

図 2.2.2-1i 195MPa, 850°C, 全岩含水量で 3.5wt.% (CG215, G251)の反射電子像写真

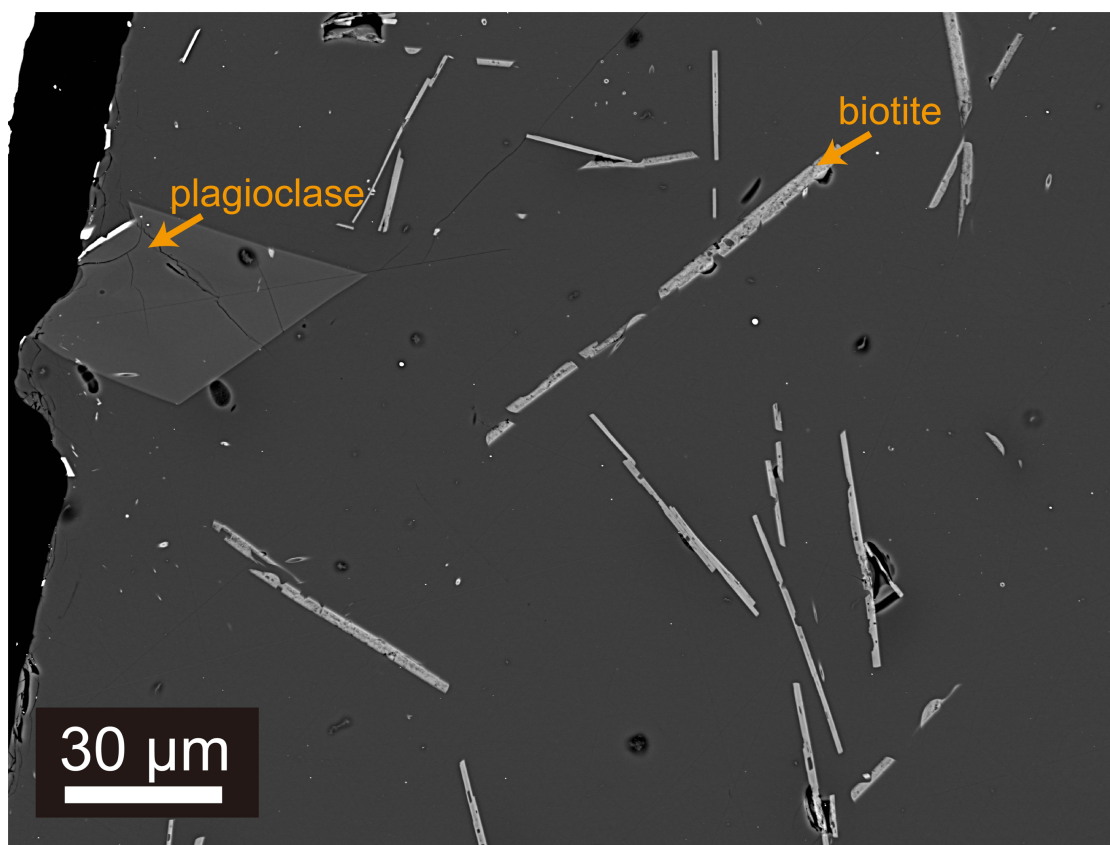


図 2.2.2-1j 195MPa, 800°C, 全岩含水量で 5.7wt.% (CG216, G252)の反射電子像写真

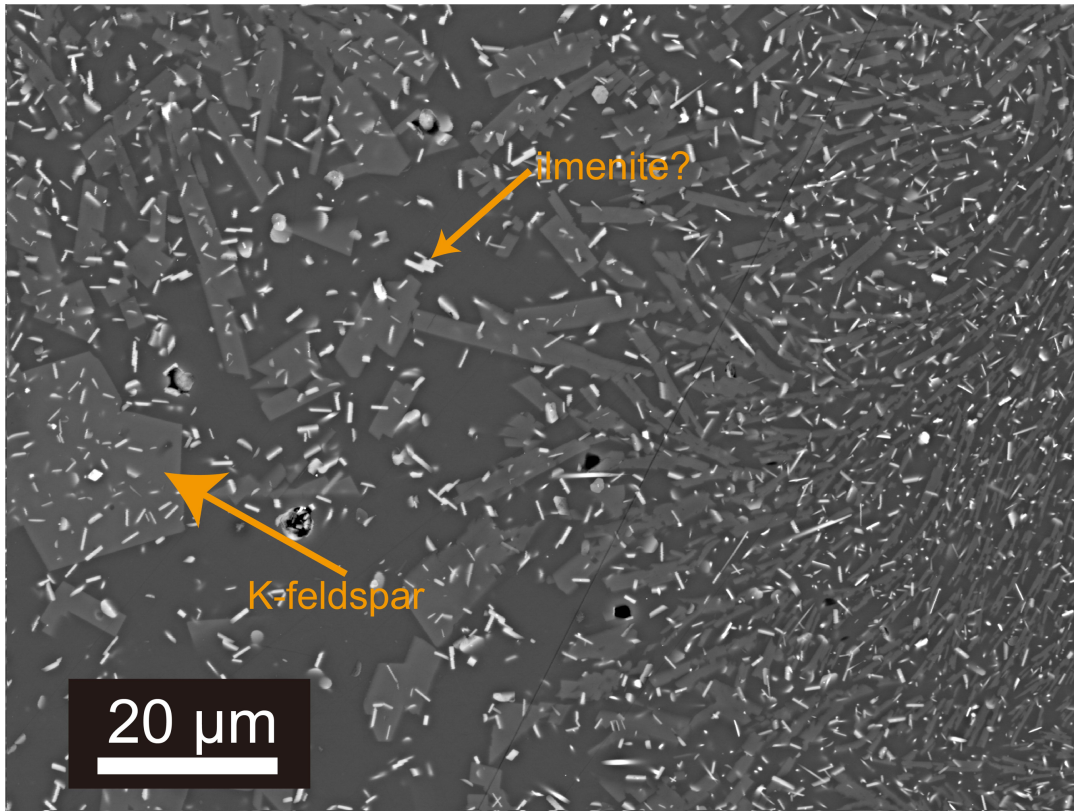


図 2.2.2-1k 195MPa, 800°C, 全岩含水量で 1.0wt.% (CG217, G252)の反射電子像写真

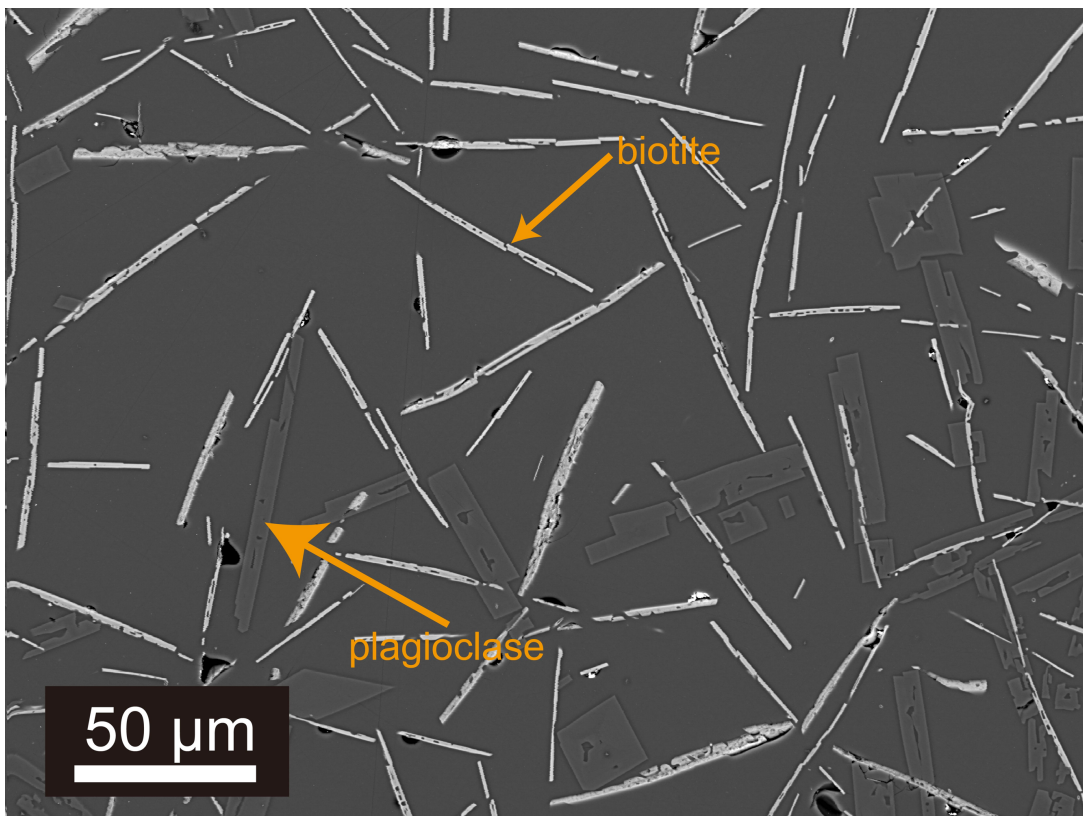


図 2.2.2-1l 195MPa, 800°C, 全岩含水量で 3.5wt.% (CG218, G252)の反射電子像写真

表 2.2.2-3a Aso-1 石基ガラス組成融解実験における各相分析値

| Run# | Capsule# | phase | n | SiO ₂ | TiO ₂ | Al ₂ O ₃ | FeO | MnO | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | P ₂ O ₅ | Total | Mg# (Fe/(Fe+Mg)*100) | An (Ca/(Ca+Na+K)*100) | |
|-------|----------|-------|-------|------------------|------------------|--------------------------------|-------|------|-------|-------|-------------------|------------------|-------------------------------|--------|-------------------------|--------------------------|--|
| G249 | CG207 | glass | 31 | 64.89 | 14.63 | 0.53 | 2.19 | 0.05 | 0.57 | 1.99 | 3.28 | 5.01 | 0.15 | 93.28 | | | |
| | | | 1σ | 0.33 | 0.09 | 0.10 | 0.32 | 0.01 | 0.02 | 0.03 | 0.06 | 0.04 | 0.04 | 0.02 | | | |
| | | | 5 | 0.07 | 2.80 | 3.58 | 86.95 | 0.40 | 2.44 | 0.03 | 0.01 | 0.04 | 0.04 | 0.02 | 96.32 | | |
| | | | 1σ | 0.01 | 0.05 | 0.11 | 0.54 | 0.01 | 0.05 | 0.01 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | | | |
| | | | 7 | 0.10 | 20.69 | 1.10 | 74.74 | 0.14 | 1.31 | 0.05 | 0.03 | 0.09 | 0.04 | 0.04 | 98.28 | | |
| | CG208 | glass | 10 | 73.63 | 0.48 | 13.31 | 1.83 | 0.05 | 0.41 | 0.70 | 2.79 | 6.40 | 0.18 | 99.78 | | | |
| | | | 1σ | 0.49 | 0.05 | 0.10 | 0.11 | 0.01 | 0.12 | 0.03 | 0.07 | 0.07 | 0.02 | | | | |
| | | | 4 | 63.12 | 0.05 | 23.65 | 0.46 | 0.07 | 0.04 | 6.08 | 6.43 | 2.27 | 0.04 | 102.21 | | 29.8 | |
| | | | 1σ | 1.72 | 0.05 | 0.75 | 0.09 | 0.07 | 0.04 | 0.56 | 0.42 | 0.21 | 0.05 | | | | |
| | | | 1 | 57.74 | 0.45 | 3.43 | 22.57 | 0.80 | 19.77 | 0.84 | 0.60 | 0.77 | 0.29 | 107.26 | 61.0 | | |
| G250 | CG209 | glass | 4 | 0.46 | 9.26 | 5.62 | 80.90 | 0.50 | 2.72 | 0.08 | 0.03 | 0.11 | 0.03 | 99.70 | | | |
| | | | 1σ | 0.16 | 0.48 | 0.85 | 0.83 | 0.12 | 0.12 | 0.02 | 0.04 | 0.05 | 0.04 | | | | |
| | | | 11 | 66.88 | 14.71 | 0.51 | 2.01 | 0.06 | 0.57 | 1.81 | 3.34 | 5.23 | 0.15 | 95.26 | | | |
| | | | 1σ | 0.25 | 0.11 | 0.04 | 0.06 | 0.01 | 0.02 | 0.03 | 0.07 | 0.04 | 0.03 | | | | |
| | | | 5 | 57.20 | 0.06 | 28.42 | 0.41 | 0.06 | 0.05 | 10.82 | 5.47 | 0.81 | 0.10 | 103.39 | | 49.9 | |
| | CG210 | glass | 20 | 64.59 | 14.60 | 0.46 | 2.06 | 0.05 | 0.58 | 1.97 | 3.38 | 5.06 | 0.14 | 92.89 | | | |
| | | | 1σ | 0.19 | 0.08 | 0.03 | 0.05 | 0.01 | 0.02 | 0.01 | 0.08 | 0.05 | 0.02 | | | | |
| | | | 7 | 0.08 | 6.07 | 3.08 | 85.31 | 0.41 | 2.16 | 0.03 | 0.02 | 0.04 | 0.01 | 97.21 | | | |
| | | | 1σ | 0.03 | 0.11 | 0.05 | 0.44 | 0.02 | 0.05 | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.01 | | | | |
| | | | 3 | 0.14 | 28.21 | 0.64 | 65.62 | 0.18 | 1.62 | 0.07 | 0.00 | 0.10 | 0.10 | 96.59 | | | |
| CG211 | glass | 9 | 74.15 | 0.35 | 13.13 | 1.60 | 0.05 | 0.24 | 0.54 | 2.54 | 6.71 | 0.19 | 99.50 | | | | |
| | | 1σ | 0.54 | 0.07 | 0.41 | 0.22 | 0.01 | 0.04 | 0.11 | 0.09 | 0.13 | 0.03 | | | | | |
| | | 2 | 61.41 | 0.08 | 22.95 | 0.24 | 0.01 | 0.01 | 5.40 | 6.40 | 3.28 | 0.07 | 99.85 | | 25.9 | | |
| | | 1σ | 0.30 | 0.01 | 0.04 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.25 | 0.32 | 0.44 | 0.04 | | | | | |
| | | 1 | 64.47 | 0.15 | 20.36 | 0.58 | 0.01 | 0.02 | 2.72 | 4.82 | 7.79 | 0.10 | 101.02 | | | | |

表 2.2.2-3b Aso-1 石英ガラス組成融解実験における各相分析値

| Run# | Capsule# | phase | n | SiO ₂ | TiO ₂ | Al ₂ O ₃ | FeO | MnO | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | P ₂ O ₅ | Total | Mg# (Fe/(Fe+Mg)*100) | An (Ca/(Ca+Na+K)*100) | |
|-------|----------|------------|-------|------------------|------------------|--------------------------------|-------|------|-------|------|-------------------|------------------|-------------------------------|--------|-------------------------|--------------------------|------|
| G251 | CG212 | glass | 14 | 67.41 | 14.33 | 0.38 | 1.84 | 0.05 | 0.51 | 1.46 | 3.32 | 5.51 | 0.15 | 94.96 | | | |
| | | | 1σ | 0.34 | 0.14 | 0.06 | 0.04 | 0.01 | 0.03 | 0.03 | 0.07 | 0.04 | 0.04 | 0.02 | | | |
| | | pl | 5 | 57.32 | 0.08 | 26.33 | 0.50 | 0.01 | 0.06 | 0.06 | 9.12 | 5.45 | 1.08 | 0.04 | 99.99 | | 45.0 |
| | | | 1σ | 0.62 | 0.05 | 0.80 | 0.14 | 0.01 | 0.03 | 0.03 | 0.60 | 0.37 | 0.23 | 0.03 | | | |
| | | opx | 5 | 50.98 | 0.33 | 3.23 | 21.81 | 0.66 | 22.48 | 0.75 | 0.03 | 0.04 | 0.05 | 0.02 | 100.34 | 64.8 | |
| | | 1σ | 0.44 | 0.04 | 0.23 | 0.90 | 0.02 | 0.69 | 0.07 | 0.07 | 0.04 | 0.02 | 0.02 | | | | |
| | | mt | 5 | 0.19 | 7.47 | 3.94 | 82.29 | 0.43 | 2.23 | 0.06 | 0.01 | 0.08 | 0.01 | 96.72 | | | |
| | | 1σ | 0.04 | 1.06 | 0.13 | 0.95 | 0.03 | 0.13 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.01 | | | | |
| | | ilm | 1 | 0.14 | 39.82 | 0.59 | 58.48 | 0.41 | 2.82 | 0.01 | 0.16 | 0.19 | 0.00 | 102.61 | | | |
| | | 1σ | 65.92 | 14.77 | 0.39 | 1.52 | 0.05 | 0.40 | 2.02 | 2.02 | 3.37 | 4.95 | 0.15 | 93.53 | | | |
| CG214 | CG213 | glass | 13 | 65.92 | 14.77 | 0.39 | 1.52 | 0.05 | 0.40 | 2.02 | 3.37 | 4.95 | 0.15 | 93.53 | | | |
| | | | 1σ | 0.14 | 0.10 | 0.04 | 0.05 | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.04 | 0.54 | 0.88 | 0.01 | 96.86 | 55.2 | |
| | | bt | 6 | 36.55 | 5.43 | 14.58 | 17.58 | 0.11 | 12.14 | 0.04 | 0.04 | 0.54 | 0.88 | 0.01 | 96.86 | | |
| | | | 1σ | 0.58 | 1.00 | 0.40 | 1.31 | 0.02 | 0.69 | 0.04 | 0.04 | 0.20 | 0.20 | 0.01 | | | |
| | | mt | 5 | 0.11 | 6.95 | 3.29 | 84.71 | 0.48 | 1.72 | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 0.05 | 0.01 | 97.35 | | |
| | | 1σ | 0.03 | 0.62 | 0.07 | 0.83 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.01 | 0.02 | 0.01 | | | | |
| | | ilm | 3 | 0.13 | 33.98 | 0.54 | 60.36 | 0.34 | 1.90 | 0.20 | 0.01 | 0.11 | 0.11 | 97.67 | | | |
| | | 1σ | 0.03 | 2.68 | 0.06 | 2.91 | 0.08 | 0.30 | 0.24 | 0.24 | 0.02 | 0.01 | 0.19 | | | | |
| | | glass | 6 | 75.19 | 0.24 | 12.44 | 1.27 | 0.03 | 0.19 | 0.41 | 2.26 | 6.77 | 0.20 | 99.01 | | | |
| | | 1σ | 0.51 | 0.05 | 0.38 | 0.34 | 0.01 | 0.03 | 0.06 | 0.06 | 0.04 | 0.30 | 0.02 | 100.25 | | 20.3 | |
| CG215 | CG214 | pl | 2 | 62.19 | 0.08 | 21.87 | 0.52 | 0.00 | 0.07 | 4.25 | 5.52 | 5.64 | 0.10 | 100.25 | | | |
| | | | 1σ | 0.15 | 0.01 | 0.34 | 0.19 | 0.00 | 0.02 | 0.63 | 0.61 | 1.40 | 1.40 | 0.00 | 100.93 | | 2.7 |
| | | K-feldspar | 4 | 64.94 | 0.09 | 18.70 | 0.43 | 0.01 | 0.05 | 0.59 | 3.11 | 12.92 | 12.92 | 0.11 | 100.93 | | |
| | | | 1σ | 0.20 | 0.03 | 0.12 | 0.15 | 0.01 | 0.05 | 0.10 | 0.10 | 0.11 | 0.28 | 0.01 | | | |
| | | glass | 17 | 69.37 | 13.67 | 0.30 | 1.35 | 0.05 | 0.29 | 1.15 | 3.17 | 3.17 | 5.67 | 0.18 | 95.21 | | |
| | | 1σ | 0.54 | 0.30 | 0.06 | 0.06 | 0.01 | 0.02 | 0.08 | 0.07 | 0.05 | 0.05 | 0.02 | | | | |
| | | pl | 18 | 58.63 | 0.03 | 25.57 | 0.27 | 0.01 | 0.02 | 7.93 | 6.46 | 0.92 | 0.04 | 99.88 | | | |
| | | 1σ | 1.00 | 0.03 | 0.69 | 0.06 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.71 | 0.33 | 0.11 | 0.02 | | | | |
| | | bt | 5 | 36.91 | 5.07 | 14.81 | 17.64 | 0.13 | 11.77 | 0.05 | 0.63 | 9.64 | 0.02 | 96.66 | 54.3 | | |
| | | 1σ | 1.13 | 1.13 | 0.16 | 1.06 | 0.02 | 1.27 | 0.06 | 0.06 | 0.07 | 0.19 | 0.02 | | | | |
| | mt | 5 | 0.16 | 6.21 | 3.23 | 85.31 | 0.58 | 1.44 | 0.05 | 0.01 | 0.08 | 0.01 | | | | | |
| | 1σ | 0.19 | 9.69 | 2.85 | 81.61 | 0.70 | 1.81 | 0.08 | 0.00 | 0.11 | 0.11 | 0.00 | | | | | |
| | ilm | 1 | 0.92 | 31.33 | 0.72 | 62.03 | 0.36 | 1.38 | 0.08 | 0.08 | 0.21 | 0.00 | 97.10 | | | | |

表 2.2.2-3c Aso-1 石基ガラス組成融解実験における各相分析値

| Run# | Capsule# | phase | n | SiO ₂ | TiO ₂ | Al ₂ O ₃ | FeO | MnO | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | P ₂ O ₅ | Total | Mg# (Fe/(Fe+Mg))*100 | An (Ca/(Ca+Na+K))*100 | |
|-------|------------|-------|-------|------------------|------------------|--------------------------------|------|------|------|------|-------------------|------------------|-------------------------------|--------|-------------------------|--------------------------|------|
| G252 | CG216 | glass | 43 | 66.41 | 0.32 | 14.56 | 1.20 | 0.05 | 0.25 | 1.97 | 3.31 | 4.85 | 0.14 | 93.06 | | | |
| | | | 1σ | 0.89 | 0.12 | 0.20 | 0.42 | 0.01 | 0.30 | 0.09 | 0.24 | 0.14 | 0.04 | | | | 0.04 |
| | | pl | 6 | 57.45 | 0.02 | 25.74 | 0.15 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 8.59 | 6.32 | 0.65 | 0.04 | 98.98 | | 41.3 |
| | | | 1σ | 0.62 | 0.02 | 0.48 | 0.06 | 0.00 | 0.01 | 0.44 | 0.18 | 0.07 | 0.02 | 0.02 | | | |
| bt | | 8 | 37.76 | 4.56 | 14.35 | 20.14 | 0.15 | 9.23 | 0.26 | 0.62 | 8.98 | 0.02 | 0.02 | 96.07 | 45.0 | | |
| | | 1σ | 1.79 | 1.16 | 0.33 | 0.72 | 0.02 | 0.95 | 0.14 | 0.12 | 0.50 | 0.01 | 0.01 | | | | |
| ilm | | 1 | 5.04 | 48.48 | 1.50 | 42.52 | 1.08 | 1.80 | 0.20 | 0.39 | 0.43 | 0.03 | 0.03 | 101.46 | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| CG217 | K-feldspar | | 1 | 65.06 | 0.12 | 17.78 | 0.48 | 0.00 | 0.06 | 0.55 | 2.73 | 12.57 | 0.16 | 99.50 | | 2.7 | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| CG218 | quartz | | 2 | 96.93 | 0.14 | 0.96 | 0.39 | 0.02 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.09 | 0.02 | 98.76 | | | |
| | | | 1σ | 1.13 | 0.04 | 0.12 | 0.08 | 0.01 | 0.02 | 0.00 | 0.05 | 0.04 | 0.01 | | | | 0.01 |
| | glass | | 29 | 70.25 | 0.28 | 12.80 | 1.04 | 0.06 | 0.19 | 0.91 | 2.86 | 5.75 | 0.15 | 94.30 | | | |
| | | | 1σ | 0.63 | 0.12 | 0.33 | 0.28 | 0.01 | 0.15 | 0.06 | 0.09 | 0.10 | 0.03 | | | | 0.03 |
| | pl | | 23 | 59.55 | 0.02 | 24.57 | 0.21 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 6.99 | 6.77 | 1.21 | 0.06 | 99.40 | | 33.8 |
| | | | 1σ | 0.43 | 0.02 | 0.32 | 0.07 | 0.01 | 0.01 | 0.36 | 0.19 | 0.12 | 0.02 | 0.02 | | | |
| bt | | 3 | 40.09 | 5.13 | 14.45 | 21.56 | 0.19 | 6.07 | 0.16 | 0.70 | 9.03 | 0.03 | 0.03 | 97.39 | 33.4 | | |
| | | 1σ | 2.56 | 0.45 | 0.16 | 2.25 | 0.02 | 1.50 | 0.09 | 0.11 | 0.49 | 0.03 | 0.03 | | | | |
| ilm | | 1 | 0.70 | 51.67 | 0.26 | 43.28 | 1.92 | 2.15 | 0.05 | 0.05 | 0.10 | 0.01 | 0.01 | 100.19 | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |

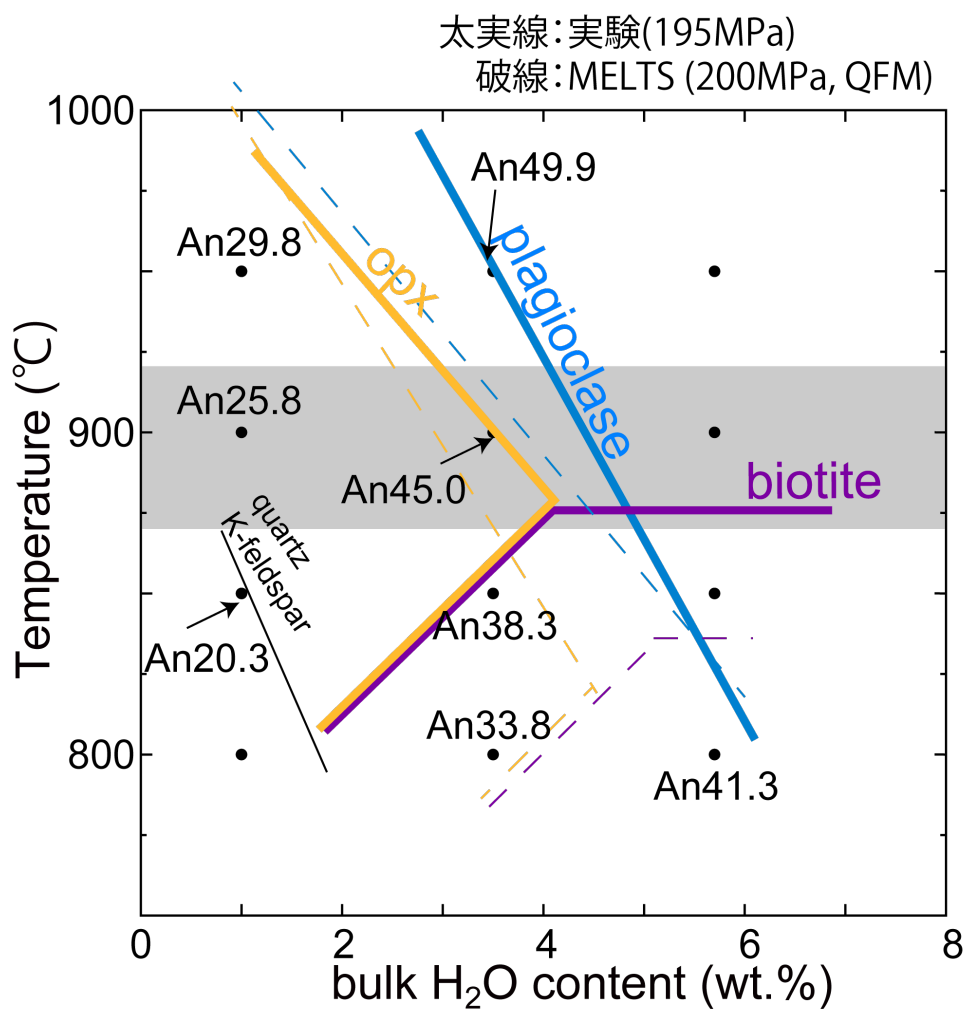


図 2.2.2-2

実験により決定した阿蘇 1 2014a-A 石基ガラス組成の高温高压下における相平衡図(195MPa). 各実線・破線は各結晶種が晶出し始める温度を示し, 実線・破線はそれぞれ本研究の実験・MELTSに基づく. 黒点は実験点で, 各実験点における斜長石組成を合わせて記した. グレーの領域は, 産総研(2015)により示された鉄チタン斑晶鈷物の平衡温度範囲を示す.

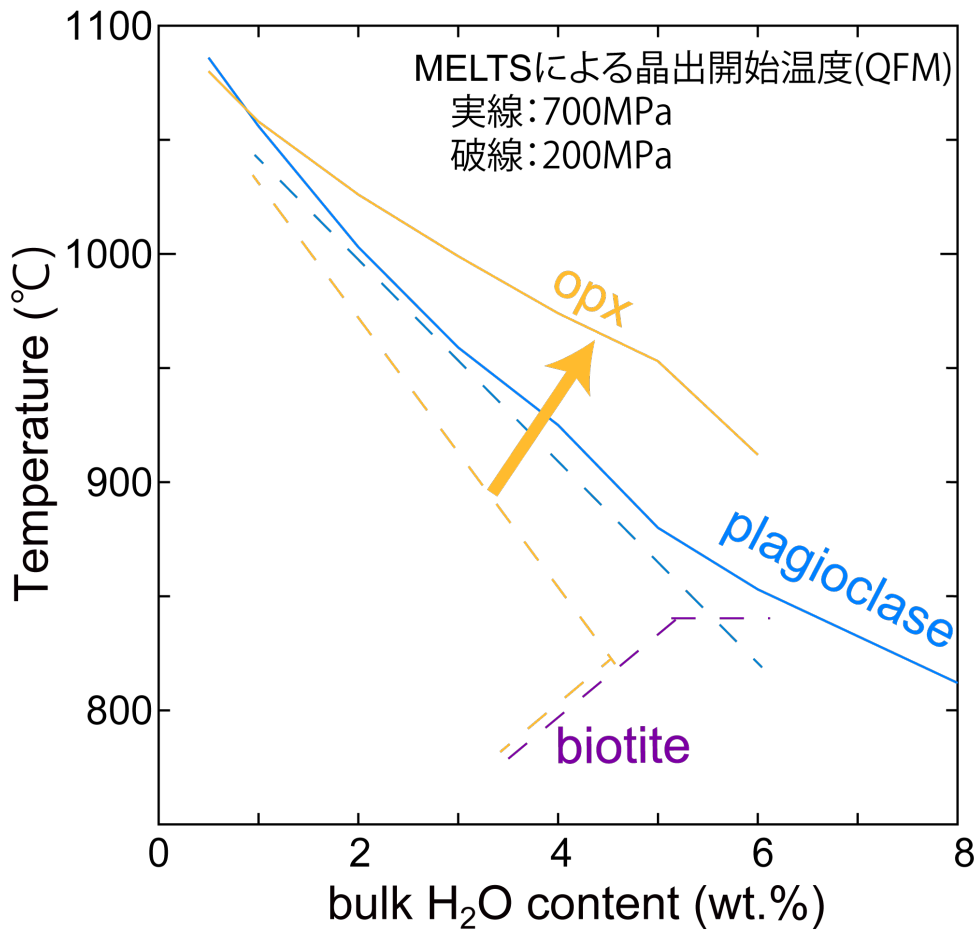


図 2.2.2-3

阿蘇 1 2014a-A 石基ガラス組成を全岩組成とした, 斜長石・斜方輝石・黒雲母の晶出温度圧力変化. 各結晶の晶出温度は MELTS に基づく.

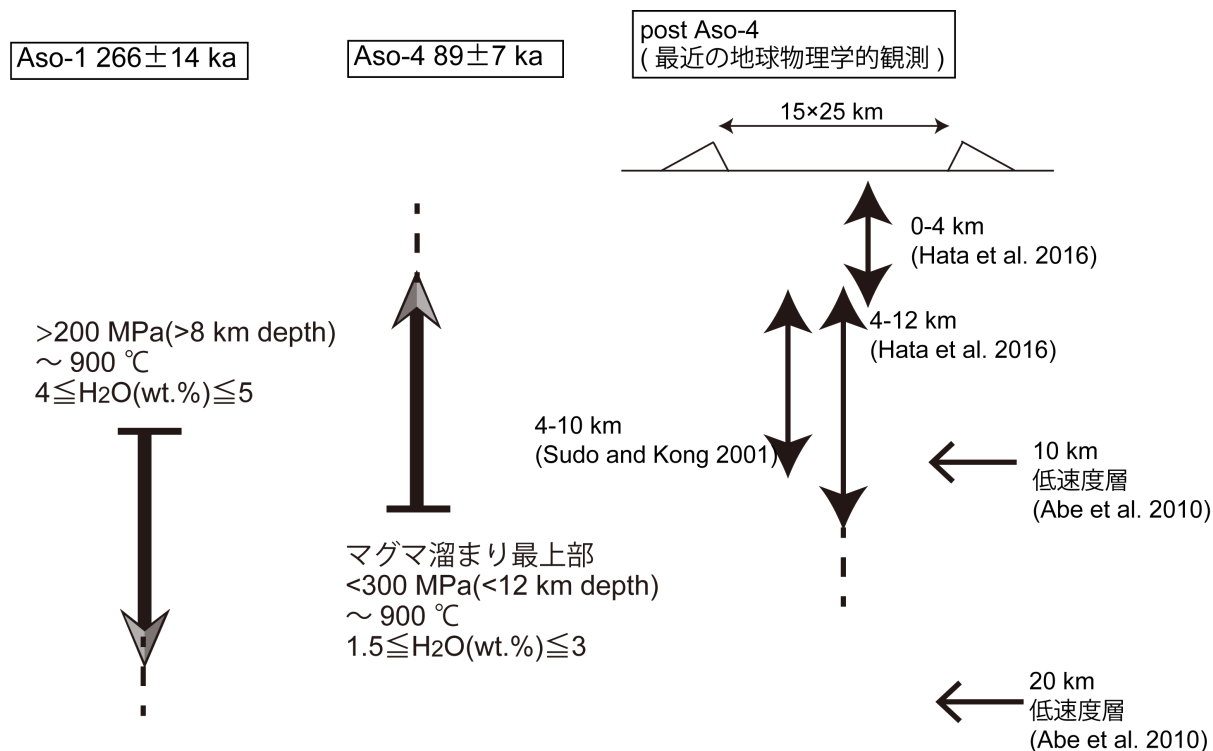


図 2.2.2-4 阿蘇 4 噴火前マグマ溜まりの模式図. 本実験では阿蘇 4 噴出物の珪長質端成分を用いたので、マグマ溜まりにおける最上部の温度圧力含水量を決めたことに相当する.

議論なども必要不可欠になるだろう.

4) まとめ

阿蘇 1 メルト(石基ガラス)組成を対象に、マグマ溜まりの温度・圧力・含水量を決定するために 200MPa で高温高压実験を行った. 鉄チタン鉱物斑晶の平衡温度がおおよそ 900°Cであることを利用するとリキダス付近で斜長石の晶出する条件から、少なくとも水が全岩で 4~5wt.%必要であることがわかった. 高含水量下における斜長石の晶出する温度は圧力変化に乏しいことを利用すると、より高压で斜方輝石の晶出領域が拡大することから、阿蘇 1 メルトと平衡であったと考えられる斜長石と斜方輝石が同時に晶出するのは 200MPa よりも深いことが予想される. この結果より、阿蘇 1 から阿蘇 4 にかけて、マグマ溜まりが浅くなっていった可能性が示された.

引用文献

- Abe, Y., Ohkura, T., Shibutani, T., Hirahara, K., Kato, M. (2010) Crustal structure beneath Aso Caldera, Southwest Japan, as derived from receiver function analysis. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 195:1-12.
- Almeev, R. R., Bolte, T., Nash, B. P., Holtz, F., Erdmann M., Cathey, H. E. (2012). High-temperature, low-H₂O Silicic Magmas of the Yellowstone Hotspot: an Experimental Study of Rhyolite from the Bruneau-Jarbidge Eruptive Center, Central Snake River

- Plain, USA. *J. Petrol.* 53(9):1837-1866.
- Andersen, D. and Lindsley, D. (1985) New (and final!) models for the Ti- magnetite/ilmenite geothermometer and oxygen barometer. *Eos*, 66:416
- Chou, I., (1986) Permeability of precious metals to hydrogen at 2kb total pressure and elevated temperatures. *Am. J. Sci.*, 286:638-658.
- Ghiorso, M. S. and Evans, B. W. (2008). Thermodynamics of Rhombohedral oxide solid solutions and a revision of the Fe-Ti two-oxide geothermometer and oxygen-barometer. *Amer. J. Sci.* 308:957-1039.
- Ghiorso, M. S. and Sack, R. O. (1995) Chemical mass transfer in magmatic processes IV. A revised and internally consistent thermodynamic model for the interpolation and extrapolation of liquid-solid equilibria in magmatic systems at elevated temperatures and pressures. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 119:197-212.
- Gualda G.A.R., Ghiorso M.S., Lemons R.V., and Carley T.L. (2012) Rhyolite-MELTS: A modified calibration of MELTS optimized for silica-rich, fluid-bearing magmatic systems. *J. Petrol.*, 53:875-890.
- Hata, M., Takakura, S., Matsushima, N., Hashimoto, T., Utsugi, M. (2016). Crustal magma pathway beneath Aso caldera inferred from three-dimensional electrical resistivity structure. *Geophys. Res. Lett.*, 43:10720-10727.
- Kaneko, K., Kamata, H., Koyaguchi, T., Yoshikawa, M., and Furukawa, K., (2007) Repeated large-scale eruptions from a single compositionally stratified magma chamber: An example from Aso volcano, Southwest Japan. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 167:160-180.
- Lepage, L. D. (2003) ILMAT: an excel worksheet for ilmenite–magnetite geothermometry and geobarometry. *Comput. Geosci.*, 29(5):673–678.
- 産業技術総合研究所 (2015) 平成 26 年度火山影響評価に係る技術的知見の整備.
- 産業技術総合研究所 (2016) 平成 27 年度火山影響評価に係る技術的知見の整備.
- 産業技術総合研究所 (2017) 平成 28 年度火山影響評価に係る技術的知見の整備.
- 産業技術総合研究所 (2018) 平成 29 年度火山影響評価に係る技術的知見の整備.
- Sudo, Y., Kong, L. S. L. (2001). Three-dimensional seismic velocity structure beneath Aso Volcano, Kyushu, Japan. *Bull. Volcanol.*, 63:326-344.
- Tatsumi, Y., and Suzuki, T. (2009) Tholeiitic vs calc-alkalic differentiation and evolution of arc crust: constraints from melting experiments on a basalt from the Izu-Bonin-Mariana arc. *J. Petrol.* 50(6):1575–1603.

2.2.3 阿蘇カルデラのマグマ起源物質

【実施内容】

平成 30 年度も前年度にひきつづき阿蘇カルデラのマグマの起源物質を把握する目的で、阿蘇カルデラ噴出物と周辺火山の噴出物を対象に、同位体地球化学的研究を実施した。今年度は阿蘇 3 ステージを対象に分析を追加した。これまでに実施した阿蘇および阿蘇周辺の基盤岩の化学組成・同位体比の分析と解析も合わせて解釈すると、阿蘇カルデラの大規模噴火をひきおこしたマグマの起源物質は、基本的にマントルに由来する苦鉄質マグマに様々な割合で地殻が混染したものを結晶分化させたものであることが示された。

【研究成果】

1) これまでの研究経緯

産業技術総合研究所は阿蘇のマグマ供給系の物理化学条件を推定する目的で地質調査による噴火層序の確立と岩石学的解析(噴出物の組織観察, 化学分析, 熱力学解析, 高温高压実験, 微量元素と同位体比分析)を行ってきた。このうち、マグマ供給系のモデルを構築するうえで基本となるマグマの起源物質に関する情報を得るため、平成 28 年度は阿蘇火山の予察的な地球化学的考察を行なった。平成 29 年度は阿蘇火山におけるマントル由来マグマに対する地殻の混染について、主要・微量元素と同位体のデータを取得し、解釈を行なった。その結果阿蘇のマグマは基本的に結晶分別作用と親子マグマ混合で説明でき、それに地殻の同化作用が加わったものと考えられた。平成 30 年度は阿蘇 3 を対象に分析を追加することにより、昨年度までに得られた阿蘇の各噴火エピソードのマグマ進化に関する追加の証拠を提示した。その結果、阿蘇 3 噴火ステージ内でのマグマの組成変化は、基本的にマグマ混合を伴う結晶分別作用によって、コントロールされていると結論され、阿蘇の火山岩の地球化学的・同位体組成の範囲は、噴火期間を通じてほとんど変わらないこと、が確認できた。

2) 試料および分析手法

産総研が保有していた阿蘇 3 ステージ(3W, 3A, 3B, 3C)に加え、神戸大学の金子克哉氏の厚意で分与された試料の分析を行なった。Kaneko et al., (2015)は阿蘇 3 ステージのマグマの地球化学的性質について検討し、通常の結晶分化作用で生じる珪長質マグマのニッケルが分化前の苦鉄質マグマよりも大幅に減少するのに対し、阿蘇 3 では珪長質マグマのほうがニッケルに富んでいることを見出した。これに従い、阿蘇の珪長質マグマは通常の結晶分化作用によって生じたのではなく、ニッケルに富む苦鉄質鉱物を含む地殻物質を熔融させることにより生じたと考えた。しかしながら Kaneko et al., (2015)の論拠は XRF 法によるごく微量のニッケルの分析値に立脚しており、より信頼性の高い手法で確認を行なう必要がある。そこで本研究は同論文と同じ試料に対して、微量のニッケル分析に優れた ICP-MS を用いて再分析を行なった。

試料の分析手法は平成 29 年度に報告したとおりである。

3) 結果

昨年度までの分析により、阿蘇のマグマの主要元素は阿蘇 1 から阿蘇 4 にかけて玄武岩質安山

岩からデイサイトにわたる変化を示し、ソレアイトを主体とする阿蘇 1 および 2 からカルクアルカリを主体とする阿蘇 4 への変化もみられた。 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$, および $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 同位体比は、阿蘇 1 から阿蘇 4 および後カルデラ期の火山岩を通じて、それぞれ 0.70389~7.0425, 0.5127~0.51285, 18.22~18.34 の狭い範囲に重なるので、阿蘇のマグマの起源物質はこの期間を通じてほぼ同じだと考えられる。Ba/Rb のような非常に不適合な微量元素の比は、阿蘇 1 が 5~13, 阿蘇 2 が 5~17, 阿蘇 3 が 4~16, 阿蘇 4 が 4~10 と、狭い範囲で変動する一方で、後カルデラ期には 6~32 と、変動範囲が広い。同様に Ba/Nb 比も、阿蘇 1, 阿蘇 2, 阿蘇 3, 阿蘇 4 においてはそれぞれ 22~39, 40~51, 35~47, および 60~70 とわずかに変化するのに対し、後カルデラ期は 24~98 の非常に広い変動幅をもつ。しかしながら(1)阿蘇の各噴火シーケンスにおける大部分の火山岩の組成は、全体の阿蘇火山システムにおける組成と類似していることと、(2)噴火系列に存在するマグマ進化トレンドとマグマ系列の変化が鉱物集合体と分別結晶・マグマ混合・地殻同化の相対量を変化させることによって再現することができる (Hunter, 1998; Miyoshi et al., 2007, 2009; Uto et al., 2007; Kaneko et al., 2007, 2015) ことから、阿蘇 1 から阿蘇 4 そして後カルデラ期にかけて、阿蘇のマグマ供給系は基本的には地殻同化を伴う/伴わないマグマ混合と関連する分別結晶化によって制御されていると考えられる。

阿蘇 3 は約 12~10 万年の間に発生し、基底部の降下軽石層阿蘇 3W と、3つのサブユニット阿蘇 3A, -3B および 3C からなる火砕流堆積物から構成されている。阿蘇 3A の基底部は白色で非熔結な斑晶に乏しく普通輝石を含む軽石流である。阿蘇 3B は、阿蘇 3A と阿蘇 3C 間の薄い (<0.5m) の混合部で、部分的溶結した褐色の普通輝石角閃石安山岩質スコリアと軽石流堆積物である。阿蘇 3C はスコリア流である。

最下部層(阿蘇 3W), 下部相(阿蘇 3A), 中間層(阿蘇 3B), 上部層(阿蘇 3C)は、全体的にはシリカが増えるとチタンが減る傾向を示しており(図 2.2.3-1), この相関は橄欖石, 輝石, または角閃石などの鉱物の分別を反映している。水が多い場合にはより多くの角閃石が晶出し, その結果メルトのチタン濃度は低くなり逆にシリカ濃度は高くなる可能性がある。シリカバリエーションダイアグラムに部分的にみられる下に凹の形状は, 水の影響を反映している可能性がある。最もチタンに乏しい阿蘇 3W と阿蘇 3A は鉄チタン酸化物鉱物が分別したことを示唆する。阿蘇 3B は角閃石あるいは黒雲母の分別を示唆し, 阿蘇 3C は橄欖石や輝石の分別を示唆する。阿蘇 3 の全岩化学組成の MgO と CaO/Al₂O₃ 比の変化は(図 2.2.3-2), 橄欖石および/または斜方輝石(青い矢印)の分別, および斜長石の分別(赤い矢印)によるものと解釈できる。このことから, 阿蘇のマグマの組成変化には, 有色鉱物(おそらく橄欖石)の分別が必要だと考えられる。橄欖石を分別するためには, 阿蘇の苦鉄質マグマがマントルに由来する必要がある。

Kaneko et al., (2015)は阿蘇の珪長質マグマが比較的ニッケルに富む性質を示したことから, 珪長質マグマは苦鉄質マグマの結晶分化作用によって生じたのではなく, ニッケルに富む橄欖石を含む地殻の部分溶融により生じたと考えた。しかしながら同じ試料を ICP-MS で測定し直したところ, 同論文とは逆に, 分化したマグマほどニッケルに乏しくなることが判明した(図 2.2.3-3)。同様に, 分化したマグマほどルビジウム濃度が高くなることが判明した(図 2.2.3-4)。これらのことから, 阿蘇の珪長質マグマは, マントルに由来する苦鉄質マグマ(様々な割合で地殻が混染)を結晶分化することで生成できると結論する。

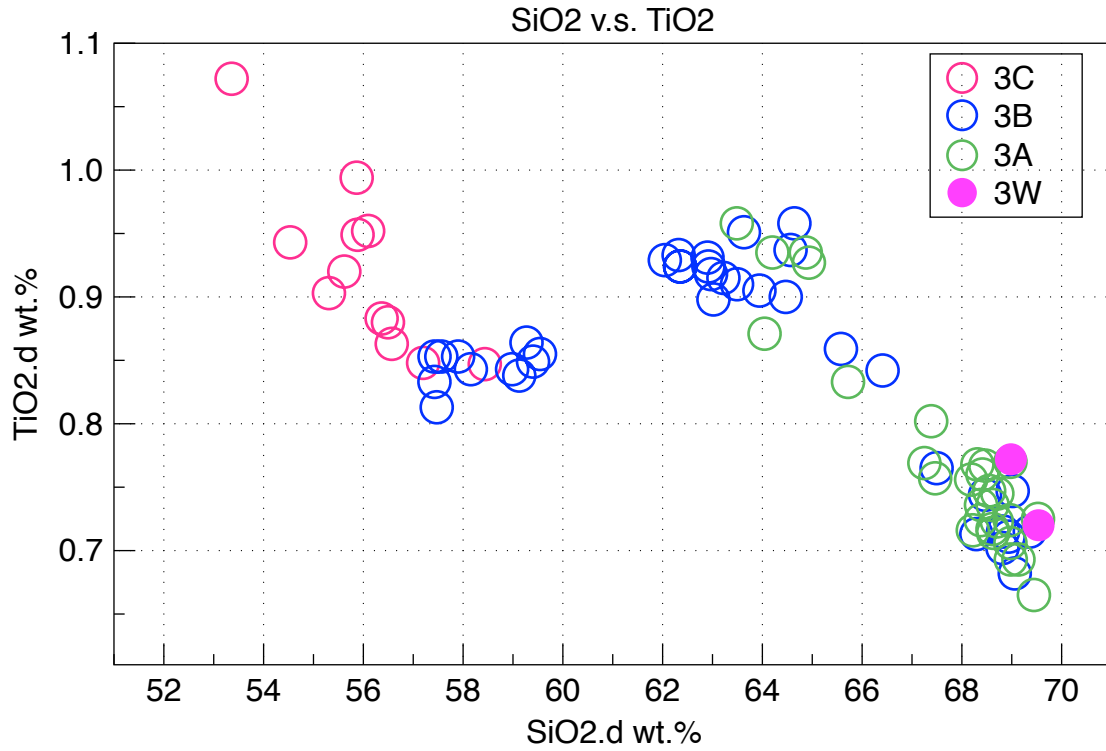


図 2.2.3-1 阿蘇 3 の 3 つのサブユニットの全岩チタンシリカバリエーションダイアグラム. Hunter (1998)および Kaneko et al. (2015)のデータを使用.

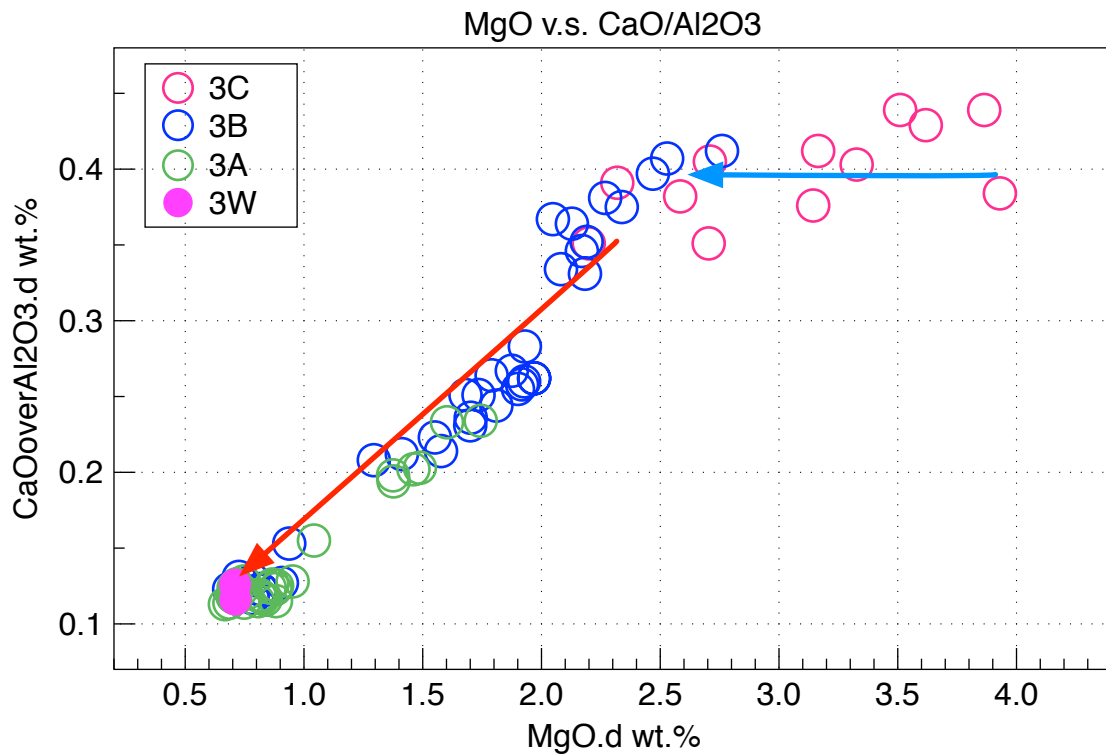


図 2.2.3-2 阿蘇 3 の 3 つのサブユニットの全岩化学組成(MgO に対する $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比).

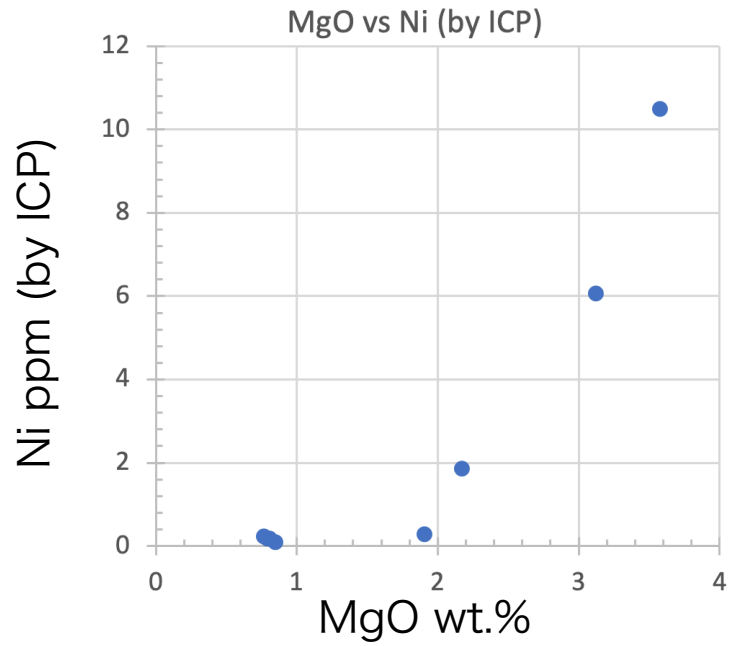


図 2.2.3-3 阿蘇 3 の全岩化学組成(MgO に対するニッケル濃度). Kaneko et al., (2015)が XRF で分析したものと同一試料セットから 8 試料を抜き出し, ICP-MS で再測定した.

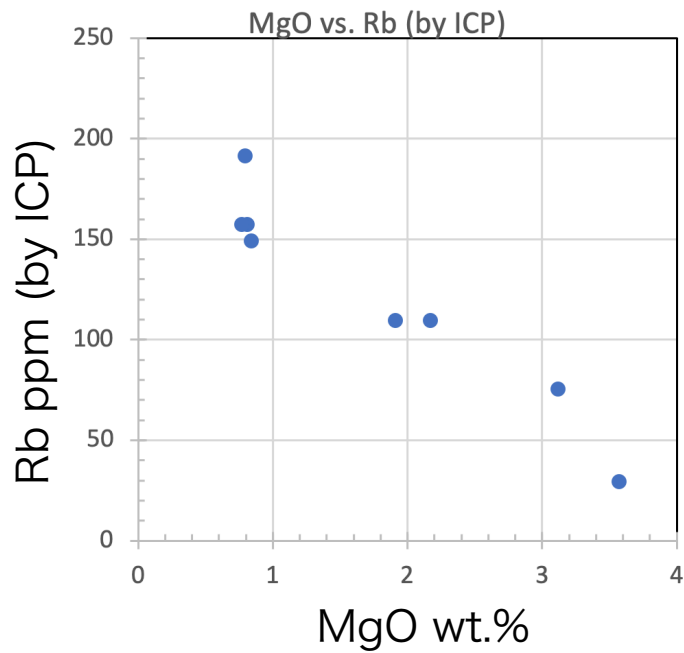


図 2.2.3-4 阿蘇 3 の全岩化学組成(MgO に対するルビジウム濃度). Kaneko et al., (2015)が XRF で分析したものと同一試料セットから 8 試料を抜き出し, ICP-MS で再測定した.

4) まとめ・今後の課題

平成 30 年度までに実施した阿蘇および阿蘇周辺の基盤岩の化学組成・同位体比の分析と解析により、阿蘇の大規模噴火をひきおこしたマグマの起源物質が基本的に、マントルに由来する苦鉄質マグマに様々な割合で地殻が混染したものを、結晶分化(あるいは親子マグマ混合)させたものであることが示された。

今後の阿蘇の火山活動をよりの確に理解するためには、大規模噴火に至るまでのマグマの蓄積プロセスに関する情報を収集するため、大規模火砕流で放出されたマグマそのものではなく、大規模噴火の間に放出された比較的小規模な噴火において、化学組成・同位体比組成の時間変化を知る必要がある。具体的には、阿蘇 3, 阿蘇 4/3 間, 阿蘇 4, ポスト阿蘇 4(2014 年の活動も含む)の一連の噴出物に対して、今年度までに実施した同位体地球化学的研究手法を適用することにより、阿蘇で最大かつ最新の大規模噴火である阿蘇 4 のマグマがどのように蓄積したのかを理解できると期待される。

引用文献

- Hunter, A.G., 1998. Intracrustal controls on the coexistence of tholeiitic and calc-alkaline magma series at Aso volcano, SW Japan. *Journal of Petrology* 39, 1255-1284.
- Kaneko, K., Kamata, H., Koyaguchi, T., Yoshikawa, M., Furukawa, K., 2007. Repeated large-scale eruptions from a single compositionally stratified magma chamber: an example from Aso volcano, Southwest Japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 167, 160-180
- Kaneko, K., Inoue, K., Koyaguchi, T., Yoshikawa, M., Shibata, T., Takahashi, T., Furukawa, K., 2015. Magma plumbing system of the Aso-3 large pyroclastic eruption cycle at Aso volcano, Southwest Japan: Petrological constraint on the formation of a compositionally stratified magma chamber. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 303, 41-58.
- Lipman, P.W., 1967. Mineral and chemical variations within an ash-flow sheet from Aso caldera, south-western Japan. *Contribution to Mineralogy and Petrology* 16, 300-327.
- Machida, H., Arai, F., 2003. Atlas of Tephra in and Around Japan. University of Tokyo Press, p. 336 (in Japanese).
- Ono, K., Watanabe, K., 1983. The Aso caldera. *The Earth Monthly* 5, 73-82 (in Japanese).
- Miyoshi, M., Furukawa, K., Shinmura, T., Shimono, M., Hasenaka, T., 2009. Petrography and whole-rock geochemistry of pre-Aso lavas from the caldera walls of Aso volcano, central Kyushu. *Journal of Geological Society of Japan*, 115, 672-687 (in Japanese with English abstract)
- Miyoshi, M., Hasenaka, T., Mori, Y., Yamashita, S., 2007. Original of compositional heterogeneity within Tochinoki andesitic lava flow from the western part of Aso

- caldera. Japanese Magazine of Mineralogical and Petrological Sciences 36, 15-29 (in Japanese with English abstract)
- Miyoshi, M., Shibata, S., Yoshikawa, M., Sano, T., Shinmura, T., Hasenaka, T., 2011. Genetic relationship between post-caldera and caldera-forming magmas from Aso volcano, SW Japan: Constraints from Sr isotope and trace element compositions. Journal of Mineralogical and Petrological Sciences, 106, 114-119.
- Ono, K., Watanabe, K., 1985. Geological map of Aso volcano, 1:50000. Tokyo: Geological Survey of Japan.
- Ono, K., Matsumoto, Y., Miyahisa, M., Teraoka, Y., Kambe, N., 1977. Geology of the Taketa district. With Geological Sheet Map at 1:50000, Geological Survey of Japan, p157. (in Japanese with English abstract 8p.).
- Ono, K., Watanabe, K., Komazawa, M., 1993. Structure of the Aso caldera implied by gravitational data. The Earth Monthly 15, 686–690 (in Japanese).
- Uto, K., Sakaguchi, K., Hoshizumi, H., Matsumoto, A., 2007. Repealing the intracaldera structure from the existing drill cores: a case study of the Aso volcano, Southern Japan. Cities on volcanoes 5, Shimabara, Japan.
- Watanabe, K., 1978. Studies on the Aso Pyroclastic Flow Deposits in the region to the west of Aso caldera, southwest Japan. Geology Memorial of the Faculty of Education, Kumamoto University, Natural Sciences 27, 97-120.

2.3 始良カルデラ噴出物の岩石学的検討

【実施内容】

始良カルデラのマグマシステムの解析のため、3 万年前の入戸火砕流噴火を含む過去約 20 万年の噴出物の系統的な調査・採取を行ない、岩石・地球化学的データを取得し、噴火期ごとにマグマ供給系の生成プロセスや噴火に至るまでの変遷や、メルト包有物の組成分析からマグマの温度・圧力・含水量を検討してきた。特に 3 万年前の破局噴火の初期噴出物である大隅降下軽石に含まれる斑晶中のガラスインクルージョンの含水量からは、およそ 1kbar の圧力が推定され、マグマ溜まりの天井の深さは約 4~5 km 程度と推測されている。平成 30 年度は、始良カルデラに関連する噴出物のこれまでの岩石学的な検討結果を取りまとめた。重要な観測事実は、以下の 4 つである。① 3 万年前の破局噴火の少なくとも更に約 3 万年前から、入戸火砕流噴火で噴出した流紋岩マグマの蓄積が開始していた。② この蓄積期間中に、マグマ溜まりの深さには大きな変化がなかった。③ 斑晶組織の累帯構造からは、入戸噴火直前のマグマ溜まりへの高温・苦鉄質マグマの注入を示唆する。④ 入戸火砕流噴火後の流紋岩マグマの化学組成は、入戸火砕流噴火までの流紋岩マグマとは明瞭に区別が可能であり、カルデラ下には別の流紋岩マグマが蓄積し噴出していることを示している。

【研究成果】

(1) 概要

始良カルデラのマグマシステムの解析のため、約 3 万年前の入戸火砕流噴火を挟む約 10 万年前~1 万 5 千年前までの始良カルデラ噴出物を網羅的に採取し、その全岩組成・鉱物化学組成および斑晶に含まれるメルト包有物の化学組成を測定した。全岩組成の時間変化から、3 万年前の入戸火砕流噴火で噴出した流紋岩マグマとほぼ同組成の流紋岩マグマが、6 万年前の岩戸火砕流噴火以降始良カルデラ直下のほぼ一定の深度のマグマ溜まりに駐留していたことが明らかになった。一方、入戸火砕流噴火以降、組成の異なる流紋岩マグマの活動がみられる。

(2) 始良カルデラにおける先カルデラ期—カルデラ形成期—後カルデラ期の噴出物の岩石学的特徴

2.1) 分析試料

分析に用いた始良カルデラの噴出物は、約 3 万年前に発生し始良カルデラを形成したと考えられる入戸火砕流噴火前後の噴出物の岩石学的特徴を解析した。入戸火砕流噴火に先行する噴出物として、福山降下軽石、敷根溶岩、清水溶岩、牛根溶岩、岩戸火砕流堆積物、大塚降下軽石、深港降下軽石、毛梨野降下軽石を用いた。本報告ではこれらを先入戸火砕流期の噴出物と呼ぶ。また、入戸火砕流噴火の噴出物は、大隅降下軽石、妻屋火砕流堆積物、大規模火砕流である入戸火砕流堆積物を用いた。入戸火砕流噴火後の珪長質噴出物と

して新島軽石、薩摩軽石及び苦鉄質噴出物として住吉池・米丸マール噴出物を解析した。本報告ではこれらを後入戸火砕流期の噴出物と呼ぶ。以下、それぞれの特徴を記載する。

これらの全岩化学組成、主要鉱物組成、および珪長質軽石噴出物の斑晶鉱物に含まれるガラス包有物の含水量を測定した

[先入戸火砕流期の噴出物]

・福山降下軽石

福山降下軽石は始良カルデラ北東部から噴出し、始良カルデラ北東部を中心に北東方向に分布するプリニー式噴火による降下軽石で、その見かけ体積は 40km^3 と見積もられている(長岡ほか 2001)。福山降下軽石は、はじめ荒牧(1969)により定義され、後述する岩戸火砕流と同じ噴火の噴出物とみなされたが、のちに岩戸火砕流とは別の噴火の噴出物であると確認された。噴出したマグマの全岩組成は、 $\text{SiO}_2=70\text{wt.}\%$ のデイサイトー流紋岩組成である。斑晶組み合わせは、斜長石、石英、斜方輝石、単斜輝石のほか、多量の普通角閃石を含む。分析に用いた試料は、始良カルデラ北東縁の霧島市亀割坂付近で採取した。採取地点における福山降下軽石は層厚 10m以上の粗粒の降下軽石層として分布し、その粒子サイズは 3~5cm 程度である。

・敷根溶岩

敷根溶岩は、始良カルデラ北東部の霧島市国分敷根地区に分布する安山岩溶岩で、上野原台地から若尊鼻にかけての高まりに厚さ 100m 以上の溶岩流として分布する(新エネルギー総合開発機構, 1987)。敷根溶岩は福山降下軽石を覆い、また岩戸火砕流堆積物に覆われる。敷根溶岩の年代は、 $0.061\pm 0.017\text{Ma}$ (周藤ほか 2000)とされる。敷根溶岩は、カンラン石単斜輝石玄武岩質安山岩である。その全岩組成は $\text{SiO}_2=54\text{wt.}\%$ FeO^*/MgO 比~2 で、先入戸火砕流噴火期の始良カルデラ噴出物の中ではもっとも未分化である。分析に用いた試料は、始良カルデラ北東縁の霧島市敷根および亀割坂付近で採取した。

・岩戸火砕流堆積物

岩戸火砕流は、複数のフローユニット・降下ユニットからなる岩戸テフラを構成する火砕流堆積物である。岩戸火砕流は始良カルデラの北縁に沿って分布し、部分的に溶結している。岩戸火砕流は本質物として白色の流紋岩質軽石($\text{SiO}_2=74\sim 76\text{ wt}\%$)と、黒色の安山岩質スコリア($\text{SiO}_2=58\sim 60\text{ wt}\%$)を共に含む。流紋岩軽石は斜長石・石英・斜方輝石・単斜輝石を斑晶として含む。安山岩スコリアは斜長石・斜方輝石・単斜輝石およびカンラン石を斑晶として含む。分析に用いた試料は、始良カルデラ北縁の霧島市岩戸付近および、北東縁の霧島市亀割坂付近で採取した。層序から、採取した試料は長岡ほか(2001)による岩戸 7 火砕流堆積物に相当すると考えられる。採取地点の岩戸火砕流堆積物は弱く溶結している。

- ・清水流紋岩

清水流紋岩（大塚・西井上，1980）は，始良カルデラ北縁の加治木～国分にかけての海岸部に分布する流紋岩溶岩である．清水溶岩の年代は， $0.036\pm 0.003\text{Ma}$ （周藤ほか 2000）とされる．清水流紋岩は，斜方輝石流紋岩からなり，その全岩組成は $\text{SiO}_2=76\text{wt.}\%$ である．分析に用いた試料は，霧島市国分小浜付近で採取した．

- ・牛根流紋岩

牛根流紋岩（小林ほか，1977）は，始良カルデラ南東部の桜島口に隣接する早崎を構成する火山岩類のうち最上部に位置する流紋岩溶岩である．牛根流紋岩の年代は， $0.033\pm 0.004\text{Ma}$ （周藤ほか 2000）とされる．牛根流紋岩は，斜方輝石流紋岩からなり，その全岩組成は $\text{SiO}_2=75\text{wt.}\%$ である．分析に用いた試料は，垂水市桜島口付近で採取した．

- ・大塚降下軽石

大塚降下軽石は，長岡ほか（2001）により再定義された大塚テフラの降下軽石である．大塚降下軽石の見かけ体積は 0.9km^3 と見積もられている（長岡ほか 2001）．噴出したマグマの全岩組成は， $\text{SiO}_2=74\text{-}76\text{wt.}\%$ の流紋岩組成である．斑晶組み合わせは，斜長石，石英，斜方輝石である．少量の鉄チタン鉱物を含む．分析に用いた試料は，始良カルデラ北縁の霧島市国分岩戸付近および国分清水付近で採取した．採取地点における深港降下軽石は，層厚約 30cm の細粒の降下軽石層として分布する．粒子サイズは $1\sim 2\text{cm}$ 程度である．

- ・深港降下軽石

深港降下軽石は，長岡ほか（2001）により再定義された深港テフラのうち，噴火前期に現在の始良カルデラ中央部から噴出したプリニー式噴火による降下軽石とそれに伴われる火砕流堆積物である（長岡ほか 2001）．深港降下軽石の見かけ体積は約 7km^3 と見積もられている（長岡ほか 2001）．また，長岡ほか（2001）は，始良カルデラ南方の垂水市荒崎付近に分布する荒崎火砕流堆積物も，深港降下軽石の噴火に伴う噴出物と考えた．

今回，垂水市牛根麓地区に露出する深港降下軽石層直下の土壌から， $32.8\sim 31.7\text{ka calBP}$ の炭素 14 年代が得られた．

噴出したマグマの全岩組成は， $\text{SiO}_2=74\text{-}76\text{wt.}\%$ の流紋岩組成である．斑晶組み合わせは，斜長石，石英，斜方輝石である．少量の鉄チタン鉱物を含む．分析に用いた試料は，始良カルデラ北縁の霧島市国分岩戸付近および国分清水付近，および垂水市牛根麓付近で採取した．採取地点における深港降下軽石は，層厚約 40cm の細粒の降下軽石層として分布する．粒子サイズは $1\sim 2\text{cm}$ 程度である．

- ・毛梨野降下軽石

毛梨野降下軽石は、始良カルデラ北縁部から噴出したテフラで、火砕サージ堆積物とそれにもなう降下軽石・降下火山灰からなるテフラである(長岡ほか 2001)。その分布から、始良カルデラ北東縁から噴出したと考えられる。毛梨野テフラ全体の見かけ体積は約 0.4km^3 と見積もられている(長岡ほか 2001)。噴出したマグマの全岩組成は、 $\text{SiO}_2=74\text{-}76\text{wt.}\%$ の流紋岩組成である。斑晶組み合わせは、斜長石、石英、斜方輝石である。少量の鉄チタン鉱物を含む。

分析に用いた試料は、始良カルデラ北縁の霧島市国分岩戸付近および国分清水付近で採取した。採取地点における毛梨野降下軽石は、層厚約 30cm のやや淘汰の悪い火山灰～軽石層として分布する。

[入戸火砕流噴火噴出物]

入戸火砕流噴火噴出物は、約 30ka に発生した大規模噴火の噴出物である。入戸火砕流噴火噴出物は、下位から大隅降下軽石、垂水火砕流堆積物、妻屋火砕流堆積物、入戸火砕流堆積物(Aramaki 1984) およびその遠方相である降下火山灰である AT 火山灰層からなる。

・大隅降下軽石

大隅降下軽石堆積物は、始良カルデラを形成した約 30ka の大規模噴火の噴出物のうち、噴火初期に現在の桜島付近から発生した大規模なプリニー式噴火による降下軽石である(Koyabashi et al., 1982)。その見かけ体積は約 98km^3 と見積もられている(Kobayashi et al., 1982)。噴出したマグマの全岩組成は、 $\text{SiO}_2=74\text{-}76\text{wt.}\%$ の流紋岩組成である。斑晶組み合わせは、斜長石、石英、斜方輝石である。少量の鉄チタン鉱物を含む。ごくまれに、普通角閃石や黒雲母がみられる。

全岩組成分析に用いた試料は、垂水市海瀉地区および垂水市新城麓地区で採取した。海瀉地区では大隅降下軽石の層厚は 10m 以上で、最大粒径は 20cm を超える。新城麓地区では大隅降下軽石の層厚は 6m で、最大粒径は 12cm である。

・妻屋火砕流堆積物

妻屋火砕流堆積物は、始良カルデラを形成した 29ka の大規模噴火の噴出物のうち、初期の降下軽石である大隅降下軽石を覆って分布する火砕サージ堆積物である。その分布から、始良カルデラの中心部あるいは北東部から噴出したと考えられている。その見かけ体積は約 10km^3 と見積もられている(Aramaki, 1984)。層序から Aramaki(1984)や長岡ほか(2001)は、妻屋火砕流堆積物は、大隅降下軽石の噴出後、入戸火砕流の噴出に先立ち始良カルデラ中心部から噴出した火砕流と考えた。福島(2015)は、層序及び岩相から妻屋火砕流堆積物は垂水火砕流堆積物と同様に、大隅降下軽石の噴煙柱の部分崩壊によって生じたと考えた。噴出したマグマの全岩組成は、 $\text{SiO}_2=74\text{-}76\text{wt.}\%$ の流紋岩組成である。斑晶組み合わせは、斜長石、石英、斜方輝石である。少量の鉄チタン鉱物を含む。ごくまれに、

普通角閃石や黒雲母がみられる。

試料は、始良カルデラ北東縁の霧島市国分川原で採取した。採取地点における妻屋火砕流堆積物は、層厚 20m 以上の非溶結の軽石混じり火山灰流堆積物として堆積している。軽石の最大径は 5cm である。

・入戸火砕流堆積物

入戸火砕流堆積物は、始良カルデラを形成した 29ka の大規模噴火の噴出物のうち、最大の噴出ユニットである大規模火砕流堆積物である。その分布から、始良カルデラの中心部あるいは北東部から噴出したと考えられている。その見かけ体積は約 250km³ と見積もられている (Aramaki, 1984)。噴出したマグマの全岩組成は、SiO₂=74-76wt.%の流紋岩組成である。斑晶組み合わせは、斜長石、石英、斜方輝石である。少量の鉄チタン鉱物を含む。ごくまれに、普通角閃石や黒雲母がみられる。

試料は、桜島から東南東に約 40km 離れた志布志市で採取した。採取地点における入戸火砕流堆積物は、層厚 30m 以上の非溶結の軽石流堆積物として堆積している。軽石の最大径は 35cm である。分析に用いた試料は、大型の軽石塊を破砕し、水簸により斑晶鉱物を分離したものを、樹脂包埋したものを研磨し露出した斑晶鉱物を分析した。分析に用いた入戸火砕流堆積物に含まれる斑晶鉱物のガラス包有物の多くは、火砕流堆積物の徐冷のため結晶化が進行していた。そのため、入戸火砕流堆積物のガラス包有物の分析結果は解析から除外した。

[後入戸火砕流噴火噴出物]

・新島軽石

新島軽石は、新島(燃島)に分布する海底堆積の軽石流堆積物であり (Kano et al., 1996) , 層序からその噴出年代は 13cal ka と推測される (森脇ほか, 2017)。噴出物の岩石学的特徴からこの軽石の噴出源は、始良カルデラの後カルデラ火山である桜島ではなく始良カルデラ内の若尊カルデラから噴出したと考えられている。新島軽石の全岩組成は SiO₂ 約 73wt.%の斜方輝石流紋岩である (西村・小林, 2015)。分析に用いた試料は新島北西海岸の海食崖から採取した。

・桜島-薩摩降下軽石

桜島-薩摩テフラ (P14) は、桜島付近から 13ka に噴出した降下軽石及び軽石質の火砕サージ堆積物である。山元ほか (2013) により、桜島北岳西部付近がその噴出源と考えられている。その見かけ体積は約 11km³ と見積もられており (小林・溜池, 2002), 入戸火砕流噴火以降、始良カルデラから発生した最大の噴火である。層序および炭素 14 年代からその噴出年代は新島軽石の直後の 12.9cal ka と推測される (森脇ほか, 2017)。噴出したマグマの全岩組成は、SiO₂=66-68wt.%のデイサイト組成である。斑晶組み合わせは、斜長

石、単斜輝石および斜方輝石である。少量の鉄チタン鉱物を含む。

試料は、桜島から北西に約 10km 離れた鹿児島市吉野町および南東に 7km はなれた垂水市海潟で採取した。採取地点における桜島薩摩テフラは、風化火山灰質土を覆って基底部に径 5-6cm の軽石粒からなる淘汰の良い降下軽石堆積物と、その上部の成層した軽石質の火砕サージ堆積物と降下軽石の互層からなる、全層厚約 1.5m の堆積物として分布している。

・米丸・住吉池噴出物

米丸・住吉池噴出物は、始良カルデラ北西の始良市蒲生付近にある米丸および住吉池マールから噴出した苦鉄質噴出物である（森脇ほか 1986）。層序および炭素 14 年代からその噴出年代は 8cal ka と考えられる。今回、始良市春花の蒲生川右岸に露出する米丸マールから噴出した火砕サージ堆積物に含まれる木片 3 片について年代測定を実施した。その結果、暦年較正年代で 8157~7937calBP の値（2 σ 値）を得た。また、米丸マールからのサージ直下の海成シルト層から得られた木片 4 片および貝殻片 1 点の年代はそれぞれ 8.6~8.5, 8.4~8.3, 8.4~8.2, 8.4~8.3（貝殻） calBP であり、層序的に矛盾しないことが分かった。以上の結果から、米丸・住吉池噴出物の年代は従来の年代と同じくおよそ 8 千年前であることが確認できた。

噴出したマグマはカンラン石単斜輝石玄武岩で、その全岩組成は SiO₂=48wt.%, FeO*/MgO 比 1.9 の玄武岩組成である。分析に用いた試料は、住吉池南縁から採取した火山礫および米丸マール南縁で採取した火山礫である。

2.2) 全岩化学組成

・分析手法

始良カルデラ噴出物の全岩主要元素化学組成を、波長分散型蛍光エックス線分析装置を用いて分析した。分析手法は四ホウ酸リチウムを希釈融剤として用いるガラスビード法を用いた。火砕流・降下軽石試料は、それぞれの軽石塊から約 10~20g を鉄乳鉢で粗粉碎し、さらにそのうちの約 15g をタングステンカーバイドミルあるいはアルミナミルによって微粉碎し均質な粉体試料とした。微粉碎した試料は四ほう酸リチウムと 1:10 の希釈率で混合し、高周波炉で溶融・固化させることによりガラスビードを作成した。成分測定は産業技術総合研究所が所有する波長分散型蛍光エックス線分析機（Panalytical 社製 Axios）を用いて測定した。測定した元素の定量は検量線法を用い、産総研地質調査総合センター地質標準試料を用いて校正した。

・結果

福山軽石以降の代表的な始良カルデラ噴出物の全岩組成を図 1 に示す。福山降下軽石がデイサイト、敷根溶岩が玄武岩質安山岩、岩戸火砕流のスコリアが安山岩、薩摩降下軽石がデイサイト、米丸および住吉池噴出物が玄武岩である。それ以外の噴出物はすべて流紋

岩組成を示す。始良カルデラ周辺で噴出した玄武岩～玄武岩質安山岩として、約 6 万 1 千年前の敷根溶岩および、約 8 千年前の米丸・住吉池噴出物がある。

福山軽石噴火以降、入戸火砕流噴火に至るまでの全岩化学組成は、主要元素で見るとほぼ単一の化学組成トレンド状に分布する (図 2.3-1)。珪長質側の端成分は、入戸火砕流噴火で噴出した流紋岩に、苦鉄質側の端成分は米丸および住吉池の玄武岩にほぼ一致する。

入戸火砕流噴火に先立つ清水流紋岩、牛根流紋岩、大塚降下軽石、深港降下軽石、毛梨野降下軽石はいずれも流紋岩マグマを噴出しており、その全岩化学組成は始良入戸火砕流噴火で噴出する流紋岩マグマと主成分及び微量成分でみてほぼ同一の組成をもつ。岩戸火砕流堆積物には安山岩スコリア及び流紋岩軽石が混在しており、そのうち流紋岩軽石は低い全岩 FeO^*/MgO 比を持つものと、高いものの 2 種類が含まれる (図 2.3-2)。高い全岩 FeO^*/MgO 比の流紋岩は、始良入戸火砕流噴火で噴出する流紋岩マグマと主成分及び微量成分でみてほぼ同一の組成をもつ。これらの流紋岩マグマはいずれも始良カルデラ内部から噴出していることから、少なくとも岩戸火砕流噴火以降、始良入戸火砕流噴火に至るまでの約 3 万年間は、始良カルデラ直下に存在した同一の流紋岩マグマ溜まりから噴火が発生していたと考えられる。

入戸火砕流噴火の最初期の噴出物である大隅降下軽石には、縞状軽石がしばしば含まれる。これらの縞状軽石の組成は、白色軽石の大多数を占める $\text{SiO}_2=74\text{-}76\%$ の流紋岩組成から苦鉄質側に直線的な分布を示す。これは、これらの縞状軽石がより苦鉄質のマグマとの混合によって形成されたことを示す。大隅降下軽石の縞状軽石は、後カルデラ期の薩摩降下軽石・新島軽石などと同様に高い Zr 含有量を示すトレンドをもつ (図 2.3-3)。

また、後カルデラ期の薩摩降下軽石や桜島北岳から噴出した大規模な降下軽石はいずれもデイサイト組成であり、 $\text{FeO}/\text{MgO}-\text{SiO}_2$ 図からは、入戸火砕流噴火の流紋岩マグマと、玄武岩質安山岩マグマとの混合によって形成されたことを示唆する。

後入戸火砕流期に始良カルデラから噴出したと考えられる新島軽石を作る流紋岩は、入戸火砕流噴火の流紋岩に比べるとやや SiO_2 に乏しい。また微量元素組成で見ると、Zn, Y, Zr といった液相濃集元素が先入戸火砕流噴火～入戸火砕流噴火の流紋岩に比べると有意に高い (図 2.3-3)。同じく後入戸火砕流期の桜島噴出物 (薩摩軽石・桜島 P11 軽石) などは、入戸火砕流の流紋岩に比べて有意に Zn, Zr 濃度が高い (図 2.3-3)。

これら始良カルデラ噴出物の全岩化学組成は、始良カルデラ直下に少なくとも 6 万年前以降同一組成の流紋岩が貯留されており、約 3 万年前の入戸火砕流噴火に先立ついくつかのより規模の小さな噴火でもこれらのマグマが噴出していたこと、これらのマグマはしばしば苦鉄質マグマの混入を受けていたことを示している。

一方、入戸火砕流噴火以降に始良カルデラに蓄積・噴出している流紋岩マグマは、微量成分で見ると入戸火砕流噴火までの流紋岩マグマとは明瞭に区別が可能であり、新たな流紋岩マグマの蓄積が起きていることを示唆する。この流紋岩マグマは新島軽石の噴火では直接噴出したほか、桜島の安山岩マグマの珪長質単成分である可能性がある。

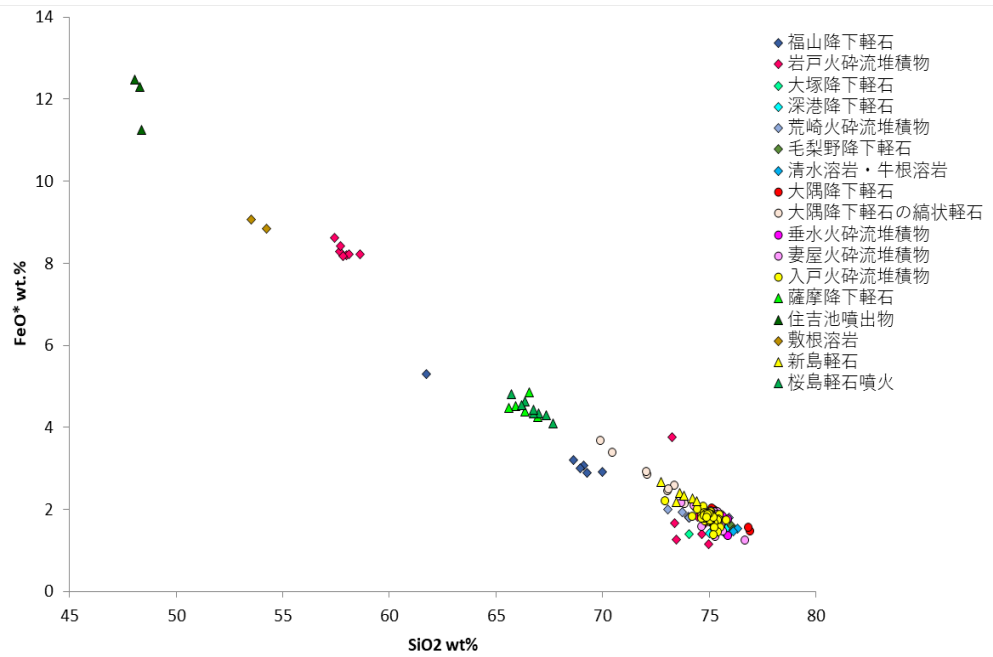


図 2.3-1-1 始良カルデラ及び周辺の過去約 10 万年間の噴出物組成. 横軸は全岩 SiO₂ 量, 縦軸は全岩 FeO*量.

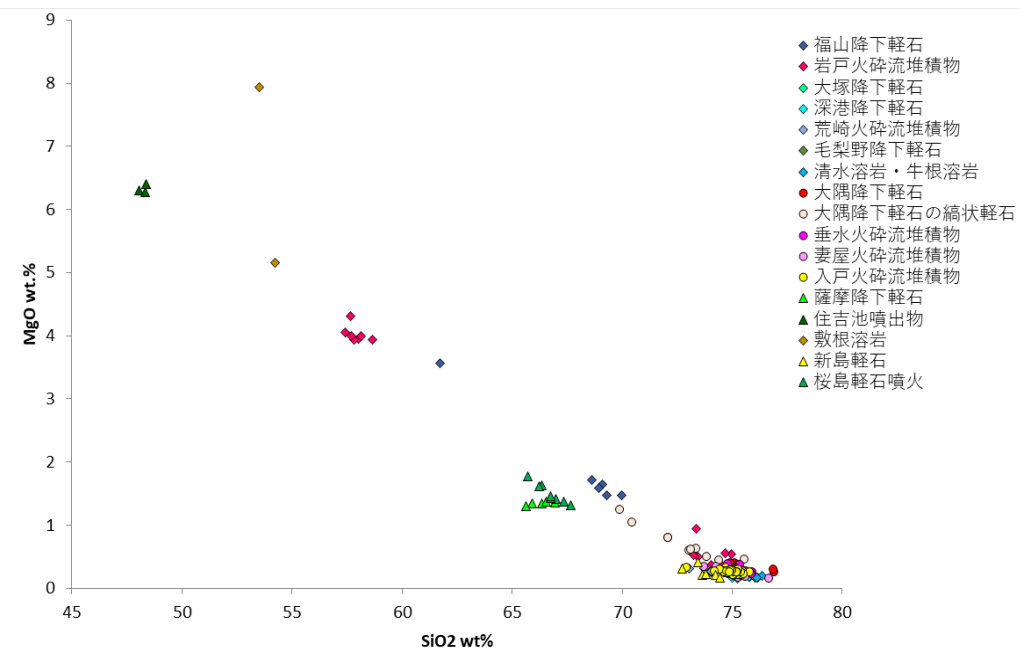


図 2.3-1-2 始良カルデラ及び周辺の過去約 10 万年間の噴出物組成. 横軸は全岩 SiO₂ 量, 縦軸は全岩 MgO 量.

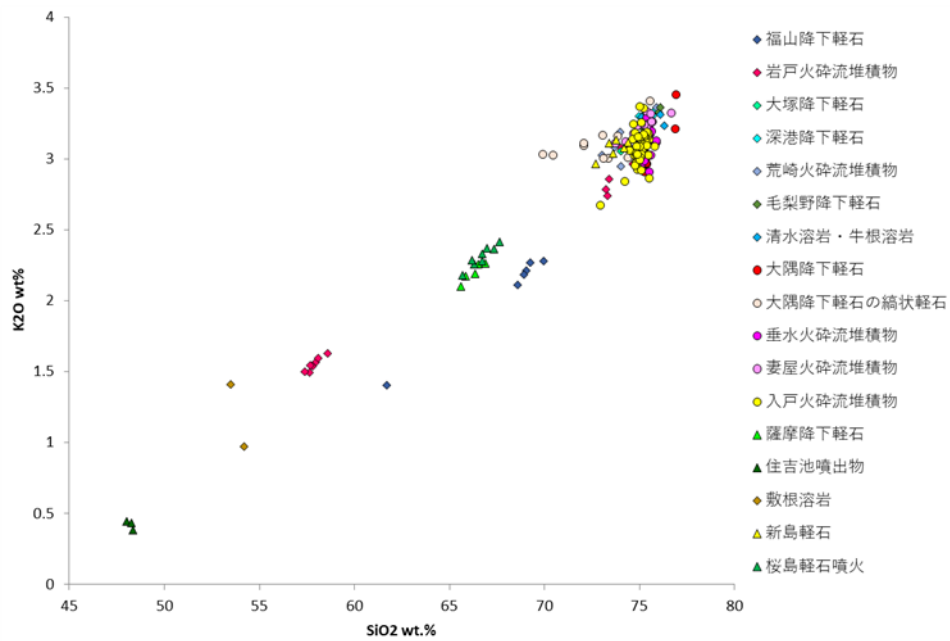


図 2.3-1-3 始良カルデラ及び周辺の過去約 10 万年間の噴出物組成. 横軸は全岩 SiO_2 量, 縦軸は全岩 K_2O 量.

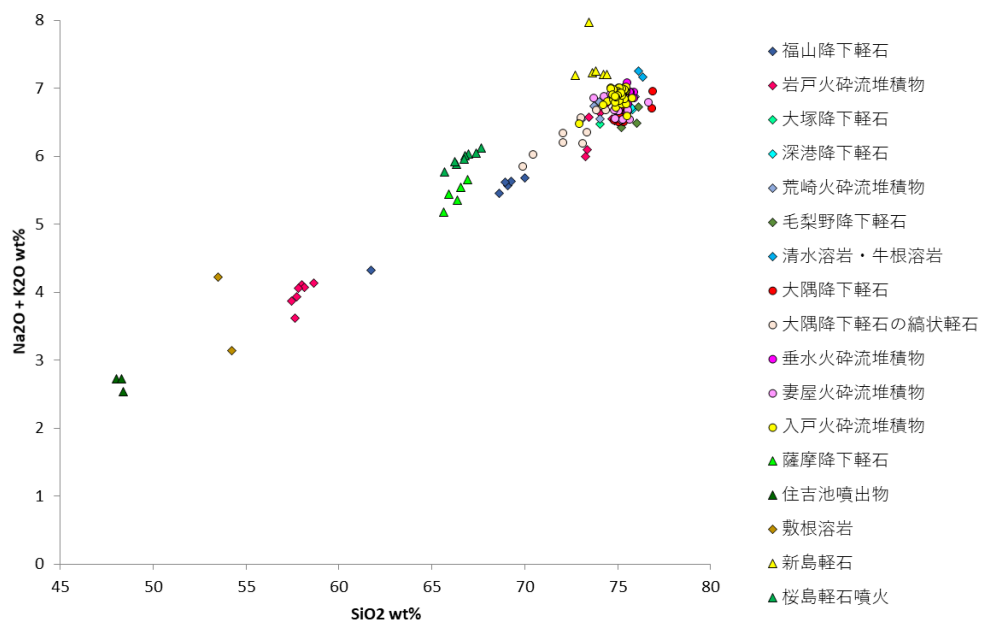


図 2.3-1-4 始良カルデラ及び周辺の過去約 10 万年間の噴出物組成. 横軸は全岩 SiO_2 量, 縦軸は全岩 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 量.

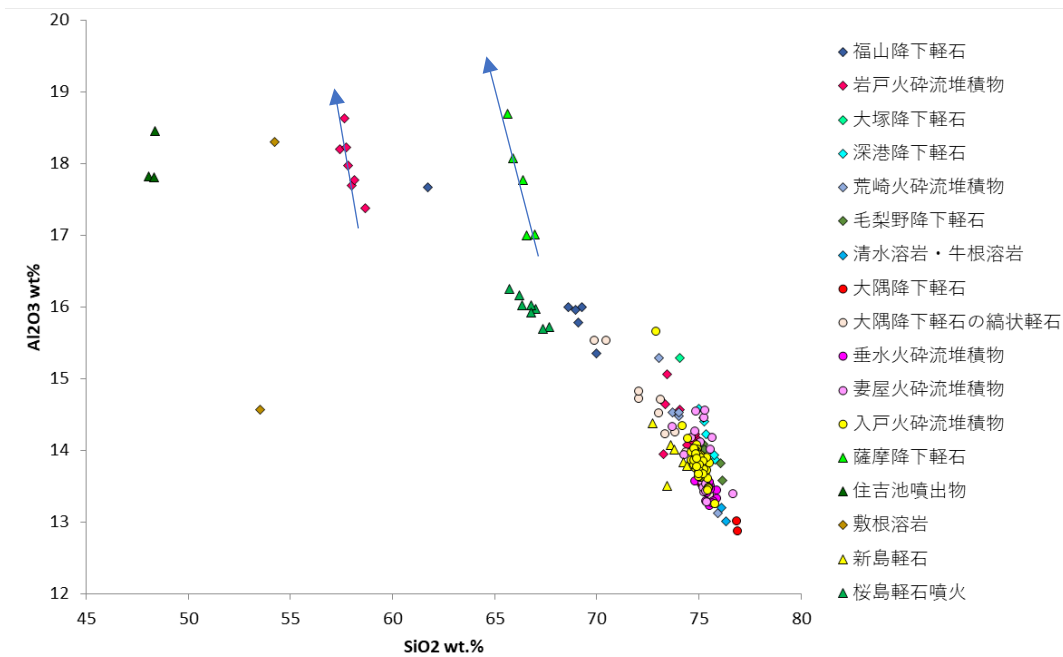


図 2.3-1-5 始良カルデラ及び周辺の過去約 10 万年間の噴出物組成. 横軸は全岩 SiO_2 量, 縦軸は全岩 Al_2O_3 量. 全岩 Al_2O_3 量の分布は全体として上に凸の曲線を描く. 岩戸火砕流堆積物および薩摩降下軽石にみられる直線状のトレンド (矢印) は, 斜長石結晶の集積効果による.

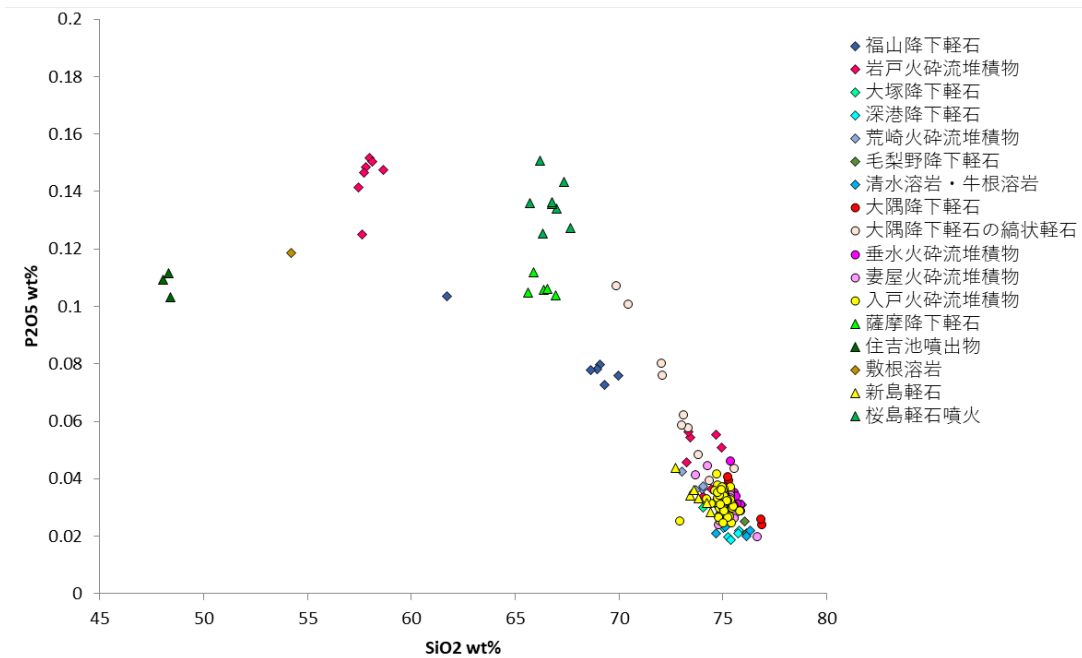


図 2.3-1-6 始良カルデラ及び周辺の過去約 10 万年間の噴出物組成. 横軸は全岩 SiO_2 量, 縦軸は全岩 P_2O_5 量. $\text{SiO}_2=60\text{wt}\%$ 付近で分布が屈曲する.

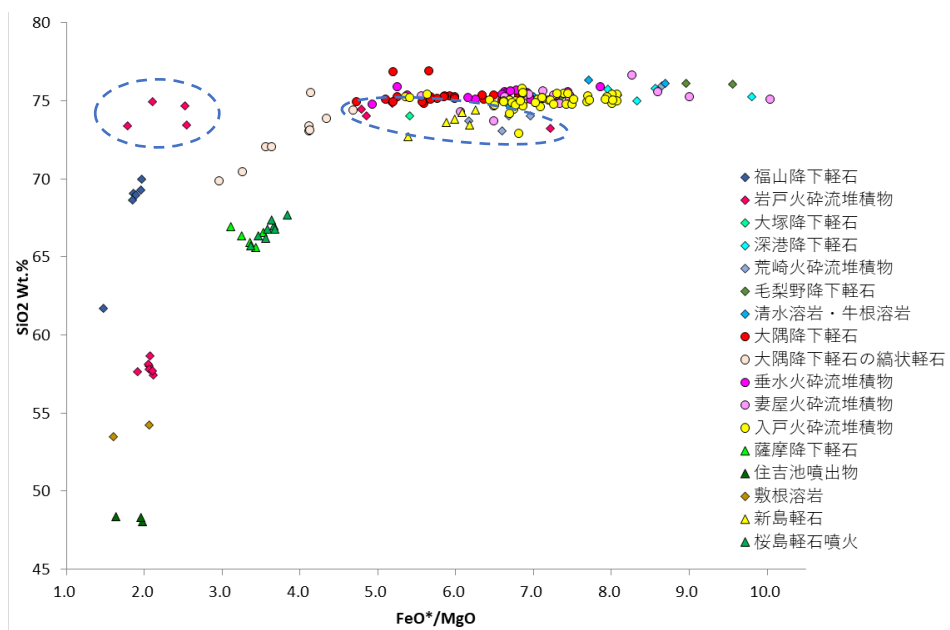


図 2.3-2 始良カルデラ及び周辺の過去約 10 万年間の噴出物組成. 横軸は全岩 FeO*/MgO 比, 縦軸は全岩 SiO₂ 量. 青破線で囲んだ範囲は, 岩戸火砕流堆積物に含まれる白色軽石の組成範囲を示す.

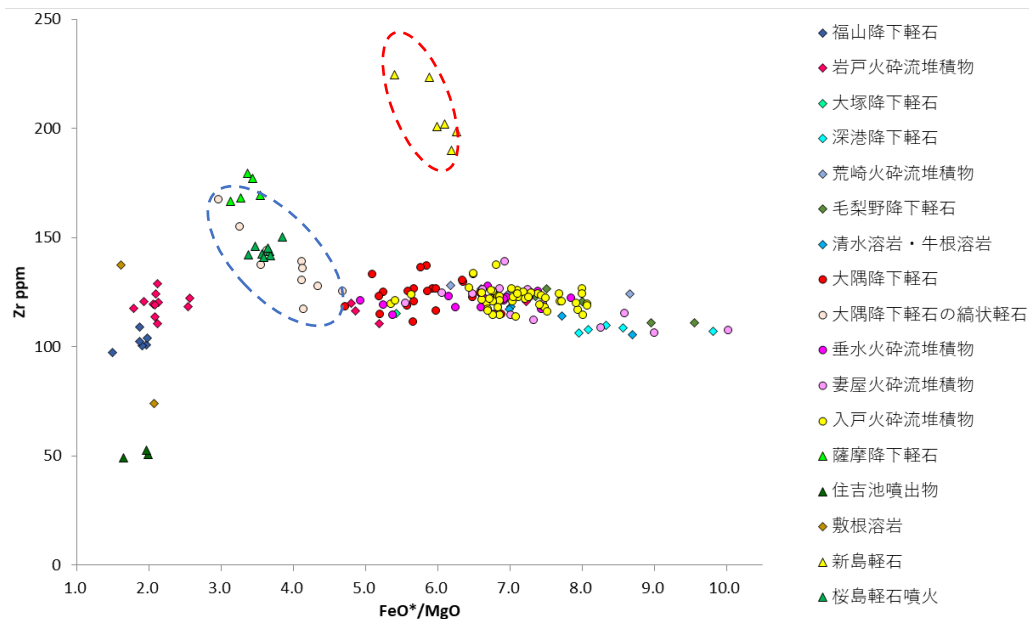


図 2.3-3-1 全岩 FeO*/MgO 比に対する全岩 Zr 量. 新島軽石の組成を赤破線, 大隅降下軽石中の縞状軽石の組成を青破線で示す.

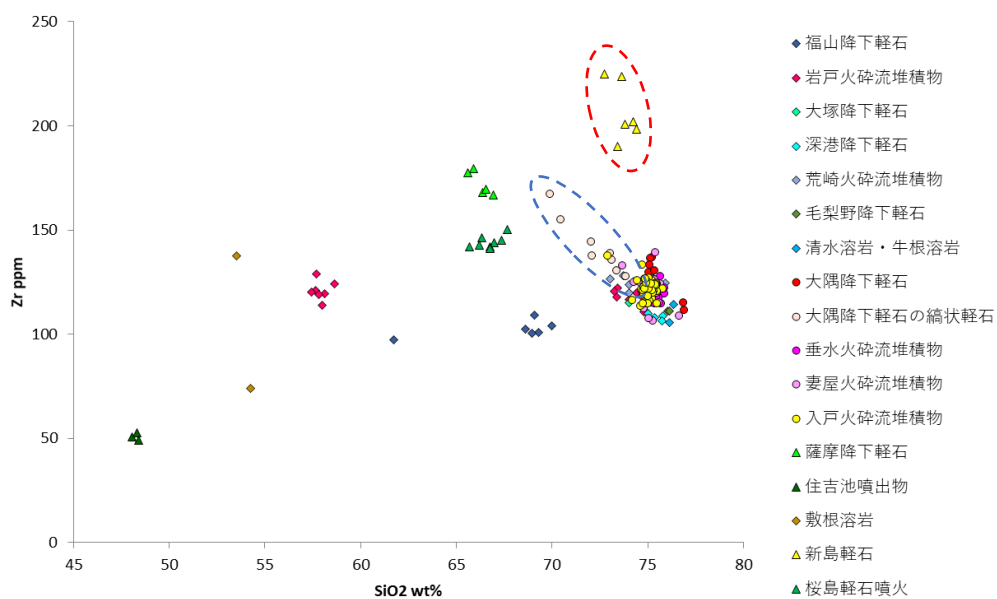


図 2.3-3-2 全岩 SiO₂ 量に対する全岩 Zr 量. 新島軽石の組成を赤破線, 大隅降下軽石中の縞状軽石の組成を青破線で示す. 新島軽石はこれら始良カルデラの噴出物の中で最も Zr が高い組成を持つ.

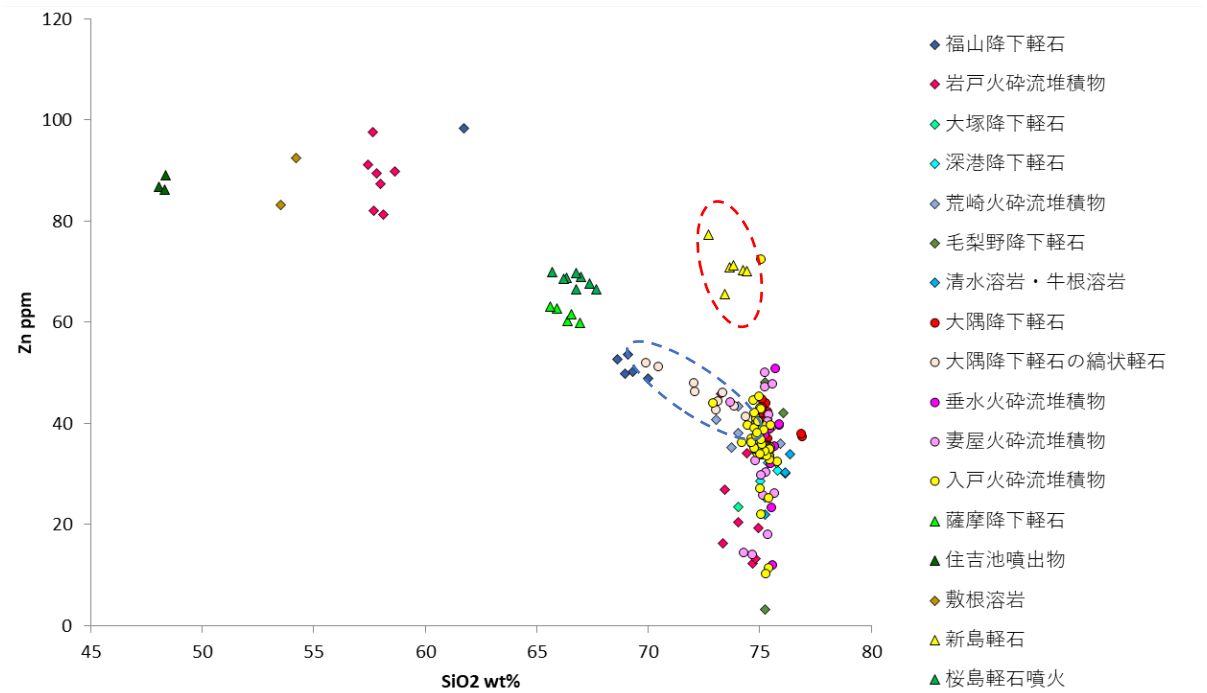


図 2.3-3-3 全岩 SiO₂ 量に対する全岩 Zn 量. 新島軽石の組成を赤破線, 大隅降下軽石中の縞状軽石の組成を青破線で示す.

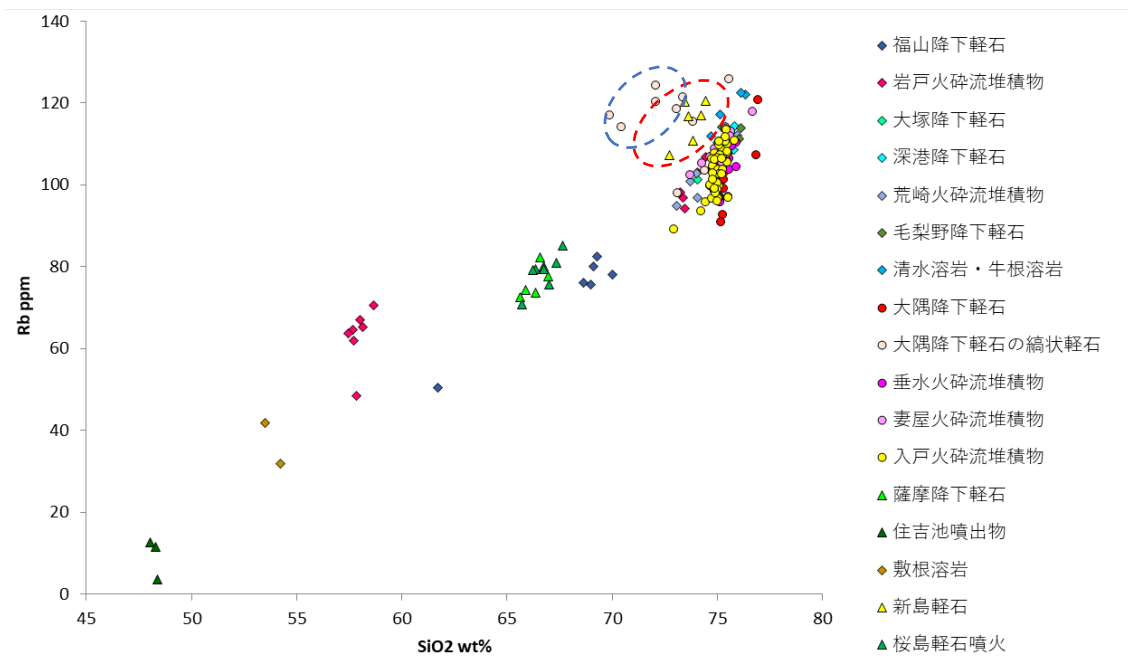


図 2.3-3-4 全岩 SiO₂ 量に対する全岩 Rb 量. 新島軽石の組成を赤破線, 大隅降下軽石中の縞状軽石の組成を青破線で示す.

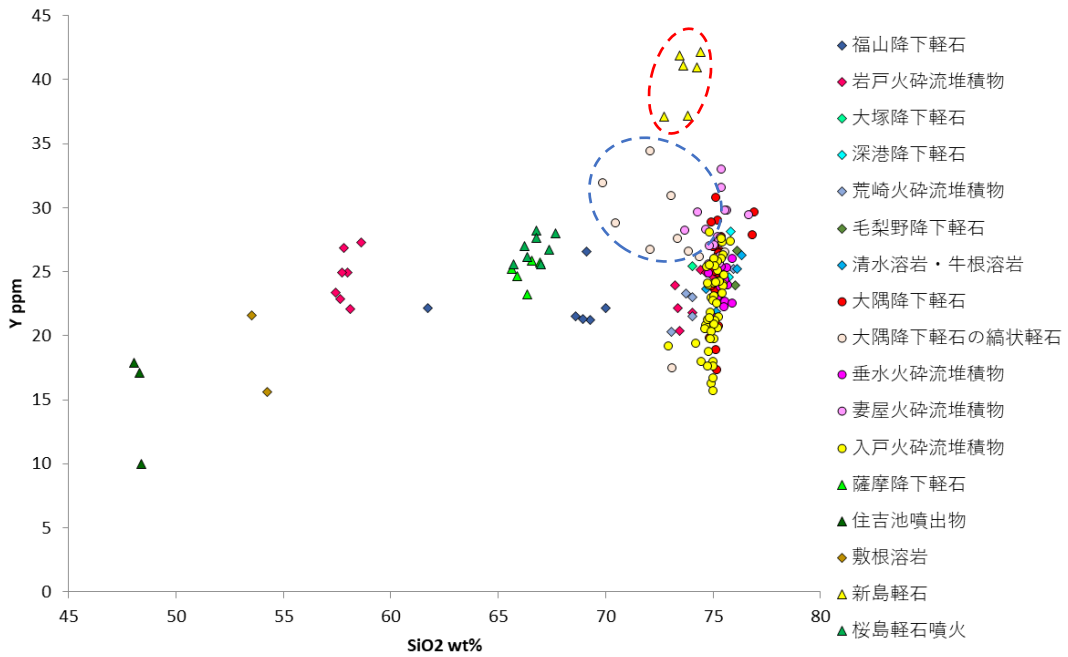


図 2.3-3-5 全岩 SiO₂ 量に対する全岩 Y 量. 新島軽石の組成を赤破線, 大隅降下軽石中の綯状軽石の組成を青破線で示す.

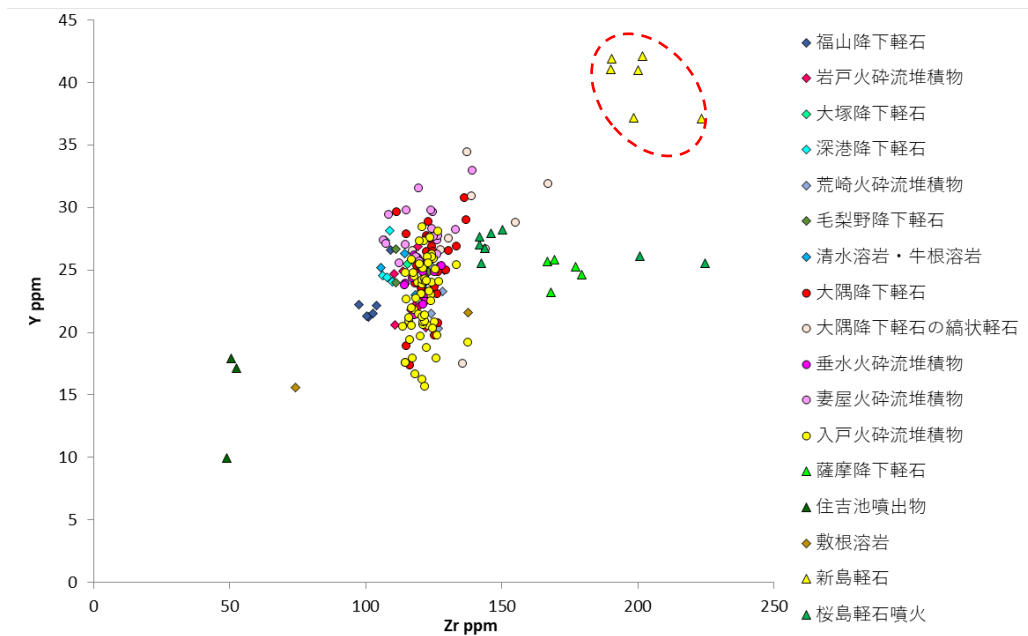


図 2.3-3-6 全岩 Zr 量に対する全岩 Y 量. 新島軽石の組成を赤破線で示す.

2.3) メルト包有物の含水量とマグマ定置深度

・分析手法

ガラス中の含水量の測定は、EDSによる炭素蒸着膜厚を補正した酸素を含む全元素の分析に基づき、ガラスを構成する陽イオン元素に対する酸素量から含水量を推定する方法（下司ほか，2017）を用いた。分析結果は、FR-IR および SIMS による含水量の定量結果と比較し、同等の分析精度があることを確認している（下司ほか，2017）。この方法を用いる場合、ガラスに含まれる鉄の価数が余剰酸素量に影響する。しかし、今回測定した始良カルデラ噴出物のガラス組成はいずれも流紋岩組成で、含まれる鉄は FeO 換算で 1 重量%に満たないこと、また結果として得られる含水量が 5%前後であったことから、鉄の価数の不確実性に伴う誤差は無視し得ると判断される。

測定に用いた試料のうち、岩戸火砕流堆積物、入戸火砕流堆積物に含まれる斑晶のガラス包有物には、徐冷によって生じたと考えられる二次鉱物の析出が頻繁に認められる。また分析値も広く分散している（図 2.3-4）ため、ここでは降下軽石から得られた値のみを用いて議論する。含水量の解析には、これら二次鉱物のみられるガラス包有物の値は除外した。本報告では、福山降下軽石、大塚降下軽石、深港降下軽石、毛梨野降下軽石、大隅降下軽石、新島軽石、および薩摩降下軽石に含まれる斑晶内のガラス包有物の含水量を用いて議論する。

・結果

福山軽石噴火から始良入戸火砕流噴火に至るまで、流紋岩質端成分マグマに含まれる斑晶のガラス包有物の含水量は、4.0~7.5wt%程度の範囲に分散し、噴火ごとに有意な違いはみられない。これは、流紋岩質の端成分マグマの平衡圧力が、福山軽石噴火以降大規模火砕流の噴出に至った入戸噴火までほぼ一定であったことを示唆する。斑晶はマグマ溜りの様々な深さからもたらされたと考えられるので、図 2.3-2 から斑晶含水量頻度がそれ以下では急激に減少する $H_2O=4\%$ がマグマ溜りの天井付近の圧力に相当する含水量と仮定すると、おおよそ 100MPa の平衡圧力が推定される（図 2.3-3）。地殻岩石の密度を 2000~2500 kg/m³ と仮定すると、入戸火砕流噴火に先行して存在した流紋岩マグマ溜りの天井の深さは約 4~5 km 程度と推測される。これは、メルト包有物の含水量や全岩・鉱物組成の化学平衡などから求めたマグマ溜り深度（安田ほか 2015）とも一致している。

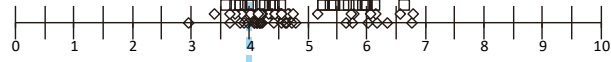
一方、後入戸火砕流期に噴出した新島軽石の含水量も 4.0~8.0 wt% 程度の範囲であり、その貯留深度は約 4~5 km 以深と推測される。

桜島火山で最大の噴火である P14 薩摩降下軽石の斑晶ガラス包有物の含水量は、それまでの噴出物に比べてやや低く、 $H_2O=4.0\%$ 程度のものが多く含まれている。

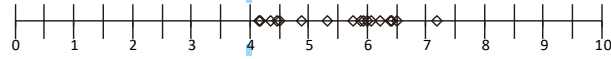
後入戸火砕流噴火期

P14 薩摩降下軽石

◇OPX: N=25 ◇CPX: N=32 □PL: N=27

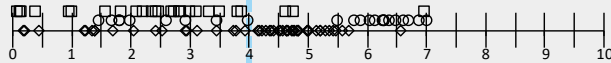


新島軽石 (◇OPX: N=17)

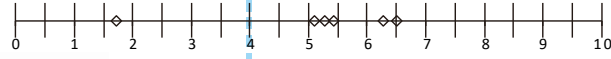


入戸火砕流噴火期

入戸火砕流堆積物 (◇OPX: N=51 ○Qz: N=23 □PL: N=27)



妻屋火砕流堆積物 (N=6)

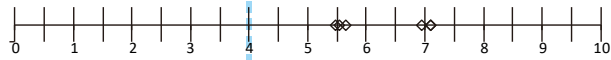


大隅降下軽石 (N=131)

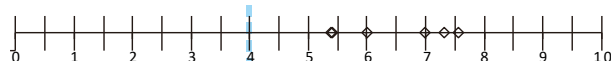


先入戸火砕流噴火期

深港降下軽石 (N=6)

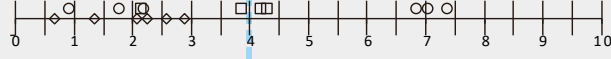


大塚降下軽石 (N=7)

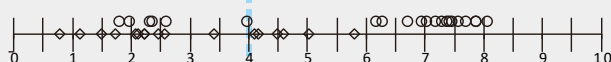


岩戸火砕流(白色軽石)

181122A (◇OPX: N=7, ○Qz: N=7 □PL: N=4)



151015A (◇OPX: N=17, ○Qz: N=21)



福山降下軽石 (◇OPX: N=15)



含水量 4wt%

含水量 (wt%)

図 2.3-4 先入戸火砕流～入戸火砕流噴火～後入戸火砕流期の噴出物に含まれる斑晶ガラス包有物の含水量 (横軸). 記号はそれぞれ分析したガラス包有物の平均した含水量. 記号はガラス包有物を含む結晶の種類. 灰色掛けした岩戸火砕流堆積物及び入戸火砕流堆積物に含まれるガラス包有物には微細結晶が晶出している. 縦の水色破線は大隅降下軽石に含まれるガラス包有物の含水量のほぼ下限である 4wt%の線を示す.

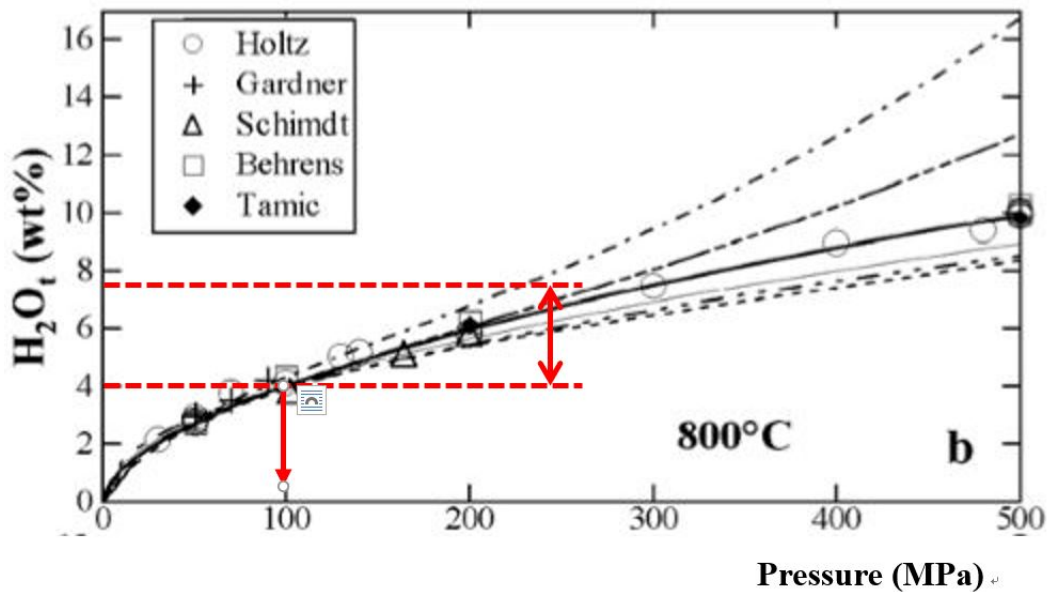


図 2.3-5 流紋岩メルトの含水量の圧力依存性. 図は Liu et al. (2005) の Figure 5 を引用し, 図 2.3-4 の大隅降下軽石のガラス包有物の含水量範囲 (4.0~7.5%) を示した. 含水量 4% は, 流紋岩メルトの約 100MPa における飽和含水量に相当し, 地殻岩石の密度を 2000~2500 kg/m³ と仮定すると約 4~5 km の深さに相当する.

2. 4) 斑晶組成累帯組織

入戸火砕流噴火噴出物に含まれる斑晶鉱物の累帯組織を解析した. 大隅降下軽石に含まれる斜方輝石斑晶は, 長径 2 mm 以下, 幅 1 mm 以下の長柱状の自形をしめす. ほとんどの斜方輝石斑晶は斑晶中心部では Mg/(Mg+Fe) 比が 0.52~0.55 程度で, 外縁部にむかって Mg/(Mg+Fe) 比が 0.45 程度まで低下する正累帯組織を示す (図 2.3-6-1). 斜方輝石斑晶中の Mg/(Mg+Fe) 比の不均質構造が均質化されずに保持されていることから, 結晶の累帯構造が形成後これらの結晶がマグマ温度に保持されていた時間は比較的短いことが推測される.

少量の斜方輝石斑晶は逆累帯構造をもつ. これらの結晶は, Mg/(Mg+Fe) 比が高い中心部をもち周辺部に向かうにつれて単調に Mg/(Mg+Fe) 比が低下する正累帯構造をもつ内部が, より Mg/(Mg+Fe) 比が高いリムに取り囲まれている (図 2.3-6-2). 外縁部の Mg/(Mg+Fe) 比が高く, 後方散乱電子線像で暗く見えるリム部分は, その内側との境界が入り組んだ複雑な形状を示す. またこの領域に多くのガラス包有物が含まれる. このような虫食い状の組織は, マグマ混合等による結晶の融解組織と考えられることから, 入戸火砕流噴火の直前に, 珩長質マグマ溜まりの一部は斜方輝石斑晶の溶融を伴うような, 高温で苦鉄質のマグマの注入を被ったことが推測される.

大隅降下軽石に含まれる斜方輝石斑晶にみられる逆累帯組織は、組成累帯構造の境界が不明瞭であり、組成累帯構造が形成されたのち十分な元素拡散が生じたことを示す（図 2.3-6-2）。これは、流紋岩マグマ溜まりへの苦鉄質マグマの注入と混合後、マグマが噴出し軽石として急激に冷却されるまでに時間差があることを示唆する。

一方、入戸火砕流噴火に先立つ毛梨野降下軽石・深港降下軽石に含まれる斜方輝石には顕著な組成累帯組織は見いだされず、わずかに結晶中心から外縁部に向かい Mg 値が減少する正累帯組織が見られる例があるのみである（図 6.3）。このことは、毛梨野降下軽石・深港降下軽石の噴火時には、大隅降下軽石の噴出時に比べ苦鉄質マグマの混合による顕著な温度上昇やメルト組成の苦鉄質への変化は軽微であった可能性がある。

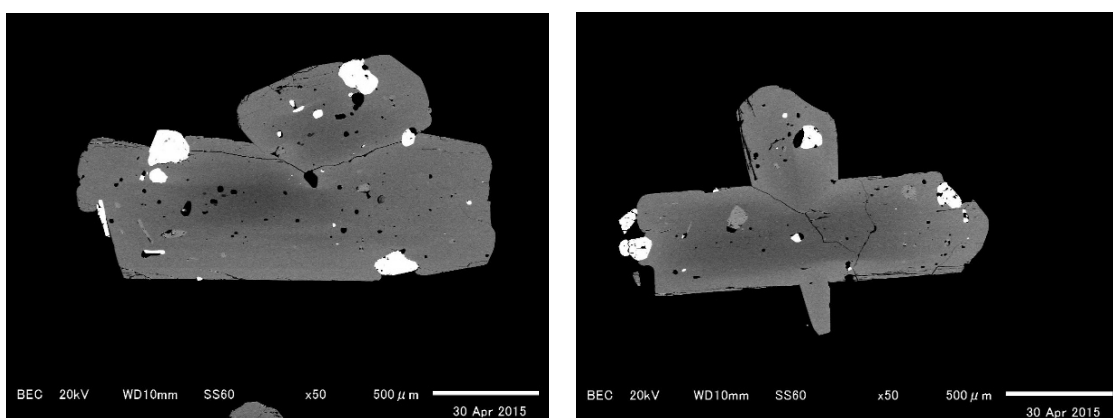


図 2.3-6-1 大隅降下軽石に含まれる斜方輝石斑晶の反射電子線像。大隅降下軽石に含まれる大多数の斜方輝石斑晶は、中心部から外縁部に向かって鉄が増加しマグネシウムが減少する正累帯組織を持つため、反射電子線像では中心が相対的に暗く外縁部に向かって単調に色調が明るくなる。

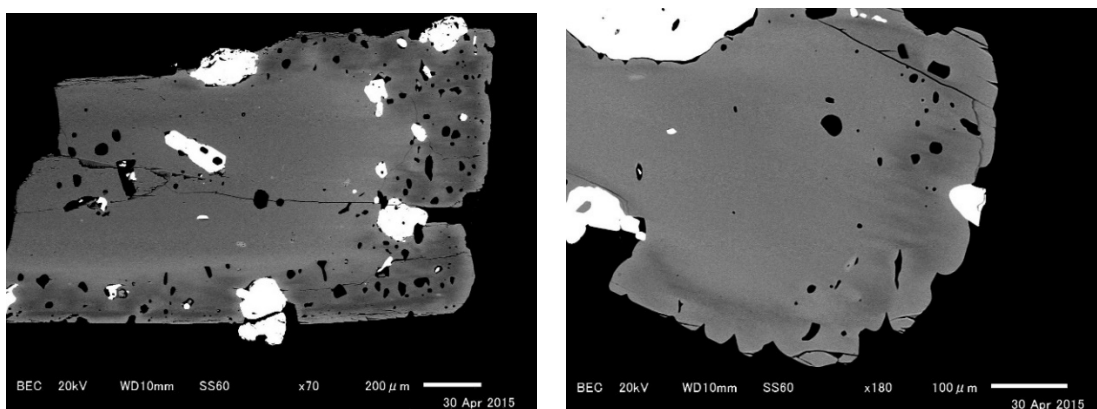


図 2.3-6-2 大隅降下軽石に含まれる斜方輝石斑晶の反射電子線像。大隅降下軽石にしばしば認められる、メルトの組成変化による結晶の熔融と再成長による逆累帯組織を持つ斜方輝石結晶。斑晶外縁部に、中心部に比べて鉄に乏しくマグネシウムに富む厚さ 100~200 μm の縁が見られる。結晶最外縁部は再び鉄に富むため明るい色調の部分が見られる。

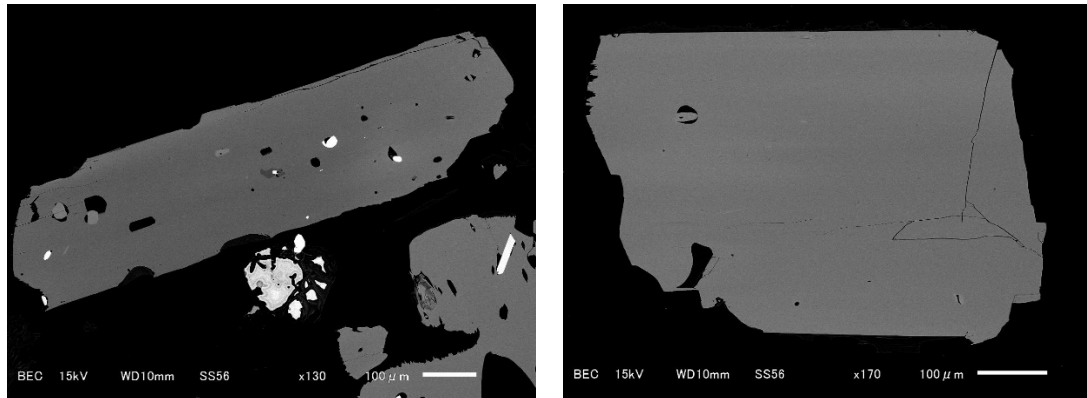


図 2.3-6-3 先入戸火砕流噴火の深港降下軽石（左）と毛梨野降下軽石（右）に含まれる斜方輝石斑晶の反射電子線像。ごく弱い正累帯構造が認められる。

2.5) 流紋岩マグマ温度

・分析手法

始良カルデラの主要な珪長質マグマに含まれる磁鉄鉱-チタン鉄鉱の組成からそれらの平衡温度を求めた。それぞれの試料に含まれる磁鉄鉱およびチタン鉄鉱の化学組成は、産業技術総合研究所が所有する波長分散型 EPMA 分析装置 JXA-8530Plus を用いて測定した。分析条件は加速電圧 15kV, 照射電流 12nA で、分析領域は 4 μ m 径である。得られた分析値は ZAF 法を用いて補正した。

・結果

岩戸火砕流堆積物から新島軽石までの流紋岩質噴出物から得られた磁鉄鉱-チタン鉄鉱平衡温度を図 7 に示す。岩戸火砕流の白色軽石、大塚降下軽石、深港降下軽石、毛梨野降下軽石に含まれる磁鉄鉱-チタン鉄鉱の平衡温度はおおよそ 700~800 $^{\circ}$ Cを示す。大隅降下軽石に含まれる磁鉄鉱-チタン鉄鉱の平衡温度はこれらより明らかに高温で 790~840 $^{\circ}$ C前後を示す。妻屋火砕流および入戸火砕流堆積物の磁鉄鉱-チタン鉄鉱の平衡温度は、大隅降下軽石のそれよりもやや低温で、730~800 $^{\circ}$ Cである。

これらの結果は、岩戸火砕流から入戸火砕流噴火前までは流紋岩マグマ溜まり温度はほぼ一定であったこと、入戸火砕流噴火の直前にマグマ溜まりの一部で温度が上昇しその部分が大隅降下軽石として噴出したこと、入戸火砕流噴火の噴出量の大部分を占める入戸火砕流のマグマの温度は、カルデラ噴火以前の長期間にわたる流紋岩マグマの温度とほぼ等しいことを示す。

このことは、大隅降下軽石の噴出直前に、流紋岩マグマ溜まりが苦鉄質マグマの注入を受けて部分的に昇温したことを示唆する。大隅降下軽石には苦鉄質マグマの混入を示す縞状軽石がしばしばみられること、大隅降下軽石の斑晶にはしばしば逆累帯組成構造が見られることなども苦鉄質マグマの注入を示唆する。

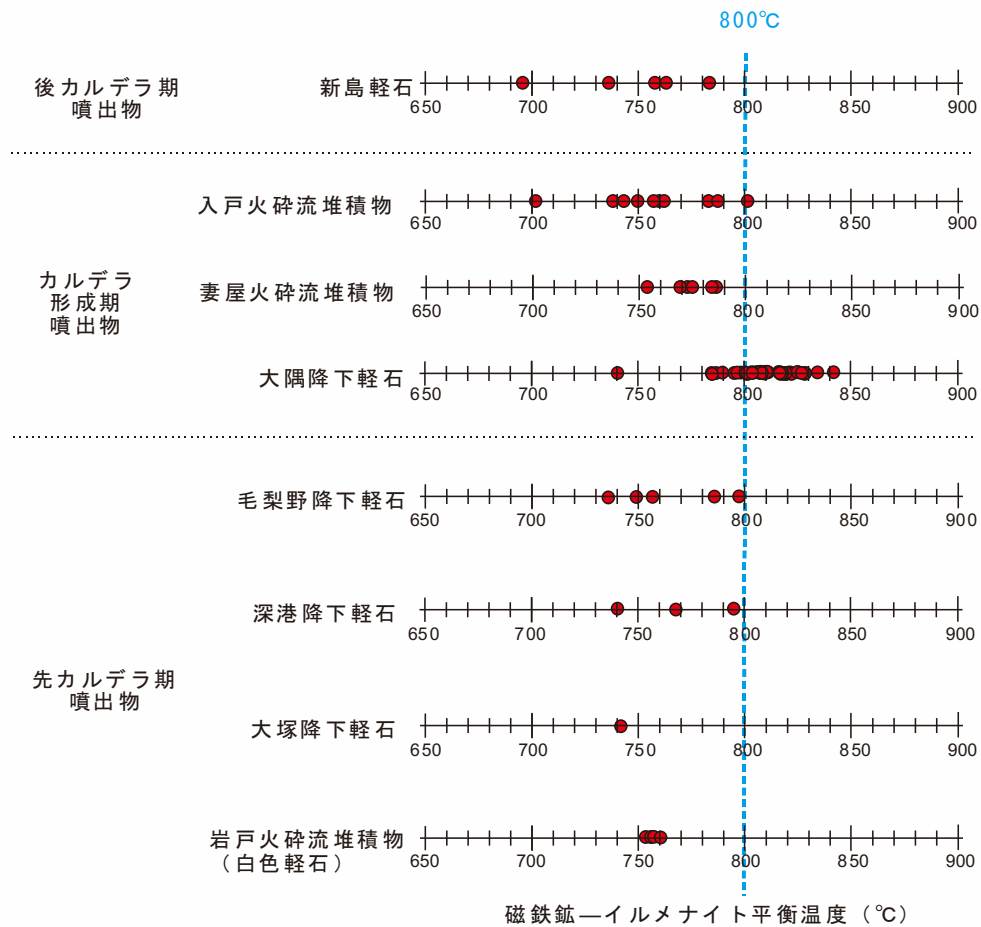


図 2.3-7 岩戸火砕流噴火 (60ka) から新島軽石(13ka)に至る, 始良カルデラから噴出した流紋岩マグマの磁鉄鉱—イルメナイト平衡温度の時間変化. 水色破線は 800°Cの平衡温度位置を示す. 大隅降下軽石の平衡温度は他の噴出物に比べ高く, 800°Cを超えるものが多い.

(3) まとめ

約 3 万年前の入戸火砕流噴火に先立ち始良カルデラから噴出した噴出物, 入戸火砕流噴火の噴出物, および入戸火砕流噴火後の始良カルデラ噴出物の岩石学的特徴を検討し, 始良カルデラにおける流紋岩マグマの蓄積条件の検討を行った. 始良カルデラの噴出物の全岩化学組成からは, 入戸火砕流噴火で噴出した $\text{SiO}_2=75\sim76\text{wt}\%$ の流紋岩マグマと類似した特徴を持つ流紋岩マグマが, 約 6 万年前と推測される岩戸火砕流噴出物の中に混合端成分として認められ, それ以降の少なくとも 3 回の始良カルデラからの火砕噴火でも同じマグマが噴出したことが分かった. これは, 少なくとも入戸火砕流噴火に先立つ約 3 万年前から, 入戸火砕流噴火で噴出した流紋岩マグマの蓄積が開始していたことを示唆する. 一方, 入戸火砕流後に噴出した流紋岩マグマを代表する新島軽石の化学組成は, 微量元素組成でみると入戸火砕流噴火までの流紋岩マグマとは明瞭に区別が可能であり, 入戸火砕流

噴火後始良カルデラには別の流紋岩マグマが蓄積し噴出していることを示している。

流紋岩質の噴出物の斑晶鉍物に含まれるガラス包有物の含水量解析から、この流紋岩マグマは深さ約 4~5 km 付近に天井を持つマグマ溜まりに蓄積されていたと推測される。また岩戸火砕流噴火~入戸火砕流噴火の間でガラス包有物の含水量範囲には顕著な違いは見られないことから、入戸火砕流噴火に先立ち流紋岩マグマが蓄積されていた深さには大きな変化はなかったと推測される。

斑晶組織の累帯構造からは、入戸噴火直前のマグマ溜まりへの高温・苦鉄質マグマの注入を示唆する。入戸火砕流噴火噴出物（大隅降下軽石・入戸火砕流）にしばしばみられる縞状軽石とその組成は、流紋岩マグマへの苦鉄質マグマの混入を示す。入戸火砕流噴火噴出物にしばしばみられる逆累帯組織を持ち熔融組織をもつ斑晶の存在もまた、流紋岩マグマへの苦鉄質マグマの混入を示す。流紋岩質噴出物に含まれる磁鉄鉍-チタン鉄鉍の平衡温度はほぼ一定であるが、入戸火砕流噴火の最初期に噴出した大隅降下軽石から得られた温度はその前後の噴出物に比較して有意に高く、入戸火砕流噴火の直前に高温のマグマの注入があったことを示唆する。

参考文献

- Aramaki, S. (1984) Formation of the Aira caldera, southern Kyushu, ~22,000 years ago. *J. Geophys. Res.*, 89, 8485-8501.
- 下司信夫・宮城磯治・斎藤元治 (2017) エネルギー分散型エックス線分析装置による火山ガラス含水量の簡易定量法. *火山*, 62, 13-22.
- 福島大輔 (2015) 始良火砕噴火の推移とマグマの発泡プロセス. *月刊地球*, 429, 252-258.
- 小林哲夫・溜池俊彦 (2002) 桜島火山の噴火史と火山災害の歴史. *第四紀研究*, 41, 269-278.
- Kano, K., Yamamoto, T. and Ono, K. (1996) Subaqueous eruption and emplacement of the Shinjima Pumice, Shinjima (Moeshima) Island, Kagoshima Bay, SW Japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 71, 187-206.
- Liu, Y., Zhang, Y., Behrens, H. (2005) Solubility of H₂O in rhyolitic melts at low pressures and a new empirical model for mixed H₂O-CO₂ solubility in rhyolitic melts. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.* 143, 219-235.
- 森脇 広・町田 洋・初見祐一・松島義章 (1986) : 鹿児島湾北岸におけるマグマ水蒸気噴火とこれに影響を与えた縄文海進. *地学雑誌*, 95, 94-113.
- 森脇広・永迫俊郎・西澤文勝・松島義章・鈴木毅彦・田中源吾 (2017) テフラ編年と ¹⁴C 年代に基づく鹿児島湾奥, 新島(燃島)の海成堆積物の編年とその意義. *地学雑誌*, 126, 557-579
- 長岡信治・奥野 充・新井房夫 (2001) 10 万~3 万年前の始良カルデラ火山のテフラ層序と噴火史. *地質学雑誌*, 107, 432-450.
- 西村光史・小林哲夫 (2015) 始良カルデラ, 高野ベースサージ堆積物と新島火砕流堆積物

の化学的特徴. 月刊地球 429, 259-264.

新エネルギー総合開発機構(1987) 昭和61年度全国地熱資源総合調査(第2次)火山性熱水対流系地域タイプ(国分地域), 88 p.

周藤正史・石原和弘・巽好幸(2000) 始良カルデラ地域の先カルデラ火山活動史～カルデラ北縁部加治木, 国分地域及び南縁部牛根地域の溶岩流試料の K-Ar 年代. 火山, 45, 1-12.

山元孝広・下司信夫・小林哲夫(2013) 桜島火山, 横山コアから見出された火砕堆積物の岩石化学的特徴. 火山, 58, 519-528.

安田敦・吉本充宏・藤井敏嗣(2015) 始良火砕噴火のマグマ溜まり深度. 火山, 60, 381-397.

2.4 鬼界カルデラ噴出物の岩石学的検討

【実施内容】

鬼界カルデラ噴出物については、平成 25-29 年度に、鬼界アカホヤ噴火（7.3 千年前）によって噴出した降下軽石及び火砕流堆積物に含まれる軽石・スコリアについて岩石学的解析とメルト包有物化学分析を行い、同噴火マグマの化学的特徴と温度・圧力条件を検討した。その結果、流紋岩マグマについては輝石温度計で $902\pm 15^{\circ}\text{C}$ ($n=35$)、鉄チタン鉱物温度計で $874\pm 6^{\circ}\text{C}$ ($n=7$)、安山岩マグマについては輝石温度計で $975\pm 5^{\circ}\text{C}$ ($n=5$) が得られた。これらの温度推定結果とメルト包有物の H_2O および CO_2 濃度（平成 25-28 年度成果）を用いてマグマのガス飽和圧力を見積もったところ、流紋岩マグマは $146\pm 53\text{MPa}$ ($61\text{-}276\text{MPa}$, $n=31$)、安山岩マグマは $115\pm 27\text{MPa}$ ($83\text{-}177\text{MPa}$, $n=21$) の圧力下にあったと推定された。両マグマのガス飽和圧力の平均値は $133\pm 46\text{MPa}$ ($n=52$) であることから、地殻密度を 2500kg/m^3 と仮定すると、鬼界アカホヤ噴火マグマ溜まりの主体は深さ $5\pm 2\text{km}$ にあったと推定できた。そこで、平成 30 年度は、これらのメルト包有物分析によるマグマの深度（圧力）推定の確度と妥当性を検討するため、(1) 竹島火砕流堆積物に含まれるメルト包有物 30 個の追加分析による圧力データの蓄積、と (2) 竹島火砕流上部ユニットに含まれるスコリアの全岩化学組成データを用いた安山岩マグマの熱力学解析、を行った。(1) では、メルト包有物の H_2O および CO_2 濃度から得られた圧力について、今年度までの結果全てをまとめたところ、流紋岩マグマは $153\pm 50\text{MPa}$ ($61\text{-}276\text{MPa}$, $n=40$)、安山岩マグマは $105\pm 25\text{MPa}$ ($69\text{-}177\text{MPa}$, $n=42$) と算出された。両マグマの圧力の平均値は $128\pm 46\text{MPa}$ ($n=82$) である。これらの平均値と標準偏差は平成 29 年度に得られた値とほぼ同じであった。

(2) においては、安山岩マグマの熱力学解析結果と安山岩スコリアの岩石学的解析・メルト包有物分析から得られた安山岩マグマの温度・圧力・含水量・メルト量・斑晶量を比較した結果、おおよそ整合的な結果が得られた。さらに、鬼界アカホヤ噴火に至るマグマ供給系の発達過程を検討するために、9.5 千年前の噴火噴出物（籠港降下スコリア、安山岩組成）と 95 千年前のカルデラ噴火（鬼界葛原噴火）の噴出物（長瀬火砕流堆積物、流紋岩組成）について EPMA および SIMS によるメルト包有物化学分析を実施した。その結果、籠港降下スコリアに含まれるメルト包有物は、主成分元素組成は竹島火砕流スコリアに含まれるメルト包有物と同様であるが、揮発性成分濃度に関しては同メルト包有物とはやや異なることが判明した。また、長瀬火砕流堆積物に含まれる流紋岩メルト包有物の主成分元素および揮発性成分の特徴は、鬼界アカホヤ噴火の流紋岩メルト包有物のそれとは異なることが判明した。これらの結果は、9.5 千年前の噴火と 95 千年前のカルデラ噴火では、鬼界アカホヤ噴火（7.3 千年前）とは異なるマグマが活動したことを示唆している。

【研究成果】

2.4.1 はじめに

鬼界カルデラは薩摩硫黄島火山の活動により形成された東西 20km、南北 17km の大型カルデラで、鹿児島県薩摩半島の南約 50km に位置する。カルデラ地形の大部分は海没しており、陸上部は薩摩硫黄島・竹島・昭和硫黄島と数個の岩礁のみである。薩摩硫黄島火山は約 70 万年前から活動を開始し、現在まで断続的に噴火活動を継続している（小野・他、1982）。小野・他（1982）

によれば、その噴火史は大きく先カルデラ火山期、カルデラ形成期（60 万年～7.3 千年前）、後カルデラ火山期（7.3 千年前～現在）に分けられる。先カルデラ火山期には、玄武岩・安山岩マグマによる小成層火山形成と流紋岩・デイサイトマグマによる厚い溶岩流の噴火があった。カルデラ形成期には大規模火砕流の流出を伴う噴火が 2 回以上と、より小規模な活動があり、このうちの 2 回の噴火でカルデラが陥没・拡大したと考えられている（小野・他，1982）。このうち、最新のカルデラ噴火が 7.3 千年前に起きた「鬼界アカホヤ噴火」で、その噴出物量は 170km^3 以上と考えられている（町田・新井，2003）。鬼界カルデラ近傍にある鬼界アカホヤ噴火の噴出物は、最下部の「幸屋（船倉）降下軽石」とその上位の「竹島火砕流堆積物」に大別できる。また、鬼界アカホヤ噴火の直前の 9.5 千年前に「籠港降下スコリア」を放出する噴火が起きている。後カルデラ火山期も断続的に噴火活動を継続し、流紋岩マグマの活動によって硫黄岳が、玄武岩マグマの活動によって稲村岳が形成された。最新のマグマ噴火は 1934・35 年の流紋岩マグマによる海底噴火で、硫黄島の東海岸沖に昭和硫黄島を形成した（例えば，Kawanabe and Saito, 2002）。さらに、後カルデラ火山期には、噴火活動とともに活発な火山ガス放出活動が継続している。

本研究ではマグマ供給系発達過程の詳細化を行うモデル事例として、鬼界アカホヤ噴火を研究対象とする。鬼界アカホヤ噴火の噴火準備過程を解明するには、マグマ溜まりの発達史と噴火直前の温度・圧力環境を知る必要がある。鬼界アカホヤ噴火は国内で起きた最新のカルデラ噴火であるため、噴火による堆積物の風化・浸食・変質が少なく、新鮮な試料を分析試料として用いることが出来る。また、噴出物の鉱物化学分析から地質温度計を用いることでマグマ溜まりの温度を、メルト包有物分析の揮発性成分 (H_2O , CO_2) の濃度測定からマグマの圧力を推定することができる。鬼界アカホヤ噴火後のマグマ溜まりについては、岩石学的解析 (Saito et al., 2002) やメルト包有物分析 (Saito et al., 2001; Saito et al., 2003) などの研究により、その化学的特徴や温度・圧力環境が明らかにされている。一方、鬼界アカホヤ噴火マグマ溜まりについては、Saito et al. (2001) で一部の火砕流堆積物についてのみ行われているだけで、系統的な解析は未だ行われていなかった。

そこで、平成 25・29 年度に本委託費研究において、鬼界アカホヤ噴火堆積物の幸屋（船倉）降下軽石とその直上にある竹島火砕流堆積物に含まれる軽石とスコリア（以後、「竹島火砕流軽石」、「竹島火砕流スコリア」と称する）について岩石学的解析とメルト包有物化学分析を行い、鬼界アカホヤ噴火に放出されたマグマの化学的特徴を明らかにし、マグマ溜まりの温度・圧力条件について検討した（産業技術総合研究所，2014，2015，2016，2017，2018）。その結果、噴火マグマは主体である流紋岩マグマに加えて安山岩マグマがマグマ溜まりに存在していたことが明らかになった。また、その圧力条件は、流紋岩マグマが 61-276MPa、安山岩マグマが 83-177MPa と見積もられた。そこで、平成 30 年度は、マグマ溜りの圧力環境をより詳細に検討するため、同噴火による竹島火砕流堆積物に含まれるメルト包有物の追加分析を行い、 H_2O および CO_2 濃度の変動範囲について確認した。用いた試料として、軽石、スコリアに加えて、これまで分析してなかった縞状軽石を新たに加えた。また、竹島火砕流の上部ユニットに含まれるスコリアの全岩化学組成データを用いて安山岩マグマの熱力学解析を行ない、安山岩スコリアの岩石学的解析・メルト包有物分析から得られたマグマの温度・圧力・含水量・メルト量・斑晶量と比較した。これらの結果を元に、地下に伏在するマグマ溜まりの深さ指標となるマグマの圧力条

件を再検討した。また、鬼界アカホヤ噴火に至るマグマ供給系の発達過程を検討するために、鬼界アカホヤ噴火の直前の噴火（9.5 千年前）の安山岩噴出物（籠港降下スコリア）について SIMS によるメルト包有物の微小領域化学分析を行い、その揮発性成分濃度を把握した。また、95 千年前のカルデラ噴火（鬼界葛原噴火）の噴出物（長瀬火砕流堆積物内の軽石）に含まれるメルト包有物について SIMS 分析を行い、マグマの揮発性成分濃度について予察的な結果を得た。

2.4.2 竹島火砕流堆積物の岩石学的解析とメルト包有物の追加分析

鬼界アカホヤ噴火で噴出した竹島火砕流堆積物は非溶結の堆積物（小野・他，1982）で、地質調査の結果、上部・中部・下部の3つのユニットに分かれることが判明している。中部および上部ユニットには白～灰白色の軽石の他に、暗灰色～黒色でやや重いスコリア（大きさ最大 50cm）と縞状軽石が存在する。既往研究（平成 28 年度成果など）では、このスコリアの全岩化学組成等の特徴が明らかにされているが、岩石学的特徴の重要な要素の1つである「モード組成」については未着手のままだった。そこで、本研究では、竹島火砕流堆積物の中部ユニットから採取したスコリア（以下「竹島火砕流中部ユニットスコリア」と呼ぶ）1個と竹島火砕流堆積物の上部ユニットから採取したスコリア（以下「竹島火砕流上部ユニットスコリア」と呼ぶ）2個について、そのモード組成分析を実施した。分析には本研究で平成 28 年度に導入した電子線マイクロアナライザー（日本電子（株）製 JXA-8530F；産総研活断層・火山研究部門に設置済み、以下「EPMA」と呼ぶ）を用いた。その結果、スコリアの発泡度（スコリア中の泡の体積率）は 52-67vol%，固体部分の斑晶量 29-35vol%，石基 66-72vol%となった（表 2.4-1，図 2.4-1）。最も多い斑晶はどのスコリアも斜長石で、固体部分の 15-24vol%を占める。上部ユニットスコリアの方が中部ユニットスコリアより、発泡度が小さく、斑晶量が多い（即ち、石基量が少ない）傾向が見られるが、分析数が少ないので断定はできない。

さらに、竹島火砕流堆積物に含まれるメルト包有物の追加分析を行い、 H_2O および CO_2 濃度の変動範囲について検討した。用いた試料は、竹島火砕流下部ユニット軽石（試料番号 06IW24-5）、竹島火砕流中部ユニットスコリア（試料番号 06IW29-3）、竹島火砕流上部ユニットの軽石（試料番号 06IW42-1）、スコリア（試料番号 06IW42-2）、縞状軽石（試料番号 06IW42-3、図 2.4-2）に含まれる斜長石、単斜輝石、斜方輝石および磁鉄鉱内のメルト包有物（大きさ 0.03-0.24mm）30個である（表 2.4-2）。金蒸着したメルト包有物について、主成分化学組成を EPMA で測定するとともに、 H_2O 、 CO_2 、S および Cl 濃度を二次イオン質量分析計（平成 28 年度に本研究で産総研活断層・火山研究部門に設置済み、以下「SIMS」と呼ぶ）で測定した（表 2.4-2）。EPMA 測定条件および誤差は、平成 28 年度成果に記載済みである。SIMS は Cameca 製 nanoSIMS50L を用い、 Cs^+ の 1 次イオンビームを金蒸着したメルト包有物に照射し、放出された 1H 、 ^{12}C 、 ^{32}S 、 ^{35}Cl 、 ^{30}Si の二次イオン数を測定し、標準ガラス試料で作成した SIMS 検量線で濃度を算出した。SIMS の分析手順は Saito et al. (2010) にまとめられている。

今年度分析した竹島火砕流下部ユニット軽石のメルト包有物 4 個の SiO_2 濃度（74-76 wt%，表 2.4-2）は、平成 26 年度に得られた同軽石のメルト包有物と石基ガラスの SiO_2 濃度（72-76wt% および $74.8\pm 1.4wt\%$ ）にほぼ一致している。また、他の主成分元素についても同様である。この一致は今回分析したメルト包有物も母斑晶に捕獲された時期が流紋岩マグマの急冷固化の直前で

あることを示す。今年度分析したメルト包有物の H₂O 濃度は 3.5-6.3 wt%, CO₂ 濃度は 0.002-0.031 wt%, S 濃度は 0.006-0.008wt%, Cl 濃度は 0.113-0.126wt%であり, 平成 26 年度成果 (同軽石のメルト包有物 9 個について, H₂O 濃度 2.9-6.0 wt%, CO₂ 濃度 0.014-0.058 wt%, S 濃度 0.003-0.019 wt%, Cl 濃度 0.099-0.151wt%) にほぼ一致している (図 2.4-3)。

竹島火砕流中部ユニットスコリアのメルト包有物 6 個の SiO₂ 濃度 (64-66 wt%, 表 2.4-2) は, 平成 28 年度に得られた同スコリアのメルト包有物と石基ガラスの SiO₂ 濃度 (66-67wt%および 66.29±2.24wt%) におおよそ一致している。また, 他の主成分元素についてもメルト包有物と石基ガラスの濃度は同様である。この一致はメルト包有物が母斑晶に捕獲された時期がマグマの急冷固化の直前であることを示す。今年度分析したメルト包有物の H₂O 濃度は 2.3-3.9 wt%, CO₂ 濃度は 0.018-0.028 wt%, S 濃度は 0.062-0.077 wt%, Cl 濃度は 0.090-0.105 wt%であり, 平成 28 年度成果 (同スコリアのメルト包有物について, H₂O 濃度 2.4-4.8 wt%, CO₂ 濃度 0.018-0.048 wt%, S 濃度 0.079-0.104 wt%, Cl 濃度 0.082-0.099 wt%) とほぼ一致している (図 2.4-3)。

今年度分析した竹島火砕流上部ユニット軽石のメルト包有物 5 個の SiO₂ 濃度 (70-75 wt%, 表 2.4-2) は, 平成 27 年度に得られた同軽石のメルト包有物と石基ガラスの SiO₂ 濃度 (65-77 wt%および 71.02±4.86 wt%) の変動範囲に含まれる。また, 他の主成分元素についても同様である。この結果は今回分析したメルト包有物も母斑晶に捕獲された時期が安山岩マグマの急冷固化の直前であることを示す。今年度分析したメルト包有物の H₂O 濃度は 3.3-5.8 wt%, CO₂ 濃度は 0.010-0.047 wt%, S 濃度は 0.007-0.027 wt%, Cl 濃度は 0.095-0.152 wt%であり, 平成 27 年度成果 (同軽石のメルト包有物 9 個について, H₂O 濃度 2.6-4.7 wt%, CO₂ 濃度 0.007-0.046 wt%, S 濃度 0.007-0.119 wt%, Cl 濃度 0.072-0.164 wt%) とほぼ一致している (図 2.4-3)。

竹島火砕流上部ユニットスコリアのメルト包有物 6 個の SiO₂ 濃度 (64-65 wt%, 表 2.4-2) は, 平成 28 年度に得られた同スコリアのメルト包有物と石基ガラスの SiO₂ 濃度 (64-68 wt%および 66.16±1.61 wt%) におおよそ一致している。また, 他の主成分元素についてもメルト包有物と石基ガラスの濃度は同様である。この一致はメルト包有物が母斑晶に捕獲された時期がマグマの急冷固化の直前であることを示す。今年度分析したメルト包有物の H₂O 濃度は 2.4-2.9 wt%, CO₂ 濃度は 0.011-0.018 wt%, S 濃度は 0.061-0.094 wt%, Cl 濃度は 0.077-0.106 wt%であり, 平成 28 年度成果 (同スコリアのメルト包有物について, H₂O 濃度 2.2-3.3 wt%, CO₂ 濃度 0.014-0.058 wt%, S 濃度 0.031-0.119 wt%, Cl 濃度 0.070-0.118 wt%) と比べると, やや CO₂ 濃度が低い以外, ほぼ一致している (図 2.4-3)。

竹島火砕流上部ユニット縞状軽石のメルト包有物 9 個の SiO₂ 濃度 (62-66 wt%, 表 2.4-2) は, 平成 28 年度に得られた竹島火砕流上部ユニットスコリアのメルト包有物と石基ガラスの SiO₂ 濃度 (64-68 wt%および 66.16±1.61 wt%) に近い。また, 他の主成分元素についても同様である。この結果は同スコリアと同様に, 縞状軽石のメルト包有物も母斑晶に捕獲された時期がマグマの急冷固化の直前であることを示す。縞状軽石内のメルト包有物の H₂O 濃度は 2.4-3.6 wt%, CO₂ 濃度は 0.014-0.026 wt%, S 濃度は 0.065-0.097 wt%, Cl 濃度は 0.082-0.110 wt%であり, これらも上記スコリアのメルト包有物の揮発性成分濃度とほぼ一致している (図 2.4-3)。従って, 竹島火砕流上部ユニット縞状軽石に含まれるメルト包有物の化学的特徴は, 同ユニットスコリアに含まれるメルト包有物とほぼ同じである。

以上をまとめると、今年度得られた竹島火砕流の下部ユニット軽石、中部ユニットスコリア、上部ユニット軽石および上部ユニットスコリアのメルト包有物の化学的特徴は、平成 26-28 年度に得られた各ユニット軽石およびスコリアメルト包有物と同様である。また、上部ユニット縞状軽石に含まれるメルト包有物の化学的特徴は、同ユニットスコリアに含まれるメルト包有物とほぼ同じである。従って、揮発性成分の濃度変化の要因に関する考察も平成 26-28 年度と変わらない。以下に、これまでの考察結果の概要を記す。揮発性成分のうち、 H_2O と CO_2 の濃度の変化の原因としては、主に、(I)ガス不飽和状態でのマグマの結晶分化、(II)ガス飽和状態でのマグマの結晶分化、(III)圧力低下によるマグマの脱ガス、(IV)ガス飽和状態でのマグマへの CO_2 ガスの付加、という 4 つの分化プロセスが考えられる (Saito et al., 2001; 図 2.4-3b)。このうち、(I)と(II)のプロセスでは H_2O と CO_2 の濃度が増加するとともに主成分元素濃度も増加する。幸屋 (船倉) 降下軽石と竹島火砕流の全ユニットの軽石に含まれる流紋岩メルト包有物について、 H_2O 濃度と K_2O 濃度、または、 CO_2 濃度と K_2O 濃度に相関は見られず (平成 26-27 年度成果)、 H_2O と CO_2 の濃度の変化の原因として、(I)と (II) の可能性は低い。一方、これらの流紋岩メルト包有物の H_2O と CO_2 の濃度のほとんどは、図 2.4-3b の(IV)で示すように 100-280MPa の等圧線上に位置していることから、(IV)のガス飽和状態でのマグマへの CO_2 ガスの付加が働いている可能性を示唆する。

また、竹島火砕流の中部および上部ユニットスコリアのメルト包有物について、 H_2O 濃度と K_2O 濃度、または、 CO_2 濃度と K_2O 濃度に相関は見られず (平成 28 年度成果)、 H_2O と CO_2 の濃度の変化の原因として、(I)と (II) の可能性は低い。(III)圧力低下によるマグマの脱ガスが起きた場合、 H_2O と CO_2 の濃度の分布は、図 2.4-3b の(III)で示すように、脱ガスの初期に CO_2 濃度が大きく低下し、その後、 H_2O 濃度が減少するというトレンドが現れる。(IV)ガス飽和状態でのマグマへの CO_2 ガスの付加が起きた場合は、上記のように H_2O と CO_2 の濃度の分布は等圧線上に位置する (図 2.4-3b の(IV))。竹島火砕流のスコリアと縞状軽石に含まれるメルト包有物は、高 H_2O 濃度 (4.8wt%) の 1 個を除き、 H_2O 濃度 2.2-3.7wt%の比較的狭い範囲に収まる一方、 CO_2 濃度は 0.011-0.058wt%と大きく変動している。この濃度分布は、上記の(III)または (IV) のプロセスによる濃度変動に近い。(III)の場合、177MPa から 69MPa への圧力低下による脱ガス、(IV)の場合、69-177MPa の等圧線上に位置していることから、69-177MPa の圧力条件にあるガス飽和状態のマグマへ CO_2 を主体としたガスが付加していたことになる。いずれにしても、マグマ溜まり内でガス飽和状態になっていたことになり、そのマグマ圧力は 69-177MPa と見積もられる。どちらのプロセスが働いていたかを知るために、今年度、上・中部ユニットスコリアのメルト包有物を追加分析したが、高 H_2O 濃度 (~5wt%) かつ低 CO_2 濃度を持つメルト包有物は確認できなかった。従って、現状では、(III)の圧力低下によるマグマの脱ガスの可能性が高いと判断できる。

表 2.4-1 薩摩硫黄島火山岩のモード組成 (vol%). 赤色が本研究成果である竹島火砕流堆積物中のスコリアおよび籠港降下スコリアのモード組成. 本研究以外のモード組成は全て小野・他 (1982) から引用.

| | | | | | | | | | | | | |
|-----------------|--------------------------------------|---------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------|------------------------|------------------------|------------------------|--|
| 噴火年代 | 先カルデラ火山期 | | | | | | | | | | | |
| 試料名 | <700ka 真米山溶岩 | <700ka 矢筈山溶岩 | <700ka 矢筈山溶岩 | <700ka 矢筈山降下スコリア | <700ka 長浜溶岩 | <700ka ヤクロ瀬溶岩 | | | | | | |
| マグマ化学組成 | 玄武岩 | 安山岩 | 安山岩 | 安山岩 | 流紋岩 | デイサイト | | | | | | |
| 試料番号 | 75TK38 | 75I010L | 75I015 | 75I016S | 75I08 | GW76KG-D6 | | | | | | |
| 備考 ^a | | | | | | | | | | | | |
| 斑晶 | | | | | | | | | | | | |
| 斜長石 | 31.9 | 20.2 | 12.2 | 8.6 | 6.0 | 17.8 | | | | | | |
| 石英 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | |
| かんらん石 | 1.6 | 3.3 | 0 | 0.1 | 0 | 0 | | | | | | |
| 単斜輝石 | 0.2 | 3.0 | 0.8 | 1.1 | 0.5 | 1.9 | | | | | | |
| 斜方輝石 | 0 | 0.1 | 1.4 | 0.9 | 0.3 | 1.4 | | | | | | |
| 鉄鋳 | 0 | 0 | 0 | 0.4 | 0.4 | 0.8 | | | | | | |
| 石基 | 66.3 | 73.4 | 85.6 | 88.9 | 92.8 | 78.1 | | | | | | |
| 発泡度 カウント数 | | | | | | | | | | | | |
| 噴火年代 | カルデラ形成期 | | | | | | | | | | | |
| 試料名 | 140ka 小アピ山火砕流 溶結凝灰岩中の 本質レンズ | 95ka 長瀬火砕 流軽石 | 9.5ka 籠港降下スコ リア (層1) | 9.5ka 籠港降下スコ リア (層2) | 9.5ka 籠港降下スコ リア (層3) | 7ka 幸屋 (船 倉) 降下 軽石 | 7ka 船倉火砕流 溶結凝灰岩 軽石 | 7ka 竹島火砕流 | 7ka 竹島火砕流中 部スコリア | 7ka 竹島火砕流上 部スコリア | 7ka 竹島火砕流上 部スコリア | |
| マグマ化学組成 | 流紋岩 | 流紋岩 | 安山岩 | 安山岩 | 安山岩 | 流紋岩 | 流紋岩 | 流紋岩 | 安山岩 | 安山岩 | 安山岩 | |
| 試料番号 | 75I07G1 | 75TK22 | sio_sg141114 05 | sio_sg141114 04 | sio_sg141114 03 | 75TK32P1 | 75TK24 | 75I09P1 | 06IW29-3 | 06IW33-4 | 06IW42-2 | |
| 備考 ^a | | | 本研究 | 本研究 | 本研究 | | | | 本研究 | 本研究 | 本研究 | |
| 斑晶 | | | | | | | | | | | | |
| 斜長石 | 6.6 | 20 | 5.8 | 32.5 | 13.2 | 5 | 5.2 | 7 | 15.0 | 16.7 | 24.1 | |
| 石英 | 0 | 2.5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| かんらん石 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 単斜輝石 | 0.7 | 0.5 | 8.6 | 4.0 | 6.9 | 1 | 0.9 | 1 | 8.6 | 12.9 | 5.8 | |
| 斜方輝石 | 0.1 | 2 | 5.1 | 3.8 | 2.4 | 1 | 0.3 | 1 | 0.7 | 1.4 | 3.1 | |
| 鉄鋳 | 0.5 | 1 | 0.9 | 0.2 | 0.1 | 1 | 0.6 | 1 | 4.2 | 2.3 | 1.4 | |
| 石基 | 92.1 | 74 | 79.6 | 59.5 | 77.5 | 92 | 93.0 | 90 | 71.5 | 66.7 | 65.5 | |
| 発泡度 カウント数 | | | 55 | 52 | 59 | | | | 67 | 54 | 52 | |
| | | | 1480 | 2160 | 2760 | | | | 2124 | 2058 | 2401 | |
| 噴火年代 | 後カルデラ火山期 | | | | | | | | | | | |
| 試料名 | 3.9ka 稲村岳スコリア | 3.9ka 東溶岩 | 3.9ka 磯松崎溶岩 | 1.1ka 硫黄岳溶岩 | 1.1ka 硫黄岳溶岩 | 0.5ka 硫黄岳火 山弾 | 1935 昭和硫黄島 溶岩 | | | | | |
| マグマ化学組成 | 安山岩 | 安山岩 | 安山岩 | 流紋岩 | 流紋岩 | 流紋岩 | 流紋岩 | | | | | |
| 試料番号 | 75I063 | 75I069 | 75I020 | 75I062 | IW74-S13 | 76I0132R | IW74S-24 | | | | | |
| 備考 ^a | | | | | | | | | | | | |
| 斑晶 | | | | | | | | | | | | |
| 斜長石 | 22.7 | 26.7 | 19.3 | 7.3 | 7.4 | 13.5 | 14 | | | | | |
| 石英 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | |
| かんらん石 | 1.7 | 3.1 | 0.2 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | |
| 単斜輝石 | 2.5 | 0.7 | 1.1 | 0.3 | 0.6 | 1.3 | 1.6 | | | | | |
| 斜方輝石 | 0.9 | 0.2 | 0.6 | 0.5 | 0.4 | 1.1 | 1.1 | | | | | |
| 鉄鋳 | 0.8 | 0 | 0 | 0.3 | 0.1 | 0.7 | 1.1 | | | | | |
| 石基 | 71.4 | 69.3 | 78.8 | 91.6 | 91.5 | 83.4 | 82.2 | | | | | |
| 発泡度 カウント数 | | | | | | | | | | | | |

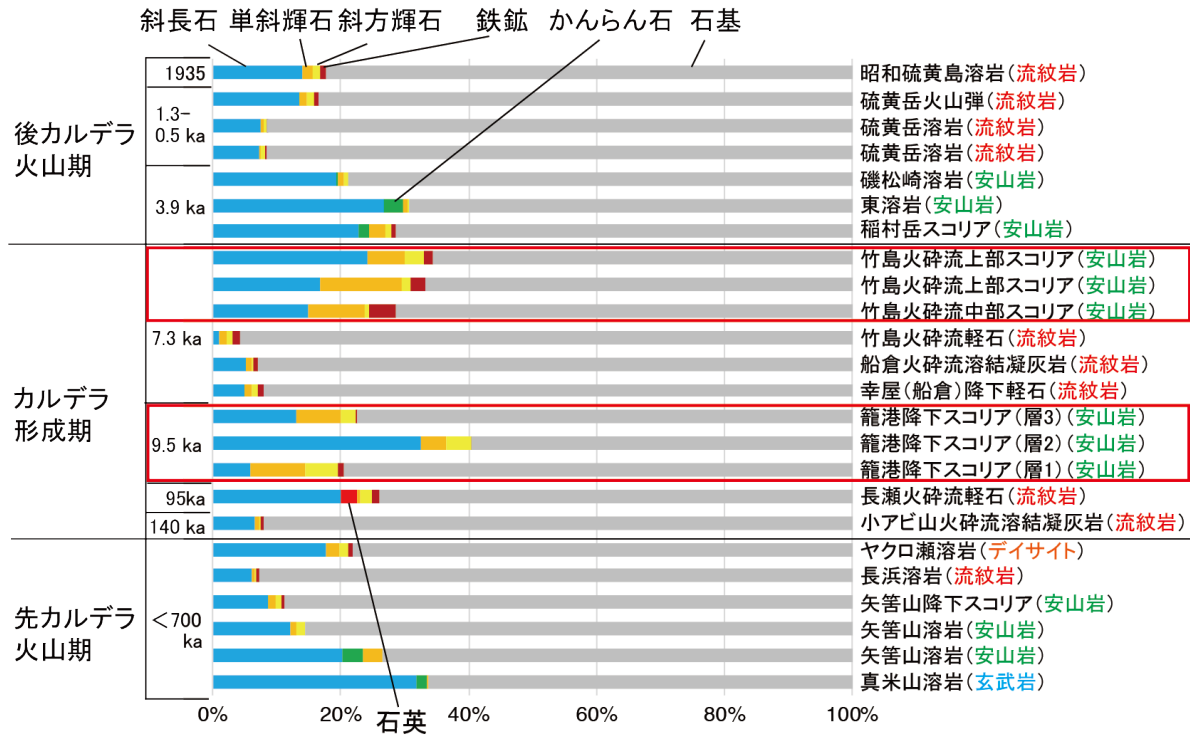


図 2.4-1 薩摩硫黄島火山岩のモード組成 (vol%). 斜長石を青色, 単射輝石を橙色, 斜方輝石を黄色, かんらん石を緑色, 鉄鉱を茶色, 石英を赤色, 石基を灰色で示す. 本研究成果である竹島火砕流堆積物中のスコリアおよび籠港降下スコリアのモード組成を赤色の枠で囲っている. 本研究以外のモード組成は全て小野・他 (1982) から引用.

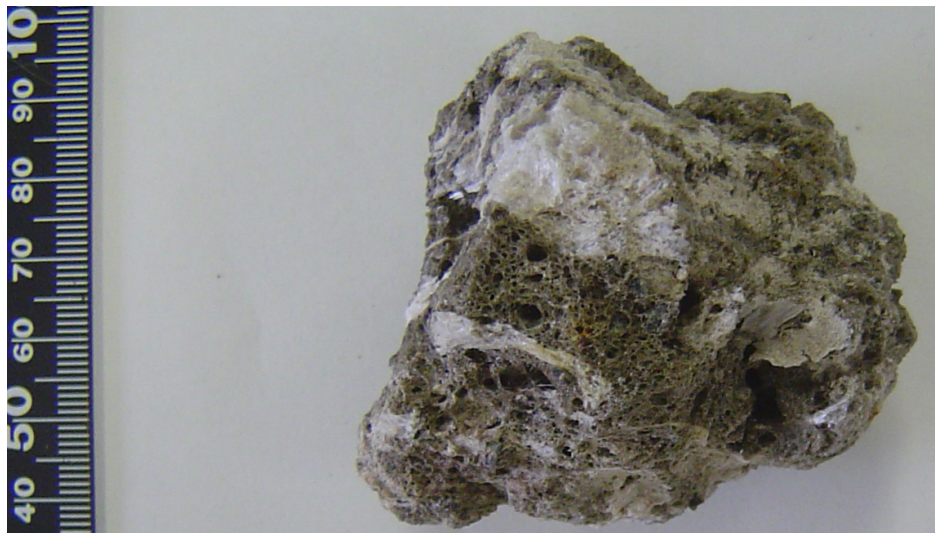


図 2.4-2 竹島火砕流上部ユニットに含まれる綿状軽石 (試料番号 06IW42-3). 竹島・エーメ立神にて採取.

表 2.4-2 竹島火砕流堆積物（下部ユニット，中部ユニット，上部ユニット）の軽石・スコリア・縞状軽石中のメルト包有物の化学組成と H₂O および CO₂ 濃度から見積もられたガス飽和圧力。

| 竹島火砕流下部ユニット軽石 | | | | | |
|--------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--|
| 試料番号 | 06IW24-5 | 06IW24-5 | 06IW24-5 | 06IW24-5 | |
| メルト包有物番号 | mt18101106p1i1 | mt18101106p2i1 | mt18101106p3i1 | mt18101106p4i1 | |
| ホスト鉱物組成 | 単斜輝石 | 単斜輝石 | 単斜輝石 | 単斜輝石 | |
| | Wo38En45Fs18Mg#71 | Wo38En43Fs19Mg#70 | Wo38En44Fs18Mg#71 | Wo38En43Fs19Mg#69 | |
| SiO ₂ | 67.26 | 68.29 | 68.20 | 67.58 | |
| TiO ₂ | 0.49 | 0.48 | 0.33 | 0.37 | |
| Al ₂ O ₃ | 11.94 | 11.67 | 10.97 | 11.49 | |
| FeO* | 3.14 | 3.20 | 3.24 | 2.95 | |
| MnO | 0.03 | 0.06 | 0.08 | 0.09 | |
| MgO | 0.40 | 0.44 | 0.36 | 0.39 | |
| CaO | 1.80 | 1.89 | 1.66 | 1.67 | |
| Na ₂ O | 3.34 | 3.26 | 2.57 | 3.20 | |
| K ₂ O | 2.84 | 2.89 | 2.74 | 2.72 | |
| P ₂ O ₅ | 0.04 | 0.05 | 0.00 | 0.05 | |
| S | 0.007 | 0.008 | 0.006 | 0.006 | |
| Cl | 0.116 | 0.123 | 0.126 | 0.113 | |
| H ₂ O | 3.5 | 4.4 | 5.8 | 6.3 | |
| CO ₂ | 0.031 | 0.015 | 0.015 | 0.002 | |
| Total | 94.93 | 96.75 | 96.05 | 96.95 | |
| ガス飽和圧力 (MPa) | 136 | 140 | 213 | 229 | |

| 竹島火砕流中部ユニットスコリア | | | | | | |
|--------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|------------------|
| 試料番号 | 06IW29-3 | 06IW29-3 | 06IW29-3 | 06IW29-3 | 06IW29-3 | 06IW29-3 |
| メルト包有物番号 | mt18101110p2i1 | mt18101110p2i2 | mt18101110p6i1 | mt18101110p6i2 | mt18101110p1i1 | mt18101110p4i1 |
| ホスト鉱物組成 | 単斜輝石 | 単斜輝石 | 単斜輝石 | 単斜輝石 | 斜方輝石 | 斜方輝石 |
| | Wo38En45Fs17Mg#73 | Wo38En45Fs17Mg#73 | Wo38En46Fs17Mg#73 | Wo37En47Fs16Mg#74 | Wo3En68Fs29Mg#70 | Wo3En65Fs32Mg#67 |
| SiO ₂ | 61.88 | 59.62 | 61.04 | 62.30 | 62.59 | 62.57 |
| TiO ₂ | 0.85 | 0.79 | 0.92 | 0.91 | 0.92 | 0.71 |
| Al ₂ O ₃ | 13.15 | 13.39 | 14.01 | 13.96 | 13.65 | 13.16 |
| FeO* | 6.02 | 6.51 | 6.84 | 6.77 | 7.05 | 7.42 |
| MnO | 0.09 | 0.10 | 0.13 | 0.17 | 0.16 | 0.03 |
| MgO | 1.57 | 1.78 | 1.97 | 1.92 | 1.56 | 1.62 |
| CaO | 4.12 | 4.27 | 4.79 | 4.55 | 4.29 | 4.21 |
| Na ₂ O | 3.49 | 3.09 | 3.42 | 3.60 | 3.26 | 3.52 |
| K ₂ O | 2.05 | 1.87 | 1.94 | 1.90 | 2.20 | 1.72 |
| P ₂ O ₅ | 0.24 | 0.24 | 0.53 | 0.53 | 0.19 | 0.44 |
| S | 0.062 | 0.066 | 0.066 | 0.077 | 0.068 | 0.068 |
| Cl | 0.105 | 0.090 | 0.095 | 0.099 | 0.096 | 0.100 |
| H ₂ O | 2.8 | 2.6 | 2.6 | 3.9 | 2.3 | 2.5 |
| CO ₂ | 0.021 | 0.020 | 0.020 | 0.018 | 0.028 | 0.019 |
| Total | 96.44 | 94.42 | 98.37 | 100.65 | 98.36 | 98.08 |
| ガス飽和圧力 (MPa) | 100 | 90 | 92 | 129 | 104 | 87 |

| 竹島火砕流上部ユニット軽石 | | | | | |
|--------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------------------|
| 試料番号 | 06IW42-1 | 06IW42-1 | 06IW42-1 | 06IW42-1 | 06IW42-1 |
| メルト包有物番号 | mt18101113p1i1 | mt18101113p4i1 | mt18101113p6i1 | mt18101113p7i1 | mt18101113p2i1 |
| ホスト鉱物組成 | 斜長石 | 斜長石 | 斜長石 | 斜長石 | 単斜輝石 |
| | An55 | An59 | An55 | An53 | Wo38En46Fs16Mg#74 |
| SiO ₂ | 71.72 | 72.28 | 74.93 | 71.20 | 69.20 |
| TiO ₂ | 0.53 | 0.38 | 0.50 | 0.61 | 0.61 |
| Al ₂ O ₃ | 11.51 | 13.46 | 12.24 | 12.49 | 13.18 |
| FeO* | 2.42 | 2.97 | 2.41 | 2.79 | 5.47 |
| MnO | 0.09 | 0.04 | 0.05 | 0.10 | 0.16 |
| MgO | 0.40 | 0.86 | 0.55 | 0.60 | 1.22 |
| CaO | 1.77 | 2.42 | 1.97 | 1.94 | 3.26 |
| Na ₂ O | 3.65 | 3.76 | 3.74 | 3.84 | 3.45 |
| K ₂ O | 2.92 | 3.26 | 3.01 | 2.94 | 2.49 |
| P ₂ O ₅ | 0.05 | 0.23 | 0.08 | 0.14 | 0.21 |
| S | 0.007 | 0.009 | 0.008 | 0.013 | 0.027 |
| Cl | 0.115 | 0.152 | 0.125 | 0.143 | 0.095 |
| H ₂ O | 5.2 | 5.8 | 5.1 | 3.9 | 3.3 |
| CO ₂ | 0.010 | nd | 0.012 | 0.034 | 0.047 |
| Total | 100.41 | 105.65 | 104.68 | 100.76 | 102.74 |
| ガス飽和圧力 (MPa) ^a | 176 | 199 | 172 | 159 | 167 |

| 試料番号 メルト包有物番号 ホスト鉱物組成 | 竹島火砕流上部ユニットスコリア | | | | | |
|--------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | 06IW42-2 | 06IW42-2 | 06IW42-2 | 06IW42-2 | 06IW42-2 | 06IW42-2 |
| | mt18101115p4i1 | mt18101115p7i1 | mt18101115p2i1 | mt18101115p6i1 | mt18101115p8i1 | mt18101115p12i1 |
| | 単斜輝石 | 単斜輝石 | 斜方輝石 | 斜方輝石 | 斜方輝石 | 斜方輝石 |
| | Wo38En45Fs17Mg#72 | Wo38En45Fs17Mg#73 | Wo38En69Fs28Mg#71 | Wo38En69Fs29Mg#70 | Wo38En67Fs30Mg#69 | Wo38En68Fs29Mg#70 |
| SiO ₂ | 63.84 | 58.02 | 63.02 | 59.12 | 59.30 | 60.73 |
| TiO ₂ | 0.86 | 0.91 | 0.74 | 0.75 | 0.78 | 0.88 |
| Al ₂ O ₃ | 13.80 | 13.35 | 13.97 | 13.05 | 13.17 | 13.58 |
| FeO* | 6.84 | 7.38 | 7.47 | 6.55 | 7.62 | 7.02 |
| MnO | 0.10 | 0.16 | 0.14 | 0.18 | 0.19 | 0.08 |
| MgO | 1.86 | 1.75 | 1.65 | 1.72 | 1.53 | 1.80 |
| CaO | 4.47 | 4.58 | 4.37 | 4.30 | 4.03 | 4.35 |
| Na ₂ O | 3.44 | 2.87 | 3.72 | 2.94 | 3.57 | 3.27 |
| K ₂ O | 1.98 | 1.67 | 1.86 | 1.86 | 1.97 | 1.93 |
| P ₂ O ₅ | 0.47 | 0.22 | 0.37 | 0.38 | 0.38 | 0.47 |
| S | 0.067 | 0.094 | 0.064 | 0.061 | 0.066 | 0.079 |
| Cl | 0.080 | 0.081 | 0.077 | 0.106 | 0.088 | 0.093 |
| H ₂ O | 2.4 | 2.8 | 2.5 | 2.5 | 2.6 | 2.9 |
| CO ₂ | 0.016 | 0.017 | 0.011 | 0.016 | 0.013 | 0.018 |
| Total | 100.25 | 93.88 | 99.96 | 93.54 | 95.29 | 97.14 |
| ガス飽和圧力 (MPa) | 78 | 89 | 69 | 79 | 80 | 95 |

| 試料番号 メルト包有物番号 ホスト鉱物組成 | 竹島火砕流上部ユニット縞状軽石 | | | | | |
|--------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | 06IW42-3 | 06IW42-3 | 06IW42-3 | 06IW42-3 | 06IW42-3 | 06IW42-3 |
| | mt18101116p1i1 | mt18101116p3i1 | mt18101116p3i2 | mt18101116p4i1 | mt18101116p5i1 | mt18101116p2i1 |
| | 単斜輝石 | 単斜輝石 | 単斜輝石 | 単斜輝石 | 単斜輝石 | 斜方輝石 |
| | Wo39En44Fs17Mg#72 | Wo39En45Fs17Mg#73 | Wo38En44Fs17Mg#73 | Wo38En44Fs17Mg#72 | Wo38En44Fs17Mg#72 | Wo38En68Fs29Mg#70 |
| SiO ₂ | 56.75 | 55.70 | 58.09 | 55.66 | 58.50 | 56.52 |
| TiO ₂ | 0.77 | 0.71 | 0.77 | 0.76 | 0.81 | 0.76 |
| Al ₂ O ₃ | 12.64 | 12.70 | 12.49 | 12.34 | 12.40 | 13.51 |
| FeO* | 6.21 | 6.48 | 6.07 | 6.92 | 6.27 | 7.95 |
| MnO | 0.10 | 0.09 | 0.13 | 0.15 | 0.21 | 0.10 |
| MgO | 1.31 | 1.80 | 1.61 | 1.77 | 1.71 | 1.85 |
| CaO | 4.08 | 4.59 | 4.10 | 4.45 | 4.35 | 4.74 |
| Na ₂ O | 3.18 | 2.80 | 2.86 | 3.10 | 2.85 | 2.83 |
| K ₂ O | 1.83 | 1.54 | 1.72 | 1.52 | 1.80 | 1.69 |
| P ₂ O ₅ | 0.33 | 0.38 | 0.37 | 0.47 | 0.42 | 0.15 |
| S | 0.075 | 0.085 | 0.077 | 0.066 | 0.065 | 0.089 |
| Cl | 0.099 | 0.087 | 0.101 | 0.095 | 0.093 | 0.082 |
| H ₂ O | 3.3 | 2.4 | 2.8 | 3.0 | 2.6 | 3.2 |
| CO ₂ | 0.026 | 0.015 | 0.020 | 0.015 | 0.022 | 0.025 |
| Total | 90.73 | 89.40 | 91.21 | 90.27 | 92.10 | 93.52 |
| ガス飽和圧力 (MPa) | 126 | 74 | 95 | 90 | 95 | 121 |

| 試料番号 メルト包有物番号 ホスト鉱物組成 | 竹島火砕流上部ユニット縞状軽石 | | |
|--------------------------------|-------------------|-------------------|----------------|
| | 06IW42-3 | 06IW42-3 | 06IW42-3 |
| | mt18101116p2i2 | mt18101116p2i3 | mt18101116p6i1 |
| | 斜方輝石 | 斜方輝石 | 磁鉄鉱 |
| | Wo38En69Fs29Mg#70 | Wo38En68Fs29Mg#70 | |
| SiO ₂ | 53.00 | 55.06 | 57.93 |
| TiO ₂ | 0.63 | 0.53 | 1.09 |
| Al ₂ O ₃ | 13.80 | 13.32 | 12.81 |
| FeO* | 7.00 | 7.96 | 8.14 |
| MnO | 0.09 | 0.12 | 0.13 |
| MgO | 1.62 | 1.73 | 1.80 |
| CaO | 4.10 | 4.82 | 4.74 |
| Na ₂ O | 2.93 | 2.70 | 3.08 |
| K ₂ O | 1.85 | 1.45 | 1.68 |
| P ₂ O ₅ | 0.20 | 0.19 | 0.51 |
| S | 0.081 | 0.097 | 0.082 |
| Cl | 0.110 | 0.084 | 0.104 |
| H ₂ O | 3.6 | 3.1 | 2.7 |
| CO ₂ | 0.024 | 0.014 | 0.024 |
| Total | 89.03 | 91.16 | 94.83 |
| ガス飽和圧力 (MPa) | 130 | 91 | 108 |

FeO* = total FeO ; na = not analyzed; nd = not detected

* Papale et al. (2006) または Newman and Lowenstern (2002) で提案されているケイ酸塩メルトへのH₂OおよびCO₂溶解度モデルに適用してガス飽和圧力を計算した。CO₂が検出できなかったメルト包有物 (mt18101113p4i1) についてはCO₂濃度0wt%と仮定して計算した。

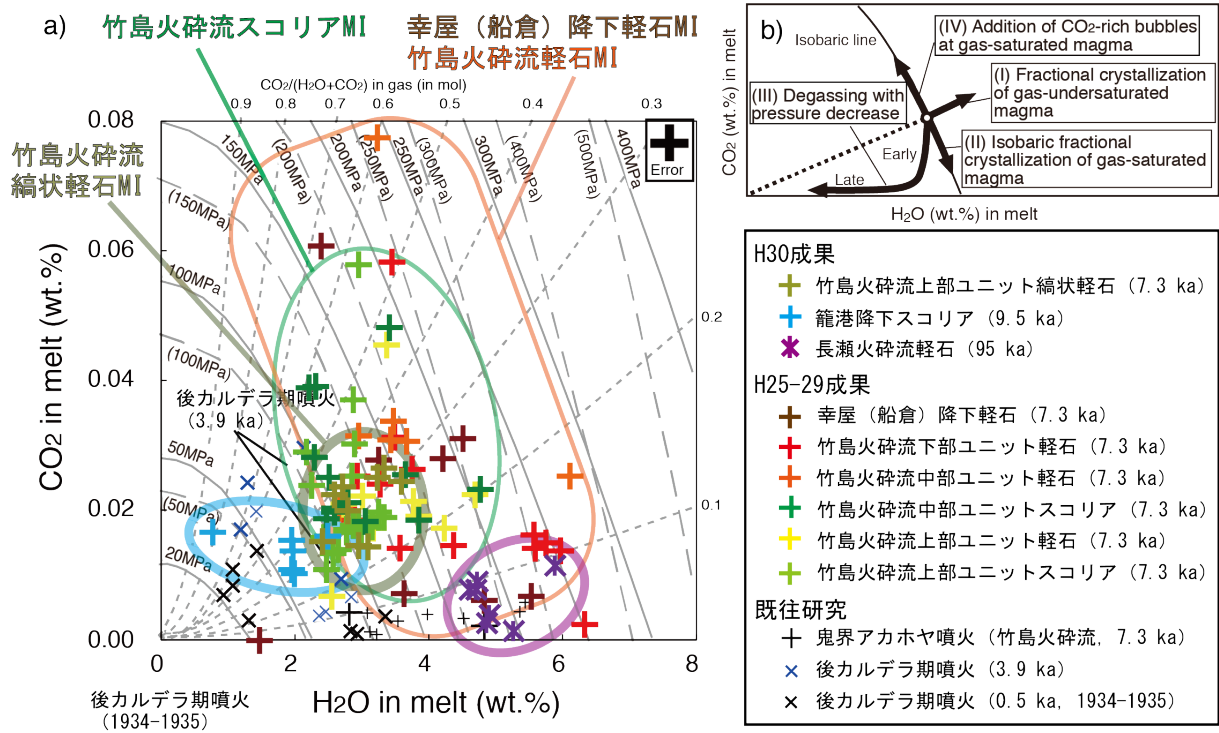


図 2.4-3 a) H25-30 年度成果である幸屋（船倉）降下軽石および竹島火砕流軽石メルト包有物の H₂O および CO₂ 濃度。籠港降下スコリア（9.5ka 噴火）および長瀬火砕流堆積物軽石（95ka 噴火）に含まれるメルト包有物の H₂O および CO₂ 濃度も示す。既往研究による結果も記す。 b) マグマプロセスに伴うメルトの H₂O および CO₂ 濃度の変化。

2.4.3 鬼界アカホヤ噴火までのマグマ溜まりの温度・圧力環境

マグマの圧力条件について、メルト包有物分析で得られたメルトの H₂O および CO₂ 濃度と各揮発性成分のメルトへの溶解度の圧力依存性からマグマのガス飽和圧力を見積もることができる。平成 29 年度には、平成 26-28 年度に得られたメルト包有物の H₂O および CO₂ 濃度に、Papale et al. (2006) または Newman and Lowenstern (2002) で提案されているケイ酸塩メルトへの H₂O および CO₂ 溶解度モデルに適用して、ガス飽和圧力を計算した (表 2.4-3)。マグマ温度は、平成 29 年度に本研究で得られた流紋岩マグマの温度 (874°C および 902°C) と安山岩マグマの温度 (975°C) を用いている。今年度、新たにメルト包有物 30 個の追加分析を行い、H₂O および CO₂ 濃度が得られたので、同様にガス飽和圧力を算出した (表 2.4-3 の赤色部分)。

流紋岩マグマ温度 874°C の場合、幸屋 (船倉) 降下軽石は 96-237MPa (165±45MPa)、竹島火砕流下部ユニット軽石は 87-246MPa (162±56MPa)、竹島火砕流中部ユニット軽石は 84-276MPa (151±64MPa)、竹島火砕流上部ユニット軽石は 61-199MPa (139±40MPa) となった。幸屋 (船倉) 降下軽石から竹島火砕流中部ユニットまで層序による系統的な変化は見られない (図 2.4-4)。なお、竹島火砕流については、上部ユニットになるに従い、やや低い平均値を示しているが、各平均値に付随する標準偏差が大きいので、有意とは言えない。また、流紋岩マグマ温度 902°C の場合の圧力はマグマ温度 874°C の計算結果とほぼ同じである (表 2.4-3)。

竹島火砕流中・上部ユニットのスコリアと縞状軽石に含まれるデイサイトメルト包有物についても同様の計算を安山岩マグマ温度 975°C の条件で行い、竹島火砕流中部ユニットスコリア 87-177MPa (117±28MPa)、竹島火砕流上部ユニットスコリア 69-170MPa (99±23MPa)、竹島火砕流上部ユニット縞状軽石 74-130MPa (103±19MPa) となった。軽石と同様に、竹島火砕流上部ユニットの平均値は、中部ユニットに比べ、やや低い平均値を示すが、各平均値に付随する標準偏差が大きいので、有意とは言えない。また、安山岩マグマの示すガス飽和圧力 (69-177MPa) は、流紋岩マグマのガス飽和圧力範囲 (61-276MPa) に含まれる。

以上、平成 30 年度までの全てのメルト包有物分析結果から得られた圧力をまとめると下記のようなになる。

- (1) 流紋岩マグマ (温度 874°C の場合) のガス飽和圧力は 61-276MPa の範囲を示し、その平均値は 153±50MPa (n=40) である。この圧力平均値は、地殻密度を 2500kg/m³ と仮定すると、深さ 6±2km に相当する。なお、平成 29 年度に比べ、分析数が 31 から 40 に増えたが、その圧力平均値と標準偏差 (153±50MPa) は、平成 29 年度の圧力平均値と標準偏差 (146±53MPa) とほとんど変わらなかった。
- (2) 安山岩マグマ (温度 975°C) のガス飽和圧力は 69-177MPa の範囲を示し、流紋岩マグマのガス飽和圧力範囲 (61-276MPa) に含まれる。安山岩マグマのガス飽和圧力の平均値は 105±25MPa (n=42) であり、この圧力は、地殻密度を 2500kg/m³ と仮定すると、深さ 4±1km に相当する。なお、平成 29 年度に比べ、分析数が 21 から 42 に倍増したが、その圧力平均値と標準偏差 (105±25MPa) は、平成 29 年度の圧力平均値と標準偏差 (115±27MPa) とほとんど変わらなかった。
- (3) 流紋岩および安山岩マグマのガス飽和圧力の平均値は 128±46MPa (n=82) であり、鬼界アカホヤ噴火マグマ溜まりの主体は深さ 5±2km にあったと考えられる。なお、平

成 29 年度に比べ、分析数が 52 から 82 に増えたが、その圧力平均値と標準偏差 (128±46MPa) は、平成 29 年度の圧力平均値と標準偏差 (133±46MPa) とほとんど変わらなかった。

平成 29 年度には、メルト包有物分析による流紋岩マグマの深度 (圧力) 推定の妥当性を検討するため、竹島火砕流軽石の全岩化学組成データを用いて流紋岩マグマの熱力学解析を行ない、観測されたマグマの温度・圧力・含水量・メルト量・斑晶量と比較した。マグマの熱力学解析には、マグマの熱力学計算ソフトウェア MELTS (Asimow and Ghiorso, 1998; Ghiorso and Sack, 1995; Ghiorso and Gualda, 2015; Gualda et al., 2012) を用いた。計算の詳細については、平成 29 年度報告書内の「阿蘇カルデラ噴出物の熱力学解析」を参照されたい。流紋岩マグマの H₂O 濃度 3 および 6wt%, CO₂ 濃度 0.1wt% を仮定して上記の熱力学計算を行った (平成 29 年度成果の図 6 および図 7)。温度 874°C または 902°C, 圧力 61-276MPa の条件の元で、計算結果と観測値 (メルト量, 斑晶量, 斜長石 An 濃度, 石基ガラス Al₂O₃ 濃度等) を比較した結果、整合的な結果になった。即ち、H₂O 濃度 3wt% かつマグマ温度 874°C の場合、熱力学計算結果は、メルト量 80-84wt%, 斜長石斑晶量 15wt%, 斜長石 An 濃度 30 程度, メルト Al₂O₃ 濃度 12wt% となり、観測値 (メルト 90vol%, 斜長石斑晶量 7vol%, 斜長石 An 濃度 42-62, 石基ガラス Al₂O₃ 濃度 13wt%) におおよそ近くなった。また、H₂O 濃度 6wt% の場合は、マグマ温度 874°C でマグマ中のメルト量が 90-99wt%, 斜長石斑晶量 <10vol%, 斜長石 An 濃度 35-40, 石基ガラス Al₂O₃ 濃度 13-14wt% になり、この場合も実際の観測値と同様である。

本年度は、さらに、メルト包有物分析による安山岩マグマの深度 (圧力) 推定の妥当性を検討するため、竹島火砕流上部ユニットスコリア (06IW33-4) の全岩化学組成データ (平成 28 年度成果報告書に記載済み) を用いて安山岩マグマの熱力学解析を行ない、観測されたマグマの温度・圧力・含水量・メルト量・斑晶量と比較した。鬼界アカホヤ噴火の安山岩マグマの酸素分圧は鉄チタン鉱物がスコリアに含まれないので不明である。そこで流紋岩の分析から得られている FMQ+1 ログユニットという値を用いた。平成 28-30 年度の本研究成果では、安山岩スコリアに含まれるデイサイトメルト包有物の H₂O 濃度は 1 個を除き、2-4wt% に収まっている。従って、安山岩マグマの H₂O 濃度は 2 および 4wt%, CO₂ 濃度は 0.1wt% を仮定して上記の熱力学計算を行い、図 2.4-5 と図 2.4-6 が得られた。平成 29 年度研究の結果から、同噴火の安山岩マグマの温度は 975°C, 圧力はメルト包有物の H₂O および CO₂ 濃度から 69-177MPa と見積もられており、この条件の元で、熱力学計算結果と岩石学的解析による観測値 (メルト量, 斑晶量, 斜長石 An 濃度, 石基ガラス SiO₂ 濃度等) を比較した。H₂O 濃度 2wt% の場合、熱力学計算結果は、メルト量 58wt%, 斜長石斑晶量 26-27wt%, 斜長石 An 濃度 59-60, メルト SiO₂ 濃度 70wt% となり、観測値 (メルト 66-72vol%, 斜長石斑晶量 15-24vol%, 斜長石 An 濃度 58-84, 石基ガラス SiO₂ 濃度 62-73wt%) に近い。また、H₂O 濃度 4wt% の場合は、マグマ中のメルト量が 62-78wt%, 斜長石斑晶量 11-24vol%, 斜長石 An 濃度 62-72, 石基ガラス SiO₂ 濃度 67-70wt% になり、この場合も実際の観測値と同様である。これらの一致は、メルト包有物の分析による安山岩マグマの深度 (圧力) 推定の妥当性を支持する。

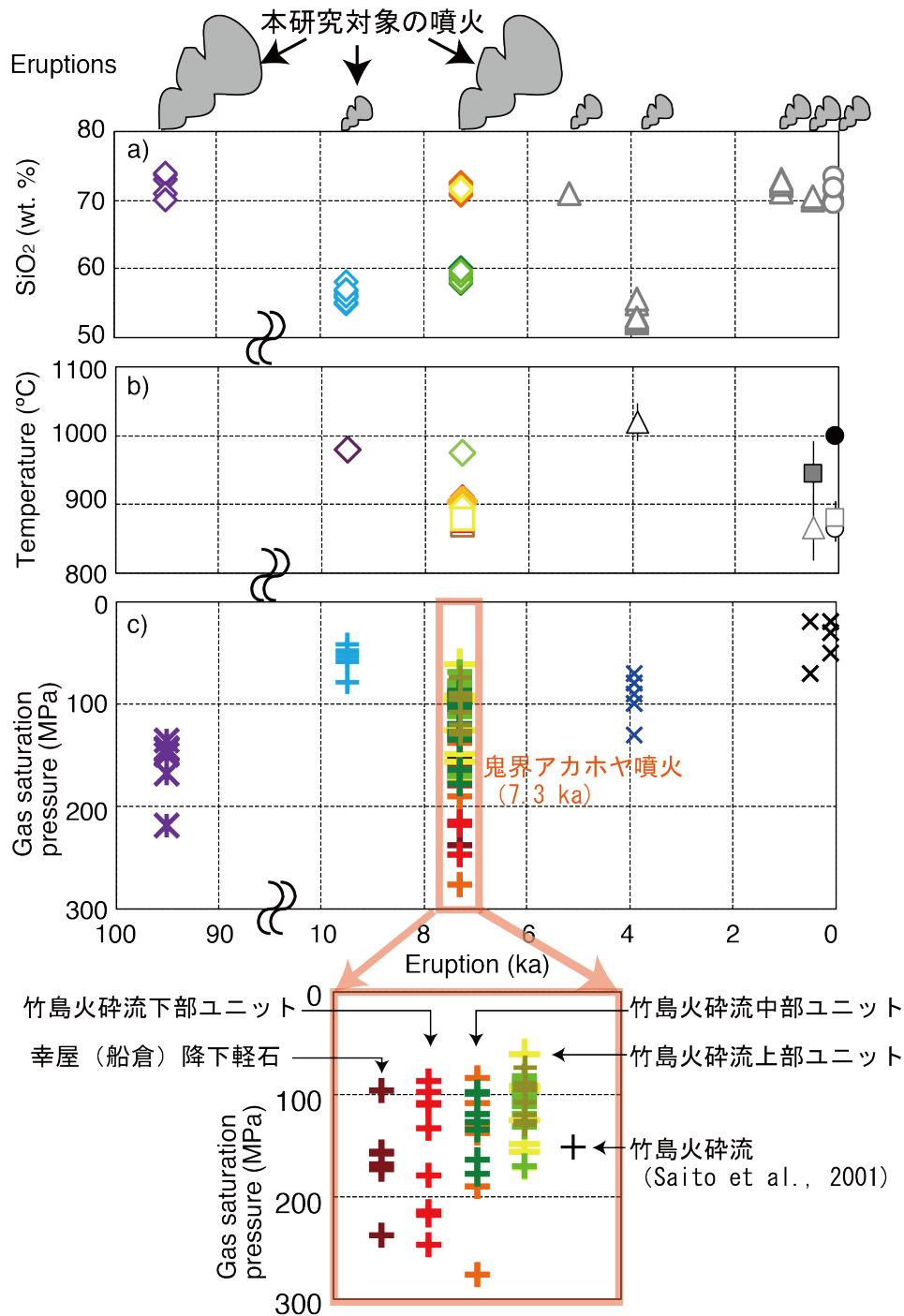


図 2.4-4 本研究によって得られた鬼界カルデラのマグマ溜まりの化学組成と温度・圧力条件. a)噴出物の全岩化学分析によるマグマの化学組成 (SiO₂ 濃度). 長瀬竹島火砕流軽石 (95ka, 青色) が本年度成果. b)輝石温度計および鉄チタン鉱物温度計によるマグマ温度. シンボルは図4と同じ. 幸屋(船倉)降下軽石および竹島火砕流軽石・スコリアについての結果が本年度成果. エラーバーは各噴出物の平均値を示している. c)本研究で見積もられた流紋岩マグマ温度 (874°C) および安山岩マグマ温度 (975°C) とメルト包有物の化学組成 (H26-28 年度成果) から算出された各マグマのガス飽和圧力. 既往研究による結果も記す.

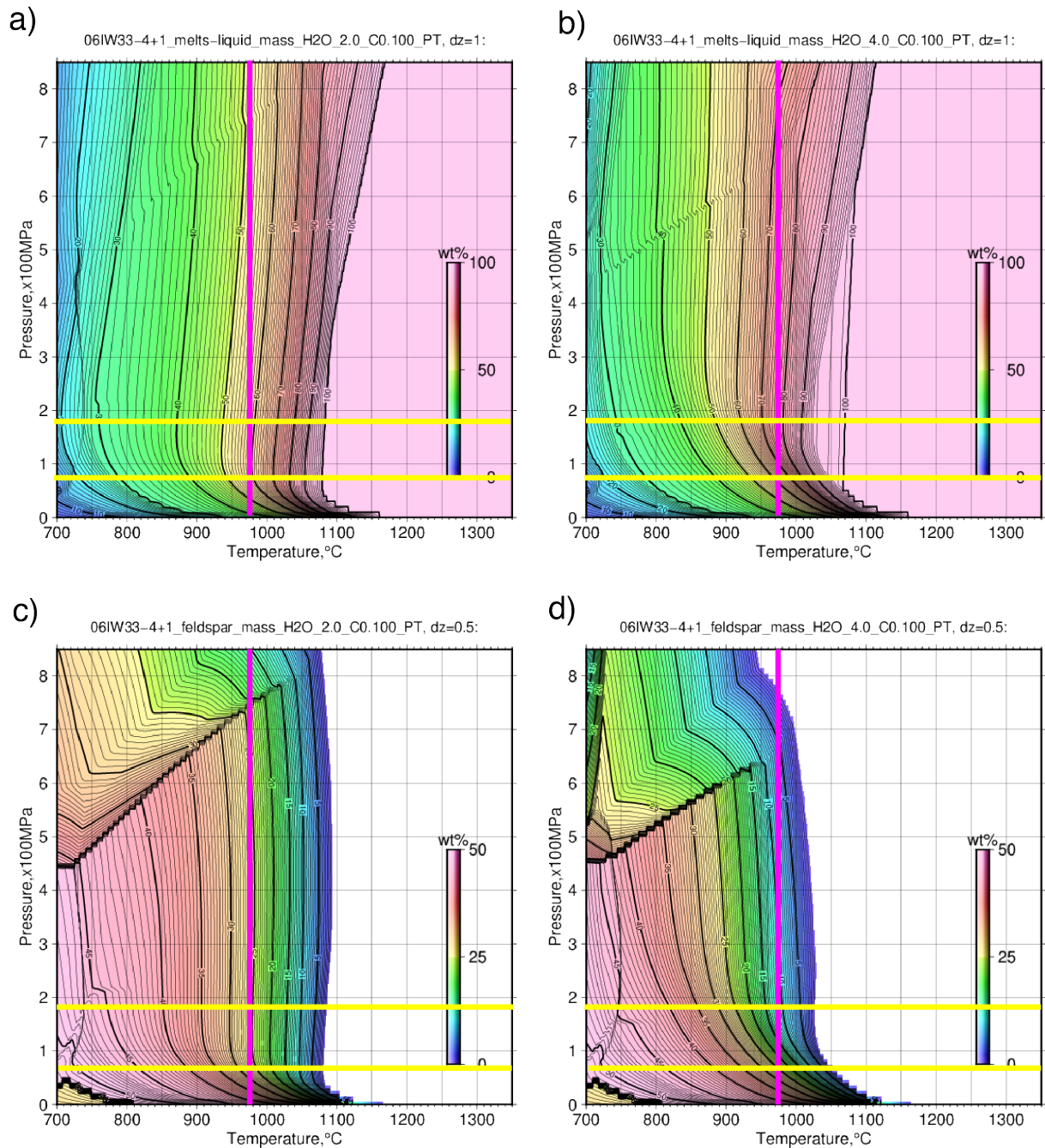


図 2.4-5 a) 鬼界アカホヤ噴火の竹島火砕流上部ユニットスコリアを形成した安山岩マグマに 2 wt.%の水を加えた際のメルト量の温度圧力依存性. b) 同マグマに 4 wt.%の水を加えた際のメルト量の温度圧力依存性. c) 同マグマに 2 wt.%の水を加えた際の斜長石斑晶量の温度圧力依存性. d) 同マグマに 4 wt.%の水を加えた際の斜長石斑晶量の温度圧力依存性. ピンク色の縦線は輝石温度計から推定されたマグマ温度 (975°C) を示す. 黄色の横線はデイサイトメルト包有物の H₂O および CO₂ 濃度から推定されたマグマ圧力の最小値 (69MPa) と最大値 (177MPa) を示す.

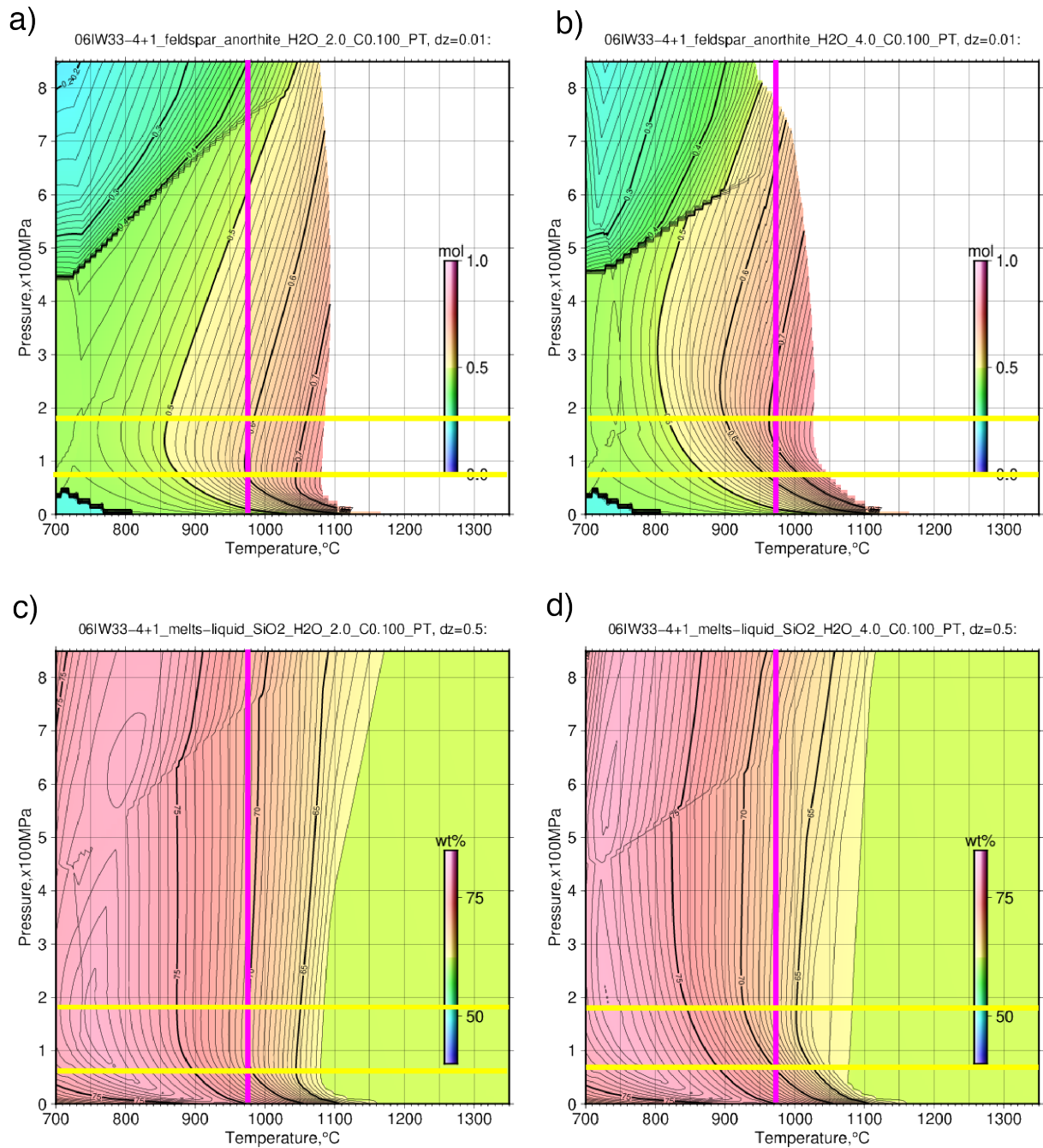


図 2.4-6 a) 鬼界アカホヤ噴火の竹島火砕流上部ユニットスコリアを形成した安山岩マグマに 2 wt.%の水を加えた際の斜長石斑晶化学組成 (An 濃度) の温度圧力依存性. b) 同マグマに 4 wt.%の水を加えた際の斜長石斑晶化学組成 (An 濃度) の温度圧力依存性. c) 同マグマに 2 wt.%の水を加えた際のメルトの SiO₂ 濃度の温度圧力依存性. d) 同マグマに 4 wt.%の水を加えた際のメルトの SiO₂ 濃度の温度圧力依存性. ピンク色の縦線は輝石温度計から推定されたマグマ温度 (975°C) を示す. 黄色の横線はデイサイトメルト包有物の H₂O および CO₂ 濃度から推定されたマグマ圧力の最小値 (69MPa) と最大値 (177MPa) を示す.

2.4.4 籠港降下火砕物（9.5 千年前）の岩石学的解析メルト包有物分析

本研究で用いた籠港降下スコリアは、平成 26 年度本研究において現地地質調査を行い、硫黄島・平家城にある籠港降下火砕物層から採取した。本層の大部分は褐色～黒色の風化火山灰層で、その中に薄い降下スコリア層（0.1m 以下）が挟まれている。上記露頭の最下部から 5m, 9m, 10m, 12m の高さにある 4 つのスコリア層（スコリア層 1～4）から試料を採取した。スコリアは最大 3cm, 黄色～オレンジ色で風化が進んでいる。平成 27 年度に各層のスコリアについて XRF で主成分元素組成を測定し、全て安山岩組成（SiO₂ 濃度 55-58 wt%）であることが明らかとなっている。今年度は、これらの岩石学的特徴を把握するため、スコリア層 1, スコリア層 2 およびスコリア層 3 の各スコリアについてモード組成分析を実施した（表 2.4-1, 図 2.4-1）。分析には本研究で平成 28 年度に導入した EPMA を用いた。その結果、スコリアの発泡度（スコリア中の泡の体積率）は 52-59vol%, 固体中の斑晶量は 20-41vol%, 石基量 60-80vol% となった（表 2.4-1, 図 2.4-1）。2 つのスコリアでは、斜長石が最も多い斑晶である（13-33vol%）が、他のスコリア（sio_sg14111405）では単斜輝石が最も多かった（9vol%）。籠港降下スコリアの斑晶量（石基量）の変動範囲は大きく、鬼界アカホヤ噴火で噴出した竹島火砕流のスコリアの斑晶量（石基量）はその範囲内に収まっている。

さらに、メルト包有物の化学組成を把握するため、スコリア層 1, スコリア層 3 およびスコリア層 4 のスコリアを粉砕し、エポキシ樹脂にマウントし、メルト包有物を露出・研磨した。平成 29 年度は、スコリア層 1 のメルト包有物 5 個、スコリア層 3 のメルト包有物 1 個、スコリア層 4 のメルト包有物 7 個について、主成分元素、S および Cl 濃度を EPMA で測定した（平成 29 年度成果の表 5）。そこで、今年度は、これらのメルト包有物の 6 個（斜長石および斜方輝石内）について H₂O および CO₂ 濃度を SIMS で測定した（表 2.4-4）。平成 29 年度の結果では、籠港降下スコリアのメルト包有物は、SiO₂ 濃度 65-74wt% を持ち、その主成分元素濃度の分布は竹島火砕流上・中部ユニットに含まれるスコリアのメルト包有物や同火砕流上部ユニット軽石内の一部のメルト包有物が示す化学組成分布とも重なった（図 2.4-6）。さらに、籠港降下スコリアのメルト包有物の S および Cl 濃度も竹島火砕流上・中部ユニットに含まれるスコリアのメルト包有物が示す濃度分布内に含まれていた。このため、平成 29 年度成果報告書では、鬼界アカホヤ噴火で噴出した安山岩マグマがその 2 千年前からマグマ溜りに存在していた可能性を指摘した。一方、今年度、籠港降下スコリアのメルト包有物を SIMS で分析した結果、その H₂O および CO₂ 濃度（0.8-2.5 wt%, および、0.010-0.017 wt%）は竹島火砕流上・中部ユニットに含まれるスコリアのメルト包有物が示す濃度よりも低いことが明らかとなった（表 2.4-4, 図 2.4-3）。上記と同様に算出したガス飽和圧力は、41-78MPa である。即ち、籠港降下スコリアを形成した安山岩マグマは、竹島火砕流に含まれる安山岩マグマとは異なる揮発性成分（H₂O および CO₂）の特徴を持つ。この結果は、鬼界アカホヤ噴火を引き起こした安山岩マグマは、その約 2 千年前に噴出した安山岩マグマとは同一では無いことを意味する。本研究成果によって、鬼界アカホヤ噴火直前のマグマ供給系の発達過程において、籠港降下スコリアを形成した安山岩マグマとは異なる安山岩マグマが深部から上昇してきた可能性や、籠港降下スコリアを形成した安山岩マグマに揮発性成分（H₂O および CO₂）が付加して高濃度になった等のプロセスを考える必要があることが判明した。

表 2.4-4 籠港降下スコリア中のメルト包有物の化学組成とその H₂O および CO₂ 濃度から見積もられたガス飽和圧力

| 層準 | スコリア層1 | | スコリア層4 | | | |
|--------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------|
| 試料番号 | sio_sg14111405 | sio_sg14111405 | sio_sg14111402 | sio_sg14111402 | sio_sg14111402 | sio_sg14111402 |
| メルト包有物番号 | mts16041406-4-pli1 | mts16041406-4-pli2 | mts16041406-2-pli1 | mts16041406-2-pli3 | mts16041406-2-p2i1 | mts16041406-3-pli1 |
| ホスト鉱物組成 | 斜長石 An61 | 斜長石 An61 | 斜方輝石 Wo4En64Fs32Mg#66 | 斜方輝石 Wo3En65Fs32Mg#67 | 斜方輝石 Wo3En63Fs33Mg#66 | 斜長石 An65 |
| SiO ₂ | 70.76 | 71.06 | 67.10 | 67.04 | 68.34 | 69.71 |
| TiO ₂ | 0.69 | 0.67 | 0.84 | 0.69 | 0.65 | 0.64 |
| Al ₂ O ₃ | 12.21 | 12.23 | 12.47 | 12.69 | 12.80 | 12.46 |
| FeO* | 3.78 | 3.77 | 5.71 | 6.10 | 5.59 | 4.12 |
| MnO | 0.08 | 0.09 | 0.13 | 0.10 | 0.08 | 0.07 |
| MgO | 0.79 | 0.82 | 1.52 | 1.41 | 1.11 | 0.82 |
| CaO | 2.64 | 2.74 | 3.53 | 3.59 | 3.50 | 3.29 |
| Na ₂ O | 2.97 | 2.57 | 2.73 | 2.83 | 3.16 | 2.79 |
| K ₂ O | 2.92 | 2.92 | 2.44 | 2.47 | 2.19 | 2.83 |
| P ₂ O ₅ | 0.19 | 0.194 | 0.209 | 0.202 | 0.173 | 0.228 |
| S | 0.028 | 0.030 | 0.035 | 0.045 | 0.036 | 0.031 |
| Cl | 0.090 | 0.082 | 0.089 | 0.093 | 0.087 | 0.074 |
| H ₂ O | 2.0 | 2.0 | 2.5 | 0.8 | 2.0 | 2.0 |
| CO ₂ | 0.011 | 0.010 | 0.016 | 0.017 | 0.015 | 0.014 |
| Total | 99.10 | 99.16 | 99.32 | 98.06 | 99.66 | 99.04 |
| ガス飽和圧力 (MPa) ^a | 50 | 49 | 78 | 41 | 59 | 55 |

FeO* = total FeO

^a Papale et al. (2006) で提案されているケイ酸塩メルトへのH₂OおよびCO₂溶解度モデルに適用してガス飽和圧力を計算した。マグマ温度は979℃ (平成29年度成果) を用いた。

2.4.5 長瀬火砕流 (95 千年前) のメルト包有物分析

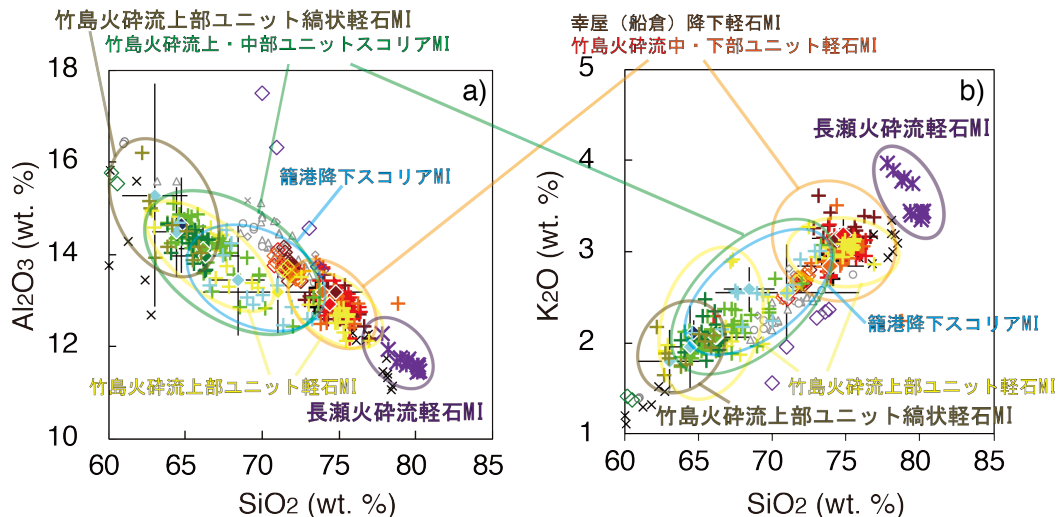
鬼界アカホヤ噴火に至る長期的なマグマ供給系の発達過程を検討するためには、鬼界アカホヤ噴火の前のカルデラ噴火である鬼界葛原噴火 (95 千年前, テフラの見かけ体積は 150km³ 以上, 町田・新井 2003) のマグマ溜りに関する情報も必要である。そこで, 平成 29 年度は, 鬼界葛原噴火で形成された長瀬火砕流堆積物から採取した軽石 (以後, 「長瀬火砕流軽石」と呼ぶ) の全岩化学組成を測定した。その結果, 鬼界葛原噴火を引き起こした流紋岩マグマは, 鬼界アカホヤ噴火の流紋岩マグマとわずかに異なる全岩化学組成を持っていることが明らかになった。そこで, 今年度は, 長瀬火砕流軽石内の石英に含まれるメルト包有物 7 個について, 主成分元素, S, Cl, H₂O および CO₂ 濃度を EPMA および SIMS で測定し, 予察的な結果を得た (表 2.4-5)。長瀬火砕流軽石のメルト包有物は, 鬼界アカホヤ噴火噴出物に含まれる流紋岩メルト包有物よりも高い SiO₂ 濃度 (79-80 wt%) および K₂O 濃度 (3.4-3.5 wt%), 低い Al₂O₃ 濃度 (11-12 wt%) を持つ (表 2.4-5, 図 2.4-7)。また, 長瀬火砕流堆積物のメルト包有物の H₂O および CO₂ 濃度 (4.6-5.9 wt% および 0.002-0.012 wt%) は, 鬼界アカホヤ噴火流紋岩メルト包有物が示す濃度に比べ, H₂O 濃度が高く, CO₂ 濃度が低い傾向を示している。鬼界アカホヤ噴火と鬼界葛原噴火のメルト包有物の化学的特徴が異なることは, 鬼界葛原噴火流紋岩の全岩化学組成が鬼界アカホヤ噴火流紋岩とわずかに異なることと整合的である。従って, 鬼界アカホヤ噴火の流紋岩マグマは鬼界葛原噴火の流紋岩マグマと同一では無く, 95 千年前以降にマグマ供給系に何らかの変化があったと考えられる。ただし, メルト包有物の分析数が少ないので, 今後, 長瀬火砕流軽石の岩石学的解析とそれに含まれるメルト包有物の化学分析をさらに進め, 鬼界葛原噴火を引き起こした流紋岩マグマの岩石学的特徴と圧力条件を明らかにする必要がある。

表 2.4-5 長瀬火砕流堆積物中の軽石中のメルト包有物の化学組成とその H₂O および CO₂ 濃度から見積もられたガス飽和圧力.

| 試料番号 | 94IW40 | 94IW40 | 94IW40 | 94IW40 | 94IW40 | 94IW40 | 94IW40 |
|--------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| メルト包有物番号 | mt07030602-a2-ph1-mi1 | mt07030602-a2-ph2-mi1 | mt07030602-a2-ph3-mi1 | mt07030602-a2-ph4-mi1 | mt07030602-a2-ph5-mi2 | mt07030602-a2-ph6-mi1 | mt07030602-a2-ph6-mi2 |
| ホスト鉱物組成 | 石英 | 石英 | 石英 | 石英 | 石英 | 石英 | 石英 |
| SiO ₂ | 75.83 | 77.54 | 76.87 | 77.04 | 76.40 | 77.71 | 75.86 |
| TiO ₂ | 0.18 | 0.20 | 0.21 | 0.25 | 0.16 | 0.19 | 0.23 |
| Al ₂ O ₃ | 11.06 | 11.21 | 11.14 | 11.01 | 10.99 | 11.10 | 11.14 |
| FeO* | 0.95 | 0.90 | 0.88 | 0.90 | 0.90 | 0.89 | 0.95 |
| MnO | 0.08 | 0.09 | 0.07 | 0.01 | 0.06 | 0.06 | 0.04 |
| MgO | 0.15 | 0.16 | 0.17 | 0.20 | 0.16 | 0.14 | 0.18 |
| CaO | 0.84 | 0.87 | 0.95 | 0.97 | 0.96 | 0.75 | 0.97 |
| Na ₂ O | 3.13 | 2.44 | 2.42 | 2.59 | 2.44 | 2.63 | 2.87 |
| K ₂ O | 3.29 | 3.32 | 3.30 | 3.23 | 3.24 | 3.34 | 3.25 |
| P ₂ O ₅ | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| S | 0.010 | 0.006 | 0.007 | 0.007 | 0.004 | 0.008 | 0.010 |
| Cl | 0.123 | 0.128 | 0.118 | 0.117 | 0.118 | 0.138 | 0.126 |
| H ₂ O | 5.9 | 4.9 | 5.3 | 4.6 | 4.9 | 4.7 | 4.7 |
| CO ₂ | 0.012 | 0.004 | 0.002 | 0.008 | 0.003 | 0.009 | 0.008 |
| Total | 101.53 | 101.79 | 101.40 | 100.93 | 100.29 | 101.69 | 100.35 |
| ガス飽和圧力 (MPa) ^a | 218 | 149 | 168 | 136 | 144 | 143 | 143 |

FeO* = total FeO

^a Papale et al. (2006) で提案されているケイ酸塩メルトへの H₂O および CO₂ 溶解度モデルに適用してガス飽和圧力を計算した。マグマ温度は鬼界アカホヤ噴火の流紋岩マグマ温度 (874°C) を仮定した。



| 全岩化学組成 | メルト包有物 (MI) 化学組成 | 石英ガラス化学組成 |
|-------------------------------|--|----------------------------|
| H29成果 | H30成果 | H25-28成果 |
| ◇ 長瀬火砕流軽石 (95 ka) | ✱ 長瀬火砕流軽石 (95 ka) | ◆ 幸屋(船倉)降下軽石 (7.3 ka) |
| H25-27成果 | + 竹島火砕流上部ユニット縞状軽石 (7.3 ka) | ◆ 竹島火砕流下部ユニット軽石 (7.3 ka) |
| ◇ 幸屋(船倉)降下軽石 (7.3 ka) | H25-29成果 | ◆ 竹島火砕流中部ユニット軽石 (7.3 ka) |
| ◇ 竹島火砕流下部ユニット軽石 (7.3 ka) | + 籠港降下スコリア (9.5 ka) | ◆ 竹島火砕流上部ユニット軽石 (7.3 ka) |
| ◇ 竹島火砕流中部ユニット軽石 (7.3 ka) | + 幸屋(船倉)降下軽石 (7.3 ka) | ◆ 竹島火砕流中部ユニットスコリア (7.3 ka) |
| ◇ 竹島火砕流上部ユニット軽石 (7.3 ka) | + 竹島火砕流下部ユニット軽石 (7.3 ka) | ◆ 竹島火砕流下部ユニットスコリア (7.3 ka) |
| ◇ 竹島火砕流中部ユニットスコリア (7.3 ka) | + 竹島火砕流中部ユニット軽石 (7.3 ka) | |
| 既往研究 | + 竹島火砕流上部ユニット軽石 (7.3 ka) | |
| × 先カルデラ期噴火 | + 竹島火砕流中部ユニットスコリア (7.3 ka) | |
| ◇ カルデラ形成期噴火 | + 竹島火砕流上部ユニットスコリア (7.3 ka) | |
| △ 後カルデラ期噴火 (硫黄岳, 5.2-0.5 ka) | 既往研究 | |
| ○ 後カルデラ期噴火 (昭和硫黄島, 1934-1935) | + 竹島火砕流軽石 (7.3 ka) | |
| | × 後カルデラ期噴火 (3.9 ka, 0.5 ka, 1934-1935) | |
| | | 石基バルク化学組成 |
| | | H28成果 |
| | | ◆ 籠港降下スコリア (9.5 ka) |

図 2.4-7 長瀬火砕流軽石中のメルト包有物の主成分化学組成。各濃度は、SiO₂~P₂O₅の主要10元素で規格化した値を用いた。平成25-29年度本研究成果である籠港降下スコリア(9.5ka噴火)、幸屋(船倉)降下軽石および竹島火砕流軽石・スコリア・縞状軽石(7.3ka噴火)の結果、および、既往研究による結果も示す。

2.4.6 噴火年代が未確定な火山岩の年代測定

薩摩硫黄島火山には、噴火年代が確定していない溶岩や火砕流堆積物があり、同火山の長期的なマグマ供給系の発達史を明らかにするためにはこれらの年代を確定する必要がある。特に、薩摩硫黄島にある長浜溶岩の噴火年代については、小野・他（1982）では、先カルデラ火山期と考えられている一方、小林（2008）では鬼界アカホヤ噴火直前と推定している（表 2.4-6）。また、小アビ山火砕流堆積物については、小野・他（1982）はカルデラ形成期内、町田・新井（2003）は14万年前としているが、Maeno et al.(2007)では鬼界アカホヤ噴火時の堆積物と考えている。鬼界アカホヤ噴火の前駆現象やマグマ溜りの情報を知る上でも、この2つの噴出物が鬼界アカホヤ噴火で形成されたかどうかを明らかにすることは非常に重要である。そこで、これらの噴出物について、産業技術総合研究所に設置済みの K-Ar 年代測定装置による測定を試みた。K-Ar 年代測定方法は、数万年から数十億年の年代が測定できるため、上記の噴出物がカルデラ形成期内の噴火であれば、K-Ar 年代測定で噴火年代が得られるはずである。今年度は、試料の選別と K-Ar 年代測定のための前処理を実施した（表 2.4-6）。各噴出物を粉砕し、0.25-0.5mm サイズの粒子について、磁性分離・重液分離・ハンドピックを行い、年代測定に必要な石基 3g 以上を取り出した。測定については、緊急停電による K-Ar 年代測定装置の故障や機器担当者の出向があり、本年度内に結果を得ることはできなかったため、今後の課題である。

表 2.4-6 K-Ar 年代測定用に調製した試料と既往研究

| 試料 | 試料番号 | 全岩化学組成 (wt%) | | 調製試料量 (g) | 噴火年代 (既往研究) |
|-----------|----------|------------------|------------------|-----------|---|
| | | SiO ₂ | K ₂ O | | |
| 長浜溶岩 | 93IW01b | na | na | 7.8 | 先カルデラ火山期 (<700ka; 小野・他, 1982), 鬼界アカホヤ噴火直前 (7.3ka; 小林, 2008) |
| 長浜溶岩 | 94IW01a | na | na | 8.9 | |
| 長浜溶岩 | 94IW02 | 72.05 | 2.66 | 9 | |
| 小アビ山火砕流軽石 | 96IW07 | 71.22 | 2.58 | 3.1 | カルデラ形成期 (140ka; 町田・新井, 2003), 鬼界アカホヤ噴火時 (7.3ka; Maeno et al., 2007) |
| 小アビ山火砕流軽石 | 96IW07-2 | na | na | 3.4 | |
| 小アビ山火砕流軽石 | 06IW20-1 | 72.34 | 2.81 | 4.1 | |

2.4.7 まとめと今後の課題

本研究において、鬼界アカホヤ噴火（7.3 千年前）、籠港降下火砕物（9.5 千年前）、鬼界葛原噴火（95 千年前）による長瀬火砕流堆積物の岩石学的解析およびメルト包有物分析を行い、鬼界カルデラに関して以下の知見が得られた。

- ・平成 26-29 年度および本年度に測定したメルト包有物全て（82 個）の H_2O および CO_2 濃度を用いてマグマのガス飽和圧力を見積もったところ、流紋岩マグマは $153\pm 50\text{MPa}$ ($61\text{--}276\text{MPa}$, $n=40$)、安山岩マグマは $105\pm 25\text{MPa}$ ($69\text{--}177\text{MPa}$, $n=42$) の圧力下にあったと推定された。両マグマのガス飽和圧力の平均値は $128\pm 46\text{MPa}$ ($n=82$) であることから、地殻密度を 2500 kg/m^3 と仮定すると、鬼界アカホヤ噴火マグマ溜まりの主体は深さ $5\pm 2\text{km}$ にあったと考えられる。
- ・メルト包有物分析によるマグマの深度（圧力）推定の妥当性を検討するため、竹島火砕流の上部ユニットに含まれるスコリアの全岩化学組成データを用いて安山岩マグマの熱力学解析を行ない、岩石学的解析およびメルト包有物分析で得られたマグマの温度・圧力・含水量・メルト量・斑晶量と比較した。その結果、熱力学計算結果と観測結果がおおよそ一致した。
- ・鬼界アカホヤ噴火に至るマグマ供給系の発達過程を検討するために、9.5 千年前の噴火噴出物（籠港降下スコリア）に含まれるメルト包有物を SIMS で分析し、その H_2O および CO_2 濃度を明らかにした。その結果、同メルト包有物は、竹島火砕流上・中部ユニットに含まれるスコリアのメルト包有物と同様な主成分元素組成を示す一方、揮発性成分に関しては竹島火砕流上・中部ユニットのメルト包有物に比べ、低い H_2O および CO_2 濃度を持つことが判明した。従って、籠港降下スコリアを形成した安山岩マグマと竹島火砕流に含まれる安山岩マグマが同一であるモデルは否定された。
- ・カルデラ噴火マグマ溜りの長期的な発達過程を検討するため、95 千年前のカルデラ噴火（鬼界葛原噴火）による長瀬火砕流堆積物内の軽石に含まれる石英内メルト包有物の化学分析を行い、予察的な結果を得た。その結果、長瀬火砕流軽石メルト包有物は流紋岩組成であること、鬼界アカホヤ噴火の流紋岩メルト包有物とは異なる化学的特徴を持つことが明らかになった。長瀬火砕流堆積物内の軽石（流紋岩）の全岩化学組成も鬼界アカホヤ噴火の流紋岩とはわずかに異なる特徴を示すことから、鬼界葛原噴火マグマと鬼界アカホヤ噴火マグマは同一では無く、鬼界葛原噴火以降に何らかのマグマ供給系の変化が起きたと予想できる。

今後、鬼界カルデラにおけるマグマ溜まりの発達過程を検討するために、以下の研究課題を進める必要がある。

- ・噴出年代が確定されていない硫黄島内の長浜溶岩および小アビ山火砕流堆積物について K-Ar 年代測定を行い、両噴出物が鬼界アカホヤ噴火に関与したかどうかを確定する。
- ・カルデラ噴火マグマ溜りの長期的な発達過程を検討するため、鬼界アカホヤ噴火以前のカルデラ噴火である鬼界葛原噴火（95 千年前）、鬼界カルデラ起源の大規模火砕流と考えられている小瀬田火砕流堆積物（58 万年前）および小アビ山火砕流堆積物（14 万年前？）について、各噴火マグマの岩石学的特徴と揮発成分濃度を把握し、マグマの温度・圧力条

件を推定する。

引用文献

- Asimow, P.D. and Ghiorso, M.S. (1998) Algorithmic Modifications Extending MELTS to Calculate Subsolidus Phase Relations. *Amer. Mineral.*, 83, 1127-1131.
- Ghiorso, M.S., Gualda GAR (2015) An H₂O-CO₂ mixed fluid saturation model compatible with rhyolite-MELTS. *Contributions to Mineralogy and Petrology* doi:10.1007/s00410-015-1141-8.
- Ghiorso, M. S. and Sack, R. O. (1995). Chemical mass transfer in magmatic processes IV. A revised and internally consistent thermodynamic model for the interpolation and extrapolation of liquid-solid equilibria in magmatic systems at elevated temperatures and pressures. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 119, 197-212.
- Gualda, G.A.R., Ghiorso, M.S., Lemons, R.V., Carley, T.L. (2012) Rhyolite-MELTS: A modified calibration of MELTS optimized for silica-rich, fluid-bearing magmatic systems. *Journal of Petrology*, 53, 875-890.
- Kawanabe, Y. and Saito, G. (2002) Volcanic activity of the Satsuma-Iwojima area during the past 6500 years. *Earth Planets and Space*, 54, 295-301.
- 小林哲夫 (2008) カルデラの研究からイメージされる新しい火山像—マグマの発生から噴火現象までを制御するマンロー地殻応力場—. 月刊地球, 号外 No.60, p65-76.
- Maeno, F. and Taniguchi, H. (2007) Spatiotemporal evolution of a marine caldera-forming eruption, generating a low-aspect ratio pyroclastic flow, 7.3 ka, Kikai caldera, Japan: Implication from near-vent eruptive deposits. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 167, 212-238.
- 町田洋・新井房夫 (2003) 新編火山灰アトラス-日本列島とその周辺. 東京大学出版会, 東京, 336p.
- 小野晃司・曾屋龍典・細野武男 (1982) 薩摩硫黄島地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 図幅), 地質調査所, 80p.
- Newman, S. and Lowenstern, J. B. (2002) VolatileCalc: a silicate melt-H₂O-CO₂ solution model written in Visual Basic for EXCEL. *Comput. Geosci.*, 28, 597-604.
- Papale, P., Moretti, R. and Barbato, D. (2006) The compositional dependence of the saturation surface of H₂O+CO₂ fluids in silicate melts. *Chem. Geol.*, 229, 78-95.
- Saito, G., Kazahaya, K., Shinohara, H., Stimac, J. A. and Kawanabe, Y. (2001) Variation of volatile concentration in a magma system of Satsuma-Iwojima volcano deduced from melt inclusion analyses. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 108, 11-31.
- Saito, G., Stimac, J.A., Kawanabe, Y. and Goff, F. (2002) Mafic-felsic interaction at Satsuma-Iwojima volcano, Japan: Evidence from mafic inclusions in rhyolites. *Earth Planets Space*, 54, 303-325.
- Saito, G., Kazahaya, K. and Shinohara, H. (2003) Volatile evolution of Satsuma-Iwojima volcano: degassing process and mafic-felsic magma interaction. In "Developments In

Volcanology 5. Melt Inclusions In Volcanic Systems, Methods, Applications and Problems” B. De Vivo and R. J. Bodnar (eds), pp.129-146, Elsevier.

産業技術総合研究所 (2014) 平成 26 年度 火山影響評価に係る技術的知見の整備.

産業技術総合研究所 (2015) 平成 27 年度 火山影響評価に係る技術的知見の整備.

産業技術総合研究所 (2016) 平成 28 年度 火山影響評価に係る技術的知見の整備.

産業技術総合研究所 (2017) 平成 29 年度 火山影響評価に係る技術的知見の整備.

産業技術総合研究所 (2018) 平成 30 年度 火山影響評価に係る技術的知見の整備.