

第10号科学衛星「すいせい」

伊藤 富造・上杉 邦憲

Halley's Comet Explorer "Suisei"

By

TOMIZO ITOH AND KUNINORI UESUGI

Abstract: In this paper, we summarize the system design, operations and a number of scientific results of the Suisei mission to comet Halley, the first exploration of interplanetary space in cooperation with Sakigake spacecraft. The followon missions of both spacecraft are also discussed.

1. 緒 言

よく知られているように、ハレー彗星は古くからの史書にその出現が記録されている巨大な彗星であって、エドモンド・ハレーが最初に計算して求めた約76年の周期で太陽に接近する。前回出現した1910年にはハレー彗星は太陽と地球の間の空間を通過したので、天空を150度もの広角度にわたって伸びた長大な尾が肉眼で観察されたばかりでなく、大規模な地上観測網が敷かれて大量のデータが得られており、多くの研究成果が公表されている。

1986年の出現の際の軌道は前回と異なり、太陽への最接近は地球から見て太陽の向う側になるので地上からの詳しい観測は望めなかった。しかし現代のわれわれには宇宙飛翔体という有力な手段があり、また各種の観測技術も高度に発達しているので、各国宇宙機関で探査機による観測が企画され実行された。

このように世界の宇宙科学者の目を、数多く出現する彗星の中で特にハレー彗星に向けさせた理由はおよそ次のようにまとめられる。

第1に、ハレー彗星は周期が200年以下の彗星の中では老化が著しくないものの一つで、大きく拡がりしかも密度の高いコマ、プラズマの尾とダストの尾、核の物質が噴出するジェット現象などの、彗星としての属性のすべてが活発に出現することが予測できる彗星であること。

第2に、軌道がよくわかっている彗星の中では最も活発で、ガスを放出する割合が他の短

周期彗星より約100倍も大きいこと。

第3に、前回1910年の出現時に得られた大量の観測のデータと今回のデータとを比較し研究することにより多くの科学的成果が期待されること、等である。この様に科学観測のねらいとしては多くの目標が考えられるが、「さきがけ」と同じく重量140kgの「すいせい」に搭載可能な観測装置は極めて限られており、両探査機の予定軌道を考慮しながら検討した結果、「すいせい」には真空紫外撮像装置（UVI）と太陽風観測装置（ESP）が搭載されることになった。

これらのうち UVI はハレー彗星の核の周りに大きく広がる水素雲の発達、消滅過程を継続的に観測することが目的とされた。UVI は水素ライマンアルファ線に感じる検出器を備えた撮像装置なので、水素雲により共鳴散乱された太陽からの水素ライマンアルファ線を捉えることにより水素雲を撮像することが出来る。UVI は、「すいせい」がハレー彗星に最接近する時点の数ヶ月前から撮像を開始し、最接近後も可能な限り撮像を続け、それにより水素雲の生成・消滅過程を研究するためのデータを得ることが計画されていた。

軌道投入後一連の試験を経た後ほぼ予定通り観測は実行され、大量の撮像データが得られたばかりでなく、後に述べるようにハレー彗星の核の自転周期の発見という、予想をはるかに越えた成果をもたらすことが出来た。

ESP は打上げてから約1ヶ月後に試験を開始し、その後に太陽風プラズマ中の正イオンと電子を観測し、そのエネルギー分布を測定することが予定され、さらにハレー彗星に最接近する時には彗星核から放出された原子・分子のイオンが測定される可能性があるため、太陽風がハレー彗星と衝突する際に生ずる衝撃波面近傍のプラズマの構造が観測される期待が持たれていた。

打上げ1ヶ月余を経て予定通り試験が行われた際、高電圧印加試験中に電子分析装置が不調となってしまったが、正イオン分析装置は予定通り動作し太陽風プラズマの観測、最接近時の観測とも順調に行われ、やはり予期以上のすばらしい成果があげられた。

このように「すいせい」は「さきがけ」と共に軌道投入、運用、観測のすべての面にわたって予期以上の成功を収め、諸外国の探査機とならんでハレー彗星探査の一翼を担って彗星の科学の飛躍的な進歩に貢献することが出来た。

両探査機は現在も太陽周回軌道上を運行中であり、1992年には再び地球に接近することが予期されている。

なお両探査機の構成、ミッション運用、科学観測の成果等の報告は既に宇宙科学研究所報告特集第19号「ハレー彗星探査研究報告」（1987）にまとめられ出版されているので、詳細はこの特集号を参照していただくこととし、本稿では概要についてのみ述べることにする。

2. 探査機のシステム

「さきがけ」、「すいせい」のミッションは、それまでわが国で製作し打上げられた地球周回衛星とは全くといってもよいほど異なっており、探査機のシステム設計に当ってはいろいろな角度から検討され、結論を得るまでには度重なる討論と試行錯誤の連続であった。その経緯については前出の宇宙研報告特集号中の論文および本特集号の論文 [1] に詳しく述べられている。設計段階で特に問題となったのは可能な限りの軽量化、姿勢制御方式、熱設計、

超遠距離通信方式などであった。その詳細は前出の論文に譲り、ここでは結果をこれらの論文 [2], [3], [4], [5], [6] から引用して記しておく。両探査機のシステムは観測器とこれに関連した部分を除き同一である。

2.1 形状、構造

探査機本体は図1(a), (b)に示す様に外形1.4m、高さ70cmの円筒形であり、内部に一段のデッキを設けて機器を搭載した。このデッキおよび太陽電池を貼る外部円筒(サブストレート)は中央の円筒状スラストチューブ(外形約50cm)と8本のストラットで支持されている。

2.2 軌道・姿勢制御方式

スピンによる姿勢安定方式を採用し、巡航時のスピン数は6rpmである。UVIによるハレー彗星撮像時には可能な限り低速のスピンが要求されるので、モーメントホイール(MWA)を搭載することにより本体のスピン数は0.2rpmとした。軌道及び姿勢の制御にはヒドラジンを燃料とするリアクション・コントロール・システム(RCS)を用いた。姿勢センサーとしてはスピン型太陽センサー(SAS)とスター・スキャナー(STS)が搭載され、これらのテレメータ・データを地上で処理することにより探査機の姿勢を決定した。

2.3 通信系

テレメータ、コマンド通信にはSバンドが使用され、超遠距離通信を可能とするため、 -140dBm 以上の高感度受信機(SBR 2台)、出力5w/0.07wを地球からの距離に応じて切替える送信機(TMS)、23dBの利得を有する口径80cmのオフセットパラボラアンテナ(HGA)を備える他、中利得アンテナ(MGA)および低利得アンテナ(LGA)が搭載された。

HGAは中心から 5° でゲインが3dBダウンする程指向性が強いので、これを常に地球に向けるためのデスパン機構が必要になる。このデスパン機構は6rpmのみならず、0.2rpmという低スピン時においても機能することという他に類を見ない要求が課されたため、完成するまでには多くの技術的課題を克服しなければならなかった。

なお、姿勢制御系には自動スピンドウン停止、自動太陽捕捉制御、および自動地球捕捉制御の3種の自動制御機能が備えられているが、ここでは説明を省略する。

2.4 データ処理系

データ処理系としては、図2に示すようにデータ処理ユニット(DPU)を中心として、地上からのコマンド信号(16bps)の解読と各機器への分配、各機器からのデータのフォーマットとPCMテレメトリ信号への変換、水晶発振器による基準時刻信号の発生、自動管制等の機能を備えている。PCMテレメトリの伝送密度は地球との距離に応じて2,048bpsと誤り訂正符号を付加した64bps(信号としては128bps)をコマンドにより切替えて用いた。又データは臼田からの非可視時等必要に応じて容量1メガビットの磁気バブルメモリーに記録した。後に述べる様に「すいせい」がハレー彗星に最接近した時刻は臼田から

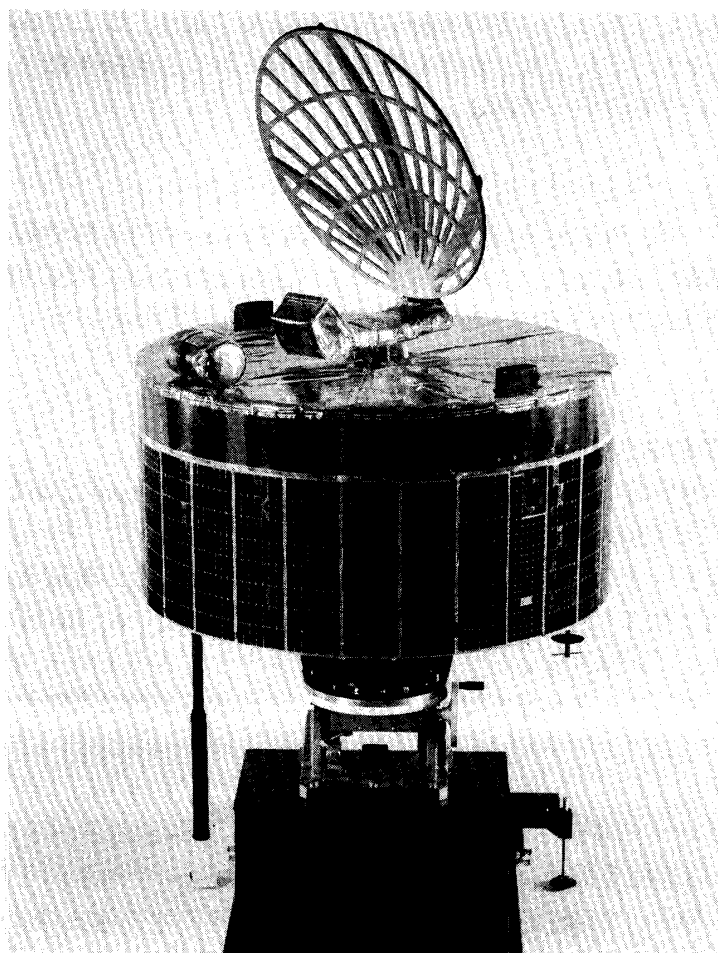


図1(a) 「すいせい」の外観

の非可視時間帯中にあったので、最も貴重なデータを記録する極めて大きい役割を果たした。

2.5 電源系

電力は外径1.4mの円筒形サブストレートに貼った太陽電池から供給される。軽量化のためケブラー繊維等の軽量材を用いたパネルの新規開発を行う一方、限られたパネル表面での発生電力を増大させるため、新たに2cm×6cmの広面積太陽電池も採用した。この結果重量比出力で見ると11.5w/kgとなり、従来のボディマウント型科学衛星用パネルに比べて約30%の改善となった。また太陽と探査機との距離が近日点においては0.68AUになり、太陽光の照射強度が地球近傍の2.2倍となることを考慮するとパネル上に放熱領域を設ける必要が生じた。このような条件の下に最終的に決定された太陽電池パネルの構成は2cm×6cmセルが1,400枚、2cm×2cmセルが336枚である。

軌道投入後の太陽電池パネルは正常に動作し、所要の電力を発生した。図3に太陽電池パネルの発生電力の実測値を予測値と共に示してある。パネル温度の最大は0.68AUの近日点通過後で、68℃であった。

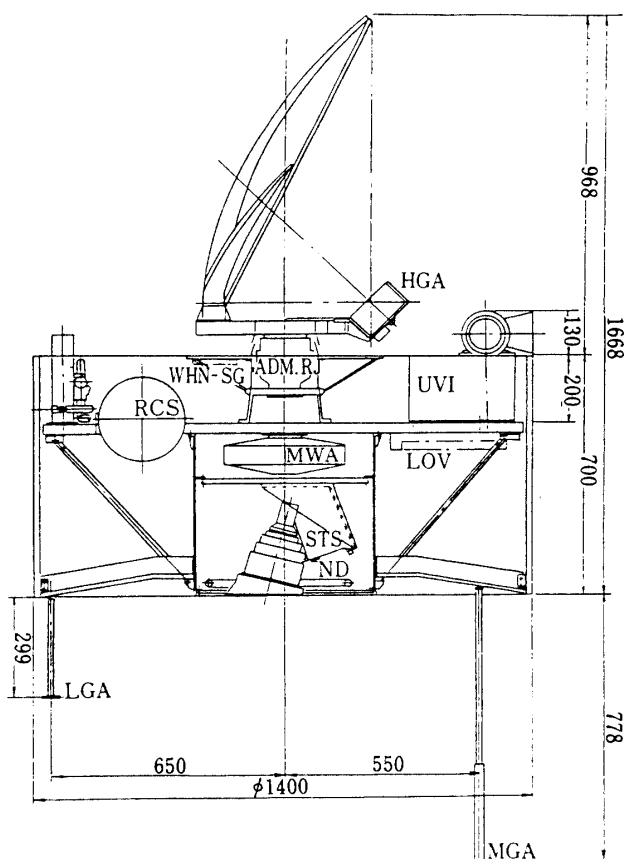


図1(b) 「すいせい」機器実装図

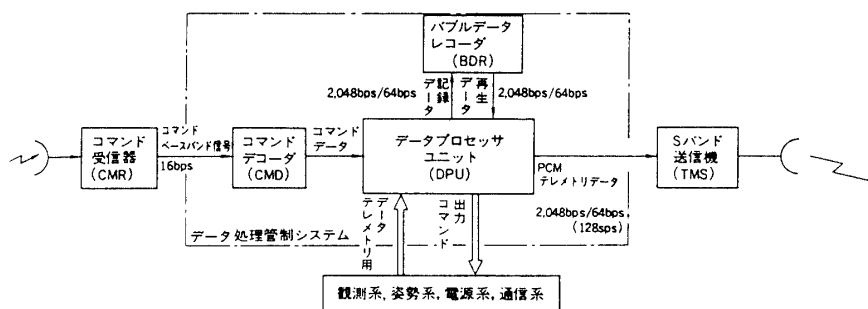


図2 データ処理管制システム系統図

「すいせい」は、全ミッション期間にわたり日陰に入ることなく、バッテリーは打上げ当初の短期間以外殆ど用いられないことがないため定格容量2 AHの $Ni-Cd$ 二次電池を搭載するに留めた。

2.6 熱設計

「すいせい」は、先に述べたように地球周回衛星に比べて最高2.2倍の太陽からの熱入力を

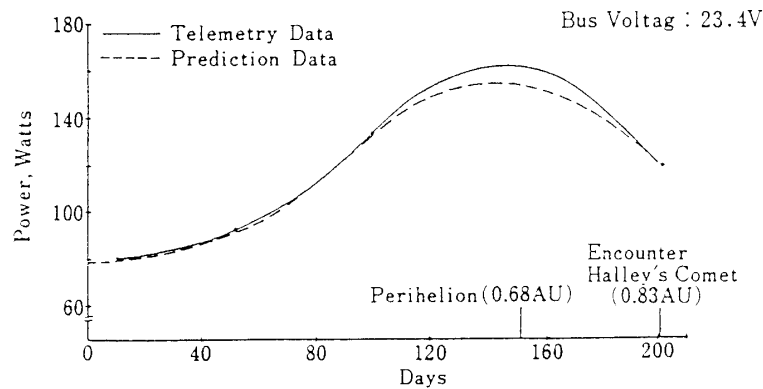


図3 「すいせい」太陽電池パネルの発生電力

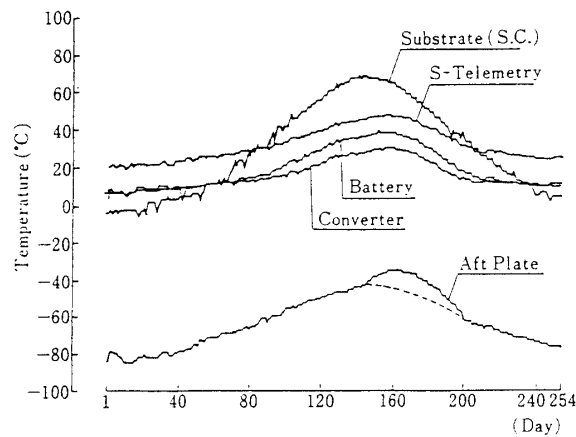


図4 「すいせい」の打上げ後の飛行温度データ

受ける。このため熱設計の基本方針として、内部機器はサーマル・ブランケットによって外部宇宙空間と熱的に遮断し、内部の発熱はデッキ下面に設けたサーマル・ルーバーで放出させる能動的熱制御方式を採用した。また2℃で凍結するヒドラジンを内蔵しているRCSや、スラストチューブ内のSTS等の機器についてはヒーターで保温することとした。

熱解析の結果、以上の熱設計によっても θ_s が $90^\circ \pm 3^\circ$ を逸脱すると内部機器で許容温度範囲を越えるものが出る可能性が指摘され、運用時の姿勢に制限が加えられることになった。

「すいせい」の飛行時の温度履歴を図4に示す。図には構体および搭載機器の代表的な計測点であるサブストレート、下部放熱プレート、Sバンドテレメータ送信機、バッテリーおよびコンバーターの温度データを示している。

「すいせい」の温度は太陽光の受光強度の変化に伴って上昇している。また打上げ後147～204日にかけてみられる下部放熱プレートの温度上昇は、マヌーバによる姿勢変化により放熱プレートから太陽光が入射したためである。これに伴い搭載機器の温度も上昇しているが、その上昇率は下部放熱プレートにより緩和されていることがわかる。なお、下部放熱プレートの温度履歴曲線の下部に示されている破線は、下方向からの熱入力が無いときのプレート

表1 「すいせい」姿勢・軌道制御系運用概要

| 年月日 | 打上後日数 | 主要運用内容 |
|----------|-------|---|
| 60. 8.19 | 0 | <ul style="list-style-type: none"> ・スピンドアウン (129 rpm→29.3 rpm) ・太陽捕捉制御 (θs 44°→89°) (以上2項目打上後非可視時に実行, 第1可視時確認) ・スピン制御 (兼 RCS 校正) 29.3 rpm→13.4 rpm→18.5 rpm→6.5 rpm ・STS 作動, 姿勢決定開始 ・姿勢制御 (STS 視野内に星を捕捉するため) ・レンジ計測, 軌道決定 |
| 60. 8.20 | 1 | <ul style="list-style-type: none"> ・RCS 校正 |
| 60. 8.21 | 2 | <ul style="list-style-type: none"> ・レンジ計測, 軌道決定 (ハレー最接近距離 21万 km) |
| 60. 8.22 | 3 | <ul style="list-style-type: none"> ・$\pm 4.5^\circ$ マヌーバ制御チェック ・スピン調整 ・姿勢制御 (黄道面に対しほぼ垂直へ) |
| 60. 8.23 | 4 | <ul style="list-style-type: none"> ・レンジ計測, 軌道決定 (以後 記載省略) ・巡航スピン時におけるアンテナ・デスピッチェック ・モーメントム・ホイール作動チェック (ホイール 1996 rpm で探査機本体 0.19 rpm) ・低速スピン時におけるアンテナ・デスピッチェック ・アンテナ地球方向ポインティング (プログラム・モード) |
| 60. 8.27 | 8 | <ul style="list-style-type: none"> ・モーメントム・ホイール回転数校正 (以後 UVI による撮像時・低速スピン) |
| 60. 9.17 | 29 | <ul style="list-style-type: none"> ・姿勢制御 (黄道面垂直へ) |
| 60.11.14 | 87 | <ul style="list-style-type: none"> ・軌道修正 $\Delta V = 13 \text{ m/s}$ (キャンテッド・モード) →姿勢調整 |
| 60.11.15 | 88 | <ul style="list-style-type: none"> ・スピン調整 ・姿勢制御 |
| 60.11.16 | 89 | <ul style="list-style-type: none"> ・レンジ計測, 軌道決定 (ハレー最接近距離 15万 km) |
| 60.12. 4 | 107 | <ul style="list-style-type: none"> ・スピン調整 |
| 60.12. 5 | 108 | <ul style="list-style-type: none"> ・スピン調整 ・姿勢制御 |
| 61. 3. 8 | 201 | <ul style="list-style-type: none"> ・ハレー彗星最接近 |

温度の予想値である。

3. 探査機の運用

3.1 最接近までの運用

1985年8月19日午前8時33分、「すいせい」は台風の間際の小雨の降る空に向かって打上げられた。投入された軌道は予定した惑星間軌道に極めて近く、速度誤差は所定の特性速度7.7km/sec に対し10,000分の1以下の0.7m/sec とわずかで、打上げ後3日目に予定されていた第1次速度修正は不要となった。

その後の運用は主として表1に示す順序で行われた。打上げ直後の非可視時に実行された自動スピンドアウン及び太陽捕捉制御もこの表に示す順序で正常に機能し、全ミッション期間中を通じ姿勢制御の観点からは最もクリティカルな制御がこの時点で達成されたものといえる。

「すいせい」は打上げ後3日を経てスピン軸が黄道面にほぼ垂直な巡航姿勢となった後は運用も定常状態に入り、臼田深宇宙局（UDSC）からリアルタイムで送られ駒場探宇宙局（KDSC）のQL画面に表示される姿勢、通信回線、温度等のデータをモニターするのみとなる。

軌道上で探査機の姿勢は太陽からの輻射圧によって序々に変化していくが、 θ_s が $90^\circ \pm 3^\circ$ あるいは θ_c が $90^\circ \pm 5^\circ$ の制限を越えた場合にはRCSを噴射して姿勢をこの範囲内に戻さねばならない。「さきがけ」の場合には打上げ前には探査機表面やHGA部分の太陽光反射率が正確には判らなかつたため、打上げ後160日まではしばしば姿勢を修正する必要があった。しかしこの間の姿勢変動から太陽光反射率を推定し、打上げ後160日にはこの推定結果に基づいてRCS噴射を必要としない姿勢に投入した。「すいせい」ではこの経験により適切な手段を用いたので打上げ後8ヶ月以上にわたり太陽光輻射圧の影響を補正するためのRCS噴射は行われなかつた。

一方「すいせい」のハレー彗星への最接近距離はハレー彗星から放出されるダストの影響を考慮して20万kmと予定されており、実際に投入された軌道から推定された最接近距離がこの値に極めて近かつたため、前述のように第1次軌道修正は実施されなかつた。その後IHW（International Halley Watch）に属する地上観測データの解析に基づいてダストの影響を再評価した結果、最接近予定距離を15万kmに変更することが決り、そのための軌道修正およびそれに伴う一連の姿勢制御が打上げ後87日、88日にかけて実行された。

3.2 ハレー彗星への最接近

この様な運用経過を経て「すいせい」は1986年3月8日にハレー彗星の前面約15.1万kmに接近したのである。図5は1986年3月8日12時30分（UT）から13時30分（UT）の間の「すいせい」とハレー彗星との相対位置を、ハレー彗星に固定した座標系（Z軸を黄道面に垂直とし、X軸を春分点方向とした右手系）のXY平面に投影したものである。軌道決定結果によれば、この間「すいせい」はハレーから見てほぼ直線上を毎秒72.97kmの一定相対速度をもって飛行し、13時05分49秒（UT）にハレー彗星から151,000kmの太陽側に最接近したものと考えられる。

この最接近前後は臼田深宇宙局（UDSC）の64mアンテナからは「すいせい」が非可視のため、米国ジェット推進研究所（JPL）の深宇宙局（DSN）による追跡が行われた他、科学観測データを初め、姿勢やHK等のデータを搭載のデータレコーダーに記録しておく方法がとられた。当初の計画ではこの記録データの再生は、ハレー接近前後のリアルタイム観測が一段落する3月10日に行われる予定であった。しかし日本時間3月9日早朝、ハレー彗星最接近後最初のUDSC入感時において、「すいせい」の姿勢が前日の消感時に比べ大きく変化していることが判明したため、急拠予定を変更して最接近時の収録データを再生することとした。そのデータによると、最接近12分前と20分後の2回、探査機に何らかの衝撃が与

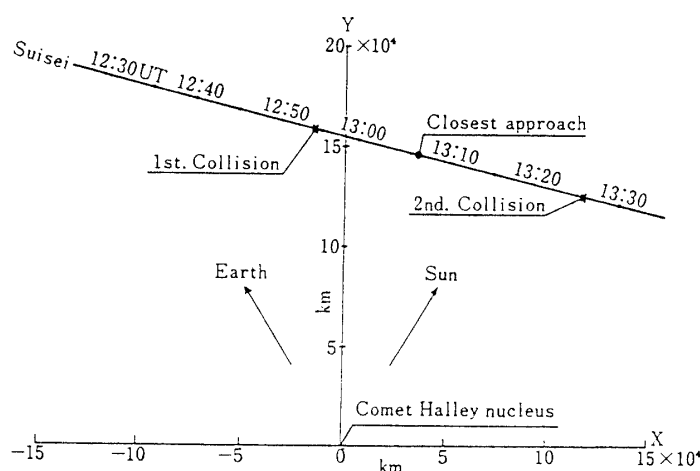


図5 ハレー彗星最接近時「すいせい」軌道

えられて姿勢とスピン周期が変化すると共に、首振り運動がおき、その後ニューテーション・ダンパー (ND) の働きで姿勢が安定していったことが判明した。

このような急激な姿勢変化は、「さきがけ」, 「すいせい」の両探査機共打上げ以後現在に至るまでこの時点を除いては全く生じていないことから、この2回の衝撃はハレー彗星の核から出てコマを形成しているダストが衝突したことによるものと考えて間違いなからう。

「すいせい」には直接ダストの大きさや質量を検出するような装置は搭載されていないが、衝突時の姿勢およびスピン速度の変化即ち探査機の角運動量の変化からダストの質量をある程度推定することが可能である。推定法 [7] については省略するが、衝突したダストの質量は少なくとも $10^{-5} g_r$ であったと考えられている。

4. 観測装置

4.1 真空紫外撮像装置 (UVI) [8], [9]

4.1.1 撮像装置光学系

撮像用の光学系は、図6に示すように平面鏡とレンズ系、イメージ検出部により構成されている。平面鏡は可動であり、ハレー彗星を捕捉するためにパルスモーターによって所要の角に設定できる。この平面鏡によって導入された観測対象の紫外線像は、焦点距離 104.6mm の反射型望遠レンズ系によってイメージ検出部上に結像される。

イメージ検出部では、まずマイクロチャンネルプレート内蔵型のイメージインテンシファイアー (UVII) で二次電子による像の増強を行い、UVII の蛍光面で可視光像に変換した後、像はファイバプレートにより CCD 面上に送られる。

一般に撮像においては、検出部内部での入力信号の蓄積が必要となる。UVI においては S/N 比の確保のためには 2 秒程度の入力信号の蓄積をしなければならない。一方 UVI による紫外像の撮像時にも探査機は低スピン速度とはいえ 0.2rpm でスピンしているため、CCD 面上でも撮像時に像は移動し、そのままでは像のブレを生ずる。このような不都合を避けるために移動積分方式が採用された。すなわち、CCD 面に光学像が入力された時生ずる CCD 内の電荷像を光学像の移動に同期して移動させる方式である。この方式によれば、以前の電

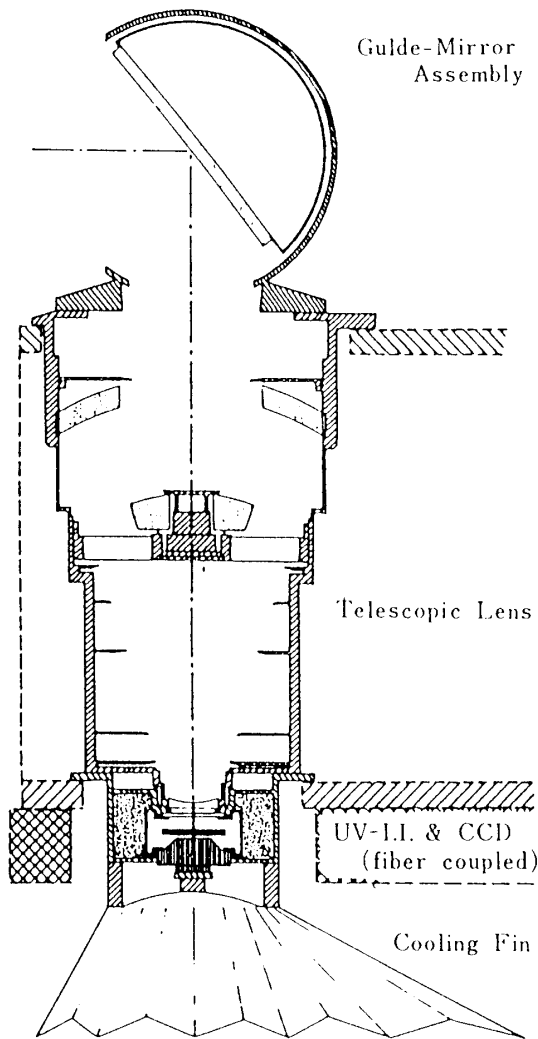


図6 「すいせい」に搭載された紫外撮影装置 (UVI) の断面図

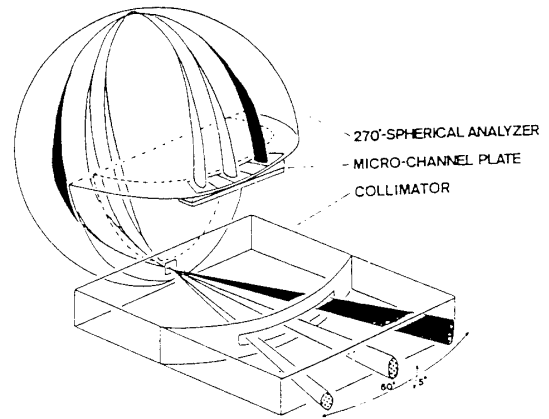


図7 「すいせい」に搭載されたESPセンサーの機能概念図

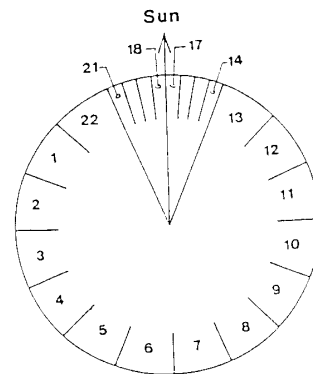


図8 ESPの方位角分布の分割。太陽方向から $\pm 22.5^\circ$ の範囲内では 5.625° ずつ、その他の方向は 22.5° ずつに分割して、全部で22セクターある。

荷像と新たに形成された電荷像とがブレることなく CCD 内部で加算され、積分効果が生ずる事になる。

また CCD 内部で発生する暗電流を減少するために、CCD 素子下部に放熱板を設け CCD を冷却させた。この結果暗電流をフルレンジの 8% 以下に抑えることが出来た。UVI によって得られる像は 153×122 ピクセルから成る 2 次元画像で、その実効視野は $1.96^\circ \times 1.85^\circ$ である。UVI の平面鏡の操作特性とその探査機上の取付位置とから観測可能な空間方向は探査機回転の赤道近くに限られる。「すいせい」のスピン軸は終始殆ど黄道面垂直に保たれていたため、従って観測可能な方向範囲は黄道面より $\pm 15^\circ$ 以内に限定された。また太陽光が直接装置に入光しないように UVI から天体を見るとき太陽離角が 16° 以内になると自動的に平面鏡を回転させて観測器を閉じる工夫がなされている。

UVI の観測運用モードとして、次の 3 種のモードが設定された。

UVIの観測運用モードとして、次の3種のモードが設定された。

I) 搜索モード

ハレー彗星の初期捕捉を容易にするためのモードで、あるポインティング方向を中心として、相隣る 3×3 の天空領域を連続する9スピンの間に観測する。出力データは1画像あたり285ビットに圧縮され、伝送されて効率良くハレー彗星を搜索することが出来る。

II) 撮像モード

最も重要なモードで、画面を構成する 153×122 ピクセルのすべてにわたる輝度情報(8ビットで構成)をそのまま地上に伝送する。このモードでは5分毎の画像取得が可能であり、観測期間中多量のデータが取得された。

III) 測光モード

画面上の輝度分布を統計的に処理し、そのヒストグラム情報を送信してくるモードである。これは撮像モードに比べると必要な送信データが少なくすむ利点がある。ハレー彗星への最接近の時、すなわち「すいせい」が水素雲の真只中を通過した際にはこのモードが使用された。

4.2 太陽風観測装置 (ESP) [10], [11]

本装置は3次元プラズマ分析器であって、図7に示すように扇形コリメータ、 270° 球形静電分析器及びマイクロチャネルプレート(MCP)で構成されている。測定エネルギー範囲は 30eV/q から 15.8keV/q で、対数的に等間隔な96ステップに分割されている。角度分布はスピンを利用して得られるが、その分割は図8に示すように22分割で1スピンの間にそれぞれの角度セクターで4ステップのイオンフラックスを測定している。

エネルギー掃引は64ステップの低エネルギーモード($30\text{eV/q} \sim 1.92\text{keV/q}$)と、高エネルギーモード($248\text{eV/q} \sim 15.8\text{keV/q}$)を交互に行った。各モードの16スピン間(約160秒)のデータを伝送するのに512秒を要するので、それぞれのデータの間には約350秒のデータ取得休止期間がある。

5. 観測の成果

5.1 ハレー彗星最接近以前の観測

5.1.1 UVIによる観測 [8]

「すいせい」の打上げ後8月末よりUVIの動作試験、機能確認試験を行った後、天空上のいくつかのO、B星の撮影、地球Geocoronaの撮影を試み、UVIの操作特性等習熟が計られた。Geocoronaの撮影はその強度が知られていることもあって、UVIの軌道上で較正に貴重なデータを供するものとなった。

ハレー彗星の搜索は10月に入ってから連日試みられたが、初めてその徴候を捉えたのは11月14日であった。この時ハレー彗星は予想される天空位置にかなりの強度でその像が捉えられたが、2~3日後には再び捕捉が困難になり、以後10日間ほど未確認時期が続いた。後に判明したのであるが、米国の地上観測によると11月14日頃にハレー彗星の光量が急増した事実があり、恐らく非常に強いアウトバーストが生じていたものと考えられる。

再びハレー彗星がUVIにより明確に同定されたのは11月26日にであり、その後は順調に

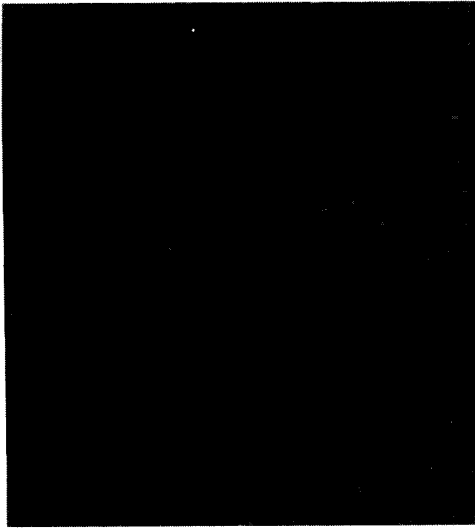


図9(a) 1985年12月11日, 02^hUT 撮影.
写真の縦横スケールはハレーの像平面上で500万 km と472万 km とである. $\gamma=1.330\text{AU}$, $\Delta_s=0.976\text{AU}$.



図9(b) 1985年12月12日, 23^hUT 撮影.
写真の縦横スケールはハレーの像平面上で515万 km と486万 km とである. ハレーの太陽および Suisai からの距離はそれぞれ $\gamma=1.301\text{AU}$, $\Delta_s=1.0006\text{AU}$ である.

観測が続けられた. この観測初期の頃の像にはかなりの明暗変化が認められている. 図9(a), (b)は1985年12月11日および12日 (UT) に撮られたもので, 一見して明らかなことは僅か2日程しか時間が経過していないのに両画面の明るさがかなり異なっていることである. この様な明るさの変化は継続的に観測されており, 11月26日から12月13日までの状況を図10に示してある. この図の斜線でハッチされた部分がUVI 観測のなされた時間帯であり, 三角形のスパイクの付された部分は画像の中心部に明るいスポットを含むデータが取得された事を表し, 恐らくジェットが出現した時点の像と考えられている. この様な中心部の明るい画像の出現をプロットして行くと, ある周期性を示していることが判明した. それを表しているのがこの図の左上より右下に斜めに走る実線であり, ほぼ2.2日の周期である.

この周期性の発見は今回のハレー彗星回帰における最初の核自転周期の決定として Nature 誌に速報された [12]. この時期はハレー彗星と太陽の距離が約1.5AU でまだ遠方であり, ハレー彗星の対恒星自転周期 (固有の自転周期) と, 彗星公転運動のために彗星から見た太陽の方向が推移することによる見掛けの自転周期とがほとんど差がないこと, および突発的なジェットによるガス放出に比べて穏やかな定常的蒸発の寄与が小さかったことが, UVI の観測データから核の自転周期が確定できた理由である.

この様な明暗の周期的変動はハレー彗星の近日点通過 (1986年2月9日) 後になっても相変わらず見られた. 図11(a), (b)はその様子を示したもので, (a)は2月25日13時 (UT), (b)は2月28日11時 (UT) に撮像されたものである. これらの写真の中心付近はかなり光学的に厚くなっていると考えられる.

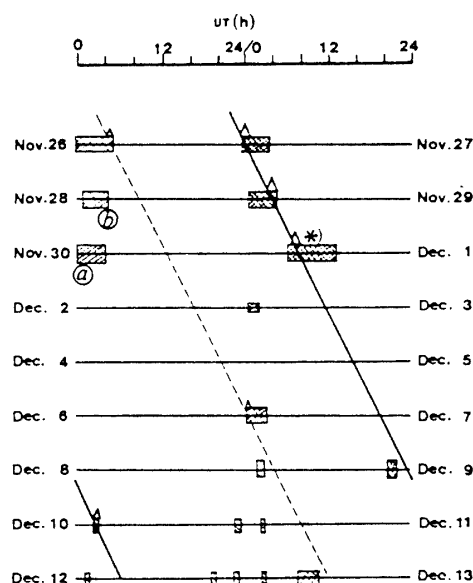


図10 1985年11月30日から12月13日の間の観測状況. このダイアグラムから彗星の自転周期~2.2日が結論された.

5.1.2 ESPによる観測 [10], [13]

UVIと同じく、ESPの動作・機能試験も8月末から開始された。この一連の試験中、9月下旬に行われた高圧印加試験の際に、電子エネルギー分析装置の高圧部に異常が生じたため、全期間にわたり観測は正イオンのみを対象として行われた。

9月27日以後定常観測の状態に入り、太陽風の観測を開始した。図12は10月24日に得られたデータを解析した結果で、電荷当りのエネルギー分布を表している。図を見ると、1~2 keV/qに主ピーク、3~4 keV/qにサブピークがあることが明らかで、これらはそれぞれプロトン (H^+) とアルファ粒子 (He^{++}) に相当している。但し観測器はハレー彗星最接近時における彗星起源のイオンも測定対象としているため、ピークカウントが 10^5 を越える太陽風プロトンのカウントは飽和している傾向がある。この図で、破線はプロトン成分をshifted Maxwellian分布で最適近似したものであるが、カウントのピーク部分が飽和していることがわかる。

この観測結果に明瞭に示されている様に、太陽風イオンの主成分はプロトンで、若干のアルファ粒子が含まれていることはよく知られているが、更に重いイオンも「すいせい」の観測結果には時々見出されている。それは特に太陽風流速が遅いとき、従って温度も低いときによく現れる。図13はそのような例で、プロトンのピークよりも高エネルギー側にいくつかのピークが見られており、太陽風中の各種イオンによって流速は変わらない、という仮定の下に各種イオンの同定を行った結果も示されている。図の下部の影線部はバックグラウンド・レベルである。太陽風の各種イオンの存在比は $R > 5R_s$ (R_s は太陽半径)で不変であるので、この重いイオンの情報は太陽コロナの状態を示唆するものと考えられる。

またこの日の観測データから太陽風の速度、温度、密度などのマクロ・パラメータを算出

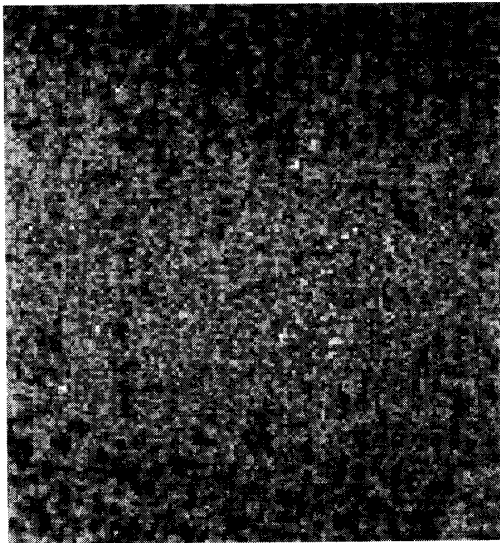


図11(a) 1986年2月25日13^hUT撮影，縦横スケールは235万 km と222万 km. $\gamma=0.684\text{AU}$, $\Delta_s=0.459\text{AU}$.

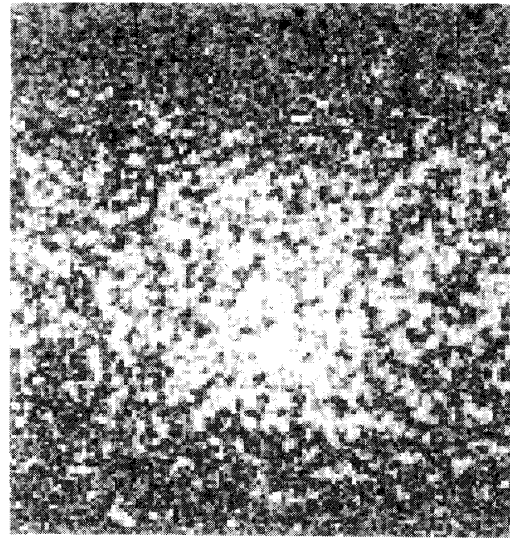


図11(b) 1986年2月28日11^hUT撮影，縦横スケールは，ハレーの像平面上で174万 km と164万 km. $\gamma = 0.717\text{AU}$, $\Delta_s=0.339\text{AU}$.

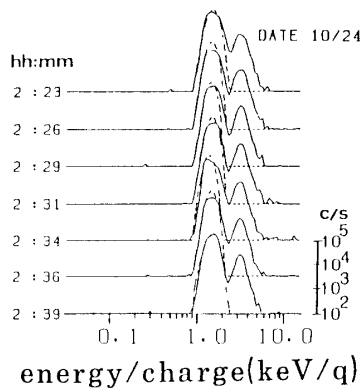


図12 E/q スペクトル例.

実線は観測データ，破線は shifted Maxwellian で近似したものである。

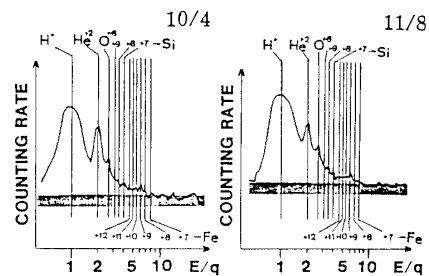


図13 重粒子イオンの同定

した結果が図14であり，速度がゆっくり遅くなっているなどの時間変動が表わされている。このような太陽風のパラメータは観測の全期間にわたって得られており，その解析結果から太陽風の速度変動，流れの相互作用などの物理的性質について多くの研究結果が公表されている [14], [15], [16] ので，詳しくはこれらの論文を参照していただきたい。

5.2 ハレー彗星最接近時の観測

1986年3月8日13時06分 (UT), 「すいせい」はハレー彗星に最接近することになり，このミッションにおける最も重要な時間帯での観測・運用計画について議論が重ねられた。こ

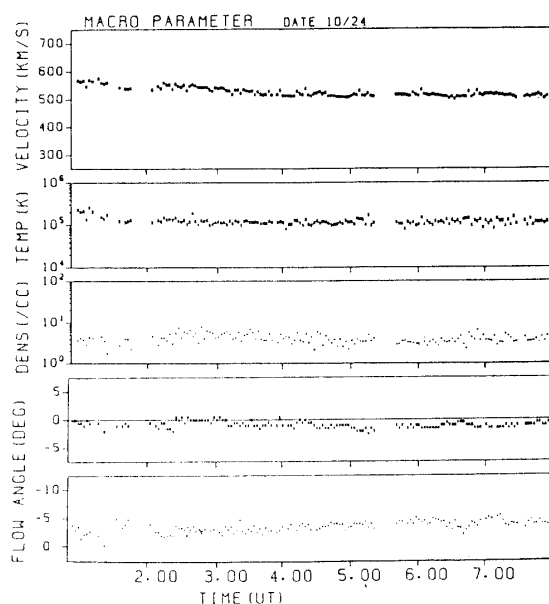


図14 太陽風パラメータの1日分データのサマリー

の探査機では観測時に UVI と ESP ではスピンの条件が異なるので、同時に両方の観測を行うことは出来ない。また UDSC で受信可能な時間帯は 3 月 8 日 4 時 16 分 (UT) までと同日 20 時 (UT) 以降であった。この様な諸条件を考慮して最終的に決定された観測計画を図 15 に示してある。観測は最接近前半を UVI に、後半を ESP に割当て、UDSC で非可視の時間帯でのデータ取得はデータレコーダへの記録と、米国航空宇宙局のマドリッド及びゴールドストーン局での受信の援助によることになった。

5.2.1 UVI の観測 [8], [17], [18]

この時期には「すいせい」はむろんハレー彗星の水素雲の中に突入しており、撮像モードでの画像取得は余り意味を持たないため、測光モードによる観測が最接近直前の十数時間にわたって行われた。この観測の視野方向はハレー彗星方向に対して殆ど逆向きに設定され、水素雲中のライマンアルファ光強度の径方向分布の測定を目指した。この方向は彗星ダストによる衝撃を回避し、同時に明るい紫外線星のある星野を避ける方向でもあった。

この様にして行われた測光モード観測は成功裡に終り、その結果は図 16 に示す通りである。この図には理論計算に基づく値も併せて記入してある。むろん厚い彗星水素雲中での測光データ取得は世界で初めてであり、貴重な成果といえよう。

5.2.2 ESP の観測 [11], [19], [20], [21]

ESP の観測が開始された時刻には、「すいせい」はすでにハレー彗星前面の衝撃波面を通過し、乱流状態のプラズマ中にあった。この時のデータのクイックルック画面はそれまで太陽風中での観測の画面とは似ても似つかぬものであり、観測担当者を戸惑わせた程であった。しかしデータの解析が進むにつれ、その様相が次第に明らかになって行った。

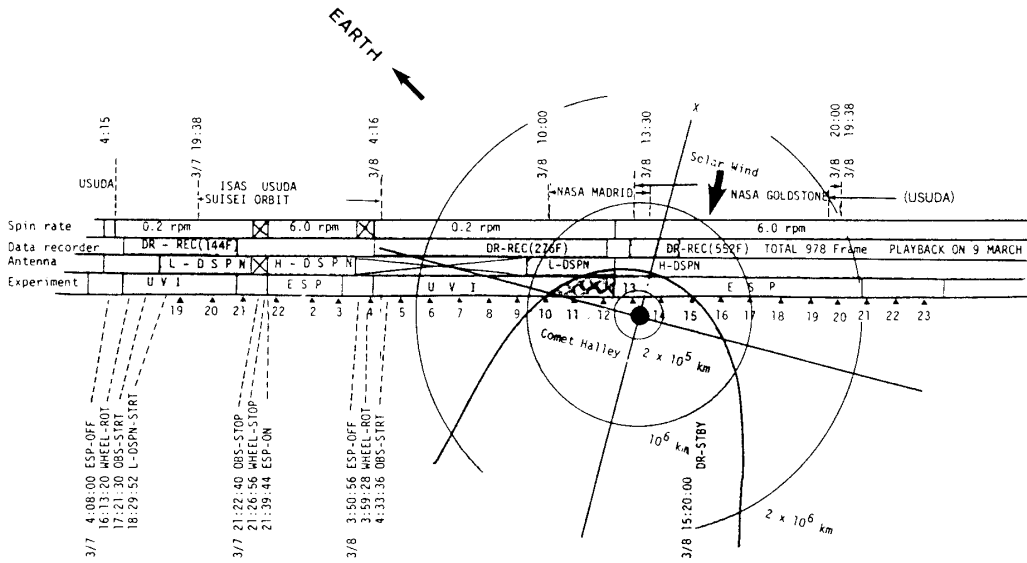


図15 ハレー彗星最近時の「すいせい」観測計画図

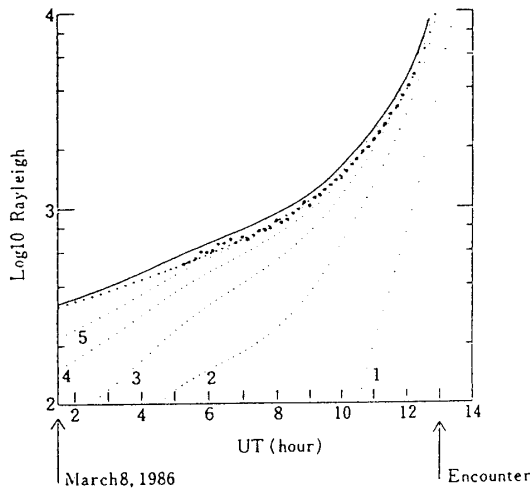


図16 「すいせい」のハレー会合直前数時間にわたってとられた $Ly\alpha$ の強度データ。横軸は3月8日のUTでの時刻。縦スケールのレーリー値は、理論計算に対するものであり、実測データは最終データ取得時（最接近に一番近い時刻）における値を上記計算値に正規化してプロットしてある。この時点のハレー太陽間距離は0.823AUである。

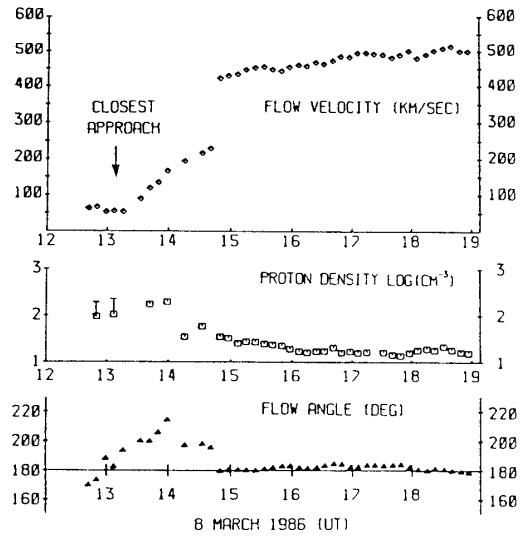


図17 プラズマのマクロ・パラメータの時間変化

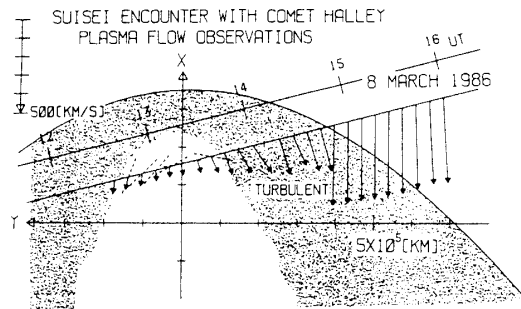


図18 ハレー会合時に「すいせい」によって観測されたプラズマ流速ベクトル。破線はピックアップ・シェルの対称軸から推定された磁力線方向を示す

まず注目されるのはこの観測データから得られたプラズマ流の流速、プラズマ密度などマクロ・パラメータの変化である。図17はこれらパラメータの時間変化を表わす図で、流速は最接近の頃最も低く、その後次第に増大し14時43分以後急激に増大している。太陽風プロトンと彗星起源のプロトンの両方を含むプロトン密度の変動はこれとは逆の傾向を示しており、流れの方向も14時43分以前と以後では大きく変わっている。

このような実測データを基に、ハレー彗星近傍のプラズマ流の特徴をまとめたのが図18である。座標系の中心は彗星核で、X軸は黄道面内の太陽方向、Z軸は北方向である。ESPの観測開始は12時32分で、14時43分までは「すいせい」はコメットシースの中であった。図18の矢印はプラズマ流速のベクトルであり、障害物のまわりで流れが減速され曲げられている状況を如実に示している。流速は最接近時前後には $56 \pm 10 \text{ km/s}$ にまで減速され、上流の太陽風速度の約 $1/8$ となっている。14時43分と14時49分の間にはプラズマ・パラメータが大きく変化していることから、「すいせい」がこの時に衝撃波面を通過したことは明らかで、その時点での彗星核からの距離は約45万 kmであった。図18には衝撃波面の形を放物線で近似して、その先端が核から35万 kmとして描いてある。衝撃波面の通過を境として流速は 240 km/s から 440 km/s に増加し、その方向も本来の太陽風の方向に近くなったが、その後もプラズマ・パラメータはゆっくりと変化し続けた。この変化は太陽風の中に彗星起源のイオンが採り込まれる現象、すなわちピックアップ現象によるものと考えられる。

彗星イオンのピックアップ現象は、測定されたイオンの2次元の速度分布関数を図に表現してみるとよく理解され、またその図からイオン種の弁別が可能である。その詳細は文献[11]、[12]に譲るが、ピックアップされたイオンの主成分は当初の予想通りプロトンと水分子イオンであった。

また適当な仮定の下にプロトンや水分子族のイオン密度を算定することも可能である。図19、図20はこの様にして得られたハレー彗星核周辺のプロトン [19]、[20] と水分子族イオンの密度の空間分布を表わしている。

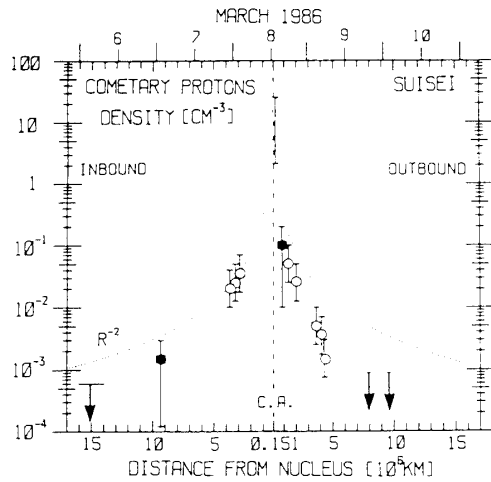


図19 ハレー彗星起源のプロトンの密度の空間分布

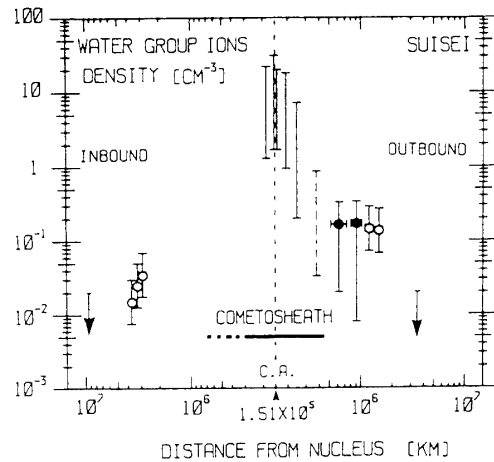


図20 水分氏族イオン密度の空間分布。
白丸は太陽風プロトンの温度異方性から磁力線方向が決められた場合、黒丸はできなかった場合に対応する。

6. 最接近以後の観測、運用

6.1 観測

UVIによる撮像は最接近後も続行された。しかし「すいせい」とハレー彗星との位置関係のため、また彗星が既に近日点を通過してから1ヶ月以上を経ていることもあり、ハレー彗星の像は急速にその明るさを減じていった。4月に入ると像は更に幽かなものとなり、4月中旬には再びハレー彗星の太陽離角が減少したために撮像は困難になり、4月14日をもってUVIによるハレー彗星の観測は終了した。

ESPによる太陽風イオンの観測はその後も続行され、現在まで約3年半にわたる膨大な観測データが蓄積され、解析が進みつつある。

6.2 「さきがけ」, 「すいせい」のフォロー・オン ミッション

1986年3月ハレー彗星への接近により所期の目的を達した「さきがけ」, 「すいせい」の両探査は、その後も太陽周回軌道上で惑星間空間における太陽風、プラズマ波動、磁場等のデータを取得しつつあるが、両探査機が1992年地球に接近する機会に地球の重力場を利用したスウィングバイにより軌道を変更し、新たなミッションを遂行する計画が立てられた。その中には金星又は火星に接近させる案も含まれていたが [22], 両探査機の科学観測目的や熱設計上の制約からこれらの案は棄却され、以下に述べる計画を採用することとした。

6.2.1 「さきがけ」のフォロー・オン ミッション

「さきがけ」は図21に示したように1992年1月に地球に接近するが、予め若干の速度修正を行っておけば、地球との最接近距離を約8万kmとして地球をスウィングバイ、その後の軌道を地球の太陽周回軌道に近いものとする事ができる。この結果「さきがけ」は、図22

SAKIGAKE EARTH-RETURN TRAJECTORY, 1985 TO 1992

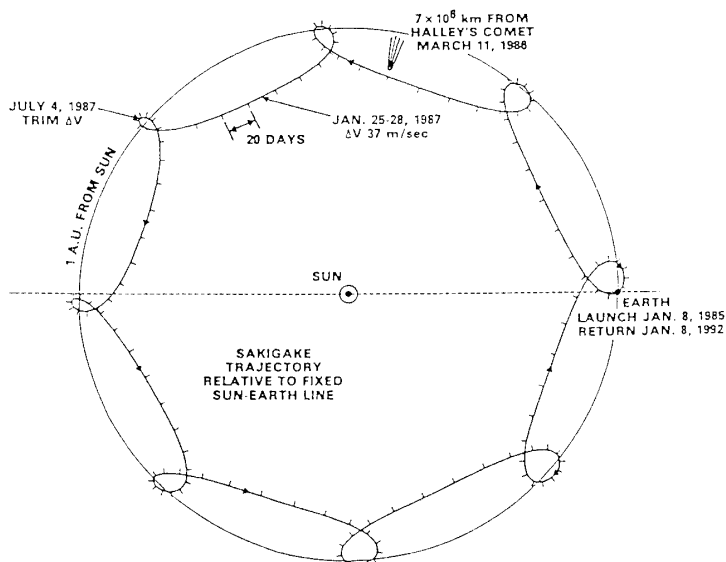


図21 「さきがけ」の地球帰還軌道 (1985~1992)

SAKIGAKE MULTIPLE EARTH SWINGBY TRAJECTORY

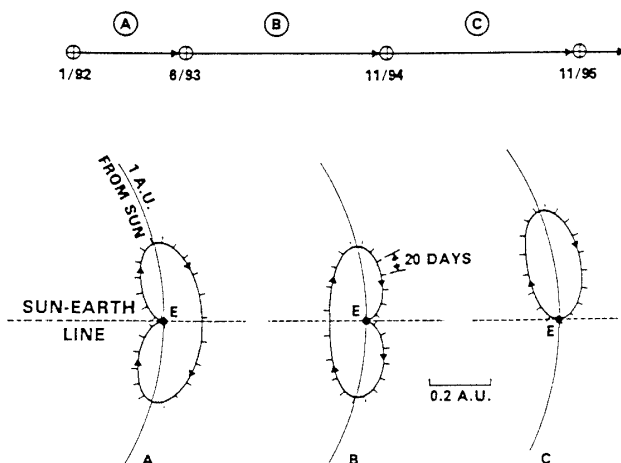
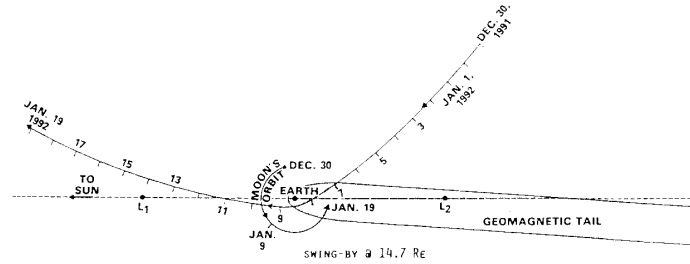


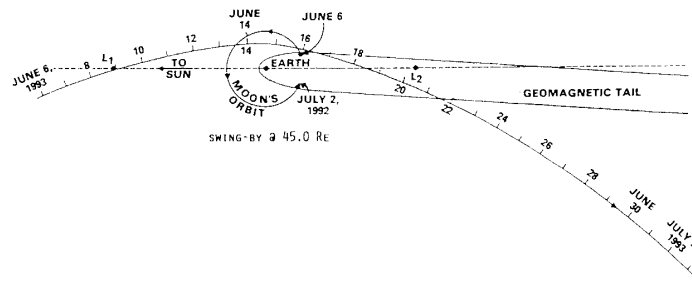
図22 「さきがけ」の地球並走軌道 (1992~1995)

に示したように地球と抜きつ抜かれつといった位置関係を保ち、特に数回にわたって地球磁気圏尾部を通過する機会がある (図23). これは「さきがけ」の搭載機器が、太陽風、プラズマ波動、磁場の観測を目的をしていること及び尾部通過時期がGEOTAILを初めとする国際太陽地球物理 (ISTP) 計画の期間中であることを考慮すると、「さきがけ」にとっても絶好のミッションである. 1987年1月25日から28日にかけて約37m/sの速度修正が行われ、今後僅かな修正が必要と考えられるものの、現在「さきがけ」はほぼ予定した軌道を飛行中

**FIRST SAKIGAKE EARTH-SWINGBY MANEUVER
JANUARY 8, 1992**



**SECOND SAKIGAKE EARTH-SWINGBY
MANEUVER JUNE 14, 1993**



**THIRD SAKIGAKE EARTH-SWINGBY MANEUVER
OCTOBER 28, 1994**

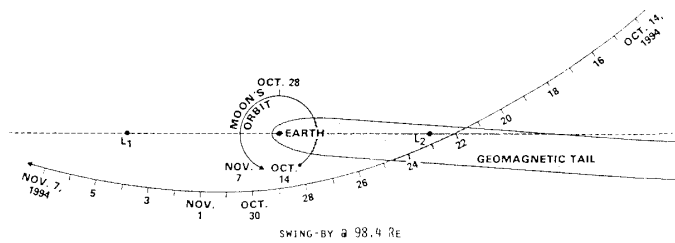


図23 「さきがけ」の地球磁気圏尾部通過

である。

なお地球近傍に留まるミッションが全て順調に行けば、第3回目の地球スイングバイの後、図24に示したように、1996年2月に Honda-Mrkos-Pajdusakova 彗星及びその後更に地球スイングバイを経て1998年11月に Giacobini-Zinner 彗星に接近させられる可能性がある。但し打ち上げ後約4年半（設計寿命の約3倍）を経て、「さきがけ」は送信パワーに劣化が生じており、地球から数千万 km 以上離れた状態ではテレメトリ信号の受信が出来ないことから、邂逅点が地球と近い HMP 彗星はともかく、GZ 彗星との邂逅時にデータの得られる可能性は少ない。

6.2.2 「すいせい」のフォロー・オン ミッション

「すいせい」は1989年3月地球と太陽の間を通過して、再度地球から遠ざかりつつあるが、1992年8月にはまた地球近傍に戻って来る。この際にやはり地球スイングバイを行えば、

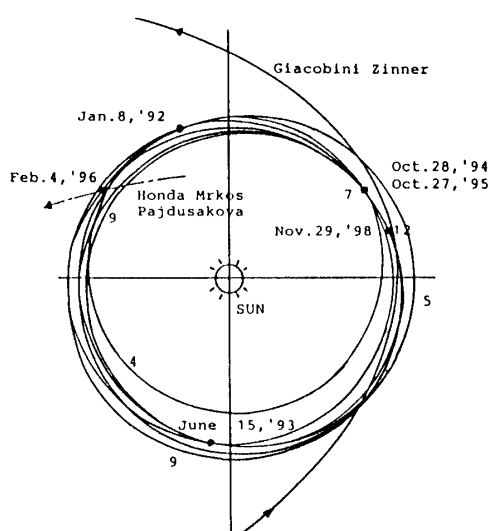
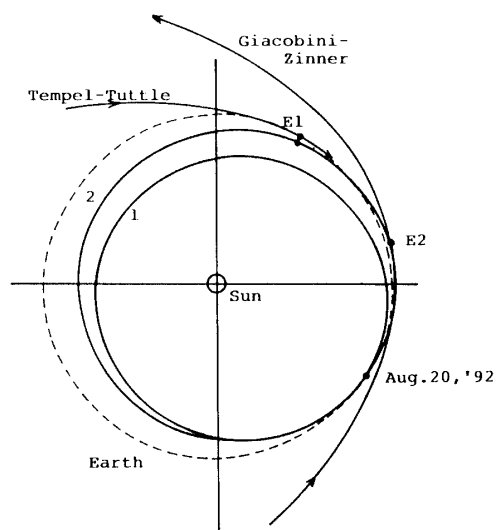


図24 「さきがけ」の彗星邂逅軌道



1: Suisei orbit before Earth swing-by
 2: Suisei orbit after Earth swing-by
 E1: Encounter with Tempel-Tuttle on Feb. 28, '98
 E2: Encounter with Giacobini-Zinner on Nov. 24, '98

図25 「すいせい」の彗星邂逅軌道

1998年2月に Tempel-Tuttle 彗星に数百万 km, 次いで同年11月に Giacobini-Zinner 彗星に(計算上は) 0 km まで接近できる軌道のあることが判明した(図25)。

この軌道を可能にするためには早い時期に若干大きな速度修正が必要であったが、幸い「すいせい」は打ち上げ直後に速度修正を行わなかったため、搭載燃料に余裕があり、1987年4月5日から10日にかけて合計約65m/sの速度修正が成された。その結果1992年8月の目標地球最接近距離の6万 km に対し、若干の誤差が生じる見込みながら、この誤差は今後修正可能と考えられている。

7. 結 言

「さきがけ」, 「すいせい」によるハレー彗星探査は、宇宙科学研究所、関係大学研究者、各会社の技術陣など多くの方々のご協力と総力を結集しての大事業であった。幸いにしてこの探査は予期以上の成果を収め、IACG を通じての国際協力も見事に成功し、宇宙科学分野の今後の国際協力のための典型としての役割も果たした。科学的成果は多くの学術誌や国際学会にも公表され、高い評価を得ている。

また本稿の最後に述べられているように、ハレー彗星探査終了後もフォローオン・ミッションが計画されている。両探査機共に既に設計寿命を大幅に越える期間を経ており、今後何時機能を停止するかは予測し難いが、少なくとも軌道に関しては前述のフォローオン・ミッション遂行に必要な修正を既に行なっている。再度彗星ミッションが達成できれば申し分ないが、少なくとも両探査機の1992年の地球スウィングバイ、特にそれに続く「さきがけ」の磁気圏尾部探査は成功させたいものである。

8. 謝 辞

本稿を終えるに当り、ハレー彗星探査の遂行に盡力された多くの方々に深い謝意を表すると共に、宇宙研報告特集号「ハレー彗星探査研究報告」に掲載された論文からこれらの方々
の文章や図を随所に引用させていただいたことを記しあらためて感謝の意を表するものである。

参考文献

- [1] 平尾邦雄 試験探査機「さきがけ」 宇宙研報告, 本特集号
- [2] 平尾邦雄, 伊藤富造, ハレー彗星探査の概要, 宇宙研報告特集19号, 3-15, (1987)
- [3] 上杉邦憲, 平尾邦雄, 原 宏徳, 山本東光, 升本喜就, 折井 武, 上村正幸, 「さきがけ」, 「すいせい」のシステム設計とミッション運用, 宇宙研報告, 特集19号, 17-31, (1987)
- [4] 井上浩三郎, 市川 満, 橋本正之, 野村民也, 林 友直, 広沢春任, 高野 忠, 通信系概要と運用結果, 宇宙研報告, 特集19号, 33-46, (1987)
- [5] 後川昭雄, 高橋慶治, 河端征彦, 村田 清, 松井捷明, 岡崎 健, 荒井英俊, 「すいせい」の電源サブシステム, 宇宙研報告, 特集19号, 47-56, (1987)
- [6] 大西 晃, 林 友直, 小林康徳, 飯田 亨, 松藤幸男, 加藤誠一, 町田恒雄, 「さきがけ」, 「すいせい」の熱設計, 宇宙研報告, 特集19号, 57-64, (1987)
- [7] 上杉邦憲, 「すいせい」ハレー最接近時のダスト衝突, 宇宙研報告, 特集14号, 66-72, (1987)
- [8] 金田栄祐, 平尾邦雄, 足原 修, 清水幹夫, 伊藤富造, 小田 稔, 「すいせい」によるハレー彗星紫外 (Ly α) 観測, 宇宙研報告, 特集19号, 111-124, (1987)
- [9] 金田栄祐, 真空紫外撮像装置 (UVI), M-3S II-2/PLANET-A 飛翔実験計画書, 245-256, (1985)
- [10] 向井利典, 三宅 亘, 寺沢敏夫, 平尾邦雄, 「すいせい」(PLANET-A) による太陽風イオン観測, 宇宙研報告, 特集14号, 59-74, (1986)
- [11] 向井利典, 三宅 亘, 寺沢敏夫, 北山正信, 平尾邦雄, 「すいせい」で観測されたハレー彗星と太陽風の相互作用, 宇宙研報告, 特集19号, 125-138, (1987)
- [12] Kaneda, E., K. Hirao, M. Takagi, O. Ashihara, T. Itoh and M. Shimizu, Strong breathing of the hydrogen coma of comet Halley, *Nature*, **322**, 140-141, (1986)
- [13] Mukai, T., W. Miyake, T. Terasawa and K. Hirao, Observations of Solar Wind Ions by the Interplanetary Spacecraft Suisei (PLANET-A), *J. Geomag. Geoelectr.*, **39**, 377-395, (1987)
- [14] Miyake W. and T. Mukai, Proton temperature properties in the solar wind, *Planet. Space Sci.* **35**, 185-189, (1987)
- [15] Miyake, W., T. Mukai, T. Terasawa, and K. Hirao, Stream interaction as a heat source in the solar wind, *Solar Phys.*, **117**, 171-178, (1988)
- [16] Miyake, W., K. Kobayashi, K. Oyama, T. Mukai, T. Abe, T. Terasawa, K. Yumoto, T. Saito, K. Hirao, A.J. Lazarus and A.D. Johnstone, Multi-Spacecraft Observations of Heliographic Structure of the Solar Wind Speed, *Planet. Space Sci.*, **36**, 1329-1342, (1988)
- [17] Kaneda, E., O. Ashihara, M. Shimizu, M. Takagi and K. Hirao, Observation of comet Halley by the ultraviolet imager of Suisei, *Nature*, **321**, 297-299, (1986)
- [18] Kaneda, E., K. Hirao, M. Shimizu and O. Ashihara, Activity of comet Halley observed in the ultraviolet, *Geophys. Res. Lett.*, **13**, 833-836, 1986

- [19] 寺沢敏夫, 向井利典, 三宅 亘, 北山正信, 平尾邦雄, 太陽風内のハレー彗星起源イオンの空間分布, 「すいせい」による観測, 宇宙研報告, 特集19号, 139-145, (1987)
- [20] Mukai, T., W. Miyake, T. Terasawa, M. Kitayama and K. Hirao, Spatial distribution of water-group ions near comet P/Halley observed by Suisei, *Astron. Astrophys.*, **187**, 129-131, 1987
- [21] Takahashi, S., T. Terasawa, T. Mukai, W. Miyake, and K. Hirao, Plasma flow in the cometsheath of P/Halley during the encounter of Suisei, *Astron. Astrophys.*, **187**, 94-96, 1987
- [22] K. Uesugi, R.W. Farquhar, H. Yokota and J. Kawaguchi, Follow-on Missions of Sakigake and Suisei, *Acta Astronautica* **18**, 241-246, (1988)