

相模湾におけるクラゲノミ亜目端脚類の季節的消長 および鉛直分布

野村英明^{1,2)†}・北林浩子¹⁾・田中祐志¹⁾・石丸 隆¹⁾

Seasonal occurrence and vertical distribution of the hyperiid amphipods in Sagami Bay, central Japan

Hideaki NOMURA^{1,2)†}, Hiroko KITABAYASHI¹⁾, Yuji TANAKA¹⁾ & Takashi ISHIMARU¹⁾

Abstract : To study the seasonal and vertical occurrences of hyperiid amphipods, collections were carried out five times (April and November in 1997, January, July and September in 1998) using ORI net and once (September in 1998) using MTD nets at a central part of Sagami Bay, in the Pacific coast of middle Japan. The ORI net samplings were made obliquely from about 1000 m deep to the surface. A set of MTD nets was towed horizontally at six different depths (0, 100, 200, 300, 500, and 800 m). A total of 25 amphipod species belonging to 18 genera was identified. Among them, *Primno latreillei* and *Primno brevidens* were recorded first from Japanese waters. The minima of abundance and species number were 2 inds. 1000 m⁻³ and 2 species, respectively, both recorded in January. In September, those maxima, 236 inds. 1000 m⁻³ and 19 species, respectively were observed. Annual average was 79 inds. 1000 m⁻³. In September and November, *Lestrignonus* spp. dominated more than 75% of the hyperiidean species assemblage. *L. bengalensis* accounted for 51% of hyperiids in abundance on the annual basis. *Primno latreillei* and *Eupronoe minuta* are likely to be native in Sagami Bay because they occurred throughout the year. Hyperiid population densities were high at 0 m (398 inds. 1000 m⁻³) and 100-m layer (179 inds. 1000 m⁻³), low at 200-m or deeper layer (23–47 inds 1000 m⁻³), and absent in the 800-m layer. Physocephalata species were abundant above 300-m layer and Physosomata species in the 500-m layer. Seasonally, population density and species number of the hyperiid amphipod seemed to increase with increasing water temperature in the surface–100 m layer. We assume the hyperiidean assemblage in Sagami Bay during summer consists of allochthonous species that are spread from the southern warm regions.

Keywords : Physocephalata, Physosomata, hyperiid, amphipod, Crustacea, Sagami Bay

1. 緒言

浮遊性端脚類は亜寒帯太平洋でサケ、マス、ニシン等の水産有用魚の餌料生物となっているほか（深滝, 1967; 劉, 1969), *Phronima sedentaria*, *Phrosina semilunata*, *Platyscelus* sp. は、沿岸や外洋域のミズウオの胃内に必ず見られるなど（KUBOTA & UYENO, 1970; 久保田・

森, 1975), 沿岸・外洋域の高次捕食者にとって重要な餌資源の一つであると考えられる。しかし、通常、クラゲノミ類は重要な生物群としては扱われず、生態系の中での位置や役割など未知な部分が多く残されている。

日本における端脚目クラゲノミ亜目（以下、クラゲノミ類）の研究は過去には種の記載や分布等、主に分類学的興味から行われてきたが（入江, 1957; IRIE, 1959; 劉, 1969), 近年、日本海や三陸沖親潮域に分布するいくつかの種や、有用魚類の天然餌料として評価の高い *Themisto japonica* を中心に生理・生態学的研究が蓄積されつつある（HIROKI, 1988; IKEDA, 1990, 1991, 1995; 杉崎, 1991; IKEDA *et al.*, 1992; 蔵田, 1999; IKEDA & SHIGA, 1999)。しかし、日本ではクラゲノミ類群集の季節的消長を調べた例はない。筆者らはクラゲノミ類研究

¹⁾ 東京水産大学, 108-8477 東京都港区港南 4-5-7 Tokyo University of Fisheries, 4-5-7 Konan, Minatoku, Tokyo 108-8477, Japan

²⁾ 現住所: 東京大学海洋研究所, 164-8639 東京都中野区南台1-15-1 Ocean Research Institute, the University of Tokyo, 1-15-1 Minami-dai, Nakano, Tokyo 164-8639, Japan

†: corresponding author

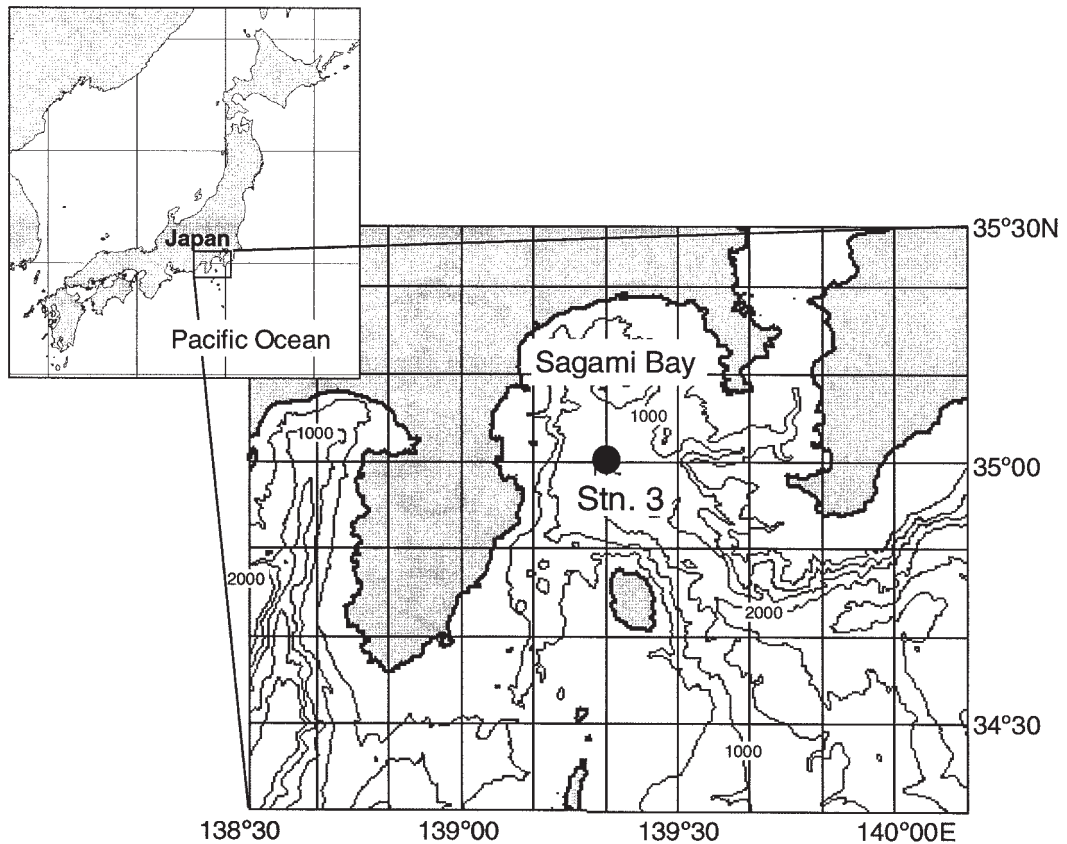


Fig. 1. Position of sampling station (Stn. 3) in Sagami Bay, central Japan.

の基礎として、相模湾における出現状況を報告する。

2. 材料と方法

採集は東京水産大学研究練習船「青鷹丸」により、相模湾のほぼ中央に位置する Stn. 3 (35°00.0N, 139°20.0 E) において、昼間行った (Fig. 1)。採集にはORIネット (メッシュサイズ0.3あるいは1.0mm, Omori, 1965) と元田式水平閉鎖ネット (MTDネット:メッシュサイズ0.3 mm, Motoda, 1971) を使用した。ORIネットによる採集は季節的消長を調べるために用い、1997年4、11月、1998年1、7、9月の計5回、繰り出しワイヤー長 2000 m の傾斜曳きによった。MTD ネットは鉛直分布を調べるために用い、1998年9月に行った。採集層は0、100、200、300、500、800 m の6層である。採集した試料は、直ちに中性ホルマリンを最終濃度5%となるように加え固定した。ネットには濾水計を取り付け、その回転数から濾水量を計算し、個体数密度を算出した。クラゲノミ類は実体顕微鏡を用いて選別し、種の同定と計数を行った。同定は VINOGRADOV *et al.* (1996)、永田 (1997) に従った。調査期間における海況の季節変化

を把握するために、青鷹丸による同じ定点における1997年1月から1998年12月までの毎月のCTD観測資料を用いた。

3. 結果

3-1. 海況

表面水温は両1997、1998年共、1月に最も低く (15.1と15.7°C)、9月に最も高かった (26.6と26.2°C)。20°C以上の水温は6月から11月には75 m以浅に分布していた (Fig. 2)。

相模湾は本州の中部太平洋岸に位置し、伊豆半島・三浦半島・房総半島に囲まれた開放型の湾であり、黒潮の変動が、その環境に強く影響する (大塚, 1972; 宮沢ほか, 1980; 岩田, 1985)。本調査の期間については、相模湾の表面水温は、夏季に25°C前後、冬季には15°C程度で、年間で10°C前後変化し、7月から9月には30 mから50 m層付近に顕著な水温躍層が形成されるという岩田 (1985) の報告に見られる変動と同様の状態にあったと考えられる。

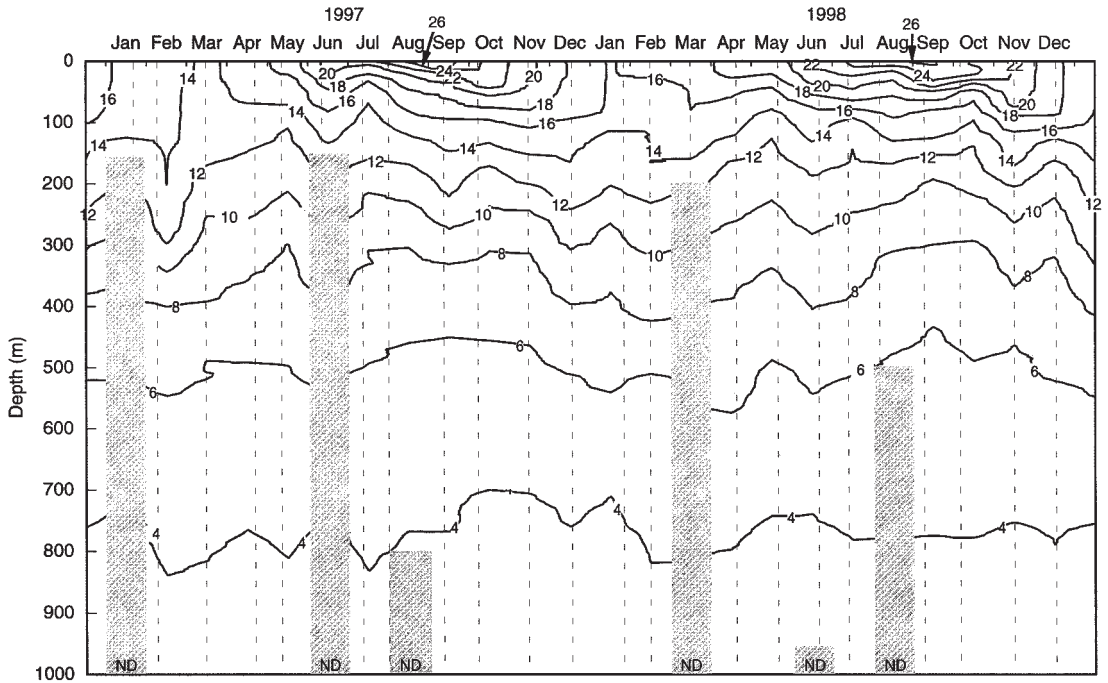


Fig. 2. Temporal changes in the depth distribution of water temperature ($^{\circ}\text{C}$). ND: no data.

Table 1. List of hyperiid species collected in the central part of Sagami Bay, Japan.

Order Amphipoda	Family Phrosinidae
Suborder Hyperiidea	<i>Phrosina semilunata</i>
Infraorder Physosomata	<i>Primno abyssalis</i>
Family Scinidae	<i>P. brevidens</i>
<i>Scina</i> spp.	<i>P. latreillei</i>
<i>Acanthoscina</i> sp.	<i>Primno</i> spp.
Family Lanceolidae	Family Pronoidae
<i>Lanceola</i> spp.	<i>Eupronoe armata</i>
Infraorder Physocephalata	<i>E. maculata</i>
Family Vibiliidae	<i>E. minuta</i>
<i>Vibilia armata</i>	Family Lycaeidae
<i>V. stebbingi</i>	<i>Simorhynchotus antennarius</i>
<i>Vibilia</i> sp.	Family Brachyscelidae
Family Hyperiidae	<i>Brachyscelus globiceps</i>
<i>Bougisia ornata</i>	Family Platyscelidae
<i>Hyperioides longipes</i>	<i>Paratyphis parvus</i>
<i>Lestrignonus bengalensis</i>	<i>Tetrathyrus fociatus</i>
<i>L. schizogeneios</i>	<i>Amphithyrus muratus</i>
<i>Lestrignonus</i> spp.	<i>A. sculpturatus</i>
<i>Phronimopsis spinifera</i>	Family Parascelidae
Family Phronimidae	<i>Parascelus edwardsi</i>
<i>Phronima atlantica</i>	
<i>P. sedentaria</i>	

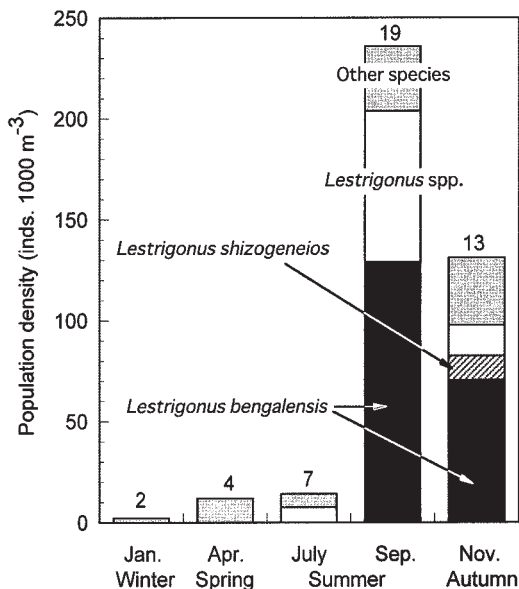


Fig. 3. Seasonal variations in population density of hyperiid amphipod and *Lestrignonus* species collected using ORI-net. Numeral above each bar denotes the number of species occurred.

3-2. 出現種

クラゲノミ類は18属25種が出現した (Table 1)。これらのうち、Physocephalata 下目の5種、*Vibilia armata*, *Phronimopsis spinifera*, *Simorhynchotus antennarius*, *Paratyphis parvus*, *Parascelus edwardsi* は熱帯・亜熱帯種である (永田, 1997)。*Primno latreillei* と *Primno brevidens* は日本近海から初めての報告である。

3-3. 季節的消長

クラゲノミ類の出現種数の最少は1月の2種、最多は9月の19種であった。総個体数密度も種数の増減と同じ傾向を示し、1月に2 inds. 1000 m⁻³と最も低く、9月に236 inds. 1000 m⁻³と高くなった (Fig. 3)。個体数密度の高かった9月と11月には *Lestrignonus* 属が総個体数密度の、それぞれ 86% (204 inds. 1000 m⁻³) と 75% (98 inds. 1000 m⁻³) を占めた。*Lestrignonus* 属の中でも特に *L. bengalensis* は9月には129 inds. 1000 m⁻³、11月には71 inds. 1000 m⁻³出現し、総個体数密度に対し両月とも54%を占めた。5回の採集を平均した場合、総個体数密度は79 inds. 1000 m⁻³となり、そのうち *Lestrignonus* 属は62 inds. 1000 m⁻³で総個体数密度の78%を、*L. bengalensis* は40 inds. 1000 m⁻³で51%を占め、優占種となった。個体数密度に関しては、相模湾のクラゲノミ群集では、*Lestrignonus* 属が優占していた

ことになるが、本属は9月と11月以外には出現しなかった。

Lestrignonus 属を除くクラゲノミ類の多くの種は個体数密度が低く、5 inds. 1000 m⁻³以上出現したのは、*Primno brevidens* (9.3 inds. 1000 m⁻³)、*Primno latreillei* (7.5 inds. 1000 m⁻³)、*Eupronoe minuta* (7.4 inds. 1000 m⁻³)、*Phronimopsis spinifera* (5.2 inds. 1000 m⁻³) の4種であった (Fig. 4)。また、周年採集されたのは *P. latreillei* と *E. minuta* の2種であった。

3-4. 鉛直分布

MTD ネットによる各層採集では、個体数密度は0 m層で398 inds. 1000 m⁻³、100 m層で179 inds. 1000 m⁻³と高く、これら2層で全層の86%を占めた (Fig. 5)。個体数密度は深度と共に減少する傾向を示し、200 m以深では23–47 inds. 1000 m⁻³となり、800 m層では1個体も採集されなかった。種数は積算して11属13種、層別で最も多かったのは100 m層の9種であった (Figs. 5, 6)。

各層の個体数密度を見ていくと、個体数密度の高い0 m層では、*Lestrignonus* 属が79% (312 inds. 1000 m⁻³)を占め、そのうち *L. bengalensis* が185 inds. 1000 m⁻³出現して0 m層の個体数密度の46%を占めた (Fig. 5)。100 m層では *Eupronoe minuta* が73 inds. 1000 m⁻³出現し、この層で41%を占め (Fig. 6)、次いで *Lestrignonus* 属が31% (55 inds. 1000 m⁻³)を占めた。200 m層では *E. minuta* や *Lestrignonus* 属は出現せず、*Primno* 属のみが出現し (24 inds. 1000 m⁻³)、中でも *P. brevidens* が15 inds. 1000 m⁻³出現した。300 m層では *Primno* 属 (28 inds. 1000 m⁻³) に次いで *Vibilia* 属 (12 inds. 1000 m⁻³) が多く出現した。500 m層では *Scina* 属のみが出現した (23 inds. 1000 m⁻³)。各層でクラゲノミ群集を比べると、Physocephalata 下目に含まれる属は、0–300 m層、特に0–200 m層で主要な構成員であったのに対し、Physosomata 下目はそれよりも深い500 m層で多い傾向を示した。

クラゲノミ類の全層での平均個体数密度は112 inds. 1000 m⁻³であった。優占種は順に *L. bengalensis* (31 inds. 1000 m⁻³)、*E. minuta* (22 inds. 1000 m⁻³)、*Lestrignonus schizogeneios* (12 inds. 1000 m⁻³)であった。

4. 考察

蔵田 (1999) は4月の三陸沖親潮域から10属20種 (うち *Scina* 属8種、*Lanceola* 属3種) のクラゲノミ類を報告した。本研究で同定した種は蔵田 (1999) の挙げた出現種の半数以上を占める Physosomata 下目の *Scina* 属と *Lanceola* 属を種まで同定できなかったが、Physocephalata 下目の *Themisto* 属、*Hyperia* 属、*Mimoneceteola* 属等は相模湾では出現していない。共通

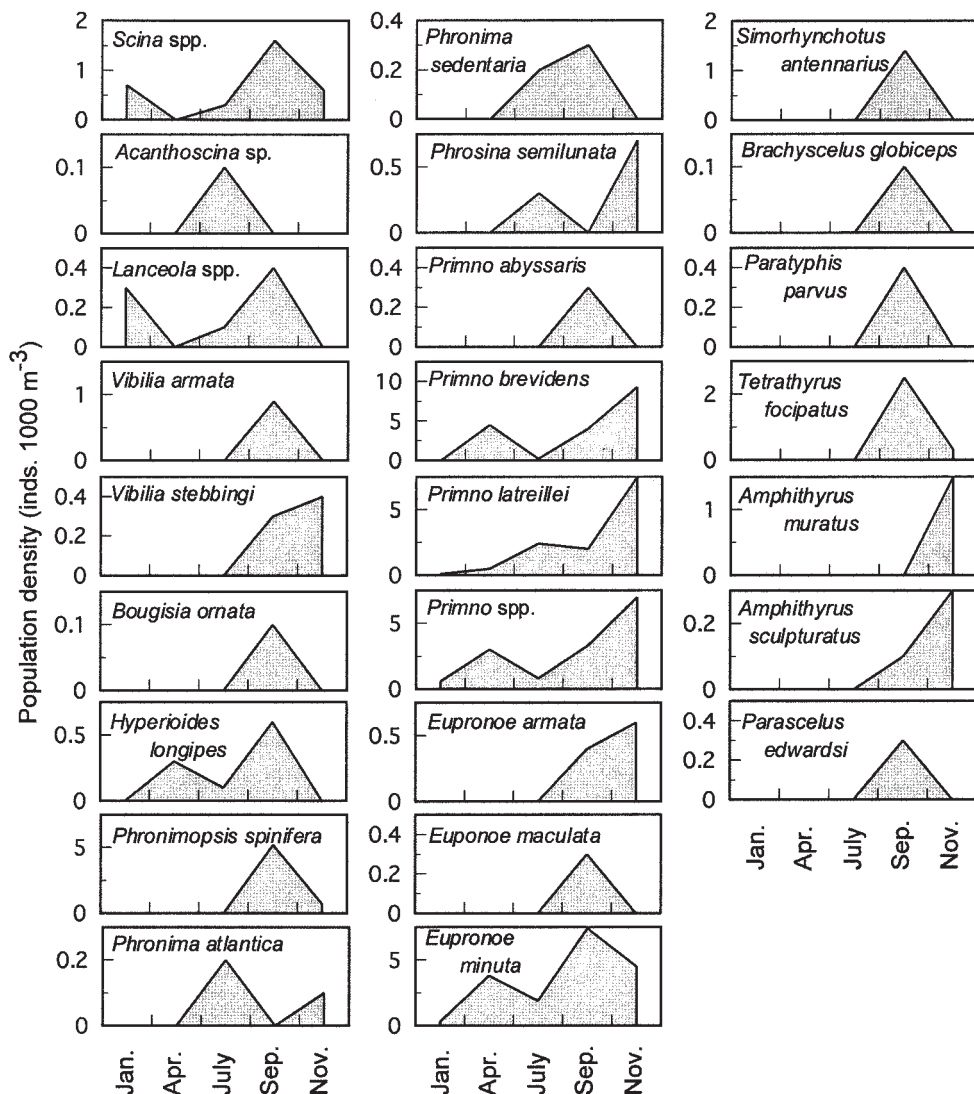


Fig. 4. Seasonal variations in population density of hyperiid species collected using ORI-net.

したのは、*Phronima sedentaria* と *Primno abyssalis* の2種であった。相模湾と三陸沖ではクラゲノミ群集の構成者は明らかに異なっている。

日本海や三陸沖のクラゲノミ群集では主に *Themisto japonica*, *P. abyssalis* が卓越する (IKEDA *et al.*, 1992; IKEDA, 1995; 蔵田, 1999)。富山湾の *T. japonica* の個体数密度は0–500 m 層の年平均で $1.25 \text{ inds. m}^{-3}$ である (IKEDA *et al.*, 1992)。相模湾では最も卓越した *Lestrigonus bengalensis* の年平均個体数密度は $0.04 \text{ inds. m}^{-3}$ 、全クラゲノミ類の平均でも $0.08 \text{ inds. m}^{-3}$ でしかない。*T. japonica* の濃密な集群 (HIROTA & SEMURA, 1990) を考慮する必要はあるが、平均値とし

ての個体数密度は1種で相模湾のクラゲノミ類全体の10倍以上高い。一方、一般に Physocephalata 下目の種数は暖海域で多いことが知られている (RAYMONT, 1983)。また、日本近海 ($21^{\circ}45.0\text{N}$ – $49^{\circ}53.5\text{N}$, 主に 26°N 以北) におけるクラゲノミ類は 35°N 以南で20–25属 (29–36種)、以北で4–12属 (6–15種) が出現し、南で属・種数とも多い (IRIE, 1959)。日本海や三陸沖ではクラゲノミ類の種数が少なく圧倒的な卓越種が存在することから、日本近海に分布するクラゲノミ群集自体の多様度は概ね 35°N 以南で高いと考えられる。

相模湾のクラゲノミ群集は、湾内に生息している種群と高温期に他地域から運ばれる異地性種群の二つの種群

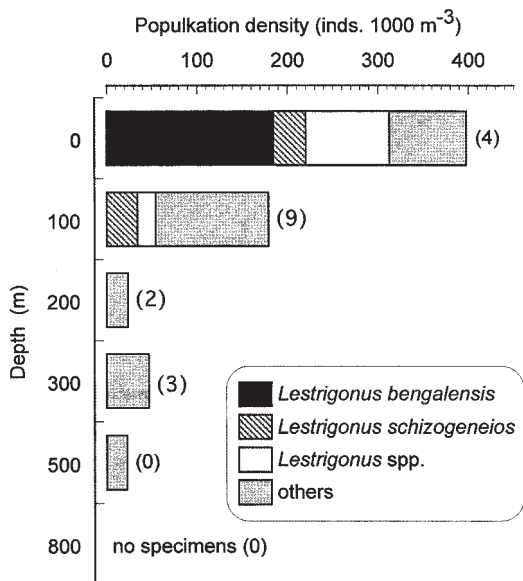


Fig. 5. Vertical distributions in population density of hyperiid amphipod and *Lestrignonus* species collected using MTD-nets in September, 1998. Numeral in parentheses denotes the number of species occurred.

によって構成される。相模湾では熱帯性毛顎類 *Sagitta neglecta*, *Krohnitta pacifica* 等は水温が 20℃ 以上になる時に出現する (MARUMO & NAGASAWA, 1973; 永沢・丸茂, 1977)。熱帯・亜熱帯性オキアミ類の量・種数が多くなる 9-12月 は 100 m 以浅の水温が上昇する時期である (広田ほか, 1982)。本研究においては, 9月に熱帯・亜熱帯種とされる *Paratyphis parvus*, *Phronimopsis spinigera*, *Simorhynchotus antennarius* が 100 m 層で採集された。この時期相模湾の表層水温は一年のうちで最も高く, 100 m で 15℃, 50 m 以浅で 20℃ 以上であった。熱帯・亜熱帯種が水温の高い上層に分布していたことは, 高水温期の種群は南方から夏季の相模湾表層に分布を広げる種で形成されることを示唆する。クラゲノミ類で夏季から秋季に出現する種, 特に熱帯・亜熱帯種は, 毛顎類・オキアミ類と同様に, 黒潮による輸送で熱帯・亜熱帯外洋域から補給されると考えられる。これらは異地性種であり, 熱帯性毛顎類と同様に (MARUMO & NAGASAWA, 1973), 水温が低下する冬季には湾内で繁殖も生残もできないだろう。

本研究で観測されたクラゲノミ類の鉛直分布は, Physocephalata 下目の種が 200 m 以浅で, Physosomata 下目の種が 200-500 m で多いという一般的な傾向 (Thurston, 1976; RAYMONT, 1983; VINOGRADOV *et al.*, 1996) と一致していた。

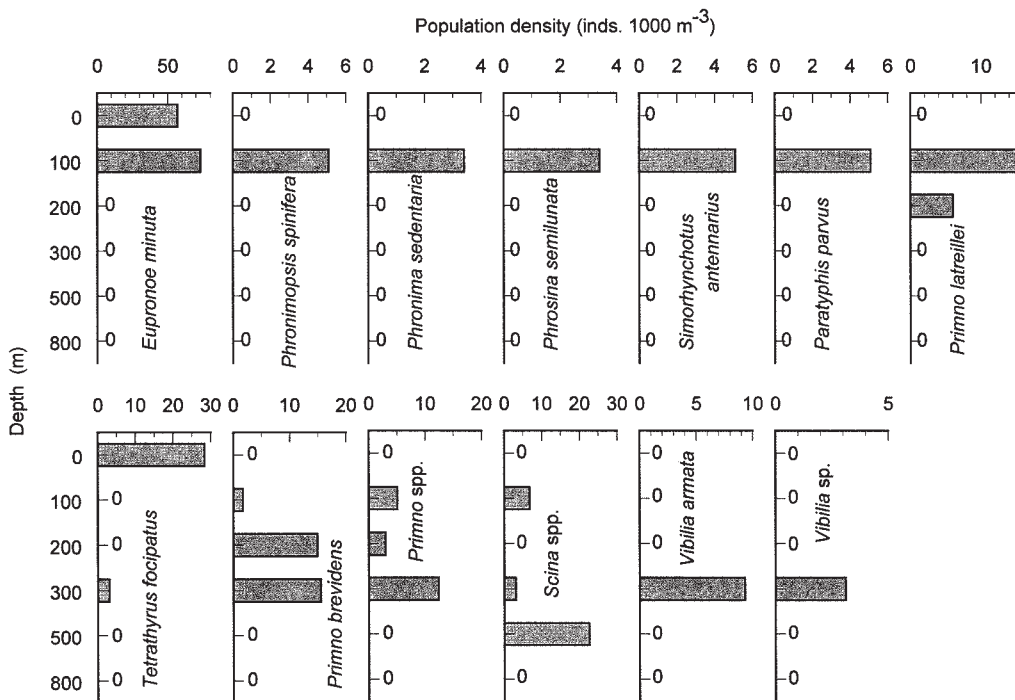


Fig. 6. Vertical distributions in population density of hyperiid species collected using MTD-nets in September, 1998.

周年出現した*Primno latreillei*と*Eupronoe minuta*は相模湾で生涯を通す種と考えられるが、その他に周年出現した種はなかった。しかし、クラゲノミ類自体の個体数密度が低いこと、パッチ状に分布する可能性も考慮すると、なお一層綿密な調査が必要と思われる。

謝辞

国土環境株式会社の村野正昭博士には御校閲・御助言を賜った。東京大学海洋研究所大学院生の蔵田泰治氏には文献の提供と共に、多くの御助言をいただいた。国立科学博物館の大澤正幸博士、福岡弘紀博士には、分類に関する御助言を賜った。東京水産大学研究練習船青鷹丸の船長、士官、甲板員の方々には試料採集にあたり、御助力いただいた。これらの方々には深謝の意を表す。

参考文献

- 深滝 弘 (1967) : 1965年春期の日本海におけるカラフトマスの食性. 日本海区水研研報, **17**, 49-66.
- HIROKI, M. (1988) : Relation between diel vertical migration and locomotor activity of a marine hyperiidean amphipod, *Themisto japonica* (BOVALLIUS). *J. Crust. Biol.*, **8**, 48-52.
- 広田祐一・根本敬久・丸茂隆三 (1982) : 相模湾におけるおきあみの季節変動と水平分布. 日本プランクトン学会報, **29**, 37-47.
- HIROTA, Y. & H. SEMURA (1990) : Surface swarming of hyperiid amphipod *Themisto japonica* in the southeastern region, Sea of Japan. *Bull. Japan Sea Reg. Fish. Res. Lab.*, **40**, 233-238.
- IKEDA, T. (1990) : A growth model for a hyperiid amphipod *Themisto japonica* (BOVALLIUS) in the Japan Sea, based on its intermoult period and moult increment. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **46**, 261-272.
- IKEDA, T. (1991) : A growth model for a hyperiid amphipod *Themisto japonica* (Bovallius) from the Japan Sea, based on its intermoult increment. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **47**, 7-16.
- IKEDA, T. (1995) : Distribution, growth and life cycle of the mesopelagic amphipod *Primno abyssalis* (Hyeriidea: Phrosinidae) in the southern Japan Sea. *Mar. Biol.*, **123**, 789-798.
- IKEDA, T., K. Hirakawa & A. Imamura (1992) : Abundance, population structure and life cycle of a hyperiid amphipod *Themisto japonica* (BOVALLIUS) in Toyama Bay, southern Japan Sea. *Bull. Plankton Soc. Japan*, **39**, 1-16.
- IKEDA, T. and N. SHIGA (1999) : Production, metabolism and production/biomass (P/B) ratio of *Themisto japonica* (Crustacea: Amphipoda) in Toyoma Bay, southern Japan Sea. *J. Plankton Res.*, **21**, 299-308.
- 入江春彦 (1957) : 日本近海浮遊性端脚類「くらげのみ」亜目25種. 水産学集成 (末広恭雄・大島泰雄・楡山義夫編), 東京大学出版会, 東京, 345-355.
- IRIE, H. (1959) : Studies on pelagic amphipods in the adjacent seas of Japan. *Bull. Fac. Fish. Nagasaki Univ.*, No. 8, 20-42.
- 岩田静夫 (1985) : 第10章相模湾Ⅱ物理. 日本全国沿岸海洋誌 (日本海洋学会沿岸海洋研究部会編), 東海大学出版会, 東京, 401-409.
- KUBOTA, T. & T. UYENO (1970) : Food habits of lancetfish *Alepisaurus ferox* (Order Myctophiformes) in Suruga Bay, Japan. *Japan. J. Ichthyol.*, **17**, 22-28.
- 久保田正・森 拓也 (1975) : ミズウオが捕食していたオオタルマワシの“タル”の形態. 東海大学海洋科博年報, No. 2/3, 61-65.
- 蔵田泰治 (1999) : 親潮域における浮遊性端脚類の鉛直分布に関する研究. 東京大学学位修士論文, 28 pp.
- 劉 光日 (1969) : 西部北太平洋における浮遊性端脚類の生態的研究. 東京大学学位博士論文, 181pp.
- MARUMO, R. & S. NAGASAWA. (1973) : Pelagic chaetognaths in Sagami Bay and Suruga Bay, central Japan. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **29**, 267-275.
- 宮沢公雄・松山優治・岩田静夫・小原基文 (1980) : 黒潮の流軸移動が相模湾周辺域の海況に及ぼす影響. 水産海洋研究会報. **37**, 1-6.
- Motoda, S. (1971) : Devices of simple plankton apparatus, V. *Bull. Fac. Fish. Hokkaido Univ.*, **22**, 101-106.
- 永沢祥子・丸茂隆三 (1977) : 相模湾における表層性やむしの季節変動. *La mer*, **15**, 185-195.
- 永田樹三 (1997) : 端脚類. 日本産海洋プランクトン検索図説 (千原光雄・村野正昭編), 東海大学出版会, 東京, 1131-1203.
- Omori, M. (1965) : A 160 cm opening-closing plankton net-I. Description of the gear. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **21**, 212-220.
- 大塚一志 (1972) : 日平均水面の変動から見た相模湾への黒潮分枝流の流入について. 水産海洋研究会報, **20**, 1-12.
- RAYMONT, J. E. G. (1983) : Plankton and productivity in the oceans. 2nd edition, volume 2-zooplankton. Pergamon press, Oxford, U. K., 824 pp.
- 杉崎宏哉 (1991) : 親潮及び日本海における浮遊性端脚類*Themisto japonica*の生態学的研究. 東京大学博士学位論文, 141 pp.
- Thurston, M. H. (1976) : The vertical distribution

and diurnal migration of the Crustacea Amphipoda collected during the SOND cruise, 1965. II. The Hyperideia and general discussion. J. Mar. Biol. Assoc. U. K., **56**, 383-470.

VINOGRADOV, M. E., A. F. VOLKOV & T. N. SEMENOVA
(1996) : Hyperiid amphipods (Amphipoda,

Hyperideia) of the world oceans. Science publishers. Lebanon, 631 pp.

2000年 5月29日 受付

2003年 7月22日 受理

Seasonal occurrence and abundance of the moonfish, *Monodactylus argenteus*, in surf zones and rivers of the northern coast of Bali, Indonesia

Takeshi YAMANE*, and Hiroshi KOHNO*¹

Abstract : The seasonal occurrence, abundance and size distribution were examined on larval and juvenile moonfish, *Monodactylus argenteus*, collected from different habitat types, surf zones and lower river reaches, along the northern coast of Bali, Indonesia, by a push-net made of "mosquito net" from 3 January 1995 to 28 January 1996. Body sizes were almost discrete between surf zone (n=110, 3.7-5.5 mm SL) and river (n=47, 4.7-49.1 mm SL) specimens, the body size of around 5.5 mm SL corresponding to the transitional stage between postflexion larva and juvenile. Surf zone specimens occurred year-round, but river specimens did not occur in the dry season in Bali, from May to August. Although no apparent growth was observed among the surf zone specimens, the body size tended to increase in river specimens. These results suggest that the surf zone would provide a short-lived nursery ground for moonfish, rivers being used for subsequent growth.

Keywords : *Monodactylus argenteus*; occurrence; larvae; juveniles; Indonesia.

1. Introduction

The moonfish, *Monodactylus argenteus*, is widely distributed in tropical and warm-temperate Indo-Pacific coastal waters, from east Africa and the Red Sea to western South Australia and north to Japan (RANDALL, 1983; HATOOKA, 1993; WHITFIELD, 1998; MISKIEWICZ, 2000). Larvae and juveniles are known to inhabit lower salinity waters such as estuaries and lower river reaches (HAYASHI, 1989; WHITFIELD, 1998), and their morphological development has been well described by KINOSHITA (1988) and MISKIEWICZ (1998). However, no detailed studies are available on their occurrence patterns in these habitats. In the course of our study on larval and juvenile fishes occurring in the surf zones and lower river reaches in Bali, Indonesia, we collected many specimens of *M. argenteus* from both habitat types. This study examined the sea-

sonal occurrence, abundance and size distribution of *M. argenteus* in both habitats along the northern coast of Bali, Indonesia. Morphometric changes with growth of some body parts are also described.

2. Materials and methods

Specimens used in this study (n=157, 3.74-49.1 mm SL) were collected from the surf zone and river at two sites, Lovina and Banyalit beaches (distance apart about 1 km) on the northern coast of Bali, Indonesia, from 3 January 1995 to 28 January 1996. The river sampling sites were located just inside the river mouth. Sampling was conducted with a push-net made of "mosquito net", operated for about 30 min on each sampling day. The total number of sampling days was 54 in the surf zones at both Lovina and Banyalit, and 64 and 65 days in the rivers at those localities, respectively. Collected samples were fixed with 5% formalin and transferred to 70% ethyl alcohol for preservation. All the specimens used in this study had a completely flexed notochord, standard length

* Laboratory of Ichthyology, Tokyo University of Fisheries, 4-5-7 Konan, Minato-ku, Tokyo 108-8477, Japan

¹ Corresponding author

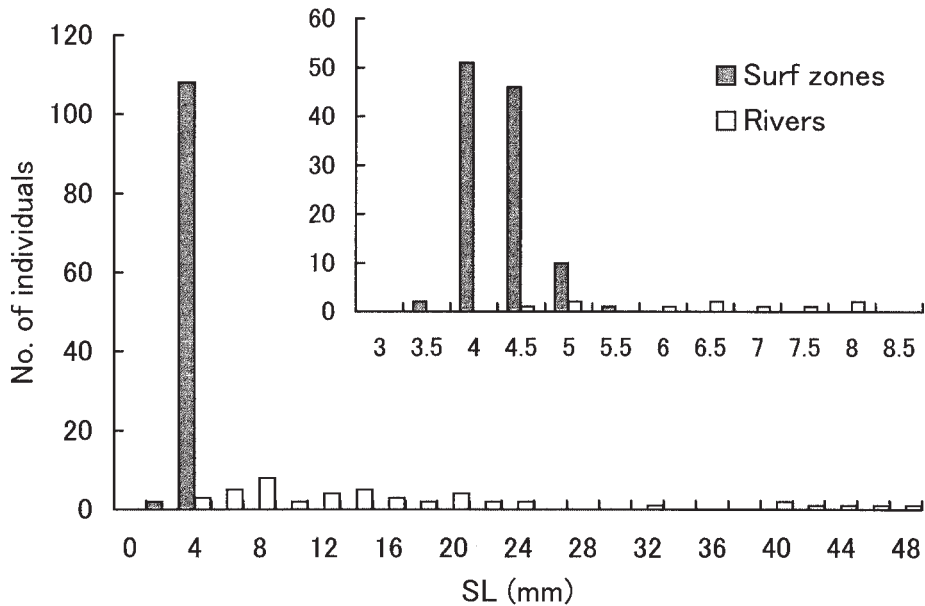


Fig. 1. Standard length, SL, distribution of larvae and juveniles of *Monodactylus argenteus* collected from the surf zones and rivers of the northern coast of Bali, Indonesia, from January 1995 to January 1996. Inset shows detailed distribution between 3–8 mm SL.

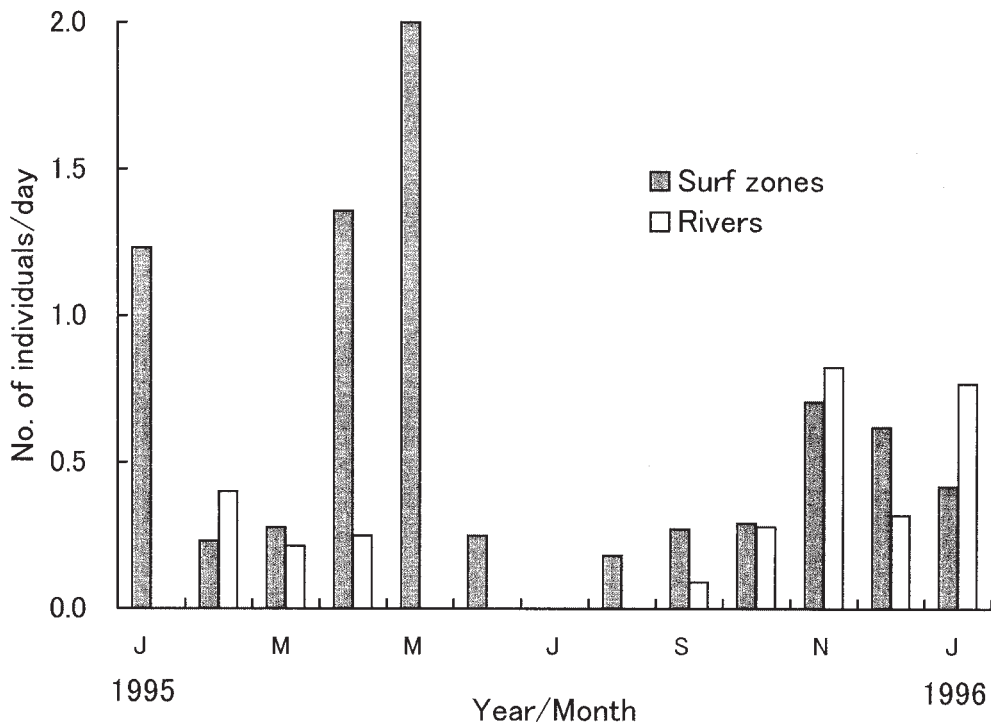


Fig. 2. Number of larval and juvenile *Monodactylus argenteus* collected per day (shown as monthly averages) from the surf zones and rivers of the northern coast of Bali, Indonesia, from January 1995 to January 1996.

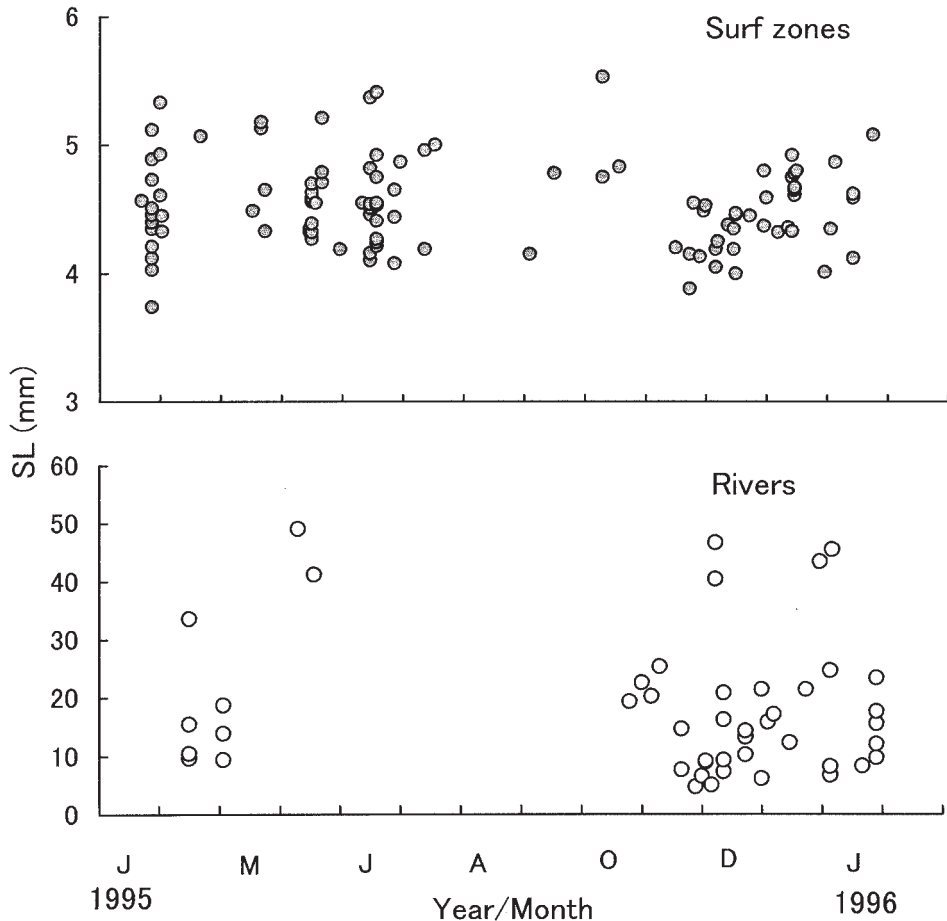


Fig. 3. Standard lengths (SL) of *Monodactylus argenteus* larvae and juveniles collected from the surf zones and rivers of the northern coast of Bali, Indonesia, from January 1995 to January 1996.

(SL) therefore being measured from the snout tip to the posterior edge of the hypural plate. The head length, body depth and pelvic fin length were measured (expressed as percentages of SL) on 20 (3.9–5.5 mm SL) and 42 (6.1–49.1 mm SL) specimens collected from the surf zones and rivers, respectively. Measurement methods followed LEIS and TRNSKI (1989). Water temperature and salinity ranged from 30.0–35.0°C and 27–33‰ in the surf zones, and from 28.0–35.7°C and 0–27‰ in the rivers, respectively. The salinity was usually less than 10‰ in the rivers, the only exceptions being 17, 20 and 27‰ on three days in November and December at Banyalit. All of the specimens were deposited in the Museum, Tokyo University of Fisheries (MTUF-P (L)).

3. Results

The numbers of larvae and juveniles collected were 54 (3.7–5.5 mm SL, mean ± SD=4.5 ± 0.4 mm SL) and 56 (4.1–5.4 mm SL, 4.6 ± 0.3 mm SL) from the surf zones at Banyalit and Lovina, respectively, and 38 (5.1–49.1 mm SL, 16.9 ± 11.6 mm SL) and 9 (4.7–40.5 mm SL, 21.8 ± 13.9 mm SL), respectively, from the rivers at those localities. No significant differences were detected in mean SL between the Banyalit and Lovina surf zones and rivers (t-test, p > 0.05). Therefore, analyses of occurrence and body size in this study were compared between the surf zone and river specimens.

Body sizes were almost discrete between the surf zone (n=110, 3.7–5.5 mm SL) and river (n=47, 4.7–49.1 mm SL) specimens (Fig. 1),

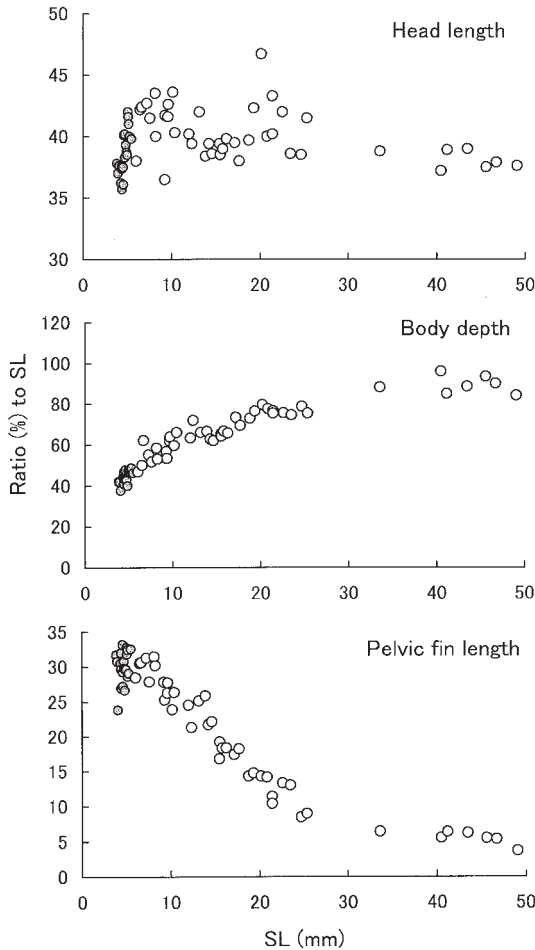


Fig. 4. Changes in body proportions, shown as percentages of standard length (SL) of *Monodactylus argenteus* larvae and juveniles collected from the surf zones (closed circles) and rivers (open circles) of the northern coast of Bali, Indonesia, from January 1995 to January 1996.

number of overlapping specimens between these localities (4.7–5.5 mm SL) being 33 and 3 in surf zone and river, respectively, an overall overlap rate of 22.9% (36/157). The largest surf zone specimen (5.5 mm SL) was a juvenile with completed fin ray complements, the remainder (≤ 5.4 mm SL) being postflexion larvae. On the other hand, the three smallest river specimens (4.7 and two 5.1 mm SL) were postflexion larvae, the others (≥ 6.1 mm SL) being juveniles.

Surf zone specimens occurred year-round, except for July, with a peak in May, the end of rainy season (Fig. 2). On the other hand, the

occurrence of river specimens was limited to the period from February to April in 1995 and from September 1995 to January 1996. The period from May to August, when river specimens did not occur, corresponds to the dry season in northern coast of Bali.

The SL of each specimen was plotted against sampling days (Fig. 3). No apparent growth cohorts were observed among the surf zone specimens. On the other hand, body size tended to increase from February to April and October to December in the river specimens, although the number of larger specimens was low.

Although head length varied from 35–45% SL, it increased from 35.7 to 42.0% SL with growth in the surf zone specimens (Fig. 4). The ratio decreased gradually thereafter, becoming stable at 37–39% SL in specimens >30 mm SL. Initially, body depth increased rather rapidly from 37.6 to 48.8% SL in the surf zone specimens, the rate becoming much less thereafter until 30 mm SL (Fig. 4). In the specimens >30 mm SL, body depth became stable at about 90% SL. The pelvic fin length increased rapidly in the surf zone specimens and decreased rapidly in the river specimens, with a peak of 32.7% SL in a 5.1 mm SL surf zone specimen (Fig. 4). The rate of decrease lessened thereafter in specimens >30 mm SL.

4. Discussion

Moonfish larvae occurred year-round in the surf zone in this study, indicating the possibility of spawning occurring throughout the years. HAYASHI (1989) reported juveniles of about 7 mm SL in mangrove areas of the Ryukyu Islands at the end of August and SENOU and SUZUKI (1980) noted that larvae occurred in river mouths at the Yaeyama Islands during Spring and Summer. On the other hand, larvae were caught entering Lake Macquarie, New South Wales, Australia, from December to May, with a peak abundance between February and April (MISKIEWICZ, 1987; cited in MISKIEWICZ, 1998). These observations indicate that the spawning season of moonfish is limited to Spring and Summer in sub-tropical and temperate waters of both the northern and southern hemispheres.

Although the smallest specimen collected in

this study was a 3.7 mm SL individual from the surf zone, MISKIEWICZ (1998) collected a 3.2 mm SL larva by plankton tow in coastal waters off Lake Macquarie, New South Wales, and indicated that hatching larvae were smaller than 2.1 mm SL. Therefore, it is considered that the larvae present in the surf zone are likely to have spawned in nearby coastal waters, subsequently migrating (passively and /or actively) to the surf zone. Moonfish larvae disappeared from the surf zone and appeared in river samples at around 5.5 mm SL, which corresponds to the transitional stage between postflexion larva and juvenile, and to the peak ratio of pelvic fin length to SL.

It seems likely therefore that the surf zone provides a short-lived nursery ground for moonfish, rivers being used for subsequent growth. However, the moonfish juveniles did not occur in the river during the dry season from September to April, although the larvae occurred in the surf zone throughout the years. The river would not provide a suitable nursery ground for the juveniles during the dry season because of inadequate volume of water. Therefore, these results suggest a possibility that other nursery grounds than rivers would exist for moonfish juveniles during the dry season.

Acknowledgments

We are grateful to K. UTSUGI, Japan International Cooperation Agency, for providing the study material, and to G. HARDY, New Zealand, for his critical reading of the manuscript and invaluable advise. We also thank the students of the Laboratory of Ichthyology, Tokyo University of Fisheries, for their invaluable support and technical assistance during the study.

References

- HATOOKA, K. (2000) : Monodactylidae. *In*: Fishes of Japan with pictorial keys to the species, 2nd Ed, Nakabo, T. (ed.). Tokai University Press, Tokyo, 882, (in Japanese).
- HAYASHI, M. (1989) : *Monodactylus argenteus*. *In*: Freshwater fishes in Japan, KAWANABE, H. and MIZUNO, N. (eds.) . Yama-kei Publishers Co., Ltd., Tokyo, 521, (in Japanese) .
- KINOSHITA, I. (1988) : Monodactylidae. *In*: An atlas of the early stage fishes in Japan, Okiyama. M. (ed.). Tokai University Press, Tokyo, 507-508, (in Japanese).
- LEIS, J.M. and T. TRNSKI (1989) : The larvae of Indo-Pacific shorefishes. University of Hawaii Press, Honolulu, 371 pp.
- MISKIEWICZ, A.G. (1998) : Monodactylidae: diamondfishes, fingerfishes. *In*: Larvae of temperate Australian fishes, Neira, F.J., A.G. Miskiewicz and T. Trnski, (eds.). University of Western Australia Press, Nedlands, 250-253.
- MISKIEWICZ, A.G. (2000) : Monodactylidae (Diamondfishes, Moonies, Fingerfishes). *In*: The larvae of Indo-Pacific coastal fishes: an identification guide to marine fish larvae. Leis. J.M. and B.M. Carson-Ewart, (eds.) . Fauna Maleisiana Handbook 2, Brill, Leiden, 351-354.
- RANDALL, J.E. (1983) : Red Sea reef fishes. Immel Publishing, London. 192 pp.
- SENOU, H. and T. SUZUKI (1980) : The inland water fishes of the Yaeyama Islands, Okinawa Prefecture, Japan (I) . The Freshwater Fishes, **6** (2), 54-65, pls. 1-8. (in Japanese)
- WHITFIELD, A.K. (1998) : Biology and ecology of fishes in southern African estuaries. Ichthyological Monographs of J.L.B. Smith Institute of Ichthyology, No.2, 223 pp.

Received June 11, 2002

Accepted July 11, 2003

Seasonal occurrence and abundance of the spotted scat, *Scatophagus argus*, in surf zones and rivers of the northern coast of Bali, Indonesia

Keiji YOSHIMURA*, Takeshi YAMANE*, Kenzo UTSUGI* and Hiroshi KOHNO*¹

Abstract : The seasonal occurrence, abundance and size distribution of the spotted scat, *Scatophagus argus*, were examined on the specimens collected from the surf zone and river at two sites, Banyalit and Lovina beaches, on the northern coast of Bali, Indonesia, by a push-net from 3 January 1995 to 28 January 1996. All of the specimens collected were metamorphosing juveniles with unique head spination. The numbers of specimens collected were 9 (8.3–10.0 mm SL) and 17 (7.9–13.4 mm SL) from surf zones at Banyalit and Lovina, respectively, and 20 (9.2–30.6 mm SL) and 15 (9.2–18.1 mm SL), respectively, from the rivers at those localities, juveniles of 9–13 mm SL appearing in both habitats. Although surf zone specimens occurred restrictedly in February, March and December, river specimens occurred each month from December to June. The growth of fish was not observed in surf zone specimens but detected in river specimens. These results would suggest that the spotted scat utilize the surf zone as a short-stop area and rivers for subsequent growth.

Keywords : *Scatophagus argus*; occurrence; juveniles; Indonesia.

1. Introduction

The spotted scat, *Scatophagus argus*, is widely distributed in Indo-Pacific waters, north to Wakayama Prefecture, Japan (SHIMADA, 2000) and is well known as a euryhaline species living in coastal waters, estuaries and even freshwater (BLABER, 1997). The larvae and juveniles, which undergo a developmental stage (sometimes misapplied as the 'tholichthys' stage) specialized for a pelagic life style (LEIS and TRNSKI, 1989), are caught in lower salinity waters (BARRY and FAST, 1988). However, little is known about their occurrence patterns in such habitats. This study examined seasonal occurrence, abundance and size distribution of spotted scat juveniles in surf zones and rivers on the northern coast of Bali, Indonesia. Morphometric changes with growth of some body parts are also described.

2. Materials and methods

Specimens used in this study (n=61, 7.9–30.6 mm SL) were collected from the surf zone and river at two sites, Lovina and Banyalit beaches (distance apart about 1 km), on the northern coast of Bali, Indonesia, from 3 January 1995 to 28 January 1996. The river sampling sites were located just inside the river mouth. Sampling was conducted with a push-net made of "mosquito net", operated for about 30 min on each sampling day. The total number of sampling days was 54 in the surf zones at both Lovina and Banyalit, and 64 and 65 in the rivers of those localities, respectively. Collected samples were fixed with 5% formalin and transferred to 70% ethyl alcohol for preservation. Standard length (SL) was measured from the snout tip to the posterior edge of the hypural plate, the notochord of all specimens collected being completely flexed. The head length, body depth and pelvic fin length were measured (expressed as percentages of SL) for all 61 specimens. Measurement methods followed LEIS and TRNSKI (1989). Water temperature and salinity

* Laboratory of Ichthyology, Tokyo University of Fisheries, 4-5-7 Konan, Minato-ku, Tokyo 108 8477, Japan

¹ Corresponding author

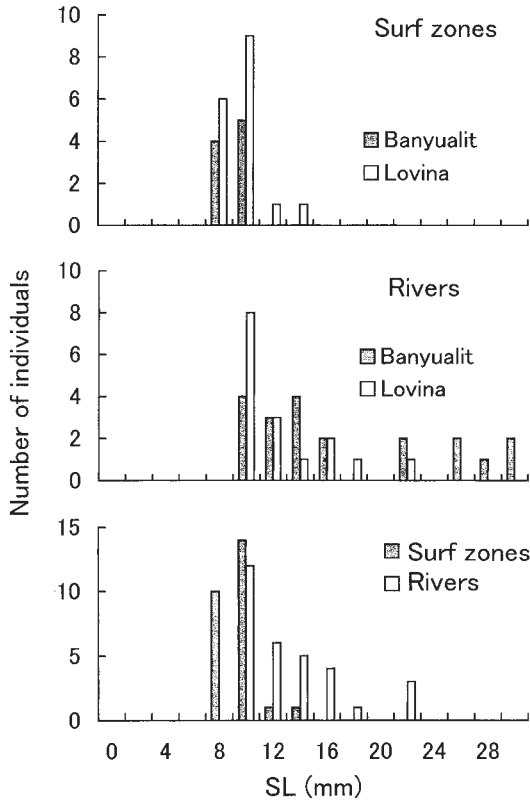


Fig. 1. Standard length (SL) distribution of juvenile *Scatophagus argus* collected from surf zones and rivers of the northern coast of Bali, Indonesia, from January 1995 to January 1996. In the bottom graph, the SL of the 5 largest river specimens were omitted.

ranged from 30.0–35.0°C and 27–33‰ in the surf zones, and from 28.0–35.7°C and 0–27‰ in the rivers, respectively. The salinity was usually less than 10‰ in the rivers, the only exceptions being 17, 20 and 27‰ on three days in November and December at Banyalit. All of the specimens were deposited in the Museum, Tokyo University of Fisheries (MTUF-P (L)).

3. Results

All of the specimens collected in the present study were metamorphosing juveniles with complete fin-ray complements and unique head spination. Nine (8.3–10.0 mm SL, mean \pm SD = 9.1 \pm 0.7 mm SL) and 17 (7.9–13.4 mm SL, 9.5 \pm 1.3 mm SL) juveniles were collected from the surf zones at Banyalit and Lovina, respectively,

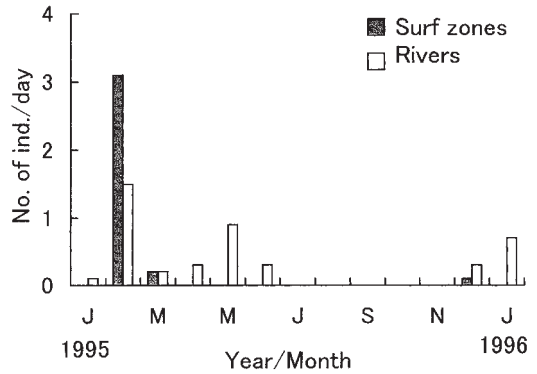


Fig. 2. Number of juvenile *Scatophagus argus* collected per day, shown as averages of each month, from surf zones and rivers of the northern coast of Bali, Indonesia, from January 1995 to January 1996.

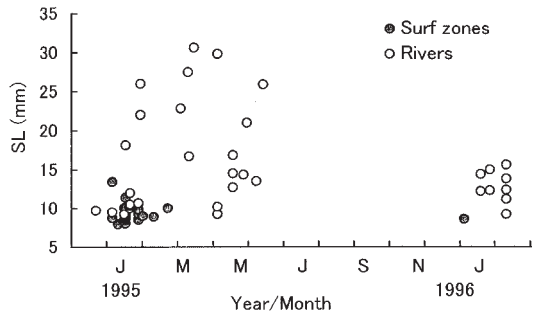


Fig. 3. Standard length (SL) of *Scatophagus argus* juveniles collected from the surf zones and rivers of the northern coast of Bali, Indonesia, from January 1995 to January 1996.

and 20 (9.2–30.6 mm SL, 17.5 \pm 7.2 mm SL) and 15 (9.2–18.1 mm SL, 12.7 \pm 3.6 mm SL), respectively, from the rivers at those localities (Fig. 1). Although no significant difference occurred in mean SL between the surf zones of Banyalit and Lovina ($p > 0.05$, t-test), mean SL of specimens from Banyalit and Lovina rivers differed significantly ($p < 0.05$, t-test). However, in the latter case, the difference was not significant when five larger specimens (25.9–30.6 mm SL) collected from Banyalit were omitted from the comparison, the mean \pm SD for that locality becoming 14.0 \pm 4.1 mm SL. Accordingly, the 5 large Banyalit specimens were omitted from subsequent surf zone and river comparisons.

The specimens collected from the surf zones (7.9–13.4 mm SL, $n = 26$) and rivers (9.2–22.8

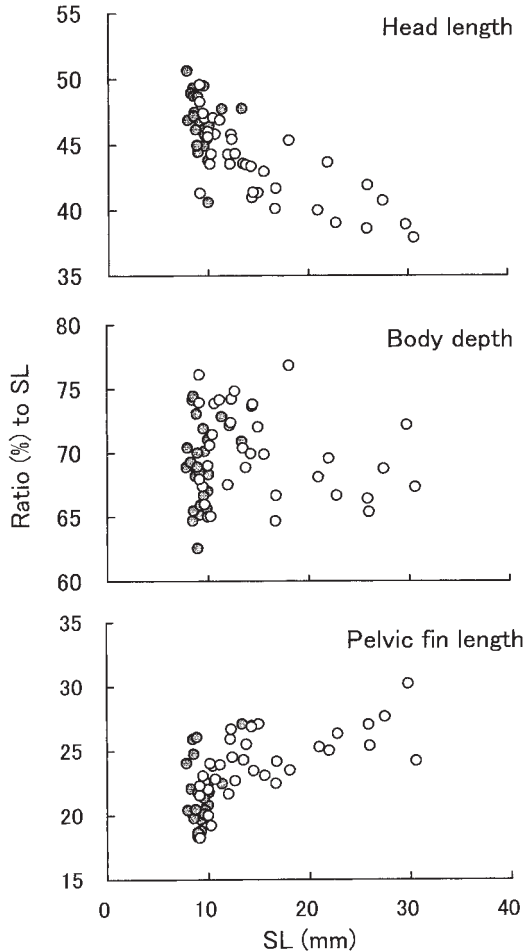


Fig. 4. Changes in body proportions, shown as percentages of standard length (SL) of *Scatophagus argus* juveniles collected from the surf zones (closed circles) and rivers (open circles) of the northern coast of Bali, Indonesia, from January 1995 to January 1996.

mm SL, $n=30$) overlapped in body size from 9.2–13.4 mm SL (Fig. 1), the number of overlapping specimens being 13 and 17 in the surf zones and rivers, respectively, and the overall overlap rate being 53.6% (30/56). On the other hand, mean SL differed significantly ($p < 0.01$, t-test) between the surf zones (mean \pm SD = 9.3 ± 1.1 mm SL) and rivers (13.3 ± 3.8 mm SL).

Surf zone specimens occurred restrictedly in February, March and December, with a peak in February (Fig. 2). River specimens, however, occurred each month from December to June,

although again peaking in February (Fig. 2). No apparent growth cohorts were detected in the surf zone specimens, although three or four were observed in river specimens sampled from January to June (Fig. 3).

With overall body growth, relative head length decreased rapidly until about 10 mm SL, the rate becoming less thereafter (Fig. 4). Body depth varied from 65–75% SL, with no remarkable changes observed in the specimens examined (Fig. 4). Pelvic fin length increased rather rapidly until 12–13 mm SL, becoming stable thereafter (Fig. 4). Overall, the above measurements varied considerably and no significant differences were detected between the surf zone and river specimens.

4. Discussion

Based on the collection of smaller spotted scat juveniles of about 10 mm SL during this study, spawning occurred during the period from November to April, corresponding to the rainy season along the northern coast of Bali, Indonesia. Spawning of the spotted scat in Iloilo, Philippines, also occurs during the rainy season at that locality (from June to October) (BARRY and FAST, 1988). The occurrence of larvae and juveniles is limited to May–August in Taiwan (TSUMOTO and KIMURA, 1988) and to summer and autumn in Moreton Bay, eastern Australia (LAEGDSCGAARD and JOHNSON, 1995), rainfall being more or less high at these times. Therefore, the spawning of spotted scat is apparently related to high rainfall, although the spawning period is longer in tropical areas such as Bali and Iloilo than in subtropical areas such as Taiwan and Moreton Bay. The peak of juvenile occurrence in the surf zone in this study was February, corresponding to a spawning peak in December–January (the beginning of the rainy season). This concurs with the observation of BARRY and FAST (1988), who pointed out that the start of the rainy season coincided with the peak of the spawning season at Iloilo, Philippines.

The smallest specimen collected in this study was 7.8 mm SL from the surf zone, but smaller spotted scat larvae of about 3 mm SL are known (WEBER and de BEAUFORT, 1936; TSUMOTO and KIMURA, 1988), indicating that

the surf zone is not the actual spawning ground. BARRY and FAST (1988) reported that adults living offshore in deeper waters moved inshore in preparation for spawning, concurrent with the maturation of oocytes. Therefore, neither the spawning ground nor habitat of individuals < ca. 8 mm SL can be specified.

Spotted scat departed from the surf zones by about 13 mm SL, whereas their appearance in the rivers was from about 9 mm SL. Apparently, juveniles of 9–13 mm SL actively move between the surf zones and rivers or utilize tidal flows into the same effect. Although, no drastic morphometric changes were observed, some flexion points occurred from 10–13 mm SL, as shown in head length and pelvic fin length. These observations, plus the apparent lack of fish growth in the surf zone, contrary to the river observations suggest that spotted scat utilize the surf zone as a short-stop area and rivers for subsequent growth.

Acknowledgments

We are grateful to G. HARDY, New Zealand, for his critical reading of the manuscript and invaluable advise. We also thank the students of the Laboratory of Ichthyology, Tokyo University of Fisheries, for their invaluable support and technical assistance during the study.

References

- BARRY, T.P. and A.W. FAST (1988): Natural history of the spotted scat (*Scatophagus argus*). *In*: Spawning induction and pond culture of the spotted scat (*Scatophagus argus* Linnaeus) in the Philippines, Fast, A.W. (ed.). Hawaii Institute of Marine Biology, Technical Report No. 39, 4–31.
- BLABER, S.J.M. (1997): Fish and fisheries of tropical estuaries. Fish and Fisheries Series 22, Chapman & Hall, London, 367 pp.
- LAEGDSGAARD, P. and C.R. JOHNSON (1995): Mangrove habitats as nurseries: unique assemblages of juvenile fish in subtropical mangroves in eastern Australia. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **126**: 67–81.
- LEIS, J.M. and T. TRNSKI (1989): The larvae of Indo-Pacific shorefishes. University of Hawaii Press, Honolulu, 371 pp.
- TSUMOTO, K. and S. KIMURA (1988): Scatophagidae. *In*: An atlas of the early stage fishes in Japan, Okiyama, M. (ed.). Tokai University Press, Tokyo, 541–542, (in Japanese).
- SHIMADA, K. (2000): Scatophagidae. *In*: Fishes of Japan with pictorial keys to the species, 2nd Ed, Nakabo, T. (ed.). Tokai University Press, Tokyo, 1314, (in Japanese).
- WEBER, M. and L.F. de BEAUFORT (1936): The fishes of the Indo-Australia Archipelago, VII. E. J. Brill, Leiden, xvi+607 pp.

Received June 11, 2002

Accepted July 11, 2003

まひ性貝毒原因渦鞭毛藻 *Alexandrium* 属の無毒変異株

大村 卓朗*, 小野寺秀幸†, 石丸 隆**, 大島 泰克††

Non-toxic Mutational Strains in the Paralytic Shellfish Poisoning Causative Dinoflagellates, *Alexandrium* spp.

Takuo OMURA*, Hideyuki ONODERA†, Takashi ISHIMARU** and Yasukatsu OSHIMA††

Abstract : Non-toxic strains of *Alexandrium tamarense* (Dinophyceae) have been established for the first time from a toxic clone of the species. For the analysis of biosynthesis of saxitoxin and its derivatives, toxic clonal cultures of dinoflagellates, *Alexandrium tamarense*, *Alexandrium catenella*, *Alexandrium minutum*, were subjected to mutagenesis treatments, viz. heat shock and UV-C radiation. 41 clones of non-toxic *A. tamarense* were obtained. Furthermore, the original clone of *A. tamarense* proved its co-existence of non-toxic mutational cells during a five-year culture after its establishment. No difference was observed in the growth-irradiance relationship between a toxic and a non-toxic clone, suggesting the toxin production dose not affect their growth much. The analysis of guawdium related substances (arginine, agmatine and arcaine), which are considered to be precursors of the skeleton of saxitoxin indicated that the biosynthesis of saxitoxin in the non-toxic clones should be suspended at later phase of skeleton formation.

Keywords : まひ性貝毒 (PSTs), *Alexandrium*, 無毒突然変異株

1. はじめに

まひ性貝毒 (Paralytic Shellfish Toxins: PSTs) は水溶性の低分子化合物であり, 数種の海産渦鞭毛藻類によって生産される。PSTs産生渦鞭毛藻類は, 二枚貝に過捕食され, 貝に蓄積したPSTsは摂食した人間にしばしば致命的な中毒を引き起こす。このためPSTsは食品衛生上の大きな問題であり, また養殖貝の毒化による出荷規制から水産養殖上も大きな問題となっている。

PSTsを生産する海産渦鞭毛藻類には, *Alexandrium catenella*, *A. fundyense*, *A. minutum*, *A. tamarense*, *Gymnodinium catenatum*, *Pyrodinium bahamense* var. *compressum*などが知られおり (Steidinger, 1993), この他に淡水産藍藻の *Aphanizomenon flos-aquae*, *Anabaena circinalis* (MAHMOOD and CARMICHAEL 1986, CARMICHAEL and FALCONER, 1993) や, *A. tamarense* の細胞内から単離された細菌が, PSTsを生産すること

が報告されている (KODAMA *et al.*, 1988, 1990)。このように, かけ離れた分類群の生物が毒を生産することから, PSTsの生産への内生細菌の関与 (KODAMA and OGATA 1988), 毒生産に関与するプラスミドの存在が考えられている (PLUMLEY 1997, SHIMIZU *et al.*, 1990)。

PSTsを生合成する渦鞭毛藻類は, いずれの種も複数のPSTsを生産する。PSTsにはsaxitoxin (STX)と骨格を共有する20を超える同族体の存在が明らかにされている (OSHIMA 1995a)。毒成分の種類とその組成は, 渦鞭毛藻自身の持つ変換酵素群の活性を反映すると考えられており, この酵素のうちN-sulfotransferaseやO-sulfotransferase等が検出されている (OSHIMA, 1995b, Yoshida *et al.*, 2002)。

一方Shimizuは, 淡水産ラン藻 *Ap. flos-aquae*を用いたアイソトープ取込み実験から, STXの骨格がアルギニンを出発点とし, 酢酸およびメチオニンの縮合によって形成されることを明らかにした (SHIMIZU, 1993)。さらに, 小野寺(2000)は, *An. circinalis*を用いてSTXの前駆体を検索し, グアニジノ化合物であるアルギニン→アグマチン→アルカインを経由する合成経路を推定した。しかしアルギニンからPSTs基本骨格にいたる過程は未解明である。

近年, 遺伝子工学的手法の急速な発達により, 特定の

* 東京大学大学院農学生命科学研究科
〒113-8675 東京都文京区弥生1-1-1
Graduate School of Agricultural and Life Science
1-1-1 Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8675 Japan

† 協和発酵工業(株)東京研究所

** 東京水産大学水産学部海洋環境学科

†† 東北大学大学院生命科学研究科

形質を発現する遺伝子を決定することが容易になって来た。このため、同一のPSTs産生種で有毒と無毒の株が得られれば、毒生産に関与する遺伝子や合成経路を解明することが可能である。

我々は、その第1歩として、PSTsを生産する*A. tamarense*, *A. catenella*, *A. minutum*から無毒株を得ることを目的とした。さらに得られた無毒株についてSTXの合成経路において生合成の停止した部位の推定を試みた。

2. 材料と方法

2-1 培養株と培養条件

本研究に用いた*Alexandrium tamarense* (OF935-AT6), *A. catenella* (OF950913, 無菌株) はそれぞれ1993年および1995年に大船渡湾から、*A. minutum* (CU Am-C5) は1990年にタイ王国チャントプリのエビ養殖池より採取・単離保存されたクローン株である。

継代培養は何れもT1培地(OGATA *et al.*, 1987a)よりNTAを除きEDTAを2倍量添加した培地で行い、*A. tamarense*ではさらに亜セレン酸20nMを添加した。*A. tamarense*では、塩分30, 温度15°C, 明期の光量85 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, *A. catenella*では塩分30, 温度20°C, 明期の光量85 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, *A. minutum*では塩分14, 温度25°C, 明期の光量100 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ で維持し、12hL:12hDの明暗周期を与えた。

2-2 突然変異誘導処理

物理的変異源を用いた突然変異誘導処理は、通常変異率の最も高くなる供試細胞の大部分を殺すような条件で行われる(JAGGER, 1967)。そのため細胞の生存する限界の条件をあらかじめ求め、その条件で処理した細胞からサブクローンを作る作業を繰り返した。

ヒートショック処理

新たな培地に摂取後約3週間を経過した前培養を試験管に分注し、水槽内(井内盛栄堂, デジタルサーマータMD-120)に置き、所定の時間を経過した後直ちに試験管を取り出し水道水で冷却した。処理条件は、*A. minutum*においては水温35, 36, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 50, 55, 60°Cと処理時間2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20分を組み合わせた130条件、*A. tamarense*においては水温25, 28, 30, 32, 35, 38, 40, 42°Cと処理時間2, 4, 6, 8, 10分を組み合わせた40条件、*A. catenella*においては水温35, 38, 40, 42, 45°Cと処理時間2, 4, 6, 8, 10分を組み合わせた25条件である。処理後は、継代培養と同様の条件で培養を続け、細胞の生死を確認した。細胞は処理直後には動かないが2, 3日すると動き出すことや、あるいは処理直後には動いているが2, 3日で運動を停止して死滅することがある。このため生死の判定は、処理後1週間目に行った。同一条件での実験を3

回行い、生存限界の条件を決定した。条件決定後はその条件で処理を行い、1週間後に生存が確認された細胞を顕微鏡下でキャピラリーピペットを用いて吸い上げ、T1改変培地を1ml入れた24穴マイクロマルチプレートに1細胞ずつ接種した。接種後の培養は、継代培養と同様の条件で行い、ある程度細胞が増殖した時点で試験管に植え継いだ。処理株の細胞数が、1ml当たり約1000細胞以上になった時点で遠沈濃縮し、毒の分析に供した。

紫外線照射処理

時計皿に新たな培地に接種後約3週間を経過した*A. minutum*の培養を3ml入れ、細菌灯(15w2灯, 波長: 254nm, 光子: 4.9eV)の下において紫外線を照射した。放射照度は、紫外線強度計(東京光学機械, UVR-254形, 殺菌紫外線用)を用いて測定し、殺菌灯からの距離を調節することによって3段階(85, 105, 130 $\mu\text{w}/\text{cm}^2$)に設定した。照射時間は8段階とし(1, 3, 5, 6, 10, 15, 20, 30分)これらを組み合わせた27条件で照射処理を行った。*A. tamarense*と*A. catenella*の照射処理は、殺菌灯(15W2灯, 波長: 254nm, 光子: 4.9eV)を取り付けた照射装置内に新たな培地に接種して3週間の培養を1ml入れたセジウィックラフターチェンバー(縦20mm, 横50mm, 容量1ml)を置いて行った。放射照度を865 $\mu\text{w}/\text{cm}^2$ に固定し、照射時間は1, 2, 2.5, 3, 4, 5分間の6条件とした。以下の操作はヒートショック処理の場合と同様である。

2-3 PSTsとグアニジノ化合物の分析

PSTsの分析には、1サンプル当たり1万細胞以上を供した。培養細胞をスウィングローター式遠心分離器により沈殿濃縮(3000回転, 約10分間)した後、さらに小型遠沈管(エッペンドルフ, 1.5ml)に移して遠心分離(約10分)を行い、沈殿に0.5N酢酸0.25mlを加えて凍結保存した。

PSTsの分析にはOSHIMA(1995c)のポストカラムー蛍光化HPLC法を用いた。カラムにはMightysil RP-8 GP, 4.6×150mm(関東化学)を、移動相としては、C1-C4については、1mMリン酸テトラブチルアンモニウム-3mMリン酸アンモニウム(pH6.0)を、GTX1-GTX6, dcGTX2, dcGTX3については2mMヘプタンスルホン酸ナトリウム-10mMリン酸アンモニウム(pH7.2)を、STX群には、2mMヘプタンスルホン酸ナトリウム-30mMリン酸アンモニウム(pH7.0)-4.4%アセトニトリルを用いた。流量は0.8ml/minとした。カラムからの溶出液に0.4ml/minの流量で7.0mM過ヨウ素酸溶液-50mMリン酸カリウム緩衝液(pH5.8)を連続的に添加し蛍光誘導化を行い、0.5M酢酸を0.4ml/minの流量で加えて感度を上昇させ、蛍光モニターで検出した(励起波長330nm, 検出波長390nm)。

グアニジノ化合物に関しては、BAKER *et al.*(1981)の

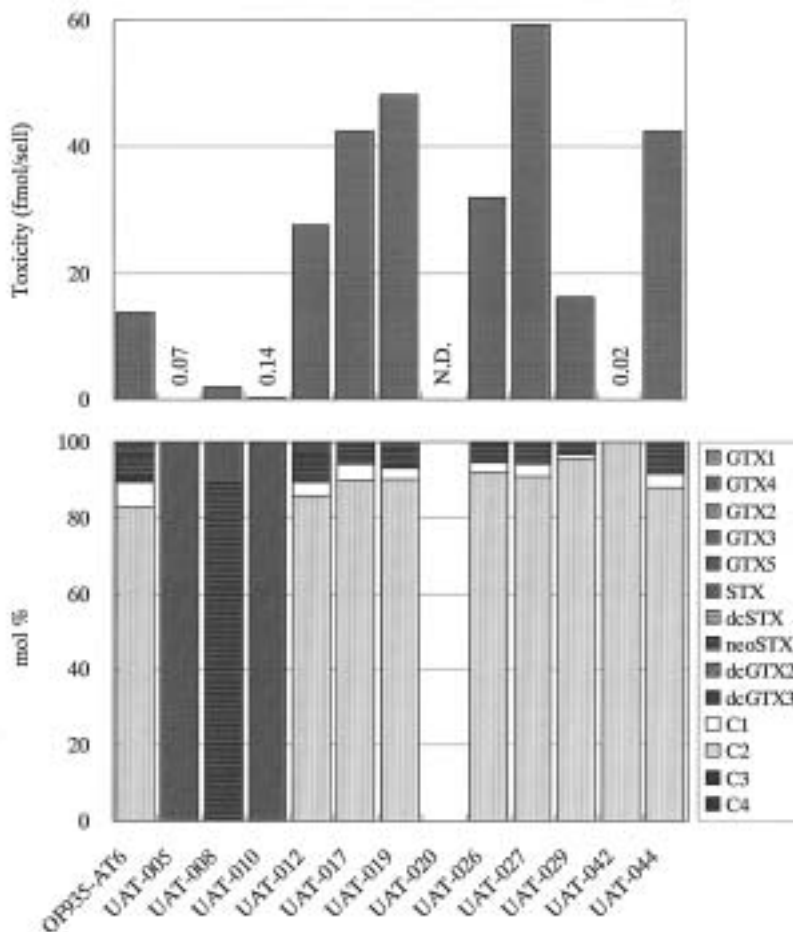


Fig. 1. Toxicity (top) and toxin composition (bottom) of *A. tamarense* (OF935-AT6) and its UV treated toxic sub-clones soon after the establishment. UAT-020 was non-toxic in this analysis, but toxic after four months (Fig.2).

ポストカラム蛍光化HPLC法を一部改変した方法(小野寺, 2000)を用いた。カラムにはCosmosil 5 C18AR II, 4.6×250mm (ナカライテスク), 移動相には 2 mMヘプタンスルホン酸ナトリウム-50mMギ酸-23%メタノール(pH4.5)を用い, 流量は0.8ml/minとした。カラムからの溶出液に0.2ml/minの流量で 2 M水酸化カリウムを加えてアルカリ性にし, 次に0.4ml/minの流量で2.5 mM 9, 10-フェナントレンキノン(ジメルチルフォルムアミドに溶解)を添加して反応させて蛍光誘導化し, 蛍光モニター(島津RF-10A_{XL}, 励起波長373nm, 検出波長465nm)によって検出した。

2-4 成長に及ぼす光の影響

上記の処理で得られた *A. tamarense* の無毒サブクローンUAT-014をピペット洗浄法により無菌化したUAT-

014-009株とOF935-AT 6株からピペット洗浄により無菌化した有毒サブクローンAxat-2を用いて, 光-成長速度の関係を求めた。

培地には, 改変T 1培地を用い, 温度15°C, 塩分30の下で光量30, 50, 75, 100, 125 150, 175, 200, 250, 300, 400, 500 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ の12条件で行った。照明には高照度蛍光灯(Twin-2 parallel 100W, National)を用いた。成長の測定には, 蛍光光度計(Turner Designs, Model 10)により *in vivo*クロロフィル蛍光値を1日おきに測定し増殖曲線を作成し, 増殖速度 $\mu_2(\text{d}^{-1})$ を求めた。

$$\mu_2 = t^{-1} \log_2(F_2/F_1)$$

ここで, F_1 , F_2 はいずれも対数増殖期の初めと終わり近くの *in vivo*クロロフィル蛍光値, t は2回の測定間の日数である。

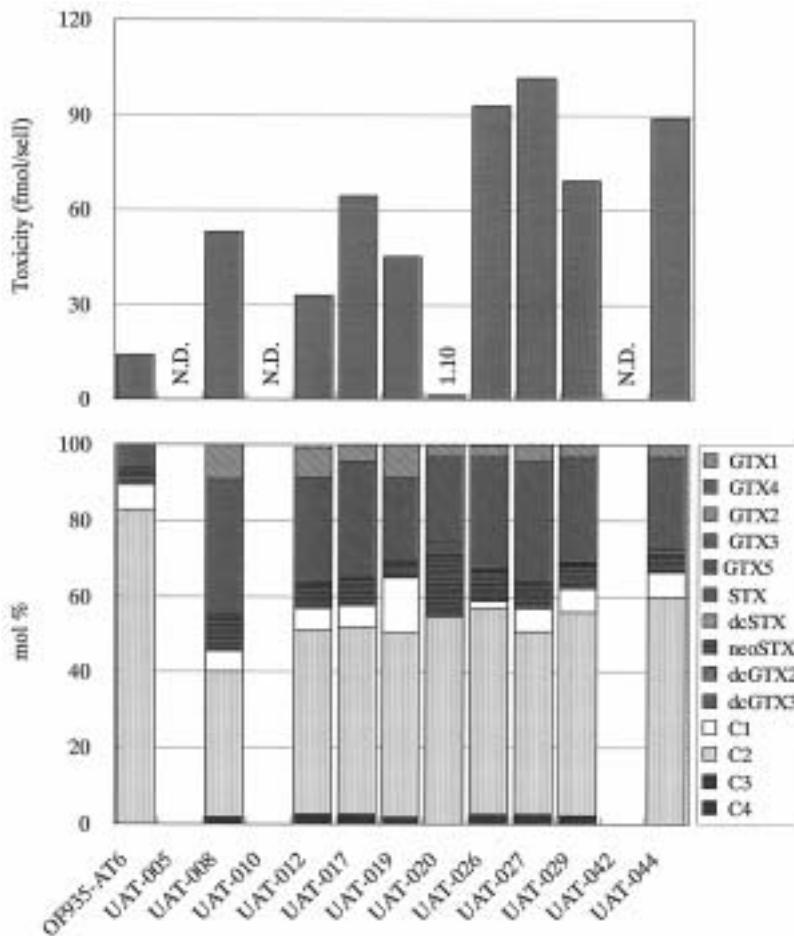


Fig. 2. Toxicity (top) and toxin composition (bottom) of *A. tamarense* (OF935-AT6) and its UV treated toxic sub-clones reanalyzed after four months of the first analysis (Fig. 1). About five times more cells were used for the analysis. UAT-005, 010 and 042 were non-toxic in this analysis.

3. 結果

3-1 ヒートショック処理株における細胞当たり毒量と毒組成変化

*Alexandrium minutum*では、ヒートショック処理による生存限界は、20分の処理時間では38°Cであり、39°Cで死滅した。以下40°C-8分、42°C-4分、45°C-2分が生存限界であった。サブクローンの作成は、42°C-4分と40°C-6分の条件で試み、後者で21株を得た。これら21株の細胞当たり毒量は、もとの株に比べて約4倍から約1/4の範囲にあり、無毒株を得ることは出来なかった。毒組成については、何れもGTX4が最も多く、次いでGTX1であり、処理前と比較して毒組成が大きく変化した株は得られなかった。

*A. catenella*の生存限界は、38°C-6分、40°C-4分、42°C-2分であり、サブクローンの取得は38°C-6分で試み92株を単離した。これらの細胞当たり毒量は処理前

と比較して、約5倍から約1/2であり、無毒株を得ることは出来なかった。毒組成については、何れもC2が最も多く、次いでneoSTXとC1であり、毒組成が大きく変化した株は得られなかった。

*A. tamarense*の生存限界は、35°C-8分、38°C-6分、40°C-2分であり、サブクローンの作成は、35°C-8分で試みたが、単離後における細胞の増殖は、2細胞から数10細胞で停止し、株を作成することは出来なかった。

3-2 紫外線照射処理株における細胞当たり毒量と毒組成変化

*A. minutum*では、紫外線照射処理による生存限界を決める予備実験においては、照度85 $\mu\text{w}/\text{cm}^2$ では6分で生存細胞が認められ、10分では死滅した。105および135 $\mu\text{w}/\text{cm}^2$ では何れも5分で生存、6分で死滅した。処理株の作成は、これら3つの放射照度、処理時間5分で行

い、生存した細胞から49株を単離した。これら49株の細胞当たり毒量は処理前に比べ、約5倍から約1/4の範囲であり、無毒株は得られず、毒組成についてはいずれもGTX 4が最も多く、次いでGTX 1であり、大きな変化は認められなかった。

*A. catenella*と*A. tamarense*では、ともに6回の照射実験を行い、*A. catenella*では、5回中4回では2.5分で生存細胞が認められ3分では死滅した。また1回は3分で生存、4分で死滅した。*A. tamarense*では、6回とも2分で生存細胞が認められ、2.5分で死滅した。以上から*A. catenella*では2.5分照射、*A. tamarense*では、2分間照射処理した細胞についてサブクローンの作成を試みた。

*A. catenella*では、紫外線照射処理株88を得たが、細胞当たり毒量は処理前に比べて約4倍から約1/4の範囲にあり、無毒株は得られなかった。また、毒組成は、すべての処理株でC 2が最も多く、次いでneoSTXとC 1が多く、処理を行わなかった株と差はなかった。

*A. tamarense*では、紫外線照射処理により、サブクローン50株を単離した。これらのうち39株では毒が検出されなかった(検出限界0.05 fmol/cell)。また、有毒株11株では、細胞当たり毒量と毒組成が処理前に比較して大きく変化した(Fig. 1)。処理前と比較し、細胞当たり毒量は最大でUAT-027の約4倍、最小でUAT-042の約1/70であった。毒組成は、UAT-005, 008, 010を除く8株では、C 2が大部分を占め、次いでneoSTXが多かった。UAT-005, 010の毒組成はGTX 3だけで構成され、UAT-008の毒組成はGTX 2が大部分を占め、次いでGTX 3が多かった。

無毒変異株の無毒性の時間的安定性を確認するために約4ヵ月後に1回目の約5倍の細胞数を用いて毒成分を精査した。この結果では、50株のうち41株が無毒であった。1回目の分析で極めて低い毒性を有することが観察されたUAT-005, 010, 042の3株からは毒性は検出されず、一方、1回目の分析では毒が検出限界以下であったUAT-020からは微量の毒が検出された。有毒であった9株では、処理前に比べて細胞当たり毒量は、最大でUAT-027の約4倍、最小でUAT-020の1/13であった(Fig. 2)。毒組成は、C 2が約半分の割合を占め、GTX 4とneoSTXが次いだ。

3-3 突然変異の検証

*A. tamarense*の無毒サブクローンの得られた割合は、突然変異によるものにしては高すぎるため、元の株に無毒細胞が混在していなかったかどうかを確認した。*A. tamarense* OF935-AT 6株よりピペットによる選別から新たに51株のクローン株を作成し、PSTsを分析した。この分析の結果、無毒サブクローンは22株存在し、処理前の培養株には、すでに無毒の細胞が存在していたことが判明した。

3-4 無毒および有毒サブクローンにおけるまひ性貝毒関連物質の探索

OF935-AT 6より単離した無毒および有毒サブクローンについて、PSTsの前駆物質と考えられるグアニジノ化合物を分析した。その結果の1例をFig. 3に示す。有毒および無毒サブクローン各2株からは、アルギニン、アグマチン、アルカインの標品とそれぞれ保持時間が等しい3成分の他に未知成分のピークがいくつか検出された。

3-5 成長生理学的特性の比較

有毒無菌サブクローンAxat-2と無毒無菌サブクローンUAT-014-009について得られた光-成長曲線をFig. 4に示す。何れの株も最も低い光量の $20 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ から成長し、 $150 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ で光飽和に達した。最大生長速度は、それぞれ約0.41, 0.42d^{-1} であった。有毒株と無毒株の間において、成長に差は認められなかった。

4. 考察

本研究から多数の*A. tamarense*の無毒株が得られた。これは、*A. tamarense*の有毒クローン内において突然変異により生じた無毒サブクローンを得た初めての報告である。これらの無毒変異株は、物理的変異源による人為的突然変異ばかりではなく長期間(約5年)にわたる維持・継代培養の間に発生した自然発生型突然変異によって形成されたと考えられる。有毒株と無毒株の成長速度-光強度の関係に差が無いことから、毒の生産は、少なくとも培養条件下では成長に影響を及ぼさないものと考えられる。無毒株のうちUAT-014-009株は単離後3年経過した後に毒性を精査したが結果は無毒のままあることが確認され(大村未発表)、この形質は、無毒株において安定したものであると考えられる。

紫外線照射処理後に単離したサブクローン中の無毒株の比率は処理せずに単離したサブクローン中のその約2倍であり、無毒細胞のほうに紫外線に対する耐性が強い可能性がある。一方、紫外線照射処理サブクローンのうち有毒であった株の細胞あたり毒量と毒組成の1回目と2回目の分析結果(Fig. 1, 2)を比較すると、多くのサブクローンにおいて細胞あたり毒量が増加し、また組成にも変化が見られた。これらのうち、極めて毒量の小さいUAT-005, 008, 010, 042(Fig. 1)、UAT-020(Fig. 2)が、それぞれの分析において他の株と異なる毒組成を示した事は、検出感度による誤差である可能性が高い。それ以外の株において、1回目ではGTX1, 4が見られず、2回目では30-40%の割合で見られたことは、紫外線照射が毒生産に何らかの影響を及ぼした結果であると考えられる。また、1回目と2回目の分析結果において無毒変異株の割合が異なった理由として、検出感度による誤差が考えられるが、1回目と2回目の分析間隔は約4ヶ月ありバックミュージーテーションの可能性も否定できない。

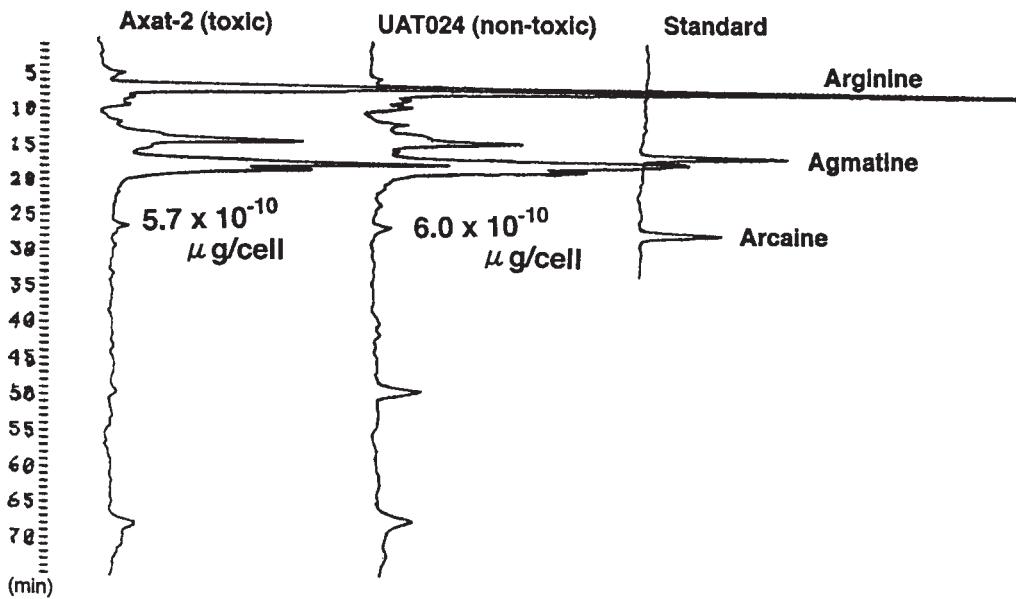


Fig. 3. Appearance of guanidium related substances in toxic (left) and non-toxic (center) subclones of *A. tamarense*.

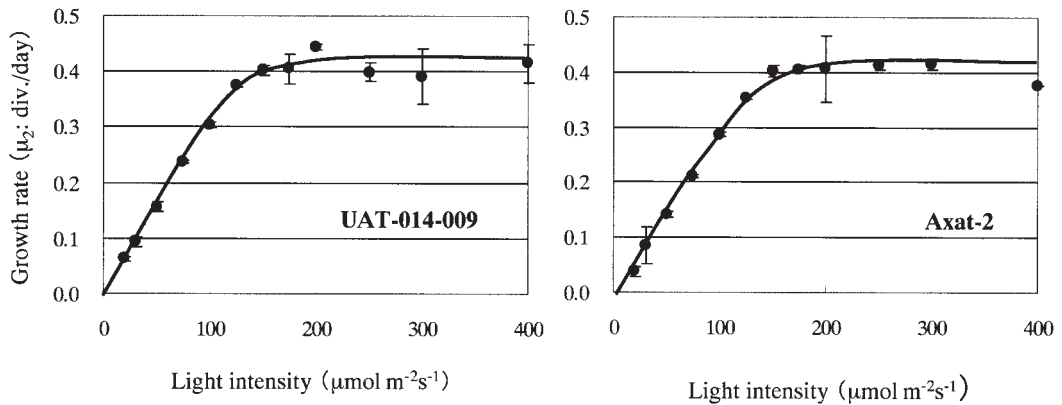


Fig. 4. Growth-irradiance relationships for non-toxic (UAT-014-009, left) and toxic (Axat-2, right) sub-clone of *A. tamarense*.

*A. tamarense*のサブクローンに関して行ったグアニジノ化合物の分析では、有毒株、無毒株のいずれにおいてもアルギニン、アグマチン、アルカインの全てが検出された。無毒株のまひ性貝毒生成経路が、ある部分で欠落していると考えれば、その部分で前駆物質が多量に蓄積すると考えられる。しかし無毒株のグアニジノ化合物の分析結果において、特定の前駆物質の多量な蓄積は認められなかった。これらのことから、無毒株における毒の生合成は、本研究で調べたグアニジノ化合物よりもさらに進み、PSTsの基本骨格の構造に近い状態まで進ん

でいると考えられる。

本研究において得られた有毒株と無毒株は、同一の親株より得られたサブクローンであるため、PSTsの生合成に関与する遺伝子以外は相同である可能性が高い。これらの株を用いて遺伝子に関する研究を分子生物学的手法を用いて進めることによってPSTs生合成に関与する遺伝子、酵素について明らかに出来ると考えられる。

*A. tamarense*の模式標本の産地であるイギリスのタマール川河口から単離された株は無毒である(MOESTRUP and HANSEN, 1988)。しかし、この種は、現

在の *Alexandrium* 属の分類形質に基づけば *Alexandrium acatenella* に近いものと考えられる (福代私信)。我が国では、緒方ら (OGATA *et al.*, 1987b) は大船渡湾において *A. tamarense* の多数の培養株を作成し、株による毒生産能の差が大きいことを報告しているが、無毒株は得ていない。また株の分離は他の多くの研究者によっても行われているが、無毒株が得られたとの報告はない。従って、*A. tamarense* においては、天然条件下で無毒細胞が存在するかどうかは明らかでないが、存在するとしてもその頻度は極めて低いものと考えられる。この理由として、有毒株が動物プランクトンに捕食されず、一方、無毒株は捕食を受けるため増殖に差が生じることが考えられる。TEEGARADEN (1999) は、カイアシ類 3 種 (*Acartia tonsa*, *Centropages hamatus*, *Eurytemora herdmanii*) が、PSTs をもつ *Alexandrium* 属を捕食しないことを報告している。一方、FRANGOPULOS *et al.* (2000) は、*Acartia clausi* が、*A. minutum* を忌避する兆候は見られないが、卵の発生やその後のノープリウスの成長に影響を与えると報告しており、PSTs の生態学的意義は明確ではないものの、多量の毒を合成するエネルギー的なコストを考えれば、恐らくは有毒細胞は忌避され、無毒細胞に選択的な捕食圧がかかることが考えられる (TEEGARADEN, 1999)。毒の合成には、新たなアミノ酸合成が必要である (OGATA *et al.*, 1987a) が、本研究では、有毒株と無毒株の光-成長関係には差は認められず、少なくとも窒素栄養が十分存在する条件下では、光エネルギーを毒生産により多く振り向ける必要性があることは示されなかった。PSTs の合成には窒素栄養を必要とすることから、有毒株においては毒合成に栄養塩を配分する必要があり、それに見合った利益が PSTs 生産にはあるものと考えられる。今回得られた無毒サブクローンと有毒サブクローンをを用いた研究により、渦鞭毛藻における PSTs の生産が進化生態学的にどのような役割を持つのか明らかに出来ることが期待される。

5. 謝辞

本研究に用いた *A. tamarense*, *A. catenella*, *A. minutum* の培養株を分与頂いた、北里大学水産学部 緒方武比古教授、小池一彦講師に感謝する。

引用文献

- BAKER, M.D., H.Y. MOHAMMED and H. VEENING (1981): Reversed-phase ion-pairing liquid chromatographic separation and fluorometric detection of guanidino compounds. *Anal. Chem.*, **53**, 1658-1662.
- CARMICHAEL, W.W. and I.R. FALCONER (1993): Diseases related to freshwater blue-green algal toxins, and control measures. 1187-1209. *In* *Algal Toxins in Seafood and Drinking Water*, FALCONER, I.R. (ed.), Academic Press.
- FRANGOPULOS, M., C. GUISANDE, I. MANERIO, I. RIVERIRO, and J. FRANCO (2000): Short-term and long-term effects of the toxic dinoflagellate *Alexandrium minutum* on the copepod *Acartia clausi*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **203**, 161-169.
- JAGGER, J. (1967): *Ultraviolet Photobiology*. Prentice-Hall, Inc., 181pp.
- KODAMA, M. and T. OGATA (1988): New insights into shellfish toxins. *Mar. Pollut. Bull.*, **19**, 559-564.
- KODAMA, M., T. OGATA, and S. SATO (1988): Bacterial production of saxitoxin. *Agric. Biol. Chem.*, **52**, 1075-1077.
- KODAMA, M., T. OGATA, S. SAKAMOTO, T. HONDA and T. MIWATANI (1990): Production of paralytic shellfish toxins by a bacterium *Moraxella* sp. Isolated from *Protogonyaulax tamarensis*. *Toxicon.*, **28**, 707-714.
- MOESTRUP, O. and P. J. HANSEN (1988): On the occurrence of the potentially toxic dinoflagellates *Alexandrium tamarense* (= *Gonyaulax excavata*) and *A. ostenfeldii* in Danish and Faroese Waters. *Ophelia*, **28**, 195-213.
- MAHMOOD, N.A. and W.W. CARMICHAEL (1986): Paralytic shellfish poisons produced by the freshwater cyanobacterium *Aphanizomenon flos-aquae*. *Toxicon*, **24**, 175-186.
- OGATA, T., T. ISHIMARU and M. KODAMA (1987a): Effects of water temperature and light intensity on growth rate and toxicity change in *Protogonyaulax tamarensis*. *Marine Biol.*, **95**, 217-220.
- OGATA, T., M. KODAMA and T. ISHIMARU (1987b): Toxin production in the dinoflagellate *Protogonyaulax tamarensis*. *Toxicon.*, **25**, 923-928.
- 小野寺秀幸 (2000): ラン藻の生産する神経毒に関する化学的研究. 東北大学博士論文. 217pp.
- OSHIMA, Y. (1995a): Post-column derivatization HPLC methods for paralytic shellfish poisons. 81-94. *In* *Manual on Harmful Marine Microalgae*. Hallegraeff, G. M., D.M. ANDERSON, and A.D. CEMBELLA (eds.), IOC Manuals and Guides No.33. UNESCO.
- OSHIMA, Y. (1995b): Chemical and enzymatic transformation of paralytic shellfish toxin in marine organisms. 475-480. *In* *Harmful Marine Algal Blooms*. LASSUS, P. *et al.* (eds.), Lavosier, Intercept Ltd.

- OSHIMA, Y. (1995c): Postcolumn derivatization liquid chromatographic method for paralytic shellfish toxins. *J. AOAC Internat.* **78**, 528-532.
- PLUMLEY, F.G. (1997): Marine algal toxins : Biochemistry, genetics, and molecular biology. *Limnol. Oceanogr.*, **42**, 1252-1264.
- SHIMIZU, Y.(1993): Microalgal metabolites. *Chem. Rev.*, **93**, 1685-1698.
- SHIMIZU, Y., S. GUPTA and A.V.K. PRASAD(1990): Biosynthesis of dinoflagellate toxins. 62-73. *In Toxic Marine Phytoplankton.* GRANELI, E. *et al.* (eds.) Elsevier.
- STEIDINGER, K.A.(1993): Some taxonomic and biologic aspects of toxic dinoflagellates. 1-28. *In Algal Toxins in Seafood and Drinking Water.* FALCONER, I.R. (ed.), Academic press.
- TEEGARADEN G.J.(1999): Copepod grazing selection and particle discrimination on the basis of PSP toxin content. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **181**, 163-176.
- Yoshida T., Y. Sako, A. Uchida, T. Kakutani, O. Arakawa, T. Noguchi and Y. Ishida (2002) : Purification and characterization of sulfotransferase specific to O-22 of 11-hydroxy saxitoxin from the toxic dinoflagellate *Gymnodinium catenatum* (dinophyceae). *Fisheries Sci.*, **68**, 634-642.

受付：平成14年8月26日

受理：平成15年6月10日

Analysis of 3-dimensional Hydro-dynamical Model Simulation in the Gulf of Kutch, India and Its Comparison with Satellite Data

Takahiro OSAWA¹, Chaofang ZHAO^{1,2}, Pravin D. KUNTE^{1,3},
Lee Sung AE¹, Masanao HARA⁴, Takashi MORIYAMA⁵

Abstract : A 3D COSMOS numerical model, initially developed by NAKATA *et al.* (1983), has been used in the Gulf of Kutch situated in the northwest of India to study tidal variation, ocean current, residual current and sea surface temperature distribution, which are very important parameters in investigating natural ecosystem and suspended matter or pollution transportation in the Gulf. Wind speed, air-sea heat flux and five main tidal components are considered in this study, and the results are compared with earlier researches (UNNIKISHNAN *et al.*, 1999, SINHA *et al.*, 2000). The model results show that the model performs well in simulating hydro-dynamical parameters. The main features of surface current are the same as the results of SINHA *et al.* (2000) and tidal current is the main factor as compared to wind induced current due to high tidal variation. Residual current distribution owns similar features with previous studies (UNNIKISHNAN *et al.*, 1999, SINHA *et al.*, 2000) but with a much clear eddy formation near the mouth area of the Gulf. Sea surface temperature distribution estimated from the model shows similar pattern with that measured by NOAA/AVHRR by including wind stress in the model, but salinity distribution varies little ranging from 36.09 to 36.13 PSU in our numerical model simulation.

Keywords : 3D numerical model, satellite data, dynamical parameters, residual current, sea surface temperature, Kutch, India.

1. Introduction

Coastal area and enclosed bay are generally the most developed areas accompanied with large cities, different kinds of industries and large population activities. Domestic and industry waste discharges cause ocean pollution, heavy nourishing and then, red tide is easy to occur. Much more environmental pressures ex-

ist in these areas. The Gulf of Kutch (shown in Figure 1), located in the northwest coast of India, is the northeastern stretch of Arabian Sea. The Gulf of Kutch has been used as the important ports from ancient India. In recent years, the Gulf of Kutch, as same with other enclosed bay in the world, faces much more marine environmental problems; especially many factories have set up around the Bay. Therefore, it is important to develop hydro-dynamical and eco-dynamical models for ocean environment management and parameter monitoring.

The Gulf of Kutch, with the area of over 7300km², is about 130 kilometers in east-west direction, and 30 kilometers in north-south direction at the central part of the Gulf. The mean depth of the Gulf is around 18 meters and the deepest part with depths ranging from 50–60 meters in the estuary. The main feature

¹ Center for Environmental Remote Sensing, Chiba University, 33, Yayoicho, Inage, Chiba, Japan 263 8522

² National Laboratory of Ocean Remote Sensing, Ocean University of Qingdao, 5, Yushan Road, Qingdao, P. R. China 266003

³ National Institute of Oceanography, Goa, India

⁴ Vision Tech Inc. 2-1-16 Umezono, Tsukuba-city, Ibaraki Japan 305-0045

⁵ NASDA SPPD, 2-1-1 Sengenn, Tukuba-city Ibaraki Japan 305-8505

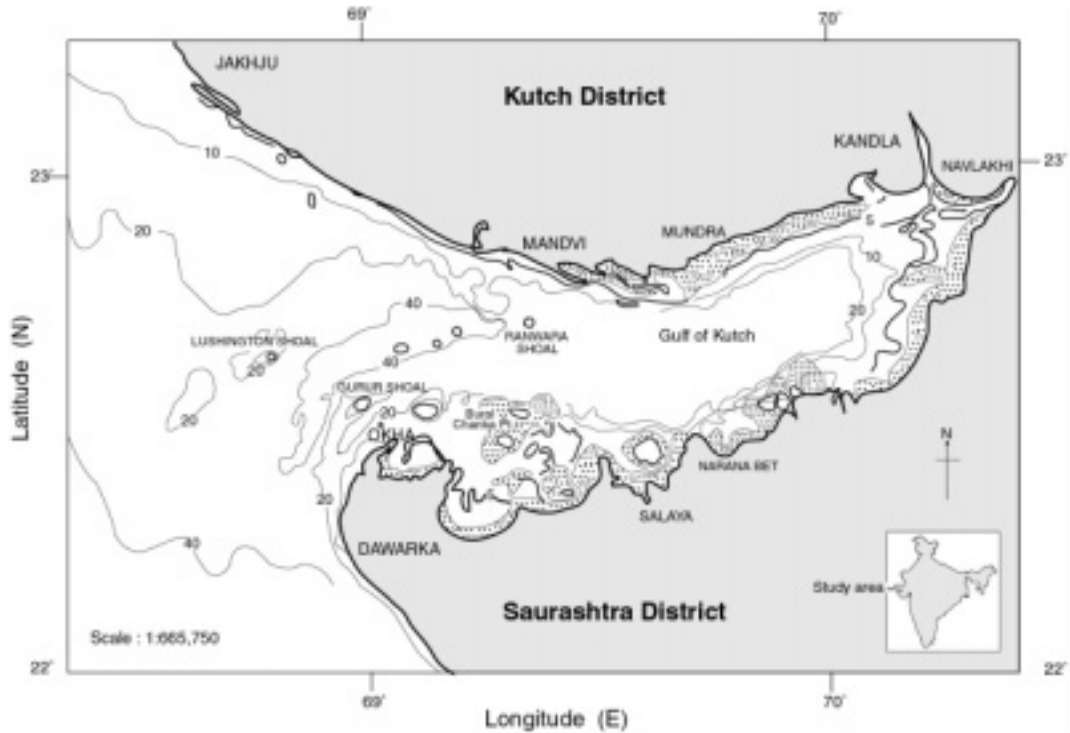


Figure 1. Location map of the Gulf of Kutch showing geomorphic features and bathymetric contours in meter.

is that the Gulf of Kutch is located in an arid zone with mean annually precipitation of about 0.4 m/year but with mean evaporation of about 1.4 m/year. Generally, salinities in the Gulf are higher than the mouth region with mean value of about 36 psu throughout the year (UNNIKSHISHMNAN *et al.*, 1999). The other feature of the Gulf is with high tidal range variation. Even at Okha, located at the mouth of the Gulf, the mean spring tidal range is over 3m, and at the eastern part of the Gulf it is over 6 meters. CENTRAL ELECTRICITY AUTHORITY of India (1985) also reported that the peak surface current velocity is in the range between 0.75 to 1.25 m/s at the estuary and between 1.5 to 2.5m/s in the central part of the Gulf.

Numerical studies in the Gulf of Kutch have been carried out for many years. SALOMON (1976) and PRANDTL (1984) simulated tidal circulation using two dimensional hydrodynamic model. UNNIKRISSAN *et al.* (1999) used 2D barotropic model to study tidal regime in the Gulf of Kutch and have found that an eddy

exists in M_2 residual current. They also found that a balance between the pressure gradient and the friction near the coast characterizes the dynamics of tidal propagation in the Gulf. SINHA *et al.* (2000) proposed a vertically integrated model to study tidal circulation and currents with tidal forcing along the open boundary of the model domain for the construction of the proposed tidal barrage, and pointed out the importance of the bathymetry of the Gulf simulating the current field. After considering the tidal variation in the Gulf, the CENTRAL ELECTRICITY AUTHORITY of India (1985) investigated the possibilities for tidal power development in the Gulf of Kutch. SHETYE (1999) studied the amplification of tidal amplitude in the Gulf of Kutch based on analytical and numerical model of linear, viscous, and cross-section averaged equations for tidal motion. He found that the amplification is due to a combination of quarter-wavelength resonance, geometric effect and sea bottom friction. We can see that only main tidal component and

bathymetry of the Gulf were considered based on analytical or 2D numerical model in the previous studies. No any researches was reported in studying the ocean current in the subsurface layers.

In recent years, many satellites have been launched and are operating. Several environmental parameters are obtained from these satellites, such as wind velocity from European ERS and US Quikscat, sea surface temperature and cloud fraction from NOAA/AVHRR and chlorophyll concentration from SeaWiFS. These data are sometimes used to monitor the variation of environment in the enclosed Gulf. Making full use of such satellite observations and combining with numerical model simulation will give better understandings of dynamical or eco-system processes in the coastal or enclosed Gulf at the present time.

The objective of this study is to simulate dynamical parameters in the Gulf of Kutch using 3-dimensional baroclinic numerical model in order to study the impact of human activities on the eco-system environment of Gulf of Kutch. Wind speed derived from Quikscat data was used in the initial condition of the model, and NOAA/AVHRR sea surface temperature data was used for surface temperature. Compared with earlier studies, several other factors such as surface wind, air-sea heat flux and river discharge around the Gulf of Kutch are introduced in 3D numerical model (COSMOS), which was initially developed by NAKATA *et al.* (1983), in addition to 5 main tidal components are considered. Section 2 will give a brief introduction of 3-dimensional numerical model. The initial conditions used in the model will be described in Section 3. The model results and discussion will be provided in Section 4, and finally Section 5 will give the conclusions.

2. Numerical model descriptions

2.1 Fundamental equation

3-dimensional (3-D) numerical model is used in this study. This model is first developed by NAKATA *et al.* (1983) and applied in the enclosed bay such as Chinhae Bay and Tokyo Bay, etc (HORIGUCHI, *et al.*, 1998a,b). Tide, wind and river run-off are taken into account in the model. After considering Boussinesq

approximation, incompressible fluid and constant Coriolis forcing, the momentum equations, equation of mass continuity, temperature and salinity conservations and state equation are summarized as follows.

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial x}(u^2) - \frac{\partial}{\partial y}(uv) - \frac{\partial}{\partial z}(uw) \\ & + f_0 v - g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{g}{\rho} \int_z^0 \frac{\partial \rho}{\partial x} dz', \\ & - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P_a}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(N_x \frac{\partial v}{\partial x} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial x}(uv) - \frac{\partial}{\partial y}(v^2) - \frac{\partial}{\partial z}(vw) \\ & - f_0 u - g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{g}{\rho} \int_z^0 \frac{\partial \rho}{\partial y} dz', \\ & - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P_a}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(N_x \frac{\partial v}{\partial y} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left(N_y \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(N_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(\int_{-H}^{\zeta} u dz \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\int_{-H}^{\zeta} v dz \right), \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial x}(uT) - \frac{\partial}{\partial y}(vT) - \frac{\partial}{\partial z}(wT) \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right), \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Cl}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial x}(uCl) - \frac{\partial}{\partial y}(vCl) - \frac{\partial}{\partial z}(wCl) \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial Cl}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial Cl}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

and

$$+ \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial Cl}{\partial z} \right),$$

$$\rho = \rho(Cl, T) \text{ and } \rho = \frac{\sigma_t}{1000} + 1 \quad (7)$$

σ_t is calculated by the following equations as,

$$\sigma_t = \sum_t + (\sigma_0 + 0.1324) \{1 - A_t + B_t(\sigma_0 + 0.1324)\}, \quad (8)$$

and

$$\sigma_0 = 0.069 + 1.4708Cl - 0.001570Cl^2 + 0.0000398Cl^3 \quad (9)$$

where,

$$\sum_t = \frac{(T - 3.98)^2}{503.570} \left[\frac{T + 283.0}{T + 67.26} \right], \quad (10)$$

$$A_i = T(4.7867 - 0.098185T + 0.00108437T^2) \cdot 10^{-3}, \quad (11)$$

and

$$B_i = T(18.030 - 0.8164T + 0.01667T^2) \cdot 10^{-6}. \quad (12)$$

u and v are the horizontal current velocities in the x and y directions, respectively; w is the vertical velocity with positive upward; ζ is the surface variation; ρ is density of sea water; f_0 is the Coriolis parameter; g is the acceleration due to gravity; T and Cl are the temperature and salinity, respectively; N and k are the coefficients of eddy viscosity and diffusivity, respectively. Kundsen's state equations have been used in the model.

2.2 Boundary conditions of the model

The boundary conditions used in this model include sea surface, sea bottom friction, open boundary and the discharge from rivers along the Gulf of Kutch. At the sea surface, the average wind stress is used here.

$$\rho_0(A_z \frac{\partial U}{\partial z}, A_z \frac{\partial V}{\partial z}) = (\tau_x, \tau_y) \quad (13a)$$

and

$$(\tau_x, \tau_y) = \rho_a C_d(UW, VW). \quad (13b)$$

Here ρ_0 is air density ($1.2 \times 10^{-3} \text{g/cm}^3$); C_d is the drag coefficients; U , V are wind velocities in the x , y directions, respectively; W is wind speed; τ_x , τ_y are wind stress in the x , y directions, respectively.

Similarly, at the sea bottom ($z = -H$), the boundary conditions are defined as follows,

$$\rho(A_z \frac{\partial U^b}{\partial z}, A_z \frac{\partial V^b}{\partial z}) = (\tau_x^b, \tau_y^b) \quad (14a)$$

and

$$(\tau_x^b, \tau_y^b) = \rho C_b(U^b W^b, V^b W^b). \quad (14b)$$

ρ is seawater density (1.024g/cm^3); (τ_x^b, τ_y^b) are frictional stresses at the sea bottom in the x , y directions, respectively; C_b is the frictional coefficient at the sea bottom. No slip condition is used at the land boundary. U^b , V^b , W^b are the current velocities in the x , y directions, and the current speed, respectively.

Heat flux between the atmosphere and ocean is estimated from two heat exchange processes. One is the heating process including short wave radiation from sun, and long wave radiation from the atmosphere, and the other is cooling process including latent heat flux by water

evaporation, and sensible heat exchange. The total heat flux could be estimated from sea surface temperature, air temperature, relative humidity, cloud content, and wind speed. All these data are obtained from Da SILVA *et al.* (1994) excerpt sea surface temperature (SST) and wind speed, where SST is estimated from NOAA/AVHRR data, and wind speed is estimated from Quikscat data.

As no field observation of tides in the open boundary, a composite tide is constructed in the form as follows (UNNIKRISHNAN *et al.*, 1999, NAKANO, 1936),

$$\xi(t) = z_0 + \sum A_i f_i \cos\{\sigma_i t - g_i + (V_i + u_i)\}. \quad (15)$$

z_0 is the mean sea level; A_i and g_i are the amplitude and Greenwich phase of the constitute i , respectively; f_i is node factor; $(V_i + u_i)$ is the astronomical arguments; σ_i is the tidal frequency. The amplitudes and Greenwich phases of various constituents at several stations around the Gulf of Kutch are documented by the International Hydrographic Bureau, Monaco (UNNIKRISHNAN *et al.*, 1999), and the astronomical arguments can be calculated theoretically and here the data are excerpted from NAKANO (1936). Table 2 lists all the five tidal components of M_2 , S_2 , N_2 , K_1 and O_1 considered in this study.

3. Model calculation conditions

In the application of model to the Gulf of Kutch, the model domain ($69.82^\circ - 70.46^\circ \text{E}$, $22.26^\circ - 23.00^\circ \text{N}$) covers the whole Gulf with 37 grids in north-south direction and 78 grids in west-east direction. The grid resolution is 2000 meters in both directions, and the time-step is 30 seconds. The Gulf is divided into 5 layers in the vertical direction with layer thicknesses being 5 meters in the first 3 layers, and 10 meters for the fourth layer. The last layer is set from 25 m to the bottom. The coefficients of eddy viscosity and diffusivity are taken to be equal to $0.85 \text{m}^2/\text{s}$ as used by UNNIKRISHNAN *et al.* (1999). The coefficient of the vertical eddy diffusivity is set to $1.0 \text{cm}^2/\text{s}$ (HORIGUCHI *et al.*, 1998a, NAKATA *et al.*, 1983).

At the open boundary, the mean sea level at the Gulf estuary is set to 0.01 m, which is used for tidal forcing. Compared with previous

Table 1. Simulation conditions used in Gulf of Kutch

Items		Contents
1. Grids		77x38 grids Grid resolution: 2 km
2. Layers		First layer 0–5 m 2nd layer 5–10 m 3rd layer 10–15 m 4th layer 15–25 m 5th layer 25–bottom
3. Open boundary	Tide conditions	M_2 , S_2 , N_2 , K_1 , O_1 components are considered, the parameters are shown in table 2.
	Temperature and salinity profile	The in situ data measured in 1997 is used shown in Fig. 2c
4. Other Parameters	Coriolis coefficient (f)	$5.62E-5 \text{ s}^{-1}$
	Bottom friction coefficient (C_b)	0.0026
	Surface friction coefficient (C_s)	0.0013
	Coefficient of eddy viscosity (horizontal) (N)	$8.5E+5 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$
	Coefficient of eddy diffusion (vertical) (k)	$1.0 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$
5. River Discharge		Phuldi, Machhu and Demi rivers run-off were used as shown in Table 3
6. Meteorological conditions	Wind velocity	Wind velocity data retrieved from Quikscat stions ensor are used and shown in Fig. 2a and Table 4
	Solar irradiance	711 cal/cm^2
	Solar zenith	0.84
	Air temperature	26.4
	Relative humidity	68.7%
	Cloud fraction	0.11
7. Time step	30 seconds	30 days from Nov.1–30, 1999

Table 2. Tide components data used in this research

Tide components	Period (hours)	Amplitude A_i, f_i (cm)	Phase (degree) $-g_i + (V_i + u_i)$
M_2	12.4	116.4	-5.01
S_2	12.0	33.5	151.36
N_2	12.7	39.5	80.85
K_1	23.9	25.7	124.35
O_1	26.9	17.4	53.64

Table 3. Main river input to the Gulf of Kutch in m^3/s and the last three rivers are considered in the numerical model

Adhoi	2.1
Sakara	4.0
Jhinhjoda	1.0
Phuldi	24.0
Machhu	476.0
Demi	438.0

studies, here we considered five main tidal components in the model, and the harmonic coefficients and the phase as shown in equation (15) are summarized in Table 2. As for the main river run-offs around the Gulf of Kutch, Machhu, Demi and Phuldi rivers are considered, and their volume transports are listed in Table 3.

The other meteorological conditions are wind velocity over the Gulf, solar irradiance, day-

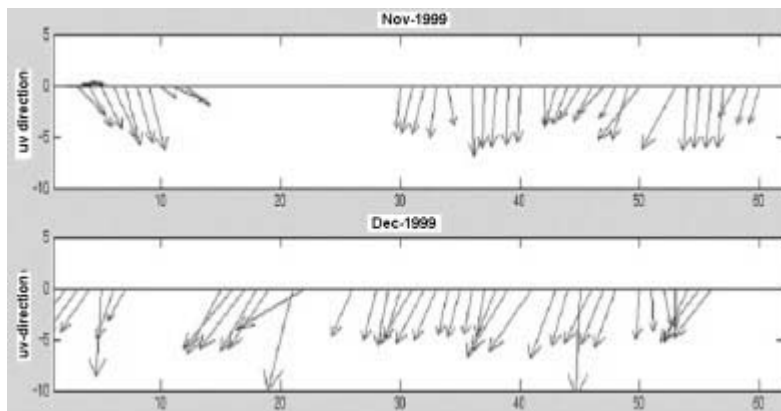


Figure 2a. Wind vectors over the Gulf of Kutch estimated from Quikscat data from Nov. to Dec 1999. Data are collected twice a day, and the number of data is taken on the abscissa.

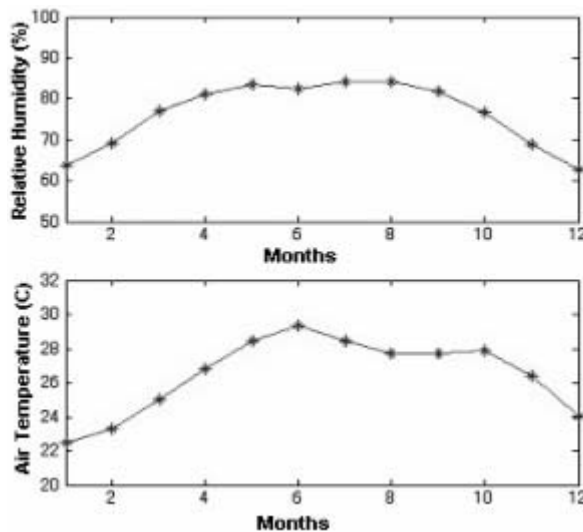


Figure 2b. Relative humidity (top) and air temperature (bottom) variation over the Gulf of Kutch obtained from Da SILVA *et al.* (1994).

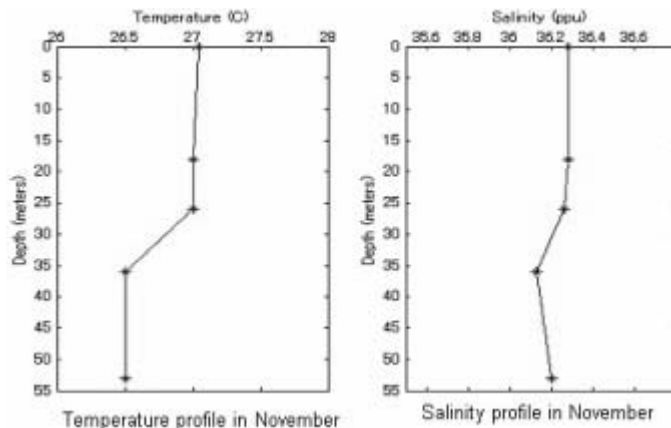


Figure 2c. Cloud fractions over the Gulf of Kutch in one year from Da Silver *et al.* (1994).

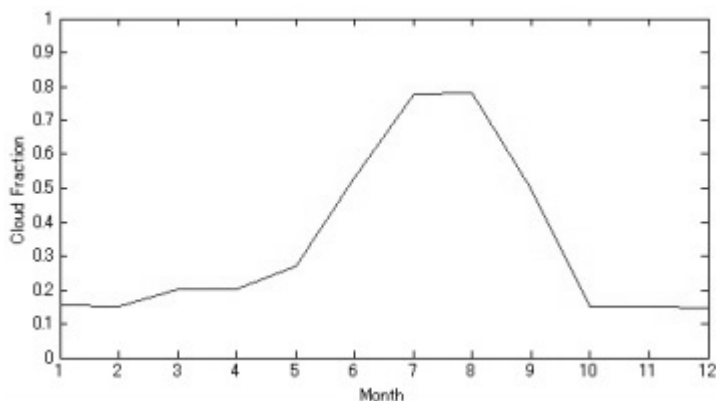


Figure 2d. Temperature and salinity profile measured at the open boundary of Gulf of Kutch.

Table 4. Mean wind velocity over the Gulf of Kutch from Quikscat data

	U m/s	V m/s	Speed
Nov 1999	-0.02	-4.14	4.1
De. 1999	-1.93	-5.45	5.8
Jan .2000	-0.10	-4.20	4.2
Feb. 2000	0.79	-3.94	4.0

length, cloud fraction, air temperature and relative humidity. In this study, wind data retrieved from Quikscat satellite are used because no in situ measurements were available. A Quikscat sensor was launched in 1999 as the successor of Japanese satellite ADEOS/NSCAT to monitor oceanic wind field globally. Map of ocean surface winds over global oceans twice a day derived from the observations by

the SeaWinds scatterometer on Quikscat was interpolated and provided in wind grid data by JPL (TANG and LIU, 1996). Figure 2a shows the mean wind vector over the Gulf of Kutch from Nov. 1999 to Dec. 1999. In winter, wind velocity over the Gulf is less than 10 m/s and wind direction are generally from north. Table 4 lists the mean wind speed in the Gulf in winter season, and the mean value used in the model is 4.1 m/s.

Air temperature, relative humidity and cloud fraction are obtained from Da SILVA *et al.* (1994) climatic data sets from 1984–1991. Figure 2b shows the air temperature and the relative humidity above sea surface. We can see that the temperature changes from 22–29°C with relative humidity variations between 60%

and 80%. Figure 2c shows the cloud fraction in this area and less than 20% cloud coverage from Oct. to May next year.

Figure 2d shows the profile of temperature and salinity measured at the open boundary in November 1997 near Okha. After checking the wind data and NOAA/AVHRR data and available in-situ data, the model calculation is conducted for Nov. 1999. The meteorological data chosen here are shown in Table 1. Surface solar irradiance in the Gulf of Kutch is calculated using the software written by PLATT *et al.* (2000).

4. Model results and discussions

The numerical experiment was conducted for the period starting from Nov. 1, 1999 for one month. As limited observations were carried out, sea surface temperature obtained from NOAA/AVHRR and results of earlier researches (SINHA *et al.* 2000, UNNIKRISHNAN *et al.* 1999) were used to validate the model results.

4.1 Surface current velocity distribution

Figure 3a and 3b (See P. 102) show the model results of ocean surface current velocities overlaid on the sea surface variation. Figure 3a is surface current distribution before high tide at the mouth of the Gulf. Surface variation changes from 0 cm at the bay head to 343 cm at the bay mouth and current travels from the mouth to the head of Gulf with maximum speed of 272 cm/s. Three hours later, the sea surface variation in the Gulf is from 250 cm at the bay mouth to 540 cm at the bay head with maximum current speed of 99 cm/s (Fig 3b). At this time, the tide in the mouth region has changed from 350 cm to 250 cm and that in the head region changes from 0 cm to 540 cm in 3 hours, and tidal current direction is reversed as compared with Figure 3a in the mouth region of the Gulf. As far as the tide magnitude is concerned, the model simulation shows that the maximum current velocity attains up to 270 cm/s. These results are almost the same with the other numerical results (SINHA *et al.* (2000), PRANDTL (1984)), which were estimated from 2D numerical model (Figure 4) (See P. 102) and only tidal influence included.

However, the residual current field shows much more detailed structure in our 3D numerical models, especially we can find the difference of the residual currents in the vertical direction.

4.2 Residual current distribution

Residual current distribution in the Gulf of Kutch is shown in Figure 5a (See P. 102) gives the similar patterns as obtained by earlier studies (PRANDTL, 1984, SINHA *et al.*, 2000). Residual current travels from the mouth at the open boundary area with large magnitude around 15 cm/s, two largest residual current regions are found in the east and west of the Island Bural Chanka with a magnitude of more than 25 cm/s. However, on average, the residual currents have average magnitudes less than 5 cm/s as shown in Figure 5a.

A clear anti-cyclonic eddy of residual current is located near the mouth of the Gulf, which was also reported, by PRANDTL (1984), UNNIKRISHNAN *et al.* (2000) and SINHA *et al.* (2000). Several convergence and divergence regions are visible in the middle part of the Gulf. The main features of the residual current field do not show much difference amongst subsurface layers and bottom layer of the Gulf of Kutch. However, the current speed decreases from the surface to bottom layer. When compared with different water depth distribution, we found that the areas with larger value of residual current are located over the area with rapid depth change. Hence, it is concluded that topography is the most important factor in the Gulf of Kutch in determining the distribution of residual current velocity. UNNIKRISHNAN *et al.* (1999) also used model simulation to validate the effect that the topography on the eddy generation and showed that the eddy disappears if no depth variation is assumed in the model. Figure 5b and Figure 5c show the residual current distribution in the middle and bottom layer. Various features like eddy, places of convergence and divergence etc, which are visible in the surface layer, are seen diminishing towards deeper layers of the Gulf of Kutch. Hence, using 3D model study, it is easy to decipher the depth to which tides are influencing the water section.

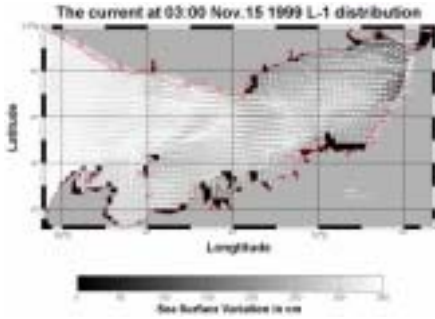


Figure 3a. Surface current velocity distribution from 3-D numerical model (before high tide at Okha around open boundary)

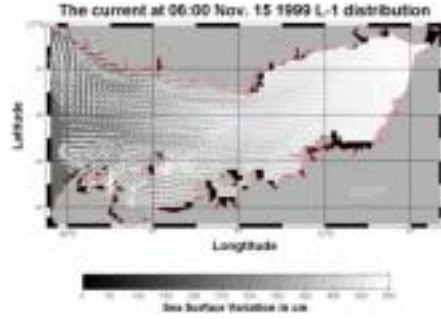


Figure 3b. Surface current velocity distribution from 3-D numerical model (after high tide at Okha)



Figure 4. Tide stream current one and half hour before high at Okha (excerpted from SINHA *et al.* (2000)).

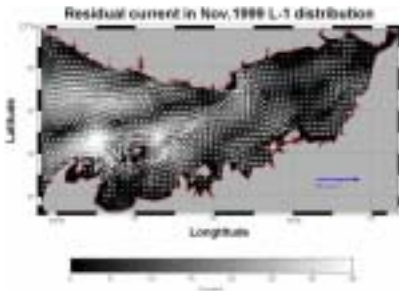


Figure 5a. Residual current velocity distribution of the Gulf of Kutch the first layer.

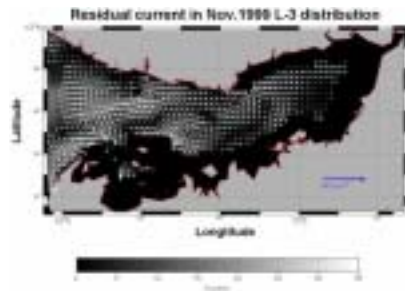


Figure 5b. Residual current velocity distribution of the Gulf of Kutch the Middle layer.

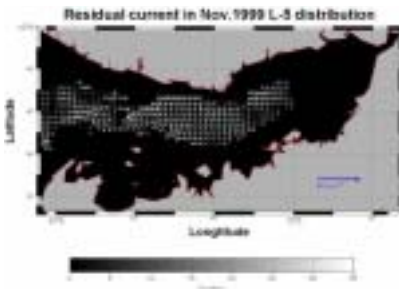


Figure 5c. Residual current velocity distribution of the Gulf of Kutch the bottom layer.

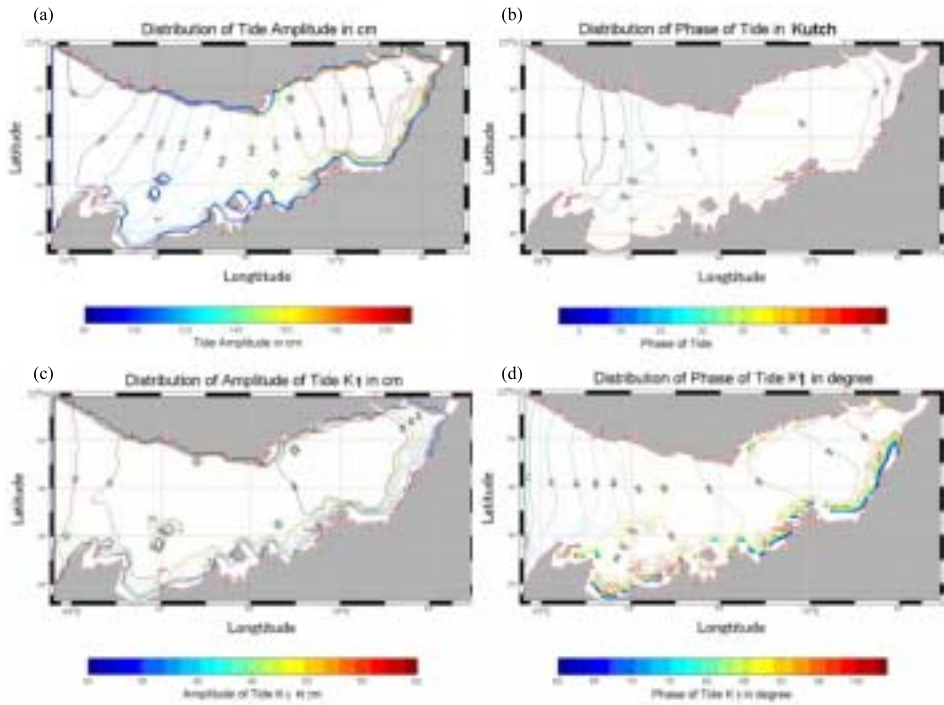


Figure 6. (a) Tide amplitude of M_2 in Gulf of Kutch, (b) Tide phase of M_2 in Gulf of Kutch, (c) Tide amplitude of K_1 in Gulf of Kutch, (d) Tide phase of K_1 in Gulf of Kutch

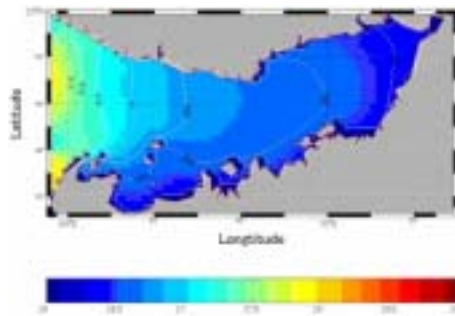


Figure 7a. Sea surface temperature in the first layer of the Gulf of Kutch

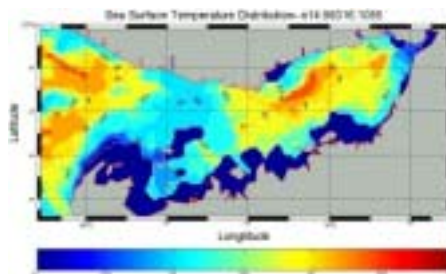


Figure 7b. Sea surface temperature measured by NOAA/AVHRR

4.3 Tidal features and tidal mixing effects

The main characteristic of Gulf of Kutch is its high tidal variation. SHETYE (1999) proposed that amplification of tide is due to a combination of quarter-wavelength resonance and geometric effect. We analyzed the model results and obtained the amplitude and phase distributions of tide M_2 and K_1 components for comparison. Figure 6a, b (See P. 103) shows that the amplification ratio for M_2 tide is about 2.3 times and the phase difference is about 90 degree. According to quarter-wavelength resonance condition, the tide period is equal to the resonance period $T_r = 4L/(gH)^{1/2}$, (L is wave length and H is wave height). The resonance period in the Gulf of Kutch is 16 hrs. After considering the bottom friction and other factors, SHETYE (1999) proposed that the resonance period is around 11.5 hrs, which is almost coincides with M_2 period and hence tidal amplification takes place. We also analyzed the second largest tide component, K_1 , in Gulf of Kutch and the results (Figure 6c and Figure 6d) (See P. 103) shows that the tidal amplitude variation changes from 55 cm to 60 cm in the Gulf and phase difference is just 24 degrees. It concludes that no resonance effect was observed with K_1 tidal component. UNNIKRISHNAN *et al.* (1999) also noted this amplification effect and proposed the natural period as around 10 hr using moment balance along lateral section, which is also similar to our model simulations.

4.4 Sea surface temperature and salinity distribution

Sea surface temperature derived from NOAA/AVHRR was used to validate the model results, It is found that sea surface temperature decreases from the mouth toward the head of the Gulf after wind stress influence is considered in the model simulation. The similar trend was also found in NOAA/AVHRR data. However, the detailed structure of sea surface temperature differs as satellites measures the skin temperature of water body whereas the model considers entire first layer. The sea surface temperature obtained from NOAA/AVHRR, shown in Figure 7b, decreases from the mouth to the head of the Gulf, and our model results (Figure 7a) (See p. 103) also

show the similar trend and pattern. Salinity distribution in the Gulf was also investigated using 3D numerical model. As we have no the in-situ data for the same season, we set the initial condition of salinity profile to be the same as the open boundary. The model results show salinity distribution in the Gulf varies from 36.09 to 36.13 psu, and no much difference is found after considering wind stress.

5. Conclusions

From COSMOS model results, it is concluded that the current system (tidal and residual tidal) is mainly controlled by tidal variation. In this study, wind stress slightly changes surface current pattern without disturbing major structure of current, as wind speed is generally very low in November. Current field in the subsurface are similar to surface current velocity distribution but are of lesser magnitude. Residual current velocity distribution shows a clear anti-cyclonic eddy, several divergence and convergence areas in the center of Gulf, which is not reported in earlier studies. Further in-situ investigations are needed to confirm their existence. Two areas with large magnitude of current velocity are found over the area with higher depth variation. It shows the importance of topography in controlling current fields.

Sea surface temperature decreases from the mouth toward the head of the Gulf after wind stress influence is considered in the model simulation. The similar trend was also found in NOAA/AVHRR data. However the detail structure of sea surface temperature differs as satellites measures the skin temperature of water body whereas the model considers entire first layer. Finally, the COSMOS model has achieved reasonable success in predicting hydrodynamic parameters in high tide dominated GoK. However use of higher spatial resolution and extensive incorporation of the spatially and temporally field data into the modeling process are required to be made to attain reality in the future.

Acknowledgements

Satellite wind data is obtained from the NASA/NOAA sponsored data system Seaflux,

at JPL through the courtesy of W. Timothy Liu and Wenqing Tang, and climatic meteorological data is obtained from Da SILVA *et al.* (1994). Second author gratefully acknowledges Japan Society of Promotion of Science (JSPS), Japan for awarding RONPAKU Fellowship under which this work has been carried out.

References

- CENTRAL ELECTRICITY AUTHORITY (1985): Investigations and studies for tidal power development in the Gulf of Kutch, Interim Rep. Ministry of Irrigation and Power, Government of India, New Delhi, pp. 87.
- Da SILVA, A., A. C. YOUNG and S. LEVITUS (1994): Atlas of surface marine data 1994, Volume 1, Algorithms and procedures, Technical report 6, US Department of Commerce, NOAA, NESDIS 6, Washington D.C.
- HORIGUCHI, F., K. NAKATA, P. LEE, W. CHOI, C. KIM, and T. TERASAWA, (1998a): Mathematical Ecohydrodynamical model application in Chinhae Bay, *J. Adv. Mar. Sci. Tech. Soc.*, **4** (1), 81–94.
- HORIGUCHI, F., K. NAKATA, H. NISHIDA (1998b): The development of a size-based mathematical ecohydrodynamical model and application to Tokyo Bay, *J. Adv. Mar. Sci. Tech. Soc.* **4** (1), 95–122.
- NAKANO, S. (1936): Tide. published by Kokin Syoin (in Japanese), pp 528.
- NAKATA, K., F. HORIGUCHI, and Y. SETOGUCHI (1983): Oinami Bay, 3-dimensional tidal simulation, *Pollut. And Resc.* **12** (3) , 17–36.
- PLATT T., S. SATHYENDRANATH, and G. WHITE, (2000) : Ocean Primary Production Software Package for Calculation of Oceanic Primary Production, Biological Oceanography, Ocean Sciences Division, Bedford Institute of Oceanography, Dartmouth, Nova Scotia, Canada.
- PRANDTL, D., (1984) : Simple theory for designing tidal power scheme, *Adv. Water Resources*, **7**, 21–27.
- SALOMON J. C. (1976): “Modele mathematique da la propagation da la maree en stuaire et des transports sableux associes. Application aux estuaries Da la Loire et Da la Seine” (in French), Ph.D thesis, Univ. De Nretagne Occidentale, Brest, France, pp. 257.
- SHETYE, S. R. (1999), Tides in the Gulf of Kutch, India, *Continental Shelf Research*, **19**, 1771–1782.
- SINHA, P. C., S. K. DUBE, A. K. MITRA and T. S. MURTY (2000): A tidal flow model for the Gulf of Kachchh, India, *Marine Geodesy*, **23**, 117–132.
- TANG, W. and W. T. LIU (1996): Objective interpolation of scatterometer winds, JPL publication 19–96.
- UNNIKRISHNAN, A. S., A. D. GOUVEIA, and P. VETHAMONY (1999): Tidal regime in Gulf of Kutch, west coast of India by 2D model, *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, **125**(6) 276–284.

Received August, 26, 2002
Accepted August, 11, 2003

補正上限周波数の深度依存特性にもとづいた 水圧式波高計データの表面波補正変換方法

金成 誠一*

Surface Wave Transformation of Pressure Gauge Wave Meter Data based on the Depth-Dependency of Break Frequency (Fb)

Sei-ichi. KANARI

Abstract : Owing to linear wave theory, amplitudes of pressure signal measured at depth $z=-H$, is reduced by $[\cosh(kH)]^{-1}$, where k is angular wave number. Therefore, in order to recover surface waves from the pressure signals, the measured pressure signal must be corrected using pressure transfer function given by $\cosh(kH)$. However, it is well known that the theoretical pressure transfer function leads an over correction in the region of higher frequency. Then, it is needed to use a suitably modified pressure transfer function for theoretical one. In this paper, a modification was adopted, in which transfer function is suppressed as a constant value in the frequency region higher than a boundary frequency, F_b . The break frequency, F_b is determined so as to minimize the error between the transformed surface wave and the waves measured with an acoustic wave meter. The above method was applied for wave data taken at various coastal regions with different depths. The determined F_b showed a clear depth dependency, and it is found that the depth dependency of F_b is due to the depth dependency of pressure transfer function itself. If formulation of F_b v.s. depth is once established, it enables us to derive surface wave time series only giving a settling depth of pressure gauges, without any acoustic wave meter data. It is shown that the new method gives an excellent agreement of the waveform with the surface waves measured with an acoustic wave meter.

Keywords : Surface wave transformation, Transfer function, Wave meter, Pressure waves

1. はじめに

水圧式波高計の圧力センサー出力信号を表面波に変換するには、圧力波の深度補正を必要とすることは良く知られていることである。しかし、深度補正関数が周波数(または波数)とともに関数値が増大するという性質のために、単純に補正を実行すると高周波側で過剰補正となり、変換された波は高周波雑音を多く含んだ波形となりやすい。こうした過剰補正を抑制するには、高周波域の適当な周波数以上で圧力応答関数による補正を抑制する必要がある。たまたま、波浪観測データの解析の機会に直面し、この解析に供する目的で、上記の抑制域境界の周波数(以下では上限周波数または F_b と呼ぶ)の最

適値を、表面波変換された時系列と超音波波高計時系列の差を最小にするように逐次法で決定するという変換手法を検討した。圧力応答関数を用いて補正を行う場合、応答関数は、水深と波数の関数であるから、波数を求めおかなければならない。周波数が与えられると、波の分散方程式の波数と周波数の関係から波数が求められる筈であるが、分散式から波数を計算することはそれほど簡単ではない。そこで、補正関数算出の際に必要な波数計算には、HUNT(1979)の計算アルゴリズムを採用した。以上に述べた手法を実際のデータに適用し、良好な結果を得ることができた。さらに、この方法を、いろいろな場所、深度で計測された波高データに適用して上限周波数を求めた結果、上限周波数が深度に密接に関係していることが明らかになった。その理由についても検討し、その結果を元に、上限周波数の深度依存関係式の定式化を試みた。

* 立正大学地球環境科学部海洋環境物理学研究室
360-0194 埼玉県熊谷市万吉1700
Laboratory of Environmental Physical Oceanography,
Faculty of Geo-environmental Science, Rissho Univ.,
Magechi 1700, Kumagaya 360-0194

2. 水圧—表面波変換の基礎概念

水深 h , 振幅 a , 角周波数および角波数がそれぞれ σ , κ の表面波の位置 x , 時刻 t における波高を $\eta(x, t)$ とするとき, この波は

$$\eta(x, t) = a \sin(\kappa x - \sigma t + \theta) \quad (1)$$

で表される。ここに, θ は波の位相角である。この波による深度 z における水圧変動 $p(x, z, t)$ は, 水の密度を ρ , 重力の加速度を g とすると

$$p(x, z, t) = \rho g a \frac{\cosh(\kappa[h+z])}{\cosh(\kappa h)} \sin(\kappa x - \sigma t + \theta) \quad (2)$$

で与えられる。(1), (2)式から, $\eta(x, t)$ と $p(x, z, t)$ の関係を求めると次式が得られる。

$$\eta(x, t) = p(x, z, t) / \rho g K_p(z) \quad (3)$$

ただし,

$$K_p(z) = \frac{\cosh(\kappa[h+z])}{\cosh(\kappa h)} \quad (4)$$

である。(3)式は, 水圧から表面波に変換するための基本式で, 例えば, 海底設置型の水圧計で波を計測した場合, 設置深度を $z = -h$ とすると, (3)式は

$$\eta(x, t) = p(x, -h, t) / \rho g K_p(-h) \quad (5)$$

となり, 圧力計センサー出力 $p(x, -h, t)$ に $[K_p(-h)]^{-1}$ を掛け算することにより, 表面波 $\eta(x, t)$ が得られることを示している。このことから, $[K_p(z)]^{-1}$ を圧力補正関数あるいは, 水圧伝達関数と呼んでいる。以下では $K_p(-h)^{-1}$ を補正関数と呼ぶ。

3. 補正関数 $K_p(-h)$ の計算

ここでは, 海底設置型の水圧式波高計の場合に問題を限定する。この場合, 補正関数 $[K_p(-h)]^{-1} = \cosh(\kappa h)$ は(4)式から明らかなように, 波数の関数となっている。したがって, $K_p(-h)$ を評価するには, あらかじめ波数を波の分散式を用いて求めておかなければならない。一般に, 波の分散式は波の角振動数を σ として

$$\sigma^2 = g \kappa \tanh(\kappa h) \quad (6)$$

で与えられ, これは, 角波数 κ と角周波数 σ の関係を与えるものである。(5)を使って与えられた角周波数 σ に対する角波数 κ を求めるのであるが, (6)式は角波数について解ける形の関数ではないので, ここでは HUNT (1979) の関数展開式を利用する。これによると, $y = \frac{\sigma^2}{g} h$ とおくことにより, 角波数は次式で求められる。

$$\kappa^2 = y^2 + \frac{y}{1 + \sum_{n=1}^6 d_n y^n} \quad (7)$$

ただし, d_n は多項式展開の係数で $n = 1 \sim 6$ に対し,

$$\begin{aligned} d_1 &= 0.666 \\ d_2 &= 0.3555 \\ d_3 &= 0.1608465608 \\ d_4 &= 0.0632098765 \\ d_5 &= 0.0217540484 \\ d_6 &= 0.0065407983 \end{aligned}$$

で与えられる。この関数は $n = 6$ の 6 次展開で近似されたものであるが, $y = 0 \sim \infty$ に対し 0.1%, $n = 9$ の場合は 0.01% の精度で角波数が計算できる (ROBERT, G.D., and A.D. ROBERT(1984))。

計測される波は多数の周波数 (したがって波数) の単弦波の和からなっていると考えられるので, 上記の圧力補正は含まれるすべての周波数 (波数) の波について実行する必要がある。そのために, 補正は周波数スペクトル空間で行い, しかる後に時系列に逆変換するという手順になる。ここでは, FFT によるスペクトル上で補正を実行し, その後, FFT によるフーリエ逆変換により表面波時系列に変換した。なお, 本研究で用いた波浪データは, 各地点で計測されたそれぞれの波浪計の 1 バースト分で, いずれもサンプル時間間隔は 0.5 秒, 1 バースト 20 分間のデータである。FFT にはその内の 2048 個のデータを切り出したものを用いた。

4. 上限周波数 F_b の決定

補正関数 $[K_p(-h)]^{-1}$ は, 高波数側で値が急激に増大する性質を持っているために, 理論式をそのまま当てはめて補正をすると, 高周波域では過剰補正になり, 具合が悪い。Fig. 1 は太平洋沿岸 A 港外の水深 16m の地点で計測された水圧式波高計信号時系列に対し, 補正なしでスペクトルを求めたもの (実線) であるが, 高周波側で水圧信号のパワーが大幅に減衰しているのが認められる。(4)式の逆数で与えられる理論伝達関数は, 一般に単調増加関数で, この伝達関数をそのまま適用して圧力補正を行うと, 点線で示すようなスペクトルとなり, 明らかに 0.3 Hz 近傍より高い周波数で補正過剰となってしまうという 1 例である。

こうした過剰補正を回避する目的で, 提案された方法がいくつかあり, その代表的なものに WANG *et al.* (1986), 徳田・道田 (1986) および, 橋本ら (1992) 等がある。WANG *et al.* の方法は, 周波数領域での伝達関数を Fourier 級数に展開し, 伝達関数が高周波側で滑らかに頭打ちとなるような関数形で近似し, 近似式の係数を実測波に最も良くヒットするように決めるというものであり, 徳田・道田らの方法は船用波浪計出力を統計的波浪スペクトルに合うように指数法補正関数を決めるといものである。また, 橋本らの方法は, 波の実測伝達関数が, ある周波数よりも高周波側で特性が理論伝達関数から外れて頭打ちになるという特徴に着目し, ある周波数 (f_b) よりも高周波域では伝達関数を一定として

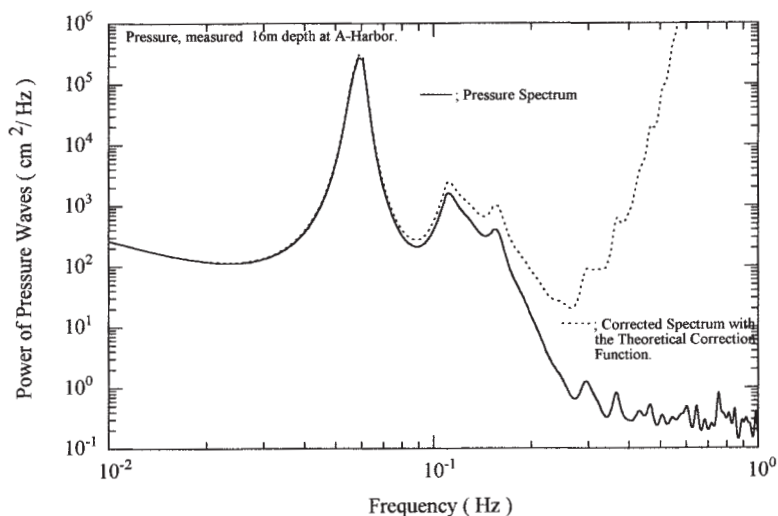


Fig. 1. An example of wave spectrum of raw pressure data (solid line) and its corrected one (dotted line) using with a theoretical pressure transfer function (broken line).

補正を行う。その際、ピーク周波数よりも高周波側の減衰域のスペクトル形を、直線と放物線で近似し、その境界の周波数を f_B とし、この近似スペクトルと実測スペクトルとの差が最小になるように f_B を決めるというものである（橋本ら1992）では、この周波数を、直線近似と放物線近似の境界の周波数という意味で f_B と名づけているようである。具体的には、水圧変動スペクトルのピーク周波数を f_p とし、 f_p の1.3倍の周波数を f_1 、 f_p の5倍の周波数を f_2 とし、 f_1 と f_2 の間に f_B を設定し、 f_1 から f_B までのスペクトルは直線近似とし、 f_B から f_2 の間は放物線近似を用い、この近似スペクトルと生のスペクトルの差が最小になる f_B を逐次法で決めるというやり方である。ただし、橋本ら（1992）では、 f_B の上限を0.2Hzに設定し、 f_B がこの上限を超えるときは f_B を0.2に固定し、これ以上の周波数範囲に対しては伝達関数を0とおくという制約を与えている。

本論文では、ある周波数よりも高周波側で伝達関数を一定値に固定するという点は、橋本ら（1992）の方法と同じであるが、その周波数の決定の仕方が少し異なる。すなわち、本論文で用いた方法は、同時測定された超音波波高計の水位時系列と、圧力補正した水圧波による水位時系列との差を直接比較し、その誤差（水位振幅の2乗平均誤差）が最小になるような上限周波数 Fb を逐次的に求めるというものである。具体的には、 Fb 値のサーチ範囲を0.1~0.4Hz程度にあらかじめ決めておき、 Fb 値を0.1Hzから0.0125きざみで変化させ、それぞれの Fb に対する変換波と超音波波高計の表面波とを直接比較し、振幅の2乗平均誤差を計算する。この2乗平均誤差が最小になっている Fb を最適 Fb 値として採用する。その際、 Fb に対する上限制約は何も与えない。したがっ

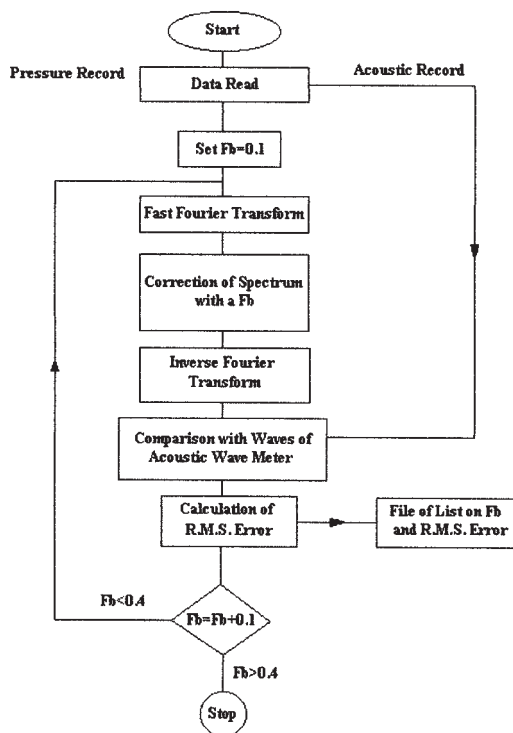


Fig. 2. Schematic flow chart for determining a most suitable break frequency Fb .

て、この方法では、伝達関数抑制上限周波数を用いるという意味では、橋本ら（1992）の f_B と似ているが、周

波数決定の手法の背景が異なる。本論文では、その上限周波数を F_b と記すことにする。この手続きの流れ図を Fig. 2 に示す。また、この一連の過程で求められる 2 乗平均誤差と逐次設定される F_b 値の関係の一例を Fig. 3 に示す。縦軸は 2 乗平均誤差、横軸は周波数で、この例では、 0.28Hz のところで 2 乗平均誤差が最小値を示している。したがって、この例では 0.28Hz が F_b の最適値ということになる。

5. 変換結果

Fig. 4 は、Fig. 1 に示したスペクトルの元になる波浪データ時系列である。4(a)は水圧計による水圧変動を

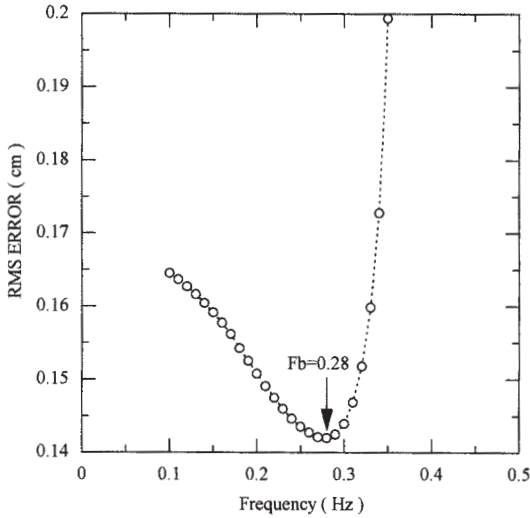


Fig. 3. An example of F_b vs R.M.S. Error for determining the most suitable break frequency, F_b .

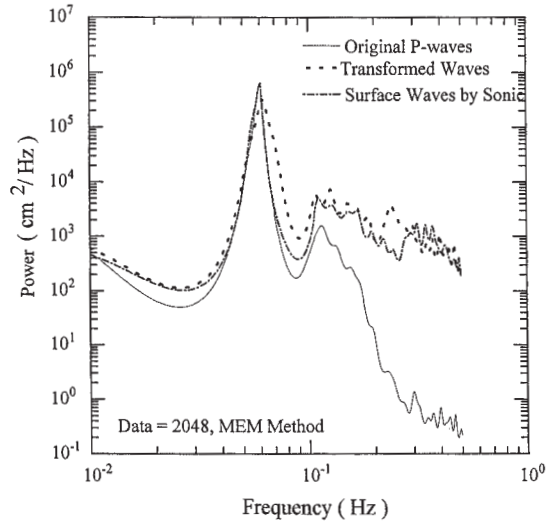


Fig. 5. Comparison between the corrected pressure wave spectrum (dotted broken line) using a modified transfer function and the spectrum obtained from the acoustic wave meter data (broken line). Solid line shows the spectrum of original pressure data.

補正なしで水位に換算した時系列で、波形は、超音波波高計による波形 Fig. 4(b) に比べ、高周波成分が減衰した滑らかな波形になっていることがわかる。いずれも、縦軸は水位振幅 (cm) で、横軸は 0.5 秒毎にサンプルされたデータの番号で表してある。したがって、横軸の数値の半分が秒単位の時間である。4(b)は、水圧と同時に計測した超音波波高計の波高時系列である。本論文で用

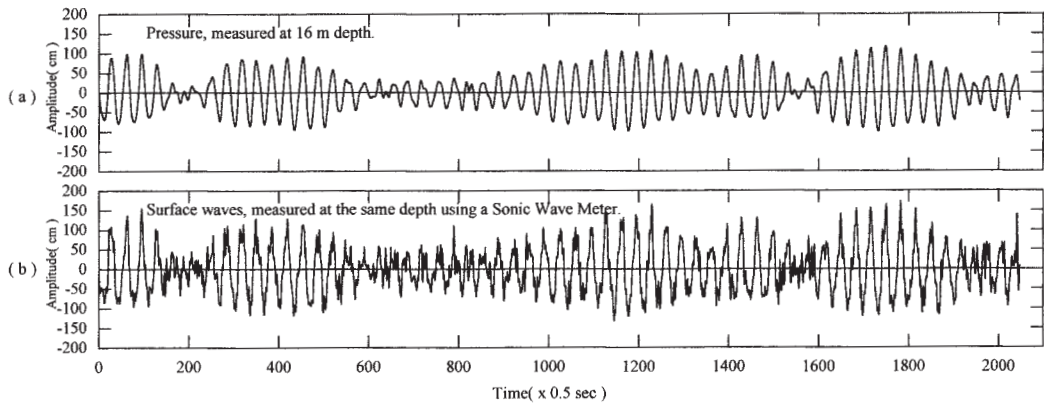


Fig. 4. (a) Raw pressure time series at the depth of 16m, and (b) time series of surface waves measured with an acoustic wave meter.

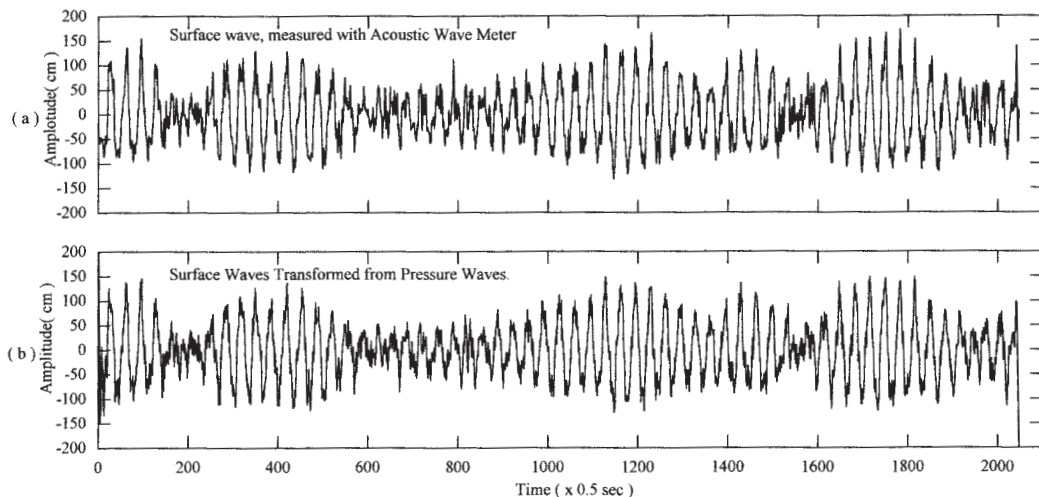


Fig. 6. Comparison with (a) surface waves measured with an acoustic wave meter, and (b) recovered surface waves using a determined Fb.

いた方法を上記の波に適用した結果を Fig. 5 に示す。Fig. 5 に示すように、この例では、Fb が 0.25Hz の場合で、補正伝達関数は、 0.25Hz より低い周波数では理論曲線をそのまま用い、 0.25Hz より高周波域では、その点の値を水平に延長した形の補正曲線として補正変換を行ったものである。実線のスペクトルは補正前の水圧スペクトルで、一点鎖線は、 $Fb=0.25\text{Hz}$ を使った伝達関数によって補正したスペクトルである。明らかに高周波側での過剰補正は回避されている。図では、補正変換された水圧スペクトルと、同時に計測された超音波式波高計のスペクトル(破線)とを比較したもので、高周波域の細かい凹凸を除けば、両スペクトルはほぼ一致していると言える。

Table 1. Break Frequency (Fb), determined at various coastal regions with different depths.

Depth (m)	Fb (Hz)
5	0.35
9.6	0.297
10.9	0.278
16	0.25
17	0.23
23	0.17
6.675	0.29
6.549	0.28
6.387	0.28
6.252	0.3
6.171	0.3
6.146	0.31
6.905	0.31
6.471	0.31

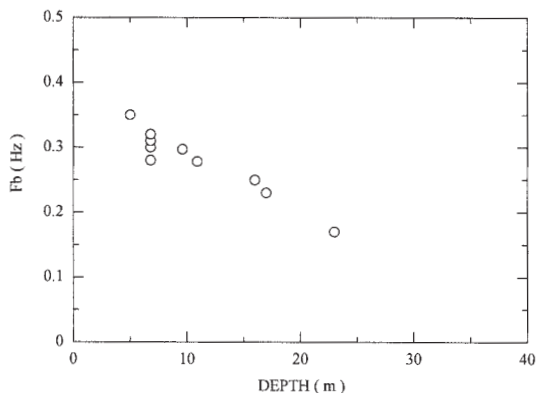


Fig. 7. Correlation between the Fb determined at various sites and the depths at which pressure measured.

上記の伝達関数によって補正したスペクトルをフーリエ逆変換し、表面波時系列に変換した時系列を超音波波高計の時系列と比較したものを Fig. 6 に示す。Fig. 6 (a) は超音波波高計時系列、また Fig. 6 (b) は伝達関数補正を行った後、フーリエ逆変換して求めた水圧式波高計による波形である。上記の方法で変換された表面波は、超音波波高計の波形と見分けがつかないほど良く一致していることがわかる。

上記の波(水深16m)の例以外に、同様な方法を日本海沿岸および太平洋沿岸各地の種々の水深の海域で行った波浪観測のデータに上記方法を適用して、Fb を決定した結果を、A港のデータとともに Table 1 に示す。得られた Fb 値と水深(設置深度)の値は Table 1 に示し

たとおりであるが、この関係をグラフにしたものを Fig. 7 に示す。Fig. 7 の横軸は波高計設置深度、縦軸は周波数である。上記各地点のデータについて決定された F_b 値は○印で示してある。○印の分布から、 F_b は深さとともに減少していることがわかる。

6. 上限周波数の深度依存性にたいする考察

ここで、Fig. 7 に示した F_b がなぜ深度に依存するかを少し考察してみる。

F_b より高周波で、伝達関数を一定にするということは、そこで、伝達関数の上限値を設定したことになるので、 F_b は伝達関数と密接に結びついている。伝達関数には、深度 H がパラメータとして含まれているから、伝達関数が深度によって変わり、これが F_b の深度特性に

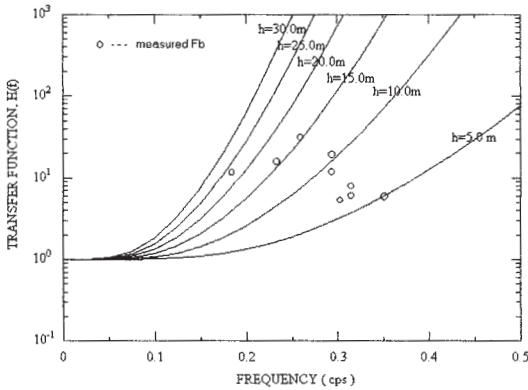


Fig. 8. Transfer function - frequency characteristics for the various depth parameters. Open circles show F_b , determined from measurements.

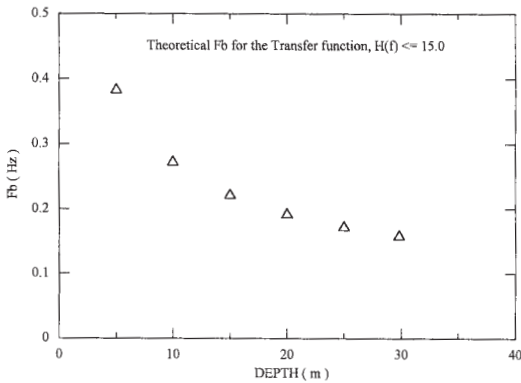


Fig. 9. Theoretical F_b (Δ) for depth parameters, assuming a constant maximum correction factor of 15 in the transfer function in Fig. 8.

寄与している可能性がある。Fig. 8はそれぞれ、深度 5 m, 10m, 15m, 20m, 25m, 30mに対して描いた伝達関数のグラフであるが、深度とともに、伝達関数の立ち上がりが高周波側にシフトしてゆくのがわかる。このグラフ上に Table 1 の F_b をプロットしたものが丸印で示してある。○印の縦軸に対応する値がその深度の伝達関数の補正倍率上限値を示し、深度により、ばらつきはあるものの、最大30倍、平均約15倍となっている。そこで、平均補正倍率を15倍と仮定して、15倍の横線と各深度の伝達関数との交点に対応する周波数をその深度の F_b 値として読み取り、深度- F_b グラフとして表したものが Fig. 9 の Δ 印である。明らかに、この F_b は深度に依存していることがわかる。これを、計測から求めた F_b の深度特性上にプロットしてみると Fig. 10 の Δ 印で示すように、計測から求めた F_b (○印) とほぼ同一曲線上に並ぶ。このことから、計測から求めた F_b の深度特性は、伝達関数の深度特性をそのまま反映したものであると結論することができる。

7. F_b の深度特性の近似式

ここで、Table 1 で与えた一連の F_b 値の深度依存関係が、深度と逆数関係の傾向を示す事実に着目して、深度の逆数の冪の関数形による最小二乗法で実験式を求めてみる。結果は Fig. 10 の点線で示した曲線である。曲線の式は

$$\ln(F_b) = -0.5655178 - \left(\frac{1}{3}\right)\ln(D) \tag{8}$$

で与えられ、深度 D の冪の形に直すと

$$F_b = 0.56807D^{-\frac{1}{3}} \tag{9}$$

となる。このような形で F_b が確定できると、もはや、 F_b の決定に超音波高データは必要なくなる。 F_b は、水圧計設置深度 D を与えれば(9)から計算で求められ、こ

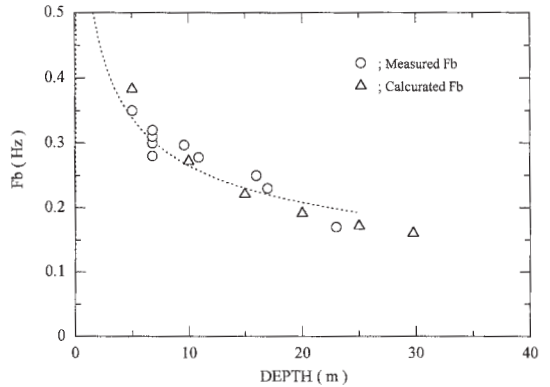


Fig. 10. Total plot of the theoretical F_b (Δ) and measured F_b (\circ). Both F_b s are drawn up in nearly a same line.

れを補正プログラム中に組み込んでおけば、データ読み込みから表面波変換までの処理が自動化でき、水圧式波高計単独で超音波波高計と同等の表面波変換ができることになる。この場合は、Fig. 2の表面波変換の手続きの流れ図に代わって、Fig. 11のような流れ図となる。ちなみに、この方法で水圧データのみから表面波時系列変換を行い、その結果を超音波波高計の波高時系列と比較した結果の一例をFig. 12に示す。実線は超音波波高計による時系列を、また、点線は(9)式を用いて変換された水圧計による表面波時系列で、微細な部分の差を除けば、両者は極めて良く一致している。

8. 超音波波高計の高周波域の深度特性

以上に述べた方法においては、超音波波高計は深度にかかわらず、正しい波高を常に計測するという仮定の元に、波高変換を行うものであるが、ここで、超音波波高計の高周波特性（分解能）が計測深度によってどうなるかについて少し考察してみる。

超音波波高計のビーム角が一定であれば、海面のターゲット面積が深度に応じて変化する筈である。波高は、ターゲット面積上の平均波高値として計測されるので、深度が大きい（ターゲット面積が大きい）と、より長波長の波が平均化されてしまうことになる。このことは、超音波波高計も、計測深度が大きくなると、高周波分解能が低下するというを意味している。したがって、このような波高計に合わせて上限周波数を決めると、その値は、深度が増すにつれて低周波側にずれることを暗示する。

超音波波高計のビームの片側半値幅を $\frac{\varphi}{2}$ 、波高計設置深度を h とすると、超音波ビーム（ビームの断面は円と仮定する）が海面を切り取る円の半径は $h \tan\left(\frac{\varphi}{2}\right)$ で与えられる。この円形の領域から反射された音波によって海面までの高さを計測し、平均水深を差し引いたものが超音波波高であるから、この円内に一波長以上の波が

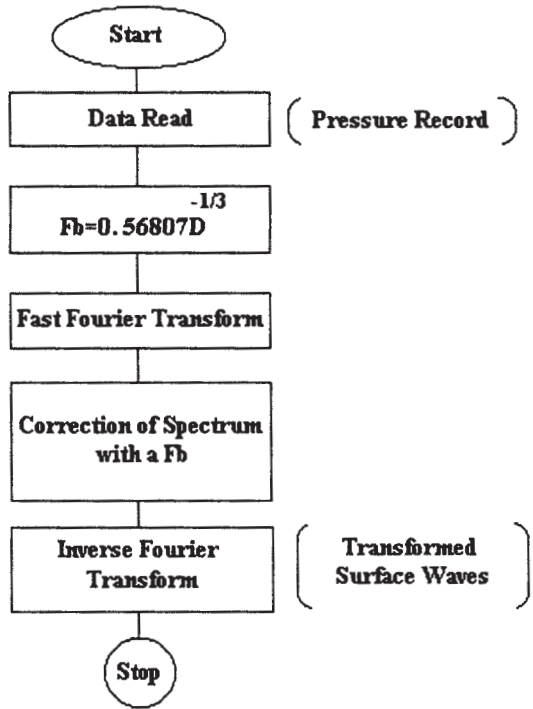


Fig. 11. Flow chart of surface wave recovery after built-in of Eq. (9).

含まれている短波長波は、いわば平均化されて計測されないことになる。この計測されない波の最大波長は

$$\lambda_{\max} = 2h \tan\left(\frac{\varphi}{2}\right) \tag{10}$$

である。この波長に対応する波の周波数を σ_{\max} とすると、 $h \gg \lambda_{\max}$ ならば分散式から

$$\sigma_{\max}^2 = g \left(\frac{2\pi}{\lambda_{\max}} \right) \tan h \left(\frac{2\pi h}{\lambda_{\max}} \right) = \frac{2\pi g}{\lambda_{\max}}$$

となる。したがって、 σ_{\max} は

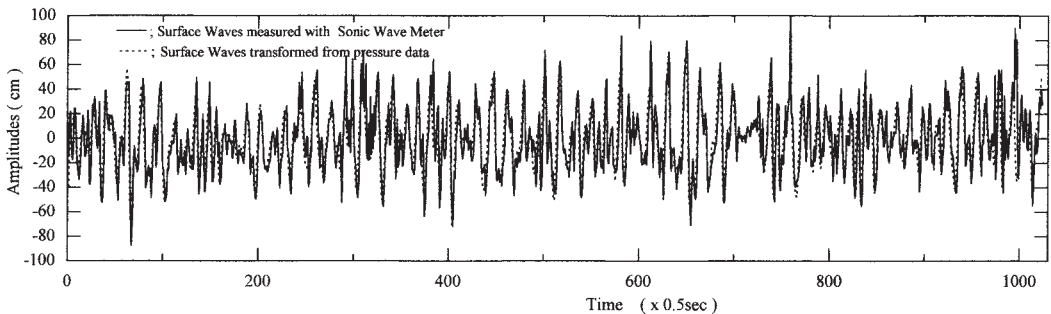


Fig. 12. An example of comparison between the recovered surface wave (dotted line) using Eq. (9) and the surface waves measured with an acoustic wave meter (solid line).

$$\sigma_{\max} = \sqrt{\frac{2\pi g}{\lambda_{\max}}} = \sqrt{\frac{\pi g}{\tan\left(\frac{\varphi}{2}\right)}} h^{-\frac{1}{2}} \quad (11)$$

となり、計測可能周波数の上限が水深の -0.5 乗で変わること示している。つまり、計測深度が大きくなると、超音波波高計の計測可能周波数帯の高周波側で劣化がおり、劣化周波数は深度の -0.5 乗に比例して低周波側にシフトすることを示している。現在、超音波波高計が港湾の波浪環境調査の標準的計測器として使われているが、上で示したような深度依存特性の補正は全くなされていらないようである。

9. むすび

今回、波浪観測データの解析の機会に直面し、水圧信号から表面波変換の必要にせまられ、新たに、表面波変換方法の開発を行った。

方法の検討に伴って行ったいくつかの波浪データの解析により、 F_b の深度依存関係が見出され、その定式化を行うとともに、深度依存特性が伝達関数の深度依存特性を反映したものであることを明らかにした。また、 F_b を深度の関数として表すことにより、 F_b を設置深度から計算で求めることが可能になった。この方法によれば、いちいち超音波波高計データとの比較により F_b を決めるという手続きが不要になり、水圧式波高計だけで表面波変換が可能になることを示した。実際に、この方法で変換した表面波を、同時計測した超音波波高計のデータと比較し、きわめて良好な一致が得られた。

ここで示した方法は、超音波波高計の波形を正しいものと仮定した上でのもので、 τ で触れたように、超音波波高計自体が深度の増大とともに高周波分解能が劣化する可能性があるため、こうした影響が水圧変換波に直接反映される可能性があることは否めない。これを回避する手段は、残念ながら、現時点では見当たらない。また、以上に示した変換方法は、線形波理論に立脚したもので、浅海域で卓越するであろう非線形効果がどの程度影響す

るかの評価については考慮外であった。

最後に、今回の解析で使用した水圧式波高計のデータ取得率はいずれの場合も100%に達していたのに対し、超音波波高計は、高波浪時の欠測事例が非常に多いという結果を見るにつけ、その補完としての水圧式波高計の有用性を認識せざるを得なかったことを付記しておく。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、観測に種々ご協力いただいた三洋テクノマリン神戸氏に謝意を表します。また、研究の機会を与えていただいた三洋テクノマリン札幌支店長、片桐氏に深甚の謝意を表します。比較観測の一部で使用した圧力式波高計はアレック電子(株)社長の戸川弘氏の貸与によるものである。ここに併せて深甚の謝意を表します。

文 献

- 橋本典明, 永井紀彦, 菅原一晃, 浅井正, 久高将信 (1992): 波浪の多方向性と弱非線形性を考慮した水圧波から表面波への換算法について, 海岸工学論文集, **39**, 171-175.
- HUNT, J. N. (1979): Direct solution of wave dispersion equation, *J. Waterways, Ports, Coastal Ocean Div., ASCE*, **105**, WW4, 457-459.
- ROBERT, G. D., and A. D. ROBERT (1984): *Water wave mechanics for Engineers and Scientists*, Prentice-Hall, Inc., 352pp.
- 徳田・道田 (1986): タッカ-式船用波浪計に関する研究 I, 計測処理システム, 国立防災科学技術センター研究速報, **72**, 1-32.
- WANG, H., LEE, D.Y., and G. ALLEN (1986): Time series surface-wave recovery from pressure gage, *Coastal Eng.*, **10**, 379-393.

Received July, 11, 2003

Accepted September, 26, 2003

Estimate of the Slick Thickness for Leaked Heavy Oil from the Sunken Nakhodka in the Sea of Japan

Tsutomu MORINAGA*, Hisayuki ARAKAWA*, Masami SHOUJI**,
and Tomonori KIYOMIYA***

Abstract : In order to estimate the thickness of leaked oil from the sunken Tanker Nakhodka in the Sea of Japan, the relationships between the slick thickness and the upward radiance from the surface of water at selected wavelengths were investigated by experiments in a test water tank. The obtained relationships and *in situ* oceanographic measurement data were used for the estimate of actual oil slick thickness. In the range of slick thickness of 0.0005–0.0019 mm, white and shiny stripe patterns are observed and the appearance is white. This is considered to be caused by the irregular reflection, which results from the oil droplets due to the small surface tension of the dirty city water. Above the slick thickness of 0.0027 mm, the white area decreases gradually with the increase of oil and becomes entirely brown at the thickness of 0.075 mm. When the thickness increases further, a tint of dark brown increases. No definite relationship is found between the slick thickness and the dominant wavelength of chromaticity point of the water. The relationships between the upward radiance and the oil slick thickness are as follows:

$$Y = \alpha X^{-0.0637} \quad (Lu/Ed (412) / Lu/Ed (510) \leq 1.4)$$

$$Y = \beta X^{0.143} \quad (Lu/Ed (412) / Lu/Ed (510) > 1.4)$$

where Y : upward radiance at 510nm of oil slick

X : oil slick thickness (mm)

α, β : constant value calculated from upward radiance at 510nm of sea water at critical point

Lu : upward radiance Ed : downward irradiance

412, 510: wavelength (nm)

Near the sunken site, the oil slick thickness is estimated to be 0.014 mm in 1997 and 0.017 mm in 1998.

Keywords : *Slick thickness, Leaked heavy oil, Sunken Nakhodka, Critical point*

1. Introduction

In January of 1997, there was a large-scale heavy oil leak from the ruptured Tanker Nakhodka located at the western region of the Sea of Japan. The oil that was leaked then spread rapidly by action of wind and currents

towards the northern coastal areas of Honshu Island and inflicted great damage on the fisheries. (KATSURAGI, 1999)

At that time it was estimated that the volume of the leaked oil was 5000–6000 kL based on the volume of the boat hold. However, it was very difficult to grasp the volume of oil at each different location because the leaked oil dispersed in the form of slicks. In addition, the thickness of oil slicks was very thin and the slick layers fragmented into many pieces. It is extremely important to accurately grasp the spread range and the volume of spilled oil for the preservation of environment and marine life, and the protection of the fisheries. The information is also important for the removal of

*Department of Ocean Sciences, Tokyo University of Fisheries

4-5-7, Konan, Minato-ku, Tokyo 108-8477, Japan

**National Saury stick-held-Dipnet Fishery Cooperation.

1-9-13, Sankaidou-BL, Akasaka, Minato-ku, Tokyo 107-0052, Japan

***Ocean Research Institute, University of Tokyo.

1-15-1, Minamidai, Nakano-ku, Tokyo 164-8639, Japan

spilled heavy oil and its treatment and/or disposal.

So far, there has been a lot of research for the detection of oil slicks and the determination of the spread range for spilled oil. For the detection, the infrared method (FORNACA *et al.*, 1995) and the fluorescence method (HOVER and PLOURDE, 1995) were employed. For the spread range, the remote image sensing from satellites was used because it can cover wide area to obtain extensive information (TSENG and CHIU, 1994). CHUBAROV *et al.* (1995) used laser light and BROWN *et al.* (1995) used laser light and ultrasonic waves for the determination of oil slick thickness. Both methods, however, are inappropriate for the determination of slick thickness for the extensive area of ocean.

In the present investigation, in order to estimate the thickness of leaked oil slicks from the sunken tanker Nakhodka in the Sea of Japan, we conducted laboratory experiments and these results are applied to estimate the thickness of leaked oil slicks.

2. Experimental Methods

The laboratory experiment was performed at the roof top of the Department of Ocean Sci-

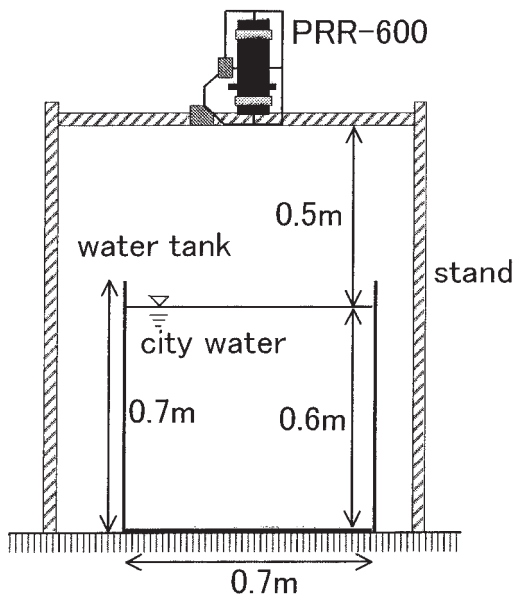


Fig. 1. A schematic diagram of the experimental apparatus.

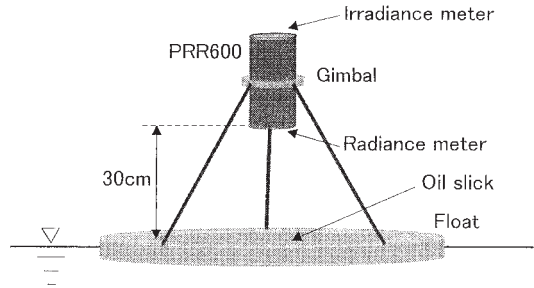


Fig. 2. A sketch of measurement on *in situ* oil slick with PRR 600.

ences building at Tokyo University of Fisheries when the altitude of the sun was high (from 11: 30 a.m. to 3: 15 p. m., on a sunny day) in October 1997. A schematic diagram of the experimental apparatus is shown in Fig. 1. A cylindrical tank (diameter: 0.7 m, height: 0.7 m), of which the inner wall and bottom were painted black, was filled with city water to the height of 0.6m. The C-heavy oil (density: 0.96 g/cm^3) was used for the formation of oil slicks. A micropipette with the precision of 1/1000 ml was used to drop the heavy oil on the surface of the water and the water was stirred slowly so that the slick became uniform on the surface of the tank. The slick thickness was calculated by dividing the amount of dropped oil by the area of water surface. Seventeen levels of thickness were prepared between 0.0005 to 1.0 mm. A profiling reflectance radiometer, PRR600 (Biospherical Instruments Inc.) was installed at the top center of tank so as not to form the shade on the surface of water. The distance between the surface of the water and the sensor of the instrument was 0.5 m. With PRR600, the upward radiance and the downward irradiance can be measured simultaneously at the wavelength of 412, 443, 490, 510, 555 and 665 nm. The upward radiance and downward irradiance were measured for each oil slick thickness to obtain the relationship between the slick thickness and the upward radiance.

The *in situ* oceanographic observations were carried out aboard the RT/V Umitaka-maru of Tokyo University of Fisheries in September of 1997 and 1998 around the region where the Nakhodka had sunken ($37^\circ 14.4' \text{ N}$, $134^\circ 24.9' \text{ E}$). The profiling reflectance radiometer PRR600

was fixed to the ring float so that the light-receiving sensor was located approximately 0.3m above the surface of the water (Fig. 2). The upward radiance and downward irradiance were measured simultaneously at the selected wavelengths by setting the ring float around the region of the oil spill. For comparison, measurements were also performed for the nearby ocean surfaces where no oil slicks were observed.

3. Results and Discussion

3-1. Visual observation of water color

The experiment was started by injecting C-heavy oil at the center of water surface of laboratory tank. When the oil spread to the entire area of the water surface and the slick thickness became 0.0005 mm, many white and shiny stripe patterns were formed. When more sample oil was injected, white stripe patterns increased and the entire water surface became white at the thickness of 0.0019 mm. When oil was added further, the oil on the water surface formed masses and no longer spread easily. These results are probably due to the low surface tension of dirty city water resulting in irregular reflection of the light and droplet-like oil (SATO, 1960). When the water surface was disturbed, the masses of oil dispersed into countless spots, and formed light brown patches dotted on the water surface in white. This is considered to be the beginning of the formation of the oil slick by the mergence of droplets. When the slick becomes thicker than 0.0027 mm, the white area decreased and the brown area increased. At the slick thickness of 0.075 mm, the entire surface displayed a light brown color. Further addition of oil resulted in easy spreading. When the slick becomes thicker than 0.1 mm, the color changed to a darker brown with the increase of the thickness.

3-2. Relationship between oil slick thickness and upward radiance as a function of wavelength

The changes in downward irradiance distribution of the sun and sky during the experiment is shown in Fig. 3. (See P.120) At the beginning of experiment (time: 11:30), the curve for irradiance of the sun and sky versus

the wavelength has a small value in shorter wavelength band with a peak at 510 nm. The downward irradiance decreases with time, namely with decrease in altitude of the sun. At the end of experiment (time: 15:15), the downward irradiance at 510 nm decreased to be 30% of that at the start time, and the curve is almost similar to that at the beginning of experiment. Thus, it is natural to consider that this time-dependent change of the irradiance of the sun and sky should affect the radiance from the oil slick. Therefore, in the present analysis the radiance is expressed with the relative value by dividing the upward radiance by the downward irradiance (Lu/Ed ; Lu : upward radiance, Ed : downward irradiance).

Table 1 shows the dominant wavelength at each oil slick thickness from the chromaticity diagram. Here Lu/Ed is used. As the oil thickness increased from 0.0013 to 0.0019 mm, the dominant wavelength shifted from shorter to longer ones, and it moved back and stayed around the vicinity of 480 nm when the thickness is 0.0027–0.01 mm. When the thickness is 0.05–0.075mm, the complementary wavelength was 567 nm, and the thickness is 0.1–1.0 mm it again moved back to shorter wavelengths

Table 1. Dominant wavelength of each oil slick. Symbol indicates complementary wavelength.

Thickness of oil slick(mm)	Dominant wavelength(nm)
No slick	494.8
5.0×10^{-4}	489.0
1.3×10^{-3}	562.7
1.9×10^{-3}	570.0
2.7×10^{-3}	482.4
4.0×10^{-3}	485.5
5.0×10^{-3}	484.2
8.0×10^{-3}	482.0
1.0×10^{-2}	484.4
2.0×10^{-2}	539.4
3.0×10^{-2}	588.7
5.0×10^{-2}	* 566.9
7.5×10^{-2}	* 567.0
1.0×10^{-1}	457.9
1.5×10^{-1}	464.5
2.0×10^{-1}	466.0
5.0×10^{-1}	470.8
1.0×10^0	469.0

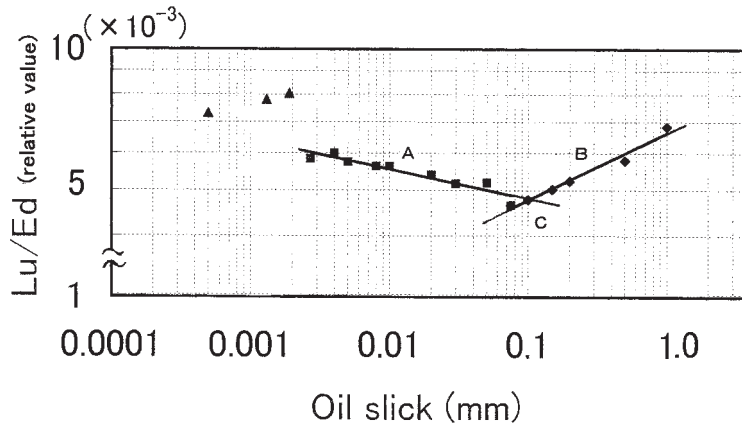


Fig. 4. Ratio of upward radiance and downward irradiance at 510nm versus oil slick thickness. A, B: regression lines. C: cross point.

around 460 nm. Thus the change of wavelength (water color) as a function of the oil slick thickness is not a monotonous increase. This result is similar to the relationship between the dominant wavelength of water color and the concentration of suspended solid (SS) and phytoplankton (Chl. *a*), as investigated by MORINAGA *et al.* (1992).

Fig. 4 shows a relationship between Lu/Ed at 510 nm and the oil slick thickness. The value of Lu/Ed without oil slick is 4.75×10^{-3} . When the oil slick thickness is very thin (0.0005–0.0019 mm), the Lu/Ed greatly increases from that without oil slick. As described previously in the visual observation of the color of water, this phenomenon is due to irregular reflection caused by the formation of heavy oil droplets (SATO, 1960). When the oil thickness is from 0.0027 to 0.075 mm, the Lu/Ed decreases with the increase of the slick thickness. The scattered light due to oil increases, but the scattered light from the water inside largely decreases with the increases of slick thickness. This is explained as follows: the transmitted light into water through the thick oil slick decreases, and the scattered light from the water inside also decreases because of the thick oil, resulting in an extreme decrease of the resultant scattered light. The phenomenon of the radiance decrease with the increase of the slick thickness is also observed at 412, 443, 490, and 555 nm with the exception at 665 nm. As to an exceptional wavelength, it can be considered

that the rate of light attenuation by water itself is extremely high at longer wavelength band. MORINAGA and ARAKAWA (2000) investigated the effect of oil slick to the irradiance under the water. If we set the irradiance without oil slick at 100%, the irradiance measured at 510 nm attenuates to 37.5% at the slick thickness of 0.02 mm, showing a high attenuation rate. When the slick thickness is 0.075–1.0 mm, the Lu/Ed increases with the increase of the slick thickness. In this case, there is almost no scattered light from the water inside due to thick slick, and the increase of upward radiance is due to an increase of the scattered light from the oil slick. The upward radiance is considered to be the sum of the reflected light and the scattered light from the oil slick. The same trend of the radiance increase with the increase of the slick thickness is also observed at 412, 443, 490, and 555 nm.

Now we will discuss equations that are used for the calculation of the thickness of oil slick. In Fig. 4 two regression lines are drawn using the least squares method for the relationship between the oil slick thickness and the Lu/Ed for the above two cases. The first line and the second line is A and B, respectively, and the cross point is a critical point C. These results can be interpreted by the schematic diagrams for the optical phenomena (Fig. 5). The upward radiance without oil slick (L_{UW}) is the sum of reflected light from the water surface (L_{RW}), and scattered light from the water

inside (L_w), and L_{RW} is much smaller than L_w (Fig. 5a). When there is oil slick, reflected light from the oil slick (L_{RO}) is a little larger than L_{RW} because the relative refractive index of oil is larger than that of water (Fig. 5b). Here, two cases can be considered depending upon the thickness of oil. When the oil slick is very thin (Fig. 5b (1)), the upward radiance (L_{UO}) is the sum of L_{RO} and scattered light from the water inside (L_w') and that from the oil itself (L_o) including reflected light from the boundary of oil and water (Line A in Fig. 4). In this case L_w' is larger than L_o . When the oil slick thickness increases, L_w' becomes to be smaller than L_o , and eventually it becomes zero. When the oil slick thickness is rather larger (Fig. 5b(2)), the upward radiance ($L_{UO'}$) is the sum of L_{RO} and scattered light from the oil itself (L_o') (Line B in Fig. 4). That is, when the oil slick thickness increases, only L_o' increases, resulting in the increase of the upward radiance.

In Fig. 4 the critical point C is the point where L_w becomes zero. Thus, L_{UO} is equal to $L_{UO'}$. At the critical point C, the values of Lu/Ed as a function of wavelength are as follows: 5.57, 5.10, 4.78 and 4.45×10^{-3} at the wavelengths of 443, 490, 510, and 555 nm, respectively. The oil slick thickness at those points is 0.076, 0.097, 0.102, and 0.123 mm, respectively. That is to say, the position of critical point varies with the wavelength. When there is no oil slick, the values of Lu/Ed are 5.17, 4.85, 4.75, and 4.37×10^{-3} at each of the above wavelengths. Thus, at point C, L_{UO} is slightly larger than L_{UW} , and the difference between L_{UO} and L_{UW} varies with the wavelength. As mentioned above, this maybe is due to the difference between L_{RW} and L_{RO} . The difference is the smallest at 510 nm, and it corresponds to 0.6 % of the total value. Based on these, we obtain the following equations for the calculation of the film thickness using the Lu/Ed at 510 nm. The regression equation for line A (film thickness, less than 0.102 mm) is $Y = \alpha X^{-0.0637}$ and the one for line B (film thickness, more than 0.102 mm) is $Y = \beta X^{0.143}$ (Y : Lu/Ed (510), X : oil slick thickness, α , β : constant). Here Lu/Ed (510) is ratio of upward radiance and downward irradiance at 510 nm of oil slick. The α and β are the constant values calculated from the ratio of

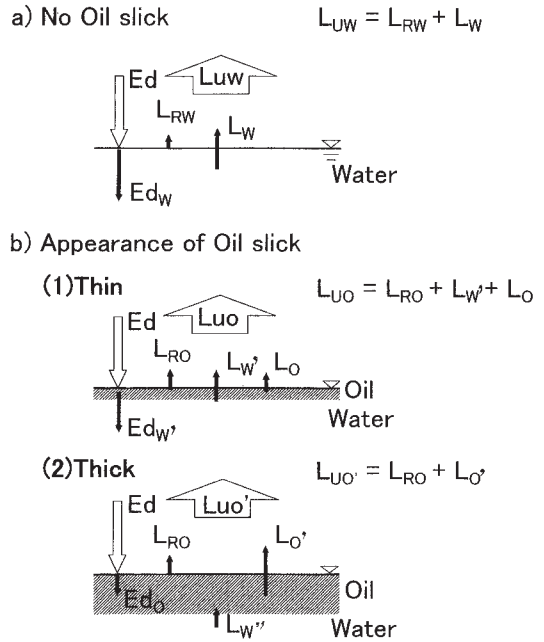


Fig. 5. Optical process by oil slick near the water surface. Ed: downward irradiance Ed_w , Ed_w' : downward irradiance inside the water, Ed_o : downward irradiance inside the oil. L_{uw} : upward radiance without oil slick. L_{rw} : reflected light from the water surface. L_w : scattered light from the water inside. L_{uo} : upward radiance through the oil. L_{ro} : reflected light from the oil surface. L_w' : scattered light from the water inside. L_o : scattered light from the oil itself. $L_{uo'}$: upward radiance through the oil. $L_{o'}$: scattered light from the oil itself. L_w'' : scattered light from the water under the oil.

upward radiance and downward irradiance at 510 nm of sea water at critical point.

When the Lu/Ed data of *in situ* observations is used for the ordinate, two values can be obtained for oil slick thickness (abscissa) from line A and from line B (Fig. 4). In order to solve this contradiction, the relationship between the ratio of Lu/Ed at two different wavelengths and the oil slick thickness is plotted in Fig. 6. The combinations of Lu/Ed at two wavelengths that give a large difference with respect to the thickness are Lu/Ed (412) / Lu/Ed (510) and Lu/Ed (443) / Lu/Ed (510). For example the ratio Lu/Ed (412) / Lu/Ed (510) is 1.4 if the thickness is more than 0.1

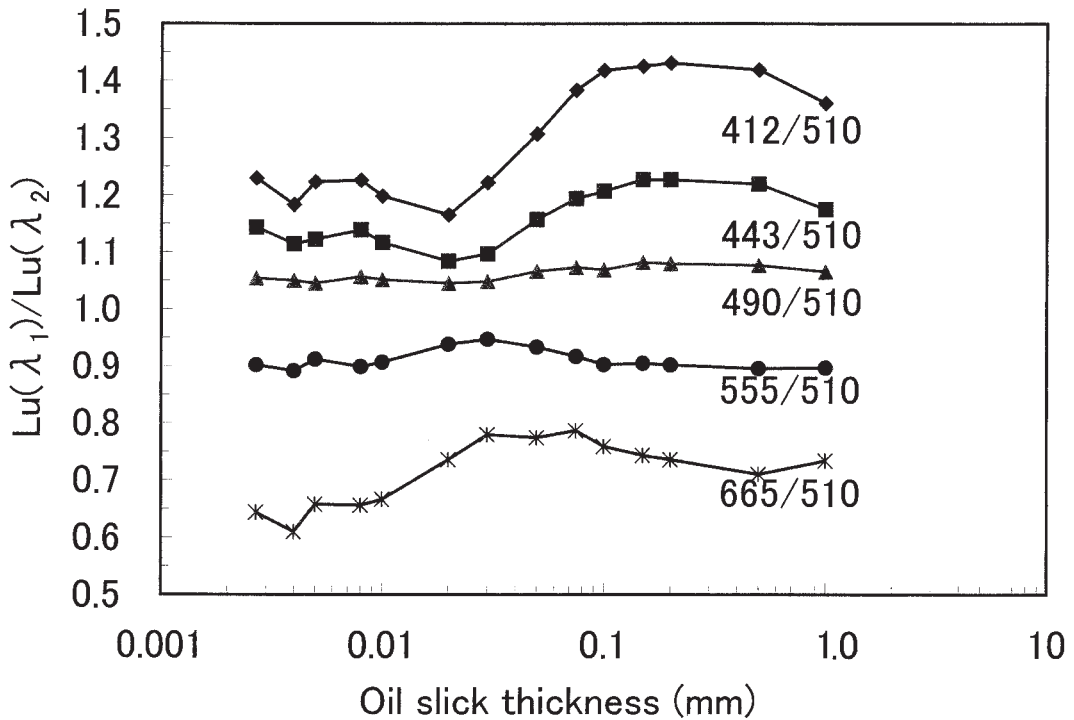


Fig. 6. Relationships between ratio of upward radiance at two wavelengths and oil slick thickness.

mm and it is less than 1.2 if the thickness is less than 0.02 mm, showing a great difference. Therefore, the applicable regression line can be determined easily if we take the ratio of the upward radiance and downward irradiance at two wavelengths, 412 and 510 nm.

3-3. Oil slick thickness for leaked heavy oil in the Sea of Japan

One of the pictures of *in situ* oil slick in September 1997 is shown in Fig. 7. This leaked oil was from the bottom of the sea, which was approximately 2500 m deep. The elapsed time after the leak from the boat hold was unknown. In the visual observation, the width of major oil slick was 300 m and the length was 1.2 km (HAMADA and AOYAMA, 1999). The oil slick was shiny, and it was obvious that the radiance in the region was much higher than that of the surrounding water.

Water temperature and salinity of the surface layer for surveyed sea area are 25.1–25.3 °C and 32.3–32.6 psu, respectively. Both the water temperature and salinity do not change

down to the depth of 30m, indicating a mixed layer. A permanent thermocline is observed from the depth of 30m to approximately 300 m. The temperature decreases gradually below thermocline, reaching 0.5 °C at the depth of 500 m. On the other hand, the salinity increases gradually and reaches 34.4 psu at the depth of 100 m, and there is almost no change below that (MAEDA *et al.*, 1999).

The observed values for the oil slick are tabulated in Table 2. The upward radiance is divided by the downward irradiance and the relative values are used. Since the values of Lu/Ed (412)/ Lu/Ed (510) are in the range of 1.01–1.12 and they are smaller than 1.4, the equation $Y = aX^{-0.0637}$ is used for the calculation. Here Y is Lu/Ed (510) of oil slick and X is oil slick thickness (mm). The value of a is calculated using that Y is 0.0192 and X is 0.102 in 1997, and that Y is 0.0100 and X is 0.102 in 1998. It becomes to be 1.66×10^{-2} in 1997, and to be 8.64×10^{-3} in 1998. Based these values, the each thickness of oil slick a, b, c, d and e is estimated to be 9.2×10^{-5} , 2.2×10^{-4} , 1.4×10^{-2} , 1.7×10^{-2}

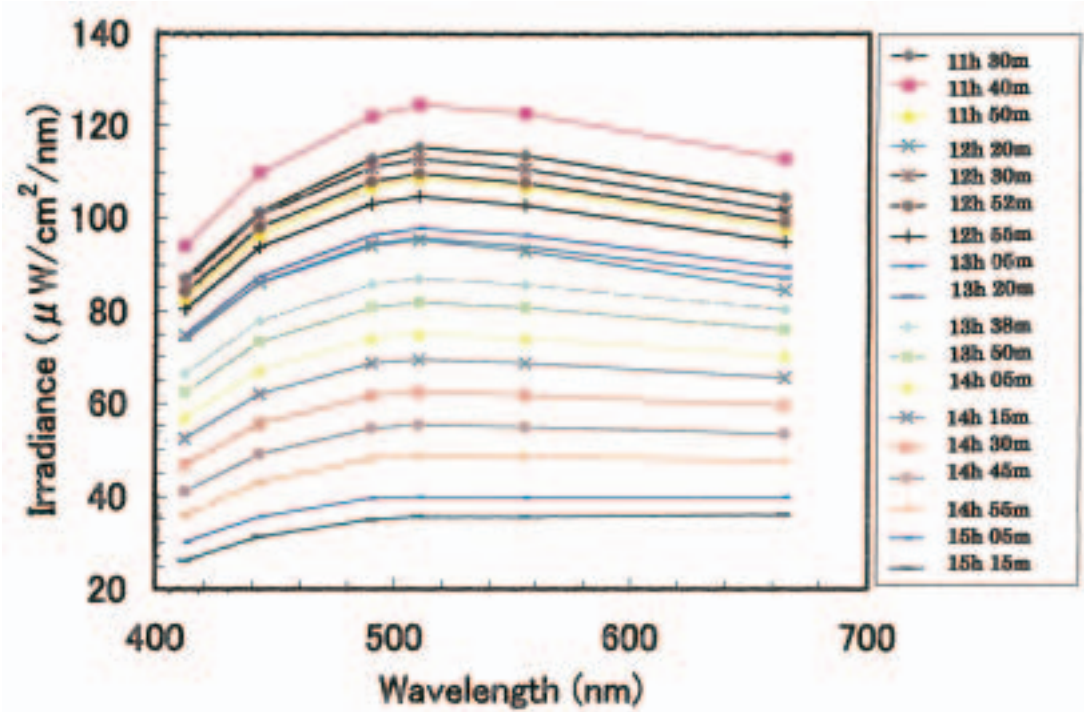


Fig. 3. Distribution of downward irradiances of the sun and sky. The numerals outside the figure indicate the time of each measurement.

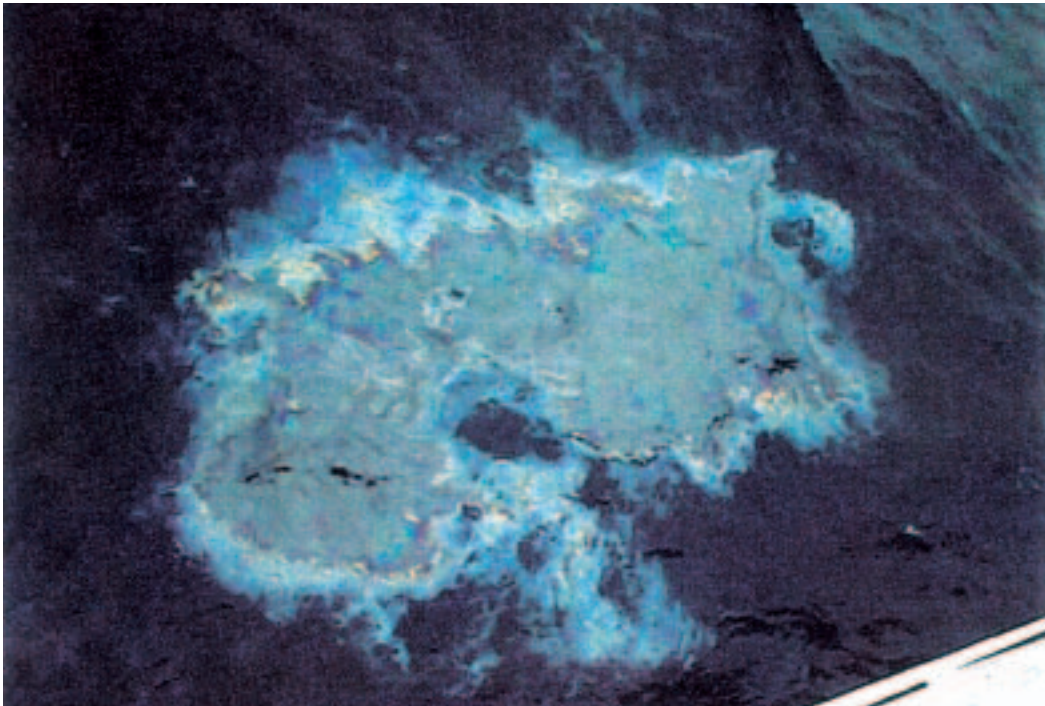


Fig. 7. Picture of *in situ* oil slick observed at September 11 in 1997. This was photographed on board by Prof. Hamada Yoshiyuki of Tokyo University of Fisheries.

Table 2. *In situ* measurement data for the oil slick in 1997 and 1998. *Lu*: upward radiance of oil slick. *Ed*: downward irradiance of oil slick. *Lu**: upward radiance of sea water. *Ed**: downward irradiance of sea water 412, 510: wavelength (nm)

Observation Month&Year	Site	Lu/Ed		Lu/Ed(412)	Lu*/Ed*(510)
		412nm	510nm	Lu/Ed(510)	
Sep.in 1997	a	0.0308	0.0300	1.02	0.0192
	b	0.0294	0.0284	1.03	0.0192
	c	0.0232	0.0218	1.06	0.0192
Sep.in 1998	d	0.0126	0.0112	1.12	0.0100
	e	0.0220	0.0216	1.01	0.0100

and 5.7×10^{-7} mm, respectively. However, the thickness values that are in the range of experiment are the oil slick c of 1997 and the oil slick d of 1998. Accordingly, they are estimated 0.014 and 0.017 mm, respectively. The estimate for the oil slick b of 1997 is considered to be accurate judging from the visual observation. Other thickness values are extremely thin. It is unknown if this is due to unique dispersion by the long term wave effect or due to a change of oil properties after a long time of the leak from the boat hold. If the properties of oil are different, the above correlation equations may not be applicable. This will be investigated in the future.

Acknowledgements

The present investigation is a part of the special research project in Tokyo University of Fisheries, "Investigation for the Effect of Heavy Oil Leak Incident in the Sea of Japan". The authors express their sincere appreciation to the project leader, Professor MAEDA Masaru, the investigators, and also the captain, TAKASU Yasusuke of the RT/V Umitakamaru and his crew at Tokyo University of Fisheries for their cooperation during the oceanic investigation.

References

- BROWN, C.E., M. FRUHWIRTH, M.F. FINGAS, R.H. GOODMAN, J. MULLIN, G. VAUDREUIL, J.P. MONCHALIN, M. CHOQUET, R. HEON, and C. PADOLEAU (1995) : Absolute measurement of oil slick thickness: Why do we need to know and how can we achieve it?., Proc. 3rd Themat. Conf. Remote Sens. Coast Environ., 1995, Vol.1, p. I.491-I.500.
- CHUBAROV, V.V., T.A. DEYDAN, V.V. FADEEV, and P.S. PETROV (1995) : New remote laser method for measurement of oil slick thickness on water

surface., Proc. 3rd Themat. Conf. Remote Sens. Coast Environ., 1995, Vol.1, p. I.433-I.440.

- FORNACA, S., H.H. AGAVANTE, B.I.HAUSS, P.S. LEE, M.S. MUSSETTO, J.S. PEARLMAN, B.H. STARK, S. TALMADGE, and A. VALLES (1995) : Remote oil spill sensing system (ROSS)., Proc.3rd Themat. Conf. Remote Sens. Coast Environ. 1995, Vol.1, I.473-I.479.
- HOVER, G.L. and J.V. PLOURDE (1995) : A nighttime evaluation of infrared sensors over the Santa Babara oil seeps., Proc. 3rd Themat. Conf. Remote Sens. Coast Environ. 1995, Vol.1, I.7- I.17.
- HAMADA, Y. and C. AOYAMA (1999) :Acoustic measurement of sunkenTanker Nakhodka and heavy oil slick. Cruise Reports. No. 8, 26-29, Tokyo University of Fisheries. (in Japanese).
- KATSURAGI, K. (1999) : The studies of the social-economic and natural resource damages on the Japan Sea shoreline by the Nakhodka oil spill and the subsequent cleanup treatment activities. 182pp. Liaison Center for the round Japan Sea of Toyama University, Toyama, (in Japanese).
- MAEDA, M., J. YOSHIDA, S. HASHIMOTO, H. ARAKAWA, I. KASUGA, Y. MINE, A. NODA, K. IIDA, K. SATO and M. SHOUJI (1999) : Effect of heavy oil from sunken Nakhodka to the marine environment off Okinoshima in the Japan Sea. Cruise Reports, No. 8, 30-32, Tokyo University of Fisheries. (in Japanese).
- MORINAGA, T., H. ARAKAWA, H. SATOH and K. MATSUIKE (1992) : Colors of submerged objects observed from a view point above the sea surface. La mer, 30 (4), 349-363.
- MORINAGA, T. and H. ARAKAWA (2000) : Distribution of underwater irradiances and estimated light attenuation by oil slick in the ROPME Sea area. La mer, 37 (4), 173-181.
- SATO, M. (1960) :Physics 1, Baifukan, Tokyo (In Japanese).
- TSENG, W. T. and L. S. CHIU (1994) : AVHRR Observations of Persian gulf oil spills., IGARSS, 1994, No. 2, p. 779-782.

Received July 3, 2002

Accepted September 28, 2002

津軽海流域の断面構造の季節変化と 津軽海流の前駆水について

永田 豊*・小熊幸子*・鈴木 亨*・野澤清志**

Seasonal variation of vertical structure of Tsugaru Current area and forerunner of Tsugaru Current

Yutaka NAGATA, Sachiko OGUMA, Toru SUZUKI and Kiyoshi NOZAWA

Abstract : Seasonal variation of vertical structure of Tsugaru Current area and forerunner of Tsugaru Current were discussed using observation data obtained by Iwate Fisheries Technology Center from 1971 to 1995. Vertical distributions of monthly mean temperature and salinity showed that Tsugaru Current presents all year around, and temperature front of Tsugaru Current becomes clear from June to October. It was also indicated that forerunner of Tsugaru Current appears in March and April, which was formerly suggested by UENO and YAMAZAKI (1987). However, clear forerunner of Tsugaru Current appeared only 3 times during targeted 25 years, while that of Soya current arrives from March to May every year.

Keywords : Tsugaru Current, Forerunner, Seasonal variation

1. はじめに

OGUMA *et al.* (2002) は、1971年から1995年までの岩手県水産技術センターの4本の沿岸観測定線の観測資料をもとにして、津軽海流の季節変化を論じた。その議論は津軽海流や親潮第一分枝が明確に現われる100m水深と、それらがほとんど現われない200m水深との水温・塩分の月平均の水平分布を中心に行われた。上野・山崎(1987)は同じ岩手県水産技術センター資料から、トドヶ崎観測定線の1976年から1985年までの10年間のデータを用いて、月平均の水温・塩分の断面分布を描き、その季節変化を論じ、種々の興味ある現象を指摘している。この論文では、OGUMA *et al.* (2002)と同じ25年間の資料を用いて、4本の定線の水温・塩分の月平均断面構造を示し、その季節変化の特性を明らかにする。

上野・山崎(1987)も指摘しているが、1つの特徴的な季節特性として、3月および4月の断面で陸棚上の底

近くに高温・高塩分水が潜り込む形で存在することが示される。同様の現象はオホーツク海の宗谷海流の初冬および春先に見られ、TAKIZAWA (1982)は春先に現れる底層の高温・高塩分水を宗谷海流の前駆水と名付けて論じている。津軽海流においては、高温水の沈み込みは毎年観測されるとは限らず、底層ではなく中層に現れることもある。しかし、その生起は季節が限定されており春先のみ現れ、宗谷海流の前駆水に対応するものと考えられる。ここでは、月々の断面構造に戻って、この津軽海流の前駆水の生起特性を論ずることとする。

従来、三陸沖の津軽海流の特性は比較的良く調べられている。しかし、それ以南では、津軽海流は金華山付近では認められないことが分かっているもの、津軽海流の南限あるいは終末域の特性に付いては全くと言ってよいほど議論されていない。上述の解析の結果から、津軽海流の南限域に付いて幾つかの示唆を得ることが出来たので、これについても述べる。

2. 使用したデータ

岩手県水産技術センターでは、1963年から、Fig. 1に示す4本の沿岸観測定線に沿って、月一回の割合で海洋調査を行っている。特に1971年に高精度の塩分計が導入されてからの観測精度は高く、観測点の位置決め精度もこの頃から格段に改善されている(小熊ら, 1999)。こ

* (財)日本水産協会海洋情報研究センター、〒104-0061 東京都中央区銀座7-15-4 三島ビル5F.

Marine Information Research Center, Japan Hydrographic Association, 7-15-4 Ginza, Chuo-ku, Tokyo, 104-0061, Japan

** 岩手県人事課、〒024-8570 岩手県盛岡市内丸10-1. Iwate Prefecture, 10-1, Uchimaru, Morioka, Iwate, 024-8570, Japan

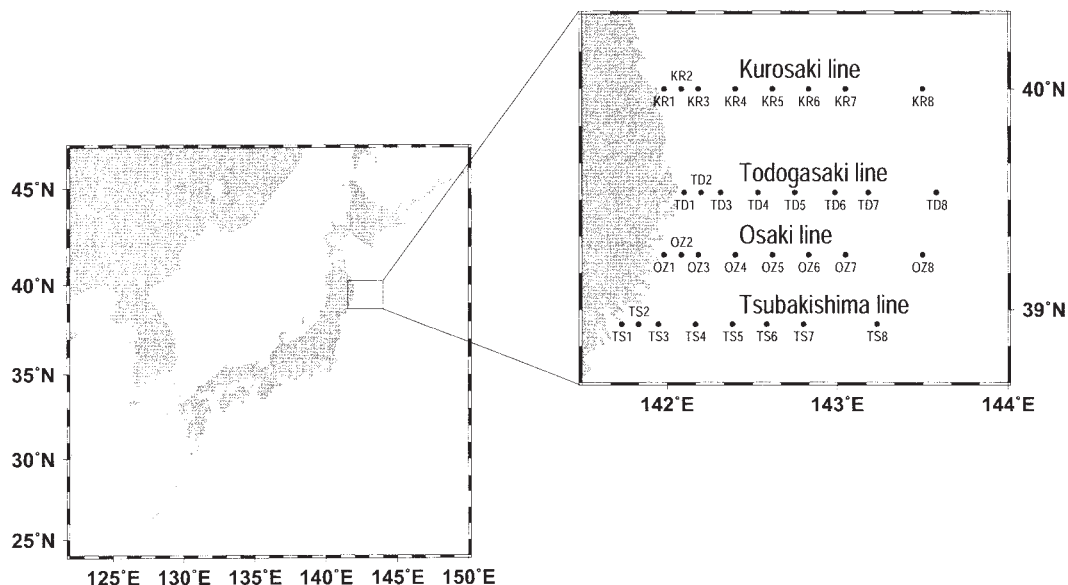


Fig. 1. Distribution of the observation points along routine Coastal Observation Lines of the Iwate Fisheries Technology Center. The lines are called Kuroasaki Line, Todogasaki Line, Osaki Line and Tsubakishima Line from north to south.

ここでは、1971年以降1993年までの観測資料について、海洋情報研究センターが品質チェックを行ったデータベース、MODS2001 (MIRC, 2001) を使用し、さらに、1994年、1995年の資料を同様な品質チェックをおこなって追加し、全体として25年間のデータを用いた。なお、津軽海流前駆水の出現の有無については、それ以後も2001年まで、岩手県水産技術センターが毎月発行している「沿岸定線観測結果」によって調べた。

3. 月平均水温・塩分の断面構造の季節変化

1971年から1995年までの25年間の観測資料から、4つの岩手県水産技術センターの沿岸定線について月平均の水温・塩分断面を求めた結果を、水温について Fig. 2 に、塩分については Fig. 3 にそれぞれ示す。個々の月の海況の変化を見ると、空間的な変動も大きく、また月毎の変動も激しく、隣り合う月の海況を連続的に追うことは出来ないのが通例である。したがって、海況の季節変化の存在は明確でも、その季節変動パターンを見ることは難しい。しかし、Fig. 2 や Fig. 3 の水温・塩分の月平均分布の形状は、各測線の分布形状が互いに良く似ており、また、季節変化も明確に示し得ている。これは、25年の統計値をとることによって季節変動の本質的な特性を表現することが可能になったためと考えられる。

Fig. 2 の水温断面図において、全ての季節、全ての測線について、陸棚付近において左下がりの等温線の傾きが見られるが、Fig. 3 で、この部分は比較的高塩分になっており、津軽海流系の高塩分・高塩分水が沿岸近くに存在

していることが分かる。個々の月の断面では、特に2月を中心とした冬季では、津軽海流系の水が沿岸域にも認められないことが少なくないが、月平均断面分布を見る限り、四季を通して津軽海流が継続して存在していることになる。しかし、月平均分布図でも津軽海流の現われ方には著しい季節変化が見られ、厳冬期にはその存在は不明確であるが、6月から10月の強勢期には非常に明確となる。これは OGUMA *et al.* (2002) の示した100m深の水平断面水温・塩分の季節変化に良く対応している。津軽海流域の最低水温値は4月に現われ、6℃近くまで下がる (OGUMA *et al.*, 2002)。

季節変化に現れる1つの特異的な構造として、北側の2測線である黒崎・トドヶ崎において陸棚上の底に張り付いた形で高温の水が春先(3月)に認められることが挙げられる。このような底層暖水は上野・山崎(1987)のトドヶ崎における10年間の統計結果にも示されている。この沈み込んだ暖水層に関しては、宗谷海流の前駆水 (TAKIZAWA, 1982) と対応させながら、次節に論じることとする。

各月、各測線で津軽海流域の沖側において、等温線がドーム状に盛り上がっている様子が見られる。等塩分線については、100 m 深付近に沖合から比較的高塩分の水が貫入してくるような現象が見られ、ドーム形状は明確ではないが、一般に水温のドーム状の部分では岸寄り、あるいは沖合寄りの水よりも低塩分になっている。この等温線の盛り上がり部分が、親潮第一分枝に対応している。岩手県水産技術センターの沿岸定線は、このド

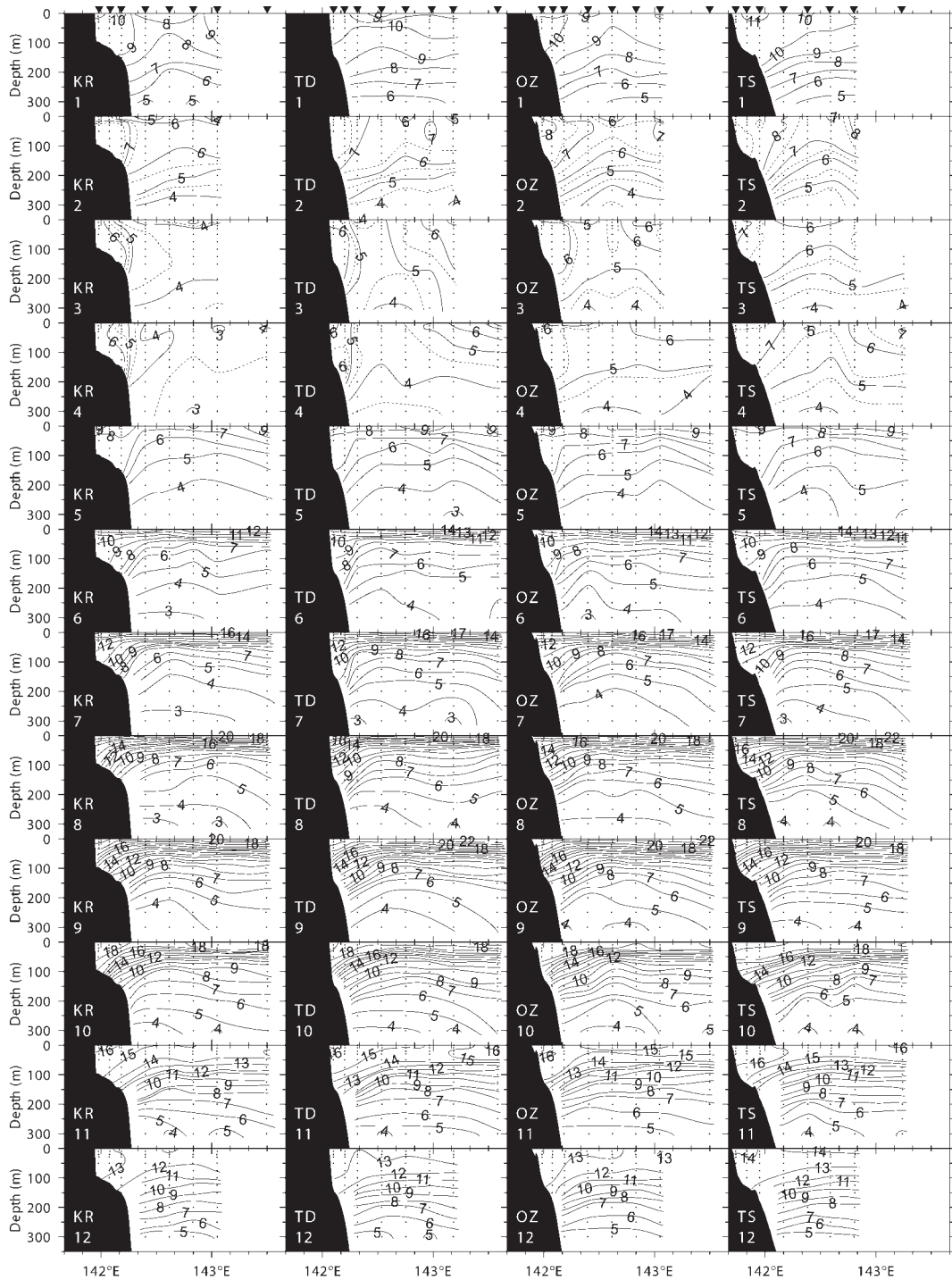


Fig. 2. The monthly averaged temperature fields along Kurosaki Line (leftmost figure), Todogasaki Line (left middle figure), Osaki Line (right middle figure), and Tsubakishima Line (rightmost figure). The fields are given from January to December downward from top. Numerals attached to isotherms indicate temperature in $^{\circ}\text{C}$ (supplementary isotherm of 0.5°C is given for the field in February, March and April).

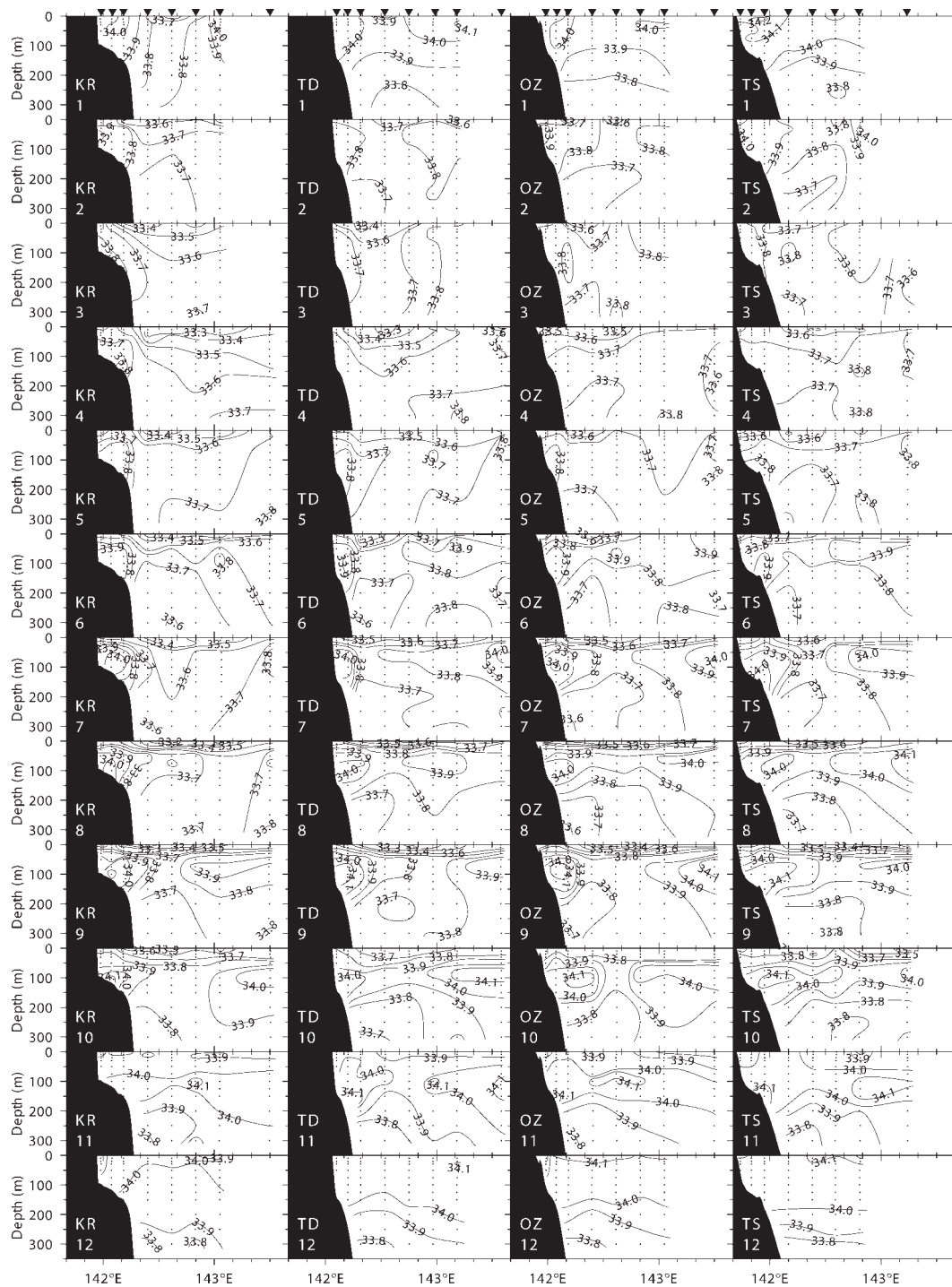


Fig. 3. Same as in Fig. 4 except for isohalines in psu.

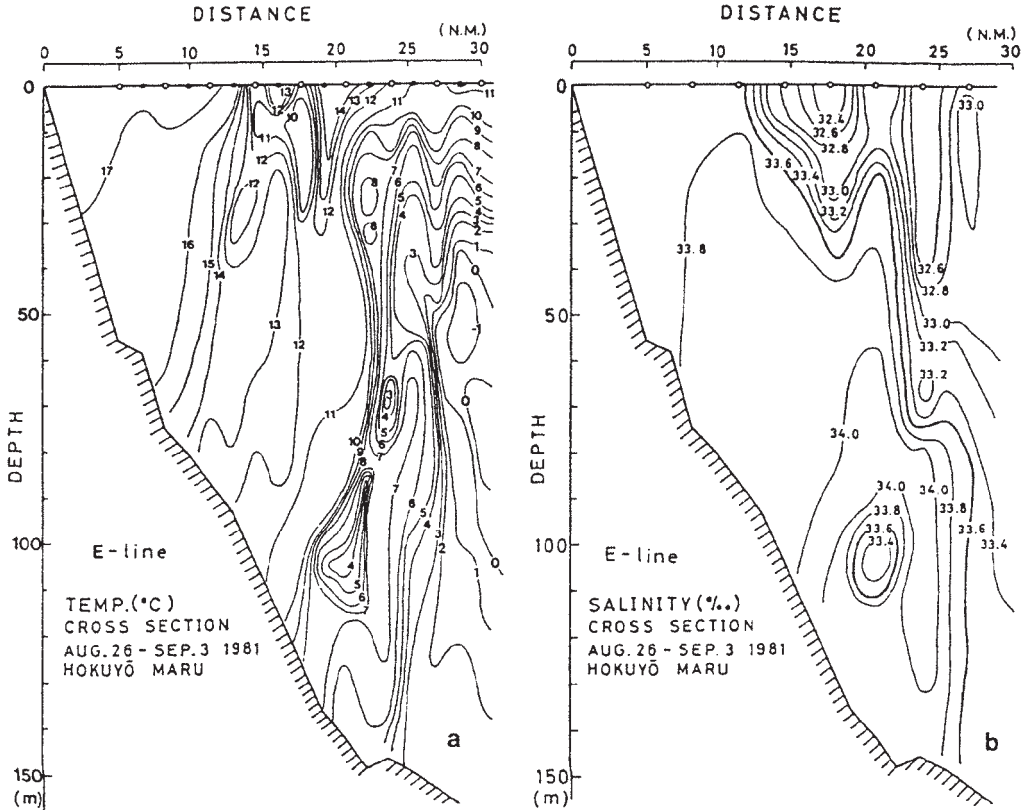


Fig. 4. Cross-sectional distributions of temperature ($^{\circ}\text{C}$: left) and salinity (psu: right) along the line extending northeast off Mombetsu on 26 August–3 September, 1981 (MOTOI *et al.*, 1982).

ム状の水温分布を十分捉えられるように設定されており、同センターの観測の主要目的が、この海域での漁況に最も関係する親潮第一分枝のモニターにあることが見て取れる。

各測線の分布を比較すると、津軽海流の幅、すなわち沿岸から水温フロントまでの距離が、陸棚の幅の最も狭いトドヶ埼定線から南端の椿島定線に向かって広がっていく傾向がある。同様の傾向は塩分分布特性にも現れており、その著しい例は10月の月平均塩分の34.0 psuの等値線に見ることが出来る。また、津軽海流域の水温がトドヶ埼から南に向かって上昇する傾向が見られる（このことは水温の低い2月～4月の水温分布において、特に明確である）。これらのことについては、津軽海流の末端域の特性として節を改めて論じることとする。

4. 津軽海流の前駆水

4.1 宗谷海流の前駆水との対比

海底近くへの暖水の沈み込みはオホーツク海の宗谷海流域に、より顕著に認められる。宗谷海流も、津軽海流と同様に、日本海の対馬海流の水が海峡を通して亜寒帯

水域に流入することにより生じている。宗谷海流の場合には、流入する対馬海流水と周辺のおホーツクの水の間のコントラストが大きく、周辺水との間に津軽海流の場合よりシャープなフロントを形成する。Fig. 4にその一例を示すが（本井ら, 1982）、沖合の中冷水との間に形成されるフロントを挟んで夏季での温度差、塩分差はそれぞれ 10°C 、0.8 psuを超えることがある。宗谷海流は顕著な季節変動を示し、厳冬期には対馬海流系の高塩・高塩分の水は全く認められなくなる（例えば、青田, 1971, 1975）。宗谷海流水はその高塩分性のため、しばしば低塩分の水の下に潜り込む傾向があるが、特に、消滅前の11月～12月、流氷明け後の復活期の3～5月には、暖水がFig. 5のように陸棚底部に張りついた形で存在する（WAKATSUCHI and OSHIMA, 1990）。TAKIZAWA (1982)は宗谷海流水の季節変動を調べ、復活直後の陸棚域底層に現れる暖水の塩分が34 psu前後の値を持ち、宗谷海流水の特性を持つことを示した。しかし、その水温は顕著に低く、一般の宗谷海流水とは著しく異なっており、特徴的な水系を持つことから、この水を宗谷海流の前駆水（フォアランナー）と定義している。

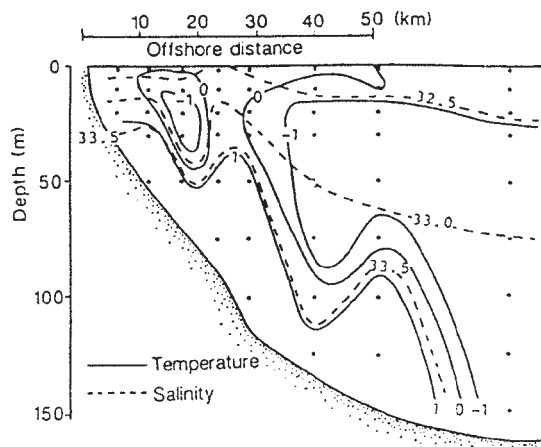


Fig. 5. Cross-sectional distribution of temperature ($^{\circ}\text{C}$: full line) and salinity (psu: dashed line) along the line extending northeast off Mombetsu in late April, 1984. (WAKATSUCHI and OSHIMA, 1990). Forerunner of the Soya Current can be seen above the bottom slope.

津軽海流の場合、周辺水との間の水温・塩分差のコントラストとは宗谷海流に比べて小さく、宗谷海流のような顕著な沈み込みは見られない。前節で示した平均断面分布の3~4月に現れる陸棚上の底層暖水は、個々の月の断面では毎年現れるとは限らず、また底層ではなく中層に現れることもある。この暖水は周辺水より高塩分であり、密度的には安定成層となっている。この水の出現は、例外なく春先にのみ限られており、宗谷海流の前駆水に対応したものと考えることが出来る。この節では、この沈降した津軽海流の暖水を、津軽海流の前駆水と考え、その現われ方について考察する。

4.2 津軽海流の前駆水の定義

宗谷海流の前駆水と異なり、津軽海流の前駆水は毎年現れるとは限らず、その水温・塩分も年によって異なるため、TSダイアグラム上にその水系の分布範囲を特性的に論じ難い。Fig. 3に見られるように塩分の月平均断面分布は、水温に比べて複雑であり、1月を中心とした厳冬期には余り見られないが、表面近くに薄い低塩分層が見られることが多い。これは陸水の影響と考えられるが、オホーツク海の流水の溶けた水を起源とする非常に低塩分の沿岸親潮水（大谷，1971）の影響も考えられる。厳冬期に見られないのは、季節風による混合、表面冷却に伴う対流のためであろう。この表面低塩分水層に影響されて表層下部に塩分極大が形成される。これとは別に、塩分場には50~100 m深を中心、塩分の極大層がしばしば現われる。この塩分極大層は、途中で親潮第一分枝によって分断されることもあるが、全体としては観測

Table 1. Occurrence of the forerunner of the Tsugaru Current along four observation lines in April in the period from 1971 to 2001. Circles indicate that clear subsurface warm and saline layer appeared, triangles that some signature is observed and crosses that no subsurface warm layer is recognized over the continental shelf.

	Kurotsaki line	Todogasaki line	Osaki line	Tsubaki shima line
1971	○	○	○	×
1972	△	×	×	×
1973	○	○	×	×
1974	○	○	○	○
1975	△	×	×	×
1976	○	○	○	×
1977	×	×	×	×
1978	△	○	△	×
1979	×	×	×	×
1980	×	×	×	×
1981	○	○	○	×
1982	○	○	△	×
1983	×	×	×	×
1984	×	×	△	×
1985	○	○	×	○
1986	○	○	○	○
1987	○	○	○	×
1988	×	△	×	×
1989	○	○	○	○
1990	×	×	×	×
1991	×	×	△	×
1992	×	○	×	△
1993	×	×	×	×
1994	×	○	×	×
1995	○	○	○	×
1996	○	○	○	×
1997	×	×	△	△
1998	○	×	△	△
1999	×	×	×	×
2000	△	○	×	×
2001	○	△	○	×

範囲外の沖合から岸近くまで続いていることが通例で、この水は津軽海流とは別起源の大規模な現象と考えられる。水系としては区別できないが、親潮第一分枝の沖側から侵入してくる黒潮系の水に基づくものであろう。月平均図 (Fig. 2) では、黒埼定線の3月にその例が認められる。この断面では、沿岸に津軽海流による暖水があり、それから沖に延びているように見える。しかし、個々の月の水温断面では、岸の暖水が見られず、沖合のみに水温極大が現われることも少なくない。そこで前駆水の

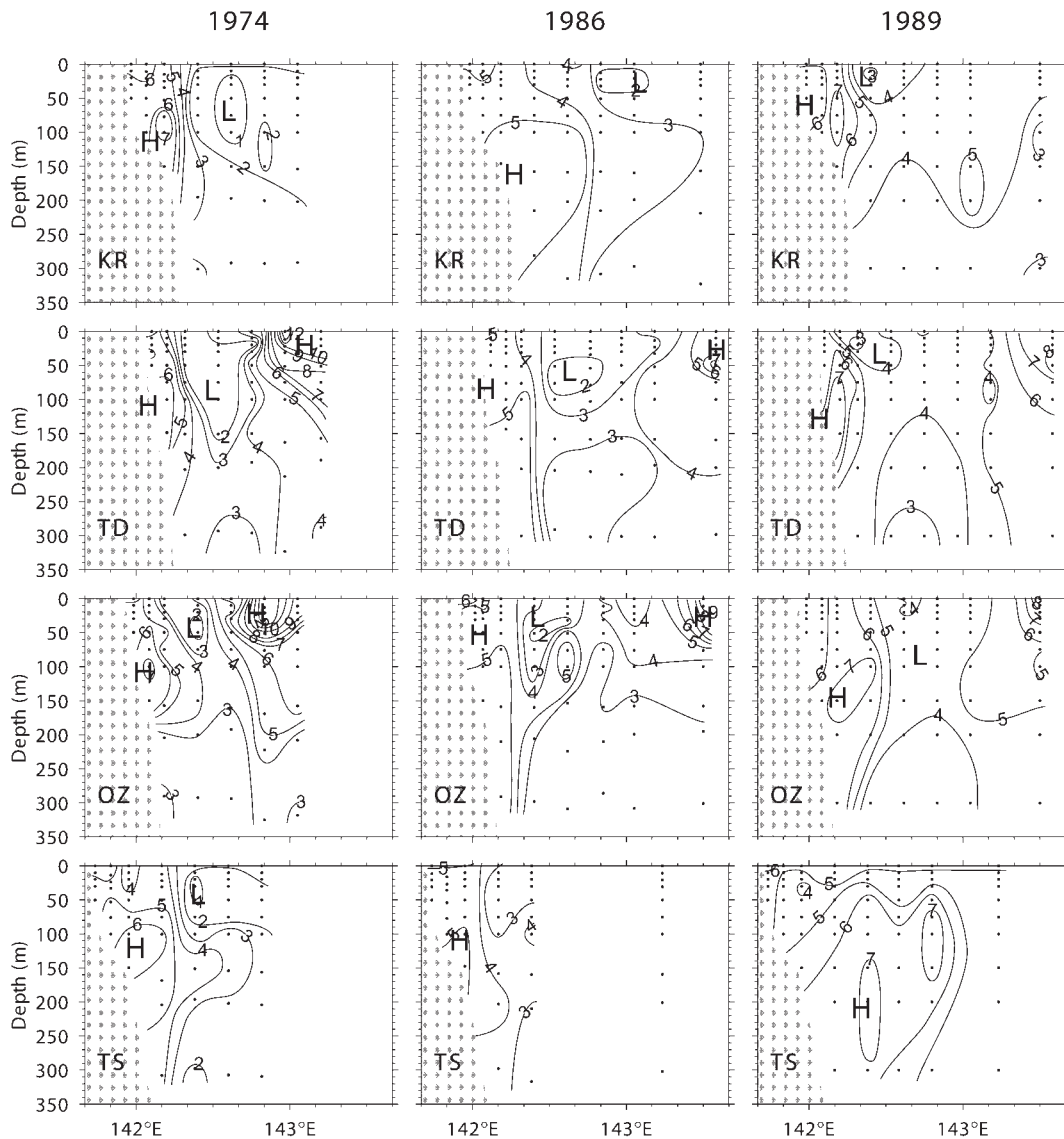


Fig. 6. Cross-sectional temperature distributions along Kurosaki Line (KR: the first row), along Todogasaki Line (TD: the second row), along Osaki Line (OZ: the third row) and along Tsubakishima Line (TS: the fourth row) in April 1974 (left figures), April 1986 (middle figures), and April 1989 (right figures). Isotherms are given at 1 °C interval. Numerals attached to isotherm indicate temperature in °C.

出現の有無を調べる場合、陸棚上を中心に考え、沖合に現われる大規模な水温極大層は除外した。また、表層に現われる低塩分層の存在や、塩分分布の複雑さから、前駆水の解析には主として水温断面を用いて、陸棚域で中・底層に現れる水温極大が存在する場合に、前駆水が存在すると定義した。

4.3 前駆水の出現頻度

まず、予備的に岩手県水産技術センターが毎月発行している「沿岸定線観測結果」を1971年以後について調べて、沿岸陸棚傾斜の海底付近に、暖水層が何月に現われるかを調査した。暖水は必ずしも海底に接しているとは限らないが、中層に現われてもその上部に顕著な水温逆転をとまなうものは考慮の対象とした。このような暖水

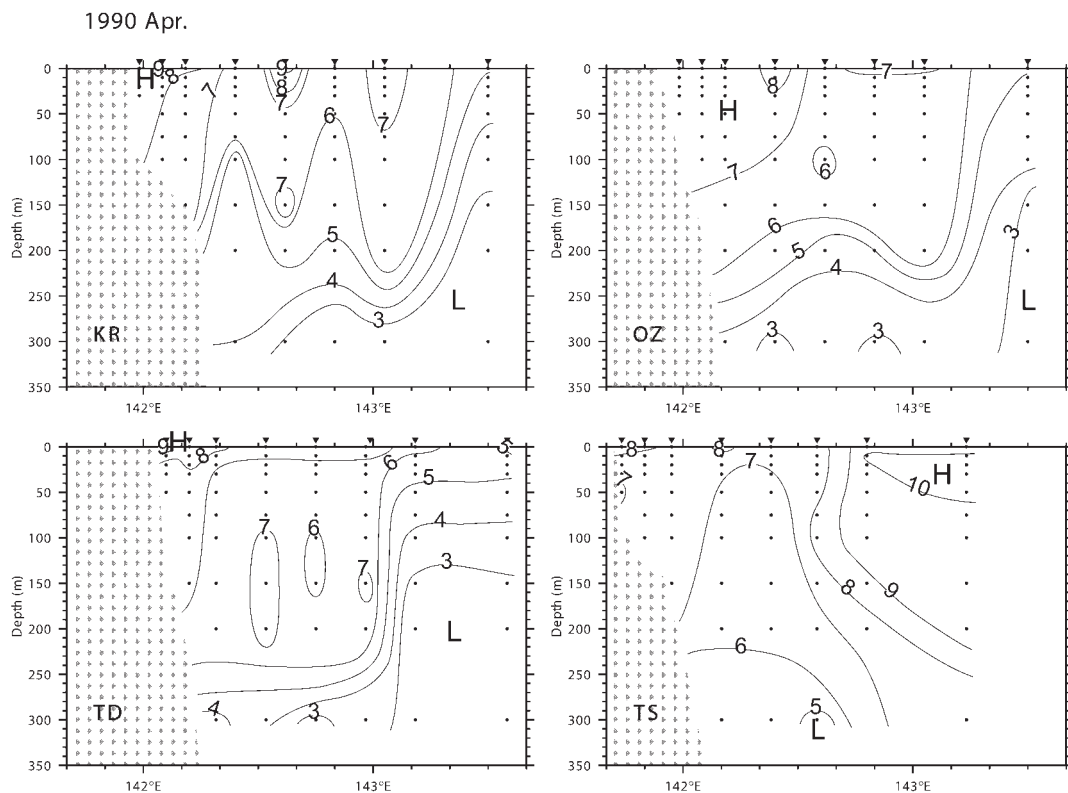


Fig. 7. Cross-sectional temperature distributions along Kurosaki Line (KR: upper left), along Todogasaki Line (TD: lower left), along Osaki Line (OZ: upper right) and along Tsubakishima Line (TS: lower right) in April 1990. No forerunner can be seen in this year.

層は、毎年現われるものではないが、顕著な暖水層の出現は圧倒的に3月、4月に多いことが分かった。一般に、4月の方が明瞭に認められることが多く、また3月に現われる場合は、引き続いて4月の断面でも認められた。そこで、ここでは各年の4月の断面に注目して、その出現年を調べることにする。

「沿岸定線観測結果」の断面図は、速報であることと、特に暖水層を意識して作られてはいないので暖水層の近くの等温線・等塩分線の引き方に若干不自然な場合が見られる。そこで、各年の4月を中心に、MODS2001等のデータベースを基に、4つの観測断面について等温線・等塩分線を引き直し、中・底層の暖水層の有無を調べた。ここでは陸棚・大陸傾斜が400 m以浅に現われる各観測線の岸側4測点に注目して、そこに現われるものだけを津軽海流の前駆水と考えることにする。前駆水ともななって現われる中・底層の暖水層の形状は宗谷海流の前駆水のように明確な形をとると限らず、また水温逆転の規模から暖水層とすべきかどうか判定し難い場合がある。そこで、明確な場合（丸印）、不明確であるが存在すると思える場合（三角印）、明らかに存在しない場合（バ

ツ印）に分けて、出現の様子を示したものがTable 1である。

4つの測線全部に前駆水の兆候が見られなかった年が、1977年、1979年、1980年、1983年、1990年、1993年、1999年と解析した30年間で1/5を越す7回あった。すでに述べたように、これは宗谷海流の前駆水との大きな違いである。明確な前駆水が見られた頻度は、一番北の黒埼定線で14回、トドヶ埼定線で16回、尾崎定線で10回、樺島定線で4回、不明確なものを含めると、北からそれぞれの定線で、18、18、16、7回となる。トドヶ埼定線の所で陸棚・大陸傾斜の幅が最も狭くなっており、ここを境に南側では南に向かって前駆水の出現頻度が低下する傾向が見られる。複数の定線で出現が見られた場合において、それらの出現は1ヶ月間隔の観測においては同時期に起こっている。

4.4 全定線に前駆水が見られた例

4つの定線全部に明確な前駆水が見られたのは1974年、1986年、1989年の3回である（Table 1）。それぞれの年の4月について、4つの断面における水温断面をFig. 6

Kuroski line, 1981 Jan-Jun

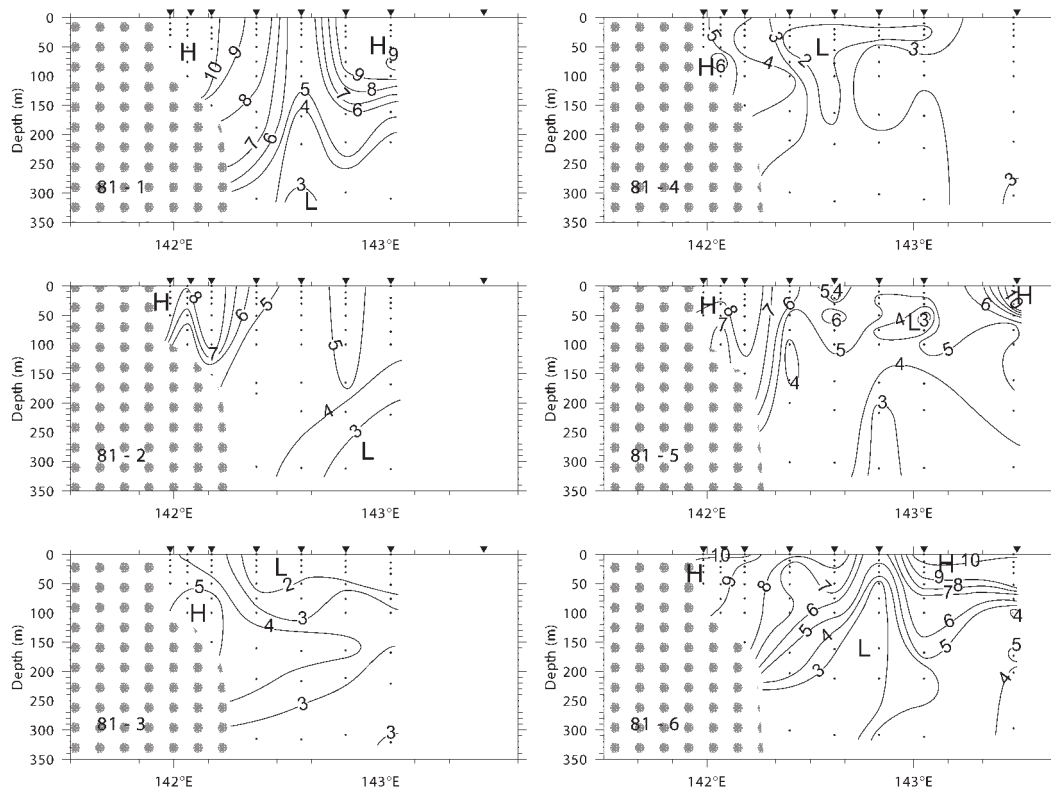


Fig. 8. Temporal variation of the cross-sectional temperature distribution along Kuroski Line from January to June, 1981.

に示す。1986年の分布は典型的な例で、各測線ともに、最高温度は海底近くに現われている。他の年では、水温の極大は中層に現われる場合も多い。1989年4月の場合、尾埼定線から樺島定線へと暖水のコアが沖方向に移動し、広がっているのが見て取れる。この樺島定線の水温断面構造で、沈降暖水の外縁の5°Cの等温線が陸棚底に達しており、陸棚の底近くで僅かに水温極大を示しているの、我々は前駆水有りとしている。しかし、この点を除くと、前駆水が不明確として三角印を付けた場合とほとんど同じ形状である。後に述べるように、樺島定線付近で津軽海流が岸を離れる可能性があるとするれば、前駆水の定義をこの定線では若干変更する必要があるかもしれない。前駆水の定義の難しさを示すものであるが、1989年の事例は、北側の尾埼定線の断面形状の類似性からも、前駆水有りと判断するのが妥当であると考えている。

4.5 前駆水の認められない例

前駆水が全く現われなかった年は、解析した31年間のうち、前述のように7年あった。不明確な暖水が1定線

のみに現われ、他測線に認められなかった5年を加えると39%に近い年には前駆水が現われていない。その1例として1990年4月の断面構造をFig. 7に示す。前駆水の見られない場合の構造は互いに似ているので、ここでは1例のみを示すとどめる。この1990年の場合、4月に既に明確な津軽海流水が沿岸近くに存在しており、前駆水が出現する余地が無かったとも考えられる。解析中に、厳冬期にも津軽海流が存在する年には前駆水が現れ難いという印象を持ったが、実際には3月、4月の海況そのものが前駆水の出現の有無を決める要素になっているようで、厳冬期の海況との関連を統計的に示すことは出来なかった。

4.6 春先での海況変化の例

すでに述べたように、月々の海況の変化は津軽海流域では一般に非常に大きく、1ヶ月間隔の観測では、一般に変化を追うことは難しい。比較的連続性のある場合の例として、1981年の黒埼定線における1月から6月までの水温断面の変化をFig. 8に示す。この年には、厳冬

期の1月、2月にも、明らかに津軽海流系の高温・高塩分の水が岸近くに認められ、津軽海流は消滅していない。この年の3月、4月には中層ないし底層に暖水層が現われている。この場合は、Table 1において、我々は前駆水が認められたとカウントしている。3月の水温分布を見ると、前駆水の潜り込みと言うよりは、沖合から表層に低温低塩分の水が侵入して、底部に暖水層を構成したと見られなくもない。しかし、この例でも、月毎の断面変化が連続的に起こっているとは言えない。例えば、3月の陸棚上暖水の水温は5℃程度であり、2月の水温よりも1℃程度下降しているため、同一の水塊であるかどうか明確でない。4月により高温の暖水が中層に見られ、この水は北方から新たに津軽海流系の水が中層に潜り込んで来たことを示している。周辺の低温・低塩分水が表層に侵入してきたのか、暖水が底層に侵入してきたかを区別することは、月1回の観測では判定は不可能である。しかし、周辺水の下に高温の水が見られるという点では同じであり、ここでは、その差違は論じない。

5. 津軽海流末端域の海況について

津軽海流の末端、あるいはその消滅域の議論は、過去にほとんど行われていない。少なくとも金華山以南の宮城県沖で津軽海流が認められた例はなく、岩手県沖の現在対象としている海域のすぐ南で消滅しているはずである。しかし、消滅域と考えられる海域での海洋観測密度が十分でなく、はっきりとした結論を得ることが難しい。ただ、OGUMA *et al.* (2002) は100 m 層の月平均水温の季節変化を調べて、北側3定線の津軽海流域の陸棚上の測点(測点2~3)の変化特性が沖側の測点(測点4~7)のそれと異なっていることを指摘している。そしてこの津軽海流域の特性が、最南端の樺島定線では、より沖合の測点5付近まで見られることが示されている(OGUMA *et al.* の Fig. 9)。岩手県水産技術センターの観測の各月の分布を調べると、観測範囲が限定されているため明確な結論は出せないが、親潮第一分枝の南への張り出しが弱い場合には、津軽海流がその南端を回るように沖合東方に流れ去っているように見える場合が少なくない。OGUMA *et al.* (2002) の結果は、津軽海流は樺島定線あるいはその南方で沖に転じ、黒潮の北側に沿って沖に出る可能性を示唆している。4.4節で論じた1989年4月の場合(Fig. 6)に、樺島定線で前駆水のコアが沖側にシフトした現象は、このことを支持しているものと考えられる。

津軽海流域の水温は、平均場においてもトドヶ崎から南に向かって高くなる傾向を示す(Fig. 2)。特に、低温期の1月~4月の分布では、樺島定線の津軽海流水の水温は、黒埼定線に比べて1℃以上高くなっており、これは大気からの加熱では説明できそうもない。面白いのは、Fig. 6の前駆水のコアの水温は1974年の分布で、黒埼と尾埼定線の最高水温値は7℃を超えていて、南の

定線よりも若干高温になっている他、1986年、1989年の場合には、コア水温は各定線でほぼ同じ値を示し、南に向かっての昇温傾向が見られないことである。これは前駆水の水が1つの水系の水として岸沿いに南下してきたと考えれば当然のことであろう。

樺島沿岸に高水温・高塩分の水が見出された時、「黒潮水の侵入」といった表現で沿岸定線観測結果などでは説明されることが多い。しかし、黒潮の流れが岸沿いにここまで直接北上することは、等温線の水平分布から考え難い。もし津軽海流水がその終端部で沖に運び去られるとするならば、岸近くの水が連行されて沖合に運ばれ、その後黒潮系水の影響を強く受けた水が南方から侵入してくることは十分考えられるところである。この点について明確な結論を得るためには、津軽海流の末端域の海況の精密な観測を行う必要がある。

6. おわりに

この論文では、月平均場を用いて、岩手県沖の東西断面での水温、塩分分布の季節変化の特性を論じた。そうして、解析期間を25年に延ばしても、上野・山崎(1987)が示した3月、4月に陸棚・大陸斜面上に現われる底層暖水が明確に示されることを確かめた。宗谷海流の前駆水にちなんで、この論文では津軽海流の前駆水と名付けたが、この暖水層は毎年現われる訳では無く、また、個々の年では中層に現われることもある。宗谷海流の前駆水とはかなり違った性質を持っているが、この前駆水は、津軽暖流が春先に復活、ないし強勢に転ずる時に発生する特性を持ち、発生する時期が季節的に限定されていることが特徴的である。前駆水が4月を中心として現れることは、津軽海流域での陸棚上の月平均水温の最低値がこの月に現れること(OGUMA *et al.*, 2002)と関係すると考えられる。TSダイアグラム上での等密度線は曲線を描くが、低温部分では、この曲線は温度軸に並行する向きをとる傾向がある。海水の沈降は密度に対する塩分の効果が、水温のそれを上回る必要がある。宗谷海流水は津軽海流水よりも低温であり、周辺水との塩分コントラストも大きい。そのため、宗谷海流においては底層暖水の出現がより明確に起こる。また、厳冬期に宗谷海流は完全に消滅するため、春先に前駆水の発生が特徴的に起こることになる。しかし、津軽海流の前駆水は、宗谷海流のそれほど顕著な現象とはいえない。したがって、1ヶ月という測定間隔は粗すぎて、津軽海流の消長を詳しく論じることは難しい。今後、より密度の高い観測が行われることが望ましいが、この論文の結果は、そのような将来の観測の計画に資するものと考えられる次第である。

謝辞

この論文は、岩手県水産技術センターの観測資料に基づいており、同センターの研究者、船舶乗務員の労苦に

負うところが大きい。また貴重なデータの提供を頂いたことに関して同センターに心からの感謝を表明する次第である。

引用文献

- 青田昌秋 (1971) : 北海道オホーツク海沿岸における海況変動の研究Ⅲ. 低温科学, 物理篇, **29**, 213-224.
- 青田昌秋 (1975) : 宗谷暖流の研究. 低温科学, 物理篇, **33**, 151-172.
- MIRC (2001) : MIRC Ocean Dataset 2001-Documentation. MIRC Technical Report No. 1, pp. 169.
- 本井達夫・小野延雄・青田昌秋 (1982) : オホーツク海・北海道沿岸に夏現われる冷水塊. 低温科学, 物理編 **41**, 199-206.
- 大谷清隆 (1971) : 噴火湾の海峡変動の研究. II. 噴火湾に流入・滞留する水の特異性. 北大水産学部研究彙報, **22**, 58-66.
- 小熊幸子・鈴木亨・永田豊・渡辺秀俊・山口初代・高杉知 (1999) : 海洋データセット作成・管理に際して発生し易い誤りと原因, —II 岩手県水産技術センターの事例と重複データの取り扱い—. 海洋調査技術, **11**, 11-18.
- OGUMA, S., T. SUZUKI, and Y. NAGATA (2002) : Seasonal Variations in the sea off Sanriku Coast, Japan. *J. Oceanogr.*, **58**, 825-835.
- TAKIZAWA, T. (1982) : Characteristics of the Soya Warm Current in the Okhotsk Sea. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **38**, 281-282.
- 上野康弘・山崎幹雄 (1987) : 三陸沿岸域における津軽暖流の季節変化. 東北水研研報, **49**, 111-123.
- WAKATSUCHI, M., K. I. OSHIMA (1990) : Observations of ice-ocean eddy streets in the Sea of Okhotsk off Hokkaido Coast using radar images. *J. Phys. Oceanogr.*, **20**, 595-594.

2003年6月5日受付

2003年10月3日受理

資 料

第 41 卷第 2・3 号掲載欧文論文要旨

山根武士*・河野 博*¹ : インドネシア, バリ島北岸の砕波帯と河口域に出現するヒメツバメウオの季節的变化

インドネシアのバリ島北岸の砕波帯と河口域で、1995年1月3日から1996年1月28日にかけて押し網で採集されたヒメツバメウオの出現と量、大きさ(体長)の季節的变化を調べた。採集された仔稚魚の数と体長は砕波帯で110個体、体長3.7-5.5mm、河口域で47個体、4.7-49.1mmで、両域の境となる体長5.5mmは屈曲後仔魚期と稚魚期との転換期に相当していた。砕波帯ではほぼ年間を通して出現したが、河口域ではバリ島の乾期にあたる5月から8月には出現しなかった。また、砕波帯では仔稚魚の成長は確認できなかったが、河口域では成長が見られた。これらの結果から、ヒメツバメウオにとって、砕波帯は短期間ではあるが仔魚の成育場であり、また河口域はその後の成長の場であると考えられた。

(*〒108-8477 東京都港区港南4-5-7 東京水産大学魚類学研究室(現東京海洋大学魚類学研究室) 1 Corresponding author)

吉村圭司*・山根武士*・打木研三・河野 博*¹ : インドネシア, バリ島北岸の砕波帯と河口域に出現するクロホシマンジュウダイの季節的变化

インドネシア, バリ島北岸の2地点の砕波帯と河口域で1995年1月3日から1996年1月28日にかけて押し網で採集されたクロホシマンジュウダイの出現と量、大きさ(体長)の季節的变化を調べた。採集されたクロホシマンジュウダイは、すべてが変態中の稚魚で、頭部には特異な骨板が発達していた。砕波帯では合計26個体(体長7.9-13.4mm)が、また河口域では35個体(体長9.2-30.6mm)が採集された。砕波帯では2月と3月および12月に、また河口域では12月から6月にかけて毎月出現した。成長は、砕波帯では認められなかったが、河口域ではみられた。これらの結果から、クロホシマンジュウダイの稚魚は砕波帯を短期間の成育場として利用し、河口域はその後の成長の場であると考えられた。

(*〒108-8477 東京都港区港南4-5-7 東京水産大学魚類学研究室(現東京海洋大学魚類学研究室) 1 Corresponding author)

大澤高浩*¹, 趙朝方, パラビン・クンテ, 李星愛, 森山隆, 原政直 : 3次元水理モデルの数値実験と人工衛星データを用いたコチ湾の堆積物輸送の研究

インド大陸西岸域におけるコチ湾は、海洋力学的にも地質学的にも大変興味ある内湾である。その理由は、ティグリス・ユフラテス河から流出する莫大な堆積物を含んだ河川水がインド大陸西岸を流れる海流によって運ばれ、湾内に流入されるからである。ここで、コチ湾の堆積物が海流によって流入する結果、湾内でどのように分散されるかを3次元力学モデルによる数値実験と人工衛星観測結果を照合する事によって、その過程を検証した。3次元流動モデルとしてCOSMOSを採用し、コチ湾における潮汐変動、海流、残差流、海面温度分布等を推定するモデルにより、水温と塩分の2つの輸送方程式を計算した。コチ湾は、緯度22~23度、経度69~70.45度に位置し、複雑な潮汐が混在する内湾域である。COSMOSの流動モデルを数値計算するにあたり、海面温度、塩分、河川からの流量、気候物理的大気物理量と5つの分潮が用いられた。又、陸一海、大気一海洋、海底地形、河川からの流入、及び、外洋の5つの境界層条件が設定された。COSMOSによる数値計算は、1999年、10月と12月のケースを、深度方向に5層に分け各層における流速、流速方向、水温、塩分、乱流エネルギーを計算した。そして、現場の実測値との比較照合し、そのモデルの有用性が示された。モデル計算の結果を見ると、支配的な流れは潮汐残差流の変動によるものであることが分かり、本研究による潮汐残差流の計算は、以前に行われた研究結果よりも空間分解能と鉛直プロファイルにおいて更に精度良い結果が得られた。湾内の潮汐残差流の表層流成分は、海面応力による大きな変動を示したが、中層と底層も、類似したパターンを示した。この結果は、NOAA/AVHRRの表層水温分布とほぼ一致した。また、流速は、当然のことながら、表層から下層に行くに伴い、減少する傾向を示し、最終的にそれらの渦は、ある一定の深さで消滅した。このことは、残差流の流速の分布は、海底地形に対し堆積物の輸送に対し重要な役割をしている事を示していることがわかった。

(*〒263-8552 千葉県千葉市稲毛区弥生町1-33 千葉大学 環境リモートセンシング研究センター 1 Corresponding Author)

森永勤, 荒川久幸, 正地雅実, 清宮智則: 日本海・ナホトカ号沈没海域における漏出重油の膜厚の見積もり

日本海・ナホトカ号沈没海域における漏出重油の膜厚を見積る目的で, 水槽実験において水面上における波長別上方向輝度と試験油の膜厚との関係を求めた。さらに, 海洋現場で光学観測を行い, 双方の取得資料から漏出油の膜厚を推定した。極薄い膜厚0.0005-0.0019mmの範囲では, 水面に白く輝く縞模様が目視観察され, 白色を呈する。この現象は水槽内の水道内の汚れで表面張力が小さく, 油は滴の状態に在り, 乱反射の影響と考えられる。膜厚0.0027mm以上では試験油の増加とともに白色部分の面積が減少し, 膜厚0.075mmでは水面の全域が薄い褐色へ変色する。さらに, 膜厚が増大すると, 次第に黒褐色を帯びるようになる。油膜の厚さと水色の色度点の主波長との間には一定の関係が見られない。測定波長510nmにおける上方向輝度と油膜の厚さとの関係式は次のように表される;

$$Y = \alpha X^{-0.0637} \quad (\text{Lu/Ed (412)/Lu/Ed (510)} < 1.4)$$

$$Y = \beta X^{0.143} \quad (\text{Lu/Ed (412)/Lu/Ed (510)} > 1.4)$$

ここで, Y: 油膜の波長510nmにおける上方向輝度

X: 油膜の厚さ (mm)

α, β : 臨界点の海面の波長510nmにおける上方向輝度から求める定数

Lu: 上方向輝度 Ed: 下方向照度 412, 510: 測定波長 (nm)

ナホトカ号からの漏出油の膜厚は1997年で0.014mm, 1998年で0.017mmとそれぞれ推定できる。
(〒108-8477 東京都港区港4-5-7 東京水産大学海洋環境学科 (現東京海洋大学海洋環境学科))

学 会 記 事

1. 2003年6月2日(月) 東京水産大学海洋環境棟会議室において幹事会が開かれた。

44回総会議案を検討した。その後、評議員会が開かれた。

2. 2003年6月14日(土) 日仏会館会議室において平成15年度学術研究発表が開かれた。発表題目と発表者は次の通り。

午前(10:00-12:00)

1. 大槌湾の海水流動の季節変化
 ……………乙部弘隆(東大海洋研・大槌セン)
 ○安保綾子・長島秀樹(東水大)
 2. Tidal and Subtidal Currents in Sagami Bay
 ……………○Angmalisang, P. A., Matsuyama, Y. Kitade(Tokyo Univ. of Fish.)
 H. Ishidoya(Kanagawa Fish. Inst.)
 and S. Iwata(JAFIC)
 3. LADCPで観測された南大洋インド洋セクターにおける流れの構造について
 ……………○鳴海吉洋・日下朋子・川村有二・北出裕二郎・長島秀樹(東水大)
 4. Seasonal Variations of Sea Level along the Japanese Coast
 ……………○Natih, M., M. Matsuyama and Y. Kitade(Tokyo Univ. of Fish.)
 5. 射影演算法による乱流拡散効果の定量的評価
 ……………○佐藤健司・長島秀樹(東水大)
 6. 水圧式波高計データの表面波補正伝達関数の上限周波数特性について
 ……………金成誠一(立正大・地球環境)
- 午後(13:30-15:35)
7. 仙台湾におけるダイオキシン類の動態
 ……………○奥村裕(東北水研)・山下洋(京大農)・神山孝史・鈴木敏之(東北水研)
 8. 魚類の視感度特性の行動学的測定
 ……………長谷川英一(独法・さけますセン)
 9. LEDを用いた高周波数光条件における植物プランクトンの培養とその効果
 ……………○大久保保に・荒川久幸・森永勤(東水大)・杉島凱夫(CCS(株))
 10. PAM法による海草アマモ*Zostera marina*の光合成速度の測定
 ……………○姫路真人・岡本峰雄・堀本奈穂・

山口征矢(東水大)

11. わが国のタラソセラピー(海洋療法)の研究とその周辺の現況について

……………村瀬暁・○野村正(日本海洋療法研究会)

12. 新しい海流「琉球海流続流」に関する数値実験

……………関根義彦(三重大・生資)

3. 2003年6月14日(土) 日仏会館会議室において第44回(平成15年度)総会が開かれた。議事の概要は次の通り。

1) 平成14年度事業報告

(a) 庶務

会員異動状況

	H14年 4月	入会	退会	逝去	資格 変更	15年 3月
名誉会員	2	-	-	-	-	2
正会員	270	9	11	-	-	268
学生会員	5	5	-	-	-	10
賛助会員	11	-	1	-	-	10

(b) 活動状況

評議員会 1回(14/5/28)

幹事会 4回(14/5/28, 14/9/27, 14/11/27, 15/3/4)

総会 1回(14/6/1 日仏会館於)

学術研究発表会 1回(14/6/1 日仏会館於)

学会誌発行 39巻4号~40巻3号

学会賞授与 平 啓介会員(東京大学 H14/6/1)

論文賞授与 森永勤会員(東京水産大学 H14/6/1)

鷺見浩一会員(金沢工業大学 H14/6/1)

・日仏科学シンポジウム共催(日仏会館 H14/12/1)

・文部省科学研究費審査員の候補者推薦(水研連 H15/5)

・ " " (海研連 H15/5)

・日本学術会議第19期会員の候補者推薦(H15/2)

・ホームページ作成

URL

和文: <http://wwwsoc.nii.ac.jp/sfjo/index.html>

英文: <http://wwwsoc.nii.ac.jp/sfjo/index-e.html>

(c) 編集

学会誌「La mer」39(4), 40(1), 40(2), 40(3) 発行。

2) 平成14年度収支決算および監査報告

収入の部 (備考)	
前年度繰越金	94,879
正会員会費	1,110,000 (延べ数185)
学生会員会費	12,000 (3)
賛助会員会費	170,000 (11社 17口)
学会誌売上金	155,225
広告料	20,000
別刷印刷費	276,056
著者負担印刷費	400,000
雑収入	46,508 (学術著作権許諾料, 科学技術振興他)
寄付金収入	100,000 (今協会員より)
合計	2,384,668
支出の部	
学会誌印刷費	1,250,000
送料・通信費	188,551
事務費	623,056 (人件費, 事務備品, 封筒他)
交通費	23,620
会議費	16,058 (総会会場費, 評議員, 幹事会他)
学会賞経費	34,186 (メダル研磨, 賞状他)
雑費	190,180 (総会バイト料, 水産 海洋祝金, ホームページ 作成申請料, 手数料)
次年度繰越金	59,017
合計	2,384,668

3) 平成14年度事業計画 (案) 審議

下記原案通り承認された。

評議員会 総会 学術研究発表会 幹事会

La merの発刊

その他

4) 平成14年度予算 (案) 審議

原案通り承認された。

収入の部	
前年度繰越金	59,017
正会員会費	1,608,000 268×6,000
学生会員会費	40,000 10×4,000
賛助会員会費	180,000 10社 18口 1口10,000
学会誌売上金	200,000
広告料	20,000
別刷印刷費	300,000
著者負担印刷費	300,000
雑収入	50,000
寄付金収入	1
合計	2,757,018
支出の部	
学会誌印刷費	1,760,000 440,000×4
送料・通信費	200,000
事務費	700,000
交通費	24,000
会議費	15,000
学会賞経費	35,000
雑費	15,000
次年度繰越金	8,018
合計	2,757,018

5) その他

引き続き前田昌調会員への学会賞授与と受賞記念講演が行われた。また、堀本奈穂会員へ論文賞授与が行われた。終了後アトレ恵比寿「桃花宮」で懇親会が開かれ盛会裡に終了した。

4. 新入会員 (正会員・学生会員)

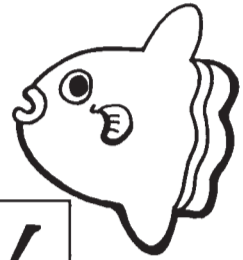
氏名	所属	紹介者
岩崎哲也	東京海洋大学海洋生産学科海洋機械工学 研究室 〒108-8477 東京都港区港南3-4-7	矢田貞美
野口浩介	宮崎大学大学院農学研究科 〒889-2192 宮崎県宮崎市学園木花台西 1-1	前田昌調

賛 助 会 員

アレック電子株式会社	神戸市西区井吹台東町7-2-3
株式会社イーエムエス	神戸市中央区多聞通3-2-9
有限会社英和出版印刷	文京区千駄木4-20-6
株式会社内田老鶴圃 内田 悟	文京区大塚3-34-3
財団法人海洋生物環境研究所	千代田区神田神保町3-29 帝国書院ビル5F
株式会社川合海苔店	大田区大森本町2-31-8
ケー・エンジニアリング株式会社	台東区浅草橋5-14-10
国土環境株式会社 (環境情報研究所)	横浜市都筑区早渕2-2-2
三洋測器株式会社	渋谷区恵比須南1-2-8
株式会社高岡屋	台東区上野6-7-22
テラ株式会社	世田谷区代沢4-44-2 下北沢ビル2F
日本海洋株式会社	北区栄町9-2
渡邊機開工業株式会社	愛知県渥美郡田原町神戸大坪230



海洋生物資源を大切に利用する企業でありたい
 —— 青魚(イワシ・サバ・サンマ)から宝を深し出す ——



母なる海・海には愛を!

La mer la mère, l'amour pour la mer!



SHIDA

信田缶詰株式会社

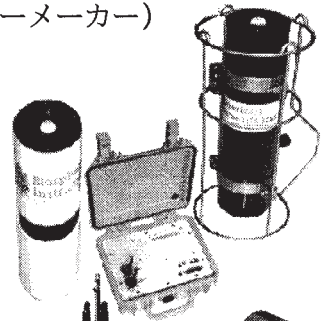
〒288-0045 千葉県銚子市三軒町2-1 TEL 0479(22)7555 FAX 0479(22)3538

● 製造品・水産缶詰・各種レトルトパウチ・ビン詰・抽出スープ・栄養補助食品・他

URL <http://www.fis-net.co.jp/shida/> メールアドレス: shida@choshinet.or.jp

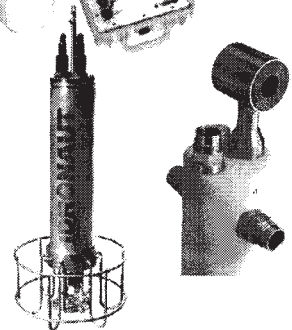
Biospherical Instruments (水中分光放射計・PAR センサーメーカー)

- 10 ダイナミックレンジ水中分光プロファイラー
- 自然蛍光光度測定
- 洋上輝度観測モニター
- Scalar・Cosine PAR センサー
- モノクロセンサー



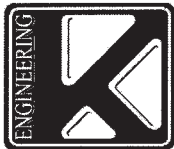
Idronaut (WOCE CTD メーカー)

- 24 ビット分解 メモリー/FSK プロファイラー
- 6 項目測定+ROSETTE 採水装置インタフェース
- 多項目観測プイ・ボルタンメトリー電極



Richard Brancker Research (水中ロガーメーカー)

- 24 ビット分解・RS インタフェース内蔵ロガー
- 6 項目測定



日本総代理店 **ケー・エンジニアリング株式会社**

〒111-0053 東京都台東区浅草橋5-14-10

TEL 03-5820-8170 FAX 03-5820-8172

www.k-engineering.co.jp sales@k-engineering.co.jp

日仏海洋学会入会申込書

(正会員・学生会員)

	年度より入会	年	月	日申込
氏名				
ローマ字		年	月	日生
住所 〒				
勤務先 機関名				
電話				
自宅住所 〒				
電話				
紹介会員氏名				
送付金額	円	送金方法		
会誌の送り先 (希望する方に○をつける)		勤務先	自宅	

(以下は学会事務局用)

受付	名簿 原簿	会費 原簿	あて名 カード	学会 記事
----	----------	----------	------------	----------

入会申込書送付先：〒150-0013 東京都渋谷区恵比寿 3-9-25

(財) 日仏会館内

日 仏 海 洋 学 会

郵便振替番号：00150-7-96503