

中国の気象衛星FY2Bによる大気観測

奥 勇一郎・石川 裕彦

要 旨

中国の気象衛星FY2B赤外画像のジオコーディング処理を行った。処理に必要な幾何学的情報などが不十分であるため、古典的な手法を用いた幾何補正を行いGOES-9のデータとの比較を行うことで、データの精度や信頼性についての議論を行った。処理されたFY2Bのデータは大陸スケールの対流活動の解析データとして十分使え、精度の高い幾何補正処理が要求されるメソスケールの対流活動の解析データとしても利用できることがわかった。

キーワード：静止気象衛星，FY2B，ジオコーディング

1. はじめに

2003年5月22日に日本の気象衛星ひまわりGMS-5 (Geostationary Meteorological Satellite-5)が観測を終え、日本の静止衛星による観測は米国のGOES-9 (Geostationary Operational Environmental Satellite-9)による代替観測体制に切り替わった。GOES-9は東経155度の赤道上空に静止しており、これはGMS-5より15度ほど東に位置している。そのため東南アジアから南アジアにかけての地域はGOES-9の画像周縁部に位置し、有効観測限界とされている衛星への仰角35度以上(衛星天頂角55度未満)の領域(加藤, 1983)から外れる。したがってGMS-5の後継機である運輸多目的衛星MTSAT-1R (Multi-functional Transport Satellite-1R)の運用が開始されるまで、これらの地域では十分な観測が行えない可能性がある。

京都大学防災研究所ではGMS-5運用停止とともに受信アンテナの設定を変更し、中国の気象衛星であるFY2B (Fengyun-2B)のデータを受信している(Fig.1)。FY2BにはGMS-5と同様、可視赤外走査放射計VISSR (Visible and Infrared Spin Scan Radiometer)が搭載されている。FY2Bの赤外チャンネルはGMS-5のようなスプリットウィンドウではないが、そのほかのセンサの諸元;走査線数、画素数、回転数、解像度など基本性能は同等であ

る(Table 1)。また受信されるFY2BのデータフォーマットはGMS-5のものと同様で、GMS-5用の処理プログラムがほとんどそのまま利用できる。FY2Bは東経105度に位置しており、東は日本列島から西はアラビア半島まで視野に入る(Fig. 2)。特にアジアモンスーン地域は正面から捉えることができ、モンスーン研究には特に有用であると思われる。にもかかわらずFY2Bのデータが研究者の間であまり用いられていないのは、幾何補正やキャリブレーションの情報が不十

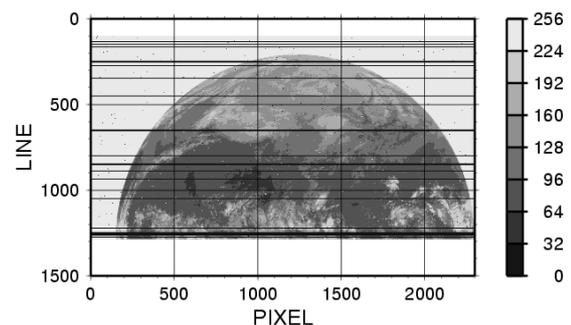


Fig. 1: Raw image observed by the infrared (IR) channel of FY2B/VISSR at 14:01 UTC on December 8, 2003. FY2B terminated its operation of Southern Hemisphere from November 2003. Horizontal black lines across the image might be caused by a signal fault in bad receiving conditions.

分であるため、定量的な解析データとしてすぐに用いることができないからである。そこで本研究では、GCP 最小二乗法、エッジ検出法という古典的な手法で幾何補正を行い、GOES-9 データとの比較した上で、処理されたデータがどの程度の精度や信頼度を持っているものなのかについての考察を試みた。

2. データ処理法

衛星画像データを処理する際に必要な情報は大きく分けて2つある。1つは衛星画像上の画素と現実空間の緯度経度を用いた地理座標の対応をとるジオコーディング処理のための座標変換に関する幾何補正情報、もう1つはセンサが観測する放射輝度の階調値を可視波長帯ならば反射強度、赤外波長帯ならば等価黒体温度といった物理値に変換するためのキャリブレーションテーブルである。受信されるFY2Bデータの幾何補正情報のうち、衛星直下地点における緯度や経度、衛星の海拔高度などバルク補正情報のレコードには、過去のGMS-5のデータと比較する限りは

もってもらしい値が入っており問題がないものと思われる(Fig. 3)。しかし、軌道情報と姿勢情報が入っているべきAttitude and Orbitセクションを読み出すことができず、また画像上の地球の位置が毎回の観測で上下左右に移動するのに関わらず受信データの画像の中心座標が一定値で記録されているため画像を固定することができないので、バルク補正による系統的なジオコーディング処理が行えない。一方、キャリブレーションテーブルに関しては受信データからテーブルそのものが欠落しており、代わりに中国衛星気象センター(National Satellite Meteorological Center)が固定値を公開している。これについても固定値の妥当性を調べておく必要がある。

幾何補正情報なしで画像の位置を固定するために、GCP 最小二乗法、エッジ検出法の2つの方法を用いた。まずGCP 最小二乗法であるが、地理座標がわかっていて画像でも確認できる目標物の位置(ground control point; GCP)を使って、座標変換の誤差が最小になるように幾何補正情報を与える方法である。具体的には、ある適当な幾何補正情報を与えてGCPの衛星画像上の座標から

Table 1: Comparison of specifications between FY2B/VISSR and GMS-5/VISSR.

| Satellite/Sensor | FY2B/VISSR | GMS-5/VISSR |
|---|-----------------|------------------------------------|
| Geosynchronous Position | 105°E | 140°E |
| Channels, Wavelength (μm) VIS (Visible), IR (Infrared), WV (Water Vapor) | VIS (0.55-1.05) | VIS (0.55-1.05) |
| | IR (10.5-12.5) | IR1 (10.5-11.5) IR2 (11.5-12.5) |
| | WV (6.2-7.6) | WV (6.5-7.0) |
| Instantaneous Field of View | VIS: 35μrad | IR·WV: 140μrad |
| Scan Line | VIS: 10000 | IR·WV: 2500 |
| Resolution at Sub Satellite Point | VIS: 1.25km | IR·WV: 5km |
| Quantification Scale | VIS: 6bits | IR·WV: 8bits |

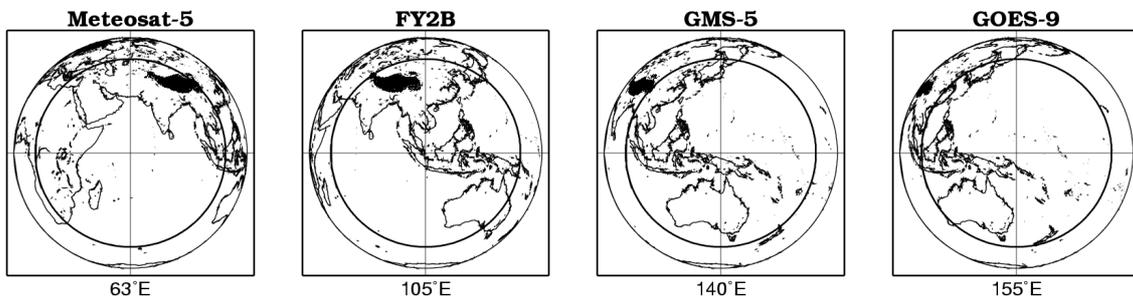


Fig. 2: Full disk images of observation by geostationary satellites; Meteosat-5, FY2B, GMS-5 and GOES-9. Longitude shown under each panel is indicated geosynchronous position of the satellite. Shaded area inside the image is corresponding to the Tibetan Plateau that is defined as the area higher than 4,000mASL. Isoline of 35° elevation angle to the satellite is indicated by solid circle inside the image.

地理座標への変換を行い、算出された緯度・経度と現実の緯度・経度からその距離を誤差として求める。GCPは画像上で偏在しないように一様を選定し、複数地点について行う。画像全体を1画素ず

つ上下左右にずらして座標変換を行い、すべての地点の誤差がもっとも小さくなったときの幾何補正情報を真の値とする。赤外波長帯におけるGCP法では、対象物の温度差を利用して検出する

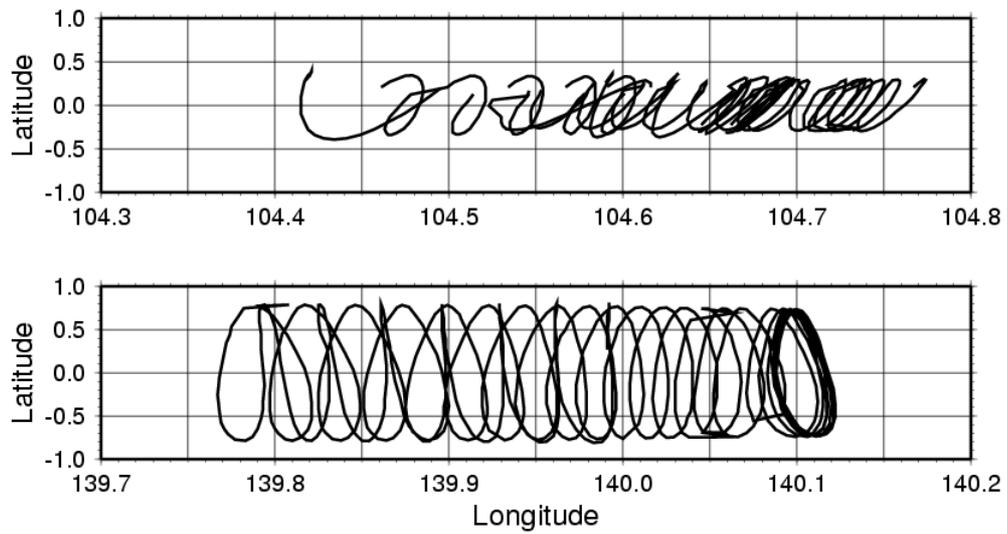


Fig. 3: Trajectories of sub satellite point for a month, upper panel is FY2B in January 2004 and lower is GMS-5 in December 2001.

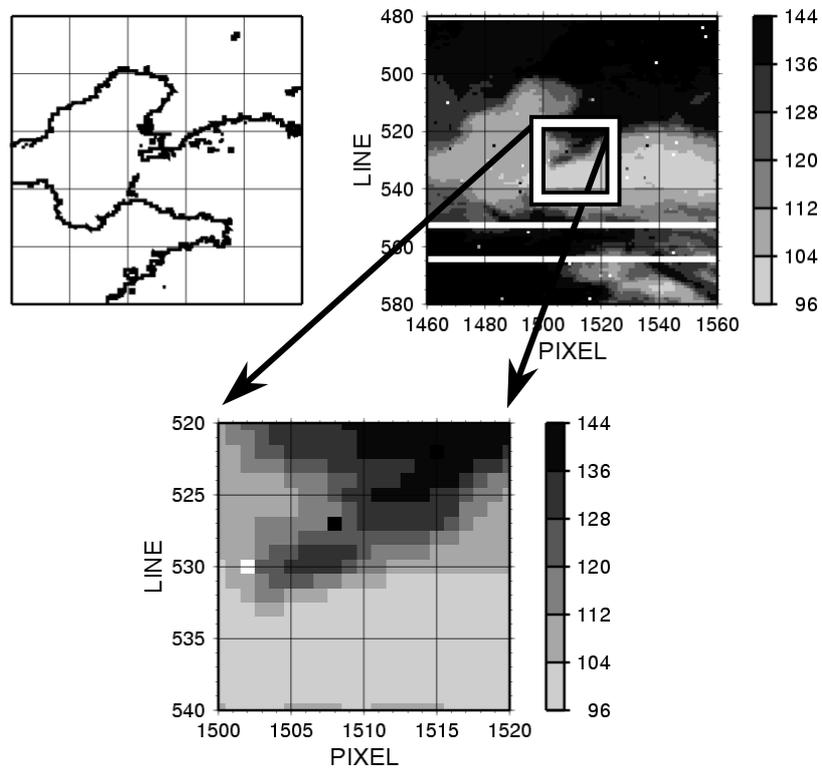


Fig. 4: Coastal line of the area surrounding the Yellow Sea observed through the viewpoint of FY2B (upper left), IR image observed by FY2B at 14:01UTC on December 8, 2003 over the same area as upper left panel (upper right), and its enlarged image of rectangle area in the upper right panel around Dalian, Liaoning Province, China (lower), defied as cross.

ことになる。また FY2B の衛星直下地点における赤外チャンネルの空間解像度は約 5km である。したがって 5km 以上の空間スケールで温度差が明瞭に解像できる地形的特徴でないと GCP として用いることはできない。現実問題として赤外面像では大陸と海洋の温度差により海岸線を確認することになる。半島の先端部分など特徴的な海岸線を持った沿岸部の地点の緯度・経度が既知であり、衛星画像からその地点が確認できれば GCP として使える。たとえば 2003 年 12 月 8 日 14:01UTC の赤外面像からは遼東半島が確認できるので、大連の緯度・経度（北緯 38.90 度, 東経 121.63 度）を用いて幾何補正情報を復元することができる(Fig. 4)。大連ほかにロシアのウラジオストク（北緯 43.12 度, 東経 131.93 度）、カタールのドーハ（北緯 25.30 度, 東経 51.55 度）を GCP として使用した。一般に、衛星の位置・姿勢データから系統的に補正するバルク補正に比べてこの GCP 最小二乗法による補正の方が、系統的な誤差が生じにくく精度はよいと言われている。しかし、海岸線のように二次元的空間構造を通しての GCP 検出においては、結果に解析者の主観が大きく関与してしまう恐れがある。また、海岸線が確認できるためには、付近の上空が晴れていることと大陸と海洋の温度差が十分あることが条件となる。したがって、雲に覆われている場合や温度差が小さくなる日の出および日の入り前後の時間帯は海岸線の検出が困難になり、処理が行えない。さらに、1 シーンごとに海岸線を確認し GCP の抽出作業を行わなければならない処理が非効率

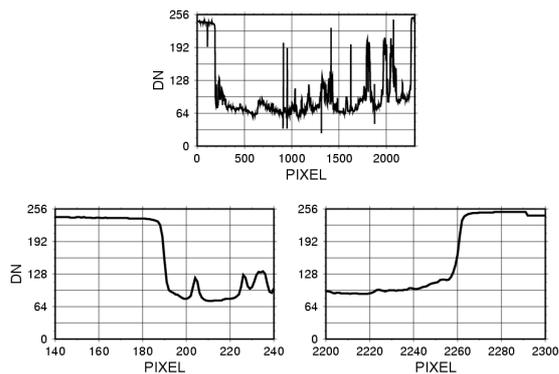


Fig. 5: Digital values of IR image at the line number of 1000 observed by FY2B at 14:01UTC on Dec. 8, 2003. Upper panel shows all values at the line number of 1000, lower left is same as upper panel but pixel number from 140 to 240 that is corresponding to western edge of the earth image, and lower right is from 2200 to 2300 that is eastern edge.

的である。

この GCP の抽出作業に客観性および系統性を持たせたのがパターンマッチング法である。あらかじめある領域の衛星画像上の座標に変換した海岸線データを用意してこれをテンプレートとし、衛星画像上でそのテンプレートを移動させ放射輝度の階調値パターンとの相互相関係数をもっともよいところで画像の固定を行い、幾何補正情報の復元を行う。しかし GCP 最小二乗法と同様、ターゲットとなる領域が雲に覆われている場合や、日の出や日の入り前後といった海陸表面温度のコントラストが弱い場合にはこの手法は使えない。

一方、エッジ検出法は、宇宙空間と地球の放射輝度の差が大きいことを利用して画像中の地球周縁部を検出し、そこから画像中心位置を決定、座標変換を行う方法である。宇宙空間からの放射はほとんどなく、極地方の低温領域あるいは雲頂高度の高い雲からの低放射輝度の領域と比べても宇宙空間の放射輝度は十分小さいため、海岸線に比べて検出が容易である。しかも宇宙空間からの放射は時間に依存せず一定であるので、陸海のように放射輝度のコントラストが弱まることもない。たとえば衛星画像左右すなわち東西方向の中心位置は、赤道付近における地球の両端を検出して行う(Fig. 5)。2003 年 12 月より FY2B は晩年の GMS-5 と同じく南半球の観測を取りやめているため、上下すなわち南北方向の中心位置は静止経度子午線付近における北側のエッジを検出、そこから中心位置を推定する。輝度温度の差は Fig.5

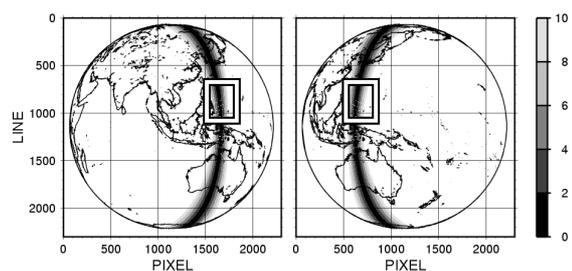


Fig. 6: Full disk images of observation by FY2B (left) and GOES-9 (right) with distribution of satellite zenith angle difference between both satellites. The rectangle area in each panel shows the object domain to compare with IR brightness temperature observed by both satellites (see Fig.8 and 9).

のように観測される階調値の勾配として系統的に検出するので、解析者の主観が入ることなく効率的な処理が可能であるが、GCP 最小二乗法のように座標変換の前後における照らしあわせを行わないバルク的な処理を行うため GCP 最小二乗法と比べて精度に不安が残る。

3. データのバリデーション

これらの手法を用いて FY2B の赤外生画像データを緯度経度座標に展開し、キャリブレーションテーブルを用いて輝度温度への変換を行った。これら一連の処理が適切に行われているのかを確

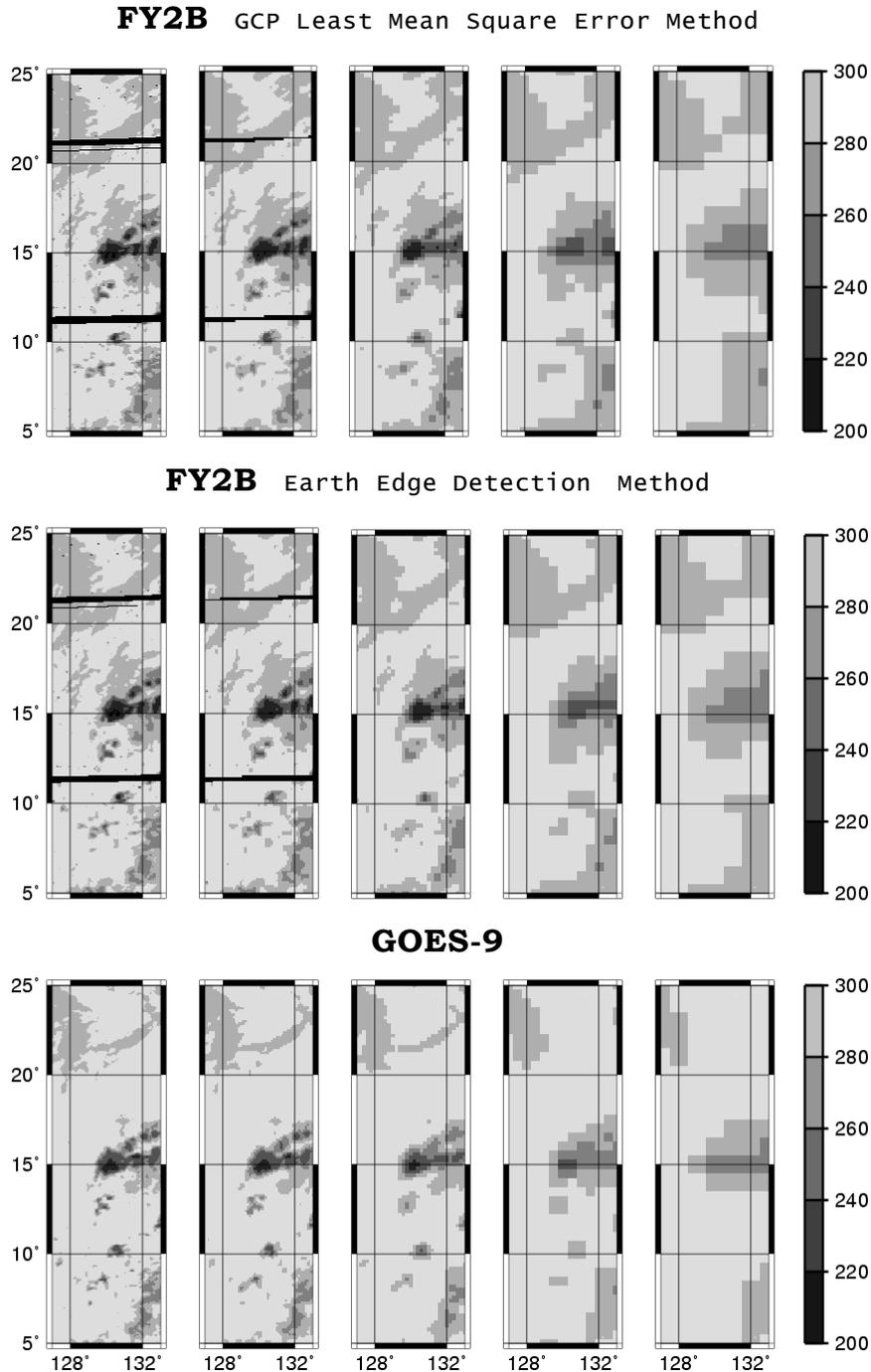


Fig. 7: IR brightness temperature over the Northwest Pacific Ocean in the east of Philippine Islands, indicated by rectangle domain in Fig. 6, observed by FY2B geocoded with using GCP least mean square error method (upper), with Earth edge detection method (middle) and by GOES-9 (lower).

かめるために、GOES-9の $11\mu\text{m}$ 輝度温度データとの比較を行った。対象とした領域は、フィリピン東方海上、北緯5度から25度、東経127度から133度の領域である。この領域を選んだ理由は、東経130度上で、両衛星の衛星天頂角が等しくなること、海上で比較すれば Minnis and Khaiyer (2000) が報告しているような地形の凹凸の影響により日の当たる側の衛星から見た地表面温度と日陰側の衛星から見たそれが系統的に異なる影響がでないことによる。また、比較した期間は、2003年12月8日01UTCから19UTCの19シーンである。

GOES-9のデータは、気象業務支援センターから配信されるデータを用いた。配信されるデータは、東経155度から観測されるデータをGMS-5の視点から見たようにリサンプルしたものであるが、ここでは、これを正しい値と仮定する。さらに、FY2BとGOES-9との観測時間にはおよそ20分の差があり、小さなスケールの積雲などはこの間に变化してしまうことが十分考えられる。ま

た、背の高い雲など観測目標が三次元的な構造をもっていると、目標への視準線の方向の違いに起因して、目標が投影される位置が若干ずれる場合も考えられる。そこで、衛星直下の解像度(約5km)に相当する0.05度の緯度経度格子にデータを变换したものに加え、これを平均して0.1度、0.2度、0.5度、1.0度の緯度経度格子の値になおしたものについて比較を行う。

4. 結果

フィリピン東方海上における2003年12月8日18:02UTCのGCP最小二乗法で処理したFY2Bデータ、エッジ検出法で処理したFY2Bデータを同日18:23UTCのGOES-9のデータと比較した(Fig.7)。一般に座標変換の解像度を落とすと、変換後の1グリッドのデータとして取り込まれる画素数が増えるため、取り込まれる画素の分だけ分布パターンの差が見かけ上打ち消される。たとえば衛星直下地点では0.1度間隔だとおよそ4画素、

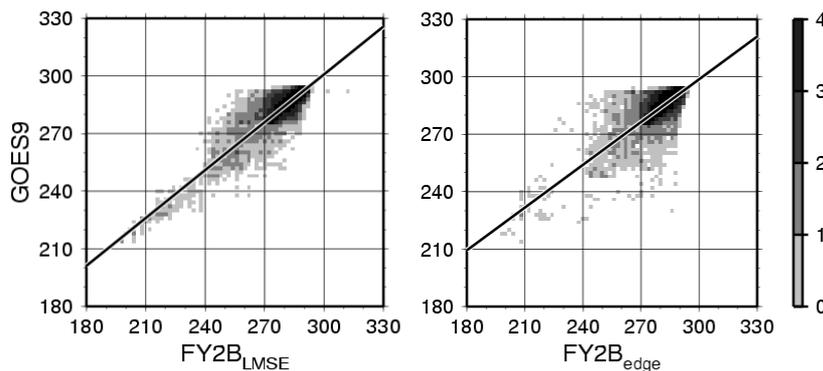


Fig. 8: Scatter diagram of IR brightness temperature observed by between GOES-9 and FY2B geocoded by GCP least mean square error method (left), by Earth edge detection method (right) shown as a base 10 logarithm of samples within every 2K square. Solid lines indicate liner regression.

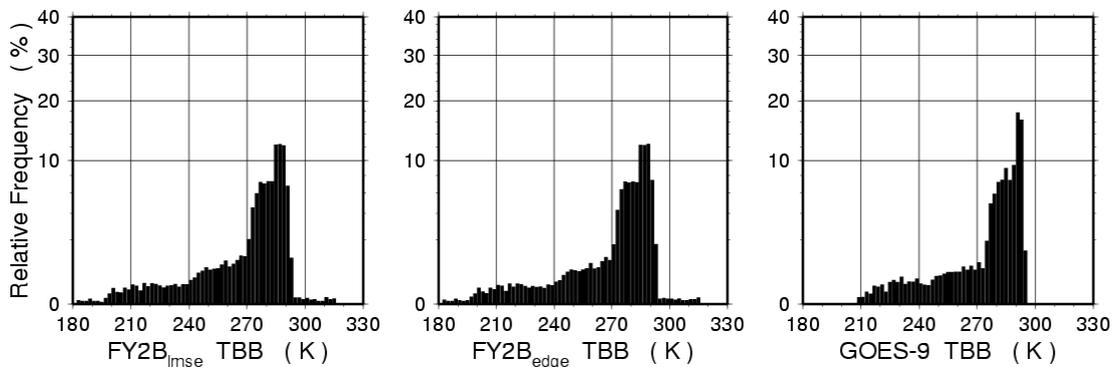


Fig. 9: Relative frequency distributions of IR brightness temperature observed by FY2B geocoded by GCP least mean square error method (left), by Earth edge detection method (middle) and GOES-9 (right).

1 度間隔だとおよそ 400 画素の平均として緯度経度格子に変換された値が計算される。

Fig. 7 において、260K 以下の輝度温度の低い領域は雲に相当し、これ以外の領域はほぼ晴れていると思われる。これらの輝度温度の分布パターンは GCP 最小二乗法、エッジ検出法とも GOES-9 とよく合っており、座標変換の解像度を落とすほどパターンはよく似てくる。また、それぞれの場合について同緯度同経度地点の輝度温度を散布図で比較し(Fig. 8)、統計値を算出した(Table 2)。相関係数は、数値が高いほど FY2B と GOES-9 の輝度温度の分布パターンに差がないことを意味し、FY2B 画像の座標変換が正確に行われているかどうか分かる。相関係数で比較するとエッジ検出法に比べ GCP 最小二乗法の方が正確に座標変換が行われていることがわかる。GCP 最小二乗法で 0.05 度格子に変換した場合の相関係数 0.8718 に対し 1.0 度格子では 0.9762 になる。他の 18 シーンについても、0.05 度格子への変換で GCP 最小二乗法では平均 0.8、エッジ検出法でも 0.7 の相関係数を得ることができた。解像度を 1 度まで落とすと、GCP 最小二乗法では 0.95、エッジ検出法では 0.9 の相関が得られることがわかった。座標変換が正確に行われているという閾値として相関係数 0.9 を与えると、GCP 最小二乗法では 0.1 度、エッジ検出法では 0.5 度～1.0 度の解像度から、FY2B データが使えることになる。

解像度を落としても依然として 5K 以上の平均二乗誤差 RMSE が存在する。RMSE も座標変換の正確さに依存して変化するが、センサの波長帯の違いに起因する影響も考慮する必要がある。

Fig. 7 からわかるように FY2B の輝度温度は GOES-9 に比べて全体的に低い。散布図をみると、300K 付近の両者の一致は良いが、低温側でこの傾向が顕著になり、回帰直線の傾きは 1 より小さくなる(Fig. 8)。領域内の輝度温度のヒストグラム(Fig. 9)でみても、FY2B と GOES-9 との間にはそ

の分布に顕著な差がみられる。領域内の輝度温度平均値は FY2B が 278.50K、GOES-9 が 283.00K であり 4.5K の差がある。

FY2B の赤外チャンネルは 10.5 μ m～12.5 μ m の波長帯からの放射に感度を持っている。一方、GOES-9 はスプリットウィンドウの 11 μ m 帯のデータを用いており、感度のある波長帯が FY2B の赤外チャンネルより狭い。12 μ m 帯は 11 μ m 帯よりも水蒸気による放射減衰をより受けやすいため、12 μ m 帯にも感度を持つ FY2B の輝度温度は GOES-9 の 11 μ m 輝度温度に比べて低くなる。そこで、この傾向が系統的に現れるものなのかどうかを確かめるために、フィリピン東方海域の FY2B 赤外画像を GCP 最小二乗法により解像度 0.1 度で座標変換を行い輝度温度に変換したものを、同領域の GOES-9 の 11 μ m 輝度温度と比較し、Fig. 8 のような線形回帰直線を求め 180K と 300K における輝度温度差を算出した(Table 3)。180K では 20K 近く差があるが、300K ではその差は 1K 前後でほとんどない。よって、センサの波長帯の違いに起因する輝度温度差の傾向が反映されているものと思われる。また、これら 19 シーンでの比較では、相関係数が 0.5 と低く幾何補正が正しく行われなかった 10:02UTC を除いて、全シーンで同じような線形回帰の傾向がみられた。FY2B の感度関数の詳細が不明であるため、GOES-9 との輝度温度の差がどれくらい生じるものなのかについての定量的な議論はできない。センサの波長帯の差に起因する輝度温度の誤差を定量的に求めるには、センサの感度関数を考慮し様々な大気プロファイルを想定した放射伝達の計算をする必要がある。しかし、RMSE の中に含まれる誤差のうち 5K 前後は、センサの波長帯および感度関数の違いに起因する誤差の可能性がある。仮にそうだとすれば、この誤差を取り除くと座標変換の解像度 0.05 度での比較でも、RMSE は 5K 以内におさまることになる。

Table 2: Correlation coefficients of IR brightness temperature between FY2B and GOES-9 at 18:02UTC on December 8, 2003. The values in parentheses show root mean square error (RMSE) of brightness temperature between both satellites by the Kelvin.

| resolution | GCP least error mean square method | Earth edge detection method |
|------------|------------------------------------|-----------------------------|
| 0.05° | 0.8718 (8.707) | 0.7731 (10.374) |
| 0.10° | 0.8996 (7.985) | 0.8108 (9.637) |
| 0.20° | 0.9312 (7.175) | 0.8628 (8.398) |
| 0.50° | 0.9621 (6.273) | 0.9255 (6.582) |
| 1.00° | 0.9762 (5.619) | 0.9561 (5.655) |

5. まとめ

中国の気象衛星 FY2B の赤外画像を幾何補正し、GOES-9 の赤外画像との比較を行った。衛星画像の位置合わせには、GCP を目視により決定し座標変換で生じる誤差を最小にとどめることで幾何補正の信頼性が高い GCP 最小二乗法と、地球周縁部の輝度温度差を用いるエッジ検出法の 2 通りの方法を試みた。GCP 最小二乗法による FY2B と GOES-9 との輝度温度分布パターンとの差はそれほどなく、座標変換の解像度 0.1 度以上では幾何補正が十分できているものと考えられる。また、GCP 最小二乗法に比べて精度で劣るエッジ検出法であるが、座標変換の解像度 0.5 度以上の結果では GCP 最小二乗法との差はほとんどなく、幾何補正が適切にできることがわかった。毎回の GCP 抽出が不要であり、解析者の主観が関与しないエッジ検出法を用いることで長期間のデータ処理を容易に行うことが可能である。よってメソスケールの対流活動の解析データとしては GCP 最小

二乗法による処理を行う必要があるが、大陸スケールの対流活動の解析データとしてはエッジ検出法で処理されたデータでも十分使えるといえる。

一方、輝度温度のキャリブレーションに関しては、FY2B に搭載されたセンサの感度関数の詳細が不明のため、輝度温度差に関する定量的な議論は行えない。GOES-9 以外にも Meteosat-5 が東経 63 度に位置している。Meteosat-5 は FY2B と同じく赤外がスプリットになっていないので、センサの波長帯の違いを GOES-9 ほど気にすることなく、両者の赤外輝度温度を比較することができるものと思われる。

2003 年 5 月末から FY2B のデータを受信、蓄積している。同年 12 月からは北半球だけの観測となっているが、現在の GOES-9 では観測が困難な東経 90 度以西の地域における対流活動の研究に、今後 FY2B のデータが貢献できるものと期待される。

Table 3: Correlation coefficients and RMSEs of IR brightness temperature between FY2B geocoded by GCP least mean square error method with 0.1-degree resolution and GOES-9 on December 8, 2003. ΔT indicates difference of brightness temperature between GOES-9 observation T_{GOES} and FY2B calculated by using liner regression T_{FY2B} at 180K and 300K, thus $\Delta T = T_{\text{GOES}} - T_{\text{FY2B}}$.

| UTC | R | RMSE (K) | ΔT (180K) | ΔT (300K) |
|-----|--------|----------|-------------------|-------------------|
| 1 | 0.8516 | 9.357 | 21.480 | 0.480 |
| 2 | 0.8620 | 8.864 | 21.714 | 0.594 |
| 3 | 0.8427 | 9.100 | 24.542 | 0.074 |
| 4 | 0.8723 | 7.931 | 18.816 | 0.840 |
| 5 | 0.7995 | 9.680 | 27.727 | -0.545 |
| 6 | 0.8312 | 8.689 | 27.004 | -0.380 |
| 7 | 0.8403 | 8.218 | 23.301 | 0.237 |
| 8 | 0.8838 | 7.811 | 25.226 | 0.578 |
| 9 | 0.7828 | 9.414 | 37.601 | -1.123 |
| 10 | 0.5831 | 11.215 | 54.851 | -4.225 |
| 11 | 0.9066 | 6.857 | 26.372 | 0.548 |
| 12 | 0.9107 | 6.474 | 24.064 | 0.568 |
| 13 | 0.7552 | 9.495 | 37.178 | -1.978 |
| 14 | 0.9127 | 6.925 | 21.288 | 0.624 |
| 15 | 0.8888 | 7.376 | 23.320 | -0.260 |
| 16 | 0.9819 | 7.350 | 21.347 | 0.323 |
| 17 | 0.9096 | 7.597 | 21.735 | 0.663 |
| 18 | 0.8996 | 7.985 | 22.360 | 0.652 |
| 19 | 0.8582 | 9.183 | 26.646 | -0.318 |

参考文献

- 加藤一靖 (1983): 静止気象衛星の画像データによる気象要素の抽出. 気象研究ノート, 第 148 号, pp.1-102.
- FY2B Calibration Table: National Satellite Meteorological Center. Available from <http://nsmc.cma.gov.cn>
- Japan Meteorological Agency, 1993: Revision of GMS Stretched-VISSR data format. 42 pp.
- Meteosat Archive User Handbook, 2001: EUMETSAT. Available from <http://www.eumetsat.de>
- Minnis, P. and M.M. Khaiyer, 2000: Anisotropy of land surface skin temperature derived from satellite data. J. Appl. Meteor., Vol. 39, No. 7, pp. 1117-1129.

Atmospheric Observation by using Chinese Meteorological Satellite Fengyun-2B (FY2B)

Yuichiro OKU and Hirohiko ISHIKAWA

Synopsis

FY2B infrared images received in Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, have been geocoded by using classic method. Received FY2B raw images do not include some important parameters those are essential to the accurate geocoding, so that infrared brightness temperatures obtained from processed FY2B data are compared with those derived from GOES-9 image to measure the reliability. The results show the processed FY2B data is not only available for the synoptic scale analysis but also can be used for the meso-scale analysis of convective activity.

Keywords: geostationary satellite, FY2B, geocoding