

多細胞生物の柔軟な形態を支えるスピングラス的発生システム

	研究代表者	大阪大学・全学教育推進機構・講師 北沢 美帆 (きたざわ みほ)	研究者番号：60759158
	研究課題 情報	課題番号：24B301 キーワード：形態的柔軟性、極性、発生、植物、スピンス	研究期間：2024年度～2026年度

なぜこの研究を行おうと思ったのか（研究の背景・目的）

●研究の全体像

土や岩に固着して生育する多細胞生物は、一つの個体群や個体の中でも様々な形を変えることがある。この柔軟性は、どのような発生過程によって生み出されているのだろうか？ 私たちは、植物の発生過程において、一つ一つの細胞の極性（形や物質の偏り）と組織全体の極性がよく揃っている場合の他に、細胞極性にはばらつきがありながら、全体として何らかの器官形態を作り出す場合があることに着目した（図1）。また、多細胞組織をミクロな極性の集まりとして抽象化して考えることで、組織の一般的な性質をとらえることができるのではないかと考えた。これらの発想のもとで、この領域では「細胞極性の乱雑さが器官形態の柔軟性を生み出す」との仮説を立て、実験と理論の協働による実証を目指す。

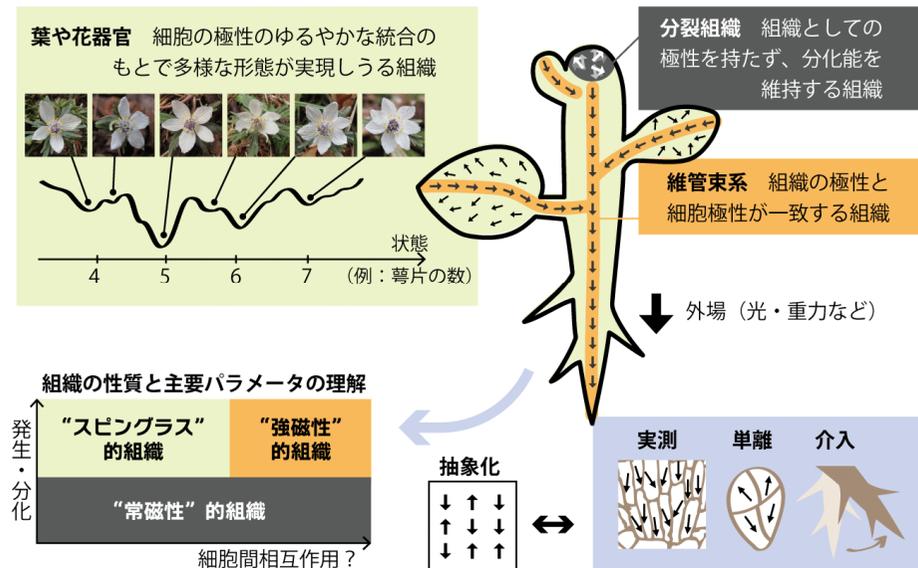


図1 研究の全体像

●植物や大型藻類の形態的柔軟性

植物や大型藻類など、土や岩などに固着して生きる生物は、形態的柔軟性を示すことが多い。例えばタンポポの葉の切れ込みやキンポウゲの花弁の数は、同じ個体の中でも異なることがある。これらの違いは、これまで、遺伝的な違い、あるいは環境や発生ステージの違いとして説明されてきた。一方で、生物には、サイコロを振るような確率的な過程に左右されるような現象もあることが分かってきており、マクロな形態のばらつきを遺伝子発現の確率的な違いから説明する研究も発表されている。遺伝と環境に加えて確率性も影響する形態的柔軟性の全体像をとらえるには、どのようなアプローチが適切だろうか？

●植物組織の細胞極性とスピンスとしての抽象化

多細胞組織の形づくりの鍵を握るのは、細胞の分裂や成長の方向などを決める細胞極性である。細胞極性は、何らかの分子の細胞内分布の偏り、細胞の形状や力学的特性の非対称性などによって生じ、確率的なゆらぎを内包しながら細胞分裂や成長を通して組織全体の形を作り出す。組織や器官・個体としての極性（体軸）は逆に、モルフォゲン（位置情報）など化学的あるいは力学的な情報を通して細胞の極性を制御する。さらに、固着性の多細胞生物の場合、重力や光、水流など外部環境からの入力も重要となる。

このように複雑な対象の性質の理解には、思い切った抽象化が有効である。本領域では、さまざまな分子によって担われる細胞極性を、方向だけに抽象化した“スピンス”としてとらえる。物理学分野の研究により、スピンス間の相互作用などによって、マクロな状態の急激な変化が引き起こされることが知られている。同様に、多細胞組織をスピンスが集めた“スピンス系”とみなすことで、マクロな形態の性質を把握できるのではないかと、というのが本領域の発想である。

この研究によって何をどこまで明らかにしようとしているのか

本領域では、スピンス間の相互作用を細胞極性に関する実測から推測して数理モデルに組み込み、組織の単離や外場をかけた実験系を用いて数理モデルの解析結果を検証するというサイクルを進める。具体的な実験・測定系は以下の通りである。以上の実験系と数理モデルのサイクルを進めることで、植物組織にみられる三つの状態、すなわち未分化状態・ミクロな極性がよく揃って固定された状態・ミクロな極性のばらつきがありながら固定された状態の再現及び主要パラメータの解明を目指す。

●細胞極性の分布の定量

隣接する細胞間の極性の相関や、組織内の極性の分布を定量する。これにより、細胞間の相互作用の符号および強さを推測する。

●細胞極性の乱雑さとマクロな形態の柔軟性の解析

組織内の細胞極性の秩序の程度（どれだけ揃っているか）と組織・器官レベルの形態解析を行い、「ミクロな非一様性がマクロな柔軟性を生む」という仮説の検討材料とする。

●再構成系での体軸形成

イネの in-vitro 受精系を用い、明確な極性を持たない少数の細胞から緩やかに体軸が形成される過程を計測する。また、シロイヌナズナやゼニゴケの形質転換体で人為的に極性形成関連因子を発現させ、細胞動態の経時変化を測定する。

●外場への応答

重力や光などは、形態形成に影響する“外場”とみなすことができる。これらの外場を人為的に操作することで、個々の細胞の極性の変化を解析し、結果としての形態と数理モデルの予測とを検証する。

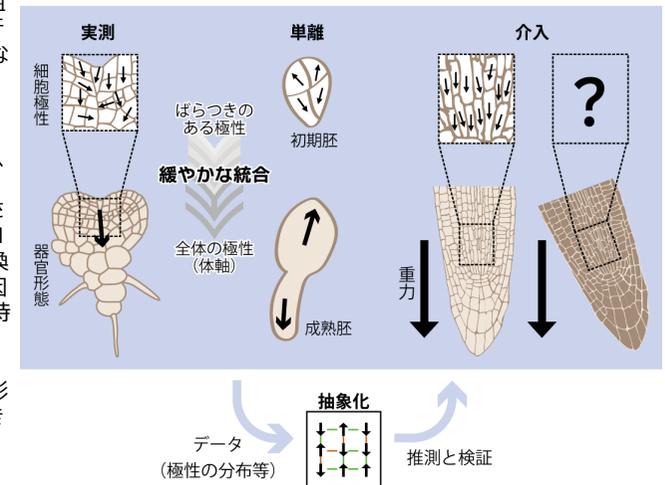


図2 測定、抽象化しての解析、検証のサイクル

以上の実験系と数理モデルのサイクルを進めることで、植物組織にみられる三つの状態、すなわち未分化状態・ミクロな極性がよく揃って固定された状態・ミクロな極性のばらつきがありながら固定された状態の再現および主要パラメータの解明を目指す。