地球観測システムの智能化^{*1}興 石 肇^{*2}

Key Words: Earth Observation System, Intelligent System, Automatic Classification, Intelligent Sensor, Smart Sensor

1. ま え が き

本年2月にわが国も地球観測衛星 MOS-1 を打ち上げた。これにつづきわが国は MOS-2、資源探査衛星 ERS-1 を計画している。フランスはその地球観測衛星 SPOT-1 号につづいて、3号、4号までの打上げを決めている。人類は地球上に何百万年にもわたって生きてきたが、ここにきてやっとその自分の棲家を外から見る手段を持つことができた。これは非常に重要な人類史上の出来事である。米国はそのランドサット 1号によって、外から地球を見るという歴史的な仕事を初めて行った。そして、これから21世紀に向けて大規模な地球観測システム (Earth Observing System) を構築しようとしている。これは地球を一つのシステムとして、それを構成している気圏、水圏、雪氷圏および生物圏が固体地球とともに相互にダイナミックに作用し合う総合的システムとして捉えようとする地球システム科学 (Earth System Science) の観測手段の一つである。後に詳しく述べるが、そこでは多くの観測器が一つのプラットフォームに同時に搭載される。これは1990年代の半ば頃、地球を回る軌道に入れられる予定である。ここで、地球観測技術は一つのエポックを迎えようとしている。そのエポックを画する技術の特徴は要約すると次の三項目にまとめられ

る。

- 1) 大型化
- 2) 長寿化
- 3) 知能化

この技術的すう勢の背後には宇宙技術全般の発展が、時期的にそこまで盛り上がってきた、ということが大きな要因として存在する。

これらの三つの項目はお互に深い関連をもって作用し合っている。たとえば、知能化は大型化により搭載計算機システムの容量が大きくなった結果として可能になったのであり、逆に大型化したプラットフォームの制御は、システムが高度に知能化することによって可能になる。また、長寿化は知能化された制御システムによる故障診断や、それに対する対応処置が十分に働かねば成り立たない。このようにシステムの知能化は将来の地球観測システムのキーテクノロジーの一つと考えられる。以下、これに関して、その現状と問題点、将来予測とビジョンを記して見たい。

2. 現状と問題点

現在運用されている地球観測衛星、すなわち米国の LANDSAT、フランスの SPOT、わが国の MOS-1、および気象観測衛星などは膨大な量のデータを生み出している。これらのデータは今後、その量、質ともに向上することが期待され、さらにその利用の適時性の要求が高まるにつれ、高度な機上処理、観測器の知能化、そして判断・決定能力をもつ搭載知能システムの要求が高まってきた。そのことはデータ処理・解析における従来の、観測システムからユーザへの情報の流れとその取扱いに変化をもたらすことになる。現在、衛星上での前処理や処理システムの開発が目的としているのは、データ伝送システムの容量の改善や、データ圧縮、符号化システムの改良である。しかし、不必要なデータの収集という最大の欠点を改めることに直接焦点をあてている研究開発は多くはない。たとえば、LANDSAT は実際に利用しうるデータの2倍のデータを送信してきている。これは雲に覆われたシー

著 者 紹 介

興石 肇 (正会員)

昭和5年生。東京都出身。昭和26年早稲田大学理工学部電気工学科卒業。防衛庁技術研究本部第3研究所を経て、航空宇宙技術研究所入所。現在に至る。航空機・ロケットの制御、地球観測技術の研究に従事。HOPEの会会員、計測自動制御学会その他の会員。

^{*1} 昭和61年11月6日、第24回飛行機シンポジウムにて講演。昭和62年5月19日原稿受理 Intelligent Earth Observation System

^{*2} 航空宇宙技術研究所 Hajime KOSHIISHI

ンのデータも撮っているからである。さらに、この取得したデータの1%以下しか処理されていないという¹⁾。この効率の悪さは、一つにはデータ処理システムの能力を越えて、データ収集能力の発達が大きかったからともいえる。これらの点を考慮すると、観測器側におけるデータの高度な選択性が要求される。この高度なデータの選択性は、観測器自身の知能化と、ユーザーの要求とリンクしたデータ取得・選択のシステムができて初めて可能になる。

また、衛星からのマルチスペクトル・イメージデータを種々の分野における分類処理に用いる場合、この処理は現在地上処理で行われているが、それは通常かなり複雑な処理過程を必要とする。今後の動向として考えられるシーン毎の画素数の増加、同時搭載される観測器の数、そのバンド数の増加は、テレメータシステムに対する電力の増大と帯域幅の拡大の要求となって現われてくる。その結果、テレメータシステムにおける観測器側でのデータの大幅な削減の必要が生じてくる。そのためには、衛星上での分類処理の実行を可能にするシステムの開発も必要になる。

3. 近未来の地球観測プラットフォーム

今後10年間くらいの地球観測のプラットフォームは、従来型ともいべきLANDSAT, SPOT, あるいはMOS-1型の衛星と、Earth Observing Systemの構成要素となる宇宙ステーションの極軌道プラット

フォーム、および静止衛星系から成る。

地球観測においてはデータの継続性が重要な属性の一つであり、この意味から従来型の個々の地球観測衛星による観測は引き続いて行われるであろう。しかし、1990年代の地球観測には宇宙ステーションの実現によって大きな変革がもたらされる。宇宙ステーション・システムは第1図に示すように、人間の常駐する有人宇宙ステーションと、二機の無人プラットフォーム(Polar Orbiting Platform: POP)が地球観測に専用的に用いられる。

現在、米国が中心になりNASAとNOAAが共同で、POPによる地球観測システム(Earth Observing System: EOS)の計画を進めており、ESAも一機のPOPを分担する予定である。このPOPによるEOS計画は、初期(1994~5年)で12t、後には55t(因みにLANDSAT 5号は1.75t)の巨大なプラットフォームを、地球をまわる低軌道に構築し、これに多数の観測器を同時搭載して、水圏、気圏、雪氷圏、生物圏、および固体地球が相互に動的に干渉し合うトータル・システムとしての地球を把握しようとするものである²⁾。POPによる地球観測システムの特徴としては次のような点が挙げられる。

- 1) 多くの観測装置により、関連する多数の物理量の同時観測が可能になる。
- 2) 大きな能力の計算機を搭載できるので、高度の

第1図 宇宙ステーション・システム

第1表 Earth Observing System の搭載観測器

観 測 器	観 測 項 目	関連観測器等
<u>THE SISP INSTRUMENT SET</u>		
1. Moderate Resolution Imaging Spectrometer	1 km Res : Biological Cycle	CZCS ; AVHRR ; SISEX
2. High Resolution Imaging Spectrometer	30 m Res : Biology/Geology	SISEX ; Studies, TM, MSS
2a Thermal Imaging Spectrometer	IR Portion of #2	TIMS
3. High Resolution Multifrequency Microwave Radiometer	Hydrology ; Soil Moisture	LAMMR ; Studies, SMMR, ESMR
4. Lidar Atmospheric Sounder	Atmospheric Correction	A/C ; Studies, Balloon
4a Laser Altimeter	Laser Ranging	Studies ; BB Systems
<u>THE SAM INSTRUMENT SET</u>		
5. Synthetic Aperture Radar	Land, Ice, Vegetation	Adv. SEASAT, SIR Series
6. Radar Altimeter	Topography	SEASAT, TOPEX
7. Scatterometer	Wind Stress	Adv. SEASAT, NROSS
<u>THE APACM INSTRUMENT SET</u>		
8. Correlation Radiometer	Species : NH ₃ , NO, OH, O ₃	MAPS, DCR
9. Interferometer/Spectrometer	NO ₂ , CH ₄ , N ₂ S, etc.	IRIS, ATMOS
10. Differential Absorption Lidar	Species	A/C ; Studies
11. Doppler Lidar	Tropospheric Winds	Studies
12. IR Radiometer	Species : Limb ; O ₃ , N ₂ O, etc.	LIMS/LRIR
13. Interferometer/Spectrometer	Species : Limb ; CFCI ₃ , etc.	CLAES
14. Submillimeter Spectrometer	Species : Limb ; OH, HCl, HF	New Technology
15. Microwave Limb Sounder	Species : Limb ; ClO, O ₃	MLS ; UARS
16. VIS/UV Spectrometer	Species	Studies ; ISO
17. Fabry Perot Interferometer	Wind & Temperature	HRDI
18. Michelson Interferometer	Wind & Temperature	TWM ; CLIR
<u>THE MONITORS INSTRUMENT SET</u>		
19. Solar Monitor	Spectrum	SUSIM
20. Solar Constant Monitor	Output	ACR
21. Magnetosphere Particles	Particles	Probes
22. Magnetosphere Currents/Fields	Currents & Fields	Probes
23. Automated Data Collection & Location System	Misc. from Bouys	ARGOS

機上処理ができ、システムの適応性が増大する。

- 3) 機上での較正が可能になり観測精度が向上する。
- 4) 修理・部品交換が軌道上で可能になり、信頼性の向上とともに長寿命化が期待できる。

一方、このような観測システムを構成し効率よく運用するには、次のような点が問題になる。

- 1) 柔軟構造システムとしての姿勢制御
- 2) 観測装置のポインティング制御
- 3) データ量が膨大になるので無駄な観測を極力排除する。
- 4) 上記に関連して、運用管理者、利用者とのリアルタイムの情報交換により、有効、かつ適応性に富む観測を行う。
- 5) 同じく、機上データ圧縮、機上処理・解析により地上へのデータ伝送量の減少を図る。

第1表はEOSの科学観測目的に必要な観測機器の概要をまとめたものである³⁾。観測器は大きく四つの

グループに分けられる。すなわち、Surface Imaging and Sounding Package(SISP), Sensing with Active Microwaves(SAM), Atmospheric Physical and Chemical Monitor(APACM)および Automated Data Collection and Location System(ADCLS)である。表にはそれぞれの観測器の観測項目、既存あるいは類似の観測器名などがあげられている。EOSの寿命は少なくとも10年と計画されているので、そのミッションの進展に伴い観測器も変更され、開発された新しい装置が搭載されることもある。

第2表はこれらの装置の重量、電力、データ量の予測値を示すものである。データ量はトータルで3.3×10¹¹ Bits/Orbitであるが、一周90分として平均のデータ取得率にしても約60 MBPSとなり、ピークではこの数倍のデータ取得率になることが予想される。初めに述べたごとく、LANDSATのMSSデータの利用効率1%以下のようなことは、その何十倍ものデータ取得率のEOSに対して許されるはずがない。不

第2表 Earth Observing Systemの観測器の重量、電力、データレート

Instrument payload	Mass(kg)	Power(kW)	Data volume /Orbit(bits)
SISP	4,000	4.3	1.2×10^{11}
SAM	1,000	15.6	2.0×10^{11}
APACM	4,200	6.6	0.1×10^{11}
MONITORS	300	0.2	—
TOTALS	9,500	26.7	3.3×10^{11}

用・無用なデータの取得を自動的に禁止し、利用者との通信や機上での自律的判断機構により、適応性に富んだ観測を行うことが必要である。

4. 知能的地球観測システム

従来型および極軌道プラットフォームを含む近未来の地球観測プラットフォームにおいても、観測精度の向上と観測装置の多様化により、観測する物理量とデータ量はこれまでよりも格段に増大する。したがって、適応性に富む、無駄を排除した観測と機上でのデータ圧縮や処理の高度化が必要になることは前節に述べたとおりである。

一方、観測され伝送されたデータを利用する立場から考えて、宇宙からの地球観測データの利用が思ったほどの促進を見なかった大きな理由として次のような点が挙げられる。これは地球科学と実利用のいずれの分野にもいえることである。

- 1) 観測要求に応じたデータが得られない。
- 2) データへのアクセスが面倒である。
- 3) コストが高い。
- 4) データの入手に時間がかかる。

極軌道プラットフォームを越えて、さらに21世紀への地球観測システムではこれらの問題点が解決されていなければならない。そのキーテクノロジーは知能化技術である。これらの問題点を解決した知能的地球観測システム (Intelligent Earth Observation System: IEOS) とはどんなシステムになるだろうか。

- 観測プラットフォーム・システムは、多数の観測器を同時搭載した大型のプラットフォームと、搭載観測器の数は少ないが、従来型の中高度極軌道、静止軌道をもつもの、中高度と静止軌道の間軌道をもつもの、長楕円軌道のペア、低軌道傾斜角、軌道高度や傾斜角の変更能力を有するもの、などの多くのプラットフォームから成り、それらが各個バラバラでなく coordinate して働くシステムが必要である。このようなシステムにより、利用者の観測要求に柔軟、かつ迅速に適応できるようになる。
- 観測が有効、かつ無駄を排除して行われるため

には、それぞれの分野において観測モデルが確立されていることが必要である。しかし、このモデルは新しいデータによって常に改良されていくものである。観測データは観測モデルから推定される値と適時比較され、観測システムの検証とモデルの検証が行われる。その結果、観測システムが改良されることもあれば、観測モデルの修正が行われることもある。

無駄な観測を排除するためには、データのアーカイブ（記録・保存）も重要である。ユーザの観測要求に対しては、まずその要求に適合するデータがすでにアーカイブの中にある否かが検索される。そのデータでよければコストも安く済む。

- 観測される地球と観測するプラットフォームの間に緊密な連絡が保たれることが必要である。観測される対象の状態がプラットフォームに伝達されていることにより、無駄なデータを取得することも避けられると同時に、観測系のパラメータを最適に設定することができ、情報取得の効率を上げることができる。光学センサにとっては、観測区域が雲に覆われているときには観測は無意味である。また、実時間の現象の追跡には対象の自動認識も必要になるであろう。

- プラットフォーム上での自動分類が可能になる。これはデータ伝送系の効率を上げ、その帯域幅の縮小と消費電力の低減化にもつながる。また雲と雪の判別はプラットフォーム上で行われることが、データ取得の効率向上には必要である。

- 観測ミッションの変更、利用者からの観測要求に応じて観測器のパラメータ、たとえば空間分解能、観測波長、波長分解能、走査幅、あるいは周波数、オフナディア角などを変更することが可能になる。観測システムのパラメータは、それぞれの観測対象に最適な値に設定される。

- データのコスト低減のためには、システムを運用する人員は地上設備、軌道上のプラットフォーム、それらの間のリンケージを通して、極力少なくすることが望ましい。知能化技術の発展により、最終的には全システムが無人で運用されることも可能であろう。そのようなシステムでは、利用者はターミナルから自然言語でシステムと対話し、必要な情報を得ることができる。この場合、利用者にはシステムに関する知識は全く必要ない。

- 将来の知能的システムから利用者がデータを得るプロセスは次のようになる。

- 1) 利用者がシステムに ID カードを入れる。
- 2) 利用者／システム・インターフェースが働き出

し、利用者は自然言語で要求を伝え、対話を開始する。

- 3) システムはアーカイブ・データを検索する。
アーカイブにない場合には全ての利用者の要求と優先度を調べる。
- 4) システムは全てのプラットフォームの状態を調べる。
- 5) システムは観測モデルに基づいて観測計画を立て、そのコストを見積る。
- 6) 利用者にコストを提示し、実行するか否かを決める。
- 7) 実行が決まれば、システムは軌道上の適当なプラットフォームと地上設備へ指令を出す。同時に観測対象に関する関連情報をプラットフォームに送る。
- 8) プラットフォームは地上からの情報に基づいて、観測装置のパラメータを最適化する。
- 9) プラットフォームは、有効なデータが得られるか否かを判断した後、観測を開始しデータを取得する。
- 10) 取得したデータには必要な機上処理が施された後、地上へ伝送される。
- 11) 地上処理が行われる。必要ならば画像処理も行われる。
- 12) 処理されたデータと観測モデルとの比較・検討が行われ、必要があれば観測モデルのアップデートが行われる。
- 13) 処理された結果が利用者に出力される。

以上が高度に知能化された将来の地球観測システムのありうべき姿である。観測モデルのアップデートや検討は最後まで人間の介入する部分になるであろう。

5. 知能化の試みの現状

現在、種々の知能化の試みがなされている。その一つは知識工学の観測データの処理への応用で、たとえば、森林の樹種の分類とか、漁海況図の作成とかの試みがなされている。また、観測装置の知能化の試みがある。次に紹介するのは、観測器の知能化の試みである NASA の FILE⁴⁾ (Feature Identification and Location Experiment) の考え方の概要である。

従来の地球観測システムでは、地球は完全に受身の観測対象であった。しかし、効率の良いデータ選択のためには地球は単に観測されるだけではいけない。すなわち観測対象のほうからも観測に協力する形のフィードバックが実時間で行われなければならない。このフィードバックされた情報を観測器はデータ選択の判断に用いる。この協調的観測対象の概念を第2図に示

第2図 協調的観測対象の概念

す。観測器システムに入る情報は二つのカテゴリーに分けられる。第一は観測対象を観測したそのままの、スペクトル的、空間的、時間的情報である。第二のカテゴリーは第一のカテゴリーのデータの性質に関する情報で、季節の変化、大気の変化、人工的变化などを示す情報である。判断・決定人工知能システムへの入力の一つは、センサー・システムからの中間的信号であり、他の一つは参照データ入力である。参照データ入力とは、リアルタイムに、up-link を通して人間から与えられる情報や、以前の観測からこの判断・決定人工知能システムが学習し記憶していた情報、あるいは、ミッションの初めに与えられた条件などの情報である。これらの全ての情報を用いて、判断・決定人工知能システムは有用なデータ出力を生み出す。たとえば、地表の被覆分類結果とか、衛星の位置と観測装置の指向している方向、地表の目標の追跡、あるいは航法のための情報などである。

地球観測がこのようなシステムとして完成すれば、非常に広い分野のユーザに有用なデータを効率よく提供することができ、かつ、観測器へデータを取得しないように指示を与えることにより、不必要なデータの取得を避けることができるようになる。また、観測対象の情報に基づいたセンサー・レベルでの選択することにより、全データ処理一前処理、圧縮、記憶、伝送、処理の全過程の負荷を最小に抑え、処理そのものの効率を上げることができる。

協調的観測対象という概念は、地球の遠隔観測における自律化にとって基本となる概念である。観測器の自律的指向能力と、目標を自動的に追跡する能力は、地球表面の繰返し観測が必要ときには有用な能力となる。それはたとえば、河川、湖沼、海岸線の汚染の監視、煙突からの排出ガスの監視、土地利用状況とその変化の把握、積雪量のマッピング、雲量のマッピング、穀物の生育状況の監視、洪水による災害の見積り、海水や湖の水の動きと変化の監視、火事の検出とその被害の見積り、乾燥地域のマッピング、水資源の質と量のモニタリング、海岸線の急速な変化の把握、分水界や流域面積の計測などである。このような自律的機能は、今後継続して打ち上げられる従来型の

LANDSAT, SPOT, MOS-1等の地球観測衛星を効率的に運用するためにも必要となる機能であるが、それにもまして宇宙ステーションの極軌道プラットフォームのような、大型で多種の観測器を同時搭載するプラットフォームの運用には不可欠な機能といえよう。

第3図 将来の地球観測システムのキーテクノロジーの開発順序

第4図 種々の対象物の輝度曲線

第5図 赤および近赤外カメラの出力による種々の対象物の99%信頼度多角形(太陽は天頂から41°~60°の範囲にある)

今後の地球観測と惑星探査ミッションを考えると、そのキーテクノロジーの一つは自律的運用、正確な軌道と観測器の指向の制御、誘導制御技術と目標の追跡技術である。地球観測プラットフォームの自律航法は、究極的には地上のステーションの援けを必要としない。パターン／特徴認識技術を用いる自律システムになるであろう。惑星探査における航法も自律航法システムで行われるようになる。パターン認識の技術はランデヴー・ドッキング、惑星表面への着陸、惑星表面上の自律的 roving system (障害物の検知と回避を自律的に行う)にも不可欠の技術である。

これまで述べてきた、将来の高度な地球観測・惑星探査に必要な技術—衛星上での自動分類、雲の検出、観測器の指向能力、目標の追跡、自律航法システムはどのような順序で研究開発が行われるべきか。第3図はその一案を示す。いずれも地上における実験、計算機によるシミュレーション研究(縦軸)と、衛星や宇宙ステーション、スペースシャトルなどによる飛行実験(横軸)を通じて研究開発が進められる。これらキーテクノロジーのうち、初めの二つについては現状でも多少のことがいえる。

自動分類システム：たとえば、裸地、小麦、汚れた河川、きれいな水、平均としての植物の五つのカテゴリーの分類を考える。グランドトルースの計測と計算機によるシミュレーションから、これらのカテゴリーは二つの波長、 $0.65\mu\text{m}$ と $0.85\mu\text{m}$ における輝度測定から判別されることがわかった⁵⁾。第4、5図からもわかるように、これら五つのカテゴリーは、この二つの波長における輝度の比によって明瞭に区別される。この手法は植物の中をさらに細かく分類したいときにも、その背景の土壌のスペクトルの違いを補償して、正しい結果を与えるといわれている⁶⁾。水と植物はこの手法により、雲、氷、裸地から分離することができる。しかし、裸地についてのこの2波長の輝度の比は、雲や氷のそれとほぼ等しい。雲と氷(雪)の反射率は裸地の反射率よりもかなり高い。第5図はCCDを用いた二つの放射計：一つは $0.85\pm 0.010\mu\text{m}$ に感度を持ち、他の一つは $0.65\pm 0.010\mu\text{m}$ に感度をもつ放射計で、植物、裸地、水および雲を観測したときの出力を示したものである。図中の多角形で示された領域は、大気の透過度、照射角、観測器の雑音、感度のバラツキおよび暗電流、放射計の光軸の角度、植物や裸地の種類による変化、水の濁度等を考慮した数式モデルを基にした99%信頼度の範囲を示す。この図から、裸地と雲とは二つの放射計の出力比はほぼ等しいが、出力そのものに大きな差があることがわかる。

第6図 FILE機上分類システムのブロック図

雲の検出システム：キーテクノロジーの一つは、雲と雪の区別を自動的に行うシステムの開発である。雲の検出ができれば、雲による被覆率によって自動的にそのシーンのデータを撮るか否かの決定ができる。また逆に自動的に雲のマッピングを撮ることもでき、さらに将来、目標の追跡システムが開発されれば、特定の雲を追跡することにより、風向、風速の把握ができるようになる。雲と雪とは可視波長域では同様に高い反射率を示すが、 $1.55\mu\text{m}$ 付近の波長に対しては雲のみが高い反射率をもっている。雪もその種類によって多少異なるスペクトル特性を示すが、いずれも $1.5\sim 1.6\mu\text{m}$ の波長帯では非常に低い反射率をもっている。そこでこの波長帯は雪と水滴成分の雲との分離に用いることができる。氷片から成る雲と雪の分離はずっと複雑な問題である。おそらくさらに波長の長い熱赤外のバンドを付加することが必要であろう。第6図はNASAがスペースシャトルで実験を計画していた、二つの放射計による搭載型自動分類システムのブロック図である。

6. おわりに

私はいま、海洋観測の分野で人間の頭脳を計算機に置き換えることができるか。いわゆる、知識工学の援用による観測作業の効率の向上ということを試みてい

る。それはもとより容易なことではないことはわかってはいたが、やってみて人間の端倪すべからざる能力に、その道の遠いことを思い知らされている。本稿で述べたような知的地球観測システムへはいつ到達できるかわからない。そのためには計算機そのものにも変革が必要かもしれない。人間の知能を真似ること自体誤っているかもしれない。しかし、そのような認識を含めて、将来システムは知能化されていくことは確かなことのように思える。

参考文献

- 1) NASA: Data Management System Flight Experiment Development Plan, Vol. II, Final Report, NASA CR-150258, Apr. 1977.
- 2) Science and Mission Requirements Working Group: Earth Observing System Vol. I, 1984.
- 3) R. M. Muller, et al.: Earth Observing System (EOS) Requirements for A Polar Platform SPIE Vol. 493, 1984, pp. 228-235.
- 4) Wilson, R. G., et al.: Earth Feature Identification and Tracking Technology Development, SPIE Vol. 178, 1979, pp. 185-194.
- 5) Schappell, R. T., et al.: Experimental and Simulation Study Results for Video Landmark Acquisition and Tracking Technology, NASA CR-158997, Feb. 1979.
- 6) Tucker, C. J.: Use of Near IR/Red Radiance Ratios for Estimating Vegetation Biomass and Physiological Status, NASA TMX-71388, July 1977.