

7. 月面農場システムの検討

～ 生命維持システム設計の観点から見た月面農場の検討 ～

宮嶋宏行(国際医療福祉大学 総合教育センター 教授)

7.1. はじめに

月では約 4 週間周期で約 2 週間ずつの昼夜があり、夜間の電力を貯蔵する必要があるため、従来、月面での食料生産は魅力的な選択肢ではなく、食料生産は約 24 時間 40 分周期の昼夜がある火星に焦点を当てるが多かった。宇宙での食料生産のための作物栽培は、1960 年代のロシアでの研究以降、多数の事例がある。食料生産と居住を地上実験施設で同時に実施した代表的な事例にはロシアの BIOS3^{3,4)}、米国の Lunar Mars Life Support Test Project (LMLSTP)⁵⁾、日本の Closed Ecology Experiment Facilities (CEEFF)⁶⁾がある。最近の事例では中国の Lunar Palace 1⁷⁾がある。特に近年の作物栽培では、LED の利用が一般的になり、高圧ナトリウムランプを利用していた時代とは耐久性、軽量化、エネルギー利用効率の面で大きく異なる設計が可能になった。^{8,9,10)}

そこで本検討では、生物再生型生命維持システム分析ツール^{11,12)}を用いて、最新の植物工場の知見を取り入れた月面農場のシステム設計を行う。特に食料生産は、生命維持システムの設計に大きく関わるため、生命維持システム設計の観点から、月面農場全体の仕様を検討する。本報告では、分析ツールの設計法や計算手順について示した後、ワーキンググループで検討された設定値¹³⁾を用いて、月面農場を設計した一例について示す。

7.2. 月面農場設計の前提条件

まず、ワーキンググループの月面農場設計の前提条件について示す。月面拠点システムに必要な全体システムのうち他のグループで検討されている部分については次のような前提条件を設定した。

GR1：ISRU 利用により水、酸素、窒素を月面で製造できる。

GR2：月面でコンクリートを製造できる。

GR3：拠点位置を南極域の高地と想定し、9 割の日照率で太陽電池を利用できる。

GR4：原子力発電の利用も電力供給源の選択肢の 1 つである。

日本人の食事摂取基準 2015 年版¹⁴⁾に掲載された栄養価を参考に、エネルギー、たんぱく質、脂質のバランスを考慮し栽培作物候補が決められ、基準モデルは 30～49 歳男性身体活動レベルⅡ（2650kcal/日）である。農作物からの栄養は、植物性のみであることを考慮し、動物性たんぱく質を地球から供給する。その他の不足する栄養素についてはサプリメントとして地球から供給する。

作物種は、栽培面積、必要エネルギー、作業労働量、料理メニュー数を考慮して選定された。ワーキンググループで現在設定されている栽培作物と栽培量を表 7.1 に示す。地上の植物工場で得られた生産量や収穫指数から必要面積が決定された。イネ、ジャガイモ、サツマイモ、大豆、レタス、トマト、キュウリ、イチゴの 8 種類を内部で生産する。また、これら 8 種類では不足するエネルギーとたんぱく質については、動物性たんぱく 50g を地球から持ち込むという前提で計算する。このときのエネルギー、要求量、収穫までの日数、収穫指数、一日当たりの可食部の生産量、一人分の食料生産に必要な栽培面積、栽培棚の段数を考慮した実際の床面積を表 7.1 に示す。イネ、ダイズの栽培棚の段数、および床面積は、ここに示す 3 通りについて検討する。

表 7.1 月面農場の栽培作物候補

作物	エネルギー	要求量*1	収穫までの 日数	収穫指数*1	1 日の 生産量*1	一人当たり 栽培面積	栽培棚段数 *2	床面積 *2
	kcal/day	g/day	day	-	g/m ² /day	m ²	-	m ²
イネ	1421.1	335.2	90	0.5	8.5	40.0	1	40.0
							2	20.0
							3	13.3
ジャガイモ	58.6	15.6	100	0.82	4.6	3.4	3	1.13
サツマイモ	206.2	52.0	120	0.65	7.0	7.5	3	2.5
ダイズ	646.9	131.9	100	0.52	5.6	25.0	1	25.0
							2	12.5
							3	8.33
レタス	26.3	7.4	30	0.91	4.2	1.8	5	0.36
トマト	48.8	12.4	100	0.7	13.9	0.9	1	0.9
キュウリ	18.3	4.8	80	0.7	9.7	0.5	1	0.5
イチゴ	12.2	3.1	60	0.7	2.8	1.1	5	0.22
小計	2438.5	562.4				80.2		70.6
								38.1
								27.3
動物性たんぱく*3	211.0	50.00						
合計	2649.5	612.4						

*1 WG で設定された数字をドライマスに変換

*2 イネ、ダイズの栽培棚段数を 1 段, 2 段, 3 段の 3 通り検討する。これらのシステムを CLOSED 1、CLOSED 2、CLOSED 3 と呼ぶ。

*3 動物性たんぱくを追加で摂取したと仮定

NASA の先端生命維持システムの基準値^{15,16,17)}をもとに、人間の生活に関わる設定値を表 7.2 に示すように設定する。

表 7.2 人間の生活に関わる設定値（1 日一人当たりの kg）

要求項目	月面拠点, kg/CM-d
酸素	表 7.1 の設定による
食料（固形）	表 7.1 の設定による
食料（水分）	表 7.1 の設定による
代謝水	表 7.1 の設定による
調理用水	0.76
飲用水	2.10
手洗い用水	0.20
シャワー用水	2.72
トイレ洗浄水	0.30
洗濯用水	12.5
その他	0.78

7.3. 物質収支計算

表 7.1 の作物の栽培量をもとに生化学量論(付録 7A)^{18,19)}により物質収支を計算した結果を表 7.3 に示す。不足する物質が外部からの補給量になる。

表 7.3 物質収支モデル

	Input 1	Input 2	Input 3	Input 4	Output 1	Output 2	Output 3
植物	CO ₂	H ₂ O	NH ₃	HNO ₃	Edible	Inedible	O ₂
dry-g/CM	1741.2	621.7	19.1	42.4	562.4	497.8	1364.2

計算は付録 7A の式(A1)(A2)を利用

	Input 1-4	Input 5	Output 1	Output 2	Output 3	Output 4	Output 5
人間	Food	O ₂	Urine	Feces	Other	CO ₂	H ₂ O
dry-g/CM	612.4	599.0	51.7	105.2	0.00	778.7	275.9

計算は付録 7A の式(A3)を利用

	Input 1-4 or Input 1	Input 2 or Input 5	Output 1	Output 2	Output 3	Output 4
廃棄物処理	Waste	O ₂	CO ₂	H ₂ O	N ₂	Residues
尿, dry-g/CM	43.9	39.0	42.9	26.3	13.7	6.6
便, dry-g/CM	105.2	208.7	228.4	76.8	8.7	0.0
非可食部, dry-g/CM	497.8	602.1	789.6	301.5	8.9	0.0
Total, dry-g/CM	646.9	849.8	1060.9	404.6	31.2	6.6

計算は付録 7A の式(A4)(A5)(A7)を利用

	Input 1	Input 2	Output 1	Output 2
N ₂ 固定	N ₂	H ₂ O	NH ₃	HNO ₃
Total, dry-g/CM	25.1	36.4	19.1	42.4

計算は付録 7A の式(A8)を利用

7.4. 生命維持システムの設計

付録 7B に示した等価システム質量 Equivalent System Mass (ESM)²⁰⁾を利用して、月面農場を組み込んだ生命維持システムの比較を行う。ESM は質量、体積、電力、冷却、労働時間より構成される。付録 7C の表 7C1 の生命維持システム要素技術候補^{20,21)}をもとに人数に比例した値を用いる。補給質量はその利用技術により変化する。

7.4.1. 計算手順

設計ツールの計算手順を図 7.1 に示す。ミッション要求設定、栽培作物設定、物質収支計算、サブシステム要素技術設定、ESM 計算の手順で検討し、ミッション要求の変更、栽培作物の変更、要素技術の変更の 3 つのループがあり(B)、ESM を減らす方策を検討する。また、検討中に栽培作物データ、および技術データの更新があれば、そのデータを全体の計算に反映させることができる(A)。

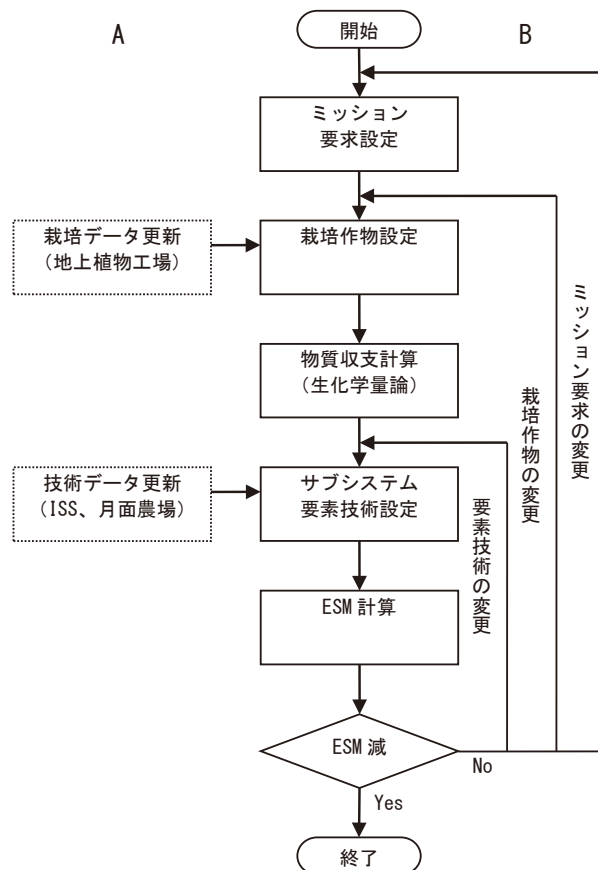


図 7.1 設計ツールの計算手順

7.4.2. 生命維持システムの構成

開放型、ISS 型、閉鎖型の要素技術を表 7.4 に示す。これら 3 つの型のサブシステムの質量、体積、電力、冷却、労働時間の組み合わせを付録 7C の表 7C2 に示す。開放型は、利用後の物質を再生しない。ISS 型は、二酸化炭素、水を再生し、廃棄物を再生せず乾燥させて貯蔵する。閉鎖型は、植物の光合成を利用して二酸化炭素と水を再生する。廃棄物を処理して再利用する。

表 7.4 月面拠点の要素技術

機能	サブ機能	開放型	ISS 型	閉鎖型
空気処理系	CO ₂ 除去	LiOH	4BMS	4BMS
	CO ₂ 還元	—	サバチエ	作物栽培
	微量有害物除去	活性炭、フィルタ	活性炭、フィルタ、酸化剤	活性炭、フィルタ、酸化剤
	空気貯蔵	N ₂ /低温 O ₂ タンク	N ₂ /O ₂ タンク	N ₂ /O ₂ タンク
	空気供給	N ₂ /低温 O ₂ タンク	CO ₂ 還元、水電気分解	作物栽培
	温湿度制御	CHX	CHX、排水へ凝縮	CHX、排水へ凝縮
水処理	飲料水貯蔵	タンク	タンク	タンク
	水供給	タンク	タンク、水再生	作物栽培
	水精製	ヨウ素、MCV	ヨウ素	ヨウ素
	排水処理	放出	多重ろ過	多重ろ過
	排水貯蔵	タンク	タンク	タンク
廃棄物処理系	尿処理	排水タンクへ	VCD	バイオリアクター
	便処理	便バッグ	便バッグ、乾燥圧縮	バイオリアクター、湿式酸化
食料系	食料生産	—	—	作物栽培
	食料供給	積載型食品	積載型食品	冷蔵/冷凍
居住系	洗濯	—	—	洗濯

4BMS: 4 ベッドモレキュラシープ, CHX: 凝縮熱交換, LiOH: 水酸化リチウム, MCV: 微生物チェックバルブ, VCD: 蒸気圧縮蒸留

7.4.3. 食料生産システム

月面農場の食料生産システムの ESM を表 7.5 に示す。この設計値は LED 照明、水耕栽培、インフレーターブル構造を前提とした。

表 7.5 の作物部分の初期質量 6.51kg/m^2 は、地球からの N_2 、 CO_2 、 NH_3 、 HNO_3 の質量の合計であり、 N_2 の質量は栽培空間の体積から計算され、 CO_2 、 NH_3 、 HNO_3 の質量は表 7.3 の物質収支をもとに計算された。

表 7.1 に示された作物栽培に必要な LED 電力を計算した。光量子束当たりの光合成量を 0.4g/mol とすると^{8,23)}、生産量 $1,090\text{g}$ (可食部 562g 、非可食部 498g)に必要な光合成光量子束は $2,651\text{mol}$ ($1,090\text{g}/0.4\text{g/mol}$)となる。LED の 1 ジュール当たりの光合成光量子を $1.66\mu\text{mol/J}$ とすると¹⁵⁾、光合成光量子束は $1,596,728\text{kJ}$ ($2,651\text{mol}/0.00166\text{mol/kJ}$)となる。仮に、このエネルギーを 8 時間で照射すると、必要電力は、 44.4kW/CM-day ($1,596,728\text{kJ}/36,000\text{s}$)となる。これを栽培面積 80.2m^2 で割ると 0.553kW/m^2 となる。また冷却(排熱)は、植物工場のデータより、LED 照明電力の 20%とした。労働時間 $1.3\text{h/m}^2\text{-year}$ は、ほとんどの農作業を機械化すると仮定した場合の数字である。

表 7.5 月面農場の食料生産システム

構成要素	初期質量	体積	電力	熱負荷	補給質量	労働時間
	kg/m^2	m^3/m^2	kW/m^2	kW/m^2	$\text{kg/m}^2\text{-year}$	$\text{h/m}^2\text{-year}$
作物部分	6.51	2.6	0.14	0.14	0	1.3
照明設備	7.54	0.4	0.691	0.138	0.19	0.0027
電力系	2.77	0	0.02	0.02	1.07	0.0032
機械系	4.1	0	0.1	0.1	0.5	0.1
2 次構造系(棚等)	5.7	0	0	0	0	0
合計	26.6	3.00	0.96	0.41	1.75	1.41
1 次構造系(インフレーターブル)	9.16	0	0	0	0	0

7.4.4. 資源再生システム

食料の生産に伴い、可食部の量に相当する非可食部が発生する。表 7.3 の物質収支をもとにバイオリアクターの ESM を計算する。一人当たりの非可食部のドライマスは 497.8g/day である。加水前の湿質量は、 736g/day (非可食部 497.8g/day 、水 238.2g/day)である。処理前に水の比率を 80%にするために $2,175\text{g}$ の水を加えると、合計量は 2987g (736g/day 、 2251g/day)となる。処理物の密度を $1,000\text{g/L}$ と仮定すると、その体積は 3.0L/day ($2987\text{g/day}/1000\text{g/L}$)となる。反応時間 20 日間と仮定すると反応容器の大きさは、 60L/day ($3.0\text{L/day}\times 20\text{day}$)、すなわち 0.06m^3 となる。

次に低炭素社会戦略センターの報告書²⁴⁾に示されたメタン発酵設備の仕様(処理能力 $17,500\text{kg}$ に対して、装置質量 $865,000\text{kg}$ 、装置体積 $33,600\text{m}^3$ 、電力 566kW 、冷却 361kW)をもとに、一人 1 日当たり 497.8g の処理ができるバイオリアクターの仕様を見積もると表 7.6 のようになる。この一人当たりの体積 1.17m^3 は 0.06m^3 に対して十分な大きさである。 1.17m^3 は反応容器だけではなく、その他の設備も含む体積である。

表 7.6 月面農場のバイオリアクター

質量	体積	電力	熱負荷	補給量	労働時間
kg/CM	m^3/CM	kW/CM	kW/CM	kg/CM-yr	h/CM-yr
30.0	1.17	0.02	0.01	TBD	TBD

7.5. システム設計案の比較

図 7.2 に月面農場のシステム構成を示す。このシステムは空気再生(Air)、食料生産(Biomass)、食料貯蔵(Food)、熱制御(Thermal)、廃棄物処理(Waste)、水再生(Water)、船外活動(EVA)(図 7.2 には示していない)、居住(Accommodations)の 8 つのサブシステムからなる。

ここでは開放型(OPEN)、ISS 型(空気と水の再生)(ISS(A+W))、3 つの閉鎖型(CLOSED 1, CLOSED 2, CLOSED 3)の 5 つの生命維持システム設計案を比較した。このうち閉鎖型が月面農場で食料生産する構成である。CLOSED 2 は CLOSED 1 に比べ、イネとダイズの栽培棚段数を 1 段から 2 段へ変更し、CLOSED 3 は 1 段から 3 段へ変更した。このとき食料生産システムを除く植物栽培モジュール(インフレータブル外殻)の設定は、表 7.7 のようになる。例えば、CLOSED 1 の床面積は 70.6m²、栽培空間の高さ 3m で、20%のマーヅンを含むその容積は 267m³である。これをシールドなしのインフレータブル構造で建設した場合の外殻質量は 2,444kg (267m³×9.16kg/m³)となる。単位体積当たりの質量 9.16kg/m³は、NASA 先端生命維持システムの基準値¹⁵⁾を利用した。

6 人の食料供給のためには、体積 1,601m³(267m³×6)、質量 14,661kg(2,444kg×6)の植物栽培空間が必要になり、これは 150m³のモジュール 11 棟に相当する。また CLOSED 2 を利用した場合は 6 棟、CLOSED 3 を利用した場合は 4 棟になる。この他に、居住モジュール 1 棟、実験モジュール 1 棟、ユーティリティモジュール 1 棟がある。これらのモジュールは図 7.3 に示すようにレゴリスで覆われ保護される。

表 7.8 に月面拠点の ESM 変換係数を示す。電力の変換係数は原子力発電を利用した場合の数値である。労働力の変換係数は、利用できる時間により変動するが、その計算方法²¹⁾については省略する。

表 7.7 植物栽培モジュール(インフレータブル外殻)の設定

	CLOSED 1	CLOSED 2	CLOSED 3
栽培面積, m ² /人	80.2	80.2	80.2
床面積, m ² /人	70.6	38.1	27.3
床面積/栽培面積	0.88	0.48	0.34
植物栽培空間の体積 (20%マーヅン含む) , m ³ /人	267	144	103
植物栽培空間の質量, kg/人	2,444	1,319	944
植物栽培モジュール体積 (6 人用) , m ³	1,601	864	618
植物栽培モジュール質量 (6 人用) , kg	14,661	7,913	5,664
植物栽培モジュール数 (6 人用)	11	6	4

表 7.8 月面拠点の ESM 変換係数²¹⁾

要素	変換係数
質量 kg/kg	1
体積 kg/m ³	9.16
電力 (原子力利用) kg/kW	76
冷却 kg/kW	102
労働時間 kg/h	(変数)

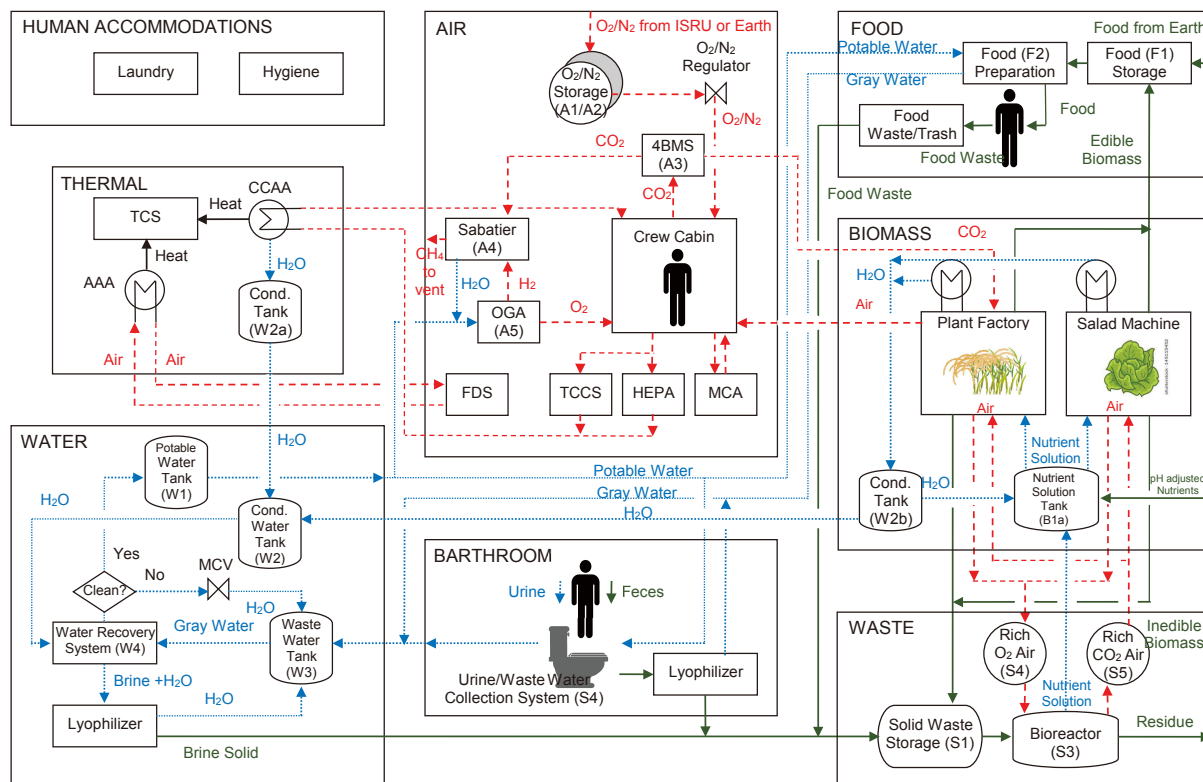


図 7.2 月面農場を含む月面拠点の生命維持システム構成

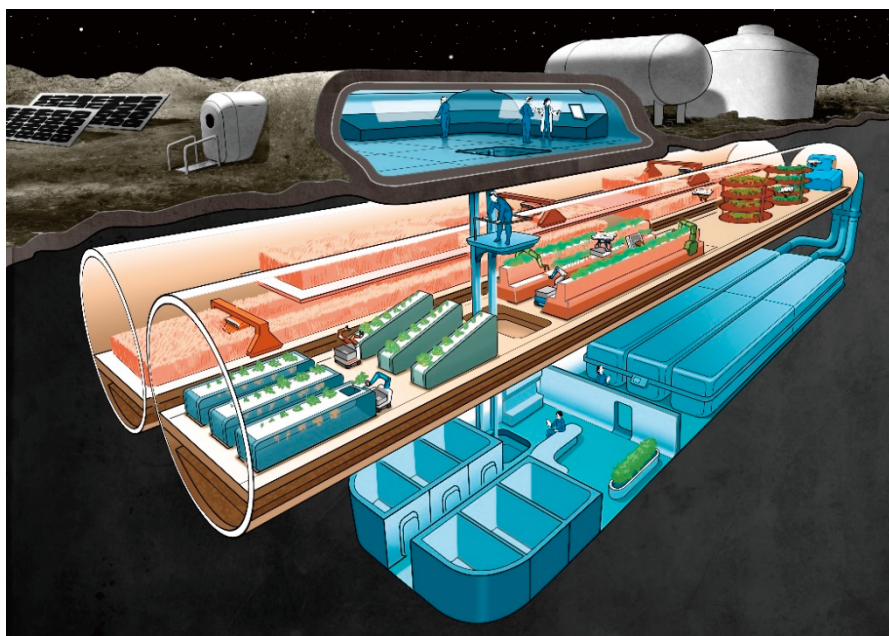


図 7.3 レゴリスで覆われた月面拠点

6 人が 1 年間、月面に居住した場合の質量と ESM の計算結果を表 7.9 に示す。表 7.9 に示した OPEN、ISS(A+W)、CLOSED 1、CLOSED 2、CLOSED 3 のグラフを図 7.4～7.9 に示す。図 7.4、7.5、7.7、7.8 は初期質量、1 年間の補給質量、初期 ESM、1 年間の ESM 増分をサブシステムごとに示し、図 7.6 は 5 つの生命維持システムの全体質量の時間変化、図 7.9 は 5 つの生命維持システムの ESM の時間変化を示す。カッコ内の

数字は質量換算での再生率である。最後に図 7.10 に、農作業自動化率を変化させた場合の ISS(A+W)と CLOSED 2、および ISS(A+W)と CLOSED 3 の ESM の大きさが逆転する日数を示した。

初期質量と補給質量の比較(表 7.9(a)(b)、図 7.4、図 7.5)

表 7.9(a)(b)に 5 つの生命維持システムの初期質量と 1 年間の補給質量を示す。CLOSED 1 の初期質量は OPEN の 19.3 倍である。CLOSED 1 では空気処理や水処理サブシステムの機能が食料生産により代用されるため、2 つのサブシステムの初期質量が ISS(A+W)より小さくなっているが、食料生産システムの質量が 26,534kg と大きく、CLOSED 1 の初期質量は OPEN よりかなり大きい。

次に、食料生産システムを CLOSED 1 より小型化するために、イネとダイズの栽培棚段数を 2 段にした場合(CLOSED 2)と、3 段にした場合(CLOSED 3)の初期質量は OPEN の 12.7 倍、10.4 倍である。CLOSED 2 と CLOSED 3 は CLOSED 1 より与圧体積が減少したことで、その初期質量は小さくなっているが、まだ OPEN や ISS(A+W)の初期質量よりかなり大きい。

CLOSED 1、CLOSED 2、CLOSED 3 の補給質量は OPEN の 0.24 倍、0.22 倍、0.21 倍である。食料生産により空気(酸素)、食料、水を再生し、それらの補給質量を OPEN や ISS(A+W)より大きく減らすことができている。

初期質量と補給質量の時系列比較(図 7.6)

図 7.6 に 5 つの生命維持システムの全体質量(初期質量と補給質量)の 1800 日の時間変化を示す。CLOSED 2 の質量は 550 日以降に OPEN より、900 日以降に ISS(A+W)より小さくなっている。また、CLOSED 3 の質量は 450 日以降に OPEN より、750 日以降に ISS(A+W)より小さくなっている。

初期 ESM と 1 年間 ESM 増分の比較(表 7.9(c)(d)、図 7.7、図 7.8)

表 7.9(c)(d)に 5 つの生命維持システムの初期 ESM と 1 年間運用した場合の ESM 増分を示す。CLOSED 1 の初期 ESM は、OPEN の 44.4 倍である。CLOSED 2 は OPEN の 33.1 倍、CLOSED 3 は OPEN の 29.4 倍である。CLOSED 1、CLOSED 2、CLOSED 3 の 1 年間の ESM 増分は、OPEN の 0.4 倍、0.3 倍、0.3 倍である。

ESM の時系列比較(図 7.9)

図 7.9 に 5 つの生命維持システムの ESM の 4000 日間の変化を示す。CLOSED 1 が OPEN の ESM を 3600 日以降下回り、ISS(A+W)の ESM を 4000 日以内に下回ることではない。CLOSED 2 が OPEN の ESM を 2200 日以降下回り、ISS(A+W)の ESM を 4000 日以内に下回ることではない。CLOSED 3 が OPEN の ESM を 1850 日以降下回り、ISS(A+W)の ESM を 3650 日以降下回る。イネとダイズを 3 段栽培にした場合に 10 年程度で ISS(A+W)より有利なシステムとなる。

農作業自動化率と損益分岐点(図 7.10)

農作業自動化率を変化させた場合に CLOSED 2 と CLOSED 3 の ESM が ISS(A+W)の ESM を下回るミッション期間の変化を図 7.10 に示す。自動化率 0 は年間 13 時間/m²の農作業を示し²²⁾、1 は完全自動化を示す。図 7.1 から図 7.9 に示した結果は、自動化率 0.9 で計算された値である。自動化率が 0.8、0.7 と下がっていくと、CLOSED 2 の ESM が ISS(A+W)の ESM を下回るミッション期間が急激に長くなる。CLOSED 3 の損益分岐点(ESM が逆転する点)は、自動化率低下に対して CLOSED 2 の場合よりはその感度が小さい。月面農場での農作業の自動化が運用コスト削減には重要であると言える。

表 7.9 1 年間運用した場合の (a) 初期質量・(b) 補給質量・(c) 初期 ESM・(d) ESM 増分

初期質量, kg	OPEN (0%)	ISS(A+W) (37%)	CLOSED 1 (76%)	CLOSED 2 (78%)	CLOSED 3 (79%)
Air	585	846	653	653	653
Biomass	0	0	26,534	16,623	13,320
Food	0	0	321	321	321
Thermal	390	390	390	390	390
Waste	115	115	348	348	348
Water	164	1,062	141	141	141
EVA	196	196	196	196	196
Accommodations	35	35	115	115	115
Total	1,485	2,644	28,698	18,787	15,484
System/OPNE	1.0	1.8	19.3	12.7	10.4

補給質量, kg/年	OPEN (0%)	ISS(A+W) (37%)	CLOSED 1 (76%)	CLOSED 2 (78%)	CLOSED 3 (79%)
Air	1,705	28	28	28	28
Biomass	0	0	733	437	339
Food	4,073	4,073	149	149	149
Thermal	19	19	19	19	19
Waste	0	0	0	0	0
Water	6,462	2,206	3	3	3
EVA	757	757	757	757	757
Accommodations	3,024	3,024	2,131	2,131	2,131
Total	16,041	10,108	3,819	3,524	3,425
System/OPEN	1.00	0.63	0.24	0.22	0.21

初期 ESM, kg	OPEN (0%)	ISS(A+W) (37%)	CLOSED 1 (76%)	CLOSED 2 (78%)	CLOSED 3 (79%)
Air	730	1,110	900	900	900
Biomass	0	0	90,115	66,511	58,644
Food	0	0	339	339	339
Thermal	628	628	628	628	628
Waste	138	138	413	413	413
Water	179	1,338	145	145	145
EVA	382	382	204	204	204
Accommodations	35	35	231	231	231
Total	2,093	3,631	92,974	69,371	61,503
Total/OPEN	1.0	1.7	44.4	33.1	29.4

ESM 増分, kg/年	OPEN (0%)	ISS(A+W) (37%)	CLOSED 1 (76%)	CLOSED 2 (78%)	CLOSED 3 (79%)
Air	1,705	39	104	85	78
Biomass	0	0	3,446	1,528	1,032
Food	4,073	4,073	149	149	149
Thermal	36	32	111	87	79
Waste	0	0	6	4	4
Water	6,462	2,206	3	3	3
EVA	984	929	757	757	757
Accommodations	3,024	3,024	2,462	2,377	2,349
Total	16,284	10,303	7,037	4,990	4,452
Total/OPEN	1.0	0.6	0.4	0.3	0.3

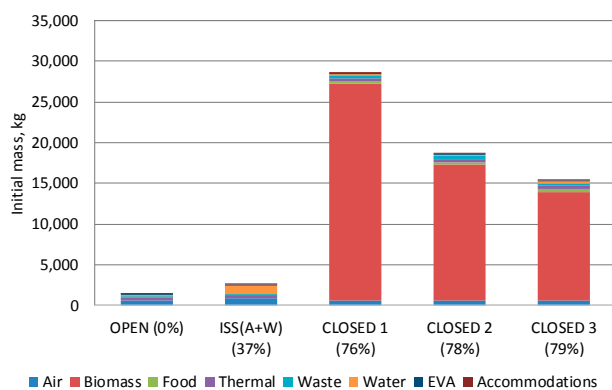


図 7.4 5つのシステム構成の初期質量の比較

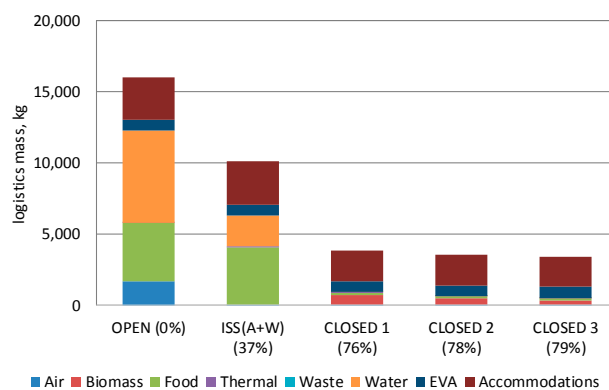


図 7.5 1年間運用した場合の5つのシステム構成の補給質量の比較

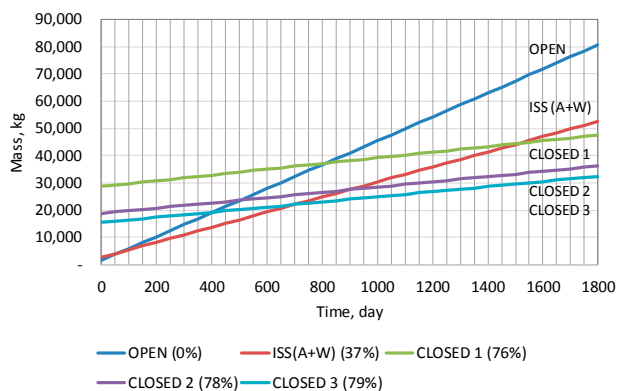


図 7.6 5つのシステム構成の質量（初期+補給）時間変化比較

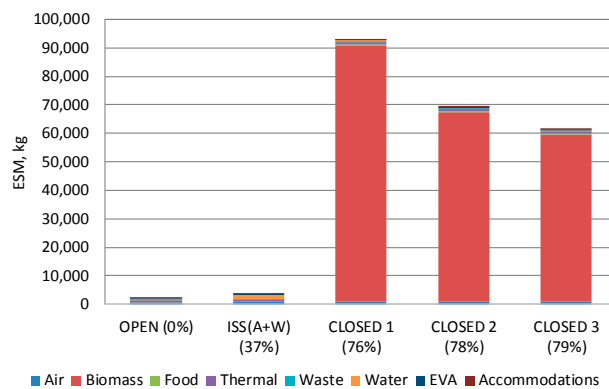


図 7.7 5つのシステムの0日 ESM 比較

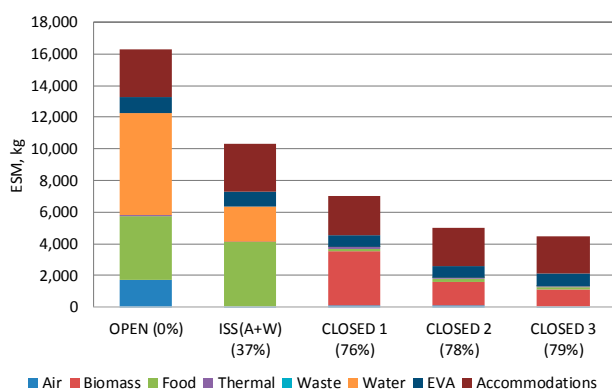


図 7.8 5つのシステムの1年間 ESM 増分比較

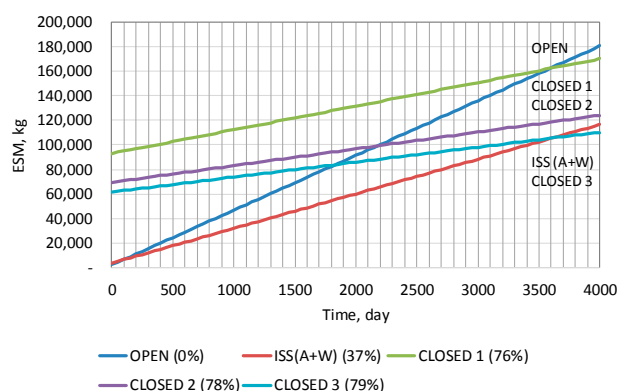


図 7.9 5つのシステム構成の ESM 時間変化比較

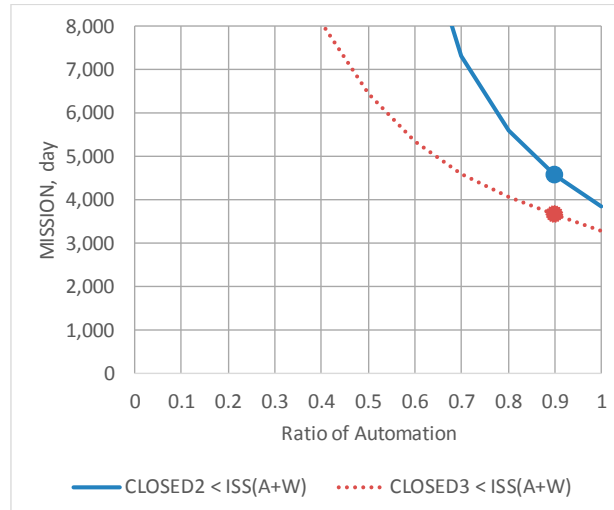


図 7.10 農作業自動化率と損益分岐点

7.6. まとめ

月面拠点への月面農場の導入に関して検討が可能な生物再生型生命維持システム分析ツールを開発した。食料生産システムを含む月面拠点生命維持システムの質量と ESM について、LED など最近の技術を導入した場合について比較した。栽培量の多い作物の栽培棚の段数を増やし、空間利用効率を上げた場合に大きく初期質量を抑えることができ、開放型の質量合計より 450 日以降、ISS 型の質量合計より 750 日以降に有利になることを確認した。しかしながら、労働力を含む ESM を用いた評価では、栽培棚段数を増やし、空間利用効率を上げた場合でも、開放型や ISS 型よりも有利な運用には、それぞれ 1850 日、3650 日以上が必要であることがわかった。

ここでは、月面で建築資材や水・酸素等の物質を調達し、原子力発電を利用した場合、10 年程度で地球から食料を補給するよりも ESM で表した運用コストで有利な月面農場の 1 つの姿を示した。今回想定した 8 種類の作物を利用する場合、栽培面積が大きいイネ、ダイズの多段栽培(3 段程度)と自動化技術が運用コスト削減には特に重要である。

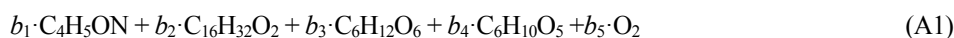
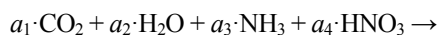
付録 7A：生化学量論

生命維持システムの物質収支解析では生化学量論(Biochemical Stoichiometry)¹⁰⁾が用いられる。生化学量論は、閉鎖生態系の物質収支を解析するために Volk T. と Rummel J. D.によって開発された。生化学量論は、生物の代謝物質を化学式で近似し、その代謝に関する物質平衡式を作成し、質量保存則に基づいて物質平衡式を解くことにより未知の代謝量を求める¹¹⁾。植物、人間、廃棄物処理、肥料生産の 4 つの物質平衡式を示す。

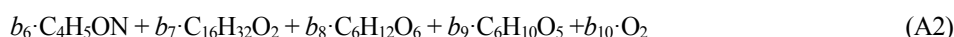
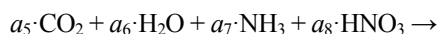
植物

植物の物質平衡式は、光合成により「二酸化炭素・水・アンモニア・硝酸」が「たんぱく質・脂質・糖質・繊維・酸素」に変化する式(A1)と式(A2)からなる。

可食部：

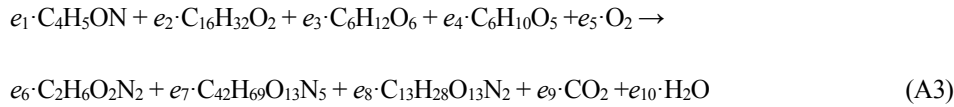


非可食部：



人間

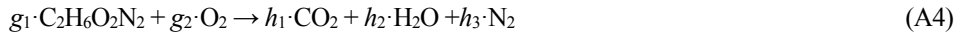
人間の物質平衡式は、「たんぱく質・脂質・糖質・繊維・酸素」が「尿・糞・その他の有機物・二酸化炭素・水」に変化する式(A3)からなる。



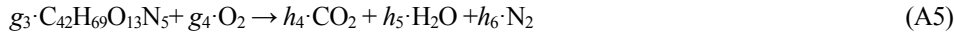
廃棄物処理

廃棄物処理の物質平衡式は、「尿・酸素」が「二酸化炭素・水・窒素」に変化する式(A4)、「糞・酸素」が「二酸化炭素・水・窒素」に変化する式(A5)、「その他の有機物・酸素」が「二酸化炭素・水・窒素」に変化する式(A6)、「非可食部のたんぱく質・脂質・糖質・繊維・酸素」が「二酸化炭素・水・窒素」に変化する式(A7)からなる。

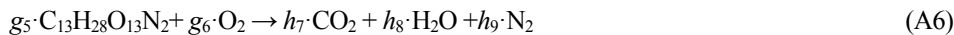
尿：



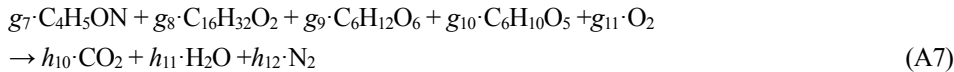
糞：



その他の有機物：



非可食部：



肥料生産

肥料生産の物質平衡式は、「窒素と水」が「アンモニアと硝酸」に変化する式(A8)からなる。



付録 7B 等価システム質量

全体システムの比較には NASA で利用されている等価システム質量(ESM : Equivalent System Mass)⁶⁾を用いる。ESM は生命維持システムのコストを式(B1)のように質量、体積、電力、冷却、労働時間で表し、サブシステム $i=1$ から n まで合計して ESM を計算する。

$$ESM = \sum_{i=1}^n \left[(M_{li} \cdot SF_{li}) + (V_{li} \cdot V_{eqi}) + (P_i \cdot P_{eqi}) + (C_i \cdot C_{eqi}) + (CT_i \cdot D \cdot CT_{eqi}) + (M_{TDi} \cdot D \cdot SF_{TDi}) \right] \quad (B1)$$

M_{li} : サブシステム i の初期質量[kg]

SF_{li} : サブシステム i の初期質量貯蔵係数[kg/kg]

V_{li} : サブシステム i の初期体積[m³]

V_{eqi} : サブシステム i の与圧体積質量等価係数[kg/m³]

P_i : サブシステム i の必要電力[kW_e]

P_{eqi} : サブシステム i の電力質量等価係数[kg/kW_e]

C_i : サブシステム i の冷却要求[kW_{th}]

C_{eqi} : サブシステム i の冷却質量等価係数[kg/kW_{th}]

CT_i : サブシステム i の労働時間要求[CM-h/yr]

D : ミッション期間[y]

CT_{eqi} : サブシステム i の労働時間質量等価係数[kg/CM-h]

M_{TDi} : サブシステム i の時間依存質量[kg/yr]

SF_{TDi} : サブシステム i の時間依存質量貯蔵係数[kg/kg]

質量変換係数 (V_{eq} , P_{eq} , C_{eq} , and CT_{eq}) は質量ではない要素(V , P , C and CT) を質量に変換する。

付録 7C 生命維持システム要素技術候補

月面拠点生命維持システムの要素技術候補を表 7C1 に示す。サブシステムの質量、体積、電力、冷却、労働力の数値は文献 MSAD-04-0306 (Hanford, 2004)²¹⁾、NASA CR-2006-213694 (Hanford, 2006)²²⁾、NASA JSC-47804 (Hanford, 2002)²⁵⁾を参考にした。OPEN、ISS(A+W)、CLOSED のサブシステムの構成を表 7C2 に示す。

表 7C1 6 人の月面拠点生命維持システム要素技術候補

No.	Subsystem	Tech.	Mass kg	Volume m ³	Power W _e	Cooling W _{th}	Resupply Mass kg/day	Resupply Parts Mass kg/yr	Resupply Volume m ³ /yr	Crew time CM-h/yr	Ref. No
100	Air Subsystem										
110	Atmospheric Control System										
111	Atmospheric Pressure Control	ISS	119.4	0.26	70.5	70.5	0	0.00	0	0	20
120	Atmosphere Revitalization System										
121	Carbon Dioxide Removal	LiOH	0	0	0	0	0.00	365.00	1.095	0	
122	Carbon Dioxide Removal	4BMS/ISS	185.1	0.44	556.21	556.21	0.00	0.00	0	2.76	20
123	Carbon Dioxide Reduction	Sabatier	75.91	0.14	82.94	82.94	-3.59	0.00	0	0	20
125	Oxygen Generation	SPE/ISS	388.97	1.02	3421.67	1868.34	4.04	50.32	0	10.1	20
126	Gaseous Trace Contaminant Control	ISS	68.41	0.14	194.35	194.35	0.00	21.29	0.322	0	20
127	Atmosphere Composition Monitoring Assembly	ISS	54.3	0.09	103.5	103.5	0.00	0.00	0	0	20
128	Sample Delivery System	ISS	35.11	0.04	0	0	0.00	0.00	0	0	20
129	Airlock Carbon Dioxide Removal	ISS	181.3	0.23	397	397	0.00	0.00	0	0	20
180	Gas Storage										
181	Nitrogen Storage	High Pressure	1	0.00	0	0	0.02			0	22
182	Nitrogen Storage	Cryogenic	22	0.02	0	0	0.02			0	22
183	Oxygen Storage	High Pressure	118	0.09	0	0	3.59			0	22
184	Oxygen Storage	Cryogenic	139	0.11	0	0	3.59			0	22
190	Fire Detection and Suppression										
191	Fire Detection System	ISS	1.5	0	1.48	1.48	0	0.00	0	0.01	20
192	Fire Suppression System	ISS	6.8	0.04	0	0	0	0.00	0	0	20
200	Biomass Subsystem										
220	Plant Growth Chamber / Salad Machine										
221	Plant Growth Chamber	Drysdale	43004	436	1107923	1107923		1614.22		922	16
222	Salad Machine	Takashima	120	0.602	500	500		2.40		91.25	
223	Plant Growth Machine I	CLOSED 1	11873	1303	442610	176489		732.83		92	WG
224	Plant Growth Chamber unshielded I	CLOSED 1	14661								15
225	Plant Growth Chamber shielded		213038								15
226	Plant Growth Machine II	CLOSED 2	8710	792	392001	125880		437.10		50	WG
227	Plant Growth Chamber unshielded II	CLOSED 2	7913								15
228	Plant Growth Machine III	CLOSED 3	7656	622	375132	109011		338.52		36	WG
229	Plant Growth Chamber unshielded III	CLOSED 3	5664								15
260	Food Subsystem										
262	Food Storage without food production	Shuttle	0	0	0	0	11.16	0.00	0	0	WG
263	Refrigerator/Freezer	ISS	321	2	0.204	0.228					22
264	Food Storage with biomass production	Lunar Farm	0	0	0	0	0.41	0.00	0	0	WG
300	Thermal Subsystem										
310	Temperature and Humidity Control										
311	Common Cabin Air Assembly	ISS	118.08	0.5	530.52	530.52	0		0	0	20
312	Avionics Air Assembly	ISS	12.4	0.03	175	175	0		0	0	20
313	Atmosphere Circulation	ISS	9.8	0.02	61	61	0		0	0	20
314	Atmosphere Microbial Control	ISS	100	0.27	0	0	0	19.06	0.13	3.33	20
320	Internal Thermal Control System										
321	Internal Thermal Control System	-	149.28	0.3	517.71	517.71	0		0	0	20
400	Waste Subsystem										
410	Solid Waste Collection										
411	Solid Waste Collection	ESDM	36.36	0.13	14	14	0	0.00	0	0	20
420	Solid Waste Processing System										
421	Solid Waste Treatment	Storage	78.33	2.18	0	0		0.00	0	0	20
422	Incinerator	ALS	200	1.4	0.3	1.3		10.00		0.2	22
423	Supercritical Water Oxidation	ALS	200	1.4	0.5	1.5				0.2	
424	Bioreactor	ALS	231	0.46	0	0.59		1.50		1059.00	22
425	Bioreactor	LCS	148	6	0.1	0.1					WG
500	Water Subsystem										
510	Urine/ Waste Water Collection System										

511	Urine/ Waste Water Collection System	ISS	4.55	0.02	4	4	0	1.62	0	0	20
512	Urine/ Waste Water Collection System	ALS	4.55	0.02	4	4	0	1.62	0	0	20
520	Water Recovery System										
521	Water Treatment Process	ISS WRS	541.63	1.93	788.76	788.76		1295.75	0	0	20
522	Water Treatment Process	VPCAR	557.56	1.69	4011.45	1808.87		100.96	0	0	20
523	Urine, Hygiene&Potable Water, and Brine Storage	ISS	133.34	0.35	13.68	13.68			0	0	20
524	Urine, Hygiene&Potable Water, and Brine Storage	ALS	205.12	0.53	19.81	19.81			0	0	20
525	Microbial Check Valve	ISS	3.56	0.01	0	0		1.41	0	0	20
526	Microbial Check Valve	ALS	6.67	0.02	0	0		2.65	0	0	20
527	Process Controller	ISS	36.11	0.08	156.18	156.18			0	0	20
528	Process Controller	ALS	63	0	180	180			0	0	20
529	Water Quality Monitoring	ISS	14.07	0.04	4.72	4.72			0	0	20
530	Water Quality Monitoring	ALS	14.07	0.04	4.72	4.72			0	0	20
531	Product Water Delivery System	ISS	37.99	0.09	2.65	2.65			0	0	20
532	Product Water Delivery System	ALS	58.37	0.14	3.83	3.83			0	0	20
540	Water Storage										
541	Hygiene Water Storage	-	132	1.32			14.70		0	0	
542	Potable Water Storage	-	27	0.27			3.00		0	0	
543	Urine Storage	-					9.02		0	0	
544	Waste Water Storage	-					4.80		0	0	
600	Human Accommodations										
610	Clothing										
611	Clothing	Supply					2.92		6.24	0	
612	Clothing	Laundry					0.12		0.26	0	
620	Laundry Equipment										
621	Water/Dryer	-	80	0.26	633.33	633.33	0.00		0	12.045	20
622	Detergent	-	0.01	0	0	0	0.35		0	0	20
630	Whips										
631	Hand/Face/Shower Wet Whips	-					0.31				
640	Miscellaneous Items										
641	Miscellaneous Items	-					5.06				
642	N ₂		35.42								
700	Extravehicular Activity										
711	Maximum Absorbency Garments	-	196	0.82			0.05		0.0001	44.8	20
712	Carbon Dioxide Removal (LiOH)	-					0.50		0.0015		
713	Airlock Recycle Pump for EVA	-			1000	1000	0.48		0.0014		
714	Oxygen Recharge Compressor Assembly for EVA	-					0.27		0.0008		
715	Food, O ₂ , and Water Add	-					0.77		0.0023		

表 7C2 OPEN、ISS(A+W)、CLOSED のサブシステムの構成

	サブシステム	OPEN 型	ISS (A+W)型	CLOSED 型
1	Air	111, 121, 126, 127, 128, 129, 181, 183, 191, 192	111, 122, 123, 124, 126, 127, 128, 129, 181, 183, 191, 192	111, 122, 126, 127, 128, 129, 181, 191, 192
2	Biomass			223, 224 (CLOSED 1) 226, 227 (CLOSED 2) 228, 229 (CLOSED 3)
2	Food	262	262	263, 264
3	Thermal	311, 312, 313, 314, 321	311, 312, 313, 314, 321	311, 312, 313, 314, 321
4	Waste	411, 421	411, 421	423, 425
5	Water	511, 541, 542	511, 521, 523, 525	511, 523, 525
6	Accommodations	611, 631, 641	611, 631, 641	612, 621, 622, 631, 641
7	EVA	711, 712, 713, 714, 715	711, 712, 713, 714, 715	711, 712, 713, 714, 715

サブシステムの数字は、表 7C1 の数字と対応している。

引用文献

- 1) Cabinet Office, Government of Japan, Comprehensive Strategy on Science, Technology and Innovation 2014 - Bridge of Innovation toward Creating the Future -, Cabinet Decision, 2014.
- 2) JAXA, Space Exploration Innovation Hub, <http://www.ihub-tansa.jaxa.jp/english/index.html> [cited 20 February 2018].
- 3) Wheeler, R. M., Agriculture for Space: People and Places Paving the Way, *Open Agriculture* 2017 2, 14-32, 2017.
- 4) Gitelson, J. I., Terskov, I. A., Kovrov, B. G., Lisovskii, G. M., Okladnikov, Yu. N., Sid'ko, F. Ya., Trubachev, I. N., Shilenko, M. P., Alekseev, S. S., Pan'kova, I. M., and Tirranen, L. S., Long-term experiments on man's stay in biological life-support system, *Adv Space Res.* 1989;9(8):65-71.
- 5) Packham, N. J., The Lunar-Mars Life Support Test Project: the Crew Perspective, <https://lsda.jsc.nasa.gov/books/ground/1.3Crewmembers.pdf> [cited 20 February 2018].
- 6) Tako, Y., Komatsubara, O., Tsuga, S., Arai, R. et al., Circulation of Water in Addition to CO₂, O₂ and Plant Biomass in an Artificial Ecosystem Comprised of Humans, Goats and Crops During Three 2-Weeks Closed Habitation Experiments Using CEEF, *SAE 2007-01-3091*, 2007.
- 7) Dong C., Fu Y., Xie B., Wang M., and Liu H., Element Cycling and Energy Flux Responses in Ecosystem Simulations Conducted at the Chinese Lunar Palace-1, *Astrobiology*. January 2017, 17(1), 78-86.
- 8) Goto, E., Plant Cultivation and Light Environment Control under Artificial Light, <http://www.academy.nougaku.jp/sympo/pdf/20131109sympo/20131109goto.pdf> [cited 20 February 2018].
- 9) Goto, E., Matsumoto, H., Ishigami, Y., Hikosaka, S., Fujiwara, K. and Yano, A. 2014. Measurements of the photosynthetic rates in vegetables under various qualities of light from light-emitting diodes. *Acta Hort.* 1037: 261-268.
- 10) Ono, E., Usami, H., Fuse, M., and Watanabe, H., Operation of a Semi-Commercial Scale Plant Factory, *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 2011.
- 11) Miyajima, H., Ishikawa, Y., Arai, R., Tako, Y., and Nitta, K., Considerations of Material Circulation in CEEF Based on the Recent Operation Strategy, *SAE Technical Paper 2003-01-2453*, 2003.
- 12) Miyajima, H., Logistics and Life Support Systems Analysis for High-Mobility Exploration on a Lunar Surface, *43rd International Conference on Environmental Systems*, *AIAA-2013-3377*, 2013.
- 13) Discussions in JAXA Innovation Hub Lunar Farm Working Group, 2017.
- 14) Ministry of Health, Labor and Welfare (MHLW), Dietary Reference Intakes for Japanese (2015), <http://www.mhlw.go.jp/file/06-Seisakujouhou-10900000-Kenkoukyoku/Overview.pdf> [cited 20 February 2018].
- 15) Anderson, M. S., Ewert, M. K., Keener, J. F., and Wagner, S. A., Advanced Life Support Baseline Values and Assumptions Document, NASA, TP-2015-218570, 2015.
- 16) Hanford, A. J., Advanced Life Support Baseline Values and Assumptions Document, NASA, CR-2004-208941, 2004.
- 17) Tobias, B., Garr, J. and Erne, M., 2011: International Space Station water balance operations, *Proceeding of 41st International Conference on Environmental Systems*, *AIAA 2011-5150*.
- 18) Rummel, J. D., and Volk, T., 1987: A modular BLSS simulation model, *Advances in Space Research*, 7(4), 59-67.
- 19) Volk, T., and Rummel, J. D., 1987: Mass balances for a biological life support system simulation model, *Advances in Space Research*, 7(4), 141-148.
- 20) Hanford, A. J., Subsystem Details for the Fiscal Year 2004 Advanced Life Support Research and Technology Development Metric, *MSAD-04-0306*, 2004.

- 21) Hanford, A. J., Advanced Life Support Research and Technology Development Metric - Fiscal Year 2005, NASA/CR-2006-213694, 2006.
- 22) Drysdale, A. E. et al., Advanced Life Support Systems Modeling and Analysis Project Baseline Values and Assumptions Document, JSC 39317, 1999.
- 23) Patterson, R. L., Giacomelli, G. A., Hernandez, E., Yanes, M., and Jensen, T., Poly-Culture Food Production and Air Revitalization Mass and Energy Balances Measured in a Semi-Closed Lunar Greenhouse Prototype (LGH), ICES-2014-167, 2014.
- 24) The Center for Low Carbon Society Strategy (LCS), Methane Production from Biomass Wastes by Anaerobic Fermentation (First step), LCS-FY2013-PP-05, 2014.