

周防灘における透明度の変動特性

平田貴文*¹・千手智晴*²・杉原滋彦*²Spatial and Temporal Variability of Transparency
in Suo-Nada AreaTakafumi Hirata*¹, Tomoharu Senju*², and
Shigehiko Sugihara*²

Spatial and temporal variations of transparency in the Suo-Nada area were investigated on the basis of monthly data obtained from 1973-1985. Transparency is relatively high in the eastern area and gradually decreases to the west. The water of low transparency (<5 m) is seen near the coast throughout the year. The water mass in Suo-Nada is classified into four groups on the basis of temperature, salinity and transparency distributions: open ocean water from Iyo-Nada, northern coastal water off Yamaguchi prefecture, southern coastal water off Fukuoka and Oita prefectures and mixed water of open ocean and coastal waters. The transparency in the northern area shows yearly seasonal variation, though that in the eastern and central areas exhibits a 6-month variation. The transparency off Yamaguchi and Fukuoka prefectures shows a decrease of 2-3 m from 1973 to 1985. EOF analysis revealed that the most prevailing variation is the seasonal one with a period of 12 months which shows an opposite phase between the eastern and other areas. The third mode of the EOF with a period of 6 months shows opposite phases between the coastal area and the central and eastern areas, suggesting that the water from Iyo-Nada and the coastal water alternately occupies the central region of Suo-Nada within a year.

水産大学校研究業績 第1564号, 1997年3月17日受付.

Contribution from National Fisheries University, No.1564. Received Mar. 17, 1997.

*1 水産大学校研究科 (Graduate School, National Fisheries University).

*2 水産大学校海洋生産管理学科 資源環境計画学講座 (Laboratory of Marine Resource and Environment Planning, Department of Fishery Science and Technology, National Fisheries University).

1 はじめに

周防灘は瀬戸内海の西端に位置する、面積が約3,100km²で、大部分の水深が40m以下の海域である(Fig. 1)。東部は黒潮の影響を受ける伊予灘と通じているが、西部は非常に狭い関門海峡のみが響(ヒビキ)灘に通じており、閉鎖性の強い海域となっている。

近年、周防灘では夏季に貧酸素水塊が発生し、沿岸漁業に悪影響を及ぼしている(磯辺ら¹⁾)。一般に沿岸域での海水交換は、海中の酸素供給の一端を担っているため、その過程を把握することは、貧酸素水塊の消長を調べる上で重要である。周防灘の海水交換を支配する、水塊の分布や流動について、これまでに得られた知見を整理すると次のようになる。

- 1) 周防灘(以下「灘」と記す)の水塊は、水温、塩分、栄養塩類の分布から、(1)豊後水道系外洋水、(2)灘固有混合水、(3)山口県側沿岸水、(4)福岡県・大分県側沿岸水、(5)関門海峡系外洋水の5つに分類できる(神戸海洋気象台海洋課²⁾)。
- 2) 伊予灘からの豊後水道系の外洋水は、山口県側より流入し、国東半島に沿って流出する。
- 3) 関門海峡からの響灘系の海水が、周防灘の海水交換に及ぼす影響は小さい。

4) 灘中央部から西部にかけては、停滞性の強い水塊がある。

5) 灘の海水の流動や混合は、主に潮汐流によるものであり、他の海域へ及ぼす影響は少ない(以上、宇田・渡辺³⁾、柳・樋口⁴⁾、神戸海洋気象台海洋課²⁾)。

一方、貧酸素水塊の形成には、海水の移流、拡散のような物理的要因の他に、海水中の溶存酸素濃度や酸素消費速度、一次生産量といった生化学的な要因も関わっている(磯辺ら¹⁾、神蘭ら⁵⁾)。例えば、富栄養化に伴う植物プランクトンの増加は、海中のデトリタスの量を増加させ、結果として底層での酸素消費速度に影響を及ぼす(神蘭ら⁵⁾)。これらの生化学的要因を簡単にモニタリングする指標として、透明度がある。透明度は、海中の植物プランクトンや懸濁物の量と密接に関連しているからである(神蘭ら⁶⁾)。周防灘では、長年にわたり山口県内海水産試験場、福岡県豊前水産試験場(現 福岡県水産海洋技術センター豊前海研究所)、大分県浅海水産試験場が、定期的に水温、塩分の他に透明度の観測を行ってきた。そこで本研究では、周防灘全域にわたっての透明度の空間的な分布や経年変動を調べるとともに、EOF(Empirical Orthogonal Function)解析によって時空間的な変動パターンを抽出し、周防灘の水質環境を明らかにする。

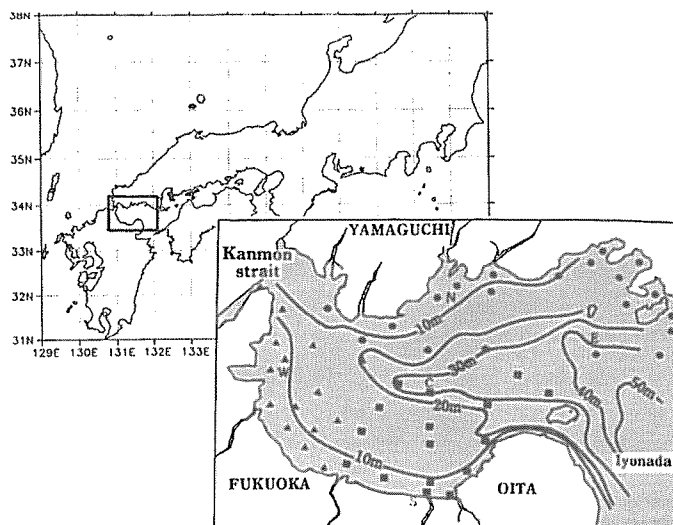


Fig. 1. Bottom topography in Suo-Nada area and location of stations. Solid circles, solid triangles and solid squares indicate stations measured by Yamaguchi Naikai fisheries experimental station, Fukuoka Buzen fisheries experimental station, and Oita Senkai fisheries experimental station, respectively.

2 使用したデータ

本研究で使用したデータは、山口県内海水産試験場、福岡県豊前水産試験場、大分県浅海水産試験場が、1973年から1986年までに観測した透明度、海面水温、海面塩分の資料である。各機関による観測点をFig. 1に示す(●:山口県内海水産試験場, ▲:福岡県豊前水産試験場, ■:大分県浅海水産試験場)。観測点は全部で54点である。観測は原則として毎月1回、各月の上旬に行われているが、天候などの諸条件のために多少の変動がある。

3 透明度、水温、塩分の水平分布の季節変動

各季節ごとの透明度の平均的な分布をFig. 2に示す。ただし、本研究では3~5月を春季、6~8月を夏季、9~11月を秋季、12~2月を冬季とし、透明度の平均値の算出には、透明度と照度消散係数の関係を考慮して調和平均を用いた。

年間を通じて、透明度が5~6 m以下の濁った水が、沿岸域に分布している。一方、灘東部では透明度は高く、灘

西部に向かって徐々に低下しており、等値線が舌状に分布している様子がみられる。透明度の分布を季節ごとにみていくと、春季(Fig. 2a)には、灘東部では8 m以上の高い値を示しているが、灘西部では4 m以下となっており、東部の透明度と比べ、4 m以上もの差がみられる。沿岸域には5~6 m以下の濁った水が分布しており、灘中央部に広く分布している比較的透明度の高い海水との間に、フロントを形成している。この特徴は、特に山口県沖で顕著であり、4~6 mの等値線の間隔が密に分布している様子がわかる。夏季(Fig. 2b)は、春季と似た分布を示しているが、透明度が8 m以上を示す海域がなくなっており、灘東部と西部の差は、春季と比べて小さくなっている。また、山口県沖のフロント(4~7 mの等値線が密になっている部分)が、春季と同様に現れている他、灘西部から中央部にかけて、6 mの等値線が蛇行している。秋季(Fig. 2c)では、8 m以上の透明度を示す海域が再び東部に現れている一方、4 m以下の濁った海水が山口県から大分県にかけて、岸沿いに広く分布している。また、山口県沖では4~6 mの等値線の間隔が春季や夏季に比べて広がっており、フロント構造が不明瞭になっている。冬季(Fig. 2d)においては、夏季にもみられたように、灘中央部付近で6 mの等値線が

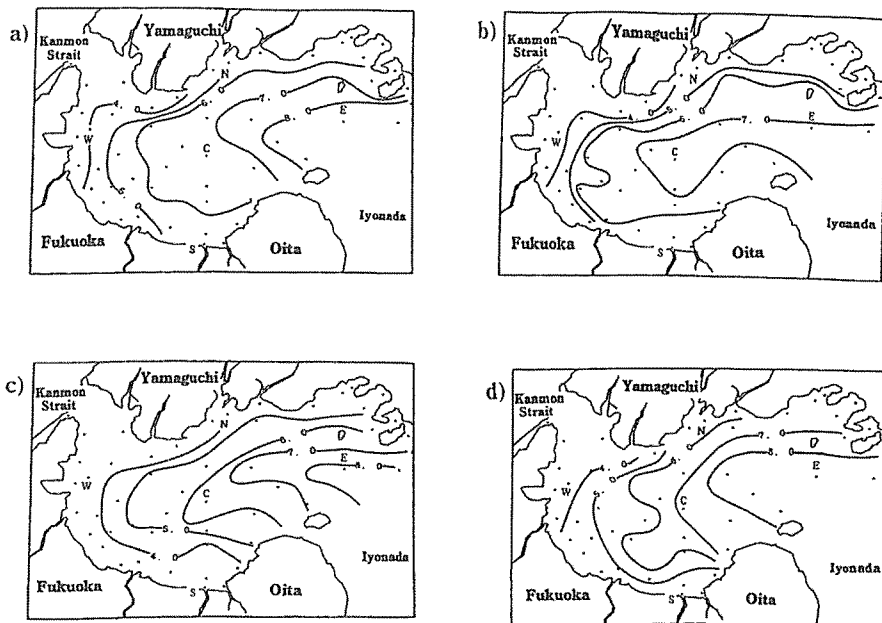


Fig. 2. Horizontal distributions of seasonal mean transparency, a) Spring (March-May), b) Summer (June-August), c) Autumn (September-November), d) Winter (December-February).

蛇行している。また、山口県沖では再び4~6 mの等値線の間隔が狭くなっており、フロント構造が認められる。灘東部の8 m以上の水は、この時期に最も広く分布している。

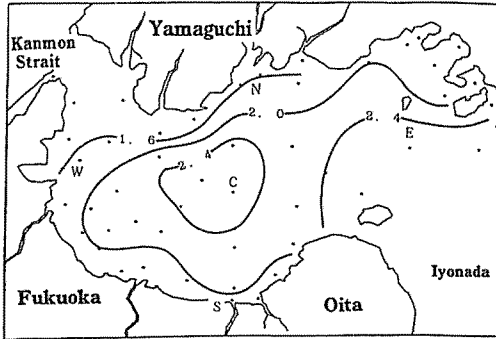


Fig. 3. Horizontal distribution of the standard deviation for transparency in the period of 1973-1985.

資料の全期間を通しての、透明度の標準偏差の分布をFig. 3に示す。灘東部では、2.4 m以上と高い値を示している。逆に、沿岸部では2.0 m以下となっており、特に山口県沿岸では1.6 m以下となっている。このことは、灘東部では海水交換が活発であるが、沿岸部では海水が停滞しやすいことを示している。また、灘中央部には局地的に標準偏差が2.4 m以上を示す、変動の大きな海域がみられる。

一般に水塊の分類には、水温と塩分が利用される。そこで、透明度の水平分布が、水温、塩分の分布とどのように異なるかをみるために、表面水温、表面塩分の水平分布図をFigs. 4, 5に示す。ただし、水温と塩分の平均値の算出には、通常の相加平均を用いている。

春季と秋季の水温 (Fig. 4a, c) は南高北低の分布を示している。春季 (Fig. 4a) では、山口県沖には12.0°C以下の比較的低温の海水が分布しており、南に向かって徐々に上昇し、大分県沖では13.0°C以上となっている。一方、秋季 (Fig. 4c) の水温は、23.0~24.0°Cと春季より高い値を示しているが、春季と同様に等温線はほぼ東西に分布しており、山口県沖と大分県沖との温度差も1.0°C程度となっている。夏季 (Fig. 4b) には、水温は西高東低の分布となり、23.5°C以下の比較的低温な海水が、灘東部から山口県沿岸に沿って西部へ広がっている。伊予灘と通じている灘東部では

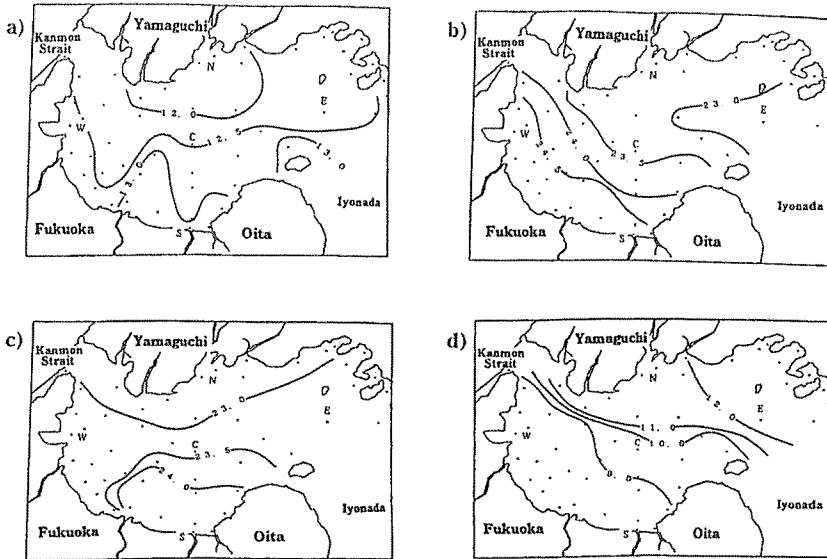


Fig. 4. Horizontal distributions of the sea surface temperature. a) Spring (March-May), b) Summer (June-August), c) Autumn (September-November), d) Winter (December-February).

23.0°C以下、閉鎖性の強い灘西部では24.0°C以上となっており、特に福岡県・大分県沿岸には24.5°C以上の高温水が存在している。これに対して冬季 (Fig.4d) では、夏季とは反対に、東高西低の水温分布をしている。福岡県沖から大分県沖にかけては、水温9.0°C以下の低温の海水が広く分布しており、灘北東部の11°C以上の海水との間にフロントを形成している。冬季と夏季で、水温の分布が逆転しているが、これは、水深の浅い灘西部では、水深が深い灘東部と比べて貯熱量が小さいため、夏季にはより高温に、冬季にはより低温になったものと考えられる。

塩分については (Fig.5a~d)、各季節とも灘東部から比較的塩分の高い海水が西部へと広がっており、透明度の分布でもみられたような、等値線の舌状の分布が認められる。春季の分布をみると (Fig.5a)、33.0psu以上を示す海水が伊予灘から西に向かって張り出しており、32.5psu以上の海水が灘西部にまで入り込んでいる。また、大分県沖には、32.0psu以下の低塩分水がみられる。一方、関門海峡付近には32.5psu以上の高塩分水がみられ、関門海峡から流入した響灘系水の影響を示している。夏季 (Fig.5b) は年間で最も低塩分を示し、31.5~32.0psuの海水が、灘東部から中央部にかけての広い範囲にわたって分布している。これ

は主に、夏季の降水による、淡水流入の影響と考えられる。特に、福岡県から大分県沿岸にかけての海域には、31.0psu以下の低塩分水が認められる。同様の低塩分水は秋季 (Fig.5c) の福岡・大分県沿岸にもみられるが、塩分は31.5psuと夏季よりもわずかに高くなっている。冬季 (Fig.5d) には、再び関門海峡付近に響灘系水と考えられる33.0psu以上の比較的高塩分な海水が認められるが、その範囲は春季に比べて狭い。灘全体での塩分差は1.0psu以内と小さくなっており、他の季節にみられた福岡県沖から大分県沖にかけての低塩分水も、現れていない。

年間を通じて、透明度と塩分の水平分布が類似していることがわかる。透明度と塩分との関係を詳しくみるため、夏季と冬季のTr. (透明度) - Sal. (塩分) ダイアグラムを Fig. 6 に示す。夏季には、塩分は27.3~32.9psuの、透明度は2.3~9.8mの範囲にあり、両者は弱い正の相関を示している。これに対して冬季では、透明度は夏季とほとんど同じであるが (2.5~9.5m)、塩分は全体的に夏季よりも高塩分の、31.2~33.6psuの狭い範囲にあり、両者の間には夏季よりも強い正の相関が認められる。両季節の透明度と塩分の間に正の相関がみられたことから、周防灘では年間を通じて、透明度が低い海水は塩分も低く、透明度の高い海水

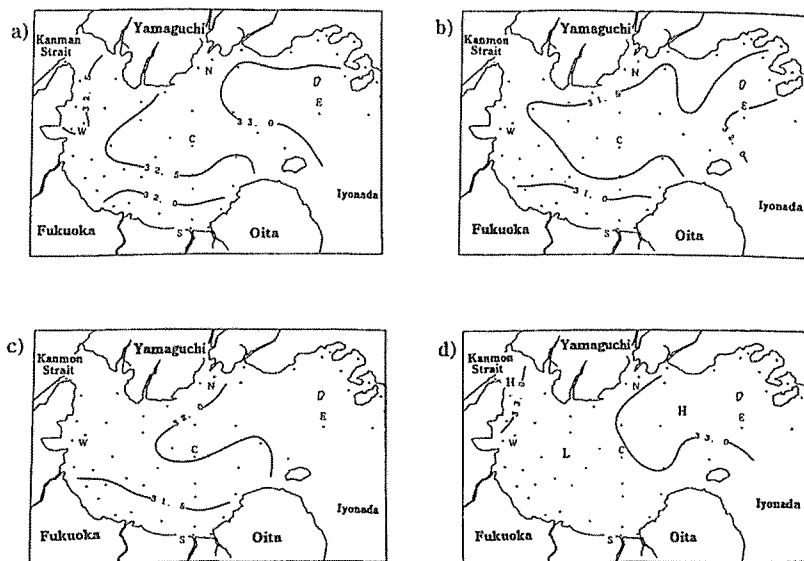


Fig. 5. Horizontal distributions of the sea surface salinity. a) Spring (March-May), b) Summer (June-August), c) Autumn (September-November), d) Winter (December-February).

は塩分も高いことがわかる。透明度と塩分の水平分布図 (Figs. 2, 5) より、透明度の低い海水は沿岸の低塩分水であり、透明度の高い海水は外洋系の高塩分水と考えられる。

透明度の分布にみられた山口県沖のフロントが、塩分の水平分布図には明確に現れていない。また、灘全体のコントラストも、塩分よりも透明度の方が鮮明になっている。このことは透明度が水塊の分析に有効な手段であることを示している。

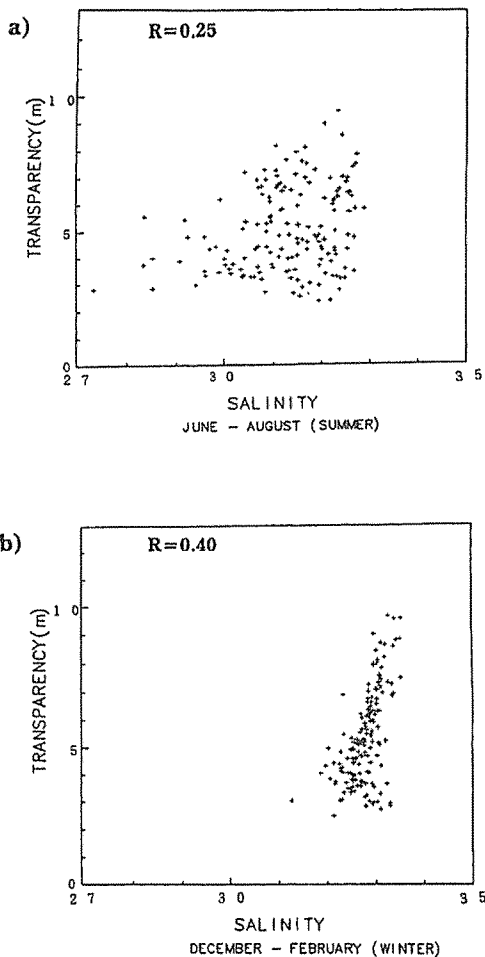


Fig. 6. Relationship between transparency and salinity in summer (June-August) and winter (December-February).

周防灘の水塊を、水温、塩分と透明度によって分類すると、灘東部に分布する比較的高塩分で透明度の高い外洋系水と、沿岸部に位置する低塩分で透明度の低い沿岸水、さらに灘中央部において、これら双方の影響を受けている混合水に分けることができる。さらに沿岸水は、福岡県～大分県沖の高温、低塩分の海水と、山口県沖の低温、低塩分の海水に分けることができる。このような水塊の分類は、神戸海洋気象台海洋課²⁾による、水温、塩分及び栄養塩類の分布に基づく水塊分類とも良く一致しており、比較的容易に計測できる透明度からも、水塊分布が把握できることを示している。

4 透明度の時間的な変動

周防灘の透明度の時間的な変動をみるために、灘を東部・北部・西部・南部・中央部に分け、これらの海域を代表するE点・N点・W点・S点・C点 (Fig. 1) での透明度の季節変動と経年変動を調べることにする。

Fig. 7 に、各測点での1973～1985年の透明度の時系列を示す。図中には、観測された透明度を細線で、季節変動を除去した12ヶ月移動平均値を太線で示してある。

観測値 (細線) をみると、灘東部のE点では振幅が他の点と比べて大きく、最大で約10mの変動を示す。また、E点での平均透明度は約9mと他の点と比べて高く、1985年3月には最高値の19.2mを記録している。これに対して、灘西部のW点では、変動の振幅が最大でも約7mと小さく、平均透明度も3.9mと低い。灘中央部に位置するC点では、沿岸に位置するN, W, S点よりも、大きな振幅で変動している。

観測値には、どの点においても、季節変動と思われる1年以内の変動が認められる。そこで、各点での月別平均透明度のグラフをFig. 8に示す。灘北部のN点では2月に最大 (6.5m)、7月に最小 (3.8m) を示している。N点のような1年周期の変動は、東京湾や広島湾でも報告されている (宇野木・岸野⁷⁾、野村⁸⁾、木村⁹⁾)。これに対してE点では、3月と9月にそれぞれ極大を示しており、最大値は9月 (10.8m) に、最小値は11月 (7.4m) に現れている。春季と夏季～秋季にピークを示す、透明度の同様な変動はC点にもみられるが、C点での極大は3月 (7.4m) 及び7月 (8.3m) と、若干時期が異なっている。一方、灘南部のS点や西部のW点では3～4ヶ月周期の短い変動がみられ、S点では4, 8, 10, 12月に、W点では4, 8, 12月にそれぞれ極大を示している。

次に、季節変動を除去した12ヶ月の移動平均値 (Fig. 7の太線) から、各点での透明度の経年変化を調べる。E点では、1977年から透明度は徐々に高くなり、1978年には11.5mのピークを示している。その後、1979年に2 m程度減少してからは、1985年まで約9 mで推移している。C点では、1982年から透明度は増加しており、1984年に8.6mのピークを示し、以後約2 m減少して、1985年には約6 mまで低下している。最も透明度が低い灘西部のW点では、1979年後半と1981年後半に約1 mの増加が認められるものの、全期間を通じてみると透明度は低下の傾向にあり、

1973~1985年までに約2 m低下している。N点の透明度も1980年以降徐々に低下し、1985年までに1~2 m程低下している。また、大分県沿岸のS点では、1973年以降徐々に低下が認められ、1980年までに2 m程低下したが、1982年以降増加に転じ、1985年には1970年代と同水準を示している。透明度の経年変化には、全体的に2~3年程度の周期性がうかがえる。また、E、S、C点では、1982年より透明度が増加し1984年に減少するという共通した変動がみられる。

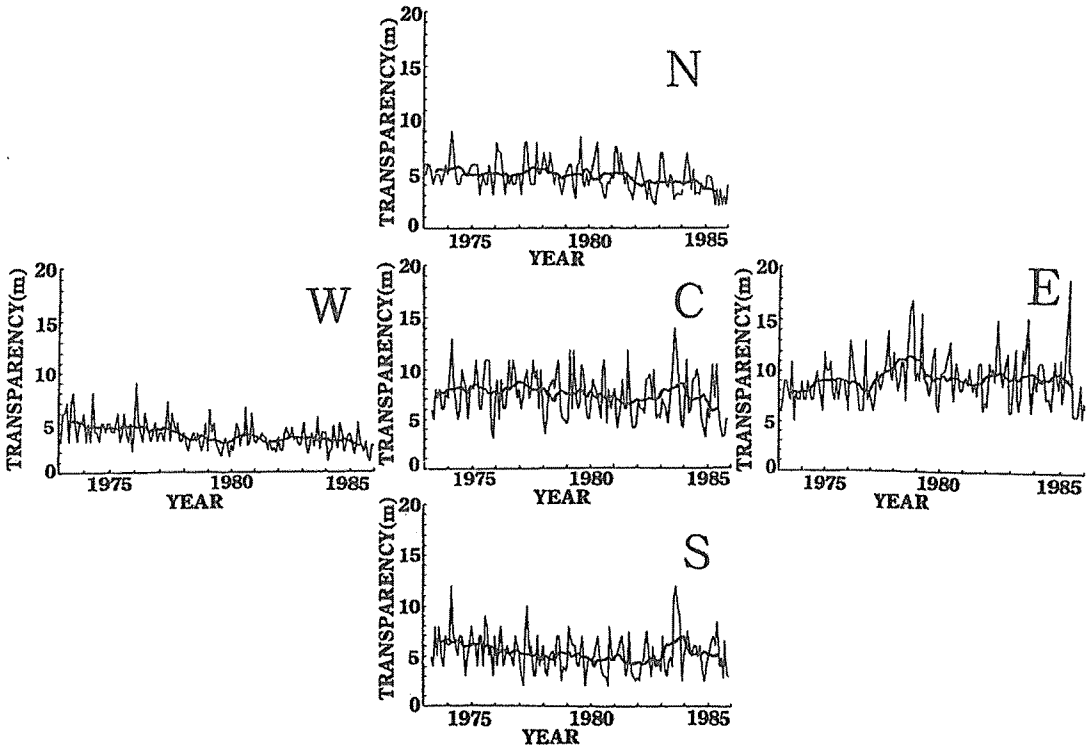


Fig. 7. Temporal variations of transparency at Sts. E, N, W, S, and C from 1973 to 1985. Thin line shows monthly observed transparency and bold line denotes 12-months running mean.

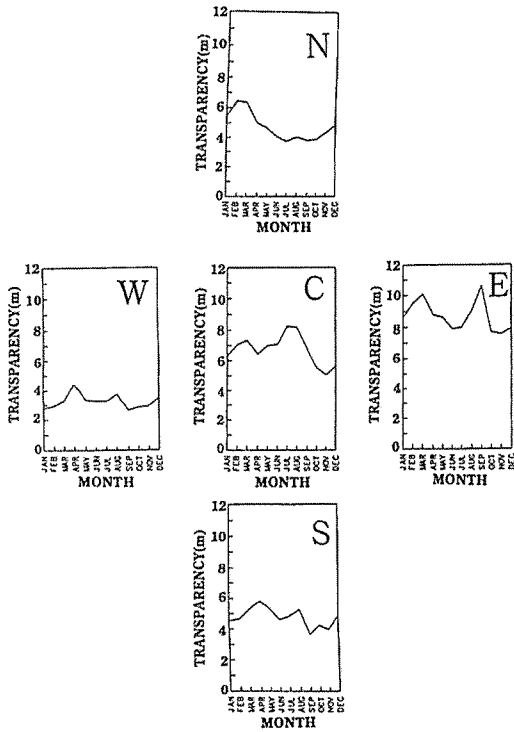


Fig. 8. Seasonal variations of transparency at Sts. E, N, W, S and C.

5 EOF解析による透明度の時空間変動

周防灘の透明度の時間的・空間的な変動特性を詳しく検討するために、欠測が少なく、空間的にも均等に分布しているE点、N点、W点、S点、C点の透明度に対して、EOF (Empirical Orthogonal Function) 解析を行った。

EOF解析とは、互いに相関のある多変数データから、それぞれ独立なモード(合成変数)を抽出する方法であり、主成分分析と同様のものである。本研究では、説明変数を各測点で毎月観測された透明度とした。このときの変動の第*n*モードは、各点で観測された透明度、 TR_E , TR_N , TR_W , TR_S , TR_C をそれぞれ直交軸とする5次元空間での直線

$$Z_n = L_{E,n} \cdot TR_E + L_{N,n} \cdot TR_N + L_{W,n} \cdot TR_W$$

$$+ L_{S,n} \cdot TR_S + L_{C,n} \cdot TR_C$$

(ただし、 $L_{E,n}$, $L_{N,n}$, $L_{W,n}$, $L_{S,n}$, $L_{C,n}$ は各測点の第*n*モードの固有値に対する固有ベクトルで、 $L_{E,n}^2 + L_{N,n}^2 + L_{W,n}^2 + L_{S,n}^2 + L_{C,n}^2 = 1$) にデータを射影したとき、*n*番目に分散が大きくなるものと定義される。また、*i*番目に観測した月の第*n*モードの時係数は

$$S_{n,i} = \sum (L_{st,n} \cdot TR_{st,i}), \quad (st = E, N, W, S, C)$$

であり、これにより、第*n*モードの時間的な変動が求まる。

Table 1. Eigenvalue, Proportion and Cumulative Proportion for All of the Modes

Mode	Eigenvalue	Proportion	Cumulative Proportion
1	1.528	0.306	0.306
2	1.119	0.224	0.529
3	0.929	0.186	0.715
4	0.790	0.158	0.873
5	0.635	0.127	1.000

EOF解析の結果をTable 1に示す。相対寄与率をみると、第1モードが全変動の約31%を占めており、以下それぞれ、第2モードが約22%、第3モードが約19%、第4モードが約16%、第5モードが約13%となっている。累積寄与率をみると、第3モードまでで全変動の70%以上が説明できることから、ここでは第3モードまでを検討することとする。各点における第3モードまでの固有ベクトルをTable 2に、各モードの固有ベクトルの水平分布と時係数及びその自己相関コログラムをFigs.9~11に示す。

Table 2. Eigenvector for the First, Second and Third Modes at Each Station

Station	1st mode	2nd mode	3rd mode
E	-0.123	0.836	0.143
N	0.552	-0.308	-0.295
W	0.548	0.365	-0.187
S	0.516	0.234	-0.060
C	0.340	-0.138	0.924

第1モードについてみると、固有ベクトルはE点のみで負の値を示しており (Fig.9a), それ以外の4点では同位相の変動であることがわかる。また、これら4点の固有ベクトルは、沿岸域のN, W, S点ではほぼ同じ値を示すが、C点では若干低い値となっている。第1モードの時係数を Fig.9bに示す。第1モードには1年以内の変動が存在する

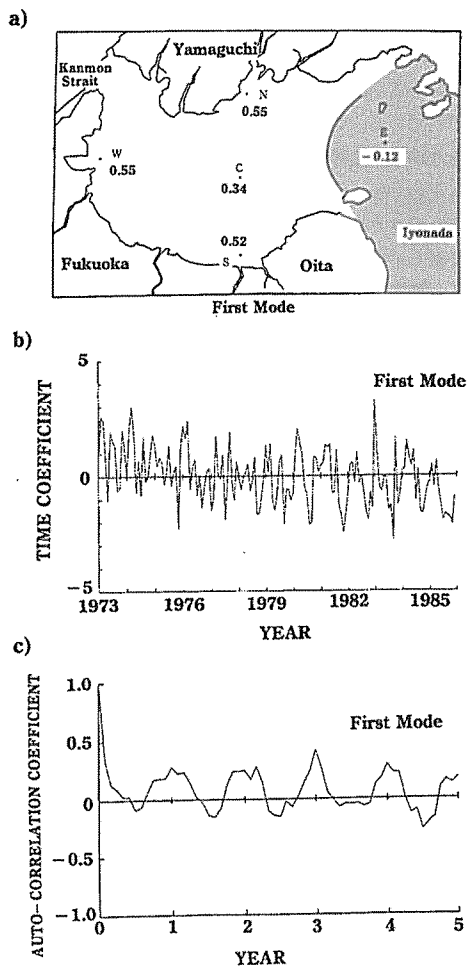


Fig. 9. a) Horizontal distribution of the eigenvalue for the first mode.
 b) Temporal variation of the EOF time coefficient for the first mode from 1973 to 1985.
 c) Auto-correlation diagram of the EOF time coefficient for the first mode.

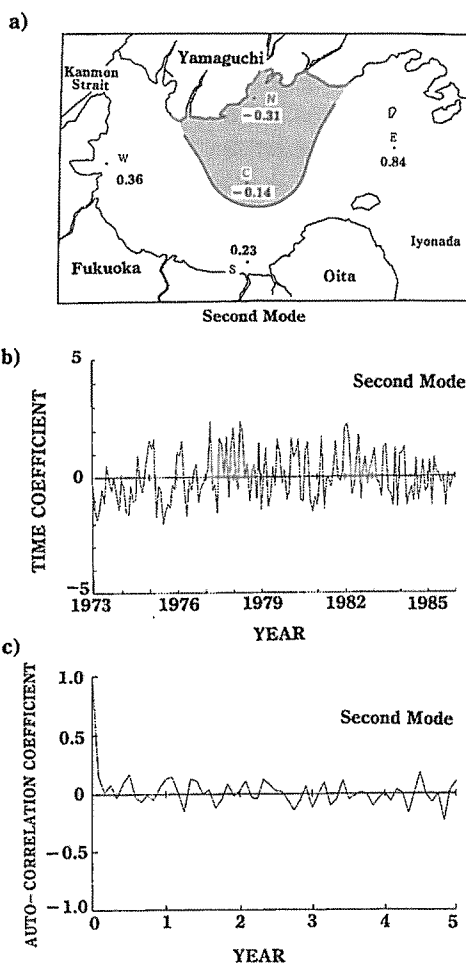


Fig. 10. Same as in Fig.9 except for the second mode.

ことがわかるが、この図からはっきりとした周期性をみるのは困難である。そこで、時係数の自己相関コレログラムを作成した (Fig.9c)。Fig.9cより、第1モードは1年周期の季節変動であることがわかる。以上のことから、周防灘の透明度は1年周期の季節変動が最も大きく、灘東部とそれ以外の海域では逆位相となっていることがわかる。

第2モードの固有ベクトルをみると (Fig.10a), N点とC点では負の値を、E, W, S点では正の値を示している。また、E点での固有ベクトルが0.84と最も大きいことから、

この変動は灘東部で強く現れることがわかる。第2モードの時係数をFig.10bに示す。6~7ヶ月周期の変動と、それより短い周期の変動が重なっているように見える。コロログラムをみると(Fig.10c), 半年周期の他に3~4ヶ月周期の変動があるように見えるが、明確な周期性がつかめない。これは透明度の観測間隔が1ヶ月であるため、1ヶ月以下の周期の変動をうまく抽出できなかったことに起因しているのかもしれない。

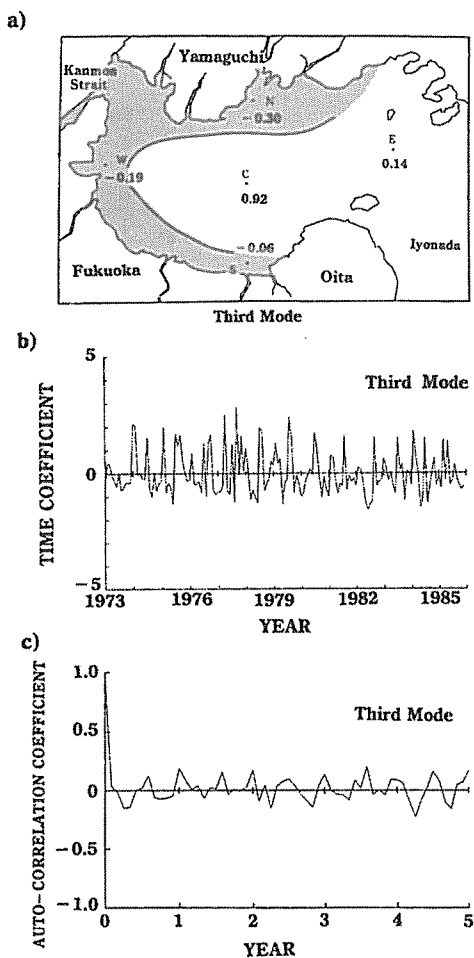


Fig. 11. Same as in Fig.9 except for the third mode.

第3モードの固有ベクトル(Fig.11a)は、E、C点で正

の、沿岸域に位置するN、W、S点で負の値となっている。固有ベクトルはC点で特に大きくなっており、灘中央で強く現れる変動であることがわかる。一方、S点での値は小さく、ほぼゼロであるといつてよい。このことは、S点では、このモードの変動はほとんど現れないことを意味する。第3モードの時係数(Fig.11b)をみると、半年程度の周期性が認められ、これはコロログラム(Fig.11c)にも明確にあらわれている。これらの図より、第3モードは灘中央部、東部と沿岸域とで逆の位相をもつ、半年周期の変動であることがわかる。これは、月別平均値のグラフ(Fig. 8)にもよく現れている。また、先に述べたように、固有ベクトルの大きさから、この変動は灘中央部で強く現れる変動であることがわかる。透明度の標準偏差の水平分布(Fig. 3)にもみられるように、灘中央部には標準偏差が極大を示す、変動の激しい海域が存在する。第3節で行った水塊分類によると、灘中央部には、伊予灘からの外洋系水と沿岸水の両方の影響を受ける灘混合水が分布していることから、この変動は両水塊が半年ごとに入れ替わっていることを示唆している。

6 まとめ

周防灘の1973~1985年の透明度の時間的、空間的変動を調べた結果、次のことが示された。

- 1) 透明度は年間を通して灘東部で高く、灘西部及び沿岸部では低くなっており、海面塩分の分布と類似している。
- 2) 水温、塩分及び透明度の分布から、周防灘の水塊は、(1)伊予灘系外洋水、(2)山口県側の沿岸水、(3)福岡・大分県側の沿岸水、(4)伊予灘系外洋水と沿岸水の両方の影響を受けた周防灘混合水の4つに分けられる。
- 3) 周防灘の透明度の季節変化は、灘北部では1年周期、灘東部や中央部では半年周期であり、灘南部や西部ではさらに短い3~4ヶ月周期である。
- 4) 経年変化をみると、周防灘の透明度は2~3年の周期で変動している。また、山口県沖と福岡県沖の透明度は徐々に減少しており、1985年には1970年代よりも2~3m低下していた。
- 5) EOF解析から、周防灘の透明度の変動に最も寄与しているのは、灘東部とそれ以外の海域で逆位相の変動を示す1年周期の変動である。
- 6) EOF第3モードは、半年周期の、周防灘中央部で

強く現れる変動であった。透明度の水平分布から、この変動は周防灘混合水の変動を表していると考えられ、灘中央部では半年ごとに外洋水と沿岸水が入れかわっていることが推測される。

文献

- 1) 磯辺篤彦・神崗真人・依悟：周防灘南西部における貧酸素水塊。沿岸海洋研究ノート，31，1，109-119 (1993)
- 2) 神戸海洋気象台海洋課：周防灘の海況－1982～1983年特殊観測結果－。神戸海洋気象台彙報，204，23-37 (1985)
- 3) 宇田道隆・渡辺信雄：瀬戸内海の平均各月海況。水産試験場報告，3，(1933)
- 4) 柳哲雄・樋口明生：瀬戸内海の恒流。沿岸海洋研究ノート，16(2)，123-127 (1979)
- 5) 神崗真人・吉田幹英・荒田敏生：周防灘の貧酸素水塊。福岡豊前水試研報，4，185-197 (1991)
- 6) 神崗真人：周防灘西部における透明度の分布特性とその支配要因。福岡豊前水試研報，3，137-144 (1990)
- 7) 宇野木早苗・岸野元彰：東京湾の平均的海況と海水交流。Technical Report of the Physical Oceanography Laboratory, The Institute of Physical and Chemical Research, No.1 (1977)
- 8) 野村英明：東京湾における水域環境構成要素の経年変化。La mer，33，107-108 (1995)
- 9) 木村知博：広島湾北部の透明度の経年変化とその支配要因について。沿岸海洋研究ノート，14，1・2，101-107 (1977)