

CEEFはClosed Ecology Experiment Facilitiesの略称である。生態系のヒトを含む部分の機能を模擬するため、CEEFは閉鎖系植物実験施設(CPEF, Closed Plant Experiment Facility)、閉鎖系動物飼育・居住実験施設(CAHEF, Closed Animal and Human habitation Experiment Facility)、及び閉鎖系陸・水圏実験施設(CGHEF, Closed Geo-Hydrosphere Experiment Facility)で構成された(図2)。各実験施設は夫々、物質循環・環境計測制御システムを持つ。これらのシステムは物質を変換し循環するために物理化学的手法を用いている(Tako *et al.* 2001ab, 2002, 2003, 2004, 2005ab, 2010, 多胡2002, Nitta 2002, 多胡ら2005, 新田・多胡2006)。

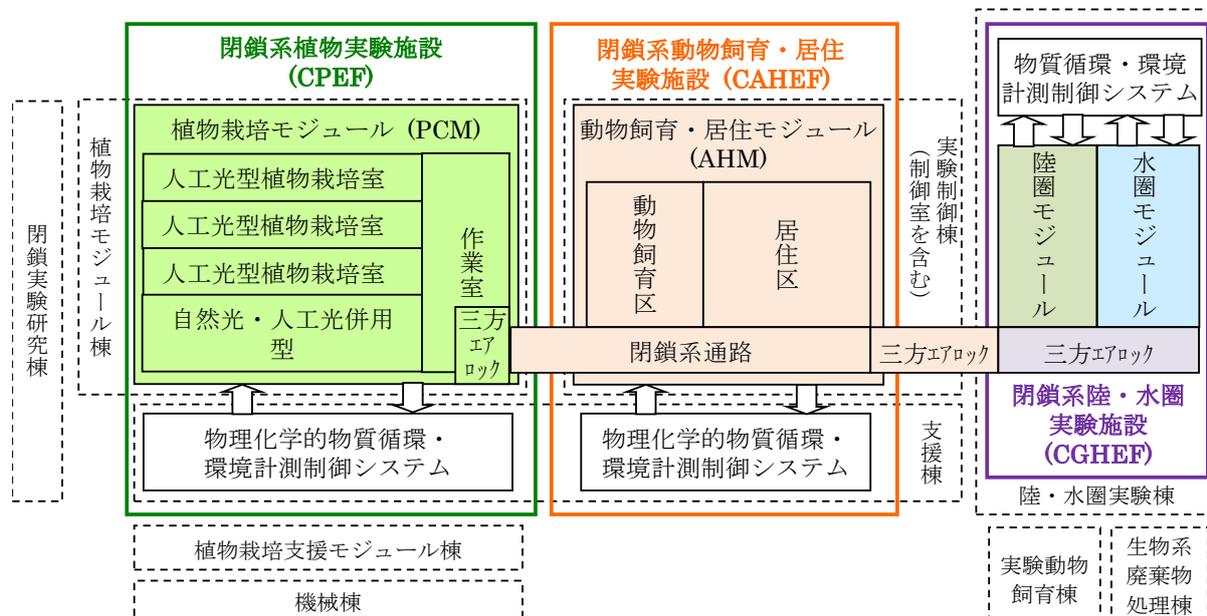


図2 閉鎖型生態系実験施設(CEEF)の構成

2.1 ヒトを含む生態系における物質循環研究

2.1.1 生物影響実験調査(閉鎖系)及び生物体移行実験調査

これらの調査では、CEEFの設計・建設・整備と並行して、施設の概念及び基本設計要因、施設内における栽培候補植物種及びそれらの栽培方法、飼育動物種の選定及び飼育法、並びに生物生理代謝による物質移行測定技術の検討を行った。これらの調査での実施内容は、財団法人環境科学技術研究所五年史(pp24-28)、財団法人環境科学技術研究所創立五周年「調査研究成果の概要」(平成2年度～平成6年度)(pp99-128, pp213-227)、並びに環境研十年史(pp83-121)に詳しい。

2.1.2 生物圏物質循環総合実験調査

代表的成果である閉鎖居住実験について記す。

2.1.2.1 物質循環閉鎖居住実験—食料・飼料自給及び物質(空気成分、水、廃棄物)循環

2.1.2.1.1 概要

平成17年から19年にかけて、CPEFとCAHEFを結

合して一連の実験を実施し、気体成分、水、及び廃棄物から回収された物質の循環を実証した。これら2つの設備を結合して、これらの物質を循環した閉鎖実験系内にはクルー2名が滞在した。CPEFの植物栽培モジュール(PCM)内でイネ、ダイズ、ラッカセイを含む23種類の作物を栽培し、CAHEFの動物飼育・居住モジュール(AHM)内で2頭のシバヤギを飼育した。

平成17年には1週間の閉鎖居住実験を3回行い、平成18年にはクルー(2名)が1週間ごとに交代し、2週間連続した物質循環・閉鎖系内居住を3回行った。平成19年には同一クルー(2名)による連続した閉鎖系内居住を1週間(1回)、2週間(2回)、4週間(1回)の各期間で行った(表1)。

2.1.2.1.2 実験系

図3は平成19年最後の4週間閉鎖居住実験における物質循環系を示している。表1に示した全ての実験は、CPEFとCAHEFを結合して行った。PCMからAHMへの食料と飼料の運搬は人手を介して行ったが、空気成

表 1 各閉鎖居住実験の実施期間とクロー・飼育動物

2005年に行った実験の	9月	9月27日-	10月			
実施期間	6-13日	10月4日	18-25日			
居住者	AおよびB	AおよびB	AおよびB			
シバヤギの頭数	2	2	2			
2006年に行った実験の	9月	9月	10月	10月	11月	11月
実施期間	5-12日	12-19日	10-17日	17-24日	7-14日	14-21日
居住者	AおよびC	B及びD	AおよびD	BおよびC	AおよびB	CおよびD
シバヤギの頭数	2	2	2	2	2	2
2007年に行った実験の	8月28日-	9月18日-	10月	10月30日-	11月13日-	
実施期間	9月4日	10月2日	16-30日	11月13日	12月11日	
居住者	CおよびD	AおよびD	CおよびD	なし	AおよびC	
シバヤギの頭数	2	0	2	2	2	

分及び水の循環と廃棄物の分解は物理化学的物質循環システムを用いて行った。

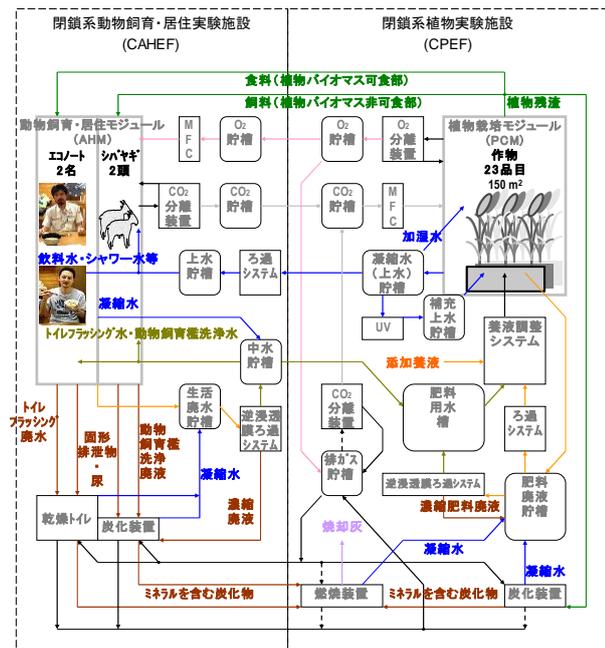


図3 平成19年最後の4週間閉鎖居住実験での物質循環系。平成17年にはCAHEFでの水処理後のCPEFの養液調整システムへの還流を行っておらず、平成17~18年には炭化・燃焼装置による系内での廃棄物処理とそれから回収されたCO2のPCMへの注入を行っていない。MFC: マスフローコントローラー、UV: 紫外線殺菌システム

PCM (図4) は夫々43 m²の床面積、146 m³の容積、及び5 m²×6台=30 m²の栽培面積を持つ人工光型植物栽培室3室、65 m²の床面積、239 m³の容積、及び5 m²×12台=60 m²の栽培面積を持つ自然光・人工光併用型植物栽培室1室、332 m³の容積を持つ作業室、並びに8 m³の容積を持つエアロックから成る。平成17~19年に行った閉鎖居住実験では、23種類の作物を連続的に栽培したが、その栽培法をシークエンス栽培と呼んだ。この栽培法は、夫々の品目に割り当てた面積を更に分割して、小区画ごとに一定のインターバルで苗の移植または播種と収穫を行うことで、苗から収穫直前ま

で生育段階が連続的に異なる植物体から成り、全体としては定常状態の個体群を形成し、作物代謝量と収穫物生産量が定常化する方法である。イネ及びダイズは移植に先立ち自然光・人工光併用型植物栽培室で夫々24日間及び14日間育苗した。総栽培面積は150 m²であり、その内10.3 m²は育苗に用いた。

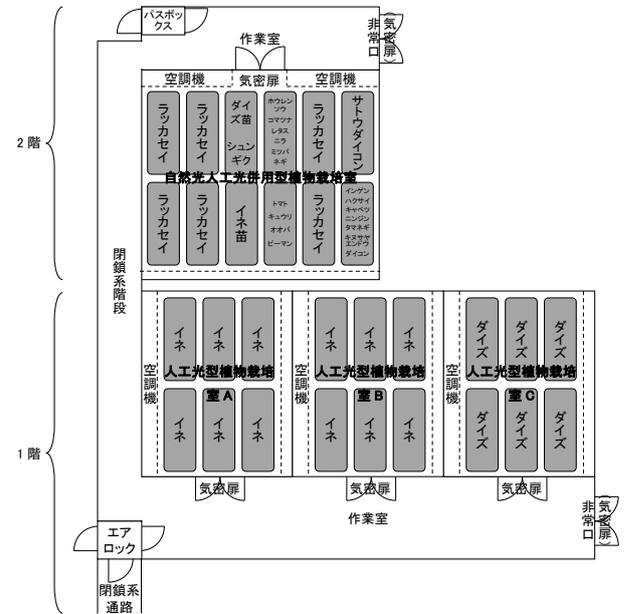


図4 PCMの各植物栽培室における養液栽培床 (灰色部分、各5 m²) と作物の配置。平成18年の例を示す。主要作物は平成17~19年にわたって共通である。その他の栽培品目も種類は共通である

AHM (図5) は22 m²の床面積と54 m³の容積を持つ動物飼育区、51 m²の床面積と123 m³の容積を持つ居住区、163 m³の容積を持つ閉鎖系通路、及び8 m³の容積を持つエアロックから成る。

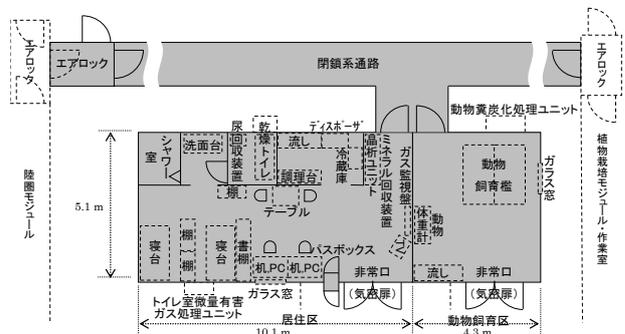


図5 AHM (灰色部分) における設備等の平面配置

閉鎖居住実験においては同時に2名のクローがCEEF内に滞在した (図6上)。平日の場合、PCMでの作業で2時間程、動物飼育区での作業で1時間程、系内でしか

行えない環境等計測用センサー類の校正作業（系内各所：作業場所は日によって異なる）で2時間程、自らの医学的・心理学的検査（医師による遠隔診断を含む；居住区）で1時間程、調理等（居住区）で1.5時間程、食事（居住区）で1.5時間程、シャワー等（居住区）で0.5時間程、睡眠（居住区）で8時間程を過ごしたので、その他マージンとしての時間（居住区）が6.5時間程であったが、系内で居住者自身がトラブル対処等に当たった場合（主に居住区）はマージンの時間が削られた。実験中、2頭のシバヤギを動物飼育区内の動物飼育檻内で飼育した（図6下）。CEEF内で収穫した作物の内、ヒトにとっての非可食部をシバヤギに給餌した。シバヤギは雌であったが、妊娠が必要な搾乳は行わなかった。

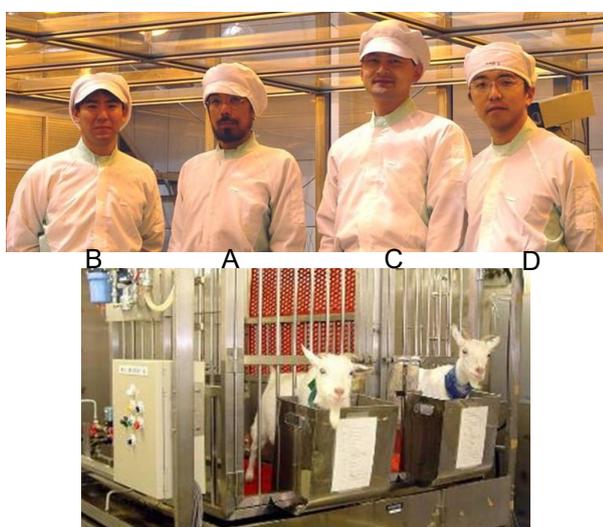


図6 閉鎖居住実験でCEEFに滞在したクルーとシバヤギ

図7は閉鎖居住実験で用いた空気処理システムを示す。CO₂分離装置は吸脱着体として固体アミンを使用し、冷温水夫々のバッファタンクを持ち、それらを用いた温度圧カスイング法でCO₂を分離する（Tani *et al.* 2007）。微量有害ガス処理装置では、酸性及びアルカリ性ト्रेसコンタミナントガスを夫々、アルカリ添着活性炭及びリン酸添着活性炭で吸着除去し、植物に影響を及ぼすエチレンを含む中性の炭化水素等のガスは加熱したパラジウム触媒で分解する。

図8は閉鎖居住実験で用いた水処理システムを示す。PCM大気からの凝縮水処理水は施設運転当初から植物栽培養液に還流し再利用していたが、平成18～19年の閉鎖居住実験では、更に肥料廃液処理水と生活廃水処理水も植物栽培養液に還流し再利用した。

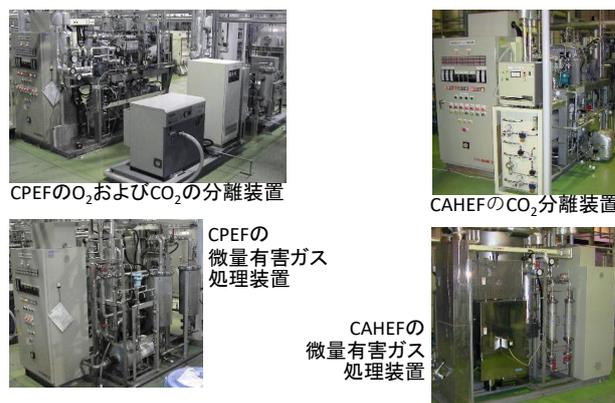


図7 閉鎖居住実験で用いた空気処理システム



図8 閉鎖居住実験で用いた水処理システム

図9は閉鎖居住実験で用いたCPEFの廃棄物処理システムを示す。平成19年の閉鎖居住実験では、回収した廃棄物、飼料としても用いなかった非可食部を、植物系廃棄物処理システムで先ず炭化処理し、次に燃焼処理した。炭化と燃焼の2段階に分けて処理した理由は、機器に障害をもたらすタールの発生を避けるためであった。これらの処理で発生した排ガスに対して、排ガス処理ユニットで、CO無害化のための触媒酸化と、PCM大気への注入のためのゼオライトを吸脱着体として用いる圧カスイング法によるCO₂濃縮を行った。

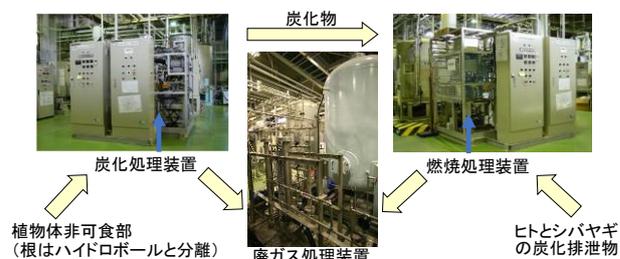


図9 閉鎖居住実験で用いたCPEFの廃棄物処理システム

図10は閉鎖居住実験で用いたCAHEFの廃棄物処理システムを示す。ヒトの排泄物を炭化処理する乾燥ト

イレ、シバヤギ糞を回収する動物飼育檻糞尿分別回収装置、及び動物糞炭化処理ユニットによって排泄物の回収・炭化処理を行い、ヒトとシバヤギの炭化排泄物は CPEF の廃棄物処理システムの燃焼処理ユニットと排ガス処理ユニットを用いて最終処理した。初期の閉鎖居住実験では居住区の乾燥トイレ運転時にトイレ室内の NO₂ がヒトに影響を与える濃度まで上昇することがあったため、トイレ室微量有害ガス処理ユニットを増設・運用し、乾燥トイレの運用を改善した。



図 10 閉鎖居住実験で用いた CAHEF の廃棄物処理システム

2.1.2.1.3 1週間食事メニュー

閉鎖居住実験における食事は完全なヴェジタリアンであり、タンパク質、脂質、炭水化物の3大栄養素

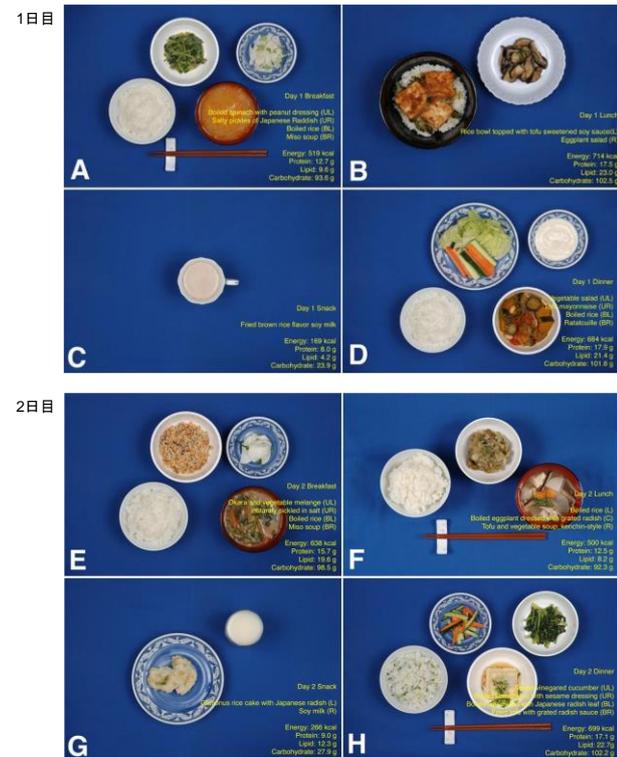
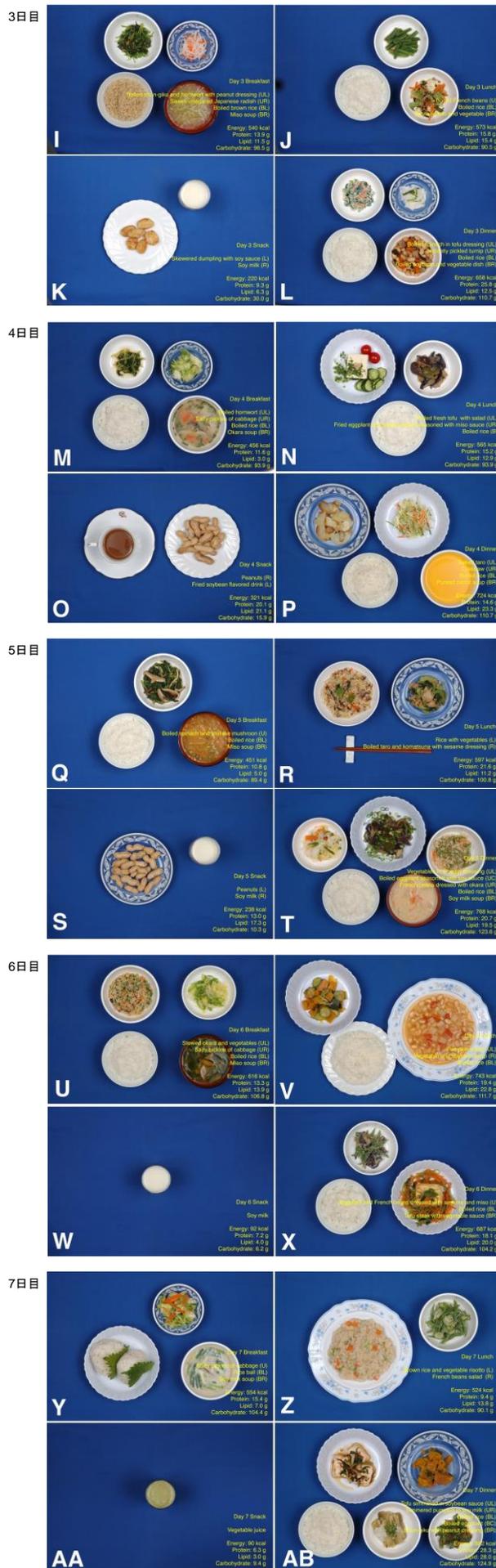


図 11 閉鎖居住実験におけるクルーの1週間サイクル食事メニュー。各日の写真において、左上は朝食、右上は昼食、左下は間食、右下は夕食である。



要求量を満たすように設計された (Masuda *et al.* 2005abcd, 2006, 増田・多胡 2005, Masuda 2007)。エネルギーは、クルーの活動量から計算された要求量を満たすように設計された。1週間サイクル食事メニューを図11に示す。

2.1.2.1.4 自給自足と物質循環に関する成果

2.1.2.1.4.1 平成17年の主要成果 (Tako *et al.* 2006, 2008)

平成17年、CEEFにおけるO₂・CO₂循環及び栽培作物からの食料供給を実証するため、1週間閉鎖居住実験を3度行った。全閉鎖居住実験期間を通して居住区及び動物飼育区の気温、相対湿度、CO₂濃度及びO₂濃度は夫々ヒト及びシバヤギにとって好適な範囲に制御された(表2)。表3は平成17年の全収穫期間について平

表2 平成17年閉鎖居住実験におけるAHMの居住区及び動物飼育区の明暗周期及び大気環境条件の制御結果

区画	実験	明期/暗期 [h:d']	気温 [°C]	相対湿度 [%]	CO ₂ 濃度 [μL L ⁻¹]	O ₂ 濃度 [% (v/v)]
居住区	1回目実験	16/8	24.8-25.5	37-55	1,477-3,676	20.1-20.6
	2回目実験	16/8	24.9-25.4	37-51	1,472-3,492	20.0-20.8
	3回目実験	16/8	24.9-25.3	37-52	1,832-3,514	20.1-20.3
動物飼育区	1回目実験	12/12	19.9-25.3	44-60	1,610-4,002	20.1-20.6
	2回目実験	12/12	19.8-22.0	45-53	1,496-4,214	20.2-21.0
	3回目実験	12/12	19.8-22.4	45-54	1,921-3,656	20.2-20.6

表3 平成17年の全収穫期間について平均した各作物のバイオマス生産速度

植物栽培室	作物種	可食部	バイオマス生産速度 (g 生重/日)		
			可食部	非可食部	トータル
A	イネ	玄米	369	2585	2954
B	イネ	玄米	378	2648	3026
C	ダイズ	子実	744	1599	2343
F	ラッカセイ	子実	226	2253	2479
	サトウダイコン	肥大直根	568	49	617
	ダイコン	肥大直根	95	38	133
	カブ	肥大直根	47	16	63
	キャベツ	地上部	122	65	187
	エンドウ	鞘	28	23	51
	インゲン	鞘	48	37	85
	タマネギ	鱗茎	24	63	87
	ニンジン	肥大直根	59	32	91
	ハクサイ	地上部	42	23	65
	トマト	果実	65	66	131
	キュウリ	果実	135	20	155
	ピーマン	果実	30	17	47
	オオバ	葉 (10 cm以上)	7	20	27
	ハウレンソウ	葉	25	1	26
	ネギ	鱗茎・葉	33	1	34
	シュンギク	葉	199	7	206
	コマツナ	葉	54	1	55
	レタス	葉	53	1	54
	ミツバ	葉	41	3	44
ニラ	鱗茎・葉	34	3	37	

均した各作物の生重量ベースのバイオマス生産速度を示す。非可食部バイオマスにはシバヤギが摂取したも

のと植物残差が含まれる。2回目と3回目の実験では、生重量ベースで、クルー2名分の食料の82%とシバヤギ2頭分の飼料の全てをPCM内で生産された作物から供給した。ガス収支に関して、CO₂のAHMにおける発生量はPCMにおける消費量の46~51%であった。O₂の剰余量とCO₂の不足量が発生したのは、排泄物がほとんど処理されなかったためである。クルーの推定摂取炭素量は、収穫された作物体可食部炭素量の64~92%であった。シバヤギの推定摂取炭素量は、収穫された作物非可食部炭素量の36~53%であった。

2.1.2.1.4.2 平成18年の主要成果 (Tako *et al.* 2007)

平成18年、4名から2名を取る全ての組合せで閉鎖居住実験を行った。この年の閉鎖居住実験における食料自給率を表4に示す。イネ、ダイズ、ラッカセイといった主要作物については外部から全く供給しなかった。1週間当たりの調味料は915gであった。外部供給量と系内作物生産量から計算した自給率は88.6~95.0%であった。

一方、表5にシバヤギの飼料自給率を示す。シバヤギ2頭の1週間当たりの必要飼料エネルギーは31242 kcalであった。これと系内作物からの飼料供給量から計算されたシバヤギが摂取した飼料のエネルギーベースでの自給率は94.9~95.7%であった。

表4 平成18年の閉鎖居住実験における食料自給率

		生重量 (g)					
		1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	6回目
外部供給	イネ・ダイズ・ラッカセイ	0	0	0	0	0	0
	野菜20種	154	20	0	760	0	1167
	調味料	915	915	915	915	915	915
	合計	1069	935	915	1675	915	2082
	系内生産量	17400	17300	17300	16800	17300	16200
食料自給率 (%)		94.2	94.9	95.0	90.9	95.0	88.6

表5 平成18年の閉鎖居住実験における飼料自給率

	飼料エネルギー (kcal)					
	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	6回目
系内生産	29854	29902	29909	29744	29909	29659
必要量	31242	31242	31242	31242	31242	31242
飼料自給率 (%)	95.6	95.7	95.7	95.2	95.7	94.9

作物のガス交換に関しては、各植物栽培室における注入CO₂量と分離O₂量から計算したイネ、ダイズ及びその他の作物群の同化商(AQ=同化CO₂量 / 発生O₂量)

は、夫々0.95、0.87及び0.90であった。一方、可食部と非可食部の収穫量、栄養成分分析による炭水化物と食物繊維の含有量・タンパク質含有量・脂質含有量に関するデータから求めたイネとダイズの同化商(AQ)推定値は夫々0.98と0.91であった。この様に収穫量データと栄養成分分析結果を用いて同化商(AQ)をある程度推定できることを示した。また、ヒトとシバヤギのガス交換に関して、AHMにおける分離CO₂量と注入O₂量から、クルー2名とシバヤギ2頭の全体としての呼吸商(RQ = 排出CO₂量 / 消費O₂量) = 0.86を得た。

平成18年には、CPEFとCAHEFを結合した水の循環も初めて行った。表6に示すように、PCMに供給された水量とそれから排出された水量の差は0.5%未満であった。クルーの適正労働時間を超過するため、収穫された作物はパスボックスを介して一旦搬出され、系外で乾燥・脱穀・計測等を行って再び系内に搬入したが、上記の水量の差は収穫された作物と共に排出され系外で乾燥された際に失われた水量に匹敵していた。各養液栽培床は上面の植物栽培トレイまたは栽培床下部の養液バッファタンクに1床当たり300Lの養液を保持していたため、PCMが保有する水の量は約9000Lだった。この内2087Lの水が毎日入れ替わっていた。そして、2006年の閉鎖居住実験に先立つ期間を含むPCMでの植物栽培では、18週間の収穫期を含め38週間の全栽培期間において、僅か500Lの肥料廃水養液を廃棄したに過ぎなかった。

表6 平成18年の閉鎖居住実験におけるPCMの水収支 (平均±標準偏差、2週間×3回)

PCMへの供給水	水量 (L d ⁻¹)
補給上水	737± 93
供給養液	1350±750
PCMからの排水	水量 (L d ⁻¹)
凝縮水として回収された蒸散水	679± 22
回収廃養液 (逆浸透膜で処理)	1400±720

AHMに供給された水の量と排出された水の量の差は約9%であったが、その差は生理観察のため系外に排出した人尿の量と、外気を用いたシバヤギ糞尿の炭化処理時の水蒸気損失分の合計量に匹敵した(表7)。

2.1.2.1.4.3 平成19年の主要成果 (Tako *et al.* 2009, 2010, 2017, 2022, 多胡 2015, 2018ab, 2022, 多胡ら 2022)

表7 平成18年の閉鎖居住実験におけるAHMの水収支 (平均±標準偏差、2週間×3回)

AHMへの供給水	水量 (L d ⁻¹)
供給上水	51.5± 8.3
トイレ及び飼育檻洗浄用中水	23.7± 2.9
AHMからの排水	水量 (L d ⁻¹)
逆浸透膜処理水	56.3±17.8
濃縮廃水	4.6± 1.7
凝縮水	7.3± 8.0

平成19年、4週間に亘って行った閉鎖居住実験における2名のクルーの体重変化データ(図12)から、実験期間中の体重減少はかなり小さく、食料は充分供給されていたと考えられる。実際は、CEEF内の作物はクルーの活動に必要な量を上回る熱量を供給できていたが、実験期間中に人体の水収支がシフトしていた可能性がある。

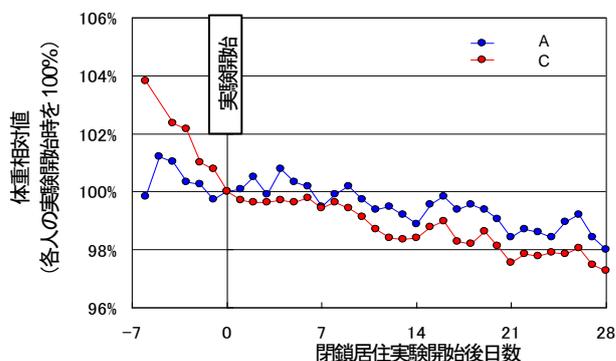


図12 平成19年の4週間閉鎖居住実験及びそれに先立つ1週間におけるクルー(2名)の体重(実験開始時を基準とした相対値)変化

表8は平成19年、最後4週間の閉鎖居住実験期間中の1日当たりの可食部、飼料バイオマス及び廃棄非可食部の生産量を栽培品目ごとに示している。表9は系外から1日当たり補給した食料及び飼料の生重量を栽培品目ごとに示すとともに、シバヤギに外部から補給した鉱塩と米ぬかの生重量を示している。これらの結果から、食料と飼料の自給率は夫々91.4%及び97.2%と評価した。

4週間の閉鎖居住実験では、系内空気を用いて以下の

- ①～⑤の工程からなる廃棄物処理を行った。
- ①ヒト固形排泄物の炭化
- ②シバヤギ排泄物及び人尿の炭化
- ③シバヤギ飼料を除く作物非可食部の炭化
- ④炭化人糞の燃焼

⑤シバヤギ排泄物と人尿の混合炭化物の燃焼

これら5工程で発生したCO₂を回収したが、その実験期間の一部ではトラブルシューティングを行い、その間は人尿とシバヤギ排泄物の炭化が外気を用いて行われた。そのため、系内空気のみを用いてこの全5工程を実施した最長の連続期間は平成19年12月2日から12月12日までの10日間だった。この期間にPCMに注入したCO₂、AHMから分離したCO₂及び廃棄物分解処理から回収したCO₂の積算量(mol)の変化を図13に示す。当該10日間の各積算量は877mol、543mol及び245molであり、作物に吸収されたCO₂の90%がAHMの居住者及びシバヤギの呼気並びに廃棄物分解時に発生する排ガスから回収された。循環できなかった10%は廃棄物処理装置内への付着や植物栽培固形培地から分離できなかった物が原因と推測した。

表8 平成19年4週間閉鎖居住実験における1日当たり可食部、飼料生産量及び廃棄非可食部発生量(g生重d⁻¹)

作物種	食料 (可食部)	飼料 バイオマス	廃棄 非可食部
イネ	598	1016	339
ダイズ	167	279	20.3
ラッカセイ	72	433	19.8
サトウダイコン	107		2.50
ハウレンソウ	6.47		0.54
コマツナ	5.12		0.56
シュンギク	4.10		1.38
レタス	2.80		0.34
ミツバ	5.40		1.31
ニラ	2.83		3.31
ネギ	1.97		0.33
キャベツ	3.83		0.40
ハクサイ	3.18		0.26
ダイコン	5.58		0.65
ニンジン	6.89		0.39
カブ	2.57		0.65
タマネギ	1.45		0.27
サヤインゲン	2.33		1.25
サヤエンドウ	3.29		0.76
トマト	2.21		0.63
キュウリ	2.94		0.87
ピーマン	0.78		0.38
オオバ	1.49		0.57
合計	1009	1728	396

2.1.2.1.5 物質循環閉鎖居住実験の総括

植物、動物及びヒトを循環系に組み入れ、長期に安定した物質循環機能を段階的・総合的に実証したことで、CEEFを用いる実験の実施に必要な運用技術を獲得

表9 平成19年4週間閉鎖居住実験における1日当たり系外から供給した食料及び飼料(g生重d⁻¹)

作物種	食料	飼料
イネ	60.7	23.4
ダイズ	4.07	0.00
ラッカセイ	6.16	0.00
サトウダイコン	0.00	
ハウレンソウ	0.00	
コマツナ	0.03	
シュンギク	12.1	
レタス	0.00	
ミツバ	0.00	
ニラ	0.74	
ネギ	0.00	
キャベツ	0.00	
ハクサイ	0.00	
ダイコン	5.21	
ニンジン	0.80	
カブ	1.82	
タマネギ	1.05	
サヤインゲン	1.21	
サヤエンドウ	0.18	
トマト	0.69	
キュウリ	0.04	
ピーマン	0.39	
オオバ	0.17	
鉱塩		2.5
米ぬか		23.4
合計	95.4	49.3

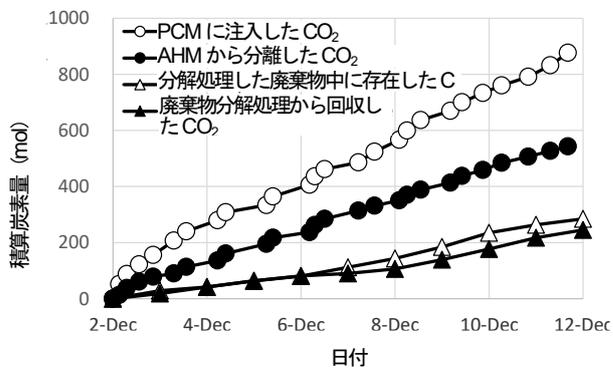


図13 平成19年12月2日から12月12日までの期間にPCMに注入したCO₂(○)、AHMから分離したCO₂(●)、分解処理した廃棄物中に存在したC(△)及び廃棄物分解処理から回収したCO₂(▲)の積算量(mol)の変化

得した。と同時に、将来の隔離された環境中での居住に不可欠な閉鎖型生命維持システムの実現に向けた貴重な基盤が築かれた。一方、空気・水・廃棄物をほぼ完全に循環した中で95%程の食料・飼料自給を達成したことは、地球もしくは環境への負荷の少ない食料生産技術の可能性を示す事例ともなった。

2.2 物質循環要素技術開発・微生物系調査・陸水圏生態系移行研究

2.2.1 物質循環システム要素技術開発

CEEF 整備に先立つ平成 2 年度から開始された放出放射性物質影響試験では、施設内で物質循環を実現するために必要な物理化学的処理を行う様々な装置の要素技術開発を行った。平成 12 年度から開始された物質循環システム要素技術開発では、物質循環をよりの確に行い、微生物を利用した処理装置や陸・水圏実験施設における物質循環を行うことをめざして、以下の 5 つの調査を実施した。

2.2.1.1 資源再生型バイオリアクタに関する研究

CEEF を用いた閉鎖居住実験では生物系廃棄物が発生するが、植物残渣については被験者並びに実験動物の飼料として消費されるため原則的に余剰分は発生しない。本研究では実験動物（シバヤギ）の排泄物を試料として活性汚泥法を用いた分解試験を実施した。シバヤギの排泄物には未分解の植物性有機物が多量に含まれており、植物性廃棄物への応用も視野に入れていた。

排水処理には嫌気好気法排水処理試験装置（図 14）を、固形廃棄物処理試験には高温嫌気消化処理法を採用し、試験装置を作成した。処理条件の最適化を行った結果、CEEF 内で発生する排水の処理が可能であると判断された。



図 14 嫌気好気法排水処理試験装置

2.2.1.2 有害ガス分解バイオリアクタの開発

閉鎖型生態系実験施設物質循環試験では系内の生物や資材から各種有害ガスが微量ながら発生する。閉鎖系内ではこれらが蓄積し、濃度が高くなると生物に影響を及ぼす懸念があった。そこで、主として生物機能を活用した微量有害ガス分解技術の開発を目的として、親水性吸収塔と疎水性吸収塔及び活性汚泥槽からなるバイオリアクタ（図 15）を作成した。シバヤギ飼育施設の大気には 100 種類を超える微量成分が存在しているが、エタノール、アセトアルデヒド、アセトンなどの親水性化合物は親水性吸収塔において吸収されたが、大気成分の大部分は除去することが出来なかった。そこで、平成 15 年度からは前処理装置としてプラズマ分解実験装置を製作し、併用試験を行った。その結果、難水溶性化合物であるメチルブタン、メチルヘキサン、ベンゼン、トルエンなどを含む多くの化合物を分解または除去することが可能であった（永井ら 2007）。

2.2.1.3 閉鎖系物質循環システムの制御技術に関する研究

CEEF では、物質循環処理のため多くの処理装置やバッファタンクが設置されていた。施設内の物質はこれらの装置、作物、家畜およびヒトの間を循環する。多くの装置はバッチ処理で動作し循環系であるため、一般的な制御法を用いることが困難であった。そこで、物質循環系を構築する処理装置や生物の取り込み量と払い

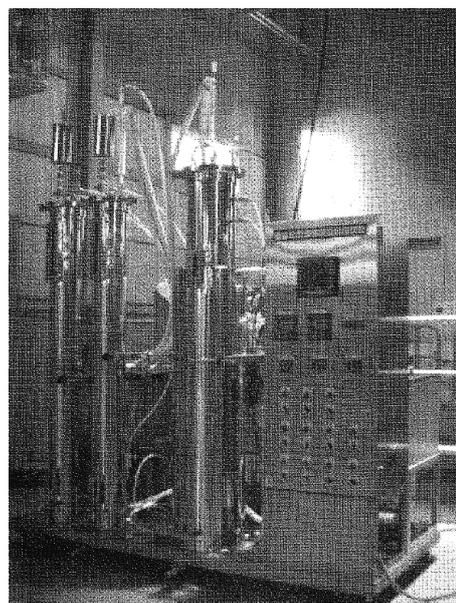


図 15 有害ガス分解バイオリアクタ

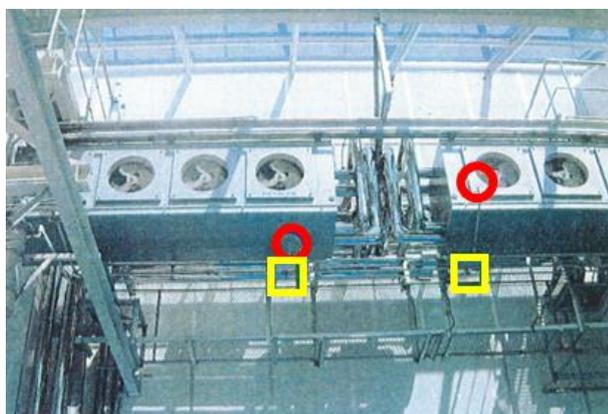
出し量を予測し、予測に基づいた実験施設の運用をめざして、閉鎖系挙動予測システムを開発した (Abe *et al.*, 2003b)。

最終的に、居住実験における物質循環データから、閉鎖系動物・居住実験施設モデル、閉鎖系植物実験施設モデルを構築し、それぞれのモデルを結合させシミュレーションプログラムを完成させた (Abe *et al.*, 2005, 2006)。居住実験の結果とシミュレーションの結果を比較すると、開発した閉鎖系挙動予測システムを用いて居住実験を行うことが出来れば、閉鎖実験期間中の施設内への物質の投入量・払い出し量を大幅に低減できることがわかった。

2.2.1.4 霧発生制御技術に関する研究

CEEF 内の陸圏モジュールには、六ヶ所村特有の気象現象である「やませ」の再現をめざして、霧発生装置 (図 16) が組み込まれている。この装置は水の噴霧により植物や土壌への給水を模擬できる。しかし、大気中においては霧の発生が光環境、温湿度、エアロゾルの挙動に影響を及ぼす (Abe *et al.*, 2003a) が、陸圏モジュールに組み込まれた霧発生装置ではこのような現象を模擬できなかった。

そこで、陸圏モジュール内のエアロゾルの特性、既設の霧発生装置による水滴の発生状況などを把握し (Casareto *et al.*, 2004)、気流シミュレーションにより霧の発生・制御法を検討した。さらに、陸圏モジュールを模した霧発生試験装置を用いて霧発生試験を行い、陸圏モジュールで大気中と同様の条件で霧を発生させるために必要な設備の仕様を検討した。



○ 降雨装置ノズル □ 霧発生装置ノズル

図 16 陸圏モジュール内の霧発生装置

2.2.1.5 閉鎖型作業服の開発

CEEF 内で長期間実験を継続するために、系外から作業者が入らざるを得なくなる可能性がある。しかし、そのような事態になると、作業者の呼気や発汗により、閉鎖系内の物質循環に大きな影響を与えてしまう。そこで、作業者が系内に入る際に用いる閉鎖型作業服 (図 17) を開発した。

開発した閉鎖型作業服は、作業者からの呼気や汗の放出を防ぐための気密服、作業者に酸素を供給し呼気ガス中の CO₂ 等を除去する呼吸制御装置、及び作業者の発汗に代わり代謝熱を除去する冷却服からなる。このような作業服は通常非常に重くなる (例えば宇宙服では 100kg 超) が、着用して自立作業が可能で約 25kg までの軽量化に成功した (Abe *et al.*, 2003c)。



図 17 開発した閉鎖型作業服

2.2.2 陸・水圏物質循環実験調査

大型再処理施設から大気中及び沿岸海域へ排出された放射性核種の陸・水圏環境中での循環に関する実験調査を平成 9 年に開始した。この調査は次の陸・水圏生態系炭素等移行実験調査終了の平成 21 年まで継続して行われた。

2.2.2.1 水圏物質循環実験調査

平成 9 年度から平成 11 年度までは閉鎖系陸・水圏実

験施設を整備すると同時に予備的に候補生物の栽培試験を行った。その結果、根・葉部から栄養源を吸収し、単一群落を形成する海草類のアマモが、沿岸域生態系を実験施設内に長期間安定させるのに適していることが分かった。また、枯死アマモの分解に関わる微生物類についても調査を行った。平成11年度に閉鎖系水圏実験施設が完成し、平成12年度以降は施設内での生態系構築のための調査を行った。2t水槽を用いてアマモを栽培し、必要な光量、栄養塩類の添加量などに関する結果を得、20t育成槽による長期育成を可能とした。図18は2t水槽と20t水槽におけるアマモ株の増加を示す。

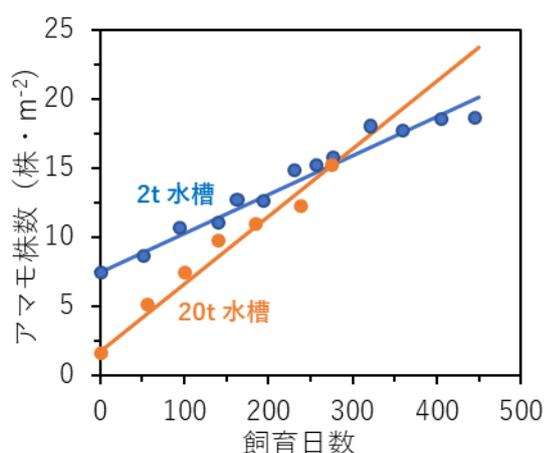


図18 2t水槽と20t水槽における単位面積あたりのアマモ株数の経時変化

2.2.2.2 陸圏物質循環実験調査

六ヶ所村内の代表的な陸上自然環境である小川原湖沼群に広がる湿原生態系を閉鎖型陸圏実験施設に導入することとし、尾駱沼周辺域の生物の現地調査を平成11年度に行った。多くの水中生物、昆虫、陸上植物、陸上動物の存在を確認した。陸上植生はいくつかの群落に分かれ、ヨシ群落、ヨシースゲ群落、ヨシーヤチハンノキ群落、ヤチヤナギーヌマガヤ群落などが河口域から丘陵地にかけて分布していた。

平成12年度からは、試験対象をヨシ群落とし、放射性炭素の移行を調査するために全炭素の循環を把握する必要があると考え、尾駱沼において土壌からのメタン放出量及び、大気・植物・土壌間での二酸化炭素収支量の測定法を検討し、測定を行った。その結果、メタン発生(図19)は1日のうち15:30頃に最大となり、そ

の原因はメタンの土壌からの放出に植物体(ヨシの幹)が関わっているためであると推察された。一方、二酸化炭素のフラックス(図19)は、日中は光合成量に左右されるため、群落の生育段階の違いが大きな影響を及ぼすことが明らかとなった。また、施設内の植生に影響する光環境の詳細な調査を実施した。

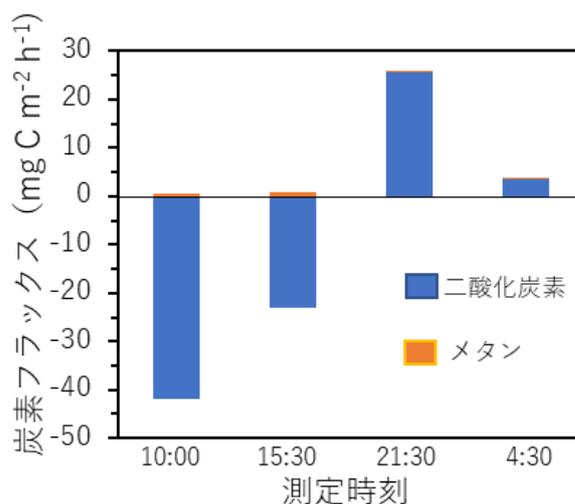


図19 2004年10月26日におけるヨシ群落の測定時刻別炭素フラックス

2.2.3 陸・水圏生態系炭素移行実験調査

平成16年度までに実施した予備的検討の結果をもとに、閉鎖系水圏実験施設に六ヶ所村沿岸域に存在するアマモを中心とした海草群落生態系を、閉鎖系陸圏実験施設にヨシ群落からなる湿地生態系を構築し、炭素の移行・蓄積を明らかにすることで、大型再処理施設稼働後の¹⁴Cの周辺環境における挙動を予測することを目的に調査を実施した。

2.2.3.1 海草群落生態系における炭素移行試験

平成17年度から平成20年度にかけて、閉鎖系水圏実験施設内に、生産者としてのアマモ、消費者としてのウニ、分解者としてのマナモコからなる人工的な海草群落生態系を構築し、各生物レベル、及び群集レベルでの炭素移行に関する実験を実施した。平成21年度には、閉鎖系水圏実験施設内に海水温を20℃及び15℃に設定した海草-エゾバフンウニ-マナモコからなる海草群落生態系を構築して、各生物、海水中及び堆積物中の炭素量に関するデータを取得した。これらに基づき海



図 22 閉鎖系陸圏モジュールに敷き込んだ湿地根圏層土壌（上）と敷き込み1年後のヨシの様子（下）

の非可食部（稲藁）にも固定されると考えられるが、稲藁は堆肥化や水田への鋤き込みによる再資源化が推奨されていることから、堆肥発酵過程や土壌に施用された後の稲藁由来有機物の分解及び土壌に蓄積される割合を明らかにする調査を行った。

2.2.4.1 堆肥化による炭素挙動の調査

^{13}C 標識した稲藁と牛糞を原料とした堆肥を作成し、発酵過程における炭素の挙動を調査した。稲藁と牛糞を乾燥重量比で等量になるように混合し、堆肥化した

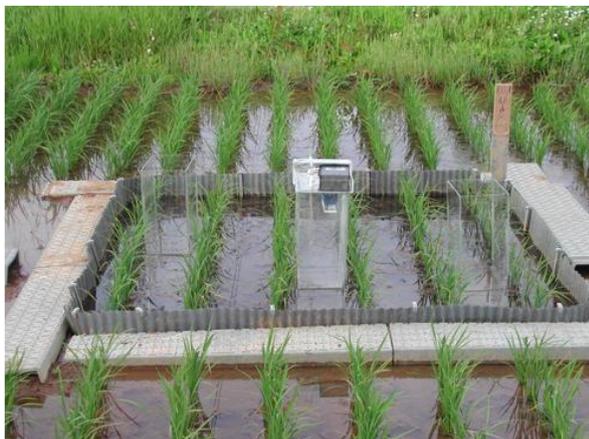


図 24 ^{13}C 標識稲藁を鋤き込んだ水田と土壌に残存する ^{13}C 量の経時変化

ところ、稲藁と牛糞由来の炭素比は初期は 5 : 6 であったが、発酵が進むと 1 : 2 に変化した。これにより堆肥熟成過程では稲藁由来の有機物の分解が大きく、牛糞由来の有機物は残留する傾向があった。稲藁由来の有機物を 3 つのコンパートメントに分けて予測式を構築した。発酵開始直後は分解率が高く約 10 日後から分解速度が遅くなることが明らかとなった（図 23）。

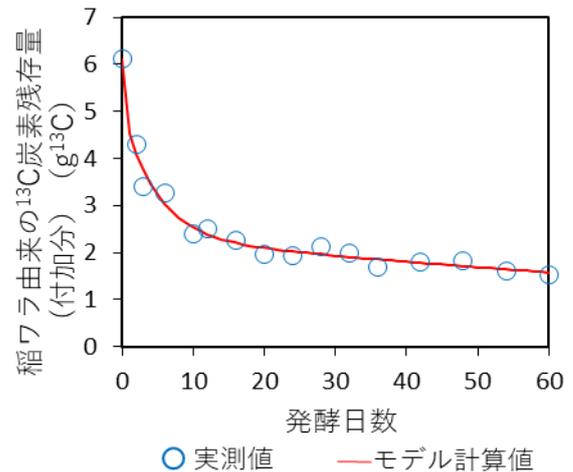
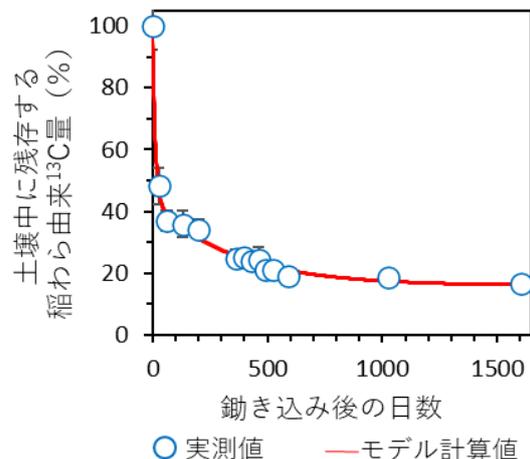


図 23 ^{13}C 標識稲藁と牛糞を主原料とする堆肥発酵中の ^{13}C 量の経時変化

2.2.4.2 土壌における炭素の蓄積と放出の調査

2.2.2.4.1 で作製した ^{13}C 標識した堆肥を施用したニンジン畑と ^{13}C 標識稲藁を鋤き込んだ水田において、土壌中 ^{13}C 量の減衰を測定することにより、稲藁由来の有機物の土壌での分解速度を調査し、稲藁由来の ^{14}C の土壌への蓄積速度を評価した（図 24）。

牛糞堆肥を施用したニンジン畑では、堆肥に含まれていた ^{13}C は施用 1 年後には 55% の残存率であった。堆肥発酵前からは、発酵過程で 50% に減少した後、施用 1 年後には 29% の ^{13}C が土壌に残存した。稲藁を鋤き込んだ水田では 1 年後には ^{13}C の 49% が土壌に残存



した。水田では1700日まで実験を続け、稲藁由来の有機物を3つのコンパートメントに分けて予測式を構築した。いずれの場合も施用直後には分解率が高く、約1か月後から分解速度が遅くなった (Nagai et al., 2023)。また、施用した初年度の畑、水田で栽培したニンジン及びイネ (図25) に、夫々0.1%、0.6%の ^{13}C が移行することが明らかになった。

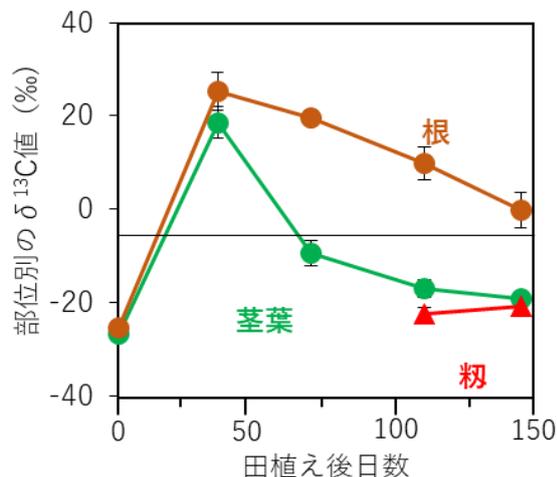


図25 ^{13}C 標識稲藁を鋤き込んだ水田で栽培した稲中の ^{13}C 濃度の経時変化

以上のように、物質循環要素技術開発から閉鎖系陸・水圏実験施設を用いた研究では、施設内に生態系を再現し、水圏では沈殿物への、陸圏では土壌への放射性核種の蓄積を調査し、上記の成果が得られた。また、微生物系物質循環実験調査では、野外圃場でトレーサ実験を行い、土壌への放射性炭素の蓄積と次期作物への移行を評価した。これらの成果は排出放射性炭素の蓄積評価に関する実験調査及び排出トリチウム生物体移行総合実験調査へと引き継がれた。

引用文献

Abe et al. (2003a) *Fluid Dyn. J.*, 12, 295-308.
 Abe et al. (2003b) *SAE Tech. Pap.*, 2003-01-2547.
 Abe et al. (2003c) *Eco-Engineering*, 15, 13-19.
 Abe et al. (2005) *Adv. Space Res.*, 35, 1597-1608.
 Abe et al. (2006) *SAE Tech. Pap.*, 2006-01-2125.
 Casareto et al. (2004) *Eco-Engineering*, 16, 39-44.
 Masuda et al. (2005a) *SAE Tech. Pap.*, 2005-01-2819.
 Masuda et al. (2005b) *Habitation*, 10, 87-97.
 Masuda et al. (2005c) *Eco-Engineering*, 17, 55-60.
 Masuda et al. (2005d) *Eco-Engineering*, 17, 61-66.

増田・多胡 (2005) *生態工学*, 17, 183-189.
 Masuda et al. (2006) *Habitation*, 11, 69-84.
 Masuda (2007) *World of Food Science*, 2.
 永井ら (2007) *生態工学*, 19, 179-184.
 Nagai et al. (2023) *Eco-Engineering*, 35: 3-12.
 Nitta (2001) *Adv. Space Res.*, 27, 1505-1512.
 Nitta (2002) *Adv. Space Res.*, 31, 63-68.
 新田・多胡 (2006) *これからの大学等 研究施設 第3編 「環境科学編」*, 文教施設協会・科学新聞社, pp 181-187.
 Suzuki et al. (2010a) *Eco-Engineering*, 22, 147-152.
 Suzuki et al. (2010b) *Environ. Control. Biol.*, 48, 25-34.
 Suzuki et al. (2012) *J. Hydrometeorol.*, 13, 966-980.
 Tako et al. (2001a) *SAE Tech. Pap.*, 2001-01-2133.
 Tako et al. (2001b) *Adv. Space Res.*, 27, 1541-1545.
 Tako et al. (2002) *SAE Tech. Pap.*, 2002-01-2484.
 多胡 (2002) *関東の農業気象*, 28, 10-11.
 Tako et al. (2003) *SAE Tech. Pap.*, 2003-01-2452.
 Tako et al. (2004) *SAE Tech. Pap.*, 2004-01-2349.
 Tako et al. (2005a) *SAE Tech. Pap.*, 2005-01-3108.
 Tako, et al. (2005b) *J. Agric. Meteorol.*, 60, 1099-1104.
 多胡ら (2005) *生態工学*, 17, 231-242.
 Tako et al. (2006) *SAE Tech. Pap. (SAE 2006 Transactions, J. Aerospace)*, 2006-01-2075.
 Tako et al. (2007) *SAE Tech. Pap. (SAE 2007 Transactions, J. Aerospace)*, 2007-01-3091.
 Tako et al. (2008) *Adv. Space Res.*, 41, 714-724.
 Tako et al. (2009) *SAE Tech. Pap.*, 2009-01-2580.
 Tako et al. (2010) *Gravit. Space Res.*, 23, 13-23.
 多胡 (2015) *閉鎖生態系・生態工学ハンドブック*, pp 48-56, (生態工学会編) 丸善, 東京.
 Tako et al. (2017) *Space Util. Res. (JAXA)*, 31, 1-4.
 多胡 (2018a) *Eco-Engineering*, 30, 103-106.
 多胡 (2018b) *月刊誌「生活と環境」*, (1月号), 18-23.
 多胡 (2021) *宇宙科学技術連合講演会論文集 65*, 2H01, 1-6.
 Tako et al. (2022) *JASMAC34*, 0705, 1-9.
 多胡ら (2022) *宇宙科学技術連合講演会論文集 66*, 3J15, 1-6.
 Tani et al. (2007) *SAE Tech. Pap. (SAE 2007 Transactions, J. Aerospace)*, 2007-01-3097.