

6. 持続的な物質循環システム

中井勇介(農業食品産業技術総合研究機構 九州沖縄農業研究センター 園芸研究領域)

遠藤良輔(大阪府立大学大学院 生命環境科学研究科)

小島昌治(株式会社 翔栄)

中野明正(農林水産省農林水産学術会議事務局)

豊田剛己(東京農工大学大学院 農業研究院生物システム科学部門)

概要

月面での長期間滞在または居住を可能にするためには、月面での生活で生じる有機性廃棄物の処理や植物生産のための元素資源の欠乏といった問題を解決する必要がある。月面農場ワーキンググループ第3グループでは、持続的な月面農場を確立させるために必要なシステムの一つを構築することを目的として、ISRU(In-Situ Resource Utilization；その場資源利用技術)などを念頭におきながら、月面における効率的な有機性廃棄物の資源循環のあり方について議論を行った。

月-地球間の輸送は莫大なコストがかかるため、作物を生産するために必要な炭素や窒素などの元素は、その都度の交換輸送ではなく、月面での生活において生じる作物残渣などの有機性廃棄物から、効率的に回収して循環利用する必要があると考えられる。月面において生じる有機性廃棄物は、非可食部などの作物残渣や養液栽培廃液、尿、糞便などが想定された。それらを効率的に循環させるためには、月面での現地試験が必要であるが、地球上で実用化されている嫌気的処理であるメタン発酵や好気的処理である活性汚泥法、堆肥化などの微生物を利用した処理が有効であり、資源循環の中核を成すと考えられた。本稿では、これまでの第3グループの検討結果を取りまとめ、持続的な月面農場を確立するための資源循環システムや月の鉱物(レゴリス)の資源としての利用について提案を行う。

6.1. はじめに

我々第3グループは、月面農場での資源循環システムについて議論を行ってきた。その結果、月面において有機性残渣を効率的に資源化して循環させるためには、嫌気的処理であるメタン発酵や好気的処理である活性汚泥法などの微生物を利用した処理が月面におけるリサイクルの中核を成すと想定された。さらに、月面における効率的な資源循環を考えると、残渣・廃棄物の性状や、月面農場で用いられる栽培用培地の種類に応じて、柔軟に微生物処理法を使い分ける、もしくは組み合わせることが重要となるという考えに至った。また、月面に存在する月面鉱物(月レゴリス)から、作物栽培に必要とされるカリウム(K)、リン(P)、カルシウム(Ca)、マグネシウム(Mg)などの元素を供給するのも資源利用効率の点で有用であると考えられた。

以上のように、月面における資源循環システムを構築する際には、嫌気的ならびに好気的微生物群による残渣の効率的な資源化やリサイクル可能資材や月レゴリスの積極的利用が、持続的な作物生産体系を確立する上で必要な視点になると考えられる。

6.2. 月面入植当初における元素の供給

月面に長期間滞在するためには、リサイクル、特に元素の循環システムの構築が不可欠になる。表6.1に示すように、ヒトが生命活動を維持するためには各種のミネラルやエネルギー源としての糖だけでなく、体内で合成できないアミノ酸、ビタミンなどを食物から摂取する必要がある¹⁾。そのため、食物残渣などに含まれる元素を効率よくリサイクルできるシステムを構築することが、長期間の月面における有人活動を支える鍵となる。ヒトが生存するために必要な多くのミネラル分は植物から供給が可能である。そこで、作物を栽培する際の月面での物質循環を考えると、月面入植初期は、作物の生産に必須であり、かつ月面で収集するには多大な労力とエネルギーが必要となる窒素(N)、硫黄(S)、カリウム(K)、リン(P)、炭素(C)、水素(H)、酸素(O)などの多量元素を地球から供給することが重要になると考えられる。

表 6.1 植物および動物を構成する元素

	※	元素名	元素記号	元素番号	植物の 必須性	ヒトの 必須性	ほ乳類の 必須性	化学性状	地殻中濃度 (%)	海水中濃度 g/L, (g/kg*)	被子植物濃度 2) mg/kg	成人人体存在量 体重70kg	成分として含まれる 生体内活性物質	ヒトでの欠乏症状
		炭素	C	6	○	○	○	非金属	0.02	0.026	454000	12.6 kg	タンパク質, 核酸, 脂質等	
		水素	H	1	○	○	○	非金属	0.14	-	55000	7 kg	タンパク質, 核酸, 脂質等	栄養失調
		酸素	O	8	○	○	○	非金属	46.6	0.0024	410000	45.5 kg	タンパク質, 核酸, 脂質等	
		窒素	N	7	○	○	○	非金属	0.002	0.0083	30000	2.1 kg	タンパク質, 核酸等	
主要ミネラル	○	カルシウム	Ca	20	○	○	○	金属 軽金属	3.39	0.41	18000	1.05 kg	ヒドロキシアパタイト	骨粗鬆症
	○	リン	P	15	○	○	○	非金属	0.08	0.0006	2300	0.7 kg	ヒドロキシアパタイト	骨疾患
	○	カリウム	K	19	○	○	○	金属 軽金属	2.4	0.38	14000	140 g		無力症, 不整脈
		硫黄	S	16	○	○	○	非金属	0.06	0.905	3400	175 g	アミノ酸, グルタチオン	
		塩素	Cl	17	○	○	○	非金属	0.19	18.8	2000	105 g	胃酸	
	○	ナトリウム	Na	11	○	○	○	金属 軽金属	2.63	10.77	1200	105 g		筋肉痛, 熱けいれん
	○	マグネシウム	Mg	12	○	○	○	金属 軽金属	1.93	1.29	3200	105 g	Mg結合ATP	心臓疾患
微量ミネラル	○	鉄	Fe	26	○	○	○	金属 重金属	4.7	0.00002	140	6 g	ヘモグロビン, 酵素	鉄欠乏性貧血
	○	亜鉛	Zn	30	○	○	○	金属 重金属	0.004	0.000049	160	2 g	酵素	脱毛, 皮膚疾患
	○	銅	Cu	29	○	○	○	金属 重金属	0.01	0.0000003	14	80 mg	酵素	貧血
	○	マンガン	Mn	25	○	○	○	金属 重金属	0.09	0.000002	630	100 mg	酵素	骨病変
	○	ヨウ素	I	53	○	○	○	非金属	0.00003	0.0005		11 mg	甲状腺ホルモン	甲状腺腫
	○	セレン	Se	34	○	○	○	非金属	0.00001	0.000002		12 mg	酵素	心臓疾患, 克山病
		モリブデン	Mo	42	○	○	○	金属 重金属	0.0013	0.0001	0.9	10 mg	酵素	
		コバルト	Co	27	○	○	○	金属 重金属	0.004	0.0000005		1.5 mg	ビタミンB12	悪性貧血
		クロム	Cr	24	○	○	○	金属 重金属	0.02	0.000003		2 mg	GTF	耐糖能低下
		フッ素	F	9			○	非金属	0.03	0.013		3 g		
		ケイ素	Si	14			○	類金属	25.8	0.002	200	2 g		
		ルビジウム	Rb	37				金属 軽金属	0.03	0.00012	20	320 mg		
		臭素	Br	35				非金属	0.00025	0.067				
	x	鉛	Pb	82			○	金属 重金属	0.0015	0.0000001	2.7	120 mg		
		アルミニウム	Al	13				金属 軽金属	7.56	0.00002	550	60 mg		
	x	カドミウム	Cd	48				金属 重金属	0.00005	5E-09		50 mg	酵素	
	x	ホウ素	B	5	○			類金属	0.001	0.0044	50			
		バナジウム	V	23			○	金属 重金属	0.015	0.000025	1.6	1.5 mg	酵素	
	x	ヒ素	As	33			○	類金属	0.0004	0.000037		2 mg		
		ニッケル	Ni	28	○		○	金属 重金属	0.01	0.000017	2.7	10 mg	酵素	
	x	スズ	Sn	50			○	金属 重金属	0.004	0.0000001		20 mg		
		リチウム	Li	3				金属 軽金属	0.006	0.00018				
		ストロンチウム	Sr	38			○	金属 軽金属	0.0375	0.0078	26	320 mg		

※ 糸川嘉則編集, ミネラルの事典, 2003より(一部抜粋, 改変)。

1) 糸川嘉則編集, ミネラルの事典, 2003より(一部抜粋, 改変)。

2) 高橋英一, 比較植物栄養学, 1974より。

※ 人間の生命活動に不可欠な栄養素で, 科学的根拠が医学的・栄養学的に広く認められ確立されたものが対照であり, ○: 規格基準が定められているミネラル, ○: それ以外のミネラル, x: 規格基準がある食品中有毒元素

6.3. 栽培システムと居住区の循環

6.3.1. 想定される資源循環システム

月面農場における資源循環システムの中核処理技術には、微生物を利用した生物化学的物質変換を想定した(図 6.1)。月面においては、窒素、炭素、水が少ない。これらの元素は植物の必須元素でもあるため、資源として効率的に再利用する必要がある。そこで、ヒトが居住する区域と植物群を生産する区域、廃棄物処理区域をある程度独立させることで、効率的な資源循環が行えると考えられる。また、月面入植初期は、地球上から運搬する食料に頼らざるを得ないため、排泄された尿や糞便は、作物生産用の肥料資源として廃棄物処理地域にストックすることで、効率的な資源循環を行えると考えられる。一方で、微生物による有機性廃棄物の生物化学的物質変換は、成熟した安定的な廃棄物処理技術として地球上で実用化されているが、月面農場のような閉鎖空間では微生物による環境汚染リスクがこれまで課題とされてきた。しかしながら、月面農場全体を考えるとヒトや植物には常在細菌が生息しているため、滅菌した場合でも細菌やウイルスを完全に排除することは難しい。植物病原菌の蔓延リスクに備えた持続的な作物生産体系を確立するうえでは、有用微生物群で構成される安定的な微生物菌叢を積極的に月面農場に導入することも重要であると考えられる。

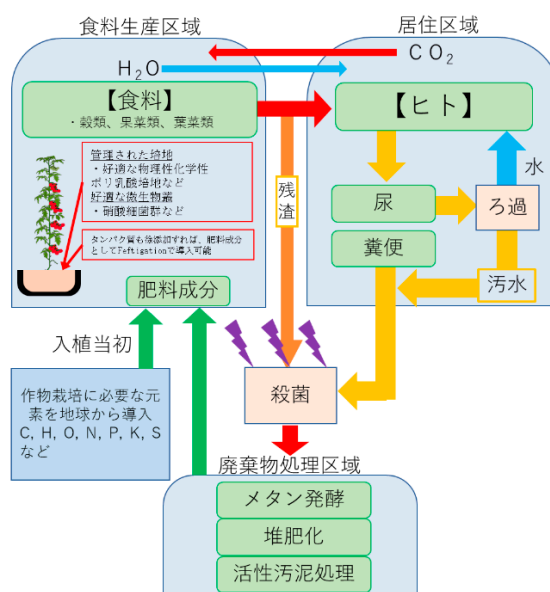


図 6.1

月面農業における食料生産と物質循環の概略

以上のことから、本グループでは、各区域を分けることで作物病害の発生などのリスクの分散し、さらに紫外線殺菌や膜ろ過による除菌技術を併用しながら、メタン発酵や堆肥化によって有機性廃棄物を資源に変換する技術を採用した。

6.3.2. 微生物の利用と増殖制御

月面に居住するにあたり、食料供給に必要な農地面積が第4グループにより計算された(表6.2)。第3グループでは、想定された農地の規模から、資源循環と生産システムの運営を実施する場合に考慮すべき問題点を解決するために想定される手法を示す。

効率的な資源循環を想定した場合、微生物による対応が必須である。植物に対しては地球上から病原菌が持ち込まれなければ、長期間、病原菌なしで生産できる可能性がある。一方で、滅菌処理を行った場合でも、植物体や資材、ヒトに付着した一般細菌をゼロにすることは不可能と考えられる。一般細菌は、水と無機成分、根から分泌される有機物により、容易に繁殖できるため、栽培環境を無菌条件でスタートしたとしても比較的速やかに微生物叢が形成されることが予測される。この際、積極的に特定の微生物を接種すれば想定した菌叢をある程度制御できる可能性がある。近い将来、病原菌が侵入してくることを想定して、病原菌に対して抵抗力を有する微生物叢を人工的に確立しておくことが、持続的な月面農場を確立する上で重要であると考えられる。このような考え方は地球上における有機栽培でも実践されている技術である。すなわち、太陽熱消毒などで病原菌を減少させ、一般細菌を含む堆肥を施用することにより生産を持続的に実施している。

表 6.2 必要栽培面積の算出例(3章 表 3.5 再掲)

	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	100人
						(m ²)	(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。

6.3.3. 培養液の循環利用

月面では、水もまた貴重な資源となるため、循環利用が必須である。水を再利用する際、微生物混入のリスクが考えられる。一方で、微生物のうち大半は無害であり、特にヒトに対して害がある微生物はごく一部である。ヒト・農作物に被害を与えない微生物であれば殺菌処理の必要性は当面ないと考えられる。しかし、混入した微生物が増殖しすぎた場合や病原性微生物が発生した場合、その数を制御する必要があるため、滅菌技術は必須である。現在、地球上で行われている水の滅菌技術は、塩素や紫外線による殺菌、濾過による除菌が挙げられるが、塩素は濃度により植物の根やヒトの健康に害を与える可能性があるため、第3グループでは、月面農場に適した殺菌方法として、紫外線による殺菌や濾過による除菌を採用した。また、水を再利用する際の注意点として、病原性微生物などの混入以外に、植物が分泌する自家中毒(アレロパシー)物質の養液などへの蓄積が考えられるが、加熱分解、活性炭による濾過である程度の除去が可能であると考えられる。

6.4. 微生物を利用した物質変換

非可食部などの生産物の残渣が月面では貴重な炭素源、窒素源となるため効率的に循環させ再利用する必要がある。第3グループでは、月面農場において、それらを効率的に資源循環させるシステムの中核処理技術には、微生物を利用した生物化学的な物質変換を想定した(図6.2)。微生物を用いない資源循環方法としては、1994年に青森

県六ヶ所村で建設が開始された CEEF(閉鎖生態系実験施設)において、高温高压下の水中で有機性廃棄物を物理化学的に分解する湿式酸化処理が試みられてきた(6.6 参照)。非生物的な本手法は、分解に要する時間が短いという利点がある一方で、ガス化した窒素を植物養分にできないことや高压処理による火災などの危険性が短所とされる。他方、微生物により有機性廃棄物を生分解する生物化学的物質変換は、成熟した安定的な廃棄物処理技術として地球上で実用化されているが、宇宙のような閉鎖空間では微生物による環境汚染リスクが課題とされている。しかしながら、月面農場全体を考えるとヒトや植物には常在細菌が生息しているため、滅菌した場合でも細菌やウイルスを完全に除去することは難しい。また、植物病原菌の蔓延リスクに備えた持続的な作物生産体系を確立するうえでは、有用微生物群で構成される安定的な微生物菌叢をむしろ積極的に月面農場に導入することも重要であると考えられる。微生物処理は、対象とする廃棄物の種類や処理法によって得られる肥料成分の形状が異なることから、月面における効率的な資源循環を考えると、残渣・廃棄物の性状や、農場で用いられる植物用培地の種類に応じて、柔軟に微生物処理法を使い分ける、もしくは組み合わせることが有効となると考えられる。

以上のことから、月面入植当初は、紫外線殺菌や膜ろ過による除菌技術を併用しながら、メタン発酵や堆肥化によって有機性廃棄物を資源に変換する技術を採用した。ただし、有機性廃棄物中に、生分解できない有毒物質あるいは重金属が含まれる場合、これらは微生物・植物・ヒトのいずれかに経時的に蓄積して、なんらかの影響を及ぼす可能性がある。そのため、これらを選択的に排除する物理化学的技術について、今後検討する必要がある。

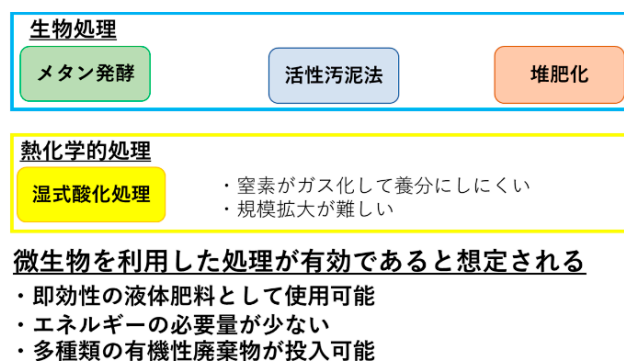


図 6.2 月面に適した物質循環法の提案

6.4.1. メタン発酵

メタン発酵は、嫌気性微生物により進行する廃棄物系バイオマスの生物化学的変換プロセスの一種である。メタン発酵は、堆肥化と比較して相対的に含水率の高い廃棄物が対象となり、また反応過程での発熱があまり生じない。このため、メタン発酵によって無機化された肥料成分は液状となる。これを酸化処理して液中の高濃度アンモニウムイオンを硝酸イオンに転換、もしくは、施肥方法を工夫すれば、養液栽培のための培養液のベースや速効性の液体肥料として利用できる(図 6.3)。他方、メタン発酵は酸化還元電位が -300 mV 以下の絶対嫌気性環境によってのみ成立するため、高効率処理のためには発酵槽の高い気密性が要求される。

メタン発酵は、酵母のみからなるエタノール発酵と異なり、多種多様な微生物群から構成される多段型反応系である。結果として、メタン発酵では非常に多くの種類の有機性廃棄物を投入することが可能である。また、酢酸などの有機酸や硫化物など多くの中間代謝物が生成する。これらはいずれメタン、アンモニア、二酸化炭素に分解されるものであるが、メタン発酵の進行を意図的に制御して、ヒトの生活に資する中間代謝物を取り出すことも可能である。候補作物であるイネならびにダイズを対象として、収穫時に発生する残渣量、収穫時残渣をメタン発酵して得られる資源の生成量およびメタン発酵槽容積について、それぞれ推定した(表 6.3～5)。これらはあくまで理論値であり、実際のメタン発酵では pH やアンモニア濃度など、種々の動的な環境要素が資源化量の変動要因となることに注意する必要がある。また、他の残渣について同様の試算を行うためには、その化学組成を明らかにする必要がある。

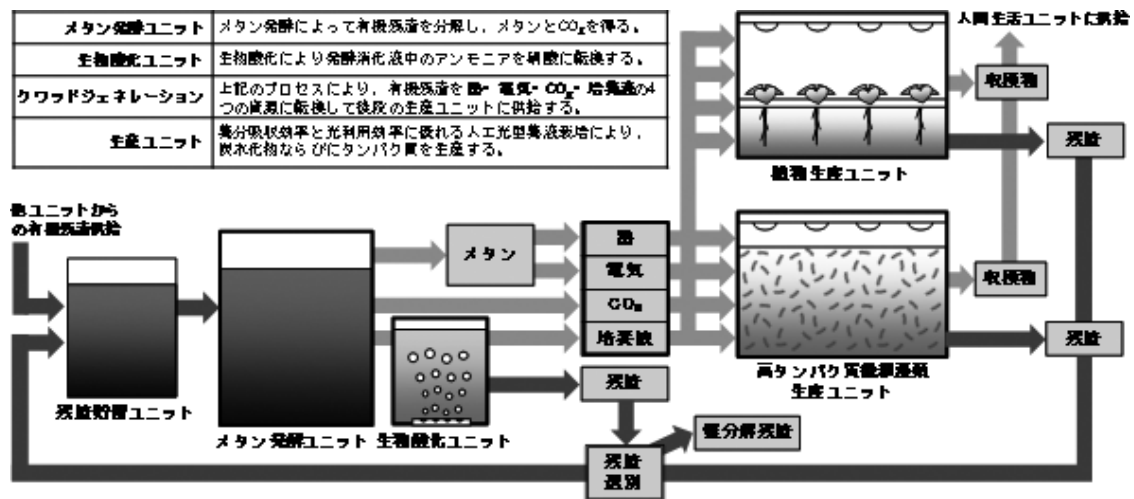


図 6.3 宇宙利用におけるクワッドジェネレーション型マルチ生産システムの例

表 6.3 イネおよびダイズの必要重量から求めた収穫時残渣の発生重量、有機物量、含水率

	必要重量 (gFW day ⁻¹ person ⁻¹)	収穫時残渣の 重量 (gFW day ⁻¹ person ⁻¹)	収穫時残渣の 有機物量 (gVS day ⁻¹ person ⁻¹)	収穫時残渣の 含水率 (gH ₂ O gFW ⁻¹)
イネ (精白米)	400	—	—	—
ダイズ	350	—	—	—
稲わら	—	560 ¹⁾	409 ¹⁾	0.13 ¹⁾
粃殻	—	89 ²⁾	63 ²⁾	0.09 ²⁾
ダイズ収穫残渣	—	735 ³⁾	632 ³⁾	0.14 ³⁾
計	750	1384	1103	—

¹⁾保井ら (1969)。²⁾平成 19 年度東北バイオマス発見活用促進事業におけるデータ (農水省、2007)。³⁾IPCC 報告書 (1996)。表 6.4 イネおよびダイズ収穫時残渣がメタン発酵で 60%分解¹⁾された場合の CH₄、CO₂、NH₄⁺生成量の推定値

	CH ₄ 生成量 (L day ⁻¹ person ⁻¹)	CO ₂ 生成量 (L day ⁻¹ person ⁻¹)	NH ₄ ⁺ 生成量 (g day ⁻¹ person ⁻¹)
稲わら	109 ²⁾	100	2.0
粃殻	16 ³⁾	16	0.0
ダイズ収穫残渣	176 ⁴⁾	146	12.9
計	301	262	14.9

¹⁾落ら (2005) における牧草のメタン発酵分解率の報告を適用した。²⁾保井ら (1969) の報告している稲わら成分組成に、稲わらの C/N 比を 60-80 とする犬伏・安西 (2001) の報告を加味して C/N 比を 70 とし、稲わらの組成を C₂₅H₄₂O₂₀N_{0.3} と推定して下のメタン発酵理論式*を用いて算出した。³⁾粃殻が炭水化物のみからなると仮定し、組成を C₆H₁₀O₅ と推定して算出した。⁴⁾IPCC 報告書 (1996) の報告から、組成を C₃₃H₅₄O₂₄N₂ と推定して算出した。

*メタン発酵理論式 (李, 2005) :

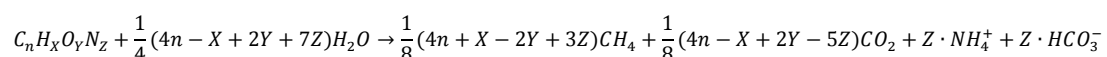


表 6.5 滞在人数ごとの残渣の総容積ならびにメタン発酵槽¹⁾有効容積の推定値

規模	1 人 (原単位)	6 人	100 人
メタン発酵槽に投入する 希釈残渣の総容積 ²⁾ (L day ⁻¹ person ⁻¹)	6.0 ²⁾	36.0	600
水理学的滞留時間 ³⁾ を 20 日とした場合の メタン発酵槽有効容積 (L)	120	720	12,000

¹⁾メタン発酵方式は連続運転・湿式中温方式とした。基質の含水率ならびに投入負荷は、生ごみを基質とした場合に概ね標準的とされる条件（含水率約 80%ならびに水理学的滞留時間 20 日）を仮定した。

²⁾加水前の残渣重量を Table 1 から 1384 gFW day⁻¹ person⁻¹、そのうち水分量を 165 gH₂O day⁻¹ person⁻¹と仮定して、4620 g の水を加水することで含水率 80%とした。加水後の残渣の密度は 1000 g L⁻¹とした。

³⁾水理的滞留時間は以下の式で求めた。

$$\text{水理学的滞留時間 (day)} = \frac{\text{メタン発酵槽有効容積 (L)}}{\text{投入する希釈残渣の容積 (L / day)}}$$

6.4.2. 堆肥化、残渣の利用

比較的簡易な廃棄物処理に堆肥化がある(図 6.4)。堆肥の原料は、主に稲わらやもみ殻、家畜糞尿など、大部分が植物由来の粗大有機物であり、最終的に二酸化炭素とアンモニアに分解することが可能である。堆肥化に関する詳細な研究はその歴史を含めて長く行われており^{2, 3)}、堆肥中には、無機元素も多く残存する。月面農場を長期的に運営するには、エネルギーコストが低く、中長期にわたり炭素を保持する性質を活かし、これらを作物生産の肥料として活用することが合理的であると考えられる。また、堆肥化中、堆肥内の温度は 60℃～80℃程度まで上昇することから、その熱を利用した病原菌などの殺菌効果が期待できる。

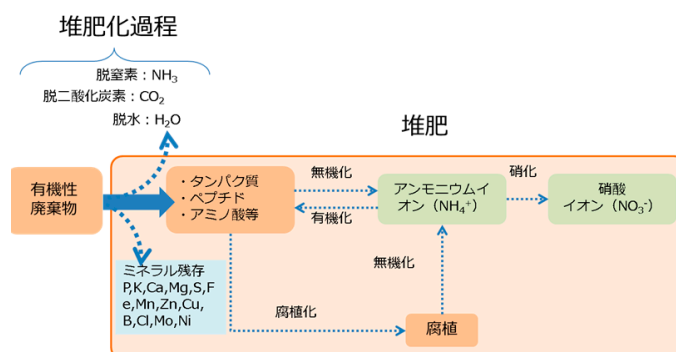


図 6.4 堆肥化家庭と窒素の形態変化

6.4.3. 尿尿、糞便の再利用

月面上での生活において排泄された尿や糞便を作物生産用の肥料資源として廃棄物処理地域にストックすることで、資源不足を効率的に回避できると考えられる。ヒトの尿尿には、尿素やリン酸、カリウムなどが含まれていることや、ヒトの尿尿を原料とした養液栽培方法が報告されていることから⁴⁾、月面農場においても、尿素を窒素肥料として利用できる可能性がある。尿や糞便を効率的に再利用するためには、尿と糞便を分別回収し、それぞれに適したリサイクルシステムで処理を行う必要があると考えられる。尿を肥料として再利用する場合は、必要に応じて殺菌後、濾過や透析膜などで、除塩処理を行い利用することや、作物に生理障害が観察されるほどではないが、液体肥料としてそのまま利用するには窒素含量が高濃度であるため、希釈して使用することが想定できる。また、尿はウレアーゼによりアンモニウムイオンと二酸化炭素まで分解可能であり、さらにアンモニウムイオンを酸化することで、硝酸イオンに変換できる。以上のような尿尿から得られた資源を月面農場における作物生産に最大限活用するには、そのまま作物に施与するのではなく、Fertigation のシステム(図 6.5)^{2, 5)}などと組み合わせることで、その効果を最大限発揮できると想定される。一方、糞便はメタン発酵や堆肥化に組み込むことができる。この際、気相から CO₂、NH₃、H₂O が回収可能であり、堆肥化物中に含まれる S、Ca、Mg および微量元素を作物栽培用の資源として再利用が可能であると想定される。以上から、月面においては、糞便や尿も貴重な元素資源であるため、長期的に月面農場を運営するためには、いずれかのタイミングで資源循環することが望ましいと考えられる。

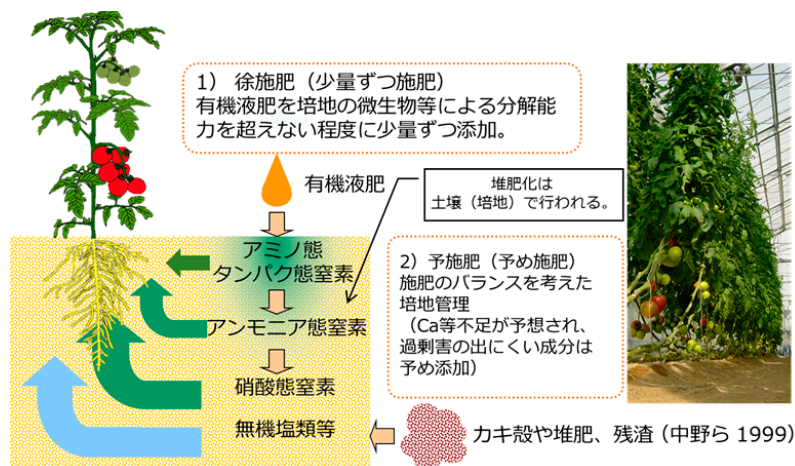


図 6.5 Fertilization システム

6.5. 月面鉱物の資源としての利用

月面鉱物(月レゴリス)を構成する元素は、地球上の土壌元素と類似性があり⁶⁾、Ca、Mg、K、Pや微量元素などが含まれているため(表 6.6、6.7)、作物への栄養素供給源の候補として利用・活用が期待できる。実際、火星および月の土壌を模して作成された人工土壌を用いてトマト、コムギ等を栽培した報告があり、土壌として問題はないとされている⁷⁾。一方で、月レゴリス中の Mn、Zn、Pb、Se などの重金属含量は地球上の土壌の中央値と同程度であるが、Ni は 6 倍、Cr においては 27 倍も高い。また、月レゴリスには As、Cd、Ag が濃度は低いながらも含まれる場合がある。今後、月レゴリスを用いて作物を栽培することを想定すると、これら重金属の作物への吸収量について常に留意していく必要がある。さらには、月レゴリスの物理性、特に、保水性や通気性などの特性解明も望まれる。

表 6.6 月の岩石の組織の例

		A11	A12	A14	A15	A16	A17	unit
Major and minor elements	SiO ₂	42.2	46.3	48.1	46.8	45.0	43.2	(wt%)
	TiO ₂	7.8	3.0	1.7	1.4	0.5	4.2	
	Al ₂ O ₃	13.6	12.9	17.4	14.6	27.3	17.1	
	Cr ₂ O ₃	0.3	0.3	0.2	0.4	0.3	0.3	
	FeO	15.3	15.1	10.4	14.3	5.1	12.2	
	MnO	0.2	0.2	0.1	0.2	0.3	0.2	
	MgO	7.8	9.3	9.4	11.5	5.7	10.7	
	CaO	11.9	10.7	10.7	10.8	15.7	11.8	
	Na ₂ O	0.5	0.5	0.7	0.4	0.5	0.4	
	K ₂ O	0.2	0.3	0.6	0.2	0.2	0.1	
P ₂ O ₅	0.1	0.4	0.5	0.2	0.1	0.1		
S	0.1	-	-	0.1	0.1	0.1		
Total		99.9	99.6	99.8	100.8	100.8	100.5	
soils & breccias		A11	A12	A14	A15	A16	A17	unit
miscellaneous minor elements	P	560	1616	2073	908	570	453	(μg/g)
	V	69.6	114.4	51.1	110.4	21.1	71	
	Cr	1986	2468	1496	2530	728	2220	
	Mn	1662	1600	1009	1445	511	1252	
	Sr	163	138	184	138	154	153	
Incompatible trace elements	K		540	912	409		440	(μg/g)
	Ba	232	70	146			74	
siderophile elements	Co	31	40.8	34.6	44.6	27	33.8	(μg/g)
	Ni	199	260	411	216	378	211	
vapor-mobilized elements	S	1240	820	870	624	543		(μg/g)
	F			138	69			
	Zn	24.7	6	26.7		19.1		
	As			85				(ng/g)
	Se	330	200	316	193	224		
	Ag					8.5		
	Cd					83		
	Pb	1.61	3.9	8.3	1.81	1.9	1.47	(μg/g)

表 6.7 月と地球の岩石組成の例

酸化物	月岩石重量%	地球岩石重量%
SiO ₂	44.40%	59.36%
Al ₂ O ₃	6.14%	15.30%
FeO	10.90%	6.43%
MgO	32.70%	3.48%
CaO	2.31%	5.04%
Na ₂ O	0.09%	3.77%
K ₂ O	0.01%	3.13%
TiO ₂	0.31%	0.33%

※地球岩石の値はクラーク係数から計算

6.5.1. 模擬月レゴリスの保水力

月レゴリスを作物への栄養素供給源や作物栽培用の培地として利用できるかどうか探るため、JAXA から提供された模擬月レゴリスの保水力や根圏に与える影響などを検討した。模擬月レゴリスは一般的な土壌と比較して保水力に乏しく、もっとも保水力の乏しい川砂よりも低いという結果が得られた(図 6.6A)。

JAXA から提供された月レゴリスの形状などに関する情報を併せて判断すると、月レゴリスを作物栽培用の培地として利用するには、保水力や物理性を改善する必要があることが示唆された。また、レゴリスの保水力を改善し得る資材としていくつか検討したところ、ポリ乳酸(PLA: 農業資材名 LACTIF)やパルプが高い保水力を示すことが判明した(図 6.6B)。

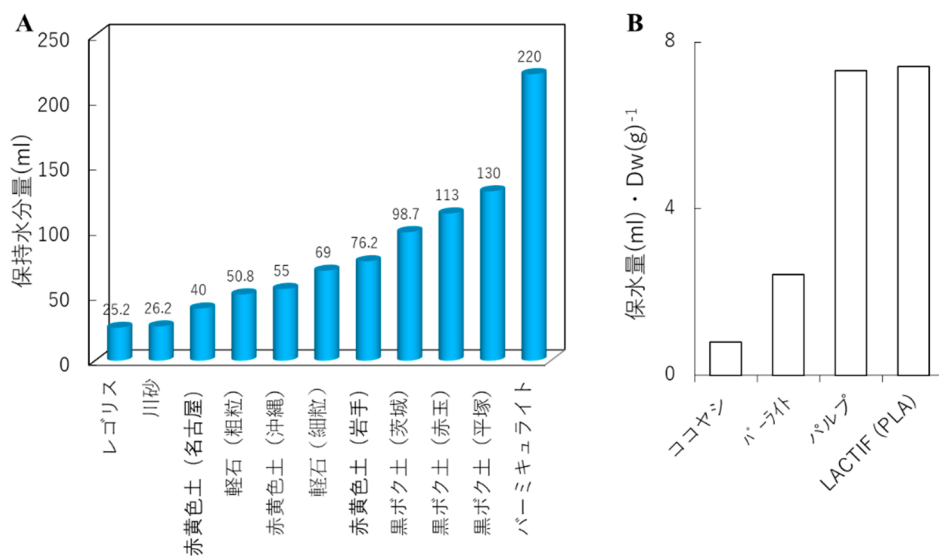


図 6.6 各培地の保水量

6.5.2. 月レゴリスの物理性の改善が見込める資材

月レゴリスを作物栽培用の培地として利用するには、保水力や物理性を改善する必要があることが示唆された。月レゴリスを利用して作物を栽培するためには、リサイクル可能で気相率が高く軽量であるなどの特徴を持つ資材と混和することで、保水力などの物理性を改善し利用できる可能性が考えられる。上記のような特徴を併せ持つ資材として、デンプンなどを原料に合成される生分解性のポリマーであるポリ乳酸 (PLA)が考えられた(図 6.7)。PLA は、デンプンの糖化、乳酸発酵、重合を経て PLA 樹脂が製造され、繊維やフィルムなどに加工される⁸⁾。一般的にポリ乳酸製品は、ABS 樹脂製品と比較して耐久性や耐熱性が劣るとされているが、製造方法によりポリプロピレンと同等の強度を与えることが可能とされている。また、加水分解や堆肥化などの生分解により、最終的に水と二酸化炭素に分解できるため、元素の循環利用の観点からも有用な資材であると考えられた。さらに、月面農場において作物を生産する際は人工光型植物工場のシステムが提案されているが、栽培過程で必要となる苗などの支持体としての利用も考えられる。また、堆肥中において、ポリ乳酸の分解は難しいとされているが、ポリ乳酸を効率よく分解する *Pseudozyma* 属の酵母菌や *Amycolatopsis* 属の放線菌などが報告されている^{9, 10)}。月面における資源循環システムを構築する際に、上記のような特定の微生物を積極的にリサイクルシステム中に接種し、微生物叢を人工的に確立することが、持続的な作物生産体系を確立する上で重要になると考えられる。PLA は、デンプンなどを原料に合成できることから、製造設備を月面農場に導入することで、月面でも製造できる可能性が高いと考えられるため、持続的に月面農場を運営するうえ、有望な素材の一つであると考えられた。

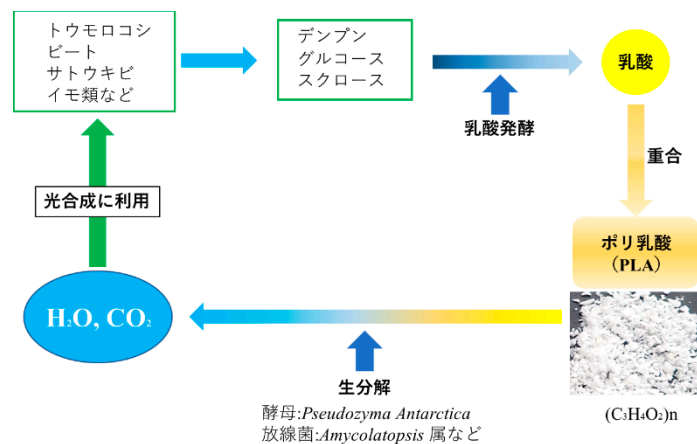


図 6.7 ポリ乳酸の物質循環

6.5.3. 模擬月レゴリスを用いた作物栽培試験

ポリ乳酸を原料に作成された軽量で気相率が高い LACTIF 培地(株式会社 JSP)が開発されている。LACTIF 培地のような物理性に優れる資材と月レゴリスを混和することで、月レゴリスの土壌としての物理性や保水力が改善され、根圏発達が良くなり肥料資源を効率的に利用できる可能性がある。そこで、月面入植後に月レゴリスが現地資源として活用可能か探るため、スプラウト(芽生え野菜)や月面農場での栽培候補作物の一部であるダイズ、リーフレタス、イチゴを用いて、模擬月レゴリスとポリ乳酸の混和による根圏の発達や生育への影響を検討した。なお、試験に用いられたポリ乳酸は、株式会社 JSP よりご提供いただいた LACTIF 培地を用いた。

試験の結果、模擬月レゴリスは、LACTIF 培地と混合して用いることで模擬月レゴリス単体での栽培よりもダイズ、リーフレタス、イチゴ、スプラウト類の根圏発達を促進させるという予備実験結果が得られた(図 6.8A, B)。以上の結果は、LACTIF 培地を混合することで、培地気相率などが改善され植物生育適性が向上したためと考えられる。さらに、模擬月レゴリスと LACTIF 培地の混合培地で栽培したダイズを完熟稲ワラ堆肥に定植し栽培を続けたところ、コントロール(培養土)と比較するとやや果実は小さいが、果実を得られることが確認できた(図 6.8C)。

本実験により、月レゴリスを活用し作物を栽培できる可能性が示唆された。月面での生活が安定し、将来的に月レゴリスを利用した作物栽培も視野に入れる場合、月面入植後から、人工光型植物工場での作物栽培と並列して、月レゴリスの物理的改良が作物の成長に与える生理生態的な影響の評価や可食部位への有害重金属蓄積などの調査が必要であると考えられる。このように、長期的な月面への居住を可能にするためには、残渣の効率的な資源化に加えて、循環資源の利用効率を向上しうる現地調達資材の開拓・導入も重要であると考えられる。

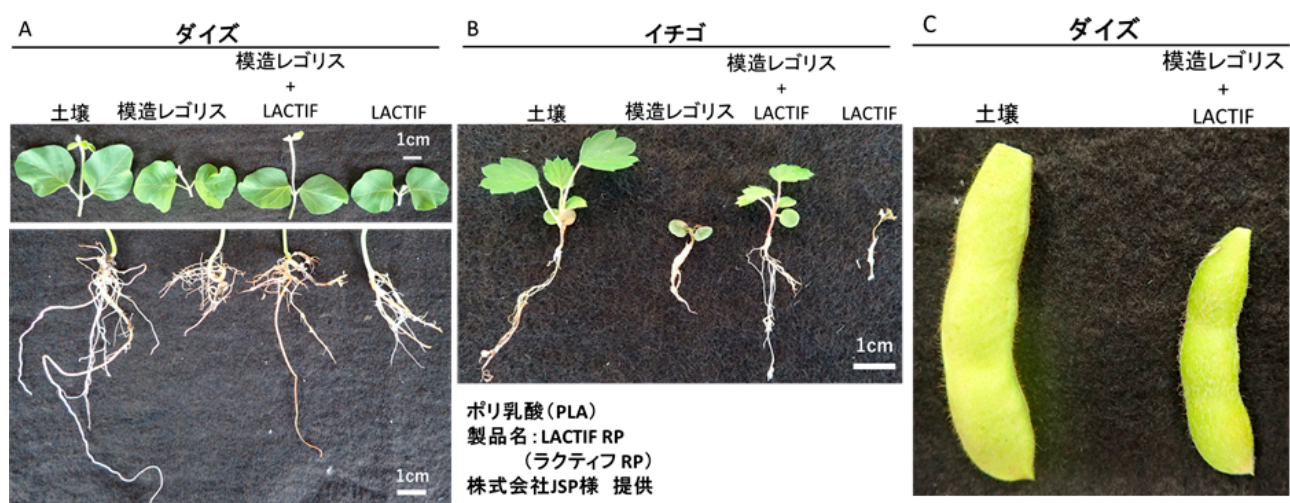


図 6.8 各培地上で栽培した作物

6.5.4. レゴリスの再利用

レゴリスの利用方法として、焼結し培地として利用できる可能性がある。一方、使用後の焼結レゴリスを再利用する場合、例えば、宇宙放射線などを利用し殺菌、滅菌ができるかを検討する必要がある。現在、月面における曝露環境での宇宙放射線(太陽粒子、銀河放射線等の主に陽子線)の実測データは十分にない。一度使用した焼結レゴリスを月面で曝露した場合、奥深い部分まで殺菌ができていないか、また、宇宙放射線環境が安定しているかどうか不明である中で、殺菌を確実に行うのは容易ではない。むしろ、照射対象のレゴリスを混合しながら、人工的に発生させた滅菌用の紫外線ランプ等を必要な照射波長や照射時間を調整しながら照射した方が殺菌には有効と考えられる。また、対象となる菌の種類により、殺菌に必要な放射線の強度や照射時間が異なると考えられる。このような環境下での微生物動態については、月面上で研究を実施する必要があると考えられる。

6.6. 熱化学的処理

1994 年から青森県六ヶ所村で建設が開始された CEEF(閉鎖生態系実験施設)では、微生物によらない熱化学的廃棄物処理として、ヒトの排泄物と植物の不可食部を高温高压下の水中で分解する湿式酸化処理が試みられている。湿式酸化は、水の臨界に達しない 374℃以下で、かつ水の気化を防ぐために密閉式の高圧容器の中で行われる。生物処理に比べて分解時間が短い点、分解物中に細菌やウイルスが含まれず環境汚染のリスクが少ない点がメリットとされる。一方、高压処理であることや規模を大きくしにくいこと、窒素がガス化して植物養分としにくいことがデメリットとされる。図 6.9 に、閉鎖系における資源循環ユニットとして検討されてきた湿式酸化処理・堆肥化・メタン発酵の概略図を示す。

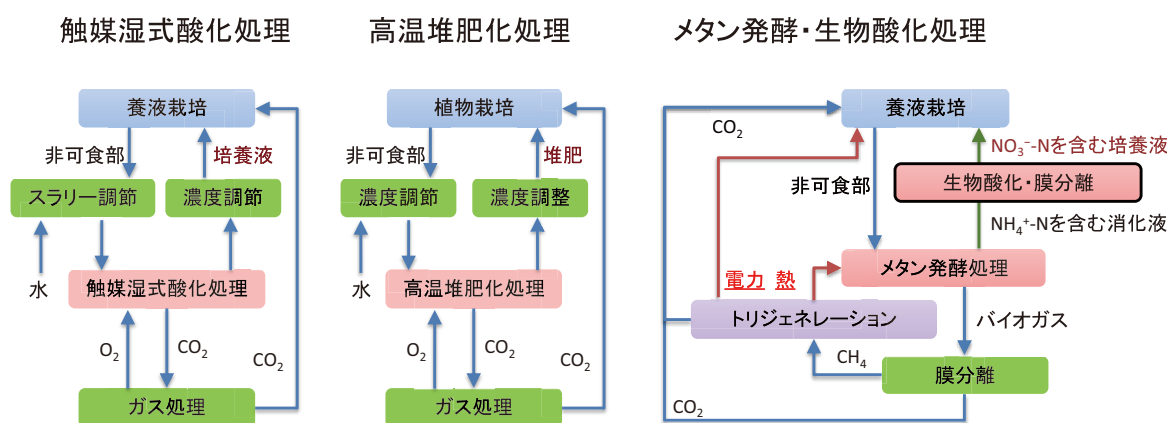
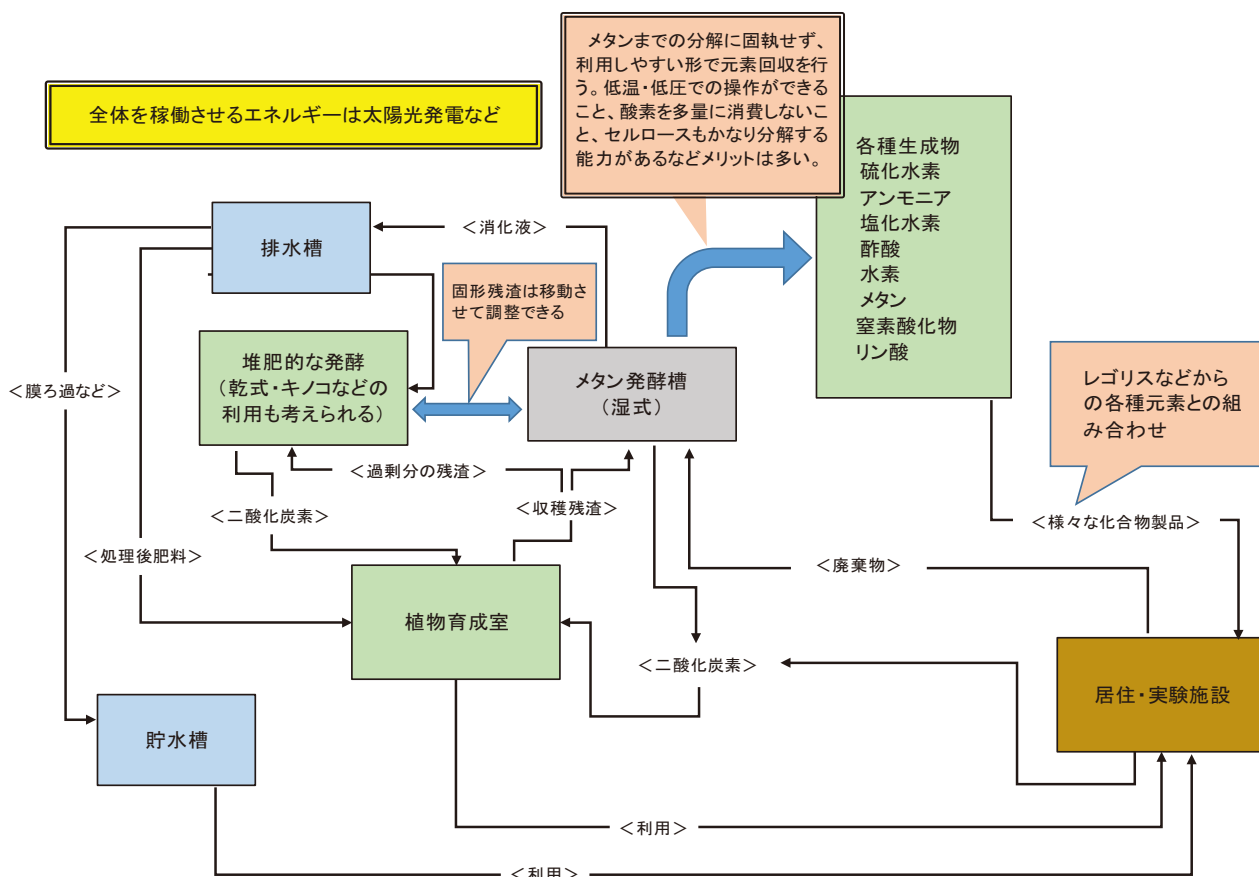


図 6.9 閉鎖系における熱化学的ならびに生物化学的有機物分解処理方法の概略

6.7. 月面における長期的な資源循環に関する今後の展望

地上での嫌気発酵槽の主な使用目的は、メタンガスの生産となることが多い。一方で、メタンガス生産までの段階でアンモニアや硫化物などの副生産物が発生する。月面では、元素資源が限られると予測できるため、これら副産生成物が、重要な資源となる。そのため、それぞれの化合物の生成の仕組みや条件などを研究・解明することは、月面農場での効率的な資源循環だけではなく、地上での効率的なメタン製造などにも反映可能と考えられる。作物残渣に最も多く含有される有機物として、植物セルロースが挙げられる。現在、植物セルロースの効率的な分解について、多くの視点から研究がなされている。その中で、真菌類や細菌類を用いた効率的な植物セルロースの分解に関する研究が活発に行われている。月面農場において発生する植物セルロースの分解も真菌類・細菌類を用いると効率的な資源循環が可能であると予測される。以上から、月面農場を持続的に運営するための資源循環の今後の予測として、図 6.10 のようなシステムをイメージした。生物という完全なコントロールのできないものをできる限り簡易的に扱うことを考慮し、元素をできるだけ扱いやすい状態で貯留することに留意している。例えば、収穫物からの残渣物は稲のように一回の排出量の多いものもあるため、貯留しながら堆肥化やキノコなどのセルロース分解菌などを用い、緩やかに分解させながら、メタン発酵槽への投入量を主に調整する役割を担うなどである。



月面農場が軌道に乗り、滞在人数や基地面積が増加すれば、炭素や酸素、水素を保持するためのバッファー機能の高い土、もしくは、それに準じたものを増やす必要があると考えられる。特に、土の基材の一つである堆肥は、炭素などの元素を蓄える能力が高いため、その必要性が高まってくることが予想される。また、培地耕なども、この段階で有効になっていくと考えられる。嫌気発酵でもセルロースは分解されるが、高効率とはいえないため、堆肥化によるセルロースの分解機能を導入することで、嫌気槽への投入量の調整や前処理など、循環速度のコントロールをおこなうことが有効であると考えられた。月面に堆肥の生産システムが組み込まれると、発酵の際の熱が得られるため、嫌気発酵の加温や植物育成室の加温に利用することが可能であると予測される。一方で、月面農場は完全閉鎖空間であるため、熱や二酸化炭素を上手く活用するための、装置やそれを駆動させるためのエネルギーが別途必要になることは、考慮すべきである。また、合成・生分解が可能なポリ乳酸や、月レゴリスから製造可能と考えられるパーライトに準じたものは、月面入植時から早い段階で導入することを視野に入れることも必要になるかもしれない。一方で、月面農場を長期的に運営していると、居住空間や生活空間、生産空間から、無機性の廃棄物も生じてくると考えられるため、例えば、金属類やガラス類は電気炉などによる溶解、プラスチックなどは熔融など、無機性廃棄物のリサイクルシステムも構築しておくことが望ましいと考えられる。以上のように、月面における持続的な資源循環システムを構築する際は、発生しうる残渣の効率的な資源化を考慮することが重要であると考えられる。

図 6.10 は滞在人数が 5 人前後の人数を対象としており、バッファ機能は嫌気発酵槽と水が担うことを想定した。廃棄物は嫌気発酵槽にあえて集中させており有機物を中心にした循環システムを示した。

メタンの利用は、太陽電池による電気エネルギーを前提とした場合、エネルギーとしての価値は低く、N、C の循環においては二酸化炭素の利用が容易であることから、メタンまでの発酵を目的としていない。月面において各種化合物を製造することを視野にいれていくとアンモニア、硝酸、硫酸、塩化水素は重要な位置を占めてくると予想される。アンモニアのハーバー・ボッシュ法のような触媒を用いた合成法と併用し、閉鎖系での循環利用下での効率的な運用が必要と考えられる。

6.8. 今後の課題

物質循環に必要な微生物や作物をはじめとした物資を月面に持ち込む際、意図しない病原菌の混入やそれを原因とした病害の発生が危惧される。月面入植当初は、養液栽培を主とするため病気が発生すると、甚大な被害が出ると予測される。病害による作物の被害を抑制するためには、病原菌の侵入防止策や滅菌技術、農薬などによる病原菌の防除に関しても議論を深める必要があると考えられる。一方で、月面には地球上から導入した微生物しか存在しないと考えられるため、病害防除などに農薬を使用する場合は、微生物の多様性が形成されずに農薬分解が進まない可能性や共生菌不在による肥料の利用効率の低下なども考えられる。以上のことから、今後、月面における物質循環において、分解菌コミュニティなどの形成についても議論が必要になると考えられる。

参考文献

- 1) 文部科学省, 食品成分データベース, 2015, <https://fooddb.mext.go.jp/index.pl>
- 2) 中野明正, インテグレート有機農業論, 誠文堂新光社, 2012.
- 3) 中野明正ら, 植物工場・施設園芸ハンドブック, 2015.
- 4) Linyan Yang, Apostolos Giannis, Victor W.-C. Chang, Bianxia Liu, Jiefeng Zhang, Jing-Yuan Wang. Application of hydroponic systems for the treatment of source-separated human urine, *Ecological Engineering*, 81, 2015, 182-191.
- 5) Fernandez-Salvador, J, B.C. Strik, D.R. Bryla., Liquid corn and fish fertilizers are good options for fertigation in blackberry cultivars grown in an organic production system, *HortScience*, 50(2) 2015, 225-233.
- 6) SPACE.com, アポロ 15 号によって採集された岩石の組成, 2010.
- 7) Wamelink GWW, Frissel JY, Krijnen WHJ, Verwoert MR, Goedhart PW. Can Plants Grow on Mars and the Moon: A Growth Experiment on Mars and Moon Soil Simulants. *PLoS ONE* 9(8), 2014, e103138. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0103138>
- 8) 木村良晴, 石油に依存しない高分子、ポリ乳酸をつくる。高分子, 2015, 64(5), 278-282. <http://www.space.com/scienceastronomy/moon-mantle-exposed-craters-100705.html>
- 9) 北本宏子 et al, 特願 2008-023030 号(2008).
- 10) 常盤 豊, 生分解性プラスチックを分解する微生物と天然高分子, 生物工学会誌, 2007, 85(6), 264-266.