

104:406 (総観気象; 水文気象)

5. 北東ユーラシアの「大気-植生-凍土-河川」 システムの現在と将来

檜 山 哲 哉*

1. はじめに

北極海の海水面積がユーラシア大陸側で年々縮小するのに伴い、北東ユーラシアに位置する東シベリアとモンゴルでは、大気水循環と陸域水循環がかつて無いほど大きく変動している。東シベリアでは大きな年々変動を伴いながら夏季降水量が増加傾向を示し、地表の湿潤化と永久凍土表層の融解が生じるとともに、北極海への河川流出量が増加している。一方、モンゴルでは2000年代に高気圧偏差となり、夏季降水量が激減して干ばつ傾向が長く続いた結果、人々の生業に影響

が出た。このように、東シベリアとモンゴルは南北に隣接していることから対照的な気候変動（気候の共変動）が発現しやすい。

本稿では、北東ユーラシアにおける夏季の大気循環場と降水量の変動に関わる研究を振り返り、それらの変動がこの地域の植生、凍土、河川に及ぼす影響について調べた研究をいくつか紹介する。そして、北東ユーラシアの「大気-植生-凍土-河川」システムの将来に関する今後の研究の展望を述べる。

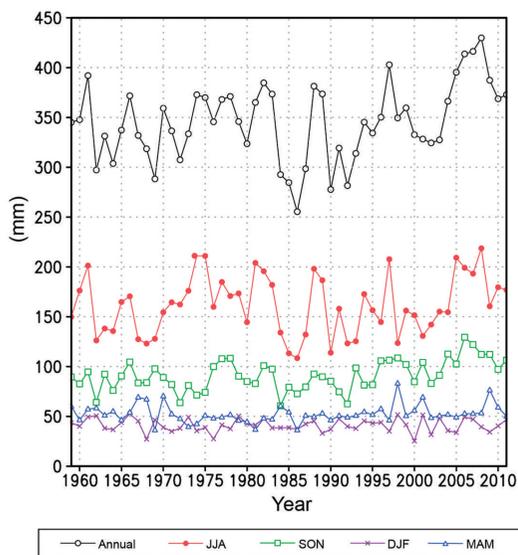
2. システムの現在

北東ユーラシアの「大気-植生-凍土-河川」を一つのシステムとしてとらえた研究は少ない。しかし、この地域の水文気候を大気水収支と陸域水収支の視点

* 名古屋大学宇宙地球環境研究所。

hiyama@nagoya-u.jp

© 2019 日本気象学会

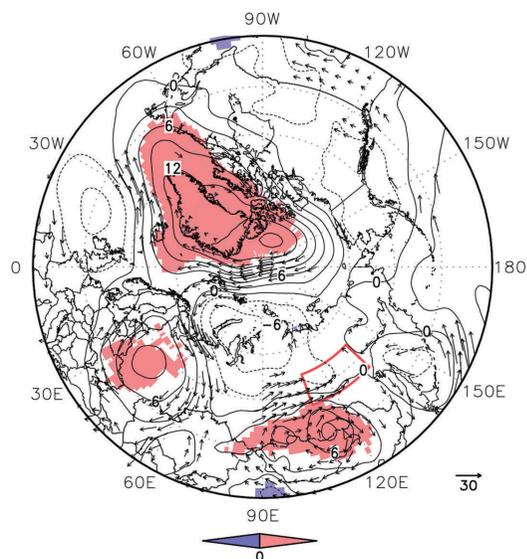


第1図 レナ川流域における1959年から2011年までの年降水量, 夏季(6月~8月)降水量, 秋季(9月~11月)降水量, 冬季(12月~2月)降水量, 春季(3月~5月)降水量の時系列変化 (Hiyama *et al.* 2016の Fig. 2a). 年降水量 (mm yr^{-1}) は前年12月から当該年11月までの値. 季節降水量の単位は ($\text{mm (3 months)}^{-1}$). 格子点降水量データ (PREC/L; Chen *et al.* 2002) を使用.

で解析した研究は数多く行われている (例えば Serreze *et al.* 2003). 最近では Oshima *et al.* (2015) がシベリア三大河川流域 (レナ, エニセイ, オビ) における大気水収支を解析し, 流域ごとに河川流出量との関係を調べた. その結果, 水蒸気輸送に着目した場合, 東シベリアのレナ川流域では (西シベリアのオビ川流域に比べて) 低気圧活動に伴う水蒸気輸送が卓越することが見い出された. そこで, 以下では先ず, シベリアにおける大気循環場と降水量の変動を振り返ってみたい.

2.1 近年の夏季降水量と大気循環場の変動

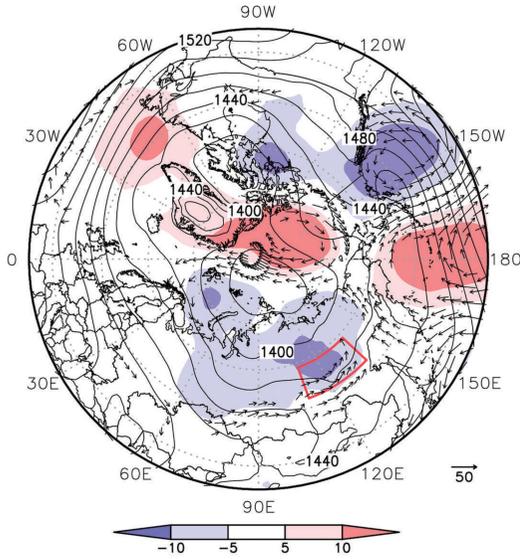
東シベリアのレナ川上・中流域では, 2005年から2008年にかけての4年間, 連続して夏季降水量が平年より多く (第1図), 植生や凍土にも影響した (Iijima *et al.* 2010). このような複数年にわたる夏季降水量の増加が過去にも同地域でみられたのか, そして他の地域ではどうであったのかを調べるため, Hiyama *et al.* (2016) は格子点降水量データ (PREC/L) と大気再解析データ (JRA-55; Kobayashi *et al.*



第2図 環北極域の夏季(6月~8月)における850 hPa 高度場 (等値線) と鉛直積算した水蒸気フラックス (ベクトル) の1984年~2011年の長期変化傾向 (ただし, decade^{-1}). 等値線は 3 gpm 間隔. 色を付けた領域は Mann-Kendall 検定において95%の水準で統計的に有意な領域. 赤い枠線はレナ川上・中流域の解析対象領域. 大気再解析データ (JRA-55; Kobayashi *et al.* 2015) を使用. Hiyama *et al.* (2016) の Fig. 5a を一部修正.

2015)を用いて, 1958年から2012年までの夏季(6月~8月)降水量と大気循環場の経年変動を解析した. シベリア三大河川流域とモンゴル域の850 hPaの高度場を比較したところ, シベリア三大河川流域には十年スケールの変動が見出され, モンゴルでは顕著な長期変化傾向 (第2図) が検出された.

そして興味深いことに, 1970年代半ばから1990年代半ばにかけて見られたレナ川流域とオビ川流域における夏季降水量の負相関 (Fukutomi *et al.* 2003) が, 1990年代半ば以降は不明瞭となり, レナ川流域とエニセイ川流域における夏季降水量が有意な正相関に移移していた. さらに, 1990年代半ば以降, レナ川とエニセイ川流域では北極海から伸びる大規模なトラフに覆われやすくなっていた (第3図). このトラフは, 1980年代半ば以降のモンゴルにおける850 hPa 高度場の有意な上昇 (第2図) と相まって, エニセイ川とレナ川流域の上・中流域で西方からの大気水蒸気フラッ



第3図 レナ川上・中流域で降水量が多かった2005年～2008年の4年間における、夏季（6月～8月）平均の850 hPa 高度場と水蒸気フラックスの平年（1995年から2011年までの16年間）からの偏差の合成図。等値線は20 gpm 間隔で示した2005年～2008年の夏季平均の850 hPa 高度場。色を付けた領域は高度場の偏差がMann-Kendall 検定において95%の水準で統計的に有意な領域。ベクトルは2005年～2008年の水蒸気フラックスの平年からの偏差。赤い枠線はレナ川上・中流域の解析対象領域。大気再解析データ（JRA-55；Kobayashi *et al.* 2015）を使用。Hiyama *et al.* (2016) の Fig. 5b を一部修正。

クス（水平輸送量）と収束量を増加させていた。すなわち、北東ユーラシアにおける大気循環場の長期変化傾向に十年スケールの変動が伴うことで、2005年から2008年にかけての複数年にわたり、レナ川上・中流域の夏季降水量が増加したのである（第1図）。

Hiyama *et al.* (2016) による上記の研究は、EOF解析の結果（Fujinami *et al.* 2016）や、CL index（Canada Basin-Laptev Sea index; Inoue and Kikuchi 2007）を用いた解析結果（Iijima *et al.* 2016）とも矛盾無い。そして、東シベリアで湿潤になった2000年代半ばに、モンゴルでは熱波（heat wave）が頻発したことが報告されている（例えば Erdenebat and Sato 2016等）ことから、東シベリアとモンゴルにおける対照的な気候変動（気候の共変動）を裏付けるも

のである。

2.2 「植生－凍土－河川」への影響

それでは、2000年代半ばの降水量変動は、植生や永久凍土表層にどのような影響を及ぼしたのだろうか。

Iijima *et al.* (2010) は、レナ川上・中流域の2000年代半ばの降水量（夏季～秋季の降水量と冬季の降雪量）が数年連続して多かったため土壌水分量と土壌熱容量が変化し、地温が上昇して融解深（暖かい時期に地表層が0℃以上になる融解層（活動層）の深さ）が深くなったことを示した。これは永久凍土表層の融解が進んだことを意味しており、それに伴って植生を含む景観も大きく変化したことを示唆するものである。

実際、レナ川中流域のタイガには、サーモカルストと呼ばれる陥没地形が多数存在する。サーモカルストは原野火災によって森林が消失した場合、地表が日射の曝露を受けるため凍土中に存在する地下水の上部が融解することで生じた陥没地形である。永久凍土は不透水層であるため、地下水の融解水は容易に河川に流出することができない。そのためサーモカルスト地形の最深部には湖沼（サーモカルスト湖沼）が形成されるのである。我々が行っている日露共同研究によって、1980年代以降、サーモカルストの進行が加速し、湖沼水の体積が増加していることがわかってきた。そして Fedorov *et al.* (2014) は、湖沼水の増加分のうち、約7割は降水量の増加に起因し、残りの約3割は地下水の融解水が起源になっていることを明らかにした。このように、温暖化に代表される気候変動は、永久凍土表層の熱・水環境を変えることで東シベリアでは湿潤化として表出するのである。

凍土表層に生じたこのような熱・水環境の変化は、先に述べたように植生にも大きな影響を及ぼす。Ohta *et al.* (2014) は、レナ川中流域に位置するヤクーツク近郊のカラムツ林におけるフラックス観測データから、降水量が増加した2000年代半ば以前とそれ以降とでは、土壌水分量に対する蒸発散量とGPP（総一次生産量）の振る舞いが異なることを示した。Iijima *et al.* (2014) も、同じ観測サイトにおいて、2000年代半ば以降、活動層中の土壌水分量が増加し融解深が深くなったところに生育するカラムツの蒸散速度が低下したことを指摘し、凍土表層の温暖化と湿潤化が、カラムツ林に負の影響をもたらすことを示した。

さて、降水量の変動と植生・凍土の変化は、河川流出量の変化にどのように結びつくのだろうか。この

点を論ずる前に、流域に貯留される陸水貯留量の変動について簡単に紹介しておく。Suzuki *et al.* (2016) は重力観測衛星 GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) のデータを解析し、レナ川流域における陸水貯留量変動の季節変化と年々変動 (2002年4月から2015年8月まで) を調べた。その結果、2005年から2008年にかけて夏季降水量が多かったレナ川上・中流域では、陸水貯留量も増加傾向にあることが確認できた。一方で、陸水貯留量の長期変化傾向を見た場合、レナ川下流域 (北極海沿岸のツンドラ域) における乾燥化が検出された。具体的には、GRACE の観測が始まった2002年以降、年当たりの水柱高で6 mm 以上の乾燥化が生じていたのである。レナ川の下流域では、夏季平均気温が年当たり0.36°C上昇しており、この気温上昇が植物の生長期間を長くし、植生の活性を促すことによって蒸発散量が増加し、乾燥化を引き起こしたと考えられる。

それでは、レナ川流域の全体としての河川流出量の変化はどうだったのであろうか。Suzuki *et al.* (2016) で示されたレナ川下流域の乾燥化は、下流域の集水域が上・中流域の面積と比較すると狭いため、レナ川の河川流出量には直接影響を及ぼしていない。一方、レナ川の河川流出量に対しては、集水域が広い上・中流域における陸水貯留量と永久凍土の状態が影響するようである。その根拠となる研究例を、以下にいくつか紹介する。

まず、Hiyama *et al.* (2013) は、レナ川中流域に存在する複数の湧水点における湧水の地下水年代を調べた。その結果、地下水年代は湧水ごとに大きく異なるものの、それらの年々変動は大きくなかった。その理由として、対象とした全ての湧水の集水域内 (永久凍土中) に多量の地下水が存在しないこと、そして温暖化による永久凍土融解が4年という短期間では湧水に表出しにくいこと、が考えられた。一方、Brutsaert and Hiyama (2012) は、河川が凍結していない時期における支流の日最低流量の変化が、支流域で平均した年最大融解深 (annual maximum thaw depth; AMTD) の変化に対応するものと考え、レナ川上流域の4つの支流で得られた1950年から2008年までの河川流量データを用いて AMTD の経年変化傾向を推定した。その結果、レナ川上流域の不連続的永久凍土帯では年当たり0.3 cm から1 cm の速さで、アルダン川上流の寒冷な連続的永久凍土帯ではその半分程度の速さで、AMTD が増加 (活動層下端の凍土が融

解) していることがわかった。解析期間を約20年ごとに区切った場合には、1950年から1970年にかけては AMTD が減少し (活動層下端の土壌が凍結傾向にあり)、後半の1990年代以降は、年当たり2 cm あるいはそれ以上の速さで AMTD が急激に増加していることがわかった。Tananaev *et al.* (2016) も、レナ川上流域の不連続的永久凍土帯では、1990年代から2000年代初め頃に、日最低流量が急激に変化したことを明らかにしている。このように、降水量と陸水貯留量 (サーモカルスト湖沼と土壌水分量) の変動を受け、凍土表層の熱容量の変化を介して、河川流出量は融解深と連動するのである。

レナ川上・中流域における2000年代半ばの降水量の増加は、夏洪水という災害の形においても、レナ川の河川流出量に現れた (檜山 2015)。複数年にわたり夏季から秋季にかけての降水量が増加したことで、活動層中の土壌水分量が飽和含水率近くにまで達し、夏季の降雨が河川に速やかに流出しやすくなったと考えられる。大気水循環 (降水量) の年々変動が乾燥と湿潤を交互に繰り返す場合、植生の蒸発散によって土壌水分量は飽和含水率には至らず、夏洪水は生じにくくなるはずである。ところが、複数年にわたって湿潤状態が続いた結果、融雪時期のみならず、夏季においてもピーク流量が現れ始めたのである (Gautier *et al.* 2018)。このような夏季の河川流出におけるピーク流量の出現は過去にはあまり記録されておらず、近年の大気水循環変動に対応した陸域水循環変動の一つの現れであると言える。

モンゴルにおける河川流出量の最近の変化を調べていないが、永久凍土の融解によって、今後モンゴルでは湧水量や河川流出量が増加する可能性を秘めている。その可能性は、モンゴル北部よりも中部の、不連続的永久凍土帯や点状的永久凍土帯で高いようである (檜山ほか 2017)。

3. システムの将来

最後に、北極海の海水面積の縮小によって引き起こされる北東ユーラシアの大気水循環の変動を踏まえながら、この地域の「植生-凍土-河川」システムの将来について述べてみたい。ここでは、植生、凍土、河川の将来予測を行った最近の研究をレビューし、今後の研究の方向性を展望する。

3.1 植生と凍土の将来

気候変動による植生の変化予測については、動的全

球植生モデル (dynamic global vegetation model ; DGVM) を用いた研究が多数行われている。我が国では、Sato *et al.* (2007) が SEIB-DGVM を開発している。Zhang *et al.* (2011) も、中国東北部とロシア極東地域の植生動態を念頭に開発された FAR-EAST モデル (Yan and Shugart 2005) に陸面水文過程を組み込み、東シベリアにおける植生の変遷を予測した。その結果、降水量が現在と変わらず年平均気温が現在よりも 2°C 上昇した場合、融解深が深くなることで活動層中の土壌水分量が減少し、カラマツは東シベリアから姿を消すというショッキングな予測結果が示された。夏季 (あるいは生長期間における) 降水量の増減が、この地域のカラマツの生存と生育に重要な因子となるようである。

一方 Sato *et al.* (2016) も、SEIB-DGVM に陸面過程モデル (NOAH-LSM) を組み込み、東シベリア・カラマツ林の今世紀末の生産量を推定した。その結果、気候変動に伴う土壌水分量の顕著な増減はなく、カラマツの生長期間が長くなることで NPP (純一次生産量) が前世紀末よりも数倍に増加すると結論づけた。すなわち、Zhang *et al.* (2011) が指摘したような、融解深が深くなることで土壌水分量が減少してカラマツの生産性が落ちるといった結果は得られず、逆に、Sato *et al.* (2016) は生産性が増す結果を示したのである。このような相反する結果が異なるモデルから得られたという事実は、植生動態と凍土水文に関わるモデルの改良が今後必要であることを意味する。

3.2 凍土と河川の将来

Bring *et al.* (2017) は、今世紀後半 (2061-2090 年) における北極海に流れ込む河川流出量の将来予測を行った。彼らは、シベリア (特にコリマ川) とアラスカ、カナダ北部における河川流出量が、前世紀後半 (1961-1990 年) と比較して 50% 以上増加するという予測結果を示した。この増加分には降水量の増加が大きく寄与しているが、忘れてならないのは、これらの地域には永久凍土が存在するという事実である。

Bring *et al.* (2017) の結果は、CMIP5 (Taylor *et al.* 2012) における 6 つの GCMs のアンサンブル平均予測に基づいており、凍結・融解過程には大きな不確実性が含まれる。しかしながら、永久凍土帯で今世紀末に河川流出量が (前世紀末に比べて) 1.5 倍以上増加するという予測結果は、北東ユーラシア、特に東シベリアにおける「大気-植生-凍土-河川」システム

の重要性を物語っている。そしてそれは、北極海の海水と陸域の熱・水循環を包含した形でシステムを取り扱う必要性を示唆している。

4. おわりに

本稿では、北東ユーラシア (特に東シベリア) を対象に、そこでの「大気-植生-凍土-河川」システムの現在を概観した後、その将来と今後の研究の展望を述べた。ここで言えることは、大気循環場や降水量の変動に応じた植生や凍土の将来を論じた研究は存在するものの、「大気-植生-凍土-河川」システムを一体として取り扱った研究はほとんど無い、ということである。この事実は、気象関連分野 (より具体的には、植生を陽に取り扱う「水文気候学」あるいは「生態水文気候学」分野) には、やるべき研究課題がたくさん残されていることを意味する。今後、我が国の水文気候学コミュニティの主導によって、北極域や北東ユーラシアを対象とした「大気-植生-凍土-河川」システムの全体論的な研究がさらに進むことを期待する。

謝辞

本講演資料を準備するに当たり、北極域研究推進プロジェクト (ArCS: Arctic Challenge for Sustainability) および科学研究費補助金 (課題番号 26242026, 26252021, 17H01849) の一部を使用した。作図において、名古屋大学宇宙地球環境研究所の藤波初木博士にお世話になった。ここに記して感謝申し上げる。

参考文献

- Bring, A., A. Shiklomanov and R. B. Lammers, 2017: Pan-Arctic river discharge: Prioritizing monitoring of future climate change hot spots. *Earth's Future*, 5, 72-92.
- Brutsaert, W. and T. Hiyama, 2012: The determination of permafrost thawing trends from long-term streamflow measurements with an application in eastern Siberia. *J. Geophys. Res.*, 117, D22110, doi:10.1029/2012JD018344.
- Chen, M. Y., P. P. Xie, J. E. Janowiak and P. A. Arkin, 2002: Global land precipitation: A 50-yr monthly analysis based on gauge observations. *J. Hydrometeorol.*, 3, 249-266.
- Erdenebat, E. and T. Sato, 2016: Recent increase in heat

- wave frequency around Mongolia: role of atmospheric forcing and possible influence of soil moisture deficit. *Atmos. Sci. Lett.*, **17**, 135–140.
- Fedorov, A. N., P. P. Gavriliiev, P. Y. Konstantinov, T. Hiyama, Y. Iijima and G. Iwahana, 2014: Estimating the water balance of a thermokarst lake in the middle of the Lena River basin, eastern Siberia. *Ecohydrology*, **7**, 188–196.
- Fujinami, H., T. Yasunari and T. Watanabe, 2016: Trend and interannual variation in summer precipitation in eastern Siberia in recent decades. *Int. J. Climatol.*, **36**, 355–368.
- Fukutomi, Y., H. Igarashi, K. Masuda and T. Yasunari, 2003: Interannual variability of summer water balance components in three major river basins of northern Eurasia. *J. Hydrometeorol.*, **4**, 283–296.
- Gautier, E., T. Dépret, F. Costard, C. Vermoux, A. Fedorov, D. Grancher, P. Konstantinov and D. Brunstein, 2018: Going with the flow: Hydrologic response of middle Lena River (Siberia) to the climate variability and change. *J. Hydrol.*, **557**, 475–488.
- 檜山哲哉, 2015: 気候・凍土と水環境. シベリアー温暖化する極北の水環境と社会 (環境人間学と地域), 檜山哲哉・藤原潤子 編, 京都大学学術出版会, 3–29.
- Hiyama, T., K. Asai, A. B. Kolesnikov, L. A. Gagarin and V. V. Shepelev, 2013: Estimation of the residence time of permafrost groundwater in the middle of the Lena River basin, eastern Siberia. *Environ. Res. Lett.*, **8**, 035040, doi:10.1088/1748-9326/8/3/035040.
- Hiyama, T., H. Fujinami, H. Kanamori, T. Ishige and K. Oshima, 2016: Recent interdecadal changes in the interannual variability of precipitation and atmospheric circulation over northern Eurasia. *Environ. Res. Lett.*, **11**, 065001, doi:10.1088/1748-9326/11/6/065001.
- 檜山哲哉, 金森大成, 浅井和由, D. Avirmed, 石川 守, 2017: モンゴル・ハンガイ山脈の湧水: 地下水年代からみた脆弱性. 2017年度日本水文科学会設立30周年記念学術大会発表要旨集, 28–31.
- Iijima, Y., A. N. Fedorov, H. Park, K. Suzuki, H. Yabuki, T. C. Maximov and T. Ohata, 2010: Abrupt increases in soil temperatures following increased precipitation in a permafrost region, central Lena river basin, Russia. *Permafr. Periglac. Process.*, **21**, 30–41.
- Iijima, Y., T. Ohta, A. Kotani, A. N. Fedorov, Y. Kodama and T. C. Maximov, 2014: Sap flow changes in relation to permafrost degradation under increasing precipitation in an eastern Siberian larch forest. *Echohydrology*, **7**, 177–187.
- Iijima, Y., T. Nakamura, H. Park, Y. Tachibana and A. N. Fedorov, 2016: Enhancement of Arctic storm activity in relation to permafrost degradation in eastern Siberia. *Int. J. Climatol.*, **36**, 4265–4275.
- Inoue, J. and T. Kikuchi, 2007: Outflow of summertime Arctic sea ice observed by ice drifting buoys and its linkage with ice reduction and atmospheric circulation patterns. *J. Meteor. Soc. Japan*, **85**, 881–887.
- Kobayashi, S., Y. Ota, Y. Harada, A. Ebata, M. Moriya, H. Onoda, K. Onogi, H. Kamahori, C. Kobayashi, H. Endo, K. Miyaoka and K. Takahashi, 2015: The JRA-55 reanalysis: General specifications and basic characteristics. *J. Meteor. Soc. Japan*, **93**, 5–48.
- Ohta, T., A. Kotani, Y. Iijima, T. C. Maximov, S. Ito, M. Hanamura, A. V. Kononov and A. P. Maximov, 2014: Effects of waterlogging on water and carbon dioxide fluxes and environmental variables in a Siberian larch forest, 1998–2011. *Agric. For. Meteorol.*, **188**, 64–75.
- Oshima, K., Y. Tachibana and T. Hiyama, 2015: Climate and year-to-year variability of atmospheric and terrestrial water cycles in the three great Siberian rivers. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **120**, 3043–3062.
- Sato, H., A. Itoh and T. Kohyama, 2007: SEIB-DGVM: A new dynamic global vegetation model using a spatially explicit individual-based approach. *Ecol. Model.*, **200**, 279–307.
- Sato, H., H. Kobayashi, G. Iwahana and T. Ohta, 2016: Endurance of larch forest ecosystems in eastern Siberia under warming trends. *Ecol. Evol.*, **6**, 5690–5704.
- Serreze, M. C., D. H. Bromwich, M. P. Clark, A. J. Ertringer, T. Zhang and R. Lammers, 2003: Large-scale hydro-climatology of the terrestrial Arctic drainage system. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **108**, 8160, doi:10.1029/2001JD000919.
- Suzuki, K., K. Matsuo and T. Hiyama, 2016: Satellite gravimetry-based analysis of terrestrial water storage and its relationship with run-off from the Lena River in eastern Siberia. *Int. J. Remote Sens.*, **37**, 2198–2210.
- Tananaev, N. I., O. M. Makarieva and L. S. Lebedeva, 2016: Trends in annual and extreme flows in the Lena River basin, Northern Eurasia. *Geophys. Res. Lett.*, **43**, 10764–10772.
- Taylor, K. E., R. J. Stouffer and G. A. Meehl, 2012: An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **93**, 485–498.
- Yan, X. D. and H. H. Shugart, 2005: FAREAST: a forest gap model to simulate dynamics and patterns of

- eastern Eurasian forests. *J. Biogeogr.*, **32**, 1641-1658.
- Zhang, N., T. Yasunari and T. Ohta, 2011: Dynamics of the larch taiga-permafrost coupled system in Siberia under climate change. *Environ. Res. Lett.*, **6**, 024003, doi:10.1088/1748-9326/6/2/024003.
-