

## 定点観測およびリモートセンシングデータを用いた 大分県周辺海域における水塊分析\*

久保田直治\*\*・羽野 忠\*\*\*・滝田 祐作\*\*\*・島崎 孝\*\*・宮澤 正\*\*\*\*

### Characterization of water masses in the sea area around Oita Prefecture with monthly observational data and remote sensing data\*

Naoji KUBOTA\*\*, Tadashi HANO\*\*\*, Yusaku TAKITA\*\*\*,  
Takashi SHIMAZAKI\*\* and Tadashi MIYAZAWA\*\*\*\*

**Abstract:** Distribution of water masses in the sea area around Oita Prefecture were investigated, employing monthly observational data at 54 stations (1965-1988) and Landsat Multi Spectral Scanner data (February 4, 1988). The averaged water temperature and salinity were used for cluster analysis. Landsat digital data were combined with transparency measurements, one of water quality parameters, and regression model was developed between them. The transparency model obtained was then extended to the entire study area for mapping the spatial distribution of water quality in the western Seto Inland Sea. The results of transparency map were completely consistent with those of cluster analysis on the water temperature and salinity; the sea area around Oita Prefecture was subdivided into several subareas. A coastal front was observed off the coast of Kunisaki Peninsula in the Iyo Nada. There was a isolated mixing zone in Hayasui Strait, where water temperature, salinity, and transparency were approximately uniform due to strong tidal currents. Beppu Bay was a semi-closed area, which was characterized by large seasonal variations of water temperature and salinity.

#### 1. 緒 言

内海などの閉鎖性海域は古くから人間活動の場として利用されてきたが、この海域は同時に、海水の交換

が悪く汚染に対して弱いという側面を持っている。したがって、その海洋環境の監視、保全、管理には特別の配慮が必要となる。

瀬戸内海は我が国最大の内海であり、豊後水道や紀伊水道などのわずかな部分でしか外洋とつながっていないため、これらの水道付近の水塊特性について解析すれば、瀬戸内海における汚染物質などの動態把握が可能になると考えられる。しかしながら、沿岸海洋の諸現象は外洋に比べて時間的および空間的な変化が大きいので、従来の離散的に配置された観測的による観測では、海洋環境の大局的な情報は得られても空間的に密な情報は得られにくく、広範囲にわたる水質モニタリングには手間を要す。これに対し、飛行体によるリモートセンシングデータは、対象とする全海域に水質パラメータをマッピングするのに優れていると考えられる。既に、ランドサットなどの人工衛星によるリ

\*1991年3月31日受理 Received March 31, 1991

\*\*大分大学工学部海洋生産工学センター、〒870-11 大分県大分市大字旦野原700 Marine Science Laboratory, Faculty of Engineering Oita University, Dannoharu, Oita, 870-11 Japan

\*\*\*大分大学工学部化学環境工学科、〒870-11 大分県大分市大字旦野原700 Department of Environmental Chemistry and Engineering, Faculty of Engineering, Oita University, Dannoharu, Oita, 870-11 Japan

\*\*\*\*大分県水産試験場、〒879-26 大分県南海部郡上浦町大字津井浦  
Oita Prefectural Fisheries Experimental Station, Kamiura, Minamimabe-gun, Oita, 879-26 Japan

モートセンシングデータを使った水質モニタリングが数多く試みられており、リモートセンシングは浮遊物質やクロロフィルの分布予測に適していることが明らかにされている(たとえば ARANUACHAPUN *et al.*, 1981; 安岡・宮崎, 1983, 1985; KHORRAM, 1985; RUTTNER *et al.*, 1987)。

そこで本研究では、まず伊予灘、別府湾および豊後水道の大分県周辺海域における定点観測データを使って、統計的な手法で水塊分析を行った。また、ランドサットリモートセンシングデータから水質パラメータのひとつである透明度に対する回帰モデルを得、これを対象海域に展開して水塊分析を試みた。そして、両者の水塊分析結果について比較検討を加えた。このようなリモートセンシングデータを使って水塊分析ができれば、瀬戸内海や別府湾の海洋環境アセスメントを行う上でも有用な手段の一つとなろう。

## 2. データおよび解析方法

### (1) データ

大分県水産試験場(1965-1988)は、毎月1回伊予灘、別府湾および豊後水道の54定点で海洋観測を行っている。Fig. 1に各観測点(Stn.1-54)の位置を示した。1965年4月から1988年3月までの23年間の各観測点における水温、塩分、透明度、天候、気温および伊予灘と別府湾におけるDO、COD、窒素、リンなどの栄養塩類についてデータベースを構築し、解析に用いた。定点観測データは、毎月10日前後に得られたものであり、水温および透明度は1965年から、塩分は1969年からのものである。また、各観測点の海面における欠測数は、水温で平均21個(最大35個、最小7個)、塩分で平均21個(最大38個、最小11個)あった。ただし、水深が増すにつれて欠測数は増加する。

さらに、定点観測日と同じ1988年2月4日におけるランドサット5号のMulti Spectral Scanner (MSS)補正済みデータ磁気テープ(CCT)をリモートセンシング技術センターより購入し、解析に用いた。

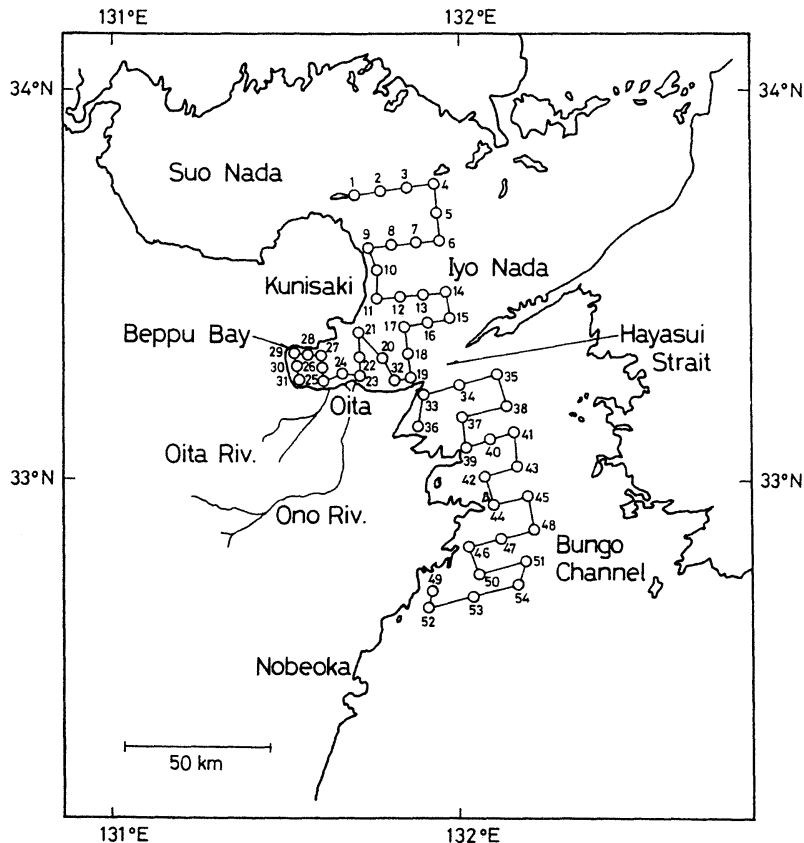


Fig. 1. Observation stations by Oita Prefectural Fisheries Experimental Station.

(2) 水温-塩分解析

水塊分布を把握するのに有効な水温-塩分 (T-S) ダイアグラムを作成した。まず、各観測点ごとに海面、5, 10, 20, 30, 50 および 75m の水深における水温および塩分の 23 年間のデータを月別に平均した。得られた各水深における全観測点の平均水温および平均塩分を月別にプロットした。

(3) クラスタ分析

前項で得られた各観測点の海面における月別平均水温および月別平均塩分の 24 項目を変量とし、クラスタ分析を行った。座標上における各観測点の標準ユークリッド距離を計算し、ワード法で分類した。

(4) ランジサットデータの解析

ランドサット CCT は、大分大学海洋生産工学センターの画像解析装置 (日本電気 TGD-612) に合うようフォーマットし直した。各観測点に一致したピクセルを中心にして、9 個のピクセルブロック (3 × 3) に

おけるランドサット MSS データのバンド 4, 5, 6 および 7 の各放射輝度のカウント値をそれぞれ平均した。得られた各平均値は、以下に示す重回帰分析の独立変量として用いた。

1988 年 2 月 4 日の伊予灘および別府湾における 24 の各観測点の透明度の実測値と、ランドサットの各バンドの平均放射輝度との間に最も高い相関が得られるように、各バンドの比や組合せを逐次変えながら重回帰分析による回帰モデルを検討した。得られた最も高い相関係数の回帰式を対象海域における全ピクセルに適用し、水質パラメータの予測値として出力した。また、この予測値を 7 つのレベルにスライスし、カラーコード化することにより水質をグループ分けした。結果は、カラープリンターで出力した。

3. 結果

(1) 水温および塩分の季節変動

得られた T-S ダイアグラムのうち、2 月、5 月、8 月および 11 月をそれぞれ冬季、春季、夏季および

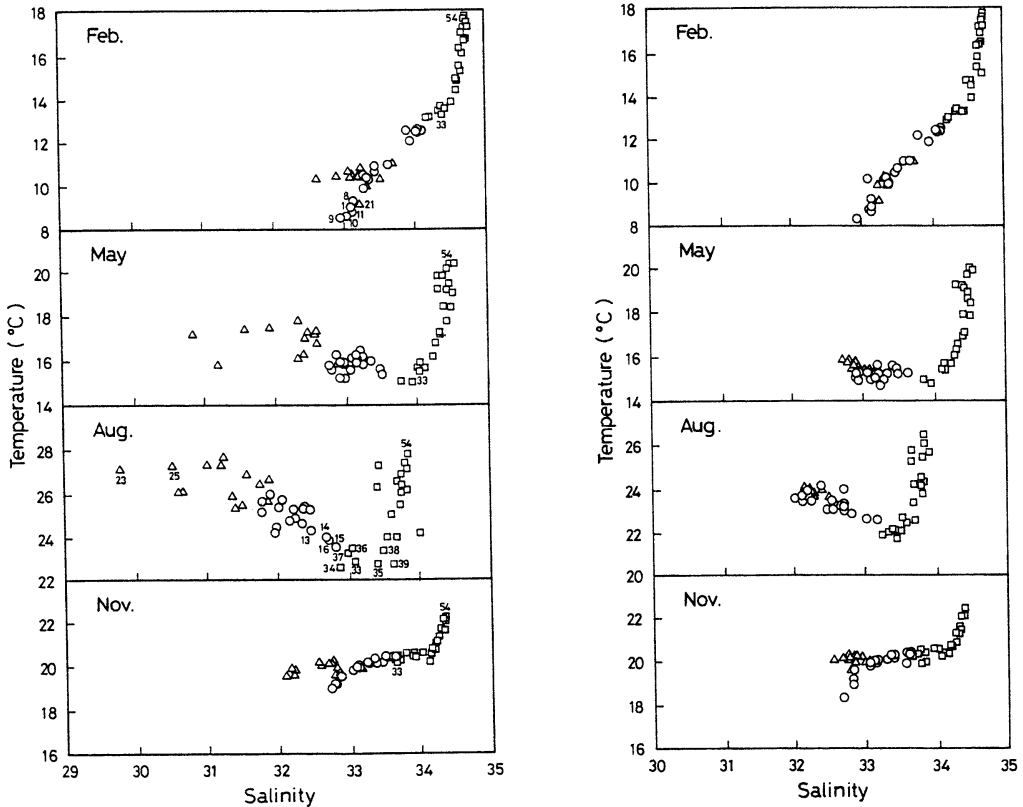


Fig. 2. Seasonal variation of water temperature-salinity diagrams. ○, Iyo Nada; △, Beppu Bay; □, Bungo Channel.

秋季の代表として、海面および10mの水深のものを Fig. 2 に示した。豊後水道における海水は、いずれの季節にも Stn. 54 から 33 へ水道を北上するにつれて水温のみが大きく低下し、塩分の変化は小さい。一方、伊予灘および別府湾では塩分が大きく変化しており、水温も各季節ごとに特徴ある変化を示している。なかでも、冬季の国東半島沿岸および夏季の別府湾は、以下に示すように独立の海域であることがわかる。

まず、2月のT-Sダイアグラムから、国東半島沿岸の Stn. 1, 8-11 および 21 だけが9℃前後の低温であり、伊予灘の海水との水温差が著しいことがわかる。国東半島沿岸では冬季に特有の冷水塊が沿岸フロントを形成することが報告されており (YANAGI, 1980; YANAGI and KOIKE, 1987), これは冬季の強い北西季節風による冷却と淡水供給が原因と考えられている。また、8月の別府湾は、海面で著しく高温かつ低塩分の水塊を形成している。特に、大野川および大分川の河口域である別府湾の Stn. 23 および 25 付近の海水は最も低塩分となる。しかしながら、10mより深いところでは、別府湾も伊予灘もほぼ同じ水温およ

び塩分になってくる。

さらに、5月および8月には伊予灘北部および豊後水道南部の海水はともに水温が高く、速吸瀬戸付近の Stn. 13-16 および 33-39 の狭い海域だけ低温になっていることがわかる。これは、豊後水道における8月の水温の鉛直分布 (久保田ら, 1990) でより明確に示されている。

## (2) 海域の分類

以上のように、海面における水温および塩分は季節変動が大きく、海域の特徴をより強く表していると考えられる。そこで、海面の月別平均水温および月別平均塩分を用いて各観測点をクラスター分布し、水塊分析を試みた。その結果、Fig. 3 のようなデンドログラムが得られた。ここでは、上で述べたT-S解析の結果および鉛直方向のT-S解析の結果 (久保田ら, 1990) を考慮して、①伊予灘、別府湾および豊後水道がそれぞれ別々のグループに分かれること、②速吸瀬戸付近に潮流による混合海域があること、③国東半島沿岸に伊予灘から独立したグループが形成されること、

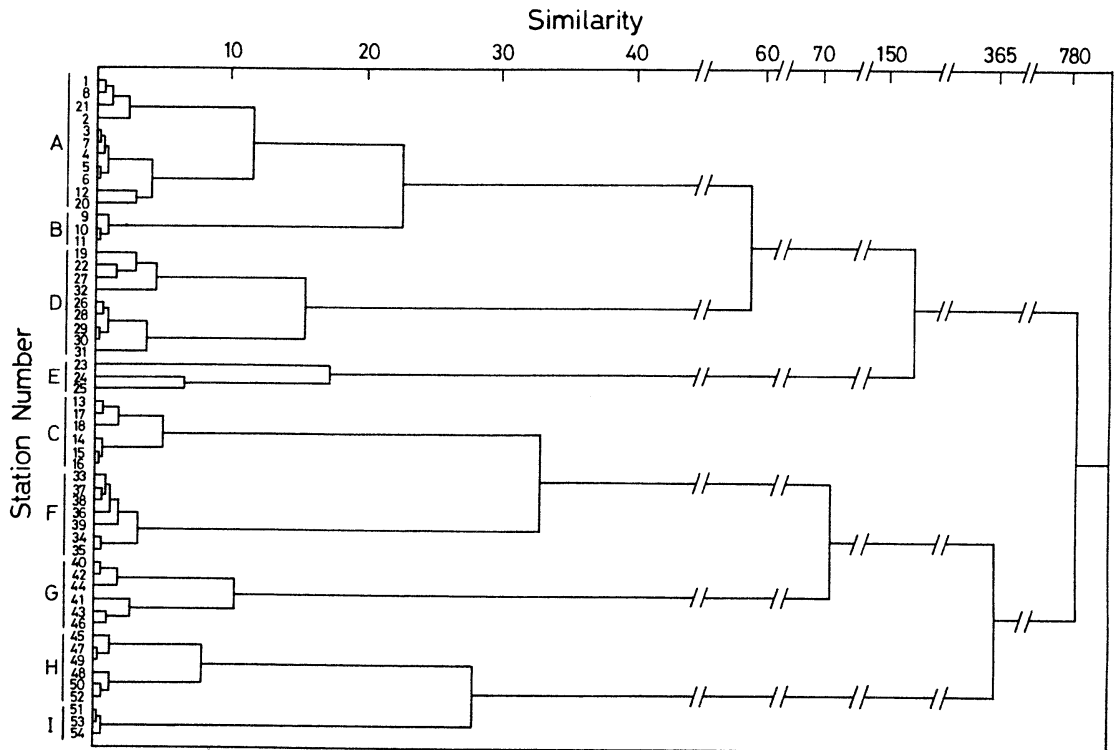


Fig. 3. Dendrogram showing the results of cluster analysis on surface water temperature and salinity.

④大分川および大野川河口域に別府湾とは別のグループがあること、を必要条件として標準ユークリッド距離が20のところまで分類するとにした (Fig. 4)。さら

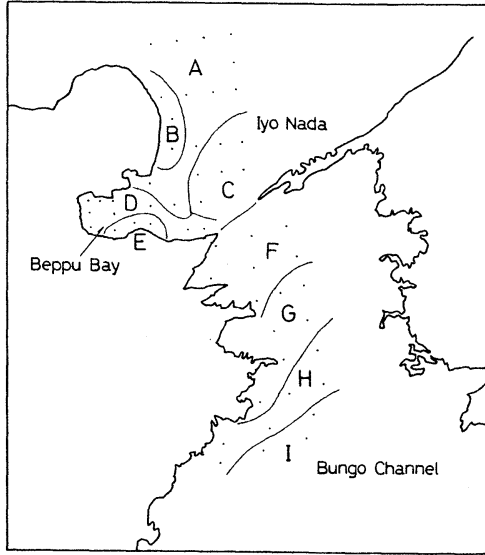


Fig. 4. Schematic representation of sea area classified with cluster analysis. Alphabetical codes correspond to those in Fig. 3.

に、この分類図をもとに各クラスターごとに水温および塩分を月別に平均し、そのT-SダイアグラムをFig. 5に示した。

Fig. 5によれば、伊予灘および別府湾においては、冬から夏にかけてと夏から冬にかけてのT-Sダイアグラムが重ならない、いわばヒステリシス現象というべき図形が得られたが、豊後水道ではほぼ直線的な変化を示している。

クラスターAは、国東半島沖の伊予灘に属する海域であり、秋から冬および冬から春にかけて温度差が大きく塩分差は小さい傾向で、逆に春から夏および夏から秋にかけて温度差は小さく塩分差が大きい傾向を示している。しかし、同じ瀬戸内海に属するクラスターでもBおよびCでは11月から3月にかけての挙動がかなり異なっている。すなわち、国東半島沿岸のクラスターBでは、秋から冬にかけて塩分はほとんど変化せずに温水のみが急激に低下し、この時期に沿岸フロントが発達する。また、逆に冬から春にかけては塩分が高くなっている。速吸瀬戸の北側に位置するクラスターCでは、冬季の温水低下はあまりなく、塩分も34を越えクラスターAと後述する豊後水道のクラスターとの中間の塩分を示す。しかしながら、春から

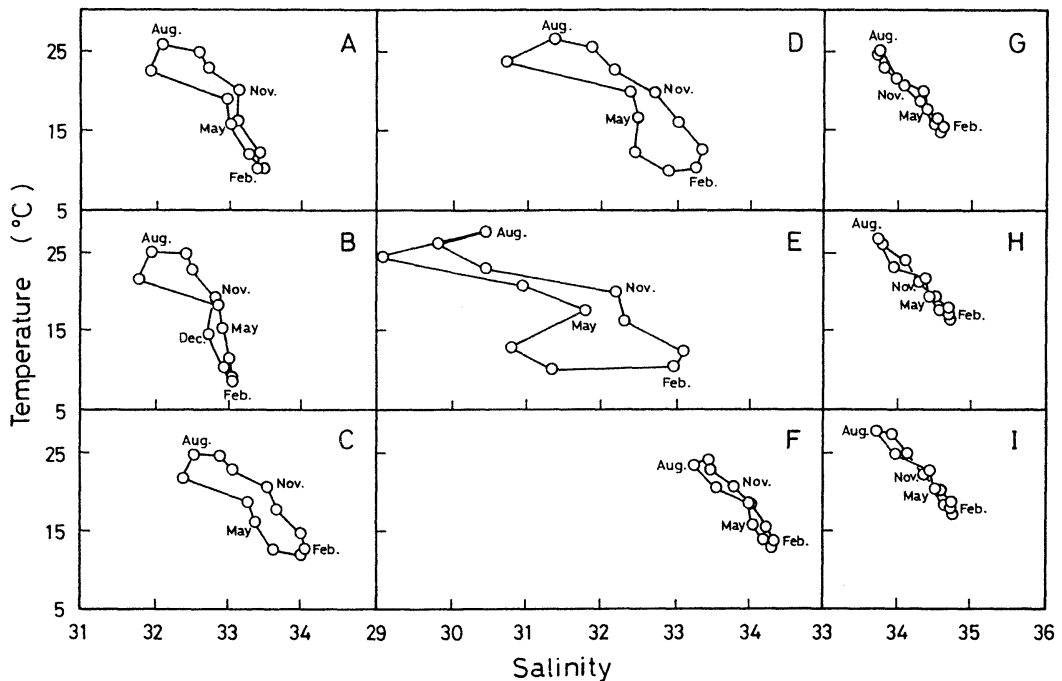


Fig. 5. Seasonal variation of averaged water temperature and salinity at sea surface. Alphabetical codes correspond to those in Fig. 3.

夏にかけて豊後水道より低塩分になるため、豊後水道のクラスターより T-S ダイアグラム上での占有面積が広がっている。別府湾内のクラスター D は、河川からの陸水の流入に起因する全体的に低い塩分と、T-S ダイアグラム上での占有面積が伊予灘より広いことで特徴づけられる。この極端な例が、大分川および大野川河口付近のクラスター E である。ここでは、春季の雪解け水、梅雨期および秋雨期の降雨による河川水流入に起因する、塩分の著しい変化が特徴である。

一方、速吸瀬戸南側のクラスター F では、瀬戸北側のクラスターと異なり、直線的な変化を呈している。豊後水道を南下するにつれて、さらに高温高塩分で季節変化の小さい直線的な T-S ダイアグラムが得られ、より黒潮本流の季節変動（国立天文台、1990）に近づいていると考えられる。

### (3) 水質モデル

人工衛星からのリモートセンシングでは、大気による散乱光や水面での反射光などの雑音が大きく、精密なリモートセンシングを行うにはこのような効果を除く必要がある（GORDON *et al.*, 1983）が、今回用いたデータは快晴の 2 月のものなのでエアロゾルなどはきわめて少なく均一であるとみなし、そのまま処理した。また、リモートセンシングデータと水質パラメータの回帰分析には種々の方法が考えられる（安岡・宮崎、1983）が、今回は重回帰分析を用いた。その結果、定点観測データとランドサット MSS データ平均カウント値との間に最も高い相関を示す次の重回帰モデルが選択された。

透明度モデル

$$Y_T = 191.88 - 74.36 \times \ln(X_4) + 0.53 \times (X_6)^2$$

$Y_T$  = 透明度 (m)

$X_4$  = ランドサットデータのバンド 4 における平均カウント値

$X_6$  = ランドサットデータのバンド 6 における平均カウント値

得られた透明度モデルは、バンド 4 およびバンド 6 との相関が高いことを示している。バンド 4 およびバンド 6 の波長帯域はそれぞれ 500–600 および 700–800nm であり、海水中の浮遊物質により 520 および 540nm の波長の分光反射率が高くなる（安岡・宮崎、1985）ことから、本モデルもバンド 4 の寄与が大きいと考えられる。この透明度モデルの重回帰係数 R は、0.84 であり、F 値は棄却率 0.01 以下の水準であった。

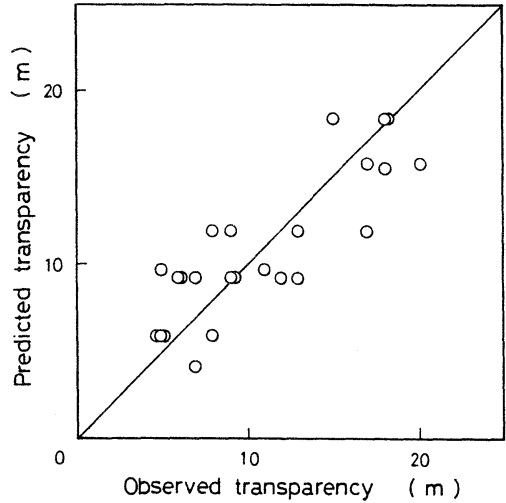


Fig. 6. Observed values versus predicted values based on transparency model.

すなわち、重回帰係数は回帰モデルと水質パラメータの近さを表わし、F 値はスペクトルの変化で水質パラメータの変化を説明し得ることを示している。実測値と予測値の分散を Fig. 6 に示したが、互いによく相関を示している。そこで、得られた透明度モデルを水塊分析に用いることにした。

得られた透明度モデルを対象とする海域の全ピクセルに展開し、7 つのレベルに分けてカラーコード化した。その水質分布図を Fig. 7 に示した。雲と陸地の部分は白で示してある。また、水質パラメータの値は、透明度 0m から 21m までは暖色系（桃色）から寒色系（黒色）になるにつれて増加するように表示してある。これによると、伊予灘、国東半島沿岸および別府湾で別々の水塊を形成していることが明らかである。特に国東半島沿岸には、周防灘から続いた透明度の低い水塊が出現しているのがよくわかる。これは、冬季の国東半島における沿岸フロントの位置に一致しており、残差流として周防灘系の冷水塊が南下していることをよく表わしている。また、別府湾は透明度が高くなっているが、冬季の鉛直混合の影響を受けても、水深が深いため濁度が増加しないことが原因と考えられる。さらに、緑色で示された潮流による混合域と思われる海域が、速吸瀬戸付近にできていることがわかる。この混合域は、先のクラスター分析による速吸瀬戸の北と南の混合海域の Stn. 13–18 および Stn. 33–39 に相当するものである。

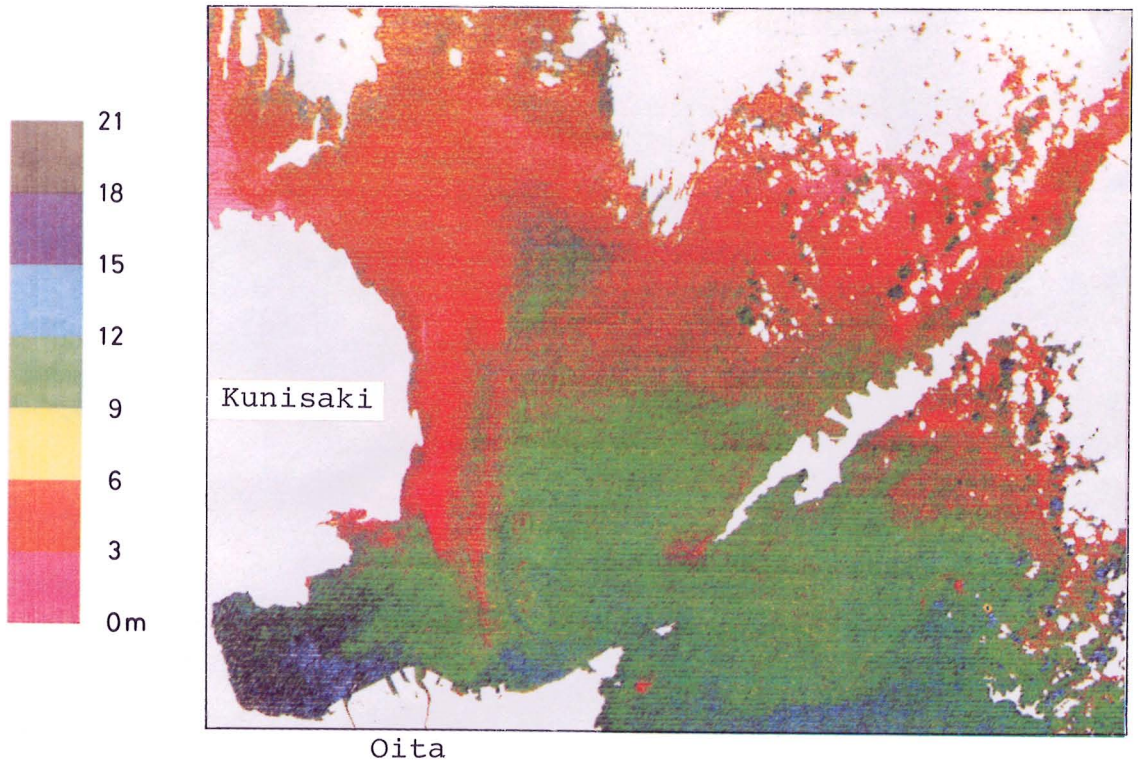


Fig. 7. Transparency map of the study area, derived from Landsat digital data (February 4, 1988).

#### 4. 考 察

T-S 解析から夏季に速吸瀬戸付近だけ低温になることがわかったが、これは、伊予灘北部および豊後水道南部では夏季の表面加熱によって成層しているのに対して、速吸瀬戸では最大 4.6kt にも達する 1 日 4 回の潮流（海上保安庁水路部，1987）による水平および鉛直方向の活発な混合により、海面から海底部まで均一な水塊を形成しているためと考えられる。緒方ら（1985a）は、これを NOAA/AVHRR データにより速吸瀬戸における夏季の冷水塊として観測している。また、柳・大庭（1985）や YANAGI and KOIKE（1987）は、潮汐フロントとして報告しており、定量的な把握のためのモデル化も行われている（YANAGI and TAMARU, 1990）。

速吸瀬戸では速い潮流によりクラスター C と D の分割は困難と思われるが、速吸瀬戸の北と南では潮流の速度が異なり混合状態も違うために、別の水塊として分割されたものと考えられる。また、速吸瀬戸に観測点がないこともふたつのクラスターに分割された原因の一つと考えられる。クラスター分析により得られ

た分類図はそれぞれ特徴があり、水塊分析に利用できると考えられる。たとえば、別府湾の Stn. 19 は瀬戸内海側で最も豊後水道に近いにもかかわらずクラスター C ではなくクラスター D に分類される。これは、別府湾には潮汐残差流と思われる左旋回流があるので（緒方ら，1985b），別府湾の水塊の影響を強く受けているためと考えられる。このような残差流により、別府湾南側のコンビナートからの温排水や河川から流入する生活排水は、比較的速やかに豊後水道へ運ばれることも考えられる。また、Fig. 4 に見られるように豊後水道内の各クラスターは北西から南東へ分布しており、秋山・柳（1989）による日向灘定点観測データの解析とも一致している。これは、高温高塩分の黒潮分岐流が四国側を北上し、低温低塩分の内海水は大分県沿岸を南下することを示唆している。

ランドサットデータに基づく透明度モデルによる水塊分析の結果は、定点観測データに基づく T-S 解析およびクラスター分析による水塊分析の結果とよく一致した。透明度は濁度、海色、栄養塩類、クロロフィルなどと関係があるとされており（RAITALA and

JANIUNEN, 1984), 海洋環境をモニタリングするための有効な水質パラメータのひとつと考えられるが, 今回得られた分布図は冬季のものであり, 生物活動がそれほど高くなく, 濁度を強く反映しているものと思われる。このような透明度モデルでも T-S 解析により得られた国東半島の沿岸フロントや速吸瀬戸付近の潮汐フロントが確認できることは, 興味深いことである。これらのフロントは, 汚染物質, 栄養塩類, プラクトンのような物質の蓄積の問題に関して重要であると考えられる。

## 5. 結 論

大分県周辺海域の伊予灘, 別府湾および豊後水道の 54 定点で毎月行われている海洋観測データからデータベースを構築した。このうち 1965 年 4 月から 1988 年 3 月までの 23 年間の水温および塩分データを利用して, 統計的な手法で伊予灘, 別府湾および豊後水道の水塊分析を行った。また, 1988 年 2 月 4 日のランドサットリモートセンシングデータを加えて, 透明度による水質モデルを検討した。その結果, 定点観測データによる水塊分析結果とランドサットデータに基づく水塊分析結果がよく一致することがわかった。瀬戸内海側と豊後水道側とでは水温および塩分の季節変動のしかたが大きく異なっており, 速吸瀬戸付近の海域に潮流による混合域が発生していることも検出できた。この混合海域は, 北側で国東半島沖の伊予灘と, また南側で豊後水道南部との間にフロントを形成していると考えられる。また, 国東半島沿岸で, 冬季に沿岸フロントが生成されていることも検出できた。さらに, 別府湾の閉鎖性も確認された。別府湾の表層水は, 水温および塩分の大きな季節変動が特徴である。

## 文 献

- 秋山秀樹, 柳 哲雄 (1989): 日向灘の水系分布とその季節変動. 沿岸海洋研究ノート, 27, 146-157.
- ARANUVACHAPUN, S. and P. H. LeBLOND (1981): Turbidity of coastal water determined from Landsat. Remote Sensing Environ., 11, 113-132.
- BUTTNER, G., M. KORANDI, A. GYOMOREI, Z. KOTE and G. SZABO (1987): Satellite remote sensing of inland waters: Lake Balaton and Reservoir Kiskore. Acta Astronaut., 15, 305-311.
- GORDON, H. R., D. K. CLARK, J. W. BROWN, O. B. BROWN, R. H. EVANS and W. W. BROENKOW (1983): Phytoplankton pigment concentrations in the middle Atlantic bight: Comparison of ship determinations and Coastal Zone Color Scanner measurements. Appl. Opt., 22, 20.
- 海上保安庁水路部 (1987): 豊後水道及付近潮流図.
- KHORRAM, S. (1985): Development of water quality models applicable through the entire San Francisco Bay and Delta. Photogramm. Eng. Remote Sensing, 51, 53-62.
- 国立天文台 (1990): 理科年表. 丸善, 東京. P. 696.
- 久保田直治, 羽野忠, 滝田祐作, 島崎孝, 堀文昭 (1990): 別府湾を含む伊予灘および豊後水道における海況特性の解析. La mer, 28, 48-57.
- 緒方純俊, 工藤勝宏, 篠原俊夫, 幡司明 (1985a): NOAA/AVHRR データによる豊後水道周辺海域における水塊特性の把握. 日本リモートセンシング学会誌, 5, 5-13.
- 緒方純俊, 工藤勝宏, 吉仲利哲, 土居浩範, 篠原俊夫, 幡司明 (1985b): 別府湾周辺沿岸のリモートセンシング. 日本リモートセンシング学会誌, 5, 19-26.
- 大分県水産試験場 (1965-1988): 漁況海況予報事業結果報告書.
- RAITALA, J. and H. JANIUNEN (1984): Developments in the evaluation of small lake water quality from digital Landsat MSS data, Kuusamo, Northeast Finland. Earth, Moon, and Planets, 31, 249-264.
- YANAGI, T. (1980): A coastal front in the Sea of Iyo. J. Oceanogr. Soc. Japan., 35, 253-260.
- 柳 哲雄, 大庭哲哉 (1985): 豊後水道の Tidal Front. 沿岸海洋研究ノート, 23, 19-25.
- YANAGI, T. and T. KOIKE (1987): Seasonal variation in the thermohaline and tidal fronts, Seto Inland Sea, Japan. Cont. Shelf Res., 7, 149-160.
- YANAGI, T. and H. TAMARU (1990): Temporal and spatial variation in a tidal front. Cont. Shelf Res., 10, 615-627.
- 安岡善文, 宮崎忠国 (1983): 遠隔計測による湖水域の水質分布計測一回帰分布を用いた大気補正と水質推定一. 国立公害研究所研究報告, 第 39 号, 129-143.
- 安岡善文, 宮崎忠国 (1985): 遠隔計測による水質定量. 国立公害研究所研究報告, 第 77 号, 165-185.