

井上浩三郎氏を紹介させていただきます。井上氏は、1963年に東京大学生産技術研究所に入所、その後宇宙航空研究所、宇宙科学研究所(I S A S)発足と研究所の名称は変更されましたが、日本の科学衛星開発の創成期から衛星通信機器の開発・科学衛星通信方式の研究に携わられました。科学衛星ミッションでは20機以上の衛星ミッションに携わられました。特に76年周期で地球からも観測できるハレー彗星は全世界の関心事でした。その太陽を回る軌道に初めて探査機を投入した「ハレー彗星探査ミッション」では工学チーフとして、衛星側では搭載重量140kg、電力100W以下の制約、また、経験したこともない深宇宙通信2AU(3億km)の探査機開発、また、臼田に64mφのアンテナ建設・深宇宙運用局、通信システムの構築と寝食を忘れてご苦労をされました。本文では、そのときの井上氏のご苦労が伺える記録として素晴らしい内容となっています。2003年に退職されましたが、退職後も宇宙科学研究所共同研究員としてアドバイザー、レビュワーとして活躍されています。余暇はスポーツ観戦、音楽鑑賞の他、テニス、囲碁を楽しんでいます。(編集委員 小淵知己)

## ハレー彗星探査ミッション

宇宙航空研究開発機構 (JAXA)宇宙科学研究所  
共同研究員 井上浩三郎



### 略歴

1963年東京大学生産技術研究所入所、改組により東京大学宇宙航空研究所、文部科学省宇宙科学研究所勤務等を経て、2003年定年退職、その後も衛星の打上に携わる。この間、40数年に亘り日本の宇宙開発の創成期から、ロケット及び科学衛星・探査機の研究開発に携わる。日本初の人工衛星「おおすみ」を始め多数のロケット及び科学衛星、探査機の打上げに参加。

現在、宇宙航空研究開発機構(JAXA)宇宙科学研究所共同研究員。私立大学理工学部非常勤講師。

昨年(2010年)は、JAXA宇宙科学研究所にとって記念すべき年でした。一つ目は、1970年2月11日、我が国初の人工衛星「おおすみ」を打ち上げて、40年目にあたりました。二つ目は、2003年5月9日に打ち上げた小惑星探査機「はやぶさ」が、小惑星「イトカワ」に着陸した後、打上げから7年の歳月を経て2010年6月13日に地球に帰還し、オーストラリアのウーメラ砂漠でカプセルの回収に成功したことでした。特に「はやぶさ」の快挙は、日本国民に大きな感動を与えたようです。

さて、私がこれまでに携わってきた宇宙科学研究所における科学衛星・探査機は29機におよびますが、その中から特に印象に残っているハレー彗星探査ミッションについて、その一端をお話したいと思います。

このミッションは、今から25年前の1986年に、76年振りに太陽に回帰してきたハレー彗星を観測するため、文部省宇宙科学研究所(旧東京大学宇宙航空研究所が改組)が総力を挙げて取り組んだPLANET-A計画でした。

宇宙研では、それまで科学衛星を10機以上打ち上げていましたが、地球の引力圏を脱出させ、惑星間を航行する探査機を打ち上げるのは初めてでした。理工一体になり、2機の探査機、「さきがけ」と「すいせい」を開発して、ハレー彗星に向けて打ち上げました。

各国もこのハレー彗星観測のため、ソビエトが2機の探査機「ベガ1号」「ベガ2号」、ヨーロッパ連合が探査機「ジオット」をそれぞれ開発し、アメリカは太陽風を観測していた国際太陽地球観測探査機「ISEE-3」の軌道を変更し、国際彗星観測探査機「ICE」と改名して、ハレー彗星との会合のため集結しました。

## ◎4つの開発課題

ハレー彗星を探索する PLANET-A 計画は、1980年度からスタートしましたが、限られた条件のもと、短期間で、下記に示す4つの開発を同時に行う必要がありました。

- (1) M-3 S II型ロケットの開発
- (2) 惑星間を航行する探査機の開発
- (3) 大型アンテナの建設と深宇宙局の開発
- (4) 惑星間航行用のソフトウェアの開発

### (1) M-3 S II型ロケットの開発

ロケット開発の経緯を詳細に述べることはできませんが、計画主任を頂点とする開発組織を明確にして1981年より開始されました。厳しい時間的制約のもと、M-3 S型からM-3 S II型ロケットへの性能向上は、既存モータを活用する開発基本方針に従い、これまでの固体ロケット技術蓄積に基づく上段モータの質的向上と大型化によって実現しました。

しかし、惑星空間に140kgの探査機を打ち出すためには、3段式では能力不足であり、1、2号機では第4段として、キックモータが必要でした。計画当初よりパーキング軌道を用いない直接投入方式を予定していたので、そのサイズは、第3段との組み合わせにおいて、投入能力を最大となるように選ばれました。また、保安上の観点から、第3段が地球周回軌道に入るように配慮が払われました。その間、能代実験場に於ける8機の地上燃焼実験、ST-735-1号機による飛行実験など、関係者による大変な努力が払われました。

M-3 S II型ロケットは、M-13、M-23、M-3B各モータよりなる3段ロケットが基本構成で、惑星間飛行に使用された1、2号機では、第4段としてキックモータ(KM-P)が搭載されました。

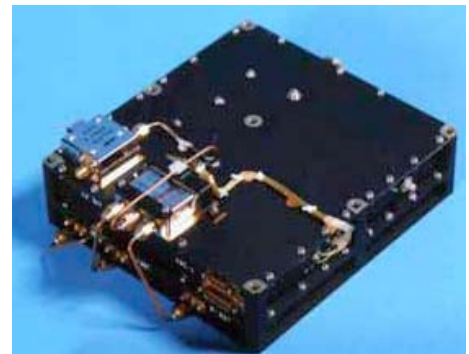
### (2) 探査機の開発

探査機は、我が国で初めての惑星間空間を航行するもので、地球周回衛星とは多くの点において異なっており、その開発には関係者の大変な努力がありました。超遠距離通信、軌道及び姿勢制御、軌道生成、軌道決定、姿勢決定、熱制御など初めての経験で、重量はロケットの性能から140kgと決められておりました。衛星班をはじめ、関係者による度重なる検討の結果、形状を円筒型として、姿勢はスピン安定方式にして安定をはかり、大きさは太陽電池の面積と姿勢制御用ジェットの観点から、直径1.4m高さ70cmとしました。上面には超遠距離用アンテナとして開発した低速の機械的デスパン機構を持つ直径80cmのオフセットアンテナと、ヒドラジンを燃料とする制御用ジェットを搭載しました。このアンテナは重量や耐震性や耐熱性を考慮して、金メッキしたニクロム線で編んだメッシュを貼っています。姿勢検出装置として、側面には、サンセンサーとスラストチューブ内に下方をむいたスタースカナーが取り付けられています。また搭載送信機としては、ハイパワーで5ワットの新設計によるSバンド送信機を用いています。機上受信機も冗長性を持たせ2台搭載しました。

探査機の構造は、「さきがけ」と「すいせい」は基本的に同じで、機器搭載用として、直径1.34mのアルミハニカム製のプラットフォーム、スラストチューブとしてCFRP製の円筒、更にスラストチューブ下端とプラットフォーム周辺をつなぐ8本のCFRP製のストラットから成っています。このようにアルミハニカムやCFRPを使用し軽量化を図りました。太陽電池は高さ70cmの円筒パネルに取り付けられ、約100Wの電力が得られます。通信系、姿勢系、電源系の各搭載機器も、プラットフォームの上面及びスラストチューブ内に主として取り付けられています。



M-3 S II-2号機による  
ハレー彗星探査機「すいせい」の打上げ風景



超遠距離用に新設計されたSバンド送信機



超遠距離アンテナとして開発された  
低速デスパン機構を持つ直径80cm  
オフセットアンテナ

### (3) 64mアンテナ建設・深宇宙運用局及び運用システムの開発

「ハレー彗星探査計画で超遠距離通信を可能にするためには大型アンテナが必要である」と、1978～1979年に関係者で議論されました。そして、宇宙研、三菱電機及び日本電気の研究者、技術者より成る調査団を組織して、1980年3月に世界各地の大型アンテナの実地調査を行いました。引き続き、国内での設置場所の検討が始まりました。その条件として、①極めて微弱な電波を受信するために、山に囲まれて都心雑音から遮蔽されていること、②航空路や公共通信回線から隔離されていること、③データ伝送の面から東京に近いところ、そして地元の協力が得られるところでした。これらの条件の下、候補地が10カ所に絞り込まれ、その結果、最適な場所として長野県白田町の現在の位置に決定しました。そして道路工事、土地造成、アンテナ資材の搬入、組立、調整と息つく間もない作業が続き1件の事故もなく大型アンテナは完成しました。このアンテナ建設と同時に開発・製造された深宇宙用送受信機などの地上ハードウェア装置と運用システムも、その性能確認のため昼夜試験が続けられ完成しました。そして明けて1月、見事に目標とした「さきがけ」の追跡を立派に果たしました。この大型アンテナが短時日に実現したのは関係官庁をはじめ関連会社の献身的な努力の賜でした。1984年10月31日、このアンテナのもとで行われた寒風の中の白田宇宙空間観測所の開所式が思い出されます。



超遠距離通信を行った白田64m大型アンテナ

候補地が10カ所に絞り込まれ、その結果、最適な場所として長野県白田町の現在の位置に決定しました。そして道路工事、土地造成、アンテナ資材の搬入、組立、調整と息つく間もない作業が続き1件の事故もなく大型アンテナは完成しました。このアンテナ建設と同時に開発・製造された深宇宙用送受信機などの地上ハードウェア装置と運用システムも、その性能確認のため昼夜試験が続けられ完成しました。そして明けて1月、見事に目標とした「さきがけ」の追跡を立派に果たしました。この大型アンテナが短時日に実現したのは関係官庁をはじめ関連会社の献身的な努力の賜でした。1984年10月31日、このアンテナのもとで行われた寒風の中の白田宇宙空間観測所の開所式が思い出されます。

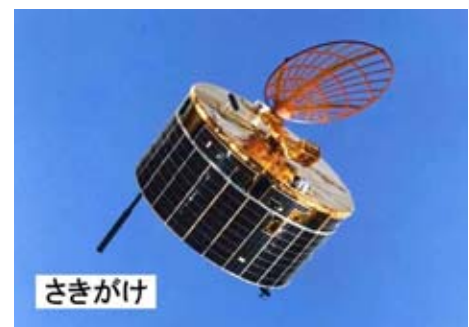
### (4) 惑星間軌道決定プログラムの開発

惑星間飛行に不可欠な軌道決定プログラムは、アメリカのNASA、JPLでマリナ探査機の軌道決定に携わったN先生の指導のもとF社の協力を得て5年間かけて開発されました。少人数での大規模ソフトウェアの開発は大変なご苦労があった事と思います。駒場の研究所近くでN先生とご一緒したとき「アメリカではこの規模のソフト開発には20人以上のスタッフが居ましたよ」と仰っていました。実際に小人数で行った軌道決定作業は大変タイトなスケジュールで、打ち上げ時には布団をもって徹夜で軌道ソフトを作ったりもしました。まさに自転車操業で、計算機を導入し、初めての白田局との高速回線を導入したりして、大変な地上システムの構築でしたが、F社のNさんによると「N先生のご指導で、メーカーも含めて仕事が非常にやりやすかったです」と大変な仕事の中でも細かいところまで気を配られていた先生の思い出を語っておられました。

## ◎試験探査機「さきがけ」とハレー彗星探査機「すいせい」

### (1) さきがけ

M-3S型を改良したM-3SII-1号機に搭載された試験探査機MS-T5は、1985年(昭和60年)1月8日4時26分(日本標準時)に打ち上げられました。ロケットの飛翔は正常で、所期の性能を発揮し、完璧な飛行によって予定された惑星間空間軌道へ投入され「さきがけ」と命名されました。達成された軌道は、近日点 $121.7 \times 10^6$  km、遠日点 $151.4 \times 10^6$  km、周期318.6日でした。実験班は全員内之浦で越年して打上げに備えました。打上げ予定日は1月5日でありましたが、天候不良で初日を見送り、6日には打上げ直前に補助ブースタ可動ノズルの油圧駆動用モータの電源開閉回路が一時閉じなくなる不具合が発生しましたが、地上装置に問題があることが確認されたため、1月8日の打上げに至りました。この成功は宇宙研が総力を上げて達成したもので、実験班の底力を見たようでした。我が国初の人工衛星「おおすみ」誕生から数えて15年、記念すべき年になりました。4種類の新開発モータを含む新機体M-3SII型ロケットは、その飛翔試験を一気に成功させたものであり、A実験主任より「120%の成功」との場内放送があったのもこのときでした。



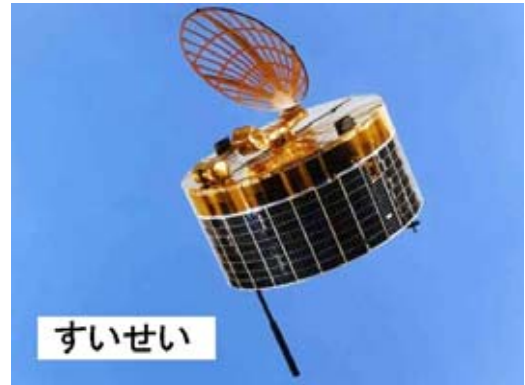
試験探査機「さきがけ」

科学観測として、太陽風プラズマと惑星間磁場の観測を行うために、太陽風イオン観測器(SOW)、プラズマ波観測器(PWP)及び太陽風・惑星間空間磁場観測器(IMF)という3種類の観測器が搭載されました。

### (2) すいせい

ハレー彗星探査を目的とする探査機「PLANET-A」は、予定より2日遅れて1985年(昭和60年)8月19

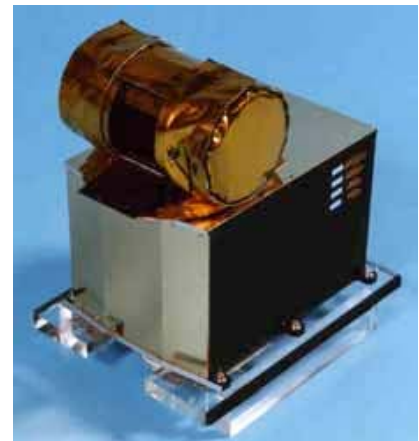
日 08 時 33 分、小雨まじりの中、一瞬の晴れ間をみつけてランチャーをセットし、M-3 S II-2 号機で打ち上げられました。非常にスリリングな打ち上げでした。ロケットの完璧な飛行によって、予定された惑星間軌道に乗り PLANET-A は「すいせい」と命名されました。米国航空宇宙局をはじめ、我が国の追跡局（勝浦、内之浦、臼田）も、次々に第 1 パスの電波を受信しました。臼田深宇宙局と米国航空宇宙局深宇宙通信網において得られたデータに基づき、算出された軌道要素は、①近地点高度 217km、②対地球軌道傾斜角 31.25 度、③双曲線余剰速度 2.985km/s、④遠日点距離  $151.42 \times 10^6$  km、⑤近日点距離  $100.50 \times 10^6$  Km、⑥傾斜角 0.888 度、⑦周期 282 日でした。



ハレー彗星探査機「すいせい」

受信したテレメトリデータから「すいせい」の動作状態は正常でスピン数 25.35rpm、太陽方向とスピン軸のなす角は 89 度であることが確認されました。そして宇宙研で算出したハレー彗星への最接近日時は 1986 年 3 月 8 日 22 時（日本標準日時）で、その距離は 21 万 km でした。その後ハレー観測関係機関が集まる国際会議において、ハレー彗星中心核付近のダストのひろがりから従来考えられていたよりも小さいことが示されたことと、太陽風観測装置にとっても中心核に近いほどより良い結果が得られることが予想されるため、11 月 14 日にハレー彗星に近付ける軌道修正を行いました。その結果ハレー彗星との最接近時の距離は 14.5 万 km となりました。

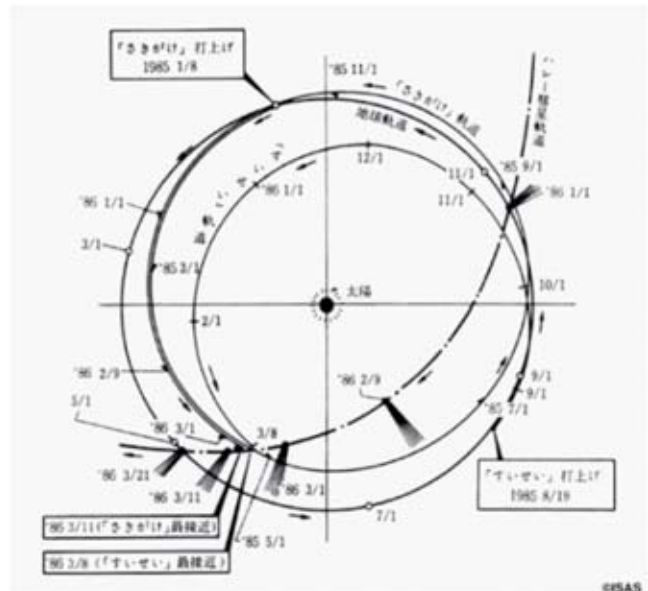
「すいせい」には 2 個の観測装置が搭載されました。一つは水素ライマンアルファ線 ( $1216\text{\AA}$ ) という紫外線によってハレー彗星の水素コマを撮像する真空紫外撮像装置 (UVI) で、もう一つは太陽風中の荷電粒子（イオンと電子）の観測のための太陽風観測器 (ESP) です。彗星の核は太陽系始原物質の微粒子と氷で形成された直径数 km の塊と考えられており、これが太陽に近づくにつれ蒸発して巨大なコマと尾を形成します。UVI はハレー彗星の軌道上の各点でこの水素コマを撮像することにより、コマの生成・消滅の機構を解明しようとするのが観測目的で、一方 ESP は太陽風と彗星の電離大気との相互作用の研究を行うもので、相互作用によって形成される衝撃波面の存在などを解明しようとするものです。これらの観測を行うために「すいせい」はハレー彗星の核の 100 万 km 以内に接近することを目的として打ち上げられました。



真空紫外撮像装置 (UVI)

### ◎さきがけ/すいせいの成果

衛星主任の報告によりますと『「さきがけ」は予定通り最接近距離 700 万 km でハレー彗星を通過した後、打上げから約 3 年たって、「さきがけ」は地球から見て丁度太陽の反対側を通過しました。このハレー彗星が太陽風に及ぼす影響や太陽風そのものに関する研究、更にいわゆるソーラーオカルテーション時の電波の特性から太陽近辺の太陽プラズマの特性を調べる等多大な成果を収めています。また工学的には深宇宙探査に関する数多くの基礎的実験を成功裏に行いました。』とあります。いずれにしても、初めての人工惑星となり、試験探査機として、ハレー彗星に接近して 2 AU（天文単位：1 AU = 1 億 5000 万 km）近く離れた超遠距離から観測データを送り続けたことは、我々にとって大きな自信になりました。



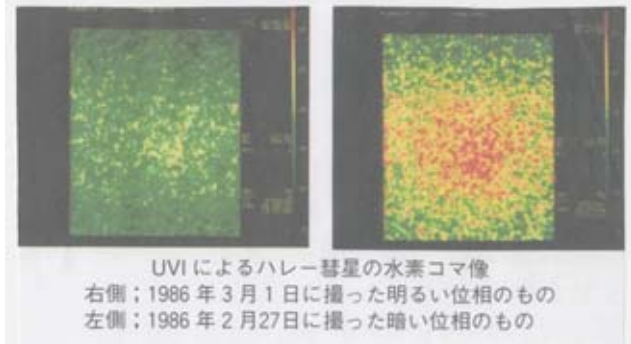
「さきがけ」と「すいせい」の軌道

「すいせい」は 9 月中旬より観測体制に入りました。太陽風観測装置は 9 月下旬より観測をはじめ、続いて紫外線撮像装置は 11 月中旬よりハレー彗星の紫外線像の撮像を開始しました。そして 1986 年（昭和 61 年）3 月 8 日 22 時 06 分、ハレー彗星の太陽側約 15 万 km の点を通過しました。3 月 8 日 13 時 16

分に臼田局の受信範囲外に去った「すいせい」はプログラム制御により13時34分より紫外線測光装置による観測を行いました。

また21時31分から3月9日6時10分まで太陽風観測装置による観測を実施しました。観測データによりますと、紫外ライマンアルファ光撮像装置は11月14日に初めてハレー彗星の像を捉えましたが、ライマンアルファ像には明暗の繰り返しがあることが判明しました。この明暗に伴った現象を組織的に観察することにより、従来諸説あったハレー彗星核の自転周期に対し $2.2 \pm 0.1$  days という値を導きだし、これらの結果がまとめられNature誌に投稿がなされました。太陽観測装置も3月8日～9日のハレー彗星への最接近に際しては、ハレー彗星と太陽風の相互作用に関して大変貴重なデータを取得しました。

このように、ハレー彗星ミッションは多くの方々の努力と協力によって、成功裏に進み多くの貴重な観測成果がなされましたが、その一方でここに至るまでの総合試験や運用に於いて、ハラハラする場面にも遭遇しました。そのなかから印象に残っているものを少し挙げてみます。



UVIによるハレー彗星の水素コマ像  
右側；1986年3月1日に撮った明るい位相のもの  
左側；1986年2月27日に撮った暗い位相のもの

### ◎大変だった相模原試験棟での総合試験

「さきがけ」の総合試験は、改組にともない相模原の新しいキャンパス内に建設された新環境試験棟で行われました。出来たてのクリーンルームは温度、湿度、クリーン度が不安定で大変苦勞したことが記憶に残っています。また当時は交通が不便で、試験のために当番で駒場から相模原キャンパスへ通う日々は大変でした。

### ◎きわどかったアンテナデスパンモータの不具合

PLANET-A (すいせい) の8月打ち上げに向けて最後の仕上げに入った総合試験での出来事でした。7月1日射場輸送前の最終チェックも無事問題なく終了しましたが、7月2日に実施したバッテリー特性試験での負荷設定で、デスパンモータを回転させようとしたとき、モータはびくともせず静止したままという不具合が発生しました。このデスパンモータは地球との超遠距離通信やハレー彗星を撮像するときを使用し、これが動作しなければミッションができなくなる程の重要なところで、関係者は懸命にその原因究明にあたりました。1回転360度を少しずつ動かしながらチェックを7月11日まで繰り返し行いました。その結果、その原因はアンテナと衛星との相対速度を検出するタコパルスと、衛星との相対位置を検出するための位置パルス进行处理する回路が、アンテナと衛星の非常に狭い特有な範囲で、初期起動用トルクを発生しない事にあるということがわかりました。この原因の究明をされたN社のKさんの執念が実り、奇跡的に原因をつきとめられたと思います。検討の結果運用上は問題ないとの結論に達し、打ち上げに臨みましたが、ミッション中は全く問題なく動作しました。原因不明や修復に時間がかかる不具合で打ち上げに間に合わなかったら、と思うと肝をひやす出来事でした。



探査機にアンテナを取り付ける総合試験風景

### ◎失敗出来ない最接近時の観測データ取得

76年振りに太陽に近づいてきたハレー彗星へ向け、各国が競って探査機を飛ばし、いろいろな方法で観測データを取得しました。「すいせい」も2個の観測装置を載せ最接近時のデータを取得しました。失敗すると76年待たなければなりません。「すいせい」のシステムを担当されたN社のKさんは『「すいせい」の運用で一番緊張したのは打上げでも、軌道修正でもなく、彗星最接近時のESPの運用コマンドプログラムの作成でした。最接近時のハレー彗星との方向と時刻情報からESPの観測制御と取得したデータを確実にデータレコーダに記録しなければなりません。ESPとデータレコーダの動作を絵で描いたり、何度もシミュレーションしました。何年もかけての成果がこの瞬間に懸かっていると思うと絶対にミスは出来ないという最高の緊張状態で作業しました。予定どおりの観測データが得られた時は正直「ほっと」しました。』と当時の思い出を語っておられま

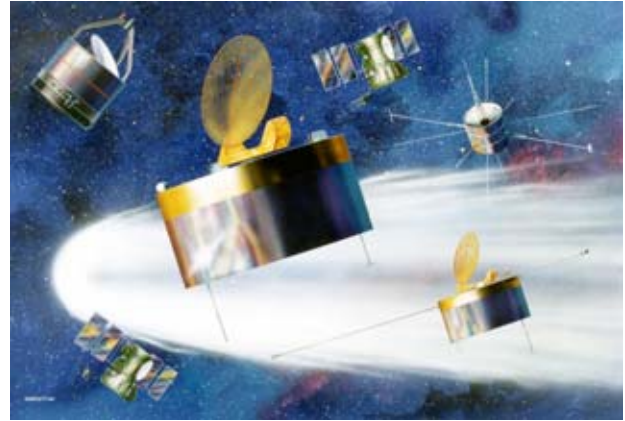
した。

### ◎世界一小さい深宇宙運用管制室と名物教授のお話

「すいせい」の運用は、これまで衛星の試験を行っていた駒場キャンパスのクリーンルームに造られた管制室で行いました。この管制室には、探査機の軌道を担当されたN先生がよくお見えになり軌道運用に当たられました。先生はヘビースモーカーとして有名でありましたが、「さきがけ」と「すいせい」、初めての深宇宙ミッションにおける軌道決定を心配されてか、そのタバコの本数はますます増えて、軌道を担当したF社のNさんは「灰皿をもって先生の後をよく付いてまわりましたよ」とエピソードを語っておられました。またこの管制室には運用を担当されたU先生も外国からのVIPを案内され「世界一小さな深宇宙管制室です」と説明されていたことも思い出されます。いずれにしても、この小さな管制室で二つの探査機を少人数で‘よくも運用したものだ’と思います。

### ◎国際協力

このミッションでは国際協力の点でも新しい進歩がありました。宇宙研究機関が集まって結成されたのがIACG (Inter-Agency Consultative Group) でした。1986年(昭和61年)3月10日には、ハレー彗星の軌道が黄道面を通過(降交点通過)しましたが、この日の前後に、「さきがけ」「すいせい」をはじめとして、ヨーロッパのGIOTTO、ソ連のVEGA-1、VEGA-2、アメリカのICE、の6探査機がハレー彗星に接近し、さまざまな観測を行いました。これらの観測結果は国際的な協議機関(IACG)を通じて各国に通報され、共同研究の成果をあげるために貢献しました。特にGIOTTO、VEGAが各国の協力のもと、ハレー彗星の核に突っ込んでいきながら、画像データなどを送り続けた光景は今でも深く印象に残っています。



ハレー艦隊(各国の探査機がハレー彗星に接近し、さまざまな観測を行った)

### ◎あとがき

PLANET-A計画は4つの開発課題を同時に行わなければならない、厳しいものがありました。新聞記者の人たちからも、「こんなにたくさんの新規開発課題を抱えてうまくいくはずがない」とまで言われましたが、終わってみると、数々の難関はあったものの、それらをすべて見事に突破した素晴らしいプロジェクトとなりました。

宇宙科学研究所のハレー彗星探査研究報告によると「我が国のハレー探査ミッションは、小さな探査機にも拘わらず、めざましい成果をあげることができた。これは宇宙科学研究所を核として集まった宇宙科学(理学及び工学)の研究者のすぐれた見通しとそれを遂行する努力、これを支えてくれた我が国のすぐれた会社の技術陣の努力、そうしてこのような大きな計画に対して財政的、事務的に支持を与えていただいた関係者、特に文部省および宇宙研の事務当局者の支援等が結集した結果である」と述べています。

(写真提供：JAXA宇宙科学研究所)