展望・解説

宇宙からみた地球環境*

坂 田 俊 文**

Global Environment from Space

Toshibumi SAKATA

1. はじめに

人工衛星による地球の観測が始まってからすでに30年たっている。ロケットによる大気構造の観測から始まり、地上からのさまざまな地球を知る手段が今世紀になって活発になった。地球科学は広範な対象を科学者のフィールドサーベイ、観測船による調査、探査隊に観測、種々の観測機材の開発などによる研究報告やデータの蓄積によって発展し多くの研究業績があげられている。この分野に人工衛星による観測が加わったことは、いままでにない幅広い新しいデータが得られるようになったと言えよう。リモートセンシングと呼ばれる技術はこの人工衛星や航空機による画像撮影技術によって地球表面のあらゆる対象物からのスペクトルや形状のデータを捉えることができるのである。

流れの可視化という視点でこの人工衛星からみた地球上のさまざまな対象物や現象がどのように捉えられているか述べてみたい。

2. 地球を観測する

地球観測衛星として早くから実用化されたのは気象観測衛星である。1957年に打上げられた“スプートニク”以来、世界中で人工衛星の打上げの競争が始まった。特に米ソ間の激しい争いは失敗を連続しながら徐々に技術を向上させ、さらに、両国間の打上げ競争が続いた。1960年初頭になると米国の気象衛星の打上げが始まり、TIROS-シ

リーズのスタートになった。この TIROS に続いて、ESSA、NOAA (ITOS) と1970年代の終りまで続くことになる。さらに TIROS-N として新しい NOAA が軌道に送られ現在10号までが運用されている。この NOAA は、極軌道衛星として高度約800kmで3,000km幅の地表を撮影しており、世界の広域のデータを捉えているもっとも利用度の高い衛星になっている。1960年代の後半に NIMBUS という気象衛星が計画され、オゾン、紫外線、海温分布、太陽エネルギーなどの観測機材を搭載した衛星が開発され、現在もその7号が軌道上にある。静止軌道の気象衛星は1974年に GOES が打上げられ、“GMS” ひまわり、ついで METEOSAT、INSAT が軌道上に配置された。1972年に NASA は地球資源探査技術衛星 “ERTS” を初の気象衛星以外の観測衛星として打上げた。この ERTS は現在 LANDSAT と呼ばれていて、現在4号および5号が軌道上にある。この LANDSAT は NIMBUS とほとんど同じ形のもので NIMBUS の搭載センサーを変えたもので、3号まで運用した(1960年代から開発されてきた多くの搭載センサーの改良されたものがこの LANDSAT に載せられ実用衛星として利用されている)。

LANDSAT は極軌道太陽同期の衛星で1号から3号までは高度約900km、4号からは約700kmで地球一周が90分から110分程度で周回している。地上の撮影は地上解像力が80mの MSS (Multi Spectral Sensor) と30mの TM (Thematic Mapper) のセンサーを搭載しており、地上幅を185kmを秒速約8km弱でスキャンしている。

*原稿受付 昭和63年2月17日

**東海大学情報技術センター

る。スペクトルの幅は可視、近赤外および熱赤外までをMSSで4バンド、TMで7バンドにわけて撮影し、地上の受信局へと送信している。LANDSATが1972年以上15年間にわたり観測した地球上のあらゆる対象物の姿から実にさまざまな多くのデータが得られ、貴重な成果をもたらしている。

このLANDSATはその後地球観測の幅広いデータの取得から画像処理技術を含めたリモートセンシング技術を発展させた地球観測の分野での関心を高めた。1985年になりフランスは“SPOT”という地球観測衛星を打上げた。この衛星は地上解像力10mという高解像力のセンサーを搭載し、LANDSAT以上の能力に関心が持たれた。さらに1987年に日本の地球観測衛星“MOS-1”が軌道に載せられた。ここの衛星の特徴は海洋観測衛星と呼ばれ、1978年に初の海洋観測衛星として打上げられ、わずか3か月で停止した米国の“SEASAT”に次ぐものである。このMOS-1は試験的な実用衛星としての側面が強く、MESSERと呼ばれるセンサーは解像力50mであるが、2台のカメラを持ち交互に運用できる。また、VTIRは可視熱赤外センサーで、0.9kmおよび2.7kmの解像力で1,500kmの幅の範囲を観測できる。MSRはマイクロ波放射計で23.8GHzおよび31.4GHzの2波長受動型のセンサーを搭載し317kmの円形を観測するものである。LANDSATとの交換性のあるデータ、NOAAのもつ広域探査用の特徴と試験的なマイクロ波放射計の三つの特長あるセンサーをもっている。

気象衛星N-NOAAは1978年にスタートしたシリーズTIROS-Nで、常時2個を組合わせて極軌道で観測している。さまざまな衛星があるが、現在では上記の代表的な衛星によって地球の環境観測が常時できるようになりつつある。静止軌道上の気象衛星5個、極軌道上のNOAA 2個、同じく極軌道上のLANDSAT, SPOT, MOSの3個による地球観測が何らかのデータリンクによって地球全体の動きを観測できる。次期衛星として資源探査衛星が1990年代に予定されていて、日本およびヨーロッパでJ-ERS, E-ERSの名でそれぞれ打上げられる。これらの計画では、雲や水蒸

気の吸収のないマイクロ波領域で全天候の合成開口レーダーが搭載される。

このように、つぎつぎと地球観測に対して衛星の利用が高まっているが、その理由の第1として常時広域を観測できることで地球表面の大気の流れ、海流の動き、熱の分布、植生の変化、砂漠の拡大などが従来の観測手段とは異なり、地球的規模でネットワーク化できるからである。このため、衛星の大型化や寿命の延長、燃料の補給、メンテナンスなどのため極軌道プラットフォームやスペース基地が考えられている。

3. 動く大地

地球の誕生から46億年といわれる地球の表面は地表や大気の安定によって徐々に変わってきた。大陸と海洋は何億年もの間、変化の激しい移動を繰り返しており今後も続くであろう。常時に長い時間のスケールで考えると地表はマグマの上をゆっくりとした流れの状態にあって大陸は常に移動している。このような大陸の移動すなわち流れの状態は地形の上に現われ、大断層や山脈の形成にその流れの姿をみることができる。約6億年前のカンブリア紀以降の地質は生物を指標として現在では相当詳しくわかってきており、古生代、中生代の岩石の分布やジュラ紀や白亜紀におきた造山運動、もちろん新生代に入っておきた造山運動を含めて地球観測衛星が捉えた地表のさまざまな姿にみえている。

大規模な地表の構造線は大陸の上に多くは直線状にみることができる。山脈や地溝は衛星の地上解像力がLANDSATの80mから30mになってより明確になり、ステレオ撮影によって立体視が可能になり、線状構造（リエアメント）がよく見える。

ウェゲナーによって提唱された大陸移動説は近年になってプレートテクトニクスの理論やグロマー、チャレンジャ号による海底掘削調査によって明確に支持されるようになって地上の形状との関係が知られるようになった。この結果、アフリカ東部の大地溝帯、ヒマラヤ山脈に対するインド亜大陸の圧縮、アンデス山脈、アフリカ大陸と南米大陸の形状などがLANDSATによって見るこ

とができるようになってきている。現在も年に数センチずつ動き続ける大陸や島がプレートの上に乗ってマグマの上で流れているわけである。このわずかな流れは地上のいくつかの観測点で準星の電波の信号を受け、その時間差によって年間の移動が計れるようになってきている。超長基線電波干渉計は、VLBI (Very Long Baseline Interferometer) と呼ばれ、大陸の移動をセンチメートルのオーダーで計ることが可能になり大陸移動を裏づけている。インド大陸が6500万年前に南極大陸の位置から移動し、ヒマラヤ山脈の位置に衝突し、現在もヒマラヤ山脈を押しあげており、また、ハワイ諸島が西方に移動し日本列島に近づいているのである。

気象衛星 NOAA からのデータをコンピュータモザイクすることによって世界全図を作ることができるようになった。写真1は人工衛星ノア (NOAA) で撮影した3000km幅の画像をコンピュータモザイクしメルカトル図法に展開したもので、(i)は雲のデータを加えたもの、(ii)は雲のデータを除去したもの、(iii)は海底地形を加えたものである。メルカトル図法に展開したこの衛星からの地球全図から雲を除去すると、大陸の地形と植生を明瞭にみることができる。

この地形図は観測波長域の組合わせによって植生分布を表示することが可能で、その結果から地表の水分や植物の状況を知ることができる。このデータから砂漠の分布が帯状になって北半球および南半球ともに広がっているのが見える。北半球は赤道から緯度で約10度から30度ぐらいの所は砂漠状になって西から東へとつながっている。サハラ砂漠から中近東を通過して中国のタクラマカン砂漠に至る。また太平洋をこえてアメリカ西部のアリゾナ、メキシコに至る地域である。一方、南半球はアフリカのナミブで砂漠からオーストラリア、チリと北半球と同じく同緯度の帯状の砂漠が続いている。乾期と雨期ではこの砂漠帯は変動しサヘル地帯がサハラ砂漠では北上または南下しその幅は数百キロメートルに達する。また、気候の変化によって緑の帯は広がりを変える。

森林の生態は気温や大気によって変わるが、最近では人間の活動によるところが多い。アマゾン

は地球上では極めて大きい森林地帯である。この地域では開拓によって急速に森林が減少している。LANDSAT からみた森林地帯の一部ではわずか5年間で道路沿いの地域が大規模に開拓され、回復不可能まで土壌が失われている状況がみられた。同様のことが大なり小なり地球のあちこちでみられている。

かつて地上に落下した大きな隕石のあともみられる。植物に覆われた地域では不明であるが、砂漠やツンドラ地帯ではしばしば見出されることがある。大きさは航空機では発見されなかったが衛星で見つかることがある。カナダやアフリカで大隕石穴とみられるものがLANDSAT で撮影された。

地球上の人間活動は年々規模が拡大してゆく。その典型的な例が都市の変化である。古代の都市は消滅してもその痕跡は残り、現在の都市は拡大を続けている所が多い。人間の歴史の流れは都市を作りそして消滅させてゆく。都市のスプロール現象は衛星データから観測されている。

4. 海洋の流れ

海は地球の表面の70%を占めている。地球が太陽系の惑星のなかで最も特異なことは、酸素を含んだ大気と海を保有していることである。回転する地球の表面には海の動きがあり、海の流れのパターンと複雑な現象によって熱エネルギーが運ばれている。写真2は日本列島に沿って流れる黒潮の動きをみたものである。

太平洋、大西洋そしてインド洋と代表的な地球上の大きな“くぼみ”とそれ以外の全地球の海水量は130,000,000トンと推定される。海の世界の平均深度は約4,000mで大陸の高さとは較べものにならない。海底の地形は意外に変化に富んでいて海溝、海膨、海嶺があって太平洋底はさまざまな物質の堆積層に覆われている。海溝部の最深部は10,000メートル以上あり、太平洋で広がった部分は平均4,000~6,000メートルの所である。水の運動は粘性からみて移動性に富んでいるので、地球の回転運動に極めて大きな影響を及ぼし、月の引力による潮の干満にも関係してくる。しかし、衛星による観測では海の表面のみであって、内部

写真1 気象衛星 (NOAA) データのコンピュータモザイクによる全世界図

写真2 日本南岸太平洋の黒潮のパターン

写真4 赤道を中心にした地球の温度分布

事故前

事故後

写真7 ソ連のチェルノブイリ原子力発電所の事故

の動きは間接的にしか知ることができない。

海の動きは、表面での動きと断面方向での動きに大きく分けることができる。これらの動きを支配する条件として、地球の回転と太陽の照射エネルギーによる対流、そして大気との相互作用がある。海流の動き、特に表面では風によって動きは複雑になっている。衛星による地球観測のなかで最も注目され期待されるのが、この海流の動きである。広域で熱の運動の激しい低緯度帯から高緯度帯までの動きを連続に観測できることは、調査船による点の観測から衛星による面への観測へと飛躍的にかえたのである。

赤道を境にして北および南半球はそれぞれ対象的な変化をするが、大陸の多い北半球は南半球に較べ複雑であり、海底の地形とも関係してくる。地球の回転に伴い両半球では熱帯から亜熱帯にかけ時計回り、または反時計回りに流れる。この結果、太陽からの熱は海水の蒸発と吸収によって熱エネルギーを海流とともに北上または南下させる。静止衛星は雲の動きに主点がおかれるが、熱分布を広域にみることができる。一方、極軌道衛星は低高度で海流方向と海水温をみることができる。しかし、海水温は直接测温したものとは隔りがある。その一つは大気補正が極めて重要で、衛星高度までの垂直方向の大気の分布と水蒸気などの吸収の補正が必要である。その二は表面海水温が下層の構成によって異なるからである。

垂直面での海水の動きは太陽により温められた海水は極方向に動き、冷却されて下層から再び赤道にもどる。一方、2,000メートル近い所では亜寒帯深層流があって極方向から赤道に向かっていく。さらにこの下層部は赤道から極方向に向かって深層流が動いている。底層流は極方向から赤道に向かっており、地極全体の海底はゆっくりと海水が流れ南極、北極とも長い時間をかけて海水で結ばれている。海水温は表面に近い所では温度差が少なく、中層で急速に低下し以下は一定温度に近づいている。海流の動きの激しいのは赤道付近で、この移動分を補うため、下層部から供給されてくる。これを湧昇流と呼んでおり、大洋上で何か所かがよく知られている。すなわち、北米の西海岸、南米の西チリ、ペルー沖、アフリカの北西

および南西の沖、赤道に沿った海域および日本の近海である。

この湧昇流には多量の栄養塩類が含まれ、それによってプランクトンと魚が集まり漁場となっている。このようなことから人工衛星は海面の温度分布と海流の方向、スペクトル分布によってプランクトンを観測している。写真3は人工衛星NOAAによって日本列島周辺海域の海流の温度分布を観測したもので、色のステップは約 1°C に対応している。NOAAのデータは海流の動きの観測に最も適しており、NIMBUSではCZCS (Coastal Zone Color Scanner) によって多くのデータが取得されている。漁場の観測として海水温が極めて重要で漁船ではこのデータを利用しているものが増えている。潮目境もよく検出され、漁群探知として今後に期待されている。一方、陸域から海へ流出する河川水も多量の栄養分に富み、海水への拡散によって漁場に大きな影響を与える。しかし、工業廃水、生活污水、発電施設からの温廃水が過剰になると海水汚染となり、広く海洋へ拡散してゆく情況がみられる。地球的規模で最も注目されているのが温度分布で海面の温度パターンがエル・ニーニョの動向が重要である。異常気象によって引き起こされる環境変化は、干ばつと洪水の局地化、水不足、食糧の生産性などに影響を与える。このような点で衛星データは極めて強く期待されている。

写真3 日本近海の海面温度

5. 大気の流れ

地球を覆う大気は太陽から到達する強烈なエネルギーを吸収、反射するいわば地球の衣バリエーである。この地球を包む大気は地表から順に対流圏、成層圏、中間圏、熱圏として分類されている。このうち対流圏は温度と湿度が生物に適しており、海や湖水、河川からの蒸発する水分を含み、太陽エネルギーの吸収も温和である。この対流圏の厚さは季節や緯度によって異なるが、赤道上空で18kmで極上空では10kmに達している。写真4は赤道を中心にした地球の温度分布で太平洋の中心部の海面に高温部分が観察される。

太陽から照射するエネルギーは赤道上で最も強く、その結果海洋から多量の水分を蒸発させる。上昇した水分は雲となり、上空で冷却されて雨となる。そして、多くの雲は北上または南下して地球全体を覆うのである。この結果、熱分布と地球の回転によって大気の動きがあり、雲が流れてゆくのである。強く太陽からあたためられた雲は多量の水分を含み、台風やハリケーンとなって雨を降らせる。竜巻は、激しい上昇気流によって地上のあらゆる物質を空中に吸い上げる。人と衛星からみる大気の動きはこれらの姿を捉えている。

静止軌道上にある気象衛星からは刻々と湧き出すような雲、移動する雲の動きが捉えられている。1時間また3時間ごとの映像を連結し再生すると雲の発生と消滅がよくみえる。雲の動きは地形によって異なり、局地的な気象が作られる。

対流圏の温度分布は地上からの高さによって徐々に低下する。したがって雲の温度分布によって雲の高さが推定できる。しかし、これも海面や陸上で異なり、大気の断面方向の構造によって補正が必要になる。対流圏上層の成層圏は対流はほとんどなく、温度はあまり大きく変化しない。この成層圏の中央部は紫外線の吸収するオゾン層がある。人工衛星NIMBUSによる長い間の観測結果は極めて重要である。この衛星の搭載したTOM (Total Ozone Measurement) が連続した観測の結果、この10年間で南極上空のオゾンの減少率は極めて高いという結果を示している。すでにその中心部では40%以下に達していて地表の生物が直

接あびる紫外線が増加し、皮膚に与える影響が大きく生物の生命にとって極めて重要である。最近、極地域に見られる太陽エネルギーの変動や生物に与える影響の研究が望まれている。

可視および熱赤外スペクトルによる熱分布は地表の気候、また環境状態を示している。赤道付近で発生した台風は北上する途中で加速されてエネルギーを蓄え大型化し陸地を襲うことになる。写真5は人工衛星から台風の姿を捉えたものを立体表示したものである。日本列島にシーズンになるとやってくる台風も、フロリダ半島を襲うハリケーンも同様である。一方、陸地があたためられることによって起きる急激な対流は、竜巻を起こして多くの被害を地上に与える。赤道近く海面をもつ地域ではモンスーン地帯と呼ばれる激しい気流の動きによって大量の雨と暴風雨に見舞われる。インドからバングラディシュ、東シナ海、日本列島がいわゆるアジアモンスーン地帯のよい例である。静止気象衛星GMS ひまわりは、この地域の雲の動きを観測する役割にもっとも適した位置にある。一方、“GOES-East”は西インド諸島からフロリダ半島、メキシコ湾にかけての地域をみており、上述のハリケーンの動きを観測している。このように静止衛星による雲の動きは36,000km上空から地球の全球をみており赤道を中心とした南北半球の状況を一度に捉える最も効果的な方法である。

モンスーン期のインドから日本列島にかけての雲の動きは興味深い、アラビア海、インド洋からの多量の水分と熱を含んだ雲がインドのデカン高原にかかり、ベンガル湾を北上した雲がヒマラヤ

写真5 台風の立体表示

山脈にはばまれて東シナ海にでる。さらに北上して日本列島にかかって梅雨による状況がひまわりの画面に刻々と写しだされている。気象衛星“NOAA”は詳細な雲の動き、形、温度分布を撮影していて陸地にかかる陸の動きをより明確に示している。

火山の噴火が大規模な場合には地球規模での影響がある。古くは浅間山の爆発は世界的に寒冷化の影響を与えたと言われ、近くはエル・チョ・チョンの噴火は3日間で噴煙が地球を覆った。三原山の噴煙も NOAA で捉えられている。口絵1は大島三原山の大噴火を爆発3時間後(1986年11月21日午後7時)に人工衛星 NOAA から赤外線センサーで捉え画像処理したもので、噴煙が東へ800 km 以上ひろがっているのがみえる。地球規模のこのような大気の流れは多くの粒子が地球規模で浮遊しており、サハラ砂漠の砂もヨーロッパはもとより太平洋や大西洋の上空で採取される。中国の黄砂も日本には季節風によって全国に飛来しており、これらも衛星画像で捉えられる。

6. 地球の環境

回転する地球の表面には、固体の大陸、液体の海洋、気体の大気がそれぞれ三つの相が相互に関係して流れの動きをもっている。もちろんその動きの速度は異なるが、これらは太陽からのエネルギーの吸収と反射を繰り返して、吸収されたエネルギーは大きく熱エネルギーとして地球上に分布される。写真6に気象衛星 METEOSAT (静

止軌道衛星)が撮影した雲の動きを示す。地球の平均気温の $1\sim 2^{\circ}\text{C}$ の差は気候に大きく影響を与え生物の生命を支配してしまう。太陽エネルギーが常に照射される赤道では常に海面から水分が蒸発しており、海流の循環の大きなエネルギーへと変換される。地球規模の流れは大気の流れ、海流の動きと熱分布の重なったものとしてみえる。人工衛星に搭載するセンサーは可視域から熱赤外線領域までをバンド別に検知する。また、最近ではマイクロ波領域での放射、吸収、反射による観測が進められている。

積雪、流水の状況は気象の分析にとって重要であるばかりでなく、水資源による社会への影響が大きくなるので、これらの動きについて常に観測が欠かせなくなっている。同様に氷河の前進や後退も長期的な気象予報に極めて重要な情報として注目されている。

自然災害は台風による洪水、大規模な河川の氾濫などは季節によって、また、火山の噴火は長期的な周期によって、異常気象による干ばつや砂漠の拡大など地球上の変化は非常に多くさまざまである。一方、都市化による温度上昇、スモッグ、排水、汚染などは人口の増加とともにますます激しくなっている。また、都市への人口集中による市街の拡張は急速で、自然の状態の変化ははなはだしい。

人為的な自然の破壊は都市だけでなく、森林の破壊を招いている、カリマンタンやアマゾンにおける森林の伐採の現状はかなり深刻で、気象にも

写真6 雲の動き

いずれ影響してくるだろう。アマゾン奥地の開拓による森林の伐採はこの10年でまったく地表の様相を変えており、土壌の流失が進んでいるようである。一方、砂漠の拡大は年々激しくなっており、これらを人間の手でとどめることは極めて困難になってくるだろう。このような植生の変化は、NOAA衛星によって得られる Vegetation Index を用いて分布図が世界地図の上に表示されるようになった。これらのデータから世界の環境の変化を時系列でみることによって種々な予測が行われている。

人為的な事故の例としてソ連の原子力発電所“チェルノブイリ”があげられる。1986年4月に起きたこの事故は、アメリカのスリーマイル島に次ぐ社会的な重大事故でその後遺症は長く続くであろう。この事故では人工衛星による観測が有効な手段となった例である。事故発生（1986年4月26日）から3日後に LANDSAT が、続いて SPOT（ともに地球観測衛星として高解像力 30m と 10m のセンサーを搭載している）が事故現場の上空を通過し、極めて明確な映像を捉えた（写真8）。事故前の温排水は冷却池の水温より5°位高いが、事故後ではこの温度差がみられず原子炉の停止状態が表わされている。事故を起こした原子炉の温度分布と、冷却池の温度分布も観測することができ、事故の状況を正確に把握することができたのである。

このように地球上で起きるさまざまな現象や変化を刻々と捉え状況を分析できる手段として、人工衛星による観測手段が実用化されるようになった。リモートセンシング技術は複合的な技術であり、その応用分野は広く学際的である。また、画

像から情報を抽出し解析する技術もこれらのなかでその価値を大きく認められたものである。

不可視画像を可視化する技術のなかで、X線画像は医学のなかで大きく評価され今日 Computer Tomography として新しいステップを踏んでいる。一方、赤外線画像は熱領域を広く捉え地球規模の大気や海洋の流れを可視化することで成功し、現在ではマイクロ波領域のパターン情報の実用化が進んでいる。

7. 結 び

流れを可視化するという視点で地球観測を考えてみたのであるが、非常に対象が広いのでまとまりがつかなかったかと思われる。36,000km から 700km ぐらいの上空から数 10m の解像力を得るための衛星搭載のセンサー、また、衛星自身の軌道の精度からみてこれを画像するには多くの技術的な難かしさがある。これらを実現させるための地上の受信系、画像処理系のハードウェアおよびソフトウェアの開発に負うところが極めて大きい。最終の画像化までのプロセスが意外に時間を費していることを付け加えたい。

文 献

- 1) 坂田俊文：日本機械学会誌，90，823（1987）.
- 2) “ ”：月刊地球，53，11（1983）.
- 3) “ ”：写真測量とリモートセンシング，'81特集（1981）.
- 4) “ ”：“ ” ’83特集（1983）.
- 5) “ ”：環境技術，12，5（1983）.
- 6) 竹内 均，坂田俊文：宇宙からみた日本列島，日本放送出版（1983）.
- 7) 日本リモートセンシング研究会編：画像の処理と解析，共立出版（1983）.
- 8) 坂田俊文，中野尊正：日本列島地図帳，日本放送出版（1985）.