

# 大気—生態系間の温室効果気体交換量に関する研究

植山雅仁

(大阪府立大学生命環境科学研究科 〒599-8531 大阪府堺市中央区学園町1番1号)

Studies on greenhouse gas fluxes between terrestrial ecosystems and the atmosphere

Masahito UHEYAMA

(Graduate School of Life and Environmental Sciences, Osaka Prefecture University,  
1-1, Gakuen-cho, Naka-ku, Sakai, Osaka, 599-8531, Japan)

## 1. はじめに

このたびは、日本農業気象学会学術賞を賜り、たいへん光栄に存じます。ご推薦いただいた谷 晃先生、平野高司会長、学会賞選考委員会をはじめとする関係者の皆様に、心より御礼申し上げます。これまでご指導いただいた先生方と共同研究者の方々に育てていただいた研究成果であり、皆様に深く感謝の意を申し上げます。

## 2. 農業気象学との出会い

農業気象学との出会いは、大阪府立大学農学部大気環境学研究室において卒業研究と修士研究で文字信貴先生と鱧谷 憲先生のご指導のもと、複雑地形上の森林におけるフラックス測定の妥当性を検討することから始まりました。当時の大阪府立大学の大気環境学研究室では、文字先生の理論的研究と鱧谷先生の測定技術との両輪で研究が進められており、最新の観測技術や機器の取り扱いから、測定された物理量を数値モデルに表現して解析する手法を教えていただきました。計測したデータが数値モデルによって物理的にうまく説明できることへの驚きが、この分野の研究に強く惹かれるきっかけになりました。研究室では青野靖之博士を中心にされていた衛星リモートセンシングを用いた都市気候の研究を聞く機会があり、これが後に自らの領域を都市域へ広げる下地になったものと思います。修士研究では幸いに、森林群落内外の運動量輸送(植山ら, 2004a)と熱輸送(植山ら, 2004b)のメカニズムの一端を説明することができ、農業気象学会誌に論文を掲載することができました。この学生時代の農業気象分野への興味と論文投稿がその後の研究者を志すきっかけになったものと確信します。

## 3. アラスカでの大気—生態系間の温室効果気体フラックスの評価

修士課程修了後に民間企業で働いたのち、原菌芳信先生からアラスカ大学フェアバンクス校国際北極圏研究センター(以下、UAF/IARC)において北方生態系の温室効果気体(CO<sub>2</sub>とメタン)収支を評価するための研究機会をいただきました。UAF/IARCでの研究は、NSFやJAXAの支援によるプロジェクト研究であり、欠測なくデータを取

り、成果を出すことの重要性を原菌先生から厳しくご指導いただきました。永久凍土上のクロトウヒ林は、研究を始めた数年は年間でCO<sub>2</sub>吸収源でしたが(Ueyama *et al.*, 2006)、その後、10年にわたる計測から秋の気温の年々変動によって年間CO<sub>2</sub>収支が吸収から放出へと転じたことを明らかにできました(Ueyama *et al.*, 2014b)。このことは、生態系の温室効果気体収支を評価するうえで長期データの取得が非常に重要であることを示しています。アラスカ研究では、衛星データを用いてCO<sub>2</sub>収支を広域評価するために、岩田 徹博士と岡山大学の学生と協力して、いくつかの経験モデルを開発してクロトウヒ林のCO<sub>2</sub>収支の広域推定を行いました(Kitamoto *et al.*, 2007; Date *et al.*, 2009; Ueyama *et al.*, 2010)。一連のUAF/IARCでの研究を取りまとめて、岡山大学の塚本 修先生、山本 晋先生のご指導のもとで学位をいただきました。学位取得にあたり、岡山大学の皆さまには有益なご助言、激励をいただきましたことをこの場をお借りしてお礼申し上げます。アラスカ研究は、後任された岩田拓記博士、永野博彦博士の協力のもとで、現在もモニタリングを実施しており、17年にわたる長期観測データが取得できています。この間、森林火災からの二次遷移が与えるCO<sub>2</sub>収支の変動(Ueyama *et al.*, 2019)と大気境界層内の気温・湿度に対する影響(Ueyama *et al.*, 2020b)、メタン収支(Iwata *et al.*, 2015)、大気CO<sub>2</sub>濃度上昇に伴う植物生理応答(Ueyama *et al.*, 2016, 2018a)、年輪解析による長期の樹木成長(Ueyama *et al.*, 2014c)、水収支(Iwata *et al.*, 2012)等の様々な論文成果が得られました。原菌先生にはたびたびの葛藤の際も熱意を持ってご指導いただき、L. Hinzman 所長、岩田 徹博士には暖かい激励をいただきました。指導者の哲学についてアラスカ研究を通して学んだと思っています。

野外観測データが蓄積されるにつれて、データの相互利用による科学的理解の一般化へと関心が広がりました。アラスカ州内の13地点で実施されたツンドラや北方林の観測データを収集し、気温とLAIにより植物生育期のCO<sub>2</sub>吸収量の空間変動が説明できることを明らかにしました(Ueyama *et al.*, 2013b)。E. S. Euskirchen 博士、D. Zona 博士など近い世代の欧米研究者との共同研究で、論文執筆を通して強い刺激を受けました。その後、中井太郎博士、A. Rocha 博士の協力をいただき20地点にデータセットを拡充させ、機械学習法と衛星データを用いて、CO<sub>2</sub>とエネルギーのフラックスを広域推定しました(Ueyama *et al.*, 2013a, 2014a)。この研究は、市井和仁博士を代表とした環

境省推進費で実施し、市井博士が当時所属しておられた福島大学にたびたび訪問させていただきました。市井博士からは、モデル解析や衛星データの利用法、データの相互利用と共同研究の重要性についてご教授いただきました。現在、アラスカの観測データは AmeriFlux にすべて公開しており、データの相互利用による共同研究が進展中です (e.g., Helbig *et al.*, 2020)。研究成果だけでなく、得られた人脈を介して多くの貴重な経験をさせていただきました。

#### 4. 生態系におけるメタン交換量の計測法の開発

森林群落スケールでのメタン交換量の計測研究は科研費研究として、初めて自らが代表者となり推進した規模の大きな研究です。この研究テーマは鱧谷先生が以前から取り組んでおられ、私が大阪府立大学に着任した当時も簡易渦集積 (REA) 法と FID 分析計を組み合わせた連続測定システムを国立環境研究所の富士北麓サイトで検証されました。当時の計測システムでは FID 分析計の検出精度の問題で多くの不確実性を生むことが分かっていた (Ueyama *et al.*, 2012a)。また、京都大学の小杉緑子博士のグループとの共同研究で、レーザー分光計と REA 法を組み合わせることで、精度の向上が期待できることが分かっていました (Sakabe *et al.*, 2012)。森林群落でメタン交換量を計測した研究例がほぼなく、計測された結果が妥当であるかの検証が最大の困難な点でした。そのため、水はけのよい火山灰土上に植林が広がり、一様なメタンの吸収源とみなせる富士北麓サイトで、複数の計測法を相互比較することで計測システムを検証しました。高橋善幸博士のご協力のもとで3年間実施させていただき、平均化時間の考慮 (Ueyama *et al.*, 2009)、双曲線デッドバンドの導入 (Ueyama *et al.*, 2013c) でレーザー分光計と REA 法による計測システムの大幅な精度向上が図られ、閉鎖式自動閉閉型チャンバー法 (Ueyama *et al.*, 2015)、多層モデルの逆解析を用いたプロファイル法 (Ueyama *et al.*, 2014d) と REA 法による計測がおおむね一致することが分かりました。レーザー分光計の使用にあたっては高橋けんし博士、チャンバー法の導入にあたっては小南裕志博士、安宅未央子博士にご協力いただき、小杉博士、坂部綾香博士には計測システムについてのご助言をいただきました。森林メタン収支の評価のために研究した計測法や解析法は、谷 晃博士、望月智貴博士、和田龍一博士との BVOC, NO<sub>x</sub>, O<sub>3</sub> フラックスに関する共同研究にも結び付きました (Mochizuki *et al.*, 2013; Wada *et al.*, 2020)。

富士北麓での3年間の検証からメタン交換量が妥当に計測できることが分かったため、よりプロセスが複雑である溪流を含む森林においてもシステムを展開し、森林のメタン収支の一般化を次の科研費研究として実施しました。高木健太郎博士のご協力でご協力で天塩研究林、小南裕志博士、高梨聡博士のご協力でご協力で山城試験地での連続観測を行いました。富士北麓ではメタン吸収が観測されたいっぽう、溪流や湿地を含む森林の場合、これらがメタン発生のホットスポットとして寄与することで群落スケールでは年間のメタン放出源になることが分かりました (Ueyama *et al.*, 2018b)。既往のチャンバー計測の結果から、一般に森林はメタン吸収源と考えられていますが、この結論には再検討が必要だ

と思われます。森林メタン収支の研究では、土壌の微生物動態や培養実験等で、遠藤良輔博士から協力をいただきました。

一連の研究から森林内の湿地の重要性がしめされ、湿原のメタン交換についても理解を深めたいとなりました。湿原に関しては既に一流の研究が多くなされていましたが、一連のメタン交換量の計測研究やアラスカでの経験を生かしたアプローチを試したいと思いました。平野高司博士、矢崎友嗣博士、小南靖弘博士のご協力で北海道の美唄湿原で渦相関法によるメタン交換量の連続測定を行いました。台風通過時のメタンの大量放出、地温プロファイルの不安定性によると考えられる夜間のメタンフラックス増大など興味深いデータが多く取得できました (Ueyama *et al.*, 2020c)。European Flux Database Cluster を通じて美唄湿原での観測データを公開したことにより、FLUXNET-CH<sub>4</sub> プロジェクトに参画する機会をいただき、湿原のメタンフラックスを一般化するための研究を欧米研究者とともに現在進めております (Knox *et al.*, 2019)。

#### 5. 知見の広域化と国際共同研究、ツール開発

データの相互利用を通じた研究を進めるにあたって、統一的手法で処理されたデータセットを作る必要がありました。今日では FLUXNET から提供されるツールや EddyPro などの便利なツールが利用可能ですが、2000年代にはそれらがまだ利用しにくい状況でした。そこで、平田竜一博士にご協力いただき、GUI ベースの渦相関法計算プログラムとフラックスの欠測補完プログラムを開発し (Ueyama *et al.*, 2012b)、オープンソース・ソフトウェアとして公開しました。欠測補完プログラムは、当時、平野高司博士、三枝信子博士らで進められていた CarboEastAsia プロジェクトの解析法に採用いただき、アジア域のフラックスデータベース構築やそれを利用した研究に貢献できました (Ichii *et al.*, 2017)。当時、三枝博士の号令の下、国立環境研究所で夜を徹した Gap-Filling 合宿を諸先輩方と実施し、ツールの改善等を行ったことは非常に貴重な経験でした。ツールを利用いただいた縁から、AsiaFlux トレーニングコースとしてサラワク州熱帯泥炭研究所で講演させていただくなど貴重な経験をさせていただきました。大阪府大の研究室では汎用ツールを開発したことで統一したデータを教員—学生間で共有できる利点が生じた半面で、研究の根幹となる理論の学習機会を学生から奪った側面も否定できません。研究の効率化と基礎的教育とのバランスが必要だと思っています。近年では、タワー観測データから植物生理学的指標を推定する手法を開発し (Ueyama *et al.*, 2016, 2020a)、オープンソース・ソフトウェアとして公開しました。この手法の開発にあたっては、小林秀樹博士に群落の放射伝達に関してご教授いただきました。観測データのみならず、モデルやツールを積極的に公開することが研究領域を活性化させ、自らの経験を広げるために重要だと考えています。

#### 6. 今後の展望

複雑な地球システムの一部を解明し、例えば気候変化に対する生態系の応答を評価するためには、多点での数十年

にわたる長期モニタリングを最小限の欠測で続けて高品質なデータセットを構築することが必要です。学部の卒業研究からおおよそ20年間、心が折れそうなトラブルに見舞われつつ研究に従事しましたが、この目的に必要なデータセットはそろっていません。数年の観測に比べて数十年にわたる長期データの取得は、ともすれば漫然と計測しているように見えますが、非常に重要な仕事だと思っています。現在進行中のすべての観測を長期で実施することは不可能ですが、研究分野において重要となる観測は可能な限り維持して、地球システムにおける生態系機能の解明の一助になればと思います。

研究使命を帯びた長期モニタリングに加えて農業気象学の可能性を試行する萌芽的な研究も進めたいです。私が農業気象学にひかれた原点は、環境計測と物理・生物学的な理論とがうまく調和したエレガントな学問を感じたからです。AsiaFluxやFLUXNET等に代表される観測データの相互共有の仕組みや、人工衛星データ、気候データ、機械学習やベイズ統計などの近年に利用しやすくなった技術と微気象にかかわる理論を組み合わせることで、個別のデータ解析のみからでは抽出できていない情報がデータから抽出できると考えています。農業気象学的なアプローチを都市などの微気象観測例が少ない陸面に適応して可能性を試してみたいです。都市域のエネルギー収支(Ando and Ueyama, 2017; Ueyama and Ando, 2020)、CO<sub>2</sub>収支(Ueyama and Ando, 2016)などの評価に同様のアプローチがうまくいく実感を持っています。残された研究人生はうまくいけばこれまでの20年以上あり、私が見てきた20年の農業気象学の発展を鑑みますと、これからの20年先を見据えた研究計画を立てることは困難ですが、今後も、研究を通して学問を深め、共同研究の輪を広げて初心を忘れずに楽しみたいのです。

複雑な地球システムを解明するためには、多くの研究者が共同研究する必要があります。幸いにして、諸先輩方の努力により私たち世代には農業気象学を志す研究者は多く、熱意をもって研究されている多くの同世代の方々に助けをいただきました。しかし、次の世代の状況を見ますと、重要な観測拠点の維持や、共同研究による成果を導くに足る研究者の数が維持できなくなっているかと危惧しています。研究教育機関に身をおくものの責務として、農業気象学を志す後身の育成に取り組んでいきます。

## 7. おわりに

学生時代に、文字信貴先生、鱧谷 憲先生からご指導いただき、農業気象学研究の面白さを知り、研究者を志すきっかけを与えていただきました。原蘭芳信先生には研究者として飛躍するための機会をいただき、指導者の哲学、研究の厳しさ、そしてプロジェクト研究を進めていくための熱意を教えてくださいました。上記3名の先生方には格別の謝意を表します。市井和仁博士には、フィールド観測の視点を大陸や全球規模に広げる重要性と技法について教えてくださいました。岩田拓記博士、平野高司博士、高木健太郎博士、平田竜一博士、高橋善幸博士、谷 晃博士をはじめとする多くの方々と苦楽をともに共同研究をさせていただきました。大阪府立大学に着任して以降の多くの研究

は、熱意をもって研究に取り組んだ学生なくしては成し得なかったものです。上記の皆様には感謝いたします。フラックス研究が地球環境の理解のために必要なツールと認識され、先人の築いた基盤が開いた今日に研究者として活動できることが嬉しいです。

## 引用文献

- Ando T, Ueyama M, 2017: Surface energy exchange in a dense urban built-up area based on two-year eddy covariance measurements in Sakai, Japan. *Urban Climate* **19**, 155-169.
- Date T, Ueyama M, Harazono Y, Ota Y, Iwata T, Yamamoto S, 2009: Satellite observations of decadal scale CO<sub>2</sub> fluxes over black spruce forests in Alaska associated with climate variability. *Journal of Agricultural Meteorology* **65**, 47-60.
- Helbig M, Waddington J, Alekseychik P, Amiro B, Aurela M, Barr A, Black A, Blanken P, Carey S, Chen J, Chi J, Desai A, Dunn A, Euskirchen E, Friborg T, Flanagan L, Forbrich I, Grelle A, Harder S, Heliasz M, Humphreys E, Ikawa H, Iwata H, Isabelle P-E, Jassal R, Kurbatova J, Korkiakoski M, Kutzbach L, Ohta T, Lindroth A, Löfvenius M, Lohila A, Maximov T, Mammarella I, Marsh P, Melton J, Moore P, Nadeau D, Nicholls E, Nilsson MB, Peichl M, Petrone R, Petrov R, Prokushkin A, Quinton W, Roulet N, Reed D, Runkle B, Sonnentag O, Strachan IB, Taillardat P, Tuittila E-S, Tuovinen J-P, Turner J, Ueyama M, Varlagin A, Wilmking M, Wofsy S, Zyrianov V, 2020: Increasing contribution of peatland to boreal evapotranspiration in a warming climate. *Nature Climate Change* **10**, 555-560.
- Ichii K, Ueyama M, Kondo M, Saigusa N, Kim J, Alberto MC, Ardö J, Euskirchen ES, Kang M, Hirano T, Joiner J, Kobayashi H, Marchesini LB, Merbold L, Miyata A, Saitoh TM, Takagi K, Varlagin A, Bret-Harte MS, Kitamura K, Kosugi Y, Kotani A, Kumar K, Li S-G, Machimura T, Matsuura Y, Mizoguchi Y, Ohta T, Mukherjee S, Yanagi Y, Yasuda Y, Zhang Y, Zhao F, 2017: New data-driven estimation of terrestrial CO<sub>2</sub> fluxes in Asia using a standardized database of eddy covariance measurements, remote sensing data, and support vector regression. *Journal of Geophysical Research Biogeosciences* **122**, 767-795.
- Iwata H, Harazono Y, Ueyama M, 2012: The role of permafrost on water exchange of a black spruce forest in Interior Alaska. *Agricultural and Forest Meteorology* **161**, 107-115.
- Iwata H, Harazono Y, Ueyama M, Sakabe A, Nagano H, Kosugi Y, Takahashi K, Kim Y, 2015: Methane exchange in a poorly-drained black spruce forest over permafrost observed using the eddy covariance technique. *Agricultural and Forest Meteorology* **214-215**, 157-168.
- Kitamoto T, Ueyama M, Harazono Y, Iwata T, Yamamoto S, 2007: Applications of NOAA/AVHRR and observed fluxes to estimate 3 regional carbon fluxes over black spruce forests in Alaska. *Journal of Agricultural Meteorology* **63**, 171-183.
- Knox SH, Jackson RB, Poulter B, McNicol G, Fluet-Chouinard E, Zhang Z, Hugelius G, Bousquet P, Canadell JG, Saunio M, Papale D, Chu H, Keenan TF, Baldocchi D, Torn MS,

- Mammarella I, Trotta C, Aurela M, Bohrer G, Campbell DI, Cescatti A, Chamberlain S, Chen J, Chen W, Dengel S, Desai AR, Euskirchen E, Friborg T, Gasbarra D, Goded I, Goeckede M, Heimann M, Helbig M, Hirano T, Hollinger DY, Iwata H, Kang M, Klatt J, Krauss KW, Kutzbach L, Lohila A, Mitra B, Morin TH, Nilsson MB, Niu S, Noormets A, Oechel WC, Peichl M, Peltola O, Reba ML, Richardson AD, Runkle BR, Ryu Y, Sachs T, Schäfer KBR, Schmid HP, Shurpali N, Sonntag O, Tang ACI, Ueyama M, Vargas R, Vesala T, Ward EJ, Windham-Myers L, Wohlfahrt G, Zona D, 2019: FLUXNET-CH<sub>4</sub> synthesis activity: objectives, observations, and future directions. *Bulletin of the American Meteorological Society* **100**, 2607–2632.
- Mochizuki T, Tani A, Takahashi Y, Saigusa N, Ueyama M, 2013: Long-term measurement of terpenoid flux above a *Larix kaempferi* forest using a relaxed eddy accumulation method. *Atmospheric Environment* **83**, 53–61.
- Sakabe A, Hamotani K, Kosugi Y, Ueyama M, Takahashi K, Kanazawa A, Ito M, 2012: Measurement of methane flux over an evergreen coniferous forest canopy using a relaxed eddy accumulation system with tunable diode laser spectroscopy detection. *Theoretical and Applied Climatology* **109**, 39–49.
- Ueyama M, Ando T, 2016: Diurnal, weekly, seasonal and spatial variabilities in carbon dioxide flux in different urban landscapes in Sakai. *Atmospheric Chemistry and Physics* **16**, 14727–14740.
- Ueyama M, Ando T, 2020: Cooling effect of an urban park by enhanced heat transport efficiency. *Journal of Agricultural Meteorology* **76**, 148–153.
- Ueyama M, Hamotani K, Nishimura W, 2009: A technique for high-accuracy flux measurement using a relaxed eddy accumulation system with an appropriate averaging strategy. *Journal of Agricultural Meteorology* **65**, 315–325.
- Ueyama M, Hamotani K, Nishimura W, Takahashi Y, Saigusa N, Ide R, 2012a: Continuous measurement of methane flux over a larch forest using a relaxed eddy accumulation method. *Theoretical and Applied Climatology* **109**, 461–472.
- Ueyama M, Harazono Y, Ichii K, 2010: Satellite-based modeling of the carbon fluxes in mature black spruce forests in Alaska: a synthesis of the eddy covariance data and satellite remote sensing data. *Earth Interactions* **14**, 1–27.
- Ueyama M, Harazono Y, Okada R, Nojiri A, Ohataki E, Miyata A, 2006: Controlling factors on the inter-annual CO<sub>2</sub> budget at a sub-arctic black spruce forest in interior Alaska. *Tellus* **58B**, 491–501.
- Ueyama M, Hirata R, Mano M, Hamotani K, Harazono Y, Hirano T, Miyata A, Takagi K, Takahashi Y, 2012b: Influences of various calculation options on heat, water and carbon fluxes determined by open- and closed-path eddy covariance methods. *Tellus B* **64**, 19048.
- Ueyama M, Ichii K, Iwata H, Euskirchen ES, Zona D, Rocha AV, Harazono Y, Iwama C, Nakai T, Oechel WC, 2013a: Upscaling terrestrial carbon dioxide fluxes in Alaska with satellite remote sensing and support vector regression. *Journal of Geophysical Research Biogeosciences* **118**, 1266–1281.
- Ueyama M, Ichii K, Iwata H, Euskirchen ES, Zona D, Rocha AV, Harazono Y, Iwama C, Nakai T, Oechel WC, 2014a: Change in surface energy balance in Alaska due to fire and spring warming, based on upscaling eddy covariance measurements. *Journal of Geophysical Research Biogeosciences* **119**, 1947–1969.
- Ueyama M, Ichii K, Kobayashi H, Kumagai T, Beringer J, Merbold L, Euskirchen E, Hirano T, Marchesini LB, Baldocchi D, Saitoh T, Mizoguchi Y, Ono K, Kim J, Varlagin A, Kang M, Shimizu T, Kosugi Y, Bret-Harte M, Machimura T, Matsuura Y, Ohta T, Takagi K, Takanashi S, Yasuda Y, 2020a: Inferring CO<sub>2</sub> fertilization effect based on global monitoring land-atmosphere exchange with a theoretical model. *Environmental Research Letters* **15**, 084009.
- Ueyama M, Iwata H, Harazono Y, 2014b: Autumn warming reduces the CO<sub>2</sub> sink of a black spruce forest in interior Alaska based on a nine-year eddy covariance measurement. *Global Change Biology* **20**, 1161–1173.
- Ueyama M, Iwata H, Harazono Y, Euskirchen ES, Oechel WC, Zona D, 2013b: Growing season and spatial variations of carbon fluxes of arctic and boreal ecosystems in Alaska. *Ecological Applications* **28**, 1798–1816.
- Ueyama M, Iwata H, Nagano H, Tahara N, Iwama C, Harazono Y, 2019: Carbon dioxide balance in early-successional forests after forest fires in interior Alaska. *Agricultural and Forest Meteorology* **275**, 196–207.
- Ueyama M, Kudo S, Iwama C, Nagano H, Kobayashi H, Harazono Y, Yoshikawa K, 2014c: Does summer warming reduce black spruce productivity in interior Alaska? *Journal of Forest Research* **20**, 52–59.
- Ueyama M, Tahara N, Iwata H, Euskirchen ES, Ikawa H, Kobayashi H, Nagano H, Nakai T, Harazono Y, 2016: Optimization of a biochemical model with eddy covariance measurements in black spruce forests of Alaska for estimating CO<sub>2</sub> fertilization effects. *Agricultural and Forest Meteorology* **222**, 98–111.
- Ueyama M, Tahara N, Nagano H, Makita N, Iwata H, Harazono Y, 2018a: Leaf- and ecosystem-scale photosynthetic parameters for the overstory and understory of boreal forests in interior Alaska, *Journal of Agricultural Meteorology* **74**, 79–86.
- Ueyama M, Takai Y, Takahashi Y, Ide R, Hamotani K, Kosugi Y, Takahashi K, Saigusa N, 2013c: High-precision measurements of the methane flux over a larch forest based on a hyperbolic relaxed eddy accumulation method using a laser spectrometer. *Agricultural and Forest Meteorology* **178–179**, 183–193.
- Ueyama M, Takanashi S, Takahashi Y, 2014d: Inferring methane fluxes at a larch forest using Lagrangian, Eulerian, and hybrid inverse models. *Journal of Geophysical Research Biogeosciences* **119**, 2018–2031.
- Ueyama M, Takeuchi R, Takahashi Y, Ide R, Ataka M, Kosugi Y, Takahashi K, Saigusa N, 2015: Methane uptake in a temperate forest soil using continuous closed-chamber measurements.

- Agricultural and Forest Meteorology* **213**, 1-9.
- 植山雅仁・土佐竜一・道家 樹・鱧谷 憲・文字信貴, 2004a: 複雑地形上の森林における風速分布の特徴. *農業気象* **60**, 25-32.
- Ueyama M, Yamamori T, Iwata H, Harazono Y, 2020b: Cooling and moistening of the planetary boundary layer in interior Alaska due to a postfire change in surface energy exchange. *Journal of Geophysical Research Atmosphere*. doi: 10.1029/2020JD032968
- 植山雅仁・矢野貴子・鱧谷 憲・文字信貴, 2004b: 森林上から林内にかけての顕熱輸送メカニズム. *農業気象* **60**, 133-140.
- Ueyama M, Yazaki T, Hirano T, Futakuchi Y, Okamura M, 2020c: Environmental controls on methane fluxes in a cool temperate bog. *Agricultural and Forest Meteorology* **281**, 107852.
- Ueyama M, Yoshikawa K, Takagi K, 2018b: A cool-temperate young larch plantation as a net methane source - a 4-year continuous hyperbolic relaxed eddy accumulation and chamber measurements, *Atmospheric Environment* **184**, 110-120.
- Wada R, Ueyama M, Tani A, Mochizuki T, Miyazaki Y, Kawamura K, Takahashi Y, Saigusa N, Takanashi S, Miyama T, Nakano T, Yonemura S, Matsumi Y, Katata G, 2020: Observation of vertical profiles of NO<sub>x</sub>, O<sub>3</sub>, and VOCs to estimate their sources and sinks by inverse modelling in a Japanese larch forest. *Journal of Agricultural Meteorology* **76**, 1-10.