

地表徘徊性甲虫群集をもちいた風穴の microrefugia 機能評価

北海道大学大学院農学院 生態系管理学研究室 林成一朗

研究の背景

地球温暖化が進行するなか、多くの生物が高緯度や高標高の地域に分布域を移動させ絶滅を回避している可能性が指摘されている。しかし、移動能力の低い生物にとっては同一地域に存在する小規模な冷涼域である microrefugia の存在が存続の鍵となる¹⁾²⁾。

白滝ジオパークには、約300万年前以降の巨大噴火と約220万年前の火山活動に由来する地形・地質が分布しており、溶結凝灰岩や黒曜石を伴う地質基盤のもとで、夏季でも冷涼で安定した環境を維持する「風穴」が複数存在している³⁾。風穴では、岩塊内部と外気との温度差によって季節的な空気循環が生じ、冬季に岩塊内部へ蓄積された冷気が春から夏にかけて吹出口へ運ばれることで、周囲より低温な微気候が形成されることが知られている⁴⁾。

これまで北海道の低標高地にある風穴に高山性のラウスオサムシやダイセツホタルヤスデが生息していたことや⁵⁾⁶⁾、高山に生育するコケモモと低標高の風穴地に生育するコケモモで遺伝子型が異なるという結果が報告されていること⁷⁾から、風穴は冷涼な環境に依存する生物にとっての microrefugia として機能している可能性が指摘されてきた。

しかしながら、これまでの研究は特定種の一般的に生息地にに基づく定性的評価が中心であり、動物群集スケールでの定量的な検証は十分ではない。

そこで本研究では、群集スケールで定量的に風穴の microrefugia 機能を評価するため、地表徘徊性甲虫に着目した。地表徘徊性甲虫は種数が多く、環境変化に対する応答が群集レベルで把握しやすいため、群集構造の比較に適した分類群である⁸⁾。また、主に地表面で生活し、その活動は地温や地表付近の温度条件の影響を受けることが知られている⁹⁾。加えて、種ごとの温度特性を定量的に示すことができる種温度指数 (STI: Species Temperature Index) および、それを群集レベルで統合した群

集温度指数 (CTI: Community Temperature Index) の適用に適した分類群である¹⁰⁾¹¹⁾。

以上を踏まえ本研究では、風穴と周辺林分における地表徘徊性甲虫群集の温度特性および種構成の安定性を比較し、風穴の microrefugia としての機能を評価することを目的とした。

材料と方法

・調査地

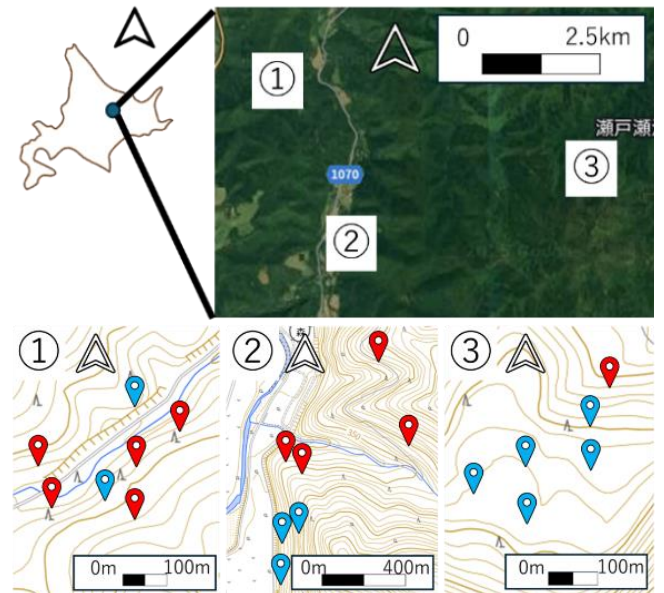


図 1.調査地点 青が風穴で赤が周辺林分

2021年8月及び2025年8月に、北海道紋別郡遠軽町丸瀬布に存在する3つの風穴地帯において調査を行った。各風穴地帯に調査地点を設定し(図1)、各調査地点において昆虫調査と地温調査を行った。

・昆虫調査

地表徘徊性甲虫を採集するためにピットフォールトラップ法(カップ径80mm、深さ86mm)を用いた。各調査地点に、12個のカップを約1mの間隔をあけて列状に設置し、1週間後に回収した。カップには誘引剤・防腐剤として30%の酢酸を15ml添加した。採集した昆虫類は実験室に全て持ち帰り、種レベルに同定し、個体数を記録した。

・地温調査

局所的な環境要因として、各調査地点中央でトラップ設置時の地温を測定した。測定には 2021 年はデジタル温度計を、2025 年は温度ロガー(HOBO Pendant MX2201)を用いた。

・STI・CTI 調査

STI は、各種が分布域内で経験する長期的な温度条件を表す指標である¹²⁾。本研究では、その算出に各採集地点の年平均気温を用いた¹³⁾。出現種の STI は、モニタリングサイト 1000、ひがし大雪自然館、北海道大学総合博物館の採集記録と AMeDAS 気象データを用いて算出した。各地点の CTI は、出現種の STI を各種の個体数で加重平均することで求めた。

・解析

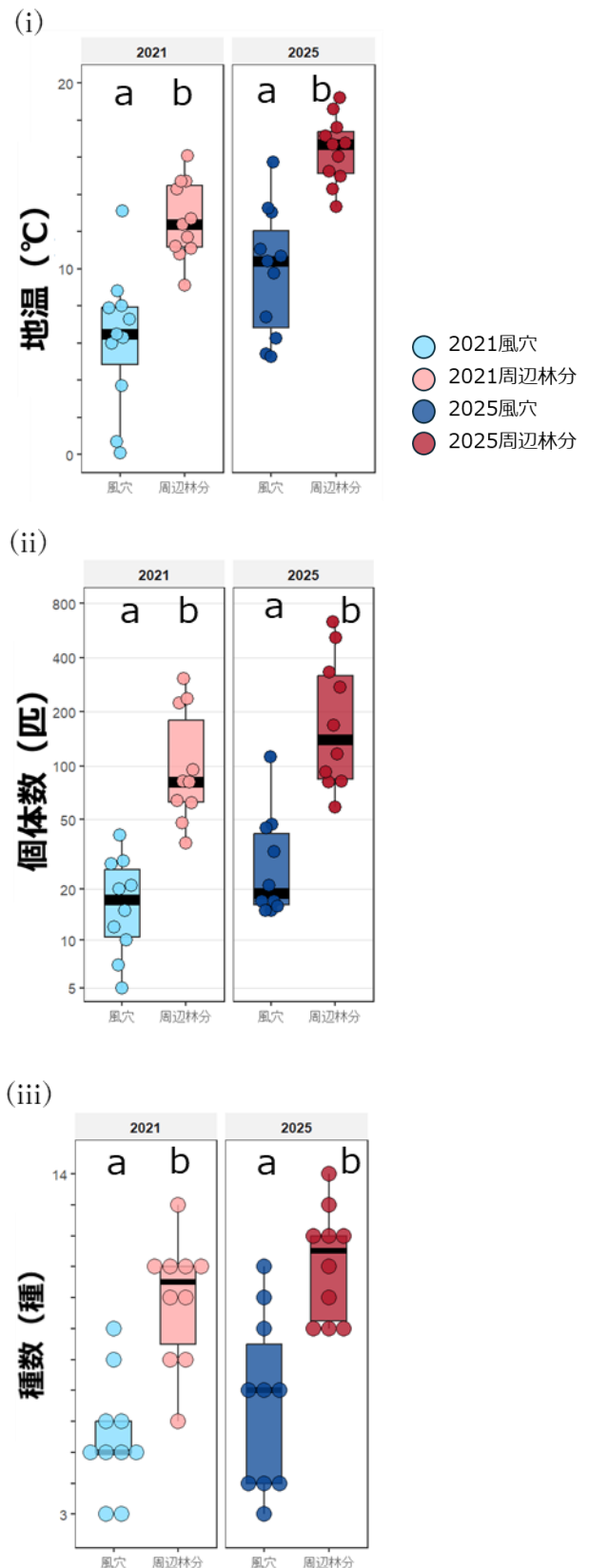
風穴と周辺林分の地温、種数、個体数、Simpson の多様度指数、CTI を比較した。有意差の検定には Mann-Whitney 検定を用いた(有意水準=0.05)。種構成の違いを評価するため、nMDS(non-metric multidimensional scaling)により種構成を座標平面上に図示したのち、環境要因を図示した。また、PERMANOVA(permutational analysis of variance)により類似度を検定した(有意水準=0.05)。

結果と考察

(1) 地温・個体数・種数・多様度指数

風穴は周辺林分に比べて地温が有意に低く(図 2. i)、個体数と種数も少なかった(図 2. ii,iii)。この傾向は 2021 年と 2025 年の両年で共通していた。風穴で地温が有意に低かった結果は、風穴が周辺よりも冷涼で安定した微気候を形成するという既往研究と一致した。個体数および種数が少なかったことは、風穴の低温環境が多くの種にとって制約として働き、出現できる種が限定されていることを示唆する。

一方で、Simpson の多様度指数には有意差は認められず(図 2. iv)、風穴では個体数や種数が少ないものの、種間の個体数の偏りが比較的小さく、均等性が保たれていると考えられる。



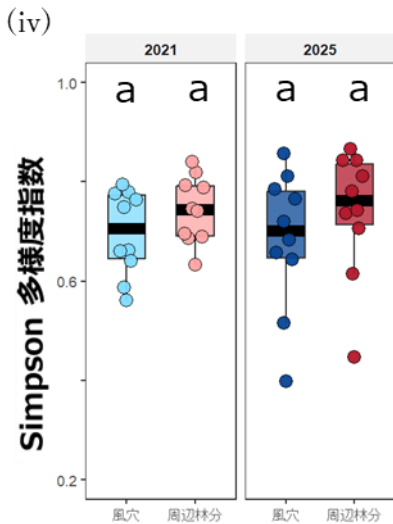


図 2. 地温データと採集データ

(i)地温、(ii)個体数、(iii)種数、(iv)Simpson の多様度指数(異符号間で有意差あり)

(2) STI と CTI

算出された STI は表 1 のようになり、風穴性とされているラウスオサムシは特に低い値を示した。CTI は兩年とも風穴で有意に低く、周辺林分よりも寒冷適応的な群集であることが示された (図 3)。これは、風穴が低温環境に適応した種を選択的に保持していることを示唆する。

この結果は、これまでラウスオサムシなどの生息記録を通じて示唆されてきた風穴の保全機能と整合的である。さらに、群集全体の温度特性を示す CTI を用いることで、風穴の microrefugia 機能を定量的に捉えることができたと考えられる。

種名	STI
クロツヤヒラタゴミムシ	11.40
ヨツボシモンシデムシ	9.03
オオクロツヤヒラタゴミムシ	8.76
コクロツヤヒラタゴミムシ	8.35
マルガタナガゴミムシ	7.66
センチコガネ	7.48
ヒラタシデムシ	7.48
ツンベルグナガゴミムシ	7.35
マイマイカブリ	7.33
コクロナガオサムシ	7.30
セダカオサムシ	7.26
アトマルナガゴミムシ	7.11
エゾマルガタナガゴミムシ	6.79
キノカワゴミムシ	6.58
ヒメクロオサムシ	6.33
ラウスオサムシ (風穴性)	1.96

表 1. 各種の STI

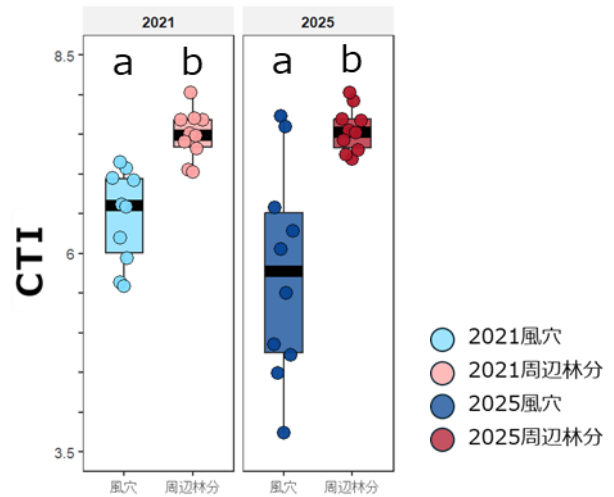


図 3. 調査地点の CTI(異符号間で有意差あり)

(3) 種構成

nMDS および PERMANOVA の結果、風穴群集と周辺林分群集の種構成は兩年で有意に異なった (図 4, 表 5)。さらに、周辺林分ではオオクロツヤヒラタゴミムシのような高 STI 種が、風穴ではラウスオサムシのような低 STI 種が偏って出現しており、両環境の種構成の違いは温度特性の違いとしても解釈できた。また、周辺林分では 2021 年と 2025 年の間で種構成の変化が検出されたのに対し、風穴では年次変動が小さい結果が得られた。種構成は地温の影響を受けており、風穴の低温環境が低 STI 種を保持し、種構成の特異性と安定性を支えていることが示唆された。

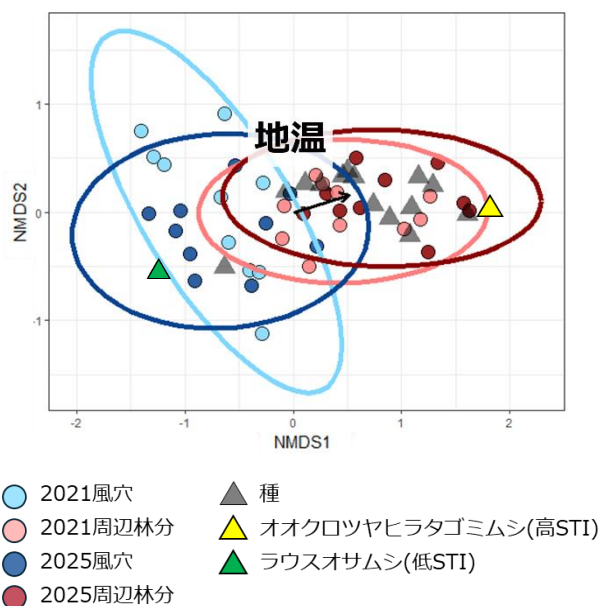


図 4. nMDS の結果

	2021 風穴	2025 周辺林分	2021 周辺林分
2025風穴	0.10	<0.05	<0.05
2021風穴		<0.05	<0.05
2025周辺林分			<0.05

表 5. PERMANOVA の結果

まとめ

本研究で得られた結果から、白滝ジオパークの風穴は周辺林分と比較して低い地温、低い CTI、特異な種構成を維持していることが明らかになった。また、風穴群集は周辺林分群集より年次変動が小さく、風穴は冷涼で安定した環境に依存する地表徘徊性甲虫群集の保全に重要な場であると考えられる。以上より、風穴は群集スケールにおいて microrefugia として機能している可能性が高い。

今後の展望

今後は、地表徘徊性甲虫の活動期全体を通じた長期的な温度観測を実施し、日較差や最高・最低温度を含めた解析を行うことで、風穴がどの程度安定した環境を維持しているかをより詳細に検証する予定である。

参考文献

1. Lenoir, J., Hattab, T., & Pierre, G. (2017). Climatic microrefugia under anthropogenic climate change: implications for species redistribution. *Ecography*, 40(2), 253–266.
2. Hampe, A., & Jump, A. S. (2011). Climate relicts: past, present, future. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 42, 313–333.
3. 山川信之, 清水長正, 杉山俊明, 川辺百樹(2013). 瀬戸瀬山周辺における風穴と低温現象. 雪氷研究大会 (2013・北見)
4. 清水長正, 澤田結基.(2015). 日本の風穴-冷涼のしくみと産業・観光への活用. 古今書院
5. 平木澤奈月・桑原良輔・小畑康之・山内健生(2022). ダイセツホタルヤスデ (*Kopidoiulus longus*) の北海道十勝地方における新記録. ひがし大雪自然館研究報告 9: 23–26.

6. 芳賀馨・幸田和富・宮下公範(1991). 東大雪山地におけるラウスオサムシと永久凍土の関係について. 上士幌町ひがし大雪博物館研究報告 13:1-12
7. Shimokawabe, A., Yamaura, Y., Sueyoshi, M., Kudo, G. & Nakamura, F. Genetic structure of *Vaccinium vitis-idaea* in lowland cool spot and alpine populations: microrefugia of alpine plants in the midlatitudes. *Alp. Bot.* 126, 143–151 (2016).
8. Pearce, J. L., & Venier, L. A. (2006). The use of ground beetles (Coleoptera: Carabidae) and spiders (Araneae) as bioindicators of sustainable forest management: A review. *Ecological Indicators*, 6(4), 780–793.
9. Müller, P., et al. (2022). Tillage effects on ground beetles in temperate climates: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 42, 54.
10. Devictor, V., Julliard, R., Couvet, D., Lee, A., & Jiguet, F. (2008). Birds are tracking climate warming, but not fast enough. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 275(1652), 2743–2748.
11. Lövei, G. L., & Magura, T. (2022). Body size and the urban heat island effect modulate the temperature–size relationship in ground beetles. *Journal of Biogeography*, 49, 1618–1628.
12. Sparrius, L. B., van den Top, G. G., & van Swaay, C. A. M. (2018). An approach to calculate a Species Temperature Index for flora based on open data. *Gorteria*, 40, 73–78.
13. Yamaura, Y., et al. (2025). Range size and abundance dynamics of Japanese breeding birds over 40 years suggest a potential crisis in warm areas. *Scientific Reports*.

本研究に関する学会発表

林成一朗, 森本淳子, 崎山智樹, 石山信雄. 北海道遠軽町の風穴と周辺林分における地表徘徊性甲虫群集の安定性の比較, 日本生態学会第 73 回全国大会, 京都, 2026/3.