

平成 28 年 5 月 24 日現在

機関番号：24403

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26550100

研究課題名(和文) 森林火災煙の移流と凍土層の融解が北方林の栄養塩循環やオゾン放出に及ぼす影響の解明

研究課題名(英文) Effects of transported wildfire smoke and permafrost melting on both nutrient cycle and ozone emission by northern boreal forest

研究代表者

原 園 芳信 (Harazono, Yoshinobu)

大阪府立大学・生命環境科学研究科(系)・客員研究員

研究者番号：90137240

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：森林火災由来のエアロゾル沈着は北方林での栄養塩循環に重要とされている。地球温暖化に伴う火災の増加は北方林の炭素収支や生育に影響していると仮説を建て、観測的データと既往モデルの改良により明らかにしようとした。

Alaska大学内クロトウヒ保護林の観測タワーに多段式フィルター装置を設置し、火災煙の移流に伴う乾性沈着量を測定した。2014年度に集中観測し、2015年度は収集したフィルタの分析と火災煙の通過コースなどの解析を行った。微量栄養塩の沈着量は火災煙が観測サイトに達する流跡線の場合に大きくなること、濃度が低いため2週間に一度しか沈着量を評価できず、定常的な評価は困難であることがわかった。

研究成果の概要(英文)：Aerosol deposition caused by wildfire has important roles on nutrient cycle at boreal forest. Increment of wildfire in relation to global warming might enhance the growth and C-budget at boreal forests. We revealed the wildfire effect by dry-deposition observation and model improves. Observations were held at flux tower at UAF's campus with multi-layer filtering system. Filter sampling was conducted in 2014 season and the chemical analyses and trajectory analysis by satellite data were examined in 2015. Deposition of trace element increased when wildfire-smoke reached the site, and it is too low concentration of aerosol to reveal regular depositions regularly.

研究分野：微気象

キーワード：北方林 森林火災 火災煙の移流 微量栄養塩 永久凍土 クロトウヒ林

1. 研究開始当初の背景

大気中の温室効果ガス濃度の上昇抑制が地球温暖化防止に不可欠とされ (IPCC, 2013), CO₂ 排出量規制が強化されつつある。陸域生態系による CO₂ 固定量の正確な見積もりは CO₂ 排出量規制に影響する事から、多くの生態系の CO₂ 収支が観測されてきた (例えば, FLUXNET)。広い分布域を持つ北方林生態系は CO₂ 固定が大きいとされるが、気候変動の影響を非常に受けやすく (Hinzman et al., 2003), 温暖化に伴う CO₂ 収支や水収支の変化を明らかにすることが求められている。クロトウヒ林はアラスカ内陸部の約半分を占める主要な森林生態系であり (Kasischek et al., 2000) 大部分は凍土上に分布する。土壌圏が狭く栄養塩供給は生物的窒素固定と大気沈着が主であり、北方林の炭素収支は栄養塩の可給性が制約となっている (Ito, 2011)。温暖化に伴う森林火災の増加が懸念されており (Rogers et al., 2013), 北方林の炭素収支解明に微量栄養塩の動態解明は緊急の課題となっている。

従来アラスカでは湿性沈着のみが実測されており、乾性沈着は沈着モデルからの推定のみであり (例えば, Jones et al., 2005), 森林に対する沈着モデルの適用には大きな不確実性が残っている (Pryor et al., 2008)。乾性沈着の算定には渦相関法をはじめとする微気象学的手法を用いた実測値との比較・修正が不可欠である。

アラスカ大学構内のクロトウヒ林 (UAF サイト) では、2002 年より渦相関法による CO₂, 水蒸気, ならびにエネルギーのフラックス観測を継続し、炭素収支や火災後の回復過程等を明らかにしてきた (Iwata et al., 2012; Ueyama et al., 2013, 2013)。同サイトにおいて申請者は 2012 年から炭素循環に大きく影響する窒素ならびに微量栄養塩の可給性について、予備的観測を実施してきた。エアロゾル粒子観測システムを改良し (粒径 2.5 μ m を境とする粗大粒子と PM_{2.5} のサイズ別捕集, およびマスフローメーターの設置) を行い、継続的なエアロゾル粒子フラックスを観測可能とした。

しかし、フィルターを用いるエアロゾル粒子フラックス測定法は 2 週間毎のサンプリングという測定上の制約があり、十分な精度で栄養塩沈着量を評価できない問題があった。そこで、渦相関法によるフラックス測定を実施している UAF サイトで、これらの微気象データを利用し微量栄養塩の乾性沈着量をより精度良く把握することを試みた。北方林ではエアロゾル粒子の乾性沈着に着目した研究はほとんどなく、新規の研究といえる。

2. 研究の目的

永久凍土地帯の高緯度生態系では土壌圏からの栄養塩加給性に制約があるため、栄養塩の動態が生育を律速するとされている。一

方、北方林では森林火災の発生件数と規模が地球温暖化に伴って増加しており、これら森林火災由来のエアロゾルや微量栄養塩の生態系への沈着は、北方林での栄養塩循環に影響していると考えられた。

そこで、火災煙の生態系への沈着が北方林の炭素収支や生育に影響しそれが温暖化の進展に伴って変化しているとの仮説をたてて、観測的データと既往モデルの改良により、これらを明らかにしようとした。

最終目的は、(1) 既往モデルの改良により、森林火災由来のエアロゾルや微量栄養塩の生態系への沈着量を精度良く把握する。であり、このモデルの改良検証のために、(2) UAF サイトで微気象学的手法によるフラックス測定に加えて、エアロゾル粒子フラックスを定量的に測定する。(3) 観測事実と従来の沈着モデルとを比較し、観測の妥当性を明らかにする。(4) 森林火災は 5 月下旬から 8 月に広域的に多発する。エアロゾルの発生源が季節ごとに変わるので、衛星データと測定結果を組み合わせ、エアロゾル粒子沈着に対する森林火災の寄与を明らかにする。

3. 研究の方法

2014 年 2 月 7 日から 12 月 10 日まで研究協力者 (永野博彦博士) が UAF/IARC に滞在してサンプリング、フラックス観測と火災発生や火災煙の移流状況を把握した。

UAF サイトでのエアロゾル粒子のフラックス測定にはフィルタ捕集と傾度法を用い、エアロゾル濃度の鉛直勾配 (ng m⁻³) と拡散係数 (m sec⁻¹) の積からフラックスを求めた。エアロゾル粒子は多段のフィルターパック法で捕集し、2 週間毎の濃度勾配を得た。拡散係数は渦相関法による CO₂ フラックス (mg m⁻² sec⁻¹) と CO₂ 濃度勾配 (ng m⁻³) の比として、2 週間のサンプリング周期毎に求めた。アラスカはバックグラウンド大気が清浄なためフィルタで分析可能なエアロゾル粒子を捕集するには 10L/min で 2 週間の連続吸引サンプリングを必要とした。このため、拡散係数の評価精度が低下する欠点を内在した。そこで、一般的なエアロゾル粒子のフラックス (ng m⁻² sec⁻¹) 評価法である、大気濃度 (ng m⁻³) と沈着速度 (cm sec⁻¹) の積による評価 (沈着モデル) も行い、観測結果と比較した (Nagano et al. 2016 査読中)。なお、沈着速度は UAF サイトの気象データから求めた。観測結果の理解を深めるために、追加的に降水の定期的なサンプリングも行った。

4. 研究成果

森林火災に伴う微量栄養塩の沈着と火災煙の移流との関係を明らかにするために、Alaska 大学キャンパス内クロトウヒ林のフラックス観測タワーで多段式フィルター装置により火災煙に含まれるエアロゾルなどをサンプリングした。2014 年度に集中してフィルタの収集を行ったが、火災煙が観測サ

イトに直接の到達することは少なかった。2015 年度は常駐観測が困難となったので、フィルタの定期的なサンプリングはせず、これまでに収集したフィルタの分析と衛星データを使って火災煙の通過コースなどの解析を行った。

(1) 火災煙エアロゾルの濃度

通常大気は絶対的なエアロゾル濃度が小さいため、フィルタから微量栄養塩の沈着量を求めるには2週間のフィルタ暴露時間が必要であった。

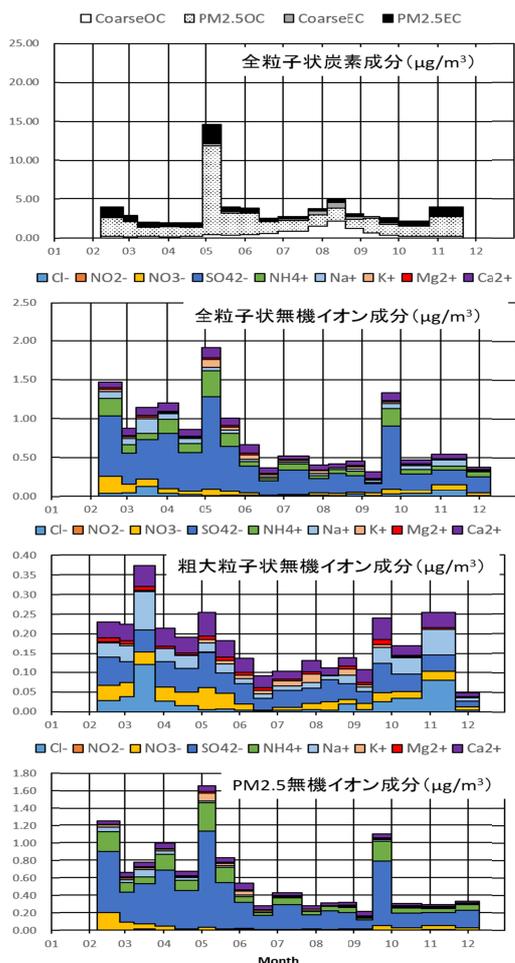


図 1 2014 年に観測された粒子状炭素成分および無機イオン成分大気濃度の季節変化。

フィルタにトラップされた乾性沈着物の分析から、粒子状炭素、粒子状無機イオンともに PM2.5 (微小粒子画分) が大部分を占めていた (図 1)。炭素成分については、一部の期間 (7 月-8 月) を除いて、大部分が PM2.5 に含まれていた。無機イオン成分では、主要構成イオン種である SO_4^{2-} および NH_4^+ の大部分は PM2.5 に含まれていた。ただし他の微量無機イオン (Cl^- 、 NO_3^- 、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+}) は PM2.5 に含まれる量と同等か、それ以上の量が粗大粒子画分に含まれていた。

2014 年は森林火災の発生が少なく、観測サイトに火災煙が直達したのは、4 月 28 日-5 月 13 日のみであった。この時には、火災煙

の到達 (図 2 右上) とそれに伴う粒子状物質の増加を捕捉することができた (図 1 炭素成分、全粒子無機イオン、PM2.5 無機イオン)。4 月 28 日-5 月 13 日 (前期) には、火災煙到達の指標となる粒子状有機態炭素および黒色炭素が急激な増加を示し、また 6 月 27 日-9 月 3 日 (後期) にも緩やかな増加傾向を示した。ただし、前期における増加は PM2.5 が主体であったのに対し、後期の増加では粗大粒子が主体であった。前期には、PM2.5 の無機イオン成分 (SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 、 K^+ など) も顕著に増加した。また、前期と後期のそれぞれについて、火災発生状況および後方流跡線 (気流の通過経路) を解析すると、4 月 28 日-5 月 13 日にフェアバンクの南東で大規模な森林火災が発生しており、同時期に火災現場を通過した気流が観測サイトに到達していたことが明らかになった。これらのことから、前期における粒子状物質の増加は、火災煙の到達が原因であった可能性が強く示唆された。後期の増加については、遠方の森林火災に伴うエアロゾルの移流、もしくは近隣における人為的燃焼活動に伴うエアロゾルの到達が原因として考えられた。

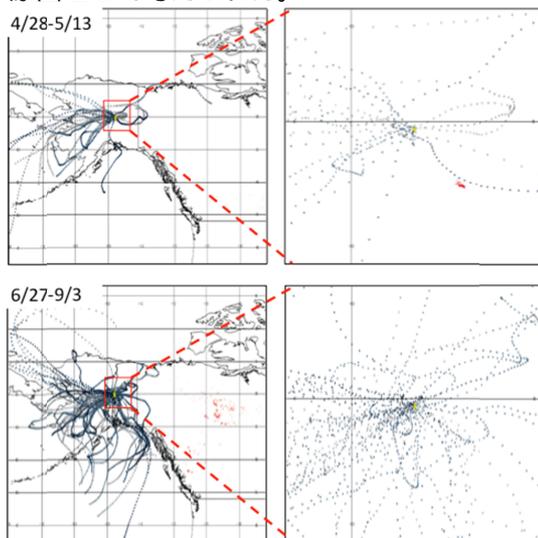


図 2 2014 年 4 月 28 日-5 月 13 日 (前期) および 6 月 27 日-9 月 3 日 (後期) における森林火災発生状況 (地図上の赤点) と後方流跡線解析。

(2) 乾性沈着量の評価とその特長

渦相関法によるフラックスから算出した乾性沈着速度は、大きな日変化を示していた (図 3 上)。季節的に春先から徐々に増加し、5 月下旬に最大となり、その後減少した (図 3 中)。沈着速度の大部分は、毎秒 0.5 cm 未満で、5 月 13 日-28 日に最大になった。ただし、沈着速度は 1 日の間にも大きく変動していたことから、2 週間の平均濃度を用いて沈着量を推定する場合、「濃度と沈着速度の日変化が相関を持たない」事の確認が必要であるが、分離は困難であった。一方、沈着速度の平均値と中間値は大きく異なったことが

ら、沈着量の不確実性を見積もる場合には、標準偏差よりも、沈着速度のばらつきを利用したパーセンタイルを利用すべきと考えられた(図3下)。

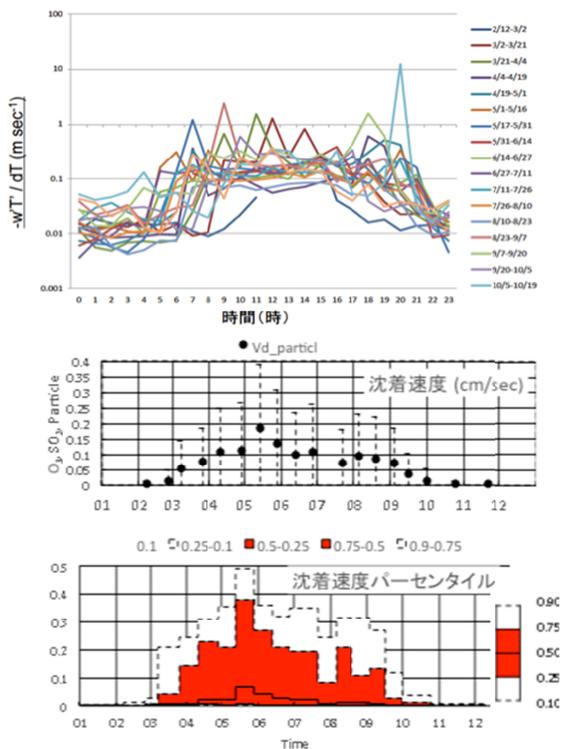


図3 渦相関法による熱輸送速度(沈着速度相当)の日変化(上図)と、2014年に観測された乾性沈着速度の平均値・標準偏差(中図)およびパーセンタイル(下図)。

粒子状炭素成分および無機イオン成分の乾性沈着量の季節変化を図4に示す。沈着速度の増加に伴って乾性沈着量も増加する季節変化を示したが、火災煙が到達した場合に顕著な沈着量を示した。特に粒子状炭素成分および無機イオン成分の乾性沈着量は、前期の火災煙が到達した4月28日-5月13日に最大であった。他方、無機イオン成分については、濃度は春から夏にかけて減少する季節変化を示したが、乾性沈着量は増加したことから、生態系への栄養塩加給性にかかわる因子としては、沈着速度の増減、及びその季節変化も重要であると考えられた。

(3) 湿性沈着量, オゾン放出について
観測サイトにおいて、定期的にサンプリングした降水(冬季は雪を含む)を分析し、各イオン濃度と観測サイトで測定した降水量との積から湿性沈着量を求めた(図5)。

無機イオン成分の湿性沈着量の季節変化と乾性沈着量のそれとは異なったことから、火災煙の到達が湿性沈着量に及ぼす影響は不明瞭である。降水中の濃度は、大気中の無機イオン成分濃度、および降水量の大小(すなわち、降水量が多いと降水中の濃度は減少する)によって決定される。火災煙の到達が

明瞭な4月28日-5月13日(前期)には、サンプリング可能な量の降水はなかったため、湿性沈着が火災煙の到達から受ける影響を検証することは困難であった。

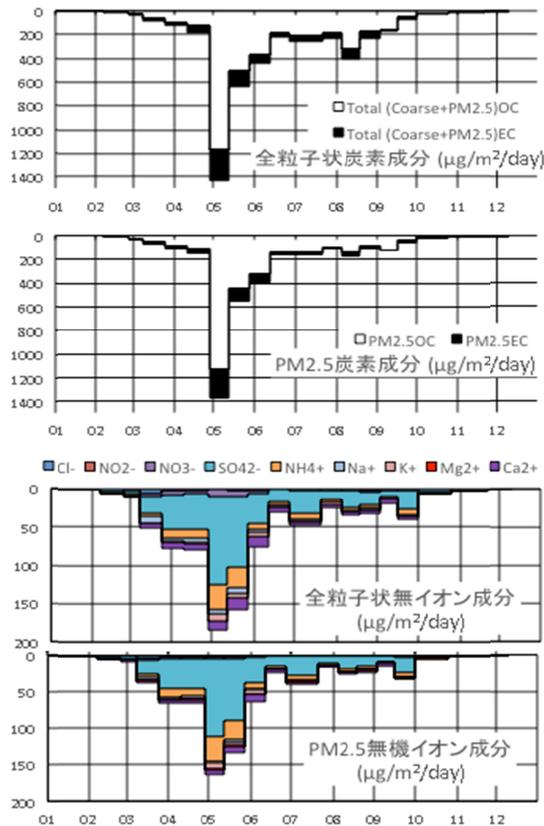


図4 2014年に観測された粒子状とPM2.5についての炭素成分(上2図), および無機イオン成分(下2図)の乾性沈着量。炭素成分・無機イオン成分。

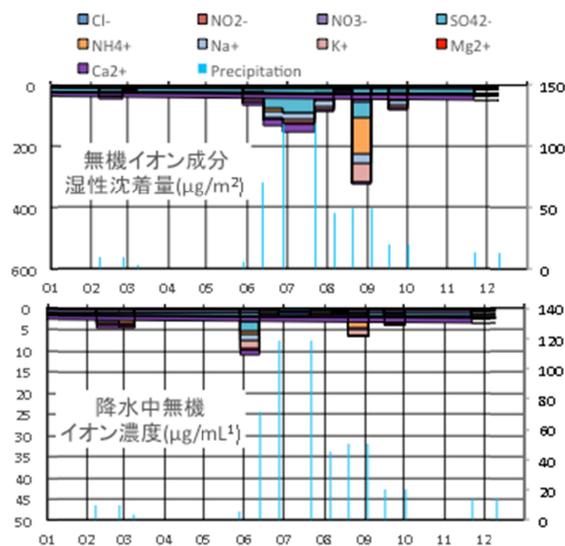


図5 2014年に観測された無機イオン成分の湿性沈着量(上図)と降水中濃度(下図)の季節変化。

オゾン濃度は春から夏にかけて減少し、秋ご

るから再び増加した。オゾンの濃度勾配から求めたフラックスは、日平均ではほぼすべての時期に吸収を示し、8月頃に最大になる結果であった。微量栄養塩との化学反応を仮定したフラックスの検証を試みたが、放出を示唆する結果は得られなかった。

(4)まとめ

フィルタから求めた微量栄養塩の沈着量は火災煙の移流が観測サイトに達する流跡線の場合に大きくなることわかった。アラスカの観測サイトではフィルタ分析から得られる絶対的な濃度が小さいため、2週間のフィルタ暴露時間が必要であった。沈着速度は渦相関法によるフラックスから日変化レベルで評価できたが、濃度は2週間に1回しか得られず、その結果、沈着量も2週間毎しか算定できず、火災煙の到達毎にそれぞれの微量塩の沈着量を定量評価することは困難であった。定性的には妥当な結果が得られたが、挑戦課題とした火災煙に含まれる微量栄養塩が亜北極圏生態系へどの程度加給されているかを火災毎に定量的に把握するにはいたらなかった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 8件)

Ueyama, M., Tahara, N., Iwata, H., Euskirchen, E. S., Ikawa, H., Kobayashi, H., Nagano, H., Nakai, T., and Harazono, Y. 2016. Optimization of a biochemical model with eddy covariance measurements in black spruce forests of Alaska for estimating CO₂ fertilization effects. *Agric. Forest Meteorol*, 査読有, 222, 98-111.

Hideki Kobayashi, Ali P. Yunus, Shin Nagai, Brie Van Dam, Yoshinobu Harazono, Donie Bret-Harte, Kazuhito Ichii, Hiroki Ikawa, Hiroki Iwata, Yongwon Kim, Hirohiko Nagano, Walter C. Oechel, Konosuke Sugiura, Masahito Ueyama, Donatella Zona, and Rikie Suzuki. 2016, Satellite-derived autumn phenology relies more on snowfall than on browning in the Alaskan boreal forest and tundra. *Remote Sensing Environment*, 査読有, in press.

doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.020.

Hiroki IWATA, Yoshinobu HARAZONO, Masahito UEYAMA, Ayaka SAKABE, Hirohiko NAGANO, Yoshiko KOSUGI, Kenshi TAKAHASHI, and Yongwon, Kim, 2015, Methane exchange in a poorly-drained black spruce forest overpermafrost observed using the eddy covariance technique, *Agricultural and Forest Meteorology*, 査読有, 214-215, 157-168.

Derek Starckenburg, Gilberto J. Fochesatto, Jordi Cristóbal, Anupma Prakash, Rudiger Gens, Joseph G. Alfieri, Hirohiko Nagano, Yoshinobu Harazono, Hiroki Iwata, and Douglas L. Kane. 2015, Temperature regimes and turbulent heat fluxes across a heterogeneous canopy in an Alaskan boreal forest, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 査読有, doi: 10.1002/2014JD022338.

Yoshinobu HARAZONO, Hiroki IWATA, Ayaka SAKABE, Masahito UEYAMA, Kenshi TAKAHASHI, Hirohiko NAGANO, Taro NAKAI and Yoshiko KOSUGI, 2015, Effects of water vapor dilution on trace gas flux, and practical correction methods, *Journal of Agricultural Meteorology*, 査読有, 71 (2): 66-75.

Masahito Ueyama, Kazuhito Ichii, Hiroki Iwata, Eugénie S. Euskirchen, Donatella Zona, Adrian V. Rocha, Yoshinobu Harazono, Chie Iwama, Taro Nakai, and Walter C. Oechel, 2014, Change in surface energy balance in Alaska due to fire and spring warming, based on upscaling eddy covariance measurements, *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 査読有, doi: 10.1002/2014JG002717

Ueyama, M., Iwata H., Harazono, Y., 2014. Autumn warming reduces the CO₂ sink of a black spruce forest in interior Alaska based on a nine-eddy covariance measurement. *Global Change Bio.*, 査読有, doi: 10.1111/gcb.12434.

Masahito Ueyama, Shinya Kudo, Chie Iwama, Hirohiko Nagano, Hideki Kobayashi, Yoshinobu Harazono, Kenji Yoshikawa, 2014, Does summer warming reduce black spruce productivity in interior Alaska?, *J of Forest Research*, 査読有, DOI 10.1007/s10310-014-0448-z.

[学会発表](計 15件)

田原成美・植山雅仁・岩田拓記・永野博彦・原園芳信・市井和仁・伊川浩樹・Eugenie S. Euskirchen, 北方林における森林火災からの遷移に伴う植物生理特性の変動. 農業気象学会全国大会 2016, 岡山大学, 岡山, 2016年3月14-17. (口頭)

Tahara, N., Ueyama, M., Iwata, H., Nagano, H., Harazono, Y., and Ichii, K., Successional change in photosynthetic capacities after wildfires across the North American boreal forests. AGU Fall meeting, Mosconi Center, San Francisco USA, 14-18 December 2015. (Poster)

Ueyama, M., Iwata, H., Ichii, K., Nagano, H., Harazono, Y., Euskirchen, E. S., Zona, D., Rocha, A. V., Nakai, T. and

Oechel, W. C., Long-term observations and synthesis for evaluating carbon dioxide fluxes over Alaska. Fourth International Symposium on the Arctic Research, 富山国際会議場, Toyama Japan, 27-30 April 2015. (Oral)
Tahara, N., Nagano, H., Ueyama, M., Iwata, H., and Harazono, Y., Changes in photosynthetic capacities of early successional ecosystems after wildfires in interior Alaska. Fourth International Symposium on the Arctic Research, 富山国際会議場, Toyama Japan, 27-30 April 2015. (Poster)

Iwata, H., Harazono, Y., Ueyama, M., Sakabe, A., Nagano, H., Kosugi, Y., Takahashi, K., and Kim, Y., Methane exchange in a poorly-drained black spruce forest over permafrost observed with the eddy covariance technique. Fourth International Symposium on the Arctic Research, 富山国際会議場, Toyama Japan, 27-30 April 2015. (Poster)

Otsuki, M. Iwata, H., Iwata, T., Nagano, H., Harazono, Y., Iwama, C. and Ueyama, M., Regional CO₂ uptake estimation applying the light use efficiency model with MODIS and field data to examine wildfire effects in Alaskan boreal forest. Fourth International Symposium on the Arctic Research, 富山国際会議場, Toyama, Japan, 27-30 April 2015. (Poster)

Tahara, N., Ueyama, M., Nagano, H., Iwata, H., and Harazono, Y., Changes in photosynthetic capacities of early successional ecosystem after wildfires in interior Alaska. Workshop on the ecosystem carbon/water cycling research in the changing climate, 国立環境研, Tsukuba Japan, 23-25 April 2015. (Oral)

岩田拓記, 原園芳信, 永野博彦, Yongwon Kim, 小杉緑子, 坂部綾香, 高橋けんし, 宮田明, 間野正美, 小野圭介, 植山雅仁, 内陸アラスカのクロトウヒ林におけるメタン交換測定, 森林水文ワークショップ 2015, 北大, 札幌 2015 (Mar. 29)

永野博彦・中井太郎・原園芳信, 微気象データからの生理生態パラメータの逆推定法の開発: アラスカのクロトウヒ林での検討, 日本農業気象学会 2015 年度大会, 科学技術交流センター, つくば市 2015 年 3 月 16-19.

植山雅仁・田原成美・岩田拓記・永野博彦・中井太郎・原園芳信, 微気象データを用いた植物生理パラメータの逆推定法の開発: アラスカのクロトウヒ林での検討. 農業気象学会全国大会 2015, 科学技術交流センター, つくば, 3 月 16-20, 2015. (口頭)

Ueyama, Masahito, N. Tahara, H. Iwata, H. Nagano, and Y. Harazono, Inverse estimation of parameters for a coupled

photosynthesis and stomatal conductance model using eddy covariance measurements at a black spruce forest in Alaska. AGU-2014 fall meeting, Mosconi Center, San Francisco, USA, December 15-19, 2014. (Poster)

Nagano, Hirohiko, H. Iwata, and Y. Harazono, Evaluation of the relationship between nitrogen dry deposition and wildfire in a boreal forest of interior Alaska. AGU-2014 fall meeting, Mosconi Center, San Francisco, USA, December 15-19, 2014 (Poster)

Ueyama, M., Tahara, N., Iwata, H., Nagano, H., and Harazono, Y., Inverse estimation of parameters for a coupled photosynthesis and stomatal conductance model using eddy covariance measurements at a black spruce forest in Alaska. AGU-2014 Fall meeting, Mosconi Center, San Francisco USA, 15-19 December 2014. (Poster)

Nagano, Hirohiko, H. Iwata, and Y. Harazono, Evaluation of the relationship between nitrogen dry deposition and wildfire in a boreal forest of interior Alaska. AGU-2014 fall meeting, San Francisco, USA, December 15-19, 2014. (Poster)

Iwata, Hiroki, Y. Harazono, M. Ueyama, A. Sakabe, H. Nagano, Y. Kosugi, K. Takahashi, and Y. Kim, Methane exchange in a poorly-drained black spruce forest over permafrost observed with the eddy covariance technique. Arctic Change 2014 conference, Convention Center, Ottawa, Canada, December 8-12, 2014. (Poster)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況 (計 0 件)
取得状況 (計 0 件)

〔その他〕
ホームページ等: なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

原園 芳信 (HARAZONO, Yoshinobu)
大阪府立大学・生命環境科学研究科・客員
研究員
研究者番号: 90137240

(4) 研究協力者

永野 博彦 (NAGANO, Hirohiko)
アラスカ大学国際北極圏研究センター, ポ
ストドク研究員, ならびに千葉大学園芸学部,
博士研究員
研究者番号: 40758918