

TERRA-ASTER画像を用いた有明海湾奥部の 水質推定手法について

ON THE ESTIMATION METHOD FOR WATER QUALITY
IN THE INNERMOST PART OF THE ARIAKE SEA
BY USING TERRA-ASTER IMAGES

大串浩一郎^{1,2}・荒木宏之³

Koichiro OHGUSHI and Hiroyuki ARAKI

¹正会員 工博 佐賀大学助教授 理工学部都市工学科 (〒840-8502 佐賀市本庄町 1 番地)

²有明海総合研究プロジェクト (〒840-8502 佐賀市本庄町 1 番地)

³正会員 工博 佐賀大学教授 低平地研究センター (〒840-8502 佐賀市本庄町 1 番地)

The method to estimate the water quality of innermost part of the Ariake Sea by the TERRA-ASTER sensor is studied. To make a model for estimating water quality from artificial satellite images, the images whose dates and times are almost same as those of observations were carefully chosen. The estimation models for not only the water transparency and temperature but also the chlorophyll-a are developed through regression analysis. The obtained results are compared with those of the LANDSAT-TM/ETM+ and the performance of the TERRA-ASTER is confirmed.

Key Words : Remote sensing; water quality monitoring; Ariake Sea; innermost part;
shallow sea; tidal flat; TERRA-ASTER sensor.

1. はじめに

有明海は、九州の4県に囲まれた半閉鎖性水域で、主に早崎瀬戸を通じて外海の東シナ海と海水交換を行っている。この水域の面積は約1,700km²、平均水深は約20mである。有明海は約6mの潮位差を有し国内最大である。この大きな潮位差により海岸には日に2回広大な干潟が現れる。我が国の約40%の干潟がこの有明海に集中しており、様々な生物が生息する最も生物生産が活発な海の1つとなった。そのため、ここの水揚げ高は非常に大きく、漁師たちはこの海のことを「宝の海」と呼んでいる。しかしながら、沿岸域の開発等により、有明海は徐々に汚れてきた。近年、そのため二枚貝の漁獲高は激減し、2000年には養殖ノリが大打撃を受けた。このような異変が何故起きたのかについてはまだ詳しく分かっていない。

そこで、この問題に答えるために、この内湾環境の長期的モニタリングが重要となってくる。しかし、この広い海域の調査を長期に行うには、非常に大きい時間とコストが要求される。したがって、広い海域をモニタリングするための効果的な手法の1つとして、衛星リモートセンシングが有力となる。

Ganら¹⁾やOhgushiら^{2),3)}は、現地調査データと地球観測

衛星LANDSATのTM/ETM+画像を用いて有明海の透明度、海面温度、クロロフィルaなどの平面分布を推定するためのモデルを開発してきた。

一方、桐本ら⁴⁾は、地球観測衛星TERRAに搭載されたASTERセンサにより、諫早湾のSSの分布状況を観察する試みを実施している。

本論文では、LANDSATより空間解像度やバンド数で有利なTERRA-ASTER衛星画像を用いた、水質情報、特に透明度、海面温度やクロロフィルaの推定方法を検討した。そして、有明海湾奥部における水質を推定するためにさまざまな方法を検証し、LANDSAT-TM/ETM+による推定結果との比較検討を行った。

2. TERRA-ASTERセンサについて

衛星リモートセンシングは1972年のLANDSAT1号打ち上げ以来、地球を観測する目的で用いられてきた。NASAは、近年顕著な地球規模の環境問題のメカニズムを説明するためにEOSプロジェクト(Earth Observing System Project)を立ち上げた。EOSプロジェクトの一環として地球観測衛星TERRAが1999年に打ち上げられた。TERRAのプラットフォームには5種類のセンサが搭載されている。

表 - 1 TERRA-ASTERセンサの観測波長域と空間解像度

放射計	バンド番号	波長域(μm)	空間解像度(m)
VNIR	1	0.52 - 0.60	15
	2	0.63 - 0.69	
	3	0.76 - 0.86	
SWIR	4	1.60 - 1.70	30
	5	2.145 - 2.225	
	6	2.185 - 2.225	
	7	2.235 - 2.286	
	8	2.295 - 2.365	
	9	2.360 - 2.430	
TIR	10	8.125 - 8.475	90
	11	8.475 - 8.825	
	12	8.925 - 9.275	
	13	10.25 - 10.95	
	14	10.95 - 11.65	

表 - 2 LANDSAT-TMセンサの観測波長域と空間解像度

バンド番号	波長域(μm)	空間解像度(m)
1	0.45 - 0.52	30
2	0.52 - 0.60	
3	0.63 - 0.69	
4	0.76 - 0.90	
5	1.55 - 1.75	
6	10.4 - 12.5	60
7	2.08 - 2.35	30

表 - 3 LANDSAT-ETM+センサの観測波長域と空間解像度

バンド番号	波長域(μm)	空間解像度(m)
1	0.45 - 0.52	30
2	0.52 - 0.60	
3	0.63 - 0.69	
4	0.76 - 0.90	
5	1.55 - 1.75	
6	10.4 - 12.5	60
7	2.08 - 2.35	30
8	0.50 - 0.90	15

ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection radiometer) はそのうちの1つのセンサであり、我が国によって開発されている。ASTERセンサは、LANDSAT-TM/ETM+センサの後継機としての強力なツールとなることが期待されている。ASTERセンサは、可視域から熱赤外域まで14バンドという広いスペクトル範囲をカバーしている。ASTERは次の3つのサブシステムから構成されている。すなわち、可視近赤外放射計(VNIR)、



図 - 1 本研究で用いた有明海奥部における水質観測地点

短波長赤外放射計(SWIR)、そして熱赤外放射計(TIR)である。VNIRは可視域から近赤外域までカバーする空間解像度15mのセンサである。一方、SWIRは短波長赤外域を受け持ち、空間解像度は30mである。一番波長の大きい熱赤外域はTIRで観測され、空間解像度は90mとなっている。その概要を表-1に示す。なお、比較のためLANDSAT-TMならびにLANDSAT-ETM+の概要もそれぞれ表-2, 3に示す。

3. 研究方法

有明海は我が国最大の潮位差を有するため、広い区域で潮汐による規則的な干出が繰り返され、広大な干潟が形成されている。ここは、生物にとっても最も活気に満ちた場所であるとともに環境学的にも重要な所である。また、本研究で使用するTERRA-ASTER衛星画像は、バンド数が多いことに加え、空間解像度が高いため、1枚の画像で有明海全体をカバーすることはできない。以上のような理由で、本研究では、研究対象地域として有明海湾奥部に焦点を当て、解析することとした。

本研究で使用したTERRA-ASTER画像は、有明海湾奥部が含まれる2002/3/13、2002/9/21ならびに2004/12/15の3シーンである。これらのデータを選んだ理由は、現地観測(観測地点は図-1を参照)を同日同時刻に実施していることと、2002/3/13ならびに2002/9/21については、LANDSAT-ETM+の衛星画像が利用可能であるため、それぞれの衛星から推定される水質指標の精度を比較検討することが可能であるためである。現地観測による観測項目は、透明度、水温、塩分、クロロフィルaなどである。これらの衛星画像は幾何補正ならびに大気補正を行うことで、お互いの比較が可能となる。幾何補正としては、国土地理院発行の数値地図海岸線・行政区界のベクトルデータを参照画像として用いた。視程などの気象情報はそれぞれの画像に対する大気補正に用いた。以上の幾何補正ならびに大気補正については、ERDAS IMAGINE[®]ならびにATCOR[®]というソフトウェアを用いて解析を行った。前者のソフトウェアにより衛星画像のインポートならび

に幾何補正を行い、後者のソフトウェアにより大気補正を行った放射輝度情報の画像を取得した。次に、LANDSAT-TM/ETM+画像データに対しては7つのバンド、TERRA-ASTER画像データに対しては、14のバンドのDN値と実測値との回帰解析を統計解析ソフトウェアSPSSを用いて行い、そこから得られる回帰式を用いて有明海湾奥部の水質指標の推定分布図を作成した。

4．回帰解析の結果

水質指標として海水面温度、透明度、クロロフィルaならびに塩分を選び、観測値に対して回帰解析を行った。TERRA-ASTERについては前述の通り3枚のシーンをを用い、一方、LANDSAT-TM/ETM+については8枚の画像を解析に用いた。これらの画像から水質を推定する推定式の精度を比較するためにLANDSAT画像の大気補正についても、大気補正プログラムATCORを用いて再度補正作業を行った。その理由は、LANDSAT-TM/ETM+画像の大気補正については、以前、LOWTRAN⁷⁾を用いた補正を行っていたが、今回、TERRA-ASTER画像に施す補正と全く同じ補正を行うことで正確な比較が可能であると考えたためである。

(1) 海水面温度

有明海の水温は、冬季には湾口部で10～13℃、湾奥部で8～10℃を示し、夏季には前者で約26℃、後者で28～29℃を示す。衛星画像の大気補正を行うことで、画像同士の比較や推定モデルの開発に利用することが可能である。その理由は、その時の大気の影響を除去することができれば、地表面あるいは水表面自身の状態を直接比較することが可能になるからである。

回帰解析によりASTER画像による海水面温度（SST）推定のための回帰式が以下のように得られた。

$$SST = \exp(k + \alpha_1 DN_1 + \alpha_2 DN_2 + \alpha_3 DN_3 + \alpha_6 DN_6 + \alpha_7 DN_7 + \alpha_8 DN_8 + \alpha_9 DN_9 + \alpha_{13} DN_{13}) \quad (1)$$

ここで、各定数はそれぞれ、 $k = 3.2134$, $\alpha_1 = 0.0014$, $\alpha_2 = -0.0228$, $\alpha_3 = 0.0365$, $\alpha_6 = 0.0404$, $\alpha_7 = -0.3010$, $\alpha_8 = -0.1429$, $\alpha_9 = 0.0760$, $\alpha_{13} = 0.0090$ であり、 $DN_i (i = 1, 2, \dots)$ は大気補正後のバンド*i*のデジタルナンバーである。熱赤外バンドについては、バンド13のみを使用しているが、他の熱赤外バンドも使用したモデルと比較して結果の差がほとんど出てこなかったため省略することとした。これは、他の水質指標でも同様である。

図-2(a)はTERRA-ASTER画像から得られた推定海水面温度と観測値の比較のための散布図である。この図の中でさまざまな季節のデータが含まれているが、これについては既往の研究¹⁾の中で、1つの季節のみを回帰解析に用いて得られたモデルでは、他の時期の推定が困難であり、複数の季節の情報を取り込むことでより精度が向

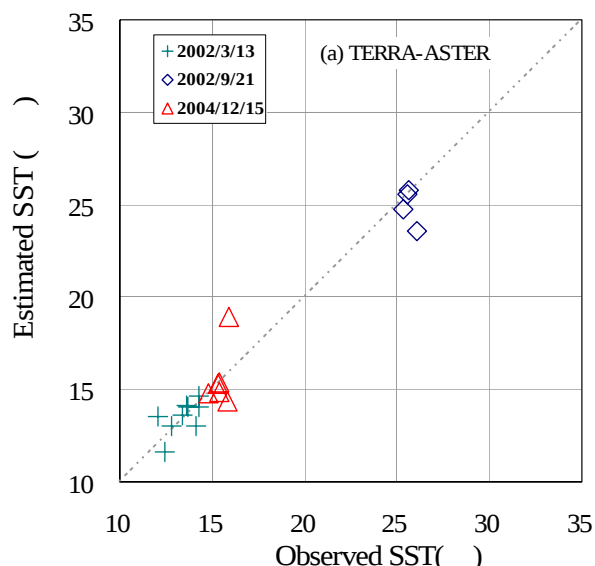


図-2(a) TERRA-ASTER画像により得られた推定海水面温度と観測値の比較

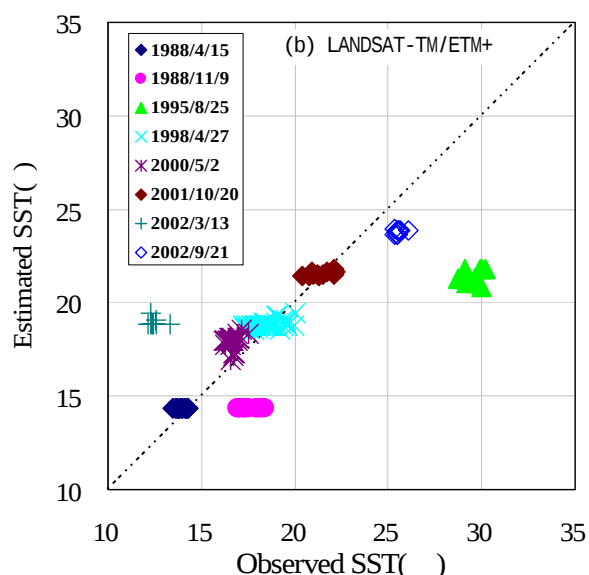


図-2(b) LANDSAT-TM/ETM+画像によって得られた推定海水面温度と観測値の比較

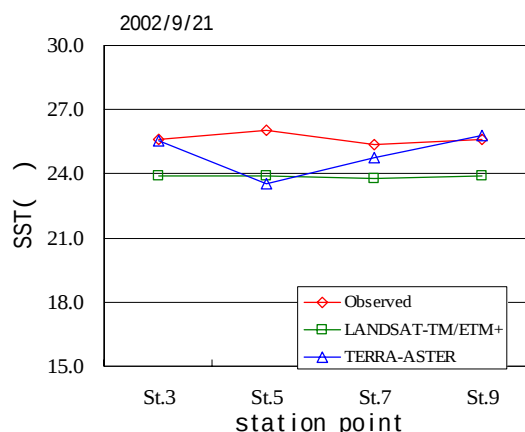


図-3 海水面温度の推定精度の比較

上することと、さらに、大気補正を適切に行えば、多時期のデータを同じように扱えるということが理由としてあげられる。決定係数 (= 相関係数²) は $R^2 = 0.9362$ である。一方、図 - 2 (b) は LANDSAT-TM/ETM+ 画像による結果である。この場合の決定係数は $R^2 = 0.5377$ であった。LANDSAT-TM/ETM+ に比べて TERRA-ASTER の推定精度が格段に向上した理由としては、この衛星画像の高い空間解像度とスペクトル解像度の両方が影響したと考えられる。LANDSAT では、1995/8/25 や 2002/3/13 の水温の推定精度が悪いが、これは、LANDSAT のモデルでバンド 6 のみ用いていたためであると考えられる。ASTER では可視域から近赤外域までの情報を取り入れたことも精度向上に役立ったと思われる。LANDSAT の場合、同様のバンドをモデルに用いた解析も行っているが¹⁾、敢えてモデルに取り込むまでの精度向上にはつながらなかった。その理由としては空間解像度の問題があげられる。図 - 3 は、実際に現地の観測地点 (図 - 1 参照) で観測した水温と推定値との比較の図である。地点番号が連続でないのは、3 つのデータの比較ができない地点を除いたためである。TERRA-ASTER によって推定された水温が LANDSAT-TM/ETM+ のそれより格段に精度向上しているのは予見された通りである。

(2) 透明度

透明度 (SDD) は、水の清澄度や水の中に含まれる懸濁性物質や有機物による光の減衰の度合いを表す指標で、通常、セッキ板と呼ばれる直径 30cm ほどの白い円板が海中のどの深さまで肉眼で見えるかを m の単位で表したものである。有光層の厚さは、普通この透明度の 2 ~ 3 倍であると言われている。この透明度の値は、植物プランクトンの生産のための最も重要なパラメータの 1 つである。この透明度は、有明海の湾奥ではほとんど 1 年中 2m 以下であるのに対し、湾口部では 8m に達する (ただし、夏季の降水期には 5m 位まで低下する)。近年、有明海の透明度が上昇しているとの報告が幾つかの報告書でな

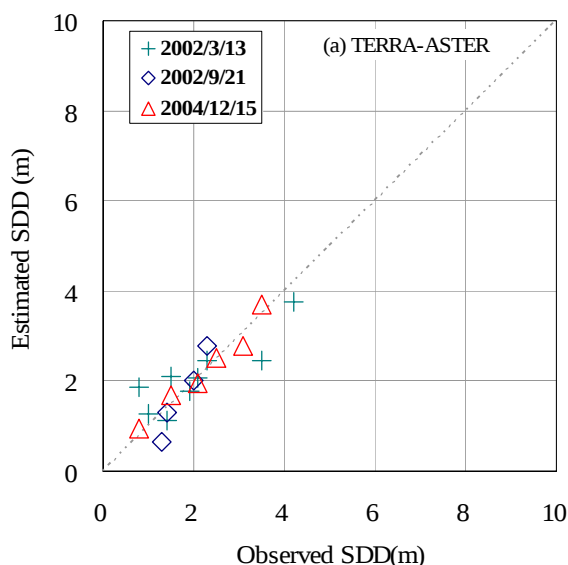


図 - 4 (a) TERRA-ASTER 画像による推定透明度と観測値の比較

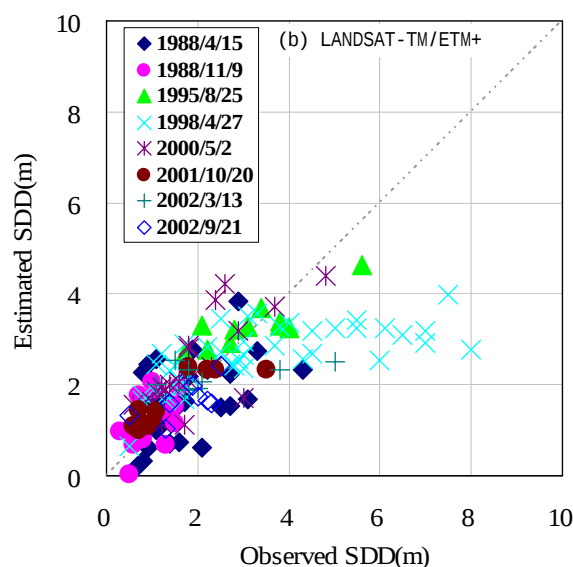


図 - 4 (b) LANDSAT-TM/ETM+ 画像による推定透明度と観測値の比較

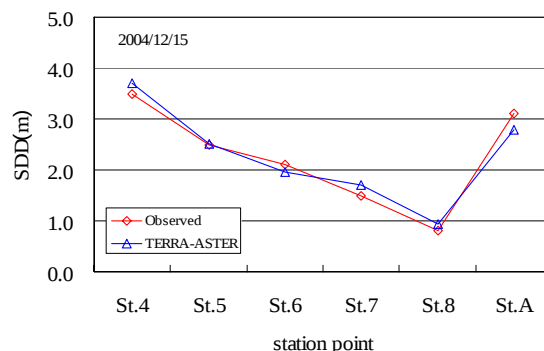
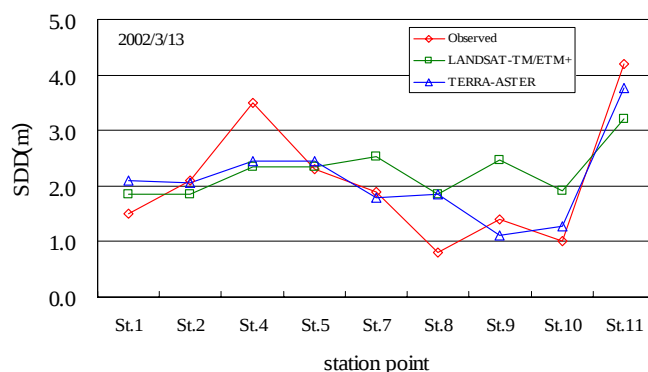


図 - 5 透明度の推定精度の比較

れている⁸⁾。

海水面温度と同様の線形回帰解析により、ASTER 画像による透明度 (SDD) を推定する回帰式が以下のように得られた。

$$SDD = \ell + \beta_1 DN_1 + \beta_2 DN_2 + \beta_3 DN_3 + \beta_6 DN_6 + \beta_7 DN_7 + \beta_8 DN_8 + \beta_9 DN_9 + \beta_{13} DN_{13} \quad (2)$$

ここで、各定数はそれぞれ、 $\ell = 12.1623$, $\beta_1 = 0.0220$, $\beta_2 = -2.7063$, $\beta_3 = -0.7135$, $\beta_6 = 0.3033$, $\beta_7 = -1.7940$, $\beta_8 = 7.7106$, $\beta_9 = 0.5256$, $\beta_{13} = 0.0240$ であり、 DN_i は上

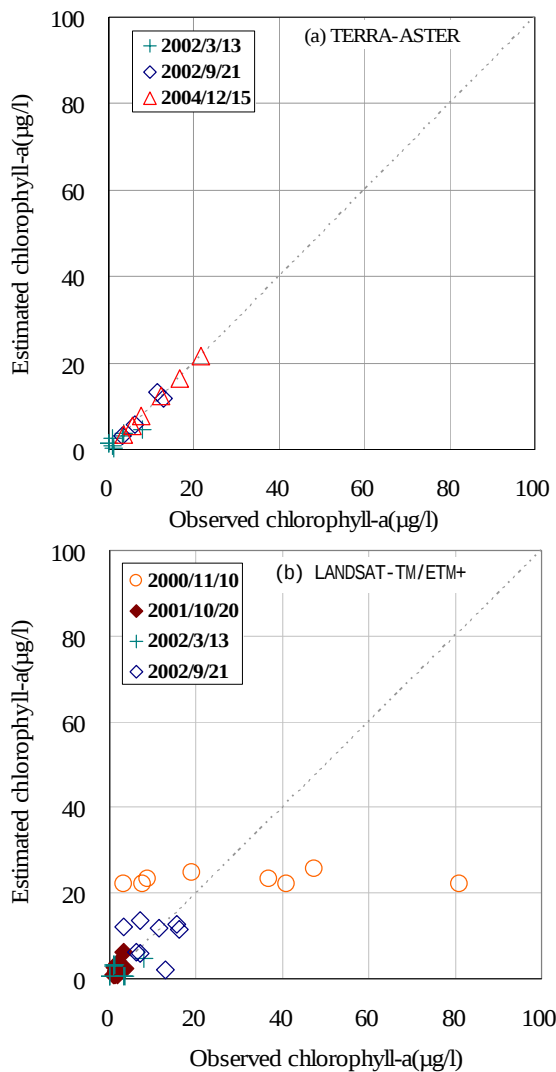


図 - 6 (a)(b) TERRA-ASTER 画像・LANDSAT-TM/ETM+による推定クロロフィルa濃度と実測値の比較

述と同様、各バンドのデジタルナンバーである。

図 - 4 (a)にTERRA-ASTER画像により求めた推定透明度と観測値の比較を示す。一方、図 - 4 (b)にはLANDSAT-TM/ETM+画像による推定透明度と実測値の比較を示している。前者の R^2 は 0.7689、後者は0.4678であった。推定精度の違いの理由は、海面温度の時と同じと考えられるが、一方、LANDSATでは、1998/4/27の観測における一部の透明度の高い測定データがうまく再現されていないため精度を落としていると言える。ASTERの場合の透明度が高い水域での比較検討が必要である。図 - 5にはそれぞれの観測点における透明度の推定値と実測値を比較した図を示している。2002/3/13の推定透明度は観測値と少し食い違っているが、許容できる範囲である。2004/12/15においては、推定透明度は観測値とほとんど一致している。

(3) クロロフィルa濃度

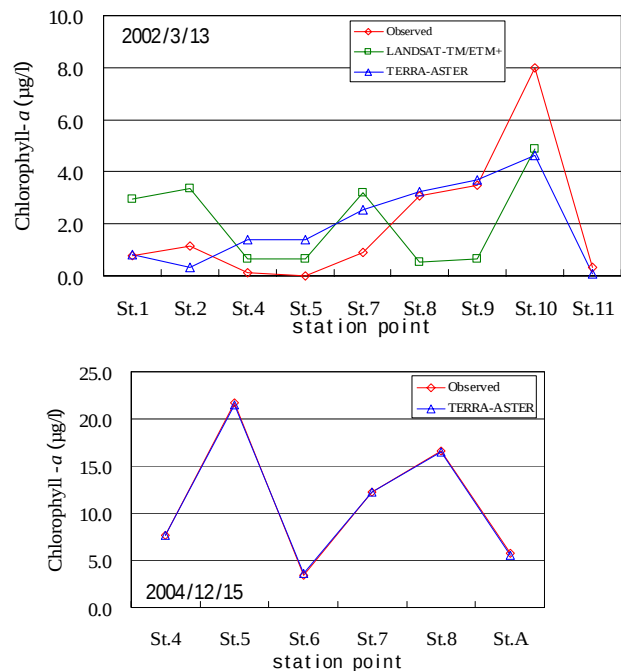


図 - 7 クロロフィルa濃度の推定精度比較

クロロフィルa濃度は水中の植物プランクトン量を表す指標としてしばしば用いられる。有明海の2000年のノリ不作は、直接的には植物プランクトンの異常増殖によるものであると結論づけてある。

線形回帰解析により、以下のようにASTER画像によるクロロフィルa濃度 (CHL) の推定式が得られた。

$$CHL = m + \gamma_1 DN_1 + \gamma_2 DN_2 + \gamma_3 DN_3 + \gamma_6 DN_6 + \gamma_7 DN_7 + \gamma_8 DN_8 + \gamma_9 DN_9 + \gamma_{13} DN_{13} \quad (3)$$

ここで、それぞれの定数は、 $m = -19.1775$, $\gamma_1 = 0.2404$, $\gamma_2 = 0.7241$, $\gamma_3 = 0.6714$, $\gamma_6 = -1.9499$, $\gamma_7 = 2.9247$, $\gamma_8 = -7.9891$, $\gamma_9 = -0.2075$, $\gamma_{13} = 0.0523$ である。

図 - 6 (a)は、TERRA-ASTER画像を用いて推定したクロロフィルa濃度と実測値の比較を表したグラフである。一方、図 - 6 (b)はLANDSAT-TM/ETM+画像による推定クロロフィルa濃度と実測値との比較図である。それぞれの決定係数は、前者が $R^2 = 0.9667$ 、後者が $R^2 = 0.4509$ であった。LANDSAT-TM/ETM+においては、高い濃度のクロロフィルa濃度の時、特に2000/11/10で大きな誤差が表れている。図 - 7は、観測地点毎の推定クロロフィルa濃度と実測値との比較を示している。2004/12/15では、ほぼ完全に推定クロロフィルa濃度と実測濃度の値が一致している。この日のクロロフィルa濃度は比較的高いが、TERRA-ASTER画像による回帰モデルはLANDSATの場合に比べてより高い精度で推定していると言えるであろう。その理由としては、クロロフィルa濃度の場合、特に可視域バンドの空間解像度の違いが大きく効いているのではないかと考えられる。現地観測の際にもクロロフィルa

濃度が高い水塊が見られ、30mの解像度ではそれが捉えにくかったのではないと思われる。

5. 湾奥における海水面温度分布の推定

有明海湾奥部の海水面温度を式(1)により推定した。2002/3/13ならびに2002/9/21に取得されたTERRA-ASTER衛星画像を幾何補正・大気補正後に海水面温度分布に変換した画像が、図-8である。この図によれば、干潟付近の水面温度は他に比較してより高い値を示しているのが分かる。これは、河川からの流出並びに春と初秋の日中の浅海域であることなどが理由であると考えられる。さらに、諫早湾と諫早干拓付近においても高い海水面温度が分布していることが分かる。このように衛星画像を利用することで、これらの様子が面的に確かめられる。

6. 結論

有明海における水質観測データを利用することで、海水面温度、透明度、クロロフィルaなどの水質指標を推定するモデルを構築することができた。このモデルは、TERRA-ASTER衛星画像よりこれらの水質指標を取り出すことを可能にするモデルである。TERRA-ASTERとLANDSAT-TM/ETM+による推定結果を比較することで、前者の方が有明海湾奥部の水質推定に関してはより高い精度を持っていることが確認できた。本研究の成果は、有明海湾奥部における将来の環境特性を理解するのに有効に活用可能であることが分かった。

謝辞：本研究は、平成16年度佐賀大学学内COEの研究助成の支援を得て行われたものである。研究を進めるにあたり、当時学部4年生であった押川典由君の多大なる協力を得た。記して感謝の意を表する。さらに、LANDSAT-TM/ETM+衛星画像は独立行政法人宇宙航空研究開発機構(JAXA)より、TERRA-ASTER衛星画像は財団法人資源・環境観測解析センター(ERSDAC)より提供を受けたものであることを付記する。

参考文献

- 1) Gan, T.Y., Ohgushi, K. and Araki, H.: "Estimating water quality of the Ariake Sea in Japan using Landsat-TM data -Evaluation of SDD and SST -", *Lowland Technology International*, Vol.2, No.1, 47-64, 2000.
- 2) Ohgushi, K., Gan, T.Y. and Araki, H.: "A study on estimation of

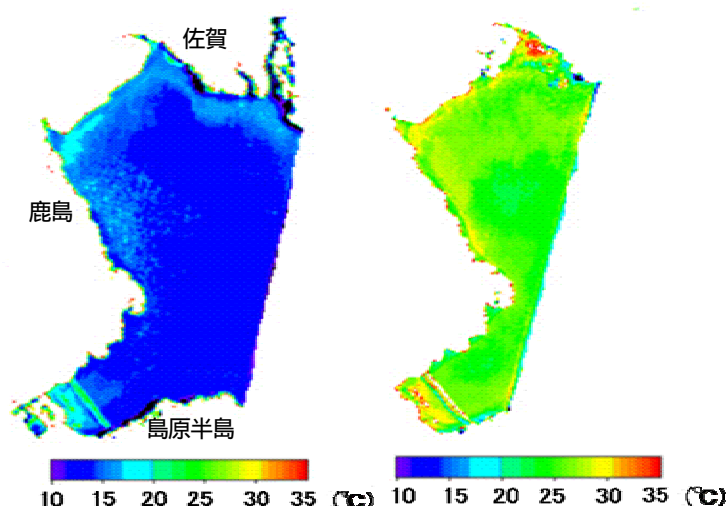


図-8 TERRA-ASTER画像により得られた海水面温度分布(左: 11:12JST, 2002/3/13, 右: 11:12JST, 2002/9/21)

water environment in Ariake Sea using remotely sensed data", *Proc. of 12th Congress of APD-IAHR, Bangkok*, Vol.2, 597-607, 2000.

- 3) Ohgushi, K., Araki, H and Gan, T.Y.: "Water quality monitoring of the Ariake Sea by remote sensing and utilization of field observation", *Lowland Technology International*, Vol.6, No.2, 1-9, 2004.
- 4) 桐本賢太・河原洋平・緒方純俊: ASTERおよびSAR画像に有明海の環境観察、日本リモートセンシング学会学術講演会論文集、Vol.33, 193-194, 2002.
- 5) Leica Geosystems GIS & Mapping, LLC.: *ERDAS IMAGINE Tour Guides*, 2801 Buford Highway, NE, Atlanta, Georgia 30329-2137, USA, 2003.
- 6) Geosystems GmbH.: *ATCOR for ERDAS IMAGINE User Manual*, Riesstrasse 10, D-82110, Germany, 2002.
- 7) Kneizys, F.X., E.P. Shettle, L.W. Abreu, J.H. Chetwynd, G.P. Anderson, W.O. Gallery, J.E.A. Selby and S.A. Clough: *Users Guide to LOWTRAN7*, AFGL-TR-88-0177 Geophysics Directorate/GPOS, 29 Randolph Rd., Hanscom AFB, MA 01731-3010, USA, 1988.
- 8) 農林水産省ノリ不作等対策関係検討委員会: 最終報告書 - 有明海の漁業と環境の再生を願って -, 2003.

(2005.9.30受付)