

MODIS 準リアルタイム処理 SST アルゴリズム Ver.3.0 開発と検証

JAXA/EORC 細田 皇太郎

Abstract

JAXA/EORC の MODIS 準リアルタイム処理海面水温 (SST) データは 2004 年 10 月 5 日以降 Ver. 2.0 アルゴリズムを用いて処理されてきた。Ver.2.0 アルゴリズム validation の結果から、現場観測に対する MODIS SST の品質に季節変化が含まれていることが判明したため、この度水温回帰式のアルゴリズム変更を伴う再最適化を行った結果を報告する。この変更によるアルゴリズムを Ver. 3.0 とし、2005 年 10 月 1 日以降の公開データ処理に適用する。

1 Validation of Version 2.0 MODIS SST

Version 2.0 MODIS MCSST の推定式は、ADEOS-II 搭載 GLI SST Ver.2.0 アルゴリズム (Sakaida et al., 2005) に基づき、2004 年 2 ~ 4 月の Terra および Aqua 搭載の MODIS L1B データ (おおよそ 20-50°N、115-155°E の範囲) を用い、式 (2) のように定められた。

$$SST = a_0 + a_1 BT_{11} + \sum_{\lambda=3.7,8.7,12} \alpha_{\lambda} \overline{BT_{11} - BT_{\lambda}} + \sum_{\lambda=3.7,8.7,12} \beta_{\lambda} \overline{BT_{11} - BT_{\lambda}} (\sec \theta_{sza} - 1) \quad (1)$$

ここで、 $\overline{BT_{11} - BT_{\lambda}}$ は $11\mu\text{m}$ と $\lambda\mu\text{m}$ の輝度温度差を、小 array 内の晴天 pixel のみで空間平均したものをしめす。version 2.0 では 7×7 pixel array による平均を用いる。また、 $BT_{3.7}$ は夜間観測に対してのみ用いる (昼間観測では、 $\alpha_{3.7} = \beta_{3.7} = 0$)。係数 $a, \alpha_{\lambda}, \beta_{\lambda}$ は Terra、Aqua それぞれについて昼夜別個に経験的に求められた。係数調整の際には、マッチアップポイントを中心とした 11×11 pixel array 内が全て晴天域と判定されたデータのみを用いた。求められた係数を表 1 に示す。

2002 年 1 月 ~ 2004 年 7 月の Terra および Aqua 搭載 MODIS L1B データを用いて Ver.2.0 アルゴリズムを評価した。参照する現場データとして、JMA から提供された GTS データ中の漂流ブイデータから、MODIS との観測時間差が 3 時間以内のバルク水温データを用い、マッチアップデータが作成された。空間的な範囲は Ver. 2.0 アルゴリズム開発に用いたときと同様おおよそ 20-50°N、115-155°E の範囲である。

図 1 に ver. 2.0 MODIS SST とブイ観測 SST の散布図を示す。マッチアップデータの位置は図 2 に示されている。夜間アルゴリズムは Bias の大きさが 0.1K 以内、RMSE が 0.6K 以下とよい品質を示しているが日中アルゴリズムでは Bias が -0.2 ~ -0.3K 程度、RMSE が 0.7K 以上となっており、特に 300K 以上での高温域で負の Bias が大きい。

月毎に求めた Bias と RMSE の時系列は図 3 のようになる。夜間アルゴリズムでは季節変化が見られないが日中アルゴリズムでは夏に Bias が低くなり RMSE が大きくなるという特徴が見られる。夜間アルゴリズムの高品質は $3.7\mu\text{m}$ を用いていることによるものであり、 $3.7\mu\text{m}$ を

表 1: 2004 年 2-4 月のマッチアップデータから Terra、Aqua の昼・夜それぞれについて求められた ver. 2.0 MODIS MCSST 係数。

Satellite	Day/Night	a_0	a_1
Terra	Day	-15.78671	1.067985
	Night	-8.906356	1.039506
Aqua	Day	-12.01327	1.054027
	Night	-0.1751089	1.04428

$\alpha_{3.7}$	$\alpha_{8.7}$	α_{12}	$\beta_{3.7}$	$\beta_{8.7}$	β_{12}
0.0	-1.27617	2.90795	0.0	0.6023583	0.5172018
-0.7502199	-0.4572076	1.182532	-0.7570907	0.4219952	-0.4408489
0.0	-1.454446	2.855139	0.0	0.686551	0.9803903
-0.5203342	-0.1321787	-0.1734824	-0.1734824	0.3197799	0.8426539

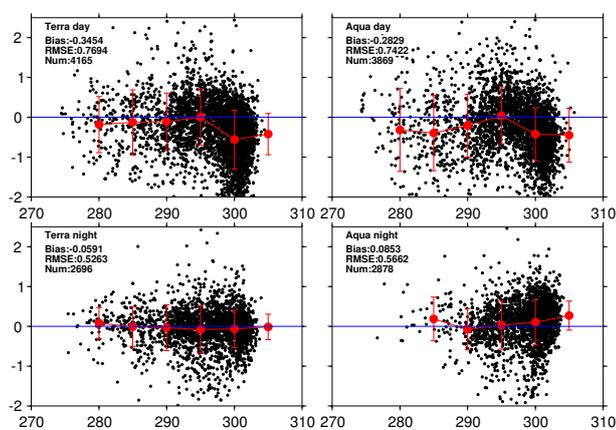


図 1: Version 2.0 MODIS SST とブイ観測 SST の比較。横軸はブイ観測 SST、縦軸は MODIS SST-ブイ SST。赤点とバーは 5K 間隔の平均と標準偏差を示す。左:Terra/MODIS、右:Aqua/MODIS で、それぞれ上:日中、下:夜間の散布図である。単位は K(Kelvin)。

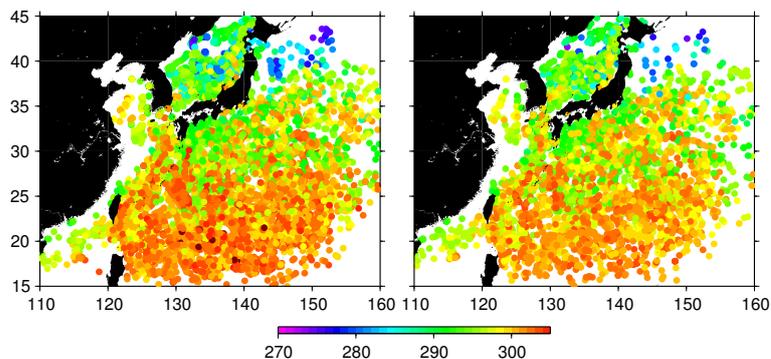


図 2: マッチアップデータの位置。カラーはブイ観測 SST を示す。

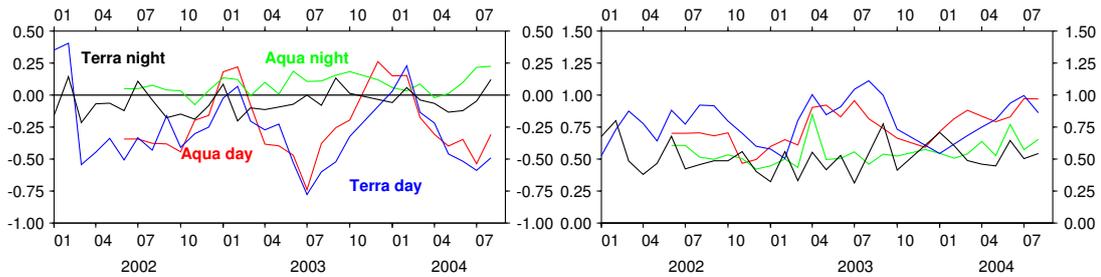


図 3: Version 2.0 MODIS SST とブイ観測 SST の Bias(上)、RMSE(下) の時間変化

用いない水温回帰式では日中と同様の季節変化をする (図は省略)。このことから、日中アルゴリズムの誤差要因は雲識別の問題ではなく、8.7、11、12 μm の 3 波長から求める MCSST 式の再調整もしくはアルゴリズムの変更が求められることが示唆される。

2 Development of Version 3.0 algorithm

Ver.3.0 アルゴリズムの候補として、ここでは Ver. 2.0 と同様の MCSST 式 (2) および Pathfinder 型 (Walton et al., 1998; Kilpatrick et al., 2001) の NLSST (NonLinear SST) 式を挙げる。それぞれの係数をマッチアップデータから算出し、第 3 節で評価し Ver.3.0 アルゴリズムを決定する。

Pathfinder 型の NLSST 式は式 (3) で与えるものとする。

$$\begin{aligned}
 SST = & a_0 + a_1 BT_{11} + \sum_{\lambda=3.7,8.7,12} (\alpha_{1,\lambda} T_{sfc} + \alpha_{2,\lambda}) \overline{BT_{11} - BT_{\lambda}} \\
 & + \sum_{\lambda=3.7,8.7,12} \beta_{\lambda} \overline{BT_{11} - BT_{\lambda}} (\sec \theta_{sza} - 1)
 \end{aligned} \quad (2)$$

ここで T_{sfc} は第一推定値として与える海面水温であり、以下では MCSST、気候値 SST などを用いて試験する。係数 $a, \alpha_{1,\lambda}, \alpha_{2,\lambda}, \beta_{\lambda}$ は Terra、Aqua それぞれについて昼夜別個に経験的に求めるものとする。以下ではこれらのアルゴリズム・係数を Ver.3 β と呼び、求められた係数は Appendix .A に示す。

2.1 MCSST algorithm

新たに作成したマッチアップデータから全季節を含む 2002 年 1 月 ~ 2003 年 12 月の 2 年間のデータを用いて MCSST 係数の再計算を行った。MCSST 式は Ver. 2.0 と同様の式 (2)、係数算出においても Ver.2.0 開発と同様にマッチアップポイントを中心とした 11x11 pixel array 内が全て晴天域と判定されたデータのみを用いた。求められた係数を表 A1 に示す。

2.2 NLSST algorithm

NLSST アルゴリズム開発も第 2.1 節と同様に新たに作成したマッチアップデータからマッチアップポイントを中心とした 11x11 pixel array 内が全て晴天域と判定されたデータのみを用い、全季節を含む 2002 年 1 月 ~ 2003 年 12 月の 2 年間のデータを用いて係数算出を行った。NLSST 式 (3) における第一推定値である T_{sfc} として、ここでは以下の 4 ケースについて試験を行う。

(1) 第 2.1 節の MCSST 式で求められる MCSST、(2) 気候値データ：Reynolds SST(Reynolds and Smith, 1994; Reynolds et al., 2002)(月平均、1 度格子を 0.25 度格子に内挿)、(3) 気候値データ：Pathfinder SST(Kilpatrick et al., 2001) (月平均、4km 格子)、(4) AMSR-E 月平均データ (Shibata, 2004) (25km 格子)。求められた係数を表 A2 ~ A5 に示す。

3 Validation of Version 3 β algorithm

図 4 に Ver.3 β MCSST の散布図を示す。日中アルゴリズムでは高温域の負の Bias は小さくなったものの 290-300K では正の Bias が見られ、中温域から高温域の温度依存性の傾向は Ver.2.0 と変わりはない。一方、Ver.3 β NLSST では (例として Case (3): T_{sfc} = Pathfinder Clim. SST を図 5 に示す) では温度帯による Bias の変化は小さく、RMSE も Ver.3 β MCSST よりも 0.1 程度小さい値を示している。

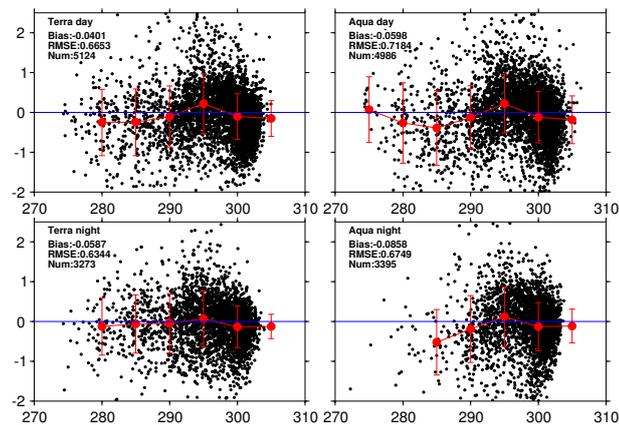


図 4: Ver.3 β MCSST アルゴリズム MODIS SST とブイ観測 SST の比較。横軸はブイ観測 SST、縦軸は MODIS SST-ブイ SST。赤点とバーは 5K 間隔の平均と標準偏差を示す。左:Terra/MODIS、右:Aqua/MODIS で、それぞれ上:日中、下:夜間の散布図である。単位は K(Kelvin)。

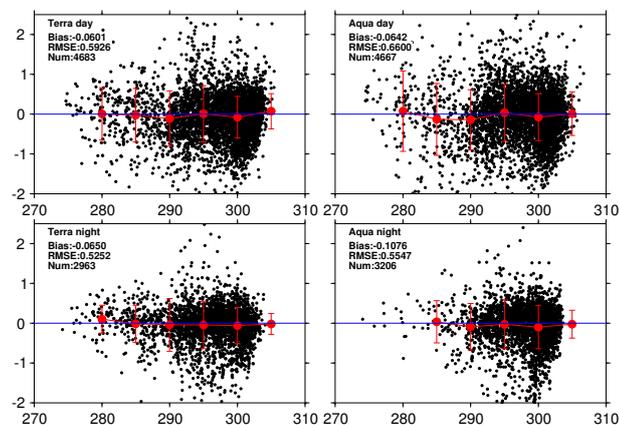


図 5: 図 4 と同様、ただし Ver.3 β NLSST アルゴリズム Case(3)(T_{sfc} = Pathfinder Clim. SST) の MODIS SST とブイ観測 SST の比較。

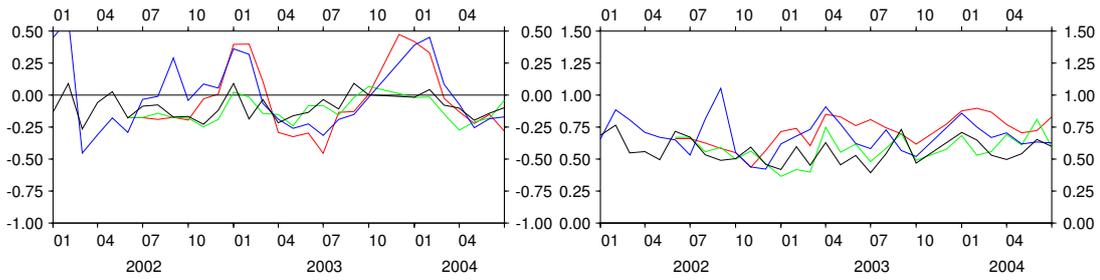


図 6: Version 3β MCSST MODIS SST とブイ観測 SST の Bias(上)、RMSE(下) の時間変化

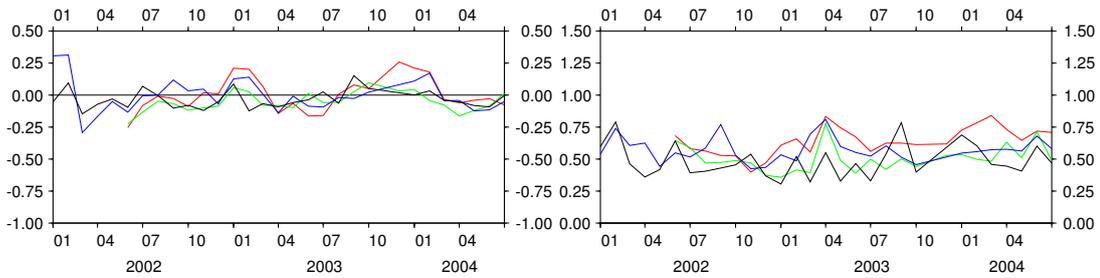


図 7: 図 6と同様、ただし Ver.3β NLSST アルゴリズム Case(3)(T_{sfc} =Pathfinder Clim. SST) の MODIS SST とブイ観測 SST の比較。

Bias、RMSE の時系列変化を見ても、Ver.3β MCSST(図 6) では夏の顕著な負の Bias が小さくなった一方で冬に正の Bias が現れ、季節変化は消えていないが、Ver.3β NLSST(図 7) では季節変化の振幅が小さくなっており、SST 推定には NLSST アルゴリズムが有効であることを示唆している。

表 2: Ver.2.0 および Ver.3β 各アルゴリズムの Bias および RMSE。

Satellite	Day/Night		Ver.2		Ver. 3β			
			MCSST	MCSST	NLSST(1)	NLSST(2)	NLSST(3)	NLSST(4)
Terra	Day	Bias	-0.345	-0.040	-0.052	-0.047	-0.060	-0.058
		RMSE	0.769	0.665	0.633	0.612	0.593	0.534
	Night	Bias	-0.059	-0.070	-0.069	-0.067	-0.065	-0.069
		RMSE	0.526	0.540	0.535	0.529	0.525	0.485
Aqua	Day	Bias	-0.283	-0.060	-0.066	-0.056	-0.064	-0.061
		RMSE	0.742	0.718	0.693	0.673	0.660	0.608
	Night	Bias	0.085	-0.114	-0.113	-0.109	-0.108	-0.111
		RMSE	0.566	0.570	0.567	0.555	0.555	0.546

各アルゴリズムの Bias、RMSE を表 2 に示す。NLSST で用いる第一推定値 T_{sfc} としては、MCSST 値を用いた Case (1) が 4 ケースの中でもっとも悪い。これは MCSST アルゴリズムの誤差要因が NLSST の結果にも影響しているためと考えられる。気候値を用いた 2 ケースでは、空間解像度が高くスムージングもされていない Pathfinder SST を用いた Case (3) が Reynolds SST を用いた Case (2) よりも全体的により品質を示している。4 ケースの中で最良の結果を示した

のは、月平均 AMSR-E を用いた Case (4) である。Case (4) は気候値ではないために経年変動などの影響も含むためであるとも考えられる。しかし、Case (4) ではノイズの大きい沿岸部では AMSR-E データが得られておらず、他の 3 ケースとは単純に比較はできず、また実用にも適しない。

以上の結果より、Ver.3.0 MODIS 準リアルタイム処理 SST アルゴリズムとして NLSST Case(3): 第一推定値として Pathfinder 気候値 SST を用いるアルゴリズムを採用する。

4 Summary

JAXA/EORC において処理・公開している MODIS 準リアルタイム処理 SST のアルゴリズム検討を行った。検討の結果、Version 1.0 および 2.0 で用いていた MCSST アルゴリズムから温度帯による Bias 変化、季節変化を見せない NLSST アルゴリズムへの変更を決定した。NLSST アルゴリズムにおける第一推定値 T_{sfc} は、現在の処理に組み込めるものとしては Pathfinder 月平均気候値が最良であり、これを採用する。

A Coefficients of Ver.3.β MCSST/NLSST equations

表 A1: 2002-2004 年のマッチアップデータから Terra、Aqua の昼・夜それぞれについて求められた MODIS MCSST 係数。

Satellite	Day/Night	a_0	a_1			
Terra	Day	-14.78591	1.063385			
	Night	-4.8397183	1.0228464			
Aqua	Day	-11.552282	1.051464			
	Night	-2.36824751	1.017440			

$\alpha_{3,7}$	$\alpha_{8,7}$	α_{12}	$\beta_{3,7}$	$\beta_{8,7}$	β_{12}
0.0	-1.214119	3.147206	0.0	0.3772148	1.454635
-0.7498865	-0.2688700	1.5877929	-0.63501286	0.4300850	-0.5948615
0.0	-1.3512659	3.0849158	0.0	0.5229179	1.19860053
-1.0891169	-0.2632018	-0.6947707	-0.2625247	0.4336031	0.3006452

表 A2: 2002-2004 年のマッチアップデータから Terra、Aqua の昼・夜それぞれについて求められた MODIS NLSST 係数。Case(1): $T_{sfc} = \text{MCSST}$ 。

Satellite	Day/Night	a_0	a_1	$\alpha_{1,3,7}$	$\alpha_{1,8,7}$	$\alpha_{1,12}$
Terra	Day	-32.7068	1.122757	0.0	0.272387	0.272387
Terra	Night	-8.74012	1.036350	-1.33036	-1.33036	-0.05074
Terra	Day	1.871445	1.004479	0.0	-0.78076	-0.78076
Terra	Night	1.608175	1.004008	-1.95170	-1.95170	0.162083

$\alpha_{2,3,7}$	$\alpha_{2,8,7}$	$\alpha_{2,12}$	$\beta_{3,7}$	$\beta_{8,7}$	β_{12}
0.0	-0.05257	-0.05257	0.0	0.328364	0.328364
0.026419	-0.01087	-0.01087	-0.64097	0.423847	0.423847
0.0	-0.01092	-0.01092	0.0	0.440289	0.440289
0.038039	-0.01867	-0.01867	-0.25677	0.403290	0.403290

表 A3: 2002-2004 年のマッチアップデータから Terra、Aqua の昼・夜それぞれについて求められた MODIS NLSST 係数。Case(2): T_{sfc} =Reynolds Clim. SST。

Satellite	Day/Night	a_0	a_1	$\alpha_{1,3,7}$	$\alpha_{1,8,7}$	$\alpha_{1,12}$	
Terra	Day	-12.4255	1.052827	0.0	-0.15028	-0.15028	
Terra	Night	1.105412	1.002308	-1.33874	-1.33874	-0.19382	
Terra	Day	-6.97273	1.035122	0.0	-0.57157	-0.57157	
Terra	Night	7.446858	0.983907	-1.90913	-1.90913	0.101662	
		$\alpha_{2,3,7}$	$\alpha_{2,8,7}$	$\alpha_{2,12}$	$\beta_{3,7}$	$\beta_{8,7}$	β_{12}
		0.0	-0.03075	-0.03075	0.0	0.348492	0.348492
		0.026933	-0.00177	-0.00177	-0.57250	0.410249	0.410249
		0.0	-0.02325	-0.02325	0.0	0.438959	0.438959
		0.035975	-0.01354	-0.01354	-0.20032	0.376387	0.376387

表 A4: 2002-2004 年のマッチアップデータから Terra、Aqua の昼・夜それぞれについて求められた MODIS NLSST 係数。Case(3): T_{sfc} =Pathfinder Clim. SST。

Satellite	Day/Night	a_0	a_1	$\alpha_{1,3,7}$	$\alpha_{1,8,7}$	$\alpha_{1,12}$	
Terra	Day	-14.0479	1.058533	0.0	-0.16868	-0.16868	
Terra	Night	0.688717	1.003909	-1.21744	-1.21744	-0.21633	
Terra	Day	-6.24153	1.032820	0.0	-0.58521	-0.58521	
Terra	Night	9.017588	0.978665	-1.92334	-1.92334	0.024944	
		$\alpha_{2,3,7}$	$\alpha_{2,8,7}$	$\alpha_{2,12}$	$\beta_{3,7}$	$\beta_{8,7}$	β_{12}
		0.0	-0.03101	-0.03101	0.0	0.358889	0.358889
		0.022925	-0.00191	-0.00191	-0.59048	0.426795	0.426795
		0.0	-0.02333	-0.02333	0.0	0.465523	0.465523
		0.035216	-0.00976	-0.00976	-0.17058	0.349572	0.349572

表 A5: 2002-2004 年のマッチアップデータから Terra、Aqua の昼・夜それぞれについて求められた MODIS NLSST 係数。Case(4): T_{sfc} =AMSRE monthly SST。

Satellite	Day/Night	a_0	a_1	$\alpha_{1,3,7}$	$\alpha_{1,8,7}$	$\alpha_{1,12}$	
Terra	Day	-8.19709	1.040094	0.0	-0.64770	-0.64770	
Terra	Night	8.363441	0.978774	-1.20066	-1.20066	-0.65101	
Terra	Day	-0.38675	1.012691	0.0	-0.88927	-0.88927	
Terra	Night	19.86769	0.942576	-2.27603	-2.27603	-0.35089	
		$\alpha_{2,3,7}$	$\alpha_{2,8,7}$	$\alpha_{2,12}$	$\beta_{3,7}$	$\beta_{8,7}$	β_{12}
		0.0	-0.01681	-0.01681	0.0	0.435904	0.435904
		0.025828	0.011765	0.011765	-0.40401	0.425650	0.425650
		0.0	-0.00988	-0.00988	0.0	0.498582	0.498582
		0.046799	0.004475	0.004475	-0.01563	0.292530	0.292530

References

- Kilpatrick, K. A., G. P. Podestá, and R. Evans, 2001: Overview of the NOAA/NASA advanced very high resolution radiometer Pathfinder algorithm for sea surface temperature and associated matchup database. *J. Geophys. Res.*, **101**, 9179–9197.
- Reynolds, R., N. A. Rayner, T. M. Smith, D. C. Stokes, and W. Wang, 2002: An improved in situ and satellite sst analysis for climate. *J. Cli.*, **15**, 1609–1625.
- Reynolds, R. W. and T. M. Smith, 1994: Improved global sea surface temperature analysis using optimum interpolation. *J. Clim.*, **7**, 929–949.
- Sakaida, F., K. Hosoda, M. Moriyama, H. Murakami, A. Murakida, and H. Kawamura, 2005: Sea surface temperature observation by Global Imager(GLI)/ADEOS-II –Algorithm and accuracy of the product, submitted to *J. Oceanogr.*
- Shibata, A., 2004: AMSR/AMSE-E SST algorithm developments - removal of ocean wind effect-. *Italian J. Remote Sens.*, **30/31**, 131–142.
- Walton, C. C., W. G. Pichel, and J. F. Sapper, 1998: The development and operational application of nonlinear algorithms for the measurements of sea surface temperatures with the NOAA polar-orbiting environmental satellites. *J. Geophys. Res.*, **103**, 27999–28012.