年	表題	雑誌･書籍名	巻	号	頁
31	中田 英二, 渡辺 雅一	2009	高温通水反応装置による灰長石を多く含む凝灰質砂岩と pH 3.8 のCO_2溶解水との溶解, 沈殿実験	岩石鉱物科学	38	5	161-174
32	足立 洋祐, 鹿園 直建	2009	堆積岩の溶解実験－帯水層CO_2地中貯留に関する基礎的研究	資源地質	59	1	9-21
33	宮本昌幸	2009	大雪山の残雪凹地における岩石の風化－野外実験による凝灰岩試料の重量現象測定－	季刊地理学	61	1	38-45
34	Bo ZHU, Tao WANG, Xiang YOU, Mei-Rong GAO	2008	Nutrient Release from Weathering of Purplish Rocks in the Sichuan Basin, China	Pedosphere	18	2	257-264
35	Bergur Sigfusson, Sigurdur R. Gislason, Graeme I. Paton	2008	Pedogenesis and weathering rates of a Histic Andosol in Iceland: Field and experimental soil solution study	Geoderma	144	3-4	572-592
36	C. Cardell, D. Benavente, J. Rodriguez-Gordillo	2008	Weathering of limestone building material by mixed sulfate solutions. Characterization of stone microstructure, reaction products and decay forms	Materials Characterization	59	10	1371-1385
37	Hanbin Ni, Liping Zhang, Dengrong Zhang, Xiyuan Wu, Xingtao Fu	2008	Weathering of pisha-sandstones in the wind-water erosion crisscross region on the Loess Plateau	Journal of Mountain Science	5	4	340-349
38	宋 苑瑞, 松倉公憲	2008	バクテリア風化に関する最近の研究動向と今後の課題	地形	29	3	313-328
39	P. A. Abanda, R. E. Hannigan	2007	Chapter 13 Mineral control of minor, trace and rare earth elements during black shale weathering at near-neutral pH	Developments in Environmental Science	5	－	273-301
40	川崎了, 趙祥鎬, 金子勝比古	2007	エコーチップによる人工風化岩の風化層厚の推定	応用地質	48	4	162-169
41	YANG Zhenfeng, MIAO Linchang	2007	EXPERIMENTAL STUDY ON SILTY MUDSTONE STRENGTH ATTENUATION AND ENVIRONMENTAL EFFECT（中国語）	Yanshi Lixue Gongcheng Xuebao	26	12	2576-2582
42	Yukinori Matsukura, Tsuyoshi Hattanji, Chiaki T. Oguchi and Takashi Hirose	2006	Rates of chemical weathering of porous rhyolites: ten-year measurements using a weight-loss method	Tsukuba geoenvironmental sciences	2	－	3-8
43	Harald Zänker, Gudrun Hüttig, Thuro Arnold, Heino Nitsche	2006	Formation of iron-containing colloids by the weathering of phyllite	Aquatic Geochemistry	12	4	－

表 1.1-5　収集文献の一覧(5)

No.	著者	発行年	表題	雑誌･書籍名	巻	号	頁
44	K. A. Evans, S. A. Banwart	2006	Rate controls on the chemical weathering of natural polymineralic material. I. Dissolution behaviour of polymineralic assemblages determined using batch and unsaturated column experiments	Applied Geochemistry	21	2	352-376
45	高屋康彦, 廣瀬 孝, 青木 久, 松倉公憲	2006	室内実験における石灰岩の溶解特性に関する一考察	地学雑誌	115	2	136-148
46	SHOICHI KOBAYASHI, TAKABUMI SAKAMOTO, KAZUHIRO YAMAGUCHI	2005	ARTIFICIAL CHEMICAL WEATHERING OF GABBRO UNDER EARTH SURFACE CONDITIONS-THE INFLUENCE OF ACID RAIN ON ROCKS AND MINERALS (PART 4)	Clay Science	12	6	367-377
47	Mark Skidmore, Martin Sharp, Martyn Tranter	2004	Kinetic isotopic fractionation during carbonate dissolution in laboratory experiments: Implications for detection of microbial CO_2 signatures using $\delta^{13}C$-DIC	Geochimica et Cosmochimica Acta	68	21	4309-4317
48	Jiří Faimon	2003	Formation of Colloidal Silica and Alumina During Experimental Granodiorite Weathering	Aquatic Geochemistry	9	4	305-341
49	五十嵐敏文, 丸山 悠, 朝倉國臣, 服部 修一	2003	黄鉄鉱起因酸性水の抑制のための方解石含有岩石の利用に関する実験的研究	応用地質	44	4	234-242
50	五十嵐敏文, 井筒崇文, 岡 泰道	2002	2段階溶出モデルによる黄鉄鉱の酸化･溶解速度の評価	応用地質	43	4	208-215
51	Samuel Etienne	2002	The role of biological weathering in periglacial areas: a study of weathering rinds in south Iceland	Geomorphology	47	1	75-86
52	須藤 祐子, 谷藤 浩二, 渡辺 公雄, 橋田 俊之, 庄子 哲雄, 高橋 秀明	2002	模擬地熱貯留層環境下における花崗岩の溶解速度の温度･流速依存性	日本地熱学会誌	24	1	47-56
53	SHOICHI KOBAYASHI, TAKABUMI SAKAMOTO	2001	ARTIFICIAL WEATHERING OF GRANITE UNDER EARTH SURFACE CONDITIONS -THE INFLUENCE OF ACID RAIN ON ROCKS AND MINERALS (PART 3)-	Clay Science	11	4	349-367
54	C.W.W. NG, Y. WANG	2001	FIELD AND LABORATORY MEASUREMENTS OF SMALL STRAIN STIFFNESS OF DECOMPOSED GRANITES	SOILS AND FOUNDATION	41	3	57-71
55	五十嵐敏文, 大山隆弘, 斎藤典之	2001	黄鉄鉱を含む堆積岩の溶出水酸性化ポテンシャルに関する実験的検討	応用地質	42	4	214-221
56	佐野博昭, 山田幹雄 奥村充司, 能澤真周 平井裕二	2001	積算温度方式を導入した土の酸性移行速度の評価手法に関する研究	土木学会論文集	－	687	95-105
57	WHITE A F, BLUM A E, BULLEN T D, VIVIT D V, SCHULZ M, FITZPATRICK J	1999	The effect of temperature on experimental, natural chemical weathering rates of granitoid rocks.	Geochimca et Cosmochimica Acta	63	19-20	3277-3291

表 1.1-6　収集文献の一覧(6)

No.	著者	発行年	表題	雑誌・書籍名	巻	号	頁
58	小浜夕子, 藤本光一郎, 中田正隆, 八田珠郎, 本間久英	1999	アンデシンの20℃,150℃における酸およびアルカリ溶液中への溶解	鉱物学雑誌	28	1	3-12
59	秦 明徳	1999	長期間の化学的風化実験による花こう閃緑岩の変質	粘土科学	38	4	233-245
60	上島雅人, 田崎和江	1998	B9 微生物による風化のメカニズム－有機酸によるカリウム含有鉱物の粘土化－	粘土科学討論会講演要旨集	42	－	－
61	平社定夫	1998	実験室で玉ねぎ状構造をつくった!	地学教育と科学運動	－	29	23-26
62	小林祥一, 坂本尚史	1996	P8 花崗岩中の鉱物の風化変質に関する実験的研究：変質における元素の挙動	粘土科学討論会講演要旨集	40	－	－
63	LIN C, ZHENG Z	1994	Experimental Studies on Metallogenetic Mechanism of Weathering Crust-Leaching REE Deposits in Southern China	Diqiu Huaxue	23	2	189-198
64	Zhang Hailin, Paul R. Bloom, Edward A. Nater	1993	Change in surface area and dissolution rates during hornblende dissolution at pH 4.0	Geochimica et Cosmochimica Acta	57	8	1681-1689
65	小林祥一, 坂本尚史 柿谷 悟	1993	地表条件下における花崗岩の人工変質－酸性雨の岩石鉱物に与える影響の研究(その2)－	粘土科学	33	2	81-91
66	J. J. M. van Grinsven, W. H. van Riemsdijk	1992	Evaluation of batch and column techniques to measure weathering rates in soils	Geoderma	52	1-2	41-57
67	Hubert Wiggering, Peter Neumann-Mahlkau, Hans-Joachim Selbach	1992	Experimental Procedures to Simulate Weathering Under Atmospheres Which May Have Characterized the Early Archean	Early Organic Evolution	－	－	31-40
68	Leonard R. Gardner	1992	Long-term isovolumetric leaching of aluminum from rocks during weathering: Implications for the genesis of saprolite	CATENA	19	6	521-537
69	Christopher Amrhein, Donald L. Suarez	1992	Some factors affecting the dissolution kinetics of anorthite at 25° C	Geochimica et Cosmochimica Acta	56	5	1815-1826
70	坂本尚史, 小林祥一	1992	地表条件下における長石類の人工変質－酸性雨の岩石鉱物に与える影響の研究(その1)－	粘土科学	32	2	108-120
71	一國雅巳	1992	風化過程における元素の移動度	粘土科学	32	1	3-7
72	八田珠郎, 野呂春文 篠原也寸志	1991	2 "岩石"の物理的風化作用に関する実験的研究－熱機械的分析－	粘土科学討論会講演要旨集	35	－	22-23
73	一國雅巳	1991	S1　風化過程における元素の移動度	粘土科学討論会講演要旨集	35	－	8-9
74	天田 高白, 岡谷 直	1991	花崗岩の風化に関する実験的研究	砂防学会誌	43	5	3-10
75	木宮一邦	1991	地質学から見た岩石風化	応用地質	32	3	22-31

表 1.1-7　収集文献の一覧(7)

No.	著者	発行年	表題	雑誌･書籍名	巻	号	頁
76	Hailin Zhang, P. R. Bloom, E. A. Nater	1990	Morphology and Chemistry of Hornblende Dissolution Products in Acid Solutions	Developments in Soil Science	19	－	551-556
77	Hubert Wiggering	1990	Removal of hydrogen sulfide from simulated Archean atmospheres by iron sulfide precipitation	Chemical Geology	85	3-4	311-320
78	Richard F. Wright	1988	Influence of Acid Rain on Weathering Rates	Physical and Chemical Weathering in Geochemical Cycles	－	－	181-196
79	玉利祐三, 辻治雄, 日下譲	1988	岩質と陸水の水質との関係－岩石の溶出実験による解析－	地球化学	22	2	139-147
80	千木良雅弘, 曽根賢二	1987	泥岩の化学的風化のメカニズム－岩石劣化試験装置を用いた酸化実験－	電力中央研究所報告	－	U87040	28P
81	Jerald L. Schnoor, Werner Stumm	1986	The role of chemical weathering in the neutralization of acidic deposition	Swiss journal of hydrology	48	2	171-195
82	Afifa A. Afifi, O. P. Bricker, J. C. Chemerys	1985	Experimental chemical weathering of various bedrock types at different pH-values: 1. Sandstone and granite	Chemical Geology	49	1-3	87-113
83	Roland Wollast, Lei Chou	1985	Kinetic Study of The Dissolution of Albite with a Continuous Flow-Through Fluidized Bed Reactor	The Chemistry of Weathering	－	－	75-96
84	M. R. Thornber	1985	Supergene alteration of sulphides: VII. Distribution of elements during the gossan-forming process	Chemical Geology	53	3-4	279-301
85	田中芳則	1985	方解石の溶出に伴う泥岩の組織と物性の変化	応用地質	26	3	19-25
86	Ronald C. Antweiler, James I. Drever	1983	The weathering of a late Tertiary volcanic ash: Importance of organic solutes	Geochimica et Cosmochimica Acta	47	3	623-629
87	Steven M. Colman	1981	Rock-weathering rates as functions of time	Quaternary Research	15	3	250-264
88	都築芳郎, 川辺岩夫, 鈴木和博	1981	化学的風化，変質について，理論，実験に基づく一考察	鉱物学雑誌	15	Special	3-13
89	Eurybiades Busenberg	1978	The products of the interaction of feldspars with aqueous solutions at 25° C	Geochimica et Cosmochimica Acta	42	11	1679-1686
90	Onodera Toru, Oda Masanobu, Minami Kazumi	1976	SHEAR STRENGTH OF UNDISTURBED SAMPLE OF DECOMPOSED GRANITE SOIL	SOILS AND FOUNDATION	16	1	17-26
91	都築芳郎	1976	造岩鉱物の風化，熱水変質過程	岩石鉱物鉱床学会誌	71	Special1	341-352
92	木宮一邦	1975	花こう岩類の物理的風化指標としての引張強度－花こう岩の風化･第1報－	地質学雑誌	81	6	349-364

表 1.1-8　収集文献の一覧(8)

No.	著者	発行年	表題	雑誌・書籍名	巻	号	頁
93	阿部 宏, 青木守弘, 今野 弘	1973	NaOH. KOH溶液による凝灰岩類の熱水変質作用, とくに化学組成変化について(鉱床母岩の熱水変質に関する実験的研究-3-)	岩石鉱物鉱床学会誌	68	9	269-276
94	CHESWORTH WARD	1973	The residua system of chemical weathering: A model for the chemical breakdown of silicate rocks at the surface of the earth.	Journal of Soil Science	24	1	69-81
95	田沼邦雄, 福田正巳	1971	寒冷な条件下で示す風化岩石の諸性質について	地学雑誌	80	5	18-26
96	千代田恒之, 坂田朗, 国分信英	1968	オートクレーブによる岩石の変質の研究	地球化学	2	1	35-36
97	千葉守男, 瀧島康夫	1964	鉱物, 岩石の風化に関する研究(第1報)湛水放置による変化とシヨ糖添加の影響	日本土壌肥料学雑誌	35	3	95-99
98	松井 健	1962	PEDRO, G.: 結晶質岩石の水による化学的風化作用にかんする実験的研究	ペドロジスト	6	1	53-54
99	Pedro G.	1961	An experimental study on the geochemical weathering of crystalline rocks by water	Clay Minerals Bulletin	4	26	266-281
100	松岡憲知, 藁谷哲也, 若狭幸	2017	岩石の物理的風化－実験・観測・自然現象のリンク－	地学雑誌	126	3	369-405
101	児玉淳一, 中谷匡志, 奈良禎太, 後藤龍彦, 藤井義明, 金子勝比古	2011	凍結融解作用を受ける岩石の破壊プロセスと耐久性の評価	Journal of MMIJ	127	3	117-126
102	松倉公憲	2008	4. 化学的風化作用と関連する地形	地形変化の科学－風化と侵食－, 朝倉書店	－	－	57-83
103	山田 剛, 青木 久, 高橋 学, 松倉公憲	2005	塩類風化速度に与える岩石物性の影響に関する一実験	応用地質	46	2	72-78
104	White A. F., Brantley S. L.	1995	Chemical weathering rates of silicate minerals: an overview	Chemical Weathering Rates of Silicate Minerals. Mineral. Soc. Am.	－	－	407-462
105	千木良雅弘	1995	第4章　岩石の風化	風化と崩壊, 近未来社	－	－	107-152
106	Matsukura Y., Kimata M., Yokoyama S.	1994	Formation of weathering rinds on andesite blocks under the influence of volcanic gases around the active crater of Aso volcano, Japan	Rock weathering and Landform Evolution. John Wiley and sons, Chichester	－	－	89-98

2. 岩石風化模擬実験の分析結果

今回の実験で得られた結果について、分析項目ごとに記す。

2.1 試料性状

硝酸溶液への浸漬前後の実験試料について、寸法・重量・密度の測定ならびに観察面（SEM 等による表面観察の対象とする面）のスキャン画像撮影を実施した。それらの結果を表 2.1-1 と表 2.1-2 および図 2.1-1 と図 2.1-2 に示す。

表 2.1-1　浸漬前の試料の寸法・重量・密度の測定結果

岩種・試料名			幅(mm)	奥行(mm)	高さ(mm)	浸漬前質量(g)	密度 (g/cm^3)
砂岩	KY-1	15日試料	19.23	19.76	11.27	11.3022	2.639
		30日試料	20.47	19.52	10.68	11.2562	2.638
		45日試料	20.60	19.95	9.44	10.2913	2.653
砂岩	KY-2	15日試料	19.42	20.23	10.83	11.1714	2.626
		30日試料	20.96	20.77	10.11	11.4065	2.592
		45日試料	18.15	20.43	10.73	10.3183	2.593
砂岩	KY-3	15日試料	18.75	22.44	10.62	11.8242	2.646
		30日試料	20.35	20.12	10.18	10.9839	2.635
		45日試料	19.26	20.46	10.19	10.5929	2.638
溶結凝灰岩	KY-5	15日試料	18.30	21.83	10.86	11.3819	2.623
		30日試料	20.41	21.84	10.64	12.4191	2.619
		45日試料	18.75	21.96	10.70	11.5332	2.618
泥岩	KY-8	15日試料	19.19	23.56	9.60	11.7807	2.714
		30日試料	20.07	23.45	9.10	11.6653	2.724
		45日試料	19.51	23.65	9.71	12.1624	2.715
溶結凝灰岩	TN-1	15日試料	19.95	22.85	9.74	11.1977	2.522
		30日試料	20.19	22.58	10.07	11.6114	2.529
		45日試料	20.01	22.18	10.49	11.8808	2.552

表 2.1-2　浸漬後の試料の寸法・重量・密度の測定結果

岩種・試料名			幅 (mm)	奥行 (mm)	高さ (mm)	浸漬後質量(g)	質量変化 (g)	質量変化率(%)*	密度 (g/cm^3)	密度変化 (g/cm^3)
砂岩	KY-1	15日	–	–	–	11.0864	-0.2158	-1.91	–	–
		30日	20.51	19.52	10.62	10.8469	-0.4093	-3.64	2.551	-0.087
		45日	20.62	19.95	9.42	9.775	-0.5163	-5.02	2.523	-0.130
砂岩	KY-2	15日	–	–	–	10.9273	-0.2441	-2.19	–	–
		30日	20.91	20.62	10.01	10.9393	-0.4672	-4.10	2.535	-0.057
		45日	18.10	20.36	10.67	9.8103	-0.508	-4.92	2.495	-0.098
砂岩	KY-3	15日	–	–	–	11.6646	-0.1596	-1.35	–	–
		30日	20.30	20.07	10.14	10.7173	-0.2666	-2.43	2.594	-0.041
		45日	19.20	20.41	10.17	10.2668	-0.3261	-3.08	2.576	-0.062
溶結凝灰岩	KY-5	15日	–	–	–	11.2796	-0.1023	-0.90	–	–
		30日	20.31	21.80	10.61	12.2866	-0.1325	-1.07	2.615	-0.003
		45日	18.70	21.96	10.67	11.362	-0.1712	-1.48	2.593	-0.025
泥岩	KY-8	15日	–	–	–	11.4883	-0.2924	-2.48	–	–
		30日	20.04	23.39	9.05	11.245	-0.4203	-3.60	2.651	-0.073
		45日	19.48	23.51	9.68	11.5682	-0.5942	-4.89	2.609	-0.105
溶結凝灰岩	TN-1	15日	–	–	–	10.4665	-0.7312	-6.53	–	–
		30日	20.08	22.42	10.02	10.4662	-1.1452	-9.86	2.320	-0.209
		45日	19.95	22.11	10.46	10.5676	-1.3132	-11.05	2.290	-0.261

–：データ欠損

*（質量変化率）＝（浸漬前質量－浸漬後質量）／（浸漬前質量）×100

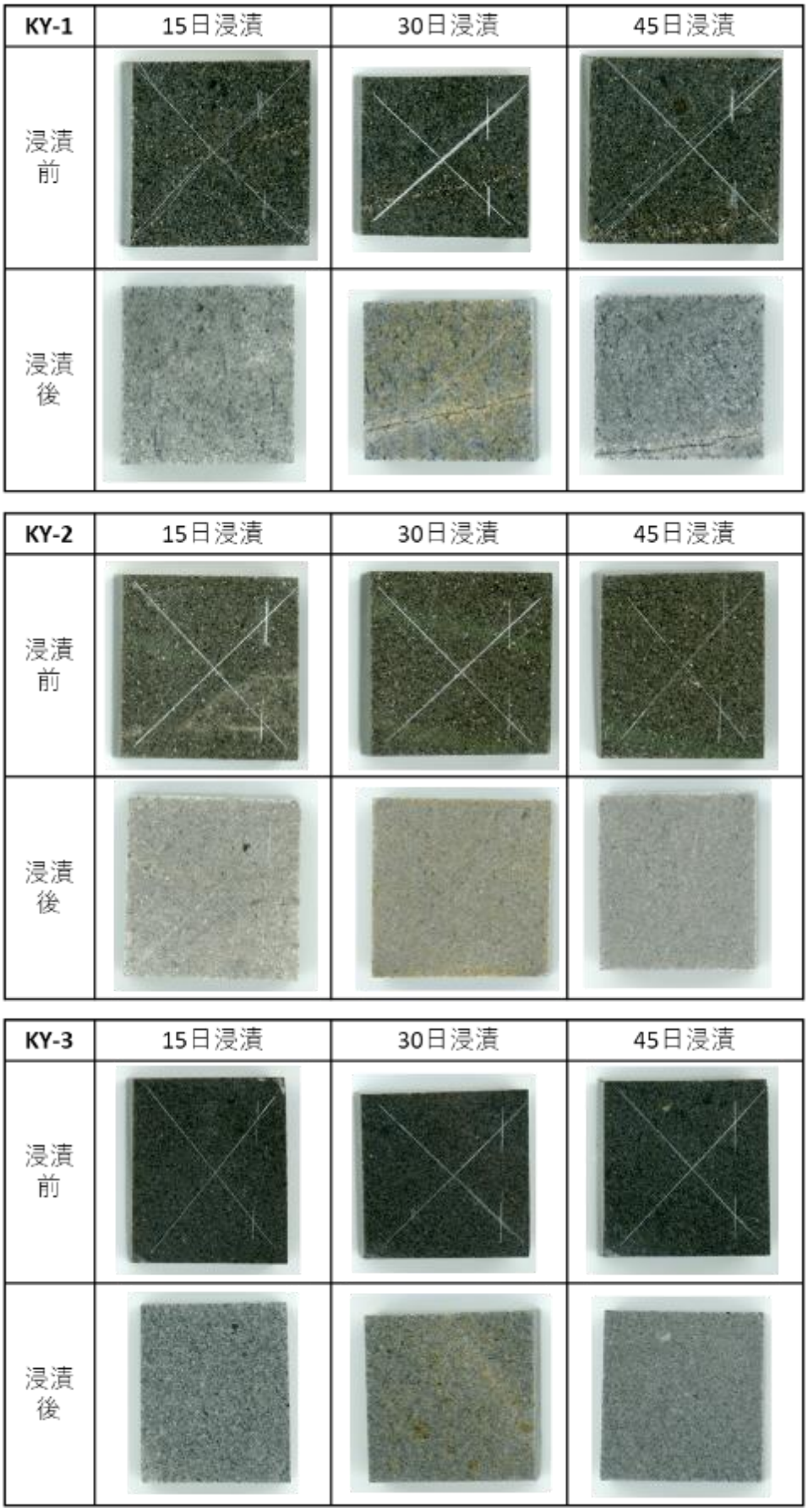


図 2.1-1　浸漬前後の試料観察面のスキャン画像(1)

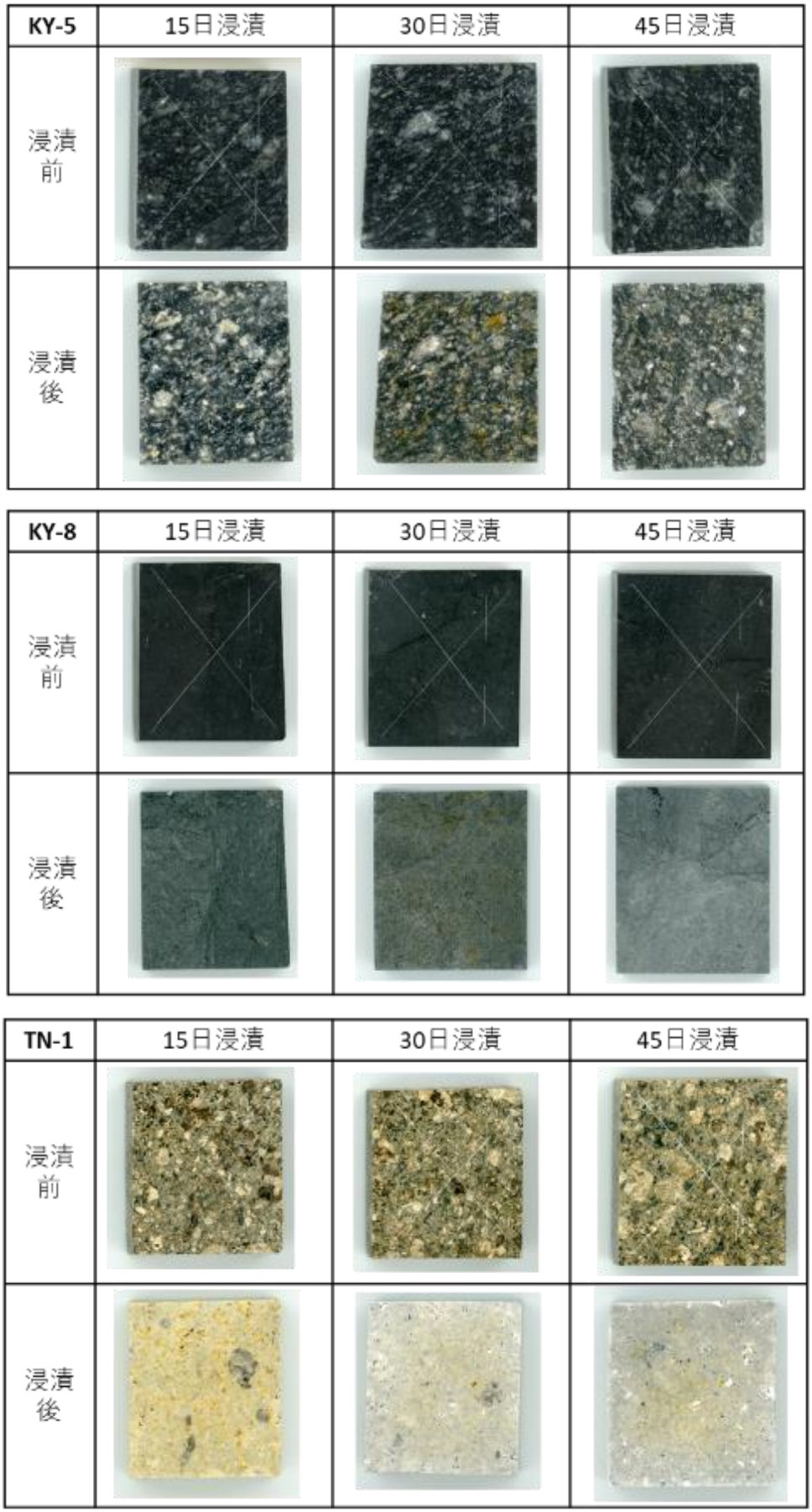


図 2.1-2　浸漬前後の試料観察面のスキャン画像(2)

2.2 光学顕微鏡観察

浸漬前の試料中の構成鉱物や組織等を把握することを目的として、浸漬していない実験試料について岩石薄片を作成し観察を行った。観察結果を図 2.2-1～図 2.2-6 に示す。

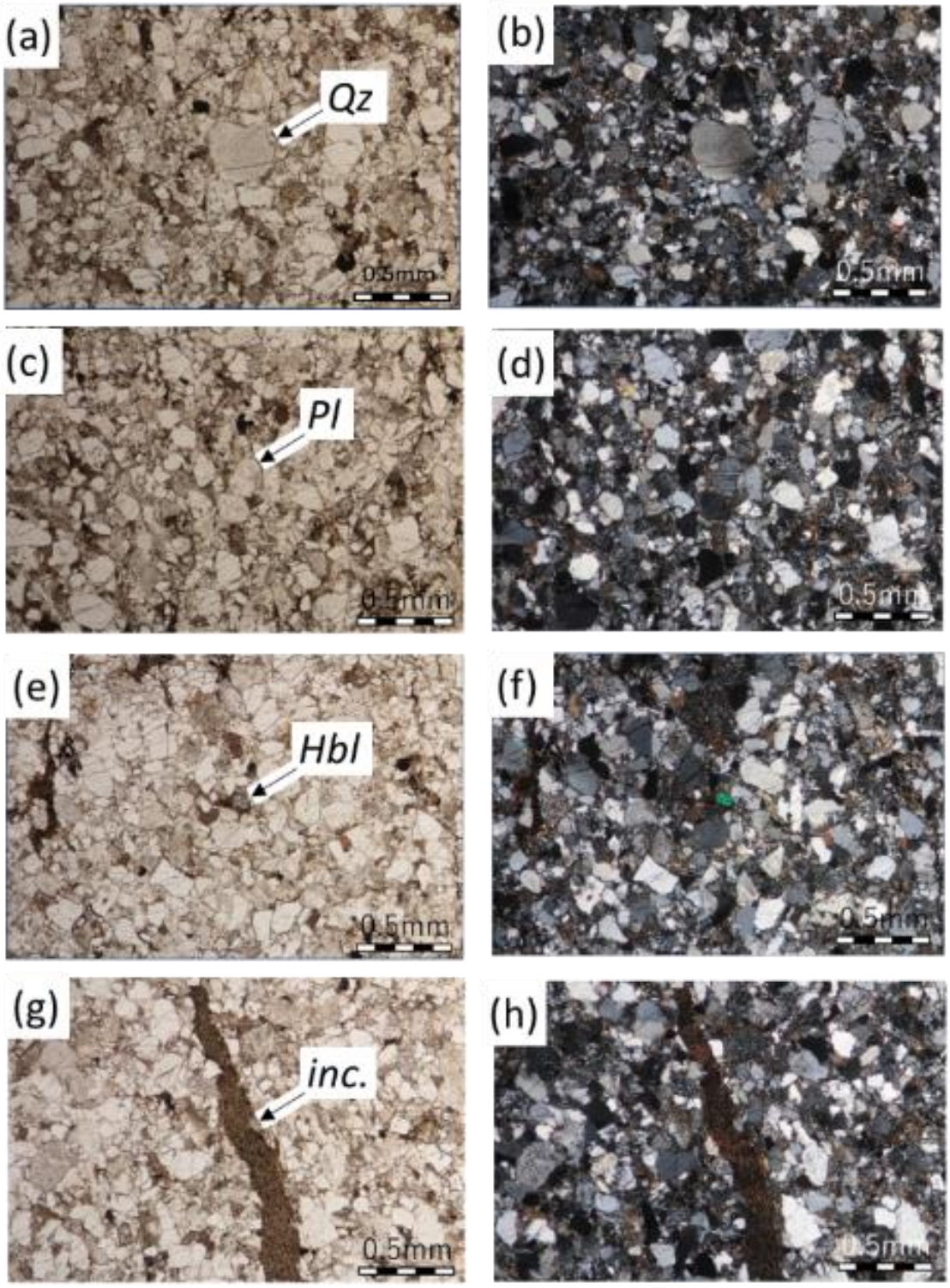


図 2.2-1　試料 KY-1（砂岩）の薄片写真

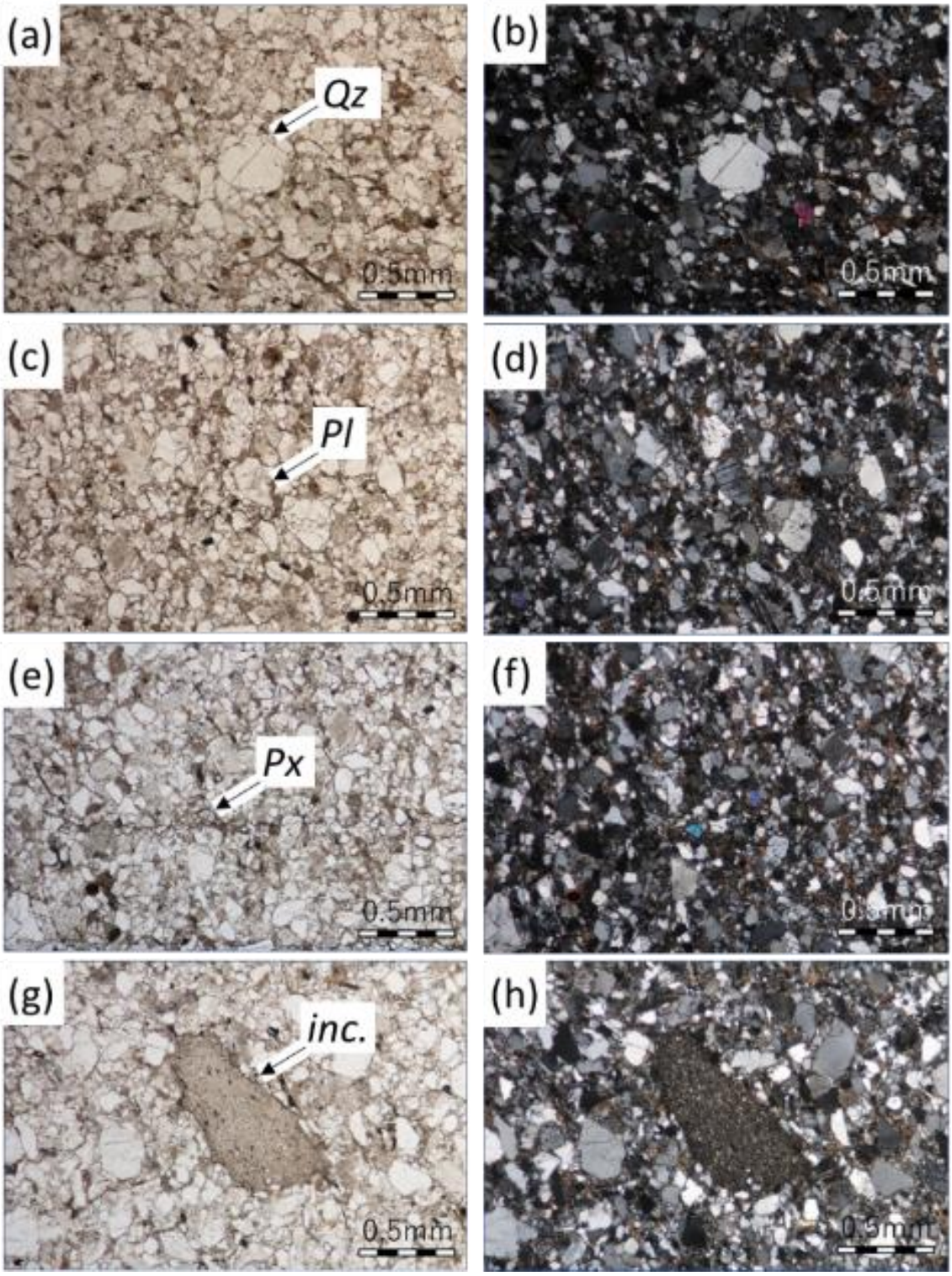


図 2.2-2　試料 KY-2（砂岩）の薄片写真

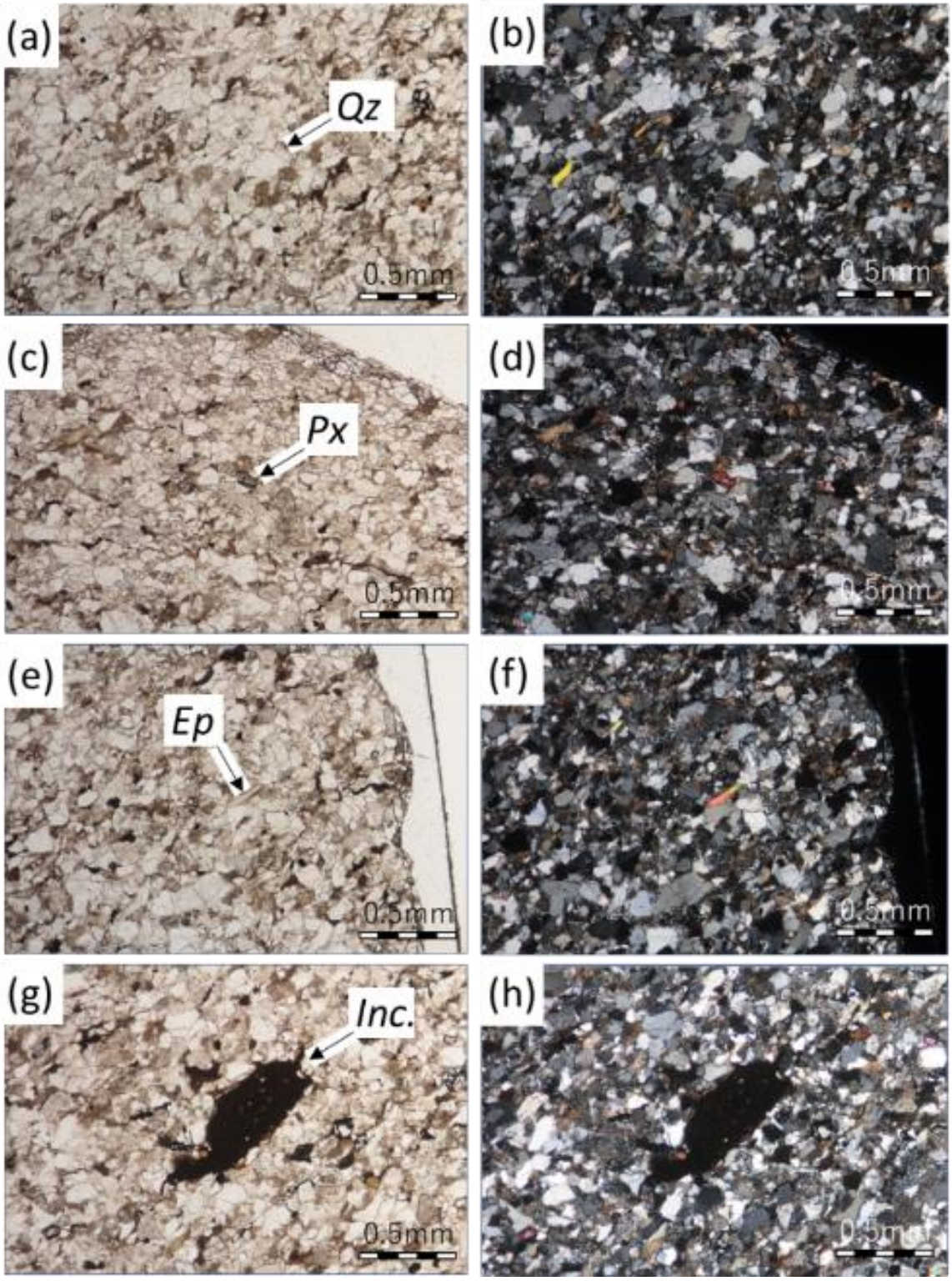


図 2.2-3　試料 KY-3（砂岩）の薄片写真

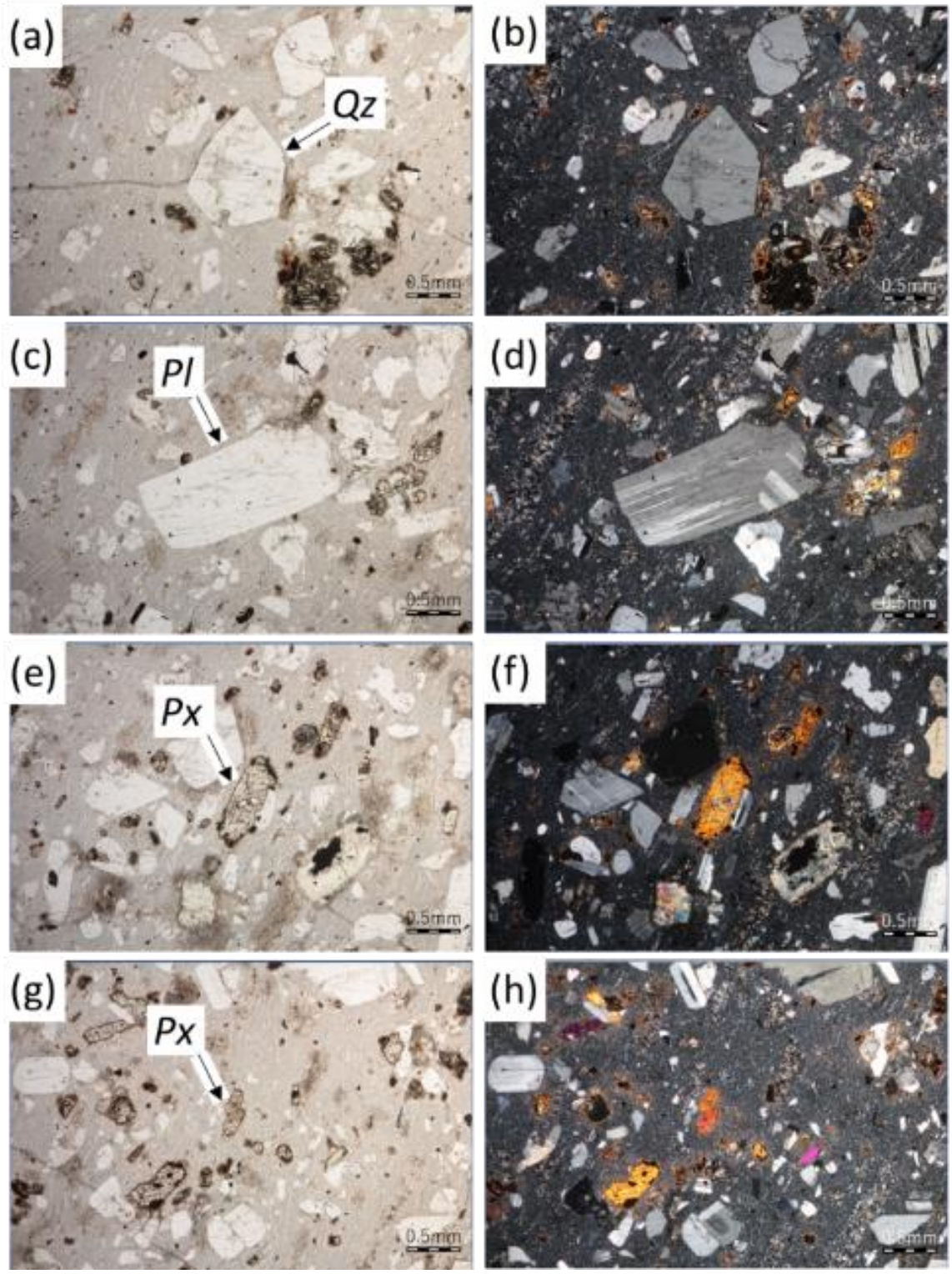


図 2.2-4　試料 KY-5（溶結凝灰岩）の薄片写真

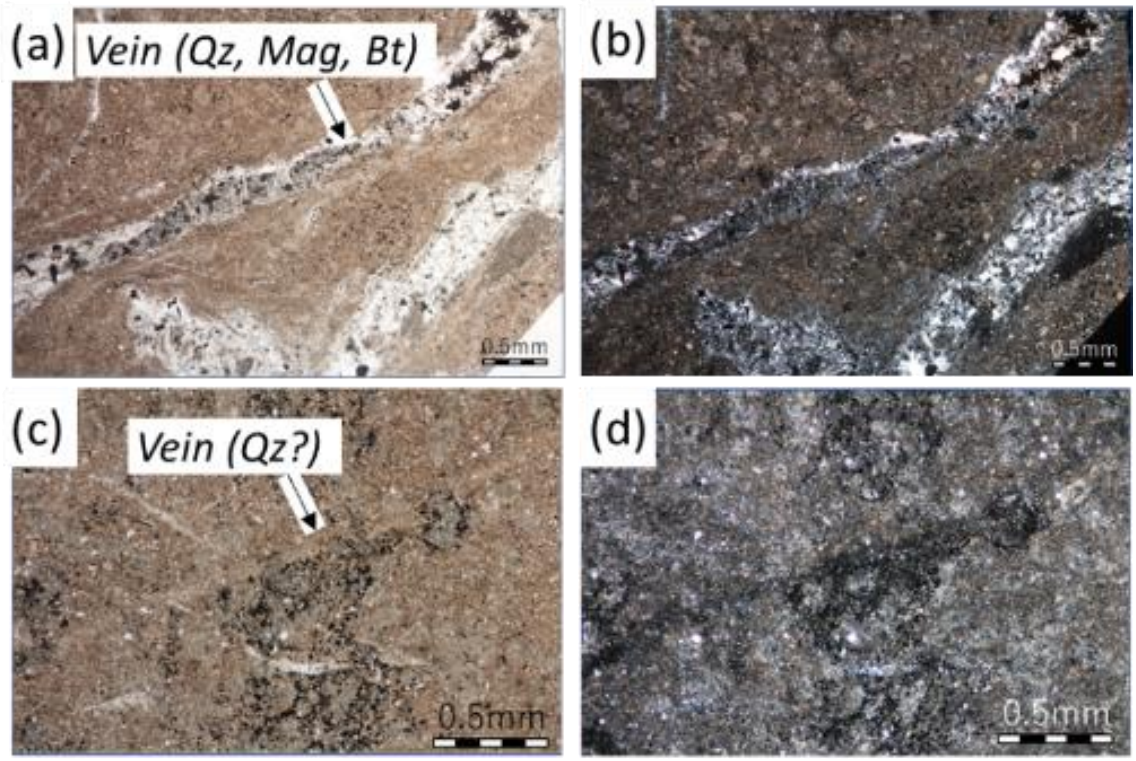


図 2.2-5　試料 KY-8（泥岩）の薄片写真

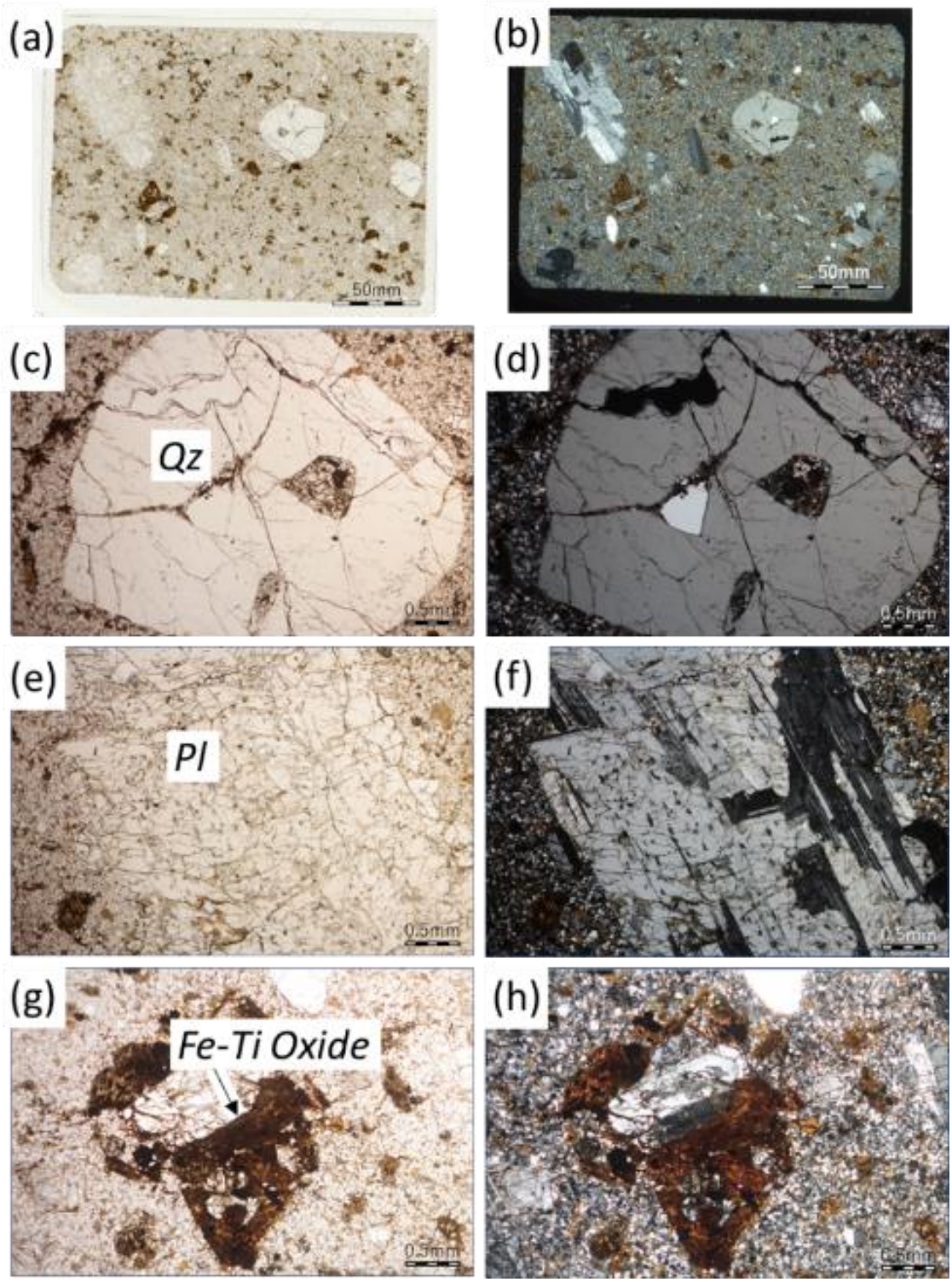


図 2.2-6　試料 TN-1（溶結凝灰岩）の薄片写真

2.3 目視観察

硝酸溶液に実験試料を浸漬している期間中、定期的に目視観察を実施し、試料および溶液の変化を確認した。15 日浸漬試料の観察結果を図 2.3-1 に、同 30 日と 45 日をそれぞれ図 2.3-2、図 2.3-3～図 2.3-4 に示す。

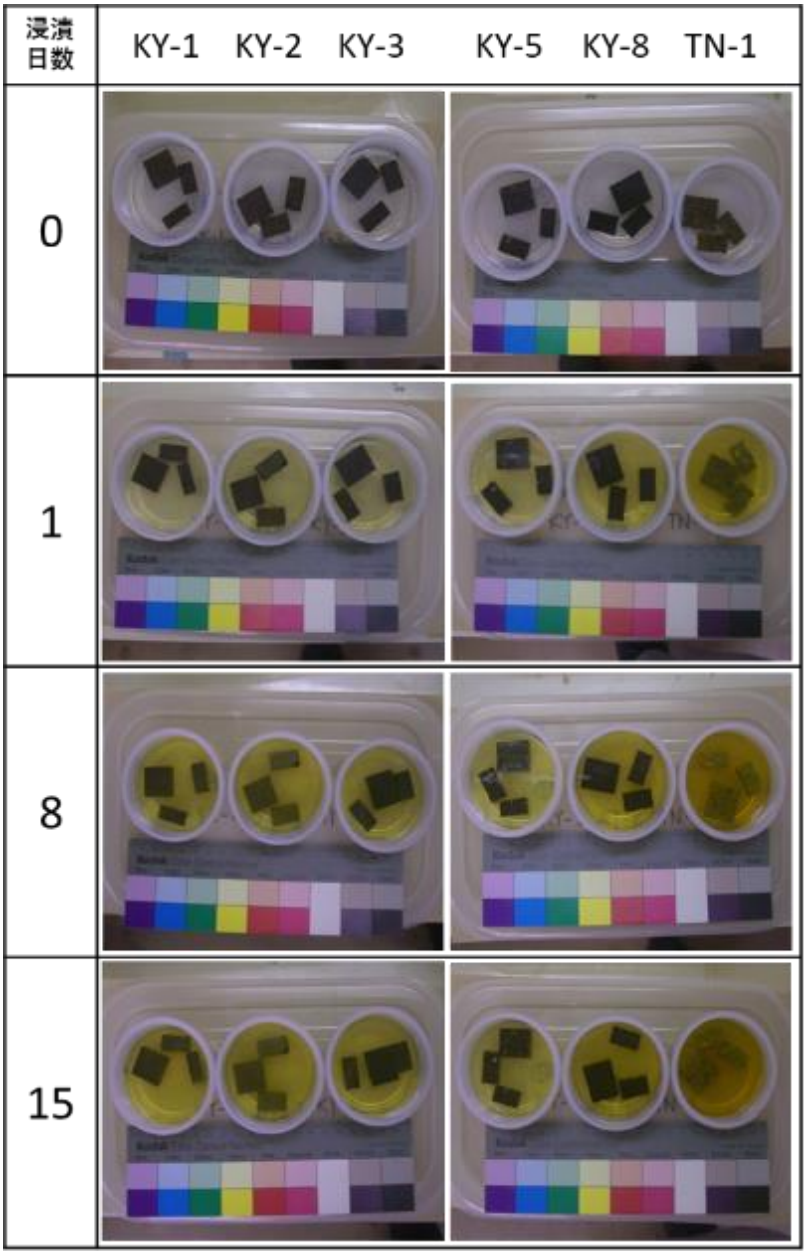


図 2.3-1　15 日浸漬試料の浸漬中目視観察結果

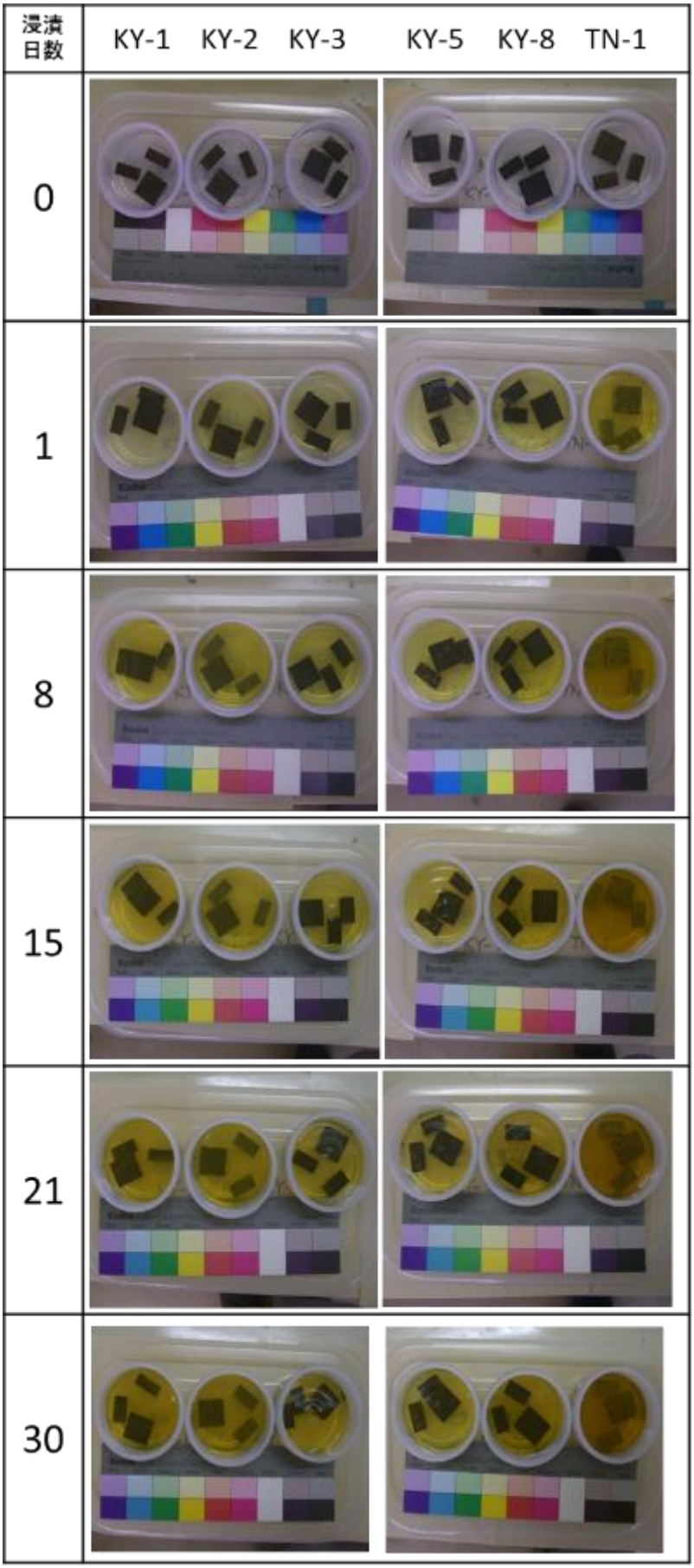


図 2.3-2　30 日浸漬試料の浸漬中目視観察結果

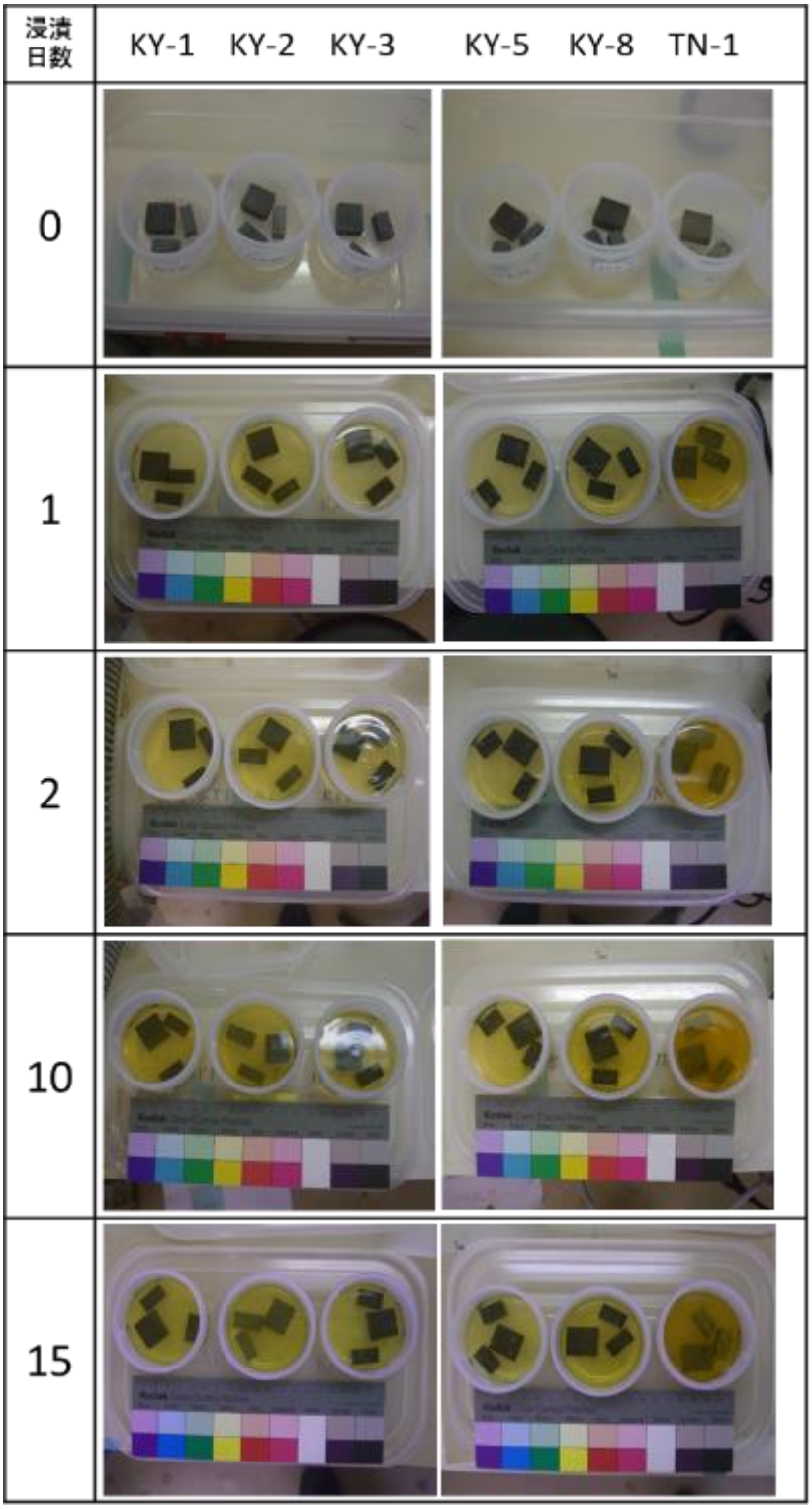


図 2.3-3　45 日浸漬試料の浸漬中目視観察結果(1)

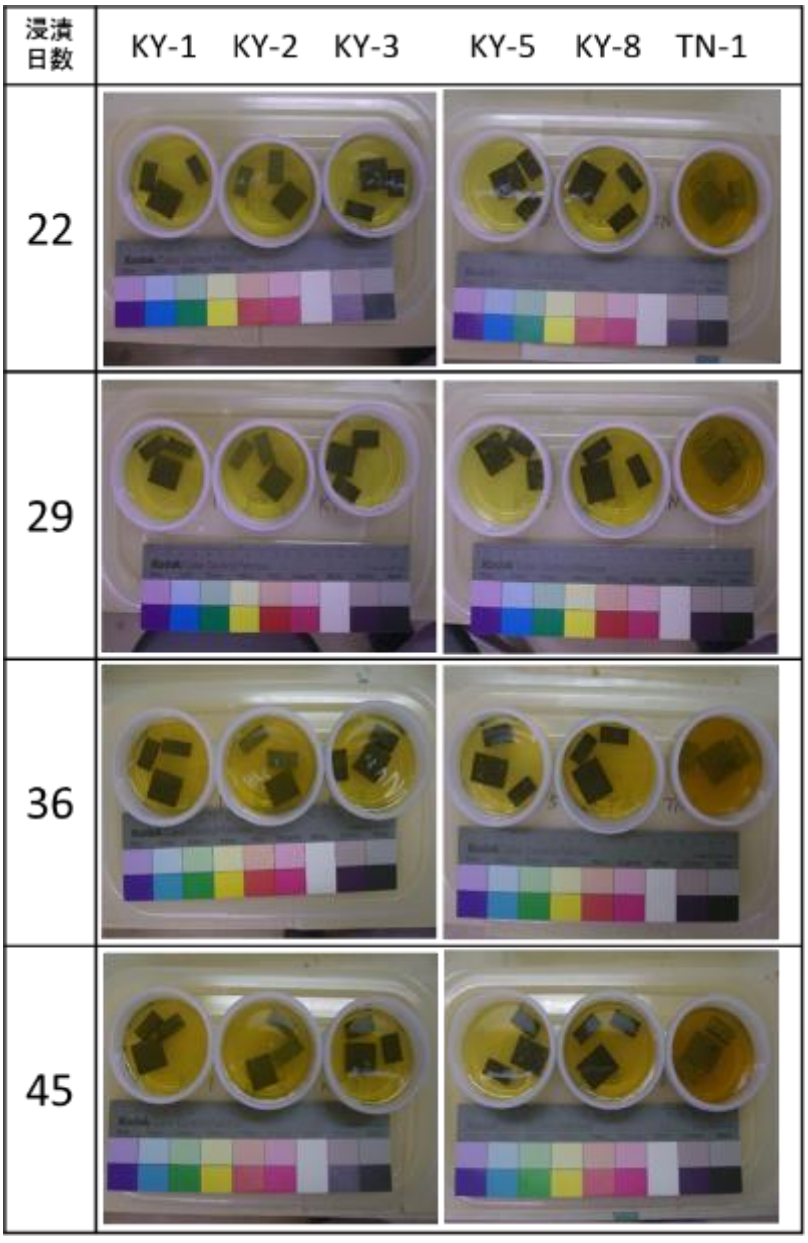


図 2.3-4　45 日浸漬試料の浸漬中目視観察結果(2)

2.4　X 線分析顕微鏡測定

浸漬前後での試料観察面における元素分布の変化を把握することを目的として、浸漬前後の実験試料について、X 線分析顕微鏡（堀場製作所(株)、XGT-7200V）による元素マッピングを実施した。マッピングの対象とした元素は、Al、Ca、Fe、K、Mg、Mn、Na、P、S、Si、及び Ti の 11 元素である。測定条件を表 2.4-1 に、測定結果を図 2.4-1～図 2.4-22 に示す。

表 2.4-1　X 線分析顕微鏡の測定条件

項目	測定条件
X線管球ターゲット	Rh
X線管電圧	30kV
電流	1mA
X線導管（XGT）径	100μm
測定時間	2,000秒
積算回数	5回
画素数	512

(1) Al

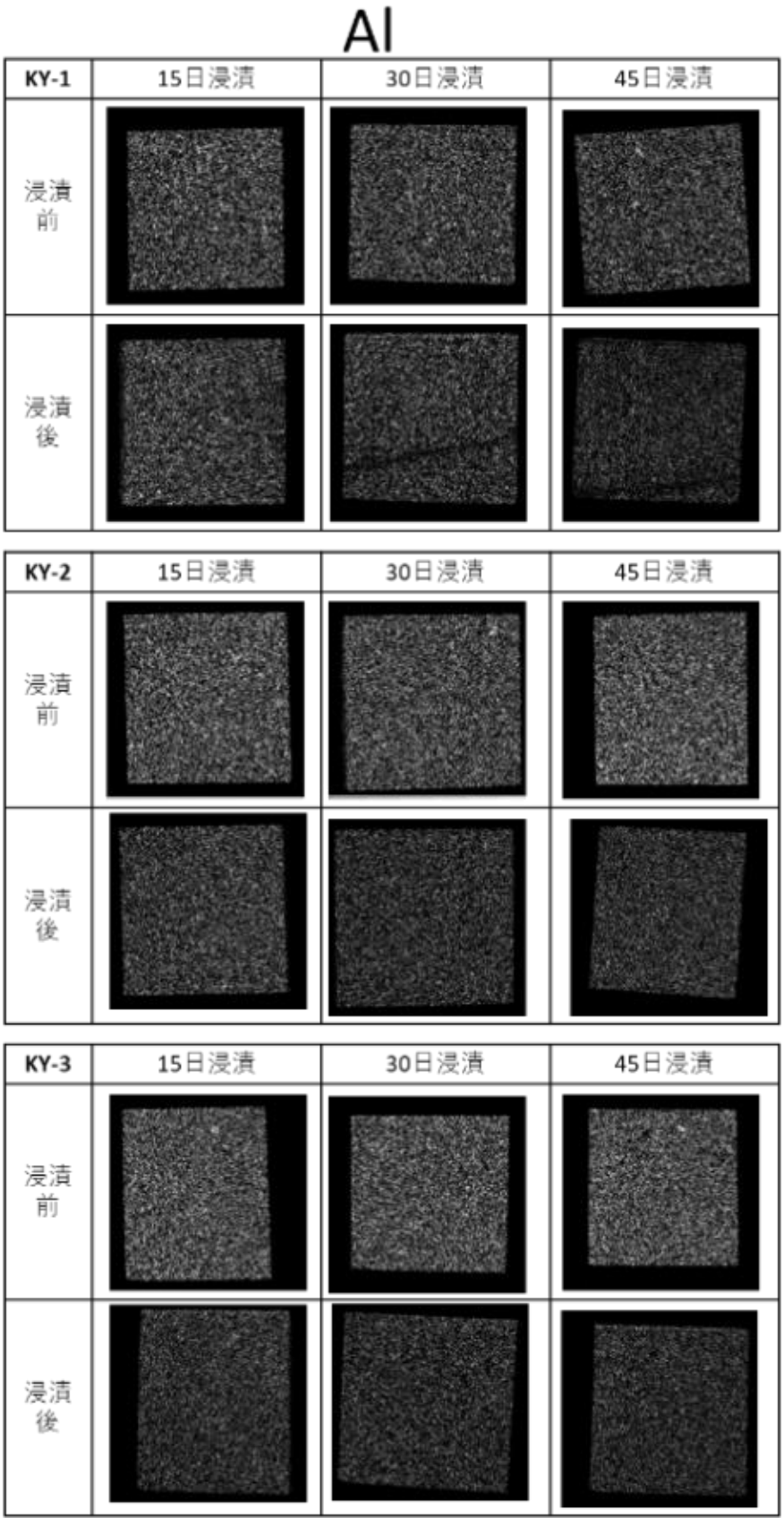


図 2.4-1　X 線分析顕微鏡による Al のマッピング結果(1)

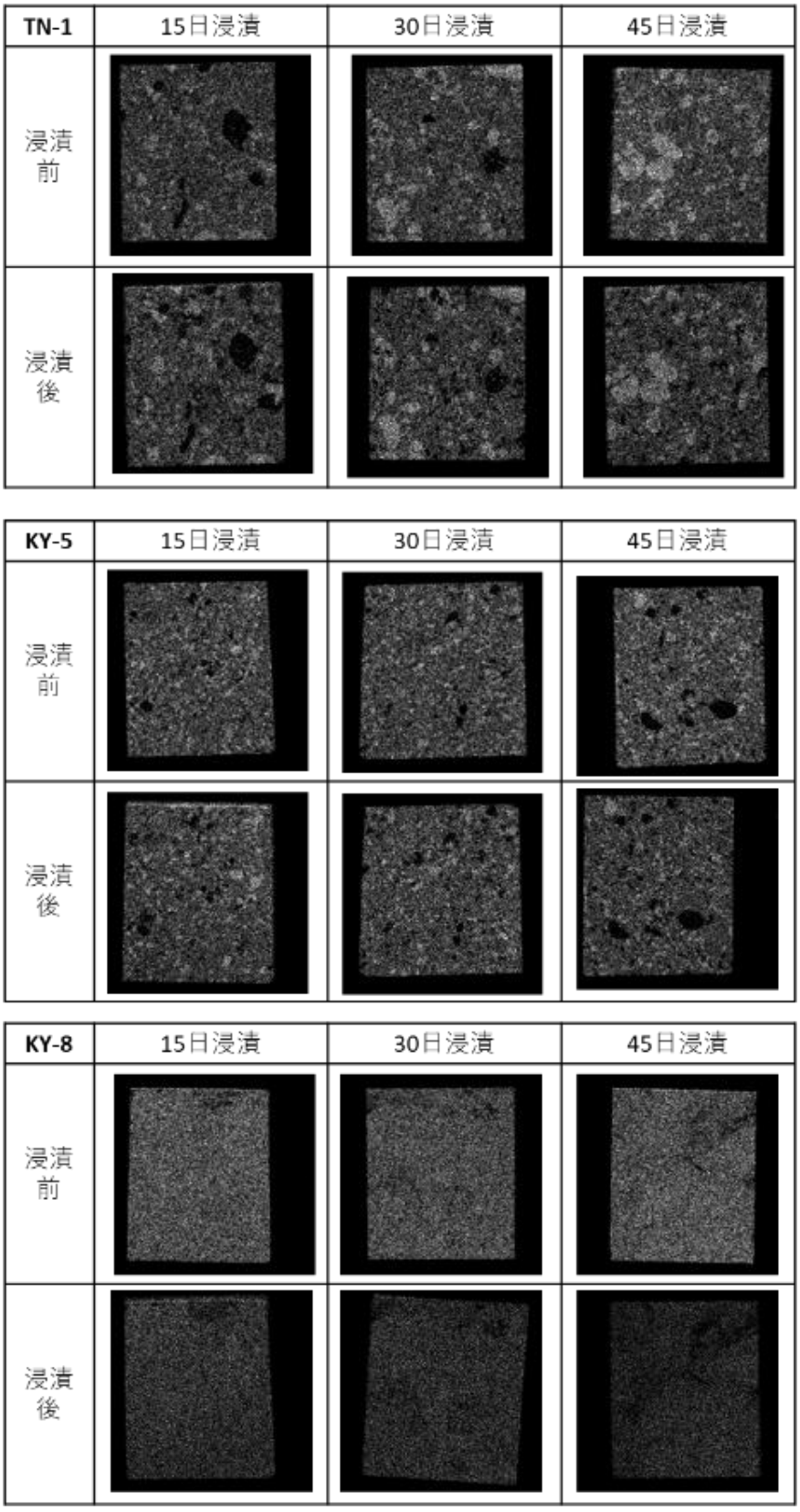


図 2.4-2　X 線分析顕微鏡による Al のマッピング結果

(2) Ca

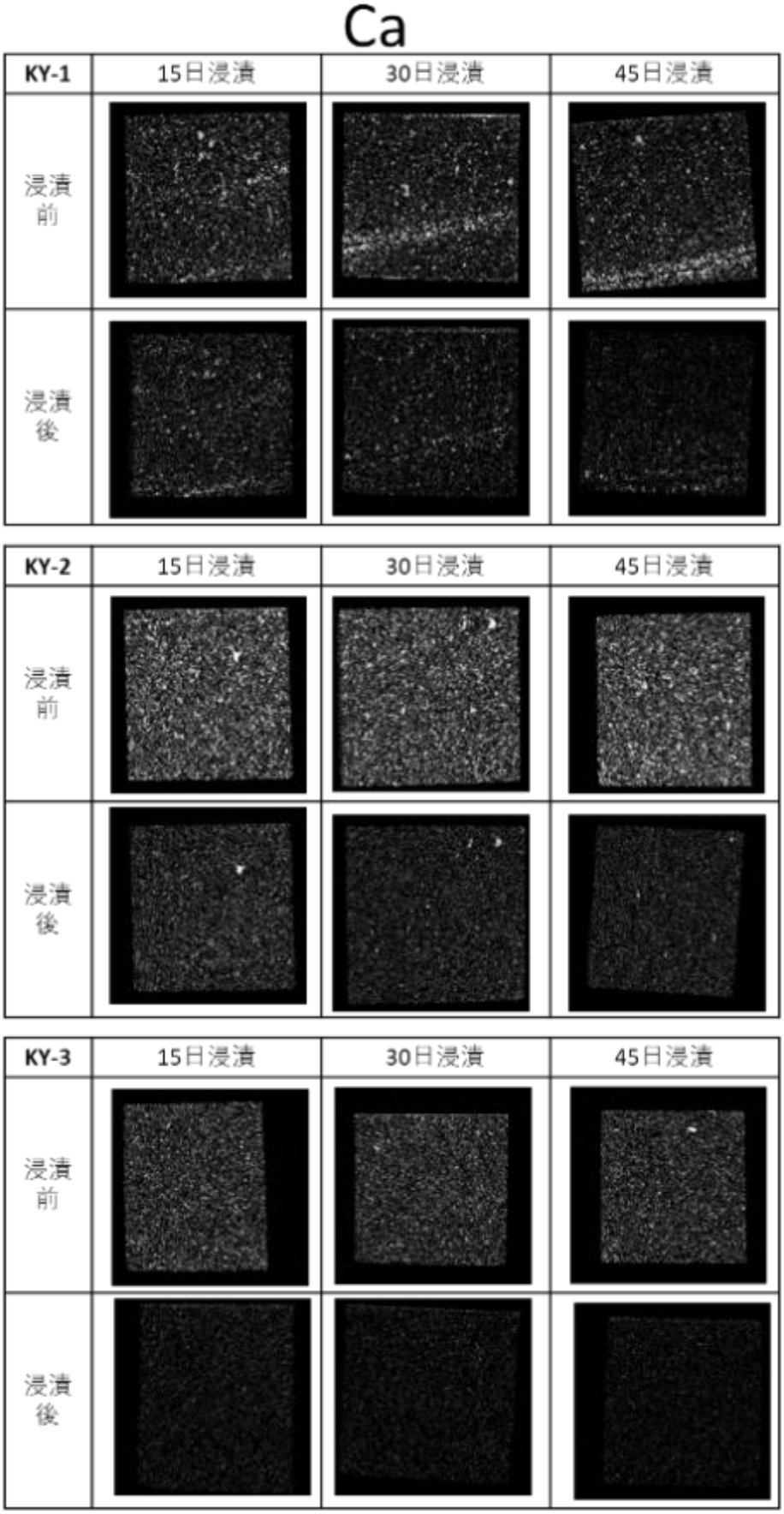


図 2.4-3　X 線分析顕微鏡による Ca のマッピング結果(1)

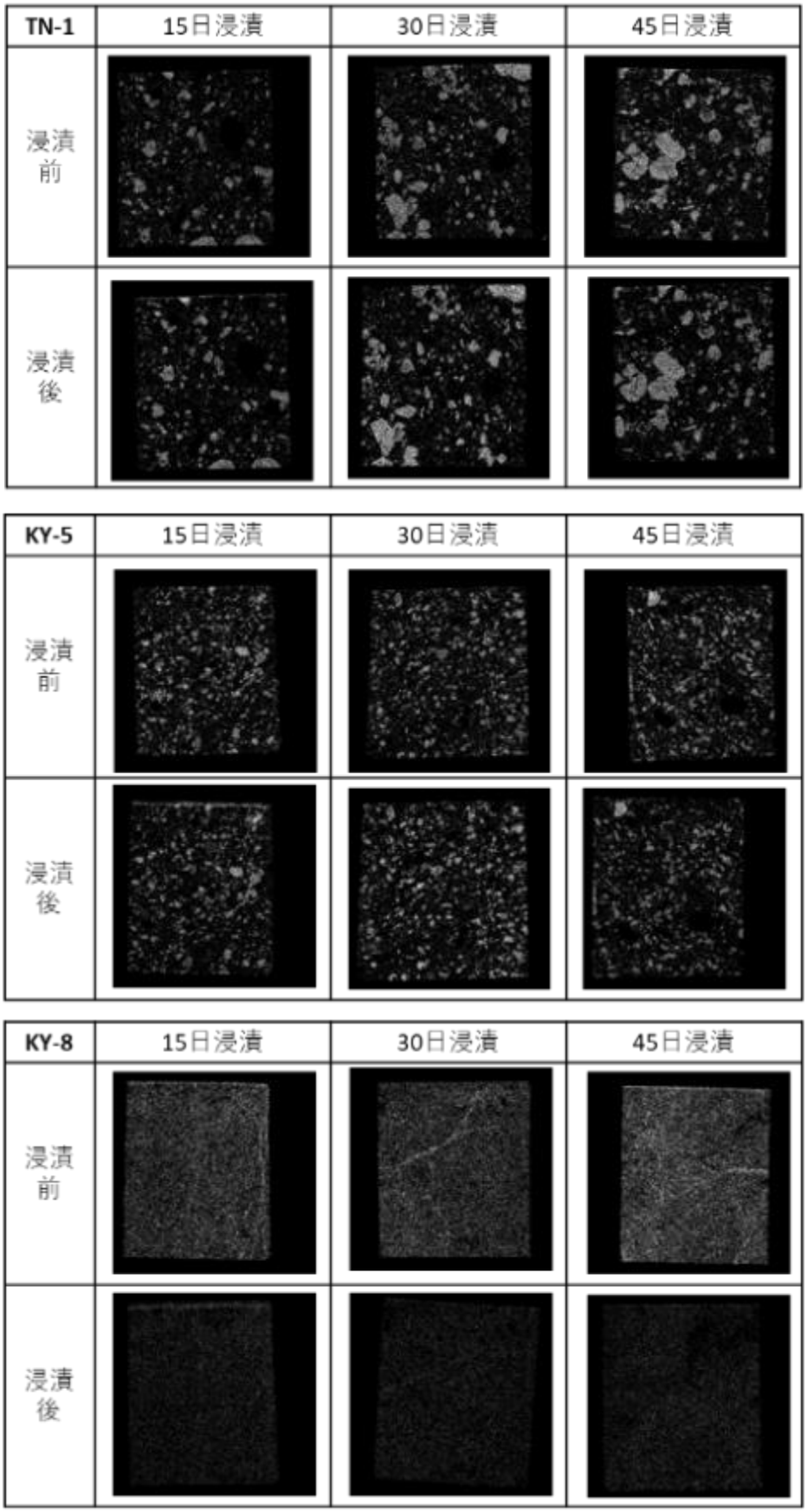


図 2.4-4　X 線分析顕微鏡による Ca のマッピング結果(2)

(3) Fe

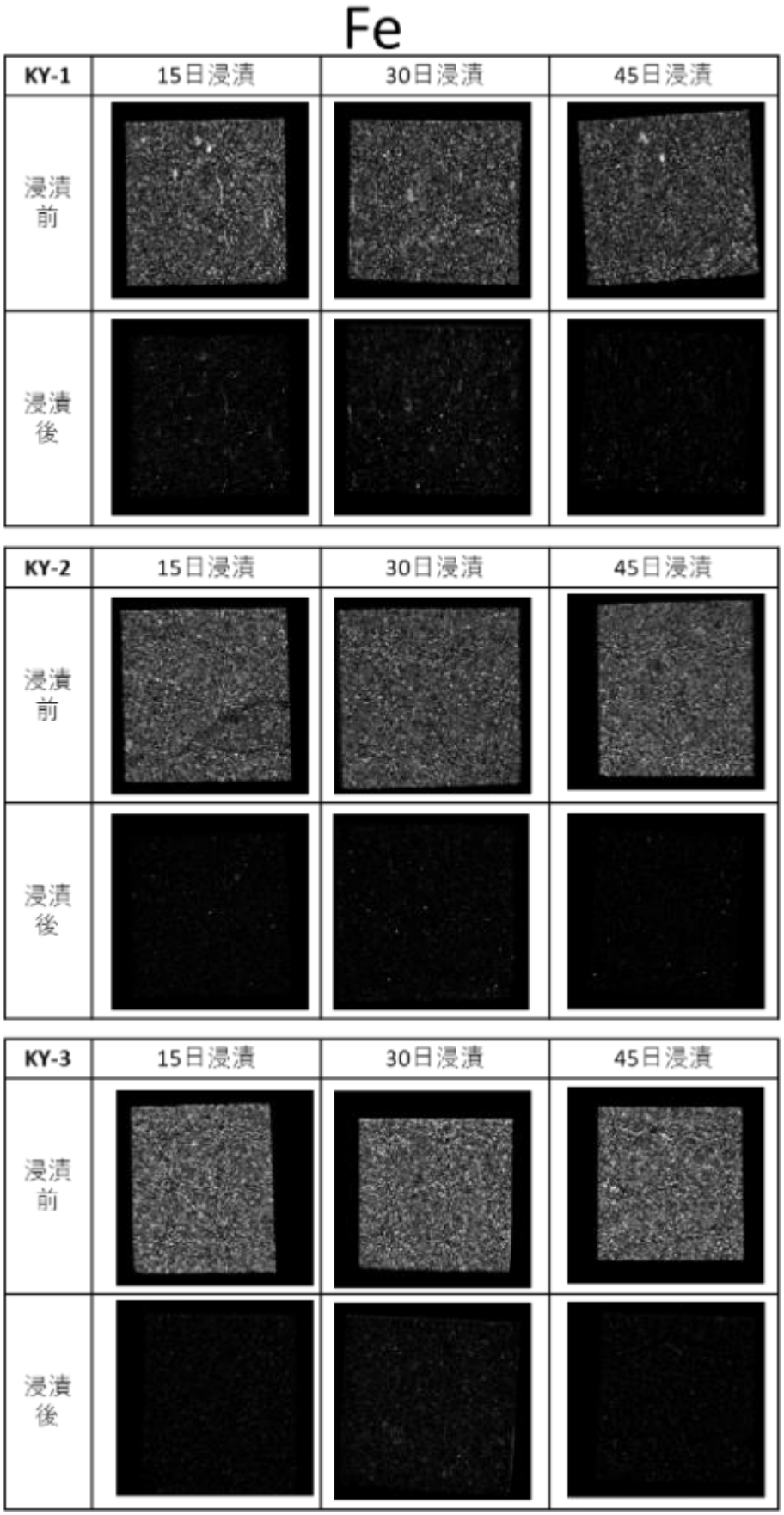


図 2.4-5　X 線分析顕微鏡による Fe のマッピング結果(1)

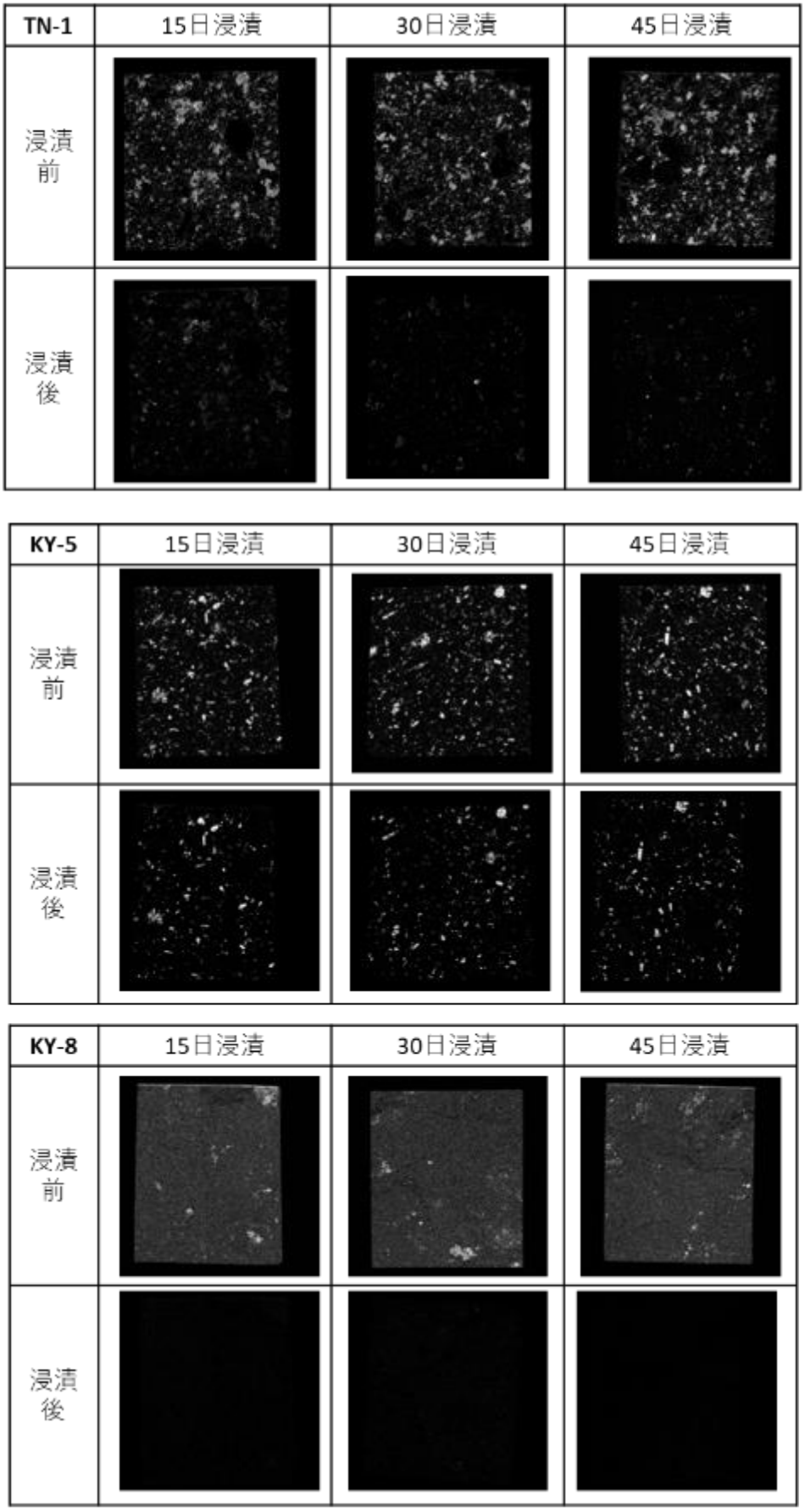


図 2.4-6　X 線分析顕微鏡による Fe のマッピング結果(2)

(4) K

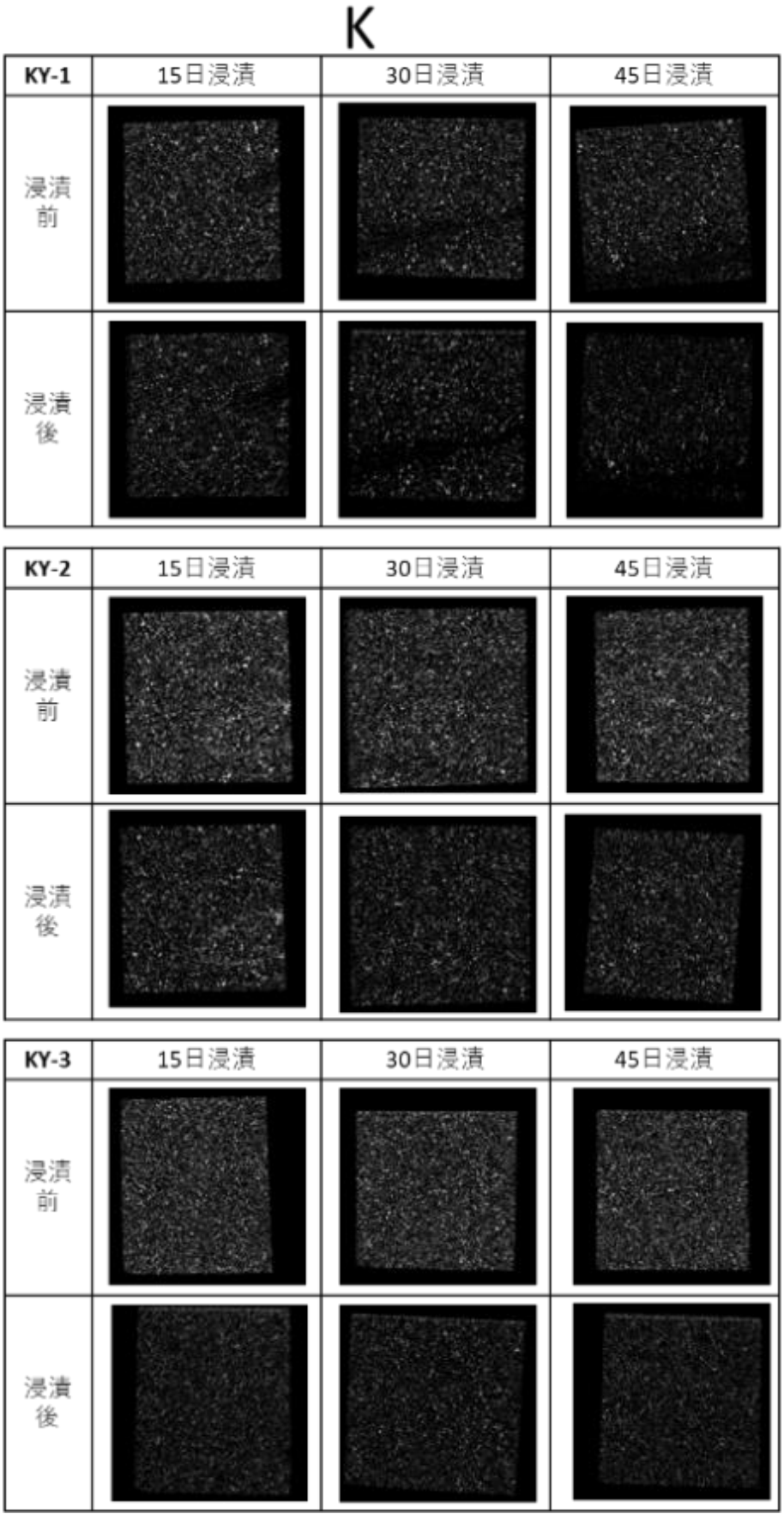


図 2.4-7　X 線分析顕微鏡による K のマッピング結果(1)

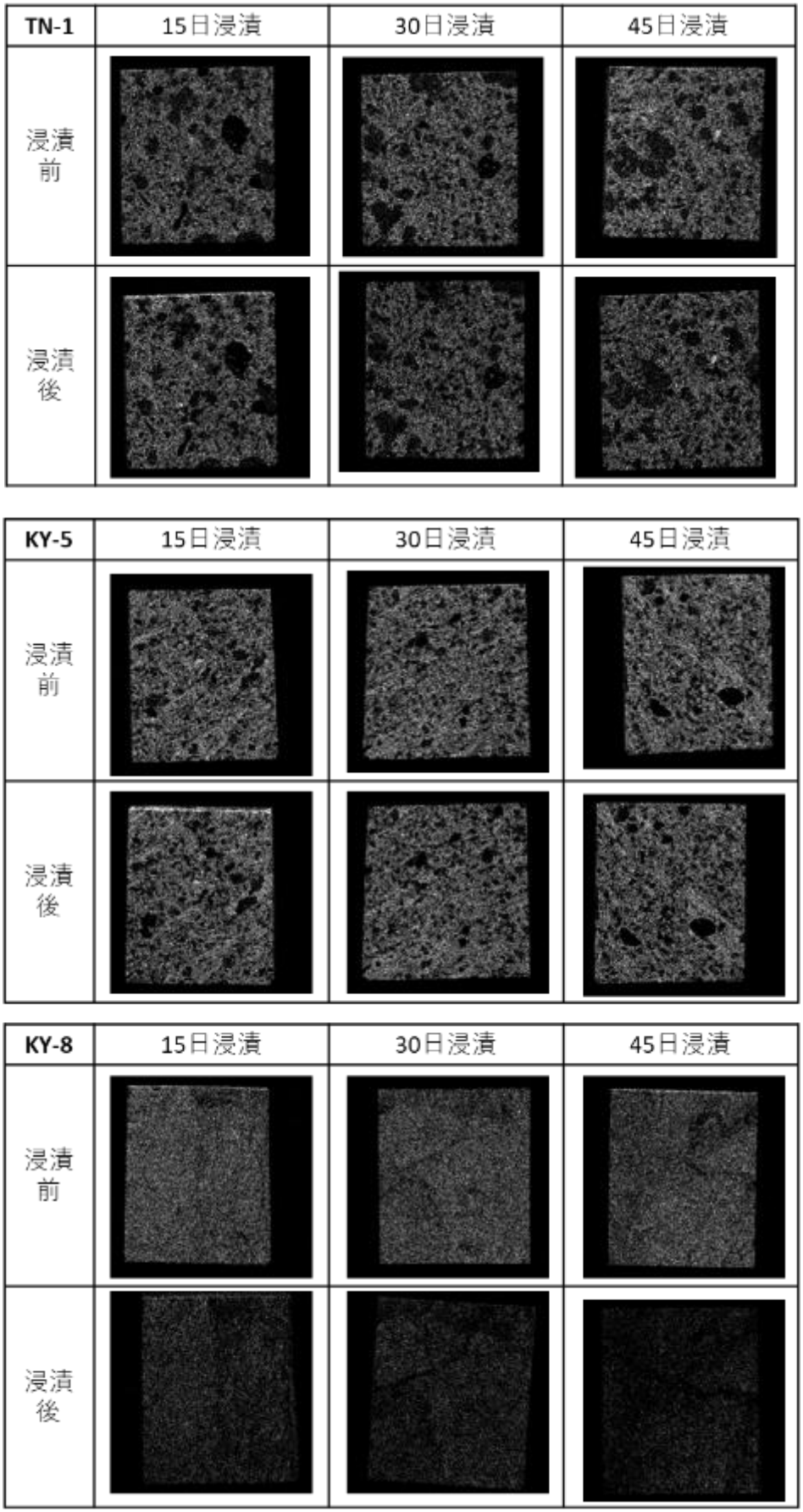


図 2.4-8　X 線分析顕微鏡による K のマッピング結果(2)

(5) Mg

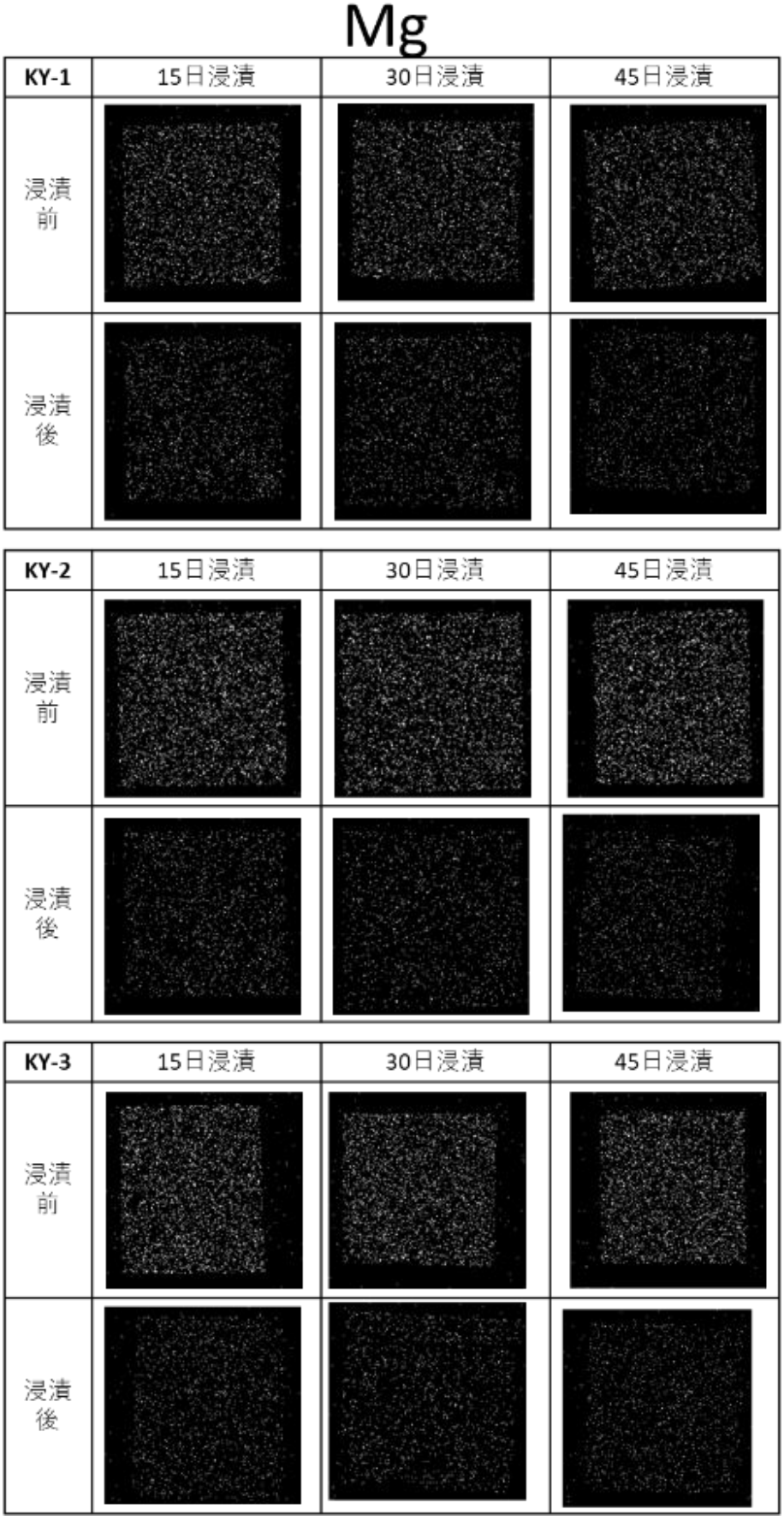


図 2.4-9　X 線分析顕微鏡による Mg のマッピング結果(1)

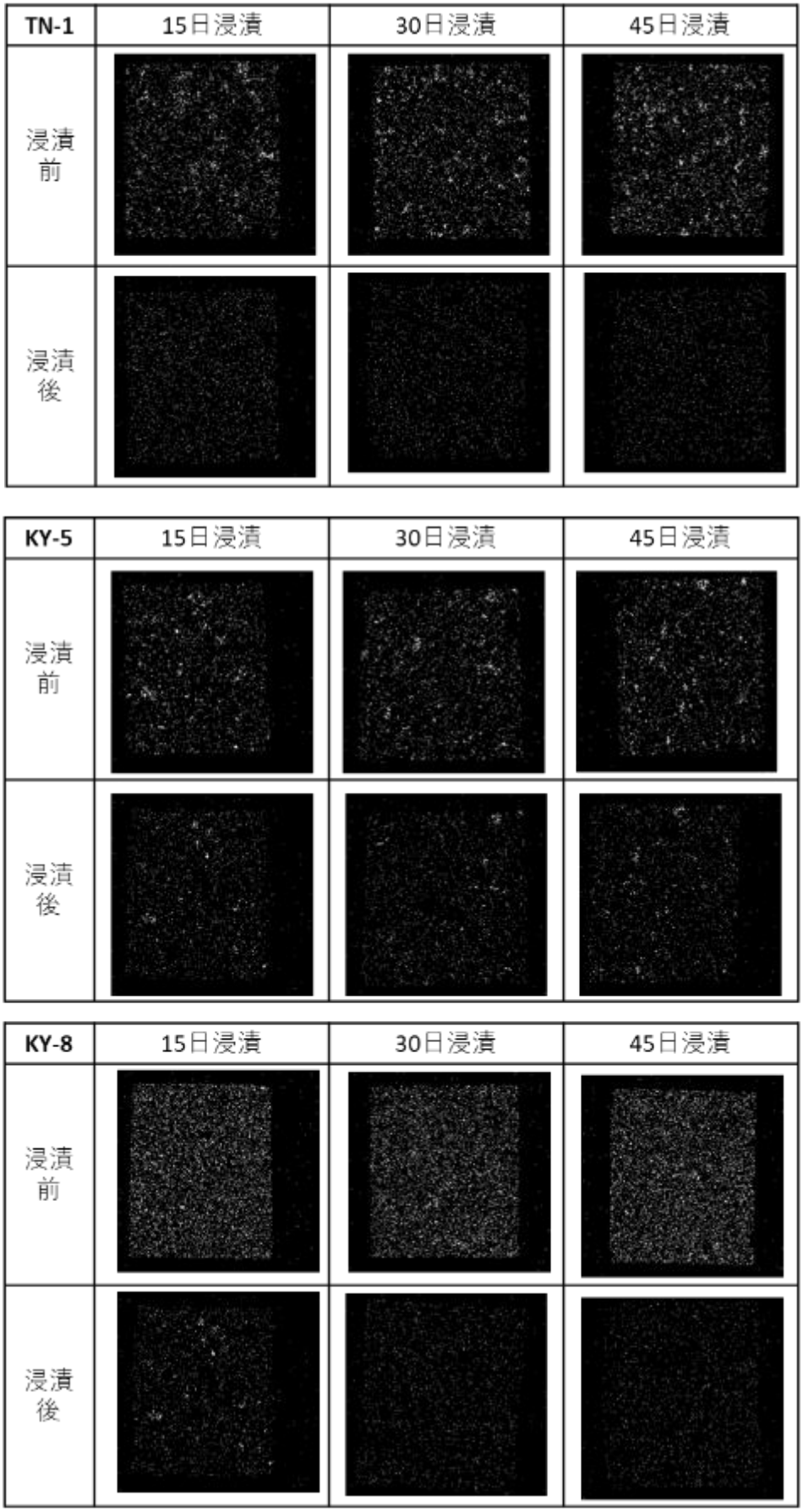


図 2.4-10　X 線分析顕微鏡による Mg のマッピング結果(2)

(6) Mn

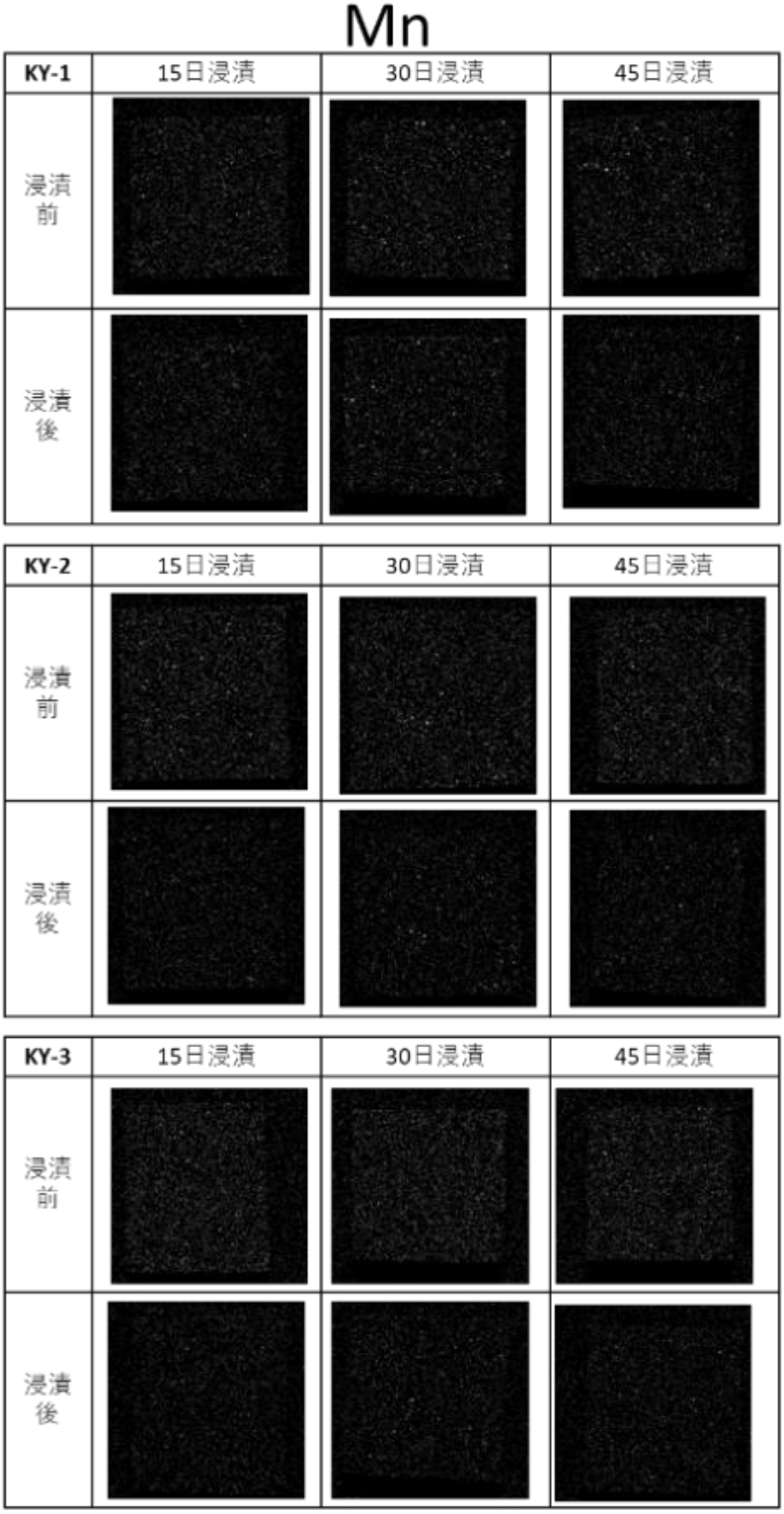


図 2.4-11　X 線分析顕微鏡による Mn のマッピング結果(1)

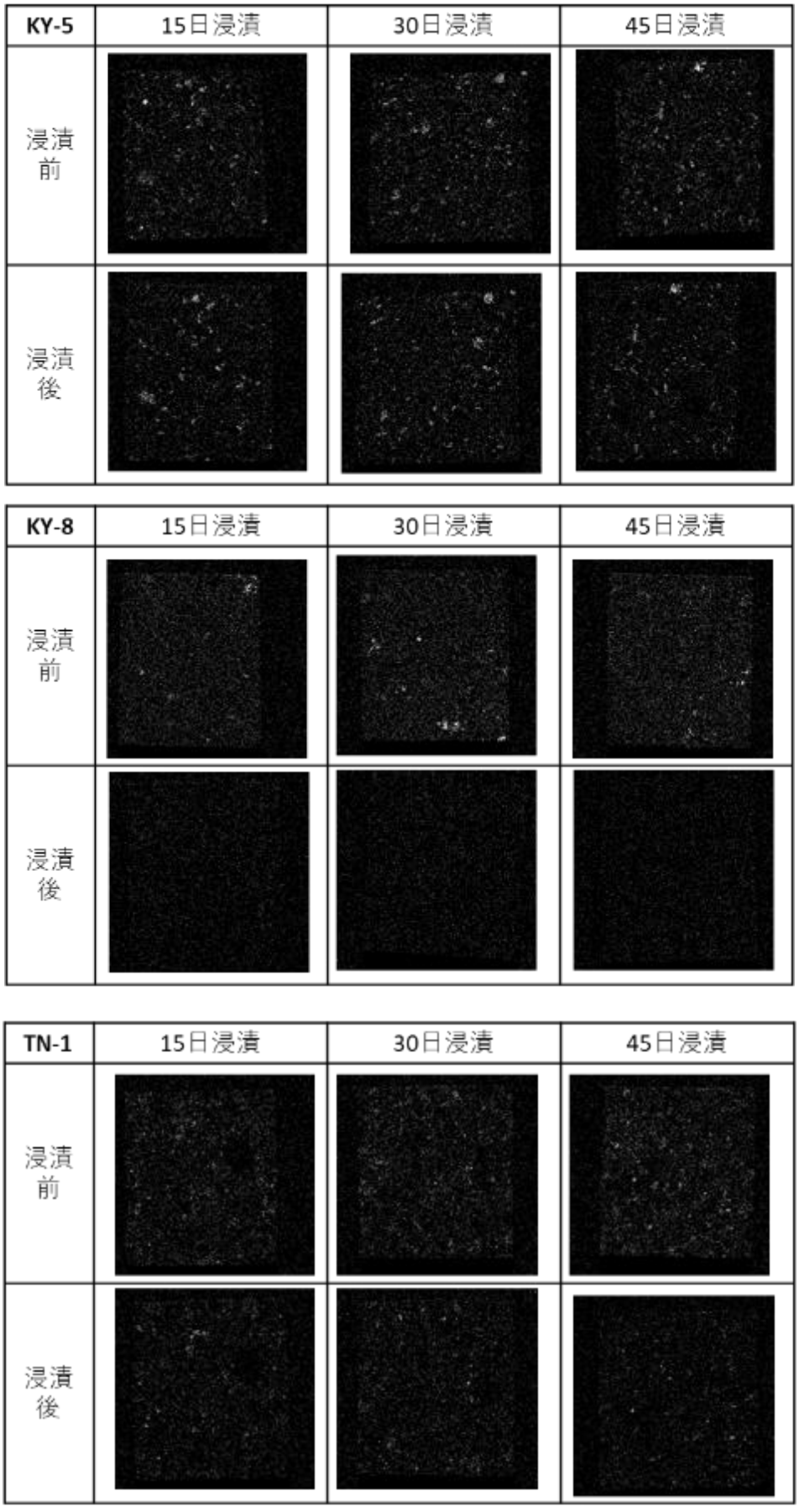


図 2.4-12　X 線分析顕微鏡による Mn のマッピング結果(2)

(7) Na

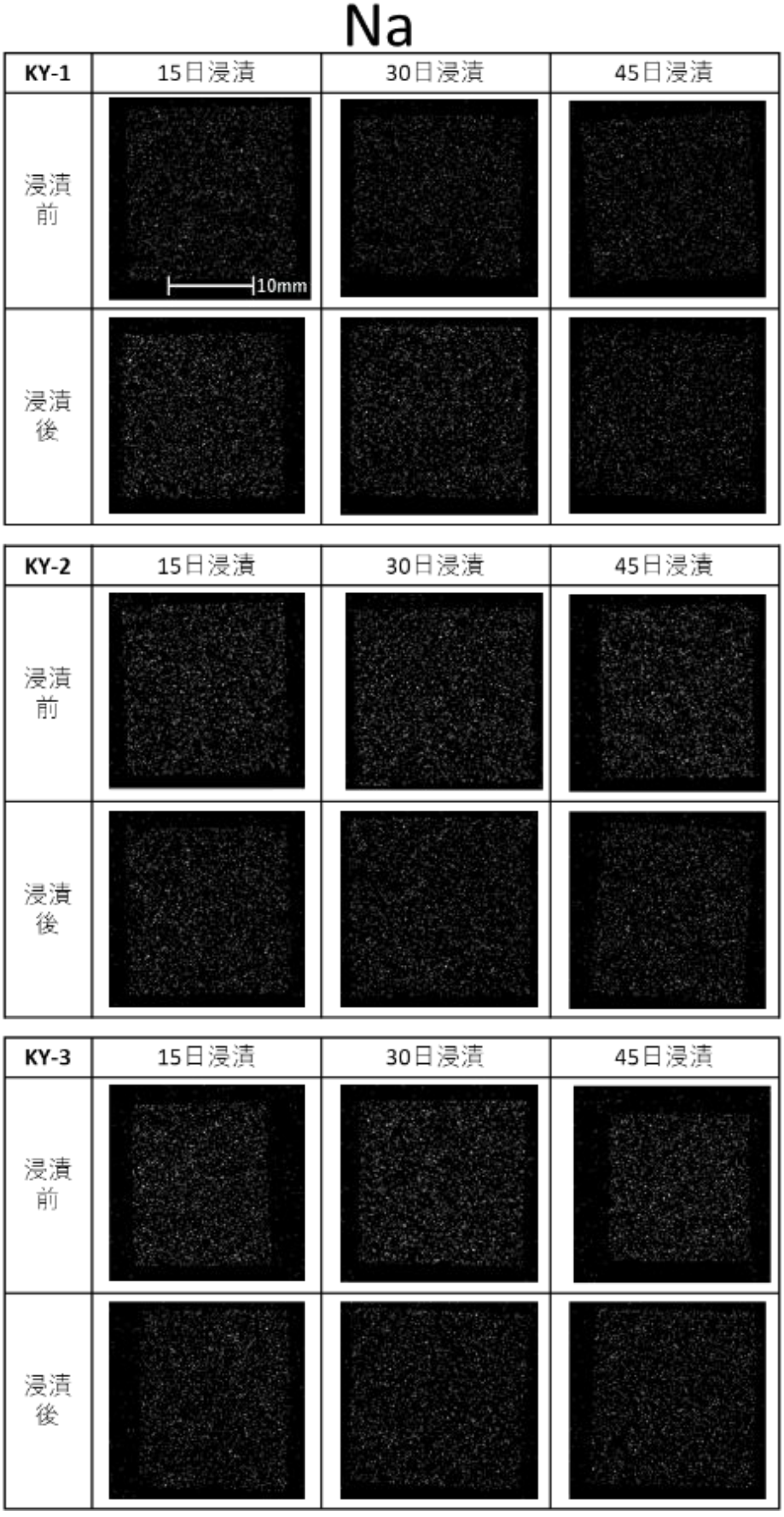


図 2.4-13　X 線分析顕微鏡による Na のマッピング結果(1)

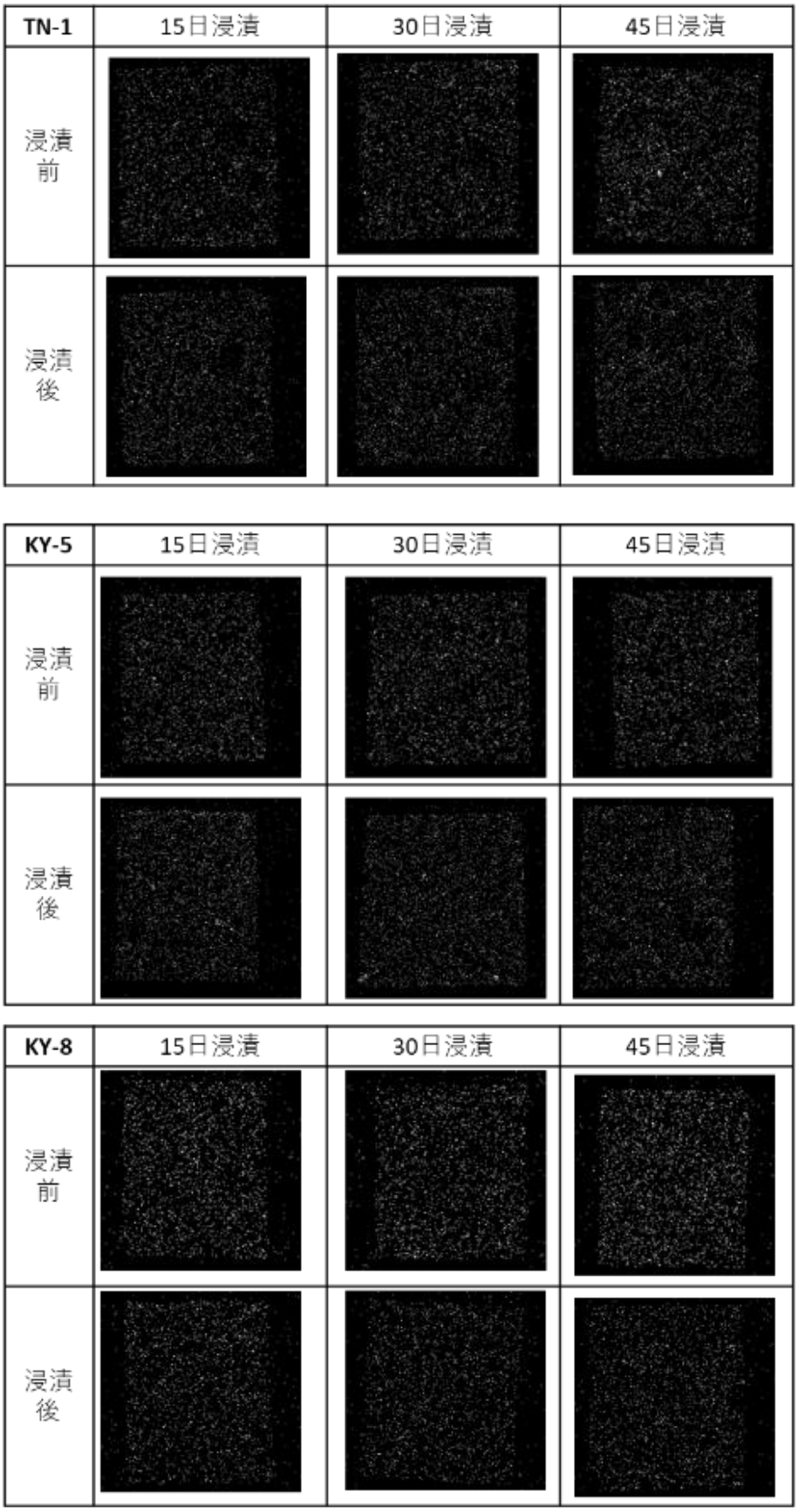


図 2.4-14　X 線分析顕微鏡による Na のマッピング結果(2)

(8) P

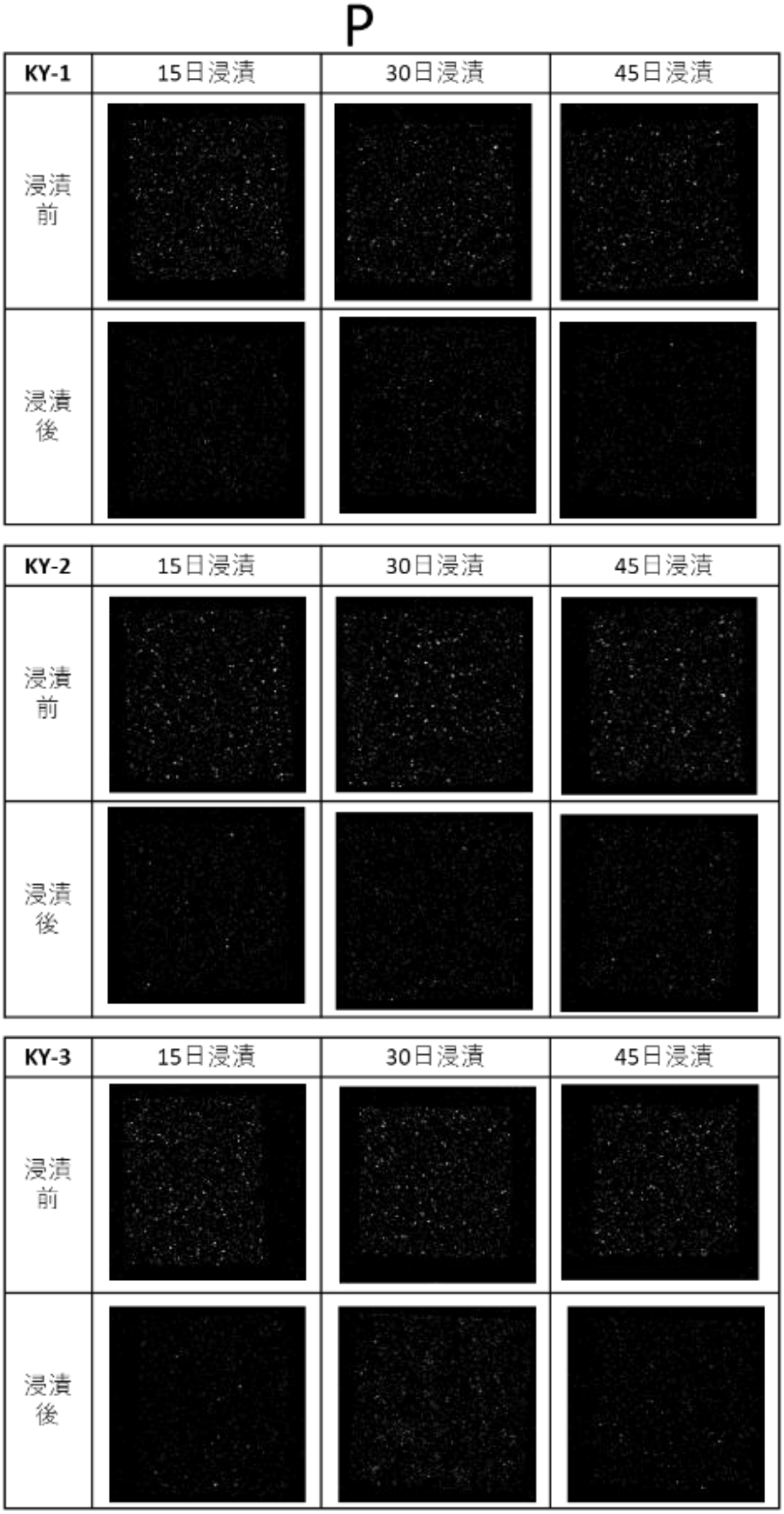


図 2.4-15　X 線分析顕微鏡による P のマッピング結果(1)

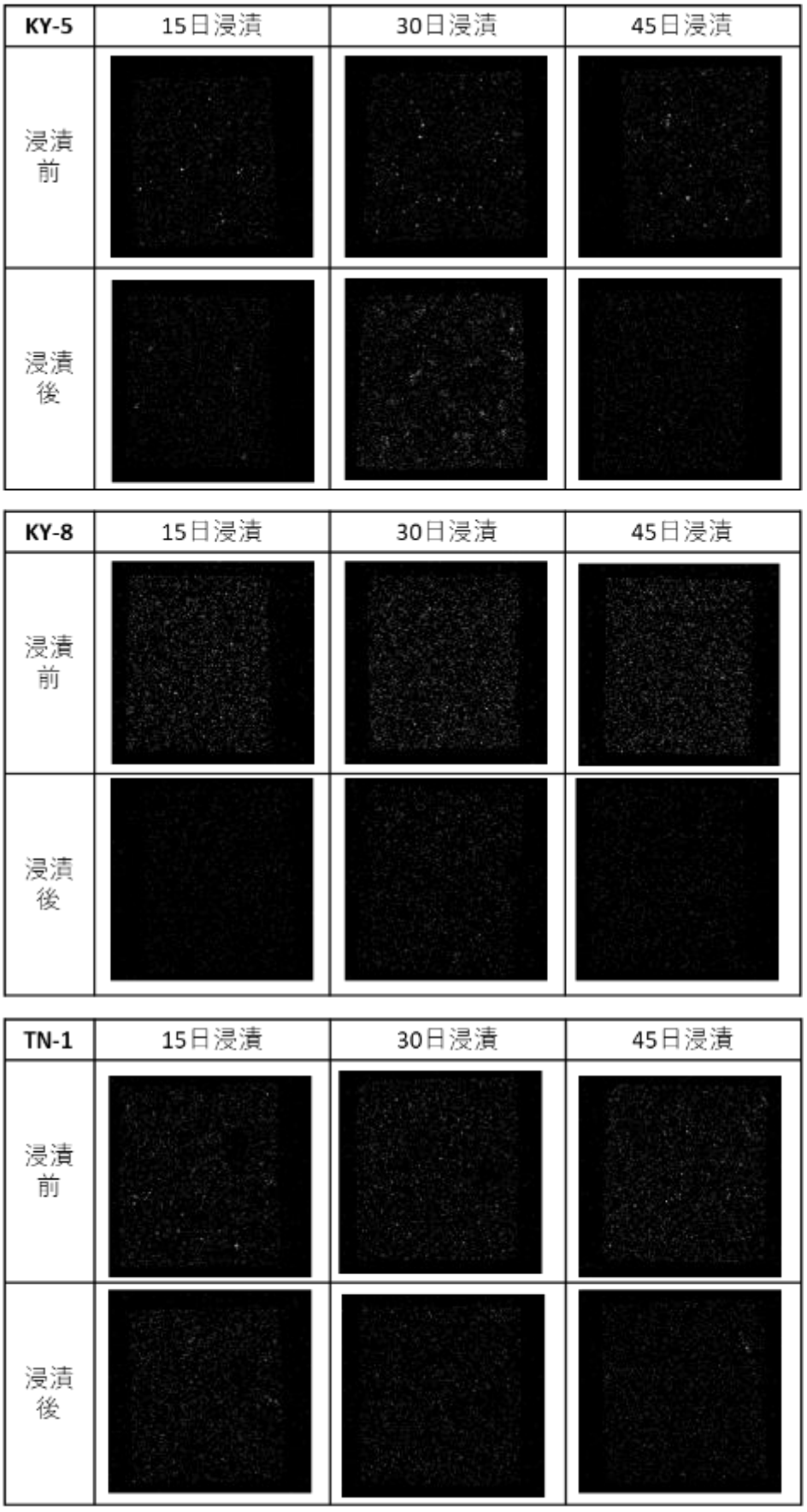


図 2.4-16　X 線分析顕微鏡による P のマッピング結果(2)

(9) S

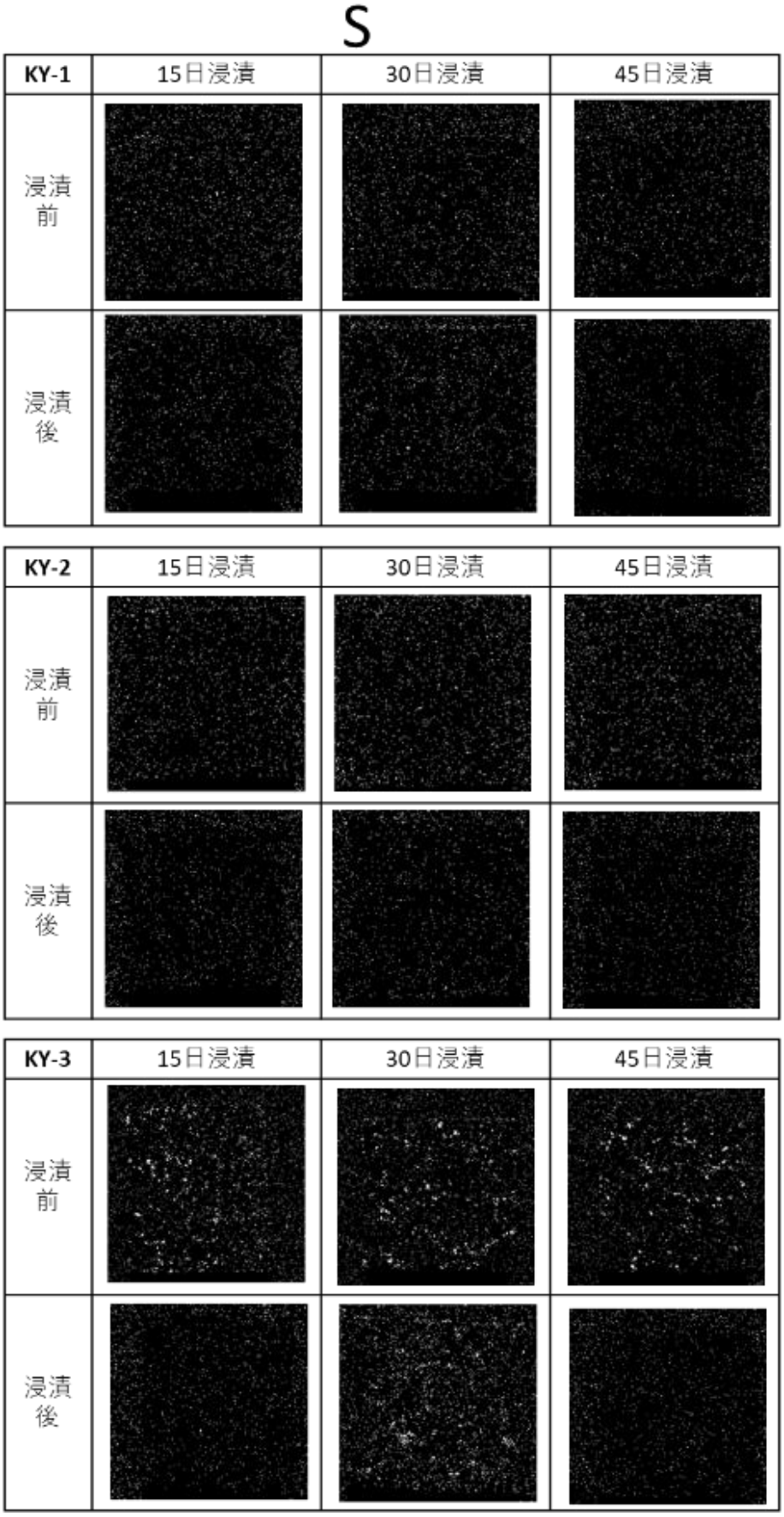


図 2.4-17　X 線分析顕微鏡による S のマッピング結果(1)

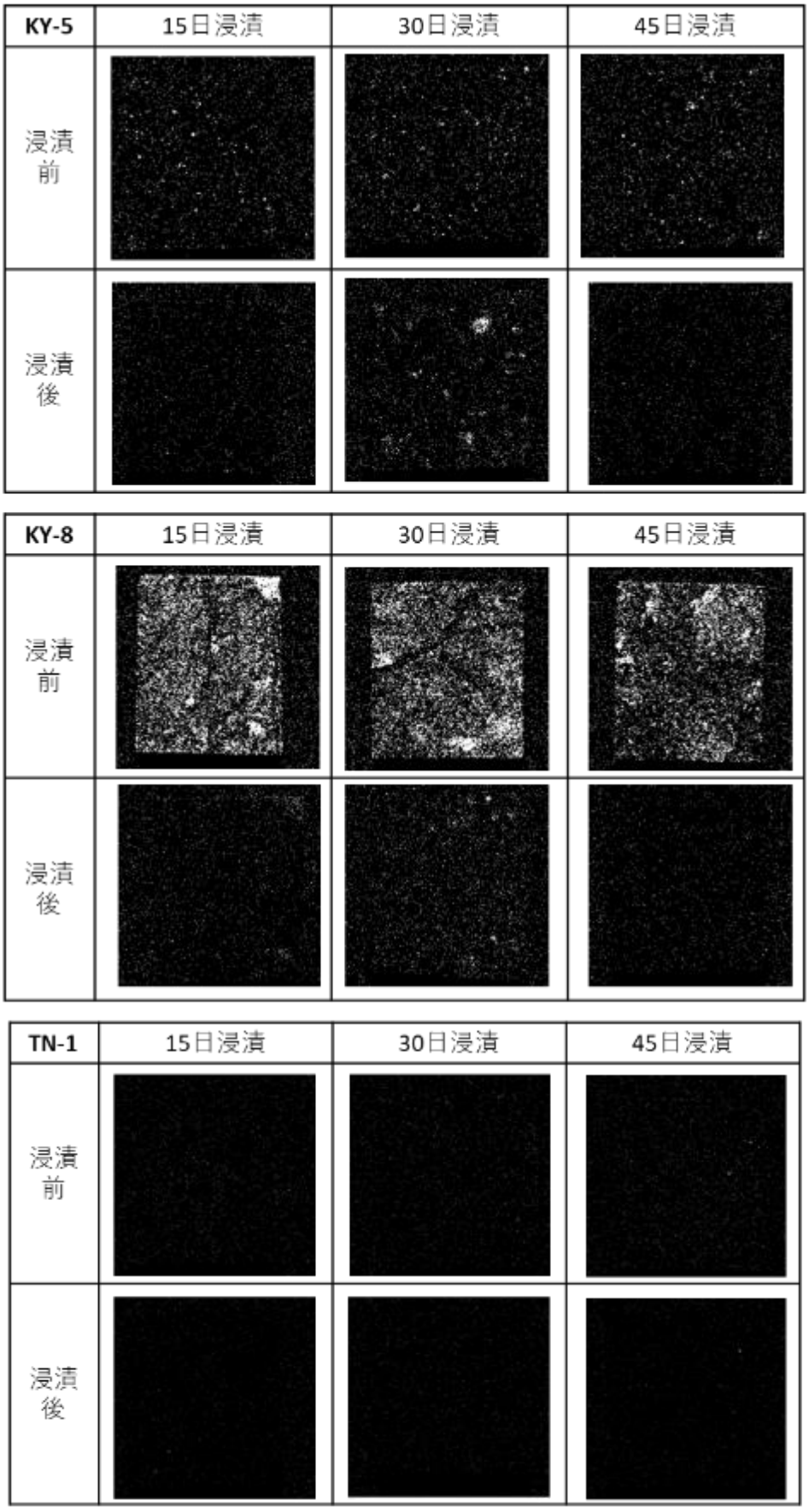


図 2.4-18　X 線分析顕微鏡による S のマッピング結果(2)

(10) Si

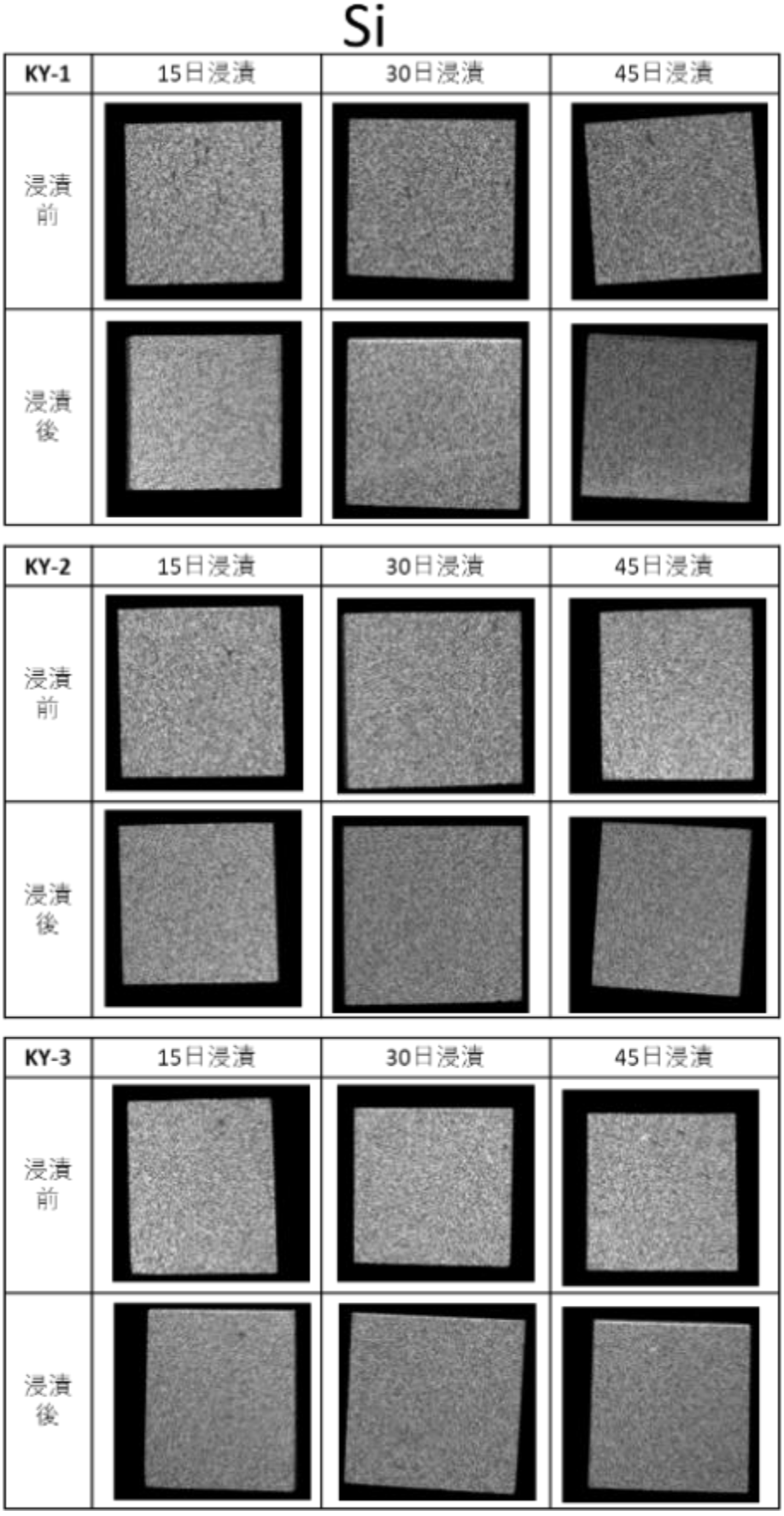


図 2.4-19　X 線分析顕微鏡による Si のマッピング結果(1)

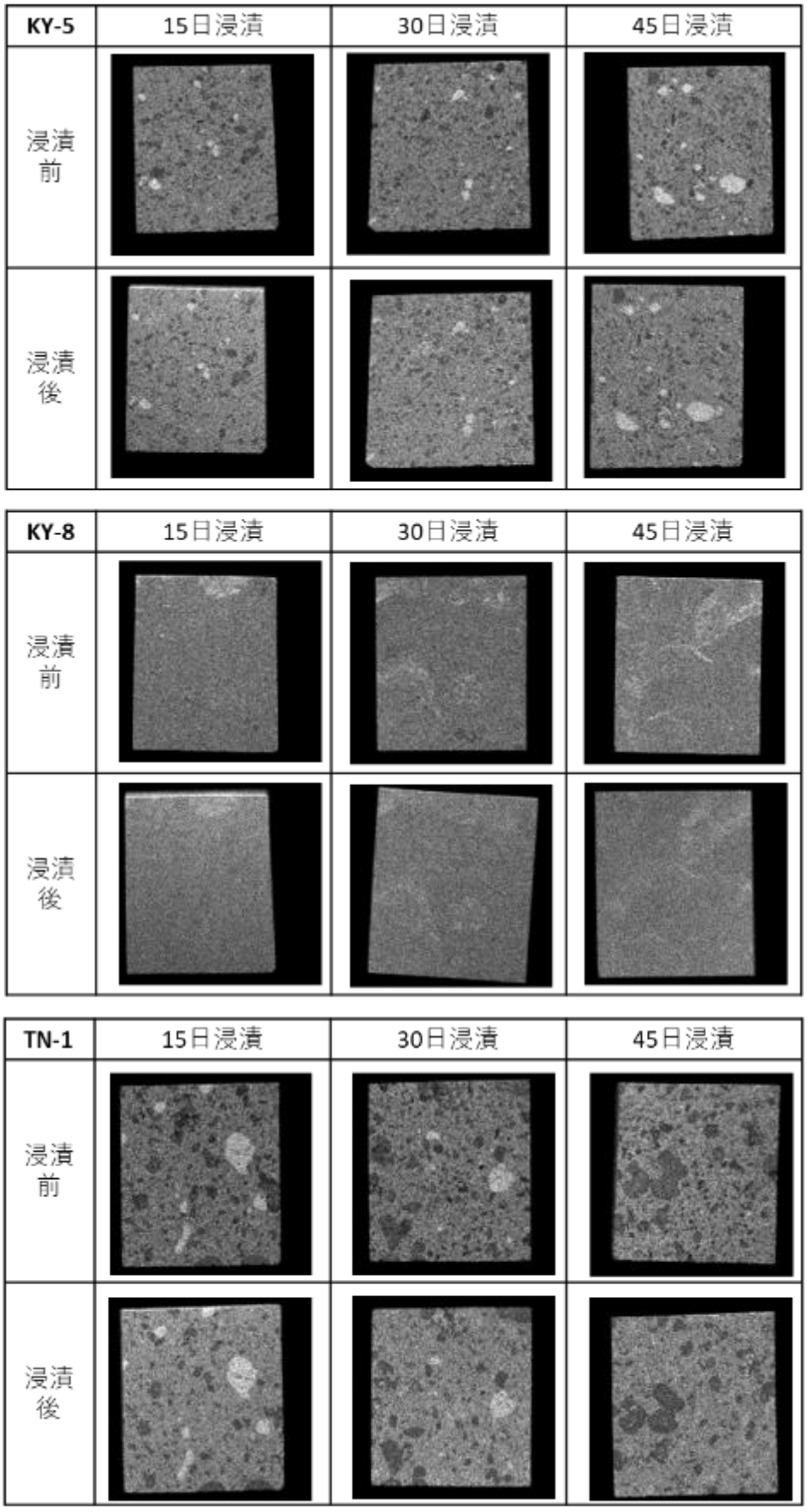


図 2.4-20　X 線分析顕微鏡による Si のマッピング結果(2)

(11) Ti

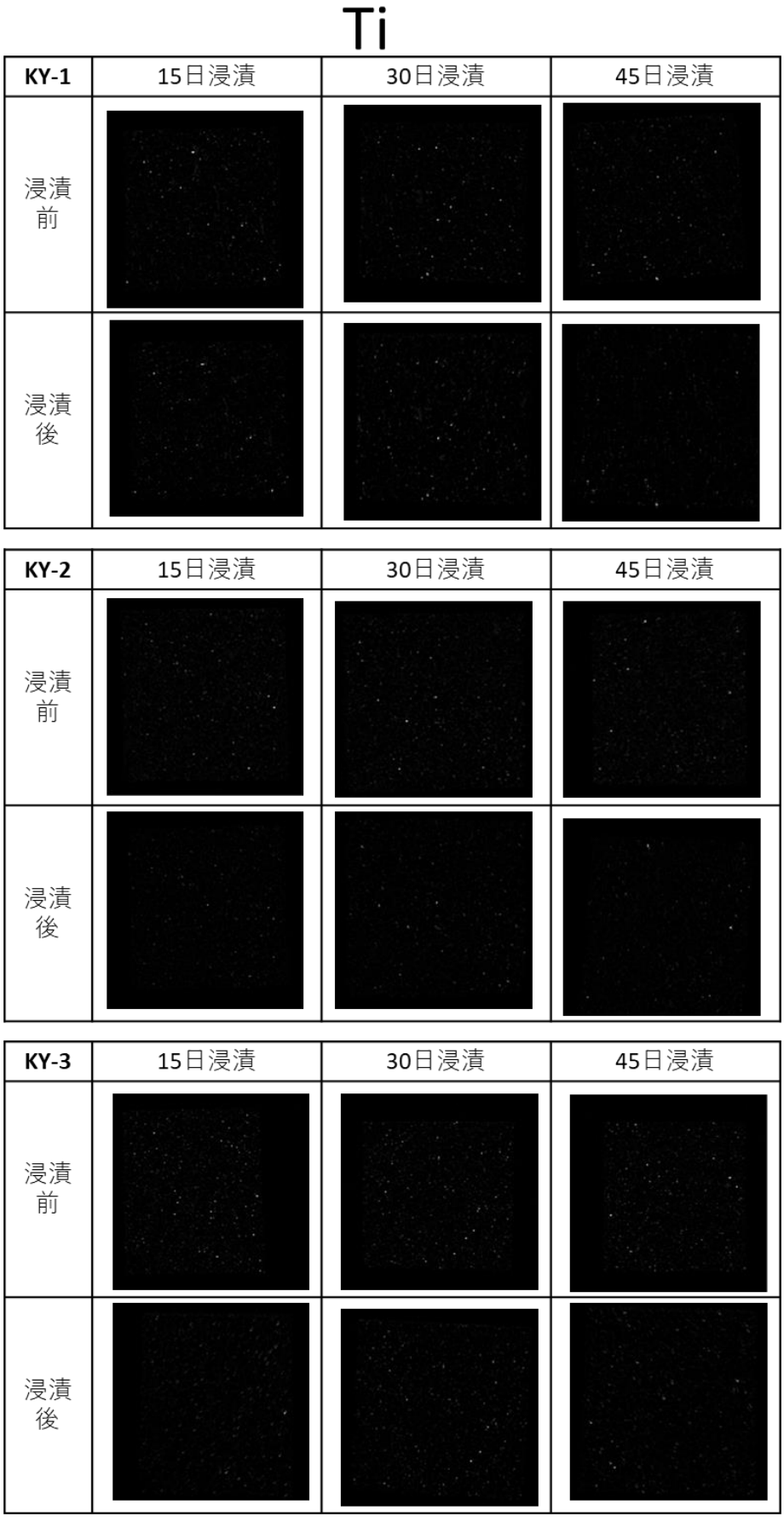


図 2.4-21　X 線分析顕微鏡による Ti のマッピング結果(1)

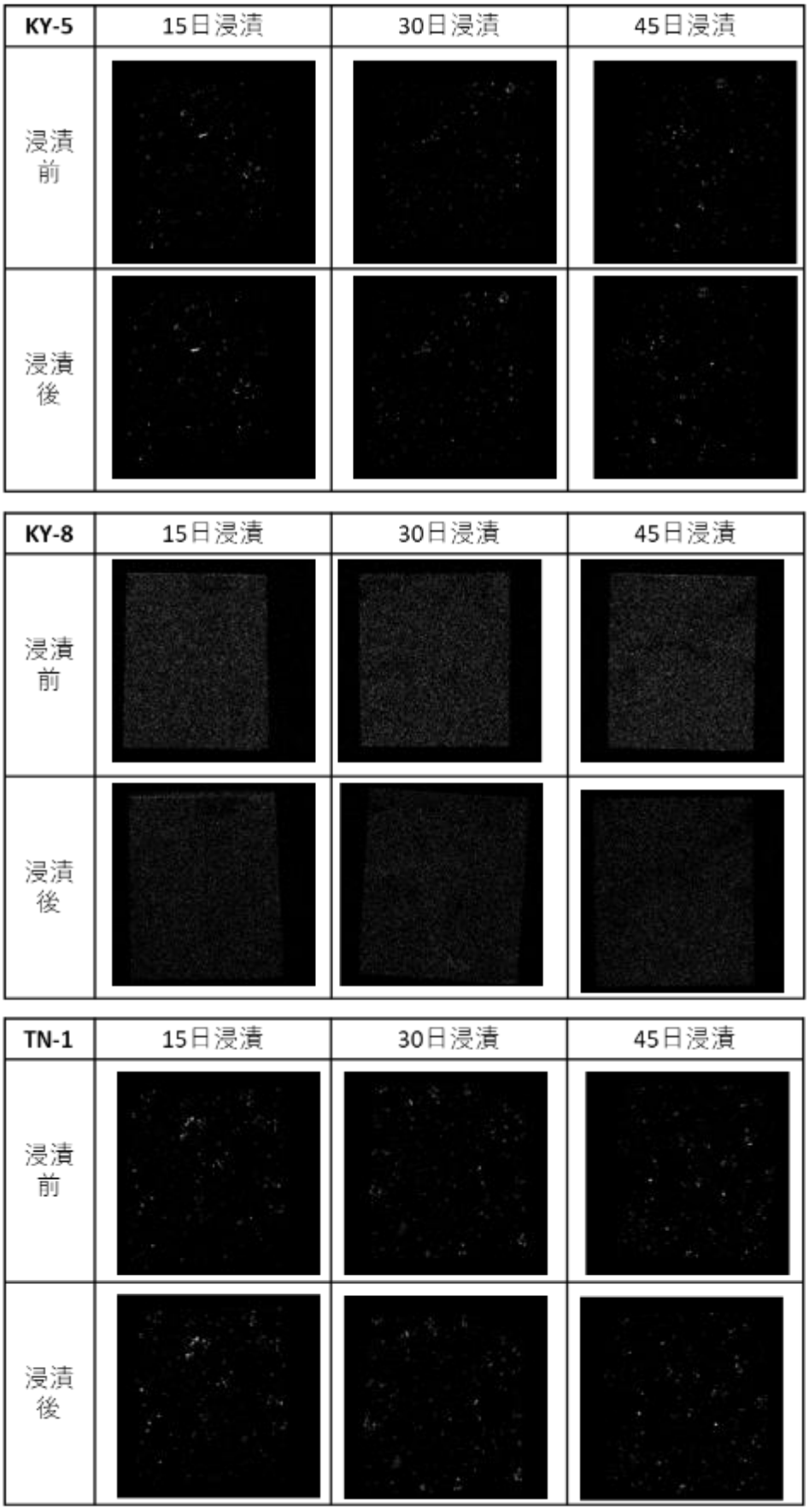


図 2.4-22　X 線分析顕微鏡による Ti のマッピング結果(2)

2.5 マイクロフォーカス X 線 CT スキャン

浸漬前後での試料内部の密度変化を把握することを目的として、浸漬前後の実験試料について、マイクロフォーカス X 線 CT スキャン（テスコ社、TXS-CT450/160）による観察を実施した。測定条件を表 2.5-1 に、測定結果を図 2.5-1～図 2.5-6 に示す。また、浸漬後に試料表面に生じた低密度帯の厚さを測定した結果を表 2.5-2 に示す。

表 2.5-1　マイクロフォーカス X 線 CT スキャンの測定条件

項目	条件
使用線源	160kV 線源
管電圧/管電流	140kV/200μA
SID/SOD	1000mm/200mm
拡大率	5
画素サイズ	40μm/pixel
有効視野	81.9mm
プロジェクション	3600
露光時間	500msec
ゲイン	×1
フィルター	無し

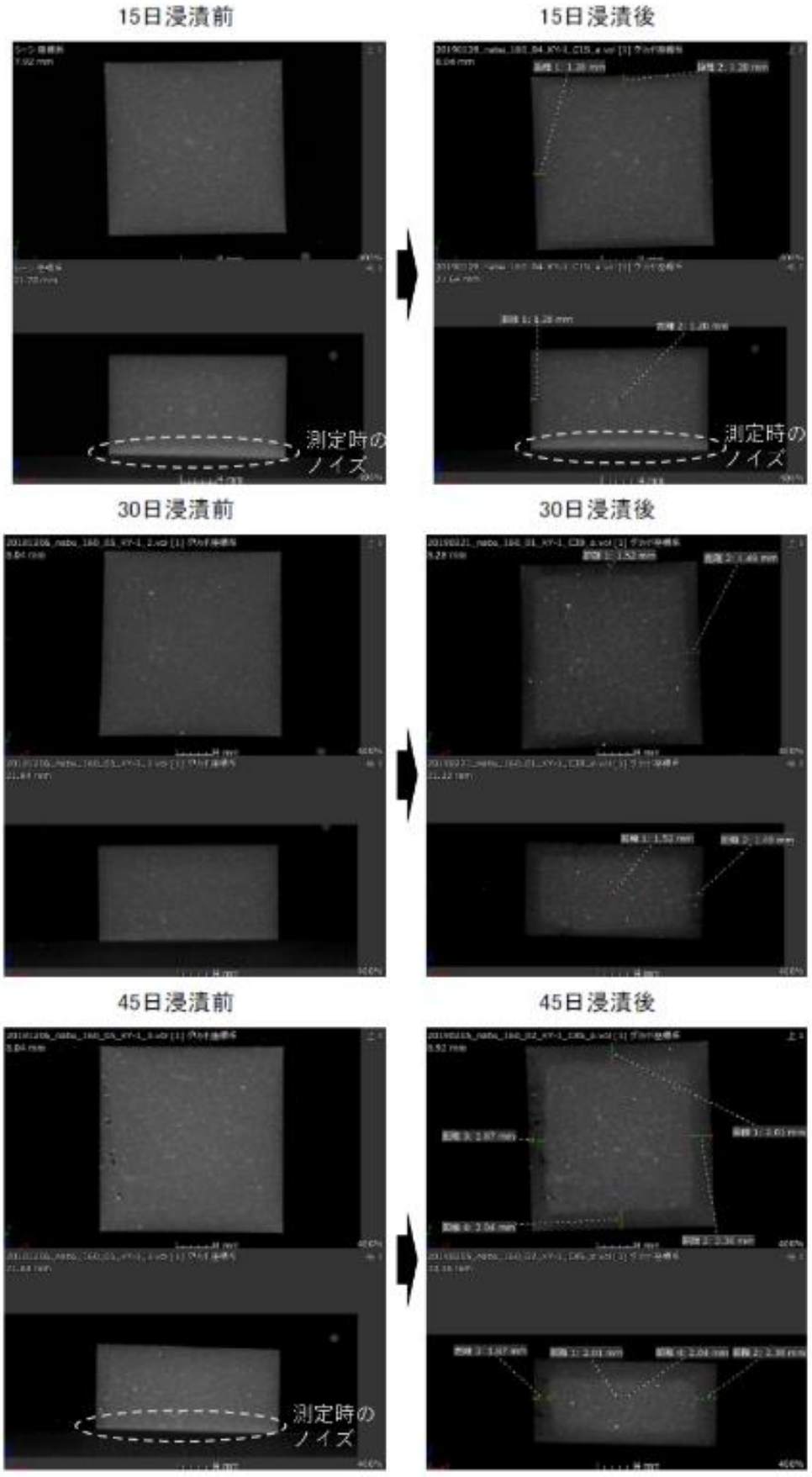


図 2.5-1　KY-1（砂岩）の測定結果

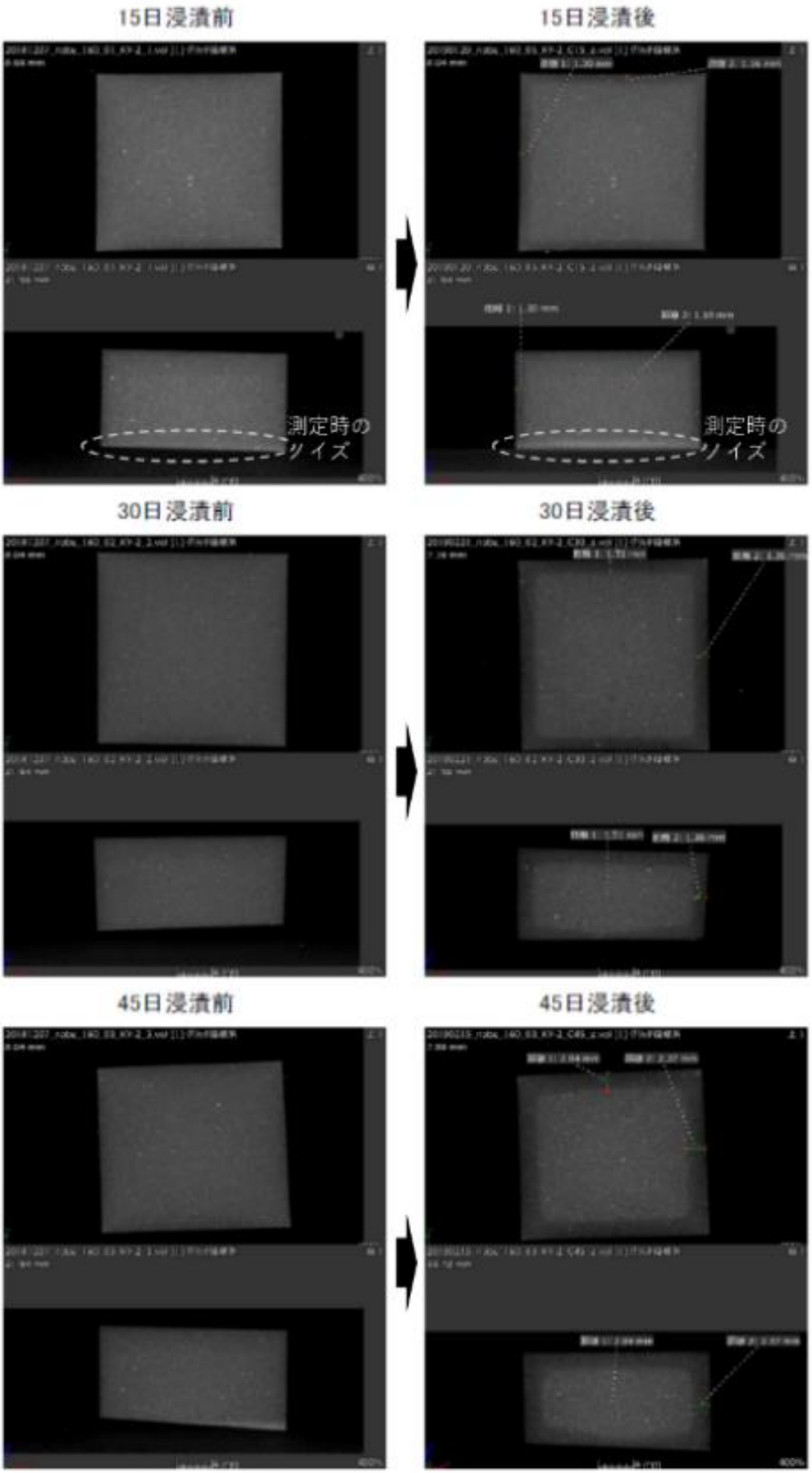


図 2.5-2　KY-2（砂岩）の測定結果

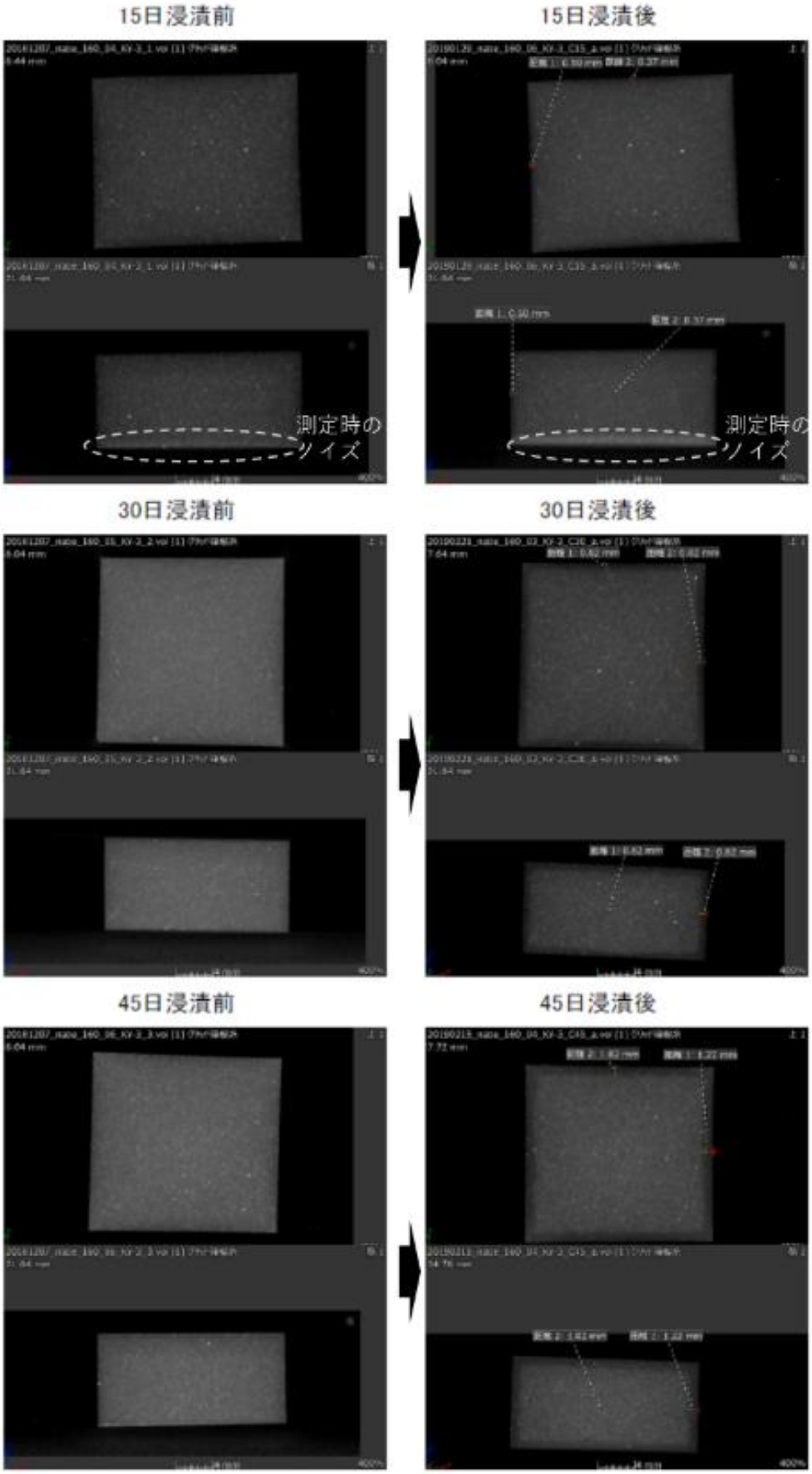


図 2.5-3　KY-3（砂岩）の測定結果

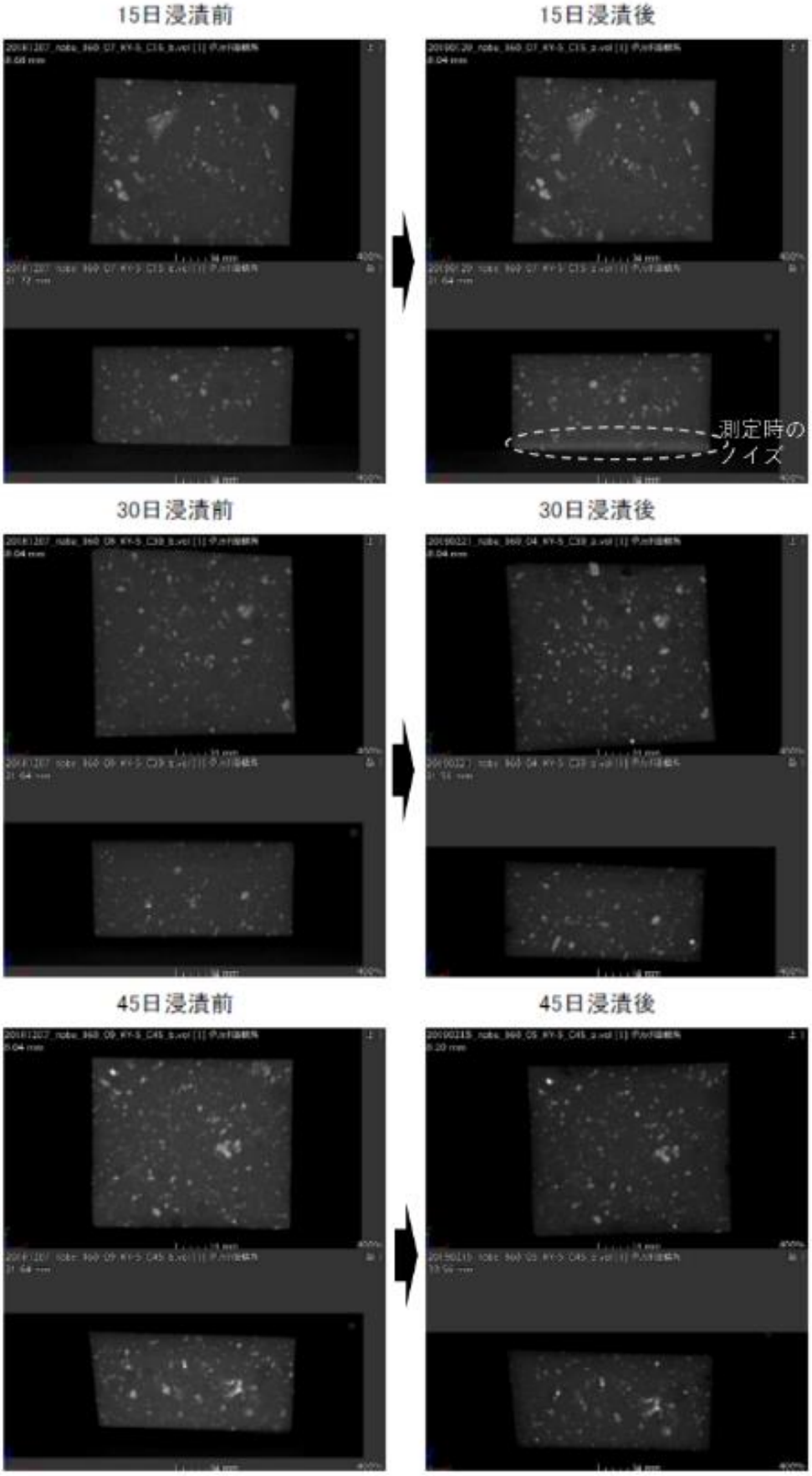


図 2.5-4　KY-5（溶結凝灰岩）の測定結果

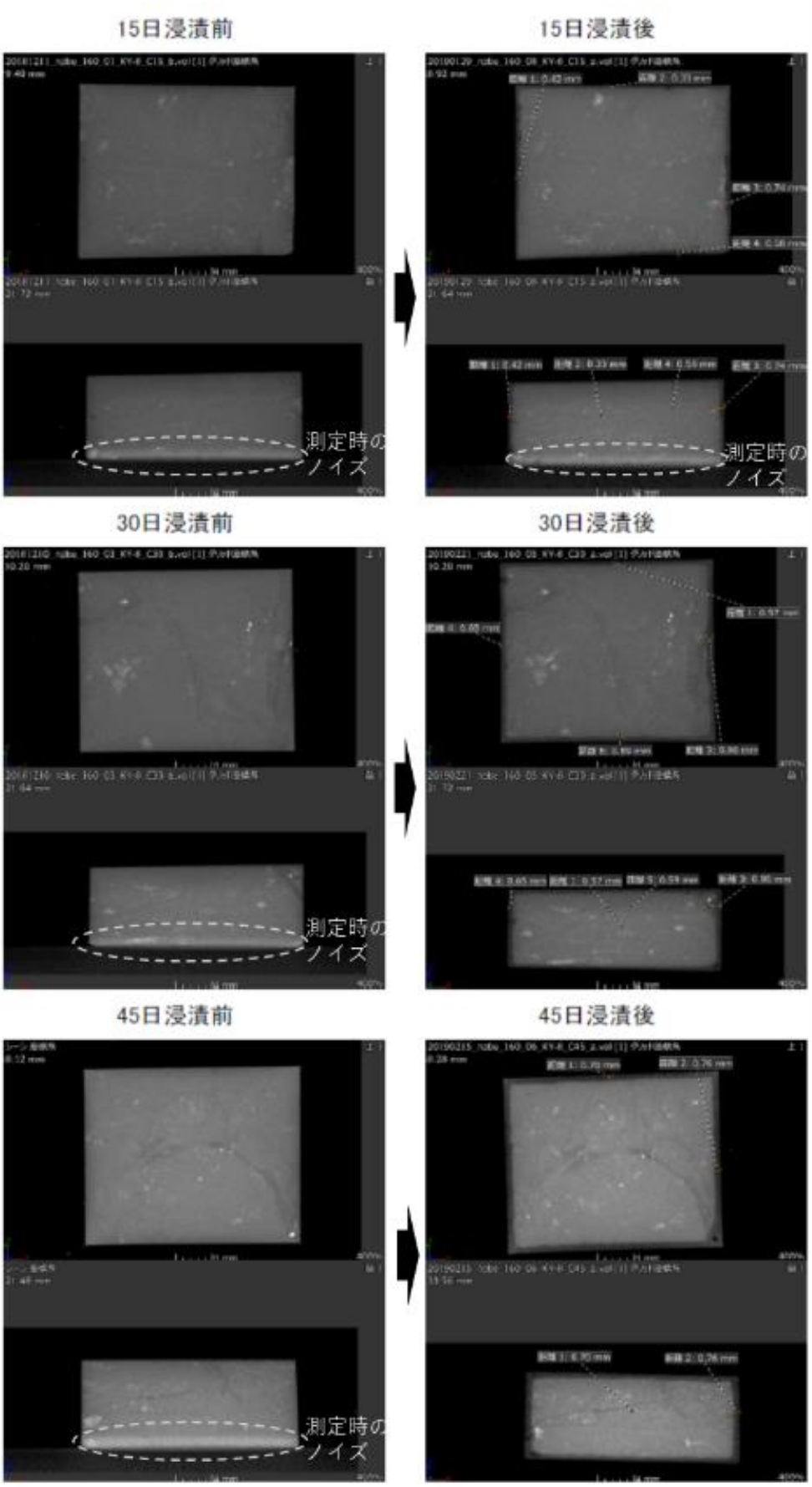


図 2.5-5　KY-8（泥岩）の測定結果

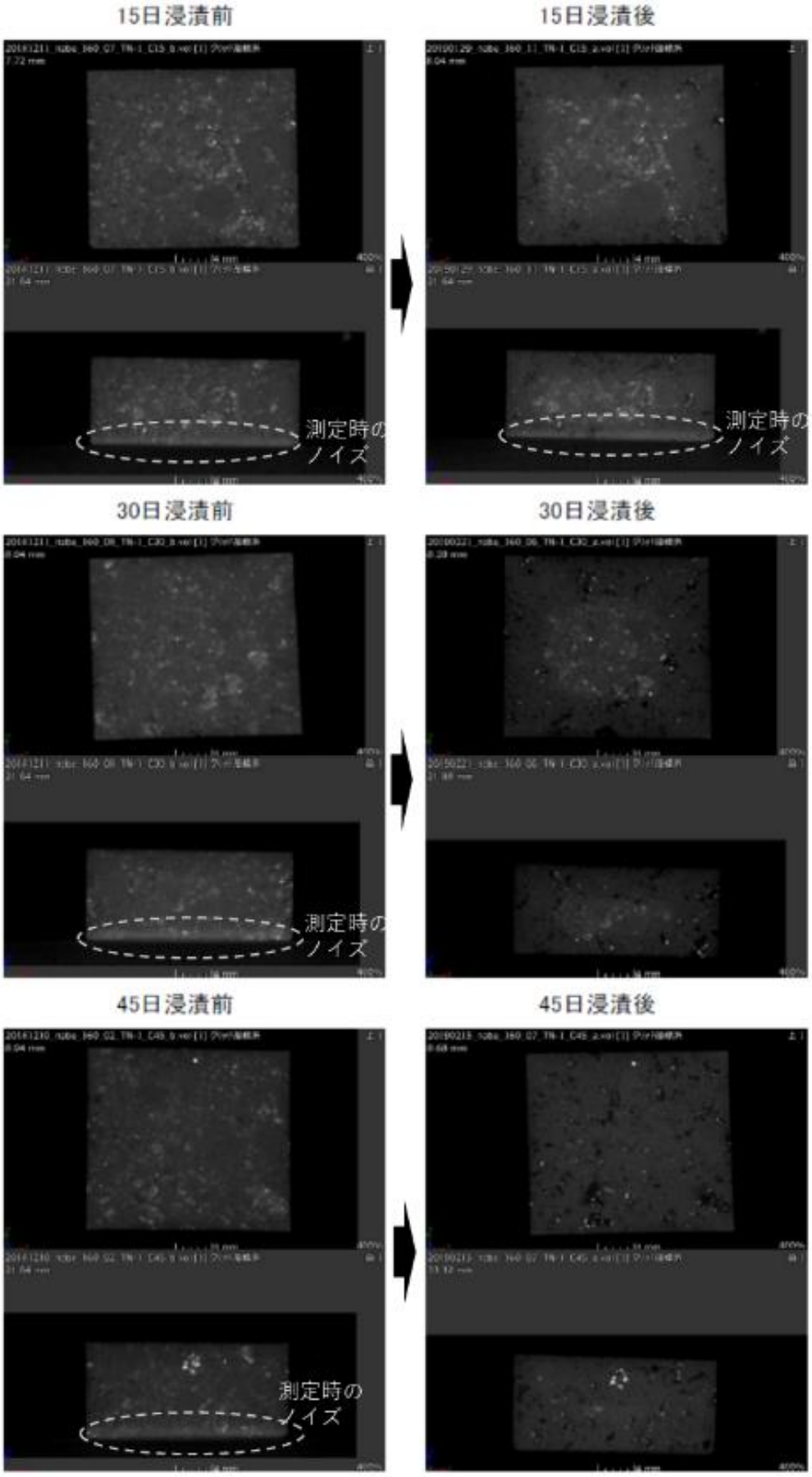


図 2.5-6　TN-1（溶結凝灰岩）の測定結果

表 2.5-2　低密度帯の厚さの測定結果

試料名	15日浸漬後	30日浸漬後	45日浸漬後
KY-1	1.24	1.51	2.07
KY-2	1.23	1.44	2.21
KY-3	0.44	0.82	1.12
KY-5	-	-	-
KY-8	0.52	0.69	0.73
TN-1	-	-	-

単位はmm

2.6 分光測色

浸漬前後での観察面における脱色等の色調変化を捉えることを目的として、浸漬前後の実験試料について、分光測色計（コニカミノルタ、CM-700d）を用いた測色を実施した。測定条件、測定箇所及び測定結果を、表 2.6-1、図 2.6-1 及び表 2.6-2 から表 2.6-4 にそれぞれ示す。

表 2.6-1　分光測色条件

項目	測定条件
照明・受光光学系	di: 8°, de: 8°(拡散照明・8°方向受光)、SCI(正反射光含む) / SCE(正反射光除去)自動切替え機構付き （DIN5033 Teil7、JIS Z 8722 条件 c、ISO7724/1、CIE No.15、ASTM E 1164 に準拠）
積分球サイズ	Φ40mm
分光手段	平面回折格子
受光素子	デュアル 36 素子シリコンフォトダイオードアレイ
測定波長範囲	400 nm～700 nm
測定波長間隔	10 nm

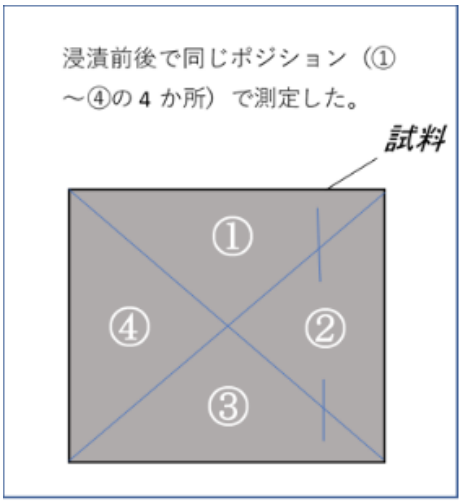


図 2.6-1　分光測色の測定箇所

表 2.6-2　15 日浸漬試料の浸漬前後での分光測色の結果

			浸漬前			浸漬前		
Sample	Position	Scan Type	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)
KY-1	1	SCI	37.33	0.03	0.66	55.77	-0.78	1.22
		SCE	33.41	0.05	0.77	53.65	-0.81	1.4
	2	SCI	37.93	0.22	1.15	53.96	-0.82	0.3
		SCE	33.8	0.26	1.33	51.84	-0.86	0.44
	3	SCI	37.77	0.08	0.98	50.26	-0.6	0.13
		SCE	33.29	0.08	1.12	48.4	-0.64	0.23
	4	SCI	38.63	0.09	0.76	48.55	-0.58	0.41
		SCE	35.18	0.11	0.81	46.23	-0.62	0.53
KY-2	1	SCI	36.92	0.71	1.96	56.25	0.13	2.42
		SCE	34.9	0.77	2.18	55.24	0.14	2.61
	2	SCI	39.53	0.79	2.59	57.74	0.24	2.86
		SCE	37.74	0.85	2.83	56.88	0.25	3.04
	3	SCI	39.04	1.09	3.22	55.56	-0.02	1.84
		SCE	37.49	1.16	3.48	54.76	-0.02	2.07
	4	SCI	36.85	0.74	2.08	54.85	0.11	1.9
		SCE	35.17	0.79	2.27	53.7	0.13	2.08
KY-3	1	SCI	31.34	0.56	0.6	46.69	-0.59	-0.44
		SCE	27.29	0.69	0.88	44.87	-0.6	-0.28
	2	SCI	31.74	0.52	0.67	46.1	-0.6	-0.64
		SCE	28.48	0.63	0.88	44.59	-0.61	-0.53
	3	SCI	31.88	0.55	0.63	46.78	-0.65	-0.77
		SCE	29.18	0.6	0.77	45.24	-0.67	-0.65
	4	SCI	31.25	0.58	0.58	46.39	-0.76	-0.93
		SCE	28.38	0.67	0.75	44.21	-0.79	-0.81
KY-5	1	SCI	31.65	0.2	-1.37	45.72	-0.07	-0.36
		SCE	23.88	0.28	-1.76	41.86	-0.08	-0.29
	2	SCI	34.54	-0.06	-0.1	41.89	-0.07	-1.03
		SCE	26.38	-0.07	0.02	37.1	-0.09	-1.07
	3	SCI	30.66	0.18	-0.82	39.68	0.26	-1.5
		SCE	19.46	0.35	-1.17	33.76	0.32	-1.75
	4	SCI	30.9	0.36	-0.98	48.18	0	0.36
		SCE	19.48	0.63	-1.45	45.69	-0.01	0.51
KY-8	1	SCI	27.97	0.33	0.09	38.96	-0.86	-1.27
		SCE	18.35	0.5	0.17	37.07	-0.9	-1.22
	2	SCI	28.43	0.23	-0.2	38.18	-0.83	-1.16
		SCE	20.39	0.31	-0.33	36.21	-0.87	-1.11
	3	SCI	28.17	0.23	-0.22	41.01	-0.93	-0.87
		SCE	19.89	0.3	-0.36	39.23	-0.97	-0.74
	4	SCI	29.05	0.33	0.05	39.42	-0.87	-1
		SCE	21.43	0.46	0.09	37.13	-0.95	-0.99
TN-1	1	SCI	50.37	2.54	9.41	64.24	2.96	16.85
		SCE	47.26	2.82	10.62	63.01	3.05	17.45
	2	SCI	46.94	1.91	8.15	65.32	2.94	17.45
		SCE	44.15	2.09	9.03	64.21	3.02	18.02
	3	SCI	52.9	2.35	10.24	67.24	2.99	18.59
		SCE	51.08	2.49	10.93	65.78	3.1	19.37
	4	SCI	54.52	2.59	11.75	66.93	3.3	18.6
		SCE	52.12	2.79	12.81	65.39	3.42	19.44

表 2.6-3　30 日浸漬試料の浸漬前後での分光測色の結果

			浸漬前			浸漬前		
Sample	Position	Scan Type	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)
KY-1	1	SCI	34.03	0.28	1.08	52.62	0.07	3.52
		SCE	29.14	0.35	1.4	50.69	0.06	3.81
	2	SCI	34.53	0.36	1.21	52.32	0.11	3.74
		SCE	30.49	0.44	1.46	50.04	0.1	4.07
	3	SCI	34.56	0.33	1.28	50.21	-0.17	1.55
		SCE	30.48	0.37	1.49	48.02	-0.18	1.72
	4	SCI	33.1	0.32	0.58	49.12	-0.03	4.01
		SCE	28.61	0.36	0.7	46.6	-0.03	4.42
KY-2	1	SCI	36.65	0.96	2.55	54.38	0.61	4.5
		SCE	33.88	1.08	2.94	52.42	0.64	4.84
	2	SCI	37.89	0.81	2.87	54.29	0.58	4.45
		SCE	34.63	0.92	3.32	52.67	0.62	4.73
	3	SCI	37.35	0.74	2.39	53.99	0.51	4.08
		SCE	34.53	0.83	2.73	52.35	0.53	4.35
	4	SCI	37.98	0.89	2.39	53.77	0.57	4.66
		SCE	35.43	1	2.74	51.98	0.61	5.02
KY-3	1	SCI	33.01	0.73	0.87	50.12	0.49	4.92
		SCE	27.83	0.91	1.18	47.73	0.52	5.33
	2	SCI	32.86	0.99	1.13	46.56	0.2	3.49
		SCE	28.99	1.14	1.39	44.1	0.19	3.77
	3	SCI	31.89	0.5	0.54	47.37	0	2.86
		SCE	27.86	0.61	0.81	44.81	-0.02	3.2
	4	SCI	31.83	0.58	0.46	48.63	0.04	3.67
		SCE	27.54	0.73	0.73	45.51	0.04	4.2
KY-5	1	SCI	33.88	0.01	-0.96	49.19	0.44	2.22
		SCE	26.93	0.04	-1.14	45.77	0.52	2.64
	2	SCI	32.4	0.13	-0.43	42.61	0.25	1.25
		SCE	24.29	0.2	-0.32	37.83	0.27	1.46
	3	SCI	31.34	0.19	-1.22	45.8	0.62	2.61
		SCE	23.1	0.28	-1.66	41.53	0.7	3.14
	4	SCI	30.95	0.24	-0.97	47.63	0.7	3.36
		SCE	21.84	0.36	-1.34	43.59	0.8	3.95
KY-8	1	SCI	29.09	0.26	-0.14	44.83	-0.15	2.85
		SCE	23.2	0.37	-0.09	41.92	-0.17	3.16
	2	SCI	29.49	0.35	0.13	45.83	-0.18	2.11
		SCE	24.17	0.45	0.14	43.39	-0.2	2.3
	3	SCI	30.05	0.43	0.09	44.88	-0.3	1.45
		SCE	26.03	0.49	0.17	42.76	-0.33	1.58
	4	SCI	29.59	0.39	-0.12	44.12	-0.29	2.74
		SCE	23.84	0.55	0.03	41.24	-0.28	3.43
TN-1	1	SCI	54.96	2.2	11.07	68.29	0.89	10.28
		SCE	52.74	2.36	12	66.94	0.91	10.73
	2	SCI	48.18	2.19	9.22	69.9	0.54	7.7
		SCE	44.74	2.44	10.56	68.49	0.56	8.07
	3	SCI	53.03	2.39	10.54	71.1	0	5.9
		SCE	50.5	2.6	11.54	69.79	0.01	6.22
	4	SCI	48.95	1.74	9.24	71.94	0.58	7.62
		SCE	46	1.92	10.32	70.77	0.59	7.94

表 2.6-4　45 日浸漬試料の浸漬前後での分光測色の結果

			浸漬前			浸漬前		
Sample	Position	Scan Type	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)
KY-1	1	SCI	33.86	0.33	1.23	52.16	-0.58	-1.56
		SCE	30.09	0.38	1.45	50.04	-0.62	-1.57
	2	SCI	32.86	0.3	1.36	54.19	-0.24	-0.45
		SCE	28.48	0.34	1.59	51.9	-0.26	-0.37
	3	SCI	33.94	0.41	1.61	51.06	-0.45	-0.91
		SCE	28.88	0.53	2.16	48.88	-0.48	-0.9
	4	SCI	33.46	0.23	1.24	49.64	-0.35	-0.6
		SCE	29.04	0.26	1.53	47.63	-0.41	-0.6
KY-2	1	SCI	36.52	0.82	2.54	54.32	0.13	1.74
		SCE	33.72	0.93	2.96	52.92	0.14	1.84
	2	SCI	37.34	0.77	2.46	54.77	0.17	1.69
		SCE	35.38	0.85	2.74	53.24	0.17	1.78
	3	SCI	37.55	0.89	2.51	54.03	0.17	1.64
		SCE	35.4	0.97	2.79	52.38	0.16	1.72
	4	SCI	37.39	0.91	2.5	54.74	0.17	1.58
		SCE	34.92	1	2.79	53.17	0.17	1.73
KY-3	1	SCI	30.75	0.4	0.24	49.14	-0.29	-0.07
		SCE	27.8	0.47	0.34	47.04	-0.31	-0.05
	2	SCI	31.59	0.44	0.48	47.72	-0.3	-0.32
		SCE	28.49	0.5	0.63	44.94	-0.33	-0.26
	3	SCI	31.17	0.42	0.39	47.65	-0.32	-0.23
		SCE	26.53	0.55	0.72	45.41	-0.35	-0.23
	4	SCI	31.14	0.35	0.09	48.9	-0.29	0.14
		SCE	27.6	0.42	0.24	46.83	-0.32	0.12
KY-5	1	SCI	31.65	0.2	-1.37	50.38	0.2	0.51
		SCE	23.88	0.28	-1.76	47.02	0.21	0.6
	2	SCI	34.54	-0.06	-0.1	48.29	0.17	0.95
		SCE	26.38	-0.07	0.02	44.34	0.19	1.15
	3	SCI	30.66	0.18	-0.82	47.76	0.33	1.33
		SCE	19.46	0.35	-1.17	43.82	0.35	1.61
	4	SCI	30.9	0.36	-0.98	49.63	0.38	1.32
		SCE	19.48	0.63	-1.45	46.3	0.39	1.47
KY-8	1	SCI	28.78	0.33	-0.2	46.49	-0.62	-1.18
		SCE	20.13	0.46	-0.23	44.25	-0.68	-1.19
	2	SCI	29.13	0.37	-0.04	49.97	-0.67	-1.17
		SCE	20.86	0.56	0.02	48.15	-0.73	-1.13
	3	SCI	29.74	0.47	-0.09	47.61	-0.57	-0.96
		SCE	22.6	0.64	-0.1	45	-0.63	-1
	4	SCI	28.95	0.44	-0.17	45.36	-0.6	-1.16
		SCE	19.2	0.69	-0.2	43.07	-0.66	-1.2
TN-1	1	SCI	53.7	3.58	13.22	67.19	0.17	6.44
		SCE	52.24	3.78	14.08	65.54	0.17	6.77
	2	SCI	50.66	2.87	11.45	68.02	0.04	5.03
		SCE	48.28	3.08	12.5	66.13	0.03	5.86
	3	SCI	55.31	2.97	12.42	68.1	0.31	6.89
		SCE	53.05	3.14	13.42	66.48	0.31	7.26
	4	SCI	54.65	2.59	12.38	64.54	0.39	6.12
		SCE	51.76	2.76	13.51	63.07	0.41	6.39

2.7　SEM 観察

浸漬前後での観察面における鉱物や結晶粒間等の形状変化を捉えることを目的として、浸漬前後の実験試料について、SEM（日本電子(株)、JSM-7001F）を用いた表面観察を実施した。浸漬前後で、同一試料の同一位置を対象として観察した。測定条件及び測定結果を、それぞれ表 2.7-1 及び図 2.7-1～図 2.7-63 に示す。

表 2.7-1　SEM の観察条件

観察条件	加速電圧	15kV
	エミッション電流	1.8×10^{-4}A
	画像形式	BMP

(1) KY-1

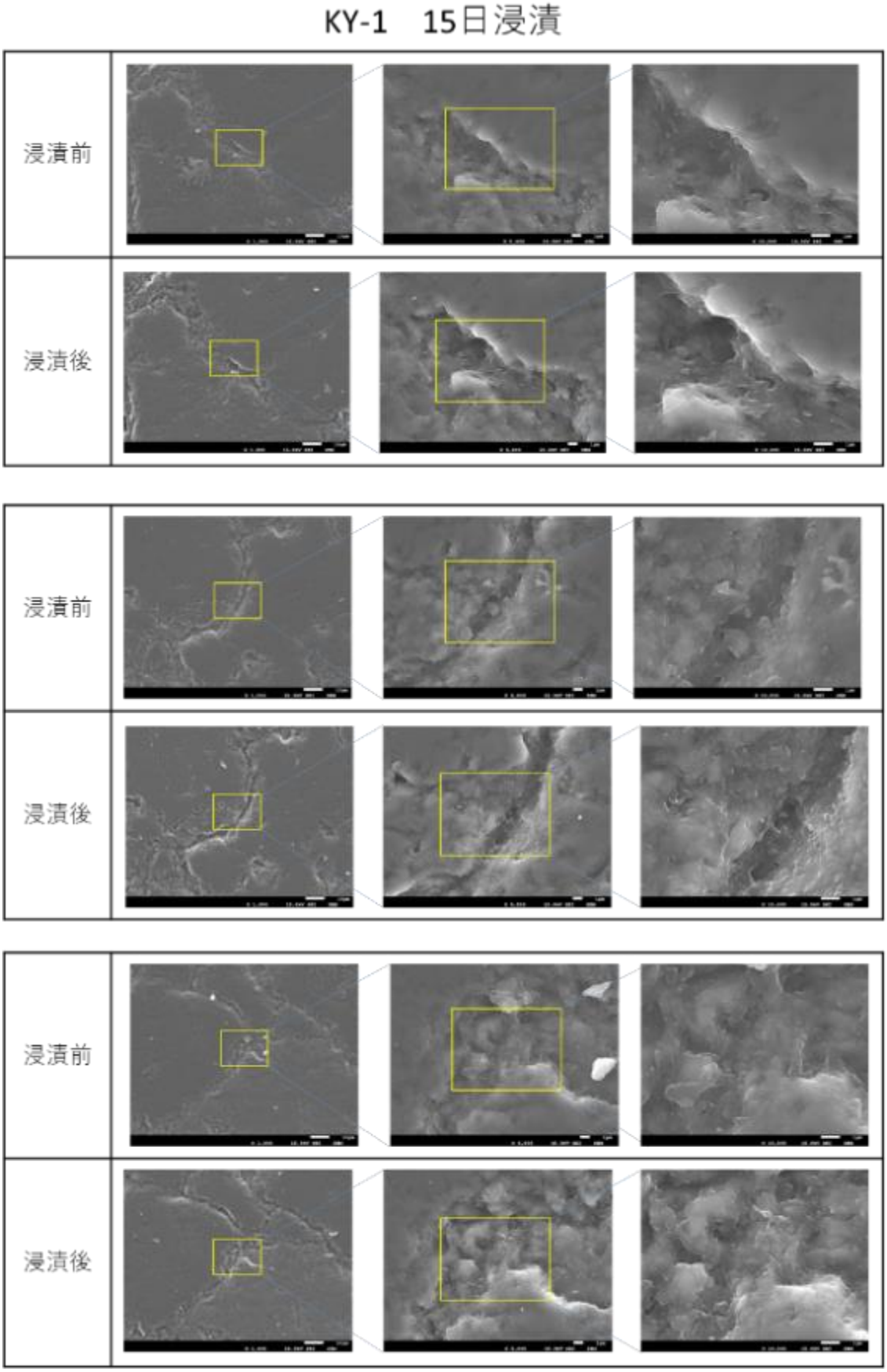


図 2.7-1　KY-1（砂岩）15 日浸漬前後の SEM 観察結果(1)

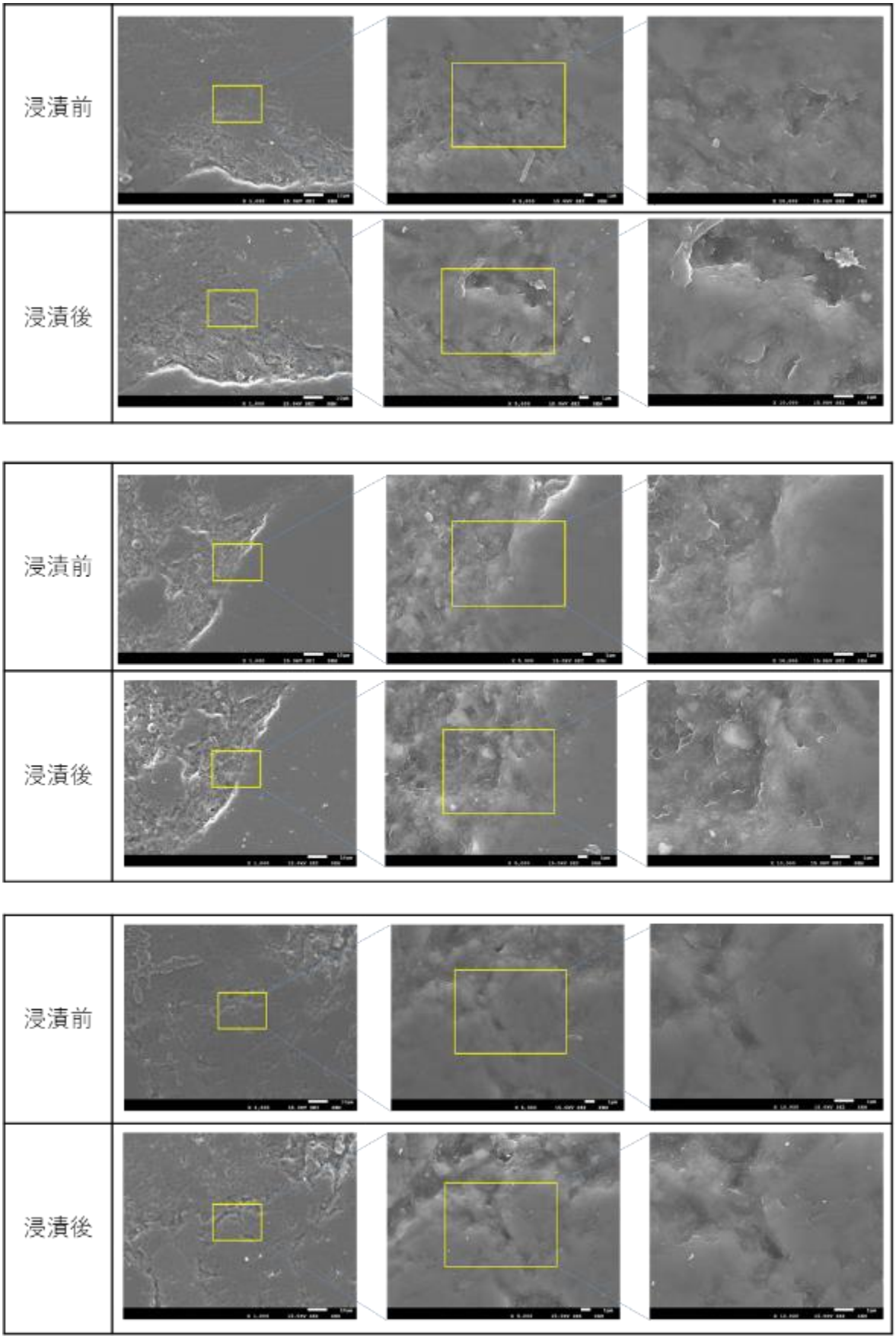


図 2.7-2　KY-1（砂岩）15 日浸漬前後の SEM 観察結果(2)

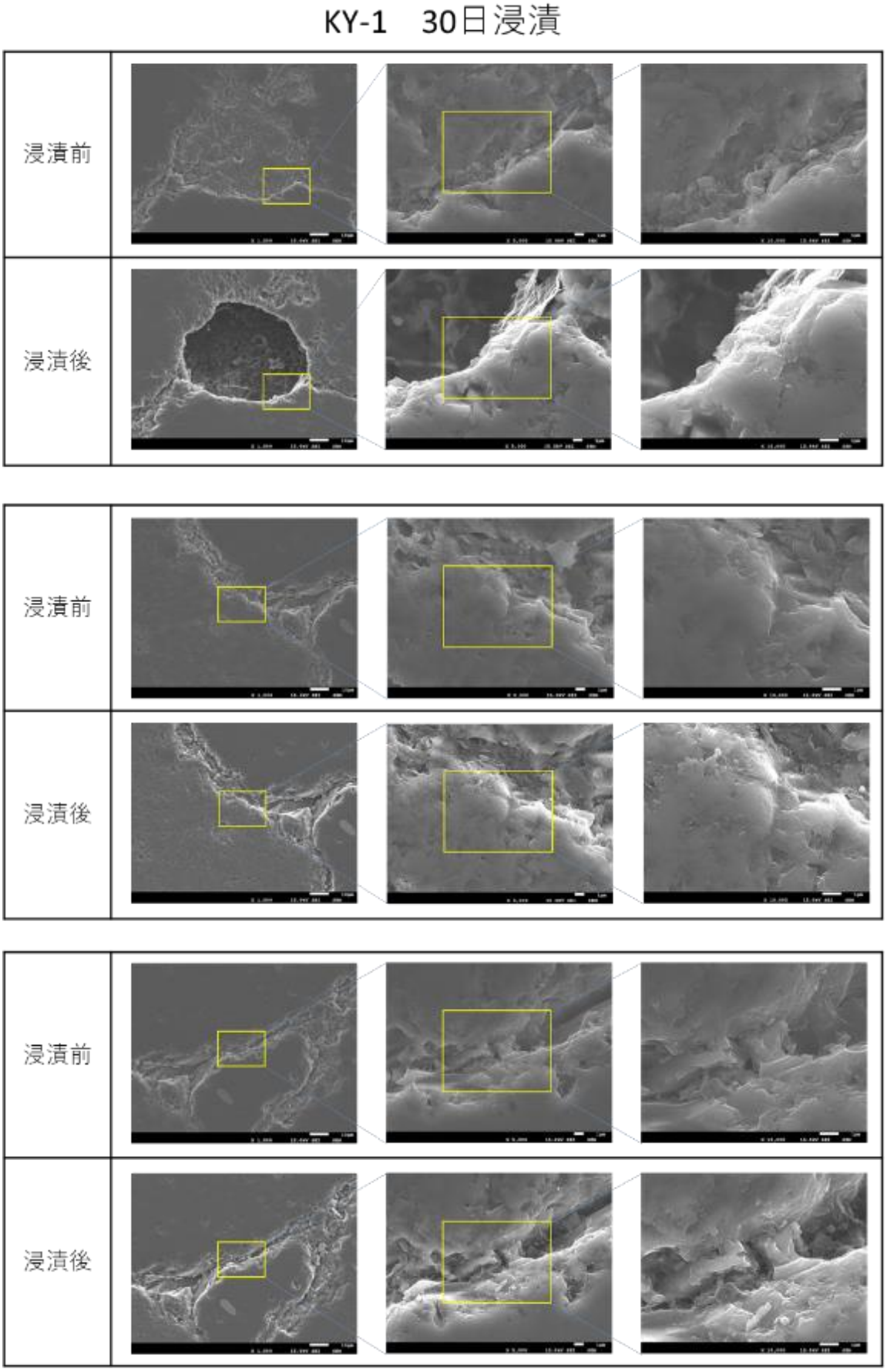


図 2.7-3　KY-1（砂岩）30 日浸漬前後の SEM 観察結果(1)

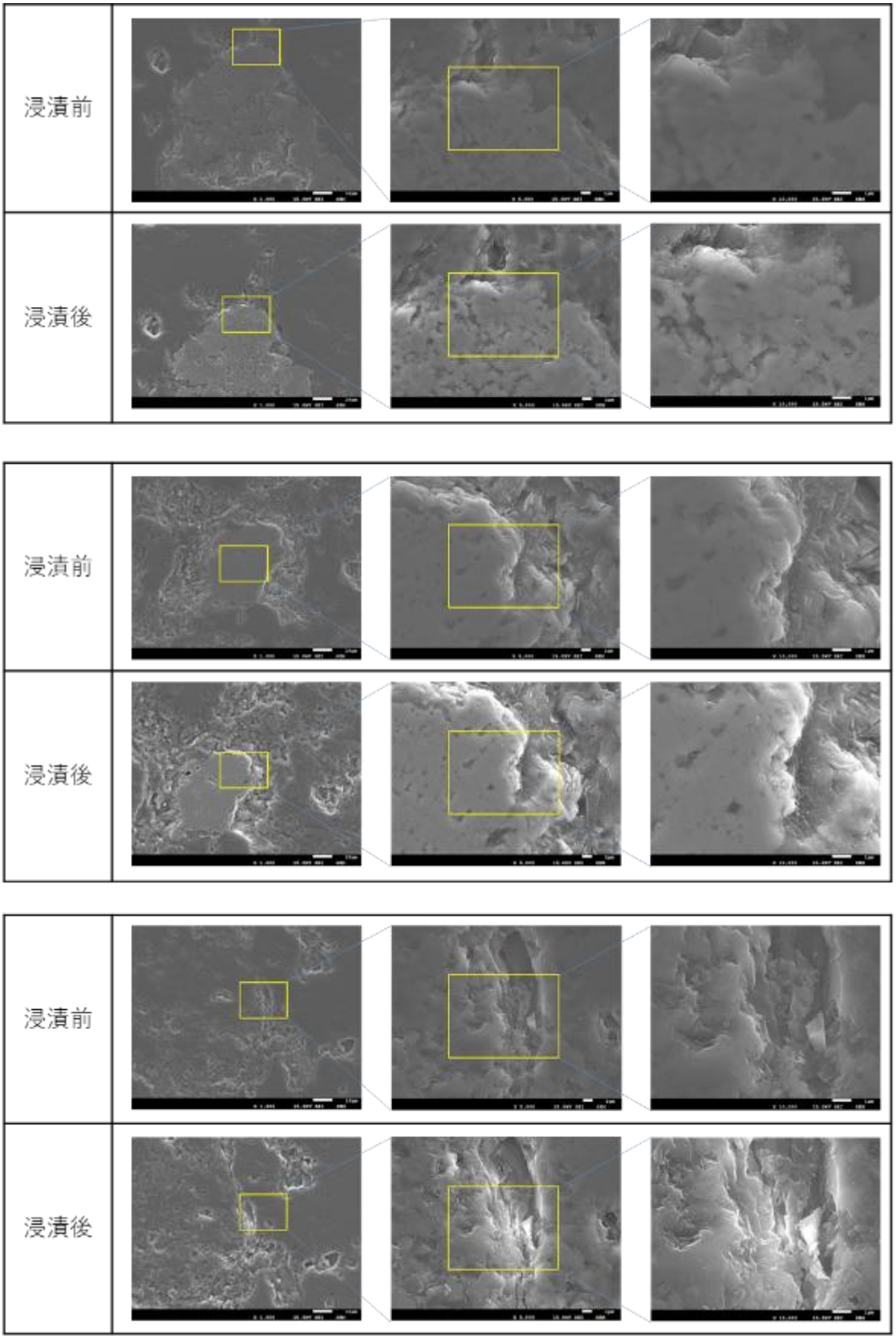


図 2.7-4　KY-1（砂岩）30 日浸漬前後の SEM 観察結果(2)

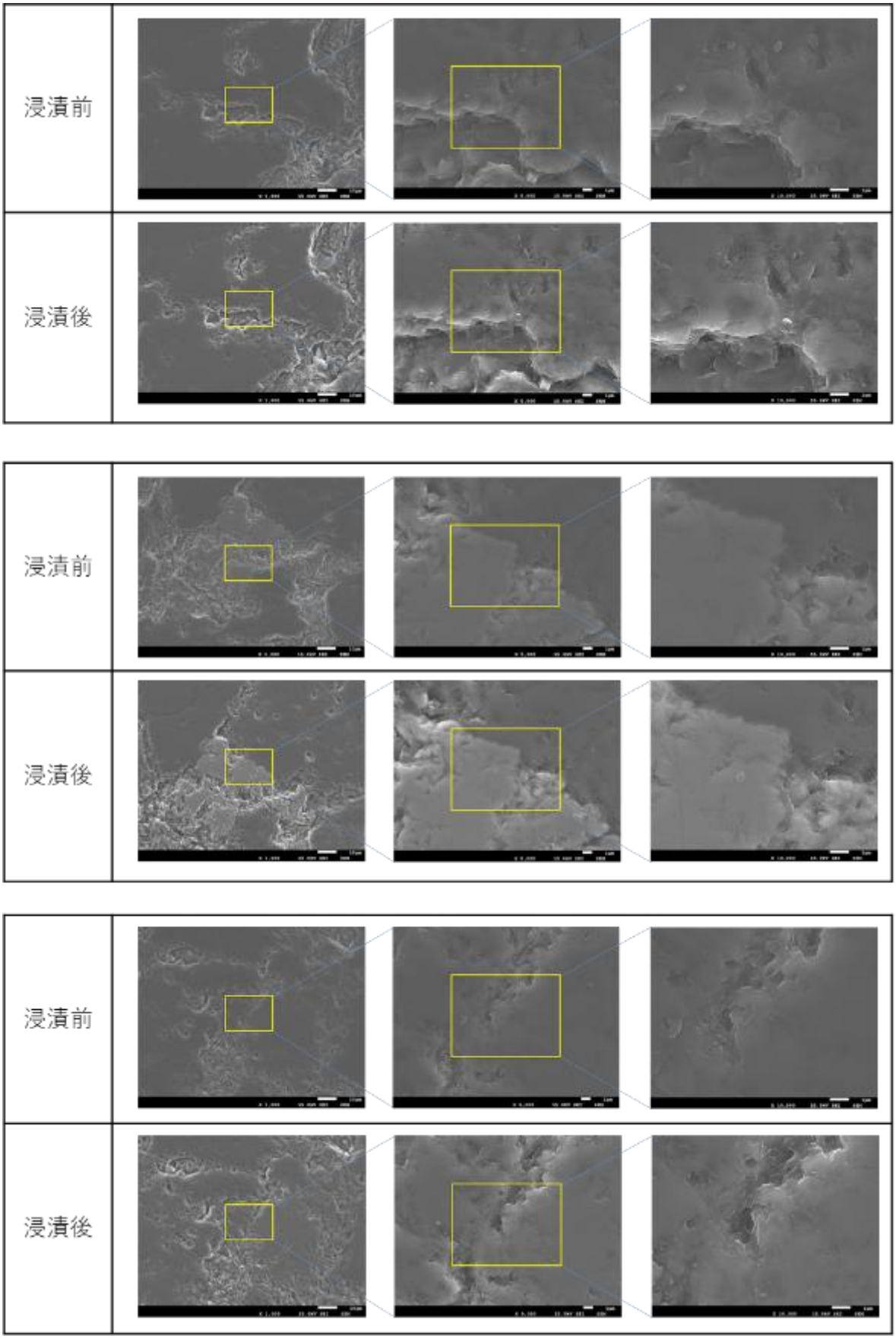


図 2.7-5　KY-1（砂岩）30 日浸漬前後の SEM 観察結果(3)

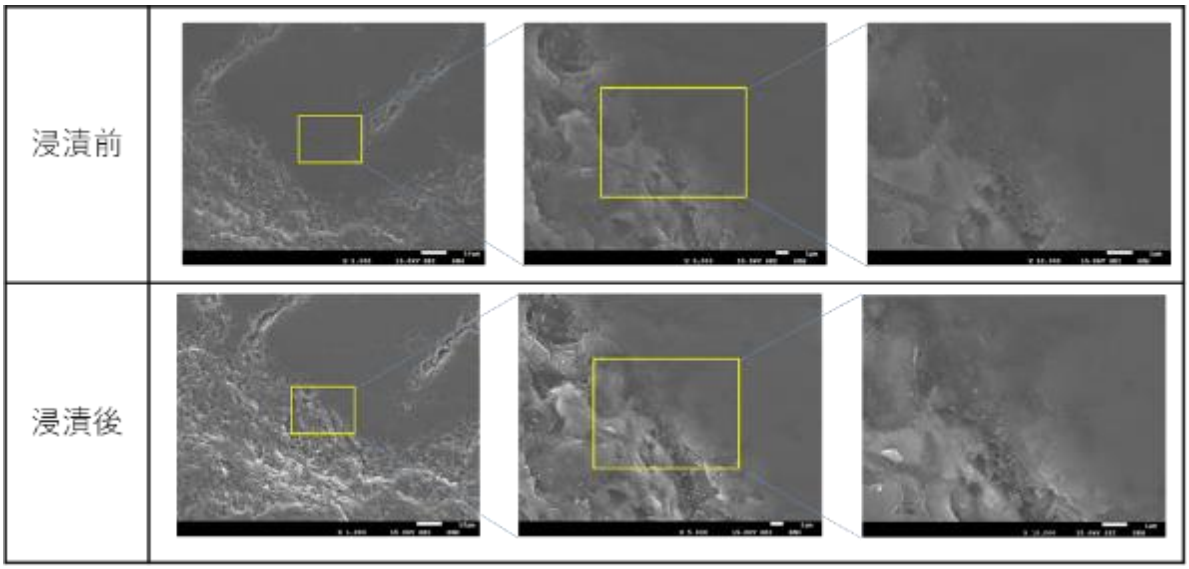


図 2.7-6　KY-1（砂岩）30 日浸漬前後の SEM 観察結果(4)

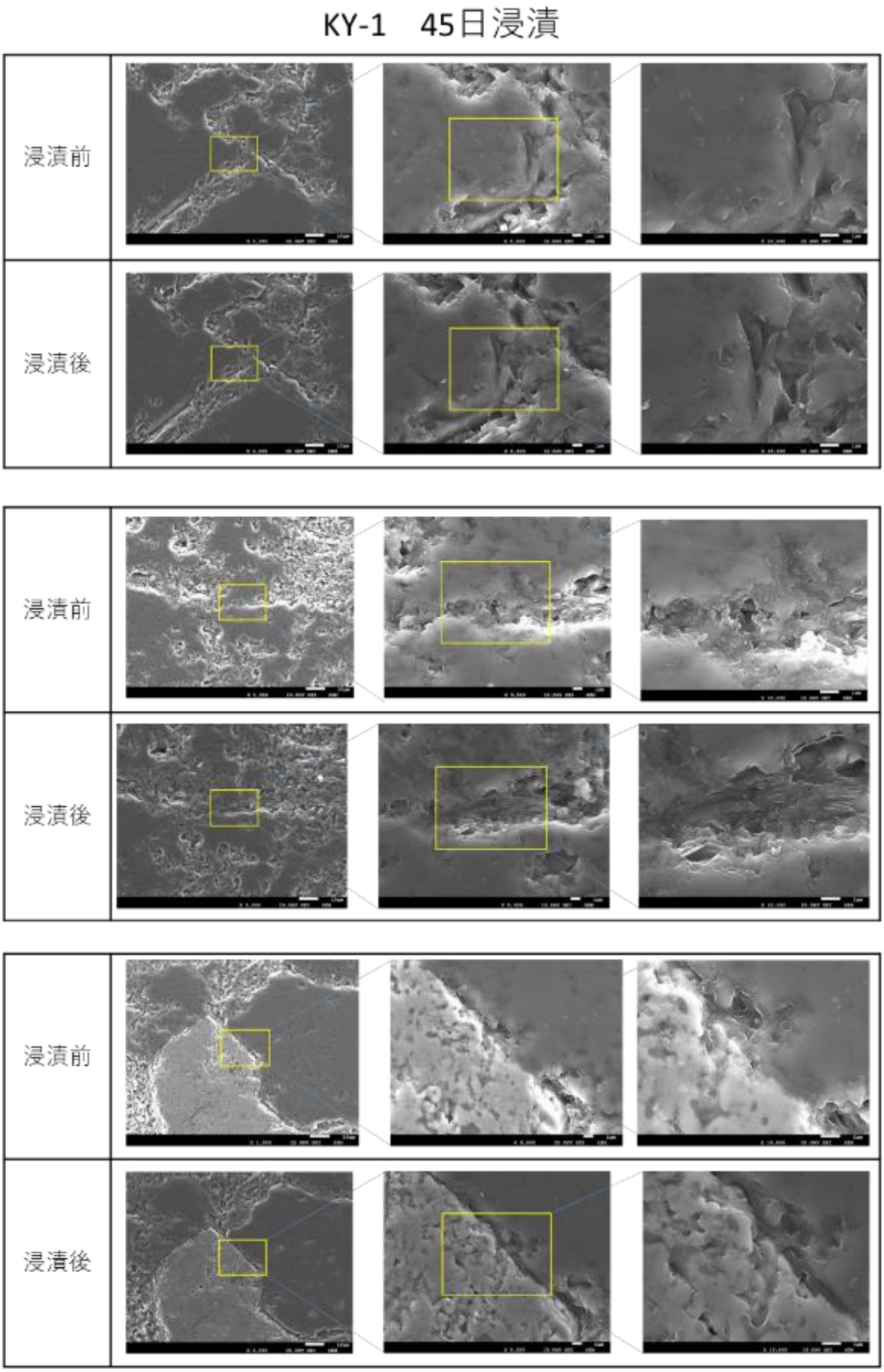


図 2.7-7　KY-1（砂岩）45 日浸漬前後の SEM 観察結果(1)

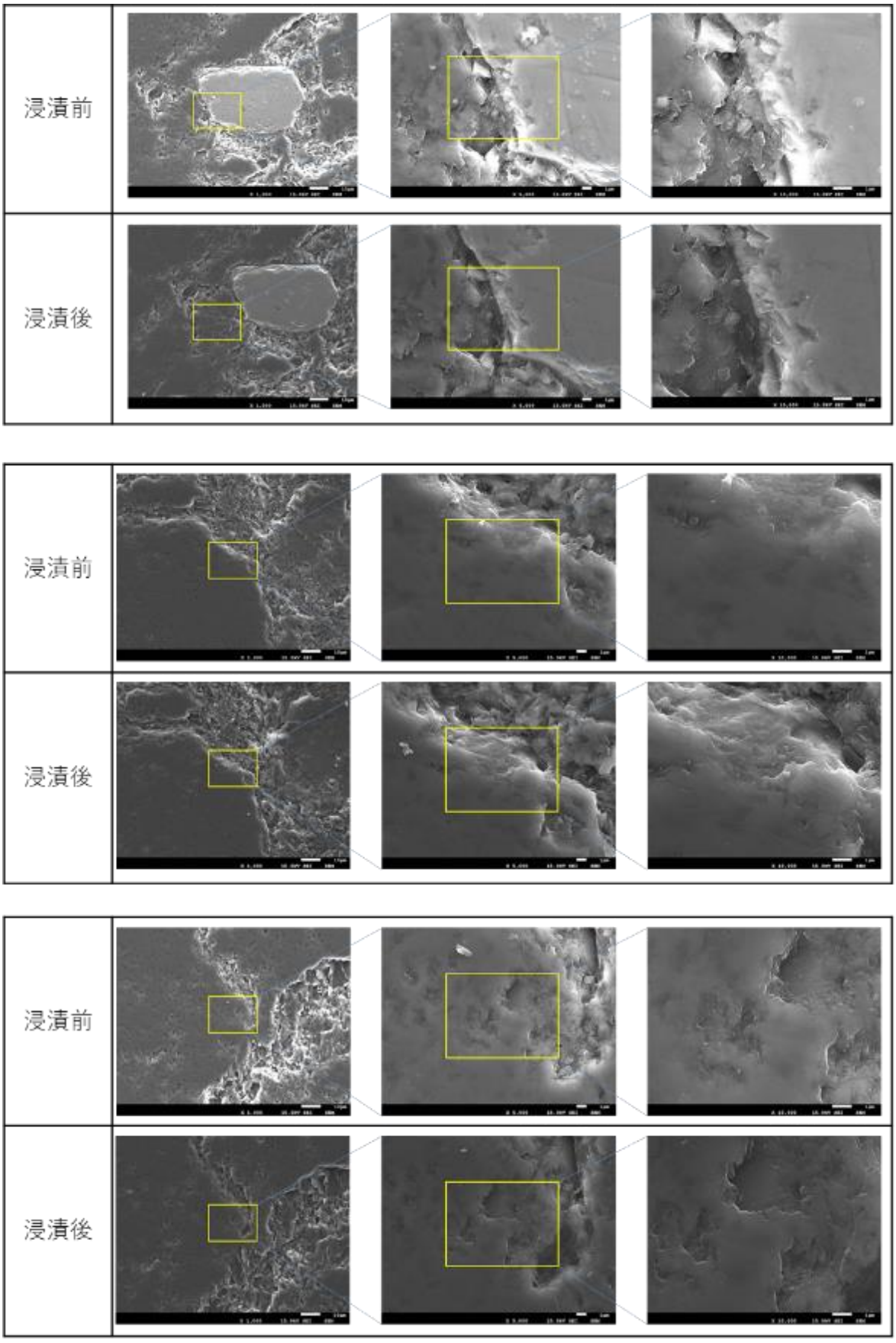


図 2.7-8　KY-1（砂岩）45 日浸漬前後の SEM 観察結果(2)

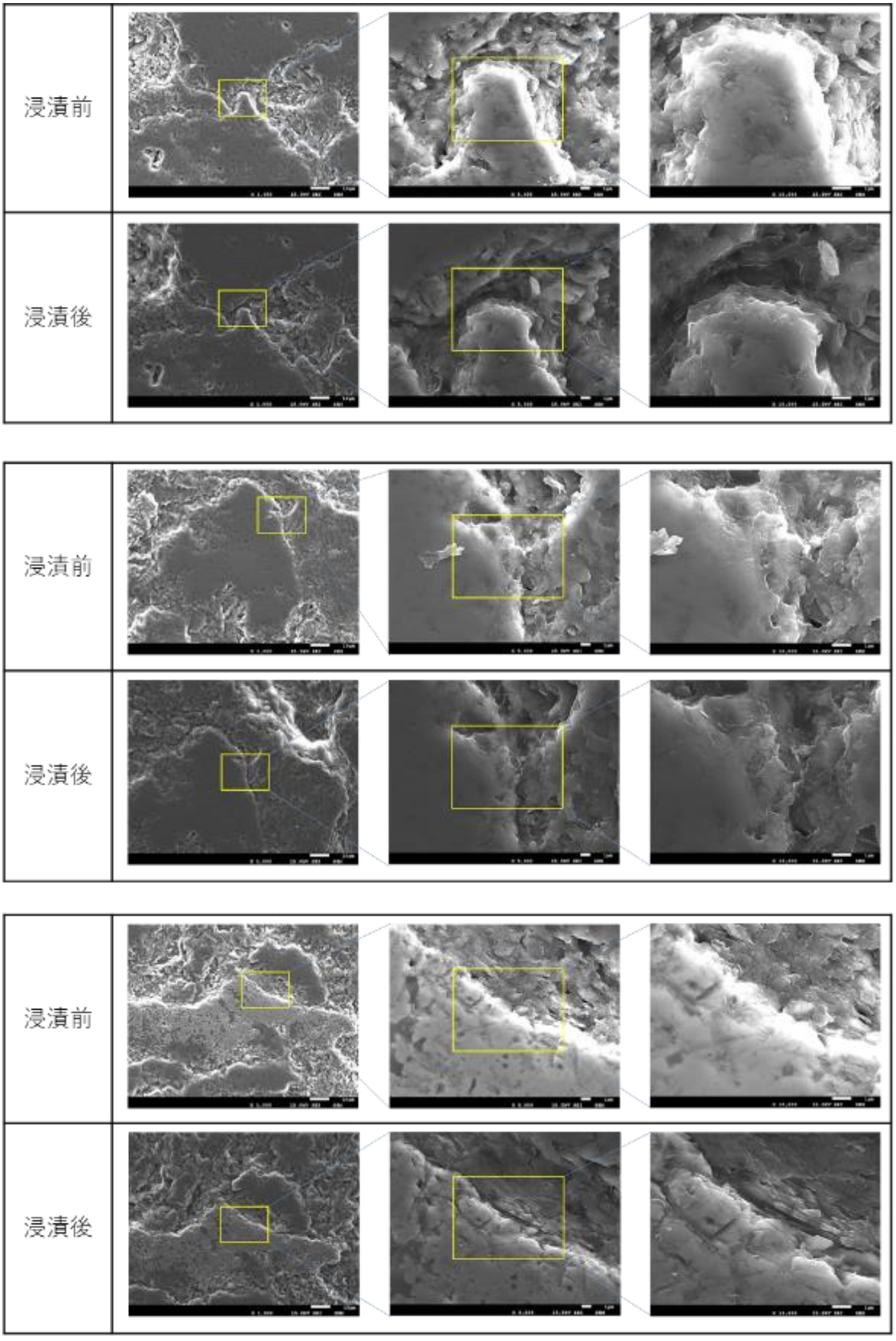
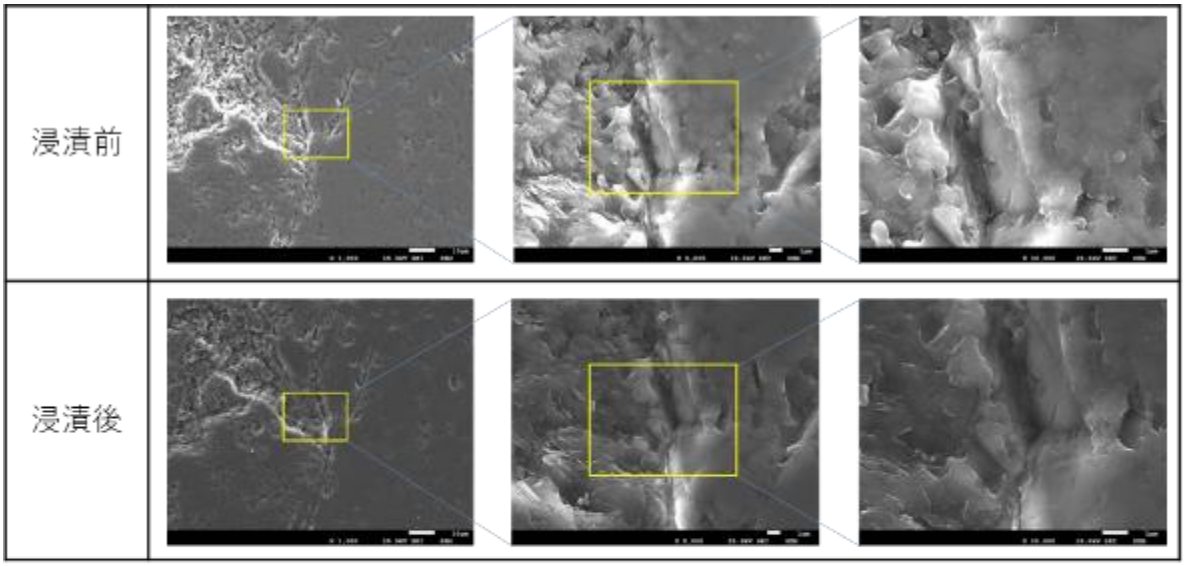
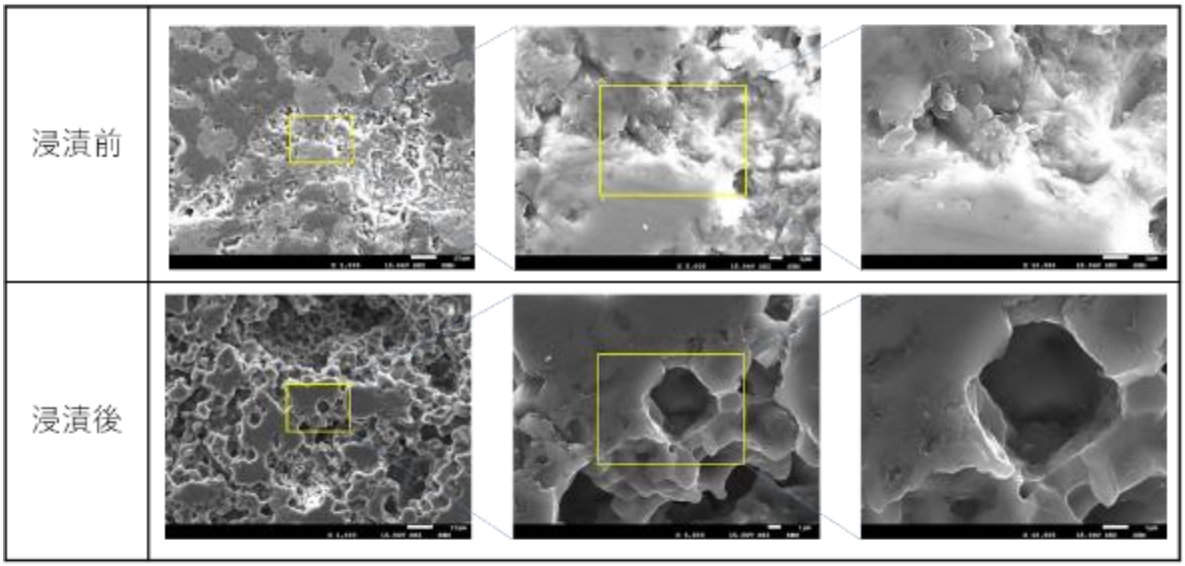


図 2.7-9　KY-1（砂岩）45 日浸漬前後の SEM 観察結果(3)





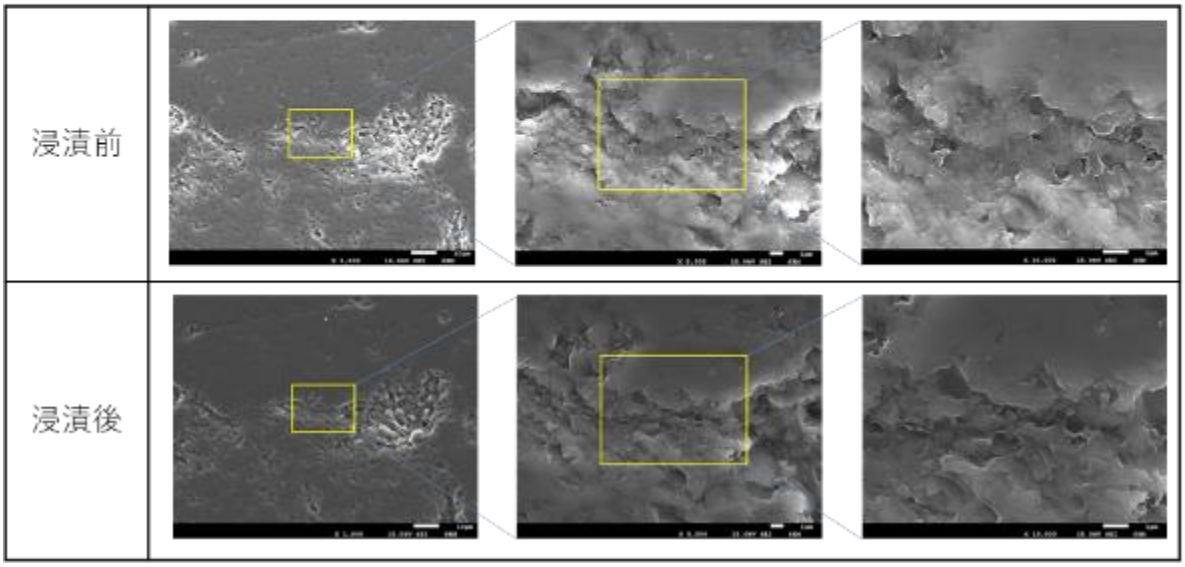


図 2.7-10　KY-1（砂岩）45 日浸漬前後の SEM 観察結果(4)

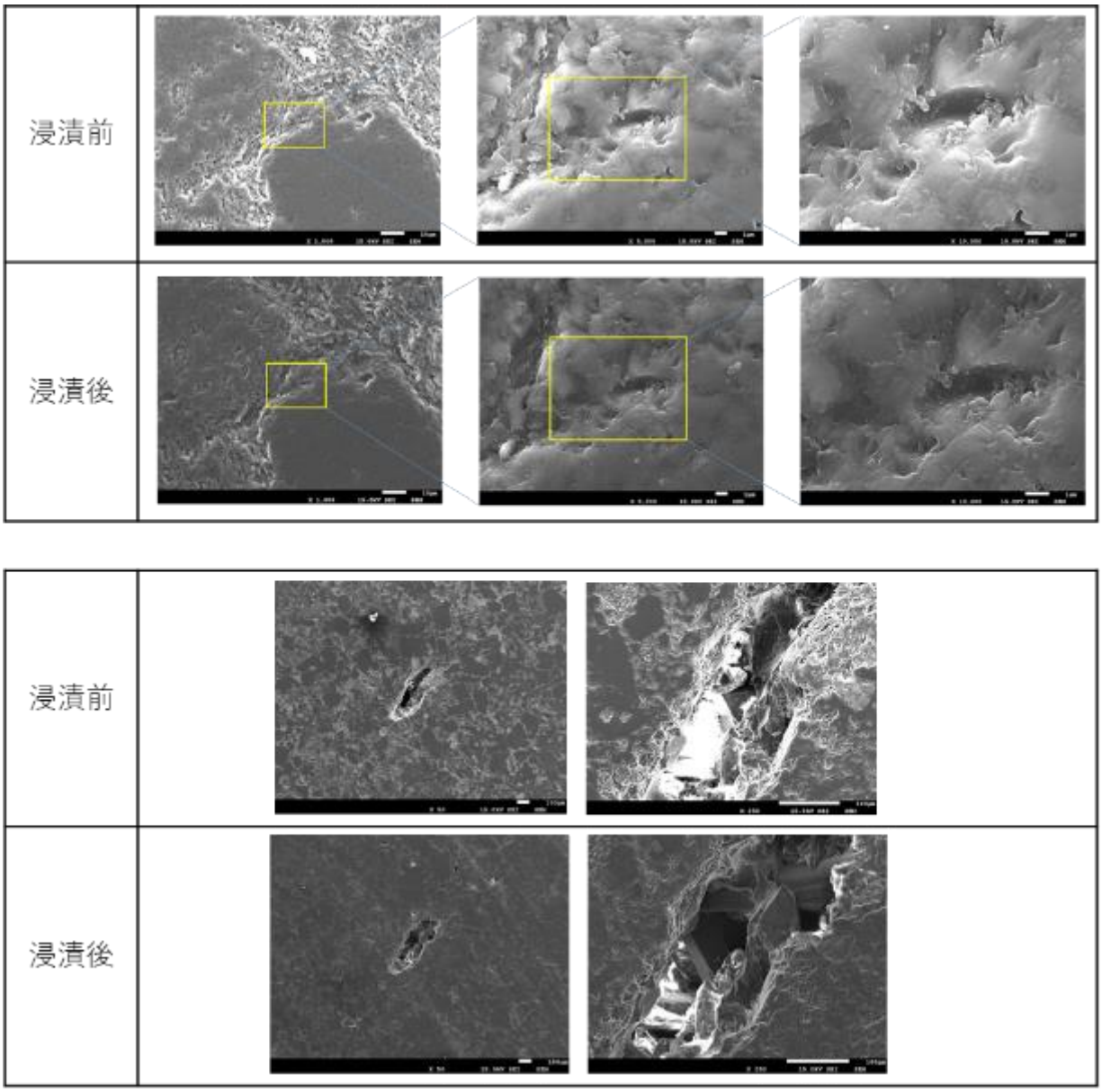


図 2.7-11　KY-1（砂岩）45 日浸漬前後の SEM 観察結果(5)

(2) KY-2

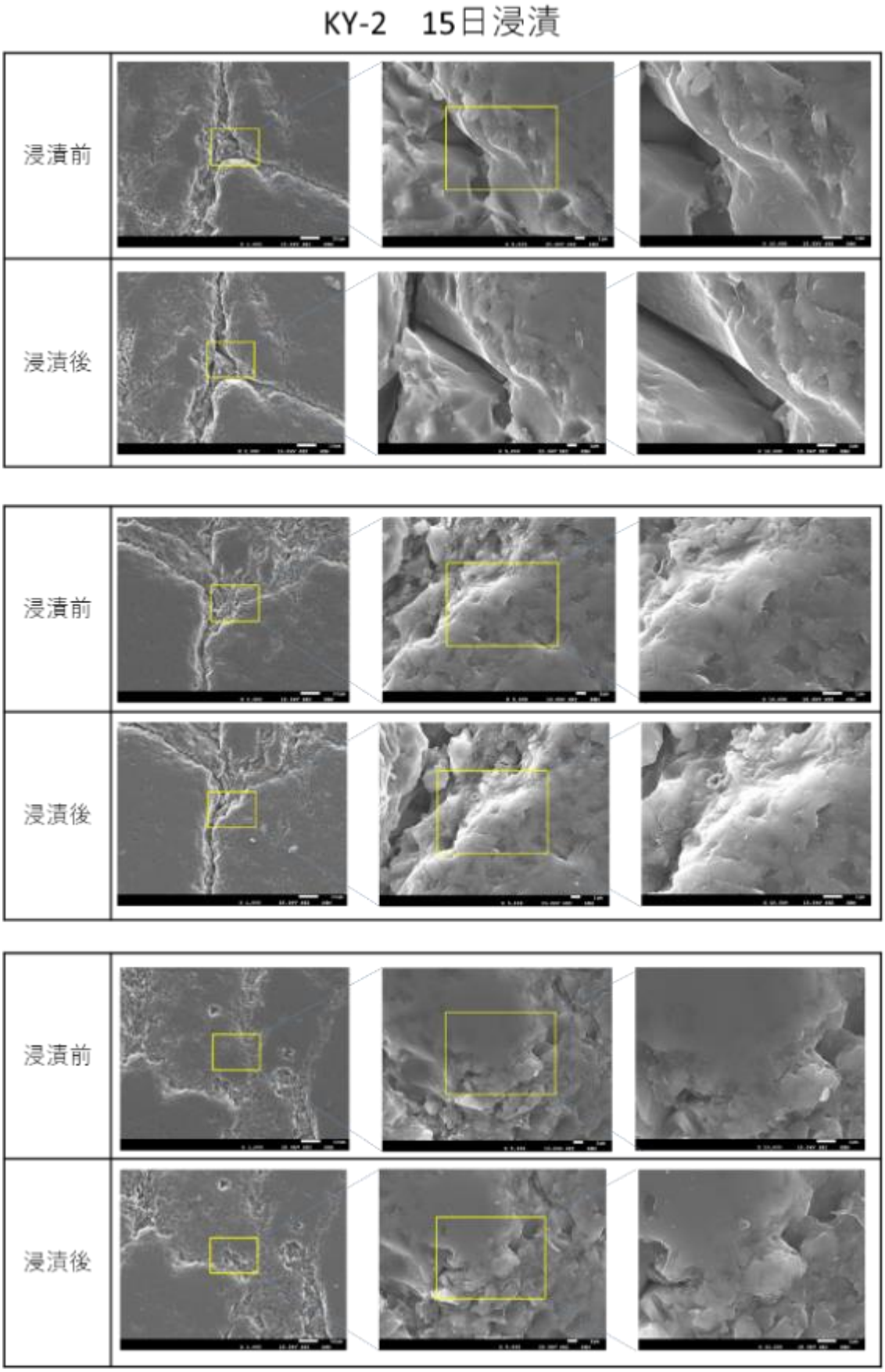


図 2.7-12　KY-2（砂岩）15 日浸漬前後の SEM 観察結果(1)

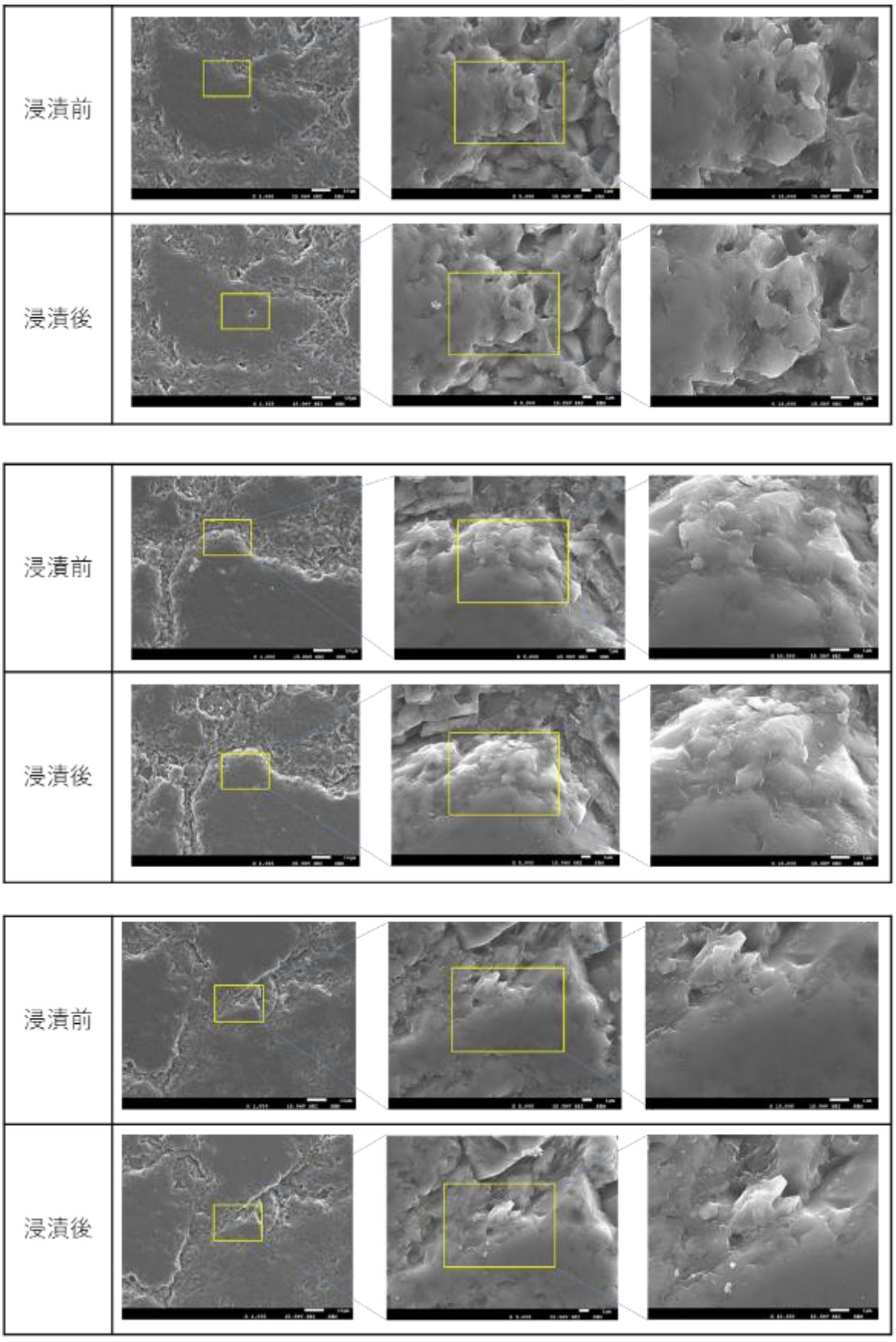


図 2.7-13　KY-2（砂岩）15 日浸漬前後の SEM 観察結果(2)

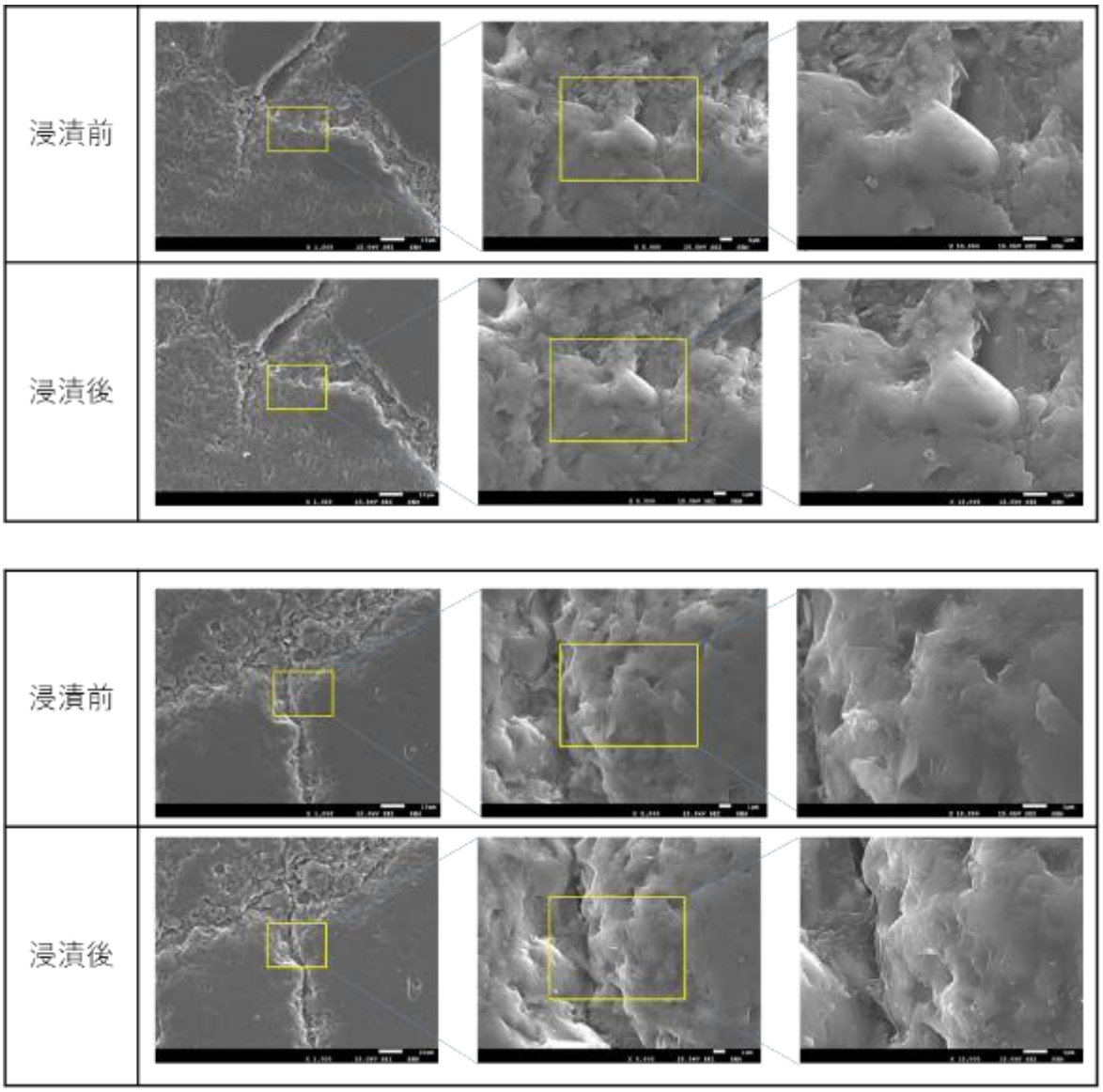


図 2.7-14　KY-2（砂岩）15 日浸漬前後の SEM 観察結果(3)

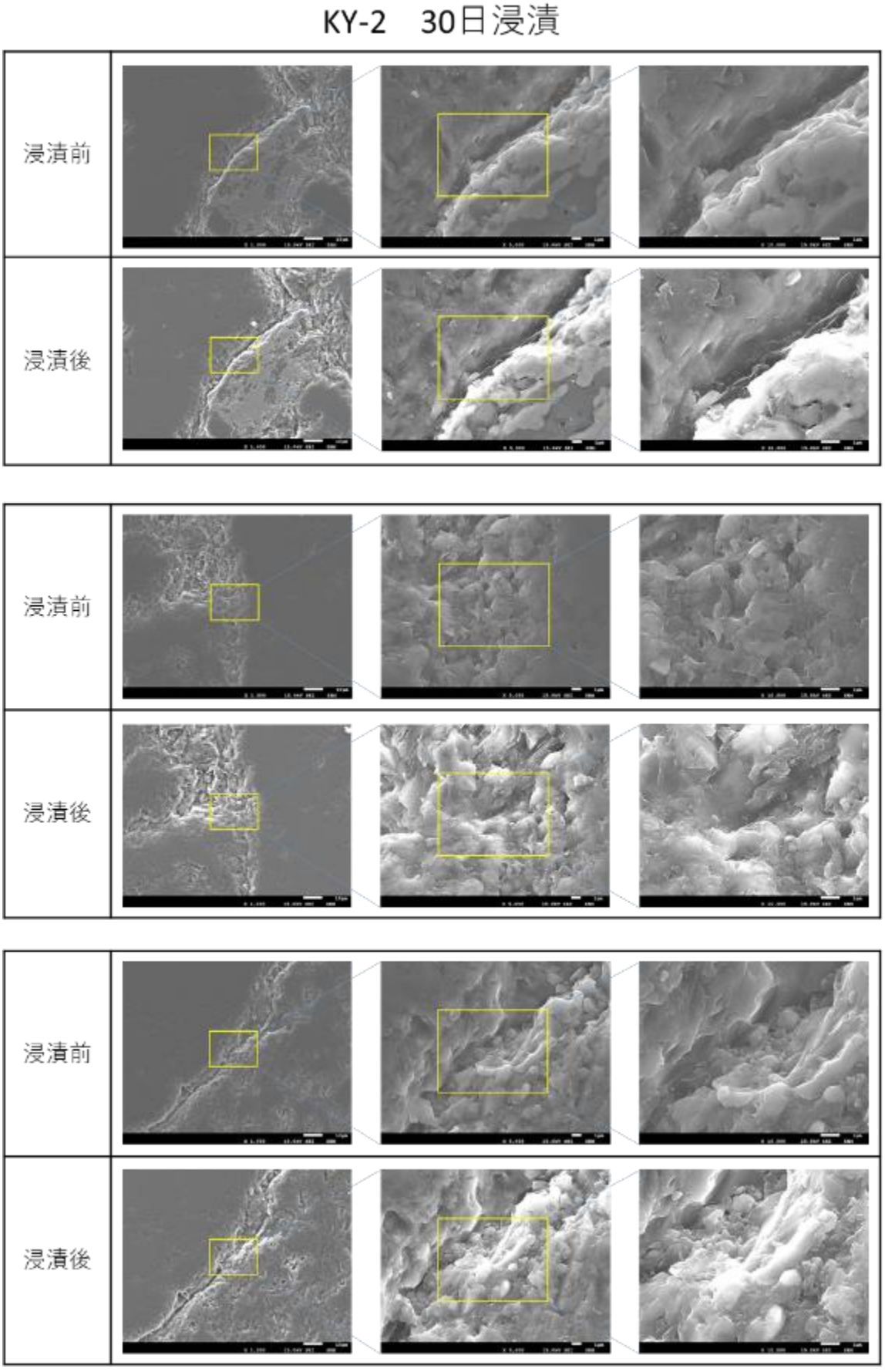


図 2.7-15　KY-2（砂岩）30 日浸漬前後の SEM 観察結果(1)

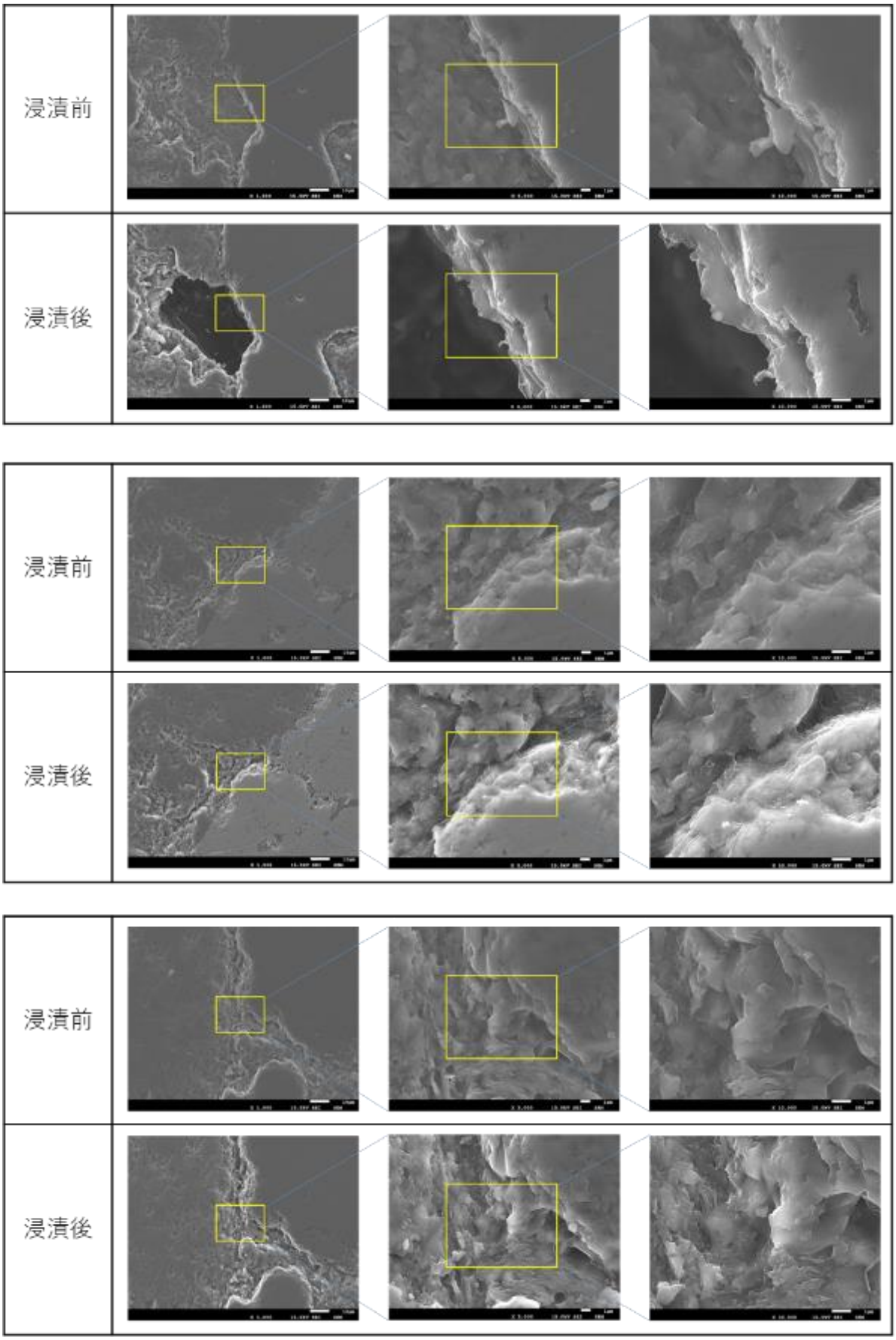


図 2.7-16　KY-2（砂岩）30 日浸漬前後の SEM 観察結果(2)

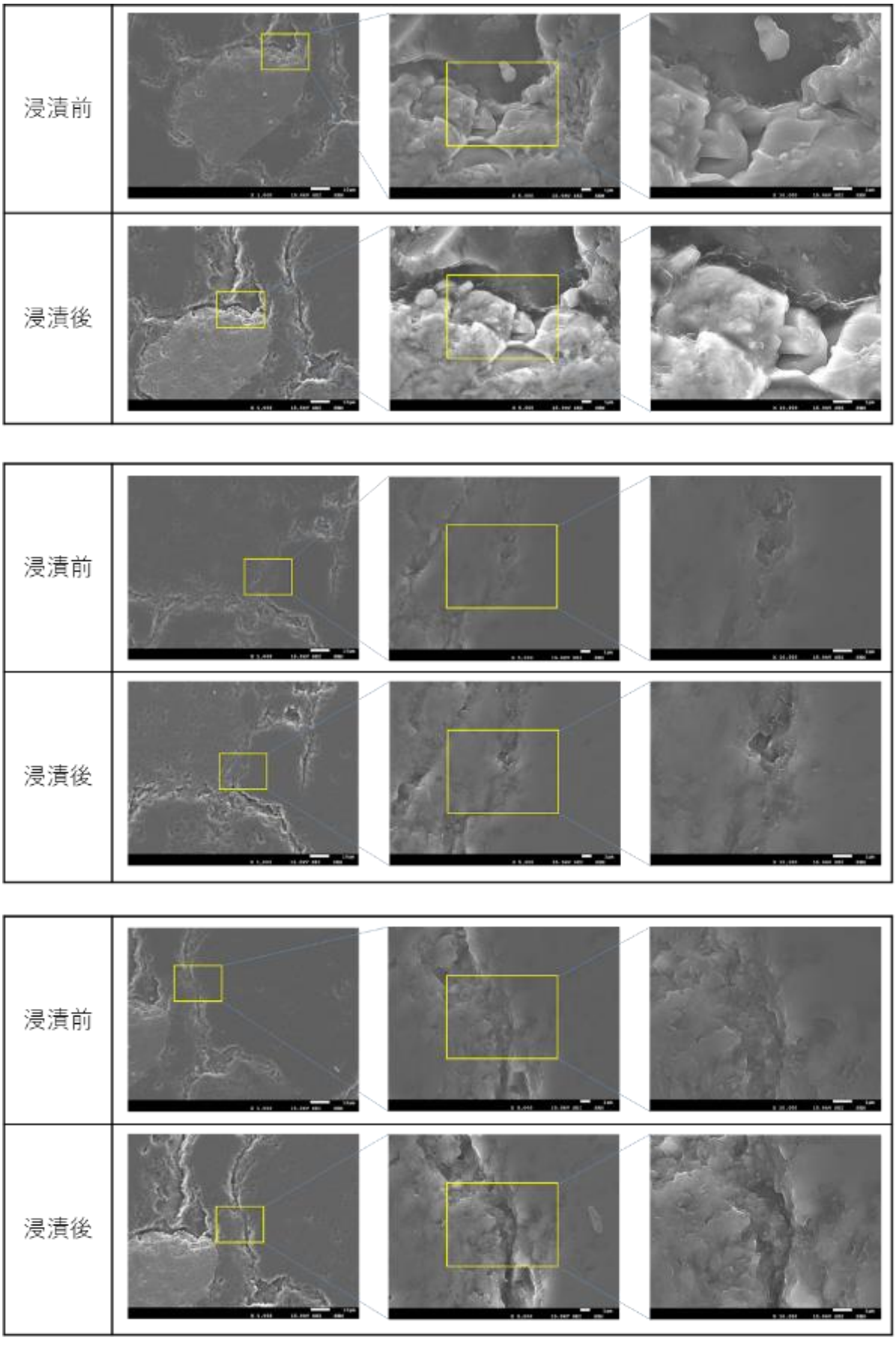


図 2.7-17　KY-2（砂岩）30 日浸漬前後の SEM 観察結果(3)

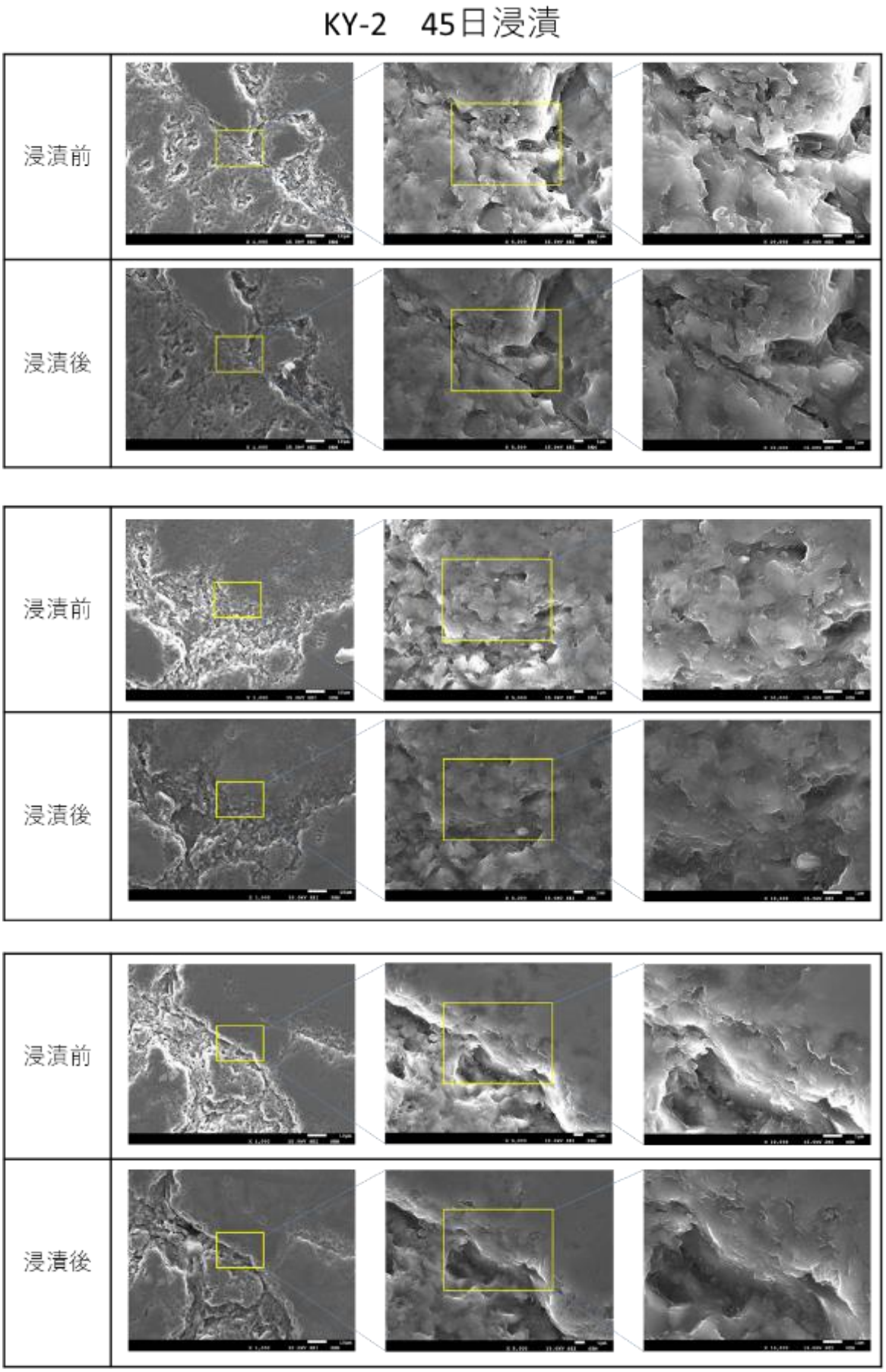


図 2.7-18　KY-2（砂岩）45 日浸漬前後の SEM 観察結果(1)

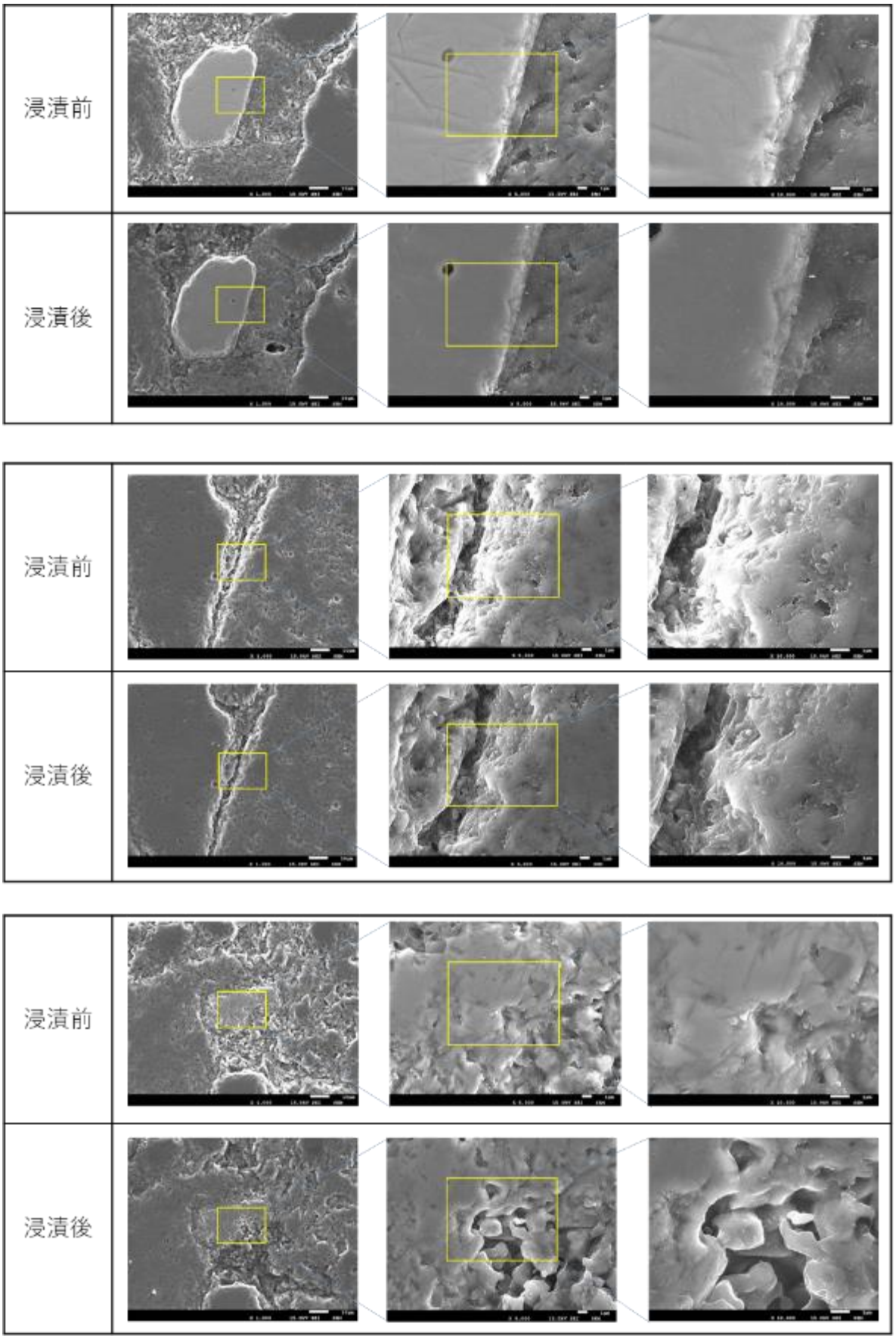


図 2.7-19　KY-2（砂岩）45 日浸漬前後の SEM 観察結果(2)

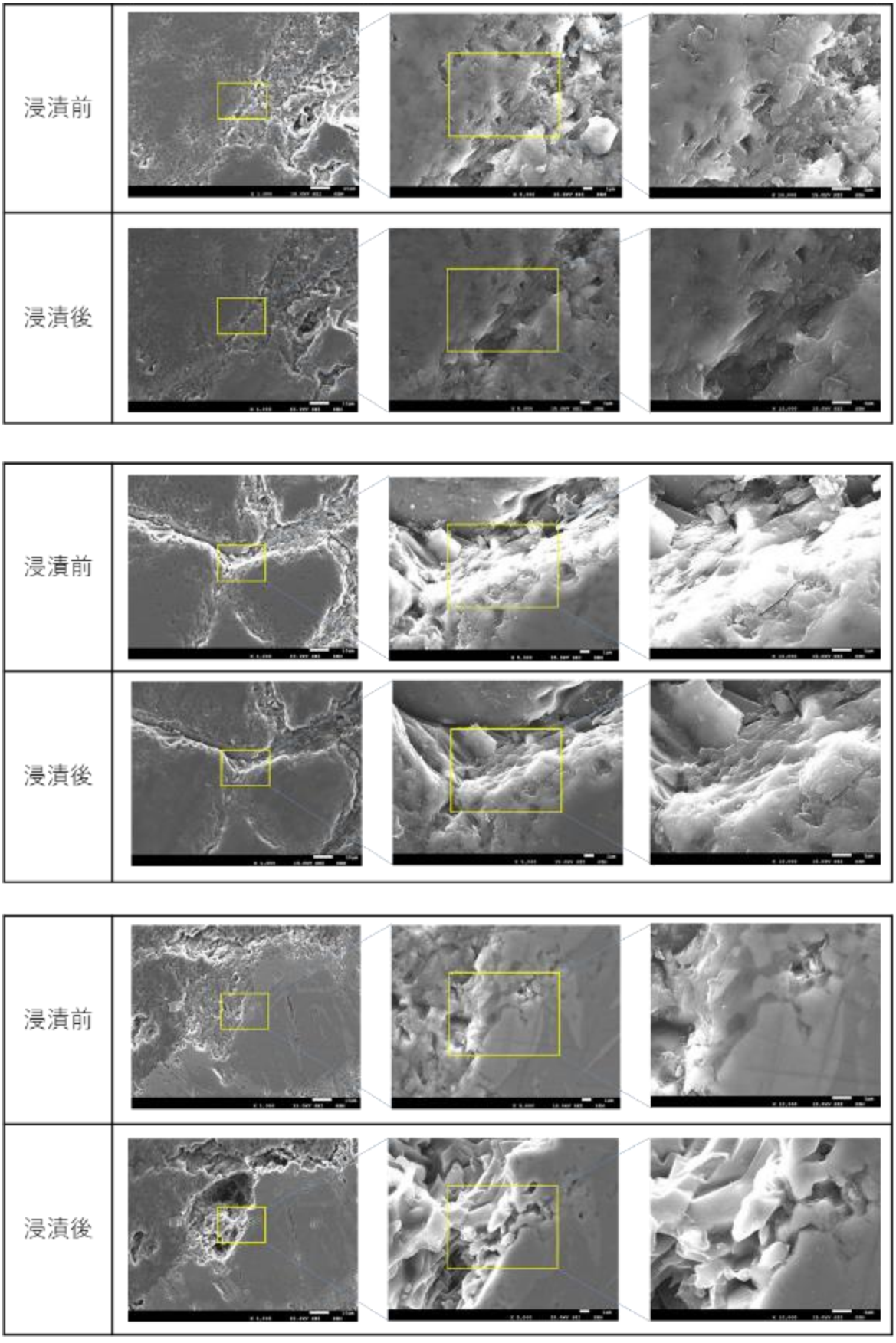
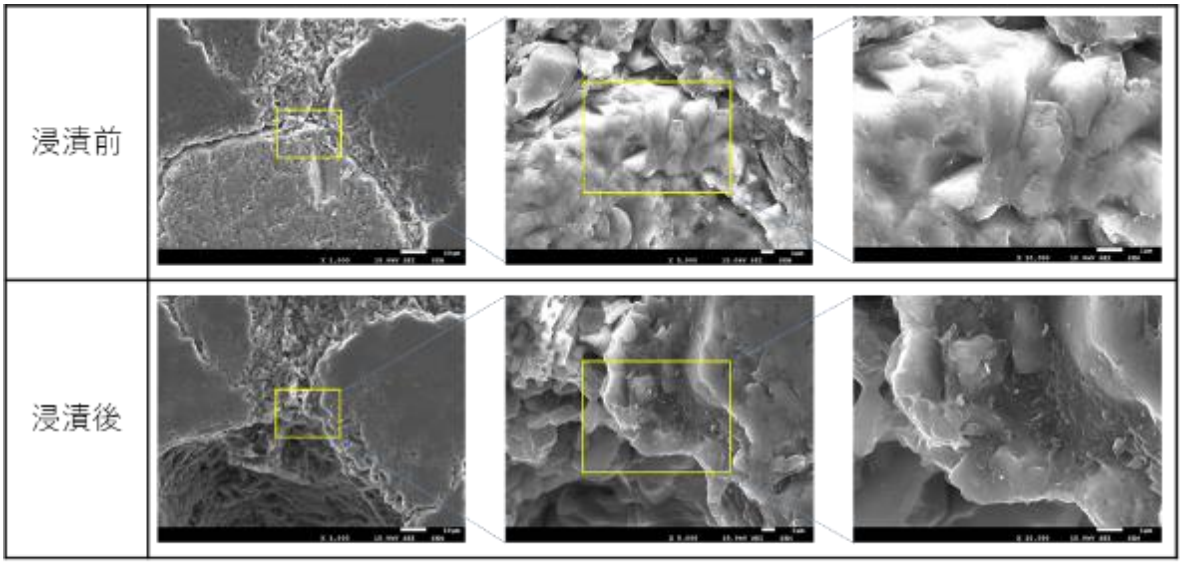
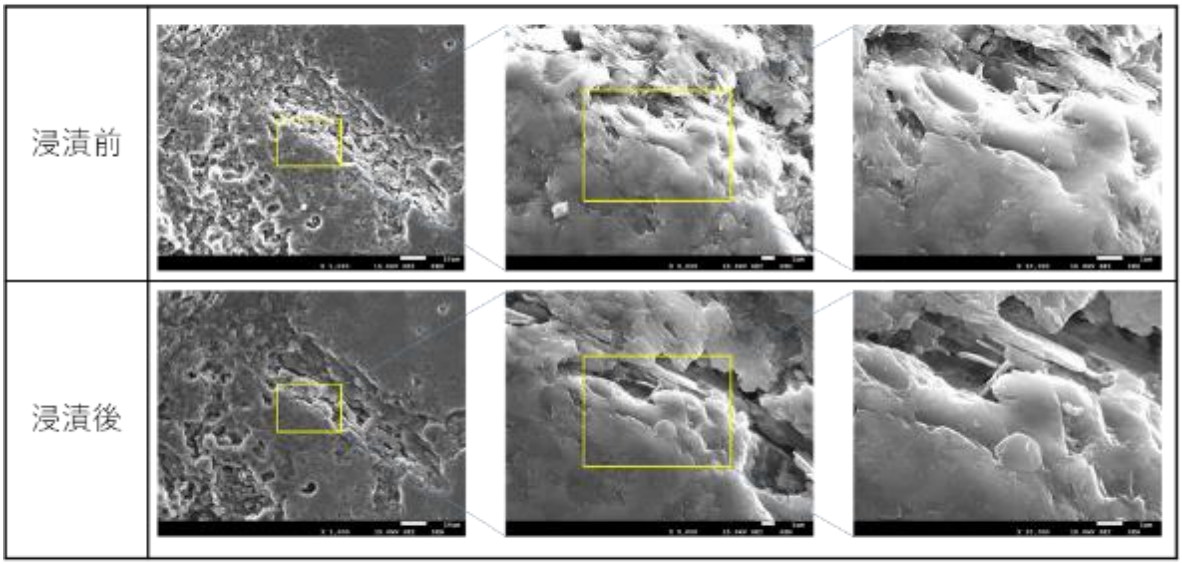


図 2.7-20　KY-2（砂岩）45 日浸漬前後の SEM 観察結果(3)





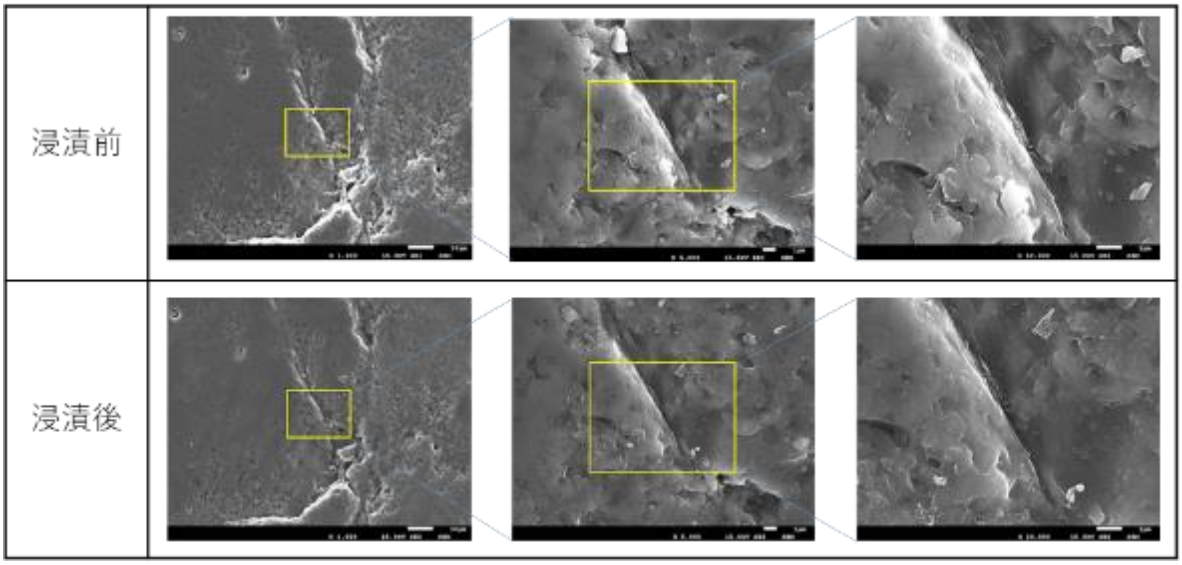


図 2.7-21　KY-2（砂岩）45 日浸漬前後の SEM 観察結果(4)

(3) KY-3

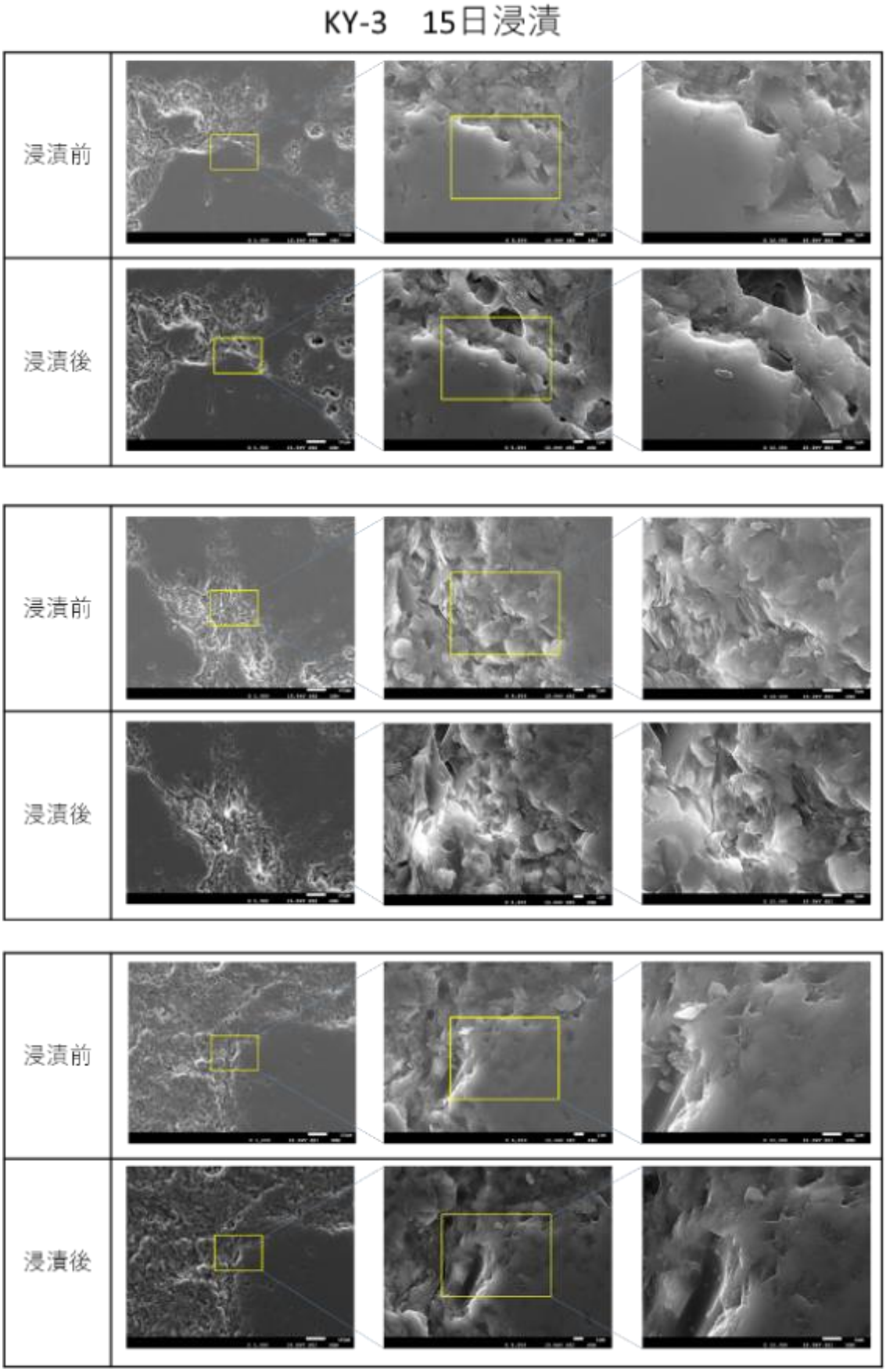


図 2.7-22　KY-3（砂岩）15 日浸漬前後の SEM 観察結果(1)

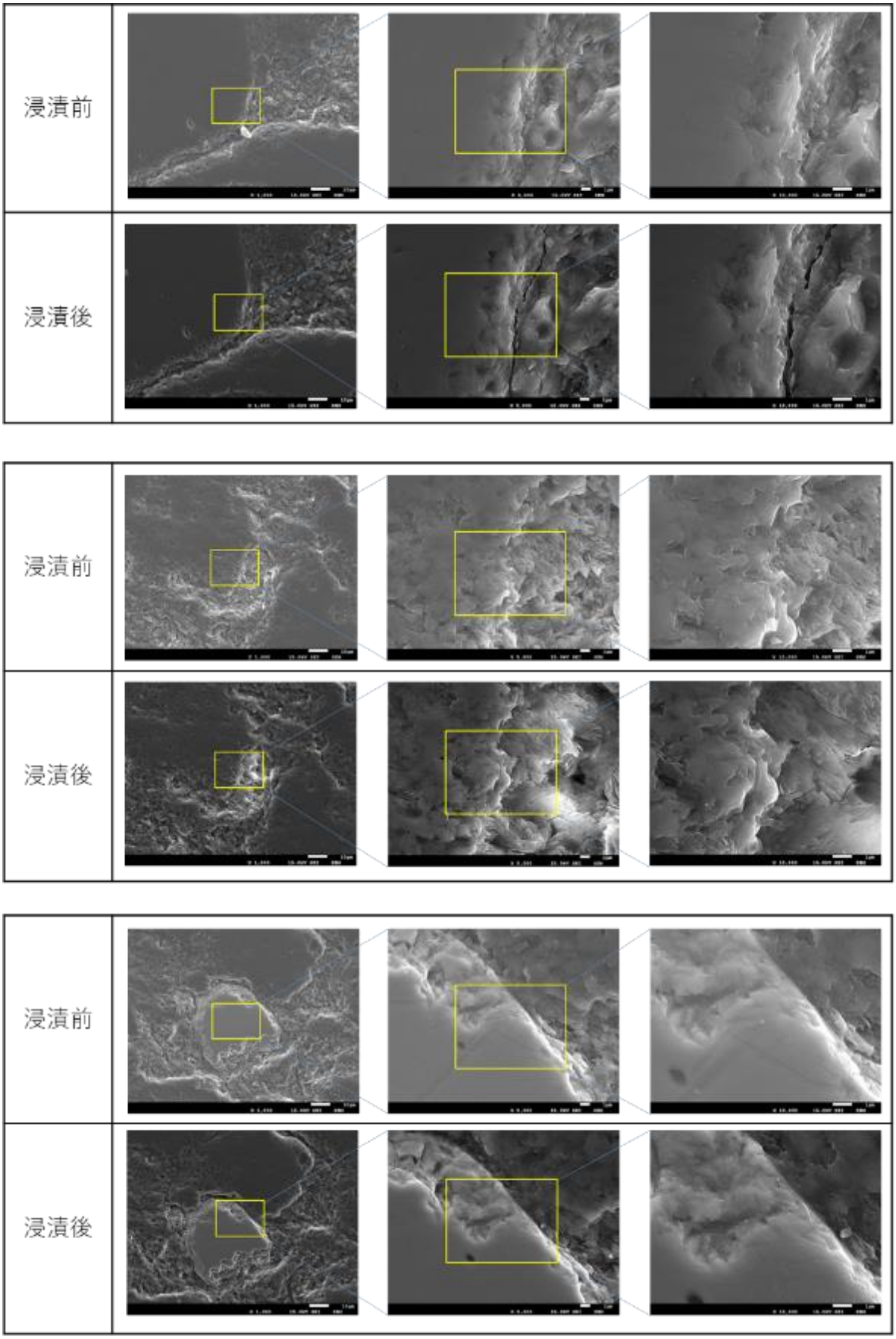


図 2.7-23　KY-3（砂岩）15 日浸漬前後の SEM 観察結果(2)

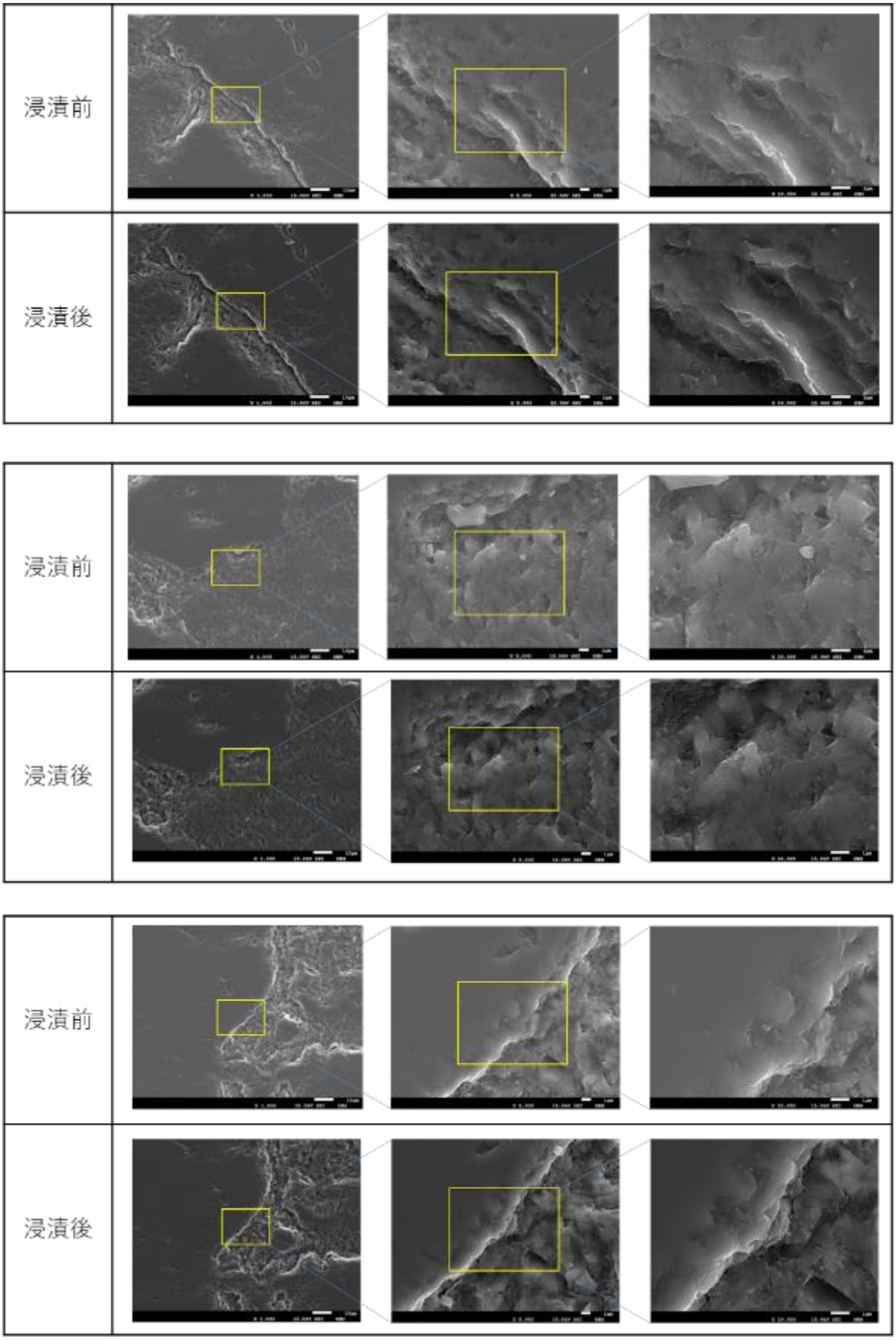


図 2.7-24　KY-3（砂岩）15 日浸漬前後の SEM 観察結果(3)

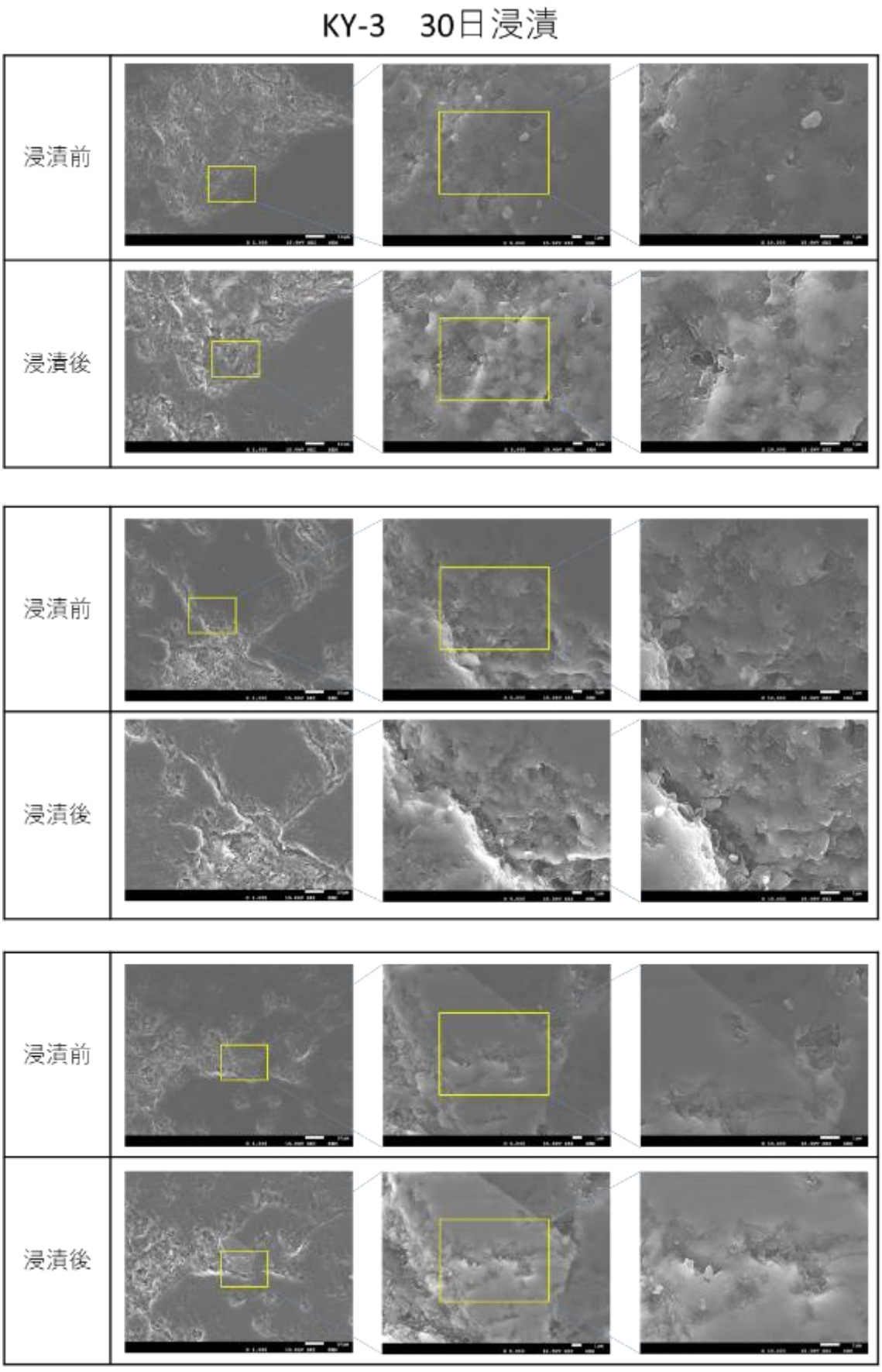


図 2.7-25　KY-3（砂岩）30 日浸漬前後の SEM 観察結果(1)

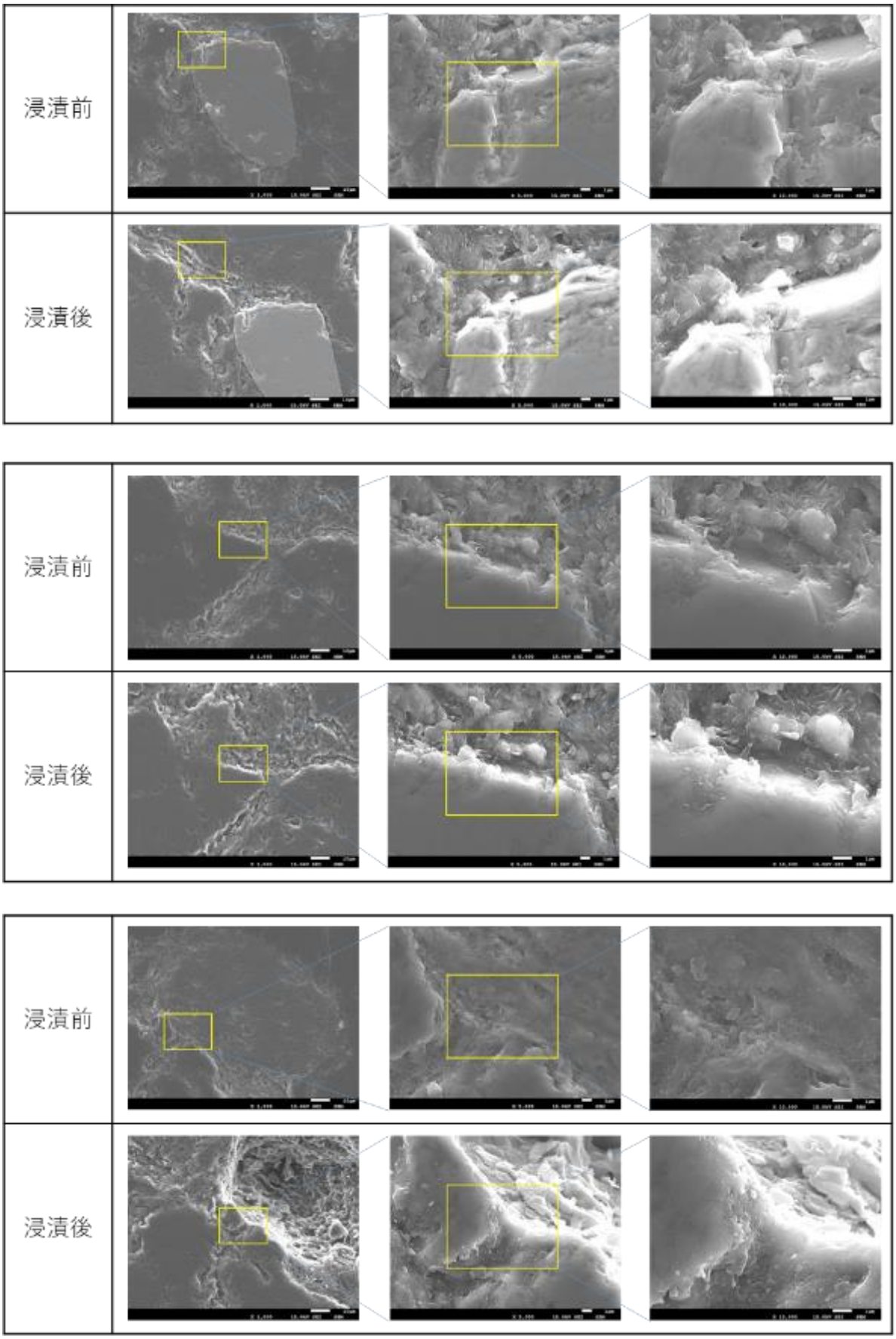


図 2.7-26　KY-3（砂岩）30 日浸漬前後の SEM 観察結果(2)

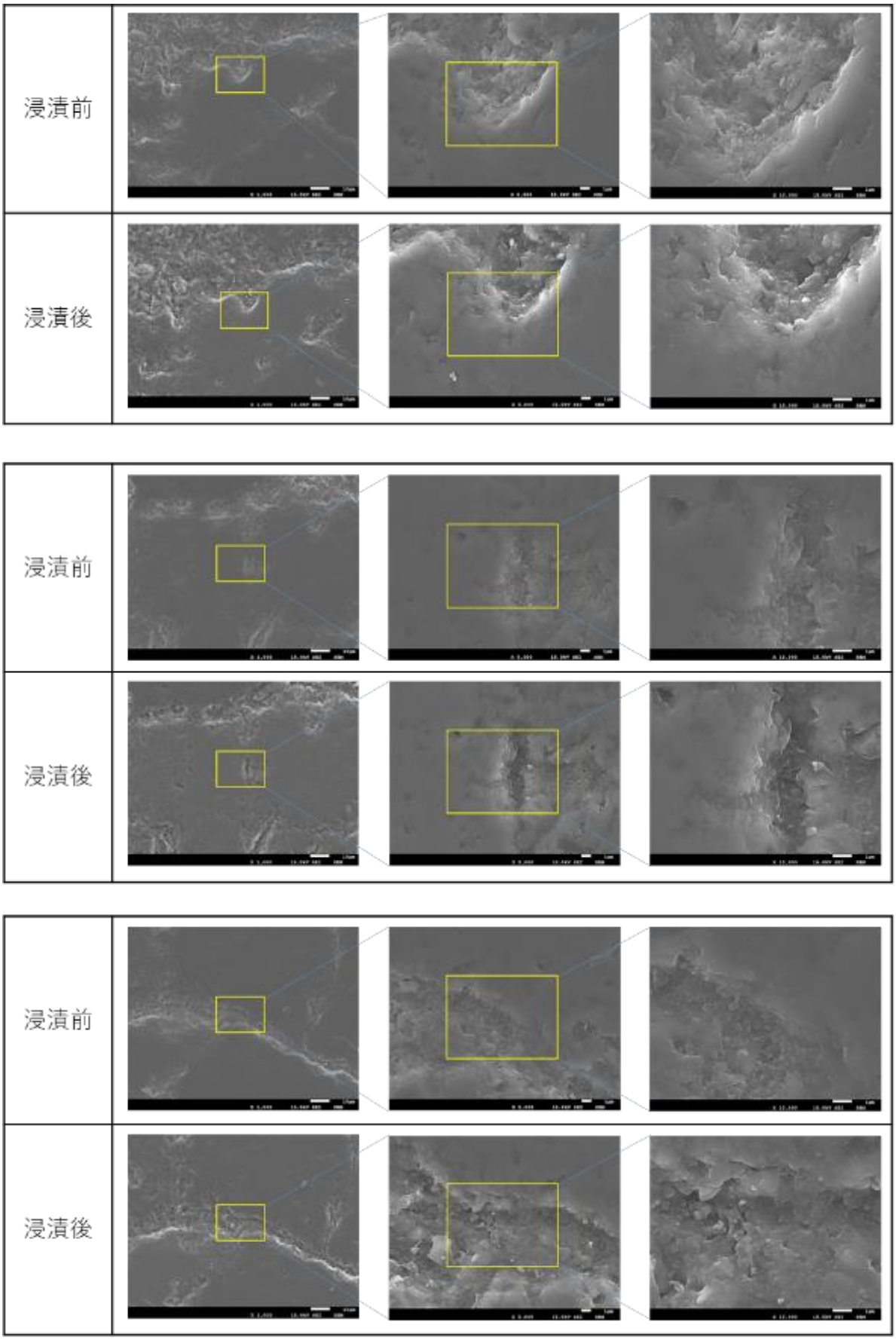


図 2.7-27　KY-3（砂岩）30 日浸漬前後の SEM 観察結果(3)

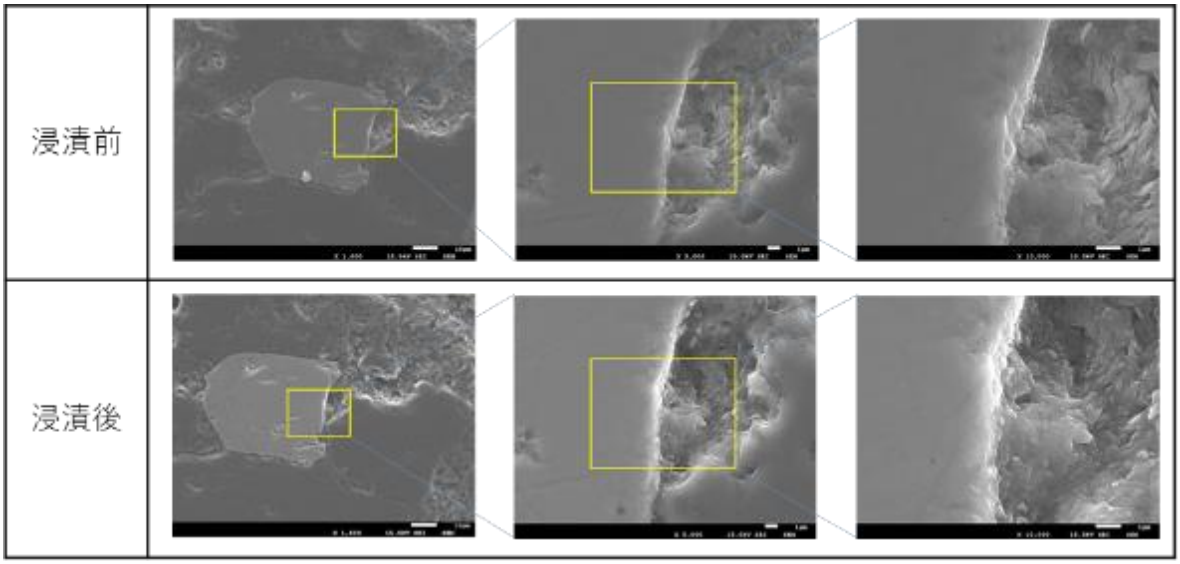


図 2.7-28　KY-3（砂岩）30 日浸漬前後の SEM 観察結果(4)

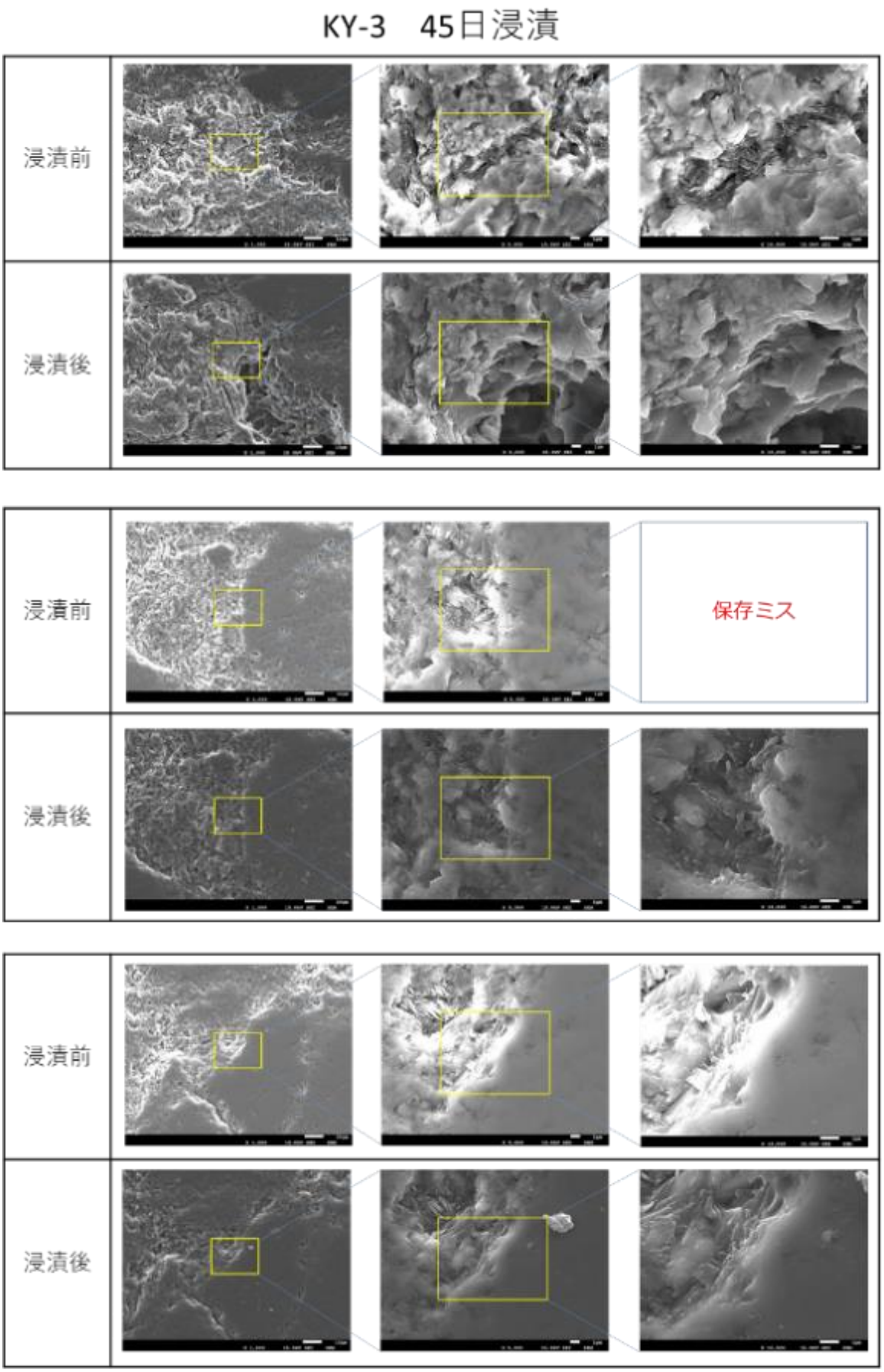


図 2.7-29　KY-3（砂岩）45 日浸漬前後の SEM 観察結果(1)

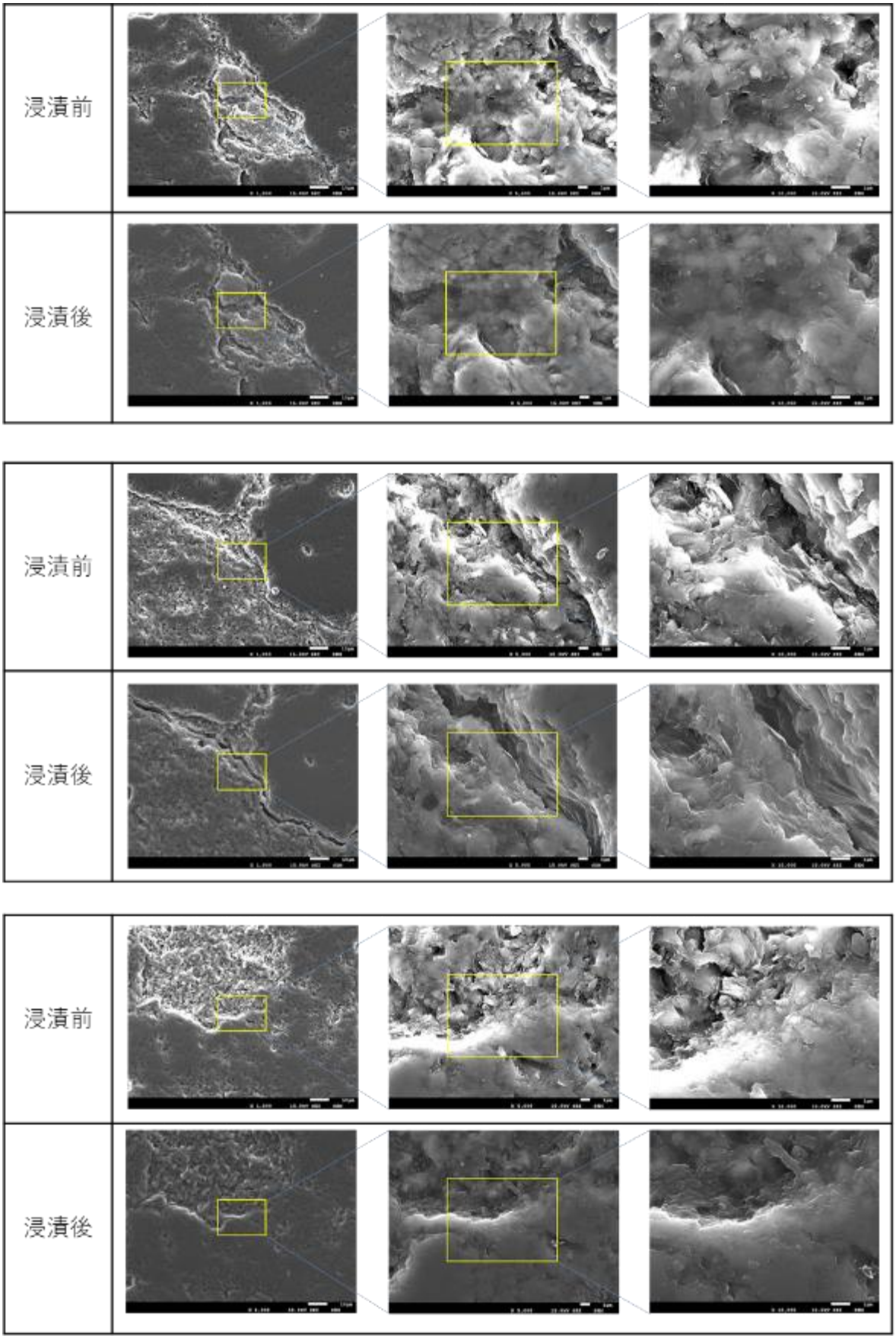


図 2.7-30　KY-3（砂岩）45 日浸漬前後の SEM 観察結果(2)

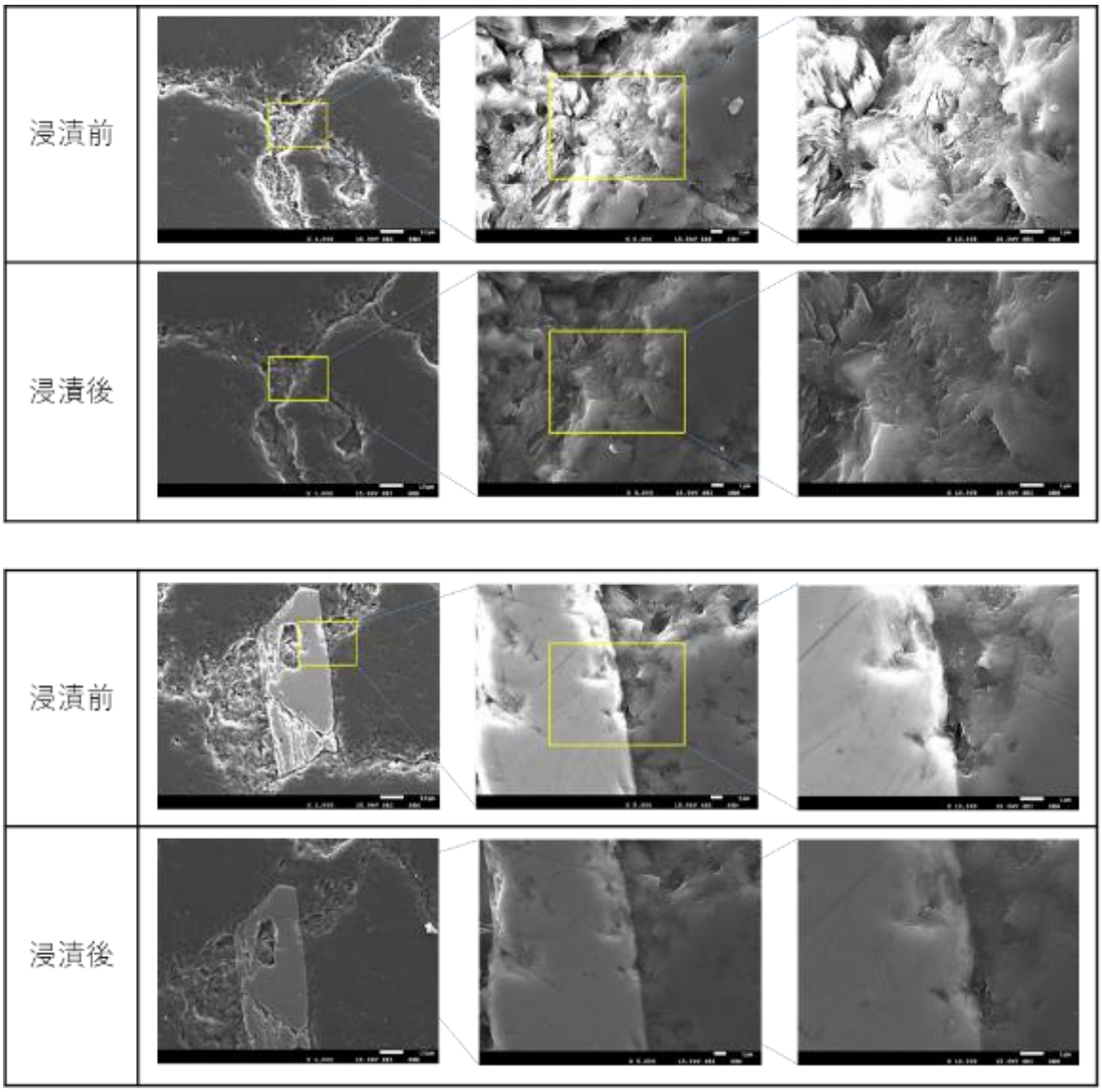


図 2.7-31　KY-3（砂岩）45 日浸漬前後の SEM 観察結果(3)

(4) KY-5

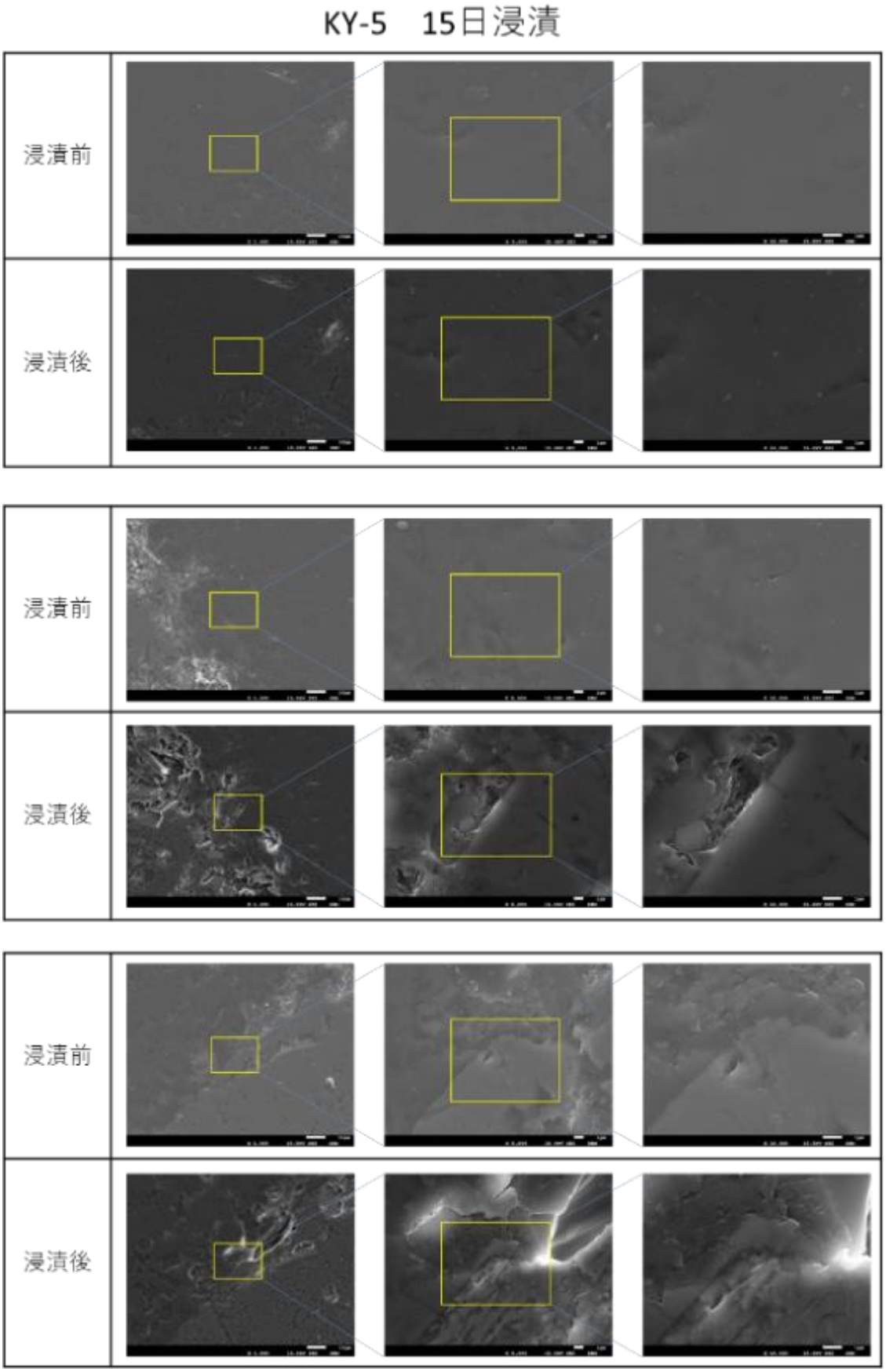


図 2.7-32　KY-5（溶結凝灰岩）15 日浸漬前後の SEM 観察結果(1)

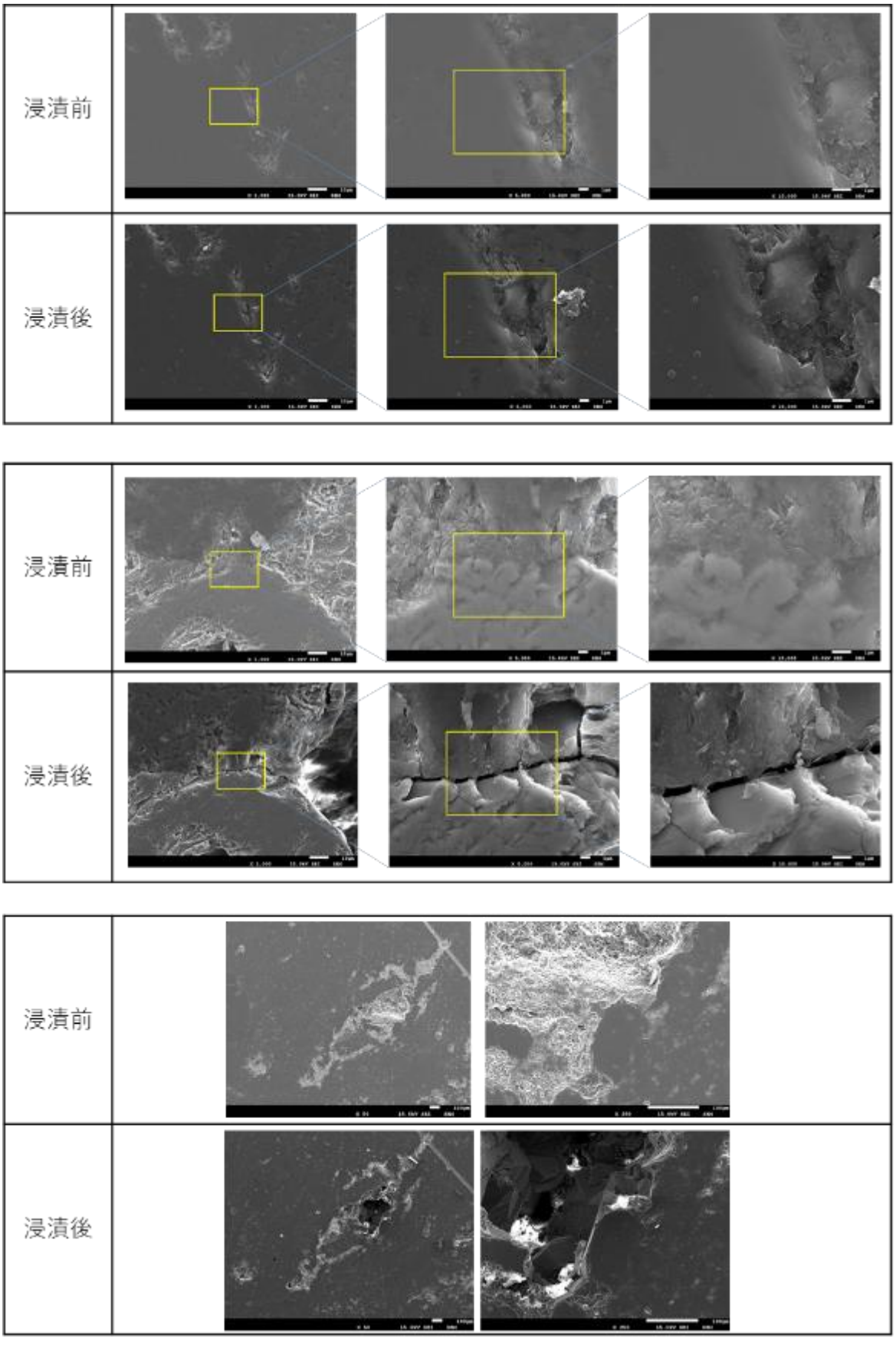


図 2.7-33　KY-5（溶結凝灰岩）15 日浸漬前後の SEM 観察結果(2)

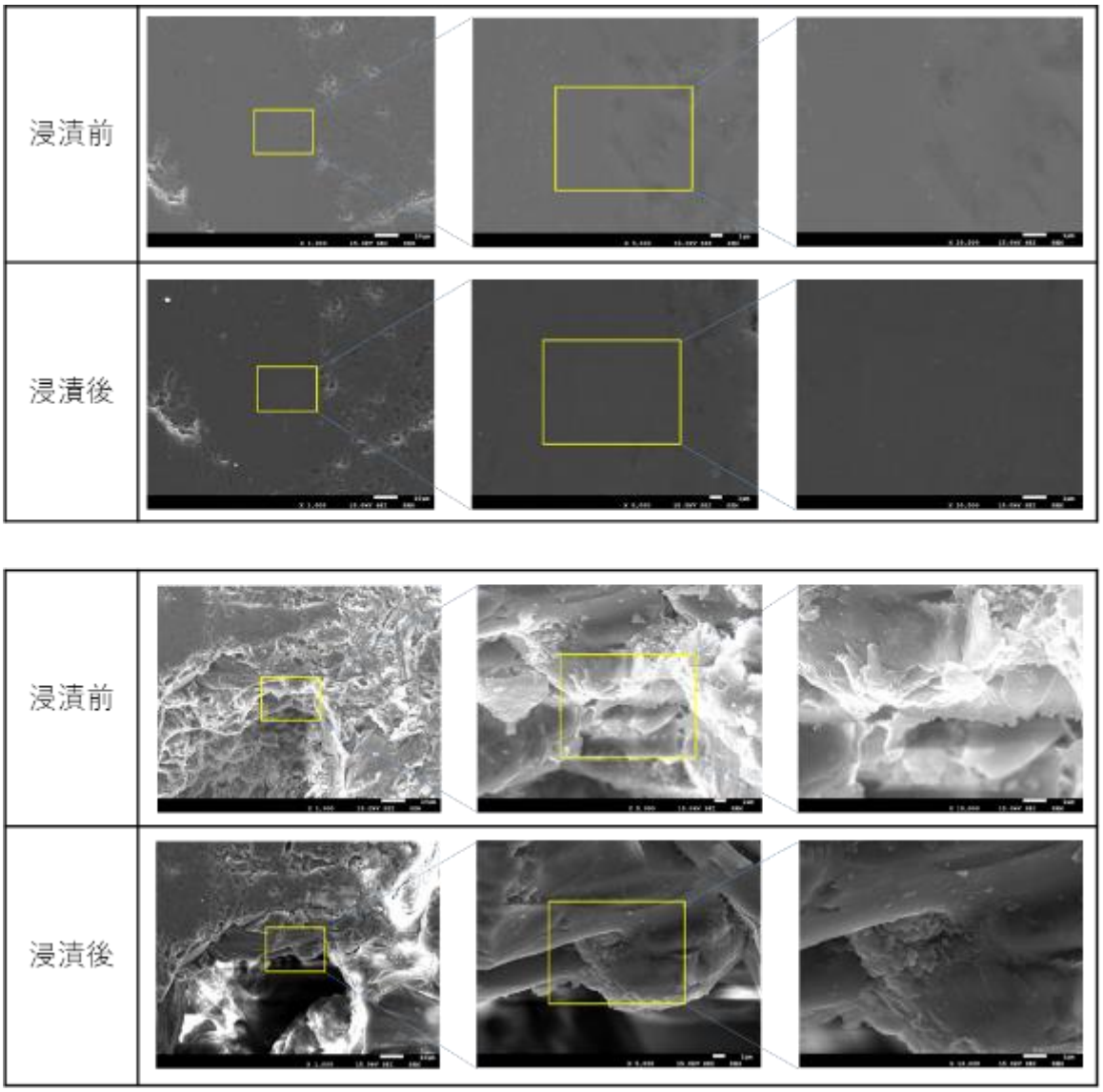


図 2.7-34　KY-5（溶結凝灰岩）15 日浸漬前後の SEM 観察結果(3)

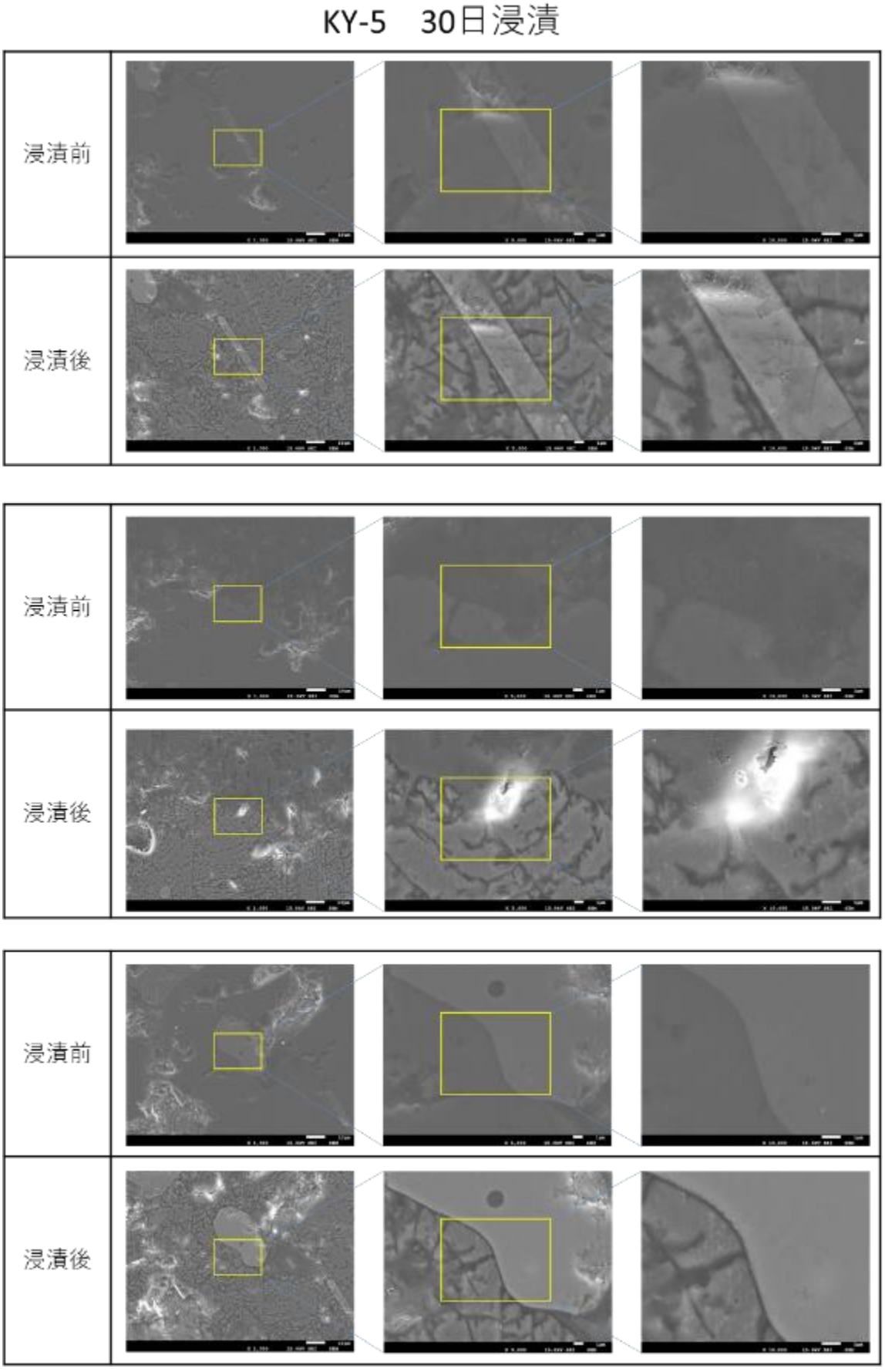


図 2.7-35　KY-5（溶結凝灰岩）30 日浸漬前後の SEM 観察結果(1)

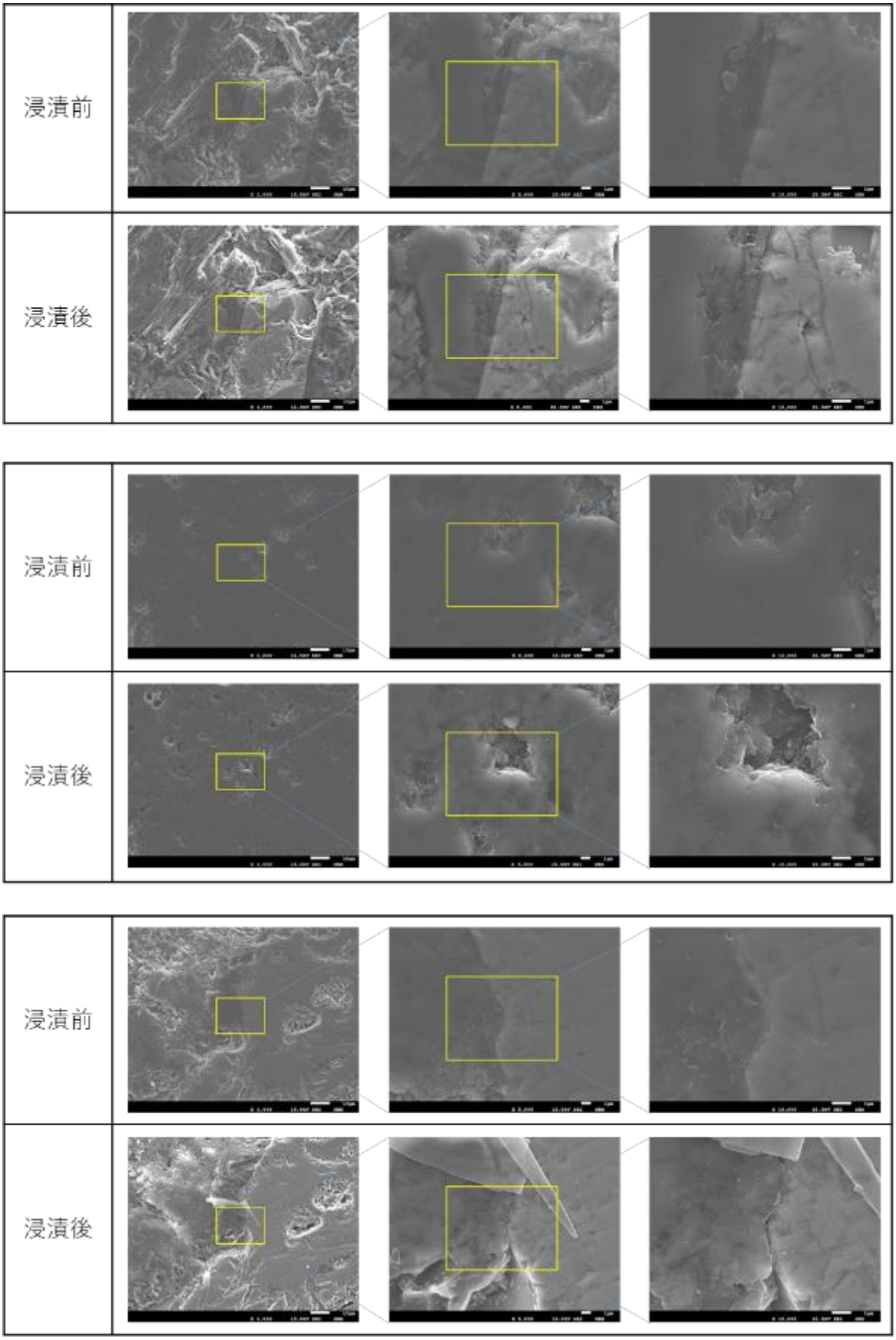


図 2.7-36　KY-5（溶結凝灰岩）30 日浸漬前後の SEM 観察結果(2)

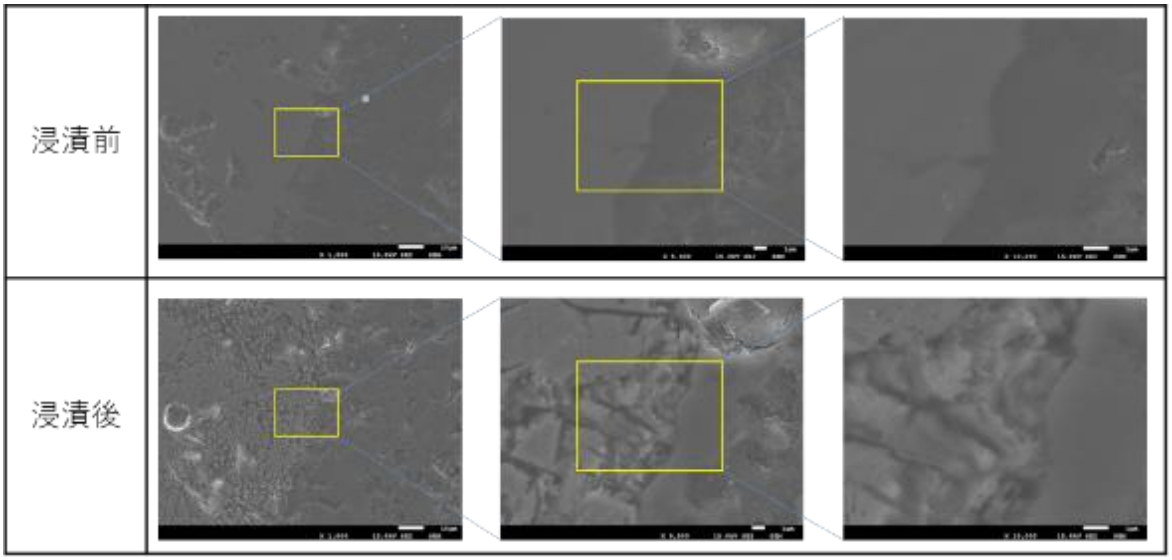


図 2.7-37　KY-5（溶結凝灰岩）30 日浸漬前後の SEM 観察結果(3)

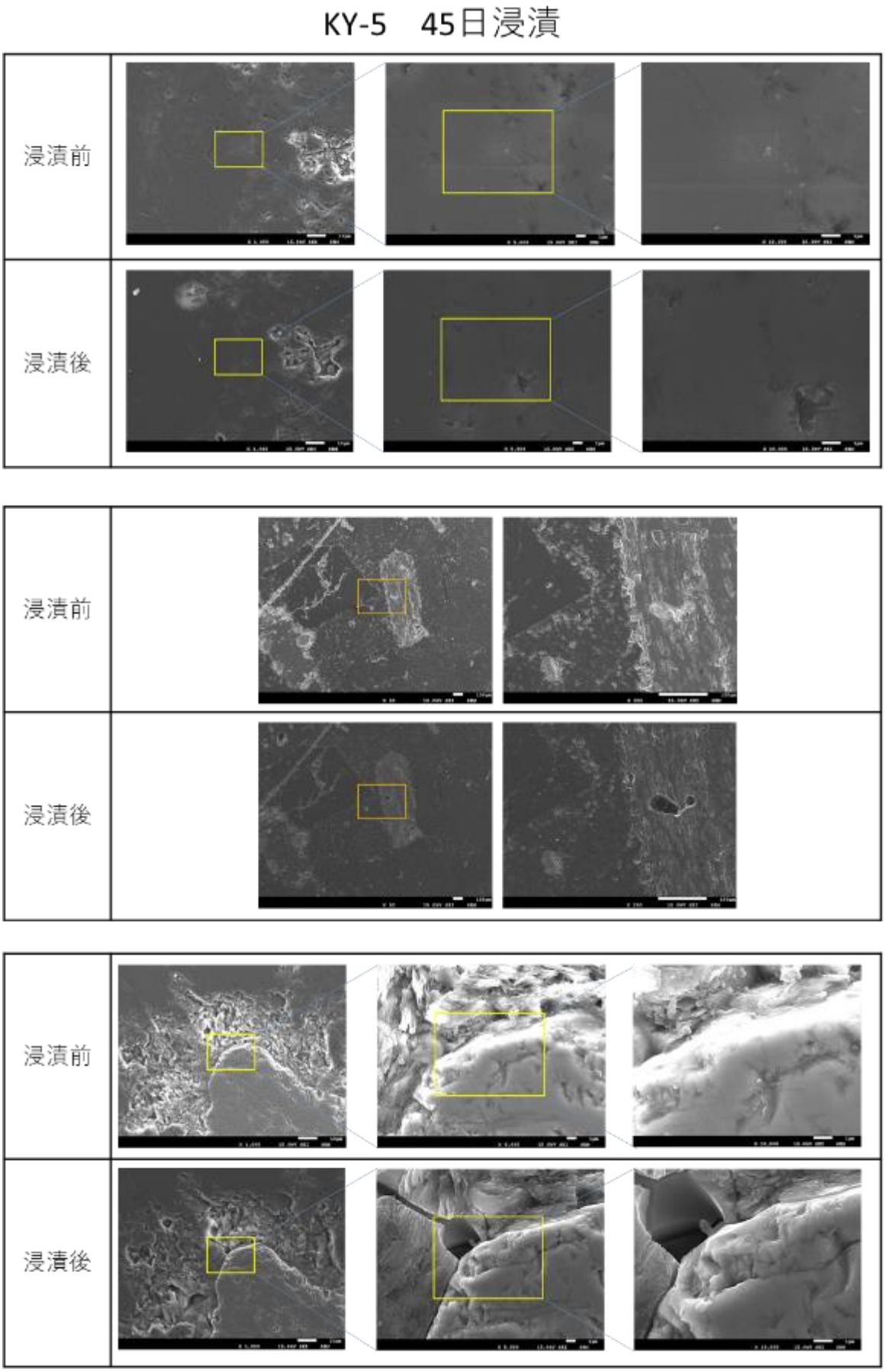


図 2.7-38　KY-5（溶結凝灰岩）45 日浸漬前後の SEM 観察結果(1)

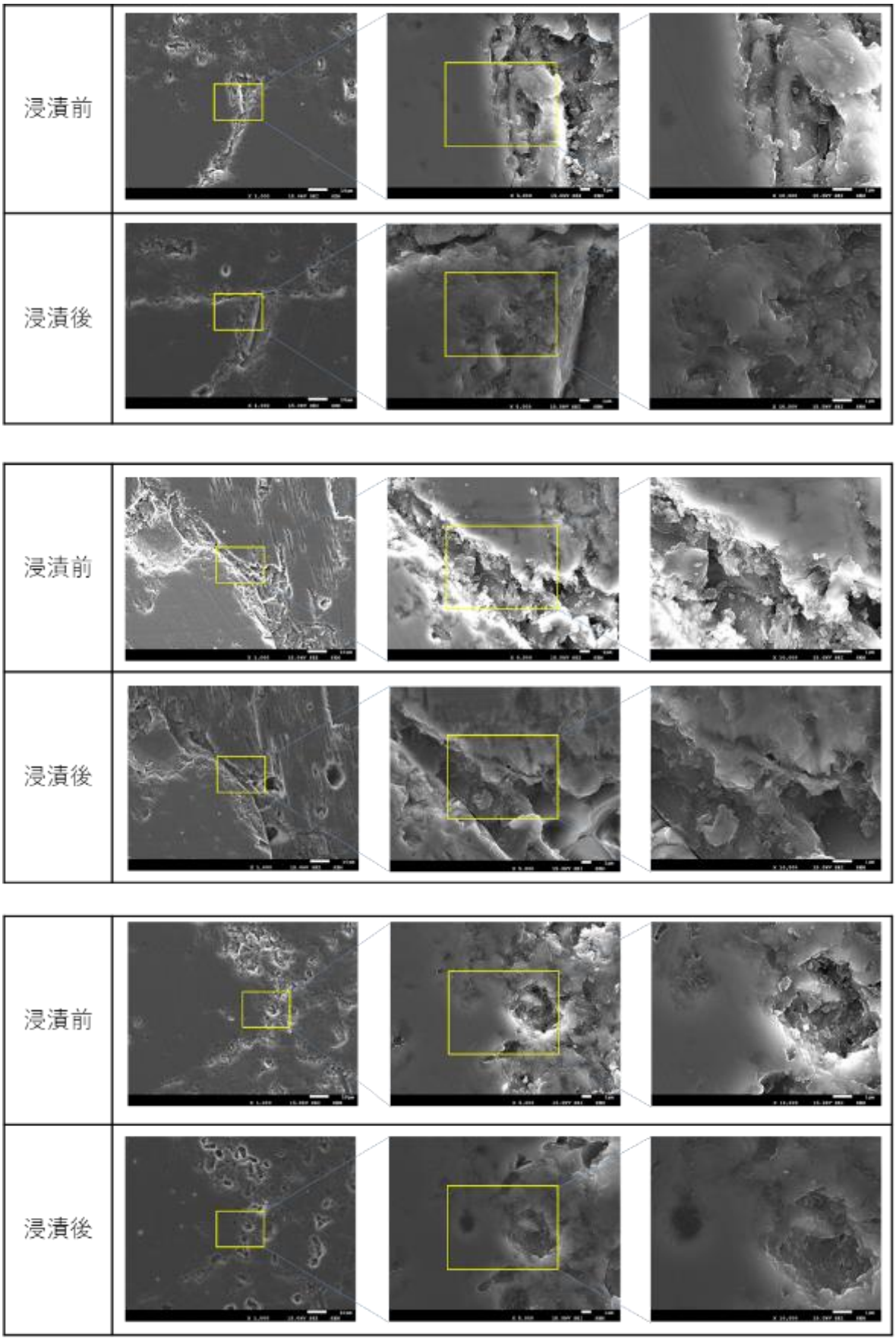


図 2.7-39　KY-5（溶結凝灰岩）45 日浸漬前後の SEM 観察結果(2)

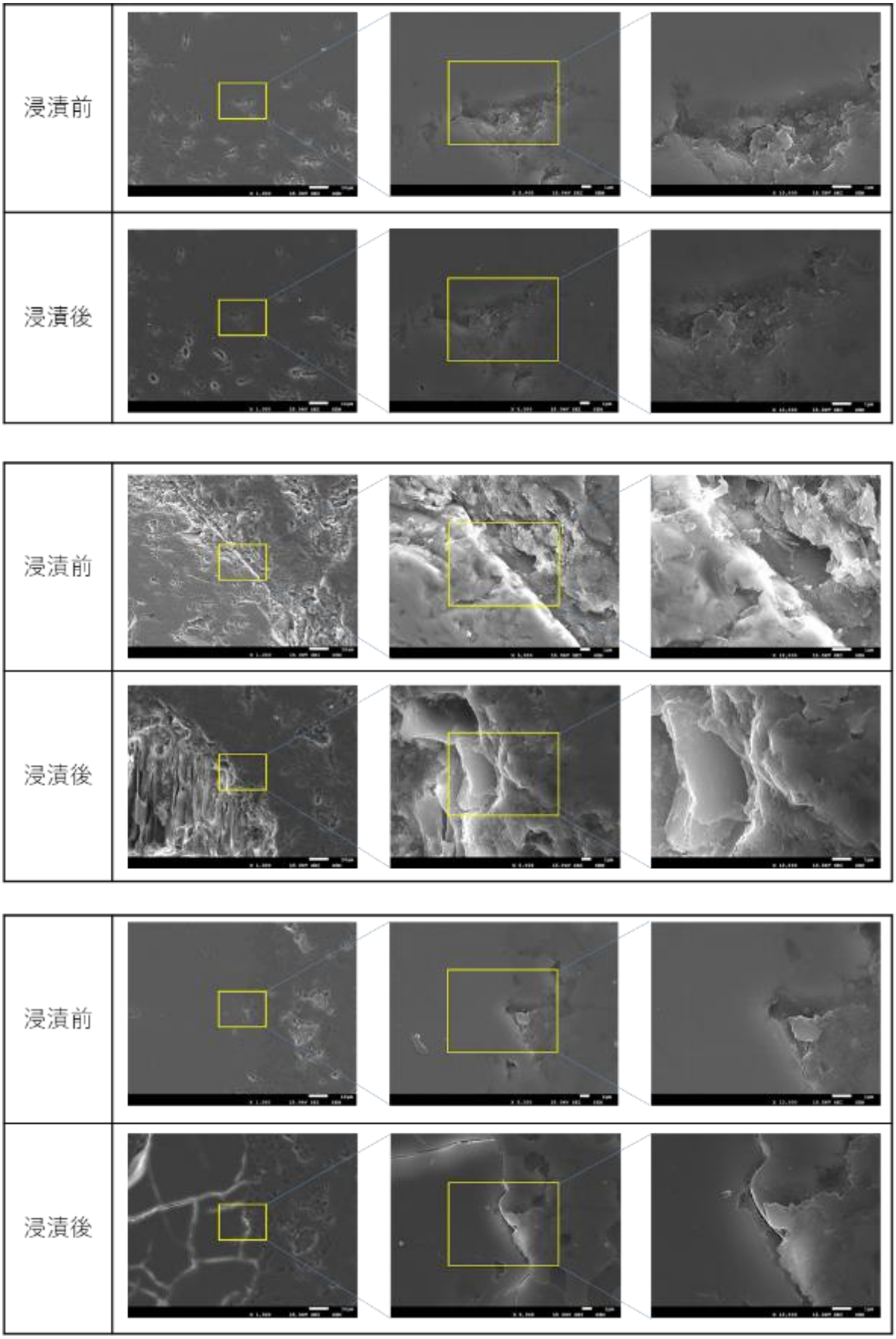


図 2.7-40　KY-5（溶結凝灰岩）45 日浸漬前後の SEM 観察結果(3)

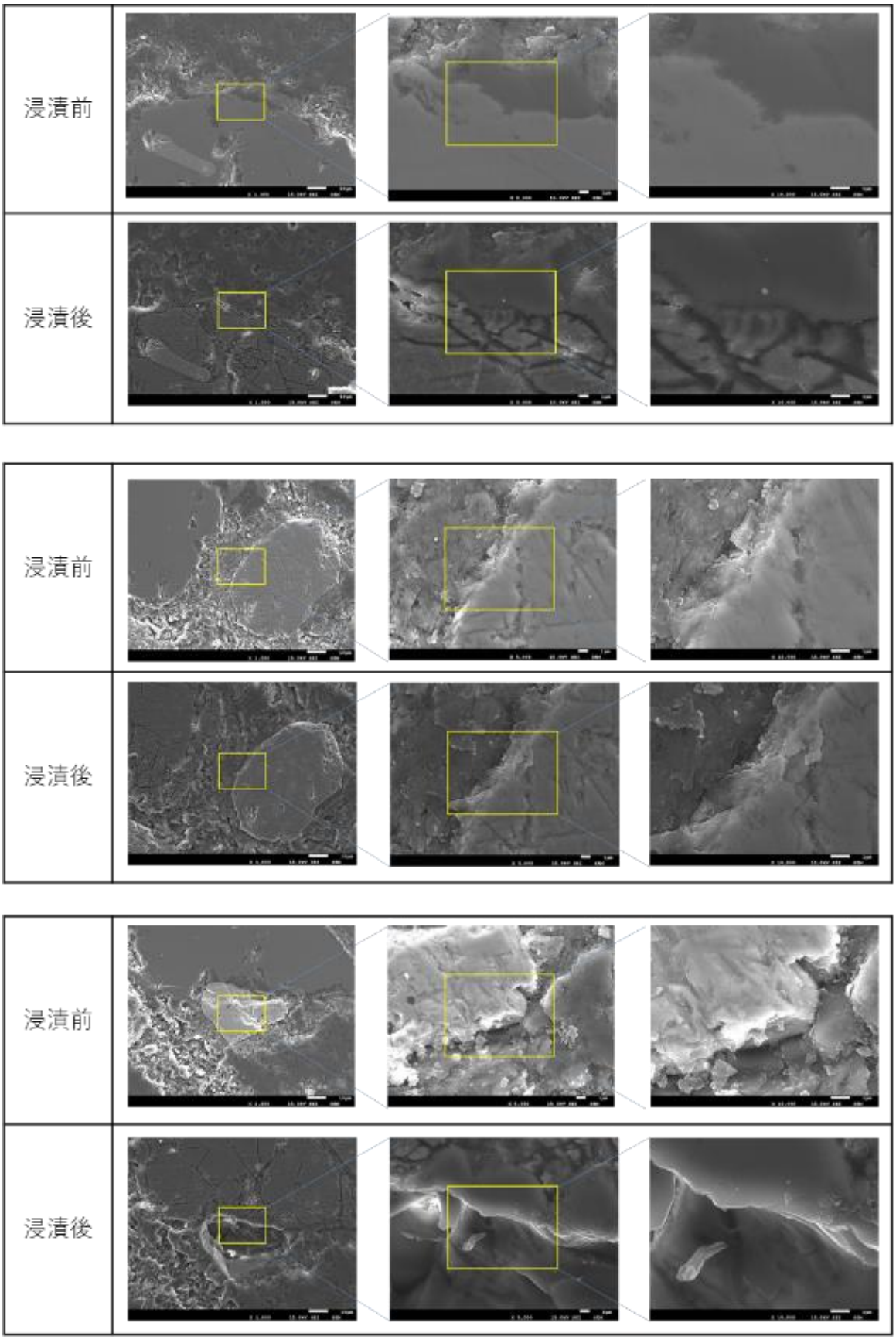


図 2.7-41　KY-5（溶結凝灰岩）45 日浸漬前後の SEM 観察結果(4)

(5) KY-8

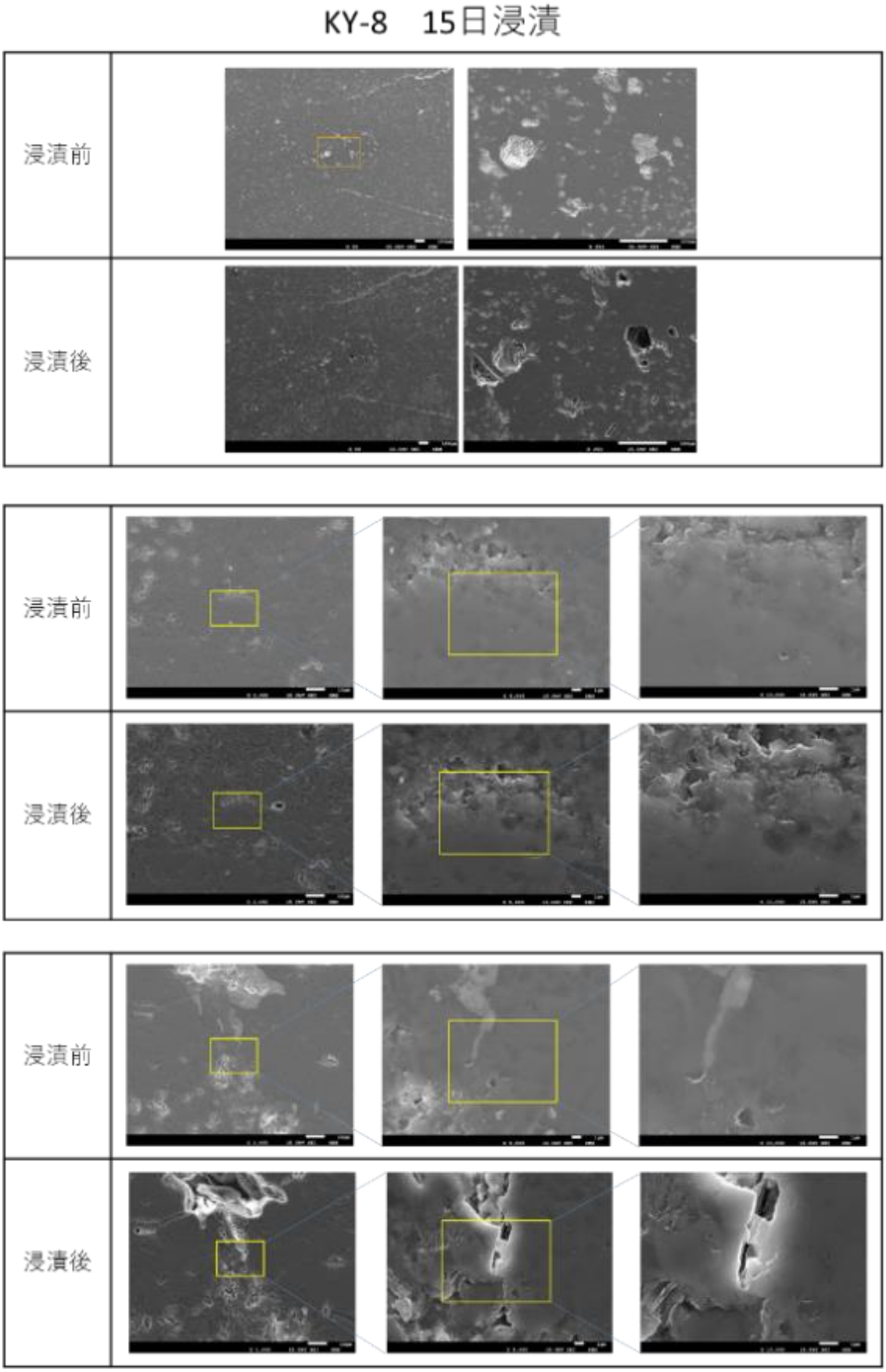


図 2.7-42　KY-8（泥岩）15 日浸漬前後の SEM 観察結果(1)

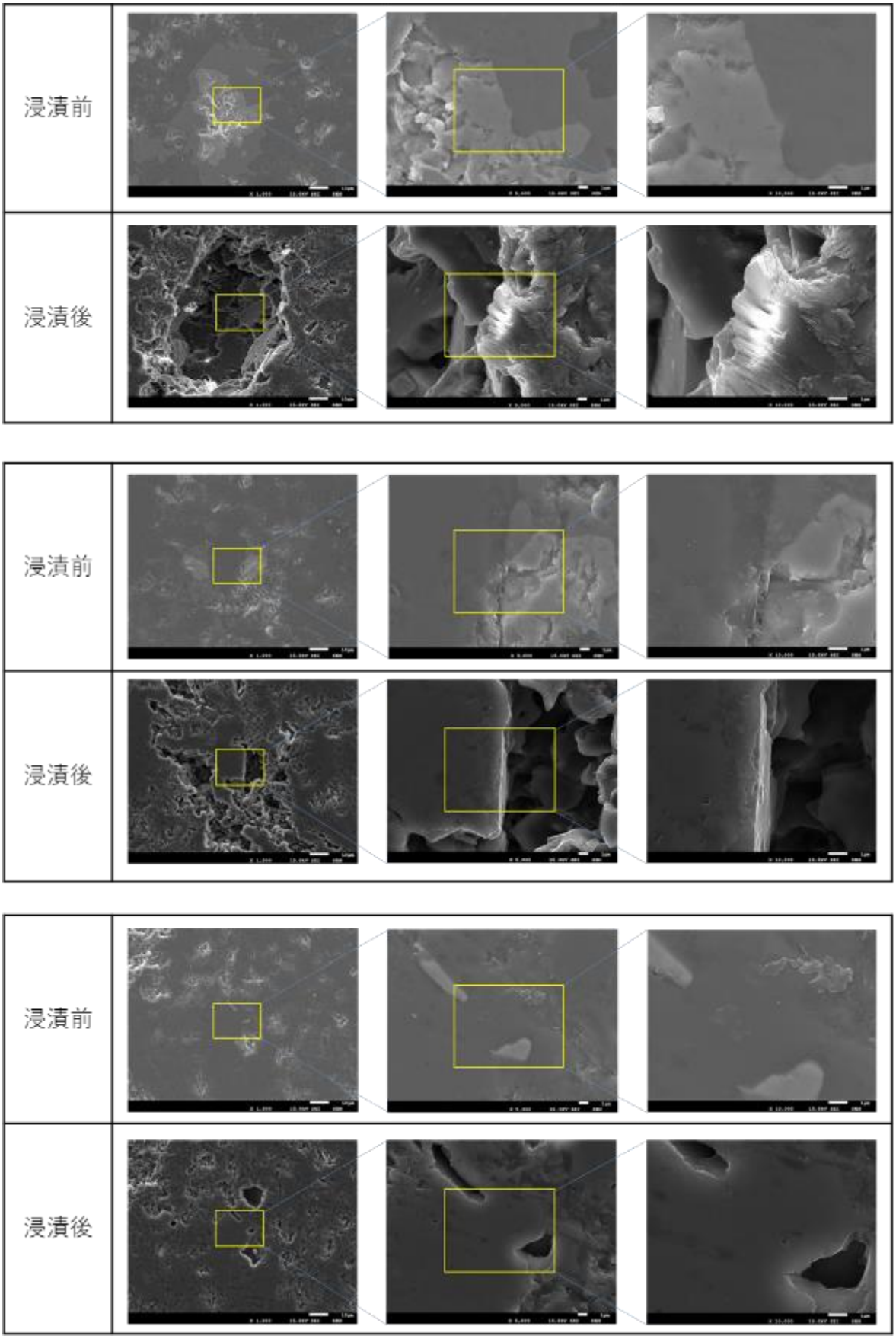


図 2.7-43　KY-8（泥岩）15 日浸漬前後の SEM 観察結果(2)

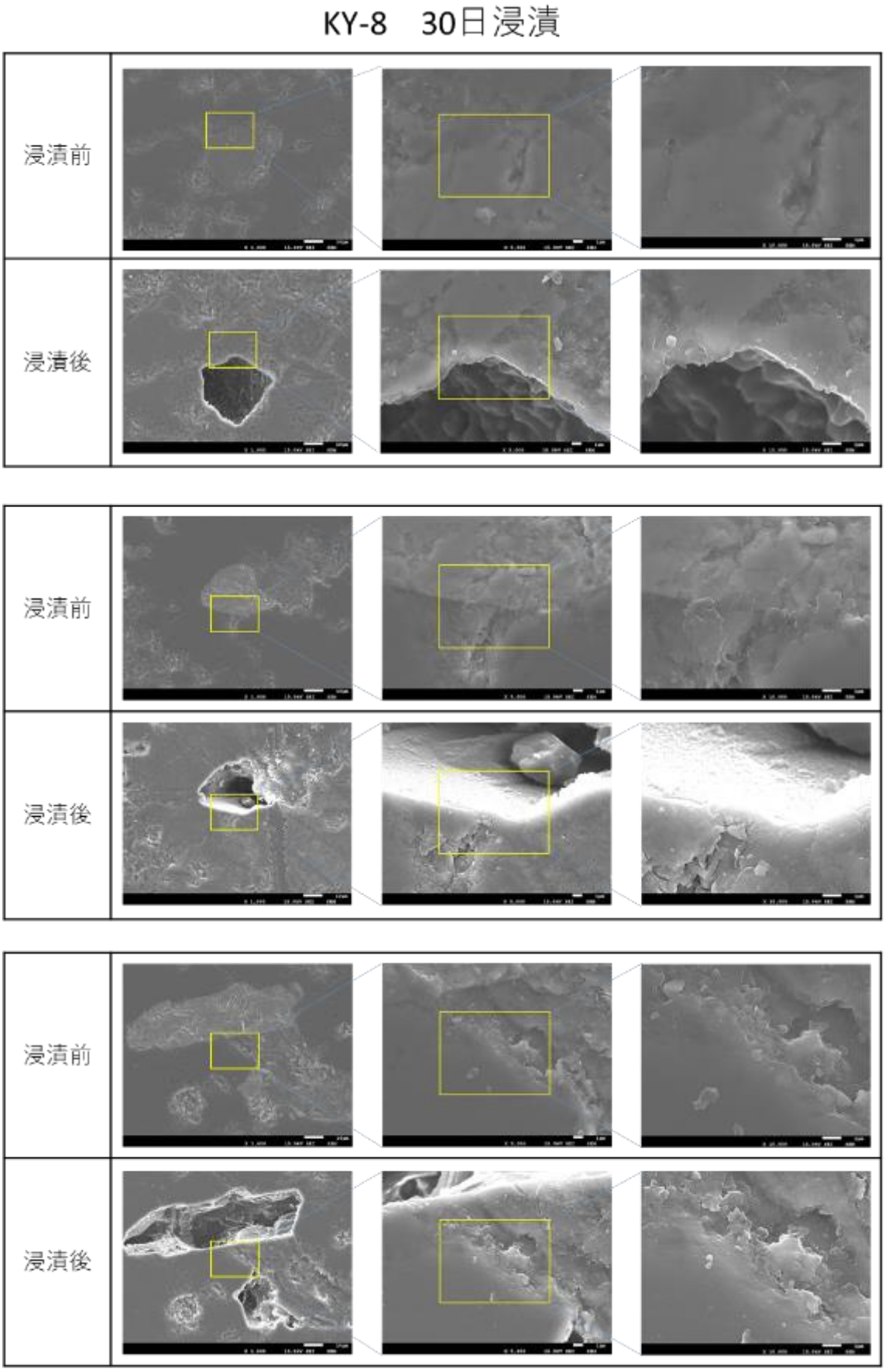


図 2.7-44　KY-8（泥岩）30 日浸漬前後の SEM 観察結果(1)

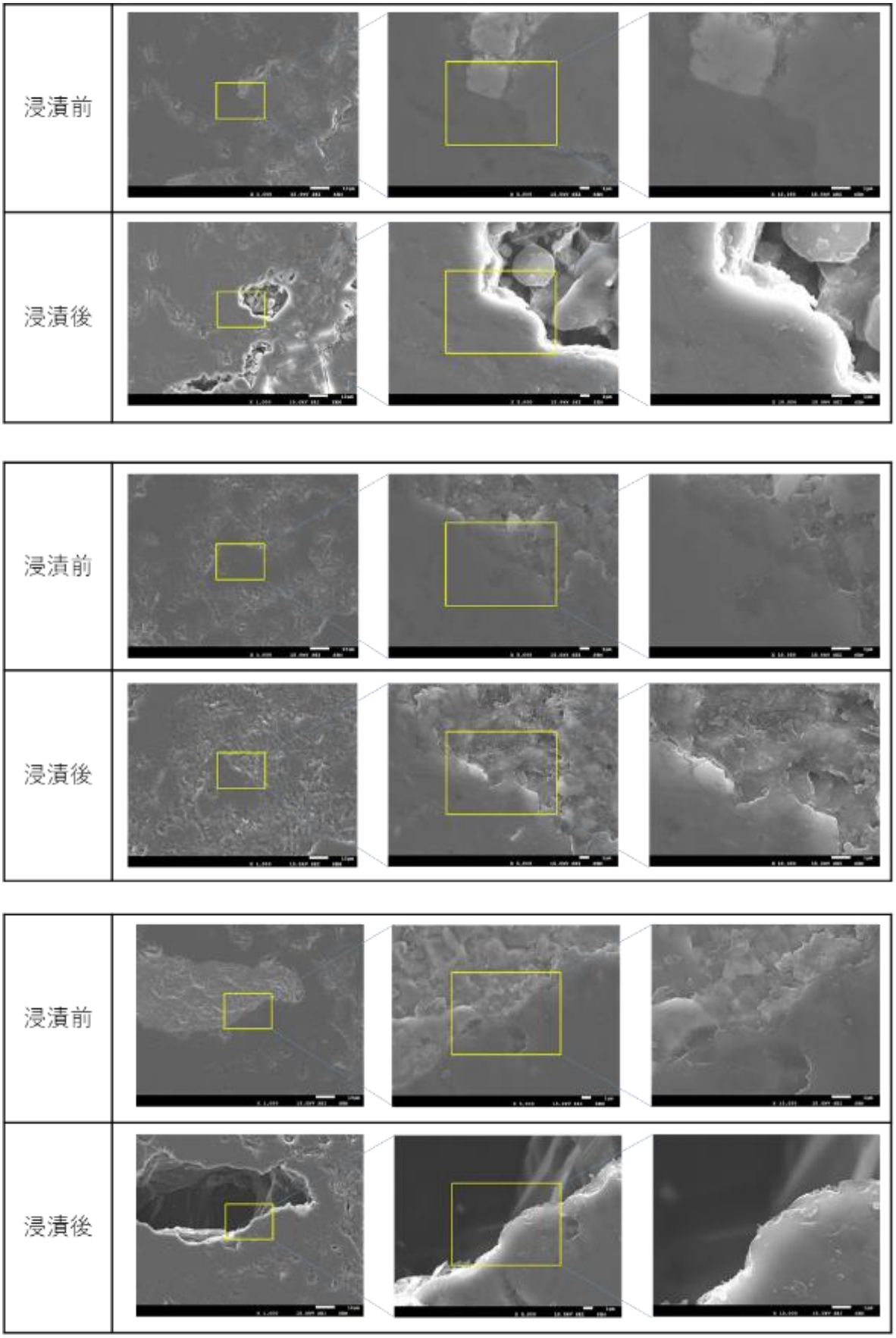


図 2.7-45　KY-8（泥岩）30 日浸漬前後の SEM 観察結果(2)

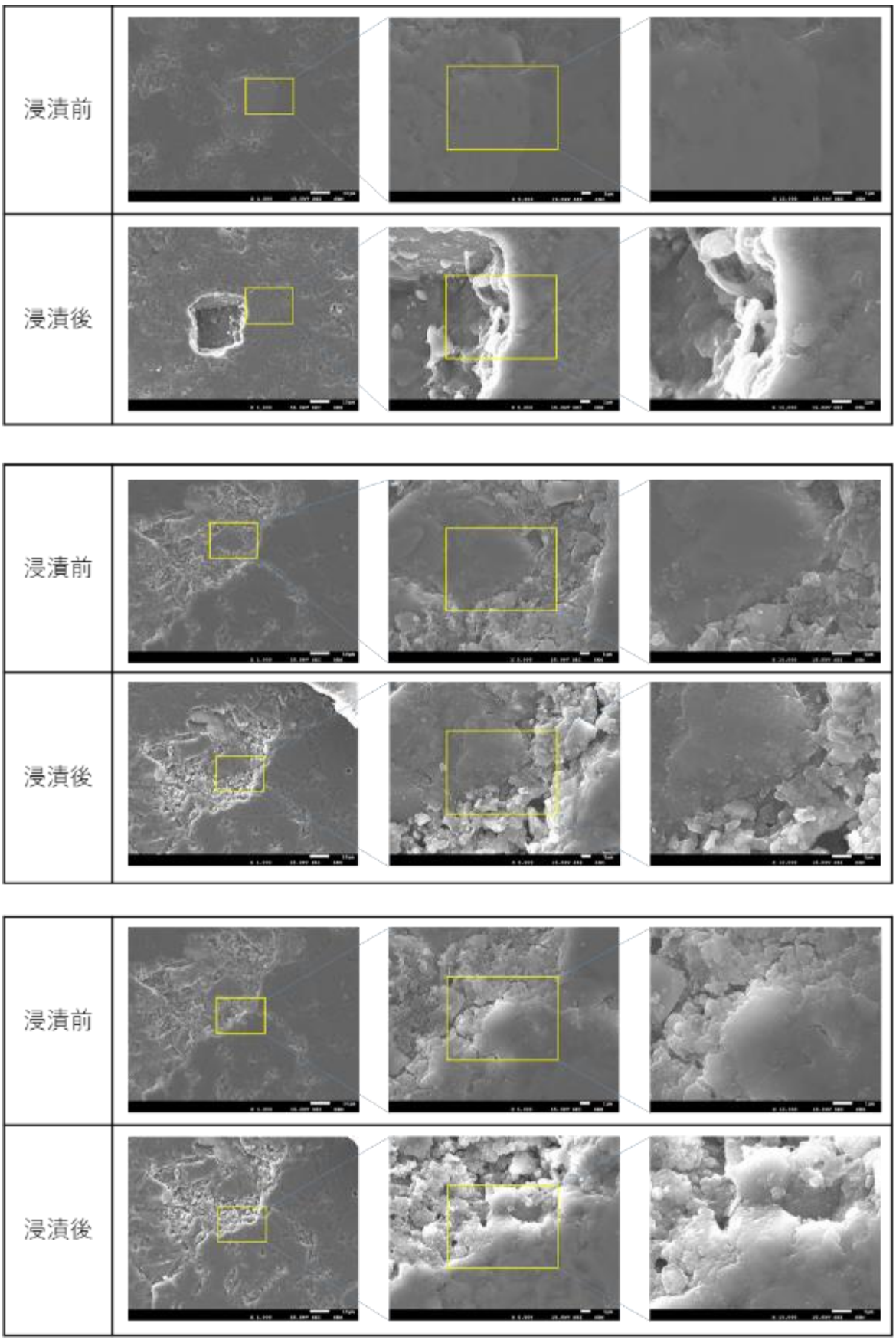


図 2.7-46　KY-8（泥岩）30 日浸漬前後の SEM 観察結果(3)

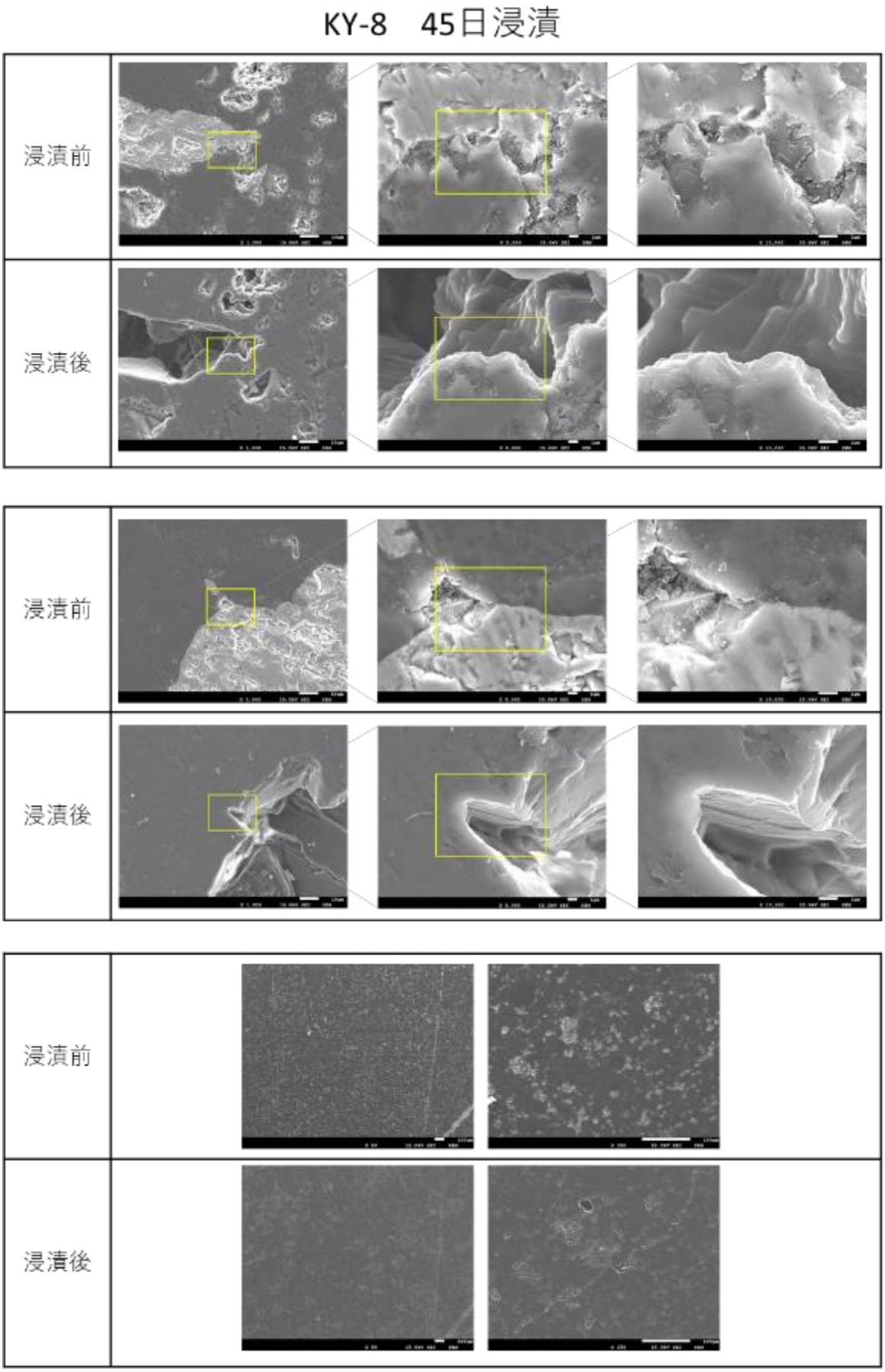


図 2.7-47　KY-8（泥岩）45 日浸漬前後の SEM 観察結果(1)

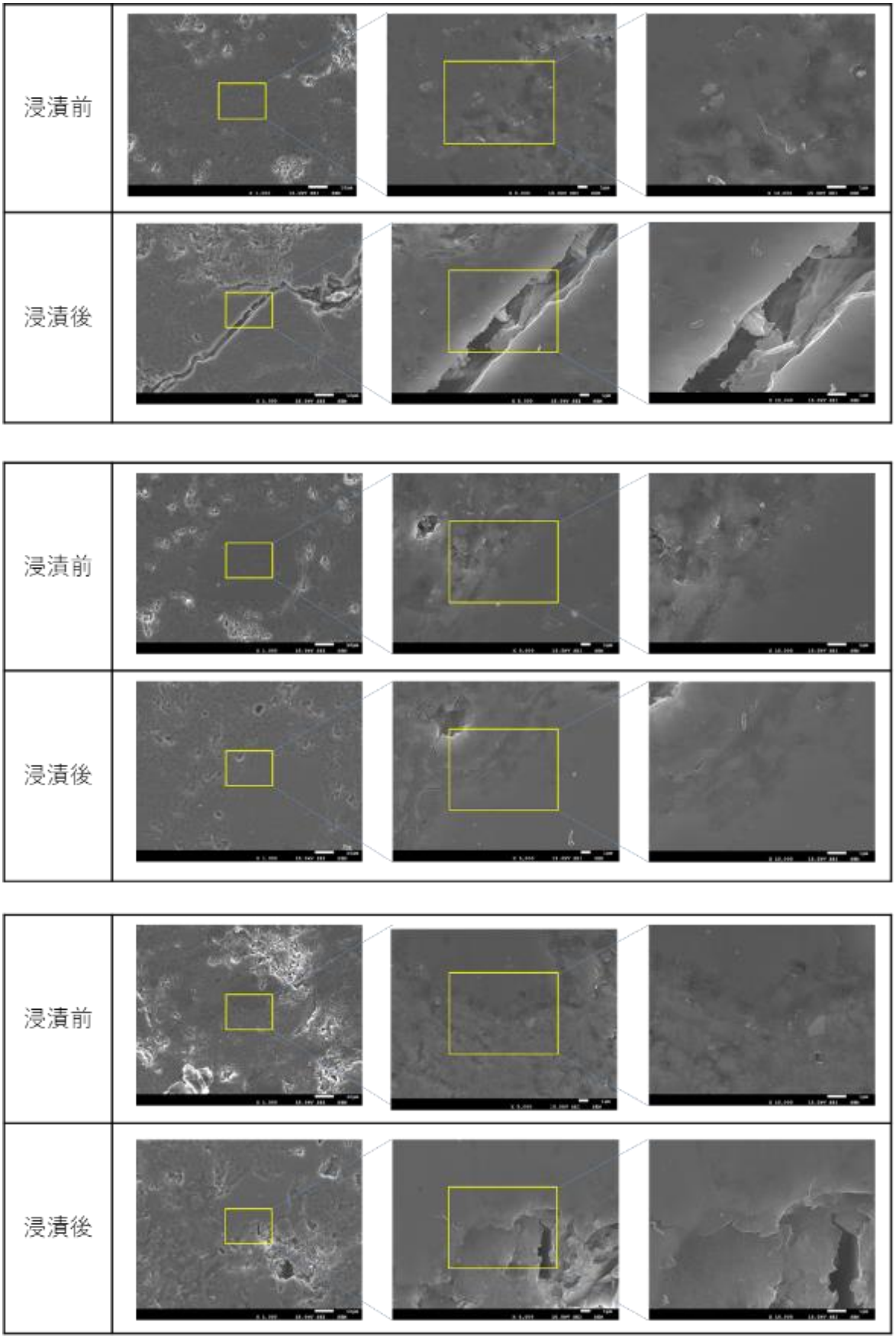


図 2.7-48　KY-8（泥岩）45 日浸漬前後の SEM 観察結果(2)

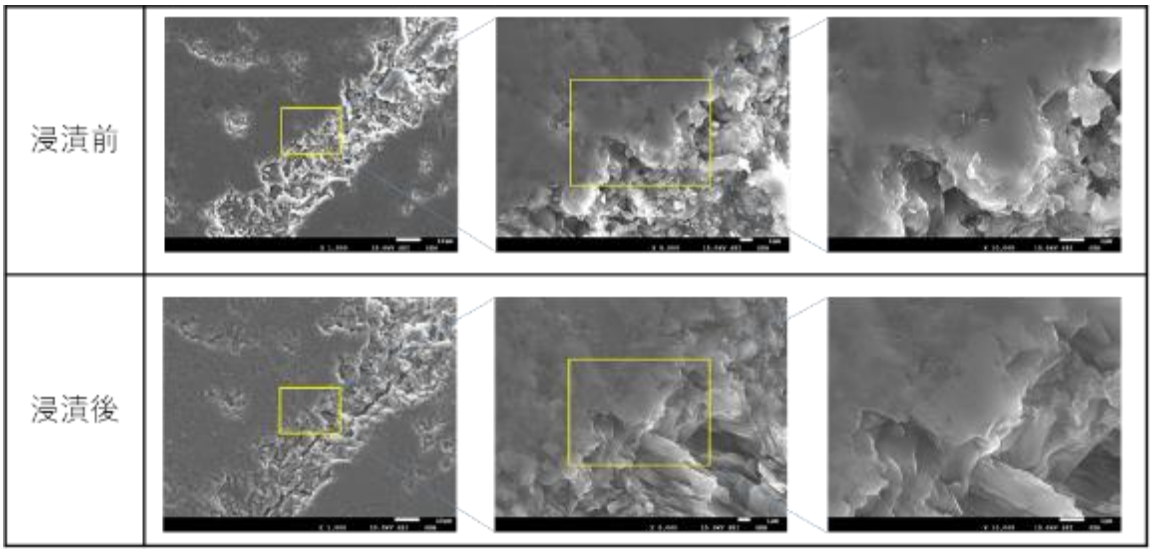


図 2.7-49　KY-8（泥岩）45 日浸漬前後の SEM 観察結果(3)

(6) TN-1

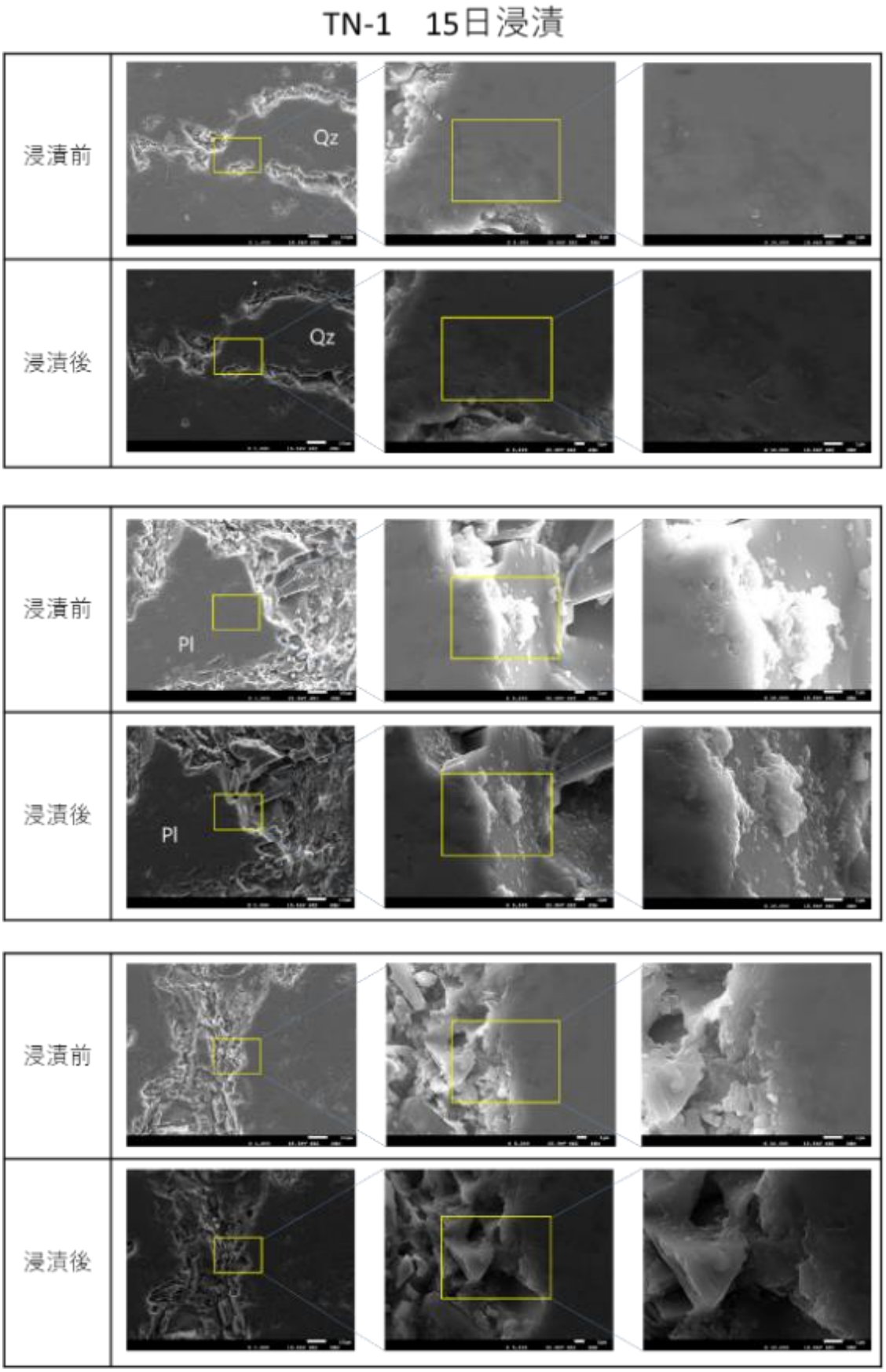


図 2.7-50　TN-1（溶結凝灰岩）15 日浸漬前後の SEM 観察結果(1)

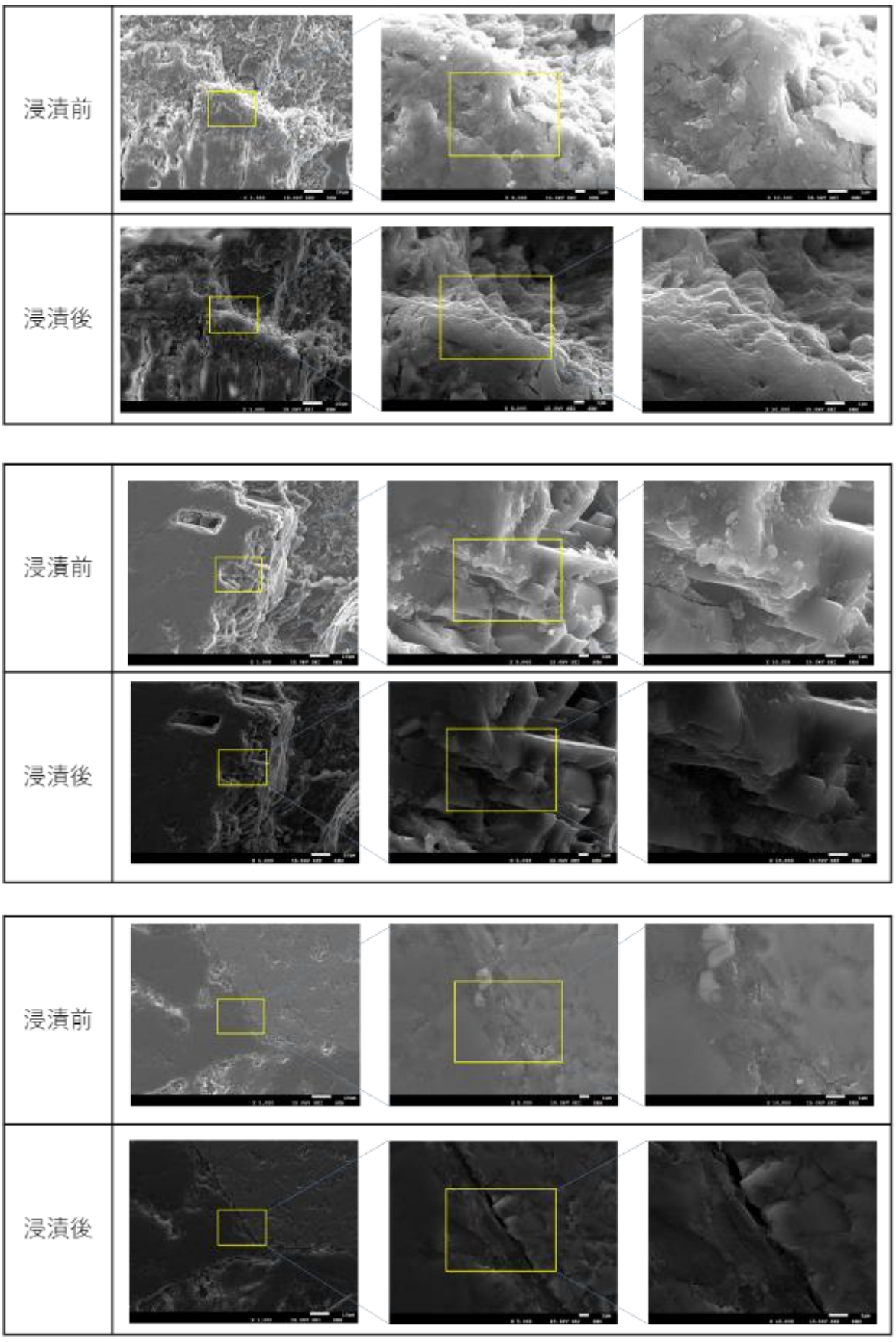


図 2.7-51　TN-1（溶結凝灰岩）15 日浸漬前後の SEM 観察結果(2)

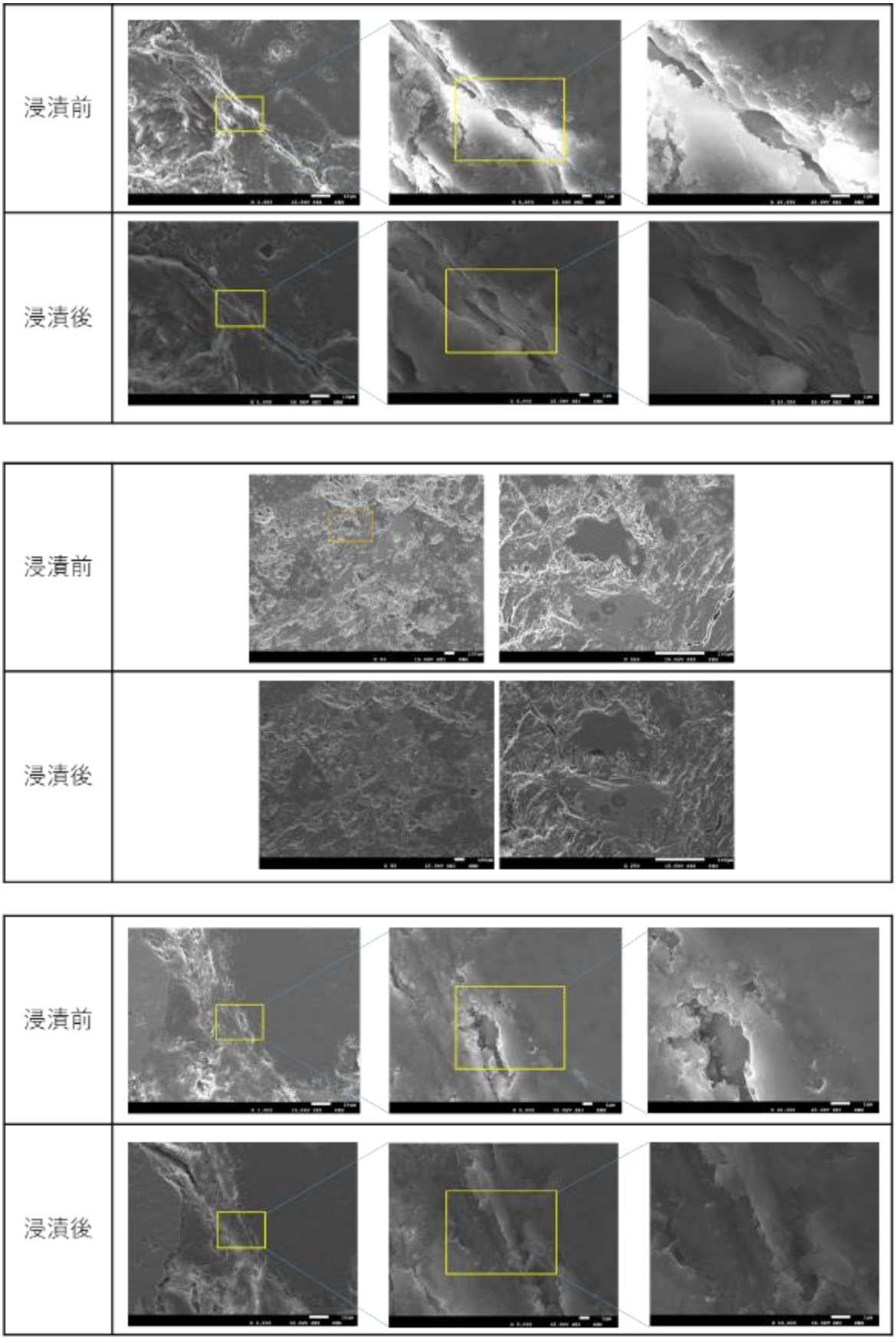


図 2.7-52　TN-1（溶結凝灰岩）15 日浸漬前後の SEM 観察結果(3)

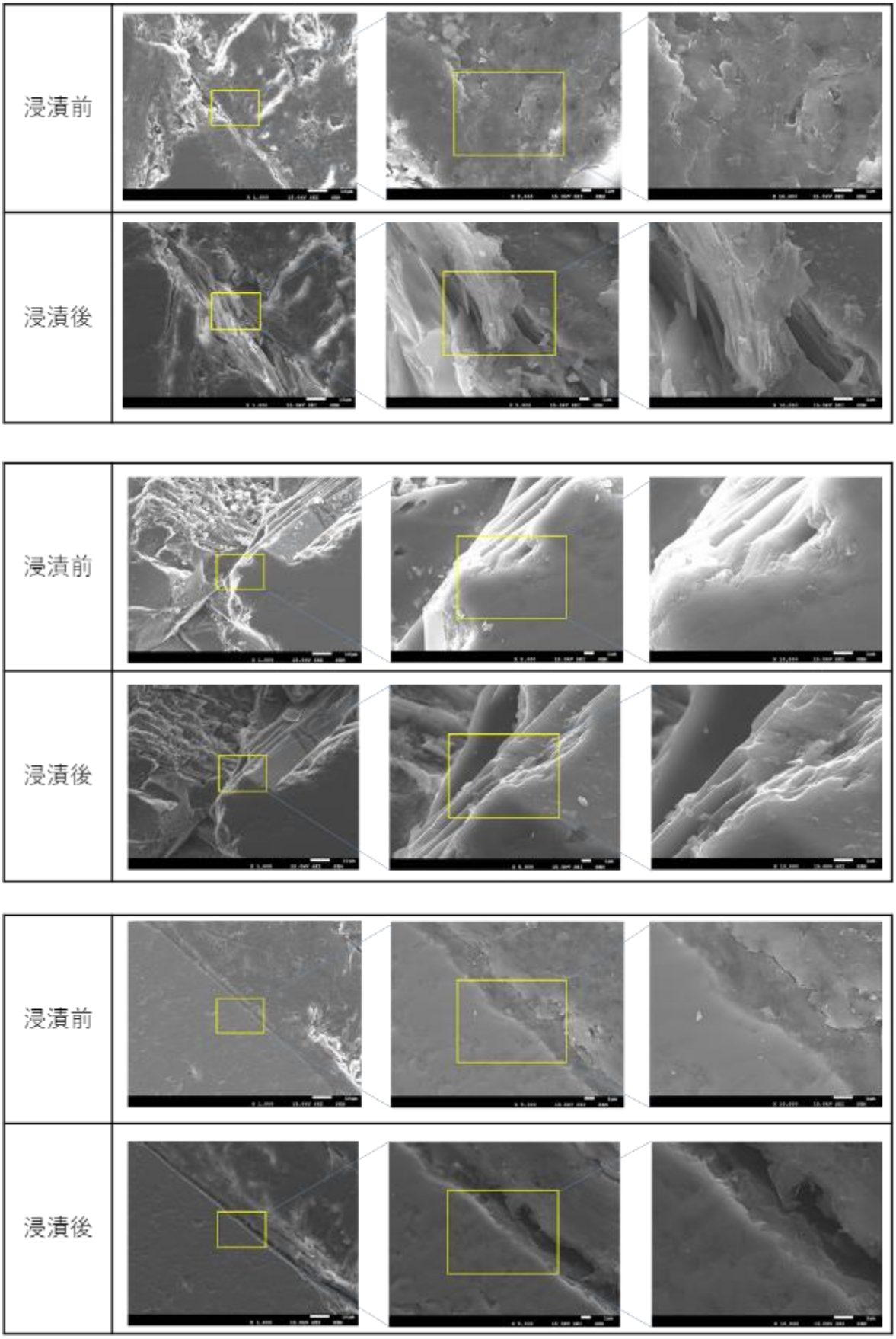


図 2.7-53　TN-1（溶結凝灰岩）15 日浸漬前後の SEM 観察結果(4)

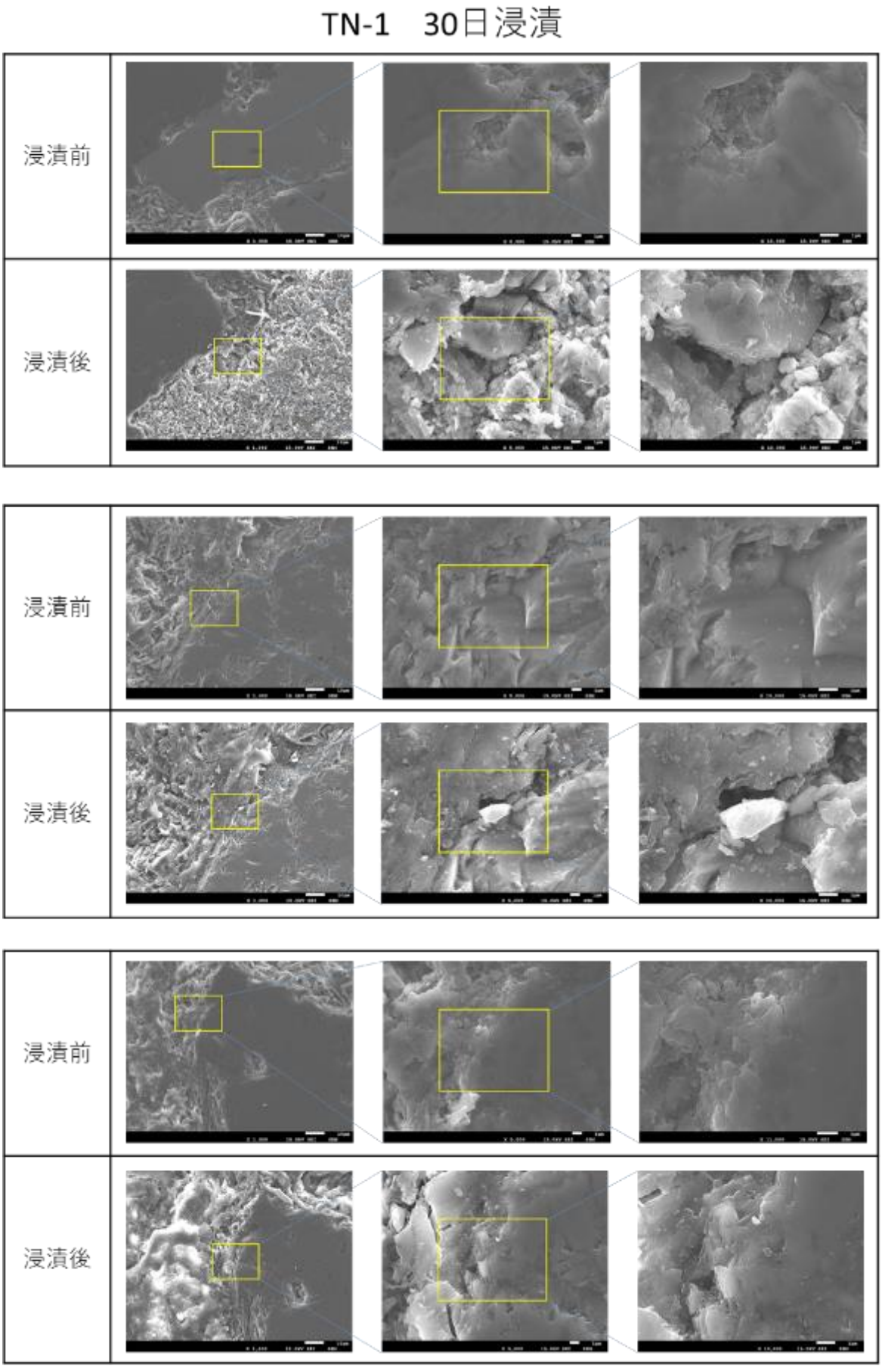


図 2.7-54　TN-1（溶結凝灰岩）30 日浸漬前後の SEM 観察結果(1)

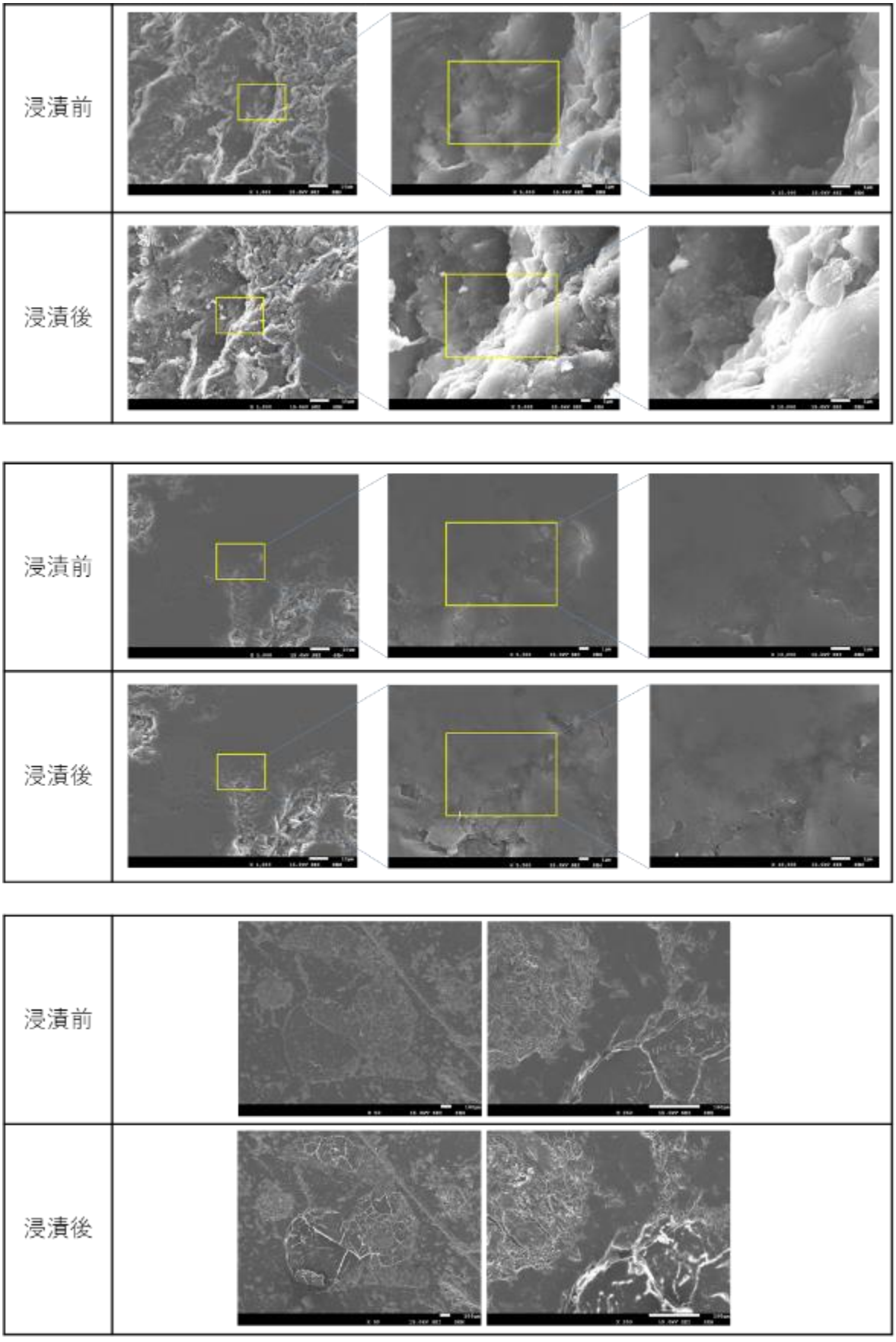


図 2.7-55　TN-1（溶結凝灰岩）30 日浸漬前後の SEM 観察結果(2)

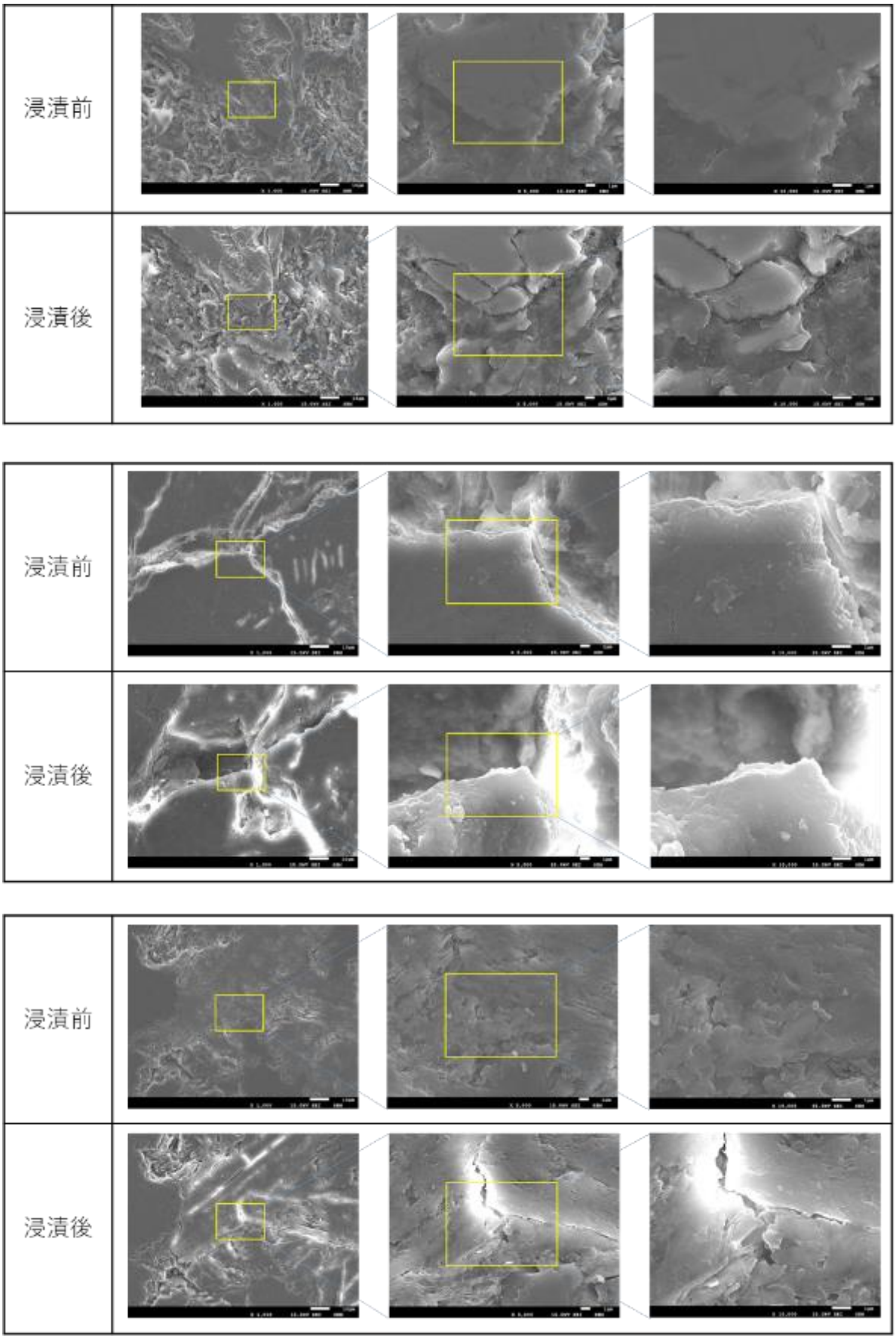


図 2.7-56　TN-1（溶結凝灰岩）30 日浸漬前後の SEM 観察結果(3)

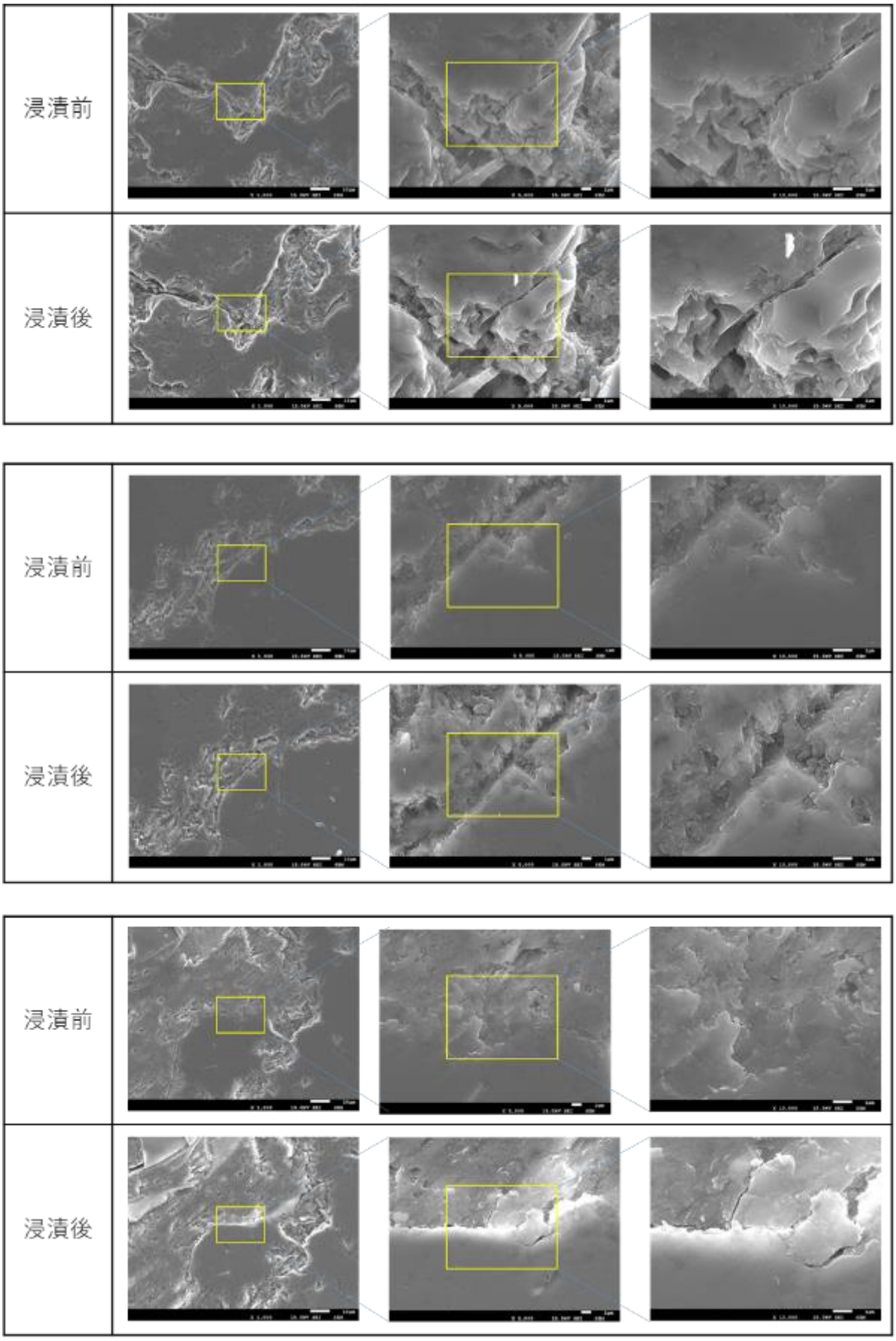


図 2.7-57　TN-1（溶結凝灰岩）30 日浸漬前後の SEM 観察結果(4)

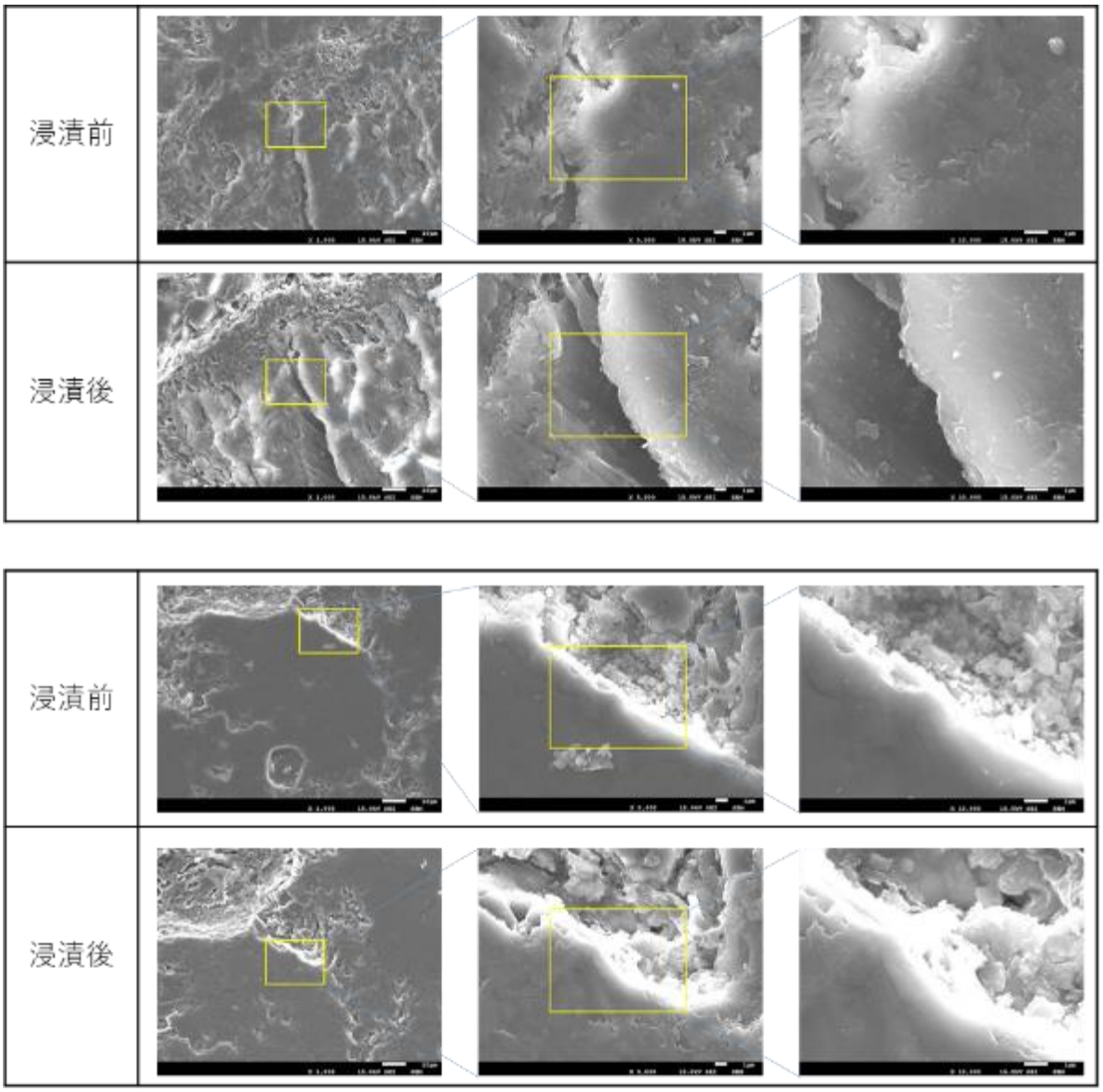


図 2.7-58　TN-1（溶結凝灰岩）30 日浸漬前後の SEM 観察結果(5)

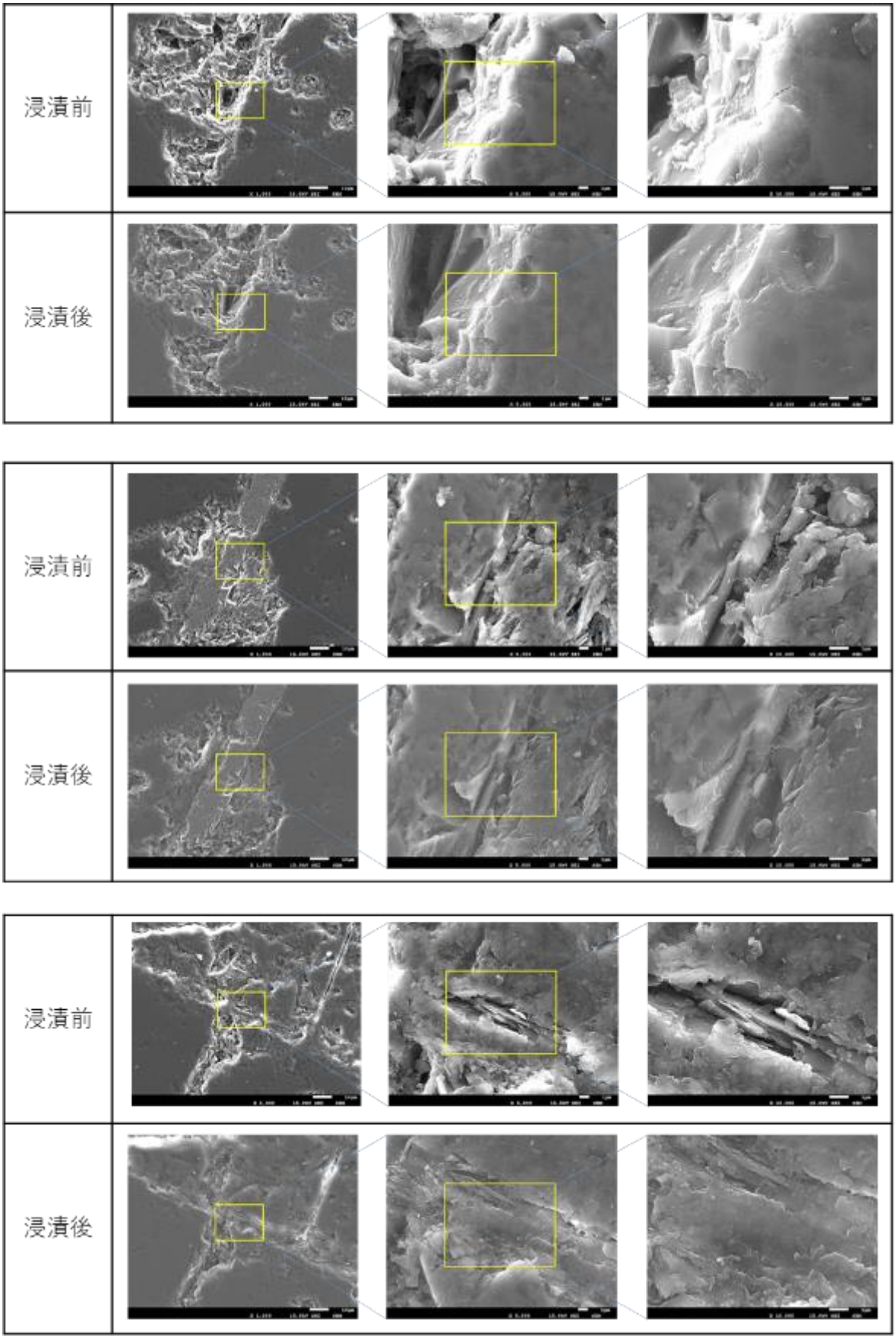


図 2.7-59　TN-1（溶結凝灰岩）45 日浸漬前後の SEM 観察結果(1)

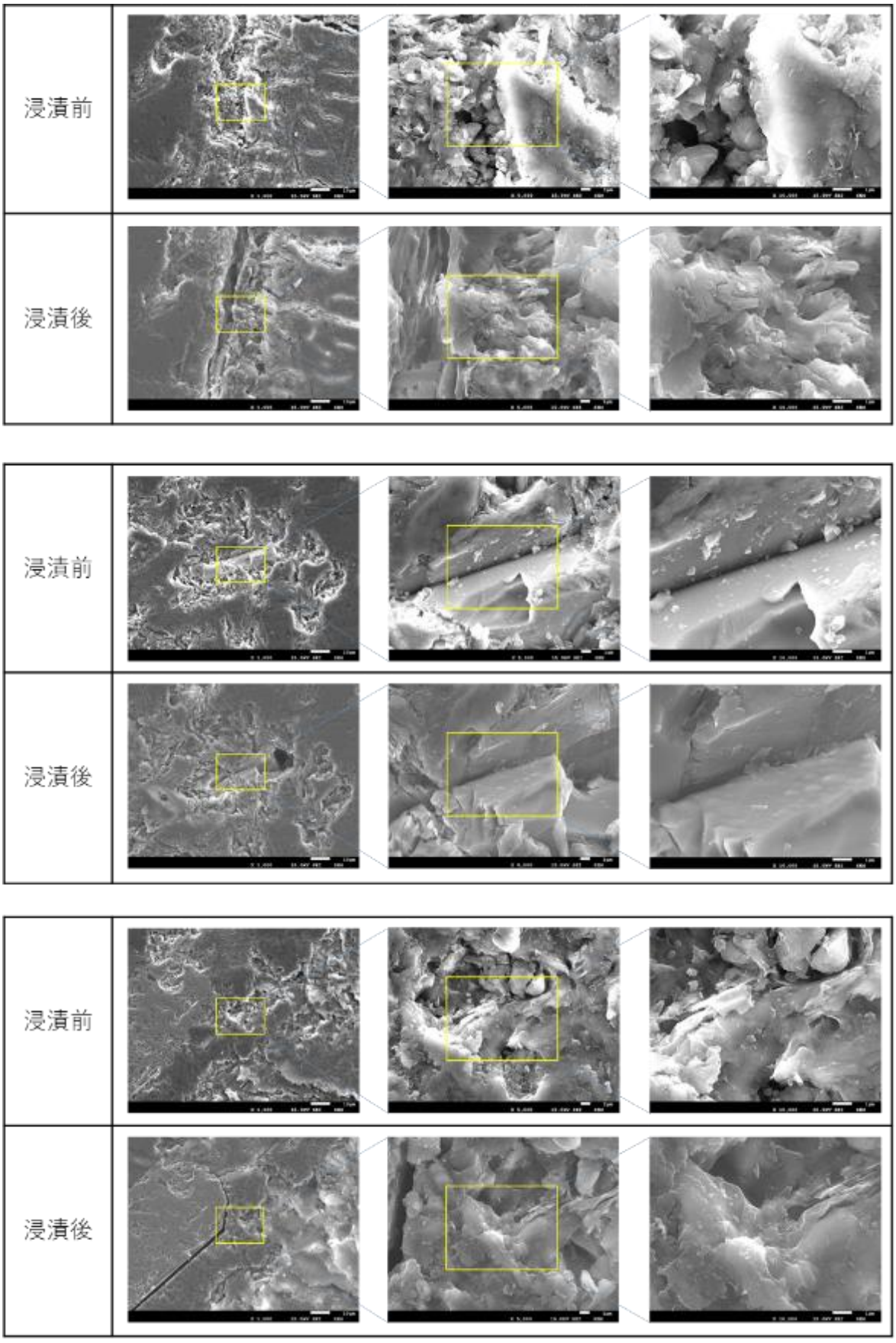


図 2.7-60　TN-1（溶結凝灰岩）45 日浸漬前後の SEM 観察結果(2)

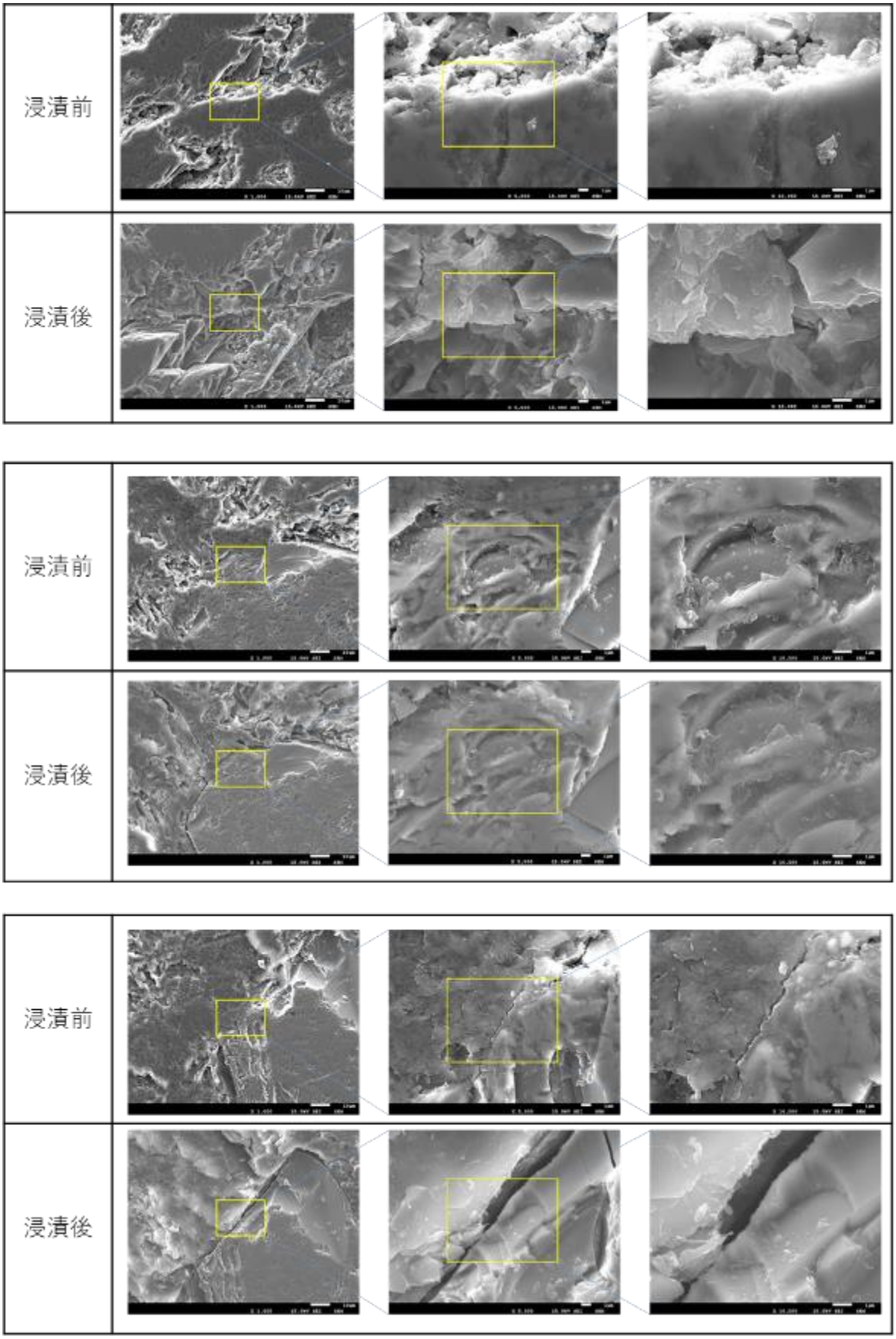


図 2.7-61　TN-1（溶結凝灰岩）45 日浸漬前後の SEM 観察結果(3)

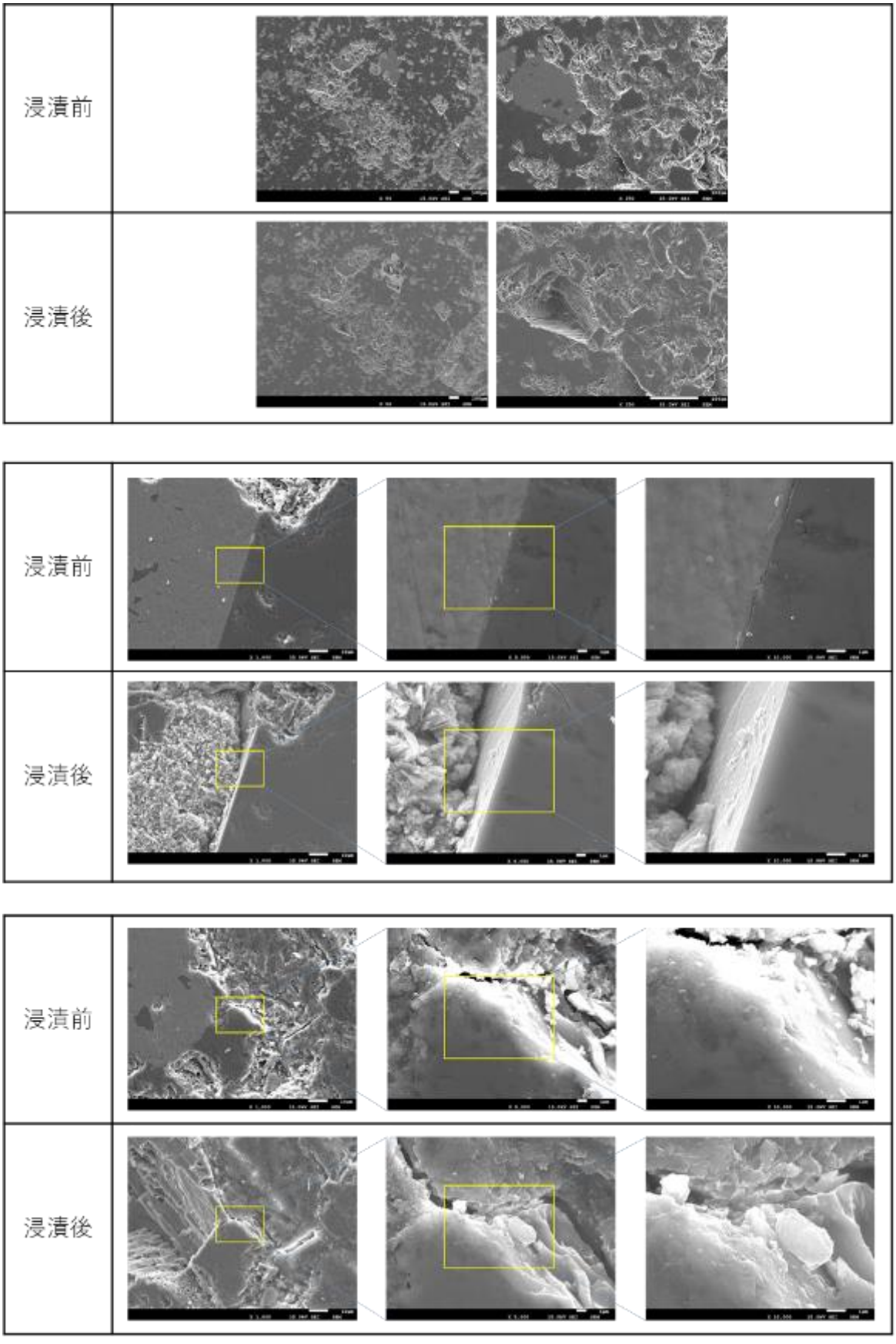


図 2.7-62　TN-1（溶結凝灰岩）45 日浸漬前後の SEM 観察結果(4)

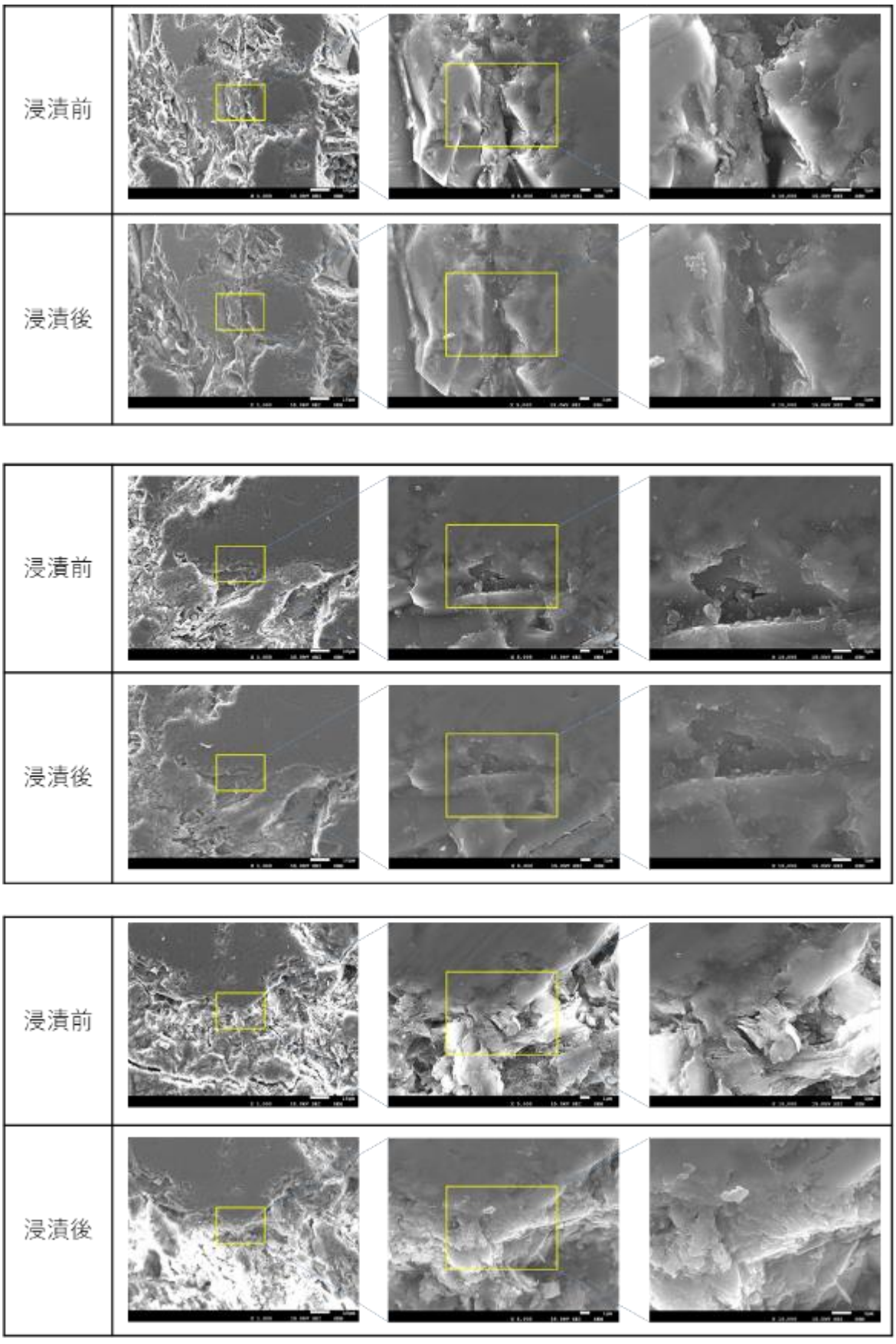


図 2.7-63　TN-1（溶結凝灰岩）45 日浸漬前後の SEM 観察結果(5)

2.8 XRD 分析

浸漬前後での試料中の鉱物種や鉱物組成の変化を把握することを目的として、浸漬前試料及び浸漬後試料に対し、X 線回折装置（Malvern Panalytical 社、X'Pert）を用いた分析を実施した。なお、浸漬後の試料は、表面から約 2 mm 厚の範囲を岩石カッターで切出し、分析に資した。測定条件を表 2.8-1 に示す。また、浸漬前試料における鉱物組合せの測定結果を表 2.8-2 に、浸漬前後の測定結果の比較を図 2.8-1～図 2.8-12 に示す。

表 2.8-1 XRD 分析の測定条件

	不定方位試料	水ひ，エチレングリコール処理，及び塩酸処理試料
X線管球	Cu	Cu
波長	CuKα，1.54178 Å	CuKα，1.54178 Å
電圧・電流	40kV・50mA	40kV・50mA
測定角度・測定速度	2～70°，2°/分	2～40°，2°/分
サンプリング幅	0.02°	0.02°
スリット条件	DS：AS：RS＝15 mm：15 mm：0.2mm	DS：AS：RS＝15 mm：15 mm：0.2mm

表 2.8-2 浸漬前の鉱物組み合わせ

	石英	斜長石	カリ長石	黒雲母	角閃石	イルメナイト	緑泥石	カオリナイト	スメクタイト
KY-1	○	○	○	○					
KY-2	○	○	○	○			・		・
KY-3	○	○	○	○					
KY-5	○	○	○	○	○	○	・		・
KY-8	○	○	○	○			・		・
TN-1	○	○	○	○				・	・

(1) KY-1

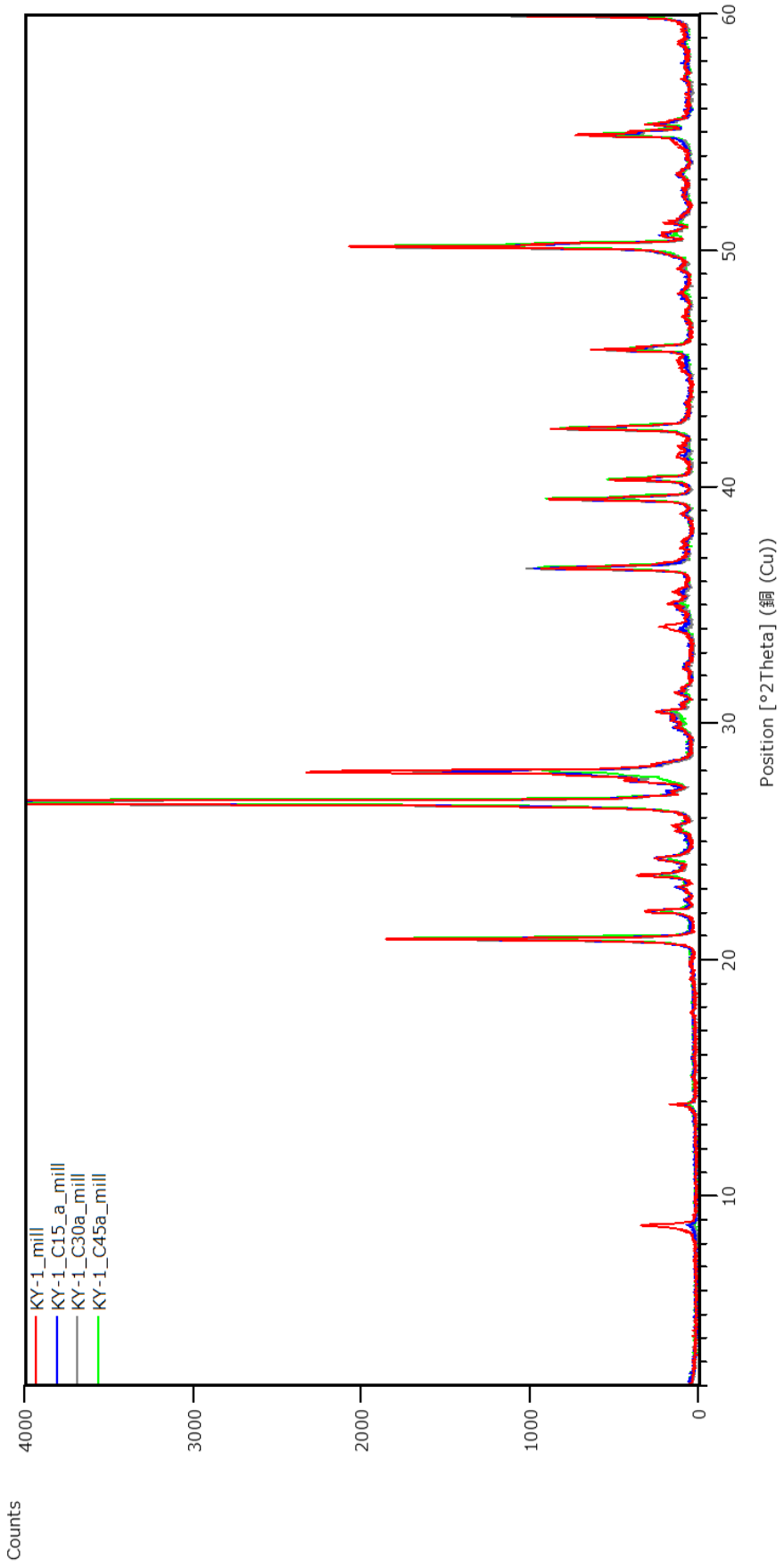


図 2.8-1　KY-1 の浸漬前後の XRD 測定結果比較
（赤線：未浸漬　青線：15 日　灰線：30 日　緑線：45 日）

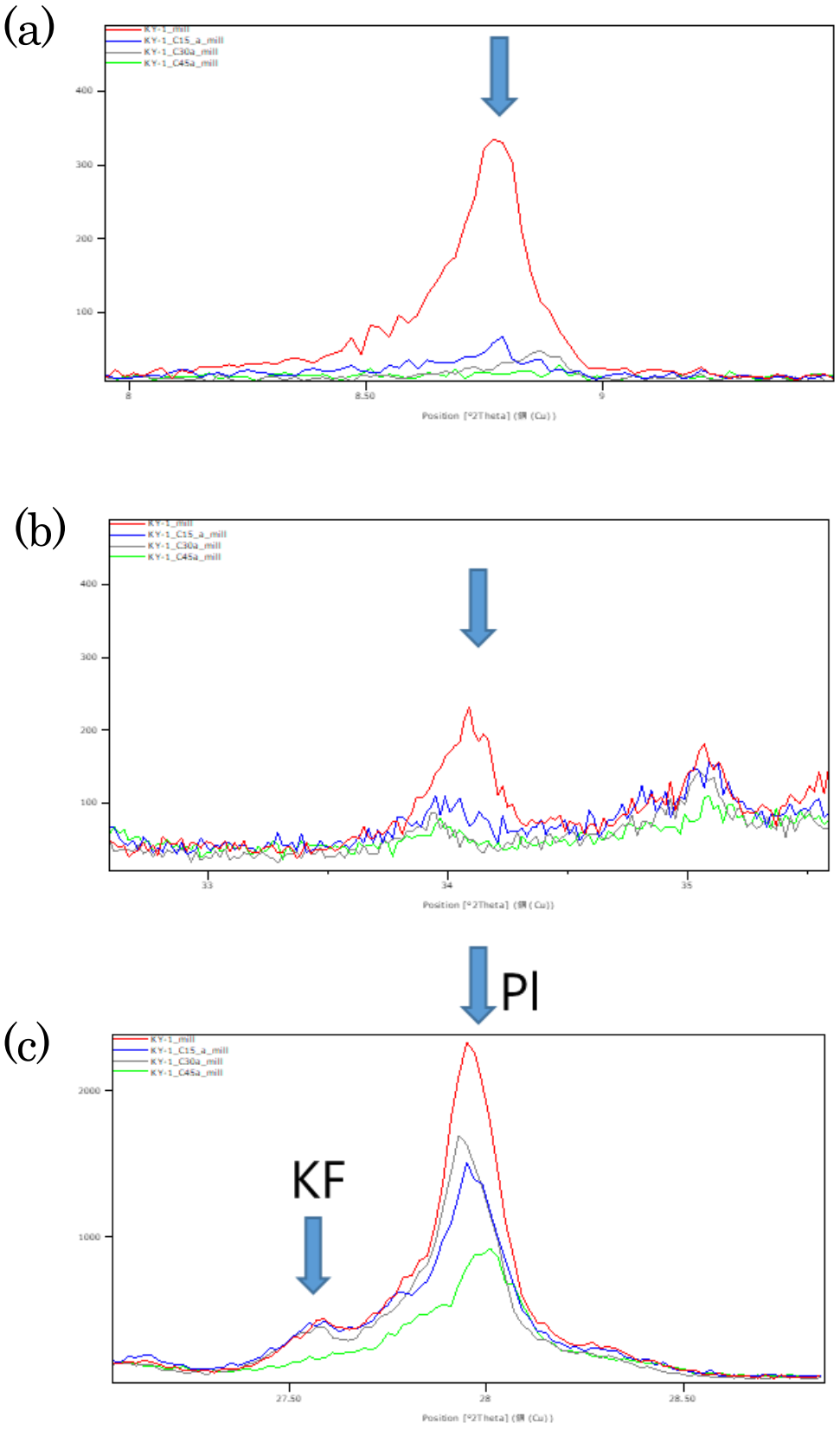


図 2.8-2　図 2.8-1 の拡大
(a) 8.7°付近、(b) 34°付近、(c) 28°付近

(2) KY-2

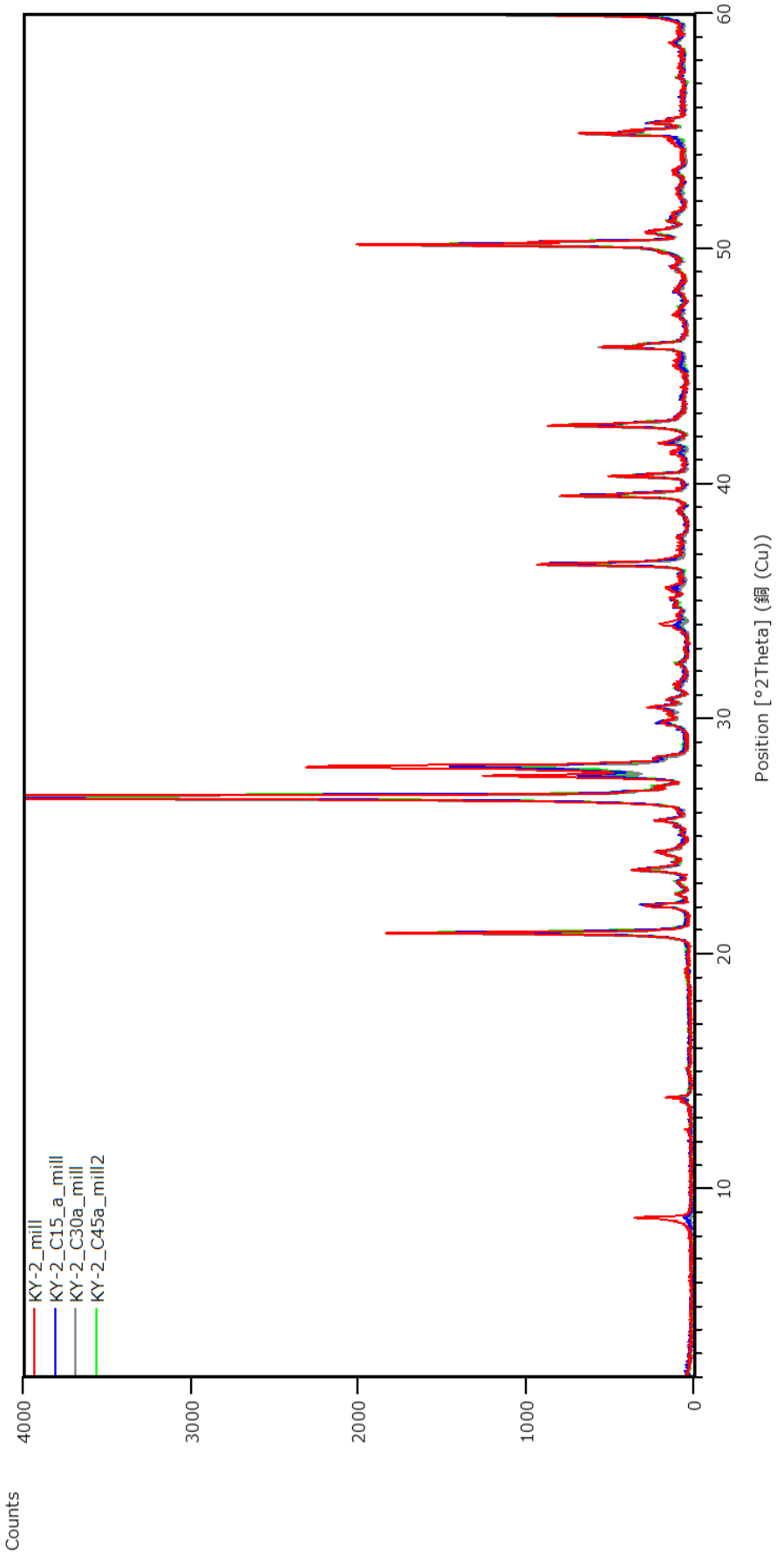


図 2.8-3　KY-2 の浸漬前後の XRD 測定結果比較
（赤線：未浸漬　青線：15 日　灰線：30 日　緑線：45 日）

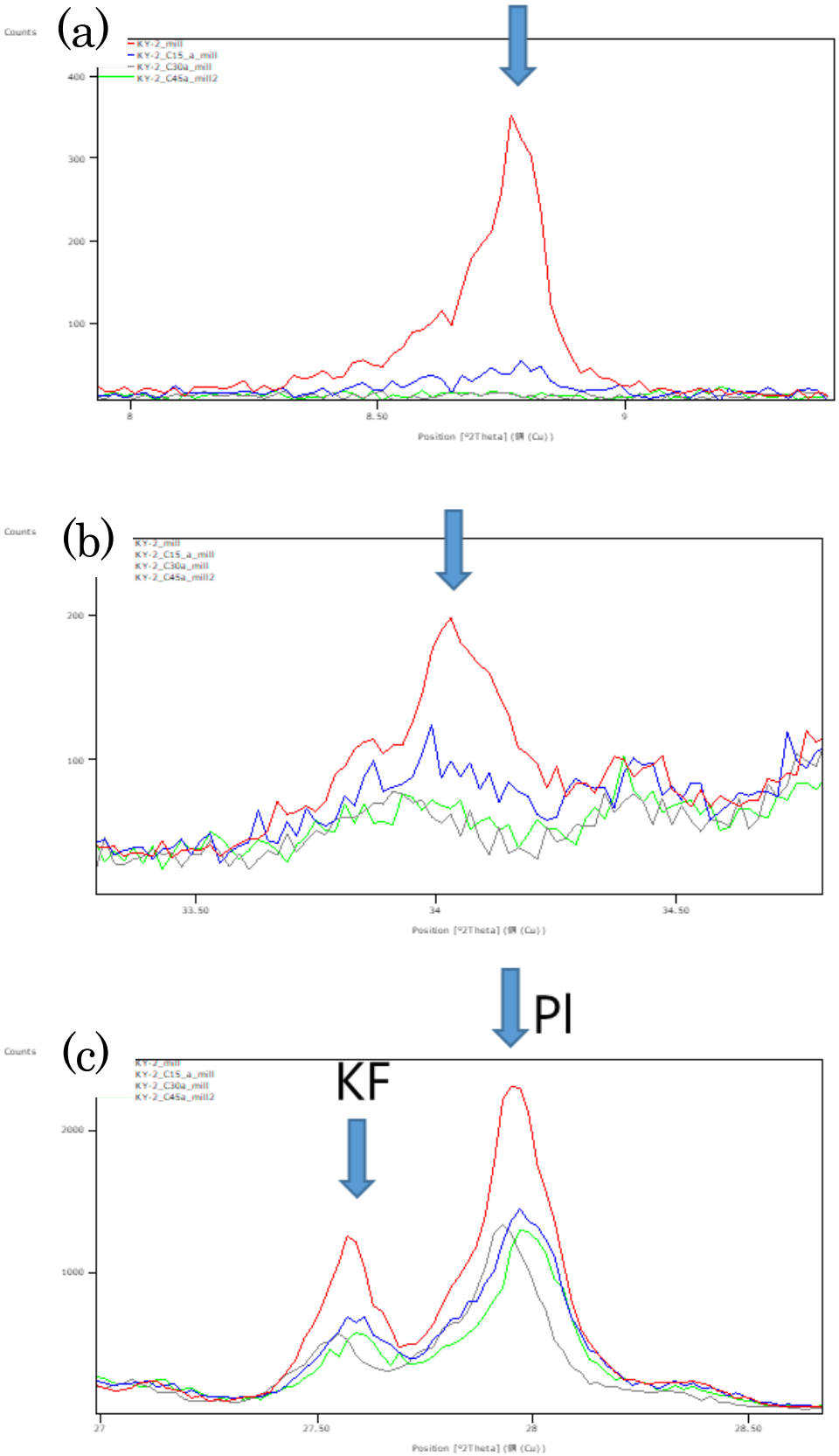


図 2.8-4　図 2.8-3 の拡大
(a) 8.7°付近、(b) 34°付近、(c) 28°付近

(3) KY-3

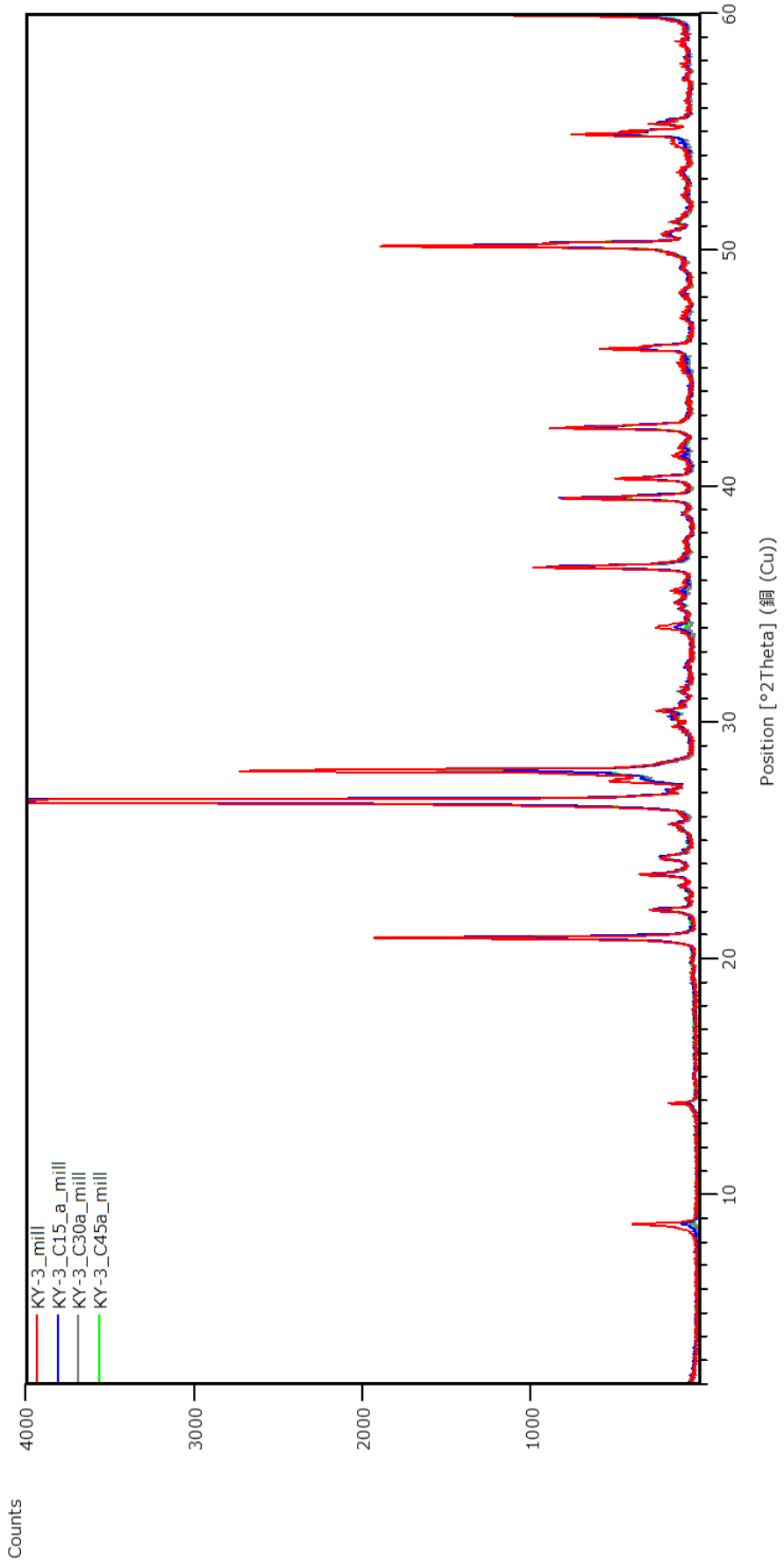


図 2.8-5　KY-3 の浸漬前後の XRD 測定結果比較
（赤線：未浸漬　青線：15 日　灰線：30 日　緑線：45 日）

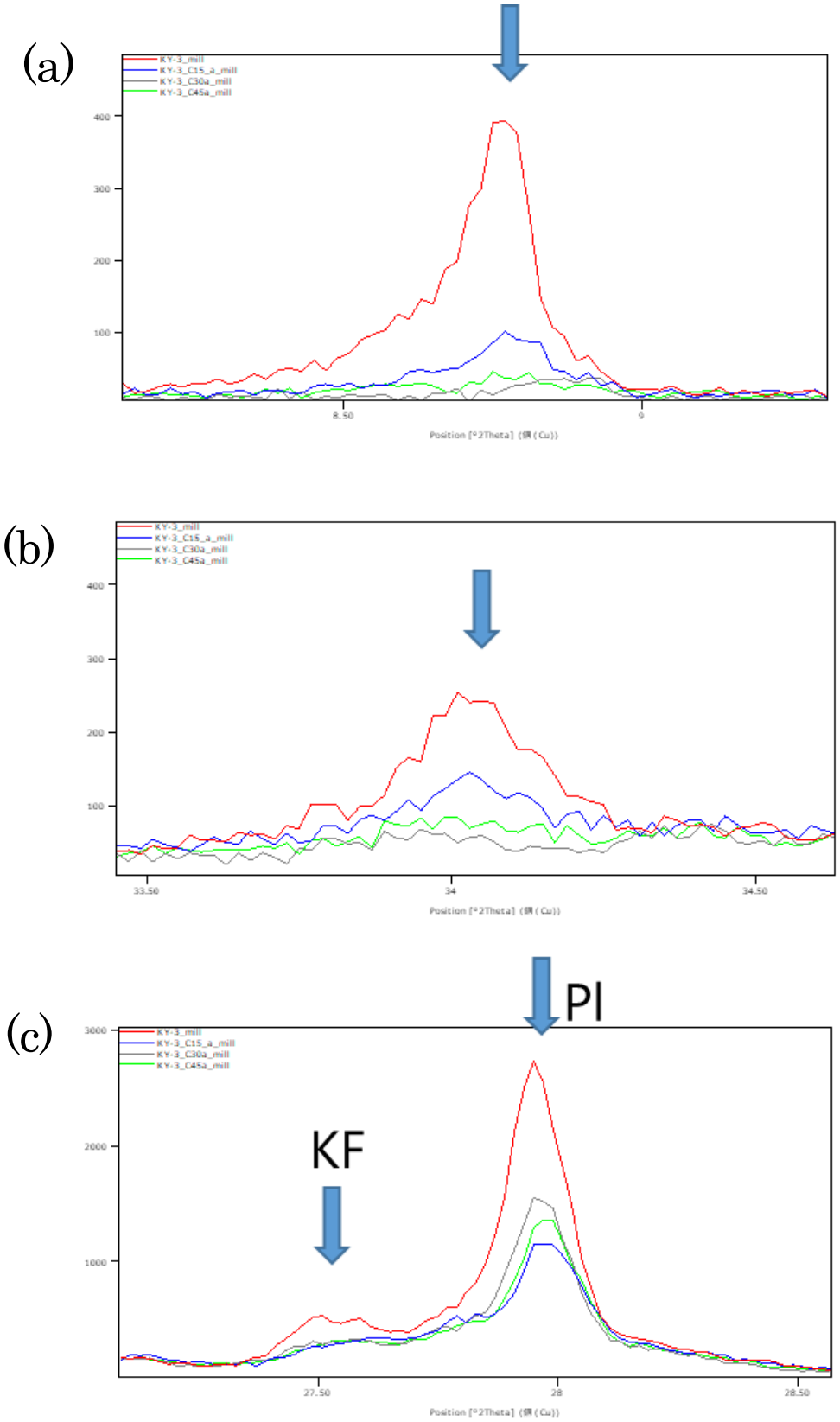


図 2.8-6　図 2.8-5 の拡大

(a) 8.7°付近、(b) 34°付近、(c) 28°付近

(4) KY-5

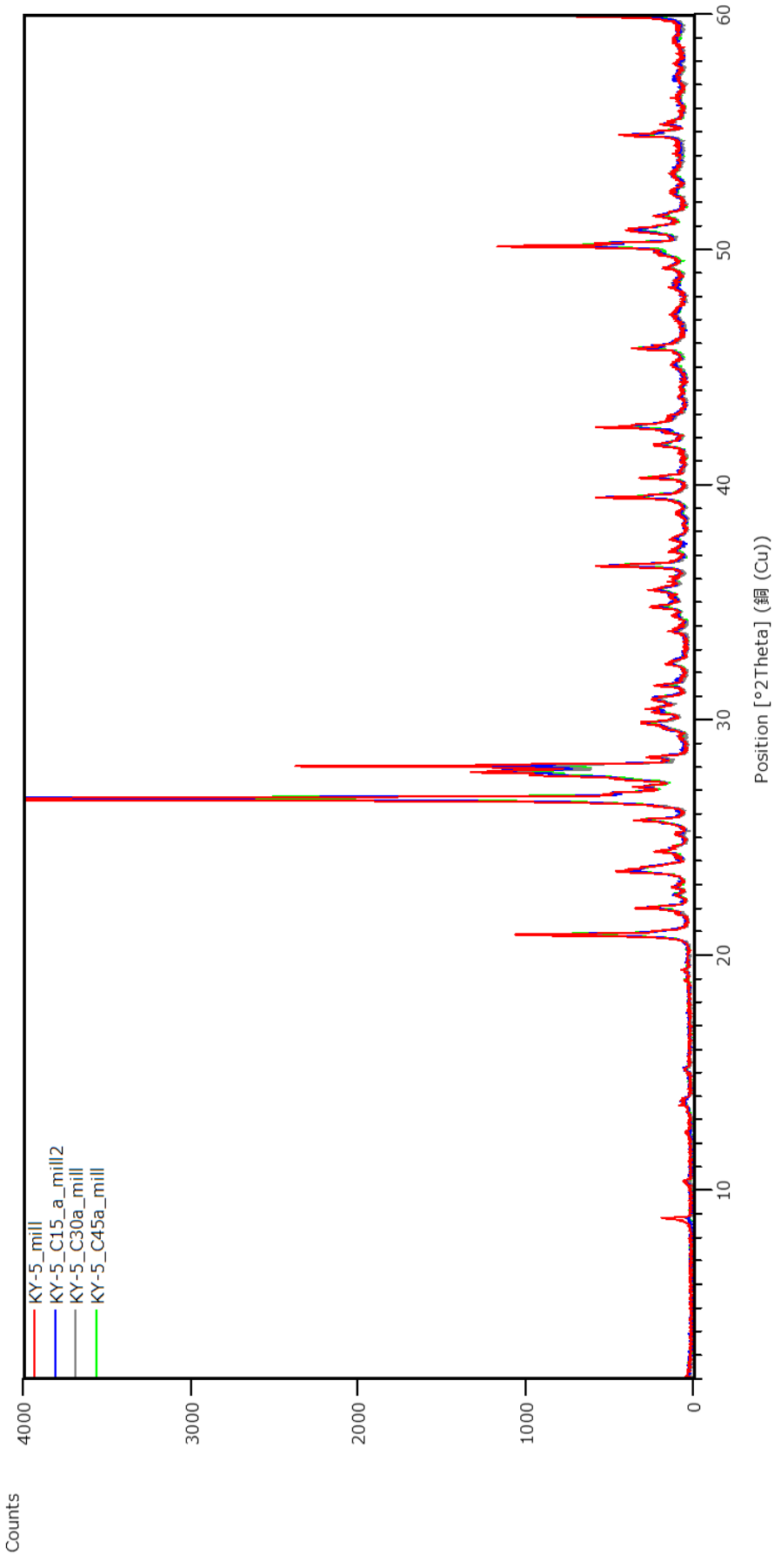


図 2.8-7　KY-5 の浸漬前後の XRD 測定結果比較
（赤線：未浸漬　青線：15 日　灰線：30 日　緑線：45 日）

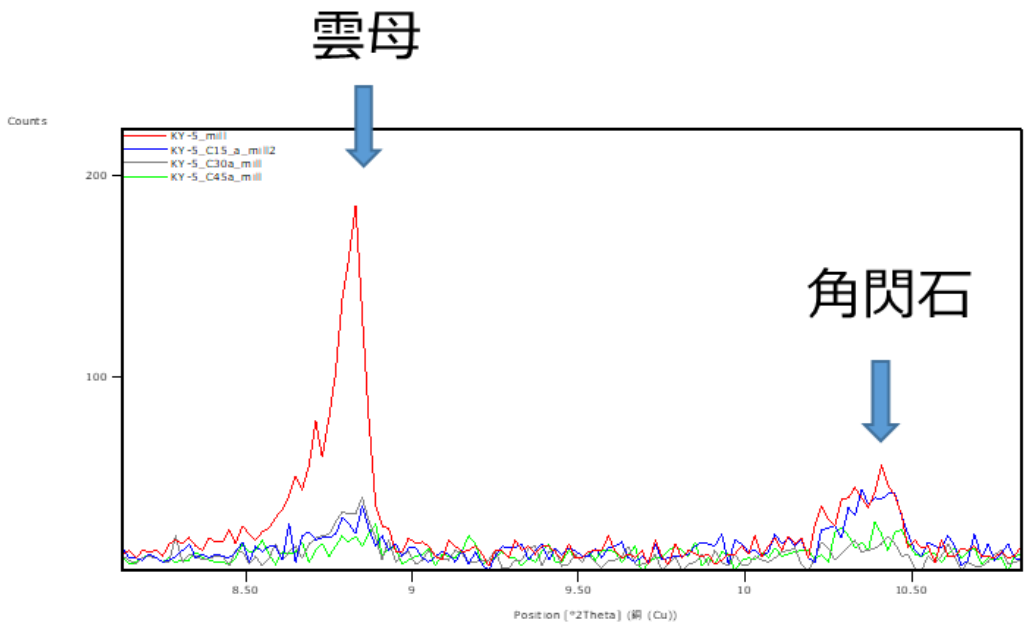


図 2.8-8　図 2.8-7 の拡大
（8-11°付近）

(5) KY-8

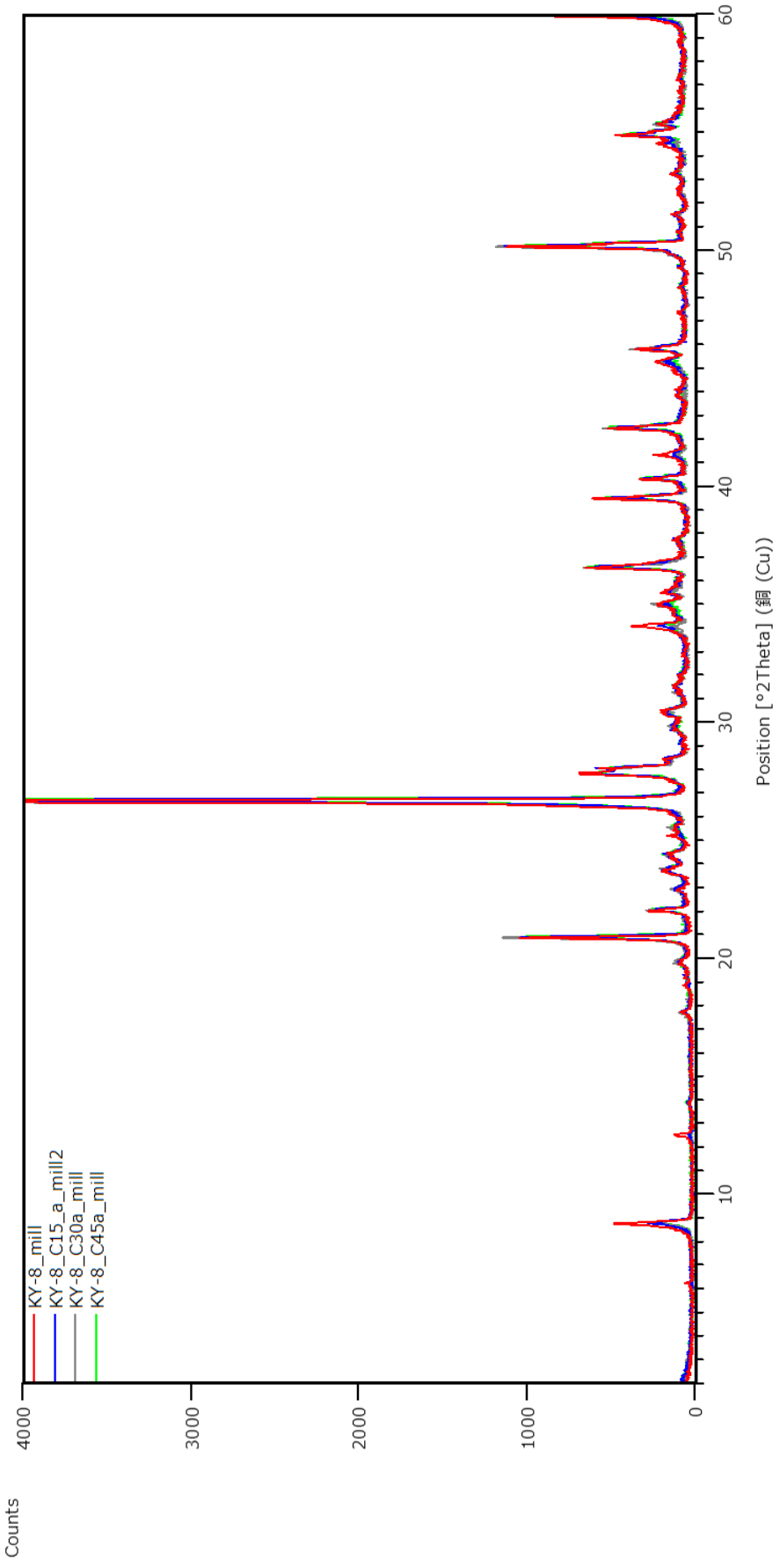


図 2.8-9　KY-8 の浸漬前後の XRD 測定結果比較
（赤線：未浸漬　青線：15 日　灰線：30 日　緑線：45 日）

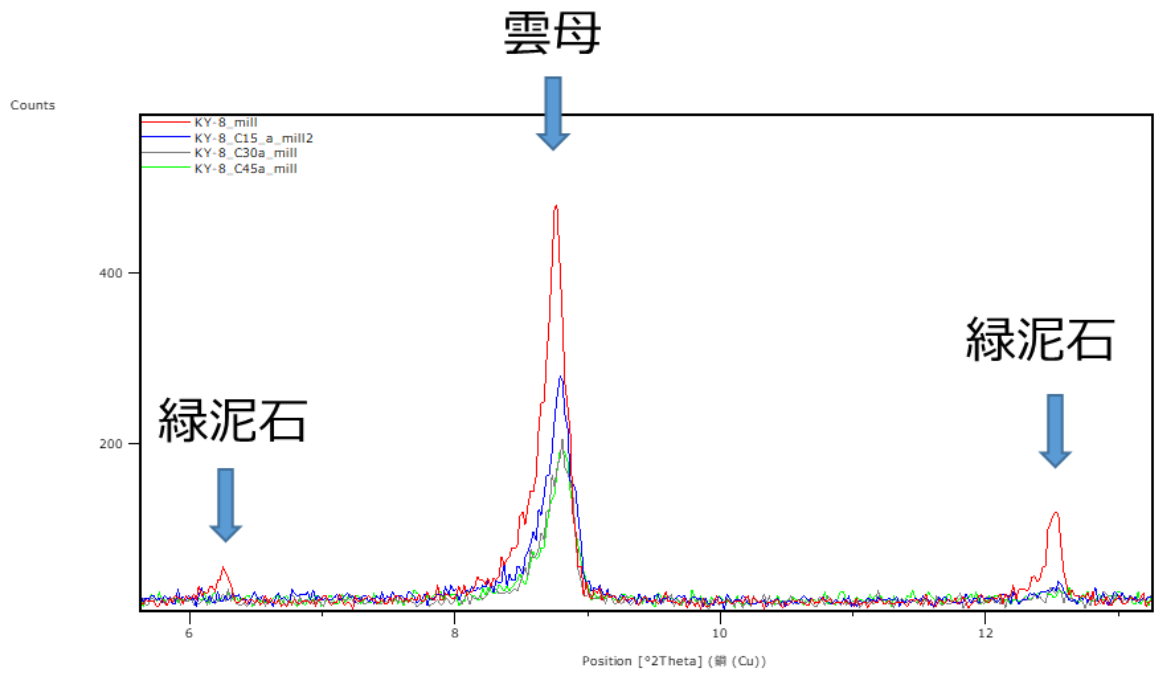


図 2.8-10　図 2.8-9 の拡大
（6-12.5°付近）

(6) TN-1

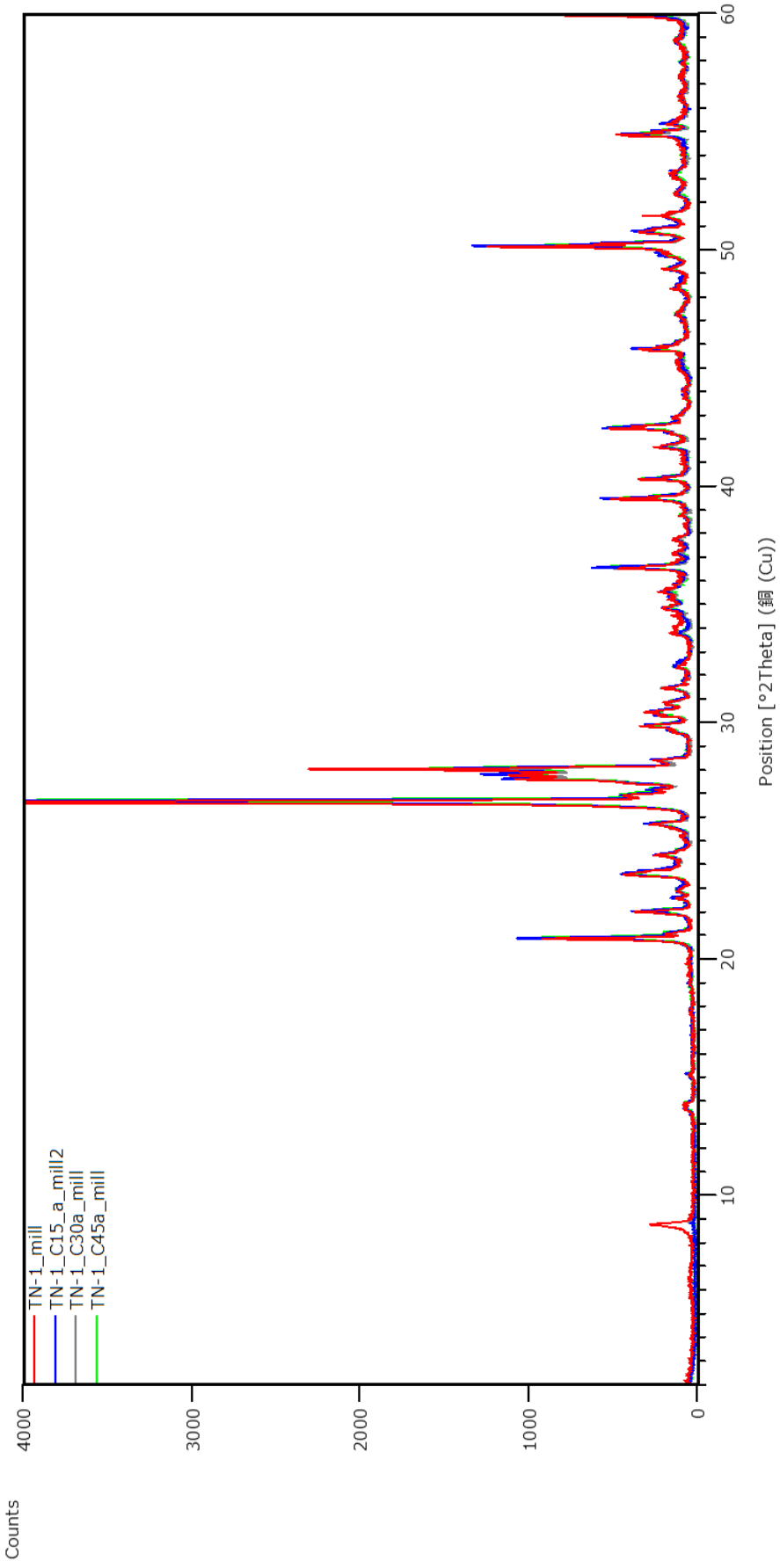


図 2.8-11　TN-1 の浸漬前後の XRD 測定結果比較
（赤線：未浸漬　青線：15 日　灰線：30 日　緑線：45 日）

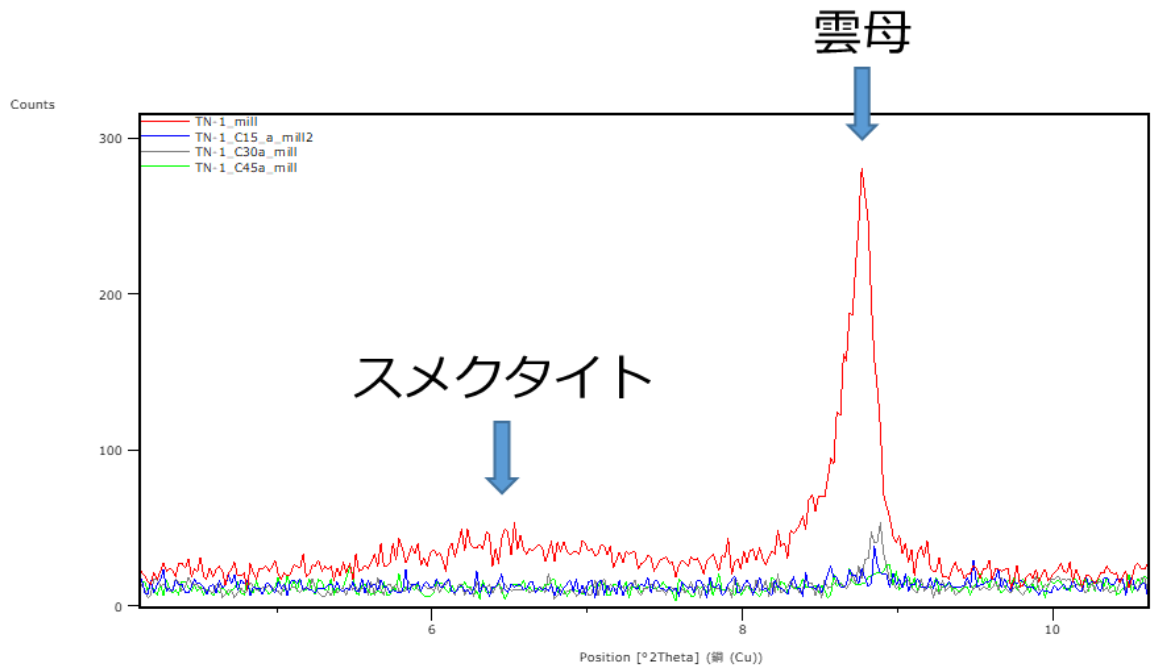


図 2.8-12　図 2.8-11 の拡大
（5-10°付近）

2.9 水銀ポロシメータ測定

浸漬前後での試料の間隙率や間隙径分布の変化を捉えることを目的として、浸漬していない試料および浸漬後の試料について、水銀ポロシメータ（Micromeritics 社、AutoPore IV 9505）を用いた間隙測定を実施した。測定条件を表 2.9-1 に、測定結果を表 2.9-2～表 2.9-7 および図 2.9-1～図 2.9-6 に示す。

表 2.9-1　水銀ポロシメータの測定条件

	低圧測定部	高圧測定部
接続点	0.50psia(34.47kPa)～ 30psia(206.84kPa)	30psia(206.84kPa)～ 約30,000psia(206.8428MPa)
孔隙径	約360μm～約6μm	約6μm～0.006μm
測定点数	約300点	

(1) KY-1

表 2.9-2　KY-1 のポロシメータ測定結果

KY-1_浸漬前		KY-1_Pb-1		KY-1_Pb-2		KY-1_Pb	
Contents	Unit	Value	Pressure(psia)	Value	Pressure(psia)	Average	STDEV.S
Total intrusion volume	mL/g	0.0012	29,993.01	0.0012	29,992.41	0.0012	0.00000
Total pore area	m²/g	0	29,993.01	0.001	29,992.41	0.0005	0.00071
Median pore diameter (volume) at 0.001 mL/g	μm	105.44435	1.72	109.03286	1.66	107.23861	2.53746
Median pore diameter (area) at 0.000 m²/g	μm	19.9444	9.07	1.00526	179.92	10.47483	13.39199
Average pore diameter (4V/A)	μm	0	–	9.39216	–	4.69608	6.64126
Bulk density at 0.50 psia	g/mL	2.6465	0.50	2.6534	0.50	2.64995	0.00488
Apparent (skeletal) density	g/mL	2.655	29,993.01	2.6619	29,992.41	2.65845	0.00488
Porosity:	%	0.3207	–	0.32	–	0.32035	0.00049
Stem volume	%	1	–	1	–	1	0

KY-1_15日間浸漬		KY-1_P15-1		KY-1_P15-2		KY-1_P15	
Contents	Unit	Value	Pressure(psia)	Value	Pressure(psia)	Average	STDEV.S
Total intrusion volume	mL/g	0.0034	29,992.48	0.0074	29,991.97	0.0054	0.00283
Total pore area	m²/g	0.499	29,992.48	2.169	29,991.97	1.334	1.18087
Median pore diameter (volume) at 0.001 mL/g	μm	0.04638	3,899.45	0.01222	14,803.16	0.0293	0.02415
Median pore diameter (area) at 0.000 m²/g	μm	0.01312	13,788.79	0.01134	15,955.76	0.01223	0.00126
Average pore diameter (4V/A)	μm	0.02705	–	0.0137	–	0.020375	0.00944
Bulk density at 0.50 psia	g/mL	2.5858	0.50	2.5755	0.50	2.58065	0.00728
Apparent (skeletal) density	g/mL	2.6086	29,992.48	2.6257	29,991.97	2.61715	0.01209
Porosity:	%	0.8736	–	1.9136	–	1.3936	0.73539
Stem volume	%	1	–	1	–	1	0.00000

KY-1_30日間浸漬		KY-1_P30-1		KY-1_P30-2		KY-1_P30	
Contents	Unit	Value	Pressure(psia)	Value	Pressure(psia)	Average	STDEV.S
Total intrusion volume	mL/g	0.0058	29,992.37	0.0096	29,991.89	0.0077	0.00269
Total pore area	m²/g	1.224	29,992.37	2.581	29,991.89	1.9025	0.95954
Median pore diameter (volume) at 0.001 mL/g	μm	0.03203	5,646.61	0.0125	14,465.56	0.022265	0.01381
Median pore diameter (area) at 0.000 m²/g	μm	0.00899	20,121.33	0.01138	15,895.83	0.010185	0.00169
Average pore diameter (4V/A)	μm	0.01898	–	0.0149	–	0.01694	0.00288
Bulk density at 0.50 psia	g/mL	2.5272	0.50	2.5307	0.50	2.52895	0.00247
Apparent (skeletal) density	g/mL	2.5649	29,992.37	2.5938	29,991.89	2.57935	0.02044
Porosity:	%	1.4682	–	2.4329	–	1.95055	0.68215
Stem volume	%	2	–	2	–	2	0.00000

KY-1_45日間浸漬		KY-1_P45-1		KY-1_P45-2		KY-1_P45	
Contents	Unit	Value	Pressure(psia)	Value	Pressure(psia)	Average	STDEV.S
Total intrusion volume	mL/g	0.0096	29,992.59	0.0127	29,991.51	0.01115	0.00219
Total pore area	m²/g	2.397	29,992.59	2.974	29,991.51	2.6855	0.40800
Median pore diameter (volume) at 0.001 mL/g	μm	0.02287	7,908.79	0.01786	10,128.86	0.020365	0.00354
Median pore diameter (area) at 0.000 m²/g	μm	0.00783	23,096.62	0.01139	15,880.95	0.00961	0.00252
Average pore diameter (4V/A)	μm	0.016	–	0.01703	–	0.016515	0.00073
Bulk density at 0.50 psia	g/mL	2.5038	0.49	2.4909	0.49	2.49735	0.00912
Apparent (skeletal) density	g/mL	2.5655	29,992.59	2.572	29,991.51	2.56875	0.00460
Porosity:	%	2.4014	–	3.1545	–	2.77795	0.53252
Stem volume	%	2	–	3	–	2.5	0.70711

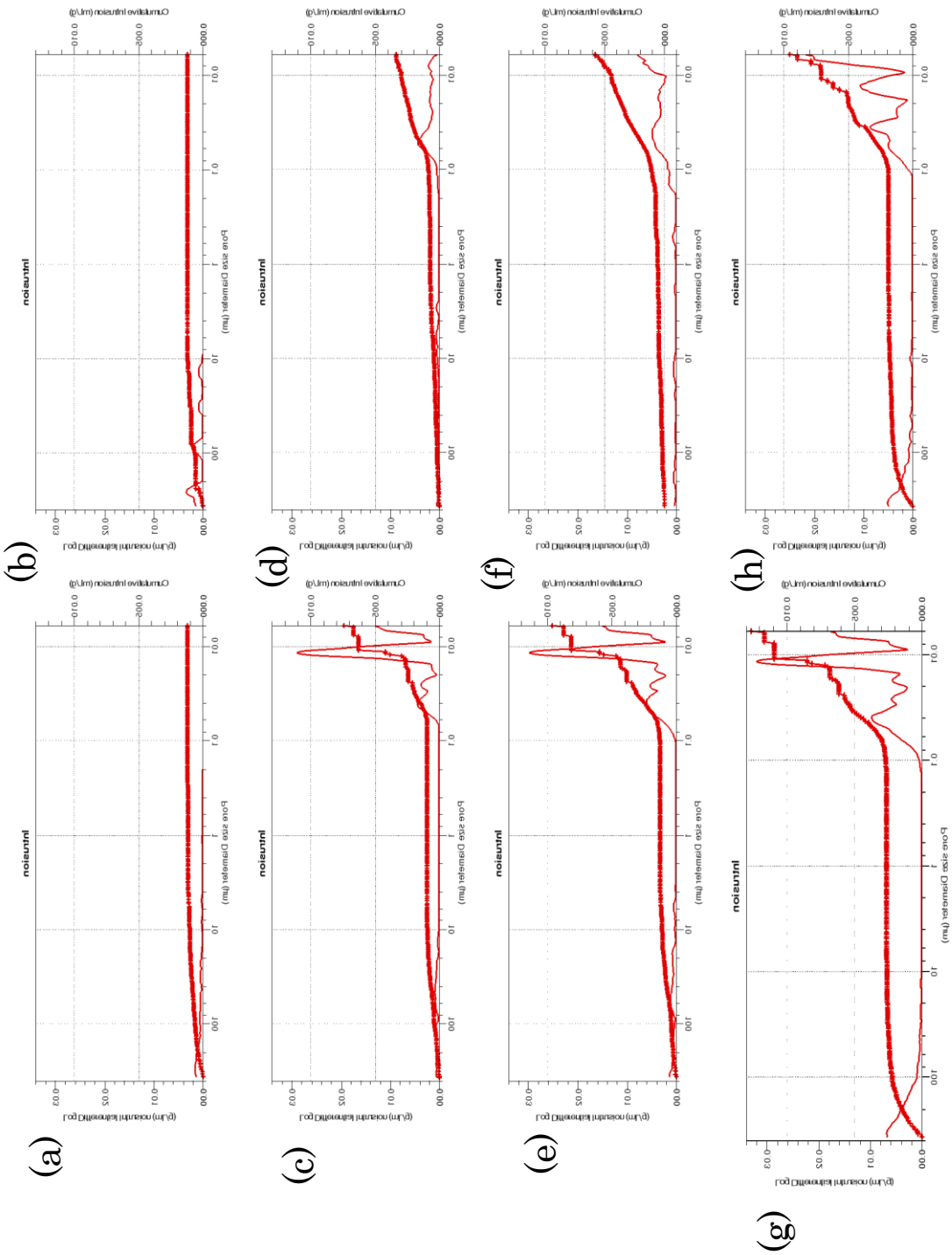


図 2.9-1　KY-1 の間隙径分布

(a)・(b) 未浸漬試料、(c)・(d) 15 日浸漬試料、(e)・(f) 30 日浸漬試料、(g)・(h) 45 日浸漬試料

(2) KY-2

表 2.9-3　KY-2 のポロシメータ測定結果

KY-2_浸漬前		KY-2_Pb-1		KY-2_Pb-2		KY-2_Pb	
Contents	Unit	Value	Pressure(psia)	Value	Pressure(psia)	Average	STDEV.S
Total intrusion volume	mL/g	0.0023	29,992.27	0.0038	29,992.64	0.00305	0.00106
Total pore area	m²/g	0.424	29,992.27	0.469	29,992.64	0.4465	0.03182
Median pore diameter (volume) at 0.001 mL/g	μm	76.9309	2.35	148.1282	1.22	112.52955	50.34409
Median pore diameter (area) at 0.000 m²/g	μm	0.00801	22,566.50	0.00828	21,853.38	0.008145	0.00019
Average pore diameter (4V/A)	μm	0.02156	–	0.03216	–	0.02686	0.0074953
Bulk density at 0.50 psia	g/mL	2.6311	0.50	2.6293	0.50	2.6302	0.00127
Apparent (skeletal) density	g/mL	2.647	29,992.27	2.6556	29,992.64	2.6513	0.00608
Porosity:	%	0.6017	–	0.9918	–	0.79675	0.27584
Stem volume	%	1	–	1	–	1	0

KY-2_15日間浸漬		KY-2_P15-1		KY-2_P15-2		KY-2_P15	
Contents	Unit	Value	Pressure(psia)	Value	Pressure(psia)	Average	STDEV.S
Total intrusion volume	mL/g	0.0065	29,990.88	0.0053	29,993.96	0.0059	0.00085
Total pore area	m²/g	1.432	29,990.88	0.714	29,993.96	1.073	0.50770
Median pore diameter (volume) at 0.001 mL/g	μm	0.03205	5,643.91	0.06365	2,841.33	0.04785	0.02234
Median pore diameter (area) at 0.000 m²/g	μm	0.00871	20,753.56	0.01182	15,304.14	0.010265	0.00220
Average pore diameter (4V/A)	μm	0.01807	–	0.02976	–	0.023915	0.00827
Bulk density at 0.50 psia	g/mL	2.5627	0.50	2.5431	0.50	2.5529	0.01386
Apparent (skeletal) density	g/mL	2.6059	29,990.88	2.5778	29,993.96	2.59185	0.01987
Porosity:	%	1.6577	–	1.3463	–	1.502	0.22019
Stem volume	%	2	–	2	–	2	0

KY-2_30日間浸漬		KY-2_P30-1		KY-2_P30-2		KY-2_P30	
Contents	Unit	Value	Pressure(psia)	Value	Pressure(psia)	Average	STDEV.S
Total intrusion volume	mL/g	0.0068	29,992.51	0.008	29,992.29	0.0074	0.00085
Total pore area	m²/g	1.161	29,992.51	1.108	29,992.29	1.1345	0.03748
Median pore diameter (volume) at 0.001 mL/g	μm	0.04627	3,908.67	0.04903	3,688.76	0.04765	0.00195
Median pore diameter (area) at 0.000 m²/g	μm	0.01245	14,524.66	0.01224	14,780.11	0.012345	0.00015
Average pore diameter (4V/A)	μm	0.02354	–	0.02875	–	0.026145	0.00368
Bulk density at 0.50 psia	g/mL	2.5127	0.50	2.4929	0.50	2.5028	0.01400
Apparent (skeletal) density	g/mL	2.5566	29,992.51	2.5432	29,992.29	2.5499	0.00948
Porosity:	%	1.7169	–	1.9805	–	1.8487	0.18639
Stem volume	%	3	–	3	–	3	0

KY-2_45日間浸漬		KY-2_P45-1		KY-2_P45-2		KY-2_P45	
Contents	Unit	Value	Pressure(psia)	Value	Pressure(psia)	Average	STDEV.S
Total intrusion volume	mL/g	0.0084	29,992.71	0.0075	29,991.86	0.00795	0.00064
Total pore area	m²/g	1.239	29,992.71	1.191	29,991.86	1.215	0.03394
Median pore diameter (volume) at 0.001 mL/g	μm	0.05058	3,575.86	0.04724	3,828.76	0.04891	0.00236
Median pore diameter (area) at 0.000 m²/g	μm	0.01273	14,210.57	0.01274	14,194.21	0.012735	0.00001
Average pore diameter (4V/A)	μm	0.02701	–	0.02509	–	0.02605	0.00136
Bulk density at 0.50 psia	g/mL	2.4861	0.49	2.4915	0.49	2.4888	0.00382
Apparent (skeletal) density	g/mL	2.5389	29,992.71	2.5387	29,991.86	2.5388	0.00014
Porosity:	%	2.0797	–	1.8575	–	1.9686	0.15712
Stem volume	%	4	–	4	–	4	0

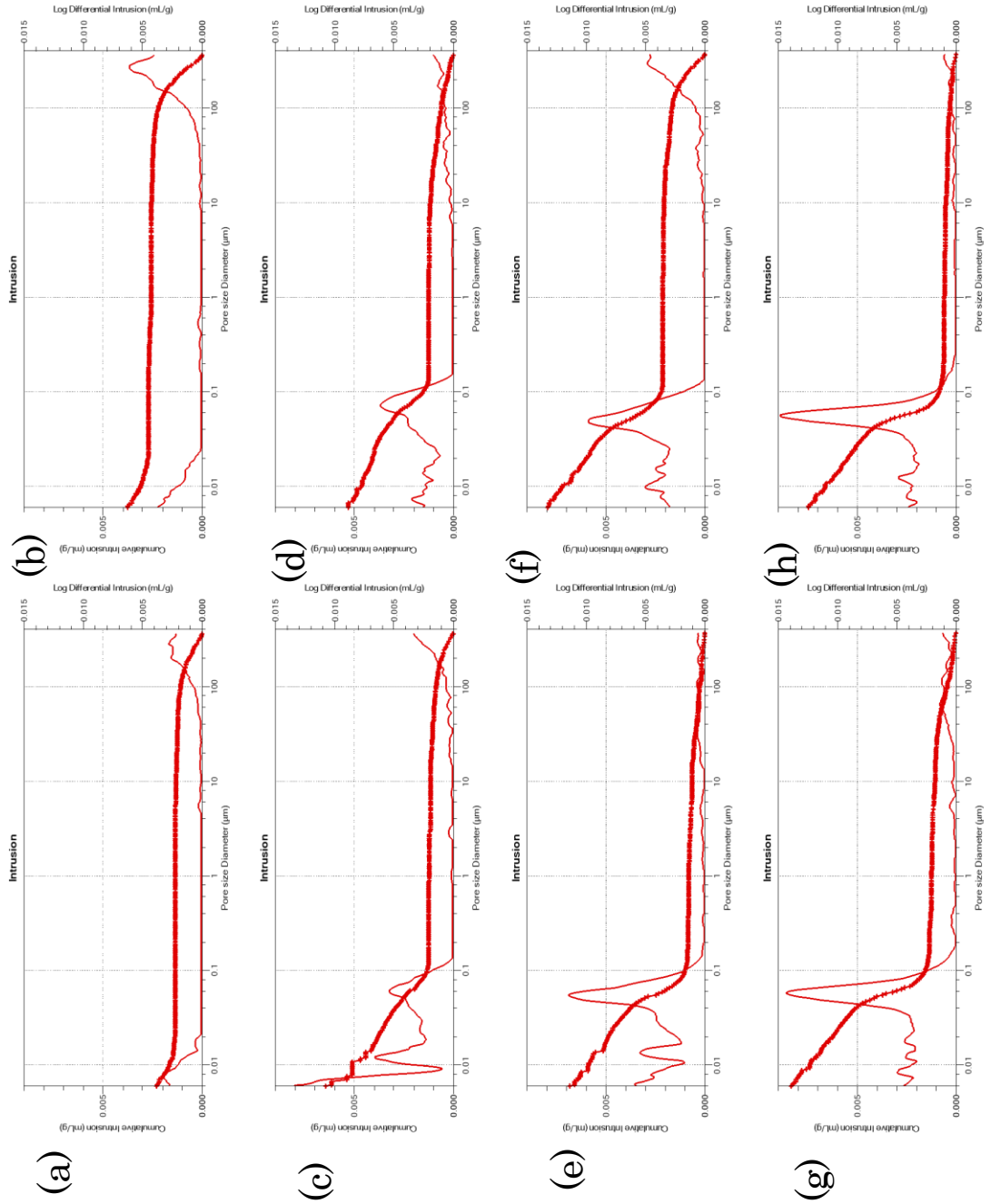


図 2.9-2　KY-2 の間隙径分布

(a)・(b) 未浸漬試料、(c)・(d) 15 日浸漬試料、(e)・(f) 30 日浸漬試料、(g)・(h) 45 日浸漬試料

(3) KY-3

表 2.9-4　KY-3 のポロシメータ測定結果

KY-3_浸漬前		KY-3_Pb-1		KY-3_Pb-2		KY-3_Pb	
Contents	Unit	Value	Pressure(psia)	Value	Pressure(psia)	Average	STDEV.S
Total intrusion volume	mL/g	0.003	29,992.24	0.0056	29,992.51	0.0043	0.00184
Total pore area	m²/g	0.563	29,992.24	1.158	29,992.51	0.8605	0.42073
Median pore diameter (volume) at 0.001 mL/g	μm	21.4145	8.45	0.01238	14,604.21	10.71344	15.13358
Median pore diameter (area) at 0.000 m²/g	μm	0.00919	19,670.18	0.0117	15,463.03	0.010445	0.00177
Average pore diameter (4V/A)	μm	0.0215	–	0.01927	–	0.020385	0.0015768
Bulk density at 0.50 psia	g/mL	2.6574	0.50	2.6441	0.50	2.65075	0.00940
Apparent (skeletal) density	g/mL	2.6789	29,992.24	2.6837	29,992.51	2.6813	0.00339
Porosity:	%	0.8053	–	1.4755	–	1.1404	0.47390
Stem volume	%	1	–	1	–	1	0

KY-3_15日間浸漬		KY-3_P15-1		KY-3_P15-2		KY-3_P15	
Contents	Unit	Value	Pressure(psia)	Value	Pressure(psia)	Average	STDEV.S
Total intrusion volume	mL/g	0.002	29,993.01	0.0016	29,992.29	0.0018	0.00028
Total pore area	m²/g	0.21	29,993.01	0.104	29,992.29	0.157	0.07495
Median pore diameter (volume) at 0.001 mL/g	μm	24.06944	7.51	52.3862	3.45	38.22782	20.02297
Median pore diameter (area) at 0.000 m²/g	μm	0.00766	23,604.70	0.01129	16,017.77	0.009475	0.00257
Average pore diameter (4V/A)	μm	0.03771	–	0.06269	–	0.0502	0.01766
Bulk density at 0.50 psia	g/mL	2.6127	0.50	2.6086	0.50	2.61065	0.00290
Apparent (skeletal) density	g/mL	2.6263	29,993.01	2.6197	29,992.29	2.623	0.00467
Porosity:	%	0.5184	–	0.4264	–	0.4724	0.06505
Stem volume	%	1	–	1	–	1	0

KY-3_30日間浸漬		KY-3_P30-1		KY-3_P30-2		KY-3_P30	
Contents	Unit	Value	Pressure(psia)	Value	Pressure(psia)	Average	STDEV.S
Total intrusion volume	mL/g	0.0051	29,992.58	0.0041	29,992.58	0.0046	0.00071
Total pore area	m²/g	1.222	29,992.58	0.346	29,992.58	0.784	0.61943
Median pore diameter (volume) at 0.001 mL/g	μm	0.02965	6,100.13	182.18176	0.99	91.105705	128.80099
Median pore diameter (area) at 0.000 m²/g	μm	0.0072	25,108.66	0.00991	18,248.07	0.008555	0.00192
Average pore diameter (4V/A)	μm	0.01673	–	0.04754	–	0.032135	0.02179
Bulk density at 0.50 psia	g/mL	2.5748	0.50	2.5617	0.50	2.56825	0.00926
Apparent (skeletal) density	g/mL	2.6091	29,992.58	2.5889	29,992.58	2.599	0.01428
Porosity:	%	1.3158	–	1.0535	–	1.18465	0.18547
Stem volume	%	1	–	1	–	1	0

KY-3_45日間浸漬		KY-3_P45-1		KY-3_P45-2		KY-3_P45	
Contents	Unit	Value	Pressure(psia)	Value	Pressure(psia)	Average	STDEV.S
Total intrusion volume	mL/g	0.0045	29,992.71	0.0068	29,992.14	0.00565	0.00163
Total pore area	m²/g	0.78	29,992.71	1.905	29,992.14	1.3425	0.79550
Median pore diameter (volume) at 0.001 mL/g	μm	0.05856	3,088.47	0.01228	14,732.48	0.03542	0.03272
Median pore diameter (area) at 0.000 m²/g	μm	0.00841	21,501.00	0.01149	15,736.16	0.00995	0.00218
Average pore diameter (4V/A)	μm	0.0232	–	0.01425	–	0.018725	0.00633
Bulk density at 0.50 psia	g/mL	2.5592	0.50	2.5586	0.50	2.5589	0.00042
Apparent (skeletal) density	g/mL	2.5892	29,992.71	2.6038	29,992.14	2.5965	0.01032
Porosity:	%	1.1581	–	1.7359	–	1.447	0.40857
Stem volume	%	1	–	1	–	1	0

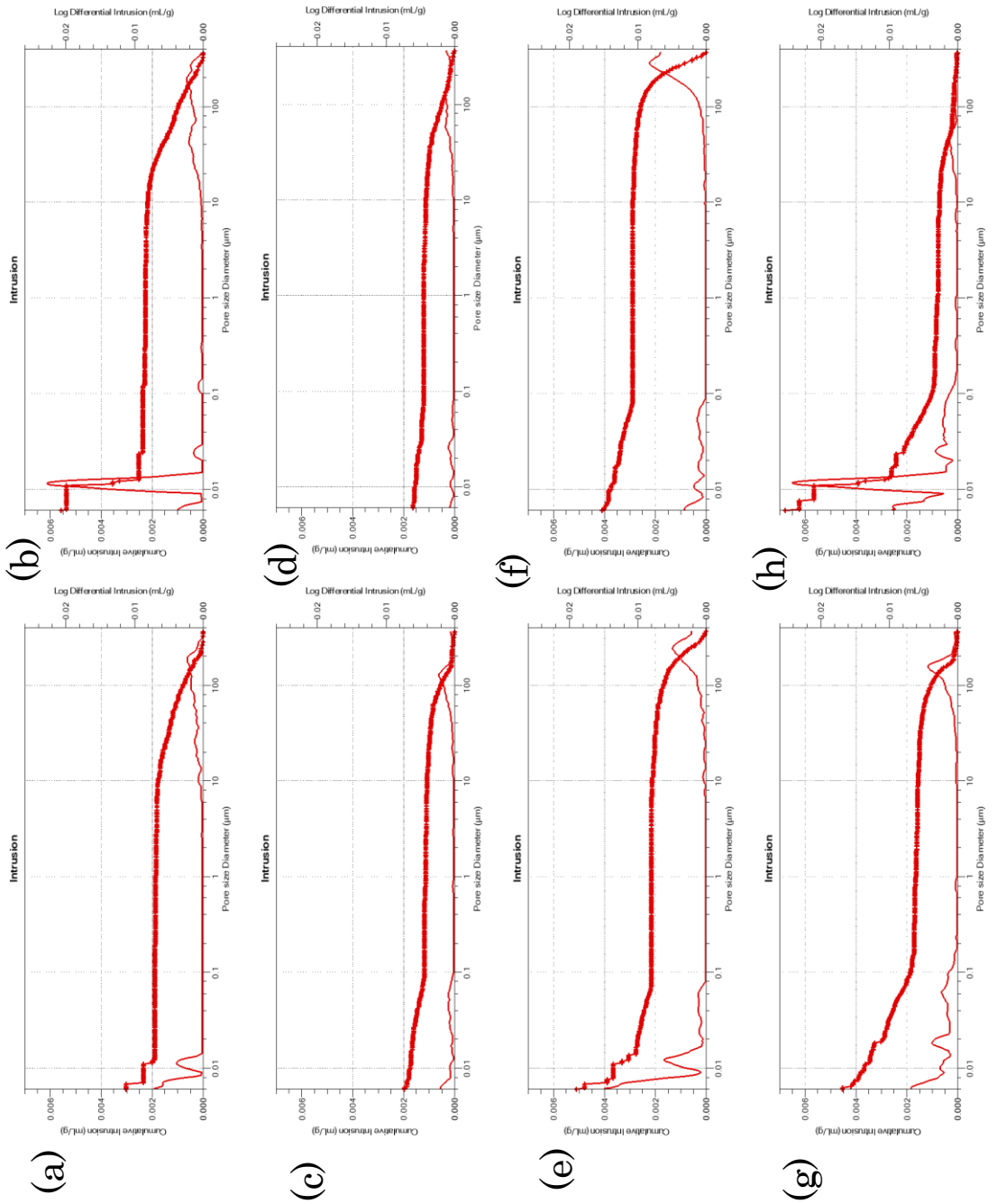


図 2.9-3 KY-3 の間隙径分布

(a)・(b) 未浸漬試料、(c)・(d) 15 日浸漬試料、(e)・(f) 30 日浸漬試料、(g)・(h) 45 日浸漬試料

(4) KY-5

表 2.9-5　KY-5 のポロシメータ測定結果

KY-5_浸漬前		KY-5_Pb-1		KY-5_Pb-2		KY-5_Pb	
Contents	Unit	Value	Pressure(psia)	Value	Pressure(psia)	Average	STDEV.S
Total intrusion volume	mL/g	0.0045	29,992.41	0.0007	29,991.82	0.0026	0.00269
Total pore area	m²/g	0.796	29,992.41	0.0000	29,991.82	0.398	0.56286
Median pore diameter (volume) at 0.001 mL/g	μm	0.02399	7,539.91	168.23717	1.08	84.13058	118.94468
Median pore diameter (area) at 0.000 m²/g	μm	0.01169	15,466.40	3.51302	51.48	1.762355	2.47581
Average pore diameter (4V/A)	μm	0.02255	–	0.0000	–	0.011275	0.0159453
Bulk density at 0.50 psia	g/mL	2.6406	0.49	2.6489	0.49	2.64475	0.00587
Apparent (skeletal) density	g/mL	2.6722	29,992.41	2.6535	29,991.82	2.66285	0.01322
Porosity:	%	1.1844	–	0.171	–	0.6777	0.71658
Stem volume	%	1	–	0	–	0.5	0.7071068

KY-5_15日間浸漬		KY-5_P15-1		KY-5_P15-2		KY-5_P15	
Contents	Unit	Value	Pressure(psia)	Value	Pressure(psia)	Average	STDEV.S
Total intrusion volume	mL/g	0.0018	29,992.83	0.004	29,992.96	0.0029	0.00156
Total pore area	m²/g	0.431	29,992.83	0.934	29,992.96	0.6825	0.35567
Median pore diameter (volume) at 0.001 mL/g	μm	0.01383	13,081.19	0.01224	14,774.15	0.013035	0.00112
Median pore diameter (area) at 0.000 m²/g	μm	0.01122	16,117.93	0.01169	15,467.21	0.011455	0.00033
Average pore diameter (4V/A)	μm	0.0166	–	0.01712	–	0.01686	0.00037
Bulk density at 0.50 psia	g/mL	2.6263	0.50	2.6247	0.50	2.6255	0.00113
Apparent (skeletal) density	g/mL	2.6387	29,992.83	2.6526	29,992.96	2.64565	0.00983
Porosity:	%	0.4703	–	1.0493	–	0.7598	0.40941
Stem volume	%	0	–	0	–	0	0

KY-5_30日間浸漬		KY-5_P30-1		KY-5_P30-2		KY-5_P30	
Contents	Unit	Value	Pressure(psia)	Value	Pressure(psia)	Average	STDEV.S
Total intrusion volume	mL/g	0.0005	29,991.73	0.0045	29,991.79	0.0025	0.00283
Total pore area	m²/g	0	29,991.73	1.118	29,991.79	0.559	0.79055
Median pore diameter (volume) at 0.001 mL/g	μm	150.15743	1.2	0.01222	14,803.07	75.084825	106.16870
Median pore diameter (area) at 0.000 m²/g	μm	9.41416	19.21	0.0117	15,461.26	4.71293	6.64854
Average pore diameter (4V/A)	μm	0	–	0.01601	–	0.008005	0.01132
Bulk density at 0.50 psia	g/mL	2.6232	0.50	2.6036	0.50	2.6134	0.01386
Apparent (skeletal) density	g/mL	2.6267	29,991.73	2.6343	29,991.79	2.6305	0.00537
Porosity:	%	0.1336	–	1.1647	–	0.64915	0.72910
Stem volume	%	0	–	0	–	0	0

KY-5_45日間浸漬		KY-5_P45-1		KY-5_P45-2		KY-5_P45	
Contents	Unit	Value	Pressure(psia)	Value	Pressure(psia)	Average	STDEV.S
Total intrusion volume	mL/g	0.0035	29,992.52	0.0037	29,992.46	0.0036	0.00014
Total pore area	m²/g	0.877	29,992.52	0.147	29,992.46	0.512	0.51619
Median pore diameter (volume) at 0.001 mL/g	μm	0.01639	11,035.01	150.94345	1.2	75.47992	106.72155
Median pore diameter (area) at 0.000 m²/g	μm	0.00714	25,334.17	0.01282	14,111.82	0.00998	0.00402
Average pore diameter (4V/A)	μm	0.01596	–	0.10175	–	0.058855	0.06066
Bulk density at 0.50 psia	g/mL	2.6031	0.49	2.5882	0.49	2.59565	0.01054
Apparent (skeletal) density	g/mL	2.627	29,992.52	2.6134	29,992.46	2.6202	0.00962
Porosity:	%	0.9108	–	0.9625	–	0.93665	0.03656
Stem volume	%	1	–	2	–	1.5	0.7071068

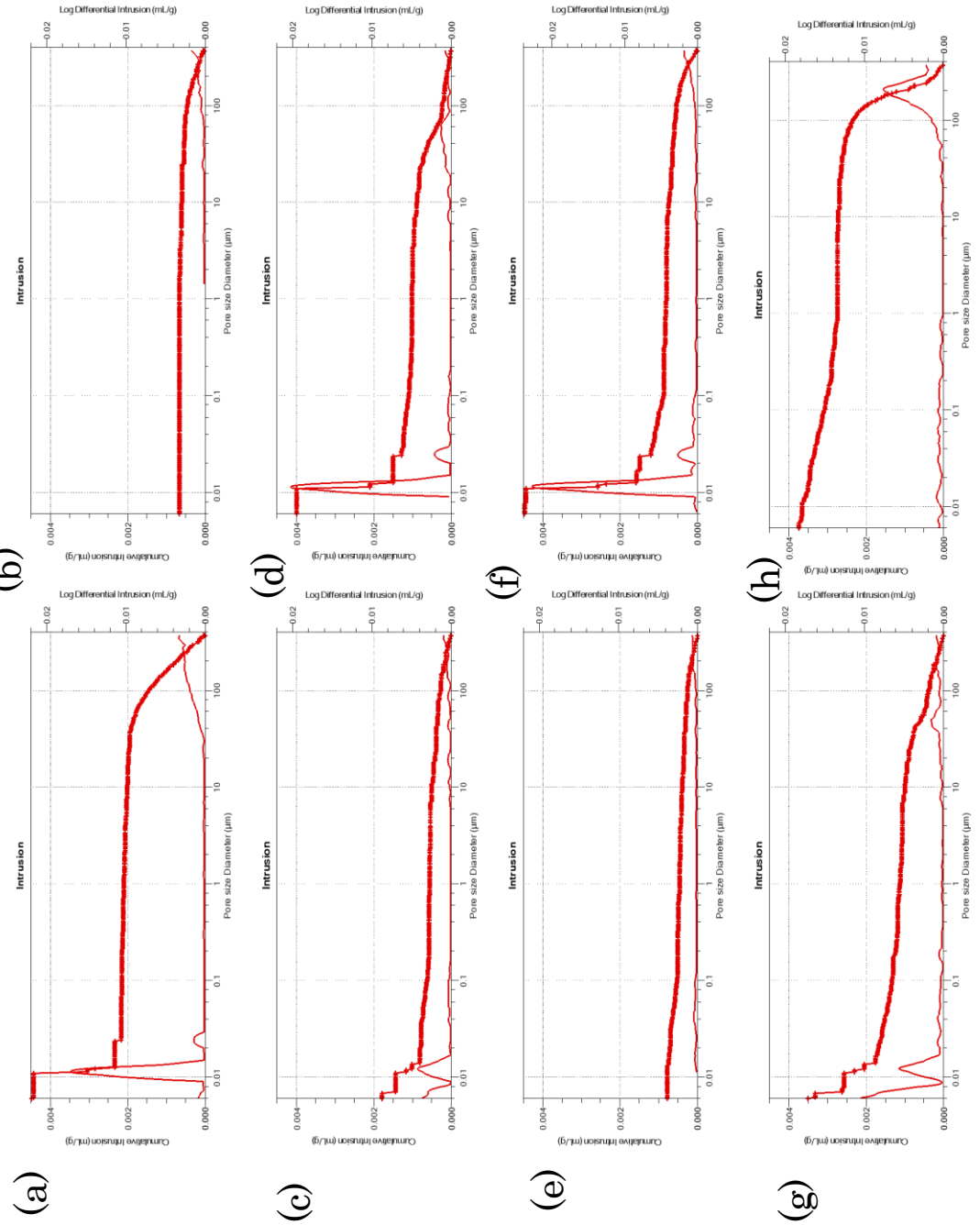


図 2.9-4 KY-5 の間隙径分布

(a)・(b) 未浸漬試料、(c)・(d) 15 日浸漬試料、(e)・(f) 30 日浸漬試料、(g)・(h) 45 日浸漬試料

(5) KY-8

表 2.9-6　KY-8 のポロシメータ測定結果

KY-8_浸漬前		KY-8_Pb-1		KY-8_Pb-2		KY-8_Pb	
Contents	Unit	Value	Pressure(psia)	Value	Pressure(psia)	Average	STDEV.S
Total intrusion volume	mL/g	0.0016	29,992.29	0.0019	29,992.25	0.00175	0.00021
Total pore area	m²/g	0.001	29,992.29	0.001	29,992.25	0.001	0.00000
Median pore diameter (volume) at 0.001 mL/g	μm	91.63509	1.97	136.57394	1.32	114.10452	31.77657
Median pore diameter (area) at 0.000 m²/g	μm	1.14934	157.36	0.45439	398.04	0.801865	0.49140
Average pore diameter (4V/A)	μm	10.63994	–	6.22555	–	8.432745	3.1214451
Bulk density at 0.50 psia	g/mL	2.7349	0.50	2.7336	0.50	2.73425	0.00092
Apparent (skeletal) density	g/mL	2.7467	29,992.29	2.7477	29,992.25	2.7472	0.00071
Porosity:	%	0.4289	–	0.5115	–	0.4702	0.05841
Stem volume	%	1	–	1	–	1	0

KY-8_15日間浸漬		KY-8_P15-1		KY-8_P15-2		KY-8_P15	
Contents	Unit	Value	Pressure(psia)	Value	Pressure(psia)	Average	STDEV.S
Total intrusion volume	mL/g	0.0014	29,991.68	0.0013	29,992.32	0.00135	0.00007
Total pore area	m²/g	0.235	29,991.68	0.228	29,992.32	0.2315	0.00495
Median pore diameter (volume) at 0.001 mL/g	μm	4.26205	42.44	1.79454	100.79	3.028295	1.74479
Median pore diameter (area) at 0.000 m²/g	μm	0.00679	26,629.60	0.00856	21,116.78	0.007675	0.00125
Average pore diameter (4V/A)	μm	0.02296	–	0.02283	–	0.022895	0.00009
Bulk density at 0.50 psia	g/mL	2.671	0.50	2.6562	0.50	2.6636	0.01047
Apparent (skeletal) density	g/mL	2.6806	29,991.68	2.6653	29,992.32	2.67295	0.01082
Porosity:	%	0.3607	–	0.3423	–	0.3515	0.01301
Stem volume	%	0	–	0	–	0	0

KY-8_30日間浸漬		KY-8_P30-1		KY-8_P30-2		KY-8_P30	
Contents	Unit	Value	Pressure(psia)	Value	Pressure(psia)	Average	STDEV.S
Total intrusion volume	mL/g	0.0018	29,991.72	0.004	29,992.48	0.0029	0.00156
Total pore area	m²/g	0.411	29,991.72	0.776	29,992.48	0.5935	0.25809
Median pore diameter (volume) at 0.001 mL/g	μm	0.04575	3,953.01	42.32597	4.27	21.18586	29.89663
Median pore diameter (area) at 0.000 m²/g	μm	0.00741	24,395.78	0.00741	24,418.12	0.00741	0.00000
Average pore diameter (4V/A)	μm	0.01763	–	0.02039	–	0.01901	0.00195
Bulk density at 0.50 psia	g/mL	2.6328	0.50	2.6074	0.50	2.6201	0.01796
Apparent (skeletal) density	g/mL	2.6454	29,991.72	2.6345	29,992.48	2.63995	0.00771
Porosity:	%	0.4773	–	1.0271	–	0.7522	0.38877
Stem volume	%	1	–	1	–	1	0

KY-8_45日間浸漬		KY-8_P45-1		KY-8_P45-2		KY-8_P45	
Contents	Unit	Value	Pressure(psia)	Value	Pressure(psia)	Average	STDEV.S
Total intrusion volume	mL/g	0.0042	29,991.49	0.0073	29,991.91	0.00575	0.00219
Total pore area	m²/g	1.019	29,991.49	2.68	29,991.91	1.8495	1.17450
Median pore diameter (volume) at 0.001 mL/g	μm	0.01735	10,424.90	0.01112	16,261.77	0.014235	0.00441
Median pore diameter (area) at 0.000 m²/g	μm	0.00809	22,354.09	0.00989	18,279.63	0.00899	0.00127
Average pore diameter (4V/A)	μm	0.01635	–	0.01094	–	0.013645	0.00383
Bulk density at 0.50 psia	g/mL	2.5808	0.50	2.5705	0.50	2.57565	0.00728
Apparent (skeletal) density	g/mL	2.6088	29,991.49	2.6199	29,991.91	2.61435	0.00785
Porosity:	%	1.0746	–	1.8849	–	1.47975	0.57297
Stem volume	%	2	–	1	–	1.5	0.7071068

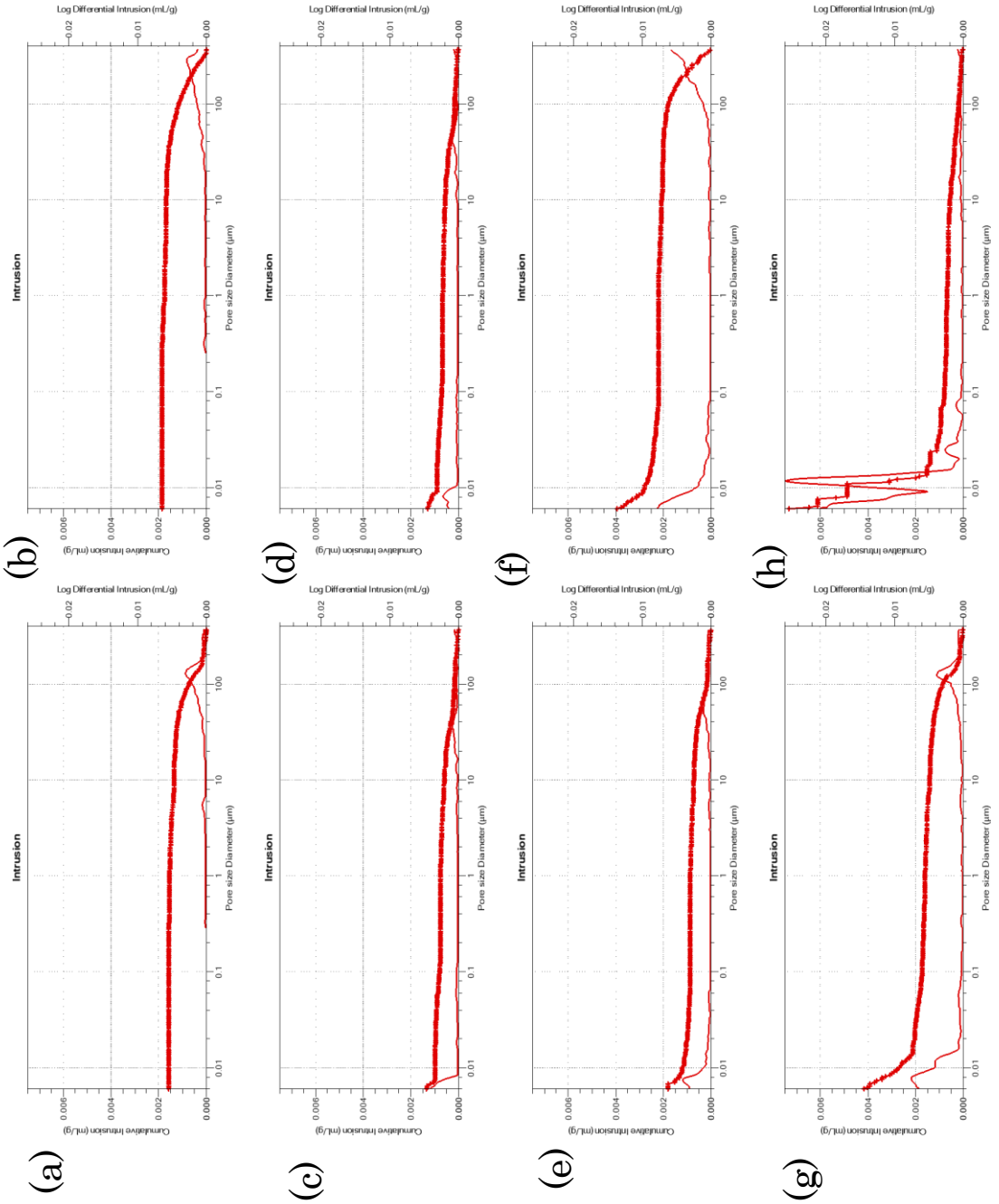


図 2.9-5　KY-8 の間隙径分布

(a)・(b) 未浸漬試料、(c)・(d) 15 日浸漬試料、(e)・(f) 30 日浸漬試料、(g)・(h) 45 日浸漬試料

(6) TN-1

表 2.9-7　TN-1 のポロシメータ測定結果

TN-1_浸漬前		TN-1_Pb-1		TN-1_Pb-2		TN-1_Pb	
Contents	Unit	Value	Pressure(psia)	Value	Pressure(psia)	Average	STDEV.S
Total intrusion volume	mL/g	0.0216	29,992.25	0.0227	29,992.21	0.02215	0.00078
Total pore area	m²/g	0.934	29,992.25	2.353	29,992.21	1.6435	1.00338
Median pore diameter (volume) at 0.001 mL/g	μm	0.202	895.37	0.1267	1,427.48	0.16435	0.05325
Median pore diameter (area) at 0.000 m²/g	μm	0.03273	5,526.01	0.01226	14,746.79	0.022495	0.01447
Average pore diameter (4V/A)	μm	0.09268	–	0.03855	–	0.065615	0.0382757
Bulk density at 0.50 psia	g/mL	2.515	0.50	2.5346	0.50	2.5248	0.01386
Apparent (skeletal) density	g/mL	2.6596	29,992.25	2.6892	29,992.21	2.6744	0.02093
Porosity:	%	5.4365	–	5.7483	–	5.5924	0.22048
Stem volume	%	10	–	9	–	9.5	0.7071068

TN-1_15日間浸漬		TN-1_P15-1		TN-1_P15-2		TN-1_P15	
Contents	Unit	Value	Pressure(psia)	Value	Pressure(psia)	Average	STDEV.S
Total intrusion volume	mL/g	0.0326	29,992.29	0.0324	29,992.01	0.0325	0.00014
Total pore area	m²/g	2.12	29,992.29	2.214	29,992.01	2.167	0.06647
Median pore diameter (volume) at 0.001 mL/g	μm	0.29791	607.10	0.27355	661.18	0.28573	0.01723
Median pore diameter (area) at 0.000 m²/g	μm	0.01346	13,436.42	0.01302	13,886.16	0.01324	0.00031
Average pore diameter (4V/A)	μm	0.06155	–	0.05857	–	0.06006	0.00211
Bulk density at 0.50 psia	g/mL	2.33	0.50	2.3152	0.50	2.3226	0.01047
Apparent (skeletal) density	g/mL	2.5216	29,992.29	2.503	29,992.01	2.5123	0.01315
Porosity:	%	7.6004	–	7.5034	–	7.5519	0.06859
Stem volume	%	13	–	14	–	13.5	0.7071068

TN-1_30日間浸漬		TN-1_P30-1		TN-1_P30-2		TN-1_P30	
Contents	Unit	Value	Pressure(psia)	Value	Pressure(psia)	Average	STDEV.S
Total intrusion volume	mL/g	0.0367	29,992.05	0.0372	29,992.39	0.03695	0.00035
Total pore area	m²/g	4.085	29,992.05	3.582	29,992.39	3.8335	0.35567
Median pore diameter (volume) at 0.001 mL/g	μm	0.17734	1,019.86	0.1987	910.23	0.18802	0.01510
Median pore diameter (area) at 0.000 m²/g	μm	0.00938	19,277.72	0.01045	17,302.47	0.009915	0.00076
Average pore diameter (4V/A)	μm	0.03591	–	0.04158	–	0.038745	0.00401
Bulk density at 0.50 psia	g/mL	2.2857	0.50	2.2566	0.50	2.27115	0.02058
Apparent (skeletal) density	g/mL	2.4949	29,992.05	2.4636	29,992.39	2.47925	0.02213
Porosity:	%	8.3828	–	8.4009	–	8.39185	0.01280
Stem volume	%	15	–	15	–	15	0

TN-1_45日間浸漬		TN-1_P45-1		TN-1_P45-2		TN-1_P45	
Contents	Unit	Value	Pressure(psia)	Value	Pressure(psia)	Average	STDEV.S
Total intrusion volume	mL/g	0.0361	29,992.45	0.0384	29,992.51	0.03725	0.00163
Total pore area	m²/g	3.016	29,992.45	3.361	29,992.51	3.1885	0.24395
Median pore diameter (volume) at 0.001 mL/g	μm	0.20124	898.74	0.19814	912.79	0.19969	0.00219
Median pore diameter (area) at 0.000 m²/g	μm	0.01316	13,744.25	0.01215	14,883.78	0.012655	0.00071
Average pore diameter (4V/A)	μm	0.04781	–	0.0457	–	0.046755	0.00149
Bulk density at 0.50 psia	g/mL	2.2843	0.50	2.2655	0.50	2.2749	0.01329
Apparent (skeletal) density	g/mL	2.4893	29,992.45	2.4813	29,992.51	2.4853	0.00566
Porosity:	%	8.2356	–	8.6991	–	8.46735	0.32774
Stem volume	%	15	–	16	–	15.5	0.7071068

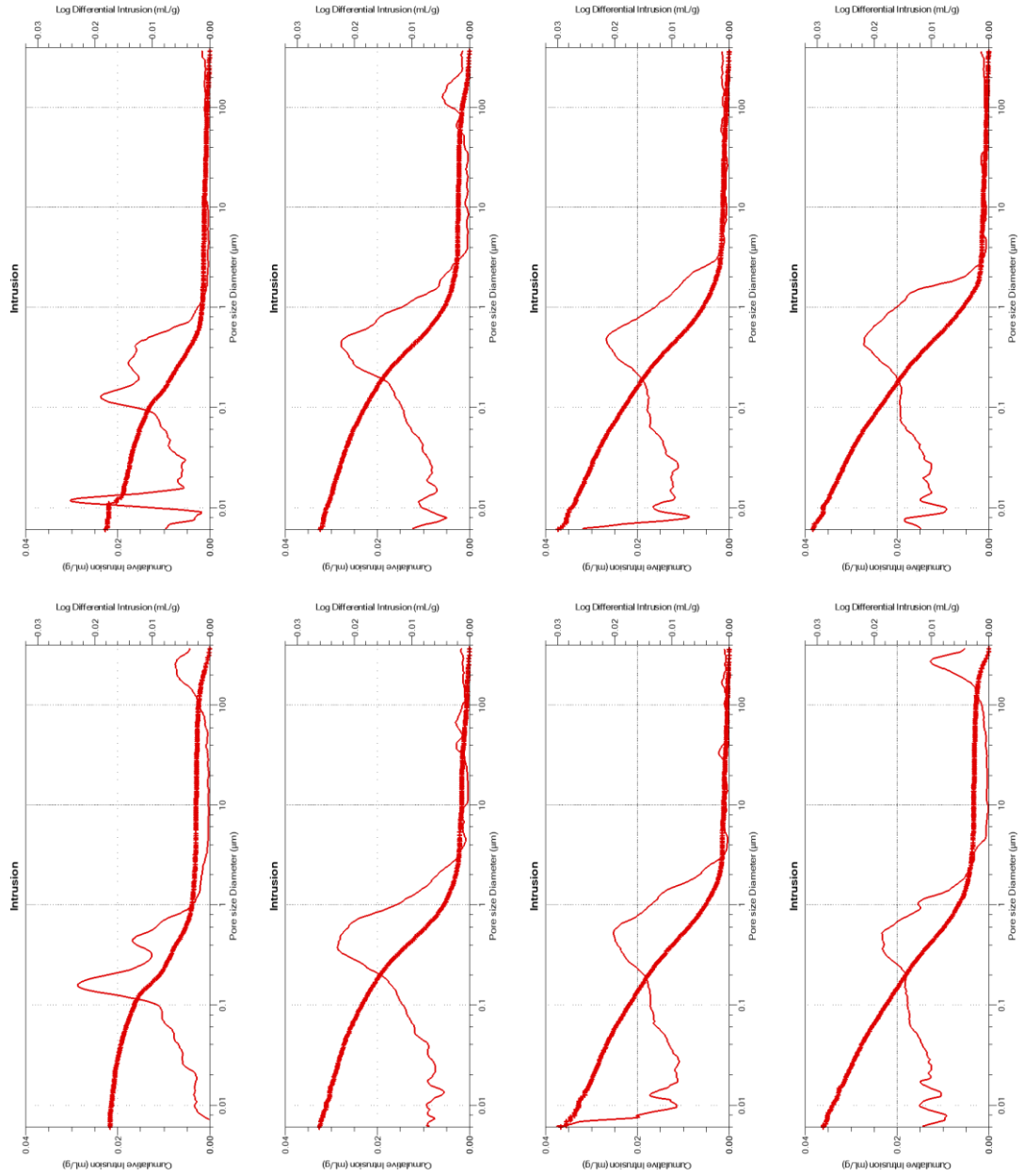


図 2.9-6　TN-1 の間隙径分布

(a)・(b) 未浸漬試料、(c)・(d) 15 日浸漬試料、(e)・(f) 30 日浸漬試料、(g)・(h) 45 日浸漬試料

2.10 溶液の ICP-OES 分析

硝酸溶液への浸漬によって試料から溶け出した元素を定量的に評価することを目的として、岩石試料浸漬後の硝酸溶液について、ICP-OES（Agilent 社、Agilent 5100）を用いた分析を実施した。分析にあたっては、JIS K0102 工場排水試験方法および JIS M8206 鉄鉱石―ICP 発光分光分析方法を参考に、試料の前処理を行い測定した。測定結果を表 2.10-1 に示す。

表 2.10-1　ICP-OES による定量分析結果

サンプル名	浸漬期間（日）	Mg ppm	Al ppm	Ca ppm	Si ppm	Mn ppm	Sr ppm	Ba ppm	Fe ppm
バックグラウンド	15	0	0	0	0.6	0.0	-0.1	0.0	-1
	30	0	1	0	0.3	0.0	-0.1	0.0	-1
	45	0	0	0	0.5	0.0	-0.1	0.0	-1
KY-1	15	797	2073	429	0.7	19.1	4.1	3.3	2497
	30	1193	3656	903	0.8	72.8	9.6	5.4	3810
	45	1408	4440	1117	0.4	109.0	10.9	6.3	4535
KY-2	15	1146	2742	1024	1.0	22.8	0.2	2.6	2561
	30	1622	4106	1609	0.9	60.5	0.5	4.7	3679
	45	2025	5377	2093	0.7	27.1	7.9	3.1	4513
KY-3	15	606	1570	406	0.7	29.6	12.5	4.1	1717
	30	890	2451	639	0.6	134.2	15.2	5.0	2504
	45	1115	3228	850	0.7	12.8	2.6	2.4	3180
KY-5	15	329	699	133	0.9	38.8	4.4	3.5	1403
	30	455	1057	184	0.5	31.9	5.8	4.4	1907
	45	541	1314	225	0.8	22.0	0.2	2.8	2296
KY-8	15	1085	2690	739	1.0	17.8	0.4	4.2	3130
	30	1528	3735	933	0.7	45.5	0.5	4.8	4340
	45	2062	5618	1547	0.7	35.9	4.2	5.5	5621
TN-1	15	2723	5758	453	0.7	99.0	2.4	24.5	10347
	30	3447	6990	637	0.4	50.0	3.7	38.6	13405
	45	3911	7723	694	0.5	20.1	4.0	39.4	14546

※Siは測定強度が測定下限値以下のため参考値

B. 段丘の対比・編年の高精度化に関わる文献調査 収集文献一覧

一般財団法人電力中央研究所

「5.5 段丘対比・編年技術の高精度化に関する検討」では、わが国における高位段丘、中位段丘、低位段丘などといった段丘群ごとの風化の様式、性状といった特徴の把握を目的に、既往文献を対象に、段丘の被覆層、段丘堆積物（特に礫層）、基盤に関する柱状図を収集・整理した。既往文献の収集にあたっては、濱田・幡谷（2011）で実施された段丘の分布に関わる文献調査で引用した文献を中心に実施した。なお、平成 30 年度事業では、収集・整理する文献の対象を、関東平野―新潟平野―佐渡ヶ島より東側の東日本とした。

収集した文献を表 1 から表 11 に示す。

表 1　収集した文献一覧（その 1）

No	著者	発行年	タイトル	誌名・書籍名	巻	号	ページ
1	中村有吾・平川一臣・長沼　孝	1999	北海道白滝遺跡と周辺地域のテフラ	地学雑誌	108	5	616-628
2	Wako, Tatuo	1962	River terraces and gentle slopes along the Tokoro river-geomorphological study in northeastern Hokkaido(2)	Sci.Rep.Tohoku.Univ.Ser7	-	11	31-43
3	Wako, Tatuo	1963	River terraces and gentle slopes along the Yubetsu river-geomorphological study in northeastern Hokkaido(3)	Sci.Rep.Tohoku.Univ.Ser7	-	12	35-52
4	鳥居栄一郎	1966	十勝川下流の段丘地形と埋積谷について	地理学評論	39	9	577-590
5	岩崎孝明・吉永秀一郎・平川一臣	1991	元浦川・日高幌別川の河成段丘	地理学評論，Ser.A	64	9	597-612
6	中村有吾・平川一臣	2001	十勝平野南部における酸素同位対比ステージ 5，7，9 のテフラ	第四紀研究	40	5	373-384
7	岡　孝雄	1985	北海道天北・問寒別構造盆地のネオテクトニクス	活断層研究	-	1	19-29
8	伊藤友彦・伴　かおり・両角　拓・當眞陽子・柳井清治・鴈澤好博	2000	北海道北部における後期更新世，広域風成塵起源粘土層の層序と分布	第四紀研究	39	-	199-214
9	Wako, Tatuo	1961	River terraces and gentle slopes along the Shokotsu river, northeastern Hokkaido	Sci.Rep.Tohoku.Univ.Ser7	-	10	39-49
10	平川一臣・小野有五	1974	十勝平野の地形発達史	地理学評論	47	10	607-632
11	柳田　誠	1981	沙流川における最終氷期以降の河岸段丘の形成過程	地理学評論	54	8	423-436
12	加藤茂弘	1991	北海道日高地方西部の静内川・新冠川における最終間氷期以降の段丘形成過程	地理学評論	64A	-	71-94

表２　収集した文献一覧（その２）

No	著者	発行年	タイトル	誌名・書籍名	巻	号	ページ
13	加藤茂弘	1994	北海道，日高地方南部の日高幌別川・元浦川における第四紀後期の段丘形成過程	人と自然	-	4	27-56
14	山本憲志郎	1987	暑寒別岳周辺の緩斜面と河成段丘	東北地理	39	2	81-97
15	北海道立地質研究所	2002	北海道活断層図 No.4　当別断層および南方延長部　活断層図とその解説	北海道	-	-	109
16	柳田　誠	1991	河岸段丘の動的地形変化に関する研究	駒沢地理	-	27	1-75
17	奥村晃史・八木浩司・寒川　旭	1984	黒松内低地帯の後期更新世段丘に関する年代資料	第四紀研究	23	-	209-212
18	大森博雄	1975	北海道渡島半島江差付近の海岸段丘	第四紀研究	14	-	63-76
19	岩崎孝明	1983	青森県東部の火山灰	駒沢大学大学院地理学研究	-	13	33-39
20	新戸部　芳	1964	三沢台地の段丘地形	東北地理	16	-	121-125
21	新戸部　芳	1972	奥入瀬川中下流部の段丘地形とその発達過程	東北地理	24	-	77-85
22	大池昭二・中川久夫・七崎　修・松山　力・米倉伸之	1966	馬渕川中・下流沿岸の段丘と火山灰	第四紀研究	5	-	29-35
23	西城　潔	1987	馬淵川上流部の段丘地形	東北地理	39	3	170-176
24	大和伸友	1988	馬渕川下流の段丘地形	駒沢地理	24	-	57-76
25	大和伸友	1989	五戸川流域の地形面	駒沢大学大学院地理学研究	19	-	1-18
26	秋田第四紀研究グループ米代川班	1977	秋田県能代平野から藤里地域にかけての段丘群について	秋田地学（秋田地学教育学会）	-	27	1-9
27	内藤博夫	1963	秋田県鷹巣盆地の地形発達史	地理学評論	-	36	655-668
28	内藤博夫	1966	秋田県米代川流域の第四紀火山砕屑物と段丘地形	地理学評論	-	39	463-484
29	内藤博夫	1970	秋田県花輪盆地および大館盆地の地形発達史	地理学評論	-	43	594-606
30	内藤博夫	1977	秋田県能代平野の段丘地形	第四紀研究	16	2	57-70
31	大月義徳	1991	秋田県鷹巣盆地における中部更新統盆地埋積層と高位段丘	地学雑誌	100	7	1077-1091
32	豊島正幸	1987	米代川支流，小猿部川における最終氷河期後半以降の河成段丘形成	地理学評論，Ser. A	60	1	40-51
33	Higaki, D.	1988	Chronological study on gentle slopes and river terraces in theeastern Kitakami mountains ,notheast Japan	Sci.Rep.Tohoku Univ.　Ser7	38	1	10-31
34	西城　潔・小岩直人・吉永秀一郎・沢口晋一	1989	427 馬淵川・小本川中上流の河岸段丘と山麓緩斜面の発達過程	日本地理学会予稿集	-	35	206-207

表３　収集した文献一覧（その３）

No	著者	発行年	タイトル	誌名・書籍名	巻	号	ページ
35	土井宣夫・大石雅之・吉田裕生	1995	岩手火山山麓の河岸段丘堆積物および沖積層の 14C 年代-岩手火山噴出物とそれに関連する堆積物の 14C 年代（その 5)	岩手県立博物館研究報告	-	13	1-12
36	内藤博夫	1965	秋田県岩見川流域およびその周辺の段丘について	第四紀研究	4	1	23-34
37	佐藤芳和・板垣直俊	1982	子吉川流域の河岸段丘群	秋田地学	-	33	1-8
38	白石建雄	2000	秋田県男鹿半島における酸素同位体ステージ 5a に対比される地層（五里合層；新称）と海成段丘	第四紀	32	-	1-10
39	菅原　啓・高橋節子	1974	遠野盆地の緩斜面と段丘の成因について	東北地理	26	-	11-21
40	渡辺満久	1991	北上低地帯における河成段丘面の編年および後期更新世における岩屑供給	第四紀研究	30	1	19-42
41	小岩直人	1996	岩手県夏油川扇状地における後期更新世の河谷埋積期に関する新知見	第四紀研究	35	1	35-39
42	松浦旅人	2000	山形県新庄盆地およびその周辺地域における河成段丘面編年-毒沢テフラおよび 14C 年代資料による検討-	日本第四紀学会講演要旨集	-	30	64-65
43	松浦旅人	2003	山形県新庄盆地に分布する中期更新世後半のテフラ層序	地理学評論	76	-	142-160
44	松浦旅人	2003	山形県新庄盆地西部に分布する Flexural-slip 断層とその活動時期	活断層研究	-	23	29-36
45	中川久夫・石田琢二・大池昭二・小野寺信悟・七崎修・松山　力	1971	北上線沿線の段丘群	東北大学地質古生物邦報	-	71	47-59
46	Toyoshima, Masayuki	1984	The Sequence of River Terrace Development in the Last 20，000 Years in the Ou Backbone Range，Northeastern Japan	Sci.Rep.Tohoku.Univ.Ser7	34	2	88-105
47	豊島正幸	1993	和賀川流域の地形編年と遺跡の立地，岩手県愛宕山遺跡のテフラ検出分析報告	北上市和賀町愛宕山遺跡発掘調査報告書	-	-	15-21
48	小松原　琢	1997	庄内堆積盆地東部の上部第四系とその地殻変動史	地質調査所月報	48	-	537-565
49	藤原健蔵	1967	山形盆地の地形発達	地理学評論	40	-	523-542
50	古谷尊彦	1963	白石川，松川の河岸段丘について	東北地理	15	-	29-35

表４　収集した文献一覧（その４）

No	著者	発行年	タイトル	誌名・書籍名	巻	号	ページ
51	幡谷竜太・柳田誠・佐藤　賢・佐々木俊法	2005	宮城県川崎盆地における海洋酸素同位体ステージ６河成段丘の認定とその意義	第四紀研究	44	-	155-167
52	小岩直人	1994	111 宮城県名取川流域における最終氷期以降の河成段丘発達史	日本地理学会予稿集	-	45	34-35
53	小岩直人	2005	宮城県名取川上流域における最終氷期の堆積段丘発達過程	地理学評論	78	-	433-454
54	中川久夫・小川貞子・鈴木養身	1960	仙台付近の第四系および地形（１）	第四紀研究	1	6	219-227
55	遅沢壮一	2004	仙台市西部，愛子断層を含む活スラスト帯を伴う愛子-奥武士撓曲	地球科学	58	3	149-160
56	大内　定	1973	広瀬川の河岸段丘の変位	東北地理	-	25	84-90
57	仙台市史編さん委員会	1994	地形と地質	仙台市史　特別編１自然	-	-	44-93
58	豊島正幸	1977	最上川中流部，山形・長井両盆地間の河岸段丘	東北地理	29	4	221-227
59	豊島正幸	1980	山形盆地東縁部における洪積世末期のテフラと河成段丘の形成時期	東北地理	32	4	203-210
60	Toyoshima, Masayuki	1981	A Geohistorical Study of Fluvial Landform through the Last 30, 000 Years at the Ou Eastern Fringe of the Yamagata Basin, Japan	Sci.Rep.Tohoku.Univ.Ser7	31	1	15-28
61	Toyoshima, Masayuki	1986	The Downstream Progressing Degradation Since the wurm Stage in the Naruse River Basin, Northeastern Japan	Sci.Rep.Tohoku.Univ.Ser7	36	2	114-125
62	豊島正幸・早田勉・北村　繁・新井房夫	2001	仙台地域における台ノ原段丘面の形成時期	第四紀研究	40	1	53-59
63	Win, Maung・豊島正幸	1989	Slope modification during the late Pleistocene in the Natori river drainage basin.	東北地理	-	41	1-14.
64	高浜信行・大塚富男・Brahmantyo, Budi	2000	三面川上流・朝日山地奥三面地域の第四紀末期の遺跡，河成段丘とネオテクトニクス	新潟大学積雪地域災害研究センター研究年報（新潟大学積雪地域災害研究センター）	-	22	1-6
65	真鍋賢一・竹内貞子・矢部文江	1992	福島盆地の第四系	福島大学特定研究「猪苗代湖の自然」研究報告	-	3	1-11
66	小元久仁夫	1988	最終氷期以降の猪苗代湖の水位変化	地学雑誌	97	-	346-354

表５　収集した文献一覧（その５）

No	著者	発行年	タイトル	誌名・書籍名	巻	号	ページ
67	佐藤　浩・池田宏	1992	阿武隈川，郡山-福島間における急勾配区間の成因	筑波大水理実験センター報告	-	16	158
68	Yamamoto, T.	2005	The rate of fluvial incision during the Late Quaternary period in the Abukkuma mountains, northeast Japan, deduced from tephrochronology	The Island Arc	14	-	199-212
69	吉田　義・伊藤七郎・鈴木敬治	1968	福島-郡山間の第四系	第四紀	-	13	10-29
70	吉田　義・伊藤七郎・鈴木敬治	1969	東北地方南部の阿武隈川流域の第四紀編年と２・３の問題	日本の第四系　地団研専報	-	15	99-125
71	吉田　義・伊藤七郎・白瀬美智男・堀内俊秀・真鍋健一・鈴木敬治・竹内貞子・野中俊夫・楡井良政・楡井典子	1981	阿武隈山地中央部における第四系と植物化石群	第四紀研究	20	-	143-163
72	岩崎孝明・柳田誠・森野泰行・大和伸友	1989	沼沢沼カルデラ周辺の軽石流および２次堆積物の作る地形	駒沢大学大学院地理学研究	-	19	29-34
73	木村　広	1964	五十嵐川流域の河岸段丘について	新潟県地学教育研究会誌（新潟県地学教育研究会）	-	2	48-53
74	笹神団体研究グループ	1982	笹神丘陵の第四系	地球科学	36	-	240-260
75	柳田　誠	1979	阿賀野川中流域の地形発達史	地理学評論	52	12	689-705
76	柳田　誠	1981	阿賀野川の河岸段丘	駒沢地理	-	17	29-56
77	Choi, Tad James, Takahama, Nobuyuki and Urabe, Atsushi	2000	Tephrochronology of Late Quaternary Strath Terraces and Their Implications to Neotectonic Movements in the Shitada and Tochio Regions of the Niigata Basin, Central Japan	Quaternary Research	39	6	521-533
78	早津賢二・新井房夫	1981	信濃川中流域におけるテフラ層と段丘形成年代	地質学雑誌	87	12	791-805
79	新潟平野団体研究グループ	1972	十日町盆地の河岸段丘	地質学論集	-	7	267-283
80	阿久津　純	1955	宇都宮付近の関東火山灰層と河岸段丘	宇都宮大学学芸学部研究論集,第２部	4	-	33-46
81	鈴木毅彦	1989	常磐海岸南部における更新世後期の段丘と埋没谷の形成	地理学評論	-	62	475-494

表６　収集した文献一覧（その６）

No	著者	発行年	タイトル	誌名・書籍名	巻	号	ページ
82	渡部景隆・堤橋昇・新藤静夫	1960	那須野が原の地質構造，特に那珂川旧河動の変遷について	地質学雑誌	66	-	113-122
83	野上道男・吉永秀一郎・高沢信司	1983	7. 久慈川	海面変動・気候変動と河岸段丘　研究課題番号 56380029　昭和 57 年度文部省科学研究費補助金（総合研究 A）研究成果報告書（貝塚爽平：東京都立大学理学部）	-	-	57-64
84	坂本　亨・宇野沢昭	1976	茨城県瓜連丘陵の第四系と久慈川・那珂川の河谷発達史	地質調査所月報	27	-	655-664
85	鈴木毅彦	1990	北関東海岸部に分布するテフラとそれに関する諸知見	関東平野	-	3	23-32
86	吉木岳哉	2000	栃木県喜連川丘陵における遷急線に基づく谷壁斜面の分類と編年	地理学評論	73A	-	637-659
87	白井哲之	1976	小櫃川沿岸の段丘地形形成に関する予察的研究-半固結地層地域の地形形成(その 1)-	千葉大教育学部研究紀要	-	25	159-169
88	赤木達司・小池一之	1978	416 那須野が原扇状地の形成過程の再検討	日本地理学会予稿集	-	14	256-257
89	阿久津　純	1962	那須野が原の第四系について	宇都宮大学学芸学部研究論集	2	12	73-92
90	Choi, Tad James, Takahama, Nobuyuki and Urabe, Atsushi	2002	Tephrochronology of Late Pleistocene to Holocene Strath Terraces along the Aburuma River of the Niigata Basin, Central Japan	Quaternary Research	41	1	45-51
91	早川唯弘	1985	箒川上流域における河岸段丘の発達と関谷断層の活動	活断層研究	1	-	41-53
92	早川唯弘・広瀬和男・野口 真	1985	箒川上流域における河岸段丘の発達	茨城大学教育学部紀要（自然科学）	-	34	1-22
93	Sugitani, Takashi	1987	Processes of Holocene terrace formation in a steep gravel-bed river, Nikko volcanic area, Japan	Geographical Review of Japan（Ser.B）	60	2	195-202
94	高田将志	1984	片品川流域における段丘形成過程について	関東平野（関東平野研究会）	-	1	11-16
95	竹本弘幸	1993	国指定特別天然記念物・名勝「吹割渓ならびに吹割瀑」周辺の地形	天然記念物・および名勝　吹割渓ならびに吹割瀑　地形・地質調査報告書（群馬県利根村・教育委員会　吹割の滝調査会）	-	1 - 16	55
96	山口伸弥	1984	片品川流域における武蔵野期以降の段丘形成過程	関東平野（関東平野研究会）	-	1	6-10

表７　収集した文献一覧（その７）

No	著者	発行年	タイトル	誌名・書籍名	巻	号	ページ
97	小池一之	1961	那珂川流域の地形発達	地理学評論	-	34	498-513
98	鈴木毅彦	2000	宇都宮丘陵，大志白遺跡周辺の地形	大志白遺跡群発掘調査報告書(旧石器時代編)河内町埋蔵文化財調査報告書	-	3	164-191
99	竹本弘幸	1984	栃木県足尾町周辺のテフラ	関東平野（関東平野研究会）	-	1	31-34
100	竹本弘幸	1998	利根川水系片品川流域の地形発達史-赤城火山の活動とその影響について-	地理学評論	-	71	783-804
101	上村恵利子	1979	荒川中流下位段丘の地形発達史的考察	お茶の水地理	-	20	2-3
102	安藤一男・渡辺満久	1992	武蔵野台地開析谷，目黒川谷底平野の埋没段丘面と最終氷期後半以降の古環境変遷	季刊地理学	-	44	79-92
103	安藤一男・渡辺満久	1996	武蔵野台地北部の開析谷沿いにおける埋没地形群	第四紀研究	-	35	281-291
104	広内大助	1999	武蔵野台地，大宮台地における第四紀後期段丘面の高度分布から見た荒川断層の活動性についての再検討	地理学評論	72	5	335-344
105	今泉知也・吉山昭	1999	223 相模川山間部における酸素同位体ステージ6の河成段丘	日本地理学会発表要旨集	-	55	98-99
106	寿円晋吾	1965	多摩川流域おける武蔵野台地の段丘地形の研究-段丘傾動量算定の一例-（その一），（その二）	地理学評論	-	38	557-571, 591-612
107	加藤定男・新堀友行	1973	いわゆる武蔵野段丘について	地球科学	27	1	25-34
108	古賀まどか	1982	秦野盆地西縁，四十八瀬川流域の河成段丘	関東の四紀	-	9	49-58
109	町田瑞男	1973	武蔵野台地北部およびその周辺地域における火山灰層位学的研究	地質学雑誌	79	-	167-180
110	松本栄次・撰梅正人	1970	多摩川河谷における旧埋積谷（演旨）	地理学評論	43	-	403-404
111	皆川紘一	1968 1969	相模川山間部のローム層と第四紀地史ⅠⅡ	第四紀研究	-	7，8	101-108 1-9
112	沼上　優	1996	武蔵野台地北東部のM3面について	立正大学大学院年報	13	-	97-107
113	岡　重文・宇野沢昭・黒田和男	1971	武蔵野西線に沿う表層地質～むさしの台地横断面～	地質ニュース	206	-	22-27
114	角田清美	1981	Ⅳ　青梅市の地形　Ⅴ　青梅市の陸水	青梅市の自然Ⅰ[地学編]（青梅市教育委員会）	-	-	127-304
115	角田清美	1983	多摩川上流・旧埋積谷堆積物の14C年代-日本の第四紀層の14C年代（150）-	地球科学	37	6	373-375
116	角田清美	1994	自然環境　地形	福生市史	-	-	23-36
117	角田清美・徳田光治	1972	桂川の河岸段丘-山中湖から上野原まで-	駒澤大学大学院地理学研究ノート	-	2	3-17
118	徳田光治	1976	上野原盆地における段丘地形の2.3の問題点	駒沢大学大学院地理学研究	6	-	1-15

表８　収集した文献一覧（その８）

No	著者	発行年	タイトル	誌名・書籍名	巻	号	ページ
119	山崎晴雄	1978	立川断層とその第四紀後期の運動	第四紀研究	16	-	231-246
120	米澤　宏	1981	相模川中流域・道志川流域の河岸段丘	関東の四紀	-	8	21-32
121	関東第四紀研究会	1987	大磯丘陵の層序と構造	関東の四紀	13	-	3-46
122	鹿島　薫	1985	房総半島，丸山川・和田川流域の完新世の地形発達	地理学評論	-	58	734-743
123	久保純子	1997	相模川下流平野の埋没段丘からみた酸素同位体ステージ 5e 以降の海水準変化と地形発達	第四紀研究	36	-	147-163
124	西島晶子	1985	箱根火山北東麓関本丘陵における地形発達史	関東の第四紀	-	11	43-51
125	天野和孝・今井了・菅野三郎・久保田吉則・水野敏明・高野武男・米山正次・渡辺　隆	1989	松代町の地形・地質	松代町町史（新潟県東頚城郡松代町）	-	-	3-88
126	荒川勝利	1997	堀之内町の自然環境　第一節　堀之内町の地形と地質	堀之内町史	-	-	28-45
127	幡谷竜太・柳田誠・山本真哉・佐藤　賢・古澤　明	2006	新潟県魚沼丘陵北部の河成段丘の層序	応用地質	47	3	140-151
128	早津賢二・新井房夫	1982	信濃川下流域（新潟県小千谷市付近）における河成段丘群の形成年代と段丘面の変位速度	地理学評論	55	2	130-138
129	町田　貞・池田宏	1969	信濃川中流域における段丘面の変位	地理学評論	42	10	623-631
130	宮内崇裕・武田大典	2004	長野盆地西縁断層帯北部，飯山盆地周辺の断層変位地形と第四紀後期の発達過程	活断層研究	-	24	77-84
131	内藤博夫	1965	新潟県十日町市付近の地形－魚沼地方の地形発達史についての若干の考察	地理学評論	-	38	613-629
132	信濃川段丘研究グループ	1970	新潟県十日町附近の河岸段丘について－新潟県の第四系その 13－	新潟大学教育学部高田分校研究紀要（新潟大学教育学部高田分校）	-	15	303-320
133	信濃川ネオテクトニクス団体研究グループ	2002	信濃川津南地域における第四紀後期の段丘形成と構造運動	第四紀研究	41	3	199-212
134	信濃川ネオテクトニクス団体研究グループ	2003	河成段丘面の高度分布に基づく信濃川中流域の第四紀末期の活構造運動	地球科学	57	-	273-287
135	信濃川ネオテクトニクス研究団体グループ	2002	信濃川中流域の活構造運動と段丘形成	日本地質学会第 109 年学術大会　見学旅行案内書　第６班	-	-	-

表９　収集した文献一覧（その９）

No	著者	発行年	タイトル	誌名・書籍名	巻	号	ページ
136	鈴木毅彦	1996	CB-2 信濃川中流域に分布する河成段丘とそれを覆う風成テフラ-谷上段丘と 350Ka 以降の風成層-	第四紀露頭集-日本のテフラ（日本第四紀学会）	-	-	225-225
137	田中真弓	2000	信濃川中流域，十日町盆地における河成段丘の変位からみた活褶曲と活断層の関係	第四紀研究	39	5	411-426
138	若林優子・金　幸隆・吾妻　崇	2000	十日町盆地，信濃川左岸に発達する河成段丘面の編年	月刊地球	22	10	706-710
139	渡辺秀男・卜部厚志・荒川勝利	1999	新潟県津南町地域の貝坂段丘堆積物中の広域火山灰	地球科学	53	6	420-433
140	新井房夫	1962	関東盆地北西部地域の第四紀編年	群馬大学紀要自然科学編	-	10	1-79
141	守屋以智雄	1966	吾妻川流域の地形発達	地理学評論	-	39	51-62
142	中山茂樹	1978	碓氷川流域の河岸段丘	駒沢地理（駒沢大学文学部地理学教室）	-	14	245-252
143	利渉幾多郎	2001	ノッチの形成史から復元される古水文史－長野県千曲川上流，北相木川のノッチと段丘を例に－	第四紀（第四紀総合研究会）	-	33	105-123
144	関根　清・大川幹雄・渋谷義之・小鷹兼博	1970	砥川の地形	地域研究（立正地理学会）	13	-	21-30
145	竹本弘幸・米沢宏・由井将雄・小池一之	1987	中之条湖成層の層序とフィッション・トラック年代	駒沢地理	-	23	93-105
146	海野芳聖・大井信三・黒木貴一・坂井尚登	1992	群馬県南西部，神流川流域における火山灰層序について	地理調査部研究報告（国土地理院技術資料 D・1-No.308）	-	8	196-204
147	渡辺秀男　卜部厚志	2003	十日町盆地北西部の河成段丘の編年と隆起運動	地球科学	58	-	171-191
148	山口一俊	1975	中之条盆地とその周辺の地形	駒澤大学大学院地理学研究	-	5	28-39
149	米澤　宏・岡田武幸・由井将雄・竹本弘幸・丸山三美	1984	中之条盆地のテフラ-とくに中之条湖成層の年代について-	関東平野	-	1	2-5
150	吉田英嗣・須貝俊彦	2004	P728 中之条盆地における中之条泥流の堆積と段丘地形発達	日本地理学会発表要旨集	-	65	213
151	花井重次	1927	桂川沿岸の地形及び河岸段丘の研究（一）（二）（三）	地理学評論	3	3	173-189 308-326 420-430
152	平川一臣	1981	山梨県の地形に関する資料（II）鳳凰山・青木鉱泉付近の地形	山梨大学教育学部研究報告	-	32	89-96

表 10　収集した文献一覧（その１０）

No	著者	発行年	タイトル	誌名・書籍名	巻	号	ページ
153	平川一臣	1996	CB-11 山梨県甲斐駒ヶ岳北東麓神宮川の河成礫層とテフラ	第四紀露頭集－日本のテフラ（日本第四紀学会）	-	-	235-235
154	神沢公男・平川一臣	2000	南アルプス仙丈ケ岳・藪沢の最終氷期の氷河作用と堆積段丘	地理学評論	73A	-	124-136
155	町田　洋・松島義章・今永　勇	1975	富士山東麓駿河小山付近の第四系-とくに古地理の変遷と神縄断層の変動について-	第四紀研究	-	14	77-89
156	町田瑞男・磯田亮洋	1983	関東平野西縁，秩父盆地の第四紀地史	埼玉県立自然史博物館研究報告	19	1	51-66
157	松島信幸	2001	南アルプス北部，三峰川沿いの更新世後半（海洋酸素同位体ステージ6以降）の造地形史	飯田市美術博物館研究紀要（飯田市美術博物館）	-	11	79-96
158	百瀬　貢・駒澤大学自然地理学研究会	1981	千曲川最上流部の河岸段丘	駒澤大学大学院地理学研究	-	11	1-12
159	中沢紀枝・今泉俊文	2001	荒川（山梨県）沿いの河岸段丘地形	山梨大学教育人間科学部紀要	3	1	50-56
160	大貫靖浩	1989	725 多摩川中流部青梅市西郊の旧埋積谷堆積物	日本地理学会予稿集	-	36	228-229
161	大貫靖浩	1990	121 多摩川中・上流部の段丘地形	日本地理学会予稿集	-	37	42-43
162	相模原地形・地質調査会	1986	相模原の地形・地質　調査報告書（第 3 報）	―	-	-	95
163	澤　祥	1981	甲府盆地西縁・南縁の活断層	地理学評論	54	-	473-492
164	渋谷　紘	1983	秩父山地の火山灰層について	埼玉県立自然史博物館研究報告	1	-	67-74
165	田力正好	2002	糸魚川－静岡構造線活断層系南部，白州－韮崎付近の活構造と第四紀の活動史	活断層研究	-	21	33-49
166	内山美恵子・金川美幸・武智国加	1998	19 長野県千曲川上流域に分布する河岸段丘	日本地質学会第 105 年学術大会講演要旨	-	-	11
167	柳田　誠・百瀬貢・大熊良章	1982	荒川の河岸段丘	駒沢大学大学院地理学研究	-	12	3-13
168	吉永秀一郎・宮寺正美	1986	荒川中流域における下位段丘の形成過程	第四紀研究	25	3	187-201
169	北里　洋・新井房夫	1986	有度丘陵，小鹿層に挟在する On-Pm I テフラ	静岡大学地球科学研究報告	6	-	245-249
170	近藤康生	1985	静岡県有度丘陵の上部更新統の層序	地質学雑誌	91	-	121-140
171	佐藤正典	1983	狩野川の河岸段丘	静岡地学（静岡県地学会）	-	48	8-11
172	杉山雄一・下川浩一	1982	静岡県庵原地域の地質構造と入山断層系	地質調査所月報	33	6	293-320

表 11　収集した文献一覧（その１１）

No	著者	発行年	タイトル	誌名・書籍名	巻	号	ページ
173	山崎晴男・坂本亨・秦　光男・倉沢　一・垣見俊弘・羽田野誠一・町田　洋・大八木規夫	1981	駿河湾北岸部における活断層の地質学的研究	東海地域の地震予知に関する総合研究報告書（科学技術庁）	-	-	177-207
174	藤木忠美	1974	北海道主部における最終氷期の河川地形変動	第四紀研究	12	-	211-222
175	貝塚爽平・鈴木毅彦	1992	1.　関東の地形と地質＜地盤の生い立ち＞　1.2　関東ロームと富士山	土と基礎	40	3	9-14
176	竹本弘幸	1991	大山倉吉軽石層とこれにまつわる諸問題	駒沢地理	-	27	131-150
177	田中和弘・遠田晋次・上田圭一・千木良雅弘	1997	我が国の地質環境の長期的変動特性評価(その 2)―隆起・沈降特性評価手法の提案と適用性検討―	電力中央研究所報告 U96028	-	-	1-25
178	若生達夫	1964	東北日本における地形面と赤色風化殻との関係	第四紀研究	-	3	197-221
179	八木浩司・早田勉	1989	宮城県中部および北部に分布する後期更新世広域テフラとその層位	地学雑誌	98	5	39-53

参考文献

濱田崇臣, 幡谷竜太, 河成段丘を用いた内陸部隆起量評価手法の適用性の検討～経験的指標を重視したアプローチ～（本編及び別冊付録）, 電力中央研究所報告（研究報告）, N10050, 2011.