

瀬戸内海の一次生産と海洋構造*

橋本 俊也**・山本 民次**・多田 邦尚†

松田 治**・永末 寿宏***††

Primary Production and Physical Structure of the Seto Inland Sea, Japan.

Toshiya Hashimoto, Tamiji Yamamoto, Kuninao Tada,
Osamu Matsuda and Toshihiro Nagasue

瀬戸内海を鉛直混合強度の季節変動を指標として9海域に区分し、一次生産量の地理的・季節別変動を調べ、海洋構造との関係を考察した。年間平均一次生産量のもっとも大きな海域は大阪湾北部 ($1,227 \text{ mgC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$)、ついで広島湾北部 ($1,013 \text{ mgC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$) であった。これらの海域は周年にわたって成層が形成され、陸域からの大量の栄養塩供給によって一次生産が高く維持されていた。また、これからの海域の一次生産量は夏季と秋季に大きく、冬季と春季に小さかった。一方、年間平均一次生産量の小さな海域は備讃瀬戸 ($323 \text{ mgC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$)、安芸灘 ($335 \text{ mgC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$) であった。これらの海域は周年にわたり鉛直混合が卓越しており、光不足により一次生産が制限されていると考えられる。最も鉛直混合が卓越する備讃瀬戸では周年にわたり一次産量は小さく、季節変動はほとんど見られなかった。

According to the seasonal variation of the vertical mixing condition, the Seto Inland Sea were divided into 9 sub areas. Geographical and seasonal variations of primary production were investigated in relation to physical structure of each area. Annual average primary production was high at the northern part of Osaka Bay ($1,227 \text{ mgC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$) and the northern part of Hiroshima Bay ($1,013 \text{ mgC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$). At these areas, the density stratification developed throughout the year and the primary production was enhanced due to the nutrient supply by river discharge. The primary production at these areas was high during autumn and summer, and was low during winter and spring. While, the annual average primary production was low at Bisan Seto ($323 \text{ mgC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$) and Aki Nada ($335 \text{ mgC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$). At these areas, the vertical mixing was dominant throughout the year. It was suggested that the primary production at these areas was restrained by the light condition for the phytoplankton. At Bisan Seto, where the vertical mixing was the strongest, the primary production was low during all seasons and its seasonal variation was almost negligible.

キーワード：一次生産量, 海域区分, 海洋構造, 瀬戸内海

1. はじめに

海産植物による光合成すなわち一次生産は、海洋における食物連鎖の出発点であり、海洋生物生産の根幹をなすものである。一次生産過程を定量的に把握することは、海域の低次から高次に至る各栄養段階の生物生産過程の解明といった生態学的観点のみならず、漁業資源の維持管理といった水産学的観点からも重要な研究課題である。現場海域での一次生産量の定量的な測定は Steeman

Nielsen (1952)¹⁾ による ^{14}C 法の確立によって隆盛をみたが、我が国においては自然生態系での放射性同位体の使用の困難さにより十分なデータが得られないまま今日に至っている。近年では非放射性同位元素を用いた ^{13}C 法 (Hama *et al.*, 1983²⁾) による測定が行われ始めているが、瀬戸内海における一次生産量に関する報告は少なく (遠藤, 1970³⁾; Endo and Okaichi, 1977⁴⁾; 山口・安楽, 1984⁵⁾; Uye *et al.*, 1986⁶⁾)、遠藤 (1970)³⁾ による実測値 ($330 \text{ mgC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$) がこの海域の代表値として長年引用されてきた。ただし、最近この値は過小評価になっているのではないかと指摘がなされている (山本ら, 1994⁷⁾)。

瀬戸内海は、海洋物理学的にかなり性格の異なった湾、

* 1996年12月12日受領, 1997年4月28日受理

** 広島大学生物生産学部

† 香川大学農学部

†† 現所属：(株)NTT

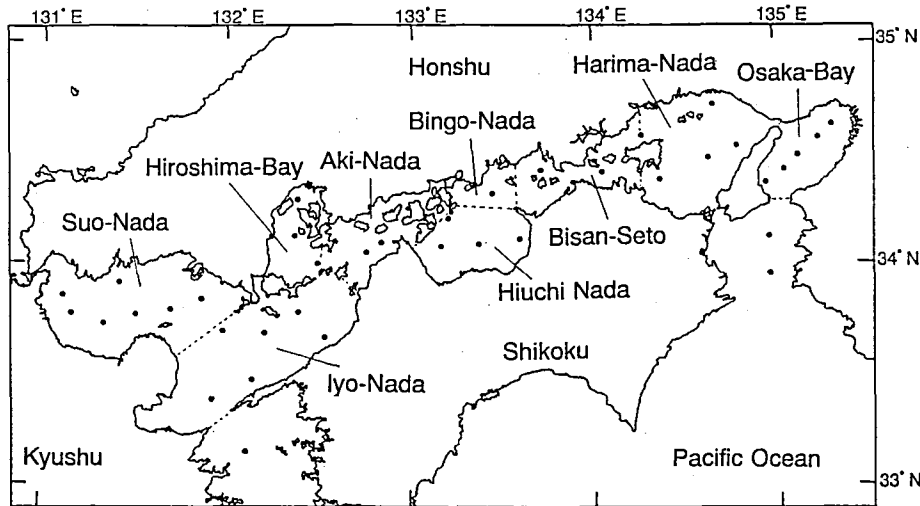


Fig. 1 Map showing the locations of observing station in the Seto Inland Sea.

瀬および瀬戸によって成り立っているが、通常の海域区分は Fig. 1 に示すように地理的観点からなされている。

(例えば、瀬戸内海環境保全協会, 1995⁹⁾)。そのため、このような海域区分では同じ海域内でも場所により海況特性が大きく異なる場合がある。たとえば、広島湾の海況特性は厳島と西能美島の間に位置する那沙美瀬戸を境界に北部と南部では大きく異なっており (中国工業技術試験場, 1986⁹⁾; 橋本ら, 1994¹⁰⁾)、これらを同一の海域 (広島湾) として扱うことは海洋学的に問題がある。従って、海況変動特性や一次生産量の時空間変動を議論する上では、地理的区分とは別に海洋学的観点からみた海域区分によって諸データを解析することが重要となる。

海域での一次生産量を決定する主要な条件の一つである栄養塩濃度の時空間変動には海水の流動という物理過程が大きな役割をはたしている。たとえば河川水の直接的な影響の少ない海域においては有光層内の栄養塩濃度は、鉛直混合による下層からの栄養塩供給によって決まる。したがって、鉛直混合を起こすような海水の運動が有光層内の栄養塩濃度を定める重要な要因となる (武岡, 1996¹¹⁾)。また、有光層内に分布する植物プランクトンは、鉛直混合や自らの沈降により無光層に輸送されて一次生産を行うことが出来なくなる。鉛直混合が海底まで及んでいる場合は、植物プランクトンの沈降速度と水柱の鉛直混合速度が等しい場合、有光層の厚さの水深に対する比が大きいほど、植物プランクトンは光合成に必要な光エネルギーを獲得しやすいことになる。

本研究では、水柱の混合強度の季節変化をもとに瀬戸内海を区分し、各海域の一次生産量の時空間変動特性を明らかにすることを目的とする。さらに、それぞれの海域における成層構造、有光層深度と水深の比の特性を明らかにし、これらが各海域の一次生産量の時空間変動に

与える影響について考察した。

2. 方法

現地観測は広島大学生物生産学部付属練習船「豊潮丸」により、1993年10月12～22日 (秋)、1994年1月8日～21日 (冬)、1994年4月12～22日 (春)、1994年6月20～30日 (夏) の4回行った。瀬戸内海全域に39測点を設け (Fig. 1)、全測点において透明度 (30 cm 白色セッキ板) の測定、CTD (SBE-9/11 plus, Sea Bird Electronics Inc.) による水温、塩分、密度、蛍光光度計 (Sea-Tech Fluorometer, Sea Tech Inc.) による水中蛍光光度の鉛直分布の測定を行った。また、全測点表層から採水した試料を用いてクロロフィル *a* (Chl *a*) 濃度を測定した。Chl *a* 濃度はジメチルホルムアミド (DMF) により抽出し (Suzuki and Ishimaru, 1990¹²⁾)、分光法 (Lorenzen, 1967¹³⁾) により測定した。Lorenzen (1967¹³⁾) の式は90% アセトン抽出に対するものであるが、Chl *a* フェオピグメントの90%アセトンおよびDMF 中での分子吸光係数の差は極めて小さいため、上式を用いることは実用上問題はない (Tada *et al.*, in preparation¹⁴⁾)。各航海ごとに蛍光光度と Chl *a* 濃度の回帰分析を行い (Fig. 2)、得られた回帰係数を用いて蛍光光度を Chl *a* 濃度に換算した。一次生産の測定は、¹³C法を用いて各航海ごとに約10測点で行った。これらの実測値をもとに一次生産量と有光層内 Chl *a* 現存量について回帰計算を行い、各航海毎の光合成指数 (単位 Chl *a* あたりの一次生産量) を求めた。求められた光合成指数は1993年10月、1994年1月、4月、6月で、それぞれ15.7, 7.21, 15.5, 11.8 mgC mgChl *a* day⁻¹ である。そして、各航海毎に有光層内 Chl *a* 現存量に光合成指数を乗じて全測点の一次生産量を算出した。

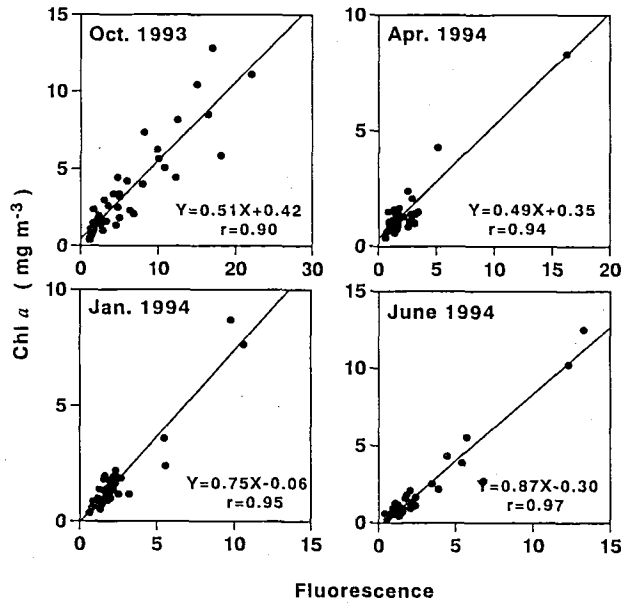


Fig. 2 Relationships between fluorescence and Chl *a* for each cruise.

本研究では水柱の鉛直混合強度の季節変化により海域区分を行うために、現地調査結果をもとに各測点の水柱が成層状態にあるか混合状態にあるかを季節別に判断する。各測点の密度の鉛直分布から完全混合状態に対するポテンシャルエネルギーの変化量(成層強度, ϕ)を以下の式(Simpson and Bowers, 1981¹⁵⁾)に従って計算した。

$$\Phi = \frac{1}{H} \int_0^H (\rho(z) - \bar{\rho}) g z dz \quad (1)$$

$$\bar{\rho} = \frac{1}{H} \int_0^H \rho(z) dz$$

ここで $\rho(z)$ は深度 z (m) における海水の密度 (kg m^{-3}), g は重力加速度である。 ϕ が大きいほど水柱の成層構造が強いことを意味しており、水柱が完全に混合している場合は $\phi = 0$ となる。成層・混合状態の判別は潮汐フロントの位置決定の指標として用いられている $\log_{10}(H/U^3)$ (Simpson and Hunter, 1974¹⁶⁾) によって決定した。ここで H は水深, U は潮流振幅である。全測点位置に対応する $\log_{10}(H/U^3)$ の値を Yanagi and Okada (1988)¹⁷⁾ から読みとり、その値と最も成層の発達する夏の成層強度 ϕ との関係調べた (Fig. 3)。この図から $\log_{10}(H/U^3)$ と ϕ の間の回帰分析を行って、回帰直線を求め瀬戸内海で潮汐フロントが形成されるといわれている $\log_{10}(H/U^3) = 2.5$ (Yanagi and Okada, 1988¹⁷⁾; 柳・大庭, 1985¹⁸⁾) に対応した ϕ の値を求めると約 10 J m^{-3} となった (Fig. 3)。そこで、ここでは $\phi = 10 \text{ J m}^{-3}$ 以上を成層状態, $\phi = 10 \text{ J m}^{-3}$ 未満を混合状態にあると考えることとする。この様にして決定された全

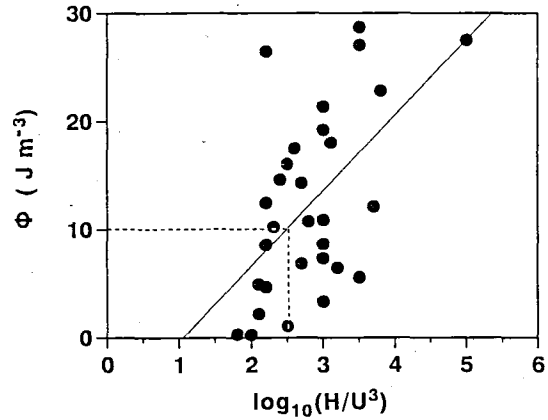


Fig. 3 Relationship between ϕ in Aug. 1995 and $\log_{10}(H/U^3)$ (Yanagi and Okada, 1988¹⁷⁾). Where ϕ is the stratification parameter that means the potential energy relative to the well mixed condition (Simpson and Bowers, 1981¹⁶⁾), H is the water depth in meter and U is the amplitude of M_2 tidal current in m sec^{-1} .

測点の各季別の成層・混合状態をもとに、(I) 周年成層域 (四季とも成層状態にある), (II) 成層卓越域 (夏季とそれ以外の季節にも成層状態になる), (III) 混合卓越域 (夏季のみ成層状態にある), (IV) 周年混合域 (四季とも混合状態にある) の4つに分類し、海域区分を行った。

有光層深度 (Z_{cd}) は橋本・多田 (1997)¹⁹⁾ が行った観測結果をもとに透明度の2.8倍とし、各測点の有光層深度と水深 (H) の比 ($\alpha = Z_{cd}/H$) を算出した。

3. 結 果

2章で述べた海域区分法に基づく瀬戸内海は Fig. 4 に示すように A~I の9海域に区分された。(I) 周年成層域は海域 A と G, (II) 成層卓越域は海域 C, (III) 混合卓越域は海域 B, E と H, (IV) 周年混合域は海域 D, F と I である (Table 1)。成層強度 (ϕ) の年間平均値は海域 G (28 J m^{-3}) と A (14 J m^{-3}) で大きく、一方、海域 D (0.80 J m^{-3}), F (3.2 J m^{-3}), I (3.7 J m^{-3}) で小さ

Table 1 The vertical mixing condition of water column.

Area	Season			
	Autumn	Winter	Spring	Summer
A	S	S	S	S
B	M	M	M	S
C	S	M	S	S
D	M	M	M	M
E	M	M	M	S
F	M	M	M	M
G	S	S	S	S
H	M	M	M	S
I	M	M	M	M

S: Stratified M: Mixed

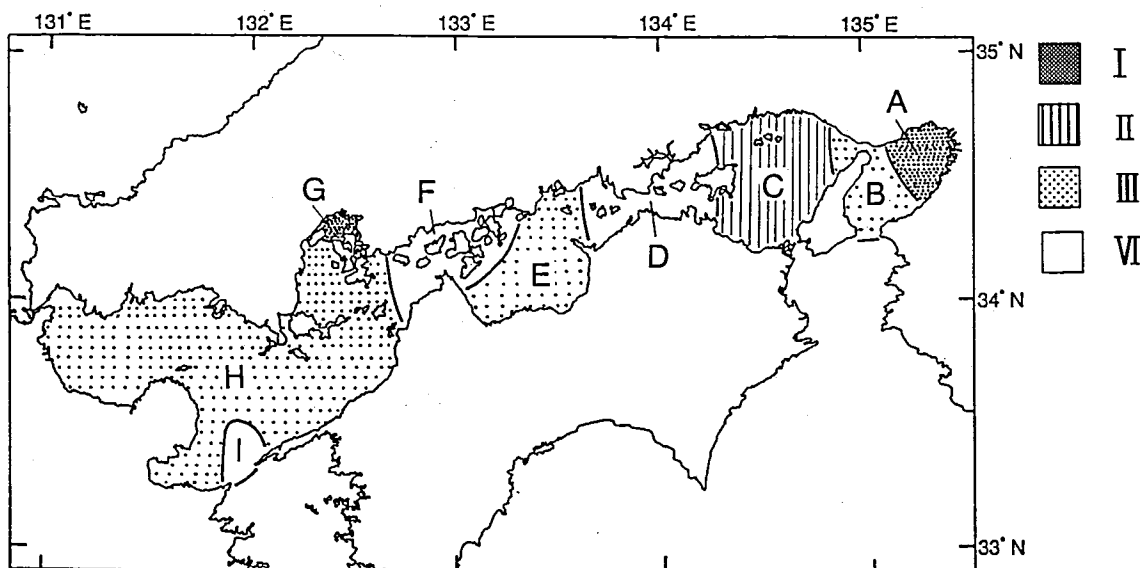


Fig. 4 Division of the Seto Inland Sea according to the seasonal variation of the vertical mixing condition. The density stratification developed (I) throughout the year, (II) during summer and other season and (III) during only summer, and (IV) the vertical mixing is dominant throughout the year.

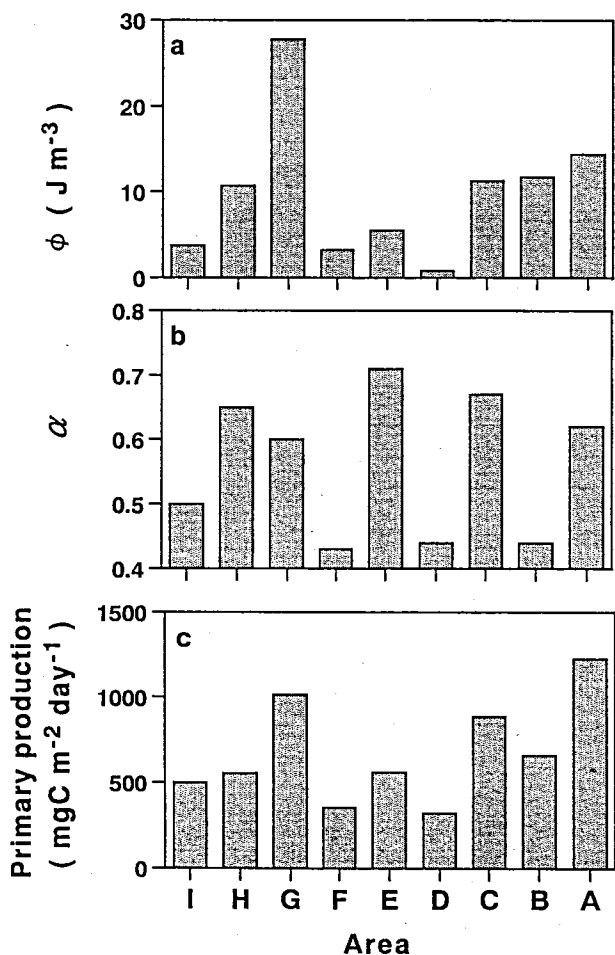


Fig. 5 Geographical variations in annual average of (a) ϕ , (b) α and (c) primary production. Where α is the ratio of the euphotic depth to the water depth.

い (Fig. 5a). 有光層深度と水深の比 (α) の年間平均値は海域 E (0.71), C (0.67), H (0.65) の順に大きく, 逆に F (0.43), D (0.44), B (0.44) の順に小さい (Fig. 5b). 年間平均一次生産量は海域 A ($1,227 mgC m^{-2} day^{-1}$), G ($1,013 mgC m^{-2} day^{-1}$), C ($885 mgC m^{-2} day^{-1}$) の順に大きく, 一方, D ($323 mgC m^{-2} day^{-1}$), F ($335 mgC m^{-2} day^{-1}$), I ($496 mgC m^{-2} day^{-1}$) の順に小さい (Fig. 5c).

各海域の面積による加重平均を行って得られた瀬戸内海全域の一次生産量は秋, 冬, 春, 夏でそれぞれ 992, 283, 556, $514 mgC m^{-2} day^{-1}$ で, 年間平均値は $663 mgC m^{-2} day^{-1}$ である.

4. 考 察

各海域ごとの年間平均の成層強度 (ϕ) と一次生産量の間には正の相関関係が見られた (Fig. 6). 年間平均 ϕ の大きい周年成層域 (I) (A: 大阪湾北部, G: 広島湾北部) は, 他の海域と比較して一次生産量は大きい (Fig. 5c). 成層は, 有光層内に分布する植物プランクトンが有光層より下層へ運ばれることを妨げることにより一次生産を促進する効果をもつが, 一方で上層への栄養塩供給を妨げることから一次生産を抑制する効果をもつ. 大阪湾北部や広島湾北部の海域 (I) では, 成層の形成に対して海面加熱よりも河川からの淡水負荷による浮力エネルギーが支配的であり (武岡, 1985²⁰; 橋本ら, 1994¹⁰), 淡水とともに栄養塩負荷量も大きいと考えられる. したがって海域 (I) では主として塩分差による密度差の大きい成層によって, 下層からの栄養塩供給は少ないが, 陸

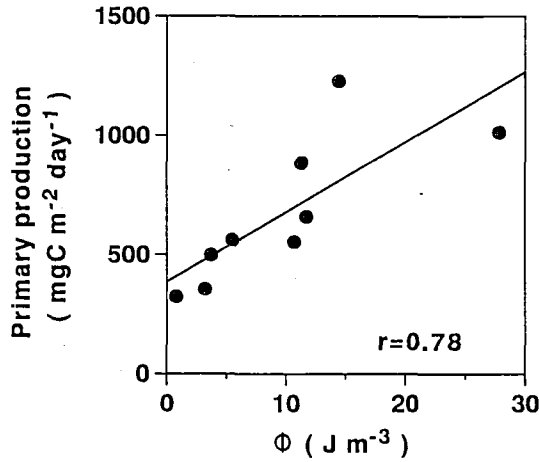


Fig. 6 Relationship between ϕ and primary production.

域からの水平的な栄養塩供給が海域の一次生産量を高めていると考えられる。

一方、年間平均 ϕ の小さい周年混合域(IV) (D: 備讃瀬戸, F: 安芸灘)では、一次生産量は小さい(Fig. 5c)。これらの海域では、鉛直混合が強いことと、有光層深度と水深の比(α)が小さい(Fig. 5b)のために、植物プランクトンが有光層内に長時間滞留できず、光エネルギーを十分利用することができないので一次生産量が小さくなっていると考えられる。

海域別に一次生産量の季節変動を見ると、夏から秋にかけてピークとなる海域(A, C, E, G)がみられた(Fig. 7)。これらの海域の一次生産量の季節変動では、成層が発達して下層からの栄養塩供給が抑制される夏季においても一次生産量が大きいことが特徴である。夏季に大きな一次生産量を維持するためには、鉛直混合による下層からの供給以外の栄養塩供給機構が必要である。これらの海域はEを除けば、(I)周年成層域または(II)成層卓越域で、先に述べたように陸域からの栄養塩供給のために夏でも栄養塩が枯渇しないと考えられる。一方、海域Eは河川水の影響は小さく(武岡, 1985²⁰)、陸域からの栄養塩負荷が夏季の大きな一次生産量の原因とは考えられない。したがって栄養塩の供給経路としては隣接する海域からの水平的な輸送が考えられる。海域Eと隣接する海域は(IV)周年混合域である海域D(備讃瀬戸)とF(安芸灘)である。周年混合域では夏でも強い潮流により鉛直混合が卓越している。このように混合域と成層域が隣接した海域では、成層域下層の豊富な栄養塩がまず水平的に混合域に運ばれ、その後鉛直混合により全層に分配され、さらに水平的な流動拡散によって成層域上層に運ばれるという栄養塩供給経路(栄養塩バイパス)があると考えられる(武岡, 1996¹¹)。この経路による栄養塩供給が海域Eの夏の高い一次生産量を支えている可

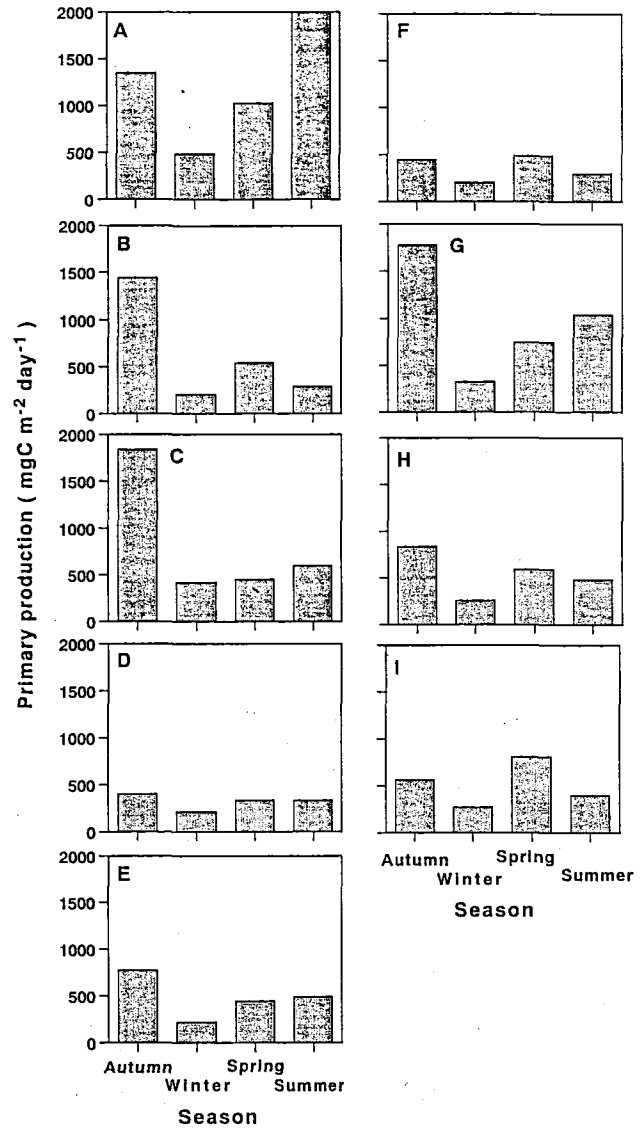


Fig. 7 Seasonal variation in primary production for each area.

能性が考えられる。

周年混合海域D(備讃瀬戸)では一次生産量の季節変動はほとんどなく、1年中一次生産量は小さい(Fig. 7)。この海域では、鉛直混合が最も強く、どの季節でも ϕ の値は0(完全混合)に近い値であり、 α も小さい(Fig. 5a, b)。このことから、この海域では、どの季節でも植物プランクトンが十分な光エネルギーを得ることが出来ないため、一次生産量は小さくなっていると考えられる。

5. おわりに

本研究では、四季にわたる調査結果をもとに瀬戸内海における一次生産量の時空間変動と物理的海洋構造の関係性を明らかにした。ただし、今回の研究では天候の変化、植物プランクトンの種の交代、赤潮の発生・消滅といっ

た短いタイムスケールの変動は評価していない。また、今回の観測の行われた期間は、1993年夏季の低気温、多雨、1994年夏季の高気温、小雨という経年的な気象変動の影響も含んでいると考えられる。このような観測船を利用した実測では瀬戸内海全域の平均的な海況の時空間変動を詳細に調査することは困難である。瀬戸内海全域の一次生産量のより詳細な時空間変動の研究に関しては、今後発展するであろう人工衛星によるChl *a*濃度の測定に期待したい。また、海域の一次生産を支配している物理的要因の定量的な把握に関しては、生態系モデルにより解析することが重要である。

最後に本研究を行うにあたり終始有益な助言をいただいた愛媛大学工学部柳哲雄教授および同学部武岡英隆助教授に感謝します。また観測にご協力頂いた郷秋雄船長をはじめとする広島大学生物生産学部付属練習船「豊潮丸」乗組員の方々と学生諸氏に感謝します。

なお、本研究は「瀬戸内海における有用水産資源の持続的生産と環境保全に関する学際的研究」(日本生命財団特別助成、1992年10月～1995年9月、研究代表者 岡市友利)により行われた研究成果の一部であることを付記する。

参 考 文 献

- 1) Steeman Nielsen, E. (1952): The use of radio-active carbon (^{14}C) for measuring organic production in the sea. *J. Cons. Int. Explor. Mer.*, **18**, 117-140.
- 2) Hama, T., T. Miyazaki, Y. Ogawa, T. Iwakuma, M. Takahashi, A. Otsuki and S. Ichimura (1983): Measurement of photosynthetic production of a marine phytoplankton population using a stable ^{13}C isotope. *Mar. Biol.*, **73**, 31-36.
- 3) 遠藤拓郎 (1970): 瀬戸内海の一次生産に関する研究. 広島大学水産学部紀要, **9**, 177-221.
- 4) Endo, T. and T. Okaichi (1977): Productivity of phytoplankton. *Productivity of Biocenoses in Coastal Regions of Japan*. JIBP Synthesis, **14**, ed. by K. Hogetsu *et al.*, Univ. Tokyo Press, Tokyo, 318pp.
- 5) 山口峰生・安楽正照 (1984): 瀬戸内海西部周防灘における基礎生産について. *南西水研報*, **14**, 135-149.
- 6) Uye, S., H. Kuwata and T. Endo (1986): Standing stocks and production rate of phytoplankton and planktonic copepods in the Inland Sea of Japan. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **42**, 421-434.
- 7) 山本民次・橋本俊也・多田邦尚 (1994): 瀬戸内海の漁業を支える基礎生産. *瀬戸内海科学*, **16**, 150-153.
- 8) 瀬戸内海保全協会 (1995): 瀬戸内海の環境保全—資料集—環境庁水質保全局 (監修), 159pp.
- 9) 中国工業技術試験場 (1986): 瀬戸内海における海水交換性及び負荷量影響度の研究報告書, 444pp.
- 10) 橋本俊也・松田 治・山本民次・米井好美 (1994): 広島湾の海況特性—1989～1993年の変動と平均像—. 広島大学生物生産学部紀要, **33**, 9-19.
- 11) 武岡英隆 (1996): 漁業生産を支える環境と低次生産—基礎生産と物理過程—. 瀬戸内海の生物資源と環境, 岡市友利・小森尾見・中西 弘 (編), 恒星社厚生閣, 東京, 52-57.
- 12) Suzuki, R. and T. Ishimaru (1990): An improved method for determination of phytoplankton chlorophyll using N, N-dimethyl-formamid. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **46**, 190-194.
- 13) Lorenzen, C. J. (1967): Determination of chlorophyll and phaeo-pigments: Spectrophotometric equations. *Limnol. Oceanogr.*, **12**, 343-346.
- 14) Tada, K., K. Monaka, M. Morishita and T. Hashimoto: Standing stocks and production rates of phytoplankton and abundance of bacteria in the Seto Inland Sea, Japan. in preparations.
- 15) Simpson, J. H. and D. Bowers (1981): Models of stratification and frontal movement in shelf seas. *Deep-Sea Res.*, **28**, 727-738.
- 16) Simpson, J. H. and J. R. Hunter (1974): Fronts in the Irish Sea. *Nature*, **250**, 404-406.
- 17) Yanagi, T. and S. Okada (1993): Tidal Fronts in the Seto Inland Sea. *Memoirs of the Faculty of Eng., Ehime Univ.*, **12**, 61-67.
- 18) 柳 哲雄・大庭哲哉 (1985): 豊後水道の Tidal Front. 沿岸海洋研究ノート, **23**, 19-25.
- 19) 橋本俊也・多田邦尚 (1997): 広島湾の海水の光学的特性. 海の研究, **6**, 151-155.
- 20) 武岡英隆 (1985): 瀬戸内海の密度成層, *海と空*, **60**, 145-152.