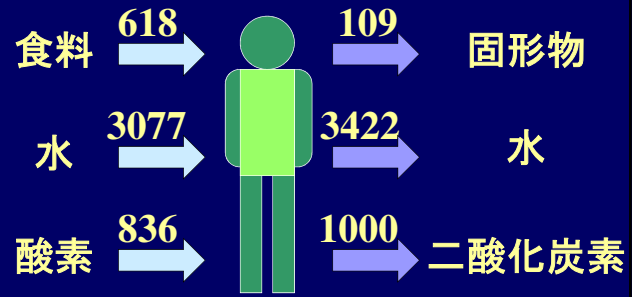


宇宙での食料生産・物質循環・健康維持 機能を担う植物システムの構築

大阪府立大学大学院
生命環境科学研究科

北宅 善昭



ヒトの平均代謝量 (Nitta, 1989より)

(g/日/人)

食料および固形物は乾燥重量

成人男性一人が通常的生活を行う場合の1日分の食料、生理代謝に必要な水、呼吸に必要な酸素の摂取量の総量は、約4.5 kgである。

また排出される物質の総量も同じである。

例えば火星への有人飛行において、3人の乗員が1.5年間生存するために必要とする必要最小限の物質の総量だけでも約7.5トンであり、さらに生活用水など生活必要物資の量を積算すると、これらすべてを地球から持って行くことは不可能である。

人間が長期にわたって宇宙船、宇宙ステーション、あるいは月や火星の基地などに滞在する場合、人間の生存に不可欠な食料の生産、空気や水の浄化、物質のリサイクルなどを行う装置が不可欠である。

このように閉鎖環境下で、人間生存環境を維持するための装置を、**閉鎖生態系生命維持システム**と呼ぶ。

閉鎖生態系生命維持システム

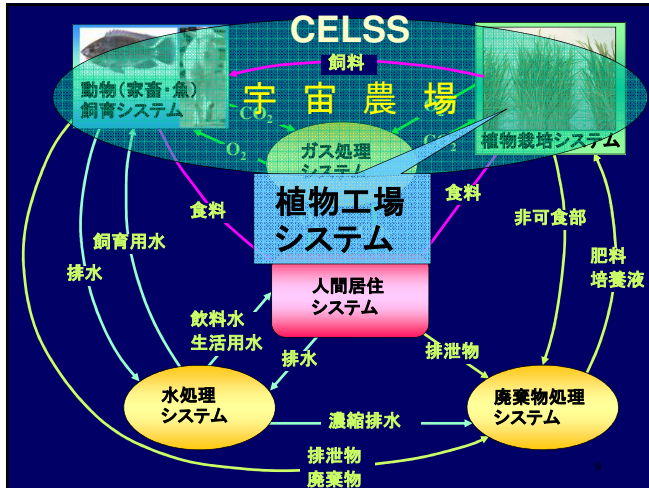
(Controlled Ecological Life Support Systems)

C E L S S
セ ル ス

宇宙農場

ECLSS

限られた空間内で
安定した高速度の物質循環のもとで
生物学および物理化学的な手法を用いて
自給自足の人間生存環境を創るシステム

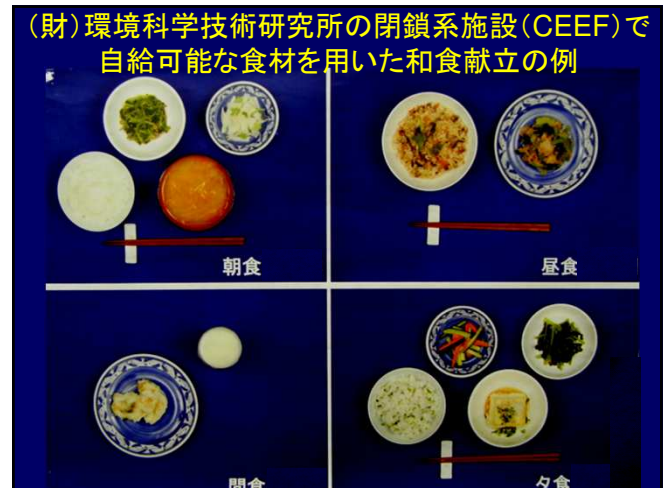
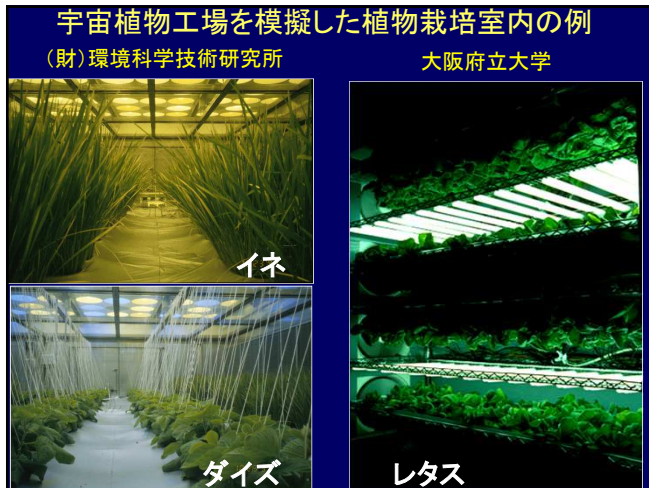


宇宙農場では、何を栽培するのか

コムギ、イネ、サツマイモ、ジャガイモ

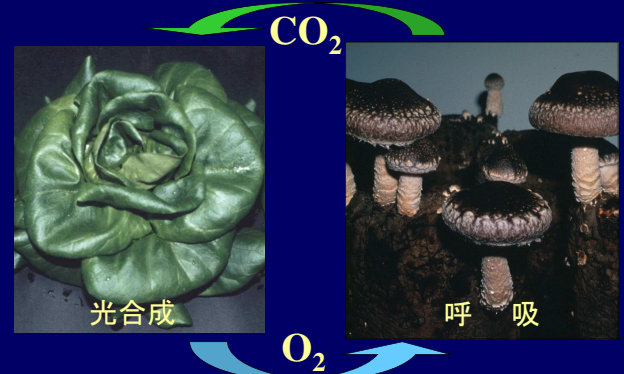
ダイズ、ピーナッツ

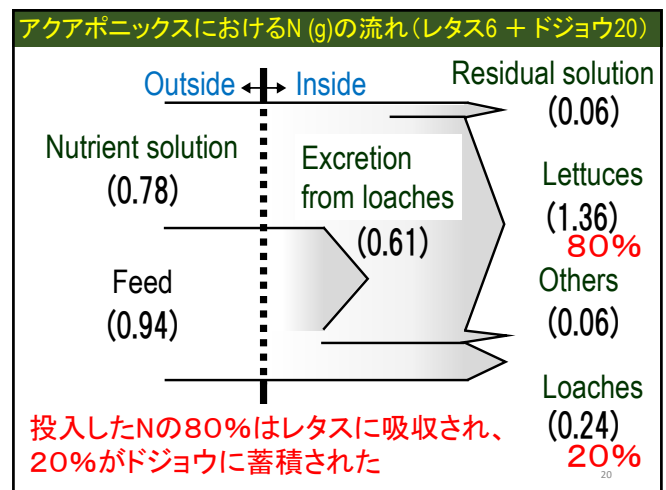
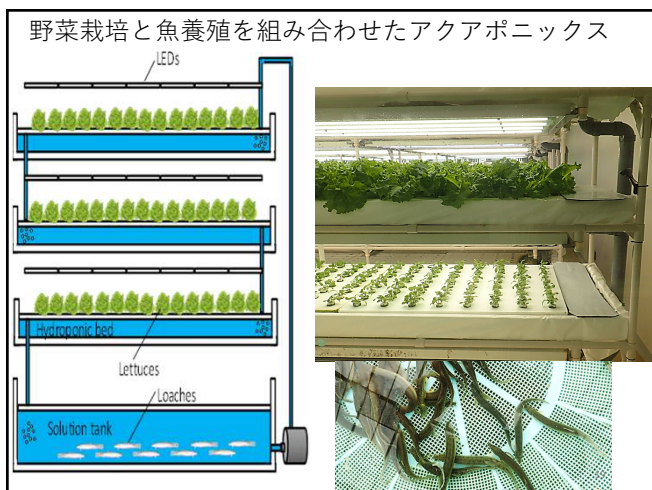
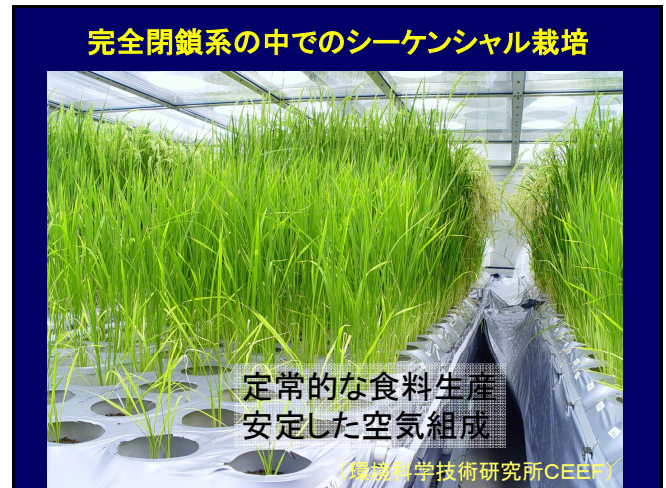
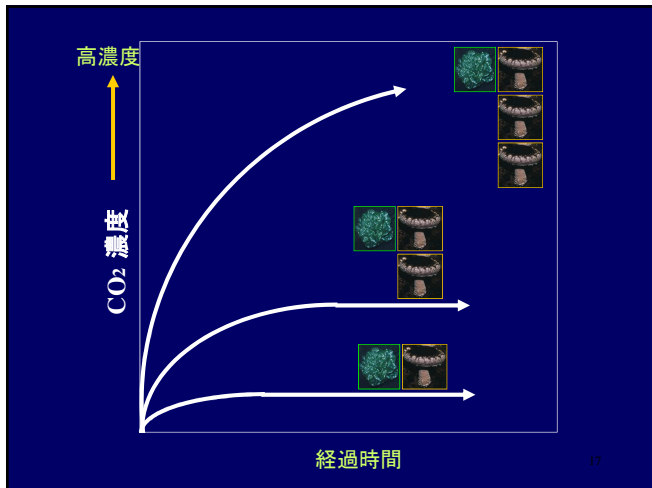
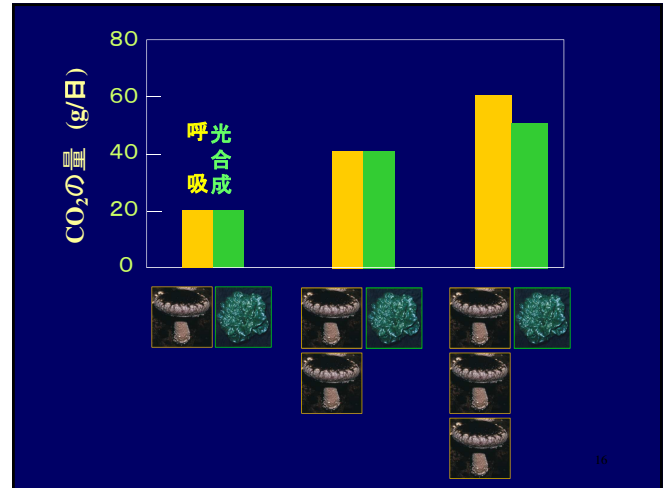
レタス、ニンジン、トマト、イチゴ、……



閉鎖系内での
物質収支の重要性

植物と従属栄養生物を組み合わせたモデル実験





物質循環のための
植物生産とティラピア養殖の複合システム

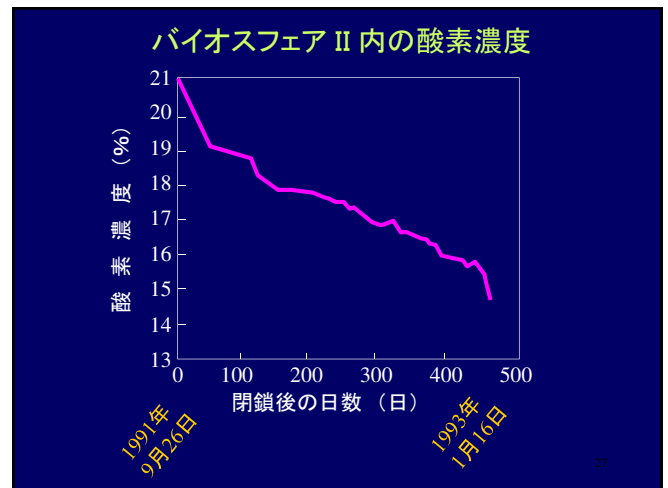
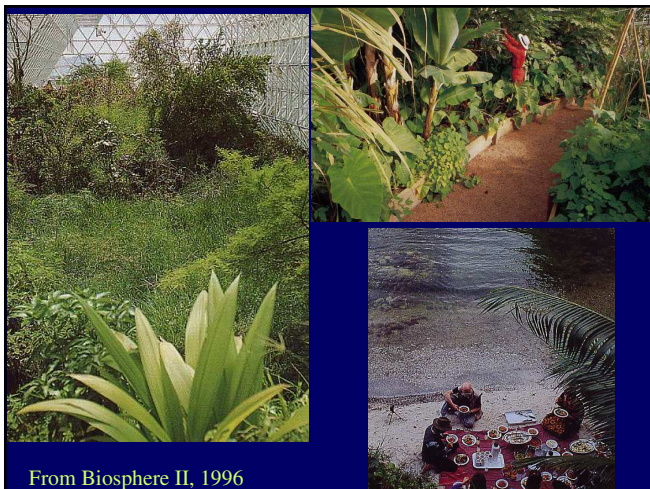
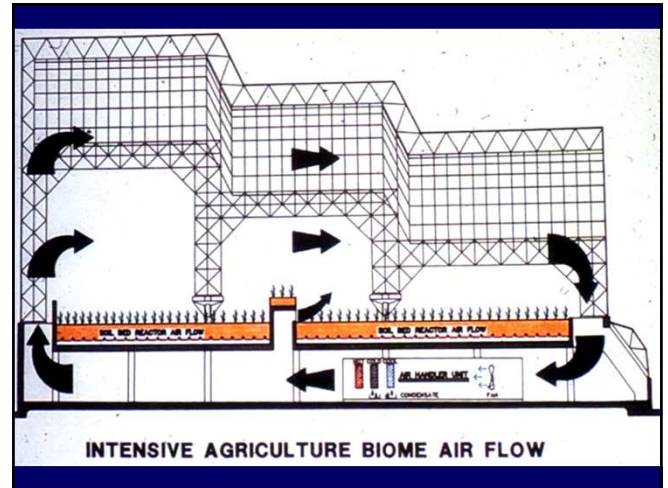
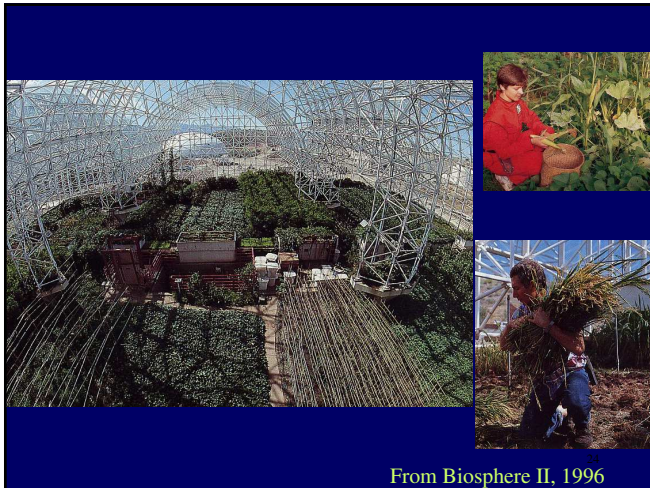


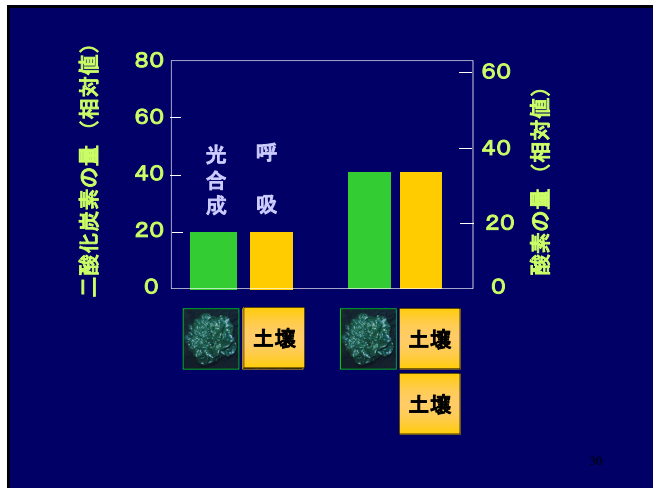
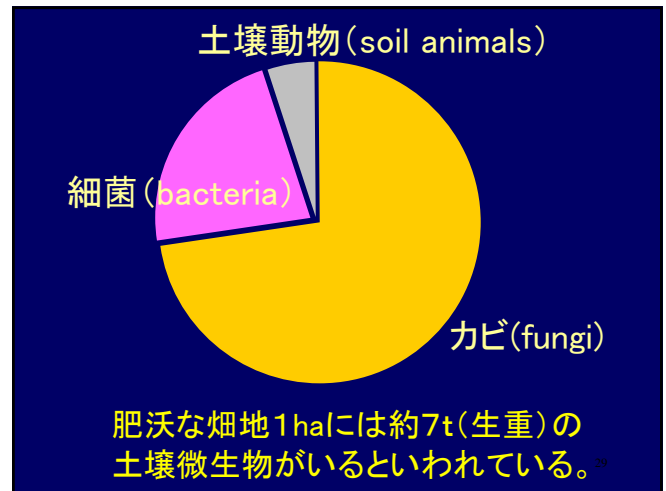
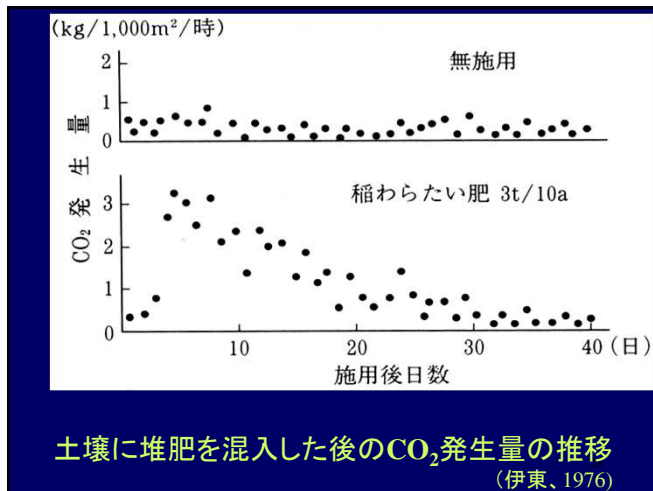
バイオスフェア II



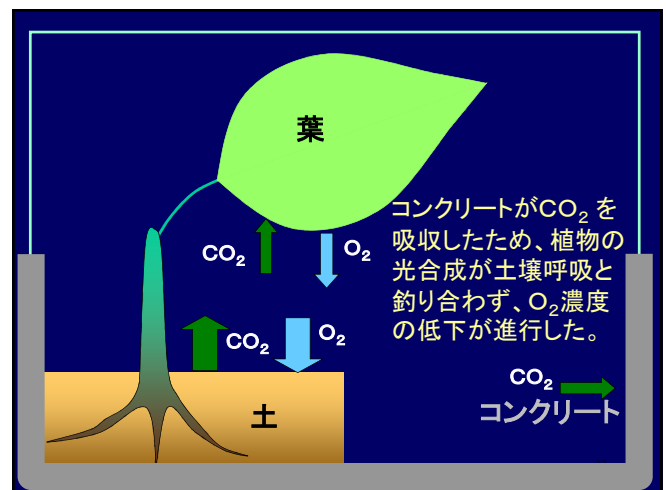
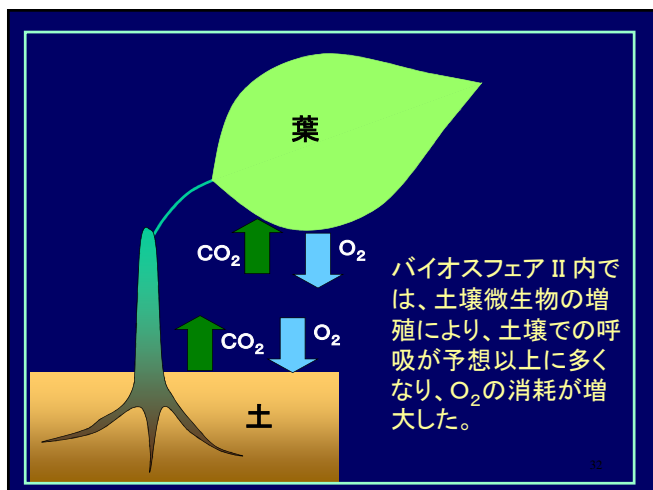
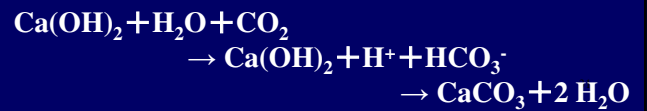
バイオスフェア＝生物圏

From Biosphere II, 1996





施設内では、様々なところでコンクリートが使われている。
このコンクリートが二酸化炭素を吸収した。



日本での閉鎖型生態系実験施設の開発

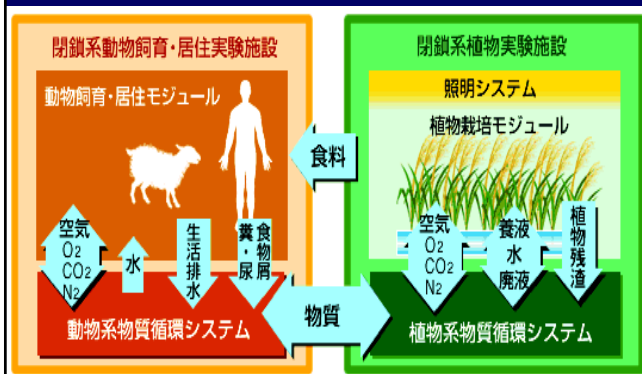
環境科学技術研究所

エネルギーと情報以外、外部との物質のやり取りを一切行わない閉鎖型生態系実験施設(ミニ地球)を開発

目 的

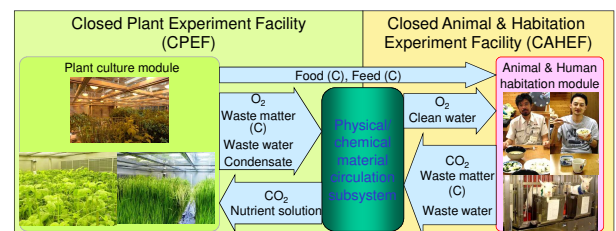
- ・ 宇宙の閉鎖環境での生命維持システムを開発する。
- ・ 閉鎖型生態系実験施設(ミニ地球)を使い、物質が生態系の中でどのような形態で循環し、蓄積されるのかについて解明する。
- ・ 自然生態系を模擬した陸と海の生態系モデルを構築し、このモデルを利用して生態系での物質循環を解明する。

宇宙農場

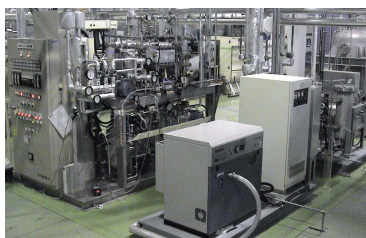


閉鎖型生態系実験施設 CEEF の概要

- ・ **閉鎖系植物実験施設 (CPEF)**
植物栽培モジュール (総栽培面積 = 150 m²) ではイネ (2つの人工光栽培室), ダイズ (1つの人工光栽培室), ラッカセイ, サトウダイコン (自然光併用型栽培室) を含む23種類の作物をシークエンス栽培
- ・ **閉鎖系動物・居住実験施設 (CAHEF)**
動物・居住モジュールではヤギ2頭 + ヒト2名 が滞在



空気処理システム



閉鎖系植物実験施設のO₂、CO₂、N₂の分離装置



閉鎖系動物・居住実験施設のCO₂分離装置

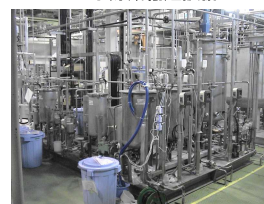
水処理システム



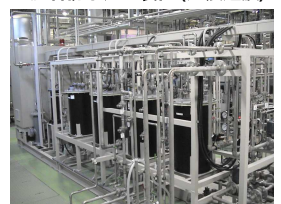
上水貯蔵輸送設備



肥料排水処理装置 (逆浸透膜)



養液調整装置



生活排水処理装置 (逆浸透膜)

廃棄物処理システム



廃棄物炭化処理装置



廃棄物燃焼処理装置



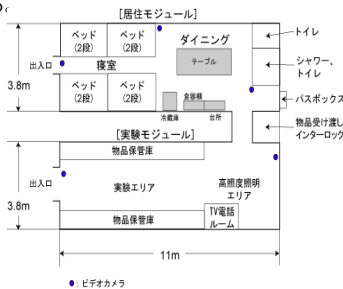
ロシア科学アカデミー生物医学研究所で2010年6月3日から約1.5年に渡って、男性6人(ロシア人3人、イタリア人、フランス人、中国人各1人)が入ったモジュール「Mars500」で有人火星探査の模擬実験が行われた。

実験は、実際の火星探査で見込まれる往路250日、復路240日、探査期間30日のスケジュールに沿って進められ、隔離環境下での心身への負担を調査した。(http://www.esa.int/SPECIAL/S/Mars500/)

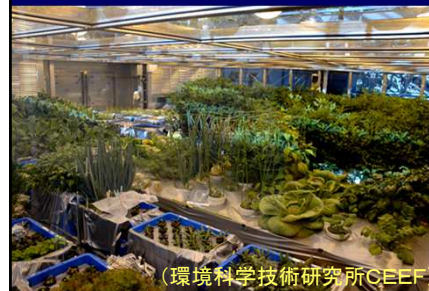
JAXA、閉鎖空間でストレス実験(<http://iss.sfo.jaxa.jp/topics/2004/041222.html>)
宇宙航空研究開発機構(JAXA)は、国際宇宙ステーション(ISS)での宇宙飛行士の心理的ストレス状態の評価手法開発を目的に、閉鎖空間環境でのストレス指標を調べる研究に乗り出す。被験者に閉鎖空間での作業や規制によるストレスを与え、血液中のタンパク質や声、表情などの変化を調べる。その中から最適な測定項目を特定し、宇宙飛行士の健康管理手法の開発につなげる。将来、ISSだけでなく長期の宇宙滞在にも適用できる手法としても使える。筑波宇宙センター内の閉鎖環境適応訓練設備を利用する。1回目の実験被験者として健康な成人男性8人を選抜し、2016年から2週間閉鎖実験を実施する。



筑波宇宙センター内にある閉鎖環境適応訓練設備(2015/12/28 JAXA提供)



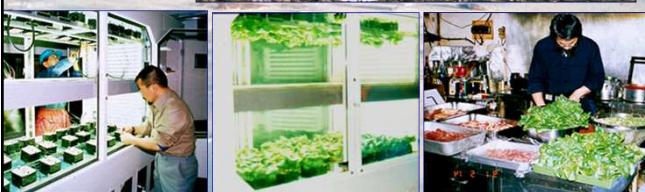
植物栽培の心理的効果 宇宙閉鎖空間でのガーデニング



- ・生鮮野菜
- ・香り
- ・色
- ・育てる喜び
- ・明るい照明
(概日リズムの維持)

(環境科学技術研究所 CEEF)

南極 昭和基地



野菜栽培装置

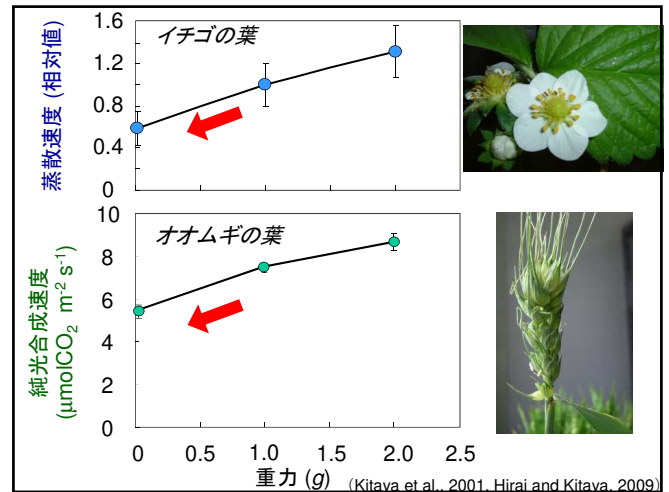
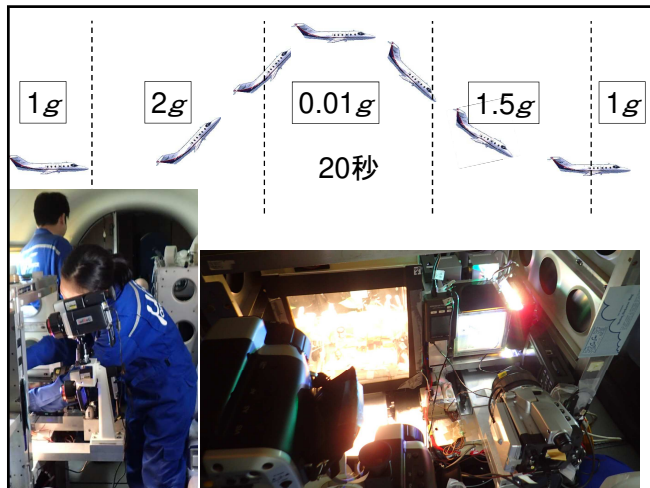
開発:大阪府立大学・ヤンマー・松下電器(現パナソニック) 1992年

低重力下での植物の成長

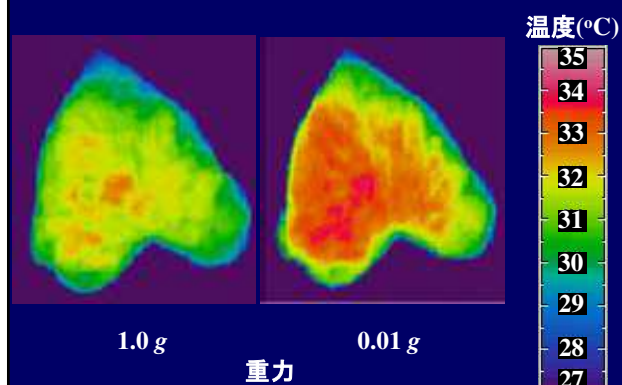
微小重力の影響を推測するための
地上での逆さ吊り下げ栽培実験



微小重力下では、葉でのガス交換が抑制される



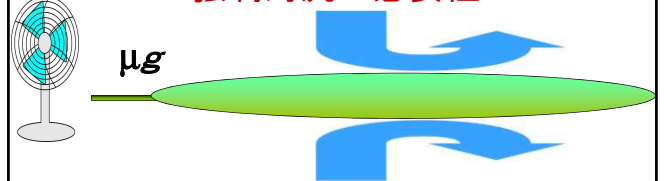
微小重力下でのサツマイモ葉の温度上昇

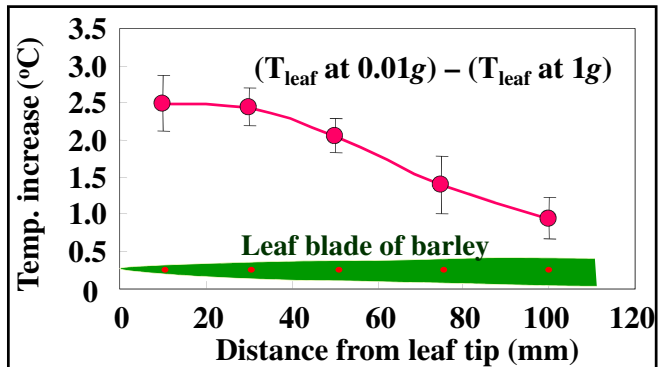
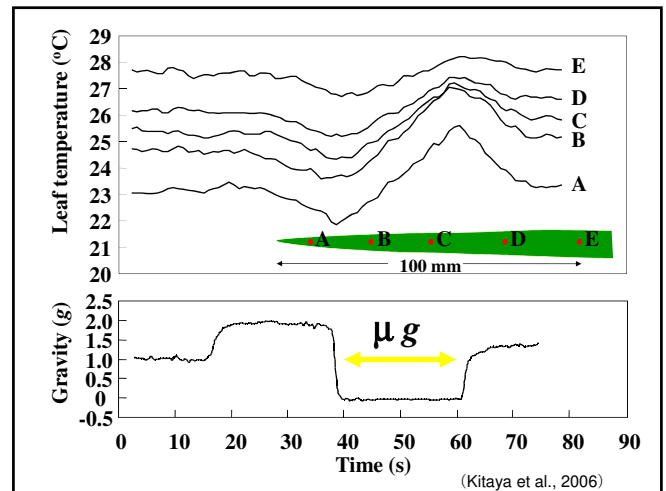
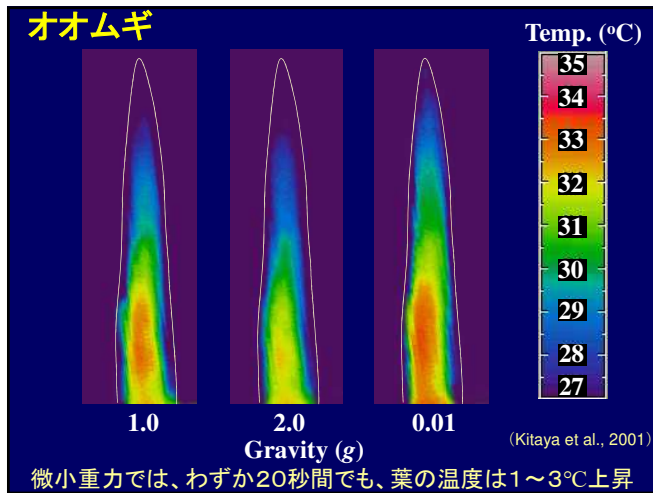


密度差対流の抑制



強制対流が必要





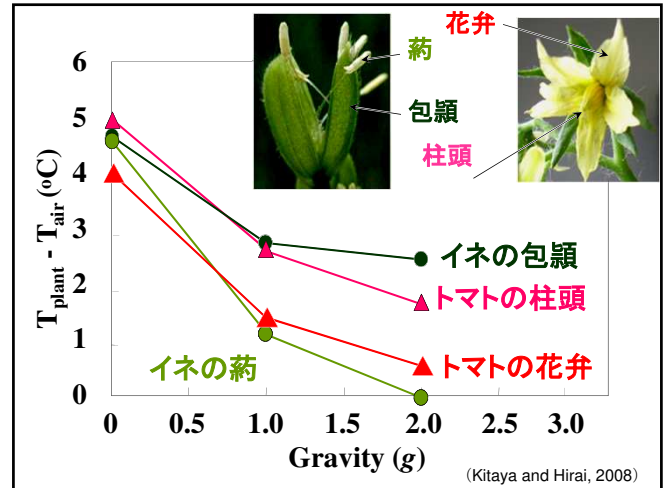
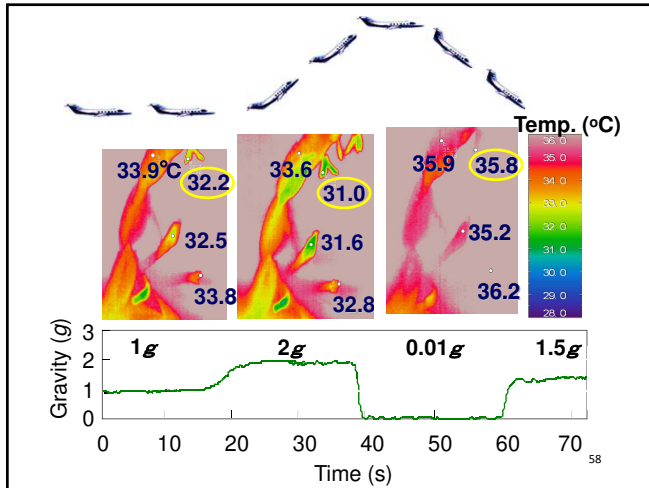
微小重力下での温度上昇は、
葉の先端ほど著しい。

植物生殖器官の温度に及ぼす
重力の影響

95



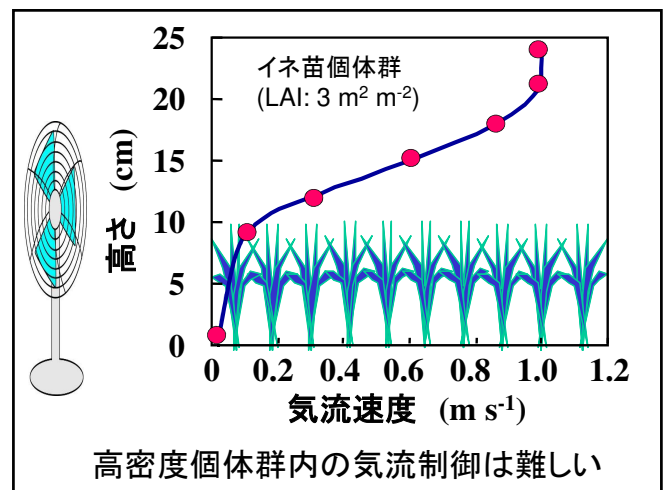
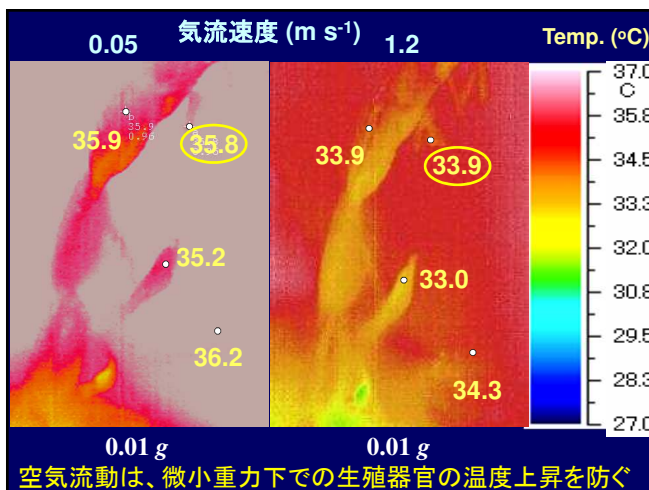
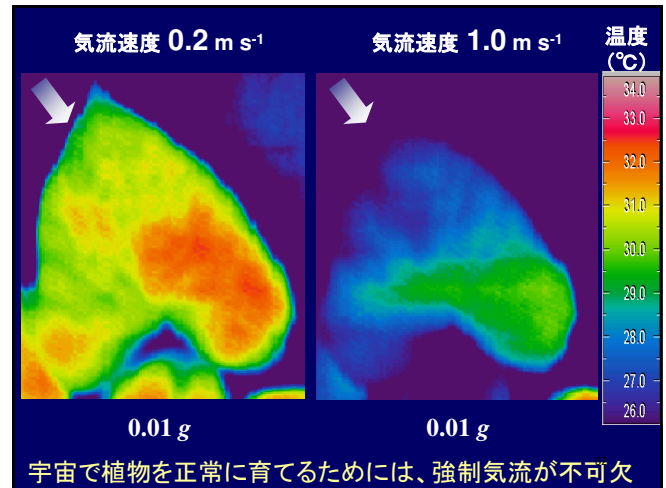
97

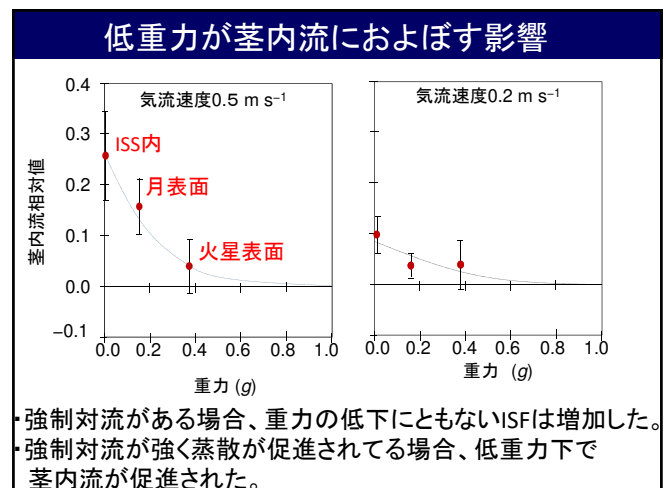
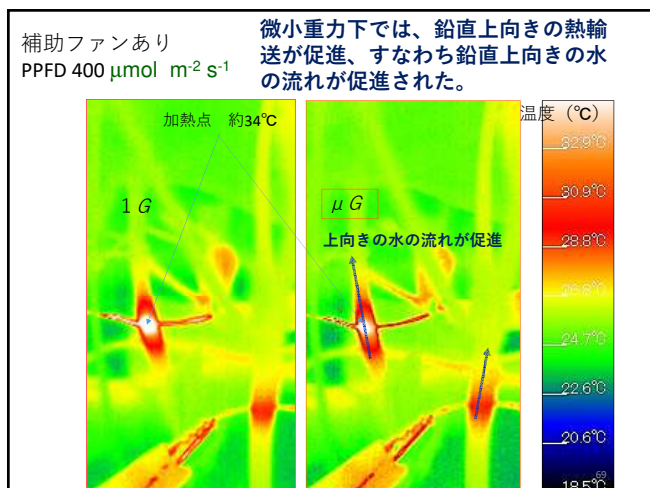
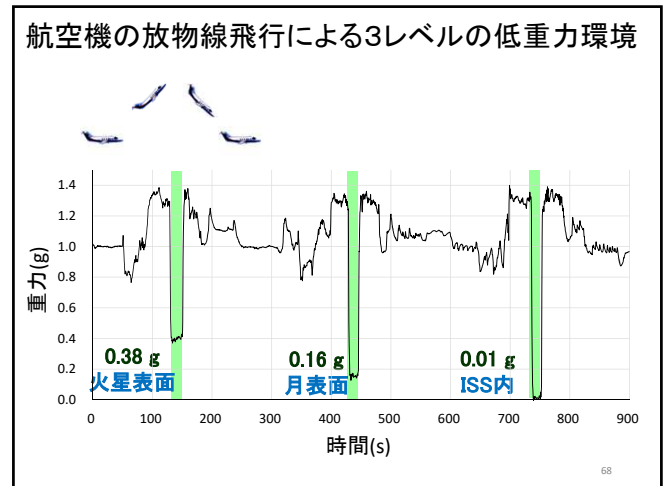
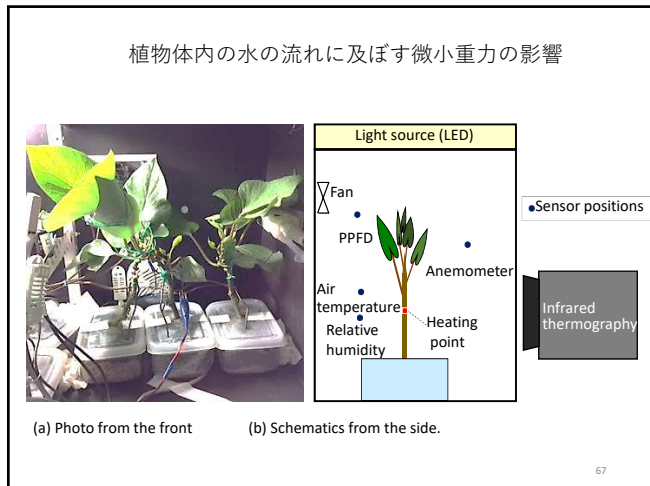
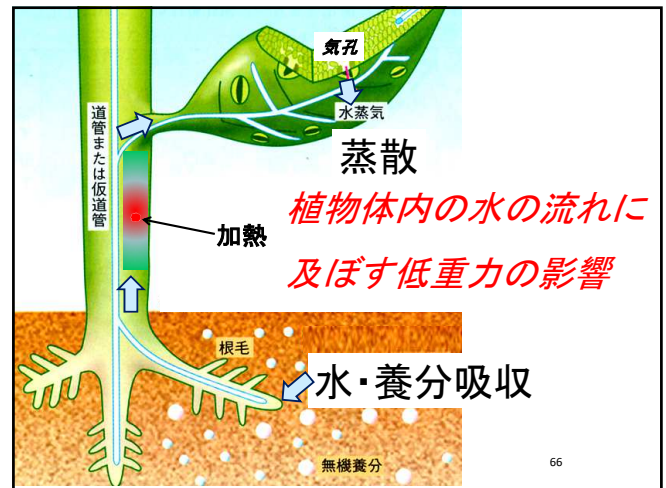
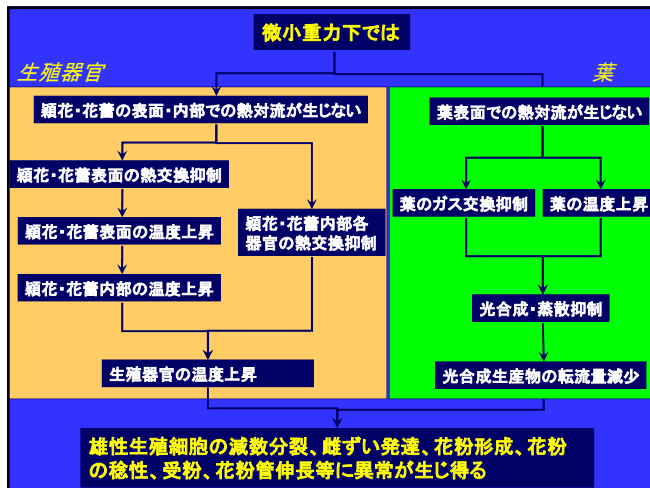


地上研究での 高温 (30-33°C)による生殖異常の例

- ・ オオムギのオシベの初期発育及び分化は、高温 (昼温30°C / 夜温25°C) に対する感受性が高く、遺伝子発現の異常を引き起こす。
(Abiko et al., 2005)
- ・ ピーマンの受粉は、高温 (33°C) で不良となる。
(Erickson and Markhart, 2002)

60





宇宙でのCELSSにおける植物栽培では、特に以下の点に留意が必要である。

- ・光合成と呼吸のバランス
 - ・光合成を促進し、熱負荷を軽減する光源、光照射方法
 - ・最適な気流制御
 - ・重力に依存しない給水方法
 - ・植物に障害を与える微量有害ガスの除去
- e.t.c.



White potato
(NASA)



Sweetpotato
(Osaka Pref. Univ.)

なぜサツマイモなのか？

生殖成長を経ない食料生産、栽培管理の容易さ、栄養価、可食部バイオマス分配、成長速度、遺伝形質の多様性などの観点から、サツマイモが最有力候補となる。

73

サツマイモ品種間のバリエーション



品種展示 (御前崎市食文化さつまいもサミット)



農水省作物研究所 品種保存圃場

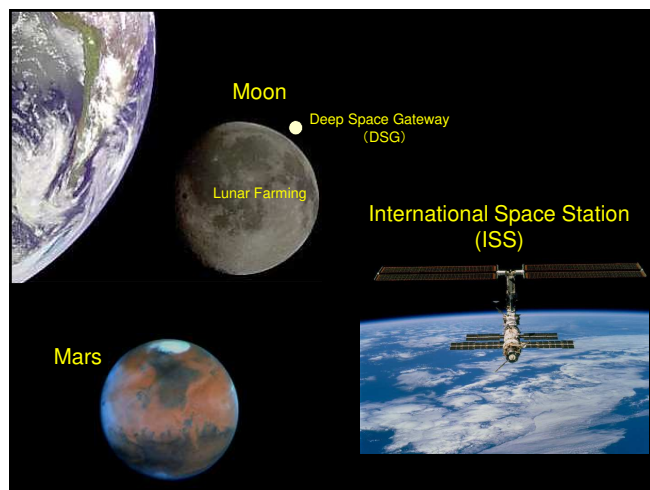
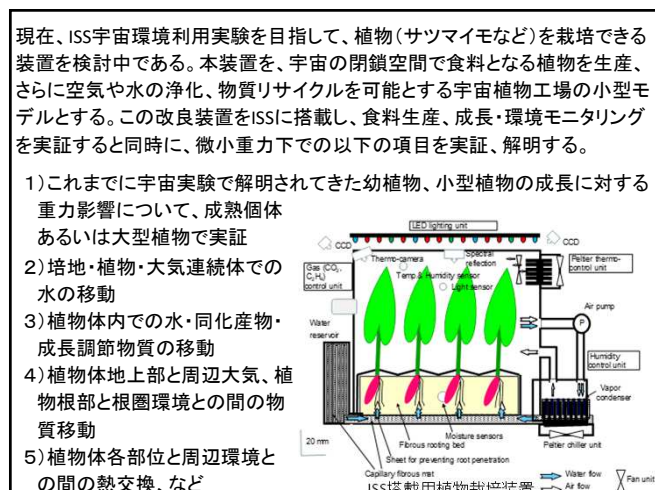
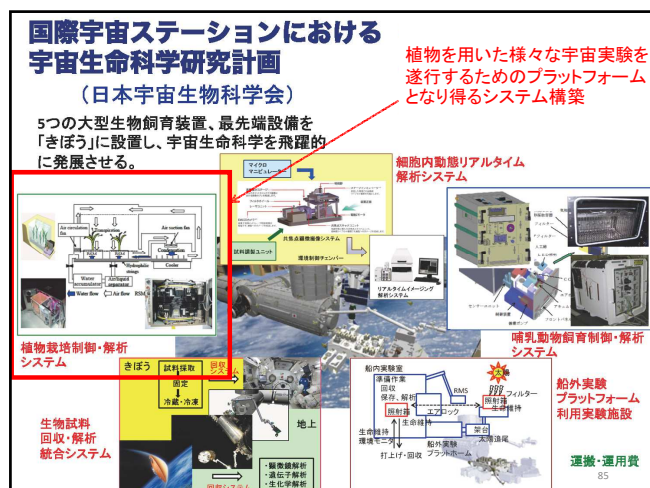
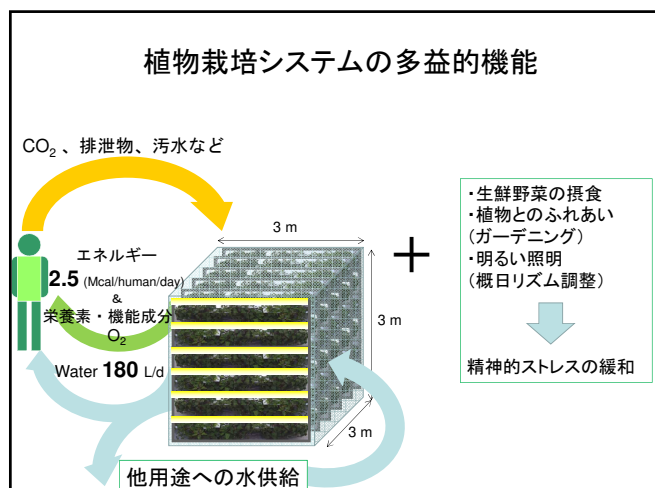
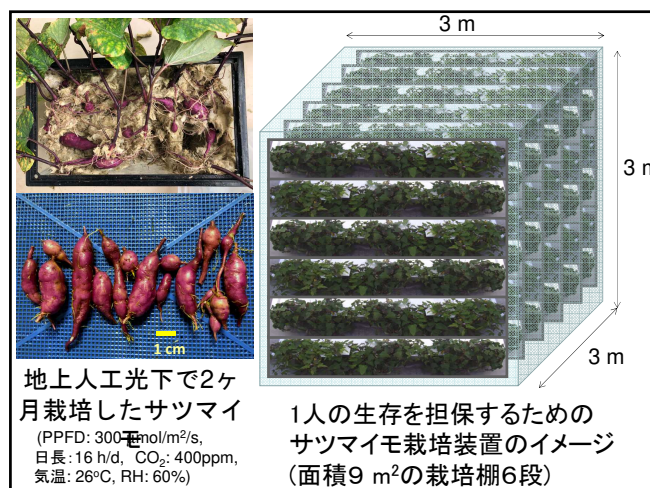
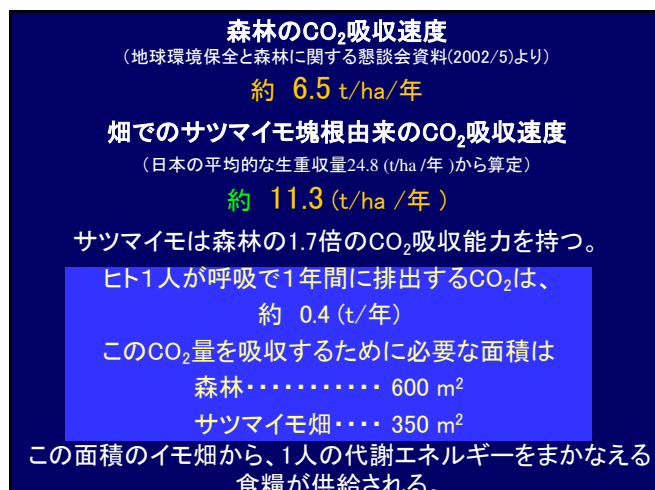
75

可食部の栄養価 (per 100 g fresh weight)

Crop plants	Fe (mg)	P (mg)	Ascorbic Acid (mg) Vc	β-Carotene (mg) Va	α-Tocopherol (mg) Ve	Vitamin K (mg)
Tuberous root of sweetpotato	0.7	46	29	23	1.6	(0)
White potato	0.4	40	35	-	Tr	Tr
Rice	2.1	290	(0)	1	1.2	(0)
Wheat	3.2	350	(0)	-	1.2	(0)
Soybean	9.4	580	Tr	6	1.8	18
Peanut	1.6	380	(0)	-	10.1	Tr
Leaf & petiole of sweetpotato	2.0	(44)	31	9400	4.3	1016
Leaf Lettuce	1.0	41	21	2300	1.3	160
Cabbage	0.3	27	41	49	0.1	78
Spinach	2.0	47	35	4200	2.1	270

From standard tables of food composition in Japan 2010, and
<https://www.naro.affrc.go.jp/project/results/laboratory/karc/2002/konarc02-10.html>

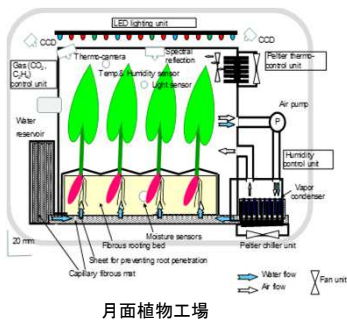
76



月面全自動無人植物工場のDSGからの遠隔管理実証および月面宇宙環境の植物影響評価実験

目的: CELSSの中核となる宇宙植物工場での食料生産の実証および月面宇宙環境の植物影響説明

- ・月面極域に全自動無人宇宙植物工場試験装置を設置する。DSG内で、生育状況、環境制御状況をモニタリングし、状況に応じて、DSGから環境制御を行う。
- ・ITによる遠隔管理農業技術を先鋭化し、完全リモート栽培管理を行う。
- ・月面での電力は太陽電池とする。
- ・植物工場試験装置は、地球上で完全に組み立ててから、月面に輸送する。
- ・カロリー源、機能性野菜として有望なサツマイモの単節をアルギン酸マイクロカプセルに封入した人工種子を開発する。
- ・月面設置後にDSGからの指令で、サツマイモ人工種子に給水し、発芽、育成を開始する。
- ・収穫物(可食部を含む全植物体)はDSGに搬送し解析後、詳細科学解析用サンプルを地球に搬送する。

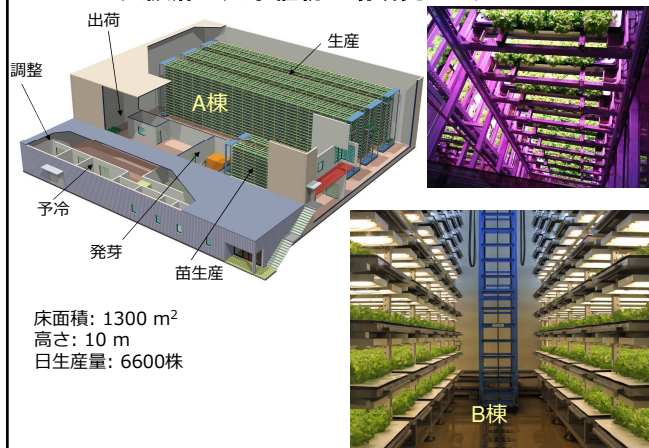


月面植物工場

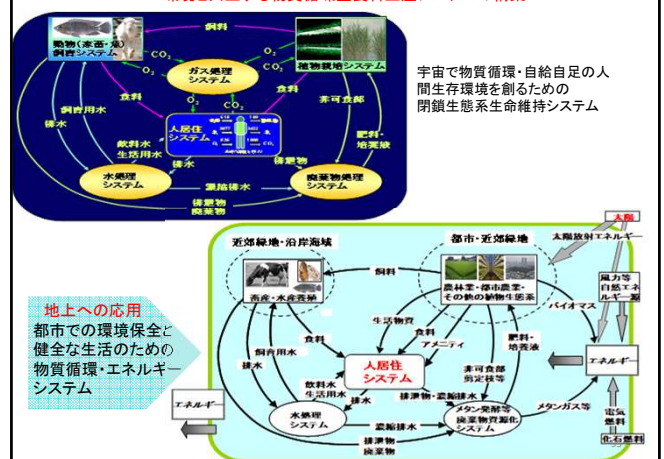
地上への応用

93

大阪府立大学植物工場研究センター



環境と共生する物質循環型食料生産システムの構築



地上で植物が関与するサービス



謝辞

宇宙航空研究開発機構(JAXA)
日本宇宙フォーラム(JSF)
ダイヤモンドエアーサービス(DAS)
日本学術振興会JSPS 科研費(16H01646、18H04984)
大阪府立大学 生物環境調節学研究室スタッフ・学生