



地球観測プラットフォーム

興 石 肇

航空宇宙技術研究所 〒182 調布市深大寺東町 7-44-1

(1985年10月21日受理)

Earth Observation Platform

Hajime KOSHISHI

National Aerospace Laboratory,
7-44-1, Jindaiji-higashi-machi, Chofu 182

1. ま え が き

地球観測衛星として考えられるものはいわゆるランドサット・シリーズ(1~5号)のほかに, NOAA(米国商務省海洋大気庁)のNOAAシリーズ, 静止気象観測衛星, わが国の海洋観測衛星MOS-1, フランスの地球観測衛星SPOT等がある。これらすべてについて解説をすることは著者の能力の及ぶところではなく, また限られた紙数でそれを試みることも無意味であろう。これらについてはすでに多くの紹介がなされているので¹⁻⁴⁾, 関心のある方はそれらを参考にしていただくとして, ここでは将来の地球観測衛星のあり方等を含めて, 未来指向の解説を試みた。

現用の地球観測衛星としては代表としてランドサット4,5号のみを採り上げ, なるべく光学観測器に関連する点に絞って記述した。1990年代の地球観測には宇宙基地は大きなインパクトを与えらると思われるので, 現在NASAやNOAAが中心になって検討を進めている, 極軌道プラットフォーム利用の地球観測システムを中心に, 解説を試みた。

2. 実利用を築いた地球観測衛星⁵⁾

今日の地球観測の実利用を築いた観測衛星には, 既述のランドサット・シリーズ, 気象衛星シリーズ, 合成開口レーダーによる観測を初めて行なったSEASAT等がある。そのなかで最も功績の大きい, かつ現時点で最も複雑, 高精能な観測衛星はランドサット4,5号である。

図1にその外観・構造のあらましを示す。4,5号と

も高度約705km, 軌道傾斜角98.2°の太陽同期円軌道に打ち上げられた。降交点通過時刻は地方時で9時45分±15分である。軌道は1日に14~9/16周, 16日233周で全地球をカバーする。赤道における軌道間隔は172kmで7.6%のオーバラップがある。705kmという軌道高度はスペースシャトルによる回収の可能性, 光学観測器の一つであるTM(thematic mapper)の空間分解能に対する要求(地上において30m)と, 空力擾乱による軌道の繰返し精度を考慮して決められた。

衛星は図1に示すようにIM(instrument module)と標準的なMMS(multimission modular spacecraft)の二つの部分から成る。このような衛星の設計はTMの放射冷却器がつねに宇宙空間を向き, 太陽と反対の方向を向いていること, TMおよびMSS(multi-spectral scanner)の視野を確保すること, TDRS(データリレー衛星)を指向するハイゲインアンテナの要求を充たすこと, 太陽電池パネルの要求を充たすこと等の要件から決められる。

IMにはMSS, TM, GPS(global positioning system), および熱制御系等が搭載されている。

MSSは可視域4バンド, 熱赤外1バンドをもつ機械走査型放射計で, 地上分解能は可視域で80mである。

TMは可視域4バンド, 近赤外2バンド, 熱赤外1バンドの機械走査型放射計で, 可視域の地上分解能は30mである。

GPSは衛星を基準にした航法システムで, 現時点では6個の衛星が打ち上げられているが, 最終的には120°ずつ傾角の異なる三つの軌道面に配置された18個の衛星

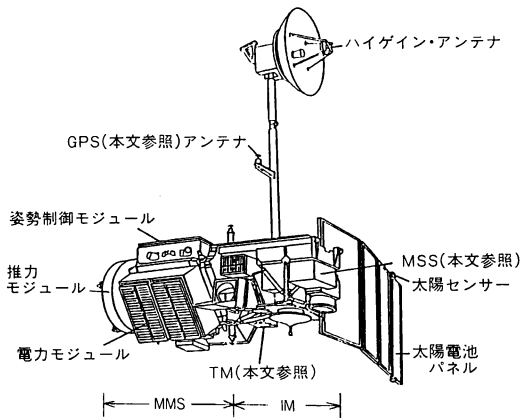


図1 ランドサット4, 5号

で構成される。3ないし4個のGPS衛星が視界の中にあると、 1σ の誤差が35m以内で衛星の位置が求まる。

熱制御はサーモスタットにより制御されるヒーター、絶縁ブランケット、ルーバー、放熱器、熱の反射吸収板および塗料によって行なわれる。制御の結果得られるMSSとTMの温度環境を表1に示す。

MMSはMACS(modular attitude control system)その他から成る。

MACSはゼロモーメント方式の3軸姿勢制御システムで、3軸の指向精度は 1σ で0.01度、安定度は 10^{-6} 度/秒である。この精度は慣性基準装置とそのドリフト補正を行なう2台のスタートラッカーにより達成される。

TMとMMSは走査を行なうための振動鏡をもっているため、その動きは衛星本体への外乱になる。またTDRSアンテナ、太陽電池パネルの駆動などによっても外乱が生ずる。

これらの外乱源は互いに干渉し合い、TMおよびMSSの光軸にジッター(jitter)と呼ばれる μrad の大きさの変動を生じさせる。この光軸変動の値は計測され、地上に伝送されて、画像再生の際の幾何学補正のためのデータとして用いられる。これはTMにのみ必要で、MSSのほうは分解能が低いので不要である。図2はTMのロール軸の変動を示す。ロール方向は走査方向と一致するので影響が大きい。同様の振舞はピッチ軸、ヨー軸にも起こる。

表1 MSSとTMの温度環境(°C)

	最低	最高
TM インターフェースの平均温度	15.3	15.9
MSS 構体の平均温度	16.7	18.1

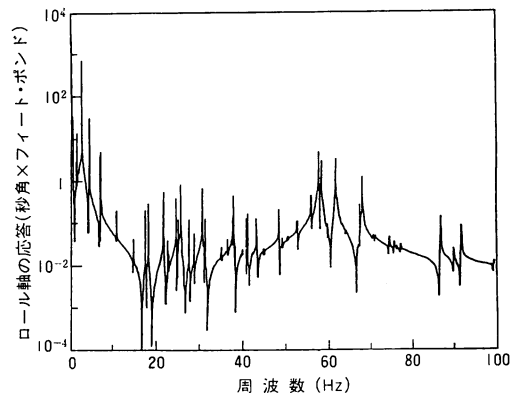


図2 TMのロール軸における外乱力

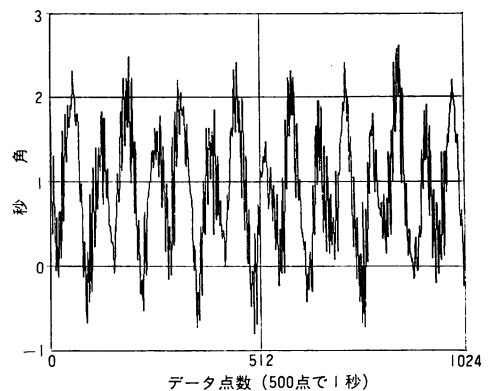


図3 TMとMSSが作動しているときのTMのADSのロール軸出力

軌道上におけるこのような光学系の振舞は、地上の光学ベンチに固定されているときの振舞とはまったく異なる。この外乱の検出には、2Hzまでの低周波についてはMACSのジャイロが用いられ、2~125Hzの高周波については、TMの望遠鏡部に装着されている非常に高感度の3軸ADS(angular displacement sensor)によって行なわれる。検出された信号は2msごとにサンプルされ、各軸とも12ビットに量子化され地上に伝送される。

図3はTMとMSSの双方が作動しているときの、TMのロール軸のADSの出力である。peak-to-peakで約 $15\mu\text{rad}$ あり画素にして0.3画素に相当する。これは画像処理において可能な幾何学補正量の約1/2に当たる。さらにTDRSアンテナが動き始めると、TMのロール軸変動はpeak-to-peakで $2,000\mu\text{rad}$ にも達し、これは2分間続く。この間はTMの画像データを撮ることはできない。TM、MSSおよびTDRSアンテナの動きが定常状態に達したときの、TMのロール軸のジッ

ターは約 $24 \mu\text{rad}$ で、これは許容しうる幾何学補正量のほぼ限界値に等しい。

ランドサット 4, 5 号は高い安定度をもつ MACS, 高精度の機上計測装置および地上における画像処理による外乱の除去により、最終的に非常に高精度の指向精度を達成している。

3. 宇宙基地時代の観測プラットフォーム

宇宙基地は図4に示すように、低軌道傾斜角 (28.5°) をもつ有人ステーション、これと同じ軌道傾斜角をもつ無人のプラットフォーム、および、極軌道をもつ無人のプラットフォームからなり、さらにこれらの要素間の輸送や種々のサービスを行なう OMV (orbit maneuvering vehicle^{*1}), OTV (orbit transfer vehicle^{*2}) がある。宇宙基地は 1990 年代初頭にその第一段階のシステムが軌道に乗り、以後 2000 年までの間に発展しながら完成していく。

地球観測の立場からは、有人ステーションからの研究者あるいは熟練者の介在した観測にも、サリュート 6 号やスペースシャトルでの地球観測の例が示すように多くの利点があり、宇宙基地の実現に伴って“人間による地球観測”という分野も大きく育っていくと思われる。

極軌道の無人プラットフォームは主として地球観測のためのものである。

極軌道のプラットフォームによる地球観測は、従来の個々の地球観測衛星に比して次のような利点がある^{6,8)}。

- 1) 大口径・高精度の観測器を搭載できる。
- 2) 多くの観測器を同時に搭載できる。したがって多くの物理量の同時観測ができる。

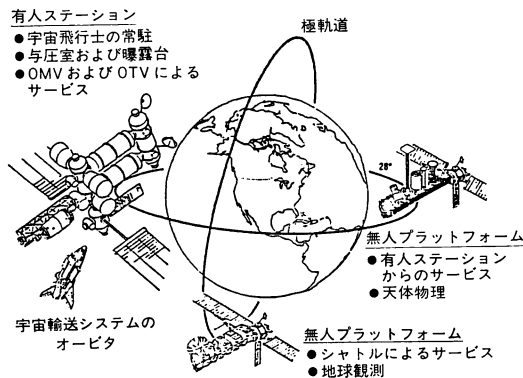


図4 宇宙基地システム

*1 有人ステーションと、これと同じ軌道傾斜角をもつ無人プラットフォームの間のサービスを行なう。

*2 有人ステーションと、極軌道無人プラットフォームの間の輸送サービスを行なう。

3) 大容量の計算機が搭載できる。これにより機上処理が可能になり、データ伝送・配布が高効率化される。さらにシステムのインテリジェント化が図れる。

4) 有人ステーションあるいは OTV により、修理、部品交換、制御用燃料の補給等のサービスを受けることができる。したがって、観測器の信頼性の向上、システムの長寿命化が期待される。

一方、観測内容から見たこれからの課題は、一つの総合的なダイナミックシステムとしての地球の科学的観測である。そのような観測が必要とされる現象として、大気中の炭酸ガスの増大、オゾン層の枯渇、気象パターンの変化によるエルニーニョ現象、酸性雨等があげられる。これらの問題の解明には地球を一つのシステムとして捉える、マルチディシプリナリな研究が必要であり、それには人工衛星からのリモートセンシングによる観測が不可欠である。図5⁷⁾は総合的な地球システムの考え方を示す。後述するようにこのような考え方に立った二つの地球観測計画がある。一つは NASA の EOS (earth observing system) の計画で、他の一つは米国の NOAA と欧州の ESA (欧州宇宙機関) との共同計画による、ENVIROSAT-2000 である。

次に、これらを含めて極軌道無人プラットフォームを用いた地球観測システムとして具体的に計画されているものを二、三紹介する。

3.1 海洋情報即時通報システム (real time reporting system on oceanic condition)⁹⁾

NOAA 衛星に搭載されている AVHRR (advanced very high resolution radiometer) の信号を気象庁で受信し、これを基に(財)漁業情報サービスセンターでは図6に示すような漁海況速報図を作製し、ファクシミリに

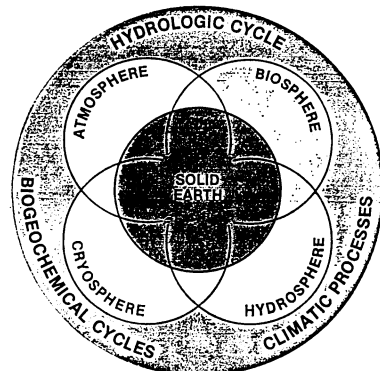


図5 総合的なダイナミックシステムとしての地球

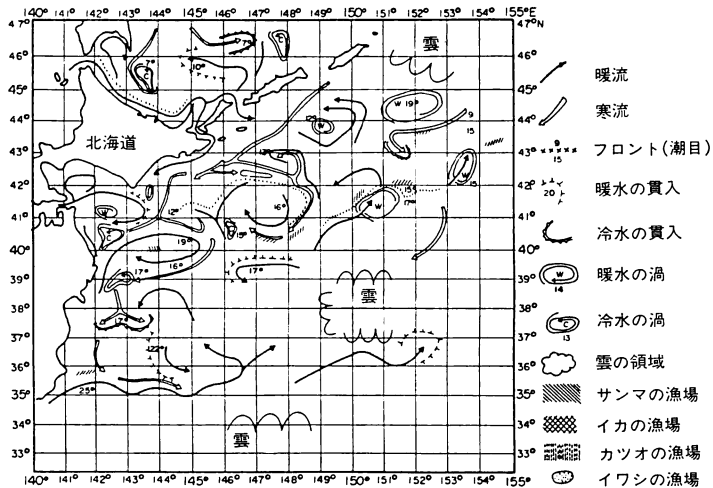


図6 漁業情報サービスセンターの出している人工衛星情報による漁海況速報図

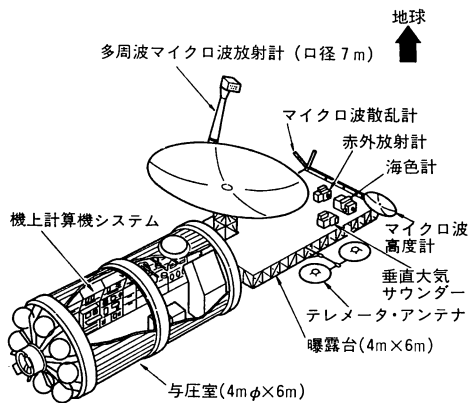


図7 極軌道プラットフォームを用いた海洋情報即時通報システム (RTRSOC) の概念図

より漁船に送信している。これは80%以上の漁船で受信され漁場探査や操業に非常に有効に利用されているが、現時点では2日に1度の頻度である。海況は1日で大きく変化するものである。海洋情報即時通報システムは宇宙基地の極軌道プラットフォームに赤外放射計、大口径多周波マイクロ波放射計、海色計等の観測器を搭載し、海面温度を実時間で計測し、搭載計算機により温度マップと漁海況図を作成して、ファクシミリまたはビデオ信号として、少なくとも1日1回直接漁船に伝達できるシステムである。図7にその概念図を示す。

海色計によりクロロフィル量を、電波高度計、散乱計により波高、海上風等も観測することを計画しており、海洋の基礎生産力を把握し将来の管理型漁業のための必要データを長期にわたって観測、蓄積するとともに、海

象の研究に必要な科学観測も行なうことを考えている。これらのデータはまた、その観測のリアルタイム性のゆえに台風、津波等の予報、警告にも大いに役立つものと考えられる。

このシステムが実現すれば、漁船は海上を右往左往することなく、かなりの確に漁場を探し当てることができるようになるので、それによる便益は燃料費の節約分だけでも年間数百億円に上るといわれている。

3.2 NASA EOS 計画⁷⁾

NASA は1982年から宇宙基地の地球観測への利用に関して、Science and Mission Requirements Working Group を組織し検討してきた。その結果がこのEOS (earth observing system) 計画である。

これは730kmの高度の極軌道に投入されたプラットフォームに、表2に掲げた多種の観測器を搭載し、種々の物理量を synergetic に観測する計画で、これらの観測器は ADCLS (automated data collection & location system), SISP (surface imaging & sounding package), SAM (sensing with active microwaves), および APACM (atmospheric physical & chemical monitor) の四つのグループから成る。これらのパッケージの重量、電力および1周回ごとのデータ量を表3に示す。

EOS 計画では、極軌道プラットフォームはその搭載する画像センサーが2日で全地球をカバーするように軌道が選択された。この軌道選択に当たって考慮されたことは、走査幅とその端における画素の歪、軌道高度の差による空気抵抗の差が軌道の安定性に与える影響、大気

表2 EOSの観測装置

Instrument	Measurement	Spatial Resolution	Coverage
1. Automated Data Collection & Location System (ADCLS)	Data and command relay and location of remotely sited measurement devices	Location to 1 km for buoys, to 1 m for ice sheet packages	global, twice daily
SISP—Surface Imaging & Sounding Package			
2. Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS)	Surface and Cloud imaging in the visible and infrared .4 nm-2.2 nm, 3-5 μ m, 8-14 μ m resolution varying from 10 nm to .5 μ m.	1 km \times 1 km pixels (4 km \times 4 km open ocean)	global, every 2 days during daytime plus IR nighttime
3. High Resolution Imaging Spectrometer (HIRIS)	Surface Imaging .4-2.2 nm. 10-20 nm spectral resolution	30 m \times 30 m pixels	pointable to specific targets, 50 km swath width
4. High Resolution Multifrequency Microwave Radiometer (HMMR)	1-94 GHz passive microwave images in several bands	1 km at 36.5 GHz	global, every 2 days
5. Lidar Atmospheric Sounder and Altimeter (LASA)	Visible and near infrared laser backscattering to measure atmospheric water vapor, surface topography, atmospheric scattering properties	vertical resolution of 1 km, surface topography to 3 m vertical resolution every 3 km over land	global, daily atmospheric sounding; continental topography total in 5 years
SAM—Sensing with Active Microwaves			
6. Synthetic Aperture Radar (SAR)	L, C, and X-Band Radar images of land, ocean, and ice surfaces at multiple incidence angles.	30 m \times 30 m pixels	200 km swath width daily coverage in regions of shifting sea ice
7. Radar Altimeter	Surface topography of oceans and ice, significant wave height.	10 cm in elevation over oceans	global with precisely repeating ground tracks every 10 days
8. Scatterometer	Sea surface wind stress to 1 m/s, 10° in direction Ku band radar	one sample at least every 50 km	global, every 2 days
APACM—Atmospheric Physical & Chemical Monitor			
9. Doppler Lidar	Tropospheric winds to 1 m/s doppler shift in laser backscatter	1 km vertical, 2° longitude, 2° latitude	global, twice daily surface to 100 mb
10. Upper Atmosphere Wind Interferometers	Upper atmospheric winds to 5 m/s, doppler shift in O ₂ thermal emissions	3 km vertical, 2° longitude, 2° latitude	global, daily
11. Tropospheric Composition Monitors	Trace chemical constituents of the troposphere	varies from total column density to 1 km vertical, from 1° to .1° horizontal	global, daily, surface to 100 mb
12. Upper Atmosphere Composition Monitors	Trace chemical composition passive emission detectors at wavelengths from UV to microwave	3 km vertical 2° longitude, 2° latitude	tropopause to 120 km global daily day and night coverage
13. Energy and Particle Monitors	Solar Emissions from 150-400 nm, 1 nm spectral resolution. Earth radiation budget Total Solar irradiance Particles & fields environment	total solar output	roughly continuous sampling, at least twice daily for solar observations

による観測器の汚染、および放射線の影響等である。軌道高度によるこれらの条件の比較を表4に示す。結果として730 \pm 30 kmの高度が選ばれた。

EOSの目的は、はじめにも述べたように、地球を図5のような種々のサイクルが相互干渉をする総合システ

ムとして科学観測を行ない、長期にわたるデータを蓄積して地球のダイナミクスを理解することにある。

3.3 NOAA-ESAのENVIROSAT-2000計画¹⁰⁾

これはNOAAが1992年に終わる、その極軌道気象衛星NOAAシリーズの後を引きつぐものとして、1993

年に打上げを計画している、宇宙基地のプラットフォームによる観測システムで、EOS と同様に地球を一つの総合体として観測するものである。その観測項目、搭載観測器は EOS 計画のそれとだいたい同じである。異なるところは赤道を北から南へと、南から北へ回る二つの極軌道プラットフォームを用いることで、その基本的

諸元と観測機器を図 8 に示す。ESA はこのうちの一枚を受けもつ形で国際協力による地球観測を進めようとしている。

図 8 に示すように、二つの極軌道プラットフォームは α, β と呼ばれ、可視光からマイクロ波までの受動、能動の多種の観測器が搭載される。 α -プラットフォームは海洋観測に重点を置き、海面からの太陽グリッターを避けるために 13 時 (ローカル時刻) に昇交点を通過するように軌道がえらばれている。 α, β 共通の観測器 (図の中心部の二重枠に囲まれた部分) のほかに、海洋観測用合成開口レーダー (SEASAR)、海色計 (ocean color imager) 等を搭載している。 β -プラットフォームは陸域観測に主眼を置き、地形判断のための影の情報も得るため、9 時 (ローカル時刻) に降交点を通過するような軌道が選ばれている。観測器としては共通なもののほか

表 3 NASA EOS 観測機器の重量, 電力およびデータ量

観測装置	質量 (kg)	電力 (kW)	データ量/軌道 (ビット)
SISP	4,000	4.3	1.2×10^{11}
SAM	1,000	15.6	2.0×10^{11}
APACM Monitors	4,200 300	6.6 0.2	0.1×10^{11}
Totals	9,500	26.7	3.3×10^{11}

表 4 NASA EOS の軌道の比較

軌道高度における性質	420 ± 30 km	730 ± 30 km	1070 ± 30 km
2 日でカバーするための走査幅	1400 km	1500 km	1600 km
走査幅の端におけるピクセルの大きさ (730 km 高度直下点のピクセルで正規化)	1.1 × 2.5	1.5 × 2.3	1.9 × 2.6
走査幅の端におけるピクセル楕円の縦横比	2.3	1.5	1.4
大気密度	抵抗大	抵抗問題なし	抵抗汚染ともに大
放射能強度	汚染の可能性あり	汚染は僅少	
	低	低	高

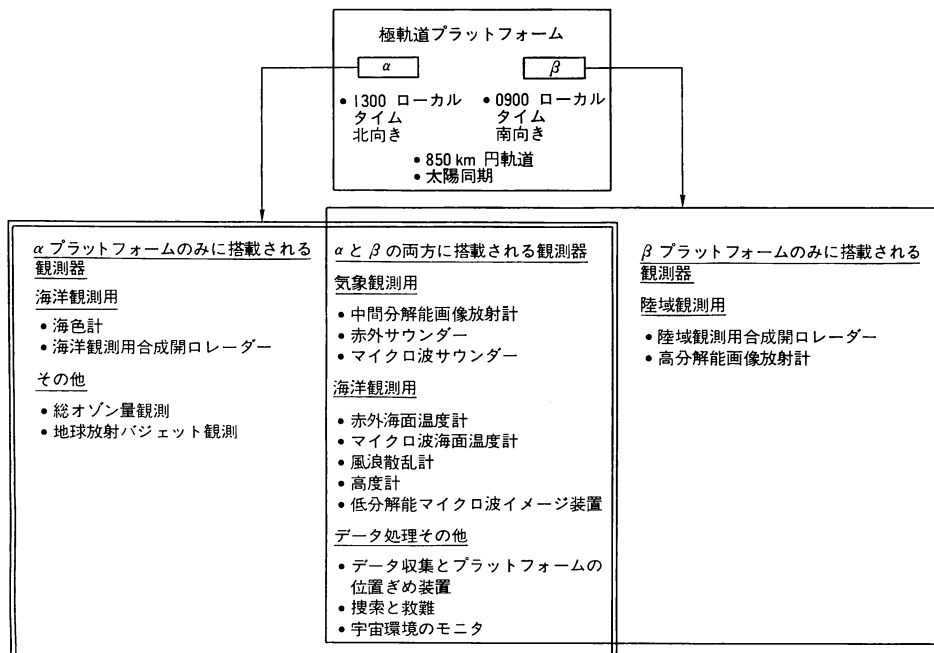


図 8 NOAA-ESA ENVIROSAT-2000 のシステム

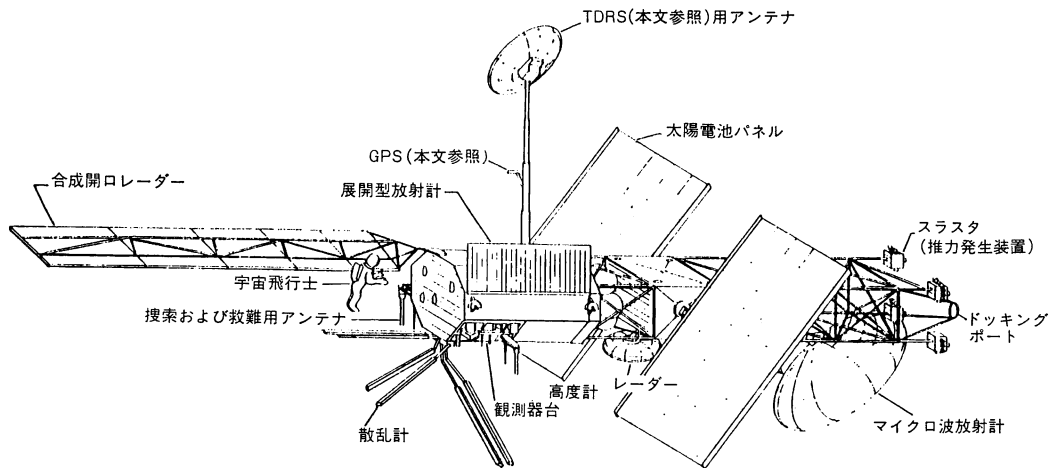


図9 NOAA ENVIROSAT-2000 の極軌道プラットフォーム

に、陸域観測用合成開口レーダー (GEOSAR)、高分解能画像型放射計が搭載される。図9はこれら α , β -プラットフォームの概念図で、スペースシャトルの1回の飛行で軌道投入できるように考えられている。右端にはOTVあるいは宇宙基地本体とのドッキングポートが見られ、左方から宇宙飛行士がアクセスしているのがわかる。

4. おわりに

与えられた表題は地球観測衛星であったが、1990年代への見通しを与えるためにあえて地球観測プラットフォームと改題し、宇宙基地時代における地球観測についてかなりの頁数を費した。ソビエトは1986年中にも宇宙基地を構築するというニュースも流れている。宇宙基地の実現は地球観測にも大きなインパクトを与えることになるであろう。

文 献

- 1) 石上 博: "SPOT システムについて", 日本リモートセンシング学会誌, 5 (1985) 71-77.
- 2) "小特集リモートセンシング", 計測と制御, 15, 7(1976).
- 3) "小特集宇宙と海洋における計測と制御", 同上, 21, 2 (1982).
- 4) NHK 編: 地球観測衛星ランドサット—宇宙から見た日本列島 (日本放送出版協会, 東京, 1982).
- 5) J. R. Schulman: "Landsat—an unmanned space platform," SPIE, 493 (1984) 258-268.
- 6) E. H. Swanson, M. L. Coker and J. M. Ludwinski: "Space station options for electro-optical payloads," SPIE, 493 (1984) 248-256.
- 7) NASA Science and Mission Requirement Working Group Report: "Earth Observing System," NASA TM 86129 (1984).
- 8) R. E. Arvidson, D. M. Butler and R. E. Hartle: "EOS: The Earth Observing System of the 1990s," Proc. IEEE, 73 (1985) 1025-1030.
- 9) RTRSOC Concept Study Team: "Conceptual design study of real time reporting system on oceanic conditions," NAL SP-2 T (1984).
- 10) J. H. McElroy, S. R. Schneider, D. B. Miller and J. W. Sherman, III: "ENVIROSAT-2000 report: Plan for space station polar-orbiting platform," NOAA (1985).