

平成 18 年度「宇宙農業構想 研究班 WG」活動報告書

JAXA 宇宙科学研究本部 山下雅道

1. 構成メンバー

青木晶世 北海道大学  
 秋山豊寛  
 新井真由美 理化学研究所  
 Oscar Arenales 東京海洋大学  
 安藤達彦 東京農業大学  
 石井忠司 次世代技術  
 石川洋二 大林組  
 石川芳男 日本大学  
 泉龍太郎 JAXA  
 伊藤雅則 東京海洋大学  
 稲富裕光 JAXA  
 江端弘樹 芙蓉海洋開発  
 大塩貴寛 日本肥糧  
 大島泰郎 環境微生物研究所  
 大島博 筑波大学生物資源  
 太田誠一 JAXA  
 大西充徳 JAXA  
 大森正克 埼玉大学  
 岡本美貴 日本大学生物資源科学部  
 尾上典之 北海道大学生命科学院  
 鏡味裕太 信州大学  
 片山新直 名古屋大学工コトピア機構  
 片山藤拓 名古屋女子大学  
 加藤晋二 茨城県農業総合センター  
 刈屋達也 九州大学農学研究院  
 河崎行繁 帯広畜産大学  
 木口憲爾 IAS  
 岸田芳朗 信州大学繊維学部  
 北宅善昭 岡山大学  
 小池惇平 JAXA  
 上妻馨梨 大阪府立大学生命環境科学  
 小島洋志 東京工業大学  
 後藤英高 奈良先端工業  
 齋藤孝夫 千葉大学園芸学部  
 笹沢教一 宇都宮大学農学部  
 嶋宮民安 読売新聞  
 清水和哉 山梨大学  
 清水強 筑波大学大学院生命環境  
 白石篤志 清水宇宙生理学研究所  
 鈴木洋平 佐賀大学 農学部  
 鈴木智典 YSC  
 高冲宗夫 東京工業高等専門学校  
 高橋秀幸 宇宙システム開発  
 竹内俊郎 JAXA  
 武田弘 東北大学  
 田中茂雄 東京海洋大学  
 谷晃 千葉工業大学・総合研究所  
 田村憲司 金沢大学大学院自然科学  
 土肥哲哉 東海大学  
 都木恭一郎 筑波大学  
 富田(横谷)香織 筑波大学  
 中沢武 森産業/日本きのこ研究所

中島 厚

長友信人  
 中野完  
 中村輝子  
 中村祐二  
 中山伸  
 新田慶治  
 野瀬昭博  
 能登谷正浩  
 橋本博文  
 馬場啓一  
 平藤雅之  
 広崎朋史  
 藤井義晴  
 藤田修  
 船本林太郎  
 古野隆雄  
 堀川大樹  
 丸茂克美  
 水谷広  
 御手洗玄洋  
 三橋淳  
 三原恵二郎  
 宮川照男  
 宮嶋宏行  
 向井千秋  
 森滋夫  
 矢沢勇樹  
 矢野幸子  
 山崎直子  
 山下雅道  
 山本聡子  
 横田博樹  
 横山正  
 和田秀徳  
 渡辺巖  
 渡邊博之

JAXA

宇宙科学研名誉教授  
 JAXA  
 さくら研究所  
 北海道大学  
 帝塚山大学  
 環境科学研究所  
 佐賀大学  
 東京海洋大学  
 筑波大学  
 京都大学  
 中央農研  
 宇宙システム開発  
 農業環境技術研究所  
 北海道大学  
 東京大学生物生産工学研  
 合鴨家族古野農場  
 東京大学大学院理学系研究科  
 産業技術総合研  
 日本大学生物資源科学部  
 名古屋大学名誉教授  
 東京農業大学  
 MTR  
 アイエスエス  
 東京女学館大学  
 JAXA  
 名古屋大学名誉教授  
 千葉工業大学工学部  
 JAXA  
 JAXA  
 JAXA  
 Kanazawa Chaen  
 Indiana University  
 東京農工大学  
 東京大学名誉教授  
 (元)国際稲研究所  
 玉川大学

国 外

Mark Nelson Laboratory Biosphere  
 Bill Dempster Laboratory Biosphere  
 Abigail Alling Laboratory Biosphere  
 Liu Chung-Chu China  
 Robert Kok McGill University  
 Kyoung Shik Han Woosuk University  
 Pilson Choi Nambu University  
 Woong-Young Soh Chonbuk National University  
 Duck Yee Cho Woosuk University  
 Gin Chang Soh Korea  
 Hyuncheul Soh Korea  
 Charles Van Hove Catholic University of Louvain  
 楊玉楠 北京航空航天大学  
 劉紅 北京航空航天大学  
 権春善 大連民族学院  
 Vladimir Sychev Inst Biomedical Problems  
 Yuli Berkovich Inst Biomedical Problems  
 Alex Skripnikov Inst Biomedical Problems  
 Vjacheslav Ilyin Inst Biomedical Problems  
 D. Marshall Porterfield Purdue University

## 2. 本年度 WG 会合開催実績

- (1) 第1回：平成18年8月24日
- (2) 第2回：平成18年12月7日
- (3) 第3回：平成19年2月27日

## 3. 活動目的

宇宙農業は生物・生態学的な要素により人間の生命を維持し火星などの地球外天体上でのアストロバイオロジー探査をはじめとする有人活動を可能にする。惑星資源を活用し物質の再生循環利用をはかるシステムの構成について検討してきた。高温好気堆肥菌生態系、樹木による余剰酸素と昆虫による動物性食料の確保、海藻や耐塩性植物によるナトリウム循環などである。低圧低重力環境におけるヒトの生理や植物の応答や、それらからする宇宙農業への要求もあきらかにする。この構想をさらに緻密に展開するために、宇宙農業システムで物質循環などが整合して構成できるかをしらべる。宇宙農業のシステム概念をまとめるのにあきらかにしなければならない要素の特性を抽出する。火星での圏外生命探査に宇宙農業はどのような影響をあたえるか考察し、宇宙農業開発と圏外生命探査の総合的なシナリオを惑星防護に注意をはらいながら策定する。そのうえにたつて、宇宙農業構想を実現するための地球周回軌道や月面で実施すべき実験課題を抽出し、その実験を設計する。

## 4. 活動内容

宇宙農業は、火星におけるアストロバイオロジー探査を目的として長期間多人数のミッションを実現するエンジニアリングである。地球圏外での農業をすすめるには惑星生物学の基礎的な知識の蓄積を要する。本年度は次にあげるいくつかの課題に集中して研究班における討論を組織し、またいくつかの実験をすすめた。

### (1) 宇宙農業における食品構成と作物植物の候補

食品の構成を設計するさいに考慮すべきは、栄養学的な諸要求を(過不足なく)満たすのが第一の要素である。宇宙農業にもとめられる要求は、限られた資源の範囲でその食品が生産できる、またその生産・供給において確実であることである。作物品種を選定するには、単位面積当たりの(多毛作をおこなうとし、一回の耕作期間も考慮した)収量をもとに、可食部に含有されるエネルギーやタンパクなどを得るのに必要な面積を作物品種で比較した。

エネルギー含量を指標とした所要栽培面積をくらべると、サツマイモがもっともすぐれている。穀類では、近代農業の発展において収量がいちじるしく増大したイネがぬきんでている。タンパク含量からみるとダイズがえらばれる。以上の観点

からイネ、ダイズ、サツマイモをえらび、鉄やビタミンの要求などから緑黄色野菜(コマツナで代表)を加える。

これら4つの植物性食品の組合せでは、ビタミンD、B<sub>12</sub>、コレステロール、塩分が不足する。このため、まず昆虫を食材に加えた。クワを育て、その葉をカイコにあたえてサナギを食用する。樹木を宇宙農業にくわえることにより、余剰の酸素と木材をえる。カイコのサナギは、脂質の構成やアミノ酸の構成という点から、十分なものではない。そこでドジョウをくわえた。水田でチッ素固定するラン藻を共生させるアカウキクサをそだて、水中でドジョウを養殖する。

アカウキクサは直接に人間の食用にもできるが、ドジョウはカイコの糞や水中の微細藻類などを餌として成長し、より高品位の食材へと変換する。アカウキクサ、ドジョウに自然の池の底泥の微生物生態系をくわえると、太陽光を照射のもと蒸発する水を補水するのみで、長期間水換えなしに安定した生態系を維持できることを実証した。

### (2) 宇宙における土壌の創生とその評価

宇宙農業構想では、火星のレゴリスにふくまれる生元素や大気中の微量の窒素などを生物学的な要素によって作物植物に利用可能な資源として活用する。土壌中の生物の果たす役割や、作物植物との相互作用など、土壌のなかの生態系の理解は宇宙農業構想の基礎となる。

火星の表面をおおうレゴリスがそもそもどのような鉱物学的な性質をもつのかについて、これまでの探査結果をまとめて整理した。さらに今後どのような情報を得なくてはいけないのかを明らかにして、火星探査計画に宇宙農業からの要求を組み入れていく。細断した非可食バイオマスや堆肥化したバイオマスを模擬火星レゴリスにくわえて、植物を栽培する試験をした。

高温好気堆肥菌生態系による排泄物や非可食バイオマスの肥料への変換についても、宇宙農業のシステム設計に必要な特性の把握をすすめた。

### (3) 宇宙農業における Na-K の循環

人間は Na を要求し、摂食した Na は排泄される。排泄物を堆肥として農業土壌に施肥すると、一般の作物植物の栽培を阻害する塩集積がおこる。高濃度の Na は植物にとって毒性をもつ。これにひきかえて、Na とおなじアルカリ金属である K は細胞内に選択的にとりこまれるし、肥料の三大要素とされる。

宇宙農業における Na、K の循環に対するアプローチはいくつかある。ひとつは生物学的な手法であり、K を選択的に収穫する生物をもちいそれを堆肥化すると、Na が高濃度であっても生育する栽培植物をもちいるふたつがあげられる。前者の候補としてアオサをとりあげ、その特性を調

べた。アオサは広い総塩濃度への耐性がある。アオサの培養液のNaとKの比を海水での比から大きくかえ、またさまざまな総塩濃度にしてアオサを栽培した。総塩濃度、Na・Kの濃度比を大きくかえてもアオサ藻体内のこれらイオンの濃度や濃度比はおよそ一定にたもたれること、K濃度について生育を制限する上限閾値が存在することがわかった。アオサ藻体にくまれるKは人間の排泄物中の比よりもおおい。したがって、堆肥浸出成分をいれた擬似海水中でアオサを栽培し、擬似海水中から食塩を作成すればよい。アオサはそのまま食用するか、あるいは堆肥とする。

アイスプラントは耐塩性の植物であり、海水ほどの高塩濃度でも生育する。葉や茎の表面に球状の透明な液胞をつけ、そのなかにNaを選択的に排出する。アイスプラントに含まれるNa塩は乾量の30%にもおよぶ。一つの植物体の大きさもおおきい。これまでにあげられてきた候補耐塩性植物種のなかではもっともすぐれている。栽培液のイオン濃度比とアイスプラント植物体内の比の関係などについて調べた。

宇宙農業に関連する事項の検討を、アメリカ、カナダ、ベルギー、ロシア、中国、韓国の研究者とも連絡をとりながらすすめている。宇宙農業構想を火星において実現するのを今世紀中と想定し、着実な研究と開発の計画をたてている。

## 5. 成果

活動の成果は、原著論文として公表したり、いくつかの国際・国内学会で発表するほか、下記ウェブページにおいて示している。

[http://surc.isas.ac.jp/space\\_agriculture/](http://surc.isas.ac.jp/space_agriculture/)

また、宇宙農業構想研究班の活動は、国内外の新聞や通信社、雑誌、放送によりとりあげられ、多くのサイトに転載されてもいる。主要なものについて以下のリストにまとめた。

### 1) 原著論文その他 (13件)

山下雅道; 火星での暮らし -地球圏外の極限に生きる、*科学*, **76**, 800-805 (2006)

Masamichi Yamashita, Yoji Ishikawa, Yoshiaki Kitaya, Eiji Goto, Mayumi Arai, Hirofumi Hashimoto, Kaori Tomita-Yokotani, Masayuki Hirafuji, Katsunori Omori, Atsushi Shiraishi, Akira Tani, Kyoichiro Toki, Hiroki Yokota, Osamu Fujita; An Overview of Challenges in Modeling Heat and Mass Transfer for Living on Mars, *Ann. N.Y. Acad. Science*, **1077**, 232-243 (2006)

山下雅道、片山直美; Habitation2006 どうかかわれた米国新宇宙政策下の生命維持工学の展望および Laboratory Biosphere での研究展開、*Eco-Engineering*, **18**, 89-92 (2006)

片山直美、山下雅道、和田秀徳、三橋淳、宇宙農業サロン; 火星居住のための昆虫を考慮した宇宙食の構想、*Biol Sci Space*, **20**, 48-56 (2006)

Naomi Katayama, Masamichi Yamashita, Hidenori Wada, Jun Mitsuhashi, Space Agriculture Task Force; Entomophagy as Part of a Space Diet for Habitation on Mars, *J. Space Technol. Sci.*, **21-2**, 27-38 (2005)

Masamichi Yamashita, Yoji Ishikawa, Makoto Nagatomo, Tairo Oshima, Hidenori Wada, and Space Agriculture Task Force; Space Agriculture for Manned Space Exploration on Mars, *J. Space Technol. Sci.*, **21-2**, 1-10 (2005)

Makoto Nagatomo; Experimental Study on Growth of Young Trees under The Pressure of One Tenth of Earth Atmosphere. *J. Space Technol. Sci.*, **21-2**, 11-26 (2005)

Yuji Nakamura; Engineering of Pressurized Structure and Fire Safety for Space Habitation on Mars - Needs of Fundamental Fire Researches for Space Enclosure System- *J. Space Technol. Sci.*, **21-2**, 39-48 (2005)

Hashimoto, H., Koike, J., Yamashita, M., Oshima, T., Space Agriculture Saloon; Proposal for Extension of Planetary Protection Policy to Avoid Biological Contamination of Mars with Manned Exploration Supported by Space Agriculture, *Viva Origino*, **34**, 86-89 (2006)

山下雅道; 地下にもぐる太陽系内の生命、*科学*, **77**, 143-146 (2007)

N. Katayama, Y. Ishikawa, M. Takaoki, M. Yamashita, S. Nakayama, K. Kiguchi, R. Kok, H. Wada, J. Mitsuhashi and Space Agriculture Task Force; Entomophagy; a key to space agriculture, *Adv Space Res*, on line, (2007)

Y. Nakamura, A. Aoki; Ignition of Solid Fuels at Low Pressure, Selected Paper at Proc. *25th Int'l. Sympo. on Space Tech. and Science (ISTS)*, (2006), pp.922-927.

Y. Nakamura, A. Aoki; Irradiated Ignition of Solid Materials in Reduced Pressure Atmosphere with Various Oxygen Concentrations - For Fire Safety in Space Habitats, *Adv Space Res*, on line, (2007)

### 2) 国際会議など (5件)

Masamichi Yamashita, Naomi Katayama, Shigeo Mori; Living in Greenhouse Built on Mars, *Gravitational Physiology*, **13**(1), P-155-156 (2006)

Shin-ichiro Kanazawa, Yoji Ishikawa, Kaori Tomita-Yokotani, Hirofumi Hashimoto, Yoshiaki Kitaya, Masamichi Yamashita, Makoto Nagatomo, Tairo Oshima, Hidenori Wada and Space Agriculture Task Force; Space agriculture for habitation on Mars using thermophilic aerobic composting bacteria, insects, woods and other biological members, COSPAR Beijing, July, 2006 (Submitted to *Adv Space Res*)

Tairo Oshima, Shin-ichiro Kanazawa, T. Moriya, Yoji Ishikawa, Hirofumi Hashimoto, Masamichi Yamashita, and Space Agriculture Task Force; Hyper-thermophilic aerobic bacterial ecology for space agriculture, COSPAR Beijing, July, 2006 (Submitted to *Adv Space Res*)

Masamichi Yamashita; Eating Insect for Habitation on Mars - A Testbed for Solving Our Global Problems, International Space Medicine Symposium in Sapporo 2007, Sapporo (2007)

Y. Nakamura, A. Aoki, O. Fujita, H. Ito; Similarity in Irradiated Ignition Characteristics of Cellulosic Paper under Low Gravity and Low Pressure Environments, 5th International Symposium on Scale Modeling (ISSM-V), Choshi, Sept, 2006 pp.89-98.

### 3) 国内講演会 (16 件)

山下雅道; 食料系の選択と計画、JAXA 環境制御・生命維持技術に関するワークショップ (2006)

山下雅道; 火星での人類生存に向けた宇宙農場構想、地球惑星科学連合大会 (2006)

山下雅道、富田香織、石川洋二、北宅善昭、宇宙農業サロン; 宇宙農業構想と生態工学、生態工学会大会 (2006)

山下雅道; 食料生産と宇宙農業 - 宇宙長期構想・生命維持工学における食料系の選択と計画、生態工学会大会 (2006)

片山直美、山下雅道; 給食から提案する昆虫食 - 地球や宇宙などの閉鎖型環境における循環永続型社会構築のために、植物工場学会大会 (2006)

山下雅道・宇宙農業サロン; ポスト国際宇宙ステーションを牽引する有人宇宙探査とそれを支える宇宙農業構想、宇宙科学技術連合講演会 (2006)

山下雅道、野瀬昭博、北宅善昭、富田-横谷香織、橋本博文、能登谷正浩、和田秀徳、宇宙農業サロン; 宇宙農業におけるナトリウム・カリウム問題、日本宇宙生物学会第 20 回大会 (2006)

太田誠一、平石香苗、青木俊夫、田村憲司、橋本博文、山下雅道、富田-横谷香織、宇宙農業サロン; 火星模擬レゴリスを用いたミヤコグサの栽培による宇宙農業の可能性、日本宇宙生物学会第 20 回大会 (2006)

橋本博文、中山伸、山下雅道、宇宙農業サロン; 低圧環境におけるカイコの飼育実験、日本宇宙生物学会第 20 回大会 (2006)

片山直美、山下雅道、宇宙農業サロン; 給食から提案する宇宙食、日本宇宙生物学会第 20 回大会 (2006)

富田-横谷香織、青木俊夫、太田誠一、藤井義晴、田村憲司、吉田滋樹、橋本博文、山下雅道; 宇宙環境を利用した植物と微生物の共生関係解明の可能性 *Space Utiliz. Res.*, **23**, 391-392 (2007)

山下雅道、秋山豊寛、新井真由美、石井忠司、石川洋二、稲富裕光、大島泰郎、大西充、大森克徳、大森正之、鏡味裕、片山直美、金澤晋二郎、刈屋達也、河崎行繁、木口憲爾、岸本直子、北宅善昭、後藤英司、齋藤高弘、嶋宮民安、清水強、白石篤志、高沖宗夫、高橋秀幸、竹内俊郎、武田弘、田中茂雄、谷晃、田村憲司、都木恭一郎、富田(横谷)香織、中島厚、長友信人、中野完、中村輝子、中村祐二、中山伸、新田慶治、能登谷正浩、橋本博文、馬場啓一、平藤雅之、広崎朋史、藤井義晴、藤田修、水谷広、三橋淳、三原恵二郎、宮川照男、向井千秋、森滋夫、矢沢勇樹、山崎直子、横田博樹、渡邊博之、和田秀徳、そのほか宇宙農業サロン; 宇宙農業構想の展開 *Space Utiliz. Res.*, **23**, 396-399 (2007)

橋本博文、中山伸、山下雅道、宇宙農業サロン; カイコの低圧飼育に関する研究 *Space Utiliz. Res.*, **23**, 400-401 (2007)

中村祐二、青木晶世; 低圧下における固体物質の放射着火特性に関する研究、平成 18 年度日本火災学会講演論文集, 452-455 (2006.5)

青木晶世、中村祐二、伊東弘行、藤田修、山根清隆; 低圧場の固体放射着火に関する実験的検討、第 4 回燃焼シンポジウム講演論文集, 276-277 (2006)

中村祐二、青木晶世、伊東弘行、藤田修、草野真一郎; 低圧閉鎖空間における固体の自発着火特性に関する基礎研究、*Space Utiliz. Res.*, **23**, 125-128 (2007)

### 4) 紹介 (14 件)

#### 新聞・通信社

日経産業新聞 2006 年 4 月 26 日; 宇宙での農業研究「伝統食」で火星暮らしを

時事通信ほか 2006 年 5 月 20 日: 火星で養蚕 宇宙食に「サナギは動物たんぱく」

毎日新聞 2006 年 5 月 31 日朝刊: 宇宙農場構想: 火星暮らしは蚕から 温室ドーム、桑と併せ自給自足

信濃毎日新聞 2006 年 7 月 11 日: 宇宙でタンパク源研究-蚕のさなぎ: 信州の食、新ふーど記

中日新聞 2006 年 7 月 23 日: 宇宙農業、めざせ火星で自給自足

新華社 (Xinhua News Agency) 2006 年 7 月 19 日  
Japanese scientists discuss recycling in space

新華社 (Xinhua News Agency) 2006 年 7 月 24 日  
Silkworm Space Cookies Add Flavour To Diet

#### 雑誌

地上 宇宙農業: 人間が生き延びるための農業、アグリ@ナビ、2006 年 10 月号

発明 Mother Mars Mission 11, 2006 年 11 月号

Yahoo メルマガ「漢のホビイ団、

<http://merumaga.yahoo.co.jp/Detail/3/p/1/> 第 7 号

(2006/11/21) 食糧危機を救うことができる宇宙農業

相模原 Style 2007 年 3 月号

#### 放送

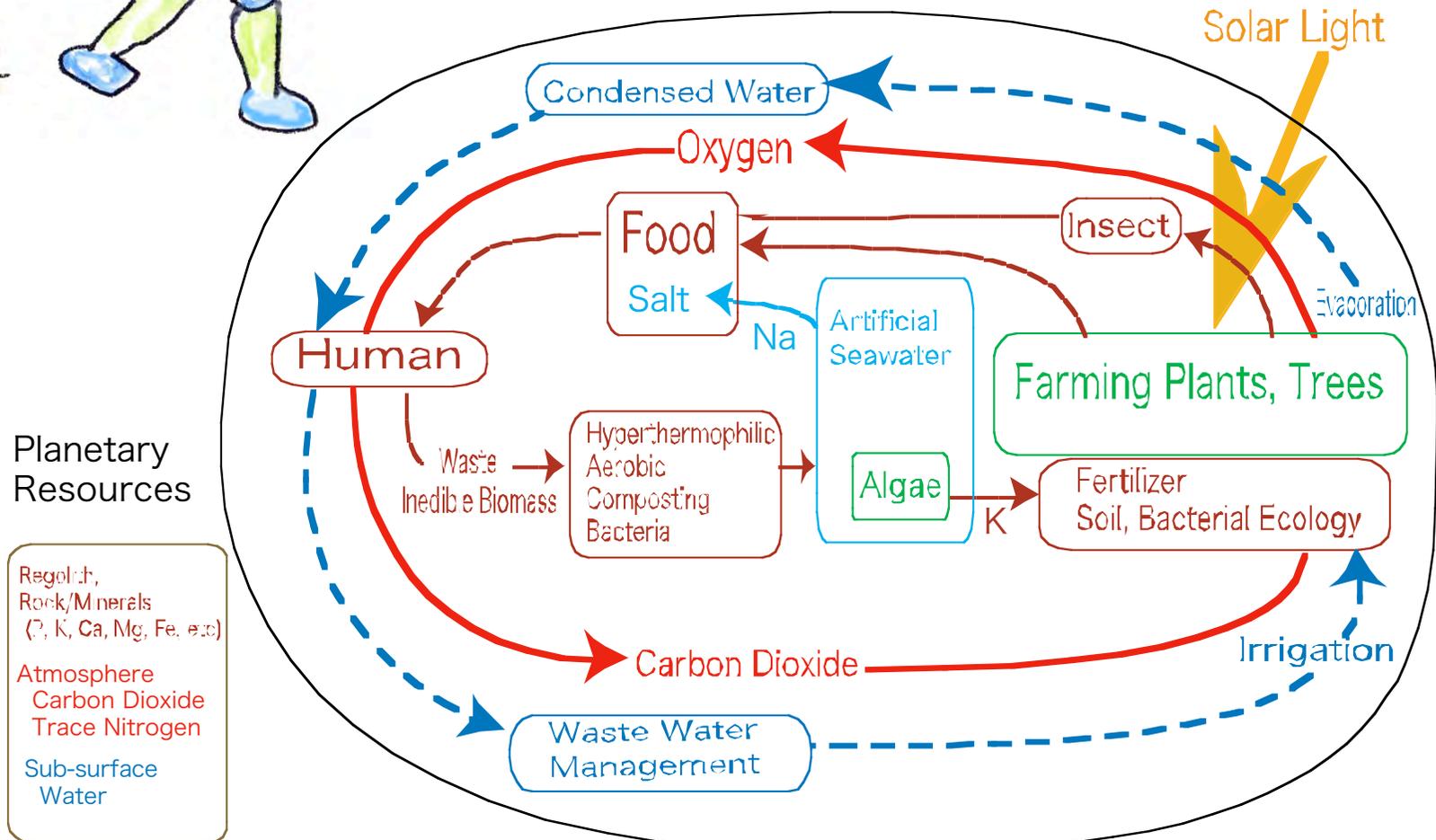
HBCラジオ 2006 年 5 月 31 日: カーナビラジオ午後一番「火星暮らしは蚕から」

TBSラジオ 2006 年 7 月 1 日: 永六輔の土曜ワイド

FM さがみ 2006 年 8 月 15 日 お盆特番: 宇宙科学研究所本部

# Space Agriculture

## Bio-regenerative Life Support System for Astrobiology Exploration on Mars



# Rice - Soybean - Sweet potato - Green yellow vegetable - Silkworm pupa - Loach fish Recipe

- Core components for Space Agriculture
  - Hyper-thermophilic aerobic composting bacteria for safe materials recycle
  - Tree for excess oxygen
  - Insect eating to upgrade inedible biomass
  - *Azolla* for nitrogen fixation
  - Marine macro-algae and halophytes for Na-K processing

