

令和 6 年 6 月 18 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2022～2023

課題番号：22K19846

研究課題名（和文）対流圏二酸化炭素の超高精度三酸素同位体異常定量

研究課題名（英文）Development of a high-precision measurement system for the triple oxygen isotopic compositions of atmospheric carbon dioxide

研究代表者

中川 書子（Nakagawa, Fumiko）

名古屋大学・環境学研究科・准教授

研究者番号：70360899

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：対流圏二酸化炭素の三酸素同位体組成は地球表層環境の炭素サイクルを定量化する上で有用なトレーサーとなる。しかし従来の二酸化炭素の三酸素同位体組成分析法は、危険性が高く、かつ入手困難な強還元剤を必要としたため、その実測は困難であった。そこで本研究は、強還元剤を一切使わずに二酸化炭素の高精度三酸素同位体組成分析を実現する自動分析計を開発した。具体的には、二酸化炭素を水分子に変換し、分光計を用いてこの水分子の三酸素同位体組成を測定した。そして都市域や森林等において、二酸化炭素の三酸素同位体組成の実測に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

国内では初となる対流圏二酸化炭素の高精度三酸素同位体組成の定量が実現した。本手法は安全で簡便な手法であり、三酸素同位体組成の応用範囲が広がる。これにより、世界各地で連続モニタリングされている対流圏二酸化炭素濃度に見られる季節変動や経年変化、イベント的な変動に関して、原因を把握し、必要に応じて迅速な対策を講じることが出来るようになり、地球システムや炭素循環の学術的理解を深化させることが出来るようになると思われる。

研究成果の概要（英文）：The triple oxygen isotopic compositions of tropospheric carbon dioxide can be a useful tracer to quantify carbon cycle in terrestrial environments. Traditionally, carbon dioxide must be converted to oxygen gas to determine triple oxygen isotopic compositions precisely. However, toxic and dangerous reagents such as bromine pentafluoride must be needed for the reactions to convert carbon dioxide to oxygen gas. In this study, we developed an alternative new method for the high precision measurements on the triple oxygen isotopic compositions of carbon dioxide using Cavity Ring-Down Spectroscopy (CRDS) for water and successfully measured them in urban areas and forests.

研究分野：同位体地球化学

キーワード：二酸化炭素 三酸素同位体組成 対流圏大気 都市域 森林域

## 1. 研究開始当初の背景

人為起源の CO<sub>2</sub> がもたらす地球温暖化やその気候・気象影響は世界各所で顕在化しつつあり、人類の大きな脅威となっている。しかし大気中に放出された人為起源の CO<sub>2</sub> は、そのまま大気中に蓄積する訳では無い。その多くは海洋や陸上生態系に吸収され、大気中に蓄積する CO<sub>2</sub> は全人為起源 CO<sub>2</sub> の半分程度に過ぎない。このため、海洋や陸上生態系の CO<sub>2</sub> 吸収量がどのような仕組みによって決まり、これが今後どのように変化していくのかと言った、いわゆる炭素循環の定量的理解が、人類にとってきわめて重要な課題となっている。

このような炭素循環を定量化する指標として利用されて来たのが、CO<sub>2</sub> の安定同位体比 ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ) である。これは主要起源毎に CO<sub>2</sub> の安定同位体比が大きく異なることを利用するもので、大気 CO<sub>2</sub> の安定同位体比の絶対値やその季節変動、経年変化等を観測することで、海洋や陸上生態系との相互作用を定量化出来る。しかし同位体比の異なる起源間の混合以外に、海洋や植物が CO<sub>2</sub> を吸収する際の同位体効果によって  $\delta^{13}\text{C}$  値や  $\delta^{18}\text{O}$  値は変化する。このため複数の仮定を置かないと解析出来ず、定量化された炭素循環量の確度も低かった。

これに対して、対流圏 CO<sub>2</sub> の三酸素同位体異常 ( $\Delta^{17}\text{O} = \ln(1+\delta^{17}\text{O}) - 0.522 \times \ln(1+\delta^{18}\text{O})$ )、すなわち <sup>16</sup>O および <sup>18</sup>O の存在量に対する <sup>17</sup>O の相対過剰量が、その起源の差異のみを反映して微小変化することが近年明らかになった (Hofmann et al., 2017)。しかも  $\Delta^{17}\text{O}$  値なら同位体効果が無視出来る。従って、対流圏 CO<sub>2</sub> の  $\Delta^{17}\text{O}$  値を 0.01‰前後の超高精度で分析することが出来れば、炭素循環量を高確度で定量出来る。しかし大気濃度レベルの CO<sub>2</sub> の  $\Delta^{17}\text{O}$  値を、0.01‰前後の高精度で分析するのは極めて難しい。従来は、BrF<sub>5</sub> などの危険で入手困難な試薬を使って CO<sub>2</sub> の O 原子を O<sub>2</sub> に変換して質量分析する必要があった。このため、0.01‰前後の高精度で分析された対流圏 CO<sub>2</sub> の  $\Delta^{17}\text{O}$  値は過去にほとんど報告が無く、国内には存在しなかった。また数少ない報告値も、そのすべてが相互に整合性があるとは言えない状況にあった。

そこで本研究では、H<sub>2</sub>O の  $\Delta^{17}\text{O}$  値を 0.01‰前後の精度で定量出来る CRDS (Steig et al., 2014) に着目し、CO<sub>2</sub> の O 原子を定量的に H<sub>2</sub>O に変換した上で、CRDS を用いて  $\Delta^{17}\text{O}$  値を分析する新しい同位体比分析システムを開発することを着想した。O<sub>2</sub> 化と異なり、CO<sub>2</sub> の H<sub>2</sub>O 化は、化学的に容易に進行するからである (Brenninkmeijer and Röckman, 1998)。なお CO<sub>2</sub> のままで  $\Delta^{17}\text{O}$  値が定量出来る機器も Aerodyne 社から市販されているが、測定精度は不十分である。また CO<sub>2</sub> や H<sub>2</sub>O をはじめとした多くの物質の  $\Delta^{17}\text{O}$  値は、H<sub>2</sub>O 形の国際同位体比標準 (VSMOW や SLAP) との比較で定義されるので、 $\Delta^{17}\text{O}$  値を国際スケールで校正して報告する上で、CO<sub>2</sub> の H<sub>2</sub>O 化は不可欠である。以上の理由により、本研究は H<sub>2</sub>O 化を選択することとした。

## 2. 研究の目的

本研究は、CO<sub>2</sub> の  $\Delta^{17}\text{O}$  値を対流圏 CO<sub>2</sub> の起源推定の指標として活用できるようにする。ただし、これまで、CO<sub>2</sub> の高精度  $\Delta^{17}\text{O}$  値分析を実現するには、危険かつ国内では入手困難な強還元剤を使って CO<sub>2</sub> の O 原子を O<sub>2</sub> 化し、これを精製した上で質量分析する必要があった (表 1)。このため、対流圏 CO<sub>2</sub> の高精度  $\Delta^{17}\text{O}$  値分析はほとんど実現していなかった。そこで本研究は、強還元剤を一切使わない高精度自動分析システムを開発する。

表 1 本研究手法と従来法の比較

引用	精度 (1σ)	安全性・簡便性	測定時間	試料量 (μmol)
Kawagucci et al. (2005)	✗ 0.3‰	○ CO <sub>2</sub> +CuO→CO <sub>2</sub> +CuO	△ 3時間	◎ 9×10 <sup>-3</sup>
Hofmann and Pack (2010)	△ 0.05‰	✗ CO <sub>2</sub> +CeO <sub>2</sub> →CO <sub>2</sub> +CeO <sub>2</sub> CeO <sub>2</sub> +BrF <sub>5</sub> →O <sub>2</sub>	○ 1時間	✗ 3500
Barkan and Luz (2012)	◎ 0.005‰	✗ CO <sub>2</sub> +H <sub>2</sub> O→CO <sub>2</sub> +H <sub>2</sub> O H <sub>2</sub> O+BrF <sub>5</sub> →O <sub>2</sub>	✗ 7日間	△ 70
本研究	○ 0.01‰	◎ CO <sub>2</sub> +4H <sub>2</sub> →2H <sub>2</sub> O	○ 1時間	○ 10

### 3. 研究の方法

#### (1) 分析システム開発

本研究では、CO<sub>2</sub>をH<sub>2</sub>と反応させてH<sub>2</sub>Oに変換し、キャビティリングダウン型分光計(CRDS)を用いてこのH<sub>2</sub>OのΔ<sup>17</sup>O値を分析する。製作を計画している自動分析システムの概略図を図1に示す。これは①CO<sub>2</sub>精製、②CO<sub>2</sub>のH<sub>2</sub>O化、③H<sub>2</sub>OのΔ<sup>17</sup>O値分析、の3つの部分から構成されている。

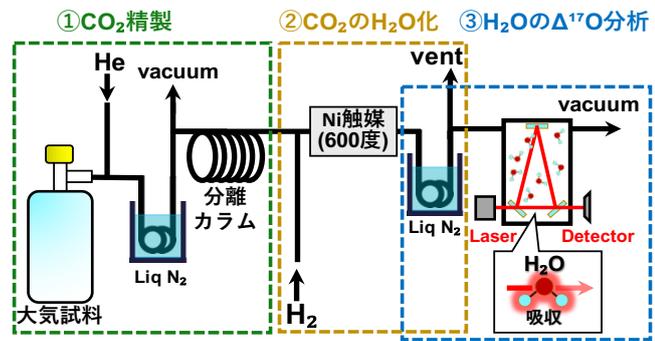


図1 本研究で開発するCO<sub>2</sub>のΔ<sup>17</sup>O値自動分析システム。

試料分取後は、全自動で前処理と分析を行い、高精度Δ<sup>17</sup>O値定量を実現する。  
**①CO<sub>2</sub>精製:**大気中にはCO<sub>2</sub>(-79°C)以外にO<sub>2</sub>(-183°C)、CO(-191°C)、N<sub>2</sub>O(-88°C)といったH<sub>2</sub>と反応してH<sub>2</sub>Oになる含酸素化合物(括弧内は1気圧時の沸点)やH<sub>2</sub>O(0°C)が存在するため、②のCO<sub>2</sub>のH<sub>2</sub>O化をする前に、CO<sub>2</sub>以外の含酸素化合物は低温トラップ(-196°C → -70°C)と分離カラム(Porapak PS)を使って完全に分離除去する。本研究で分離条件を決定する。

**②CO<sub>2</sub>のH<sub>2</sub>O化:**分離カラムからCO<sub>2</sub>だけが溶出するタイミングでこれをH<sub>2</sub>とともに600°CのNi触媒に導入して完全にH<sub>2</sub>O化し、低温トラップ(-196°C)に捕集する。導入したCO<sub>2</sub>量とCRDSで定量化したH<sub>2</sub>O量を比較し、最適な反応管の長さや温度、流速条件などを決定する。

**③H<sub>2</sub>OのΔ<sup>17</sup>O値分析:**低温トラップを室温に戻した上で高純度N<sub>2</sub>を用いて希釈し、キャビティリングダウン型分光計(CRDS; Picarro社製L2140-i)に導入してH<sub>2</sub>Oのδ<sup>18</sup>O値とδ<sup>17</sup>O値を分析し、Δ<sup>17</sup>O値を算出する。また前後に同位体比既知のH<sub>2</sub>Oを導入し、Δ<sup>17</sup>O値を校正する。

#### (2) 大気試料の実測

本研究では、名古屋大学構内と若宮大通公園、桐生水文試験地にてCO<sub>2</sub>の濃度と同位体比(δ<sup>13</sup>C・δ<sup>18</sup>O・Δ<sup>17</sup>O)の観測を行なった。名古屋大学構内では、「都市大気」、「森林大気」、「土壌呼吸」、「植物呼吸」、「自動車排気ガス」のサンプリングを行い、若宮大通公園では「都市大気」、桐生水文試験地では森林キャノピー上空における「上昇流」と「下降流」のサンプリングを行なった。また、サンプリングには以下の2種類の方法を用いて行なった。

**グラブサンプリング:** 予め200ml~6Lの金属またはガラス容器を真空引きしておき、採取地点で栓を開けて容器内に大気試料を拡散させて捕集する方法である。主に濃縮しなくても分析可能なCO<sub>2</sub>量を確保できる大気試料で使用した。

**濃縮法:** グラブサンプリングでは測定に必要な量のCO<sub>2</sub>を確保できないときに行う。液体酸素(-183°C)を用いてCO<sub>2</sub>をトラップした後に、予め真空引きした200mLガラスボトルに拡散させて捕集する方法である。概略図を図2に示す。

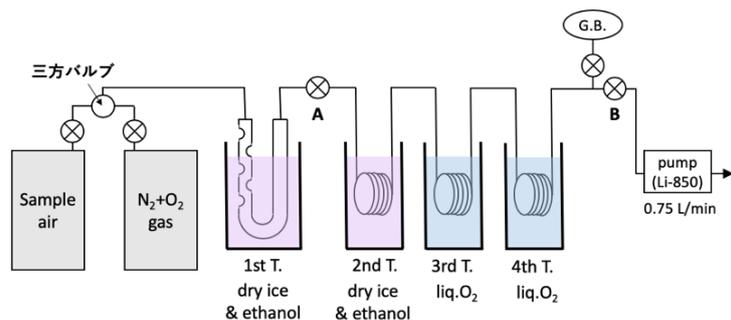


図2 CO<sub>2</sub>濃縮ラインの概略図

## 4. 研究成果

### (1) 分析システム開発

#### ①CO<sub>2</sub> 精製

##### <CO<sub>2</sub> と H<sub>2</sub>O の分離>

大気試料中の CO<sub>2</sub> と H<sub>2</sub>O の分離条件を決めるために基礎実験を行った。まず U 字トラップに大気試料中の CO<sub>2</sub> と H<sub>2</sub>O を液体窒素温度でトラップする。高純度 He をキャリアガスとして流しながら、U 字トラップを室温 (25°C) まで徐々に戻す。流速 20ml/min でキャリアガスを流した時の CO<sub>2</sub> と H<sub>2</sub>O のリテンションタイムを ND-IR (LI-7000, LI-COR 社製) を使って確認したところ、CO<sub>2</sub> は、約 150~300 秒の間に出てくるのに対して、H<sub>2</sub>O は約 740 秒以降に出てくるのが分かった。本研究では全ての CO<sub>2</sub> が出た 300 秒後に再度トラップを冷却することによって CO<sub>2</sub> と H<sub>2</sub>O を分離することにした。

##### <CO<sub>2</sub> と N<sub>2</sub>O の分離>

GC 分離カラム (PorapakPS 充填、長さ 3m, 内径 3.1mm) を用いて CO<sub>2</sub> と N<sub>2</sub>O を分離する際の最適条件を決定するために、流速や冷媒の条件を変えながら実験を行った。実験には標準ガス (CO<sub>2</sub> : 996ppm, N<sub>2</sub>O : 202ppm, N<sub>2</sub> ベース) を使い、カラムから出てきた CO<sub>2</sub> と N<sub>2</sub>O を独立型 TCD 検出器 (model 110 Stand-alone GC Detector Chassis, 米国 SRI 社) を使って検出した。冷媒として UC リアクター極低温反応機 (約-70°C) やドライアイス&エタノール (約-78°C) を使った実験では CO<sub>2</sub> と N<sub>2</sub>O の分離の再現性が悪いことが分かった。そこで冷媒を液体窒素に変えたところ、He キャリアーの流速が 20ml/min とした時が一番効率良く CO<sub>2</sub> と N<sub>2</sub>O の分離ができることを確認した。

#### ②CO<sub>2</sub> の H<sub>2</sub>O 化

CO<sub>2</sub> を H<sub>2</sub> と Ni 触媒のもと高温下で反応させて CH<sub>4</sub> と H<sub>2</sub>O に変えるために基礎実験を行った (反応式: CO<sub>2</sub> + 4H<sub>2</sub> → CH<sub>4</sub> + 2H<sub>2</sub>O)。本研究では触媒を Ni 粉末ではなく Ni チューブ (外径 1.5mm, 肉厚 0.35mm, 純度 99%) を用いた。還元率は温度が高いほど、Ni チューブは長いほど、He の流速が大きいくほど還元率は高い傾向が見られた。ただし、CO<sub>2</sub> と N<sub>2</sub>O のカラム分離の最適流速が 20ml/min であったため、その条件で反応させることにした。還元条件は He 20ml/min、H<sub>2</sub> 40ml/min、Ni チューブ 5m、管状炉温度 600°C に設定することにした。

#### ③H<sub>2</sub>O の Δ<sup>17</sup>O 値分析

同一の CO<sub>2</sub> の Δ<sup>17</sup>O 値を測定すると、導入量の逆数に依存して、定量される Δ<sup>17</sup>O 値が変化する傾向が見られた。これはライン内で微量の Blank H<sub>2</sub>O が発生し、混入することが原因と考えられ、日々この Blank 量およびその Δ<sup>17</sup>O 値を測定して補正することにした。最終的に一回測定当たり 40 μmol (CO<sub>2</sub> 濃度 400 ppm の対流圏大気 2.4 LSTP 中の CO<sub>2</sub> 量に相当) 導入することで、CO<sub>2</sub> の Δ<sup>17</sup>O 値を 0.025‰ (1σ) 以内の高い精度で測定できるようになった。また Δ<sup>17</sup>O 値既知の H<sub>2</sub>O と平衡化させた CO<sub>2</sub> の Δ<sup>17</sup>O 値を測定したところ、CO<sub>2</sub> の Δ<sup>17</sup>O 値は H<sub>2</sub>O の Δ<sup>17</sup>O 値と誤差範囲内で一致し (図 3)、新分析システム内の一連の反応・精製・導入過程において Δ<sup>17</sup>O 値の有意な変化が起きていないことが明らかになった。

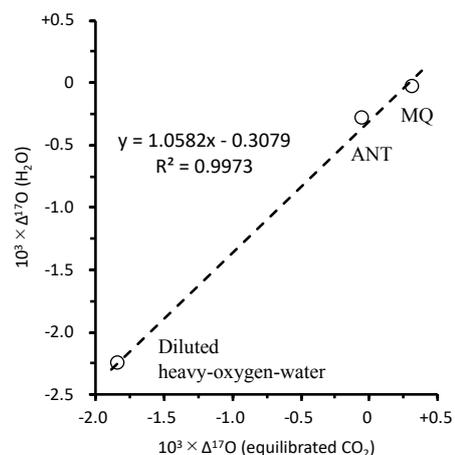


図 3 水試料と平衡化させた CO<sub>2</sub> を用いて作成した検量線。横軸に平衡化させた CO<sub>2</sub> の測定値、縦軸に平衡化に使用した H<sub>2</sub>O の値をプロットした。

## (2) 大気試料の実測

本研究では、陸域生態系呼吸(土壌呼吸・植物呼吸)、化石燃料燃焼といった CO<sub>2</sub> の主要放出源に加えて、都市大気(名古屋大学構内)と滋賀県の桐生水文試験地にて大気観測を行った。桐生水文試験地では、森林フラックスタワーを利用した渦集積法で上昇流と下降流に区分して捕集した大気試料を同位体比測定用に分取した。CO<sub>2</sub> の濃度と同位体比 ( $\delta^{13}\text{C}$ ・ $\delta^{18}\text{O}$ ・ $\Delta^{17}\text{O}$ ) は質量分析法と分光法を併用して測定を行った。

その結果、土壌呼吸と植物呼吸によって放出される CO<sub>2</sub> はそれぞれ  $+74 \times 10^{-6}$  と  $+42 \times 10^{-6}$  という高い  $\Delta^{17}\text{O}$  値を示すことが判明した(図4)。これは天水との酸素同位体交換、蒸発散による同位体分別、拡散による同位体分別の影響が加わった CO<sub>2</sub> と考えると妥当な  $\Delta^{17}\text{O}$  値である。また、桐生水文試験地における上昇流(森林大気由来)と下降流(一般大気由来)の  $\Delta^{17}\text{O}$  値を比較すると、上昇流が下降流と比べて有意に高い  $\Delta^{17}\text{O}$  値を示し、陸域生態系呼吸 CO<sub>2</sub> の  $\Delta^{17}\text{O}$  観測結果を支持した。観測された  $\Delta^{17}\text{O}$  値は下降流として森林キャノピー内に入った CO<sub>2</sub> の約 30% が陸域生態系と相互作用した上で上昇流として一般大気中に放出されていることを示唆した。

一方、名古屋大学構内の大気 CO<sub>2</sub> は  $-100 \times 10^{-6}$  から  $+50 \times 10^{-6}$  程度の幅広い変化を示した(図5)。このうち低い  $\Delta^{17}\text{O}$  値は化石燃料燃焼に直接由来する CO<sub>2</sub> の混合で説明できるが、高い  $\Delta^{17}\text{O}$  値はバックグラウンドの対流圏 CO<sub>2</sub> より有意に高い。この名古屋大学構内で観測された高い  $\Delta^{17}\text{O}$  値を示す CO<sub>2</sub> は陸域生態系からの放出を反映したものであり、都市圏内でも陸域生態系と活発な相互作用をしている可能性が高いと考えられる

(図6)。CO<sub>2</sub> は海洋とも活発に相互作用することが知られているが、その  $\Delta^{17}\text{O}$  値は  $-5 \times 10^{-6}$  程度と予想されるため、陸域生態系との相互作用を経て放出される CO<sub>2</sub> は海洋起源と明確に区別することができることが分かった。

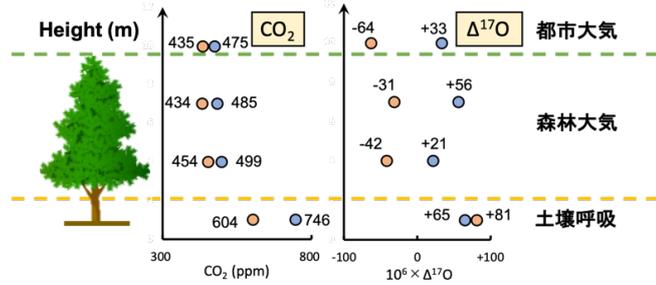


図4 名古屋大学構内の観測結果(CO<sub>2</sub>鉛直分布) 上から順に、名古屋大学環境共用館屋上大気、森林大気(4 m)、森林大気(1 m)、土壌呼吸)。オレンジ色が昼、青色が夜の観測結果を示す。

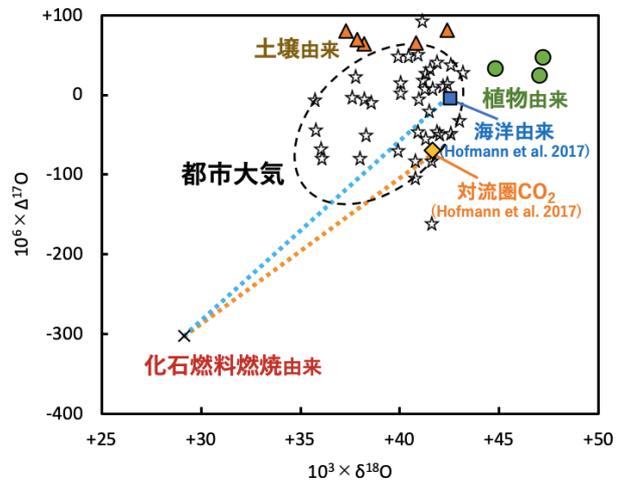


図5 本研究で測定した都市大気の大気 CO<sub>2</sub> の主要放出源のデータとともにプロット

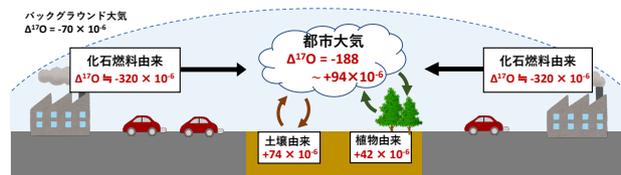


図6 都市域における CO<sub>2</sub> の循環のイメージ図

### 【引用文献】

- Brenninkmeijer, C. A. M., Röckmann, T. (1998): A rapid method for the preparation of O<sub>2</sub> from CO<sub>2</sub> for mass spectrometric measurement of <sup>17</sup>O/<sup>16</sup>O Ratios. Rapid Commun. Mass Spectrom. **12**, 479-483.
- Hofmann, M.E.G., Horvath, B., Schneider, L., Peters, W., Schützenmeister, K., Pack, A. (2017): Atmospheric measurements of D<sup>17</sup>O in CO<sub>2</sub> in Göttingen, Germany reveal a seasonal cycle driven by biospheric uptake. Geochim. Cosmochim. Acta, **199**, 143-163.
- Steig, E. J., Gkinis, V., Schauer, A. J., Schoenemann, S. W., Samek, K., Hoffnagle, J., Dennis, K. J. and Tan, S. M. (2014): Calibrated high-precision <sup>17</sup>O-excess measurements using cavity ring-down spectroscopy with laser-current-tuned cavity resonance, Atmos. Meas. Tech., **7** (8), 2421-2435.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Tsunogai Urumu, Shingubara Ryo, Morishita Yuhei, Ito Masanori, Nakagawa Fumiko, Yoshikawa Shin, Utsugi Mitsuru, Yokoo Akihiko	4. 巻 10
2. 論文標題 Sampling Volcanic Plume Using a Drone-Borne SeIPS for Remotely Determined Stable Isotopic Compositions of Fumarolic Carbon Dioxide	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Frontiers in Earth Science	6. 最初と最後の頁 833733
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/feart.2022.833733	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Ding Weitian, Tsunogai Urumu, Nakagawa Fumiko, Sambuichi Takashi, Sase Hiroyuki, Morohashi Masayuki, Yotsuyanagi Hiroki	4. 巻 19
2. 論文標題 Tracing the source of nitrate in a forested stream showing elevated concentrations during storm events	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Biogeosciences	6. 最初と最後の頁 3247 ~ 3261
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5194/bg-19-3247-2022	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Sase Hiroyuki, Takahashi Masamichi, Matsuda Kazuhide, Yamashita Naoyuki, Tsunogai Urumu, Nakagawa Fumiko, Morohashi Masayuki, Yotsuyanagi Hiroki, Ohizumi Tsuyoshi, Sato Keiichi, Kurokawa Junichi, Nakata Makoto	4. 巻 68
2. 論文標題 Nitrogen saturation of forested catchments in central Japan - Progress or recovery?	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Soil Science and Plant Nutrition	6. 最初と最後の頁 5 ~ 14
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/00380768.2021.1991228	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 角皆 潤, 中川 書子	4. 巻 -
2. 論文標題 赤外分光法による軽元素安定同位体比の分析（原理編第2章第7節第5項）	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 先端の分析法 第2版	6. 最初と最後の頁 250 ~ 254
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ding Weitian, Tsunogai Urumu, Nakagawa Fumiko, Sambuichi Takashi, Chiwa Masaaki, Kasahara Tamao, Shinozuka Ken'ichi	4. 巻 20
2. 論文標題 Stable isotopic evidence for the excess leaching of unprocessed atmospheric nitrate from forested catchments under high nitrogen saturation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Biogeosciences	6. 最初と最後の頁 753 ~ 766
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5194/bg-20-753-2023	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計13件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 中村恵弥, 角皆潤, 中川書子, 伊藤昌稚, 高梨聡, 坂部綾香, 斉藤拓也
2. 発表標題 三酸素同位体組成を指標に用いた対流圏二酸化炭素と陸域生態系の相互作用の定量化.
3. 学会等名 日本地球化学会第69回年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中川 書子, 黄 天政, 角皆 潤, Ding, Wei Tian, 伊藤 昌稚, Kim Yongwon
2. 発表標題 土壌から放出される一酸化二窒素の三酸素同位体異常定量.
3. 学会等名 JpGU Meeting 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 織田 舞保, 角皆 潤, 中川 書子, 伊藤 昌稚, 許 昊, 山神 真紀子
2. 発表標題 三酸素同位体組成を指標に用いた対流圏窒素酸化物の反応過程追跡.
3. 学会等名 日本地球化学会第69回年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 渡部紘平, 角皆潤, 宮木 裕崇, 伊藤 昌稚, 中川 書子, 風早 竜之介
2. 発表標題 鉛直硫化水素センサーアレイを用いた火山性ガス 放出量定量法開発.
3. 学会等名 日本地球化学会第69回年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 角皆潤, 中川書子
2. 発表標題 同位体環境化学の現在地と展望.
3. 学会等名 日本地球化学会第69回年会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中村恵弥, 角皆潤, 中川書子, 伊藤昌稚, 高梨聡, 坂部綾香, 斉藤拓也
2. 発表標題 三酸素同位体組成を指標に用いた対流圏二酸化炭素と陸域生態系の相互作用の定量化.
3. 学会等名 第27回大気化学討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 織田 舞保, 角皆 潤, 中川 書子, 伊藤 昌稚, 許 昊, 山神 真紀子
2. 発表標題 三酸素同位体組成を指標に用いた対流圏窒素酸化物の反応過程追跡.
3. 学会等名 第27回大気化学討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 宮木 裕崇, 角皆 潤, 伊藤 昌稚, 渡部 紘平, 中川 書子, 寺田 暁彦, 田中 良, 西川 空良
2. 発表標題 ドローンを用いた噴気孔別噴煙採取と遠隔噴気温度推定への応用.
3. 学会等名 2022年度日本質量分析学会同位体比部会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中川 書子, 中村 恵弥, 角皆 潤, 伊藤 昌稚, 高梨 聡, 坂部 綾香, 齊藤 拓也
2. 発表標題 三酸素同位体組成を指標に用いた対流圏二酸化炭素と陸域生態系の相互作用の定量化
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2023年大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 角皆 潤, 中川 書子, 三步一 孝, Ding, Wei Tian, 伊藤 昌稚
2. 発表標題 大気化学・生物地球化学分野における同位体地球化学の進展
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2023年大会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Sambuichi, U. Tsunogai, F. Nakagawa
2. 発表標題 High-precision $\delta^{17}O$ measurements of phosphate in modern and fossil bioapatite: application for reconstructing paleo-environments.
3. 学会等名 JpGU Meeting 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ding, Wei Tian, 角皆 潤, 三步一 孝, Ruan, Wenhua, 中川 書子
2. 発表標題 三酸素同位体組成を用いた土壌由来一酸化二窒素の起源推定
3. 学会等名 日本地球化学会年会第70回年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 伊藤 昌稚, 角皆 潤, 中川 書子, 三步一 孝, 渡邊 悠斗
2. 発表標題 水圏環境下における高感度酸素消費速度定量法の開発
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2023年大会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関