

LOWTRAN 7 を用いた MODIS 熱赤外バンドの Global 代替校正

ADEOS-2 GLI NASDA Calibration 4th Group 村上 浩 March 22, 2002

1. 概要

MODIS ラジオメトリック校正済み熱赤外(TIR)データ(MOD021KM)を用いた海面水温(SST)推定を行うため、1日分のMOD021KM 5 km 間引きデータ(MOD02CSS)と、Reynolds and Smith [1994]の Weekly SST データ、気象庁(JMA)客観解析データ(ANAL)低分解能放射伝達モデル(LOWTRAN 7)を用いて、MODIS TIR バンドの代替校正を行った。併せてLOWTRAN 7の出力から MCSST 法における係数を求め、MODIS TIR データを用いて SST の推定を行った。日本周辺の 2 シーンの SST 推定画像を VIRS の SST と比較したところ、bias は 0°K、0.3°K、RMSE は 0.76°K、0.78°K であった。本解析で用いた衛星 TIR の Global 代替校正と SST 推定手法は衛星ミッション初期の校正作業において有効である。

2. データの準備

2.1 MOD02CSS データ

NASA から NASDA に提供されている MOD02CSS データ(MODIS L1B Version 3)のうち、2001年9月13日の夜間(1日分のデータ(Ascending 75°N ~ 75°S の約 120 シーン)から、SST 推定に用いられる 4 バンド(ch20、ch29、ch31、ch32; 中心波長は Table 1 参照)の輝度、衛星天頂角(SAZ)、衛星方位角(SAA)の 0.25°等緯経度格子 Binned データを作成した。夜間データを用いているのは ch20 における太陽光の反射の影響を避けるためである。この 0.25°格子データを、ANAL の水平空間グリッドサイズに合わせ、更に 1.25°格子にリサンプリングした。

本解析では、計算に簡略化のために MODIS TIR バンドの波長応答は中心波長 λ_c で代表させた。 λ_c は MODIS 校正チーム(MCST)から提供された応答関数 $R(\lambda)$ から、以下の式を用いて計算した。

$$\lambda_c = \sum_{i=1}^{N-1} (w_i \times \lambda_i^{ave}) / \sum_{i=1}^{N-1} w_i \quad (\text{eq. 1})$$

$$w_i = 1/2 \times (R(\lambda_i) + R(\lambda_{i+1})) \times (\lambda_{i+1} - \lambda_i) \quad (\text{eq. 2})$$

$$\lambda_i^{ave} = (\lambda_{i+1} - \lambda_i) / (R(\lambda_{i+1}) - R(\lambda_i)) \times (\text{sqrt}((R(\lambda_{i+1})^2 + R(\lambda_i)^2)/2) - R(\lambda_i)) + \lambda_i \quad (\text{eq. 3})$$

計算した結果を Table 1 に示す。

Table 1 MODIS の応答関数から計算した ch20, 29, 31, 32 の中心波長

MODIS ch.	ch20	ch29	ch31	ch32
λ_c [nm]	3.789	8.532	11.006	11.996

本解析における輝度温度→輝度変換は以下の式を用いた。

$$R = c_1 / \lambda_c^5 / (\exp(c_2 / \lambda_c / T) - 1) \quad (\text{eq. 4})$$

R: radiance [$\text{W}/\text{m}^2/\text{str}/\mu\text{m}$], T: Brightness temperature [K],
 λ_c : center wavelength [μm] of each band (Table 1参照)
 $c_1=119104272.3$, $c_2=14387.75197$

2.2 Reynolds and Smith [1994]の SST データ

米国 National Meteorological Center (NMC)から公開されている Reynolds and Smith [1994]の 1° 格子 Weekly SST データ (2001 年 9 月 12 日 ~ 18 日平均データ) から、ANAL に合わせて 1.25° 格子に線形補間したデータを作成した。

2.3 気象庁客観解析各層データ (ANAL)

JMA から NASDA に提供されている 1.25° 格子、鉛直 18 層の客観解析データ (ANAL) を LOWTRAN 7の大気プロファイルに使用した。2001 年 9 月 13 日の 12 時 (UT) のデータにおける、気圧、気温、湿度のデータを抽出し、GRIB format から 3 次元のラスタデータへ平文化した。

2.4 GMT 陸/海率データ

GLI 処理用に作成されている陸/海フラグデータ (GMT 海岸線ベクトルデータから変換した約 500m 分解能のグリッドデータ) から、等緯経度 $1/16^\circ$ 格子の陸/海域データを作成した。この $1/16^\circ$ 格子データから、等緯経度 1.25° 格子に含まれる陸/海域率を求め、陸域 10%以上の場合に陸、それ以外を海として扱った。海域と陸域で大気のプロファイルが違ふことが予想されるため、本解析ではこの陸/海率データにおける海域のみで行った。

3. LOWTRAN 7による輝度シミュレーション

前章で作成したデータを用いて、LOWTRAN 7による輝度シミュレーションを行った。海面での TIR の放射率は 0.99 とした。本解析では TIR をターゲットにしており、また、MODIS CSS では夜間データを用いているので、日射の反射のシミュレーションは行っていない。シミュレーション Flow と、その出力結果の評価 Flow を図 1 に示す。

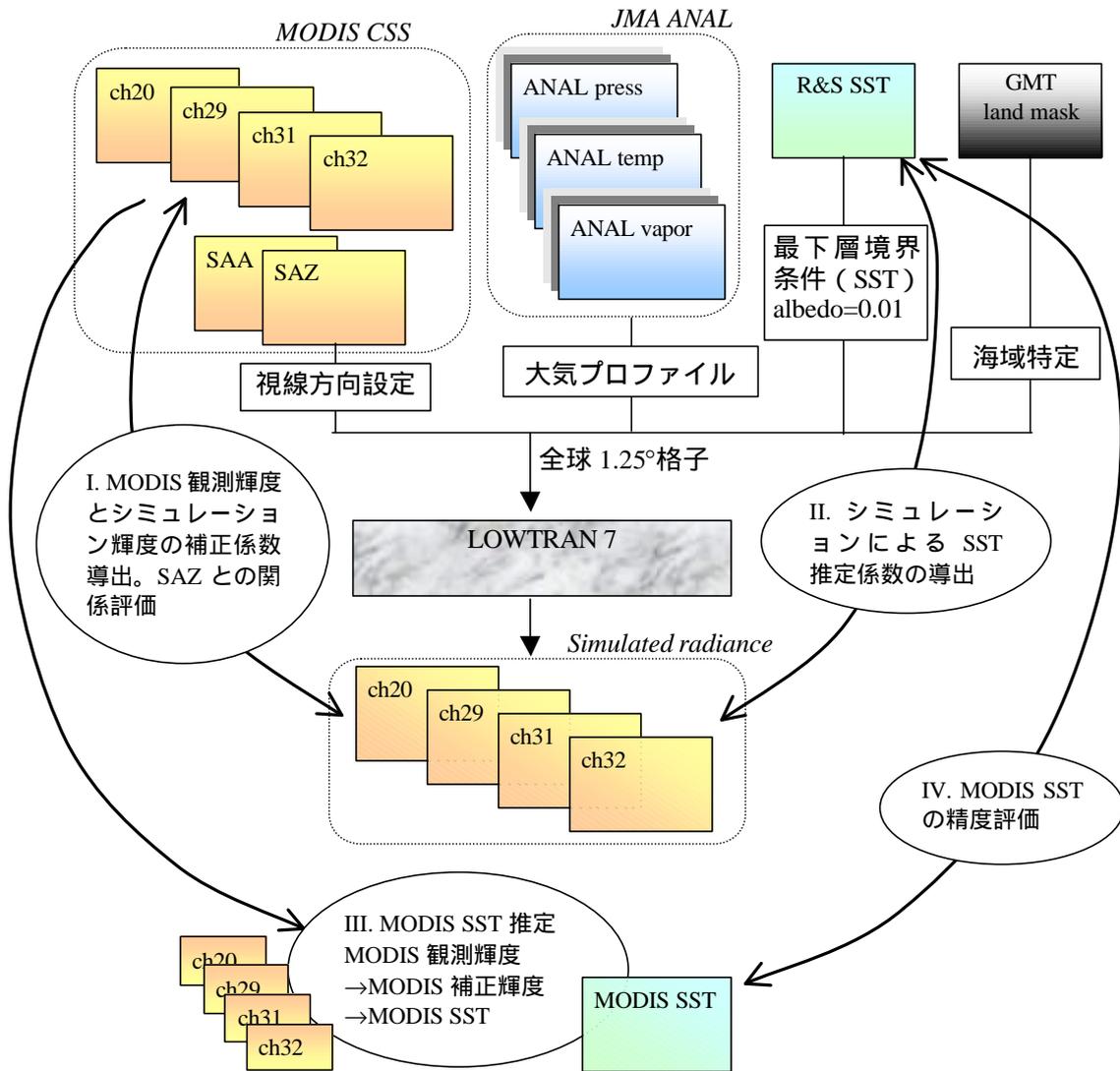


図 1 シミュレーションとその評価の Flow

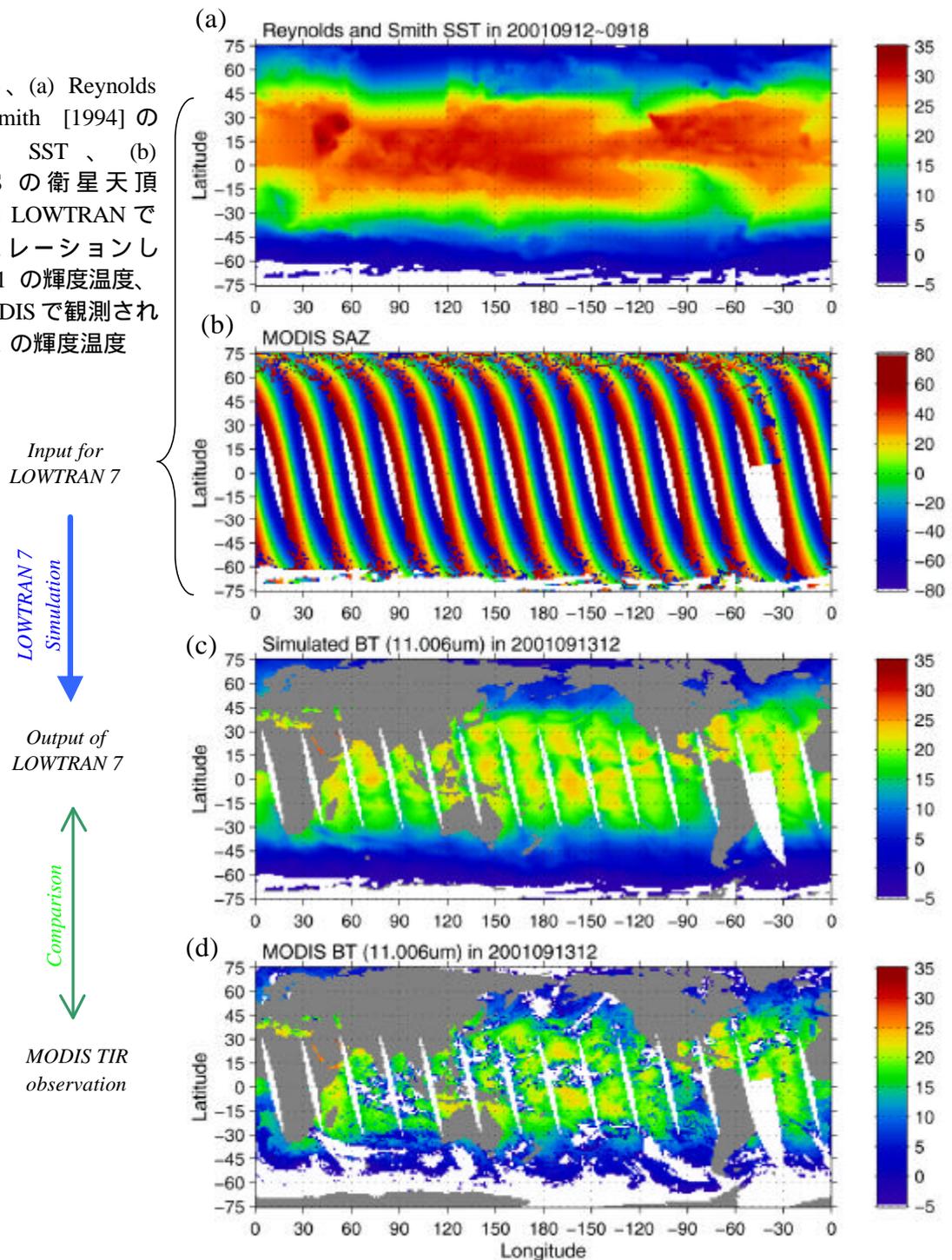
4. 結果

4.1 MODIS 観測輝度とシミュレーション輝度の補正係数の導出 (図1のI)

図2はLOWTRAN 7のInput/Outputの例である。SAZについては、走査鏡の反射率の影響を評価できるように、 $SAA > 0$ の時(すなわち衛星直下点から西側)はSAZ→SAZ、 $SAA < 0$ (東側)の時はSAZ→-SAZに変換している。

図2

上から、(a) Reynolds and Smith [1994]のWeekly SST、(b) MODISの衛星天頂角、(c) LOWTRANでシミュレーションしたch31の輝度温度、(d) MODISで観測されたch31の輝度温度



シミュレーションされた輝度と MODIS で観測された輝度 (図 2 の(c), (d)が ch31 の場合の例) を比較することで、MODIS の観測輝度の補正係数を求めた。その結果が図 3 と Table 2 である。雲域における熱赤外放射は LOWTRAN 7 のシミュレーションでは考慮されていない。そこで、本解析では、MODIS データの輝度温度や多バンド間の輝度温度差によって雲域を判別し、図 3 の比較から除外した。

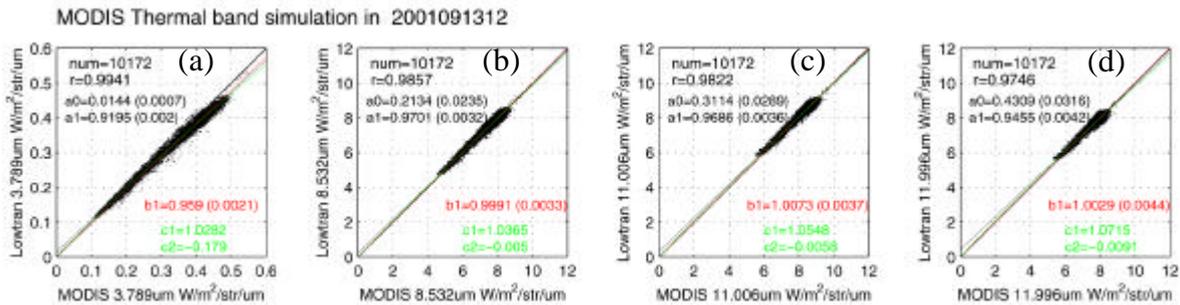


図 3 MODIS 観測輝度とシミュレーション輝度の散布図

x 軸は MODIS 観測値、y 軸シミュレーション結果。(a) ch20, (b) ch29, (c) ch31, (d) ch32 の場合。サンプル数は 10172。

b1 は(A) $y=b_1 x$ 、a0, a1 は(B) $y=a_0+a_1 x$ 、c1, c2 は(C) $y=c_1 x+c_2 x^2$ に対する最小二乗回帰係数。括弧中の値は信頼区間 95% の±幅

Table 2 MODIS 観測輝度のシミュレーション輝度に対する補正係数

Eq.	$I_c [nm]$	a_0	a_1	a_2
A	3.789	—	0.9590 (±0.0021)	—
	8.532	—	0.9991 (±0.0033)	—
	11.006	—	1.0073 (±0.0037)	—
	11.996	—	1.0029 (±0.0044)	—
B	3.789	0.0144 (±0.0007)	0.9195 (±0.0020)	—
	8.532	0.2134 (±0.0235)	0.9701 (±0.0032)	—
	11.006	0.3114 (±0.0289)	0.9686 (±0.0036)	—
	11.996	0.4309 (±0.0316)	0.9455 (±0.0042)	—
C	3.789	—	1.0282	-0.1790
	8.532	—	1.0365	-0.0050
	11.006	—	1.0548	-0.0058
	11.996	—	1.0715	-0.0091

a0, a1, a2 は $y=a_0+a_1 x + a_2 x^2$ に対する最小二乗回帰係数。

括弧中の値は信頼区間 95% の±幅

図 3 では殆どのバンドで回帰直線が $y=x$ に近くなっている。しかし、95%信頼区間を見ると、(B) $y=a_0+a_1 x$ の回帰では a0, a1 とともに(a) ~ (d)の全てにおいて、(A) $y=b_1 x$ の回帰では(a)と(c)で有意に $y=x$ と異なっている。

MODIS では走査鏡の反射率が走査角度に応じて変化することが知られている。そこで、LIB 処理 (校正) 後でもその影響が残っている可能性もある。そこで、図 4 では、SAZ に対する、シミュレーション輝度値/観測輝度値比率の変化を評価した。

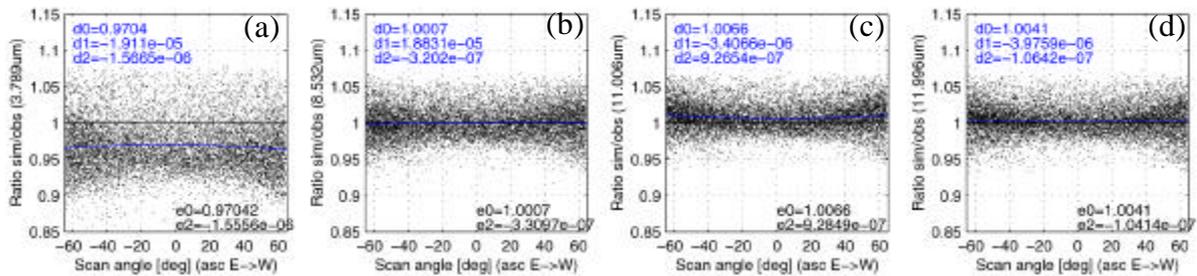


図4 衛星天頂角 SAZ に対する、シミュレーション輝度値/観測輝度値比率の分布
 x 軸はスキヤンの左右を考慮した SAZ (4.1 節参照) y 軸はシミュレーション/MODIS 観測値。
 (a) ch20, (b) ch29, (c) ch31, (d) ch32 の場合。サンプル数は 10172。
 d0, d1, d2 は $y=d_0+d_1 \times SAZ+d_2 \times SAZ^2$ (Table 2 B)、e0, e2 は $y=e_0+e_2 \times SAZ^2$ (Table 2 A) に対する最小二乗回帰係数。

図4を見ると、(a) ch20 や(c) ch31 で SAZ に対する関係は弱いながらも認められる。しかし、0°に対してほぼ対称であり、走査鏡反射率補正の問題というよりも、LOWTRAN 7 のシミュレーションにおける系統的誤差であると考えた方が良いかもしれない。本解析では、SST 推定精度の結果から (図7 参照) 0°に対して対称な [Table 3 \(A\)の補正係数を採用することにする](#)。

Table 3 MODIS TIR correction coefficients

Eq.	I_c [mm]	r_0	r_1	r_2
A	3.789	0.9704	—	-0.1556E-5
	8.532	1.0007	—	-0.0331E-5
	11.006	1.0066	—	0.0928E-5
	11.996	1.0041	—	-0.0104E-5
B	3.789	0.9704	-0.1911E-4	-0.1566E-5
	8.532	1.0007	0.1883E-4	-0.0320E-5
	11.006	1.0066	-0.0341E-4	0.0927E-5
	11.996	1.0041	-0.0398E-4	-0.0106E-5

$$\text{rad}_{\text{corrected}} = \text{rad}_{\text{original}} \times (r_0 + r_1 \times \text{SAZ} + r_2 \times \text{SAZ}^2) \quad (\text{SAZ: [degree]})$$

以上より、TIR 補正係数が求められた。この補正係数は、LOWTRAN 7 やその Input データにおける系統誤差や波長応答を中心波長で代表させていることによる誤差などを含んだものであり、一概に校正誤差であるとはいえない。しかし、このシミュレーションを真として SST 推定係数を求め、「輝度補正→SST 推定」を行えば、MODIS 輝度から LOWTRAN 7 の Input に合った SST を求めることができる。

4.2 シミュレーションによる SST 推定係数の導出 (図 1 の II)

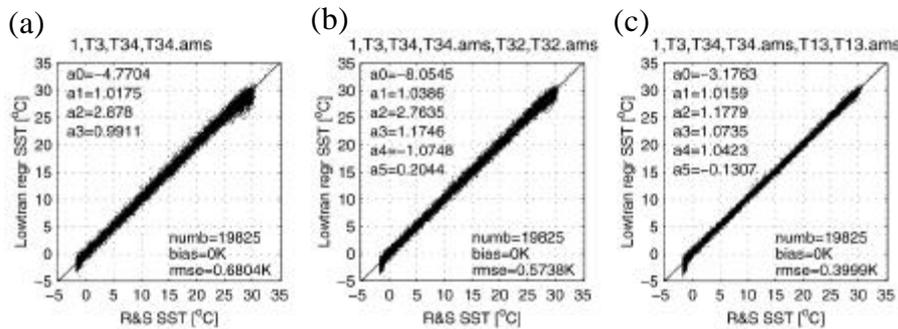


図 5 LOWTRAN 7 の出力による SST 推定係数の導出

x 軸は Reynolds and Smith 1994 の SST、y 軸は LOWTRAN 7 の出力から推定した SST。サンプル数は 19825。

a0, a1, a2, a3, a4, a5 は、(a), (b), (c)それぞれ

$$\text{SST} = a_0 + a_1 T_3 + a_2 (T_3 - T_4) + a_3 (T_3 - T_4) \text{ ams} \quad (\text{eq. A})$$

$$\text{SST} = a_0 + a_1 T_3 + a_2 (T_3 - T_4) + a_3 (T_3 - T_4) \text{ ams} + a_4 (T_3 - T_2) + a_5 (T_3 - T_2) \text{ ams} \quad (\text{eq. B})$$

$$\text{SST} = a_0 + a_1 T_3 + a_2 (T_3 - T_4) + a_3 (T_3 - T_4) \text{ ams} + a_4 (T_1 - T_3) + a_5 (T_1 - T_3) \text{ ams} \quad (\text{eq. C})$$

$$\text{ams} = 1 / \cos(\text{saz} \times \pi / 180) - 1$$

に対する最小二乗回帰係数。

図 5 は LOWTRAN 7 の出力輝度を eq. 4 で輝度温度に変換し、MODIS センサノイズを考慮するために 0.1K の標準偏差を持つランダムノイズを加え、eq. A~C に対して最小二乗回帰を行った結果である。Table 4 に求められた回帰係数と Root Mean Square Error (RMSE)を示す。

Table 4 Regression coefficients for each equation

Equation	a0	a1	a2	a3	a4	a5	RMSE [K]
eq.A	-4.7704	1.0175	2.8780	0.9911	0	0	0.68
eq.B	-8.0545	1.0386	2.7635	1.1746	-1.0748	0.2044	0.57
eq.C	-3.1763	1.0159	1.1779	1.0735	1.0423	-0.1307	0.40

4.3 MODIS SST 推定と精度評価 (図 1 の III と IV)

上記で求めた、MODIS 輝度補正係数 (Table 3A)、SST 推定係数 (Table 4) を、2.1 節で作成した全球 1.25°格子の MODIS 観測輝度に適用して SST を推定した。また、その結果を LOWTRAN 7 の Input である Reynolds and Smith [1994]の Weekly SST と比較し、精度を評価した。

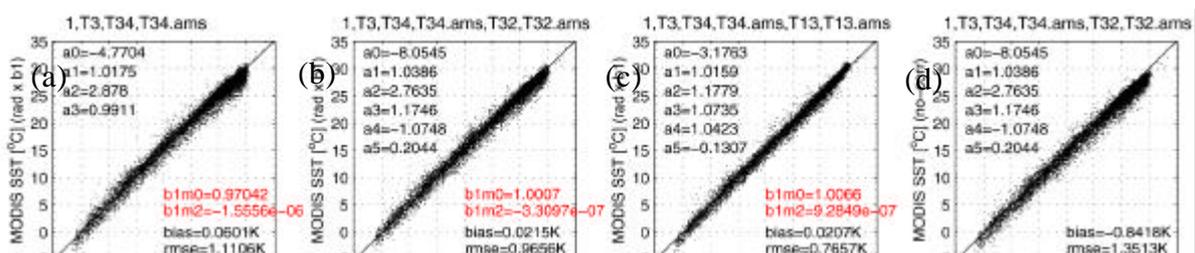


図6 MODIS 観測輝度→補正輝度→輝度温度→SSTで求めた SST(y 軸)と Reynolds and Smith [1994] による SST (x 軸) との比較。

(a) eq.A, (b) eq.B, (c) eq.C の場合。(d)は輝度補正を行わなかった場合の eq.B による SST 推定精度。

Table 4 の回帰精度や図 6 の SST 推定精度は eq.C が最も良いが、T3 (3.789 μ m)は太陽光反射の影響で日中は使えないこと、GLI の標準アルゴリズムでは現在 eq.B を用いている、といった理由から、本解析では eq.B を使用することにする。図 6(b)と(d)を比較すると、輝度補正を行った場合の SST 推定精度は輝度補正を行わなかった場合の SST 推定精度よりも、bias、RMSE の両方において改善していることがわかる。

図7 SST推定精度の輝度補正係数による違い。入力輝度は MODIS CSS から作成 (2.1 節) SST 推定式は Eq. B を用いている。値は Reynolds and Smith [1994] SST からの残差を示す。(a)輝度補正を行わなかった TIR、(b) Table 2A で輝度補正を行った TIR、(c) Table 2B で輝度補正を行った TIR、(d)Table 3A で輝度補正を行った TIR、を用いた場合。

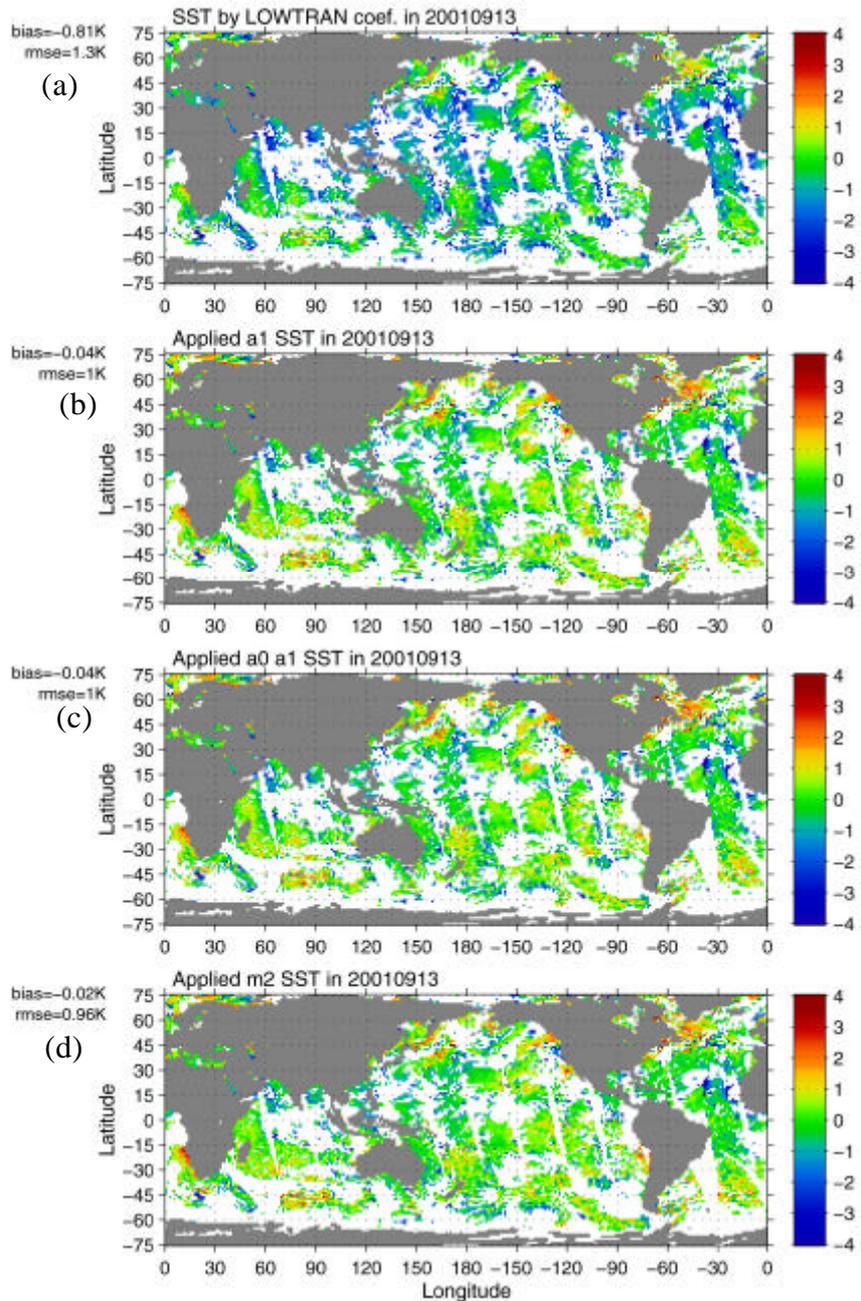


図7は各補正係数を用いた時の SST 推定精度を比較したものである。補正係数を用いていない(a)では -0.8°K のバイアスを示しており、輝度補正が必要であることを示している。(b)と(c)の違いは、定数項を入れない/入れるであるが、bias や RMSE に差はなく、定数項を入れなくても良いことがわかる。(b)と(d)を比較すると、スキャンの端で(d)の方が0に近くなっており、Table 3のSAZ補正が有効であることを示している。

4.4 TRMM VIRS SST データを用いた MODIS SST の精度評価 (図 1 中の III と IV)

前節では SST 推定係数決定時に用いたデータで精度評価を行ったが、係数決定とは独立した他の日の MODIS データでも同様な精度で SST 推定を行えるかどうかを検証した。ここでは比較の対象に、Reynolds and Smith [1994]より高空間分解能 (0.125°格子) の TRMM VIRS SST データを用いた (VIRS SST の TAO array SST 観測値からの RMSD は 0.68K, http://www.eorc.nasda.go.jp/TRMM/imgdt/day_vrs/virs_sst.pdf 参照)

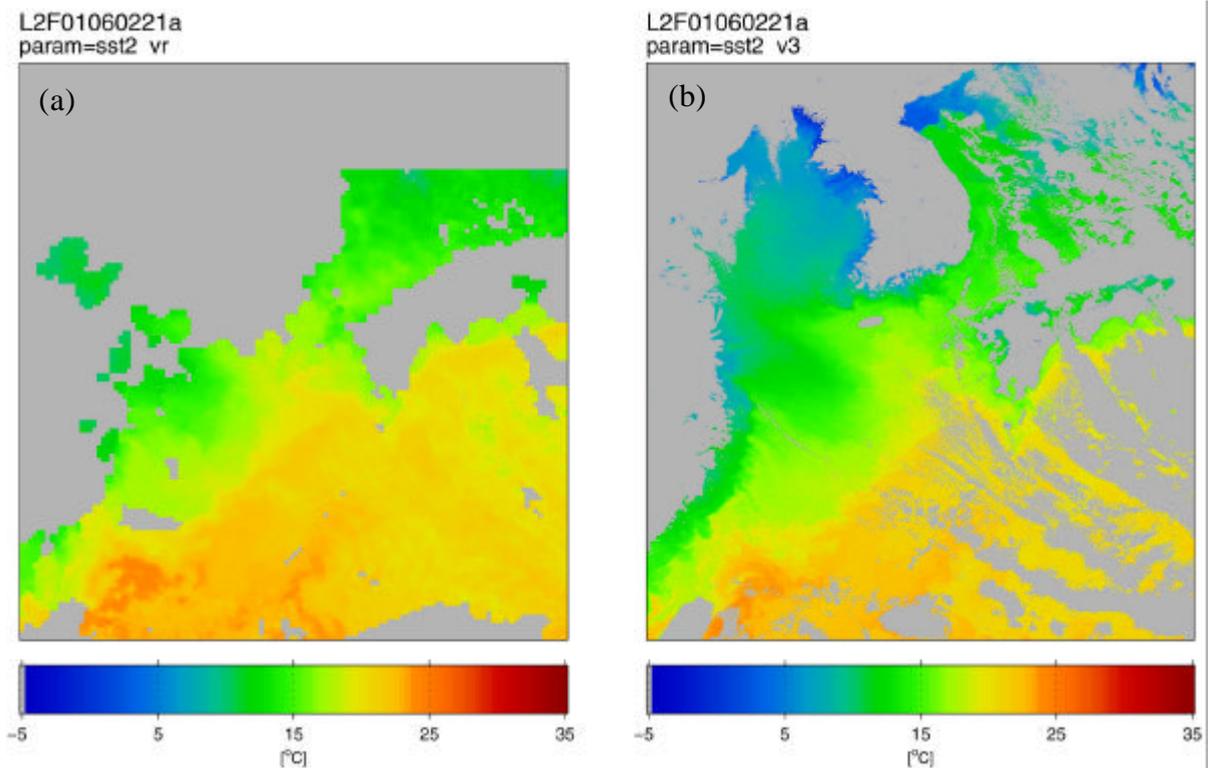
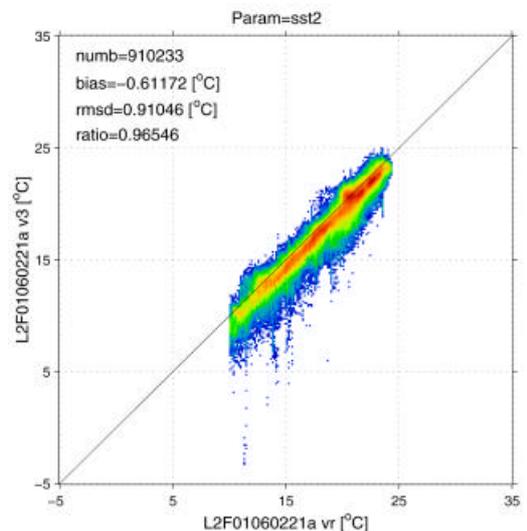


図 8 2002 年 1 月 6 日の東シナ海 (120°E ~ 134°E、24°N ~ 41°N) における、(a)TRMM VIRS の SST と、(b)MODIS SST (輝度補正なし+Table 4B SST 係数)

図 8 を見ると、MODIS SST の空間構造はほぼ VIRS SST と一致している。しかし、図 9 で見られるように、bias が -0.6°K となっており、輝度の補正が必要であることを示している。このバイアスの傾向は図 6(d)や図 7(a)と一致している。

図 9 図 8 の(a)と(b)の散布図。
x 軸は VIRS SST、y 軸は MODIS SST。



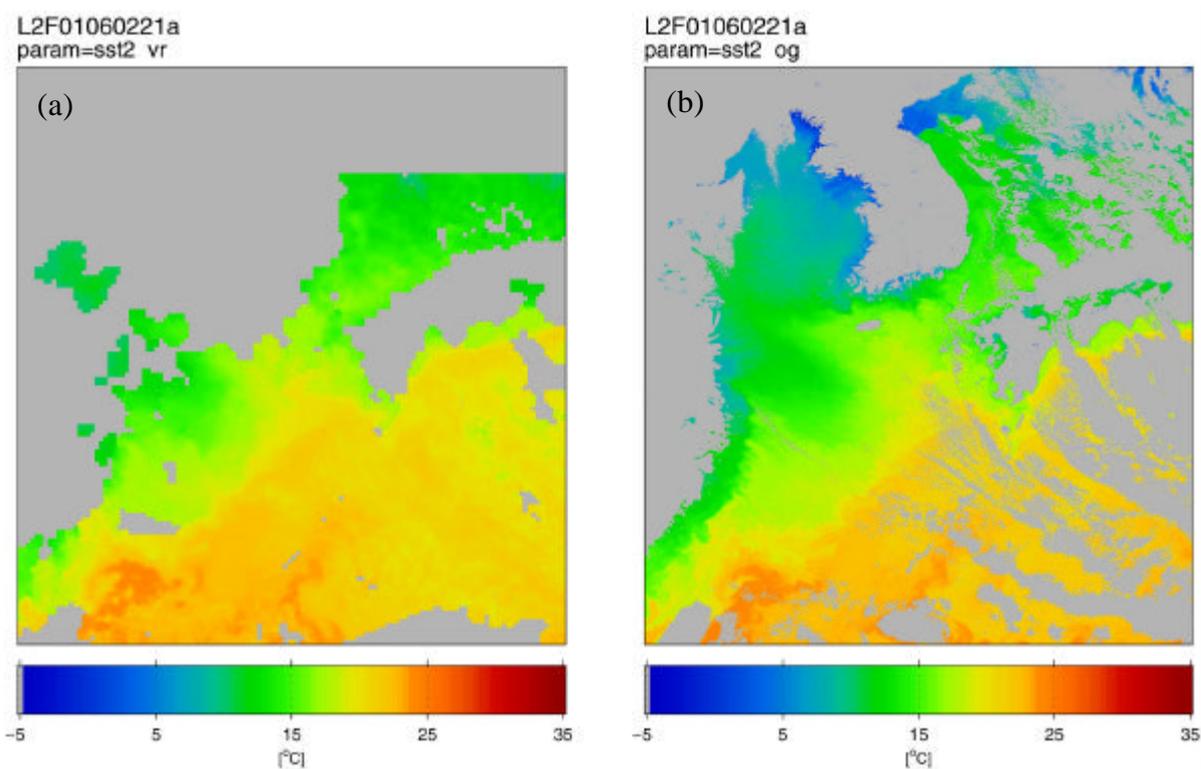


図 10 図 8 と同じ。但し(b)では Table 3(A)による輝度補正済み TIR を使用。

Table 3 (A)による輝度補正を行い、さらに本解析で求めた SST 推定係数を用いると、図 11 のように bias はほぼ 0、RMSD は 0.76°K 、となった。この RMSD の値は、VIRS と TAO の比較結果が 0.68°K であることを考えれば、この輝度補正版 MODIS SST が VIRS SST と同等の精度を持っていることを示すと考えられる。

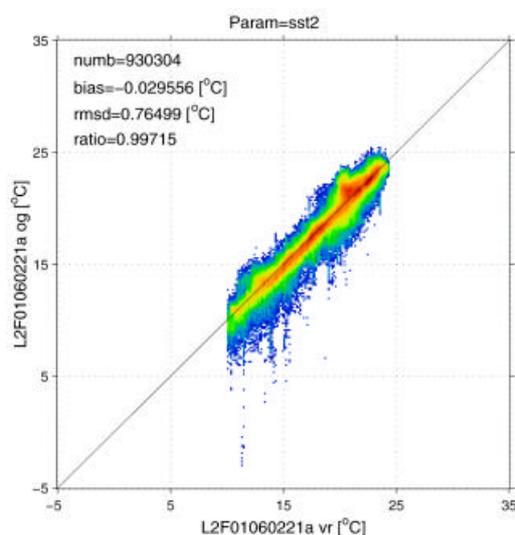


図 11 図 10 の(a)と(b)の散布図。
x 軸は VIRS SST、y 軸は MODIS SST。

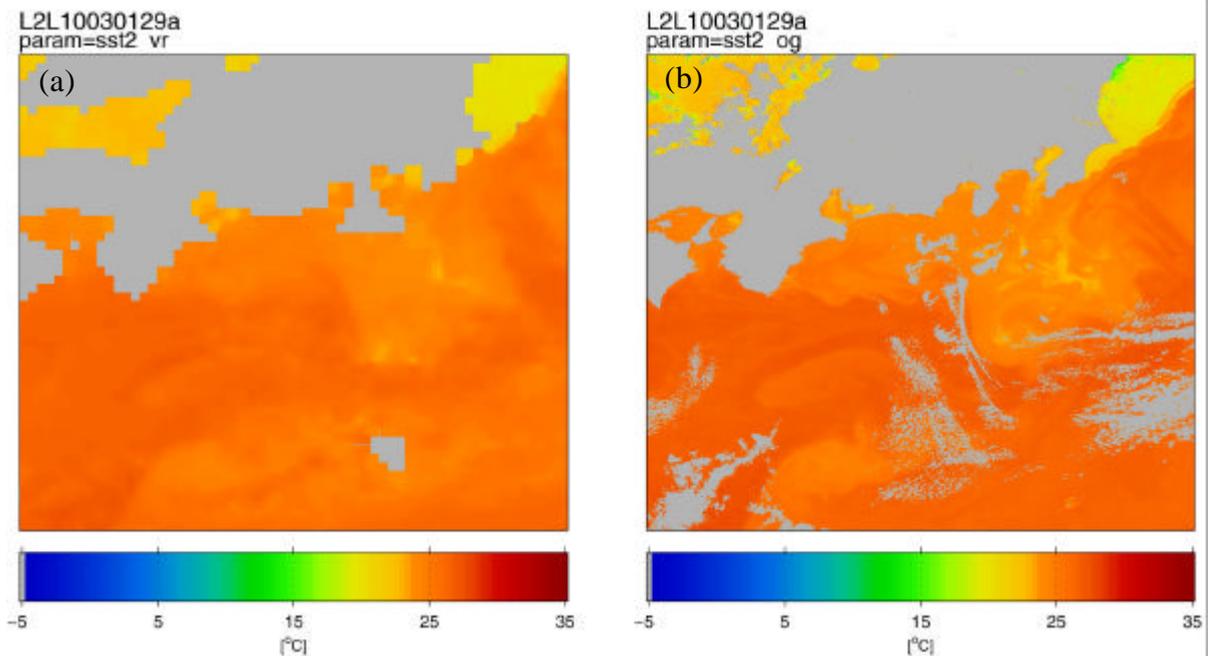


図 12 図 10 と同じ。2001 年 10 月 3 日の 134°E ~ 142°E、30°N ~ 37°N。

違う月のシーンについて Table 3A と Table 4B を用いた MODIS SST と VIRS SST とを比較した。その結果、bias は 0.3°K、RMSD は 0.78°K、となった。Bias は若干あるものの、図 13 の散布図ではほとんどのグリッドで $y=x$ のラインに乗っており、図 11 と違う傾向は見られない。よって、Table 3(A)輝度補正係数 + Table 4B SST 係数によって、どのシーンでも同様な精度で SST 推定ができると考えられる。

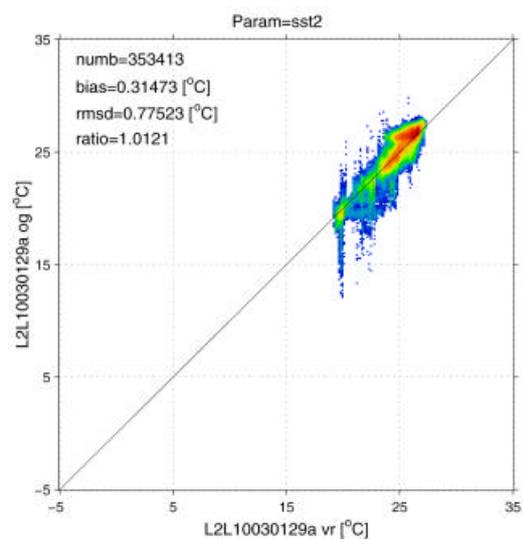


図 13 図 12 の(a)と(b)の散布図。
x 軸は VIRS SST、y 軸は MODIS SST。

5. まとめと考察

5.1 本解析でわかったこと

LOWTRAN 7による TIR シミュレーションを全球で行い、求められた TIR と衛星観測 TIR とを全球で比較することにより、衛星 TIR を LOWTRAN 7 に適応した値に校正できる可能性があることがわかった。ただし、ここでの輝度補正係数は、バンド応答を中心波長で代表したことによる誤差や LOWTRAN 7 とその Input データのもつ系統的な誤差(全球あるいは地域毎のバイアスなど) を含んだものであるため、校正誤差そのものを表していない可能性がある。

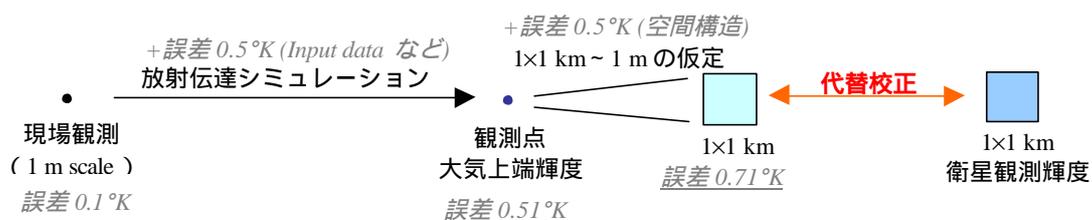
もし ANAL の水蒸気量や気温に系統誤差があると TIR のシミュレーションにおいて大きな影響があると思われるが、同じ ANAL+LOWTRAN 7 の結果から求められた SST 推定係数を用いれば、全ての誤差をこの補正係数に押し込める形になり、輝度補正後の TIR からある程度の精度で (VIRS SST との RMSD=0.76°K や 0.78°K) SST 推定が行えることがわかった。

5.2 解析誤差の考察

本解析では、LOWTRAN 7 の入力に Reynolds and Smith [1994] の SST と JMA ANAL の大気プロファイルを用いている。Reynolds and Smith [1994] の SST は、現場観測と NOAA 衛星の AVHRR による SST を効果的にブレンドすることで、100km スケールとしては系統的なバイアスを注意深く排除している。一方 JMA ANAL も、現場観測データや衛星データを JMA の数値モデルに注意深く取り込んでおり、それほど系統誤差は無いと期待できる。

通常のアダプティブ校正では、現場で精度の高い地表及び大気の観測データを取得し、それらを Input にして放射伝達モデルで大気上端輝度をシミュレーションし、衛星観測輝度と比較する。しかし本解析では、100km スケールの Input データと衛星観測データを用いている (図 14 参照)。

(a) 通常の現場観測による代替校正



(b) 100km スケールデータによる代替校正

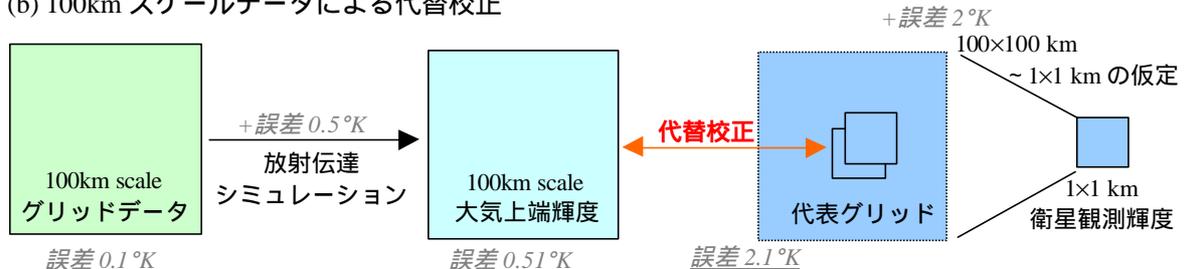


図 14 通常のアダプティブ校正(a)と本解析での代替校正(b)との違い

経験的に推測される誤差を斜字で記した。誤差の積算は、 $E_{total}^2 = E_1^2 + E_2^2 \dots$ の関係を用いた。

図 14 の様に、代替校正時の誤差は、(a)の手法より(b)の手法の方が大きいと考えられる。しかし、本解析のような(b)の場合、図 3 のように 10000 点以上の解析点数を容易に取ることができる。一方(a)の代替校正では、現場での良質な測定点を多数得ることは困難であり、例えば OCTS の場合、打ち上げ 1 年後の時点で 86 点しか得られなかった (Sakaida et al., 1998) 。実際には測定点の校正係数の平均値が校正結果となるので点数が多いほど有利である。各点の誤差が独立であると仮定すると、 $E_{total}=E_{each}/\sqrt{N}$ (N: data number) となるので、(a)と(b)の手法の校正精度は、

(a)の場合： $0.71^{\circ}\text{K}/\sqrt{86}=0.08^{\circ}\text{K}$

(b)の場合： $2.1^{\circ}\text{K}/\sqrt{10000}=0.02^{\circ}\text{K}$

となり、(b)の方が精度が良いと考えることができる。しかも現場の測定点は入手に数ヶ月の時間がかかるものもあるが、(b)の手法では 1 日分の衛星データがあれば、SGI のサーバーによる数時間の処理で 10000 点以上の点数を得ることができる。

5.3 GLI 校正作業における意義

GLI の SST の検証作業においては JMA から提供されている GTS データ中のブイデータを使用できるので、OCTS に比べて格段に現場観測データの点数が得られると思われる。しかし衛星打ち上げ当初の段階では、やはり現場の測定点の数は限られるので、(b)の手法がより効果的であると考えられる。また(b)では、全球的に均一に測定点が取れるので、スキャン角度やチルト角度に相関した相対誤差を見出すのに有効であると考えられる。また、期間を置いて何度も作業を行うことで、感度の長期変動を評価できるかもしれない。

但し、5.1 節で述べたとおり、Input データに系統誤差があるとサンプル数が多くても TIR のシミュレーション結果に系統誤差が生じる。SST 推定のみが目的であれば、補正係数に全ての誤差を押し付けることができるが、GLI では雲物理量の推定など様々な目的で TIR が用いられるので、この系統誤差が問題となる。GLI の TIR 校正作業においては、現場観測による代替校正と全球データによる代替校正を両方行い、現場観測データ数の増加を見ながら相互に補完し合うようにして校正結果を導いていくことが必要であると思われる。

参考文献

Murakami, H., Sea Surface Temperature Estimation using Visible and Infrared Scanner (VIRS), http://www.eorc.nasda.go.jp/TRMM/imgdt/day_vrs/virs_sst.pdf, 1999.

Reynolds, R. W. and T. M. Smith, Improved global sea surface temperature analyses, *J. Clim.*, **7**, 929-948, 1994.

Sakaida, F., M. Moriyama, H. Murakami, H. Oaku, Y. Mitomi, A. Mukaida and H. Kawamura, The sea surface temperature product algorithm of the Ocean Color and Temperature Scanner (OCTS) and its accuracy, *J. Oceanogr.*, **54**, 437-442, 1998.