

# 日本農業気象学会 2014 年大会 オーガナイズドセッション SA: 「陸域メタンフラックスの評価のための連携研究に 向けて—現状の課題共有の先にある飛躍」

植山雅仁\*・平田竜一\*\*・齊藤 誠\*\*

[ \*大阪府立大学  
\*\*国立環境研究所 ]

Report on the organized session at the annual conference 2014 of the Society of Agricultural Meteorology of Japan entitled as “Toward synthesizing studies for terrestrial methane fluxes: sharing current issues and expanding future sciences”

\*Masahito UHEYAMA, \*\* Ryuichi HIRATA, and \*\* Makoto SAITO

[ \*Osaka Prefecture University  
\*\*National Institute of Environmental Studies ]

## 1. 概要

日時：2014年3月17日 12:30-14:45

場所：北海道大学 学術交流会館 A 会場

オーガナイザー：JapanFlux [平野高司（北海道大学），植山雅仁（大阪府立大学），齊藤誠，平田竜一（国立環境研究所）]

講演：

- SA-1 プロセスモデルを用いたメタン収支の広域評価（伊藤昭彦）
- SA-2 チャンバー法による地表面メタンフラックス観測についてのもろもろの話（伊藤雅之）
- SA-3 我が国の森林土壌における年間メタン吸収量の推定（森下智陽，橋本昌司，石塚成宏，阪田匡司，三浦 覚，金子真司，高橋正通）
- SA-4 渦相関法および多点自動開閉チャンバー法を用いたチベット高山湿地生態系における CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub> 収支の評価（梁 乃申，寺本宗正，賀 金生，于 凌飛，杜 明遠）
- SA-5 微気象学的手法を中心とした生態系スケール

<http://www.agrmet.jp/sk/2014/D-3.pdf>

2014年4月25日 掲載

Copyright 2014, The Society of Agricultural Meteorology of Japan

でのメタン交換の解明（岩田拓記，原菌芳信，小杉緑子，植山雅仁，坂部綾香，永野博彦，奥見智佳，間野正美，小野圭介，高橋けんし，宮田 明）

- SA-6 全球メタンフラックス推定—温室効果ガス観測技術衛星 GOSAT から見えてきたもの—（Heon-Sook KIM，齊藤 誠，佐伯田鶴，Dmitry BELIKOV，伊藤昭彦，森野 勇，内野 修，吉田幸生，横田達也，Shamil MAKSYUTOV）

## 2. 趣 旨

メタンは二酸化炭素に次ぐ強力な温室効果気体である。陸域生態系はメタンの放出・吸収源として作用しているが，その動態については，計測技術の問題もあり，多くの不確実性が残されている。日本農業気象学会，AsiaFlux，JapanFlux 等の国内研究者は，これまでメタンフラックスの計測技術の開発・高度化や，それらを使った継続的な観測を実施してきた（e.g., Harazono *et al.*, 1995, 2006; Miyata *et al.*, 2000; Nagano *et al.*, 2012; Shimizu *et al.*, 2013）。近年になって高性能な分析計が利用可能になったことから（Baer *et al.*, 2002），亜寒帯から東南アジアまで様々な生態系においてメタンフラックスの観測が開始されてい

る (Detto *et al.*, 2011; Friborg *et al.*, 2003; Hendriks *et al.*, 2008; Nicolini *et al.*, 2013; Olson *et al.*, 2013; Querino *et al.*, 2011; Rinne *et al.*, 2007; Smeets *et al.*, 2009; Sturtevant and Oechel, 2013; Wang *et al.*, 2013; Zona *et al.*, 2009)。また、人工衛星を用いた全球のメタン濃度観測 (*e.g.*, Clerbaux *et al.*, 2009; Frankenberg *et al.*, 2005; Yokota *et al.*, 2009) や、近年のプロセスモデルの高度化 (Inatomi *et al.*, 2010; Ito and Inatomi, 2012; Tian *et al.*, 2011; Zhuang *et al.*, 2004) により、地球規模でのメタン収支の全容が明らかになりつつある。その一方で、いずれの手法においても、多くの問題や不確実性を有しており (Kroon *et al.*, 2010; Melton *et al.*, 2013; Ueyama *et al.*, 2013; Cressot *et al.*, 2014)、メタン収支評価の研究は発展途上段階にある。そこで、2014 年度日本農業気象学会全国大会において、JapanFlux 主催により「陸域メタンフラックスの評価のための連携研究に向けて—現状の課題共有の先にある飛躍」と題したオーガナイズドセッションを企画した。本セッションの目的は、全球から生態系スケールまで様々なスケールのメタンフラックスの評価手法の問題点を共有し、課題解決のための議論を深めることで、分野間の連携研究の発展を模索することである。6 題の講演を通して、現時点での研究の問題点について活発な議論があった。

### 3. 発表内容

伊藤昭彦 (国立環境研究所) は、全球スケールでのメタンの動態研究のレビューやプロセスモデルによる全球評価研究 (Ito and Inatomi, 2012; Kirschke *et al.*, 2013) について報告した。今日の大気メタン濃度の上昇量は、これまでのどの IPCC 報告書で予測された上昇量と比べても少なく、全球スケールでのメタン濃度やフラックスの予測には依然として多くの不確実性が含まれていることが報告された。生態系モデルを用いたメタンフラックスの評価にも多くの不確実性が含まれており、特に、使用するサブモデルや湿地の分布によって全球で百数十 Tg の不確実性となること (Melton *et al.*, 2013; Wania *et al.*, 2013) が報告された。観測データによるモデルの検証や感度解析、また広域化された観測データとの比較などを通して、モデルの高度化が期待されることが発表された。観測研究との連携に加えて、水文気象分野との連携、衛星データの利用、同位体計測、インベントリーの作成がモデルの高度化に有益となると述べられた。

伊藤雅之 (京都大学) は、地表面の不均一性による流域スケールでのメタンフラックス評価の課題を報告した。日本の森林は、山地流域に分布してお

り、また温暖湿潤な夏季を伴うために、土壌におけるメタンフラックスが時空間的に非常に不均一である (Itoh *et al.*, 2007, 2009) ことが報告された。温暖な夏季においては、流域内に存在する数パーセントの湿地からのメタン放出が、そのほかの不飽和土壌の吸収に比べて 100~1000 倍以上大きくなるため、流域スケールでは、メタンの放出になりうるということが報告された。このことは、チャンバー法等のプロットスケールでの観測で、流域スケールのフラックスを評価する場合の大きな障壁となりうる。また、非泥炭地の熱帯林では、大きなメタンの放出は観測されなかったこと (Itoh *et al.*, 2012)、水田からのメタン放出量も水田によって大きく異なる (Itoh *et al.*, 2011) ことが報告された。これらの観測データが示唆することは、植生タイプによるメタン放出量の単純な見積もりには多くの不確実性が伴うことである。メタン生成についてのプロセスを解明するためには、フラックスの観測だけではなく、土壌の酸化還元電位、酸化マンガン、鉄などの濃度を同時に計測しておく必要があることが述べられた。

森下智陽 (森林総合研究所) は、不飽和森林土壌におけるメタン吸収量に関する統合解析の結果を報告した。日本の森林土壌は、ヨーロッパの土壌と比べてメタン吸収量が多いこと、また、その理由として日本の森林土壌が火山灰由来の黒色土であることが報告された (Ishizuka *et al.*, 2009; Morishita *et al.*, 2007)。国内の森林土壌の吸収量は容積重 (bulk density) によって説明できることが報告された。今後、メタンの吸収量を計測する場合、このような環境要因も同時に計測しておくことで他サイトとの比較が容易になる可能性がある。観測データに基づくモデルから、大気メタン濃度の上昇により我が国の森林土壌のメタン吸収量が年々増加している可能性があること (Hashimoto *et al.*, 2011) が報告された。森林毎でメタン吸収量が大きく異なるため観測サイト数を増やす必要があること、間伐・皆伐の影響を評価すること、窒素降下物の増加による影響を評価することなどが課題として残されていると報告された。

梁乃申 (国立環境研究所) は、チベット高原湿地生態系で実施している多点自動開閉チャンバーシステムを用いた連続観測、渦相関法による連続観測、固定チャンバーを用いた空気サンプリングとガスクロマトグラフィー分析による定期観測の 3 つの手法を用いたメタンフラックス観測の結果について報告した。2 つのチャンバー法と渦相関法によるメタンフラックスは概ね一致したものの、渦相関法で得られた日変化の方が連続チャンバーシステムで得られた日変化よりも振幅が大きいこと (Yu *et al.*, 2013)

が示された。また、チャンパー内の植生影響の評価などプロセス研究にチャンパーが利用できることを報告した。

岩田拓記(京都大学)は、国内外の研究者による微気象学的手法を用いたメタンフラックス計測のレビューと、発表者らが主導しているアラスカの永久凍土上の森林における研究例を紹介した。森林 3 サイト(Sakabe *et al.*, 2012; Ueyama *et al.*, 2006, 2012, 2013), 水田 1 サイト(Iwata *et al.*, 2014)において、微気象学的手法により継続的にメタンフラックスが計測されていることが報告された。永久凍土上の森林では、風向によってメタンフラックスが異なること、融解深が深まるにしたがってメタン放出量が大きくなることが報告された。チャンパー法による観測からメタンの吸収・放出を示すプロットが森林内に混在しており、森林スケールでのメタン収支の評価に微気象学的手法が有用であることが報告された。一方で、微気象学的手法においてもバブリング等によって突発的に発生する大きな放出が観測されることがあり、突発的な放出の定量評価に関して課題が残されていることが報告された。また、北方地域の湿地であっても観測サイトによってメタンフラックスが大きく異なる(Long *et al.*, 2010; Nadeau *et al.*, 2013; Rinne *et al.*, 2007; Sachs *et al.*, 2008)ため、湿地における更なる観測や湿地の区分について詳細な検討を行う必要があることが報告された。

齊藤誠(国立環境研究所)は、全球のメタン収支や空間分布が GOSAT 衛星によりどの程度、高度化されたのかについて発表があった。GOSAT 衛星によるメタン濃度の観測点が増えたことにより、地上観測点が少ない東南アジアや南米、南亜熱帯地域のメタン放出が顕著である可能性が示された。全球スケールでの評価の検証・高度化のため、地上観測データが必要であることが述べられた。特に、地上観測データの代表性の情報、フラックスデータに加えて濃度の絶対値(1ppb 程度の精度)の観測、地上観測—航空機観測—衛星観測を統合する解析、地域スケールでのメタン交換を支配するプロセスの解明が有益となることが述べられた。

6名の講演の後に、コメンテーターとして波多野隆介(北海道大学)、宮田明(農業環境技術研究所)から総括をいただいた。メタン交換に係わるプロセスの理解のためには、フラックスの計測のみならず、それらに関する環境要因を同時に計測しておくことが重要であることが述べられた。特に、メタン生成を支配する要因である有機物量、 $O_2$ 、 $NO_3^-$ 、 $MnO_2$ 、 $Fe_2$ 、 $O_3$ 、 $SO_4^{2-}$ 濃度は、サイト毎のメタン生成量の違いを説明できる重要な要素となりうる。ま

た、サイト毎での解析においても、生物地球科学循環を考慮したモデルを用いることで、メタン生成・酸化に係わる理解が深まる可能性がある(Fumoto *et al.*, 2008, 2010)ことが述べられた。

#### 4. おわりに

本オーガナイズドセッションを通して、現時点におけるいくつかの課題が明らかになったと思われる。まず、メタン交換量については、吸収源と放出源が様々な空間・時間スケールによって混在していることがあげられる。全球スケールにおいては湿地の分布、生態系スケールではフットプリント内におけるホットスポットの分布、チャンパースケールでは吸収・放出源の土壤中の鉛直分布や空間分布、またその時間変化をどのように定量化していくかがメタン交換量評価の高度化に向けての課題である。時間・空間スケールによって有効なツールが異なるため、いくつかの研究グループの連携が必要である。また、メタンの生成と酸化には、いくつものプロセスが関わっていることから、主要な環境要因を同時に計測することが重要であり、フラックス観測や化学分析を得意とする研究グループの連携が重要である。

#### 引用文献

- Baer, D. S., Paul, J. B., Gupta, M., and O'Keefe, A., 2002: Sensitive absorption measurements in the near-infrared region using off-axis integrated-cavity-output spectroscopy. *Appl. Phys. B*, **75**, 261–265.
- Clerbaux, C., Boynard, A., Clarisse, L., George, M., Hadji-Lazaro, J., Herbin, H., Hurtmans, D., Pommier, M., Razavi, A., Turquety, S., Wespes, C., and Coheur, P. -F., 2009: Monitoring of atmospheric composition using the thermal infrared IASI/MetOp sounder. *Atmos. Chem. Phys.*, **9**, 6041–6054.
- Cressot, C., Chevallier, F., Bousquet, P., Crevoisier, C., Dlugokencky, E. J., Fortems-Cheiney, A., Frankenberg, C., Parker, R., Pison, I., Scheepmaker, R. A., Montzka, S. A., Krummel, P. B., Steele, L. P., and Langenfelds, R. L., 2014: On the consistency between global and regional methane emissions inferred from SCIAMACHY, TANSO-FTS, IASI and surface measurements. *Atmos. Chem. Phys.*, **14**, 577–592.
- Detto, M., Verfaillie, J., Anderson, F., Xu, L., and Baldocchi, D., 2011: Comparing laser-based open- and closed-path gas analyzers to measure methane fluxes using the eddy covariance method. *Agric. For. Meteorol.*, **151**, 1312–1324.
- Frankenberg, C., Meirink, J. F., van Weele, M., Platt, U.,

- and Wagner, T., 2005: Assessing methane emissions from global space-borne observations. *Science*, **308**, 1010–1014.
- Friborg, T., Soegaard, H., Christensen, T. R., and Lloyd, C. R., 2003: Siberian wetlands: Where a sink is a source. *Geophys. Res. Lett.*, **30**, doi:10.1029/2003GL017797.
- Fumoto, T., Kobayashi, K., Li, C., Yagi, K., and Hasegawa, T., 2008: Revising a process-based biogeochemistry model (DNDC) to simulate methane emission from rice paddy fields under various residue management and fertilizer regimes. *Global Change Biol.*, **14**, 382–402.
- Fumoto, T., Yanagihara, T., Saito, T., and Yagi, K., 2010: Assessment of the methane mitigation potentials of alternative water regimes in rice fields using a process-based biogeochemistry model. *Global Change Biol.*, **16**, 1847–1859.
- Harazono, Y., Miyata, A., Yoshimoto, M., Mikasa, H., and Oku, T., 1995: Development of a movable NDIR-methane analyzer and its application for micrometeorological measurements of methane flux over grasslands. *J. Agric. Meteorol.*, **51**, 27–35.
- Harazono, Y., Mano, M., Miyata, A., Yoshimoto, M., Zulueta, R. C., Vourlitis, G. L., Kwon, H., and Oechel, W. C., 2006: Temporal and spatial differences of methane flux at arctic tundra in Alaska. *Mem. Natl. Inst. Polar Res., Spec. Issue*, **59**, 79–95.
- Hashimoto, S., Morishita, T., Sakata, T., and Ishizuka, S., 2011: Increasing trends of soil greenhouse gas fluxes in Japanese forests from 1908 to 2009. *Sci. Rep.*, **1**, 116:doi:10.1038/srep00116.
- Hendriks, D. M., Dolman, A. J., van der Molen, K. M., and van Huissteden, J., 2008: A compact and stable eddy covariance set-up for methane measurements using off-axis integrated cavity output spectroscopy. *Atmos. Chem. Phys.*, **8**, 431–443.
- Inatomi, M., Ito, A., Ishijima, K., and Murayama, S., 2010: Greenhouse gas budget of a cool-temperate deciduous broad-leaved forest in Japan estimated using a process-based model. *Ecosystems*, **13**, 472–483.
- Ishizuka, S., Sakata, T., Sawata, S., Ikeda, S., Sakai, H., Takenaka, C., Tamai, N., Onodera, S., Shimizu, T., Kan-na, K., Tanaka, N., and Takahashi, M., 2009: Methane uptake rates in Japanese forest soils depend on the oxidation ability of topsoil, with a new estimate for global methane uptake in temperate forest. *Biogeochem.*, **92**, 281–295.
- Ito, A., and Inatomi, M., 2012: Use of a process-based model for assessing the methane budgets of global terrestrial ecosystems and evaluation of uncertainty. *Biogeosciences*, **9**, 759–773.
- Itoh, M., Kosugi, Y., Takanashi, S., Kanemitsu, S., Osaka, K., Hayashi, Y., Tani, M., and Nik, A. R., 2012: Effects of soil water status on the spatial variation of carbon dioxide, methane and nitrous oxide fluxes in tropical rain-forest soils in Peninsular Malaysia. *J. Tropical Ecol.*, **28**, 557–570.
- Itoh, M., Ohte, N., and Koba, K., 2009: Methane flux characteristics in forest soils under an East Asian monsoon climate. *Soil Biol. Biochem.*, **41**, 388–395.
- Itoh, M., Ohte, N., Koba, K., Katsuyama, M., Hayamizu, K., and Tani, M., 2007: Hydrologic effects on methane dynamics in riparian wetlands in temperate forest catchment. *J. Geophys. Res.*, **112**, doi: 10.1029/2006JG000240.
- Itoh, M., Sudo, S., Mori, S., Saito, H., Yoshida, T., Shiratori, Y., Suga, S., Yoshikawa, N., Suzue, Y., Mizukami, H., Mochida, T., and Yagi, K., 2011: Mitigation of methane emissions from paddy fields by prolonging midseason drainage. *Agric. Ecosys. Environ.*, **141**, 359–372.
- Iwata, H., Kosugi, Y., Ono, K., Mano, M., Sakabe, A., Miyata, A., and Takahashi, K., 2014: Cross-validation of open-path and closed-path eddy-covariance techniques for observing methane fluxes. *Boundary-Layer Meteorol.*, **151**, 95–118.
- Kirschke, S., Bousquet, P., Ciais, P., Saunois, M., Canadell, J. G., Dlugokencky, E. J., Bergamaschi, P., Bergmann, D., Blake, D. R., Bruhwiler, L., Cameron-Smith, P., Castaldi, S., Chevallier, F., Feng, L., Fraser, A., Heimann, M., Hodson, E. L., Houweling, S., Josse, B., Fraser, P. J., Krummel, P. B., Lamarque, J. -F., Langenfelds, R. L., Le Quééré, C., Naik, V., O'Doherty, S., Palmer, P. I., Pison, I., Plummer, D., Poulter, B., Prinn, R. G., Rigby, M., Ringeval, B., Santini, M., Schmidt, M., Shindell, D. T., Simpson, I. J., Spahni, R., Steele, L. P., Stode, S. A., Sude, K., Szopa, S., van der Werf, G. R., Voulgarakis, A., van Weele, M., Weiss, R. F., Williams, J. E., and Zeng, G., 2013: Three decades of global methane sources and sinks. *Nature Geoscience*, **22**, 813–823.
- Kroon, P. S., Hensen, A., Jonker, H. J. J., Ouwersloot, H. G., Vermeulen, A. T., and Bosveld, F. C., 2010: Uncertainties in eddy covariance flux measurements assessed from CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O observations. *Agric. For. Meteorol.*, **150**, 806–816.
- Long, K. D., Lawrence, B., Flanagan, and Cai, T., 2010: Diurnal and seasonal variation in methane emissions in

- a northern Canadian peatland measured by eddy covariance. *Global Biogeochem. Cycles*, **16**, 2420–2435.
- Melton, J. R., Wania, R., Hodson, E. L., Poulter, B., Ringeval, B., Spahni, R., Bohn, T., Avis, C. A., Beerling, D. J., Chen, G., Eliseev, A. V., Denisov, S. N., Hopcroft, P. O., Lettenmaier, D. P., Riley, W. J., Singarayer, J. S., Subim, Z. M., Tian, H., Zürcher, S., Brovkin, V., van Bodegom, P. M., Kleinen, T., Yu, Z. C., and Kaplan, J. O., 2013: Present state of global wetland extent and wetland methane modeling: conclusions from a model inter-comparison project (WETCHIMP). *Biogeosciences*, **10**, 753–788.
- Miyata, A., Leuning, R., Denmead, O. T., Kim, J., and Harazono, Y., 2000: Micrometeorological measurement of methane and CO<sub>2</sub> fluxes over an intermittently drained paddy field. *Agric. For. Meteorol.*, **102**, 287–303.
- Morishita, T., Sakata, T., Takahashi, M., Ishizuka, S., Mizoguchi, T., Inagaki, Y., Terazawa, K., Sawata, S., Igarashi, M., Yasuda, H., Koyama, Y., Suzuki, Y., Toyota, N., Muro, M., Kinjo, M., Yamamoto, H., Ashiya, D., Kanazawa, Y., Hashimoto, T., and Umata, H., 2007: Methane uptake and nitrous oxide emission in Japanese forest soils and their relationship to soil and vegetation types. *Soil Science and Plant Nutrition*, **53**, 678–691.
- Nadeau, D. F., Rousseau, A. N., Coursolle, C., Margolis, H. A., and Parlange, M. B., 2013: Summer methane fluxes from a boreal bog in northern Quebec, Canada, using eddy covariance measurements. *Atmos. Environ.*, **81**, 464–474.
- Nagano, H., Sugihara, S., Matsushima, M., Okitsu, S., Prikhodko, V. E., Manakhova, E., Zdanovich, G. B., Manakhov, D. V., Ivanov, I. V., Funakawa, S., Kawahigashi, M., and Inubushi, K., 2012: Carbon and nitrogen contents and greenhouse gas fluxes of the Eurasian steppe soils with different land-use histories located in the Arkaim museum reserve of south Ural, Russia. *Soil Science and Plant Nutrition*, **58**, 238–244.
- Nicolini, G., Castaldi, S., Fratini, G., and Valentini, R., 2013: A literature overview of micrometeorological CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O flux measurements in terrestrial ecosystems. *Atmos. Environ.*, **81**, 311–319.
- Olson, D. M., Griffis, T. J., Noormets, A., Kolka, R., and Chen, J., 2013: Interannual, seasonal, and retrospective analysis of the methane and carbon dioxide budgets of a temperate peatland. *J. Geophys. Res.*, **118**, 1–13.
- Querino, C. A. S., Smeets, C. J. P. P., Vigano, I., Holzinger, R., Moura, V., Gatti, L. V., Martinewski, A., Manzi, A. O., de Araújo, A. C., and Röckmann, T., 2011: Methane flux, vertical gradient and mixing ratio measurements in a tropical forest. *Atmos. Chem. Phys.*, **11**, 7943–7953.
- Rinne, J., Riutta, T., Pihlatie, M., Aurela, M., Maapanala, S., Tuovinen, J. –P., and Tuittila, E. –S., 2007: Annual cycle of methane emission from a boreal fen measured by the eddy covariance technique. *Tellus*, **59B**, 449–457.
- Sachs, T., Giebels, M., Wille, C., Kutzbach, L., and Boike, J., 2008: Methane emission from Siberian wet polygonal tundra on multiple spatial scales: vertical flux measurements by closed chambers and eddy covariance, Samoylov Island, Lena river delta. *Proc. Nine International Conference on Permafrost*, 1549–1554.
- Sakabe, A., Hamotani, K., Kosugi, Y., Ueyama, M., Takahashi, K., Kanazawa, A., and Itoh, M., 2012: Measurement of methane flux over an evergreen coniferous forest canopy using a relaxed eddy accumulation system with tunable diode laser spectroscopy detection. *Theor. Appl. Climatol.*, **109**, 39–49.
- Shimizu, M., Hatano, R., Arita, T., Kouda, Y., Mori, A., Matsuura, S., Niimi, M., Jin, T., Desyatkin, A. R., Kawamura, O., Hojito, M., and Miyata, A., 2013: The effect of fertilizer and manure application on CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from managed grasslands in Japan. *Soil Science and Plant Nutrition*, **59**, 69–86.
- Smeets, C. J. P. P., Holzinger, R., Vigano, I., Goldstein, A. H., and Röckmann, T., 2009: Eddy covariance methane measurements at a Ponderosa pine plantation in California. *Atmos. Chem. Phys.*, **9**, 8365–8375.
- Sturtevant, C., and Oechel, W. C., 2013: Spatial variation in landscape-level CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> fluxes from arctic coastal tundra: influence from vegetation, wetness, and the thaw lake cycle. *Global Change Biol.*, **19**, 2853–2866.
- Tian, H., Xu, X., Lu, C., Liu, M., Ren, W., Chen, G., Melillo, J., and Liu, J., 2011: Net exchanges of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and N<sub>2</sub>O between China’s terrestrial ecosystems and the atmosphere and their contributions to global climate warming. *J. Geophys. Res.*, **116**, G02011, doi:10.1029/2010JG001393, 2011.
- Ueyama, M., Hamotani, K., Nishimura, W., Takahashi, Y., Saigusa, N., and Ide, R., 2012: Continuous measurement of methane flux over a larch forest using a relaxed eddy accumulation method. *Theor. Appl. Climatol.*, **109**, 461–472.
- Ueyama, M., Harazono, Y., Okada, R., Nojiri, A., Ohtaki, E., and Miyata, A., 2006: Micrometeorological

- measurements of methane flux at a boreal forest in central Alaska. *Mem. Natl. Inst. Polar Res., Spec. Issue*, **59**, 156–167.
- Ueyama, M., Takai, Y., Takahashi, Y., Ide, R., Hamotani, K., Kosugi, Y., Takahashi, K., and Saigusa, N., 2013: High-precision measurements of the methane flux over a larch forest based on a hyperbolic relaxed eddy accumulation method using a laser spectrometer. *Agric. For. Meteorol.*, **178–179**, 183–193.
- Wang, J. M., Murphy, J. G., Geddes, J. A., Winsborough, C. L., Basiliko, N., and Thomas, S. C., 2013: Methane fluxes measured by eddy covariance and static chamber techniques at a temperate forest in central Ontario, Canada. *Biogeosciences*, **10**, 4371–4382.
- Wania, R., Melton, J. R., Hodson, E. L., Poulter, B., Ringeval, B., Spahni, R., Bohn, T., Avis, C. A., Chen, G., Eliseev, A. V., Hopcroft, P. O., Riley, W. J., Subim, Z. M., Tian, H., van Bodegom, P. M., Kleinen, T., Yu, Z. C., Singarayer, J. S., Zürcher, S., Lettenmaier, D. P., Beerling, D. J., Denisov, S. N., Papa, F., and Kaplan, J. O., 2013: Present state of global wetland extent and wetland methane modeling: methodology of a model inter-comparison project (WETCHIMP). *Geosci. Model Dev.*, **6**, 617–641.
- Yokota, T., Yoshida, Y., Eguchi, N., Ota, Y., Tanaka, T., Watanabe, H., and Maksyutov, S., 2009: Global concentrations of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> retrieved from GOSAT: First preliminary results. *Sola*, **5**, 160–163.
- Yu, L., Wang, H., Wang, G., Song, W., Huang, Y., Li, S. –G., Liang, N., Tang, Y., and He, J. –S., 2013: A comparison of methane emission measurements using eddy covariance and manual and automated chamber-based techniques in Tibetan Plateau alpine wetland. *Environ. Pollution*, **181**, 81–90.
- Zhuang, Q., Melillo, J. M., Kicklighter, D. W., Prinn, R. G., McGuire, A. D., Steudler, P. A., Felzer, B. S., and Hu, S., 2004: Methane fluxes between terrestrial ecosystems and the atmosphere at northern high latitudes during the past century: A retrospective analysis with a process-based biogeochemistry model. *Global Biogeochem. Cycles*, **18**, doi: 10.1029/2004GB002239.
- Zona, D., Oechel, W. C., Kochendorfer, J., Paw U, K. T., Salyuk, A. N., Olivas, P. C., Oberbauer, S. F., and Lipson, D. A., 2009: Methane fluxes during the initiation of a large-scale water table manipulation experiment in the Alaskan Arctic tundra. *Global Biogeochem., Cycles*, **23**, GB2013, doi:10.1029/2009GB003487.