

衛星画像と現地観測に基づく 有明海湾奥部の水質評価

WATER QUALITY ESTIMATION OF THE INNERMOST PART OF THE
ARIAKE SEA BASED ON SATELLITE IMAGES AND FIELD OBSERVATION

大串浩一郎¹・馬場里美²・荒木宏之³・Thian Yew GAN⁴
Koichiro OHGUSHI, Satomi BABA, Hiroyuki ARAKI and Thian Yew GAN

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学生会員 佐賀大学大学院生 工学系研究科博士前期課程 (〒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)

⁴Member of CSCE Ph.D. アルバータ大学教授 土木環境工学科 (T6G 2G7 カナダ、エドモントン)

A water quality of the Ariake Sea is estimated by using Landsat-TM, ETM+ data and field observation. The estimation model for not only the water transparency or temperature but also the salinity, chlorophyll-a etc. are developed through regression analysis. Continuous field observation at fixed locations in the Ariake Sea was executed during about 5 months. The results obtained by this observation could explain the characteristics of the water quality in the innermost part of this bay and complement the estimated water quality distribution by the satellite images very well.

Key Words : The Ariake Sea, Water Quality, Landsat, Remote Sensing, GIS, Field Observation

1. はじめに

有明海は、我が国最大の潮位差を有する半閉鎖性内湾であり、大潮時には湾奥で最大約6mの潮位差となる。最近数10年の沿岸域の開発により、有明海は有機物、栄養塩、浮遊固形物などさまざまな物質による水質悪化を受けてきた。この現象は、陸域からの負荷と流体塊の運動に影響されるものだが、詳細なメカニズムはまだ明らかにされていない。有明海沿岸各県は、浅海定線調査という名称の観測により、過去20年以上に渡って毎月大潮満潮時に多項目の水質指標について観測を続けてきている。図-1は佐賀、福岡、熊本各県の総計51地点の観測地点を示している。この観測結果のデータは膨大な量として集積されてきている。

一方、1980年代より地球環境をモニタリングするための人工衛星が用いられ、この衛星情報もまた膨大な量として集積されてきた。著者らとその共同研究者は既にランドサットTMデータ並びにETM+データから有明海の透明度並びに海水面温度推定のモデル式を開発している^{1), 2), 3)}。

本研究では、その他の水質指標、例えば塩分濃度、ク

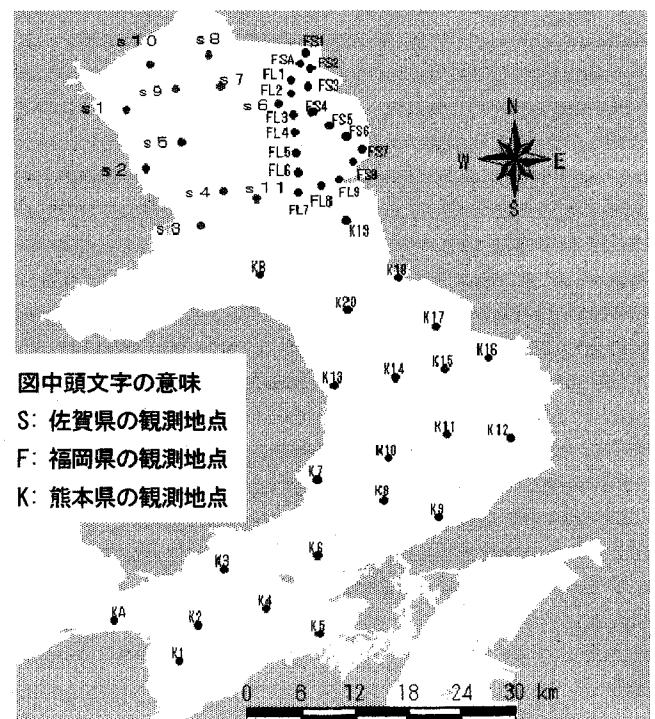


図-1 有明海と各県の水質観測地点

クロフィルa、プランクトン量などを推定するために上記のランドサットTMデータ並びにETM+データを用いた。有明海の水質の季節的な変動や空間的な特性を把握し、さらに水質の時間的な変化をも推定するためにGISの技術も適用した。また、衛星画像から水質を推定するモデルの精度を高めるために沿岸各県の観測データだけでなく、著者の研究室独自の現地観測結果も用いた。有明海湾奥部の固定された観測点における現地観測を約5ヶ月実施したのでその結果についても報告する。

2. 研究方法

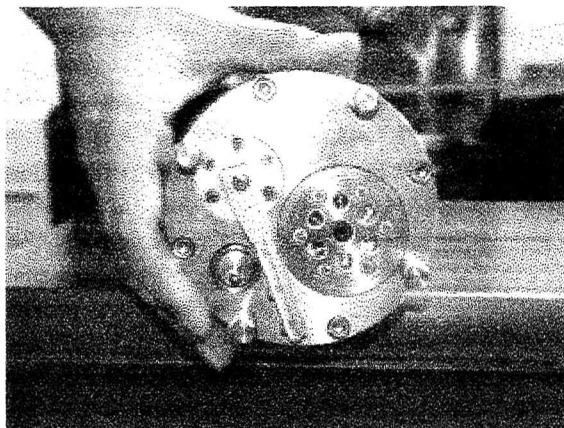
上述のように、有明海沿岸各県は浅海定線調査により過去20年以上に渡って毎月大潮満潮時に多項目の水質観測を続けており、著者らはこの膨大なデータ並びにランドサットTM、ETM+データを収集した。衛星画像から水質を推定するモデルを構築するためには、水質観測日時と同一時刻の衛星画像が必要である。ランドサット5号と7号は地表や海水面から放射・反射される輝度を観測しているが、同一地点に戻ってくるまでに16日を要する太陽同期準回帰軌道をとっている。しかも、16日後に必ずしも晴天とは限らないので、利用できる衛星画像は非常に限られてくる。最終的に8枚の衛星画像が水質推定モデル構築のために利用可能であることが分かった（表－1）。沿岸各県は浅海定線調査以外にも赤潮調査（県によって名称は異なる）などでクロロフィルa濃度の測定を浅海定線と異なる地点において、異なるスケジュールで実施しており、クロロフィルa推定式のモデリングのためには僅か3枚の衛星画像しか利用できないことも分かった。

これらの衛星画像は幾何補正、大気補正などを行った後、現地観測結果との回帰解析を行った。観測地点の和は最大51点であるが、各県毎に観測日が異なった時期もあり、観測日が違うものは回帰解析から排除した。大気補正にはLowtran7という大気補正プログラムを採用し、そのプログラムで必要な気象条件として風速、降水量、気温ならびに視程を用いた。

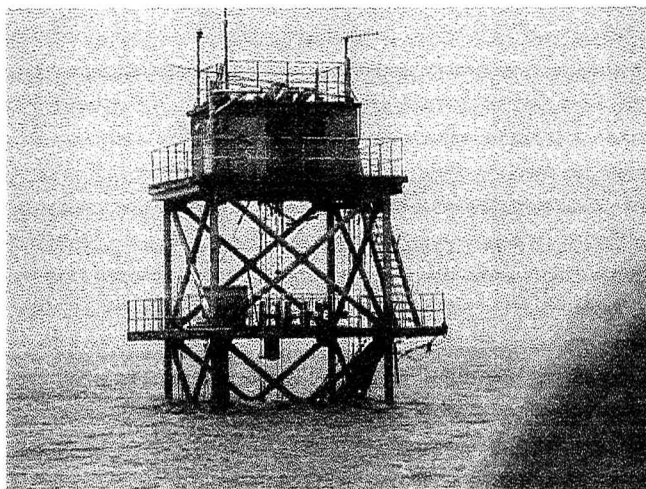
著者の研究室では、ランドサットが有明海の衛星画像を取得する日時にできるだけ近い時刻に有明海湾奥部11地点で幾つかの水質項目を測定する現地観測を2001年度より続けている。観測に使用している機器は、堀場製作所のマルチモニタリングシステムU-22とW-22P並びにアレック電子のクロロテックモデルACL-104-8Mである。前者のU-22とW-22Pはポータブルの多項目水質計で、pH、DO、塩分濃度、水温、濁度など10項目の測定を瞬時に行うことができる。W-22Pは船から水中へ沈めて測定に用いた。U-22は以下で述べる有明海観測塔に設置して水質の連続測定に用いた。後者のクロロテックは、水中に

表－1 水質推定アルゴリズム構築のために用いたランドサットTM, ETM+データ

観測年月日	センサー	観測時刻 (JST)
1988/04/15	TM	10:23AM
1988/11/09	TM	10:24AM
1995/08/25	TM	9:56AM
1998/04/27	TM	10:30AM
2000/05/02	TM	10:29AM
2000/11/10	TM	10:32AM
2001/10/20	ETM+	10:42AM
2002/03/13	ETM+	10:42AM



写真－1 クロロテックとそのワイパー



写真－2 佐賀大学有明海観測塔

沈めてクロロフィル、濁度、水温を長期間連続観測可能な長期設置型のセンサである。それを可能にしているのが大容量のメモリ・バッテリーとセンサ面を拭き取るワイパーである（写真－1）。クロロテックは佐賀大学有明海観測塔（写真－2）の中央の底部に水面から1m下に常に位置するようにフロートに接続し、約5ヶ月間の観測を行った。U-22はこのクロロテックの直下に約3ヶ月間の水質変動を測定するように設置した。この有明海観測塔の場所は、有明海湾奥部、早津江川滞筋の端部に位置し、その座標は北緯33°05' 52"、東経130°16' 42"である。この地点の潮流は早津江川、筑後川からの流出と

地形性の流れのために速い。その他、佐賀大学観測塔周辺に設置してある国土交通省の水位観測塔のデータも利用した。

3. 水質推定のための回帰モデル解析

(1) 透明度 (Transparency, Secchi disk depth; SDD)

海水の透明度 (SDD) は、海水中に含まれる土粒子や有機物などのために太陽光線の透過が阻まれるのを利用して海水の清澄の度合いを水深 (m) で表す水質指標である。理論的には衛星センサが受け取る輝度の量は透明度の逆数に関係し、両者の経験的な関係を導き出すことが可能である。相関解析によりランドサット TM、ETM+ の可視バンドは透明度と負の相関があることが分かっている。

大気補正プログラム Lowtran7 で補正したスペクトル放射輝度の割合を見てみると、可視バンド (バンド 1 から 3) は他のバンドに比べてモデルに対してより大きい影響を与えることも明らかとなっている。回帰解析において多くのアルゴリズムを試した結果、以下のモデル式が透明度を推定するために最も良い精度を与えることを著者らは既に得ている³⁾。

$$\sqrt{SDD} = 1.8041 + 0.1472TM_1 - 0.2652TM_2 + 0.1076TM_3 \quad (1)$$

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

(2) クロロフィル a (Chlorophyll-a, CHL)

自然界にはクロロフィル a, b, c, d が存在するが、全ての藻類に含まれているのがクロロフィル a である。クロロフィル a 濃度は水域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ている。海水面から放出される光の波長分布はクロロフィル濃度の大きさにより異なるが、TM のバンド 2 (波長 0.52-0.60 μm) 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 を組み合わせてクロロフィル濃度を推定する試みがなされてきた^{4) 5)}。著者らも幾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に相関係数が低い結果しか出せなかった。得られている回帰式は以下の通りである³⁾。

$$\log(CHL) = 2.34 - 0.33(TM_2 / TM_4) \quad (2)$$

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。

(3) 塩分濃度 (Salinity, SAL)

塩分濃度の推定については、特定のバンドとの相関が見られなかったため以下の回帰式を用いた。

$$SAL = \exp(3.3778 - 0.00567TM_1 + 0.00017TM_2 - 0.00717TM_3 + 0.02687TM_4 + 0.00967TM_5 - 0.03207TM_6 + 0.03527TM_7) \quad (3)$$

4. GISを利用した有明海の水質特性の把握

有明海沿岸各県の浅海定線調査資料の量は膨大である。数字だけからは分かりにくい貴重な資料に対して GIS (地理情報システム) を利用して有明海の季節的、空間的な水質特性を把握することを試みた。さらに、最近 10 年間の変動特性を概観し、気象条件や水文資料との関連についても考察した。

今回、GIS を用いて可視化したデータは佐賀、福岡、熊本各県の浅海定線調査資料 (合計 51 地点) の中の透明度、水面温度、塩分濃度 (水面のみ) の 3 つである。使用した GIS ソフトウェアは、ESRI 社の ArcView3.2 及び Spatial Analyst Extension である。各県の観測地点の緯度・経度は既知であるので、各地点における測定データを属性データとして ArcView へ取り込み、スプライン補間により面的データとして可視化を行った。

GIS の適用により得られた結果は以下の通りである。

(1) 透明度

一般的な傾向としては、湾奥から湾口にかけて透明度は高くなっている。季節変化としては透明度は夏から秋にかけて低下し、また、冬から春にかけては湾口部の透明度は上昇している。また、1996 年頃より湾口部の透明度が上昇する傾向が見られた。透明度は特に降水量との関連が高く、夏季の降水量が多い時期に透明度が低くなる傾向があり、また、水深が浅く外海から遠い湾奥部で同じく透明度が低くなる。近年の透明度の上昇は、平均水位の上昇や流速低下による底泥の巻き上げの減少と関連があると考えられる。

(2) 塩分濃度

塩分濃度については、一般的な傾向として、外海に近づくほど上昇し、湾奥では河川水の供給があるため塩分濃度は低い値を示す。また、夏季に降水量が多いためこの時期は一般的に塩分濃度は低い。しかしながら、1994 年と 2000 年については濃度低下がさほど顕著でない。その理由は 2 つの年が小雨の年で似ていたことによる。

(3) 水面温度

冬季における水面温度は平均 10℃ 前後で、夏季は平均 25℃ ほどを示す。水面温度は気温、あるいは陸地の地面

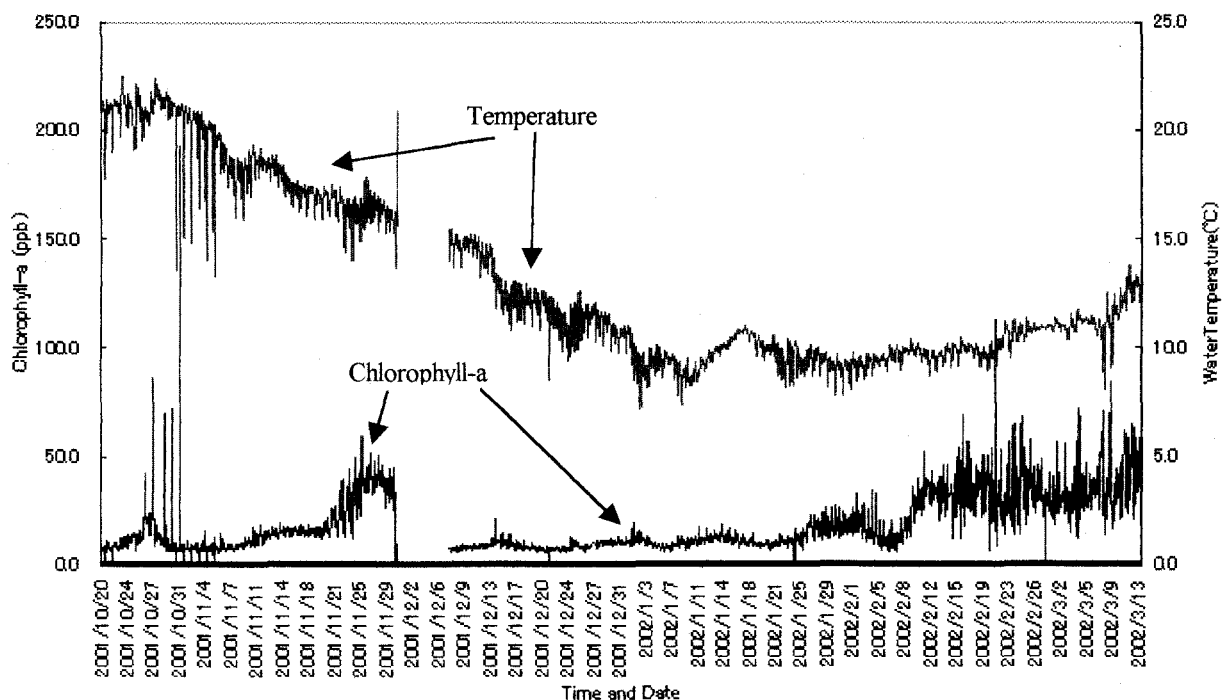


図-2 観測塔におけるクロロフィルa と水温の変動

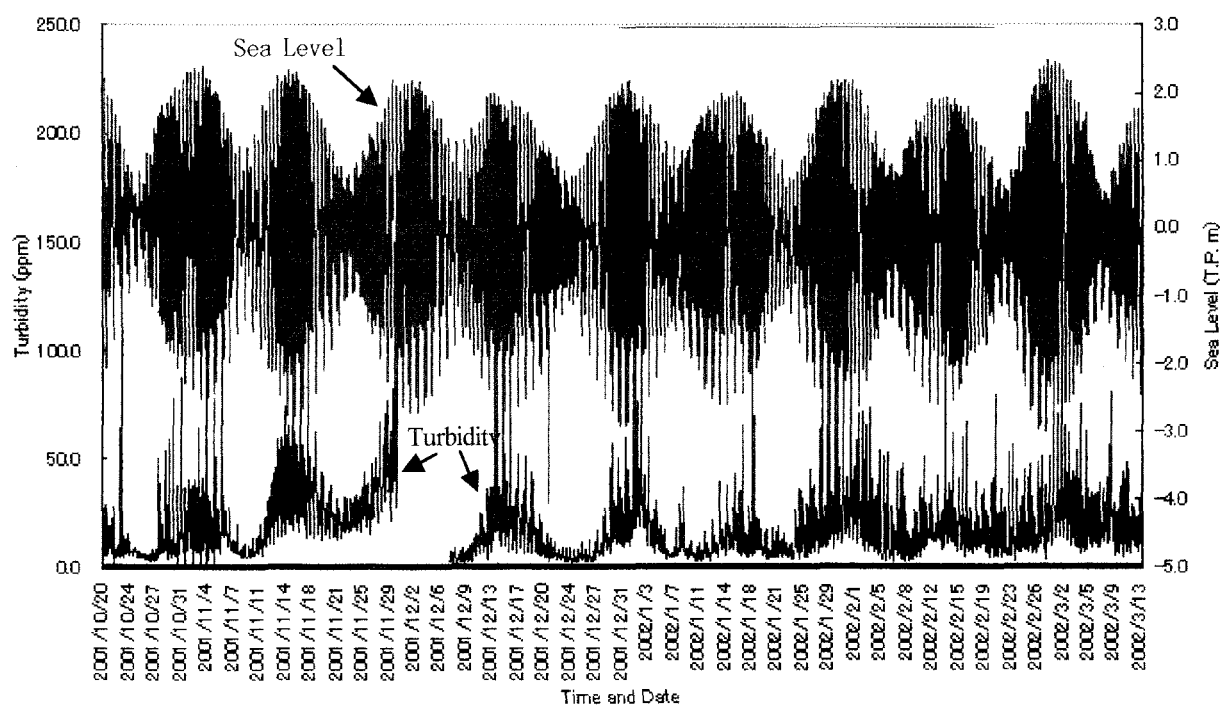


図-3 観測塔における濁度と潮位の変動

温度と連動し、特に水深の浅い湾奥部は冬季、夏季ともにより追従する傾向にある。しかしながら、1997年以降、12月の海水面温度が上昇傾向にあることも分かった。

5. 現地観測の結果

図-2は有明海観測塔において2001年10月20日から2002年3月13日までの約5ヶ月間、クロロテックにより観測されたクロロフィルa濃度と水温の変動を表すグラフである。1週間の欠測はクロロテックのメンテナンスのためである。水温は徐々に下がり、1月上旬に最低点(約7℃)を示している。クロロフィルaは春になって増

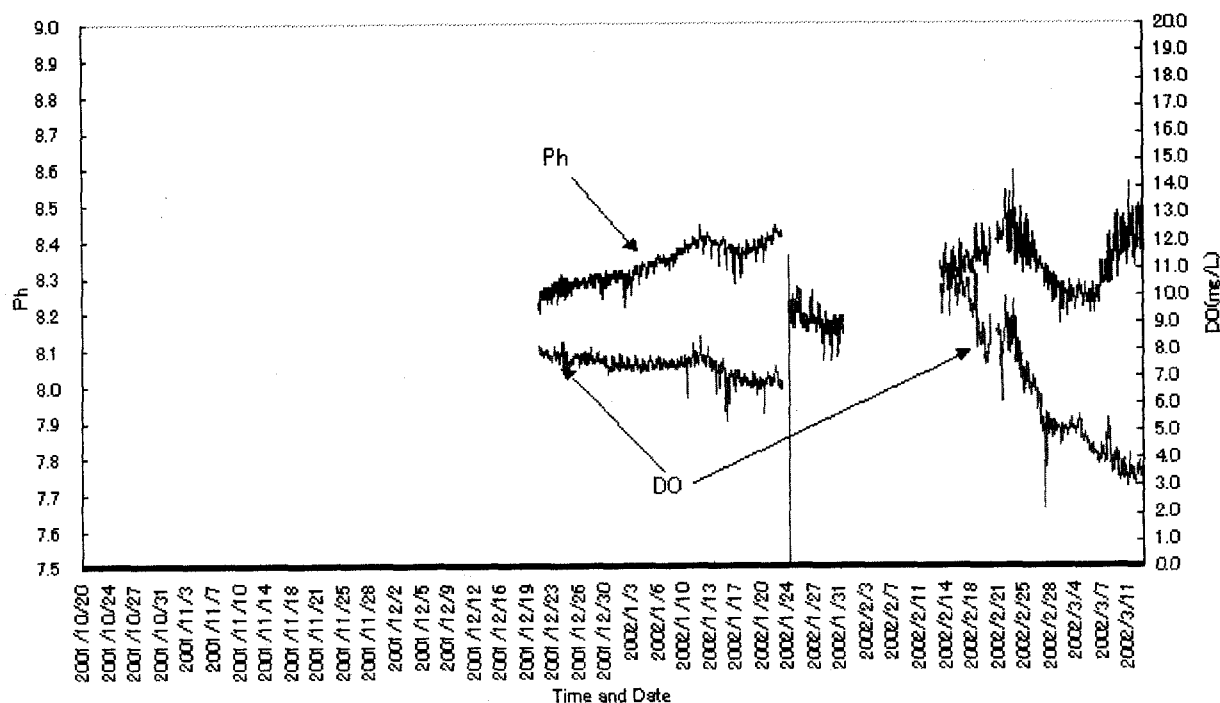


図-4 観測塔におけるpHとDOの変動

加し始めている。これを春のブルーミングと呼んでいる。2001年11月にもクロロフィルaは若干増加している。

図-3は、佐賀大学観測塔のクロロテックで測定した濁度の変動と、国土交通省の観測塔で測定した潮位変動（T.P.値）の記録である。2つの観測塔間の距離は約3kmで、潮汐などのゆっくりした変動を考える際には潮位変動の時間差、潮位の絶対値の差などはほとんど考えなくて良い。すなわち、ほとんど同一地点での観測と見なして良いと思われる。このグラフを見ると、濁度は潮位変動と同期して変化しているのが分かる。特に大潮の時期は潮位差が大きく、潮流が速いことから海底面近くの泥を巻き上げる量が増えるためだと考えられる。沿岸各県の浅海定線調査では、毎月大潮満潮時に水質観測を行っており、濁度あるいは透明度に関しては一番濁っている時期に観測していることになる。一方、図-2ではクロロフィルaの変動記録が示してあるが、クロロフィルaは必ずしも濁度と同じ変動特性は示していない。これは、植物プランクトンが濁度、つまり海水中の濁りだけに依存せず、さまざまな条件（例えば、栄養塩、日射量、風速など）に依存しているからである。濁度は潮位変動や降水量に応じて変動するが、クロロフィルaはそれ以外の影響因子が複雑に影響しあっていると考えられる。

さらに、図-4ではU-22による3ヶ月間の水質測定結果の一部を示している。pHとDOの変動を示しているが、pHについては8.2～8.4を示している時期がほとんどであるが、年が明けて1月下旬になると8.1～8.0あたりに下

がっている。DOは2002年2月以降減少傾向にあり、クロロフィルaの増加傾向と何らかの関係がありそうである。

図-5は、以上の観測期間中の降水量と全天日射量の日データを佐賀地方気象台の気象月報よりプロットしたものである。10月末から11月上旬にかけてまとまった雨が降り、11月は好天が続いたため植物プランクトンの増殖が起こったものと思われる。その結果、図-2のようなクロロフィルaの上昇が見られたと想定される。

6. 衛星画像による透明度分布の推定

定点で現地観測を開始した2001年10月20日と終了した2002年3月13日にはそれぞれ午前10時半過ぎにランドサット7号が有明海上空に飛来して衛星画像を取得している。両日とも天候は快晴で雲による影響はほとんどなく、良好なETM+画像を得ることが出来た。これらのETM+データに対して式(1)及び大気補正プログラムを適用して透明度の推定分布図を作成した。図-3からも明らかに2枚の画像取得時はどちらも大潮時である。したがってどちらの時期の濁度も確かに高い。しかし、湾口付近、すなわち島原半島最南端の口之津付近から島原半島の南側の湾内にかけては3月13日の透明度がより高いことが両図より分かった。このように、衛星リモートセンシングと長期間の連続現地観測あるいは定期的なスポット観測を組み合わせることにより、両者の長所がうまく機能することが分かる。

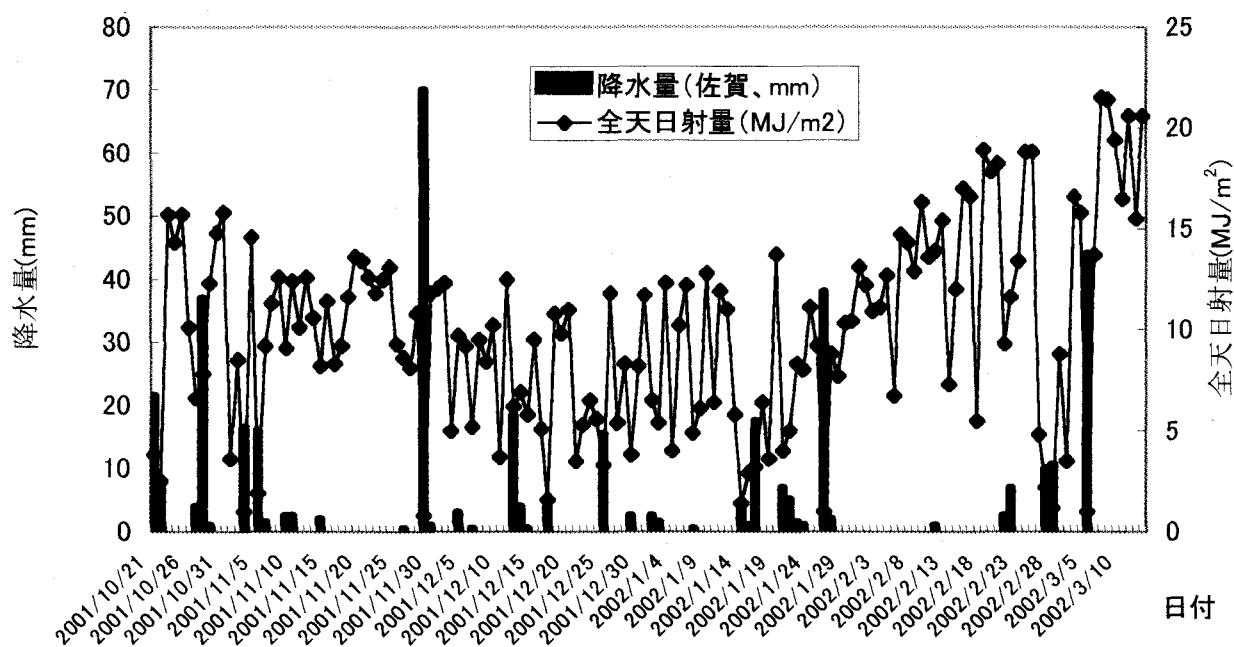


図-5 佐賀地方気象台観測の降水量と全天日射量

7. 結論

本研究では、有明海湾奥部の水質評価を行うために、人工衛星ランドサットのTM/ETM+データ、沿岸各県の浅海定線調査資料を収集・解析し、さらに著者ら独自の現地観測を加えて水質推定アルゴリズムの開発並びに有明海の水質特性についての考察を行った。得られた結論は以下の通りである。

(1) 現地調査および浅海定線調査資料により有明海の透明度、塩分濃度、クロロフィルa濃度などの推定アルゴリズムを構築できた。クロロフィルaについては更に現地調査が必要である。

(2) 各県の浅海定線調査資料の量は膨大であるが、GISを用いて可視化することで、有明海の季節的、空間的な水質変動特性を理解することができた。また、10年間の各月のデータを可視化することで、気象変動やその他の影響因子をより詳細に考察できた。

(3) 佐賀大学有明海観測塔において5ヶ月の長期的な水質変動特性について連続観測を行うことで、浅海定線調査や衛星画像では得られない短いタイムスケールの現象についても検討することができた。

(4) 以上のように沿岸各県の大潮満潮時の毎月1回の調査と人工衛星による広域のスペクトル画像情報、さらに観測塔における長期連続観測を組み合わせることで、お互いの長所を生かした調査が可能なが分かった。

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/ETM+データは宇宙開発事業団より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) 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, pp.47-64, 2000.
- 2) Ohgushi, K., Gan, T.Y. and Araki, H.: A study on estimation of water environment in Ariake Sea using remotely sensed data, *Proc. of 12th Congress of APD-IAHR*, Vol.3, pp. 597- 607, 2000.
- 3) 大串浩一郎, Thian Yew Gan, 荒木宏之: 人工衛星を用いた有明海の水質解析, *水工学論文集*, 第46巻, pp. 995-1000, 土木学会, 2002.
- 4) 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.
- 5) 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. (2002. 9. 30受付)