

3. 作物種の選定

後藤英司(千葉大学大学院 園芸学研究科 教授)
宮松雅子(シダックス総合研究所)

3.1. 月面で日本人に必要とされる栄養量

3.1.1. 月面で日本人に必要とされる栄養量の前提

本ワーキンググループでの対象は、日本人である。宇宙での ISS 長期滞在時の栄養摂取基準は、NASA の惑星探査ミッション等があるが、これらは、欧米人を中心に考えられており、日本人に当てはめることはできない¹⁾。現時点での惑星ミッション用基準は、カルシウムやビタミン D 等、特に長期ミッションで栄養学的意義が強調されるもの以外は概ね米国の地上基準に準じ²⁾ており、本ワーキンググループにおける月面農場での作物種の栽培量を定める基準は、日本人を対象としてことから、厚生労働省が示す「日本人の食事摂取基準 2015 年版 (以下、「食事摂取基準」)²⁾」を活用することとした。「食事摂取基準」は、健康な個人並びに集団を対象として、国民の健康の保持・増進・生活習慣病の予防のために参照するエネルギー及び栄養素の摂取量の基準を性年齢別に示すものである。「食事摂取基準」の 30～49 歳男性(身体活動レベル 2)を基準に、検討を進めた(表 3.1)。

表 3.1 30～49 歳男性・女性(身体活動レベル 2)の食事摂取基準値

			男性	女性	耐用上限量	授乳婦・妊婦 (付加量)
エネルギー	kcal/日	推定平均必要量	2650	2000		
たんぱく質	g/日	推奨量	60	50		
	目標量 %エネルギー	目標量	13-20	13-20		
脂質	%エネルギー	目標量	20-30	20-30		
炭水化物	%エネルギー	目標量	50-65	50-65		
食物繊維	g/日	目標量	20以上	18以上		
ビタミンA	μ RAE/日	推奨量	900	700	○	○
ビタミンD	μ g/日	目安量	5.5	5.5	○	○
ビタミンE	mg/日	目安量	6.5	6.0	○	○
ビタミンK	μ g/日	目安量	150	150		
ビタミンB1	mg/日	推定平均必要量-推奨量	1.2-1.4	0.9-1.1		○
ビタミンB2	mg/日	推定平均必要量-推奨量	1.3-1.6	1.0-1.1		○
ナイアシン	mgNE/日	推定平均必要量-推奨量	13-15	8-11	○	○
ビタミンB6	mg/日	推定平均必要量-推奨量	1.2-1.4	1.0-1.2	○	○
ビタミンB12	μ g/日	推定平均必要量-推奨量	2.0-2.4	2.0-2.4		○
葉酸	μ g/日	推定平均必要量-推奨量	200-240	200-240	○	○
パントテン酸	mg/日	目安量	5	4		○
ビオチン	μ g/日	目安量	50	50		○
ビタミンC	mg/日	推定平均必要量-推奨量	85-100	85-100		○
ナトリウム	mg/日	推定平均必要量	600	600		
(食塩相当量)	g/日	推定平均必要量	1.5	1.5		
カリウム	mg/日	目安量	2500	2000		○
カルシウム	mg/日	推定平均必要量-推奨量	550-650	550-650	○	
マグネシウム	mg/日	推定平均必要量-推奨量	310-370	240-290		
リン	mg/日	目安量	1000	800	○	○
鉄	mg/日	推定平均必要量-推奨量	6.0-7.0	9.0-10.5(月経有) 5.5-6.5(月経無)	○	○
亜鉛	mg/日	推定平均必要量-推奨量	8-10	6-8	○	○
銅	mg/日	推定平均必要量-推奨量	0.7-1.0	0.6-0.8	○	○
マンガン	mg/日	目安量	4.0	3.5	○	○
ヨウ素	μ g/日	推定平均必要量-推奨量	95-130	95-130	○	○
セレン	μ g/日	目安量	25-30	20-25	○	○
モリブデン	μ g/日	推定平均必要量-推奨量	25-30	20-25	○	○

3.1.2. エネルギー及び栄養素の指標²⁾

「食事摂取基準」では、エネルギーは、エネルギー摂取の過不足の回避を目的とする指標(推定エネルギー必要量)が設定されている。栄養素については、摂取不足の回避を目的とする3種類の指標(推定平均必要量、推奨量、目安量)、過剰摂取による健康障害の回避を目的とする指標(耐用上限量)、及び生活習慣病の予防を目的とする指標(目標量)の5つの指標で構成されている。エネルギー及び栄養素に関する6つの指標は下記の通りである。

表 3.2 「食事摂取基準」で示されているエネルギー及び栄養素に関する指標

指標	
推定エネルギー必要量	エネルギー必要量は、WHOの定義に従い、「ある身長・体重と体組成の個人が、長期間良好な健康状態を維持する身体活動レベルの時、エネルギー消費量との均衡がとれるエネルギー摂取量」と定義。 推定エネルギー必要量 (kcal/day) = 基礎代謝量 (kcal/day) × 身体活動レベル
推定平均必要量 (estimated average requirement; EAR)	ある対象集団において測定された必要量の分布に基づき、母集団における必要量の平均値を示すもの。当該集団に属する50%の人が必要量を満たすと推定される摂取量として定義。
推奨量 (recommended dietary allowance; RDA)	ある対象集団において測定された必要量の分布に基づき、母集団に属するほとんどの人(97~98%)が充足している量。
目安量 (adequate intake; AI)	特定の集団における、ある一定の栄養状態を維持するのに十分な量として「目安量」を定義する。十分な化学的根拠が得られず「推定平均必要量」が算定できない場合に算定するものとする。実際には、特定の集団において不足状態を示す人がほとんど観察されない量として与えられる。
耐用上限量 (tolerable upper intake level; UL)	健康障害をもたらすリスクがないとみなされる習慣的な摂取量の上限を与える量。これを超えて摂取すると、過剰摂取によって生じる潜在的な健康障害のリスクが高まると考える。十分な化学的根拠が得られない栄養素については設定しない。
目標量 (tentative dietary goal for preventing life-style related diseases; DG)	「生活習慣病の予防のために現在の日本人が当面の目標とすべき摂取量」として設定。

3.2. 栽培作物候補の選定

月面農場においては、太陽光を利用せずに人工光源で作物を栽培できる植物工場を用いる。我が国は植物工場を用いた商業栽培が世界で最も普及しており、関連研究蓄積および技術開発力は世界トップクラスである。我が国で開発された人工光型植物工場は、栽培室の閉鎖度を高く維持することができるため、エネルギー収支や物質収支の制御が容易である。月面で人工光型植物工場を用いて作物を生産するにあたり、候補作物の選定で考慮すべき点は以下の通りである。

3.2.1. 植物工場における作物生産

主要な食用作物として穀類、マメ類、イモ類、種実類、葉菜類、果菜類、根菜類、果樹がある。食用作物の大多数は、人工光型植物工場で生産できる。人工光型植物工場は、土壌の代わりに養液栽培法を用い、植物生育に必要な地上部環境要因である温湿度、光、CO₂ガス、O₂ガス、気流を制御する。

養液栽培は、土壌を使わないで必要元素を含む培養液を植物に与えて栽培する方法である³⁾。養液栽培には培地に砂、れき、おがくず、ロックウール、パーライトまたはバーミュキュライト等を使う固形培地耕と、固形培地を使わない水耕および噴霧耕に大別できる。葉菜類は水耕法で栽培できるが、多くの作物は固形培地耕で栽培する。月面は重力が存在する(1/6G)ため、養液栽培は地上の技術がほぼそのまま運用できると考えられる。

3.2.2. 作物種間差

植物工場における生産性(1作の収量)は、環境条件と栽培条件を最適化すれば、慣行法の同等～3倍程度である。イネ(水稻)の場合、水田の平均収量の2倍の収量を得ることができる。また年に3作程度の栽培ができるため、年間収量は水田の約6倍になる⁴⁾。

植物工場において栽培に必要な電力は主に照明と空調に使われる。植物体内の物質合成の第1ステップである光合成(糖の合成)の効率は、作物種間によらずほぼ同じとみなしてよい⁵⁾ため、投入電力量あたりの乾物重量成長の効率は植物種間差は小さいと考える。ただし、タンパク質、脂質、二次代謝物の合成効率は作物種間で異なる。

作物種間で異なる他の点として、可食部比率(収穫指数、harvest index)と栽培管理作業の労働量がある。可食部比率が大きいと残渣になる非可食部が少ないことを意味する。栽培管理作業や収穫作業などの労働量は、作物種間差が大きい。栽培管理が複雑だったり長時間必要であると月面居住者の負担が増える。しかし労働量については後述する機械化・ロボット化によって解決が可能であるため、候補作物の選定では、あまり重視しないでよい。

3.2.3. ウイルスフリー化

月面基地内で植物のウイルス病、カビ病を蔓延させないために、地球上から作物をウイルスフリー化して月面基地に持ち込むことが望ましい。現状では植物組織培養法によるウイルスフリー化・増殖が可能な作物と技術未確立の作物に大別できる。そのため、作物の選定において留意するのが望ましい。また地上から病害虫類を持ち込まないことも必要である。以上を考慮すれば、月面農場では病虫害の発生を抑えることができるため、無農薬栽培が可能になる。

3.2.4. 形質

農業の品種改良において重視された病虫害耐性、環境ストレス耐性および高い水利用効率は、植物工場では必要ない。むしろ、植物工場の好適栽培条件下で高速成長を示す品種を探し出すことも有用である。植物工場において高速成長をする、栄養成分・機能性成分を高含有するなどの有益な形質を付与した遺伝子組換え作物を利用することも想定する。

3.2.5. 機械化、ロボット化、ICT利用

農業分野のAI、ICT、機械化、ロボット化は、月面基地の稼働時期までに大幅に進歩していることが予想される。そこで、現在すでに可能性が示唆されている機械化・ロボット技術は導入できると仮定する。人間の嫌う、単純、辛い、危険な農作業はロボットが行うと仮定する。受粉昆虫は導入しても良いが、しない場合は、ホルモン剤散布を含めてロボットが行うと仮定する。ただし、これらを実現するための要素技術開発が必要である。

以上の観点と3.1節の食事摂取基準を考慮して、下記の作物を候補作物として選定した。

穀類	イネ
マメ類	ダイズ
イモ類	ジャガイモ、サツマイモ
果菜類	トマト、イチゴ、キュウリ
葉菜類	レタス、その他(コマツナなど)

いずれも植物工場での栽培が可能であり、組織培養法によるウイルスフリー化が可能で、遺伝子組換えも可能である。

主要な穀類にイネ、コムギ、オオムギがあるが、和食を中心に料理のバラエティを考慮してイネを選んだ。植物工場での栽培は研究例が豊富である。ダイズはマメ類の中では主食、副食、植物油としても利用可能で、豆腐やハンバーグの食材にも使えるポピュラーな作物であり、植物工場での栽培は研究レベルでは豊富である。ジャガイモとサツマイモは露地農業では土壌中でイモが肥大する。ジャガイモや塊茎であり養液栽培の

研究例が多い。サツマイモは肥大根であり養液栽培はやや難しいが研究開発がなされている。どちらも栄養価が高く料理に欠かせない作物であり選定した。野菜では、生産量が多く食材としての利用価値が高い果菜類と葉菜類を選んだ。それぞれポピュラーな作物で植物工場の生産事例の多い作物種を選定した。

今回選定した作物群以外には種実類、根菜類、果樹、茶などがある。これらの作物は、選定した 8 作物の栽培方法を適用すれば、いずれかの方法で栽培が可能である。したがって本報告では、この 8 作物の組み合わせを用いて各種の検討を行う。

3.2.6. 選定した候補作物の特徴⁶⁾⁷⁾⁸⁾

選定された候補作物の栄養学的な特徴は下記の通りである。

(1)イネ <コメ (玄米) >

イネの可食部であるコメについて説明する。コメは、炭水化物を多く含み、主要なエネルギー源であり、主食となる。玄米は、もみからもみ殻を除いたもので、ぬかと胚芽が残っているため、精製したコメと比べ、たんぱく質、脂質、ミネラル、食物繊維が多いが、消化吸収率は低い。

(2)ジャガイモ

ジャガイモは、冷涼な気候での栽培に適する。安定して収穫でき、貯蔵性が高いため世界的にも重要な食物である。味が淡白なため、主食としても常用される。主成分はでんぷんであり、ビタミン C、ビタミン B₁、カリウムを多く含み、フランスでは「大地のりんご」とも呼ばれる。主食になる野菜として世界中で栽培される。

(3)サツマイモ

サツマイモは、気象の変化に強く、安定して収穫できることから、救荒作物として重視されていた。イモ類の中では糖分含有量が高く甘みが強い。主成分はでんぷんで、ビタミン C、ビタミン E、カリウム、カルシウム、銅などのミネラルと食物繊維を多く含む。葉や茎も食することができる。

(4)ダイズ

①ダイズ

ダイズは「畑の肉」と呼ばれるほど良質なたんぱく質に富み、カルシウム、ビタミン B₁、ビタミン B₂、ビタミン E を多く含む。ダイズは組織が固く、消化が悪いことから豆腐、油揚げ、豆乳、みそ、納豆、油脂、醤油など、様々な加工品に加工される。

②エダマメ

大豆を完熟前に収穫した未熟豆を指す。大豆と同様に、たんぱく質、糖質、ビタミン B₁、ビタミン B₂、カルシウムが豊富に含まれ、大豆にはないビタミン C を含む。

(5)トマト (ミニトマト)

鮮やかな色で料理を引き立てるナス科の西洋野菜。日本では生で食べる事が多く使用頻度が高い。ミニトマトは、小粒で甘みが強く多汁質で、ほどよい酸味を持つ。赤い色素はリコピンと呼ばれ抗酸化作用を持つ。ビタミン C とビタミン A が比較的多く、カリウムを含む緑黄色野菜である。

(6)キュウリ

さわやかな香りと歯触りが特徴で生で食べられることから常備野菜の一つとされる。キュウリの約 95%は水分であり、残りの 4%にビタミンやミネラル、炭水化物などがわずかに含まれる。ビタミン C を壊すアスコルビナーゼという酵素が含まれる (酸により抑制される)。

(7)レタス (リーフレタス)

シャキッとしており、何にでも合わせやすい万能野菜である。全体の約 95%が水分で、ビタミン C、E、カロテン、カルシウム、カリウム、鉄、亜鉛などを含む。結球レタスに比べ、リーフレタスはカリウムを始めビタミン、ミネラル含量が多い。

(8)イチゴ

洗うだけで簡単に食べることができ、さわやかな甘みと香りで万人に好まれる。果物の中でもビタミン C を多く含み、果肉は多汁質でほどよい甘みと酸味が特徴の果物である。

表 3.3 8作物種の栄養価(100gあたり)⁹⁾

	エネルギー kcal	たんぱく質 g	脂質 g	炭水化物 g	食物繊維 g	ナトリウム mg	カリウム mg	カルシウム mg	マグネシウム mg	リン mg	鉄 mg	亜鉛 mg	銅 mg	マンガン mg	ヨウ素 μg	セレン μg	クロム μg	モリブデン μg	レチノール 当量 μg
1) コメ 玄米	353	6.8	2.7	74.3	3.0	1	230	9	110	290	2.1	1.8	0.27	2.06	0	3	0	64	0
精白米	358	6.1	0.9	77.6	0.5	1	89	5	23	95	0.8	1.4	0.22	0.81	0	2	0	69	0
2) サツマイモ	134	1.2	0.2	31.9	2.2	11	480	36	24	47	0.6	0.2	0.17	0.41	1	0	1	4	2
3) ジャガイモ	76	1.6	0.1	17.6	1.3	1	410	3	20	40	0.4	0.2	0.10	0.11	0	0	5	4	0
4) ダイズ	422	33.8	19.7	29.5	17.9	1	1900	180	220	490	6.8	3.1	1.07	2.51	0	5	3	350	1
エダマメ	135	11.7	6.2	8.8	5.0	1	590	58	62	170	2.7	1.4	0.41	0.71	0	1	1	240	22
5) レタス	16	1.2	0.2	3.2	2.0	4	410	66	15	31	1.8	0.4	0.05	0.43	0	0	0	0	170
6) ミントマト	29	1.1	0.1	7.2	1.4	4	290	12	13	29	0.4	0.2	0.06	0.10	4	0	0	4	80
7) キュウリ	14	1.0	0.1	3.0	1.1	1	200	26	15	36	0.3	0.2	0.11	0.07	1	1	1	4	28
8) イチゴ	17	0.5	0.1	4.3	0.7	0	85	9	7	16	0.2	0.1	0.03	0.10	1	0	0	5	1

	レチノール 当量 μg	ビタミンD μg	α-トコフェ ロール mg	ビタミンK μg	ビタミンB1 mg	ビタミンB2 mg	ナイアシン mg	ビタミンB6 mg	ビタミンB12 μg	葉酸 μg	パントテン 酸 mg	ビオチン μg	ビタミンC mg	食塩相当 量 g
1) コメ 玄米	0	0.0	1.2	0	0.41	0.04	6.3	0.45	0.0	27	1.37	6.0	0	0.0
精白米	0	0.0	0.1	0	0.08	0.02	1.2	0.12	0.0	12	0.66	1.4	0	0.0
2) サツマイモ	2	0.0	1.5	0	0.11	0.04	0.8	0.26	0.0	49	0.90	4.1	29	0.0
3) ジャガイモ	0	0.0	0.0	0	0.09	0.03	1.3	0.18	0.0	21	0.47	0.4	35	0.0
4) ダイズ	1	0.0	2.3	18	0.71	0.26	2.0	0.51	0.0	260	1.36	27.5	3	0.0
エダマメ	22	0.0	0.8	30	0.31	0.15	1.6	0.15	0.0	320	0.53	11.1	27	0.0
5) レタス	170	0.0	1.2	160	0.10	0.10	0.3	0.08	0.0	120	0.14	0.0	17	0.0
6) ミントマト	80	0.0	0.9	7	0.07	0.05	0.8	0.11	0.0	35	0.17	3.6	32	0.0
7) キュウリ	28	0.0	0.3	34	0.03	0.03	0.2	0.05	0.0	25	0.33	1.4	14	0.0
8) イチゴ	1	0.0	0.2	0	0.02	0.01	0.2	0.02	0.0	45	0.17	0.4	31	0.0

3.3. 月面農場における1日の摂取量の決定²⁹⁾

本ワーキンググループでは、地球からの補給に頼らず月面農場で栽培された植物で自給自足をを行うことを前提条件として検討を進めた。それぞれの栽培作物の栄養素的な特徴を踏まえ、「食事摂取基準」の示す範囲を目指し、はじめに、エネルギーと3大栄養素のバランスを考慮し8作物種の1日量を決定した。

ビタミン・ミネラルは可能な限り推奨量(RDA)を目指し、推定平均必要量(EAR)から耐用上限量(UL)の範囲を目標値とし、内容を調整した。最終的に玄米 400g、サツマイモ 150g、ジャガイモ 75g、大豆(乾)120g、エダマメ 50g、リーフレタス 150g、トマト 200g、キュウリ 100g、イチゴ 50gを本ワーキンググループにおける1日量として決定した。8つの作物種の補給量と基準値(※推定平均必要量、推奨量、目安量のいずれか)との比較は表4に示す。

表 3.4 8作物種から得られる栄養量と日本人の食事摂取基準(2015年版)基準値との比較

食品名	重量 (g)	エネルギー kcal	たんぱく質 g	脂質 g	炭水化物 g	食物繊維 g	ナトリウム mg	カリウム mg	カルシウム mg	マグネシウム mg	リン mg	鉄 mg	亜鉛 mg	銅 mg	マンガン mg	ヨウ素 μg	セレン μg	クロム μg	モリブデン μg
玄米	400	1412	27.2	10.8	297.2	12	4	920	36	440	1160	8.4	7.2	1.08	8.24	0	12	0	256
サツマイモ	150	201	1.8	0.3	47.85	3.3	16.5	720	54	36	70.5	0.9	0.3	0.26	0.62	2	0	2	6
ジャガイモ	75	57	1.2	0.075	13.2	0.975	13.2	307.5	2.25	15	30	0.3	0.15	0.08	0.08	0	0	4	3
大豆(乾燥)	120	506	40.56	23.64	35.4	21.48	1.2	2280	216	264	588	8.16	3.72	1.28	3.01	0	6	4	420
エダマメ	50	68	5.85	3.1	4.4	2.5	0.5	295	29	31	85	1.35	0.7	0.21	0.36	0	1	1	120
大豆油	30	276	0	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0	0	0	0
リーフレタス	150	24	1.8	0.3	4.8	3	6	615	99	22.5	46.5	2.7	0.6	0.08	0.65	0	0	0	0
ミントマト	200	58	2.2	0.2	14.4	2.8	8	580	24	26	58	0.8	0.4	0.12	0.20	8	0	0	8
キュウリ	100	14	1	0.1	3	1.1	1	200	26	15	36	0.3	0.2	0.11	0.07	1	1	1	4
イチゴ	50	17	0.45	0.05	4.25	0.7	0	85	8.5	6.5	15.5	0.15	0.1	0.03	0.10	1	0	0	5
合計	1325	2633	82.06	68.565	424.5	47.9	38	6003	495	850	2090	23.1	13.4	3.23	13.32	11	20	10	822
基準			P比(12%)	F比(23%)	C比(65%)			2500	650	370	1000	7.5	10	1	4	130	30	10	25
充足率								240%	76%	231%	209%	307%	134%	323%	333%	8%	65%	104%	3286%
評価			○	○	○	○	○	過剰	不足	過剰	○	○	○	○	過剰	不足	不足	○	過剰

食品名	レチノール μg	ビタミンD μg	α-トコフェ ロール mg	ビタミンK μg	ビタミンB1 mg	ビタミンB2 mg	ナイアシン mg	ビタミンB6 mg	ビタミンB12 μg	葉酸 μg	パントテン 酸 mg	ビオチン μg	ビタミンC mg	食塩相当 量 g
玄米	0	0.0	4.8	0	1.64	0.16	25.2	1.80	0.0	108	5.48	24.0	0	0.0
サツマイモ	3	0.0	2.3	0	0.17	0.06	1.2	0.39	0.0	74	1.35	6.2	44	0.0
ジャガイモ	0	0.0	0.0	0	0.07	0.02	1.0	0.14	0.0	16	0.35	0.3	26	0.0
大豆(乾燥)	1	0.0	2.8	22	0.85	0.31	2.4	0.61	0.0	312	1.63	33.0	4	0.0
エダマメ	11	0.0	0.4	15	0.16	0.08	0.8	0.08	0.0	160	0.27	5.6	14	0.0
大豆油	0	0.0	3.1	63	0.00	0.00	0.0	0.00	0.0	0	0.00	0.0	0	0.0
リーフレタス	255	0.0	1.8	240	0.15	0.15	0.5	0.12	0.0	180	0.21	0.0	26	0.0
ミントマト	160	0.0	1.8	14	0.14	0.10	1.6	0.22	0.0	70	0.34	7.2	64	0.0
キュウリ	28	0.0	0.3	34	0.03	0.03	0.2	0.05	0.0	25	0.33	1.4	14	0.0
イチゴ	1	0.0	0.2	0	0.02	0.01	0.2	0.02	0.0	45	0.17	0.4	31	0.0
合計	459	0.0	17.4	388	3.21	0.92	33.0	3.42	0.0	889	10.12	78.0	221	0.0
基準	900	5.5	6.5	150	1.4	1.6	15	1.4	2.4	240	5	50	100	
充足率	51%	0%	268%	258%	230%	57%	220%	244%	0%	412%	202%	156%	221%	
評価	不足	不足	○	過剰	過剰	不足	○	○	不足	○	過剰	過剰	過剰	

3.4. 必要な栽培面積

植物工場で想定する成長・収量などの栽培データと可食部収穫指数(H.I.)などを考慮すると、必要面積は以下のようになる。

表 3.5 必要栽培面積の算出例

	1人あたりの 必要重量 (g/day)	植物工場における生産性			1人あたりの 必要面積 (m ²)	必要面積	
		1作の生産量 (g/m ²)	栽培日数 (day)	日生産量 (g/m ² /day)		6人 (m ²)	100人 (m ²)
イネ	400	900	90	10	40.0	240	4000
ジャガイモ	75	8000	360	22	3.4	20	338
サツマイモ ¹⁾	150	-	-	20	7.5	45	750
ダイズ	350	1400	100	14	25.0	150	2500
レタス	150	2500	30	83	1.8	11	180
トマト	200	83000	360	231	0.9	5	87
キュウリ	100	70000	360	194	0.5	3	51
イチゴ	50	17000	360	47	1.1	6	106

¹⁾ サツマイモの栽培例が少ないため、日生産量をジャガイモの約9割と仮定した。

3.5. 過剰となる可能性のある栄養素

摂取量が過剰となる可能性のある栄養素(推定平均必要量または推奨量の2倍以上)は、カリウム、マグネシウム、ビタミンK、ビタミンB₁、パントテン酸、ビタミンC、銅、α-トコフェロール、ナイアシン、ビタミンB₆、葉酸、鉄、マンガン、モリブデンの14の栄養素である。

表 3.6 推定平均必要量または推奨量の2倍以上となる栄養素
(上限量以下の栄養素は除く)

<耐用上限量なし>

食品名	カリウム mg	マグネシウム mg	ビタミンK μg	ビタミンB ₁ mg	パントテン酸 mg	ビタミンC mg
1日の合計栄養価	6003	856	388	3.21	10.12	221
基準	2500	370	150	1.4	5	100
充足率	240%	231%	258%	230%	202%	221%
耐用上限量	-	-	-	-	-	-
評価	過剰	過剰	過剰	過剰	過剰	過剰

<耐用上限量あり>

食品名	銅 mg	αトコフェロール mg	ナイアシン mg	ビタミンB ₆ mg	葉酸 μg	鉄 mg	マンガン mg	モリブデン μg
1日の合計栄養価	3.23	17.4	33.0	3.42	989	23.1	13.32	822
基準	1	6.5	15	1.4	240	7.5	4	25
充足率	323%	268%	220%	244%	412%	307%	333%	3286%
耐用上限量	10	900	350	60	1000	55	11	550
評価	過剰	過剰	過剰	過剰	過剰	過剰	過剰	過剰

8つの作物種の補給量による栄養素と「食事摂取基準」と比較すると、マンガン、モリブデンが耐用上限量以上となること課題としてあげられる。

マンガンは成人の体内に12~20mg存在し、マンガンスーパーオキシドジスムターゼなどの酵素の構成、アルギナーゼなどの酵素の活性化を行っており、骨代謝、糖脂質代謝、運動機能、皮膚代謝等に関与する。マンガンは穀類、野菜類、豆類に多く含まれ、厳密な菜食など特異な食事形態及びサプリメントの不適切な利用によって過剰摂取が生じる可能性があり、耐用上限量が設定されている。マンガンは、糠側に偏在するため、精米によって5.0mg減らすことが可能である(図3.1)。過剰症を防ぐ意味でも精米の工程は必要となる可能性がある。

一方、モリブデンは、キサンチンオキシダーゼ、アルデヒドオキシダーゼ、亜硫酸オキシダーゼの補酵素として機能している。モリブデンも穀類や豆類に多く含まれることから、極端な菜食の場合に摂取量が多くなる。モリブデンは玄米と白米で比較した場合、両者に明確な差を認めず、コメ全体にほぼ均一に分布している⁷⁾、との報告があり、モリブデンは、精米による減少は見込めない。しかし、植物性食品のモリブデンをはじめとする微量ミネラル濃度は、生育土壌や品種の影響を受けて変動することが明らかとなっていることから、養液の組成を含め検討を行うことが必要である。

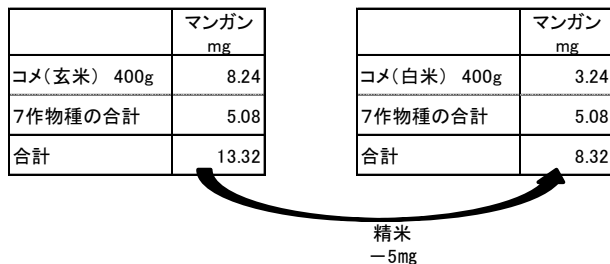


図 3.1 コメの精米によるマンガン量の変化

8つの作物種の補給量が定平均必要量または推奨量の2倍以上となる栄養素は、12の栄養素である。これらは、耐用上限量の設定がない、または、耐用上限量以下のため健康障害リスクは少ないと考えられる。しかし、宇宙環境では宇宙放射線への暴露により、鉄が酸化剤として組織障害を引き起こす懸念があるため、鉄の過剰摂取には注意が必要である⁷⁾。また、葉酸をはじめ、過剰の可能性のある栄養素のうち、ビタミンK、ビタミンC以外の栄養素は精米を行うことで含有量が減少する(表 3.7)。ナイアシンのみ基準値をわずかに下回るが、過剰による健康リスクが懸念されるため、過剰摂取のリスク軽減を優先して考える必要がある。モリブデンやマンガンと同様に、精米の行程を行うことや、栽培養液組成を含め検討を進める必要がある。

また、食物繊維やカリウムは耐用上限量が設定されていないが、現代では不足しやすい栄養素のため過剰に摂取した場合についての検討が少なく言及が難しい。耐用上限量がない栄養素においても、地上での生活と大きく異なることから、慎重な検討が必要である。

表 3.7 コメの精製による栄養価の変化

	重量 (g)	エネルギー (kcal)	カリウム (mg)	マグネシウム (mg)	鉄 (mg)	銅 (mg)	αトコフェロール (mg)	ビタミンK (μg)	ビタミンB1 (mg)	ナイアシン (mg)	ビタミンB6 (mg)	葉酸 (μg)	パントテン酸 (mg)	ビタミンC (mg)
玄米400g+7作物種	1325	2633	6003	856	23.1	3.23	17.4	388	3.21	33.0	3.42	989	10.12	221
充足率			240%	231%	307%	323%	268%	258%	230%	220%	244%	412%	202%	221%
白米400g+7作物種	1325	2653	5439	508	17.9	3.03	13.0	388	1.89	12.6	2.10	929	7.28	221
充足率			218%	137%	238%	303%	200%	258%	135%	84%	150%	387%	146%	221%
精米の影響			減少	減少	減少	減少	減少	なし	減少	減少	減少	減少	減少	なし

3.6. 不足の可能性のある栄養素

日本人の食事摂取基準と8作物種からの補給量を比較すると、カルシウム、ヨウ素、セレン、ビタミンA(レチノール)、ビタミンD、ビタミンB₂、ビタミンB₁₂の7つの栄養素(ナトリウムは、野菜だけで補給はされないが、調理の際に、調味料等々から摂取が見込めることから除外)が推定平均必要量または推奨量以下となる。

月面農場では、緑黄色野菜が少なく、動物性食品(魚類、肉類、乳製品)の供給がないため、食品に特異的に含まれる栄養素の不足が考えられる。中でも、宇宙環境では筋・骨量が減少するとされており、カルシウム、ビタミンDには注意する必要がある。8作物種からの補給で不足する栄養素に関しては、補助食品(サプリメント)から補う必要がある。基準と比べ不足する栄養素の量は158.9mgと計算である(表 3.9)。実際に、宇宙飛行士は不足するビタミンDサプリメントの持ち込みを行っており、不足する栄養素は欠乏症のリスクを回避する上でも補うことが必要である。

表 3.8 不足する栄養素

食品名	重量 (g)	カルシウム mg	ヨウ素 μg	セレン μg	レチノール μg	ビタミンD μg	ビタミンB2 mg	ビタミンB12 μg
玄米	400	36	0	12	0	0.0	0.16	0.0
サツイモ	150	54	2	0	3	0.0	0.06	0.0
ジャガイモ	75	2.25	0	0	0	0.0	0.02	0.0
大豆(乾燥)	120	216	0	6	1	0.0	0.31	0.0
エダマメ	50	29	0	1	11	0.0	0.08	0.0
大豆油	30	0	0	0	0	0.0	0.00	0.0
リーフレタス	150	99	0	0	255	0.0	0.15	0.0
ミニトマト	200	24	8	0	160	0.0	0.10	0.0
キュウリ	100	26	1	1	28	0.0	0.03	0.0
イチゴ	50	8.5	1	0	1	0.0	0.01	0.0
合計	1325	495	11	20	459	0.0	0.92	0.0
基準		650	130	30	900	5.5	1.6	2.4
充足率		76%	8%	65%	51%	0%	57%	0%
評価		不足	不足	不足	不足	不足	不足	不足




表 3.9 不足する栄養素量

	補給量	基準値	不足量	(mg)
カルシウム (mg)	495	650	155	155
ヨウ素 (μg)	11	130	119	0.119
セレン (μg)	20	30	10	0.01
レチノール (μg)	459	900	441	0.441
ビタミンD (μg)	0	5.5	5.5	0.0055
ビタミンB2 (mg)	0.92	1.6	0.68	0.92
ビタミンB12 (mg)	0	2.4	2.4	2.4
合計(mg)				158.9

3.7. 8作物種を用いた食事イメージ




3.3 で決定された8作物種の補給量で、一般的な家庭料理を参考に1日の食事イメージを作成した。

表 3.10 1日の食事イメージ

	料理名	料理写真	エネルギー kcal	たんぱく質 g	脂質 g	炭水化物 g	食物繊維 g	食塩相当 量 g
朝	ごはん		469	9.0	3.6	98.8	4.0	0.0
	煮豆		156	10.8	5.9	15.7	5.4	1.3
	呉汁		59	4.5	2.5	4.9	2.2	1.1
	中華和え		71	1.9	4.2	7.7	1.8	0.9
	いちご		17	0.5	0.1	4.3	0.7	0.0
	合計		773	26.8	16.2	131.4	14.1	3.3
昼	ダイズカレー		860	27.4	28.2	124.2	13.9	1.6
	レタスの甘酢和え		31	0.9	0.2	6.5	1.1	0.0
	合計		891	28.3	28.4	130.7	15.0	1.6
間食	さつまいも茶巾		117	0.7	0.4	27.8	2.1	0.1
	合計		117	0.7	0.4	27.8	2.1	0.1
夕	ごはん		469	9.0	3.6	98.8	4.0	0.0
	ダイズハンバーグ		433	15.9	23.1	41.3	9.2	2.0
	サツマイモの甘煮		128	0.7	0.4	30.8	2.1	0.1
	トマトスープ		14	0.6	0.1	3.3	0.8	1.0
	えだまめ		34	2.9	1.6	2.2	1.3	0.0
	合計		1078	29.2	28.7	176.4	17.3	3.1
一日の合計			2859	84.9	73.6	466.2	48.4	8.1

別途、サツマイモは茎や葉を喫食できることから、レシピを作成した。

表 3.11 サツマイモ茎葉料理

お浸し	きんぴら	チヂミ風	中華炒め
		 (ジャガイモのすりおろしをつなぎに利用)	

サツマイモの茎や葉は、日本では食用される機会が少ないが、クセがなく、短時間の加熱でおいしく食べることができる。日本食品標準成分表 2015 年版(七訂)では、サツマイモの茎や葉の栄養価の記載がなく、詳細な栄養価は不明のため、分析が必要である。

3.8. 8 作物種のための食材による栄養摂取の限界

8 作物種のための食環境は、地球上の食環境と大きく異なる。特に、地上では、多岐に渡る食品があり、豊かな食環境は栄養素の補給だけでなく、精神衛生の面でも大きく貢献している。肉・魚・卵・乳製品などの動物性食品、キノコや果樹、海藻といった食材が今回検討から外れたが、8つの植物性食品のみで構成された食事による生活は、これまでの実績がなくわからない部分が多い。

実際に宇宙食は、16 周期のサイクルで作成されているが、宇宙飛行士からは、メニューの多様化が求められている¹¹⁾こと、増田らは、7 種類の作物だけでヒトの精神的ストレスを低く維持しながら長期間の閉鎖居住実験を行うことは不可能¹²⁾、と言及している。長期的な滞在を目指すためにも、将来的には栽培品目の増加、更には牛、豚、鶏、魚といった家畜類の導入を行い、食事に対する多様性を増やしていくことが必須と考えられる。

3.9. まとめ

対象とした 8 作物種で、エネルギーを始め炭水化物、たんぱく質、脂質の 3 大栄養素を満たすことは可能であったが、ビタミン・ミネラルの過不足が課題である。マンガン、モリブデンをはじめ、過剰の可能性のある栄養素は 14 種類である。これらは過剰摂取による健康リスクが懸念されるため、不足する栄養素と比べ、健康リスク軽減を優先して考える必要がある。その対処方法として、精米によって、糠・胚芽を取り除くことや、栽培液組成を変えることが挙げられる。

不足する栄養素は、カルシウム、ヨウ素、セレン、ビタミン A(レチノール活性当量)、ビタミン D、ビタミン B₂、ビタミン B₁₂ である。その要因として月面農場には動物性食品、海藻、きのこ、緑黄色野菜がないためである。今回検討をした 8 作物種からの補給が難しいため、サプリメントからの補給が必須である。サプリメントの補給量は 158.9 mg/日程度と考えられる。

今回は、30～49 歳の男性(身体活動レベル 2)を基準に検討を行ったが、他の年齢または、女性については別途検討が必要である。

引用文献

- 1) 松本暁子, “宇宙での栄養”宇宙航空環境医学, Vol.45, No.3, 75-97, 2008
- 2) 日本人の食事摂取基準(2015年版), 厚生労働省
- 3) 養液栽培の全て, 日本施設園芸協会・日本溶液栽培研究会共編, 誠文堂, 2012
- 4) Eiji Goto, Production of pharmaceutical materials using genetically modified plants grown under artificial lighting. *Acta Hort.* 907: 45-52. 2011.
- 5) 後藤英司, 人工環境下の植物の光合成と物質生産, *TechnoInnovation*, 16(4): 18-22, 2006
- 6) 食品解説つき 新ビジュアル食品成分表, 新しい食生活を考える会. 大修館書店, 2016
- 7) 野菜と果物の品目ガイド, 霜村春奈, 農経新聞, 2014
- 8) からだに美味しい 野菜の便利帳, 坂木利隆, 高橋書店, 2008
- 9) 日本食品標準成分表 2015年版(七訂), 文部科学省
- 10) 齊悦, 崔懿, 下城千可, 吉田宗弘, “コメのマンガンとモリブデン含有量”, *Biomedical Research on Trace Elements* 26(1); 23-26, 2015
- 11) 立花正一, 中沢孝, 渋川喜和夫, “宇宙環境のストレスと宇宙食”, *日本食品科学工学会誌* 第55巻 第12号, 2008年12月
- 12) 増田毅, 多胡靖宏, “閉鎖居住実験の準備状況(1)閉鎖生態系実験施設(CEEF)における食糧供給” *Eco-Engineering*, 17(3), 183-189, 2005