2026 年 11 月 12 日

報道関係者各位

国立大学法人筑波大学
国立研究開発法人国立環境研究所

# 奥日光の戦場ケ原に形成される冷気だまりでは、周囲の高地より芽吹きが遅れ黄葉が早まる

**栃木県日光市に位置する凹地の戦場ケ原では、晴天かつ静穏な夜間に周囲の斜面に比べて気温が相対的に低くなる「冷気だまり」と呼ばれる現象が発生します。この現象に伴い、戦場ケ原では、周囲のより標高が高い斜面に比べて落葉樹林の葉の芽吹きは遅れる一方、黄葉/紅葉は早まることが分かりました。**

**植物が春に芽吹いて葉を広げる（展葉）時期と、秋に黄葉/紅葉して落葉する時期は、一般的に気温と深く関係しています。一般に、山では標高が高いほど気温が低くなるため（気温の逓減）、高標高地ほど春の展葉は遅く、秋の黄葉/紅葉や落葉は早くなります。一方、晴れて風の弱い夜には、高標高地から冷気が斜面を流れ下り、盆地や谷底にたまります。この「冷気だまり」によって、周囲から相対的に標高の低い場所が周囲斜面より寒くなることがあります。国土の 7 割が山地である日本では、冷気だまりは珍しい現象ではありませんが、こうした局所的な寒さ（微気象）が展葉や黄葉/紅葉など季節に応じて変化する植物の状態（植物季節）に与える影響は十分に分かっていませんでした。**

**本研究では、栃木県の奥日光を対象に、冷気だまりと落葉樹林の植物季節の関係を調べました。2023～2025 年の衛星データを用いて、夜間の地表面温度、展葉日、黄葉/紅葉日を調べました。その結果、戦場ケ原周辺の盆地や谷底では、周囲の斜面に比べて標高が低いにもかかわらず地表面温度は低いこと、そして展葉日は遅く、黄葉/紅葉日は早いことが分かりました。**

**本研究成果は、冷気がたまる地形では、展葉などの植物季節と標高の関係が一般的な山の傾向とは逆になることを示しました。植物季節や気候変動影響を理解するには、広い地域の平均的な気温だけでなく、地形が生み出す局所的な気温の違いにも注目することが重要であることが示唆されました。**

研究代表者
筑波大学大学院環境学学位プログラム　博士後期課程 1 年次
国立研究開発法人国立環境研究所生物多様性領域　リサーチアシスタント
水野　優輝
筑波大学生命環境系
奈佐原　顕郎　准教授

## 研究の背景

通常、気温は標高が高くなるほど低くなります。しかし、山地では、気象条件や地形によって盆地や谷底に冷たい空気がたまり、標高の低い場所が周囲の高い斜面より寒くなることがあります。この冷たい空気のたまりを冷気だまり[注1)]（冷気湖とも言う）と呼びます。山地の多い日本では、こうした気温の逆転が各地で知られています。

植物が春に葉を広げる展葉[注2)]や、秋に黄葉/紅葉する時期は、気温と深く関係しています。そのため、一般に高標高地ほど展葉は遅く、黄葉/紅葉は早くなります。しかし、冷気だまりによって気温が逆転する場所で、こうした植物季節（植物フェノロジー）[注3)]がどのように変わるかは、十分に明らかになっていませんでした（図 1）。そこで本研究では、栃木県日光市の日光国立公園内に位置する戦場ケ原を対象に、衛星データを用いて、冷気だまりが形成される地域の温度と植物季節を面的に捉え、両者の関係を調べました。

## 研究内容と成果

本研究では、国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構（JAXA）の気候変動観測衛星「しきさい」に搭載された多波長光学放射計（SGLI）[注4)]による空間解像度 250 m の夜間地表面温度データを用いて、冷気の滞留に伴う低温域の空間分布を可視化しました。また、空間解像度 30 m の衛星データセット「HLS（Harmonized Landsat and Sentinel-2）」[注5)]を用いて、日光周辺の落葉樹林・草地における展葉日（Start of growing Season: SOS）と黄葉/紅葉日（End of growing Season: EOS）を推定しました。

2023～2025 年のデータを解析した結果、戦場ケ原周辺の盆地・谷底では、季節によって範囲や強度が変化するものの、晴れた夜間ではほぼ 1 年を通じて周囲の斜面より地表面温度が低く、冷気だまりの形成と整合する温度分布が確認されました（図 2）。これらの低温域では、標高が比較的低いにもかかわらず、周囲の斜面より展葉日が遅く、黄葉/紅葉日が早い傾向が認められました。標高の影響を調整した統計解析でも、冷気だまり域における展葉日の遅延（図 3）と黄葉/紅葉日の早期化（図 4）が確認されました。

これらの結果は、冷気だまりが形成される地域では、落葉樹林の植物フェノロジーと標高の関係が、一般的な山地で見られるパターンとは逆転することを示しています。一方、地表面温度との関係では、春季に低温な場所ほど展葉日が遅く、秋季に低温な場所ほど黄葉/紅葉日が早い傾向が認められ、局所的な温度環境と植物フェノロジーの密接な関連が示されました。

## 今後の展開

本研究グループはこれまで、近年の高温に伴う展葉日の早期化（Mizuno et al., Scientific Reports, 2025）を明らかにしており、気候変動が既に生態系へ何らかの影響をもたらしていることが示唆されています。そうした中で、周囲よりも気温が低くなるエリア（冷気だまりの発生エリア）では気候変動による気温上昇を緩和し、一部の動植物のレフュージア（逃避地）となる可能性も指摘されています（Pastore et al., Ecology, 2022）。気候変動下における今後の植生動態を解明するうえで、冷気だまりは重要な気象現象であり、継続的なモニタリングが求められます。

また、植物フェノロジーの変化は生態系のみならず地域社会にも影響を及ぼす可能性があります。日光は黄葉/紅葉で有名な一大行楽地であり、黄葉/紅葉のタイミングや色鮮やかさは地域経済と密接に関連していると考えられます。近年では、気候変動が進行することで黄葉/紅葉の鮮やかさが失われていくといった研究結果が報告されており（Koide et al., Scientific Reports, 2025）、本研究グループは今後も、衛星データを用いた植物フェノロジーの継続的なモニタリングを進めていく予定です。

参考図

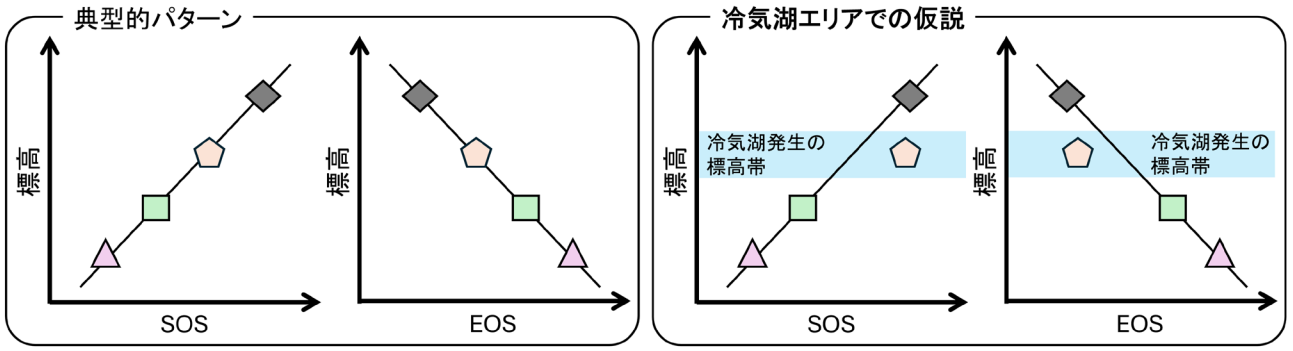



**図 1　標高と植物フェノロジー（SOS：展葉日；EOS：黄葉/紅葉日）の関係に関する仮説**

異なる記号は、各標高に分布する仮想的な植生を示す。一般に、標高の上昇に伴って気温が低下し、高標高ほど展葉日（SOS）が遅く、黄葉/紅葉日（EOS）が早くなる（典型的パターン）。しかし、冷気だまりが形成される地域では気温逆転が生じることがあり、そこでの植物フェノロジーパターンは典型的パターンから逸脱すると予想した。

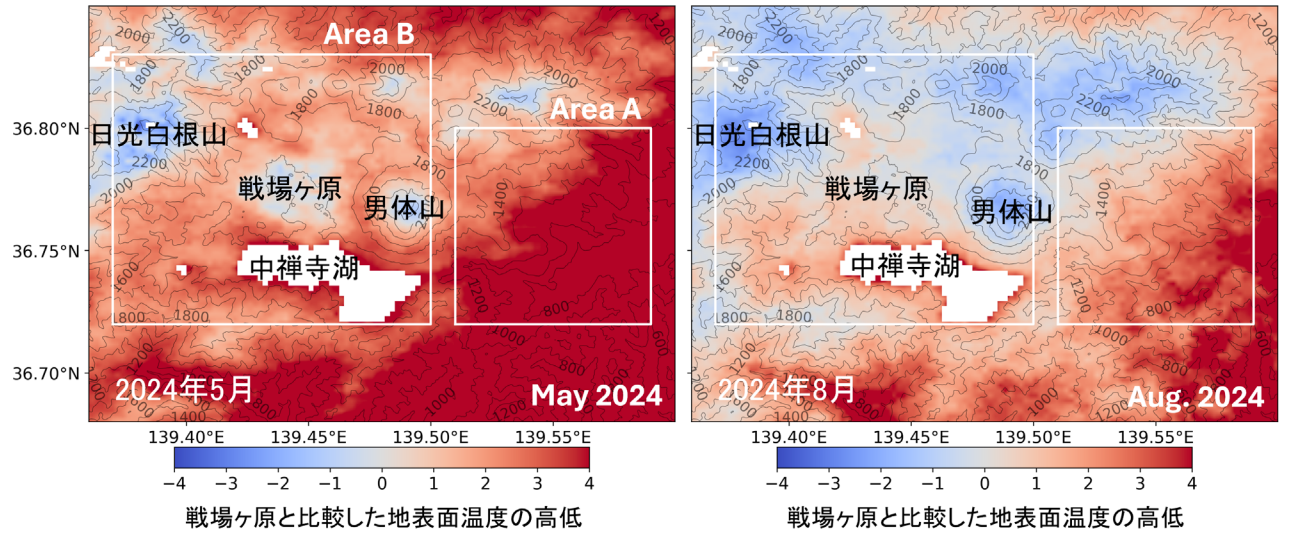



**図 2　戦場ヶ原底部の平均夜間地表面温度を基準に算出した、2024 年 5 月・8 月の地表面温度の差分**

JAXA の気候変動観測衛星「しきさい」により捉えられた夜間地表面温度偏差の空間パターン（1 カ月平均）。戦場ヶ原底部を基準値の 0 とした。青色と赤色は、それぞれ基準地域より低温および高温であることを示し、白色画素は欠測、または水域などの観測対象外の地域を示す。白い長方形は、その後の解析に用いた Area A（冷気だまりの生じないエリア）と Area B（戦場ヶ原を含む冷気だまりが生じるエリア）の範囲を示す。

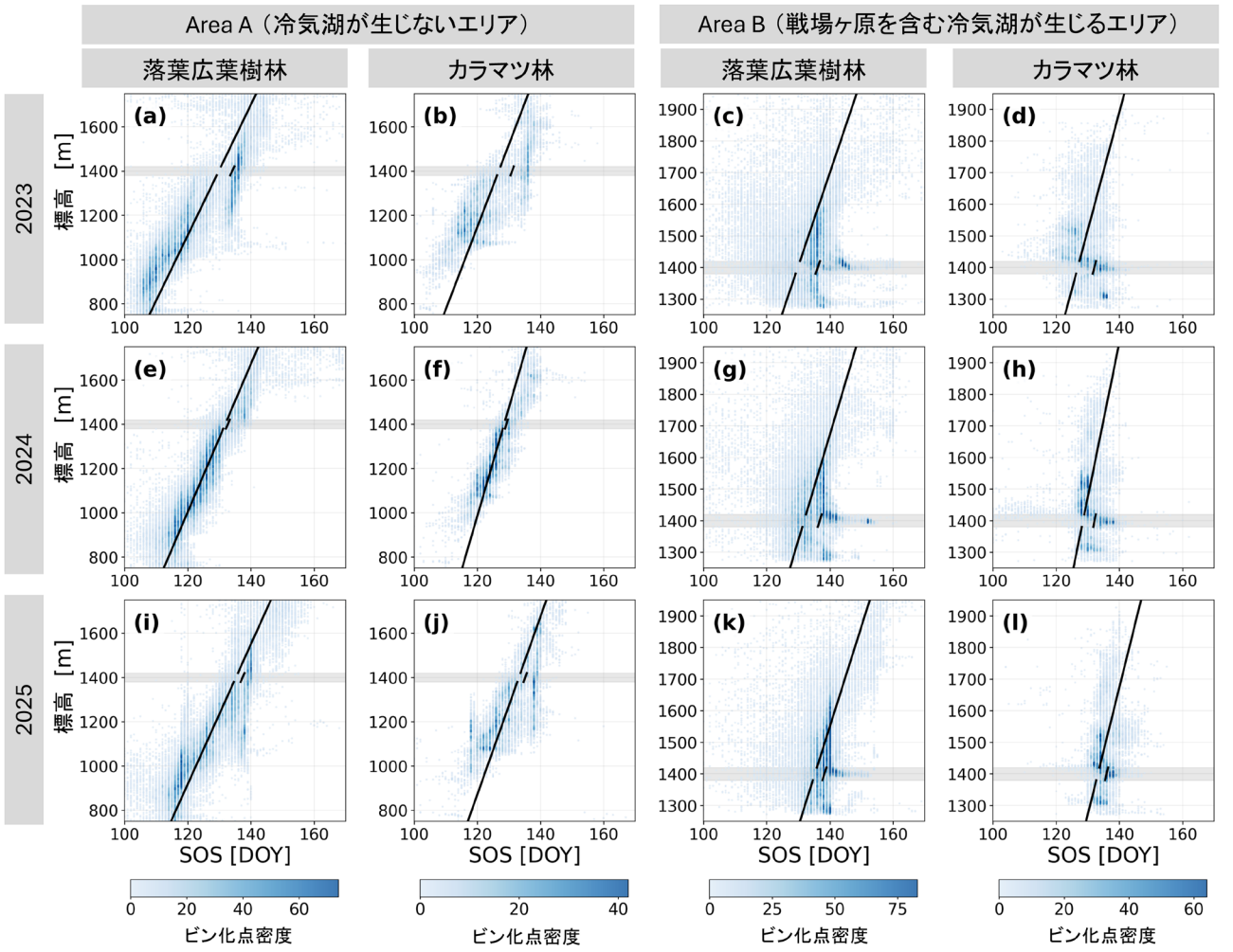



**図 3　Area A と Area B における、標高と展葉日（SOS）の関係**

Area A は冷気の滞留の影響が比較的小さい地域であるのに対し、Area B は戦場ケ原の冷気だまり形成エリアを含む。灰色の帯は冷気だまりが形成される戦場ケ原の標高帯（約 1400m付近）を示す。実線は線形モデルにより、標高の関数として予測した展葉日（SOS）を示す。Area B の冷気だまりの標高帯では展葉日が周辺標高帯に比べ遅れる傾向が毎年認められる。なお、DOY は積算日（例：1 月 1 日は DOY 1、12 月 31 日は DOY 365）。なお、ビン化点密度とは散布図を細かいセル（ビン）に分割し、それぞれのセル内にいくつの点が含まれているか（密度）を計算したもの。Area B（右側）の灰色の帯で示された標高帯（戦場ケ原周辺）に着目すると、本エリアで有意に展葉が遅れていることが分かる。

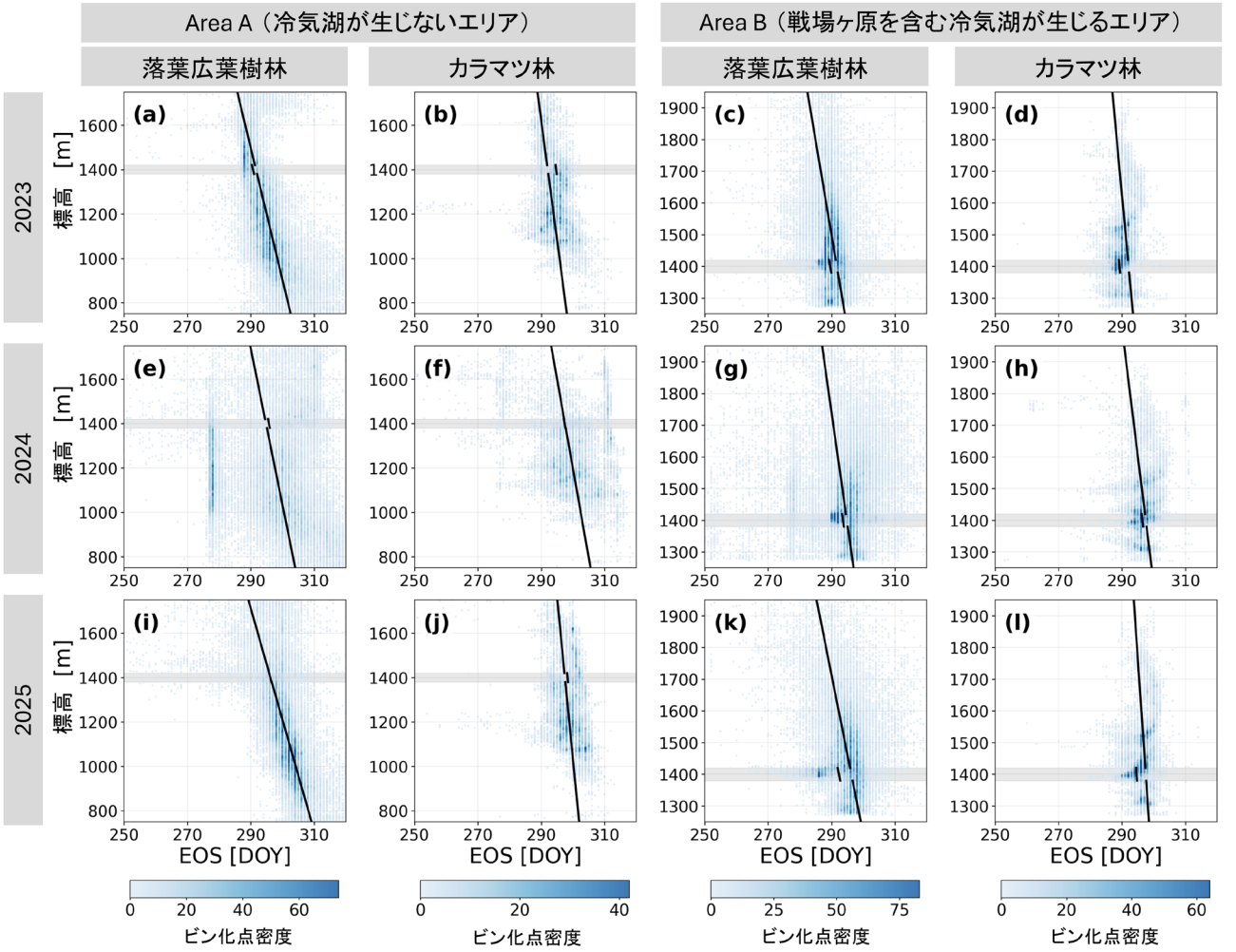



**図 4　Area A と Area B における、標高と黄葉/紅葉日（EOS）の関係**

Area A は冷気の滞留の影響が比較的小さい地域であるのに対し、Area B は戦場ヶ原の冷気だまり形成エリアを含む。灰色の帯は冷気だまりが形成される戦場ケ原の標高帯（約 1400m）を示す。実線は線形モデルにより、標高の関数として予測した黄葉/紅葉日（EOS）を示す。Area B の冷気だまりの標高帯では黄葉/紅葉日が周辺標高帯に比べ早まる傾向が毎年認められる。なお、DOY は積算日（例：1 月 1 日は DOY 1、12 月 31 日は DOY 365）。なお、ビン化点密度とは散布図を細かいセル（ビン）に分割し、それぞれのセル内にいくつの点が含まれているか（密度）を計算したもの。Area B（右側）の灰色の帯で示された標高帯（戦場ヶ原周辺）に着目すると、本エリアで有意に黄葉/紅葉が早まっていることが分かる。

用語解説

注 1）　冷気だまり、冷気湖（cold-air pool）

周囲を山地に囲まれた盆地等にできる冷気が蓄積された層のこと。晴天かつ静穏な夜間に放射冷却により底部に安定した冷気の層が形成されるとともに、周囲の斜面の冷気が底部へ流下し、盆地底部や谷底に冷気が滞留していく。日本では阿蘇、菅平、八ヶ岳など多くの場所で観測されている。

注 2）　展葉（spring leaf flush）

樹木や草本の芽（たたまれた状態の葉）が開いて広がっていくこと。展葉した日（展葉日）を SOS（Start of growing Season）と呼ぶ。本研究では衛星データから算出される植生指標（植物の状態を推定する指標）に一定の基準値を設けて展葉日を定義した。

注 3）植物季節、植物フェノロジー（plant phenology）

季節の移り変わりに伴う植物の行動や状態の変化を示す。季節変化に伴う動植物の行動や状態変化

を併せて「フェノロジー」と呼ぶため、今回は区別を目的に「植物フェノロジー」とした。

注 4）気候変動観測衛星 GCOM-C（しきさい）の多波長光学放射計 SGLI

「しきさい」は 2017 年 12 月に JAXA が打ち上げた衛星。搭載する「多波長光学放射計（SGLI: Second-generationGLobal Imager）」が近紫外線から可視光、熱赤外線まで 19 種類の光を観測する。

注 5）Harmonized Landsat Sentinel-2 (HLS)

アメリカ航空宇宙局（NASA）が運用する衛星 Landsat-8, Landsat-9 の観測データと欧州宇宙機関（ESA）が運用する衛星 Sentinel-2 の観測データを融合させた衛星データセット。30 m という比較的高い空間解像度と 1〜2 日おきの高頻度観測が特徴。ただし、雲等による欠測が存在するため、実際の有効データは 1〜2 日おきではないことが多い。

## 研究資金

本研究は、主として 2025 年度一般財団法人リモート・センシング技術センター（RESTEC）と国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構（JAXA）第 3 回及び第 4 回地球観測研究公募（ER3GCF102、ER4GCF102）研究助成の一環として実施されました。

## 掲載論文

【題　名】 Terrain-induced cold-air pooling reverses typical elevational patterns of deciduous vegetation phenology in a mountainous landscape.（山岳地形により生じる冷気だまりは典型的な標高と落葉樹林の植物季節の関係性を逆転させる）
【著者名】 Y. Mizuno and K. N. Nasahara
【掲載誌】 *Theoretical and Applied Climatology*
【掲載日】 2026 年 10 月 30 日
【DOI】 10.1007/s00704-026-06651-8

## 問合わせ先

【研究に関すること】
奈佐原　顕郎（なさはら　けんろう）
筑波大学 生命環境系　准教授
URL: https://pen.envr.tsukuba.ac.jp/~ryuiki/ja

【取材・報道に関すること】
筑波大学広報局
E-mail: kohositu@un.tsukuba.ac.jp

国立環境研究所 企画部広報対話室
E-mail: kouhou0@nies.go.jp

# 奥日光の戦場ヶ原に形成される冷気だまりでは，周囲の高地より芽吹きが遅れ黄葉が早まる

筑波大学 University of Tsukuba　国立研究開発法人 国立環境研究所 National Institute for Environmental Studies

**水野 優輝[1,2]・奈佐原 顕郎[1]**

1. 筑波大学; 2. 国立環境研究所 生物多様性領域

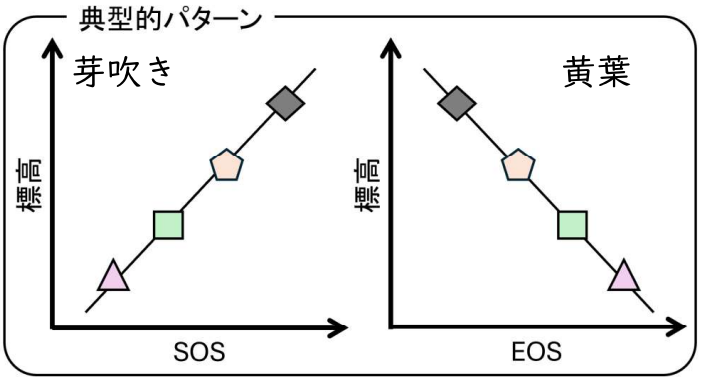
## 導入

筑波大学 University of Tsukuba　国立研究開発法人 国立環境研究所 National Institute for Environmental Studies

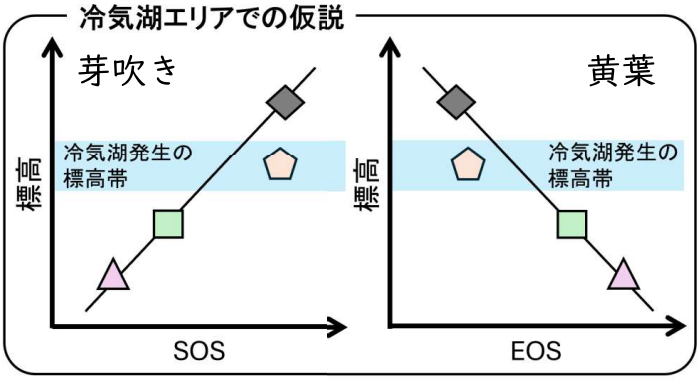
冷気湖: 冷たい空気が盆地や谷底にたまり，周囲の山地よりも気温が低くなる。

晴天かつ静穏な夜間に発生。日本各地で確認されている。

**普通の山地**




**冷気湖ができる場所（研究の仮説）**

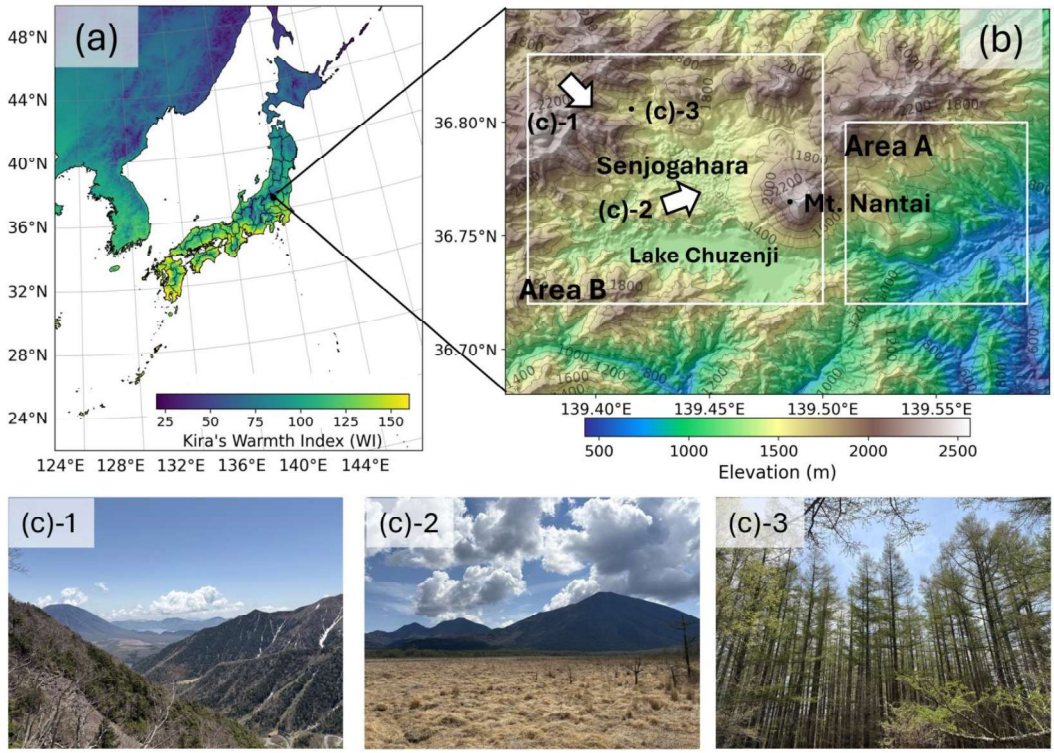



縦軸は標高。横軸は時期（右ほど遅い）。SOS＝芽吹き、EOS＝黄葉。

**冷気湖が起きるエリアでは，低温環境（気温の逆転）が植物季節（植物フェノロジー）にも影響を及ぼすのではないか？**

# 導入

戦場ヶ原は男体山等の山地に囲まれ，晴天かつ静穏な夜間に冷気湖が生じる。



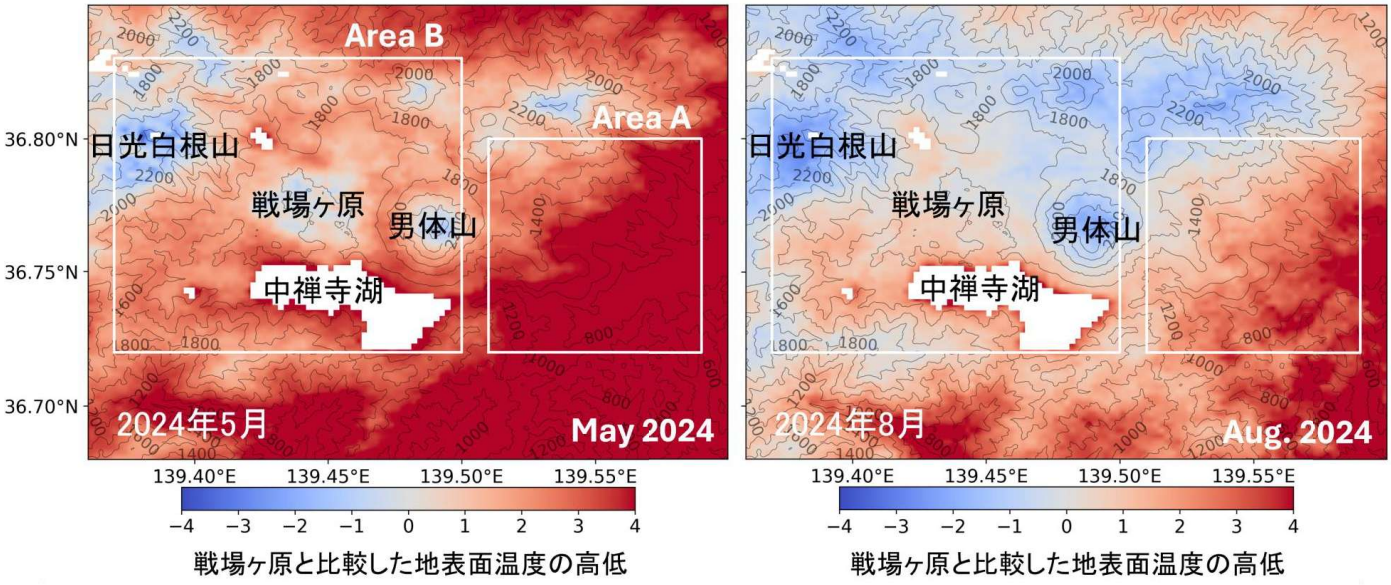

**戦場ヶ原の盆地周辺の展葉は周辺より遅く，黄葉ははやい？**
**温度と芽吹き/黄葉を衛星データから面的に確認！**



# 結果 -冷気湖の形成-

戦場ヶ原周辺での冷気湖の形成が衛星データからも確認できた。

年間を通して，晴天かつ静穏な夜間には冷気だまりが形成される。ただし，その強度は時期により異なる。



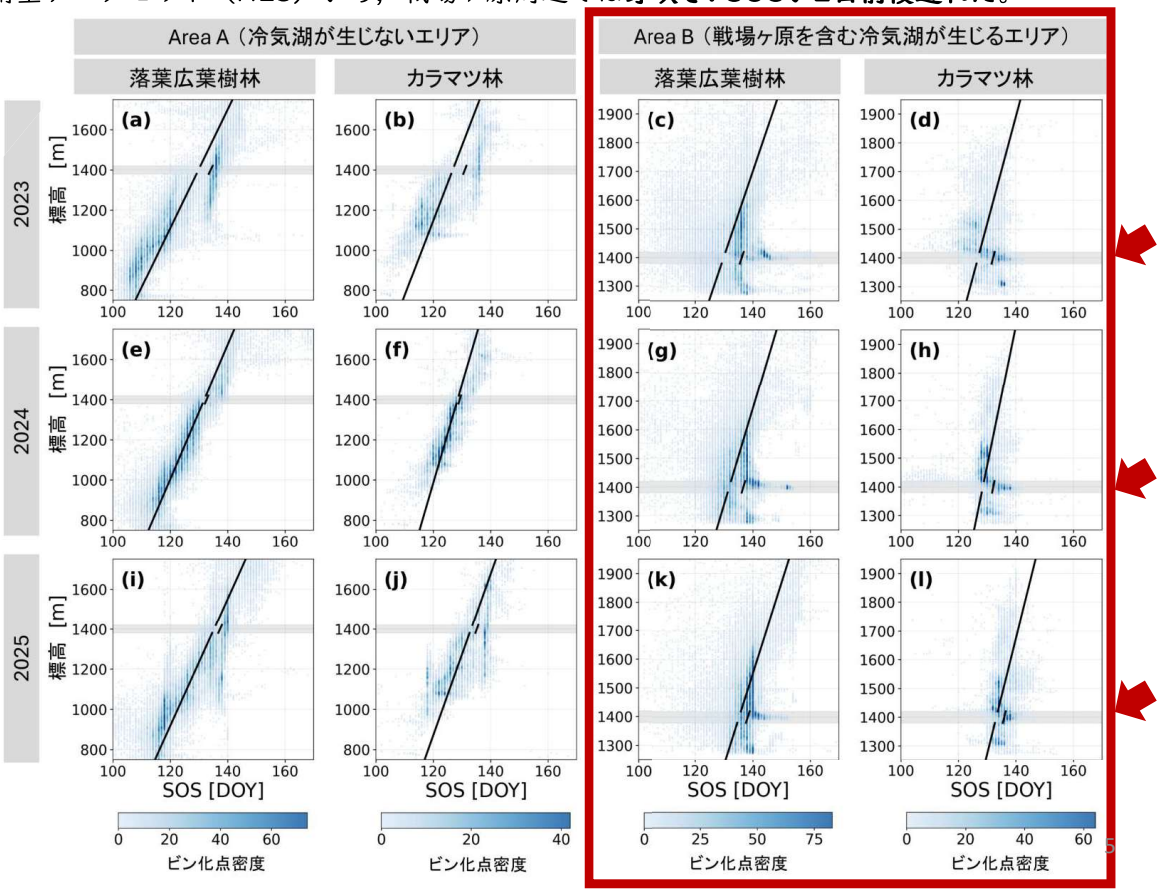

JAXAの気候変動観測衛星「しきさい」観測の地表面温度データを解析

# 結果 -春の芽吹き-

冷気湖が生じるエリアBでは，典型パターンより毎年有意に芽吹きが遅れた。

30 m解像度衛星データセット（HLS）から，戦場ヶ原周辺では**芽吹き: SOSが2日前後遅れた。**



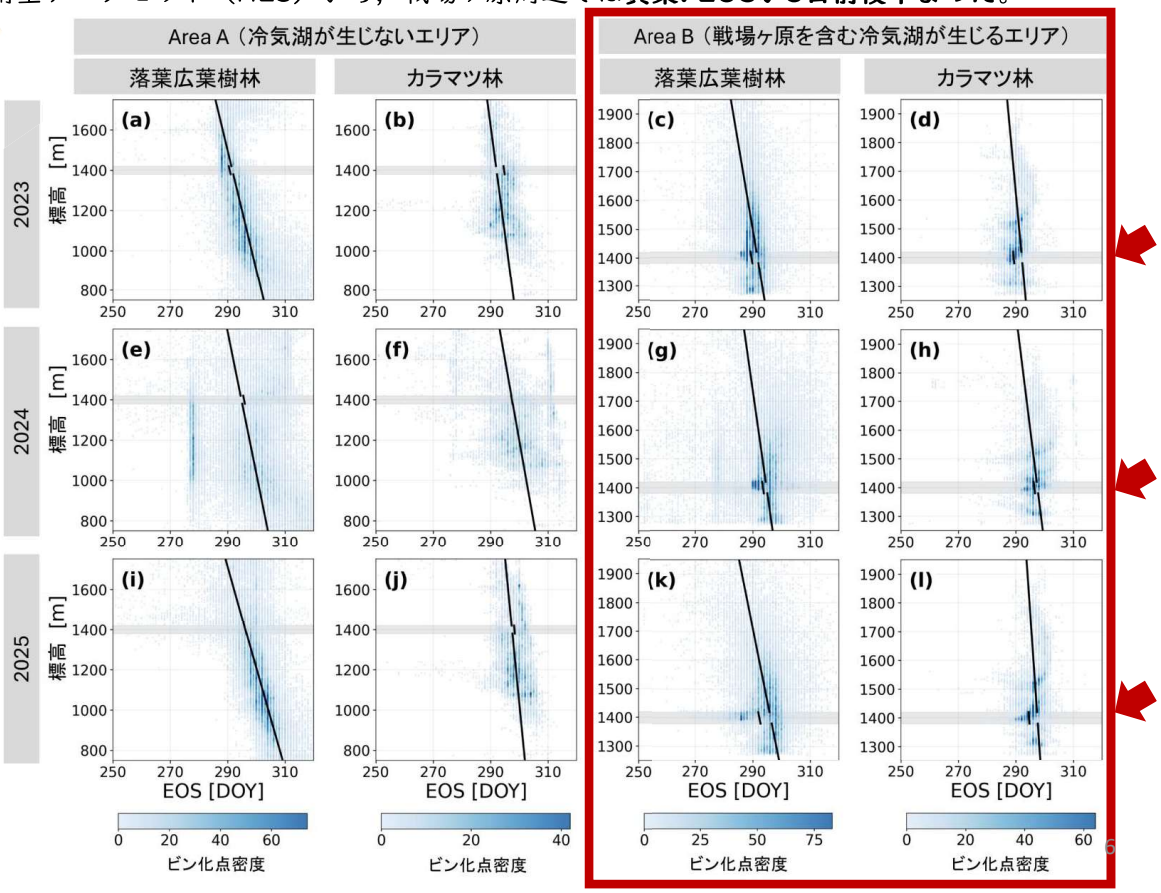



# 結果 -秋の黄葉-

冷気湖が生じるエリアBでは，典型パターンより毎年有意に黄葉が早かった。

30 m解像度衛星データセット（HLS）から，戦場ヶ原周辺では**黄葉: EOSが3日前後早まった。**





# 結論・今後の展望

## 主要な結果

✓ 冷気湖の形成はJAXAの衛星「しきさい」からも確認された。
✓ 戦場ヶ原周辺では，春が2日遅く，秋は3日はやい。

## 今後の展望

✓ 局所的な低温環境は地球温暖化の緩衝地域となる可能性。
✓ 日本では，気候変動に伴う芽吹きの早期化も確認されており，
今後は冷気湖等の微気象に着目したモニタリングが重要。

**論文情報**

Mizuno, Y., Nasahara, K.N. Terrain-induced cold-air pooling reverses typical elevational patterns of deciduous vegetation phenology in a mountainous landscape. *Theor Appl Climatol* **157**, 765 (2026). https://doi.org/10.1007/s00704-026-06651-8

**論文に関して:** 生命環境系 准教授 奈佐原顕郎