

## 北極海—大気—植生—凍土—河川系における水・物質循環の時空間変動

### Pan-Arctic Water-Carbon Cycles (PAWCs)

課題番号：19H05668

檜山 哲哉 (HIYAMA Tetsuya)

名古屋大学・宇宙地球環境研究所・教授



#### 研究の概要（4行以内）

北極海氷縮小に起因した水循環の時空間変動と北ユーラシアにおける植生状態・凍土状態・湛水状態の時空間変動、および温室効果気体の放出・吸収量の時空間変動を明らかにすることを目的とする。起源別の水の動きを追跡する水循環統合モデルを開発し、衛星リモートセンシングデータを活用することで、湛水域時系列マップと植生変化域時系列マップを作成する。

研究分野：水文学・気候学・気象学・凍土学・雪氷学

キーワード：温暖化・北極海氷縮小・大気—陸域水循環・永久凍土荒廃・温室効果気体

#### 1. 研究開始当初の背景

北極域の温暖化は水循環の著しい変動を伴う。また環北極陸域の温室効果気体の放出・吸収量は湛水状態や植生状態によって大きく異なるため、北極域の大気水循環の変動を定量評価するとともに、環北極陸域の植生状態・凍土状態・陸域水循環・温室効果気体の放出・吸収量の変動を統合的に研究することが肝要である。

#### 2. 研究の目的

温暖化に伴う北極海氷縮小と永久凍土荒廃を考慮に入れ、過去～現在～将来の大気—陸域水循環の時空間変動を解析し、環北極陸域の植生状態と湛水状態の時空間変動を定量評価する。そして温室効果気体の放出・吸収量の時空間変動を明らかにすることを目的とする。

#### 3. 研究の方法

起源別の水の動きを追跡する水循環統合モデルを開発し、衛星リモートセンシングデータを活用して湛水域時系列マップと植生変化域時系列マップを作成する。それらを用いて、並行して開発中の陸域生態系物質循環モデルから得られる温室効果気体の放出・吸収量の時系列マップを作成する。北ユーラシア（東シベリア・モンゴル）の北方林で温室効果気体フラックス観測を行い、得られた観測データを機械学習によるデータ駆動型経験モデルを用いて広域化し、温室効果気体の放出・吸収量の時系列マップの検証を行う。

#### 4. これまでの成果

4つの班（陸域観測班・陸域モデル班・大気班・統括班）が互いに連携することで、目的達成に向けた研究を行っている。各班のこれまでの研究で得られた成果を以下に示す。

陸域観測班は東シベリアとモンゴルにおける温室効果気体フラックスの観測準備と広域化に向けた準備を行った。2020年はCOVID-19の影響で現地観測が不可能となったため、既存の温室効果気体フラックス観測データを整備するとともに、AsiaFluxデータを活用することで二酸化炭素フラックスの北ユーラシアへの広域化を試み、シベリアにおける光合成量と純生態系交換量のデータセットを2000年～2020年まで構築した。また、衛星リモートセンシングデータを用いて東シベリアの2つの観測拠点（Spasskaya Pad研究林およびElgeei研究林）の植生と二酸化炭素フラックスの解析を実施した。その結果、多年多雨などの極端イベントの影響が少なかったElgeei研究林においては植生指数が有意に増加し植生活動が活発化していた一方、多年多雨の影響を受けたSpasskaya Pad研究林ではその傾向が見られなかった。したがって、気温だけでなく降水量が、植生活動に対して非常に重要な役割を果たすことが明らかとなった。

陸域モデル班は、陸面過程モデルと水文モデルを結合した水循環統合モデルを用いて、環北極陸域から北極海に流れ出る河川水とそれに伴う熱フラックスが北極海氷縮小にどの程度影響を与えるのかを世界で初めて定量的に明らかにした。また水循環統合モデ

ルに地下水の融解過程を結合し、河川水に対する地下水融解水の寄与を定量評価できるようにした。加えて、河川流出と蒸発散に対する融雪水、暖候期降水（降雨）、地下水融解水の成分分離とそれらの寄与率を定量的に評価できるように、同位体トレーサーモデルを結合した。その結果、暖候期降水（降雨）が蒸発散の主要な起源水であること、融雪水が河川水の主要な起源水であること、そして地下水融解水は蒸発散に対して大きく寄与していないことが明らかとなった。また、土壌が凍結する直前（秋季）の降雨の一部が土壌表層に凍結貯留され、翌年の春季に融雪水や降雨と混合し、蒸発散に対して融雪水と同等に寄与することがわかった。これらの結果から、永久凍土を有する北ユーラシアにおける水循環のメモリー効果を定量的に把握することができた。

大気班は水蒸気トレーサーモデルの改良を進めた。特に大気再解析データを入力データとして利用できるように改良し、1981年～2019年（39年間）の3時間毎の降水量と蒸発散量のグローバルプロダクトを作成した。また、北極点の周辺域にデカルト座標を適用することで、従来の緯度経度直交座標を用いた環北極域の計算に滑らかに結合できるスキームを開発した。これらの改良により、北極海で蒸発した水蒸気の輸送を高精度で追跡することが可能となった。その結果、シベリアの大気水蒸気量に対し、北極海で蒸発した水蒸気の割合が徐々に増加してきていることがわかった。特に、2000年頃を境に、9月には西シベリアで、10月～12月には東シベリアで増加傾向が顕著になっていることが明らかとなった。北極海氷縮小が進行するに伴い、海面からの蒸発量が増加し、それが大気循環を通じて北ユーラシアに輸送されるという当初の仮説を裏付けることができた。

統括班は湛水域時系列マップと植生変化域時系列マップの作成を開始した。湛水域マップについては、低解像度で広域を観測するAMSR2と中解像度で観測するMODISのそれぞれの水指標画像をもとに、pix2pixの機械学習によるデータフュージョン技術を適用し、レナ川中流域の湛水域マップの作成を開始した。これまでに、2012～2018年（7年間）の500m分解能で日別の湛水域マップが作成できた。植生変化域マップも同様のデータフュージョン技術を用い、低解像度画像から中・高解像度の植生指数の予測が可能かどうかを検討した。また、ALOSやALOS2合成開口レーダ後方散乱強度の変化から植生を含む地表面状態の変化検出手法を検討し、地上観測データと水循環統合モデルとの連携を検討した。

以上の研究成果を複数の論文として発表するとともに、投稿する準備を進めている。

## 5. 今後の計画

AsiaFlux等で公開されている地上観測データと衛星リモートセンシングデータを用いて、北ユーラシアの温室効果気体フラックスの経年変動や長期変化傾向の解析を進める。そして将来予測の準備を開始し、大気循環・降水量変動解析と、永久凍土域の陸域水循環に対する地下水の影響を定量評価する。その際、北極海起源水蒸気の挙動の解析、特に、北極海とシベリア間の水蒸気交換の解析を行う。湛水域マップと植生変化域マップの開発・改良・検証・広域への拡張を行い、北ユーラシアにおけるメタン放出量の広域推定を行う。

国際シンポジウムを2021年度と2023年度に開催するとともに、研究進捗状況を相互に確認するために月例オンラインセミナーを開催する。そして、北極海氷縮小－積雪－植生－凍土－河川流出の関係を明らかにする。

## 6. これまでの発表論文

Hiyama, T., Ueyama, M., Kotani, A. et al.: Lessons learned from more than a decade of greenhouse gas flux measurements at boreal forests in eastern Siberia and interior Alaska. *Polar Science*, **27**, 100607, 2021, doi:10.1016/j.polar.2020.100607.

Hiyama, T., Dashtseren, A., Asai, K., Kanamori, H., Iijima, Y., Ishikawa, M.: Groundwater age of spring discharges under changing permafrost conditions: the Khangai Mountains in central Mongolia. *Environmental Research Letters*, **16**, 015008, 2021, doi:10.1088/1748-9326/abd1a1.

Mizuochi, H., Iijima, Y., Nagano, H., Kotani, A., Hiyama, T.: Dynamic mapping of subarctic surface water by fusion of microwave and optical satellite data using conditional adversarial networks. *Remote Sensing*, **13**, 175, 2021, doi:10.3390/rs13020175.

Park, H. et al.: Increasing riverine heat influx triggers Arctic sea ice decline and oceanic and atmospheric warming. *Science Advances*, **6**, eabc4699, 2020, doi:10.1126/sciadv.abc4699.

Suzuki, K., Hiyama, T., Matsuo, K., Ichii, K., Iijima, Y., Yamazaki, D.: Accelerated continental-scale snowmelt and ecohydrological impacts in the four largest Siberian river basins in response to spring warming. *Hydrological Processes*, **34**, 3867-3881, 2020, doi:10.1002/hyp.13844.

## 7. ホームページ

<https://pawcs.home.blog/>