東シベリア・カラマツ林における水・エネルギー・炭素循環－GAME, CREST, RIHNの成果より－

太田 岳史¹⁾ 檜山 哲哉²⁾ 小谷 亜由美¹⁾
山崎 剛³⁾ Trofim C. MAXIMOV⁴⁾

¹⁾ 名古屋大学生命農学研究科
(〒464-8601 愛知県名古屋市千種区不老町)

²⁾ 名古屋大学宇宙地球環境研究所
(〒464-8601 愛知県名古屋市千種区不老町)

³⁾ 東北大学理学研究科
(〒980-8578 仙台市青葉区荒巻字青葉6-3)

⁴⁾ ロシア科学アカデミー・シベリア支所 寒冷圏生物問題研究所
(677980 ロシア サハ共和国ヤクーツク市レーニン通り41)

東シベリアにおける1998年～2013年にわたる水・エネルギー・炭素(WEC)循環の結果を総括する。スバスカヤパッド観測サイトでは、カラマツ林での暖候期におけるWEC循環と様々な環境因子との関係が明らかになった。また、スバスカヤパッドとエルゲイでの観測では、同じカラマツ林でほぼ等しい気象条件であっても下層構成樹種によりWEC循環が異なっていた。レナ河流域における流出量の観測では、永久凍土帯における年々の活動層深は 10^0 cm year⁻¹で深くなっており、近年はその速度が増加していた。WEC循環のモデル研究では、陸面モデルで推定された蒸発散量は渦相関法から導かれた蒸発散量の実測値とほぼ同じ範囲にあった。流出モデルでは、年間の流出量のうち約30%が非常に遅い流出成分であり、それは実測値ともほぼ一致した。今後は、地球温暖化が予測される中で、東シベリアに存在する北方林が環境の変化にどのように応答するのかを明らかにすることが課題である。東シベリアにおける湿潤化のWEC循環への影響は、流域全体へと広がっていくであろう。WEC循環の研究は、乾燥化ばかりでなく湿潤化にも目を向けなければならない。

キーワード：水循環、エネルギー循環、炭素循環、シベリア、永久凍土、地表面状態

I. はじめに

地球上の森林は全陸域の約30%を占め(FAO, 2005)、熱帯林、温帯林、北方林に区分した場合、それぞれが占める面積比率はほぼ等しい。そして、陸上の全ての生物は、水と炭素の循環を駆動しており、水・エネルギー・炭素(以下、WECと略す)循環の理解は、水文学、生態学、気象学などにとり重要な課題である。

近年、森林生態系への干ばつや熱波の影響が注目されている。アマゾン河流域の熱帯林については、Brando *et al.* (2008)、Betts *et al.* (2008)などが乾燥化を指摘している。そして、Betts *et al.* (2008)は、アマゾン河流域における急激な環境変化が森林生産

と地元産業に及ぼす影響に関する報告をしている。また、中緯度帯の森林に関しては、2003年のヨーロッパにおける大規模な干ばつと熱波の森林への影響について、Ciais *et al.* (2005)、Granier *et al.* (2007)らが報告している。そして、Ciais *et al.* (2005)は、1960年以降食料生産に対する干ばつの影響が2003年に最大になったと報告している。北方林ではカナダにおいて、Peng *et al.* (2011)やMa *et al.* (2012)が、乾燥化による枯死率の増加や純一次生産量の減少を示している。

さて、北方林におけるWEC循環においては、寒冷地に適応した植生と寡雨、積雪、永久凍土などとの関係が重要であろう。寒冷圏での大気－陸面相互

作用を明らかにする研究は、Bonan *et al.* (1992; 1995) による大気大循環モデルによる数値実験で始まった。そして、現地での観測が、北アメリカにおける Boreal ecosystem-atmosphere study (BOREAS; Sellers *et al.*, 1995), スカンジナビア半島における Northern Hemisphere Climate Processes Land Surface Experiment (NOPEX; Halldin *et al.*, 1999) によって展開された。また、ヨーロッパ・シベリアから西シベリアにおいては、Terrestrial Carbon Observation System - Siberia (TCOS-Siberia; Schulze *et al.*, 2002) が行われた。これらの研究により、北方林生態系における WEC 循環が明らかになり、その影響の評価が試みられるようになった。そして、WEC 循環の定量化とその時空間分布、より広域へのスケールアップなどが展開されるようになった。

我々が大気-陸面相互作用の研究を実施している東シベリアにおいては、Kelliher *et al.* (1997) による短期的な観測が始められた。その後、GEWEX Asia Monsoon Experiment-Siberia (GAME-Siberia; Lowford *et al.*, 2004; Yasunari, 2007), Core Research for Evolutional Science and Technology (CREST)/ Water and Energy Cycles in Northern Forests (WECNoF; Ohta, 2010), PIN-Matra (Moors *et al.*, 2004), Research Project No. C-07 of Research Institute for Humanity and Nature (RIHN-Siberia; Hiyama *et al.*, 2013b; 檜山・藤原, 2015) などによって観測が継続されてきた。なお、GAME はアジア地域における代表的な地表面における水・エネルギー循環を把握するものであり、GAME-Siberia は東シベリアでの水・エネルギー循環を理解するものである (Yasunari, 2007)。水文学、気象学に携わるものがこのプロジェクトに多数参加し、現在の両者間の関係を築き上げたことになる。WECNoF は、東シベリアのみでなく日本を含めた北東ユーラシアでの WEC 循環の理解と将来予測を目的に行ったプロジェクトである (Ohta, 2010)。このプロジェクトには、水文学、気象学の他に植物生理生態学の研究者も参加した。また、RIHN-Siberia は、自然科学系でまとめられている分野を人文社会科学系にも広げ、WEC 循環と洪水リスクへの対応、シベリアの水環境変動と社会の適応と言った課題に対応している (檜山・藤原, 2015)。このプロジェクトでは、水文学、気象学と人文社会科学系との共同作業で多くの結果が得られている。

本総説では、我々が東シベリアで行った上記の観測プロジェクトで得られた成果に基づき、東シベリ

アの WEC 循環に関して報告する。

II. 観測地の概要

高緯度地帯の植生分布を緯度方向に見ると、北東ユーラシアの特徴が見えてくる。北米や北欧の北方林はトウヒなどを中心とする常緑針葉樹林であるのに対して、ユーラシア大陸の東経 90° 以東はカラマツを中心とする落葉針葉樹林になっている (檜山・藤原, 2015)。また、この北方林の分布は、永久凍土の地域ともほぼ一致しており (檜山・藤原, 2015)、その中でも落葉針葉樹林であるカラマツ林が大部分を占めるユーラシア大陸東部は連続永久凍土帯が広く分布する地域でもある。その地域に、我々の観測地点が存在している。

1. フラックス観測

我々が主に観測しているのは、東シベリア・レナ河中流部に位置するヤクーツク近郊のスパスカパッド (以下、SPA)、およびレナ河支流であるアルダン河沿いに位置するウスチ・マヤ近郊のエルゲイ (以下、ELG) である (Ohta *et al.*, 2001; Kotani *et al.*, 2014)。これらの地点を図-1 に、地点におけるタワーの写真を、図-2 に示す。

図-1 レナ河の地形とフラックス観測点および4支流の位置
UL: レナ河上流部, OI: オレクマ河, A1: アルダン河1, A2: アルダン河2

Fig. 1 Map of the Lena River watershed and locations of flux observation sites and main Lena River tributaries: UL, Upper Lena; OI, Olyokma; A1, Aldan-1; A2, Aldan-2.

図-2 両サイトのタワー全景
図-2a スパスカヤパッド (SPA) の森林観測タワー
図-2b エルゲイ (ELG) の森林観測タワー

Fig. 2 Comprehensive views of observational towers.

Fig. 2a Observation tower at Spasskaya Pad (SPA).

Fig. 2b Observation tower at Elgeii (ELG).

SPAは62°15'N, 129°14'E, 海拔220 mに位置し, ロシア科学アカデミー・シベリア支所・寒冷圏生物問題研究所 (Institute for Biological Problems of Chryolithozone, Siberian branch, Russia Academy of Science) に属している. SPAの32 mフラックス観測タワーは, ヤクーツクでは最初のタワーであり, WEC循環の基礎的項目の理解, 長期にわたるWEC循環の変動特性などに貢献している. 1996年にタワー建設が始められ, 1998年から現在まで観測が継続されている. 地形は北に向かってやや傾斜しているが, ほぼ平坦である. 土壌はsandy loamである. ヤクーツクの1961年~1990年までの年平均気温は-10℃, 年平均降水量は236.9 mmである. 主な上層植生は, カラマツ (*Larix cajanderi*) であり, 立木密度は1998年には844本ha⁻¹であったが, 2011年には740本ha⁻¹に減少している. 展葉期間のPAI (植物面積指数) は1.32~1.56である. 上層植生の平均樹高は20 mであった. 下層植生は, 1998年にはコケモモ (*Vaccinium vitis-idaea*) が主力であったが, 2005年~2008年以降の土壌湿潤化により, 現在は低木類と耐湿性に優れている草本が侵入してきている. 下層植生のPAIは, 1.86~2.0である.

ELGは60°55'N, 133°28'E, 海拔256 mに位置する. 2009年に34 mタワーが設置され, 2010年より本格的

な観測が始められ, 現在も観測が継続されている. ELGのフラックス観測タワーは, SPAのタワーより降水量が多く, 環境要因が異なることによるWEC循環の相違を調査するために建設された. 地形は平坦であり, 土壌はclay loamである. 1961年~1990年におけるウスチ・マヤの年平均気温は-10℃, 年平均降水量は293.0 mmである. ヤクーツクと比較すれば, 年平均気温は等しいが, 年平均降水量はウスチ・マヤの方が25%ほど多い. 上層植生はカラマツ (*Larix cajanderi*) であり, 2009年現在のPAIは2.1であった. また, 上層植生の立木密度は1,040本ha⁻¹, 上層植生の平均樹高は25 mである. 下層植生は1998年のSPAの状態に似ており, コケモモ (*Vaccinium vitis-idaea*) が卓越する. 2009年の下層植生のPAIは, 0.8である.

2. 流域流出量

流域からの流出量解析には, 短期流出解析と長期流出解析がある. レナ河からの長期にわたる流出量を解析するためには, 長期流出解析, その中でも基底流出量の解析が重要となる (Brutsaert and Hiyama, 2012; Hiyama *et al.*, 2013a). レナ河では基底流出解析において2つの手法が用いられた. 1つはレナ河上流

部における永久凍土帯からの地下水流出と凍土融解に関するものであり、もう一方はヤクーツク近郊における凍土帯地下水の滞留時間に関するものである。

レナ河上流部における永久凍土帯の融解速度に関する研究は、図-1に示されるようにレナ河上流域(770,000 km²)、オレクマ河流域(115,000 km²)、アルダン河1(514,000 km²)およびアルダン河2(696,000 km²)で流出量データが集められた(Brutsaert and Hiyama, 2012)。前2者が不連続永久凍土帯(流域の約70%が永久凍土)、後2者が連続永久凍土帯(流域の約92%が永久凍土)である。そして、1950年～2008年までの基底流出量のうち、各年の下位5日間の流出量が調べられた。

ヤクーツク近傍の永久凍土帯における地下水の滞留時間に関する研究は、レナ河右岸に位置し、ヤクーツクから南西に25～80 km離れたミチタ湧水、エリュ湧水、ウラハン・タルン湧水およびブルース湧水で得られたサンプルを対象に行われた(Hiyama *et al.*, 2013a)。滞留時間の推定に用いた水文トレーサーは、トリチウム(³H)、クロロフルオロカーボン(CFCs)、六フッ化硫黄(SF₆)である。

III. 観測結果と考察

1. スパスカヤパッドにおける環境状態量

GAME, WECNoF, RIHNの3つのプロジェクトを通して、環境状態量の変動はWEC循環を決定する重要な項目である。そのために、まず環境状態量の変動について述べておく。

1998年～2011年までのSPAにおける環境状態量の変化は、図-3に示されている(Ohta *et al.* 2014)。

降水量(図-3f)については、1998年～2000年と2009年～2011年で年降水量が200～240 mmで平年並み、2001年～2004年が110～170 mmで渇水状態、2005年～2008年が300～330 mmで豊水状態となった。

このような降水量の変動に対して、大気側の環境状態の変動は、樹冠上の純放射量(Rn, 図-3a), 32 mの気温(Ta, 図-3b), 飽差(VPD, 図-3c)ともに大きな年々変動を示すことはなかった。これに対して、土壌側の環境要因である-20 cm, -60 cm, -120 cmの地温(Tg, 図-3e), 0～-50 cmの土壌水分量(SWC, 図-3d)を概観すると、年最高地温は各深度ともにあまり大きな変動をしていない。しかし、年最低地温は3深度ともに2003/2004年以前は同じような変動をしているが、2004/2005年～2008/2009年

の冬にかけて、一部欠測はあるが、2008/2009年まで年最低地温が上昇しているのを仮定すると、地温は上昇していた。また土壌水分量は、1998年～2000年と2010年～2011年は平年並みで変動したが、2001年～2004年は乾燥状態、2005年～2009年は湿潤状態で変動した。そして、土壌水分量は2009年まで湿潤状態で保たれ、降水量よりも1年長く湿潤状態が保たれた。

このようなSPAの環境状態量の変動は、WEC循環とどのように関連しているのだろうか。

2. スパスカヤパッドにおけるエネルギー循環の季節変動

GAMEでは、まず調査地域の代表的な地表面であるカラマツ森林上でのエネルギー収支が測られた。ここでは、1998年を例として、カラマツ森林上でのエネルギー収支を取り上げる。

図-4は、降水量が平年並みの1998年4月中旬～9月上旬までの暖候期におけるエネルギー収支構成(a; 純放射量, 地中熱流量(融雪熱量を含む), b; 潜熱フラックス, 顕熱フラックス, c; ボーエン比)である。なお、図下の横棒は、地表面状態を表している。

図-4bより、潜熱フラックスは、融雪期にあたる5月中旬までは増加せず、カラマツが新葉を展開する5月下旬から6月上旬になって急激に増加し始めた。この時期は根系の約80%が分布している-10～-20 cm深までの永久凍土表層の融解が進行していた(Ohta *et al.*, 2001)。この時期は、夏至前であるために純放射量は増加しているが(図-4a)、顕熱フラックスは5月中旬にピークを迎えた後に減少している(図-4b)。このように、展葉に伴う潜熱フラックスおよび顕熱フラックスの大きさの変動によって、樹冠上のエネルギー収支が決まっている。

図-4cは、日ごとのボーエン比の経時変化である。これによれば、ボーエン比は春期と秋期に5～20で高く、夏期には1前後の低い値を取る“U”字型を示した。北方林では春期や秋期は太陽光度が高くても、気温が低く、大気中への水蒸気の放出が制限されることを示していた。そして、夏期になると蒸発散の活性化により十分な水蒸気が放出され、ボーエン比は1前後に収まった。北方林では東シベリア以外でも、夏期のボーエン比の最小値が1前後になることが多い(Sellers *et al.* 1995; Kelliher *et al.*, 1998)。また、熱帯林のボーエン比の最小値は0.1～0.3程度

図-3 スパスカヤパッドにおける1998年～2011年の水文気象状況 (Ohta *et al.*, 2014)

a) 純放射量 b) 気温 c) 飽差 d) 土壌水分量 e) 地温 f) 降水量 (黒; スパスカヤパッド, 灰; ヤクーツク)

Fig. 3 Hydro-meteorological conditions at SPA in 1998-2011 (Ohta *et al.* 2014):

a) net radiation, b) air temperature, c) vapor pressure deficit, d) soil moisture content, e) ground temperature, and f) precipitation (black, at SPA; gray, Yakutsk).

になることが多い (例えば, Shuttleworth *et al.*, 1984) が, 熱帯林では蒸発散に相対的にエネルギーをより多く使っていることが分かる。

ここで, 本研究と同じように日単位でのボーエン比が示されているシベリアの他の森林とSPAの相違

点に関して述べておく。Hamada *et al.* (2004) は, SPAのヨーロッパアカマツ (*Pinus sylvestris*) 林において2000年4月中旬から8月下旬にかけてボーエン比を観測している。土壌はsandy siltであり, 夏期の活動層厚は2.5 mに達する。それによれば, 観測期間中に

図-4 スパスカヤパッドのタワー上における熱収支の日変化 (Ohta *et al.*, 2001)

a) 純放射量と地中熱流量, b) 顕熱フラックスと潜熱フラックス, c) ボーエン比
下の線は、地表面状態を示す

Fig. 4 Time series of (a) daily net radiation and ground heat flux, (b) the sensible heat flux and the latent heat flux, and (c) the Bowen ratio (Ohta *et al.* 2001). The lower bar shows surface conditions.

ボーエン比は“U”字型を示さずに、観測期間中1～2の値を取って変動していた。これは、常緑のヨーロッパアカマツ林では、表層の凍土が融解を始めた直後から蒸散が活発に生じているためだと考えられる。また、Tchebakova *et al.* (2002) は、中央シベリアのヨーロッパアカマツ (*Pinus sylvestris*) 林でボーエン比を観測している。土壌は沖積世の砂質であり、永久凍土は存在しない。Hamada *et al.* (2004) の結果と違い5月中旬にボーエン比は低下しており、6月中旬から9月中旬までは1前後の値を取っている。このように見ると、シベリアの他の森林でもボーエン比は、常緑、落葉を問わずに夏期に1前後の値を取ることが多く、それが年間の最小値となっていることが多い。

3. スパスカヤパッドの下層植生におけるエネルギー循環

1998年から2013年までのSPAの森林のPAIが、1.32～1.56と本論文で示されているように、上層植生の植生量は少ない。すなわち、下層植生には多くの太陽光が降り注いでいる。このような環境で、下層植生はWEC循環に対して、どのような役割を持っているのだろうか？ここではこの問題について取り上げる。

Ohta *et al.* (2001) は、1998年6月上旬から9月上旬まで、SPAにおける全生態系からの蒸発散量に対する下層植生からの蒸発散量の比率を計測した。その結果、下層からの蒸発散量は、全生態系からの蒸発散量の約35%となった。また、Iida *et al.* (2009) による同一林分における2005年、2006年の6月1日から8月31日の下層蒸発散率は、全生態系蒸発散量の約50%であった。Iida *et al.* (2009) の蒸発散率は、Ohta *et al.* (2001) に対する値よりも約15%高い。また、Ohta *et al.* (2001) の蒸発散率は、Kelliher *et al.* (1997;1998) による38～50%を占めるカラマツ林や33～58%を占めるヨーロッパアカマツ林、Baldocchi and Vogel (1997) によるバンクスマツ林での10～40%の値に近い。しかしながら、Ohta *et al.* (2001) の値は、北欧のマツヤトウヒ (Lindroth, 1985; Grelle *et al.* 1997) に較べると大きい。これらの林床植生の蒸発散量に関する議論は、土壌組成、上層植生の植物量 (PAI, LAI など)、土壌空隙率なども含めて今後の課題である。

4. スパスカヤパッドの水収支の年々変動

WECNoFでは、10年近くにもなるスパスカヤパッドでのWEC循環、特に水収支の評価への貢献が求められた。

水収支は、以下のように示される。

$$P = E + \Delta S + R \quad (1)$$

ここで、Pは降水量 (mm)、Eは蒸発散量 (mm)、 ΔS は土壌水分の変化量 (mm)、Rは残差 (mm) である。正のRは土壌層からの流出を示し、負のRは土壌層内への流入を示す。

図-5は、SPAにおける1997年10月から2006年9月における年間水収支を示している (Ohta *et al.*, 2008)。なお、n年とは、n-1年10月からn年9月の一年間を示す。

1998年から2006年にかけての降水量は111～347 mm year⁻¹となっており、特に5月から9月にかけて

図-5 1998年～2006年におけるスパスカヤパッドの年間水収支 (Ohta *et al.*, 2008)
水文年は前年の10月から当年の9月としている

Fig. 5 Interannual variation of water balance components at SPA in 1998-2006 (Ohta *et al.* 2008). Hydrological year is from October of the prior year to September of the current year.

の年変動が大きい。また、遮断蒸発量を含めた蒸発散量は $169 \sim 220 \text{ mm year}^{-1}$ となっており、年降水量の変動と比較すれば小さな変動となっている。Zhang *et al.* (2001) は、全世界の永久凍土を含まない250流域における年降水量と年蒸発散量の関係を調べた。それによれば、年降水量が多い地域に位置する流域では年蒸発散量の変動が小さい。しかし、年降水量が少ない流域、特に年降水量が 500 mm year^{-1} 以下の地域では、年降水量が減少すると年蒸発散量も急激に減少している。SPAの1998年から2006年の降水量を、Zhang *et al.* (2001) の非永久凍土帯の年蒸発散量の経験式に与えると、年蒸発散量は $110.7 \sim 337.9 \text{ mm year}^{-1}$ と算出される。しかし、永久凍土帯に位置するSPAの実際の年蒸発散量は $169 \sim 220 \text{ mm year}^{-1}$ であり、非永久凍土帯で推定される値より変動幅がかなり小さい。このような傾向は、Yamazaki *et al.* (2007) の陸面モデルでも推定されている。

Sugimoto *et al.* (2002) は、SPAにおける降水、植物体内水、土壌水の酸素安定同位体比を用いて、カラマツが利用する水は降水量によって異なることを示した。それによれば、6月のカラマツの植物体内の安定同位体比は年によって変わることはなく、凍土の融解水をカラマツは利用していた。しかし、8月の安定同位体比は、豊水年であると当年の降雨の安定同位体比とほぼ同じ値の水がカラマツ樹体内に存在

し、渇水年になると前年までの凍土の水がカラマツの樹体内にはあった。このようにして、カラマツ樹体内の水は、その年の夏期の降水量によって決まることが示された。これらの研究から、永久凍土の存在が東シベリアの水循環に大きな役割をはたしていることが分かる。

5. スパスカヤパッドにおける群落コンダクタンスと空気力学的コンダクタンス

このような水循環を行っているSPAの森林は、「どのように植物生理・生態学的に水を循環させているのであろうか」という問題も、WECNoFの課題として挙がっていた。すなわち、「どのような群落コンダクタンスと空気力学的コンダクタンスを有するのであろうか?」と言う課題である。なお、群落コンダクタンスとは環境に対する植物の主体的な反応を示すパラメータであり、具体的には環境要因が気孔応答特性にどう影響するのかを見るものである (Blanken and Black, 2004; Vourlitis *et al.*, 2008)。一方、空気力学的コンダクタンスは、植物の群落の特徴を表していると考えられ、表面の粗度長や鉛直方向の風速分布の影響を受ける (Grantz and Vauohn, 1999; Zha *et al.*, 2013)。

SPAの森林の群落コンダクタンスには、日平均値で見た場合には飽差の増加に伴い減少する傾向が見られる (Ohta *et al.*, 2001; Dolman *et al.*, 2004; Hamada *et al.*, 2004)。また、群落コンダクタンスの年変動に関しては、土壌水分量と正の相関関係があったとの報告もある (Yoshida *et al.*, 2010; Xue *et al.*, 2012)。このように群落コンダクタンスと環境要因の間には、時間単位によって異なる応答を示す。

SPAとその他の場所における森林の群落コンダクタンスと環境要因の関係の違いは、どのようになっているのであろうか。Matsumoto *et al.* (2008) は、群落コンダクタンスと環境要因の関係を表すJarvisモデルを、SPAと北海道の森林2カ所、愛知県の森林1カ所の計4カ所の森林に適用した。群落コンダクタンス (G_s) に関連する気象要素としては、林外の下向き日射量 (S_d)、群落上の気温 (T_a)、群落上の大気飽差 (VPD)、0～-50 cmまでの土壌水分量 (SWC) を用いた。Jarvisモデルの G_s は、以下の2つの方法によって求められた。1つはサイト毎に G_s と4つの環境要素の関係を求める方法であり、“within-site” モデルと名付けられた。もう1つの方法は、4つの森林を区別せずに全てのデータを用いて、 G_s と環

境要因の関係を求めるものである。このモデルは、“pooled”モデルと名付けられた。

図-6は、Gsの実測値と“within-site”モデルおよび“pooled”モデルによる推定値を比較している。“pooled”モデルによる推定値は“within-site”モデルによる推定値から大きく外れることはなく、観測値を良好に再現している。また、SPAのように4つの環境要素の値が低くとも、“pooled”モデルでは互いに補完し合っている。そして、Matsumoto *et al.* (2008)は、“森林の応答特性は、気候帯、森林タイプを超えて1つの関係に収束している”と言う新たな考え方を示している。

空気力学的コンダクタンス (G_a) に関しては、Nakai *et al.* (2008a;2008b) によって調べられた。Nakai *et al.* (2008a) は、Matsumoto *et al.* (2008) と同じくSPAを含む5つの森林で、地面修正量 d と粗度長 z_0 に関する調査を行った。これらのパラメータを群落高 h で基準化した d/h 、 z_0/h は、上記の5つの森林でそれぞれ異なった値となり、それらの違いは立木密度によって決定されていた。すなわち、SPAの基準化された d/h は他の森林よりも低くなり、 z_0/h は他の森林よりも高くなった。さらに、立木密度の小さい林ほどPAIの季節変化による G_a の変動が大きくなることから、立木密度とPAIを用いて空気力学的コンダクタンスの振る舞いをモデル化した。またNakai *et al.* (2008b) は、 z_0 と d の線形関係から決定される群

落高 (真木, 1975), すなわち空気力学的群落高が様々な森林における代表的な樹冠層の高さに対応することを示した。そして、Nakai *et al.* (2010) は、様々な群落高と空気力学的群落高の対応を調べ、有効群落高と空気力学的群落高が一致することを見いだした。

Baldocchi *et al.* (1997) は、評価するフットプリントの確率密度曲線の水平分布は群落高に影響されることを示し、Desai *et al.* (2008) は CO_2 フラックスが群落高との相関が高かったことから、 CO_2 フラックスの空間分布を説明する上で群落高が重要な要素であることを指摘している。Nakai *et al.* (2008a, 2008b, 2010) の G_a に関する研究は、これらの研究に対しても応用が期待される。

6. スパスカヤパッドにおける近年の水・炭素循環の変化

その後、東シベリア・レナ河流域でも気候変動の影響がWEC循環にも現れるようになった。そして、レナ河流域での気候変動は、乾燥化ではなくて湿潤化によるWEC循環への影響であった。

SPAを中心とするレナ河中流域においては、2005年～2008年の降水量増加に対応した上層植生、下層植生の変動が見られた。図-7は、SPAにおける森林生態系全体 (図-7a, b) と下層植生 (図-7c, d) の写真である (Ohta *et al.* 2014)。図-7aは、2003年8

図-6 スパスカヤパッドを含む4林分で実測された群落コンダクタンスとモデルによって推定された群落コンダクタンス (Matsumoto *et al.*, 2008)

a) within-site モデル b) pooled モデル

Fig. 6 Calculated and observed surface conductance at four forests including SPA (Matsumoto *et al.* 2008): a) within-site model and b) pooled model.

a) 2003年8月

b) 2007年7月

c) 1997年8月

d) 2009年6月

図-7 スパスカヤパッドにおけるカラマツ林の樹冠の写真(図-7a, b)とタワー基部付近の写真(図-7c, d) (Ohta *et al.*, 2014)

a) 2003年8月. b) 2007年7月. c) 1997年8月. d) 2009年6月

Fig. 7 Photographs of the forest canopy (Figs. 7a) and 7b)) and around the basement of tower (Fig. 7c) and 7d)) at SPA (Ohta *et al.* 2014): a) August 2003, b) July 2007, c) August 1997, and d) June 2009.

月のものであるが、上層植生は一面緑である。ところが、図-7bは2007年7月の写真であるが、画面中央に黄変あるいは茶変した部分が現れている。そして、これらの樹木は、2008年春には展葉しなかった。これらの現象は、Iwasaki *et al.* (2010), Iijima *et al.* (2010) にも記載されている。

このような上層植生の変動が、下層植生にどのような変動を与えているのだろうか。図-7cのように1997年8月には、林床にはコケモモが広がっていたが、図-7dに示す2009年6月の写真では、低木類と耐湿性に優れた草本類が広く侵入してきている。これらは、2005年に始まった降水の増加による土壌の過湿状態が、強く影響しているものと考えられる。

次に、このような植生状態の変化が、WEC循環にどのような変動を与えているのかについて見ていく。図-8は、SPAにおける群落コンダクタンス (G_s) と S_d (図-8a), T_a (図-8b), VPD (図-8c), 0~50 cmのSWC (図-8d) の関係である (Ohta *et al.*, 2014). S_d と G_s の間には、関係は見られない (図-8a)。また、 T_a と G_s あるいは VPD と G_s の関係は緩やかな負

の相関関係が見られるが、2005年~2008年にかけての豊水状態が水循環に影響を与えたかについては明らかではない (図-8b,c)。そして、SWCと G_s の関係では、2006年以前の関係と2007年以降の関係で違っていることが分かる (図-8d)。すなわち、年単位の場合、同程度のSWCに対する G_s の値は、2007年以降で2006年以前よりも小さくなる傾向を示している。

図-9は、総一次生産量 (GPP) と光合成有効放射量 (PPFD: 図-9a), T_a (図-9b), VPD (図-9c), 0~50 cmのSWC (図-9d) の関係を示している (Ohta *et al.*, 2014)。PPFDとGPPの関係は見られず (図-9a), T_a とGPP (図-9b), VPD とGPP (図-9c) の関係を見ても際立った特徴を見つけることは出来ない。つまり、年単位での G_s とGPPは、 S_d またはPPFD, T_a , VPD とは一定の関係が見いだせなかった。GPPとSWCの関係は図-9dである。 G_s とSWCとの関係と同じように、2つの関係が見られる。その関係は、2004年~2007年までの関係と2008年~2011年の関係に二分され、前者の関係は

図-8 1998年から2011年の6月から8月におけるスパスカヤパッドの群落コンダクタンスと環境要素との関係 (Ohta *et al.*, 2014)

a) 下向き日射量 (Sd). b) 気温 (Ta). c) 飽差 (VPD). d) 土壌水分量 (SWC)

a) から c) の白丸は、2011年を示す。d) で黒丸は1998年～2006年、白丸は2007年～2010年、半黒丸は2011年を示す

Fig. 8 Relations between the environmental characteristics and surface conductance at SPA during June-August in 1998-2011 (Ohta *et al.* 2014): a) downward shortwave radiation, b) air temperature, c) vapor pressure deficit, and d) soil water content in 0-50 cm depth. White circles in Figs. 8a)-8c) show 2011. In Fig. 8d), black circles show data of 1998-2006. Open circles show 2007-2010. The semi-open circle is 2011.

後者の関係よりも同じSWCに対してGPPが大きくなる関係にある。そして、SWCとGPPの関係が変化する年はSWCとGsの関係より1年ほど遅れる関係にある。これより、過湿による水循環と炭素循環への影響の顕在化には、ほぼ1年のラグがあるといえる。

また、斉藤 (2015) によれば、SPAの同じ森林において、WEC循環に関する影響因子の解析を、上層植生、下層植生にわけ、Boosted Regression Trees法 (BRT法, Elith *et al.*, 2008) を用いて行っている。それによれば、上層植生の潜熱フラックスには土壌水

分量と上層植生量が、上層植生の総一次生産量には単位葉面積当たりの最大光合成速度と大気飽差が関連していた。また、下層植生からの潜熱フラックスには光環境が、下層植生の総一次生産量には下層の植生量が、それぞれ関連していた。このように、SPAの森林においてWEC循環を上層植生、下層植生で見ると最も影響している因子が異なり、土壌-植生-大気の間で複雑に環境要因と植生が絡み合っていることが分かる。

ここで、乾燥による干ばつの森林に対する影響は、他の気候帯で報告されている (Malhi *et al.*, 2002;

図-9 2004年から2011年の6月から8月におけるスパスカヤパッドの総一次生産量と環境要素との関係 (Ohta *et al.*, 2014)

a) 光合成有効放射量 (PAR). b) 気温 (Ta). c) 飽差 (VPD). d) 土壌水分量 (SWC)

a) から c) の白丸は、2011年を示す。d) で黒丸は2004年～2007年、白丸は2008年～2010年、半黒丸は2011年を示す

Fig. 9 Relations between the environmental characteristics and gross primary production at SPA during June-August in 2004-2011 (Ohta *et al.* 2014): a) photosynthetically active radiation, b) air temperature, c) vapour pressure deficit, and d) soil water content at 0-50 cm depth. White circles in Fig. 9a)-9c) denote 2011. In Fig. 9d), the black circles show 2004-2007, open circles show 2008-2010, and the semi-open circle is 2011.

Ciais *et al.*, 2005; Krishnan *et al.*, 2006; Barr *et al.*, 2007; Krishnan *et al.*, 2008). また、北方林においては、降水量と気温の関係から枯死率の増加も報告されている (Peng *et al.*, 2011; Ma *et al.*, 2012). しかし、森林が湿潤状態の影響で枯死率などに変化が現れると言う例は、ヤクーツクにおいて初めて見られた現象である。今後は、乾燥状態とともに湿潤状態と森林状態の関係にも注意を払っていかなければならない。

7. スパスカヤパッドとエルゲイにおける近年の水・炭素循環の比較

RIHNでは、対象とする森林が同じカラマツ林であったとしても、異なる降水量環境下において、それらのWEC循環は同じであるのか？違うのか？と言う問題設定を行った。そこで、同じカラマツ林であってもスパスカヤパッドとは降水量などが違う地点でのWEC循環に関して述べることにする。

SPAと同様にカラマツを主体とする森林である

ELGにおいても、気象観測、フラックス観測が行われた。ここでは、SPAとELGにおける観測値を用いて比較する (Kotani *et al.*, 2014)。

図-10は、SPAとELGにおける2010年から2012年の蒸発散量 (ET)、純生態系生産量 (NEE)、総一次生産量 (GPP) および生態系呼吸量 (Re) の変動を示す。5月から9月の生育期間における両サイトのETは同程度であったが (図-10a)、ELGにおけるNEEはSPAの1.6倍であった (図-10b)。これは、図-10dに示すようにReが両サイトで差が小さいのに対して、GPPは図-10cに示すようにELGの方がSPAにおけるGPPの量よりも大きかったことによる。ELGにおけるGPPが多い原因としては、植物量の違いが挙げられる。ELGでは降水量がSPAの1.3倍程度であり、植物量が多い。また、ELGと比較して樹木バイオマスの小さいSPAでは、ETもELGより小さいことが予想されるが、土壌面からの蒸発と下層植生からの蒸散が樹木からのETを補っている

(Iida *et al.*, 2009)。そして、ELGと同程度のETが観測されている (図-10a)。

下層植生からの蒸発散の寄与の違いに加えて、2つの森林生態系におけるGPPとETの相違に関しては、樹木が利用できる土壌水分量の相違が考えられる (Kotani *et al.*, 2014)。両サイトにおける夏期のSWCの違いは、両サイトにおいて発生する同規模の降雨によっても見受けられた。SPAにおいては、無降雨期間には下層植生の蒸散と地面蒸発によって地表面付近のSWCは減少するが、それよりも深い層のSWCは一定であった。この層のSWCが維持される理由としては、SPAでは土壌の透水性が大きいため上層からの浸透がより速やかであること、そして活動層の底面、すなわち凍結面が不透水層として働くこと (Lopez *et al.*, 2007) などが考えられる。一方、ELGでは土壌の保水力が大きいことに加えて、SPAに比べて落葉落枝が豊富であり、土壌表層からの蒸発散を押さええていると考えられる (Kotani *et al.*, 2014)。

図-10 2010年から2012年におけるスパスカヤパッドとエルゲイにおける (a) 蒸発散量 (ET), (b) 純生態系生産量 (NEE), (c) 総一次生産量 (GPP), (d) 生態系呼吸量 (Re) (Kotani *et al.*, 2014)
黒丸がスパスカヤパッド、白丸がエルゲイを表している

Fig. 10 Time series of evapotranspiration ET (a), net ecosystem exchange NEE (b), gross primary production GPP (c), and ecosystem respiration Re (d) at SPA and ELG in 2010-2012 (Kotani *et al.* 2014). Black circles are at SPA; open circles are at ELG.

SPAとELGでは、植物量とSWCの違いにもかかわらず、下層植生の寄与と土壌特性の違いにより2つの森林の蒸発散量は同程度となった。GPPの季節変化がサイトにより異なったため、水利用効率(WUE)は両サイトで異なる変化を示す。ELGにおけるWUEの季節変化は、最夏期に絶対値が減少する傾向を示したが、これは北方林地帯の気候においては他の地域でも見られる(Kuglitsch *et al.*, 2008)。また、SPAにおけるWUEは、日変化、季節変化とも明瞭な変動を示さなかった(Kotani *et al.*, 2014)。

このように、SPAとELGを比較すると、植物成長期を通じてWEC循環には異なる調節機構が働いていることが分かった。Dolman *et al.* (2004) が示したように、樹木などの上層植生が高い蒸散量を維持し早く落葉に向かうことを回避するような機構が働いている。すなわち、森林が成立している地域の気象条件に対して、森林の蒸発散量は最適化していることが考えられる。そして、この影響が年間蒸発散量が小さな割合で変化することにつながっているのかもしれない(Ohta *et al.*, 2008)。

8. 東シベリアにおける流域からの流出

これまでの議論は、東シベリアにおけるカラマツを中心とする森林におけるWEC循環と環境要因による調節機構が主な話題であった。しかし、水文学の分野では、流域からの流出現象も重要な課題である。そこで以下では、GAME, WECNoF, RIHNの共通課題であるレナ河流域の流出現象を取り上げて論説する。

図-11は、夏期の基底流出量から推定したレナ河の4つの支流(図-1)における1950年～1969年、1970年～1989年および1990年～2008年の年最大活動層深さの変化速度(dn_0/dt ; cm year^{-1})の経時変化である(Brutsaert and Hiyama, 2012)。これによれば年最大活動層深さは、1970年代以降、深くなる傾向にある。1950年～2008年の間にレナ河上流とオレクマ河の不連続永久凍土帯では $0.3 \sim 1.0 \text{ cm year}^{-1}$ の速度で永久凍土が融解し、永久凍土帯であるアルダン河の2流域では $0.1 \sim 0.5 \text{ cm year}^{-1}$ で永久凍土が融解していることがわかった。Frauenfeld *et al.* (2004) は、ロシアにおける永久凍土帯の31地点で活動層深さを調べ、1956年～1990年の間に平均 $0.59 \text{ cm year}^{-1}$ の速度で活動層深さが深くなったことを示した。Zhang *et al.* (2005) は、我々と同じレナ河流域の17地点での観測で、活動層の深化は平均 0.9 cm year^{-1}

図-11 レナ河上流部の4支流における1950年～1969年、1970年～1989年、1990年～2008年の年最大活動層深さの変化速度 (Brutsaert and Hiyama, 2012)

Fig. 11 Average changes of the annual maximum active layer depth in the tributary of the upstream basin of the Lena River during 1950-1969, 1970-1989, and 1990-2008 (Brutsaert and Hiyama 2012).

との結論を得ている。これらの研究は、Brutsaert and Hiyama (2012) の研究結果と一致する。もっと小さなスケールの研究では、Yang *et al.* (2002) が1931年～1986年にかけてヤクーツク近傍において、年最大活動層深さが1950年の-200 cm深から1985年の-220 cm深に深くなっており、活動層深さの変化速度が年平均で $0.57 \text{ cm year}^{-1}$ 増加したことが報告されている。このようなスケールにおいても、Brutsaert and Hiyama (2012) の結果は一致している。

ヤクーツク近郊のSPAにおける観測例では、Ohta *et al.* (2008) が夏期の融解深が1998年～2003年の平均-127 cmから2006年の-200 cmへと深化したことを示し、活動層深さの変化速度は年平均で 9.1 cm year^{-1} となった。Iijima *et al.*, (2014) は、同じSPAにおいて活動層厚のマニュアル観測を行い、年最大活動層深さは2000年の-137 cmから2007年の-167 cmへと深化(変化速度は年平均で 3.3 cm year^{-1})したことを報告した。Brutsaert and Hiyama (2012) は、ヤクーツクに近いアルダン河の一つの支流流域で1990年～2008年の平均融解深は $2.5 \sim 3.2 \text{ cm year}^{-1}$ を求めている。これらの結果から見ると、最近のヤクーツク周辺域の年最大融解深の変化速度は $10^0 \text{ cm year}^{-1}$ と推定される。このように、流域単位で見れば、1970年代以降レナ河流域における活動層の深さは増加していることが分かる。

次にHiyama *et al.* (2013a) は、ヤクーツク周辺における湧水調査により永久凍土帯での地下水滞留時間について調べた。地下水の滞留時間に関しては、

乾燥地、半乾燥地および湿潤地において調べられている (Busenberg and Plummer 1992; 2000; IAEA 2006)。しかし、本研究で対象とする永久凍土帯を含む寒冷地域では、地下水の貯留時間の推定は初めての試みである。4湧水のトリチウムの分析結果は1~16.8 TUの値を示し、湧水がいつの降雨に由来するかと言う地下水の推定年齢は1-55年となった。そして、湧水の90 %以上が1960年代の核実験以前のものであることが明らかになった。

9. 東シベリアにおけるモデルシミュレーション

また、GAME, WECNoF, RIHNにおける東シベリア・レナ河流域のWEC循環に関する共通の課題として、モデル研究がある。レナ河流域におけるWEC循環のモデルシミュレーションの研究は、大きく分けて2つの分野で行われてきた。1つは鉛直1次元モデルを用いる方法で、水循環の観点から主にSPAで発展してきた。もう1つはWEC循環を扱うもので、河道の水の運動も含めた3次元モデルでの利用である。これは、レナ河流域を対象に発展してきた。

鉛直1次元モデルによる水循環の研究は、Yamazaki (2001) によってSPAで開発が行われ、水・エネルギー収支の日変化、季節変化が計算された。続いて、Yamazaki *et al.* (2004) は2LM (two-layer model) によりSPAのカラマツ林、ヨーロッパアカマツ林およびレナ河対岸のカラマツ林、草地で、適切なPAIが与えられれば同一の気孔パラメータで水・エネルギー収支を求められることを示した。その後、SPAにおけるポテンシャル蒸発量に対する実蒸発散量の比 (E/E_p) などに用いられ (Yamazaki *et al.*, 2007)、モデルによる E/E_p の値は0.37-0.44となった。これは、Ohta *et al.*, (2008) が実測値で示した E/E_p の値の0.3-0.45と極めて近い結果となった。2LMは、森林タワーで気象観測が計測されていない期間にも用いられ、水・エネルギー循環に関しては十分な精度で再現されている (Yamazaki *et al.*, 2007)。また、Yamazaki *et al.* (2013) は、Matsumoto *et al.* (2008) が示した東アジア12林分のデータから得られたwithin-siteモデルとpooledモデルについて、東アジア4林分で検証を行った。その結果、pooledモデルの結果はwithin-siteモデルの結果と大きな違いがないことが分かった。これは、Matsumoto *et al.* (2008) が提案した“森林は気候帯、森林タイプを越えて、ある関係に収束している”と言う考え方が、より広い範囲でも適合することを示している。

レナ河におけるWEC循環の予測は、以下のように進められた。Yamazaki *et al.* (2004) が示した2LMを、 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 解像度でレナ河流域に拡張した (Park *et al.*, 2008)。このグリッドに2LMで計算される水収支の余剰水を、八田ら (2009) が示した分布型水文モデルに与え、河道流を追跡するモデルである。Park *et al.* (2008) が示した2LMを流域スケールに発展させたモデルによって得られるレナ河流域の平均蒸発散量は、1986年から2000年の6~8月の場合で 1.6 mm day^{-1} となった。この値は、ヤクーツク周辺の過去の観測例として挙げられる 1.9 mm day^{-1} (Kelliher *et al.*, 1997), 1.7 mm day^{-1} (Kelliher *et al.*, 1998), 1.2 mm day^{-1} (Ohta *et al.*, 2001), 1.5 mm day^{-1} (Dolman *et al.*, 2004) に近いものとなった。また、モデルによって計算される流域平均の年蒸発散量は $201.1 \text{ mm year}^{-1}$ (標準偏差; $\pm 13.3 \text{ mm}$) であり、過去にモデル化した蒸発散量として計算されている Serreze *et al.* (2001) や Fukutomi *et al.* (2003) の結果とも一致している。

次に、2LMを結合させたレナ河における分布型水文モデルに関して述べる (八田ら, 2009)。単位メッシュへの余剰水は一定の割合で直接流出成分と基底流出成分とに分けられる。そして、直接流出成分は直接河道に与えられ、基底流出成分は貯留関数を介して河道に与えられる。実測流量の再現を試みた結果、貯留関数を通過する基底流出成分の割合は、流域全体における流出水の30 %となった。また、貯留関数内の運動パラメータ k の値は125daysと非常に大きく、非常に遅い成分の存在を示している。すなわち、レナ河からの夏期の流出には、陸面過程モデル (2LM) における土壌と河道の変換系によって流出は説明できるが、冬期にはより遅い流出成分の占める割合が顕在化し、この遅い成分の評価が重要であることを示している。本研究では、上記のように余剰水のうち貯留関数を通過する割合は30 %としている。これは、Shepelev *et al.* (1984) によるレナ河からの流出に占める凍土中あるいは凍土下からの地下水の割合が20~30 %であると述べていることにほぼ一致する。すなわち、非常に遅い流出成分が、レナ河には存在していることになる。

これまでレナ河流域においては、1水文年の流出計算に成功した例はあるが (Ma and Fukushima, 2002)、同一パラメータにより10年以上の再現が出来たことは特筆すべきである。

IV. まとめ

本総説では、東シベリアにおける WEC 循環に関して、水文学および気象学的側面より 1998 年から 2013 年までの成果を中心に解説した。SPA では、1) カラマツ林の暖候期における WEC 循環の環境要素との関係、2) 群落コンダクタンスと空気力学的コンダクタンスの変動要因、3) 2005 年～2008 年にかけての湿潤化による WEC 循環の変動特性などが明らかになった。また、SPA と ELG における観測では、4) 同じカラマツ林ではほぼ等しい気象条件であっても下層植生の成立条件により WEC 循環が異なっていることが示された。流域における流出量の観測では、5) 永久凍土の表層の融解深は $10^0 \text{ cm year}^{-1}$ で、近年はその融解過程の速度が上昇していることが示された。WEC 循環に関するモデル研究では、6) 陸面モデルで推定された蒸発散量は渦相関法から導かれた蒸発散量とほぼ同じ範囲にあった。河道モデルでは、7) 年間の流出量のうち約 30 % が非常に遅い流出成分であり、実測値ともほぼ一致することが示された。

今後は、地球温暖化が進む中で、東シベリアに存在する北方林が環境の変化にどのように適応するのかが課題となろう。つまり、温暖化に伴う気温や降水量の経年変化において年平均値の上昇ばかりでなく、年最高値や年最低値も変動する。その中で、レナ河流域の SPA では 2005 年～2008 年に降水量が大きく増える傾向にあった。ELG ではまだ観測年数が短いためこのような傾向は見られていないが、短・中期的な湿潤化の影響が現れる可能性がある。この湿潤化の影響は、WEC 循環がより劣化した斜面がより広い範囲に広がっていくだろう。WEC 循環に関する実態解明とモデル開発の研究は、流域の乾燥化のみでなく湿潤化に対しても水文学的、生態学および気象学的な影響を与える可能性がある。

謝辞

この研究は、Global Energy and Water Cycle Experiment (GEWEX) Asian Monsoon Experiment - Siberia (GAME-Siberia), Core Research for Evolutional Science and Technology - Water and Energy Cycles in Northern Forests (CREST/WECNoF), Research Institute for Humanity and Nature, Research Project No. C-07 (RIHN-Siberia), 名古屋大学グローバル COE プログラム「地球学から基礎・臨床環境学への展開」および科学研究費補助金(基盤研究 A: 26252021)からの援助を受けた。

また、編集担当者、2 名の査読者の方々に心からの謝意を表します。

引用文献

- Baldocchi DD, Vogel CA. 1997. Seasonal variation of energy and water vapor exchange rates above and below a boreal jack pine canopy. *Journal of Geophysical Research* 102, D24: 28939-28951.
- Barr AG, Black TA, Hogg EH, Griffis TJ, Morgenstern K, Kljun N, Theede A, Nesic Z. 2007. Climatic controls on the carbon and water balances of boreal aspen forest, 1994-2003. *Global Change Biology* 13: 561-576. DOI:10.1111/j.1365-2486.2006.01220.x.
- Betts RA, Malhi Y, Roberts J T. 2008. The future of Amazon: new perspectives from climate, ecosystem and social sciences. *Philosophical Transactions of the Royal Society* 363: 1729-1735. DOI:10.1098/rstb.2008.0011.
- Blanken PD, Black TA. 2004. The canopy conductance of a boreal aspen forest, Prince Albert National Park, Canada. *Hydrological Processes* 18: 1561-1578. DOI:10.1002/hyp.1406.
- Bonan GB, Pollard D, Thompson SL. 1992. Effects of boreal forest vegetation on global climate. *Nature* 359: 716-718.
- Bonan GB. 1995 Land atmosphere CO₂ exchange simulated by a land surface process model coupled to an atmospheric general circulation model. *Journal of Geophysical Research* 100: 2817-2831.
- Brando PM, Nepstad DC, Davidson E A, Trumbore SE, Ray D, Camargo P. 2008. Drought effects on litter, wood production and belowground carbon cycling in an Amazon forest: results of a throughfall reduction experiment. *Philosophical Transactions of the Royal Society* 3363: 1839-1848. DOI:10.1098/rstb.2007.0031.
- Brutsaert W, Hiyama T. 2012. The determination of permafrost thawing trends from long-term streamflow measurements with an aolication in eastern Siberia. *Journal of Geophysical Research*. 117: D22110, DOI:10.1029/2012JD018344.
- Busenberg E, Plummer LN. 1992. Use of chlorofluorocarbons (CCl₃F and CCl₂F₂) as hydrologic tracers and age-dating tool: the alluvium and terrace system of Central Oklahoma. *Water Resource Research* 28: 2257-2283. DOI:10.1029/92WR01263.
- Busenberg E, Plummer LN. 2000. Dating young groundwater with sulfur hexafluoride: natural and anthropogenic sources of sulfur hexafluoride. *Water Resource Research* 36: 3011-3030. DOI:10.1029/2000WR900151.
- Ciais Ph, Reichstein M, Viovy N, Granier A, Ogée J, Allard V, Aubinet M, Buchmann N, Bernhofer Chr, Carrara A, Chevallier F, Noblet N De, Friend AD, Friedligstein P, Grünwald T, Heinesch B, Keronen P, Knohl A, Krinner G, Loustau D, Manca G, Matteucci G, Miglietta F, Ourcival JM, Papale D, Pilegaard D, Rambal S, Seufert G, Soussana JF, Sanz MJ, Schulze ED, Vesala T, Valentini R. 2005. Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature* 437: 529-533. DOI:10.1038/nature03972.
- Desai AR, Noormets A, Bolstad PV, Chen J, Cook BD, Davis KJ, Euskirchen ES, Gough C, Martin JG, Ricciuto DM, Schmid HP, Tang J, Wang W. 2008. Influence of vegetation and seasonal forcing on carbon dioxide fluxes across the Upper Midwest, USA: Implications for regional scaling. *Agricultural and Forest Research* 148: 288-308. DOI:10.1016/j.agrformet.2007.11.012.

- Dolman AJ, Maximov TC, Moors EJ, Maximov AP, Elbers JA, Kononov AV, Waterloo M J, van der Molen MK. 2004. Net ecosystem exchange of carbon dioxide and water of far eastern Siberian larch (*Larix cajanderii*) on permafrost. *Biogeosciences* 1: 133-146. DOI:10.5194/bg-1-133-2004.
- Elith J, Leathwick JR, Hastie T. 2008. A working guide to boosted regression trees. *Journal of Animal Ecology* 77: 802-813. DOI:10.1111/j.1365-2656.2008.01390.x.
- FAO. 2005. State of the World's Forest. Food and Agriculture Organization of the United Nation. Rome; 166.
- Frauenfeld OW, Zhang T, Barry RG, Gilichinsky D. 2004. Interdecadal changes in seasonal freeze and thaw depths in Russia. *Journal of Geophysical Research* 109: D05101. DOI: 10.1029/2003JD004245.
- Fukutomi Y, Igarashi H, Masuda K, Yasunari T. 2003. Interannual variability of summer water balance components in three major river basins of northern Eurasia. *Journal of Hydrometeorology* 4: 283-296.
- Granier A, Reichstein M, Bréda N, Janssens IA, Falge E, Ciais P, Grünwald T, Aubinet A, Berbigier P, Bernhofer C, Buchmann N, Facini O, Grassi G, Heinesch B, Ilvesniemi H, Keronen P, Knohl A, Köstner B, Lagergren F, Lindroth A, Longdoz B, Loustau D, Mateus J, Montagnani L, Nys C, Moors E, Papale D, Peiffer M, Pilegaard K, Pita G, Pumpanen J, Rambal S, Rebmann C, Rodrigues A, Seufert G, Tenhunen J, Vesala T, Wang Q. 2007. Evidence for soil water control on carbon and water dynamics in European forests during the extremely dry year: 2003. *Agricultural and Forest Research* 143: 123-145. DOI:10.1016/j.agrfotmet.2006.12.004.
- Grantz DA, Vauohn DL. 1999. Vertical profiles of boundary layer conductance and wind speed in a cotton canopy measured with heated brass surrogate leaves. *Agricultural and Forest Research* 97: 187-197.
- Grelle A, Lundberg A, Lindroth A, Morén A-S, Cienciala E. 1997. Evaporation components of a boreal forest: variations during the growing season. *Journal of Hydrology* 197: 70-87. DOI:10.1016/S0022-1694(96)03267-2.
- Halldin S, Gryning S-E, Gottschalk L, Jochum A, Lundin L-C, Van de Griend AA. 1999. Energy, water and carbon exchange in a boreal forest landscape - NOPEX experiences. *Agricultural and Forest Research* 98-99: 5-29.
- Hamada S, Ohta T, Hiyaama T, Kuwada T, Takahashi A, Maximov TC. 2004. Hydrometeorological behavior of pine and larch forests in eastern Siberia. *Hydrological Processes* 18: 23-39. DOI:10.1002/hyp.1308.
- 八田茂美・早川 博・朴 昊澤・山崎 剛・山本一清・太田岳史2009. 分布型水文モデルによるレナ川流域の長期流出解析. 水文・水資源学会誌 22: 178-187.
- Hiyaama T, Asai K, Kolesnikov AB, Gagarin LA, Shepelev V. 2013a. Estimation of the residence time of permafrost groundwater in the middle of the Lena River, eastern Siberia. *Environmental Research Letters* 8: 035040, DOI:10.1088/1748-9326/8/3/035040.
- Hiyaama T, Ohta T, Sugimoto A, Yamazaki T, Oshima K, Yonemoto H, Yamamoto K, Kotani A, Park H, Kodama Y, Hatta S, Fedorov AN, Maximov TC. 2013b. Changes in eco-hydrological systems under recent climate change in eastern Siberia. *IAHS Publication* 360: 155-160.
- 檜山哲哉・藤原潤子. 2015. シベリア-温暖化する極北の水環境と社会. 京都大学学術出版会: 511.
- IAEA. 2006. *Use of chlorofluorocarbons in Hydrology-A guidebook*: Vienna; 277.
- Iida S, Ohta T, Matsumoto K, Nakai T, Kuwada T, Kononov AV, Maximov TC, Dolman H, Tanaka H, Yabuki H. 2009. Evapotranspiration from understory vegetation in an eastern Siberian boreal larch forest. *Agricultural and Forest Research* 149: 1129-1139. DOI:10.1016/j.agrfotmet.2009.02.003.
- Iijima Y, Fedorov AN, Park H, Suzuki K, Yabuki H, Maximov TC, Ohata T. 2010. Abrupt increases in soil temperature following increased precipitation in a permafrost region, central Lena River basin, Russia. *Permafrost and Periglacial Processes* 21: 30-41. DOI:10.1002/ppp.662.
- Iijima Y, Ohta T, Kotani A, Fedorov AN, Kodama Y, Maximov TC. 2014. Sap flow changes in relation to permafrost degradation under increasing precipitation in an eastern Siberian larch forest. *Ecohydrology* 7: 177-187. DOI:10.1002/eco.1366.
- Iwasaki H, Saito H, Kuwao K, Maximov TC, Hasegawa S. 2010. Forest decline caused by high soil water conditions in a permafrost region. *Hydrological Earth System Sciences* 14: 301-307. DOI:10.5194/hess-14-301-2010.
- Kelliher FM, Hollinger DY, Schulze E-D, Vygodskaya NN, Byers JN, Hunt JE, McSeveny TM, Milukova I, Sogatchev A, Varlargin A, Ziegler W, Arneth A, Bauer G. 1997. Evaporation from an eastern Siberian larch forest. *Agricultural and Forest Research* 85: 135-147.
- Kelliher FM, Lloyd J, Arneth A, Byers JN, McSeveny TM, Milukova I, Grigoriev S, Panfyorov M, Sogatchev A, Varlargin A, Ziegler W, Bauer, G, Schulze E-E. 1998. Evaporation from a central Siberian pine forest. *Journal of Hydrology* 205: 279-296.
- Kotani A, Kononov AV, Ohta T, Maximov TC. 2014. Temporal variations in the linkage between the net ecosystem exchange of water vapour and CO₂ over boreal forests in eastern Siberia. *Ecohydrology* 7: 209-225. DOI: 10.1002/eco.1449.
- Krishnan P, Black TA, Grant NJ, Barr AG, Hogg EH, Jassal RS, Morgenstern K. 2006. Impact of changing soil moisture distribution on net ecosystem productivity of a boreal aspen forest during and following drought. *Agricultural and Forest Research* 139: 208-223. DOI:10.1016/j.agrfotmet.2006.07.002.
- Krishnan P, Black TA, Barr TA, Grant NJ, Gaumont-Guay D, Nesic Z. 2008. Factors controlling the interannual variability in the carbon balance of a southern boreal black spruce forest. *Journal of Geophysical Research* 113: D09109. DOI:10.1029/2007JD008965.
- Kuglitsch FG, Reichstein M, Beer C, Carrara A, Ceulemans R, Granier A, Janssens IA, Koestner B, Lindroth A, Loustau D, Matteucci G, Montagnani L, Moors EJ, Papale D, Pilegaard K, Rambal S, Rebmann C, Schulze ED, Seufert G, Verbeeck H, Vesala T, Aubinet M, Bernhofer C, Foken T, Grünwald T, Heinesch B, Kutsch W, Laurila T, Longdoz B, Miglietta F, Sanz MJ, Valentini R. 2008. Characterisation of ecosystem water-use efficiency of European forests from eddy covariance measurements. *Biogeosciences Discussions* 5: 4481-4519. DOI:10.5194/bgd-5-4481-2008.
- Lawford RG, Stewart R, Roads J, Isemer H-J, Manton M, Marengo J, Yasunari T, Benedict S, Koike T, Willeams S. 2004. Advancing global- and continent-scale hydrometeorology. *Bulletin of the American Meteorological Society* 85: 1917-1930. DOI:http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-85-12-1917.

- Lindroth A. 1985. Seasonal and diurnal variation of energy budget components in coniferous forests. *Journal of Hydrology* 82: 1-15.
- Lopez ML, Saito H, Kobayashi K, Shiota T, Iwahana G, Maximov TC, Fukuda M. 2007. Interannual environmental-soil thawing rate variation and its control on transpiration from *Larix cajanderi*, Central Yakutia, Eastern Siberia. *Journal of Hydrology* 338: 251-260. DOI:10.1016/j.jhydrol.2007.02.039.
- Ma X, Fukushima Y. 2002. A numerical model of the river freezing process and its application to the Lena River. *Hydrological Processes* 16: 2131-2140. DOI:10.1002/hyp.1146.
- Ma Z, Peng C, Zhu Q, Chen H, Yu G, Li W, Zhou X, Wang W, Zhang W. 2012. Regional drought-induced reduction in the biomass carbon sink of Canada's boreal forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109: 2423-2427. DOI:10.1073/pnas.1111576109.
- 真木太一 1975. 種々の植被面における風速分布式の中の変数と安定度. 農業気象 31: 61-70.
- Malhi Y, Pegoraro E, Nobre AD, Pereira MGP, Graca J, Culf AD, Clement R. 2002. Energy and water dynamics of a central Amazonian rain forest. *Journal of Geophysical Research* 107, D20: 8061. DOI:10.1029/2001JD000623.
- Matsumoto K, Ohta T, Nakai T, Kuwada T, Daikoku K, Iida S, Yabuki H, Kononov AV, van der Molen MK, Kodama Y, Maximov TC, Dolman AV, Hattori S. 2008. Responses of surface conductance to forest environments in the Far East. *Agricultural and Forest Research* 148: 1926-1940. DOI:10.1016/j.agrformet.2008.09.009.
- Moors E, Dolman AJ, Maximov TC. 2004. Overview of joint research at Spasskaya Pad as part of the PINMATRA and TCOS-Siberia programmes. *Proceedings of the international semi-open workshop "C/H₂O/Energy balance and climate over boreal regions with special emphasis on eastern Eurasia"*: 15-18.
- Nakai T, Sumida A, Daikoku K, Matsumoto K, van der Molen MK, Kodama Y, Kononov AV, Maximov TC, Dolman AJ, Yabuki H, Hara T, Ohta T. 2008a. Parameterisation of aerodynamic roughness over boreal, cool- and warm-temperate forests. *Agricultural and Forest Research* 148: 1916-1925. DOI:10.1016/j.agrformet.2008.03.009.
- Nakai T, Sumida A, Matsumoto K, Daikoku K, Iida S, Park H, Miyahara M, Kodama Y, Kononov AV, Maximov TC, Yabuki H, Hara T, Ohta T. 2008b. Aerodynamic scaling for estimating the mean height of dense canopies. *Boundary-Layer Meteorology* 128: 423-443. DOI:10.1007/s10546-008-9299-5.
- Nakai T, Sumida A, Kodama Y, Hara T, Ohta T. 2010. A comparison between various definitions of forest stand height and aerodynamic stand height. *Agricultural and Forest Research* 150: 1225-1233. DOI:10.1016/j.agrformet.2010.05.005.
- Ohta T, Hiyama T, Tanaka H, Kuwada T, Maximov T C, Ohta T, Fukushima Y. 2001. Seasonal variation in the energy and water exchanges above and below a larch forest in Eastern Siberia. *Hydrological Processes* 15: 1459-1476. DOI:10.1002/hyp.219.
- Ohta T, Maximov TC, Dolman AJ, Nakai T, van der Molen MK, Kononov AV, Maximov A P, Hiyama T, Iijima Y, Moors EJ, Tanaka H, Toba T, Yabuki H. 2008. Interannual variation of water balance and summer evapotranspiration in an eastern Siberian larch forest over a 7-year period (1998-2006). *Agricultural and Forest Research* 148: 1941-1953. DOI:10.1016/j.agrformet.2008.04.012.
- Ohta T. 2010. Hydrological aspects in a Siberian larch forest. In *Permafrost Ecosystems*, Osawa A. (ed). Springer:London; 245-269.
- Ohta T, Kotani A, Iijima Y, Maximov TC, Ito S, Hanamura M, Kononov AV, Maximov AP. 2014. Effects of waterlogging on water and carbon dioxide fluxes and environmental variables in a Siberian larch forest, 1998-2011. *Agricultural and Forest Research* 188: 64-75. DOI:10.1016/j.agrformet.2013.12.012.
- Park H, Yamazaki T, Yamamoto K, Ohta T. 2008. Tempo-spatial characteristics of energy budget and evapotranspiration in the eastern Siberia. *Agricultural and Forest Research* 148: 1990-2005. DOI:10.1016/j.agrformet.2008.06.018.
- Peng C, Ma Z, Lei X, Zhu Q, Chen H, Wang W, Liu S, Li W, Fang X, Zhou X. 2011. A drought-induced pervasive increase in tree mortality across Canada's boreal forests. *Nature Climate Change* 1: 467-471. DOI:10.1038/NCLIMATE1293.
- 齊藤淳志 2015. 東シベリアカラマツ林における長期湿害に伴う水・炭素交換特性の変化. 名古屋大学生命農学研究科修士論文; 70.
- Schulze E-D, Vygotskaya NN, Tchepakova NM, Czimczik CI, Kozlov DN, Lloyd J, Mollicone D, Parfenova E, Sidorov KN, Varlagin AV, Wirth C. 2002. The eurosiberian transect: An introduction to the experimental region. *Tellus* 54B: 421-428. DOI:10.1034/j.1600-0889.2002.01342.x.
- Sellers P, Hall F, Margolis H, Kelly B, Baldocchi D, den Hartog G, Cihlar J, Ryan MG, Goodison B, Crill P, Ranson K J, Lettenmaier D, Wickland DE. 1995. The boreal ecosystem-atmosphere Study (BOREAS): An overview and early results from the 1994 field year. *Bulletin of the American Meteorological Society* 76: 1549-1577. DOI:http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477(1995)076<1549:TBESAO>2.0.CO;2.
- Serreze MC, Bromwich DH, Clark MP, Etinger AJ, Zhang T, Lammers R. 2001. Large-scale hydro-climatology of the terrestrial Arctic drainage system. *Journal of Geophysical Research* 108, D2: 8160. DOI: 10.1029/2001JD000919.
- Shepelev VV, Tolstykhin ON, Piguzova VN. 1984. Permafrost hydrogeological conditions of eastern Siberia. *Science* 187. (in Russian).
- Shuttleworth WJ, Gash JH, Lloyd CR, Moore CJ, Roberts J, Filho ADAM, Fisch G, Filho VDPS, Ribeiro MDNG, Molion LCB, Sa LDDA, Nobre JCA, Cabral OMR, Patel SR, Moraes JCD. 1984. Eddy covariance measurements of energy partition for Amazonian forest. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 110: 1143-1162. DOI:10.1002/qj.49711046622.
- Sugimoto A, Yanagisawa N, Naito D, Fujita N, Maximov C. 2002. Importance of permafrost as a source of water for plants in east Siberian taiga. *Ecological Research* 17: 493-503. DOI:10.1046/j.1440-1703.2002.00506.x.
- Tchepakova NM, Kolle O, Zolotoukhine D, Arneth A, Styles JM, Vygotskaya NN, Schulze E-D, Shibistova O, Lloyd J. 2002. Inter-annual and seasonal variation of energy and water vapour fluxes above a *Pinus sylvestris* forest in the Siberian middle taiga. *Tellus* 45B: 537-551. DOI:10.1034/j.1600-0889.2002.01337.x.
- Vourlitis GL, Nogueira JdS, Lobo FdA, Sendall KM, de Paulo SR, Dias CAA, Pinto Jr O B, de Andrade NLR. 2008. Energy balance and canopy conductance of tropical semi-deciduous

- forest of the southern Amazon Basin. *Water Resource Research* 44: W03412, DOI:10.1029/2006WR005526.
- Xue BL, Komatsu H, Kumagai T, Kotani A, Otsuki K, Ohta T. 2012. Interannual variation of evapotranspiration in an eastern Siberian larch forest. *Hydrological Processes* 26: 2360-2368. DOI:10.1002/hyp.9195.
- Yamazaki T. 2001. A one-dimensional land surface model adaptable to intensely cold regions and its applications in Eastern Siberia. *Journal of the Meteorological Society of Japan* 79: 1107-1118.
- Yamazaki T, Yabuki H, Ishii Y, Ohta T, Ohata T. 2004. Water and energy exchanges at forests and a grassland in eastern Siberia evaluated using a one-dimensional land surface model. *Journal of Hydrometeorology* 5: 504-515. DOI:http://doi.org/10.1175(2004)005<0504:WAEAF>2.0.CO;2.
- Yamazaki T, Ohta T, Suzuki R, Ohata T. 2007. Flux variation in a Siberian taiga forest near Yakutsk estimated by a one-dimensional model with routine data, 1986-2000. *Hydrological Processes* 21: 2009-2015. DOI:10.1002/hyp.6708.
- Yamazaki T, Kato K, Ito T, Nakai T, Matsumoto K, Miki N, Park H, Ohta T. 2013. A common stomatal parameter set used to simulate the energy and water balance over boreal and temperate forests. *Journal of the Meteorological Society of Japan* 91: 273-285. DOI:10.2151/jmsj.2013-303.
- Yang D, Kane DL, Hinzman LD, Zhang X, Zhang T, Ye H. 2002. Siberian Lena River hydrologic regime and recent change. *Journal of Geophysical Research* 107, D23: 4694. DOI:10.1029/2002JD002542..
- Yasunari T. 2007. Role of land-atmosphere interaction on Asian monsoon climate. *Journal of the Meteorological Society of Japan* 85B: 55-75.
- Yoshida M, Ohta T, Kotani A, Maximov TC. 2010. Environmental factors controlling forest evapotranspiration and surface conductance on a multi-temporal scale in growing seasons of a Siberian larch forest. *Journal of Hydrology* 395: 180-189. DOI:10.1016/j.jhydrol.2010.10.023.
- Zha T, Li C, Kellomäki S, Peltola H, Wang K-Y, Zhang Y. 2013. Controls of evapotranspiration and CO₂ fluxes from scots pine by surface conductance and abiotic factors. *PLOS ONE* 8: e69027, DOI:10.1371/journal.pone.0069027.
- Zhang L, Dawes WR, Walker GR. 2001. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resource Research* 37: 701-708. DOI:10.1029/2000WR900324.
- Zhang T, Frauenfeld OW, Serreze MC, Etringer A, Oelke C, McCreight J, Barry RG, Gilichinsky D, Yang D, Ye H, Ling F, Chudinova S. 2005. Spatial and temporal variability in active layer thickness over the Russian Arctic drainage basin. *Journal of Geophysical Research* 110: D16101. DOI:10.1029/2004JD005642.

(受付：2015年8月5日，受理：2016年3月31日)
この論文への討議・コメントを，2017年3月末日
まで受け付けます。

Water, Energy, and Carbon Dioxide Circulation in Eastern Siberian Larch Forests: GAME, CREST and RIHN Results

Takeshi OHTA ¹⁾ Tetsuya HIYAMA ²⁾ Ayumi KOTANI ¹⁾
Takeshi YAMAZAKI ³⁾ Trofim C. MAXIMOV ⁴⁾

¹⁾ Graduate School of Bioagricultural Sciences, Nagoya University
(Furo-cho, Chikusa Ward, Nagoya, Aichi 464-8601, Japan)

²⁾ Institute for Space-Earth Environmental Research (ISEE), Nagoya University
(Furo-cho, Chikusa Ward, Nagoya, Aichi 464-8601, Japan)

³⁾ Graduate School of Science, Tohoku University
(Aramaki, Aoba Ward, Sendai, Miyagi 980-8578, Japan)

⁴⁾ Institute for Biological Problems of Cryolithozone, Siberia Division, Russian Academic Society
(Lenin Avenue, Yakutsk, Republic of Sakha 677980, Russia)

During 1998-2013, water, energy, and carbon (WEC) cycles in larch forests of the Lena River Basin of eastern Siberia were investigated using plot and watershed scales. Plot scale studies of Spasskaya Pad (SPA) near Yakutsk clarified complex relations among diverse environmental variables and the WEC cycles in warm seasons. The WEC cycle characteristics in Elgeei (ELG) forest, approximately 300 km southeast of Yakutsk, which has similar climate but different species composition, differed from those at SPA. The annual maximum active layer depths of permafrost increased by $10^0 \text{ cm year}^{-1}$ in the major tributaries of the Lena River Basin. A significant increasing trend was found for the annual maximum active layer depth. The WEC cycle model indicated that the estimated evapotranspiration was in the same range as that observed using eddy correlation. Using the hydrological model, almost 30 % of the total runoff in the Lena River discharged extremely slowly; this result agreed with observed amounts. Next we must ascertain how the WEC cycles of the Siberian boreal forest adapt to expected environmental changes caused by global warming. Waterlogging in eastern Siberia expanded to a watershed scale suggests that the WEC cycles will affect environmental variables. Therefore, discussion of WEC cycles in high-latitude forests should emphasize not only drought, but also waterlogging.

Key words : water cycles, energy cycles, carbon cycles, Siberia, permafrost, surface condition