

環境劇変時代に植物の適応研究から何が提案できるか

● オーガナイザー

露崎 史朗 (北海道大学大学院地球環境科学研究院)

上村 松生 (岩手大学)

地球環境の劇変が続くのは避けられない。特に、平均気温は上昇し続け、そのうえ様々なスケールで環境の振れが生じている。このような時代だからこそ、植物が持つ環境劇変への適応機構を多様な角度から明らかとすることは非常に重要である。本シンポジウムでは、異なるスケール間での研究の橋渡し可能な概念とし注目されるスケール依存性環境要因に結び付く研究を、遺伝子レベルから生態系レベルで共同研究等を行ってきたダイバーシティ満載のメンバーの研究紹介を通じ植物科学の最前線のトピックと問題点、今後の新しい展開可能性を共有する。

9:00-9:15	2aSE01	植物低温科学の系譜 露崎 史朗 (北大・院地球環境)
9:15-9:40	2aSE02	Observation of plant root growth in cool-temperate wetlands using scanner method Chen Zhao (Grad. Environ., Hokkaido Univ)
9:40-10:05	2aSE03	東南アジアを中心に分布するサラノキ連 Shoreae (Dipterocarpaceae) の移動分散と種多様化のプロセス 井坂 友一, 中村 彰宏, 和泉 健司, Harald Schneider (西双版納熱帯植物園)
10:05-10:30	2aSE04	気温の日周変動と低温環境がフルクタン蓄積や組織形態に与える影響 菊地 拓真, 泉 義紀, 小竹 敬久, 高橋 大輔 (埼玉大・院理工)
10:30-10:55	2aSE05	凍結がもたらす馴化：植物の越冬を理解するための新たな視点 杉田 健史 ¹ , 河村 幸男 ² (¹ 岩大・院農 (現 Univ. Nebraska・Biochem.), ² 岩大・院農)
10:55-11:10	2aSE06	寒冷応答研究から垣間見える植物科学の新展開 上村 松生 (岩手大学)
11:10-11:30		総合討論

露崎 史朗 (北大・院地球環境)

植物は、移動性が低いため、地球環境の劇的な変化を回避することができず、必然的に環境適応を余儀なくされる。特に気温上昇と、それに伴う降水・積雪等の劇変は、生存戦略に大きな影響を与える。このような環境変動に対応するためには、分子レベルから景観・地球レベルに至るまでの多様なスケールで適切な応答を行うことが不可欠となる。

持続可能な地球環境の構築に向けて、単一領域の研究では、もはや限界がある。異分野融合の必要性は科学の発展とともに常に指摘されてきたが、分野横断的研究が機能しているかどうかは再考されるべき課題である。一方、多様な学問領域を融合させ植物科学の発展に寄与してきた研究室も存在する。その一つが、北海道大学低温科学研究所の吉田静夫先生の研究室である。

2024年冬に88歳で逝去された吉田先生は、「植物生理学」を専門とし、低温耐性や凍結傷害機構の解明に大きく貢献された。しかし、吉田研究室に集った研究者は、分子レベルから生態系レベルまで幅広いアプローチを展開し、植物適応研究を推進してきた。これらの研究の多様性こそが、植物低温科学の進展に重要な役割を果たしてきたといえるだろう。吉田研究室の系譜は今なお国内外の研究機関に継承され、さらなる発展を遂げている。

本講演では、吉田研究室の歩みを振り返りながら、植物科学における研究のダイバーシティ形成の過程を検討する。その中で、意識的・無意識的に関わらず、多くの研究者がスケール依存性環境要因を取り扱ってきたように思う。その部分に着目し、異なるスケール間での研究の橋渡しは、どうあるべきかを検討する。そのための一つの切り口として、スケール依存性環境要因を介した遺伝子レベルから生態系レベルに至る研究を紹介し、異なるスケール間での統合がどのように実現され得るかを探る。さらに、若手研究者による最新の研究成果を通じて、植物科学の最前線のトピックや課題、そして今後の新たな展開可能性について議論する。

最後に、「低温科学から垣間見える植物科学の新展開」へとつながる視点を提供し、本シンポジウムの「はじめに」としたい。

Chen Zhao (Grad. Environ., Hokkaido Univ)

Climate change dramatically accelerates temperature rise, impacting both aboveground ecosystems and belowground structures, particularly root networks in boreal wetlands with substantial peat accumulation. These shifts result from intensified thermal and hydrological fluctuations within peat layers. Since the observation of root dynamics requires non-destructive monitoring, this study evaluated and validated the applicability of an A4-sized flatbed scanner in a post-mined peatland, Sarobetsu mire, Hokkaido (Zhao et al 2024). Then, root images obtained through scanning were analyzed across a successional sere, ranging from *Rhynchospora alba* sedge (RA) to *Sphagnum* bog via *Moliniopsis japonica* grassland (MJ). Using these images, I examined spatiotemporal fluctuations in root density (intersections/cm) of *R. alba* and *M. japonica* at different depths during snow-free seasons from 2021 to 2024, because root density serves a broader indicator of root system functions, offering insights into ecosystem stability, including carbon storage, stress responses and interspecific interactions, beyond conventional metrics such as root length and thickness. *R. alba* showed higher root density in RA (0.256 ± 0.361 , mean \pm SD) and lower in MJ (0.021 ± 0.062). In contrast, *M. japonica* increased root density from 0.111 ± 0.231 in RA to 0.531 ± 0.634 in MJ, with a greater presence in deeper peat layers. The root density of *M. japonica* was decreased by the roots of *Phragmites australis* (GLMM, slope = -0.69 , $p < 0.001$) and *Carex middendorffii* (slope = -1.04 , $p < 0.001$) and was increased by these of *R. alba* (slope = 0.36 , $p < 0.001$). These results showed that the species-specific belowground interaction determined the root dynamics and were different among habitats. In conclusion, the present methods and results suggest that to fully understand the effects of dramatic climate change on ecosystem dynamics, belowground processes should be monitored alongside aboveground ones.

2aSE03

東南アジアを中心に分布するサラノキ連 Shoreae (Dipterocarpaceae) の移動分散と種多様化のプロセス

井坂 友一, 中村 彰宏, 和泉 健司, Harald Schneider (西双版纳熱帯植物園)

フタバガキ科 (Dipterocarpaceae) は 500 種以上を含み、東南アジア熱帯林を構成する主要な樹種群である。なかでもサラノキ連 (Shoreae) は 10 属約 320 種からなり、フタバガキ科のなかで最も種多様性が高いグループを形成している。フタバガキ科はアフリカで起源し、インド亜大陸を経由して東南アジアへと分布を拡大し、熱帯気候のもとで種多様化を遂げたと考えられてきた。この進化史は、大陸移動や気候変動が植物の分布パターンと多様性に与える影響を探る上で、重要なモデルケースとなるだろう。しかし、サラノキ連の系統進化や移動・種多様化のプロセスには未解明な点が多く、特に東南アジアにおける熱帯気候の成立が種多様化に与えた影響については、依然として議論が続いている。本研究では、サラノキ連に属する約 190 種を対象に分子系統樹を構築し、気候適応特性と分布地の祖先形質推定を行った。さらに、分岐年代推定と多様化解析を統合するとともに、復元された古気候データをふまえてサラノキ連の進化史を詳細に検討した。解析の結果、(1) サラノキ連は大きく二つの主要系統に分かれ、各属は単系統性を示すこと、(2) サラノキ連の祖先種は当初から熱帯気候への適応性を備えており、アフリカで起源したとされた。また、インド亜大陸が旧ユーラシア大陸と衝突を開始した約 5000 万年前以降、サラノキ連は東南アジアへと分布を拡大し、(3) ボルネオ島などを中心とするスダ地域で、熱帯雨林気候の発達とともに種多様化を遂げたことが推定された。本研究は、東南アジア熱帯林の主要な構成要素であるサラノキ連の進化動態を明らかにするとともに、気候変動や地殻変動が植物の種多様化に果たした役割に新たな視点を提供するものである。

2aSE04

気温の日周変動と低温環境がフルクタン蓄積や組織形態に与える影響

菊地 拓真, 泉 義紀, 小竹 敬久, 高橋 大輔 (埼玉大・院理工)

植物は移動することができないため、周囲の環境変化に合わせて適切に応答する必要がある。環境変化の中でも植物の生存を大きく左右する要因の一つが凍結傷害である。自然環境下の植物は厳冬期の凍結傷害を回避するため、秋に低温を感知し、糖の蓄積や細胞膜脂質の変化などを通じて、凍結耐性を向上させる低温馴化機構をもつ。特に、本研究で対象とするコムギにおいては、低温馴化過程で可溶性糖であるフルクタンが蓄積することで、凍結耐性の向上に寄与することが知られている。これまでの低温馴化に関する研究は、植物を常温一定で育成した後に低温一定に移すことで馴化処理が行われていた。しかし、実際の自然環境下では気温が日中に上昇し明け方にかけて低下するというように日周変動が伴うことから、実験室環境とは気温の変化パターンが大きく異なる。そこで本研究では、実際の自然環境下を模した気温の日周変動パターンをチャンバー内で再現し、春コムギであるハルヨコイと冬コムギであるユメチカラの二品種を用いて、自然環境に近い条件でフルクタンの蓄積パターンを解析した。気温の日周変動を経験したコムギの凍結耐性を評価すると、常温一定で育成したコムギと比較して、両品種ともに凍結耐性が向上しており、気温が上昇している 14 時時点でも高い凍結耐性が維持されていた。また、コムギの分裂組織であるクラウンのフルクタン量を調べたところ、常温一定条件と日周変動条件のいずれも、育成の進行に伴ってフルクタン量が減少していたが、日周変動を経験した場合にはその減少が抑制されていた。さらに、フルクタンの蓄積は気温の日周変動とともに変化し、特に冬コムギでは昼にフルクタン量がピークに達し、そのレベルが夜でもある程度維持されていることがわかった。これらの結果から、コムギが自然環境において示す低温馴化の仕組みには、従来の一定条件下の実験では捉えきれなかった重要な側面が存在し、フルクタンの昼夜にわたる蓄積動態が日中および夜間における凍結耐性の維持に寄与している可能性が示唆された。本発表では、これらの知見に加え、低温馴化に伴う葉の組織構造の変化にも着目した解析結果を紹介し、低温環境とそれに対する植物の応答が、植物の適応や発生にどのような影響を与えるかについて広く議論したい。

杉田 健史¹, 河村 幸男² (1岩大・院農(現 Univ. Nebraska・Biochem.), 2岩大・院農)

零下で越冬する多くの植物は、晩秋からの日長や温度低下に応答し、低温馴化プロセスを経て凍結耐性が向上する。また、馴化した植物は初冬からの氷点下に応答し、凍結耐性はさらに増大する。この氷点下に伴う馴化現象はシロイヌナズナやコムギなどの草本植物で確認されており、木本植物においても類似する現象が報告されていることからあらゆる植物で普遍的に見られると考えられる。越冬に関する分子生理学的な研究は、低温馴化に関するものがほとんどであるが、越冬現象全体を理解するには、氷点下での知見も必要となる。

これまで我々は、植物を氷点下で馴化できる実験系を構築し、シロイヌナズナを用いて分子生理学的な視点からの解明に取り組んできた。まず、氷点下において、低温馴化後の植物に、凍結を経験させた場合と凍結させない過冷却状態を経験させた場合とで、凍結耐性への影響を比較した。その結果、どちらの条件下でも、低温馴化後からさらに凍結耐性が増大し、特に、凍結を経験させた方がより凍結耐性が向上した。我々は、この凍結による馴化を「凍結馴化」、過冷却による馴化を「過冷却馴化」と呼ぶこととした。興味深いことに、凍結馴化や過冷却馴化中に明所に置いた植物は暗所での処理と比較して、より大きい凍結耐性を獲得した。低温馴化プロセスでも糖は蓄積するが、凍結馴化と過冷却馴化ともに明所ではさらに糖が蓄積し、また、その程度は凍結馴化の方がより顕著であった。そこで、光合成の関与を確認するため、光合成電子伝達阻害剤 DCMU を与えた条件で凍結馴化を行った。その結果、明所での凍結馴化中の DCMU 処理は糖の蓄積や凍結耐性の低下をもたらした。以上より、凍結下での馴化であっても、明所では光化学系の電子伝達が生じ、その結果が糖の蓄積さらには凍結耐性の増加につながっている可能性が示唆された。

気温低下だけでなく凍結・融解を繰り返す季節変化の中で、植物は低温馴化だけでなく凍結馴化を経て越冬する能力を獲得する。昨今、気候変動に伴う異常気象が頻発するが、例えば、越冬する植物の一部は、馴化条件が揃わず、厳冬期の突発的な寒波により傷害が頻発するリスクなどが想定される。越冬メカニズムにおいて“凍結がもたらす馴化”という新しい視点から得られる分子生理学的な知見は、気候変動下での植物への影響を、正確に評価するためにも必須であると考えられる。

上村 松生 (岩手大学)

植物の生存は、様々な時空間スケールで変化する周囲の環境に対して的確に応答する能力に大きく依存している。特に、20 世紀後半から顕著に観測されるようになった地球規模で進行する気候変動によって、植物が環境応答システムの時間的および空間的な柔軟性と頑強性を十分に発揮することが生存に不可欠となっている。

例えば、温度（低温、高温）ストレスは植物生活史全般に、そして、その生産性に影響を与える最も重要な要因の 1 つである。本シンポジウムでは、低温（凍結を含む）ストレスへの植物の応答を主に取り上げたが、その様相は複雑である。地球規模で進行する気候変動により世界各地で見られるようになった急激な気温変化により、野外に生息する植物は予測不能でしかも繰り返し起こる凍結イベントを経験する機会が増加している。特に、春先にみられる急激な気温上昇と気温低下の組み合わせは、植物が凍結耐性維持から生長へ向けて大きな生理的転換を行う過程で致命的な凍結に曝される可能性を増大させ、農業的にも大きな問題になりつつある。したがって、「地球温暖化」が大きな注目を浴びている現在においても植物が有する凍結耐性機構を理解することは植物生産性の維持や向上にとってより重要になってきている。

そのような現状を考えると、細胞・分子レベルでの研究に広く用いられてきたような植物に対して一定温度を限られた期間与えた際の温度への応答を調べる実験系だけで植物の野外（低温）環境への応答機構や生存戦略を理解すること難しいと言える。本シンポジウムでは、植物の複雑な環境下での生存戦略について生態系レベルから遺伝子レベルでの研究をもとに異なる視点から報告していただいた。本発表では、それらの研究を通して、予想される複雑な気温変化に対する植物の応答機構の理解を進める方向性について考えてみたい。