

# ポストISSを見据えた現ISSの科学的利用促進 ～ライフサイエンスの立場から～

群馬大学重粒子線医学研究センター生物学部門・教授



理学博士 (京都大学)  
専門：宇宙生物学

高橋 昭久

- ・宇宙惑星居住科学連合・代表 (2021-)
- ・日本宇宙生物科学会・理事長 (2023-)
- ・日本宇宙放射線研究会・会長 (2016-)
- ・月惑星に社会を作るための勉強会・世話人 (2020-)
- ・JAXA 宇宙環境利用専門委員会・委員長 (2023-)
- ・ISS「きぼう」利用生命科学シナリオWG委員 (2011-2012)

スペースシャトル，ミール，ISS「きぼう」を利用した多数の宇宙実験に参画経験

# 地球低軌道で科学実験を行う意義・目的・成果



## 地球低軌道の利点：

アクセス・サンプル回収容易  
(装置・試料の運搬や通信の利便性)

## 特殊な環境：

無重力・高真空(良好な視野・閉鎖環境)・宇宙放射線  
\* 遠心機の利用で月・火星と同じ**低重力**環境創出可

月周回Gateway:  
輸送コスト約10倍  
年間30日のみ滞在

## 意義・目的

・宇宙環境利用

・技術実証

・**Challenge**

## 想定される成果

→ 物理・化学・生命現象の普遍性解明  
新規物質・創薬開発／地球や宇宙観測／  
安全・安心な**有人宇宙活動**の基盤確立

→ **宇宙惑星居住**の技術確立

→ **Serendipity**

脱コスパ&タイパ  
≡ 基礎研究の重要性

素敵な偶然に巡り合ったり、  
予想外のものを発見すること

「真理の探究」，「基本原理の解明」や「新たな知の発見，  
創出や蓄積」など，卓越した新たな発想を追求し，創造する  
知的活動である基礎研究における**多様性と厚み**が増加すると  
期待→独創的な研究である低軌道実験の支援が必要.

## 波及効果

地球での人類の  
生活/健康/医療/  
文化などへ還元

# 「継続は力なり」 → 日本の研究の強みに

## 小型植物

高橋秀幸

東北大 → 千葉大  
前宇宙惑星居住科学連合代表  
前日本宇宙生物科学会理事長



1998



2010



2011-4



2015

宇宙環境利用で新規の植物機能を解明し，宇宙などの特殊環境での植物栽培技術基盤を築いた!!

## 培養細胞

二川 健

徳島大  
前日本宇宙生物科学会理事長



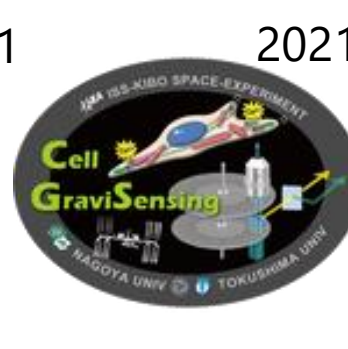
1998



2009



2021



2021-4

宇宙栄養学の礎に：無重力による筋萎縮の分子機構解明から，栄養素による予防法開発ができた!!

## 線虫

東谷篤志

東北大  
日本宇宙生物科学会理事長



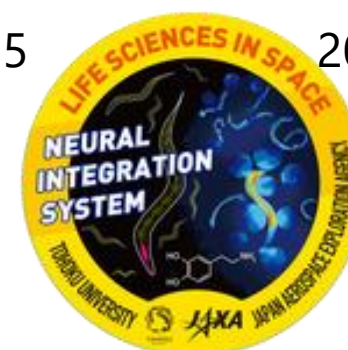
2009



2015



2015



2022

宇宙飛行士と同じく無重力は，筋，ミトコンドリア不全，エピゲノム変化，浮遊に伴う物理的刺激の低下が神経伝達物質ドーパミンの低下，加齢に伴う神経筋萎縮の亢進に繋がることを証明!!  
→ヒトをはじめ全ての生命体にとって，積極的に軽い刺激を取り入れることの重要性が再認識



# 「宇宙実験」 → 新規治療薬シーズの創出

## 培養細胞

二川 健

徳島大

前日本宇宙生物科学会理事長



2021

## 細胞培養：筋由来モデル

- 筋萎縮予防薬のスクリーニング

筋萎縮関連酵素Cbl-bユビキチンリガーゼの阻害ペプチド  
熱ショックタンパク質誘導剤Celastro

## ウロコ

鈴木信雄

金沢大



2010

## 器官培養：骨・表皮組織モデル

- 骨萎縮予防薬のスクリーニング
- 放射線防護薬のスクリーニング

メラトニン

新規化合物（トリブロモメラトニン）

## ショウジョウバエ

園下将大

北大



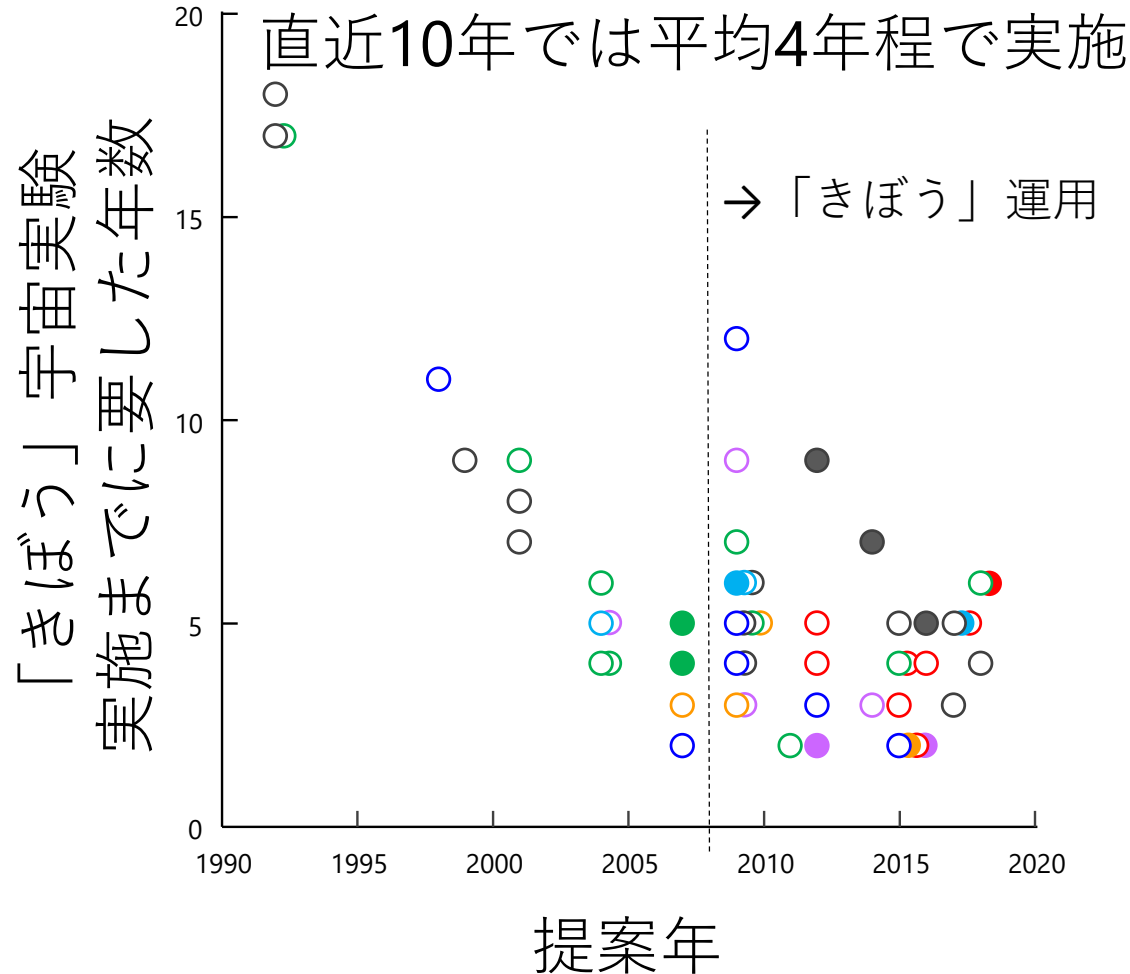
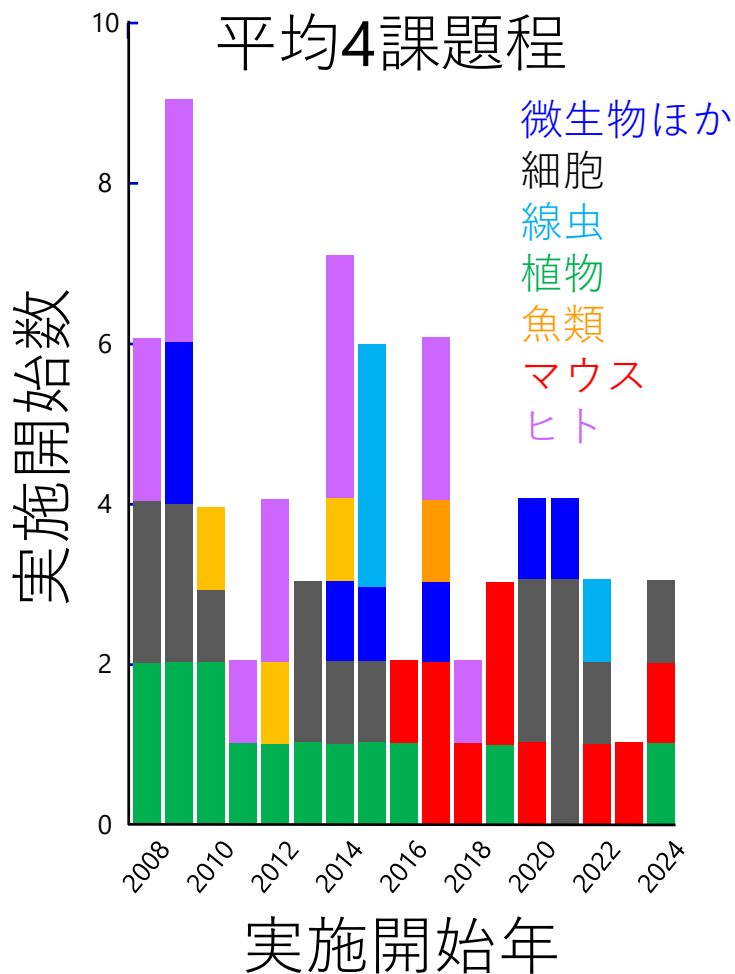
2025計画中

## 個体培養：腫瘍発生モデル

- 新規治療標的のスクリーニング
- がん治療薬のスクリーニング

→ 宇宙のみならず，地上での健康福祉にも貢献

# ISS「きぼう」ライフサイエンス分野利用状況



合計14課題（検討・準備中）

- 2課題：2018年度FSテーマ
  - 1課題：2019年度FSテーマ
  - 4課題：2020年度FSテーマ
  - 1課題：2023年度定型プロトコルによる医学系研究
  - 2課題：2023年度定型化細胞培養装置 (ASTROCELL) 技術実証
  - 4課題：2023年度船内利用フラグシップミッション
- 2027-8迄に  
完了予定

自動実験システム  
(GEMPAK)

通常ペースで  
10課題程追加募集？

技術実証：要追加  
ポストISS実験分を併行して募集開始必要？

→ Closing期間を考慮すると  
もっと少ない？

# ISS「きぼう」を使い尽くす方策

①既存の実験プラットフォームの利用により、隙間時間に宇宙実験実施可能なもの

1) これまでの宇宙実験を低重力で比較：月，火星進出に向けた基礎研究

例：微小重力でがんは進行する？

→ 予防法は？

→ 月・火星の低重力では？

海外が羨む軌道上**1G**や低重力装置が  
活かされてない！

2) 宇宙飛行士対象実験経験者により、  
条件の異なるヒト対象（性別，2回目飛行など）  
を追実験し，新たな科学的価値の創出

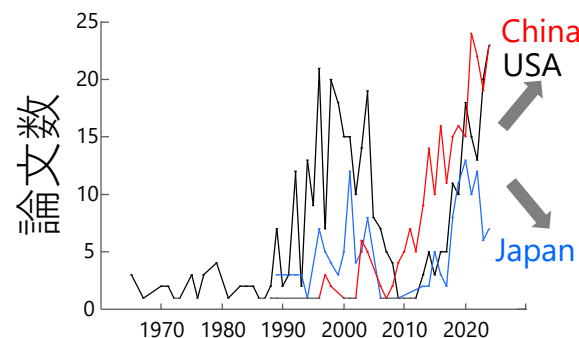
宇宙飛行士（健康な人）が，地上には無い特異な  
環境に行き変化や障害を起こし帰還後に回復する  
全過程を捉えることで医学的，科学的に大変貴重な  
知見が得られる <参考資料1>



第1回 若田宇宙飛行士  
第2回 野口宇宙飛行士  
第3回 古川宇宙飛行士

↓  
**Chance!** 大西/油井宇宙飛行士

PubMed : Microgravity & Life science & 国名で検索



3) 教育実験による次世代育成

②既存の装置をカスタマイズすることで短期準備期間で実施可能なもの

例：ショウジョウバエ容器の改良で薬物／遺伝学的ミニスクリーニング可能

\*使用・搭載可能な素材リスト公開，装置試作スキームの簡素化

③ポストISSを目指して新たな装置の技術実証

例：大型植物栽培装置 <参考資料2>

サツマイモ，ラッカセイなど→月面での効率的な食料生産

樹木→火星での再生可能資源，盆栽（芸術，文化，技術などの継承）

ポストISSを見据えたJAXA主導の研究チームづくり



# 利用拡大の方策①：新規研究機器→新たな研究の展開

Confocal Space Microscopy (COSMIC):

ライブイメージングシステム

Tele-Luminescence

Analysis System (TELLAS):

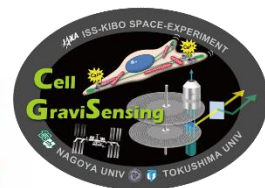
発光イメージング解析装置

Mouse Habitat Unit (MHU):  
小動物飼育装置

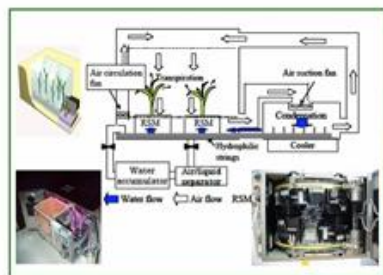
小動物ミッションから得られた  
身体の機能維持・有人探査に向けた科学知見

日本宇宙生物科学会発案

- 大型研究計画マスタープラン2011 (日本学術会議)
- 大型プロジェクトロードマップ2012 (文部科学省)
- 大型研究計画マスタープラン2014 (日本学術会議)
- 大型研究計画マスタープラン2017 (日本学術会議)



5つの大型生物飼育装置、最先端設備を「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

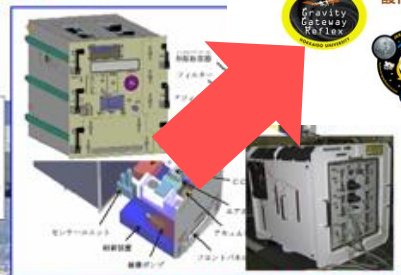
生物試料回収・解析統合システム



細胞内動態リアルタイム解析システム



哺乳動物飼育制御・解析システム



船外実験プラットフォーム利用実験施設



<https://humans-in-space.jaxa.jp/kibouser/provide/mhu/>

たんぽぽ計画



# 利用拡大の方策②：基礎研究の経済的支援



2015年度(平成27年度)  
科学研究費補助金 新学術領域研究  
(研究領域提案型)に宇宙の生命医科学研究  
に関する領域が採択

2015年以降に実施・準備中の「きぼう」  
での生命医科学領域41課題中、20課題が  
本新学術領域研究の参画者！

→ この領域のレベルアップに重要

一方、  
宇宙実験後の解析費などは支援不足



研究の質を高めるために重要

	宇宙居住の安全・安心を保证する「きぼう」船内における微生物モニタリング 科学利用(生命医科学) 微生物学	那須 正夫 大阪大谷大学	完了
	線虫を用いた宇宙環境によるエピジェネティクス 科学利用(生命医科学) 細胞生物学	東谷 篤志 東北大学	完了
	線虫Cエレガンスを用いた微小重力による筋繊維変化の解析 科学利用(生命医科学) 細胞生物学	東谷 篤志 東北大学	完了

JAXAきぼう利用テーマ：<https://humans-in-space.jaxa.jp/kibouser/subject/life/index.html>

	無重力での視力変化等に影響する頭蓋内圧の簡便な評価法の確立 科学利用(生命医科学) 医学	岩崎 賢一 日本大学	完了
	宇宙滞在中の液体生検による血漿中核酸のゲノム・エピゲノム解析～cfDNA等を用いた低侵襲体内モニタリングに向けて～ 科学利用(生命医科学) 医学	村谷 匡史 筑波大学	完了
	無重力や寝たきりによる筋萎縮の予防に有効なバイオ素材の探索 科学利用(生命医科学) 細胞生物学	二川 健 徳島大学	完了
	無重力ストレスの化学的シグナルへの変換機構の解明 科学利用(生命医科学) 細胞生物学	曾我部 正博 金沢工業大学	完了
	【MHU-3】宇宙ストレスにおける環境応答型転写因子Nrf2の役割 科学利用(生命医科学) 健康長寿研究支援	山本 雅之 東北大学	完了
	【MHU-8】JAXA-NASA共同低重力ミッション 科学利用(生命医科学) 健康長寿研究支援	日米国際研究チーム(4PI)	解析中
	ゼブラフィッシュを用いた宇宙滞在感受性遺伝子の同定とその感知機構の解明 科学利用(生命医科学) 細胞生物学	瀧原 淳子 京都大学	解析中
	宇宙微小重力・高紫外線環境ストレスに対する植物の応答解析 科学利用(生命医科学) 植物生理学	日出開 純 東北大学	実施中
	きぼう日本実験棟 船内実験室微生物環境の評価 科学利用(生命医科学) 微生物学	東端 晃 / 一條 知昭 JAXA/大阪樟蔭女子大学	実施中
	モデル生物を用いた宇宙フライトが及ぼす加齢への影響 科学利用(生命医科学) 細胞生物学	東谷 篤志 東北大学	実施中
	宇宙船内水環境微生物のオンボードモニタリング法の開発 科学利用(生命医科学) 微生物学	山崎 丘 帝京大学	実施中
	細胞の重力センシング機構の解明 科学利用(生命医科学) 細胞生物学	曾我部 正博 金沢工業大学	実施中
	長期宇宙滞在により引き起こされる耳石前庭機能障害の評価 科学利用(生命医科学) 医学	森田 啓之 岐阜大学/東海学院大学	実施中
	長期宇宙滞在がヒトの脳循環調節機能に及ぼす影響 科学利用(生命医科学) 医学	岩崎 賢一 日本大学	実施中
	【MHU-9】生体防御機能強化による宇宙ストレス克服法の開発 科学利用(生命医科学) 健康長寿研究支援	山本 雅之 東北大学	準備中
	宇宙環境による遺伝子発現制御変動の1細胞解析 科学利用(生命医科学) 医学	秋山 泰身 理化学研究所	準備中
	宇宙での微小重力環境におけるガンの進行 科学利用(生命医科学) 健康長寿研究支援	高橋 昭久 群馬大学	



# 宇宙生命科学の国際統合

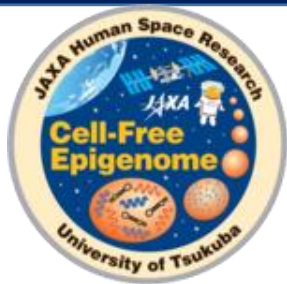
オミックス

村谷匡史

筑波大

MHUなど多くの

宇宙実験オミックス解析に関与



NASA GeneLab  
データベース  
2015-



新学術領域研究  
2015-2019



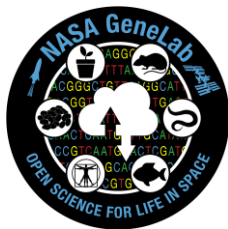
ESA  
宇宙オミックス

日米欧などの  
研究者が集結

基盤整備



宇宙オミックス標準化  
国際コンソーシアム  
産学官の連携  
村谷が共同代表者



GeneLab  
解析ワーキンググループ  
>400名のオープンサイエンス  
コミュニティー

2020年  
Cell Press  
宇宙生物学特集  
責任・共著2報

2024年  
Nature Journals  
宇宙オミックス特集  
責任・共著10報



2023年度フラグシップミッション選定  
宇宙飛行士デジタルツイン：  
iPS細胞と人工知能の応用による  
宇宙個別化医療の展開



iPS細胞, 実験ロボット分野等の強みを  
活かした日本が主導する国際共同研究

ISSの集大成の一つと  
して国際共同研究をとり  
まとめ, 科学成果の  
発信を目指す

- ISS, 民間宇宙フライトによる研究成果を統合
- オープンサイエンス時代の新しい宇宙生命科学の新しい宇宙生命科学の枠組みを国際連携で構築

# ポストISS (米国民間ステーション主体)の課題

歯がゆい！ 海外依存

民間の話題づくり？

科学がゆがめられない？

宇宙放射線の悪影響等，不都合データが抹消されない？

日本の研究者が使える？

特定企業・国による独占の懸念

Why

基礎研究者個人で支払えない！

実験実施費用は？

仲介・交渉，ドキュメント作成，  
物資の受渡，ノウハウの継承，  
支援体制は？

Who

課題  
≡不安

How

実験装置は？

ユーザーが個々に装置開発？

実験装置の設計指針や規格化？

When

Where

打上げ・回収地での実験場所？

居住空間の有効利用に加えて，

曝露露部利用も必要

機体の詳細な構造不明な商業ステーションの中  
では，宇宙放射線の線量評価の精度低下

What

実験チャンスは頻回？

提案採択から実施までの時間は？

民間の都合による強制的な

実験スケジュールの変更はない？

やりたい研究できる？

英知の流出？

こんな  
期待も...

**科学研究**：民間人を含めた人類の安全・安心な宇宙進出を支えるライフ  
サイエンスに関する研究開発を**廉価に頻回**に実施可能

**商用利用**：宇宙開発に進出する企業の開発品（飛翔体やローバー等）の  
真空，低温，高温，宇宙放射線等の環境における実証が可能

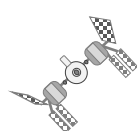
# 政府にどういったことを期待するか？

## ステーション

日本国内の民間主導  
東京大学社会連携



兼松  
業務提携



Sierra Space

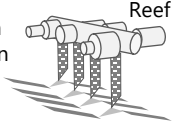
若田光一 CTO

三井物産  
資本提携



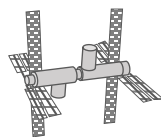
Axiom Space

三菱重工  
協業



Blue Origin

Orbital Reef



Northrop Grumman

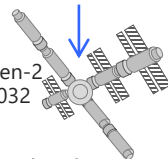


Nanoracks



Haven-1

Voyager Space → Vast Space



Haven-2  
~2032



各国（民間？）独自の  
宇宙ステーション建設

NASAと契約

無人補給船接続

三菱商事資本提携 Starlab  
Starlab Space

支援

## 人工(生物)衛星 <参考資料3,4>

地球低軌道拠点からの  
高頻度再突入・回収事業

Elevation Space <https://elevation-space.com/>

宇宙バイオ実験サービス

IDDK [https://iddk.co.jp/app-def/S-102/iddk\\_wp/](https://iddk.co.jp/app-def/S-102/iddk_wp/)

欧米多数

## 日本独自の実験室

- ・一研究者や一企業のみでは困難が予想される  
当該企業・国との交渉や、不足する費用の補助。
- ・**統一規格**：実験装置、インターフェース、  
利用者間の共同研究スキームの国際的整備

## 打上げ・回収システム

補給機の改良／開発

- ・生命維持装置搭載
  - ・「きぼう」実験装置搭載
  - ・各種ポートへの可変的な接続ユニット
- 日本製宇宙服・船外活動技術

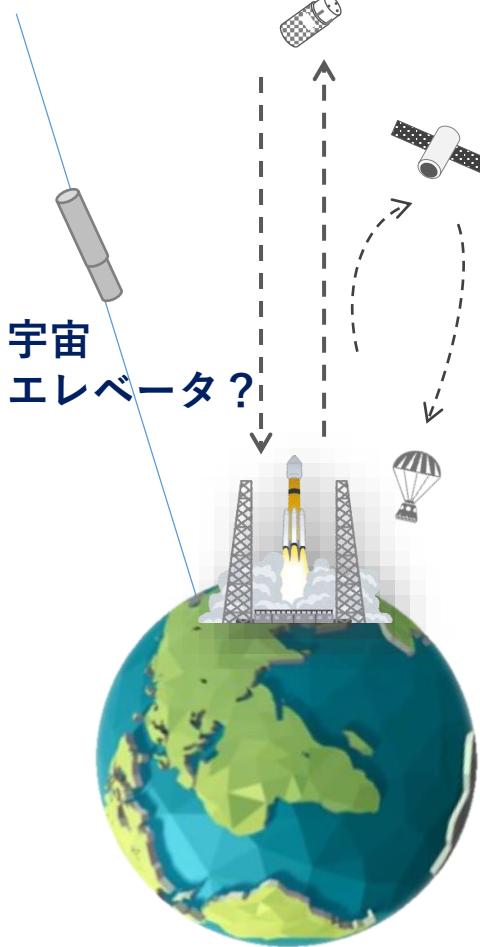
自前の往復機で打上げ頻度が上がれば  
提案から実施までの期間がより短く、  
タイムリーかつ頻繁に実験機会提供可

規格化されたコンテナで  
実験装置をフレキシブル  
に入替可能

## JAXAを主とした研究機関・大学、企業の連携

(全国宇宙共同利用研究施設構想)

→ プレゼンス向上・イニシアチブ発揮





# JAXA主導の全国宇宙共同利用研究施設構想

JAXA内にライフサイエンスの各研究部門をつくり，研究者を配置．流動的なクロスアポイントによる人材・設備の利活用，協力関係強化，新しい創案．宇宙環境模擬装置などを全国共同利用施設として活用．それぞれの施設にJAXA分室設置／民間企業との連携．

→宇宙ライフサイエンス研究・  
微小重力科学研究のプラットフォームに

京都大学

宇宙総合学研究ユニット

同志社大学

宇宙医科学研究センター

徳島大学

宇宙栄養研究センター

JAXA

調布

筑波

相模原

千葉大学

宇宙園芸研究センター

宇宙関連学協会を  
シンクタンクとして活用

日本宇宙生物科学会  
日本宇宙航空環境医学会  
日本マイクロ重力応用学会  
生態工学会  
宇宙人類学研究会  
日本宇宙放射線研究会など

\* 宇宙放射線模擬施設 (QSTなど)

陽子・中性子・重粒子線などの低線量率長期照射施設要望

東京理科大学

スペースシステム  
創造研究センター

# 宇宙環境におけるヒト医学研究の科学的的重要性

## 有人宇宙技術開発



アルテミス計画：NASA  
JAXAも参加；2022年～

## 過酷な宇宙環境

- ・微小・低・過重力
- ・宇宙放射線
- ・閉鎖環境 等々。。。



## 地上の医療との関連

### 老化の加速

※加齢対策，がん化の対応

### 極限環境医療

- ・遠隔医療、災害対応
- ・自立医療体制 等

### 科学技術の利用と展開

- ・人工知能(AI)とロボット
- ・生命科学研究(オミクス)
- ・モニタリング技術 等

## 健康管理

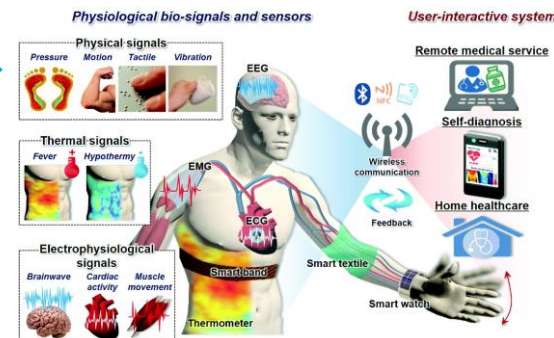
宇宙飛行士  
→宇宙機関

民間宇宙旅行者  
→民間企業・個人



データベースの構築  
ガイドラインの作成

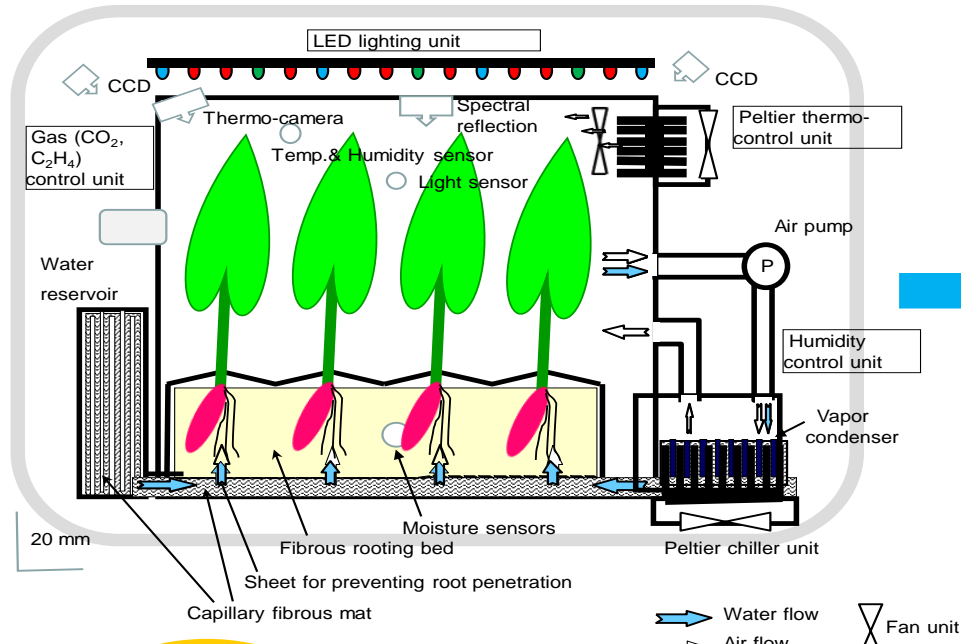
地上で得難い，希少・貴重な  
研究データの収集と蓄積



# 閉鎖生態系生命維持システムの中核となるサツマイモ生産植物工場

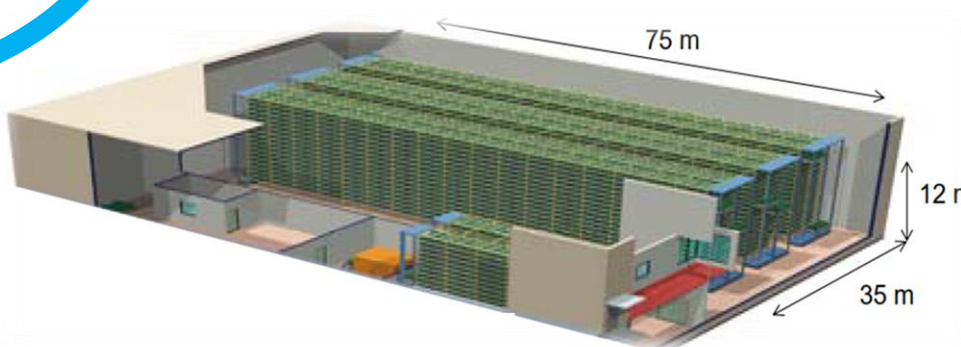
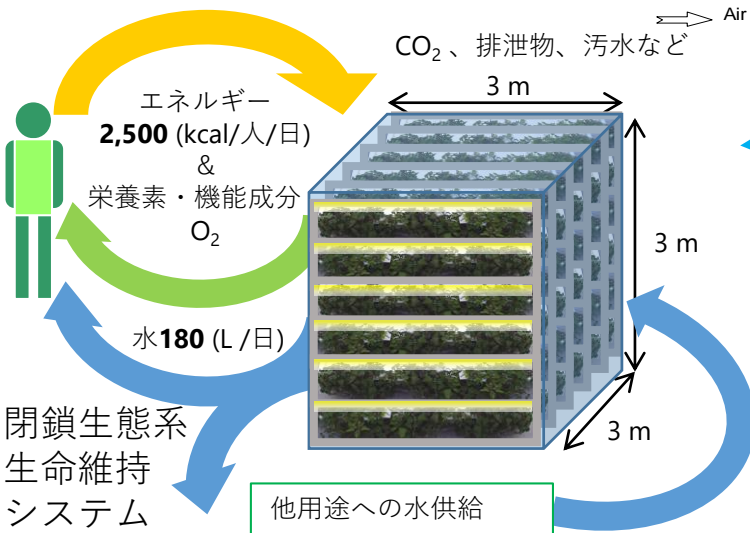
イモ, 葉, 茎も食べられる準完全栄養食材サツマイモを27 m<sup>3</sup>で栽培すれば一人の生命維持が可能

ISSでの栽培実証・宇宙環境影響解明



地上人工光下で2ヶ月栽培したサツマイモの茎葉とイモ

(PPFD: 300 mmol/m<sup>2</sup>/s, 日長: 16 h/d, CO<sub>2</sub>: 400ppm, 気温: 26°C, RH: 60%)



1,000人の生命維持を可能とする月面植物工場 (大阪公立大学植物工場実証生産施設をベースに設計)



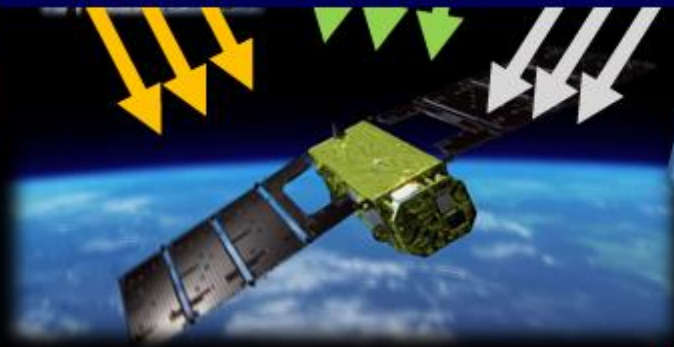
日本宇宙生物科学会

# 長期有人宇宙活動を支える宇宙生命科学研究の 基盤整備



Solar particles  
Solar UV  
Galactic cosmic rays  
Protons  
Heavy particles

Microgravity and Space radiation environment



宇宙生命科学  
宇宙工学  
宇宙理学 連携

**6U CubeSat**  
 ・打上時の基本寸法：6U  
 ・1U = 10 x 10 x 10cm

**TU BioCube**  
 ・暴露環境実験装置  
 ・1Uサイズ  
 ・標準モジュール化

© AAC Clyde Space

汎用Unit (1U) 宇宙環境曝露  
実験ユニット開発

$\mu G$

宇宙理学

## 宇宙惑星居住科学

宇宙栄養学

宇宙社会学

宇宙人文学

宇宙環境科学

宇宙医学

宇宙法学

宇宙材料学

CELSS構築

宇宙工学

宇宙開発分野での世界を先導する研究フロンティアの開拓

# 宇宙惑星居住科学のパイオニア的研究、そして新たなステージへ

## 生命科学

宇宙(居住)生物学  
 基礎生物学  
 植物工場分野  
 宇宙医学  
 宇宙栄養学

## 新興・異分野融合

汎用型 **宇宙環境曝露ユニット**の開発  
 宇宙実証・実験の機会の飛躍的増大

## 工学・理学

宇宙(居住)工学  
 衛星工学  
 材料工学  
 計測工学

分野横断・融合研究の活性化

## 人文・社会学

新研究基盤の創出

## 宇宙法学

## 分野横断による宇宙惑星居住科学研究の新領域の開拓

宇宙開発分野の活性化

宇宙ベンチャー等民間企業の参入

## 連携融合

国際連携強化

国際共同研究の加速化

➤ 世界を先導する研究フロンティアの開拓

日本から20~30年後トレンドとなる研究を発信