

微小重力環境における高等植物の生活環 (Space Seed)

富山大学 神阪盛一郎客員教授

(1) 発表概要

- tua6チューブリンミュータントの茎のねじれは、PEUのカメラでは分からなかった。細胞壁が1gの過重をかけたときに何マイクロメータ伸びるかという伸展性は、基部が伸びやすいことが分かった。
- μ G下では老化が遅く、それにはエチレンが葉の老化の抑制に関わっているだろうと思われる。
 - エチレンが老化を促進する
 - 植物に対する機械的なストレスはエチレンの合成を促進する。
- メチオニンから合成
 - マイクロアレイの解析は、過重力刺激によってエチレンの生合成とエチレンの情報伝達に関わる遺伝子発現が増加することを示した。
- 長期観察・サンプル回収の結果として、花、さや（長角果）については、「きぼう（宇宙）」でも同じ数のさやになったが、長さが短い。さやのなかの種子の数が「きぼう」の方が少ない。また、受粉がおこなわれていた。
- 持って帰ってきた種子は、ほとんど発芽しない。中のエンブリオができなかったのではないかと推測。Spring-8を使って断層写真を撮ったが、種子の中では子葉も、幼根も、茎もきちんとできていた。
- なぜ、さやの長さが宇宙では地上に比べて短いのか、また、宇宙でさやに含まれる種子が少ないのかなどの課題は未解明。
- 原因としては、宇宙放射線、エチレンやCO₂ガスの影響、CBEF湿度の影響、さらには収穫後の種子の低温保存中の影響も考えている。

(2) 評価パネル総括

a). 総論

- これまでシロイヌナズナを含むいくつかの植物種で、Seed to Seed宇宙実験が行われているが、本研究の特徴は、各発育段階における詳細な形態学的、生理学的解析に加えて、植物の抗重力反応と細胞壁・微小管の関連を分子生物学的に解析し、新たな知見を見出しているところに意義が認められる。
- 本実験は世界に先駆けて、宇宙での1Gと μ Gで植物の生活環を完結させることに成功し、比較解析している点でも注目される。そのために、当該分野の複数の専門家グループからなる共同体制で、それぞれが役割分担によって準備・実験・解析を着実に実施しているところは高く評価される。
- さらに、本実験は長期宇宙環境利用によって可能になったもので、その結果、茎葉の成長、老化、種子形成などの特性に顕著な重力影響を見出すことができた。

*：事後評価会は平成23年12月に実施。

- 植物の発芽、栄養成長、生殖成長、種子生産までの過程を宇宙で確認できたことから、宇宙における食料生産のための植物栽培システム構築の第一歩としての意義は大きい。
- 一方で、当初計画に、先行して実施された二つの宇宙実験（Cell Wall, Resist Wall）が追加される形で行われたためにサンプル数が十分に確保できていない、実験スペースの問題など、植物の正常な成長やサンプル数の確保にとって問題であったと考えられ、全体的な計画に改善すべきところがあったことは否めない。

b). 科学的意義等

- 科学的には、植物の生殖成長および老化に及ぼす重力影響について興味深い結果が得られているだけでなく、重力下で植物体を支えるために支持組織の強度を調節する細胞壁関連遺伝子が次世代高速シーケンサーを用いた解析から明らかになった。また、抗重力反応における微小管の役割に関する仮説が、微小管形成異常の突然変異体を用いた解析から示されている。現在進行中の詳細な解析結果を待つことになるが、これらの知見は植物科学的に新たな事実をもたらすだけでなく、抗重力反応においては世界をリードし、新領域を開拓しうる成果であると評価される。
- また得られた成果は、宇宙環境における植物生産という観点でも、その理想型を構築し、その具現化のための新たな成長制御法や新植物を開発するために役立つ。これは植物科学の中でも、細胞壁分野で世界を先導する日本の研究グループの特徴を最大限に活かしたプロジェクト研究として、世界に誇れる成果であろう。
- 本実験では、宇宙環境で陸上植物の生活環（Seed to Seed 実験）を世界最小の植物育成装置で、且つ、ほぼ全自動化によって達成されたところに、技術的な革新性がみられる。また、長期軌道上IG実験区との比較を初めて可能にしているところが注目される。これらの成果は、今後の装置・環境調節法の改善・開発にも直結し、植物の宇宙実験を一層発展・進化させる基礎的知見として重要になる。

c). 課題

- 植物育成装置内の温度や湿度は、実験前半の30日間ほどは安定しているが、その後は装置の不具合等で実験区（容器）によって大きな変動を示している。また、宇宙IG区の抽だい(bolting)後など、サンプルを十分量得られてなかったために評価が難しくなっているところがある。この点、温湿度、光、培地水分含量、ガス成分など、環境制御装置の改善の余地がある。GUS発現解析のための固定法を確立する必要がある。
- 本宇宙実験の成果に関しての発表やメディア等への公表も積極的に行われているが、科学実験として国際的な学術誌への発表が十分でない点は課題である。

d). 提言等

- 宇宙で植物を育成する際には、徒長を防ぎコンパクトに育てることが必要で、本宇宙実験は、エチレンを付与することによって解決できる可能性を示している。今後、本実験で得られた成果の一般性（シロイヌナズナに特異的な結果か否か）を調べるために、シロイヌナズナ以外の植物についても宇宙・微小重力環境での育成実験を行い、宇宙における食料生産へと展開する必要がある。そのためにも、今回の実

験の結果と経験を基盤に、次世代植物育成装置ならびに環境制御システムを開発することが今後の課題になろう。

e). 実験結果と考察に対するコメント

- 1G区に比較して μ G区では花茎の成長速度が早く、老化速度が遅くなるという結果は大変興味深い。しかし、抽だい (bolting) の早さを示す図7では deviation のバーが大きく、1G区と μ G区の違いは統計的に有意なのか、確認が必要である。また、図8は33日目という1点での花茎の長さであって、花茎の成長速度を示したデータではない。成長速度を求めたデータを出していただきたい。さらに、その原因を機械的ストレスの減少とし、エチレンの生合成が抑制されたためと結論されているが、この点も確認が必要である。これに関連して、照明時間 (明暗周期) や、1G区と μ G区におけるCO₂やエチレンの濃度等について、記載していただきたい。
- 次世代シーケンサーによる遺伝子発現パターンの解析から、1G区と μ G区で有意な差がみられたことは喜ばしい。しかし、その解釈はまだ十分でないので、今後の解析が必要である。明らかになった重力環境によって変動する細胞壁関連遺伝子の発現は、実際の μ G、1G下での成長をどのように説明するのか。
- μ G下では、微小管変異体の花茎の出現時期が早く、その後の成長速度も大きいとの結果も重要で面白い。しかし、これらの変化の原因について、「このような花茎の成長促進は、細胞壁進展性の増加が原因であることがわかりました (成果概要の「実験3」)」と記載されているが、「細胞壁進展性の増加が原因」という結論は十分に証明されたことにはなっていないのではないか。
- 「重力に抗した植物の成長反応において、微小管と細胞壁が協調して重要な役割を果たしていることが初めて明らかになった」という結論は概ね妥当だと思うが、確認を得るためには今後の解析が必要である。
- 用いた照明の赤：青の光強度比が3：1であり、茎の伸長を抑制する青色の比率がやや多いと考えられる。栽培容器の高さの制約もあるが、4：1の比率にすれば、さらに顕著な有意差が見られた可能性がある。
- 湿度は茎の伸長に大きく影響する (高湿度は茎の伸長を促進する) ので、各区における湿度の差異による影響も考察する必要がある。
- 長角果の発達や種子形成で、宇宙 μ G区と宇宙1G区のいずれでも低下した原因、また、宇宙1G区で抽だいが極端に低下した原因は何か。
- 実験後半の温度・湿度の実験区における違いや、抽だいたった個体数 (密度) がその後の生育に及ぼした可能性はないのか。あるとすれば、抽だい後の長角果の発達や種子の形成・稔性に関する議論には注意を要する。
- 容器内の成長 (抽だい) の個体間差を解消できないか。
- 地下部 (根) の解析の内容とその結果を記載していただきたい。