

東シベリアにおける水・エネルギー・炭素循環に関する研究

太田岳史・小谷亜由美

1. 研究の背景

地球上に森林は30%の面積を占めており、熱帯林、温帯林、北方林に分けるとその面積は、ほぼ等しい。森林の炭素蓄積は陸域で最大であり、その量は2,260 PgCにのぼっている。そして、森林は水・炭素循環を通して、森林がない時よりも穏やかな環境条件を形成している。

北方林と比較して熱帯林や温帯林では、環境変動と水・炭素循環との関係について十分な解析が進んでいる。東南アジアやアマゾンなどの熱帯林での地上観測により、Kumagaiら⁶⁾、Bettsら¹⁾などが多くの成果を挙げてきた。そのなかでもBettsら¹⁾は、アマゾンにおいて急激な環境変化が、森林と地元産業の変化に及ぼす影響に関して言及している。また、ヨーロッパの温帯林において2003年の夏に生じた大規模な干ばつ、熱波が、森林での二酸化炭素交換に及ぼす影響が解析されている²⁾。

北方林では、水・エネルギー・炭素(WEC)循環での特徴として、寒冷気候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る。寒冷圏での大気・陸面相互作用の理解を深める研究としては、北アメリカにおけるBoreal ecosystem-atmosphere study (BOREAS¹²⁾)、スカンジナビア半島におけるNorthern Hemisphere Climate Processes Land Surface Experiment (NOPEX³⁾) 等がある。本研究で対象とするシベリアでは、Terrestrial Carbon Observation System-Siberia (TCOS-

Siberia¹¹⁾)がある。これらの研究では、北方林生態系がWEC循環に与える影響を評価することが試みられている。これらにより、WEC循環の定量的評価が行われ、さらにそれらの時空間分布特性とその影響評価、より広域へスケールアップするモデル研究の発展が求められた。

本稿では、東シベリアの陸面過程について、レナ河流域の森林を対象とし、主に融雪期から秋期までの陸面フラックスの観測結果を報告する。

2. プロジェクトの概要

研究対象領域は、東シベリアの永久凍土帯に位置するレナ河流域である。森林構造の異なる2ヶ所のカラマツ林において、フラックス観測、気象環境観測を実施している。

第1の地点は、レナ河中流部に位置するヤクーツクの北方、約20kmのスパスカヤパッド実験林(62°15'N, 129°14'E, 標高220m a.s.l.)である。1996年に高さ32mの観測タワーが立てられ、1998年から観測を開始している。地形は北向き斜面であり、ほぼ平坦である。観測サイトの土壌は、sandy loamである。年平均降水量は230mm、年平均気温は-10°C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840本ha⁻¹であったが、2011年には740本ha⁻¹と減少していた。植物面積指数(PAI)は、観測期間では1.50~1.56の値で変化が小さかった。また上層木(上位10%)の平均樹高は20mである。1998年当時の下

Takeshi Ohta, Ayumi Kotani : The Studies of the Water/Energy/Carbon Cycles in an Eastern Siberia
名古屋大学生命農学研究科

層植生はコケモモ (*Vaccinium vitis-idaea*) が主力であったが、後述する 2005-8 年以降の土壌湿潤化に伴い植生変化が起こり、2011 年には低木と耐湿性に優れた草本が進入してきている。下層植生の PAI は、1998 年は 2.00、2011 年には 1.86 となった。

第 2 の地点は、レナ河支流であるアルダン川沿いの町であるウステイ・マヤ (ヤクーツクの南東、約 300 km) の南西 60 km にあるエルゲイ (60°55' N, 133°28' E, 標高 256 m a.s.l.) である。2009 年に高さ 34 m の観測タワーが立てられ観測を開始している。地形はほぼ平坦であり、土壌は podzol である。年平均降水量は 290 mm、年平均気温は -10°C である。年平均気温はスパスカヤパッドとエルゲイでは変わらないが、年平均降水量はエルゲイの方がスパスカヤパッドより 25~30% ほど多い。主な上層植生はカラマツ (*Larix cajanderi*) であり、PAI は 2.1 である。また、立木密度は 1040 本 ha⁻¹、上層木の平均樹高は 25 m である。下層植生は、1998 年のスパスカヤパッドに似ており、コケモモが主力である。下層植生の PAI は 0.8 である。

スパスカヤパッド、エルゲイともにほぼ同じシステムを用いて、気象環境の観測が行われている。気象要素は、大気側の成分として短波放射収支量 (下向き, 上向き), 長波放射収支量 (下向き, 上向き), 光合成有効放射量 (上向き, 下向き), 気温, 湿度, 風向, 風速, 地表下成分として地温, 土壌水分量が計測された。降水量は 4 月下旬から 10 月上旬まで計測した。

潜熱フラックス, 顕熱フラックス, 二酸化炭素フラックスは、渦相関法によって測定されている。渦相関法とは、鉛直風速と大気中の水蒸気密度および二酸化炭素密度の変動を計測し、単位面積あたりの水平面を通して鉛直方向に運ばれる単位時間当たりの潜熱フラックス, 顕熱フラックスおよび二酸化炭素フラックスを求める方法である。測定された二酸化炭素フラックスは、森林生態系全体からの呼吸放出量と光合成吸収量すなわち第一次生産量との差であり、正味の二酸化炭素吸収量を表す。本研究では経験的モデル式⁷⁾などを用いて、呼吸量と光合成

量に分離して解析に用いた。

3. 現在までの結果

3-1 スパスカヤパッドにおける WEC 循環に関する現在までの成果

1998~2011 年までの気象状態は、以下のようであった。降水量については、1998~2000 年と 2009~2011 年は総降水量が 200~240 mm 前後で平年並み、2001~2004 年は約 110~170 mm 前後で渇水状態、そして 2005~2008 年は約 300~330 mm の豊水状態であった。このような降水状態の変動に対して、大気状態は、純放射量, 気温, 飽差とも大きな変動はなく、ほぼ平年値を保っていた。ところが地表下の状態は、地温, 土壌水分量とも変動していた。120 cm までの地温は、最高地温はあまり変化しないが、マイナスを示す最低地温が変化した。最低地温は 1998/99~2003/04 年と 2009/10~2010/11 年の変化は小さかったが、2004/05~2008/09 年には上昇していた。土壌水分量は 1998~2000 年と 2010~2011 年はほぼ平年並みに変化したが、2001~2004 年は乾燥状態を示し、2005~2009 年は湿潤状態を示した。このような環境変動が、スパスカヤパッドの森林の WEC 循環にどのような影響を与えるかを見てゆく。

図 1 は、1998 年の熱収支構成 (上; 純放射量と地中熱流量 (融雪熱量を含む), 中; 潜熱・顕熱フラックス, 下; ボーエン比) を示している。なお、下の横棒グラフは、地表面状態を示している。潜熱フラックスは融雪期にあたる 5 月上旬までは増加せず、カラマツが新葉を展開する 5 月下旬から 6 月上旬に急激に増加する。この時期は、根系の 80% が分布している -10~-20 cm 深の土層が融解し始め、土壌水が急激に樹木内を上昇する時期と一致する。この時期の純放射量は夏至前のため増加しているが、顕熱フラックスは減少している。このように融雪は樹冠上の熱収支構成には効かず、展葉によってフラックスの大きさと季節変化が決まっている。また、図 1 下のボーエン比の経時変化を見れば、“U” 字型を描いている。春、秋のボーエン比が増

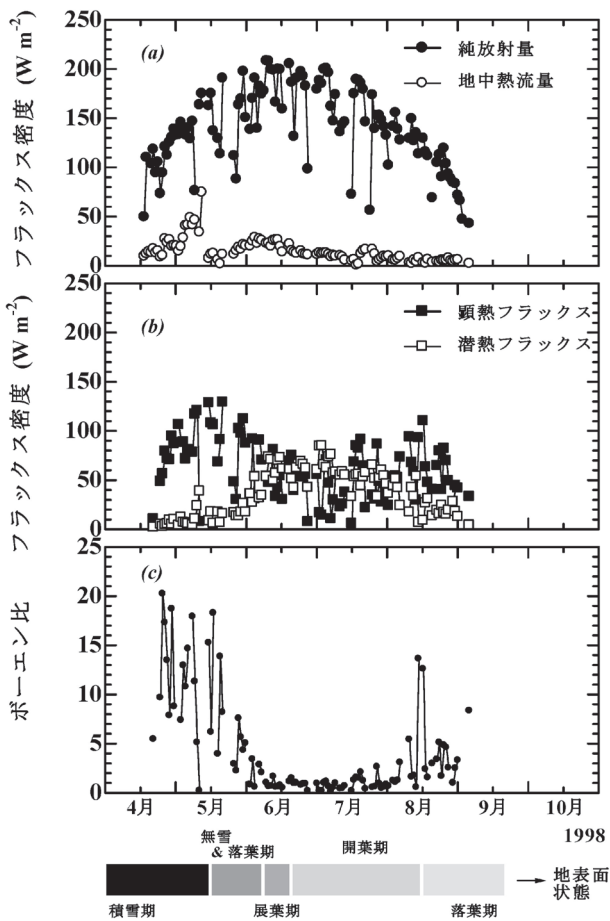


図1 1998年4月から9月におけるシベリア・スパスカヤパッド・カラマツ林上における熱収支 (Ohta *et al.*, 2001) 上; 純放射量と地中熱流量 中; 顕熱フラックスと潜熱フラックス 下; ボーエン比。棒グラフ; 地表面状態

加する時には10~20の値を取るのに対して、夏期は1前後の小さい値を取る。これは、北方林では、春と秋には土壤の凍結のため、蒸発散に用いる水が十分に得られず、大気中への水蒸気の放出が制限されることを示している。そして、夏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前後になる。熱帯林のボーエン比は0.1~0.3前後の低い値¹³⁾であるのに対して、北方林ではシベリア以外の森林(例えば, Seller *et al.*, 1997)も含め1前後のボーエン比となることは注目される。

このような水収支の季節変動をする森林にお

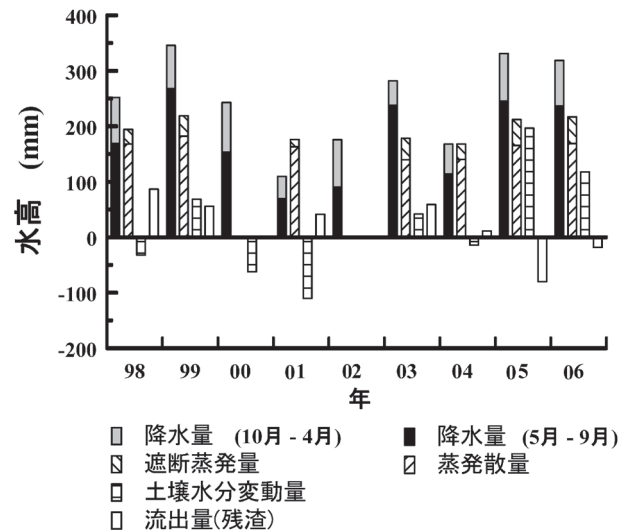


図2 1998年から2006年のスパスカヤパッドでの水収支 (Ohta *et al.*, 2008)

る、年々変動はどのようになっているのかを示したものが図2である。図2によれば、1998~2006年の年降水量は111~347mmになっており、特に5~9月の変動が大きい。降雨遮断量も含めた蒸発散量は169~220mmとなっており、年降水量に比べると年による変動が小さい。そして、乾いた樹冠からの蒸発散量は $1.49\sim 2.30\text{ mm day}^{-1}$ になっている。Zhangら¹⁵⁾は、永久凍土地帯を含んでいない250流域の年降水量と年蒸発散量の関係調べている。それによれば、年降水量が多い範囲では年蒸発散量はあまり変化を示さないが、年降水量が 500 mm year^{-1} 以下の地域では年蒸発散量は急激に減少している。永久凍土帯にあるスパスカヤパッドの $111\sim 347\text{ mm year}^{-1}$ の年降水量を、Zhangら¹⁵⁾の関係に与えると $110.7\sim 337.9\text{ mm year}^{-1}$ の蒸発散量が算出される。しかし、実際の年蒸発散量は169~220mmであり、蒸発散量の変動は永久凍土のない地域よりも小さくなっている。このように、永久凍土が水循環に大きな役割を持っていることが示唆される。

このような水収支特性を持つスパスカヤパッドのWEC収支特性が、どのように変化するかを示し

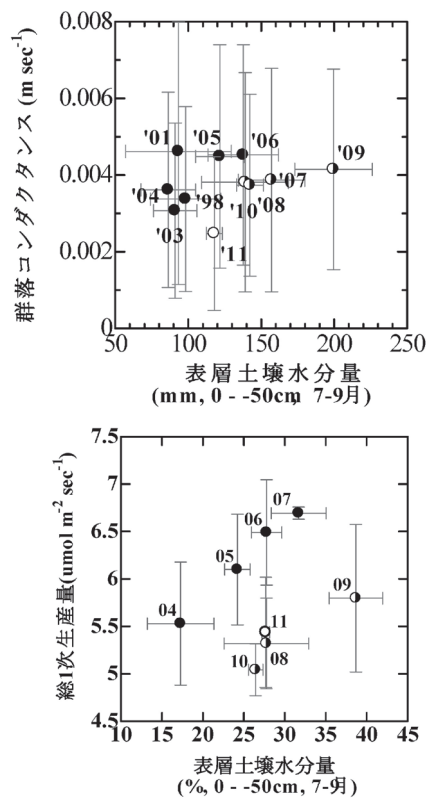


図3 表層土壌水分量と a. 表面コンダクタンス (上), b. 総1次生産量 (下) の関係 (Ohta *et al.*, submitted)

たものが、図3である。図3aは0～-50cmまでの表層土壌水分量とPenman-Monteith式により計算される群落コンダクタンス (G_s : 群落コンダクタンスとは、生理的応答特性を示すものであり気孔の開閉度を示す) の関係を、図3bは表層土壌水分量と総1次生産量 (GPP) の関係を示している。両図とも1998から2006, 2007年までは1本の直線で関係が近似されるが、それ以降は違う直線で近似されることが分かる。2007, 2008年以降の直線はそれ以前の直線と比べて、同じ表層土壌水分量に対して、 G_s あるいは GPP が下回る関係であることが分かる。これは気象条件のところで述べたとおり、2005～2008年にわたり降水量が増加し、2009年まで表層土壌水分量が非常に高かったことが影響していると考えられる。また、 G_s と GPP では、第1の直線から第2の直線へ乗り移る時期が異なっていること

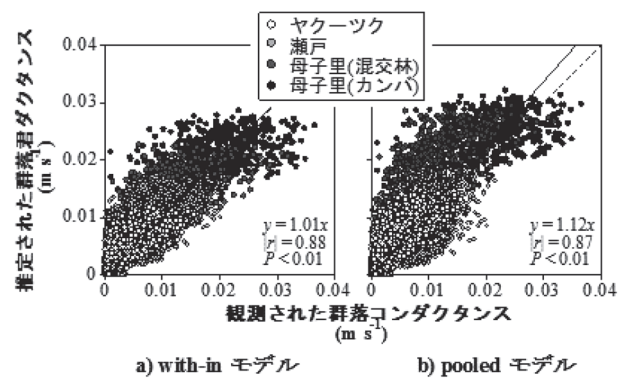


図4 スパスカヤパッドを含む4森林における群落コンダクタンスの実測値と計算値の比較 (Matsumoto *et al.*, 2008)

が分かる。つまり、2005年に降水量が増加し始め、2007年に蒸発散量が、2008年に二酸化炭素が低下し始める。

次に、森林の蒸発散特性を、Penman-Monteith式中の群落コンダクタンス (G_s) で表す事とする。 G_s に関しては、Matsumotoら⁸⁾ が図4に示すようにスパスカヤパッドを含めた温帯までの4サイトを比較し、すべてのパラメータが1つの共通の式で表される可能性を示した (pooled model)。このようにスパスカヤパッドにおいては、森林におけるWEC循環に対する基本的特性が集められつつある。

3-2 スパスカヤパッドとエルゲイにおいて比較したWEC循環の現在までの成果

2ヶ所のカラマツ林、スパスカヤパッド (SPA) とエルゲイ (EGL) にて2010-12年の5-9月に観測された蒸発散量 (ET)、正味二酸化炭素交換量 (NEE) と総1次生産量 (GPP) の季節変化を図5に示す。いずれのサイトでも、6月下旬から7月にかけて蒸発散量は最大となり、NEEと GPP の春期の増加は蒸発散量よりも急激であった。フラックスのピーク以後は、秋に向かって増加時よりも緩やかに減少した。夏期森林蒸発散量の2サイトの違いは小さかったが、 GPP はEGLのほうが1.3倍程度大きかった。2サイトで GPP が異なる原因として、

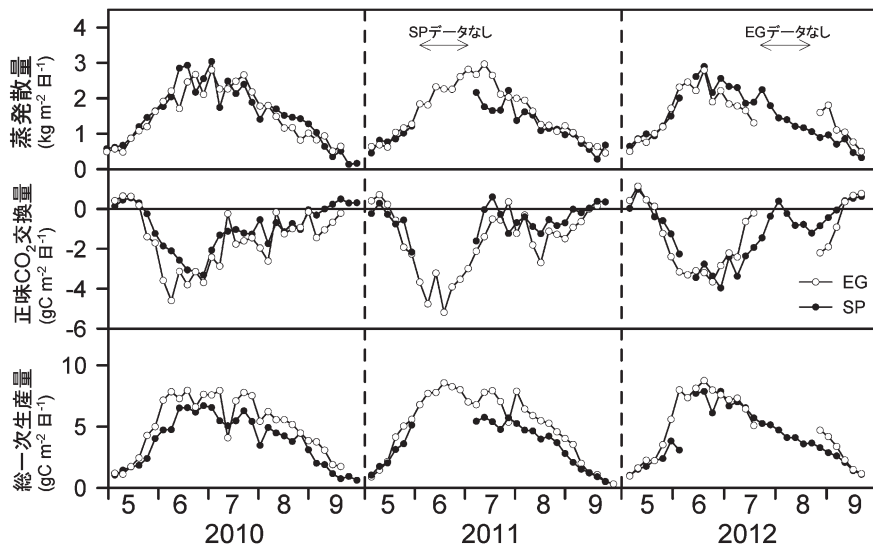


図 5 蒸発散量，正味二酸化炭素交換量，総一次生産量の季節変化
1 点は 5 日平均値を表わす。白色がエルゲイ，黒色がスパススカヤパットを表わす。

気象条件や土壌水分条件，植物の活性度の違いが考えられるが，気象条件の違いは小さく，GPP の違いの主要因は植物量の違い（EGL での PAI であらわされる地上植物量は SPA の約 1.5 倍）であると考えられる。

GPP と気象条件との関係と比較すると，SPA では強光条件では GPP が飽和するのに対して，EGL では光飽和せずに GPP が増加した（図 6）。これらの群落の主要樹種であるカラマツとカンバの個葉レベルの光合成光応答曲線を比較すると，カンバは光合成有効放射量が約 $500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ で光合成量がほぼ一定となったが，カラマツは光合成量の光飽和が明確ではなかった。このようなカラマツとカンバの特徴は中央シベリアの森林でも観測されている⁴⁾。

また，カラマツの葉内窒素濃度は EGL のほうが SPA よりも大きい¹⁴⁾。これらより，EGL では SPA と比較してカラマツによる CO_2 吸収の寄与が大きいと考えられる。2 サイトとも上層樹冠はカラマツにより構成されているが，SPA ではカラマツの樹木密度は小さく，またその一部（33 本）が枯死・未着葉であることからカラマツの寄与が相対的に小

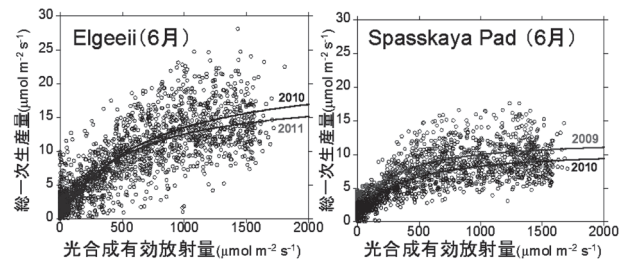


図 6 総一次生産量と光合成有効放射量の関係
1 点は 30 分測定値を表わす。曲線は年ごとに作成したフィッティング曲線を表わす。

さくなる可能性がある。2 サイトの林内の光環境を比較すると SPA では EGL よりも樹冠透過日射量が多いことから，SPA では中・下層のカンバの活性が高くなることが考えられる。

GPP に 2 サイト間での違いがみられたのと対照的に，蒸発散量の違いは小さかった。観測期間における 2 サイトでの夏期降水量の違いが小さかったことがその主な原因であると考えられる。さらに，2005 年以降の林床蒸発が森林全体の蒸発散量に占める割合が SPA では 50-60% であるのに対して EGL では 20-40% であり，GPP と蒸散量が比例関

係にあると仮定すると、樹木の蒸散量の違いを林床蒸発が補って水収支の地域間差を小さくしたと考えられる。また、2サイトでの表層（-10cm）とカラマツ吸水深度の中心（-20cm）の土壤水分量の変動にも違いが表れた。2サイトとも融雪および表層凍土の融解による顕著なピークは秋に向かって土壤水分は減少したが、SPAでは-20cmよりも-10cmの減少が著しくEGLでは逆であり、林床と中・上層樹木の蒸発散への寄与率の違いが裏付けられる。また、土壌の違い（SPAでは砂質成分が多く土壤水の保持力が小さい）も土壤水分変動および植物の水利用の違いの原因となると考えられる⁵⁾。

4. 今後の方向性

これまでの研究から、スパスカヤパッドに関しては、15年分の水・炭素循環のデータに基づき、1) カラマツ林でのWEC循環の基本的変動、2) 2007、08年から森林全体のWEC収支の変容、3) カラマツを中心とする上層植生と下層植生のWEC収支の違い（本稿では触れていない）などが明らかになった。スパスカヤパッドとエルゲイの森林による水・炭素交換の相違に関しては、4) 両森林における蒸発散特性の違いは小さいが、二酸化炭素特性には違いがみられ、エルゲイの方がスパスカヤパッドより1.3倍の吸収がみられたことなどが明らかになった。

今後の方向性としては、地球環境の温暖化が進行するなかで、東シベリアの北方林がどう適用するかを見ていきたい。つまり、温暖化に伴い、気温や降水量の経年変動において、年平均値のみではなく最高値、最低値の幅が広がる傾向にある。その中でスパスカヤパッドは降水量が大きく外れる傾向にあり、湿潤化による生態系への変動が顕在化しつつある。また、エルゲイは観測年が4年と短いためこのような傾向は見られていないが、短・中期的な乾燥化あるいは湿潤化が出現する可能性がある。つまり、北半球高緯度地帯においては、乾燥化のみではなく湿潤化への森林生態系の応答が顕在化することが考えられる。

このような北半球高緯度帯においては、現地観測

研究と本報告ではふれなかったモデル解析研究がお互いを支え合うようにして現在の知見を増やしていくような活用が望まれる。

謝 辞

この研究は、Global Energy and Water Cycle Experiment — Siberia (GAME-Siberia), Core Research for Evolutional Science and Technology / Water and Energy Cycles in Northern Forest (CREST-WECNoF), Research Institute of Humanity and Nature — Siberia (RIHN) および名古屋大学グローバルGCOEプログラム「地球学から基礎・臨床環境学への展開」からの財政的な援助を受けた。

【引用文献】 1) Betts *et al.*, (2008) mineral dust and isoprene and air quality through fluxes of carbon dioxide, water, energy, mineral dust and isoprene. *Phil. Trans. R. Soc. B* 2008 363, 1873-1880. 2) Ciais *et al.*, (2005) Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature*, 437, 529-533. 3) Halldin *et al.*, (1997) Energy, water and carbon exchange in a boreal forest landscape - NOPEX experiences. *Argic. For. Meteorol.*, 98-99, 5-29. 4) Koike *et al.*, (2010) Photosynthetic characteristics of trees and shrubs growing on the north- and south-facing slopes in central Siberia. Osawa, A., *et al.*, ed.: *Permafrost Ecosystems: Siberian Larch Forest*. *Ecol. studies*. Springer, vol. 209, 273-287. 5) Kotani *et al.*, (2013) Temporal variation in the linkage between the net ecosystem exchange of water and CO₂ over boreal forest in eastern Siberia. *Ecohydrology*, in press. 6) Kumagai *et al.*, (2004) Transpiration, canopy conductance and the decoupling coefficient of a lowland mixed dipterocarp forest in Sarawak, Borneo: dry spell effects. *J Hydrol.*, 287 (1-4), P237-251. 7) Lloyd, J. and Taylor, J.A., (1994) On the temperature dependence of soil respiration. *Functional Ecology*, 8, 315-323. 8) Matsumoto *et al.*, (2008) Response of surface conductance to forest environments in the Far East. *Argic. For. Meteorol.*, 148, 1926-1940. 9) Ohta *et al.*, (2001) Seasonal variation in the energy and water exchanges above and below a

larch forest in eastern Siberia. *Hydrol. Process.*, 15, 1459-1476. 10) Ohta *et al.*, (2008) Interannual variation of water balance and summer evapotranspiration in an eastern Siberian larch forest over a 7-year period (1998-2006). *Argic. For. Meteorol.*, 148, 1941-1953. 11) Schulze *et al.*, (2002) The Eurosiberian transect : an introduction to the experimental region. *Tellus*, 54B, 421-428. 12) Sellers *et al.*, (1997) The boreal ecosystem-atmosphere study (BOREAS) : an overview and early results from

the 1994 field year. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 76, 1549-1577. 13) Shuttleworth *et al.*, (1984) Eddy correlation measurements of energy partition for Amazon. *Q J Roy Meteorol. Soc.*, 110, 1143-1162. 14) Tei, S. (2013) Study on radial growth and carbon isotope ratio of larch in taiga of northeastern Siberia. Ph. D thesis, Hokkaido University, Sapporo, Japan. 15) Zhang *et al.*, (2001) Response of mean evapotranspiration to vegetation change at catchment scale. *Water Res. Res.*, 37, 701-708.

【お知らせ】 第 88 号記事 訂正とお詫び

第 88 号の記事「国際セミナー報告 パラグアイにおける天然林や環境の保全・管理のためのアクション —炭素蓄積量推定のためのツール—」高橋正義・ルイス アルベルト ベガ イスワ イラス (p50~53) に誤りがございましたので、下記のとおり訂正いたします。

P50 右段最下行 (誤: 下線部)「照葉樹のような森林 (太平洋森林)」 (正) 大西洋

P52 右段 14 行目 (誤: 下線部)「パラグアイ東部の太平洋森林」 (正) 大西洋

読者の皆様に大変なご迷惑をおかけしましたことを深くお詫び申し上げます。