

Archives of Atmospheric Chemistry Research

第 43 号



Japan Society of Atmospheric Chemistry

総説

―トピックス:「陸域生態系と大気化学」―	Artio	cle No.
生物起源揮発性有機化合物とその反応性の測定・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	公本 淳	043A01
森林大気のバイオエアロゾル牧 輝弥,北 和之,保坂住	建太郎,	
三星かおり,五十	一嵐康人	043A02
安定同位体比を用いた陸域生態系における N2O 放出と吸収の解明	豊田 栄	043A03

会員からのお知らせ

『基礎から学ぶ光学センサの校正』刊行について久世暁彦	043N01

学会からのお知らせ

第25回大気化学討論会のお知らせ斎藤尚子,入江住	仁士, 内田里沙,	
	中山智喜, 豊田栄	043N02
2020年度日本大気化学会奨励賞の候補者募集日本大気化学	学会 運営委員会	043N03
JpGU-AGU2020「大気化学」セッション開催報告日本大気化学	学会 運営委員会	043N04
日本大気化学会会員集会プログラム日本大気化学	学会 運営委員会	043N05
第16·17回日本大気化学会運営委員会議事録·······日本大気化学	学会 運営委員会	043N06

記事のご投稿について

論文や記事のご投稿をご検討されている方は,事前に本誌編集委員または日本大気化学会運営委員まで ご相談下さい。

大気化学研究編集委員:森本真司(共同編集長),山地一代(共同編集長),竹谷文一,宮崎雄三

日本大気化学会運営委員(第11期,2019年7月1日から):

谷本浩志(国立環境研究所),金谷有剛(海洋研究開発機構),内田里沙(日本自動車研究所),江口菜穂 (九州大学),齋藤尚子(千葉大学),関山剛(気象研究所),竹川暢之(首都大学東京),豊田栄(東京工 業大学),永島達也(国立環境研),中山智喜(長崎大学),廣川淳(北海道大学),森本真司(東北大学), 山地一代(神戸大学)

生物起源揮発性有機化合物とその反応性の測定

Measurements of biogenic volatile organic compounds and their

reactivities

松本 淳^{1*}

対流圏において揮発性有機化合物 (volatile organic compounds: VOCs) と大気ラジカルとの反応は, VOCs そのものの大気寿命だけでなく、オゾンの生成と消失や二次有機エアロゾルの生成をはじめと する大気化学の諸課題を考えるうえで重要である。植物などの陸域生態系から大気に放出される生 物起源揮発性有機化合物 (biogenic VOCs: BVOCs) は、地球全体での VOCs 放出量の多くを占 めるため、その放出特性の解明が不可欠である。本稿では、陸域生態系から大気に放出される BVOCs の挙動に関して、ラジカル反応性としての包括把握の視点から概説する。特に、BVOCs 把 握の新たなツールとして著者が開発を進めてきたオゾン反応性測定装置を用いた測定事例を紹介す る。

1. はじめに

対流圏大気において,揮発性有機化合物 (volatile organic compounds: VOCs)の大気ラジカル X (OH ラジカル, NO₃ ラジカル, オゾン O₃) による 酸化反応

$$VOC + X \rightarrow Loss$$
 (R1)

は、VOCs の挙動に影響するだけでなく, 過酸化ラ ジカル(HO₂ や RO₂; R は有機官能基), O₃, 二次 有機エアロゾル (secondary organic aerosols: SOAs) の二次生成を介して大気質を左右する [*Atkinson*, 2000; *Donahue et al.*, 2009; *Hallquist et al.*, 2009; *Heald and Kroll*, 2020]。酸化反応 R1 において, OH は日中に, NO₃ は夜間に, それぞれ重要である 一方で, O₃ は日中も夜間も存在しうる [*Atkinson and Arey*, 2003]。VOC の大気寿命 τvoc は X との反 応における VOC 消失速度の逆数として決まる。

$$\tau_{\rm VOC} = (k \, [\mathrm{X}])^{-1} \tag{1}$$

k は VOC+X の反応速度定数, [X] は X の数密 度である。各 X に対する代表的な VOCs の k お よび tvoc を表 1 に例示する。O3 との反応 (オゾノ リシス) の遅いアルカン類の大気寿命は日中の OH との反応で決まるが、O3 は終日有意な濃度が存在 するため、アルケンの大気寿命にはオゾノリシスが重 要となる。VOCs の X との反応による二次生成物の うち, 過酸化ラジカルは NO を酸化し NO2 経由で O3 を生成するほか,半揮発性有機化合物 (semi-volatile organic compounds: SVOCs) は SOAs 生成に重要となる。二次生成するアルキルナイトレー ト RONO₂ は NOx (NO, NO₂) の収支や O₃ 生成 の議論に必要となる。VOCs の O3 収支への寄与と しては, O3 生成効率 [Carter, 1994, 2009] のほか, アルケンのオゾノリシスによる O3 消失も注目される [Monks et al., 2015; Mogensen et al., 2015; Sommariva et al., 2020]。 過酸化ラジカルは大気ラジ カルのソースとしても重要である [Faloona et al.,

			大気寿命。		反応性 d (s ⁻¹ /ppbv)				
VOCs	<i>k</i> (O ₃)	<i>k</i> (OH)	<i>k</i> (NO ₃)	τ (by $O_3)$	τ (by OH) τ	(by NO ₃)	R ₀₃	$R_{\rm OH}$	R _{NO3}
<u>BVOCs:</u>									
イソプレン	1.3 (-17)	1.0 (-10)	7.0 (-13)	0.91 d	<u>0.23 d</u>	1.3 d	3.2(-7)	2.5(0)	1.8(-2)
α-ピネン	8.4 (-17)	5.2 (-11)	6.2 (-12)	<u>0.14 d</u>	0.44 d	0.15 d	2.1(-6)	1.3(0)	1.5(-1)
リモネン	2.1 (-16)	1.6 (-10)	1.2 (-11)	<u>0.06 d</u>	0.14 d	0.08 d	5.3(-6)	4.1(0)	3.1(-1)
β-カリオフィレン	1.2 (-14)	2.0 (-10)	1.9 (-11)	<u>86 s</u>	0.12 d	0.05 d	2.9(-4)	4.9(0)	4.8(-1)
<u>AVOCs:</u>									
エチレン	1.6 (-18)	8.5 (-12)	2.1 (-16)	7.3 d	<u>2.7 d</u>	4.5 d	4.0(-8)	2.1(-1)	5.1(-6)
1-ヘキセン	1.1 (-17)	3.7 (-11)	1.8 (-14)	1.0 d	<u>0.63 d</u>	51 d	2.8(-7)	9.3(-1)	4.5(-4)
n-ヘキサン	< 1 (-23)	5.2 (-12)	1.1 (-16)	> 3000 y	<u>4.5 d</u>	23 y	< 2.5(-13)	1.3(-1)	2.8(-6)
シクロヘキサン	< 1 (-23)	7.0 (-12)) 1.4 (-16)	> 3000 y	<u>3.3 d</u>	18 y	< 2.5(-13)	1.7(-1)	3.5(-6)

表 1. 代表的な VOCs の大気ラジカル (O3, OH, NO3) との反応速度定数, 大気寿命, 反応性 a

a A (B) は A x 10^Bを表す。

b 反応速度定数は 298 K のもの [Atkinson and Arey, 2003]。

c <u>太字</u>は成分ごとの大気寿命に対してもっとも支配的となったラジカル反応を表す。O₃ は終日 40 ppbv (= 1.0 (12) cm⁻³), OH は日中 12 時間に 1.0 (6) cm⁻³, NO₃ は夜間 12 時間に 1 pptv (= 2.5 (7) cm⁻³) 存在し, 他の時間は 0 cm⁻³とした。 単位 s, d, y はそれぞれ sec, day, year を表す。

d VOC 1 ppbv (= 2.5 (10) cm⁻³) あたりの反応性。

2001; *Kanaya et al.*, 2007; *Sommariva et al.*, 2007; *Stone et al.*, 2012]₀

VOCs としては、人為起源 (anthropogenic VOCs: AVOCs) だけでなく,森林の植生といった陸域生態 系から放出される生物起源揮発性有機化合物 (biogenic VOCs: BVOCs, 図 1) も重要である。 BVOCs の地球全体での放出フラックスは VOCs 放 出量の約 90% (1000 TgC/y) を占めるとされ, そのう ち約半分がイソプレン,約 15% がモノテルペンであ る [Guenther et al., 2012; Glasius and Goldstein, 2016; Mochizuki and Tani, 2017]。BVOCs は近年の 重要な話題のひとつであり、対流圏オゾンへの寄与 [Papiez et al., 2009; Calfapietra et al., 2013], SOAs への寄与 [Henze and Seinfeld, 2006; Cleavs et al., 2004; Hallquist et al., 2009; Perraud et al., 2010; Surratt et al., 2010; Xu et al., 2015], 放出量の観測や 推定 [Guenther et al., 1993, 1995, 1996, 2006; Tani et al., 2002; Okumura et al., 2008; Tani and Kawawata, 2008; Langford, et al., 2009], などの研究 例が報告されている。

VOCs の組成とラジカル反応の把握は大気化学 の重要課題であり、VOCs の多くを占める BVOCs の挙動解明が急務である。特に、森林など陸域生態 系における BVOCs の測定と放出の把握は不可欠 である。本稿では、陸域生態系から大気に放出され る BVOCs の挙動把握に関して、植生放出 BVOCs とそのラジカル反応性について基礎事項と研究事例 を概説したうえで、著者が進めてきたオゾン反応性測 定に基づく BVOCs 把握の試みを紹介する。



図1 生物起源揮発性有機化合物 BVOCs の例。

2. BVOCs とその反応性の基礎と研究事例

植物由来の BVOCs には、イソプレン C₅H₈、イソ プレンを構成単位とするモノテルペン類 C₁₀H₁₆ や セスキテルペン類 C₁₅H₂₄, OH 基が結合したモノテ ルペンアルコール類、などがある (図 1)。イソプレン を構成単位とする炭化水素を総称してテルペンと呼 ぶ。BVOCs の放出特性 (主成分、条件依存性、放 出のタイプ) は植物の種類によって異なる [Mochizuki and Tani, 2017]。イソプレンは主に広葉樹 から放出され、放出特性は温度と光量に依存する。 Guenther et al. (1991, 1993) は、イソプレン放出速度 E の温度と光量への依存性を

$$E = \varepsilon C_{\rm L} C_{\rm T} \tag{2}$$

と表した。ここで、 C_L は光量に依存する係数、 C_T は 温度に依存する係数、 ε は基準とする温度と光量に おける放出速度である。植物内の酵素活性に起因し て、 $4ソプレン放出速度は 35 ^{\circ}$ から 40 $^{\circ}$ Co間で 最大値を示し、より高温では減少に転じる。一方でモ ノテルペン類は、広葉樹と針葉樹を含む多様な樹種 から放出され、放出速度は温度に依存する。モノテ ルペン放出速度の温度依存 E(T) は

$$E(T) = E_{\rm s} \exp \left\{ \beta \left(T - T_{\rm s} \right) \right\}$$
(3)

と記述される [*Guenther et al.*, 1993]。ここで *T* は温 度, β は放出速度の温度係数, *E*_s は基準温度 *T*_s における放出速度をそれぞれ表す。

植物放出 BVOCs の把握には,対象 (枝,葉,苗 など)を囲って放出ガスを測る方法 [eg. Niinemets et al., 2011] とともに,実地での大気観測に基づく放出 フラックスの検証も重要である。植物放出 BVOCs に着目した観測事例は近年多く報告されている [eg. Rinne et al., 2002; Holzinger et al., 2006; Hellén et al., 2018; Mochizuki et al., 2015, 2020]。たとえば,夏の 森林大気における BVOCs 濃度の日変化は,(1) 日中の高温時に最大となる BVOCs 放出,(2) 日中 の OH 反応による BVOCs 消失,(3) 鉛直混合の 弱い夜間の BVOCs の放出と蓄積, を反映すると考 えられている [Hellén et al., 2018; Mochizuki et al., 2020]。

VOCs や BVOCs は膨大な種類の化合物を含み, 従来法による個別成分分析にて全成分を網羅するこ とは難しい。BVOCs 個別成分分析の限界に起因す る数え落とし (未測定) や過小評価が指摘されてい る [Goldstein and Galbally, 2007; Guenther et al., 2012; Glasius and Goldstein, 2016]。また, VOCs の 包括定量法として一般的な全炭化水素 (total hydrocarbon: THC) の測定では,成分ごとに異なる 反応特性を考慮できない。VOCs を網羅的に把握し つつ,成分ごとの反応特性も同時に考慮する測定法 として, ラジカル反応性全量 (以下「反応性」)の測 定が研究されている。X (OH, NO₃, O₃) に対する VOCs 混合試料の反応性 R_x は

$$R_{\rm x} = \Sigma k({\rm VOC}_{\rm i} + {\rm X}) [{\rm VOC}_{\rm i}]$$
(4)

と書ける。VOCi は個々の成分, k(VOCi+X) は VOC_iの X との反応速度定数を表す。VOCs 成分 の 1 ppbv あたりの各 X に対する反応性の例を表 1 に示す。反応性のうちまず, OH 反応性 RoH の 測定が提案され,活用されてきた [Kovacs and Brune, 2001; Sadanaga et al., 2004; Sinha et al., 2008, 2010; Fuchs et al., 2017]。OH 反応性は, OH と反応する VOCs を網羅しつつ, 各成分の濃度と反応を同時に 反映する。ROH 測定値を,個別測定から求まる反応 性の総和と比べることで,個別未測定 VOCs の寄 与を議論できる。森林や都市郊外では、ROH 観測に 基づいて BVOCs を検証した例が報告されている [Di Carlo et al., 2004; Sinha et al., 2008; Kato et al., 2011; Nakashima et al., 2014; Williams et al., 2016; Praplan et al., 2017]。近年, RoH と別視点の包括測 定法として NO3 ラジカル反応性 RNO3 の測定が提 案された [Liebmann et al., 2017]。その後, Liebmann et al. (2018) は森林観測を実施し, VOC+NO3 反応 (アルキルナイトレート生成) に伴う NOx 消失の指

標として R_{NO3} が有用であることを示した。一方でオ ゾン反応性 R_{O3} については、シミュレーション計算 での議論 [Mogensen et al., 2015], BVOCs 把握のた めの R_{O3} 測定に期待する言及 [Yang et al., 2016; Heald and Kroll, 2020], の程度で、実大気観測を報 告した学術誌論文の例は無い。

オゾン反応性測定による BVOCs 把握の 試み

BVOCs は C=C 二重結合を有しているため,そ の消失速度や大気寿命に対してオゾノリシスの寄与 が重要となる。O3 との反応は、BVOCs などアルケン 類は速く、アルカン類は遅いことから、オゾン反応性 Ro3 はアルケン選択的であり、BVOCs の包括把握へ の活用が期待される。著者はこれまでに、BVOCs 包







図 3 反応前後の O3 濃度比の反応時間とオゾン反応 性への依存性(ボックスモデルによる見積もり)。図中 の数値が小さいほど、反応に伴う O3 減少すなわち 反応進行度が大きい。

括測定のためのオゾン反応性測定装置 (Ro3 計) の開発研究を遂行してきた。はじめは,反応速度定 数の測定実験 [*Matsumoto*, 2011] にて構築した装 置をベースとして, Ro3 計を試作した (図 2)。 BVOCs 混合試料の Ro3 は, (1) O3 の安定な添加, (2) BVOCs+O3 反応に伴う O3 減少量の高精度測 定,に基づく次式により定量した [*Matsumoto*, 2014]。

$$R_{\rm O3} = -t_{\rm R}^{-1} \ln \left\{ \left[O_3(t_{\rm R}) \right] / \left[O_3(0) \right] \right\}$$
(5)

[O₃(*t*_R)] / [O₃(0)] は反応前後でのオゾン濃度比 (反応に伴うオゾン減少の指標), *t*_R は反応時間 (試料の反応容器内での滞在時間)をそれぞれ表す。反応時間が長い,または VOC 濃度が高いと,反応進行度が大きくなって O₃ 減少を測りやすくなる (図3)。ただし反応進行度が大きすぎると,応答が遅くなるうえ,擬一次反応条件の不成立に伴って *R*_{O3} の不確実性が高まる。装置の実用試験として,植物の



図4 植物放出試料のオゾン反応性測定:

- (a) エンクロージャー法と組合せた測定の概略
- (b) レモンタイム放出試料の測定事例

苗から放出される BVOCs 混合試料を Ros として 包括測定する室内実験に初めて成功した。たとえば, 清浄空気を流し続けたテフロンバッグ内にレモンタイ ムの苗を設置し,バッグ内の空気を Ros として測定 したところ,設置時の物理的な刺激による苗からの BVOCs 放出と空気の希釈に伴う Ros の変化をリア ルタイムに捕捉した (図 4)。また,スギの苗を用いて Ros を測定した例では,光照射の有無による BVOCs 放出の変化を捉えた [Matsumoto, 2014]。 次に, Ros 計の反応容器に温度調節機構を追加し, BVOCs のオゾン反応速度について温度依存性の 測定に成功した [Matsumoto, 2016a, 2016b]。

森林大気での BVOC を Ro3 として把握する試 みとして、早稲田大学所沢キャンパス(埼玉県所沢 市,北緯 35.7864 度,東経 139.3992 度)におい て実大気観測を断続的に実施してきた [Matsumoto and Kato, 2018]。実験棟に隣接する雑木林はコナラ 二次林であり、コナラ、トウネズミモチ、ケヤキ、シラカ シ、アカシデ、アオキ、アズマネザサ、ヒノキ、モミ、ス ギ、など多様な樹種が確認された。観測試験の結果, O3 反応の速い NO の影響が大きい時間帯には Ro3 の議論が困難だが、BVOCs 放出が強い高温 条件下で、かつ NO の影響が小さければ、Ro3 計 は有意な測定値を得た。夏季日中を中心とする観測 事例について、Ro3 測定値には明確な温度依存性 が認められた (図 5)。この相関プロットの事例を指 数関数にて回帰分析したところ、

$$R_{O3}(T) = R_{O3}(T_{\rm s}) \exp \{\beta (T - T_{\rm s})\}$$
(6)

$$T_{\rm s} = 293 \text{ K} (20^{\circ}\text{C}), R_{\rm O3}(T_{\rm s}) = 8.6 \text{ x} 10^{-5} \text{ s}^{-1},$$

 $\beta = 0.16 \text{ K}^{-1}, R^2 = 0.69$

を得た。この結果をモノテルペン放出の温度依存性の式 (3) にあてはめて考えて, 観測地点の森林における BVOCs 放出の温度係数が平均として 0.16 K⁻¹ であり, これを Ro3 測定値が反映したものと推測された。先行研究では夏季の植物からのモノテルペン放出の温度係数として 0.1 K⁻¹ のオーダーが報

告されている [eg. Mochizuki et al., 2015, 2020; Rinne et al., 2002; Holzinger et al., 2006; Hellén et al., 2018]。温度係数 β は樹種,成分,葉や枝ごとに異 なる点を考慮すると,今回得た値は植物放出 BVOCs の温度依存性を反映したものとして妥当で ある。オゾン反応性 Ro3 の実大気観測によって,陸 域生態系から大気への BVOCs 放出を検証できる ことを示した。ただし,周辺の樹木には不均一な温度 分布が見られ (図 5 の写真),実際には個々の樹 木・枝・葉それぞれにおける環境要因を反映した BVOCs 放出をトータルとして観測したと考えられる。 陸域生態系としての植物における個々の放出プロセ スと,大気における成分の挙動を,大気観測によって つなげる研究を深める必要があろう。



図 5 森林観測試験におけるオゾン反応性測定値の温 度依存性(写真は近傍樹木のサーモグラフィの例)。

4. まとめ

森林に代表される陸域生態系から大気への BVOCs の放出を把握するツールとして, R_{03} 計の 開発と実用化を進めてきた。最近までに,実際の森 林大気にて高温かつ NO 影響が小さい条件下にて 有意な R_{03} を初めて捕捉した。 R_{03} 測定値は明確 な温度依存性を示し, BVOCs 放出の温度特性を反 映したものと推測された。実大気観測試験によって, R_{03} 測定が森林での BVOCs の把握に有効である ことを示した。今後は、Ro3 計の改良と汎用化を進め つつ、実大気観測事例を蓄積することが肝要である。 本研究のオゾン反応性測定は海外からも注目されて おり [eg. Yang et al., 2016]、本研究に触発されて Ro3 測定装置を構築し、温室にて測定試験を実施し た報告例も出てきた [Sommariva et al., 2020]。こうし たグループとの協力と切磋琢磨を通して方法論・手 順・装置を改善しつつ観測事例の蓄積を進め、陸域 生態系と大気化学をつなぐ研究の一端を担うことを 目指す。

5. 謝辞

観測地点周辺の植生・樹種については,早稲田大 学の平塚基志准教授のご助言をいただきました。

6. 参考文献

- Atkinson, R. (2000), Atmospheric chemistry of VOCs and NOx, Atmos. Environ., 34, 2063-2101.
- Atkinson, R. and J. Arey (2003), Atmospheric Degradation of Volatile Organic Compounds, *Chem. Rev.*, 103, 4605-4638.
- Calfapietra, C., et al. (2013), Role of Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOC) emitted by urban trees on ozone concentration in cities: A review, *Environ. Pollut.*, 183, 71-80.
- Carter, W. P. L. (1994), Development of Ozone Reactivity Scales for Volatile Organic Compounds, *Air & Waste*, 44, 881-899. DOI: 10.1080/1073161X.1994.10467290
- Carter, W. P. L. (2009), Updated maximum incremental reactivity scale and hydrocarbon bin reactivities for regulatory applications, *California Air Resources Board Contract* 07-339.
- Claeys, M., et al. (2004), Formation of Secondary Organic Aerosols through Photooxidation of Isoprene, *Science*, 303, 1173-1176.
- Di Carlo, P., et al. (2004), Missing OH reactivity in a forest: Evidence for unknown reactive biogenic VOCs, *Science*,

304, 722-725.

- Donahue, N. M., A. L. Robinson, and S. N. Pandis (2009), Atmospheric organic particulate matter: from smoke to secondary organic aerosol, *Atmos. Environ.*, 43, 94-106.
- Faloona, I., et al. (2001), Nighttime observations of anomalously high levels of hydroxyl radicals above a deciduous forest canopy, J. Geophys. Res., 106, 24315-24333.
- Fuchs, H., et al. (2017), Comparison of OH reactivity measurements in the atmospheric simulation chamber SAPHIR, Atmos. Meas. Tech., 10, 4023-4053. https://doi.org/10.5194/amt10-4023-2017.
- Glasius, M. and A. H. Goldstein (2016), Recent Discoveries and Future Challenges in Atmospheric Organic Chemistry, *Environ. Sci. Technol.*, 50, 2754-2764.
- Goldstein, A. H. and I. E. Galbally (2007), Known and Unexplored Organic Constituents in the Earth's Atmosphere, *Environ. Sci. Technol.*, 41, 1514-1521.
- Guenther, A. B., R. K. Monson, and R. Fall (1991), Isoprene and monoterpene emission rate variability: observations with Eucalyptus and emission rate algorithm development, *J. Geophys. Res.*, 96, 10799-10808.
- Guenther, A., P. Zimmerman, P. Harley, R. Monson, and R. Fall (1993), Isoprene and Monoterpene Emission Rate Variability: Model Evaluations and Sensitivity Analyses, J. Geophys. Res., 98, 12609-12617.
- Guenther, A., et al. (1995), A Global Model of Natural Volatile Organic Compound Emissions, J. Geophys. Res., 100, 8873–8892.
- Guenther, A., et al. (1996), Estimates of Regional Natural Volatile Organic Compound Fluxes from Enclosure and Ambient Measurements, J. Geophys. Res., 101, 1345-1359.
- Guenther, A., et al. (2006), Estimates of Global Terrestrial Isoprene Emissions Using MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature), *Atmos. Chem. Phys.*, 6, 3181-3210.

- Guenther, A. B., et al. (2012), The Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature Version 2.1 (MEGAN2.1): An Extended and Updated Framework for Modeling Biogenic Emissions, *Geosci. Model Dev.*, 5, 1471-1492.
- Hallquist, M., et al (2009), The formation, properties and impact of secondary organic aerosol: current and emerging issues, *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 5155-5236.
- Heald, C. L. and J. H. Kroll (2020), The fuel of atmospheric chemistry: Toward a complete description of reactive organic carbon, *Sci. Adv.*, 6, eaay8967.
- Hellén, H., et al. (2018), Long-term measurements of volatile organic compounds highlight the importance of sesquiterpenes for the atmospheric chemistry of a boreal forest, *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 13839-13863.
- Henze, D. K. and J. H. Seinfeld (2006), Global Secondary Organic Aerosol from Isoprene Oxidation, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L09812.
- Holzinger, R., A. Lee, M. Mckay, and A. H. Goldstein (2006), Seasonal variability of monoterpene emission factors for a ponderosa pine plantation in California, *Atmos. Chem. Phys.*, 6, 1267-1274.
- Kanaya, Y., et al. (2007), Chemistry of OH and HO₂ radicals observed at Rishiri Island, Japan, in September 2003: missing daytime sink of HO₂ and positive nighttime correlations with monoterpenes, *J. Geophys. Res.*, 112, D11308.
- Kato, S., T. Sato, and Y. Kajii (2011), A method to estimate the contribution of unidentified VOCs to OH reactivity, *Atmos. Environ.*, 45, 5531-5539.
- Kovacs, T. A. and W. H. Brune (2001), Total OH Loss Rate Measurement, J. Atmos. Chem., 39, 105-122.
- Langford, B., B. Davison, E. Nemitz, and C. N. Hewitt (2009), Mixing ratios and eddy covariance flux measurements of volatile organic compounds from an urban canopy (Manchester, UK), *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 1971-1987.
- Liebmann, J. M., et al. (2017), Measurement of ambient NO3

reactivity: design, characterization and first deployment of a new instrument, *Atmos. Meas. Tech.*, 10, 1241-1258. https://doi.org/10.5194/amt-10-1241-2017.

- Liebmann, J., et al. (2018), Direct measurement of NO₃ radical reactivity in a boreal forest, *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 3799-3815. https://doi.org/10.5194/acp18-3799-2018.
- Matsumoto, J. (2011), Kinetics of the Reactions of Ozone with 2,5-Dimethylfuran and Its Atmospheric Implications, *Chem. Lett.*, 40, 582-583. https://doi.org/10.1246/cl.2011.582.
- Matsumoto, J. (2014), Measuring Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOCs) from vegetation in terms of ozone reactivity, Aerosol Air Qual. Res., 14, 197-206. doi:

10.4209/aaqr.2012.10.0275.

- Matsumoto, J. (2016a), Temperature dependence of rate constant for the gas-phase reaction of ozone with linalool, *Chem. Lett.*, 45, 1102-1104. https://doi.org/10.1246/cl.160500.
- Matsumoto, J. (2016b), Improved analyzer for biogenic volatile organic compounds as total ozone reactivity and its application to kinetics of gas-phase reactions, *the International Global Atmospheric Chemistry (IGAC) Project 2016 Science Conference*, 4.05.
- Matsumoto, J. and S. Kato (2018), Applications of total ozone reactivity analyzer to a trial observation in the ambient air and to a further experiment on kinetics of terpene-ozone reactions, 2018 joint 14th iCACGP Quadrennial Symposium / 15th IGAC Science Conference, 2.025.
- Mochizuki, T., et al. (2015), Emissions of biogenic volatile organic compounds and subsequent formation of secondary organic aerosols in a Larix kaempferi forest, *Atmos. Chem. Phys.*, 15, 12029-12041.
- Mochizuki, T. and A. Tani (2017), Biogenic volatile organic compound fluxes above forest ecosystems, *Archives of Atmospheric Chemistry Research*, 37, 037A02.
- Mochizuki, T., et al. (2020), Canopy fluxes of monoterpene, isoprene and isoprene oxidation products in a pine-oak

forest, J. Agric. Meteorol., 76, 36-43.

- Mogensen, D., et al. (2015), Simulations of atmospheric OH,
 O₃ and NO₃ reactivities within and above the boreal forest, *Atmos. Chem. Phys.*, 15, 3909-3932.
 doi:10.5194/acp-15-3909-2015.
- Monks, P. S., et al. (2015), Tropospheric ozone and its precursors from the urban to the global scale from air quality to short-lived climate forcer, *Atmos. Chem. Phys.*, 15, 8889-8973.
- Nakashima, Y., et al. (2014), Total OH reactivity measurements in ambient air in a southern Rocky mountain ponderosa pine forest during BEACHON-SRM08 summer campaign, *Atmos. Environ.*, 85, 1-8.

doi:10.1016/j.atmosenv.2013.11.042, 2014.

- Niinemets, Ü., et al. (2011), Estimations of isoprenoid emission capacity from enclosure studies: measurements, data processing, quality and standardized measurement protocols, *Biogeosciences*, 8, 2209-2246. doi:10.5194/bg-8-2209-2011.
- Okumura, M., et al. (2008), Isoprene Emission Characteristics of Quercus serrata in a Deciduous Broad-Leaved Forest, J. Agric. Meteorol., 64, 49-60.
- Papiez, M. R., et al. (2009), The impacts of reactive terpene emissions from plants on air quality in Las Vegas, Nevada, *Atmos. Environ.*, 43, 4109-4123.
- Perraud, V., et al. (2010), Identification of Organic Nitrates in the NO₃ Radical Initiated Oxidation of α-Pinene by Atmospheric Pressure Chemical Ionization Mass Spectrometry, *Environ. Sci. Technol.*, 44, 5887-5893.
- Praplan, A. P., E. Pfannerstill, J. Williams, and H. Hellén (2017), OH reactivity of the urban air in Helsinki, Finland, during winter, *Atmos. Environ.*, 169, 150-161. doi: 10.1016/j.atmosenv.2017.09.013.
- Rinne, H. J. I., A. B. Guenther, J. P. Greenberg, and P. C. Harley, (2002), Isoprene and monoterpene fluxes measured above Amazonian rainforest and their dependence on light and temperature, *Atmos. Environ.*, 36,

2421-2426.

- Sadanaga, Y., et al. (2004), Development of a Measurement System of OH Reactivity in the Atmosphere by Using a Laser-induced Pump and Probe Technique, *Rev. Sci. Instrum.*, 75, 2648-2655.
- Sinha, V., J. Williams, J. N. Crowley, and J. Lelieveld (2008), The Comparative Reactivity Method - a new tool to measure total OH Reactivity in ambient air, *Atmos. Chem. Phys.*, 8, 2213-2227.
- Sinha, V., et al. (2010), OH Reactivity Measurements within a Boreal Forest: Evidence for Unknown Reactive Emissions, *Environ. Sci. Technol.*, 44, 17, 6614-6620.
- Sommariva, R., et al. (2007), Night-time radical chemistry during the NAMBLEX campaign, *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 587-598.
- Sommariva, R., L. J. Kramer, L. R. Crilley, M. S. Alam, and W. J. Bloss (2020), An instrument for in situ measurement of total ozone reactivity, *Atmos. Meas. Tech.*, 13, 1655-1670. https://doi.org/10.5194/amt-13-1655-2020.
- Stone, D., L. K. Whalley, and D. E. Heard (2012), Tropospheric OH and HO₂ radicals: field measurements and model comparisons, *Chem. Soc. Rev.*, 41, 6348-6404, doi:10.1039/c2cs35140d.
- Surratt, J. D., et al. (2010), Reactive Intermediates Revealed in Secondary Organic Aerosol Formation from Isoprene, *Proc. Nat. Acad. Sci. U.S.A.*, 107, 6640-6645.
- Tani, A., S. Nozoe, M. Aoki, and C. N. Hewitt (2002), Monoterpene Fluxes Measured above a Japanese Red Pine Forest at Oshiba Plateau, Japan, *Atmos. Environ.*, 36, 3391-3402.
- Tani, A. and Y. Kawawata (2008), Isoprene Emission from the Major Native Quercus spp. in Japan, *Atmos. Environ.*, 42, 4540-4550.
- Williams, J., et al. (2016), Opposite OH reactivity and ozone cycles in the Amazon rainforest and megacity Beijing: Subversion of biospheric oxidant control by anthropogenic emissions, *Atmos. Environ.*, 125, 112-118.

doi:10.1016/j.atmosenv.2015.11.007, 2016.

- Xu, L., et al. (2015), Effects of anthropogenic emissions on aerosol formation from isoprene and monoterpenes in the southeastern United States, *Proc. Nat. Acad. Sci. U.S.A.*, 112, 37-42.
- Yang, Y., et al. (2016), Towards a quantitative understanding of total OH reactivity: A review, *Atmos. Environ.*, 134, 147-161.

原稿受領日: 2020年5月14日 掲載受理日: 2020年5月26日

著者所属:

- 1. 早稲田大学 人間科学学術院
- * 責任著者:

Jun Matsumoto <jmatsumoto@waseda.jp>

森林大気のバイオエアロゾル

Bioaerosols transported from forest areas

牧輝弥¹*,北和之²,保坂健太郎³,三星かおり⁴,五十嵐康人⁵

氷雲の形成には「氷晶核(氷核活性を持つ粒子)」が必須であるが、氷晶核となる大気粒子は特定さ れておらず、その粒子密度は気候変動を予測するにあたり不確定因子となってきた。その為、近年、 分析・観測技術の向上に伴い検出可能となった大気浮遊微生物(バイオエアロゾル)の氷核活性へ学 術的関心が集まっている。欧米の研究グループは, 蛍光検出装置を使って森林内外を浮遊するバイ オエアロゾルの分布量を測定し、バイオエアロゾルが森林から上空へと放出され、氷雲の形成に関わ っている可能性を突き止めた。また、フランスの研究者らによって、強い氷核活性を持つ微生物株が、 植物表面から分離培養され、その後、植物表面に生息する微生物の複数種で氷核活性が認められた。 しかし、分離株の多くは植物表面のみから得られており、実大気で機能しているかは断定できず、森 林から放出される微生物の群集構造(どんな種であるか?)は不明なままであり,種ごとの放出量も定 かでない。そこで、日本国内では、バイオエアロゾルを標的とした森林観測サイトを設け、森林地帯を 浮遊する微生物の群集構造を遺伝子レベルで調べる観測調査が施行されている。その結果,森林内 には真菌(キノコやカビ)が優占して浮遊しており、特に、キノコ胞子は、夏から秋にかけて森林内で増 え,森林上空(高度 500m)からも検出された。さらに、上空の大気粒子から分離された真菌株が、比較 的強い氷核活性を示したため,氷核活性微生物の気中浮遊が実証されつつある。こうした氷核活性 微生物の森林からの放出過程の解明は、気候変動予測や環境保全に役立つだけでなく、大気・気 象・気候研究における生物学的な研究側面を切り開くことになろう。

1. はじめに

大気中において,高密度の水蒸気が飽和水蒸気 圧に達するだけでは,雲は形成されない。水蒸気が 集まり水滴となるための粒子(核)が,雲形成には必 要となる。特に,氷粒からなる氷雲は,「氷晶核(氷核 活性を持つ粒子)」が引き金となって形成されるが, 実大気で機能する氷晶核は,特定されておらず,そ の発生源も定かでない。そのため,氷晶核の粒子密 度は,気候変動を予測する上での不確定因子となっ ている。そこで,無生物粒子(主に,海塩や鉱物など 無機物)の氷核活性が検証されてきたが,近年,分 析化学技術の革新に伴って,「大気中を浮遊する生 物由来の粒子(バイオエアロゾル)」が観測・解析でき るようになり,その氷核活性にも注目が集まるようにな った[Pöschl et al., 2010; 谷本, 2012; Šantl-Temkiv et al., 2019]。実際に,高高度の氷雲からは,生物由来 の有機物粒子が高い割合で検出され[Christner et al., 2008; Pratt et al., 2009],植物表面や土壌から分離培 養された微生物が,強い氷核活性を持ち[Maki et al., 1974; Moriss et al., 2008; Joly et al., 2013],その氷雲 形成能力が擬似大気環境下で実証されている [Möhler et al., 2008]。また,高度数千 m にも数百種 以上の微生物種が浮遊しており,その一部で生存が 確認されたため[Maki et al., 2013],バイオエアロゾル に含まれる微生物が, 実大気で氷晶核として働いて いる可能性が高い[Maki et al., 2018]。しかし, 未だに 気象学では, 無機物(無生物)粒子を対象とした研究 報告が多くを占め, 大気浮遊微生物の氷核活性に 関する知見は少ない。これは, 微生物を無菌的に捕 集する必要があり, その生理活性は変化しやすく, 気 象学での通常実験操作に加え生物学的技法も求め られるからである。

本トピックスでは、バイオエアロゾルの放出量が多い森林地帯に焦点を絞り、"森林から放出される氷核活性微生物"に関わる研究例を紹介するとともに、著者らが森林観測サイトを使って展開する研究プロジェクトを概説する。

2. 大気バイオエアロゾル

大気中には, 真菌および細菌, ウィルス, 花粉, 動 植物の細胞断片などが微粒子となって浮遊している。 このように生物に由来する大気粒子を総称して,「バ イオエアロゾル」と呼ぶ(図 1)[*Iwasaka et al.*, 2009; *Igarashi et al.*, 2019]。特に, 真菌と細菌は, ヒト健康 や生態系に影響を及ぼすだけでなく, 先述のとおり, 氷晶核として働き雲形成にも関わる可能性があるた め, 国内外で学術的関心が高い[*Šantl-Temkiv et al.*, 2019]。 バイオエアロゾルの中でも、カビやキノコが属す真 菌は、胞子を風送拡散させて生殖域を広げるため [深澤, 2017](図 1)、真菌の胞子は、バイオエアロゾ ルとして検出されやすい。また、地上に沈着した真菌 の胞子は、環境に適応すれば分裂を繰り返し、糸状 の細胞が連なった菌糸体(子実体)を形成する。目に 見える傘状の子実体を形成する種類が、一般的にキ ノコに言われ、カビと区別される。微小な胞子の時期 も、生活史の一形態であるため、真菌は微生物として 扱われている。一方、菌糸体も、断片化されると、数 µm の粒子になり、風送されるため、バイオエアロゾル として頻繁に検出される。

単細胞生物である細菌は、鉱物粒子などの粗大 粒子に付着するか潜り込む、あるいは細胞同士が凝 集することで、乾燥および紫外線、過酷な温度変化 等の大気環境ストレスを軽減し、高高度の大気中で あっても生きながらえる。一方、細菌が形成する芽胞 も、環境ストレスに強い耐性を示す。従って、芽胞を 形成する Bacillus 属の細菌が大気中で頻繁に検出さ れ、納豆菌 (Bacillus subtilis)までもが高度数千メート ルの大気粒子から分離培養されているに至った[牧ら、 2016]。また、高高度の大気中を数日間漂う細菌群は、 雲水に含まれる水分や栄養塩を使って、低温下であ っても増殖すると考える研究者もおり[Vaitilingom et



図 1 福島県浪江町の森林地帯においてバイオエアロゾルを採取し、 DAPI 染色した後に落射型蛍光顕微鏡で観察した写真 [*Igarashi et al.*, 2019]。図中の白線はいずれも 5.0 µmの長さを示す。

al., 2013], 大気中でも微生物は生態系を育んでいるのかもしれない。

3. 主要発生源としての森林地帯

ヒト健康や雲形成に関わるバイオエアロゾルは,耕 作地および都市部,森林,砂漠,外洋,沿岸海域, 極域など,さまざまな環境で測定され,大気浮遊微 生物の細胞密度は、場所によって変動するものの、 通常 10⁴から 10⁶ particles/m³の範囲に収まると報告 されている[Bowers et al., 2010]。特に, 人が密集する 都市部において,大気浮遊微生物は増加する傾向 にある。微生物のバイオマスそのものが少ない砂漠 や極域では、大気中の微生物密度も極端に減少す るが,砂漠で砂塵が発生すると,大気中には鉱物粒 子とともに微生物も激増する(10⁸ particles/m³ 以上に 及ぶ)。一般的に、生物活性が高い夏季には、植物 表面や土壌から浮遊する微生物が増え,冬季には, 生物活性が低下すると、植物が落葉あるいは枯死し、 地表面を積雪が覆うところでは,バイオエアロゾルの 飛散が抑制される。特に、樹木下草が生い茂る森林 は、バイオエアロゾルの供給源となりやすく、その増 減は,季節を通じて大きく変化すると考えられる。

森林には、樹木や下草などの高等植物だけでなく、 その植物に付随して真菌や細菌が寄生あるいは共 生関係を維持している[Andrews and Harris, 2000;



図2 森林内に生息する真菌類の生態系と風送過程

Vorholt, 2012]。植物に由来する落葉や朽ち木などの 大部分は,土壌に生息する微生物によって,有機物 断片あるいは栄養物質(リン・窒素)にまで分解される ため、微生物は物質循環には欠かせない(深澤、 2017)。一方, 微生物は必ずしも分解者としてだけで なく、微生物自体が他の微生物に捕食されることで、 有機物源としての役割も担っている。従って, 光エネ ルギーを使って炭素が固定される主領域であり,上 記の物質循環が盛んな森林は有機物源のホットスポ ットとなり、その有機物を代謝することで膨大未知な 微生物が生息している。従って,森林からは,真菌が 発する胞子のみならず,真菌や細菌が付着した有機 物断片も多く放出される(図 2)。森林地帯は、バイオ エアロゾルの主要な発生源の一つと見なせ,森林由 来のバイオエアロゾルを介した雲特性や降水量の変 動に注目が集まるようになった[Pöschl et al., 2010; Huffman et al., 2013; Šantl-Temkiv et al., 2019].

4. 雲形成に関わる大気浮遊微生物

大気放射や降雨量を変化させ気候影響をおよぼ す氷雲(零下で形成される雲)は、気温-5℃以下で 氷晶核の周りに水蒸気が集まりはじめ、形成されてい く。これに対し、無機粒子など多くの大気粒子の氷核 活性は-15℃以下と弱く、実大気で働く氷晶核を全て 網羅するに至っていない(図 3)。気候変動を予測す る上で、より高い温度領域(-5℃から-15℃)で氷粒を



図3 バイオエアロゾルを氷晶核とした雲形成過程

作る氷晶核を定め,その粒子密度を正確に把握する 必要がある。

大気粒子がもつ氷核活性を評価するには,研究 対象の粒子を懸濁させた水滴を,コールドプレート (冷却可能なアルミ製ブロック)上で冷却させ、その水 滴が凍結する温度を調べる"小滴凍結実験法"が定 跡として使用され、凍結温度が高い粒子ほど氷核活 性機能が高いと判断される[Yankofsky et al., 1981]。 純水のみの水滴だと、-20℃程度から凍りはじめ、鉱 物粒子を懸濁させた水滴では、-15℃程度と氷核活 性が高まる。これに対し,植物表面や土壌から分離 培養した微生物の細胞を使うと, Pseudomonas syringae(細菌)や Fusarium acuminayum(真菌)など の特定種では、比較的高い温度(-5℃以上)で水滴 が凍結しはじめる[Maki et al., 1974; Morris et al., 2008]。従って、微生物株の氷核活性は、氷雲が形 成されはじめる-10℃を説明するのに合致し、実大気 の氷雲形成に関わっている可能性は十分にある。こ れまでの報告によると, 強い氷核活性を持つ微生物 の多くは,植物細胞を氷で破壊し,植物体内に入り 込み,病害枯死を引き起こす感染菌である[Morris et al., 2008]。感染菌は, 枯死した植物から気中へと放 出され,上空で雲を形成し,再び降雪降雨とともに沈 着した後,新しい植物体へと生息域を拡げているよう に思える。微生物にとって, 雲も生態系の一つなのか もしれない。

こうした強力な氷核活性をもつ微生物の存在が後 押しとなって,約 10 年前から,バイオエアロゾルを対 象とした研究観測が盛んになってきた[Möhler et al., 2008]。欧米では,バイオエアロゾルの自家蛍光を自 動測定する観測装置がいち早く開発され,森林大気 の蛍光測定値を,氷核活性粒子の挙動や雲形成の 状態と比較する観測が度々実施され,雲形成とバイ オエアロゾルとが関連付けられるようになった[Pöschl et al., 2010; Huffman et al., 2013]。さらには,実大気 に含まれる強い氷核活性を持つ粒子を顕微鏡下で 観察しながら,たんぱく質分解酵素や核酸染色法で, 対象粒子が生物由来であることを検証するに至って いる[*Iwata et al.*, 2019]。

しかしながら、バイオエアロゾルと推定される有機 物粒子が、 雲形成を促進するという現象を実証した のみに留まり、雲形成に関わる生体物質や微生物種 は、実大気の観測では特定されていない。また、先 述の分離株の多くは、地上表面の植物や土壌から得 られており、実際に大気中を浮遊しているかは不明 である。そればかりか、培養可能な環境微生物は、全 体の 1%未満と言われており、残り 99%以上の培養 できない微生物群が、雲形成に関わっている可能性 もある。

5. 森林内外を浮遊する微生物の群集構造

北半球中緯度帯に位置するため氷晶が含まれる 雲が多く発生する日本でも,雲形成に,森林由来の



図 4 福島県浪江の森林に浮遊する真菌類の群集構造の季節変化[*Igarashi et al.*, 2019]

バイオエアロゾルが関与している可能性が高いもの の、森林を浮遊する微生物の氷核活性のみならず、 その群集構造(どんな微生物種が含まれているか?) も不明である。そこで、著者らは、福島県浪江の森林 に、バイオエアロゾルを標的とした観測サイトを立ち 上げ、最先端の遺伝子解読技術(超並列シーケンス) をいち早く導入し、森林内外を浮遊する微生物の群 集構造を調べる解析をこころみた[Igarashi et al., 2019]。超並列シーケンスは、従来の遺伝子解読手 法に比べると千倍から数万倍の遺伝子情報を解読で き、この10年程度で急速に普及してきた先端技術で ある。そのため、分離培養法を経ず、環境試料に含 まれる微生物由来の核酸(環境 DNA)配列を、直接 解読することで、より多くの試料を使って、より網羅的 に微生物群集構造を解析できるようになっている。福



図 5 筑波実験植物園の上空に浮遊する真菌類の群集構 造の垂直分布

島県浪江の森林地帯には、数十種以上の微生物が 浮遊しており、乾燥地や都市部に比べると、細菌より も真菌の方が 10 倍以上に優占することが判明した (図 4)。実際に、蛍光顕微鏡で粒子を観察すると、 細菌粒子は少なく、真菌の胞子が顕著に確認された (図 1)。特に、森林内の大気中には、夏から秋にか けて、キノコの種が多く属す Agaricomycetes 綱の遺 伝子配列の割合が 2 倍以上に増えたため、キノコの 繁殖がバイオエアロゾルの組成に及ぼす影響は大き いと言える。

更に,茨城県筑波実験植物園にも森林観測サイト を設け,森林内部に加え,樹冠上空を浮遊する大 気粒子も解析し,森林から放出される微生物群を 突き止める観測調査に取り組んだ。ヘリコプターと 建物屋上,地上を利用し,それぞれ高度 500m と 20m(樹上),2m(林床)で大気粒子を捕集し,福島 県の観測と同様に環境ゲノムを使って,3 高度の微 生物群集構造を比較した。その結果,高度 500m の 上空にも真菌の胞子が観察され,福島県の森林観 測サイトと同じく Agaricomycetes 綱が多くを占めた

(図5)。従って、キノコの胞子は、森林上空にまで舞い上がっていると推察できる。しかし、試料から直接抽出した環境ゲノムを解析しただけでは、検出された菌種の生死は判断できない上に、生理機能は近縁種から推測するしかない。特に、氷核活性種と同種であっても活性が無い場合もあるため、培養株を使った氷核活性の検証が必要となる。

6. 森林から放出される真菌とその氷核活性

そこで,筑波実験植物園の大気粒子試料から微 生物株を分離培養したところ,計 50株以上の株が得 られ,遺伝子レベルの系統分類解析で,約 20 種の 真菌と細菌に分類された。いずれも,腐食土壌ある いは葉上に生息する種[Vorholt, 2012]と近縁になっ たため,微生物の発生源は森林内であると推察でき る。さらに,これら分離株の氷核活性を,小滴凍結実 験によって検証すると, Fusarium 属と Pseudomonas 属の2株で,-5℃程度から水滴が凍結しはじめ,比 較的強い氷核活性が確認された(図6)。特に, *Fusarium*属の株は,上空500mの大気粒子試料か ら分離された株である。従って,森林内には,土壌や 植物の表面に由来する微生物が漂っており,生きた まま上空まで巻き上がり,その内,一部の真菌は強い 氷核活性を持っていると結論付けられた。



図 6 筑波実験植物園のエアロゾルから分離培養した微生物 株の液滴凍結実験

7. おわりに

森林に生息するキノコやカビが,胞子や糸状細胞 で大気中を浮遊し,森林由来の主要なバイオエアロ ゾルになることが,国内外の観測調査によって実証さ れるようになってきた。また,強力な氷核活性を持つ 微生物が,植物表面や土壌だけでなく,高度 500m の大気粒子からも分離培養されたため,バイオエアロ ゾルが雲形成に関わっている可能性は一段と高まっ ている。ただし,環境微生物の大部分は(全体の 99%以上)は,培養できないため,実大気では,未培 養の微生物群が,氷晶核として働いているかもしれな い。氷核活性細菌の代表格である P. syringae では, 分子生物学的解析が進み,水の結晶化を促すタン パク質が分離精製され,そのタンパク質の構造もコー ドする遺伝子もデータベースとして公開されている [Turner et al., 1991]。今後は,実大気に浮遊する微 生物の氷核活性機能そのものを、タンパク質あるい は遺伝子配列を使って解析できれば、バイオエアロ ゾルを介した雲形成プロセスの理解がより深まるであ ろう。

8. 参考文献

- Andrews, J. H and R. F Harris (2000), The ecology and biogeography of microorganisms on plant surface, *Annu. Rev. Phytopathol.*, 38, 145—180.
- Bowers, R. M., S. McLetchie, R. Knight, and N. Fierer (2010), Spatial variability in airborne bacterial communities across land-use types and their relationship to the bacterial communities of potential source environments, *ISME J.*, 5, 601–612.
- Christner, B. C., C. E. Morris, C. M. Foreman, R. Cai and D. C. Sands (2008), Ubiquity of biological ice nucleators in snowfall, *Science*, 319, 1214.
- Huffman, J. A. et al. (2013), High concentrations of biological aerosol particles and ice nuclei during and after rain, *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 6151–6164.
- Igarashi, Y. et al. (2019), Fungal spore involvement in resuspension of radiocesium in summer, *Sci. Rep.*, 9, 1954, doi.org/10.1038/s41598-018-37698-x.
- Iwasaka, Y. et al. (2009), Mixture of Kosa (Asian dust) and bioaerosols detected in the atmosphere over the Kosa particles source regions with balloon-borne measurements: possibility of long-range transport, *Air. Qual. Atmos. Health.*, 2, 29–38.
- Iwata A. et al. (2019), Release of highly active ice nucleating biological particles associated with rain, *Atmosphere*, 10, 605, doi.org/10.3390/atmos10100605.
- Joly, M. et al. (2013), Ice nucleation activity of bacteria isolated from cloud water, *Atmos. Environ.*, 70, 392–400.
- Maki, L. R., E. L. Galyan, M. M. Chang-Chien, and D. R. Caldwell (1974), Ice nucleation induced by *Pseudomonas* syringae, Appl. Microbiol., 28, 456–459.
- 牧輝弥, 岩坂泰信, 吉田圭吾, 小林史尚, 河合賢人, 市瀬孝

道 (2016), プロダクトイノベーション:「そらなっとう」開発 秘話:空飛ぶ納豆菌はなぜ発見されたのか?, 化学と生物, 54, 289–293.

- Maki, T. et al. (2018), Long-range transported bioaerosols captured in snow cover on Mount Tateyama, Japan: Impacts of Asian-dust events on airborne bacterial dynamics relating to ice-nucleation activities, *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 8155–8171.
- Maki, T. et al. (2013), Assessment of composition and origin of airborne bacteria in the free troposphere over Japan, *Atmos. Environ.*, 74, 73–82.
- 深澤遊 (2017), キノコとカビの生態学-枯れ木の中は戦国時 代-, 共立出版株式会社, pp.20-36.
- Möhler, O. et al. (2008), Heterogeneous ice nucleation activity of bacteria: new laboratory experiments at simulated cloud conditions, *Biogeosciences*, 5, 1425–1435.
- Morris, C. E. et al. (2008), The life history of the plant pathogen *Pseudomonas syringae* is linked to the water cycle, *ISME J.*, 2, 321–334.
- Pöschl, U. et al. (2010), Rainforest aerosols as biogenic nuclei of clouds and precipitation in the Amazon, *Science*, 329, 1513—1516.
- Pratt, K. A. et al. (2009), *In situ* detection of biological particles in cloud ice-crystals, *Nature Geosci.*, 2, 398–401.
- Šantl-Temkiv et al. (2020), Bioaerosol field measurements: Challenges and perspectives in outdoor studies, *Aerosol Sci. Technol.*, 54, 520–546.
- 谷本浩志 (2012). 海洋生物・大気化学・気候変動のリンケー ジを探る: 質量分析法によるオンライン計測で拓ける新 展開, 化学と工業, 65, 686-687.
- Turner, M. A., F. Arellano, and L. M. Kozloff (1991), Components of ice nucleation structures of bacteria, J. Bacteriol., 173, 6515–6527.
- Vaïtilingom, M. et al. (2013), Potential impact of microbial activity on the oxidant capacity and organic carbon budget in clouds, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 110, 559–564.

Vorholt, J. A. (2012), Microbial life in the phyllosphere, Nature

Rev. Microbiol., 10, 828-840.

Yankofsky, S. A., Z. Levin, T. Bertold, and N. Sandlerman (1981), Some basic characteristics of bacterial freezing nuclei, J. Appl. Meteor., 20, 1013–1019.

> 原稿受領日: 2020年5月14日 掲載受理日: 2020年6月10日

著者所属:

- 1. 近畿大学 理工学部
- 2. 茨城大学 理工学研究科(理学野)
- 3. 独立行政法人 国立科学博物館·植物研究部
- 4. 金沢大学 理工学域
- 5. 京都大学 複合原子力科学研究所
- * 責任著者:

Teruya Maki <makiteru@life.kindai.ac.jp>

安定同位体比を用いた陸域生態系における №O 放出と 吸収の解明

Emission and absorption of N₂O by the terrestrial ecosystem

elucidated by stable isotope analysis

豊田栄1*

陸域生態系から放出される種々の微量気体のなかで、一酸化二窒素(N₂O)は地球温暖化および成 層圏オゾン破壊をもたらす重要な長寿命成分である。N₂O は微生物の窒素代謝過程で生成するため、 自然あるいは人為的な生態系における放出と吸収は空間的・時間的変動が大きく、いまなお全球収 支の見積もりには不確実性が残っている。また、陸域生態系からの N₂O 放出を削減するための技術 開発においては、多様な N₂O 生成過程や消滅過程の寄与率が環境条件にどのように呼応するのか を理解することが必要である。本稿では、安定同位体比がこれらの課題の解決にどのように利用できる かについて筆者らの研究を中心に紹介する。

1. はじめに

一酸化二窒素(N₂O)は対流圏では CO₂の約 220 倍の放射効率をもつ温室効果気体として,成層圏で はクロロフルオロカーボン(CFC)の全廃後最も重要 なオゾン層破壊物質として知られている[*IPCC*, 2013; *Ravishankara et al.*, 2009]。全球平均濃度は 2011 年 現在で約 324 ppb であり, 0.73 ppb/年で増加している [*IPCC*, 2013]。N₂O の発生源には,窒素代謝を行う 微生物による陸域・海洋の自然発生源と,農業など 人為的な窒素負荷に伴う微生物過程や燃焼過程な どの人為発生源があり,消滅先は成層圏における光 化学反応である(図1)。

これら多岐にわたる発生源のなかで,陸域生態系 (本稿では広い意味で,農地も含める)の占める割合 は大きい。しかし,微生物の代謝過程とその速度は 微生物の種類,基質濃度,温度,酸素濃度などの環 境条件に依存して変動することから,海洋と比べて空



図1N₂Oの全球収支 [IPCC, 2013]。

間的不均一性の大きい陸域では局所的な濃度観測 に基づくフラックス測定はしばしば大きな誤差を伴う。 ゆえに N₂O 放出量推定値には依然として大きな誤差 があり,人間活動の変化や将来の気候変動によって その強度や相対比率が変化することも予想される。

濃度測定を補う物質循環の追跡手法として,安定 同位体比の変動が広く活用されている。N₂O につい ては,窒素・酸素の安定同位体比測定に加えて,非 対称な分子構造を利用した分子内同位体分布の測 定が可能となり、さらに赤外レーザー光を用いた分析 計も最近汎用化されたことから、安定同位体比を活 用した研究が増えている。以下では、陸域生態系に おける N₂O の生成や消滅を理解するうえで安定同位 体比がどのように利用されるかを筆者らの研究を中 心に紹介し、今後の課題にも触れたい。

2. 陸域生態系における N₂O の生成・消滅過 程

微生物による窒素の代謝で N₂O の生成に関わっ ている主要な過程は, 細菌(バクテリア)による硝化お よび脱窒である(図 2)。硝化は, 好気的(酸化的)環 境下でアンモニア(NH₃)がアンモニア酸化細菌によ ってヒドロキシルアミン(NH₂OH)を経て亜硝酸イオン (NO₂⁻)に, さらに亜硝酸酸化細菌によって硝酸イオ ン(NO₃⁻)に変換される過程である。N₂O は NH₂OH が NO₂⁻に酸化される際の酵素反応において副生成 物として生成する。脱窒は, NO₃⁻が脱窒細菌によっ て嫌気的(還元的)環境下で段階的に N₂まで還元さ れる過程である。N₂O は, NO が還元される酵素反応 で生成する中間体であるが, 酸化還元環境や気体の 拡散のしやすさに応じて一部が N₂まで還元されずに 系外に放出される。

アンモニア酸化細菌のなかには NO2⁻還元酵素を もつ種がおり,環境に応じて生成物の NO2⁻を脱窒の 場合と同様に還元して N2O を生成する。この過程は 硝化菌脱窒と呼ばれる[Wrage et al., 2001]。さらに最 近の研究で,海洋や土壌に存在するアンモニア酸化



図 2 N₂O の主な生成・消滅過程。 [*Toyoda et al.,* 2017 の図を一部改変]

古細菌(アーキア)がバクテリアの場合と同様に N₂O を副生することや、NO₃⁻還元を行う糸状菌(カビ)が 中間生成物あるいは最終生成物としてN₂Oを生成す ることも知られるようになり、それらも重要な役割を果 たしていることが指摘されている[Laughlin and Stevens, 2002; Santoro et al., 2010]。

硝化, 脱窒以外の土壌中微生物による N₂O 生成 過程として, 共脱窒と化学脱窒も最近注目され始め ている。前者は NO₂⁻ または NO と他の化学種 (NH₃ や有機態窒素など)が 1:1 で反応して N-N 結合が生 成する[*Spott et al.*, 2011]。後者は無酸素または酸性 条件下で NO₂⁻の非生物反応(鉱物粒子由来の鉄イ オンの関与など)により N₂O が生成する[*Jones et al.*, 2015]。

3. N₂O 安定同位体比の定義と表記法

N₂O 分子を構成する窒素と酸素には複数の安定 同位体(14N,15N,16O,17O,18O)が存在し、さらに非対称 の分子構造(NNO)をもつことから2種の窒素を区別 できるため, 種々の安定同位体を含む分子種が存在 する。これら安定同位体置換を考慮した異性体群を 総称して isotopocule と呼ぶ (isotopologue, isotopomer も似たような意味で用いられるが, 定義・用法につい ては研究者間で未だ一致をみていないので, 読者の 混乱を避けるため本稿では単に安定同位体と表記 する)。N₂Oの安定同位体の自然存在比(同位体比) は,基本的には上述した生成反応の基質(NH3, NO₃-など)の同位体比や各反応における同位体効 果によって決定される。ただし環境によっては拡散過 程における同位体効果や、水とN2Oの間での酸素の 同位体交換平衡を考慮する必要が生じる場合もある。 また、起源の異なるN2Oを含む気塊や水塊が混合す ると,混合後の同位体比は変化する。これらの特性を 利用することによって同位体比の観測結果から逆に N₂Oの起源や生成・消滅過程の寄与率や進行度を 推定することが可能となっている。

N₂O 安定同位体比の標記法と定義は以下のとおり

である[Toyoda and Yoshida, 1999]。

$$\delta X = (R_{\text{sample}} - R_{\text{standard}}) / R_{\text{standard}}$$
(1)

(1)式の Xは¹⁵N^{α}, ¹⁵N^{β} または ¹⁸Oを表し, *R* は それぞれ ¹⁴N¹⁵N¹⁶O/¹⁴N¹⁴N¹⁶O, ¹⁵N¹⁴N¹⁶O/¹⁴N¹⁴N¹⁶O または ¹⁴N¹⁴N¹⁸O/¹⁴N¹⁴N¹⁶O を表す。添え字はそれ ぞれ測定試料,標準試料についての値であることを 示す。N, O についての標準試料はそれぞれ大気中 N₂、標準平均海水 (VSMOW)である。(1)式で計算さ れるδ 値を 1000 倍してパーミル (‰) で表現すること が多い。 δ^{15} N^{α} と δ^{15} N^{β}を用いると N₂O の平均窒素 同 位 体 比 δ^{15} N^{β}レ と 分 子 内 ¹⁵N 席 選 択 (site preference)の指標 SP が以下のように表せる。

 $\delta^{15} N^{\text{bulk}} = \left(\delta^{15} N^{\alpha} + \delta^{15} N^{\beta} \right) / 2 \tag{2}$

 $SP = \delta^{15} N^{\alpha} - \delta^{15} N^{\beta}$ (3)

大気試料または水試料中の N₂O 同位体比の測定 は,前処理を施したうえで同位体比質量分析計 (IRMS)またはレーザー光源を用いた赤外吸収分光 計で行われる[*Toyoda et al.*, 2017]。IRMS で通常の 大気試料 300 mL を分析する場合の精度はδ¹⁵N^{bulk} が 0.1‰以下, δ¹⁸O が 0.2‰, δ¹⁵N^αが 0.5‰以下で ある。

4. N₂Oの生成・消滅過程と同位体効果

軽い同位体を含む分子と重い同位体を含む分子 との間に存在する内部エネルギー(振動・回転状態) の微小な差異は,化学結合の開裂や生成が起きる 際に反応の速度の差異として現れる[Bigeleisen and Wolfsberg, 1958]。これを速度論的同位体効果と呼び, 同位体濃縮係数(ε)として次式で定義され,δ値の場 合と同様に1000倍して‰で表現される。

$$\varepsilon = \mathbf{k}'/\mathbf{k} - 1 \tag{4}$$

(4)式の k', k はそれぞれ重い同位体, 軽い同位体を 含む分子についての速度定数を表す。多くの反応で は k' < k であるので, (4)式の定義ではεは負の値とな るが, 比の分母と分子を逆にして定義する文献もある。 N_2O が基質 A から生成する際の ϵ は, 基質濃度が 十分高く, 律速とならない条件下で N_2O が生成する ときに A と N_2O の同位体比を測定することで実験的 に求められる。

$$\varepsilon_{\text{A-N2O}} \approx \delta X_{\text{N2O}} - \delta X_{\text{A}}$$
 (5)

(5)式の X は¹⁵N または¹⁸O である。SP 値は基質の δ¹⁵N値には依存せず,反応経路固有の値をとること が知られている[*Toyoda et al.*, 2017]。

 N_2O が還元される際の ϵ は(5)式と同様に, 生成する N_2 の同位体比を測定すれば得られるが, 大気中 N_2 の混入を避けて精密測定するのは容易ではないため, 閉鎖系で実験して N_2O の濃度減少率と同位体比の変化から Rayleigh 蒸留の式を用いて次式で求められることが多い。

$$\epsilon_{N2O-N2} \approx \{\delta X_{N2O}(t) - \delta X_{N2O}(0)\} / \ln \{C(t)/C(0)\}$$
 (6)

(6)式の C は N₂O 濃度を, t, 0 はそれぞれ時刻 t およ び初期における値であることを示す。また, 還元反応 の場合はδX_{N20} を SP と置き換えて SP についての ε_{N20-N2}を得られる。

5. N₂O 同位体比測定による陸域生態系の評価

5.1. 発生源観測

N₂O の全球収支における陸域発生源の寄与を調 べるうえで,発生源を直接観測する,いわゆるボトム アップの方法は濃度(フラックス)のみならず同位体 比解析においても利用されている。

土壌中で生成し大気へ放出される N₂O の同位体 比観測は,土壌表面に設置したチャンバーを用いる 方法あるいは土壌に気体採取用プローブを挿入して 直接観測する方法によって行われる。多くの場合, 採取される気体には大気中 N₂O がバックグラウンドと して存在しているので,2 成分混合を仮定して,大気 N₂O の濃度および同位体比,採取気体の N₂O 濃度 と同位体比から土壌中で生成した正味の N₂O 同位



図3 種々の土壌から放出される N₂O の同位体比。× は最小・最大値,箱は第1四分位~第3四分位点,水 平線は中央値,ひげは第1,第3四分位点から四分位 範囲の1.5倍以内の範囲にある最小値,最大値を,□ は平均値を表す。[*Toyoda et al.*, 2017の図を一部改変]

体比を算出する。チャンバー法ではチャンバーを大 気開放状態から閉鎖状態に切り替えてから時系列で 試料採取・分析することができるので、その変化を解 析して土壌起源 N₂O 同位体比を推定することもでき る。 現場観測以外の研究手法として土壌インキュベーション法が用いられることもある。研究室に持ち帰った土壌試料をチャンバーに入れ、閉鎖あるいは通気条件で気相の分析を行う。この方法は基質濃度、酸素濃度、土壌水分、温度などの条件を制御することができるので、 N_2O 生成・消滅過程の環境条件依存性を調べるのに適している。ただし、実験系のスケール、通気方法などによっては現場の土壌環境を忠実に再現しない可能性にも注意が必要である。 [Lewicka-Szczebak et al., 2014].

図 3 に, 筆者らの研究を含む文献値から得られる 種々の土壌から放出される N₂O の同位体比を示す。 自然土壌については温帯では N₂O 放出量が少ない ため同位体比観測例が少ないが, 熱帯土壌や季節 性凍土, 自然土壌の耕起直後など N₂O 放出が高い 土壌についての同位体比観測例がある[Goldberg et al., 2010; Ostrom et al., 2010; Pérez et al., 2000]。こ のような土壌起源 N₂O 同位体比の特徴を他の N₂O 発生源と比べると図 4 のようになり, 後述する全球規 模での N₂O 収支解析に利用できる。

一方、 N_2O の同位体比情報として $\delta^{15}N^{bulk}$ 、 $\delta^{18}O$ 、 SPの3種類が得られるので、これらの相互関係を利 用して生成過程や消滅過程の寄与率を解析すること が可能となる。たとえばフィールド観測により土壌中



図 4 N₂O 発生源の安定同位体比の分布。大気中 N₂O の値を緑色の星印で示した。[Toyoda et al., 2017 を改変]



図 5 N₂O 安定同位体比相互の関係を利用した, 生成・ 消滅過程解析の例。[*Toyoda et al.*, 2017 を改変]

で生成した N₂O の δ^{15} N^{bulk} と SP が図 5 の「観測値」と して得られたとする。一方,対象フィールドにおける N₂O の基質の同位体比を実測または推定し,各生成 過程の ϵ 値(前節参照)と組み合わせることで,各過程 で生成する N₂O がもつ固有の同位体比(端成分と呼 ぶ)を推定することができる(図 5 の四角形)。観測値 と端成分の位置関係から各過程の寄与率が計算で きる。ただし,生成過程の候補が3つ以上ある場合に は解は一つと限らない(図 5 の例では細菌による硝化 と細菌による脱窒の 2 成分混合を仮定した場合の解 析を示している)。また,N₂O 還元が同時に起こると推 定されるような環境では,還元を受ける前の同位体比 を推定する必要も生じる(図 5 の星印)。

図 5 のような同位体比一同位体比相関図を用いた 解析により, 温帯火山灰土壌における N₂O 生成に占 める硝化と脱窒の寄与率が肥料のタイプ(化学肥料 vs 堆肥)によって大きく変わることや, 火山灰土壌と 比べてかさ密度の高い沖積土壌では脱窒による N₂O 還元が促進されること [*Toyoda et al.*, 2011], 温帯草 地土壌の耕起後に短期間で観測される N₂O 放出は 脱窒起源であること [*Ostrom et al.*, 2010]などが明ら かにされている。

5.2. 大気観測

CO2 やメタンについてすでに行われてきたように、 大気中 N2O 同位体比とその長期変動を調べることで、 全球収支を解析する、いわゆるトップダウンの方法も 陸域生態系発生源を評価するのに有効である。これ までに 10–30 年間保存された中・高緯度大気試料や 極域のフィルン(万年雪)中に保存された過去 100 年 におよぶ大気の分析により N₂O 安定同位体比の経 年変化が報告され、¹⁴N に富む「軽い」N₂O を放出す る発生源が N₂O 濃度の増加に寄与していることが明 らかになった[Sowers et al., 2002; Röckmann and Levin, 2005 など]。しかし、大気中における継続的な観測の 報告例は極めて限られている。

筆者らはこれまでに沖縄・波照間島, ロシア・ノボ シビルスク, カナダ・チャーチルの北半球 3 地点にお いて約 20 年にわたって大気試料を採取し, N₂O 安 定同位体組成の分析を行ってきた。3 地点の長期変 動傾向はほぼ一致し, N₂O 濃度の増加に対して δ¹⁵N^{bulk} は約 0.05‰/年で減少, δ¹⁸O は約 0.02‰/年 で減少していること, SP には有意な増加・減少傾向 が認められないことがわかった。これらの傾向は既往 の極域フィルン(万年雪)中に保存された過去の大気 分析に基づく報告と概ね一致した[Toyoda et al., 2013]。

同位体比の経年変化をもとに N₂O 収支をボックス モデルで解析して得られる人為発生源(濃度増加に 寄与している発生源)は、対流圏大気に対して図4(a) では左下、図 4(b)では左に位置する。したがって土 壌、特に化学肥料を施した農業土壌の寄与が大きい と考えられる[Toyoda et al., 2013]。

一方、筆者らが得た時系列データを詳細に解析す ると、年変化率には年々変動がありそうなことがわか ってきた。たとえば2012-2014年、2015-2016年に濃 度増加とδ¹⁵N^{bulk}減少が弱化する傾向がみられた。同 時期の他地点、特に南半球での同位体の観測例が ないので原因は明らかではないが、陸域発生源の放 出量や発生過程が短期的または局地的に変動して いる可能性がある。

下部対流圏の大気中 N₂O 濃度は春季に高濃度, 夏季に低濃度となる弱い季節変動を示すことが知ら れている[Tohjima et al., 2000 など]。しかしこの季節変 動の位相は,陸域 N2O 発生源について予想される 変動の位相とは一致しないため,対流圏内の輸送過 程や対流圏-成層圏間の大気交換による成層圏起源 の低濃度 N₂O の混合などが提案されている[Ishijima et al., 2010; Nevison et al., 2007]。N2O 同位体比を調 べることにより、この謎を解決することが期待されてい るが,筆者らの北半球3地点での観測では, N2O同 位体比の変動は分析精度と比べて極めて小さく,現 在のところ検出できていない[Toyoda et al., 2013]。し かし, 南半球の Cape Grim で 1978-2005 に採取・保 存された大気試料を分析した Park et al. [2012]は濃 度極小期にδ¹⁵N^{bulk} とδ¹⁸O が極大を示すとの解析結 果を報告し、対流圏-成層圏間の大気交換により成層 圏起源の低濃度,高同位体比の N2O の混合によると 推察している。ただし Park et al. [2012]が用いた試料 の採取頻度は1-6試料/年で季節変動を解析するの に必ずしも十分な時間分解能を有しておらず, 観測 地点やデータの量および質をさらに充実させて再検 討を行う余地がある。そのうえで、N2O 濃度の季節変 動に陸域生態系が関与しているか否かの検証が可 能となるであろう。

5.3. モデリング

フィールド観測の蓄積に伴い、土壌における N₂O の生成と放出は定常的に起こるものではなく、施肥 や降雨のタイミングに連動して間欠的に起きることが わかってきた [Akiyama and Tsuruta, 2003]。このよう な時間変動の予測には、土壌中での各種プロセスを 組み込んだ生物地球化学モデルが適している。植生 や土壌のタイプ、土壌有機物量、施肥情報、気温、 降水量などの条件に基づいて窒素代謝反応を計算 し、NH4⁺、NO3⁻などの無機態窒素化合物や気体状 窒素化合物の濃度を計算するモデルが開発され、 N₂O 発生量を陽に扱うモデルも報告されている[Ito et al., 2018 など]。これらのモデルにおいて安定同位体 比を利用すると、各プロセスの速度定数などのパラメ ータの妥当性を検証することができる。たとえば Bai and Holton [2009]は、窒素循環モデル DAYCENT で 熱帯土壌の(バルク)窒素同位体比を計算して実測値 と比較することにより、観測では得られにくい、脱窒に よる N₂ 放出の重要性を半定量的に示した。また、 Denk et al. [2019]は、LandscapeDNDC モデルを用い て施肥された草地土壌における N₂O 同位体比を計 算し、SP 値がモデルの硝化速度および脱窒速度の 妥当性を検証するのに特に有効であることを示して いる。

一方,トップダウン的手法での解析においては大 気化学輸送モデルが有効である。まず成層圏のN2O 分解過程に安定同位体比を組み込んだモデルが開 発され,大気球による観測結果を再現できることが示 された[*Ishijima et al.*, 2015]。対流圏については,大 気観測値や各種発生源の同位体比の空間分布につ いての情報が未だ十分ではないために,前節で述べ たような短期的・局地的な変化を再現するには至っ ていないが,半球レベルで平均化した発生源の同位 体比の特徴が推定されている [*Ishijima et al.*, 2015]。

6. まとめと今後の課題

同位体比を利用して多様な N2O 発生源を識別したり,複雑な生成・消滅過程を解析したりする研究を 概説した。図4に例示した N2O 発生源の同位体比の 特徴や大気中 N2O 同位体比の長期変動傾向につい ての研究は、多くの研究者によって SP を含むデータ の蓄積や測定の高精度化の努力が続けられている。 また、陸域生態系における N2O の生成や消滅過程 については、安定同位体比を用いた研究のほか、分 子生物学的研究も進展してきたので、両者を相補的 に利用して細菌による硝化と脱窒や他の微生物によ る窒素代謝過程の相対寄与が土壌の環境条件にど のように依存するか、が明らかにされつつある。

今後の課題としては、まず、高時間分解能、広域の大気 N2O 同位体比観測の拡充が課題として挙げられる。近年、赤外レーザー分光[Mohn et al., 2012]

や人工衛星を用いたリモートセンシング[Bernath et al., 2017]による N₂O 同位体比測定法が報告され,精度も改善されつつある。これらをも利用して全球での 観測網を充実させて大気化学輸送モデルにより逆解 析を行えれば,地域毎の微小な変化を検出して発生 源の分布と変動の解析が進展すると思われる。また, さまざまな研究室で測定される安定同位体比のデー タをモデルで利用するためには,利用しやすい標準 物質を作製,配布して較正スケールを統一する必要 がある。

次に, N₂O の安定同位体比を決める主要因の一 つである同位体効果や同位体交換平衡(3,4節)の 詳細な解明を課題として挙げたい。土壌のように空 間的に不均一な環境では,窒素代謝の律速段階の 変化などの理由で同位体効果が変動したり,同じ代 謝過程を担う微生物であっても種によって酵素の型 の違いなどにより同位体効果が異なったりすることが ある。それゆえ,発生源の同位体比観測や生物地球 化学モデルシミュレーションにおいて,基質の同位体 比だけでなく,各過程の同位体効果を適切に見積も る手法の確立が望まれる。

最近, 土壌・植物根圏における微生物による N₂O 還元を強化することによって N₂O 放出を抑制する技 術の開発が進められている[*Itakura et al.*, 2013]。本 稿で紹介した安定同位体比を用いた生成・消滅過程 の解析は, N₂O 還元の進行度を評価するのにも有効 であるので, 地球温暖化やオゾン層破壊問題の緩和 策への貢献も期待される。

6. 参考文献

- Akiyama, H. and H. Tsuruta (2003), Effect of organic matter application on N₂O, NO, and NO₂ fluxes from an Andisol field, *Global Biogeochem. Cycles*, 17(4), 1100, doi:10.1029/2002GB002016.
- Bai, E. and B. Z. Houlton (2009), Coupled isotopic and processbased modeling of gaseous nitrogen losses from tropical rain forests, *Global Biogeochem. Cycles*, 23(2), GB2011,

doi:10.1029/2008gb003361.

- Bernath, P. F., M. Yousefi, E. Buzan and C. D. Boone (2017), A near-global atmospheric distribution of N₂O isotopologues, *Geophys. Res. Lett.*, 44(20), 10,735–710,743, doi:10.1002/2017gl075122.
- Bigeleisen, J. and M. Wolfsberg (1958), Theoretical and experimental aspects of isotope effects in chemical kinetics, *Adv. Chem. Phys.*, 1, 15–76.
- Denk, T. R. A., D. Kraus, R. Kiese, K. Butterbach-Bahl and B. Wolf (2019), Constraining N cycling in the ecosystem model LandscapeDNDC with the stable isotope model SIMONE, *Ecology*, 100(5), e02675, doi:10.1002/ecy.2675.
- Goldberg, S. D., W. Borken and G. Gebauer (2010), N₂O emission in a Norway spruce forest due to soil frost: concentration and isotope profiles shed a new light on an old story, *Biogeochemistry*, 97(1), 21–30.
- IPCC (2013), Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by T. F. Stocker et al., pp. 465–570 and 659–740, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Ishijima, K. et al. (2010), Stratospheric influence on the seasonal cycle of nitrous oxide in the troposphere as deduced from aircraft observations and model simulations, *J. Geophys. Res.*, 115, D20308, doi:10.1029/2009JD013322.
- Ishijima, K. et al. (2015), Development of an atmospheric N₂O isotopocule model and optimization procedure, and application to source estimation, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 15, 19947–20011, doi:10.5194/acpd-15-19947-2015.
- Itakura, M. et al. (2013), Mitigation of nitrous oxide emissions from soils by Bradyrhizobium japonicum inoculation, *Nature Climate Change*, 3, 208-212, doi:10.1038/nclimate1734.
- Ito, A., K. Nishina, K. Ishijima, S. Hashimoto and M. Inatomi (2018), Emissions of nitrous oxide (N₂O) from soil surfaces

and their historical changes in East Asia: a model-based assessment, *Prog. Earth Planet. Sci.*, 5, 55, doi:10.1186/s40645-018-0215-4.

- Jones, L. C., B. Peters, J. S. L. Pacheco, K. L. Casciotti and S. Fendorf (2015), Stable isotopes and iron oxide mineral products as markers of chemodenitrification, *Environ. Sci. Technol.*, 49, 3444–3452, doi:10.1021/es504862x.
- Laughlin, R. J. and R. J. Stevens (2002), Evidence for fungal dominance of denitrification and codenitrification in a grassland soil, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 66, 1540–1548.
- Lewicka-Szczebak, D. et al. (2014), Experimental determinations of isotopic fractionation factors associated with N₂O production and reduction during denitrification in soils, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 134, 55–73, doi:10.1016/j.gca.2014.03.010.
- Mohn, J. et al. (2012), Site selective real-time measurements of atmospheric N₂O isotopomers by laser spectroscopy, *Atmos. Mes. Tech.*, 5, 1601–1609, doi:10.5194/amt-5-1601-2012.
- Nevison, C. D., N. M. Mahowald, R. F. Weiss and R. G. Prinn (2007), Interannual and seasonal variability in atmospheric N₂O, *Global Biogeochem. Cycles*, 21(3), GB3017, doi:10.1029/2006gb002755.
- Ostrom, N. E. et al. (2010), Isotopologue data reveal bacterial denitrification as the primary source of N₂O during a high flux event following cultivation of a native temperate grassland, *Soil Biol. Biochem.*, 42(3), 499–506.
- Park, S. et al. (2012), Trends and seasonal cycles in the isotopic composition of nitrous oxide since 1940, *Nat. Geosci.*, 5, 261–265, doi:10.1038/ngeo1421.
- Pérez, T. et al. (2000), Isotopic variability of N₂O emissions from tropical forest soils, *Global Biogeochem. Cycles*, 14, 525– 535.
- Ravishankara, A. R., J. S. Daniel and R. W. Portmann (2009), Nitrous oxide (N₂O): The dominant ozone-depleting substance emitted in the 21st century, *Science*, 326, 123– 125, doi:10.1126/science.1176985.
- Röckmann, T. and I. Levin (2005), High-precision determination

of the changing isotopic composition of atmospheric N_2O from 1990 to 2002, *J. Geophys. Res.*, 110, D21304, doi:10.1029/2005JD006066.

- Santoro, A. E., K. L. Casciotti and C. A. Francis (2010), Activity, abundance and diversity of nitrifying archaea and bacteria in the central California Current, *Environmental Microbiology*, 12(7), 1989–2006, doi:10.1111/j.1462-2920.2010.02205.x.
- Sowers, T., A. Rodebaugh, N. Yoshida and S. Toyoda (2002), Extending records of the isotopic composition of the atmospheric N₂O back to 1800 A.D. from air trapped in snow at the South Pole and the Greenland Ice Sheet Project II ice core, *Global Biogeochem. Cycles*, 16(4), 1129, doi:10.1029/2002GB001911.
- Spott, O., R. Russow and C. F. Stange (2011), Formation of hybrid N₂O and hybrid N₂ due to codenitrification: First review of a barely considered process of microbially mediated N-nitrosation, *Soil Biol. Biochem.*, 43, 1995–2011, doi:doi:10.1016/j.soilbio.2011.06.014.
- Tohjima, Y. et al. (2000), Variations in atmospheric nitrous oxide observed at Hateruma monitoring station, *Chemosphere-Global Change Science*, 2(3-4), 435–443.
- Toyoda, S. and N. Yoshida (1999), Determination of nitrogen isotopomers of nitrous oxide on a modified isotope ratio mass spectrometer, *Anal. Chem.*, 71, 4711–4718.
- Toyoda, S. et al. (2011), Characterization and production and consumption processes of N₂O emitted from temperate agricultural soils determined via isotopomer ratio analysis, *Global Biogeochem. Cycles*, 25, GB2008, doi:10.1029/2009GB003769.
- Toyoda, S. et al. (2013), Decadal time series of tropospheric abundance of N₂O isotopomers and isotopologues in the Northern Hemisphere obtained by the long-term observation at Hateruma Island, Japan, J. Geophys. Res., 118, 3369–3381, doi:10.1002/jgrd.50221.
- Toyoda, S., N. Yoshida and K. Koba (2017), Isotopocule analysis of biologically produced nitrous oxide in various

environments, *Mass Spectrom. Rev.*, 36, 135–160, doi:10.1002/mas.21459.

Wrage, N., G. L. Velthof, M. L. v. Beusichem and O. Oenema (2001), Role of nitrifier denitrification in the production of nitrous oxide, *Soil Biol. Biochem.*, 33, 1723–1732.

> 原稿受領日: 2020 年 06 月 02 日 掲載受理日: 2020 年 06 月 15 日

著者所属:

- 1. 東京工業大学 物質理工学院
- * 責任著者:

Sakae Toyoda <toyoda.s.aa@m.titech.ac.jp>

『基礎から学ぶ光学センサの校正』刊行について

久世暁彦 1*

【書籍名】

基礎から学ぶ光学センサの校正 監修・執筆 小野晃 執筆 新井康平 ・小畑建太・ 久世暁彦・神山徹・佐久間史洋・土田聡・外岡秀行 監修 松永恒雄 ISBN:978-4-8446-0895-0 理工図書(本体 3,000円)

本書は太陽の地表面反射光・地球大気散乱光お よび地表面・地球大気からの熱放射光を用いて,遠 隔観測の手法で物理量である分光放射輝度の計測 を行うセンサが,いかに不確定性の低減を軌道上で 実現しているかについて述べたものである。温室効 果ガス観測技術衛星 GOSAT に搭載された二酸化炭 素・メタンを観測する分光計と,20 年以上2 次元放射 計測を行っている ASTER の校正にかかわってきた 筆者らが執筆した。

人工衛星による観測は、単一の機器で長期に、全 球を、上空から観測できる唯一の観測手段であるが、 一度打ち上げてしまうと修理はできない。一方、 GOSAT が対象とする二酸化炭素の長期の変動監視 や発生源別排出量の評価には、1 ppmレベルの計測 精度が長期にかつ全球の観測点に対して要求され る。そこで必要になるのが光学センサの校正である。

GOSAT はフーリエ干渉計方式により,世界で唯一 太陽反射領域と地球放射域を同時に観測し,分光 分解能は世界で最も高い。太陽反射領域から得られ る気柱量に熱放射領域情報を付加することで,排出 の影響を受ける下層と大気の輸送の影響が大きい上 層の濃度をそれぞれ導出することができる。

その精度実現および国際的な取り組みについて, 地上の基準による評価(第2章 打ち上げ前地上校



正), 軌道上における太陽・月・搭載校正光源である 黒体を用いた定期的な評価(第3章 機上校正, 第5 章 月校正), エアロソルが少なく, GOSAT のフットプ リントである10.5 km の範囲内で, 均一で高い地表面 反射率を有するネバダの砂漠における衛星・地上・ 航空機・ゾンデの同時観測による年1回の評価(第4 章 代替校正), 打ち上げ前に行った NASA ジェット 推進研究所の基準との比較, 軌道上大気成分観測 のための分光方式をして回折格子を採用している太 陽反射領域の OCO-2, 放射領域の AIRS との相互比 較(第6章 軌道上相互校正)について具体例により 網羅的に記述されている。

宇宙から,温室効果ガスのわずかな変化をとらえる のは難しいのではないかという読者の疑問にできる だけ答えたつもりである。衛星データをより身近なも のとして研究に使って頂きたい。

1. 宇宙航空研究開発機構

* Akihiko Kuze <kuze.akihiko@jaxa.jp>

第25回大気化学討論会のお知らせ

齋藤尚子1*,入江仁士1,内田里沙2,中山智喜3,豊田栄4

第25回大気化学討論会は、2020年11月11(水) ~13日(金)に討論会初の試みであるオンライン形式 で開催いたします。昨年度の第24回大気化学討論 会にて、千葉大学けやき会館(大学会館)での開催 を告知しておりましたが、新型コロナウイルス感染拡 大防止の観点からやむなくオンライン形式での開催 とさせていただくことになりました。

- 主催:日本大気化学会,名古屋大学宇宙地球環境研究所(ISEE)
- 共催:千葉大学環境リモートセンシング研究センタ ー(CEReS)
- 後援: 国立大学法人千葉大学
- 日程: 2020年11月11日(水)~13日(金),3日間 終日(予定)

懇親会:オンライン形式にて会期中に開催予定 発表・参加申込:下記のURL(第25回大気化学討 論会 Web サイト)より内容をご確認の上,発表申込・ 参加登録をお願いします。

https://jpsac.org/symposium/25th-touronkai 2020/



第25回大気化学討論会は、千葉大学が後援 となっています。今回は、皆様を千葉大学で お迎えすることができず大変残念です。

参加·発表申込受付開始:8月24日 発表申込·予稿原稿送付〆切:9月25日(予定) 参加申込〆切:10月26日(予定) プログラム公開:10月15日(予定)

*1 ×切等の日程が変更になる場合は大会 Web ページにて随時お知らせいたしますので,最新の情報は大会 Web ページをご確認下さい。

*2 参加費は日本大気化学会の会員の方は無料と する予定ですが,非会員の方は参加費を徴収する可 能性があることを予めご了承下さい。詳細は大会 Webページに掲示する予定です。

*3 オンライン大会ツールのアカウント発行等の準備の都合上,当日参加は受け付けません。必ず事前の参加申込をお願いいたします。

例年 5 月に開催されていた JpGU2020 年大会(今回は AGU との共催で JpGU-AGU joint meeting 2020)が7月にオンライン開催となったことで、JpGU の「大気化学」セッションからあまり間を置かないタイミングでの大気化学討論会となりますが、皆様、奮ってご投稿・ご参加下さいますよう宜しくお願いいたします。

オンライン開催ではありますが、出張の手間な く効率的に多くの方と研究交流ができるオンラ イン大会の良い面が活かされ、さらにオンサイト 大会のような臨場感のある討論会となるよう、な るべく多くの方にインタラクティブな議論をし ていただけるような「仕掛け」を検討しています。 皆様の積極的なご参加をお待ちしております。 問合せ先:〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33 千葉大学環境リモートセンシング研究センター 第 25 回大気化学討論会事務局 Email: taikikagakuchibauniv@gmail.com 大会実行委員:入江仁士,齋藤尚子,喜多夏子, 熊川靖代(千葉大学環境リモートセンシング研究セン ター) プログラム委員:内田里沙(自動車研究所,主担当), 中山智喜(長崎大学),豊田栄(東京工業大学),齋

藤尚子(千葉大学)

著者所属:

- 1. 千葉大学 環境リモートセンシング研究センター
- 2. 一般財団法人 日本自動車研究所
- 3. 長崎大学 大学院水産·環境科学総合研究科
- 4. 東京工業大学 物質理工学院

* 責任著者

Naoko Saitoh <nsaitoh@faculty.chiba-u.jp>

2020年度日本大気化学会奨励賞の候補者募集

日本大気化学会では下記の通り第16回(2020年度) 奨励賞の募集を行います。皆様からの推薦(自薦、 他薦を問いません)をお願い致します。日本大気化 学会事務局までメール(jpsac-post@bunken.co.jp)ま たは郵便でお送り願います。

募集要項

- 選考対象は大気化学の分野で優れた研究を行っ た本会会員(学生会員を含む)で,原則として 2020年4月1日現在で満39歳以下または学位 取得後10年未満の者。(※応募回数に制限はあ りません。過去の業績ばかりでなく将来性も含め て選考を行いますので、学生を含めた若い世代 からの応募も歓迎いたします。)
- 2. 推薦資料は下記の事務局宛にメールまたは郵便 で提出。
 - 〒162-0801

東京都新宿区山吹町 358-5 アカデミーセンター 日本大気化学会事務局宛

e-mail: jpsac-post@bunken.co.jp

- 1. 推薦資料は次の 5 つの項目を含んだ A4 用紙と する。(メールの場合,一つの pdf ファイルに内容 をまとめ、パスワードをかけたものを添付し、別メー ルでパスワードを送る。)
 - (1) 会員番号
 - (2) 略歴(年齢や推薦対象研究の実施との対応 が分かる程度の学歴・職歴など)
 - (3) 推薦対象とする研究課題名
 - (4) 推薦理由(1200字程度)
 - (5) 業績リスト(3ページ以内)

項目は論文(査読の有無を付記),学会発表 (国際・国内に分類し,口頭・ポスター・招待講演 を付記),著書,外部資金獲得状況,その他特記 事項とする。 4. 推薦資料提出の締め切りは 2020 年 7 月 31 日。

注)

- ・ 選考の段階で, 選考委員会から追加資料の提出を 求められた場合には, その指示に従って下さい。
- ・提出された資料は返却致しません。
- ・資料は奨励賞の選考以外には使用致しません。

過去の受賞者および大気化学会奨励賞に関する細 則については、日本大気化学会 HP 内の記事 https://jpsac.org/news/post_3416/ をご参照ください。

> 日本大気化学会 表彰委員長 豊田 栄

JpGU-AGU 2020「大気化学」セッション開催報告

齋藤尚子1*,中山智喜2*,内田里沙3,豊田栄4,坂本陽介5,江口菜穂6

1. JpGU-AGU Joint Meeting 2020 オンライン開催

日本地球惑星科学連合(JpGU)と米国地球物理 学連合(AGU)の共催となる 2020 年大会(JpGU-AGU Joint Meeting 2020)は、当初5月24日(日)~ 28日(木)に幕張メッセ国際会議場・国際展示場、東 京ベイ幕張ホールにて開催される予定でしたが、新 型コロナウイルス感染拡大防止のため、学会初のオ ンライン形式となり、会期も7月12日(日)~16日(木) に延期されての開催となりました。

通常セッションの講演は、ロ頭・ポスターの区別な く原則すべて「iPoster」となり、会期中は終日 iPoster 閲覧可、講演者が都合のよい時間にコアタイムを設 けるなどして双方向のコミュニケーションツール(チャ ット, Email, zoom 等)を活用できる形式となりました。

JpGU-AGU Joint Meeting 2020 の「大気化学 (Atmospheric Chemistry)」セッションは、「E」区分(ス ライド・ポスター表記および口頭発表の言語ともに英 語)として開催され、当初の講演申込数は 56 件(招 待講演 3 件含む)と、一昨年の 59 件、昨年の 67 件 には及ばなかったものの、口頭セッションのコマ数と して 5 コマ確保できる講演数であり、AGU と共催とい うこともあって米国から 4 件の投稿がありました(海外 研究機関所属の研究者による投稿は全部で 6 件)。 大会の延長、大会開催形態の変更等により、残念な がら 6 件の講演キャンセルがあったものの、追加で 2 件の講演申込があり、最終的に講演数は 52 件となり ました。このうち、iPoster が掲示されていたのは 48 件 でした。

2. ディスカッションフォーラムセッション(DFS)

今回の大会では、iPoster による全講演のオンライ



写真1.「大気化学」セッションのiPoster。iPosterは 全セッションまとめて掲示されており、セッションごとに 検索するなどの機能がある。

ン形式での発表に加え、「リアルタイムで研究成果を 議論し交流する場」を提供することを目的に, Zoom による双方向式のディスカッション・フォーラムセッショ ン(DFS)が設けられました。「大気化学」セッションの DFSには7月16日(木)の10時45分~12時15分 の 90 分が割り当てられました。 DFS の時間枠の使い 方は各セッションに委ねられており,「大気化学」セッ ションの DFS では,3件の招待講演(各25分),2件 のiPosterショートトーク(各2分),若手発表紹介を企 画しました。招待講演では,三枝信子氏(国立環境 研究所地球環境研究センター)から「Monitoring anthropogenic and natural sources and sinks of GHGs: Challenges in Asia and Oceania」,花岡達也氏(国立 環境研究所社会環境システム研究センター)から Cobenefits and Tradeoffs in Reducing Short-Lived Climate Forcers and Air Pollutants by Deep Decarbonization in Asia」,大河内博先生(早稻田大 学創造理工学部)から「Recent research trends in airborne microplastics (AMPs)」について、Zoom によ るオンライン講演という慣れない形式ながら,各分野 の最新のご研究を詳細にご紹介いただきました。通 常のオンサイト開催とは違い,会場の人数の制約もな いため, 117 名もの方に「大気化学」セッションの DFS に参加いただき、ご講演者と聴衆の間でオンサイトさ ながらの臨場感のある活発な議論が行われました。

iPoster のシステムトラブルや, DFS の Zoom の接 続不良など,大規模なオンライン大会ならではの不 備はありましたが,コロナ禍での学術研究交流の実 現のため短い準備期間で大会開催に尽力して下さ った大会事務局の皆様に感謝するとともに,オンライ ン形式での「大気化学」セッションにご参加下さった 皆様に深くお礼申し上げます。来年の JpGU および 「大気化学」セッションもまだどのような形態になるか はわかりませんが,奮ってご投稿・ご参加下さいます よう宜しくお願いいたします。

3. オンライン会員集会

例年、「大気化学」セッションの合間の昼休みの時間を利用して開催される会員集会も今回はオンライ



写真 2.7月 16 日午前後半の Zoom Live(DFS への入口)。「大気化学」セッションの DFS は「Ch. 07」から入室する。



写真 3.「大気化学」セッションの DFS。

ン形式での開催となりました。Zoom での DFS の直後 に別のビデオ会議システムに繋ぎ替えて参加いただ く形となりましたが、多くの会員の方にご参加いただ き、問題なく開催することができました。

4. 大気化学分野に興味のある学生の皆さん との交流会を兼ねたオンライン懇親会

人材育成ワーキンググループが中心となり、大気 化学分野の研究や大学院への進学に興味ある学生 を対象として、「大気化学 DFS セッション」を聴講して いただくとともに、研究者とオンラインで交流していた だく企画を実施しました。その結果、4 名の学生の参 加がありました。

また、学生向け企画の交流会を兼ねて、日本大気 化学会および JpGU-AGU「大気化学」セッションのオ ンライン懇親会を、同日 17:00-19:00 に開催しました。 一般 25 名 (招待講演者 2 名を含む)・学生 11 名 (上 記企画の参加者 4 名を含む)の合計 36 名の参加が ありました。Zoom のブレークアウトルーム機能を用い て、4 つのグループに分かれて、30 分程度毎にメンバ ーを入れ替えながら、歓談しました。学生から研究者 に大学院進学や研究内容について質問したり、研究 者から学生に今回の会議に参加した感想や新型コロ ナ感染防止対策による授業や生活への影響につい て質問したりするなど、和やかな雰囲気のもと親睦を 深めました。懇親会終了後の二次会では学生のみの グループを作り歓談する機会も設けました。他大学の 学生同士、積極的な交流がなされ、刺激を受けたよ



写真 4. オンライン懇親会の様子。

うでした。

初めてのオンライン懇親会でしたが、多くの方に参 加いただき、楽しいひと時となりました。参加頂いた 皆様、開催にご協力頂いた皆様に深く感謝申し上げ ます。

著者所属:

- 1. 千葉大学 環境リモートセンシング研究センター
- 2. 長崎大学 大学院水産·環境科学総合研究科
- 3. 一般財団法人 日本自動車研究所
- 4. 東京工業大学 物質理工学院
- 5. 京都大学 大学院人間·環境学研究科
- 6. 九州大学 応用力学研究所
- * 責任著者:

Naoko Saitoh <nsaitoh@faculty.chiba-u.jp>

Tomoki Nakayama <t-nakayama@nagasaki-u.ac.jp>

JpSAC news

日本大気化学会会員集会プログラム

日時:2020年7月16日(水) 12:15-12:45 場所:Web 会議による開催

- 1) 谷本会長より挨拶
- 2) 会員報告,会計報告
- 3) JpGU-AGU2020 大気化学セッションの開催状況
- 4) 奨励賞の募集について
- 5) 2020年開催の大気化学討論会について
- 6) 発行誌「大気化学研究」について
- 7) 女性活躍推進 WG より
- 8) その他

(日本大気化学会 運営委員会)

第 16-17 回日本大気化学会運営委員会議事録

第16回日本大気化学会運営委員会

(大気化学研究会より通算47回)

日時:2020年5月14日(木)13:00~16:00

場所:WEB 会議による開催

出席者:谷本浩志、金谷有剛、内田里沙、齋藤尚子、 関山剛、竹川暢之、豊田栄、永島達也、中山智喜、 廣川淳、山地一代、町田敏暢(監事:途中までオブ ザーバ参加)

欠席者:森本真司、江口菜穂

会長より、COVID-19による社会状況を踏まえつつ、 学会会合の開催方法などを前向きに議論したい旨、 挨拶があった。引き続き、以下の報告・審議を行っ た。

1) 会計状況、会計監査報告および会員状況につ いて

関山委員と町田監事より 2019 年度の会計報告、 監査報告があった。当該年度は学部生旅費補助や 保育費補助を新たに実施したが、それでも健全な会 計状況といえる。選挙費用など、当該年度は発生し なかった費用については留意が必要なものの、学会 として有意義な活動を検討し、積極的に資金投入し てゆくべきとの方向性が確認された。

関山委員より会員状況の報告があった。谷本会長 から、会費納入者数の把握に加え、新規入会・退会・ 除名の人数の把握が重要との指摘があった。学生会 員の追跡が困難となる問題について議論した。卒業 前の時期に、学位取得後の会員種別変更や退会の 手続きについて案内することで改善を試みることとし た。また、学生会員の期間を単年度毎に設定する可 能性などについても継続的に議論することとした。今 年度は直接的な会合が困難であり、入会を勧誘する 機会が限られる点にも留意すべきとの議論があった。 2) JpGU-AGU2020 でのセッション運営等について

齋藤委員より説明があった。発表はすべて iPoster 形式となるが、コアタイムの設定などにより議論を促し たい。DFS(ディスカッションフォーラムセッション)を希 望し、その内容としては招待講演等を検討することと した。また、学部生が参加できる企画を、プログラム 委員と人材育成 WG で検討することとした。可能な限 り、非会員にも学会の雰囲気が伝わるような形で臨む べきとの議論があった。なお、会員集会は DFS とは 別枠で実施することを確認した。

3) 奨励賞対象者の拡張について

豊田委員および廣川委員から資料提示と説明が あり、議論した。応募者数増加に向けた方策として、 年齢上限を引き上げること、年齢だけでなく学位取得 後年数でも資格が得られるようにすること、産休育休 やキャリアブレイクを考慮できるようにすることが有効 であるとの意見で一致した。そのうえで、細則を「満 37歳以下(満 37歳を含む)の者」から「原則として、39 歳以下または学位取得後 10年未満とする」と修正す ることを可決した。

4) 第25回大気化学討論会運営戦略について

齋藤委員よりコロナウィルス蔓延の社会的状況を 踏まえ、千葉大学での開催条件や関連状況につい て説明があった。議論の結果、準備期間も必要なこと から、千葉大学での現地開催ではなく、11月にオン ライン開催を目指す方向を決定した。なお、名古屋 大学宇宙地球環境研究所の共同利用の要件を確認 しつつ、オンライン実施の際の費用や方法を検討す ることとした。

5) 選挙制度について

廣川委員から説明があった。制度変更を次回の選 挙に間に合わせるべく検討してきたが、コロナウィル ス蔓延状況下においては、会合を充実化する検討を 優先すべきであり、選挙制度に関する大きな変更を 次回選挙に反映することは見送ることとした。ただし、 現行の制度を維持したまま技術的に電子投票を導 入する可能性については、継続的に検討することとし た。

6) 女性活躍推進 WG の活動について

江口委員がとりまとめた資料に基づき山地委員か ら、女性会員メーリングリスト作成準備状況、保育支 援ガイドライン等の改訂整備状況、保育支援アンケ ート実施準備状況について報告があり意見を交換し た。会合がオンラインで開催される場合にも適切な支 援を行うべきとの議論があった。

7) IGAC2020 国際会議の延期について

谷本会長から、現時点では IGAC2020 国際会議 は 2021 年 9 月に延期され、対面形式での実施が検 討されているとの報告があった。Early Career Scientist Program への応募者等は延期開催の場合 には引き継がれる見込みである点や、延期の一方で、 元のスケジュールである 2020 年 9 月に COVID-19 関連の科学などをオンラインで議論する可能性も検 討されている点が共有された。

8) 日本学術会議・協力学術研究団体としての認定 について

谷本会長から日本学術会議から学術研究団体とし て承認された旨の報告があった。会員にも周知する 予定である。

9) 学会誌「大気化学研究」の著作権規定について

金谷委員が代理で著作権規定案を提示した。著 作者にとっても特に不利益がないことなどを確認し、 案を可決した。

10) その他

永島委員から、運営委員会活動に関する年間スケ ジュール表について、作成状況の報告と改訂依頼が あった。また本会会員メーリングリストへの配信方法 が運営委員に共有された。 以上

第17回日本大気化学会運営委員会

(大気化学研究会より通算48回)
日時:2020年6月30日(火)10:00~12:30
場所:WEB会議による開催
出席者:谷本浩志、金谷有剛、内田里沙、江口菜穂、 齋藤尚子、関山剛、豊田栄、中山智喜、永島達也、 森本真司、山地一代
欠席者:竹川暢之、廣川淳

会長より、会期が近づいている JpGU-AGU2020 や 秋の大気化学討論会について、Web 開催となるもの の、本会の特色を生かし会合を成功させるために協 力をすすめるべき旨、挨拶があった。引き続き、以下 の報告・審議を行った。

1) 会員状況について

関山委員より、現在の状況としての報告があった (その後、7月16日の研究集会時点での更新情報で は、正会員225名(新規1名、会費納付203名)、学 生会員29名(新規4名、会費納付12名)、賛助会員 5社(新規1社、会費納付4社))。会費徴収を円滑 化するため、海外在住者からの会費徴収方法として PayPalの可能性を議論した。学生会員を期限付きの 会員とすることも国際文献社として対応可能ではある との情報があり議論した。

2) 女性活躍推進 WG の活動について

江口委員より説明があった。女性会員 ML の設定 準備が完了し、7 月より運用開始予定である。保育支 援ガイドラインに関し、宿泊キャンセルの場合の扱い について軽微な修正を加えた版について承認し、7 月から運用することとなった。保育支援に関するアン ケート案が完成しており、運営委員内で意見を収集 したのちに実施する。男女共同参画学協会にオブザ ーバーとして加入を検討している旨の説明があり、追 加情報を収集のうえ次回の運営委員会で結論を出 すこととなった。

JpGU-AGU2020 での大気化学セッション、DFS、 学部学生企画について

齋藤委員および中山委員から、大気化学セッショ ンの iPoster, DFS(ディスカッション・フォーラムセッショ ン)によるリモート実施と、学部生とのリモート交流企 画に関する資料提示と説明があり、議論した。7月16 日 10:45-12:15 に割り当てられた DFS では、3 件の招 待講演に加え、ショートトークと若手紹介を行うことと して提案があり、当日進行の確認や参加促進方法な どを議論した。iPoster での学生発表を DFS でも紹介 し、運営委員が積極的に発表内容に対しコメントする こととした。近年 JpGU で行ってきた学部生との昼食 会や懇親会に代わるものとして、同日夕方から、「大 気化学研究者との"オンライン"交流会」へ学部生を 招待する企画を実施することとし、少人数グループへ の分割の予備練習などを実施した。当日は DFS, 会 員集会、iPoster 閲覧議論、交流会と続くため、誘導 をスムーズに行うべく情報をまとめて周知することとし た。

4) 第25回大気化学討論会について

内田委員および齋藤委員より資料配付と説明があ り、議論した。会期(2020年11月11日~13日)とオ ンライン開催方式を決定した。講演申し込み期間等 を含む当日までのスケジューリング、名古屋大宇宙 地球環境研究所の共同利用の位置づけを踏まえた 予算使途計画、一般・学生会員に関する参加費設定 と学生優秀発表賞の評価方法、口頭発表に加えて ポスター発表もオンラインで実施するかどうか等に関 する議論を行った。第一報として7月16日の会員集 会や「大気化学研究」誌夏号等で周知を始めることと した。

5) 「大気化学研究」誌第43号について

森本委員から報告があった。大気化学討論会開 催のお知らせ、JpGU でのセッション開催報告、奨励 賞の候補者募集についても時期を見つつ掲載予定 である。

6) 奨励賞募集案内について

豊田委員より説明があった。応募資格変更(細則 の変更)について、HP へ反映されたことを踏まえ、近 日中に会員へ周知する。

7) 年間スケジュールについて

国際文献社とのやり取りの円滑化などのため、永 島委員が取りまとめている運営委員の年間スケジュ ール表の改訂が進み、ほぼ最終版となり、近日中に 共有予定である旨、説明があった。

8) Web 選挙について

永島委員が調査した 4 社のデモサイトや費用につ いて資料を基に説明があった。今後は選挙管理委員 会および選挙制度 WG が対応を引き継ぎ、運営委員 で試用・評価した結果なども踏まえつつ 1 月の次回 選挙をweb 選挙方式で実施するための準備を進める こととなった。

9) その他

特になし 以上

(日本大気化学会 運営委員会)

編集後記

今号ではトピックスとして「陸域生態系と大気化学」をテーマに、松本様、牧様ら、豊田様にトピックスをご寄稿頂きました。各 テーマともに、執筆者の方々の最新の知見に基づく見解と、「陸域生態系と大気化学」の新たな研究への展望が、非常に丁 寧に述べられており、大変興味深い内容となっております。各先生方に執筆をお願いした当時は、休校や在宅勤務、会議の キャンセルやオンライン化が始まる頃で、まさかこんなに続くとは想像もしておりませんでした。コロナ禍の中、慣れないオンラ イン対応で何の大学も戦場と化していた折、早々に原稿を頂戴し、また校閲のお時間も作って下さった皆様に感謝しておりま す。このような大変な時に、貴重な原稿をご執筆、ご寄稿頂きました、また、査読を快く引き受けて下さいました皆様に、この場 をお借りして改めてお礼申し上げます。

JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (大気化学セッション) はオンラインにて開催しました。第25回大気化学討論会もオンライ開催が決定されました。何かと不自由な毎日ではございますが、大気化学研究が stay at home のおともに、学生や若手の方の学びの場の1つになれば嬉しく思います。

最後になりましたが、本号を発行するにあたりご協力いただきました皆様に感謝の意を伝えますともに、例年より発行がおく れましたことをお詫び申し上げます。今後とも一層ご支援ご鞭撻賜りますよう何卒よろしくお願い申し上げます。(K)

大気化学研究 第43号 (2020年7月25日 発行)

編集兼発行: 日本大気化学会 編集委員: 森本真司(共同編集長),山地一代(共同編集長),竹谷文一,宮崎雄三 連絡先: 〒162-0801 東京都新宿区山吹町358-5 アカデミーセンター 日本大気化学会事務局 電話: 03-5389-6237 FAX: 03-3368-2822 電子メール: jpsac-post@bunken.co.jp ホームページ: https://jpsac.org/publications/aacr/

《本誌掲載著作物の転載を希望される方へ》 本誌に掲載された著作物を転載される場合は、上記までご連絡ください。無断での二次使用や勝手 な加工はお控えください。