

土壌—大気間の微量気体の交換に関する農業気象学的研究

米村正一郎

(農研機構 農業環境変動研究センター)

Agro-meteorological study about exchanges of atmospheric minor constituents
between soil and atmosphere

Seiichiro YONEMURA

(Institute for Agro-Environmental Sciences, NARO)

1. はじめに

このたびは、由緒ある農業気象学会学術賞を賜り、大変光栄に存じます。推薦いただいた宮田 明博士はじめ、学会賞審査委員会の先生方、北野雅治学会長、学会の皆様方、共同で研究を進めてくださった皆様方には、ここからの感謝を申し上げます。恥ずかしながら、これまで賞は一度も受賞したことがなく、半分は一生縁のないものだと思っておりましたので、大変身に余る光栄であります。また、もとの大学では農学出身でない私が受賞をいただいたことは、農業気象学会が学際的で開かれた学会であることを示しています。

2. 農業気象と私がかかわってきた様々な研究

わたくしは、少年の頃は地図を眺めるのが大好きであったとともに天文学に大変な興味を持っていました。そして、中学高校時代からは、地球環境問題や人口食料問題に興味を持っていました。東京大学では学部に進学する際に農工工学科にも見学に行ったのですが、地球環境問題関連の事にふれられればと考へ、地球物理学科(専攻)に進み大気成分を光学的に測定する研究室に修士課程までおりました。修士課程の時には岩上直幹教授から赤外分光法による大気微量成分測定に関する研究についてご指導いただきましたが、理学部らしくわからないものが面白いから飛びつけという考え方が自分に身に付きました。また、それ以来、赤外ガス分析計を使ったガス濃度測定を現在に至るまでずっと手掛けることとなります。

就職を考える際には、公務員試験一種(物理)に合格しておりましたが、以上のこれまでの動機から、環境・食料に関して国際的な研究に携わることが出来れば良いと考えました。そして、農林水産省の試験研究機関に就職しました。半年の四国農業試験場で研修をお世話(研究室長は林陽生室長で渦相関法について学びました)になり、農業環境技術研究所で現在に至るまでのキャリアを積んでいくことになりました。

農業環境技術研究所では、農業気象研究者が集まっている気象管理科で気象生態研究室(矢島正晴室長)に配属されました。最初、行ったことは、水稻を対象とした作物モ

デルによる広域収量予測でした(米村ら, 1998)。当時先輩として気象管理科に所属していた横沢正幸博士からモデルに関する事について多くを学びました。

そして、ガス交換量に関する研究に関しては様々な研究に携わってきました。土壌のみならず植物でのガス交換や野焼きによるガス放出量に関する研究にもかかわってきました。その過程で、ガス濃度測定・分析技術のみならずデータ解析手法・プログラミング手法について習熟することが出来ました。関係研究者や農業気象学会からは温度・湿度・風・光などに関する測定の基礎と実際について習熟することができました。論文作成に関しては、川島茂人室長、鶴田治雄室長をはじめとする多くの方々のご指導をいただきましたが、投稿したヨーロッパ系の雑誌の査読者の多くが研究者としての品格に富んでいたことをよく覚えています。

植物のガス交換については、ドイツマックスプランク化学研究所での在外研究員時代に植物への硫化カルボニルの取り込み量に関する研究を行いました(Yonemura *et al.*, 2005)。在外中は、様々な海外の研究者のスタンスについても触れることが出来ました。農作物残渣からどの程度のガスの放出があるかの疑問を持ち、乾燥させた作物残渣を用いて燃焼実験を行い含炭素ガスをキーとしてガス放出量特性も調べました(Yonemura *et al.*, 2002; Yonemura and Kawashima, 2007)。

また、一方で、杜 明遠博士と黄砂の発生に関する研究やチベット草地生態系の物質循環研究などについて中国との共同研究に協力したり(Du *et al.*, 2016 など)、インドネシアやマレーシアとの共同研究も行ってきました。川島茂人室長の指導のもと組換え作物(イネ)の花粉交雑の広域推定にもかかわって来たりしました(Yonemura *et al.*, 2011)。ここで用いられたモデルは風によって花粉が運ばれるかが基本となっております。

以上のように農業気象学の中で様々な関係の研究について行ってまいりましたが、受け持ったプロジェクトなどとの関係から土壌・大気間のガス交換量についての研究を主に行い、学術賞をいただきましたので、以降、内容について簡単に触れさせていただきます。

3. 土壌—大気間の微量気体の交換に関する農業気象学的研究

大気中には、二酸化炭素(CO₂)、メタン(CH₄)、一酸

化二窒素 (N_2O) 等の温室効果気体や、その大気中濃度に影響を及ぼす一酸化炭素 (CO)、水素 (H_2) 等の温室効果関連気体、大気汚染物質などの様々な微量気体が含まれています。そして、地球・地域スケールの環境に重要な影響を及ぼしています。これらの微量気体の動態には、土壌、土壌動物による生態系プロセスが深く関与しています。土壌による微量気体の吸収、放出は、大気化学、生態学、土壌学等の各分野で古くから研究が行われ、農業気象学分野でも手掛けられてきました。そして、農業活動によって吸収・放出が大きく左右されます。プロセスといっても様々なものがあり、様々なプロセスに関して研究を手掛けてきました。

ガス交換量を測定する手法に関して、これまでの研究ではその大半は手動の閉鎖型チャンバー法を用いた非連続、低頻度のフラックス測定に基づいてそれぞれの微量気体の収支(一定期間の総放出・吸収量)を推定する研究に止まっていた。一方、農業気象学分野では、植物の光合成・呼吸や土壌呼吸の研究を通じて、環境変化に伴う CO_2 交換の時間変化を観測や実験により動的に把握し、そのメカニズムを解明するという研究手法や研究成果の蓄積がありました。私の研究ではその研究手法を CO_2 以外の微量気体にも適用し、主に畑地とその比較対照としての林地を対象に、土壌面での微量気体のフラックスや土壌中の微量気体濃度の連続測定と数値モデルを用いた解析を行い、それぞれの微量気体の土壌-大気間の交換の動態を把握し、そのメカニズムを解明するとともに、様々な微量気体の交換を総合的に理解するための研究を進めてきました。以下、内容別に分けて説明いたします。

3.1 土壌によるガス吸収過程について

畑地・林地での測定や室内実験により、 CH_4 、 CO 、 H_2 の各気体の土壌への沈着速度(沈着フラックスはガス濃度に比例するため、沈着の強度を定量化する場合にはフラックスを濃度で除した沈着速度を使用(Yonemura *et al.*, 2013a))の差異や、温度、土壌水分、有機物施用が沈着速度に及ぼす影響を明らかにした(Yonemura *et al.*, 1999, 2000a)。また、土壌中でのガス拡散モデルを用いた解析により、土壌表面に付着・吸着する微量気体とは異なり、土壌微生物によって吸収される CH_4 、 CO 、 H_2 の沈着速度には同じ程度の温度依存性が認められ、その温度依存性は CO_2 のように土壌から放出される微量気体よりも小さいことを明らかにした(Yonemura *et al.*, 2000b)。これらの研究成果は、土壌による微量気体の吸収メカニズムに係わる先駆的な研究として多くの論文で引用され、後続研究の指針となりました。

3.2 土壌内 CO_2 測定について

土壌からの微量気体の放出については、畑地および森林を対象に、土壌内の CO_2 濃度の鉛直分布の連続測定と拡散方程式を基礎とするモデル化により、土壌からの CO_2 放出量を算定しました。この結果、森林土壌に比べてガス拡散係数が小さな畑地土壌では、土壌水分の増加により土壌各層での微生物呼吸が増加すると、ガス拡散係数が低下するため土壌内に CO_2 が貯留され、土壌水分の減少に伴っ

て貯留された CO_2 が土壌面から一挙に放出されるメカニズムが明らかになりました(Yonemura *et al.*, 2009, 2013b; Sakurai *et al.*, 2015)。また、この方法で算定した土壌からの CO_2 放出量をチャンバー法で測定した土壌呼吸量と比較し、チャンバー法による測定が困難な森林生態系の積雪期間の土壌呼吸量を定量化することに成功しました。

3.3 不耕起栽培と温室効果ガスの収支に関して

国内の黒ボク土壌の畑地で、4年以上にわたり、3種類の温室効果気体のフラックスの連続測定を行い、不耕起栽培による温室効果気体発生抑制効果を定量化しました(Nouchi and Yonemura, 2005; Yonemura *et al.*, 2014)。その結果、中高緯度乾燥地域とは異なり、わが国では高温多湿期間に不耕起栽培で有機物を蓄積する表層土壌の有機物分解が進むため、不耕起栽培で温室効果気体の発生を抑制するためには土壌水分を低下させる排水管理と組み合わせる必要があること、地球温暖化ポテンシャルとしては N_2O 放出も炭素収支の数分の1に相当する大きな寄与があること、不耕起栽培では N_2O の放出削減というメリットとともに、 CH_4 の吸収低下というデメリットがあることを明らかにしました。不耕起栽培は温暖化緩和策として世界各国で研究が実施されていますが、わが国のように高温多湿な時期を含む地域で、長期連続測定に基づいて温室効果気体の収支への影響を評価した例は他になく、本研究は貴重な研究成果となっています。

4. 研究に対する考え方

農業気象に関わる研究といっても、基礎的な研究から実学的な研究までさまざまであり、研究者のスタンスや所属先などの環境で研究の行い方は全く異なります。研究の質は個々人の思考法・価値観や学術的教養に大きく左右されます。そして、どんなコンセプトや技術を取り入れたかに応じて、研究の質は大きく左右されます。また、農業研究、環境研究で重要なことは、個々の基礎的な現象自体はわかっていることでも、実際の現象を説明できるのはどのメカニズムであるかがわからないことです。そのためには、いろいろな組み合わせを考えてみることで、人が考えない組み合わせをすることによって違った視点から物事を見ることができるようになります。本学術賞については、土壌化学をはじめとする本来静的な手法で行われることが多かった土壌現象に対して、農業気象的な手法で臨んでみることで様々な知見を得ることができました。

5. これからについて

今後の研究については、より集大成的にこれまでの研究をまとめていくとともに、やはり農業気象的な手法を活かしながら進めていくスタンスには変化がないと考えられます。本受賞研究との関連研究については、農研機構になってから、土壌からの N_2O 放出過程についてのモデル化に関する基礎的な実験を中心に研究を行っています。手法としては施設制御的な方法で、酸素濃度を数 ppm から大気濃度まで制御させるなど、様々な環境要素を制御しながら N_2O の放出量や関連する NO や N_2 の放出量を調べています(2017年九州大会 OS-J2)。また、農業気象的な手法を

活かして全く別な研究を行ってみたいという気持ちもあります。若手の方々と共同・協力研究や教育活動および海外を対象とした研究は非常にやりがいがあり、推進していければと考えています。

1940年台から発刊されこれまで多くの学会員の努力で発行されてきた農業気象学会誌編集委員会の編集理事を賜っておりますが、論文担当ということで投稿されてきた論文を担当編集委員の皆様方に割り振りさせていただき、最終結果をまとめるお役目を現在させてもらっています。最近、海外の有名雑誌でも品格のない査読者や編集者が多いと感じておりますが、農業気象学会誌は学会員および担当編集委員の皆様方の真摯な科学的姿勢・努力で成立しているということがよくわかりました。農業気象学会誌がISI登録された中で多分な変化がある時期で、Preparation of the Manuscriptなどを改訂してきましたが、農業気象学会誌が品格を保ちつつさらに国際雑誌として発展できるように貢献できればと考えております。

6. おわりに

本学術賞をいただいたのは、多くの皆様方のお力添えがあったからであります。推薦していただいた宮田 明博士には農業環境変動研究センターの領域長として、書類など事務的な問題でうまくいかない時も大変お世話になりました。あまりにも多くの皆様方にお世話になったのでお名前をお示しませんが、皆様方には厚く御礼を申し上げます。

引用文献

- Du M, Wang W, Yonemura S, Shen Y, Maki T, 2016: Evaluation of regional dust emission with different surface conditions at Dunhuang, China. *Journal of Arid Land Studies* **26(1)**, 1-7.
- Nouchi I, Yonemura S, 2005: N₂O, CO₂ and CH₄ fluxes from soybean and barley double cropping in relation to tillage in Japan. *Phyton* **45**, 327-338.
- Sakurai G, Yonemura S, Kishimoto-Mo AW, Murayama S, Ohtsuka T, Yokozawa M, 2015: Inversely estimating the vertical profile of the soil CO₂ production rate in a deciduous broadleaf forest using a particle filtering method. *PLOS ONE*, DOI:10.1371/journal.pone.0119001.
- Yonemura S, Kawashima S, 2007: Concentrations of carbon gases and oxygen and their emission ratios in the burning of rice seed sheaths in a wind tunnel. *Atmospheric Environment* **41**, 1407-1416.
- Yonemura S, Kawashima S, Tsuruta H, 1999: Continuous measurement of CO and H₂ deposition velocities onto an Andisol: Uptake control by soil moisture. *Tellus* **51B**, 688-700.
- Yonemura S, Kawashima S, Tsuruta H, 2000a: Carbon monoxide, hydrogen, and methane uptake by soils in a temperate arable field and a forest. *Journal of Geophysical Research* **105**, 14347-14362.
- Yonemura S, Nishimura S, Kawashima S, 2013a: Systematic formulation of equations for trace-gas uptake by soil. *Journal of Agricultural Meteorology* **69**, 277-287.
- Yonemura S, Nouchi I, Nishimura S, Sakurai G, Togami K, Yagi K, 2014: Soil respiration, N₂O, and CH₄ emissions from an Andisol under conventional-tillage and no-tillage cultivation for 4 years. *Biology and Fertility of Soils* **50**, 63-74.
- Yonemura S, Sandoval-Soto L, Kesselmeier J, Kuhn U, von Hobe M, Yakir D, Kawashima S, 2005: Uptake of carbonyl sulfide (COS) and emission of dimethyl Sulfide (DMS) by plants. *Phyton* **45**, 17-24.
- Yonemura S, Shibaie H, Iwasaki N, Kawashima S, Ushiyama T, Du M, 2011: A system model for estimating regional cross-pollination rates between GM and non-GM rice considering actual meteorological conditions and field distributions. *Journal of Agricultural Meteorology* **67(2)**, 57-64.
- Yonemura S, Sudo S, Tsuruta H, Kawashima S, 2002: Relations between light hydrocarbon, carbon monoxide, and carbon dioxide concentrations in the plume from the combustion of plant material in a furnace. *Journal of Atmospheric Chemistry* **43**, 1-19.
- 米村正一郎・矢島正晴・酒井英光・諸隈正裕, 1998: CO₂濃度および温度が変化した条件における日本の水稲収量のメッシュ気候値を用いた推定. *農業気象学会誌* **54**, 235-245.
- Yonemura S, Yokozawa M, Kawashima S, Tsuruta H, 2000b: Model analysis of the influence of gas diffusivity in soil on CO and H₂ uptake. *Tellus* **52B**, 919-933.
- Yonemura S, Yokozawa M, Sakurai G, Kishimoto-Mo AW, Lee M-S, Murayama S, Ishijima K, Shirato Y, Koizumi H, 2013b: Vertical soil-air CO₂ dynamics at AsiaFlux TKY super site: variations in summer and winter seasons in bamboo-floored cool temperate deciduous forest. *Journal of Forest Research* **18**, 49-59.
- Yonemura S, Yokozawa M, Shirato Y, Nouchi I, 2009: Soil CO₂ concentrations and their implications in a plow-managed agricultural soil. *Journal of Agricultural Meteorology* **65**, 141-149.