

太平洋赤道海域における植物プランクトン色素及び 分光照度鉛直分布

松村 皐月*・塩本 明弘*・下田 徹**

Vertical distribution of phytoplankton pigment and spectro irradiance around equatorial Pacific

Satsuki MATSUMURA,* Akihiro SHIOMOTO,* Toru SHIMODA**

Abstract

A phytoplankton vertical distribution model was used for estimating total phytoplankton biomass around equatorial Pacific. The vertical distribution pattern is characterized by area and season. Subsurface maximum chlorophyll density layer is often found at mid and low latitude ocean. Observed data and the result of the vertical distribution model are well matched.

The depth of subsurface phytoplankton pigment maximum density layer was different by area which was defined by equatorial upwelling and the range was around 80 meters to 100 meters at observed area.

Although density of phytoplankton pigment in surface water of those area was very low compare to high latitude water, it can be also determined by spectro radiance ratio which is supposed to be measured by ADEOS/OCTS in near future as well as high latitude water. North equatorial water and south equatorial water which is divided at latitude eight degree south has different optical character respectively. Using each bio-optical algorithm for each water is recommended for getting more accurate phytoplankton pigment density by means of satellite remote sensing.

はじめに

衛星可視域リモートセンシングを用いて植物プランクトン色素濃度を広域に求める動きが世界的に行いつつある。地球環境問題として海洋に於ける炭素化合物循環機構を量的に把握する必要があり、植物プランクトン色素による基礎生産は、その基本量となるからである。また、魚類や海産哺乳類を頂点とする食物連鎖機構の量的把握に関しても、植物プランクトンバイオマスの計量と基礎生産力の把握は

1995年1月23日受理 遠洋水産研究所業績 第317号

* 遠洋水産研究所 (National Research Institute of Far Seas Fisheries; 7-1, Orido 5-Choume, Shimizu, 424 JAPAN)

** 中央水産研究所 (National Research Institute of Fisheries Science; 12-4, Fukuura 2-Choume, Kanazawa-ku, Yokohama, 236 JAPAN)

やはり基本量になる。これらの基本量を広域に求めるためには衛星リモートセンシングによる測定が方法として最も優れていると考えられるが、欠点として表面近くの情報しか得られない事が上げられる。

Gordon(1980)は海面射出光(L_w)がどの程度の深度情報を持つかについて解析し、 L_w の90%を占める深度を $z(90)$ と定義し、松村(1991)は透明度板深度の半分以上からの情報が L_w の70-80%を占めている事を表した。Platt and Harman(1983)は、この問題を一義的に解決するために水柱クロロフィル量と海面クロロフィル濃度との関係を求め、水域によっては両者の間に高い相関があるとし、後に鉛直分布モデルを提唱した(Platt and Sathyendranath, 1988)。松村・塩本(1993)はPlattの鉛直分布モデルに更に改良を加え、日本近海に代表される中高緯度海域に於けるクロロフィル鉛直分布は、衛星(ADEOS/OCTS)で測定される水色データと水温データおよび気候値を用いてほぼ求められる事を示した。

グローバルスケールで海洋の総基礎生産力を求めようとする場合、赤道湧昇域の基礎生産力が重要な役割を果たすことは広く知られている(例えば、Ryther 1969)。本報告では、赤道湧昇域の基礎生産力メカニズムを解明するために必要となるクロロフィルを基本とする植物プランクトン色素と、水中の光エネルギー到達状況について述べる。

また、前述の様にリモートセンシングによりクロロフィル濃度を求めようとする、海面近くのクロロフィル濃度と海面分光射出輝度の関係についても検討する必要がある。これについてはCZCSデータ解析のために用いられたアルゴリズムに準拠して、主として441nmと565nmの上向き輝度を用いる事とした。

1. 観測線および測定法

調査は水産庁調査船開洋丸(全長93m, 2942国際トン)平成3年度第1次航海において行われたものである。観測線は赤道を中心として南北方向に5測線(経度160°E, 180, 150°W, 120°W, 130°E)と赤道に沿った西端から東端までである。航行順路にそって便宜上各々の観測線をLeg 1-Leg 7とした。観測はLeg 1からLeg 4までは原則として日中3回、8時、11時、15時前後に行った。夜間は航走にあてため観測点間は等間隔ではない。Leg 1(160°E)およびLeg 3(150°W)は赤道を挟む南北20°の間を、Leg 2(180°)およびLeg 4(120°W)は各々南北10°の間を観測線とした。Leg 6, Leg 7の一部は赤道上の点であり、Leg 7の残りは130°Eを17°N迄北上した。観測線をFig.1に、観測点情報をAppendix.1に示す。観測点番号の百番台はLeg番号である。

各観測点ではCTD観測、水中分光観測、Go-Flow採水器による採水およびその他の観測を行った。使用したCTDはCTD OCTOPUS(EG & G Model, Mark-IV)であり、水温塩分深度計の他に濁度計、蛍光光度計、溶存酸素計、光量子計およびロゼット多層採水器が組込まれている。

水中分光観測にはBiospherical Instrument社製MER-1032分光照度輝度計を用いた。分光照度輝度計の性能をTable 1に示す。Fig.2に当論文に用いている光学要素を記す。MER-1032は水中に於いて下向照度 $E_{d,\lambda}$ 12チャンネル(各チャンネルに測定波長帯が割り当てられている)、上向照度 $E_{u,\lambda}$ 8チャンネル、上向輝度 $L_{u,\lambda}$ 8チャンネルの他、水温と深度を同時に測定すると共に空中光も測定し、観測中の空中光変化を監視できる仕組になっている。水中分光照度測定は原則として深さ1mから150mまでとした。毎秒約1mの速度で測器を降ろした場合、データは1mにつき4-6セット(1セットは前記全チャンネルのデータを意味する)取られている。データを平滑化するために、1次処理として深さ1m毎の平均値が計算され保存される。それはPACデータと呼ばれている。データの細部にわたる検討以外は、このPACデータを用いて解析した。

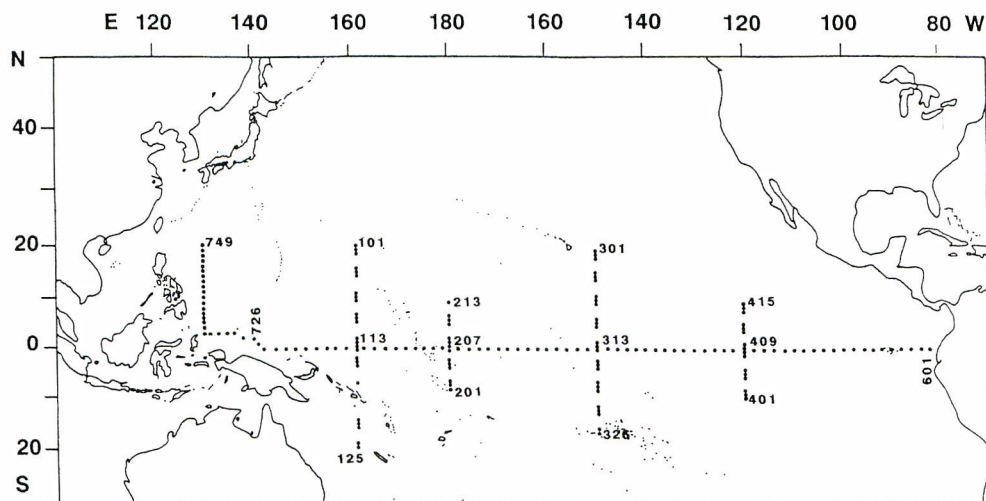


Fig. 1. Track chart and stations of KAIYOMARU cruise (Nov. 1991-Mar. 1992).

Table 1. Specification of MER-1032 underwater spectro radiometer.

①Under water spectro irradiance and radiance,
wave lengths of center of each band. (nm)

Down ward Irradiance	: 410, 441, 465, 488, 520, 540, 565, 589, 625, 671, 683, 700
Up ward Irradiance	: 410, 441, 488, 520, 565, 625, 671, 683 ($\mu\text{w}/\text{cm}^2/\text{nm}$)
Up Ward radiance	: 410, 441, 488, 520, 565, 625, 671, 683 ($\mu\text{w}/\text{cm}^2/\text{nm}/\text{sr}$)

②Sky Spherical Quantamn Irradiance
400-700nm ($\times 1017\text{quanta}/\text{sec}/\text{cm}^2$)

③Beam Attenuation
Under Water Beam Transmisso meter (Transmissometer : Sea Tech Co. Ltd)

Pass Length	10cm
Beam Diameter	1.5mm
Wave length of Lamp	660nm (Red)

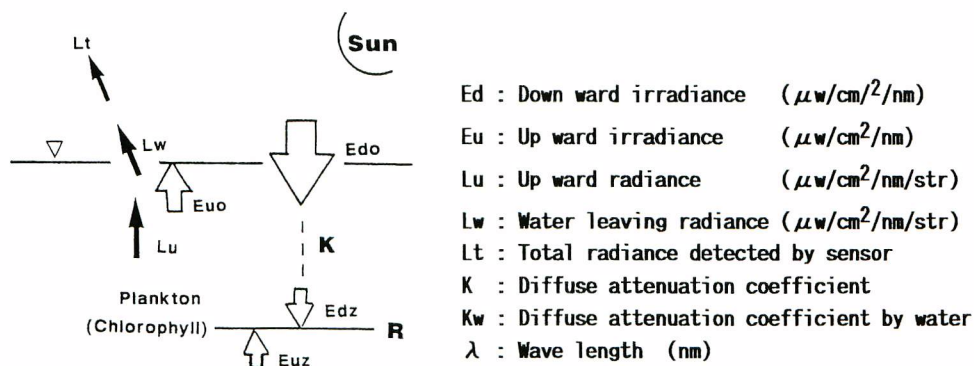


Fig. 2. Underwater optical process and significant symbols.

クロロフィルの分析には主として分光蛍光光度計(島津製作所, RF5000)を用い、試水はロゼットサンプラーにより10m 毎150m までと200m にて採水された。それは採水直後にワットマン GF/F フィルターでろ過され、そのフィルターは冷暗所で90%アセトンに24時間浸漬・抽出された。色素全般にわたる定量分析のために HPLC(高速液体クロマトグラフィ High Performance Liquid Chromatography)も使用し、その為の採水には Go-Flow 採水器 (30l) を用いたが、一検体に要する分析時間が長いことから、分析されたサンプル数は少ない。そのために植物色素の解析には蛍光光度計法による分析値をもちいた。

蛍光法による分析は、90%アセトン溶液に抽出したクロロフィル-a の蛍光を測定し、それに希塩酸を加えてもう一度蛍光を測定する事によりクロロフィル-a 濃度とその分解生成物であるとされているフェオフィチン-a 濃度を計算で求めるものである。この方法によるとほぼ全サンプルからクロロフィルと同量程度のフェオフィチンが検出された。しかし、今回 HPLC を用いて色素を厳密に分析したところ、フェオフィチンは殆ど検出されなかった。類似の蛍光特性を持つ色素としてクロロフィル-b が考えられるが、今回の HPLC 測定からはクロロフィル-b は検出されている。この現象は HPLC を用いて海洋生物色素を測定し始めて以来云われ出したものである。古谷(私信)も熱帯太平洋海域に於いて蛍光光度計で計られたものは、フェオ色素ではなくクロロフィル-b であろうと指摘している。そのため当報告ではこれ以後、蛍光光度計にて測定したクロロフィル-a はそのままクロロフィル-a として用い、クロロフィル-a とフェオフィチン-a を合せたものをクロロフィル色素と呼ぶ事とする。

2. 観 測 結 果

水中分光照度・輝度

海面に達した太陽光は海面反射分を除き、海水の濁度に応じて深く迄透過していく。深さ z (m) に於ける下向き照度 $E_d(z)$ は、次の様に表される。

$$E_d(z) = E_d(0) * \exp(-Kz) \quad \dots\dots(2-1)$$

ここに、 $E_d(0)$ は海面直下下向き照度であり、 K は zm までの平均拡散消散係数である。

各深度における波長(λ)毎の消散係数 $K_{(\lambda)}$ は平滑化された照度値を用いて10m 毎に計算した。清浄海水に於ける波長別消散係数 $K_{W(\lambda)}$ は Smith & Baker(1981) によって求められており、松村・塩本(1990) に図示されている。海水にはプランクトンや溶存有機物を始めとする様々なものが混在しており、それらの物質が各々光を吸収あるいは散乱しているために、現場海水の消散係数 $K_{(\lambda)}$ はプランクトン濃度等のパラメーターになる。一方ある深度に到達した光は基礎生産力のエネルギーとなり、その深度における消散係数は、基礎生産力に使われた光エネルギーのパラメーターにもなる。

海水自身による光の消散は410nm から490nm についてはほぼ同等の値 ($K_{(410)} \cong 0.02$) であるが、その後波長が長くなるに従い大きくなり、580nm で $K_{(580)} \cong 0.11$, 680nm では $K_{(680)} \cong 0.45$ となる。従って長波長部分の光は、プランクトンの有無にかかわらず深さと共に急速に小さくなり、結果として短波長領域である青のみが残る事になる。一方、水中に植物プランクトンが存在すれば、その基本的色素であるクロロフィルにより440nm 近傍の光が大きく吸収される。また植物プランクトンは懸濁体として後方散乱に影響を及ぼすので、消散係数は440nm をピークとして全波長にわたり大きくなる。海水に有機物が溶存している場合は、短波長領域の吸収が大きくなるが、今回は溶存態有機物の分析はしていないのでこれについては触れない。以上の光学的性質により、水中光は Fig.3 に示される様な波長別深度分布を持

つようになる。図に示されている深度分布曲線の傾きが消散係数となる。

Appendix.3に、観測された E_d , E_u , L_u 値の一部を掲載した。この値は PAC データを更に 5 m 毎の 5 項移動平均したものであり、従って表に示されている光学値は深度方向に前後 2 m の値を含めて計算されたものである。現場に於ける光学観測の困難さは、総てが静止している状態での測定が殆ど出来ないところにある。大気揺らぎによる海面到達光の変化、海面の波によるレンズ効果と揺らぎ、船の影あるいは船体による反射光の影響、船の動揺や測器の揺らぎによる照度観測面の振れ等に起因するデータのバラツキは避けられないものがある。それらを平滑化するための処理である。太陽高度補正や大気透過率補正は行っていない。そのため、空中照度の低い日（例えば、薄曇りのような）の観測結果は、そのまま低く記されている。

Appendix.3に記載されている照度値にも、海面近くのデータにかなりの不自然さがみられるのはそのためである。衛星リモートセンシングにより測定されるのは海面射出光であるので、海中の植物プランクトン色素と海面光の関係を求めるためには、海面光を出来るだけ正しく求める必要がある。海面近くのデータばらつきによるエラーを避けるために、以後の計算に使用する海面上向輝度 $L_u(0)$ は、5 m と 10m のデータから外挿して求めた。後に述べるクロロフィル色素鉛直分布データからみても、この海域に於いて表層 40m までは光学的にほぼ均質な水であると見られることから、この方法で求めた海面上向光でも問題はなく、むしろバラツキの多い 1~2 m 層のデータよりも信頼できる。

クロロフィル色素

熱帯海域では一般的に表層に於けるクロロフィル色素は殆どゼロに近い低濃度である。但し、赤道東部湧昇域にはエル・ニーニョ海況時以外に、表層にかなり濃密なクロロフィル色素が見られる (Tog-gweiler 1990)。今回の観測時は 91 年秋から始ったエル・ニーニョの最盛期に当り、赤道東部海域においても高色素濃度は観測されず、表層のデータを見る限りクロロフィル色素の東西変化はなかった。Fig.4 にクロロフィル-a 濃度の南北鉛直断面図を示す。南北鉛直断面図は日本側すなわち西から太平洋を見る方向で描き、北を図の左とした。このクロロフィル-a 断面図と、後に示すクロロフィル色素濃度の鉛直断面図とはほぼ同じパターンである (Fig.5)。

クロロフィル色素濃度等の鉛直分布を感覚的に表すには、このような図にするのが分かりやすい方法の一つであるが、大量のデータを数値的に処理するためには不向きである。特に採水を伴うデータの場合、各研究者により、あるいは目的により採水深度はバラバラな事が多く、統一は取られていない。現に今回の観測に於いても同一航海であるにも関わらず採水層は随時変化している。そのため観測値を機械的

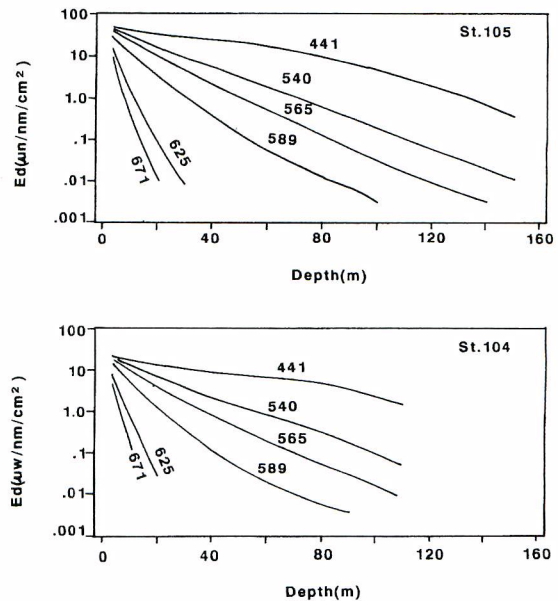


Fig. 3. Some examples of vertical distribution of underwater spectro irradiance.

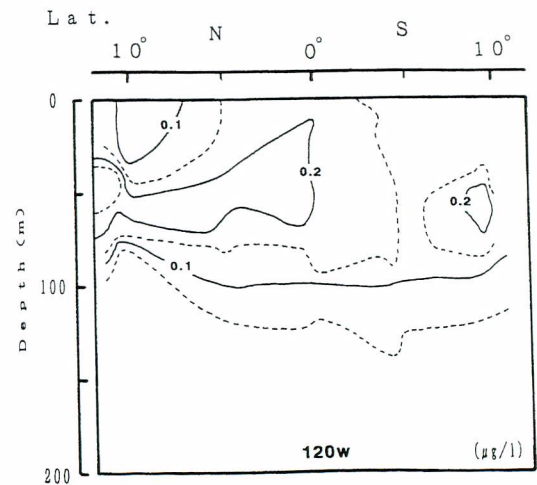
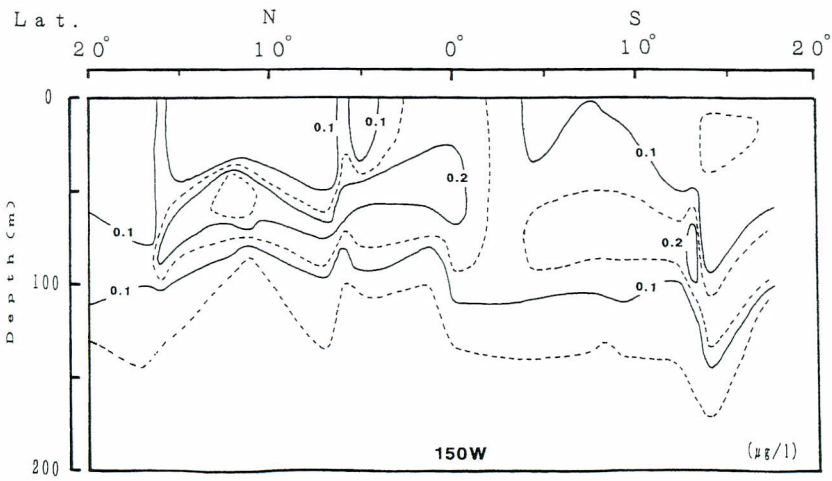
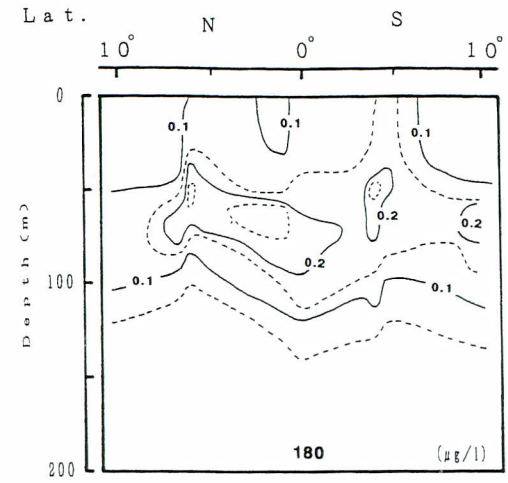
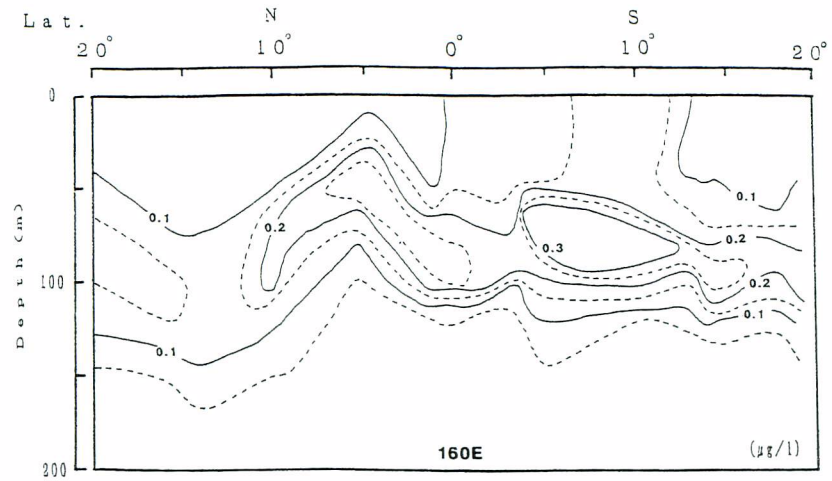


Fig. 4. Chlorophyll-a N-S Vertical section ($\mu\text{g/l}$) at Leg1 to Leg4.

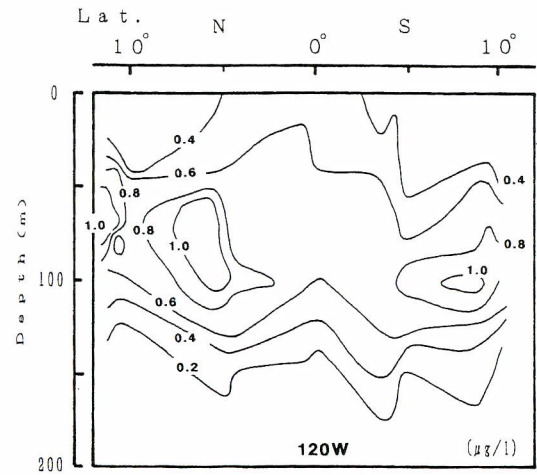
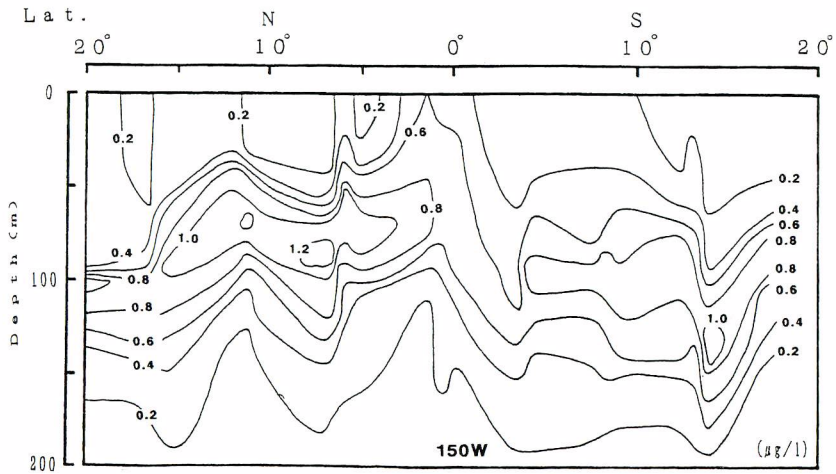
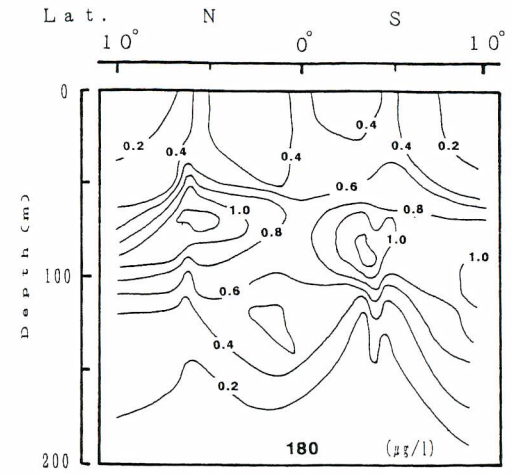
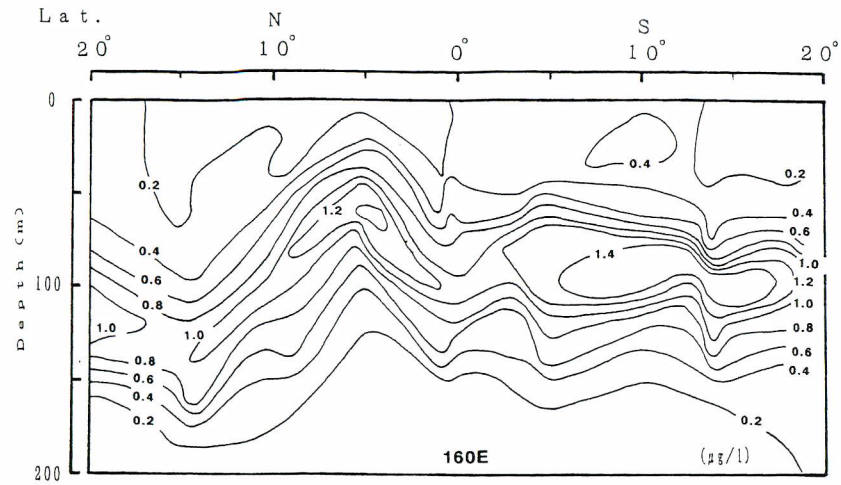


Fig. 5. Vertical N-S section of chlorophyll pigment ($\mu\text{g/l}$) at Leg1 to Leg4.

に処理したりデータベース化するには不便である。これらを一元的に表すためには、鉛直分布形態を関数化すれば良い。

松村・塩本(1993)はクロロフィル色素濃度鉛直分布モデルとして次の関数を与え、日本近海で観測値との良い一致を見ている。すなわち、深度 z におけるクロロフィル色素濃度 $C(z)$ は

$$C(z) = B_0 + S * Z \frac{h}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(Z-Z_m)^2}{2\sigma^2} \right] \quad \dots\dots(2-2)$$

ここに、

- B_0 : 海面クロロフィル色素濃度 (mg/m^3)
 ; Z_m が海面に近い場合、仮値となる。その場合、表層値は $C(0)$ として得られる。
- S : クロロフィル色素濃度鉛直勾配 ($\text{mg}/\text{m}^3/\text{m}$)
- Z_m : クロロフィル色素最大濃度の深度 (m)
 ; 最大濃度が海面にある場合 $Z_m \leq 0$ となる。
- h : 極大層に存在するクロロフィル色素量 (mg/m^2)
- $h/\sigma \sqrt{2\pi}$: 亜表層クロロフィル色素濃度極大値
- σ : 極大層厚の標準偏差
 ; 極大層の厚さのパラメーター: 4σ が層厚

水柱クロロフィル色素量 $Tchl$ は

$$Tchl(\text{mg}/\text{m}^2) = \int_0^{Ez} C(z) dz \quad \dots\dots(2-3)$$

Ez : 生産深度(当論文では200m までとした)

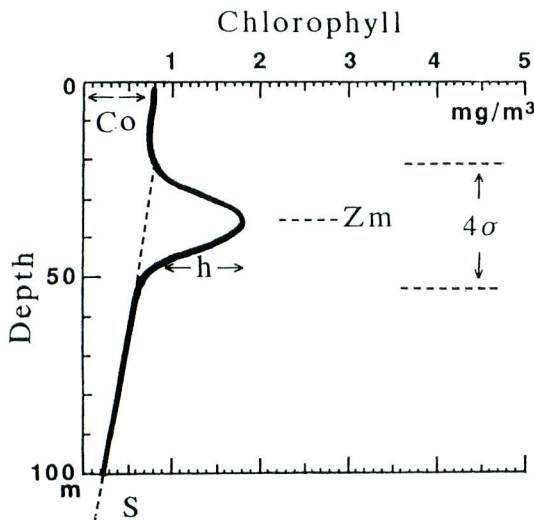


Fig. 6. Vertical profile Model of Chlorophyll pigment concentration.

で表される (Fig.6)。

このモデルを赤道海域に適用すると、観測値と良く一致する事が今回の観測結果から明らかになった。Appendix 2. 1~10に Leg 1から Leg 4までのデータとモデル曲線を示す。Appendix 2. に示されている60例の中でデータとモデル値に0.3 mg/m^3 以上の誤差が見られた観測点は2点のみであった。これは水塊が複雑に入り組んでいる日本近海におけるモデル適合率86% (松村・塩本 1993) より高率である。このモデルは図示されているように単峯型ガウス分布を基準にしているため、実測値が鉛直方向に複数の凹凸分布を持つ場合は実測パターンとモデルパターンが一致せず、モデルによる曲線は小規模の凹凸分布を平滑化するように描かれる。実測値とモデル曲線の差は最小値となるように計算されているため、鉛直方向に積算して

Table 2 Chlorophyll pigment vertical distribution function for eq. (2-2)
Kaiyomaru Nov. -Dec. 1991

St.	Lat.	BO	Ch.MAX (m)	MAX.PIG (mg/l)	SIGMA	SLOPE (m)
101	19.59N	0.25	105.64	1.16	29.03	-0.002
104	15.24N	0.13	129.28	0.82	24.96	0
105	14.39N	0.14	103.75	1.03	14.30	0
109	9.10N	0.05	86.48	1.32	26.55	0
110	5.06N	0.18	56.28	1.30	20.48	-0
112	4.57N	0.15	63.23	1.89	19.98	-0
114	0.27N	0.35	98.98	1.24	26.98	-0.002
115	0.03N	0.28	95.98	1.14	24.36	-0.001
117	-3.39S	0.22	87.57	1.45	24.93	-0.001
118	-4.31S	0.19	93.72	1.42	32.09	-0
119	-10.16S	0.48	92.18	1.90	16.81	-0.002
120	-13.13S	0.18	91.43	1.45	21.78	-0
121	-13.44S	0.14	110.05	1.49	19.35	0
122	-14.17S	0.18	102.65	1.72	15.35	0
201	-9.03S	0.07	102.78	1.09	35.97	0
202	-8.30S	0.07	100.33	0.96	36.54	-0
203	-4.30S	0.56	76.68	1.28	19.81	-0.003
205	-3.56S	0.44	91.46	1.33	22.93	-0.002
206	-3.22S	0.39	80.55	1.48	18.85	-0.002
208	0.23N	0.53	84.14	0.98	14.25	-0.001
209	0.58N	0.01	96.45	0.76	53.22	-0
210	1.32N	0.41	76.44	1.29	22.72	-0.002
213	6.16N	0.26	66.11	1.29	22.50	-0.001
214	6.41N	0.20	80.21	1.17	17.30	0
216	9.49N	0.18	91.02	0.96	16.73	0
301	20.00N	0.23	107.11	0.99	13.13	0
303	16.30N	0.19	113.91	0.97	20.20	-0.001
304	15.57N	0.29	106.20	1.05	29.08	-0.001
305	15.22N	0.17	93.62	0.93	27.33	0.001
307	11.38N	0.13	69.16	1.24	24.45	-0
308	11.04N	0.09	66.13	1.20	22.12	-0
309	10.34N	0.13	75.02	1.12	22.66	0
311	6.30N	0.08	91.71	1.15	25.88	0.001
312	5.51N	0.34	65.19	1.30	20.94	-0.001
313	5.15N	0.18	75.35	1.18	20.74	0
315	1.16N	0.66	62.03	1.17	18.15	-0.004
316	0.34N	0.47	53.96	0.90	22.82	-0.002
317	0.01N	0.49	66.85	1.02	31.19	-0.002
319	-3.37S	0.31	112.81	0.72	36.88	-0.001
321	-4.16S	0.21	93.24	0.83	30.19	-0
323	-7.49S	0.29	100.47	0.82	31.66	-0.001
324	-8.17S	0.24	101.77	0.95	38.07	-0.001
325	-8.53S	0.21	101.99	1.05	37.10	-0.001
327	-12.36S	0.13	103.03	0.95	34.11	-0
328	-13.12S	0.18	102.66	0.97	31.25	-0
329	-13.49S	0.15	131.84	1.23	17.77	0
331	-16.49S	0.13	90.76	0.85	20.37	-0
401	-9.59S	0.26	89.43	1.00	26.26	-0.001
402	-9.29S	0.16	86.99	0.96	35.02	-0.001
403	-8.52S	0.28	93.59	1.07	34.75	-0.001
405	-4.42S	0.36	95.61	0.98	12.65	-0.001
406	-4.16S	0.40	102.38	0.98	37.33	-0.002
407	-3.40S	0.00	89.74	0.81	62.95	-0.001
409	-0.00S	0.56	82.40	0.97	27.18	-0.003
411	0.28N	0.34	67.60	0.89	45.07	-0.002
413	4.15N	0.57	97.45	1.11	31.27	-0.003
414	4.48N	0.47	96.07	1.16	34.37	-0.002
415	5.29N	0.29	82.71	1.33	32.37	-0.001
417	10.04N	0.23	69.18	0.84	18.44	-0.001
418	10.40N	0.21	60.21	1.02	22.44	-0.001
419	11.11N	0.25	65.28	1.20	22.79	-0.001

水柱クロロフィル色素量を求めたり、光クロロフィル色素アルゴリズムを考えたりする場合は、両者の差の影響は小さいものとなる。クロロフィル色素を鉛直方向の微細構造解析の指標として用いるのでない限り、モデル曲線をクロロフィル色素鉛直分布と置き換えて処理しても良いという事になる。Leg1から Leg4までの各観測点に於けるクロロフィル色素濃度鉛直分布は、式(2-2)と Table 2により総て表される事になる。

クロロフィル色素濃度南北鉛直断面図を Fig.5に示す。これらの断面図は Table 2に示されている各要素から直接計算で再現できる。両図表に見られるように、赤道海域に於いては表層から30m-50mのクロロフィル色素量はごく僅かであり、50m-120mの間に濃度極大層を有している。クロロフィル色素濃度極大層の分布は赤道海域の海流構造(奈須 1990)に一致しており、北赤道海流と赤道反流の境に於ける顕著な湧昇域に対応して、クロロフィル色素濃度極大層は盛り上がっているように見える。極大層の厚さは全体的に80m程度であり、湧昇域に於ける極大値深度は56mである。この湧昇域に於いても海面から20mまでの色素濃度は $0.2\mu\text{g/l}$ 以下が多い。湧昇域以外の極大値深度は100m前後であり、概ね150m以深のクロロフィル色素濃度は $0.3\mu\text{g/l}$ 以下、クロロフィル-a濃度は $0.05\mu\text{g/l}$ 以下である。Appendix 3.水中照度波長分布表にも見られるように、深さ150mまでは基礎生産に必要な光エネルギーが届いている。

3. 検 討

人工衛星等可視リモートセンシングによる表層クロロフィル濃度計算手法が開発されれば、衛星の特徴を生かした広域観測から植物プランクトンバイオマスを求めることが可能になる。1978年に打ち上げられた米国の衛星 NIMBUS-7に搭載された海洋可視センサーCZCS(Coastal Zone Color Scanner)の成功以来、海の色(海面分光輝度比)が植物プランクトン色素の指標となる事を前提とした各種の衛星センサーが開発されている。これらセンサーの特徴は、いずれもクロロフィル色素による光吸収特性に合せた波長帯を持っている点である。そして多くの研究者が、クロロフィル色素による最大吸収帯である440nm附近と最小吸収帯である560nm附近のバンドに着目して、両者の海面輝度比とクロロフィル色素濃度との相関関係について検討してきた(松村・塩本 1993)。それらは主として中緯度海域における研究であった。当論文では、太平洋赤道海域の様なクロロフィル低濃度域($0.1-0.8\mu\text{g/l}$)においても、そのような高い相関関係が得られるか否か、もし得られるとしても両海域に同じアルゴリズムが適用されるのか否かを検討する。

1996年2月に打ち上げが予定されている、日本の地球観測衛星 ADEOSに搭載される OCTS(海色海温走査放射計)も CZCSと同じくクロロフィル色素測定用の主波長として443nm帯や565nm帯を持っている。当研究で、クロロフィル色素濃度算定アルゴリズムに用いたのは441nm帯と565nm帯である。前者については OCTS仕様(443nm)と若干異なるが、各々のセンサーは分光特性として半値巾20nmの帯域を持ち、分光感度の大部分に於いて重なっているため、両者を同一に取扱っても大きな支障はない。

衛星可視センサーは、大気補正後に海面射出輝度 L_w を測定する。しかし、海洋観測では海面直上向き輝度 $L_u(0)$ を得ている。海面直上で L_w を測定するのは、海面反射光の影響を除去するのが技術的に困難だからである。衛星データではこれを大気補正の項に入れて計算している。 $L_u(0)$ と L_w の関係は、フレネルの光の反射と屈折の法則を用いて、波のない海面から鉛直方向に出てくる光に関しては

$$L_{w(\lambda)} = (1 - (n_{\lambda} - 1)^2 / (n_{\lambda} + 1)^2) * L_{u(\lambda)} \quad \dots\dots(3-1)$$

が成り立つ。ここに $n(\lambda)$ は波長 λ の光に対する水の屈折率である。

今、 $n(443) = 1.3355$, $n(565) = 1.3338$ とすると、

$L_w(443) = 0.9794Lu(0, 443)$, $L_w(565) = 0.9795Lu(0, 565)$ となる。

CZCS 解析に用いた $L_w(443)/L_w(565)$ を基準とすれば、

$$\begin{aligned} L_{w(443)}/L_{w(565)} &= 0.9998 * Lu(0, 443)/Lu(0, 565) \\ &\approx Lu(0, 443)/Lu(0, 565) \end{aligned} \quad \dots\dots(3-2)$$

となるため、これ以後海面直下上向輝度 $Lu(0, \lambda)$ を用いて検討を進める。

海面に於ける 441nm と 565nm の輝度比 R を

$$R = Lu_{(441)}/Lu_{(565)} \quad \dots\dots(3-3)$$

とし、 R と海面より 20m までの平均クロロフィル色素濃度を相関解析した結果について述べる。Leg1 から Leg4 までの水中照度観測点 67 点のデータをすべて用いた海面分光輝度比 R とクロロフィル色素濃度 C の散布図を Fig. 7-A に示す。両者関係は、従来より主として次の関係式で表されている (MAREX 1982)。

$$\text{Log}(C) = a * \log(Lu_{(441)}/Lu_{(565)}) + b \quad \dots\dots(3-2)$$

今回の南北断面観測で得た回帰直線の係数と標準誤差を Table 3 に示す。

Table 3. Regression coefficient between pigment concentration and upward radiance ratio at surface.

Stations,	Y value,	Y stand. err.,	X coef.,	X stand.err,	Determ coef.
All St.	0.368	0.1180	-1.102	0.1200	0.604
N of 8S	0.382	0.0850	-1.053	0.0947	0.765
S of 8S	0.357	0.0558	-1.208	0.1436	0.855

Fig. 7-A に見られるように、海面分光輝度比とクロロフィル色素濃度との間には相関係数 -0.78 と負の相関があるが分散も大きい。Table 3 に示されている All St. (全海域) 欄の諸係数は全データを一括処理した場合の値であるが、この係数を用いてクロロフィル色素濃度を算出するとすれば、最大 50% の誤差を見込む必要がある。この分散は海域に依存する傾向がある。Fig. 7-N, S は各々南緯 8° を境とする北および南の観測点に分けた分光輝度比 R とクロロフィル色素濃度 C の散布図である。南緯 5° から 8° 附近は南赤道反流域に当る。ここで海域を南北に分ける事により、相関係数は各々 -0.87, -0.92 と高くなる。各海域に応じたアルゴリズムを用いれば最大 25% 程度の誤差で済む事になる。現時点に於ける可視光リモートセンシングによるクロロフィル濃度検出目標精度は最高 30% 程度とされているから、この回帰式を用いても十分実用的である。この南北差は植物プランクトン組成が異なる事による違いであると考えられるが、今回の観測では種の同定はしていないため推測の域を出ない。

衛星データを解析するに当り、海域毎に異なるアルゴリズムを用いる事は、クロロフィル色素濃度算出精度を高める反面、グローバル観測にはなじまない事になる。植物プランクトン種組成や深度分布は海域によりまた季節により異なるものであるから、海面輝度に表れる光学的性質も当然異なってくる。

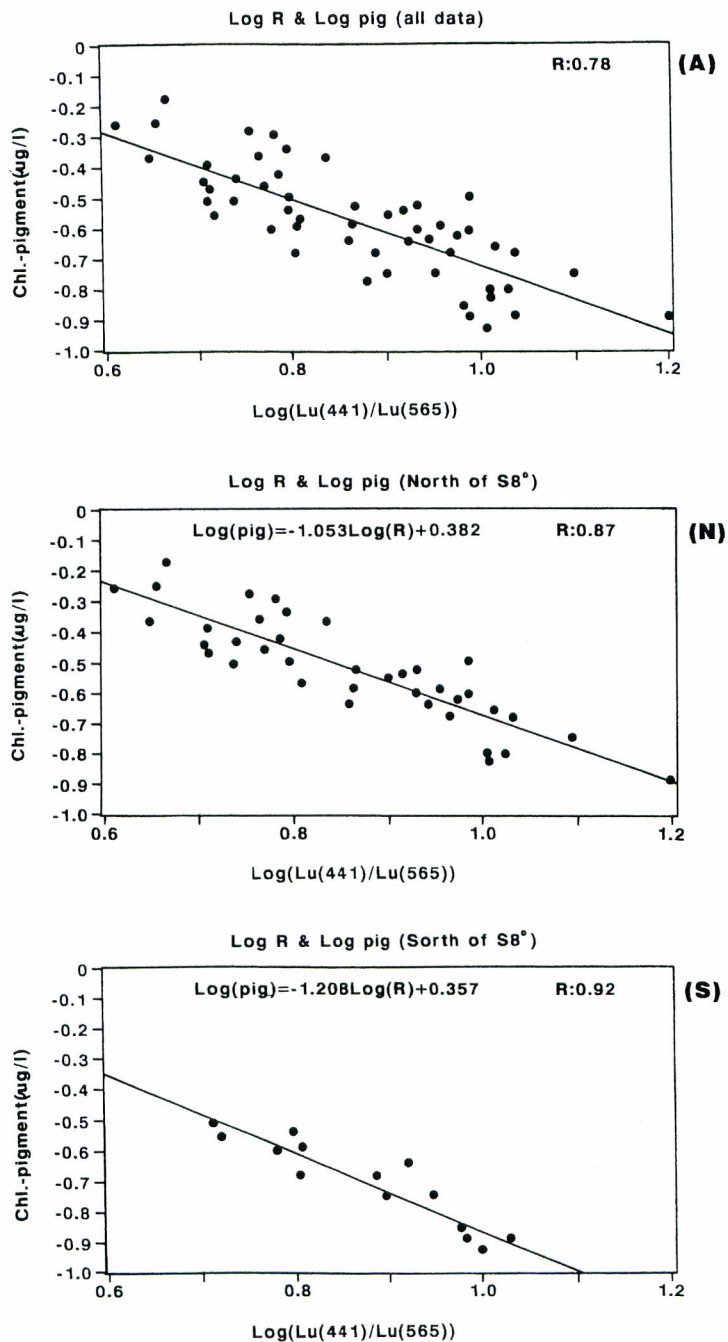


Fig. 7-A. Scattering diagram of Log (pigment) and Log (R). used data cover all station of Leg 1 to Leg4.

Fig. 7-N. Scattering diagram of Log (pigment) and Log (R). at northern station of 8° S.

Fig. 7-S. Scattering diagram of Log (pigment) and Log (R). at southern station of 8° S.

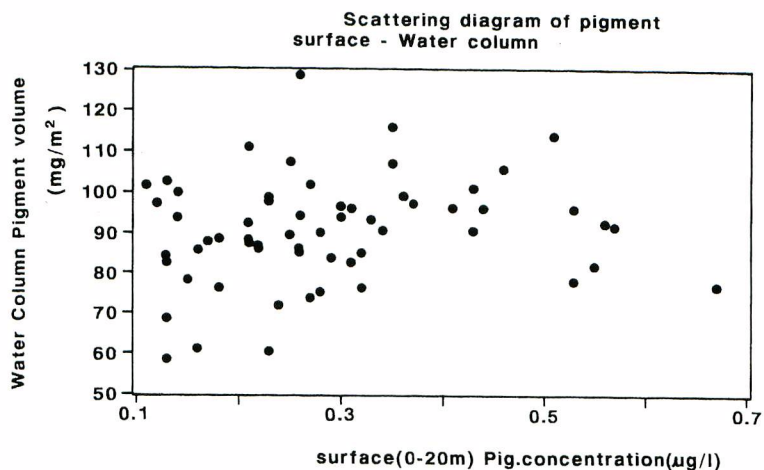


Fig. 8. Scattering diagram of surface (0-20m) pigment concentration and water column (0-200m) pigment volume.

従って、どの生物光学アルゴリズムを用いて表層クロロフィル色素濃度を求めるかは、研究の目的に応じて考慮されるべきである。例えば特定海域のクロロフィル分布状況を知るためにはその海域特有の鉛直分布アルゴリズム（松村・塩本 1993）や生物光学アルゴリズムを用いればよいのであり、地球上あるいは大洋規模を論じる場合は一律のアルゴリズムを用いる方が便利であろう。現時点では、季節毎海域毎に自動的に係数処理したグローバルマップが出来るほどには基礎データが揃っていない。何れのアルゴリズムを用いるにしろ推定誤差範囲を十分認識した上で利用すべきである。

当海域における今回の観測では、表層クロロフィル色素濃度と水柱色素量との間に一次的な相関関係は見られない（Fig. 8）。従って、衛星リモートセンシングによる海面情報から水柱クロロフィル色素量を求めるためには、前章で述べた鉛直分布モデルをうまく適用する方法しかない。しかし、この海域では海面情報のみから鉛直分布関数を定めるのは容易ではない。この海域を特徴づける南北赤道海流とそれらの反流を海面輝度や海面水温から求める事は困難だからである。一つの方法として、衛星マイクロ波高度計や散乱計データにより、それらの海流域が判明すれば、適合する鉛直分布関数を与える事ができよう。それ以前の近似法として、予めそれらの海流域を地理的に設定しモデル関数を与える方法もあるが、それは環境変化による海洋構造変化に対応できないため、モニタリング手法としては意味を持たない。

赤道海域の東部は、エル・ニーニョ時とラ・ニーニャ時とは、全く異なる海洋構造を呈している。ラ・ニーニャ時は、表層に高クロロフィル色素濃度層が出現するため、海色現象としても海面水温現象としても容易に捉え得る（NASA 1989）。ラ・ニーニャ時は表層クロロフィル色素濃度と水柱色素量との間にかなり高い相関が得られるであろう事は想像できる。言い換えれば、赤道東部海域においては、エル・ニーニョ、ラ・ニーニャ海況を OCTS データから判別する事は可能であり、海況毎の鉛直分布関数を与える事により植物プランクトンバイオマスを見積もる事も可能になる。今回の観測ではエル・ニーニョ時のデータしか得られなかった。しかし今後ラ・ニーニャ時の観測データを得る事により、両海況毎の鉛直分布関数がそろえば、衛星可視熱赤外情報から当海域の植物プランクトン量の変動が把握できるようになる。

謝 辞

当研究は水産庁新造調査船開洋丸の処女航海による観測結果を基になされたものである。処女航海につきもののシステムトラブルと闘いながら、観測成果を上げるべく努力を積み重ねて頂いた後明船長以下船舶職員諸兄に心から感謝します。また船上に於いて水中照度観測を担当し膨大な量のデータを処理してくれた東海大学大学院生（当時）米沢隆史君、当報告の校閲の労を取って頂いた東海大学海洋学部千賀康弘助教授に謝意を表します。

引用文献

- RYTHER J.H. 1969: Photosynthesis and Fish Production in the Sea. Science 3 Oct. Vol. 166, 72-77.
- GORDON, H.R., and D.K. CLARK 1980: Remote sensing optical properties of a stratified ocean: an improved interpretation. appl. Optics, 19, 3428.
- SMITH R.C. and K.S. BAKER 1981: Optical properties of the clearest natural waters. Applied Optics Vol. 20, No. 2 177-184.
- MAREX 1982: The Marine Resources Experimental Program, Report of the Ocean Color Science Working Group, NASA GSFC.
- PLATT T. and A.W. HATMAN 1983: Remote sensing of phytoplankton in the sea: surface-layer chlorophyll as an estimate of water-column chlorophyll and primary production. INT. J. REMOTE SENSING., Vol. 4, No. 2, 343-351.
- PLATT T. and S. SATHYENDRANATH 1988: Oceanic Primary Production: Estimation by Remote Sensing at Local and Regional Scales. Science 23 Sep. Vol. 241, 1613-1620.
- NASA 1989: Ocean Color from Space, Edited by J. Yoder, M. Lewis, P. Blanchard, CZCS images were made by J. Feldman. 6/89: 15K.
- TOGGWEILER J.R. 1990: Modeling Workshop Offers First Look at New Simulation of Equatorial Pacific. U.S. JGOFS News 2(2), WHOI, Woods Hole MA.
- 奈須敬二 1990: 解説エル・ニーニョとラ・ニーニャ現象, 水産海洋研究 54(1), 105-108.
- 松村皐月, 塩本明弘 1990: 基礎生産力関数 Φ の鉛直分布 遠洋水研研究報告 No.27, 31-56.
- 松村皐月 1991: 可視光リモートセンシングが持つ深度情報, 水産工学 Vol.27, No.1, 65-68.
- 松村皐月, 塩本明弘 1993: 基礎生産力関数 Φ の鉛直分布(II) - 衛星リモートセンシングによる基礎生産力算定のために -, 遠洋水研報 No.30, 227-270.

Appendix 1. Stations of bio-optical observation and sky conditions

St.	Observing Station						(KAIYOMaru 1991-92 Equat.)				
	Day Time			Station			Deck		Irrad.	Weather	
	19YY	MM	DD	TT	MM	Lat.	'	Long.			'
101	91	11	7	14	10	20	0N	160	0E	(Lux)	CL
104	91	11	9	7	18	15	24N	160	0E	0	CL
105	91	11	9	14	39	14	40N	160	0E	31200	CL
107	91	11	10	9	6	10	13N	160	0E	44700	FIN
108	91	11	10	12	17	9	45N	160	0E	106000	FIN
109	91	11	10	17	17	9	10N	160	0E	87900	#FIN
110	91	11	11	9	46	5	7N	160	0E	46600	RA
112	91	11	11	15	32	4	58N	160	0E	80700	FIN
113	91	11	12	9	9	0	59N	160	0E	0	FIN
114	91	11	12	12	7	0	28N	160	0E	13900	U
115	91	11	12	15	49	0	3N	160	0E	20700	RA
116	91	11	13	8	3	3	39S	160	0E	22700	CL
117	91	11	13	12	2	3	58S	160	0E	45300	FIN
118	91	11	13	15	4	4	32S	160	0E	53400	FIN
119	91	11	14	15	18	10	16S	160	0E	42100	CL
120	91	11	15	8	32	13	14S	160	0E	27800	FIN
121	91	11	15	11	14	13	45S	160	0E	118000	FIN
122	91	11	15	15	3	14	18S	160	0E	0	U
123	91	11	16	8	34	18	16S	160	0E	39700	FIN
124	91	11	16	12	35	18	41S	160	0E	115000	FIN
201	91	11	26	6	6	9	3S	180	0E	0	FIN
202	91	11	26	10	30	8	31S	180	0E	83300	FIN
203	91	11	27	7	0	4	30S	180	0E	72200	FIN
205	91	11	27	11	0	3	50S	180	0E	109000	FIN
206	91	11	27	15	0	3	22S	180	0W	40300	CL-RA
208	91	11	28	7	0	0	23S	180	0W	0	FIN
209	91	11	28	11	45	0	58N	180	0W	21300	FIN
212	91	11	29	7	0	5	48N	180	0W	5240	CL
213	91	11	29	11	30	6	17N	180	0W	22400	CL
214	91	11	29	15	0	6	41N	180	0	6340	U
216	91	11	30	7	0	9	50N	180	0	24000	CL
301	91	12	9	15	0	20	0N	150	0W	43100	CL
303	91	12	10	7	0	16	30N	150	0W	0	U
304	91	12	10	11	30	15	57N	150	0W	94200	FIN
305	91	12	10	15	30	15	22N	150	0W	0	CL
307	91	12	11	7	30	11	38N	150	0W	61000	FIN
308	91	12	11	11	30	11	4N	150	0W	67000	#FIN
309	91	12	12	15	0	10	35N	150	0W	11200	CL
311	91	12	12	7	30	6	31N	150	0W	47600	CL
312	91	12	12	11	30	5	51N	150	0W	84000	FIN
313	91	12	12	15	30	5	15N	150	0W	44000	FIN
315	91	12	13	7	30	1	16N	150	0W	47100	FIN
317	91	12	13	15	30	0	2N	150	0W	55800	FIN
319	91	12	14	7	0	3	38S	150	0W	63000	FIN
321	91	12	14	16	0	4	16S	150	0W	22400	FIN
323	91	12	15	7	0	7	50S	150	0W	76100	FIN
324	91	12	15	10	30	8	18S	150	0W	110000	FIN
325	91	12	15	14	0	8	54S	150	0W	9000	#CL
327	91	12	16	7	0	12	36S	150	0W	34100	FIN
328	91	12	16	10	30	13	12S	150	0W	107000	FIN

Appendix 1.

St.	19YY	MM	DD	TT	MM	Lat.	'	Long.	'	Irrad.	Weather
329	91	12	16	14	30	13	50 S	150	0W	87900	FIN
331	91	12	17	7	0	16	50 S	150	0W	63000	FIN
401	91	12	26	7	0	9	60 S	120	0W	59900	FIN
402	91	12	26	10	30	9	29 S	120	0W	116000	FIN
403	91	12	26	14	30	8	53 S	120	0W	88700	U
405	91	12	27	7	35	4	43 S	120	0W	20000	CL
406	91	12	27	10	45	4	16 S	120	0W	114000	CL
407	91	12	27	14	30	3	40 S	120	0W	82100	CL
409	91	12	28	7	30	0	0 S	120	0W	46800	FIN
411	91	12	28	16	10	0	28 N	120	0W	42300	FIN
413	91	12	29	7	30	4	16 N	120	0W	12500	CL
414	91	12	29	10	45	4	48 N	120	0W	7950	CL
415	91	12	29	14	30	5	30 N	120	0W	19300	CL
417	91	12	30	7	45	10	4 N	120	0W	49700	FIN
418	91	12	30	12	0	10	40 N	120	0W	27300	CL
419	91	12	30	15	30	11	12 N	120	0W	29800	CL
603	92	1	29	14	5	0	0 N	86	35W	0	CL
605	92	1	30	9	0	0	1 N	90	27W	0	CL
608	92	2	2	13	47	0	0 N	96	5W	0	FIN
611	92	2	3	14	17	0	0 N	102	0W	0	FIN
614	92	2	4	16	31	0	0 N	108	20W	0	FIN
616	92	2	5	10	41	0	0 N	112	0W	0	FIN
618	92	2	6	7	42	0	0 N	116	0W	0	U
621	92	2	7	13	33	0	0 N	122	0W	0	FIN
623	92	2	8	9	53	0	0 N	126	0W	0	FIN
626	92	2	9	14	7	0	0 N	132	0W	0	U
628	92	2	10	8	48	0	0 N	136	1W	0	U
631	92	2	11	13	54	0	0 N	142	7W	0	U
633	92	2	12	7	5	0	0 N	146	6W	0	CL
636	92	2	13	10	11	0	0 N	152	0W	0	U
639	92	2	14	11	18	0	0 N	158	4W	0	CL
642	92	2	16	15	37	0	0 N	164	12W	0	CL
644	92	2	16	10	6	0	0 N	168	31W	0	FIN
704	92	2	28	17	11	0	0 N	178	0W	0	CL
705	92	2	28	7	58	0	0 N	180	0	0	CL
708	92	3	1	12	16	0	0 N	174	5E	0	CL
710	92	3	2	7	46	0	0 N	170	0E	0	U
713	92	3	3	14	45	0	0 N	164	0E	0	FIN
715	92	3	4	7	55	0	0 N	160	0E	0	FIN
718	92	3	5	12	53	0	0 N	154	10E	0	CL
720	92	3	6	7	50	0	0 N	150	0E	0	CL
723	92	3	7	12	31	0	0 N	144	10E	0	CL
725	92	3	8	10	30	1	50 N	141	0E	0	U
728	92	3	9	7	19	3	3 N	137	0E	0	FIN
731	92	3	10	10	47	2	36 N	131	30E	0	FIN
735	92	3	11	13	23	5	60 N	130	0E	0	FIN
739	92	3	12	12	29	9	55 N	130	4E	0	FIN
742	92	3	13	9	2	12	60 N	130	1E	0	FIN
746	92	3	14	9	30	17	0 N	130	6E	0	FIN

*Deck irradiance 0 lux means no measurement.

* Weather ; FINE, CLOUD, RAIN, UNKNOWN

; # means large change in lux during observation

Appendix 2.

Vertical distribution of Chlorophyll pigment at each station.

circles show measured value.

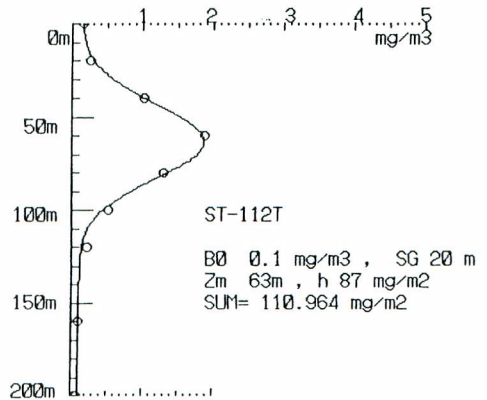
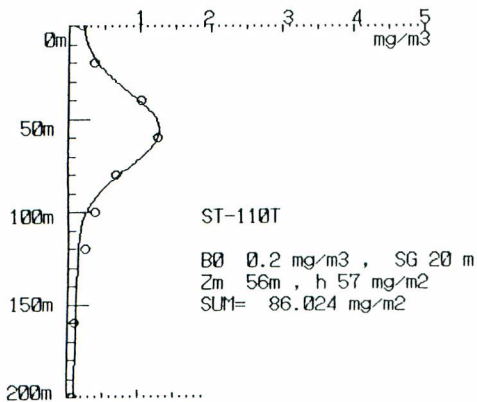
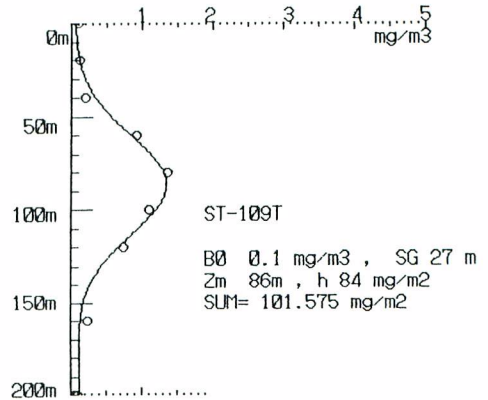
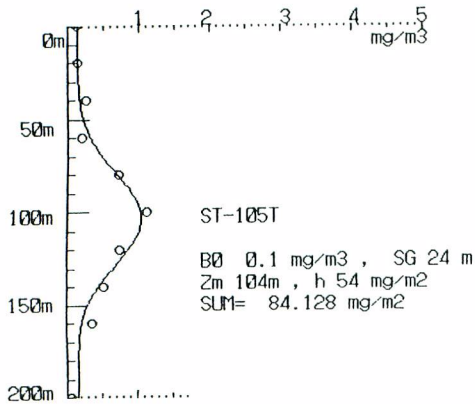
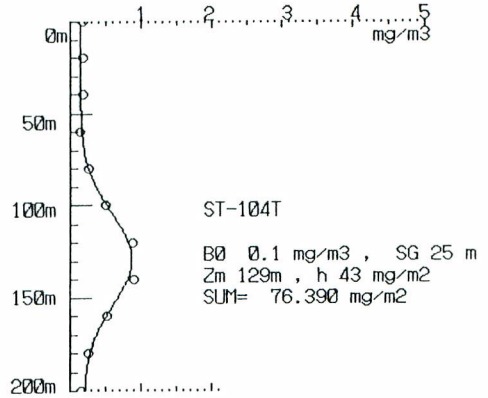
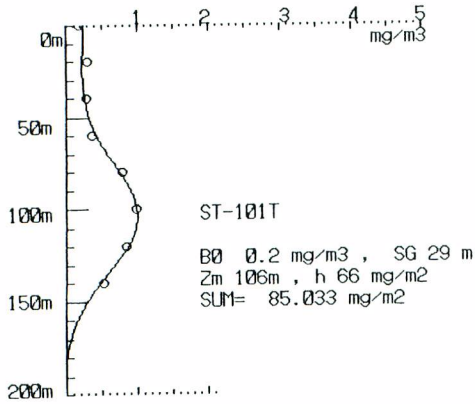
line shows best fitted model curve.

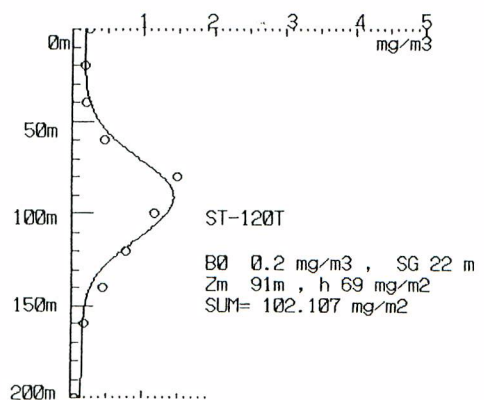
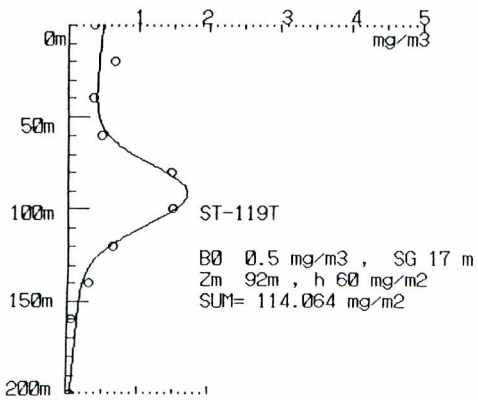
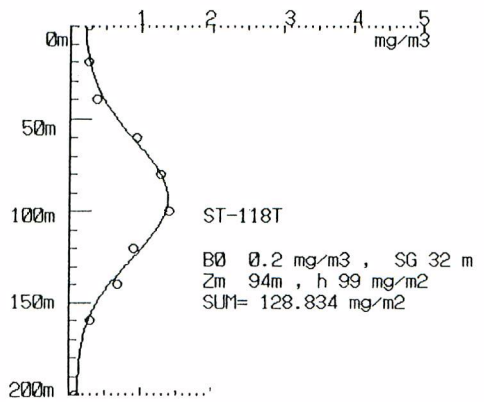
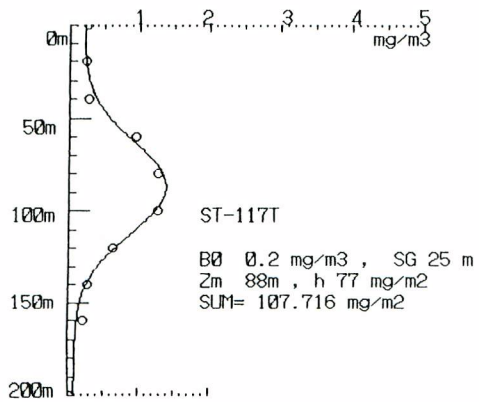
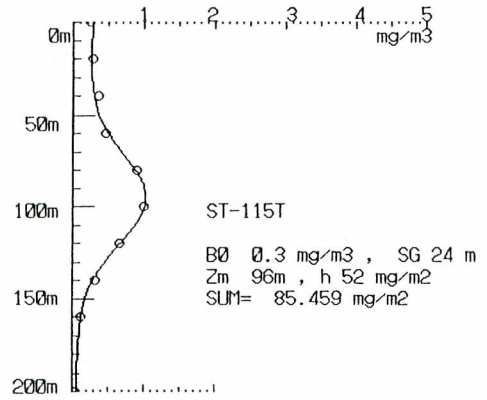
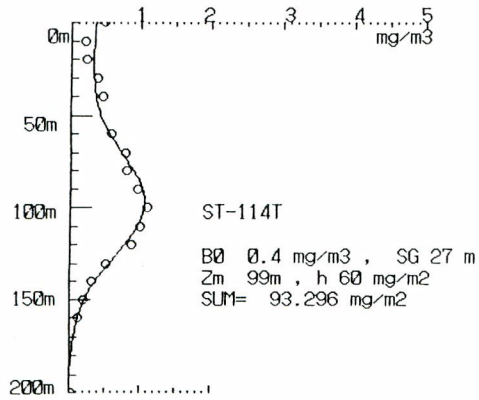
T after St. No. means fig. of total (Chlorophyll) pigment.

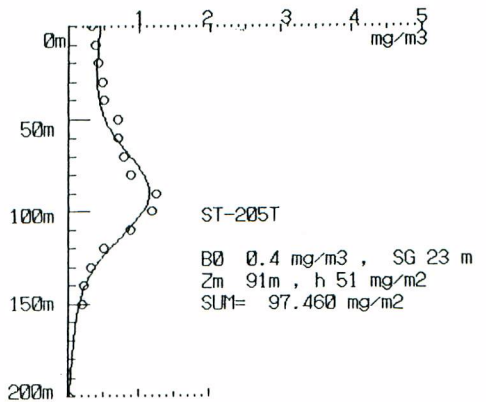
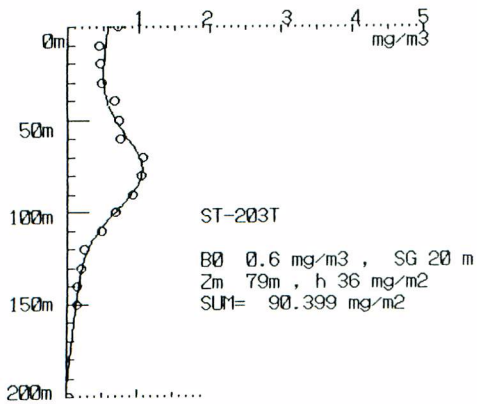
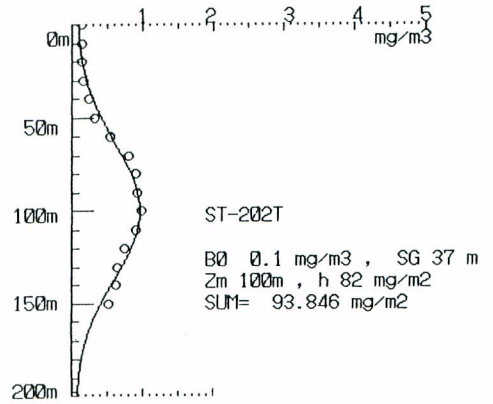
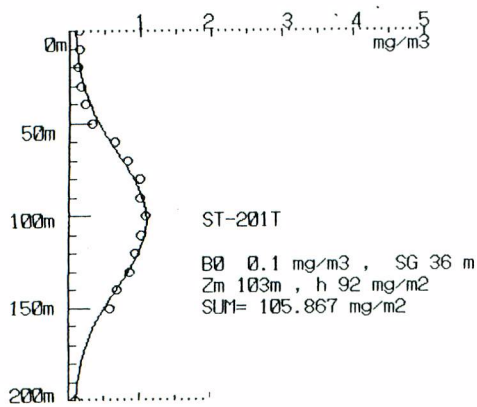
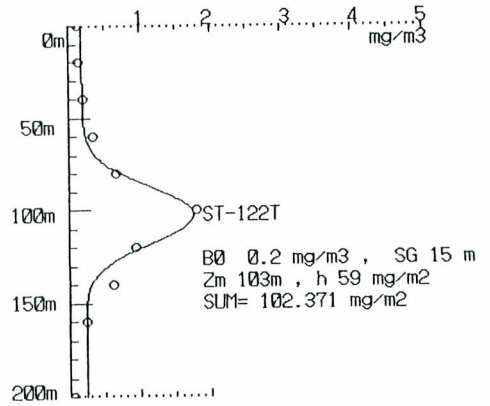
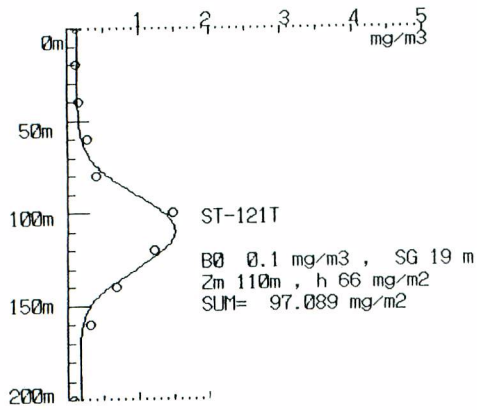
B₀, Z_m, h, is parameter of model as shown eq. (2-2).

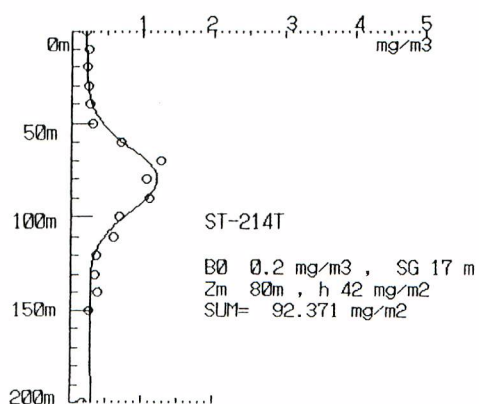
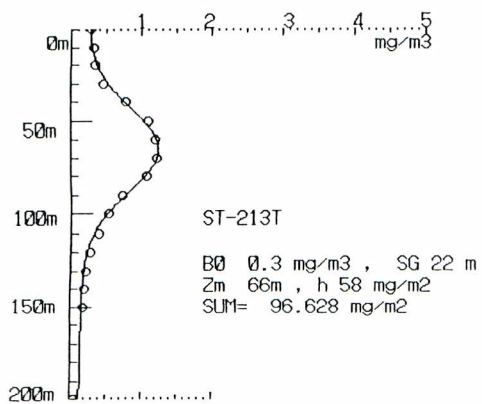
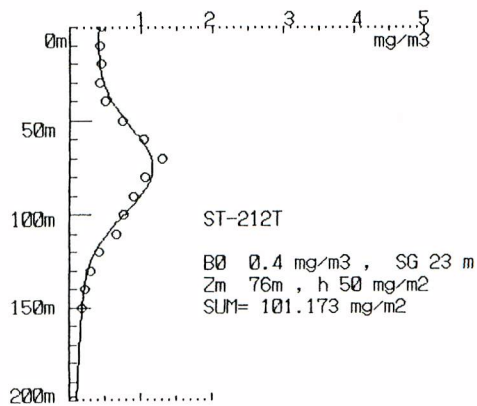
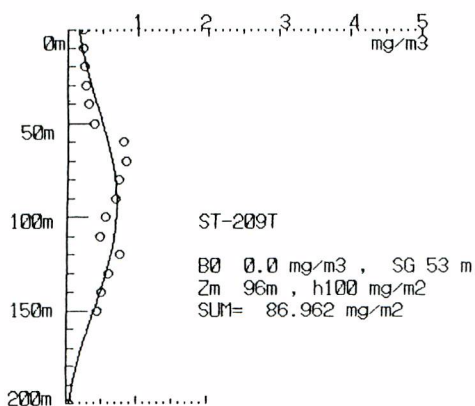
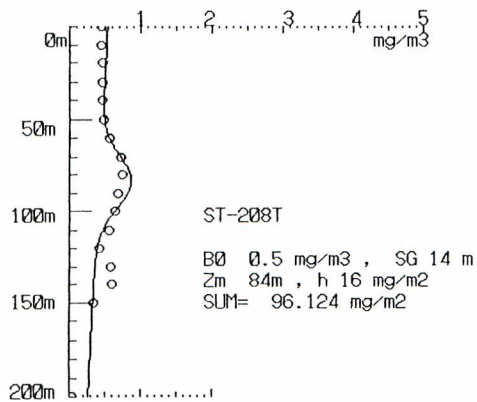
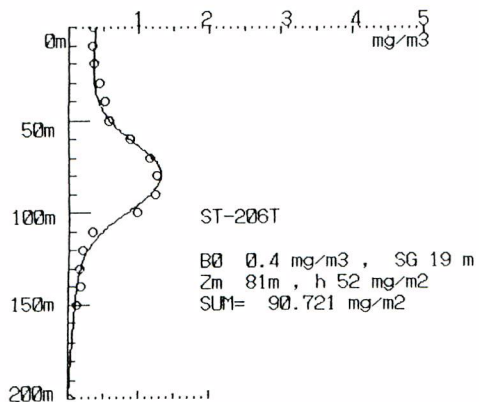
SG : σ

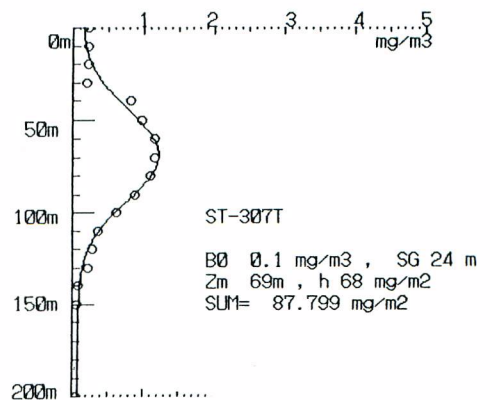
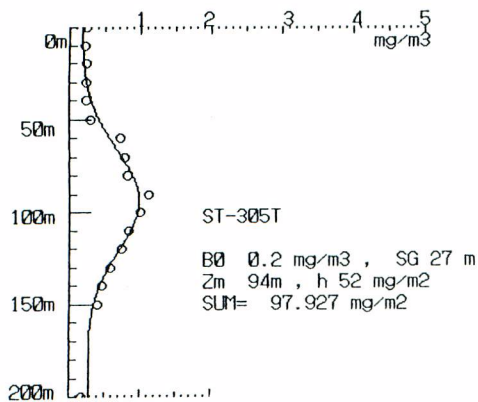
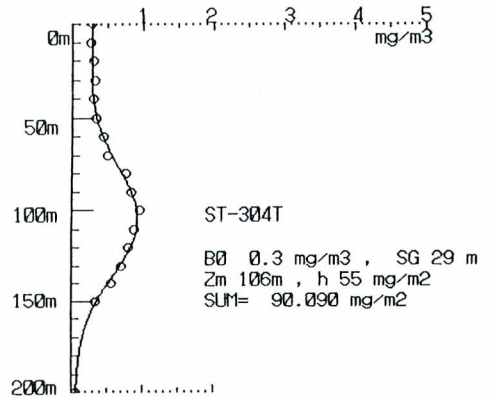
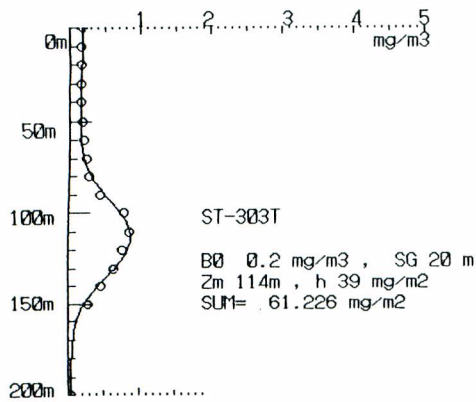
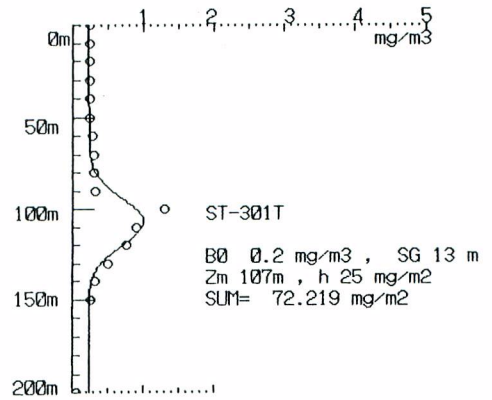
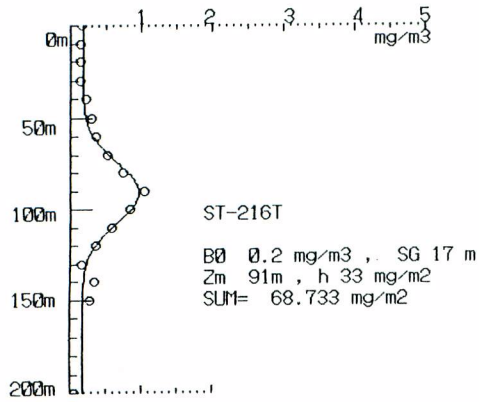
SUM : total pigment volume in the water column.

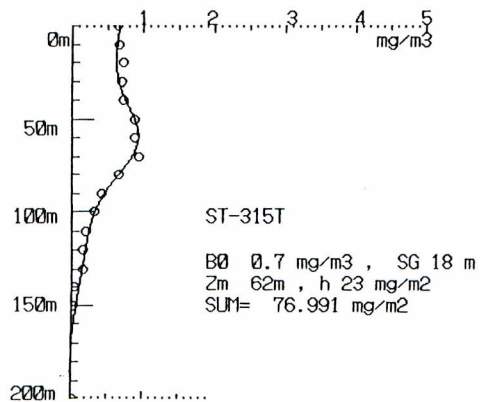
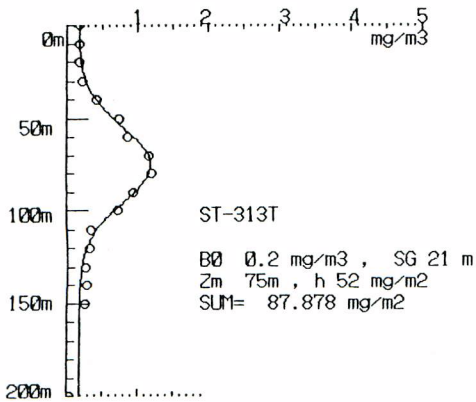
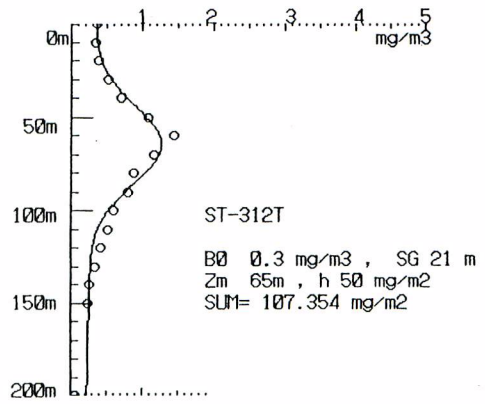
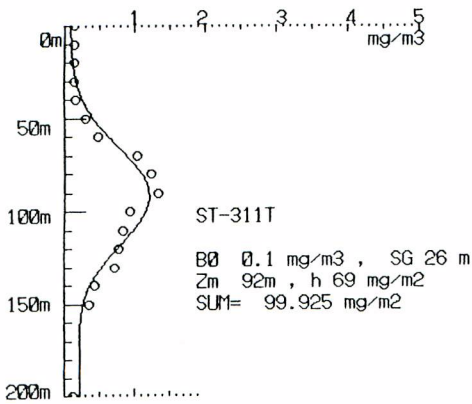
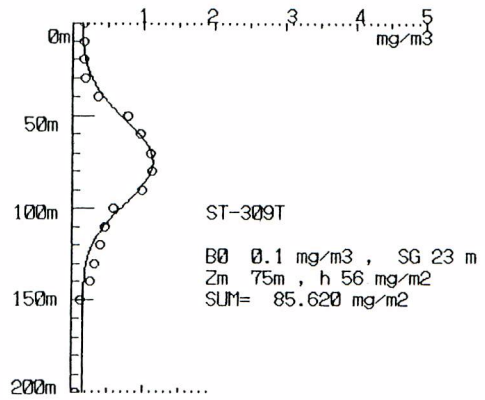
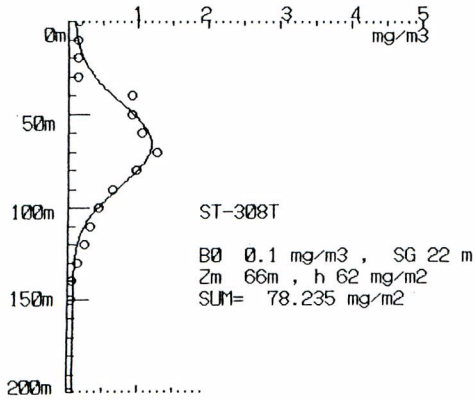


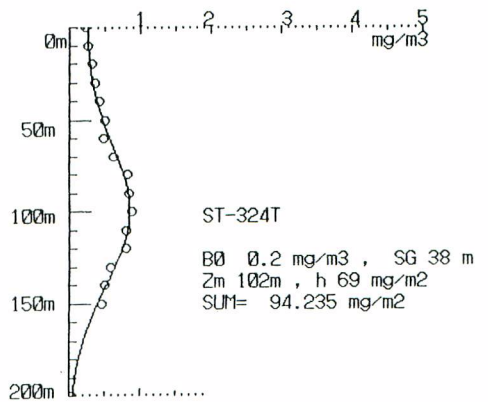
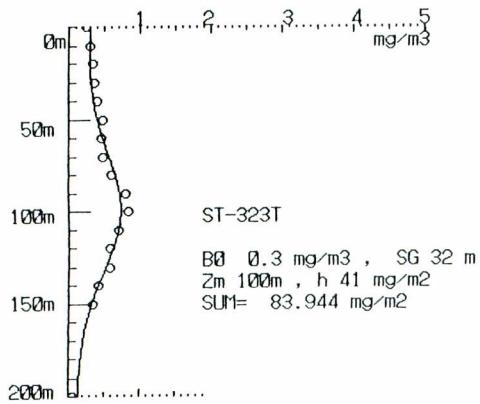
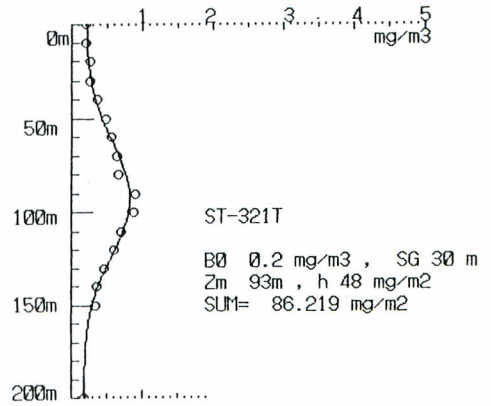
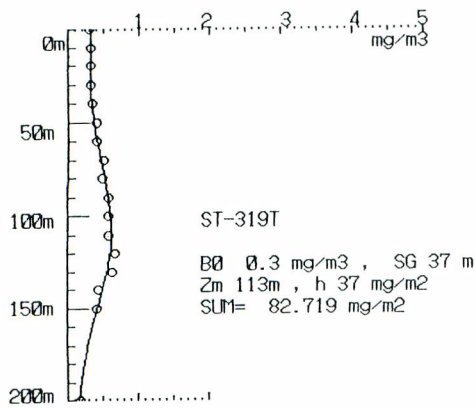
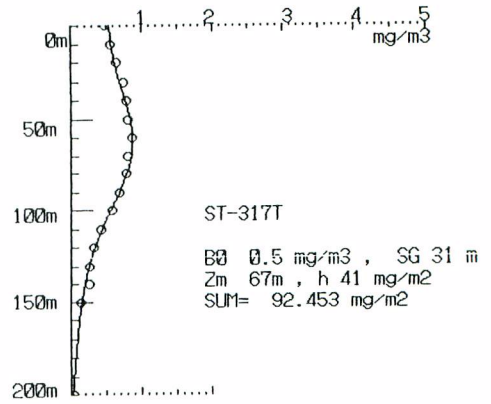
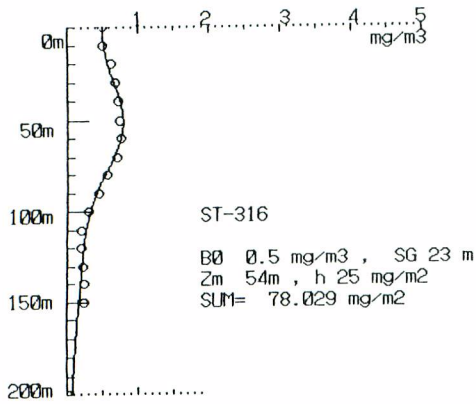


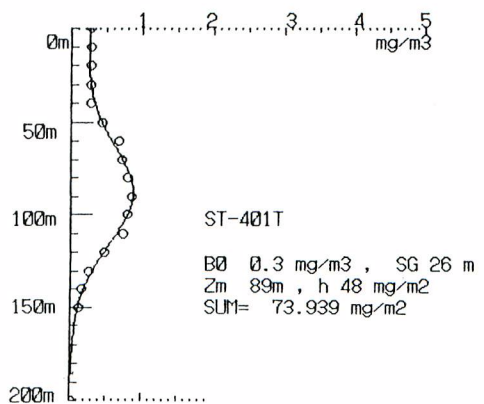
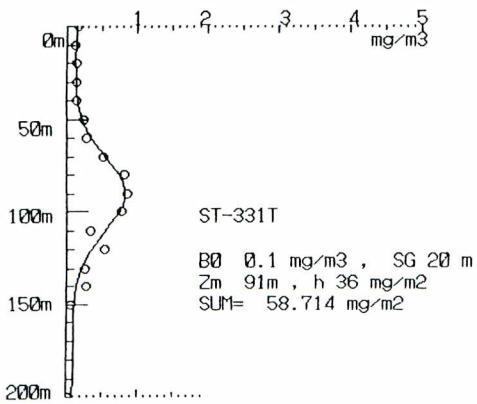
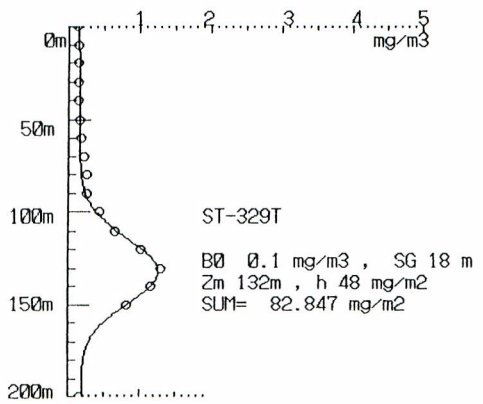
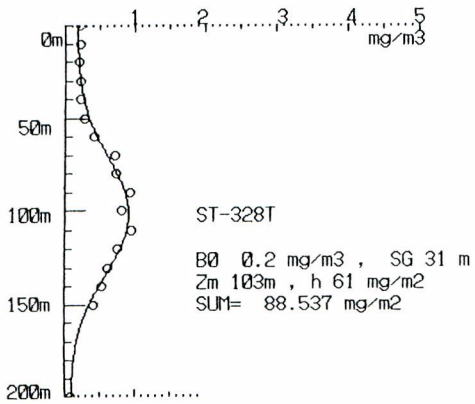
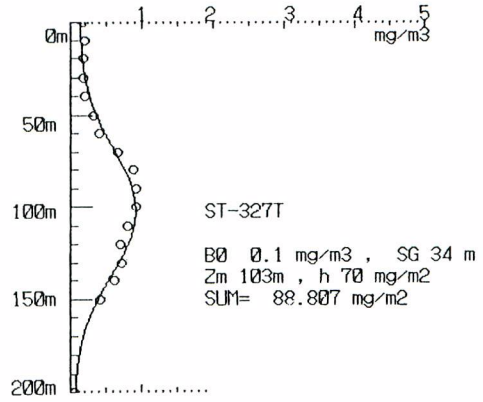
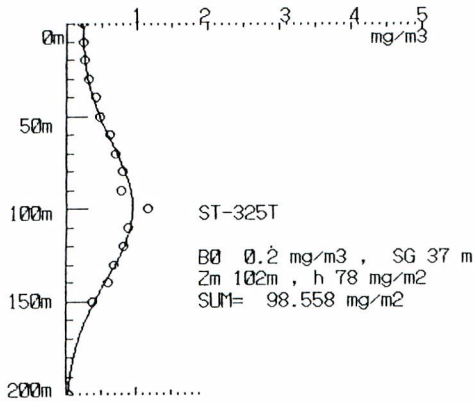


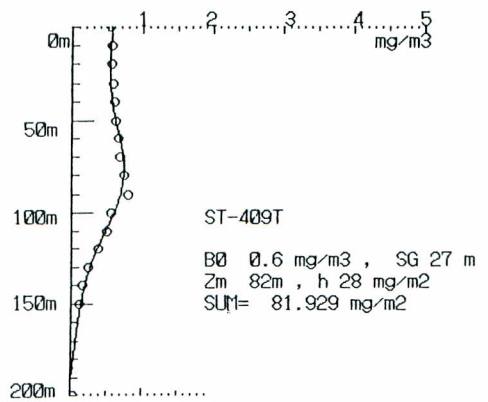
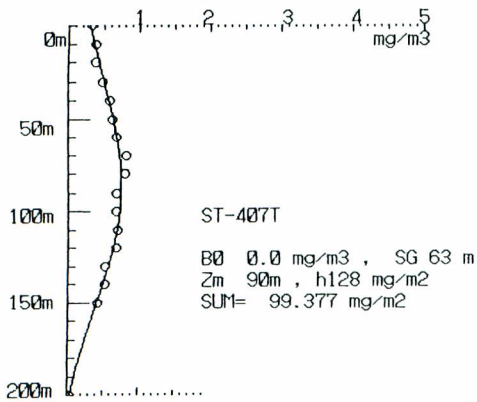
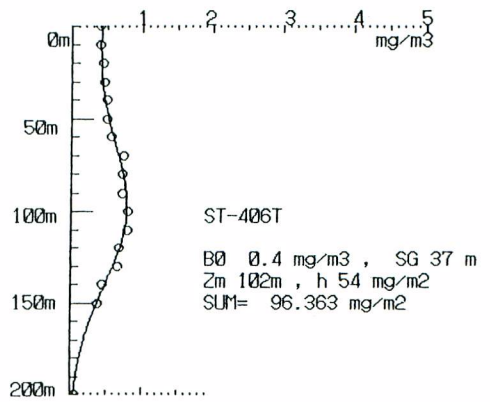
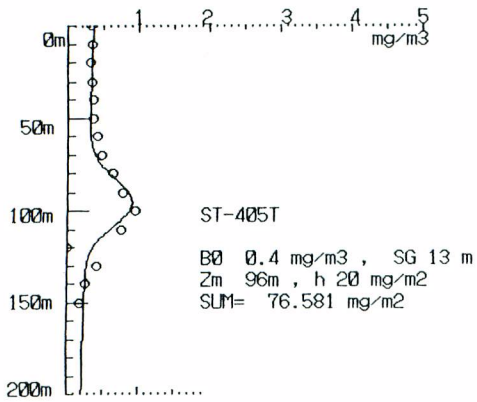
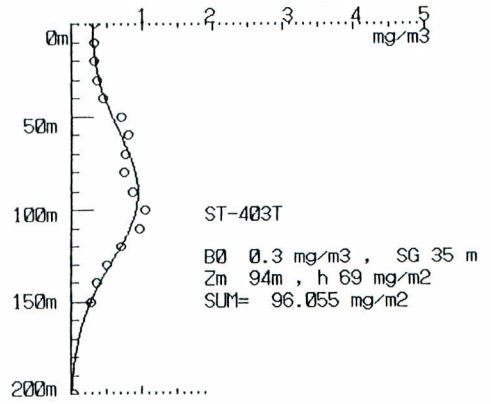
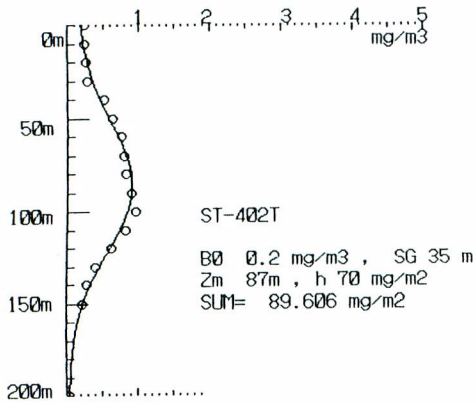


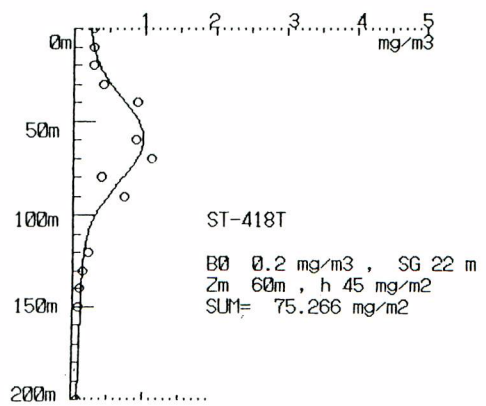
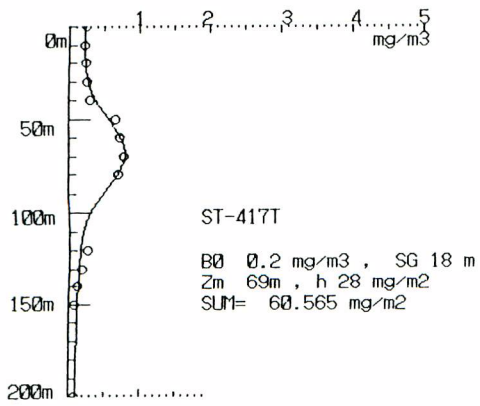
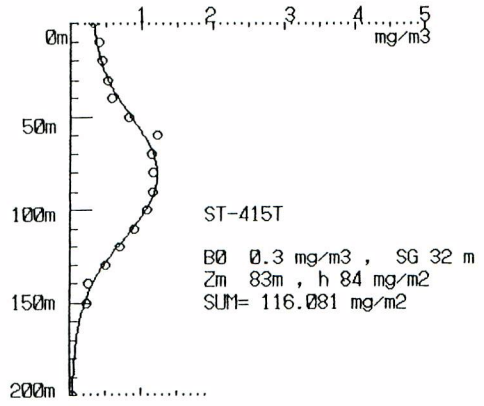
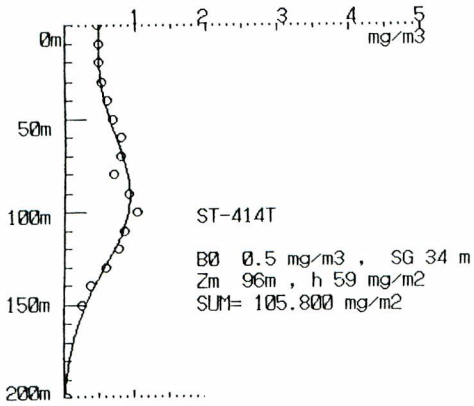
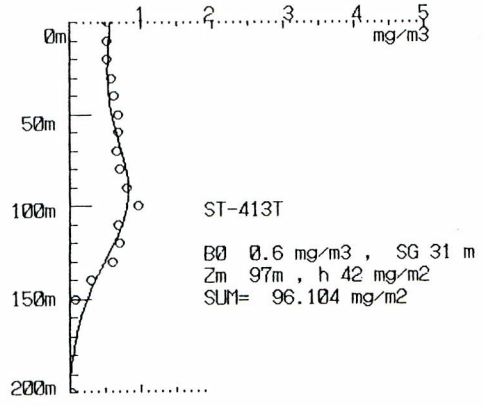
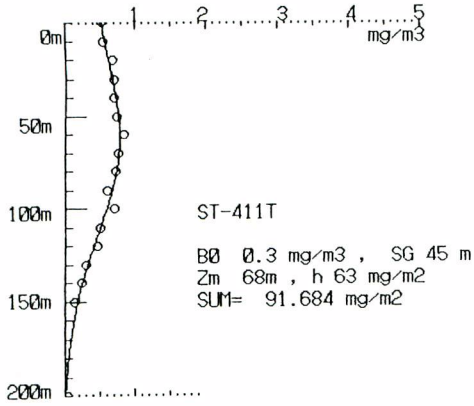












Appendix 3. Result of underwater optical measurement at Equatorial Pacific.
Measured by MER-1032 (Bio-spherical Instrument Co. Ltd)

Down ward irradiance $E_d(\lambda)$
Up ward irradiance $E_u(\lambda)$
Up ward radiance $L_u(\lambda)$

Numbers of observation at each leg.

Leg1	160E (N-S)	19 stations
Leg2	180 (N-S)	10
Leg3	150W (N-S)	20
Leg4	120W (N-S)	14
Leg6	E-equator	14
Leg7	W-equator	16

attention ;

- 1) Optical data at each depth are running meant by 5 meters.
- 2) Sun light correction was not done.
- 3) There may be large deviation on near surface data because of wave, ship shadow, reflection by ship body etc.
- 4) Carefulness is required to use deepest data because of near limitation of sensor sensitivity.

Floppy diskette is available for reference.

注) 水中照度・輝度データは膨大な量になるため、ここではサンプルとして一測点の物のみ記す。このタイプの全データは、別刷り要求と同じ扱いの下に著者に要求することにより、フロッピーデスクあるいはE-Mailにより入手できる。

