草津白根山火山ガスの化学組成(2014 年 7 月～2023 年 10 月) *

Chemical composition of the volcanic gases sampled at Kusatsu-Shirane volcano, Japan (July 2014 to October 2023)

東海大学**気象研究所***東京科学大学****

Tokai University** Meteorological Research Institute*** Institute of Science Tokyo****

１．概要

草津白根山において、2014 年から 2023 年にかけて山頂湯釜火口北側斜面地熱地帯で放出される火山ガス（噴気）を繰り返し採取・分析した。噴気の成分比（He/CO_2 比、CO_2/H_2S 比）は概ね地震回数と同期して変動した。このことは、地震の主な発生場である浅部熱水系に流入するマグマ起源流体の流量と地震回数が相関していることを意味している。He/CO_2 比や CO_2/H_2S 比は草津白根山の火山活動を評価するために有用な情報であると考えられる。

２．噴気の採取・分析

草津白根山の湯釜火口の北山麓に広がる地熱地帯において 3 つの噴気孔 W、C’、E で噴気を採取した（図１）。これらの 3 つの噴気孔（W、C’、E）は東西方向に配列しており、W を起点とすると C’、E はそれぞれ 160、400ｍ東方に位置している。これらの噴気を採取するために、金属チタン管を噴気孔に差し込み、管と孔の隙間を砂などで注意深く塞いだ。次にチタン管にゴム管を接続し、ゴム管の出口を真空ガラス瓶のコックに接続した。真空ガラス瓶にはあらかじめ高濃度のアルカリ性水溶液（KOH）20ml を封入しておいた。コックを慎重に開けることにより火山ガスをアルカリ性水溶液に吸収させた。噴気の化学分析は主に、小沢の方法[1]に従った。

３．結果および考察

図２に噴気の成分比（He/CO_2, CO_2/H_2S）の時間変化と草津白根山における月別地震回数の時間変化を示した。t_1（2014 年 7 月）から t_2（2017 年 4 月）の期間は、2014 年に発生した地震活動の unrest が緩和する過程に相当し、He/CO_2 比と CO_2/H_2S 比は共に単調な低下傾向を示した。t_2 から t_3（2017 年 11 月）にかけて、CO_2/H_2S 比は低下したが、He/CO_2 比は上昇した。この He/CO_2 比の上昇は、その後に起きる本白根山噴火（2018 年 1 月）の前兆であった可能性があり注目される。

本白根山噴火後、湯釜火口直下で地震が頻発するようになり、これに伴い He/CO_2 比と CO_2/H_2S 比は共に上昇し、t_4（2018 年 6 月）でピークに達した。t_4 から t_5（2019 年 10 月）にかけて、He/CO_2 比は一度低下し、再び上昇したが、CO_2/H_2S 比はなだらかな低下傾向を示した。t_5 から t_6（2021 年 10 月）の期間、月別地震回数は 100 回前後で地震活動が若干活発化した状態が継続した。t_5 から t_6 にかけて、He/CO_2 比と CO_2/H_2S 比は共に変動が少ない状態が継続した。この期間、He/CO_2 比の値は t_4 におけるピークの

＊　2024 年 10 月 31 日受付

＊＊大場武，沼波望，豊島誠也（Takeshi Ohba, Nozomi Numanami, Seiya Toyoshima）

＊＊＊谷口無我 (Muga Yaguchi)　＊＊＊＊寺田暁彦 (Akihiko Terada)

値と同程度であったが、CO_2/H_2S 比の値は、t_4 におけるピークの値よりも有意に低かった。t_6 から t_7（2023 年 5 月）にかけて、He/CO_2 比はなだらかに低下したが、CO_2/H_2S 比は 2022 年に一度大きく低下し、再び上昇した。

噴気に含まれる成分の起源として、He はマグマ、CO_2 はマグマおよび地殻物質、H_2S は熱水系流体であると考えられている[2]。He/CO_2 比の変動は、地殻物質に由来する CO_2 に対するマグマ起源 He の増減に対応し、CO_2/H_2S 比の変動は、熱水系流体で生成する H_2S に対するマグマおよび地殻物質に由来する CO_2 の増減に対応すると考えられる。地殻物質に由来する CO_2 の生成流量と、H_2S の生成流量が一定であると仮定すれば、He/CO_2 比と CO_2/H_2S 比の上昇は、共にマグマ起源成分の流量増加を意味する。図２に示されるように、t_1 から t_2 にかけての減少、t_3 から t_4 にかけての増加など、He/CO_2 比と CO_2/H_2S 比の変動が月別地震回数の変動と同期していることは、マグマ起源成分流量と地震活動が密接に関係していることを示唆する。しかしながら、t_4 から t_5 の期間、および t_6 から t_7 の期間において、He/CO_2 比と CO_2/H_2S 比の変動には明確な相違が見られる。これらの相違の原因として、地殻物質に由来する CO_2 の生成流量と、H_2S の生成流量を一定とする仮定が成立していない場合があることが考えられる。たとえば、熱水系では以下の二つの反応が起きていると考えられる。

$$4SO_2 + 4H_2O = 3HSO_4^- + H_2S + 3H^+ \qquad (1)$$
$$3SO_2 + 2H_2O = 2HSO_4^- + S^0 + 2H^+ \qquad (2)$$

これらの反応では、左辺のマグマ起源 SO_2 が熱水系の H_2O と反応し、右辺の H_2S や S^0（自然硫黄）を生成する。熱水系の酸化還元状態が還元的であれば反応(1)が優勢になり、酸化的であれば反応(2)が優勢になるので、熱水系の酸化還元状態の変化により H_2S の生成流量は変動する可能性がある。

４．結論

草津白根山において、山頂火口北側斜面地熱地帯で放出される火山ガス（噴気）を繰り返し採取・分析した。噴気の成分比（He/CO_2 比、CO_2/H_2S 比）は概ね地震回数と同期して変動した。このことは、地震の主な発生場である浅部熱水系に流入するマグマ起源流体の流量と地震回数が相関していることを意味している。He/CO_2 比や CO_2/H_2S 比は草津白根山の火山活動を評価するために有用な情報であると考えられる。一方で、He/CO_2 比と CO_2/H_2S 比の間には協調しない変動（＝デカップリング）が起きる場合があり、He/CO_2 比や CO_2/H_2S 比がマグマ起源流体の流量だけで決定されていないことを示唆する。例えば熱水系における H_2S の生成流量は、熱水系の酸化還元状態により変化する可能性があり、デカップリングを引き起こしている可能性がある。

5．文献

[1] 小沢竹二郎（1968）地球化学におけるガス分析法（I）．分析化学，17，395-405.

[2] Ohba T, Yaguchi M, Nishino K, Numanami N, Tsunogai U, Ito M and Shingubara R (2019) Time Variation in the Chemical and Isotopic Composition of Fumarolic Gasses at Kusatsu-Shirane Volcano, Japan. Front. Earth Sci. 7:249. doi: 10.3389/feart.2019.00249

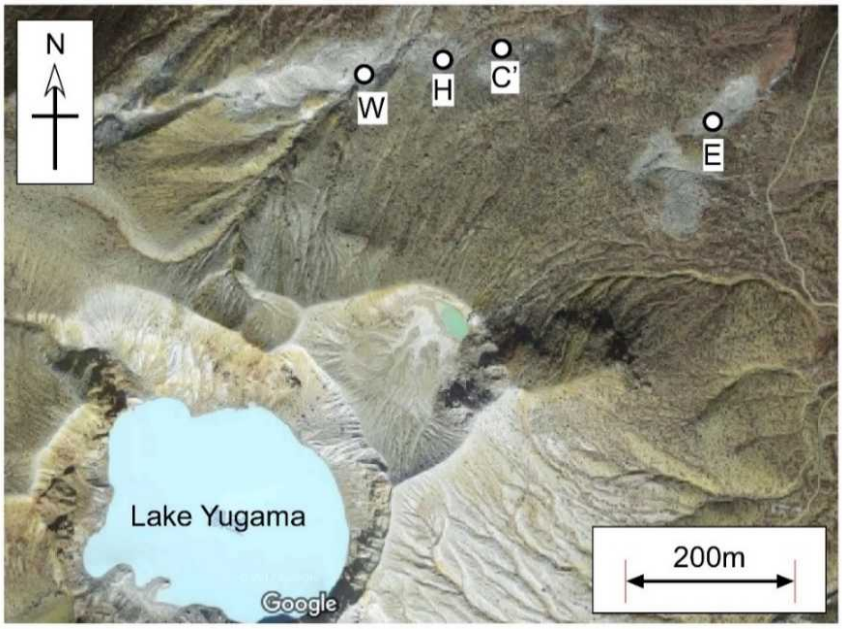


図１．草津白根山山頂北側山麓噴気 W，C’，E の位置（背景図として，GoogleMap を使用した）

Fig.1. Location of fumaroles W, C’ and E on the north flank of Kusatsu-Shirane volcano (GoogleMap was used for the background)

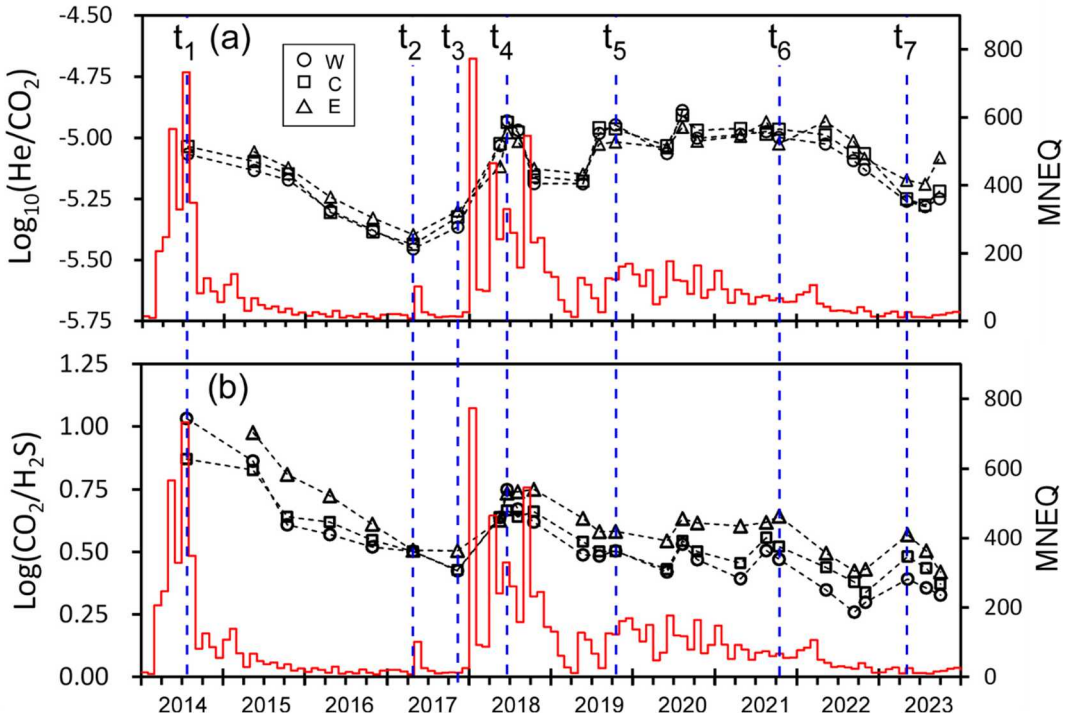


図２．噴気の成分比（He/CO_2, CO_2/H_2S）の時間変化。月別地震回数（MNEQ：赤線、右縦軸に目盛り）は気象庁の観測による。

Fig.2.　Temporal variation of He/CO_2 and CO_2/H_2S molar ratio. The monthly number of earthquakes (MNEQ) was observed by JMA (red lines calibrated on the right axis).