

植物のケイ素利用にかかる制約の解明に迫る 葉の脆さがケイ素利用のデメリット？

【発表のポイント】

- イネをはじめとする一部の植物はケイ素を葉の支持に用いますが、多くの植物の葉はケイ素をほとんど含みません。しかし、ケイ素を利用する植物としない植物の両方が存在する理由はこれまで不明でした。
- 様々な樹木の葉のケイ素濃度と力学特性を評価したところ、ケイ素は葉の硬さには貢献するが強度には貢献しないこと、ケイ素濃度の高い葉はより小さな変形で壊れる（つまり脆い）ことがわかりました。
- ケイ素が葉を脆くすることを発見した本研究は、ほとんどの植物が葉の支持にケイ素を利用しない理由の解明につながると期待されます。

【概要】

ガラスの主要成分であるケイ素は、植物の葉を支える細胞壁を構成するための、炭素の安価な代用品として機能すると考えられてきました。しかし、実際にケイ素を根から吸収・利用するのはイネ科の草本をはじめとする一部の種だけであり、多くの種は根でケイ素を排除して体内に取り入れないようにします。したがって、ケイ素の利用にはメリットだけでなくデメリットもあると考えられます。

東北大学大学院生命科学研究科の梶野浩史特任研究員は京都大学大学院農学研究科の小野田雄介教授、北島薫教授との共同研究で、落葉広葉樹 33 種の葉の力学特性と化学特性を比較し、「ケイ素濃度の高い葉は硬いが脆い」という新たな仮説を検証しました。葉の脆さがケイ素利用のデメリットになることを示唆した本研究は、植物の葉のケイ素濃度の多様性を理解するための手がかりになると期待されます。

本成果は 2025 年 4 月 10 日に植物学に関する専門誌 *New Phytologist* にオンライン掲載されました。

【詳細な説明】

研究の背景

植物はセルロースをはじめとする細胞壁繊維を用いて葉を支えたり壊れにくくしたりしています。一方で、イネをはじめとする一部の種は土壌から吸収したケイ素^(注1)を葉の支持に用いることが知られています。ケイ素は土壌に多く含まれる元素で、根から水に溶けているケイ素を吸収するのに必要なエネルギーは細胞壁繊維を合成するのに必要なエネルギーよりも少ないため、ケイ素は葉の細胞壁構成成分として炭素の安価な代用品になると考えられています。しかし、実際にケイ素を吸収・利用するのは一部の種だけであり、多くの種は根でケイ素を排除して体内に取り入れれないようにします。そのため、ケイ素の利用にはメリットだけでなく何かしらのデメリットや制約があると考えられますが、何がケイ素利用の制約になっているのかは長年の疑問でした。

今回の取り組み

本研究では、「ケイ素濃度の高い葉は硬いが脆い」という仮説を検証しました。落葉広葉樹33種の葉を採取し、葉の力学特性と化学特性を比較しました。葉の力学特性については、葉をゆっくりと引っ張る引張試験により、硬さ（変形させるのに必要な力）、強度（破壊するのに必要な力）、最大ひずみ（許容できる変形の大きさ）を測定しました（図1）。葉の化学特性については、ケイ素とセルロース等の細胞壁繊維の濃度を測定しました。

その結果、ケイ素は葉を硬くするけれども、強度には貢献せず、最大ひずみを低下させることが分かりました。一方で、葉の支持を主に担うことが知られているセルロースは硬さと強度の両方に寄与しました（図2、図3）。よって、①ケイ素は葉を硬くするという点ではセルロースの代用品になりますが、強度を高める機能は代用できないこと、②ケイ素濃度の高い葉はより小さな変形で壊れる（つまり脆い）ことが分かりました。ケイ素は強度には貢献せず、葉をむしろ脆くすることを明らかにした本研究によって、ケイ素を用いることの植物にとってのデメリットが初めて明らかになりました。

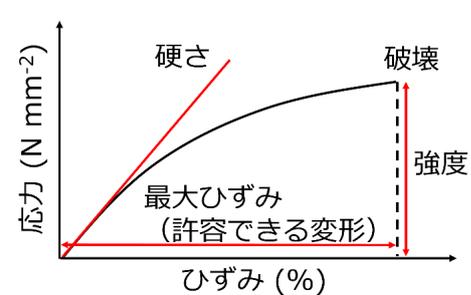


図1. 葉をゆっくり引っ張った際のひずみ（元の長さに対する伸びた長さの割合）と応力（断面積あたりにかかる力）の関係。引張の初期には応力はひずみに対

して直線的に増加するが、ひずみが大きくなるにつれて応力は頭打ちになり、最終的にサンプルがちぎれる。ひずみと応力の初期勾配を硬さ、ちぎれた際の応力を強度、ちぎれた際のひずみを最大ひずみと定義した。

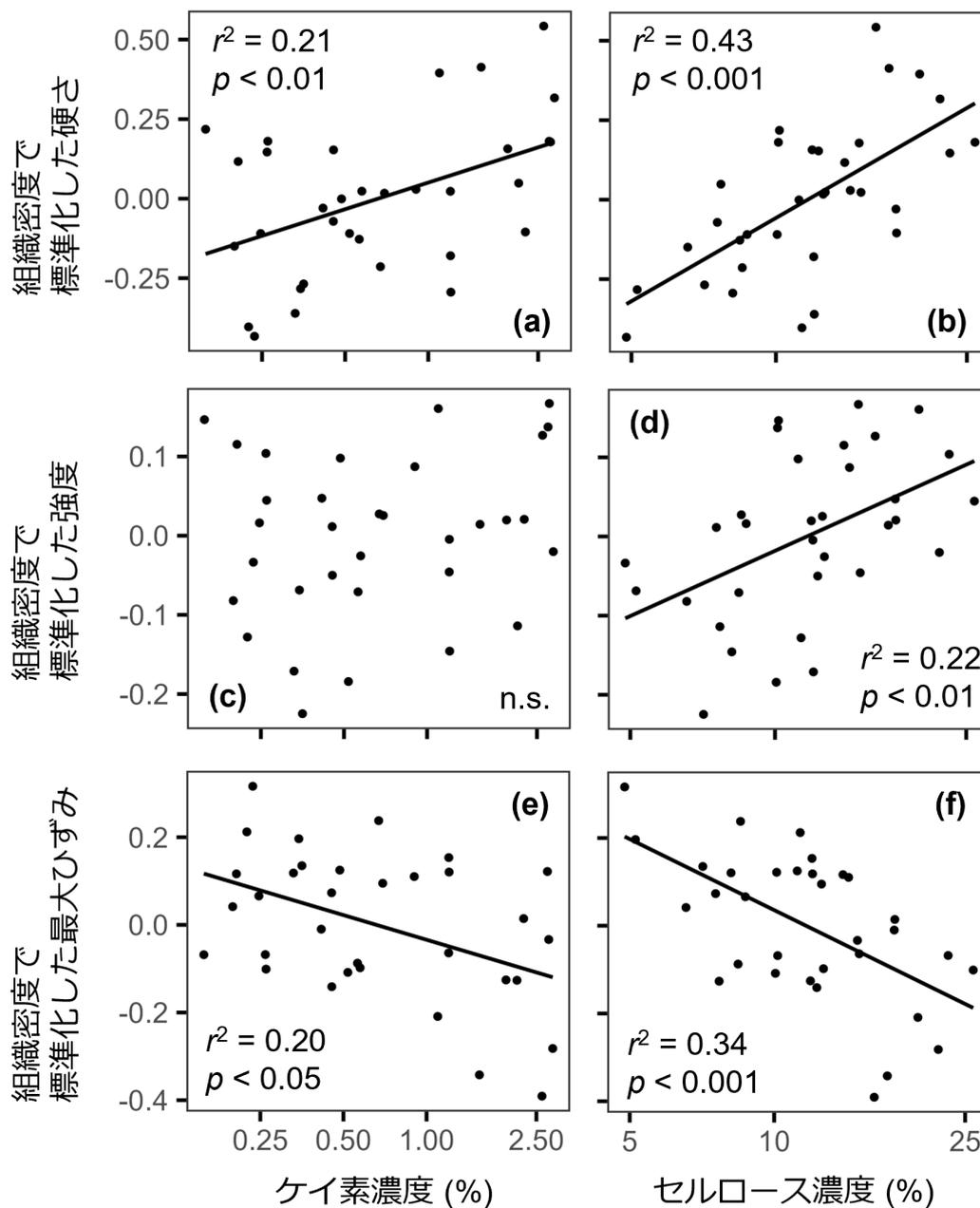


図 2. 葉の組織密度で標準化した力学特性（力学特性を組織密度で回帰した際の残差）と、ケイ素濃度とセルロースの濃度関係。ケイ素もセルロースも硬さに正に寄与し (a, b)、最大ひずみに負に寄与する (e, f)。強度にはセルロースが正に寄与するが (d) ケイ素は寄与しない (c)。

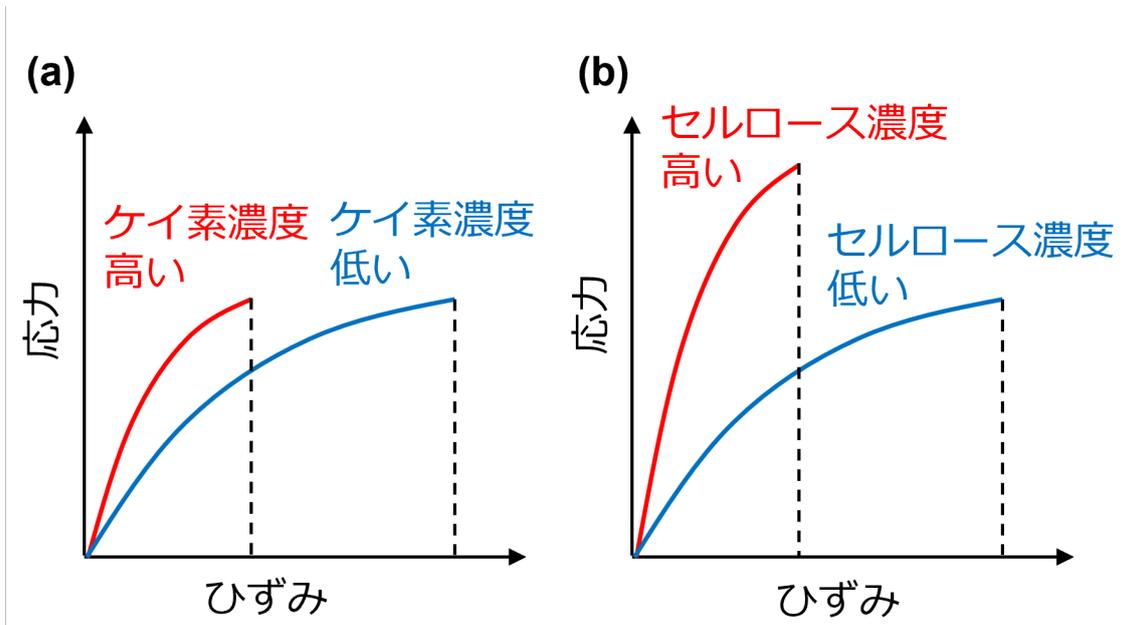


図 3. 本研究の結果（図 2）の概念図。ケイ素濃度が高いと葉は硬くなるが、強度は変わらず、最大ひずみが下がる（つまり葉が脆くなる, a）。一方で、セルロース濃度が高いと葉の硬さと強度の両方が上がる（b）。

今後の展開

本研究の成果は、現存するケイ素を利用する植物としない植物にどのような進化・生態学的な選択圧がかかるのかを理解するための手がかりになると期待されます。葉が脆くなることは、特に葉の寿命が長い種にとって大きなデメリットとなりえます。今後はケイ素に由来する葉の力学特性が野外での葉の壊れにくさにどのように影響するかを検証する予定です。

【謝辞】

本研究は、文部科学省科学研究費（「葉の可逆的な構造変化を可能にさせる細胞・組織の力学バランスの解明(JP19H05365)」）の支援を受けて行われました。本論文は『東北大学 2024 年度オープンアクセス推進のための APC 支援事業』により Open Access となっています。

【用語説明】

注1. ケイ素

ガラスの主要成分であり、ケイ素濃度の高い葉はガラス質の硬さをもつことが知られています。植物は根から水と共に吸収したケイ素を、オパールと呼ばれる水の分子を含む非結晶性のケイ酸体として体内に蓄積します。葉のケイ素濃度は種間で大きく異なりますが、この違いには進化生態学的

な理由があると考えられています。

【論文情報】

タイトル : Across 33 broad-leaved deciduous woody species, silicon enhances leaf lamina stiffness but not tensile strength whereas cellulose enhances both

著者 : Hirofumi Kajino^{1,2*}, Yusuke Onoda¹ and Kaoru Kitajima¹

*責任著者 : 東北大学大学院生命科学研究科 特任研究員 梶野浩史

掲載誌 : New Phytologist

DOI : <https://doi.org/10.1111/nph.70079>

URL: <https://nph.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/nph.70079>

著者の所属

1 京都大学大学院農学研究科

2 東北大学大学院生命科学研究科