

第2次国際微小重力実験室(IML-2)

に関する搭載実験実施計画書

平成6年4月

宇宙開発事業団

目 次

ページ

1	概 要	
1. 1	緒 言	1
1. 2	I M L - 2 計画の概要	1
1. 3	搭載実験の目的	1
1. 4	搭載実験の実施機関	1
1. 5	搭載実験の実施責任者	1
1. 6	実験システムの名称	2
1. 7	輸送システムの名称	2
1. 8	スペースシャトル搭乗者名	2
1. 9	実施日時及び飛行期間	2
2	打上げ及び実験運用計画	
2. 1	打上げ及び実験運用の実施場所	3
2. 2	搭載実験の実施の組織	4
2. 3	打上げ・飛行・帰還の概要	5
2. 4	実験運用計画	7
3.	ペイロードスペシャリストの健康管理	
3. 1	飛行前	13
3. 2	飛行中	13
3. 3	飛行後	13
4.	安全管理	14
5.	関係機関等への情報の提供	15

第2次国際微小重力実験室 (IML-2) に関する搭載実験実施計画書

図一覧		ページ
第1図	NASAのIML-2関連施設の所在地	3
第2図	IML-2運用隊の組織図	4
第3図	実験装置搭載ラックの外観図	9
第4図	実験運用データ伝送システムの概要図	11
第5図	日本の実験装置の飛行実験実施スケジュール	12

表一覧		ページ
第1表	IML-2ミッションの飛行運用計画の概要	6
第2表	IML-2日本関係実験装置/実験テーマ一覧	10

付表一覧		ページ
付表-1	搭載実験装置の主要諸元	16
付表-2	日本の実験テーマの概要	17
付表-3	日本の実験装置を使用する米国実験テーマの概要	21
付表-4	日本の実験テーマの搭載実験試料の主要諸元	22
付表-5	日本の実験装置を使用する米国実験テーマの 搭載実験試料の主要諸元	23

参考資料一覧		ページ
参考-1	IML-2実験装置と実験テーマ提案数の国別内訳	24
参考-2	IML-2実験テーマ一覧(日本の実験装置以外)	25

1 概要

1.1 緒言

宇宙開発事業団は、米国航空宇宙局(以下「NASA」という。)が進めている第2次国際微小重力実験室(The second International Microgravity Laboratory、以下「IML-2」という。)計画に参加して宇宙実験を行う。

この実施計画書は、IML-2ミッションを搭載したスペースシャトルの打上げから実験運用管制の実施、スペースシャトルの帰還までの業務に関し、事業団が実施する搭載実験の計画について述べる。

1.2 IML-2計画の概要

IML-2計画は、NASAが国際協力のもとに進めるスペースラブを利用した国際微小重力実験室(IML)計画の第2回目のものである。IML計画は参加各国が実験装置を提供し、NASAが飛行の機会を提供する。NASA及び参加各国はその実験装置を使用して夫々の実験を行う。

IML-2計画では、米国、カナダ、ヨーロッパ、日本などの7機関が19の実験装置を提供し、13カ国の研究者が参加して80テーマの実験が行われる。日本は、宇宙開発事業団が6つの実験装置を提供し、日本の12テーマ及び米国の4テーマの実験を行う。

1.3 搭載実験の目的

第一次材料実験(FMPT)計画等の開発成果を活用し、宇宙ステーション時代における有人宇宙実験に必要な共通実験技術及び装置開発のための技術の蓄積を図る。また、日本人宇宙飛行士の参加機会の確保を図る。

1.4 搭載実験の実施機関

宇宙開発事業団

理事長 山野 正登

東京都港区浜松町2丁目4番1号

世界貿易センタービル

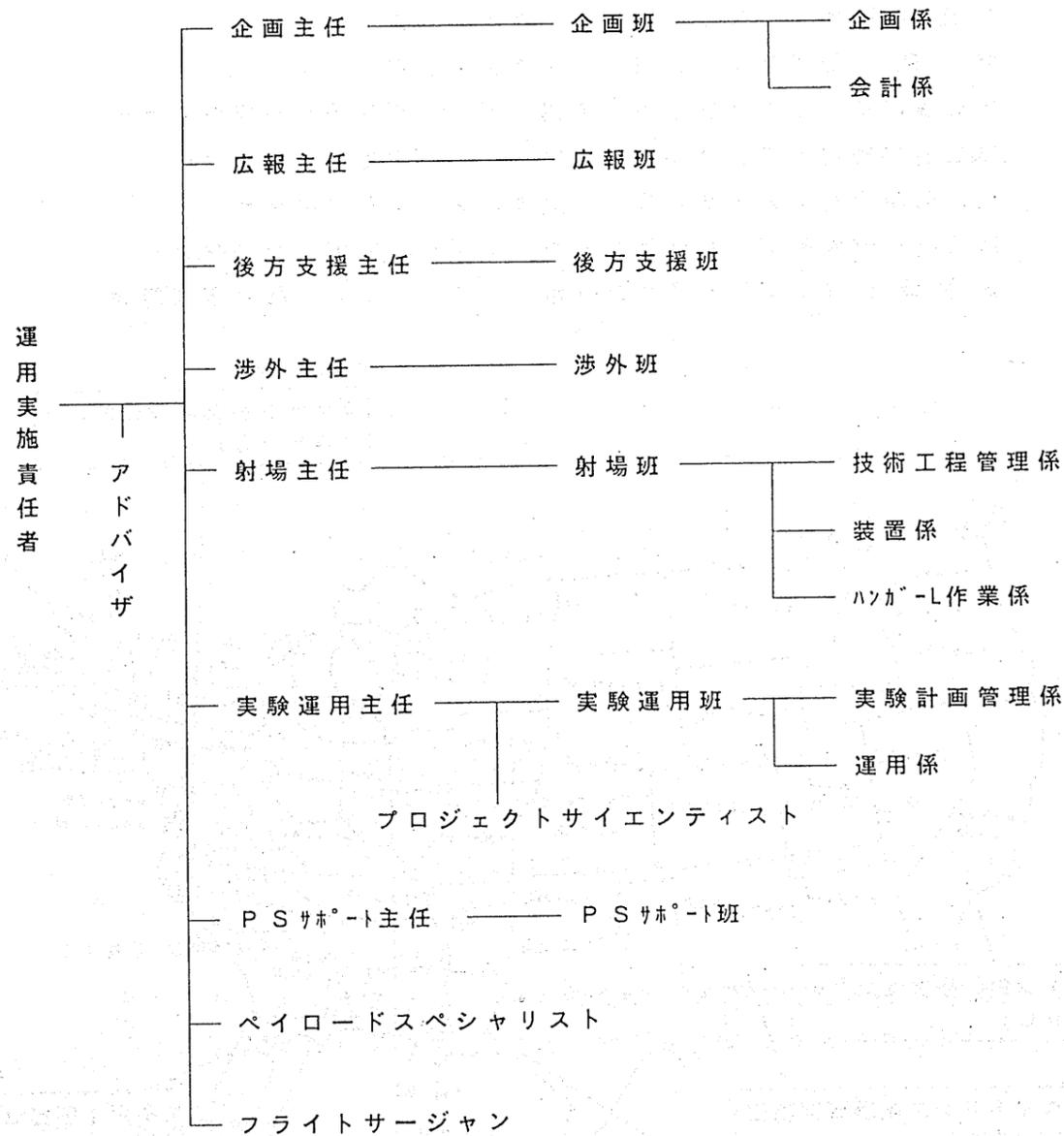
1.5 搭載実験の実施責任者

宇宙開発事業団 理事 石澤 禎弘



## 2.2 搭載実験実施の組織

搭載実験は、第2次国際微小重力実験室運用隊(1ML-2運用隊)により行う。この運用隊の組織を第2図に示す。



第2図 1ML-2運用隊の組織図

## 2.3 打上げ・飛行・帰還の概要

1ML-2ミッションを搭載したスペースシャトル(STS-65、オービタ:コロンビア号)は、ケネディ宇宙センター39番射点から打ち上げられる。発射に先立つ約19時間前までには、生物試料の最終搭載(レイトアクセス)を行い、搭載実験装置の準備を完了する。打上げのための最終秒読みは、発射約8時間前から始め、スペースシャトルの外部タンクへの燃料、酸化剤の充填を開始し、発射約3時間前には所定の健康管理、検査を終えた搭乗員が搭乗する。

発射約6秒前にメインエンジンを点火し、推力が正常であることを確認した後、固体ロケットブースタを点火し、スペースシャトルのリフトオフを開始させる。当初垂直に発射されたスペースシャトルは、その後姿勢を変更しながら上昇を続け、固体ロケットブースタ、外部燃料タンクを切り離した後、軌道修正用エンジンを噴射し約40分後に高度約300kmの円軌道に投入され、実験運用を開始する。

飛行期間は約14日間で、搭乗員は1日2交替で実験を実施する。この間地上では生物系実験テーマの対照実験を行う。

スペースシャトルは、搭載実験終了後に地球への帰還を行うが、着陸約2時間前から着陸準備に入り、姿勢変更、軌道修正を行った後大気圏に突入し、大気抵抗により速度を落としながら高度を下げ、ケネディ宇宙センター(KSC)に着陸する。

着陸後、3時間~6時間以内にスペースシャトルに搭載されていた生物試料を回収して、打上げ・実験運用・帰還作業が完了する。

1ML-2ミッションの飛行計画の概要を第1表に示す。

第1表 IML-2 ミッションの飛行計画の概要

1	ミッション名	第2次国際微小重力実験室(IML-2)
2	STS飛行番号	STS-65 (シャトルとして64番目の打上げ)
3	オービタ名称	コロンビア号
4	構成	ロングモジュール、軌道上滞在延長キット
5	打上げ予定日	1994年7月8日(目標)*
6	打上げ予定時刻	午後0時30分頃(米国東部夏時間)*
7	ロンチウインドウ	約2時間30分
8	打上げ場所	KSC、射点LC-39
9	軌道高度	約300km、円軌道
10	軌道傾斜角	約28.5度
11	飛行期間	約13日18時間
12	周回周期	約90分
13	姿勢制御方式	重力勾配安定方式(機尾が地球方向を向く)
14	搭乗員数	7名(内日本人1名)
15	帰還地	主帰還地:ケネディ宇宙センター 代替帰還地:ドライデン飛行研究センター
16	着陸予定日	1994年7月22日*
17	着陸予定時刻	午前6時30分頃(米国東部夏時間)*

(注) \* : 打上げ日時は、NASAが打上げ約2週間前に決定する。

## 2.4 実験運用計画

### 2.4.1 実験運用の概要

日本の実験テーマ及び日本の実験装置を使用する米国の実験テーマの実験(以下「軌道上実験」という。)は、スペースシャトルが打上げ段階を完了し、高度約300kmの地球周回軌道に投入された後、搭乗員が、オービタミッドデッキからトンネルを経てスペースラブ内に移動してから開始される。移動は、リフトオフから約3時間30分後に開始される予定である。

軌道上実験の操作は、日本人PS及びNASAのミッションスペシャリスト(MS)により行われる。実験の進捗状況の監視、搭乗員に対する実験に係る指令、実験データの取得等の実験運用に関する管制は、マーシャル宇宙飛行センター(MSFC)内の実験運用管制所(POCC)において、事業団が実験研究者と協力し、NASAの支援を得て実施する。

スペースシャトルに搭載された実験装置からのデータ等は、NASAの実験運用データ伝送システムによりシャトルのテレメトリ送信装置からデータ中継衛星、ホワイトサンズ通信設備、米国内通信衛星を経由してマーシャル宇宙飛行センター(MSFC)に送信される。

軌道上実験は、あらかじめ定めた計画・手順に基づいて行うが、不具合等が発生し、これにより実施することが困難な状況が生じた場合においては、搭乗員の判断、又は実験運用管制所(POCC)内のIML-2運用隊からの指示により処置する。IML-2運用隊では、このような状況に速やかに対応するため、あらかじめ想定される不具合については不具合処置手順を作成しておく。また、不具合処置手順の作成されていない不具合が生じた場合は、緊急に不具合処置手順を作成し対処する。

なお、飛行中の実験スケジュールは12時間単位で見直しが行われる。

2.4.2 日本の実験装置とそれを使用する実験テーマ

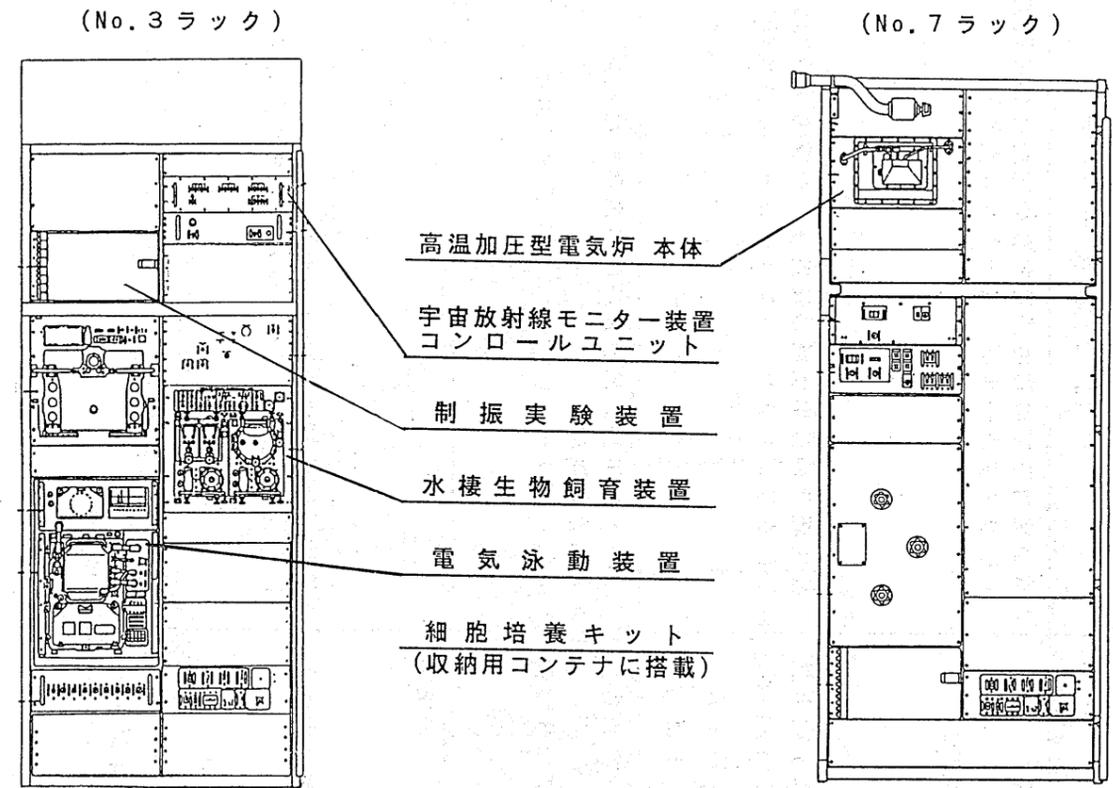
IML-2に搭載する日本の実験装置システムの概要を第3図に示す。  
また、日本の実験装置を使用する実験テーマの一覧を第2表に示す。なお、日本の実験装置の主要諸元については付表-1に、それを使用する実験テーマの概要と実験試料の諸元については付表-1~付表-4に示す。

2.4.3 実験運用データ伝送システムの概要

IML-2の実験運用時に使用するデータ伝送システムの概要を第4図に示す。

2.4.4 実験スケジュール

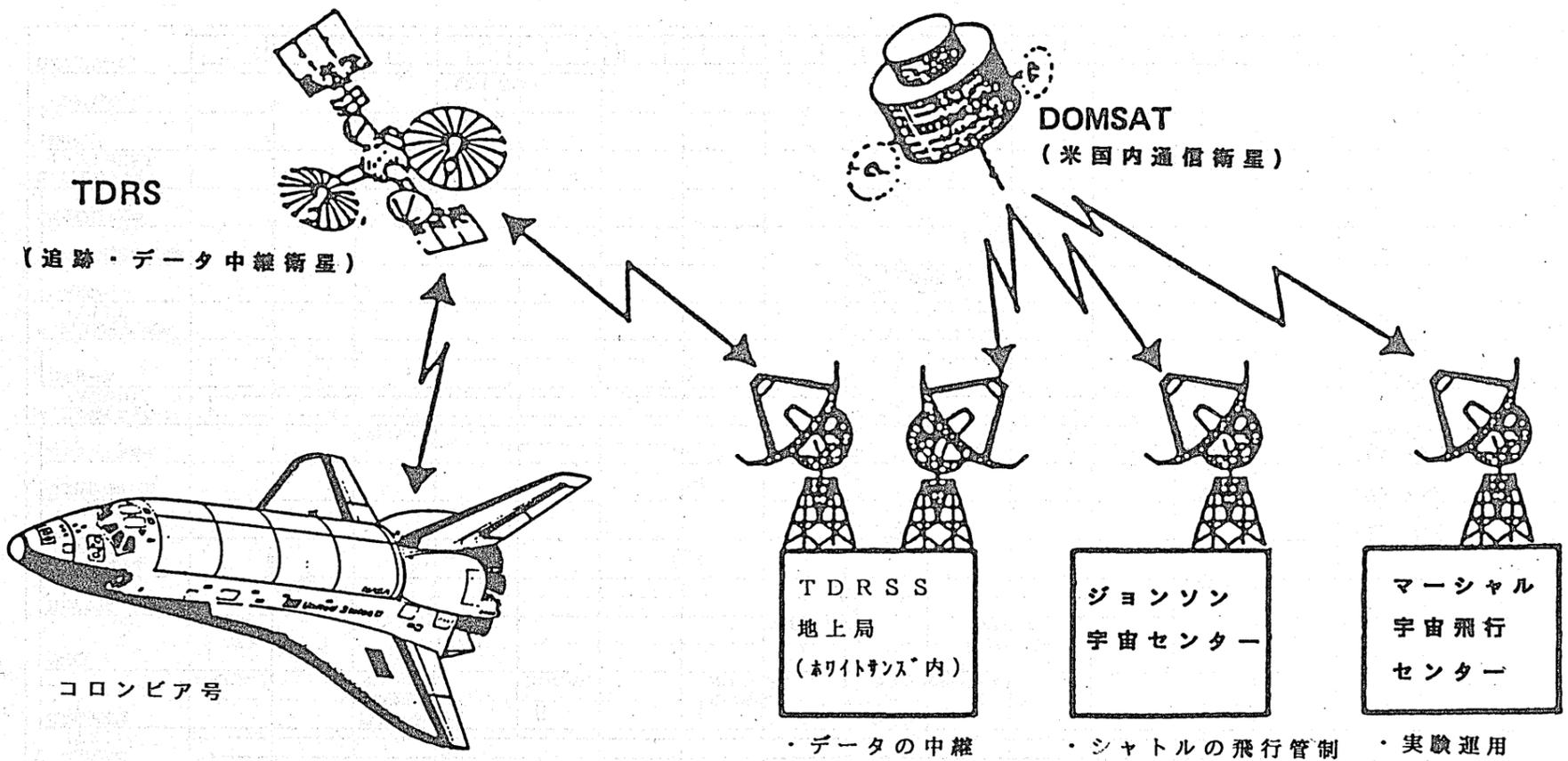
飛行実験スケジュールの概要を第5図に示す。なお、本スケジュールは、今後詳細な調整等に基づき変更することがある。



第3図 実験装置搭載ラックの外観図

第2表 IML-2 日本関係実験装置/実験テーマ一覧

実験装置名	日本の実験テーマ	米国の実験テーマ
水棲生物飼育装置	「微小重力下における魚の前庭順応機構の研究」 高林 彰 (藤田保健衛生大学) 「イモリの宇宙における産卵および受精卵の発生」 山下 雅道 (宇宙科学研究所) 「メダカの宇宙における交尾・産卵行動」 井尻 憲一 (東京大学)	「微小重力下での重力感受器官の初期発生の研究」 M.L. ヴィダホールド (テキサス大学)
細胞培養キット	「骨由来培養細胞の増殖・分化機能発現に及ぼす微小重力の影響」 糸井 康宏 (東京医科歯科大学) 「宇宙空間における細胞性粘菌の分化」 大西 武雄 (奈良県立医科大学)	「植物胚芽の分化状態の安定性への重力関与の研究」 A.D. クリコリアン (ニューヨーク州立大学)
電気泳動装置	「電気泳動による線虫 <i>C. elegans</i> の染色体DNAの分離」 小林 英三郎 (城西大学) 「微小重力環境における高密度動物細胞培養液の分離精製実験」 奥沢 務 (日立製作所)	「ラット脳下垂体細胞及び細胞内顆粒の電気泳動分離実験」 W.C. ハイマー (ペンシルバニア州立大学)
放射線モニター装置	「宇宙船内における重粒子線による線量計測とその生物効果実験」 道家 忠義 (早稲田大学)	
高温加圧型電気炉	「微小重力下におけるTiAl系金属間化合物の組織制御とその機械的性質」 佐藤 彰 (金属材料技術研究所) 「多元系化合物半導体融液の均一分散・混合化」 平田 彰 (早稲田大学)	「液相焼結における重力の効果」 R.N. ジャーマン (ペンシルバニア州立大学)
制振実験装置	「自然対流と拡散に対する重力加速度ゆらぎ(gジッタ)の影響」 東 久雄 (航空宇宙技術研究所) 「微小重力下での熱駆動流の研究」 古川 正夫 (宇宙開発事業団)	



第4図 実験運用データ伝送システムの概要図

ミッション経過時間 1. 水棲生物培養装置 (AAEU)	▽船陸														
	日	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
時	6 12 18	6 12 18	6 12 18	6 12 18	6 12 18	6 12 18	6 12 18	6 12 18	6 12 18	6 12 18	6 12 18	6 12 18	6 12 18	6 12 18	6 12 18
① 登島	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓
② イモリ/イモリ卵	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓
③ メダカ	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓
2. 恒温恒湿槽 (TEI)															
① 骨由来細胞															
② 粘菌															
③ 植物細胞															
3. 電気泳動装置 (FFEU)															
① 細菌染色体															
② 高速度動物細胞															
③ ラット脳下垂体															
4. 放射線モニタ装置 (RMD)															
① 重粒子線															
5. 高添加型電気炉 (LIF)															
① 液相結															
② 多アミン化合物半固体															
③ 金属錯化合物															
6. 別添手帳装置 (VIBES)															
① 中5ぎ															
② 熱電動流															
日本人PSシート															

第5図 日本の実験装置の飛行実験スケジュール

3. ペイロードスペシャリスト(PS)の健康管理  
 日本人PSの飛行前及び飛行中並びに飛行後における健康管理は、事業団のフライトサージャンの支援を得て、NASAが行う。  
 NASAは、これまで事業団立合いのもと年1回の医学検査を行ってきた。また、事業団はこれとは別に年1回の健康診断を実施してきている。

3.1 飛行前  
 飛行前10日及び2日並びに飛行当日に、飛行前医学検査を行う。

3.2 飛行中  
 飛行中健康モニタリング及びプライベートメディカルカンファレンスを行う。

3.3 飛行後  
 帰還当日を含めた飛行後の医学検査を実施する。  
 なお、事業団は、帰還後7日(NASAと共同)、2ヶ月及び6ヶ月に健康診断を実施する。

#### 4. 安全管理

IML-2 搭載実験システムのスペースシャトルによる打上げ、地球周回軌道への投入、スペースシャトルの飛行管制、地球への帰還はNASAにより実施され、これに関する安全管理はNASA側で実施される。スペースシャトルは、搭乗員、地上運用者、公衆及びスペースシャトル等の財産への安全確保を基本方針とするNASAの安全要求及び規定に基づいて設計、製作、運用される。

シャトルにとってのペイロードである全ての実験装置に対して、NASAにより飛行運用及びケネディ宇宙センター(KSC)における地上運用に関する安全審査が実施される。事業団の実験装置については、これまでフェーズ0/I、フェーズII、及びフェーズIIIの飛行運用及び地上運用に係わるNASAの安全審査が実施され、安全性が確認されている。

あとは打上げ前に実施される最終安全確認のためのフェーズ3以降の設計変更あるいは運用手順変更に対するNASAの安全審査(デルタセフティレビュー)が残されているのみとなっている。

IML-2の搭乗員に対して緊急時対策、サバイバル訓練等安全訓練がNASAにより実施されている。

IML-2 ペイロード安全審査の実施状況

審査名称	分類	実施日及び場所	主な審査目的
フェーズ0/I	飛行関係	1992年 5月 / JSC	バザードの特定及び除去/減少方法
	地上関係	1992年 5月 / KSC	
フェーズII	飛行関係	1993年 3月 / JSC	バザードの除去/減少方法及び検証方法
	地上関係	1993年 1月 / KSC	
フェーズIII	飛行関係	1993年11月 / JSC	安全性検証結果の最終確認
	地上関係	1993年 6月 / KSC	
デルタフェーズIII	飛行関係	1994年4月末～5月初 / JSC (予定)	その後の設計変更又は運用変更に対する安全評価

#### 5. 関係機関等への情報の提供

##### 5.1 関係機関

搭載実験の状況等の情報については、関係官庁、在外公館等関係機関に速やかに通知する。

##### 5.2 テーマ提案機関、代表研究者

進行状況に応じ適宜情報を提供する他、搭載実験の結果得られたデータ等は速やかにそれぞれのテーマ提案機関、代表研究者に提供する。

##### 5.3 報道関係

- (1) 報道関係者に対し、搭載実験に支障を及ぼさない範囲で取材の便宜を図る。
- (2) 搭載実験の状況については、実施責任者等から発表を行う。

##### 5.4 普及啓発

宇宙実験技術及び有人宇宙技術の開発について、広く国民の理解を得るとともに、その知識の普及と啓発を図るため、スペースシャトルの飛行中において以下のイベントを実施する。

- (1) 政府要人と向井PSとの交信
- (2) 軌道上の搭乗員と地上の報道関係者との記者会見
- (3) 向井PSと地上を結び生命の惑星'地球'について語る
- (4) 向井PSによる仕事場としてのスペースシャトル船内の紹介
- (5) 日本食の良さを活かした宇宙食の試食

付表-1 実験装置等の主要諸元

実験装置	主要諸元
水棲生物飼育装置	アクリル水槽：4個，フッ素水槽：1個 生命維持期間：19日間以上，制御温度範囲：15～25℃ O <sub>2</sub> 供給／CO <sub>2</sub> 除去：人工肺によるキャビテーションとのガス交換 寸法／重量：483×444×606(mm)／約69kg
細胞培養キット	構成：細胞培養容器，植物細胞培養容器，粘菌培養容器，培地容器，採液／廃液容器，細胞固定液容器 培養細胞等：動物細胞，植物細胞，胚
電気泳動装置	有効泳動範囲：60W×100H×4D(mm)，サンプル流速：1～5cm/分 バッファ流速：2～10cm/分，印加電圧：最大600V 泳動試料：1mL/カセット，バッファ液容量：1200～1500mL/タンク 寸法／重量：本体 483×533×609(mm)／約82kg サブユニット 483×221×609(mm)／約12kg
宇宙放射線モニター装置	検出方式：実時間宇宙放射線検出 検出開口角：120度×120度 伝送データ：入射時刻，入射方向，エネルギースペクトル 寸法／重量：コントロールユニット 483×133×300(mm)／約9kg センサー部 320×160×350(mm)／約10kg
高温加圧型電気炉	加熱特性：最高1600℃，1600℃まで80分以内 温度制御：設定精度±3.0℃，安定性1.5℃（カートリッジ温度） 温度均一性：100mmに対して5度℃以下，160mmに8度℃以下 試料寸法：最大260×168mm，試料加圧：最大6.5kg/cm <sup>2</sup> 寸法／重量：サンプルラック1/2に相当，約175kg
制振実験装置	防振機構：粘弾性体の複合防振機構 実験装置容器：最大190×200×100(mm)，最大3.5kg 加速度計測装置：計測範囲±4G，分解能10μG 寸法／重量：370×247×439(mm)／約15kg
支援装置 恒温恒湿槽	温度制御：高温モード37℃，低温モード22℃，制御精度：±1℃ 湿度制御：設定60%RH，制御精度±10%RH CO <sub>2</sub> 供給：5体積%±1体積%（高温モードのみ） 寸法／重量：本体 483×444×606(mm)／約49kg CO <sub>2</sub> ガス供給ユニット 483×221×444(mm)／約15kg
支援装置 生物顕微鏡	拡大倍率：対物レンズ10倍，接眼レンズ4倍，10倍，20倍，40倍 ステージ移動：X，Y方向±30mm，焦点調節：ステージ上面+9mm 視野：25度（100倍），マウント：Fマウント（F-マウントコンバータ使用可能） 寸法／重量：本体 258×489×412(mm)／約11kg

付表-2 日本の実験テーマの概要(1/4)

装置	テーマ略称	実験テーマ名 代表研究者名	実験テーマの概要
水 棲 生 物 飼 育 装 置	Goldfish (金魚)	微小重力下における 魚の前庭順応機構の 研究 藤田衛生保健大学 高林 彰	地上での動物の運動は、重力感覚器として中心的な役割をはたしている前庭耳石器の働きと、視覚、体性感覚などを総合した結果として常に調整がうまく行われているが、突然の微小重力状態への移行は、過渡的な生理的不適応を引き起こす。その結果と考えられる宇宙酔いの原因を解明するため、金魚(6匹)を用いて微小重力中での前庭耳石器と視覚による姿勢制御機能の時間的適応と1gへの再適応を中心に実験を行う。実験は、耳石摘出時期の異なる2群の金魚を用い、背向反射行動を指標に微小重力への適応過程と飛行後の再適応過程を観察、解析する。
	Medaka (メダカ)	メダカの宇宙におけ る交尾・産卵行動 東京大学 井尻 憲一	交尾-産卵-発生という、一連の動物の基本的生殖過程が微小重力でどのような影響を受けるか、日本産のメダカ雄雌2組を実験装置内で維持し観察する。メダカは照明による暗明時間の制御により、その交尾行動が調節可能で、さまざまな要因が影響を与える宇宙環境で、交尾や産卵などの高度な動物の行動の変化や適応について研究、解析を行うことができる。産卵後約1週間でふ化するため、イモリと同様に受精後の発生分化の過程について観察可能となる。
	AstroNewt (イモリ)	イモリの宇宙におけ る産卵及び受精卵の 発生 宇宙科学研究所 山下 雅道	微小重力での発生と分化の問題は、生物学として重要な研究課題である。アカハライモリ(日本産、両性類)は交尾後、雌が精子を体腔内に保持したまま冬眠し翌年の春に産卵する習性があり、この性質をうまく利用すると、微小重力で交尾や複雑な試料操作を必要とせず、ホルモン処理のみで簡単に受精卵を得ることができる。本実験ではこの性質を利用し、産卵、発生、分化の一連の過程を微小重力状態で実現し、その生物学的発生の初期過程の重力との関与について研究する。米国のWiederholdらと実験テーマを編成し、特に耳石器発達と行動の連関に関して、共同で解析を行う。

付表-2 日本の実験テーマの概要(2/4)

装置	テーマ略称	実験テーマ名 代表研究者名	実験テーマの概要
細胞培養キット	Spore (粘菌)	宇宙空間における細胞性粘菌の分化 奈良県立医科大学 大西 武雄	細胞性粘菌は通常、森林の湿度の高い場所で朽ち木などに繁茂する単細胞生物であり、その短いライフサイクル(約1週間)の間に、初期は動物細胞様性質を示し後半では植物様性質を示す特異な生物種である。本実験では、生物の全ライフサイクルを宇宙環境(微小重力、宇宙放射線など)に曝することによる影響を研究する。また試料として放射線に感度の高い変異株も用い、微小重力の影響と、宇宙放射線の影響を分離して検出することを試みる。
	Osteogene (骨由来細胞)	骨由来培養細胞の増殖・分化機能発現におよぼす微小重力の影響 東京医科歯科大学 糸井 康宏	有人宇宙滞在時の問題の一つである、脱カルシウムと骨形成不全の問題を分子生物学的見地から研究する。骨細胞や骨組織が増殖・分化する際には、重力変化に対応して発現する遺伝子が存在することが、明らかになりつつある。本実験ではラットの下肢骨から採取した前骨細胞を、打上げ直前に培養状態とし、微小重力環境で培養する。飛行期間中骨形成機能を形態学的に観察するとともに細胞から遺伝子(メッセンジャーRNA)を抽出し重力感受生遺伝子の解析を行う。
電気泳動装置	Chromosome (線虫染色体)	電気泳動による線虫 <i>C. elegans</i> の染色体DNAの分離 城西大学 小林 栄三郎	微小重力の特性を利用して電気泳動装置内で、pHの勾配を作成し(等電点電気泳動法)、地上では分離が難しいとされている染色体DNAの効果的な分離を試みる。実験試料は、遺伝子構造の簡単な線虫( <i>C. elegans</i> )の染色体DNAを用い、これを電気泳動により分離、分取し、遺伝子解析手法により分析する。染色体の単離が可能となれば、染色体と生体機能の関係を明らかにして発生・分化の機構の解明に資することができ、さらに遺伝子複製におけるスクリーニング技術としても有効な方法となる。
	Antibody (高密度動物)	微小重力環境における高密度動物細胞培養液の分離精製実験 日立製作所(株) 奥沢 務	モノクローナル抗体などの生理活性物質を培養細胞を利用して生産する場合の高密度動物細胞培養液の懸濁液又は一次ろ過処理培養液用い、軌道上でゾーン電気泳動法による分離精製実験を行い、生理活性物質を他の共存成分、例えば培養液成分、生細胞、死細胞から高効率で分離するプロセス技術の基礎的実験を行う。また微小重力での細胞培養系と電気泳動分離プロセスの複合化技術に関する基礎的なデータを取得すると共に、濃厚試料の泳動特性を把握する。

付表-2 日本の実験テーマの概要(3/4)

装置	テーマ略称	実験テーマ名 代表研究者名	実験テーマの概要
宇宙放射線モニター装置	Radiation (放射線)	宇宙船内における重粒子線による線量計測とその生物効果実験 早稲田大学 道家 忠義	宇宙飛行中に船内に到達する宇宙放射線は、バンアレン帯の陽子や太陽粒子線及び銀河宇宙線など、そのエネルギーと核種は広く分布している。宇宙船内の放射線量の測定はこれまで色々と行われてきたが、その多くは非リアルタイム的測定で、飛行後の解析に依らないと結果が得られなかった。宇宙飛行の期間が長期化するにつれ、乗組員の安全確保の点からも出来る限り広範囲のエネルギーをリアルタイムで測定することが望まれていた。本実験ではじめて採用する宇宙放射線モニターは、アルファ粒子以上の粒子放射線を広範囲なエネルギー領域で刻々変化する船内の放射線環境(イベント時刻、入射角、核種、LETスペクトル等)を完全にリアルタイムで計測し、地上へ伝送することが可能となっている。
高温加圧型電気炉	Intermetallics (TiAl)	微小重力下におけるTiAl系金属間化合物の組織制御とその機械的性質 金属材料技術研究所 佐藤 彰	TiAlは、比強度、比弾性率、さらに耐熱性が高く将来の高効率輸送機に使用される材料として有望視されている。さらに、TiB <sub>2</sub> を粒子分散強化した材料は宇宙往還機の構造材料として大きな期待が寄せられている。この種の材料の試作は地上では粉末冶金で行われているが、内部欠陥等により強度上の問題がある。本実験では、TiAlのマトリックスに適合性の良いTiB <sub>2</sub> 粒子を混合し、粒子分散強化型複合材料として組織制御しTiAlの特性を有効に引き出すことを試みる。TiAlは、金属間化合物であり層状の組織をつくり析出強化型の組織となるが、TiB <sub>2</sub> 粒子を混合することによりTiB <sub>2</sub> 粒子が核生成サイトとなり特異な析出状態に制御できる可能性がある。実験によって得られた試料の機械的性質を調べることで、組織と強化機構の関係を明らかにすることを目的とする。

付表-2 日本の実験テーマの概要(4/4)

装置	テーマ略称	実験テーマ名 代表研究者名	実験テーマの概要
高温 加圧型 電気炉	Marangoni (マランゴニ)	多元系化合物半導体 融液の均一分散・混 合化  早稲田大学 平田 彰	微小重力環境下では、地上での熱対流が存在しないため、熱対流にかわってマランゴニ対流が顕在化する。マランゴニ対流は温度勾配によるものと濃度勾配によるものの2種類がある。微小重力環境下で物質を混合したりする際、機械的な攪はんは不純物の混入を招くため好ましくない。本実験では、2種類以上の物質を混ぜ合わせ、組成の均一化に濃度差マランゴニ対流を積極的に利用することを試みる。実験では、濃度差マランゴニ対流による均一化および純粋拡散による試料の均一化について数種類の試料を使用して溶解実験を実施し、マランゴニ対流現象のメカニズムの解明およびその試料均一化の方法への応用を行うことを目的としている。
	Capillary (熱駆動流)	微小重力下での熱駆 動流の研究  宇宙開発事業団 古川 正夫	相変化に伴い発生する熱駆動流は、微小重力環境下での熱発電などさまざまな技術の基礎となる。本実験では、温度による蒸気圧の差と毛細管力を利用し、容器から容器への液体の移送実験を実施する。液体の移送実験を防振機構を機能させた状態と、防振機構により保持されないシャトル環境下の両方で行い移送状態を観察する。実験により、微小重力レベルの差の流れに及ぼす影響を調べる。
制振 実験 装置	Convection (ゆらぎ)	自然対流と拡散に対 する重力加速度ゆら ぎ(gジッタ)の影響  航空宇宙技術研究所 東 久雄	スペースシャトルや宇宙ステーションで材料を製造する際、微小重力場での熱対流と拡散がgジッタによりどのような影響を受けるかは、材料の製造過程や流体実験等で重要な因子となる。これを調べるために、シャトル中の搭乗員の移動、シャトルの姿勢制御などに起因する振動が実験装置自体に伝わりにくくした防振機構を備えた制振実験装置を使用した実験を行う。防振機構を機能させ、振動が内部の実験装置本体に伝わりにくくした条件と、シャトル内のgジッタに実験装置がさらされた条件とで実験を実施し、比較、解析を行う。

付表-3 日本の実験装置を使用する米国実験テーマの概要

装置	テーマ略称	実験テーマ名 代表研究者名	実験テーマの概要
水棲 生物 飼育 装置	Otoconia (イモリ卵)	微小重力下での重力 感受器官の初期発生 の研究  テキサス大学 M.L.グイーグホルト	イモリの受精卵を用いて平衡感覚器官の中心的役割を果たしている重力センサー(耳石器)の発達過程を無重力環境で調べる。実験装置に発生段階の異なった2群の受精卵をセットし、軌道上で異なった時期に耳石の発達を調べるため、カルシウム染色用の蛍光色素を注入し飛行後耳石器の発達形態や速度を組織学的に研究する。また山下らと共同で、重力感覚器官の発達と行動との連関を、微小重力と地上でふ化した個体を用いて詳しく解析する。
細胞 培養 キット	Pembsis (植物細胞)	植物胚芽の分化状態 の安定性への重力関 与の研究  ニューヨーク州立大学 A.D.カリコフ	培養状態の植物細胞(人参、DAYLILY)が胚形成から分化し植物組織となる際に、細胞内過程(遺伝子またはその関連過程)が重力変化あるいは微小重力状態に影響を受けることが提案者の過去の宇宙実験(コスモス)から明らかにさつつある。この実験では、過去のコスモス実験及びスペースラブ-Jでの知見に基づき植物の分化過程における重要な段階の微小重力状態の影響を明らかにする。
電気 泳動 装置	Pituitary (ネズミ細胞)	ラット脳下垂体細胞 及び細胞内顆粒の電 気泳動分離実験  ペンシルバニア州立大学 W.C.ハイマー	脳下垂体はホルモン調節の中核として非常に重要な器官であり、微小重力で生じるさまざまな生理的変動と密接に関連していることが多くの宇宙実験で明らかにされつつある。本実験では、地上で打上げ直前に調整したラットの脳下垂体細胞を軌道上で培養し、微小重力に数日間曝した後、細胞をさらに酵素処理し濃縮後、ゾーン電気泳動法にてホルモン含量の異なる細胞成分に分離し分取することを目的としている。さらに、軌道上で培養した脳下垂体細胞の一部を破碎し、細胞中のホルモンを多量に含む顆粒成分を電気泳動的に分離する実験も行う。この実験では軌道上で、細胞培養と電気泳動分離を有機的に活用する初めての試みであり技術的にも種々の工夫がなされている。
高温 加圧 型 電気炉	Sintering (液相焼結)	液相焼結における重 力の効果  ペンシルバニア州立大学 R.N.ジャーマン	粒子分散複合材料の製造は地上では一般に、粉末冶金に用いられるが、欠陥が内在するため強度が低い。このため、混合物の一部を溶解させて液相状態で焼結する液相焼結があるが、地上では重力のために液相と固相が分離せず、均一な組織を有する材料を製造することができない。本実験では、微小重力環境下での液相焼結のメカニズムを調べることを目的とし、数種類の混合比率の異なる試料を作製し、液相焼結状態を解析する。これにより、Wの含有量、焼結時間などのパラメータを変化させた場合の、組織の分布状態、W粒子同士の結合状態、マトリックスとW粒子の反応状態より液相焼結のメカニズムを明らかにする。

付表-4 日本の実験テーマの搭載実験試料の主要諸元

テーマ略称	実験テーマ名	搭載試料諸元
Goldfish (金魚)	微小重力下における魚の前庭順応機構の研究	金魚6匹(体重20~25g/匹) フィッシュハッチャー1個(容量3300ml/個)
Medaka (メダカ)	メダカの宇宙における交尾・産卵行動	メダカ4匹(2ペア、体重約0.7g/匹) アクリウムハッチャー1個(容量240ml/個) メダカ卵
Astronewt (イモリ)	イモリの宇宙における産卵及び受精卵の発生	アカハライモリ雌4匹(体重約8g/匹) アクリウムハッチャー3個(容量240ml/個)
Spore (粘菌)	宇宙空間における細胞性粘菌の分化	細胞性粘菌2系統(γs13、NC4) 粘菌培養容器1個
Osteogene (骨由来細胞)	骨由来培養細胞の増殖・分化機能発現におよぼす微小重力の影響	ラット骨由来培養細胞 細胞培養容器4個(容量20ml/個)
Chromosome (線虫染色体)	電気泳動による線虫 <i>C. elegans</i> の染色体DNAの分離	線虫 <i>C. elegans</i> の染色体DNA サンプルホルダー2本(2.5ml/本)
Antibody (高密度動物)	微小重力環境における高密度動物細胞液の分離精製実験	マウスハイブリドーマ高密度培養細胞 サンプル培養容器1個(容量20ml/個)
Radiation (放射線)	宇宙船内における重粒子線による線量計測とその生物効果実験	乾燥菌体(大腸菌) サンプルホルダー(3.5×15.3×14.0cm)1個
Inter-metallics (TiAl)	微小重力下におけるTiAl系金属間化合物の組織制御とその機械的性質	Ti-48at.%Al成形体; φ18×25、24.1g φ18×23、22.2g Ti-48at.%Al、5vol%TiB <sub>2</sub> 成形体 φ18×25、2個 重量24.5g
Marangoni (マランゴニ)	多元系化合物半導体融液の均一分散・混合化	In/GaSb/Sb及びIn/Sb化合物半導体 In/GaSb/Sb(0.3:0.7:0.3)2個 φ11.6×18.1, φ13.0×7.0 各1個 In/GaSb/Sb(0.5:0.5:0.5)2個 φ13.0×7.0 2個 In/Sb(0.5:0.5)2個 φ11.6×10.5, φ13.0×7.0 各1個
Capillary	自然対流と拡散に対する重力加速度ゆらぎ(Gジッタ)の影響	食塩水 ; 0.02mol/l, 約120ml フェノール ; 1.1mol/l エタノール ; 7%
Convection (ゆらぎ)	微小重力下での熱駆動流の研究	蒸留水 ; 20ml

付表-5 日本の実験装置を使用する米国実験テーマ搭載実験試料の主要諸元

テーマ略称	実験テーマ名	搭載試料諸元
Otoconia (イモリ卵)	微小重力下での重力感受器官の初期発生の研究	アカハライモリ卵144個 アクリウムハッチャー3個(容量240ml/個)
Pembesis (植物細胞)	植物胚芽の分化状態の安定性への重力関与の研究	ニンジン、テイリリイの培養細胞 植物細胞培養容器6個(容量60ml/個) 細胞培養固定容器6個(容量60ml/個)
Pituitar (脳下垂体細胞)	ラット脳下垂体細胞及び細胞内顆粒の電気泳動分離実験	ラット脳下垂体培養細胞 サンプル培養容器4個(容量20ml/個)
Sintering (液相焼結)	液相焼結における重力の効果	ニッケル-鉄-タンタルステン混合粉末の成形体 試料個数 7個/カートリッジ 試料重量 9~12g 試料寸法 φ10×10

IML-2 実験装置と実験テーマ提案数の国別内訳

参考 - 1

実験装置名	提供機関	日本	米国	カナダ	ドイツ	フランス	イタリア	ベルギー	スイス	スペイン	ソ連	合計
水棲生物飼育装置	NASDA	3	1									4
細胞培養キット	NASDA	2	1									3
電気泳動装置	NASDA	2	1									3
宇宙放射線モニタ装置	NASDA	1										1
高温加圧型電気炉	NASDA	2	1									3
制振実験装置	NASDA	2										2
加速度計測装置	NASA		1									1
滞在延長医学実験装置	NASA		2									2
作業効率評価ワークステーション	NASA											未発表
バイオラック	ESA				4	3			4	1	2	19
泡/液滴/粒子実験装置	ESA		2		2		2	1				7
改良型蛋白質結晶装置	ESA		1		3	1		2			1	10
臨界点実験装置	ESA		1		1	1						4
バイオスタック	DLR				1							1
静的加速度計測装置	DLR				1							1
電磁浮遊無容器処理装置	DARA		4		4							8
重力生物実験装置	DARA		1		6				1			8
多目的溶液分離実験装置	CNES		1						1			2
脊椎形態変化計測装置	CSA			1								1
合計 80テーマ/19装置		12	17	1	22	5	2	1	5	1	2	80

参考 - 2

IML-2 実験テーマ一覧(日本の実験装置以外) (1/10)

実験装置名	実験テーマ名/代表研究者名
提供機関: NASA 加速度計測装置 SPACE ACCELERATION MEASUREMENT SYSTEM(SAMS)	同左 / C.Baughner, United States
滞在延長医学実験装置 EXTENDED DURATION ORBITER MEDICAL PROGRAM (EDOMP)	下半身陰圧負荷 - 飛行後の起立耐性失調の軽減対策 Lower body negative pressure: countermeasure investigation for reducing postflight orthostatic intolerance / J.CHARLES, United States  空中微生物採取 Microbial air sampler / D.L.PIERSON, United States
作業効率評価ワークステーション PERFORMANCE ASSESSMENT WORK STATION (PAWS)	未発表

実験装置名	実験テーマ名/代表研究者名
提供機関: ESA バイオラック BIORACK(BR)	<p>微小重力における抗原の添加及びT細胞の増殖 Antigen presentation and T-cell proliferation in micro g : ANTIGEN / A.COGLI, Switzerland</p> <p>リンパ球の活性化、分化及び着生の活性化に対する依存性 Lymphocyte activation, differentiation, and adhesion dependence on activation : ADHESION / A.COGLI, Switzerland</p> <p>リンパ球の運動及び相互作用 Lymphocyte movements and interactions : MOTION / A.COGLI, Switzerland</p> <p>細胞の活性化に関する微小重力の影響—サイトカインの役割 Effect of microgravity on cellular activation : the role of cytokines : CYTOKINES / D.SCHMITT, France</p> <p>細胞の活性化に関する微小重力の影響—ホルモンの役割 Effect of microgravity on cellular activation : the role of cytokines : PHORBOL / D.SCHMITT, France</p> <p>細胞の微小環境及び膜の微小重力下での信号形質伝導 Cell microenvironment and membrane signal transduction in microgravity : SIGNAL / P.BOULOC, France</p> <p>微小重力下でのバイオリアクター実験における攪拌及び混合の影響 Effect of stirring and mixing in a bioreactor experiment in microgravity : BIOREACTOR / A.COGLI, Switzerland</p> <p>動物多細胞集合体の微小重力下での再生に関する分子生物学的研究 Molecular biological investigations of animal multi-cell- aggregates reconstituted under microgravity : AGGREGATE / U.A.O.HEINLEIN, Germany</p> <p>微小重力による細胞の成長及び分化の制御; レチノ酸誘導細胞分化 Regulation of cell growth and differentiation by micro- gravity:retinoic acid-induced cell differentiation : MOUSE / S.W.de LAAT, The Netherlands</p> <p>ウニの幼生—宇宙でのミネラル化・脱ミネラル化プロセス研究の有望モデル The sea urchin larva, a potential model for studying biomineralization and demineralization processes in space : URCHIN / H.J.MARTHY, France</p> <p>微小重力、可変1-gへの曝露時間の骨融食作用に対する影響; 試験 管内実験 The effects of microgravity and varying 1-g exposure periods on bone resorption; an in vitro experiment: BONES / J.P.VELDHUIJZEN, The Netherlands</p>

実験装置名	実験テーマ名/代表研究者名
バイオラック (続き)	<p>微小重力下でのショウジョウバエの発生、行動、老化のメカニズムに関する研究 Investigation of the mechanisms involved in the effects of space microgravity on drosophila development, behavior and aging: DROSOPHILA / R.MARCO, Spain</p> <p>両生類卵の胚軸発生における重力の役割 The role of gravity in the establishment of embryonic axes in the amphibian embryo: EGGS / G.A.UBBELS, The Netherlands</p> <p>ヒヨコマメの形態発生に関する微小重力の影響 Effect of microgravity on lentil morphogenesis : LENTIL / G.E.PERBAL, France</p> <p>遺伝学的に形質転換された根の屈性、成長調整、適応及び無重力下 での挙動 Root orientation, growth regulation, adaptation, and agravitropic behavior of genetically transformed roots : TRASFORM / T.H.IVERSEN, Norway</p> <p>植物の成長及び酔歩運動 Plant growth and random walk : RANDOM / A.JOHNSSON, Norway</p> <p>IML-2におけるバイオラック内部の放射線分布 Dosimetric mapping inside biorack on IML-2 : DOSIMETRY / G.REITZ, Germany</p> <p>放射線被曝原核生物における修復効率 Efficiency of radiation repair in prokaryotes : REPAIR / G.HORNECK, Germany</p> <p>放射線被曝真核生物の修復機構 Radiation repair kinetics in eukaryotes : KINETICS / G.HORNECK, Germany</p>
泡/液滴/粒子実験装置 BUBBLE, DROP, AND PARTICLE UNIT(BDPU)	<p>気泡の移動、集合、及び溶融・凝固フロントとの相互作用 Bubble migration, coalescence and interaction with melting and solidification fronts / R.MONTI, Italy</p> <p>気泡及び液滴の熱対流及び相互作用 Thermocapillary migration and interactions of bubbles and drops / R.S.SUBRAMANIAN, United States</p> <p>低重力下での気泡の挙動 Bubble behavior under low gravity / A.VIVIANI, Italy</p> <p>非混合多層液系での界面現象 Interfacial phenomena in a multilayered fluid system / J.N.KOSTER, United States</p>

IML-2 実験テーマ一覧(日本の実験装置以外) (4/10)

実験装置名	実験テーマ名/代表研究者名
泡/液滴/粒子実験装置 (続き)	<p>三層系での熱毛管現象の不安定性 Thermocapillary instability in a three-layer system. / J.C.LEGROS, Belgium</p> <p>気泡形成、気泡成長、界面での微細層、蒸発及び濃縮メカニズム Nucleation, bubble growth, interfacial micro-layer, evaporation and condensation kinetics / J.STRAUB, Germany</p> <p>容器の隅、縁、内部における液体の静的、動的挙動 Static and dynamic behavior of liquid in corners, edges, and containers / D.LANGBEIN, Germany</p>
改良型蛋白質結晶成長装置 ADVANCED PROTEIN CRYSTALLIZATION FACILITY (APCF)	<p>医学、生物学に關与するタンパク質の結晶化 Crystallization of medically and biologically related proteins / D.BLOW, England</p> <p>過飽和におけるタンパク質結晶成長 Protein crystal growth at known supersaturation / A.DUCRUIX, France</p> <p>可視染料物質ロドプシンの結晶化 Crystallization of visual pigment rhodopsin / W.J.DE.GRIP, The Netherlands</p> <p>リボゾーム 5 S RNA の結晶化 Crystallization of ribosomal 5s RNA / V.A.ERDMANN, Germany</p> <p>tRNA の結晶化 Crystallization of tRNA / R.GIEGE, France</p> <p>リゾチームの結晶化 Crystallization of Lysozyme / J.HELLIWELL, England</p> <p>高分子及びウイルスの結晶化に関する微小重力の影響 Microgravity effects on macromolecule and virus crystallization / A.McPHERSON, United States</p> <p>地上及び微小重力下での高分子の結晶多形成と分子間相互作用 Crystal packing interactions between different crystal forms of macromolecules grown on earth and in microgravity / L.SJOLIN, Sweden</p> <p>微小重力下での一団リボゾーム分子の結晶化 Crystallization of intact ribosomal particles under microgravity / A.YONATH, Germany</p> <p>小受容体分子ロドプシン及びカルモデュリンの結晶化 Crystallization of the small receptor molecules archaeobacterial rhodopsin and plant calmodulin) / G.WAGNER, Germany</p>

IML-2 実験テーマ一覧(日本の実験装置以外) (5/10)

実験装置名	実験テーマ名/代表研究者名
臨界点実験装置 CRITICAL POINT FACILITY (CPF)	<p>ピストン効果 The piston effect / D.BEYSENS, France</p> <p>単一成分液体における熱平衡 Thermal equilibration in a one-component fluid / R.A.FERRELL, United States</p> <p>密度平衡タイムスケール Density equilibration time scale / H.KLEIN, Germany</p> <p>臨界状態の液体における熱輸送及び密度変化 Heat transport and density fluctuations in a critical fluid / A.C.MICHELS, The Netherlands</p>

IML-2 実験テーマ一覧(日本の実験装置以外) (6/10)

実験装置名	実験テーマ名/代表研究者名
提供機関: DLR バイオスタック BIOSTACK(BSK)	同左 / G.REITZ, Germany
準静的加速度計測装置 QUASI-STEADY ACCELERATION MEASUREMENT (QSAM)	同左 / H.Hamacher, Germany

実験装置名	実験テーマ名/代表研究者名
提供機関: DARA 電磁浮遊無容器処理装置 TIEGELFRIES ELEKTRO- MAGNETISCHES PROZESIEREN UNTER SCHWERELOSIGKEIT (TEMPUS)  ELECTROMAGNETIC CONTAINERLESS PROCESSING FACILITY	低重力下での無容器処理による結晶核生成の影響 Effects of nucleation by containerless processing in low gravity / R.J.BAYUZICK, United States  合金の過冷却実験 Alloy undercooling experiments / M.C.FLEMINGS, United States 大幅過冷却熔融金属の非平衡凝固 Non-equilibrium solidification of largely undercooled melts / D.M.HERLACH, Germany  準結晶生成合金の大幅過冷却熔融物の構造及び凝固 Structure and solidification of largely undercooled melts of quasicrystal-forming alloys / K.URBAN, Germany 過冷却液体合金における熱力学的性質及びガラス組成 Thermodynamics and glass formation in undercooled liquid alloys / H.J.FECHT, Germany  宇宙空間における金属ガラスの研究: 金属ガラス及び過冷却合金の熱的性質 Metallic glass research in space: thermophysical properties of metallic glasses and undercooled alloys / W.J.JOHNSON, United States  過冷却熔融物の粘性及び表面張力 Viscosity and surface tension of undercooled melts / I.EGRY, Germany  微小重力下での過冷却熔融物の粘性/表面張力の測定、及び電磁流体解析 Measurement of the viscosity and surface tension of undercooled melts under microgravity conditions and supporting MHD calculations / J.SZEKELY, United States
重力生物実験装置 NIEDERGESCHWINDIGKEIT- ZENTRIFUGEN-MIKROSKOP (NIZEMI)	粘菌(モシホリヒ)の重力感受性及び走地性 Gravisensitivity and geotaxis of the slime mold physarum polycephalum: SLIME MOLD / I.BLOCK, Germany  原生動物ロクテヌストリアスの宇宙での配向性に関する加速度の影響 Influence of accelerations on the spatial orientation of the protozoan loxodes striatus: LOXODES / R.HEMMERSBACH-KRAUSE, Germany  ユーグレンーグラシリスにおける重力配向性 Graviorientation in EUGLENA GRACILIS: EUGLENA / D.P.HADER, Germany

実験装置名	実験テーマ名/代表研究者名
重力生物実験装置 (続き)	ミスクラゲ(アウレリア エフィラ)の行動・発生に関する微小重力の影響 Effects of microgravity on AURELIA EPHYRA behavior and development: JELLYFISH / D.SPANGENBERG, United States  微小重力下におけるシャジク根の仮根の重力反応 Gravireaction in CHARA RHIZOIDS in microgravity: CHARA / A.SIEVERS, Germany  クレス(カラシ科植物)根の重力感受性 Gravisensitivity of cress roots: CRESS / D.VOLKMANN, Germany  リンパ球の運動及び相互作用 Lymphocyte movements and interactions: MOTION / A.COGLI, Switzerland  2次元溶解面の対流安定性 Convective stability of a planar solidification front: MONI / K.LEONARTZ, Germany

IML-2 実験テーマ一覧(日本の実験装置以外) (9/10)

実験装置名	実験テーマ名/代表研究者名
提供機関: C N E S 多目的溶液分離実験装置 RECHERCHE APPLIQUE SUR LES METHODS DE SEPARA- TION EN ELECTROPHORESE SPATIALE (R A M S E S)  APPLIED RESEARCH ON SEPARATION METHODS USING SPACE ELECTROPHORESIS	蛋白質分離の最適化 Optimization of protein separation / V.SANCHEZ, France  電磁流体力学的な試料の歪み Electrodynamic sample distortion / R.SNYDER, United States

IML-2 実験テーマ一覧(日本の実験装置以外) (10/10)

実験装置名	実験テーマ名/代表研究者名
提供機関: C S A 脊椎形態変化計測装置 SPINAL CHANGES IN MICROGRAVITY(S C M)	微小重力下での背骨の変化 Spinal changes in microgravity / J.R.LEDSOME, Canada

## 第2次国際微小重力実験室（IML-2）搭載実験実施計画要旨

### 1. IML-2計画の概要

NASA（米国航空宇宙局）を中心とした国際協力による宇宙実験計画であり、スペースシャトル「コロンビア号」に搭載されるスペースラブ（宇宙実験室）に、参加各国から持ち寄られた実験装置を積み、それをNASAと参加各国が利用して微小重力環境下でライフサイエンスや材料実験等を行う。

### 2. 打上げ・着陸予定日

平成6年7月8日（米国東部夏時間）フロリダ州ケネディ宇宙センターから打ち上げ、7月22日同センターに着陸予定。

### 3. 参加機関

NASA、NASDA（宇宙開発事業団）、ESA（欧州宇宙機関）、DARA／DLR（ドイツ航空宇宙機関／航空宇宙研究所）、CSA（カナダ宇宙庁）、CNES（フランス国立宇宙研究センター）の7機関。

### 4. 搭乗員

7名

我が国の向井千秋宇宙飛行士が搭乗科学技術者として搭乗。

### 5. ミッションの概要

（1）軌道 高度約300km、傾斜角 28.5度

（2）飛行期間 13日18時間

（3）全体の実験装置 19装置

（4）全体の実験テーマ 80テーマ  
（13か国の研究者が参加）

### 6. 我が国の実験計画

（1）提供する実験装置 6装置

ライフサイエンス分野 4装置

材料実験分野 2装置

（2）同装置を使用した日本人研究者の実験テーマ 12テーマ

ライフサイエンス実験 8テーマ

材料実験等 4テーマ

（この他、同装置を使用する米国人研究者のテーマが4テーマ）

### 7. 広報イベント

政府要人と向井宇宙飛行士との交信、軌道上の搭乗員と地上の報道関係者の記者会見他3件の広報イベントを実施する。

第 2 次 国 際 微 小 重 力 実 験 室

# SECOND INTERNATIONAL MICROGRAVITY LABORATORY

## IML-2



# 目次

2ページ	IML-2計画とは	
4ページ	ライフサイエンスの実験	
6ページ	材料科学の実験	
	こんな実験装置を搭載します	
8ページ	AAEU	水棲生物飼育装置
10ページ	CCK	細胞培養キット
12ページ	FFEU	電気泳動装置
14ページ	RRMD	放射線モニター装置
16ページ	LIF	高温加圧型電気炉
18ページ	VIBES	制振実験装置
20ページ	実験支援装置	— 恒温恒湿槽 (TEI) 生物顕微鏡 (BM) カムコーダー —
	こんな実験をします	
22ページ	Goldfish	微小重力下における魚の前庭順応機構の研究 (代表研究者 高林 彰)
23ページ	Medaka	メダカの宇宙における交尾・産卵行動 (代表研究者 井尻憲一)
24ページ	AstroNewt	イモリの宇宙における産卵および受精卵の発生 (代表研究者 山下雅道)
25ページ	Otoconia	微小動下での重力感受器官の初期発生の研究 (代表研究者 M. L. ヴィーダホルド)
26ページ	Osteogene	骨由来培養細胞の増殖・分化機能発現におよぼす微小重力の影響 (代表研究者 桑井康宏)
27ページ	Spore	宇宙空間における細胞性粘菌の分化 (代表研究者 大西武雄)
28ページ	Pembis	植物胚芽の分化状態の安定性への重力関与の研究 (代表研究者 A. D. クリコリアン)
29ページ	Chromosome	電気泳動による線虫 <i>C. elegans</i> の染色体 DNA の分離 (代表研究者 小林英三郎)
30ページ	Antibody	微小重力環境における高密度動物細胞培養液の分離精製実験 (代表研究者 奥沢 務)
31ページ	Pituitary	ラット脳下垂体細胞および細胞内顆粒の電気泳動分離実験 (代表研究者 W. C. ハイマー)
32ページ	Radiation	宇宙船内における重粒子線による線量計測とその生物効果実験 (代表研究者 道家忠義)
34ページ	Sintering	液相焼結における重力の効果 (代表研究者 R. M. ジャーマン)
35ページ	Marangoni	多元系化合物半導体融液の均一分散・混合 (代表研究者 平田 彰)
36ページ	Intermetallics	微小重力下における TiAl 系金属間化合物の組織制御とその機械的性質 (代表研究者 佐藤 彰)
37ページ	Convection	自然対流と拡散に対する重力加速度ゆらぎ ( <i>g</i> ジッタ) の影響 (代表研究者 東 久雄)
38ページ	Capillary	微小重力下での熱駆動流の研究 (代表研究者 古川正夫)
39ページ	海外の実験装置とテーマ	
42ページ	搭乗する宇宙飛行士	
44ページ	スケジュール	
45ページ	略語	

## IML-2計画とは

国際微小重力実験室 (IML=International Microgravity Laboratory) 計画はスペースシャトル/スペースラブを使った微小重力実験計画です。この計画は、米国航空宇宙局 (NASA) が国際協力のもとで推進しています。第1回IML宇宙実験 (IML-1)は1992年1月に打ち上げられました。IML-2はIML計画の2回目の宇宙実験で、1994年7月に打ち上げられる予定です。

IML-2計画には、NASA、宇宙開発事業団、欧州宇宙機関、ドイツ宇宙機関、ドイツ航空宇宙研究所、フランス国立宇宙研究センター、カナダ宇宙機関の7機関 (国の数としては13カ国) が参加しています。各機関が実験装置を提供し、それをNASA共同で使用して実験をおこないます。ライスサイエンス系10装置、材料科学系8装置の計18装置が搭載され、80の実験がおこなわれます。

宇宙開発事業団では過去にIML-1と「ふわっと'92」の2回の有人宇宙実験をおこないました。IML-2では、それらの成果をもとに有人宇宙実験の経験をさらに積み重ねて、宇宙ステーションでの本格的な宇宙実験時代に向けての技術開発や国際協力を進めていきます。

1989年11月にNASAはIML-2に搭載する装置を選定し、日本からは6種の装置が搭載されることになりました。これを受けてこれらの装置を用いる実験テーマを募集したところ、産・官・学の各方面から75テーマの応募があり、その中から12のテーマが選定されました。これら12テーマのほかに、日本が提供する装置を使うアメリカの研究者による実験テーマが4つあります。

1992年10月には、宇宙開発事業団の宇宙実験搭乗部員である向井千秋医学博士が、IML-2の搭乗科学技術者 (ペイロードスペシャリスト) に選ばれて、スペースラブで実験をおこなうことが決まりました。

### 微小重力

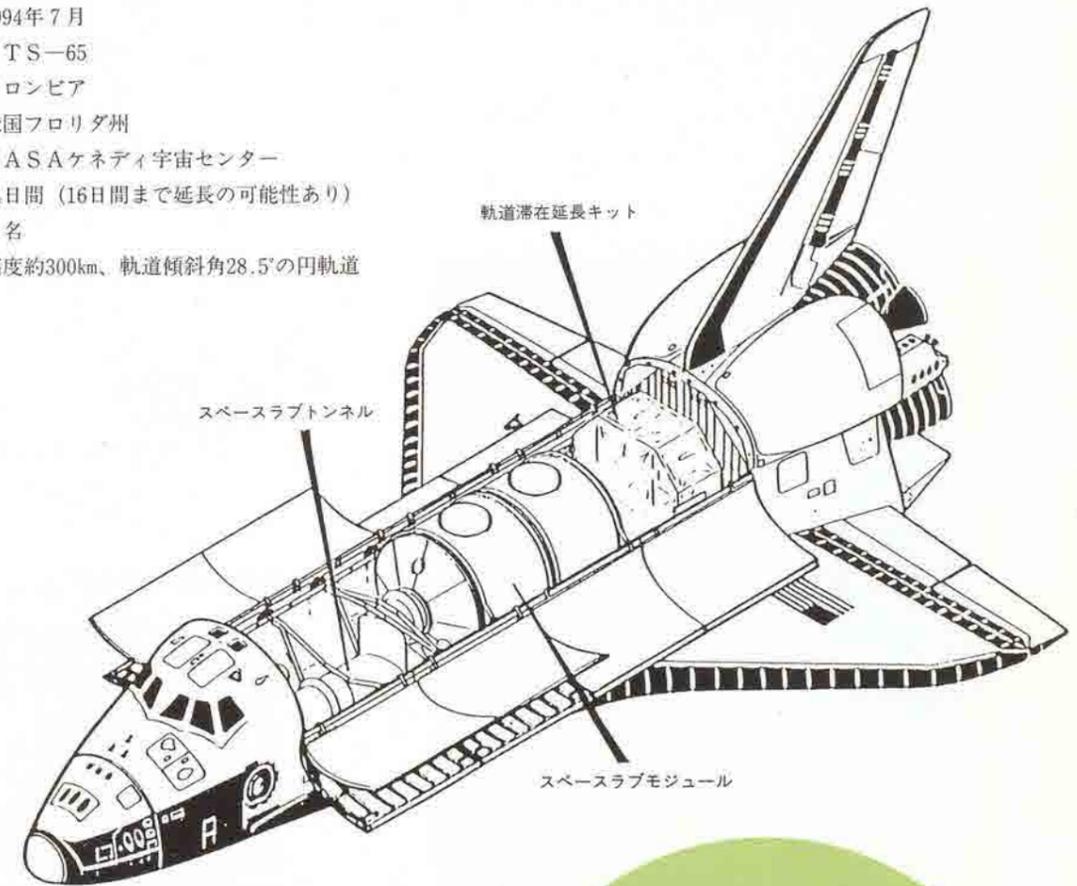
スペースラブにはまったく重力がないわけではなく、地上の約千分の1から1万分の1というたいへん小さな重力があります。そこで、正確にはこのような状態を“無”重力ではなく、“微小”重力とよびます。

微小重力環境では、重いものが沈んだり軽いものが浮いたりすることがほとんどないので、物質を混合しやすくなります。そこで、優れた特性をもつ合金や複合材料を作れるだろうと考えられています。また、地上では物質の荷電状態のわずかな違いを利用して有用物質を分離するときに熱対流が起こってうまく分離できませんが、微小重力環境では熱対流がほとんど起こらないのできれいに分離できるものと期待されます。さらに、液体は微小重力環境では球形になって宙に浮きますから、地上のように容器が必要なく、容器から液体に不純物が混ざることがありません。スペースラブではこのような微小重力環境の特徴をいかして、地上ではできないような新しい材料や新しい技術の開発をめざした研究をおこなうことができます。

いっぽう、地球上の生物は微小重力環境という今まで経験したことのない環境におかれると、さまざまな反応を示します。宇宙ステーション時代には宇宙に滞在する時間がたいへん長くなります。そのときに、ヒトをはじめ、いろいろな生物が健康に生活できるように、宇宙環境への適応技術を確立しなければなりません。宇宙に浮かぶスペースラブではそのための研究もおこなうことができます。

### IML-2ミッションの概要

打ち上げ予定日	: 1994年7月
シャトル飛行番号	: STS-65
スペースシャトル	: コロンビア
打ち上げ場所	: 米国フロリダ州 NASAケネディ宇宙センター
飛行日数	: 14日間 (16日間まで延長の可能性あり)
搭乗員数	: 7名
軌道	: 高度約300km、軌道傾斜角28.5°の円軌道



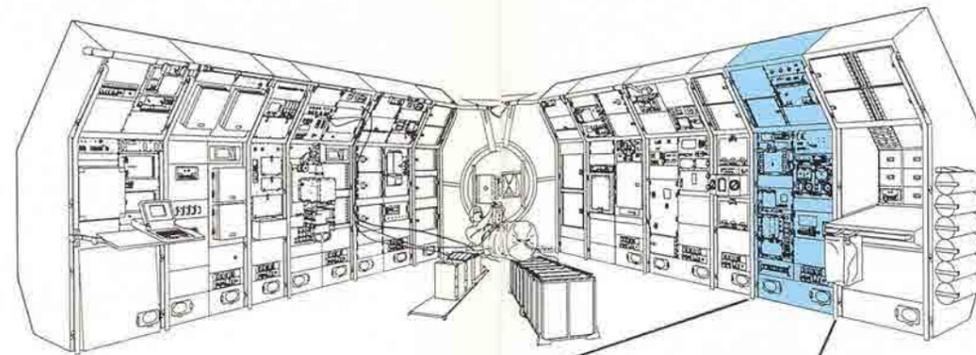
### 「ふわっと'92」 (第1次材料実験)

1992年9月に打ち上げられた日米協同の宇宙実験プロジェクトで、日本の本格的な宇宙実験の第1歩となりました。毛利衛博士が搭乗科学技術者として乗り組み、日本は8日間の飛行で予定していた22テーマの材料科学実験と12テーマのライフサイエンス実験をすべておこなうことができました。

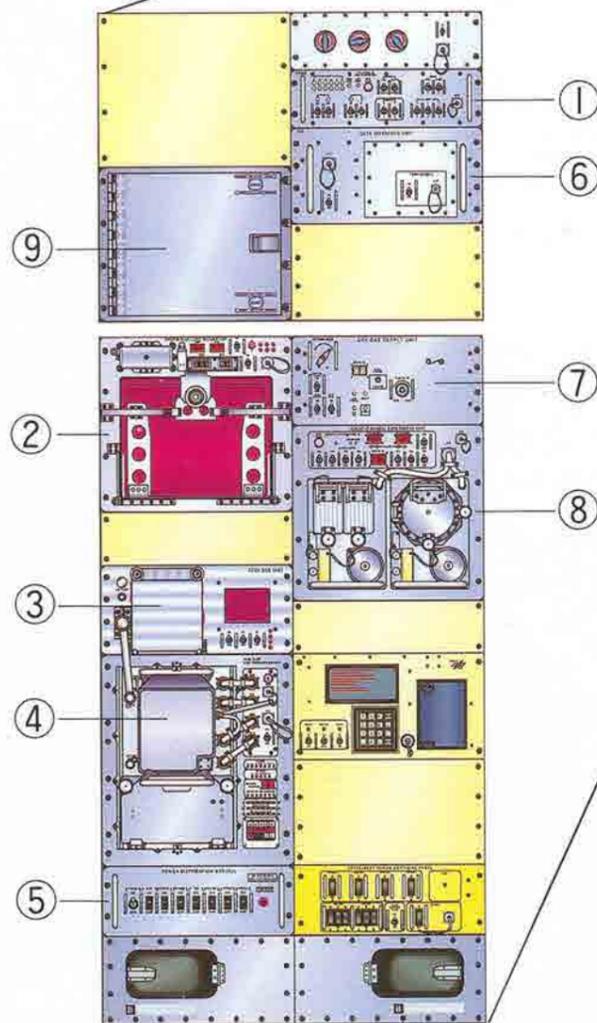
### 「IML-1」

(第1次国際微小重力実験室)

IML計画の第1回目のもので、1992年1月に打ち上げられました。各国の開発した16種の実験装置を使って、微小重力環境での結晶成長や細胞培養など42テーマの実験が8日間にわたっておこなわれました。日本からは2種の装置が積み込まれ、有機超伝導体の結晶成長と、スペースラブ内の宇宙放射線環境のモニタおよび生物にあたる影響の調査の2つの実験が実施されました。



実験装置ラック No.3



ライフサイエンスの実験テーマ

「水棲生物飼育装置」を使う実験  
 微小重力下における魚の前庭順応機構の研究  
 イモリの宇宙における産卵および受精卵の発生  
 メダカの宇宙における交尾・産卵行動  
 微小重力下での重力感受器官の初期発生の研究

「細胞培養キット」を使う実験  
 骨由来培養細胞の増殖・分化機能発現におよぼす微小重力の影響  
 宇宙空間における細胞性粘菌の分化  
 植物胚芽の分化状態の安定性への重力関与の研究

「電気泳動装置」を使う実験  
 電気泳動による線虫 *C. elegans* の染色体DNAの分離  
 微小重力環境における高密度動物細胞培養液の分離精製実験  
 ラット脳下垂体細胞および細胞内顆粒の電気泳動分離実験

「放射線モニター装置」を使う実験  
 宇宙船内における重粒子線による線量計測とその生物効果実験

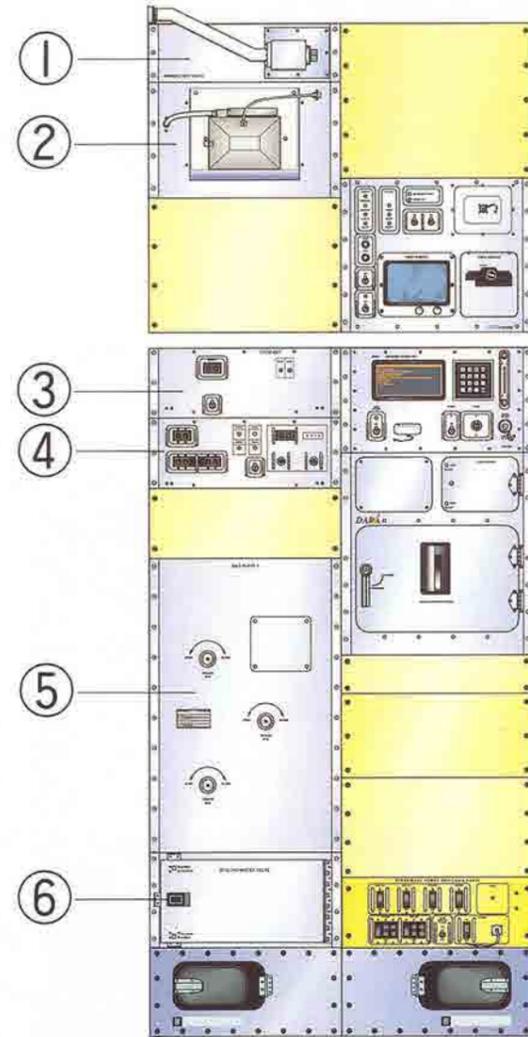
ライフサイエンス実験で使う装置と器具

ラックに搭載するもの	収納用の機器で収納しておくもの
① 放射線モニター装置 コントロールユニット	細胞培養キット
② 恒温恒湿槽 本体	放射線モニター装置 センター部
③ 電気泳動装置 サブユニット	生物顕微鏡
④ 電気泳動装置 本体	35mmカメラ*
⑤ 電力分配装置	カムコーダー*
⑥ データインターフェイスユニット	冷蔵庫*
⑦ CO <sub>2</sub> ガス供給ユニット	冷凍庫*
⑧ 水棲生物飼育装置	ミッドデッキ収納庫*
⑨は制振実験装置が搭載されている ラックストウェッジコンテナ	など

\*NASAと共用

高温加圧型電気炉に関する実験装置  
(ラックに搭載するもの)

- ① 真空排気パネル
- ② 高温加圧型電気炉 本体
- ③ 高温加圧型電気炉 制御装置  
実験部
- ④ 高温加圧型電気炉 制御装置  
データインターフェイスユニット
- ⑤ ガス供給装置
- ⑥ 高温加圧型電気炉バルブアクセスパ  
ネル



実験装置ラック No.7

材料科学の実験テーマ

「高温加圧型電気炉」を使う実験

液相焼結における重力の効果

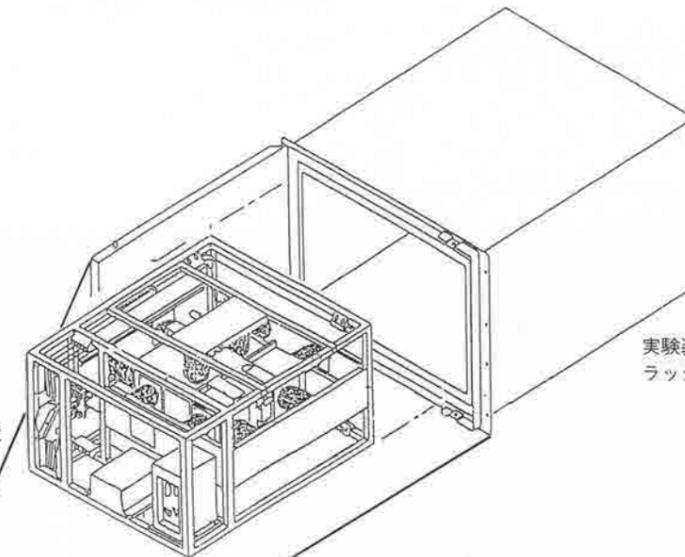
多元系化合物半導体融液の均一分散・混合

微小重力下における TiAl 系金属間化合物の組織制御とその機械的性質

「制振実験装置」を使う実験

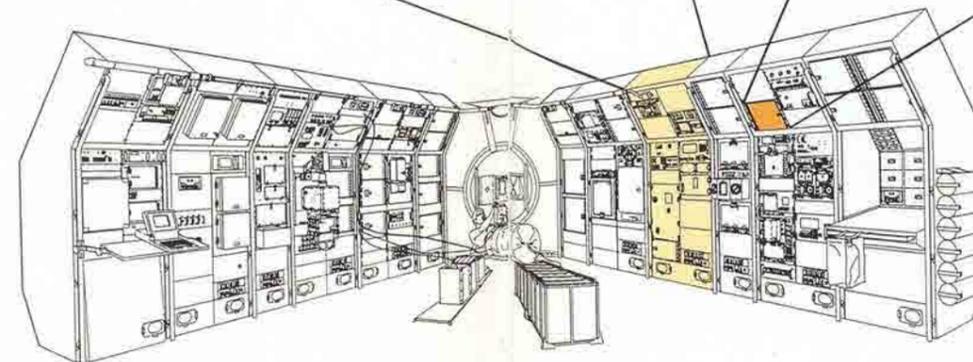
自然対流と拡散に対する重力加速度ゆらぎ ( $g$  ジッタ) の影響

微小重力下での熱駆動流の研究



実験装置ラック No.3の  
ラックストウェージコンテナ

制振実験装置



制振実験装置に関する実験装置  
(収納しておくもの)

- 対流拡散実験ユニット
- 熱駆動流実験ユニット
- カムコーダー
- など

# 搭載実験装置 水棲生物飼育装置

水棲生物飼育装置は微小重力環境下で小型の水棲生物を19日間以上にわたり飼育、維持することが可能な装置で、宇宙でこれらの生物の産卵、受精、胚発生などの生物学実験や生理学、行動学などの実験に使用できる。

本装置ではアクアリウムパッケージとフィッシュパッケージの2つの異なる飼育環境を同時に実現できる。また、微小重力環境下で給餌、注射などの生物試料への簡単なアクセスができ、拡大ビデオ画像による試料の観察やデータの収録が可能である。

## 仕様

生物試料収容水槽	アクアリウムパッケージ水槽 (カセット式)	内容量	240ml	4個
	フィッシュパッケージ水槽	内容量	3330ml	1個
生命維持機能	アクアリウムパッケージ、フィッシュパッケージを独立に制御			
—制御系	19日間以上			
—生命維持期間	人工肺によるキャビンエアとのガス交換			
—O <sub>2</sub> 供給/CO <sub>2</sub> 除去	15~25℃			
—温度制御	ゼオライト、活性炭吸着法によるアンモニア、有機物等の除去			
—排泄物除去	483W×434H×606D (mm)			
装置寸法/重量	約69kg			



水棲生物飼育装置

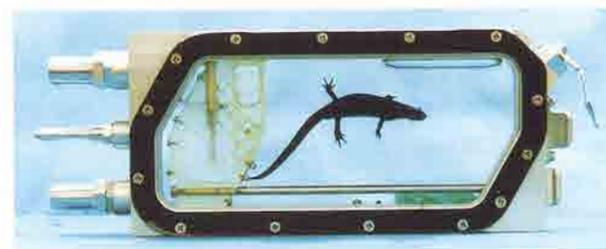
# 搭載実験装置 A A E U



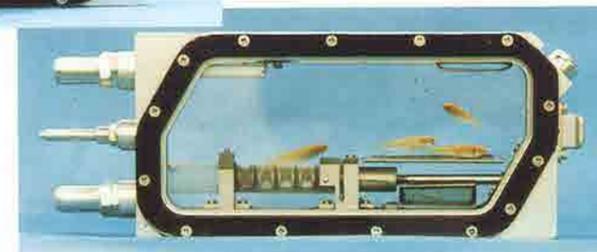
金魚を入れたフィッシュパッケージ



ドアを開けてアクアリウムパッケージを引き出す



イモリ用



メダカ用

アクアリウムパッケージ



イモリを引き寄せてホルモンを注射する (地上予備実験)

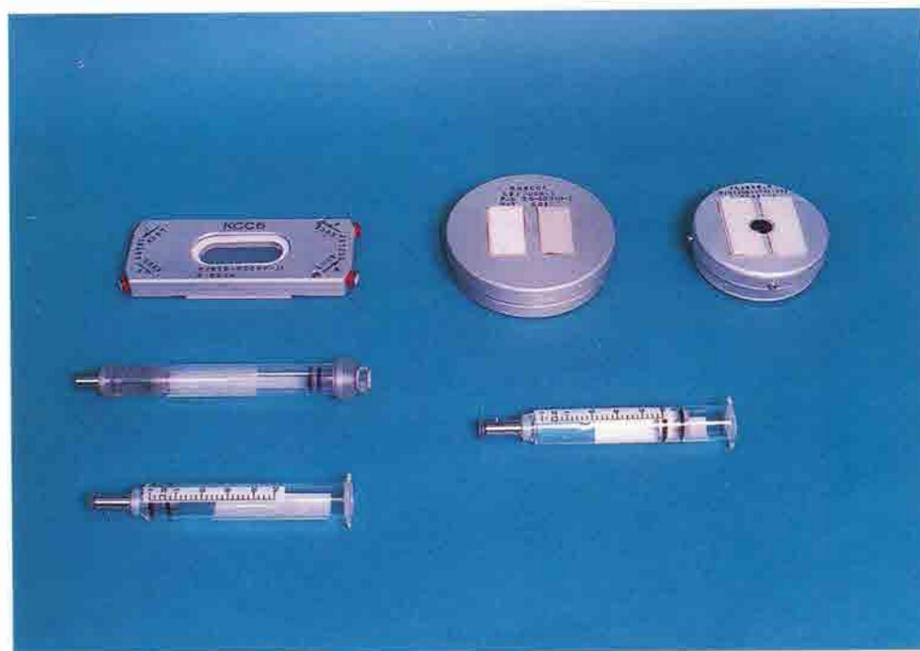
## 実験テーマ

愛称	テーマ名	代表研究者	掲載ページ
Goldfish	微小重力下における魚の前庭順応機構の研究	高林 彰 (藤田保健衛生大学)	22
AstroNewt	イモリの宇宙における産卵および受精卵の発生	山下雅道 (宇宙科学研究所)	24
Medaka	メダカの宇宙における交尾・産卵行動	井尻憲一 (東京大学)	23
Otoconia	微小重力下での重力感受器官の初期発生の研究	M. L. ヴィーダホルド (テキサス大学)	25

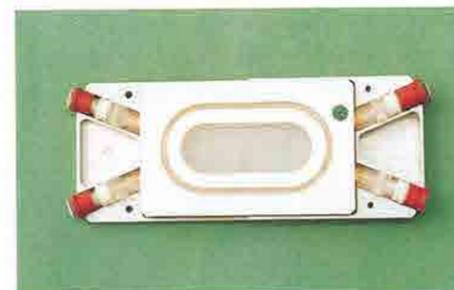
細胞培養キットは宇宙での動物・植物細胞および微生物などの培養実験に使用可能な汎用の小型培養実験器具をキットの形にまとめたもので、微小重力下での培養に必要な無菌的な液処理や細胞の観察、記録などを含めた本格的な実験を行うことが可能である。本キットは通常恒温恒湿槽（TEI）の中での培養実験に用いられる。また生物顕微鏡（BM）や画像記録のためのカムコーダーと組み合わせることも可能である。

仕様

細胞培養器	動物細胞、植物細胞および胚に適用可能 内容積 20ml（最大24ml） 中隔膜による二層構造、観察窓付き
植物細胞培養容器	植物の組織培養に適用可能 寒天培地型 100φ×30（mm）
粘菌培養容器	粘菌の培養に適用可能 4分割ろ紙式培地（大腸菌を含む）
培地容器	容積 20ml（最大 30ml、シリンジ型）
採液/排液容器	容積 20ml（最大 30ml、シリンジ型）
細胞固定液容器	有効容積 10ml、20ml、二重保護機能付き（シリンジ型）
トリプシン処理容器	最大バッファ容積 20ml トリプシンを粉末状態で保持し、使用直前に溶解、調製が可能
ソフトケース	4培養容器を収納可能
シリンジケース	16シリンジを収納可能



細胞培養キットの構成



細胞培養容器（上ブタをはずしたところ）



植物細胞培養容器



細胞を固定する



粘菌培養容器



細胞固定液容器

実験テーマ

愛称	テーマ名	代表研究者	掲載ページ
Osteogene	骨由来培養細胞の増殖・分化機能発現におよぼす微小重力の影響	糸井康宏（東京医科歯科大学）	26
Spore	宇宙空間における細胞性粘菌の分化	大西武雄（奈良県立医科大学）	27
Pembasis	植物胚芽の分化状態の安定性への重力関与の研究	A. D. クリコリアン（ニューヨーク州立大学）	28

# 搭載実験装置 電気泳動装置

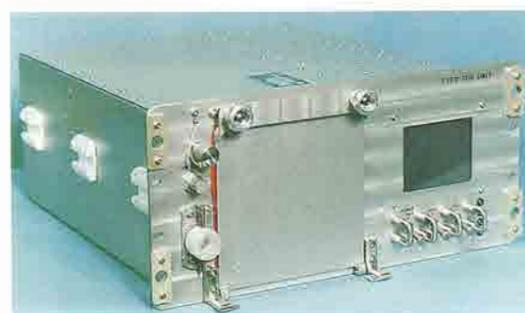
搭載実験装置  
F F E U

電気泳動装置は細胞、DNA、タンパク質あるいはこれらの混合物など、溶液中で電荷を持つ移動緩衝液中の生体試料に外部から電場を加え、中に含まれる成分の電荷の違いにより連続的に分離・精製（無担体電気泳動）する装置である。微小重力環境下においては比重差による沈降や熱対流による外乱が非常に小さいので地上用装置に比べて数倍厚い泳動槽を用いることができる。本装置の泳動槽厚は4mmである。

本装置は宇宙実験用にきわめてコンパクトに設計され、かつ自動化されている。サンプルはカセット式で宇宙飛行中でも容易に交換できる。泳動緩衝液タンクも実験条件に応じて交換可能である。試料の分離状態は吸光度モニターによりスペースラブ内と地上とで同時に確認でき、泳動試料は最大60本の分画に分取することができる。試料注入機構を備えており、安定した試料の注入が可能である。

## 仕様

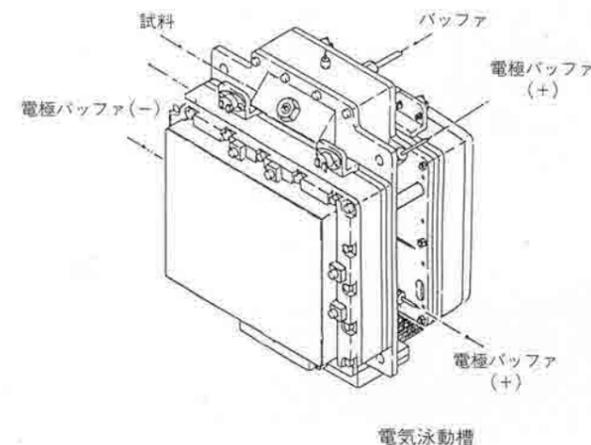
泳動諸元	
—有効泳動範囲	60W×100H×4D (mm)
—バッファ流速	2～10cm/分 (1cm/分間隔で設定可能)
—サンプル流速	1～5cm/分 (0.5cm/分間隔で設定可能)
—印加電圧範囲	最大600V (50V間隔で設定可能)
緩衝液容量	1200および1500ml/タンク (交換可能)
泳動試料	最大2ml/カセット (交換可能)
試料分取	最大60本/回 (最大5ml/本)
分離検出機構	吸光度検出、サブユニットのディスプレイモニターに表示 (吸収波長 254nm)
—感度	0～1、0～0.5、0～0.25、0～0.125
装置寸法/重量	
—本体	483W×533H×609D (mm) 約85kg
—サブユニット	483W×221H×609D (mm) 約12kg



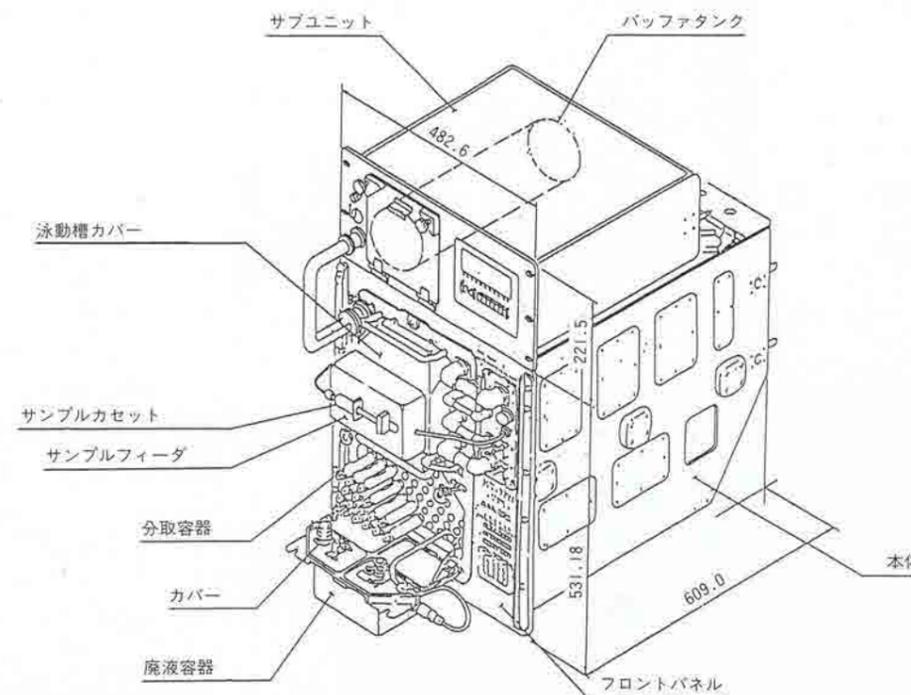
電気泳動装置サブユニット(バッファタンク収納部)



電気泳動装置本体



分取容器



## 実験テーマ

愛称	テーマ名	代表研究者	掲載ページ
Chromosome	電気泳動による線虫 <i>C. elegans</i> の染色体DNAの分離	小林英三郎 (城西大学)	29
Antibody	微小重力環境における高密度動物細胞培養液の分離精製実験	奥沢 務 (日立製作所)	30
Pituitary	ラット脳下垂体細胞および細胞内顆粒の電気泳動分離実験	W.C.ハイマー (ペンシルバニア州立大学)	31

放射線モニター装置はスペースラブの船内に達する高エネルギーの宇宙放射線をリアルタイムで計測するための装置である。この装置の特長は、IML-1や「ふわっと'92」で用いられた固体飛跡検出材による計測と異なり、宇宙放射線の性質、たとえば入射時刻、入射方向、エネルギースペクトルなどをリアルタイムで計測し、伝送することが可能なことである。

この装置は、コントロールユニットとセンサー部およびサンプルホルダーで構成されている。コントロールユニットは実験装置用ラックに搭載され、センサー部からの計測信号処理や感度およびバイアスの調整などの計測制御機能と、外部へのインターフェイス機能をもつ。センサー部は粒子放射線のエネルギー・符号の大きさを直接計測できる分光型センサーを持っており、スペースラブのいろいろな場所にはりつけることができる。生物試料をセットしたサンプルホルダーはセンサー部の中のセンサーの上部に固定される。

仕様

検出粒子の線種	
入射核種 (イオン)	検出エネルギー/核 (MeV) 核電荷に対して
He	10-55
C	18-110
Ne	24-130
Mg	26-160
Si	28-180
Ca	34-210
Fe / Ni	38-210

検出開口角	120度×120度
電荷分解能	核電荷40以下において0.1acu
伝送データ	入射時刻、入射方向、エネルギースペクトル
装置寸法/重量	
ーコントロールユニット	483W×133H×300D (mm) 約9kg
ーセンサー部	320W×160H×350D (mm) 約10kg



コントロールユニット



サンプルホルダーにセットする生物試料



センサー部



サンプルホルダー

IML-1および「ふわっと'92」で用いたものと同じドシメータを今回も搭載する。

放射線モニター装置の測定データをこのドシメータで得られたデータと比較して、放射線モニター装置の性能を評価する。



ドシメータ

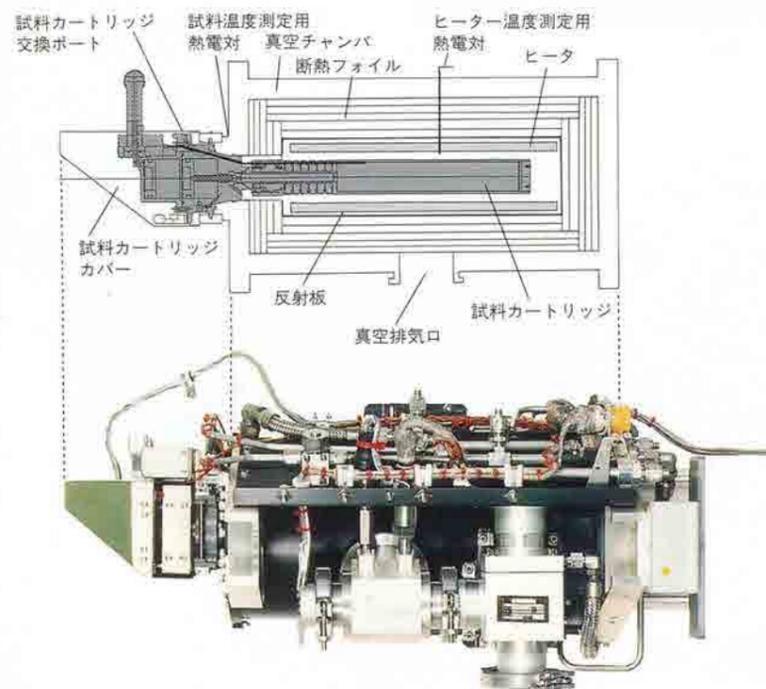
実験テーマ

愛称	テーマ名	代表研究者	掲載ページ
Radiation	宇宙船内における重粒子線による線量計測とその生物効果実験	道家忠義(早稲田大学)	32

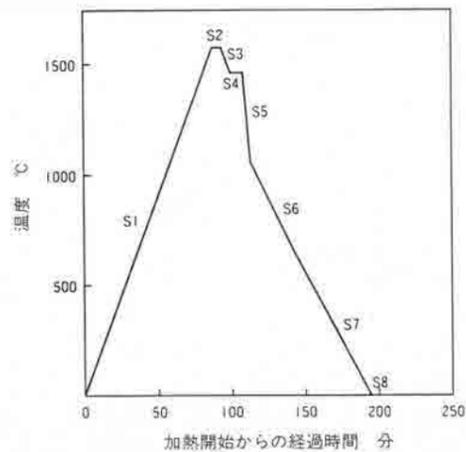
高温加圧型電気炉は、宇宙の微小重力環境を利用して、材料の溶融・凝固実験や焼結実験などを実施できる実験装置である。  
この装置は、高温加圧型電気炉本体、制御装置、ガス供給装置、バルブアクセスパネル、真空排気パネルなどから構成されている。実験試料は試料カートリッジに封入して電気炉本体に組み込む。試料カートリッジは宇宙飛行中に交換が可能で、1回の飛行で複数の実験を実施できる。試料カートリッジには通常タイプのほかに試料加圧機構付きのタイプがある。加圧機構付き試料カートリッジでは、ガス供給装置から供給されるヘリウムガスの圧力で加圧ロッドを駆動することにより、実験中に試料を加圧することができる。この装置の運転は試料カートリッジの装着および取り出し以外は自動化されており、あらかじめ設定した温度プロファイルにしたがって、加熱や冷却などが行われる。冷却時には、ガス供給装置からヘリウムガスを炉内へ導入して、試料を急速に冷却することも可能である。

仕様

加熱温度	最高温度 1600°C
加熱特性	室温から1600°Cまで80分以内
冷却特性	1600°Cから45°Cまで240分以内 (ヘリウムガスで急速冷却したとき)
試料温度均一性 (軸方向)	
— 試料長さ100mm に対して	最高温度と最低温度の差 5°C以下
— 試料長さ160mm に対して	最高温度と最低温度の差 8°C以下
温度制御	
— カートリッジ温度設定精度	±3.0°C
— カートリッジ温度安定性	±1.5°C
試料寸法	最大26φ×168 (mm)
試料加圧力	最大6.5kg/cm <sup>2</sup> (絶対圧)
装置寸法/重量	スペースラブ実験装置用ダブルラックの1/2に相当 約175kg



高温加圧型電気炉本体

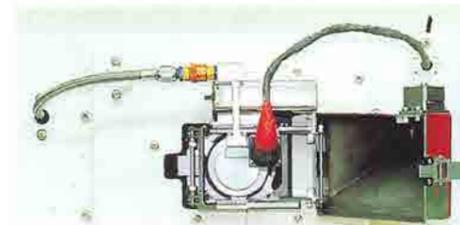


実験温度プロファイルの一例

- S 1 : 1530°Cまで、80分以下で加熱。
- S 2 : 1530°C、5分間保持。終了とともに試料加圧開始。
- S 3 : 10°C/分で降温。
- S 4 : 1440°Cにて10分保持。終了とともにヒーター電源OFF。
- S 5 : Heガス炉内導入 (100terr)。ガス冷却 (7分間)。
- S 6 : 炉内真空排気。(真空冷却 (40分間)。
- S 7 : Heガス炉内導入 (100terr)。ガス冷却 (150分間)。
- S 8 : 炉内真空排気 (1分間)。



真空排気パネル  
高温加圧型電気炉本体とスペースラブの真空ラインをつないでいる。



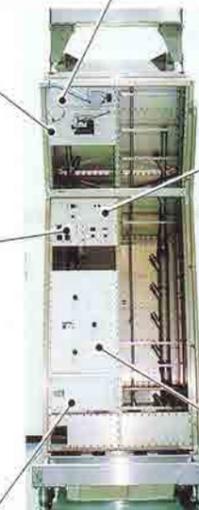
高温加圧型電気炉本体  
試料を加熱・冷却する。試料カートリッジはここに挿入される。



制御装置—実験部  
温度プロファイルにしたがって実験を制御する。



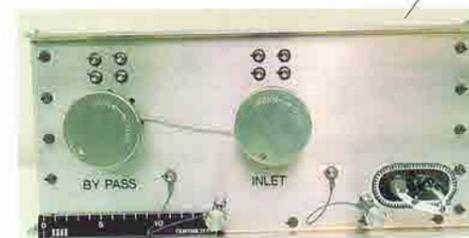
制御装置データインターフェイスユニット  
高温加圧型電気炉本体とスペースラブのデータラインをつないでいる。



実験装置ラック No. 7



ガス供給装置  
試料の冷却や加圧などに必要なヘリウムガスを供給する。



バルブアクセスパネル  
冷却水系統の手動バルブがある。

実験テーマ

愛称	テーマ名	代表研究者	掲載ページ
Sintering	液相焼結における重力の効果	R.M.ジャーマン(ペンシルバニア州立大学)	34
Marangoni	多元系化合物半導体融液の均一分散・混合化	平田 彰(早稲田大学)	35
Intermetallics	微小重力下における TiAl 系金属間化合物の組織制御とその機械的性質	佐藤 彰(金属材料技術研究所)	36

制振実験装置は、宇宙実験室内部での搭乗員作業やほかの実験装置によって発生する加速度ゆらぎ(gジッタ)が、流体物理実験のような良質の無重力環境を必要とする系にどのような影響をおよぼすかを調べることができる実験装置である。

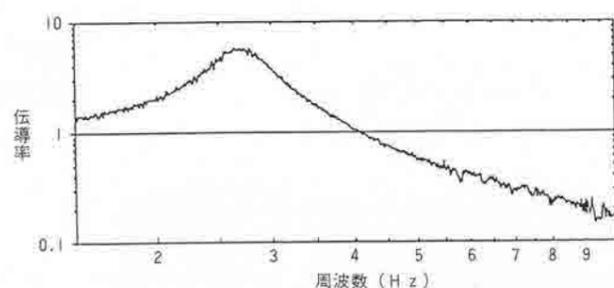
この装置は、防振機構、加速度計測装置、および実験ユニットで構成されている。防振機構は、シリコンゲルによってgジッタに対して受動的に制振を行う機構で、必要に応じてロックすることが可能なので、内部に保持した実験ユニットで行う実験結果を防振状態と非防振状態で比較することができる。実験ユニットは、宇宙飛行中に交換可能で、IML-2ミッションでは対流拡散実験ユニット(実験ユニット1)と熱駆動流実験ユニット(実験ユニット2)の2つの実験ユニットを準備している。実験ユニット内の状態は、観察窓をとおして観察することができ、ビデオカメラ等を用いて収録することが可能である。加速度計測装置は、実験中の加速度環境を、防振機構に保持されたユニット部分とその外部(スペースラブ環境)の2カ所で同時に計測し、メモ리카セットにデータを保存する。この装置は、スペースラブ内のラックストウエージコンテナに収納することができ、このコンテナ内に入れたままで実験が実施される。

仕様

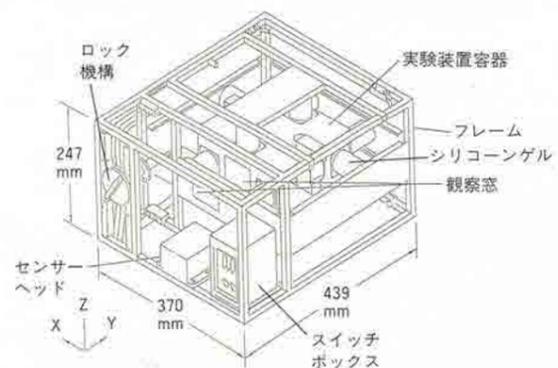
防振機構	粘弾性体の複合防振機構で、外部からの振動を制振する
実験装置容器	実験装置を収納する
一収納体積	最大190×200×100 (mm)
一収納重量	最大3.5kg
加速度計測装置	
一計測範囲	± 4g
一最大分解能	10 $\mu$ g
一サンプリング周波数	50Hz
一メモリ容量	1 Mbyte /メモ리카セット
装置寸法/重量	370W×247H×439D (mm) 約15kg



防振機構



X軸方向の振動に対する防振特性



加速度計測装置

実験ユニット1 対流拡散実験ユニット

仕様

液体試料を封入した容器(ベッセル)の一面を加熱して内部に対流を生じさせ、その様子を観察するための装置	
試料加熱	ヒーター加熱
試料温度	ベッセル内8カ所を温度センサーで計測し、LEDディスプレイに表示
試料観察	観察窓をとおしてビデオカメラなどで撮影可能
観察用照明	シート状白色EL光源
電源	アルカリマンガン乾電池



実験ユニット2 熱駆動流実験ユニット



仕様

液体試料を封入した2つの容器(ベッセル)を連結し、それぞれを加熱、冷却して毛細管流により液を移送し、液体の様子を観察するための装置	
試料加熱/冷却	ペルチエ素子による加熱/冷却
試料温度	ベッセル内2カ所を温度センサーで計測し、LEDディスプレイに表示
試料観察	観察窓をとおしてビデオカメラなどで撮影可能
観察用照明	LEDランプ
電源	アルカリマンガン乾電池

実験テーマ

愛称	テーマ名	代表研究者	掲載ページ
Convection	自然対流と拡散に対する重力加速度ゆらぎ(gジッタ)の影響	東久雄(航空宇宙技術研究所)	37
Capillary	微小重力下での熱駆動流の研究	古川正夫(宇宙開発事業団)	38

恒温恒湿槽 (TEI)

恒温恒湿槽は熱電素子による加熱、冷却の双方向制御が可能なインキュベータであり、温度、湿度、CO<sub>2</sub>ガス濃度を同時に制御できる。設定温度を変えることにより、細胞培養実験、生物飼育実験、タンパク質結晶成長実験など、恒温あるいは恒湿を必要とする種々の実験に使用することができる。

本装置は宇宙飛行中でも高温モード (37℃) と低温モード (22℃) との切り替えが可能である。高温モードではCO<sub>2</sub>インキュベータとして使用でき、細胞培養実験にあたって地上と同一の培養条件を整えられる。低温モードは22℃付近の温度を必要とする実験、たとえば結晶成長実験、植物細胞培養実験、生物飼育実験などに使用できる。

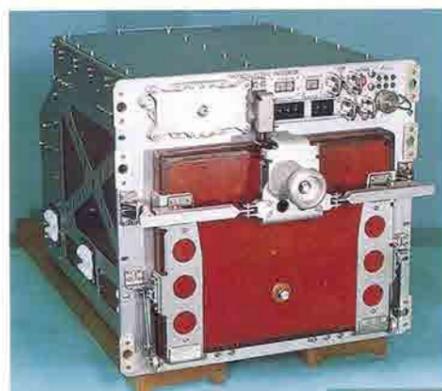
IML-2 ミッションでは、細胞培養キットおよび電気自動装置を用いた実験の支援装置として使用する。

仕様

設定温度	
— 高温モード	37℃
— 低温モード	22℃
温度制御精度	±1℃
湿度制御範囲	60% RH
湿度制御精度	±10% RH
CO <sub>2</sub> 設定濃度	5体積%±1体積%(高温モード時のみ)
有効収容容積	28リットル
装置寸法/重量	
— 本体	483W×444H×606D (mm) 約49kg
— CO <sub>2</sub> ガス供給ユニット	483W×221H×444D (mm) 約15kg



CO<sub>2</sub>ガス供給ユニット



恒温恒湿槽



ドアを開いた状態

生物顕微鏡 (BM)

生物顕微鏡は双眼・倒立型・位相差顕微鏡で写真撮影用にFマウントのインターフェイスを備えている。観察ステージには細胞培養容器、植物細胞培養容器、粘菌培養容器を固定でき、培養状態の試料を直接観察することが可能である。

IML-2 ミッションでは、細胞培養キットを用いた実験の支援装置として使用する。



生物顕微鏡

カムコーダー

カムコーダーはNASAの装置で、市販の高機能8ミリビデオカメラをスペースシャトル搭載用に一部変更してあるが、機能は市販品とほぼ同じである。

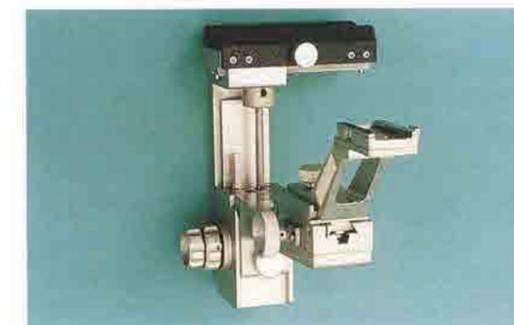
このカムコーダーは実験専用ではなく、ミッション中のさまざまな撮影に汎用的に使用される。日本の実験では水棲生物飼育装置、細胞培養キット、制振実験装置の実験にマクロレンズを用いて使用する。



カムコーダー

仕様

ステージ移動範囲	X、Y方向 ±30mm
焦点調節範囲	ステージ上面+9mm まで
接眼レンズ倍率	10倍
対物レンズ倍率	4倍、10倍、20倍、40倍
視野	25° (100倍)
フィルター	緑色干渉フィルター使用可能
撮影用インターフェイス	Fマウント (F-Cマウントコンバータの使用も可能)
光源	タングステン照明、50W
消費電力	58W (28VDC)
装置寸法/重量	258W×489H×412D (mm) 約11kg



接写撮影用観察微動台

水棲生物飼育装置のアクアリウムパッケージ水槽および細胞培養キットの培養容器をこの観察微動台に固定して、試料を接写撮影する。欧州宇宙機関が開発したバイオラック用タイプ1容器にも使用できる。

仕様

システム	
— 信号方式	NTSC方式準拠
— 使用可能ビデオカセット	E6/P6タイプ (Hi8および8ミリビデオカセット)
— テープ速度	約1.43cm/秒
— 録画/再生時間	120分 (P6-120/E6-120使用時) (SPモードのみ)
— 撮像素子	1/2インチ CCD 固体撮像素子 総画素数41万 有効画素数38万
— レンズマウント	VLマウントシステム準拠
— ビューファインダー	電子ビューファインダー (0.7インチ白黒)
— マイク	エレクトレットコンデンサーマイク (ステレオ/モノラル切り替え可)
— 焦点調整	TTL自動焦点、マニュアル調整可
— 色温度切り替え	オート/ホワイトバランスセット
— 最低被写体照度	7 Lx
(F1.4レンズ装着時)	デジタルスローシャッター (1/8秒) 使用時は1 Lx
— 被写体照度範囲	7~10万 Lx
(F1.4レンズ装着時)	
— 絞り	オートアイリスサーボ方式(マニュアル調整可)
電源	
— 電源電圧	DC 6V (公称)
— 消費電力	8.6W(フルオートモード録画・合焦時)
動作温度	0~40℃
装置寸法/重量	170W×165H×237D (mm) 1.4kg (本体のみ)

# Goldfish 微小重力下における魚の前庭順応機構の研究

代表研究者 高林 彰 (藤田保健衛生大学)

地上では、動物は常に重力を基準として姿勢と運動を制御しており、重力センサーである前庭耳石器官のはたらきを中心に、視覚や体性感覚を総合して姿勢調節を行っている。そして、まったく新しい環境の微小重力化におかれると、時間が経つにつれて前庭感覚の変化に順応していく。そこで、人間においては順応の過程で宇宙酔いの症状が現れてくることもある。「ふわっと'92」では2匹の鯉を利用して、耳石器官が微小重力環境でどのように姿勢調節に関与しているかがまず調べられた。IML-2では金魚を用い、その姿勢や行動を指標として、姿勢調節メカニズムの時間的変化、すなわち微小重力下における順応過程と地上の通常重力環境へ再順応する過程を明らかにすることを目的とする。

金魚はいろいろな姿勢、行動を示すが、背光反応は視覚と重力感覚の相互作用を観察するのに適している。図1にその特徴を示す。地上の自然環境では、重力のはたらく方向が下で、光のくる方向が上である。このような環境では、金魚の

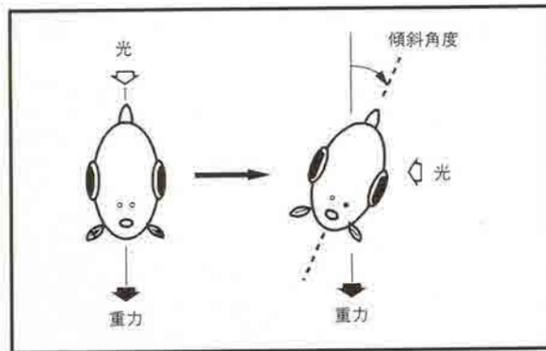


図1 金魚の背光反応

姿勢は腹を下に、背を上に向けている。もし、光を横から照射すると、金魚は光の方向に背を向けようとするが、下向きの重力感があるため、完全に光に背を向けることはない。重力感知のための最も重要な器官は、左右両側にある前庭器官である。この器官を両側とも摘出すると、背光反応は完全に光の方向に依存する(図2)。しかし、この傾斜角度は時間が経つにつれて減少し、6ヵ月も経過すると一定のレベルに落ち着く。一方、片側の前庭器官のみを摘出した金魚の背光反応は、手術側に大きく傾斜し、正常側への傾斜は少し増大する(図3)。しかし、時間の経過とともに、手術側への傾斜角度は減少し、また、正常側への傾斜角度はほとんど変化せず、結果的に左右のバランスがとれるように順応する。ところが、飛行機の放物線飛行によって得られる短時間(約20秒間)の微小重力下で背光反応を調べると、これらの金魚の傾斜角度は90度に近くなり、視覚だけで姿勢が制御されているようにみえる。

宇宙実験では、片側の前庭器官を摘出してから6ヵ月経過した金魚を2匹、両側の前庭器官を摘出してから6ヵ月後の金魚を1匹、片側の前庭器官を摘出してから2週間後の金魚を2匹および正常な金魚1匹の計6匹を宇宙飛行させ、その間の背光反応の変化および飛行後の背光反応をビデオで撮影して、重力環境の変化にどのように順応するかを解析する。前庭系を主にした感覚系の順応のメカニズムを明らかにすることは、宇宙医学の大きな問題点のひとつである宇宙酔いの発生メカニズムの解明とその対策に有用な情報を与えることが期待される。また、この実験により、両側前庭器官間あるいは他の感覚との相互作用を解明できるものと期待される。

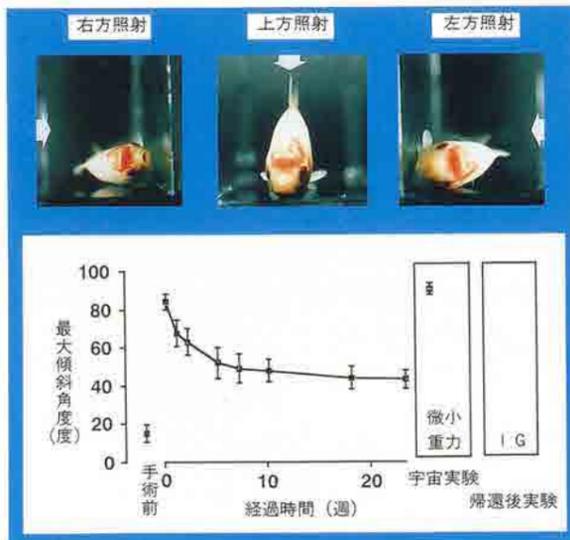


図2 両側の前庭器官を摘出した金魚の背光反応の変化

微小重力での最初のデータは飛行機の放物線飛行実験で得られたもので、宇宙実験および宇宙飛行後の実験によってこのあとのデータが得られる。

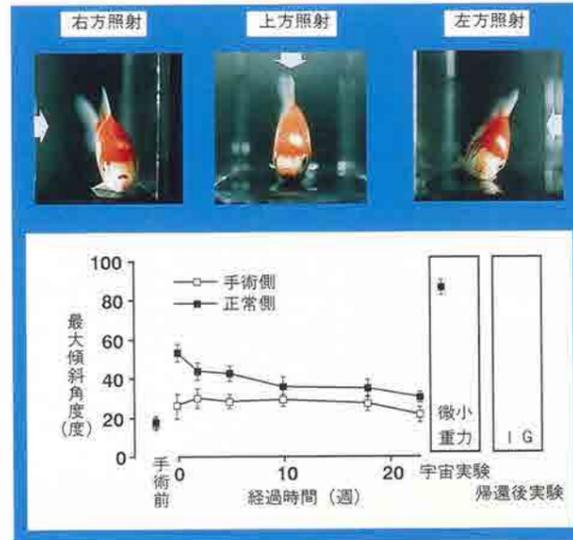


図3 片側の前庭器官を摘出した金魚の背光反応の変化

# Medaka メダカの宇宙における交尾・産卵行動

代表研究者 井尻憲一 (東京大学)

この実験ではメダカのはいった水槽を宇宙へ持って行き、微小重力下でメダカが産卵行動をとれるかどうかを試すとともに、その受精卵が微小重力下で正常に発生する(受精卵から、からだができあがっていく)か否かを調べる。

一般に魚は微小重力下ではぐるぐると回転運動を行うことが知られている。ジェット機を放物線を描くように飛行(放物線飛行)させることで約20秒間の微小重力状態が作り出せる。代表研究者らはこの方法で多くのメダカをテストし、微小重力下でまったく回転せずふつうに泳ぐ微小重力に強いメダカの系統を探した。しかもこの性質は、親から子へ、そして孫へと遺伝する。そこでこの系統のメダカを用い、宇宙での行動をくわしく調べるとともに、産卵行動および産卵された卵が発生していくようすを観察する。

地上で産卵を続けている雌雄2ペア(計4匹)のメダカを水棲生物飼育装置に入れ、スペースラブで飼育する。クルーは4日ごとに給餌機構を動かし、新しい餌を補給する。産卵を継続させるために14時間の明期と10時間の暗期の明暗サイクルを繰り返し、水温は25℃に設定しておく。産卵を続けているメダカは毎朝1回、明期開始後2時間以内に産卵行動をとる。クルーはその朝に産卵が行われたことを雌の腹部に付着している受精卵を確認し、翌日の明期開始後に水槽にビデオカメラをセットして、メダカの様子を2時間にわたって撮影する。これにより、産卵行動が確実に記録される。産卵された卵は水流によって水槽の片隅にある卵隔離用の区画に運ばれるので、親メダカに食べられることはない。さらに、卵の発生していく状況を日々を追って観察し、これもビデオにおさめる。

メダカの卵はそれを囲む膜(卵膜)が透明なだけでなく、ふ化するまではからだの表面もほぼ透明で、たとえば内臓ができていくようすも外からくわしく観察できる。微小重力下で脊椎動物の受精卵が正常に発生し、ふ化(誕生)するかについては、まだはっきりとした結論が出ていない。これは地



メダカの雌雄卵をつけているのが雌(下の魚)

球上で重力が発生の過程にどのように作用しているかを知ろうえでも重要な研究テーマである。

メダカの卵は産卵後8日間でふ化する(25℃の場合)。今回の宇宙滞在期間は約2週間と長いので、その後半には卵膜からふ化した稚魚の行動も観察できるはずである。このメダカは遺伝的に均一な純系であるため、実験結果にバラツキが少なく、宇宙で発生したメダカに異常が生じたときにも、原因を解明しやすい。

地上に回収した稚魚は、行動を観察するとともに、その後も成長させる。宇宙旅行をした4匹の成魚については、雌は地上で飼育していた雄と、逆に雄は地上で飼育していた雌と一緒にして、地上で産卵を継続させる。この場合、産卵された卵が発生するかを調べることで、微小重力下において成魚のからだの中で生殖細胞(卵子や精子)が正常に形成されたか、またその形成過程のどの時期が微小重力の影響を受けやすいかが判定できる。

将来の人類の宇宙生活を考えるとき、魚類の養殖はタンパク質源確保の点からも重要である。とくに、わが国は肉肉から各種加工品を作る技術に優れており、各国からもおおいに期待されている。しかし現時点で、具体的に宇宙でどのような養殖方法が可能であるかはまったく白紙の状態であり、この実験が宇宙での魚類養殖実現への第一歩となることが期待される。



メダカの胚の発生



# AstroNewt イモリの宇宙における産卵および受精卵の発生

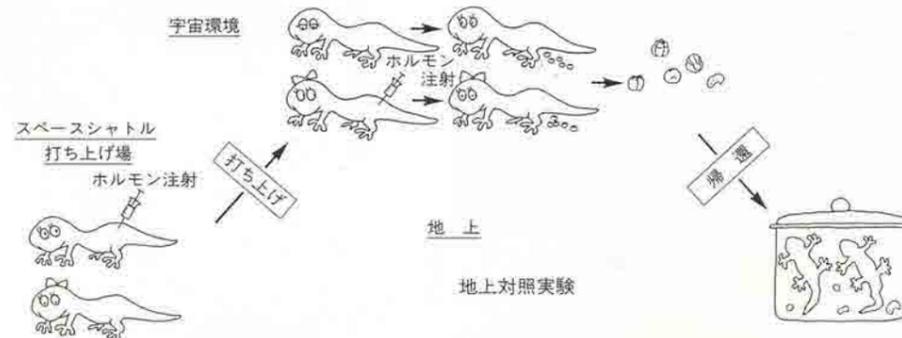
代表研究者 山下雅道 (宇宙科学研究所)

アストロニュート (Newt=イモリ) 実験とよばれるこの実験は、Astronaut (宇宙飛行士) など人間を含めた生物の活動に重力がどのような役割をはたしているか、特に動物の初期発生(受精卵から、からだができあがっていく過程の初期) への重力の影響を調べる。細胞は生命の基本単位である。細胞が重力を感知し利用することがわかれば、重力の生命現象への根本的な作用を明らかにすることになる。ところで重力は質量に対して作用するため、質量や密度差が大きければその作用も大きい。いろいろな細胞の中で両生類の卵は大きく、質量も大きい。さらに卵は極性をもち、密度の異なる茶褐色の動物極と卵黄を多く含むクリーム色の植物極は重力によりそれぞれ上と下に向く。重力は細胞にとって重要な作用をおよぼすのか、生物の生活史のなかで最もダイナミックな過程である初期発生に何らかの役割をはたしているのかという設問に答えるのが、この AstroNewt 実験である。過重力(地上の通常重力より大きい重力) に受精卵をさらす実験から、受精卵の第一卵割以前、すなわち単一の卵細胞が2つに分裂する以前に重力の影響の大きいことがわかっている。これまでの両生類卵の宇宙実験の多くは、少し発生の進んだ卵を宇宙に送っているが、その場合は微小重力の影響が小さい。したがって、宇宙で卵を受精させ、第一卵割以前の卵を微小重力にさらすことが実験のなめとなる。

イモリはよくヤモリ (は虫類) とまちがえられるが、両生類有尾目一種で、きれいな水の流れや水田に生息する。日本のアカハライモリ (Cynops pyrrhogaster) は、春に加えて秋にも婚姻行動をする。雌は体腔内に精子のうを蓄え、春に



アカハライモリ



冬眠からさめるとその精子を使って卵を受精させ産卵する。その卵は直径が約2 mmもある大きな単一の細胞である。卵は細胞分裂、細胞分化を経ていろいろな組織や器官を形成していく。

イモリは何か所かの野外で採集された後、冬眠状態に維持されスペースシャトルの打ち上げ場に運ばれる。IML-2ではイモリ胚の平衡石の発達を調べる実験も行われるため、地上で産まれた卵も水棲生物飼育装置 (AAEU) に搭載される。打ち上げ場では、この卵の準備も兼ねて、イモリの抜き取り検査を行い、最良の雌イモリの集団を選び出す。3つのイモリ用AAEUカセット (水槽) のうちの1つには、地上でホルモン処理をしたイモリ (2匹を予定) を搭載する。他の2つのカセットには各1匹のイモリを搭載し、これらには宇宙でホルモン処理をする。このように2群のイモリを用いるのは、ホルモン処理による雌イモリの体内での卵の成熟過程が地上の通常重力環境で進行する場合と微小重力状態で始まる場合を比較する目的他に、次の要素を考慮するためである。シャトルの打ち上げが延期された場合に地上処理群は地上でかなりの数の卵を産んでしまう危険がある。一方、宇宙ではカセットの中のイモリに注射するむずかしさがある。打ち上げ後、クルーは地上処理群がすでに卵を産んでいないかをなるべく早い時期に調べ、イモリが水草だと思って卵を産みつけるプラスチックテープを広げる。宇宙処理群の2匹は、カセット前面に体を引き寄せて、ホルモン注射をする。1日おきにイモリは観察され、卵が産みつけられると、カセットの中の引き寄せ機構が中央に動かされ、卵を親から隔離する。卵の発生がどのように進むかを、卵をビデオで拡大撮影して記録する。これを飛行実験と並行して行われる地上対照実験の結果と比較する。卵は地上への回収後、一部をすぐ固定して、顕微鏡で組織を観察する。一部はそのまま発生を進行させて、ふ化した幼生の形態や行動を調べる。親のイモリは解剖して宇宙環境のさまざまな影響を解析する。イモリの卵はホルモン処理後2、3日で産まれる。約5日で尾芽胚となり、10日で前肢が出はじめ、約20日でふ化する。IML-2では、宇宙での産卵、第一卵割から細胞が分化し各器官が形成されるまでのイモリの発生にとって重要な期間に卵が微小重力にさらされることとなり、動物の初期発生への重力の影響を明らかにすることができる。

# Otoconia 微小重力下での重力感受器官の初期発生の研究

Early Development of a Gravity-Receptor Organ in Microgravity

代表研究者 M. L. ヴィーダホルド (テキサス大学)  
M. L. Wiederhold (University of Texas)

すべての脊椎動物と大部分の無脊椎動物は重力を感知する特別な器官を持っている。この器官の中では、平衡石(耳石)がその周囲の有毛細胞から出ている感覚毛の上ののっている。平衡石はまわりにある体液より密度が大きいので、重力によって沈む。すると、平衡石の沈んだ位置にある感覚毛の束が曲げられ、その毛が出ている有毛細胞が脳につながる感覚神経を興奮させる。脊椎動物では前庭器官がこのような重力感受器官で、内耳(耳の内部)にある。脊椎動物の平衡石はたくさんの微細な炭酸カルシウムの結晶のかたまりで、有毛細胞の分泌物から成る平衡石膜に包まれて、前庭器官の中の平衡斑と呼ばれる重力を感受する部分を覆っている。

平衡石は動物が成長するにしたがって大きくなるが、何がこの石の形成をコントロールしているのかは解明されていない。もしこのプロセスがある理想的な重量の平衡石を作るようにコントロールされているとすれば、石が重量を持たない(質量はあるが)宇宙では、平衡石の重量コントロールができないから大きな石が作られるだろう。ロシアの科学者は宇宙で産卵されたカエル卵の胚(ふ化する前の時期)では平衡石が大きいと報告しているが、そのような変化はないという報告もあり、平衡石やそれに関係する感受細胞、脳内にある神経繊維のつながりなどが宇宙という重力の小さい環境でどのように形成されるかは明らかになっていない。そこで、この実験ではこれらの形成のメカニズムを調べることを目的とする。

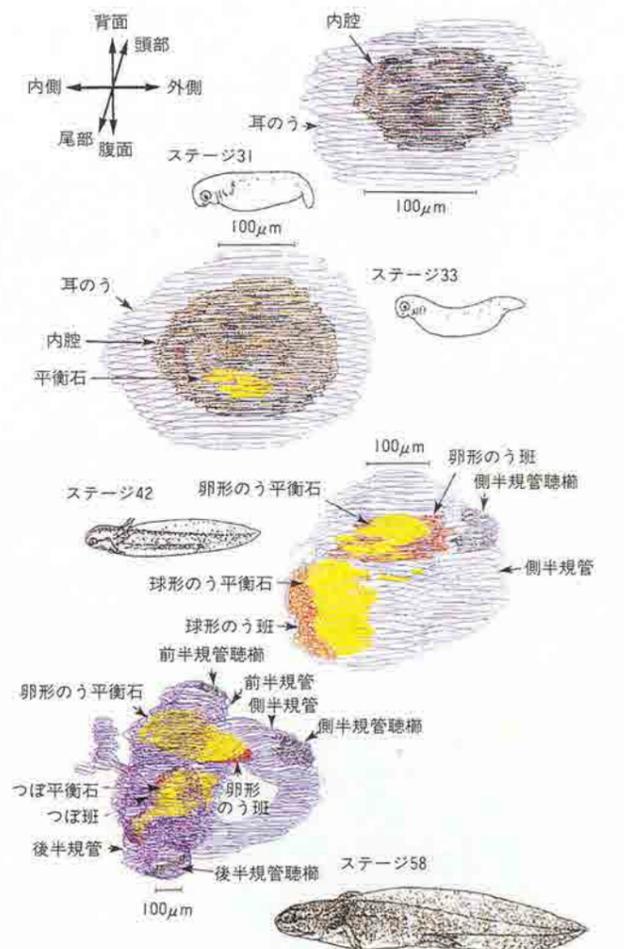
この実験では、アカハライモリ (Cynops pyrrhogaster) を使って重力感受器官(前庭器官)および角加速度感受器官(半規管)を研究する。この動物はミッション期間(13日間)内に前庭器官がほぼ完全に形成されるため、この実験にふさわしい試料である。また、メスのイモリはホルモンを注射されると体内で受精を行い、産卵する。そこで、宇宙飛行中にメスにホルモン投与を行うと、微小重力環境下で自然に受精し、初期発生した胚を使って重力感受器官の発生を調べることができる。

宇宙実験の予備実験として、代表研究者らは地上でのイモ



ステージ44のイモリ幼生の卵形のう斑

りの前庭器官の発生過程を調べている。下図は4つの発生段階(ステージ)におけるイモリの前庭器官の断面図をコンピュータで三次元的に再構成したものである。ステージ31(産卵後7日齢)には耳のうというのちに内耳になる球構造の器官がみられる。この段階ではまだ平衡石は形成されていない。ステージ33(9日齢)では最初の平衡石(図中の黄色で表した部分)が観察される。ステージ42(15日齢)では卵形のうと球形のうとが分かれて、それぞれに平衡石がみられる。卵形のうは水平面上の運動の際に、球形のうは垂直の運動の際におもに働く。また、最初の半規管(側半規管)が現れる。ステージ58(約30日齢)までにすべての三半規管(半規管の膨大部にある加速度を感受する部分)および2つの平衡石器官(卵形のうと球形のう)が完全に形成され、ほとんどイモリ成体の前庭器官と同じになる。写真はステージ44のイモリ幼生の卵形のうの平衡斑(卵形のう斑)である。感覚毛の束が2つの有毛細胞から平衡石を包む平衡石膜に向かって出ているのがわかる。平衡石は光学的に複屈折を持っているため、偏光でみると写真のように黄色にみえる。



イモリ胚および幼生の耳のう断面の三次元的再構成図4つとも同じ方向からみた図である。

# Osteogene 骨由来培養細胞の増殖・分化機能発現におよぼす微小重力の影響

代表研究者 桑井康宏 (東京医科歯科大学)

宇宙飛行にともなう医学上の問題点として、骨からカルシウムが溶け出したり、骨密度が低下したりすることなどが指摘されている。スペースシャトルを利用した宇宙実験においても、宇宙空間でラットの飼育を始めると、早い時期に大腿骨などに変化が生じ、骨成長の抑制、骨形成にかかわるタンパク質産生低下、あるいは骨のせい弱化が起きることが報告されている。

正常な骨の成長は、古い骨組織の溶解と新しい骨組織の形成との調和のとれた骨代謝によって営まれる。宇宙空間ではこの調和がくずれ、骨量の減少が起きる。しかも神経系・前庭系あるいは循環系などの生理機能と異なり、一度起きた骨塩漏出は宇宙飛行期間中、もともどもどることなく持続し、骨密度の低下が続くので、問題は深刻である(図1)。このように宇宙空間で骨代謝が著しく変化をうけるメカニズムはまだ明らかにされていないが、骨代謝の主要な役割を担う骨芽細胞および破骨細胞の機能、あるいは両者の相互作用が重力をとりまく環境変化により何らかの影響を受けるためとの見方が有力である。

地上でラットの大腿骨の骨髄を無菌的に抽出し、均質なけん濁液にしたのを培地とともにシャーレにまき、37℃、5%炭酸ガス供給下で培養すると、骨芽細胞あるいは破骨細胞の特徴をもつ細胞群が増殖し、全面に広がる。同時にコラーゲンなどの細胞外基質(細胞の間を満たす物質)を形成し、や

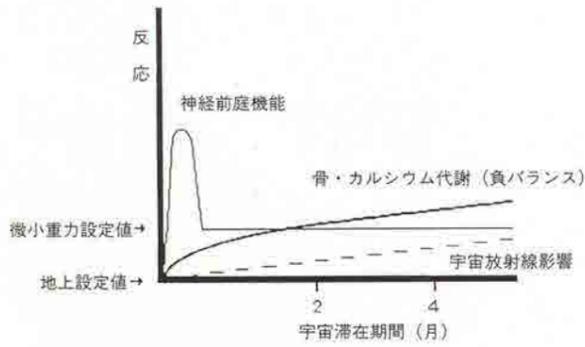


図1 ヒトの宇宙滞在と生理機能変化

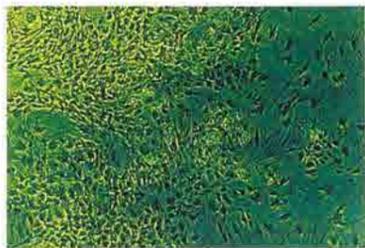


図2 骨由来培養細胞の位相差顕微鏡写真

がてカルシウムなどが沈着する石灰化が始まって、骨特有の分化現象(細胞などが形態的・機能的に特殊化すること)がみられるようになる。宇宙実験に適した特殊な容器を用いてこの状態を培養下で再現し、骨成長にかかわる骨芽細胞の増殖および分化過程を追跡する。宇宙での培養3日目および7日目に細胞内遺伝子の転写産物であるメッセンジャーRNA(mRNA)を抽出し、地上に帰還する。地上対照群も同様にして行う。宇宙飛行実験群および地上対照群のそれぞれすべてのmRNAより相補的DNA(cDNA)を作製する。両群より得られたcDNAを相互に差し引きハイブリダイズさせる(2重らせんを作らせる)ことにより、宇宙空間で特異的に発現または抑制される遺伝子cDNAを単離する(図3)。同遺伝子の構造と機能を解析することにより、骨代謝に関与する重力の役割あるいは微小重力の影響について細胞の分子レベルで作用のメカニズムを解明することがこの実験の目的である。

地球上生物は数十億年にわたり、重力を必須の外的要素として受け入れ進化してきた。したがって地上で生物に対する重力の役割を完全に理解することは非常に困難である。しかし、重力をとりまく環境の変化に対し高い感受性を示す骨代謝にかかわる細胞を用い、微小重力の影響を明らかにすることにより、重力の役割が浮かび上がる。重力の役割について生物に普遍的な法則が遺伝子レベルで見いだされる可能性も秘められている。

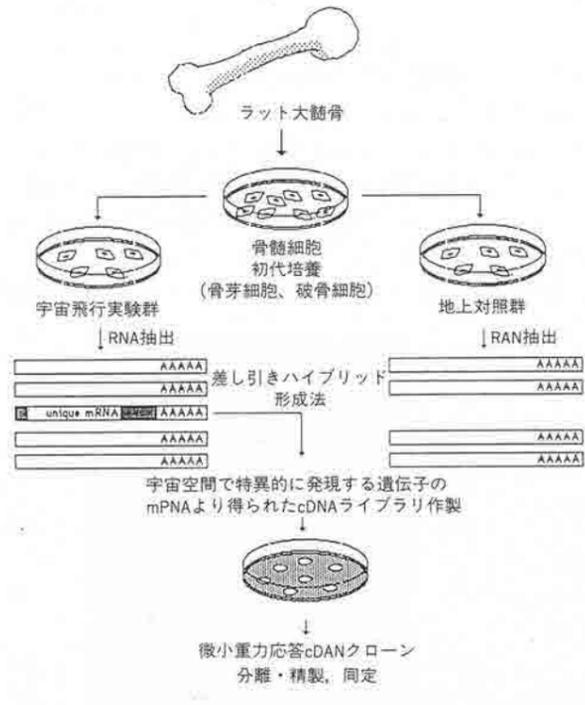


図3 骨由来培養細胞におよぼす微小重力の影響解明(実験概要)

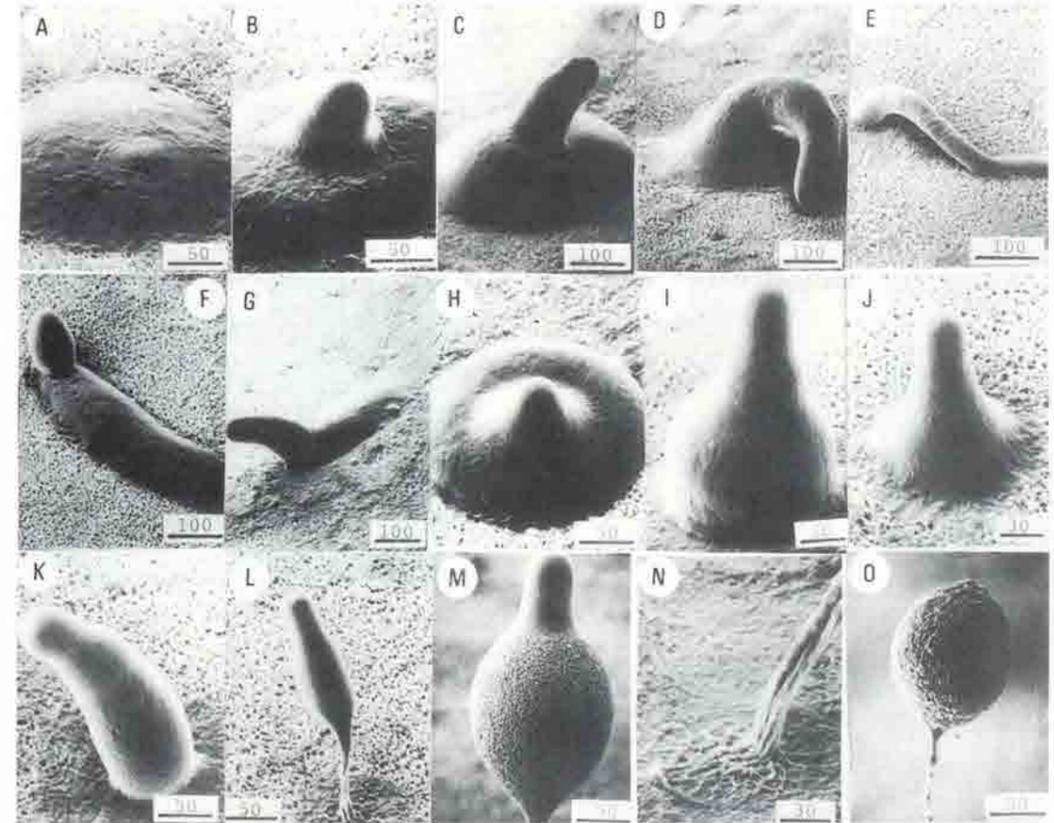
# Spore 宇宙空間における細胞性粘菌の分化

代表研究者 大西武雄 (奈良県立医科大学)

宇宙空間での生命活動が現実化しつつあるが、そこでは地球上と同じような生命活動が営めるのであろうか。たとえば、生命誕生から胎児の発生(からだができあがっていくこと)や成長の過程で、はじめ1個の受精卵から全身を構成するそれぞれの細胞へと分化(形態的・機能的に特殊化すること)するのに微小重力および宇宙放射線はどのような影響をもたらすのであろうか。そこで基礎研究のひとつとして粘菌に注目した。日本の粘菌の分類の研究では古くは南方熊楠がたいへん有名である。とくに細胞性粘菌は下等な有核生物で、アメーバの時期があることにより動物(原生動物・根足虫類)に、また子実体を形成することにより植物(変形菌植物)にも分類されている。この生物は独自の生活史をもち、増殖する時期と分化の時期とが明確に分かれているため、古くから分化を研究する材料に広く用いられてきた。この細胞性粘菌は微小重力や宇宙放射線の生物影響の研究に非常に便利な生物である。別の種の粘菌はこれまでIML-1などで欧州宇宙機関の実験試料として搭載されたことがあるが、そこでは粘菌細胞の原形質流動などが調べられた。

この実験では、宇宙空間で細胞性粘菌の野生株(NC4)および放射線感受性株( $\gamma$ s13)を培養し、胞子の発芽・アメーバの増殖・形態形成の各時期の移行・子実体形成、さらには胞子形成への影響をビデオや写真におさめることによって、細胞性粘菌の分化への宇宙環境の影響を観察する。また宇宙空間で形成された胞子を地上に持ち帰り、発芽させることによって細胞性粘菌胞子の宇宙放射線に対する感受性も測定する。

細胞性粘菌の野生株(NC4)からは放射線に感受性の高い突然変異株が多数分離されている。そのうち最も放射線に敏感な $\gamma$ s13は、ごく少ない放射線・紫外線やDNAに傷をつける化学物質によって非常に死にやすい。とくに野生株との比較において放射線感受性株を用いることは、粘菌のさまざまな分化の段階での宇宙放射線の影響や微小重力との複合的影響を推定することができるし、もしも放射線感受性株も野生株も分化できない場合は微小重力の影響が大きいと推測できる。



細胞性粘菌の生活史

細胞性粘菌の胞子に水を与えることにより、胞子は膨潤胞子を経てアメーバになる。アメーバは大腸菌などの細菌を食べて増殖する。この増殖期ではDNA合成がさかんに行われている。餌の細菌がなくなると分化の時期へと移る。アメーバは集まって、多細胞集団である集合体を形成することになる[A]。次に、移動体[D, E, F, G]からメキシカンハット[H]の時期を経て、やがて子実体[L, M, N, O]が形成される。子実体の胞子のうには胞子が多数あるのがわかる[M, O]。餌がなく、アメーバが集合して子実体を形成するのに約24時間かかるが、細胞分化の時間としては非常に短いといえる。子実体は大きく分けて柄細胞[N]と胞子細胞[O]より成り、もとのアメーバがそれぞれの細胞へと分化することになる。図中の数字は大きさの単位( $\mu$ m)である。

# Pembsis 植物胚芽の分化状態の安定性への重力関与の研究

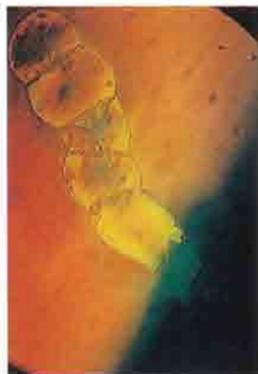
Gravity and Stability of the Differentiated State of Plant Proembryos

代表研究者 A. D. クリコリアン (ニューヨーク州立大学)  
A. D. Krikorian (State University of New York)

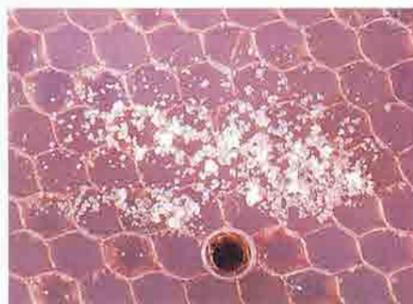
植物の発生(受精卵などが成体になる過程)では、決まった時間に決まった場所で決まった変化が徐々に順序よく起こっていく。高等植物の子房にある胚珠の胚のうは発生につごうのよい環境だが、その胚のうで胚(多細胞生物の個体発生における初期の時代)の発生が進むのには重力がなんらかの役割をはたしていると思われる。そこで、微小重力環境では正常な胚発生が確実に起こるわけではなく、また効率的に起こることもないであろうと考えられている。

植物は二酸化炭素を吸収して光合成をおこない、酸素を作り出す。また、植物はヒトをはじめとする多くの動物の食糧にもなる。したがって、ヒトが宇宙に長期に滞在する場合には、植物はたいせつな酸素と食糧の供給源となると期待される。そこで、宇宙で高等植物を単に生かしておくだけでなく、種子を収穫し、その種子から次の世代の植物体を育成してまたその種子を収穫するといった継代栽培の技術を開発することが必要である。

しかし、現在スペーススラブなどでおこなわれている宇宙実験は期間が短く規模も小さいので、実際に宇宙で開花植物を継代栽培することはできない。継代栽培実験が可能になるまでには、もっと簡便な実験系を使って植物の継代で重要な点について少しずつ情報を蓄積していくことである。培養細胞はそのような実験系にふさわしいものである。培養



体細胞から得られた発生初期のニンジン胚(地上実験)  
宇宙でこのような胚が形成されるかどうかを調べる。



寒天培地で成長したデイリリィの胚(地上実験)  
宇宙でもこのように発生するかどうかを確かめる。

細胞は条件が整えば完全な植物体まで成長する能力(全能性)をもっており、高等植物の胚のうの中で受精卵が発生していく過程で起こる変化をシミュレートすることができる。しかも、培養細胞を使えば、胚のうのような制約のある特殊な環境ではなく、まったく自由な状態で形態形成に微小重力が及ぼす影響を調べることができるのである。また、培養細胞は取り扱いが比較的簡単で、搭乗員の作業があまり必要でない点でも現在の宇宙実験に適している。

宇宙での植物継代栽培を考えるにあたって、もし微小重力下で胚が正常に発生できないのであれば、正常な胚発生をおこなわせるような工夫が必要である。それにはまず重力が胚の発生にどんな役割をはたしているのかを調べることが重要である。細胞は胚発生のどの段階で重力を必要とするのか、どの部分で重力を感じたり重力に反応したりするのか、胚発生する部分や多細胞の全能性を持つ部分は重力を感じているのか、どのくらい小さな重力まで感受できるのか、など明らかにすべき問題はたくさんある。

代表研究者らは従来からスペースシャトルや旧ソ連の生物学実験衛星でこのような問題を検討してきた。今回の実験は、過去の実験結果をふまえて、胚発生においてどこが重要な段階であるのかをさらに追求することを目的とする。とくに、微小重力下で極性のある組織が形成されるかどうか(たとえば、一方が茎になって他方が根になるか)、核の状態が保たれるかどうか、染色体が忠実に複製されるかどうかに重点をおいて実験をおこなう。また、この実験はCHROME X実験の結果を培養細胞をモデルとして確認することにもなる。CHROME Xは1989年3月にスペースシャトルの5日間の飛行で代表研究者らがおこなった実験で、微小重力下で根の組織を培養したところ、地上よりも染色体の異常が多くみられた。異常の原因ははっきりしないが、宇宙放射線の影響だけでは説明できず、宇宙放射線と微小重力との相乗効果と思われる。

今回の実験ではニンジンの培養細胞とデイリリィ(ユリ科の植物)の培養細胞を打ち上げて、液体培地と寒天をベースとした半固体の培地で培養する。細胞培養キットの細胞培養容器6個では液体培地での培養を、植物細胞培養容器6個では寒天培地での培養をおこなう。液体培地での培養では、細胞を分化(形態的・機能的な特殊化)できない培地に入れて打ち上げ、宇宙環境で分化できる培地に交換して培養を始める。約10日間の培養のあと、地球への帰還の直前に3個の培養容器の細胞は固定液で固定し、残りの3個はそのまま地上に持ち帰る。寒天培地での培養細胞についてははじめから細胞が分化できる培地で打ち上げ、そのまま地上に持ち帰る。

今回の実験の成果は、宇宙における植物の継代栽培技術を開発するのに寄与するだけでなく、宇宙環境で培養細胞を取り扱う技術としてバイオテクノロジーの分野に応用することもできる。もちろん、科学的にも興味深いものである。

# Chromosome 電気泳動による線虫 C. elegans の染色体DNAの分離

代表研究者 小林英三郎(城西大学)

生物の遺伝情報を担うDNAには、生物種が保存され、また発生(受精卵から、からだができあがっていくこと)し分化(細胞などが形態的・機能的に特殊化すること)するための基本的な設計図が塩基配列のかたちで書き込まれている。DNAの塩基配列を決定する研究は活発に行われており、生命科学のひとつの目的であるヒトの遺伝子の解析が始まっている。ヒトの染色体は46本であるが、染色体を分離する技術の基礎を研究するためにはその数が少ないものを選ぶ必要がある。

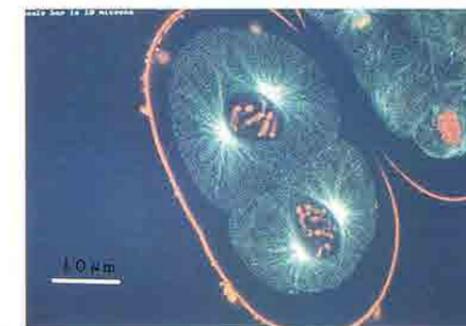
Caenorhabditis elegansは体長わずか1mmという小型な、自由生活型線虫で、動物の発生・分化の遺伝的研究にとってすばらしい生物である。線虫はその名前のように細長い虫であるが、生殖器、神経、筋肉、消化器など動物の基本的体制を持っている。この虫は体が透明なので、一つの受精卵から分裂し分化していくようすを完全に観察することができる。この虫の基本である雌雄同体は959個の細胞から構成されており、それらすべての細胞の分化の手順である細胞系統樹が完成した初めての動物である。また、神経ネットワークも再構築されている。一世代が3日半と短いので遺伝学研究に適しており、すでにいくつもの突然変異体が分離され、遺伝学が確立している。これらの特質によって、分子レベルから細胞・個体のレベルにわたって多方面から発生・分化を研究することが可能になっている。この線虫の染色体はわずか6本であることから、今回は、この6本の染色体DNAを電気泳動で分離する基礎研究をおこなう。



線虫 Caenorhabditis elegans の雌雄同体

電気泳動は荷電している物質を電解質溶液の存在する電場において移動させ分離する技術である。地上では、荷電している物質をより効果的に電気泳動する目的で大きな電力を与えると、生じる熱対流のために分離状態が乱される。これに対して微小重力下では、熱対流がないので良好な分離が期待できる。また、微小重力下では沈降現象がないため、地上では自然沈下してしまう細胞や細胞構成成分などの荷電けん濁液をも電気泳動が可能である。

使用する電気泳動装置(FFEU)は、512チャンネルからなる紫外吸収モニターを装備しており、サンプルの分離状況

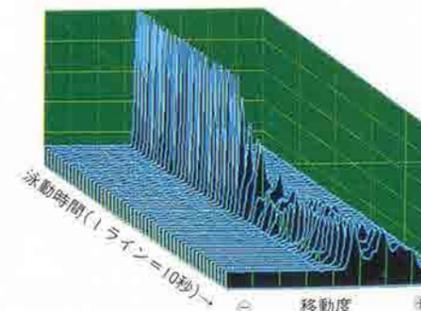


共焦点レーザー走査蛍光顕微鏡で撮影した線虫 C. elegans の卵  
染色体はオレンジ色に染色されている。

をリアルタイムで観測できる。今回は等電点電気泳動の原理にもとづいた分離方法を採用する。線虫の卵から取り出した染色体DNAをサンプルとして、スペーススラブで電気泳動による分離実験を行う。この電気泳動によるサンプルの分離状態は紫外吸収信号として地上基地に送信されるので、その信号から下図のような3D(三次元)エレクトロフェログラムを作成して電気泳動過程を解析し、分け取る部分を決める。スペーススラブの搭乗科学技術者は、目的のDNAが分離した分取容器を生物学的汚染がないように注意深く冷凍庫に移し、ミッションが終了するまで安定な状態に保存する。

地上に持ち帰った電気泳動で分離されたDNAサンプルは、PCR(ポリメラーゼチェーンリアクション)法でDNAを増幅する。これらのDNAは、すでに代表研究者らが明らかにしているDNAマーカーを用いたハイブリダイゼーション実験(分析したいDNA試料が既知のDNAと2重らせんを作るかどうかを調べる実験)で、個々の染色体への帰属が決定される。

現在、線虫 C. elegans は染色体の物理地図(DNA塩基配列)が90%以上完成しているが、いくつかの部分が寸断されており、残りの数%を決定するのが困難な状態である。ここで計画している染色体DNAの分離が成功すれば、線虫の物理地図を完成することができて多細胞系で初めての物理地図が完成されるばかりでなく、生物の基本的法則を知る上で必要な染色体DNAの分離技術に大きく貢献することになる。



3Dエレクトロフェログラム(地上予備実験結果の一例)

# Antibody 微小重力環境における高密度動物細胞培養液の分離精製実験

代表研究者 奥沢 務 (日立製作所)

現在、ガンの治療薬および診断薬として期待されているものにモノクローナル抗体とよばれるものがあり、病気の治療と予防に欠かせない免疫反応を受け持っている。このモノクローナル抗体は一般にリンパ球の中のB細胞によって生産・分泌される。しかし、B細胞は生体外では増殖しないので、このB細胞と生体外でも増殖する細胞を融合させたハイブリドーマ(図1)と称する融合細胞を培養してモノクローナル抗体を産出させる必要がある。例えば、STK1と呼ばれるハイブリドーマの場合、通常の培養フラスコ(実験室レベル)で培養すると、モノクローナル抗体として免疫グロブリンGを最高で数十mg/cm<sup>2</sup>程度産出する。工業的にはバイオリアクタと呼ばれる培養タンクを主としたプロセスにより生産され、最近の動物細胞高密度培養技術の進歩で実験室レベルの数十倍の産出量が得られるようになってきている。

図2はその生産工程を示したもので、培養プロセスで動物細胞を高密度に培養したあと、分離精製プロセスにおいて培養液から不純物を取り除き、有用物質のみを精製する。図2に示すように、現状のプロセスでは、数段階のろ過を行ったあと最終的に液体クロマトグラフィーで精製しているのが、プロセスが複雑である。また、液体クロマトグラフィーの分離能および分離量にも限界があるので、この分離精製プ



図1 ハイブリドーマ

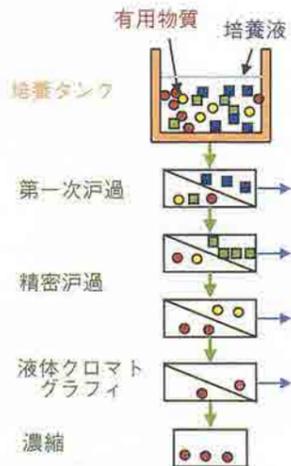


図2 高密度動物細胞培養液の分離(現在の方法)

ロセスの分離能力の向上が課題となっている。

この解決策のひとつとして期待されるのが、微小重力環境における無担体電気泳動法による分離である。無担体電気泳動法は、物質ごとの電荷の違いを利用して分離する方法で、旧西ドイツで開発され比較的早くから使われている。原理的には高純度分離が可能であるが、分離過程で熱対流が発生すると分離性能が低下する欠点がある。このため、この電気泳動法は地上では対流が起きない範囲または条件下での使用に限定され、主として分析用として用いられてきた。しかし、宇宙のように微小重力状態では熱対流がほとんど発生しないので、高純度分離を実現させることが可能である。

図3はシャトル内で行う実験の概要を示したもので、宇宙の滞在最初の5日間は細胞培養キットで細胞を培養する。その後、この培養液を電気泳動槽に注入し、電気泳動法で分離する。分離した試料は、着陸までの8日間冷凍庫で保存され、地上に回収される。

図4に示すのは地上実験結果の一例であり、二つの物質(細胞と免疫グロブリンG)に分離しているのが検知されている。微小重力環境では、これよりも分離の距離および分離濃度が高まることが予想される。

このような実験を通じて、宇宙の電気泳動法の有効性を実証するとともに将来の宇宙バイオ工場を実現させるための有用な知見を得ることができるものと期待される。

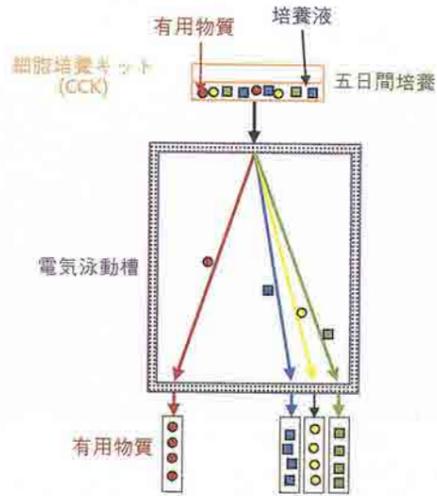


図3 宇宙実験の概要

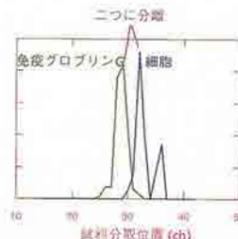


図4 地上泳動分離の検出状況

# Pituitary ラット脳下垂体細胞および細胞内顆粒の電気泳動分離実験

Electrophoretic Separation of Cells and Particles from Rat Pituitary

代表研究者 W. C. ハイマー (ペンシルバニア州立大学)  
W. C. Hymer (Pennsylvania State University)

脳下垂体は、自律神経の中核である間脳の視床下部から下垂して(ぶらさがって)いる器官で、成長ホルモン(GH)やプロラクチン(PRL、黄体刺激ホルモン)など多くのホルモンを生産しており、脊椎動物のもっとも重要な内分泌腺である。GHは成長を促すほか、脂肪、炭水化物、タンパク質の代謝を調節するはたらきをもっているが、最近では筋肉、骨、免疫系細胞の機能にも直接関与していることが明らかになりつつある。宇宙の微小重力環境ではこれらの機能が低下して飛行士が健康を損なうことが知られており、GHがどのようにこれらの機能にかかわっているかを明らかにすることは、長期の宇宙飛行で飛行士が健康を維持する方法を考えるうえでたいへん重要である。

代表研究者らは過去に3回の宇宙実験を行い、宇宙飛行したGH細胞や宇宙飛行したラットから調製したGH細胞は、宇宙飛行しないラットの細胞ほど生物学的に活性なホルモンを生産しないことを報告した。このことから、宇宙で筋肉が縮んだり骨がもろくなったりする現象は、GH細胞の機能が低下したために起こるという仮説をたてることができる。今回の実験の目的は、この仮説を確認することである。

今回は、地上で打ち上げ直前に調製したラットの脳下垂体細胞(図1)を用いて図2に示すような3つの実験を行う。

パートAの実験の目的は、脳下垂体細胞が生産する生物学的に活性なホルモンの量が微小重力環境下と地上とで同じであるかどうかを調べることであり、このパートでは、宇宙飛行中の細胞から分泌されるホルモンの活性が飛行の影響を受けるかどうかを測定し、もし影響があるならばそのメカニズムを検討する。そのほか、細胞の形態が宇宙飛行で変化するのか、分泌されたホルモン分子の集合形態(とくにポリマー化の程度)は宇宙飛行の影響を受けるのかなど

を調べる。これまでの研究でホルモンの活性が分子の集合形態と密接に関係しているという結果が得られていることから、宇宙での分子の集合形態の変化の有無は非常に興味深い。

パートBでは、宇宙の方が地上より細胞をきれいに電気泳動分離できることを確かめるとともに、分離してから培養した細胞のホルモン生産能力が地上で分離・培養した細胞と同じかどうかを調べることを目的とする。脳下垂体細胞はホルモンの含有量によっていくつかのタイプに分けられる。電気泳動でこれらのタイプを分離すれば、異なるタイプの細胞の間の相互作用を除くことができる。細胞生物学では、ある細胞が分泌した物質が隣接する細胞に直接作用する傍分泌が細胞機能を調節するうえで非常に重要であることが広く認められている。このパートの実験は、微小重力環境下での脳下垂体細胞における傍分泌の重要性を検討する最初の実験となるだろう。

パートCは、細胞内のホルモンを多量に含む顆粒が日本の電気泳動装置で地上より良く分離できることを確かめ、宇宙飛行中の細胞内顆粒に含まれるホルモン分子の集合形態が微小重力によって変化するかどうかを調べるのが目的である。

パートA、B、Cの実験を宇宙でおこなっている間に、ケネディ宇宙センターでも同じ手順で実験をおこなう。この地上対照実験の結果を宇宙実験の結果と比較することによって、①宇宙で連続的な電気泳動分離が有効であることを確認できるだけでなく、②微小重力が細胞そのものに与える影響を調べることができる。しかし、宇宙実験と地上対照実験の結果に差があるとき、微小重力の影響でそれらの差異が生じたのか、それともスペースシャトルの打ち上げや帰還の際に細胞が大きな重力や振動を受けたために差異が生じたのかを判断するのは難しい。そこで、今回の実験ではパートDというもうひとつの対照実験をおこなう。パートDの結果をパートA、B、Cの結果と比較すると、上で述べた①、②の点をより確実に明らかにすることができる。

この実験は、基礎的な細胞生物学の見地から興味深いのはもちろん、宇宙飛行士の健康維持技術の開発に有益な情報を与える。また、宇宙環境で細胞培養と電気泳動分離を有機的に活用する初めての試みである点でも注目される。

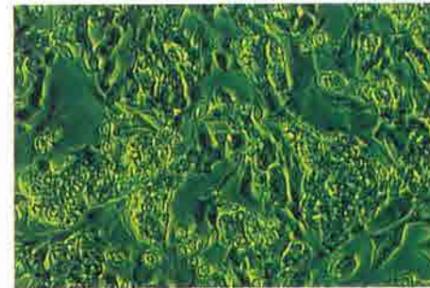


図1 ラットの脳下垂体細胞

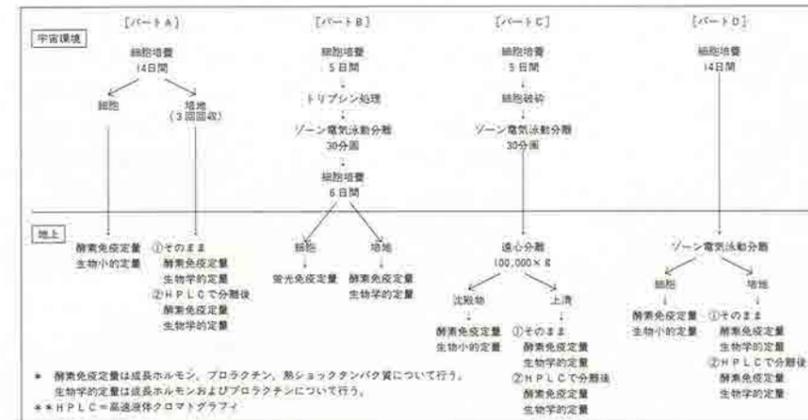


図2 実験手順の概略

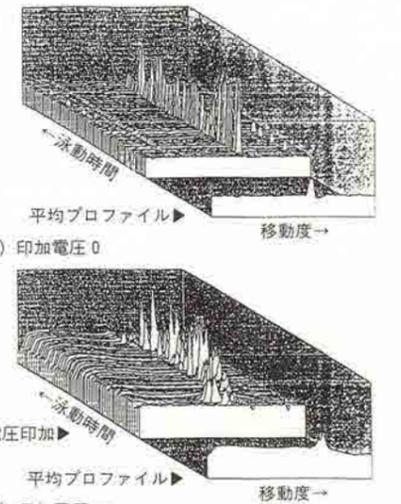


図3 地上におけるラットの脳下垂体細胞の電気泳動のようす(エレクトロフェログラム)

## Radiation

## 宇宙船内における重粒子線による線量計測とその生物効果実験

代表研究者 道家忠義 (早稲田大学)  
共同研究者 G. バドワー (NASA)

月基地の建設や火星への有人飛行などが近くはじまろうとしているが、地磁気圏外に長く滞在すると、人体は地表よりかなり強い宇宙特有の放射線にさらされる。宇宙放射線の主要な成分は高いエネルギーをもつ重い粒子からなる粒子線で、これらは地上にはほとんど届かない。そのため、宇宙放射線が生物にあたえる影響を評価するのに、地上の技術をそのまま用いるのは適当ではなく、宇宙放射線の特殊性を考慮した新しい評価技術の確立が必要である。とくに高エネルギー重粒子線による線量当量の計測は技術的に多くの問題を含んでおり、現状ではその測定技術は確立されていない。線量当量は、放射線が生体に与える影響の指標で、LET (linear energy transfer; 線エネルギー付与) の関数である線質係数と吸収線量の積であらわされる。したがって、宇宙環境では重粒子によって付与される LET-分布を直接計測することが重要であるが、この分布は従来の方法では計測できなかった。LET-分布がわかれば、経験から決められた線質係数とかけ合わせて線量当量を推定できる。

この研究は、放射線モニター装置 (RRMD) を用いて、宇宙船内における重粒子による LET-分布をリアルタイムで計測し、線量当量をより正確に推定するとともに、微小重力のもとで重粒子が生物にどのような効果を与えるかを調べることが目的である。

図1にRRMDのセンサーの断面図を示す。センサーは8個のシリコン検出器からなるテレスコープである。上部の2個は2次元位置検出器で、それらの出力から粒子の入射角を求めれば、その粒子が検出器に与えるエネルギー損失を検出器に垂直に入射した場合に換算して、すべての粒子のLETを

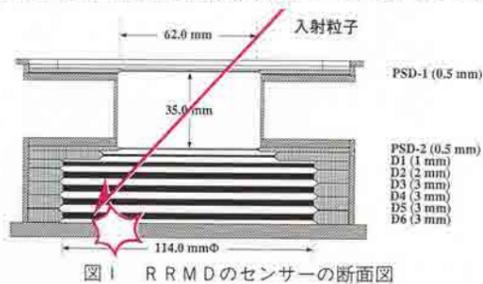


図1 RRMDのセンサーの断面図

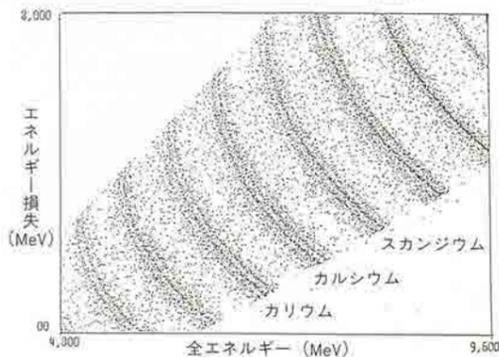


図2 各種の入射粒子の全エネルギーとD-1、D-2、D-3、D-4でのエネルギー損失の和との関係

比較することができる。そのエネルギー損失 (ここではD-1、D-2、D-3、D-4の出力の和) を縦軸に、テレスコープ内で停止した粒子の全エネルギー (各検出器からの出力の和) を横軸にとってデータを蓄積していけば、データは図2に示すように核種ごとに別々の曲線の上に乗る (この図は、重イオン加速器で加速された高エネルギー鉄イオンを標的に衝突させて、多種類の粒子を発生させることにより得られた結果である)。このように、テレスコープ内で停止した重粒子は簡単に弁別でき、核種別のエネルギー分布が計測できる。

以上のようにして核種別のエネルギー分布が得られれば、さらに計算によって生体内部のいろいろな臓器ごとのLET-分布と線量当量などを求めることが可能になる。このような線量計測法はこれまでに試みられたことがなく、IML-2ではじめて実験されるものである。

また、テレスコープを突き抜けた粒子のみについてのLET-分布は、近似的にテレスコープの置かれている点でのLET-分布と考えることができる。図3は図2が得られた実験で同時に測定された検出器D-4を突き抜けた粒子によるLET-分布である。

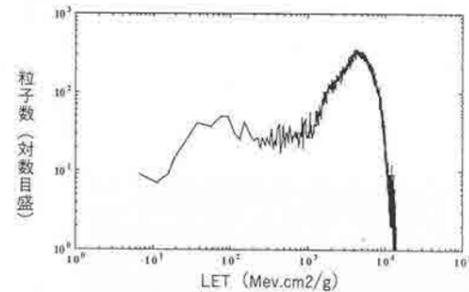


図3 加速器実験で得られたD-4におけるLET-分布

### デインコッカス・ラジオデュランスに対する宇宙放射線の影響

共同研究者 渡辺 宏 (日本原子力研究所)

宇宙放射線には高エネルギーの電子、陽子、 $\alpha$ 粒子 (ヘリウムの原子核)、重粒子などが含まれている。これらの放射線は、地球の磁場や大気などによってそのほとんどがさえぎられてしまうので、地上での環境放射線のレベルは宇宙よりもずっと低く保たれている。しかし、放射線レベルの高い宇宙空間で長時間宇宙飛行する場合には、人間に対する放射線障害の危険性を評価しておく必要がある。特に、地上には存在しない重粒子線の影響を知ることが、危険性を評価し、放射線防護方法を開発するために必要である。また、放射線の生物への効果に宇宙での微小重力が影響をあたえるかどうか調べる必要がある。そこで、放射線抵抗性細菌であるデインコッカス・ラジオデュランス (Deinococcus radiodurans) を用いて、宇宙放射線の細胞への影響や障害からの回復を調べることがこの研究の目的である。

実験では、デインコッカス・ラジオデュランスの中で放射線に耐性のある種類と放射線の影響を受けやすい種類の乾燥細胞を放射線モニター装置のサンプルホルダーにセットして、スペースシャトル内で宇宙放射線にさらし、さらに微小重力下で栄養液中に浸したのち、サンプルを回収する。細胞への障害の程度は、電子顕微鏡で観察するとともに、培養後の生存率や突然変異を測定して評価し、地上実験で得られた結果と比較することによって、宇宙放射線の影響を解析する。

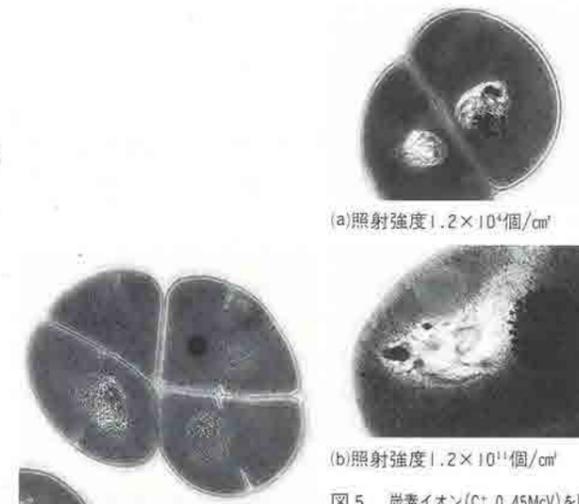


図4 正常なデインコッカス・ラジオデュランスの電子顕微鏡写真

図5 炭素イオン(C+, 0.45McV)を照射したデインコッカス・ラジオデュランスの電子顕微鏡写真

### 宇宙天気予報のための宇宙放射線環境の基礎的研究

共同研究者 富田二三彦 (通信総合研究所)

宇宙を飛び交う放射線粒子やX線に長時間人体がさらされると皮膚ガンや遺伝子損傷など放射線被曝の危険があり、衛星搭載機器は誤動作等の悪影響を受けることが知られている。特に、大きな太陽フレア (太陽面爆発) が発生した場合には、人体への直接的危険やさまざまな宇宙機器への悪影響は増大する。このような過酷な環境で活動する宇宙飛行士の安全を確保し、宇宙を利用しやすくするためには宇宙環境の予報 (宇宙天気予報) が必要となる。

現在、通信総合研究所の宇宙環境センターでは太陽フレアの発生を予知するため、光や電波によって太陽を観測し、太陽の磁場やプラズマの変化を立体的に監視している。さらに、国際的なコンピュータネットワークにより、地球の裏側からの最新の宇宙環境観測データも手に入れることができるようになってきている。今回の実験では、このようにして集められた太陽や宇宙環境に関するさまざまな観測データと、実際にスペースシャトルから得られた放射線環境に関するデータを総合的かつ迅速に解析することにより、太陽活動や太陽地球間

の宇宙環境がシャトル軌道上の放射線環境にどのように影響をおよぼしているかを調べる。

宇宙は広大で、しかも地球周辺は地球磁場と太陽風磁場とが複雑に絡み合っている。今回のような研究の積み重ねにより、太陽活動が宇宙空間のさまざまな点にどのような影響をおよぼすかが把握できるようになり、宇宙環境の変化をモデル化して未来の宇宙の様子を予測することも可能になる。21世紀の宇宙基地では「宇宙天気予報キャスター」から、次のような説明が聞かれるかもしれない。

「12月12日0時から6時までの宇宙天気予報をお知らせします。はじめに概況です…。太陽面では活動域380号が急速に発達しています…。次にフレア警報です。この時間帯に、マグニチュード7以上の大きなフレアが発生する確率は70%です。強力なX線などの放出が予想されますので、3時から7時までは船外活動を中止してください。代わりに宇宙風予報です…。ここ数日の太陽活動の上昇に伴い、放射線強度がレベル7を越えています。宇宙D地区を航行中の宇宙船は警戒して下さい…」

21世紀には宇宙天文台や宇宙工場のほか、宇宙ホテルなどが建設される。このようにだれもが宇宙で生活できる時代には、自分たちのまわりのようす (宇宙環境) をよく知り、それを正しく利用していくことが大切になるだろう。

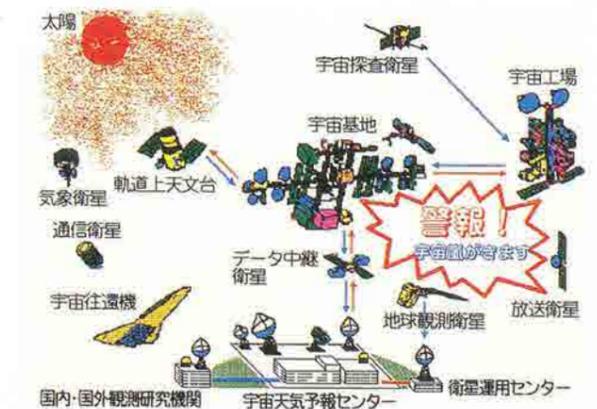


図6 宇宙天気予報システムの全体像

# Sintering

## 液相焼結における重力の効果

The Gravitational Role in Liquid Phase Sintering

代表研究者 R. M. ジャーマン (ペンシルバニア州立大学)  
R. M. German (Pennsylvania State University)

焼結法とは粉末の成形体を主成分の融点以下の温度で加熱して粉末粒子間を接合することにより、強固な結合体を得る技術で、金属材料やセラミックスを製造するのに用いられている。液相焼結は焼結法の一つで、一部の成分が液相となった状態で行う焼結である。この方法は、切削工具、磁石、放射線しゃへい材、自動車のギアなどの工業部品の製造に広く実用化されているほか、最近では粒子分散複合材料やサーメット（金属とセラミックスの超耐熱性複合材料）などの製造への応用も興味をもたれている。液相焼結は固相のみで行う焼結より速く、また、この方法で形成される特殊な微細構造によって高密度や高強度などの優れた特性をもつ材料が得られることから、工業的に重要な技術のひとつである。

一方、液相焼結法にはいくつかの問題点もある。この方法では成形体が著しく収縮することが多く、焼結中に成形体とそれを支える支持体との摩擦によって、破断、スランピング（成形体の上部から低部に材料が流れ落ちる現象）、ひずみが生じる。そのため、複雑な形状の成形体は工業的に製造しにくい。また、液相焼結技術はその長所が認められて一般に広く用いられているにもかかわらず、焼結体の微細構造がどのように形成されるかはほとんど解明されていない。微細構造が焼結体の特性を決める重要な因子であることはわかっているが、その微細構造を制御する方法を理論的に導き出すにはいたっていない。従来から液相焼結の理論モデルはいくつか提案されてきたが、それらの大半は重力の効果を考えていないので実際に起きる現象を説明しきれなかったのである。

代表研究者らはこれまで地上の通常重力のもとで液相焼結実験を行い、液相焼結過程、とくにその微細構造形成過程の理論モデルを組み立ててきた。今回の実験は、微小重力環境下での液相焼結現象を解析して、これまでに構築した理論モデルを改良することを目的とする。

重力が液相焼結の過程で重要な役割をはたしていることは疑いない。一般に固相粒子は液相より密度が大きいため、重力があると固相粒子が沈み、液相が浮いて二つの相が分離する。すると、成形体全体としてみればスランピングや形状のゆがみ、ひずみが生じる（図1）、微細構造レベルでは粒子分布のムラが生じる（図2）ことにより特性のムラが生じると



図1 通常重力下で1480°Cで30分間液相焼結して得られたタンクステン-ニッケル-鉄重合金の形状(ニッケルと鉄の重量比は7:3)



図2 図1の試料a)における微細構造

いった不都合が起きる。微小重力環境ではこのような問題は起こらないものと期待される。また、重力は固相粒子を沈めて粒子どうしを衝突しやすくし、いっぽうでは粒子の回転を妨げる。焼結中に固相粒子は図3のように成長あるいは融合すると考えられるから、重力の有無によって粒子の衝突や回転の起こりやすさが変わること、粒子の大きさや形状が変化するのである。

試料にはニッケル(Ni)-鉄(Fe)とタングステン(W)の混合粉体を用いる。この材料は従来から焼結の研究によく使われており多くの研究成果が蓄積されていることや、液相と固相の密度の差が非常に大きくて重力の効果ははっきり現れることなどから、本実験にもっともふさわしい。また、この混合粉体は、焼結すると高密度、高強度、高延性、高耐腐食性、低膨張率などの優れた特性をもつ重合金となり、工業的にも興味深い。この材料は約1450°C以上に加熱すると液相が生じて固液混合物となる。焼結後の材料は粒径15~18μmのタングステン粒子がマトリックス（固化した液相）に囲まれている微細構造をもつ（図2）。

この実験では、混合比率や前処理の異なる7種の試料を3のように形成されるかはほとんど解明されていない。微細構造セット用意し、高温加圧型電気炉を用いて微小重力環境で最高温度（1500°C）の保持時間を変えて焼結する。そして、得られた焼結体から、タングステンの含有量や焼結時間を変えたときの形状の変化、マトリックスの量、粒子の大きさ、粒子どうしの接触や接着の状態、機械的性質などを解析し、地上の通常重力下で焼結した試料と比較して、液相焼結のメカニズムを明らかにする。

この研究によって構築される液相焼結の理論モデルは、基礎科学的にも非常に興味深く、また微細組織の制御による高性能材料の開発に応用できるであろうことから工業的にも価値の高いものである。

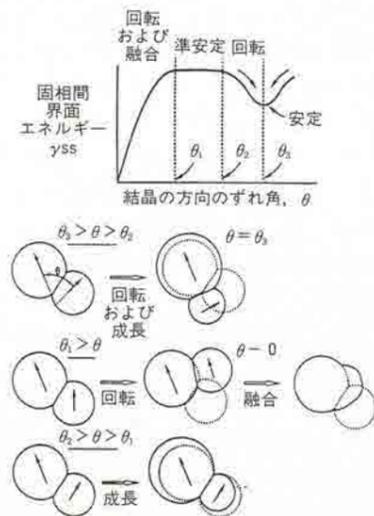


図3 固相粒子の成長、融合過程の模式図

# Marangoni

## 多元系化合物半導体融液の均一分散・混合化

代表研究者 平田 彰 (早稲田大学)

近年の電子産業の発展にともない、デバイス材料用単結晶の高品質化が強く求められている。宇宙の微小重力環境下では、密度差により生じる重力対流および沈降がほとんど起こらないので、融液から材料を作製するときに密度の異なる成分元素やドーパント（半導体の特性を出すために少量加えられる不純物）元素が不均一に凝固することなく高品質な化合物半導体あるいは合金等の材料が作製できると期待されている。しかし、分子拡散（その物質の濃度の濃い部分から薄い部分に物質が移動する現象）のみによって融液を完全に混合するにはかなりの長時間が必要であり、時間や電力の限られたスペースシャトルあるいは宇宙ステーション内では、完全に均一化した高品質な材料の作製は難しい。そこで、微小重力下における混合化手法を確立することが必要となる。

この研究では、融液表面上の濃度差により発生するマランゴニ対流（表面張力の差によって起こる対流）を有効に活用することにより、密度の異なるいくつかの元素から成る（多元系）化合物半導体融液の完全混合手法を確立することを目的として、まったく重力対流のない条件下で濃度差により発生する真のマランゴニ対流を明らかにし、融液化合物半導体の相互分子拡散係数の値を求め、マランゴニ対流による混合の度合と分子拡散のみによる混合の度合との比較を行う。

図1にスペースシャトルに搭載する試料の概念図を示す。化合物半導体としてはインジウム(In)-ガリウム(Ga)-アンチモン(Sb)系を取り上げ、6個の試料はそれぞれ各純成分を層状に密着させてある。試料は大きく2種類に分けられ、一方(M-1、M-2、M-3、M-3')は融液に自由界面が存在し、濃度差にもとづくマランゴニ対流が分子拡散とともに存在する条件において、他方(D-1、D-2)は融液に自由界面がまった

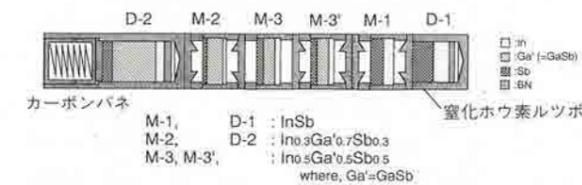


図1 スペースシャトルに搭載する試料の概略図

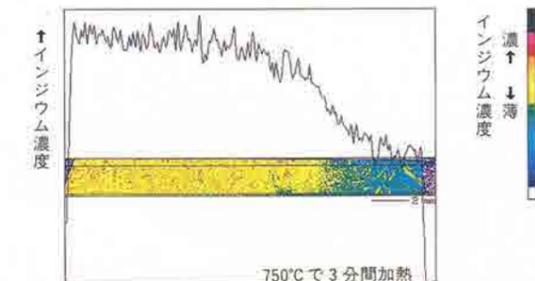


図2 分子拡散のみによるインジウムとアンチモンの混合におけるインジウム濃度分布

くなく分子拡散だけが存在する条件において、試料の溶融固化実験を行う。実験終了後、得られた結晶については、各元素の濃度分布、結晶の形状・品質、結晶粒界の大きさ等さまざまな角度からの評価を行い、マランゴニ対流による混合の度合と分子拡散のみによる混合の度合との比較を行う。さらに地上における対照実験および数値シミュレーション結果と比較照合し、目的を達成する。図2には、試料D-1を用いた地上での対照実験結果の一例を示す。この結果より地上におけるIn-Sb系の分子拡散係数を求めることができる。図3と図4には微小重力下における試料M-2についての数値シミュレーション結果の一例を示す。濃度差マランゴニ対流により融液表面や内部で複雑な流れが生じて、In-GaSb融液が急速に混合し、混合するにしたがってマランゴニ対流が減衰していく様子がシミュレートされている。

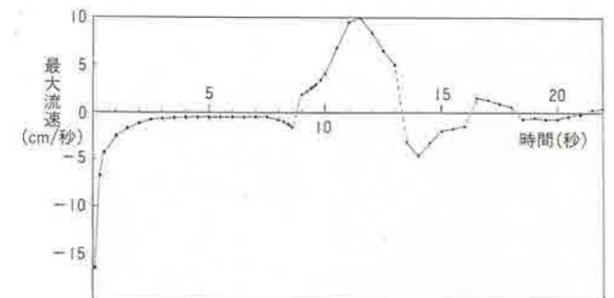


図3 濃度差マランゴニ対流による混合過程(シミュレーション) —最大流速の経時変化—

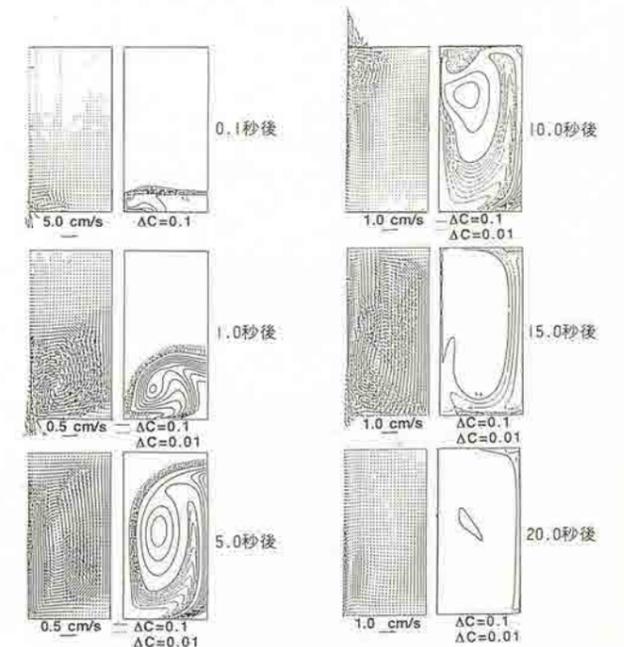


図4 濃度差マランゴニ対流による混合過程(シミュレーション) —速度ベクトルと濃度分布—

Intermetallics

微小重力下における TiAl 系金属間化合物の組織制御とその機械的性質

代表研究者 佐藤 彰 (金属材料技術研究所)  
共同研究者 竹山雅夫 (東京工業大学)

六方晶の結晶構造をもつ純チタン (Ti) と面心立方晶の構造をもつ純アルミニウム (Al) を原子パーセント (at.%) で等しい量だけ混ぜて合金化すると、図1に示すように、Al原子面とTi原子面とが交互に積み重なった規則的な結晶構造 (L10型構造) をもつ合金 (化合物) ができる。これが TiAl 金属間化合物である。この化合物は軽量 (密度3.8g/cm<sup>3</sup>) で、高温での比強度 (強度/密度) が高く、酸化されにくいことから、宇宙往還機のエンジン部材や胴体部分へ利用する構造材料としてたいへん魅力的な特性を持っている。しかし、こまた、もろくて必要な形に加工するのが難しい。このような短所の改善には別の物質の粒子 (第2相粒子) の分散や相変態 (温度などの外的条件によって結晶構造が変化する現象) を利用して組織を制御するなどの工夫が必要となる。

この実験で用いる Ti-48at.%Al 合金は、図2に示すように、TiAl 化合物のなかに六方晶構造の Ti<sub>3</sub>Al 化合物を少し含んだ層状組織をもつ。この組織は、図3の Ti-Al 2 元系の状態図に示すように、冷却途中でいったん六方晶の α 相となり、その後 TiAl-γ 相が結晶学的にある特定の方向に析出するために形成される。この層状組織は TiAl 化合物の機械的性質を評価するうえで、もっとも重要な組織因子である。

今回の実験ではこの Ti-48at.%Al 合金とこれに TiB<sub>2</sub> セラミックス粒子を分散させた2種類の材料を高温加圧型電気炉を用いて微小重力環境下で溶融・凝固させ、得られた組織を詳細に解析するとともに地上実験での結果と比較して、次のような宇宙で生じる基本的な現象を理解することを目的とする：

1. 結晶粒の形態におよぼす熱対流の影響

宇宙環境では密度の差によって生じる熱対流はほとんどな

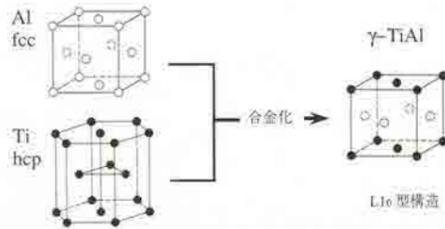


図1 アルミニウム (Al) とチタン (Ti) の合金化による TiAl 化合物の形成と結晶構造変化

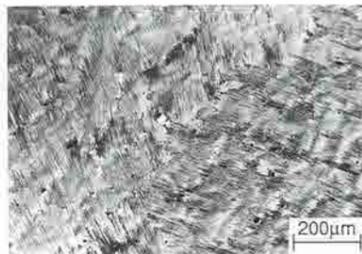


図2 α → γ 相変態により層状組織を呈する Ti-48at.%Al の鑄造組織

く、物質が移動しにくくなる。そこで、微小重力環境と地上との化合物は高温に長時間おくと比較的速く強度の劣化が進み、得られる TiAl 2 元化合物の凝固組織を比較して、材料が固まるときにできる結晶粒の形成におよぼす熱対流の影響を調べる。

2. 粒子分散形態におよぼす重力の影響

TiB<sub>2</sub> 粒子の密度 (比重) は4.5g/cm<sup>3</sup>であり、TiAl よりもやや重い。密度の違う両物質を地上で均一に分散させることは難しいが、宇宙では容易である。そこで、微小重力環境と地上で創製した TiAl/TiB<sub>2</sub> 複合材料の粒子分散形態を比較すれば、粒子の分散におよぼす微小重力の効果が明らかとなる。

3. 微小重力下での凝固および相変態におよぼす分散粒子の役割

凝固組織は凝固核がどのくらいの頻度で生じるかということ、凝固界面がどのくらいの速度で進むかということによって定まる。TiB<sub>2</sub> 粒子の融点は約3000℃であり、この粒子は TiAl 化合物を融点 (約1500℃) 以上に加熱した溶湯中でも安定に存在する。したがって、微小重力環境下で溶融凝固させた TiAl および TiAl/TiB<sub>2</sub> 複合材の組織を比較すれば、粒子が凝固の核生成サイト (凝固核が生成しやすい場所) として働いて凝固核の生成頻度が上がったかどうかを調べることができる。また、前に述べたように、この材料は凝固して α 相となったあと、さらに冷却すると γ 相が層状に析出する。そこで、α 相のときの凝固組織が変化すれば、α → γ 相変態によって形成される層状組織の形態も変化することが予想される。

このように、微小重力環境で物質を創製すると、地上とは異なるさまざまな現象が生じる。たとえば、TiAl のみの試料において熱対流がほとんどない場合に形成される組織は地上創製材よりも結晶粒の大きな組織となることが予想される。また、TiAl/TiB<sub>2</sub> 試料のような粒子分散合金では第2相粒子が均一に分散し、それが凝固時に核生成サイトとして働けば微細な凝固組織が得られ、機械的性質も向上すると考えられる。この実験では微小重力環境で創製した化合物の機械的性質も調べ、組織と特性との関係についても検討する。材料特性の評価から良好な特性が得られれば、この研究の結果を地上での組織制御技術に発展させることも可能となる。

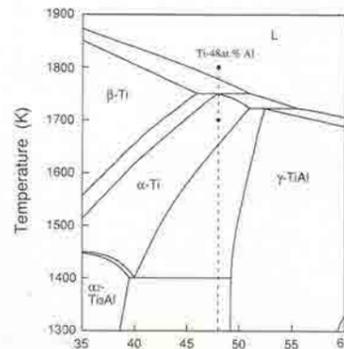


図3 Ti-Al 2 元系状態図 (破線は Ti-48at.%Al の凝固パス)

Convection

自然対流と拡散に対する重力加速度ゆらぎ (g ジッタ) の影響

代表研究者 東 久雄 (航空宇宙技術研究所) 土井隆雄 (宇宙開発事業団) 石川正道 (三菱総合研究所)  
共同研究者 木田 隆 (航空宇宙技術研究所) R.L. サニ (コロラド大学)

スペースシャトルや宇宙ステーション内は、完全な無重力状態ではなく、空気抵抗や重心位置からのずれによりわずかながら定常的な重力が残っている (残留重力)。また、船内での人間の活動や種々の機械の作動などによる振動があることが知られている (重力ゆらぎ)。これらの微小重力は、それがいかに微小であろうとも、流れを新たに発生させたり、流れに影響をおよぼすのではないかと考えられる。そのため、それらの影響を知ることは、材料プロセッシングなどの流体を扱う分野では大切なことである。

残留重力は10<sup>-5</sup>~10<sup>-6</sup>g のレベルと考えられ、これは一方向への流れをわずかに起こす。重力ゆらぎは10<sup>-3</sup>~10<sup>-4</sup>g のレベルでいろいろな周波数で振動しているもので、低い周波数の振動は流れを振動させ、高い周波数のそれは拡散に強く影響すると考えられている。残留重力と重力ゆらぎがある場合の流れのようすをコンピュータシミュレーションで図1に示す。この場合は周波数が比較的低いため、流れが振動している。

実験ではこのような微小重力の影響を実際に観察し、定量的に測定するために、図2のような実験容器を用いる。内寸が約縦7cm、横8cm、幅2cmの直方体の容器に水、食塩、染料 (フェノールフタレイン) を入れ、容器上面を加熱 (70℃) し、液体に温度こう配をつける。この温度こう配により、重力加速度があると流れが起きる。電解発色法を用いてこの流れを観測する。容器内に陽極 (プラス極) の銀板と陰極 (マ

イナス極) のパラジウム線を設け、通電することにより容器内の食塩水を電気分解し、陰極パラジウム線の近くの水素イオン濃度 (pH) を変化させて染料を変色させるのである。この変色部分の移動のようすにより流れを知ることができる。実際に地上試験で変色させた状態を図3に示す。透明な液体が陰極パラジウム線の近くで赤紫色に変色している。食塩水の電気分解では、陽極には塩素ガス、陰極には水素ガスが発生するが、この実験装置ではそれらはそれぞれ銀とパラジウムにより吸収され、実験を妨げる気泡の発生を防いでいる。

宇宙では上記の容器をもつ対流拡散実験ユニットを制振実験装置の防振機構に入れ、シャトルの振動がある程度低減された場合とそうでないもとの場合の二つの状態で実験を行い、それらの結果を比較することにより、重力ゆらぎの影響をより正しく知ることが可能となる。

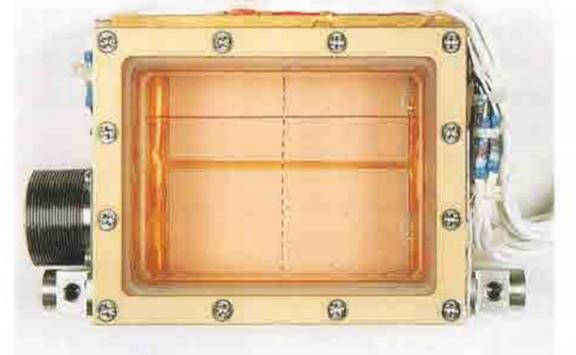


図2 対流拡散実験ユニットの実験容器  
実験容器上面にはヒータが、左右面には温度計測用の熱電対が埋め込まれている。加熱によって試料液の体積が膨張しても良いように左面にはベローズ (じゃばら) が取り付けられている。発色する染料の量が多すぎると流れのようすを観察しにくくなるので、陰極パラジウム線のところどころに赤色の塗料を塗ってその部分では染料が発色しないようにしてある。

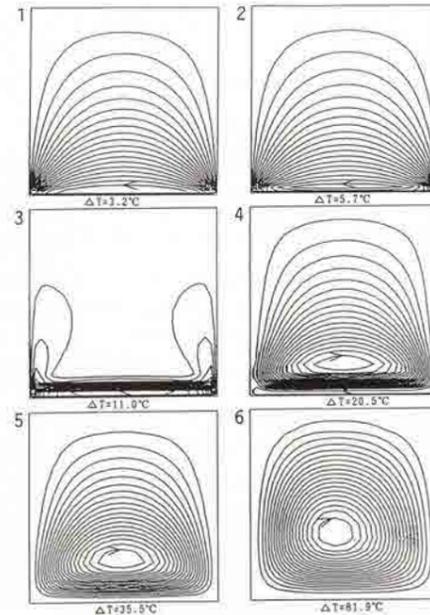


図1 残留重力 (10<sup>-6</sup>g) と重力ゆらぎ (10<sup>-3</sup>g, 3Hz) がある場合の流れのようす  
加熱を初めてから1秒後、6秒後、25秒後、90秒後、270秒後、1200秒後。ΔT は試料溶液の最高温度と最低温度の温度差。



図3 電解発色法の地上模擬試験

# Capillary 微小重力下での熱駆動流の研究

代表研究者 古川正夫 (宇宙開発事業団)

熱駆動流の研究は、宇宙環境での表面張力を利用した気体を蒸発潜熱として吸収した蒸気は、ラジエタまで輸送され、と液体の分離技術、蒸発・凝縮の制御技術、蒸気圧の変化を利用した液体輸送技術の基礎研究である。今回は、これらの技術の原理を確認する実験をスペースラブで行う。

宇宙機が動作するのに使用した電力は最終的には不要の熱となるため、その熱を宇宙機からラジエタを介して宇宙空間に放熱する必要がある。将来の宇宙機を考えた場合、大きさや使用電力は現在の人工衛星に比べて、非常に大きくなる事が予想される。そのため、発熱源からラジエタまでの距離が長くなり、また、放熱すべき不要な熱も増える。

そこで宇宙機内部の温度の制御および宇宙機内部の発熱源からラジエタまでの熱輸送の手段として、液体の蒸発潜熱(物質が液体から蒸気になるときにまわりから吸収する熱で、蒸気から液体になるときはこの熱を放出する。)を利用した流体ループ(二相流体ループと呼ぶ)が提案されており、1980年代から日本や米国、欧州が研究を進めている。

- 二相流体ループの概要を図1に示す。二相流体ループは
- ・熱を吸収し液体を蒸発させるコールドプレート (CP)
  - ・宇宙空間に放熱し蒸気を凝縮させるラジエタ
  - ・コールドプレートに液体を送るポンプ
  - ・二相流体ループ内圧力を制御するアキュムレータ
  - ・それらをつなぐ液路と蒸気路
  - ・制御系

から構成される。

CPは、ポンプによりCPに輸送された液体をCP上の機器からの発生熱で蒸発させる。その熱を蒸発潜熱として吸収

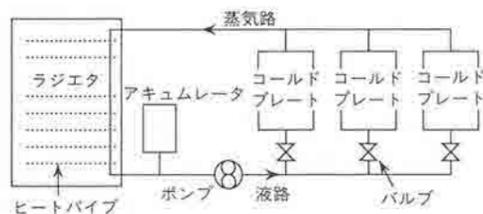


図1 二相流体ループの概要

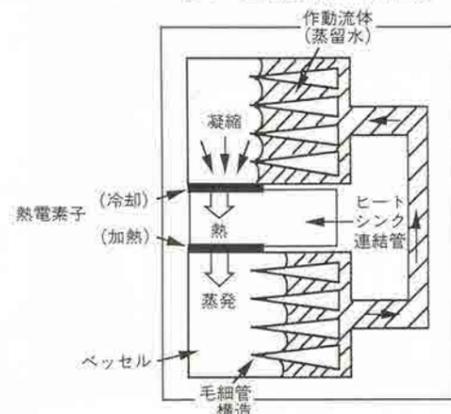


図2 熱駆動流実験ユニット (TDFU) の原理図

した蒸気は、ラジエタまで輸送され、その宇宙空間に放熱することにより凝縮して液体に戻る。CPの温度は液体の蒸発温度にはほぼ等しくなるが、液体の蒸発温度は二相流体ループ内の圧力に依存する。したがって、ループ内圧力をアキュムレータで制御するとCP温度を制御することができる。アキュムレータはその内部に二相流体ループから液体を吸入したり、その内部から二相流体ループに液を排出することにより、二相流体ループ内の圧力を制御する。

現在、宇宙開発事業団で研究を進めている二相流体ループでは、アキュムレータに熱駆動方式を採用することになっている。アキュムレータ内部の液体出入口部は毛細管構造になっており、液体だけを出入口に集められるよう工夫されている。さらにアキュムレータ内壁には細かい溝(グループ)がきざんであり、内壁に薄い液膜が形成されるようになっている。アキュムレータを加熱・冷却することにより内壁から液を蒸発させたり、グループ部分に蒸気を凝縮させることができる。これによりアキュムレータ内部の圧力を調整し、アキュムレータ内の液体を駆動する。IML-2での実験は、熱駆動流実験ユニット(TDFU)と呼ばれるアキュムレータの原理モデルを用いて、熱駆動の原理確認を行うものである。

TDFUの原理を図2に示す。TDFUは内部観察窓をもつ2つの銅製のベッセル(容器)、ベッセルを加熱・冷却するための2つの熱電素子(電気エネルギーと熱エネルギーを交換する素子。素子に流す電流の向きによって暖めたり冷やしたりする。)および熱電素子の発生する熱をたくわえる金属製のヒートシンクから構成されている。各ベッセルの内壁にはグループがきざんであり、2つのベッセルは連結路でつながれていて液体が移動できる。ベッセル内部は2つの部分からなる。1つはベッセルの連結路側の毛細管構造部分で、他は反対側の空洞部分である。作動流体としては蒸留水を使用する。ベッセル内表面と液体との親和性(濡れ性)を高くすることと表面張力により液体が毛細管の部分に吸い込まれることを利用してベッセル内の気体と液体とが分離される。微小重力下では気液分離などの流体の制御において、濡れ性や毛細管力が重要な役割をはたす。

熱電素子に通電すると、一方のベッセルは加熱され、他方のベッセルは冷却される。加熱されたベッセルの内部圧力は液体が蒸発するために上昇し、冷却されたベッセルの内部圧力は蒸気が凝縮するために減少して、2つのベッセル間に圧力差が生じ、液は加熱側から冷却側へ移動することになる。

実験は制振実験装置の制振機構のオンおよびオフ状態で実施され、ベッセル内の気液の状態を観察/録画して、熱駆動の原理を把握・確認する。

この研究により得られる成果は、二相流体ループのアキュムレータ設計に反映されるだけでなく、気相と液相が共存する系を取り扱うエネルギー技術、熱制御技術、環境制御技術、液輸送などの宇宙開発の基盤技術への応用が期待できる。

# 海外の実験装置とテーマ

## 米国航空宇宙局 (NASA) の実験装置と実験テーマ

SPACE ACCELERATION MEASUREMENT SYSTEM (SAMS)

C. Baugher (NASA Marshall Space Flight Center)

EXTENDED DURATION ORBITER MEDICAL PROGRAM (EDOMP)

Lower Body Negative Pressure : Countermeasure for Reducing Postflight Orthostatic Intolerance

J. Charles (NASA Johnson Space Center)

Microbial Air Sampler

D. L. Pierson (NASA Johnson Space Center)

## 欧州宇宙機関 (ESA) の実験装置と実験テーマ

BUBBLE, DROP, AND PARTICLE UNIT (BDPU)

Bubble Migration, Coalescence and Interaction with Solidification Front

R. Monti (University of Nobile)

Thermocapillary Migration and Interactions of Bubbles and Drops

R. S. Subramanian (Clarkson University)

Bubble and Drops Behavior under Low Gravity

A. Viviani (MARS Center)

Interfacial Phenomena in a Multilayered Fluid System

J. N. Koster (University of Colorado)

Thermocapillary Instability in Three-Layer System

J. Legros (Free University of Brussels)

Nucleation, Bubble Growth, Interfacial Micro-Layer, Evaporation and Condensation Kinetics

J. Straub (Technical University of Munich)

Static and Dynamic Behavior of Liquid in Corners, Edges, and Containers

D. Langbein (Battelle Europe)

ADVANCED PROTEIN CRYSTALLIZATION FACILITY (APCF)

Crystallization of Medically and Biologically Related Proteins

D. Blow (Imperial College)

Protein Crystal Growth at Known Supersaturation

A. Ducruix (CNES Laboratory of Crystallography)

Crystallization of Visual Pigment Rhodopsin

W. J. De Grip (University of Nijmegen)

Crystallization of Ribosomal 5S RNA

V. A. Erdmann (Free University of Berlin)

Crystallization of Convolvulin A, Aminoacyl tRNA Synthetase, and tRNA

R. Gieg (CNRS Institute of Molecular and Cellular Biology)

Crystallization of Glutathione Reductase

J. Helliwell (University of Manchester)

Protein Single Crystal Growth

W. Little (Universität Freiburg)

Microgravity Effects on Macromolecule and Virus Crystallization

A. McPherson (University of California at Riverside)

Crystal Packing Interactions Between Different Crystal Forms of Macromolecules Grown on Earth and in Microgravity

L. Sjolín (Chalmers University of Technology)

Crystallization of the Small Receptor Molecules Archaeobacterial Rhodopsin and Plant Calmodulin

G. Wagner (Justus-Liebig University of Giessen)

Crystallization of Horse Liver Alcohol Dehydrogenase Isozymes

M. Zeppezauer (University of Saarland)

欧州宇宙機関 (ESA) の実験装置と実験テーマ (続き)

CRITICAL POINT FACILITY (CPF)

- The Piston Effect  
D. Beysens (Department of Condensed Matter Physics)
- Thermal Equilibration in a One-Component Fluid  
R. A. Ferrell (University of Maryland)
- Density Equilibration Time Scale  
H. Klein (DLR Institute for Space Simulation)
- Heat Transport and Density Fluctuations in a Critical Fluid  
A. C. Michels (University of Amsterdam)

BIORACK (BR)

- Antigen Presentation and T-Cell Proliferation in Micro-G (ANTIGEN)  
A. Cogoli (University of Sassari and Space Biology Group of ETH)
- Lymphocyte Activation, Differentiation, and Adhesion Dependence of Activation (ADHESION)  
A. Cogoli (University of Sassari and Space Biology Group of ETH)
- Lymphocyte Movements and Interactions (MOTION)  
A. Cogoli (University of Sassari and Space Biology Group of ETH)
- Effect of Microgravity on Cellular Activation: The Role of Cytokines (CYTOKINES)  
D. Schmitt (Laboratory of Immunology)
- Effect of Microgravity on Cellular Activation: The Role of Cytokines (PHORBOL)  
D. Schmitt (Laboratory of Immunology)
- Cell Microenvironment and Membrane Signal Transduction in Microgravity (SIGNAL)  
P. Boulou (CNRS Jacques Monod Institute)
- Effect of Stirring and Mixing in a Bioreactor Experiment in Microgravity (BIOREACTOR)  
A. Cogoli (University of Sassari and Space Biology Group of ETH)
- Molecular Biological Investigations of Animal Multi-Cell-Aggregates Reconstituted under Microgravity (AGGREGATE)  
U. A. O. Heinlein (Heinrich-Heine-University)
- Regulation of Cell Growth and Differentiation by Microgravity: Retinoic Acid-Induced Cell Differentiation (MOUSE)  
S. W. de Laat (Netherlands Institute for Developmental Biology)
- The Sea Urchin Larva, a Potential Model for Studying Biomineralization and Demineralization Processes in Space (URCHIN)  
H.J. Marthy (CNRS Observatoire Océanologique)
- The Effects of Microgravity and Varying 1-g Exposure Periods on Bone Resorption; an *in vitro* Experiment (BONES)  
J. P. Veldhuijzen (Amsterdam Academic Center for Dentistry)
- Investigation of the Mechanisms Involved in the Effects of Space Microgravity on *Drosophila* Development, Behavior and Aging (DROSOPHILA)  
R. Marco (Independent University of Madrid)
- The Role of Gravity in the Establishment of Embryonic Axes in the Amphibian Embryo (EGGS)  
G. A. Ubbels (Netherlands Institute for Developmental Biology)
- Effect of Microgravity on Lentil Morphogenesis (LENTIL)  
G. E. Perbal (Pierre and Marie Curie University)
- Root Orientation, Growth Regulation, Adaptation, and Agravitropic Behavior of Genetically Transformed Roots (TRANSFORM)  
T.H. Iversen (University of Trondheim)
- Plant Growth and Random Walk (RANDOM)  
A. Johansson (University of Trondheim)
- Dosimetric Mapping inside Biorack on IML-2 (DOSIMETRY)  
G. Reitz (DLR Institute for Aerospace Medicine)
- Efficiency of Radiation Repair in Prokaryotes (REPAIR)  
G. Horneck (DLR Institute for Aerospace Medicine)
- Radiation Repair Kinetics in Eukaryotes (KINETICS)  
G. Horneck (DLR Institute for Aerospace Medicine)

ドイツ宇宙機関 (DLR) の実験装置と実験テーマ

ELECTROMAGNETIC CONTAINERLESS PROCESSING FACILITY (TEMPUS)

- Effects of Nucleation by Containerless Processing in Low Gravity  
R. J. Bayuzick (Vanderbilt University)
- Alloy Undercooling Experiments  
M. Flemings (Massachusetts Institute of Technology)
- Non-Equilibrium Solidification of Largely Undercooled Melts  
D. M. Herlach (DLR Institute for Space Simulation)
- Structure and Solidification of Largely Undercooled Melts of Quasi-Crystal-Forming Alloys  
K. Urban (Institute for Solid State Physics)
- Thermodynamics and Glass Formation in Undercooled Liquid Alloys  
H. J. Fecht (University of Augsburg)
- Metallic Glass Research in Space: Thermophysical Properties of Metallic Glasses and Undercooled Alloys  
W. L. Johnson (California Institute of Technology)
- Viscosity and Surface Tension of Undercooled Melts  
I. Egry (DLR Institute for Space Simulation)
- Measurement of the Viscosity and Surface Tension of Undercooled Melts under Microgravity Conditions and Supporting MHD Calculations  
J. Szekely (Massachusetts Institute of Technology)

SLOW ROTATING CENTRIFUGE MICROSCOPE (NIZEMI)

- Gravisensitivity and Geo(gravi)taxis of the Slime Mold *Physarum polycephalum* (SLIME MOLD)  
I. Block (DLR Institute for Aerospace Medicine)
- Influence of Accelerations on the Spatial Orientation of the Protozoan *Loxodes striatus* (LOXODES)  
R. Hemmersbach-Krause (DLR Institute for Aerospace Medicine)
- Gravioorientation in *Euglena gracilis* (EUGLENA)  
D. Häder (Friedrich-Alexander-University)
- Effects of Microgravity on *Aurelia Ephyra* Behavior and Development (JELLYFISH)  
D. Spangenberg (Eastern Virginia Medical School)
- Gravireaction in *Chara* in Microgravity and on Earth (CHARA)  
A. Sievers (Rheinische Friedrich-Wilhelms-University)
- Gravisensitivity of Cress Roots (CRESS)  
D. Volkmann (Rheinische Friedrich-Wilhelms-University)
- Lymphocyte Movements and Interactions (MOTION)  
A. Cogoli (University of Sassari and Space Biology Group of ETH)
- Convective Stability of a Planar Solidification Front (MONI)  
K. Leonartz (Aachen Center for Solidification in Space)

ドイツ航空宇宙研究所 (DLR) の実験装置と実験テーマ

QUASI-STEADY ACCELERATION MEASUREMENT (QSAM)

- H. Hamacher (DLR Institute for Space Simulation)

BIOSTACK (BSK)

- G. Reitz (DLR Institute for Aerospace Medicine)

フランス国立宇宙研究センター (CNES) の実験装置と実験テーマ

APPLIED RESEARCH ON SEPARATION METHODS USING SPACE ELECTROPHORESIS (RAMSES)

- Optimization of Protein Separation  
V. Sanchez (CNES Chemical Engineering Laboratory)
- Electrohydrodynamic Flow  
R. Snyder (NASA Marshall Space Flight Center)

カナダ宇宙機関 (CSA) の実験装置と実験テーマ

SPINAL CHANGES IN MICROGRAVITY (SCM)

- J. R. Ledsoe (University of British Columbia)

IML-2では、7名の宇宙飛行士がスペースシャトルに搭乗します。そのうち4名がパイロットクルーで、宇宙実験を担当する搭乗員です。他の3名はスペースシャトルを操縦する船長およびパイロットと、スペースシャトルやスペースラブのシステムをあつかうミッションスペシャリストです。パイロットクルーにはミッションスペシャリスト (MS)

プライムパイロットスペシャリスト

向井 千秋 (むかい ちあき)



1952年5月6日、群馬県館林市生まれ。  
慶応義塾大学医学部卒業。同大学医学部外科教室の助手として心臓血管外科の臨床および研究に従事していた85年8月に宇宙開発事業団によりPSとして選定される(応募者533名から選ばれた3名のPSのひとり)。同年11月、同事業団職員となり、現在宇宙環境利用システム本部宇宙環境利用推進部有人宇宙活動推進室宇宙実験搭乗部員。87年6月から88年12月まで米国防空宇宙局(NASA)ジョンソン宇宙センターの宇宙生物医学研究所の訪問研究員として、心臓血管生理学の研究に従事。88年7月には慶応義塾大学より医学博士号を授けられる。  
89年1月から90年4月まで国内において第1次材料実験「ふわっと'92」で実施される各種の実験についての研究および実験機器の操作技術の修得訓練を受ける。90年4月24日に日本人PS3名のなかから、「ふわっと'92」のプライムPSに選ばれた毛利衛氏のバックアップPSに任命され、これ以後は米国内のおもにNASAの施設にて訓練を受けたあと、92年9月に実施された「ふわっと'92」にバックアップPSとして参加する。同年10月16日にNASAによりIML-2ミッションのプライムPSに選定される。同年11月上旬にはIML-2米国訓練のため、渡米。現在はテキサス州ヒューストンに在住し、NASA施設および日本、カナダ、ヨーロッパの関係諸機関で訓練中。医学博士、既婚。  
趣味: スキー、水泳、ゴルフ、テニス等のスポーツ。(とくにスキーはセミプロの腕前で、大学時代にはアルペン競技での優勝歴あり)  
身長・体重: 158cm・52kg

とパイロットスペシャリスト (PS=搭乗科学技術者) とがいます。今回は、MS 3名とプライムPS 1名がシャトルに搭乗し、バックアップ (予備) PSはシャトル飛行中にNASAのマーシャル宇宙飛行センターにあるパイロット運用管制センターで地上から実験を支援します。

ミッションスペシャリスト (パイロットコマンダー)

リチャード J. ヒーブ  
Richard J. Hieb

1955年9月21日、米国ノースダコタ州生まれ。79年にコロラド大学より航空宇宙工学の修士号を授けられる。86年にNASAの宇宙飛行士に採用され、MSとして過去2回のシャトル搭乗経験 (91年4月および92年5月) がある。92年5月のエンタープライズ号の初飛行では、他のクルー2人とともにインテルサット6号を宇宙空間で修理することに成功した実績がある。17時間以上の船外活動 (宇宙遊泳) を含め、宇宙滞在時間が400時間を超えるベテラン宇宙飛行士である。今回はパイロットコマンダー (PC=搭乗実験責任者) として宇宙実験全体を円滑に進める役割を担う。  
身長・体重: 191cm・91kg



ミッションスペシャリスト

ドナルド A. トーマス  
Donald A. Thomas

1955年5月6日、米国オハイオ州生まれ。82年にコーネル大学より材料科学の博士号を授けられる。91年にNASAの宇宙飛行士 (MS) に採用され、現在は宇宙飛行士室の安全運用開発部門でスペースシャトルオービターシステム関連の業務に従事している。  
身長・体重: 178cm・68kg



ミッションスペシャリスト

リロイ チャオ  
Leroy Chiao

1960年8月28日に米国ウィスコンシン州に生まれ、カリフォルニア州で育つ。87年にカリフォルニア大学より化学工学で博士号を授けられる。91年にNASAの宇宙飛行士 (MS) に採用され、スペースシャトルの飛行ソフトウェアの開発に従事する。現在は宇宙飛行士室で搭乗員用装備関連の仕事に携わっている。  
身長・体重: 173cm・75kg



バックアップパイロットスペシャリスト

ジャン-ジャック ファビエ  
Jean-Jacques Favier

1949年4月13日、フランス生まれ。76年に物理金属学でパリ鉱山工科大学から、77年に凝固過程の研究でグルノーブル大学から博士号を授けられる。85年にフランス宇宙局に宇宙飛行士候補として選ばれる。現職はフランス原子力庁の凝固研究実験所長で、92年から始まった凝固研究のプロジェクトであるMEPHISTO計画の提案者である。  
身長・体重: 191cm・90kg



船長

ロバート D. カバナ (米国海兵隊大佐)  
Robert D. Cabana

1949年1月23日、米国ミネソタ州生まれ。71年に米海軍アカデミーから数学の学士号を取得する。86年にNASAの宇宙飛行士に採用される。パイロットとして過去2回のシャトル搭乗経験 (90年10月および92年12月) があり、宇宙滞在時間は273時間を超えている。  
身長・体重: 175cm・71kg



パイロット

ジェームズ D. ハルセル, Jr. (米国空軍中佐)  
James D. Halsell, Jr.

1956年9月、米国ルイジアナ州生まれ。85年に空軍工科大学より宇宙運用の分野で修士号を授けられる。91年にNASAの宇宙飛行士 (パイロット) に採用され、現在はスペースシャトル機の打ち上げ準備業務に従事している。  
身長・体重: 188cm・79kg



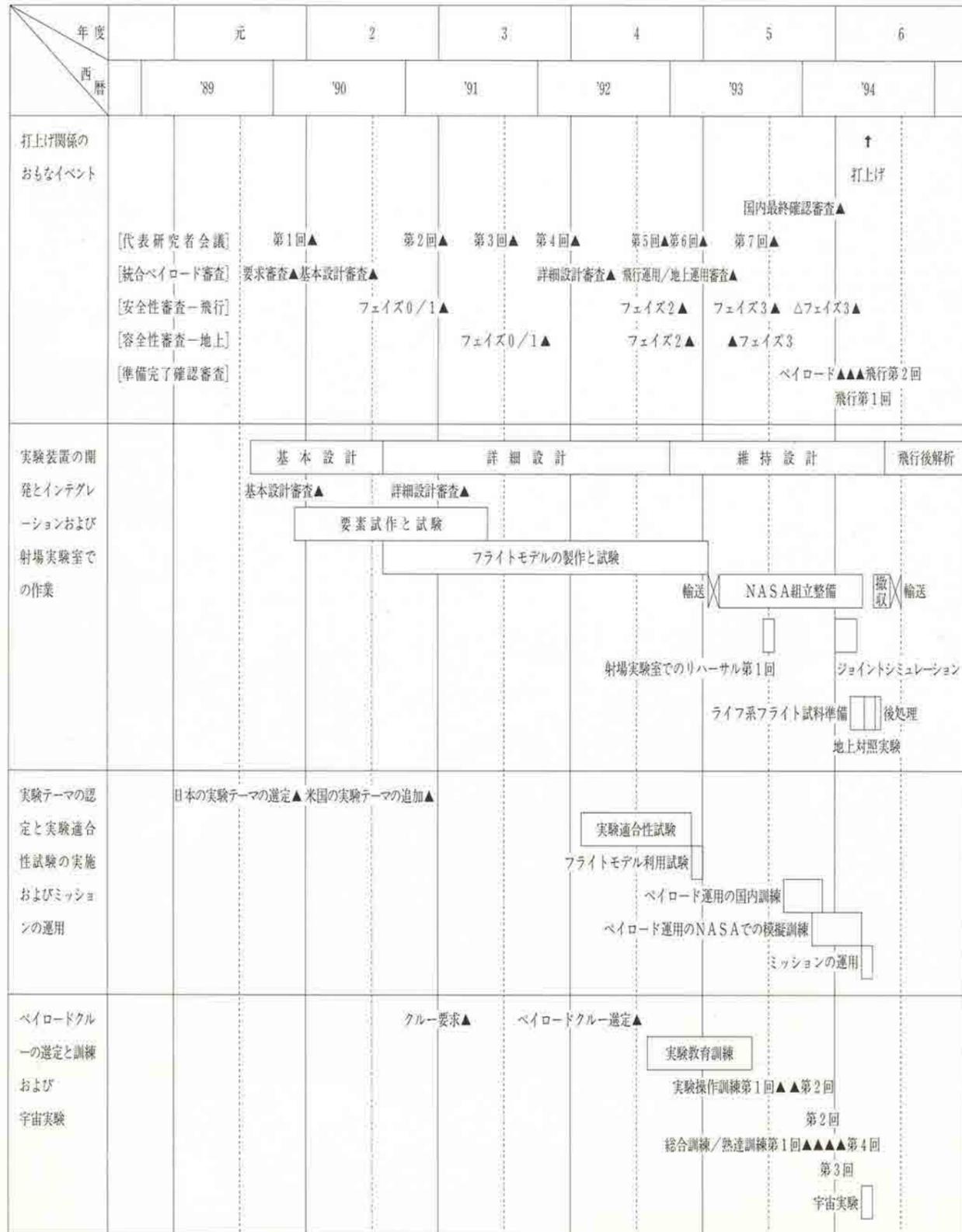
ミッションスペシャリスト

カール E. ウォルツ (米国空軍少佐)  
Carl E. Waltz

1955年9月6日に米国オハイオ州に生まれる。79年にジョンキャロル大学より固体物理学の修士号を授けられる。91年にNASAの宇宙飛行士 (MS) に採用され、現在は宇宙飛行士室のミッション支援部門で飛行データファイル関連の仕事に携わっている。93年9月にMSとしてスペースシャトルに搭乗した経験がある。  
身長・体重: 168cm・75kg



平成5年8月現在



AAEU	Aquatic Animal Experiment Unit	水棲生物飼育装置
AME	Acceleration Measurement Equipment	加速度計測装置
BBM	Bread Board Model	要素試作モデル
BM	Biological Microscope	生物顕微鏡
CKK	Cell Culture Kit	細胞培養キット
CDU	Convection and Diffusion Unit	対流拡散実験装置
CDR	Critical Design Review	詳細設計審査
CI	Co-Investigator	共同研究者
CNES	Centre National d'Études Spatiales	フランス国立宇宙研究センター
CSA	Canadian Space Agency	カナダ宇宙機関
DARA	Deutsche Agentur für Raumfahrtangelegenheiten GmbH	ドイツ宇宙機関
DIU	Data Interface Unit	データインターフェイスユニット
DLR	Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt	ドイツ航空宇宙研究所
DR	Double Rack	(スペースラブの実験装置用の)ダブルラック
EPDB	Experiment Power Distribution Box	実験用電力分配装置
EPSP	Experiment Power Switching Panel	実験用電力切換えパネル
ESA	European Space Agency	欧州宇宙機関
FFEU	Free Flow Electrophoresis Unit	電気泳動装置
FM	Flight model	飛行モデル
FOR	Flight Operation Review	飛行運用審査
FRR	Flight Readiness Review	飛行準備完了確認審査
FRZ	Freezer	冷凍庫
GOR	Ground Operation Review	地上運用審査
GMT	Greenwich Mean Time	グリニッジ平均時
GSU	Gas Supply Unit	ガス供給装置
HRM	High Rate Multiplexer	高レートマルチプレクサー
IML	International Microgravity Laboratory	国際微小重力実験室
IPL	Integrated-Payload	総合ペイロード
IWG	Investigators Working Group	代表研究者会議
KSC	John F. Kennedy Space Center	ケネディ宇宙センター
LIF	Large Isothermal Furnace	高温加圧型電気炉
LIF-MP	Large Isothermal Furnace - Material Processor	高温加圧型電気炉本体
LIF-VAP	Large Isothermal Furnace - Valve Access Panel	高温加圧電気炉-バルブアクセスパネル
LIFCE	Large Isothermal Furnace Control Equipment	高温加圧型電気炉制御装置
-EXP	-Experiment Control Unit	実験部
LIFCE	Large Isothermal Furnace Control Equipment	高温加圧型電気炉制御装置
-DIU	-Data Interface Unit	データインターフェイスユニット
MET	Mission Elapsed Time	ミッション経過時間
ML	Middeck Locker	ミッドデッキロッカー
MPE	Mission Peculiar Equipment	ミッション特別装置
MS	Mission Specialist	ミッションスペシャリスト
MSFC	George C. Marshall Space Flight Center	マーシャル宇宙飛行センター
MTU	Master Time Unit	マスタータイムユニット
NASA	National Aeronautics and Space Administration	米国航空宇宙局
NASDA	National Space Development Agency of Japan	宇宙開発事業団
OHC	Over head Container	オーバーヘッドコンテナ
PC	Payload Commander	ペイロードコマンダー=搭乗実験責任者
PCTC	Payload Crew Training Complex	ペイロードクルー訓練施設
PDB	Power Distribution Box	電力分配装置
PDR	Preliminary Design Review	基本設計審査
PI	Principal Investigator	代表研究者
POCC	Payload Operations Control Center	ペイロード運用管制センター
PRR	Payload Readiness Review	ペイロード準備完了確認審査
PS	Payload Specialist	ペイロードスペシャリスト=搭乗科学技術者
RAU	Remote Acquisition Unit	遠隔データ取得装置
REF	Refrigerator	冷蔵庫
RR	Requirement Review	要求審査
RRMD	Real-time Radiation Monitoring Device	放射線モニター装置
RSC	Rack Stowage Container	ラックストウェッジコンテナ
SR	Safety Review	安全性審査
SR	Single Rack	(スペースラブの実験装置用の)シングルラック
TDFU	Thermally Driven Flow Unit	熱駆動流実験装置
TEI	Thermo-Electric Incubator	恒温恒湿槽
VAS	Video Analog Switch	ビデオアナログスイッチ
VIB	Vibration Isolation Box	(制振実験装置の)防振機構
VIBES	Vibration Isolation Box Experiment System	制振実験装置
VVP	Vacuum Vent Panel	真空排気パネル



**NASDA**  
宇宙開発事業団

〒105 東京都港区浜松町2-4-1 世界貿易センタービル  
TEL: 03-5470-4111 FAX: 03-3433-0796