

たった一つの受精卵から、何がどうなって植物の形ができるの？

東北大学大学院生命科学研究所 植田美那子

植物の形が作り上げられる仕組みを理解するために、単細胞である受精卵から始まる胚発生過程の時空間動態を探ってきました。ほとんどの植物では、受精卵が上下に不等分裂することで第一の体軸である上下軸が確立され、この上下軸に沿って胚がパターン形成を進めることで、葉や根などの器官を適切な配置に作ります。被子植物である

シロイヌナズナでは、受精卵がまず細胞伸長して不等分裂に至ることが知られていましたが、この極性的な細胞伸長がどのような動態や仕組みで起こるのかは不明でした



図1: 受精卵から始まる植物の上下軸形成

(図1; J Cell Sci. 2024)。そこで、受精卵の成長動態を詳細にライブイメージングし、画像解析と数理シミュレーションによって、どのような変化が起こるのかを特定することを目指しました。

具体的には、受精卵を含む若い種子（胚珠）を顕微鏡下で液体培養する系と、深部観察に適した二光子励起システムとを組み合わせ、生きた受精卵の成長動態を高精細にライブイメージングしました (Plant Cell Physiol. 2021)。このとき、液体培地中で胚珠が成長する際に視野内で動いてしまい、定量解析が困難になるという問題がありました。そこで、取得画像のブレを補正する新たな画像解析法 (KymoTip) を開発し、受精卵の成長速度や先端形状の変化などを精緻に定量化できるようにしました (Plant J. 印刷中)。その結果、細胞全域が変形する一般的な成長様式とは異なり、受精卵では精細胞と融合した上部細胞の先端のみが伸長する「先端成長」の様式で極的に細胞伸長することを突き止めました (Biomolecules 2023; Plant Cell Physiol. 2023)。

さらに、「先端成長」する植物細胞として知られる根毛と挙動を詳細に比較したところ、一定の太さと速度を保って伸長する根毛とは異なり、受精卵では細胞分裂の前に一過的に太さと速度が増す時期（急速成長期：RGS）があることを見出しました (図2)。この急速成長によって受精卵の上部に「括れ」が生じ、その領域に細胞分裂面が形成されることから、受精卵成長のわずかな時空間的变化が、上下軸形成の鍵となる不等分裂に直結することを明らかにしました。

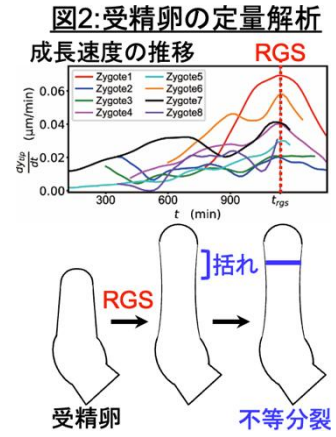
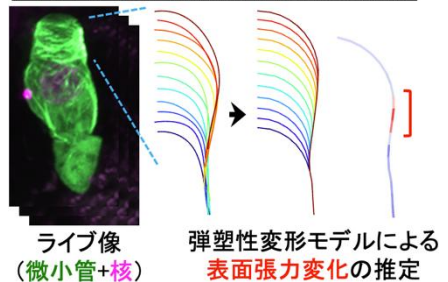


図2: 受精卵の定量解析

また、これらの解析で得られた受精卵の先端半径や曲率の実測値に基づき、受精卵の成長動態を再現する定量数理モデル（弾塑性変形モデル）を導出しました。これにより、受精卵で働く力学パラメータ（膨圧や表面張力）を推定することに成功しました (図3; Quant. Plant Biol. 2024)。

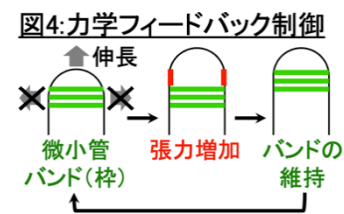
加えて、細胞表層に存在する細胞骨格である微小管の時空間動態もライブイメージングし、角度や配向変化を精緻に定量化しました (Protoplasma 2025; Plant Cell Rep. 2025)。この微小管の配向変化と定量数理モデルを

図3: モデルによる力学変化の推定



組み合わせさせた結果、表層微小管の配向と細胞成長の間に自立的

な力学フィードバック制御が働くことも見出しました (bioRxiv 2024)。具体的には、受精卵上部の表層でバンド状に配向した微小管が力学的な「枠」として横方向の細胞成長を阻害すると、受精卵が上方向に伸長し、この伸長領域の表面張力が増加することで微小管バンドが誘導されることが推定されました (図4)。さらに、受精卵を模した円柱空間表面で微小管バンドの自己組織化をシミュレーションしたところ、表面張力の増加に応じて微小管がバンド状に自律的に配向する様子も定量的に再現されました (Sci Rep 2025)。



同様に、上下軸に次いで形成される第二の体軸である内外軸 (放射軸) についても、初期胚の高精細ライブイメージング、画像解析、定量数理シミュレーションを組み合わせることで解析しました。その結果、細胞成長方向のわずかな変化によって分裂面の方向が幾何学的に規定されることが、内外軸の形成に重要であることを特定しました (Curr Biol. 2024)。現在は、上下軸や内外軸が形成される動態や仕組みがシロイヌナズナ以外の植物にも共通するかを探るために、コケ植物やシダ植物の生きた胚の観察法も確立して研究を進めています (Plant Methods 2025; bioRxiv 2025)。

本研究において、高精細ライブイメージングと精緻な画像解析、定量数理シミュレーションを統合したことで、単一細胞である受精卵から植物の形が作り上げられる過程の最初期の動態や機構が明らかになってきました (Curr. Opin. Plant Biol. 印刷中)。上下軸と内外軸のいずれにおいても、わずかな細胞変形が力学的な負荷や幾何学的な変化を生じ、それが細胞分裂面を規定することが、体軸形成に直結することが見えてきました。したがって、1細胞の分裂パターンが個体発生に直結する初期胚では、表層の細胞骨格や細胞壁などの力学的な制約要因をも活用して、周辺環境に依存せずに細胞が自律的に分裂方向を規定するのかもしれませんが。このことから、本研究は植物発生の仕組みを捉え直すうえで重要な新たな研究基盤を示したと考えています。

参考文献：

1. Matsumoto, H. and M. Ueda. J Cell Sci, 2024. 137(5).
2. Matsumoto, H., et al. Plant Cell Physiol, 2021. 62(8): p. 1280-1289.
3. Kang, Z., et al. bioRxiv, 2025: p. 2025.06.27.661917.
4. Kang, Z., et al. Plant and Cell Physiology, 2023. 64(11): p. 1279-1288.
5. Shiba, Y., et al. Biomolecules, 2023. 13(2).
6. Kang, Z., et al. Quantitative Plant Biology, 2024. 5: p. e13.
7. Horiuchi, R., et al. Protoplasma, 2024.
8. Kikuchi, S., et al. Plant Cell Reports, 2025. 44(6): p. 115.
9. Kang, Z., et al. bioRxiv, 2024: p. doi: 10.1101/2024.08.07.605794 (preprint).
10. Nonoyama, T., et al. Sci Rep, 2025. 15(1): p. 25787.
11. Tanaka, S., et al. Current Biology, 2024. 34(20): p. 4639-4649. e4.
12. Hanaki, Y., et al. Plant Methods, 2025. 21(1): p. 149.
13. Woudenberg, S., et al. bioRxiv, 2025: p. 2025.08.29.673061.