人工衛星画像を用いた有明海の水質解析

WATER QUALITY ANALYSIS IN THE ARIAKE SEA USING ARTIFICIAL SATELLITE IMAGES

大串浩一郎¹・Thian Yew GAN²・荒木宏之³

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)

²Member of CSCE Ph.D. アルバータ大学助教授 土木環境工学科 (T6G 2G7 カナダ, エドモントン)

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)

Multiple images of the Landsat-TM were utilized to develop algorithms for retrieving water quality indices of the Ariake Sea. Atmospherically corrected radiance were regressed against the field survey's data, such as transparency, water temperature, turbidity and chlorophyll-a. Results for transparency estimation show that the use of multi-date visible channels as calibration data predicts more accurate and dependable values of water quality at validation stage than the use of single-date calibration ones. Spatial information of water quality in the Ariake Sea can be easily obtained by using proposed algorithms and Landsat images.

Key Words : *Landsat-TM images, the Ariake Sea, transparency, sea surface temperature, turbidity, chlorophyll-a*

1. はじめに

我が国の多くの都市は河川や湖沼・海域の沿岸部に分布しており、多かれ少なかれ周辺水域を利用し環境への負荷を与えている。九州4県に囲まれた有明海は、周辺地域からの影響を受けてきた水域で、逆にまた多くの人々がこの有明海から恩恵を受けてきた。この海が担ってきた役割や、将来に向けての環境保全を考える上で、人間活動が環境へ与える影響を評価し、またこの水域の今後の水環境をモニタリングしていくことが重要となってくる。

ところで、地球観測衛星ランドサットは、これまでさまざまな分野で広く長期間に渡って利用されてきた息の長い人工衛星で、水環境に関する分野でも沿岸域や湖沼の水質問題を研究するため広く用いられてきた。1970年代後半より濁度・流動に関する解析^{1), 2), 3), 4), 5)}が行われた。1980年代に入ると単なる濁度や濁水の挙動だけでなく塩分やクロロフィルaなどの推定を試みる研究^{6), 7), 8)}が始まった。水工学へのリモートセンシングの応用については大西⁹⁾が概説している。我が国においてリモートセンシングによるクロロフィルaの推定については水尾ら¹⁰⁾が検討し、近年はその時系列解析^{11), 12)}も行われるようになった。また、水域の流動解析についても数値シミュ

レーションと組み合わせた研究¹³⁾や経時変化による解析¹⁴⁾も行われてきている。ランドサット以外で水域への適用例としてはNOAA/AVHRRによる水面温度の推定^{15), 16)}やJERS-1・MOS-1による河川合流部への適用¹⁷⁾があるがその数は僅かである。ランドサットが広く用いられてきた理由としては、センサの広範囲のスペクトル特性と約30年間という長期に渡って変わらない地球観測を行ってきた事実が挙げられるであろう。

有明海などの広い水域において長期間の情報収集を行う際に、時間とコストの面から考えると、経済的で効果的な研究アプローチの1つとしてこの衛星リモートセンシングの適用が考えられる。本研究では、この長期に渡る衛星画像情報と有明海の水質観測資料並びに現地観測結果を基に回帰解析を行い、有明海の水質評価手法を開発し、また水環境の長期的な経年変化についても考察を加えた。

2. 有明海について

有明海は、図-1に示すように逆L字形に屈曲した半閉鎖性の内湾で、平均水深20m、中心線延長90km、面積約1,700km²であり、その規模は東京湾に匹敵する。外海との連絡は幅約4kmの早崎瀬戸を通してのものがほとんど

図一 有明海と水質観測地点

で、南部の八代海とは余り海水交換がないことが分かっている¹⁸⁾。有明海へ流入する主要な一級河川は筑後川など8河川であり、上流より土砂等を運んできている。また、有明海の潮位差は湾奥部の住之江で6mと我が国最大である。この両者の相乗作用により有明海沿岸には我が国の干潟の約4割にあたる220km²の広大な干潟が形成され、貴重種を含めて非常に多くの生物の生息場所となっている。戦後、有明海周辺の4県（佐賀・長崎・福岡・熊本）の経済的な発展とともに、有機肥料や栄養物、土砂などの流入増加により有明海湾奥部などで水質悪化をきたし、水産物漁獲量が大幅に減少している¹⁹⁾。また、1997年には国の干拓事業により、諫早湾の約35.5km²が締め切られている。しかしながら、2001年の海苔不作問題が起きるとともに諫早湾・有明海は社会問題化してきている。

陸域からの負荷量や湾内の潮流・潮汐が湾内の水環境に直接影響を及ぼすと考えられるが、物理学的、生物学的、化学的、あるいはそれ以外の学際領域の共同研究を進めなければこの海の本物の姿は見えて来ない。人間活動による水質汚染を防ぐためにも、有明海的环境をモニタリングすることが一つの重要な対策と考えられる。有

明海におけるランドサットによる流況解析としては、渡辺・瀬口²⁰⁾の研究がある。彼らは現地観測データとランドサットTMの衛星データを用いて有明海の潮流特性を解析し、可視域のバンド2で河川からの淡水拡散と海水交換、バンド4で濁度との関係を、赤外域のバンド6で流況特性を解析している。

3. 解析手法

本研究では、ランドサットTMデータ並びに図一のような佐賀県・熊本県の有明海における浅海定線調査地点（33地点）の水質観測資料、佐賀県の赤潮対策調査資料および補助的に福岡県の浅海定線調査資料と我々自身による現地観測結果を用いた。各県の浅海定線調査はほぼ朔望満潮時前後に行われているが、海苔等を対象とした赤潮対策調査は主に秋から冬、春にかけて実施されており、日時や観測地点も浅海定線調査とは一致していない。これらの調査項目を表一に示す。

まず、衛星画像で推定できる水質項目として、透明度、水面温度、クロロフィルaなどが考えられるが、クロロフィルaについては赤潮調査でしか観測していないので、前の2つの項目について浅海定線調査資料を用いて検討した。ランドサットは16日に1回同一地点の地表や海面、大気から反射・放射されてくる電磁波を観測している。月に1度の浅海定線調査の観測日時と一致し、しかも海上の雲量が少なく利用可能な衛星画像は数が限られており、本研究では表二に示した6つのランドサットTMデータのシーンをを用いてモデル式を構築することとした。

次にクロロフィルaについては、佐賀県の赤潮対策調査資料を用いて行ったが、衛星画像取得日時と一致するものが2000年11月10日のみであることが分かったのでそのデータを用いることとした。

リモートセンシング解析ソフトウェアとしてPCI社のImageWorksとGCPWorksを使用した。国土地理院発行の数値地図25000行政界・海岸線の緯度・経度情報を持ったベクトルデータを用いて、ランドサットTM画像の幾何補正・画像の切り出しを行った。次に水質観測地点それぞれについて30m解像度のピクセルを4×4のウィンドウで

表一 有明海沿岸各県の水質調査一覧

県名	調査事業名	調査時期	地点数	調査項目	開始年
福岡県	浅海定線調査	毎月大潮時	10	水温、塩分、透明度、DO、COD、栄養塩、プランクトン	1965
	赤潮監視調査	1～2回/月	4	水温、塩分、透明度、DO、栄養塩、クロロフィルa、プランクトン	1985
佐賀県	浅海定線調査	毎月大潮時	11	水温、塩分、pH、透明度、DO、栄養塩、プランクトン、クロロフィルa（赤潮調査時に8点のみ、1987～）	1974
	有害プランクトンモニタリング調査	10～3月	32		1983
熊本県	浅海定線調査	毎月大潮時	22	水温、塩分、透明度、DO、COD、栄養塩	1974
	赤潮調査	1～3回/月	10	水温、塩分、DO、栄養塩、クロロフィルa、プランクトン	1986
長崎県	浅海定線調査	4, 8, 11, 2月	14	水温、塩分、プランクトン	1992
	シャットネラ赤潮予察調査	6～8月	9	栄養塩、クロロフィルa、DO	1999

表-2 透明度・水面温度推定アルゴリズム構築のために用いたランドサットTM
画像の各種パラメータ並びに対応する有明海の満潮位などの状況

衛星観測日	観測時刻 (日本時間)	太陽方位角 (ϕ)	太陽天頂角 (θ)	湾奥部住之江 における満潮 時刻	実測による透 明度の範囲 (m)	実測による海水 面温度の範囲 ($^{\circ}\text{C}$)
1984/9/27	10:24AM	139 $^{\circ}$	42 $^{\circ}$	10:41AM	0.8 - 6.8	24.7 - 26.6
1988/4/15	10:23AM	126 $^{\circ}$	35 $^{\circ}$	8:38AM	0.8 - 11.2	13.5 - 16.8
1988/5/17	10:24AM	113 $^{\circ}$	28 $^{\circ}$	9:39AM	0.8 - 8.5	17.8 - 21.1
1988/11/9	10:24AM	152 $^{\circ}$	55 $^{\circ}$	9:22AM	0.3 - 7.2	16.9 - 21.4
1990/11/15	10:13AM	149 $^{\circ}$	57 $^{\circ}$	7:50AM	1.0 - 7.8	16.6 - 20.1
1995/5/5	10:01AM	112 $^{\circ}$	34 $^{\circ}$	12:27AM		17.6 - 19.8

表-3 ランドサットTMデータの輝度パラメータ並びにLOWTRAN7により得られた大気補正量

TM Band	波長 λ (μm)	Gain (A_1) ($\text{W}/\text{m}^2/\text{sr}/\mu\text{m}$ /DC)	Offset (A_0) ($\text{W}/\text{m}^2/\text{sr}$ / μm)	Averaged $L_T(\lambda)$ ($\text{W}/\text{m}^2/\text{sr}/\mu\text{m}$) 11/15/1990	$L_R(\lambda) + L_A(\lambda)$ by Lowtran 7 ($\text{W}/\text{m}^2/\text{sr}/\mu\text{m}$) 11/15/1990 5/17/1988	
1	0.45 - 0.52	0.602	-1.500	42.047	20.580	30.210
2	0.52 - 0.60	1.175	-2.805	27.246	11.700	17.670
3	0.63 - 0.69	0.806	-1.194	16.085	5.830	9.040
4	0.76 - 0.90	0.814	-1.500	7.265	2.030	3.300
5	1.55 - 1.75	0.108	-0.370	0.267	0.065	0.094
6	10.5 - 12.5	0.056	1.238	7.893	7.050	7.530
7	2.08 - 2.35	0.057	-0.150	0.012	0.007	0.012

平均化して不必要なノイズや位置の誤差などをできるだけ除去した。

最後に、これらの幾何補正などの補正を施した画像データを各波長バンド毎に気象データをもとにLOWTRAN7という大気補正プログラムを用いて大気補正を行い、各バンド毎の正確なスペクトル輝度情報を取得した。LOWTRAN7に入力した気象データは、佐賀・福岡・長崎・熊本4県における風速、降水量、気温、視程などである。

4. 衛星データの大気補正

Tassan⁷⁾は、ランドサットTMやNIMBUS7のCZCSデータと水質パラメータ（例えば濁度、透明度、SS、クロロフィルなど）を定量的に関係づけることが可能であることを示した。理論的には、水面からの放射輝度の強さや量は水中に存在する懸濁物質の量に影響される。その理由は、懸濁物質が水中に含まれることで海水の反射特性が変化するからである。また、熱赤外バンドのランドサットTMの6チャンネルは水面温度と密接に関係することも見いだされている。

しかしながら、衛星のセンサに到達する電磁波の輝度情報は海水面の情報だけを含む訳ではない。センサに到達する波長 λ の電磁波の放射輝度 $L_T(\lambda)$ は、海水面の輝度 $L_w(\lambda)$ と大気中の空気分子によるRayleigh散乱量

$L_R(\lambda)$ 並びに分子より大きいエアロゾルによる散乱量 $L_A(\lambda)$ の和で表される⁴⁾。

$$L_T(\lambda) = L_w(\lambda) + L_R(\lambda) + L_A(\lambda) \quad (1)$$

複数の日時の衛星画像を扱う際には大気補正が非常に重要になってくる。なぜならば、水質パラメータは海水面からの放射輝度 $L_w(\lambda)$ に関係しており、センサに到達する全放射輝度 $L_T(\lambda)$ とは異なるからである。その差 $L_R(\lambda) + L_A(\lambda)$ は、大気の状態によって変化する、すなわち画像ごとに異なるので気象状況に応じてそれぞれ補正する必要がある。

本研究では、Knetzysら²¹⁾の大気モデルLOWTRAN7を用いて $L_R(\lambda) + L_A(\lambda)$ を見積もった。表-3は、中緯度の海洋におけるエアロゾルに対する大気データを元にLOWTRAN7により見積もった1990年11月15日及び1988年5月17日の有明海における $L_R(\lambda) + L_A(\lambda)$ の値を示している。LOWTRAN7では大気からの熱放射（大気放射）と大気によって散乱される太陽放射（パサラジアンズ）を計算する。前者は可視域、近赤外並びに熱赤外域（0.45~2.35 μm の範囲）において無視できるほど小さいことが分かったが、後者では最大 $30\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$ 程度に達することが分かった（表-3）。6枚の画像全てでバンド1におけるセンサに到達する全放射輝度は 50Wm^{-2}

表-4 クロロフィルa推定アルゴリズム構築並びに3つの水質の経時変化を見るため
7つの衛星データの大气補正量をLOWTRAN7で計算した結果 (単位 $W/m^2/sr/\mu m$)

TM Band	1988/4/15	1995/5/5	1997/4/24	1998/4/27	1999/4/14	2000/5/2	2000/11/10
1	26.7	26.6	27.2	28.0	27.0	28.2	20.6
	46.8	47.7	48.2	49.3	47.8	49.9	33.7
2	15.4	15.2	15.8	16.2	15.6	16.3	11.7
	36.8	37.6	37.7	38.7	37.4	39.1	25.7
3	8.16	7.97	8.44	8.58	8.37	8.72	6.18
	29.8	30.0	30.03	31.3	30.0	31.5	21.2
4	2.78	2.65	2.98	2.94	2.94	3.04	2.12
	17.3	17.7	17.5	18.2	17.4	18.3	13.4
5	0.0947	0.074	0.136	0.0991	0.134	0.118	0.0798
	4.14	4.21	4.12	4.32	4.09	4.31	3.09
6	7.37	7.30	7.23	7.66	7.12	7.44	7.18
	7.37	7.30	7.23	7.66	7.12	7.44	7.18
7	0.015	0.0095	0.0253	0.016	0.0249	0.0207	0.0138
	1.24	1.28	1.24	1.29	1.23	1.29	0.926

$sr^{-1}\mu m^{-1}$ を超えていないので、結局、ランドサットTMセンサのバンド1が受け取るスペクトル放射輝度の中に海水中の情報は40~50%しか含まれていないことを意味する。

同様に、クロロフィルa推定アルゴリズム構築のための衛星データ並びに上記透明度、水面温度とクロロフィルaの経時変化を見るための他の衛星データについても大气補正のためLOWTRAN7による計算を行った。結果を表-4に示す。各バンド毎に上段が大气による影響を含むスペクトル輝度 $L_r(\lambda) + L_a(\lambda)$ で、下段がセンサが受け取るスペクトル輝度の全量である。この差が海水面の情報を示すことになる。この結果を参照するとバンド6を除いて他の6つのバンドでは波長が長くなるにしたがって大气の影響の割合が小さくなっているのが分かる。バンド6については残念ながら全てが大气の影響を受けているので水質推定には利用できないことも判断できる。後の節に示すように、水温の推定にはバンド6のデータを用いるので、水温の時系列変化についてはこれらの衛星画像からは推定できないことが分かった。

5. 水質データと回帰解析

潮汐の効果は、得られる水質データや画像データの精度に影響を与え得るので、ランドサットTM画像が取得された日における有明海湾奥の住之江で潮位変化を調べた。表-2に示すようにこの地域のランドサット衛星画像はほとんど全て午前10:00~10:30頃取得されていることが分かる。有明海の干潮や満潮時とこの時間が重なれば潮流は非常に小さくなり衛星画像が捉える各観測地点の輝度情報との時間差を小さくすることが出来て理想的である。また、この時間に全ての水質観測がなされればさらに完全を期すことが出来るが、

有明海の水域の広さを考えるとそれは不可能である。事実、佐賀県、熊本県の水質観測では、毎月大潮の満潮時に水質観測を行っているが、全ての観測地点で一斉に観測を行っている訳ではないので数時間のずれが起きるのが普通である。表-2によれば、1984年9月27日、1988年5月17日及び同年11月9日は余り潮汐の影響を受けていないが、一方、1988年4月15日と1990年11月15日は少し潮汐の影響を受けていることが分かる。

(1) 透明度 (transparency, Secchi Disk Depth ; SDD)

透明度は、水がどれだけ透明であるかを表すために水面から光がどこまで届くのかという長さの単位を用いる。水中の懸濁物質の存在によりこの量は減少していく。理論的には、人工衛星が受け取る放射量は透明度に反比例するはずであり、両者の間の経験的な関係を求めることが可能である。

大气補正を施したスペクトル放射輝度 (各バンド毎の放射輝度) と透明度の相関を取ると、特にバンド1から3との相関が高いことが分かった。さまざまなアルゴリズムを線形回帰解析により試した結果、次式の評価アルゴリズムが最適な結果を与えることが分かった。

$$\sqrt{SDD} = 1.8041 + 0.1472 \times TM_1 - 0.2652 \times TM_2 + 0.1076 TM_3 \quad (2)$$

ここで、 SDD は透明度(m)を、 TM_1, TM_2, TM_3 はバンド1から3の大气補正済みのスペクトル放射輝度を表す。

キャリブレーション段階で1984/9/27, 1988/4/15,

1988/5/17, 1988/11/9の4つの時期の大気補正済みの衛星データを用い、その結果を別の時期の透明度推定に利用できるかどうかを検証した。その結果、相関係数0.80、バイアス1.75%とかなり高い精度に高められることが分かった。すなわち、異なる日時の衛星画像であっても、適切に大気補正がなされれば同時にキャリブレーション時に組み込むことで、季節的な変動も取り込まれた普遍的なアルゴリズムが求まる可能性があるということが明らかとなった。

(2) 海面温度(Sea Surface Temperature ; SST)

海面温度(SST)は気象に大きな影響を与えるパラメータで、世界中で気象学者によって詳細なモニタリングがなされている。近年、NOAA-AVHRRデータによる地球規模の海面温度マップが作成されている。また、有明海においても同様に海面温度をNOAA-AVHRRデータにより評価する試みもなされている¹⁶⁾。ただし、NOAAの空間分解能は1.1kmと粗く、ランドサットTMが分解能30m(ランドサット7号はパンクロマチックで15mの空間分解能を持っている)であることを考慮すると、両者の使い分けを考えなければならない。

本研究では、ランドサットTMの各バンド(特に熱赤外バンド(バンド6)の相関が高い)を用いて有明海の海面温度を評価することを試みた。

SSTについては、最も相関が高かったランドサットTMのバンド6のみを用いて以下の回帰式の係数を求めた。

$$(SST - \mu_{SST}) = -0.5742 \times (TM_6 - \mu_{TM_6}) \quad (3)$$

ここで、 μ_{SST} , μ_{TM_6} はそれぞれ、海面温度の平均値並

びにバンド6の大気補正済みの放射輝度データの平均値である。平均値からの偏差をとった理由は、衛星データのみからでは海面温度の絶対値を十分に評価できなかったためである。キャリブレーションで1984年9月27日と1995年5月5日のデータを用い、検証段階で1990年11月15日の海面温度の推定に適用した所、相関係数0.41、バイアス0%を得た。相関係数についてはまだ不十分な結果であるが、海面温度の推定をある程度の精度で行うことが可能であることが分かった。

(3) クロロフィルa(Chlorophyll-a; Chl-a)

クロロフィルはa, b, c, dと存在するが、全ての藻類に含まれるのがクロロフィルaである。植物プランクトン濃度の指標としてこのクロロフィルa濃度がよく用いられる。クロロフィル濃度の大きさにより水面から射出する光の波長分布は異なるが、TMのバンド2(波長0.52-0.60 μ m)周辺においてはその変化が少ないことが分かっている。このことを利用して、上向き照度がクロロフィル濃度に依存する波長域のバンドとバンド2を組み合わせるクロロフィル濃度を推定する試みがなされてきた^{10), 11), 12)}。

本研究では、いくつかの組み合わせによるクロロフィルa濃度の推定方法を検討したが、キャリブレーションに利用できる衛星画像が少なかったため相関係数が0.408と非常に低かった。得られた回帰式は以下の通りである。

$$\log(Chl-a) = 2.34 - 0.33(TM_2 / TM_4) \quad (4)$$

今後、現場における実測などを増やして、より精度の高いモデル式を構築する必要がある。

図-2 透明度推定図 (1988年4月15日)

図-3 透明度推定図 (2000年5月2日)

6. 有明海における水質の時系列変化について

以上のようにしてランドサットTMデータと水質観測資料を用いて水質評価アルゴリズムを構築し、有明海の水質の時系列変化について解析を行った。式(2),(4)を用いて透明度とクロロフィル濃度を推定し、その時系列変化を検討したが、透明度についてその結果の一部を示したのが図-2、図-3である。前者は1988年4月15日の透明度分布推定図、後者は2000年5月2日の図である。両者の潮の時期は月齢28日と27.4日ではほぼ等しく、衛星画像取得時刻の10:30前後は最大下げ潮の約1時間前である。全体的な透明度の大きさは2000年の方が高いことと、1988年の下げ潮の流れによる底泥の巻き上げなども大きいことが推測される。両者の観測日以前の降水量や風、気圧などの影響も考慮しなければならないが、そのような自然条件以外に人間活動による影響も否定はできないと考えられる。

7. 結論

地球観測衛星ランドサットのTMデータと水質観測資料を用いて有明海の透明度、海面水温、クロロフィルa濃度の評価アルゴリズムを構築することができた。透明度については、複数の日時の衛星画像をキャリブレーションに用いることで推定精度を大幅に向上させることが分かった。また、衛星画像を用いることで有明海水環境の広域の経時変化を定性的・定量的に把握することが可能であることが明らかとなった。

謝辞：本研究は、平成13年度文部科学省科学研究費補助金基盤研究(C) (課題番号13650572) の援助のもとで行われた。また、本研究で用いたランドサットTMデータは宇宙開発事業団より研究用として提供されたものである。さらに、有明海の水質観測資料は、佐賀県有明水産振興センター、熊本県水産研究センター並びに福岡県有明海研究所より提供していただいた。あわせて感謝の意を表する。

参考文献

- 1) Abiodun, A. A.: Satellite survey of particulate distribution patterns in Lake Kainji, *Remote Sensing Environ.*, 5, pp.109-123, 1976.
- 2) 大西外明、田中聡太郎：Landsatによる急傾斜湾内密度流フロントの観測と安定性に関する考察、土木学会論文報告集、No.292, pp.53-63, 1979.
- 3) Carpenter, D. J., and Carpenter, S. M.: Modeling inland water quality using Landsat data, *Remote Sensing of Env.*, 13, pp.345-352, 1983.
- 4) Aranuvachapun, S. and LeBlond, P. H.: Turbidity of coastal water determined from Landsat, *Remote Sensing of Env.*, 14, pp.113-132, 1984.
- 5) 宇多高明、古川博一、竹渕勉：ランドサット・航空機・船の同時観測による沿岸海域特性の把握、第31回海岸工学講演会論文集、pp.690-694, 1984.
- 6) Khorram, S.: Development of water quality models applicable throughout the entire San Francisco Bay and delta, *Photogram. Eng. Remote Sensing*, 51, pp. 53-62, 1985.
- 7) Tassan, S.: Evaluation of the potential of the thematic mapper for marine application, *Int. J. Remote Sensing*, 8, pp.1455-1478, 1987.
- 8) 大西外明、河合弘泰：ランドサットTMデータによる河口流出の解析法の提案—新宮川への適用、土木学会論文集、No.452/II-20, pp.11-20, 1992.
- 9) 大西外明：水工学とリモートセンシング、土木学会論文集、No.393/II-9, pp.9-20, 1988.
- 10) 水尾寛己、二宮勝幸、雫石雅美、多賀保志、安岡善文：TMデータによる東京湾のクロロフィルa量の観測の検討—中間赤外域における水質情報抽出可能性—、日本リモートセンシング学会誌、Vol.11, No.3, pp.135-139, 1991.
- 11) 鈴木三貴子、武田健一、岩下圭之他：TTMデータによる東京湾の水質環境リモートセンシング、土木学会第54回年次学術講演会講演概要集、共通セッション、pp.16-17, 1999.
- 12) 水出寛之、岩下圭之他：LANDSAT MSS/TMデータを利用した内湾のChlorophyll-a分布の時系列評価、土木学会第56回年次学術講演会講演概要集、第IVセッション、pp.394-395, 2001.
- 13) 兵頭竜二、後藤恵之輔：衛星リモートセンシングによる閉鎖性湾の流動シミュレーションの検証、水工学論文集、第43巻、pp.851-856, 1999.
- 14) 藤井壽生、工藤勝輝、岩下圭之他：印旛沼の濁度分布経時変化から判読した流動化メカニズム解析—LANDSAT TTMデータによる—、日本リモートセンシング学会誌、Vol.20, No.3, pp.71-84, 2000.
- 15) 菊川浩行、木下紀正他：NOAA/AVHRRによる鹿児島湾表面水温の季節変化の解析、日本リモートセンシング学会誌、Vol.16, No.3, pp.35-45, 1996.
- 16) 福士大介、風間聡、沢本正樹：NOAA/AVHRRデータを用いた有明海周辺の熱環境解析、土木学会論文集、No.677/II-55, pp.163-174, 2001.
- 17) 田中修三、西川肇、岩下圭之他：衛星データによる河川合流区間のリモートセンシング、日本リモートセンシング学会誌、Vol.16, No.5, pp.14-22, 1996.
- 18) 気象庁：有明海・八代海の水象調査報告書、1974.
- 19) 菅野徹：有明海、東海大学出版会、1981.
- 20) Watanabe, K. and Seguchi, M.: Study on oceanic phenomena in the shallow area of Ariake Sea by remote sensing, II, Observation of flow regime by Landsat 5 TM data, *Bull. Fac. Agr. Saga University*, 65, pp.53-59, Saga Japan, 1988.
- 21) Kneizys, F. X. et al.: User code to LOWTRAN 7. AFGL-TR-88-0177 *Environmental Research papers*, No. 1010, US Department of Defense, Air Force Geophysics Laboratory, Optical Physics Division, 137, 1988.

(2001. 10. 1受付)