

令和元年5月29日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K00521

研究課題名(和文) 東シベリア森林域の大気境界層気候学-植物フェノロジーと広域大気場の相互作用

研究課題名(英文) Boundary layer climatology over larch forest in eastern Siberia, focus on interaction between plant phenology and atmosphere

研究代表者

小谷 亜由美 (Kotani, Ayumi)

名古屋大学・生命農学研究科・助教

研究者番号：80447242

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：東シベリア北方林地域での森林-大気間の相互作用について、最近20年間の地上観測データと大気プロファイルデータを用いて地表面熱収支と大気境界層の諸量の季節変化および年々変動を明らかにした。とくに春季と秋季の季節推移に関して、植物フェノロジーと永久凍土表層の凍結融解の季節進行に着目し、20年間の変化傾向と2000年代の活動層湿潤化の影響を考察した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

森林構成や環境条件などによって様々な応答をする森林生態系の水・炭素循環プロセスの時空間変動の特性を明らかにすることは、陸域生態系の炭素循環、水循環の科学的解明に不可欠である。本研究成果に基づき、気候変動の影響が顕在化しさらに将来予測の不確実性の大きい東シベリアにおける凍土の季節融解過程と植物フェノロジーを関連付けた季節推移の陸面モデリングの改良に寄与する情報を提供することを目指す。

研究成果の概要(英文)：The interaction between forest ecosystem and atmosphere in eastern Siberian was investigated, using the ground observation and the atmospheric profile data for the last two decades. The seasonal and interannual variations of the surface heat balance and parameters of the atmospheric boundary layer were presented. Based on these results, interannual variation of the seasonal transition factors, including snow melt, plant phenology and seasonal thawing process in the permafrost active layer, and effects of the unusually wet condition in the active layer in the 2000s were discussed.

研究分野：水文気象学

キーワード：大気陸面相互作用 地表面熱収支 大気境界層 凍土季節融解 北方林 シベリア

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

地球大気の最下端である大気境界層は、全球および広域の大気循環や物質輸送過程においてだけでなく、動植物の生育空間の大気・水環境としても重要である。大気境界層は、地表面から数 km (日中の陸面の場合) の地表面の影響を強く受ける大気層であり、地表面の加熱/冷却の日変化に対応して、大気境界層も日スケールの変化を繰り返す。植物フェノロジーなどの地表面状態の変化は、地表面熱収支を通して大気境界層に影響する。すなわち日中の大気境界層の発達程度と雲の形成に地表面状態の影響が表れる (Yasunari, 2007)。一方で、高低気圧や前線など総観規模の大気場における移流の影響を受けて、大気境界層の構造が変化する (Sinclair et al. 2010)。このように、大気境界層は地表面 (森林群落) と大気との境界領域として、これらの相互作用を仲介している。しかし、大気境界層の諸過程は局所的な時空間スケールであるため、その長期変動や地域による違いなどより大きな時空間スケールでの研究は限られている。このような気候学的な研究は、境界層過程の理解だけでなく大気モデルでの陸面パラメタリゼーションの改良においても重要である (Seidel et al., 2012)。

世界各地の気象台における、ラジオゾンデのルーチン観測による大気プロファイルデータを用いて、大気境界層高度の季節変化および年変化を数 10 年スケールで研究する Boundary layer climatology が Seidel et al. (2010) などにより進められてきた。このなかで、高緯度地域では、観測地点が少ないことや地表面逆転層が形成されて境界層高度の判定が困難なことから、日中の混合境界層の発達よりも地表面逆転層の形成に着目した研究が行なわれている (Zhang et al., 2011)。しかし、高緯度地域とくに北方林における日中の混合境界層の発達もまた、植生の影響を受けたものである。例えば、日中の顕熱輸送量に応じて大気境界層 (混合層) が発達し、上空から乾燥暖気を境界層内に取り込み地表付近を乾燥化させる。大気飽差の増加に対して植物が気孔を閉じて蒸散を抑制すると、潜熱と顕熱のバランスが変わる。日中に蒸発散が活発になると境界層を湿潤化して境界層上端に雲が形成されると、日射が減少して顕熱、潜熱も小さくなり、境界層発達が抑えられる (Sellers et al., 2000)。凍土の融解に地中熱量が費やされて、地表面加熱が押さえられることで顕熱が抑制されることも境界層の発達を妨げ、地表付近の乾燥化を防いでいるとされる (Eugster et al., 2000)。

また、高緯度の北方林は、短い生長期間と長く続く冬季の低温環境に適応して成立する森林生態系であるが、熱/水循環の観点からは、低温だけではなく地中の凍土の存在も北方林の特徴的な生育環境の一つである。また、限られた生長期間での循環プロセスが年間の収支に大きく影響を及ぼす (Piao et al. 2008 など) ため、生長期間の開始/終了時期およびその決定要因が重要である。植物活動の開始時期には積算的な温度環境と土壌水分状態が影響する。北方林においては、冬季には土壌が地上まで凍結するケースが多いのでこの二つの要因が重要である (Tanja et al. 2003 など)。東シベリアヤクーツクの森林では、20 年近くの森林気象観測が継続されており、森林 - 大気間の熱・水・二酸化炭素交換量の長期変動が得られている (Ohta et al., 2008, 2014)。観測期間中には、対照的な少雨・多雨年の発現があり、さらに 2004-05 年に秋から冬季の降水 (降雪) が大きくなったことを端緒とした土壌水分が多い状態が 2009 年頃まで持続的に観測された。地表面の湿潤化はヤクーツクを含むレナ川中流域でも広域に顕在していることが、重力場測定衛星により得られた陸水貯留量の変化からも指摘されている (Velicogna et al., 2012)。このような広域で持続的な地表面環境の変容は、長期的な大気境界層の変動に影響を及ぼすと考えられる。

### 2. 研究の目的

東シベリア北方林地域での大気境界層の季節変化を明らかにし、本地域の Boundary layer climatology を融雪・積雪や凍土融解・凍結を含む地表面変化と植物フェノロジーによる陸面プロセスの変化と広域大気場の変化との関係から明らかにする。さらに本地域における 2000 年代の大気陸面環境の変動を、地表面熱収支および大気境界層の年々変動を通して把握することを試みる。研究提案時には、具体的な課題として以下の 2 点をあげた。

- 1) 融雪 - 開葉期および落葉 - 降雪期の季節推移を中心として、地表面熱収支と大気境界層の発達過程の季節変化を介した、植物フェノロジーと総観大気場との関係を明らかにすること。
- 2) 夏季の植物活性期を中心とした長期の地表面熱収支と大気境界層発達過程の年変化から、近年の地表面湿潤化の影響が現れるかどうか、現れている場合にはその空間的広がりを明らかにすること。

### 3. 研究の方法

東シベリアのレナ川中流域の森林地域を対象地域とする。解析中心とするヤクーツクにおける 1989-2008 年の平均年降水量は 239 mm、平均気温は -8.4 (1 月平均 -40.4, 7 月平均 19.0 度) である。周辺の森林は、上層の主要樹種はカラマツ (*Larix cajanderi*) で、中下層にはシラカンバ (*Betula pendula* Roth) やヤナギ (*Salix bebbiana* Sarg.)、林床植生はコケモモ (*Vaccinium vitis-idaea*) 等で構成される。本研究では、大気境界層発達高度の季節推移とその年変化を中心に、これに影響する地表面状態の変化と広域大気場の変化について、地上観測データと大気プロファイルデータを用いて解析を行った。当初予定していた、再解析グリッドデータの空間解析は達成できなかった。

A) 地上観測データ: 森林群落内外での熱/水蒸気/二酸化炭素の鉛直輸送量や活動層の水熱環境

を含む気象水文環境の観測が行われているカラマツ林観測サイト (Ohta et al., 2014) の観測データを用いた。展葉や落葉の植物フェノロジーや雪面の有無については群落での日射反射率や吸収率などの気象測定値から推定した。夏季から秋季にかけて実施した現地調査による得られた、凍土表層の融解深や植物量の記録も併用した。

B) 大気プロファイルデータ: 全球の高層ゾンデデータを集約している IGRA (Integrated Global Radiosonde Archive) (Durre et al., 2006) より、1980–2018 年の地上から 5 km 程度の温度等の鉛直プロファイルを用いて、混合層と接地逆転層の季節および年変化を調査した。混合層高度は、温位の鉛直勾配より決定したものと、IGRA により提供されている混合高度など複数の指標を比較した。下層大気の特徴量として、可降水量、安定度指数、持ち上げ凝結高度等を用いた。ゾンデ観測はヤクーツクでは現地時刻の午前/午後 9 時に実施されるため、直接日中の大気境界層データとしては使用しにくい。接地逆転層の検出においては利用可能と考えられ、逆転層の形成頻度、高度、強度 (鉛直方向の温度差) を用いた。このほかに、可降水量や安定度など大気境界層の特徴量も合わせて用いた。地上観測サイト周辺の森林地帯における最寄りのヤクーツクと同じレナ川中流域の森林帯にある観測点と、西・中央・東シベリア (それぞれオビ・エニセイ・レナ川流域) の複数の観測点のデータを用いて、空間分布を調査した。

#### 4. 研究成果

##### (1) 季節指標の年々変動

ヤクーツクの地上観測を用いた群落スケールの季節指標の年々変動を明らかにした。融雪開葉期には、4 月下旬 - 5 月上旬の林内消雪から、凍土表層 (0–10 cm) の融解、カラマツの展葉および CO<sub>2</sub> 吸収の増加開始、5 月中下旬の生態系全体の正味の二酸化炭素吸収の開始とつづき、植物成長期へと移行した (図 1)。1998 年から 2016 年の間に、消雪とカラマツ展葉時期はそれぞれ 10 年あたり約 6 日と約 9 日早くなり、その年々変動は春季気温 (積算温度) とよく対応していた。また同期間において、下記の大気プロファイルから得られた同地域の 4 月の接地逆転層の出現頻度が減少しており、春季の季節推移が早くなっていることが裏付けられた。凍土表層の融解時期には有意な変化傾向および他の季節指標との相関はみられなかった。この原因として、調査地で 2005–2008 年に生じた土壌水分増加の影響を受けて、地中熱環境が変容したことがあげられる。活動層の水分飽和が発生した 2005 年には急激な融解が起こったが、その後には活動層表層の乾燥化に伴い、とくに表層において潤年以前の状態に回復しつつある (図 2)。60cm 以深の深層では融解の早期化が維持されているが、この原因は温度変動と土壌湿潤化の双方の影響であると考えられる。

##### (2) 地表面熱収支の年々変動

ヤクーツクの地上観測による地表面熱収支では、とくに顕熱/潜熱の比率 (ボーエン比) の季節変化についてその特徴的な U 字カーブ (Ohta et al 2001) は維持されるが、2005–07 の湿潤年にはそれ以前よりも秋季の潜熱輸送量の減少が小さかったため低いボーエン比が維持されており、その傾向は 2008 年以降も続いた (図 3)。一方で、春から夏季前半にかけての潜熱輸送量の増加は湿潤年に限って早期化傾向があった。上記のカラマツ開葉時期や森林による CO<sub>2</sub> 吸収の開始時期の変化は主に気温に伴うとみられ、熱収支の年々変動とは同調しなかった。この時期の正味放射量の年々変動は 1 年のうちで最も大きく、潜熱輸送量 (蒸発散) が増加する前のため、顕熱輸送量は正味放射量の変動に追従しその年々変動も大きかった。夏後半の蒸発散の維持については、上記のように湿潤年以降には表層から活動層の乾燥化が進んでいるが、根系中心から深い層では土壌水分が多い状態が続いていることから、樹木蒸散の維持が原因と考えられる。

##### (3) 大気境界層特徴量と地上観測との対応

ヤクーツクでは可降水量や大気層の不安定指標は 6–7 月に最大、混合高度と持ち上げ凝結高度は 5–6 月に最大となる季節変化がみられ (図 4)、それぞれ森林からの潜熱および顕熱輸送量と同調する季節変化を示した。ヤクーツク周辺での地表付近の湿潤化が顕著であった 2005–07 年には、8–9 月 (夏季後半から秋季) の可降水量が平年よりも大きく大気境界層の発達を抑えられたが、その後の年には湿潤年以前と同程度となった (図 4)。これは地上観測サイトでの土壌水分や融解層深度が近年も湿潤年以前の程度には戻らないことと対照的である。また、この大気境界層特徴量の傾向は東シベリアの中ではレナ川中流域の他のゾンデ測定地点でみられ、水平 100–1000 km スケールの下層大気との対応が示される現象であると考えられる。

大陸スケールでは、夏季 6–8 月平均の可降水量、境界層高度 (西・中央シベリアのみ)、不安定大気の出現頻度が高緯度 (ツンドラ) から低緯度 (森林) へむかって増加した。1980–2018 年の各年 6–8 月平均値は、西シベリアでは増加傾向のあるサイトが多くみられ、ヨーロッパでの観測結果 (Zhang et al., 2013) と同様の傾向であったが、その傾向は中央、東シベリアではみられなかった。上述のように接地逆転層の形成高度、強さ (地上と逆転層上端との温度差)、発生頻度の 4 月および 5 月平均値を春季の季節推移の指標として用いると、東シベリアでは 2000 年代に低下傾向がみられる地点があったが、中央シベリアでは増加傾向の地点が多かった。

##### (4) まとめ

研究目的で示した2つの課題について、以下の結論が得られた。

1) 融雪 - 開葉期および落葉 - 降雪期の季節指標のうち、開葉や落葉時期には気温など気象条件が主要因であるのに対し、凍土の季節融解過程には経年的な地中水分環境の影響を受けてとくに活動層底部において融解の早期化が進行している。植物フェノロジーと凍土融解過程との関係が地表面湿潤化の影響により攪乱されたと考えられ、本研究期間内に地表面熱収支（または蒸発散）と大気境界層を介した広域大気と植物フェノロジーとの関係の解明まで到達できなかった。年単位の解析では不十分であったので、経年的な地中の熱・水環境の影響を考慮した解析により、ひきつづき本課題の解明を目指す。

2) 夏季の植物活性期を中心とした長期の地表面熱収支と大気境界層発達過程の年変化から、活動層湿潤化の影響は、凍土の季節融解と植物活動（ここでは蒸発散）の変動を介して地表面熱収支の年々変動に現れた。湿潤年の後には、地表面や下層大気と比べて表層を除く活動層内でその影響が持続している。

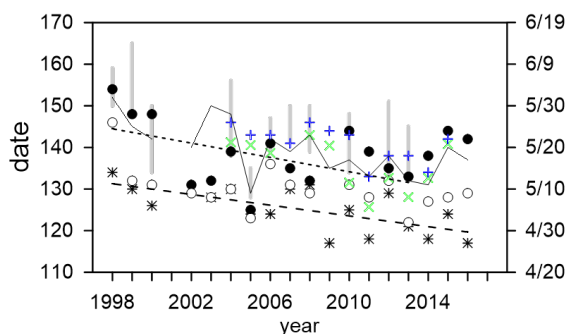


図1 春季季節指標の年々変動。○：消雪（破線は回帰直線），●：10 cm 融解，▲：20 cm 融解，実線：気温ゼロ以上の積算温度が150日を超えた日，鉛直バー：林冠の開葉期間（点線は開葉日に対する回帰直線），×：蒸発散の増加開始，+：CO<sub>2</sub>の正味吸収開始。

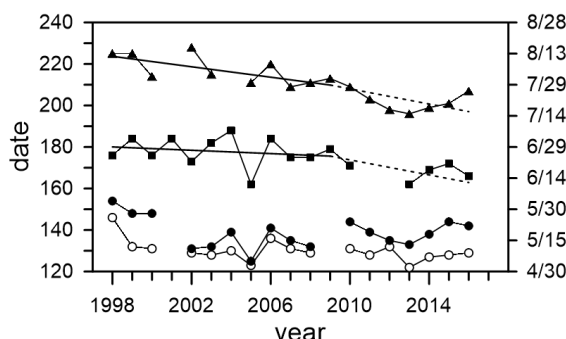


図2 活動層の季節融解日の年々変動。● 10 cm, ▲ 20 cm, △ 60 cm, ○ 120cm の深度で0以上となった日づけを示す（Kotani et al 2019より改変）

### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2件)

Kotani, A., Saito, A., Kononov, A., Petrov, R., Maximov T., Iijima, Y., Ohta, T., 2019. Impact of unusually wet permafrost soil on understory vegetation and CO<sub>2</sub> exchange in a larch forest in eastern Siberia. *Agr. For. Meteorol.*, 265, 295–309. 査読有

〔学会発表〕(計 13件)

Kotani, A., Ohta, T., Hiyama, T., Nakai, T., Iijima, Y., Maximov, T.C., Variation of seasonal thaw depth at permafrost larch forest in eastern Siberia. 日本惑星科学連合 2018 年大会, 2018. q

小谷亜由美, 檜山哲哉, 太田岳史, Trofim Maximov, 東シベリアのカラマツ林における永久凍土の季節融解層. 水文・水資源学会研究発表会, 2018.

Kotani, A., Ohta, T., Iijima, Y., Maximov, T.C., Response of larch forest ecosystem to wetting permafrost active layer in eastern Siberia. The Cool Forests Conference (IBFRA18), 2018.

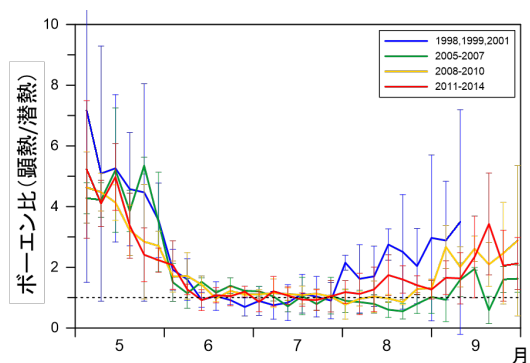


図3 ボウエン比の季節変化 5日平均値を (1) 1998,1999,2001, (2) 2005–07, (3) 2008–2010, (4) 2011–2014 において平均した値とその標準偏差を示す。

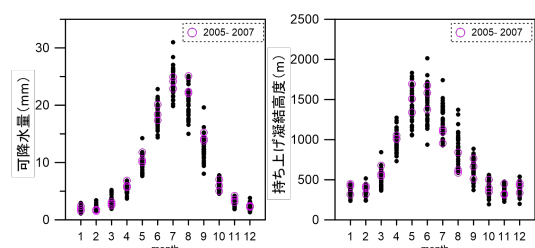


図4 ヤクーツク上空の可降水量と持ち上げ凝結高度の月平均値（1980–2016年，うち2005–07年を○で示す）。

Kotani, A., Nakatsubo, M., Ohta, T., Hiyama, T., Iijima, Y., Maximov, T.C., Active-layer thickness at permafrost larch forests in eastern Siberia. Fifth International Symposium on Arctic Research, 2018.

Kotani, A., Ohta, T., Maximov, T.C., Response of larch forest CO<sub>2</sub> exchange on wetness variability of permafrost active layer in eastern Siberia. The 2nd Asian Conference on Permafrost, 2017.

Kotani, A., Ohta, T., Iijima, Y., Maximov, T.C., Role of understory vegetation in decadal variation of water and carbon dioxide exchange over larch forest of eastern Siberia. European Geophysical Union general assembly, 2016.

〔図書〕(計 2件)

Kotani, A., Ohta, T., Water Cycles in Forests. Ohta, T., Hiyama, T., Iijima, Y., Kotani, A., Maximov, T.C. (Eds.) Water-Carbon Dynamics in Eastern Siberia. Springer-Nature, 43–67, 2019.

Maximov, T.C., Maksimov, A.P., Kononov, A.V., Kotani, A., Dolman, A.J., Carbon Cycles in Forests. Ohta, T., Hiyama, T., Iijima, Y., Kotani, A., Maximov, T.C. (Eds.) Water-Carbon Dynamics in Eastern Siberia. Springer-Nature, 69–100, 2019.

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

〔その他〕

とくになし

## 6 . 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名：太田岳史

ローマ字氏名：Ohta Takeshi

所属研究機関名：名古屋大学

部局名：生命農学研究科

職名：教授

研究者番号(8桁)：20152142

### (2)研究協力者

研究協力者氏名：トロフィム マキシモフ

ローマ字氏名：Trofim Maximov

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。