

地球環境観測衛星 Terra/Aqua-MODIS 受信システム

加 藤 芳 信*・青 山 隆 司*

Earth Environment Observation Stellite Terra/Aqua-MODIS Receiving System

Yoshinobu Kato and Takashi Aoyama

At the Awara campus (lat. 36.159°N, long. 136.141°E) of Fukui University of Technology, a MODIS receiving system was set up in September, 2003. This system directly receives the X-band (8GHz) MODIS data from the satellites Terra and Aqua within a radius of 2700km by using a 10-meter parabolic antenna. The maximum observation area is about 5400km(north-south direction) x 2330km(east-west direction). The first image from Terra was received on September 11, 2003. This paper shows the details of MODIS receiving system and the processed images of Typhoon 14, Fukui prefecture, etc. The research subjects from now on are described.

1. はじめに

福井工業大学・芦原学舎（芦原町北湯，北緯 36.159°，東経 136.141°）には，2001 年 5 月 15 日に完成した 10mφパラボラアンテナ（米国 ViaSat 社製，株式会社東陽テクニカ納入）がある[1]。今年（2003 年）9 月に，学園のご理解のもと，「テラ・アクア衛星 MODIS 受信システム」（ノルウェー国 Kongsberg Spacotec 社製，株式会社ビジョンテック納入）を導入することができた。本システムは，10mφパラボラアンテナを利用して，地球環境観測衛星 Terra（テラ）及び Aqua（アクア）の MODIS（モーディス：Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer：中分解能撮像分光放射計）センサデータを直接受信し，データ処理及び蓄積し，画像解析するシステムである[2]。

本システムの受信範囲は半径 2700km である。従って，衛星が真上を通過する場合，南北方向 5400km*東西方向 2330km の範囲を観測できる。また，本学は日本海側にあるため，西方向に低い仰角の衛星追尾により，かなり中国大陸の奥地まで観測できる。初画像受信は 9 月 11 日（木）に成功した。現在，本システムは，学部生の教育（宇宙通信工学科 3 年「電子・通信工学実験実習Ⅱ」および電気工学科電子工学専攻衛星通信工学コース 4 年「衛星通信工学実習」），卒業研究，大学院修士研究，教員の研究などで活用されている。

本文では，本システムの詳細と受信画像を示し，最後に今後の研究方向について述べる。

2. Terra/Aqua 衛星と MODIS センサ

Terra（別名 EOS-AM1，図 1 参照）は 1999 年 12 月 18 日に，Aqua（別名 EOS-PM1，図 2 参照）は 2002 年 5 月 4 日に，米国 NASA により打ち上げられた。これら 2 つの衛星は，高度約 705km，傾斜角 98.2 度，軌道周期約 99 分，回帰周期 16 日の太陽同期準回帰軌道で地球を観測する。Terra は 10 時 30 分頃（±1 時間），Aqua は 13 時 30 分頃（±1 時間），及びそれらの 12 時間後に，日本上空を通過する。

両方の衛星に搭載されているセンサとして，MODIS（モーディス：Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer：中分解能撮像分光放射計）がある。MODIS の場合，地表を観測飛行しながら観測データを X バンド（8GHz）で地表に送信する。MODIS の電波の受信は無料である。MODIS センサは，観測幅 2330Km (across track) by 10Km (along track at nadir)，空間分解能 250m

* 宇宙通信工学科

(Band 1,2), 500m (Band 3~7), 1000m (Band 8~36)で、可視域 $0.4\mu\text{m}$ ~赤外域 $14\mu\text{m}$ (計 36 バンド) を観測する (図 3, 表 1 参照)。

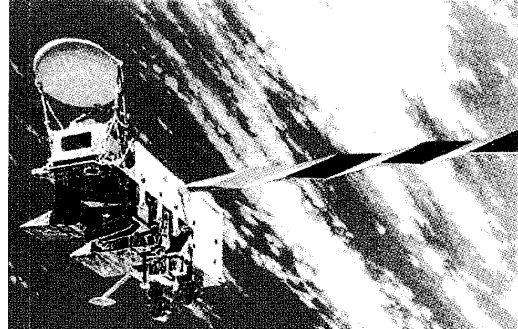
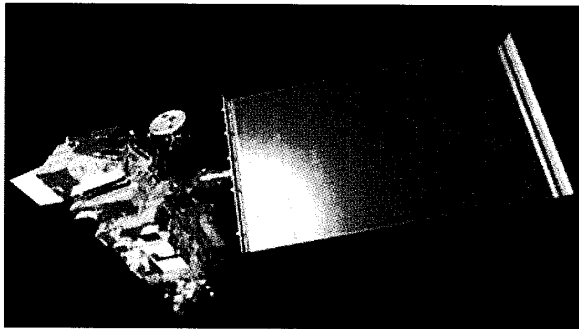


図 1 .Terra 衛星(出典 <http://eos-am.gsfc.nasa.gov/>) 図 2 .Aqua 衛星(出典 <http://eos-pm.gsfc.nasa.gov/>)

寸法(収納状態): 直径約 3.2m ×長さ約 6.8m

重量: $5,040\text{kg}$

衛星電力: 平均 $2,530\text{W}$, 最大 3.5KW

センサ: ASTER,CERES,MISR,MOPITT,MODIS

赤道地方時間: 午前 10 時 30 分降交点

直径約 2.6m ×長さ約 6.6m

$2,934\text{Kg}$

平均 $4,444\text{W}$

AMSR-E,AMSU-A,AIRS,CERES,HSB,MODIS

午後 1 時 30 分昇交点

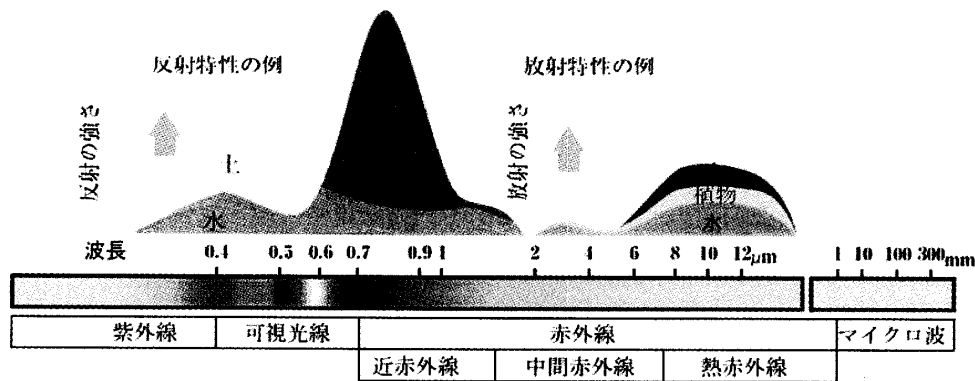


図 3 . 波長に対する反射・放射特性

MODIS センサの観測対象は、「雲の性質, 放射エネルギー束, エアロゾル, 気温と湿度, 地表面温度, 積雪, 土地被覆, 土地利用変化, 植生ダイナミクス, 森林火災, 噴火, 海面温度, 海色, 海水, など」である。

3. Terra / Aqua 衛星 MODIS 受信システムの構成

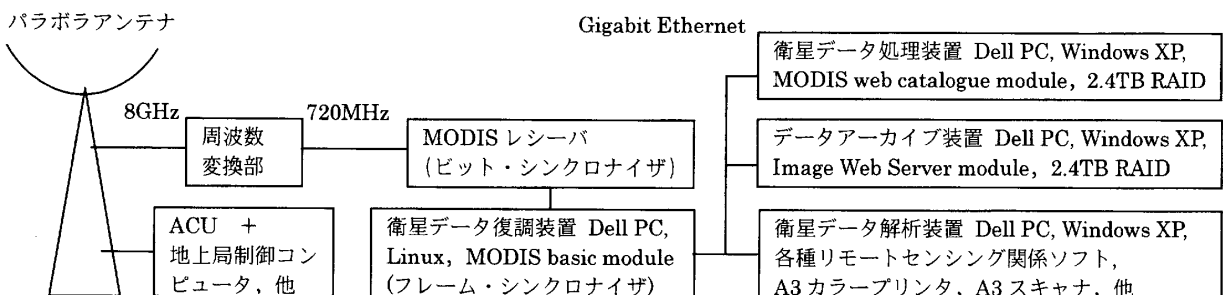


図 4 . 地球環境観測衛星 Terra/Aqua-MODIS 受信システム構成図

図 4 に本システムの構成図を示す。本システムの動作は次のようである。

(1) 10m φパラボラアンテナは、「ACU(アンテナ・コントロール・ユニット)」によって方位制御され、Terra-MODIS と Aqua-MODIS からの信号を受信する。

表 1. MODIS のバンドとバンド幅 (観測波長) および主利用目的

Primary Use (主利用目的: 解像度)	Band バンド	Bandwidth [nm] バンド幅 = 観測波長	Spectral Radiance ¹	Required SNR ² 要求 S/N 比
Land/Cloud/Aerosols Boundaries (陸地・雲・エアロゾル境界: 250 m)	1	620 – 670 (赤)	21.8	128
	2	841 – 876 (近赤外)	24.7	201
Land/Cloud/Aerosols Properties (陸地・雲・エアロゾル特性: 500 m)	3	459 – 479 (青・緑)	35.3	243
	4	545 – 565 (緑・黄)	29.0	228
	5	1230 – 1250 (近赤外)	5.4	74
	6	1628 – 1652 (中間赤外)	7.3	275
	7	2105 – 2155 (中間赤外)	1.0	110
Ocean Color/Phytoplankton/ Biogeochemistry (海水色・植物プランクトン・生物 地球化学: 1000 m)	8	405 – 420 (紫・青)	44.9	880
	9	438 – 448 (青)	41.9	838
	10	483 – 493 (青・緑)	32.1	802
	11	526 – 536 (黄緑)	27.9	754
	12	546 – 556 (黄)	21.0	750
	13	662 – 672 (赤)	9.5	910
	14	673 – 683 (赤)	8.7	1087
	15	743 – 753 (近赤外)	10.2	586
	16	862 – 877 (近赤外)	6.2	516
Atmospheric Water Vapor (大気水蒸気: 1000 m)	17	890 – 920 (近赤外)	10.0	167
	18	931 – 941 (近赤外)	3.6	57
	19	915 – 965 (近赤外)	15.0	250

Primary Use (主利用目的: 解像度)	Band バンド	Bandwidth [μm] バンド幅 = 観測波長	Spectral Radiance ¹	Required NE (delta)T [K] ³
Surface/Cloud Temperature (表面・雲の温度: 1000 m)	20	3.660 – 3.840 (中間赤外)	0.45 (300K)	0.05
	21	3.929 – 3.989 (中間赤外)	2.38 (335K)	2.00
	22	3.929 – 3.989 (中間赤外)	0.67 (300K)	0.07
	23	4.020 – 4.080 (中間赤外)	0.79 (300K)	0.07
Atmospheric Temperature (大気温度: 1000 m)	24	4.433 – 4.498 (中間赤外)	0.17 (250K)	0.25
	25	4.482 – 4.549 (中間赤外)	0.59 (275K)	0.25
Cirrus Clouds Water Vapor (巻雲・絹雲水蒸気: 1000 m)	26	1.360 – 1.390 (近赤外)	6.00	150 (SNR)
	27	6.535 – 6.895 (中間赤外)	1.16 (240K)	0.25
	28	7.175 – 7.475 (中間赤外)	2.18 (250K)	0.25
Cloud Properties (雲特性: 1000 m)	29	8.400 – 8.700 (熱赤外)	9.58 (300K)	0.05
Ozone (オゾン: 1000 m)	30	9.580 – 9.880 (熱赤外)	3.69 (250K)	0.25
Surface/Cloud Temperature (表面・雲の温度: 1000 m)	31	10.780 – 11.280 (熱赤外)	9.55 (300K)	0.05
	32	11.770 – 12.270 (熱赤外)	8.94 (300K)	0.05
Cloud Top Altitude (雲頂高度: 1000 m)	33	13.185 – 13.485 (熱赤外)	4.52 (260K)	0.25
	34	13.485 – 13.785 (熱赤外)	3.76 (250K)	0.25
	35	13.785 – 14.085 (熱赤外)	3.11 (240K)	0.25
	36	14.085 – 14.385 (熱赤外)	2.08 (220K)	0.35

1 Spectral Radiance values are [W/m² · μm · sr] 2 SNR = Signal-to-noise ratio

3 NE(delta)T = Noise-equivalent temperature difference

(2) アンテナで受信された X バンド (8GHz) の信号は、「周波数変換部」で 720MHz の中間周波数

(IF 信号)に変換される。

(3)「MODIS レシーバ」は、IF 信号を復調してデジタル信号に変換し、ビット・シンクロナイザで一次同期をとる。

(4)「衛星データ復調装置(フレーム・シンクロナイザ)」により、復号されたデータを画像データ(Level 0)に変換する。なお、受信のスケジューリングは ACU とは独立に設定される。

(5) 画像データ(Level 0)は「衛星データ処理装置、データアーカイブ装置および衛星データ解析装置」により幾何補正などの処理を行い、通常のリモートセンシング画像データ(Level 1A, 1B, 1B_B)に変換・保存される。保存された画像データを読み出し、更に高度な画像解析も可能である。

写真1～8に、本システムの様子を示す。

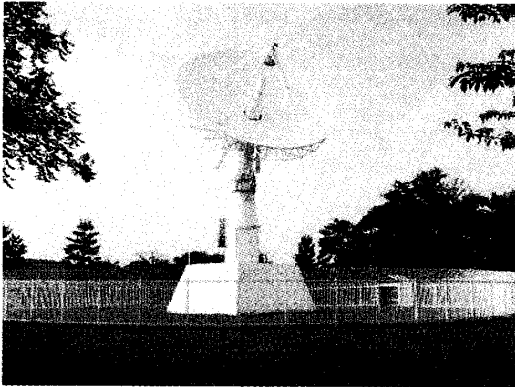


写真1. 10mφパラボラアンテナ(米国 ViaSat 社製)

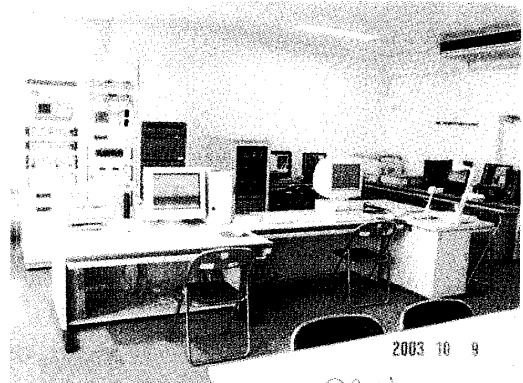


写真2. 芦原学舎2号館2階の宇宙信号受信地上局室

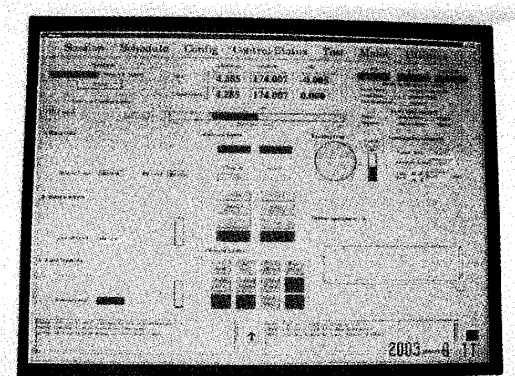


写真3. パラボラアンテナを制御する地上局制御コンピュータの画面(Aqua 衛星を追尾中)

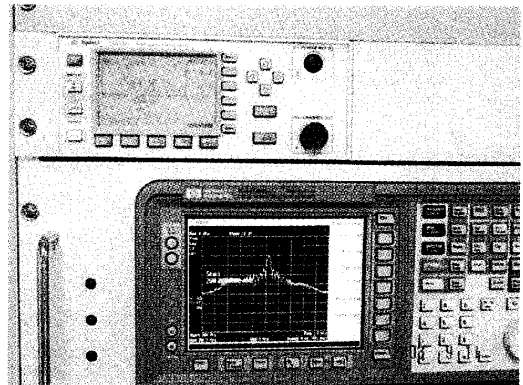


写真4. Terra または Aqua 衛星受信時のスペアナによる信号確認



写真5. 衛星データ復調装置と衛星データ処理装置(ノルウェー国 Kongsberg Spacetec 社製)



写真6. (左)MODIS レシーバを内蔵した衛星データ復調装置, (右) 衛星データ処理装置, (上) DLT テープ装置

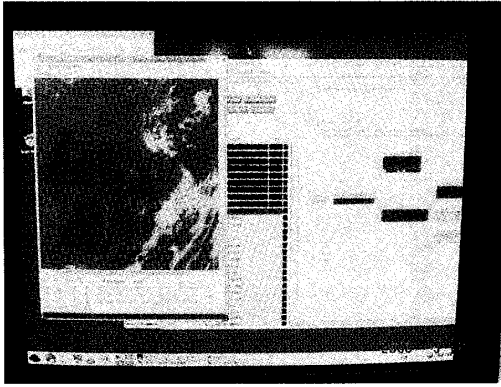


写真7. 衛星データ復調装置の画面（受信しながらクイックルック画像を表示し、更に処理の進行状況を表示する。）



写真8. (左) データアーカイブ装置
(右) 衛星データ解析装置

4. 受信画像と画像処理例

4.1 2003年9月11日(木)22:36~22:48JST 受信 Terra 衛星 Orbit=19852(アセンディングモード)



図5. 初受信画像(上が南,下が北)
Band 23 (中間赤外) 全体画像
(Level 1B 処理, 幾何補正前)
(黒は温度の低い所,
白は温度の高い所を表す。)

[図5,6の説明] 宮古島付近の台風14号の目がはっきり見える。
Bowtie Effectにより、画像の左端,右端が圧縮表示されている。

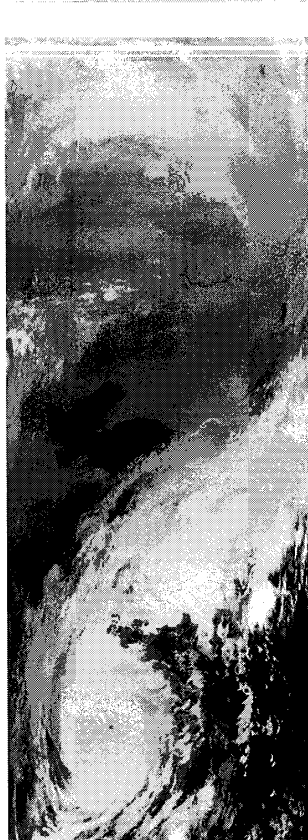


図6. Band 23 白黒画像で
180度回転し, 白黒反転した画像
(白は温度の低い所,
黒は温度の高い所を表す。)

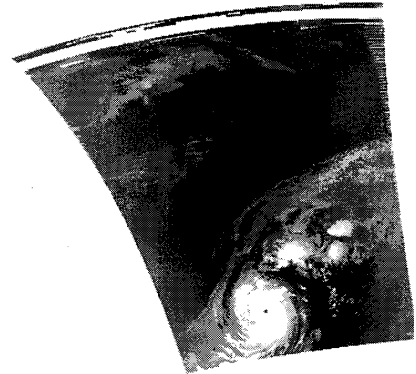


図7. Band 36 幾何補正後画像 (等緯経度投影表示) (白は温度の低い所, 黒は温度の高い所を表す。)

(14.085~14.385 μ m: 雲頂高度が分かる熱赤外バンド=高さ 1000m につき温度が 6.5 $^{\circ}$ C下がることを利用する。)



図8. 台風14号の立体画像
(画像処理ソフト ER Mapper の機能を使い, 図7の一部を拡大表示し, 擬似カラー化し, 鳥瞰図を作成した。)

4.2 2003年9月12日(金)12:14~12:28 JST 受信 Aqua 衛星 Orbit=7221(アセンディングモード)



図9. Level 1B 幾何補正前
受信画像 (180度回転済み)

R=Band 1 (620~670nm, 赤), G=Band 2 (841~876nm, 近赤外)
B=Band 1 (620~670nm, 赤), 解像度: Band 1,2 = 250m/pixel

〔説明〕陸地は Band2 (近赤外) の反射が大きい。ディスプレイの
3原色 RGB の G に Band 2 を割り当てたのだから、陸地は Green になる。

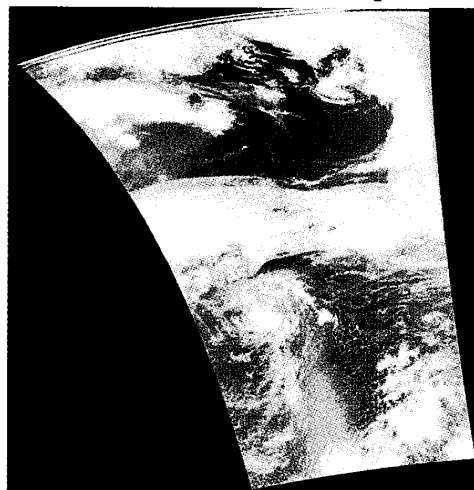


図10. 幾何補正後 (等緯経度投影表示)
トルーカラー表示画像

R=Band 1 (620~670nm, 赤)
G=Band 4 (545~565nm, 緑・黄)
B=Band 3 (459~479nm, 青・緑)

解像度: Band 1 = 250m/pixel,

Band 3,4=500m/pixel

〔説明〕R,G,B とバンドの色が一致している
のでトルーカラー (True Color: 人間の目で見た色) になる。

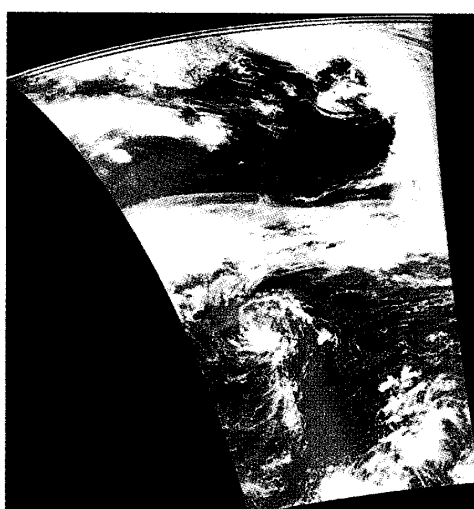


図11. 幾何補正後 (等緯経度投影表示)
近赤外カラー表示画像

R=Band 2 (841~876nm, 近赤外)
G=Band 4 (545~565nm, 緑・黄)
B=Band 3 (459~479nm, 青・緑)

解像度: Band 2 = 250m/pixel,

Band 3,4=500m/pixel

〔説明〕陸地は Band2 (近赤外) の
反射が大きいので Red になる。海は
Band3 (青・緑) の反射が大きいので
Blue になる。

図11と図10を比較すると分かるように、
図11の方が、陸域の水域 (湖、
川など) の識別が容易である。

このように、リモートセンシング画
像処理の基本は、何を見たいか (何を
強調したいか) により、ディスプレイ
の3原色 RGB にどのバンドを割り当
てるかを定めることである。

〔図9~図11の解説〕高度 705 km を飛行する Aqua 衛星から見たオホーツク海・樺太・日本列島・太平洋の画像 (北緯約 60~20 度) である。画面には入っていないが、九州の西側海上に台風 14 号がいる。

アセンディングモードとは、人工衛星が北緯 0 度 (赤道) から 90 度 (北極) の方へ飛行するモードである。ディセンディングモードとは、人工衛星が北緯 90 度 (北極) から 0 度 (赤道) の方へ飛行するモードである。

4.3 10月5日(日)10:44~10:59JST 受信 Terra 衛星 Orbit=20194(ディセンディングモード)

図12は、芦原学舎のほぼ真上を飛行した Terra 衛星から見た画像 (北緯約 60~15 度) である。

図13のバンドの組合せでは、海は青 (B=Band 3, 459~479nm, 青・緑のため)、山は緑 (G=Band 6, 1628~1652nm, 中間赤外で、植物の方が土よりも反射が大きい)、地面は肌色 (R=Band 7, 2105~2155nm, 中間赤外で、土の方が植物・水よりも反射が大きい)、街は紫ピンク、雲は白・青・ピンクとなる。山、平野、都市、水域 (海、川、湖) の識別が容易である。



図 12. (左の図)
Level 1B 幾何補正前受信画像
R=Band 1 (620~670nm, 赤)
G=Band 2 (841~876nm,
近赤外)
B=Band 1 (620~670nm, 赤)
解像度: 250m/pixel

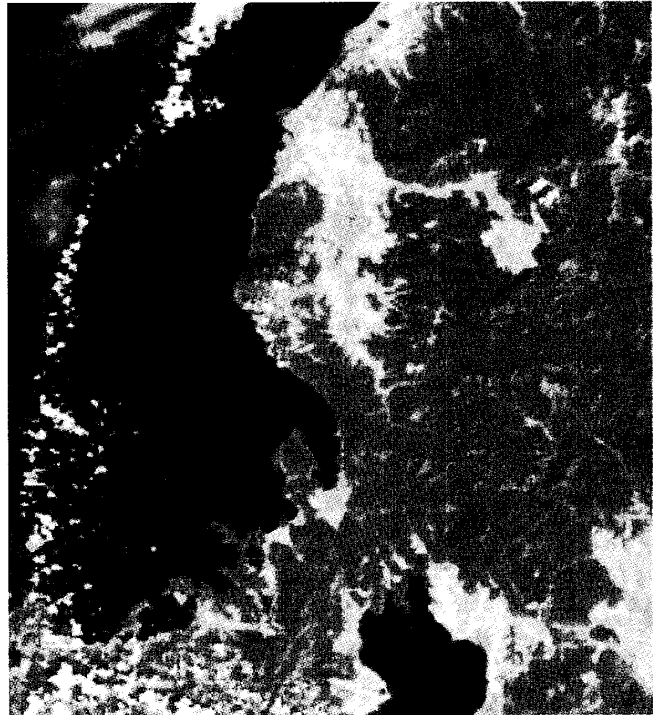
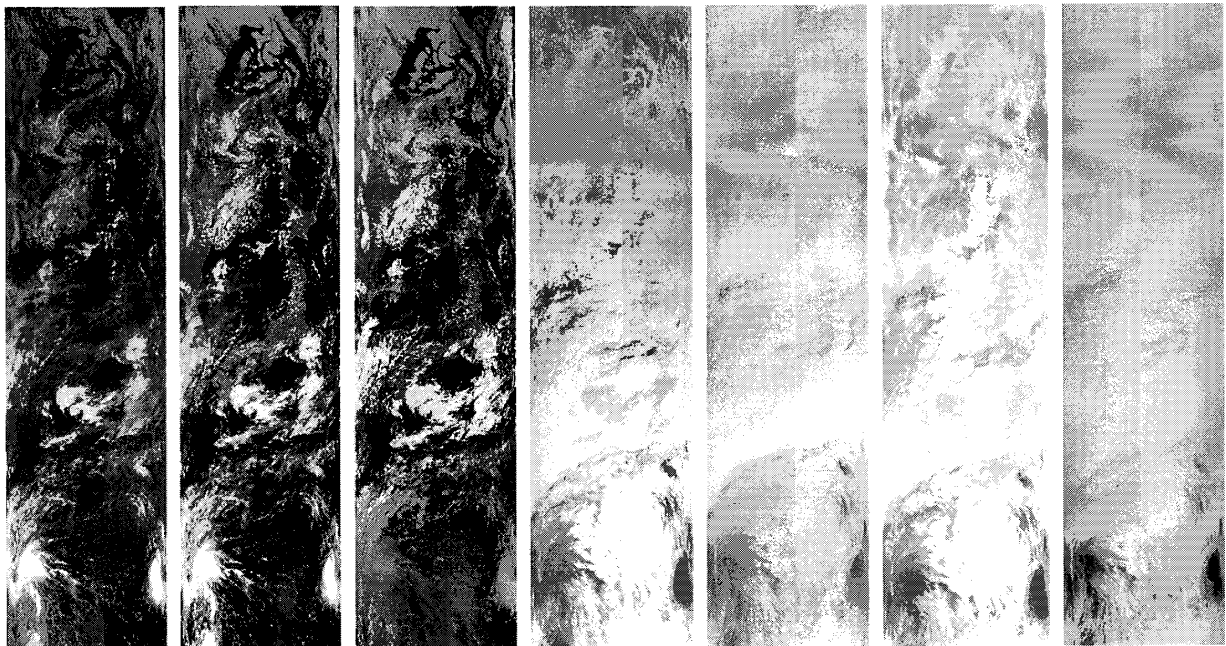


図 13. (右の図)
Level 1B ナチュラルカラー
表示画像 (福井県地方)
R=Band 7 (2105~2155nm,
中間赤外)
G=Band 6 (1628~1652nm,
中間赤外)
B=Band 3 (459~479nm,
青・緑)
解像度: 500m/pixel



Band 3 Band 5 Band 7 Band 23 Band 28 Band 31 Band 36

図 14. バンドによる見え方の違い

〔図 14 の解説〕図 14 は各バンドをモノクロ表示したものである。Band 3(459~479 nm, 青・緑)では地表はうっすらと見える。Band 5(1230~1250 nm, 近赤外)では地表がはっきり見える。Band 7(2105~2155 nm, 中間赤外), Band 23(4.020~4.080 μ m, 中間赤外)では地表はうっすらと見える。Band 28(7.175~7.475 μ m, 中間赤外), Band 31(10.780~11.280 μ m, 熱赤外), Band 36(14.085~14.385 μ m, 熱赤外)では地表は見えない。このようにバンドによって見え方が違う (観測対象が違う) のである。

5. むすび

本文では Terra/Aqua 衛星 MODIS 受信システムの詳細と受信画像を示した。現在、最大仰角 10 度以上の衛星（1 日あたり 4～10 パスとなる）のデータを取得中である。1 パスあたりの容量は、Level 1B で約 2GB、画像を見えるように変換すると約 4GB になる。芦原学舎へは週 2～3 回、アンテナ及び MODIS 受信システムの衛星軌道情報更新とデータ吸上げのために通っている。

本システムの期待される成果としては、MODIS センサの性能（最大地上分解能 250m, 36 バンド観測）と毎日 4～10 パス受信できるというリアルタイム性から判断して、データを蓄積することにより、「環境監視と保全、防災、降雨・積雪予測、黄砂予測、エチゼンクラゲ大量発生時の海水温度変化究明、漁場予測、その他農林水産業の分野などへの貢献」があげられる。

ここで、今後本システムを利用する場合の留意点を述べる。MODIS は最大解像度が 250m の中解像度衛星である。従って、10m 程度の物体を識別できる高解像度衛星（Landsat 7 号、Spot 4 号など）や、1m 程度の物体を識別できる超高解像度衛星（Ikonos など）とは当然利用分野が異なる。高解像度衛星は地上物体の識別に使えるが[3,4]、MODIS は地上物体の識別には使えない。MODIS は、あくまでも環境を観測する衛星である。MODIS には MODIS の特長（多バンド観測とリアルタイム性）があるのだから、それを生かした応用を考えるべきである。

最後に、筆者等の本システムを用いた研究テーマを紹介する。

（1）エチゼンクラゲ大量発生のリモートセンシングによる分析と予測

福井県などの日本海沿岸において、エチゼンクラゲ（傘の直径約 1m、重さ約 100kg の大型クラゲ）が昨年（2002 年）に続き今年（2003 年）も大量発生し、漁業に多大な被害をもたらした。これに関連して、MODIS センサによる海水温度観測と海面色観測を組み合わせることにより、エチゼンクラゲの大量発生時の分布、移動などが分かるのではないかと、また、大量発生の予測ができるのではないかと考えている。このためには、少なくとも 2～3 年のデータの蓄積が必要である。

（2）広範囲観測によるリモートセンシング応用

本学の MODIS 受信システムは、半径約 2700km 以内の衛星の電波を受信可能である。従って、衛星が真上を通る場合、南北約 5400km、東西約 2330km の長方形の領域を観測できる。また、本学は日本海側に位置しているため、西方向に低い仰角の衛星により中国大陸のかなり内部まで観測できる。この特徴を活かした研究テーマとして、中国大陸からの黄砂観測、SO₂・NO_x 観測がある。

（3）高解像度衛星データとの比較による MODIS データの環境監視観測への適用限界

MODIS センサは解像度が中程度（250m, 500m, 1000m の 3 種類）であるため、Landsat 7 号衛星 ETM+センサ（解像度 15m, 30m, 60m の 3 種類）や Terra 衛星 ASTER センサ（解像度 15m, 30m, 90m の 3 種類）と比べると解像度が悪い。しかし、ある程度広い面積を持つ対象物であれば、MODIS で環境監視観測が可能ではある。この具体的テーマとして、福井工業大学・芦原キャンパスに面した北潟湖の MODIS による環境監視観測を考える。このテーマは現地調査（水温・水質測定など）が可能であるため、適用限界を確認できると判断し選んだものである。また、ETM+データや ASTER データ等の高解像度衛星データを購入し、MODIS データとの適用限界を比較したい。

文献

- [1] 芳野起夫：“芦原宇宙通信教育研究施設の概要”，福井工業大学研究紀要，第 32 号，pp.357-364 (2002-03)
- [2] 加藤芳信，青山隆司，大家寛：“地球環境観測衛星 Terra/Aqua-MODIS センサ受信システム”，平成 15 年度電気関係学会北陸支部連合大会講演論文集，C-39，p.167 (2003-09)
- [3] 加藤芳信，中原茂幸：“LANDSAT・SPOT・ADEOS 衛星 CD-ROM データ読み込みプログラムの開発とその「ナホトカ号」重油流出事故画像解析への応用”，福井工業大学研究紀要，第 31 号，pp.39-46 (2001-03)
- [4] 加藤芳信，稲田昌恭，小田祥継，奥山誠，藤田裕介：“各種衛星 CD-ROM データ（BSQ 並び）画像処理プログラム－雲量と陸域・海域に着目した画像表示の検討－”，福井工業大学研究紀要，第 33 号，pp.381-388 (2003-03)

(平成 15 年 12 月 9 日受理)