

MODIS・ASTERデータを用いた伊勢湾海域 における海面水温の推定評価

VALIDATION OF SEA SURFACE TEMPERATURE IN ISE BAY AREA ESTIMATED USING MODIS AND ASTER DATA

川崎浩司¹・作野裕司²・玉田沙織³
Koji KAWASAKI, Yuji SAKUNO and Saori TAMADA

¹正会員 博(工) 名古屋大学准教授 大学院工学研究科社会基盤工学専攻
(〒464-8603 名古屋市千種区不老町C1-3 (651))

²正会員 博(工) 広島大学助教 大学院工学研究科社会環境システム専攻
(〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1)

³学(工) 株式会社ベイカレント・コンサルティング (〒163-0805 東京都新宿区西新宿2-4-1)

In this study, the validity of sea surface temperature estimated employing the MODIS data was first verified in Ise Bay through the comparison with the field observation data. The estimation method of sea surface temperature based on the MCSST method was proposed using the ASTER data with high spatial resolution and was applied to Ise Bay area to confirm its validity. Furthermore, the seasonal characteristics of sea surface temperature in Ise Bay were discussed based on the sea surface temperature estimated by the proposed method.

Key Words : MODIS, ASTER, sea surface temperature, remote sensing, Ise Bay area

1. はじめに

海水交換性が悪い内湾では、富栄養化、水質悪化により、赤潮・青潮が頻発している。このような水環境問題を把握・解明する一手段として、広域的かつ周期的なモニタリング観測が可能な衛星リモートセンシングが期待されている。

人工衛星に搭載されているセンサを活用することによって、海面水温SST(Sea Surface Temperature)を推定することが可能となる。現在、人工衛星搭載センサの一つであるMODIS(MODERate resolution Imaging Spectroradiometer)によるデータを用いた海面水温の推定式がEORC¹⁾により確立されており、よく利用されている。しかし、空間分解能が250～1000mと粗いため、内湾の海面水温の空間変化を詳細に検討することは難しい。一方、MODIS同様、衛星に搭載されているセンサであるASTER(Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection radiometer)によるデータは15～90mと高い空間分解能を有するため、内湾の海面水温の空間変化をより詳細に検討するにあたり有効である。しかしながら、ASTERデータに関しては、海面水温の推定式が確立されていない。

これまでに、作野ら²⁾は宍道湖・中海においてASTER TIRデータの5チャンネルを使った

MCSST(Multi Channel Sea Surface Temperature)法により海面水温の推定式を提案した。そして、2000年～2002年の現地観測データと推定結果を比較し、その妥当性を明示した。また、作野・川崎³⁾は三河湾において、2004～2005年の現地観測データと、輝度値、輝度温度、ASTER MCSST法による推定結果を比較し、MCSST法が三河湾においても適切であることを示した。しかし、ASTERによる伊勢湾の海面水温の推定はほとんど行われていないなど課題が残されている。

そこで、本研究では、伊勢湾海域を対象に、現地観測データとの比較から、MODISによる海面水温の推定精度を評価するとともに、ASTERデータを用いたMCSST法に基づく海面水温の推定法を提案し、その妥当性を検証する。

2. MODIS データによる海面水温推定の妥当性

MODISは、可視～熱赤外域に36バンドをもつ光学センサである。空間分解能は250m～1000mとASTERに比べて低いが、衛星Terraと衛星Aquaの2つに搭載されているため、1日に1～2回という短い観測周期をもち、リアルタイムな観測に適している。

MODISデータを用いた海面温度推定式は、上述

したとおり、EORCにより確立されている。本研究では、東京情報大学学術フロンティア共同研究推進センターにより提供されているSST画像と、三重県科学技術振興センターによる浅海定線調査、中部国際空港株式会社と愛知県による水質調査、愛知県水産試験場による三河湾ブイの現地観測データの比較により、MODISから求めた伊勢湾海域におけるSSTの妥当性を確認する。妥当性の検証は、MODIS SSTと現地観測の両方のデータが存在する2004年2月～2005年12月の期間について行った。表-1にMODISの月ごとのデータ数を示す。

図-1に、MODISデータを用いて推定された海面温度と実測水温の関係を示し、二乗平均平方根誤差RMSE(Root Mean Square Error)を表-2に示す。図-1より、大きな誤差を含むデータが多くみられることがわかる。このときのRMSEは23.68℃であり、画像解析に利用できる精度とはいえない。これは、雲などの影響で部分的に大きな誤差が生じたことが原因であると考えられる。

そこで、表-1と図-1に示すデータのうち、正午の雲量が1以下の場合、つまり快晴時のデータのみを用いて推定した結果を図-2に示す。図-2をみると、全データを用いた場合に比べて、推定精度が大幅に向上していることがわかる。また、表-2に示すとおり、このときのRMSEは2.79℃となり、統計的にも推定精度の向上が確認できる。また、季節ごとの精

度を確認したところ、多少の誤差はあるものの、どの季節においてもほぼ同じ精度であった。

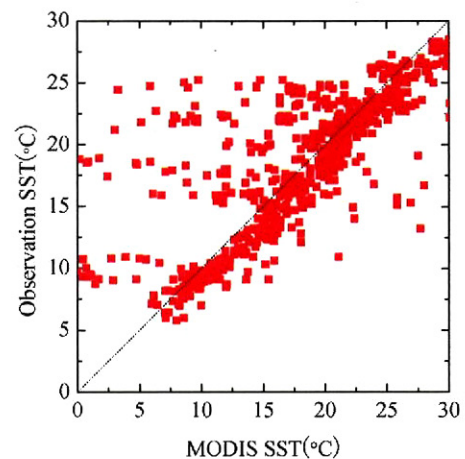


図-1 MODIS SSTによる推定水温と実測水温の比較

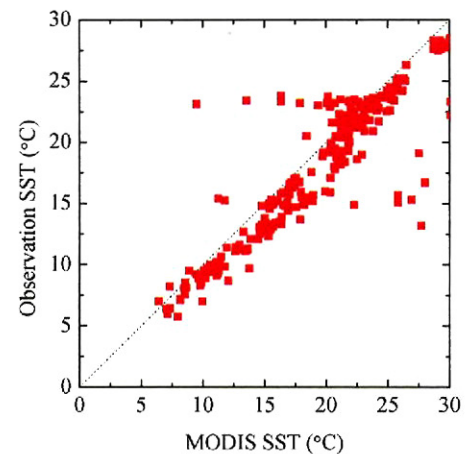


図-2 MODISによる推定水温と実測水温の比較
(快晴時のみ)

表-1 月ごとのMODISの観測データ数

観測月	伊勢湾 データ 数	三河湾 データ 数	雲量1以下	
			伊勢湾 データ 数	三河湾 データ 数
2004年 2月	33	13	9	4
3月	76	24	8	7
4月	70	24	38	13
5月	163	14	18	0
6月	107	0	22	0
7月	90	0	18	0
10月	220	47	79	30
12月	22	2	22	2
2005年 2月	11	3	7	2
3月	15	2	15	2
4月	7	1	0	1
5月	13	6	0	0
8月	0	2	0	0
9月	0	4	0	2
10月	0	7	0	4
11月	13	16	0	9
12月	6	8	0	3

表-2 MODIS SSTの推定精度

	データ数	RMSE(℃)
全データ	1021	23.68
雲量1以下	324	2.79

3. ASTERデータによる海面温度の推定と精度検証

(1) ASTERの特徴

本研究で用いるASTERのバンドと波長を表-3に示す。ASTERは、地球環境問題・資源問題解決への貢献を目的として開発された高性能光学センサである。表-3に示すように、ASTERは可視～熱赤外域に14バンドを有しており、高い空間分解能をもつ。特に、可視光の波長帯(Band 1～Band 3)では、15mという高い空間分解能をもつ。

ここでは、ASTERから得られた衛星画像を例示し、ASTERの有用性を確認する。図-3はASTERが観測した中部国際空港の建設の様子である。近赤外

領域を赤色、赤色の波長域を緑色、緑色の領域を青色としてカラー合成した。図-3より、空港や常滑の沿岸の埋立地が完成していく過程がよくわかる。さらに、図-3(c)および図-3(d)では、滑走路や旅客ターミナルビルの形状まではっきりと確認することができる。このように、ASTERは詳細な観測に適していると判断される。この特性を活かし、以下ではASTERによる海面水温推定について提案する。

表-3 ASTERのバンドと波長

Band	波長帯(μm)
1	0.52-0.60
2	0.63-0.69
3N	0.78-0.86
3B	0.78-0.86
4	0.52-0.60
5	2.145-2.185
6	2.185-2.225
7	2.235-2.285
8	2.295-2.365
9	2.360-2.430
10	8.125-8.475
11	8.475-8.825
12	8.925-9.275
13	10.25-10.95
14	10.95-11.65

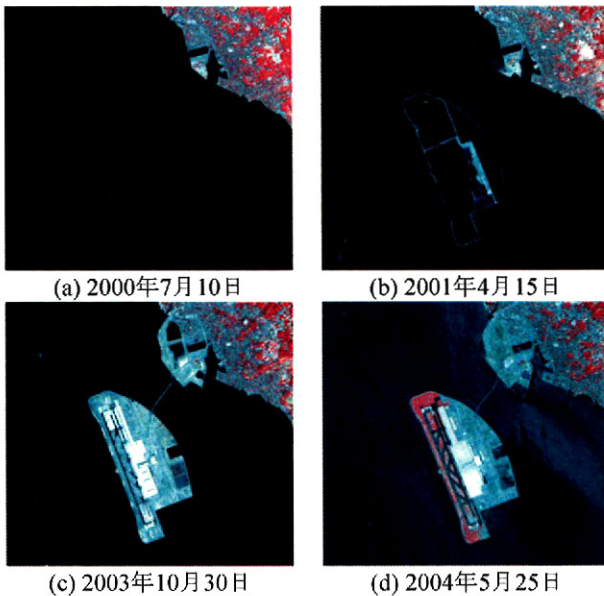


図-3 中部国際空港建設の様子

(2) 海面水温推定法

高空間分解能を有するASTERデータを用いた海面水温推定には、ASTERデータからわかる輝度値DN (Digital Number) および輝度温度BT (Brightness Temperature) による推定と、バンドのデータを組み合わせるMCSST法を用いることができる。

あらゆる物質はその熱エネルギーに応じた電磁波

を放射しており、この放射を熱放射という。熱放射はその物体の温度に依存する。ASTER TIRはこの熱放射を観測しているため、Band 10~14の輝度値DNを用いて、式(1)により海面温度を推定することができる。

$$SST = \alpha DN_i + \beta \quad (1)$$

ここで、 α , β は定数、 i はバンド番号、DNは輝度値である。

一方、熱放射は物体を構成する物質や条件によって異なるため、黒体を基準として定量的な法則が確立されている。黒体とは周囲からの電磁波を全て吸収し、一切反射しない物体のことをいう。観測物体と等しい放射エネルギーを放射する黒体の温度を輝度温度BTといい、BTを用いて、式(2)により海面温度を推定することができる。

$$SST = \alpha BT_i + \beta \quad (2)$$

ここで、 α , β は定数、 i はバンド番号である。

BTは、プランク関数を用いた新井⁴⁾による以下の方法で求める。黒体の温度と単位波長当たりの分光放射輝度の関係を定式化したプランク関数は、式(3)で表される。

$$I_\lambda = \frac{2hc^2}{\lambda^5 (\exp[hc/\lambda kT] - 1)} = \frac{c_1}{\lambda^5 (\exp[c_2/\lambda T] - 1)} \quad (3)$$

ここで、 I_λ は分光放射輝度(W/m²/str/m)、 T は黒体温度(輝度温度)(K)である。また、 h はプランク常数、 k はボルツマン常数、 c は光速、 c_1 , c_2 はプランク第1定数、第2定数と呼ばれ、式(4), (5)で表される。

$$c_1 = 2hc^2 = 1.1911 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2/\text{str}/(\text{cm}^{-1})^4 \quad (4)$$

$$c_2 = \frac{hc}{k} = 1.4387 \text{ K/cm}^{-1} \quad (5)$$

輝度温度をBT(K)、バンド番号を i 、放射された電磁波の波長を $\lambda(\mu\text{m})$ として式(3)を変形すると、式(6)となる。

$$BT_i = \frac{c_2}{\lambda \ln \left(\frac{c_1}{\lambda^5 I_i} + 1 \right)} \quad (6)$$

ここで、分光放射輝度 I_i は式(7)により求められる。UCCおよび A , B は補正係数で、UCCは衛星打ち上げ前に設定された値、 A , B は衛星打ち上げ後のキャリブレーション段階で設定された値を用いる。なお、水面の放射率は1とする。

$$I_i = A[(DN_i - 1)UCC] + B \quad (7)$$

衛星データから計算された輝度温度BT_iは大気の影響を受けた温度となっている。これに対し、複数の熱赤外バンドを使って計算を行うMCSST法を用いることにより、簡単に大気の影響を軽減することができる。熱赤外域に5つのバンドをもつASTER

データでは、同法を応用して、以下の式(8)と大気計算コードを使った係数が提案されている。

$$\text{MCSST} = a\text{BT}_{10} + b\text{BT}_{11} + c\text{BT}_{12} + d\text{BT}_{13} + e\text{BT}_{14} + f \quad (8)$$

表-4 ASTER MCSST推定係数

	a	b	c	d	e	f
Model A	-1.07	0.49	1.13	0.78	-0.32	1.16
Model B	-1.34	0.72	2.07	0.60	-1.03	-3.53

ここで、MCSST, BT, $a \sim f$ はそれぞれASTERの5バンドから推定された海面水温、輝度温度、係数を表す。係数は、表-4に示すように、摂氏温度(°C)の松永⁵⁾によるModel Aと絶対温度(K)のTonooka⁶⁾によるModel Bの2種類が提案されている。

これらの方法の違いとして、DN, BTによる推定は大気補正を施していないのに対し、MCSST法を用いることで大気の影響を軽減できることが挙げられる。そこで、本研究では、MCSST法を用いて海面水温の推定を行い、推定結果と現地観測データの比較により精度を検証する。ASTERによる海面水温推定に使用したのは、ASTERセンサに搭載された熱赤外放射計TIR (Thermal Infrared Radiometer)で観測したデータである。TIRは地球からの熱赤外放射を5バンド(Band10~Band14)で、高精度に観測することができる。なお、幾何補正、放射量補正済みのデータを用いた。現地観測データは、ASTERの観測日と同じ日の中部国際空港株式会社と愛知県の水質調査18地点、愛知県水産試験場の三河湾ブイ3地点のデータを使用した。伊勢湾、三河湾でのデータ数と雲量を表-5に示す。

(3) 海面水温推定の妥当性

図-4に、MCSST法による推定水温と実測水温の比較を示す。図-4 (a)は全データ、図-4 (b)は快晴時のみのデータを用いた結果である。縦軸は実測水温、横軸はASTERデータから推定した水温である。また、表-6にModel A, Model BのRMSEを示す。全

表-5 月ごとのASTERデータ観測データ数

観測日	データ数		観測時刻の雲量
	伊勢湾	三河湾	
2000/ 7/10	18	3	1
2000/ 9/19	18	3	6
2001/ 4/15	18	3	0
2002/11/12	18	0	10
2003/10/30	14	0	0
2004/ 1/ 2	0	3	2
2004/ 3/15	8	3	0
2004/ 5/25	18	0	0
2005/ 2/21	8	2	3
2005/ 9/17	0	3	6
2005/11/ 4	0	3	0

データの場合、Model A, BのRMSEはそれぞれ1.91°C, 1.72°Cであったが、快晴時のみのデータでは、Model Aで0.99°C, Model Bでは1.28°Cとなり、特に、Model Aで大きく精度が向上した。

以上の結果より、大気の影響を考慮して伊勢湾海域の海面温度推定を行う際には、MCSST Model Aを用いるとよいことがわかる。

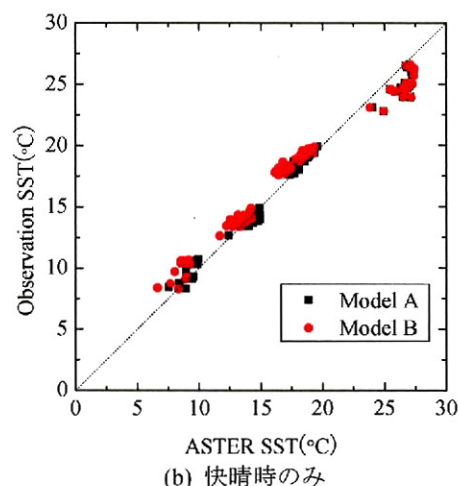
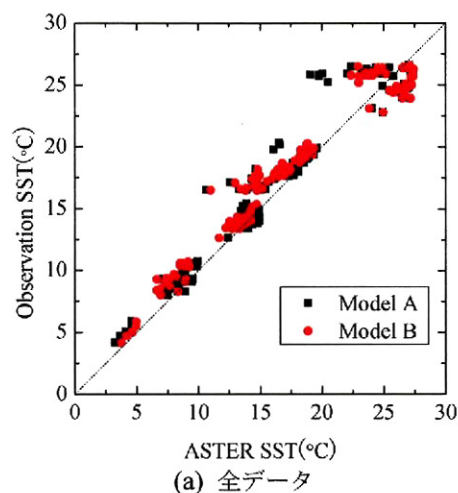


図-4 MCSST法による推定水温と実測水温の比較

表-6 MCSST推定精度

		RMSE(°C)
Model A	快晴時のみ	1.91
	全データ	0.99
Model B	快晴時のみ	1.72
	全データ	1.28

4. 伊勢湾海域における海面水温の季節変化

本章では、MODISデータを用いた海面水温の推定式、ASTERデータによる海面水温の推定式MCSST Model Aを利用して海面水温の画像解析を行い、海面水温分布の季節的な特性を把握するため、

春夏秋冬においてそれぞれ考察する。季節の分類は、春を3～5月、夏を6～8月、秋を9～11月、冬を12～2月とした。MODISはデータ数が多い一方で、空間分解能が低く、空間的に詳細な解析には適さない。そこで、MODISデータにより伊勢湾海域の時間変化を把握し、ついで空間解像度の高いASTERデータによって河口部などの詳細な海面水温分布を把握する。なお、MODIS SST画像の黒い部分は陸と雲を表す。黒い部分の面積が変化しているのは、雲の有無によるものである。また、秋季の海面水温特性については、紙面の都合上、割愛した。

(1) 春季

図-5に、2004年のMODISによる春季の伊勢湾海域の海面水温分布、図-6に、ASTERによる春季の伊勢湾海域の海面水温分布をそれぞれ示す。図-5(a)をみると、3月中旬において、伊勢湾海域の海面水温は6～8℃であることがわかる。その後2か月

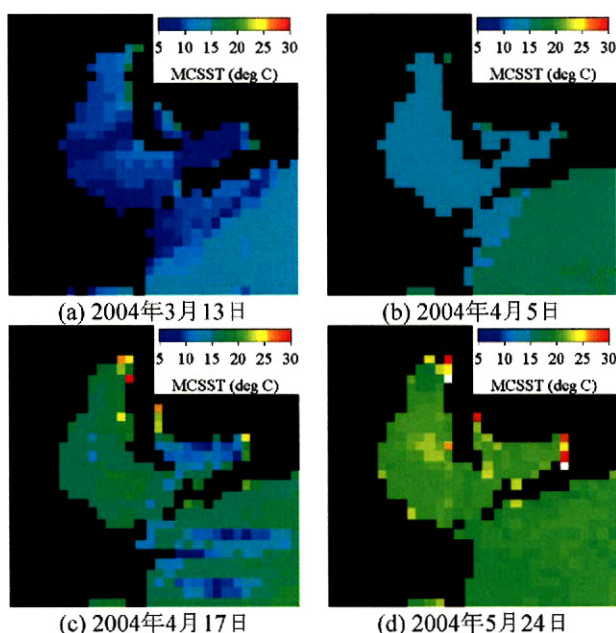


図-5 MODISによる春季の伊勢湾海域の海面水温分布

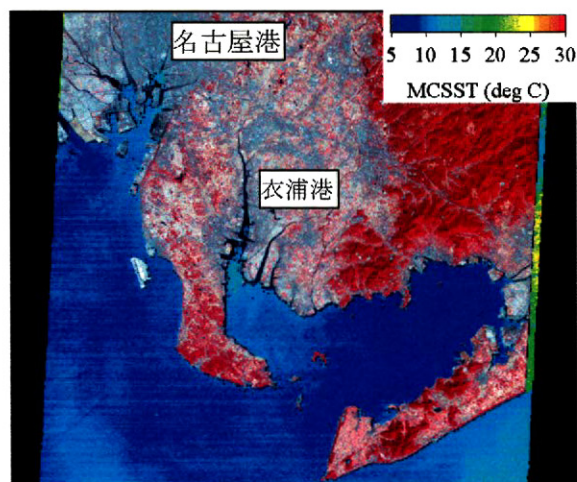


図-6 ASTERによる春季の伊勢湾海域の海面水温分布 (2004年3月15日)

で約10℃上がり、図-5(d)に示すように、5月には15～17℃になる。外洋では、海面水温は3月中旬で12～15℃となっており、内湾に比べて温度が高い。5月には、伊勢湾海域よりもゆるやかに水温が上昇し、5月下旬には内湾と同じ15～17℃になる。伊勢湾海域の海面水温が外洋よりも早く上昇するのは、外洋に比べて水深が浅いからである。また、図-6で河口部に注目すると、庄内川、矢作川の流入する名古屋港、衣浦港など水深の浅いところを中心に海面水温が高くなっていることが認められる。

(2) 夏季

MODISおよびASTERによる夏季の伊勢湾海域の海面水温分布を図-7、図-8にそれぞれ示す。図-7に示すMODISデータは3日分のみであるが、3日間とも、伊勢湾海域は外洋よりも海面水温が高い。これは、広くて浅い伊勢湾海域の地形特性により、日射による海面水温上昇が起こりやすくなっているため

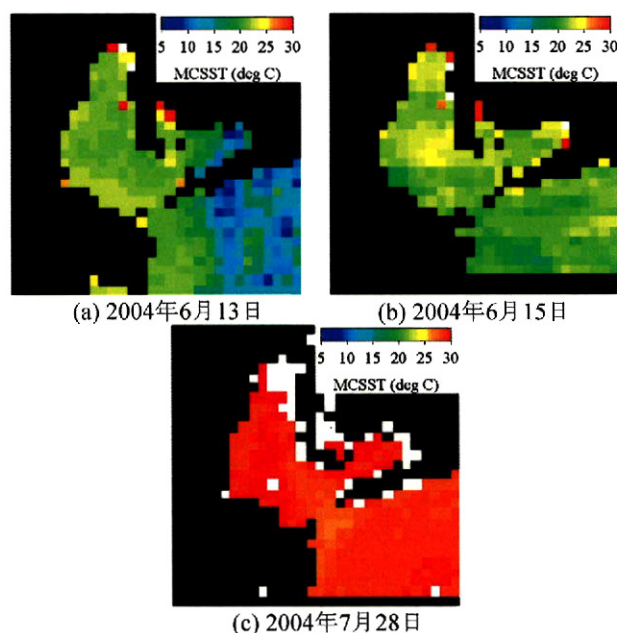


図-7 MODISによる夏季の伊勢湾海域の海面水温分布

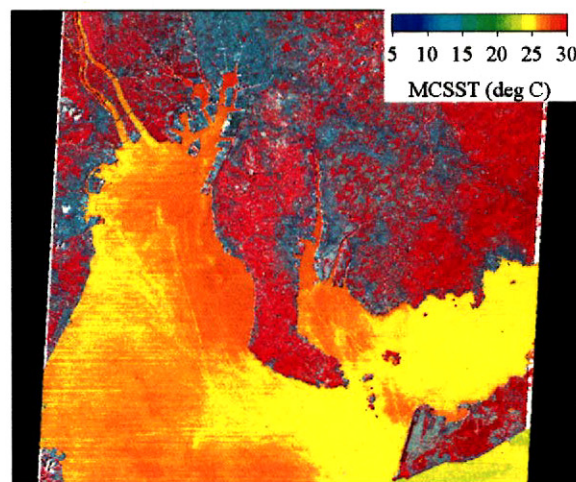


図-8 ASTERによる夏季の伊勢湾海域の海面水温分布 (2004年7月10日)

であると考えられる。特に、図-8をみると、名古屋港や衣浦港など湾奥部に位置する海域では、海面水温が極めて高くなっており、高空間分解能を有するASTERによる海面水温推定の利点が確認される。

(3) 冬季

図-9、図-10はそれぞれ2005年のMODISデータ、2004年のASTERデータから推定した冬季の海面水温分布を示したものである。両図より、冬季は伊勢湾と三河湾で5℃程度の水温差があることが認められる。特に三河湾の湾奥部で海面温度が低いことがわかる。これは、三河湾の平均水深が伊勢湾の平均水深19.5mに比べて9mと浅いためであり、伊勢湾に比べて、三河湾は気象の影響を極めて受けやすい海域であるといえる。図-10からは、三重県側で水温の低い河川の影響も詳細にみることができる。一方、

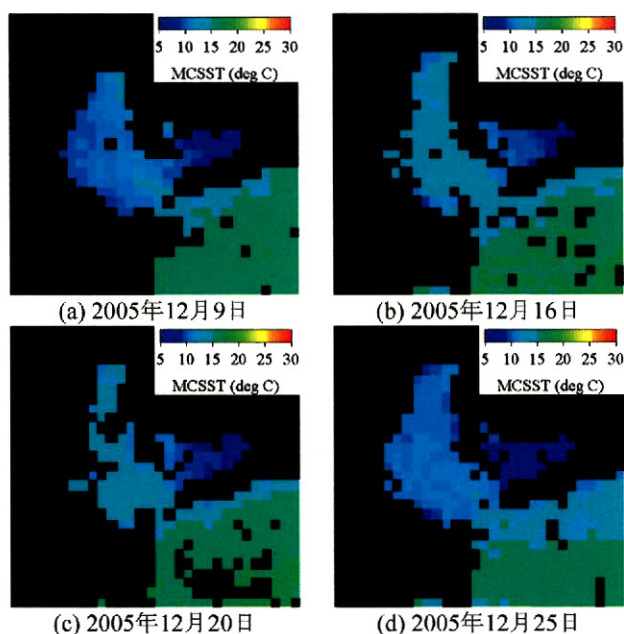


図-9 MODISによる冬季の伊勢湾海域の海面水温分布

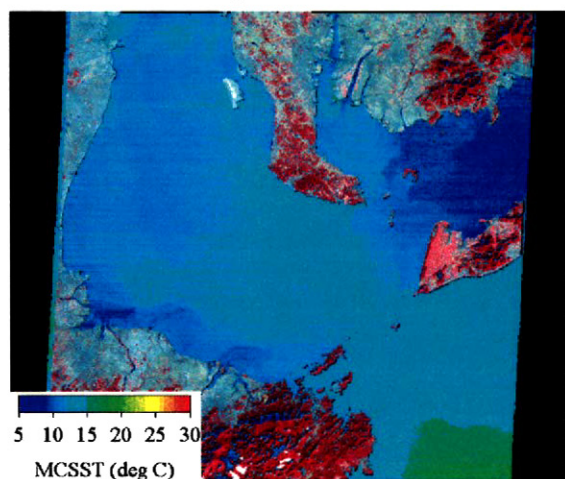


図-10 ASTERによる冬季の伊勢湾海域の海面水温分布
(2004年1月2日)

外洋の海面水温は内湾に比べて15～20℃と高いことがわかる。また、湾口部では、複雑な流動場により海水混合が促進されるため、湾口周辺の海面水温は内湾水と外洋水の間値となっている。

5. おわりに

本研究では、伊勢湾海域を対象に、現地観測データとの比較から、MODISデータを用いた海面水温推定の妥当性を検証した。また、ASTERデータによる海面水温推定には、MCSST Model Aが有効であることを明示した。さらに、MCSST Model Aを用いて伊勢湾海域の海面水温を推定した結果、海面水温の空間変化を詳細に把握できることを示した。

以上のことから、高い空間分解能を有するASTERデータを用いた衛星リモートセンシング技術は水環境問題を把握・解明する一手段として有効であると判断される。

謝辞：本研究で利用した衛星データは、東京大学生産技術研究所、東京情報大学学術フロンティア共同研究室センターよりご提供いただいた。また、海洋観測データは愛知県水産試験場、中部国際空港株式会社・愛知県企業庁、三重県科学技術振興センターよりご提供いただいた。ここに謝意を表する。また、本研究の一部は、科学研究費補助金・若手研究(A)（研究代表者：名古屋大学・川崎浩司、課題番号：21686046）であることをここに付記し、感謝の意を表する。

参考文献

- 1) EORC : EORC における MODIS 処理のバージョンアップについて (オンライン), http://suzaku.eorc.jaxa.jp/GLI/ocean/modis_nrt/, 参照 2009-02-02, 2007.
- 2) 作野裕司, 山本正智, 吉田武史, 松永恒雄, 中山大介, 高安克己, 古津年章, 下舞豊志: 多時期 ASTER データを用いた宍道湖・中海の濁度・クロロフィル a 濃度推定, LAGUNA (汽水域研究), No.11, pp.147-153, 2004.
- 3) 作野裕司, 川崎浩司: ASTER TIR データによる三河湾の SST 推定精度検証, 第 45 回日本リモートセンシング学会学術講演会論文集, pp.243-244, 2008.
- 4) 新井康平: 独習リモートセンシング, 森北出版, 175p, 2004.
- 5) 松永恒雄: ASTER TIR の観測輝度温度の線形式を利用した水面温度推定—日本周辺の気温及び湿度データを用いた推定誤差の予備評価—, 日本リモートセンシング学会誌, No.5/Vol.16, pp.404-415, 1996.
- 6) Tonooka, H.: Accurate atmospheric correction of ASTER thermal infrared imagery using the Water Vapor Scaling method, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol.43(12), pp.2778-2792, 2005.