

日本周辺海域における透明度の地理的分布と季節変動

長田 宏¹⁾・小川嘉彦¹⁾・平井光行¹⁾・平川和正¹⁾

Geographical and Seasonal Changes of Water Transparency in the Seas Adjacent to Japan

Hiroshi NAGATA¹⁾, Yoshihiko OGAWA¹⁾, Mitsuyuki HIRAI¹⁾ and Kazumasa HIRAKAWA¹⁾

Abstract

This paper examines the characteristic features of geographical distribution and seasonal changes in transparency of sea water in the seas adjacent to Japan. Geographically, transparency is high in the offshore waters of the Kuroshio reaching an annual mean of 21.8m and tends to become lower from the southern warm waters to the northern cold waters showing an annual mean of 15.2m. Seasonally, transparency clearly decreases in spring in almost all sea areas and also there occurs another decrease in autumn, especially in the northern waters. Although patterns of spatial and temporal changes in transparency vary with sea areas, they show patterns implying a negative correlation to the concentration of chlorophyll *a*/cell number per litre of phytoplankton in the seas around Japan. This implies that transparency may be a useful and practical index of long-term trends of phytoplankton biomass in sea water masses around Japan.

Key words : chlorophyll *a*, geographical distribution, long-term trend, phytoplankton biomass, seasonal change, transparency

緒 言

透明度は、海水の濁りの程度を概略的に示すものとして、古くから海洋観測の基本的な調査項目の一つに取り上げられている。透明度の分布の地理的差異や季節変化について、森田(1973)は180°E以西の西部太平洋における特徴を報告しているが、その内容は、赤道をはさんだ熱帯、亜熱帯域を中心としたものであり、日本周辺海域についての記述は少ない。宇田(1930)は、黒潮域および対馬暖流域では、透明度はおおむね冬、春季に低下し、夏、秋季に増大するが、親潮域では夏季に低下することを報告している。また最近、長田(1994a)は、1920年代から1990年代までの日本海における毎月の平均透明度の分布を示し、春季には広域同時に透明度が低下するようにみえるが、他の季節では、海域によって変動様式が異なることを示した。宇田(1930)や長田(1994a)の報告からは、日本周辺海域では主要な水塊ごとに、透明度の季節変動パターンが異なっていることが示唆されるが、いずれの解析も、特定の観測点あるいは範囲を、ある水塊の代表とみなしている。ところが、太平洋における親潮と黒潮の位置関係は

1996年1月16日受理 日本海区水産研究所業績A第504号

¹⁾ 〒951 新潟市水道町1丁目5939-22 日本海区水産研究所

(Japan Sea National Fisheries Research Institute, Suido-cho, Niigata 951, Japan)

変動が著しく（川合 1955）、黒潮についても直進型、蛇行型等、多様な流動パターンがあることが知られている（川合 1972；SHOJI 1972）。また日本海における対馬暖流の流動、亜寒帯前線の変動も複雑である（周東 1982；久保田 1990）。これらの事実、海域による透明度の変動パターンの比較は、海流系を考慮して区分した水塊ごとに行うべきであることを示している。

透明度は天候や測定者によってあまり大きく左右されず、いつ、どこで、誰が測っても比較しうるといふ普遍性をもった環境パラメーターである（福田・津田 1980）。同時に、植物プランクトン現存量さらには基礎生産量とも関連をもっていることが報告されている（例えば、SHIBATA and ARUGA 1982；SHEMISHURA *et al.* 1982；LEWIS *et al.* 1988）。日本周辺海域における透明度が、これらの多寡を示す指標として有効かどうかを検討するには、まず水塊ごとの透明度の差異、季節変動等を明らかにしておかねばならない。本報では、(1)日本周辺海域における透明度の地理的分布と、その季節変化の実態を明らかにすると共に、(2)海流系ごとに区分した水塊別に、透明度の季節変化のパターンを検討し、水塊ごとにどのような特徴があるのか、また水塊間で類似点と相違点にどのような特徴が見られるかを検討した。その上で、(3)明らかになった特徴がもつ意味について、海洋の低次生産の地理的分布と、季節変化という観点から考察を試みた。

資料と方法

本報では、透明度の変動解析のために、日本海洋データセンターから提供を受けた資料と、水産庁の「水産試験研究機関海洋観測資料」の2つを利用した。このうち、前者の資料には海上保安庁、気象庁、水産庁、大学等の多くの機関のデータが含まれており、後者の資料に比べ、より広範囲にわたるデータが含まれている。そこで、広域的な透明度の分布を解析するために、1925～1992年の間に観測された日本周辺海域の透明度の値を、日本海洋データセンターから提供していただいた。本報では、日本周辺海域として27°～46°N、125°～149°Eの海域を選び、その中で緯経度1°柵目ごとに毎月の平均透明度、前・当月間の平均透明度の差、変動係数（CV）を求め、水塊の配置とは無関係に、それらの分布パターンを検討した。

次に、日本周辺海域を海流系ごとに水塊区分し、各水塊における透明度の季節変動パターンを比較した。水塊区分を行うには、各層の水温、塩分の値を用いた。これらを、透明度とともに前述の観測期間について求めると膨大なデータ量に達し、使用するパーソナルコンピュータの能力を超えてしまうことがわかった。そこで、ここでは水産庁の「水産試験研究機関海洋観測資料」に収録されている、1963～1988年の日本周辺海域の透明度、水温、塩分の値を利用した。これらのデータを、過去の知見から整理した基準（Table 1）に基づいて、親潮域、混乱水域、津軽暖流域、黒潮流軸域、黒潮外側域、黒潮内側域、対馬暖流域、北方冷水域、東シナ海の黒潮流軸域、大陸系沿岸水域の10の水塊（Fig. 1）に区分し、それぞれの水塊における透明度の平均値と変動係数の季節変動を検討した。各水塊における透明度のデータ数は、Table 2 に示した。なお、ここで述べる太平洋、東シナ海の範囲は、Fig. 2-4 に示されている海域に限ったものである。

結 果

1 日本周辺海域の透明度の分布

ここでは、まず日本周辺海域における透明度の水平分布の季節変化（Fig. 2）を検討すると

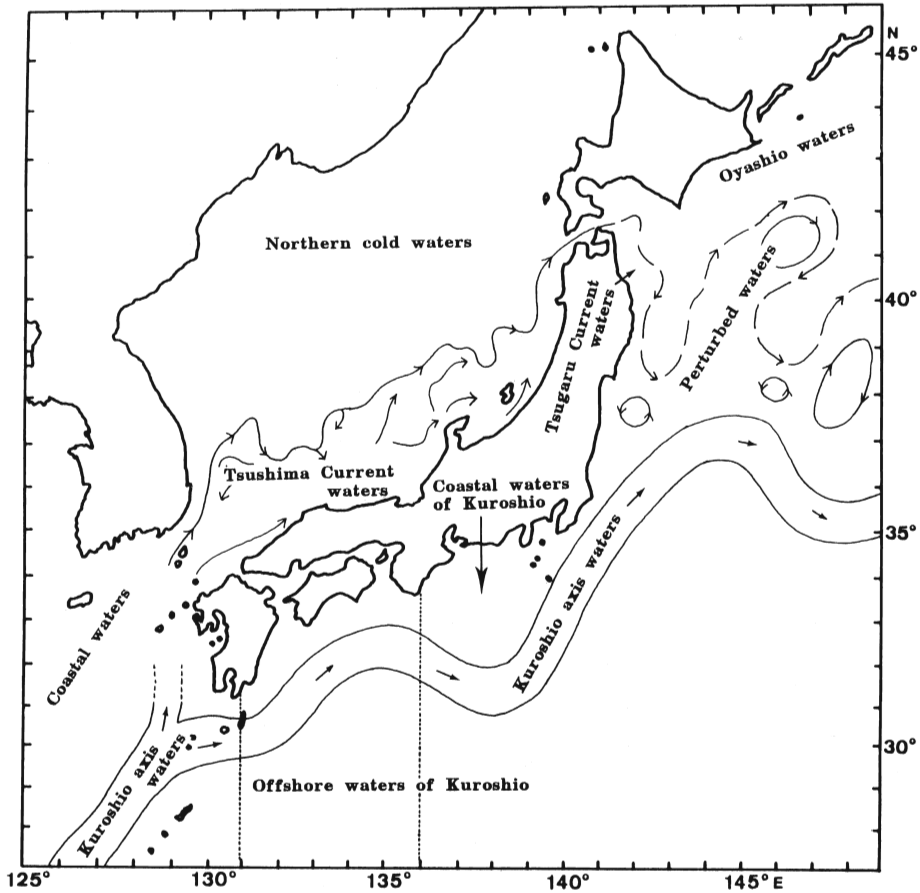


Fig. 1. Schematic representation of currents and water masses in the seas adjacent to Japan. Dashed lines indicate 131°E and 136°E longitude.

ともに、その推移を明らかにするために、各月の透明度の前月からの差(Fig.3)を併せて検討した。また、そのような季節変化が、年によってどの程度変動するのかを評価するために、透明度の変動係数を検討した (Fig. 4)。

透明度の累年平均値は、4月の東シナ海の中国大陸寄りにみられる4m以下の水域から、夏、秋季を中心に太平洋南方沖合にみられる32m以上の水域まで、地理的にも、また季節的にも大きく変化している。水平分布図 (Fig. 2) には、いくつかのバッチ状の分布パターンが認められるが、この図は緯経度1°柵目の累年平均値に基づいたものであること、また海域、あるいは月によって、1°柵目のデータ数が異なっていることから、このような局所的な分布パターンにまで注目することには、あまり意味がないと思われる。そこで、日本周辺海域の透明度の地理的分布と、その季節変化について、大きな特徴に注目すると、次の3点を指摘することができる。

透明度の水平分布にみられる最も大きな特徴は、不連続線の存在である。その一つは、例えば200m深水温分布図に現れる黒潮のフロント (例えば、TAFT 1972) を想定させるような、九州から本州南岸に沿って延びる不連続線がそれである。この不連続線は、夏季から秋季に発達し、冬季から春季にやや弱まるという変化を示しているように見えるが、周年にわたって認められる。透明度の不連続線は東シナ海にも存在している。東シナ海にはほぼ南北に延びる不連続

Table 1. Hydrographic characteristics used as criteria to classify the seas adjacent to Japan into ten waters.

Waters	Criteria	Authors
Pacific Ocean		
(1) Oyashio waters	$5^{\circ}\text{C} \geq T_{100}^{\text{a}}$	HATA (1969)
(2) Perturbed waters	$5^{\circ}\text{C} < T_{100} < 15^{\circ}\text{C}$ and $S_{100}^{\text{b}} < 33.8$	KAWAI (1958), HATA (1969)
(3) Tsugaru Current waters	$5^{\circ}\text{C} < T_{100} < 15^{\circ}\text{C}$ and $S_{100} \geq 33.8$	KAWAI (1958), HATA (1969)
(4) Kuroshio axis waters	$15^{\circ}\text{C} \leq T_{200}^{\text{c}} \leq 18^{\circ}\text{C}$ ($131^{\circ}00'\text{E} \sim 136^{\circ}00'\text{E}$)	KONAGA <i>et al.</i> (1967a, b)
	$10^{\circ}\text{C} \leq T_{200} \leq 15^{\circ}\text{C}$ ($136^{\circ}00'\text{E} \sim$)	KONAGA <i>et al.</i> (1967a, b)
(5) Offshore waters of the Kuroshio	$18^{\circ}\text{C} < T_{200}$ ($131^{\circ}00'\text{E} \sim 136^{\circ}00'\text{E}$)	KONAGA <i>et al.</i> (1967a, b)
	$15^{\circ}\text{C} < T_{200}$ ($136^{\circ}00'\text{E} \sim$)	KONAGA <i>et al.</i> (1967a, b)
(6) Coastal waters of the Kuroshio	$15^{\circ}\text{C} > T_{200}$ ($131^{\circ}00'\text{E} \sim 136^{\circ}00'\text{E}$)	KONAGA <i>et al.</i> (1967a, b)
	$10^{\circ}\text{C} > T_{200}$ ($136^{\circ}00'\text{E} \sim 140^{\circ}00'\text{E}$)	KONAGA <i>et al.</i> (1967a, b)
Japan Sea		
(7) Tsushima Current waters	$T_{100} \geq 6^{\circ}\text{C}$	TANIOKA (1962)
(8) Northern cold waters	$T_{100} < 6^{\circ}\text{C}$	TANIOKA (1962)
East China Sea		
(9) Kuroshio axis waters	$16.5^{\circ}\text{C} \leq T_{200} \leq 19.5^{\circ}\text{C}$ ($\sim 131^{\circ}00'\text{E}$)	NITANI (1972), INOUE (1981)
(10) Coastal waters	$T_{200} < 16.5^{\circ}\text{C}$ ($\sim 131^{\circ}00'\text{E}$)	NITANI (1972), INOUE (1981)

^{a)}Temperature at 100m depth

^{b)}Salinity at 100m depth

^{c)}Temperature at 200m depth,

Table 2. Number of stations from which transparency data were obtained from 1963 to 1988. The data were used for calculations of the spatial mean values and CV shown in Figs. 5 and 6.

Waters	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Total
Pacific Ocean													
(1)Oyashio waters	32	124	214	258	302	372	389	418	238	248	72	49	2716
(2)Perturbed waters	418	461	642	772	1036	1275	1434	1169	1047	693	492	470	9909
(3)Tsugaru Current waters	312	383	547	543	592	695	762	867	716	785	632	360	7194
(4)Kuroshio axis waters	868	910	1037	1042	1032	1093	930	1004	1002	1055	980	950	11903
(5)Offshore waters of the Kuroshio	68	91	68	82	118	131	72	141	102	125	139	94	1231
(6)Coastal waters of the Kuroshio	283	308	364	406	486	479	441	452	250	355	371	316	4511
Japan Sea													
(7)Tsushima Current waters	108	304	831	1135	1151	1024	490	856	903	853	602	331	8588
(8)Northern cold waters	5	34	81	155	123	383	266	177	218	52	13	5	1512
East China Sea													
(9)Kuroshio axis waters	49	109	33	35	32	20	80	43	12	44	32	9	498
(10)Coastal waters	36	86	27	37	46	29	50	111	11	74	33	13	553
Total	2179	2810	3844	4465	4918	5501	4914	5238	4499	4284	3366	2597	48615

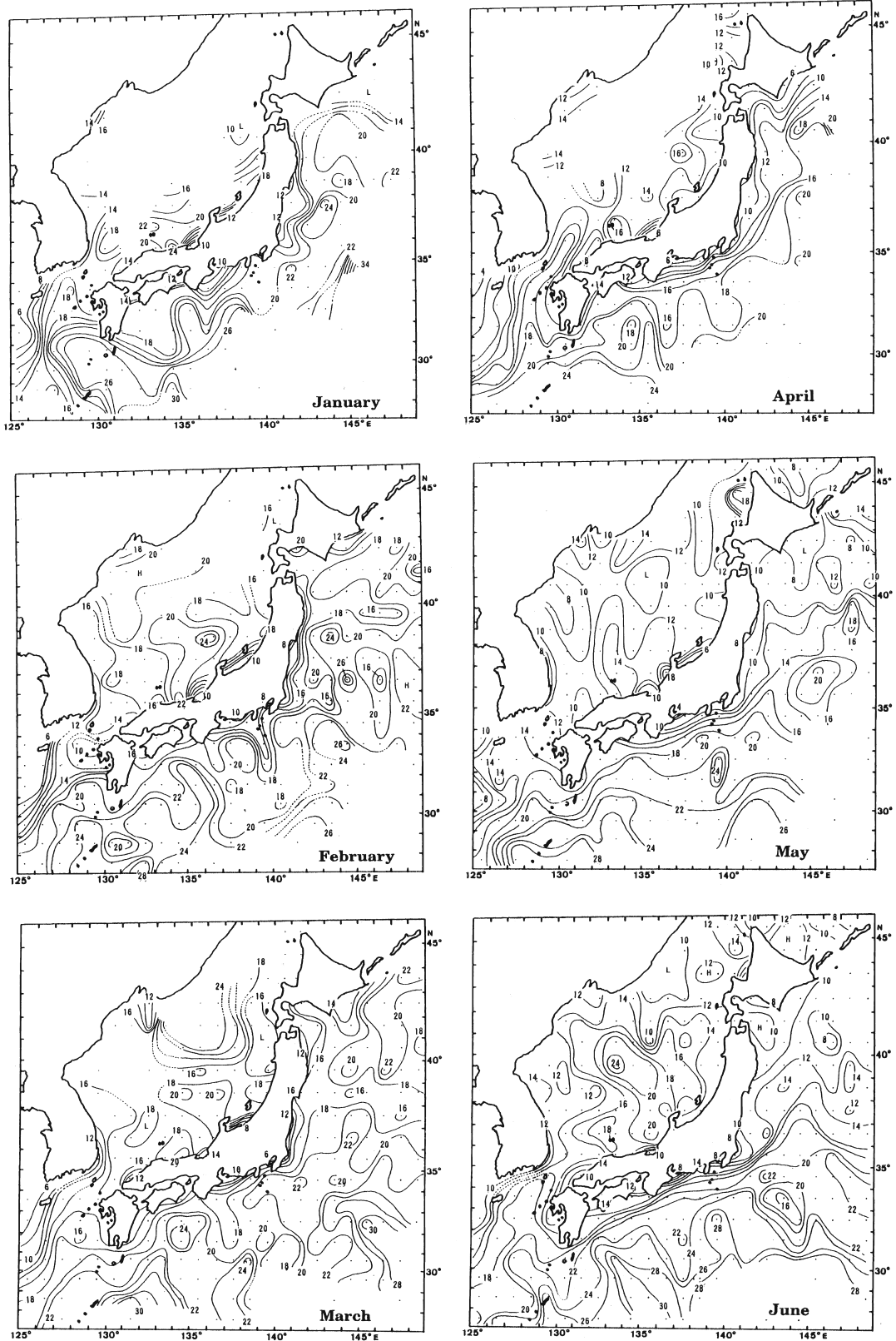


Fig. 2. Monthly distributions of the annual mean transparency (m) in the seas adjacent to Japan. Each mean value was calculated with a 1°latitude×1°longitude grid using data from 1925 to 1992.

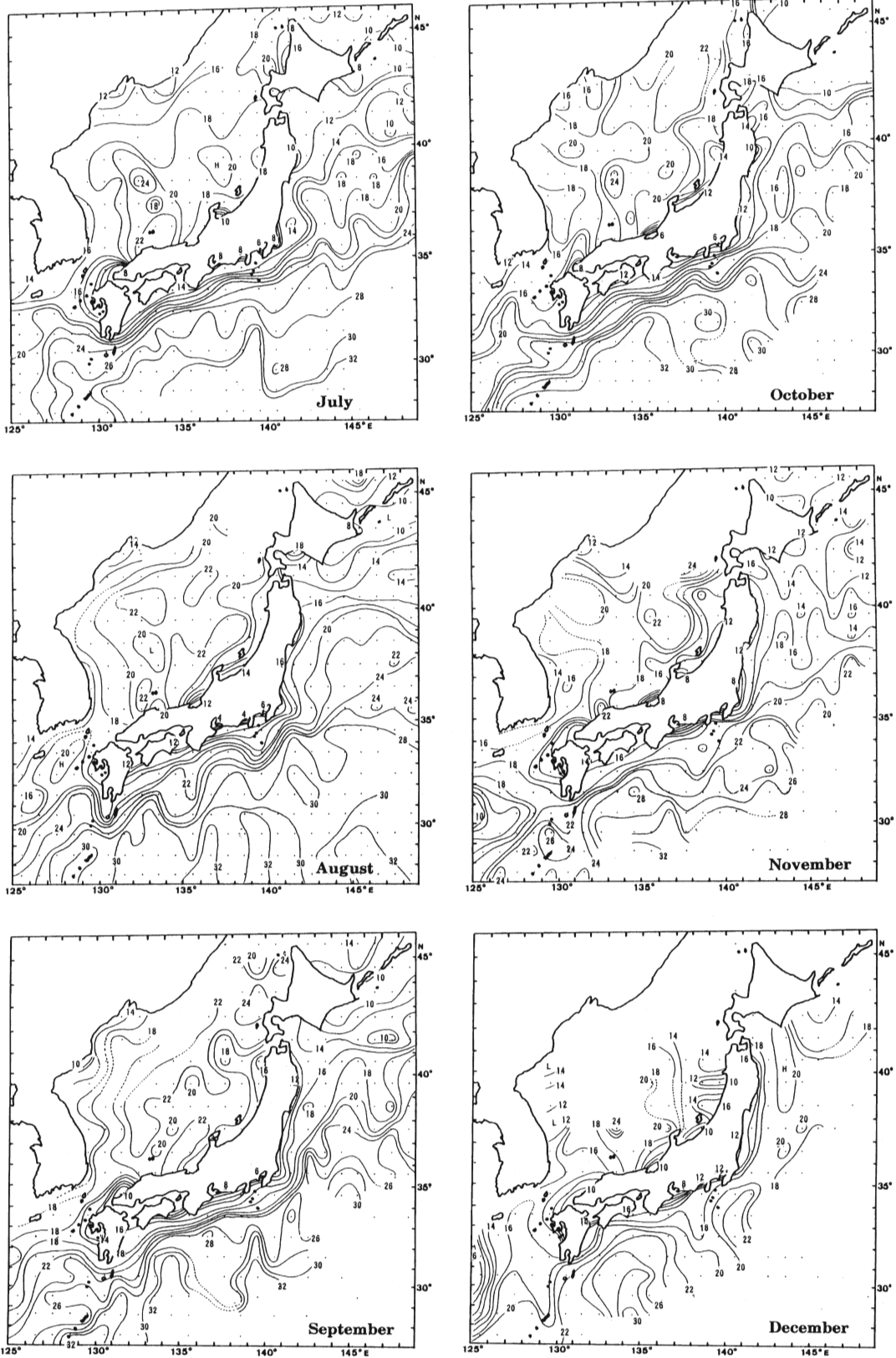


Fig. 2. Continued

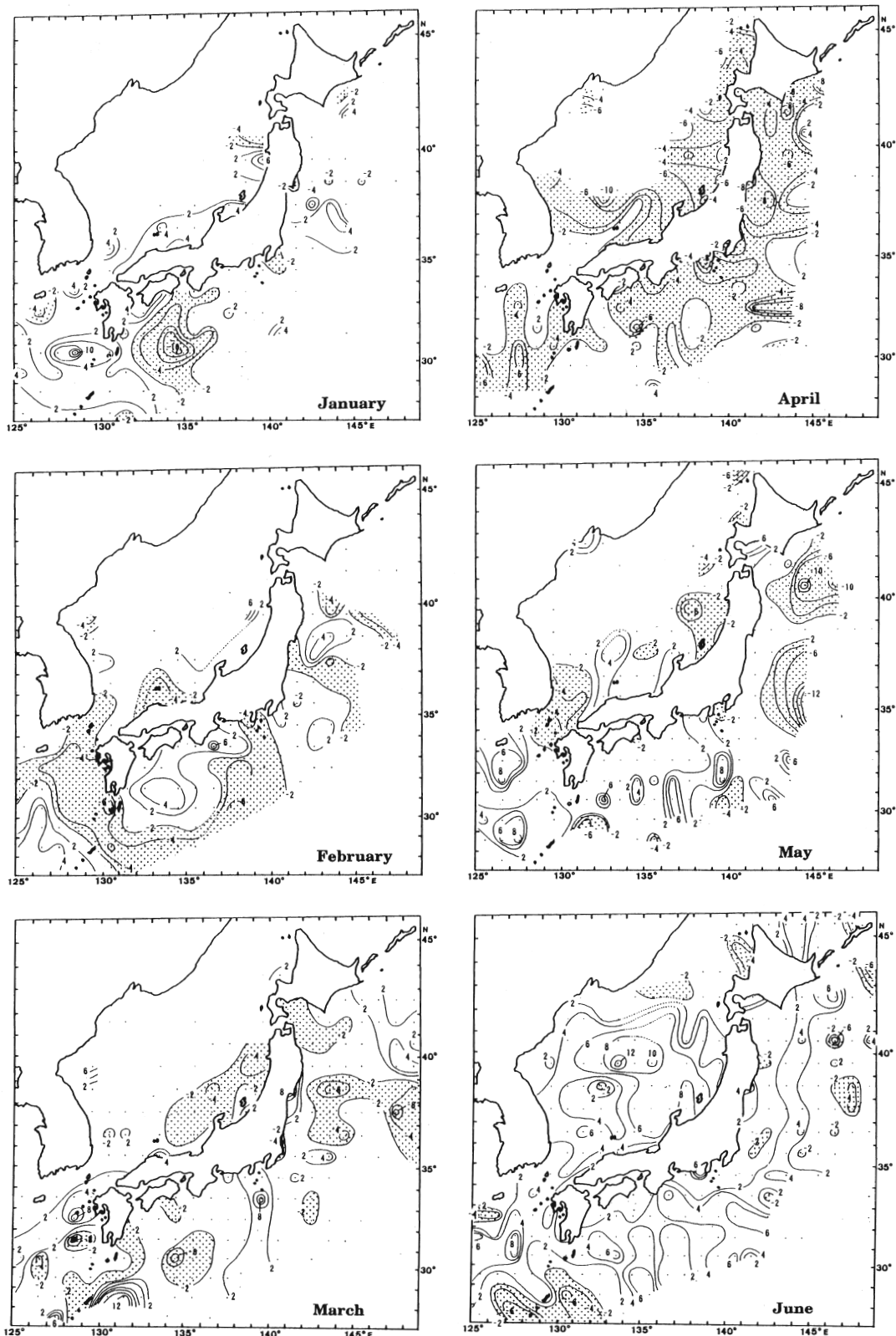


Fig. 3. Differences in monthly distributions of transparency (m) between two successive months. Positive and negative values indicate increases and decreases of transparency in meters respectively. Dotted areas denote where decrease in transparency exceeds 2m/month.

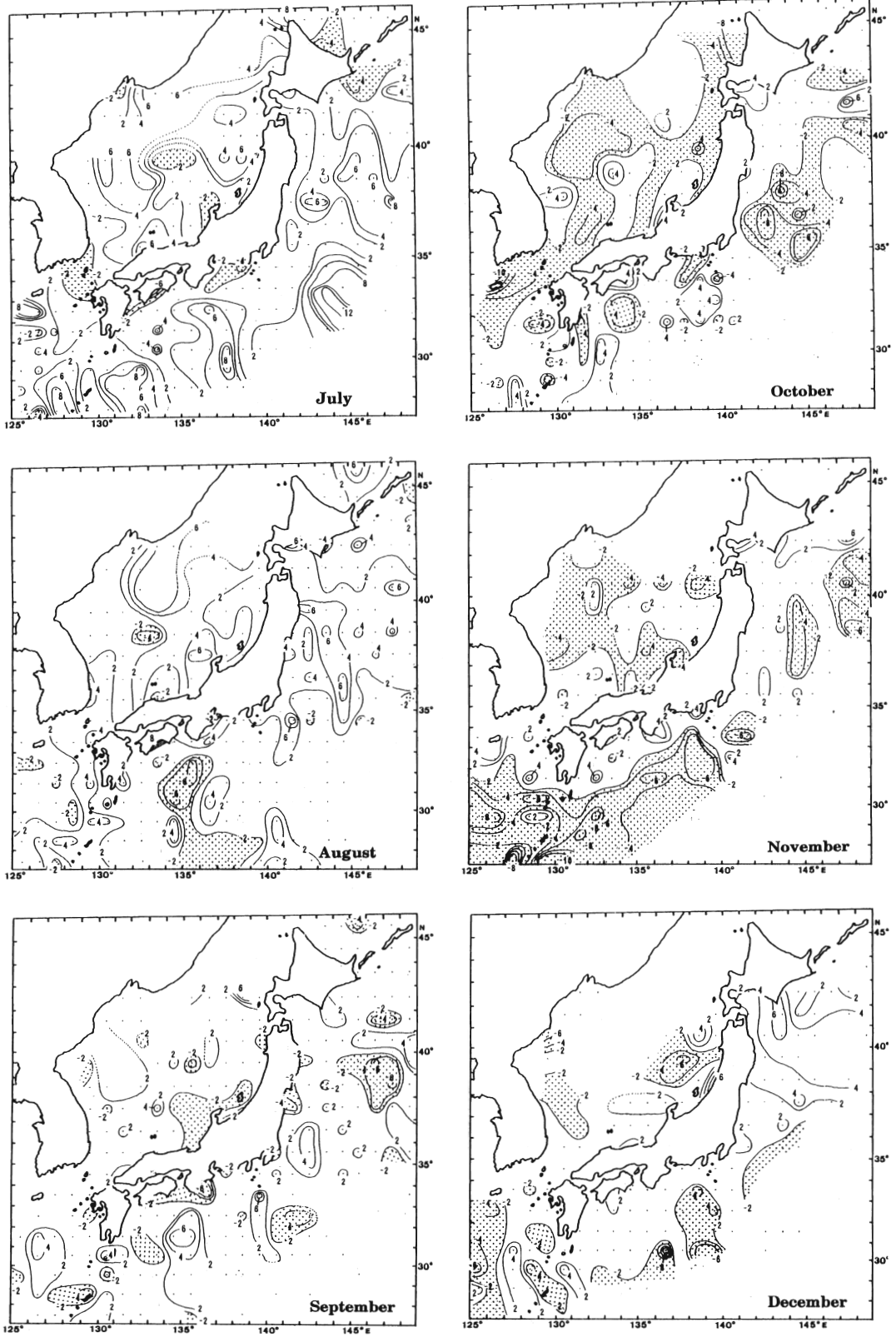


Fig. 3. Continued

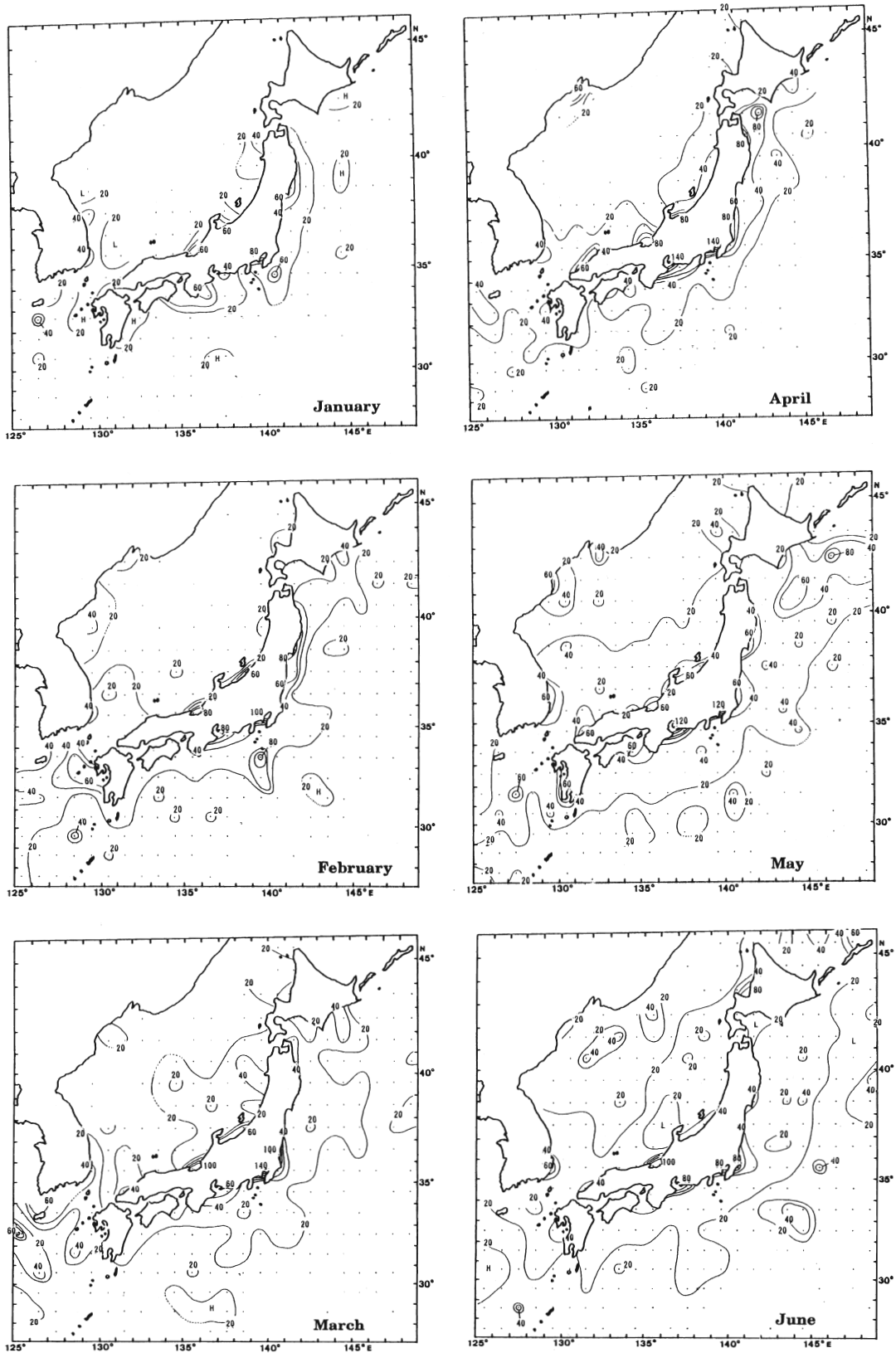


Fig. 4. Monthly distributions of the coefficient of variation (CV, %) of transparency in the seas adjacent to Japan. Each value was calculated with a 1°latitude×1°longitude grid using data from 1925 to 1992.

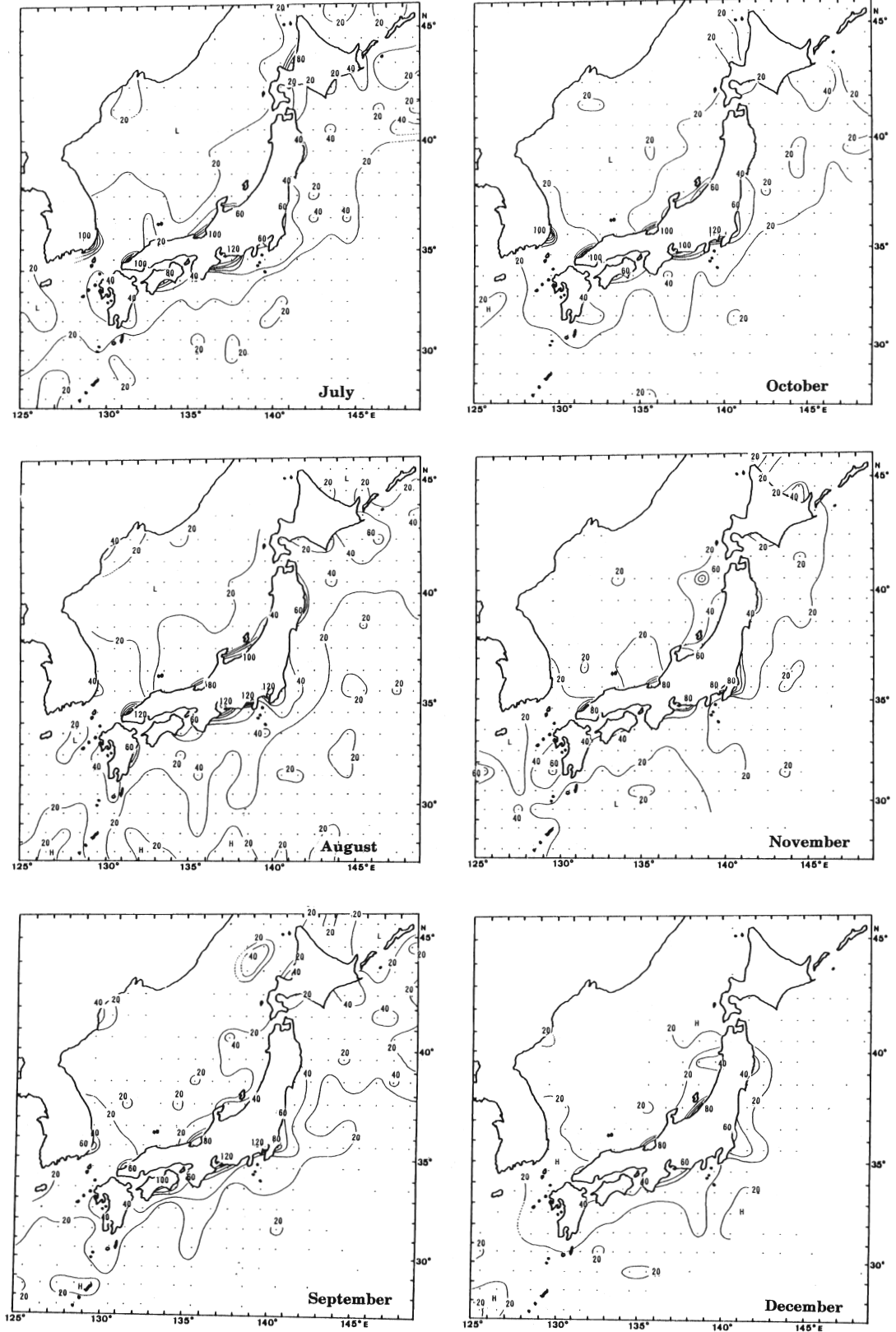


Fig. 4. Continued

線には、秋季から春季に発達して、夏季にはやや弱まるという傾向がみられ、前述の九州から本州南岸に沿った黒潮フロントを想定させる不連続線とは異なった季節変化がみられるものの、どちらもほぼ周年存在するという点では共通している。

第二の大きな特徴は、黒潮フロントを想定させる本州南岸沿いの不連続線によって一層際だったものとなっているが、日本近海の透明度は、地理的に南高北低の分布パターンを示している点である。ただし、東シナ海だけは前述の南北に延びる不連続線の存在によって、東高西低の分布パターンを示している。太平洋の不連続線以南の南方沖合域では、透明度は年間を通じて高く、最も低い値でも20m以上を示している。太平洋と日本海とでは様相の異なる点はあるものの、北へ行くほど透明度は低くなり、特に北海道東方海域で透明度は最も低くなる。東シナ海の不連続線以西の、中国大陸側の海域における透明度も周年を通して低く、特に不連続線が発達する時期には、内湾域、極沿岸域を除いて、日本周辺海域で最も低い透明度となっている。

日本近海の透明度の地理的分布に見られる第三の大きな特徴は、明瞭な季節変化の存在と季節変化のパターンである。日本周辺海域の透明度は、太平洋南方の沖合域を除き、ほぼ全域で、2月から4月にかけて大きく低下し、4、5月の最低期を迎える。低下する時期には、海域によって若干の時間のずれが認められ、南の海域で早く北の海域でやや遅い傾向が認められる。その後、ほとんどの海域で、透明度は6～8月を中心とした夏季に増大する。秋季には春季の場合ほどではないものの、10、11月を中心に再び透明度が低下する海域が多くみられている (Fig. 3)。ただし、このときの低下は、春季の場合とは逆に、北の海域で早く、南の海域で遅い傾向を示している。

毎月の透明度の変動係数は、沖合域よりも沿岸域の方が大きい傾向が、周年にわたって認められる (Fig. 4)。ただし、北海道南東海域では、沖合域であっても、春季は変動係数が大きい。変動係数が大きい海域ほど、年によるばらつきが大きいことを示している。したがって、春季の北海道南東海域にみられるように、透明度が大きく低下する時期に変動係数が大きくなっているという現象は、春季の透明度の低下という季節変化が、年によって大きく変動しうる可能性を示唆しており、興味深い。また Fig. 2-4 からは、透明度の季節変動のパターンが、海域によってかなり異なっていることを想定させる。

そこで次に日本周辺海域を海流系に基づいて水塊区分し、それぞれの水塊ごとの透明度の季節変動を比較・検討した。

2 各水塊における透明度の季節変動パターン

海流系に基づいて区分 (Fig. 1, Table 1) した日本周辺の10水塊における累年平均透明度と、その変動係数の季節変動を、それぞれ Fig. 5,6 に示した。また、各水塊における透明度の最大・最低値、年平均、年較差、変動係数の年平均をまとめて Table 3 に示した。Fig. 5,6 では、各水塊の透明度の季節変動パターンを詳しく比較できる反面、同一水塊内では空間的な平均値を用いているので、Fig. 2-4 の空間分布に現れている特徴が見にくくなっている点はある。例えば、地理的分布の第一の特徴として指摘した不連続線の存在は、特に太平洋南岸沿いのものについて、Fig. 5 から直接読みとることは必ずしも容易ではない。しかし、水塊ごとの季節変化の特徴、および水塊間の類似点と相違点については、Fig. 2-4 でみるよりも、その特徴を浮き彫りにできる。

Fig. 5 から、日本周辺海域の透明度の地理的分布が、ほぼ南高北低の分布パターンを示していることが判る。水塊ごとに、かなり明瞭な季節変化はあるものの、透明度の年平均値を比

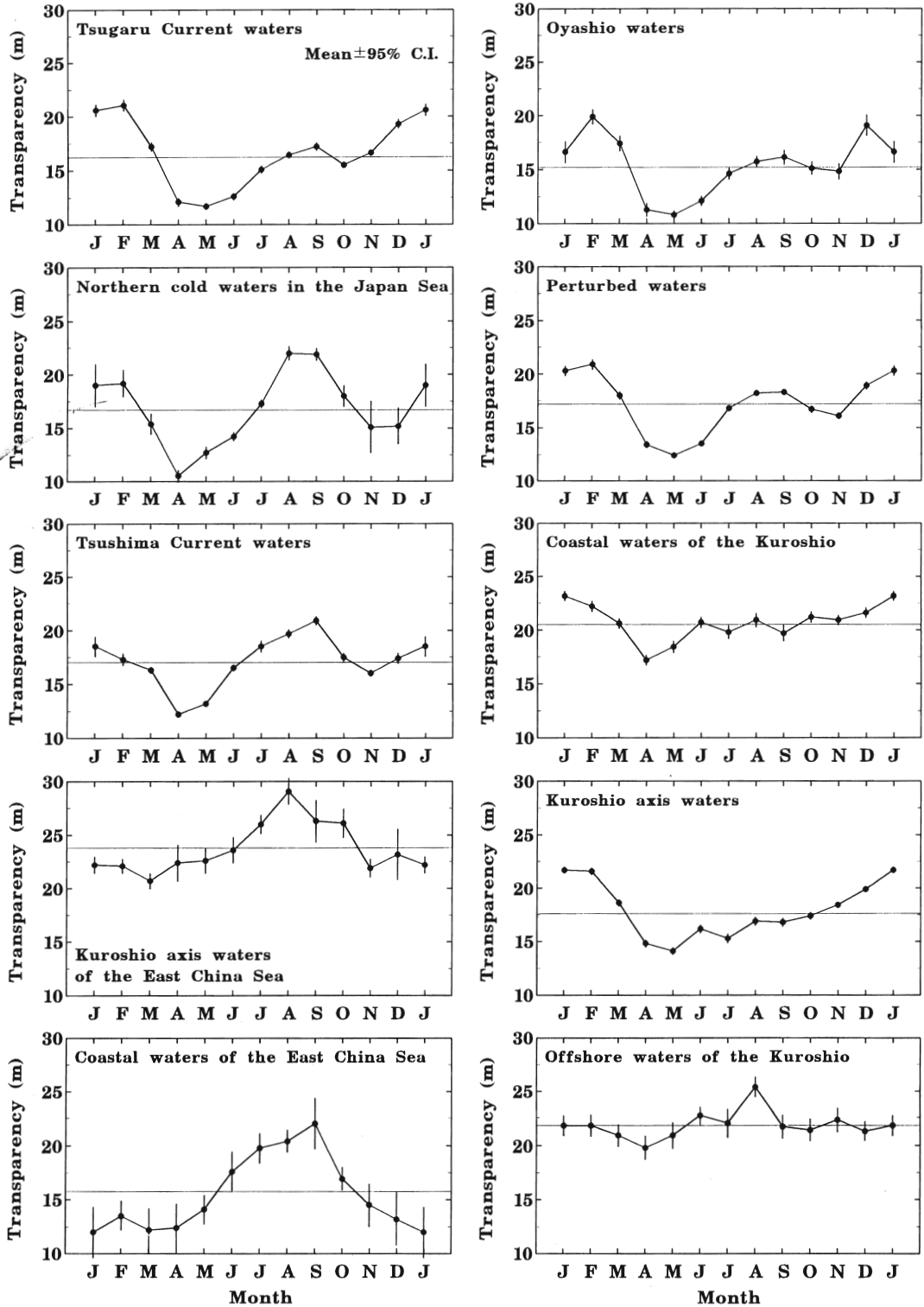


Fig. 5. Seasonal changes in the spatial mean transparency with 95% confidence intervals in ten waters classified based on Table 1. Horizontal thin lines in the figures denote the annual mean transparency.

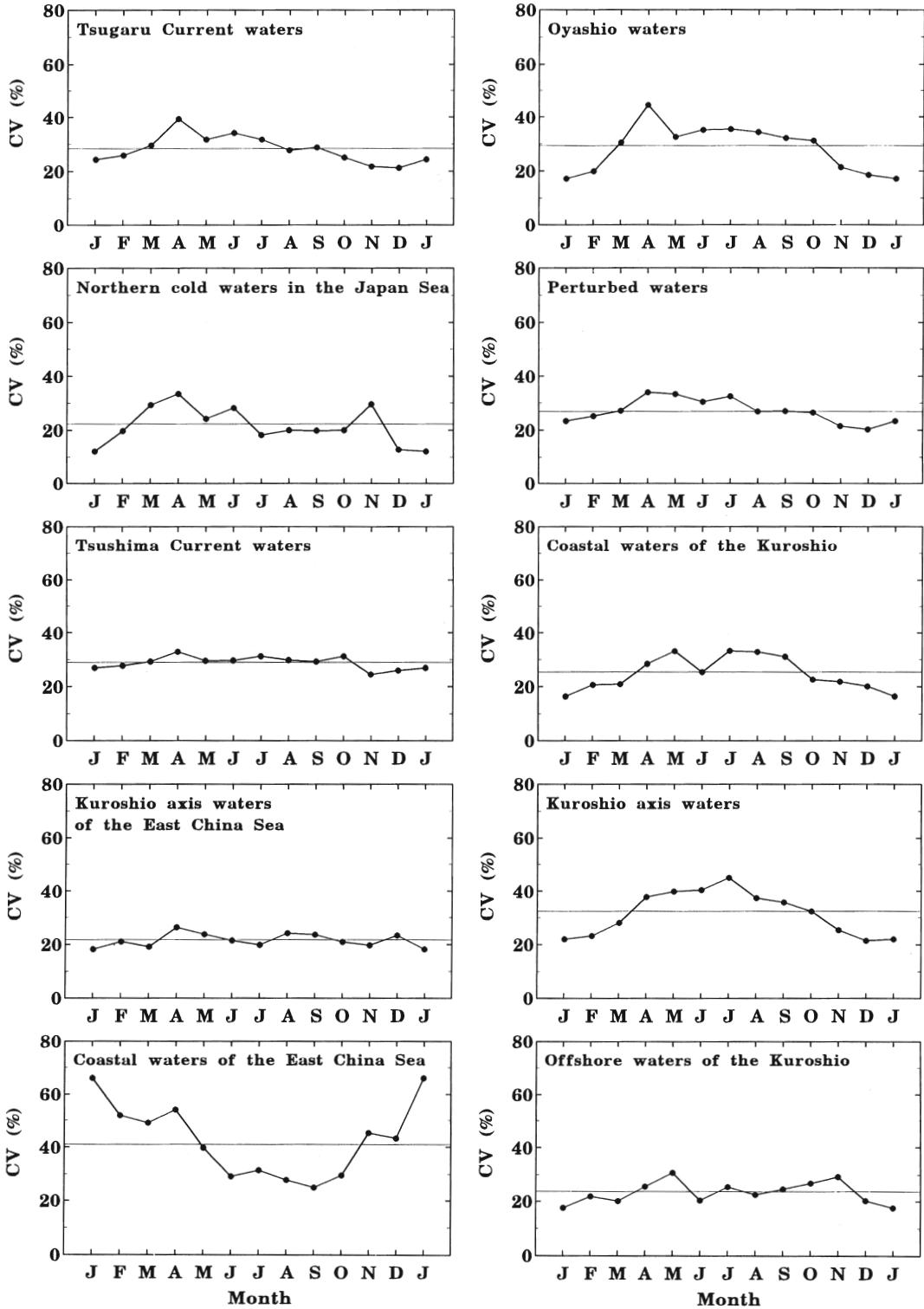


Fig. 6. Seasonal changes in the coefficient of variation (CV) of transparency in ten waters classified based on Table 1. Horizontal thin lines in the figures denote the annual mean CV.

Table 3. Seasonal changes in the transparency and coefficients of variation (CV) in the ten waters.

Waters	Transparency (m)		CV(%)		
	Maximun	Minimun	Annual mean	Annual range	Annual mean
Pacific Ocean					
(1)Oyashio waters	19.9 (Feb.)	10.8 (May)	15.2	9.1	29.3
(2)Perturbed waters	20.9 (Feb.)	12.4 (May)	17.2	8.5	26.8
(3)Tsugaru Current waters	21.1 (Feb.)	11.7 (May)	16.2	9.4	28.3
(4)Kuroshio axis waters	21.7 (Jan.)	14.1 (May)	17.6	7.6	32.4
(5)Offshore waters of the Kuroshio	25.4 (Aug.)	19.8 (Apr.)	21.8	5.6	23.7
(6)Coastal waters of the Kuroshio	23.2 (Jan.)	17.2 (Apr.)	20.5	6.0	25.5
Japan Sea					
(7)Tsushima Current waters	20.9 (Sep.)	12.2 (Apr.)	17.0	8.7	29.0
(8)Northern cold waters	22.0 (Aug.)	10.5 (Apr.)	16.7	11.5	22.2
East China Sea					
(9)Kuroshio axis waters	29.1 (Aug.)	20.7 (Mar.)	23.8	8.4	21.7
(10)Coastal waters	22.0 (Sep.)	12.0 (Jan.)	16.5	10.0	38.3

較すると、東シナ海の大陸系沿岸水域と、太平洋の黒潮流軸域を除き、明らかに南で高く北で低い。太平洋の黒潮流軸域については、黒潮外側域、黒潮内側域よりも透明度が低く、特に春季から秋季の間は、黒潮外側域との差が増大している。このことは、日本の南岸沿いにみられる透明度の不連続線は、そのまま黒潮フロントを反映したものではなく、むしろ黒潮流軸域と黒潮外側域との間の不連続線であることを示しており、興味深い。しかし、こうした特異な水塊を除けば、透明度の水平分布 (Fig. 2) にみられた、南高北低の分布傾向は、水塊ごとの平均値にもよく現れている。各水塊における透明度の年平均を比較すると、最も高いのは、東シナ海の黒潮流軸域と黒潮外側域であり、最も低いのは親潮域である。混乱水域、津軽暖流域、対馬暖流域、日本海の北方冷水域は、それぞれ同程度の平均値を示しており、黒潮外側域と親潮域の中間の透明度である。

地理的分布に現れている透明度の季節変化も、水塊ごとの平均でみると一層明瞭であり、3～5月にかけて日本周辺の広域で、透明度が低下していることがわかる。また、太平洋側の親潮域、混乱水域、津軽暖流域、日本海の対馬暖流域、北方冷水域では、10～11月の秋季にも透明度が低下している。また、Fig. 5からは、水塊ごとの季節変化の類似点と相違点も明瞭で、例えば、黒潮外側域では他の水塊に比較して、周年透明度は高いレベルにあって季節変化もかなり小さく、変化のパターンも他の海域とは異なっていること等を読みとることができる。

各水塊における透明度は、それぞれ特徴的な季節変動のパターンを示しているが、変化のパターンの類似点と相違点に基づいて、いくつかのグループにまとめることができそうにみえる。そこで、類似性と相違性を判断する一つの基準として、各水塊間で毎月の平均透明度の相関係数を調べた (Table 4)。危険率1%の相関が得られた組み合わせに注目すると、おおむね (a) 親潮域、混乱水域、津軽暖流域、黒潮流軸域、黒潮内側域の5水塊、(b) 東シナ海の黒潮流軸域、大陸系沿岸水域の2水塊、(c) 対馬暖流域、北方冷水域の2水塊、および (d) 黒潮外側域の1水塊が、それぞれ他の水塊と、透明度の季節変化に有意な差があるものとして区別できる。

Table 4. Correlation coefficients between the monthly mean transparency of the ten waters adjacent to Japan.
 1 : Oyashio waters, 2 : Perturbed waters, 3 : Tsugaru Current waters, 4 : Kuroshio axis waters of the Pacific, 5 : Offshore waters of the Kuroshio, 6 : Coastal waters of the Kuroshio, 7 : Tsushima Current waters, 8 : Northern cold waters of the Japan Sea, 9 : Kuroshio axis waters of the East China Sea, 10 : Coastal waters of the East China Sea

Waters	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	—									
2	0.897**	—								
3	0.939**	0.925**	—							
4	0.848**	0.865**	0.938**	—						
5	0.152	0.344	0.160	0.081	—					
6	0.737**	0.859**	0.825**	0.881**	0.388	—				
7	0.579*	0.738**	0.583*	0.380	0.599*	0.583*	—			
8	0.573	0.716**	0.604*	0.402	0.632*	0.558	0.929**	—		
9	-0.051	-0.068	-0.115	-0.329	0.659*	0.038	0.611*	0.623*	—	
10	-0.118	0.030	-0.191	-0.416	0.578*	-0.126	0.645*	0.589*	0.870**	—

*p<0.05 **p<0.01

(a)の水塊は、黒潮外側域を除いた太平洋にみられ、程度の差はあるものの、透明度は4、5月を中心とした春季に最低となり、1、2月を中心とした冬季に最高を示すことが共通した特徴である。親潮域、混乱水域、津軽暖流域では10、11月を中心とした秋季にもわずかに低下するが、黒潮流軸域、黒潮内側域では、秋季の低下は不明瞭である。(b)の水塊は、東シナ海にみられる。この水塊の季節変動は、冬季から春季にかけて低い状態が続き、8、9月を中心とした夏季に最高を示すことが特徴である。(c)の水塊は、日本海にみられる。透明度が4月に最低となることは、(a)の水塊と共通しているが、最高を示す時期が8、9月を中心とした夏季にみられる点が異なっている。この点は、東シナ海と共通した特徴である。このことは、日本海の透明度は、夏季を中心に、東シナ海の影響を受けていることを示唆している。また、日本海では秋季にも透明度の低下が明瞭に現れている。日本海の対馬暖流域、北方冷水域における透明度の季節変動は、混乱水域とも相関が高く (Table 4)、本来、(a)の水塊と季節変動に大きな差はないと考えることができる。(d)の水塊は、8月に高い値を示すものの、年較差は、ここに示した10海域の中で最も小さく、透明度の季節変動は不明瞭である。

以上のように、日本周辺海域では、異なった水塊であっても、透明度の季節変化は類似したものがあることが示された。このうち、季節変化のパターンが類似しているのは、例えば親潮域と混乱水域、黒潮流軸域と黒潮内側域、東シナ海の大陸系沿岸水域と黒潮流軸域、日本海の対馬暖流域と北方冷水域等のように、互いに隣接した水塊である場合が多いことは、水塊間での相互作用も考えられる。いずれにしても、(1)東シナ海の大陸系沿岸水域と、太平洋の黒潮流軸域を除く、透明度の南高北低の地理的分布パターンと、(2)広域的な春季の透明度の低下、および(3)北方の水塊を中心にもみられる秋季の低下という季節変化のパターンは、水塊別に検討した結果からも、日本周辺海域における透明度の地理的分布と季節変化の特徴として指摘することができる。

次に、各水塊における変動係数の年平均値をみると、東シナ海の大陸系沿岸水域が著しく大きく、この水塊における季節変動は、他の水塊に比べて、年変動が著しく大きいことを示して

Table 5. Correlation coefficients between the monthly mean transparency and coefficients of variation in ten waters adjacent to Japan.

Waters	r
Pacific Ocean	
(1)Oyashio waters	-0.717**
(2)Perturbed waters	-0.710**
(3)Tsugaru Current waters	-0.752**
(4)Kuroshio axis waters	-0.909**
(5)Offshore waters of the Kuroshio	-0.183
(6)Coastal waters of the Kuroshio	-0.712**
Japan Sea	
(7)Tsushima Current waters	-0.203
(8)Northern cold waters	-0.605*
East China Sea	
(9)Kuroshio axis waters	0.305
(10)Coastal waters	-0.881**

*p<0.05 **p<0.01

いる。黒潮流軸域、親潮域等も、年変動が比較的大きい水塊といえる。これに対して、東シナ海の黒潮流軸域、日本海の北方冷水域、黒潮外側域等では、月によっては大きい場合があるものの、年間を通してみれば、変動係数は小さい。これらの水塊では、変動係数の大きい水塊に比べ、季節変化のパターンは安定しており、毎年同様な季節変化が、繰り返されているということができる。

しかし、変動係数について最も注目すべき点は、変動係数にも累年平均透明度と同様、水塊によって特徴的な季節変化がみられるということである。しかも、多くの水塊で、透明度が低下する時期には変動係数は大きくなり、透明度が増大する時期には変動係数は小さくなるという共通した傾向がうかがえる。そこで、毎月の変動係数と、平均透明度との間の相関を調べた (Table 5)。その結果、親潮域、混乱水域、津軽暖流域、太平洋の黒潮流軸域、黒潮内側域、日本海の北方冷水域、大陸系沿岸水域では、両者の間に有意な負の相関が認められた。このことは、透明度が低い季節ほど、その値の年による変動が大きく、透明度が高い季節ほど、その値の年による変動が小さい傾向があることを示している。両者の相関が有意なこれらの水塊では、すでに指摘したように、冬季から春季にかけて透明度が大きく低下することが共通した特徴である。したがって、この結果は、とりわけ春季の透明度の低下について、年による変動が大きいかを示しているという点でも、注目される現象である。

考 察

透明度は海水の濁りの程度を表す指標である。濁りの原因となるものは、水中の懸濁物であるが、これには大別して河川水とともに流れ込む砂泥や、海底から巻き上がった堆積物、大気中からの降下物 (黄砂等) 等に由来する非生物粒子と、プランクトンに代表される生物粒子とがある。しかし、その中でも、特に植物プランクトン現存量の多寡が、透明度の変動と密接に関係していることが、世界各地の海域から報告されている (SHEMISHURA *et al.* 1982; SHIBATA and ARUGA 1982; MEGARD and BERMAN 1989)。日本海においても、長田(1994b)は、クロロフィル *a* 量と透明度の間に、有意な相関があることを示している。さらに最近では、透明度と基礎生産量との関係を指摘した報告もある (EPPLEY *et al.* 1985; LEWIS *et al.* 1988; FALKOWSKI and WILSON 1992)。

そこで、日本周辺海域から報告されているクロロフィル *a* 量、植物プランクトン細胞数、基礎生産量の値の一部を Table 6-8 に整理した。研究者によって扱っている海域や年、季節、さらには方法など必ずしも同一ではなく、細かい対比はあまり意味を持たないと思われるが、これら既往の研究成果から日本周辺海域における植物プランクトンの現存量の地理的分布と季節変化の特徴は読みとることができる。

まずクロロフィル *a* 量、細胞数の地理的分布についてみると、黒潮外側域では周年にわたって分布量が少なく、親潮域、混乱水域、対馬暖流域、北方冷水域で多い傾向がみられる。特に春季の親潮域は、クロロフィル *a* 量、細胞数ともに増大が著しく、全体としては南低北高の分布パターンが認められる。さらに、東シナ海について見ると、大陸系沿岸水域では、特にクロロフィル *a* 量が他の水塊に比べて著しく高い。

さらに季節的に細かく見ると、親潮域、混乱水域、津軽暖流域、黒潮流軸域、黒潮内側域では、クロロフィル *a* 量、細胞数は、冬季に比べて春季には増大している場合が多くみられている。また、親潮域、混乱水域、黒潮内側域では、秋季のクロロフィル *a* 量が、夏季に比べてやや増大している。さらに基礎生産量については、データが乏しいものの、親潮域と混乱水域で

Table 6. Summarized seasonal changes in concentration of chlorophyll *a* in the ten waters, based on various publications.

Waters	Winter	Spring	Summer	Autumn	Authors
Pacific Ocean					
(1)Oyashio waters	25mg/m ²	200—400mg/m ² 172.5mg/m ² 3.5—5.3mg/m ³	<25mg/m ² 14.6mg/m ²	25—50mg/m ²	OGISHIMA (1991) TANIGUCHI and KAWAMURA (1972) YOKOUCHI <i>et al.</i> (1991)
(2)Perturbed waters	50mg/m ²	50—100mg/m ² 0.3—4.0mg/m ³	0.5—0.7mg/m ³ 0.6—1.0mg/m ³ 10—25mg/m ²	25—50mg/m ²	SAIJO and ICHIMURA (1960) ICHIMURA (1965) OGISHIMA (1991) YOKOUCHI <i>et al.</i> (1991)
(3)Tsugaru Current waters	2.1—2.3mg/m ³		0.3—0.5mg/m ³ 0.2—0.3mg/m ³		SAIJO and ICHIMURA (1960) ICHIMURA (1965)
(4)Kuroshio axis waters	0.6mg/m ³				YOKOUCHI <i>et al.</i> (1991)
(5)Offshore waters of the Kuroshio	0.3—0.4mg/m ³ 25mg/m ² 22mg/m ²	0.1—0.3mg/m ³ 25mg/m ² 4—10mg/m ²	<0.2mg/m ³ 9mg/m ² 10mg/m ² 6—16mg/m ²	0.1—0.3mg/m ³ 14mg/m ²	TANIGUCHI and KAWAMURA (1970) KOBÉ MARINE OBSERVATORY (1987) KADONO and SAGI (1989) KURODA <i>et al.</i> (1977)
(6)Coastal waters of the Kuroshio	0.4mg/m ³ 24mg/m ²	0.5mg/m ³ 30—105mg/m ²	0.3mg/m ³ 22mg/m ² 32—160mg/m ² 60—100mg/m ²	0.4—0.6mg/m ³	ICHIMURA and SAIJO (1959) KOBÉ MARINE OBSERVATORY (1987) KADONO and SAGI (1989) ICHIMURA and SAIJO (1959) ZHU and WANG (1990)
Japan Sea					
(7)Tsushima Current waters	90mg/m ²	>100mg/m ²	20—50mg/m ²	20—50mg/m ²	KURODA (1987)
(8)Northern cold waters	1.0—2.0mg/m ³ 0.5—1.0mg/m ³	1.0—2.0mg/m ³ 1.0—2.0mg/m ³	>0.5mg/m ³ >0.5mg/m ³	>1.0mg/m ³ >0.5mg/m ³	EBARA (1984) EBARA (1984)
East China Sea					
(9)Kuroshio axis waters	0.2mg/m ³ 25mg/m ²	4—23mg/m ²	14mg/m ² 5—33mg/m ²		TANIGUCHI and KAWAMURA (1970) KADONO and SAGI (1989) ARUGA (1975)
(10)Coastal waters		0.3—9.3mg/m ³	0.3—8.0mg/m ³		KOZASA (1989) KOZASA (1987a)

Table 7. Summarized seasonal changes in phytoplankton cell number (cells/l) in the ten waters, based on various publications.

Waters	Winter	Spring	Summer	Autumn	Annual range	Authors
Pacific Ocean						
(1)Oyashio waters		$> 10^6$			10^3-10^6	KAWARADA (1975)
(2)Perturbed waters	10^3-10^5	10^3-10^5	10^2-10^3	10^2-10^3		KAWARADA (1975)
(3)Tsugaru Current waters			$3 \cdot 10^4$			ISOUCHI <i>et al.</i> (1978)
(4)Kuroshio axis waters	$5 \cdot 10^2-4 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^2-4 \cdot 10^4$	$0-4 \cdot 10^2$	$5 \cdot 10-4 \cdot 10^3$	10^2-10^4	KAWARADA (1975) KON (1963)
(5)Offshore waters of the Kuroshio	$5 \cdot 10^2-10^4$		$5 \cdot 10^2-10^4$		$< 10^4$	KAWARADA <i>et al.</i> (1966) KON (1963)
(6)Coastal waters of the Kuroshio	$< 5 \cdot 10^3$	$> 10^5$	$< 10^2$ $> 10^5$		10^3-10^5 $> 10^3$	KAWARADA <i>et al.</i> (1966) KAWARADA (1975) KON (1963) KAWARADA <i>et al.</i> (1966)
Japan Sea						
(7)Tsushima Current waters	10^3-10^4	$3 \cdot 10^3-10^5$	$5 \cdot 10^2-5 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^3-10^4$	10^3-10^4	KAWARADA (1975) EBARA (1984)
(8)Northern cold waters	$10^3-4 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^3-3 \cdot 10^4$	$7 \cdot 10^2-10^3$	$2 \cdot 10^3-9 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^2$	KAWARADA (1975) EBARA (1984)
East China Sea						
(9)Kuroshio axis waters	$5 \cdot 10^3-10^5$		$< 10^2$	$< 5 \cdot 10^2$		KAWARADA (1975) KAWARADA (1965)
(10)Coastal waters	10^3-10^4		$5 \cdot 10^2-10^4$			KAWARADA <i>et al.</i> (1968)
	$5 \cdot 10^2-5 \cdot 10^5$		$50-5 \cdot 10^3$			KAWARADA (1965)

Table 8. Summarized seasonal changes in primary productivity in the ten waters, based on various publications.

Waters	Winter	Spring	Summer	Autumn	Authors
Pacific Ocean					
(1)Oyashio waters		1.51gC/m ² /day 0.8-0.9gC/m ² /day	0.45gC/m ² /day 0.2-0.4gC/m ² /day		TANIGUCHI and KAWAMURA(1972) YOKOUCHI <i>et al.</i> (1991)
(2)Perturbed waters	0.20gC/m ² /day	1.7gC/m ² /day 0.3-0.8gC/m ² /day			TANIGUCHI(1972) ICHIMURA(1965) YOKOUCHI <i>et al.</i> (1991)
(3)Tsugaru Current waters		0.3-0.8gC/m ² /day	0.05-0.1gC/m ² /day		SAIJO and ICHIMURA(1960)
(4)Kuroshio axis waters	1.5mgC/m ³ /hr	0.3-0.8gC/m ² /day			YOKOUCHI <i>et al.</i> (1991)
(5)Offshore waters of the Kuroshio		0.1-0.7mg/m ³ /hr 1-4mg/m ³ /hr	0.05-0.1gC/m ² /day >0.1gC/m ² /day		TANIGUCHI and KAWAMURA(1970) ICHIMURA(1965) ICHIMURA and SAIJO(1959)
(6)Coastal waters of the Kuroshio	0.2gC/m ² /day		0.5-1.5gC/m ² /day		SAIJO and ICHIMURA(1960) SAIJO and ICHIMURA(1960) ARUGA(1977)
Japan Sea					
(7)Tsushima Current waters	0.21gC/m ² /day		0.08gC/m ² /day	0.12gC/m ² /day	KANO <i>et al.</i> (1984) NAGATA unpublished
(8)Northern cold waters			0.08-0.14gC/m ² /day		NAGATA unpublished
East China Sea					
(9)Kuroshio axis waters	0.7mgC/m ³ /hr 0.18gC/m ² /day	0.11gC/m ² /day	0.12gC/m ² /day		TANIGUCHI and KAWAMURA(1970) KOZASA(1987b)
(10)Coastal waters	0.12gC/m ² /day	0.49gC/m ² /day	0.49gC/m ² /day		KOZASA(1987b)

は、春季には比較的高い値を示している。東シナ海における黒潮流軸域と大陸系沿岸水域におけるクロロフィル a 量は、冬、春季と夏季では大きな差はみられないが、細胞数でみると、どちらの水塊も、夏季は冬季に比べて低い値となっている。日本海における対馬暖流域と北方冷水域では、クロロフィル a 量、細胞数ともに、春季に年間で最高、夏季に年間で最低の値が報告されている。また、冬季と夏季を比較すると、クロロフィル a 量、細胞数、基礎生産量ともに、冬季の方が高い値が報告されている。太平洋南方域の黒潮外側域ではクロロフィル a 量および細胞数ともに周年を通じて低い値で推移している。

日本周辺海域における植物プランクトン現存量、基礎生産量の地理的分布、あるいは季節変化に関する知見は未だ十分なものとはいえない。しかし、日本周辺海域における植物プランクトン現存量の地理的分布と、季節変化の特徴を整理すると、透明度の地理的分布および季節変化との間に負の相関関係が認められる。植物プランクトン現存量に関する長期間のデータが少ない一方で、透明度のデータは、すでに時空間的に膨大な量の蓄積があることを考えると、透明度はその海域の植物プランクトン現存量を推定するための指標であるとともに、長い過去から現在までの低次生物生産の長期変動を検討する際にも利用できる重要な環境パラメーターといえる。そうした検討の精度を高めるためには、透明度と植物プランクトンの現存量との定量的な相関関係をさらに詳しく解析する必要がある。

結 論

日本周辺海域の透明度の地理的分布と季節変化について、その特徴を調べた。透明度は基本的に南高北低の地理的分布パターンを示し、かつ春季に広域で透明度が低下するという特徴的な季節変化を示す。透明度の低下は秋季にも見られる場合が多く、特に北寄りの水域に共通している。細かくみれば水塊間で類似点と相違点を指摘することができるが、大きな特徴は、日本周辺海域で行われた植物プランクトン現存量に関わる研究から整理できるクロロフィル a 量あるいは細胞数の地理的分布、および季節変化と、透明度のそれらとの間に負の相関が示唆されることであり、透明度は植物プランクトン現存量の時空間変動の検討に利用できる重要な環境パラメーターであることが指摘された。

謝 辞

本論文をご校閲いただいた東北大学教授谷口旭博士に心から感謝申し上げます。日本海区水産研究所長新井茂博士には、草稿に目を通され、有益なコメントをいただいた。本論文で用いた資料の一部については、日本海区水産研究所の山田東也技官のご協力をいただいて作成した。記して感謝の意を表す。ここで用いたすべてのデータは、全国の国公立水産試験研究機関、海洋气象台、海上保安庁、大学等による海洋観測によって得られたものであり、これらの機関の担当者各位の長年のご努力に対して、深く敬意を表するとともに、これらのデータをご提供いただいた日本海洋データセンターに深謝する。

文 献

- 有賀祐勝 (1975) 東シナ海の基礎生産. 海と空, **51**, 29-31.
- ARUGA, Y. (1977) Primary production. pp345-346. In *Productivity of Biocenoses in Coastal Regions of Japan*, ed. by HOGETSU, K., HATANAKA, M., HANAOKA, T. and KAWAMURA, T., Univ. Tokyo Press, Tokyo.
- 榎原資嗣 (1984) 日本海 (TM線) における生物量の平均的分布. 黒潮の開発利用調査研究成果報告書, その7, 155-173.
- EPPLEY, R. W., STEWART, E., ABBOTT, M. R. and HEYMAN, U. (1985) Estimating ocean primary production from satellite chlorophyll. Introduction to regional differences and statistics for the Southern California Bight. *J. Plankton Res.*, **7**, 57-70.
- FALKOWSKI, P. G. and WILSON, C. (1992) Phytoplankton productivity in the north Pacific Ocean since 1900 and implications for absorption of anthropogenic CO₂. *Nature*, **358**, 741-743.
- 福田雅明・津田良平 (1980) 透明度測定に関する諸問題の考察. うみ, **18**, 138-152.
- HATA, K. (1969) Some problems relating to fluctuation of hydrographic conditions in the sea northwest of Japan (Part 1). *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **25**, 25-35.
- 市村俊英 (1965) 黒潮の基礎生産. 日本プランクトン研究連絡会報, (12), 1-6.
- ICHIMURA, S. and SAIJO, Y. (1959) Chlorophyll content and primary production of the Kuroshio off the southern midcoast of Japan. *Bot. Mag. Tokyo*, **72**, 193-202.
- 井上尚文 (1981) 東シナ海および対馬暖流域における海況特性. 五島の生物-老岐・対馬との対比-, 長崎県生物学会, 29-72.
- 磯打 勉・峰 雄二・山路 勇 (1978) 本州周辺海域の夏季における表層プランクトンの分布. 東京水産大学研究報告, **65**, 53-75.
- 角野康司・鷺 猛 (1989) 有光層における窒素化合物とクロロフィル a の分布について. 黒潮の開発利用調査研究成果報告書, 昭和62年度, 238-245.
- KANO, Y., BABA, N. and EBARA, S. (1984) Chlorophyll a and primary production in the Japan Sea. *Oceanogr. Mag.*, **34**, 31-39.
- 川合英夫 (1955) 東北海区における極前線帯とその変動について (第1報). 東北水研報告, (4), 1-46.
- 川合英夫 (1958) 資料のまとめ方と水塊配置の定め方. 東北水研海洋資源年報, 昭和25年度, 第1部海洋調査篇, 3-4.
- 川合英夫 (1972) 黒潮と親潮の海況学. pp129-321. 海洋科学基礎講座 2 海洋物理II, 東海大学出版会, 東京.
- 川原田 裕 (1965) 黒潮の珪藻類. 日本プランクトン研究連絡会報, (12), 8-16.
- 川原田 裕 (1975) 植物プランクトンの生態. pp1-47. 海洋科学基礎講座 6, 海洋プランクトン, 東海大学出版会, 東京.
- KAWARADA, Y., KITOU, M., FURUHASHI, K., SANO, A., KAROHJI, K., KURODA, K., ASAOKA, O., MATSUZAKI, M., OHWADA, M. and OGAWA, F. (1966) Distributions of plankton collected on board the research vessels of J. M. A. in 1965 (CSK). *Oceanogr. Mag.*, **18**, 91-112.
- KAWARADA, Y., KITOU, M., FURUHASHI, K. and SANO, A. (1968) Distribution of plankton in the waters neighboring Japan in 1966 (CSK). *Oceanogr. Mag.*, **20**, 187-212.
- 神戸海洋気象台 (1987) 紀伊半島沖定線 (G線) 30年報. 神戸海洋気象台彙報, (206), 1-26.
- 今 久則 (1963) 潮岬沖における珪藻分布について. 海と空, **39**, 1-6.
- 小長俊二・周東健三・草野博光・堀 王佑 (1967a) 黒潮表面の強流帯と200mの水温について. 海と空, **42**, 93-97.
- 小長俊二・周東健三・草野博光・堀 王佑 (1967b) 黒潮表面の強流帯と200mの水温についてII. 海と空, **43**, 48-53.
- 小笹悦二 (1987a) 植物プランクトンの微細分布とその変化. 黒潮の開発利用調査研究 (第II期) 成果報告書, その1, 231-236.
- 小笹悦二 (1987b) 黒潮上流域の生物生産量. 黒潮の開発利用調査研究, 第I期成果報告書, 62-68.
- 小笹悦二 (1989) 東シナ海におけるクロロフィルの分布特性. 海と空, **64**, 285-294.
- 久保田雅久 (1990) 日本海における極前線の変動. 航水研ノート, 空と海, **12**, 35-44.
- 黒田一紀 (1987) 日本南方の黒潮周辺海域におけるクロロフィルの分布特性. 航水研ノート, 空と海, **9**, 19-29.
- 黒田一紀・馬場信夫・高橋晴久・別所信一 (1977) 紀伊水道およびその隣接海域 (大阪湾・黒潮海域) におけるクロロフィル色素の分布特性. 海と空, **53**, 1-14.

- LEWIS, M. R., KURING, N. and YENTSCH, C. (1988) Global patterns of ocean transparency : Implications for the new production of the open ocean. *J. Geophys. Res.*, **93**, 6847-6856.
- MEGARD, R. O. and BERMAN, T. (1989) Effects of algae on the Secchi transparency of the southeastern Mediterranean Sea. *Limnol. Oceanogr.*, **34**, 1640-1655.
- 森田二郎 (1973) 西部太平洋における透明度の分布. 遠洋水研報告, (9), 1-18.
- 長田 宏 (1994a) 日本海における透明度の分布とその季節変動 (予報). 日水研報告, (44), 31-38.
- 長田 宏 (1994b) 日本海南部におけるクロロフィル a 量と透明度との関係. 日水研報告, (44), 39-47.
- NITANI, H. (1972) Beginning of the Kuroshio. pp129-163. In *Kuroshio, its Physical Aspects*, ed. by STOMMEL, H. and YOSHIDA, K., Univ. Tokyo Press, Tokyo.
- 萩島 隆 (1991) 北海道南東海域におけるマイワシ餌料としてのクロロフィル a 分布. 北水研報告, (55), 173-184.
- SAIJO, Y. and ICHIMURA, S. (1960) Primary production in the northwestern Pacific Ocean. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **16**, 29-35.
- SHEMSHURA, V. YE., URDENKO, V. A. and FEDIRKO, V. I. (1982) Relationship between relative transparency and chlorophyll *a* concentration in water. *Oceanology*, **22**, 298-300.
- SHIBATA, Y. and ARUGA, Y. (1982) Variations of chlorophyll *a* concentration and photosynthetic activity of phytoplankton in Tokyo Bay. *La mer*, **20**, 75-92.
- SHOJI, D. (1972) Time variation of the Kuroshio south of Japan. pp217-234. In *Kuroshio, its Physical Aspects*, ed. by STOMMEL, H. and YOSHIDA, K., Univ. Tokyo Press, Tokyo.
- 周東健三 (1982) 日本海の海況 I. 海と空, **57**, 157-169.
- TAFT, B. (1972) Characteristics of the flow of the Kuroshio south of Japan. pp165-216. In *Kuroshio, its Physical Aspects*, ed. by STOMMEL, H. and YOSHIDA, K., Univ. Tokyo Press, Tokyo.
- TANIGUCHI, A. (1972) Geographical variation of primary production in the western Pacific Ocean and adjacent seas with reference to the inter-relations between various parameters of primary production. *Mem. Fac. Fish., Hokkaido Univ.*, **19**, 1-33.
- TANIGUCHI, A. and KAWAMURA, T. (1970) Primary production in the western tropical and subtropical Pacific Ocean. pp159-168. In *Proc. of the 2nd CSK Symposium*, ed. by SUGAWARA, K., Saikon Publishing Co. Ltd., Tokyo.
- TANIGUCHI, A. and KAWAMURA, T. (1972) Primary production in the Oyashio region with special reference to the subsurface chlorophyll maximum layer and phytoplankton-zooplankton relationship. pp231-243. In *Biological Oceanography of the Northern North Pacific Ocean*, ed. by TAKENOUTI *et al.*, Idemitsu Shoten, Tokyo.
- 谷岡克己 (1962) 日本海の海況 II, 日本海にみられる冷水域・暖水域及び高かん水について. 海と空, **38**, 115-128.
- 宇田道隆 (1930) 日本近海に於ける水色透明度の分布状態及其年変化. 海と空, **10**, 173-180.
- 横内克己・安田一郎・松尾 豊・平井光行 (1991) 東北海区における植物プランクトン現存量の分布と基礎生産量. 黒潮の開発利用調査研究成果報告書, 平成元年度, 289-297.
- ZHU, B. and WANG, X. (1990) The distribution of chlorophyll *a* and primary production in the southern and eastern ocean areas off Japan in 1987. pp299-303. In *Selected Papers on the Investigation and Research of the Kuroshio (II)*, China Ocean Press, Beijing.