

## 第7章 地球周辺の科学ミッション

### 07.1 科学的研究

1950年、世界の科学者たちは、まず1882年に、そして50年後の1932年に再び、極域の研究においていくつかの国の努力に焦点を集めた国際極年の概念に戻った。この時のねらいは、1957-58年に予想された極地活動が高まっていた時期にさらなる国際年を組織立てることであった。科学団体の国際評議は、1957年7月1日から1958年12月31日まで続いた国際地球観測年の枠組みの中で地球全体にプロジェクトを拡大することを決めた。

1954年ローマでの会議中、運営委員会が、人工衛星は国際地球観測年の前後で打上げられるべきだと推薦した。ゆえに科学者は、ミサイル開発に伴った武装サービス同盟によれば、技術的に実行可能なプロジェクトを起こし助長した。実際、後者は、ミサイルが宇宙征服の可能性を秘めているということに対して決議者を説得しようと長らくの間試みていた。さらに、地球周回軌道に最初の人工衛星を投入することの象徴的意義はすでに把握されていた。米では、軍事頭脳集団としての役割にあるランド社による研究は、すでに1950年であった請合いに心理的衝撃を与えた。1952年には、初の原子爆弾を開発したマンハッタンプロジェクトへの参加で知られるA. V. Grosseという科学者がトウルーマン大統領に報告書を提出し、名声価値は言うまでもなく、そのような努力の様々な軍事的及び科学的利益を強調した。ソ連では、S. Korolevと科学アカデミー長のM. Keldyshもまた、ロケット計画は大陸間弾道ミサイル開発と結合できるだろうとJ. Stalinを納得させようとした。彼らの計画は、衛星を打上げることに戦略的利益の観点から即効性に欠け失敗に終わった。かわってN. Khrushchevは、威信ある討論にもっと理解のあるところを示し、宇宙開発のための特別委員会が科学アカデミー内に1954年に設立された。

国際地球観測年のために特別委員会によって作られた提案は、このとき結果を持ってその案を覆した。1955年7月、米国及びソ連両政府は、国際地球観測年の一部として人工衛星を打上げるつもりだと、同日のうちにそれぞれに発表した。彼らの向上心は多少違っていた。N. Khrushchevは、大陸間弾道弾の分野でのソ連の達成を国際レベルに持っていくことの方法として取ったが、軍事見直しのための衛星プログラムの開発の可能性をすでに考慮に入れていた米は、宇宙空間での活動の自由のための法的文書を作成することによって国際地球観測年の科学衛星を利用する決断を下した。

戦略上の作戦が宇宙征服に見地を開くことに前進したとしても、科学衛星は言うまでもなくさらなる宇宙の探求への開拓的役割を果たした。彼らは、民間及び軍事宇宙技術の両

方の利益に貢献すると同時に基礎的研究の条件を満たし、地球環境のよりよい理解を目指した。彼らの主なミッションは、単純に大気圏、電離圏、磁気圏、オーロラ圏、そして小隕石を含む身近な環境を調査することだった。効果的な環境的認識位置付けは、将来の衛星の世代の開発に向けての不可欠な一歩だった。のちに、費用が手に負えるレベルに抑えられ、大掛かりな打上げ施設の必要性なしに打上げられることを前提に、国立宇宙プログラムの名の下でしばしば使われた。さらに、国際計画は、十分な科学的潜在能力を秘めた国々が宇宙研究において協力することを可能にする。(図 7.1)

主要宇宙機関は、長期計画を定義するために相当する科学界をまとめ、宇宙科学においてほとんどすべての事業に対する枠組みを提供する。その一つが Terra, E01 と Landsat 7 のような衛星を含む NASA の地球観測システムの地球観測事業である。その他は ESA の要石又は地球探査、及び諸機関間計画 IASTP (諸機関間太陽系物理学) である。彼らは次々と生まれる技術計画 (例: 地球科学技術プログラム、NASA の新世紀プログラム、ESA の SMART) によって純粋に科学的ミッションを支援し、NASA に管理される探査機、小探査機、中探査機、CNES に管理される小型衛星 PROTEUS のようなプラットフォームを設計し資金提供をする。また、ESA の Estrack ネットワークまたは ISRO の Istrac ネットワークのように、TTC ネットワークを使ってデータ移動をすると同様に衛星追跡とコマンドも扱う。露連邦共和国の機関である RAKA とは別に、極めて初期の段階で、NASA は遠くにある衛星と探査機のネットワークを設立した唯一の機関である。これが深宇宙ネットワークである。ゴールドストーン (カリフォルニア州)、マドリッド (スペイン) およびキャンベラ (オーストラリア) に位置する 3 つの可動型で高利得なパラボラ反射アンテナで成り立つ。コマンドを送り通信データを受取ることは別に、ネットワークは探査機を追跡し、それらの軌道を認識し、VLBI 観測をし、無線科学実験を実行する。遠隔軌道にいる探査機と衛星はまた、ウクライナの Yevpatoria を中心とし、他 5 ヶ所 (Medvezhi Ozera, Pushino, Simiez, Ulan Ude, そして Ussurisk) の地球観測所とのネットワークに繋がれている露の TsDUC 長範囲宇宙コミュニケーション・システムによって追跡される。

### **宇宙科学部門**

科学研究はアクセスから空間まで多くの方向に利益をもたらす。大気学のようなまさに限られた数の分野にあるさまざまな地上の制約から免れようと、ロケット探査機や気球による試みがあったが、衛星が出現する前に地上の観測者に強いられた様々な条件からは開放

される。多くの制約は、宇宙空間に行くことにより解かれるか、少なくとも弱められる：重力、電磁スペクトルの一定の帯域までの大気の不透明さ、原位置か近距離の研究をする不可能性、そして地球表面から実行されるやむを得ない断片的で非世界的な性質の研究。

地球の研究の総合的な背景では、宇宙空間測地学が地殻変形の測定を通して地球力学において広い分野での研究を切り拓いた。海拔を測定する時や大陸地形を調査する時に参考にも利用される。両方が基礎レベルで民間及び軍事利用において倍の利益を持つ科学の最も良い例の一つとなる。

地球とその環境の研究は、おそらくその中で最も壮観ではなくとも、宇宙科学の重要な面を長い間象徴してきた。さらに、欧州宇宙局によって試されたやり方で、活用に向けて指揮された観測ミッションからの研究を目的とした探査ミッションを分別するのは必ずしも簡単ではない。前者に関しては、成層圏及び中間圏の力学及び物理化学における調査である。これらは、オゾン層の減少の見極め、又は、大気中のエネルギーバランスを証明することに取組んでおり、同時努力と組合わさって生物圏の進化の背後にあるメカニズムを理解する。2番目のミッションタイプは、主に地上資源（第9章参照）のリモセンと共に、大気海洋現象の理解に取組む。これらのミッションは、大気、岩石圏、氷圏、水圏、生物圏に共に影響を及ぼすシステム及び地球変動を説明する現象として、地球の構造モデルを作ることを視野に入れ、近年、前面方向に出てきた。それらこそが、ESAによる“生きている惑星”、または、NASAにより調整される“地球観測システム（EOS）”のような大規模計画の主題だ。

太陽系探査は、大気圏の網の目を取除くことからまた利益を得た。しかしそれは、距離を縮め、以前には宇宙探査機がそのように価値のある道具であることを証明する幾何学的理由には不可能であった観察をすることによりなされた。彼らは月、火星そして金星に着陸機を着地させ、それによって比較惑星学、太陽系と同じくらいの我々の地球の歴史の豊かな資源の基礎を提供した。宇宙探査機は、すでに近距離で太陽を観察し、旧太陽系 nebula（第8章参照）に見られるすべての巨大な惑星と同時にいくつかの彗星と隕石に大接近した。

恒星天文学は、長い年月をかけ観測をやってきた高水準の時代の天文学者たちや前世紀の地上観測により成し遂げられたかなりの進歩をもってしても、宇宙観測により変えられてしまった。天文測定学から離れ、それは、遠い宇宙のより一層の理解に偉大なる発展に達した X線とガンマ線の高エネルギー域と同様に、ミリメートル、サブミリ、赤外線及び

紫外線波長に大気フィルタ周回を開拓した天文物理学の新分野である。

基礎物理の新たに切り拓かれた分野である重力物理における調査は、重力と慣性の質量の同値、また一般相対性理論をテストし、低周波重力波を検知するつもりである。無重量状態、干渉計分光法のための莫大な距離、そして重力の潜在能力にある重要な変動性を考えると、宇宙空間で実験を行うことは不可欠である。

無重量状態で実験することの可能性は、生物の組織体と機能にかかる重力、及び無重量状態に適応する生物の能力の効果を観察するために植物、動物そして人の器官を使う生物学における研究には意義深い影響をもたらす。目下の研究は、他の問題の中から植物の重力屈性にある重量によって担われた役割を説明するために、細胞の代謝と構造が細胞のレベルで重力を感知することに関する問題に取り組んでいる。生理学におけるこの研究は、宇宙空間での生活に適応する宇宙飛行士を育成するのに特に重要である。心臓欠陥流動性、無重量状態の骨組織と筋肉繊維の進化、感覚神経の適応構造の調節、また、初期の胚性の発達の生物学に対して、多くの研究がなされている。さらに、生体細胞に対する宇宙放射線の影響は、将来の有人飛行に向けた準備の一部として研究されなければならない。回収カプセルが入った搭載衛星においては、無重力に対する研究は特に関心のある分野になっている。例として、露の衛星、Foton と Biokosmos、続いて Bion、または中国の FSW 衛星がある。それはまた、しばしば国際協力を必要とする米と露の宇宙ステーションやシャトル内での目玉となっている。

微重力状態は、凝縮物質物理学における新実験の可能性に道を開いた。特に、無重力状態での結晶成長に取り組む材料科学において実行された研究には、おそらく産業の波及効果があることだろう。

図 7.1 2002 年 1 月 1 日の時点で宇宙を基盤とした研究に関わっている国々 - イラク COSPAR (宇宙研究委員会) のメンバであることは一時停止されているため、ここには示されていない。

## 07.2 地球の研究

### 宇宙測地学

測地学の目的は、地球の形とその重力の分野における地理学的変化を究明するためである。それが民間又は軍事目的であろうとなかろうと、それ自体が地図製作のに精密な手法の基盤である、地球の幾何学的な知識の基礎として利用できる。重力場の研究を通じて、それは地球内、すなわち、地殻、マントル、核、の物質分布の最新知識も提供する。宇宙時代に入る前は、測地学はある地点から他の地点または天体の点まで測定される距離と角度に限られていた。初代衛星は、外側から地球を見るための方法として使われ、それ故に地上での測定からは得られなかった基点間の距離測定が出来るようになった。最初の実験は、いくつかの地上局からの同時照準角度を計算するために衛星の裏にある星の背景を使うことにある。そのような方法により、Sea 又は Ocean に分けられたネットワークを連携することが可能になった。これは、Echo 1 衛星のおかげで 1963 年に仏とアルジェリア間の衛星通信を行うために使われた案であった。世界的な測地ネットワークは、その結果、米国沿岸測地調査によって 20~40m の精密さに築き上げられた。観測には直径 41m の極めて反射率の良い膨張式球体である、米国の衛星 PAGEOS (Passive Geodetic Earth Orbiting Satellite) が使われた。

宇宙空間測地に対するまた別の手法は、Doppler-Fizeau 効果を通して局の位置決めに関わる。このために、衛星放射速度が観測の沿線上で測定される。理論上、ある一定の波長での持続的な放射を必要とするだけである。しかしながら、二つの異なった波長が通常、電離圏透過のため摂動を除くために使われる。もっとも経済的なこの方式が、トランジット・ネットワークで 1962 年以來衛星に適用されており、続いて仏の衛星 Diapason と Diademe, そしてほとんど概して全ての航法衛星に適用され、50cm から 1m の度合いの正確さを持っている。この精密さは GPS システムの Navstar 衛星では高く、フランスのシステム DORIS ではさらに高い。DORIS では、正確に座標を示すいわゆる眼窩造ビーコンと呼ばれる 50 の世界的ネットワークを使う。立体的に 10cm 以内に位置決めすることができ、100 km を超える測定範囲を 1 cm の正確さで二つの位置ビーコンの間の地上距離を測定できる。SPOT2、Helios 1A と B、Franco-American 衛星 TOPEX-Poseidon、そしてその後継機である JASON と ENVISAT 以来、SPOT 衛星を用意した。ERS に搭載された独の PRARE システムは、もっと精密な結果を生み出すところであったが正しく機能しなかった。しかしながら、

改良された PRARE は 1995 年以來 ERS2 で運用している。

1964 年以來、宇宙空間測地はまたレーザ域を使った。Starlette や Lageos や、最近のところでは EGP、Etalon1 と 2、Lageos2、Stella、GFZ1 のような衛星は、反射屈折反射装置を取付けた。これらは、放射されたビームの一部をレーザ放射局に向けて戻す。測地学では専門化されていない ERS1 のような他の衛星は、同じ役割を果たす。反射屈折反射装置はアポロ 11 と Lunakhod ミッションの時に月にも設置された。戻ってくる信号の時間差を計ることにより、局は現在 2 から 5cm の度合いの正確さで位置決めができる。しかしながら、地上局は費用がかかり、方途は高精度計測の手段として残されている。

1973 年に Skylab に初めて導入され、続いて出た 1974 年の GEOS3 のレーダ高度計測は、測定が海上で出来ることから測地者の関心を集めている。衛星に搭載されたレーダは垂直にまた高い率で海面に向けて電波を放つ。帰路にかかる時間が衛星までの距離を毎秒数回出す。そして衛星軌道の正確な知識は軌道に沿った海面の位置決めを推定するために使われる。(図表 7.2) 主要高度計測ミッションは、Seasat、Geosat、ERS1、ERS2、TOPEX-POSEIDON と Geosat の後継機によって実行されている。それらは、米の計画である EOS 衛星と同様に、CNES (仏)、Jason の初期の Proteus ミッション、極衛星 ENVISAT (欧州)、そして将来の日本の ALOS に追跡される。

超長基線干渉計は、天体の電波資源、特にクェーサ (恒星状天体) を位置づけるために電波観測に使われる。いくつかの基地で観測された同じ放射段階を比較することによって資源の方向を定める。宇宙の領域においてその主な適用は、衛星を基盤にした電波観測及び宇宙探査機を通じる惑星学にある。操作原理を反転することにより、すなわち、知りたい地上の 2 地点で観測された電波資源の相対的位置を考慮すると、これらの地点の間の距離が、たとえ広く離れている時でもかなり正確なところまで計算出来る (数 cm 以内)。

動力学の測地学は、力学的な力について述べる目的や、特に地表の重力場の衛星軌道への摂動を懸念している。非常に詳細な衛星軌道の解析が必要とされる。たとえば、それらは、放射圧の影響による摂動を、特に初期の測地衛星が非常に大きな膨張型球形だったので、著しく受け得る。これらの軌道は、地球と月の引力の潮汐による影響も受ける。しかしながら、動力学の測地学は、地球の重力における変化を研究することを目標とする (図 7.3 参照)。数多くの正確な測定が地上局のものと符合出来れば、衛星軌道をかなり近接に辿ることが出来る。そのようなデータを獲得するために設計された多くの計画が軌道記述学プログラムと呼ばれるのはこのためである。実際には、計算は、重力の媒介変数が未知

な衛星の運動方程式と、地球基準の位置媒介変数がまた別の一連の未知から成る地上局座標を同時に説明する必要性により複雑なものとなっている。

重さ(重力と遠心力を兼ねた)が各ポイントで分かっている場合、それにより、標準から軌跡水平位置までを定義し、重力等電位面を算出することが出来る。参考等電位と呼ばれる平均海面に相当する等電位面、これがジオイドである。

測地学ネットワークの構築で、ジオイドモデルが、便利ではあるが宇宙時代前に使用された参照の近似楕円体にとって代わる。精密なジオイドを組立てるのは無数の観察を伴う長期に及ぶ事業である。それは、地上のレーザ、ラジオ測深、高度測量又は重量測定による観察によってなされた大域的な改良、そして、海上での集中した一連の高度測量による測定から生じた部分的な改良に常に影響を受け易い。ジオイドモデルはいくつかある。球状モデルは、ポテンシャルが球状調波の中で膨張するとの理論に基づいている。最もよく知られているのが NASA 及びテキサス大学によって 1996 年に設立されたいわゆる共同重力モデル(JGM)、ならびに仏の the Groupe de Recherche de Geodesie Spatiale 及び独の the Geoforschungszentrum によって 1999 年に設立された GRIM 5 モデルである(図 7.4)。

異なる位置での重さのより精密な測定は、重力を直接測定するための新方式を通じてしか得ることが出来ない。そのような技術の一つは、同低軌道上を互いに接近して移動する二つの衛星の視線速度の差を極めて精密なレベルまで測定することにある。そうすると重力場の相対的な差を算定できるかもしれない。米の計画である GRM(Geopotential Research Mission) (地球ポテンシャル研究ミッション) は、この方法によって非常に正確なジオイドを提供し、そのために海洋学の測定を開発する可能性を促進することを意図していた。しかし、それはその後放棄された。2002 年 3 月、重力場及びその長い波長の変化を測定する米-独の GRACE 計画 (GRAVity recovery and Climate Experiment) (重力回収気候実験) が打上げられた。衛星は、マイクロ波によって共に連結され、互いから 170-270 km の距離で同軌道上を移動するだろう。それはさらに、大気との間の行き来を理解するための基礎的なデータの一片である地下水容量も算定出来るだろう。

傾斜測定として知られる別の方法は、それらの間の重力傾度を測定するために同じ衛星内に設置された超敏感な 2 つ以上の加速度計を使用する。微加速度計(Cactus)は仏の衛星 Castor に搭載されて 3 年間既に機能している。測定は、超高層大気及び太陽放射圧力を調査するように設計された。測地学への適用は 1992 年に廃棄された ESA のアリストテレス計画の主題であった。ESA の地球探査計画の 4 つの中心的ミッションのうちの 1 つである GOCE

計画 (Gravity field and steady state Ocean Circulation Explorer) がその後継機となり、優先事項として使用され続けている。GOCE は、重力場を極めて正確なところ (1 mGal) まで測定するため 3-軸重力傾斜測定器を、そして cm まで測定するため部分的なレベルのジオイドを使用する。適用するのは地球力学と地殻変動から海洋学と氷河学まで及ぶ。

ジオイド及び重力場についての正確な知識に対する軍事の関心は、明らかである。軌道から外された宇宙カプセルの帰還用と同様に、ミサイル発射の厳密な地図作成と微調整の両方のためだ。まさに初期の頃の実際の測量衛星は米国防省、即ち、Anna1A の失敗に続き 1962 年に打上げられた最初の光学式測地学ビーコンを備えた Anna1B によって打上げられたのは不思議ではない。GGSE シリーズ (Gravity Gradient Stabilization Experiment)、SECOR (Sequential Collation of Range または Experimental Geodetic Research Satellite と呼ばれる)、そして探査計画に加わっていた GEOS (Geodetic Earth Orbiting Satellite) など、他の軍事衛星も用意されていた。1985 年に米国海軍によって打上げられ、Geosat は位置付けの進歩と、潜水艦ミサイル発射の正確さにおいて重要な向上に導いた。その後継機である Geosat Follow-On は 1998 年 2 月に打上げられた。

ソ連も軍事目的のため、測地学の分野におけるかなりのノウハウを確立した。彼らの最初のシリーズの測量衛星 Sfera は 1968 年に登場した。Musson として知られ二重の目的 (つまり、民間と軍事の両方) があると見なされた 2 代目は、1981 年から 1 年に 1 度の Kosmos の打上げで同軌道上に存在し続けた。ソ連崩壊後は、3 年に 1 度の割合に減少し、1994 年に Geo 1 K そして 1997 年に Svobodny から打上げられたまさに最初の衛星 Zeya の打上げに留まった (図 7.5 及び 7.6 参照)。

### **構造地質学と内部地球力学**

構造地質学では、正確な距離の測定が使われ、剛体プレート、断層のシステム及び地すべりのかすかで微妙な運動も検知する。地震と火山噴火の研究と予測に対する適用は、GPS により位置が識別されるビーコンの密度の高いネットワークを必要とする。もう一つの測定技術は、もっと継続的で均質なものであることから、さらに効果的であると分かった。これが、干渉計を運用衛星によって、または、アーカイブに保存された画像から撮られたレーダ画像から構成するレーダ干渉計法である。後者は、植物による障害には前者ほどの影響は受けにくいいため、この方法は、SAR (合成開口レーダ) が L バンドで使用されたら改良されるべきである。研究のもう一つ別の線は、地震または噴火の何時間か前の磁界と電

界に起こりうる摂動を開発するかもしれない。(ソ連の衛星 Aureol3 (Arcad) ) が地震活動帯の近くを飛行した時、その送信に異常なシグナルが震動に先立って観測された。) これは CNES の微衛星計画 Demeter のミッションとなる。

地球力学では、重力と遠心力を兼ねた地場の精密で詳細な知識がその惑星(地球)のゆっくりとして深い運動の研究に役立つ。土地の隆起、海面の変動、海洋剛体プレートの沈み込み、及びマンツルの対流セルはこれらに含まれる。過去の大陸移動の歴史に光をあてることもほとんど疑いのないことだ。加えて、DORIS は、内部地球力学の現象から生じた地上局の垂直の動きを明らかにした。それがもたらす成果は、ジオイドの変形の量を定めるときに役立つ。さらに、ガリレイ・フレームにある地球局の移動を観測することにより、高軌道の衛星までの距離測定、または、電波干渉計法かのどちらかを通して、地球の軸回転及び角度速度の変動(歳差運動及び回転軸の傾斜度)を測定することが可能になる。これらの反映は、特に、地球の内部密度及びその様々な層の弾性によって変わる。

地球の内部構造に関してもう一つの分野の観測し得る現象は、磁界及びその(長年)時間変化に懸念がある。1979 から 1981 年に運用した NASA の Magsat 衛星は、地球の磁界の最初の完全な瞬時測量を生み出した。加えて、その変化を記録することにより、地球の中心核の表面の流動体循環を表す地図を作成することが出来た(図 7. 7)。

1999 年 2 月に打上げられたデンマークの衛星、Oersted、は、地球の磁気の永久観測所の最初の構成要素である。2000 年 7 月に、地球科学研究と適用のための CHAMP 計画は、2 機の磁気探知器と、地球の帯域的な長いものから中間の波長重力場と一時的な変動の写像加速器を運んだ。似通ったデータが、2000 年 11 月に打上げられたアルゼンチンの科学的地球観測衛星 SACG に搭載された機器の一つから提供された。

**図 7.2 測地学における高度測定の使用** — 衛星軌道は、A、B、C、D、E、F などに向けた測定により局 1 と 2 に対して設立される。ポイント P1、P2、P3、P4、P5 と軌道間の距離は、これらのポイントが局が属する測地システムにあてはまるように衛星高度計を使って割り出す。宇宙時代の前、測地ネットワークに海洋表面を含むことは不可能であったが、測定が今まさに最も普及しており最も正確なのがこれらの地域で得られるものである。

**図 7.3 動力学の側地学** — 青線は地球の重力場を示す。衛星軌道を観測することにより、この分野の値が軌道上(赤矢印)で計算できる。そうすると、地表(黒矢印)での重

量値を推定することが可能となる。ジオイドは、平均海水面と一致の同量表面なのである。

**図 7.4 地球の重力ポテンシャルの GRIM5-C1 モデル (1999 年)** - カーブは、基準楕円体 (半主軸 6378136m、扁平率 1/298.25781) に対するジオイドの高度の違いを表す。南極、トルキスタン、そして特にスリランカの南部は楕円体表面下に位置し、一方、アイスランドやニューギニアはその上に位置する。

**図 7.5 測地学衛星の傾斜、遠地点及び近地点** - 測地学衛星は、通常、大気破壊を最小限に食い止めるため、700 km 上空に近地点を持つ。離心率 0.2 系列の軌道は、順調な近地点の運動に好ましい。これらの制限とは別に、大きな軌道傾斜角の優位やいくつかの極軌道さえをも含む、可能な限り最も全面的なシリーズの測定をして地球をカバーするために、広範囲の傾斜さが使用される。

**図 7.6 地球物理衛星の年代記** - 特に側地学に使用されない多くの衛星もなんらかの測地ミッションをこなすことがあり、この年代記には示されない。しかしながら、測地適用が第一の重要性を持っていた 2 つの受動電気通信衛星、Echo1 と Echo2 は含む。

**図 7.7 地球の中心核の表面の流動体循環** - 地図は圧力変化 (色) と地衡循環 (矢印) を示す。Magsat により回収された磁界とその長年変化に関する瞬時データからまとめられた。中核表面の運動はコリオリの力により測定された地衡風だと推測される。(CNES 提供)

### 07.3 地球周辺環境の観測

地球表面（氷雪圏、水圏、岩石圏、生物圏）で起こっている現象は、大気現象と非常に密接に関連している。かつて、地球観測は両者を区別して行っていた。しかし、今日では、これらは地球放射線量に支配される1つのシステムとして、いっそうグローバルな地球モデルを目指して観測されている。このため、すべての高度と緯度における広範囲のプラズマ流とエネルギー伝達を理解するために、磁気圏、電離圏、上層大気圏を統括して研究している。

1つのシステムとして地球モデルを構築するために、放射線量を大気圏の最高部で確立し、降水量と大気流れの領域に関する長期データと重合わせる必要がある。このデータは一日中、すべての季節において取得しなければならない。また、氷、水と、植物やその他のものに覆われている地球表面のすべての状態を詳細に調べ、火山の噴火や炎、もしくはそのようなものを含むすべての地上現象を観測しなければならない。そして最終的に、大気の各層と、その包絡線に関連付けることで、地球モデルが得られる。そういうわけで、このような事業のために、多くのさまざまな人工衛星が要求されている。これらの研究はEOE（地球観測事業）、EOS（地球観測システム）(NASA)、EEC（地球探査及び要石(ESA)）のような、大規模なプログラムに欠くことのできない役割である。

これらのモデルはリモセンの光学センサと、第9章で説明する気象衛星によって集められたデータ、特に、植被、氷原、浮遊物質などがふんだんに利用されている。さらに、これらのモデルはこの章の最初に述べた装置を使って測定した地球観測データも使っている。なかでも、高度計測と正確なジオイドを重合わせることで、風向き、潮渦、温度差、塩分濃度による小さな摂動をもつ全領域を、潮の干満から完全に切り離して測定することができる。この摂動は、数10cmの差で、地表形状からの平均水位を上下させている。この測定は、海水と大気の間を行き来する物質循環の動的モデルを確立するときに必要なものである。一方、大陸地表面では、重力測定装置が地盤の含水量を評価するのに使われ、これは地上と大気で交換される循環モデルの基本データとなる。

そのうえ、これらのモデルを作るために必要な測定には、いっそう特化した設備が必要であり、具体的には表面現象、雲量、エアロゾル、オゾン層の進展、大気循環、異なる高度における風量、もしくは、放射線量の評価のために設計されている。これらの計測器は主要ミッションがまったく異なる衛星（とくに、リモセンや気象観測衛星であるが、まれ

に軍事衛星であったりする)に搭載されていこう。なかには、軌道特性、バス・サブシステム、伝送系など、ミッションの性質を該当する計測器のために最適化できるという利点から、専用衛星(例えば、TOMS、Quickscat、ACRIMSat)で運用されるかもしれない。ほかには、共通点はなくとも、相補的な現象に関するデータを同時に収集する大型の人工衛星に搭載されている様々な数の計測器の中にあるかもしれない(例えば、Terra、Envisat)。

これらのシステムは、1992年に採用され、1994年に実施された国連気候変動包括条約(UMFCCC: United Nations Framework Convention on Climate Change)の背景にある気候変動と地球温暖ガス(greenhouse gas)の放出を追跡する目的を果たしている。1997年12月に、この条約に関する第3回閣僚級会議で、京都議定書が採用された。京都議定書は地球温暖ガスの濃度を抑えることを目的としている。地球環境を維持できるように管理するためには、地上表面と、海洋、大気の動向を連続して地球規模で観測する衛星を利用することが、絶対不可欠である。米国地球エンタープライズ・プログラムとESAの生きてる惑星プログラムはとりわけ、これらの要求を満たしている試みである。

環境と安全保障のための全世界的な監視(GMES: Global Monitoring for Environment and Security)と呼ばれる欧州のプログラムは2000年に始められた。これは、しばしば非常にきつく制約された目的で、科学衛星や、気象・地球観測衛星によって取得したデータを統合することを目的としている。このタイプのプログラムは、まだ明確に特定されていないが、世界規模で相互に補完できる活動を決定し、遂行する必要性の認識が高まっていることを反映している。

図 7.8 MODIS 画像 — 2000年2月28日にTerra衛星によって撮られたこの画像は、エジプト、スーダン、イスラエル、ヨルダン及びサウジアラビアをカバーしている。砂漠の中心から向こう側には、ナイル川が緑のリボンのように現れ、そのうち三角州で扇形に広がる。スエズ運河によってもたらされる紅海と地中海の間の連結がはっきりと見える。環境目的の科学衛星は、地球の画像をよく集める。データ解析は、画像のデータとその他の測量を合成しなければならない。NASA提供。

### **地球表面と大気境界面**

大気物理学と地上表面の研究はリモセンによる地球観測と、地球が1つのシステムとして働いていることをモデル化したいという強い熱意を持った科学的な計画と共に行われている

る。観察している 2 領域の境界を定義するのは、ずっと難しくなっている。これらのモデルもまた、気球や気象観測ロケット、地上測定といった衛星搭載型でない技術によって得られた、非常にたくさんの測定を組込んでいる。

地被植物や地上利用の変化は地球システムの全体的なモデルに大きく関与する。このことは、第 9 章で説明する SPOT4 植生分布(図 9.3 参照)と POLDER のような、非常に多くのリモセン・システムが、なぜ森林生態系の生物量変化や、二酸化炭素の全般的な水準を評価するために湿地帯を観測するのに使われるのかを説明している。ランドサットの TM センサや SPOT の HRV センサは、メタン(CH<sub>4</sub>)と一酸化二窒素の放出している地域を観測するのに必要な高い解像度を備えている。地球表面と大気間境界面の研究は、Terra や Envisat のような大型多目的衛星と EO 1 のような小型衛星とを結びつけている。

**EOS AM 1 Terra.** しばしば Terra と呼ばれる AM 1 衛星は 1999 年 12 月 18 日に打上げられた(図 9.2 参照)。それは、2000 年 2 月 24 日から稼動している。5000kg 以上もの質量があり、全体もしくは部分的に地上表面観測に振向けられている 3 つの計測器を含む 5 つの計測器を持っている。中解像度画像分光放射計(MODIS: MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer)は 36 個の離散スペクトル帯において、地球表面と雲からの放射を測定する(図 9.13 参照)。その、広い視野の一区画は 2330km に渡るなので、日を追って、惑星の大部分を対象とできる(図 7.8 参照)。先進衛星搭載型熱放射・反射放射計(ASTER: Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection radiometer)は、可視から赤外まで、14 のチャンネル幅を持っており(図 9.13 参照)、チャンネルとセンサの動かせる方向にもよるが、15m~90m の分光解像度を持っている。多角画像分光放射計(MISR: Multiangle Imaging SpectroRadiometer)は、様々な雲の形状および、エアロゾル、煙群を観測し、275m から 1100m の解像度を持っている。また、9 つの異なる角度から得られる画像のおかげで、地球表面の立体画像が分かる。

**地球観測 1 号(EO 1)** EO 1 は新世紀プログラムの一部として、2000 年 12 月 21 日に打上げられた。プログラムの背景にある一般思想は、以前のものとくらべて大幅に小さい質量とエネルギー消費量である人工衛星を使用することにある。一分間のタイムラグがあったランドサット 7 号(Landsat 7)の軌道につづいて、425kg しかないこの小さな衛星は、ランドサット 7 号と同じライティング条件で同じ画像を撮るために先進地上観測装置(ALI: Advanced Land Imager)を使っている。そして EO 1 は ALI によって完全に地上を捕捉している。このセンサは次のスペクトル帯を対象としている。MS-1': 0.433-0.453 um; MS-1:

0.450-0.515  $\mu\text{m}$ ; MS-2: 0.525-0.605  $\mu\text{m}$ ; MS-3: 0.630-0.690  $\mu\text{m}$ ; MS-4: 0.775-0.805  $\mu\text{m}$ ; MS-4': 0.845-0.890  $\mu\text{m}$ ; MS-5': 1.20-1.30  $\mu\text{m}$ ; MS-5: 1.55-1.75  $\mu\text{m}$ ; MS-7: 2.08-2.35  $\mu\text{m}$ . ALI は地上分解能 30m と、地上サンプリング長(GSD) 10m を持った多色帯 0.480-0.690  $\mu\text{m}$  を持っている。もう一つの EO1 センサであるヒペリオン (Hyperion) は、ルイス衛星の超分光画像装置(HSI: HyperSpectral Imaging instrument)に使われた技術に由来しており、0.4-0.25  $\mu\text{m}$  間の 220 のスペクトル帯と、30m の解像度を持った超分光技術をテストしている。最後に、大気補正装置(AC: Atmospheric Corrector)は 0.850-1.50  $\mu\text{m}$  の幅に渡って高い分光解像度をもっているが、低空間分解能は 250m である。AC は表面画像を、主に水蒸気存在による大気ゆらぎに対して補正する。

**EOS PM Aqua.** この 3000kg 以上もある衛星に搭載されている 6 つの装置のうち 2 つは地球表面を対象とする予定である。1 つはブラジル湿度サウンダ(HSB: Humidity Sounder for Brazil)で、もう 1 つは Terra ですでに紹介した MODIS である。計画にあるブラジルの存在は、多くの国が宇宙技術をつかって各国の開発をよく管理したいという要望が増えていることを示している。

**EnviSat.** ESA の多目的極プラットフォーム計画(PPF: multimission Polar Platform project)は大規模欧州計画(ambitious European program)の一部として当初は計画されており、1985 年のコロンブス有人宇宙飛行計画に象徴される。欧州が宇宙の独立滞在の考えを諦めたとき、科学的な研究といつでも使える気象学的な目的を兼ね備えた初代極軌道地球観測ミッション(POEM 1: original Polar Orbiting Earth observation Mission)は、最終的に Envisat 1 と METOP 1 に受継がれた。Envisat 1 は 2002 年に高度 800km の太陽同期軌道(sun-synchronous orbit)に打上げられ、Envisat の名前から想像できるように、環境に関するテーマを遂行している。Envisat 1 は ERS 衛星(ERS 2 = 2610kg)よりも非常に重い質量(8140kg)を持っており、かつて使われていた重い多目的プラットフォームを支えている。10 の計測器が環境科学の基本的問題を観測するために同時に働いている。基本的問題とは、地球温暖化、天候変動、オゾン層破壊、雪氷と大洋のモニタリングである。1 つの狙いは ERS 1 と ERS 2(第 9 章 266 頁参照)によってかつて観測していたデータを継続して取得することである。ゆえに、ERS 1 と 2 に搭載された ATSR 1 と 2(航路走査放射計: Along Track Scanning Radiometer)から作られた先進航路走査放射計(AATSR: Advanced Along Track Scanning Radiometer)が測定を続けている。同じように、先進合成開口レーダ(ASAR: Advanced Synthetic Aperture Radar)(図 9.38 参照)が搭載され、ERS 衛星に搭載さ

れた AMI の機能を改善している。そのうえ、RA 2(レーダ高度計)は ERS のレーダ高度計よりもデータを拡張している。他の搭載検出器はマイクロ波放射計(MWR:MicroWave Radiometer)があり、レーダ高度計 RA 2 から得られたデータを校正するために、大気中の水蒸気濃度と雲中の水濃度を測定している。次の役割として、MWR はまた、地上湿度に関する情報も与えるだろう。以下に記述した 3 つの大気計測器に加えて、Envisat 1 のペイロードは DORIS システムによって完成される。

さらに遠い計画に、ESA の 4 つの中心ミッションの 1 つである地上表面プロセスと相互作用(Land Surface Processes and Interactions)がある。これは非常に多くの地上実験施設の助けを借りて、炭素サイクルと表面-大気間循環のような生物地理学的な現象の研究が計画されている。これは非常に複雑なミッションで、まだ完全に決定されていない。

**ALOS.** 2004 年に打上げ予定である、日本の人工衛星 ALOS のペイロードには、環境調査に重要な貢献ができるように 3 つの計測器を載せている。デジタル標高地図を描くための、立体地図用多色リモセン装置(PRISM:Panchromatic Remote-sensing Instrumen for Stereo Mapping)と、正確な地上被覆率を観測するための、先進可視近赤外放射計 2 型(AVNIR-2:Advanced Visible and Near Infrared Radiometer type2)と、昼夜及び全天候で地上観測するための位相配列型 L バンド合成開口レーダ(PAL-SAR:Phased Array type L-band Synthetic Aperture Rader)がある。PRISM は 2.5m の解像度をもち、前方、天頂方向、後方の望遠鏡を見ることで、立体画像が得られる。AVNIR-2 は 2.5m の地上解像度を持った 4 つのスペクトル帯(0.42-0.50  $\mu\text{m}$ 、0.52-0.60  $\mu\text{m}$ 、0.61-0.69  $\mu\text{m}$ 、0.76-0.89  $\mu\text{m}$ )で運用する(図 9.13 参照)。PALSAR は走査 SAR モードで、従来の SAR より広い視野が得られる。

**その他の人工衛星** 他の衛星は同じ目的で使用されている。米国の人工衛星 GRACE(164 頁参照)は、正確な重力測定を通して地上の含水量と、二次的に、含水量の季節変動を評価するために、参加している。ESA の SMOS 計画(土壌の水分と大洋の塩分濃度観測ミッション(Soil Moisture and Ocean Salinity Mission))は、L バンドの二次元干渉分光放射計を用いて同じ目的で遂行する予定である。

大洋循環は将来の GOCE 衛星のために、重要な研究対象となるだろう。GOCE 衛星とは、ESA の地球探索プログラム(重力測定の項目ですでに記述した)の 4 つの新しい主要ミッションのうちの 1 つである。ESA はまた、氷河学の領域で、GOCE と別けて極低温衛星(Cryosat)を用意しており、これは、Ku バンド帯レーダ高度計を装備した特別な衛星である。その上、

NASA は ICESat (氷雪、雲、地上の標高衛星 (Ice, Clouds and land Elevation Satellite)) を開発し、このライダーはまた、3次元で雲量を表示することができるだろう。その雲の構造と高度を測定するライダー技術は1996年-1999年にミール宇宙ステーションに搭載して試験され、仏のライダー ALISSA (Atmosphère par Lidar Sur Saliout) を使っている。ALISSA は幾分、解像度が低い。NASA の植生キャノピーライダー (VCL:Vegetation Canopy Lidar) は 植被 (plant cover) と地形を 3次元で図示するライダーを使用し、ESA は将来のミッション、宇宙水蒸気ライダー実験 (WALEX:Water vapour Lidar Experiment in Space) でライダーを使うことを計画している。

図 7.9 上層大気及び微小隕石 (流星塵) の観測衛星の傾斜、遠地点及び近地点 — 大気学パラメータにおける変動は、異なった高度からの観測により測定される。

## 大気圏

地上設備、もしくは気球に搭載した大気学研究用に設計された多くの計測器もまた、特別な衛星の一部を担っている。これらはちょうど、Nimbus、NOAA (国際海洋大気観測衛星: National Oceanographic and Atmospheric Administration)、露の Meteors のような気象衛星や、もしくはその他の衛星に搭載され、たいていは太陽同期軌道に運ばれている。それゆえ、さまざまな国家のたくさんの特別な人工衛星は上層大気圏を理解するために、35年以上に渡って貢献している。そして、これらの衛星は、むしろ多種多様な試験測定用の多数の検出器を運んでいる (図 7.9、7.10 参照)。たくさんの先駆者のなかで大気密度探索機 (ADE:Air Density Explores) Ex 9、19、24、39 は非常に軽く膨脹可能な球体で大気圏と電離圏間の接点で密度勾配を評価した。同じ事を、伊のサンマルコ衛星シリーズもしている。上層大気圏の密度、温度、圧力、化学組成は大気探索機 (AE:Aeronomy Explores) で研究されている。AE は後に大気圏探索機 (Atmosphere Explores) Ex 17、32、51、54、55 となり、最後の3機は150kmの初期近地点を持っていた。オゾン層とエアロゾルは米 AD 探索機、1964年、1967年、1971年に打上げられた英国のアリエル (Ariel) 2号、3号、4号、それから1981年に米の太陽中間圏探索機 (SME:US Solar Mesosphere Explorer) で観測された。1971年に前身のピオール衛星 (Peole) から引継いだ、仏米共同衛星オール (Eole) が、南半球の高層気流を研究するため、画期的な試みのなかで、気球ブローブを監視した。インターコスモス1号、4号、7号、11号、12号と、続くコスモス261号、262号は高層大気圏の太陽

放射の影響を並行して研究するために遂行された。

多くの観測が有人宇宙船から得られており、いくつかの試験用に機会が与えられる。たとえば、スペースラボ 1 号は画像分光分析観測装置 (ISO: Imaging Spectrometric Observatory) をつかって、上層大気の調査を行った。ISO は中間圏と熱圏を挟んで分光計測を行った。他の例では、4 回のシャトル飛行 (STS 2、41G、59、1994 年の STS 68) と共に始められた MAPS 計画 (衛星による大気汚染の測定: Measurement of Air Pollution from Satellite) がある。独の極低温分光分析器 CRISTA (大気用極低温赤外分光望遠鏡: Cryogenic Infrared Spectrometers and Telescopes for the Atmosphere) は 1994 年 (STS 66) と 1997 年 (STS 85) に無事大気ガスを分析した。CRISTA はフライト開始時に切り放された自由飛行プラットフォーム SPAS (Shuttle Pallet Satellite) から作動し、最後に回収された。

## オゾン

人工衛星と地上設備の測定を組み合わせ、平均温度の上昇と、オゾン層破壊が明らかになった。人間活動が、地球温暖化ガスとフロンガス (クロロフルオロカーボン: CFC) を放出することで、この進行の一端を担うとおもわれる。オゾン層分布とオゾン層に影響を与える因子の研究は、異なる検出波長をつかった多くの宇宙計画のもとになっている。すでに述べた AE とアリエル衛星や、1978 年 10 月に打上げられた NASA の Nimbus7 号によって行われた次の試験測定は、オゾン層の研究を含むいくつかの観測分野で、目に見える先駆的な測定である。そして、これらの測定は 1993 年 3 月まで行われた。その測定は 2 つの特別な検出器で行われた。1 つは太陽後方散乱超紫外分光放射計 (SBUV: Solar Backscat UltraViolet spectral radiometer) で、もう 1 つは全オゾン地図作製分光分析器 (TOMS: Total Ozone Mapping Spectrometer) である。これらは上層大気圏に関する相補的なデータを取得した。SBUV は、0.25-0.34  $\mu\text{m}$  間にある 12 本の狭いスペクトル帯を用いてオゾン層の垂直構造を与える。さらに、TOMS は天頂まわりで 3 つの可能な姿勢をもって、0.312-0.38  $\mu\text{m}$  間の 6 つのスペクトル帯で動作する。SBUV は NOAA 9 号、11 号、13 号、16 号に搭載され、TOMS は 1991 年から 1994 年の Meteor3 号から 5 号と、1996 年 11 月から 1997 年 7 月の ADEOS1 号 (Advance Earth Observation Satellite 図 7.11 参照)、1996 年に打上げられた TOMS 地球調査機に搭載された。TOMS は機能を限定した (TOMS) 衛星とほかの衛星 (ADEOS 2 号) に装備して用いられる予定である。これら 2 タイプの検出器によって、全地

球上のオゾン層の展開を監視することができる。

1984年から、もはや大気を通して地球表面を監視しないで、むしろ2つの衛星軌道間で太陽を2度観測する、つまり、1度は夜から昼に衛星が通過する間で、もう1度は昼から夜に通過する間に観測するタイプの検出器が出現している。例えば、成層圏エアロゾルガス試験機(SAGE:Stratospheric Aerosol and Gas Experiment)が地球放射量観測衛星(ERBS:Earth Radiation Budget Satellite)に搭載されて飛行し、将来のMeteor 3号にも装備される予定である。全世界オゾン監視試験機(GOME:Global Ozone Monitoring Experiment)は1995年に打上げられたERS 2号に搭載され、数年間に渡ってオゾン層の詳細な経歴を供給していた。それはまた、大きな森林火災が及ぼす大気への影響を研究した。最後に、GOME 2号として知られるGOMEの後継機は欧州のMETOP衛星(243頁参照)に搭載して実施される予定である。

POAM試験機(極地オゾンエアロゾル観測機:Polar Ozone and Aerosol Measurements)はSPOT衛星に搭載して実施されており、POAM 3号はSPOT 4号に搭載され、現在、動作中である。この試験機は地球の極上の高度10km~40kmの大気圏を通して通過する太陽放射の減少量を測定する。測定は衛星の各軌道間で2度行われる。1度目は夜から昼にかけて、2度目は夜から昼にかけてである。その結果、水、オゾン、二酸化窒素やその他の物質と言った大気成分の季節変動と長期変動を監視することができる。太陽でなくて星を監視するGOMOS検出器はEnvisat(既述)に搭載され、大気の垂直構造を研究する。最後に、2004年の伊Triana衛星計画は、EPIC分光分析器(地球多色画像カメラ:Earth Polychromatic Imaging Camera)を使って大気圏のオゾンと全地球放射量を研究するために、第一ラグランジュ点に投入される予定である。

### **地球放射量**

ここでの目的は、地球から反射(とくに雲と雪によって)される放射で可視紫外域の太陽放射と、大気圏のIR-TIR放射を比較することにある。ERBE放射計(地球放射量試験機:Earth Radiation Budget Experiment)が地球放射量観測衛星(ERBS:Earth Radiation Budget Satellite)とNOAA 9号と10号に搭載して、同時に作動している。地球表面と大気圏上限の放射量を測定する二つの走査放射計から構成される、米の雲地球放射エネルギーセンサー(CERES:Cloud and Earth Radiant Energy Sensor)がTRMM衛星とTerraにある。さらに、将来のAquaにも装備される予定である。最後に、仏のSCARAB検出器(放射量走査計:SCAnner

for RAdiation Budget)が Meteor 3-06号(1994年)と、Resurs 3M-01号に搭載して使用される以前に Resurs 01-04号(1998年)に搭載され飛行している。

1984年に衛星 ERBSは走査計と非走査計を含む8つの放射計をもち、平行した南北57°線の間で地球放射量を明らかにし始めた。その SAGE センサは上層大気圏の最初の化学的分析を成功した。1990年2月から、その計測器は非走査モードだけで動作している。

1991年9月に打上げられた、上層大気圏調査衛星(UARS:Upper Atmosphere Research Satellite)は惑星地球ミッション(MTPE:Mission To Planet Earth)の最初の衛星である。UARSは10の計測器を持っている。うち4つは太陽からのエネルギー入力量を測定し、3つは上層大気の構造と変動を記録して、温度特性とオゾン、メタン、水蒸気含有量を明らかにする。1つはフロン(CFC)と他の重要物質を追跡する検出器で、最後の2つは高解像度ドップラ観測器(HRDI:High Resolution Doppler Imager)と、上層大気の気流を図示する気流観測干渉計(WIND II:Wind Imaging Interferometer)

日米共同の熱帯降雨測定計画(TRMM:Tropical Rainfall Measuring Mission)は平行する南北35°線に挟まれた領域で降雨量を測定する。TRMMは比較的低い軌道(高度350km)を狙っており、太陽同期ではないので、現地時間の範囲で通過することができる。TRMMには5つの計測器が搭載されている。もっとも画期的なのは降雨量レーダ(PR:Precipitation Radar)である。これは、雲系のレーダ反射率と、降水域を通ることで信号が弱くなることによって降雨量の垂直分布を測定する(図7.12参照)。TRMMマイクロ波画像装置(TMI:TRMM Microwave Imager)と可視赤外走査計(VIRS:Visible and InfraRed Scanner)によって、衛星の降雨量測定システムが完成される。TRMMは雷光画像センサ(LIS:Lightning Imaging Sensor)と CERES 試験機(雲地球放射エネルギーセンサ:Cloud and Earth Radiant Energy Sensor)も持っている。TRMMのデータはエルニーニョとして知られる現象と降雨量との関係の評価するために使われる予定である。これは、米大陸付近の太平洋赤道域で生じる現象で、高度測定衛星(たとえば TOPEX-POSEIDON、ERS 1号、2号や RA 2を搭載した Envisat)によって観測された海面上昇や、赤外サーモグラフィ(たとえば Envisat 1号に搭載した AATSR)によって測定された温度上昇を通して明らかになった。

EOS AM-1 Terraには、大気観測を目的とした3つの計測器がある。MOPITT 実験装置(Measurements OF Pollution In The Troposphere:対流圏の汚染を測定)は22kmの分解能で低層大気圏のメタンと一酸化炭素濃度を測定する。MOPITT 実験装置は二酸化炭素や水蒸気といった他のガスと、対象のガスを区別することができる。これらの測定は温室効果の

原因を理解するのに大きく貢献する。MISR(Multiangle Imaging SpectroRadiometer)は分解能 275m~1100m で、地球表面を立体的に、また、様々な雲の形状や、エアロゾル、雲煙をも観測する。そして、9つの異なる視線に沿って画像を取得する。最後に、CERES(既述)は地球の放射量を測定する(上記参照)。

EOS PM Aqua に搭載の 6 つの計測器のうち、4 つは大気圏を対象としている。AIRS(Atmospheric InfraRed Sounder)、AMSR-E(Advanced Microwave Scanning Radiometer-EOS)、AMSU-A(Advanced Microwave Sounding Unit)、と既述の CERES である。

大気観測向けの Envisat 計測器は、ある高度幅毎の大気組成を測定する。GOMOS 計測器(Global Ozone Monitoring by Occultation of Star)は、高度 100km までの大気圏の断面に渡って、オゾン、NO<sub>2</sub>、NO<sub>3</sub>、水蒸気含有量を測定する。GOMOS は垂直分解能が 1.7km 以上で、昼夜問わず、動作する。SCIAMACHY(Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Cartography)と MIPAS(Michelson Interferometry Passive Atmospheric Sounder)もまた、大気の成分を詳しく調べる。(図 7.13 参照)

重量が 3 トンある米の人工衛星、EOS Chem はオゾンとエアロゾルを測定するためと、高度 30km 以下の大気化学と動的現象を広く研究するために設計された。2002 年の計画では、その中心の計測器は HIRDLS(High Resolution Dynamics Limb Sounder)、MLS(Microwave Limb Sounder)、TES(Tropospheric Emission Spectrometer)、OMI(Ozone Monitoring Instrument)である。ESA もまた、将来の中核ミッションの 1 つとして、大気化学探索衛星(ACE: Atmospheric Chemistry Explorer)という、似たような型のミッションを考えている。

大気ダイナミクス・ミッション(ADM: Atmospheric Dynamics Mission)は ESA の 4 つの中核ミッションのもう 1 つであり、2005 年に計画されている。ADM は 20 の異なる大気水準で、気流活動を直接、全世界的に観測するために、高度 400km の太陽中心軌道の上にドップラ風ライダを運ぶ予定である。ESA 中核ミッションの最後は地球放射ミッション(ERM: Earth Radiation Mission)であり、水、氷と、雲によって運ばれるこれらの垂直分布だけではなく、大気と、エアロゾル・雲放射の相互作用における、放射エネルギーの発散を研究するはずである。

いくつかの小型人工衛星もまた、大気理解に貢献する。SNOE 小型衛星(Student Nitric Oxide Explorer)は 1998 年 2 月から低層大気圏の一酸化窒素(NO)濃度の変動を調査している。他の小型衛星では、ACRIMSat が EOS ACRIM 3 計測器による測定と、最初の 4 つの UARS センサからデータを補完するために、1999 年 12 月に打上げられた。1999 年 6 月に NASA

によって打上げられた Quikscat は海洋表面の風を地図化するために設計された海風散乱計測器を運んでいる(図 9.35 参照)。同じ計測器はまた、ADEOS 2 号にも搭載される予定である。

米の Cloudsat、仏の Parasol、欧州の PRANUA-ATLASS 計画はエアロゾル・雲放射の相互作用の理解を高めるために設計された、小型と中型サイズの人工衛星を用いる予定である。EOS PM と Cloudsat と関係して飛行する予定の仏米の人工衛星 Calipso(以前は Picasso-Cena)と、NASAとコロラド大学の SORCE (more complex Solar Radiation and Climate Experiment)が同じ目的を持つ予定であり、それぞれ 4 つの計測器を運ぶ。最後に、欧州のオーデー計画の中心ミッションが天文学であるにも関わらず、そのサブミリの観測能力はまた、オゾン層破壊のメカニズム解明にも使われる予定である。

TSS(Tethered Satellite System)に導入される上層大気の調査のための新しい技術について言及する必要がある。米伊の計画で、その人工衛星はスペースシャトルの下に展開され、長いケーブルによって結びつけられている。最初の TSS フライトである TSS 1 は、約 20km のケーブルと共に、地球の磁力線を通ると、ケーブルに電流が生じることを証明する目的があった。それから、ケーブルの長さに沿って、固定された数多くのプローブを使い、そして、地球表面の 100km もしくは数 100km くらい上空から異なる高度で同時に測定することが考えられた。この技術を使えば、大気制動が実験の存続時間を厳しく制限するような高度で軌道周回することを可能とするはずであり、もし、より高い高度で引きつけているもう 1 体の存在がなかったら、有効的に観測を続けるのは不可能である。他の応用では、上層大気圏の研究から離れて、次の数十日間にわたって 1 日の日射量を予測できるらしい。しかし、その操作に関連するもっとも技術的に難しいこととは、1992 年の STS 46 の飛行中、256m のケーブルを展開することしかできなかったことを指している。その試験は 1996 年に STS 75 の飛行から 2 回目が試みられたが、ケーブルは正しく展開するのに、またしても失敗した。

### **電離圏と磁気圏**

ラジオ測深の結果として、地球は電離した環境を持っていることが、20 世紀初頭から知られるようになった。しかし、地上から放出された電波は電離圏の反射ピークまでの 300km あたりで遮られる。その層は最大の電子密度を持っている。高度 300km 以上の地球環境を観測する唯一の方法は、サウンディング・ロケットと人工衛星だけである(図 7.14 参照)。

非常に初期の人工衛星(スプートニクとエクスポローラ)はバンアレン帯を発見、研究した。後の観測で、電離圏のプラズマとプラズマ波の組成、極地オーロラ、太陽と宇宙放射の相互作用などに焦点があてられた。中心の計画は1960年代から大多数のエクスポローラ衛星(エクスポローラ8号、20号、22号、27号)、特に4機の電離圏探索衛星、カナダのアルーエット衛星とイシス衛星、ソ連のプロトン衛星、インターコスモス衛星(社会主義国間の科学的提携)、日本とISASと欧州のESROの科学調査衛星シリーズ(イリス衛星、オーロラ衛星、ポリアス衛星、ESRO4)によって実施されている。国際的には欧州各国がこの場に限られた滞在をしており、英のアリエル衛星、仏のFR1、独のアズールとアエロス衛星シリーズ、スペインのインタサット衛星、スウェーデンのヴァイキング衛星である(図7.15参照)。

磁気圏について、現在のほとんど全ての知識は人工衛星によって得られたものである。プラズマ圏の組成と電磁放射線だけではなく、磁気圏と太陽風の相互作用、磁力線の分布も、主要観測対象である。たとえば、NASAのIMP(Intersplanetary Monitoring Platforms)、NASA-ESA共同のISEE(International Sun-Earth Explorers)、ソ連のプログノーズ・シリーズである。低層磁気圏は、対になった衛星を展開した露のエレクトロン・シリーズと、米のDE(Dynamics Explorer)シリーズだけではなく、異なる傾斜を持った軌道で6つの人工衛星を展開しているOGO(Orbital Geophysical Observatories)によって調査されており、これは磁気圏における現象を研究するのに非常に重要な空間非定常変動を測定するために、異なる高度に同時に打上げられた。

磁極の分裂は、たくさんの磁気圏観測衛星で研究されている。たとえば、IPM7、OGO、DE、HEOS2(Highly Eccentric Orbit Satellite)、ARCAD計画(ARctic Auroral Density)に貢献している3機のオーレオール衛星、2機のインターコスモス衛星とヴァイキング衛星であり、また、極地オーロラを観測している電離圏観測衛星もそうである。AMPTE計画(Active Magnetospheric Particle Tracer Explorers)に関する衛星は、一斉に打上げられ、磁気圏中と、太陽風中にリチウムやバリウム雲を放出し、これらの流れを観測する(図7.16、図7.17参照)。

最初の試験的段階では、地球環境を作りあげる主システムを明らかにした。これらは、大規模セルの並列配置として現れる。これは大部分は太陽でそのほかは、銀河成分に起因する惑星間媒体、磁気圏尾部とオーロラ圏からなる磁気圏、電離圏と高層大気圏からなる(図1.5参照)。これらは臨界領域(結合が支配的)がここで発生する微視的な乱流プロセス

を介して、重要な役割を演じており、相対的に薄い境界面で接触している。中心の臨界領域は弧状衝撃波、磁気圏界面、プラズマ圏との境界層、磁場の小嵐が太陽フレア間で発生する磁気圏尾部の境界層と、オーロラの加速領域である。

中心となる結合領域は、連続太陽風-散発的コロナ大量放出 (CMEs) と磁気圏系によって支配される領域と、磁気圏プラズマとオーロラ電離圏の間(もしくは連続太陽風-CME とオーロラ電離圏の間)と、電離圏と高層大気圏の間に位置している。これら媒体の一般的な動的現象の確立している気象モデルは二つの必要条件がある。1つ目は、臨界領域の結合を詳細に一致させること、2つ目は太陽活動を頻繁に、そして迅速に観測することである。最初の条件は、巨視的リモセン観測と、そのままで行われる同調した微視的測定、重合せる必要があり、もっとも良いのは人工衛星群を用いた計画である。2つ目の必要条件は、太陽観測によって達成される、もしくは達成されるだろう。

これらの検討材料は 1977 年に太陽地球物理協議会 (IASTP: InterAgency Solar Terrestrial Physics)として知られる国際プログラムの発足をもたらした。IASTP は ESA、NASA、ISAS と IKI および、16 カ国にわたる 100 以上の大学と研究センタを団結させている。IASTP は 1992 年まで、その計画の中で、打上げた事はなかった。これは日本の人工衛星 Geotail で、日本のミッション Exos D(あけぼの)と、Muses A(ひてん)により用意された。Geotail は磁気圏尾部のエネルギー流を詳細に調査した。これに続いて、1994 年に NASA の Wind 衛星(太陽風の調査)、1995 年に ESA の SOHO 衛星(太陽観測)、1996 年に NASA の Polar 衛星(オーロラ領域の調査)が打上げられた。クラスタ衛星群は 1996 年に打上を計画された。その目的は宇宙のある 1 点で集められたデータを解明するのにかかわる困難を克服することである。衛星 4 機からなる 1 つのグループは、遠地点が 119,000km で近地点が 19,000km の高度偏心地心軌道上で四面体の頂点に配置して展開されようとしていた。それから、これらの測定は太陽活動の SOHO 観測と相互に関連付けられていただろう。不幸なことに、これらの衛星は最初の打上げのとき、アリアン 5 とともに破壊された。しかし、新しいクラスタ実験が 1997 年 4 月に決定し、2000 年の 7 月と 8 月に、4 つの衛星、Salsa 衛星、Samba 衛星、Rumba 衛星、Tango 衛星が無事、打上げられた。

IASTP プログラムに並行して、スウェーデンは Freja 衛星(1992)、Astrid 1 衛星(1995)、Astrid 2 衛星(1998)を用いて極領域の研究を専門にしていた。露と共同で 20 カ国が参加する、国際プログラム Interbol は、1995 年に、チェコの小型衛星 Magion 4 衛星とともに、Interbol 1 衛星を打上げた。これは磁気圏を詳細に調査した。これに続いて、1996 年にオ

ーロラ領域を研究する Interbol 2 衛星と Magion 5 衛星が打上げられた。米の小型探索衛星 SAMPEX (Solar Anomalous and Magnetospheric Particle Explorer) と FAST (Fast Auroral Snapshot explorer) はそれぞれ、1992 年と 1996 年に展開された。SAMPEX は外宇宙の粒子を詳細に調査し、FAST は高空間時間解像度でオーロラ領域を調査する。米独共同衛星 Equator S (1997 年) は赤道領域からのデータで IASTP プログラムの磁気圏観測を補完し、そのうえ、インドの衛星 SROSS C2 (1992) が熱圏-上層大気圏を調査し、ブラジルの SACL 1 (1999) はブラジルと南大西洋のプラズマ球と電離圏の異常を調査した。NASA によって 2000 年 3 月に打上げられた IMAGE 衛星 (Imager for Magnetopause-to-Aurora Global Exploration) は、エネルギーを持った中性原子 (ENA) と地球コロナを観測する一対の画像装置で、磁気圏のイオンと電子を一時離散的にそのまま観測する方法に置き換わる最初の観測衛星であり、ゆえに、IMAGE はこれらプラズマを高速に全世界的な観測画像として提供することができる。IMAGE は地球コロナ中の低温中性水素と部分的にエネルギーを帯びたイオン間の電荷交換から生じる ENA のエネルギーを観測する。

米の TIMED 計画 (Thermosphere, Ionosphere Mesosphere Energetics and Dynamics mission) の他には、IASTP が人工衛星群計画によってさらに追加されるはずである。クラスター2の後に、欧州は IBIZA 衛星 (Investigation Bisatellitaire des Zones Aurorales) を打上げるはずである。一対の機動的な人工衛星は、その電場と磁場のはっきりした構造を追求するために、非常に詳細に磁気圏-電離圏境界面の限られた領域を探索する予定である。それはまた、荷電粒子が加速するプロセスを理解するための試みでもあり、関連した電磁放射を測定する予定である。やや遅れて、クアトロ・プロジェクトが、磁気小嵐を形成しているとみられる領域において、人工衛星 4 機のうち衛星 2 機を関与する予定である。そしてさらに、IMAGStereo が同じ領域に 2 つの画像小型衛星を送る予定でいる。米のプロジェクトは磁気圏マルチスケール・プロジェクト (6 つの衛星、プラズマ境界層)、磁気圏コンステレーション・プロジェクト (数 10 個の微小衛星、磁気圏のダイナミクス)、全世界電気ダイナミクス・プロジェクト (衛星 2 機、外宇宙と磁気圏の境界面と、外宇宙と大気圏の境界面) がある。IMAGE に使用されたものと同じ一対の画像観測装置が、TWINS ミッション (Two Wide-angle Imaging Neutral-atom Spectrometers) を通して、コンセントレーションの 1 部として動作するはずである。TWINS ミッションでは、2 つの米の衛星 (おそらく軍事衛星) に搭載され、モルニア軌道に打上げられる。2001 年に打上げられるもう 1 つの人工衛星の TIMED 衛星もまた、上層大気圏と電離圏間の接合部分を詳細に調査するため

にリモセンを使用する予定である。

地球環境をよく理解することは軍の宇宙活用にとっても重要である。しばしば、異なる国々からの機器を含むような民間プログラムと並行して、軍のプログラムはもっと明快に、固有の必要性を満足するように同調されている。それは、さまざまな層とその中で生じる摂動や、赤外線認証の識別やその他の原因と知られている、自然、もしくは人工的な起源による放射線による衛星の防護といったものである。

米では、相当な数の軍の科学的計画が、1970年代初頭まで存在しており、それは媒体（宇宙）の最初の観測として扱われている。それは Discoverer シリーズから始まり、当初は、回収可能なカプセル技術を開発するために上げられた。Discoverer 17号から、電離圏、放射帯、宇宙放射線、地球からの赤外放射線に関するデータが取得された。後の ERS シリーズ（Environmental Research Satellites）と OV シリーズ（Orbiting Vehicles）が自然放射線の機構的、電氣的、電子的、生物学的な因果関係を研究した。1965年と1971年の間に、X線、磁気に関するものだけでなく、電離圏中のイオン、プロトン、電子に関する非常に多くのデータが集められた。Calsphere シリーズは上層大気圏の密度と、大気制動を研究した。Loft 1号、2号、P11 AS、Orbis、Radsat、P75-5、Solwind、Polar Bear といった、遠距離通信研究衛星はさまざまな波長の放射線を研究し、LOGACS 1号は上層大気圏を、SCATHA は太陽風と衛星上の粒子の影響を研究した。米海軍の Solrad シリーズは NASA の 3つの Solrad 衛星を補った。もっと最近の環境衛星は 1997年に上げられた FORTE と STEP4号である。STEP4号はオゾンの影響と、電離圏と磁気圏のイオン流束に関する3つの実験装置を持っていたが、ソーラパネルが展開できなかった。技術衛星 ARGOS (1999) は、ほかの実験装置と一緒に、プラズマ圏と磁気嵐を観測する実験装置をもっていた。

加えて、様々な作戦上の任務を遂行する軍の衛星シリーズは、上層大気圏と極地のオーロラ（DMSP 衛星、第9章参照）、太陽と銀河系の放射線（VELA シリーズ）、地球の赤外放射線（MIDAS シリーズ）に関するデータが集められた。このデータのいくつかは、科学団体に利用できるようになっている。スターフィッシュ実験は、電離圏と上層大気圏中の自然放射線に関して、高高度核爆発の影響を試験するように設計されていた。そして、いくつかの衛星に損害を与えた。NASA の Explorer 15号（1962年）、ソ連の Kosmos 5号（1962年）と同じように、Starad 衛星（USAF、1962年）、Injun 3号（USN、1962年）、Hitchhiker（USAF、1963年）もそのデータを収集した。

ソ連において、明確に軍事上の使命とミッションを同一視することは難しい。なぜなら、

民間と軍隊の宇宙活用が融合する傾向にあるからである。宇宙活用の必要性が大体同じなので、似たようなミッションは疑いなく、区別できない状態のまま Kosmos 衛星によって遂行された。それから、科学の学術団体が、普及して認められた結果を取扱っていた。

### **微小隕石の研究**

非常に多くの科学衛星と、すべての宇宙探査機は微小隕石の計測器、もしくは検出器を備えていた。しかし、米の衛星 8 機を含む 9 機だけが、微小隕石の研究だけを実行した（図 7.9、図 7.10 参照）。LDEF（Long Duration Exposure Facility: 長期宇宙環境暴露試験施設）は 11 回のスペースシャトルの打上げによって 1984 年に建造され、1990 年の 1 月に 32 回目の打上げの間、運用された。LDEF は様々な物質を微小隕石と放射線に暴露することに関する、技術的実験を中心に行った。いくつかの実験は機密扱いであるが、その結果のほとんどは、国際的に入手可能である。

独の衛星 Bremsat は、1994 年 2 月にシャトルで打上げられた。対象は地球周辺宇宙の宇宙塵の観測と、微小隕石の数を見積ることであり、人為的な汚染の研究に関して、特別な注意を払うことにある。Bremsat が 1995 年 2 月に地球に落下した時、高度 60km で破壊される前の、高度 110km に至るまでのデータを集めた。

**図 7.10 上層大気及び微小隕石観測衛星の年代記** — 多くの地球観測と気象衛星は、それらが集める画像を通して大気物理学及び陸の表面の研究、また非結像センサ（検出器）を使って得られた測定を通すほとんどのケースに関わっている。これらの衛星は、図 7.16 及び 9.20 に示される。

**図 7.11 1997 年 4 月、北半球のオゾン分布調査** — 地図は ADEOS1 衛星からのデータを使って設立された。NASDA—NASA 提供。

**図 7.12 1 日当たり mm の毎日の降雨の毎月の平均** — 1998 年、1999 年、2000 年の 1 月と 7 月の月の TRMM 衛星からのデータを使って設立された。NASDA—NASA 提供。

**図 7.13 Envisat1 に搭載の GOMOS、MIPAS 及び SCIAMACHY センサにより行われた測定の異なる高度幅** （ESA のデータに基づく）

#### 図 7.14 電離圏及び放射帯観測衛星の傾斜、遠地点及び近地点

#### 図 7.15 電離圏観測衛星の年代記

図 7.16 磁気圏観測衛星の傾斜、遠地点及び近地点 — この衛星は、通常、高度の遠地点を持つ。磁極の分裂または低磁気圏を観測する衛星は例外である。傾斜は、磁極の分裂の研究のため 90 度、露基地 Plesetsk から打上げられる衛星のための 61–65 度、そして日米の基地の高度に対応する 28–34 度の、即ち 3 つの値に集中される。欧州宇宙局 (ESA) は、静止地球軌道衛星 (GEOS) に静止軌道を上げることを選択した。しかしながら、ロケット第 3 段で失敗し、GEOS1 は遷移軌道に残された。実際のところ、そのような測定に関する限りでは、傾斜は最も重要な軌道の要素ではない。むしろ、磁気圏の空間構造について考慮することが目的である。

#### 図 7.17 磁気圏観測衛星の年代記

### 07.4 天体観測

一部の解説者のうち冒頭の懐疑主義者はさておき、宇宙技術が非常に進歩してしまったのは天文学である。たしかに、人工衛星により大気圏によって部分的、もしくは全体的に遮断してしまう波長を観測することが可能となった。それは  $\gamma$  線、X 線、紫外線や赤外線である。これらの同じ技術はまた、大気の窓を通して以前実行された観測を改善した。たとえば、光度の増大と蛍光現象の除去である。放射天文学において、干渉分光法の基準線を広げることができた。

人工衛星天文学の初期に際立った短い実験に続き、最近のプログラムは天空の広範囲で、長いミッションを必要とする傾向にあり、10 年~20 年間継続される(図 7.18、7.19 参照)。これらはよりいっそう、高感度検出器を必要とし、これは、外側のすべての干渉源を排除でき、より正確な位置決めと、高安定性を持っている。後者は一般的に有人宇宙船に搭載して実現するのは難しいが、それでもなお、天体と太陽の観測はこのような宇宙船から行

われている。なぜなら、これらは人工衛星より安定せず、安定した位置を得るのが難しいこと以外に、隣の実験から干渉を受けやすいことがある。さらに、スペース・ステーションで永続的に行われる場合を除いて、一般的に人間の任務はある程度限られている。天体観測は Salyut1 号、3 号、4 号、5 号、6 号、7 号、Skylab、Soyuz13 号、ASTP、STS-51F (Spacelab2 号)、ミール (Kvant モジュール) で行われたミッションで重要な要素を構成していた。Astro1 号のミッション (紫外線と X 線による観測) は STS35 号によって行われた。それは、ダークマターと反物質を追跡するために、シャトルもしくは ISS (国際スペース・ステーション) 上に  $\alpha$  磁気分光計 (AMS ミッション) を導入するために計画された。

### 太陽系の観測

太陽は地球に最も近い恒星で、ゆえに天体観測にとってもっとも興味がある。同時に、地球環境状態に直接的に影響を与える。実際、それは地球上の重要なエネルギー源である。それゆえ、太陽の放射線と磁気の研究は地球の磁気圏の構造を理解するのに重要な因子である。

今日、太陽観測は、磁場とドップラ・フィゾー効果の測定と一緒に、異なる波長域に渡って、連続的に長期間の観測を必要としている。継続的な軌道間で、人工衛星は地球からの観測よりも、ゆっくり時間をかけてより広い範囲を提供する。人工衛星は重要な太陽の事象により計画されるはずである。例えば 1980 年の SMM (Solar Maximum Mission: 太陽観測衛星) がそれに当てはまる。

ESA が 1984 年に宇宙科学プログラムを最初に確立したとき、STP (Solar Terrestrial Physics Programme: 太陽地球物理プログラム) が想定された最初の礎のひとつであった。これは SOHO とクラスタ・ミッションを含んでいた。SOHO (SOlar and Heliospheric Observatory) は 1995 年 12 月に打上げられ、2 ヶ月半後に、ラグランジュ点 1 に展開された。それは太陽観測のうち、もっとも包括的なものである。SOHO の実験 12 のうち、3 つは太陽地震学に専念している。: GOLF (Global Oscillation at Low Frequencies) は半径方向と、正接方向の振動を研究し、MDI/SOI (Michelson Doppler Image / Solar Oscillations Investigation) は対流域の構造を、VIRGO (Variability of Solar Irradiance and Gravity Oscillations) は太陽風の振動を観測する。他の 6 つは太陽大気圏のリモセンにもちいられ、残り 3 つはその場で分析を実行する。これらは磁気と磁気再結合現象を研究する EIT (Extreme ultra violet Imaging Telescope)、CDS (Coronal Diagnostic Spectrometer)、

UVCS (Ultra Violet Coronagraph Spectrometer)、LASCO (Large Angle and Spectrometric Coronagraph、図 7. 20 参照)、SUMER (Solar Ultraviolet Measurements of Emitted Radiation) があり、太陽風と高エネルギー粒子の放射の研究を SWAN (Solar Wind ANisotropies)、CELIAS (Charge, Element and Isotope Analysis System)、ERNE (Energetic and Relativistic Nuclei and Electron Experiment)、COSTEP (COmprehensive SupraThermal and Energetic Particle analyser) を用いて行っている。

1994 年 11 月に打上げられた Wind は、一連の高楕円軌道から近地球域における太陽風とプラズマを観測することによって始まった。Wind がラグランジュ点 1 に到達し、本当の太陽観測になったのは 1996 年 11 月だけであった。Wind には  $\gamma$  線、高エネルギー粒子検出器を含む 8 つの観測機器を持っていた。Ulysses は磁気と太陽風の測定を高太陽高度まで広げた (図 8. 8 参照) ACE (Advanced Composition Explorer) は最後の巨大探査機プロジェクトである。1997 年の 8 月にラグランジュ点 1 に向けて打上げられ、太陽と宇宙放射線観測用に設計された 8 つの観測装置と、磁気計、リアルタイム太陽風モニタからなる装置 10 個を搭載している。最後に、日本の人工衛星 Yohkoh (ようこう : 1991 年 8 月) とアルゼンチンの人工衛星 SAC-A (1998 年 12 月) は X 線望遠鏡を搭載して打上げられ、さらに、正確な UV と EUV の望遠鏡が装備された小さな探査機である TRACE (Transition Refion And Coronal Explorer) が、1998 年の 4 月に打上げられた。

2000 年初めに、人工衛星の太陽物理実験が陽光 (Solar A)、Coronas I 号、SOHO、Wind、Ulysses、ACE、TRACE、SAC-A によって実施された。自由飛行で回収できる SPARTAN201 号プラットフォームは、UV と白色光でコロナを短期間観測するために、スペースシャトルから定期的に展開される。他に予定されているプロジェクトは ISAS による Solar B (可視と X 線における正確で広範囲の観測)、CNES からの Picard マイクロ衛星 (太陽の直径の変化を正確に測定、太陽定数を評価するための異なる放射計、UV 光度計)、小型探査機 HESSI (High Energy Solar Spectroscopic Imager) がある。この HESSI は太陽フレア中に放出される爆発エネルギーを研究するために  $-198^{\circ}\text{C}$  に冷却された X 線と  $\gamma$  線の画像装置と分光計を持っている。そして、なによりも、NASA の STEREO (Solar TERrestrial Relation Oservatory) がある。

地球の前方・後方で数 10 度の角度にある太陽中心軌道を周回している人工衛星 2 機は 3 次元で観測するだろう。特に、この衛星は、X 線と紫外線のイメージ分光分析、可視光のコロナグラフ、無線方位測定器 (無線角度計) を使い、コロナ大量放出 (CMEs) と追従す

る惑星間の力線を観測する予定である。最後に、太陽探査機は観測研究に必要不可欠な存在となり、それゆえ、1974年～76年に独のヘリオス探査機シリーズが行った観測が、20年以上もたって、再開された。JPL/NASAからの最近のプロジェクトは、2008年から10年頃に、3つの太陽半径のうち最小距離に、何回か太陽の高緯度に、測測定器と画像装置を搭載した単一機を接近させるという計画をしている。

太陽は別として、太陽系にあるほかの対象は地球中心軌道から行われる観測によって恩恵を受けていた。これは、ハッブル宇宙望遠鏡によって実施される多くの月と惑星の観測の場合で、ハッブル宇宙望遠鏡は太陽系を越えた宇宙の研究も行っている。

### **太陽系を越えた観測**

■ 天文測定学はできるだけ正確に、天体の位置を測定しようと努めており、宇宙の起源の研究を基本としている。それはポスト・ニュートン変数 $\gamma$ の実験的な判定を向上するために用いられ、これらの改良は将来を疑いなく進歩させるだろう。1989年に打上げられた衛星HipparcosはHigh Precision PARAllel COllecting Satelliteの頭文字に由来しており、最初に正確な星図を確立したギリシャの天文学者を賞賛して名づけられた。しかし、アポジ・キックモータの故障のため、地球静止軌道に達することができなかったが、それでも、離心軌道でそのミッションを遂行した。1989年から1993年に120,000個の星の位置座標と固有運動の成分を確立した。他の宇宙望遠鏡、中層探査機FAME (Full sky Astrometric Mapping Explorer) とDIVA (Deutsches Interferometr fu'r Vielkanalphotometry und Astrometry) が2004年にNASAと独のDLRによって打上げられるはずである。これらは、お互いにHipparcosよりもはるかに多い4000万近くの星の位置と明るさを位置を決めることができるはずである。

2012年にESAが計画しているGaiaは10億以上の星に対しカラー光度測定を向上する予定である。この数はわれわれの銀河中の非常に広範囲にわたり、大マゼラン雲、小マゼラン雲まで達するものである。マゼラン雲中の銀河系外ケフェウス型変光星の正確な観測は宇宙の測定を語るのに非常に重要である。これは変化する周期が、その絶対強度に比例し、その距離を見かけの強度と比較することで見積もることができる変光星群である。

■ 電波天文学は電波銀河、活動銀河核 (AGNs) からのジェット噴流、超新星残骸などの構造を研究するのに使われる。1997年3月に打上げられた。日本の衛星はるか HALCA (High Altitude Laboratory for Communications and Astrophysics) は、Muses B もしくは VSOP

のように、そのプロジェクトの各段階でわかっているのだが、望遠鏡ネットワークを形成するために地上アンテナと軌道上の電波望遠鏡を対にして実現可能かをテスト予定である。

■ COBE (Cosmic Background Explorer) は原始のビッグバンからずっと残されている化石として解釈されている 2.7K 背景輻射を研究するためにミリメートルの波長を観測する。それは NASA の MIDEX マイクロ波異方性探査機 MAP (Microwave Anisotropy Probe) と欧州の衛星 Planck によって成功されるはずである。

■ サブミリメートルの波長は水と酸素分子により吸収される。それゆえ、深い星間雲に存在するこれらの分子の存在度を測定するのに用いられ、これは 15K~30K の輻射に対応する。引力の作用のためこれらが圧縮される時、熱が生じ、さらなる圧縮に対抗する傾向のある熱圧力を起こす。これは分子雲中で星を形成する間、この熱エネルギーに浪費している中で、水と酸素が重要な役割を演じていると考えられている。1998 年 12 月に打上げられた小型衛星 SWAS は、これら水と酸素分子、および銀河中の関連物質を探出す予定である。SWAS は Odin ミニ衛星に引継がれ、この衛星は仏、フィンランド、カナダの協力を得てスウェーデンが運用するはずである。Odin は 0.5mm 付近の 3 つのスペクトル帯と、もうひとつ 3mm 帯センサを搭載する予定である。惑星大気と、いくつかの彗星によって放出されるガスもまた研究されている。2007 年に向けて、2000 年 12 月に Herschel 宇宙観測衛星と名前を変更した FIRST 衛星 (Far InfraRed and Submillimetre Telescope) は ESA の礎石の一つであるが、NASA の参加も含んでいる。この衛星は赤外線と 80~670um 間のサブミリ帯を扱う予定である。その中心ミッションは銀河と若い分子雲 (十億歳以下) を研究することになるだろう。

■ 宇宙からの赤外線観測だけは大気の障壁と環境放射の干渉を乗り越えることができる。望遠鏡は衛星自身からの干渉輻射を減らすために、数ケルビンまで冷却される。赤外線観測は星と銀河の誕生とこれらの進化における初期段階を観測するのによい方法を与える。次の赤外線観測は 2 つの探査機によって行われ、英一蘭一米の IRAS (InfraRed Astronomy Satellite) は 12、25、60、100um の 4 バンドの検出器を備えている。その衛星のむしろ乏しい角度分解能にもかかわらず、全天の測定は早く、1983 年に宇宙の赤外線発生源 250,000 個を特定した。それはまた、彗星 5 つを発見した。その成功者は ESA の ISO (Infrared Space Observatory) である。これは -270°C の液体ヘリウムで望遠鏡を冷やすクライオスタットを持っており、ゆっくり蒸発し、宇宙に放出された。これは 2.5um~200um 間の赤外線を測定した。1995 年~1998 年の間、IRAS によって、さらに優れた高い分光解像度を持って、全

天よりも特定の選択された領域が観測された。1999年3月に打上げられた小型探索機 WIRE (Widefield InfraRed Explorer) は操作に失敗した。ISO は SIRTf (Space Infrared Telescope Facility)、IRAS よりも千倍感度の高い NASA の GO (Great Observatory)、そしてすでに言及した FIRST によって成功するはずである。この部分で日本は 2003 年ごろに赤外イメージ探査機 (IRIS もしくは ASTRO F) を打上げる計画がある。その 2 つの装置、FIS 露出計 (Far Infrared Surveyor) と 3 チャンネルカメラ IRC (InfraRed Camera、2~25 $\mu$ m) は液体窒素で 6K に冷やされるが、2 番目は冷却なしに動作予定である。

他のプロジェクトは NASA の TPF (Terrestrial Planet finder) と ESA の Darwin であり、衛星搭載型の赤外干渉計を使って、太陽系外を直接検出するための設計がなされている。

■ 可視-近赤外の波長範囲は地上の天文学設備にとって利用しやすい。宇宙では NASA のハッブル宇宙望遠鏡 (HST) に代表され、これは ESA の協力を得ている。HST は天文学にとって宇宙のもっとも高名な貢献と表現されるだろう。しかし、多くの困難にも遭遇している。1972 年に研究は始まった。この非常に大きな望遠鏡は 1/24 のアパーチャと 57.6m の有効焦束範囲を持っている。それは高度 610~620km の軌道を周回し、それはスペース・シャトルの到達範囲内である。そして、当初、30 ヶ月ごとにメンテナンスに訪れる予定であった。これは太陽電池パネルやジャイロ스코ープなどを交換するつもりであった。また、6 年毎に望遠鏡を地上に持帰る計画もあった。しかし、NASA は後で、メンテナンス頻度を減らし、可能ならば地上に持ち帰ることを避けたいと発表した。データはスペース・シャトルと軍用衛星の通信を取扱う TRDS ネットワークを通して発表され、後者に優先権が与えられた。打上げは当初、1983 年に計画されていたが、最終的に 1990 年 3 月に置換わった。6 月 6 日に主鏡凹面に不具合があることがわかった。5 つの独自の光学装置は動作不能と伝えられた。5 つの装置とは、WF/PC (Wide Field / Planetary Camera)、FOC (Faint Object Camera)、FOS (Faint Object Spectrometer)、HRS (High-Resolution Spectrometer)、HSP (High-Speed Photometer)。飛行中に主鏡を交換するのは不可能であったが、2 つの解決方法があった。1 つは、それぞれの装置を光学的に修正された新装置に交換することを意味していた。2 つ目は、残りの 4 装置が同一光軸を使っている事実を利用することだった。よって、修正デバイスを上流に挿入でき、それだけが WF/PC を交換するために残された。1993 年 12 月に最初の修理ミッション (STS61) の間に第 2 の解決策が採用された。HSP は修正デバイスの COSTAR (Corrective Optics Space Telescope Axial Replacement) のために部屋を作るためにシャトル内に入れられた。これはほかの 3 つの装置の解像度を 70% 近く改善した。

1997年2月、2回目の修理ミッション（STS82）はHRSをSTIS（Space Telescope Imaging Spectrograph）に、FOSをNICMOS（Near Infrared Camera and Multi-Object Spectrometer）に交換した。COSTARはFOCのために新しく必要なだけであり、ESAは予算的理由のために置換えるのではないと言及している。当初、そのデータが計画されて14年後、HSTはようやく計画に沿って運用された。同じ期間に渡って、地上観測設備は進歩しているにもかかわらず、HSTはいまだわずかに地球上の望遠鏡よりも性能が高い。その解像度は0.01arcsecで、地球設備のレベルでは0.3arcsecが限界である。また、HSTは紫外線で運用することができる。（図 7.22 参照）

したがって、4装置は今日もまだ、データを収集している。

WF/PC 2は遠紫外線から近赤外線（120～1100nm）まで扱う。それは広視野モード（1ピクセル当たり0.1arcsec）と惑星モード（1ピクセル当たり0.043arcsec）の機能がある。

STISはUV（115nm）から可視の赤と近赤外（1000nm）までのスペクトル範囲を越えて対象を研究できる。NICMOSは天文学的な対象の赤外イメージと分光観測の能力を提供する。それは、波長0.8～2.5 $\mu$ mの光を検出する。FOCはESA（European Space Agency）により建造された。FOCのための二つの完全な検出器がある。それぞれの検出器は115～650nmで運用し、受光を100,000倍明るくできる蛍光スクリーン上に画像を提供するためのイメージ増倍管を使っている。このシステムは感度が高すぎ、21等級より明るい対象は検出機を飽和させないためにカメラのフィルタ・システムで光量を落とさなければならない。広帯域フィルタを用いたとしても、正確に測定することのできる最も明るい対象は20等級である。ハッブル宇宙望遠鏡の後継で、NASAが開発中のNGST（Next Generation Space Telescope）は2007年に打上げ予定である。それは、近赤外でハッブルよりも10倍広い領域を対象とする分光器を持つ予定である。スペースシャトルでハッブルに接近できることは非常に便利であることがわかっているにもかかわらず、たぶんNGSTは視野外に観測を妨害する太陽、地球、月を置くために第2ラグランジュ点に置かれるだろう。

同じ波長で、仏のCNESが設計した小型衛星プロジェクトPicardは、2002年頃に星地震学を研究する道を開くはずである。ある星の変光を観測することで、星の前にある惑星の検出だけでなく、それらの質量、年齢、回転、磁性についての情報を得ることが可能となるだろう。

■ 紫外線放射の研究は1978年に打上げられたIUE（International Ultraviolet Explorer）によって初めて真剣に着手され、NASAとESAによって主要部分を代行するいく

つかの予備的な実験装置に続いた。完全な天空測定は EUV 分光器を使った EUVE (Extreme UltraViolet Explorer) によって遂行された。これはホットガスとプラズマの物理的、化学的性質のデータを提供する。FUSE (Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer) が GALEX 計画に先行し、微弱発生源の高解像度分光解析のために 1999 年 6 月に打上げられた。GALEX 計画とは、銀河の環境を研究するために紫外線イメージ分光器を備えた SMEX である。HETE は 1996 年に展開に失敗したが、仏と日本の HETE 2 (High Energy Transient Explorer) が、地上の光学観測設備を向けることができるように、すぐさま、 $\gamma$ 線バーストに付随する X 線と紫外放射を検出できるはずである。

■ 高エネルギー天文学は、X 線と  $\gamma$ 線の観測を含み、これは紫外光よりも波長の短い放射を研究している。この放射のタイプは普通、波長よりもエネルギーで明記される。たとえば、X 線から  $\gamma$ 線間の幾分大まかに定義された境界は、約 500,000eV に位置づけられる。

■ X 線天文学は次の種類の発生源を扱う。それは恒星のコロナ、超新星残骸、活動銀河核、連星系、クエーサ、ブラックホール付近の増大現象である。一般的な発生源の追跡、銀河核の構造研究は 1990 年から 1999 年の初めまで Rosat (Roentgen Satellite、独-英) によって実施された。Astro D (もしくは ASCA、Advanced Satellite for Cosmology and Astrophysics)、Rossi XTE (X-ray Timing Explorer)、SAX (Satellite Astronomia Raggi-X) が特定の発生源の早い変動を研究し続けた。Astro E は宇宙に高速量子 X 線熱量計を搭載し、Astro D を引継ぐ予定であったが、2000 年 2 月 10 日に打上げた際に破壊された。その後、Newton として知られる、ESA の衛星 XMM (X-ray Multiple-mirror Mission) は ESA 科学計画の 2 番目の礎石である。それは、40 度に傾いた離心軌道に 1999 年 12 月に打上げられた。その軌道は、地球の 2 倍の回転周期に相当する周期 47.86h をもつ。EPIC (European Photon Imaging Camera)、RGS (Reflection Grating Spectrometer)、OM (Optical Monitor) を装備し、観測の主目的の一つは、星や連星系にある鉄やシリコンのような重元素の分光分析である。1999 年 7 月 23 日に打上げられた AXAF 衛星 (Advanced X-ray Astrophysics Facility) は、後で宇宙物理学者 Chandrasekhar に因んで CXO (Chandra X-ray Observatory) と名前を変更したが、NASA の GO 計画 (Great Observatory) の一つである。CXO はすべての X 線源の解像度を 100 倍増加し、銀河の中心にあるブラックホール研究を可能とした。CXO は 2007-2008 年に L2 均衡点の周りに展開される人工衛星群 4 機に引継がれる予定である。この衛星群が CXM (Constellation X-ray Mission) である (すでに HTXS で紹介した)。それはホットプラズマの詳細な分光学的特徴を得るはずで、したがって、放出している物

質の組成、温度、速度を測定するはずである。これはブラックホールについてより良い理解を与えるはずである。最後に、露はプロトン・ロケットを使った Spectrum XG 衛星を打上げようとしている。これは、X線と $\gamma$ 線の観測において Granat (1989-1997) の後継になる予定である。Spectrum X (Spectrum-Roentgen-Gamma、SRG、SXG) は遠地点 200,000km、近地点 10,000km で 51.5° に傾いた軌道に打上げられる。その総重量は 5700kg で、そのうち 2750kg はデンマーク、英、独、伊、米、フィンランド、スイス、イスラエル、ハンガリー、キルギスタン、カナダ、トルコを含む様々な国によって提供された科学計測器である。

■  $\gamma$ 線天文学は電磁波スペクトルのうち最も高いエネルギー領域における放射対象を観測する。それゆえ、 $\gamma$ 線は恒星と銀河の進化で生じる急激な過程に特に関係し、この過程は $\gamma$ 線バーストとして知られている。 $\gamma$ 線天文学は先端設備を必要とする。それは 1972 年に米の SAS 2 と、1975 年に欧州の COS B の打上げに初めて開発された。1989 年に打上げられたソ連の衛星 Granat は $\gamma$ 放射線を研究し、特に仏の望遠鏡 SIGMA が使用された。NASA の GO (Great Observatories) の一つである、非常に大きな CGRO (Compton Gamma-Ray Observatory) は 1991 年 4 月に打上げられ、2000 年 6 月に軌道から外れた。それは 20keV ~ 30GeV までの広大なエネルギー範囲をカバーする 4 つの検出器を備えていた。すでに述べた Spectrum XG 衛星もまた、 $\gamma$ 放射線の研究をする予定である。SGRBE (Swift Gamma Ray Burst Explorer) は $\gamma$ 線バーストを研究するために NASA が計画しており、MIDEX 計画の枠組みの中にある。これらの衛星は ESA と露の間の共同プロジェクトである INTEGRAL (INTERNATIONAL GAMMA-RAY LABORATORY) と、NASA、ESA、ISAS の共同プロジェクトである GLAST (Gamma-ray Large Area Space Telescope) に引継がれるはずである。

図 7.18 天文衛星の傾斜、遠地点及び近地点 — 初期の頃に、恒星天文衛星は、打上げ場の場所により、傾斜をつけ低軌道を辿った。後に、これらの軌道は分散した。高度の遠地点の軌道はバンアレン帯の外での観測時間を増やし、地球による掩蔽を通して失われる時間を減らす。(例えば、COS B, Exosat, Astron 1, IUE, ISO, Granat)。電波観測では、さらに高度の遠地点が、地球からの距離の正確で機能的な測定を増やす。(例えば、ほぼ百万 km も離れた Prognos 9)。国際衛星 (IUE) の静止軌道により、受信局との規則的なつながりが持てた。IRAS1 及び COBE の太陽同期軌道は、太陽赤外線放射を縮小するために選ばれた。高度 600km、傾斜 28.5 度のハッブル宇宙望遠鏡 (HST) の軌道により、ハッブル宇宙望遠鏡は、スペースシャトルにより維持され、修理されまた回収された。最後に、太陽

—地球システムのラグランジュ 1 点は、地球と月が観測の範囲の外にいるため（例えば、Wind, SOHO, Ace）、太陽を観測するには恵まれた位置であるが、一方で、ラグランジュ 2 点の軌道は、太陽、月そして地球全てが観測の範囲の外にいるため（例えば、将来の天文台 FIRST, Planck, Gaia）、恒星観測には理想的である。

#### 図 7.19 地心軌道における天文衛星の年代記

図 7.20 SOHO によって撮られた画像 — 1996 年 12 月 23 日に LASCO C1 コロナグラフによって観測されたコロナガス噴出の始まり。禁制線にて、Fe XIV 5303 Å 21:04 (世界時) (左)、K Corona 21:07 (世界時) (右)

図 7.21 ハッブル宇宙望遠鏡によって 1998 年 4 月に撮られたサターンの画像 — この着色合成画像は、惑星の反射した赤外線を示す。サターンの大気中の雲ともやの情報がこの光景から分かる。サターンの衛星 2 機が見える：左下が Dione で、惑星の縁（へり）の前の右上が Tethys である。（画像番号 STScI-PRC98-18. アリゾナ大学及び NASA、Erich Karkoschka 提供）

図 7.22 2000 年 5 月にハッブル望遠鏡によって撮られた画像 — 珍しい配置構造が、渦状銀河がもう一つ別の渦状銀河の前にあることを示す。この位置構造により、さらに遠くの銀河の前にあるシルエットによってのみ見える最前の銀河のダークマターが観測できる。

## 07.5 その他の分野の調査

### 基礎物理

宇宙空間では、現代物理学、一般相対性理論及び量子力学に関する2つの主要な理論で実験する新しい可能性がある。計画された実験は全て重力を測定するか検知するかに関わる。

■ 最初のタイプの実験は、(受動)重力かつ慣性の質量間の等価の原理を照合に努める。地球の重力場で衛星が無抗力で軌道に異なる構成から成る自由に動く2つの質量の相対的加速を測定することが狙いである。例として、ESAも参加のNASAのMiniSTEP計画と、CNESからのMicroSCOPE計画がある。前者は、スタンフォード大学で開発された超伝導量子干渉分光計による加速を測定し、後者は、ONERA (French Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales)で開発された低温静電加速度計を使用する。

■ 2つ目のタイプの実験は、自然に発生する相対論的効果：水星軌道の主な軸の歳差運動、光信号が太陽の重力場を通抜ける時の屈折と時間遅延、恒星状天体からの無線信号の受信角度の偏差：から既に予測された後期ニュートン学説のパラメータ $\gamma$ を測定することを試みる。このカテゴリでは、NASAのGP2計画(Gravity Probe)が、理論によって予測された値と極軌道中の低温ジャイロスコープ(姿勢制御装置)の範囲の歳差を比較する。さらに先の計画ではあるがESAのSolar Orbit Relativity Test(太陽軌道相対性試験)(SORT)は、地上のレーザと超安定搭載原子時計使用して、同じ太陽の日心軌道を迎える衛星2機と光パルスが戻ってくる時の遅延の角度を測定する。SORTの準備ミッションが2003年国際宇宙ステーション(ISS)搭載に予定されたACES(宇宙の原子時計)(Atomic Clock Ensemble)である。これは地球と搭載された時計の間の2つの時計とレーザ同期リンクをテストする。

■ 3番目のタイプの実験は、全体の設定が0.1~0.0001ヘルツの周波数の干渉分光計として作動する遠く離れた衛星に運ばれた装置を使って、直接重力波を検知することを目標とする。衛星は超安定レーザによって連携され、抗力補整(抗力を受けない衛星)用のイオン推進エンジンを運ぶ。NASAの計画、オメガは、地心からは非常に高い軌道にいるMIDEXミニ衛星6機である。それらは、辺が100万kmの正三角形の角で2機1組になって移動する。ESAのLISA計画(レーザ干渉分光計宇宙アンテナ)(Laser Interferometer Space Antenna)は、地球と同じく太陽を中心とした軌道に沿い、またそれから20度の角度で、辺が500万kmの正三角形を形成する衛星3機である。近接連星システム、活発な銀河の核、銀河衝突時の巨大な2つのブラックホールの結合、そしてブラックホールの構成のような

目標は非常に強力情報源となるだろう。両計画が実現することは非常に困難で併合されるかもしれない。

### **微重力と宇宙線の影響**

この分野では、多くの価値ある実験が宇宙機器上で行われる。それらには3つの主な目的がある。宇宙船の中での人間の生活に対して微重力及び宇宙線の影響を理解すること、重力がある状態の地球における生物学の過程と微重力状態である宇宙で起こる過程とを重力により果たされる特定の役目を理解するために比較すること、及び地球で重力がある状態では成し得ない素材の実験及び生産を実行することである。

最初の実験は、後に宇宙での人間の存在の医学的な面に取組むために生物学の懸案に自然と注目した。微重力を経験する最初の生物は1957年にスプートニク2に搭載されたライカ犬とガガーリンの初飛行に先立ってボストーク宇宙船に乗って旅した犬であった。実験は、Mercuryのチンパンジー、Biosatellite IIIのマカケ猿、及びOF01(Orbiting Frog Otolith)のウシガエルなど、宇宙で他の動物にも実行された。後のミッションでは、人間が非常に似た前庭器官を持つことからウシガエルを選んだ。

多くの観察が米国人(Mercury、Gemini、アポロ)とソ連の宇宙船(ボストーク、Voskhod)の両方の宇宙飛行士でなされたが、それらは心拍数と呼吸の単純な測定に限られていた。最も詳細になされた研究でも、飛行前及び飛行後の宇宙飛行士の状態を比較したことがあった。衛星に搭載され運ばれた幼稚な装置は、単に宇宙における生物学且つ医学の研究の開発の妨げとなっただけであった。原寸の宇宙ステーションが建設されると、実験はより頻繁で、より精巧になった。

Skylab上では、動物、例えば、ハツカネズミの生理循環、ショウジョウバエの24時間周期の循環、クモの巣作り、また、植物、例えば、「米」の成長を使って実験は行われた。しかしながら、ほとんどの実験は人間、特に宇宙飛行中の物質代謝に、取組んでいた。材料科学における研究もまた、Skylabで開発された。この分野ではまた、予備実験、特にアポロ14、16、17を目撃した。材料物理学では、ほとんど明白な無重力は、流動体位相のいかなる組織も激しく変化に富んだ密度(濃度)に変える。そのような状態で対流または堆積がないことは、特に合金と結晶の分野において、新しい産業適用への道を拓くものである。

露のFotonあるいは中国のFSWのような回収カプセルの開発に加えて、ソ連側ではSalyut 5、その後のSalyut 6の打上げは、ミールへと続き、連続した米のシャトル飛行は、

生物学、医学及び材料科学において新時代の始まりを示すものであった。それぞれが、しばしば国際協力の一環として、宇宙状況からある固有の方法で進歩した（図 7. 23）。同様に、ミールの外で3か月にわたって実行された宇宙生物学実験は、南極で集められた微小隕石に付着した有機物質の繰返し観察により地球生命の起源について基礎的な問題として挙げたことから、宇宙環境で生残る分子の能力についての新しい理解への道を開いた。

生物学では、医学研究とは別に、微重力実験が植物と動物の両方で行われており、その中でも特にねずみを使っている。動物骨粗鬆症は、露の回収カプセル、Bion 10号、11号で、さらに Skylab B2号にも搭載され研究された。胚子の受精と発達は、様々な動物のために広く研究された。アフリカ・ツメガエル蛙の卵の最初の受精は1992年、IML研究所（STS 42号）に搭載中、達成された。その実験は、第2回国際微重力研究所（IML2）の中 STS 65号に搭載され、1994年に繰返された。卵を産んでからふ化するまでの宇宙でのアフリカ・ツメガエルの最初の胚子の発達は、SL-J ミッションにて達成された。最初の生体内の受精は IML2号の状況で、米のスペースシャトルに搭載された日本の実験の一部として1994年7月にイモリで実現された。ミールに搭載し実行され、1999年に Genesis によって完了された1996と1998年の仏の実験 FERTILE は、イベリア・トゲイモリと似通った成果を得た。変質は、時間が経つにつれ解剖組織上のあるいは機能本位な異常なくとも、それら自身を調整しがちであり、次の生殖が正常であることが示された。

宇宙飛行士はこれまでより長期間留まることを必要とされるため、医学研究は特に宇宙での人間の安全性の改善を目指すことが必要となった。骨格に対する微重力の影響は、長期滞在ミッションへの優先度を考えると、多くの大規模なミッションの課題となっている。骨密度についての研究は、主にミールに搭乗したソ連の宇宙飛行士になされた。最高で437日という非常に長期間、宇宙ステーションに留まった者もあり、そのような調査には重要な利点となった（13章を参照）。重力を受けている骨格と受けていない骨格の系統的分析は、ミッションが6ヶ月以上の時、習慣的な圧力の欠乏は重力を受ける骨格の宇宙骨粗鬆症（骨減少）に重要な役割を果たすことを明らかにした。

宇宙飛行士が長期にわたって微重力にさらされた際の心臓血管の未調節により生じた特有な問題があるとすれば、心臓血管の生理学を研究することはとりわけ重要なことである。特有の問題とは、彼らが地球に帰還した時の起立性低血圧症で、意識を失うことがある。これらの問題は STS 61 に搭載された Skylab D1、また STS 58号における Skylab 生物学ミッション（SLS2）で研究されたが、特に露の有人宇宙ステーションに搭乗した様々な

ミッションによって研究された。

神経科学的な調査は中枢神経系に対する微重力の影響を解決するために行なわれている。NASA の Neurolab ミッションは、大部分は人体について取組む国際協力の 26 の実験の一部であった。同様に、ミール搭載実験は、神経系にシナプス及びニューロンの可塑性現象に関わる幾らかの斬新なメカニズムを識別した。例として、ある姿勢を保つ時のその他の神経感覚の器官に応じた視覚システムの役割あるいは複雑な形を記憶する時の体重に果たされた役割がある。

無重量状態によって生じた問題とは別に、宇宙放射線生物学は宇宙での宇宙飛行士の生命に重要なもう一つの分野である。当然、これらの問題は、その後続く Biosat 2 号のような専門衛星を例に、宇宙時代の最も初期に取り沙汰された。宇宙ステーションが開発され、宇宙遊泳がより頻繁に行われるようになると、宇宙放射線によって生じた問題はさらに大きな注目集めた。放射の量と質の数値の割出しは、ミール搭載 Nausicaa または CIRCE のような様々な物理的かつ生物学の放射線線量測定システムを使用して行なわれた。これらの研究は、磁界における空間的かつ一時的な変化の影響、とりわけ太陽フレアの影響を明らかにした。

材料科学の分野では、例えば、様々な Foton 衛星搭載、1990 年に Kristall モジュールがミールに設置され、さらに多くのシャトル・ミッション搭乗など、多くの実験が結晶成長に取組んだ。その他多くある例の中でも、1992 年に STS-50、続いて 1995 年に STS-73 で打上げた米国微重力研究所 (USML)、1997 年 4 月及び 7 月にそれぞれ STS-83 号及び STS-94 号で打上げた微重力科学研究所 1 (MSL 1) については触れる価値がある。STS-87 号飛行は、材料科学に注目した USMP 4 号 (米国微重力ペイロード) を運んだ: PEP (粒子沈没と固体/液体インターフェイスによる推進) が、液体合金の凝固を調査した一方で、MEPHISTO 実験は結晶成長に取組んだ。規則的な研究は、特に上記の USMP 4 号、運用中、ELF 実験 (薄層炎入)、ミール搭載中に宇宙船搭乗の火災安全を保證するために対流がない状態での燃焼でも行なわれた。(囲まれた薄板から成るフレームス (図 7.23 を参照)。その他の実験は、人間への被害を心配しなくていいように無人プラットフォームでなされた。これらのプラットフォームは軌道に置かれ、Wake Shield Facility (WLF) の場合のように同飛行中にスペースシャトルによって回収されるか、Eureca の場合のように次の飛行中に回収される。また、H-II ロケットによって打上げられた宇宙実験・観測フリーフライヤ (SFU) の例のように、ロケットで打上げ、シャトルで回収することも可能である。

ミール上で、臨界流体の流体力学は、物質の物理学に関する様々な研究課題の中でも特に注目を集めた。材料科学では、対流がないという環境事実が、物質拡散係数を極めて正確に測定することを可能にした、産業冶金加工モデルの恩恵である。

図 7.23 微重力状態における材料物理学と生命科学の研究を実行している衛星の年代記 (1965-2000) — 第一のミッションに微重力を取上げているシャトル飛行は、ボールド体で表示されている。国際宇宙ステーションの準備は、1999 と 2000 年に宇宙実験が縮小したことを語る。