

宇宙における植物の成長と形態形成

Growth and Morphogenesis of Plants in Space

保尊 隆享

(大阪市立大学理学研究科)



1. 宇宙における植物の形態形成

2. 宇宙における植物の成長

3. 宇宙における植物栽培

* 宇宙 \approx 微小重力

重力屈性(屈地性)

- ・重力屈性は、植物の代表的な重力反応である
- ・重力屈性は、植物が効率的な生命活動を営む上で重要である
- ・微小重力環境は、重力屈性機構の解明に利用されてきた

刺激の受容 → 刺激の変換・伝達 → 刺激に対する反応

重力がないと植物の形態はどうか？



クリノスタット: 重力の方向性を相殺する装置

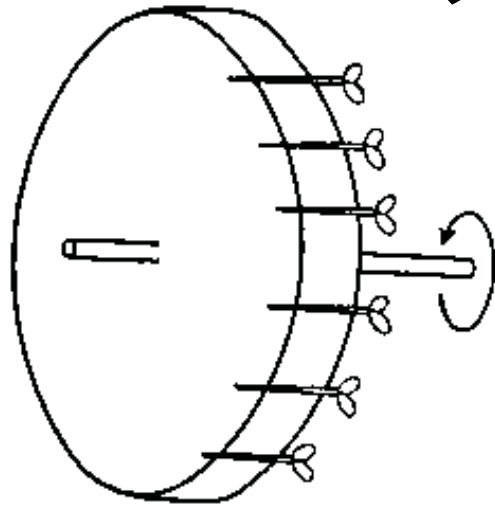


図 109 クリノスタット (田沢)

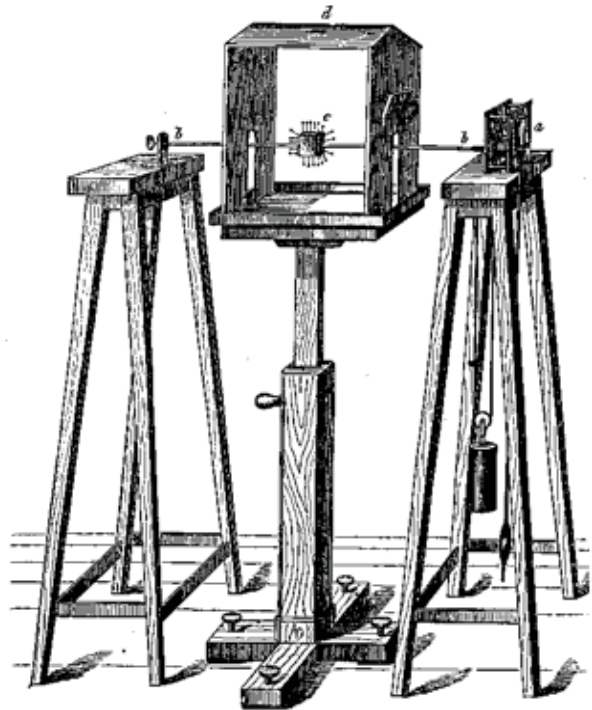
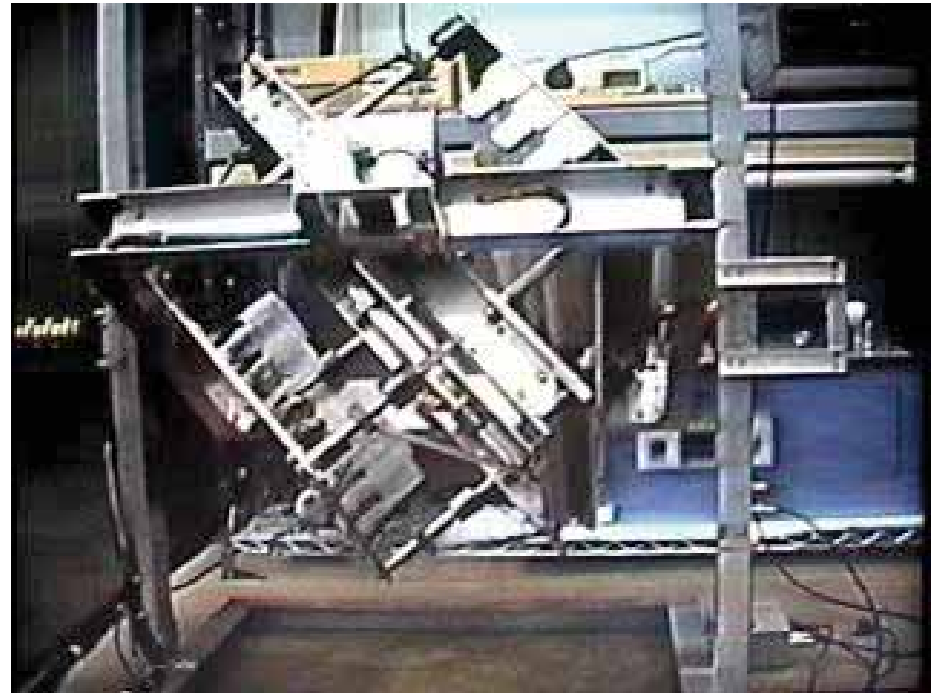


FIG. 105.—A clinostat, *a* the clockwork, with weight and pendulum, which slowly rotates the axis *AB*: on this axis is fixed a cube of bread at *c* on which a Fungus (*Phycomyces*) is growing. The middle portion of the axis is surrounded by a glass box *d*, which stands on a dish filled with water, in order to keep the air around the plant moist (about $\frac{1}{2}$ wet, with

(W. Pfeffer)



3-D クリノスタット

Zero-Gravity Instrument Project, United Nations Office for Outer Space Affairs

UNITED NATIONS
Office for Outer Space Affairs

Search

About Us - Our Work - Benefits of Space - Information for... - Events - Space Object Register - Documents - COPUOS 2016

Our Work > Programme on Space Applications > HSTI > Capacity Building > ZGIP

Zero-Gravity Instrument Project (ZGIP)

The "Zero-Gravity Instrument Project" (ZGIP) was initiated in 2012 as part of the Human Space Technology Initiative (HSTI)'s capacity-building activities, in which a fixed number of microgravity-simulating instruments, called **Clinostats**, have been distributed to selected schools and institutions worldwide.

The major objectives of the project are to provide unique opportunities for students and researchers to observe natural phenomena of samples under simulated microgravity conditions on the ground, and to inspire them to undertake further study in the field of space science and technology. The project is also aimed at creating datasets of plant species with their gravity response, which would contribute to design future space experiments, and to the advancement of microgravity research.

The Office for Outer Space Affairs developed a "Teacher's Guide to Plant Experiments in Microgravity" (ST/SPACE/63) which is intended to provide step-by-step instructions to teachers and students to perform experiments on plant growth using the clinostats in a school laboratory.

APPLICATIONS FOR THE 3RD CYCLE



TEACHER'S GUIDE



Our Work

- Secretariat of COPUOS
- Programme on Space Applications
 - ISA News
 - Expert on Space Applications
 - Fellowships
 - Schedule of Activities
- BSTI
- HSTI
 - International Cooperation
 - ASO/ISS
 - Datasech
 - Capacity Building
 - ST/SP
 - ST/ST
- Thematic Priorities
- Regional Centres
- Publications
- Reports
- UN-SPIDER
- ICG
- UN-Space
- UNISPACE+50
- Space Law
- Topics
- Photo Gallery

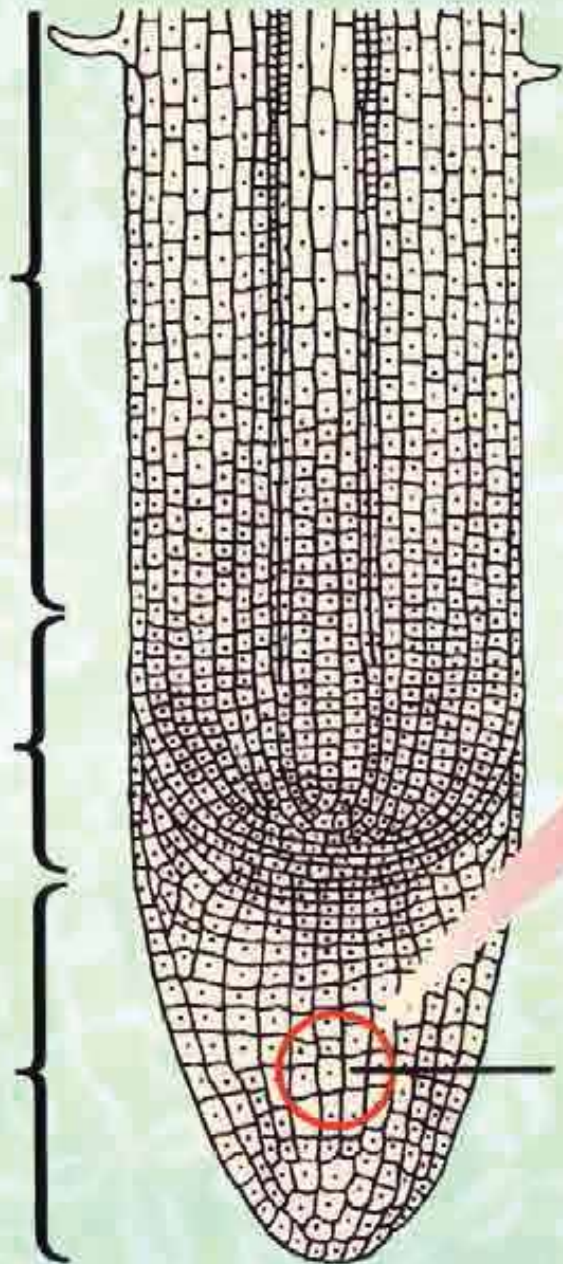
directed by T. Doi

根における重力シグナルの受容

伸長帯

分裂組織

根冠

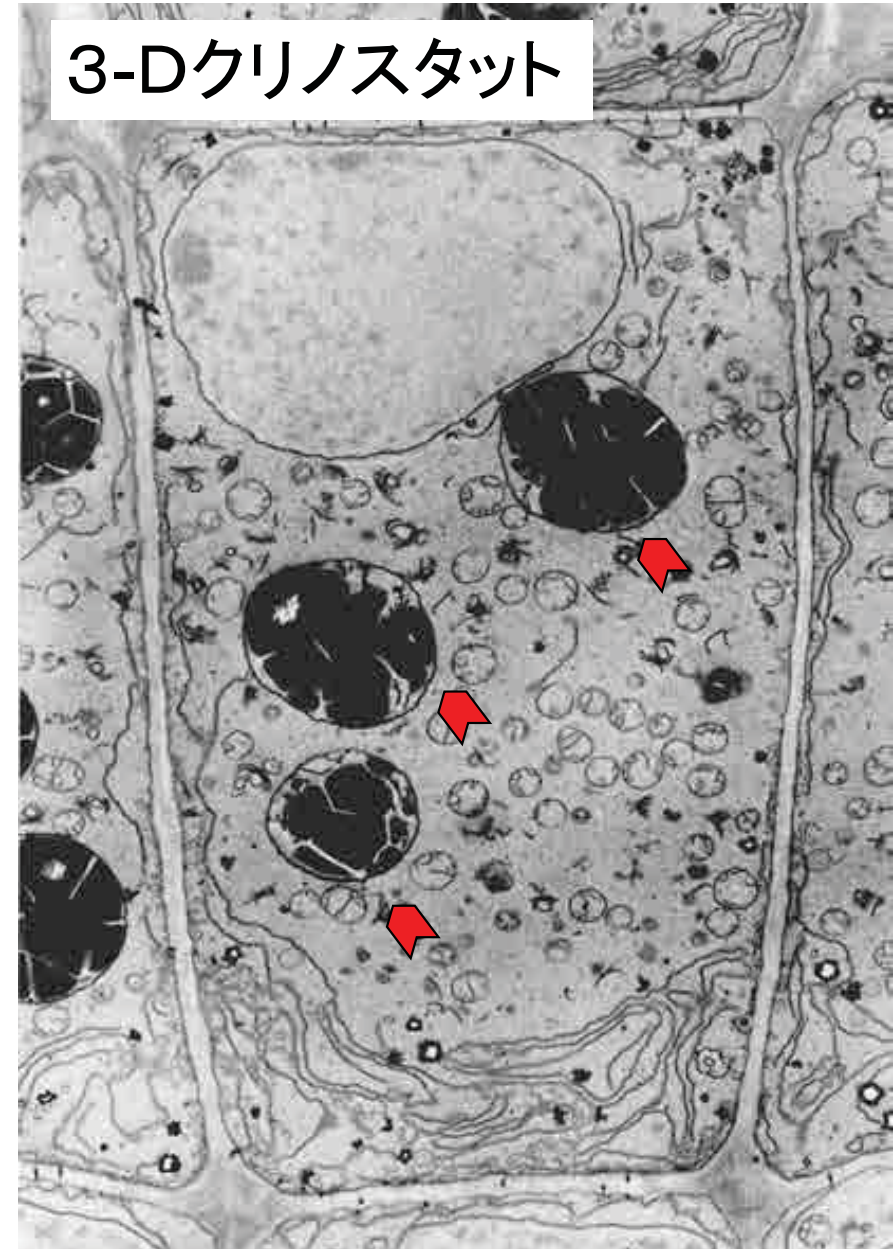


コルメラ

デンプン体



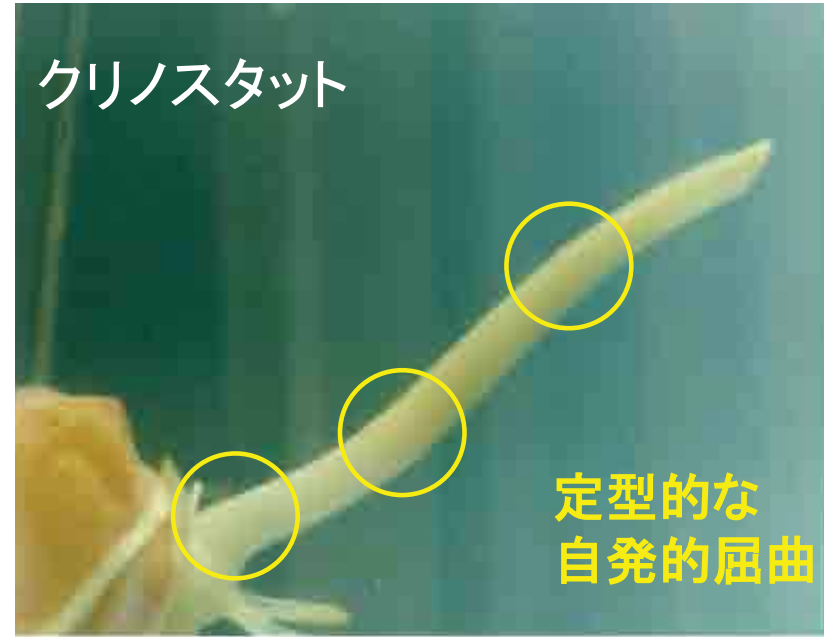
ガーデンクレス根冠コルメラ細胞の微細構造



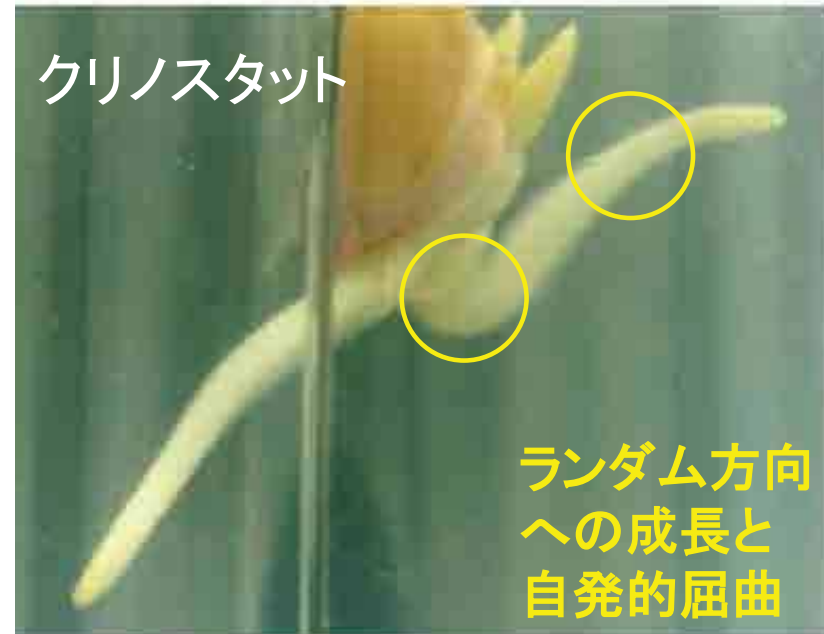
クリノスタット上ではデンプン体が沈降しない

3-Dクリノスタット上でのトウモロコシ芽ばえの形態

茎
(シュート)



根



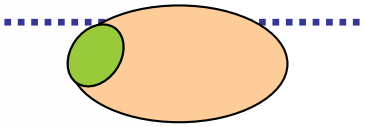
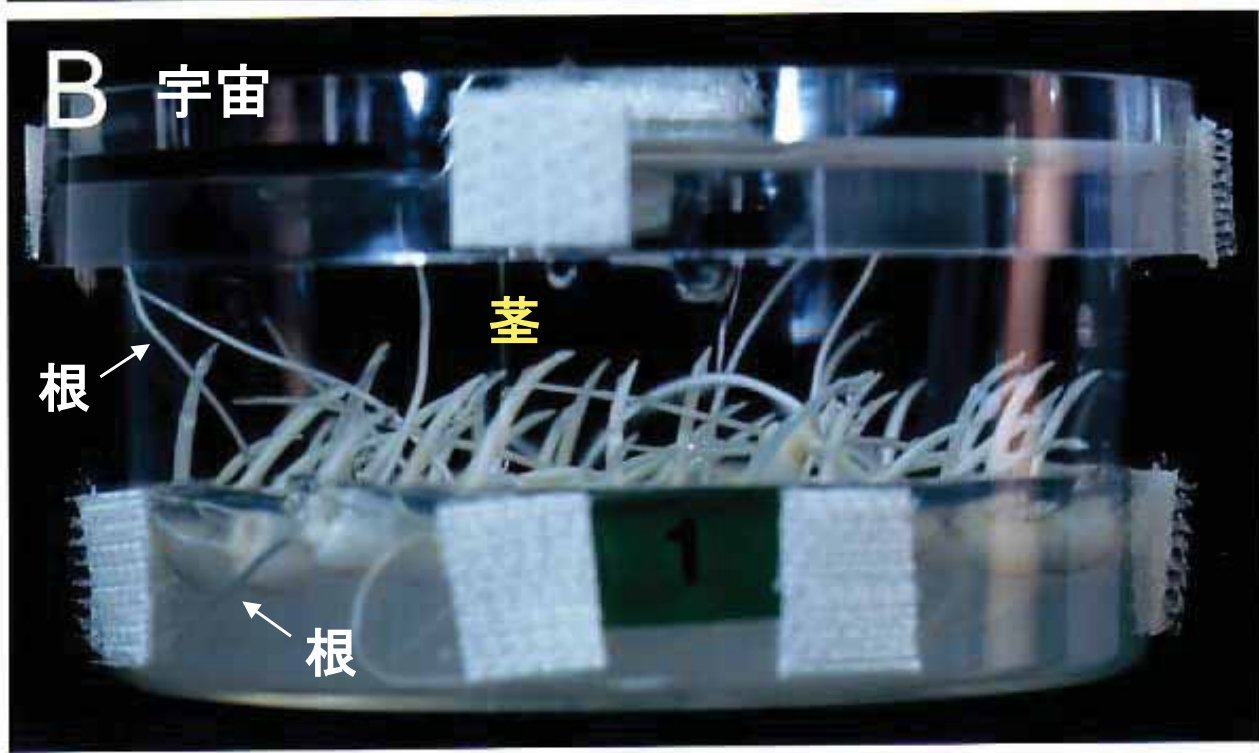
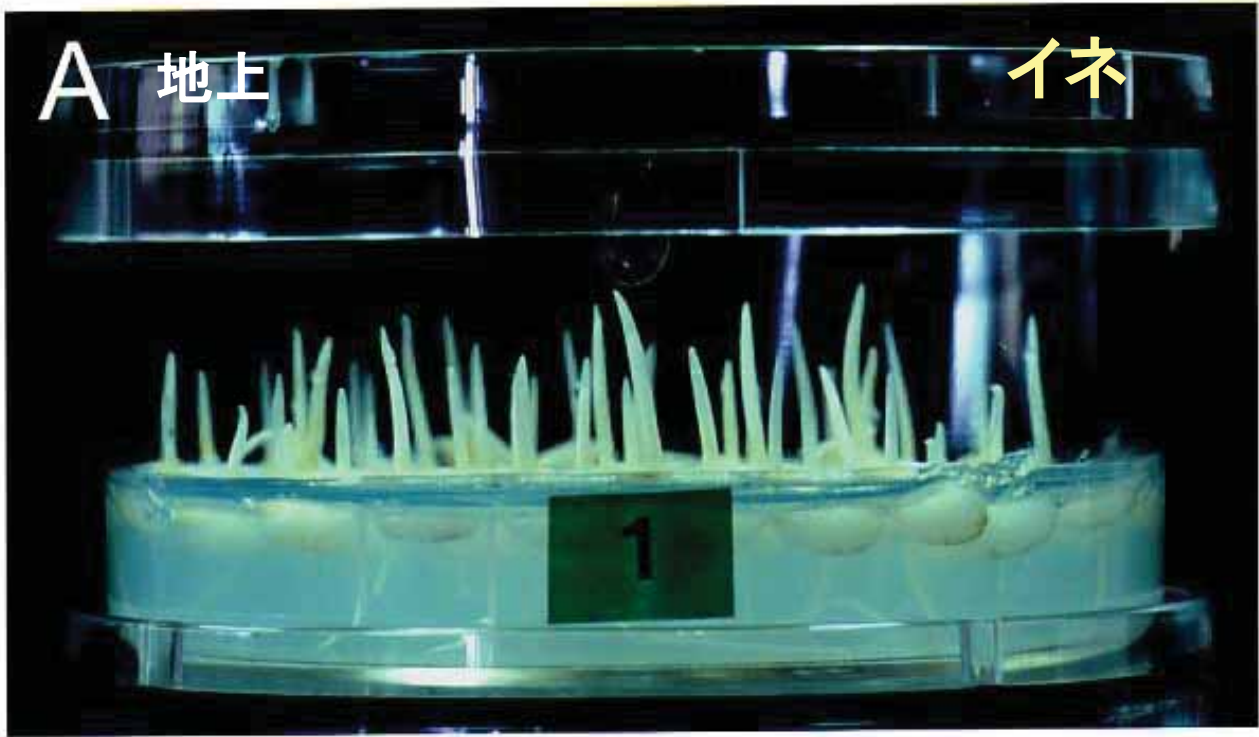
クリノスタット上では自発的形態形成 (Automorphogenesis) を示す

宇宙では植物の形態はどうか？



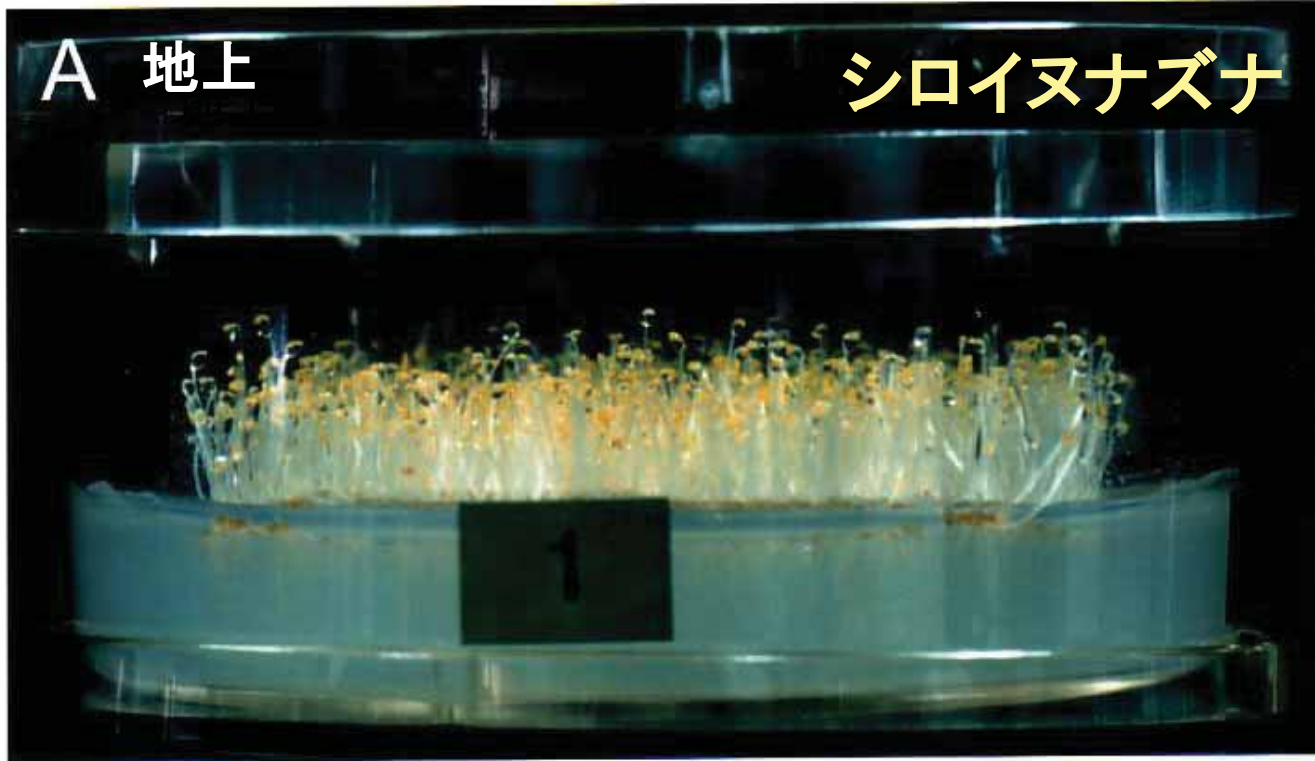
STS-95 RICE 宇宙実験





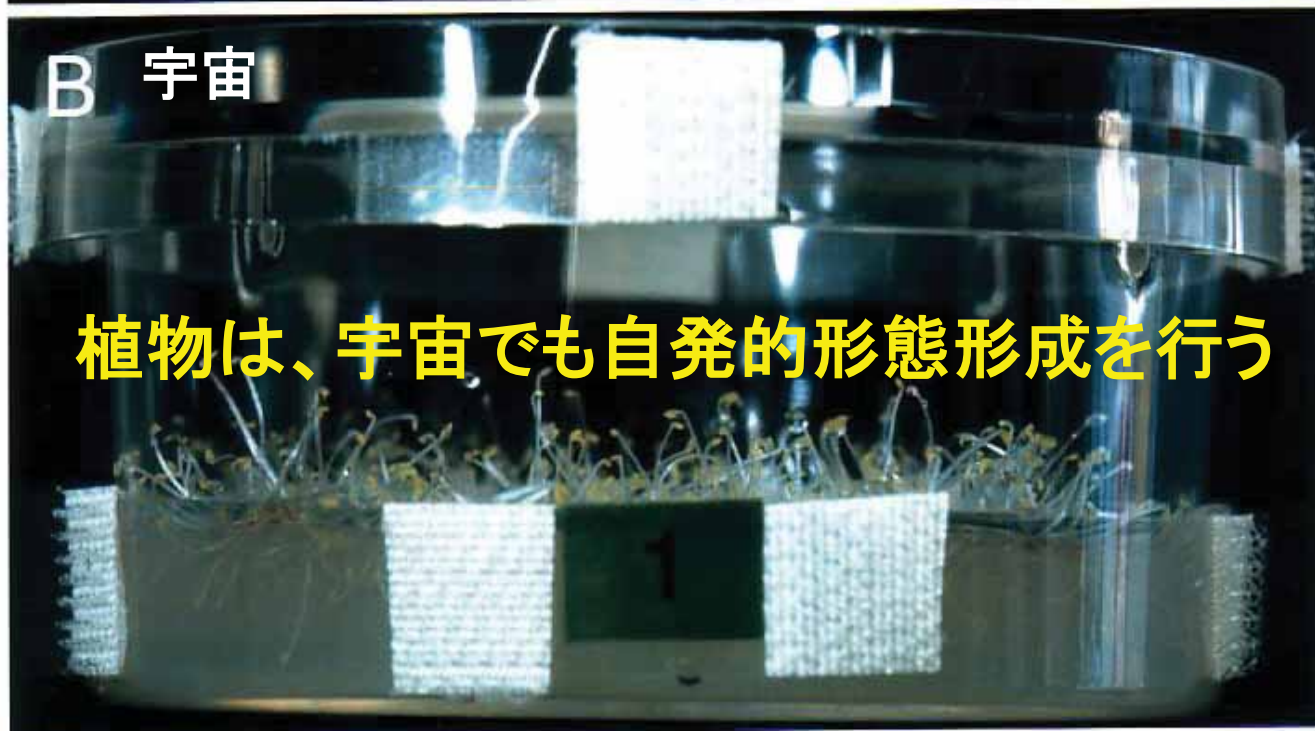
A 地上

シロイヌナズナ

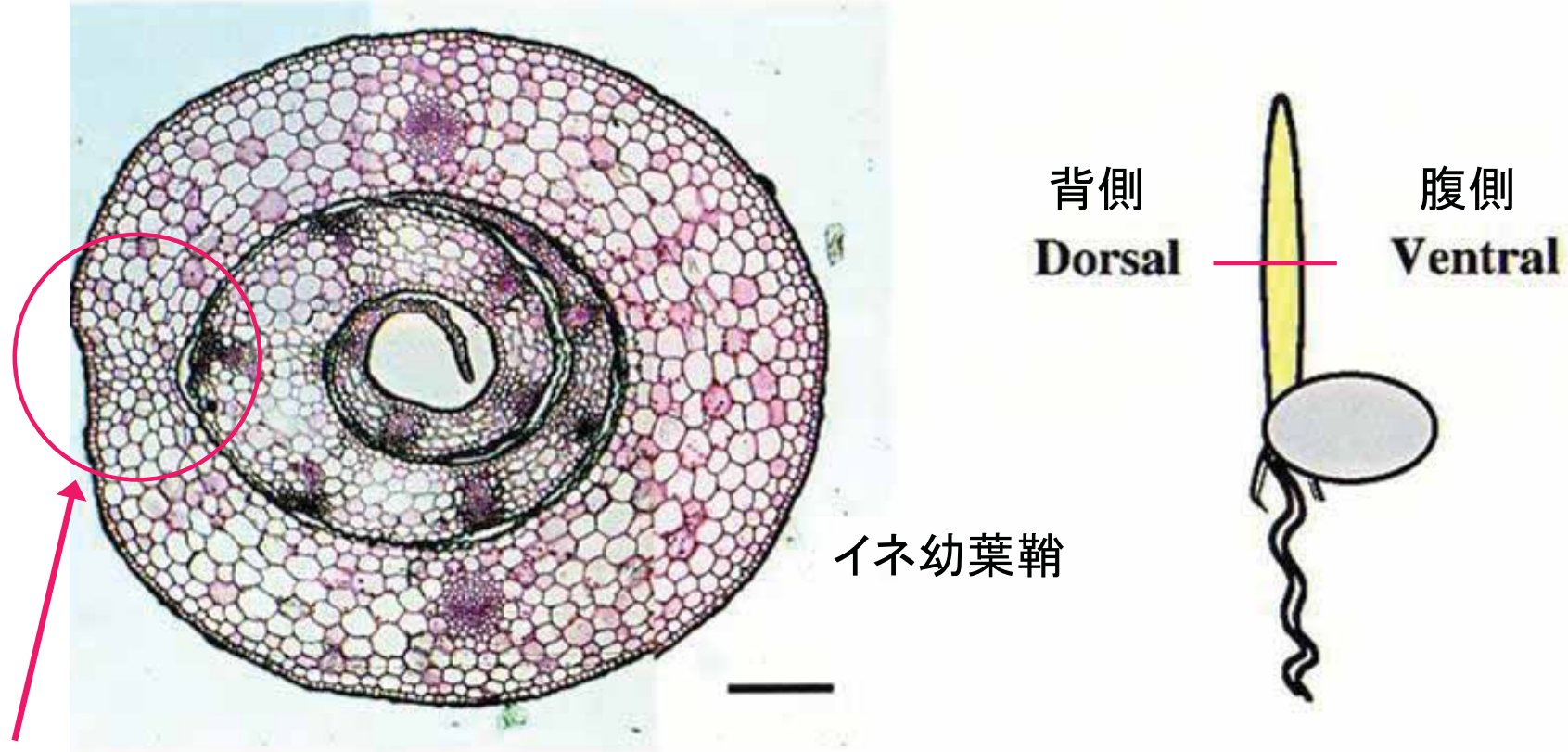


B 宇宙

植物は、宇宙でも自発的形態形成を行う



自発的屈曲機構のメカニズム



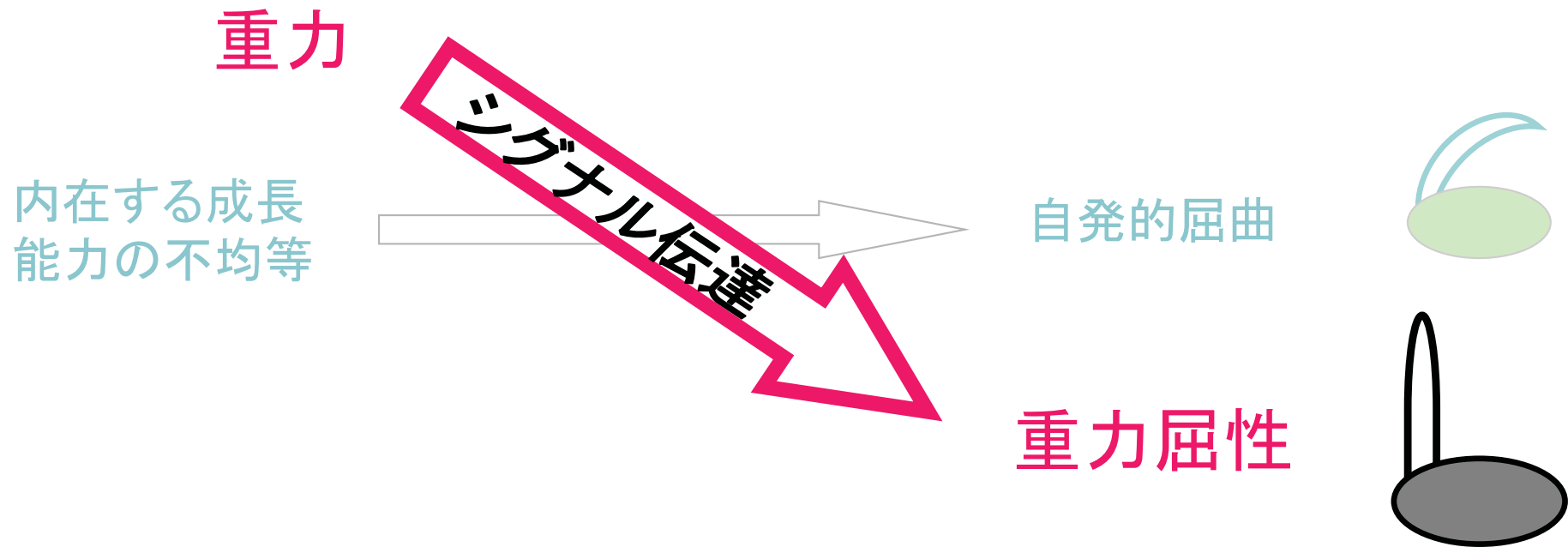
背側の細胞は、
若く伸びやすい



本来種子側に屈曲する性質を持っているが、
重力があると真っ直ぐに生育させられる

宇宙における植物の形態形成:

本来持っている性質に従った自発的形態形成を示す




自発的形態形成は、地上では、
重力屈性によってマスクされている

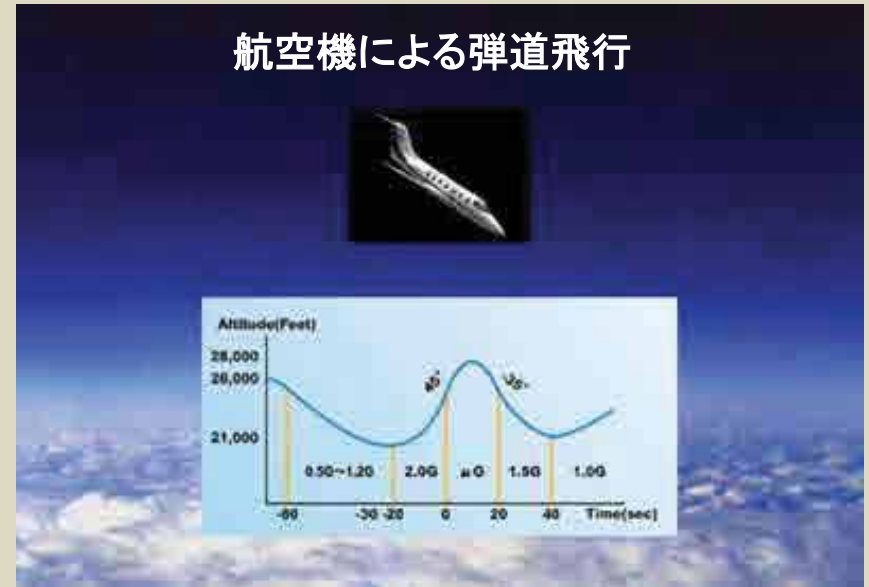
1. 宇宙における植物の形態形成

2. 宇宙における植物の成長

3. 宇宙における植物栽培



地球上での微小重力実験

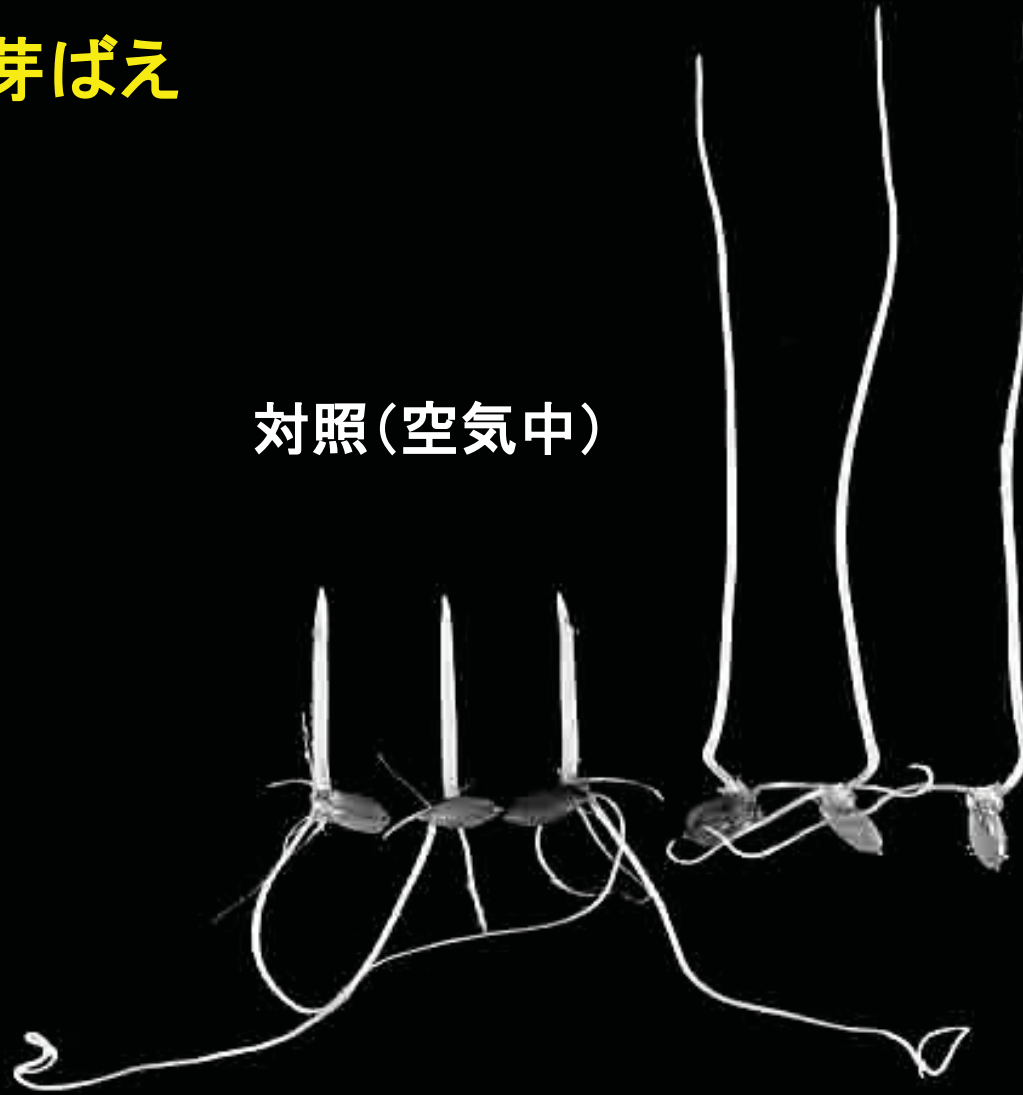


重力の大きさを変える地上実験1. 水中培養

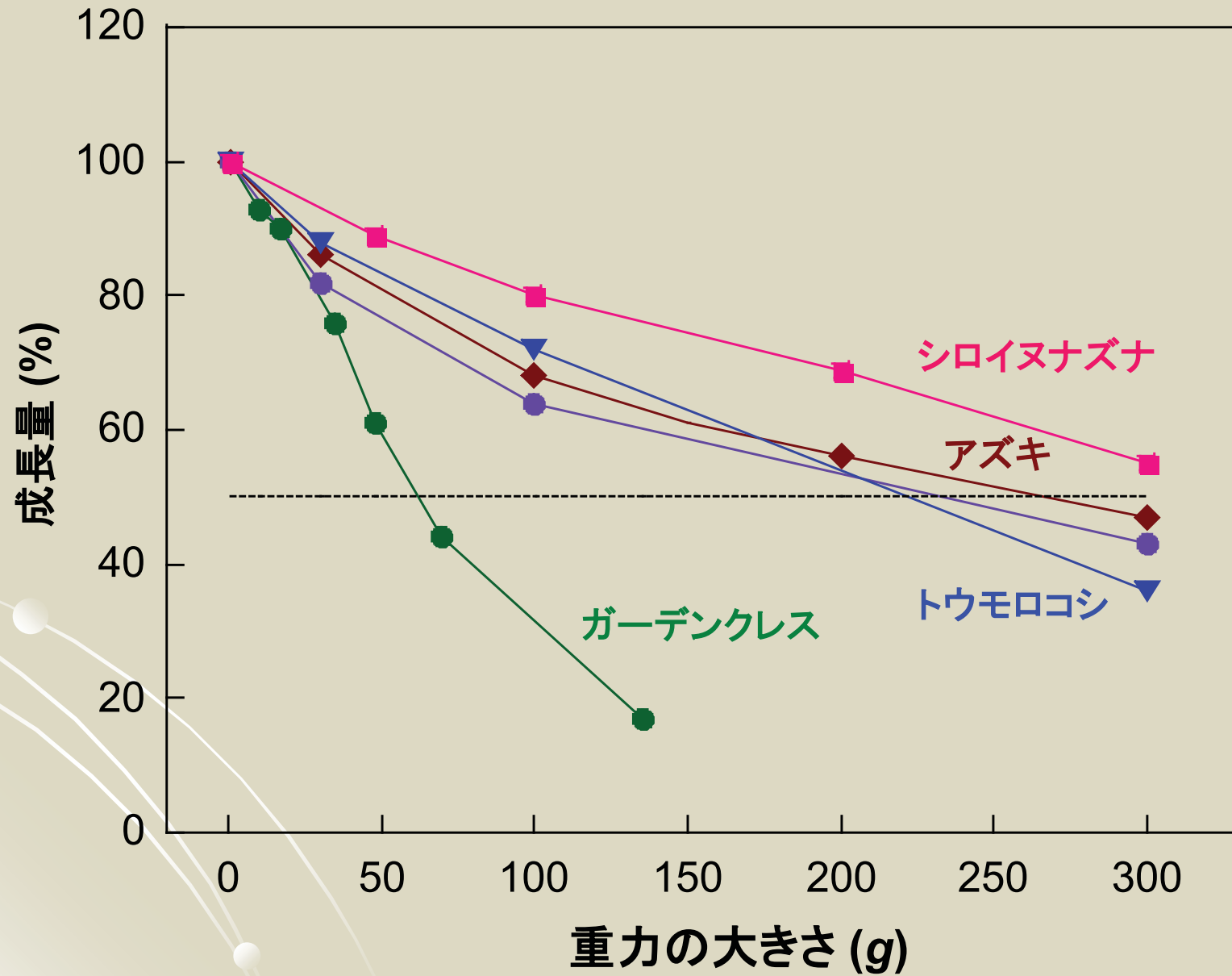
イネ芽ばえ

水中

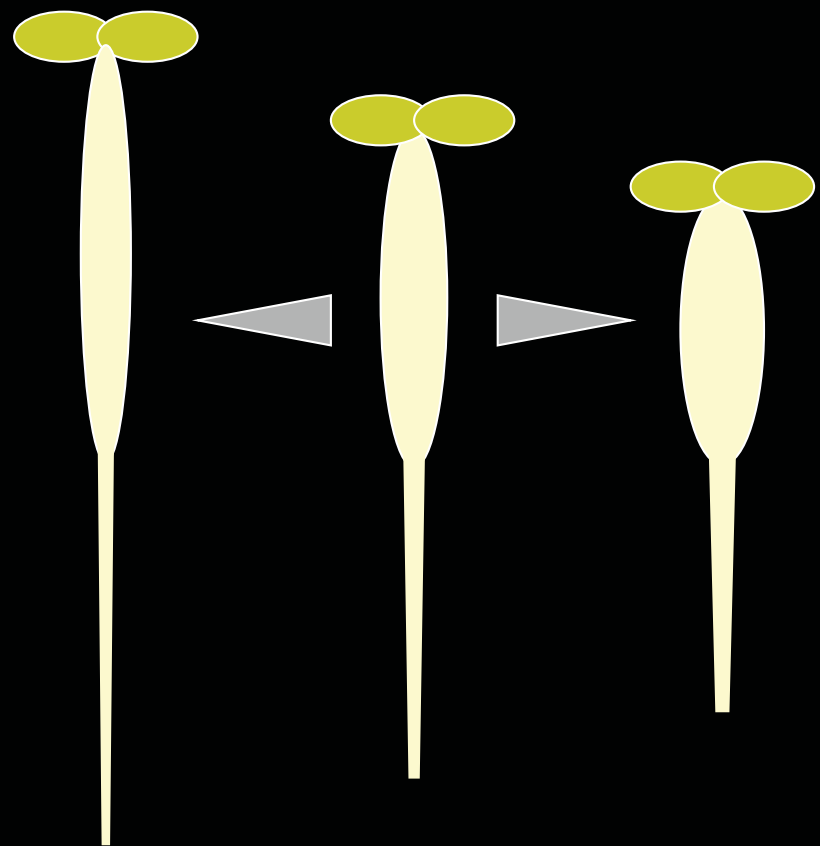
対照(空气中)



重力の大きさを変える地上実験2. 遠心過重力



植物の成長に対する重力の影響

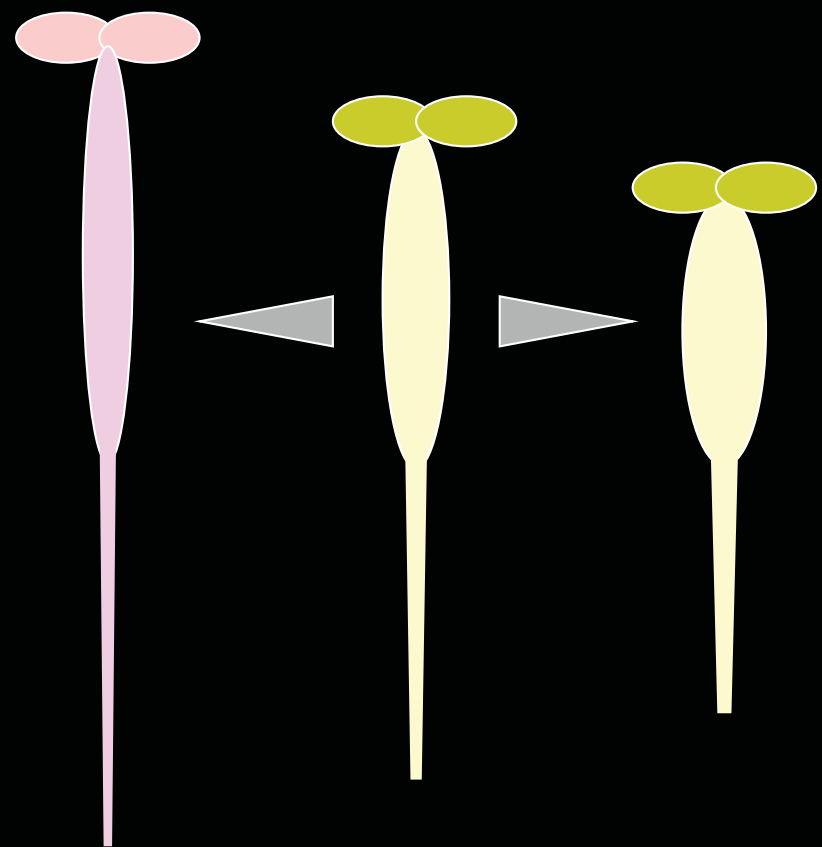


水中

1 g

過重力

植物の成長に対する重力の影響

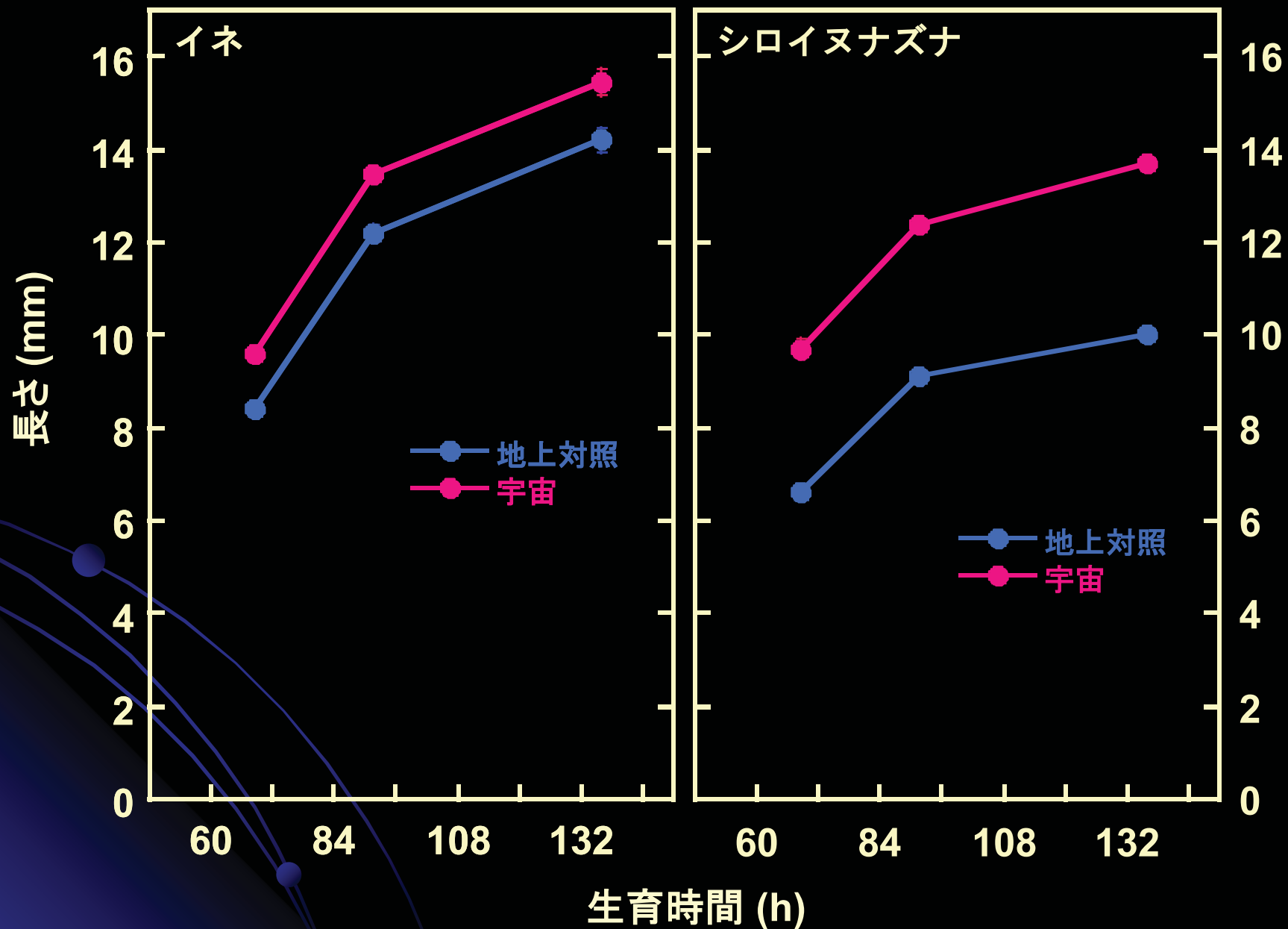


宇宙？

1 g

過重力

宇宙では伸長成長が促進される



宇宙実験の問題点と対策

【発芽】

「微小重力では乾燥種子の吸水が悪く、
吸水・発芽の遅れが成長に反映」



地上で吸水、冷蔵打ち上げ

【温度】

「微小重力と対照とで温度が異なる」
・キャビン内の温度情報がラフ
・培養容器内と周囲との温度差
(対流がない)



容器内のデータロガーの記録により、
後で対照実験を実施

【ガス】

「軌道上と対照とでガス組成・状態が
異なる」
・エチレンの蓄積



エチレン抵抗性系統の利用

【光】

「光は重力代替因子として機能」



完全暗所で生育、
異なる齢の試料は別容器から

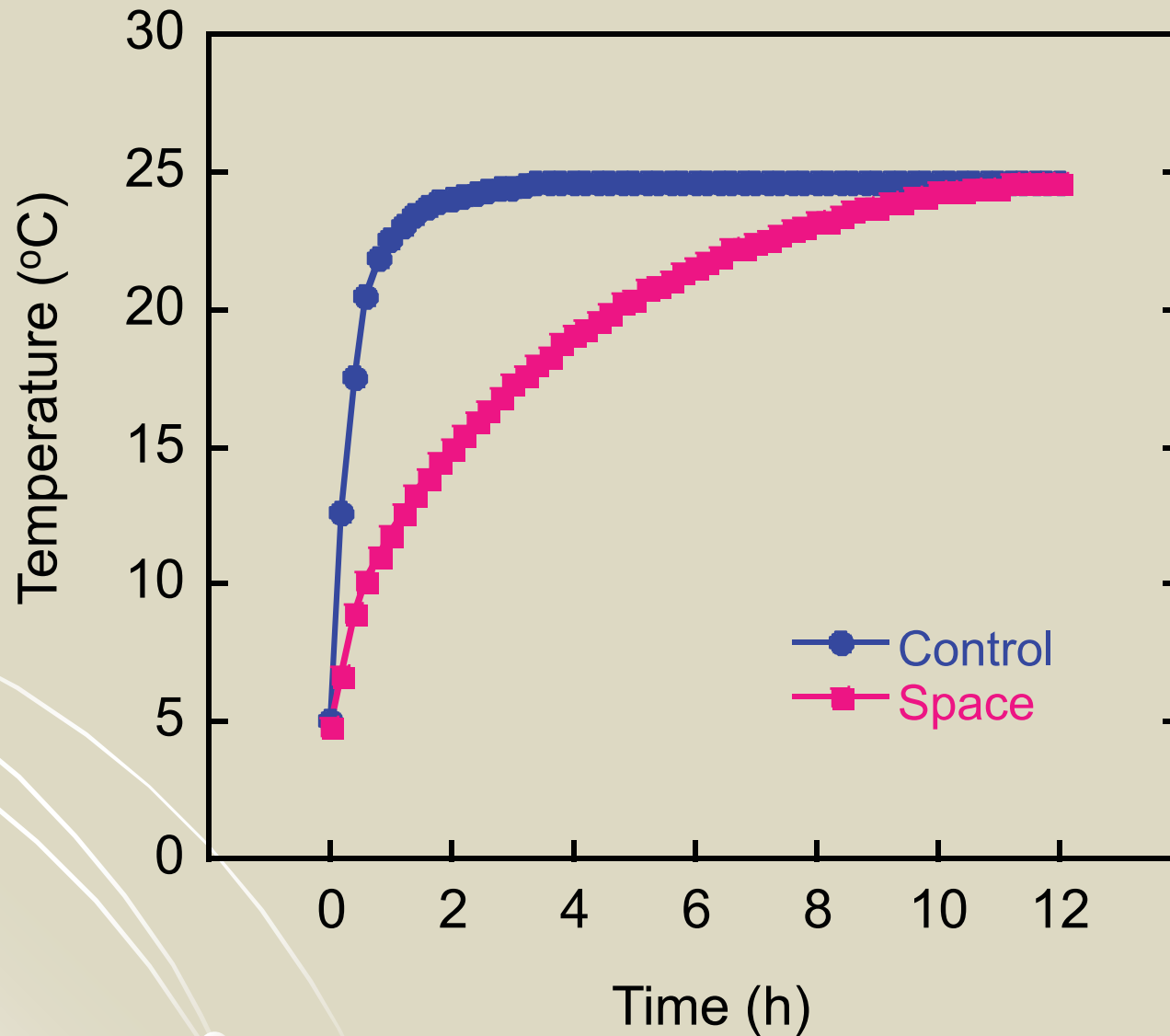
【試料回収】

「微小重力の効果は速やかに消失」



軌道上で急速凍結(GN_2)し、
凍結状態のまま回収

宇宙では培養容器内の温度が変わりにくい



植物の成長と形態形成に関する当研究室の宇宙実験

「きぼう」船内実験室一次選定

- Rice (PI: 保尊隆享)
「微小重力環境における高等植物の成長調節機構」
- Space Seed (PI: 神阪盛一郎)
「微小重力環境における高等植物の生活環」

第4回ライフサイエンス国際公募

- Ferulate (PI: 若林和幸)
「Regulation by gravity of ferulate formation in cell walls of rice seedlings
(重力によるイネ芽生え細胞壁のフェルラ酸形成の制御機構)」

第5回ライフサイエンス国際公募

- Resist Wall (PI: 保尊隆享)
「Role of microtubule-membrane-cell wall continuum in gravity resistance
in Plants
(植物の抗重力反応における微小管-原形質膜-細胞壁連絡の役割)」

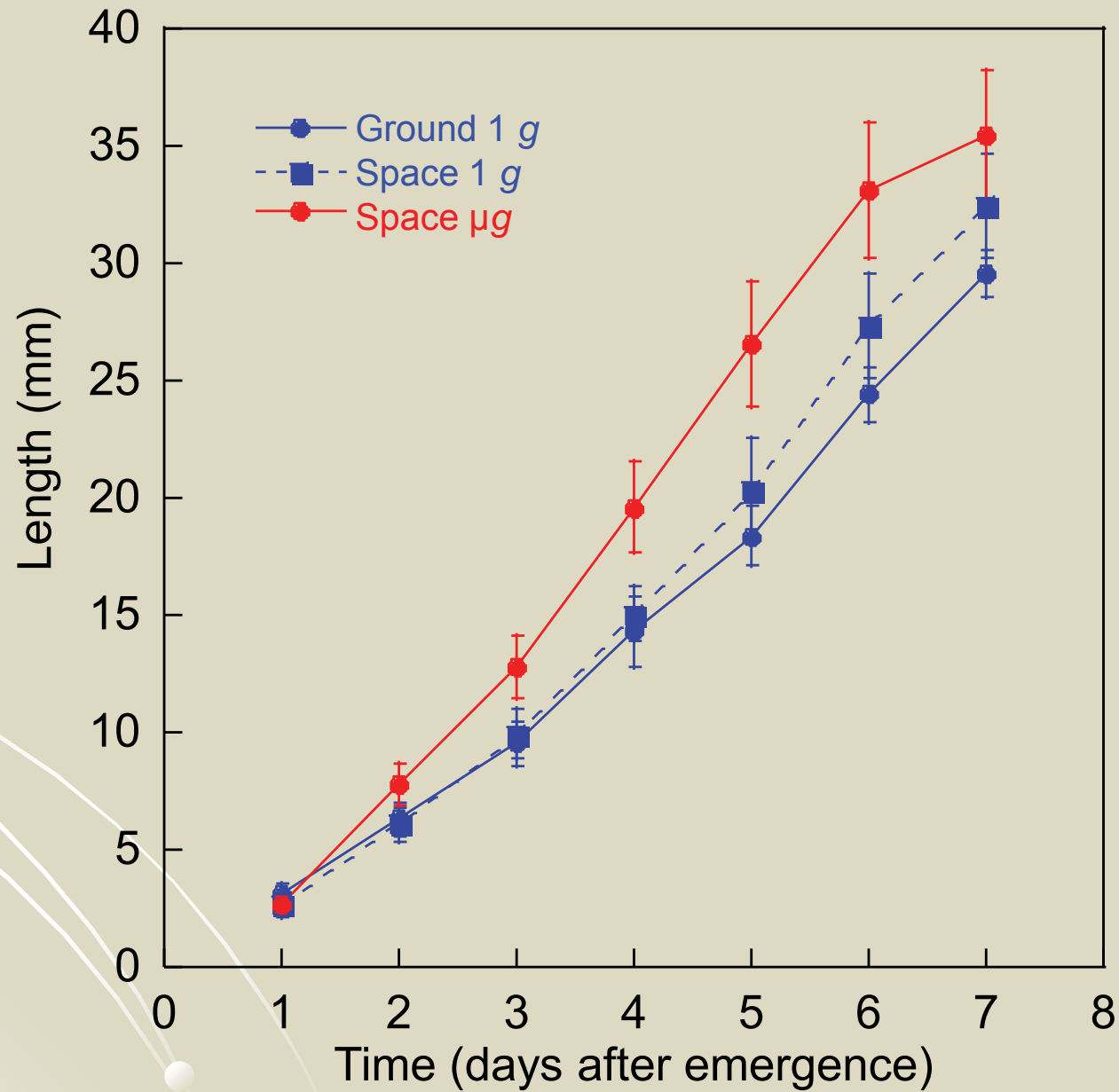
「きぼう」船内実験室第2期前半利用

- Resist Tubule (PI: 保尊隆享)
「植物の抗重力反応機構-シグナル変換・伝達から応答まで」

「きぼう」船内実験室第2期後半追加利用

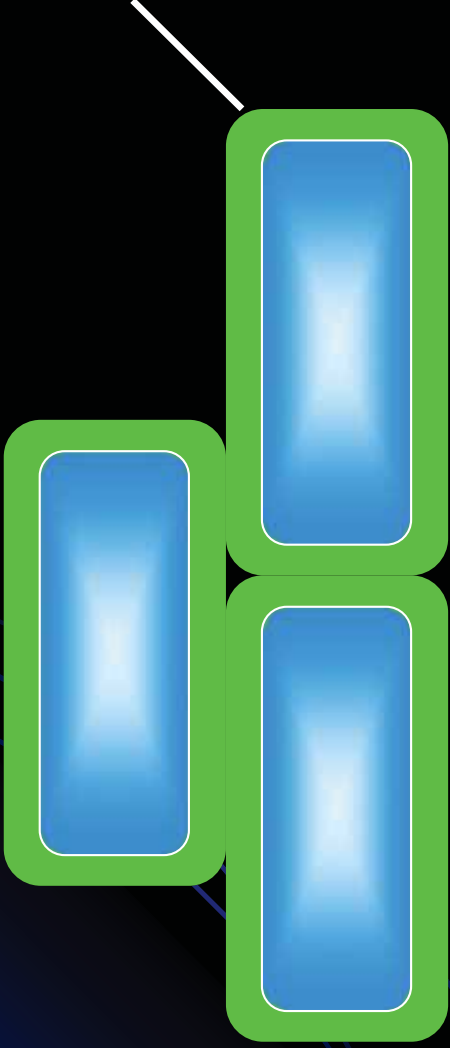
- Aniso Tubule (PI: 曾我康一)
「重力による茎の形態変化における表層微小管とMAPsの役割」

宇宙では花茎の伸長成長も促進される



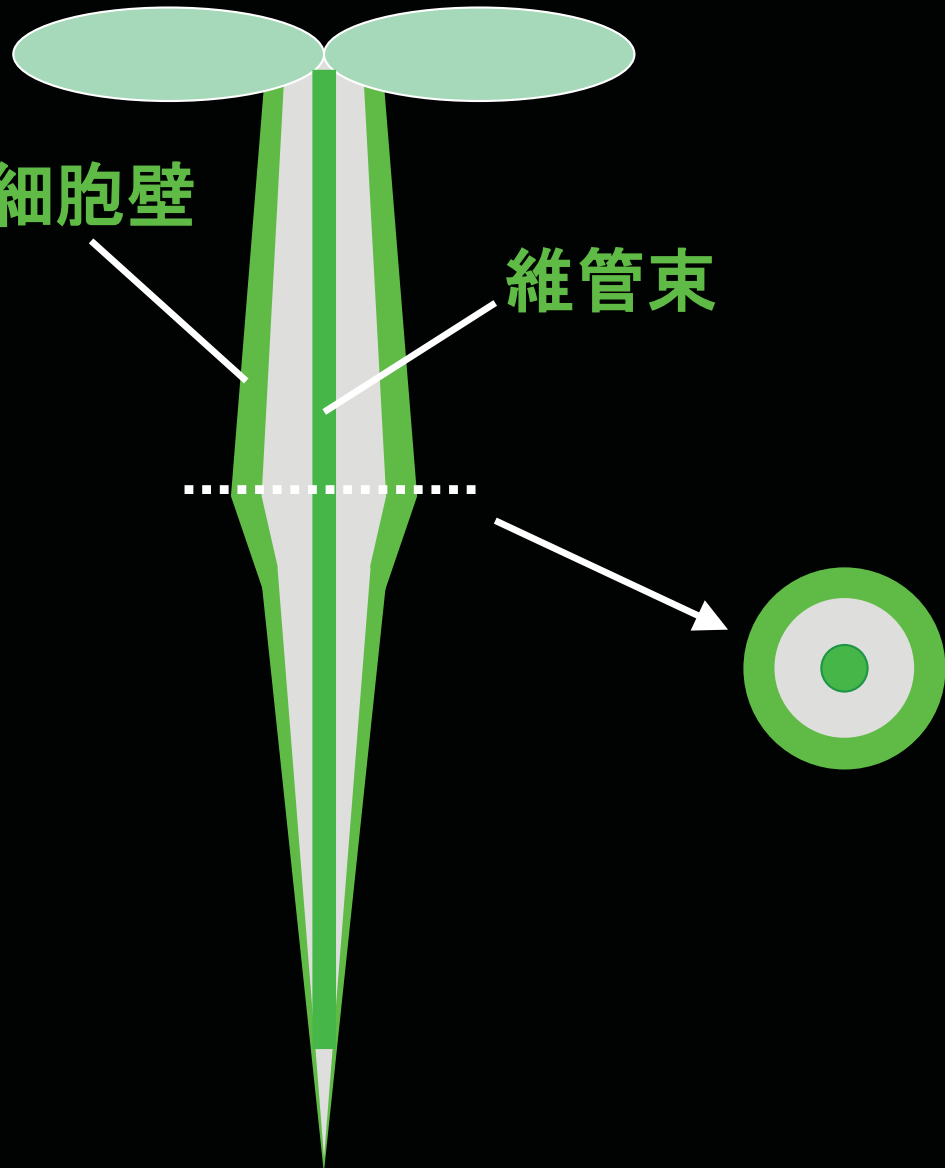
細胞壁が植物体の成長を直接的に調節している

細胞壁

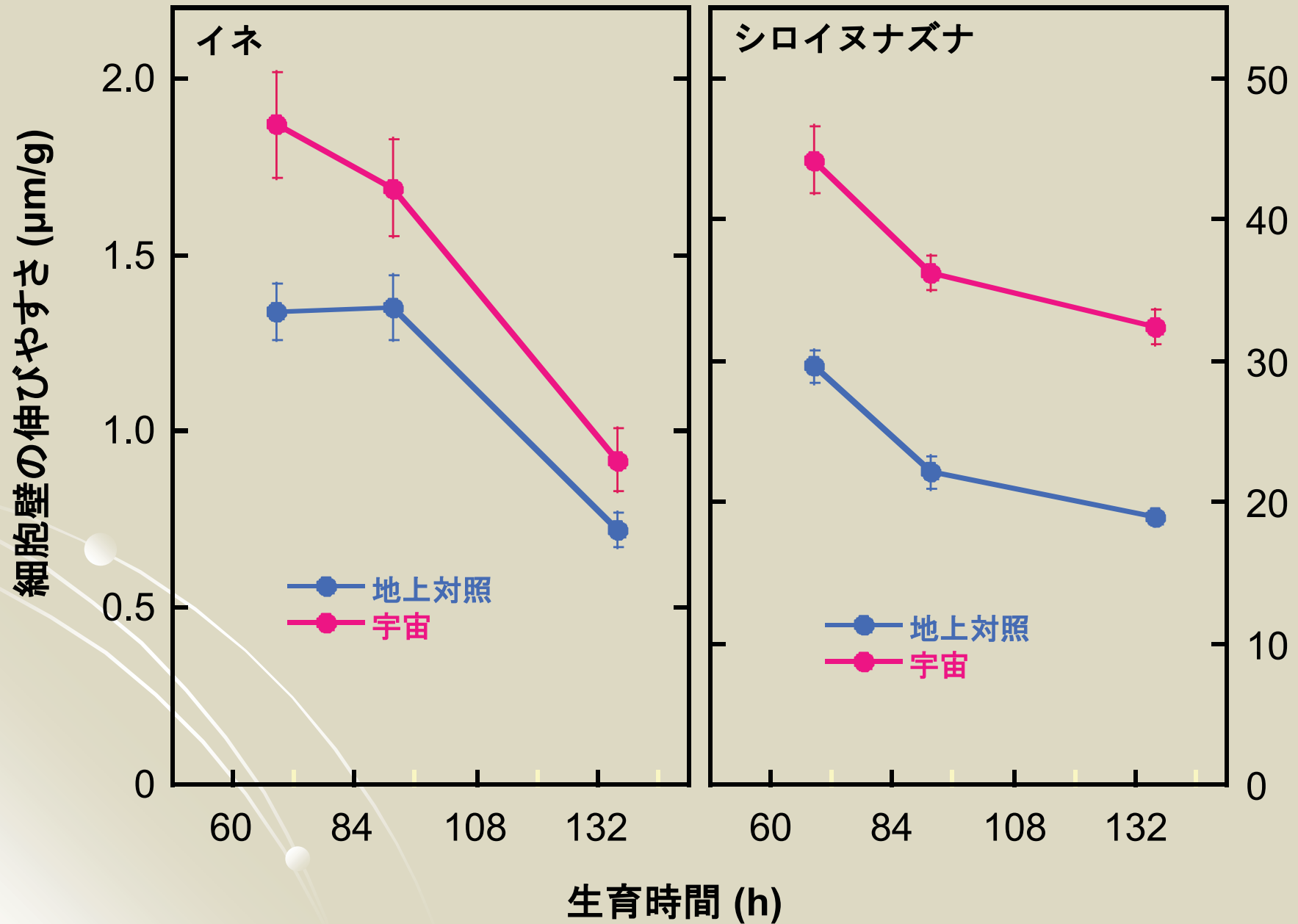


表皮細胞壁

維管束

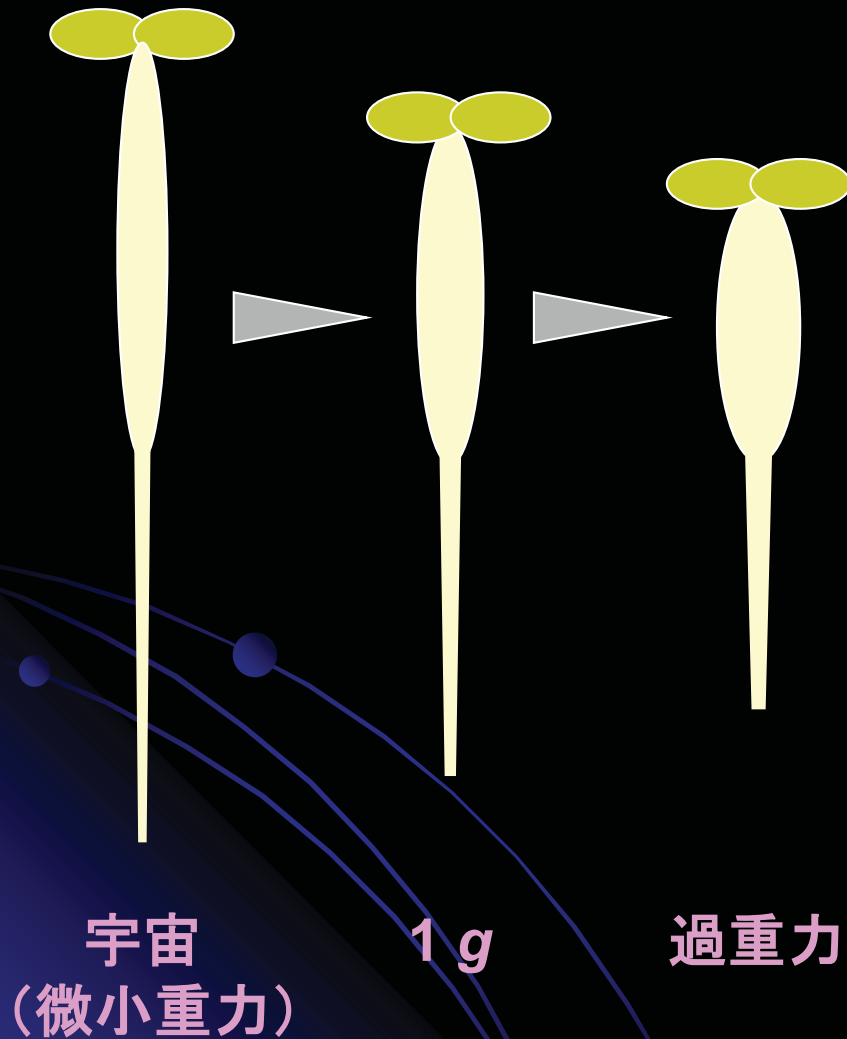


宇宙では細胞壁が柔らかく伸びやすくなる

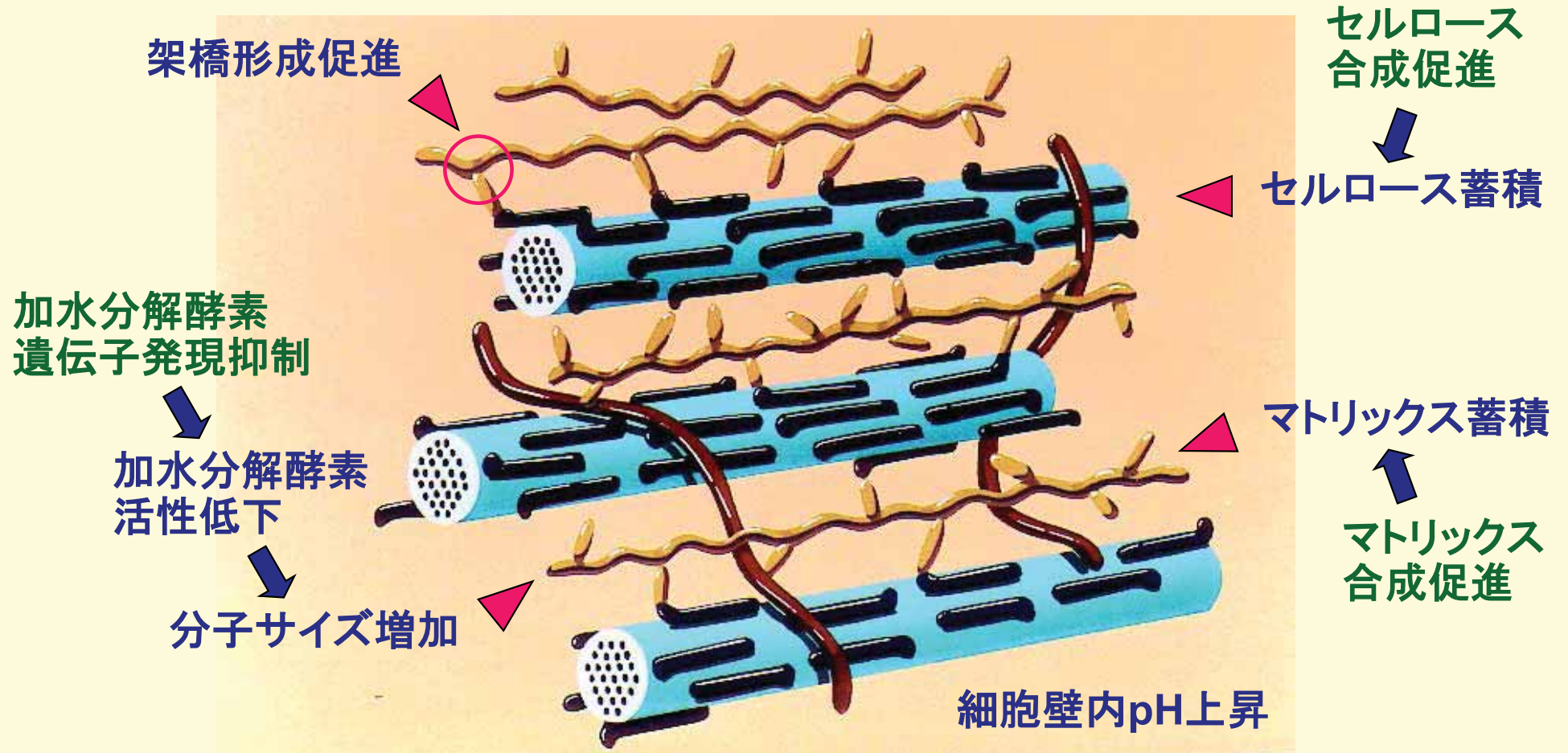


重力シグナルに対する細胞壁の応答

- ・力学的強度の増加
- ・厚みの増加
- ・セルロース繊維の蓄積
- ・マトリックス多糖の蓄積
- ・多糖類の分子サイズの増加
- ・多糖類の代謝回転の抑制
- ・多糖分解酵素活性の低下
- ・細胞壁 pH の上昇



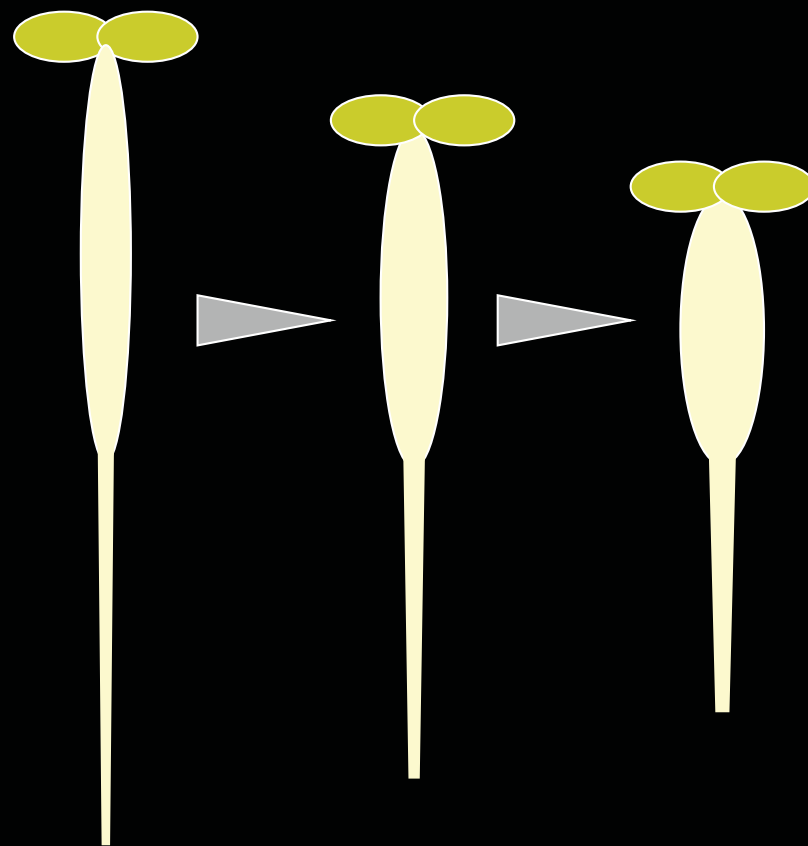
重カシグナルによる細胞壁変化



細胞壁強度増加

植物は重力によって押しつぶされているのか？

No!



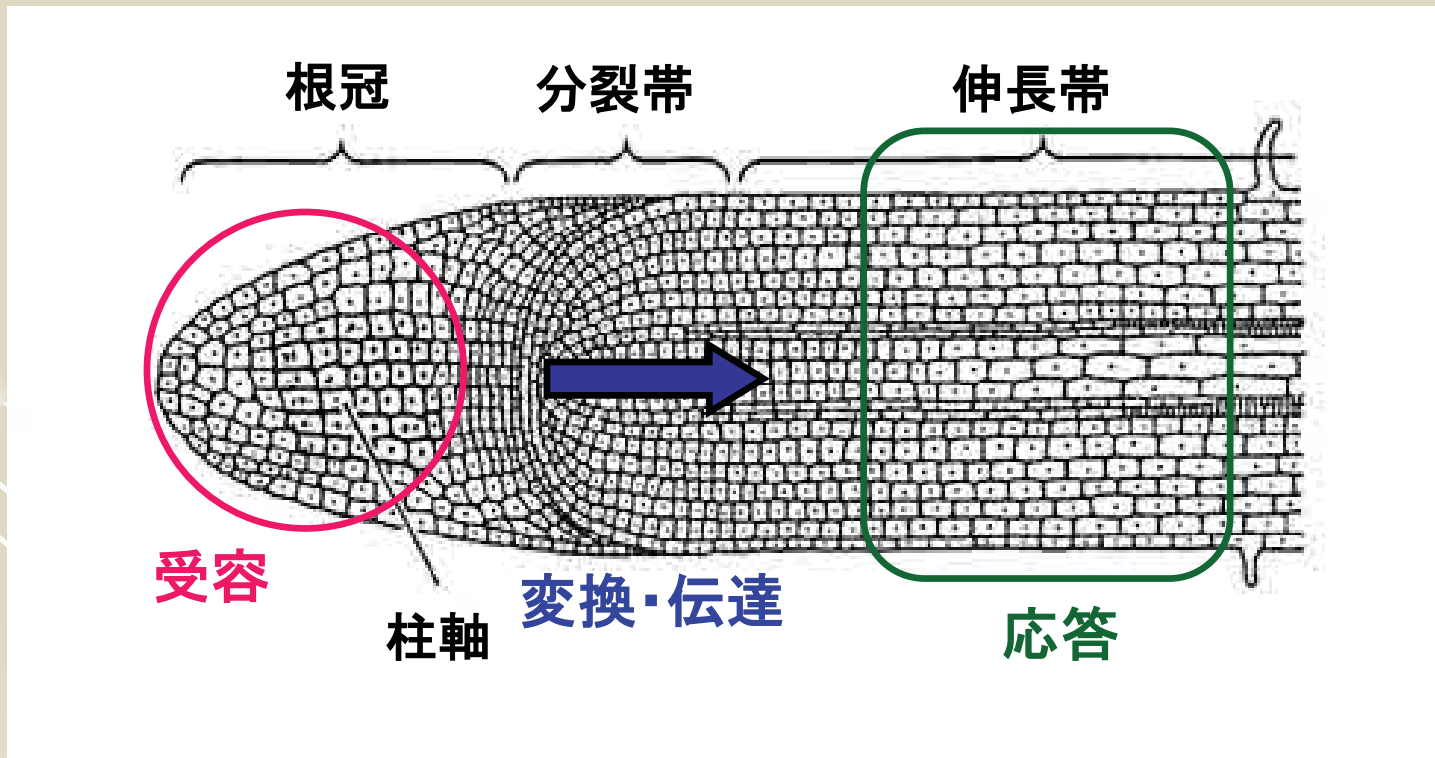
宇宙
(微小重力)

1g

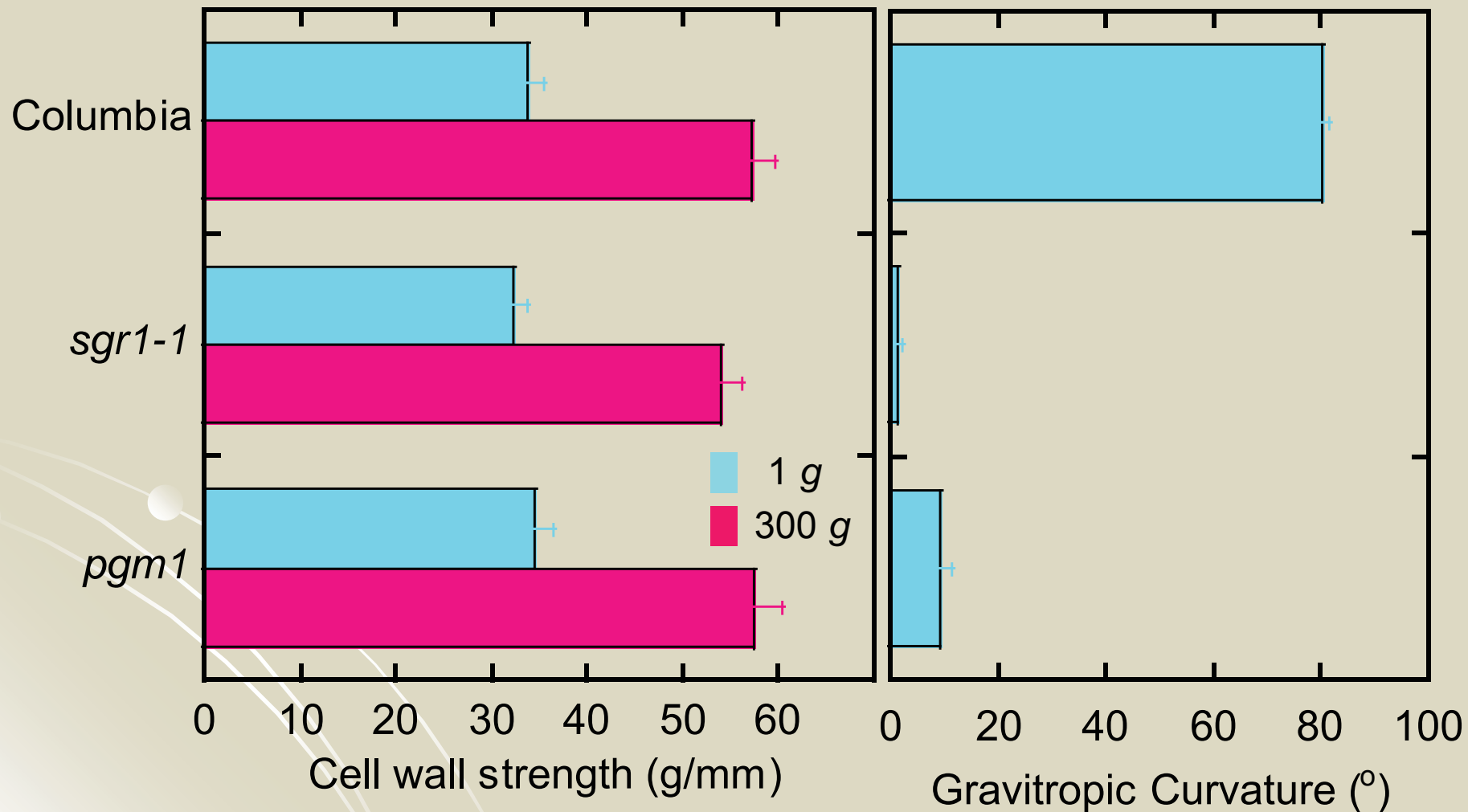
過重力

環境応答機構

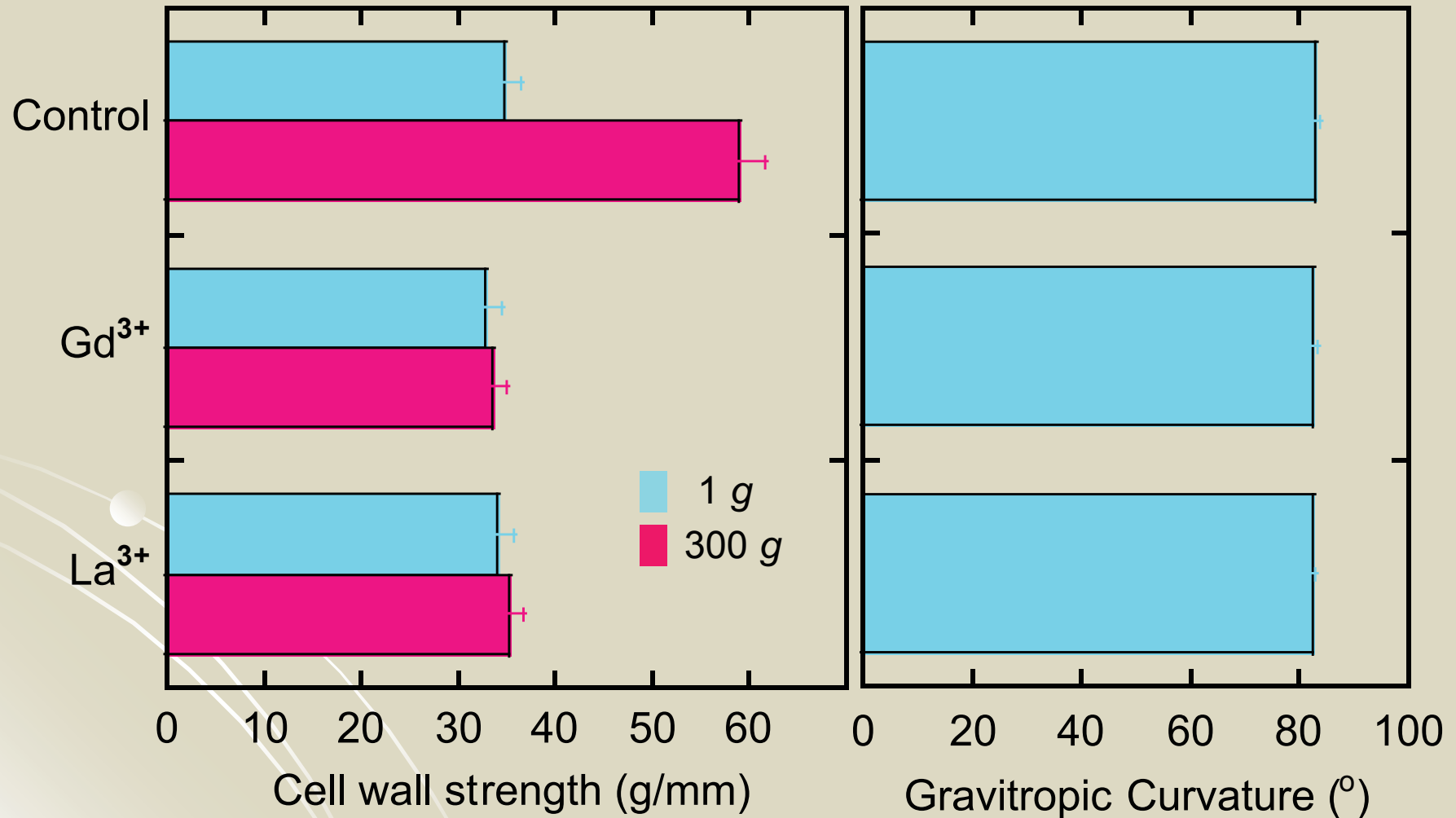
受容 → 変換・伝達 → 応答



重力屈性変異体でも過重力に対する反応は正常である

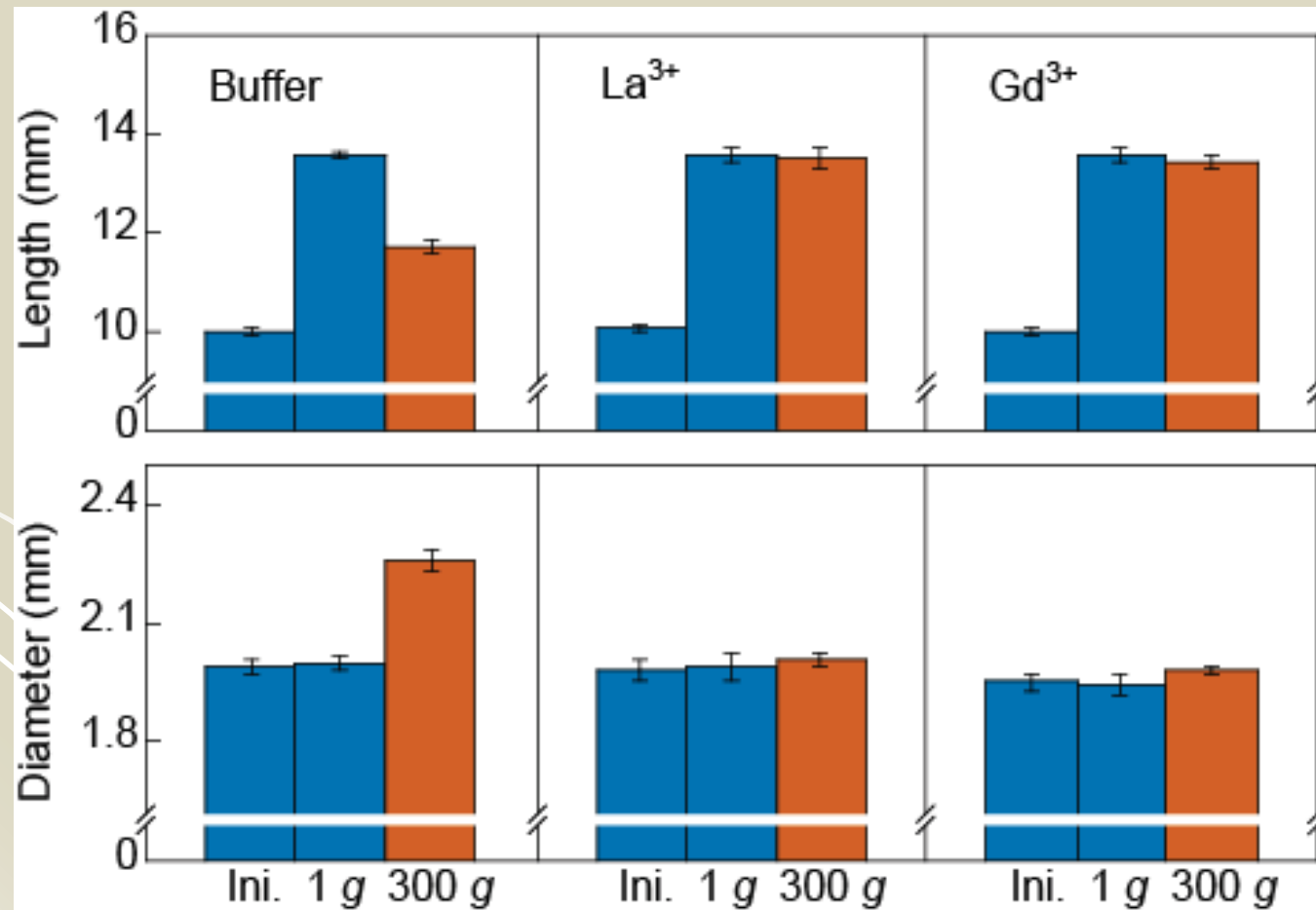


メカノレセプター阻害剤は過重力に対する反応を阻害する



メカノレセプター阻害剤存在下では成長抑制が起こらない

- ・ 過重力による変化は重力に対する植物の応答である
- ・ 重力屈性とは別の重力応答が存在する

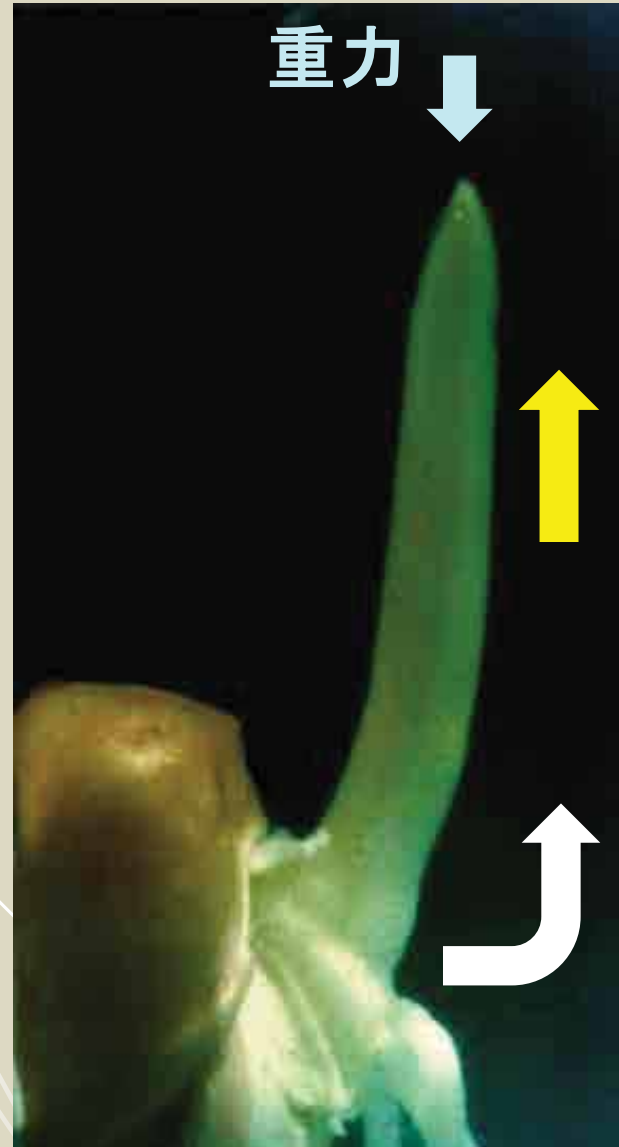


重力に反応する能力を失うとどうなるか？



- ・「しだれ」は、樹木によく見られる突然変異である。
- ・「しだれ」系統でも重力屈性は正常である。
- ・「しだれ」系統は、重力に対抗して幹を支えることができない。

植物には2つの重力反応がある



重力に対抗する反応：
抗重力反応
(Gravity resistance)

重力屈性

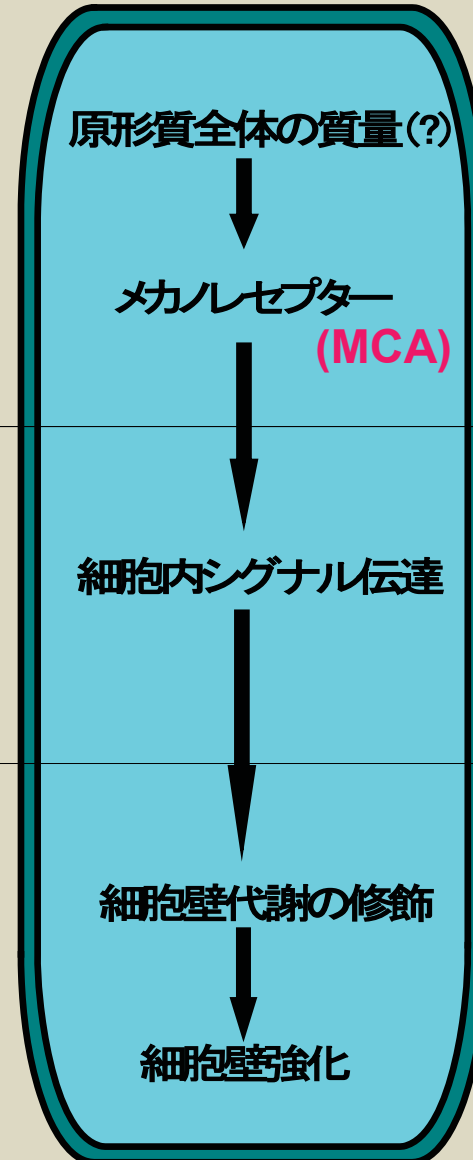
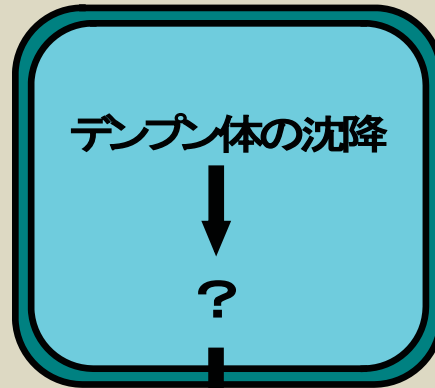
重力屈性

抗重力反応

【受容】

平衡細胞

全細胞



【変換・伝達】

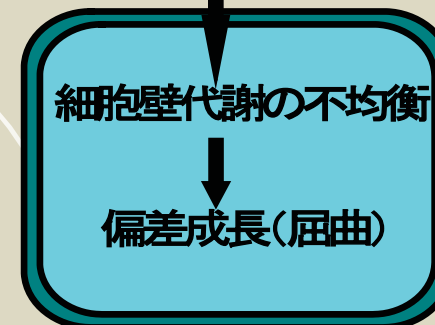
オーキシン輸送

細胞内シグナル伝達

オーキシンの不均等分布

【応答】

成長細胞



細胞壁代謝の修飾

細胞壁強化

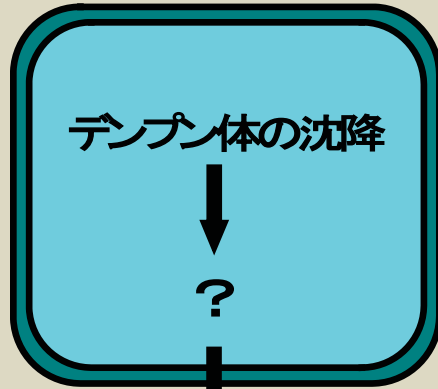
重力屈性

抗重力反応

【受容】

平衡細胞

全細胞



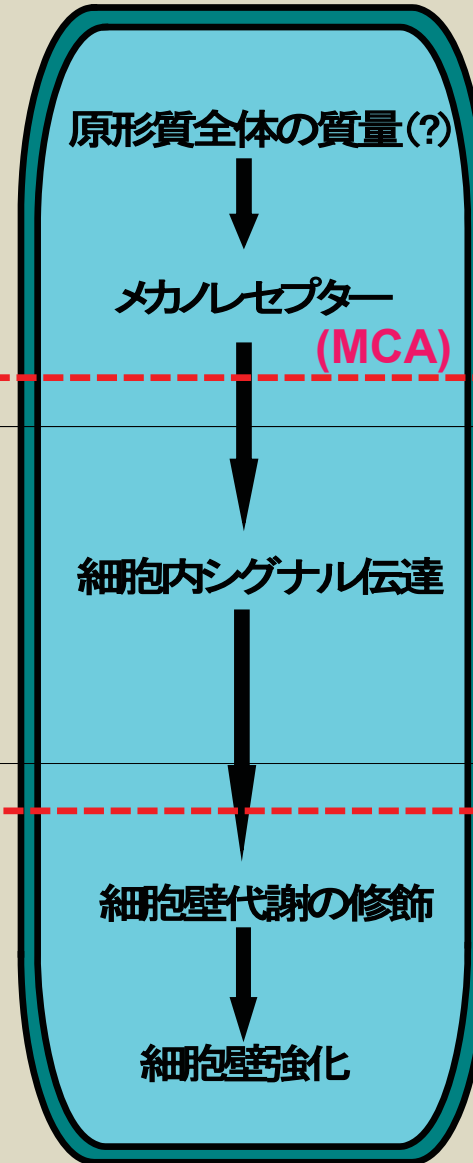
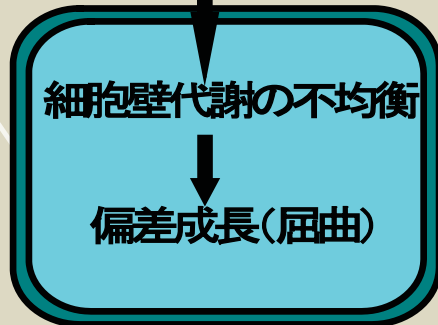
【変換・伝達】

オーキシンの輸送

オーキシンの不均等分布

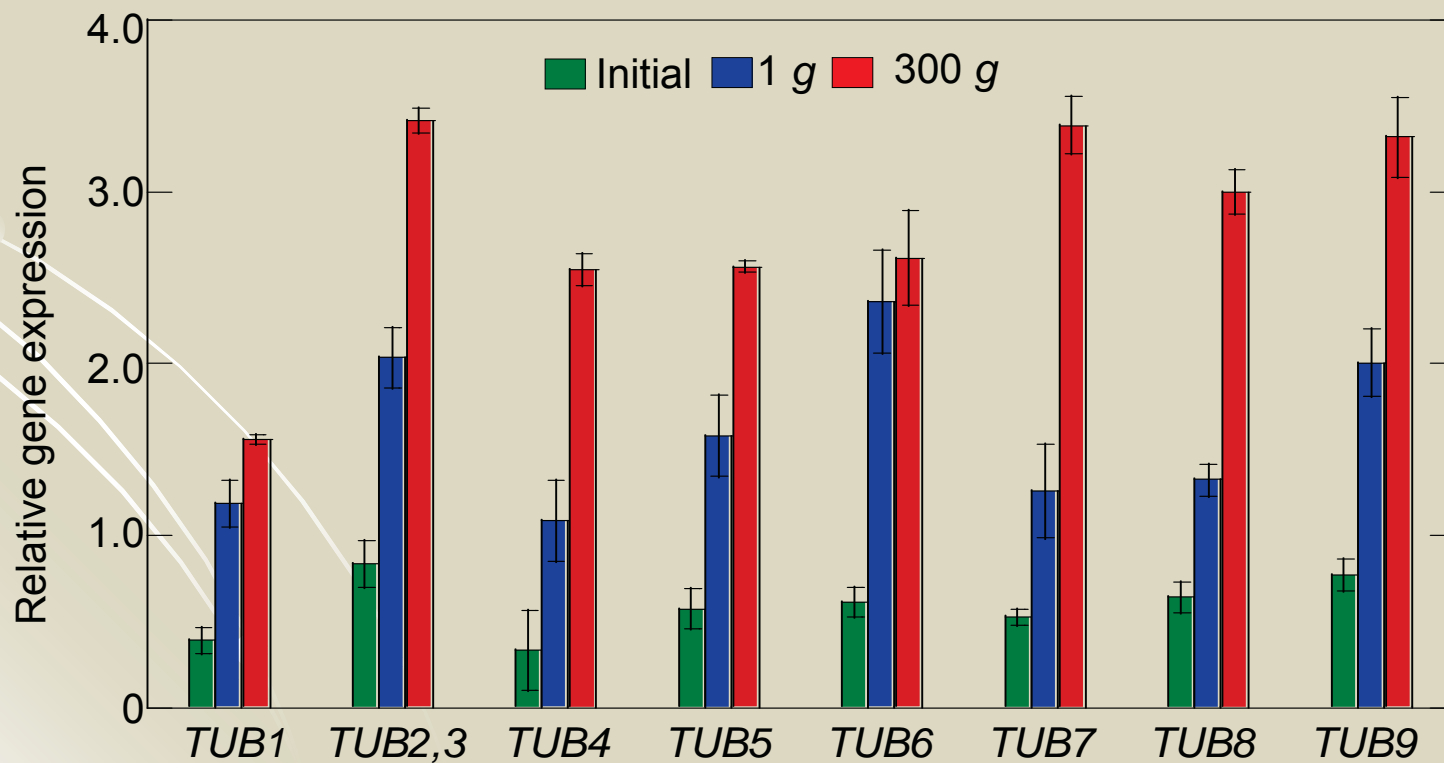
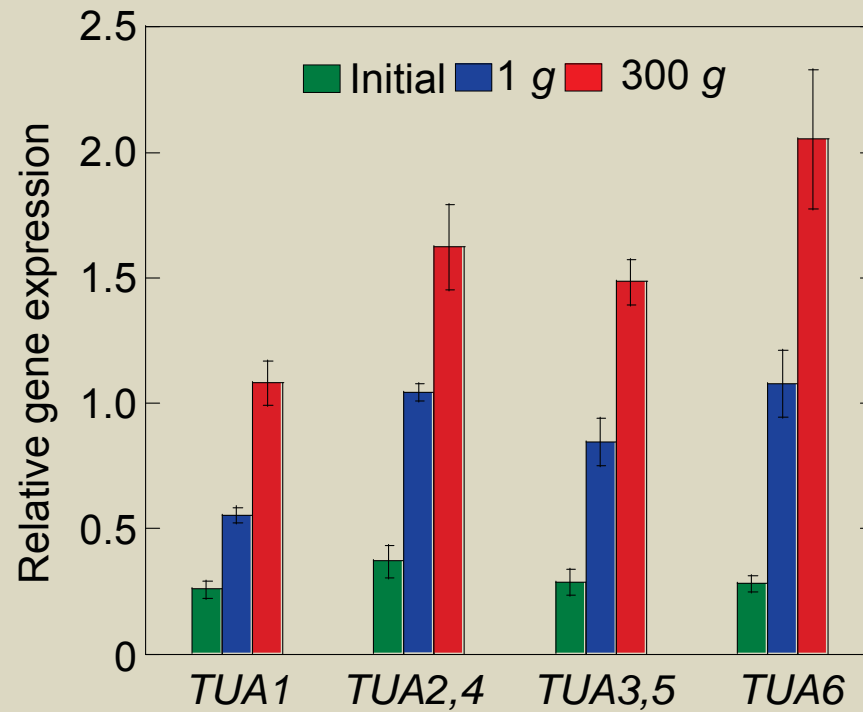
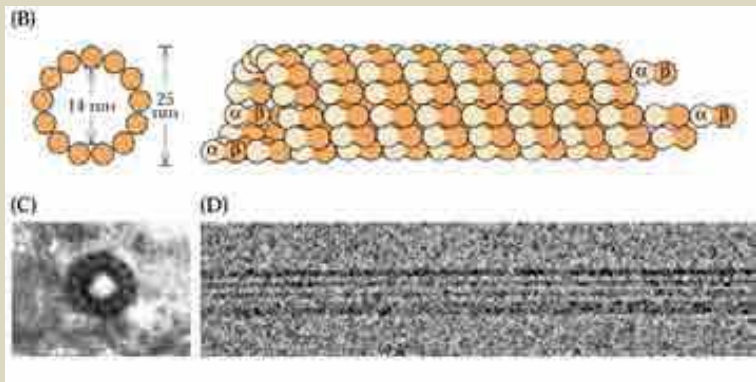
【応答】

成長細胞

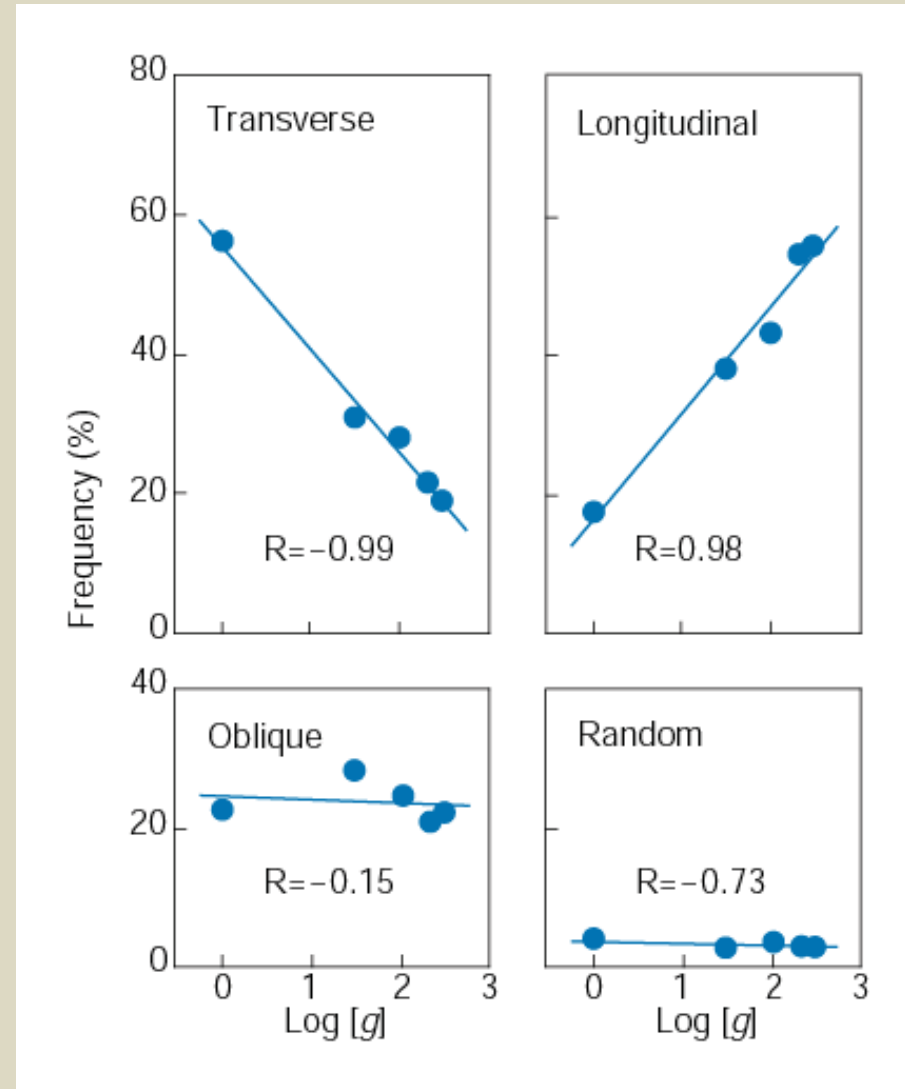
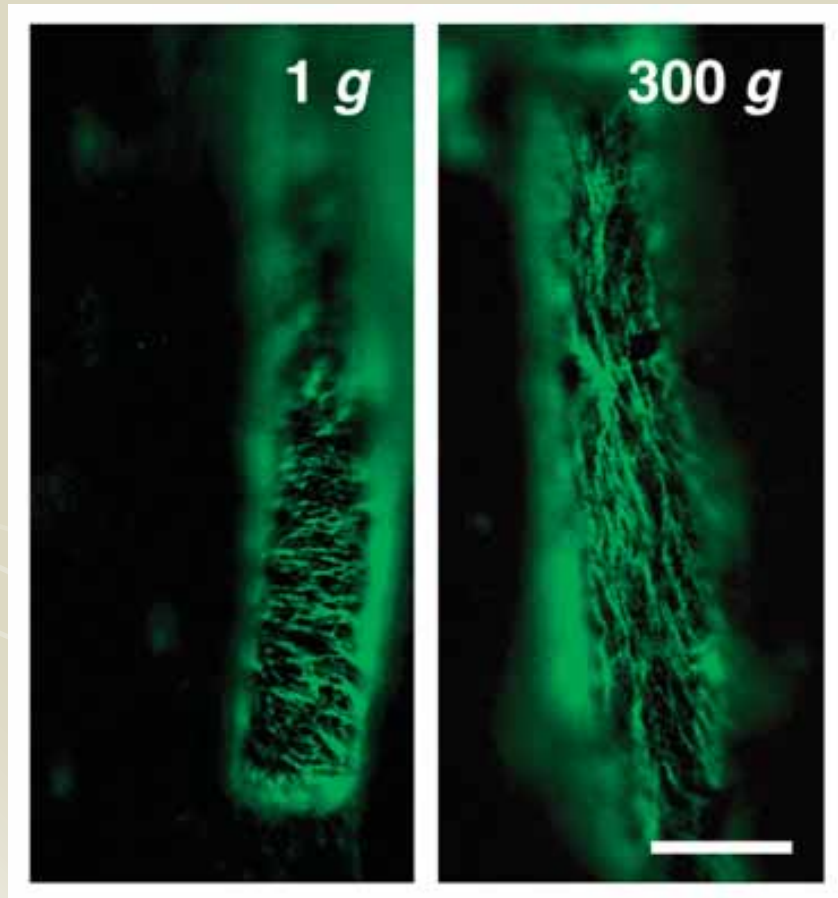


?

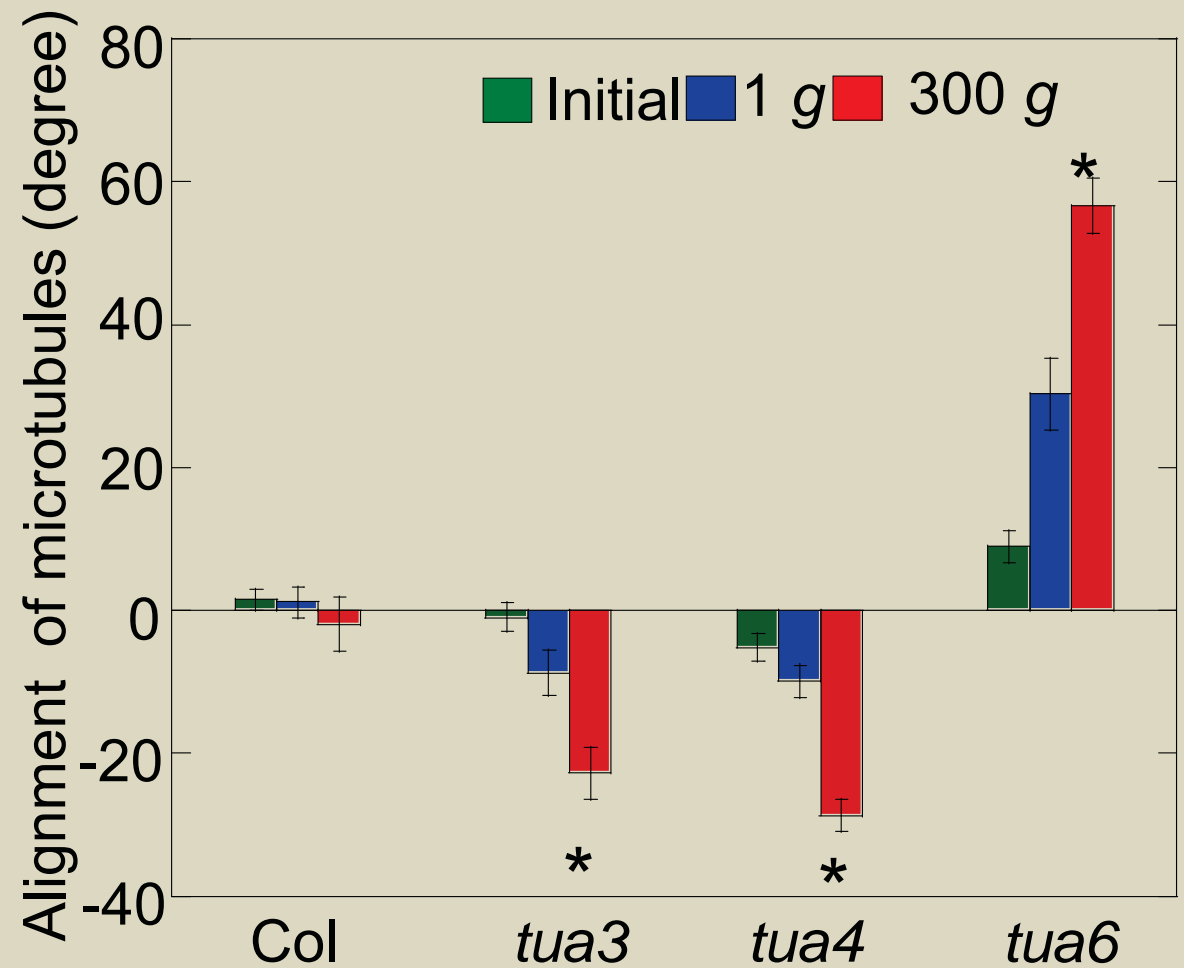
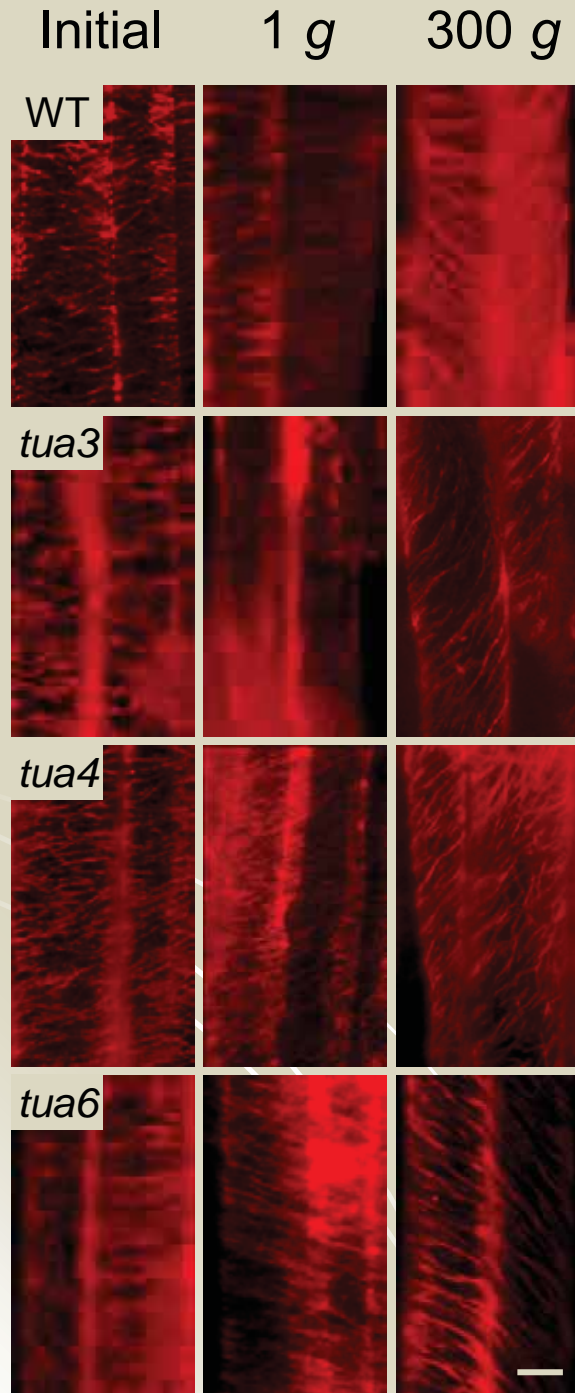
チューブリン遺伝子の発現に 対する過重力の影響



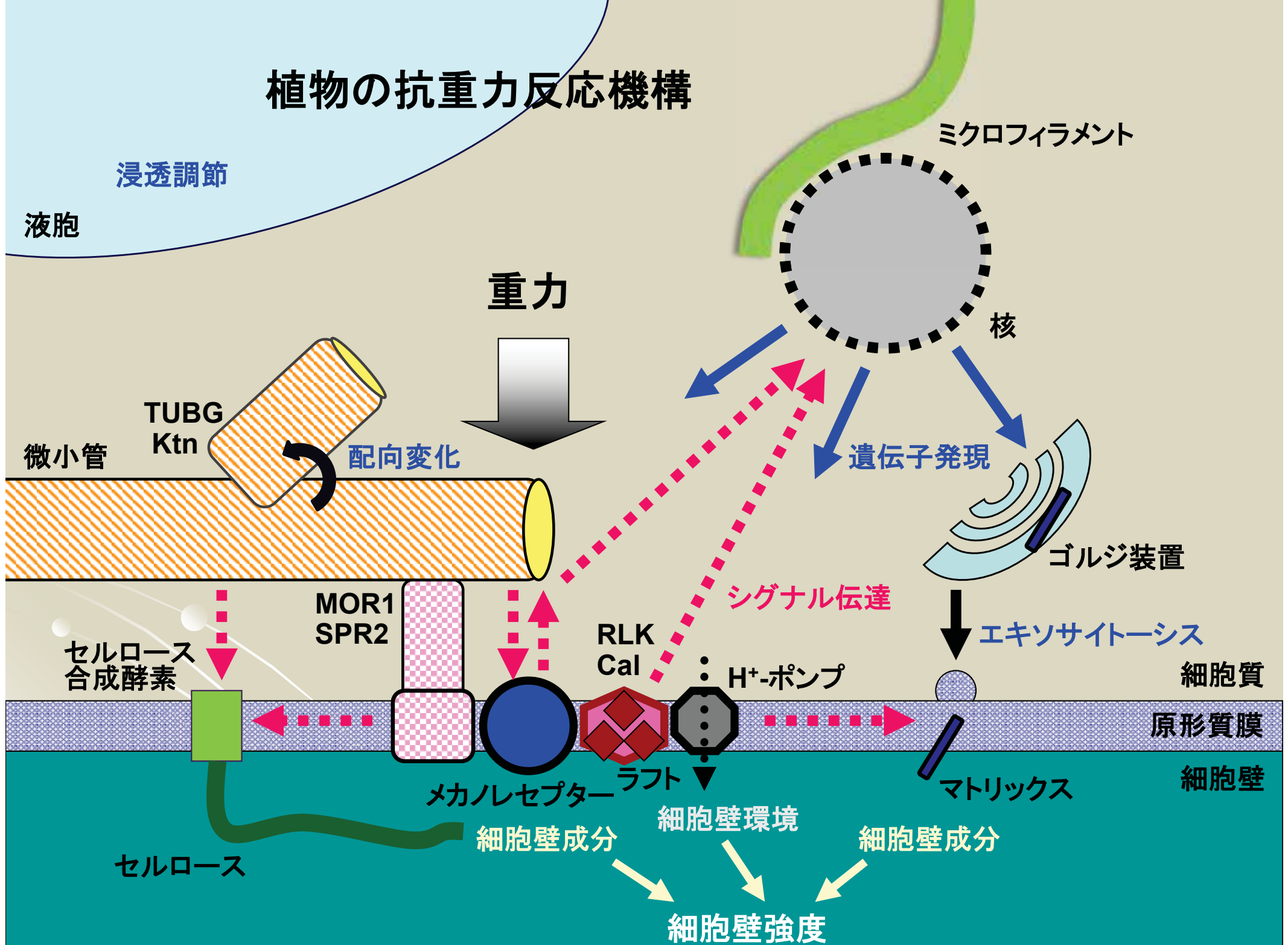
過重力刺激に反応して表層微小管が細胞長軸方向に配向し細胞を横太りさせる



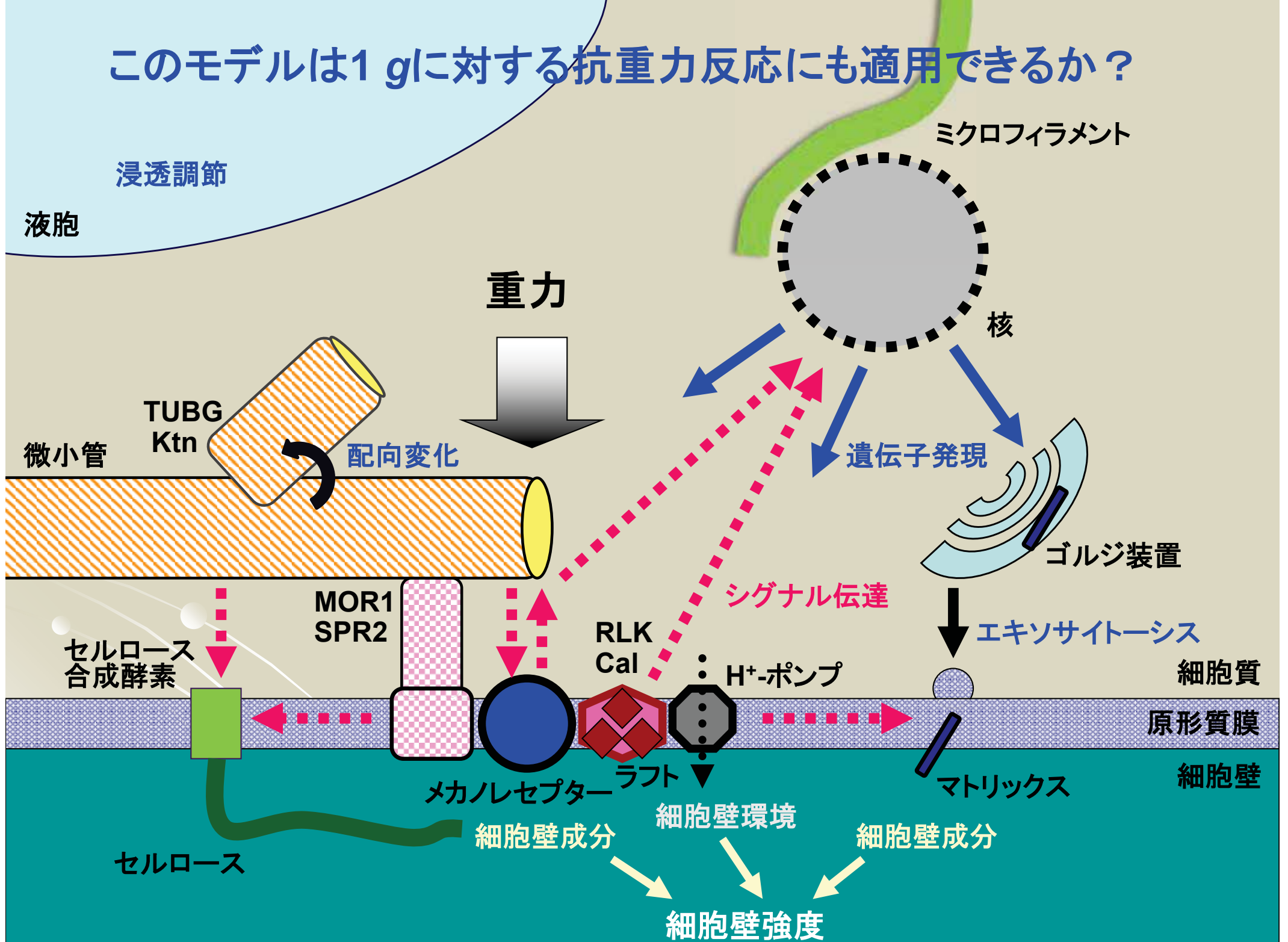
チューブリン変異体では表層微小管が傾いている



植物の抗重力反応機構



このモデルは1 gに対する抗重力反応にも適用できるか？



Resist Tubule

植物の抗重力反応機構ーシグナル変換・伝達から応答まで Mechanisms of Gravity Resistance in Plants - From Signal Transformation and Transduction to Response

目的

宇宙の微小重力環境を利用して、抗重力反応におけるシグナル変換・伝達から応答に至る機構を解明する。

仮説

1 gの重力に対する抗重力反応でも、表層微小管と膜ラフトがシグナル変換・伝達を担っており、両者の構造的、機能的な協調によって、最終的な応答としての細胞壁強度の増加が誘導される。

研究組織

研究代表者：保尊隆享

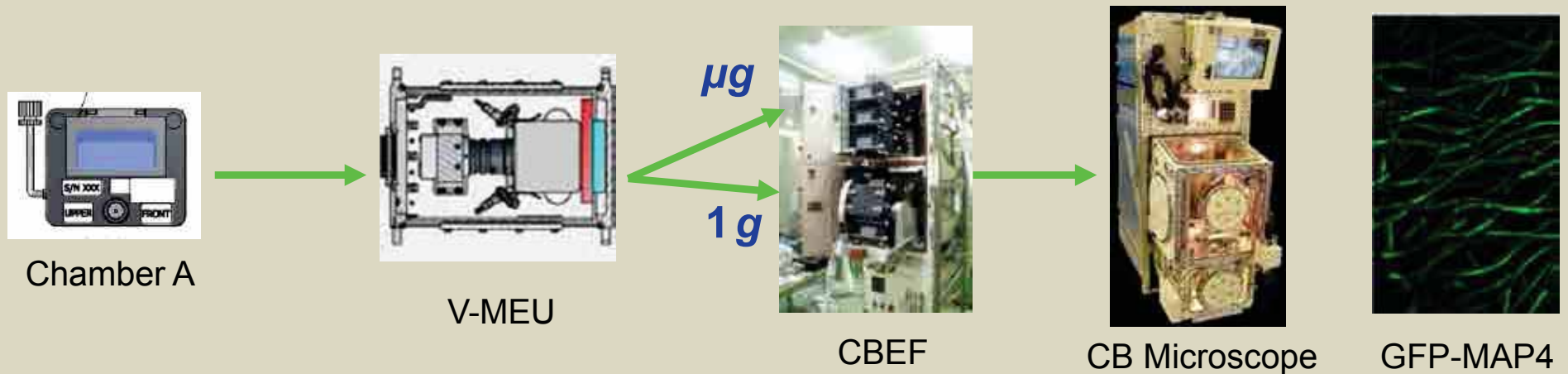
研究分担者：橋本 隆、村中俊哉、園部誠司、榊 剛、
若林和幸、曾我康一

JAXA担当者：橋本博文、東端 晃、石岡 憲昭、嶋津 徹



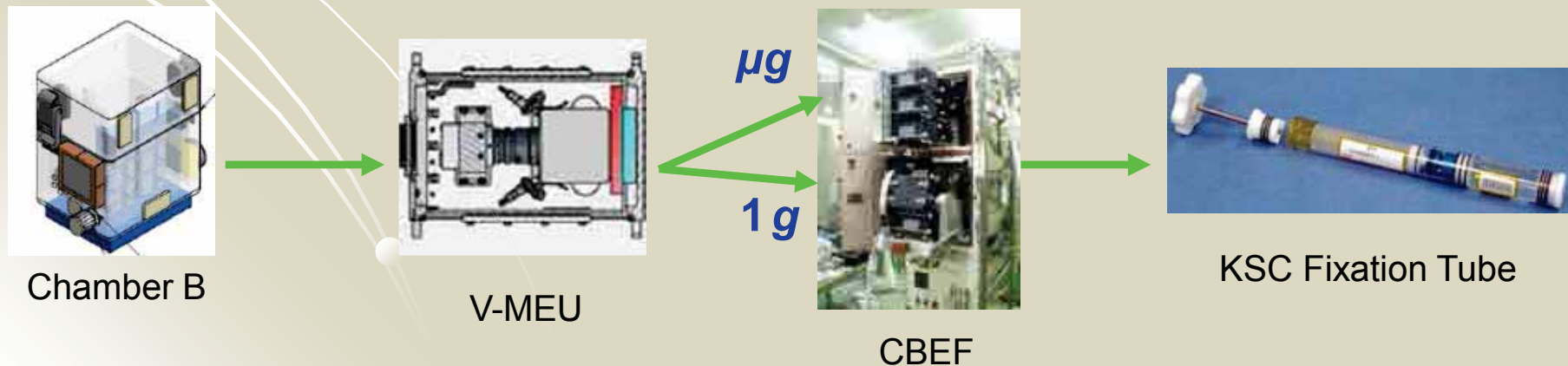
Run #1 On-site Analysis of Dynamics of Cellular Components

- ・4種のGFPラインの芽ばえを Chamber A/V-MEU/CBEF内で生育させる。
- ・表層微小管と膜ラフトの構築・配向を CB蛍光顕微鏡で観察する。



Run #2 Analysis of Cellular Components on the Ground

- ・野生型シロイヌナズナ芽ばえをChamber B/V-MEU/CBEF内で生育させる。
- ・1.5%ホルムアルデヒド+0.5%グルタルアルデヒドで固定する(KFT内)。
- ・冷蔵状態で地上に回収し、染色して観察する。



Run #3 Quantitative evaluation of roles of cortical microtubules

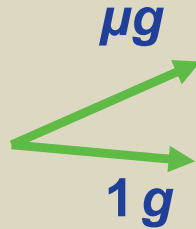
- ・形質の程度が異なるチューブリン変異体をPEU/CBEF内で生育させ、形態を観察する。
- ・32日生育させた後、RNAlater溶液で固定する(KFT内)。
- ・冷凍状態で地上に回収し、遺伝子発現の変化を解析する。



Plant Exp. Chamber



Plant Exp. Unit



CBEF



KSC Fixation Tube



チューブリン
変異体

宇宙における植物の成長:

- ・成長方向が変化する(伸長促進、肥大抑制)
- ・細胞壁代謝が変化して伸びやすくなるとともに、量的にも少なくなる
- ・微小管をはじめとする細胞構成成分の変化が、細胞壁の変化を支えている
- ・抗重力反応抑制の結果として理解される

1. 宇宙における植物の形態形成


2. 宇宙における植物の成長

3. 宇宙における植物栽培



宇宙における植物栽培：

形態や成長の変化に留意する必要がある

- ・自発的形態形成
 - ・成長方向の変化
 - ・細胞壁変化
 - ・細胞構成成分の変化
- 

- ・宇宙でも植物は生活環を完結できる
- ・宇宙での植物栽培には有利な点も不利な点もある



きぼうの船内実験装置(ライフサイエンス)



細胞培養装置



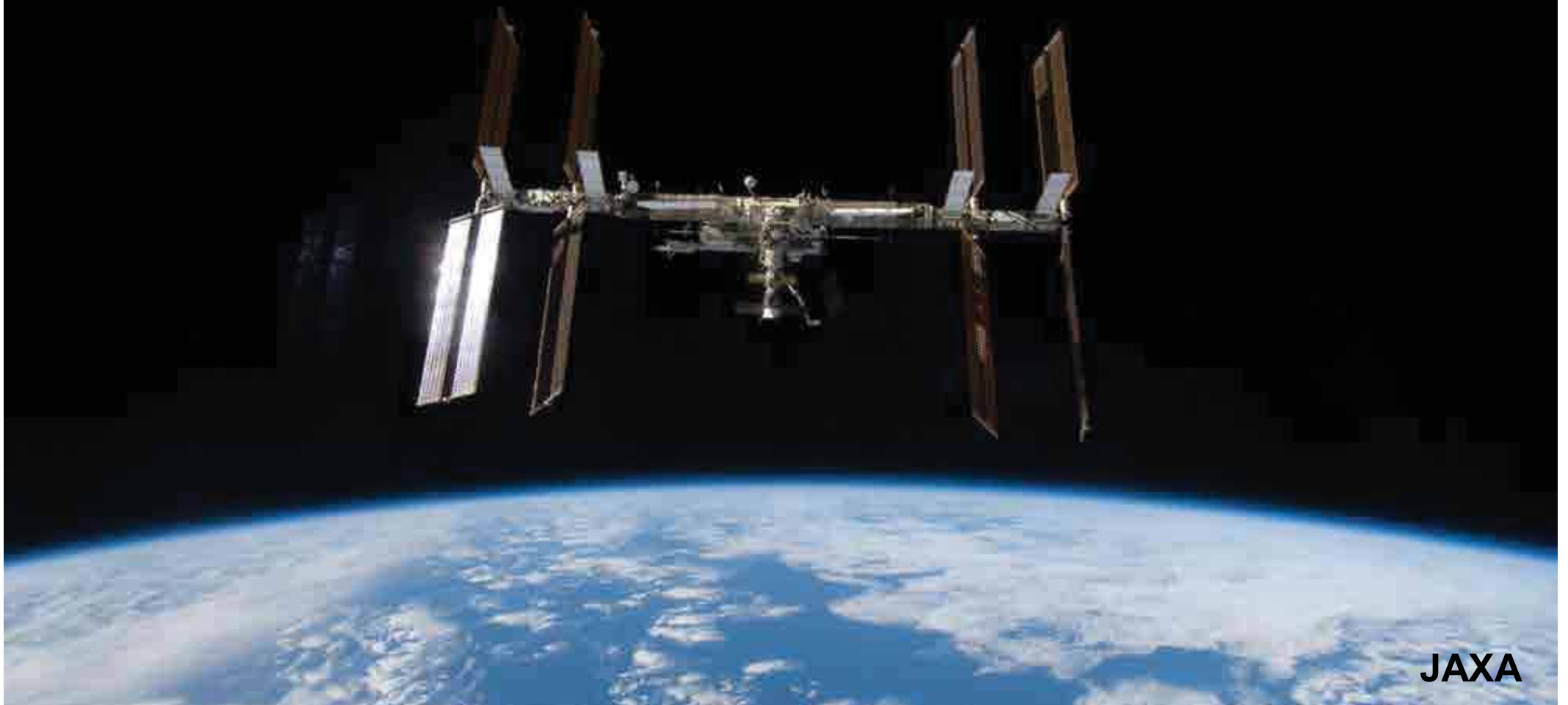
クリーンベンチ



CB顕微鏡

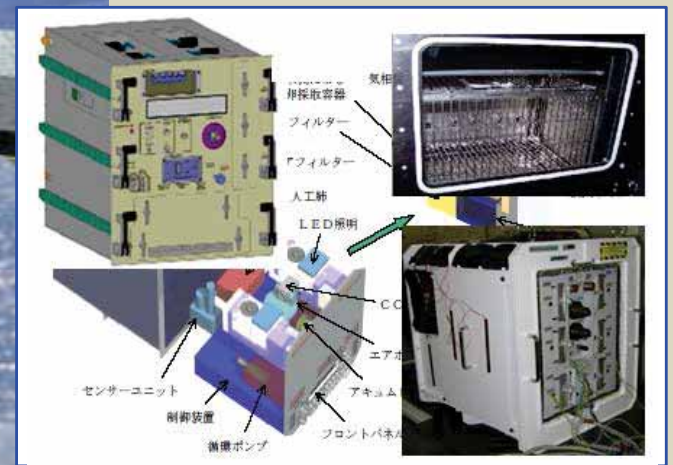
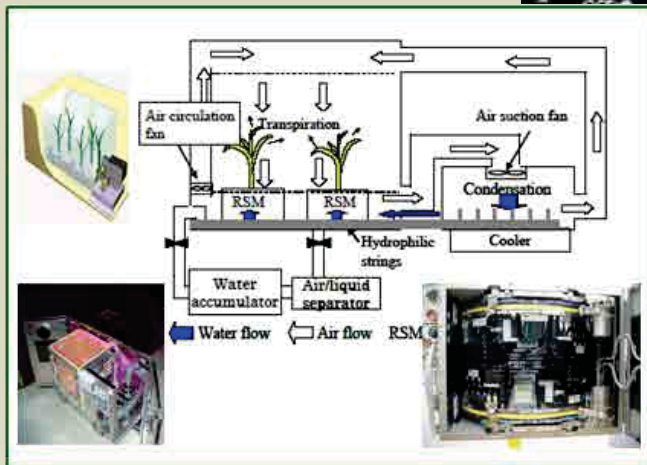
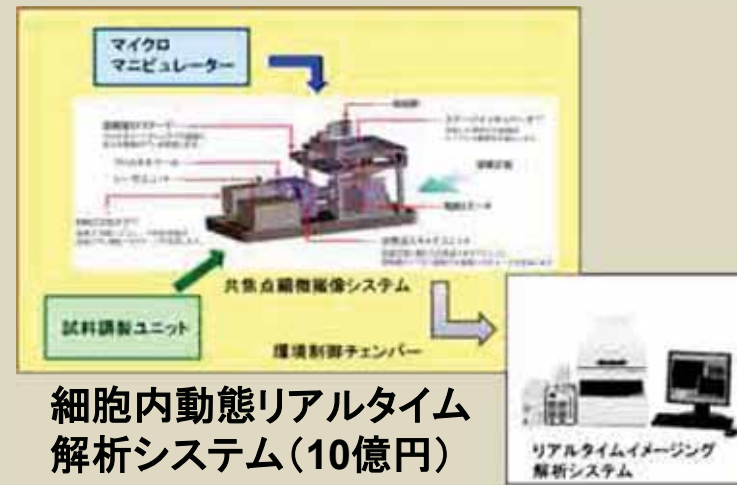
国際宇宙ステーションの現状

- ・本格的な運用開始(2008・8)。
- ・運用を2024年まで延長することが宇宙機関間で合意(2015・12)。
- ・研究設備の老朽化・陳腐化が目立つ。



研究計画の目的

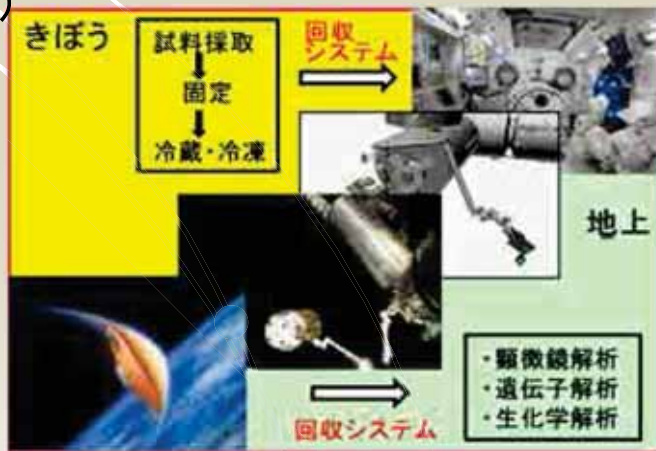
最先端生命科学研究に対応した研究設備を「きぼう」に設置し、宇宙生命科学を飛躍的に発展させる。



植物栽培制御・解析システム(15億円)

哺乳動物飼育制御・解析システム(10億円)

生物試料回収・解析統合システム(10億円)



船外実験プラットフォーム利用実験施設(25億円)

運搬・運用費(110億円)

宇宙実験の意義と応用

- 抗重力反応機構の解明
- 陸上植物の進化過程の解明
- 他の環境応答機構解明への貢献
- 宇宙環境下での植物生産の効率化
(抗重力機構の改変による「宇宙植物」の作出)
- 地球上での植物生産の効率化