

1998年しし座流星群・ 国際航空機観測ミッション顛末記

矢野 創¹, 藤井康正²

1. 獅子座狂騒曲

昨年2月に約33年ぶりに回帰したテンペル=タットル彗星を母天体とする「しし座流星群(略して「しし群」)」は、降交点の外側を地球が通過する日本時間11月18日午前4時40分前後に、流星を大出現させると予想された。その時、放射点は日本の上空高くに昇る。そこで当日の日本では、「雨のように流星が降る」という過剰な報道が出回った。暗い夜空を求めた車で時ならぬ渋滞になったり、少しでも高い所から空を眺めようとした人が煙突から落下するなど、様々な椿事が起き、一種の社会現象に発展した。(その前後の日本と世界各地の様子については別稿を参照[1].)

その頃筆者らは、東シナ海上空約13kmからしし群の姿を追っていた(図1)。米国航空宇宙局(NASA)



図1 FISTA機に搭乗した日本人クルー。

1 米国航空宇宙局ジョンソン宇宙センター・地球科学/太陽系探査部門

2 神戸大学大学院自然科学研究科

の宇宙生物学研究所(Astrobiology Institute)が「100万ドル未満の彗星探査ミッション」として組織した、「しし座流星群国際航空機観測ミッション(Leonid Multi-instrument Aircraft Campaign [Leonid MAC])」[2]のクルーとしてである。他にも世界7カ国の科学者が様々な観測機器を持ち寄って二機の航空機に分乗した。観測データは現在鋭意解析中であり、初期結果は今年4月にNASAエイムズ研究センター(NASA/ARC)で開かれるワークショップにて発表される。

従って、小稿の目的は科学成果の公表ではなく、主に以下の2つである。まず国立天文台の渡部潤一氏に、「一生のうちに何度かしか起きない天文現象を観測した者は、当事者にしか分からない裏話を『歴史的記録』として残すべきだ。」と諭されたことである。今年及び2031年以降の観測者の一助になれば幸いである。もう一点は、今後の惑星探査では国際協力が益々重要になる。Leonid MACを一つのミッションとして見たとき、それがどのように企画され、どんな障害を克服して実現したかを記録することは、当学会に利する所もあるだろう。以下の章では時系列に、筆者らの参加までの経緯、ミッション成立の過程、観測の準備と本番、宇宙空間での様子、そして今年のしし群観測への提言を記す。

2. 1993年ペルセウス座流星雨 とオリンポス衛星の喪失

事の始まりは極めて個人的な理由である。1993年8

月12日の夜、矢野は当時参加していた国際宇宙大学 (ISU) [3] で有志を募り、米国アラバマ州の草原でベルセウス座流星群 (略して「ベルセ群」) 計数観測をしていた。折りしもこの夜は、母彗星・スィフト＝タットル彗星が130年ぶりに回帰してから最初の極大期であった。ベルセ群は数年前から顕著なアウトバーストを見せており、NASAは極大期直前に予定されていたスペースシャトルの打ち上げを延期したり、ハッブル宇宙望遠鏡 (HST) の衝突断面積を流星群に対して最小限にするなどの危険回避を行っていた[4]。

翌朝ISUのキャンパスに戻ると、ドイツにあるヨーロッパ宇宙機関・ヨーロッパ衛星運用センター (ESA/ESOC) から派遣されていたNic Maadle氏が、急遽職場に呼び戻されていた。彼女は、ESAの大型通信技術試験衛星「オリンポス」の姿勢制御を担当していた。昨晚その衛星が突然の制御不能に陥り、自動補正の燃料噴射をいくら続けても姿勢が回復されないという。しかし彼女がESOCへ着いた時には衛星はすでに、運用期間を全うするのに必要な燃料を使い切っていた。事故調査委員会の最終報告では、衛星から得られたデータのみでは原因を一つに絞れないとしつつも、外部電流の流入による制御系回路の故障が最も説明しやすく、その成因としては微粒子の超高速衝突による局所的なプラズマ雲の発生が示唆された[5]。

この事件は、当時固体微粒子による宇宙機上の超高速衝突痕を分析していた矢野に少なからぬ衝撃を与えた。もしMaadle氏があの晩ESOCの管制室に待機していたら、そして微粒子衝突による故障モードを予め把握していたら、オリンポス衛星は救えたのだろうか？ また衝突電離によるプラズマの発生は速度の ~ 3.5 乗で効くことが実験的に知られている[6]。流星群の中で最も速い衝突速度 (秒速72km) を持ち、ベルセ群より数桁多い出現が予測される5年後のしし群は、もっと多くの人工衛星に被害を及ぼさないだろうか？ そんな中、オリンポス事故から15か月後に、しし群の最初

のアウトバーストが確認された[7]。

3. ミッションの誕生と母彗星の回帰

3.1 1997年8月: Leonid MACの提唱

宇宙微粒子環境を論じる場合に科学者が最も気をつけるべき点は、「狼少年」にならないこと、こうした危険性を社会が誇張してセンセーションを起こしたり、逆に取りに足らない問題として過小評価しないよう、予測の限界を認めた上で出来る限り正確な情報を提供することである。しかしデブリやメテオロイド、特に流星群の危険性を定量評価するのに十分なデータを、まだ人類は持っていない。

そんな折の1997年8月に、国際天文学連合 (IAU) の総会が京都で開かれた。そこで開催されたしし群に備える合同ディスカッションの席上で、NASA/ARCのP. Jenniskens氏がLeonid MAC計画を提唱した。要旨は、しし座流星雨出現の可能性がある今後2年間、98年の極大期に放射点が高く昇る東アジアと99年の地中海の両地域で天候に左右されずに、多角的な同時観測を行なうため、二機の航空機が地上のレーダー観測網に沿って飛行するというものである。

Jenniskens氏が渡部潤一氏に「日本の宇宙塵研究者」の紹介を依頼したことから、矢野にこの話が回ってきた。二人はNASAへ提出されたばかりのプロポーザルをめぐり、意見を交換した。ライダー、大気光観測、近・中間赤外、可視、紫外線ら複数波長域での分光、光度分布計測、二点立体観測など、重要な項目はほぼ網羅されていた。もの静かだが、流星科学にとって千載一遇の機会を逃したくないと熱心に説くJenniskens氏は、どこか16世紀に日本へ渡ったオランダの伝道師のようでもあった。氏は98年の観測地であるアジアからの参加を強く希望していたが、日本の流星観測は長年アマチュアがリードしており、プロの研究者は少ない。会談直後に日本流星研究会 (NMS) へ打診したが、残念ながら適当な提案は頂けなかった。

3.2 1997年10月：日本チームの参加決定

折りしも矢野は10月にNASA/ARCに出張し、その後ハワイ島マウナケア山頂のすばる天文台の敷地内で神戸大学チームの黄道光・対日照の可視観測を手伝うことになっていた。そこで現地で再会したJenniskens氏との話し合いに、ハワイでの観測を指揮する同大学の中村良介、石黒正晃両氏にも加わって頂いた。その結果、日本が貢献できる科学テーマとして、通常の可視カメラでは検出できない最微光流星の二点ビデオ観測と、黄道光観測を応用したダストトレイル雲の検出が提案された。

前者のアイデアは、日本放送協会(NHK)技術研究所が開発した、超高感度デジタルビデオカメラ(High Definition Television [HD-TV], いわゆる「ハイビジョン」)に撮像増倍管(Image Intensifier [II])を装着した観測装置が、同年夏にマウナケア山頂からズームレンズのみで+10等級の恒星の撮影に、1/30秒毎の実時間で成功していたからである。これほど暗い流星は、(密度や形状の仮定に依るが)過去には人工衛星上の衝突痕を検査する以外に知る術がなかった百～数百マイクロオーダーのメテオロイドに相当する。しかし各人工衛星は、極大期の持続時間がわずか2時間程のしし群について統計的データを出す「標的」としては小さすぎる。そこで逆説的であるが、しし群の人工衛星への衝突危険性を評価するには、莫大な曝露面積を持つ大空の方が適していることになる。レーダー観測でも微光流星は検出されるが、プラズマの尾から適切な反射角を持つ電波しか受信できないので、可視流星の出現数とは簡単に比較できない。だからこそLeonid MACでは電波流星と可視流星の同時観測によって、レーダーの散乱断面積と光学的明るさの相互校正を行うことを重要課題としたのである。これらの問題をクリアして93年のベルセ群以来の懸念を払うには、最微光流星の可視観測ができるHD-TV-IIにこそ可能性がある、と我々は考えた。さらにHD-TV-IIは、(1) NTSCビデオよりも画素数が7倍以上多いので空間

分解能が高く、速度や位置の決定がより正確になる、(2) 直接デジタル画像が得られるので、情報を劣化させることなくコンピュータで自動解析が出来るなど、流星観測に適した長所を備えている。

もう一方の母彗星に伴われたダストトレイル雲の観測では、数十～数百マイクロン程度のメテオロイドによる太陽散乱光の、背景黄道光に対する微かな増光を検出する。赤外線波長域では、すでにIRASなどの観測衛星により短周期彗星に伴う巨大なダストトレイル構造が発見されている[8]。ダストトレイルが地球軌道と交差すると流星群を引き起こす。そこで神戸大学チームの黄道光観測の実績を生かし、このダストトレイルの断面の空間分布を捉えることを目指した(図2)。ここで重要なのは、両者がほぼ同じサイズの塵を見ることである。前者は地球が掃くローカルな空間を、後者はトレイル内のグローバルな構造を観測する相補関係にある。両者の結果を関連させることで、より正確な

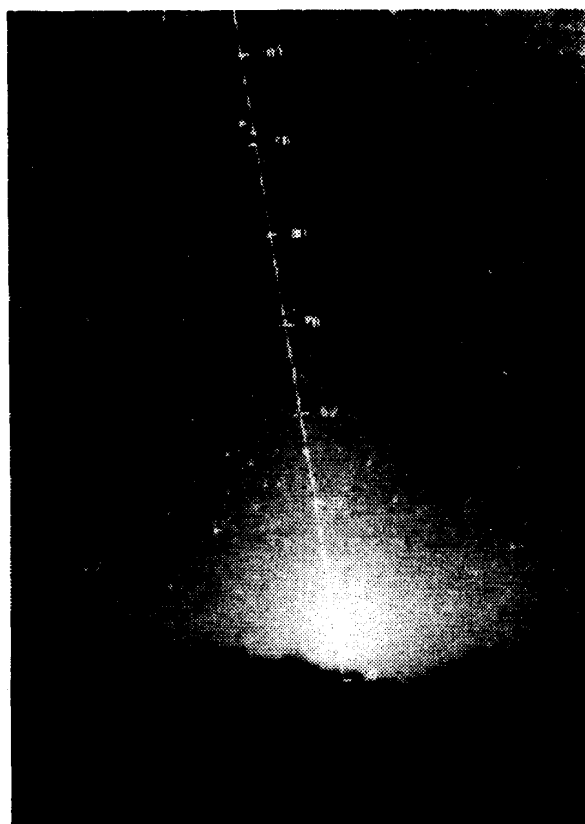


図3 97年秋にハワイ島マウナケア山より可視CCDカメラで撮影された黄道光としし座。

流星群の出現予測が可能になる。

NASA/ARCを後にした一行はマウナケア山で、藤井ら神戸大学観測チームの残りのメンバーと合流し、黄道光観測を行なった。観測したのはちょうどしし座付近である(図3)。一年後、この経験をいかして航空機観測をバックアップするための地上観測を行なうこととなる。観測の結果、小惑星族を起源とする黄道光内のバンド構造を、地上観測では初めて検出することに成功した[9]。この成果はしし群ダストトレイル雲の検出に対する期待を、大きく膨らますこととなった。

3.3 テンペル＝タットル彗星の暗示

帰国後我々は早速、NHKにてHD-TV-IIを開発した技術者を紹介して頂き、機器のスペックを確認した。マウナケアにて撮影された天の川は、明るい星の領域の密度差やその前に広がる暗黒ガスなどの構造が明瞭に確認できた。流星や星の瞬きがなければ、露光時間を稼いだ天体写真と区別がつかないほどのビデオ映像であった。NHK側も大変好意的に受け止めて頂いた。画像の著作権はNHKに帰属させ、航空機にはNHKのエンジニア、カメラマン、報道クルーの座席を確保し、撮影した素材から制作する科学・報道番組にも筆者達が協力するなら、機材を提供してもよいと

いう承諾を頂けた。

98年の年明け早々には、近日点通過が間近に迫ったテンペル＝タットル彗星へ、次々と国内の望遠鏡が向けられた[10]。我々のグループは国立天文台岡山天体物理観測所の188cm望遠鏡を使って、彗星核近くのナトリウム(Na)分光観測を試みた。前年に出現したハール・ボップ彗星では、彗星核から「Na原子の尾」が伸びていることが発見された。その発生源の候補としては、太陽光の放射圧によって飛ばされながらNaを揮発させている極微小粒子が指摘されている。もしそうだとするとNa放出量の見積もりは、HD-TV-IIとダストトレイル雲観測にも重要な示唆を与えるはずである。ところが結果は、「若い流星群には暗い流星が多い」とする通説や過去のしし群の活発な活動とは裏腹に、Na原子が全く受らない程ガス／ダスト比が高く、極微小粒子が少ないことを示唆していた[11]。

4. ミッション成立までの道のり

4.1 1998年4月：チーム集合、問題発生

4月になって日本は新年度を迎えたが、米国の会計年度は10月1日開始である。彼等にとってLeonid MACは「翌年度」の計画であり、月末にロサンゼルス(L.A.)にて世界各地からの参加研究者が初めて集結する「ハンズオン会議」から、本格的な予算折衝が行なわれる予定であった。しかし、この席上で最初の危機が報告された。それまでチャーターを予定していたNASA/ARC所属のDC-8機が、春からドライデン飛行センターが移管されたため、11月中旬の飛行は約束出来ないと通達してきたのである。

二機が一機に減れば、二点観測ができなくなるだけでなく、座席数も半減し、当初の観測項目を幾つか削らなくてはならない。各機器の科学目標や性能、必要最小限の搭乗人数を皆で細かく検討していった。その結果、あらゆるチャンネルから二機目の調達を行なうが、現時点では一機でも重要な観測ができる機器に

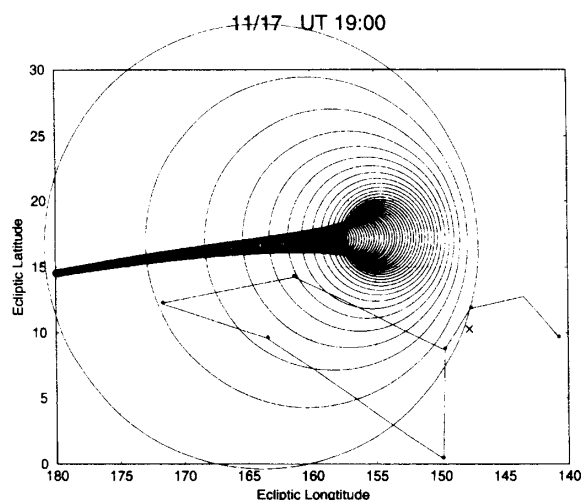


図2 1998年11月17日UT19時のしし群のダストトレイルを地球から観た予想図。

優先して座席を与えるというコンセンサスを得た。HD-TV-IIは一機につき科学者2名とNHK技術者3名、さらに同行の報道クルー3~4名という大所帯を申請していた。番組を作れなければHD-TV-IIも搭載できなくなり、報道と観測は一蓮托生の関係にあると説明し、科学者枠の減少のみで認めて頂いた。但し新たな条件として、当初NASAの報道陣が行なう予定だった航空機からの生中継など、「アウトリーチ」の部分もNHKが担当する方向で、NASA/ARCと交渉することになった。アウトリーチとは、NASAの科学研究予算の一部は必ず納税者に還元するという原則に従い、特に教育目的を中心に研究成果の一般公開を行なうことである。

翌日には、古代の巨大湖の底面が干上がった広大な平地に作られたカリフォルニア州モハベ砂漠にあるエドワーズ空軍基地で、もう一機のFISTA観測機の視察と窓枠の割り当てが行なわれた。

4.2 1998年夏：国内での準備

ダストトレイル雲の航空機観測における懸念の一つは、飛行機の揺れと露光時間の兼ね合いであった。微弱な太陽散乱光の増光を捉えるには十分な露光時間が必要である。マウナケアでの黄道光観測では、大気光の影響を避けるために、短波長の光だけを透過するフィルターを使ったが[9]、CCDの量子効率が数%しかなく、積分時間には10分を要した。問題は、ジェット機の微小な固有振動と、機体のピッチやロールの振幅と周期が、観測フレームと露光時間にそれぞれどう影響するかである。そこで我々は5月下旬に、大阪-羽田間の夜間旅客機の窓に一眼レフカメラを固定し、露光時間を変えながら撮像を行った。安定飛行中ならば3分間の露光までならぶれずに観測可能、という結論を得た。

一方、二台のHD-TV-IIの準備については、97年にマウナケアで使用された赤に感度特性がある既存のカメラに加えて、高速の流星で強く出る393nmと

397nmのCaII輝線など、青に感度特性をシフトした「流星仕様カメラ」が新たに製作された。完成したばかりの新型カメラの性能試験は、中村、渡部両氏を中心としたチームが、新月期の8月下旬に東京大学木曽天文観測所で行なった。続く10月のジャコビニ流星群でも同様の観測を行なった。これらの画像データをNHKエンタープライズ21社のハイビジョン専用スタジオで再生し、11月本番直後の初期解析の予行演習が行なわれた。

4.3 1998年9月：米議会の予算承認

その頃、米国では新しい事態が展開していた。まず米空軍の事情で、観測地がインドネシアから沖縄本島の嘉手納基地に変わった。それに伴い、地上レーダー施設の展開、送受信、さらに航空機からの生中継には郵政省の、バックアップとしての民間空港の夜間利用には運輸省の許可が必要になった。幸い許認可についてはNHKの関係者がよく対応してくださり、助かった。一方、朗報もあった。イリノイ大のC. Gardner氏の強い働きかけで、コロラド州ボデンバーにある米海洋気象局(NOAA)の全米大気研究センター(NCAR)に所属するElectraプロペラ機が、二機目のチャーター機として確保できたのである。しかもこの機にはライダー観測用に複数の天頂窓が設置されており、HD-TV-IIも天頂窓をもらえることになった。

残る関門はNASAからのミッション運営費の承認であった。NASAの研究予算はコード毎の独立採算性である。予算削減に苦しむ地球観測、スペースデブリの部門からは振られたものの、Jenniskens氏はその年に創設された宇宙生物学研究所へのプレゼンテーションに成功した。しかし海外からの参加者で、こうした米国での予算の決まり方に精通している者は少ない。予算が承認されるまではJenniskens氏の報告を信じられないという者も出てきて、彼等は独自ルートで様々な情報や仕入れては、一喜一憂していた。地上レーダー網の観測を担当していたカナダのP. Brown氏は

独自の計画を立ててミッションから離れ、レーダーと光学観測の相互較正は不可能になった。さらにドイツなど、いくつかの観測チームも脱落していった。この辺りは急造の国際チームで、信頼醸成の期間が短かったため無理からぬところである。しかし各国政府機関の運営やしきたりに関する理解不足から生じる摩擦は、国際ミッションに参加する上でデリケートな問題であり、正確で頻繁なコミュニケーションの重要性を痛感した。結局10月初旬には当該年度の予算が成立した。

5. 試験飛行

5.1 1998年10月：Electra

それから間もなくNCARにてElectraの夜間試験飛行が行なわれた。同機には鉄ライダー、大気光計測器、HD-TV-II以外にも、可視光の8 mmビデオカメラや可視、近赤外線分光器が、NASA／ARC、SETI研究所、そして新たに加わったイーストアングリア大学（英国）によって搭載された。当初予定された試験飛行は、離陸前最終チェックで燃料漏れが発覚して延期されたものの、二日後には無事に4時間ほど飛行した。機首の回頭や乱気流に入る時以外は、HD-TV-IIの画像はとても安定していた。ライダーのレーザー光の写り具合や、雲に近づくと夜行灯の反射が画面を明るくすること等、実際に飛ばないと気付かないことを一つ一つ確認していった。飛行機の位置をGPSで確認しながら、コンピュータ上に天頂の星空を模擬し、全てのレンズでの限界等級も求めた。

この試験飛行の結果と番組制作側からの映像リクエストを考慮し、本番での二機のHD-TV-IIのセットアップを以下のように決めた。Electraには従来型カメラにF1.0の50mmレンズを固定して天頂の計数観測を行なう。一方のFISTAには流星仕様カメラを搭載し、(1) 最微光流星用の135 mm望遠レンズ、(2) Electraとの同時観測用の58 mm標準レンズ、(3) 番組撮影用の28 mm広角レンズの三種類を、予想されるピークの

継続時間（約2時間）より十分短いサイクル（約20分毎）で機敏に交換していく。

残る問題は、二点同時観測を行なうためにFISTAとElectra各々で、GPSタイムコードを読み取るIRIG-BデコーダとHD-TV-IIビデオデッキの時間記録トラックを同期させることだった。試験飛行直後に両機のクルーとテレコンファレンスを開き、この点を詰めた。両者とも問題ないと答えたが、FISTAの試験飛行で再確認することになった。なお、Electra機からの生中継は技術的に可能だったが、費用分担の合意や郵政省への許可申請などに手間取り、結局諦めざるを得なかった。

5.2 1998年11月：FISTA

11月に入ると、FISTAの観測機器の設置と試験飛行を行ない、そこから沖縄まで移動するため、我々はL.A.で合流してレンタカーに全ての機材を詰め、再びエドワーズ空軍基地に向かった。宿泊は、基地内の格安ながら豪華なゲストハウスをあてがわれ、朝早い作業や夜遅くの試験を行なう際に助かった。FISTAのハンガーがある飛行エリアでのゲートでは、毎朝機関銃を肩にかけた兵士からバッジを支給された。構内での写真撮影は一切禁止され、飛行エリアを出るときは必ず集団行動が求められた。

FISTA機は、右舷に三種類の角度で20個余りの観測用窓が配してある。同機には日本から二種類の観測機器の他に、エアロスペース社（米国）、米空軍研究所、アンドロフ天文台（チェコ）、カリフォルニア流星研究会らが持ち寄った近・中間赤外線、可視・紫外線の分光器により、複数の波長域での流星群の分光観測が予定されていた。マウントアリソン大学（カナダ）やSETI研究所は、HD-TV-IIよりも明るめの流星を捉えるビデオ計測を分担した。

試験飛行の前日までに全ての機器が安全審査に合格しなくてはならず、一つ一つトラブルシューティングが行なわれた。まずHD-TV-IIでは、ヘリコプタ撮影用

の防震単脚を流用したが、その高さが割り当てられた二つの窓のうち、上の窓まで伸びないことを現地で初めて知らされた。翌朝6時半から基地のエンジニアと、単脚を底揚げする台を突貫で作成した。但し下の窓の使用は諦めた。また4月の訪問時には、HD-TV-IIカメラの背後にビデオデッキ、モニター、コンピュータ等を固定する専用ラックを置き、肉眼で窓を覗きながらビデオ操作をする筋書だった。しかしその位置には、飛行中の機内移動を最小限にするするため、機首に一番近い赤外線分光装置の制御系が配置されていた。我々のラックはカメラから10 m近く離れた機内中央部に移動したため、科学者はモニター観測のみでカメラマンに指示を出さなくてはならなくなった。そこでインターコムに日本語専用回線を作ってもらい、それを通じてカメラとラック間の通信を行なうことにした。さらに懸案だったGPSのタイムコードをビデオデッキに繋ぐIRIG-Bデコーダは、両者の相関性が取れないことが判明したため、急遽業者を探して購入し、安全審査の直前にラックへはめ込んだ。

一方、ダストトレイル雲観測の窓には、機内の照明の反射を防ぐコーティングが施された特注のガラス板が取り付けられた。次にこの窓を通して、どうやってフラットフレームを取るか決めなくてはならなかった。CCDカメラの各画素の感度を補正するには一様な光源が必要だが、 $51^{\circ} \times 34^{\circ}$ という広い画角に一様な光源を探すのは難しい。通常は薄明の一様な空を撮像したり、ドーム内の望遠鏡であればドームの内壁を撮ってフラットとするが、黄道光やダストトレイルは非常に暗く、フラットに数%のむらがあるだけで観測結果を大きく左右する。しかも窓越しに撮るので、窓とカメラとの相対角度による屈折率の変化も考慮する必要がある。様々な方法を試したが、撮れるデータ量の限界や、離着陸前後は観測できないことから、最終的にはミッション終了後に、窓をそのまま借りてフラットは改めて撮ることにした。

安全審査をパスしたものの飛行許可は予定通りに下

りず、試験飛行は7日から9日へと延期された。我々は思いがけずできた待機時間を使って、L.A.郊外のソニー・ハイビジョンセンターを訪ねてHD-TV-II画像の解析について相談したり、太平洋横断の航路図を入手して、時間と場所毎にコンピュータ上に星空の模擬ファイルを作ったりした。

試験飛行は現地時間9日21時から10日1時まで、4時間かけて行われた。機内での指揮系統や非難経路などのブリーフィングの後、酸素マスク、緊急救難用浮袋、怪我防止の手袋、インターコム用ヘッドフォン、水ボトルを常時身につけるようにと支給された。航路はL.A.沖上空を旋回し、帰還する比較的短いものであった。HD-TV-IIについてはビデオデッキとGPSタイムコードの同期確認や、観測計画に基づくレンズ交換の練習を中心に行なった(図4)。また番組用カットの撮影、窓枠のけられや反射防止対策、スクリーン上の計数観測の練習も行なった。ダストトレイル雲観測の懸念であった積分時間は、90秒までは完全に静止したフレームも取れるという感触を得た。また今回のCCDカメラは空冷式なので、外気温によるダークノイズ(熱電流)の発生を極力抑えるために、機内の温度をできるだけ



図4 機内でのHD-TV-IIカメラのレンズ交換の様子。

下げる必要があった。キャプテンに要望した結果、CCDは-10度まで冷却できた。機内と外をガラス板一枚のみで隔てており、結露を防ぐために窓ガラスにドライヤーで温風をあて続ける条件下でここまで冷却できたことは、他の観測者の協力に感謝しなければならない。

5.3 太平洋横断・夜間試験飛行

米軍の任務について我々が口をはさむ余地はないが、エドワーズ基地での活動を通じて、職業人として見習いたい姿勢は多かった。プロ意識が強く、アクションアイテムには自ら期限を設定してきばきと動く。上司は部下を迷わすような話は一切しない。もたもたしていたら仲間全員の命に関わる仕事だから当然だが、一緒に作業をされていて小気味良かった。また、今回のミッションは日本人に加えて中国や東欧からの研究者も参加しており、出発直前まで外交や軍規上の様々な問題があったようだが、結局12日には予定時刻通りに、全てのクルーを乗せて離陸できたのは見事である。本来「ミッション」とは、軍事上の作戦行動や宗教的な伝道事業を意味する用語であり、近年になって惑星探査に転用されたにすぎない。設定した目標へ至る最も確実な手段を考案し、それを実現させるという職務が、軍人と惑星科学者に共通しているのは偶然ではなからう。

エドワーズ空軍基地から沖縄・嘉手納空軍基地までの夜間飛行は、途中ハワイ・ヒッカム空軍基地まで6時間半、ハワイから沖縄まで10時間という長旅であった。すでにしし群が確認できたが、予想外におうし群も多かった。両者は明らかに飛来方向と速度、明るさの傾向などが異なっており、沖縄に着くまでにしし群の「癖」を覚えてしまった。それでも本番ではどんなハブニングが起こるか分からない。実際、太平洋横断中も何度か室内電源が落ち、観測が中断された。機材を一つ一つチェックし、考えうる全てのアクシデントを想定して対策を講じていった。唯一残った問題が右舷主翼

の下部にある安全確認用の夜光灯が観測の邪魔になることだった。しかし、これもキャプテンと交渉し、消灯して飛行できるようになった。

こうして連日の試験飛行を終えた我々は、日本時間15日早朝、折しも基地返還問題で揺れた県知事選挙の当日に、嘉手納基地へ着陸した。少し前に到着していたElectra機と合流し、税関審査を済ませて入国した(図5)。

6. ミッション実施

6.1 観測本番

ホテルで仮眠を済ませた後、早速両機の参加者合同のミーティングが開かれた。その後各航空機に戻り、機器の整備を行なった。翌日午後は地元のVIPや報道機関の訪問を受け、質疑応答に追われた。その後、NHK番組用に各国科学者へのインタビュー収録を手伝った。こうして17日の夜は駆け足でやってきた。

当日の天気予報は、「低気圧が沖縄を含めて日本列島を覆い、しし群は限られた地域でしか見えない」と悲観的なムードが漂っていた。そんな中18時過ぎにはフライトスーツに身を包んだ全参加者が、嘉手納基地の食堂で「最後の晩餐」を採った。その席上で我々日本人科学者から、沖縄の護り神「シーサー」の置物が参加者全員に手渡された。しし群と獅子「シーサー」。FISTAとElectraの2機の航空機と雌雄一対の「シーサー」。なにか運命めいたものを感じつつ、全員の気



図5 嘉手納基地に到着したFISTAとElectra二機の科学観測用航空機。

持ちが一体になった瞬間であった。

夜22時にまずFISTAジェット機が飛び立ち、機体が小さく速度も遅いプロペラ機であるElectraは2時間ほど遅れて後を追った。FISTAは沖縄本島西岸の東シナ海の上空を、計9時間飛行した。航路は、しし座が昇る東の空を一番長く向くような五角形を描いた(図6)。特に、予測された極大期の午前4時40分にはFISTAの右舷が東を向くように、時刻が調節された。これを2時間で一周する速度で計3周、明け方の空が白むまで休むことなく観測が行なわれた。二点同時観測を成立させるためにFISTAはElectraの外回り、左舷約100 kmを平行飛行した。両機は一時間毎に互いの位置を同期させた。FISTAのノミナル飛行高度は10 kmだが、赤外分光のために後半は最高高度約13 kmまで上昇した。Electraは、雲のすぐ上の高度約7kmを維持した。

FISTAでは、機内前方に位置する観測装置から準備を始め、23時頃から機内灯を消して観測を開始した。HD-TV-IIチームは、モニター、カメラ、ビデオデッキと各担当に分かれ、予定したレンズの順番での撮影と、計数観測を始めた。しかし二点観測を開始した途端、ハブニングが起きた。高度の低いElectra側

の前方の気流が悪く、一周目から予定航路を変更したのである。その後も航路は微妙に変更され、また突然出現した永続痕をカメラで追うなど、臨機応変な対応が続いた。途中Electra側のHD-TV-IIの作動確認をするため、一回だけパイロットの通信回線を使わせてもらった。

観測開始当初はおうし群が目立ったが、真夜中すぎから放射点が高く昇るに連れて、しし群も確実に検出されるようになってきた。しかし20分毎に飛行方向を変えるので、レンズ交換や星空の確認などでせわしない。各インターバルでの計数観測は10分間行なうのが精一杯であった。午前3時台から明け方にかけて出現数は徐々に上昇していったが、望遠で捉えた最微光流星に限っては、明るい流星の光度比を単純に外挿したときよりも、積算フラックスの増加率はゆるやかであった。4時40分を過ぎても、劇的なフラックスの上昇は認められなかった。例年よりはるかに多い流星雨には違いないが、ZHR200~10000と言われた予想値の下限に近い、という印象だった。一か月後に国際流星機構(IMO)がまとめたデータの集計によると、当初予想されたピークは現地時間18日午前5時30分に起き、ZHR180+-20と見積もられている[12]。

一方ダストトレイル雲観測にとっては、下が低気圧ということが災いし、航空機の安定度にやや不満が残った。パイロットも全力を尽くしていたが、観測データを見る限り、当初設定した90秒の積分時間では安定した星像は得られなかった。やむをえず30秒積分でも撮像した。5時35分には直流電源が突然切れ、CCDカメラの電源も落ちた。再び立ち上げて、最後のデータを取り終えたのは6時10分だった。計6時間50分の観測時間で、撮影したフレーム数はダークフレームを含めて283枚、約170MBのデータが取れた。

5時頃には、HD-TV-IIのモニターには実時間撮影にも拘わらず、東の空高く昇ったしし座を持ち上げるようにそそり立つ黄道光が、明るく写っていた。結局、我々が持ち場を離れて窓から星空を肉眼で覗けたの

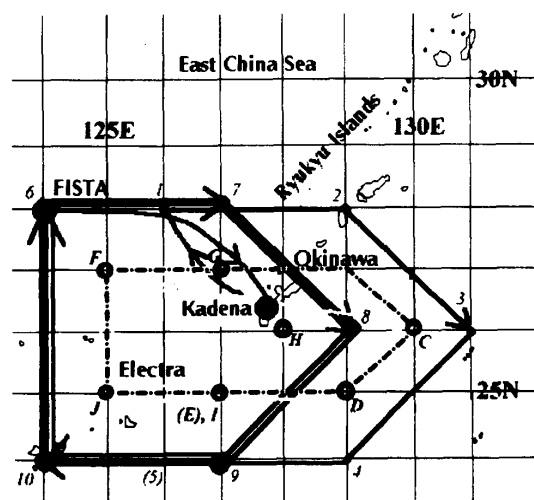


図6 極大期当日の観測飛行経路。

は、沖縄への帰路上、観測が終わってから片付けが始まるまでの間わずか5分足らずであった。

6.2 アウトリーチと初期解析

18日7時、我々は明け白む嘉手納基地に着陸した。機内では、誰からともなく固く握手を交し始めた。帰還直後に用意された基地内での記者会見では、ミッションに参加した7割の観測グループが、この晩だけで各々の科学目的を達成するのに十分な質と量のデータが取れたと述べた。その後ホテルに戻った我々は、ようやくしばしお互いの労をねぎらう余裕ができた。しかし翌日には都内で渡部氏との打ち合わせ、翌々日からは初期計数観測を行なう予定になっていた。矢野は昼過ぎに那覇へ向かい、東京行きの旅客機に乗った。その晩、ちょうど1000回記念を迎えたNHK報道番組『クローズアップ現代』では、渡部氏とElectraに搭乗したNHK記者水野倫之氏が、早速今回のミッションを解説した。その視聴率は同番組の98年年間2位、過去1000回でも歴代21位という高い関心を集めた。定時のニュースでも永続痕や火球、黄道光を背景に流れるしし群流星など、ハイビジョンの映像が一早く報道されていた。

ミッションの2日後には、多くのアマチュア研究者に都内のハイビジョン専用スタジオに集まって頂き、二台のHD-TV-IIが記録した最微光流星の計数観測と二点同時観測に的を絞って、大スクリーン上で集中的にビデオ解析が行なわれた。そこでも望遠観測については、HD-TV-IIでは取りこぼしなく写る明るさであるのに、+6〜8等級から光度比がゆるやかになることが確認された。この結果を元に数百ミクロンほどのしし群のメテオロイドが現在稼働中の約600の人工衛星どれか一つに衝突する確率は、およそ1%と試算された。こうした初期結果は同月23日にNHK地上波総局、1月3日に衛星ハイビジョン局でそれぞれ放映された二つの特集番組の制作に生かされた。23日の番組の視聴率は、裏番組の民放『ウルトラクイズ』24%に続く

15%で、科学番組としては大健闘とのことであった。これで少なくとも日本でのアウトリーチ活動は一段落した。

その後さらにデータを吟味した結果、イリノイ大学の鉄ライダーとの同時計測が1ダース以上成立していることが分かった。チェコのJ. Borovicka氏による紫外線分光観測との同時観測の成立も調査中である。さらにHD-TV-IIのデジタル動画像の特徴を生かして、個々の流星の精密な軌道決定と光度プロファイルの導出も行う予定である。一方、前述したように流星の出現数は予想の下限值に近く、しかもダストトレイル中の散乱断面積を支配している微小粒子の相対量も少なかったことがHD-TV-II観測で示された。そのため、トレイル雲の明るさが背景の黄道光にくらべて数%以下であったことは確実である。藤井らはこの微弱な増光を捉えるべく、97年のマウナケアでの経験から得た観測・解析技術を駆使して、航空機観測のデータと極大期を挟んだ11月14〜20日の一週間に行われたハワイでの地上観測のデータ双方の解析を、現在進めている。こうした複数の機器による同一流星の多角的な分析こそ、Leonid MACミッションが目指したものであった。今回の成功で、航空機を使った流星群の総合的な観測が、今後の流星科学を飛躍させる新しい潮流になることが予感された。

勿論、初めてづくしのミッションだったので、反省点も数多くある。最初の失敗は、GPSタイムコードを取り込んで両機のHD-TV-II画像をシンクロさせるのに不可欠なIRIG-Bデコーダについて、当初から問題なしとの回答を得ていたElectraの出力信号に実は互換性がなかったことを、飛行当日まで確認できなかったことである。17日夜、Electra側のNHKエンジニアから初めてこの報告を受けた時、FISTAはすでに離陸1時間前だった。そこで急遽、エアロスペース社がGPSのバックアップ用にFISTAに積んでいたタイムジェネレータを借り受け、これをElectraのHD-TV-IIのビデオデッキにつないだ。FISTAに再び戻った時には、滑

走路への移動5分前であった!この時ほど同乗の研究者の友情を強く感じたことはなかった。

それにもかかわらず、二点同時観測はさらなる困難に遭遇した。ミッション後、同時観測用の一時間分の画像を抽出し、NMSの重野好彦氏に再確認して頂いた。各機100個以上の流星のうち、二点観測が成立していたのは散在流星が3個のみであった。GPSデータを調べた所、成功率がこれほど少ない最大の原因は、Electraの飛行速度が予想外に遅く、天頂に向けたElectraの視野角のコーンが徐々にFISTAの視野後方にずれていったことにあるようだった。しかし二機間の通信はパイロット用の一回線しかなく、キャビンから相手のGPS位置を常時確認できなかった点が悔やまれる。

今後の航空機観測では、同じ飛行速度を持つジェット機で、相互のGPSデータを実時間で確認できる通信手段を持ち、それに応じて一方が相手を常に視野に収めるようにカメラをポインティングしていく必要がある。また各機器にはエンジニアだけでなく、必ず自ら空を覗ける位置に科学者を配し、どんなハプニングにも柔軟に対処できる体制を作るのが肝要であろう。

6.3 宇宙空間はどうだったか?

ところで、極大期当日、宇宙空間では何が起きていたのだろうか?

NASAは、93年のペルセ群の教訓を生かし、HSTは太陽電池と鏡筒をしし群の流れと平行にして衝突する面積を最小限にした上で、ダストトレイル下流の空にあるキューサーを観測した。スペースシャトルも今回は、極大期を外すように打ち上げ時期があらかじめ調整された。一方、ミール宇宙ステーションでは極大期にも2人の宇宙飛行士が勤務していたが、万一に備えてソユーズ脱出カプセル内で待機した。また彼等は極大の5日前にエアロジェルをミールの外壁へ、しし群の流れを受け止める向きに設置していた。標的は三か月後に回収され、フランスの実験室で衝突痕が調査

される[13]。

商業衛星としては、インマルサット2号の予備衛星のコンピュータに、微粒子衝突による放電が原因と思われる異常が発生し、機能が一部停止した。しかし当日は担当者が管制室に待機しており、直ちにコマンドを送って機能を回復させた[14]。ISASが運用する科学衛星は、高電圧を下げたり、しし群の流れに沿って姿勢を制御するなどの工夫をし、全て無事だった[15]。但し電波望遠鏡衛星「はるか」は、直前の不調によりテレメトリーが取れなかった[16]。以上のように、5年前のオリボス衛星のごとく一回の事故で機能を奪われた衛星は、幸い現在まで報告されていない。しかしこれは、各国の宇宙機関が今回のしし群の情報を検討し、衛星担当者との連携を取るなどの対策を講じたからこそ、無事だったのかも知れない。

これとは反対に、宇宙機に搭載された微粒子計測器を使って、積極的にしし群のメテオロイドを計測する試みも行なわれた。ロシアの静止軌道衛星「ゴーリッド」[17]と、当時地球から160万kmの距離にいて、地上よりも一日遅く流星群の本流に遭遇したISASの火星探査機「のぞみ」[18]である。両者とも1ミクロンオーダーの極微小粒子の検出が期待されていた。しかし各々がダストトレイルに遭遇した期間に1~2個ずつ、明瞭な高速粒子の衝突を検出したが、飛来方向や速度から判断する限り、しし群起源のものとは結論できなかった。

7. 今年のしし群観測への提言

今年予測されるしし群の極大期に放射点が空高く昇る地域は、中東~東ヨーロッパ~中海地域に移動する。二年計画のLeonid MACは、この地域から再び観測を行なう予定である。前述の反省を生かして、二点同時観測の成功率を高めるのが重要な目標である。

なお昨年、予測通りに現われたシャープな主要コンポーネントの19時間前にピークを迎えた、緩やかな背

景コンポーネントの高まり(ZHR340+20[12])が、今年再び現われるかは定かでない。いずれにしても人工衛星の運用者は、引き続き警戒体制を敷くべきだろう。なお惑星科学の観点からは、なぜ昨年のしし群には微小粒子が少なかったのか、また火球の多い背景コンポーネントのピークがなぜ今回は、主要コンポーネントの出現時刻と一致しなかったのか、という新たな謎が生まれた。これらの答えは母彗星の構造、過去のアウトバーストの規模、最近受けた摂動の強度などを説き明かす手がかりになる。

今年の極大期の月齢は約10だが、深夜に月が地平に沈むと共にしし群の放射点が昇ってくるので、観測の障害にはならない。むしろ月面観測も興味深い。もし東側の月面で閃光が見えたら、それは彗星から放出される大きさの上限に近い(サッカーボール大程度?)メテオロイド塊の衝突による「月面発光現象」の瞬間かもしれない[19]。また月の周縁部の分光観測をすれば、メテオロイドの爆撃による月の薄いNa大気の濃度の経時変化が検出される可能性もある[20]。

謝辞

本ミッションが成立し、日本からも研究者が参加できたのは、文中でご紹介させて頂いた方々以外にも、様々な方面からご理解とご支援を頂いたからである。ここに記して厚く御礼を申し上げるとともに、今年も引き続きご協力をお願いする次第である。HD-TV関連では、宮崎範義、水野倫之、吉沢章、為ヶ谷秀一、山崎順一、高橋永央、桃沢英明、山口哲史、城武光祐、中島良雄、大島進、伊藤昭司、三浦宏之(NHK)、田中孔一(NHKエンタープライズ21)、安東雄一郎、大田黒弘、若林賢二(ニュースアメリカ)各氏。ミッション直後のビデオ初期解析において、高梨雅彰、橋本岳真、重野好彦、塩井宏幸(NMS)、阿部新助(総合研究大学院大学)、海老塚昇(通信総合研究所)、清水春奈、池永敏絵、保科健太郎、佐野稔、浦田裕次、翠川

哲也、網島伸浩、大谷暁一(大天連)各氏。計画の当初に相談に乗って頂いた上田昌良、藤原康德両氏(NMS)。ミッション参加に際して寛大なご指導を頂いた、西田篤弘所長、水谷仁、的川泰宣、高野忠(ISAS)、向井正(神戸大学)各氏。ダストトレイル雲観測用のCCDカメラを提供して下さった中田昌(西明石天文台)氏。すばる天文台での地上観測に参加して下さった石黒正晃(神戸大学)、横川創造、森重和正(東京大学・ISAS)各氏、および現地での便宜を図って下さった海部宣男、関口和寛両氏をはじめとする国立天文台ハワイ観測所の関係者各位。HD-TV-II観測のCo-Iを努めた渡部潤一(国立天文台)、飯山青海(NMS)両氏と、ダストトレイル雲観測のPI・中村良介(神戸大学)氏。一つのチームとして本ミッションに参加した各国の科学者各位。航空機を提供して頂いた米エドワーズ空軍基地第452飛行中隊FISTAクルーとNCARのElectraクルー、及び米エドワーズ、ヒッカム、嘉手納各空軍基地の地上支援スタッフ各位。

そして最後に、困難な時期にもミッション全体のPIとして情熱と信念を持ち続け、実現に漕ぎ着けたPeter Jenniskens氏(SETI研究所)と、彼の努力を支えたNASA/ARC宇宙生物学研究所のスタッフ各位に最大限の賛辞を贈りたい。なお、矢野は全米科学アカデミーより、National Research Council(NRC) Research Associateship(NASA/JSC)を受けている。

参考文献

- [1] 矢野創, 1999: しし座流星群は大出現していた。ニュートン, 19, No.3, 110-117.
- [2] Vizard, F., 1998: Meteor mission. Popular Sci., 253, No.5, 68-72.
- [3] 矢野創, 1993: カンタベリーから (2) 1993年度国際宇宙大学夏季セッション。遊・星・人, 2, No.4, 193-205.
- [4] Yano, H., 1998: Meteoroid and space debris

- impacts on telescopes in space. In Preserving the Astronomical Windows, (eds.) S. Isobe and T.Hirayama, ASP Conf. Series, 139, 65-86.
- [5] Caswell, D., McBride, N. and Taylor, A.D., 1995: Olympus end of life anomaly - A Perseid meteoroid impact event? Int. J. Impact Engng., 17, 139-150.
- [6] McDonnell, J.A.M., McBride, N. and Gardner, D.J., 1997: The Leonid meteoroid stream: Spacecraft interactions and effects. Proc. of the 2nd European Conf. on Space Debris, ESA SP-393, 391-396.
- [7] Jenniskens, P., 1996: Meteor stream activity III. Measurement of the first in a new series of Leonid outburst. Meteoritics & Planet. Sci., 31, 177-184.
- [8] Sykes, M.V., Walker, R.G. 1992: Cometary Dust Trails I. Survey. Icarus 95, 180-210.
- [9] Ishiguro, M., et al., 1999: First detection of visible zodiacal dust bands from ground-based observations. Ap. J., in press.
- [10] 渡部潤一, 1998 : しし座流星群がやってくる. 誠文堂新光社, 207 pages.
- [11] 河北秀世他, 1998 : テンペルタットル彗星におけるガス／ダスト比とガス組成について. 1998年地球惑星科学関連学会合同大会予稿集, 274.
- [12] Arlt, R., 1998: The 1998 Leonid meteor shower. WGN - J. of Int. Meteor Org., 26, No. 6, in press.
- [13] Bibring, J-P., 1998: personal communication, IAS, France.
- [14] Shaki, P, 1998: Mild Leonid meteor activity catches few by surprise. Space News, 9, No.45, 6.
- [15] 高野忠, 1998: personal communication, 文部省宇宙科学研究所.
- [16] Yano, H., Shiraishi, H., Takano, T. and Konigorski, D., 1997: Feasibility of measurements of the forthcoming Leonid meteoroid storms by existing ISAS missions. Proc. ISAS Solar System Sci., 19, 61-64.
- [17] Drolshagen, G., 1998: personal communication, ESA/ESTEC, Noordwijk, The Netherlands.
- [18] Sasaki, S., et al., 1999: Initial results of Mars Dust Counter (MDC) on-board NOZOMI: Leonids encounter. Abst. LPSC XXX, 1581.
- [19] 柳澤正久, 1997: 月の異常現象. 遊・星・人, 6, No.3, 226-231.
- [20] 渡部潤一, 1997: 月のナトリウム大気の観測に挑む. 遊・星・人, 6, No.3, 218-225.