

日本周辺海域におけるクロロフィル a 量と透明度との関係

長田 宏¹⁾

Relationship Between Chlorophyll a Concentration and Water Transparency in the Seas Adjacent to Japan

Hiroshi NAGATA¹⁾

Abstract

The present paper examines the relationship between chlorophyll a concentration and transparency in waters adjacent to Japan. The results show that it is possible to estimate seasonal changes in chlorophyll a based on variations in transparency in seas adjacent to Japan. Moreover, geographical distribution of chlorophyll a can be estimated in many sea areas based on the degree of transparency. Over all seasons, transparency is a useful and practical indicator of the concentration of chlorophyll a in waters adjacent to Japan.

Key words: chlorophyll a , phytoplankton biomass, regression equation, transparency, water mass

緒 言

クロロフィル a 量は、植物プランクトンの現存量を表すだけでなく、海洋の基礎生産量の指標としても利用できる重要な環境パラメーターである（有賀 1973；EPPLEY *et al.* 1985）。それゆえ、クロロフィル a 量の季節的な分布様式あるいは経年変動は、有用水産生物の成長、漁場形成機構、さらに長期的な資源変動のメカニズムを解明するうえでも、不可欠な基礎的情報といえる。しかし、わが国でクロロフィル a 量の測定を、通常の海洋観測項目として定期的に行っている機関は極めて少数であり、時空間的な変動特性については、未解明の部分が多く残されている。

一方、透明度は水の濁り、すなわち懸濁粒子の量を概略的に表す指標であり、簡単な器具で容易に測定できることから、多くの機関で基本的な観測項目に加えられている。その反面、透明度のデータは、その蓄積量が多い割には、十分に利用されてきたとはいえない。その理由として、透明度は、(1)目視による観測であること、また(2)表層の濁りを概略的に示すものにとすぎず、海水の光学的性質とは直接結びついたものではないと考えられる（杉原 1987）こと等があげられる。しかし、(1)についてみると、透明度は天候や測定者によってあまり大きく左右されないことがわかっている（吉村 1936；福田・津田 1980）ほか、(2)についても、透明度の理

1996年1月23日受理 日本海区水産研究所業績A第507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)

論的裏付けに関する研究が進められており (TYLER 1968; HOLMES 1970; 福田・津田 1980; MEGARD and BERMAN 1989), 東京湾という限られた小水域についてはあるが, 透明度は海域の低次生物生産環境の指標として有用であることも報告されている (例えば豊田・中島 1979; SHIBATA and ARUGA 1982).

透明度に影響を与える懸濁粒子には植物プランクトンも含まれているので, 豊富に蓄積されている透明度のデータからクロロフィル *a* 量を推定することができれば, 海洋の生物生産に関する研究は大いに発展することが期待される. 前報 (長田ら 1996) において, 長田らは, 日本周辺海域の透明度の地理的分布と季節変化の特徴を明らかにすると共に, 透明度が植物プランクトン現存量の極めてよい指標となり得る可能性を指摘している. しかし, そのためには, まずクロロフィル *a* 量と透明度の関係を明らかにしておかねばならない.

これまで透明度からクロロフィル *a* 量を推定する試みは, SHEMSHURA *et al.* (1982), LEWIS *et al.* (1988), FALKOWSKI and WILSON (1992) も行っており, 世界各地のさまざまな海域, 季節の結果をもとに, 回帰式を提示している. 日本近海については, SAIJO and ICHIMURA (1960) が, 黒潮域と親潮域で, クロロフィル *a* 量と透明度の関係を比較し, 両海域で回帰式が異なることを報告している. このことは, 海域が異なればクロロフィル *a* 量と透明度の関係も異なることを示している. しかし, 黒潮域では5月と8月, 親潮域では7~9月のデータだけを解析しているため, 季節によってこれらの関係がどのように変動するのかは, 明らかにされていない. 長田 (1994) は, 日本海の南部海域において, クロロフィル *a* 量と透明度との関係を調べ, 透明度の季節変化は, クロロフィル *a* 量の季節変化を非常に高い相関で反映していることを示している. しかし, そうした検討は, 日本近海の他の海域については未だに十分には行われておらず, 長田 (1994) の結果も, 対馬暖流域だけでなく, 北方冷水域も含んでいることから, 2つの水塊における両者の関係を合わせたものといえる.

そこで, (1)日本周辺の太平洋, 日本海, 東シナ海に分布する水塊の中で, 透明度の季節変化がクロロフィル *a* 量の季節変化を表し得るか否かを検討すると共に, (2)両者の関係は, 季節によって, また海域によってどのように異なるのか, を明らかにすることを目的に資料の解析を行った.

資料と方法

解析に用いた資料は, 気象庁海洋観測資料 (気象庁 1974-1994) に記載されている, 1973~1992年の20年間にわたるクロロフィル *a* の各層観測結果と, 透明度の値である. 透明度は表面のクロロフィル *a* 量に対するよりも, 表面から透明度深までの平均クロロフィル *a* 量に対する方が, 強い相関関係が認められることが示されている (SHEMSHURA *et al.* 1982). そこで, 本論文では表面から透明度深までのクロロフィル *a* 量の積算平均値を求め, 透明度との関係を検討した. 使用したデータは, 気象庁の海洋観測定線である PH 線, PK 線 (太平洋), PM 線 (日本海), PN 線 (東シナ海) の観測結果である (Fig. 1). これらの観測線に含まれる水塊を, 同時に観測された水温, 塩分の値を基に, 過去の知見から整理した基準 (Table 1) に従って, PH 線からは (1)親潮域, (2)混乱水域, (3)津軽暖流域, PK 線からは(4)黒潮流軸域, (5)黒潮外側域, (6)黒潮内側域, PM 線からは(7)対馬暖流域, (8)北方冷水域, PN 線からは(9)東シナ海の黒潮流軸域, (10)大陸系沿岸水域, の10水塊に区分した. 観測は, 2, 4, 5, 7, 8, 9, 10月に実施されていることが多いため, 2月を冬季, 4, 5月を春季, 7, 8月を夏季, 9, 10月を秋季の代表値とした.

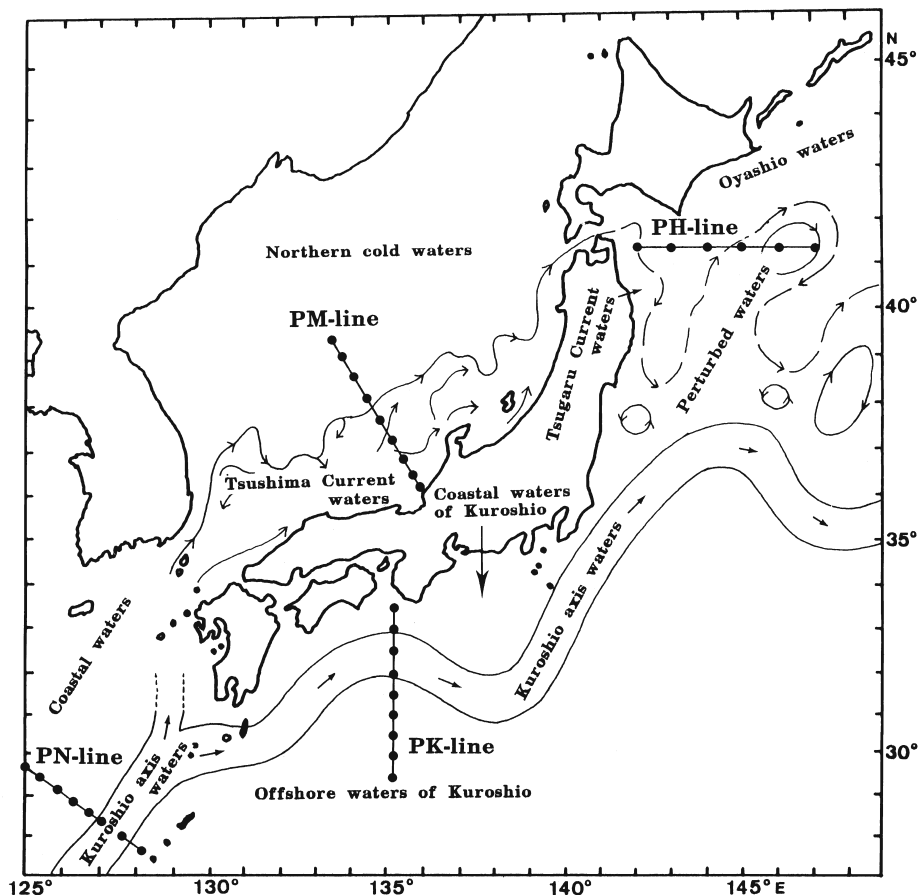


Fig. 1. Observation lines for the Hakodate (PH-line), Kobe (PK-line), Nagasaki (PN-line) and Maizuru (PM-line) Marine Observatories with a schematic representation of the current flow patterns and water masses adjacent to Japan.

透明度からクロロフィル a 量への回帰式は, SHEMSHURA *et al.* (1982), LEWIS *et al.* (1988), FALKOWSKI and WILSON (1992) と同様, $C = aT^b$ の指数関数式で表した. ここで, C はクロロフィル a 量 (mg/m^3), T は透明度 (m), a, b は定数である.

結果および考察

クロロフィル a 量と透明度との関係を明らかにするために, まず四季にわたる両者の値をプロットし, 年間を通じた関係を調べた (Fig. 2). その結果, 各水塊ごとにクロロフィル a 量と透明度のデータ数, 変動幅, 分布状況等に差はあるものの, すべての水塊において, 両対数グラフ上で有意な ($p < 0.01$) 直線関係がみられた. このことは, 程度の差はあれ, 透明度の季節変化にはクロロフィル a 量の季節変化がよく反映されており, 季節変化を推定するためであれば, どの水塊においても透明度からクロロフィル a 量が推定できることを示している.

他方, Fig. 2 から読みとることができるよう, クロロフィル a 量と透明度の値は, 季節に

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

Waters	Criteria	Authors
Pacific Ocean		
PH-line		
(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)
PK-line		
(4)Kuroshio axis waters	$15^{\circ}\text{C} \leq T_{200}^{\text{c)}$ $\leq 18^{\circ}\text{C}$	KONAGA <i>et al.</i> (1967a, b)
(5)Offshore waters of the Kuroshio	$18^{\circ}\text{C} < T_{200}$	KONAGA <i>et al.</i> (1967a, b)
(6)Coastal waters of the Kuroshio	$15^{\circ}\text{C} > T_{200}$	KONAGA <i>et al.</i> (1967a, b)
Japan Sea (PM-line)		
(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 (PN-line)		
(9)Kuroshio axis waters	$16.5^{\circ}\text{C} \leq T_{200} \leq 19.5^{\circ}\text{C}$	NITANI(1972), INOUE(1981)
(10)Coastal waters	$T_{200} < 16.5^{\circ}\text{C}$	NITANI(1972), INOUE(1981)

^{a)} temperature at 100m depth ^{b)} salinity at 100m depth ^{c)} temperature at 200m depth

Table 2. Seasonal changes in the coefficient of variation (CV in %) of chlorophyll *a* and transparency in the ten water masses adjacent to Japan. Numerals in parenthesis denotes the mean value of chlorophyll *a* (mg/m³) and transparency (m).

Waters	Chlorophyll <i>a</i>				Transparency			
	Winter	Spring	Summer	Autumn	Winter	Spring	Summer	Autumn
Pacific Ocean (PH, PK-line)								
(1)Oyashio waters	35.9 (0.37)	88.5 (6.51)	75.0 (0.79)	41.8 (0.88)	16.2 (20.3)	47.5 (10.0)	30.9 (13.0)	24.2 (12.7)
(2)Perturbed waters	34.6 (0.36)	85.5 (3.68)	78.9 (0.65)	43.5 (0.89)	21.2 (19.4)	50.5 (12.2)	29.5 (13.8)	26.4 (13.5)
(3)Tsugaru Current waters	28.9 (0.24)	30.8 (1.23)	101.6 (1.07)	54.8 (0.98)	17.1 (22.7)	16.1 (14.2)	29.8 (14.5)	31.9 (14.5)
(4)Kuroshio axis waters	38.8 (0.38)	51.1 (0.32)	87.3 (0.14)	68.0 (0.24)	30.3 (22.6)	23.6 (20.3)	22.2 (29.5)	35.2 (28.7)
(5)Offshore waters of the Kuroshio	29.8 (0.30)	55.7 (0.22)	54.9 (0.12)	60.2 (0.15)	18.1 (26.4)	18.6 (25.3)	19.3 (31.6)	17.6 (31.4)
(6)Coastal waters of the Kuroshio	34.8 (0.51)	62.9 (0.68)	66.6 (0.29)	56.6 (0.45)	25.1 (21.1)	25.5 (17.4)	25.7 (22.2)	19.9 (21.6)
Japan Sea (PM-line)								
(7)Tsushima Current waters	45.5 (0.42)	84.8 (0.61)	42.1 (0.13)	46.1 (0.22)	23.9 (20.5)	17.9 (14.0)	17.1 (23.6)	16.4 (21.0)
(8)Northern cold waters	59.0 (0.67)	58.4 (0.53)	38.6 (0.13)	41.0 (0.25)	23.6 (18.2)	20.7 (13.0)	16.5 (21.8)	19.7 (19.2)
East China Sea (PN-line)								
(9)Kuroshio axis waters	21.5 (0.36)	46.6 (0.19)	73.1 (0.15)	66.6 (0.17)	13.3 (24.7)	24.2 (25.8)	14.9 (30.2)	13.9 (31.1)
(10)Coastal waters	39.3 (0.55)	84.4 (0.97)	100.3 (0.23)	87.6 (0.46)	37.8 (15.2)	30.8 (14.6)	28.8 (23.5)	27.4 (20.8)

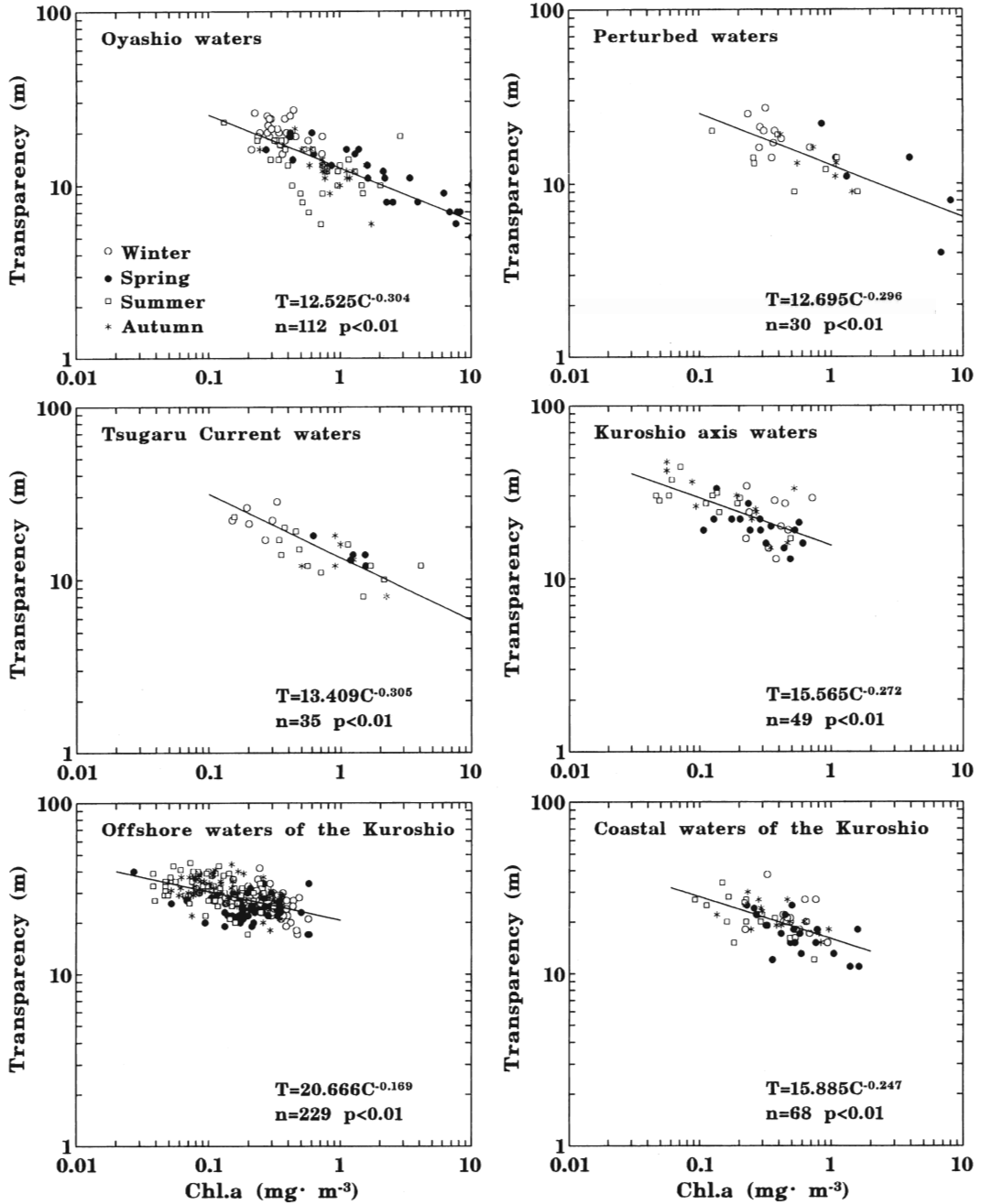


Fig. 2. Relationship between the chlorophyll *a* content (mg/m^3) and transparency (m) with fitted regression equations (see Fig. 1 for location of sea areas). Chlorophyll *a* content is given as *C* and transparency as *T* in regression equations. Chlorophyll *a* content is defined as the mean value taken from the layer above the depth at which the visibility of the Secchi disk is extinguished.

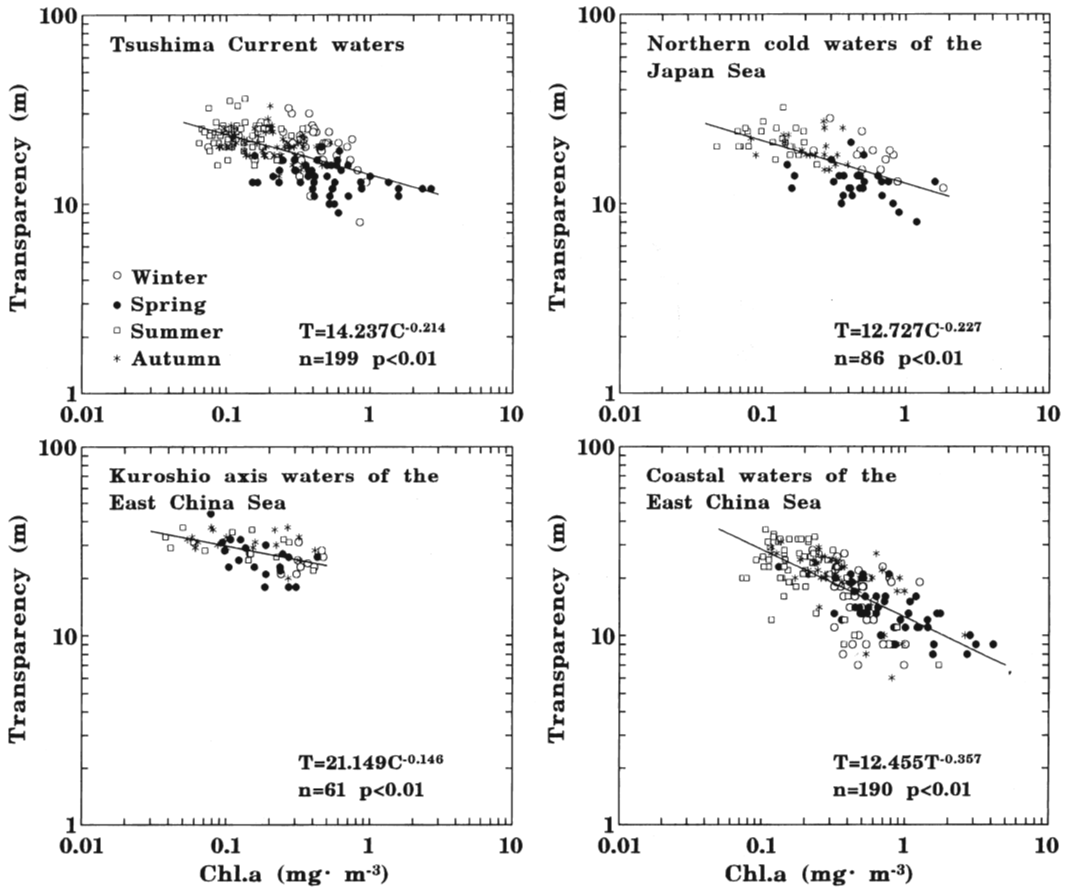


Fig. 2. Continued

よって変動する範囲や分布状況が異なっている (Table 2). このことは、透明度を用いて、ある季節における水塊内のクロロフィル *a* 量の地理的分布を推定するためには、季節ごとにクロロフィル *a* 量と透明度の関係を調べる必要があることを示している。

そこで、季節ごとに、透明度からクロロフィル *a* 量を推定することの可否を検討するため、透明度を独立変数、クロロフィル *a* 量を従属変数として、両者の関係を水塊別に検討した (Fig. 3). ここでは危険率10%を有意性の有無の基準とし、有意な相関があると判定されたときは、回帰式を併せて図中に示した。

親潮域では、冬季は有意な相関がみられないが、春季には1%の危険率で有意な相関がみられる。このときの透明度の変動範囲は4~20m、クロロフィル *a* 量の変動範囲は0.27~20.67 mg/m³と、きわめて範囲が大きく、特にクロロフィル *a* 量の変動幅が大きい。夏季は5%の危険率で有意であり、透明度、クロロフィル *a* 量の変動範囲は、それぞれ6~23m, 0.13~2.87mg/m³である。秋季は1%の危険率で有意であり、透明度、クロロフィル *a* 量の変動範囲は、それぞれ6~21m, 0.25~1.73mg/m³である。

混乱水域でも、冬季は親潮域と同様、有意な相関はみられない。春季には相関は有意であるものの、その危険率は10%と、やや大きい。透明度、クロロフィル *a* 量の変動範囲は、それぞれ4~22m, 0.85~8.08mg/m³であり、特にクロロフィル *a* 量は親潮域に次ぐ高濃度である。

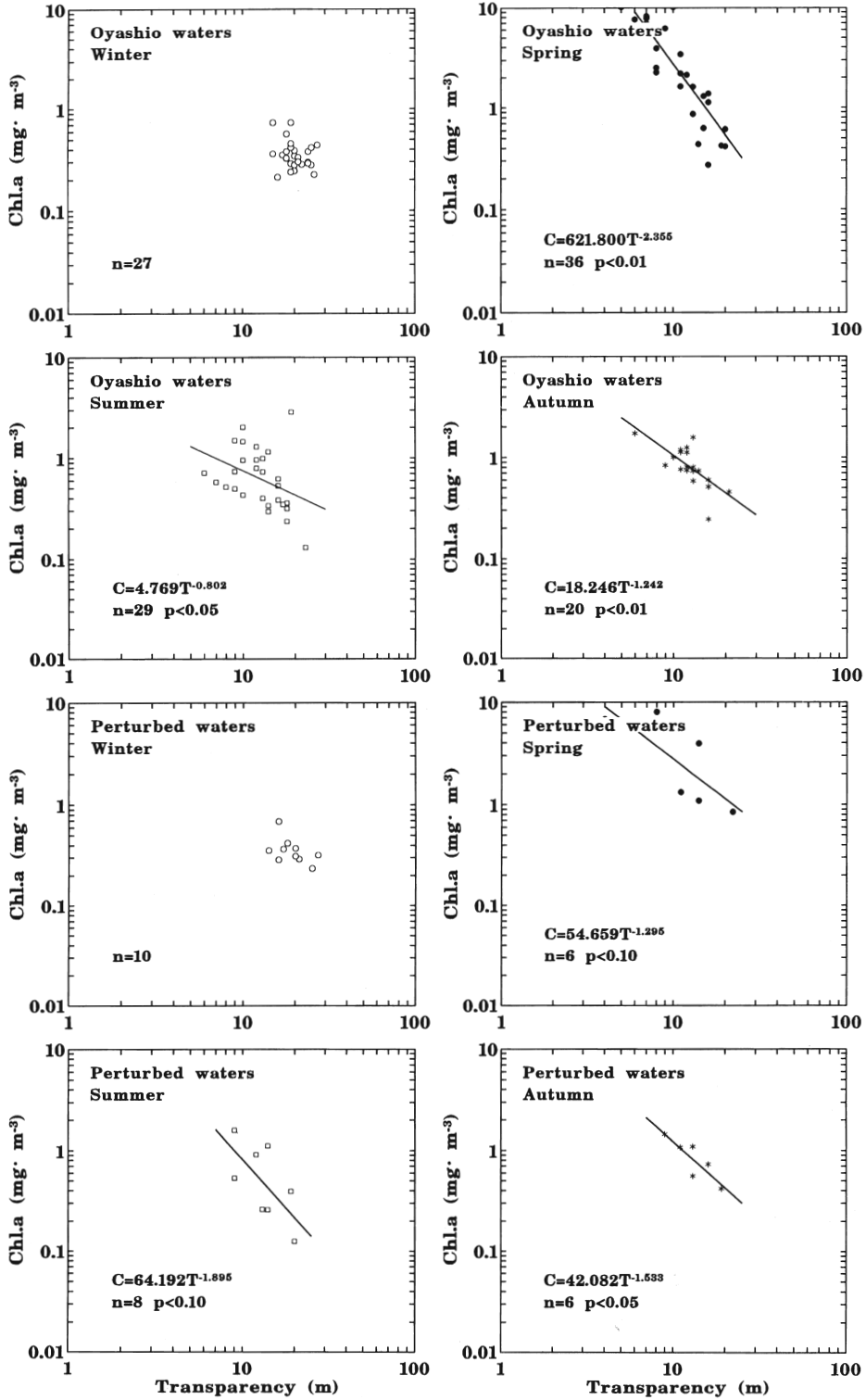


Fig. 3. Relationship between transparency (m) and chlorophyll *a* (mg/m^3) in the four seasons: winter, spring, summer and autumn. Regression lines and equations are shown for significant relationships.

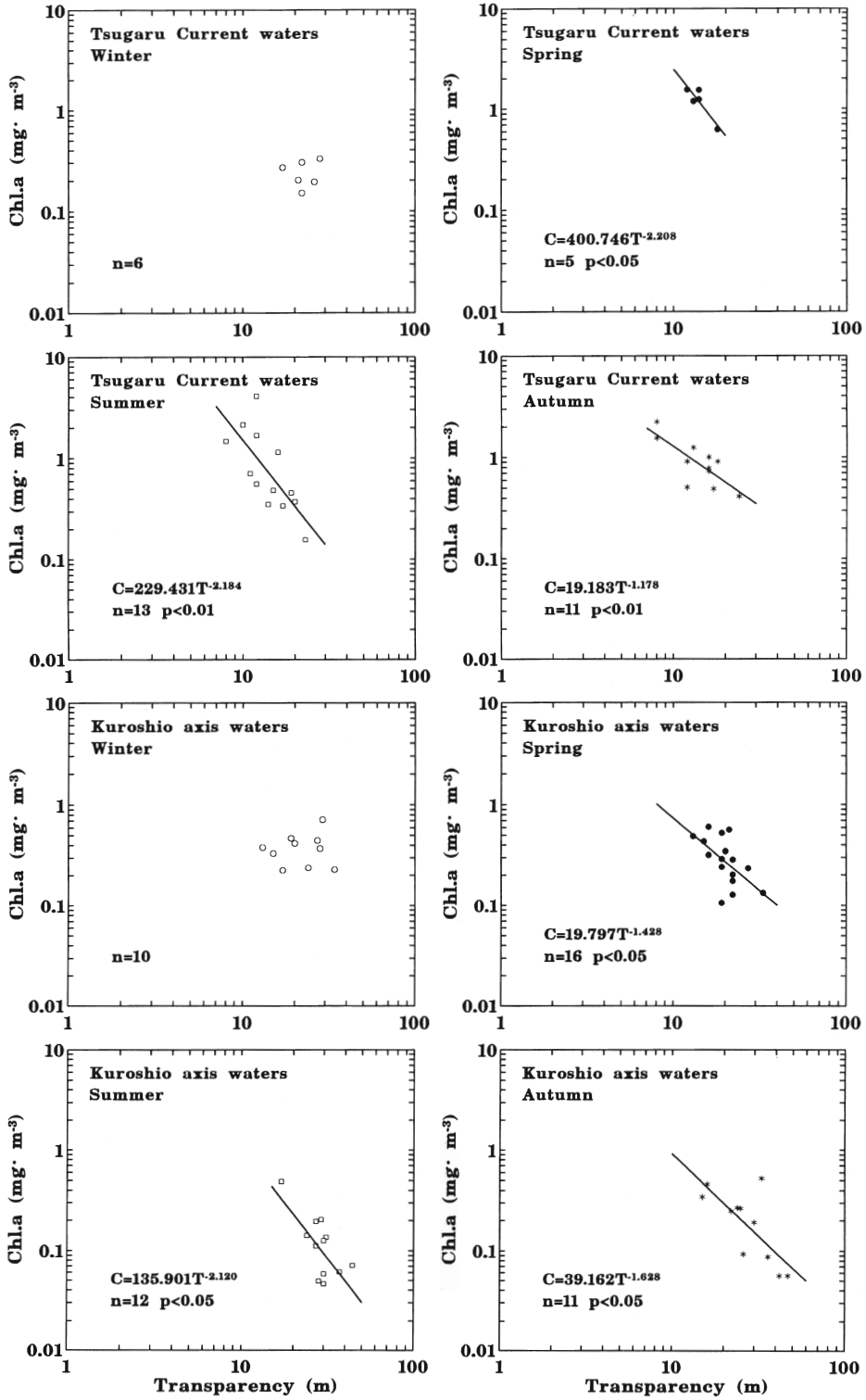


Fig. 3. Continued

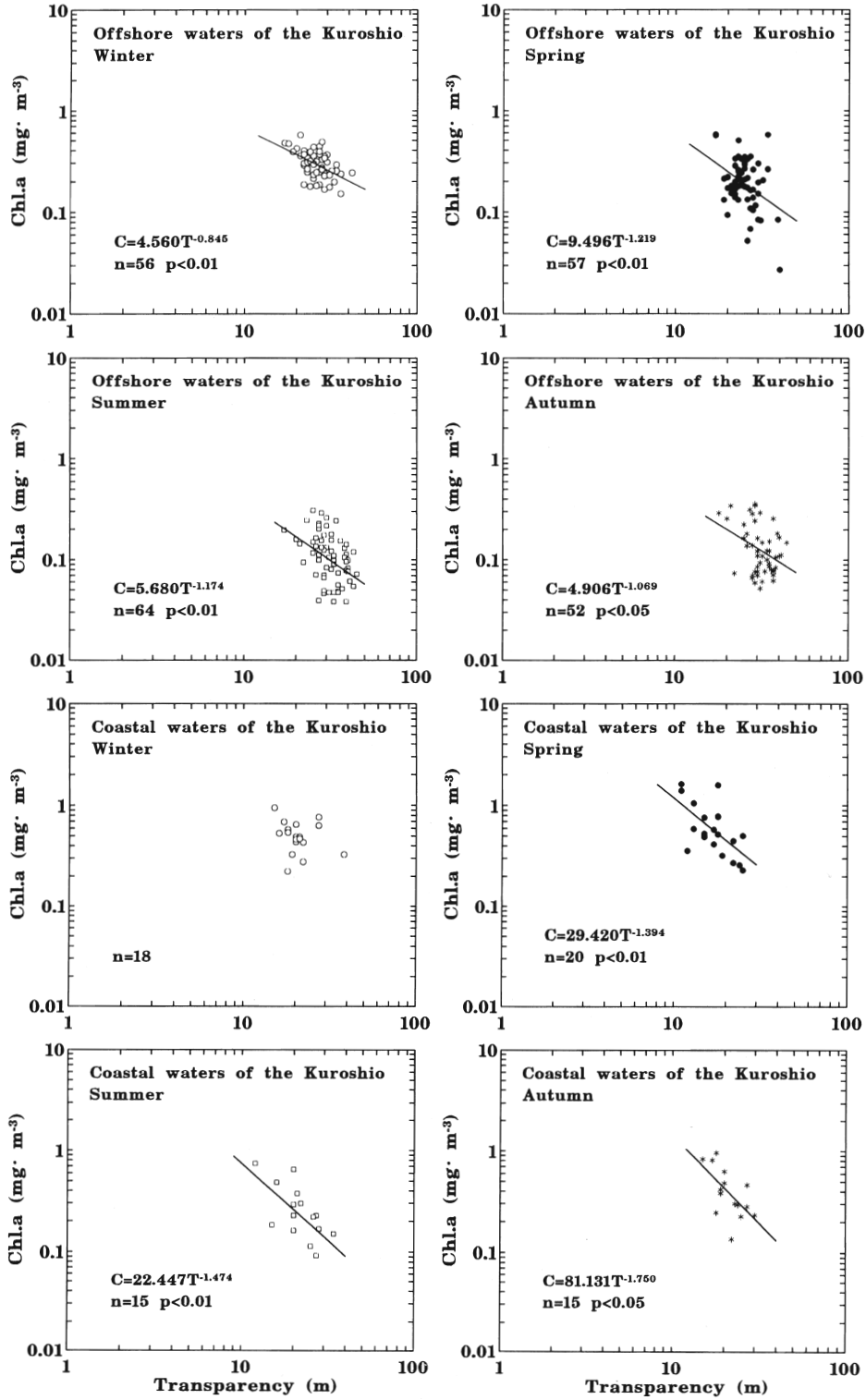


Fig. 3. Continued

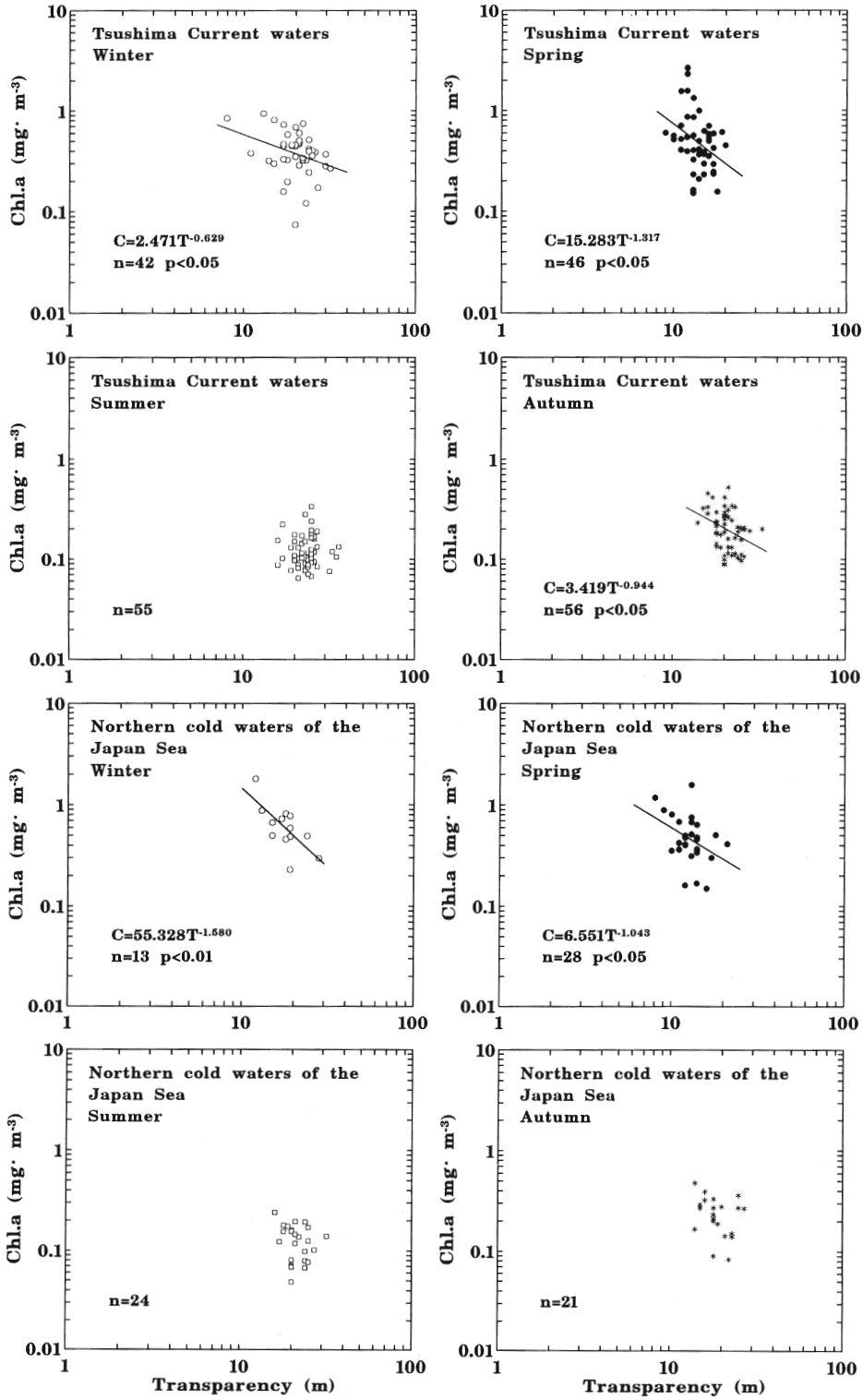


Fig. 3. Continued

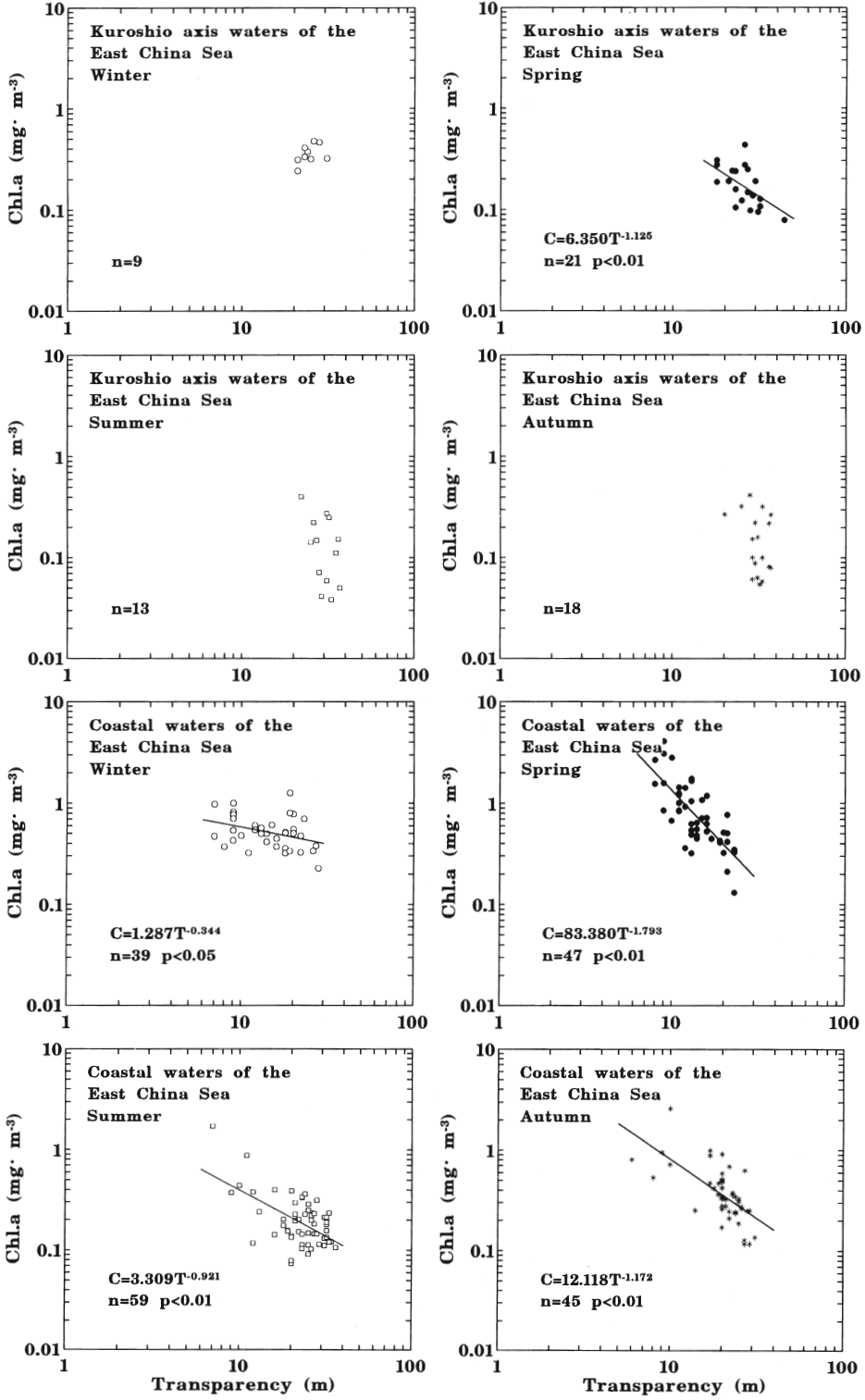


Fig. 3. Continued

夏季も10%の危険率ながら有意であり、透明度、クロロフィル *a* 量の変動範囲は、それぞれ9~20m, 0.13~1.59mg/m³である。秋季は、危険率5%で有意である。透明度、クロロフィル *a* の変動幅は、それぞれ9~19m, 0.42~1.45mg/m³である。

津軽暖流域では、冬季は親潮域、混乱水域と同様、有意な相関はみられない。春季には、5%の危険率で相関は有意である。そのときの透明度、クロロフィル *a* 量の変動範囲は、それぞれ12~18m, 0.62~1.55mg/m³である。夏季は1%の危険率で有意であり、透明度、クロロフィル *a* 量の変動範囲は、それぞれ8~23m, 0.16~4.09mg/m³である。秋季も、危険率1%で有意である。透明度、クロロフィル *a* の変動幅は、それぞれ8~24m, 0.41~2.24mg/m³である。

黒潮流軸域では、冬季は親潮域、混乱水域等と同様、有意な相関はみられない。春季は、5%の危険率で相関は有意であり、透明度、クロロフィル *a* 量の変動範囲は、それぞれ13~33m, 0.11~0.61mg/m³である。夏季も5%の危険率で有意であり、透明度、クロロフィル *a* 量の変動範囲は、それぞれ17~44m, 0.05~0.49mg/m³である。秋季も、危険率5%で有意であり、透明度、クロロフィル *a* の変動幅は、それぞれ15~47m, 0.06~0.53mg/m³である。

黒潮外側域では、冬季は1%の危険率で有意であり、透明度、クロロフィル *a* 量の変動幅は、それぞれ17~42m, 0.15~0.57mg/m³である。春季も1%の危険率で相関は有意であり、透明度、クロロフィル *a* 量の変動範囲は、それぞれ17~40m, 0.03~0.58mg/m³である。夏季も1%の危険率で有意であり、透明度、クロロフィル *a* 量の変動範囲は、それぞれ17~45m, 0.04~0.31mg/m³である。秋季は、危険率5%で有意であり、透明度、クロロフィル *a* の変動幅は、それぞれ18~44m, 0.05~0.36mg/m³である。

黒潮内側域では、冬季は有意な相関はみられない。春季は、1%の危険率で相関は有意であり、透明度、クロロフィル *a* 量の変動範囲は、それぞれ11~25m, 0.23~1.63mg/m³である。夏季も1%の危険率で有意であり、透明度、クロロフィル *a* 量の変動範囲は、それぞれ12~34m, 0.09~0.74mg/m³である。秋季は、危険率5%で有意であり、透明度、クロロフィル *a* の変動幅は、それぞれ15~30m, 0.14~0.96mg/m³である。

対馬暖流域では、冬季は5%の危険率で有意な相関がみられる。透明度、クロロフィル *a* 量の変動幅は、それぞれ8~32m, 0.07~0.94mg/m³である。春季は、5%の危険率で相関は有意であり、透明度、クロロフィル *a* 量の変動範囲は、それぞれ9~20m, 0.15~2.65mg/m³である。夏季には有意な相関はみられない。秋季は、危険率5%で有意であり、透明度、クロロフィル *a* の変動幅は、それぞれ14~33m, 0.09~0.52mg/m³である。

北方冷水域では、冬季は1%の危険率で有意な相関がみられる。透明度、クロロフィル *a* 量の変動幅は、それぞれ12~28m, 0.23~1.81mg/m³である。春季は、5%の危険率で相関は有意であり、透明度、クロロフィル *a* 量の変動範囲は、それぞれ8~21m, 0.15~1.59mg/m³である。夏季、秋季には有意な相関はみられない。

東シナ海の黒潮流軸域では、冬、夏、秋季は有意な相関がみられない。春季は、1%の危険率で相関は有意であり、透明度、クロロフィル *a* 量の変動範囲は、それぞれ18~44m, 0.08~0.43mg/m³である。

大陸系沿岸水域では、冬季は5%の危険率で有意であり、透明度、クロロフィル *a* 量の変動幅は、それぞれ7~28m, 0.23~1.26mg/m³である。春季は1%の危険率で相関は有意であり、透明度、クロロフィル *a* 量の変動範囲は、それぞれ8~23m, 0.13~4.11mg/m³である。夏季も1%の危険率で有意であり、透明度、クロロフィル *a* 量の変動範囲は、それぞれ7~36m, 0.07~1.72mg/m³である。秋季も、危険率1%で有意であり、透明度、クロロフィル *a* の変動幅は、それぞれ6~31m, 0.12~2.60mg/m³である。

Table 3. Regression equations between transparency (m) and mean chlorophyll a concentrations (mg/m^3) above the limit at which the visibility of the Secchi disk is extinguished. Hyphens (-) indicate the seasons when regression is not significant. n=No. of data SE=Standard error (mg/m^3)

Waters	Winter	Spring	Summer	Autumn
Pacific Ocean (PH, PK-line)				
(1) Oyashio waters	- n=27	C=621.8T ^{-2.355} n=36 p<0.01 SE=0.26	C=4.769T ^{-0.802} n=29 p<0.05 SE=0.28	C=18.246T ^{-1.242} n=20 p<0.01 SE=0.14
(2) Perturbed waters	- n=10	C=54.659T ^{-1.295} n=6 p<0.10 SE=0.31	C=64.192T ^{-1.895} n=8 p<0.10 SE=0.31	C=42.082T ^{-1.533} n=6 p<0.05 SE=0.12
(3) Tsugaru Current waters	- n=6	C=400.7T ^{-2.208} n=5 p<0.05 SE=0.08	C=229.431T ^{-2.184} n=13 p<0.01 SE=0.29	C=19.183T ^{-1.178} n=11 p<0.01 SE=0.15
(4) Kuroshio axis waters	- n=10	C=19.797T ^{-1.428} n=16 p<0.05 SE=0.20	C=135.901T ^{-2.120} n=12 p<0.05 SE=0.23	C=39.162T ^{-1.628} n=11 p<0.05 SE=0.25
(5) Offshore waters of the Kuroshio	C=4.560T ^{-0.845} n=56 p<0.01 SE=0.11	C=9.496T ^{-1.219} n=57 p<0.01 SE=0.24	C=5.680T ^{-1.174} n=64 p<0.01 SE=0.21	C=4.906T ^{-1.069} n=52 p<0.05 SE=0.23
(6) Coastal waters of the Kuroshio	- n=18	C=29.420T ^{-1.394} n=20 p<0.01 SE=0.20	C=22.447T ^{-1.474} n=15 p<0.01 SE=0.21	C=81.131T ^{-1.750} n=15 p<0.05 SE=0.20
Japan Sea (PM-line)				
(7) Tsushima Current waters	C=2.471T ^{-0.629} n=42 p<0.05 SE=0.21	C=15.283T ^{-1.317} n=46 p<0.05 SE=0.27	- n=55	C=3.419T ^{-0.944} n=56 p<0.05 SE=0.19
(8) Northern cold waters	C=55.328T ^{-1.580} n=13 p<0.01 SE=0.17	C=6.551T ^{-1.043} n=28 p<0.05 SE=0.22	- n=24	- n=21
East China Sea (PN-line)				
(9) Kuroshio axis waters	- n=9	C=6.350T ^{-1.125} n=21 p<0.01 SE=0.16	- n=13	- n=18
(10) Coastal waters	C=1.287T ^{-0.344} n=39 p<0.05 SE=0.15	C=83.380T ^{-1.793} n=47 p<0.01 SE=0.21	C=3.309T ^{-0.921} n=59 p<0.01 SE=0.21	C=12.118T ^{-1.172} n=45 p<0.01 SE=0.21

このように水塊別、季節別にクロロフィル *a* 量と透明度との相関を調べた結果からも、多くの場合、有意な相関が認められ、透明度がクロロフィル *a* 量のよい指標となり得ることが明らかとなった (Table 3). そこで、これまで水塊ごと、季節ごとに示した、透明度とクロロフィル *a* 量の回帰式に差異があるといえるかどうかを調べるために、各水塊における回帰式の係数の差を共分散分析によって、季節ごとに検定した (Appendix 1). その結果、各季節ともに、回帰式の切片については有意な差がみられる場合もあったが、傾きについては、ほとんどの場合、有意な差はみられなかった. このことは、クロロフィル *a* 量の推定値は、同じ透明度であっても、水塊が異なれば異なる場合があるものの、透明度の変化量に対するクロロフィル *a* の変化

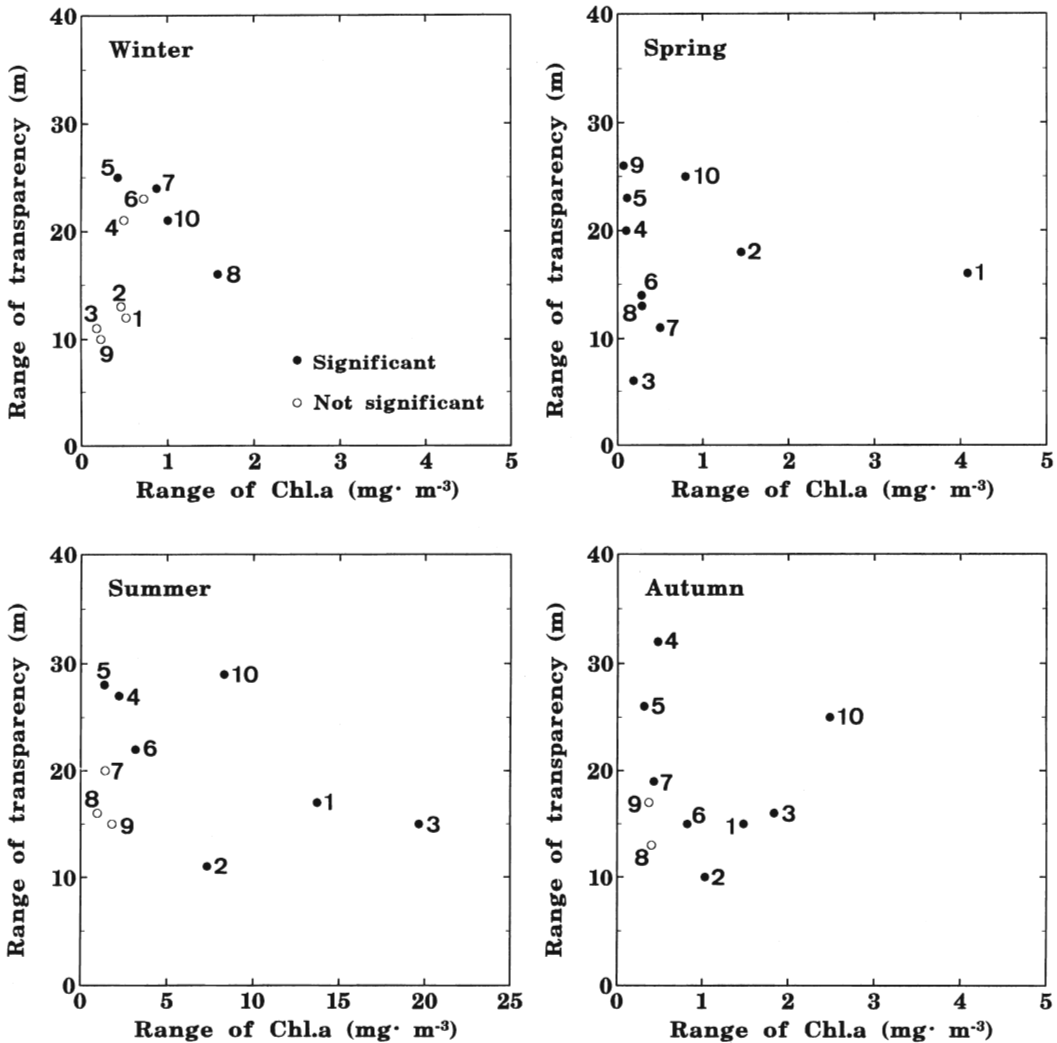


Fig. 4. Relationship between the range of chlorophyll *a* (mg/m^3) and the range of transparency (m) in the four seasons. Solid circles indicate that the regression is significant; open circles not significant. 1: Oyashio waters, 2: Perturbed waters, 3: Tsugaru Current waters, 4: Kuroshio axis waters in 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.

量についてみる限り、春、夏、秋季には、水塊による有意な差がみられないことを示している。このことから、透明度は単にそのときのクロロフィル a 量の推定に役立つだけでなく、クロロフィル a 量の地理的分布や時間的な変動を海域間で比較、評価する指標としても有効であると判断することができる。

一方、クロロフィル a 量と透明度との関係を水塊別、季節別に細かく検討すると、基本的には両者の間に相関関係があるものの、水塊、季節によっては、必ずしも相関関係がみられるとは限らない場合もあることがわかる (Table 3)。そこで、相関が有意であった水塊、季節と、有意でなかった水塊、季節とで、前述のクロロフィル a 量と透明度の変動幅を比較して検討した (Fig. 4)。まず、有意な相関がみられた水塊では、いずれの季節でもクロロフィル a 量、透明度とも、変動幅が大きいことがわかる。逆に、有意な相関がみられなかった水塊では、クロロフィル a 量と透明度の変動幅が比較的小さい場合が多く、特にクロロフィル a 量の変動幅が小さい。クロロフィル a 量と透明度の相関がみられない理由として、冬季の混乱水域、津軽暖流域のように、6~10個と、データ数が少ないことも考えられるが、例えば東シナ海の黒潮流軸域のように、クロロフィル a 量が少なく、しかも、ある特定の狭い範囲内でしか変動していない場合に相関がみられない傾向を示していると考えられる。

今回得られた回帰式がどの程度、クロロフィル a 量の実測値をよく表しているかを検討するために、クロロフィル a 量の実測値と推定値の差の標準偏差である標準誤差 (SE) を検討した (Table 3)。標準誤差は、冬季は $0.11\sim 0.21\text{mg/m}^3$ 、春季は $0.08\sim 0.31\text{mg/m}^3$ 、夏季は $0.21\sim 0.31\text{mg/m}^3$ 、秋季は $0.12\sim 0.25\text{mg/m}^3$ の範囲にあり、季節による差異は比較的小さい。このことは、クロロフィル a 量が増大する季節ほど、推定値と実測値の差が相対的に小さくなり、結果的に推定値の精度が高まることを示している。逆にクロロフィル a 量の少ない季節には、相対的に誤差が大きくなることに注意する必要がある。例えば、黒潮流軸域、黒潮外側域等では、クロロフィル a 量の実測値が夏、秋季には 0.1mg/m^3 以下に低下することもあり (Fig. 2)、回帰式が有意であるからといって、透明度から推定したクロロフィル a 量が、必ずしも意味のある数値とはいえない。このように、有意な相関が得られても、クロロフィル a の絶対量が少ない夏、秋季の黒潮流軸域や黒潮外側域では、クロロフィル a 量は、透明度から推定するよりも、むしろ水塊ごと、季節ごとのクロロフィル a 量そのものの平均値 (Table 2) を採用した方が実用的には有効であると考えられる。

透明度を用いてクロロフィル a 量を推定する場合の誤差、限界については、推定する目的に応じて十分に考慮する必要があることは言うまでもない。しかしながら、本報の結果は、従来、実測データが極めて乏しかった、日本周辺海域におけるクロロフィル a 量の季節変化や地理的分布、さらには長期変動を明らかにするうえで、透明度が有効な指標として利用できることを示している。

結 論

透明度からクロロフィル a 量を推定することの可否を明らかにするため、両者の関係を、日本周辺の海流系の差異に基づいて区分した10の水塊ごとに検討した。クロロフィル a 量の季節変動をみるためであれば、どの水塊においても、透明度からクロロフィル a 量を推定することが可能である。また、ある季節における水塊内のクロロフィル a 量の地理的な分布を調べようとする場合でも、多くの季節、海域において、透明度からクロロフィル a 量を比較的小さな誤差で推定できる。透明度からクロロフィル a 量を推定する場合の誤差、限界については、推定

の目的に応じて十分に考慮する必要があるものの、少なくとも日本周辺海域では、透明度はクロロフィル *a* 量の推定に有効な指標である。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、研究の方向と方法等について示唆に富んだ有益な助言を賜った東北大学教授谷口旭博士に厚くお礼申し上げます。また、原稿のご校閲をいただいた日本海区水産研究所海洋環境部長小川嘉彦博士、海洋動態研究室長平井光行博士にお礼申し上げます。分散分析による回帰式の比較には、資源増殖部分類増殖研究室長林育夫博士作成のプログラムを使用させていただきました。記して感謝の意を表します。本論文で使用したデータは、気象庁の海洋観測資料から得たものであり、困難な観測業務を長年にわたって継続実施されている函館、神戸、長崎、舞鶴の各海洋气象台の方々に敬意を表します。

文 献

- 有賀祐勝 (1973) 水界植物群落の物質生産 II, 植物プランクトン. 生態学講座8, 共立出版, 東京, 91.
- 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.
- HOLMES, R. W. (1970) The Secchi disk in turbid coastal waters. *Limnol. Oceanogr.*, **15**, 688-694.
- 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—奄岐・対馬との対比—, 長崎県生物学会, 29-72.
- 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.
- 気象庁 (1974-1994) 気象庁海洋 (気象) 観測資料. No. 53-84.
- 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.
- 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.
- 長田 宏 (1994) 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.
- 長田 宏・小川嘉彦・平井光行・平川和正 (1996) 日本周辺海域における透明度の地理的分布と季節変動. 日水研報告, (46), 1-24.
- 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.
- SAIJO, Y. and ICHIMURA, S. (1960) Primary production in the northwestern Pacific Ocean. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **16**, 139-145.
- SHEMESHURA, 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.

杉原滋彦 (1987) 透明度. pp372. 和達清夫監修 海洋大事典, 東京堂出版, 東京.

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.

豊田孝義・中島敏光 (1979) 水色, 透明度とそれに関する水質. 海洋科学技術センター試験研究報告, (3), 126-133.

TYLER, J. E. (1968) The Secchi disc. *Limnol. Oceanogr.*, **13**, 1-6.

吉村信吉 (1936) セッキー白円板による透明度の海洋学及び湖沼学的意義. 海と空, **16**, 23-36.

Appendix 1. Results of the comparison of covariance of the two regression intercepts (lower left), and covariance of the two regression slopes (upper right) of two 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

Winter

Waters	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	XXX	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	-	XXX	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-	-	XXX	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	XXX	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	XXX	-	0.36	5.36*	-	3.75
6	-	-	-	-	-	XXX	-	-	-	-
7	-	-	-	-	0.62	-	XXX	2.13	-	0.85
8	-	-	-	-	7.13*	-	5.36*	XXX	-	6.83*
9	-	-	-	-	-	-	-	-	XXX	-
10	-	-	-	-	10.37**	-	2.43	3.54	-	XXX

Spring

Waters	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	XXX	4.45*	0.01	1.96	6.01*	3.38	3.73	5.47*	5.28	3.24
2	0.04	XXX	0.25	0.03	0.02	0.03	0.01	0.15	0.09	1.24
3	0.03	1.54	XXX	0.27	0.31	0.30	0.19	0.49	0.78	0.07
4	10.94**	19.28**	11.90**	XXX	0.08	0.01	0.02	0.27	0.24	0.39
5	11.81**	20.38**	11.21**	0.34	XXX	0.08	0.02	0.08	0.02	1.59
6	4.58*	10.61**	3.94	9.39**	11.72**	XXX	0.01	0.30	0.23	0.70
7	42.56**	22.34**	10.64**	0.08	0.79	7.00**	XXX	0.14	0.07	0.83
8	63.07**	37.33**	19.24**	0.01	0.26	11.29**	1.01	XXX	0.02	2.09
9	10.58**	29.91**	22.45**	1.74	0.61	17.79**	1.51	1.20	XXX	1.92
10	20.56**	12.94**	4.86*	5.61*	7.26**	0.29	15.25**	27.24**	9.24**	XXX

* p<0.05 ** p<0.01

Appendix 1. Continued

Summer										
Waters	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	XXX	1.41	3.57	2.19	0.62	0.96	-	-	-	0.10
2	0.64	XXX	0.07	0.04	0.98	0.22	-	-	-	2.15
3	1.47	3.10	XXX	0.01	2.86	0.82	-	-	-	2.81
4	6.35*	0.03	0.64	XXX	1.71	0.61	-	-	-	3.28
5	14.73**	1.93	8.13**	0.01	XXX	0.28	-	-	-	0.50
6	2.75	0.13	1.18	1.82	6.25*	XXX	-	-	-	1.21
7	-	-	-	-	-	-	XXX	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	XXX	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	XXX	-
10	19.38**	3.71	20.73**	3.24	9.16**	2.48	-	-	-	XXX

Autumn										
Waters	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	XXX	0.23	0.22	0.51	0.09	0.64	0.35	-	-	0.02
2	0.40	XXX	0.32	0.01	0.24	0.06	0.55	-	-	0.19
3	2.95	0.68	XXX	0.54	0.03	0.69	0.20	-	-	0.01
4	1.75	0.80	4.51*	XXX	0.82	0.02	1.54	-	-	0.87
5	8.14**	5.71*	13.08**	1.20	XXX	0.73	0.05	-	-	0.06
6	0.02	0.04	1.13	2.49	11.32**	XXX	1.33	-	-	0.72
7	25.85**	16.49**	37.77**	2.52	0.08	30.63**	XXX	-	-	0.29
8	-	-	-	-	-	-	-	XXX	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	XXX	-
10	2.51	2.00	7.08**	2.84	17.78**	0.94	39.58**	-	-	XXX