

宇宙放射線の生物影響の検討と宇宙飛行士の放射線防御対策の開発

L-11

代表研究者

長岡 俊治（宇宙開発事業団、宇宙実験グループ）

共同研究者

道家 忠義、林 孝義（早稲田大学）、小倉 紘一、山田 博章（日本大学）

高橋 旦、谷田貝 文夫（理化学研究所）、石川 雅紀、隆島 史夫（東京水産大学）

田ノ岡 宏（国立ガンセンター）、大西 武雄（奈良県立医科大学）

原田 和樹（PL学園女子短期大学）

要約

地球近傍の宇宙環境には多種の放射線が存在するが、その中で宇宙飛行士や搭乗パイロットにとって問題となるのは、プロトン以上の質量の高エネルギー粒子放射線（HZE）である。地球近傍での宇宙放射線量は、太陽の活動状況や、軌道の高度、傾斜角に大きく依存するとともに、それらの与える生物学的な影響とその評価は過去多くの飛行が欧米でなされたにもかかわらずまだ不明確な点が多い。

この実験では、宇宙放射線の中でも宇宙船の外壁を容易に貫通して船内に到達するHZE粒子や、この粒子線が船体やパイロット等と相互作用して生ずる2次的な放射線を、飛跡検出材や熱蛍光性線量計で計測するとともに、これらの宇宙放射線の生物への影響を細胞レベルから個体レベルまでの異なった側面から研究、評価することを目的に行われた。

宇宙実験に使用した装置は宇宙放射線モニタリングコンテナ2組とドシメータ13組であり、前者には、ハーツラスと呼ばれる固体飛跡検出材の間に生物試料を挟んだスタックを積層、充填し、後者には主としてハーツラスと熱蛍光線量計（TLD）を入れたものである。これらの検出器は、スペースラブとスペースシャトルの数箇所に設置され、8日間のミッション期間中そこに放置された。使用した生物試料は、放射線に感度の高いトウモロコシと大豆の種子、乾燥豊年エビ卵、DNA修復能を欠いた大腸菌突然変異株を中心に合計14種類のバクテリアを搭載した。これらの検出器および生物試料は、エンデバーでの宇宙実験終了後、約2週間で日本に返送され、物理的な線量解析と生物影響に関する実験を行った。

TLDによる線量計測結果は、フッ化リチウム型TLDに関してはばらつきが大きく、得られた値の信頼性が低かったが、ケイ酸マグネシウム型TLDは、被爆線量値が低いにもかかわらずばらつきの少ない良好な結果を与えることが解った。また、固体飛跡検出材の解析から得られた高エネルギー粒子線の線エネルギー付与率(LET)の分布は、IML-1ミッションやD-1のような同軌道のミッションで得られた結果と定性的にはよい一致を示したが、TLDと固体飛跡検出材両者の結果から推定された吸収線量率と線量当量率の比は、NASAジョンソン宇宙センターで計測された値と比較しかなり低い値を示した。

生物試料に関し、2種の植物種子の体細胞突然変異率には、統計的に有為な変化は認められなかったが、トウモロコシにくらべダイズがより放射線に敏感であることは相対的に確認することができた。豊年エビ卵は、試料の上下に置かれた飛跡検出材のエッチピット解析から、重粒子線に被爆した卵のみを弁別することが出来、幼生細胞に現われるピクノーシス頻度は地上群に比較し有為に上昇していることが解った。プラスミドDNA pHY300 PLKを保持した乾燥枯草菌胞子のテトラサイクリン耐性保持率は、地上対照試料では約90%であったが、フライト試料では約70%に低下しており、プラスミドDNA上に損傷が生じたか、宿主側の遺伝子に何らかの障害が出たことを示唆した。

また、DNA修復能に関与する酵素活性を欠いた11種類の大腸菌突然変異株については、帰還後の生存率の変化について比較解析した結果、宇宙放射線からのDNA損傷の修復には、エキソヌクレアーゼ(特に3' → 5')活性の寄与が大きく、紫外線損傷の修復系であるUVエンドヌクレアーゼ活性はほとんど寄与していないことがわかった。また、エキソヌクレアーゼ系を含んだ多重欠損突然変異株では、その多重度に依存して生存率が低下する事がわかった。さらに、それ自身ではDNA修復系を持たないプラスミド(pz189 DNA)においては、DNA鎖切断と思われる損傷が著しく生じており、地上対照群とは明かに異なった電気泳動パターンを示した。これらの結果は宇宙放射線の生物影響がDNAのような分子レベルの領域に局在した、かなり顕著な作用を与えており、今後さらに詳細な実験や解析が必要なことを強く示唆している。

1. FMPT宇宙放射線モニタリング実験の概要

1. 1 実験の目的

地球近傍の宇宙環境には多種の放射線が存在するが、スペースシャトルや宇宙ステーションの中で宇宙飛行士や搭載ペイロードにとって問題となるのは、プロトン以上の質量の高エネルギー粒子放射線（HZE）と船内において、それらから2次的に生ずるLETR放射線である。またこれらの宇宙放射線は一定の軌道においても、常に変化しており太陽フレアにともない100倍以上に増加することもある。一方、これらの高エネルギー宇宙放射線が生物や人体に与える影響の詳細に関しては、過去多くの宇宙飛行が欧米でなされてきたが、いまだに正確に把握されていない。特に、HZEに関しては、生物影響を正しく評価し、宇宙飛行士のリスクを推定するためのデータが十分でない。さらに、宇宙放射線と無重力環境との相互作用の可能性がD-1ミッションで示されて以来、基礎的な側面からの研究が必要とされてきた。本研究は、このような点に立脚し、長期の有人宇宙飛行時の船内放射線環境の正確な計測と、クルーの健康管理や安全確保にとって必要な生物学的な基礎データを得る事に目的があり、FMPTではIML-1での経験を生かし、宇宙実験として比較的容易で、物理計測と生物影響を関連づけて研究できるような実験系を採用し、高エネルギー宇宙放射線の測定と生物効果を評価するための実験を行った。

1. 2 実験の内容

1.2.1 実験試料

実験に供された試料の概要について以下に記す。放射線検出材、生物試料ともに飛行実験用と地上対照用とは全く同様に作製された。なお、試料の準備、実験装置への収納についての詳細は次の文書にまとめられているので参照されたい。

平成4年度委託業務成果報告書

F M P T宇宙放射線モニタリング実験の試料準備・後処理

コンテナ収納用試料とドシメータ収納用試料およびそれらの収納要領

IRI-USEN-92011 (本報告書の6. 3節に掲載)

(1) 放射線検出材

①固体飛跡検出材

固体飛跡検出材はスタックに組んだものとばらの平板の両方を用いたが、材質はいずれもハーツラスTD-1である。

ハーツラスTD-1

化学組成 : Poly(allyl diglycol carbonate)

0.01% ナウガード (アンチオキシダント) 添加

(アンチオキシダントは、HZE粒子の検出感度を向上させるとともに生物試料に対する毒性を軽減するために添加される)

外 観 : 透明プラスチック板 厚さ1mm

飛跡検出材スタックは、治具を用いて平板を5枚積層し、外周上8ヵ所にあけられた固定用の貫通孔にエポキシ樹脂を注入することにより固定した。

ばらの平板はコンテナにスタックを収納するときに生じた空隙をうめるために用いた。

②熱蛍光性検出材 (TLD : Thermoluminescence Detector)

LiF系 (LiF-7)

蛍光体がテフロン樹脂と混合され、白色ペレット状に成形されている。

外形寸法：約 $1\phi \times 6\text{mm}$

MgSiO₄・Tb系 (MSO-S)

蛍光体粉末が透明パイレックス管の中に封入されている。

外形寸法：約 $2\phi \times 10\text{mm}$

これらのTLDはアニールした後1個ずつアルミ箔で包んで遮光した。LiF-7、MSO-Sとも購入時期によって新旧の2種類があるので、区別のため旧には赤色油性ペンでアルミ箔の上から着色し、新は無着色とした。

TLD固定枠にこれらのTLDをアルミ箔ごと並べて粘着テープで固定し、枠をTD-1板と重ねてさらに粘着テープで固定した。

(2) 生物試料

生物試料はそれぞれの生物試料固定枠に固定し、ハーツラスTD-1板とともにスタックを組んだ。

①豊年エビ : *Artemia salina* 卵

固定枠への卵の固定は次の3通りの方法で行った。いずれも接着剤が卵に直接接触することはない。

- 1)卵を2枚のラップフィルムの間に均等に広げてはさみ、クッション材(ティシュペーパー)とともに固定枠の間に入れる。ラップフィルムの材質はポリエチレンである。
- 2)1)と同様であるが、ラップフィルムの材質は塩化ビニリデン(サランラップ)である。
- 3)卵をハーツラス製の内枠の孔($\phi 8\sim 9\text{mm}$)に入れ、内枠の上下をラップフィルムではさんで、固定枠の間に入れる。

TD-1板のうち卵に近い3枚は、HZE粒子の通過位置を同定するためにメッシュ(黒色の1mm方眼)を片面に印刷したものをうい、このメッシュ印刷面が卵の方を向くようにセットした。

②大腸菌 : *Escherichia Coli* H/r30R株、Hs30R株、NG30株 他

試料の固定は次のようにして行った。

- 1)菌体をゼラチンと混和し、メンブレンフィルター上で減圧乾燥する。これを菌の種類別に滅菌パックに収納する。
- 2)1)のパックを上下に5段重ねて両面テープで接着する。これを1グループとする。菌種

の組合せ方によってA、B、Cの3種類のグループを作る。

3) アクリル枠の中にこのグループを9つ(3種類×各3グループ)並べ、両面テープで接着する。各グループ内の試料の配置は次のとおりである。

Aグループ	Bグループ	Cグループ	
Hs30R	resA1	KY386	上↑
NG30	polA1	KY383	
H/r30R	polts	KY385	
pZ189	pZ189	pZ189	
D. R.	polA107	KMBL3835	下↓

スタックを組んだ後、9つのグループの固定された位置を、菌体パックの外周に沿って外側から検出板上に丸くけがきした。

③枯草菌 : *Bacillus Subtilis* ISW 1214株 孢子

孢子の枠への固定は次の2通りの方法で行った。

1) 形質転換した1214株の孢子を水と混合してガラスキャピラリー(マイクロピペッター用のガラスチップ)に入れ、両端に栓をしてエポキシ樹脂で栓を固定する。

2) 孢子をPVA(ポリビニルアルコール)と混合してキャピラリー(1)と同じものに入れ、栓をせずに減圧してPVAを飛ばす。孢子は管壁に貼りついた状態になる。

1)2)とも長短2種類のキャピラリーを用いた。またキャピラリーが枠の長孔の中で動くことのないよう、中央に両面テープを巻いて長孔に入れた。なお、1214株の形質転換の詳細については2. 4節に述べる。

④トウモロコシ: *Zea Mays* 種子

トウモロコシ種子は、メッシュ印刷のあるTD-1板にピンセットを用いて両面テープで固定した。この時胚のある側がメッシュ面と反対の方向を向くようにセットした。種子の数は、スタックあたり105個~107個(約11個×10列)である。

⑤ダイズ : L65系統 種子

ダイズ種子は、メッシュ印刷のあるTD-1板にピンセットを用いて両面テープで固定し

た。この時胚のある側がメッシュ面方向を向くようにセットした。種子の数は、スタックあたり56個（8個×7列）である。

準備した実験試料の構成品と数量を次の表1.2-1 に示す。

表1.2-1 宇宙放射線モニタリング実験試料の内容

(1) 飛行試料

構 成 品	数 量	備 考
豊年エビ卵スタック	6 個	2 個はドシメータに収納
大腸菌スタック	4 個	
枯草菌スタック	1 個	
トウモロコシ種子スタック	2 個	
ダイズ種子スタック	3 個	
固体飛跡検出材スタック	7 個	固体飛跡検出材のみのセット、 1 個はドシメータに収納
TLDスタック	13 個	ドシメータに収納

(2) 地上対照試料

構 成 品	数 量	備 考
豊年エビ卵スタック	7 個	3 個はドシメータに収納
大腸菌スタック	4 個	
枯草菌スタック	1 個	
トウモロコシ種子スタック	2 個	
ダイズ種子スタック	3 個	
固体飛跡検出材スタック	6 個	固体飛跡検出材のみのセット
TLDスタック	6 個	ドシメータに収納

1.2.2 実験装置

実験装置は「放射線モニタリングコンテナ」と「ドシメータ」とから構成される（表1.2-2 参照）。

これらの概略仕様は次の通りである。

(a) 放射線モニタリングコンテナ

アルミニウム製容器の内部（内容積 $10 \times 10 \times 10$ [cm]）に固体飛跡検出材（TD-1）と生物試料固定枠に固定された生物試料（上記）を層状に収納したものである。アルミニウム製容器は密封できる構造になっており、軌道上では開封しない。

コンテナには、1個当たり70～80枚の固体飛跡検出材を収納することができる。生物試料スタックは通常6～7個、固体飛跡検出材の間に積層される。

(b) ドシメータ

アルミニウム製容器の内部（内容積 $10 \times 10 \times 0.6$ [cm]）に固体飛跡検出材とTLDを収納したものである。アルミニウム製容器は密封できる構造になっており、放射線モニタリングコンテナと同様、軌道上では開封しない。

ドシメータには、1個当たり5～6枚の固体飛跡検出材を収納できる。TLDはいずれもアルミホイルに包んで遮光し、固定枠に並べて、ドシメータに収納される。

表1.2-2 実験装置の構成

	飛行用	地上対照用
コンテナ	2個	2個
ドシメータ	15個	10個

1. 3 実験の操作手順

(1) 実験装置への実験試料のセット

コンテナおよびドシメータへの試料の収納は、打上げの約1ヵ月前にすべて日本国内で行われた。図1.3-1 に放射線モニタリングコンテナへの試料の収納状態を、図1.3-2 にコンテナとドシメータの取付状態を示す。

(2) 実験の実施

試料を収納した装置はNASAケネディ宇宙センターに輸送され、飛行試料は打上げ前日にスペースシャトルのミッドデッキのロッカーに搭載され（図1.3-3 参照）、そのままの状態で軌道上に打ち上げられた。

軌道上でロッカーから取り出され、アフトエンドコーン他決められた場所に設置されて実験が開始された（表1.3-1 参照）。

設置された時間 : 0日 7時間21分 MET

収納された時間 : 6日22時間45分 MET

*MET : Mission Elapsed Time (打ち上げ後の経過時間)

各設置場所に置かれていた時間は、6日15時間24分である。

ミッション終了後、シャトルの軌道離脱前に実験装置は各設置場所から取り外され、再びロッカーに収納されて地上に帰還し、スペースシャトルの着陸当日に回収された。

一方地上対照試料はミッション期間中ケネディ宇宙センター内の地上施設に置かれ、飛行中のシャトル内部の温度履歴が模擬された。

飛行試料、地上対照試料とも、回収後密封状態を保ったまま日本に帰還した。

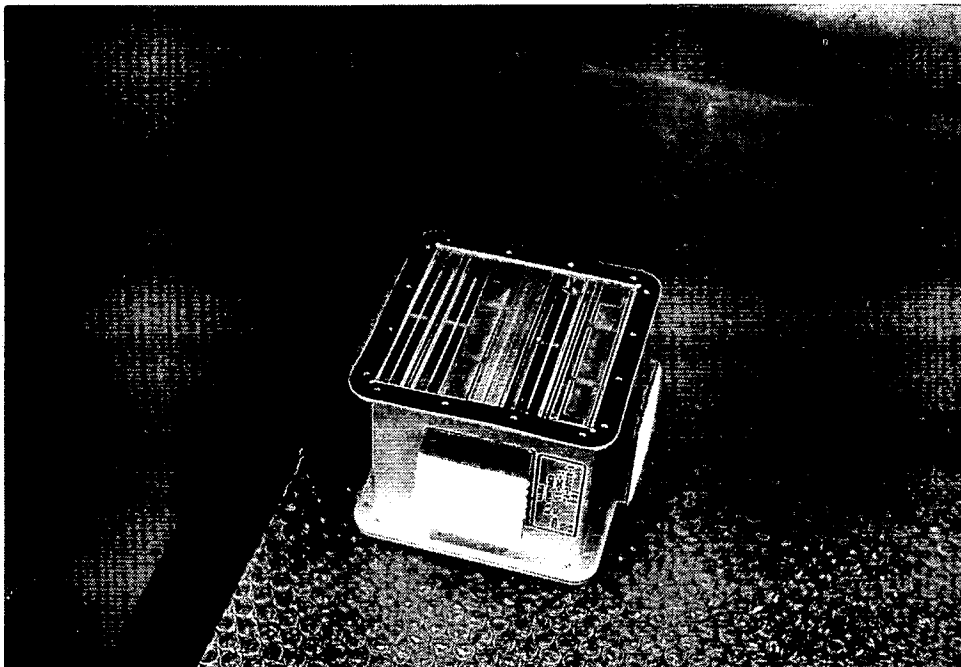


図 - 1.1 宇宙放射線モニタリングコンテナ内の試料スタック



図 - 1.2 ドシメータ内に固定されたTLDと枯草菌試料

コンテナーの上側

①	豊年エビ	E-A
②	タイズ	S-A
③	枯草菌	K-A
④	大腸菌	D-A
⑤	ハーヅラス	P-C
⑥	タイズ	S-B
⑦	大腸菌	D-B
⑧	豊年エビ	E-B

放射線検出材 FA01-FA09

放射線検出材 FA21-FA29

放射線検出材 FA41-FA50

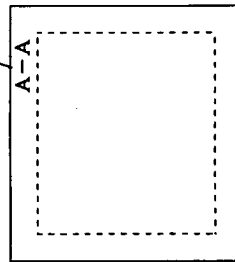
コンテナーの下側

E-A等の記号は、それぞれのスタックの識別記号である。

記号Aはスタック識別記号が記されている面が矢印の左側にあることを示す。

スタックの重ね方

スタック識別記号



コンテナーへの挿入方向

コンテナーへは、すべてのスタックについて、識別記号を目印にして挿入する。すなわち、挿入がうすたはスタックを挿入するときは、識別記号が記されている面が矢印の左側にあることを示す。

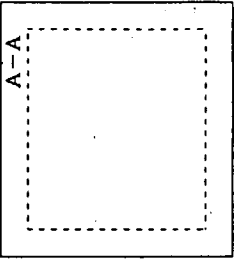
コンテナーの上側

①	トウモロコシ	T-A
②	大腸菌	D-C
③	タイズ	S-C
④	豊年エビ	E-C
⑤	ハーヅラス	P-B
⑥	豊年エビ	E-D
⑦	大腸菌	D-D
⑧	トウモロコシ	T-B

コンテナーの下側

スタックの重ね方

スタック



コンテナーへの挿入方向

コンテナーへは、すべてのスタックについて、識別記号を目印にして挿入する。すなわち、挿入がうすたはスタックを挿入するときは、識別記号が記されている面が矢印の右側にあることを示す。

図1.3-1(1/4)

コンテナーへの試料の収納状態(飛行用コンテナ)

図1.3-1(2/4)

コンテナーへの試料の収納状態(飛行用)

コンテナーの上側

①	豊年エビ	E-E	▲
②	ダイズ	S-D	▲
③	枯草菌	K-B	▲
④	大腸菌	D-E	▲
⑤	ハーヅラス	P-A	▲
⑥	ダイズ	S-E	▲
⑦	大腸菌	D-F	▲
⑧	豊年エビ	E-F	▲

放射線検出材 GA01-GA10

E-A等の記号は、それらのスタックの識別記号である。

記号▲はスタック識別記号が記されている面が矢印の先端側にあることを示す。

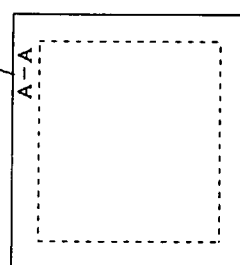
放射線検出材 GA21-GA29

放射線検出材 GA41-GA50

コンテナーの下側

スタックの重ね方

スタック識別記号



コンテナーへの挿入方向

図1.3-1(3/4)

コンテナーへの試料の収納状態(地上用コンテナ)

コンテナーの上側

①	トウモロコシ	T-C	▲
②	大腸菌	D-G	▲
③	ダイズ	S-F	▲
④	豊年エビ	E-G	▲
⑤	ハーヅラス	P-D	▲
⑥	豊年エビ	E-H	▲
⑦	大腸菌	D-H	▲
⑧	トウモロコシ	T-D	▲

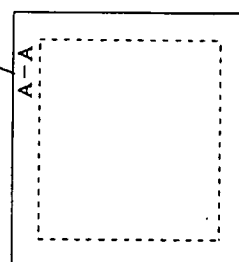
E-A等の記号は、それらのスタックの識別記号である。

記号▲はスタック識別記号が記されている面が矢印の先端側にあることを示す。

コンテナーの下側

スタックの重ね方

スタック



コンテナーへの挿入方向

コンテナーへは、すべてのスタックについて識別記号を目印にして右図に示すように挿入する。ただし、挿入する際にはスタックの向きが、挿入方向の記録を残すこと。

図1.3-1(4/4)

コンテナーへの試料の収納状態(地上用コンテナ)

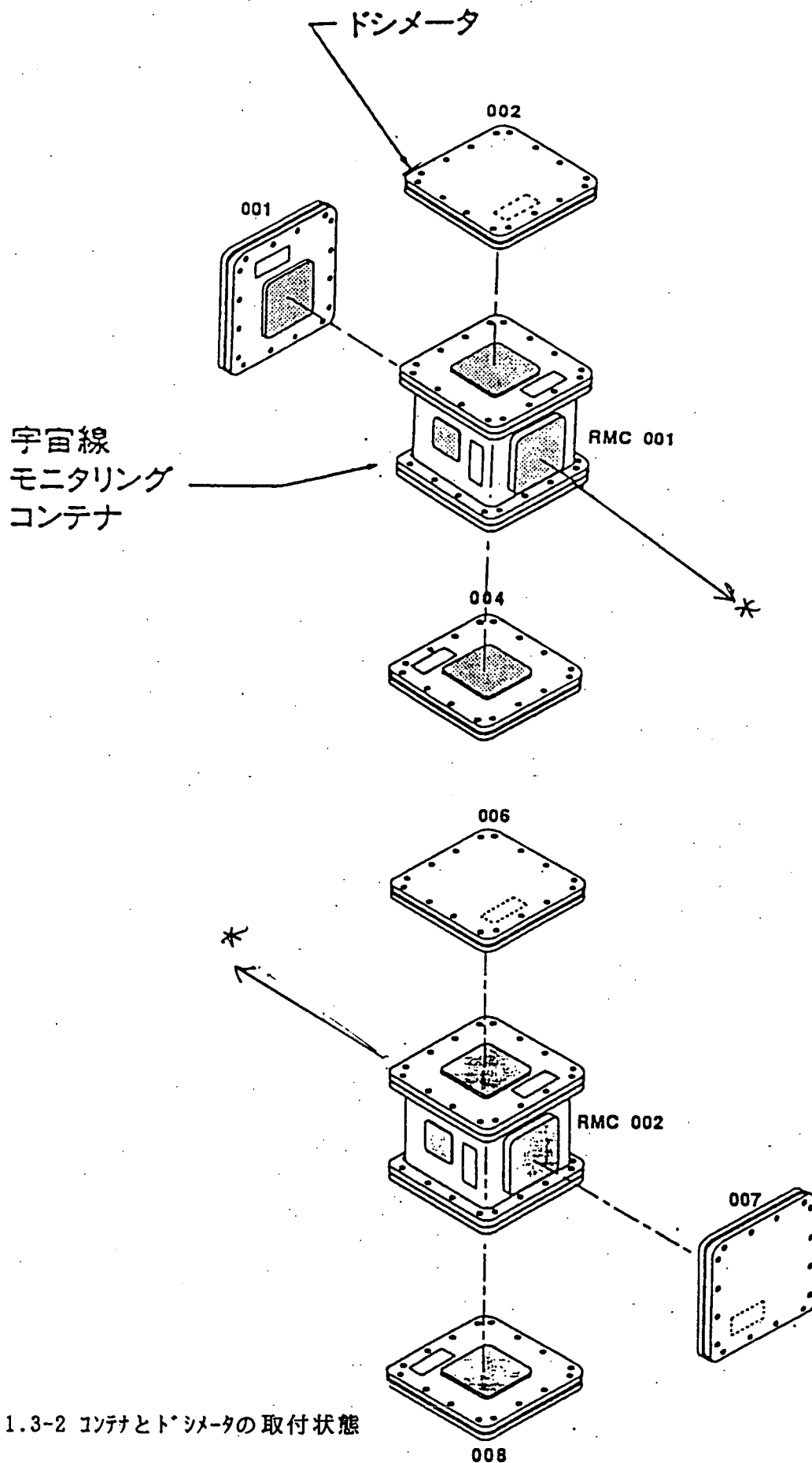


図1.3-2 コンテナとドシメータの取付状態

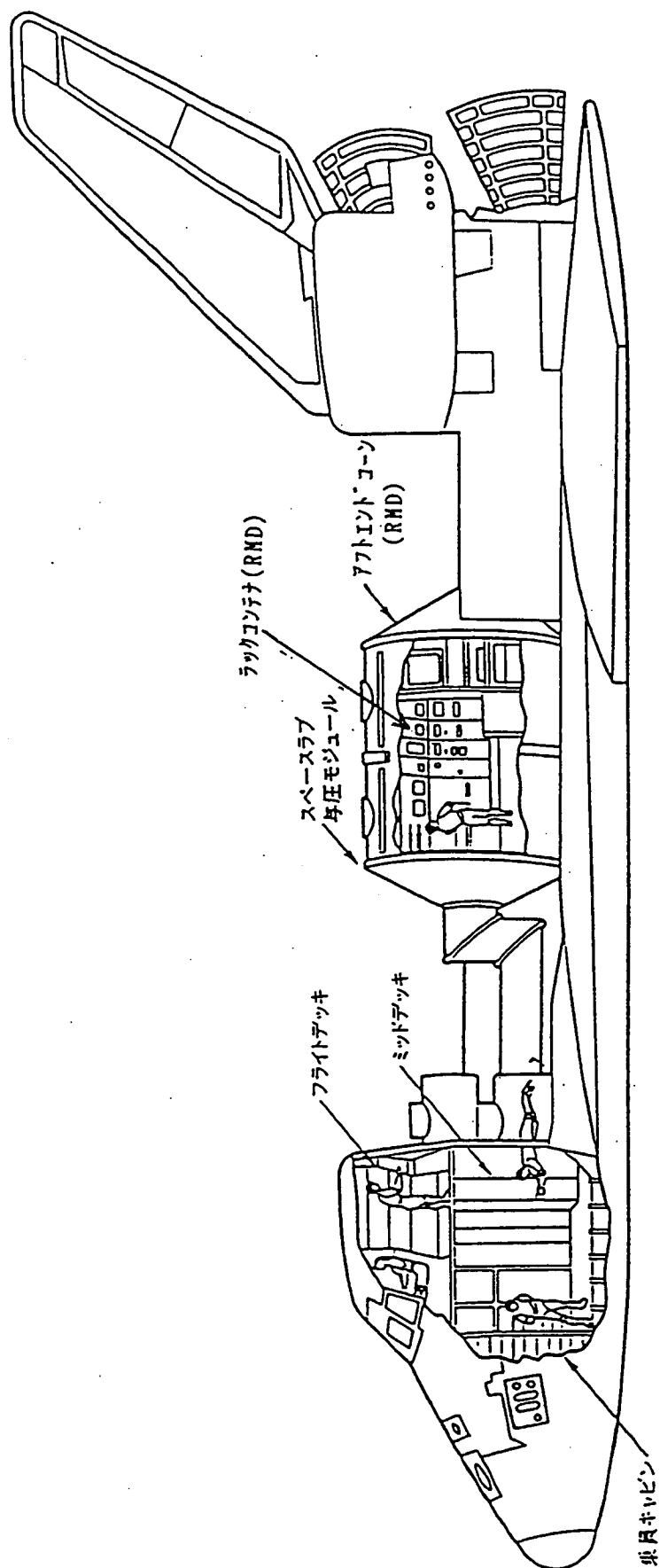


図1.3-3 スペースシャトル・スペースラプの概要と実験装置搭載場所

表1.3-1(1/2) 試料設置場所(飛行試料)

コンテナ1	アフトエンドコーン
コンテナ2	アフトエンドコーン

ドシメータS/N	識別記号	設置区分
001	TLD-A	コンテナ1に取付
002	TLD-B	コンテナ1に取付
003	E-I	コンテナ1に取付
004	TLD-C	コンテナ1に取付
005	E-K	コンテナ2に取付
006	TLD-D	コンテナ2に取付
007	TLD-E	コンテナ2に取付
008	TLD-F	コンテナ2に取付
009	TLD-G	ラック77'ランクハネル
010	TLD-H	MDロッカ-MF71H
011	TLD-I	ハエ容器
012	TLD-J	ハエ容器
013	TLD-K	ハエ容器
014	TLD-L	カビ生長箱
015	TLD-R	冷蔵庫

表1.3-1 (2/2) 試料設置場所 (地上対照試料)

コンテナ1	ケネディ宇宙センター
コンテナ2	ケネディ宇宙センター

ボックスメーカーS/N	識別記号	設置区分
016	TLD-M	コンテナに取付
017	TLD-N	コンテナに取付
101	TLD-O	ハエ容器
102	TLD-P	ハエ容器
103	TLD-Q	ハエ容器
104	TLD-Z	カビ生長箱
105	E-L	コンテナの付近
106	E-M	コンテナの付近
107	E-J	コンテナの付近
108	TD-1	コンテナの付近

1. 4 ミッションの概要

FMPTミッションの概要は次のとおりである。

フライト番号	STS-47
打上日時	1992年9月12日(土) 10時23分 (米国東部標準時)
着陸日時	1992年9月20日(日) 8時53分 (米国東部標準時)
オービター	エンデバー
ミッション期間	7日22時間30分*
打上場所	NASAケネディ宇宙センター(フロリダ州)
着陸場所	NASAケネディ宇宙センター(フロリダ州)
軌道高度	約300km、円軌道
軌道傾斜角	57°
搭乗員	7名(うち1名は日本人ペイロードスペシャリスト)

* 当初の予定では7日間であったが1日延長された

2. 実験結果

回収した試料はいずれも、外見に全く以上はなく、輸送や打ち上げ時の環境に充分耐えたことは明かであった。シャトル・スペースラブ内の温度環境は常時モニターされ、ダウンリンクされた温度履歴からは、室温の温度域を越えたことはなかった。

2.1 スペースラブ内の高LET粒子のエネルギー分布

図-2. 1は大腸菌スタック上下の飛跡検出材（ハーツラス）から得られたLET分布である。結果は典型的な低軌道宇宙船内のHZEのLETスペクトルであり、150KV/um付近の変極点は相対論的速度域の鉄イオンに基づくものである。図中に示した実線は有効シールド量の推定のためのシミュレーションデータで、1985年のD-1ミッション（軌道傾斜角：57度、高度324Km、コロンビア）によって得られた、LET分布に基づいており、今回のFMPTの放射線環境とほぼ等しいと考えられる。この図から、放射線モニタリングコンテナ内への実行的なシールド厚、約20g/cm²と推定される。解析したイベント数が充分大くないため高いLET領域での比較は誤差が多いが、飛跡検出材の置かれた場所による差は高LETで顕著で、低LET側ではほとんど一致している。

図-2. 2は図-2. 3と同様にして得られたドシメータ中の飛跡検出材のLETスペクトルをNASA BadhwarらがSTS-40でTPC(Tissue Proportional Counter)を用いて計測した結果（折れ線）を示してある。高LET領域での一致は極めてよいが、低いLET領域ではかなり大きなずれを生じている。この差については、NASAの計測方式が我々とは本質的に異なるためと考えられるが特に低LET領域での空間分解能の荒さも原因の一つと思われる。ハーツラスを用いた解析においては、低LET側の検出限界は3.5Kev/um付近であるが、これまで異なった核種とエネルギーを用いたキャリブレーションの結果から低LET側の誤差は少ないと思われる。また、我々のデータは、低LET領域ではHeinrich等（1986）のデータよりはるかに良好な結果が得られており、今回開発した固体飛跡検出材の感度はかなり改善されていることもわかった。

2.2 スペースラブでの吸収線量と線量当量

使用されたTLDは、LiFとMSOの2種類であり、それぞれのドシメータに18個のLiFと9個MSOが収納された。全体で13個のドシメータの内6個（A、B、C、D、E、F）がモニタリングコンテナのまわりに装着されエンドコーンに置かれた。G：ラック7ブランクパネル、H：ミッドデッキロッカー、（I、J、K）ハエ容器、L：カビ成長箱、Rミッドデッキ冷蔵庫、6個がが地上対照として、ハンガーLで保管された。これらのTLDのアニーリングは1992年8月6日に行なわれ、被曝線量の計測はミッション後の、10月30日～11月13日の間に行なわれた。結果は表-2. 1に示した、ここで、 D_t と D_c はそれぞれTLDと飛跡検出材の吸収線量、 H_c は飛跡検出材から計算された線量当量（ $QF > 1$ ）、 H_t は全線量当量を示す。

線量当量の推定は以下の計算式によって行った、ここで全吸収線量（ D_t ）はTLDの吸収線量を用いた。用いた2種類のTLDはともに高LET領域ではほぼLETに感度が依存しないことが地上での照射実験で明かとなっている。また、LETに依存した QF の加重は1971年ICRP勧告による直線的重みを仮定した。

$$\text{線量当量} \quad (QF = 1) = D_{TLD} - D_c$$

$$\text{線量当量} \quad (QF > 1) = H_c \quad (> 3.5 \text{ KeV} / \mu\text{m})$$

$$\text{全吸収線量} \quad D_t = D_{TLD}$$

$$\text{全線量当量} \quad H_t = D_{TLD} - D_c + H_c$$

$$\text{実効線質係数} \quad QF_{av} = H_t / D_{TLD}$$

INTEGRAL LET-SPECTRUM

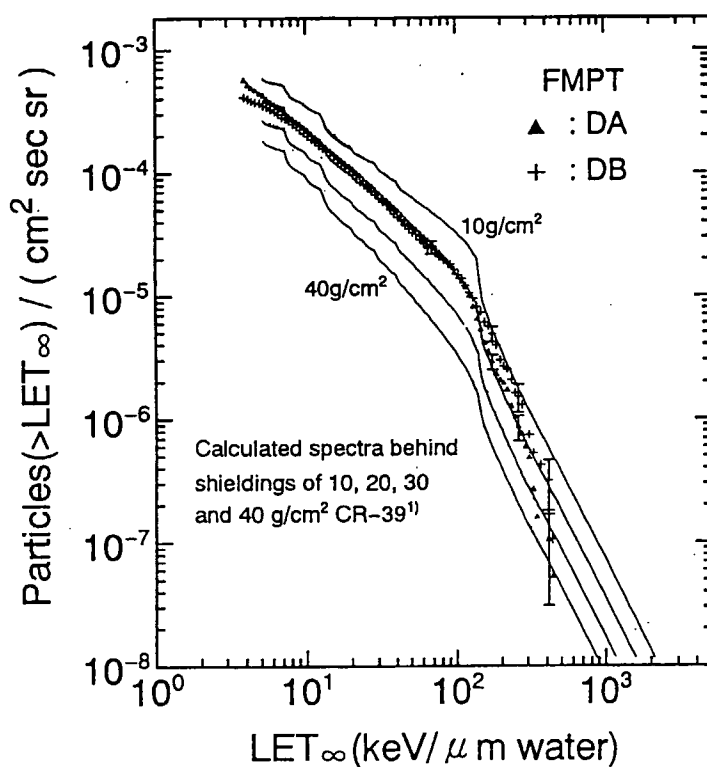


図-2. 1 大腸菌スタックに入射した粒子のLET分布

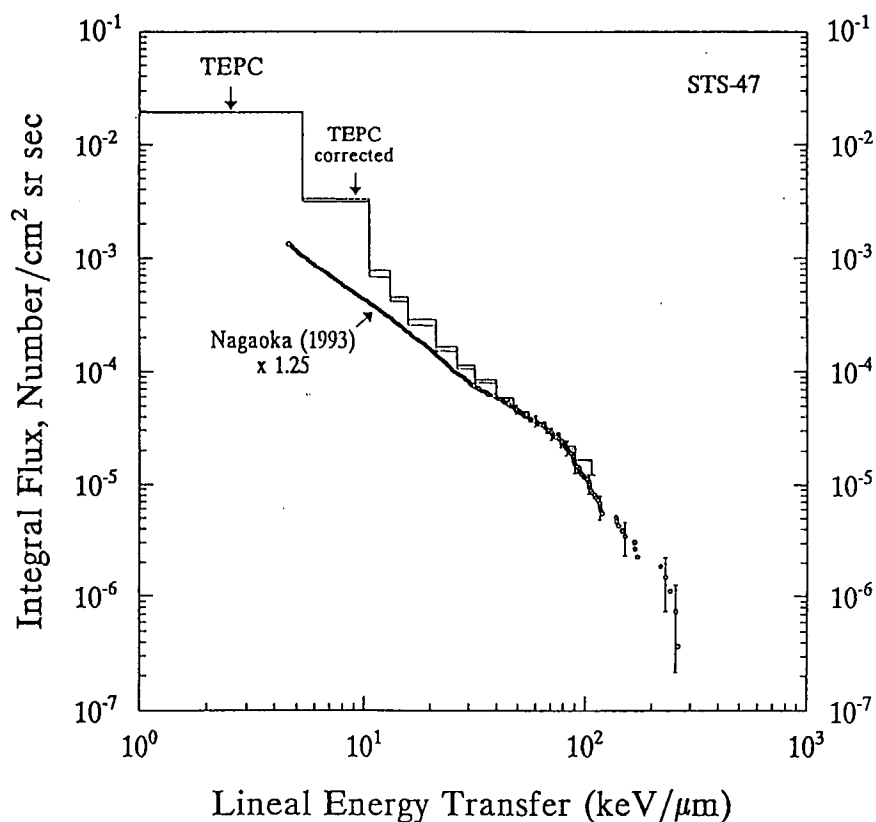


図-2. 2 ドシメータ内に入射した粒子のLET分布とNASAのTPCによる計測結果 (STS-40)

表-2. 1 TLDによる吸収線量率と線量当量率の推定

TLD (MSO)	D t mrad/day	D c mrad/day	H c mrem/day	H t mrem/day	H t / D t
A 0 0 1	17.5	1.62	8.83	24.7	1.41
B 0 0 2	16.9	1.11	6.27	22.1	1.31
C 0 0 4	15.4	1.22	7.70	20.9	1.36
D 0 0 6	16.3	1.56	9.84	24.6	1.51
E 0 0 7	15.0	1.05	6.03	20.0	1.33
F 0 0 8	15.7	1.13	7.05	21.6	1.38
G 0 0 9	15.2	1.72	8.93	22.4	1.47
H 0 1 0	13.5	1.15	4.39	16.7	1.24
I 0 1 1	14.3	1.22	6.66	17.7	1.24
J 0 1 2	13.5	1.15	6.56	18.9	1.40
K 0 1 3	13.0	0.77	4.60	16.8	1.29
L 0 1 4	13.8	1.14	6.69	19.4	1.40
R 0 1 5	12.3	1.05	5.30	16.6	1.35
AVERAGE	14.8			20.2	1.36
NASA(GC)*	5.34			14.36	2.74
NASA(Pr.)*	4.21			7.72	1.83
Total	9.55			22.08	

吸収線量率 (校正は Co-60 の γ 線により行なった)

L i FはMSOに比較し値のばらつきが極めて大きかったため、解析には利用しなかった。これはTLDの封入構造に問題があったことが飛行後の検証で判明した。すなわち、L i FではテフロンとL i Fとの混合物がアルミ箔で遮光されているだけの構造に対し、後者はパイレックス管に封入されていた。さらにL i Fが α 粒子、低エネルギー β 線、 γ 線などに感受性があるため、アニーリング後、ドシメータへのパッキング時の取扱や長期間の保存中にバックグラウンドの増加をきたした可能性が高かった。これに対し、MSOは極めて偏差の少ない良好な測定結果を与えることがわかった、これはMSOがパイレックス管に完全封入されていたことと、特性として比較的エネルギーの高い γ 線のみに感度があることに依るものと思われる。

2.3 アルテミア卵

アルテミア卵はモニタリングコンテナとドシメータの両方に搭載した。図-2.

3はモニタリングコンテナとドシメータに搭載した卵のピクノーシス出現頻度分布を示す。地上対照群では細胞あたり2個以上のピクノーシスの出現は極めて希であるが、飛行群については、細胞あたり数個最大13個のピクノーシスが見られた。しかしながら、これを細胞あたりの平均値で見るとこの場合の変化は、有為な差とは認められなかった。モニタリングコンテナに搭載した卵については、スタックの上下の飛跡検出材から得られた飛跡のトラッキングによって、HZEに被曝した卵と、被曝しなかった卵に弁別することが可能で、それぞれの群について、1)卵からの発生率、2)発生した幼生体細胞内の核の異常（ピクノーシス）の出現頻度の分布、についてべることができた。これら2群について、卵の孵化率には有為な差は認められなかったが、ピクノーシスの出現頻度の分布は被爆卵と非被爆卵で明らかに有為な差が認められた。また非被爆卵と判断された卵でも、地上に置いた対照試料に比べ、細胞あたりかなり多くのピクノーシスを示す細胞があり、飛跡同定の精度あるいは卵近傍での2次的なエネルギー粒子からの影響がでているものと考えられる。

発生頻度 (%)

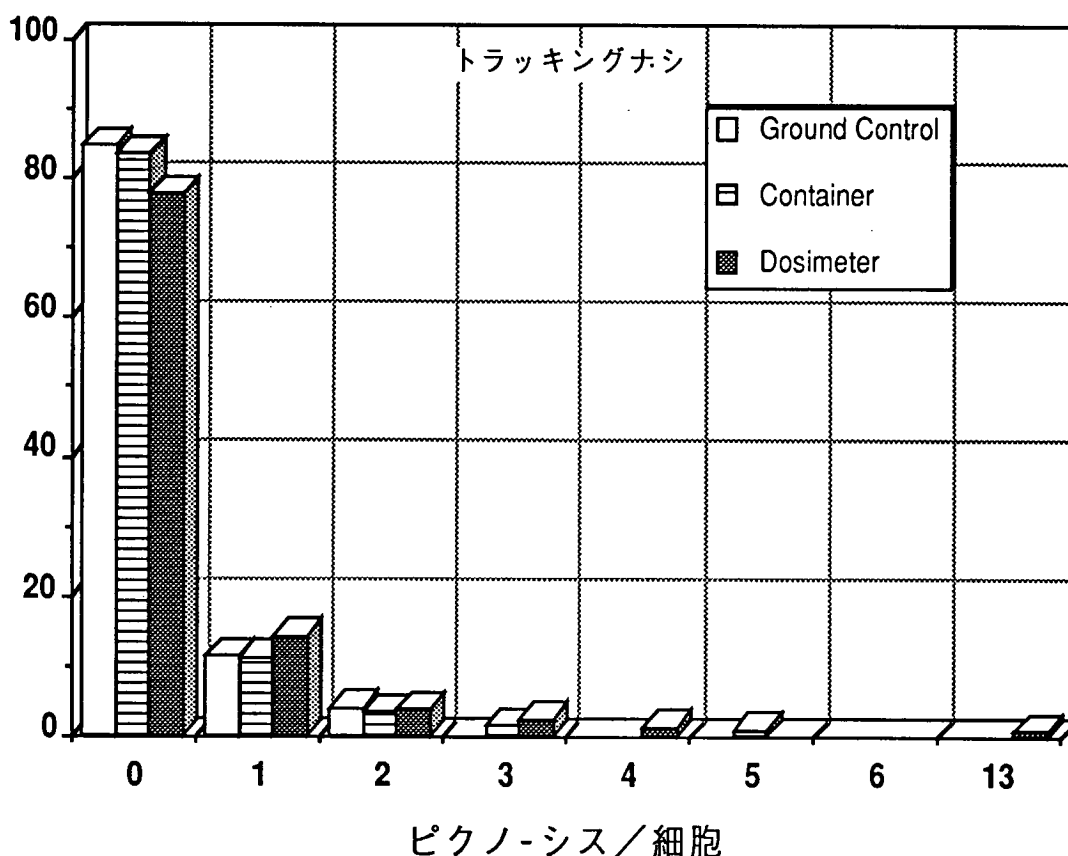


図-2. 3 アルテミア幼生細胞のピクノーシス分布 (HZEの被曝を弁別しなかった場合)

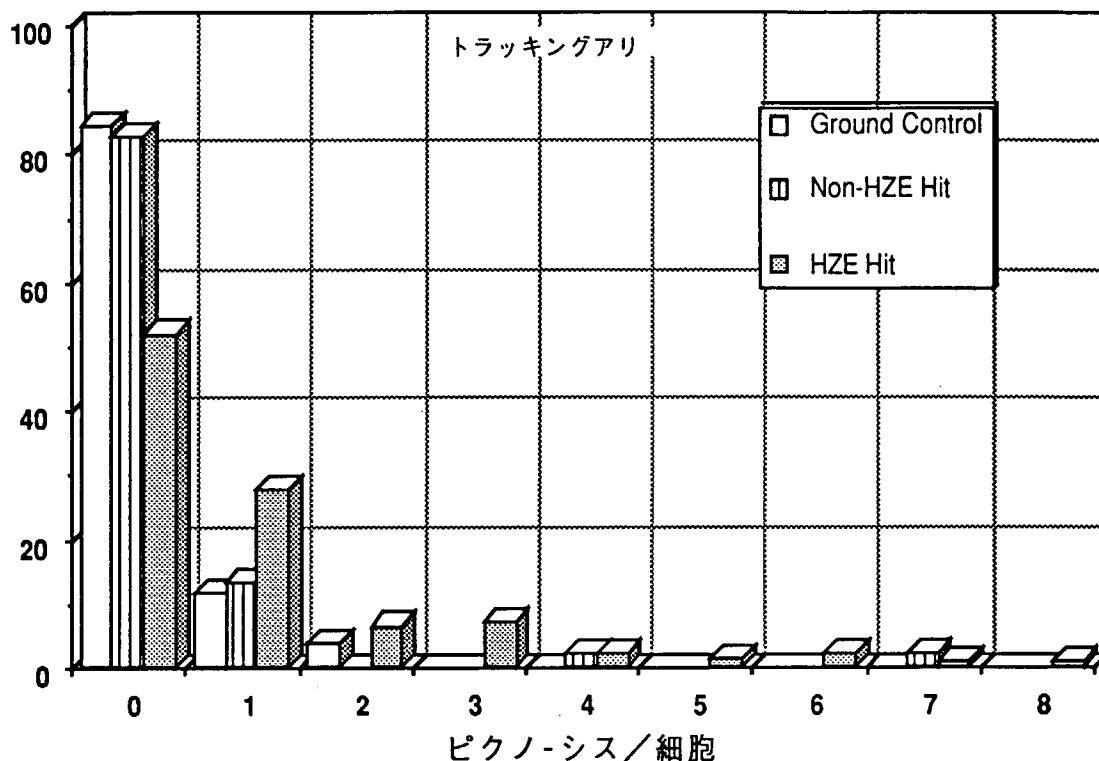


図-2. 4 アルテミア幼生細胞のピクノ-シス分布
(HZEの被曝を飛跡から弁別した場合)

2.4 枯草菌胞子

枯草菌胞子は、プラスミドDNA pHY300PLKを保持したものを乾燥状態でガラスキャピラリーに封入し、モニタリングコンテナの試料スタックに固定し搭載した。フライト後、試料の発芽率およびテトラサイクリン耐性保持率に関して調べた結果、図-2. 5に示したように、乾燥状態で封入した枯草菌胞子は、地上で4°Cまたは25°C程度の室温で約3ヶ月の保存に対しては、ほぼ90%前後のテトラサイクリン耐性を保持しているが、同一ロットのフライト試料ではTc耐性保持率が約70%前後にまで低下していた。これと同等の効果を得るために、アルゴンイオン(88MeV/n)で照射を行った場合、約100Kradの照射密度が必要であった。いずれの条件においても、テトラサイクリン耐性を欠いた枯草菌胞子は、電気泳動的にプラスミドを検出することが出来なかった。このことはプラスミドDNA上に損傷が生じたか、宿主側の遺伝子がプラスミドDNAを複製出来ないようなかなり重大な障害が出たものと解釈される。

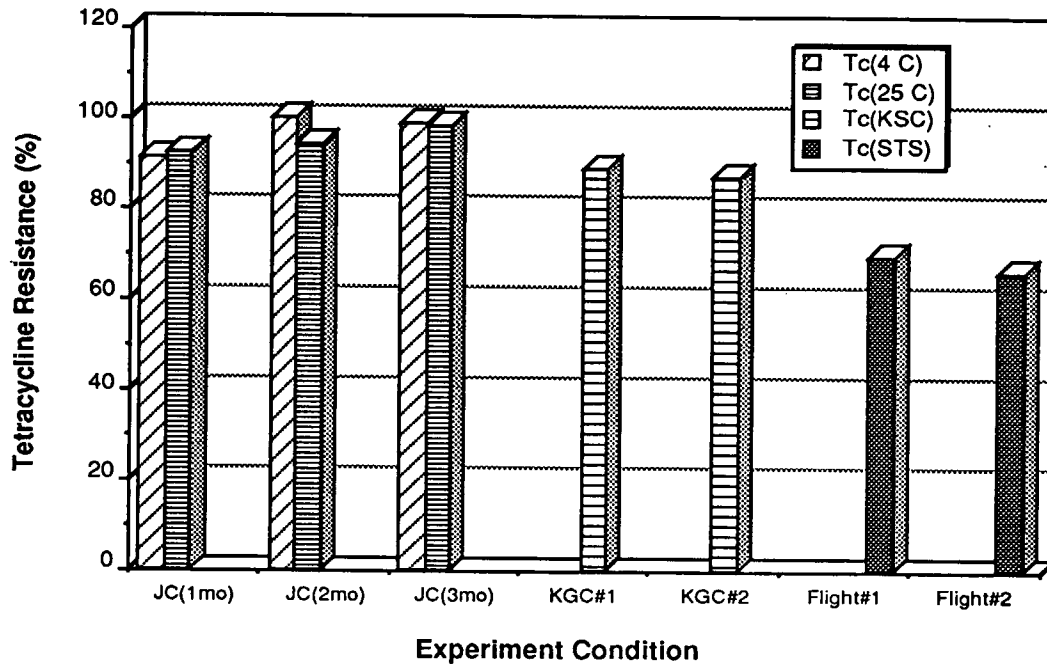
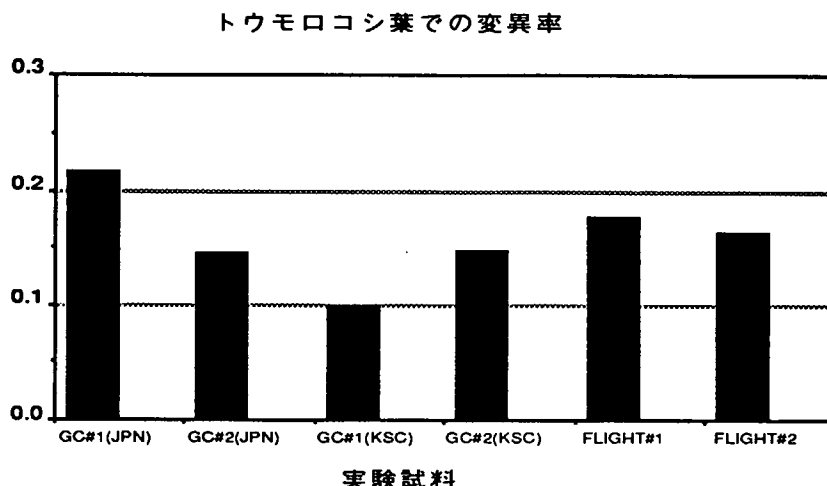


図- 2. 5 枯草菌 (*B. subtilis*) のテトラサイクリン耐性の変化

2.5 トウモロコシおよびダイズ種子

実験に用いた種子は、いずれも葉緑形質の遺伝子座で葉色突然変異遺伝子をヘテロで持ち、宇宙線や各種放射線による突然変異の結果が成長した葉上で黄色斑紋として検出可能である種を用い、この斑紋の出現頻度を影響評価の尺度とした。実験に用いたこれらの系では、トモロコシは第3葉上に黄色セクター、ダイズでは黄色と緑のセクターが出現する。飛行実験の結果、トウモロコシ葉上の突然変異斑の出現確率については、IML-1ミッションでの実験結果と異なり、地上対照群との間に有為な差を見いだすことは出来なかった。一方、ダイズの場合は、フライト群で突然変異出現率がわずかながら上昇していることが見いだされた。今回用いたダイズ系統 (L65) はトウモロコシ種子に比較し約10倍ほど生物学的感度が高いため、このように結果に差異が現われたと考えられる。

変異セクター数／葉



変異セクター数／葉

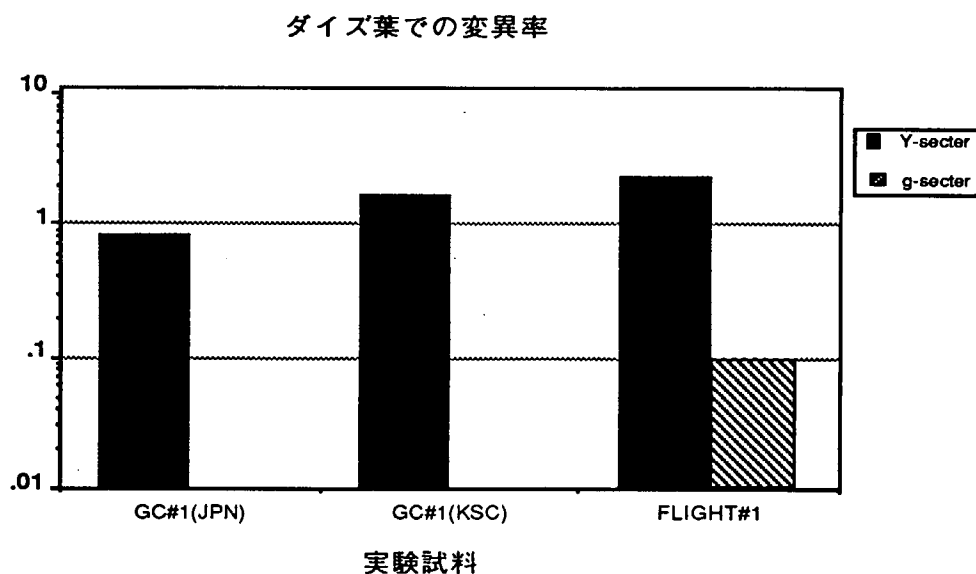


図-2. 6 トウモロコシおよびダイズ種子による突然変異出現率

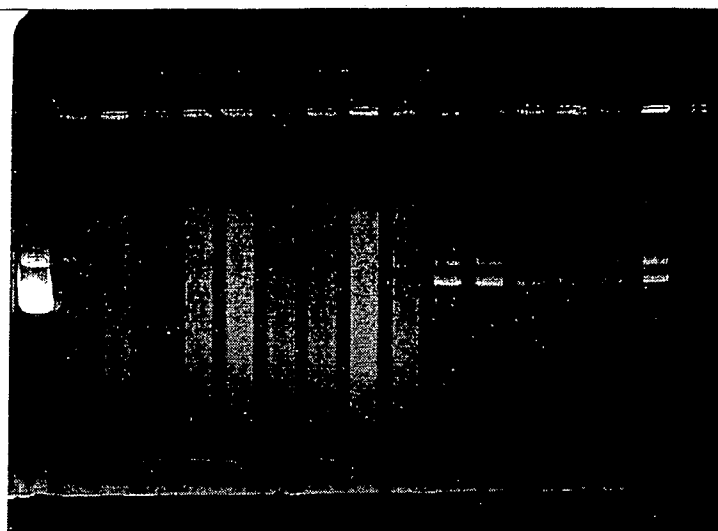
2.6 大腸菌突然変異およびシャトルベクタープラスミドDNA

搭載した大腸菌株およびシャトルベクタープラスミドpZ189DNA、長期の収納に耐えるよう、ミリポアフィルター上でゼラチンとともに包埋、乾燥し、さらにポリプロピレン膜で密封シールした。用いた大腸菌変異株は、DNA修復機能に関して、UVエンドヌクレアーゼ欠損株、DNAポリメラーゼ欠損株、組換え修復能欠損株（温度依存性）および3'と5'エクソヌクレアーゼ欠損株であり、さらにこれらの機能が多重に欠損した株も用いた。表-2.2は搭載した大腸菌突然

変異株とその遺伝子特性を示す。DNA修復能に関与する酵素活性を欠いたこれら11種類の大腸菌突然変異株について、帰還後の生存率の変化について比較解析した結果、宇宙放射線からのDNA損傷の修復には、エキソヌクレアーゼ（特に3'→5'）活性の寄与がが大きく、紫外線損傷の修復系であるUVエンドヌクレアーゼ活性はほとんど寄与していないことがわかった。また、図-2.8に示すように、エキソヌクレアーゼ系を含んだ多重欠損突然変異株では、その多重度に依存して生存率が大きく低下することが特徴的である。。さらに、図-2.7のように、それ自身ではDNA修復系を持たないプラスミド（p z 189 DNA）においては、DNA鎖切断と思われる著しい損傷が生じており、地上対照群とは明かに異なった電気泳動パターンを示した。これらの結果は宇宙放射線の生物影響は、DNAのような分子レベルの領域では、特定のDNA修復機構が機能出来なくなるような、かなり大規模な範囲で生じている可能性を強く示唆している。ガンマ線やUVのようにDNAの比較的限られた箇所に、変異を生じさせる作用とはかなり質的にことなっているとことが判明した。

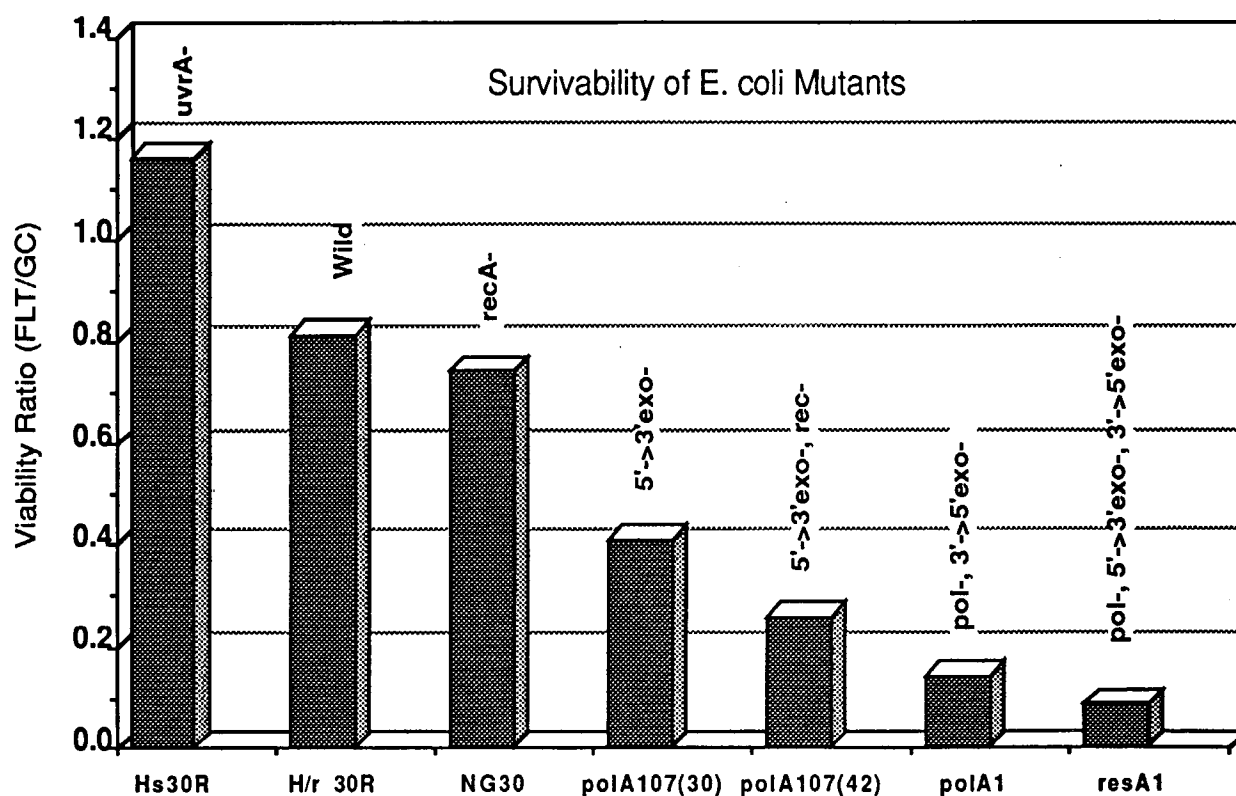
表-2.2 搭載した大腸菌突然変異株

菌 株	遺伝子特性
H/r30R	(argF ⁻ amber)
Hs30R	(argF ⁻ amber, uvrA ⁻)
NG30	(argF ⁻ amber, recA ⁻)
KMBL3835	(trpE9777 ⁻)
KY383	(trpE9777 ⁻ , lexA3 ⁻)
KY385	(trpE9777 ⁻ , recA56 ⁻)
KY386	(trpE9777 ⁻ , uvrA6 ⁻)
polts	(pol ⁺ and exo ⁺ , recA ^{ts})
polA107	(pol ⁺ , 5'exo ⁻ , 3'exo ⁺ , recA ^{ts})
polA1	(pol ⁻ , 5'exo ⁺ , 3'exo ⁻ , recA ^{ts})
resA1	(pol ⁻ , 5'exo ⁻ , 3'exo ⁻ , recA ^{ts})



From Left to Right
Control, 1-a, 1-b, 1-c, 1-d, 1-e, 1-f, 1-g, 1-h, 1-i, 5-h, 5-i, 6-b, 6-c, 6-d, 6-e, 6-f

図・2. 7 プラズミド p z 1 8 9 DNA のアガロース電気泳動
左から、コントロール、フライト試料(1-a ~ 1-i)、地上対照(5-h ~ 6-f)



図・2. 8 大腸菌変異株の生存率変化

3. 今後の課題

今回の宇宙実験ではかなり多くの生物試料を搭載し、その影響について調べた。その結果、地上実験で予測した範囲の結果となった系以外に、枯草菌や大腸菌変異株のように、全く予想しなかった結果が得られたものもあった。過去のD-1ミッションでは、1G対照試料に比較し予想外に大きな効果が得られたことから、宇宙放射線と微小重力環境の相乗作用の可能性が指摘されていたが、未だこの仮説が正しいか否か判断できるデータは得られていない。今回の宇宙実験においても、我々が得た結果の一部については、地上での予備実験結果だけでは説明が出来ない点がある。特にDNAレベルへの影響を直接調べた大腸菌変異株系やプラズミドを用いた実験の結果は低LET放射線のための効果では、説明が出来ない点がある。従って、高LET放射線、特にHZE、のDNAや遺伝子への影響は、DNA修復機能との関連でさらに詳細な実験が必要と考えられる。また、宇宙放射線の生物影響に関する研究のみならず、物理計測においても、今後できるだけ多くの宇宙実験機会を実験データの収集、解析を行う必要があると思われる。