

特集:「ひてん」宇宙でスウィング



宇宙科学研究所
1994.1 No. 154

JASニュース

年頭のご挨拶

宇宙科学研究所長 秋葉 鏡二郎

明けましておめでとうございます。

皆様、それぞれに、新たな抱負をもって、新年を迎えられたことと存じます。

この新年号は、昨年4月に月面に衝突し、使命を終えた「ひてん」の特集号ですが、昨年は「あすか」の打ち上げ、「GEOTAIL」、「ようこう」、「あけぼの」の引き続きの活躍など我が国の宇宙科学の成果が花開いた年でもありました。

世界的に見れば、冷戦構造崩壊後の世界の宇宙開発が低迷する中で、宇宙科学研究所の存在が国際注目されるようになりました。これも一重に平和、学術の目的に徹し、一步一步着実に研究を進めてこられた諸先輩とご支援を頂いた関係者のご尽力のもたらした賜物といえます。昨年のこの欄で触れた研究所の第二期整備計画は年の前半においてほぼ基本構想をまとめ、後半では国内外の有識者に御参加いただき第三者評価委員会を設置し、

現在の宇宙科学研究所の活動に対する評価に加え我々の将来構想について御意見をいただく作業を進めてまいりました。今年は、これらの経過を踏まえ、具体的着手にむけての最後の地固めに取り掛かる年と考えております。また、わが国全体の宇宙開発については、政策大綱の改訂の年であり、我々の将来構想を国の計画の中に於いて、適確に位置付ける上でも時宜を得ております。

今年は、M-V型をはじめ各種衛星の開発計画が本格化し、複雑な国際関係への対処を含め、諸事多忙かつ多難な年となる事が予想されます。この様なときこそ、地平の彼方を望みつつ、足下を踏み締め着実な歩みを心掛けることが肝要と存じます。

皆様の、御健康と御活躍を祈念いたしご挨拶の結びといたします。

新年特集号に寄せて

ISASニュース編集委員長 松尾 弘 毅

昨年4月、「ひてん」は地球・月空間を存分に飛翔したのち、初の工学実験衛星としての生涯を閉じた。

「さきがけ」、「すいせい」のハレー彗星探査によって基盤を確立した深宇宙航行能力を更に完全に手の内に入れたのが、このミッションであった。

その結果を直接に引き継いだGEOTAIL衛星は現在自在に航行を続けており、進行中のLUNAR-A、

PLANET-B計画についても航行の準備は万全である。

探査機の設計・開発、軌道設計、軌道決定、長期にわたる探査機運用、に十分な練度を発揮されたチームの諸氏に、私の好みからくる多少の羨望をまじえつつ、敬意を表する。



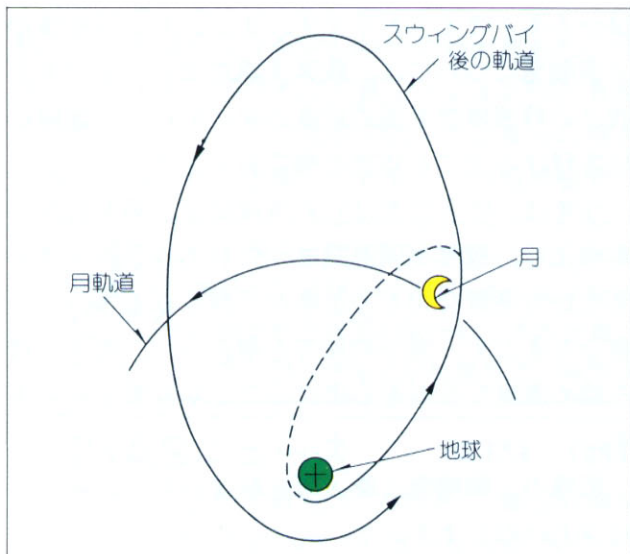
宇宙でスウィング

地球を回っている人工衛星或いは太陽を回る人工惑星は、基本的にはケプラーの法則に従って楕円軌道上を飛行しています。一方、今飛んでいる軌道を変更しようとする、一般にはかなりの燃料を使ってジェットを噴射しなければなりません。この燃料を、天体の重力という天然資源に置き換えて軌道変更するのがスウィングバイ技術です。下左図は月を使ったスウィングバイの様子を示したのですが、地球を焦点とした楕円軌道を飛んで

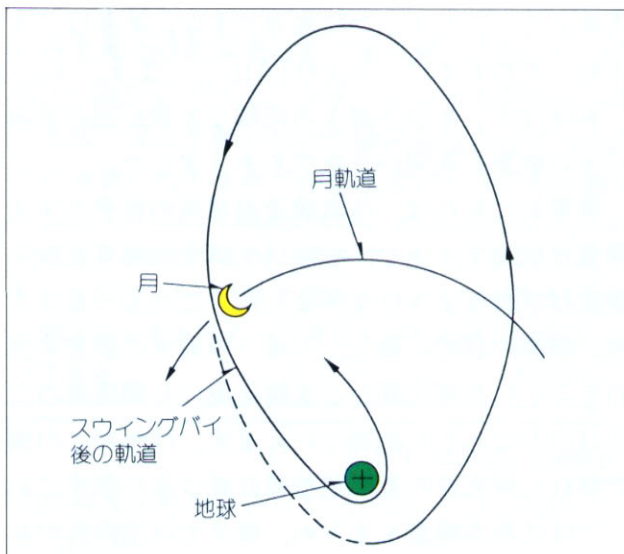
いる衛星が月の背後に接近することにより、月の重力に引っ張られて加速され、軌道が大きくふくらんでいます。サーカスの空中ブランコで、飛び移る人を衛星、受け止めて反対側に抛り出す人を月と考えれば判り易いかもしれません。また接近のタイミングが重要なことも似ています。

「ひてん」では、月スウィングバイによって大きな軌道に移った後、下右図に示したように再度月と接近するよう計画されています。この時、衛星が月の前方を通過すると減速され、元の小さな軌道に戻ります。このように加速と減速両方に月の重力を利用することから二重月スウィングバイと呼ばれる技術を修得すると共に、大気抵抗を利用した別の省エネ航法であるエアロブレーキ実験を行ったり、月を周回する等、その名の通り天空を自在に舞った「ひてん」は、今月面上にその翼を休めています。本特集号はその3年余に及ぶ飛翔の記録です。

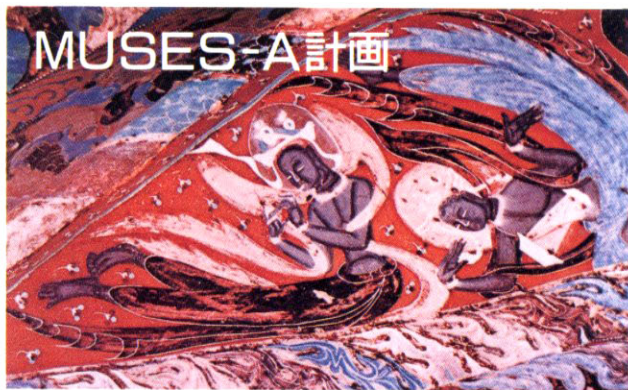
(上杉邦憲)



軌道を大きくする月スウィングバイ



軌道を小さくする月スウィングバイ



第13号科学衛星MUSES-Aは、将来の月・惑星探査に必要な技術を修得、実証する工学実験衛星として計画されました。当初予定した具体的ミッションは以下の通りです。

(1) 天体の重力場を利用した軌道変更（スウィングバイ）技術の修得。月に繰り返し接近して二重月スウィングバイを行うと共に、そのための精密な軌道標定と軌道制御技術の確立を図る。

(2) 天体周回軌道へのオービター投入実験として母船から切離した孫衛星を月の周回軌道へ投入。

(3) 惑星間航法精度向上に有効な光学航法装置（ONS）をスピン安定型衛星としては世界で初めて搭載し、軌道決定実験を行う。

(4) 新しい搭載計算機（OBC）としてのフォールト・トレラント型計算機の機能確認、およびパケット・テレメトリ送信とデータ処理の実験。

(5) ドイツのミュンヘン工科大学との共同実験として、同大学開発のダスト・カウンター（MDC）による微小宇宙塵の観測。

(6) 従来のシリコン太陽電池に代わり、新たに開発されたインジウム・リン太陽電池を孫衛星の電源として使用。

(7) 月・惑星探査で主流となりつつあるX帯通信系を初めて搭載。

(8) 軌道の近地点高度を120 km程度まで降下させ、地球上層大気との摩擦により減速させるエアロブレーキ実験を世界に先駆けて行う。

衛星は高さ79cm、直径1.4mの円筒形状の本体と、その上部に搭載された対辺寸法40cm、高さ36.5cmの26面体形状をした孫衛星から成っています。重量は、本体が燃料のヒドラジン42kgを含めて185kg、孫衛星が内蔵の減速用固体ロケット（KM-L）5kgを含め12kgです。MUSES-Aはスピン安定型衛星で、軌道変更時を除きスピン軸を黄道面にほぼ垂直に保って飛行します。その主な目的が軌道制御実験であることから搭載機器の中では特に姿勢・軌道制御系が重装備となっているのが特徴です。



衛星「ひてん」の外観、上部に孫衛星「はごろも」が組み付けられている

「飛天秘話 その1」 — 幻のSTAR-A計画 —

宇宙研初の工学実験衛星の検討が始まった頃、この衛星計画をSTAR-A（仮称）と書いた文書が残っています。Space Technology and Astronautics Researchの略との説明がついています。なかなか美しい略称ですが、工学実験衛星シリーズは当時の野村所長の発案でMUSES（Mu Space

Engineering Satellite）と決まりました。音楽の女神でもあるこのMUSESが、東洋での同じ概念である飛天となってその初号機の愛称になったのは御承知の通りです。STAR-Aの名は将来恒星間空間に初めての工学実験探査機を送り込む時にこそ適当な略称かもしれません。



可動ノズルは寒さに弱かった

「まもなくコントローラー・スタートします。用意、はい1分前」発射シーケンスは軽やかに進む。そしてX-25秒、可動ノズル(MNTVC)油圧ポンプ(HUP)オン。直後、安田君の「エマスト！」(エマージェンシー・ストップ：発射非常停止)の声に空気一変。既に機上タイマーは起動している。全員が腰を浮かす。それでも、下村君は声音も変えずにカウント・ダウンを進める。以上が、同君の背後にいて非常連絡用指令電話に向かって「エマスト！タイマー停止！」を復唱するしかなかった筆者の見た、右側補助ブースターMNTVCのHUPが起動せず、非常停止によってM-3S II-5号機の打ち上げが延期になったあの夜あの一瞬のM管制室の心象風景である。

既定のエマスト手順が手際よく機能し、機上タイマーが停止したのは、時に1990年1月23日午後8時47分42秒、予定打ち上げ時刻の実に18秒前であった。8時50分から逆行スケジュール。日付が変わった深夜、整備塔内に戻った機体搭載機器の点検開始。並行してCN(制御系)、KE(電気系)両班に関

連GSE(地上支援設備)、地上回線の点検を依頼。いずれも異常なく、原因は搭載機器そのものにある。しかし塔内駆動試験では正常に作動。当面、当事者は頭をかかえるばかり。午前2時過ぎ、同夜の外気温が -2°C と低温であったことと、スイッチ・ボックス内蔵サイリスタ・スイッチの低温作動限界の温度感度が高いとの知見から、これの不作動が原因であろうとの指摘が主に林先生よりなされ、大方の同意により検証実験を行うことになった。屋外零下の環境に1時間放置した予備スイッチ・ボックスによる不具合再現が、憔悴しつつあったM組立室本部に猪合君の妙に明るい声で報告されたのは、既に午前4時過ぎ。原因解明なる。

次なる課題は、その日も予想される低温環境での機器保温の方途。暫時思案の末、S-520搭載の赤外望遠鏡用液体ヘリウム注液カプラーの過冷却・固着防止のために準備していた温風供給装置の流用を決心。5時半頃から懇願の早出で瞼の腫れた加藤鉄工のシンちゃん、応援のロケット班平岡さん、ワラさんの手を借りて、まずは廃物利用の分岐送風管作製。ランチャー班の支援を得て送風機をランチャー・ブーム内に、ヒーターをシュラウド・リング付け根に設置。全作業を終了し左右の補助ブースターのノズル・スカート内に温風供給が可能になった頃には、M台地の朝はすっかり明け放たれ、陽射しが徹夜越しの眼底を貫いて痛かった。11時から遠隔駆動試験実施、正常機能を確認して対策完了。

その後のタイム・スケジュールを順調に消化した同号機は、24日午後8時46分、改めて旅立って行った。前夜に劣らぬ寒い夜であった。

(高野雅弘)

「飛天秘話 その2」

—— ICが入らない ——

1987年初め、MUSES-AのFM製作開始を4月に控え、関係者は米国商務省との対応に忙殺されていました。衛星に使用する耐放射線ICを国防上の理由で輸出しないという情報が米国から入ったためです。技術的には日本でも作れること、コスト上の理由だけで輸入する旨の説明をNASAの支援も得て行ったものの、「輸出不許可」の書類が届

いたのが6月3日。西村所長(当時)自ら駐日米国大使館に赴いての要請もあって、ようやく特別許可が下りICの入手ができたのは9月末。その結果、通常2年をかけて製作されるFMは1年半で製作するという突貫工事となりました。この問題は未解決ですが、GEOTAIL以降同種のICは欧州からの輸入に切り換えられることになりました。

月をめざして

「ひてん」は、月のスウィングバイを行うということと初の孫衛星を投入するということで、確実に月近傍の目標をピンポイントで狙わなければならないという点で、本格的な軌道修正を行う初めての衛星ということになります。事前の軌道設計の方針は、遠地点距離が月周回軌道よりやや遠い長楕円軌道を4周半させるというもので、おそらくこれは月飛行を行った過去の探査機での方針とは全く異なるものであったと思います。この方法は実は軌道投入時の誤差をいかに少ない燃料で確実に修正できるかを検討して得られた結果です。この月遷移軌道では、軌道修正に要する修正量は初期投入時の誤差のおよそ6倍となりますから、仮に30 m/sの初期誤差があると、それを当初の計画案に戻そうとするならば、それだけで200 m/s近い修正速度が必要となります。「ひてん」には全部で400 m/sの修正能力がありましたから、仮に30 m/sの初期誤差があったとしてもその後のミッションの遂行を含めても問題ないようになっていました。ただ、常に懸念として残ったのは、「もし万一3、4段両方が3σもの誤差を発生させてしまったら」ということでした。それは60 m/sもの初期誤差を仮定することでしたが、万一のための対応ということでそんなケースをも秘かに考慮に入れておりました。それは軌道投入後に、5.5周とか3.5周回にするという抜本的にシーケンスを変

更するという方法でした。まともに修正すると60 m/sの誤差のキャンセルには350 m/sを超える修正量が必要となるので、その後のミッションの遂行は困難になります。そんな大きな投入誤差を生じた場合には、打ち上がってから月遷移軌道シーケンス（周回数）そのものを変更せざるをえないという覚悟を決めていたのです。

さて打ち上げ当日。打ち上げは成功。相模原管制室（SSOC）でも一同歓声をあげ打ち上げ成功を喜びあいました。KSCからの運用開始までは約6時間。その間のJPLの追跡データから実際に投入された軌道情報を得て、最初の軌道修正を行う。これがシナリオでした。JPLからの連絡を待つことおよそ4時間。最初の軌道決定値がFAXで送られてきました。なんと遠地点距離は30万km。予定では50万kmでしたから、これは信じられないほど低い値でした。宇宙研の簡易軌道推定ソフトウェアもその結果を支持していましたから、これは秘策の5.5周案だと覚悟を決めました。軌道グループは翌未明に緊急の打合せを開き、最初の軌道修正は次の修正のために可視（運用）条件を確保しておくだけのごく小さな修正だけを行うことに決定しました。これが可能であったのは、我々が培ってきた軌道設計ツールがとても効果的にシーケンスを設計できたからだと思います。おそらく一時代前のソフトウェアでは打ち上がってからシーケンスを造りなおすなど到底不可能だったと思います。（川口淳一郎）

「飛天秘話 その3」 — 2ビットに救われる —

「ひてん」は数cm/sという微小な速度修正をする必要があるため、加速度計を搭載しオンボードで積分して速度変更量を制御する仕組みになっています。打ち上げ時、3、4段の速度増分合計が約50 m/s不足したのは周知ですが、実はこの時衛星搭載加速度計の積分結果は逆に100 m/s速度が出過ぎていることを示していました。加速度計そのものは正常でしたが、積分ソフトウェアに入れるパラメーター値のわずかな誤差によるものでした。

初めての使用であることを考慮し、積分値が計画値に対し±X m/s以上違った場合には第4段切離し直後に衛星のガス・ジェットを自動的に噴射して速度修正する機能を働かせないようにプログラムしてありましたが、そのXとは99 m/s！すなわち積分値がもう2ビット小さい値を示していたら、その後の速度修正はもっと大仕事になっていたでしょう。

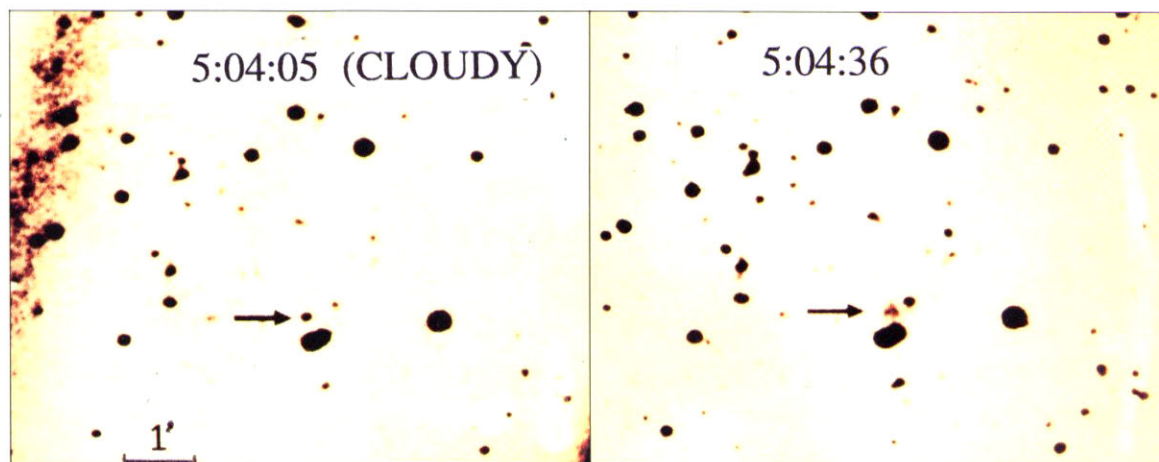
「はごろも」誕生



「艱難辛苦汝を玉にす」の諺通り、難関を乗り越えたMUSES-Aは90年代の幕開けを告げる玉（俗語で衛星のこと）として月への飛行を始めました。愛称は「ひてん（飛天）」、国際標識番号はジェームス・ボンド危機一発なる傑作造語にぴったりの1990-007Aが与えられました。まず最初のミッションは打ち上げから約2ヵ月後の第1回月

接近に向けての軌道制御です。地球を5周半する間に、低すぎた遠地点高度を徐々に上げるとともに月との邂逅条件を合わせるための速度修正が10回に分けて実施されました。

「さきがけ」、「すいせい」の経験を生かし改良、増強されたガス・ジェット装置（RCS）を初めとする姿勢・軌道制御系は予期通りの性能を発揮。特にRCS噴射中姿勢変化を検知すると噴射を調節して姿勢を保持したり、加速度データを積分して所定の速度に達すると自動的に噴射を停止するオンボード・プロセッサ（AOCP）の機能は完璧で、数回の速度制御を終えた時点で相模原管制センター（SSOC）では、「これがスウィングバイ技術なんですね」と感慨を込めた声が聞かれました。次頁の下図には打ち上げ後第1スウィングバイまでの軌道と速度修正点が描かれていますが、通常月接近直前に必要とされる軌道微調整のための速度修正は、それまでの軌道制御が極めて順調に行われた結果キャンセルされることとなりました。



東大木曽観測所のシュミットカメラの捉えたKM-Lの噴煙（矢印で示した部分）

「飛天秘話 その4」

—— 木曽からの便り ——

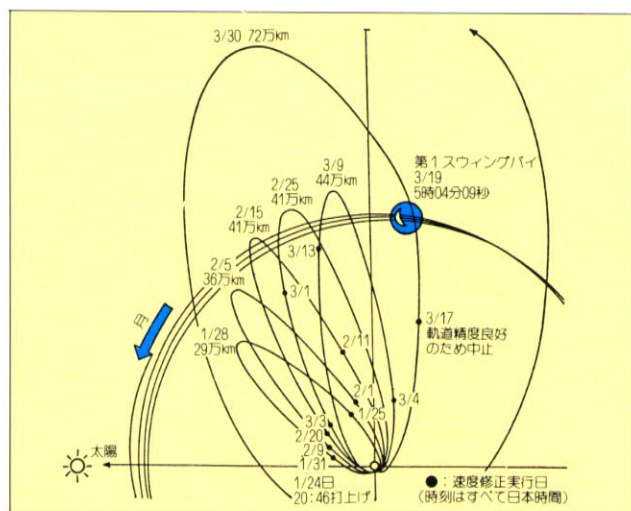
ルナー・オービター送信機故障後、その月周回軌道投入を確認するための手段が数多く検討されました。「ひてん」本体搭載のダスト・カウンターによるキック・モーターのプルームの検出、通総研、宇宙研の赤外望遠鏡、KSC及び東大木曽観測所のシュミットカメラによる地上観測などです。

1990年3月19日早朝ルナー・オービターの分離確認。他の方法による確証が得られない中、「キッ

ク・モーターの噴煙をとらえたと思います」と木曽からの素晴らしいニュースが入ったのは記者発表の30分前のことでした。月軌道投入が確認された時のみルナー・オービターに命名することになっていたため、情報を確認した後、「羽衣（はごろも）」の命名を記載した発表文を作成。記者会見場ではコピー機から出たばかりの文字通りホットな発表文が配布されることになりました。

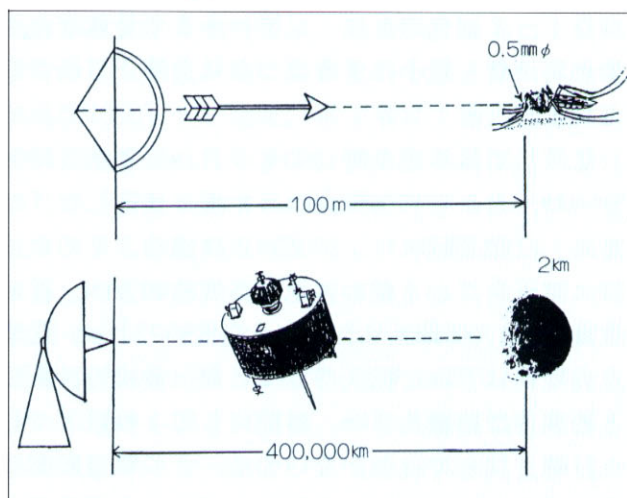
しかしながら全てが完璧という訳にはいきませんでした。「ひてん」の頭部に搭載されたルナー・オービター(LO)は打ち上げ後約1ヵ月の間、世界で初めて衛星に搭載されたインジウム・リン太陽電池を初め順調に作動していましたが、2月21日早朝、突然送信機が異常を起こしました。調査の結果、原因は動作チェックを終えた後、LOへの供給電力を「ひてん」本体からのラインに切り替えた際の過渡的過電圧がLO送信機内のトランジスターを破壊したものと判明しました。親亀の上に子亀を載せた衛星の設計や運用に大変貴重な教訓を得た訳ですが、幸いLOの他の部分は正常であったため、月接近までの間LOのデータは「ひてん」本体のテレメーターを通して取得が続けられました。問題はLO実験の主目的である月周回軌道投入をいかに確認するかということになりました。別項記載のように東大木曽観測所、郵政省通信総合研究所を初めとする各方面の御協力を得て、LO内蔵の直径たった15cm、夏みかん程度の大きさの固体ロケット(KM-L)の点火を40万km離れた地上から観測することとなりました。

いよいよ運命の3月19日未明、「ひてん」は予定通り月に接近していきます。搭載の光学航法装置(ONS)は、予測された精度で月と地球の姿を捉え、画像を送ってきました(8頁写真)。衛星のスピンを20rpmから120rpmに上げた後午前4時37分(月最接近の27分前)LO分離。それから「はごろも(羽衣)」誕生を確認するまでの約4時間は長い長いそして慌ただしい時間となりました。



第1スウィングバイまでの軌道と速度修正

蚊の目玉を射抜く



アポロ計画が開始された頃、NASAはその軌道制御精度を「1マイル先の蠅の頭を射抜く」という比喩で表わしていました。蠅の頭の大きさを仮りに8mm程度とすると、この例えは月までの距離約40万kmに対し誤差2kmに相当します。当時、日本はまだ「おおすみ」打ち上げ以前で、彼我の技術差を思い知らされたものでした。

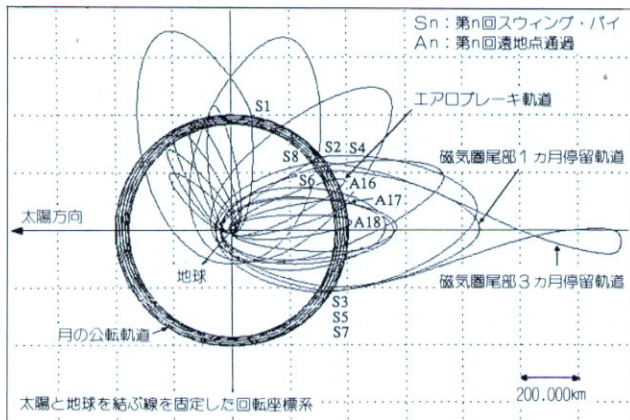
さてアポロから20年、「ひてん」の出番です。その軌道精度はどの程度だったのでしょうか。まず精密な軌道制御を行うためには探査機が現在どのような軌道を飛んでいるかを正確に知る必要があります。特に月、地球、そして太陽の重力が複雑に作用する宇宙空間を飛行して、しかも繰り返し月に接近しなければならない「ひてん」ミッションでは、この軌道標定作業が大変重要です。そのため深宇宙用に開発された軌道決定ソフトISSOPが新たに改良され、打ち上げ直後から縁の下の力持ちとしてミッションを支え続けました。第1回スウィングバイに至るまでの期間やエアロブレーキ等の重要な時期には、その道の先達ジェット推進研究所(JPL)による軌道決定も行われましたが、その結果得られた軌道推定値と宇宙研算出値は常に5～6桁目まで一致していました。

この結果を受けて軌道制御計画を立てるのが、ISAS-GOOD(Group of Orbit Design)と呼ばれるグループの仕事です。軌道伝播ソフトを駆使して、軌道修正の量や時期の最適化を図ります。特に、ただ一度月に到達すれば良いミッションとは違って、「ひてん」の場合には毎回の月邂逅条件

を常に計画値にピッタリと合わせる努力をするのではなく、4回先のスウィングバイまで見越した上で燃料消費を最小にするような軌道修正方法が採られました。

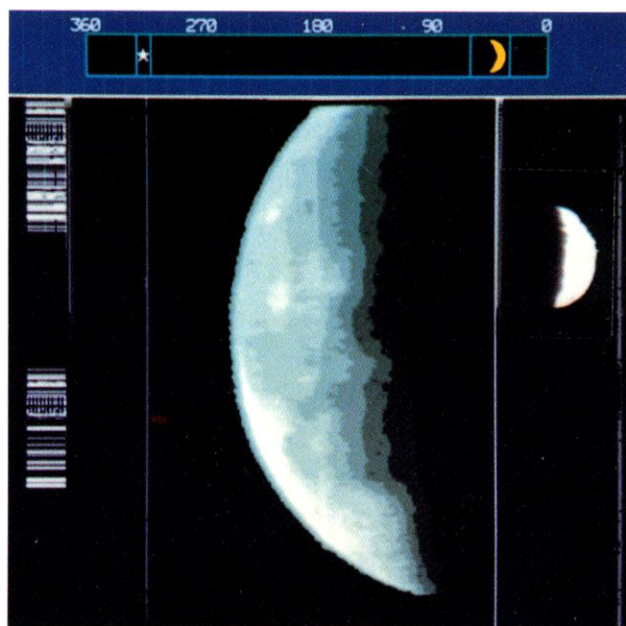
こうして日本標準時1990年3月19日午前5時04分09秒、月から16,472.4kmの距離に接近した「ひてん」は第1回スウィングバイに成功、その軌道はスウィングバイ前の遠地点高度約40万km、近地点高度約4,000kmから、遠地点高度約72万km、近地点高度約11万kmに拡大されました。最接近計画値との誤差は距離約2km、時間にして1秒以下でした。蠅と同じでは芸がないので、この軌道制御精度を「東京ドームのバックスクリーンを飛んでいる蚊の目玉をホーム・ベースから射抜く」と言うことになりました。

第1回スウィングバイの後、「ひてん」は遠地点を常に地球の夜側に保持しつつ、二重月スウィングバイを実行するという新たなミッションに入りました。これは92年打ち上げのGEOTAILの軌道を模擬、実証する役割も担っていました。打ち上げ前の計画では「ひてん」の最遠到達点は地球か



実際の軌道 (エアロブレーキ終了まで)

ら約85万kmの予定でしたが、第1回スウィングバイ成功の後、これをGEOTAILと同じ約135万kmまで延ばす案が立てられ、90年10月2日の第5回スウィングバイの月邂逅条件を変更することによって実行に移されました。下左図は実際に「ひてん」が飛翔した軌道を示したのですが、この変更により我々はスウィングバイ技術の奥深さを知ることになりました。すなわち、地球半径の212倍の距離である135万kmまで行って月の所まで還って来るには3ヵ月を要しますが、仮りに出発時(第5回月接近)にわずか1kmの誤差があったとすると、3ヵ月の間にそれが拡大され、第6回接近時には1,000kmもの誤差になることが判りました。勿論そうなる前にガスを噴いて軌道修正を行うのですが、GEOTAILに向けて貴重な経験を積むことが出来た訳です。

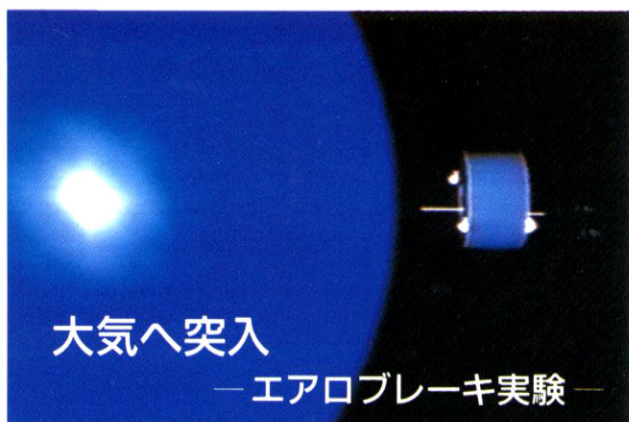


ONSの捉えた月 (中央) と地球 (右)

「飛天秘話 その5」 — 月に向かって吠える犬 —

「ひてん」には勤勉な番犬が乗っていました。Watch-Dog Timer と呼ばれるこの忠犬(宙犬)は、飛翔中一睡もすることなく姿勢・軌道制御用搭載コンピュータ(AOCP)の働きを監視しています。打ち上げ後半年ほど経った或る満月の夜、この犬が突然臼田局の管制画面の一部を真っ赤にして吠え出しました。放射線によるシングル・イベ

ント・エラーがAOCPメモリー中の自動修正不能の箇所に発生したためでした。直ちに修正プログラムをコマンドで書き込み、その後ミッション終了までこの宇宙犬の宇宙研への御注進はありませんでしたが、中震程度で済んだこの事件の中心となって働いた忠臣の活躍には、皆衷心より感謝したものです。(橋本正之)

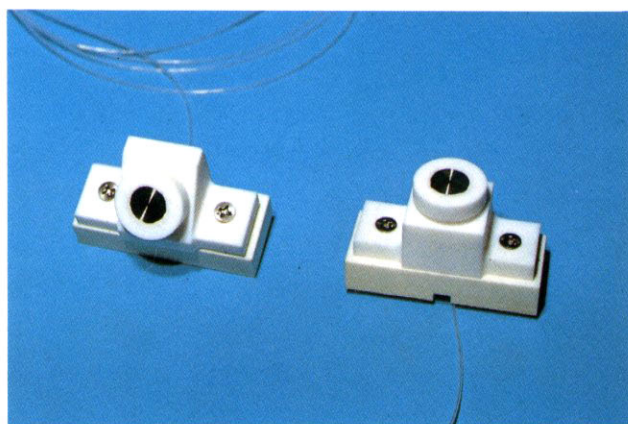


熱を測る

大気中を飛行中に受ける抵抗を利用して、衛星の軌道を変更する技術をエアロ・ブレーキと言い、軌道変更に要する推進薬を節約できるメリットを持ちます。大きな軌道変更のためには大きな大気抵抗が必要であり、大気を通過する高度をそれだけ下げする必要があります。ところが、大きな大気抵抗を受けることはそれだけ大きな空力加熱を受けることになり、それなりの耐熱構造を持つ必要がでてきます。このため、実際に受ける空力加熱量を正確に知る必要があるわけです。「ひてん」によるエアロブレーキ実験では、この空力加熱量を計測するため、いわゆるカロリー・メーターを用いています。下左の写真は搭載されたカロリー・メーターで、一昨年残念ながらお亡くなりになった斎藤敏さんが大変な苦勞の末、製作された物です。(安部隆士)

熱から護る

「ひてん」の頭部はエアロブレーキ時の空力加熱から衛星を保護する目的で、新開発の耐熱性および断熱性に優れた多層インシュレーション (M



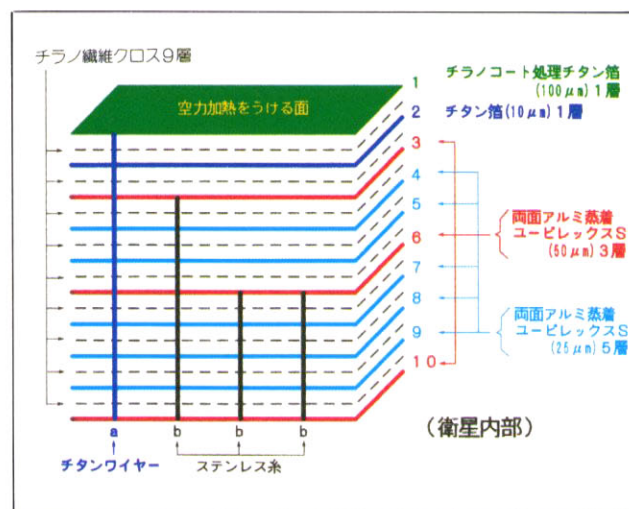
故斎藤敏氏作「カロリー・メーター」

LI) で覆われています。下右図に示したように、最も熱衝撃を受ける最外層は、高温になることを避けるために、チタン箔に耐熱塗料チラノコート (耐熱温度1000℃) を塗布、第2層は1層と同様にチタン箔を使用しています。第3～10層は、軽量化のため、ポリイミド系の高分子フィルム、ユーピレックスS (耐熱温度500℃) の両面にアルミ蒸着を施したものを採用しています。また各層間の断熱用セパレーターとして、チラノ繊維クロス (耐熱温度1000℃) が挿入されています。セパレーターを含め19層から成るMLIは、やはり耐熱性を考慮してチタンワイヤーおよびステンレス糸により縫い合わされました。このチラノ繊維はクロス加工に大変苦勞し、折り紙の名人、林先生自ら編み方の工夫をされました。(大西 晃)

いざ突入!

エアロブレーキで難しいことの一つは、月付近での距離での軌道修正でどのくらい正確に大気突入高度を制御できるか、またどのくらい正確に実際の通過高度を推定できるかということでした。また太陽活動の違いから生ずる大気密度の不確定性は高度換算では約1 kmに相当するため、平磯の郵政省通信総合研究所から太陽活動の情報を入手、エアロブレーキ時の密度の予測も行われました。

1991年3月12日、地球から約43万kmの所で第1回目のエアロブレーキ実験に向けての軌道修正が行われました。近地点目標は125km、幸い修正は極めて精確に行われました。JPLの支援も得て慎重な軌道決定が行われ、誘導誤差はわずかに100 m



「ひてん」耐熱多層インシュレーション構成図

程度という高い精度でした。軌道決定値の履歴からすると、月軌道付近から接近するにつれて近地点高度の推定精度は高まり、航法についても将来のエアロブレーキの実用化に向けて貴重な経験となりました。各エアロブレーキの直前には、万一を想定して緊急のマヌーバーを仮定していたのですが、それも取り越し苦労でした。

3月19日、1回目のエアロブレーキは太平洋上で行われたため、まさに減速の直前に日本から消感、ブレーキングの後のゴールドストーン局の入感を祈るような気持ちで待ちました。データレコーダーを再生してブレーキング中のデータを手にした時は感動でした。減速量は1.8m/sとわずかでしたが、これで遠地点は約9,000km低くなりました。これに自信を得て3月30日の第2回目では5km高度を下げ、120kmへの突入が成功裡に実施されました。この時の減速量は2.8m/s、遠地点をさらに約1万4,000km降下させました。今や、このエアロブレーキの手法は確かに我々の手中にあると実感できます。(川口淳一郎)

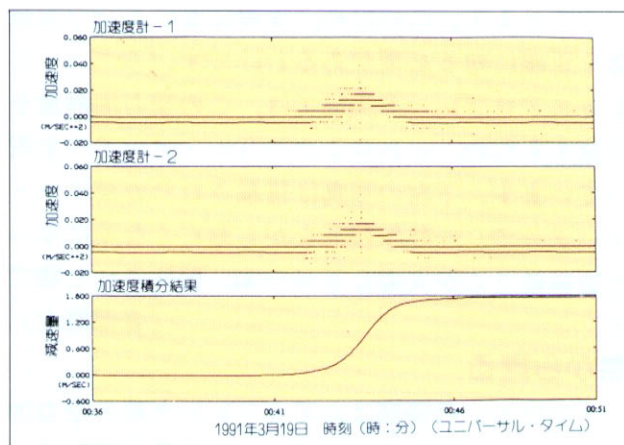
熱に耐える

「ひてん」エアロブレーキ実験は、月よりも遠いところから約11km/sの速度で大気を通過するという世界初の試みです。衛星への熱入力は速度の2乗に比例するので、7km/s程度で飛んでいる低軌道衛星に比べ、約2倍の熱入力があることになります。このような大気通過中の飛行環境の計測が実験目的の一つでした。2回の実験において、大気突入前後の軌道決定からトータルとしての減速量を求めた他、搭載機器により大気通過中の減

速度の測定、空力加熱量、衛星姿勢、衛星各部の温度変化等が計測されました。図は第1回実験の際の加速度計クイックルック・データですが、あまりに予測通りで、誰かが冗談でシミュレーション・データを流しているのかと一瞬疑ったほどでした。

その後、データの詳細な検討が行われました。計測データは、空気力学的な量と空力加熱に関する量とに分けることができます。前者に関しては、解析結果から予想される減速度、姿勢変動ともに実測値と良い一致を示しました。一方、空力加熱量に関しては、当初理論値の倍程度の加熱量になっているのではと驚かされましたが、カロリー・メーターの較正を見直した結果、解析から予想されるものと良く一致することが判りました。この結果、「ひてん」は解析と比較し得る貴重な実測データを提供し、将来のエアロブレーキ用衛星の設計に重要な指針を与えることができました。

(安部隆士)



第1回エアロブレーキ実験加速度計データ

「飛天秘話 その6」

— SFから現実に —

「ひてん」最大のミッションはスウィングバイ技術の修得ですが、海外では金星探査機マゼランより先に世界初のエアロブレーキ実験に成功したという点が喧伝されているようで、以下はその一例です。

アーサー・C・クラークのSF小説「2010年宇宙の旅2」で宇宙船が木星の大気を使ったエアロブレーキを行う場面が描かれている。「極東経済

誌」の報によれば、日本の宇宙研の探査機が昨3月エアロブレーキ実験に成功した。これは地球上層大気における空気抵抗を利用して速度を減じ、軌道変更を行った世界初の実験であり、2回に渡って実施された。この成功によりエアロブレーキはSFの世界から現実のものとなった。

— ヒューズ社社内報1991年6月号より —



To participate in the MUSES-A mission, we proposed a cosmic dust counter and formed a group with colleagues from the Universities of Bremen, Bochum, and Heidelberg, ESA and the industrial companies BMW, IABG, MBB and KT to develop and to build a small instrument, which could detect the mass and the velocity and roughly the direction of flight of cosmic dust particles, hitting the 10×10 cm sensor.

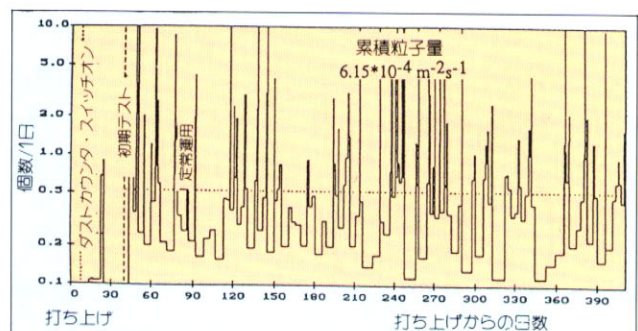
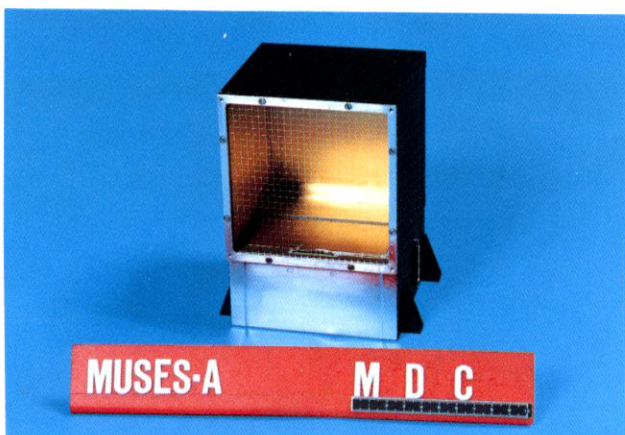
This was and still is our first flight experiment, and we were certainly fortunate to be accepted by HITEN, thanking HITEN for providing such a stable environment aboard and for even offering us an opening in its solar cell array. During the development and integration we had a strong and especially encouraging support from our colleagues at ISAS and could therefore account for the strong disturbances, generated by the solar radiation, which hit our sensor for a short time during every revolution

of HITEN. It was an adventurous launch and HITEN with the support of the ISAS crew managed to extend its nominal life-time of one year to more than three years. During this time our cosmic dust counter, MDC (Munich Dust Counter), could record approximately 500 cosmic dust particles and admire the superb navigation of HITEN and the ISAS control center. Thank you for taking us along on an unexpected one year long journey around the Moon.

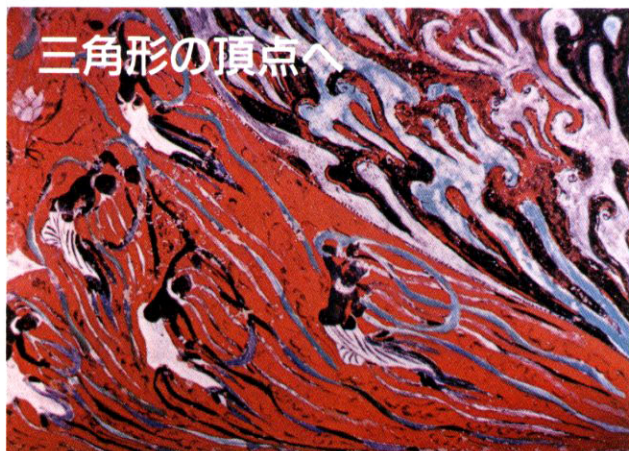
During these 3 years aboard HITEN, we could determine the mass, velocity, and angular distribution of cosmic dust particles and especially of beta-meteoroids in the Earth-Moon system. Another unexpected adventure was a visit of the neighborhood of the Lagrangian Points L4 and L5, but we could not find more cosmic particles there. And while HITEN flew through space and even detected signs of interstellar particles, here on Earth the MDC group enjoyed the hospitality and the permanent and friendly support by the colleagues of ISAS.

We were told, that HITEN will spend some time on the Moon, giving us from now on a different attitude towards this only companion of Earth in space, sometimes reminding us, that HITEN is there, of course with MDC.

Eduard Igenbergs (ミュンヘン工科大学
宇宙工学科教授 エドアルト・イゲンベルグス)

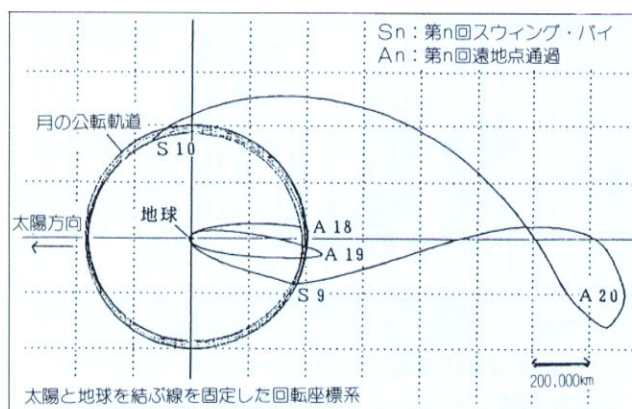


打ち上げ後約1年間のダストカウンターのデータ
(図中点線は平均して1日0.5個のインパクトがあったことを示す)



当初予定された「ひてん」のミッションは、大気圏へ突入するエアロブレーキを以て終了することになっていました。それは大気との摩擦で衛星の頭が焦げてしまう可能性を考慮したためでしたが、打ち上げ後スウィングバイを初めとする実験が順調に推移し、搭載燃料にも余裕が出てきたことから、エアロブレーキ後のミッション検討が開始されました。その間JPLからの提案もあって、衛星を一旦遙か彼方(150万km程度)へ飛ばし、太陽重力の影響を利用して近地点高度を上げ、さらに月スウィングバイを行って軌道を月公転軌道に似た形にすれば、わずかな燃料で「ひてん」本体を月周回軌道に投入できることが判りました。

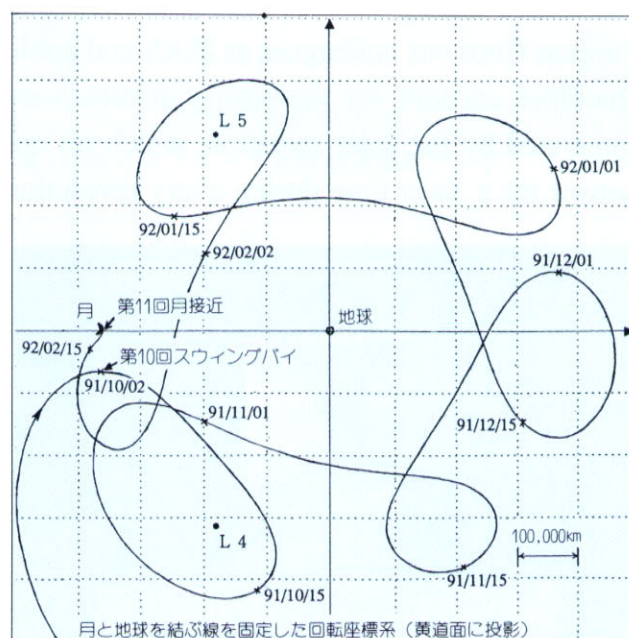
衛星の軌道を月の公転軌道に似せるなら、「ひてん」を月周回させる前に、搭載のダストカウンターを使って有意義な実験が可能になります。天体力学における三体問題の解として、天体Aを周回する天体Bに対し、AとBを結ぶ線を底辺とした正三角形の頂点が両天体の重力と遠心力の平衡点になることが知られており、発見者の名前をとって



最遠到達点へ

ラグランジュ点と呼ばれています。原理的にはこの点に置かれた物体は、安定してそこに留まる、或いはその点を回る軌道は安定ということになります。太陽・木星系でトロヤ群と呼ばれる小惑星群がその例と考えられていますが、地球・月系でも同様にこの点の周りに宇宙塵が集まっているのではないかとされています。ポーランドの天文台が観測に成功したというニュースが流れたこともありましたが、まだ確認はされていません。もし「ひてん」のダストカウンターがラグランジュ点近傍で多量の宇宙塵に遭遇すれば大発見ということになります。

下左図は「ひてん」がエアロブレーキ実験の後、91年4月27日第9回月スウィングバイにより地球周回衛星としては最遠到達記録となる153万kmまで行った軌道を、また下右図はその後10月2日第10回目の月接近で投入された軌道を示したのですが、2つのラグランジュ点(L4, L5)の周りをループを描くように飛んでいるのが判ります。この間、残念ながらMDCのダストカウント数は特に増加することはなく、大発見には至りませんでした。しかし、「ひてん」はL4, L5の2点の周囲をそれぞれ1回ずつ飛んだに過ぎず、その結果からこの「宇宙塵の雲」の存在の有無を議論するのが時機尚早であることは言うまでもありません。



ラグランジュ点周回軌道

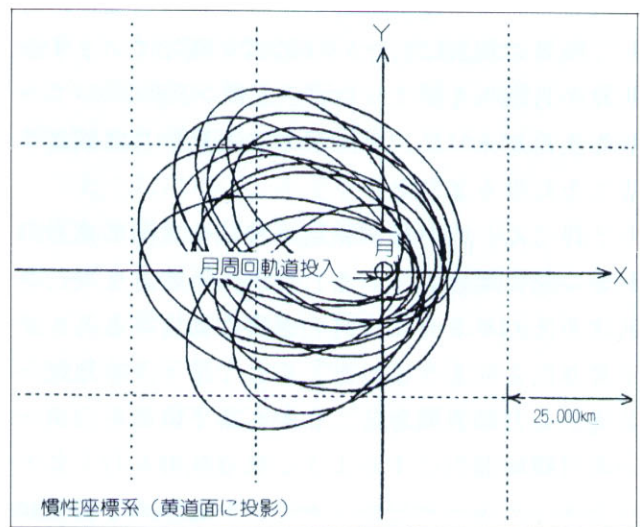


天女が羽衣なしに天空を舞えたのは不思議ですが、「ひてん」が「はごろも」に再会する日が来ました。巡り会いには絶好の聖バレンタインの日に惜しくも1日遅れの1992年2月15日、ラグランジュ点への旅を終えた「ひてん」は月から422 kmに接近、残りわずかの燃料を使って約82 m/sの減速を行い、月を回る軌道に投入されました。ホーム軌道と呼ばれる最も燃料消費の少ないとされる方式によって地球から直接月に向かい、月周回軌道に投入する場合に比べ約150 m/s程度少ない減速量での投入で、この方式による月周回軌道投入は世界初であるとともに、月到達までの時間はかかるものの、燃料を大幅に節約出来ることからLUNAR-Aでの採用が予定されています。

こうして、「ひてん」と「はごろも」はその後1年余りの間母娘連れ立って月を回ることとなりました。右図は月周回軌道投入から92年4月末までの「ひてん」の軌道を示したのですが、地球や太陽の重力の影響で常に軌道が変化しているのが判ります。「ひてん」はこの軌道上で、引き続きMDC

による宇宙塵の観測やONS, OBCの実験を行いました。さらにスウィングバイ軌道は月や地球による日陰が生じないように計画されていたのに対し、月周回軌道上では長時間の日陰を避けることが出来ません。「ひてん」は一時間までの日陰を許容するよう設計されており、それ以上長い日陰を生じると、熱的、電力的に耐えることが出来なくなります。あまりに長い日陰が予測された場合には軌道修正によってこれを出来るだけ短くすると共に、日陰中の運用や衛星熱設計の評価等に関し貴重な工学データを取得しました。これらのデータは、GEOTAILが地球磁気圏深奥部の探査を終えた後、遠地点30Reの軌道に投入された後生じる長時間の日陰への対策用に、フィード・バックされています。

なお全ての日陰突入時刻や日陰継続時間は予測値と秒の桁で一致しており、月周回衛星の軌道決定も精確に行えることが実証されました。



月周回軌道 (1992年4月末まで)

「飛天秘話 その7」 — GEOTAILと衝突? —

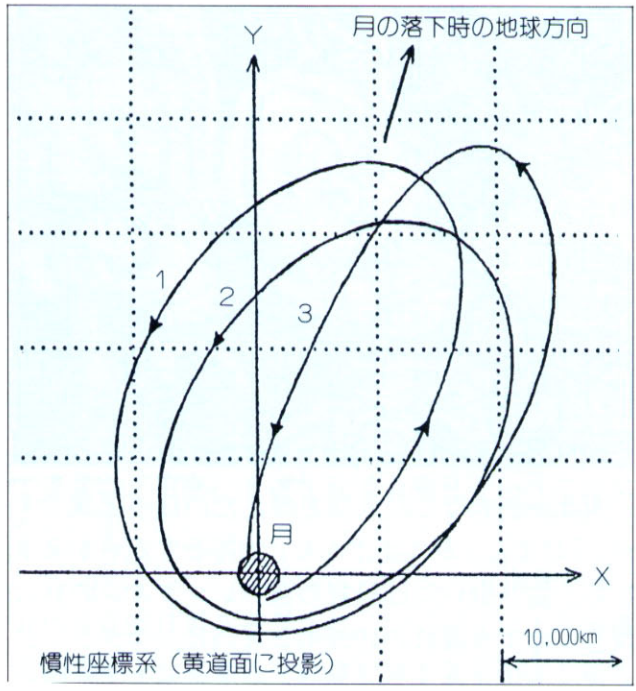
「ひてん」で修得した二重月スウィングバイ技術の使用を前提として地球磁気圏の尻尾を探る衛星GEOTAILは1992年7月24日、米国フロリダから打ち上げられました。「ひてん」はその頃月を回る軌道にあって弟分のやって来るのを見守っていたのですが、「待てよ、まさかぶつかって来ないだろうな」という訳で、GEOTAILがスウィング

バイのため月に接近する度の「ひてん」との相対距離チェックが行われました。幸い兄弟が最も近づくのは9月9日のGEOTAIL第1回スウィングバイの場合で、その距離5,000 km程度と判りました。但し両者共同の周波数の電波を使用しているため、接近時には弟分に敬意を表して「ひてん」送信機をオフにする手段が採られました。



液体ロケットの元祖ロバート・ゴダードは最初の飛行に成功する1926年より以前の1919年、ロケットの頭にフラッシュを載せて月面に打ち込んで光らせ、それを地球から観測することを提案しました。これに対し当時のニューヨーク・タイムズが「蹴飛ばす空氣の無い真空中をロケットが飛べる訳がない」と嘲笑したのは有名な話です。これに対しゴダードは「昨日の夢は今日の希望に、そして明日の現実に」という名言を残していますが、それから74年を経て、ゴダードやツィオルコフスキーを生んだ米ソに次いで日本の衛星が月に到達することになりました。

「ひてん」の月周回軌道は地球や太陽の重力の影響で常に変化していましたが、そのまま飛行を続けると93年3月には月の裏側に衝突することが予想されるに至りました。そこで落下点を地球から見える月の表側とし、しかも落下時刻を臼田からの可視時間内にするような軌道制御を行うことにより、天体へのピン・ポイント着陸の予備実験とするという最後の使命が「ひてん」に与えられました。残りの燃料は1kgあるかないかでしたが、93年2月3日と3月30日の2回に分けて実施された合計約7 m/sの速度修正は成功裡に終了、「ひて



最後の軌道修正から月落下までの3周

ん」は図に示したように最後の3周を経て、立待ちの月へと落ちて行きました。(その詳細はISAS ニュースNo.146に記載されています。)
「ひてん」の最後を見届けようとする人々で満員の深宇宙管制室では、ONSが4分おきに送ってくる月面の写真をリアルタイムでモニター、時々刻々と月面が迫ってくる中、予定通り月の陰の部分に入った「ひてん」は、太陽電池出力がスーッと下がったことを示すデータの送信を最後に、ブツンと通信を絶ちました。あまりにあっけない幕切れでした。

落下時刻は日本標準時4月11日3時3分24.5秒、予測とわずか0.4秒の差で、落下点は東経55.3度、南緯34.0度、兎の耳の先端よりやや南にあるステヴィヌス・クレーター付近と推定(16頁写真)され、将来宇宙研ロビーに展示するため誰かが拾いに行く日までそこに留まることとなりました。



2:37:26



2:41:02



2:47:58



2:51:26

月面落下直前、クレーターが次第に大きく迫り、やがて日陰部に入る(1993年4月11日)



MUSES-A ONS-0
カメラでナビゲーション

将来の深宇宙における光学航法を行うための実験装置として、「ひてん」には光学航法センサ (Optical Navigation Sensor) が搭載されています。このONSは星・月および惑星等の画像を撮り、姿勢や軌道決定の情報を提供する機器です。

「ひてん」の姿勢はスピンで安定されているため、普通の撮像方式では星や月の像が、流れてしまうことになります。このため、検出素子であるCCDの電荷転送速度を衛星のスピンの同期させ、低い照度の天体からの信号を順次蓄えながら静止画像を撮ろうとする、いわゆる移動積分方式が採用されています。この方式は、例えば、フィギュア・スケートの選手がスピンをしているとき、ボーイフレンドを見つけて顔は動かさず、目だけ動かして彼の姿を捕らえるといったようなものです。

なお、20rpmもの速度でスピンをしている衛星でこのような撮像方式を採用したのは「ひてん」が最初の試みとなります。

1990年1月30日の地球の画像を皮切りに、以後月、火星並びに地球の画像を概ねスウィングバイごとに取得する事が出来ました。そして、3年後の1993年4月11日未明、「ひてん」が月に近づくにつれ、ONSで捉えたクレータはどんどん大きくなり、月の夜の部分の画像を最後に電波が途絶えました。

今回の実験により、本方式の光学航法装置設計の基本的な技術を修得することが出来るとともに、今後の装置の設計を行う上で貴重なデータが得られました。
(廣川英治)



地上では広く普及しているマイクロプロセッサもそのままでは宇宙で使用する事は出来ないとされてきました。放射線によりメモリーやレジスターの記憶情報が反転する等の誤動作を起こしてしまうからです。こうした部品レベルの誤りが発生しても、システムの正常動作が保証できれば、宇宙で利用できる部品が大幅に増え、処理能力は向上し、開発コストは低くおさえられます。

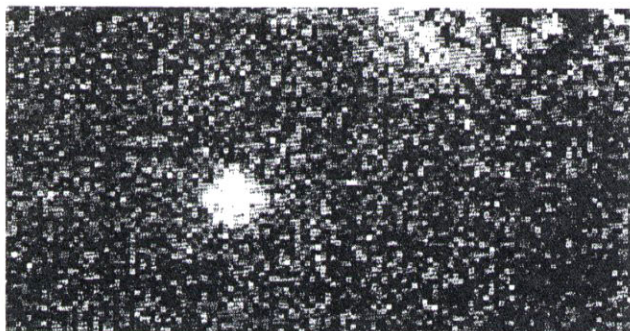
「ひてん」のOBC (OnBoard Computer) は民生用のマイクロプロセッサを3個使い、それぞれの処理結果について「正常な確率」を推定、その最も高い結果をOBCの出力とする確率的出力選択方式SNV (Stepwise Negotiating Voting) を実装しました。「ひてん」の運用が終了するまでの3年余の間、655回ものSEU (Single Event Upset) に見舞われましたが、OBCは正常に動作し続けました。なおSEUが発生する環境について、太陽フレアとの相関などの点から引き続き検討を行っています。

このOBCがミッションとして行った処理の一つは、衛星で観測したデータを小包 (パケット) にし、これを畳込み符号とリードソロモン符号で保護することでした。この方法は、世界的に宇宙データシステムを標準化するため勧告されている方式であり、JPLとの共同実験等を通して衛星の相互運用性の向上、ビットエラー率の改善等が確認されました。
(周東晃四郎)



御釈迦様の誕生日の3日後に天界に戻り、御釈迦になった飛天を偲ぶ間もなく、オランダから一通のFAXが飛び込んできました。MDCグループの一人、ESTECのスヴェーダム氏が「ひてん」月落下の情報を受けてシドニー郊外にあるアングロ・オーストラリアン天文台の赤外望遠鏡に観測を依頼していたところ、予告した時刻に予測地点（月点？）で発光を捉えたというニュースでした。まさに「ゴダードの夢」の実現です。

添えられてきた写真には1ピクセルが約1kmとの説明があり、発光部の直径は数キロあることになります。恐らく舞い上がったほこりに日光が当たったものと考えられていますが、「ひてん」の衝



アングロ・オーストラリアン天文台の観測した「ひてん」月衝突の瞬間（写真上方が東、右上隅はステヴィヌス・クレーター）

突で出来るクレーターの直径は1～2kmとの計算もあります。この人工クレーターは質量、密度、衝突速度（秒速約2.5km/s）の判っている物体によるクレーターとして貴重なものであり、将来撮像出来れば月のクレーター研究に役立つことが出来るかもしれません。

飛天死してなお科学に資することを目指し、今年米国が打ち上げ予定の月・小惑星探査機クレメンタインの搭載カメラで、「ひてん」落下点付近を綿密に撮像して貰うことを検討しています。



「ひてん」落下点（X印）

〔表題写真に用いた「飛天」の説明〕

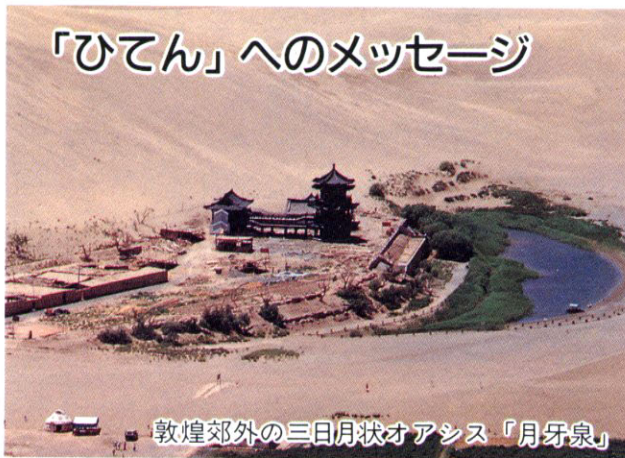
- | | | |
|------|---------------|------|
| 1 頁： | 敦煌榆林窟 第16窟壁画 | 五代時代 |
| 2 頁： | 中国西北航空公司ロゴマーク | |
| 3 頁： | 敦煌莫高窟 第288窟壁画 | 西魏時代 |
| 11頁： | 同上 第375窟壁画 | 隋時代 |
| 12頁： | 同上 第206窟壁画 | 隋時代 |
| 13頁： | 敦煌榆林窟 第25窟壁画 | 唐時代 |
| 16頁： | 敦煌莫高窟 第428窟壁画 | 北周時代 |
| 18頁： | 同上 第285窟壁画 | 西魏時代 |

「飛天秘話 その8」 — 元祖飛天は男性だった —

会津八一が「水煙の天つ乙女が衣手の暇にも澄める秋の空かな」（鹿鳴集）と詠んでいるように飛天は羽衣をまとった天女様であり、天空を自在且つ優雅に舞うというイメージから衛星の愛称になったのですが……ISCOPS（環太平洋宇宙会議）が中国で開催された機会に敦煌まで足を延ばした方から「飛天は古来男性だった」との情報がもた

らされました。有名な莫高窟の第428窟の天井に描かれた北周時代の飛天（本頁表題写真参照）は確かに男性であります。この情報がもたらされたのは「ひてん」が月の女神ダイアナの懷で永遠の眠りについた後だったのがせめてもの慰めでした。

（再び声あり……ドイツ語で月〈Mond〉は男性名詞だ！）



Japanese Spacecraft “Hiten”

Robert W. Farquhar

In 1990, Hiten became the second spacecraft to utilize the Double Lunar Swingly (DLS) technique for orbit control in the Earth-Moon system. While doing so, it also placed a smaller sub-satellite (Hagoromo) into lunar orbit. This event took place on March 18 (UTC), 1990, during Hiten's first lunar encounter. Hiten performed a total of 10 lunar swingby maneuvers, breaking the ISEE-3 record of 5 swingbys that was achieved in 1983. After an impressive demonstration of aerobraking in the Earth's upper atmosphere in 1991, Hiten embarked on an ambitious extended-mission phase. The first task of the extended mission was an investigation of the dust environment in the vicinity of the L4 and L5 Lagrangian points in the Earth-Moon system. After completing the dust measurements, Hiten was placed into a loose lunar orbit. A capture maneuver of approximately 80 m/sec was used to enter lunar orbit. Finally, on April 10 (UTC), 1993, Hiten ceased on the lunar surface.

The spectacular success of the Hiten mission was not easily achieved. It took a determined and persistent project group of ISAS to overcome a number of unlucky and unforeseen setbacks which occurred early in the mission.

In the final analysis, however, the flight of Hiten was a historic and important milestone for the Japanese Space Program.

(ジョンズ・ホプキンス大学応用物理学研究所,
ロバート・ファーকার)

HITEN Navigation

Leonard Efron

The successful navigation of HITEN throughout the various phases of the mission was accomplished as a result of a coordinated effort between ISAS and the NASA/JPL's Deep Space Network (DSN) and Multimission Navigation (MMNAV) team. Routine navigation support throughout the mission was provided by ISAS utilizing tracking data from the Usuda and Uchinoura sites. However, during several critical phases of the mission, which included the launch and early orbit phase, first lunar encounter, aerobraking, and lunar orbit capture, tracking coverage of the worldwide DSN antennas enabled more rapid and precise orbit determination than was available from using the Japanese domestic stations alone.

Lunar orbit insertion of HITEN marked the first return of an active spacecraft to Earth's closest celestial neighbor in nearly 2 decades. The Earth to Moon transfer trajectory utilized by HITEN was the first demonstration of a technique which is more energy efficient than offered by the conventional Hohmann transfer orbit concept. This new concept was first illustrated by JPL mission analysts using HITEN trajectory information provided by ISAS. Future ISAS lunar missions are planning to incorporate this new transfer trajectory concept in their baseline mission design.

This was another example of the synergism which results from the collaborative efforts between JPL and ISAS.

(ジェット推進研究所航法チーム主任,
レナード・エフロン)



飛天を追って

「ひてん」は軌道追跡の観点からも、大変役に立ったミッションであった。打ち上げ後の早朝、初期追跡データに基づきJPLから送られてきたFAXを見た時、筆者は目を疑った。初期楕円軌道の長半径が14万キロと予定の28万キロのちょうど半分であった。その後の経緯は別項に譲るが、とにかく第1回目の月スウィングバイまでの地球周回回数を一回増やせば何とかかなりそうだとのことと、急遽臼田の64mφアンテナの予報値の再計算を行って、数時間後の初期受信に成功した。これは担当者の能力が優れていたことは勿論として、筆者が前に在籍していた5,000人を超えるJPLのような大組織では考え難いことで、小廻りの利く宇宙研の利点であろう。

その後、2年程の月スウィング、巡航フェーズを経て、最終的に月周回軌道に投入された「ひてん」の投入後の受信にも成功した。月周回軌道の軌道決定精度が格段に良くなったのは、月の位置が良く判っており、その周りを3～4日の周期で廻っている探査体の方が、大きな楕円軌道上を巡航している場合より推定し易いと思われる、今後のルナーA、プラネットBミッションへの貴重な経験となった。やや短命で散ってしまった飛天の貢献には心から感謝している。（西村敏充）

地球の尻尾から月へ、そして火星へ

「ひてん」で修得したスウィングバイ技術は、1992年7月に打ち上げられたGEOTAILにおいて既にルーチンとして用いられ、地球の尻尾の探査に役立っています。GEOTAILの月スウィングバイ回数は93年の大晦日で計11回となり「ひてん」と並んだことになります。

また、GEOTAIL搭載の一観測器に生じたラッチ・アップを解消するため、衛星を日陰に入れて全電源を一旦オフにするという対策を講じる上で、「ひてん」で培われたスウィングバイ軌道設計能力および月周回中の日陰時の運用経験が大いにものを言いました。

LUNAR-Aでは、「ひてん」と同じく一度遙か遠方まで行ってから月周回軌道へ投入する省燃料航法の採用を初め、ペネトレーターと母船とのインターフェイスやペネトレーターの月面への打ち込みに関して「ひてん」の技術が生かされることになっています。

またPLANET-Bも探査機に対する重量制限が極めて厳しいところから、火星に向かう前に月スウィングバイを行って加速し、燃料を節約する方法が採られる予定です。

こうして、初の工学実験衛星として「将来の月・惑星探査に必要な技術を修得する」重責を担った「ひてん」は、当初計画のミッションを遂行した後もさらに各種の工学実験を行って、予期以上の成果を上げることが出来ました。今後、満月の夜に月を見上げれば兎の耳（蟹の鉗）の先にいつでも（心眼で）「ひてん」が見えることをお伝えして、ご支援ご協力を戴いた内外関係各位の方々への御礼の言葉に代えさせていただきます。（上杉邦憲）



「飛天」は、文字どおりなら、人工衛星や宇宙船と同類である。古き時代に描かれた中国の壁画が、その言葉上はともかく、異分野の宇宙工学特集号で、時空を

超越し見事に合体した。画中の天女（天男？）は、とにかくせわしない昨今に翻弄されがちな編集人に、幻想と安らぎを与えつつ何かを語りかけているようである。（荒木）

ISASニュース

No.154 1994.1.

ISSN 0285-2861

発行：宇宙科学研究所(文部省) ☎229 神奈川県相模原市由野台3-1-1 TEL 0427-51-3911

The Institute of Space and Astronautical Science

◆ISASニュースに関するお問い合わせは、庶務課法規・出版係(内線2211)までお願いいたします。