火星居住のための昆虫を考慮した宇宙食の構想

片山直美、山下雅道[†]、和田秀徳、三橋淳、宇宙農業サロン

昆虫食をふくむ宇宙食を火星居住のために研究している宇宙農業の構想の一環として検討している。ヒトの昆虫食は、考古学的な年代における人糞の化石 (human coprolite) にアリ、シラミ、バッタをはじめとする多様な昆虫が発見されることからわかるように、狩猟や採集により食物を得ていた時代に昆虫は食料の重要な部分をしめていた。いくつかの動植物が家畜化され作物植物として確立されて牧畜や農業がはじまり発達しても、昆虫食は食文化の一部としてのこり、全世界の広い地域でそれぞれに固有で多様な昆虫食を現在もみることができる。牧畜や農業の発達は、食料の安定した供給を可能にし、生産量の増大にみあい人口を増加させた。農業や牧畜はヒトの言語をゆたかにうみだし人類の文化と文明を成立させた。文明の生態史観 (梅棹, 1967) によれば、可食の作物植物を栽培するのが不向きな地域では非可食のバイオマスをウシやヒツジなどの家畜に与えて乳製品や食肉を得る牧畜が発達し、牧畜文化はその地域のヒトのラクトース耐性の遺伝子を自然選択させるという Gene-Culture Co-evolution をも駆動した。このように、自然生態系はそれぞれの地域の食文化をふくむ文化・文明に深く関与してきている。農業生産性の向上は、人類の活動のなかに生産余剰があつてこそ可能になる科学研究やさらに宇宙開発といった活動を花開かせ、その成果によりさらに豊かな文明の発展を展望させている。一方、地球上の人類の人口の引き続く増大と農地面積の減少は、全地球的なレベルでの食料供給力と需要量の不均衡状態の到来と苛烈な南北問題を近い将来に予想させている。火星居住の実現を目的とする宇宙農業の構想は、限られた空間のなかでの農業を最適化してその生産量を安定に高く維持することを一つの目標として

設計している。ヒトが健康に生きるために必要な栄養要求をみだし、農地面積など限定された農業資源のもとで、どのような栽培作物品種や飼育動物種をえらぶかは、宇宙農業および地上農業の双方を設計するのに重要な要素となる。本研究では、このような観点に立って、基本的な食品材料を選択した。基本食材の種類とその必要量を定めることにより農業構想の諸元について考察した。栄養学的な評価をおこなうためにここで選んだ食品数は少ないが、これを骨格として派生する多様な食品や献立を生み出していこうとしている。

栄養学的要求の規定

食品の構成に対する栄養学的な要求は「日本人の食事摂取基準 (2005 年版)」に準拠した。この基準では、摂取エネルギー、栄養素を規定し、それらの摂取目標量および摂取量の範囲として上限、下限値が規定されている。年齢や性別、身体活動レベルに従って目標量は異なるが、ここでは青年の男女の値を平均しふつうの活動レベルを対象とする基準をもちいた。本研究で考慮した栄養素の項目は、表 1 にしめすように、アミノ酸、ビタミン、無機イオンである。

栄養バランスということでは、摂取エネルギー源としてタンパク質、脂質、炭水化物の占める割合 (PFC 比) についてその推奨範囲に適合するかをみた。また必須アミノ酸の摂取量推奨値をみたすかどうかにくわえてアミノ酸構成比が適正であるかをアミノ酸スコアにより判定する。栄養バランスに対する要求の根拠は、たとえば不適切なアミノ酸バランスの食品を摂取すると、たとえ各成分が推奨値かそれ以上となっても、総体としては過剰なアミノ酸摂取におちいり、チッ素代謝産物の処理の負荷が増大するというデメリットをさけることに発している。

脂質はエネルギー源として糖質と互いにおぎないうため、所要量を決めにくい。そのため総エネルギーの中で脂質の占める比率、すなわち脂質エネルギー比が採用されている。現在、日本では一般成人で 20 から 50%、6 ヶ月未満の乳幼児で 45%、6 ～ 12 ヶ月の幼児で 30 ～ 40%、発育の盛んな青少年や重い労作などに従事するもので 25 ～ 30% 妊婦・授乳婦では 25 ～ 30% である。

Article ID: 062002007

Concept paper

Received November 11, 2006

Original Paper in English was published in Journal of Space Technology and Science, Vol. 21, No. 2, pp. 27-38 (2005).

[†]To whom correspondence should be addressed: Institute of Space and Astronautical Science, JAXA, Sagami-hara, 229-8510, Japan. Tel.: +81-(0)42-759-8230; Fax: +81-(0)42-759-8449; E-mail: yamashita@surc.isas.jaxa.jp

表 1 栄養学的評価の項目

エネルギー
タンパク質（総量、アミノ酸構成：アミノ酸スコア）
脂質（総脂質、飽和脂肪酸、n-6 系脂肪酸、n-3 系脂肪酸、脂質（動物：植物：魚類）比、n-6/n-3 系脂肪酸比、SMP 比、コレステロール）
炭水化物
タンパク質、脂質、炭水化物の占める割合（PFC 比）
食物繊維
水溶性ビタミン： ビタミンB ₁ 、ビタミンB ₂ 、ナイアシン、ビタミンB ₆ 、葉酸、 ビタミンB ₁₂ 、ピオチン、パントテン酸、ビタミンC
脂溶性ビタミン： ビタミンA、ビタミンE、ビタミンD、ビタミンK
ミネラル： マグネシウム、カルシウム、リン
微量元素： クロム、モリブデン、マンガン、鉄、銅、亜鉛、セレン、ヨウ素
電解質： ナトリウム、カリウム

脂質の摂取に際しては脂肪酸のバランスをとることが大切である。第一に、摂取割合としては、動物：植物：魚類＝4：5：1程度といわれている。この指標は食品に関する細かな数値的検討なしに脂肪酸のバランスの適切さをみるときに簡便な指標である。第二に、脂肪酸には飽和脂肪酸(SFA)・一価不飽和脂肪酸(MUSFA)・多価不飽和脂肪酸(PUSFA)があるが、これらの望ましい摂取比率はおおむねS：M：P＝3：4：3とされている。さらに、第三として、多価不飽和脂肪酸の問題があり、植物に多いリノール酸が属するn-6系の脂肪酸と、リノレン酸や魚類に多いEPAとDHAが属するn-3系の脂肪酸とがある。この摂取比率は、およそn-6系脂肪酸：n-3系脂肪酸＝4：1が適当であると考えられている。

脂質のなかでコレステロールについては『食事摂取基準』（2005）では目標量として女性600 mg/日未満、男性750 mg/日未満というように上限値のみが規定されている。コレステロールは胆汁酸や副腎脂質ホルモン、性ホルモンの材料として生体に必要なであるが、過剰摂取は動脈硬化を促進させるので上限値がきめられている。コレステロールの不足は免疫機能の不全や女性の月経不順の原因となる。リン脂質はグリセロール骨格に2分子の脂肪酸が結合したものである。細胞膜に多量に存在し、細胞膜の脂質二重構造を形成する。リン脂質及びコレステロールは生体膜機能を維持するために不可欠である。

脂肪は体内で80%は再利用されるが、20%は体外から摂取する必要がある。多価不飽和脂肪酸であるリノール酸、 α リノレン酸は体内で合成することができないため、必須脂肪酸と呼ばれ、身体機能調節、体の発育や成長にかかわる。必須脂肪酸の欠乏状態においては成長発育障害、皮膚病変、免疫機能

の低下といった症状を呈する。リノール酸系列(n-6系列)、 α リノレン酸系列(n-3系列)からさらに長鎖多価不飽和脂肪酸が合成される。

すべての項目に「食事摂取基準」が上限、下限値を規定していることはない。たとえば過剰に摂取しても障害のない場合には規定されていない。したがって、推奨値を満たせない場合でも、その影響の度合いをみさだめるには個別の項目の精査を要する。また表1にあげた栄養学的な評価項目の他にも微量元素や微量化学種で未規定の要素があったり、脂肪酸などについてここでしめたように項目間の比率で推奨すべき値が他にもあるかもしれない。多様な食品をバランスよく摂ることで満たされているかもしれない未規定の項目の評価が将来に求められるかもしれないことに留意しておく必要がある。

食品やその献立については栄養学的な要求ばかりでなく、食品は嗜好の対象であったり食文化の重要な要素であることをふまえて設計することが求められる。新規な食品材料や調理を提案するには、これらの側面を考慮して受容されるものとするための工夫も必要である。閉鎖生態系による生命維持において献立をどのように設計するかは、Masuda, et al (2005)による詳細な検討がなされており、多彩な植物性食の構成とそのための作物栽培計画が参考になる。Silverstone(1993)は閉鎖空間での農業生態系でえられた食材による献立を記載している。小池ら(2005)は閉鎖隔離環境にあるいくつかの例をもとに栄養学的な諸問題をまとめている。

基本栽培作物種の選択

宇宙食の基本的な献立を構成するうえで、宇宙システムの内容積や面積、太陽光の受光面積など限られた農業資源を有効に利用して食料を生産するこ

表 2

	収量	播種 - 収穫	エネルギー 含量	栽培所要面積	タンパク 含量	タンパク 栽培面積	アミノ酸 スコア	継世代様式
	kg/1000m ²	month	kcal/100g	2000 kcal/day m ²	g/100g	60g protein m ²		
コメ	526	4	356	130	6.8	204	64	風媒
コムギ	280	7	337	451	10.6	430	42	風媒
ダイズ	367	3.5	417	139	35.3	49	86	虫媒
ソバ	106	2.5	364	394	12	359	100	虫媒
キヌア	178	3	403	254	13.4	230	85	風媒
ジャガイモ	3000	3	76	80	1.6	114	73	栄養生殖
サツマイモ	3180	5	150	64	0.9	319	83	栄養生殖

とは考慮する一つの項目である。また穀類作物の栽培がその栄養価の高さに加え長期の貯蔵が可能であるために食料の安定した供給をもたらしたことも想起しておく必要がある。表2にコメ、コムギ、ダイズ、ソバ、キヌア、ジャガイモ、サツマイモを比較する。単位面積あたりの収量および播種から収穫までの期間から、収穫後直ちに播種する多毛作とした場合の単位面積あたりの年間総生産率を求めた。この値と各作物のエネルギー含量およびヒトの所要エネルギーから、一人あたりの所要エネルギーをまかなうのに必要な栽培面積を求めることができる。サツマイモ、ジャガイモ、コメ、ダイズの順に栽培面積は増大していく。コメとコムギを比べると、コムギの播種—収穫期間を冬コムギの期間として長く見積もっていることもあるが、コメのほうが3倍以上栽培面積を小さくできる。同様にタンパク要求をみたら栽培面積を求めるとダイズ、ジャガイモ、コメ、キヌアの順で増大していく。アミノ酸スコアをみるとソバは100であるが、他の作物植物では86から42の範囲にあり不足するアミノ酸を別の食品材料を加えることにより補充する必要がある。コムギのアミノ酸スコアはぬきんでて低い。継世代の様式をみると、栄養生殖の種の栽培は容易である。風媒の種では開花したときに花の周囲で授粉に必要な風速をあたえ、虫媒の場合には授粉動物に依存するか、あるいはその代替を準備する必要がある。

以上の点を考慮して、主要な作物種としてコメ、ダイズ、サツマイモを選択し、これら3つに緑黄色野菜類を代表してコマツナを加えた。炭水化物、ビタミン、ミネラル、食物繊維の観点から4つ食品の構成比を最適化したところ、1日あたりコメ300 g、ダイズ100 g、サツマイモ200 g、コマツナ300 gという組合せがよいとわかった。ここではこれを基本植物食とよぶことにする。コメはエネ

ルギーとタンパク、ダイズはタンパクと食物繊維、サツマイモはエネルギー・ビタミン・食物繊維、コマツナからは鉄・カルシウム・ビタミン・食物繊維をえることができる。

動物性食品の要求

コメ、ダイズ、サツマイモ、コマツナを組み合わせた基本植物食の構成では、ビタミンD、ビタミンB₁₂、コレステロール、塩分が不足する。ビタミンDの不足でおこる障害には骨の脱灰があり、無重力や低重力環境に曝露される宇宙ではビタミンDの不足による障害の効果は重篤なものとなりうる。ビタミンB₁₂の欠乏は悪性貧血をもたらす。

塩分(Na)はストレスの強い条件では摂取要求が高い。塩分は2005年日本人の摂取基準では平均値として9 gが推奨されている。ただし通常の献立を構成する食品材料には塩分が約2 gふくまれるので、食塩として加える塩分は7 gでよい。米国の基準や病態での推奨値は8 gであることから6 g程度の食塩を加えるのがよい。微小重力あるいは低重力の宇宙や火星では心臓を中心に同心円状に体液が集まり尿として余分の水分が出てしまう。また頭部への体液の滞留による浮腫(ムーンフェイス)状態がひきおこされる。体全体としては地上よりも水分が少なくなり地上と同量の塩分を摂取するならば腎への負担は増大する。これを低減するには腎臓病患者への病態食と同様に塩摂取を抑制するのがひとつの対策であり、食塩としての塩分の付加分は3 gとし塩摂取総量を5 gとするのが適切とかがえられる。

また植物のみから構成される献立では、PFC比を適正な範囲に維持することがむずかしい。植物は根野菜のように糖質の多い食品から大豆のように蛋白質の多い食品までさまざまであるが、野菜はおしなべて脂質含量が少なくPFC比のバランス(糖

質 55～65%、たんぱく質 15%、脂質 15～20% が推奨されている) が摂りにくく、脂質を多く含む動物性食品が必要となる。特に脂質の摂取量が低いと前述したような不具合をもたらす。アミノ酸の構成をみると植物性食品では一般的にリジンが不足するので、これを動物性食品に求めて、献立全体でのアミノ酸スコアを 100 に近づけることになる。

植物性食品のみでは足りない成分を加えるために、塩分は調味料として食塩を用いる。ビタミン D の供給源としてキノコ類、卵類、肉類または魚介類があり、またビタミン B₁₂ やコレステロールの供給源は肉類または魚介類が候補となる。本研究では食材の候補に加えていないが、海藻類や貝類にはビタミン B₁₂ が豊富に含まれており、特に海藻ではアオノリ、アマノリ、イワノリに、貝類ではアカガイ、アサリ、シジミ、カキ、ホッキガイに多く含まれる。

昆虫を加えた献立

コメ、ダイズ、サツマイモ、コマツナを組み合わせた基本植物食を中核として、それで不足する栄養素をおぎなう食品を追加していくうえで、まず昆虫を宇宙農業での候補とした。宇宙農業構想では樹木の栽培をその一部に含んでいる。樹木から木材をえて居住空間を構築すれば、樹木の産生する酸素とバイオマスの組み合わせのうちバイオマスを酸化しないことにより余剰の酸素を蓄積することができる。樹木の葉は腐植として宇宙で農業土壌を合成するのに活用できるほか、昆虫の餌とすることができる。

カイコは 5000 年来家畜化されてきた昆虫であり、実験動物としても確立され飼育方法も含めてその特性はよく把握されている。カイコの食餌であるクワについても、カイコと同様に多くの栽培品種が作り出されてきており、一年の間の長い期間にわたりカイコの餌を供給することも可能である。クワ以外の植物をカイコの餌とするための方法もあり、さらに人口餌も開発されている。

カイコで食用されてきているのは、マユを作った後で変態するサナギと成虫の蛾である。カイコの栄養成分の分析は基本的な項目についてなされているものの、ビタミン類など微量成分の分析や、調理した状態での成分分析などがまだなされていないので、モデル献立の栄養評価においては他の昆虫種で一部代替する。

昆虫食の効用と限界

植物は太陽光による光合成により化学的なエネ

ルギーとしてバイオマスを生産する。この植物の生産した食物エネルギーをもとに、さまざまな生物が補食・被食の関係をつくり生態系が構成される。この食物連鎖の各段階では食物エネルギーの 80-90% が熱として失われ、食物連鎖を一段上がるごとに利用可能な化学的な態様のエネルギーはおよそ 1/10 に減ずる (Odum, 1971)。生態系の中で昆虫がしめる役割は、植物の葉や蜜、花粉、樹液などを摂食する動物として食物連鎖の下位に位置しており、あるいは動物の排泄物を食料とするなど分解者の位置にある。ある植物は昆虫などに被食されないように防護化学種を産生するよう進化し、さらにその防護化学種を乗り越えるような昆虫が進化して種特異的な関係をその植物と昆虫が形成するといったことがなされてきた。また花をつける植物と送粉動物の共利的な関係が種特異性をきわだたせることにより強化されるといった共進化がすすんだ。これらがひとつの駆動力となって植物と昆虫の双方の種数が増大してきたという進化の歴史がある。カイコの場合はクワの葉を特異的に食餌とする種であり、5,000 年来家畜化されてきた。カイコはもはや人間の手をはなれて生活環を連続させていくことはできない。成虫の蛾は翅はもつが飛翔することはできない。カイコの幼虫の口器には味覚感覚受容器があり糖を高感度で感知するのにくわえて、クワの葉に特有な化学種を感知する。これがカイコがクワの葉のみを摂餌するみなもととなっている。この口器の味覚感覚にかかわる遺伝子の変異してクワ特有の化学種の感知ができなくなった場合には、クワ以外の植物の葉も摂餌できるようになる。カイコ食物エネルギー利用効率をみると、野生のヤママユガ (*Antheraea yamamai*) では、給葉量 95.5 g、食下量 43.1 g にたいし、サナギの質量は 7.3 g (♀) 5.4g (♂) である (赤井 & 栗林, 1990)。すくなくとも質量でみて食物エネルギー利用効率は 10% 程度とみることができる。

宇宙農業で動物性食品を含むよう設計するとき留意すべき点は、ヒトが可食のバイオマスを飼料として動物を飼育する場合の資源利用効率の悪さである。食物連鎖が 1 段上がるごとに利用可能なエネルギーは 1/10 に減ずることから、動物性食品からのエネルギー摂取量に対してその食物エネルギーの一次生産者である植物の栽培面積は、食物連鎖の段数にもよるが、その 10 倍以上を確保することが求められる。仮に非可食の飼料を動物にあたえるにせよ、その飼料バイオマスを生産するための農業資源が可食のバイオマス生産と競合する場合に

は資源の有効配置の点から問題となる。

昆虫食をとりいれる効用は、木の葉や排泄物など非可食のバイオマスの「質」・利用価値の向上にある。昆虫をヒトが直接食用するか、あるいは飼料として他の家畜動物や養殖魚にあたえて肥育しそれらをヒトの食品として利用する。すなわち、農業資源の配置において、可食のバイオマス生産とは競合せずに動物性の食品をあたえるということを昆虫食が可能にする。

昆虫食の文化的な受容性

宇宙農業における献立の設計においては、調理された食品が受容されるかどうか重要な要素である。昆虫の食文化は文明の生態史観ともからみ興味ふかい対象である。動物性タンパク源として昆虫が重要な食品であったことは次のようなことからよくわかる。動物性タンパク源である魚類が豊富にはえられなかった日本の山間部ではイナゴ、ハチの子、カイコのサナギ、テッポウムシ（カミキリムシの幼虫）、ザザムシ（トビゲラ・カワゲラなどの幼虫）などはよく食べられてきた。またセミの幼虫、アリなども食材とされてきた。いくつかの文献では、これらに加えて、ゲンゴロウ、ガムシ、ニカメイチュウ、マツケムシ、モンシロチョウやその他の幼虫、バッタ、コオロギ、カマキリ、ケラ、タガメ（主に卵）、トンボ、（主に幼虫）、ヘビトンボ（主に幼虫）、など多くの昆虫が食用されてきたのが示されている。現在も「まゆこ 大和煮」「蚕のさなぎ 大和煮」「いなご 甘露煮」「蜂の子 高原煮」などが市場において販売されている。長野県では季節になると「蜂の子」は牛肉に匹敵する高価な食材である。信州では「セミの幼虫」が食されており、幼虫を良く洗い、くしに刺して、水分を取り、素揚げにすることで、こうばしくおいしく食することができる。このような状況を背景として、日本政府の委員会がまとめる食品成分表には昆虫が2項目（イナゴ、ハチの子）掲載されている。

世界の各地域でも多くの人々によってさまざまな虫が食べられてきた歴史がある。栄養価が高く、また採集しやすいことが昆虫食がひろく分布している（野中、2005）理由である。三橋（1997）は昆虫の栄養価を記載しているが、どの昆虫もタンパク質と脂質にとみ、必須アミノ酸が豊富に含まれている。さらに、古くから、虫は乾燥して粉にし、栄養補給として用いられていた。生理的な調節に有効な物質や薬理的な作用を有する化学種を昆虫が含有するということもあろうが、病弱時におけるタンパ

ク質など良質な栄養成分の補給という効果があったのである。

昆虫によるバイオマスの動物化の特徴と限界

昆虫は動物であるものの、進化系統樹上での位置は哺乳類から遠い。植物のバイオマスを摂餌して昆虫がその体をつくっている、栄養学的な動物性食品の要求に昆虫の成分が適合するかは精査しておく必要がある。

カイコの体の成分がその食餌であるクワの葉からどのようにかわっているか、すなわちカイコの幼虫によるクワの葉の成分の動物化についてみると、つぎのような特徴がある。脂質についてみると、クワの葉では脂質の含有量が1%であるのに対してカイコのサナギでは8.2%と増大している。カイコの糞に含まれる脂質は0.8%とクワの葉より低く、カイコの幼虫がクワの葉に含まれる脂質をとりこみ濃縮あるいは体内で合成していることがわかる。脂質を構成する脂肪酸の割合をみると、多価不飽和脂肪酸であるリノール酸やリノレン酸といった植物の脂質を特徴付ける成分が多く、また動物の脂質に含まれるC20、22の不飽和脂肪酸がみられないというように動物の脂質構成には変換していないともみられる。ただしC16の不飽和脂肪酸であるパルミトレイン酸は多い傾向にある。

アミノ酸含有量についてもカイコのサナギはクワの葉より多く、カイコの幼虫の糞ではクワの葉より低く、脂質と同様にカイコの幼虫による濃縮や体内での合成の効果をみることができる。アミノ酸の構成比をみるとヒスチジン、チロシン（芳香族アミノ酸）、メチオニン（含硫アミノ酸）がカイコのサナギで他のアミノ酸と比較して増強されている。このように、カイコはクワの葉の成分にたいして動物化がなされているのは確かであるが、その程度は低く、カイコのサナギが動物性食品のすべてを代替できるということはない。

さてビタミンや微量元素はヒトを健康にたもつのに重要なはたらきをする。ただしそれらの摂取推奨値は小さな量である。他の栄養要求をみながらこれら微小成分も摂取推奨値となるように食品の種類とその構成を最適化するのが困難であるならば、微量成分は錠剤などの形態で補給するのも考えられる。しかしながら、コレステロールなど微量とはいえない成分や、生理的活性を保持しながら長期に貯蔵する条件が厳しい成分があるかについては識別しておく必要がある。

モデル献立の構築とその栄養評価

コメ、ダイズ、サツマイモ、コマツナを組み合わせた基本植物食に食塩と昆虫を加えた献立で不足する栄養素をおぎなう食品をさらに追加する。次の二つのモデル献立を設計し比較検討した。

1) 基本植物食 + 昆虫、ニワトリ、キノコ

卵類はコレステロールの豊富な食品であり、ビタミン D とビタミン B₁₂ も多く含まれる。そこで「ウズラ卵」「鶏卵」を加えることとした。肉類は、主にビタミン B₁₂ を豊富に含んでおり、特に「豚肝臓」「牛肝臓」「若鶏肝臓」に多く含まれている。またアヒルはビタミン D を多く含んでいる。飼育する鳥類としてニワトリを選定し、その餌はヒトにとって非可食の野菜クズなどをあてることとする。しかし、宇宙のせまい閉鎖空間内で鳥類を飼育するのは難しいという難点がある。

キノコ類は非可食の木質バイオマスを食用のキノコ子実体に変換することができる。さらにキノコ類にはビタミン D が豊富に含まれる。特にキクラゲ、シロキクラゲ、アラゲキクラゲ、シイタケに多い。キノコ類の栽培技術は多くの種で確立されている。その中でもシイタケは古くから栽培の対象であったことや日本食献立で量も多く用いられることから、シイタケを献立にふくめるよう選定した。シイタケにはビタミン D の前駆体がふくまれ、紫外光によりビタミン D に変換される。乾燥したシイタケの粉末に紫外光を照射すると単位質量あたりの照射表面積が大きいために通常の干しシイタケと比べて 10,000 倍の含有量を実現することができるし、その貯蔵性も優れている（日本きのこ研究所、2005）。カイコの食餌となる樹種でシイタケを培養できるかについて検討しているほか、微量の食品添加物として加える方策などを比較している。玄米 300 g、ダイズ 100 g、コマツナ 300 g、サツマイモ 200 g、昆虫（栄養成分の評価のためにイナゴの佃煮で代替）50 g、鶏卵 30 g、鶏肝臓 5 g、鶏肉 10 g、シイタケ 250 g、食塩 3 g の組み合わせについて栄養学的な要求を満たすことを確かめた。ただしシイタケの量は前述した理由で大きく減ずることが可能である。

2) 基本植物食 + 昆虫、ドジョウ

魚類はビタミン D とビタミン B₁₂ の両方が豊富に含まれており、特に「にしん」「さんま」「紅鮭」「テラピア」「ドジョウ」に多く含まれる。「テラピア」は NASA の宇宙食の候補に入っている食品であるが、ビタミン D は 11 µg でビタミン B₁₂ は 2.3

µg である。「どじょう」のビタミン D は 4.0 µg でビタミン B₁₂ は 2.3 µg である。イネの水田にアカウキクサをうかべてチッ素固定をおこないコメ以外のバイオマスを水禽や養殖魚の餌とし、穀物と動物性食材を同時に得ようとする構想が国際イネ研究所などから提案されている（Watanabe and Liu, 1992）。その構想ではテラピアやコイなどの例が示されているのだが、ドジョウは古くから水田の周囲で繁殖する種であり、溶存酸素が低濃度な劣悪な環境でも水面で口吻より空気を消化管に吞み込んで肛門から排出する消化管呼吸をするなど、飼育条件の範囲が広いことから、本研究ではドジョウを選んだ。ビタミン類は内臓部に多くふくまれていることから、ドジョウを食べる場合には内臓も食するのがよい。韓国では煮たドジョウの魚体の全部をすりつぶして汁の態様で食する調理方法がある。

エネルギー配分における PFC 比（タンパク質、脂質、炭水化物の摂取量の比）をみると、玄米 300 g、ダイズ 100 g、コマツナ 300 g、サツマイモ 200 g、昆虫（栄養成分の評価のためにイナゴの佃煮で代替）50 g、ドジョウ 120 g、食塩 3 g の組み合わせでは PFC 比がそれぞれ、19.1%、13.7%、67.2% である。脂質の割合が低いのがその他は推奨値の範囲にはいる。表 3 にしめすように、栄養学的な評価の項目のすべてにおいて推奨値に近い値を与えることができる。アミノ酸の充足率（表 4）をみると植物性食品のみから構成される基本色ではリジンが 90% であり、1 日あたり 36 mg が不足する。しかし昆虫、ニワトリ、キノコあるいは昆虫、ドジョウを加えたモデル献立では不足するアミノ酸成分はない。脂質（動物：植物：魚類）比は推奨比をみたすものではないが、n-6/n-3 系脂肪酸比、SMP 比、コレステロールなどは推奨値からおおきくははずれないことが確かめられた。

設計したモデル献立 2 つは、いずれも栄養学的な要求を満たす。ニワトリの飼育の困難さがいくつかの点であることから、基本植物食に昆虫とドジョウをくわえた献立をもとにして宇宙農業構想を進めることとした。

昆虫食調理例

献立を設計する上で重要な要素は、調理した食品の態様と量が食事として受容されるかにある。食文化としてすでに確立されている献立では調理した食肉を 100 g 摂食するのは菜食主義者をのぞけば十分に許容範囲である。しかし昆虫を大量に摂食するには工夫を要するのも事実である。そこで、

表3 宇宙モデル献立の栄養検討

項目	単位	2005 年 基準量	基本食 (サツマイモ 200g)	基 本 食 + 昆 虫 (イナゴ) シイタケ 鶏卵	基 本 食 + 昆 虫 (イナゴ) ドジョウ
エネルギー	kcal	2000	1773	2032	1976
たんぱく質	g	55	62.6	90.6	91.9
カリウム	mg	1800	5036	5944	5456
カルシウム	mg	800	858	910	1972
マグネシウム	mg	310	637	695	695
リン	mg	1000	1677	2058	2457
鉄	mg	9	25.5	29.7	33.5
亜鉛	mg	8	9.6	12.98	14.1
銅	mg	0.8	2.33	2.89	2.8
マンガン	mg	4	9.32	10.51	10.31
A レチノール当量	μg	700	785	913	838
ビタミン D	μg	5	0	6	4
ビタミン E	mg	9	11.3	13.3	13.3
ビタミン K	μg	70	648	659	653
ビタミン B ₁	mg	1	2.55	2.87	2.67
ビタミン B ₂	mg	1.3	0.87	2.1	2.46
ナイアシン	mg	12	25.7	36.1	30.6
ビタミン B ₆	mg	1.3	2.8	3.18	2.96
ビタミン B ₁₂	μg	2.4	0	0.6	8.6
葉酸	μg	240	739	897	782
パントテン酸	mg	6	8.48	12.27	9.36
ビタミン C	mg	100	175	200	176
コレステロール (未満)	mg	700	0	290.5	248.5
食物繊維	g	21	36.4	45.2	36.4
食塩 (未満)	g	9	5.9	8.6	8.5
n-3 脂肪酸 (下限)	g	2.4	2.1	2.3	2.3
n-6 脂肪酸 (上限)	g	11	11.3	12.6	11.5

表4 宇宙モデル献立のアミノ酸充足率

アミノ酸	必要量 (mg)	充足率 (%)		
		基本食	基 本 食 + 昆 虫 (イ ナ ゴ) シ イ タ ケ 鶏 卵	基 本 食 + 昆 虫 (イ ナ ゴ) ド ジ ョ ウ
イソロイシン	180	147	152	150
ロイシン	410	113	114	114
リジン	360	90	100	108
メチオニン+ シトシン	160	135	144	140
フェニルアラニン+ チロシン	390	135	133	128
スレオニン	210	108	113	114
トリプトファン	70	115	116	107
バリン	220	146	148	146

カイコのサナギを煎って粉末としたうえで、宇宙農業の主要作物種であるコメ、ダイズ、サツマイモとあわせていくつかの成分組み合わせでクッキー状に調理して官能試験を実施した。上新粉、キナ粉、サツマイモ薄片、カイコサナギ粉、食塩、豆乳を混合したうえで練り、整形してオーブンで焼いた。サナギ粉を含む組み合わせの食味がいくつかの中では優れているとの結果が得られた。その時の配合比は上新粉 200 g、キナ粉 50 g、サツマイモ薄片 50 g、カイコサナギ粉 5 g、食塩 2 g、豆乳 300 ml である。

昆虫食をふくむ宇宙農業の諸元

われわれの火星での宇宙農業構想（山下ら、2005、2006a）では、火星表面での太陽光強度が地球のおよそ 1/2 であることも考えて農業耕作面積を 200 m² とみつもっている。本研究で策定した主要 4 作物の年間一人あたりの消費量はコメ 110 kg、ダイズ 37 kg、サツマイモ 72 kg、コマツナ 110 kg である。多毛作を前提とすればこれら作物の収量をこの耕作面積により確保することができる。

またカイコのサナギ 18 kg を生産するためのクワの栽培面積を 64 m² としている。ドジョウの単位水表面積あたりの生産量は最大 10 kg/m² であり卵から肥育した可食の成体をえる飼育期間はおおよそ 1 年（景平、2005）であることから、年間一人あたり消費量 44 kg を生産するには最小 4.4 m² を要する。ドジョウはイネの水田においてアカウキクサとともに養殖することからはじめに推定した耕作面積の中でまかなうことができる。

献立中にふくまれるナトリウムは一人年間 1.8 kg である。このナトリウムを宇宙農業において消費物質資源として外部から与えるのか、排泄物中にふくまれるナトリウムなどの元素をどのように処理して肥料とするのかについては、いくつかの概念が比較され（山下ら、1985）、生物学的な循環再生システムの原理が検討されている（山下ら、2006b）。宇宙食の献立の概要を規定することで、宇宙農業システムの各要素に対する要求諸元をあきらかにすることができた。

参考文献

赤井弘・栗林茂治 (1990) 天蚕, サイエンスハウス, 東京.
 景平真明 (2005) ドジョウ, in 水産増養殖システム 2、淡水魚・隆島史夫・村井衛 編, 211-225, 恒星社厚生閣, 東京.
 小池朋子・宮本晃 (2005) 閉鎖隔離環境における食生活,

宇宙航空環境医学, **42**, 105-119.

Masuda, T., Ogasawara, T., Harashima, E., Tako, Y., Nitta, K. (2005) Evaluation and Implementation of an Advanced Life Support (ALS) Menu for Closed Ecology Experiment Facilities (CEEFF). *Eco-Engineering*, **17**, 55-60.

三橋淳 (1997) 虫を食べる人びと, 平凡社, 東京.

厚生労働省 (2005) 日本人の食事摂取基準, 第一出版, 東京.

日本きのこ研究所 (2005) きのこ研だより, 26, 表紙 2 面, 特願 2005-52265, 高 VD2 きのこ粉末.

野中健一 (2005) 民族昆虫学, 昆虫食の自然誌, 東京大学出版会, 東京.

Odum, E.P. (1971) Fundamentals of Ecology, 3rd Ed., Chapter 3, W.B. Saunders, Philadelphia.

科学技術庁資源調査会 (2000) 五訂日本食品標準成分表.

Silverstone, S. (1993) Eating In, From the Field to the Kitchen in Biosphere 2, The Biosphere Press, Oracle.

梅棹忠夫 (1967) 文明の生態史観, 中央公論新社, 東京.

Watanabe, I., Liu C.C. (1992) Improving nitrogen-fixing systems and integrating them into sustainable rice farming, *Plant and Soil*, **141**, 57-67.

山下雅道・大矢晴彦・新田慶治・谷田沢道彦 (1985) 閉鎖生態系 - 宇宙農業におけるナトリウムとカリウムの循環. *日本航空宇宙学会誌*, **33**, 288-296.

山下雅道・新井真由美・石井忠司・石川洋二・泉龍太郎・大島泰郎・大島博・大森克徳・片山直美・片山新太・金澤晋二郎・刈屋達也・河崎行繁・北宅善昭・後藤英司・齋藤高弘・清水強・白石篤志・高沖宗夫・高橋秀幸・谷晃・都木恭一郎・富田 (横谷) 香織・中島厚・長友信人・新田慶治・橋本博文・平藤雅之・藤井 義晴・水谷広・三原恵二郎・宮川照男・向井千秋・森滋夫・矢野幸子・山崎直子・横田博樹 (2005) 宇宙農業構想. *Space Utiliz. Res.*, **21**, 323-326.

山下雅道・新井真由美・石川洋二・石井忠司・大島泰郎・大森克徳・大森正之・片山直美・金澤晋二郎・刈屋達也・北宅善昭・後藤英司・齋藤高弘・齋藤孝夫・嶋宮民安・清水強・白石篤志・高沖宗夫・武田弘・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・中村祐二・中山伸・新田慶治・橋本博文・馬場啓一・藤田修・水谷広・三橋淳・三原恵二郎・宮川照男・森滋夫・矢沢勇樹・横田博樹・和田秀徳・Robert Kok・宇宙農業サロン (2006a) 宇宙農業構想の基本骨格. *Space Utiliz. Res.*, **22**, 333-336.

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 (2006b) 宇宙農業におけるナトリウム・カリウム問題. 日本宇宙生物科学会第 20 回大会.

Space Diet for Habitation on Mars with Entomophagy

Naomi Katayama¹, Masamichi Yamashita², Hidenori Wada³, Jun Mitsuhashi³, Space Agriculture Task Force³

¹ Nagoya Women's University, Mizuho-ku, Nagoya, 467-8610, Japan

² Institute of Space and Astronautical Science, JAXA, Sagamihara, 229-8510, Japan

³ Space Agriculture Task Force (Space_Agri@surc.isas.jaxa.jp)

Abstract

Concept of space agriculture is developed for habitation on Mars. Space diet is designed and evaluated with nutritional point of view. Combination of rice, soybean, sweet potato, green-yellow vegetable (represented by Komatsuna), silkworm pupa, and loach was found to fill the nutritional requirements.