

宇宙開発と熱現象

神 戸 博太郎*

(昭和 61 年 5 月 27 日受理)

Space Development and Thermal Phenomena

Hirotaro Kambe*

A history of space development is briefly reviewed in point of thermal phenomena. The cause of an accident of Space Shuttle Challenger on January 28, 1986 is introduced as the loss of sealing functions of a seal of a solid rocket booster at a low temperature. A new Space Transportation System using a space shuttle is described as an international cooperation program. Energy balances of spacecrafts during a mission are analyzed thermally from lift-off to landing. The heat-resistant materials of spacecrafts including silica tiles of space shuttle orbiter are criticized for the use. Materials processing at a microgravity environment is predicted as a very interesting field to the materials science and life science. The utilization of space lab in this field is emphasized by introducing SL-1 project of NASA/ESA in November, 1983. First Materials Processing Test of Japanese Government is reviewed precisely.

1. はじめに

宇宙開発の歴史は 1957 年秋ソ連の人工衛星スプートニク 1 号の打上げに始まる。その前に、第二次世界大戦中の大陸間誘導弾すなわち大型ロケットの開発の過程があり、これを踏まえての人工衛星の実現であったが、1957 年は地球に住む人類が宇宙空間の積極的利用を開始した記念すべき年である。

1961 年にガガーリンによる初の宇宙飛行、これを契機とするアメリカにおけるアポロ計画の開始、1964 年 10 月ソ連の 3 人乗り小型宇宙船ウォスホートの打上げ、そして 1969 年 7 月 21 日アポロ 11 号による月着陸と宇宙開発の歴史は短期間に目まぐるしく進展した。

30 年近い年月がたった現在、人工衛星は有人、無人併せて常時数百個が地球の上空を飛行している。誰でも宇宙開発の技術はすでに完成したかと思っていた矢先、1986 年 1 月 28 日スペースシャトル/チャレンジャーが、

全世界の人々がテレビの画面を見守る前で、爆発炎上するという事故が発生した。

すべての技術には失敗がつきものであるという開き直りの声が聞かれる反面、こんな危険なことはすぐ止めてしまえという性急な意見も出てくる。しかし、アメリカはこの事故に対して速やかに冷静な対応をした。事故直後の 2 月 3 日に大統領事故調査委員会が結成され、120 日以内に事故の原因、対策についての報告を出すことが求められた。

この委員会は 14 人のメンバーからなり、ニクソン時代に国務長官であったウィリアム・ロジャースが委員長で、始めて月面着陸を行ったニール・アームストロングが副委員長である。委員の中には 1983 年 6 月に、アメリカ女性で最初の宇宙飛行士になったサリー・ライドもいる。一般に宇宙飛行士と呼ばれているが、スペースシャトルには、機長、操縦士のほかに 2~3 人の科学搭乗者(ミッションスペシャリスト)が乗る。ライドさんはスタンフォード大学の物理学の博士号をもつ科学者で、スペースシャトル(STS-7)の科学搭乗者であった。

事故調査委員会は適確な作業をし、予定された 6 月 6 日に大統領に最終報告を提出し、その内容は 6 月 9 日に一般に公表された。報告は事故原因について次のように指摘している。

* 東京大学名誉教授、宇宙開発事業団スペースシャトル利用委員会材料分科会長

Professor Emeritus, The University of Tokyo
Chairman, Materials Subcommittee,
Committee on Utilization of Space Shuttle,
National Space Development Agency

『固体補助ロケットブースターの各セグメントの接合部はU字形のはめ込み式となっており、細い隙間を2本のO-リングでシールしている。チャレンジャーの場合、打上げ当日の異常低温によるO-リングの弾性低下、再使用ブースターの直径増加による間隙増加、接合部へ侵入した水の氷結により接合部のシール機能が働かず、燃焼ガスが噴出し、その結果外部燃料タンクが破壊され、爆発に至った。したがって事故原因は右側固体ロケットブースターの接合部の圧力シールの破損によるものであり、これは温度や材質等を十分考慮に入れなかった設計上の欠陥である』。

事故を導いた要因としては、『安全性を重視する管理体制の不備と、飛行計画の過密化に伴い、安全性確保の余裕がなかった』ことにあるとしているが、事故原因の中で低温による(ゴムの)O-リングの弾性低下と、水の水結が接合部のシール機能を破壊したといわれているのは、まさに熱現象の重大な関与といわねばならない。

本文では、宇宙開発の中で、特にスペースシャトルおよびスペースラブの利用の現状と、関連する熱現象について解説する。

2. スペースシャトル

1972年の9月、私はテキサス州ヒューストンにあるNASAのジョンソン宇宙センターを訪れた。1969年にアポロ計画が成功して、アメリカではもう宇宙に金を使うのはやめようではないかという声が高い中で、NASAはポストアポロ計画に苦慮した末、通称スペースシャトルと呼ばれる反復使用可能の宇宙飛行機を用いる新しい宇宙輸送システム(STS)の構想をまとめた。1972年の1月にニクソン大統領が“1970年代にはフロンティアである宇宙を、80年代には人類にとってより親しみやすい有用な領域に変貌させるために”、STSにゴーサインを出したのであった。

このSTSは軌道船(オービター)を回収再使用するの、アポロ計画まで一連の有人宇宙飛行機がすべて使い捨てであったのと比べて、経費節約ができるといわれていた。当時NASAは全体に沈滞気味であったが、STSの開始で一息ついたところであった。ジョンソン宇宙センターの博物館には、アポロ宇宙船の実物大模型と並べて、設計ができたばかりのスペースシャトルのエンジニアリングモデルの小さな模型が展示してあったのを思い出す。

NASAはSTS計画を立てるにあたり、始めから国際協力をうたっていた。そのため、どこの国でも一定の料金さえ払えば、人工衛星、実験機器等をスペースシャトルに積み込むことができる。これらは有償貨物(ペイロ

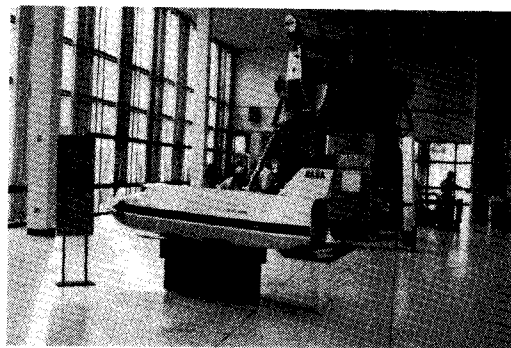


写真1 初期のスペースシャトル模型
(1972年9月撮影)

ード)と呼ばれている。これら进行操作するために利用者が派遣し搭乗させる人員は搭乗科学技術者(ペイロードスペシャリスト)と呼ばれ、前に出てきた搭乗科学者(ミッションスペシャリスト)とは区別されており、厳密に言えば宇宙飛行士ではない。

スペースシャトル/コロンビアの最初の打上げは、当初の計画より2年近く遅れて1981年4月12日に行われた。くしくも20年前にガガーリンが最初の宇宙飛行を行ったのと同月同日であった。スペースシャトルの打上げと飛行、人工衛星の放出等はNASAによって行われるが、その利用はNASA自体の計画以外に、国防省の計画が大きな比重を占めている。4機あったオービターの内1機が消滅してしまったので、今後国際協力による外国の利用がどの程度まで実現するか現在にははっきりしていない。

3. エネルギー収支

新幹線は電車であるから、動力は架線より取入れる。しかし、自動車、船、飛行機等は動力源である石油系燃料を自分の内に積み込み、これを消費して駆動される。ロケットについても同じことだが、大型ロケットの場合には地上より打上げられるとき極めて多量のエネルギーを必要とするので、機体のほとんどが燃料タンクからなるといってもよい。ロケット本体の燃料の外に、上空で飛行させる人工衛星、有人の場合は搭乗者およびその生命を維持するための諸設備等、ひっくり返して一つの閉じた空間が形成される。この空間の含むすべての重量を目的の高度まで持ち上げるためのエネルギーを計算し、必要な燃料を搭載してこの系のエネルギー収支のバランスを成立させるのがロケット工学である。

長期にわたって周回飛行を続ける飛行体の上空の軌道でのエネルギー収支の状況はまったく違ってくる。地上を離れるとき必要であった燃料はすべて消費されてしま

っている。放送衛星、気象衛星、通信衛星等の無人の人工衛星では、観測とデータ送受信のための機器を動かすエネルギーは、燃料として持込むことが困難であり、大型のパネルに貼った太陽電池より得た電力を蓄電池に蓄えて駆動される。これらの無人の人工衛星のエネルギー収支は太陽光から得るエネルギーと機器の駆動に消費されるエネルギーとのバランスで決まる。

地上を離れるときスペースシャトルは三つの部分からなる。乗員が乗って衛星軌道を通常7日前にわたって周回する軌道船は、末尾に三個の主ロケットエンジンをもち、前方に操縦室と乗員の生活空間をもつ。中間には、カバーを開いて空間に大きく開放される荷物室(その形からパレットともいう)がある。地上でいちばん大きく見えるのは、主ロケットエンジンに燃料を供給する外部燃料タンクである。燃料タンクは発射後8分間で空になって切離され、落下中に消失する。地上を離れるには、主エンジンだけでは力不足で、2本の固体ロケットブースターをもっている。ブースターは発射2分後に本体から切り離されて海中に落ち、回収して再使用される。チャレンジャー事故で主役を演じたのはこのブースターの一本であった。

軌道上にあるスペースシャトルのオービターの場合は、飛行時間が短いの、飛行中に必要なエネルギー源として燃料をもってあり、燃料電池で電力として取り出す。したがって、エネルギー収支の状況は普通の飛行機の場合とあまり違わない。

4. 耐熱性材料

宇宙開発の技術が急速に展開された1960年代の始めには、人工衛星を打上げるための大型ロケットの製作技術、ロケットもしくは有人衛星の回収の技術に関連して、耐熱性材料の開発が急がれた。特にロケットの噴出ノズルの孔の周辺は噴出ガスによって激しく加熱される。また地球上に回収される飛行体は、大気の中に再突入するにあたって空気力学的摩擦により極高温まで加熱されるので、これらの高温に耐える耐熱性材料が必要とされた。

熱の発生の原因と機構は、飛行速度、飛行体の形状等により、流体力学的に求められ、解明された。有人のアポロ衛星船が回収される際に円形の扁たい面を前方にして空気層に再突入すると、発生した熱の大部分が気流に沿って後方に逃げてゆくという事実の発見も、流体力学の成果である。

一方材料の面からいうと、予想される温度は現存の金属、セラミックスの何れも耐えられない数千度の高温に達する。その代りに、高分子材料を用いれば、表面の一部は熱により分解するが、生成物が炭化して表面の形態

が崩れず、しかも未反応の材料の熱の伝導性が悪いので、内部の温度上昇を防ぐことができるという新しい技術が登場した。これをアブレーション被覆という。これにより、回収する飛行体の表面は高分子材料をハネカム状またはバルーン(中空球)にして空気を多量に包含させた構造で保護することが一般に行われるようになった。これらの技術は、スペースシャトル以前の初期の宇宙開発に関連する熱現象としてはもっとも重要な事柄である。一口でいえば、単独の材料の耐熱性のみでは、この問題の解決には不十分であり、材料の複合によってはじめて満足な結果が得られたのである。

スペースシャトルの場合は、オービターは地上に回収される時翼をもったグライダーとして空気中に突入する。この場合には、アブレーション材料ではなく、再突入に際して高熱されるオービターの先端底面に耐熱性のシリカタイルを貼って内部の過熱を防いでいる。初期のスペースシャトル打上げに際して、このタイルが上昇時の振動や着陸時の衝撃で若干はがれ落ちたので、安全性が懸念されたが、現在は耐熱性塗料の改善によってこの問題は解決した。

5. 無重力下での材料製造

アポロ計画により月に着陸するまでは、宇宙開発はもっぱら乗物の実験と宇宙飛行士の訓練に重点がおかれていた。しかし、1969年に目的を達成してからは、1972年まで続いたアポロの飛行においても、これに続く1973~1974年のスカイラブの飛行においても、今まで人類の達しえなかった新しい宇宙環境の利用へと目的が変更された。宇宙において、涯しない高真空空間、太陽からの強い輻射線の照射、宇宙の涯から飛来する高エネルギー粒子との衝突等とともに、地球からの距離が遠いために、地球の重力からの離脱^{*1}等の新しい環境が開かれた。この環境で特に重要と思われるのは新しい材料の製造と生命現象に対する影響である。ここでは特に無重力下での新材料構造の話題を紹介する。

NASAはスカイラブその他で行った実験にもとづき、無重力環境は新しい合金・複合材料の製造、単結晶の生長等に著しい影響があるとして、これらの環境での新物質の製造法に対して特許を申請した。今後のスペースシ

^{*1} 無重力というのが一般的であるが、実際には高度300 kmの衛星軌道で、地表の重力加速度を1Gとすると、 10^{-6} G程度の微小重力(マイクロ重力)が存在する。無重量という表現もあるが、重量は物質の方の属性であるから、この語は適当でない。なおGを単位とすることについても疑問がある。Gは単位ではない!

ャトルでの実験は材料科学・生命科学に大きな進歩をもたらすものと大きな期待が集められている。

6. スペースラブ

STS に対する諸外国の協力の中で、最も積極的であったのは、欧州宇宙機関 (ESA) のスペースラブ計画である。西独で組立られたスペースラブをオービターの荷物室に搭載して、地球を周回する間の宇宙環境で搭乗科学者が種々の実験を行うものである。

西独が製作を担当するスペースラブは、与圧モジュールと呼ばれる人間が生活できるように設計された円筒形の部屋で、室内側の両壁面に設けられたラックに実験装置や測定・制御機器が組込まれる。上空で宇宙に放出される人工衛星、高真空中で行われる実験用の機器等は上空で開放される荷物室 (パレット) に積まれる。

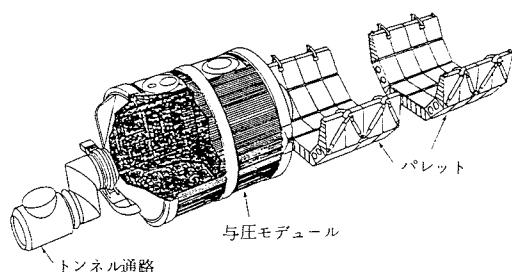


図1 スペースラブの構成
(NASA資料による)

ESA は NASA と協力して 1983 年 11 月 28 日にスペースシャトル / コロンビアによりスペースラブの初めての飛行 (SL-1) を行った。SL-1 では、与圧モジュールとパレットの双方が用いられて、NASA と ESA が提案した地球物理学、天文学、プラズマ物理学 (宇宙科学研究所大林辰造教授の人工オーロラ実験等)、宇宙環境の人体に対する影響等の実験が主として行われた。材料科学の分野では、表面張力の温度差によるマランゴニ対流、Zn/Pb 合金、鋳鉄の固化、無重力下での摩擦現象、蛋白質結晶の生長実験等が行われた。SL-1 には、搭乗科学技術者として初めての外国人である西独のマーボルト博士がアメリカ人とともに乗り込んだ。ドイツの上空を飛んだとき、ドイツ語で会話できるのが楽しかったという。

私は、後に述べる FMPT 計画に関与する一人としてケネディ宇宙センターに赴き、NASA、ESA の幹部連とともに SL-1 の打上げを見ることができた。アメリカ流に言えば、打上げは“パーフェクト”であった。その翌日、ヒューストンに飛んで 10 年ぶりに訪れたジョン

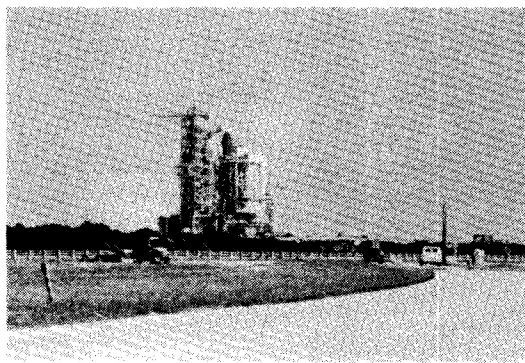


写真2 打上げ前日のコロンビア / SL-1
(1983 年 11 月撮影)

ソン宇宙センターの実験コントロールセンターに入り、SL-1 実験の進行の一部を見守ったが、スペースシャトル / スペースラブの開発の見事さには感激を禁じえなかった。

7. FMPT

STS に対する NASA の要請に応じて、わが国でも科学技術庁は 1974~1975 年に予算を計上して、特に材料科学の分野におけるスペースシャトル利用に関する調査を行った。それらにもとづき検討が進められた結果、1979 年 6 月 19 日宇宙開発委員会において、スペースシャトルの利用の推進についての報告が承認され、昭和 59 年度に第一次材料実験計画 (FMPT) の実施を目標とし、昭和 55 年度から所要の開発研究が始められた。FMPT はスペースラブを利用して与圧モジュールのダブルラック 2 個で無重力下の新材料製造実験を、別のダブルラック 1 個でライフサイエンス実験を日本人の搭乗科学技術者の手で行うものである。

FMPT を実施するために、昭和 54 年に宇宙開発事業団にスペースシャトル利用委員会が設けられ、実験テーマの募集と実施するテーマの選考が行われた。その結果、昭和 58 年夏に大学、国立研究機関、民間企業等より寄せられた 103 件のテーマの中から 34 件 (材料関係 22 件、ライフサイエンス関係 12 件) のテーマの実施が宇宙開発委員会によって決定された。一方、この実験を行う日本人搭乗科学技術者も、522 名にのぼる応募者の中から、昭和 60 年 8 月 3 名の候補者が選抜され、現在種々の訓練を受けているが、最終的には 1 名がスペースシャトルに乗ることになっている。

FMPT の実施のために、次に示す装置がスペースラブの空間的・電力的な制約を考慮して新たに設計製作された。これらはそれぞれ数テーマに共用される。

表 1 FMPT テーマ分野別分類表

	テーマ数
A. 材料分野	22
1) 新材料創造	
化合物半導体材料の製造	5
無機材料の製造	2
金属複合材料の製造	3
有機金属材料の製造	1
2) 地上の既存生産技術の改善および向上	
金属製造技術	3
半導体材料等製造技術	2
3) 将来の宇宙製造への基盤技術の確立	
無容器処理等材料製造技術	3
合金生成機構	3
B. ライフサイエンス分野	12
1) 生体材料の分離および調製技術の向上	
電気泳動法による生体成分の分離	2
生体材料の結晶成長・培養技術	2
2) 宇宙環境への適応技術の確立	
宇宙環境が生物に与える影響	4
宇宙飛行における人間の適応性	4

連続加熱型電気炉(最高 1300℃)

高温加圧型電気炉(1600℃, 1MPa)

温度勾配型電気炉(1250℃, 勾配 60℃/cm)

イメージ炉(2100℃, 500 W-ハロゲンランプ 2 個)

音波浮遊炉(1600℃, 14~20 kHz)

電気泳動装置(カセット式, フリーフロー型)

その外に, 数件の特殊実験装置を用いる実験もある。

科学技術庁は, 宇宙開発事業団が実施する FMPT の外に, 昭和 52 年度より 5 か年計画で, 無重力環境下の新材料創成に関する実験に対し, 科学技術振興調整費として予算を計上し実施した。この経費は FMPT に使用される各種電気炉の地上予備実験用の試作品(BBM)の製作に役立った。現在宇宙開発事業団の予算で実際に飛行に用いられる機器(FM)と同型の機器(EM)が製作されつつある。

FMPT で行われる宇宙環境での実験テーマには, 高真空に露出する実験は採用されていない。実験はすべて与圧モジュール内で行われる。太陽光線の照射効果を直接見るテーマもない。イオン性粒子との衝突の生物に対する影響を見る実験が 2 件ある。

材料科学の実験はほとんどが無重力の効果, 特に密度差による沈降, 対流が存在しない効果を考慮したものが多く, 均一な合金, 地上では混合しない密度の違う 2 種類の金属の合金, 均一な半導体等の製造, 単結晶の生成等を目的とするものが大部分である。なお, SL-1 でも行われた実験であるが, 温度による表面張力差に基づくマランゴニ対流を調べる実験もある。

これらのテーマはいずれも熱現象を直接に対象とするものではないが, 金属, 半導体を扱うテーマでは高温に加熱して溶融し, 冷却して凝固させるという共通のパターンがあり, 何れも熱現象が関与している。熱対流そのものを対象とするテーマもないし, 比熱や反応熱を測定するようなテーマもないが, 間接的にはどのテーマにもこれらが関係していることはいうまでもない。

8. おわりに

FMPT の 34 件の実験は, NASA の提案した 2 件と併せて 1988 年 1 月末に SL-J としてスペースシャトル/アトランティスで実施される予定であった。チャレンジャー事故のため, 1986 年 7 月現在, スペースシャトルの打上げは, 再開の目途が全く立っていない。一説には, 再開は 1988 年 4 月以降ともいわれているので, SL-J の打上げが大幅に遅れることは十分に考えられる情勢である。

FMPT は, おそらくわが国で初めての大学, 官庁, 民間の研究機関の協力によって行われる大規模の国家的計画であり, 将来宇宙基地構想ともつながりを持つものだけに, ぜひ実現させたいものである。