

2.2.2 阿蘇カルデラ噴出物の実験岩石学的検討

【実施内容】

火山噴火前においてマグマ溜まりの条件を決めることは、マグマの化学進化を考える上で基礎的な情報となると共に、地球物理学的観測と比較するための重要なテーマとなる。岩石学的にマグマ溜まりの条件を決めるために、斑晶鉱物同士やそれらとメルトとの平衡を考え、実験を基に定式化された熱力学的な関係から温度や圧力などを求めることが行われる。しかし、あらゆる組成・温度・圧力範囲で定式化することは難しく、それゆえ高温高压条件下で平衡実験を行いマグマ溜まりを再現することは非常に有力な手法である。阿蘇火山は日本で最大級のカルデラを持ち、過去4回大規模カルデラ噴火を引き起こしていることから、今後の噴火予測をすることは人間社会に対して急務であると言える。阿蘇火山における最新の大規模カルデラ噴火である阿蘇4のマグマ供給系を理解するために過去様々な研究が行われてきた。特に重要な研究が Kaneko et al.(2007)であり、彼らは阿蘇4噴出物に対し系統的な岩石学的研究を行い、阿蘇4のマグマ溜まりは珩長質なマグマと苦鉄質なマグマの成層構造であることを議論した。斑晶鉱物の平衡関係(鉄チタン鉱物・斜長石-メルト・斜方輝石-単斜輝石・角閃石-斜長石)を使い、珩長質なマグマに対し温度を830~900°C、含水量を4~6wt.%と見積もったが、種々の観測と比較する上で重要なパラメータである圧力を決定できていない。産総研(2017,2018)で阿蘇4の珩長質端成分を対象に高温高压実験が実施された。斑晶組み合わせや斑晶組成を再現するような温度圧力含水量条件は、およそ900°C, 300MPaかさらに低圧、全岩でおよそ1.5以上3wt.% H₂O以下だと制約された。本研究では、噴火長期予測に活かすために阿蘇火山の最初の大規模カルデラ噴火である阿蘇1に注目する。阿蘇1噴火時のマグマ供給系を理解することは、阿蘇火山におけるマグマ供給系の初期状態を理解することに繋がり、マグマ供給系の進化の議論に大いに役立つことが期待される。産総研(2015)で行われた阿蘇1噴出物を用いた結晶分化モデル計算結果では、マグマ溜まりが500~700MPaである可能性が示された。産総研(2016)で行われた阿蘇1火砕流堆積物基底部石基ガラスを用いた高温高压実験では先の結晶分化モデル計算結果と矛盾はない結果が得られたが、圧力や含水量を制約するに至っていない。本研究では、高温高压実験における全岩含水量を実験条件として広く振り、酸化還元状態を制御してマグマ溜まりの温度・圧力・含水量条件の決定を目指す。

【研究成果】

1) 出発物質

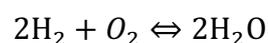
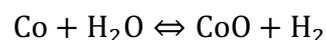
阿蘇1火砕流堆積物の基底部(産総研 2015)から採取された噴出物組成(Aso2014a-A)を再現するように試薬から均質なガラスを作成し、実験で用いる出発物質とした。産総研(2015)は阿蘇1火砕流堆積物の基底部(非溶結)をAso2014a-A, 阿蘇1その前駆的噴出物を下位からAso2014a-B, C, D, Eとし、それらの石基ガラスや斑晶を分離した後に樹脂に埋め込み、岩石学的記載が行われた。その結果、すべての層で斑晶として斜長石, 斜方輝石, 単斜輝石, 磁鉄鉱, イルメナイトが確認された。斜長石斑晶はほとんどがAn₄₅~60の範囲に収まり、Aso2014a-AにおいてはピークがおよそAn₅₂でかつ頻度分布がユニモーダルである。斜方輝石はMg#65前後の狭い範囲に入るが、単斜輝石はMg#68-80までと非常に広い範囲をとる。斜方輝石はマグマ溜まり中で平

衡であったが、単斜輝石は噴火の過程で非平衡に混ざった可能性があり、メルト包有物の組成分布結果からも支持される。石基ガラス組成は SiO_2 で 69 wt.% とどの層においても非常に均質である。鉄チタン鉱物(磁鉄鉱・イルメナイト)間の平衡を利用した温度・酸素雰囲気計(Lepage 2003; Andersen and Lindsley 1985)を適用すると、温度は $885 \pm 25^\circ\text{C}$ 程度、酸素雰囲気が FMQ+0.2 (ログユニット)と求められた。本研究では阿蘇 1 石基ガラスと平衡に共存していた斜長石・斜方輝石がどのような温度・圧力条件下で蓄積していたかを議論するために、Aso2014a-A 中に含まれる石基ガラス組成を用いた高温高压実験を行った。

Aso2014a-A の石基ガラス組成を電子線マイクロプローブで分析した結果を表 2.2.2-1 で示す。石基ガラス組成はどれも均質であり、全岩組成は SiO_2 で 68 wt.% をとる。産総研(2017,2018)で行った阿蘇 4 珪長質端成分マグマの高温高压実験で用いた軽石(KJ5665)組成よりも SiO_2 に乏しく K_2O , FeO に有意に富む。本研究では、より理想的な平衡状態を実験で達成するために、この石基ガラス組成を持つ含水ガラスを試薬から合成した。用いた試薬は SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO_2 , MgO , CaCO_3 , Na_2CO_3 , K_2CO_3 , P_2O_5 であり、 P_2O_5 を除きあらかじめ強熱させ附着水を除去した(炭酸塩は 600°C , その他は 1000°C)。これらを秤量した後メノウ乳鉢でエタノールを用いて混合・細粒化し、Pt りつぽに入れ H_2 - CO_2 混合ガス下(酸素雰囲気は MW バッファ程度)で 900°C で 15 時間加熱し、炭酸塩を分解させた。その後、大気雰囲気 1200°C で 2 時間加熱しガラス化させた。このガラスを再度メノウ乳鉢で粉末化し、 900°C , MW バッファ程度で粉末を還元させた。この還元させた粉末を、 $8.0 \sim 7.6\text{mm}\phi$ 金パラジウム合金パイプ(Au80Pd20)に水とともに封入し、内熱式ガス圧装置を用いた高温高压下で全溶解させ、それらを急冷回収して粗く砕いたものを実験の出発物質として用いた(表 2.2.2-1)。

2) 高温高压実験

阿蘇 1 石基ガラス組成から斑晶組成・組み合わせを再現する温度・圧力・含水量の条件を決定するために、産業技術総合研究所に設置された内熱式ガス圧装置(SMC5000(最高圧力 490MPa), HARM200(最高圧力 196MPa))を用いて高温高压実験を行った。これらの装置は産総研(2016, 2017)で概要が報告されている。これらの装置はアルゴンガスを圧縮することで高压を発生させる装置で、また急冷機構を備えているため実験試料を回収後に各出現相やメルト(ガラス)を容易に測定できる。圧力容器内は鉄チタン鉱物による酸素雰囲気計により NNO+3~4 ほどであると見積もられており(Tatsumi and Suzuki, 2009), 阿蘇 1 火砕流基底部分・前駆噴火噴出物中の斑晶組成から見積もられた QFM+0.2 (NNO-0.4)よりも高いことから、実験中は酸素雰囲気をバッファ材を入れることで制御することが必要となる。本研究では、産総研(2017, 2018)で使用したカプセル構成とほぼ同じであるが、水素センサーは同時封入していない。酸素雰囲気は、以下の反応式により水素を介して制御を行う。



Co-CoO バッファは、FMQ(Fayalite-Magnetite-Quartz)バッファよりも酸素雰囲気が 1 log unit ほど低く、さらに NNO(Ni-NiO)バッファより 1.6 log unit ほど低い。アウターカプセルは水素透過率の乏しい金(Chou 1986)を用い、アウターカプセル内の水素を閉じ込めることにより

酸素雰囲気制御した。低温実験(900°C 以下)において、ガラスを出発物質とすると結晶核が非常に多くなる傾向があり、分析の難しいサイズの結晶で溢れることが多い。あらかじめ高温(950°C)でプレヒートして結晶数密度を抑えておいた状態から実験温度に下げることによって少ない数密度の結晶を大きく成長させ、分析をやすくした。

3) 分析手法

出発物質の均質性チェックや実験生成物の組織観察、化学組成分析は産総研設置の電子線マイクロプローブ(JEOL JXA-8530F plus)を用いた。電子線マイクロプローブの測定条件は産総研(2018)とほぼ同じである。5 μ m よりも小さい結晶を除き、加速電圧 15kV, 10nA, ビーム径 2 μ m にややデフォーカスして行った。5 μ m よりも小さい結晶(特に斜長石)は、試料の電子線による励起領域を狭めるため、また電子線をより絞るために 10kV, 6nA, defocused beam で測定した。ガラス分析時は 15kV, 10nA, ビーム径 20 μ m で行った。10 元素(Si, Ti, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K, P)をピーク位置で 20 秒, バックグラウンド位置で 10 秒を標準値として測定したが、結晶種類により濃度の乏しい元素(およそ 1wt.%以下 : Ti, Mn, Fe, Mg, P)はカウント数を稼ぐためにピーク位置で 40~60 秒, バックグラウンド位置で 20~30 秒測定した。Na のみ、電子線を照射することによる Na ロスの影響を考慮し、各分析において最初に 10 秒(バックグラウンドは 5 秒)で測定した。

表 2.2.2-1 Aso-1 石基ガラス組成融解実験における出発物質組成 (含水ガラスと石基ガラス組成)

Capsule #	CG204	CG205	CG206	Aso-1 2014a-A glass	Aso-4 KJ5665 whole-rock (XRF)	Aso-4 MY5774 whole-rock (XRF)
Run #	G246	G247	HG565			
P(MPa)	194	196	400			
T(°C)	1250	1300	1250			
run duration(h)	8	2	1			
Capsule	Au80Pd20	Au80Pd20	Au80Pd20			
n	24	35	32	21		
(wt.%)						
SiO ₂	64.41	68.25	67.64	68.24	66.84	70.50
TiO ₂	0.61	0.65	0.63	0.63	0.64	0.49
Al ₂ O ₃	14.60	15.47	15.41	15.54	15.38	15.62
FeO	3.70	3.92	3.80	3.83	3.44	2.00
MnO	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.11
MgO	0.59	0.62	0.64	0.63	0.66	0.50
CaO	1.96	2.08	2.05	2.06	2.03	1.57
Na ₂ O	3.31	3.50	3.48	3.55	3.71	4.37
K ₂ O	4.99	5.29	5.21	5.31	5.50	4.74
P ₂ O ₅	0.15	0.16	0.16	0.15	0.12	0.09
total	94.36	100.00	99.08	100.00	98.38	99.99
H ₂ O(weighed in)	5.70	1.00	3.50			100.00
				1σ	1σ	1σ
				0.23	0.47	0.49
				0.03	0.02	0.09
				0.10	0.08	0.11
				0.12	0.14	0.11
				0.01	0.02	0.03
				0.02	0.02	0.02
				0.02	0.07	0.05
				0.03	0.07	0.06
				0.06	0.17	0.17
				0.04	0.17	0.17
				0.02	0.02	0.02
				100.00	100.00	100.00

表 2.2.2-2 Aso-1 石英ガラス組成融解実験におけるランテンテーパール

Run #	Capsule #	P (MPa)	T (°C)	Run duration (h)	pre-heat (h)	buffer check ¹ (residual phases)	H ₂ O (wt.%) phase ² (bulk)	fO ₂ ³ (ΔNNO)
G249	CG207	195	950	111		CoO	5.7 melt, mt, ilm	3.01
	CG208	195	950	111		CoO	1.0 melt, pl, opx, mt	
	CG209	195	950	111		CoO	3.5 melt, pl, mt, ilm	2.48
G250	CG210	195	900	141		CoO	5.7 melt, mt, ilm	1.78
	CG211	195	900	141		CoO	1.0 melt, pl, opx?, mt?, ilm?	
	CG212	195	900	141		CoO	3.5 melt. pl, opx, mt, ilm	1.36
G251	CG213	195	850	163	1(950°C)	CoO	5.7 melt, bt, mt, ilm,	1.43
	CG214	195	850	163	1(950°C)	CoO	1.0 melt, pl, K-feldspar, mt?, ilm?, opx?	
	CG215	195	850	163	1(950°C)	CoO	3.5 melt, pl, K-feldspar, mt, ilm, opx?	1.5
G252	CG216	195	800	191	1(950°C)	CoO	5.7 melt, pl, bt, ilm	
	CG217	195	800	191	1(950°C)	CoO	1.0 melt, pl, bt, ilm	
	CG218	195	800	191	1(950°C)	CoO	3.5 melt, pl?, K-feldspar, qz, ilm?	

¹ 実験後のカプセル内に存在していた相を記述。酸素雰囲気 Co-CoO で保持されるためには Co, CoO, H₂O の共存が必要。

CoO のみが存在する場合はバツア剤を使い果たしたもの

² melt: melt, pl: plagioclase, K-feldspar: K-feldspar, bt: biotite, opx: orthopyroxene, ilm: ilmenite, qz: quartz

³ 磁鉄鉱・イルメナイト平衡を利用した酸素雰囲気の見積もり (Ghiorso and Evans 2008)

4) 結果・考察

行った全ての実験の Run table を表 2.2.2-2 に、各相の化学組成を表 2.2.2-3 に示す。各実験生成物の反射電子像写真を図 2.2.2-1 に示す。すべての実験生成物は部分熔融し、メルト(ガラス)が存在していた。晶出した結晶種は、斜長石・カリ長石・斜方輝石・黒雲母・石英・磁鉄鉱・イルメナイトである。斜長石は全てのランにおいて自形であり、長辺で 10~20 μm のものが多い。プレヒートを行ったランにおいては、長辺で最大 100 μm まで成長した結晶が見られる。斜長石とカリ長石はしばしば双晶を形成している。斜方輝石は 10 μm 以下の自形の結晶が主に見られるが細長く針状に成長したものも見られる。黒雲母は 5 μm 以下の結晶が主で、電子線マイクロプローブによる分析が難しいほど小さい結晶がしばしば見られる。プレヒートした試料は、長辺で数 10~100 μm 以上の長さを持つ黒雲母結晶が見られる。磁鉄鉱・イルメナイトは 5 μm 以下の自形の結晶として晶出するが、これも黒雲母と同様に分析が難しいものが多い。プレヒートした試料は最大 30 μm ほどに成長するが、カプセルの縁に接触しているものがほとんどである。石英は最大 10 μm の自形のものほとんどで、含水量 1.0wt.%の実験生成物でのみ確認された。表 2.2.2-3 で示された各相の化学組成分析値は、測定対象となる結晶(黒雲母・磁鉄鉱・イルメナイト)が小さい(<5 μm)のために周囲のガラスを分析時に引っかけて測定してしまったものも含まれている。

相平衡図

195MPa における実験生成物の相関係を図 2.2.2-2 における実線で示す。シリケート鉱物のリキダス相は、含水量 3.5wt.%の実験生成物においては斜長石、含水量 5.7wt.%の実験生成物においては黒雲母であった。斜長石・斜方輝石は全岩の含水量が増えるに従って晶出温度が急激に低下する一方、黒雲母は高含水量条件下で 850°C 以下の実験生成物で晶出した。石英・カリ長石は低含水量かつ低温の実験生成物にのみ晶出した。斜方輝石と黒雲母は反応関係にあることから、斜方輝石と黒雲母が共存した実験生成物は確認されていない。

結晶の組成

実験生成物の斜長石の組成を相平衡図と合わせて図 2.2.2-2 に各実験点シンボル脇に An 値(=Ca/(Ca+Na+K))として示した。グレーの領域は鉄チタン鉱物斑晶組成から求めたの平衡温度(産総研 2015)を示す。産総研(2017, 2018)の Aso-4 珪長質端成分マグマに対する実験結果と同様に、実験で晶出した斜長石組成は全岩の含水量が増えるに従って Anorthite(An)成分が上昇する傾向がある。低含水量(1wt.% H₂O)の実験で晶出した斜長石は総じて An 値が低く、An30 以下である一方、高含水量(5.7wt.% H₂O)の実験では 800°C でのみ晶出し、温度が低いこともあって含水量が高いにもかかわらず An41.3 である。含水量 3.5wt.%H₂O の実験で晶出した斜長石が最も An 値が高い(An49.9)。斜方輝石組成に着目すると、本研究で精度良く斜方輝石を測定できたのは CG208, CG212(それぞれ Mg#は 61.0, 64.8)であり、斑晶斜方輝石組成(およそ Mg#65)と近い値をとる。磁鉄鉱・イルメナイトが共存していたランにおいては、磁鉄鉱・イルメナイト酸素雰囲気計(Ghiorso and Evans 2008)で酸素雰囲気求めた(表 2.2.2-2)ところ、G249, G250, G251 と Co-CoO バッファよりも酸化的(NNO+1.4~3)な結果が得られた。これは、実験中にバッファ剤として加えた Co 粉末がすべて CoO に反応してしまい、バッファが保てなかったことに由来する。

G252 の実験生成物のみマグネタイトを確認できず、酸素雰囲気を見積もられなかった。ただし、晶出したイルメナイトの組成は他のランで晶出したイルメナイトよりも明らかに Ti に富み、Ti が高いイルメナイトは還元的環境下で生成されることから G252 は他のランと比べて還元的であったと予想できる。

阿蘇 1 珪長質端成分の噴火前マグマ溜まり条件

本研究により阿蘇 1 火砕流基底部の石基ガラス組成の 195MPa における相平衡図を得た。石基ガラスがマグマ溜まり中におけるメルト組成を代表していると考え、このメルトはマグマ溜まりにおいて斑晶(主に斜長石・斜方輝石)と平衡共存し、メルトはこれら斑晶に飽和していたことを意味する(ただし、単斜輝石斑晶は斜方輝石斑晶と非平衡であるものが多いことから対象に含めない)。つまり、メルト組成を出発物質にして高温高压実験をする際にこれら斑晶として存在した結晶がリキダス付近で同時に飽和する条件を温度・圧力・含水量といったパラメータを振って探せば良い。図 2.2.2-2 によると、高含水量条件(およそ 5wt.% H₂O 以上)を除けば斜長石がリキダス相として晶出した。斜方輝石は今回実験を行った条件においては常に斜長石よりも低温で晶出を始めることから、斜長石・斜方輝石が同時に晶出を始める条件(相平衡図においては斜長石と斜方輝石のリキダスラインが交差する点)が存在しない。しかし、高压になればなるほど斜方輝石の晶出温度が上昇するが、斜長石の晶出温度はほとんど変化が無い(例: Aso-4 (産総研 2017, 2018), Yellowstone (Almeev et al. 2012), MELTS(Ghiorso and Sack 1995; Gualda et al. 2012): 図 2.2.2-3)ことから、本研究により行った 195MPa という実験圧力よりもさらに高压では斜長石と斜方輝石の晶出温度が逆転することが予想される。以上の議論を前提に、斜長石の晶出温度に関して圧力変化に乏しいこと、斜長石は Fe をほとんど含まないため晶出温度の酸素雰囲気依存がほとんどないことを利用すると、斜長石を用いたマグマ溜まりの条件の議論をすることが可能である。鉄チタン鉱物温度計により見積もられた温度(産総研 2015)が 885±25°C 程度であることから、この温度範囲で斜長石がリキダス相として晶出するために必要な水は、およそ 4~5wt.% H₂O であることがわかる。

阿蘇火山マグマ供給系の進化

本研究とこれまで阿蘇 4 珪長質マグマに対して行われた実験岩石学的研究(産総研 2017, 2018)を総合すると、図 2.2.2-4 のような進化モデルを考えることが出来る。阿蘇 1 は阿蘇火山において最初の大規模噴火であり、マグマ供給系の進化を考える上での初期状態と見なせる。本研究により阿蘇 1 の珪長質マグマ溜まりはおよそ 200MPa よりも深いということがわかった。この結果は産総研(2015)において結晶分化モデル計算により推定された圧力(500-700MPa)と矛盾しない。阿蘇 1 に対して最新の大規模カルデラ噴火である阿蘇 4 は、珪長質端成分マグマに対して行われた高温高压実験により、圧力で 300MPa 以下であると求められた。これらの結果より、阿蘇火山は大規模噴火を繰り返す過程で、マグマ溜まりの圧力(深さ)が減少していく可能性が示唆される。最近の地球物理学的観測によると、阿蘇 4 のマグマ溜まりの深さと同じ深さにマグマが溜まりつつあるという結果が得られている。しかし、Hata et al.(2016)で見られるような低比抵抗異常はカルデラ全域をカバーしているわけではないことから、今後の噴火予測のためには体積や熱史の

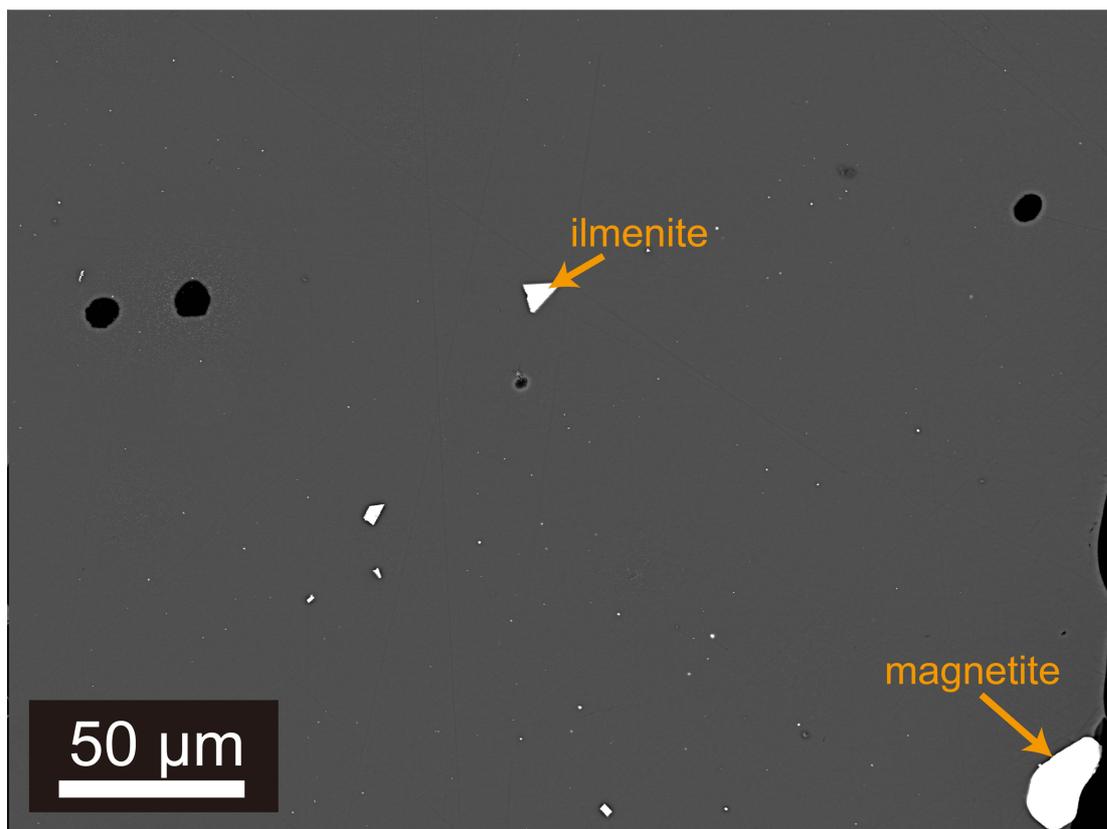


図 2.2.2-1a 195MPa, 950°C, 全岩含水量で 5.7wt.% (CG207, G249)の反射電子像写真

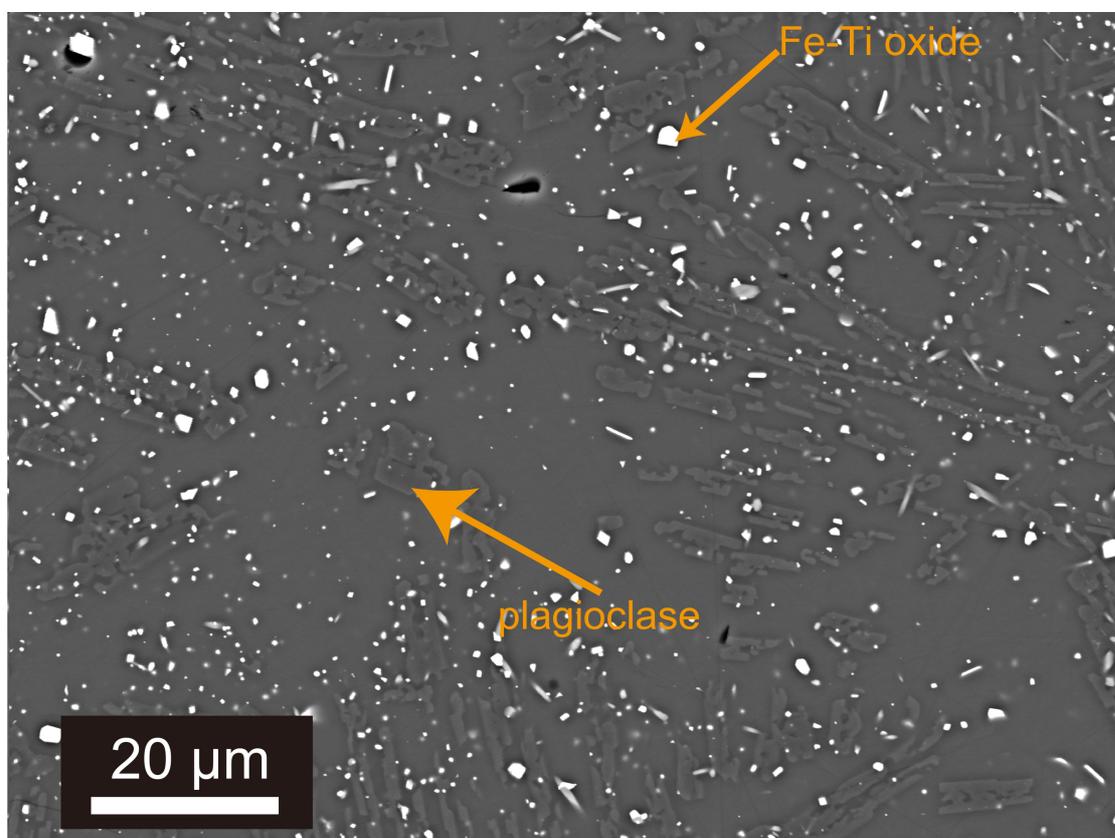


図 2.2.2-1b 100MPa, 950°C, 全岩含水量で 1.0wt.% (CG208, G249)の反射電子像写真

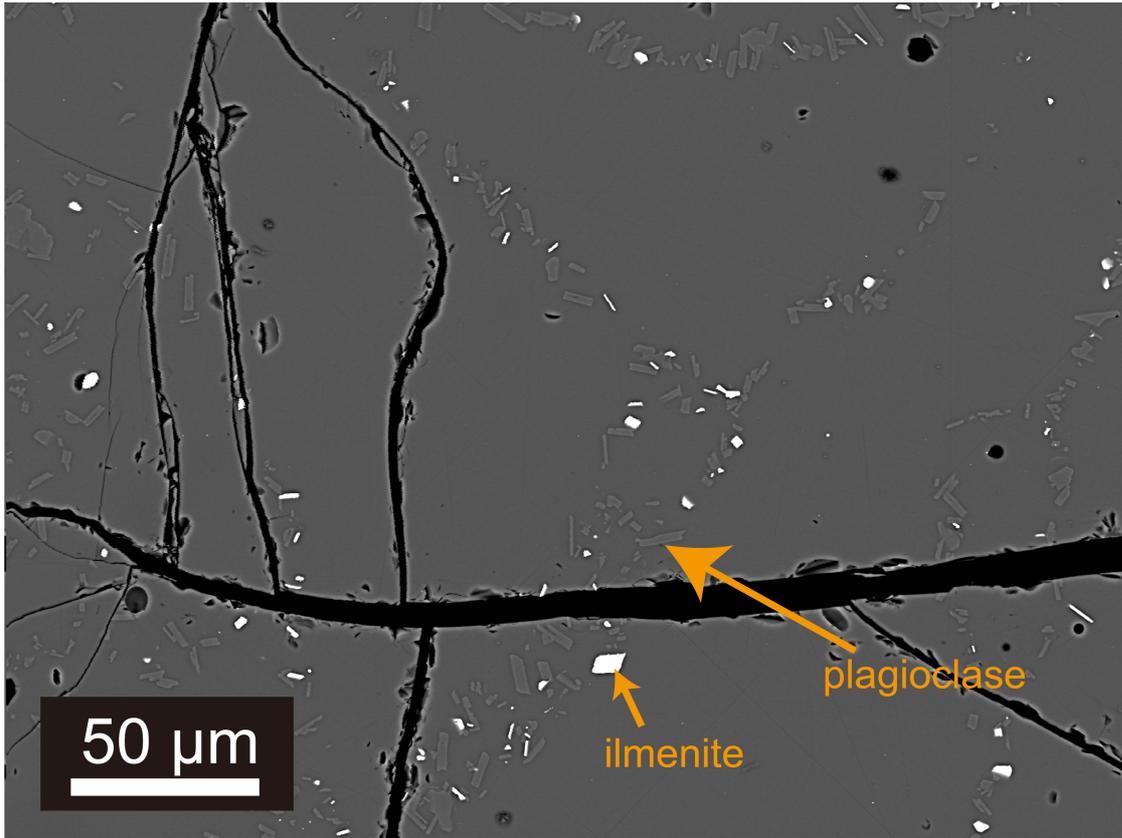


図 2.2.2-1c 195MPa, 950°C, 全岩含水量で 3.5wt.% (CG209, G249)の反射電子像写真

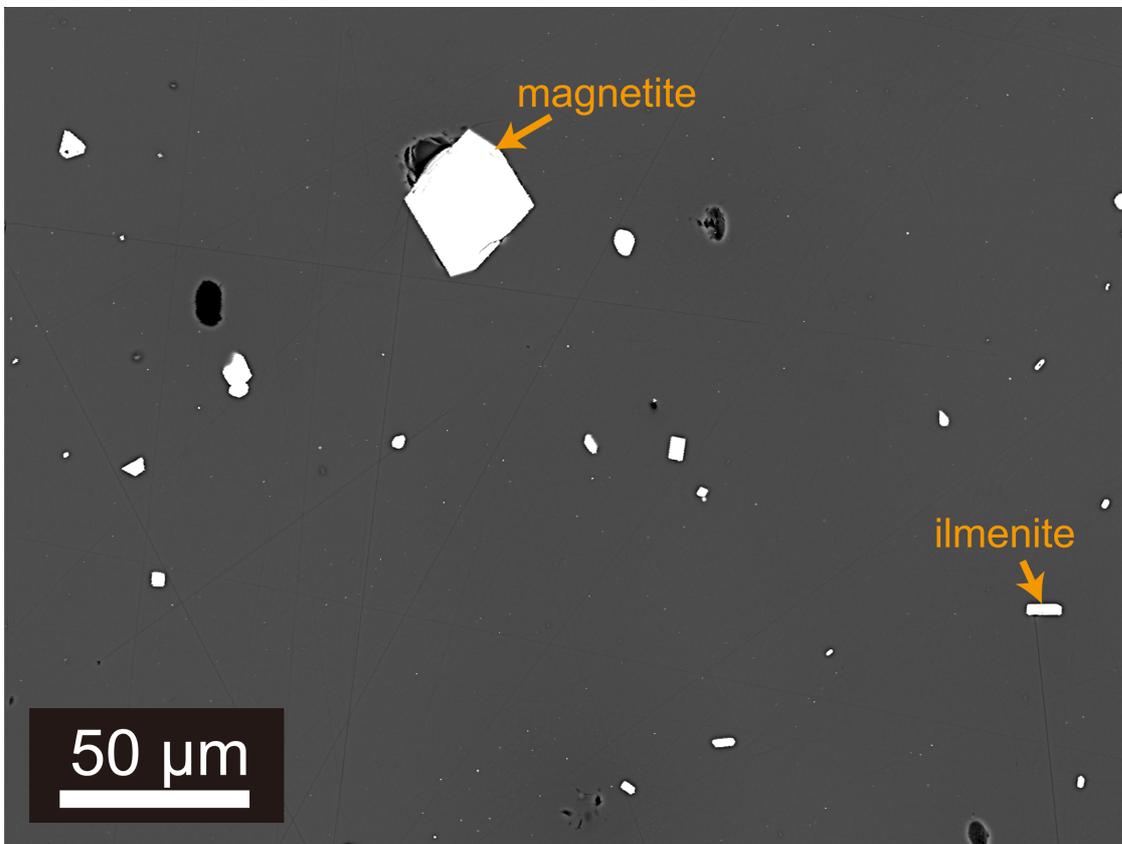


図 2.2.2-1d 195MPa, 900°C, 全岩含水量で 5.7wt.% (CG210, G250)の反射電子像写真

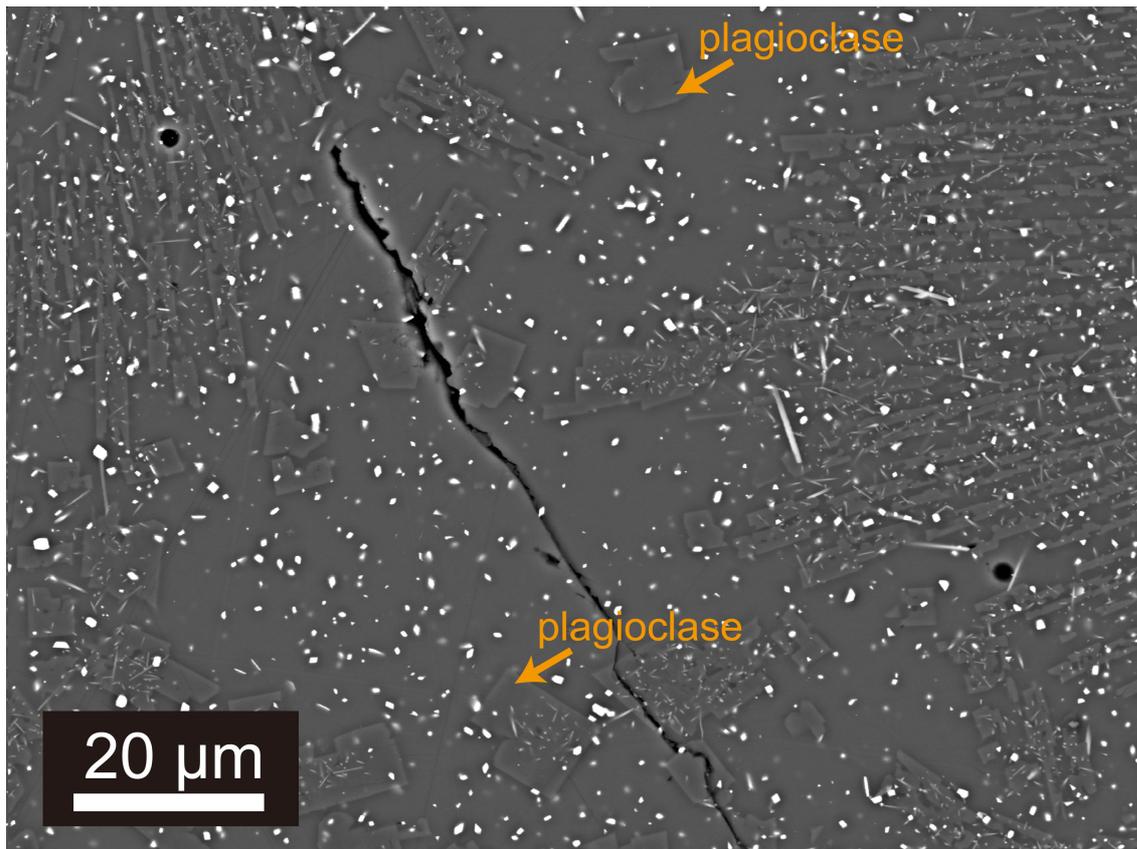


図 2.2.2-1e 195MPa, 900°C, 全岩含水量で 1.0wt.% (CG211, G250)の反射電子像写真

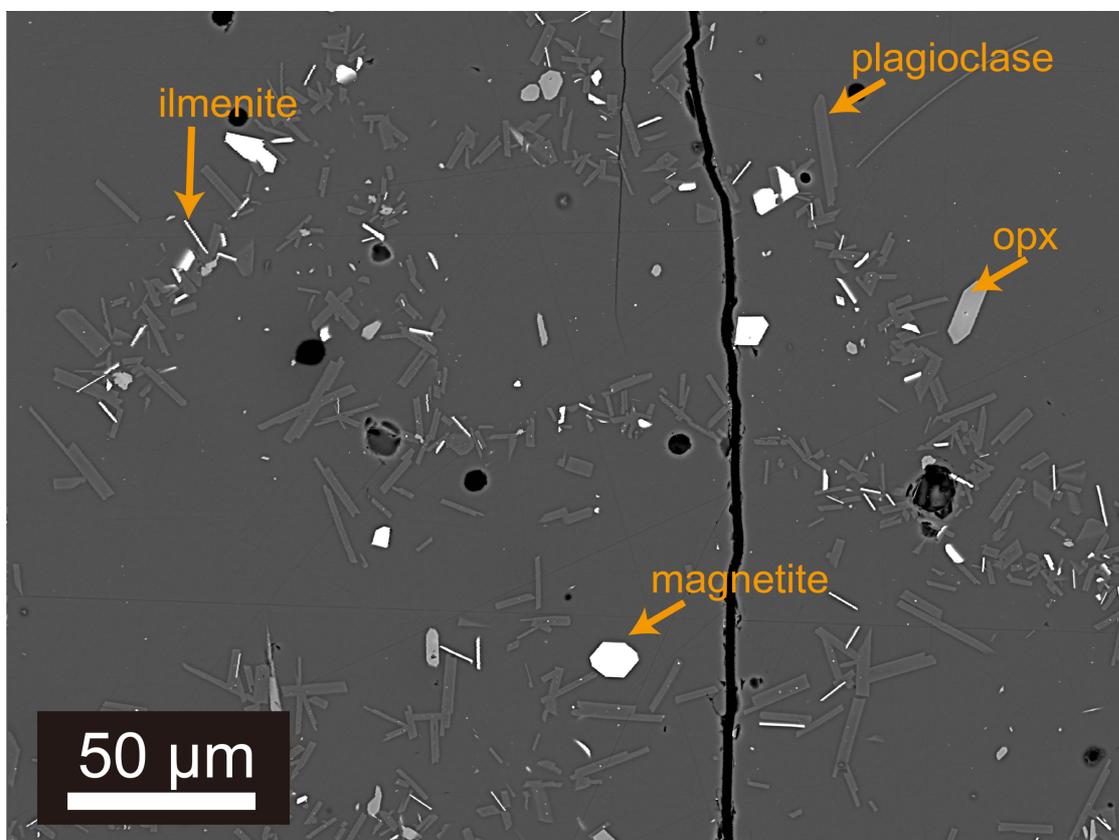


図 2.2.2-1f 195MPa, 900°C, 全岩含水量で 3.5wt.% (CG212, G250)の反射電子像写真

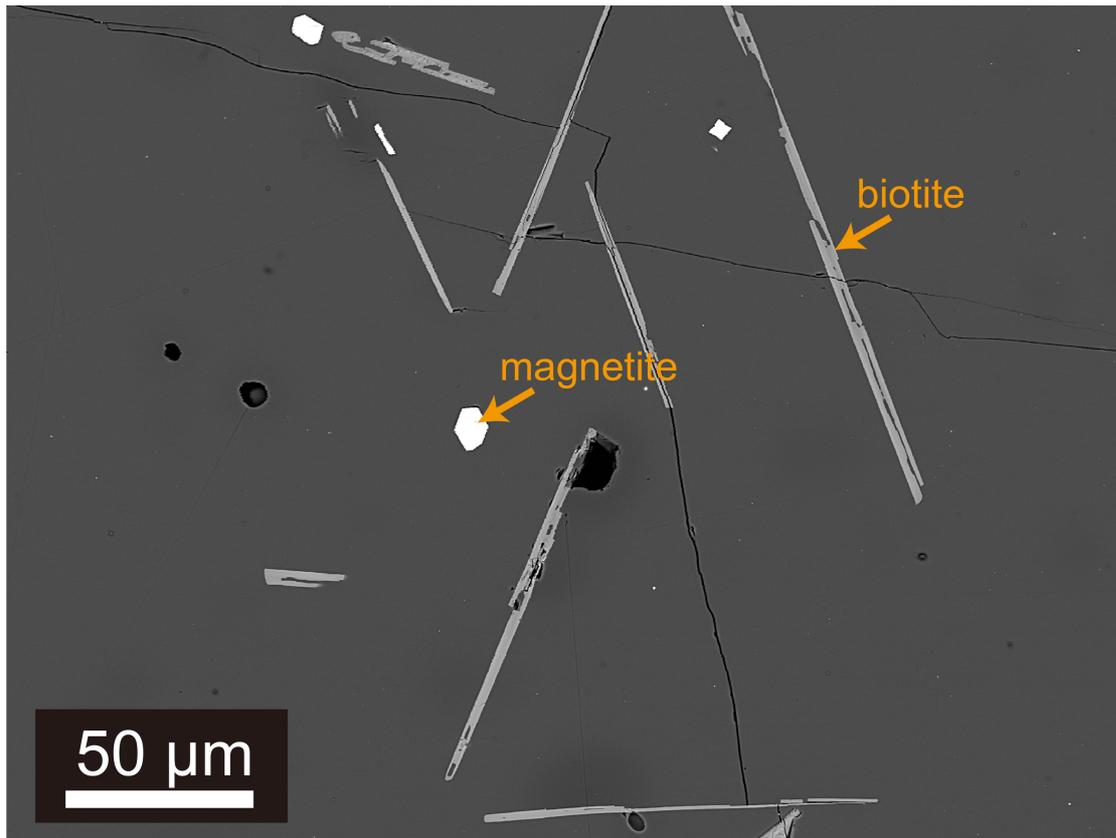


図 2.2.2-1g 195MPa, 850°C, 全岩含水量で 5.7wt.% (CG213, G251)の反射電子像写真

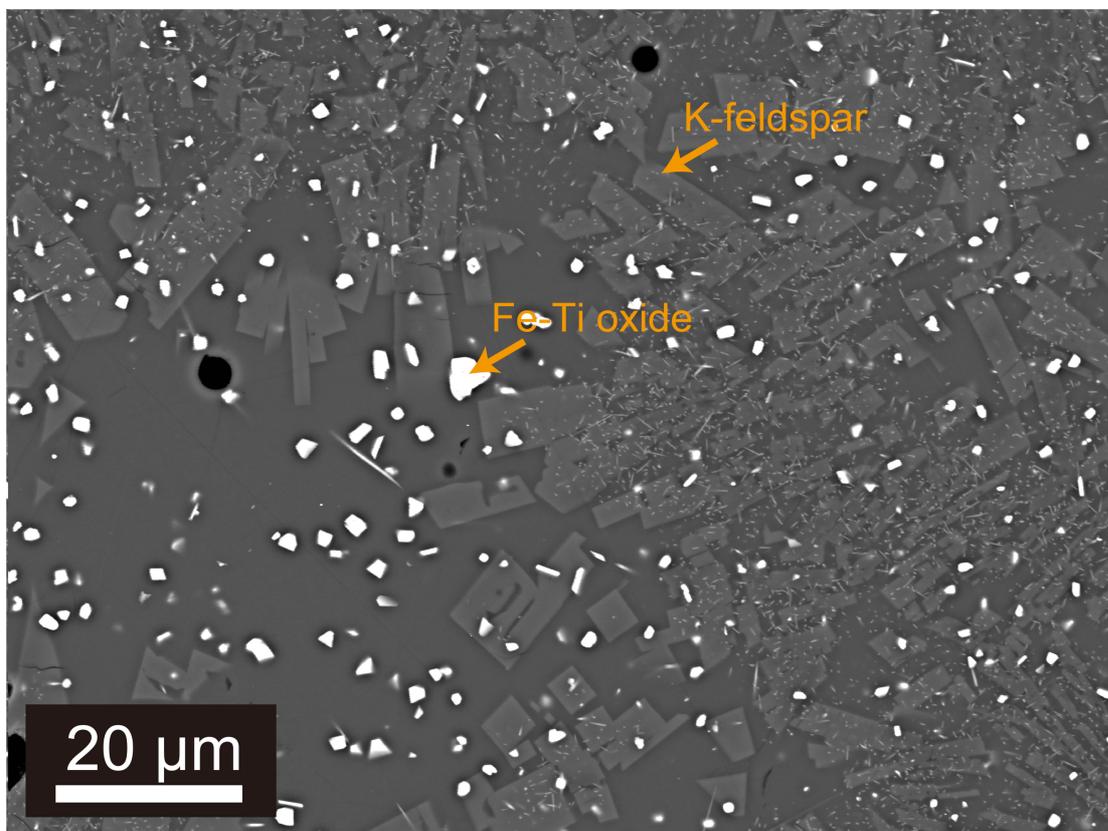


図 2.2.2-1h 195MPa, 850°C, 全岩含水量で 1.0wt.% (CG214, G251)の反射電子像写真