

6 NCEP/GDAS プロファイルを用いた熱赤外大気補正法の検証 Validation of the thermal infrared atmospheric correction with NCEP/GDAS profiles

外岡秀行 (茨城大学工学部)

〒316-8511 茨城県日立市中成沢町 4-12-1

Phone : 0294-38-5149, FAX : 0294-37-1429, e-mail : tonooka@cis.ibaraki.ac.jp

Hideyuki TONOOKA (*Faculty of Engineering, Ibaraki University*)

4-12-1, Nakanarusawa-cho, Hitachi-shi, Ibaraki 316-8511

1 はじめに

熱赤外センサデータから地球表面の温度や放射率を推定するためには、大気補正処理が不可欠である。海洋観測では複数チャンネルの観測輝度温度の線形式から海面温度を高精度に推定する簡便な大気補正法 (スプリットウィンドウ法・マルチチャンネル法) が存在するが、これは陸域観測では一般に利用できない。その主な理由は、陸域では放射率が一般に未知であるため、放射率のチャンネル間の違いがこれらの手法の誤差要因となるためである (Becker, 1987)。このようなことから熱赤外センサの陸域観測データに対する大気補正法の開発が種々試みられてきたが (例えば、Kerr *et al.*, 1992; Sobrino *et al.*, 1994; Wan *et al.*, 1996; 外岡ほか, 1997)、一般的な大気補正法は放射伝達コード (Radiative Transfer Code, RTC) に観測時の大気データを与えて大気補正パラメータを得る方法である (例えば、Hook *et al.*, 1992)。1999 年に打ち上げ予定の NASA/EOS-AM1 に搭載される ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection radiometer) の熱赤外 5 チャンネルに対する標準大気補正法にも、この RTC ベースの手法が採用されている。

RTC ベースの大気補正法の最大の問題点は観測時の大気データ (特に水蒸気及び気温の鉛直プロファイル) を如何にして与えるか、ということである。特にオペレーショナルな運用に耐えるためには、大気データもまたオペレーショナルに提供されるものでなくてはならない。ASTER の標準大気補正法ではこのような大気データとして幾つかのオプションが用意されているが、米国 NOAA の National Centers for Environmental Prediction (NCEP) が運用している全球データ同化システム (Global Data Assimilation System, GDAS) のプロダクトもその 1 つのオプションとして採用されており、特にミッション初期では GDAS プロファイルに基づく大気補正処理がベースとなる。このような背景の下、本研究は ASTER 運用に先立って GDAS プロファイルに基づく大気補正法の精度を AVHRR データを用いて検証した結果について報告するものである。

2 NCEP/GDAS とそのプロダクト

GDAS は気球、航空機、船、人工衛星、地上観測所などの観測データの客観解析と数値予報モデルを組み合わせたデータ同化予報システムで、主に他の予報システムに対して初期条件を提供することを目的としている (Kalnay *et al.*, 1990)。水平方向の離散化は球面調和関数を用いたスペクトル法によって行い、解像度は T126、鉛直方向の離散化は地表から約 2.7hPa までを 28 層に区切っている。時間ステップは約 10 分である。

プロダクトは世界標準時の 0 時 (00Z)、6 時 (06Z)、12 時 (12Z)、18 時 (18Z) の 1 日 4 時刻、1° 間隔の全緯経度について提供され、出力パラメータは指定気圧面や地表におけるジオポテンシャル高度、温度、湿度、風の水平 2 成分その他となっている。プロダクトフォーマットは世界気象機関 (WMO) の GRIB (GRIdded Binary) である。

3 ASTERの標準大気補正法

本論に入る前に、ASTERの標準大気補正法 (Palluconi *et al.*, 1996) について述べる。

RTCは米国空軍AFRL開発のMODTRANの最新版を使用する(現在の最新版は3.7)。

MODTRANに入力する大気データは、温度・水蒸気プロファイル、オゾン、エアロゾルである。これらのうち最も重要な温度・水蒸気プロファイルのソースは、EOS-AM1/MODISの各プロダクトの優先度が最も高く、次いでNCEP/GDAS及びNASA Goddard EOS (GEOS-1)の同化システムの各プロダクトが続く。但し、MODISプロダクトがミッション開始から18ヶ月は検証により利用できないこと、GEOS-1の同化システムはオペレーショナルでないことから、ミッション初期はGDASプロダクトの利用がベースとなる。オゾン及びエアロゾルについてはASTERの場合それほど重要ではないが、オゾンについてはMODIS、TOVS、SAGE、TOMSの各プロダクト(プロファイルもしくは総量)やNOAA/EMCのプロダクト(プロファイル)を、エアロゾルについてはEOS-AM1/MISRやMODISのプロダクト(光学的厚さ)を利用する。

標高データについてはまだ流動的であるが、ETOPO5やGTOPO30の利用がメインになる。

なお、大気及び標高データの空間分解能がASTER/TIRの90mより低いため、ASTERシーンを幾つかの格子(例えば15km間隔)に区切った後、各格子点の大気プロファイルを補間して求め、そのプロファイルについて周囲の代表的な幾つかの標高値に対して大気補正パラメータを求め、更に補間により各画素ごとの大気補正パラメータを求める方法が検討されている。

4 NOAA/AVHRRデータを用いたGDASベースの大気補正法の検証

本研究では、NOAA12/14のAVHRR/2のCh.4及び5にGDASベースの大気補正法を適用し、現地観測値やMCSSTと比較することにより検証を行った結果について報告する。AVHRRのCh.4はASTERのCh.13及び14にほぼオーバーラップしているため、本検証結果はASTERに対する事前検証としても有効であると思われる。また、用いたデータは主として9月上旬の日本周辺のものである。これは全球的に見てかなり湿潤な条件、すなわち大気補正には不利な条件であるため、よりエラーを検知しやすい点で有利であると思われる。

RTCはMODTRAN3.7を利用した。GDASプロダクトからは、ジオポテンシャル高度・気温・湿度プロファイルを抽出してMODTRANに入力した。オゾンについては影響を受けない波長帯での検証であることからMODTRANの内蔵データをそのまま利用し、エアロゾルについても内蔵のRural-VIS23kmを与えた。標高データについてはUSGSのGTOPO30を利用した。

以下に、3つのアプローチによる検証結果を示す。

1) 霞ヶ浦における現地観測に基づく検証

ASTER打ち上げ後の大気補正プロダクトの検証に向けて、ASTERサイエンスチームによるフィールドキャンペーンがこれまでに何度か日米の実験サイトを用いて行われてきた。日本ではこれまでに1997年の12月と1998年の9月の2回、霞ヶ浦を用いて行われた。

本キャンペーンでは、NOAA通過前に複数の水温計測ブイを配置して数~30秒間隔でロギングすると共に、NOAA通過時にそのうちの1カ所で表皮水温計測を行った。水温計測ブイは水面下4cmの水温をサーミスタにより計測するもので、ロガーはOnset社のStowAwayXTIである。表皮水温計測は複数の放射温度計により10秒間隔で計測し、数分間隔でポータブル黒体(カッパーコーン、ウォータージャケット)による温度ドリフトの補正を行った。計測終了後、表皮水温計測地点におけるNOAA通過時の表皮効果を求め、これを他のブイの計測値にも適用することにより全てのブイ計測地点での表皮水温を得た。

Fig. 1及び2はそれぞれ1997年12月13日(NOAA14)及び1998年9月9日(NOAA12及び14)の各実験で得られた各ブイ計測地点での表皮水温実測値とAVHRR/Ch.4及び5に対する

GDASベースの大气補正による表皮水温推定値の比較である。GDASプロファイルは空間的・時間的に線形補間することにより衛星通過時の霞ヶ浦のものを求めて使用した。表皮水温を求める際に使用する水の放射率は室内測定データで得られたものを使用した(Salisbury *et al.*, 1992)。また、比較のため、各図にはCh.4及び5のMCSST/split (Kidwell, 1995) による推定値も示してある。観測角は34.2° (Fig. 1)、47.7° (Fig. 2/14号)、43.1° (Fig. 2/12号) であり、GDASによる観測パス内の水蒸気量は8.5mm (Fig. 1)、39.9mm (Fig. 2/14号)、36.8mm (Fig. 2/12号) である。Fig. 1の結果はいずれも良好で、現地観測値との差はほぼ±0.5°C以内に収まっている。一方、Fig. 2では、MCSST及びGDASのCh. 4の結果は現地観測値との差がほぼ±1°C以内に収まっているのに対して、GDASのCh. 5の結果は12号、14号ともかなり外れている。データ数は少ないものの、パス内の水蒸気量が多いほど、また水蒸気による吸収を強く受けるチャンネルほど誤差が大きくなるという予想通りの結果が得られたと言える。

Figure 1 : Comparison of lake surface temperatures derived from in-situ measurements, the MCSST method and the RTC-based method using GDAS profiles for AVHRR at Lake Kasumigaura on December, 1997.

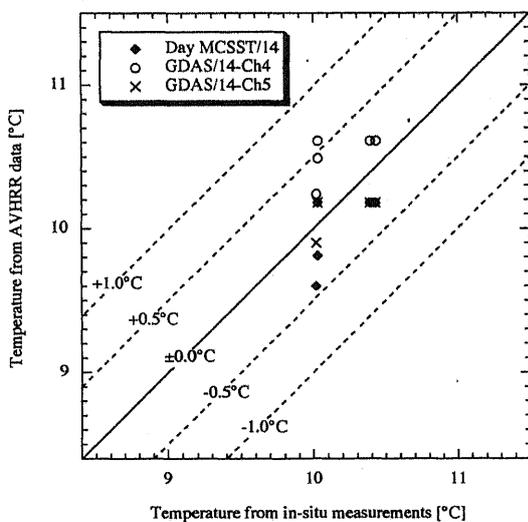
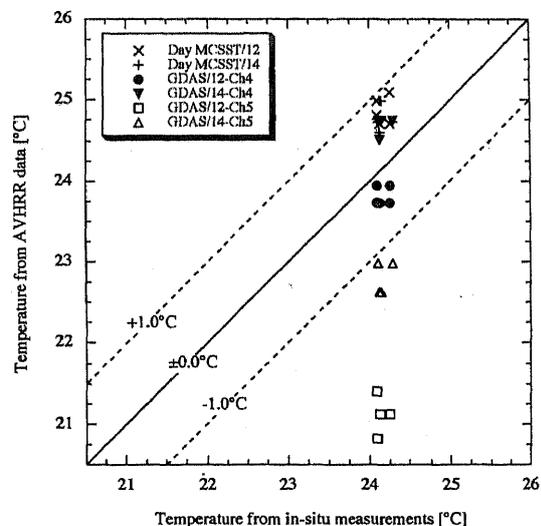


Figure 2 : Comparison of lake surface temperatures derived from in-situ measurements, the MCSST method and the RTC-based method using GDAS profiles for AVHRR at Lake Kasumigaura on September 1998.



2) 衛星直下画素を用いたMCSSTとの比較検証

1998年9月9日14:39JST頃に日本上空を通過したNOAA14/AVHRRデータの衛星直下画素を用いた検証結果について述べる。

Fig. 3はCh. 4画像中の衛星直下ラインを示す。衛星直下ラインは衛星軌道軌跡(緯経度座標)とGTOPO30の海陸分布に適合するラインをAVHRR画像中から選定したもので、画像の中心ラインからは12ピクセルほどずれている。このように選定したのは、AVHRRの視線ベクトルが必ずしも直下ではないことを考慮したためである。

Fig. 4は衛星直下ライン上の海陸分布及び被雲率である。海陸分布はAVHRR画像とGTOPO30から、被雲率はGDASプロダクト(Cloud cover)を用いた。Fig. 5はGDASプロファイルから計算された衛星直下ライン上の透過率である。陸域の標高値にはGTOPO30を使用した。Fig. 6はAVHRRのCh.4の観測輝度温度からCh.5の観測輝度温度を引いた値である。陸域及び被雲率が0より大きい画素は除いてある。スプリットウィンドウ法の原理から、図に示す値は大気効果の程度を示し、大きな値ほどその画素における大気効果が大きいことを示す。Fig.

Figure 3 : Nadir pixels of NOAA14 at 14:39 JST on Sep. 9, 1998.

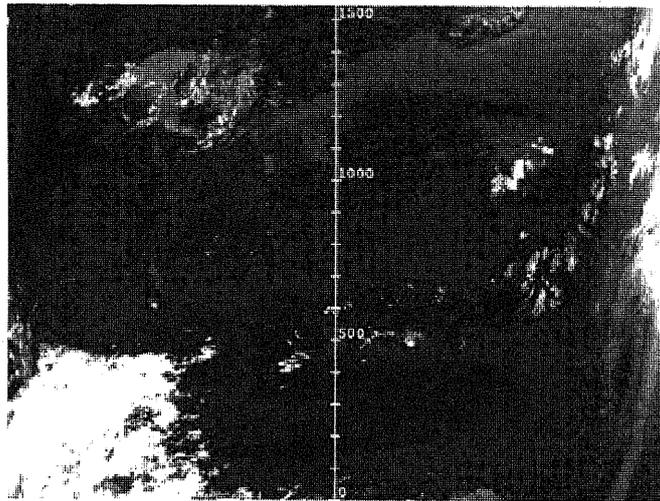


Figure 4 : Cloud cover and land/sea mask for the nadir pixels of AVHRR from Pacific Ocean to Japan Sea at 14:39 JST, September 9, 1998.

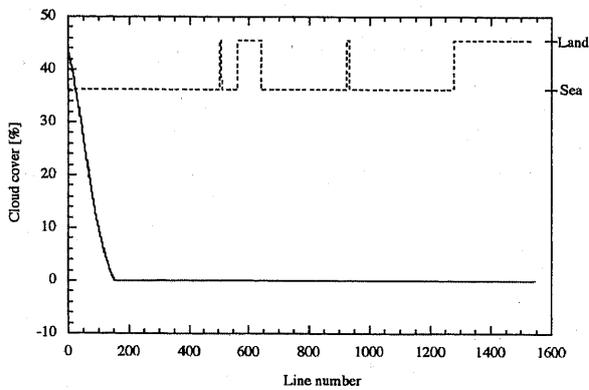


Figure 5 : Transmittance derived with GDAS profiles for the nadir pixels of AVHRR from Pacific Ocean to Japan Sea at 14:39 JST, September 9, 1998.

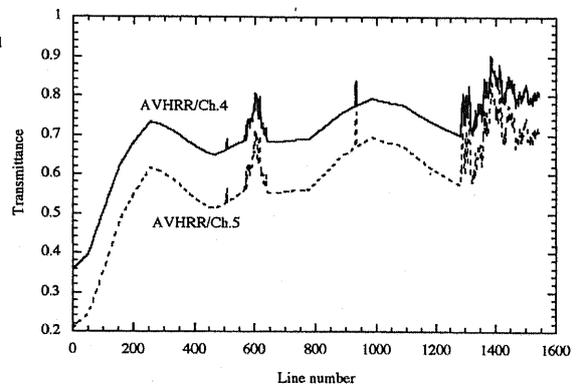


Figure 6 : Difference of sensor brightness temperature between AVHRR channel 4 and 5 for the nadir pixels from Pacific Ocean to Japan Sea at 14:39 JST, September 9, 1998.

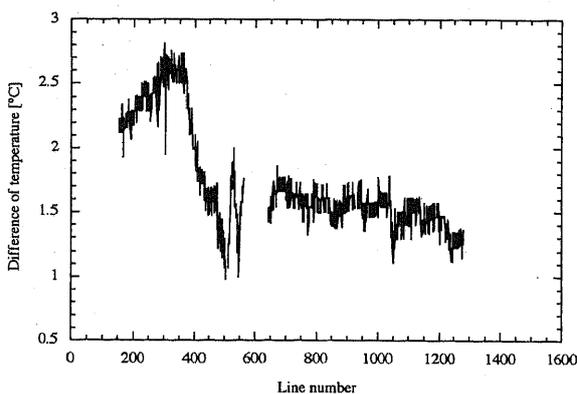
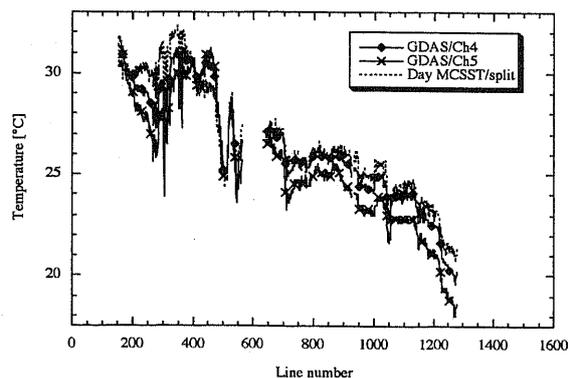


Figure 7 : Sea surface temperature derived from the MCSST and the GDAS approaches for the clear nadir pixels of AVHRR from Pacific Ocean to Japan Sea at 14:39 JST, September 9, 1998.



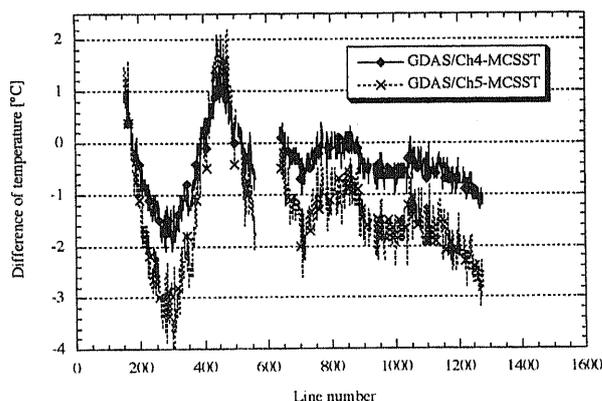


Figure 8 : Difference of sea surface temperature between the MCSST and the GDAS approaches for the clear nadir pixels of AVHRR from Pacific Ocean to Japan Sea at 14:39 JST, September 9, 1998.

7はCh.4及び5についてGDASプロファイルを用いて得られた海面温度及びMCSSTである。また、Fig. 8は各チャンネルのGDASプロファイルに基づく海面温度からMCSSTを引いたものである。

Fig. 8を見ると、まず、ライン番号300付近ではいずれのチャンネルとも差がマイナス方向に大きく、Ch.4で $-1 \sim -2^{\circ}\text{C}$ 、Ch.5で $-3 \sim -4^{\circ}\text{C}$ 程度に達していることが分かる。これはGDASによる大気補正がMCSSTによる大気補正より大気をより乾燥に扱っていることを示すもので、AVHRR画像を調査した結果、この海域には観測時に薄い巻雲が広がっていたものと考えられる。すなわち、GDASプロダクトは時間もしくは水平空間の分解能が低いためにこの巻雲が含まれず、結果としてMCSSTとの差が大きく生じたものと思われる。

次にライン番号450付近を見ると、上記とは逆にMCSSTとの差が正の方向に大きく、Ch.4で $+1^{\circ}\text{C}$ 程度、Ch.5で $+2^{\circ}\text{C}$ 程度であることが分かる。これは、GDASによる大気補正がMCSSTによる大気補正より大気をより湿潤に扱っていることを示すもので、AVHRR画像を調査した結果、この海域では海面温度が周囲より局所的に低く、その結果、局所的な乾燥領域が生じていたものと考えられる。この局所乾燥域は豊後水道に位置し、湧昇域としても知られている。この局所乾燥域のサイズは数10km四方であり、GDASの格子サイズ(約100km間隔)以下の現象であるためにGDASプロダクトに含まれず、結果としてMCSSTとの差が大きく生じたものと思われる。

3) GPS 湿潤遅延に基づく可降水量データを利用した検証

GPS衛星から地上受信局に到達する信号は大気により遅延する。この遅延量のうち、水蒸気による遅延を湿潤遅延と呼び、湿潤遅延量から逆に水蒸気量を高精度に推定することができる(Bevis *et al.*, 1992)。日本には国土地理院所管の900を越えるGPS連続観測点があり、各観測点における解析データの3時間平均値が国土地理院より配布されている。この解析データ中に湿潤遅延に関係した量が含まれており、これを用いて各観測点における3時間ごとの水蒸気量を求めることができる。

前節で用いたAVHRRデータの観測時刻を含むGPS解析データを入手し、これから各GPS観測点における可降水量を計算した。以下では、このデータを用いてGDASベースの大気補正法を検証した結果について述べる。なお、以下で述べるAVHRR画像は緯経度座標系で1画素30arcsecとなるようにNearest neighbor法により再配列したものである。

まず、MCSSTを適用可能で、かつGPS可降水量が得られるエリアの抽出を行った。今回はそのようなエリアとして、Fig. 9に示すように、晴天域にあるGPS観測点からの距離が9kmである晴天海面域とした。ここで晴天域とは、AVHRR画像から推定した雲域から10km以上離れていることとした。また、海面域の選定はGTOPO30に基づいて行った。陸域や海岸に近接した海面の混入を避けるため、 3×3 画素内の観測輝度温度差がCh.4及び5共に 0.5°C 以内のエリアのみを選び、 3×3 画素の平均値をその海面域での観測輝度温度とした。なお、1つのGPS観測点

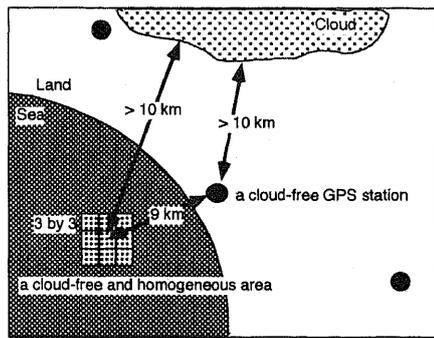


Figure 9 : Cloud-free sea surfaces adjacent to cloud-free GPS stations

Figure 10 : Comparison among the MCSST, the GDAS SST, and the GDAS SST modified by the GPS PWV for AVHRR/Ch.4 for 145 cloud-free sea surfaces adjacent to the cloud-free GPS stations.

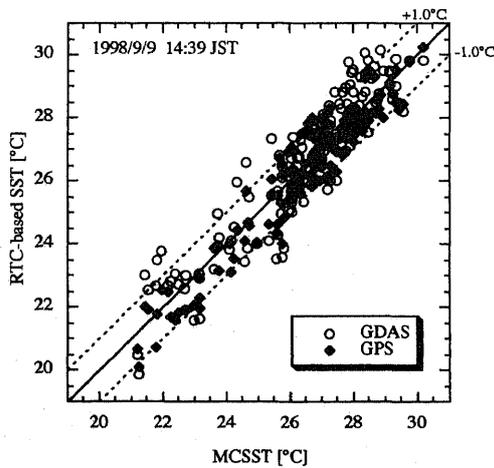
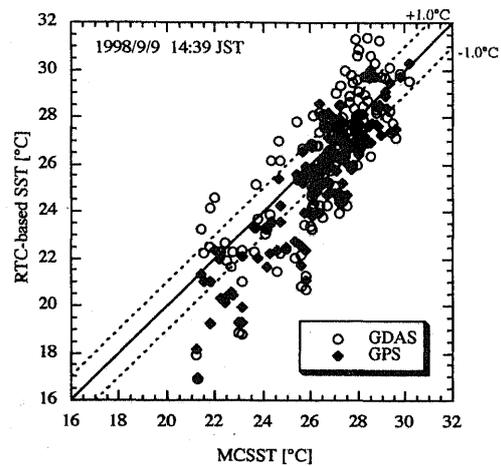


Figure 11 : Comparison among the MCSST, the GDAS SST, and the GDAS SST modified by the GPS PWV for AVHRR/Ch.5 for 145 cloud-free sea surfaces adjacent to the cloud-free GPS stations.



に対しては1つの海面域のみを与えた。この結果、1998年9月9日14:39JSTのAVHRRデータからは145のエリアが得られた。

上記で選んだエリアは、MCSST法及びGDASプロファイルに基づく大気補正法が適用できるのに加えてGPS可降水量を利用可能な位置にあるため、これらを複合的に利用した検証が可能である。Fig.10には、上記の145エリアについて、Ch. 4におけるGDASに基づく海面温度とMCSSTの関係を示してある (GDASと書かれたプロット)。また、同様に同図に示してあるGPSと書かれたプロットは、GDASの相対湿度プロファイルをGPS可降水量に適合するように修正 (全高度に一律の値を掛ける) したものを使った結果である。また、Fig. 11は、Ch. 5の同様の図である。MCSST法には0.5°C前後の標準誤差があるので、これらの図からGDASによる大気補正の精度を直接的に述べることはできないが、GPS可降水量による相対湿度プロファイルの補正を掛けることによってMCSSTとの相関が上がり、Ch.4ではMCSSTとの差はおおよそ±1°C以内に収まるのが分かる。これはGDASの相対湿度プロファイルが幾つかのエリアで実際と合わず、これがGPS可降水量によって正しく補正されたと考えるのが妥当であろう。特に、GDASがMCSSTに比べてより湿潤に扱っているエリアがGPS補正により無くなっているケースが多く見られる。なお、GPS補正後もばらつきが残るのは、MCSST自身の誤差、相対湿度プロファイルの補正誤差、GDASにおける気温プロファイルの誤差、RTC自身の誤差などが考えられる。

5 結論

AVHRRデータを用いて3つのアプローチによりGDASベースの大気補正法の検証を試みた。データ数は少ないが、9月上旬の日本周辺のデータを主に使ったため、大気補正にとっては最悪に近い条件下での検証として捉えることができよう。3つのアプローチによる結果を見ると、AVHRR/Ch.4をGDASプロファイルを用いて大気補正した場合の精度は、日本の夏場でおおよそ $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 程度以内、冬場でおおよそ $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 程度以内と見積もることができるが、更に検証が必要である。また、GPS可降水量を用いてGDASの相対湿度プロファイルを修正する方法により精度が向上する可能性も示した。この手法の更なる精度検証やシステム構築に向けての課題の検討についても今後行っていく予定である。

謝辞

本研究を進めるに際してASTERサイエンスチーム会議の場で様々な助言を頂いた。特に、NASAジェット推進研究所のF. Palluconi氏、長崎大学の森山雅雄氏、東京工業大学の松永恒雄氏、カリフォルニア大学サンタバーバラ校のZ. Wan氏には多くの有意義な助言を頂いた。また、本研究で使用したAVHRRデータは東京大学の六川修一氏より、GPS連続観測システムのデータは国土地理院より提供を受けた。ここに感謝の意を表する次第である。

参考文献

- Becker, F., The impact of spectral emissivity on the measurement of land surface temperature from a satellite, *Int. J. Remote Sens.*, Vol.8, No.10, pp.1509-1522, 1987.
- Kerr, Y. H., J. P. Lagouarde, and J. Imbernon, Accurate land surface temperature retrieval from AVHRR data with use of an improved split window algorithm, *Remote Sens. Environ.*, Vol.41, pp.197-209, 1992.
- Sobrino, J. A., Z. L. Li, M. P. Stoll, and F. Becker, Improvements in the split-window technique for land surface temperature determination, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, Vol.32, No.2, pp.243-253, 1994.
- Wan, Z., and J. Dozier, A generalized split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from space, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, Vol.34, No.4, pp.892-905, 1996.
- 外岡秀行, 六川修一, 星仰, 熱赤外多重分光スキャナを用いた大気補正パラメータ・地表面温度・分光放射率の同時推定手法, *日本リモートセンシング学会誌*, Vol.17, No.2, pp.19-33, 1997.
- Hook, S. J., A. R. Gabell, A. A. Green, and P. S. Kealy, A comparison of techniques for extracting emissivity information for thermal infrared data for geologic studies, *Remote Sens. Environ.*, Vol.42, pp.123-136, 1992.
- Kalnay, E., M. Kanamitsu, and W. E. Baker, Global numerical weather prediction at the National Meteorological Center, *Amer. Meteor. Soc.*, Vol.71, No.10, pp.1410-1428, 1990.
- Palluconi, F., G. Hoover, R. Alley, M. J. Nilsen, and T. Thompson, An atmospheric correction method for ASTER thermal radiometry over land, *ASTER Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) Rev.2*, 1996.
- Salisbury, J. W., and D. M. D'Aria, Emissivity of terrestrial materials in the 8-14 μm atmospheric window, *Remote Sens. Environ.*, Vol.42, No.2, pp.83-106, 1992.
- Kidwell, K. B., NOAA polar orbiter data users guide, U.S. Government Printing Office: 1995-630-673, 1995.
- Bevis, M., S. Businger, T. A. Herring, C. Rocken, R. A. Anthes, and R. H. Ware, GPS meteorology: remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system, *J. Geophys. Res.*, Vol.97, No.D14, pp.15787-15801, 1992.