

ビデオプランクトンレコーダーを用いた親潮域～黒潮親潮移行域におけるメソ動物プランクトン群集構造の解析に関する研究*¹

市川 忠史*²

Analysis of the community structure of meso-zooplankton in the Oyashio and Transition Zone using Video Plankton Recorder (VPRII)

Tadafumi ICHIKAWA

Abstract Accurate estimation of the biomass, community structure and relative distribution in the water column of meso-zooplankton that play various important roles ranging from the cycling of matter, biological production, and as prey of fish resources is essential for understanding the dynamics of the marine ecosystem. However, conventional methods such as using plankton nets have various biases in relation to estimating the biomass and the distribution structure, especially for fragile plankton groups. Apart from these potential biases of conventional methods, sample sorting is time consuming and laborious. To overcome such problems, the aim of this study was to establish the observational and analytical methods using a new Video Plankton Recorder (VPRII), which has previously not been used in Japan, and with the results, to allow a more accurate estimation of the biomass of Cnidaria and Ctenophore, which are important predators. Furthermore the detailed vertical distributed structure of meso-zooplankton such as Copepoda, and then to discuss the community structure and biological interrelationship of meso-zooplankton.

1. To determine the conditions for obtaining clear images using VPRII and to review the methods needed for obtaining quantitative data, laboratory experiments using copepods and jellyfish were performed. The suitable setting range of parameters was found to be different between copepods and jellyfish, and the depth of field was different for the two plankton taxa when the best setting range of parameters for each taxon was used. Since our ROI (region of interest) extraction procedure could select the best setting range of parameters and could sort out the recorded images of plankton in a given depth of field determined by the brightness gradient of the image, VPRII can acquire in-focus and clear plankton images and can provide a better estimate of the plankton abundance including gelatinous taxa by setting up the parameters to record the out-focus objects in the field of view. Development of the method within the constant image volume objectively allowed the acquisition of high precision quantitative VPRII data.

2. To assess the utility of the VPRII for determining the zooplankton population structure, the

2007年12月13日受理 (Received on December 13, 2007)

*¹東京大学審査学位論文 (掲載に際し投稿規定に沿って一部修正した)

*²中央水産研究所 〒236-8648 横浜市金沢区福浦 2-12-4

(National Research Institute of Fisheries Science, 2-12-1, Fukuura, Kanazawa, Yokohama 236-8648, Japan)

images collected from VPRII were compared with the traditional zooplankton sampling method of MOCNESS in the Oyashio and Transition Zone off the Sanriku coast, eastern part of Japan. The correlations between the abundance measured by VPRII images and MOCNESS samples of Copepoda that were undamaged by MOCNESS sampling were statistically significant ($p < 0.5$) when the probability of non-detection was less than 0.05 with VPRII. However for fragile members of the community, the Hydrozoa and Ctenophora abundances estimated from VPRII images were almost all higher than the MOCNESS samples. Chaetognatha, Siphonophora, Thaliacea-Doliolida, and Appendicularia showed more variability where the density was higher from VPR than MOCNESS and vice versa. This variability in results was considered to be affected by the patchy distribution pattern and escape behavior of plankton, also by technical problems such as visual field and illumination of the VPRII.

3. To examine and compare the biomass and detail the vertical distribution of Hydrozoa and Ctenophora, VPRII and plankton net were towed from 25 to 500m depth during July 2003 and June to July 2004 at 5 stations in the Oyashio and Transition zone off the Joban, Sanriku and Eastern Hokkaido coast, Japan. In comparison of Hydrozoa and Ctenophora biomass estimated from VPRII images and plankton net samples averaged over 25 to 500m, biomass estimates from VPRII were from 0.002 to 0.106 mgC/m³ (mean \pm standard deviation = 0.035 ± 0.031 , $n = 40$) and these biomasses were 14 times higher (0.3 to 260, standard deviation = 43.8, $n = 40$) than estimates using the plankton net samples, showing that the results by conventional net collection underestimated the biomass by ca. 1 order of magnitude. The ratio of Hydrozoa and Ctenophora to Copepoda biomass was from 0.01 to 5.13%. The depth over 1% corresponded to the distribution maximum layer of Hydrozoa or Ctenophore. The proportion of food requirement of Hydrozoa and Ctenophore for the production of Copepoda was as low as 1.5% to 5.4%; however, the role of patchiness of jellyfish in relation to the estimate of biomass requires further study.

4. We obtained the detailed vertical distribution of zooplankton community such as Hydrozoa, Ctenophore, and Copepoda in the Oyashio and Transition Zone, and discussed the effects of water mass structure on the zooplankton community and the biological interrelationship. The vertical distribution of Copepoda was continuous, and multiple distribution maximum layers occurred within the North Pacific Intermediate Water (NPIW) in the deeper points from the surface and discontinuity layer, while the vertical distributions of Hydrozoa and Ctenophore were intermittent and showed a more patchy distribution. The distribution maximum layer of Copepoda within NPIW occurred deeper than the salinity and water temperature minimum (deeper than $26.7 \sigma_{\theta}$), and tended to appear in the near $26.8 \sigma_{\theta}$ and directly under the water mass where water mass was considered to be horizontally advected. Radiolaria showed the same distribution as Copepoda within NPIW. The results of the vertical distribution of suspended particles and review of past study cases demonstrated that the distribution maximum of Copepoda in the intermediate layer was probably affected by the water mass structure as well as Radiolaria and suspended particles, and might be related with the trophic environment. Observations using VPRII showed that the zooplankton community structure can be analyzed in new view point.

Key Words: Video Plankton Recorder (VPR), zooplankton, community structure, Hydrozoa, Ctenophora

目次

1. 緒論
 - 1.1. 海洋における動物プランクトン群集の重要性
 - 1.2. 動物プランクトン群集の分布構造の把握における問題点
 - 1.3. 画像記録による動物プランクトンの計測
 - 1.4. 親潮域および黒潮親潮移行域におけるVPR観測の意義
 - 1.5. 本研究の目的
2. 動物プランクトン計測器 —特に光学系測器を中心に—
 - 2.1. はじめに
 - 2.2. 粒子検出系
 - 2.3. 画像記録系
 - 2.3.1. VPR
 - 2.3.2. UVP
 - 2.3.3. ZOOVIS
 - 2.3.4. SIPPER
 - 2.4. 画像データの解析
3. VPR II における画像取得パラメーターの特性
 - 3.1. はじめに
 - 3.2. VPR II の画像取得パラメーターについて
 - 3.3. 方法
 - 3.3.1. 実験装置の概要
 - 3.3.2. プランクトン分類群とパラメーターの関係
 - 3.3.3. DOFの客観的な判断
 - 3.4. 結果
 - 3.4.1. プランクトン分類群とパラメーターとの関係
 - 3.4.2. 合焦範囲
 - 3.4.3. 合焦範囲とプランクトン分類群のパラメーターの関係
 - 3.5. 考察
4. メソ動物プランクトンの個体数密度把握におけるVPR II とMOCNESSとの比較
 - 4.1. はじめに
 - 4.2. 方法
 - 4.2.1. 観測
 - 4.2.2. VPR II およびプランクトンネット試料の解析
 - 4.3. 結果
 - 4.3.1. 海況
 - 4.3.2. VPR II とプランクトンネットの個体数密度の比較
 - 4.3.3. カイアシ類, ヒドロクラゲ類およびクシクラゲ類の個体数密度
 - 4.3.4. ヒドロクラゲ類およびクシクラゲ類の大きさ別個体数密度
 - 4.4. 考察
 - 4.4.1. VPR II とプランクトンネットとの比較
 - 4.4.2. VPR II によるヒドロクラゲ類, クシクラゲ類の個体数密度
5. VPR II を用いた親潮域および黒潮親潮移行域の表中層におけるメソ動物プランクトンの現存量および鉛直分布特性
 - 5.1. はじめに
 - 5.2. 方法
 - 5.2.1. 観測

- 5.2.2. VPR II データの解析
 - 5.2.3. ヒドロクラゲ類およびクシクラゲ類の現存量の計測
 - 5.2.4. プランクトンネット採集試料の解析
 - 5.3. 結果
 - 5.3.1. 海洋構造
 - 5.3.2. ヒドロクラゲ類およびクシクラゲ類の鉛直分布
 - 5.3.3. クラゲ・クシクラゲ類の現存量および餌料要求量
 - 5.3.4. カイアシ類, 放散虫類および懸濁粒子の鉛直分布
 - 5.3.5. 中層における分布極大層と物理構造
 - 5.4. 考察
 - 5.4.1. ヒドロクラゲ類およびクシクラゲ類の現存量
 - 5.4.2. ヒドロクラゲ類, クシクラゲ類の鉛直分布
 - 5.4.3. 表層におけるカイアシ類の鉛直分布構造
 - 5.4.4. 中層におけるカイアシ類, 放散虫類および懸濁粒子の鉛直分布
 - 6. 総合考察
 - 6.1. VPR II におけるデータの信頼性
 - 6.2. プランクトンの群集構造
- 要約
謝辞
引用文献
付図 - VPR II で記録されたプランクトン -

第1章 緒論

1.1. 海洋における動物プランクトン群集の重要性

近年, 地球温暖化や気候変動などの地球規模の環境変動が動物プランクトンを含む海洋生態系に影響を及ぼすことが指摘されている (Ottersen *et al.*, 2001; Edwards and Richardson, 2004; Richardson and Schoeman, 2004)。例えば1955~1980年のベーリング海では, 風力の増加に伴って動物プランクトン現存量が約2倍増加し (Brodeur and Ware, 1992), 逆にカリフォルニア沖では, 1951~1993年に水温の上昇に対して動物プランクトン現存量が約80%減少したことが示されている (Roemmich and McGowan, 1995)。大西洋では気候変動と関係したクラゲ類現存量の増加が報告されている (Lynam *et al.*, 2004; 2005)。海洋生態系において, メソ動物プランクトンは基礎生産者から高次生産者への橋渡しとして重要な生態学的位置を占め (谷口, 1986a), 海洋生態系における物質輸送, 生物生産および魚類資源の加入の仲介者としての鍵となる生物群である (Lenz, 2000)。したがって, 気候変動と関係して海洋生態系がどのように変動するのか明らかにし, その影響を評価するためには, 鍵となるメソ動物プランクトン群集の種組成, 分布特性あるいは現存量に関するデータと知見を蓄積することが不可欠であ

る。

メソ動物プランクトンは, 魚類資源にとって直接の餌料として重要な存在であるとともに, 仔稚魚に対しては, 餌料をめぐる競合者あるいは捕食者としての地位にある。バルー沖のカタクチイワシや太平洋のヘイク, 北海のニシンなどでは, 加入量や再生産率の変動が動物プランクトンの現存量や種組成の変化と関係すること (Cushing, 1995), 動物プランクトンの分類群組成や体長組成は魚類の成長, 加入, 生産に影響を及ぼすことが指摘されている (Flinkman *et al.*, 1998; 高橋, 2001; Parsons and Lalli, 1988)。また, 仔稚魚の捕食者としてのクラゲ類, クシクラゲ類の重要性も報告されている (Arai, 1988)。メソ動物プランクトンの現存量を把握し, 分布構造と群集構造を明らかにすること, さらに変動機構を解明し, 他生物への影響を明らかにしていくことは, 生態研究のみならず水産資源の研究において重要な課題である。

気候変動や魚類資源の変動と対応して, 水温, 塩分のような物理環境データ, あるいはクロロフィルとして代表される基礎生産者のデータについては, 近年, 測器の発展とともに長期変動の解析, あるいは海盆規模 (basin scale), 全球規模 (global scale) での解析が行われている (Platt *et al.*, 1995)。しかし, 生態系の変動機構を明らかにする上で不可欠な動物プランクトンの現存量や分布構造に関するデータの解析例は少な

い。長期、広域に渡る観測例が他の観測に較べて少ないことはもちろんであるが、採集された試料がデータ化されていないこと、従来の採集手法だけでは定量化が困難な場合があるためと推察される。

1.2. 動物プランクトン群集の分布構造の把握における問題点

動物プランクトンの分布は一様でなく、ミリメートルからキロメートルの尺度で群集団 (swarm) を形成する (Lalli and Parsons, 1997)。動物プランクトンの採集における基本的な手法として、プランクトンネットが用いられてきた。プランクトンネットでは、曳網距離を伸ばすことで個々の群集団を抱合した採集が可能であるが、濾水量の増大と引き換えに詳細な分布構造が分からなくなるという二反性を持つ。また、プランクトンネットによる採集では水平的には10 m、鉛直的には5 m以下の空間分解能での採取は困難である (Davis *et al.*, 1992)。高い空間分解能で計測可能な測器による観測で物理あるいは化学的な成分は、1~1000 mの尺度で変動することが示され (Haury and Wiebe, 1982)、こうした変動がプランクトンの分布と相関があることが示されているにもかかわらず (Donaghay *et al.*, 1992)、個々の生物にとって生態学的に意味のある空間の尺度で動物プランクトンを直接観測することは困難な場合が多い。一方、ある海域における平均的な現存量や変動を把握する場合においても、例えば、人工衛星からの遠隔探査によるクロロフィル量の把握のように広域の定量化は難しい。さらに、採集後のプランクトンの選別および計数・計測作業に要する労力と時間も、動物プランクトン群集の現存量を把握する上での障害となっている。

クラゲ類 (Cnidaria)、クシクラゲ類 (Ctenophora) は魚類卵稚仔魚の捕食者として、あるいは餌をめぐる競争者としての位置を占めるだけでなく (Mills, 1995; Shiganova and Bulgakova, 2000)、魚類 (Runge *et al.*, 1987; Mianzan, 2001)、中層の甲殻類 (Nishida *et al.*, 1988; Moore *et al.*, 1993)、ウミガメ類 (Salmon *et al.*, 2004) および海鳥 (Harrison, 1984) も餌料としてクラゲ類を利用している。中・深層生態系では、*Oncaea* 科などのカイアシ類 (Copepoda) とともにゼラチン質プランクトンが現存量において優占し (Hunt and Lindsay, 1999)、クラゲ類、クシクラゲ類の生物量、多様性は表層よりも中・深層で大きくなる (Mackie, 1985)。また、宿主 (Harbison *et al.*, 1977) としてクラゲ類は他生物にも利用されるなど海洋生態系の中で重要な位置を占める。しかし、小型で脆弱なゼラチン

質プランクトンは採集時に壊れやすく (Harbison *et al.*, 1978; Falkenhaus, 1996; Warren *et al.*, 2001)、また採集後の固定により収縮・溶解するため (Nishikawa and Terazaki, 1996; Kasuya *et al.*, 2000; Postel *et al.*, 2000; Thibault-Botha and Bowen, 2004)、プランクトンネットによる採集では正確な分布や現存量の把握が難しい。従来の採集手法によるゼラチン質プランクトンの現存量や生態系における役割は過小評価の可能性が高いことも指摘されている (Remsen *et al.*, 2004)。

1.3. 画像記録による動物プランクトンの計測

前節で述べたように、従来、一般的に用いられてきたプランクトンネットによる採集だけでは、正確なプランクトンの現存量の把握、あるいは詳細な分布構造の解明には不十分な場合が多い。こうした問題を解決するため、メソ動物プランクトンを計測し、迅速に定量化する試みが多くなされている。特に20世紀の最後の20年は電子機器の発達と共に多くの測器が考案、開発されてきた (Wiebe and Benfield, 2003)。現在、プランクトンネットによる採集以外では、計量魚群探知器やドップラー流向流速計 (Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP) などの音響系を利用した測器、そして光学系を利用した測器の2つに大別できる (Sameoto *et al.*, 2000)。音響系の測器に較べ、光学系の測器、特にプランクトンを画像として記録する画像記録系の測器は、プランクトンの種、分類群や生態に関する情報が得られることから、動物プランクトン群集の現存量や分布構造の把握に有効な測器と考えられる。

画像記録系の測器の中で、動物プランクトンの分布構造の解明や現存量把握に関しては、ウッズホール海洋研究所 (Woods Hole Oceanographic Institution, WHOI) で開発されたビデオプランクトンレコーダー (Video Plankton Recorder, VPR; Davis *et al.*, 1992; 詳細は第2章参照) を利用した研究報告が最も多い。U. S. GLOBECのGeorges Bank Programにおける動物プランクトン微細分布構造と海洋構造との関係の解析 (Benfield *et al.*, 1996; Davis *et al.*, 1996; Gallger *et al.*, 1996; Norrbin *et al.*, 1996)、動物プランクトンの行動に関する研究 (Benfield *et al.*, 2000; Gallger *et al.*, 2004) などで利用されている。VPRは、1秒間に25フレーム (Frames) 以上の速度でプランクトン画像を記録することが可能であり、同時に、画像が記録された深度における水温、塩分などの環境データも取得できる。したがって、1m以下の微細な空間の尺度でプランクトンの分布構造が把握できるとともに、ネット採集では破損しやすいゼラチン質プランクトンの現存量

の把握に対しても有効な測器であると考えられる。さらに、VPRで記録されたプランクトン画像はデジタルデータとして保存されるため、画像解析による自動選別や自動計測が可能で (Davis *et al.*, 2004), プランクトン計測の省力化につながる可能性を併せ持つとともに、ネット採集試料に較べて小さい空間で試料 (画像データ) を保管できる。しかし、VPR自身は現在も改良・開発が継続されている測器であり、その利用は開発元のWHOIが中心で使用説明書なども一般化されていない。また、主に北大西洋のGeorges Bankにおいて利用されてきたため、日本周辺海域はもちろん、他の海域における事例も限られている。

1.4. 親潮域および黒潮親潮移行域におけるVPR観測の意義

親潮域および黒潮親潮移行域 (以下、移行域) は多獲性浮魚類の重要な索餌海域であり、初夏から秋にかけて多くの魚類が来遊し漁業生産にとって重要な海域である。親潮域および移行域においては動物プランクトン現存量の変動とサンマの漁獲変動の同調 (小達, 1994), 移行域と隣接する黒潮続流域では水温とカタチイワシの生残との関係 (高橋, 2001) が指摘され、マイワシやサンマといった小型浮魚の資源量を定める鍵となるエリアであることが示唆されている (Noto and Yasuda, 1999; Tian *et al.*, 2002)。この海域においては、国および地方自治体の試験研究機関によって1950年代から浮魚資源の餌料環境調査や定線調査が行われており (大関・木村, 2002), 過去40年分の試料の解析により動物プランクトン種組成や湿重量が10年以上の周期で変動することが示されている (小達, 1994; Tadokoro *et al.*, 2005; Chiba *et al.*, 2006)。しかし、その大半は網目幅0.3 mmのプランクトンネットによる150 m以浅の鉛直曳網によって得られたもので、鉛直分布構造が把握できないばかりでなく、甲殻類プランクトンが過大評価されている可能性が否定できない (Gallienne and Robins, 2001; Remsen *et al.*, 2004)。さらに、仔稚魚の捕食者として重要と考えられるゼラチン質プランクトン、特にクラゲ類およびクシクラゲ類に関しては採集が困難なことから定量的なデータがほとんどない (豊川, 2001)。動物プランクトンの選別および計数・計測作業には多大な労力と時間を必要とするため、多くのデータが湿重量または沈殿量として記録されているに過ぎず (小達, 1994; Hirota and Hasegawa, 1999), 仔稚魚の餌料として考える上で重要なサイズに関する情報が少ない。VPRを利用することで、プランクトンネットによる採集だけでは得られ

ないような壊れやすいプランクトンの正確な現存量把握の可能性があるばかりでなく、プランクトンの選別および計数・計測作業においても、省力化が図れると考えられる。

一方、親潮域、移行域では北太平洋中層水 (North Pacific Intermediate Water, NPIW) を通じた人為起源の炭素の輸送の場 (Tsunogai *et al.*, 1993; Ono *et al.*, 2000) としての重要性が示唆されている。親潮域、移行域では季節的鉛直移動を行う *Neocalanus* 属、*Eucalanus* 属の現存量が大きく (小達, 1994), 摂餌期以外はほぼ周年中層に存在する (Kobari and Ikeda, 1999; Tsuda *et al.*, 1999, 2001; Kobari *et al.*, 2003)。大型カイアシ類による炭素の鉛直輸送の重要性 (Kobari *et al.*, 2003) も含め、表層から中深層への物質の鉛直輸送に関わる動物プランクトンの割合は150mまでは沈降粒子の43%, 1000mでは110%との試算もある (齊藤, 2007)。こうした物質循環過程を把握し、輸送される物質量を正確に見積もるためには、カイアシ類などの生物量も水温、塩分あるいは密度といった物理化学的な成分と同じ数メートル以下の微細な空間の尺度で把握することが不可欠である。しかし、従来のプランクトン採集手法だけで、物理化学的な成分と同じ尺度でプランクトンの分布構造を解析することは難しい。VPRでは、プランクトンネットによる採集だけでは得られないような1メートル以下の微細な分布構造の把握が可能であるばかりでなく、デジタルデータである利点を生かし、水深以外の物理スケールでプランクトンの分布を再構築することも可能となる。

1.5. 本研究の目的

本研究では、メソ動物プランクトンの群集構造を現存量ならびに分布構造の観点から解析するにあたり、国内では使用例がない画像記録系の測器のひとつであるビデオプランクトンレコーダー (Video Plankton Recorder, VPR) を用いた。VPR開発時に明確な対象とされていなかったゼラチン質プランクトン、中でもクラゲ類、クシクラゲ類を対象とした観測手法ならびに解析手法の確立を目的の一つとした。また、日本周辺海域のメソ動物プランクトン群集を対象に、プランクトンネットによる採集結果ならびにVPR自身が持つ問題点を明らかにし、それぞれの有効な活用手法について検討した。さらに、その成果を元にして、水産資源的に、また環境変動に関わる物質循環の点からも重要な海域と考えられる親潮域、黒潮親潮移行域において、捕食者として重要なクラゲ類、クシクラゲ類の正確な現存量に見積もること、メソ動物プランクトン群

集の鉛直分布構造を高い空間分解能で解析することを目的とした。

本章に続く第2章では、VPRが含まれる光学系を利用した動物プランクトン計測測器について概要を述べ、発展の経緯ならびに問題点を示すとともに、VPRと他の光学系測器との相違を明示し、本研究でVPRを選択した理由を述べた。第3章では、VPRを用いて動物プランクトン現存量を精度良く見積もるために必要な較正の手法ならびに画像取得に必要な条件値（パラメーター）について検討した。第4章では、VPRで取得されたデータと従来の手法であるプランクトンネットによる採集結果を比較し、VPRデータの有効性の検証および問題点の把握を行った。第5章では、VPRおよびプランクトンネット双方のデータを用いて、親潮域から黒潮親潮移行域の表層から中層に分布するメソ動物プランクトンの現存量および詳細な鉛直分布構造を明らかにした。第6章では、第3章から第5章で得られた諸知見に基づき、VPRを利用したメソ動物プランクトン群集構造の解析への可能性ならびにメソ動物プランクトン群集内における生物相互関係について考察した。

2章 動物プランクトン計測測器 ー特に光学系測器を中心にー

2.1. はじめに

メソ・マクロ動物プランクトンの群集構造を分布構造および現存量の観点から明らかにするため、従来から慣習的に行われてきたのはプランクトンネットによる採集と、顕微鏡下における採集試料の選別および計数・計測である。プランクトンの採集はV.Hensenによって定量研究法の考案と標準化がなされた（谷口, 1986b; Wiebe and Benfield, 2003）。その後、様々な網目幅の規格化や開口比が検討されると同時に、プランクトンネットの形態も非開閉式ネット、開閉式ネット（多くはメッセンジャーによる）、連続採集装置（CPRやLHPR）、高速採集装置（Gulfシリーズ）、プランクトンベントスネット、多段開閉式ネット（MOCNESSやRMT）などとして発展してきた（Wiebe and Benfield, 2003）。大がかりな音響または電気的な制御を必要とする多段開閉式ネットを除き、鉛直曳網を行うプランクトンネットは取り扱いが比較的簡便であること、現存量把握のための基本的な要求を満たすことから、現在でも広く使われている手法である。しかし、序論で述べたように、プランクトンネットによる採集では、空間分解能が粗く、壊れやすい生物に対するの定量性

が低いなどの問題がある。

メソ・マクロ動物プランクトンを*in situ* で観測するため、プランクトンネットによる採集以外の手法・測器が数多く考案されてきた。現在、計量魚群探知器やドップラー流向流速計（Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP）などの音響系を利用した測器、そして光学系を利用した測器の2つに大別できる（Sameoto *et al.*, 2000）。プランクトンネットによる採集も含め、それぞれの測器は長所と短所を併せ持っており、1つの手法だけでなく異なった計測分野の測器を組み合わせることで、動物プランクトンに対して最大限の情報が得られる（Sameoto *et al.*, 2000）。光学系測器は、近年多くの利用事例が報告されており、技術革新と共に今後の発展が期待できると考えられる。

本研究では、プランクトンネット採集に対する問題点の解決を図り、新しい測器による観測手法を確立するため、国内で使用例がないビデオプランクトンレコーダー（Video Plankton Recorder, VPR）を用いた。VPRの詳細は後述（2.3.1）するが、本研究の目的は測器の開発ではなく、従来のプランクトンネットを用いた採集法では把握が困難であった、ゼラチン質プランクトンの現存量ならびに動物プランクトン群集の詳細な分布構造を新しい測器を用いて把握し解析することである（第1章）。そこで、1) 他の光学系の測器に比べて研究実績が多い、2) 観測から画像データの解析まで一貫して開発され使いやすい、3) 画像記録間隔が短いので微細な分布構造の把握が可能、などの利点からVPRを選択した。

本章では、VPRが含まれる光学系を利用した測器について概要を述べ、発展した経緯ならびに各測器の問題点を示すとともに、VPRなどで取得された画像データの解析手法についても言及した。光学系を利用した測器は1) 粒子検出系および2) 画像記録系に大別できる。また、それぞれネットなどで濃縮したプランクトンを記録対象とするか、測器のみの単体（stand-alone）で記録するかによっても分けられる。

2.2. 粒子検出系

粒子検出系は、電気抵抗値の変化から粒子の数と大きさを計測するコールターカウンターを元に、*in situ* で観測を行えるように改良され（Maddux and Kaneisher, 1965）、プランクトンの計測装置として発展した（Boyd, 1973）。これらはElectronic Zooplankton Counting Device（EZCD）あるいはElectronic Particle (or Plankton) Counter（EPC）と呼ばれる。電気抵抗値を計測するシステムは、計測可

能な大きさの範囲が狭いことや伝導度の低い淡水では使用できないことなどから、電気抵抗値の代わりに、粒子（プランクトン）が通過する際の光量変化を電気信号として読み取ることで粒子の大きさと数を計測する装置が考案された。Cooke *et al.* (1970) は実験室内でネットで採集されたプランクトンの大きさを計測するため、光検知器 (photodetector) を用いて計測する Opto-Electronic Plankton Sizer (OPEPS) を開発したが、その後、この装置を用いた報告はない (Sprules *et al.*, 1992)。1970年代後半から、工業用に開発された Hiac Particle Analyzer を用いた観測が行われた (Sprules *et al.*, 1992)。Hiac Particle Analyzer は光遮へいによる電圧変化から粒子の大きさを計測する装置であるが、*in situ* で利用できないこと、計測できる大きさの範囲が狭いという問題があった。1980年代に Optical Plankton Counter (OPC; Herman, 1988, 1992) が開発され、*in situ* で、かつ従来に較べて広い大きさの範囲が計測可能となった。OPC は赤色発光ダイオードが発する波長 640 nm の光を光源として利用し、Hiac Particle Analyzer と同様に光遮へいによる電圧変化から粒子の大きさと数を計測する。OPC では球体換算直径 (Equivalent Sphere Diameter, ESD) で 0.25 ~ 20 mm の大きさの範囲の間に 4096 の電氣的な大きさの範囲 (しきい値) を設け、各範囲ごとの計数を行う。OPC は装置自体が小型であるため、曳航体への搭載やプランクトンネットと組み合わせた観測が可能である。ただし、OPC ではゼラチン質プランクトンのように透明なプランクトンに対して大きさが過小評価になる (Herman, 1992; Beaulieu *et al.*, 1999)。

OPC を含めた粒子検出系の測器では、計測した粒子が生物か非生物かの判断や、種あるいは分類群の識別が難しい。種組成が単純な海域では、OPC で計測された ESD から大型カイアシ類の発育段階ごとの分布密度の把握 (Herman, 1992)、オキアミの分布 (Herman *et al.*, 1983) などの報告がある。一方、市川ら (1999) は OPC および EPC で移行域および黒潮域の動物プランクトンの計測を行い、種組成が複雑になり夜光虫などの透明なプランクトンが多い黒潮域ではネット採集結果との相関が低くなること、ネット採集による種組成の確認をしないとデータの信頼性が得られないことを示した。OPC は、赤色発光ダイオードの代わりに波長 670nm のレーザーを用いた Laser OPC (L-OPC; Herman *et al.*, 2004) へと発展し、形状識別に関する情報も得られるようになった。しかし、後述する画像を記録する測器に較べるとプランクトンの種類に関する情報は非常に少ない。

OPC を始めとする粒子検出系の測器は、1 m 以下の

細かな空間分解能でプランクトンの分布を把握できる。さらに、構造が簡単で維持管理に手間がかからず小型化が可能であると同時に、計測結果が「大きさ」と「数」という数値情報として直接的に得られるという利点がある。また、OPC、L-OPC は商品化され世界中で 100 台以上が市販され使用者も多い (Zhou and Tande, 2002)。こうした利点を生かして、CUFES (Checkly *et al.*, 1997, 2000) などのような航走中のデータ収集、Moving Vessel Profiler (MVP; Brooke Ocean Technologies) と組み合わせた高速 (12~14 kt) での連続観測 (Herman *et al.*, 2004)、プランクトンネット試料の解析 (Mullin *et al.*, 2003) など有効な利用手法が提示されている。

2.3. 画像記録系

画像によるプランクトンの記録は 1950 年代に 35mm スチルカメラを用いたことから始まり (Nishizawa *et al.*, 1954)、ほぼ同時期に深海の記録のためテレビシステムも導入された (Backus and Barnes, 1957)。スチルカメラではシルエット撮影法を用いることで、*in situ* において鮮明かつ高速で動物プランクトン画像の取得が可能となった (Edgerton, 1977; Ortner *et al.*, 1979)。カメラによる記録では濾水量の低さをカバーするため、また、シルエット撮影ではプランクトンを撮影面に集める必要があるため、プランクトンネットのコードエンドにカメラを取り付けて使用される場合が多かった (Ortner *et al.*, 1981; Olney and Houde, 1993; Lenz *et al.*, 1995)。しかし、ネットによる濃縮と組み合わせた撮影は定量性に問題があるとともに、濃縮によるプランクトンの物理的な破損を完全に排除できない。また、スチルカメラによる画像記録は、記録するフィルム容量に限られるという制限もある。高い空間分解能でプランクトンを記録するために撮影間隔を短くした場合は記録時間は短く、逆に記録時間を延ばすために撮影間隔を長くすると空間分解能が低下する。フィルムの現象、焼き付けに時間がかかり、実時間でデータを得ることが難しく、フィルムデータの解析に時間と労力を要するという問題もあった。その結果、現在の高画素 CCD (または CMOS) カメラと大容量記憶装置によるデジタル記録が可能となるまで、スチルカメラに変わってビデオカメラを用いた測器が発展した。現在は、試料の破損を避け、プランクトンの行動や形態を観察するため、ネットによる濃縮をせずにカメラ単独での記録 (stand-alone system) が中心になりつつある。

外洋の動物プランクトンの観測における単独記録装

置は、潜水艇に搭載したカメラによるプランクトンの観測から始まった (Wiebe and Benfield, 2003)。その後、スキューバダイビングによるゼラチン質プランクトンの観測や (Hamner *et al.*, 1975; Biggs *et al.*, 1981), 有人・無人潜水艇, Remotely-Operated Vehicle (ROV) に搭載されたカメラにより, 新種の記録ばかりでなく, ゼラチン質プランクトンの現存量把握や採集による代謝活性や生理特性の解明などに成果をあげている (Mackie and Mills, 1983; Bailey *et al.*, 1995; Schulze *et al.*, 1995; Youngbluth and Bamstedt, 2001)。しかし, 潜水艇やROVによる観測は装置の維持, 運用を含めて多大なコストを要求し, 運用日数(回数)や運用海域も限られる。こうした問題に対し, さらに小型あるいは簡素化した装置にビデオカメラを搭載して記録する測器が1990年代以降に数多く考案された。ビデオカメラと組み合わせた単独記録装置として, 現在, 動物プランクトンを対象に複数以上の観測実績が報告されているのは,

- 1) Video Plankton Recorder (VPR; Davis *et al.*, 1992)
- 2) Underwater Video Profiler (UVP; Gorsky *et al.*, 1992)
- 3) Zooplankton Visualization and Imaging System (ZOOVIS; Benfield *et al.*, 2003)
- 4) Shadow Image Particle Profiling and Evaluation Recorder (SIPPER; Samson *et al.*, 2001)

などである。これ以外にVPRを単純化したIn Situ Video Camera (ISVC; Tiselius, 1998), 大型クラゲ類を対象としてビデオカメラで記録するJellyCam (Graham *et al.*, 2003), 小型レーザーを利用したホログラフィック撮影でプランクトンを記録するSubmersible holography systemが開発されている (Malkiel *et al.*, 1999)。単独記録システム以外では, ネットと組み合わせた測器としてIchthyo-plankton Recorder (Lenz *et al.*, 1995), フローセル (flow cell) を基盤とした水中顕微鏡 (津田, 1994), OPCと組み合わせ計数と計測も同時に行うCUFES (Checkley *et al.*, 1997; 2000), CUFESを発展させたREFLICS (Iwamoto *et al.*, 2001), フローサイトメトリー (flow cytometry) と画像記録を組み合わせたFlowCAM (Sieracki *et al.*, 1998), ポンプによる濃縮を行うが*in situ*での利用も可能なUnderwater Microscope (Akiba and Kakui, 2000)などが開発されている。しかし, 上記1)~4)の測器, CUFES, および製品として市販されているFlowCAM以外, 現場における実用的な観測ではほとんど用いられていない。プランクトン以外では, 懸濁粒子を対象とした測器としてUnderwater video

system (Eisma *et al.*, 1990; Lunven *et al.*, 2003) などが, ビームトロールなどと組み合わせて底魚仔魚の監視を行うFishカメラがある (Cappo *et al.*, 2004; Spencer *et al.*, 2005)。

2.3.1. VPR

VPRはビデオ顕微鏡システムを基盤とし, 以下の要求を満たすために開発された (Davis *et al.*, 1992)。

- 1) μm ~ km の尺度で連続的かつ自動的に電氣的画像データを収集する。
- 2) 画像データは主要な動物プランクトン群を選別するために十分な解像度を持つ。
- 3) 画像データの較正のために粒子を採集できる能力を有する。
- 4) 航行中, あるいはネット採集中に画像データ取得ができる能力を有する。
- 5) 実時間に近い速度で分類群の解析ができる。

1), 2) および4) を満たすため, 視野の異なる4台のビデオカメラ(視野体積は $0.6\sim 26 \times 10^3 \text{ mm}^3$)で同時記録を行い, 60 fpsでカメラとストロボを同調させ, ビデオの1フレーム(Frame)ごとの高解像度画像をフレーム単位での編集が可能なビデオ記録装置(BetaCAM)に記録した。また, 鮮明なプランクトン画像が得られるようにプランクトンの斜め後方からストロボを照射し, 暗視野となる照明方法を用いた。3)のためには, カメラ後方にLonghurst-Hardy Plankton Recorder (LHPR; Longhurst *et al.*, 1966)を取り付け, 画像記録と同時にプランクトン採集を行った。5)のためには, ニューラルネットワーク(Neural network)を利用した画像解析技術を導入し, 分類群ごとに自動で選別かつ計測を行えるソフトウェアを開発するとともに (Tang *et al.*, 1998), ビデオフレームから必要とするプランクトン画像を実時間で抽出するソフトウェアを開発した。VPRは開発当初から画像の記録から処理までを一連のソフトウェアとしてまとめて設計された点が他の画像記録系の測器より優れた点と考えられる。

初期のVPRは大型構造体に搭載されていた (Davis *et al.*, 1992)。その後, 搭載カメラを2台にするとともにプランクトンの逃避の原因となったLHPRを外して小型化され, 小型曳航体のV-finに搭載されて使用された。また, 画像を含む全てのデータを光ケーブルを通じて船上で記録し, 実時間観測ができるよう改良された (Davis, 私信; Wiebe and Benfield, 2003)。現在のVPR II (Davis *et al.*, 2005)では画像を含む全データがデジタル化され, 画素数が $1024 \times 1024 \text{ pixel}$ のCCDカメラを使うことで1台のカメラで解像度の向上と広

視野化を目指すとともに、3次元で移動できる新しい曳航体と組み合わせて高速かつ広域での観測を可能にした。さらに、記録データを内蔵ハードディスクに記録し、船上に光ケーブルでデータを転送せずに使用可能なAutonomous VPR (AVPR) や、フローセルと組み合わせて実験室内でネット採集プランクトンの計数、計測を目的としたBench-top VPR (BVPR) の開発も進められている (Gallager, 私信; 市川, 2006)。VPRはそれ自体を曳航体に搭載して単独で観測するだけでなく、MOCNESSなどのプランクトンネット、BIOMAPPER II (Wiebe *et al.*, 2002) やJAISONなどの大型曳航式観測装置、海底に設置して自動昇降を行いながら観測する装置 (Autonomous Vertically Profiling Plankton Observatory, AVPPO; <http://4dgeo.whoi.edu/vpr/>) などに搭載された。また、フローセルと組み合わせ、航行中に実時間観測と記録が可能な装置も考案されている。VPRはU. S. GLOBECプログラムにおいて、Georges Bankにおけるプランクトンの分布と海洋構造との関係 (Ashjian *et al.*, 2001; Davis *et al.*, 1996; Gallger *et al.*, 1996; Norrbin *et al.*, 1996), プランクトンの行動 (Benfield *et al.*, 2000; Gallger *et al.*, 2004), 北太平洋における放散虫類の分布 (Benfield *et al.*, 2002) など多くの成果が公表されている。

2.3.2. UVP

UVPは、当初、懸濁粒子の分布および大きさを明らかにするために開発された (Gorsky *et al.*, 1992)。鉛直に降下させながら観測するように設計され、水平あるいは斜行曳航はできない。降下速度は1 m/sで逃避能力の高い動物プランクトンの観測には向かないと考えられるが、クラゲなどのマクロ動物プランクトンの記録は可能である (Gorsky and Picheral, 2002)。本体水中部に電源が搭載され、ビデオカメラで記録された画像データも水中部に搭載されたVTRで記録されるため、VPRのように専用のウィンチとケーブルを必要としない。画像は、横からの照明照射により暗視野で記録される。現在のUVP III (Gorsky *et al.*, 2000b) では、視野の異なる2台のCCDカメラを用いて $1.3 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ と $6.5 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ の空間を記録し、それぞれ0.5 mm以上の粒子または5 mm以上のマクロ動物プランクトンを対象とする。カメラのフレームレートを30 fpsに上げることで1.5 m/sでの降下を可能とした。UVPは地中海を中心に懸濁粒子の挙動に関する成果があるが (Gorsky *et al.*, 2000a; 2004; Stemmann *et al.*, 2002)、動物プランクトンに関しては、フィヨルドにおける動物プランクトンが鉛直的かつ地域的に分類群

ごとで分布し、鉛直移動しない種類については懸濁粒子の分布と重なることを示したのみである (Gorsky *et al.*, 2000a)。

2.3.3. ZOOVIS

ZOOVISはVPRとUVPを参考に開発された (Benfield *et al.*, 2003)。UVP IIIやVPR IIより高画素 (2048 × 2048 pixel) のデジタルCCDカメラを用いて白黒画像を記録する。画像データと環境データは、100Mbpsのイーサネットを通じた船上のコンピュータに転送され、画像は非圧縮のTIFF画像ファイルとして記録される。カメラは2 fpsで撮影可能であるがデータ転送とディスクへの記録速度の関係から、実際は約10分の1の速度でしか記録ができない。したがって0.5 m/sで降下した場合、鉛直方向に記録可能な空間分解能は2 mでVPRやUVPより粗い。記録された画像データは画像解析ソフトウェアを用いてプランクトン部分のみを抽出し大きさを計測する。ただし、現時点ではVPRのような自動選別のための支援ソフトウェアは備えていない。ZOOVISはコンパクトであるが、構造上、鉛直降下時にしか定量的なデータが得られない。また、空間分解能を上げて記録するためには降下速度を遅くする必要があり、逃避能力の高いプランクトンの定量性には問題が残ると考えられる。現在は音響機器と組み合わせて使用されている (Benfield *et al.*, 2004; Trevorrow *et al.*, 2005)。

2.3.4. SIPPER

SIPPER (Samson *et al.*, 2001) は、VPRやUVPで使用されているビデオカメラあるいはCCDカメラ (エリアスキャンカメラ, Area scan camera) の代わりに高画素のラインスキャンカメラ (Line scan camera) を用いてプランクトン画像を記録する。96 × 96 × 1 mmのセルを通過するプランクトンを2台のカメラを用いてx-y方向から記録する。したがって、VPR、UVPおよびZOOVISではプランクトンの姿勢によっては正確な大きさが把握できない問題も、SIPPERではプランクトンは3次元の立体的画像として記録されることで解決される。さらに透過光で撮影するためシルエット撮影に近い画像が得られ、透明度の高い管クラゲ類についても非常に細かな形態構造まで記録されている (Samson *et al.*, 2001)。最大画素数は4096 × 2048 pixelであるが、他の測器と同様に高画素ではスキャン時間の増大および記録速度の低下により、高速曳航で記録可能な空間分解能は粗くなる。また、ラインスキャンカメラの特性として撮影中に移動速度が変わると形がゆがむ場合がある。SIPPERはネット採集用具、

採水器、OPCなどを装備した大型のプラットホーム (High-Resolution Sampler, HRS; Sutton *et al.*, 2001) と組み合わせて使用され、メキシコ湾の表層において、従来のネット採集ではゼラチン質プランクトンが10%以上の過小評価となっていたことを示した (Remsen *et al.*, 2004)。

2.4. 画像データの解析

プランクトンネットで採集された試料を顕微鏡下で選別し、計数・計測すると同様に、画像による記録では、記録された後の画像解析作業が不可欠である。しかし、膨大な量の画像データまたはビデオテープから、手作業で必要な画像範囲を選別し、プランクトンの同定および計数・計測を行うことは、プランクトンネットで採集された試料の解析以上に時間と労力を要する。

コンピュータなど電子機器の発展とともに、プランクトンが記録された画像を計測し、計測された特徴値を元に分類群を識別する試みがなされ、1970年代後半から植物プランクトン (Uhlman *et al.*, 1978; Tsuji and Nishikawa, 1984)、動物プランクトン (Jeffries *et al.*, 1984; Terazaki and Ishii, 1986) で検討されてきた。初期はプランクトンの長さなどを画像処理技術を用いて検出していたが、その後、画像処理技術の発展および機能の向上とともに、プランクトンの特徴を表す特徴値を画像から抽出し、その特徴を統計処理してプランクトンを識別する研究が行われるようになった (中野, 1994)。近年は単一種の識別だけでなく、ニューラルネットワークやファジィ理論を用いて、複数の種あるいは分類群を識別する研究が行われている (廣田, 1993; Tang *et al.*, 1998; Akiba and Kakui, 2001; Luo *et al.*, 2004)。

VPR II では、事前に設定した複数の条件値 (二値化のためのしきい値など) により、記録されたビデオのフレーム内からプランクトンが写った画像の領域 (関心領域, Region of Interest, ROI) のみを自動で抽出する (Davis *et al.*, 2005)。ROIの抽出作業は専用のハードウェアを用いて行われるため処理速度が速い。また、画像データとして必要な領域のみをROIとして抽出するためデータ容量が小さく高速データ転送と記録が可能である。しかし、抽出条件を適切に設定しない場合、必要とする画像が抽出・記録されない場合もあり (市川ら, 2005)、事前の校正作業による条件設定と手順が重要である。なお、この点については第3章で検討を行った。VPR II では、記録された画像は専用の解析ソフトウェア (Visual Plankton) を用いて分類群ご

とに選別し、計数・計測および図化が可能である。選別作業は、ニューラルネットワークを用いてプランクトンの形態を特徴値として数値化したデータベースを作成し (Tang *et al.*, 1998)、それを元に自動で行われる。Davis *et al.* (2004) は種組成の単調なGeorges Bankにおけるカイアシ類で79%の確率で自動選別が可能であると報告した。しかし、種組成が複雑な日本の周辺海域では、データベースが不十分なことと合わせて、Georges Bankで行われているような自動化はまだ困難である (市川ら, 2003)。また、VPRに限らず、カメラを用いて2次元で画像を記録する測器では、対象物の向きや姿勢により、必要とする部位の大きさが計測できないという問題点がある。VPRでは画像解析からプランクトンの向きや姿勢を推定する試みもされているが解決には至っていない。

UVPとZOOVISでは、ビデオのフレーム内からROI抽出は行わず、フレーム単位で全ての画像を記録し、画像解析もフレーム単位で行う。ROIに較べてデータ量が多いため、フレームの枚数が多い場合、VPRのような準実時間での処理は難しいと考えられる。しかし、UVP、ZOOVISとも画像解析の詳細について報告はない。SIPPERでは2時間分のデータを2ヶ月かけて手動で選別したが (Remsen *et al.*, 2004)、現在、自動選別の手法が検討されている (Luo *et al.*, 2004)。一方、*in situ* で記録された画像の解析だけでなく、ネットで採集されたプランクトンについても画像として記録し、分類群ごとに選別し計数・計測をすることも試みられている。例えば、スキャナーと解析ソフトウェアを組み合わせたZOOSCAN (Grosjean *et al.*, 2004) やフローセルにネット採集試料を流して記録するBVPRがあり (Gallager, 私信; 市川, 2006)、ソフトウェア単体としてはPlankton Visual Analyzer (PVA) が公開されている (Boyra *et al.*, 2005)。プランクトンの自動識別は、画像解析技術の発展とともに精度向上が図られると考えられるが、最終的には人間の目による判断が不可欠である。また、VPRにおけるVisual Planktonのように、画像識別に用いるデータベースによって認識精度が変わるため、観測海域、対象生物による精査も不可欠であると考えられる。今後、自動識別の判定精度を高めることはもちろんであるが、手作業による負担を軽減するようなソフトウェアの改良も必要である。一方、識別および選別されたプランクトン画像を自動で計数・計測した結果は、顕微鏡や画像解析ソフトウェアで実測した値からの換算式を作成することにより (Terazaki and Ishii, 1986)、有効に活用できると考えられる。

画像記録系の測器における今後の問題点は、画素数の向上および記録面積（体積）の拡大である。フレームレートを落とすことにより、現在の民生技術でも1000万画素の記録は可能である。しかし、曳航速度を上げ、かつ、高い空間分解能で記録可能とするためには、少なくとも30 fpsで画像が記録できることが必要である。現在のハイビジョンの画素数である1920 × 1080 pixelでも、例えばノルパケットの口径と同じ面積を記録した場合、画像の解像度は約0.08 mm/pixelに過ぎない。分類群の識別に、長さ方向で50 pixelの画素数を必要とした場合、3.8 mm以上の対象しか識別できないことになる。現在使用できるカメラ、データ転送手順、圧縮技術および記憶装置では、3840 × 2160 pixelが最大画素である。今後の技術の発展により、こうした問題は解消していくと考えられるが、光学を用いた場合においてもLarge-area Plankton Imaging System (LAPIS; Wiebe and Benfield, 2003)のように広い視野と解像度が同時に得られるような手法や、カラー情報を元にしたプランクトン識別技術を開発していくことも必要と思われる（寺崎ら, 2001）。

第3章 VPR II における画像取得パラメーターの特性

3.1. はじめに

Video Plankton Recorder (VPR) はUnderwater Video Profiler (UVP; Gorsky *et al.*, 1992; Gorsky *et al.*, 2000a; 2000b) やShadow Image Particle Profiling and Evaluation Recorder (SIPPER; Samson *et al.*, 2001) のように、懸濁粒子やゼラチン質プランクトンを明確な対象として開発されていない（第2章参照）。しかし、クラゲ類や懸濁粒子の画像は記録されており（Davis *et al.*, 1996; Asijan *et al.*, 2001; 市川ら, 2003）、ゼラチン質プランクトンの現存量把握には、採集時の物理的な破損が無い場合ネット採集より有効である事が示唆されている（Benfield *et al.*, 1996）。したがって、ゼラチン質プランクトンの画像取得に対するVPRの特性を明らかにすることで、より確実に画像データが得られるとともに、測器としてのVPRの有用性が高まると考えられる。

本章では、ゼラチン質プランクトンのように透明なプランクトンの画像をVPRで取得する場合、合焦した画像を確実に記録できる条件値（パラメーター）の設定範囲を把握し校正の手順を確立すること、さらにカイアシ類とのパラメーターの相違点を明らかにすることを目的とした。また、VPR II の画像記録過程にお

ける問題点を明らかにし、定量性を高めるために必要な手法について検討した。

3.2. VPR II の画像取得パラメーターについて

本研究で使用したVPR II では、1/25秒ごとにカメラから送られてくる画像（フレーム）から、プランクトンなどの対象物が記録された関心領域（Region of Interest, ROI）を抽出し、画像ファイルとして保存する（Davis *et al.*, 2004; 2005）。事前の校正で設定したパラメーターが不適切な場合、目的とするプランクトンのROIが抽出されなかったり、また合焦していないROIが抽出される。VPR II のカメラが記録する空間の体積（Image Volume）内で合焦する範囲（被写界深度, Depth of Field, DOF）を明らかにし、DOF内にあるプランクトンがROIとして保存できるようにパラメーターを設定することが必要である（Davis *et al.*, 2004; 2005）。

ROIの抽出は船上の専用コンピュータと専用の画像取得ソフトウェアを使って行われる（Fig. 3-1）。ROIの抽出に関わるのは以下の4パラメーターである。

- 1) 画像を二値化し、ROIとして抽出する際の境界（輪郭）を判定
 - ・・・ Segmentation Threshold
- 2) 対象物の合焦の度合いを判定
 - ・・・ Sobel Threshold
- 3) 対象物の周囲に残す空間の大きさを決定
 - ・・・ Growth Scale
- 4) ROI間の距離がどのくらい離れている場合に1つのROIとして抽出するかを決定
 - ・・・ Min. Join Distance

このうち、Segmentation Threshold（以下Seg-T）およびSobel Threshold（以下Sob-T）がROIの抽出の際、主要な役割を果たす。VPR II の校正では生きたカイアシ類、あるいはホルマリン固定したカイアシ類を用いる（Davis *et al.*, 2004）。しかし、カイアシ類とクラゲのようなゼラチン質プランクトンでは、光の反射、透過などの特性が異なるため、ROIの抽出に適したパラメーター範囲も異なると予想される。したがって、VPR II を用いてゼラチン質プランクトンの現存量を見積もるためには、透明なプランクトンに対して、合焦した画像の選別に適したパラメーター範囲を把握し、カイアシ類との相違を明らかにすることが不可欠と考えられる。

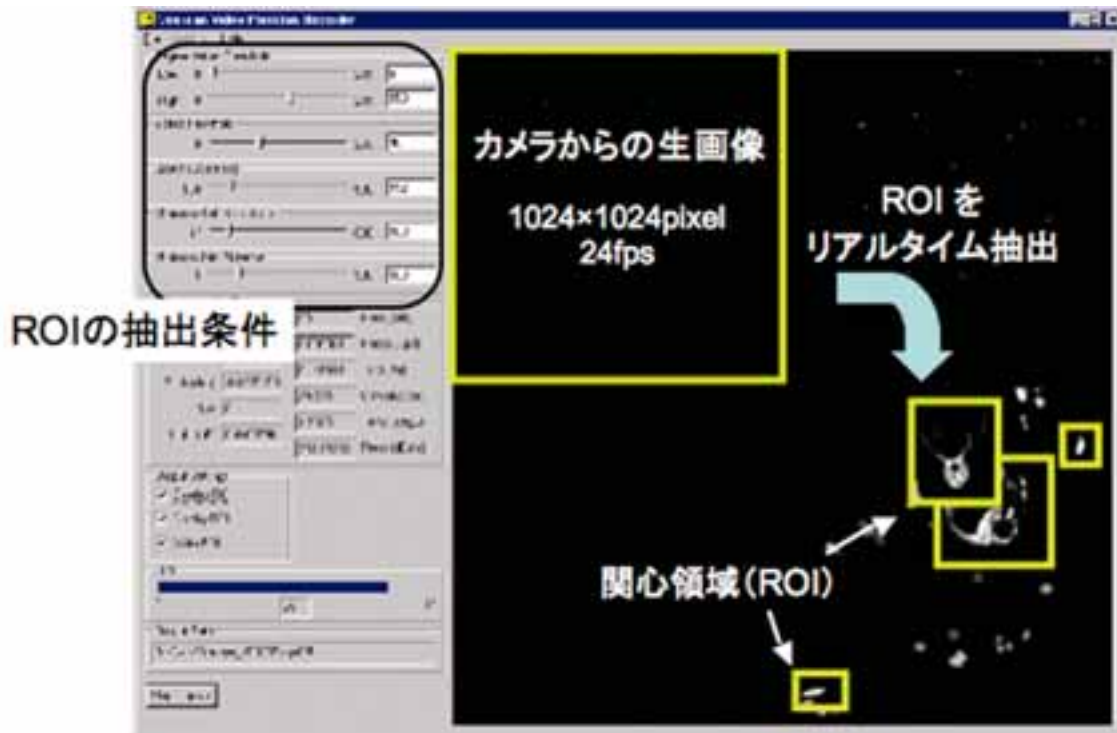


Fig. 3-1. A screen image of the image capture software for VPR II. Parameters for ROI extraction can be changed using the upper left panel sliders. Right area show the images captured from CCD camera.

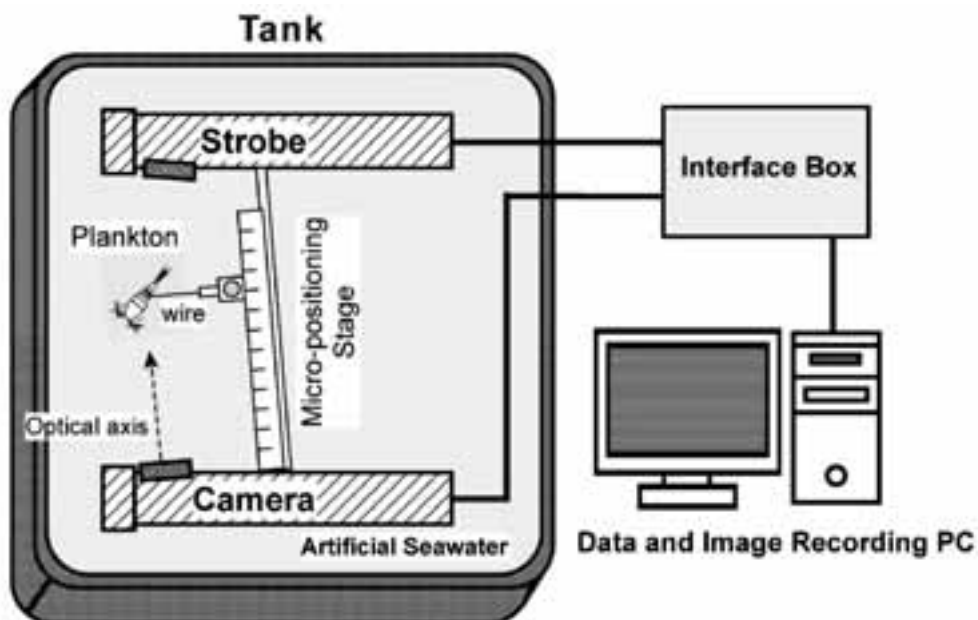


Fig. 3-2. Schematic representation of the experimental apparatus. The optical unit (CCD camera and strobe light) of VPR II was immersed in an artificial seawater tank, and it was connected to the image recording computer through the interface box. The object plankton was attached using a thin wire to the micro-positioning stage.

3.3. 方法

3.3.1. 室内実験装置の概要

実験には、水産総合研究センター遠洋水産研究所所属調査船俊鷹丸に搭載された曳航式VPR (VPR II, Davis *et al.*, 2005) の光学ユニット (CCDカメラとストロボ部分), 室内校正用に製作した光学ユニット用電源とストロボ同調コントローラーを組み込んだインターフェースボックス, および画像圧縮ボードと画像取得ソフトウェアが導入されたコンピュータを用いた (Fig. 3-2)。

光学ユニットは、人工海水 (Red Sea Salt, Red Sea) を満たした幅1.5×奥行0.8×高さ0.8 mの水槽に入れた (Fig. 3-2)。水槽の内側は光の反射を押さえる黒色のカットングシートで覆い、実験中は外光の影響をさけるために室内の照明を落とした。校正の対象プランクトンとして、ホルマリン固定されたカイアシ類 (*Neocalanus plumchrus*, 前体部長 = 約 8 mm) およびクラゲ (管クラゲの一種, 遊泳鐘部分 = 約 8 mm) を用意した。プランクトンは黒色ワイヤーの先端に取り付け、これをカメラの光軸上に設けたレールに装着し、カメラのレンズからの距離をが分かるようにスケールを取り付けた (Fig. 3-2)。プランクトンは、カメラ視野 (x-y方向) の中央に写るようにワイヤーを調整して取り付けた (Fig. 3-3)。Davis *et al.* (1992, 2005) は校正の際、視野の中央だけでなく4隅でも検討が必要としているが、本実験では4隅での結果に差違がなかったため、中央の結果のみを示した。VPRカメラの左右 (x軸) および上下 (y軸) 方向の

視野 (Dx および Dy) は44 × 43 mmに調整した。プランクトンのサイズは、マイクロメーターなど既知のスケールをカメラで事前に記録し、カメラの画素数あたりの長さ (mm/pixel) を計算して換算した。

3.3.2. プランクトン分類群とパラメーターとの関係

フレームからROIを抽出する場合、Seg-TおよびSob-Tの2パラメーターが主要な役割を果たす。Seg-TおよびSob-Tを変えた場合、カメラからどの位置で、カイアシ類およびクラゲがROIとして抽出されるかを明らかにするため、Fig. 3-2に示した実験装置を用いて検討した。Seg-TおよびSob-Tの設定は画像取得ソフトウェア上で行い、それぞれ実用上有効と考えられた70~200および0~130の範囲で組み合わせ設定した。ソフトウェア上でパラメーターを設定後、レール上のプランクトンをカメラ光軸に沿って10 mmずつ動かしながら、ROIとしての画像抽出の有無、その時のカメラレンズからの距離、およびプランクトン画像を記録した。

3.3.3. DOFの客観的な判断

VPRカメラの合焦範囲 (被写界深度, Depth of Field, 以下DOF) を客観的に判断するため、Fig. 3-2に示した実験装置を用いて検討した。校正の対象としてカイアシ類、クラゲをそれぞれ2個体ずつ (カイアシ類: C1, C2, クラゲ: J1, J2) 使用した。プランクトンをカメラ側から10 mmずつストロボ側に移動させ、カメラに写った画像をMicrosoft Windows®標準の画像キャプチャー機能を用いて記録した。記録された

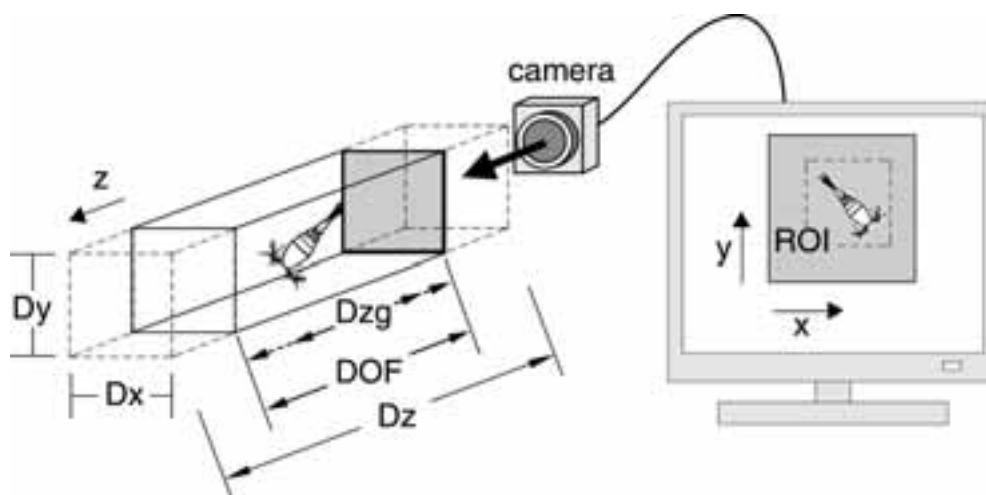


Fig. 3-3. Schematic diagram of the image volume of VPR II. The space enclosed by the solid lines is the in-focus area and that enclosed by the dotted lines is the out-focus area. Dx and Dy are the width and the height of the field of view, respectively. Dz is the depth of the field of view. DOF is the depth of field. Dzg is the ROIs extracted area within the DOF.

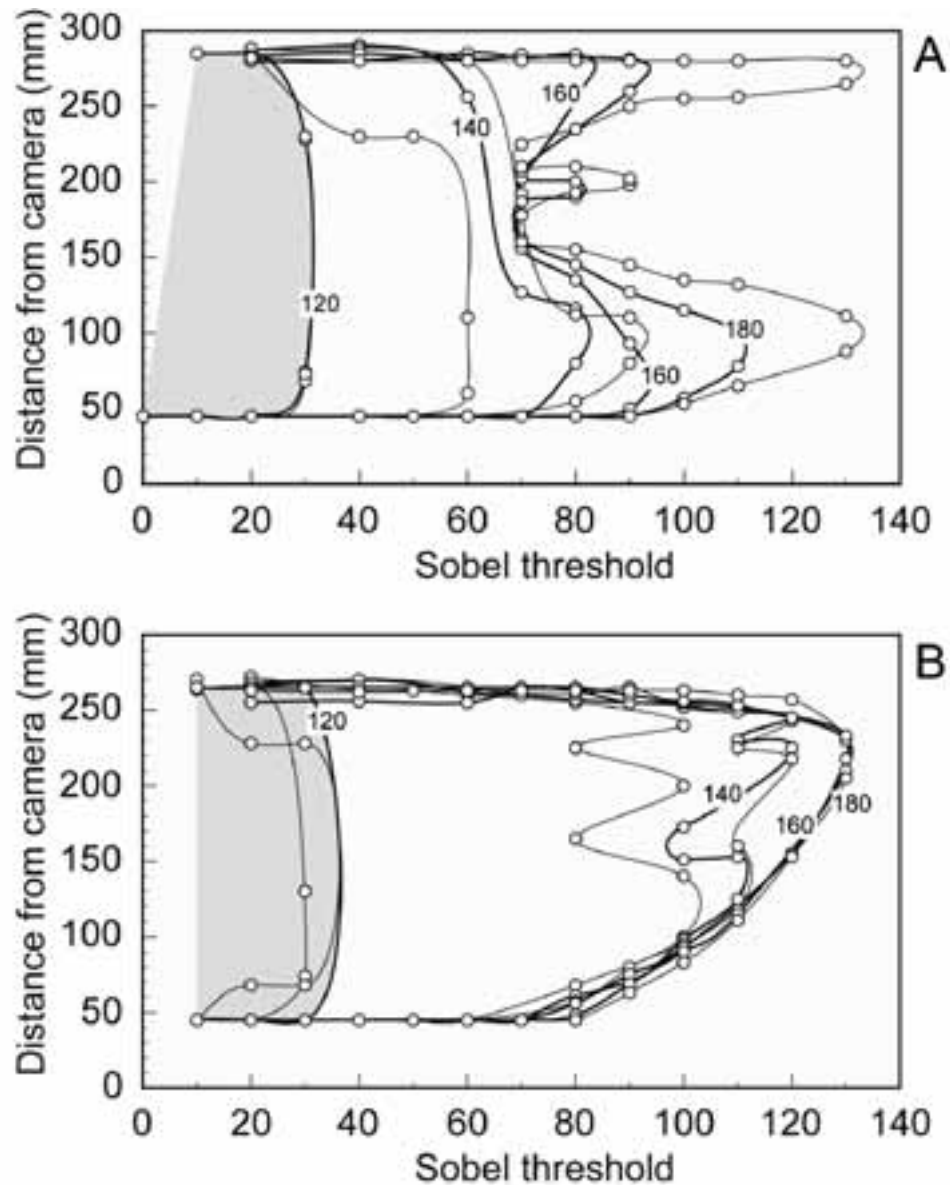


Fig. 3-4. The relationship among the Sobel threshold value, the distance from the camera and the segmentation threshold value for specimens of copepod (A) and jellyfish (B). Object images were captured in the raw video window inside of the spline curve except for the shaded areas which correspond to less than 120 of the segmentation threshold value.

画像は画像解析ソフトウェア (ImagePro Plus ver.4.5, プラネトン (株)) を用いて処理した。キャプチャーによって記録された画像ファイルを開き、その中からプランクトンが写った範囲のみを手動で選択した。選択範囲をグレースケールに変換後、画像からノイズを除去するためMedianフィルターで処理し、輪郭を抽出するためRobertsフィルター処理を行った。一連のフィルター処理後、画像の輝度分布を解析し、最大輝度がどの階調にあるか調べ、合焦の判定を行った (Pingle, 1969; 岡崎, 1996)。

3.4. 結果

3.4.1. プランクトン分類群とパラメーターとの関係

フレームからROIの抽出に使用される主要なパラメーター、Seg-TおよびSob-Tを変えた場合、カメラからどの位置で視野内にプランクトンが写り、またプランクトン部分がROIとして抽出されたかをFig. 3-4に示した。プランクトンが視野内に写った範囲 (カメラからの距離) は、Image Volumeを計算する際の視野の奥行き (z軸方向の長さ, Dz, Fig. 3-3) に相当する。カイアシ類, クラゲ共に図中の曲線で囲まれた内

側で視野内に写った。しかし、Seg-Tが120以下（影の部分）では、カメラからいずれの距離でも視野全体が抽出され、対象としたプランクトン部分はROIとして抽出されなかった。カイアシ類、クラゲ共に、実験で設定したSeg-Tの最大値である200までROIが抽出され、Seg-Tが高いほどSob-Tも高い値までROIが抽出された。しかし、Sob-Tが高くなると共にDzは狭くなった。

カイアシ類では、Seg-Tが160以上、Sob-Tが70以上の場合、ROIが抽出されたDzの範囲はカメラからの距離が100 mmを中心とした部分と、270 mmを中心とした部分の2つに分れた (Fig. 3-4 A)。さらに、Seg-Tが180以上、Sob-Tが70~90では、カメラからの距離が200 mmを中心とした狭い範囲でもROIとして画像が抽出された。一方、クラゲはカイアシ類とは異なり、Seg-Tが130以上、Sob-Tが80以下では、ほとんど全ての範囲においてROIが抽出された (Fig. 3-4 B)。Seg-Tが130~150の間では、カメラからの距離が160 mmおよび230 mm付近でDzは狭くなったが、Seg-Tが160以上ではSob-Tの値に関わらず、ほぼ同じDzとなった。この時、Sob-Tが高くなると共にカメラから

遠い200~250 mmを中心とした範囲でROIが抽出された。

3.4.2. 合焦範囲

カメラからプランクトンまでの距離を変えた場合、プランクトン画像の輝度階調の最大値（以下、輝度最大値）の変化をFig. 3-5に示した。C1では、カメラからの距離が45~175 mmまで輝度最大値は徐々に高くなり、175~205 mmで最大となった後、205 mm以上で再び低下した。C2では、140 mmまでC1とほぼ同じように変化をしたが、140 mm以上ではC1より低く推移し、185 mmで最大となった。クラゲでは、カメラからの距離が110 mm付近で変化はあるものの、155 mmまで輝度最大値は徐々に高くなり、J1、J2共に155~205 mmの範囲で最大となった。205 mm以上では急激に低下し、265 mmでは最低値となった。J1、J2共、最大値となったカメラからの距離はほぼ同じであったが、輝度最大値の変化は、カメラからの距離が同じ場合、J2が常に高い値となった。カイアシ類、クラゲ共に、視覚的にはカメラからの距離が130~230 mmの間、輝度最大値が150以上でプランクトンの形態

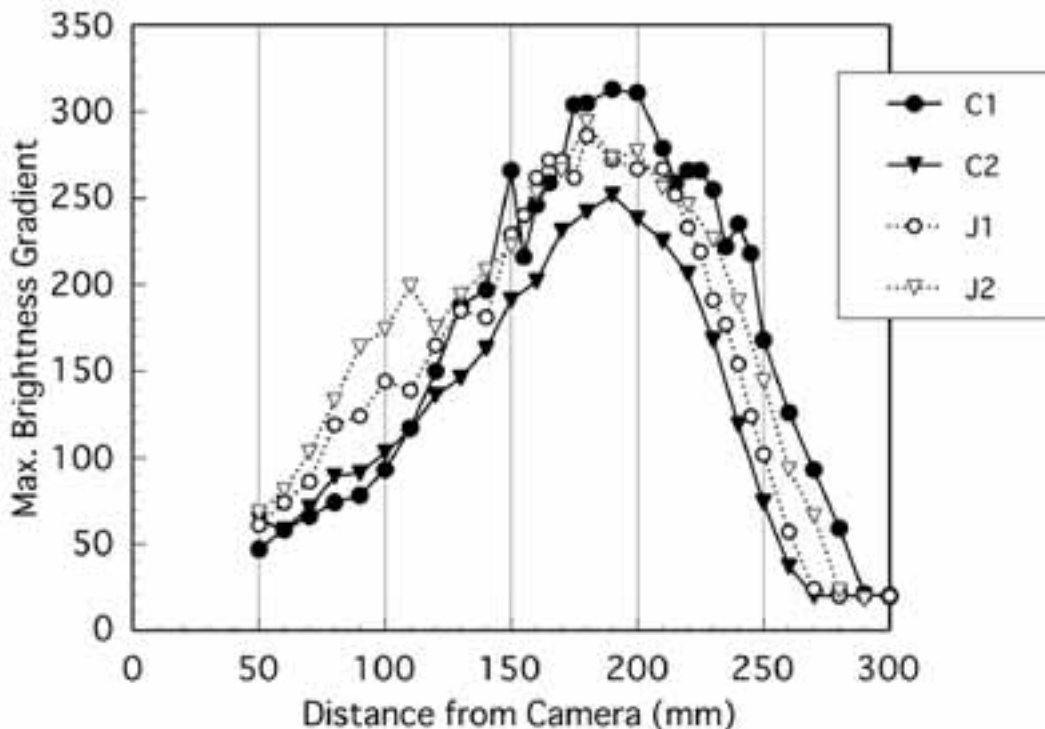


Fig. 3-5. The relationship between the distance from camera (mm) and the maximum brightness gradient. To obtain the maximum brightness gradient for the object plankton, a histogram analysis was applied after the median filter and the Roberts filter management. C1, C2: copepods. J1, J2: jellyfish.

は十分に識別可能であり、カメラからの距離が130～230 mmの範囲が、本実験においてDOFに相当すると考えられた。

3.4.3. 合焦範囲とプランクトン分類群のパラメータの関係

VPR IIの較正では、合焦したプランクトン画像のみがROIとして抽出されるようにSeg-TおよびSob-Tを設定する。Fig. 3-4より、各パラメータ値において、ROIとして抽出された範囲(Dz)を求め、さらにDz範囲内でDOF内、すなわちカメラから130～230 mmの範囲(Fig. 3-5)にあった長さをDzgとして(Fig. 3-3)、Dzに対するDzgの割合(Dzg/Dz)を計算した(Fig. 3-6)。図中の破線はカイアシ類、実線はクラゲである。数字は Dzg/Dz の割合(%)を示し、0%ではROIとして抽出されず、 $Dzg = Dz = DOF$ で

100%となる。影の部分ではFig. 3-4と同様に視野全体が記録され、ROIとしてプランクトン画像が抽出されなかった。0%および影の範囲はパラメータとしては不適切であり、それ以外の範囲で Dzg/Dz が高いほど画像を抽出する場合のパラメータとして適切と考えられる。

Dzg/Dz の割合はカイアシ類では0～64.1%、クラゲでは0～86.9%の範囲となった。 Dzg/Dz 最大値、すなわち最適なSeg-T、Sob-Tは、カイアシ類でそれぞれ70、30で、クラゲでそれぞれ180、130で得られた。カイアシ類、クラゲで Dzg/Dz の割合が50%以上となったのは、Seg-TおよびSob-Tが、カイアシ類でそれぞれ120～150、20～60、クラゲでそれぞれ140～200、80～130であり、重なる部分はなかった。カイアシ類、クラゲ共に Dzg/Dz が0%以上で重なっていたのは、Seg-TおよびSob-Tがそれぞれ120～130、40～70

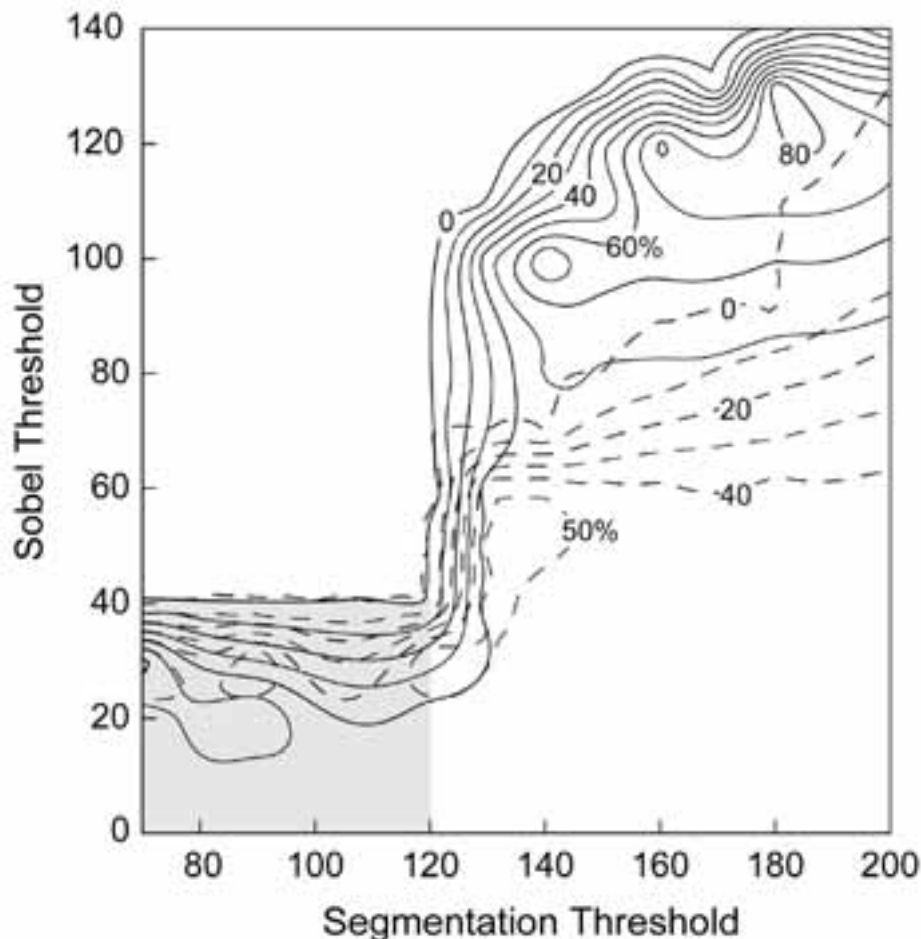


Fig. 3-6. The percentage of Dzg to Dz corresponding to the segmentation and the Sobel threshold value. Dz and Dzg were calculated from Fig. 3-4 and DOF was estimated from the result of Fig. 3-5 as 100mm. Solid line and dotted line show specimens of copepod and jellyfish, respectively. ROIs were not extracted for the shaded area which corresponds to less than 120 of the segmentation threshold value.

付近、および160以上、80以上の範囲であり、この範囲であればカイアシ類、クラゲ共に画像が記録されることが示された。Seg-Tが120~130の範囲では、Sob-Tの値に関わらず、いずれのプランクトンでもDzg/Dzは急激に変化した。また、Seg-Tが160以上、Sob-Tが80以上の範囲では、カイアシ類のDzg/Dzの割合は10%以下と低かった。合焦した画像のみをROIとして抽出するために最適なパラメーターは、カイアシ類とクラゲでは異なることが示された。

3.5. 考 察

VPR IIにおける較正の目的の一つは、データの定量性を高めるためImage Volume内においてDOFの範囲を明らかにし、フレームからDOF内にあるプランクトンなど対象とするROIのみを抽出できるようにパラメーターを決定することにある (Davis *et al.*, 1992; 2004)。しかし、ゼラチン質プランクトンに対する較正の記載、あるいは光学的特性が異なると考えられる分類群の画像取得に関する記載はない。本章でパラメーターの設定を検討した結果、合焦した画像のみをROIとして抽出するために適切なパラメーターは、カイアシ類とクラゲで異なることが示された (Fig. 3-6)。VPR IIでは、それぞれのプランクトンに適したパラメーターを同時に設定することはできないため、カイアシ類、クラゲを同時に記録するよう設定した場合、合焦していない画像も多く記録される。また、VPR IIでは視野内にプランクトンが写った場合でも、ROIとして抽出されない限り画像としての記録は残らない。例えば、Seg-T, Sob-Tをそれぞれ150, 100に設定した場合 (Fig. 3-6)、クラゲはROIとして抽出され、そのうち60%がDOF内にある画像と判断できる。しかし、カイアシ類ではROIとして抽出されないため (Figs. 3-5, 3-6) 計数対象とならず、過小評価となる可能性がある。カイアシ類とクラゲを同時に画像として記録するためには、カイアシ類、クラゲ共に0%以上の範囲にあることが必要条件である。この条件を満たすのは、Seg-Tを変えてもDzg/Dzの変化が少なく、クラゲが常に40%以上となるSeg-Tが140以上、Sob-Tが40~70と考えられた (Fig. 3-6)。

本研究では、ホルマリン固定試料を用いて実験を行った。観測対象となる生きたプランクトンの全種類について実験を行うことが理想であるが、これは現実的ではない。本研究ではROIの抽出過程で、カイアシ類とクラゲ双方を同時に満たす最適条件がないことが示された。Seg-T, Sob-Tともに光学的なしきい値を決定するパラメーターであるため、ホルマリン固定の有

無やプランクトンの種類に関わらず全種類に最適なROIの抽出条件はないと推定される。VPR IIでは画像として確実に記録されるようにROIの抽出条件を設定することが必要であり、本研究で用いたVPR IIの光学特性ではSeg-Tが140以上、Sob-Tが70以下がその範囲に相当すると考えられた。Seg-TとSob-Tともに値が大きいくらい確実に画像を記録できるが、抽出されたROIの1つあたり大きさ(面積)も増えるため、現状では装置の処理能力の関係からフレームレートが低下する。したがって、観測前に較正作業を行い、Seg-Tが140以上、Sob-Tが70以下の範囲でフレームレートが低下しない値を設定値として用いること現実的と考えられる。将来的には、目的とするプランクトンの光学的特性に適したパラメーターを用いて実時間の処理を行うと同時に、初期のVPRのように全フレームを記録し、観測後あるいは観測と並行して、他のプランクトンに適したパラメーターを使ってROIの抽出を行うようなシステムの構築が望ましいと考えられた。

Image Volumeの計算に必要なDzを得るためには、記録された画像からDOF内、あるいは一定の視野の範囲内にある画像だけを選択することが必要である。Fig. 3-5ではカイアシ類、クラゲに関わらず、輝度最大値が150以上の画像がDOF内にあることが示された。画像が合焦しているか否か、すなわち画像の縁部を判断するためには、Sobel, PrewittあるいはRobertsのような一次微分、あるいはLaplacianのような二次微分フィルターが有効とされている (Pingle, 1969; 岡崎, 1998)。VPR IIのようにデータがデジタル化される以前、ビデオテープに記録していたVPRでは、記録された映像からプランクトン画像を選択する際、Sobelを用いて同様の作業を行っていたが (Davis *et al.*, 1992; 1996)、VPR IIでは、このような作業について言及されていない (Davis *et al.*, 2004; 2005)。本章では画像の縁部の判定にRobertsを用いた輝度解析のみ検討を行ったが、画像をフィルター処理することで合焦した画像、あるいは一定の視野の範囲内にある画像だけを選択することが可能と考えられた (Fig. 3-5)。VPR IIでは、観測後、あるいは観測と並行して画像の縁部の解析を行い、DOF内あるいは一定の視野範囲にあるROIのみを抽出することで、定量的な計測が可能と考えられる。一方、合焦範囲内であってもカメラからの対象物の距離が変わることで、記録されたプランクトンサイズもわずかに変化する。カメラから対象となるプランクトンまでの厳密な距離を画像から判断することは困難であるが、合焦範囲内をプランクトンが任意に通過した場合、合焦範囲の中央のサイズで代表できると考えられた。今後、画像の縁部の判断に有効な

フィルター、プランクトンの光学的特性による相違、プランクトンの大きさによる影響などに対して検討するとともに、プランクトンの計測サイズの誤差範囲を正確に示すことが必要と考えられる。

本章における結果とDavis *et al.* (1992, 2005) を元に較正およびImage Volume算出の手順をFig. 3-7にまとめた。現行VPR II では視野内にプランクトンが写った場合でも、ROIとして抽出されない限り画像として記録されない。したがって、より多くの鮮明な画像を記録するため、事前の実験で得られた最適範囲にあるパラメーターよりも低い値に設定し、画像の記録を優先することが必要である。この場合、DOFの範囲外の画像も記録されるが、画像記録後、本章で示したように、輝度階調を元にして一定の視野の範囲内にある画像を再抽出することで、定量的な結果が得られ

る。Davis *et al.* (1992, 2005) は較正時に、画像取得に適したパラメーターとDOFを目で見て主観的に決定したが、本章の手順を用いることで、より客観的に較正を行うことが可能となった。

Fig. 3-4の結果では、Seg-Tを高くすると、カメラに近い側だけでなく、カメラから遠い側、すなわちストロボに近い側でもROIの抽出が行われた。VPRではカメラの光軸に対し、斜め横(10~20°)からストロボ光を照射し、疑似的な暗視野下でプランクトンを記録する(Fig. 3-2)。しかし、カメラ光軸とストロボの照射範囲の関係から、カメラから遠くなると共に、対象物の背後からだけでなく、横から光が当たる割合が増え、その結果、対象物の輪郭が強調されたためと考えられた。鮮明なゼラチン質プランクトン画像を記録するためには、カメラとストロボ光と照射角度の検討

Calibration

VPR optical unit set in a seawater tank

Plankton object set on the micro-positioning stage

1. Seg-T and Sob-T sensitivity test

- move plankton object along the optical axis
- check ROIs extracted position (Dz) by changing Seg-T and Sob-T

2. DOF sensitivity test

- move plankton object along the optical axis
- plankton images record at every 1cm
- brightness gradient check
- find the min. brightness gradient in the DOF

3. Field of view (Dx and Dy) check using translucent rule

4. Threshold determination

- mapping the relationship between Seg-T, Sob-T and Dz_g/Dz
- optimal Seg-T and Sob-T selection
- set a bit less value of threshold in order to cover out-focus area

After observation

1. Re-extract image using min. brightness level

2. Image volume calculation

- using Dx, Dy and DOF
- DOF is estimated from the position of min. brightness gradient

Fig. 3-7. VPR calibration and image volume calculation procedure based on this study modified from Davis *et al.* (1992, 2005). Seg-T and Sob-T: Segmentation and Sobel threshold, DOF: Depth of field, Dx, Dy and Dz: Field of view of the x, y, z axis, respectively.

も必要である。また、クラゲなどのゼラチン質プランクトンでは、輪郭の抽出が難しく、透明なため輪郭が途切れる場合もある。SIPPER (Samson *et al.*, 2001) ではラインスキャンカメラで2方向から撮影することでゼラチン質プランクトンを鮮明に記録するとともに、対象物の3次元的な画像を記録し、バイオマス換算への利便性をあげている (Samson *et al.*, 2001)。VPR II でもリング状の照明にするとといった改良により鮮明な画像の取得は可能と考えられる。

VPR II では、Seg-TおよびSob-T以外にROIの抽出に関わるパラメーターとしてGrowth ScaleやMin. Join Distanceがある。このパラメーターの設定を変えることで、全く記録されない、あるいは途切れた輪郭の一部のみが記録され、断片を1個体として認識されることを防ぐことも可能である (Davis *et al.*, 2004)。特にMin. Join Distanceは、ゼラチン質プランクトンのように透明で輪郭が途切れやすい対象物に対し、個体全体を確実に記録するために重要なパラメーターと考えられる。数字を大きくするほど途切れた断片を同一ROIとして記録可能となるが、本研究で使用した装置では設定最大値の500では抽出されるROIのサイズが大きくなり、フレームレートが低下した。本研究では、観測海域において事前にテストを行い、このパラメーターを100 (単位はpixel) に設定した。本研究ではカメラ画素数が縦横とも1024pixelであり、この値は約10%に相当する。この設定では断片として記録された画像はなかったが、対象とする生物の大きさや抽出されるROIの大きさを考慮してMin. Join Distanceを客観的に決定する手法についても検討が必要と考えられる。また、観測海域の濁度や密度、明るさの違いによる光学系への影響も考慮する必要がある。

第4章 メソ動物プランクトンの個体数密度把握におけるVPR II とMOCNESSとの比較

4.1. はじめに

VPRで記録されたプランクトン画像は常に種の判別ができるわけではなく、画像から判別した分類群を検証するためプランクトンネットなどによる試料採集を必要とする。また、VPRで得られたプランクトンのデータが、従来のネット採集の結果と比較してどのように違うのか、またどのような特徴を持つのか把握も必要である。Benfield *et al.* (1996) はGeorges Bankの70 m以浅の5層において、VPRとMOCNESS (Weibe *et al.*, 1985) を用いて、体長2 mm以下のプランクトン群集を対象に分類群ごとの個体数密度を比較した。その

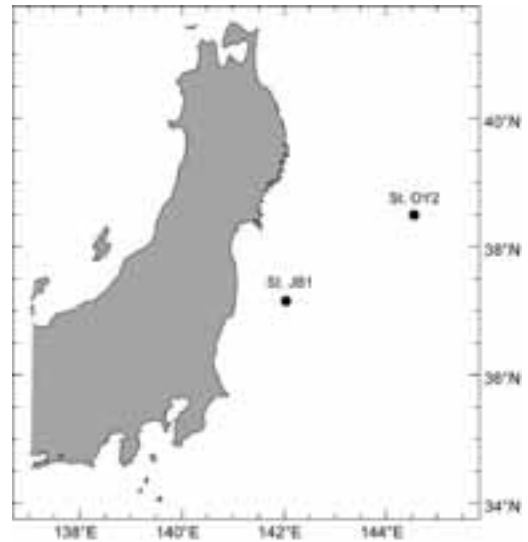


Fig. 4-1. Location of the sampling areas during 2003 in the Oyashio and Transition Zone off the Sanriku coast, eastern Japan.

結果、個体数で優占していたカイアシ類 (Copepoda) や翼足類 (Pteropoda) ではVPRとプランクトンネットではほぼ同様の個体数密度を示したが、個体数密度の低い分類群はVPRで記録されず、逆にネットで採集されなかったクラゲ類 (Hydrozoa) はVPRで多く記録された。しかし、Benfield *et al.* (1996) は70 m以浅の5層で比較したのみであり、VPRの視野が6.0 × 4.5 mmと狭く設定され濾水量が少なかったため分類群ごとの分布傾向を明らかにするに至っていない。VPRとプランクトンネットとの比較はBenfield *et al.* (1996) が報告した一例のみであり、ゼラチン質プランクトンを対象とした報告や、中・深層でVPRを用いた研究例はない。

本章では、黒潮親潮移行域および親潮域の表層～中層でVPR II を用いた観測とMOCNESSによるプランクトン採集を行い、クラゲ類、クシクラゲ類に注目しながら2～20 mmの中・大型プランクトン群集を対象として、分類群ごとの分布個体数密度をVPR II とMOCNESS間で比較し、VPR II データの有効性を検討した。さらに、プランクトンの分布や現存量把握を高精度かつ効率的に行うため、VPR II とプランクトンネット採集における個体数密度の相違とその要因について考察した。

4.2. 方法

4.2.1. 観測

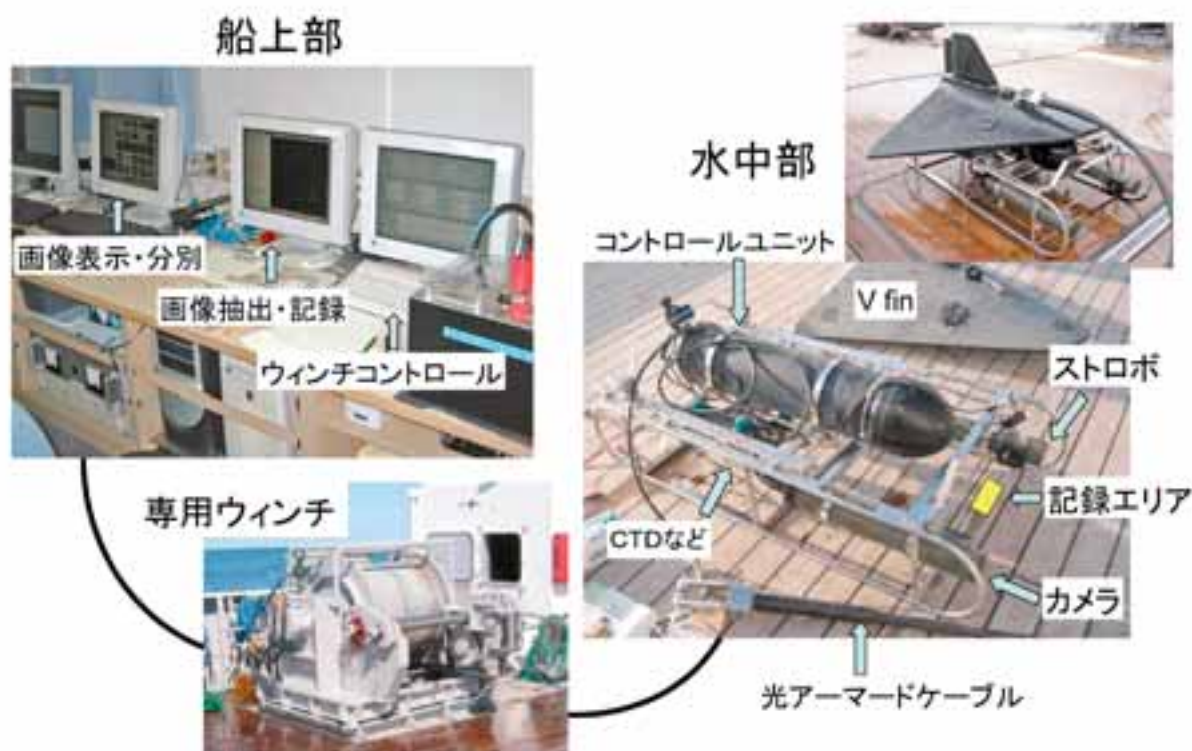
観測は、2003年7月に本州東方の黒潮親潮移行域

Table 4-1. Sampling date, cast name, time, location and maximum attained depth of VPR II and MOCNESS at each station

St.	Date	Cast Name	Start time	End time	Location	Attained depth (m)
OY2	July 23, 2003	VPR13	9:42	11:31	38-30°N 144-30°E	506
		MOC2	12:33	13:37	38-30°N 144-30°E	500
		VPR14	14:17	16:23	38-30°N 144-30°E	502
JB1	July 25, 2003	VPR18	9:37	11:26	37-10°N 142-00°E	504
		MOC3	12:31	13:51	37-10°N 142-00°E	500
		VPR19	14:53	16:26	37-10°N 142-00°E	508

(St. OY2, 38-30 N, 144-30 E) と親潮水域 (St. JB1, 37-00 N, 142-00 E) に設けた測点 (Fig. 4-1) で、水産総合研究センター遠洋水産研究所調査船「俊鷹丸」を用いて行った。曳航体 (V-Fin Type 129, YSI Inc.) に VPR II (Davis *et al.*, 2004; 2005), CTD (Falmouth Scientific Inc. MCTD), 蛍光光度計 (Seapoint Sensors Inc. SCF), 濁度計 (Seapoint Sensors Inc. Turbidity Meter), 光量子計 (Biospherical Instruments Inc. QPC-200L) の各環境センサーおよびフローメーター、ジャイロセンサー、水中高度計を取り付け、画像と同時

時に各データを取得した (Fig. 4-2)。VPR II のカメラおよびストロボユニットは、耐水圧800 dbのアルミダイキャスト製ハウジングに収めた。VPR II のカメラは画素数が1024 × 1024 pixelの白黒CCDカメラであり、カメラ視野は幅43 × 高さ44 mmにセットした。観測前に海水中で0.5 mmのスケールを撮影し、画像の1 pixelあたり長さを決定した。本研究では0.042 mm/pixelであった。なお、観測前にカイアシ類と管クラゲを用いて第3章で示した手法にしたがって較正を行い、画像取得に関わるパラメーターを決定すると

**Fig. 4-2.** Photographs of the VPR II system on the R. V. Shunyo-Maru.

ともに、合焦範囲決定に必要な輝度階調の最大値に関する情報を取得した。

VPR II の曳航は次の手順で行った。観測開始位置で停船し、安全のためVPR II を25 m深まで降下、船速を1 ktに上げた後、0.2 m/sでケーブルを繰り出し最大深度(約500 m)まで降下させた。最大深度で曳航体の姿勢が安定した後、船速を2 ktに上げ、ケーブルを0.2~0.3 m/sで巻き上げた。VPR II が記録した視野体積(プランクトンネットの濾水量に相当)を増やすため原則として深度500 mから50 m深毎に5分間ずつ水平曳航した(Fig. 4-3)。

プランクトンネットにはMOCNESS-1(開口部1 m², 網目幅0.35 mm; Weibe *et al.*, 1985)を使用し、25~100, 100~200, 200~250, 250~300, 300~350, 350~400, 400~450および450~500 mの8層から試料の採集を行った。試料は最終濃度が5%となるよう中性ホルマリンで固定した。

俊鷹丸ではVPR II による観測とネット採集は同時に行えないため、昼間、同じ観測点でVPR II 観測、ネット曳網、VPR II 観測の順で観測を行った(Table 4-1)。観測中に水塊構造が変化し、ネットとVPR II との比較ができない可能性があったため、曳航体に搭載したCTDで得られた水温、塩分などの鉛直物理構造に大きな変化がないか検討するとともに、ネットを挟んで行ったVPR II の観測結果について、採集深度ごとに

分類群別の個体数密度の有意差検定(Mann-Whitney *U*-test)を行い、個体数密度に有意差が認められなかった($p > 0.5$) VPR II の観測データをネット採集結果と比較した。また、観測中は調査船に設置された超音波式多層流向流速計(Teledyne RD Instruments Inc. OS38PA)で海流変化を記録した。

4.2.2. VPR II およびプランクトンネット試料の解析

プランクトンの逃避の影響を最小限とするため、最深深度に到達し曳航速度2 ktになった以後のVPR II のデータを使用した。VPR II が記録する一定の視野体積(Image Volume)の計算に必要な被写界深度(Depth of Field, DOF)は第3章で示した手法にしたがって求め、輝度階調の最大値が100以上の画像をImage Volume内のデータとして使用した。この時のImage Volumeは $1.9 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ であった。VPR II の濾水量は、1 m深毎のVPR II の通過時間(s)、平均フレームレート(25 fps)およびImage Volume(m³)を乗じた値から求めた。プランクトンネット採集結果と比較するため、VPR II で記録されたプランクトンの個体数密度は、ネット採集層と同じ8層について算出した。

画像表示ソフトウェア(ThumsPlus 4.5J, ビレッジセンター(株))を使用し、VPR II で記録された画像の中からゼラチン質プランクトン画像ならびに対比のためのカイアシ類(Copepoda)、放射虫類(Radiolaria)の

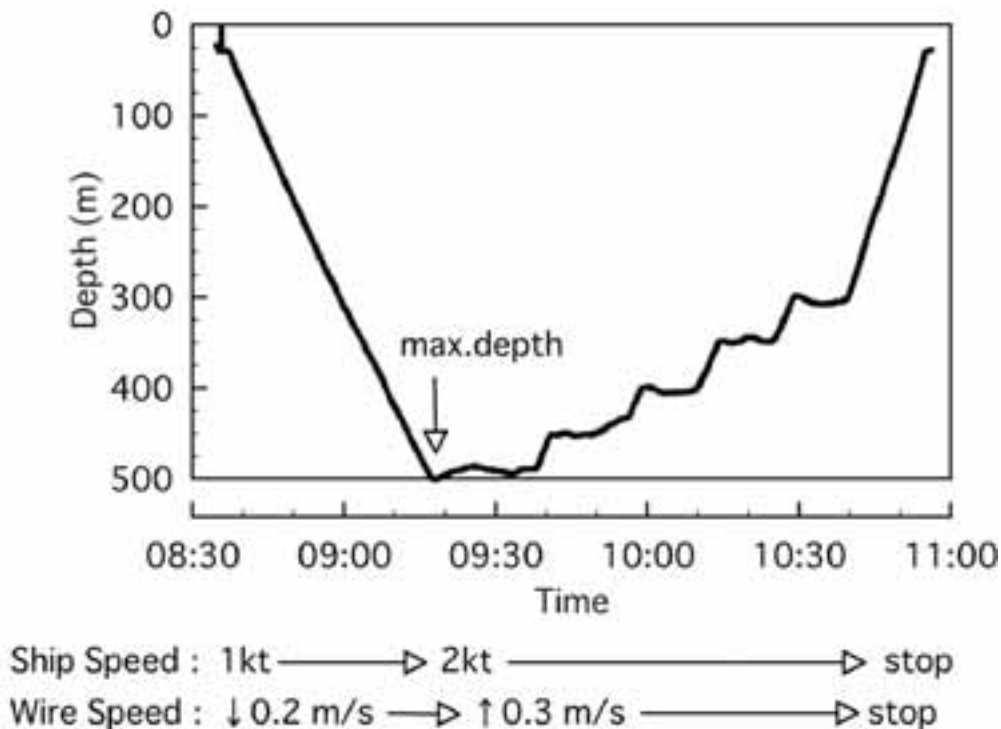


Fig. 4-3. An example of the vertical profile of the VPR II track.

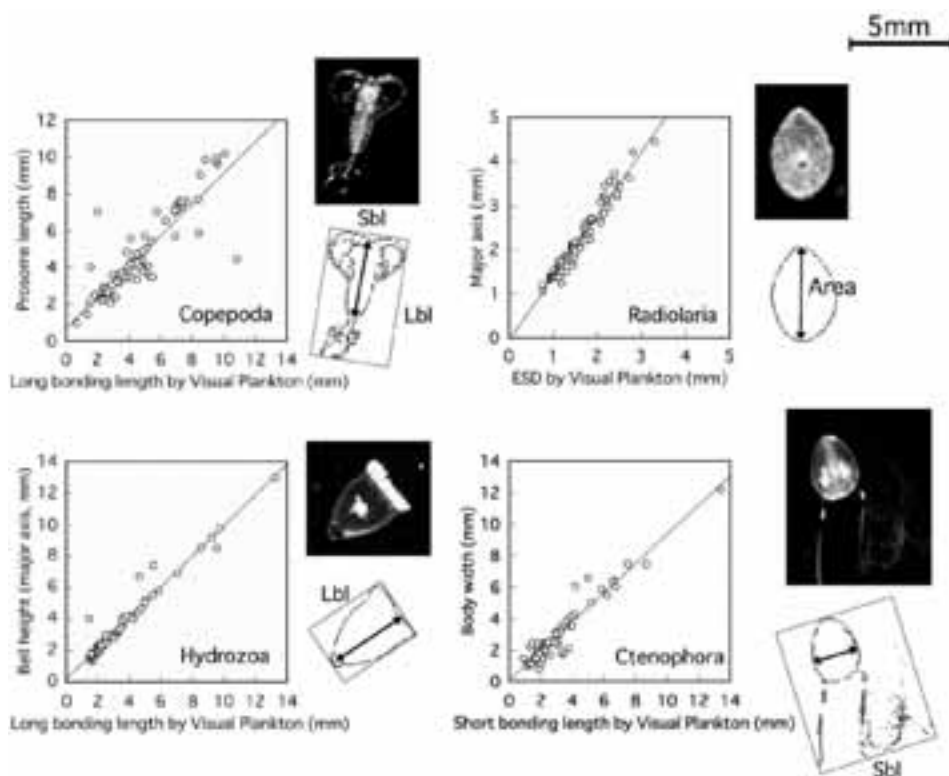


Fig. 4-4. Representative VPR II images of zooplankton groups. Scale bar for all plankton images is equivalent to 5mm. Upper four graphs are the relationship between the automatic measurements made by VPR II interface software (Visual Plankton) and visual measurements by manual use of the image processing software. The regression equations are shown in the text. Illustrations are the measurement image. Short bonding length (Sbl), long bonding length (Lbl) and area measured by Visual Plankton, distances are shown by arrowheads.

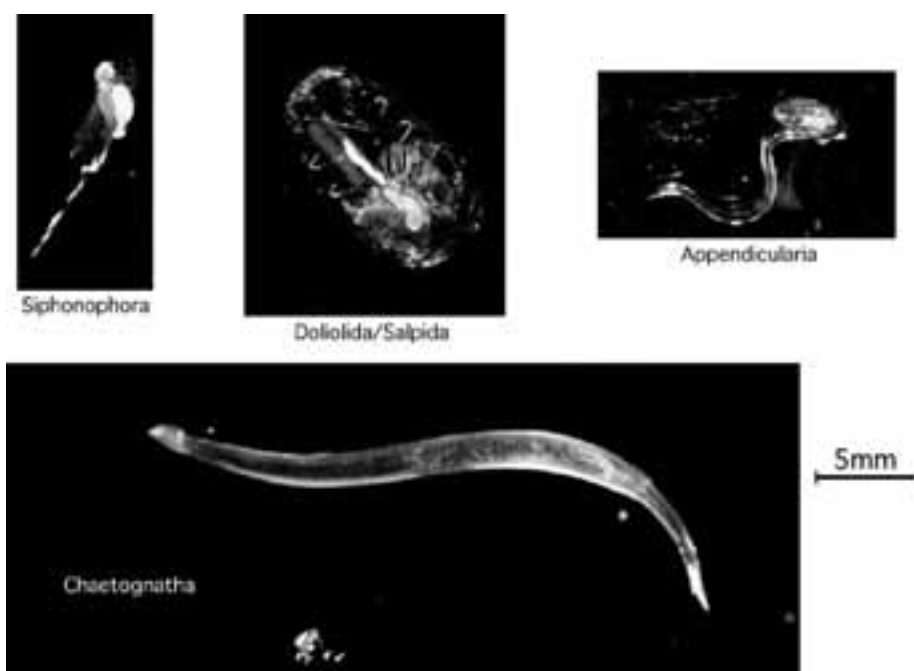


Fig. 4-4. Continued. Significant coefficients of correlation were not acquired for these zooplankton groups.

画像を手動で選別した。選別されたゼラチン質プランクトン画像はヒドロクラゲ類 (Hydrozoa), 管クラゲ類 (Siphonophora), クシクラゲ類 (Ctenophora), サルパ・ウミタル類 (Doliolida/Salpida), 尾虫類 (Appendicularia) および毛類類 (Chaetognatha) に分けた (Fig. 4-4)。分類したプランクトン画像はネット採集試料と同一の大きさの範囲で比較するため計測を行った。画像解析ソフトウェア (ImagePro Plus ver.4.5, プラネトロン (株)) を用いてプランクトンの長さ (または長径と短径), および面積を計測し (Fig. 4-4), 得られた結果をVPR IIの付属ソフトウェア (Visual Plankton) による自動計測結果と比較した。その結果, 有意な相関が得られた分類群については自動計測結果を, それ以外の分類群については画像解析ソフトウェアによる手動計測結果を用いてネット計測結果と比較するための長さを求めた。有意な相関が得られたのは以下の4分類群である (Fig. 4-4)。

カイアシ類:

$$\text{Prosome length} = 0.84 \text{ Lbl} + 0.66$$

$$(r = 0.883, p < 0.001, n = 91)$$

放散虫類:

$$\text{Diameter (major axis)} = 1.42 \text{ ESD} - 0.04$$

$$(r = 0.976, p < 0.001, n = 79)$$

ヒドロクラゲ類:

$$\text{Bell height (major axis)} = 0.97 \text{ Lbl} + 0.22$$

$$(r = 0.976, p < 0.001, n = 69)$$

クシクラゲ類:

$$\text{Body length} = 0.87 \text{ Lbl} - 0.19$$

$$(r = 0.903, p < 0.001, n = 61)$$

ここで, Lbl: Visual Planktonによる自動計測結果でプランクトンを矩形で囲んだ長辺の長さ, ESD: プランクトンの面積 (area) から換算したESD (equivalent sphere diameter) である。今回使用したVPR IIの解像度 (約0.04 mm/pixel) では, 50 pixel以下のプランクトン画像で解像度が足りず分類群の識別が困難な場合

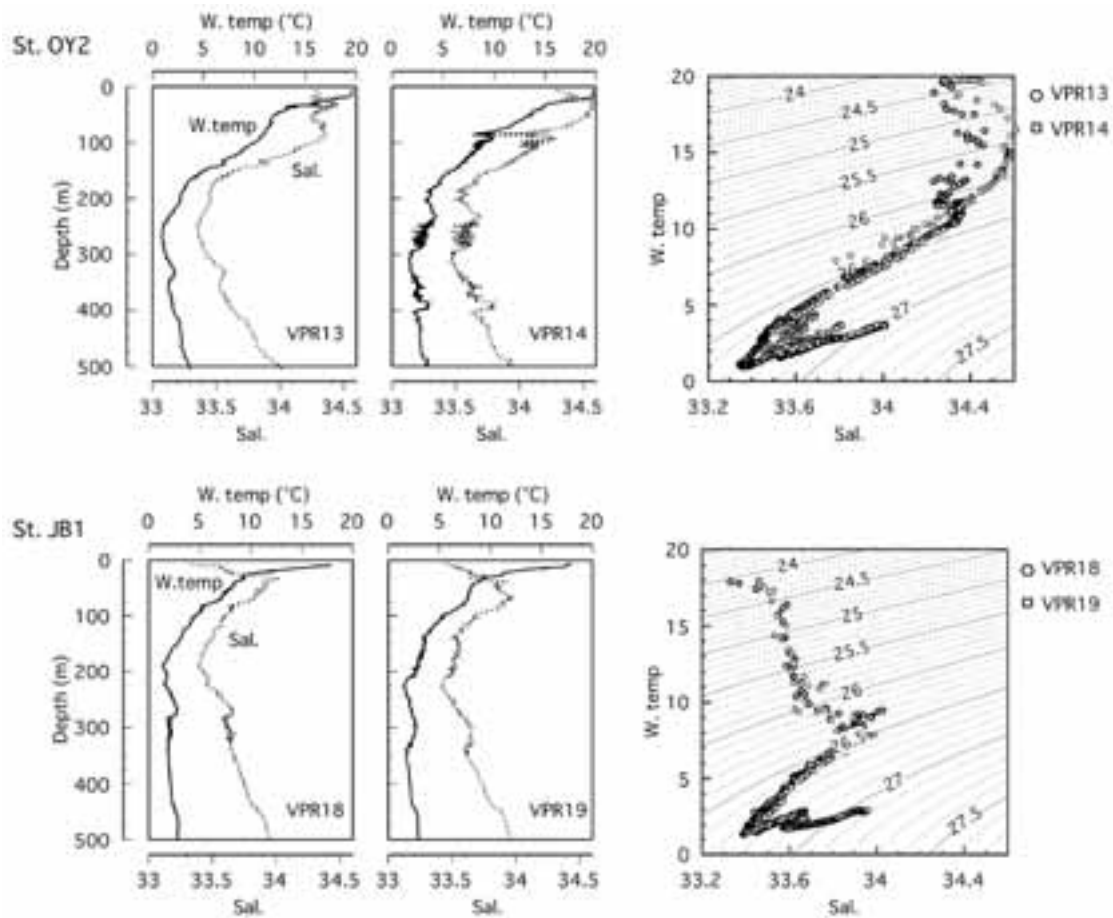


Fig. 4-5. Vertical profiles (left panels) and T-S diagrams (right panels) of water temperature and salinity measured during each VPR II cast using the CTD profiler mounted on VPR II. Solid lines show water temperature and dotted lines show salinity.

があったため、50 pixel以上（長さ2 mm以上）のプランクトン画像をプランクトンネットとの比較対象とした。また、VPR IIではプランクトンを1方向のみから写した2次元の画像として記録するため、プランクトンの姿勢や向きによってネット採集試料と同一部位を計測できない場合がある。本研究では自動計測サイズからの換算によって対象とする計測部位の長さが平均化されたと仮定して比較を行った。

ネット試料は採集量に応じて最大1/64まで分割し、種あるいは属段階で計数および計測を行った。プランクトンの計測は、接眼マイクロメーターを装着した光学顕微鏡下で行い、プランクトンの長さに応じて0.5以下、0.5~1、1~2、2~5、5~10、10~20、20 mm以上の7つに区分し、分割後の全数について計測した。サルパ・ウミタル類、毛顎類およびカイアシ類はVPR IIに合わせて2 mm以上の個体を比較対象とした。ヒドロクラゲ類、管クラゲ類、クシクラゲ類は、破損などのためVPR IIと比較する大きさの計測が困難な場合があり、2 mm以下も含めた全数を比較対象とした。尾虫類は、VPR IIでは虫体単独と虫体・ハウス共に画像として記録されたが、ネット採集試料では虫体しか計測できなかったため、これも全数を比較対象とした。

VPRでは濾水量が少ない場合、十分な個体数が得られず過小評価となる (Benfield *et al.*, 1996)。今回のVPR II観測で濾水量が十分であったか判断するため、ネットと比較した層におけるVPR IIの濾水量およびVPR IIで得られた個体数密度から、以下の式を用いてプランクトンが検出されない確率 (Probability of non-detection, p_{nd}) を計算した (Benfield *et al.*, 1996)。すなわち、

$$p_{nd} = e^{-\lambda v}$$

ここで λ は個体数密度、 v はVPR IIの濾水量である。本研究では p_{nd} が0.05以下の場合、濾水量が十分で個体数が過小評価になっていなかったと仮定した。

4.3. 結果

4.3.1. 海況

St. OY 2 (VPR13,14) およびSt. JB 1 (VPR18, 19) における500 m深までの水温、塩分の鉛直構造をVPR II観測ごとに示した (Fig. 4-5)。いずれの測点でも50 m以浅に季節躍層が発達しており、200~300 m深に水温および塩分極小が認められた。St. OY 2は100 m深の水温が10 °C 台であり黒潮親潮移行域、St. JB 1は100 m深で4 °C 台と低く、常磐沖に張り出した親潮水の残存と考えられた。St. OY 2におけるVPR IIの観測間の比較では、VPR14において200~400 m深の一部に

水温、塩分の細かな変動が認められたが、TSダイアグラムで比較した場合でも500 m深までの水塊構造には大きな差は認められなかった (Fig. 4-5)。また、St. JB 1においてもVPR18, VPR19の水塊構造は一致しており、VPR IIおよびプランクトンネットの観測中、水塊構造に大きな変化は認められなかった。いずれの測点でも表層の流れは0.2 kt以下であった。

4.3.2. VPR II とプランクトンネットの個体数密度の比較

St. OY 2 およびSt. JB 1 でのVPR II観測 (VPR13, 14, 18, 19) とプランクトンネット採集 (MOC2, MOC 3) で得られた分類群ごとの個体数密度をVPR IIの観測数 \times 8層=32層で比較した (Fig. 4-6)。また、濾水量と個体数密度から計算したVPR IIでプランクトンが検出されない確率 (p_{nd}) が0.05以上の場合を図中の Δ で、0.05以下を \circ で示した。カイアシ類と放散虫類は、比較した95 %以上の層で p_{nd} が0.05以下であった。しかし、ヒドロクラゲ類、クシクラゲ類、サルパ・ウミタル類、尾虫類および毛顎類で p_{nd} が0.05以下となったのは、それぞれ41, 22, 16, 41, 38 %であり、管クラゲ類では6 %しか0.05以下を満たしていなかった。

カイアシ類で p_{nd} が0.05以下となった採集層では、VPR IIとプランクトンネット間で有意な相関 ($r = 0.52, p < 0.05, n = 29$) が得られたが、回帰分析の結果は $y = 0.50x + 6.00$ ($r^2 = 0.26, p < 0.01, n = 29$) となり、有意な説明係数 (r^2) は得られなかった。回帰式から大きく外れたのはSt. JB 1の450~500 m層で、ネットの個体数密度は34.4 個体/ m^3 であったのに対し、VPR18, VPR19はそれぞれ18.7, 15.7 個体/ m^3 であった。放散虫類はVPR IIとプランクトンネット間で有意な相関は得られず、ネットに対してVPR IIで個体数密度が高くなる傾向が認められた。同様の傾向は、ヒドロクラゲ類およびサルパ・ウミタル類で p_{nd} が0.05以下となった採集層でも認められた。クシクラゲ類はVPR IIでのみ完全な個体が確認され、ネットではほとんど採集できず、また固定によって *Beroe* 属以外は溶解あるいは破損し計測できなかった。一方、毛顎類は p_{nd} 値にかかわらず、比較したすべての採集層でVPR IIに対してプランクトンネットの個体数密度が高かった。管クラゲ類は2層のみで p_{nd} が0.05以下となったが、いずれもネットで個体数密度が高かった。尾虫類は、 p_{nd} が0.05以下ではネットで多い傾向が認められたが、個体数密度の最大値は p_{nd} が0.05以上となった採集層のVPR IIで得られ、ネット個体数密度に較べ10倍以上高かった。

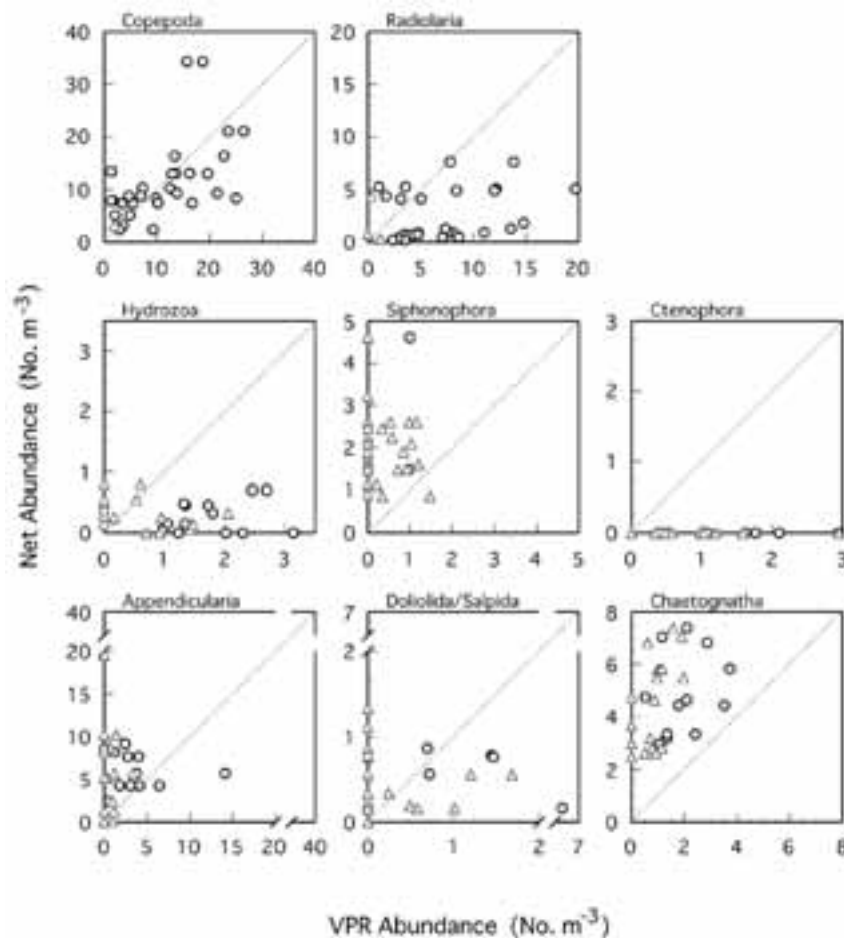


Fig. 4-6. Comparison between zooplankton abundance measured with VPR II image and sampled by MOCNESS. Open circles show the data of probability of non-detection (p_{nd}) < 0.05, open triangles show p_{nd} > 0.05 and dotted lines show $y = x$.

4.3.3. カイアシ類、ヒドロクラゲ類およびクシクラゲ類の個体数密度

VPR IIおよびMOCNESSを比較した結果、ヒドロクラゲ類およびクシクラゲ類ではプランクトンネットに較べてVPR IIで個体数密度が多いことが明らかになった。そこで、従来の結果と比較するため、VPR IIとネットではほぼ同じ結果が得られたカイアシ類とヒドロクラゲ類およびクシクラゲ類について25~500 m層の平均個体数密度を示した(Table 4-2)。25~500 m層で平均した場合でも、VPR IIの濾水量とカイアシ類、ヒドロクラゲ類およびクシクラゲ類の個体数密度から計算した p_{nd} は全て0.05以下であった。カイアシ類では、プランクトンネットに対するVPR IIの個体数密度の比(VPR/Net)は0.8~0.9となり、25~500 m層の平均個体数密度でもFig. 4-6と同様にVPR IIとネットの個体数密度の比はほぼ1となった。VPR IIで得られたヒドロクラゲ類の個体数密度は、St. OY 2のVPR13, VPR14でそれぞれ1.2, 1.3 個体/m³, St. JB 1

のVPR18, VPR19でそれぞれ0.8, 1.1 個体/m³となり、ネットの採集結果に較べ2.2~4.5倍高い個体数密度を示した。VPR IIで得られたクシクラゲ類の25~500 m層の平均個体数密度は、St. OY 2のVPR13, VPR14でそれぞれ0.8, 0.5 個体/m³, St. JB 1のVPR18, VPR19でそれぞれ0.6, 0.6 個体/m³となり、ヒドロクラゲ類とほぼ同じか半分程度であった。

カイアシ類の個体数密度に対するヒドロクラゲ類の個体数密度の比(Table 4-2)は、VPR IIで0.07 (VPR18) ~0.16 (VPR14) の範囲であり、ネットではMOC2, MOC 3ともに0.03であった。いずれの測点でもカイアシ類に対するヒドロクラゲ類の割合はVPR IIで高く、St. OY 2ではVPR IIが最大で5倍高かった。カイアシ類の個体数密度に対するクシクラゲ類の個体数密度の比は0.05 (VPR19) ~0.11 (VPR13) となり、カイアシ類に対するヒドロクラゲ類の比に匹敵した。

Table 4-2. Copepoda, Hydrozoa and Ctenophora abundance (No./m³) and the ratio of Hydrozoa and Ctenophora abundance to Copepoda estimated from VPR II images and from MOCNESS samples averaged over 25 to 500m. The numbers in parentheses are the ratio of VPR II to MOCNESS for each zooplankton group at each station

St.	Cast	Copepoda	Hydrozoa	Ctenophora	Hydrozoa/Copepoda	Ctenophora/Copepoda
OY2	VPR13	7.9 (0.9)	1.2 (4.1)	0.8	0.15	0.11
	VPR14	7.7 (0.9)	1.3 (4.5)	0.5	0.16	0.06
	MOC2	8.8	0.3	0	0.03	
JB1	VPR18	11.0 (0.8)	0.8 (2.2)	0.6	0.07	0.06
	VPR19	11.8 (0.9)	1.1 (3.3)	0.6	0.10	0.05
	MOC3	13.2	0.3	0	0.03	
Average±SD	VPR	9.59 ±2.1	1.08 ±0.2	0.63 ±0.2	0.12	0.07
	net	11.02 ±3.1	0.31 ±0.04		0.03	

4.3.4. ヒドロクラゲ類およびクシクラゲ類の大きさ別個体数密度

ヒドロクラゲ類およびクシクラゲ類について、VPR IIで得られた全データの大きさ別個体数密度の平均値をFig. 4-7に示した。ヒドロクラゲ類は、傘幅3～5 mmの個体が占める割合が最も高く、次いで5～10, 2～3, 10 mm以上の順で多く、10 mm以下の区分で個体数全体の89%を占めた。VPR IIで記録された個体の最大径は14.0 mmであった。クシクラゲ類は、体長2～3 mmの個体数密度が最も高く、大きさが増大するとともに個体数密度は減少する傾向が認められた。体長5 mm以下の区分が個体数全体の87%を占めた。

プランクトンネットに比べ、VPR IIで個体数密度が高い傾向が認められたヒドロクラゲ類について、VPR IIとネット間で大きさごとに個体数密度を比較した (Fig. 4-7)。傘幅10 mm以上の区分でVPR IIとネットの個体数密度の差は小さかったが、10 mm以下でその差は大きくなり、傘幅2～3 mmのヒドロクラゲ類はVPR IIのみで確認された。また、解像度の関係からVPR IIデータと直接の比較できない傘幅2 mm以下のヒドロクラゲ類もネット採集試料では確認できなかった。プランクトンネットで確認されたヒドロクラゲ類は主に *Aglantha* 属で、VPR IIでも同じ *Aglantha* 属と考えられる画像が確認された。

4.4. 考察

4.4.1. VPR IIとプランクトンネットとの比較

本章では、VPR IIとプランクトンネットで得られたカイアシ類の個体数密度の間に有意な相関関係が認められたが (Fig. 4-6)、有意な説明係数は得られず回帰直線の傾きも1以下となった。VPR IIとネットでは観測時刻も異なり、厳密には採集された緯経度も異なる。海洋の動物プランクトンでは、同一地点においてネットで繰り返し採集した場合でも個体数密度の変動係数は15～300%となり (Cushing, 1962)、Wiebe and Holland (1968) は過去のデータを整理し、約25～400%の範囲内に収まるとした。今回の観測結果におけるカイアシ類の変動係数は約22%であり、過去に報告された変動係数の範囲内にあった。また、カイアシ類では、VPR IIとネットを比較した採集層の95%以上でプランクトンが検出できない確率 (Probability of non-detection, p_{nd}) が0.05以下であったことから、Benfield *et al.* (1996) が指摘したVPR IIの濾水量不足による過小評価の影響は少なかったと考えられた。本研究ではMOCNESSと同じ2 kt以上 (約1 m/s以上) でVPR IIを曳航した場合のデータを用いた。しかし、説明係数の値は小さく回帰直線の傾きが1より小さかったことから、MOCNESSでは牽引索や網枠などを原因とする逃避や乱流の影響の結果、過小評価となった可能性も示唆される。Baumgartner (2003) は、カイアシ類 (*Calanus finmarchicus*) が0.75 m/sで曳航したOPCからも逃避したことを示し、OPCの開口部が小さいことをその理由とした。VPR IIでは画像として記録される部分は枠などで囲まれておらず、水圧変化や乱流のような物理的な影響も少ない構造であること、さらに曳航速度が1 m/s以上と早いことから、Baumgartner

(2003) のような逃避の影響は少なかったと考えられたが、この点については、VPR II の曳航方法や曳航体を変えるなどして検討が必要である。Davis et al. (2005) では、こうした逃避や乱流などの影響を最小限とするため、3次元方向に移動可能な新しい曳航体を提案している。ネット採集において破損の影響が少ないと考えられるカイアシ類で、VPR II またはネットのどちらかの個体数密度が極度に大きくなり、有意な正の相関関係が得られたことは、VPR II で得られたデータの有効性を示すものと考えられた。

これに対し、放散虫類とヒドロクラゲ類の個体数密度は、プランクトンネットよりVPR II で高い傾向が認められた (Fig. 4-6)。さらに、VPR II で個体数密度が過小評価になる可能性が高い採集層 ($p_{nd} > 0.05$ の層) においても、ネットよりVPR II の個体数密度が高い場合があった (Fig. 4-6)。放散虫類は、ネット採集試料中で他のゼラチン質プランクトンや放散虫類同士で絡み合うことが多く、破損による影響と併せて顕微鏡下での計数には困難が伴う。VPR II では、ほぼ全ての放散虫類が1個体ずつ独立して分布して記録されており、こうした要因がネットの過小評価につながったと考えられた。一方、ヒドロクラゲ類は、一般にネット採集による物理的な破損や固定による収縮・溶解で現存量が過小評価になることが指摘されている

(Harbison et al., 1978; Beaulieu et al., 1999; Warren et al., 2001)。今回、傘幅3 mm以下のヒドロクラゲ類の個体は、ネット採集試料から確認できなかったがVPR II では確認され、また小型個体ほどネットとの個体数密度の差が広がる傾向が認められた (Fig. 4-7)。小型個体ほど、採集や固定による物理的破損の影響を受けやすいこと、また、ヒドロクラゲ類自身の脆弱性がネット採集結果における過小評価につながったと考えられた。一方、クシクラゲ類では、ネット採集時の物理的な破損だけでなく (Harbison et al., 1978; Falkenhaus, 1996), *Bolinopsis mikado* では固定による溶解が (Kasuya et al., 2000), *Pleurobrachia bachei* や *P. pileus* では収縮が指摘され (Thibault-Botha and Bowen, 2004), 採集後の固定・保存方法による損失も大きいとされる。本研究では、動物プランクトン用の固定液として一般的な中性ホルマリンで固定した試料を用いて比較したため、ネット採集自体を過小評価の要因とすることはできない。しかし、クシクラゲ類は、従来からネット採集による物理的な破損が指摘され (Harbison et al., 1978; Falkenhaus, 1996), また、VPR II の結果では体長5 mm以下の小型個体が多いこと (Fig. 4-7), ネットでは500 m深から長い曳網を行ったことから、物理的な破損の影響も否定できない

と考えられた。Olney and Houde (1993) は、35 mm スチルカメラとネットで同時に比較を行い、脆弱なプランクトンに対するカメラの有効性を示しており、本章の結果でもそれが示された。ただし、ネットではVPR II の視野 (43×44 mm) 以上の個体も採集されている。VPR II の視野を超えるような大型個体や分布密度が低い種類については、正確な個体数密度の把握のため、ネット採集あるいは視野を広げた光学系の観測装置 (Graham et al., 2003) との併用が不可欠と考えられた。

管クラゲ類および毛顎類では、VPR II よりネットで個体数密度が高い傾向が認められた (Fig. 4-6)。管クラゲ類は比較した採集層の84%で p_{nd} が0.05以上であり、Benfield et al. (1996) が指摘したように分布密度が低く濾水量が不十分であったためVPR II で過小評価となったと推察された。また、管クラゲはプランクトンネット採集では群体が壊れやすい。ネット試料の計数では泳鐘のみを数えるといった対策を行ったが、破損などで判断できない場合もあり、その結果、ネット個体数が過大評価となった可能性も指摘できる。毛顎類は、比較した採集層のほぼ半分で p_{nd} が0.05以下と

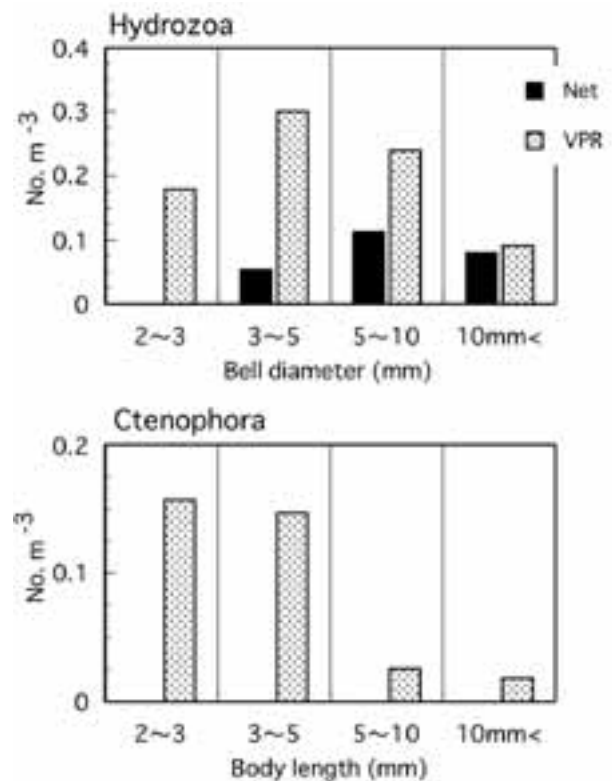


Fig. 4-7. Size-frequency data for Hydrozoa and Ctenophora abundance measured with VPR II (VPR) and sampled by MOCNESS (Net).

なったため、個体数密度の過小評価をVPR IIの濾水量不足だけで説明することはできない。VPR IIでは体を曲げた毛顎類が数多く記録されており (Fig. 4- 8), VPR IIのストロボ光による逃避の可能性も指摘できる (Davis *et al.*, 1992)。VPR IIでは、画像として記録される部分およびその前面に牽引索や枠のような構造物が無いため (Fig. 4- 2), 物理的な刺激による逃避の影響は少ないと考えられる。しかし、毛顎類はカイア

シ類など他の動物プランクトンより大きく、カメラの視野に対して相対的に大きくなるため、わずかな逃避行動でも記録されない、あるいは個体の一部しか記録されないなどの過小評価につながった可能性がある。VPR IIは5~7 ktでの曳航が可能であり、また、ストロボを赤色にすることで逃避の問題は改善可能と考えられる (Davis *et al.*, 1992; 2005)。VPRは、プランクトンの斜め後方からストロボを照射し暗視野でプランク

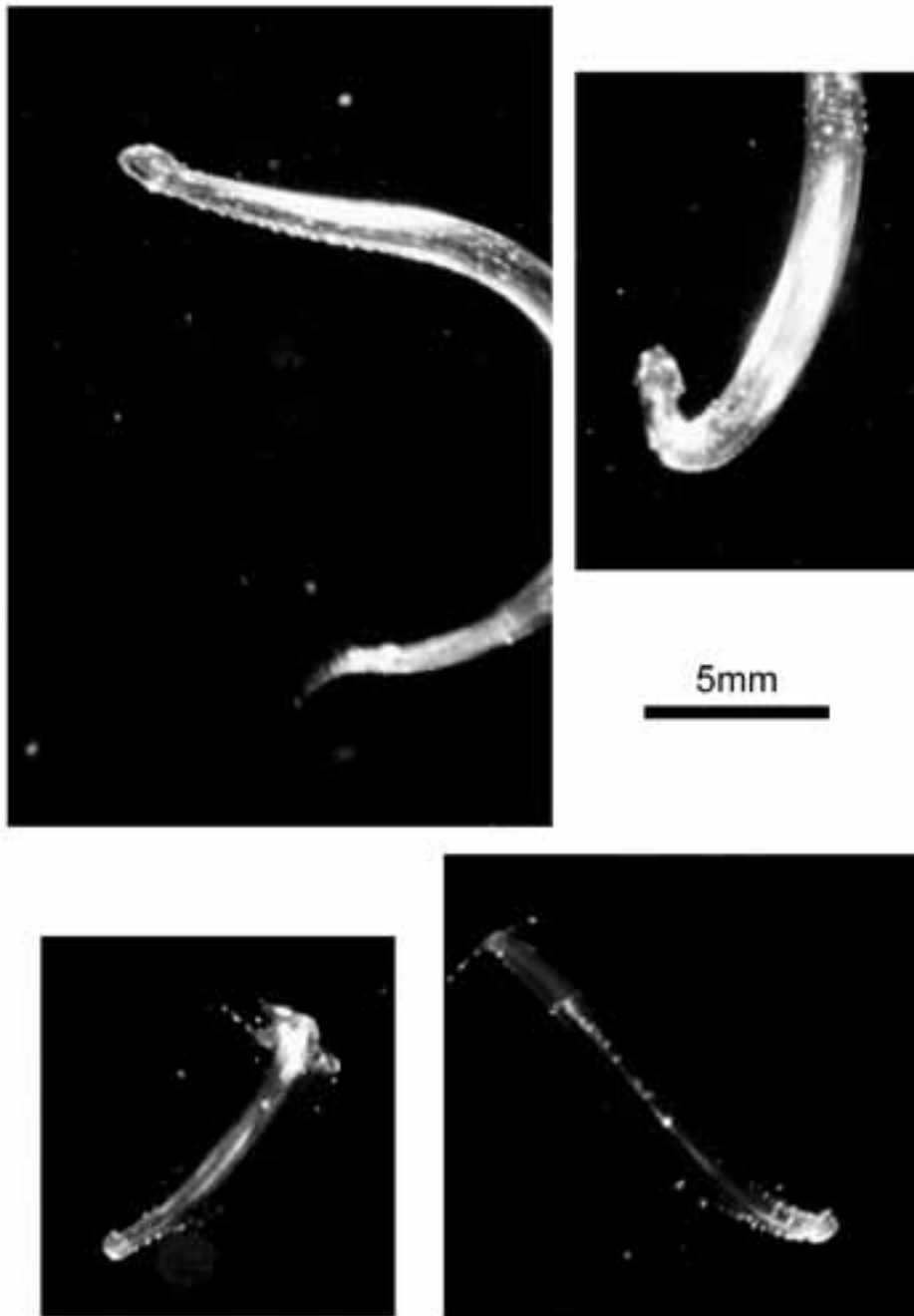


Fig. 4-8. Images of Chaetognatha from the casts of VPR14 and VPR18. Scale bar is 5mm.

トン記録する (Davis *et al.*, 1992; 2005)。しかし、透明度が高く、背景との輪郭が明瞭でないプランクトン分類群は画像として記録されない場合もあり (市川ら, 2005), その結果, 管クラゲ類や毛類類が過小評価となった可能性も考えられた。今後, リング状照明を用いるなどの照明装置の改良, さらに全ての画像が記録可能な方式への改良も必要である。

尾虫類は, p_{nd} が0.05以下の場合, プランクトンネットで個体数密度が高い傾向が見られた (Fig. 4-6)。尾虫類の場合, プランクトンネット採集試料では虫体しか残らない。しかし, VPR II ではハウスの中の虫体の大きさまで分からないため, ネット試料では2 mm以下も含め全ての虫体を計数対象とした。その結果, ネット採集試料で個体数密度が高くなったと考えられた。サルパ・ウミタル類は尾虫類とは逆にVPR II で高い傾向が認められ, その中でもVPR II の個体数密度が特に高くなった場合があった。同様の結果は尾虫類でも認められた。サルパ・ウミタル類では濃密な群集団を形成することが知られている (Tsuda and Nemoto, 1992)。VPR II による親潮域の表層の観測において, 2000 mを移動する間に10倍以上の尾虫類の個体数密度差を観測した (市川, 未発表)。VPR II で個体数密度が高くなった要因として, ネット採集による物理的な破損の影響以外に尾虫類, サルパ・ウミタル類に見られる強い群集団を形成するといった特徴が影響した可能性も考えられる。

4.4.2. VPR II によるヒドロクラゲ類, クシクラゲ類の個体数密度

日本近海では, 本州東方海域において小達 (1994) が長期にわたりプランクトンネットの鉛直曳網によって採集された試料を解析している。しかし, 個体数の上でクラゲ類, クシクラゲ類が全プランクトンに, あるいはカイアシ類に対して占める割合が分かる報告は少ない (豊川, 2001)。佐藤 (2002) は小達 (1994) のデータを元にゼラチン質プランクトンのデータを整理し, 親潮域におけるヒドロクラゲ類の6, 7月の個体数密度 (日中) は, 1950年代でそれぞれ0.48 ($n = 9$), 1.6 ($n = 12$) (個体/ m^3), 1980年代は6月に14.8 個体/ m^3 ($n = 3$) とした。これらは150 m以浅のデータであり, 1980年代のデータは観測数が3測点のみで少なく, ばらつきの程度は分からない。今回のVPR II の結果はネット採集よりプランクトンの大きさの計測範囲が狭く, 500 m以浅の平均値であるが, 過去の結果と同等の個体数密度となった。同様に親潮域におけるクシクラゲ類の6, 7月の個体数密度 (日中) は, 1950年代でそれぞれ0 ($n = 9$), 0.004 ($n = 12$) (個体

/ m^3), 1980年代は全く記録されていない。また日中以外を含めた時間帯においても1980年代の薄暮時に記録された0.04 個体/ m^3 が最大値であり今回のVPR II の結果より一桁低い。従来, 一般的に行われてきたプランクトンネットによる採集法において, クラゲ類, クシクラゲ類の個体数密度が過小評価されていた結果と考えられた。

カイアシ類の個体数密度に対するヒドロクラゲ類の割合では, VPR II の結果はMOCNESSに比べ, クラゲ類の個体数密度の割合が2~5倍高かった (Table 4-2)。さらに, カイアシ類の個体数密度に対するクシクラゲ類の個体数密度の割合もヒドロクラゲ類に匹敵するほど高い場合があった。日本周辺の外洋域において, クラゲ類, クシクラゲ類の定量的な研究はほとんどないが, 従来考えられていた以上に生態系における役割が大きいことを示唆するものである。

本章では, プランクトンネット採集による破損の影響が少ないと考えられるカイアシ類の個体数密度について, VPR II とプランクトンネットの間で相関関係が得られ, VPR II を用いた場合でも従来のネット採集と同等のデータが得られることを示した (Fig. 4-6)。さらに, ネット採集時の破損や固定による収縮・溶解などの影響で現存量が過小評価になると指摘されていたクラゲ類, クシクラゲ類の特に小型個体について, ネット採集に対するVPR II の有効性が示された。今後, 季節や海域の異なるデータを蓄積し, ネットとの比較の事例を増やして検証を進めるとともに, ネット採集などと併用することで, 精度の高いゼラチン質プランクトンの現存量の把握が可能と考えられる。また, VPR II の画像だけによる種判別は難しいため, 脆弱な生物に対する新しい採集法の開発も不可欠と考える。一方, 従来のネット採集では, プランクトンの選別および計数・計測に多大な時間と労力を要する。VPR II では画像として記録されたプランクトンの計測を自動で行い, 本章で示した何種かの分類群については, Visual Planktonによる自動計測結果から実際の大きさを見積もることも可能であった (Fig. 4-4)。今後, 画像データから現存量への換算係数の精度を高めることで, ゼラチン質プランクトンだけでなく, カイアシ類のようにVPR II とネットで個体数密度に大きな差が認められない分類群においても, VPR II の画像データを用いて迅速な現存量把握とデータ提供が可能となり, プランクトン研究に貢献するものと考えられる。

第5章 VPR II を用いた親潮域および黒潮親潮移行域の表層におけるメソ動物プランクトンの現存量および鉛直分布特性

5.1. はじめに

親潮域および黒潮親潮移行域（以下、移行域）は多獲性浮魚類の重要な索餌海域であり、漁業生産にとって重要な海域である。また、北太平洋中層水（North Pacific Intermediate Water, NPIW）を通じた人為起源の炭素の輸送の場としての重要性も指摘されている（Tsunogai *et al.*, 1993; Ono *et al.*, 2000）。しかし、カイアシ類など甲殻類プランクトンや仔稚魚の重要な捕食者であり（Purcell, 1991）、同時に餌をめぐる競合者（Mills, 1995; Shiganova and Bulgakova, 2000）でもあるクラゲ類、クシクラゲ類について、正確な現存量の見積もりや鉛直分布構造に関する知見はほとんどない。さらに、従来のプランクトン採集手法では、物質循環の正確な把握に必要な物理化学的な成分と同じ尺度でプランクトンの分布構造を解析することは難しい。

第4章では、親潮域と黒潮・親潮移行域の25~500 m層において、VPR II（Davis *et al.*, 2004; 2005）で記録された画像とMOCNESS-1（Weibe *et al.*, 1985）による採集結果とを比較した。その結果、カイアシ類の個体数密度はVPR IIとプランクトンネット間でほぼ等しかったが、クラゲ類はVPR IIが2~5倍多く、クシクラゲ類もVPR IIで多く記録されたことを示した。VPRでは、従来のプランクトンネット採集時に問題となる物理的破損や固定による溶解、収縮・変形などに影響されず、個体数密度を正確に把握できたためと考えられた。さらに、本研究で使用したVPR IIでは25 fpsで画像データが記録可能であり（第4章参照）、1 m深ごとの詳細なプランクトン現存量の把握が可能であった。

本章では、親潮域および黒潮・親潮移行域の表層から中層に分布するクラゲ類、クシクラゲ類現存量の正確な見積もりを試みるとともに、その鉛直分布の特徴を明らかにし、動物プランクトンの中で優占するカイアシ類群集への影響について考察した。さらにカイアシ類の詳細な鉛直分布を解析し、水塊構造との関係および生態系における役割について考察した。

5.2. 方法

5.2.1 観測

三陸沖～釧路沖の親潮域および黒潮・親潮移行域に

設定した測点（Fig. 5-1）で、2003年7月および2004年6~7月に水産総合研究センター遠洋水産研究所調査船「俊鷹丸」を用いて、昼間（8:00~16:00）にVPR II観測とプランクトンネットによる採集を行った（Table 5-1）。VPR II（Davis *et al.*, 2004; 2005）は曳航体（V-Fin Type 129, YSI Inc.）に搭載し、深度500 mから2 ktで曳航した（第4章参照）。VPR IIのカメラ仕様、画像データ記録方法、およびCTDによる環境データの取得手法は第4章と同一である。

プランクトンネットは、MOCNESS-1（開口部1 m², 網目幅0.35 mm; Weibe *et al.*, 1985）および閉鎖式ノルパックネット（口径0.45 m, 網目幅0.35 mm）を使用し、それぞれ25~100, 100~200, 200~250, 250~300, 300~350, 350~400, 400~450, 450~500 mの8層を曳網した。なお、ノルパックネットにはネット底部にスキャンマー深度計（Scanmar Inc. Depth Sensor HC 4）を取り付け、曳網深度をモニターした。試料は最終濃度が5%となるよう中性ホルマリンで固定した。

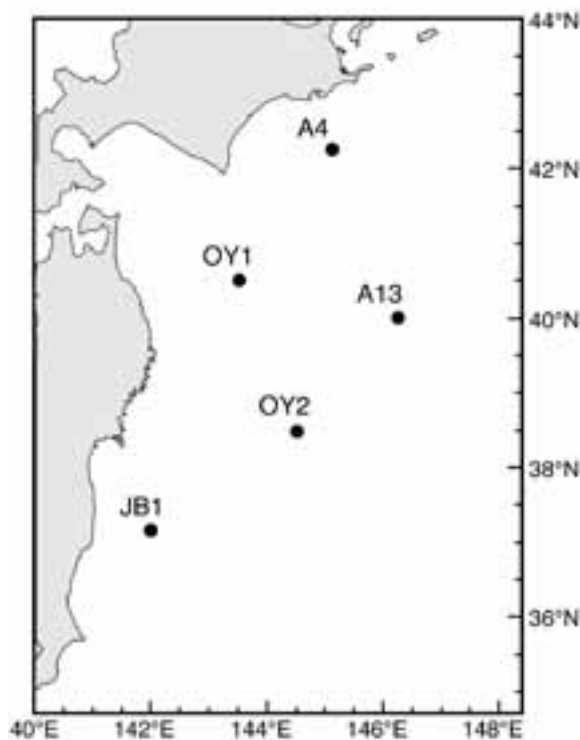


Fig. 5-1. Location of the sampling stations in the Oyashio and Transition Zone off the Joban, Sanriku and Eastern Hokkaido coast, Japan. Stations OY1, OY2 and JB1 were observed during July 2003 and stations A4 and A13 were observed in June and July 2004.

Table 5-1. Sampling date, cast name, time, location and maximum attained depth of VPR II and plankton net for each station. MOC: MOCNESS-I. NOR: Norpac net

St.	Date	Cast Name	Start time	End time	Location	Attained depth (m)
OY1	July 21, 2003	VPR 7	8:30	11:06	40-30°N 143-30°E	508
	July 21, 2003	NOR	12:42	15:14	40-30°N 143-30°E	500
OY2	July 23, 2003	VPR13	9:42	11:31	38-30°N 144-30°E	506
	July 23, 2003	MOC	12:31	13:51	38-30°N 144-30°E	500
JB1	July 25, 2003	VPR18	9:37	11:26	37-10°N 142-00°E	504
	July 25, 2003	MOC	12:31	13:51	37-10°N 142-00°E	500
A4	July 1, 2004	VPR20	8:42	11:14	42-15°N 145-08°E	500
	June 30, 2004	NOR	12:13	14:14	42-15°N 145-08°E	500
A13	June 29, 2004	VPR14	9:48	11:11	40-00°N 146-15°E	502
	June 28, 2004	NOR	12:12	14:13	40-00°N 146-15°E	500

5.2.2. VPR II データの解析

VPR II が記録する一定の視野体積 (Image Volume) は第 3 章にしたがって計算した。輝度階調の最大値が 100 以上の画像をデータとして使用し、この時の Image Volume は $1.9 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ であった。VPR II の濾水量は、VPR II が通過した時間を 1 m 深毎に記録データから計算し、通過時間 (s)、平均フレームレート (24 fps) および Image Volume (m^3) を乗じた値から求めた。

VPR II で記録された画像を、画像表示ソフトウェア (ThumsPlus 4.5J, ビレッジセンター (株)) で表示し、肉眼で識別してカイアシ類 (Copepoda)、放散虫類 (Radiolaria)、ヒドロクラゲ類 (Hydrozoa) およびクシクラゲ類 (Ctenophora) の画像を選別した。さらに、物理構造による影響を調べるため、明らかに生物でないと判断した粒子を懸濁粒子 (Detritus) と定義して選別した。選別した画像の枚数および VPR II の濾水量から、分類群ごとに個体数密度を計算した。なお、ヒドロクラゲ類およびクシクラゲ類は分布密度が低く、1 m 深ごとでは過小評価になると考えられたため、10 m 深ごとの個体数密度および現存量として算出した。カイアシ類、放散虫類および懸濁粒子の分布密度は 1 m 深ごとに算出した。また本章では、密度躍層以浅を表層、以深を中層と定義した。

5.2.3. ヒドロクラゲ類およびクシクラゲ類の現存量の計測

ヒドロクラゲ類およびクシクラゲ類の大きさは、VPR II 付属ソフトウェア (Visual Plankton) を用いて自動計測した。ヒドロクラゲ類については傘幅 (Bell diameter, BD) と高さ (Bell height, BH) を、クシクラゲ類については体幅 (Body width, BW) と体長 (Body length, BL) を自動計測結果から換算した (第 4 章)。長い触手が写ったヒドロクラゲ類の場合、傘幅 (または高さ) が過大評価され換算式から大きく外れたため、画像解析ソフトウェア (ImagePro Plus ver.4.5, プラネトロン (株)) を用いて画像の傘幅および傘高を手動計測した。触手のみが記録された画像、傘や体の一部しか記録されていない画像は計測対象から除外した。真上または真下から記録され、傘高 (体長) が分からない場合は、傘幅 (体幅) と高さが等しいと仮定して計算した。

ヒドロクラゲ類、クシクラゲ類は、BD, BH および BW, BL から回転楕円体に近似させて体積を計算した。ただし、ヒドロクラゲ類は楕円体体積の $1/2$ とした。体積から炭素量へは、比重を 1 と仮定して以下の換算係数 (Bailey *et al.*, 1995) を用いて換算した。

ヒドロクラゲ類: $DW = 0.045 WW$ および $C = 0.015 DW$
クシクラゲ類: $DW = 0.038 WW$ および $C = 0.004 DW$
ただし、DW: 乾重量, WW: 湿重量, C: 炭素量である。カイアシ類については、VPR II では種の同定が困難であったため、親潮域の主要大型カイアシ類 3 種 (*Neocalanus cristatus*, *N. plumchrus*, *N. flemingeri*) の平均値とし、Kobari *et al.* (2003) を改変した以下

の式を用いて換算した。

$$\text{Log}_{10} \text{DW} = 3.889 \text{Log}_{10} \text{PL} - 11.203$$

$$C = 0.454 \text{DW}$$

ただし、DW：乾重量、PL：前体部長（Prosome length）、C：炭素量である。クラゲ類の現存量はヒドロクラゲ類、管クラゲ類およびクシクラゲ類を合計した値とし、クラゲ類の日間餌料要求量ならびにカイアシ類の日間生産速度は、Ikeda (1985) から現存量および画像が記録された深度の水温（ネットでは採集層の平均水温）を用いて呼吸速度を計算し、呼吸効率を0.7と仮定して見積もった。

5.2.4. プランクトンネット採集試料の解析

MOCNESS-1 および閉鎖式ノルパックネットで採集した試料は、採集量に応じて最大1/64まで分割し、クラゲ・クシクラゲ類およびカイアシ類の計数と計測を行った。計測は、接眼マイクロメーターを装着した光学顕微鏡下で行い、クラゲ・クシクラゲ類の傘幅（または全長）およびカイアシ類の全長に応じて0.5以下、0.5~1, 1~2, 2~5, 5~10, 10~20, 20 mm以上の7つに区分し、分割後の全数について計測した。2 mm以下のクラゲ・クシクラゲ類については、破損や変形・収縮により正確な大きさが反映されていない可能性があった。

5.3. 結果

5.3.1. 海洋構造

2003年に観測したSt. OY1, St. OY2 およびSt. JB1, 2004年に観測したSt. A4, St. A13の100 m深における水温は、それぞれ7.6, 10.0, 4.5, 1.8, 1.9°Cで、100 m深の水温を用いた川合 (1972) の基準にしたがってSt. OY1, St. OY2 は黒潮・親潮移行域、それ以外は親潮域の測点と判断された (Fig. 5-2)。2003年の測点はいずれも50~70m以浅に季節躍層が発達していた。蛍光光度計による計測結果では、St. OY1, St. OY2, St. JB1でそれぞれ56, 36, 25mに極大値が認められ、いずれも季節躍層内に存在した。また、塩分極小層は、St. OY1, St. OY2, St. JB1でそれぞれ250, 247, 190 m深に認められた。北太平洋中層水 (North Pacific Intermediate Water, NPIW) を塩分極小層を含む26.6 σ_{θ} 以深の水塊と定義 (Yasuda, 1997) した場合、St. OY1, St. OY2, St. JB1で26.6 σ_{θ} となった深度は、それぞれ129, 152, 96 mであった (Fig. 5-2)。2004年の測点でも50 m以浅に季節躍層が発達していたが、2003年の測点に較べて浅く、蛍光光度の極大値はSt. A4, St. A13でそれぞれ32, 13 mであった (Fig. 5-

2)。また、2003年の測点では200m以深に塩分極小層が認められたが、2004年の測点では密度極大層以浅の表層で塩分が最も低かった。水温極小層はSt. A4, St. A13でそれぞれ129, 150 m深にあった。St. A4, St. A13で26.6 σ_{θ} となった深度は、それぞれ80, 86 mと2003年の測点に較べて浅かった。2003年、2004年いずれの測点においても表層の流れは0.2 kt以下で、観測中に水温・塩分の鉛直分布に大きな変化は認められなかった。

5.3.2. ヒドロクラゲ類およびクシクラゲ類の鉛直分布

VPR IIで得られたヒドロクラゲ類、クシクラゲ類の10 m深ごとの平均現存量の鉛直分布をFig. 5-3に示した。VPR IIで分類群を判別できた大きさの下限はヒドロクラゲ類およびクシクラゲ類でそれぞれ傘幅0.7 mm (St. JB1, VPR18), 体長0.7 mm (St. A4, VPR20), 上限はそれぞれ傘幅14.0 mm (St. A13, VPR14), 体長18.4 mm (St. A13, VPR14)であった。各測点において、10 m深毎の現存量の平均値 (x) および標準偏差 (σ) を求め、 $x + 2\sigma$ よりも大きな値となった層を分布の極大と定義し、Fig. 5-3中に○印で示した。ヒドロクラゲ類、クシクラゲ類いずれも海域による鉛直分布構造の違いや特徴は認められなかったが、表層ならびに中層において不連続な分布を示した。ヒドロクラゲ類の分布の極大層は、NPIWの指標とされる26.6 σ_{θ} より常に深い深度に形成され、NPIW以浅の表層には分布極大層は認められなかった。St. OY1の500 m付近、St. A13の440~460 m, St. A4の150~180 m付近では1層以上の連続した極大層が認められた。現存量が最大となったのはSt. OY2の490~500 m層で0.35 mgC/m³であった。クシクラゲ類の分布の極大層は、表層およびNPIW層のいずれにも認められ、特にSt. OY2では表層に連続した極大が認められた。表層のクシクラゲ類の分布極大層は、蛍光光度が極大となった深度の直下に認められた。クシクラゲ類の現存量の最大はSt. A13の20~30 m層における0.126 mgC/m³であった。また、クシクラゲ類とヒドロクラゲ類の分布極大層は、St. OY1の480~490 m層以外では一致しなかった。

5.3.3. クラゲ・クシクラゲ類の現存量および餌料要求量

VPR IIで記録された画像のうち、計測が可能であった最大値はヒドロクラゲ類およびクシクラゲ類がそれぞれ傘幅14.0 mm, 体長18.4 mmであり、それ以上の大きさ、特にVPR IIの視野 (43 × 44 mm) を超える個体は、画像から分類群の確定や大きさが計測できなかった。また、ヒドロクラゲ類の現存量が多かった

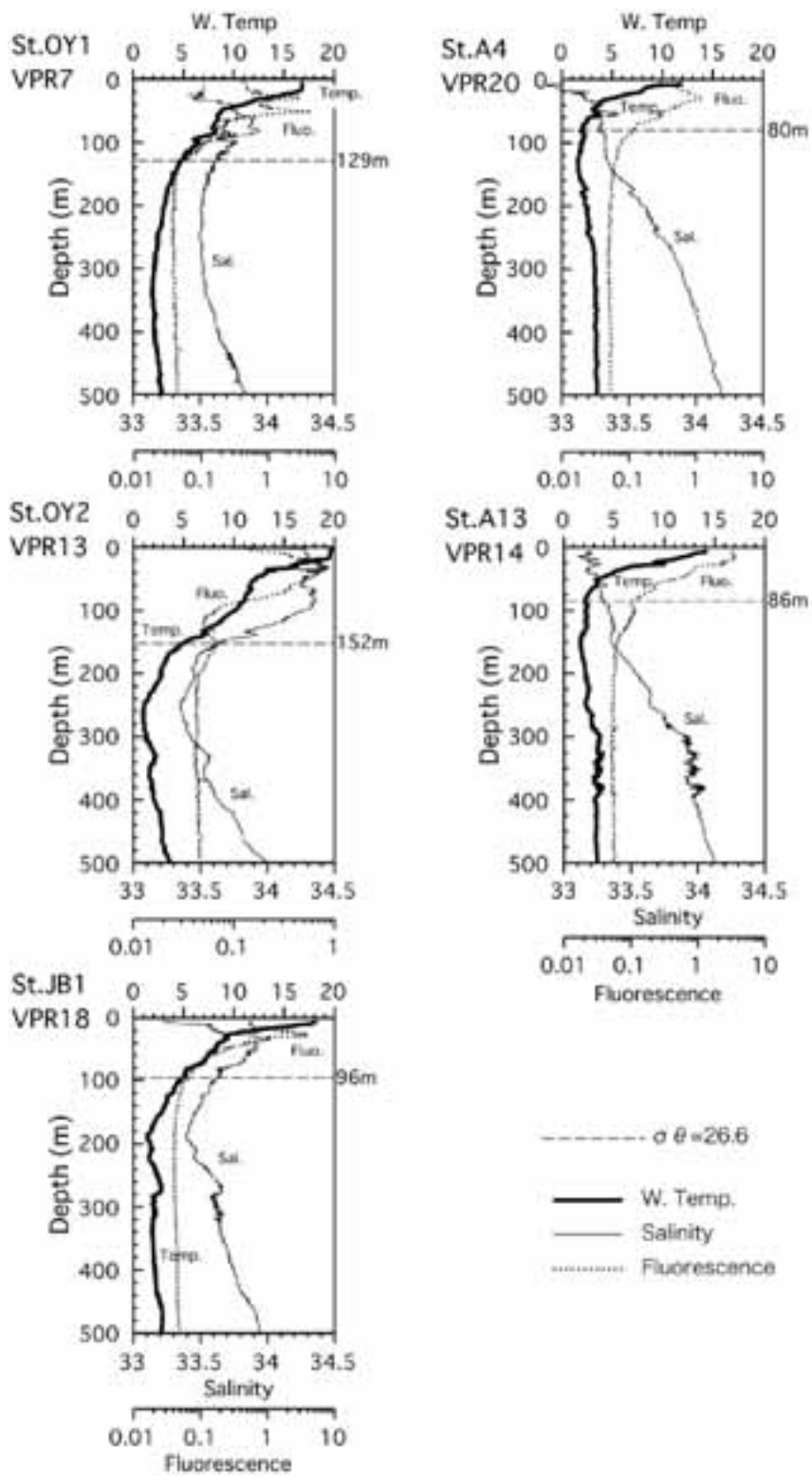


Fig. 5-2. The vertical profile of water temperature, salinity and fluorescence measured during each VPRII cast using the CTD profiler mounted on VPRII. Solid bold lines show water temperature, thin lines show salinity and dotted lines show fluorescence. Straight dashed lines show the depth of $\sigma_\theta = 26.6$.

2004年のSt. A 4 とSt. A13において、大きさ別の個体数密度をVPR II とプランクトンネットと比較したところ、10 mm以上では、VPR II とプランクトンネットではほぼ同じ値となった (Fig. 5- 4)。一方、VPR II は解像度の関係から 2 mm以下で個体数密度が過小評価となる可能性が高いが (第 4 章)、プランクトンネットとの比較ではVPR II の個体数密度が高かった (Fig. 5- 4)。さらに、管クラゲ類はVPR II がプランクトンネットに較べて過小評価になることから (第 4 章)、より信頼性の高いクラゲ類とクシクラゲ類の現存量を推定するため、10 mm以下のヒドロクラゲ類とクシクラゲ類はVPR II のデータを、10 mm以上のヒドロクラゲ類とクシクラゲ類、および全ての大きさの管クラゲ類はプランクトンネットのデータを使用して、ネット採集層ごとに、これらをまとめたクラゲ・クシクラゲ類

の現存量として算出した (Fig. 5- 5)。

各測点の採集層ごとに見積もったクラゲ・クシクラゲ類の平均現存量は $0.002\sim 0.106\text{ mgC/m}^3$ (平均±標準偏差 = 0.035 ± 0.031 , $n = 40$) の範囲にあった。最も高かったのは2004年のSt.A 4 の100~200 m層および2003年のSt.OY 1 の450~500 m層であった。クラゲ・クシクラゲ類の中ではヒドロクラゲ類の占める割合が高かった。管クラゲ類の現存量は、St. OY 1 の350~400 m層, St. OY 2 の200~250 m層, 250~300 m層, St. JB 1 の450~500 m層, St. A 4 の25~100 m層で高く、クシクラゲ類は、St. A13の25~100 m, 200~250 m層とSt. A 4 の100~200 m層で高かった。プランクトンネットの結果のみを用いて見積もったクラゲ・クシクラゲ類の現存量に対し、VPR II とプランクトンネット双方の結果を用いて見積もった現存量の比は

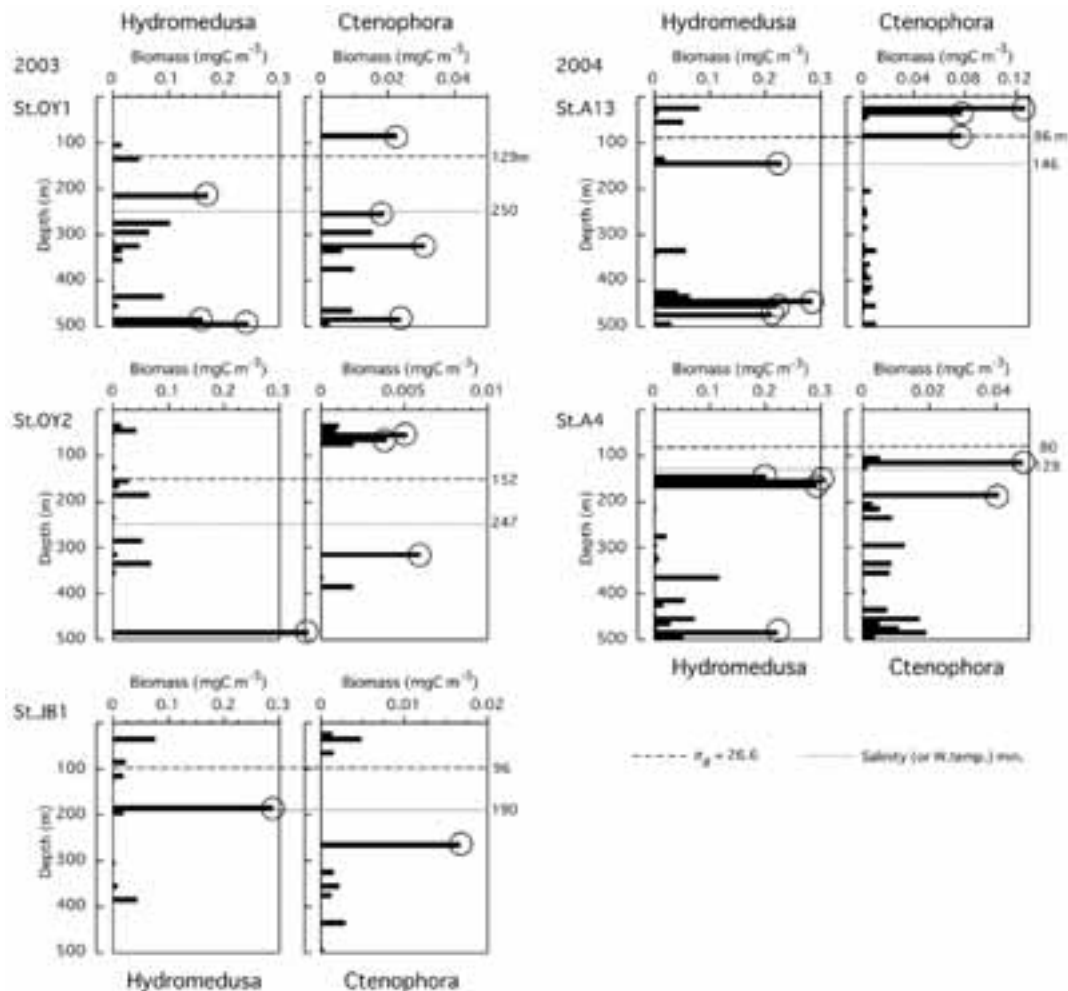


Fig. 5-3. Carbon biomass (mgC/m^3) based vertical distribution of Hydromedusa (left panel) and Ctenophora (right panel) estimated from VPR II images at every 10m depth. The circles denote the layers where the biomass is greater than 2 times the standard deviation. Straight dashed lines show the depth of $\sigma_\theta = 26.6$ and dotted lines show water temperature or salinity minimum depth.

Table 5-2. Jellyfish biomass (B, mgC/m³) and food requirement (F, mgC/m³/d) estimated from VPR II images and plankton net samples averaged over 25 to 500m in the Oyasio and Transition region, and Copepoda biomass (B, mgC/m³) and production (P, mgC/m³/d) estimated from the plankton net samples only

Station	Area	Copepoda		Jellyfish			Jellyfish total	
		B (mgC·m ⁻³)	P (mgC·m ⁻³ ·d ⁻¹)	Hydromedusa	Siphonophora	Ctenophora	B (10 ³ mgC·m ⁻³)	F (10 ³ mgC·m ⁻³ ·d ⁻¹)
				B (10 ³ mgC·m ⁻³)	B (10 ³ mgC·m ⁻³)	B (10 ³ mgC·m ⁻³)		
St. OY1	Transition	14.8	0.19	48.9	4.96	2.38	56.2	6.17
St. OY2	Transition	12.2	0.17	19.9	4.73	0.28	25.0	3.25
St. JB1	Oyashio	14.0	0.18	14.7	5.94	0.57	21.2	2.62
St. A4	Oyashio	7.67	0.11	38.8	13.1	3.12	55.0	5.74
At. A13	Oyashio	13.3	0.17	46.4	3.29	13.39	63.1	6.44

0.3~260の範囲にあり, 平均14.0倍 (標準偏差 = 43.8, $n = 40$) 高かった。カイアシ類は, St. A13およびSt. A4で25~100 mの現存量が最も多かったが, それ以外の測点ではNPIW層内で現存量が多かった。各層におけるクラゲ・クシクラゲ類現存量のカイアシ類現存量に対する百分率 (割合) は0.01~5.13 %となり, 比較した層ごとに差が大きかった。比が1 %以上となったのはSt. A13の100~200 m, 200~250 m, 450~500 mの各層とSt. A4の100~200 m層であり, St. A4の100~200 mが最も高かった。これらは全てNPIW層内にあり, ヒドロクラゲ類またはクシクラゲ類の分布極大層と一致した (Fig. 5-3)。

25~500 mにおけるカイアシ類の平均現存量, 日間

生産速度とVPR IIおよびプランクトンネットの結果から見積もったクラゲ類の平均現存量, 日間餌料要求量を測点間で比較した (Table 5-2)。カイアシ類の現存量は7.7~14.8 mgC/m³, クラゲ・クシクラゲ類の現存量は0.021~0.063 mgC/m³となり, カイアシ類現存量に対するクラゲ・クシクラゲ類現存量の比は0.2~0.7 %であった。クラゲ・クシクラゲ類の現存量は, 25~500 mで平均した場合でも親潮域, 黒潮・親潮移行域のような海域による差や, カイアシ類の現存量との相関関係は認められなかった。クラゲ・クシクラゲ類の日間餌料要求量は0.003~0.006 mgC/m³/dと見積もられ, カイアシ類の日間生産速度に対するクラゲ・クシクラゲ類の日間餌料要求量の比は1.5 % (St. JB1) ~

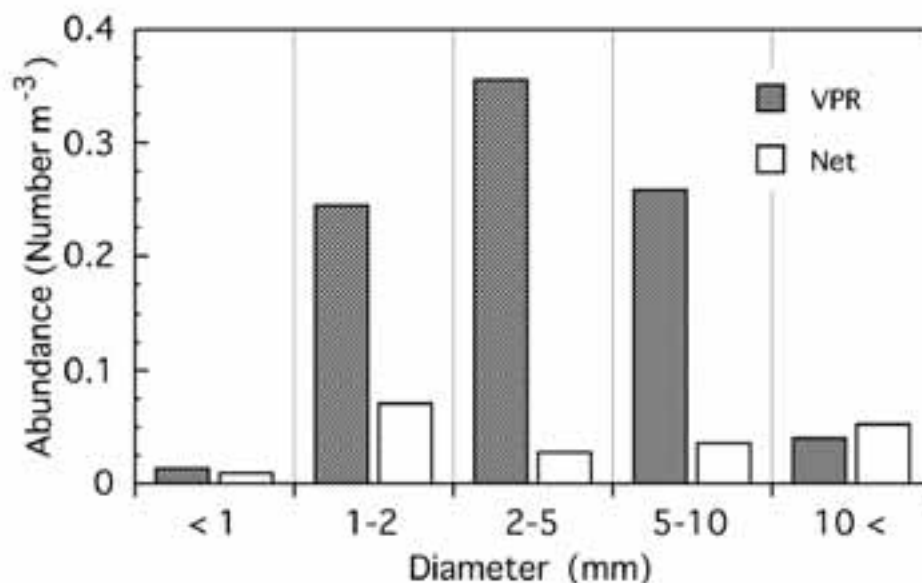


Fig. 5-4. Size-frequency data for Hydromedusa abundance measured with VPR II (VPR) and sampled by plankton net (Net) for combined data from station A4 and A13 in 2004.

5.4 % (St. A 4) の範囲であった。

5.3.4. カイアシ類, 放散虫類および懸濁粒子の鉛直分布

VPR II で観測された長さ 2 mm 以上を対象としたプランクトンネットの採集結果では, 2003年の測点で *Metridia okhotensis*, *Heterorhabdus tanneri*, *Neocalanus cristatus*, *Neocalanus plumchrus*, *Eucalanus bungii* の 5 種で個体数の 50~70% 以上を占めていた。2004年の測点では *N. cristatus*, *N. plumchrus*, *Candacia columbiae*, *Pleuromamma abdominalis*, *M. okhotensis*, *H. tanneri*, *E. bungii* が個体数の 80% 以上を占めていた。

VPR II で得られた 1 m 深ごとのカイアシ類, 放散虫類および懸濁粒子の鉛直分布を Fig. 5-6 に示した。ここでは 1 m 深あたりの個体数密度の平均値 (x) および標準偏差 (σ) を求め, $x + 3\sigma$ よりも大きな値となった層を分布の極大と定義し, Fig. 5-6 では $x + 3\sigma$ 以下を影の部分で示した。カイアシ類では, いずれの VPR II の観測においても密度躍層以浅の表層および 200~300 m 以深の中層に多くの分布が認められた。表層の分布極大層は 2003年の VPR13, 2004年の VPR14 および VPR20 では密度躍層底部に, また 2003年の VPR7 および VPR18 では, 密度躍層底部より数 10 m 深い層に認められた。また, 懸濁粒子の極大層ともよく合っていた。これに対して, 密度躍層以深の中層では複数

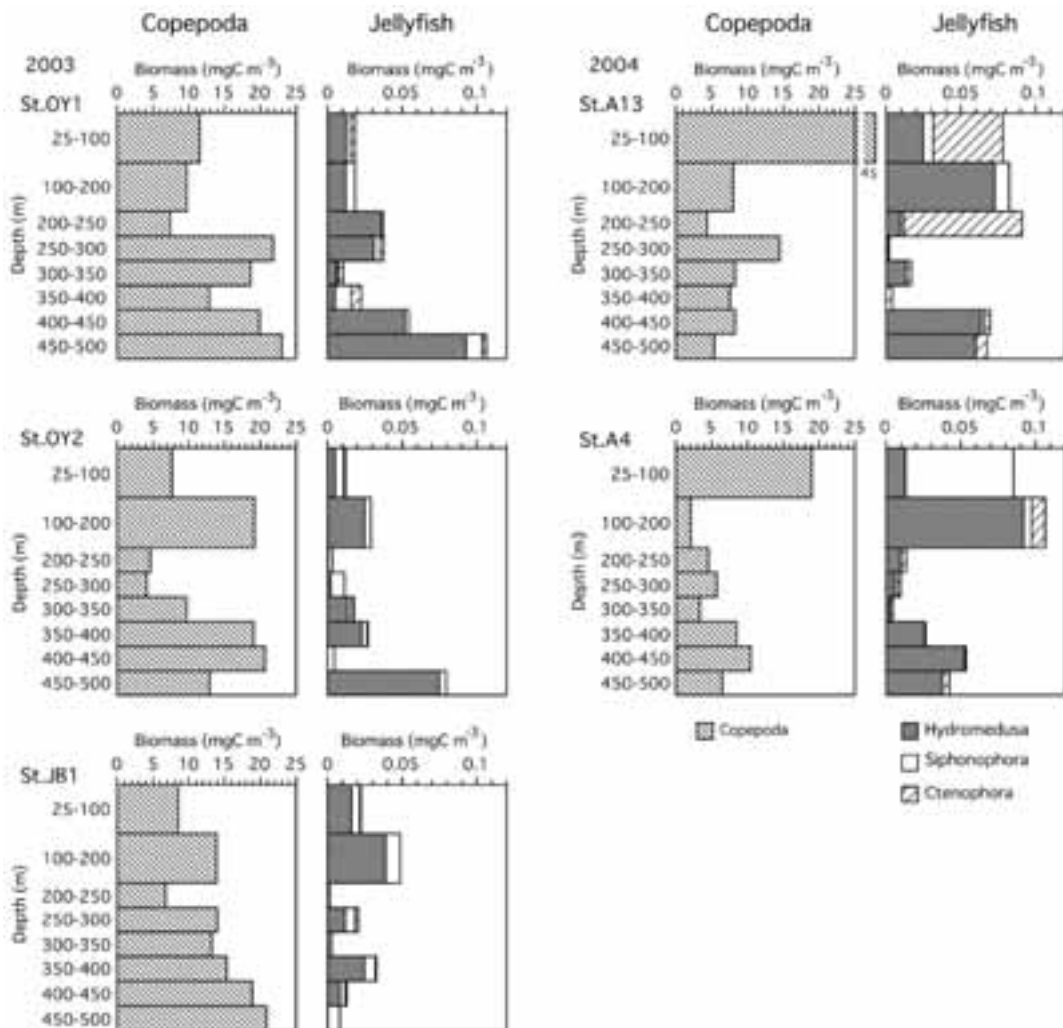


Fig. 5-5. Carbon biomass (mgC/m^3) based vertical distribution of Copepoda (left panel) and jellyfish (Cnidaria and Ctenophora, right panel) estimated from VPR II images at every 10m depth. Copepoda biomass was estimated from plankton net samples. Jellyfish biomass was estimated from VPR II images and plankton net samples, as <10mm sized Hydromedusa and Ctenophora used for VPR II data, whereas the >10mm Hydromedusa and Ctenophora and whole size Siphonophora were used for the plankton net data.

の極大層が認められ、2003年は塩分極小、2004年は水温極小以深に分布の極大層が存在したが、極大層は常に同じ深度でなく測点ごとに異なった。表層以深で

は、各測点ともに上下数メートルの範囲で、カイアシ類の分布極大深度と放散虫類および懸濁粒子の分布極大深度の一致が認められたが (Fig. 5-6 の矢印で示し

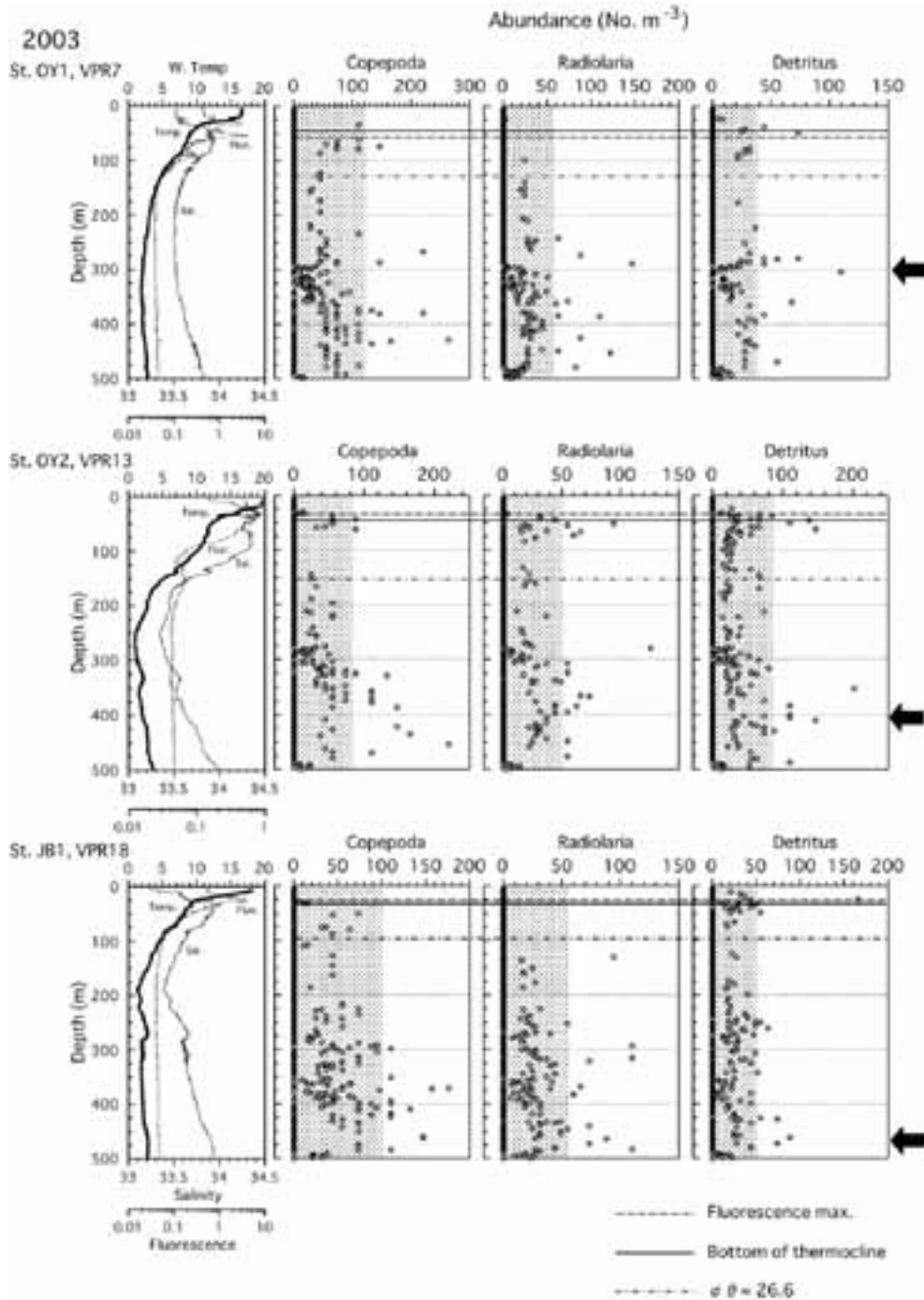


Fig. 5-6. The vertical profile of hydrogeologic structure (far left), and the vertical profile of Copepoda, Radiolaria and detritus abundance from the cast of VPR7 (St. OY1), VPR13 (St. OY2) and VPR18 (St. JB1) during 2003 cruise. The density of abundance was averaged from every 1m. The shadowed area shows less than 3 times the standard deviation. Straight line, short-dashed line, and dashed lines show the depth of the thermocline bottom, maximum of fluorescence and $\sigma_\theta=26.6$, respectively. Solid bold arrow show the maximum distributed layer which corresponded with Copepoda, Radiolaria and detritus (suspended particles).

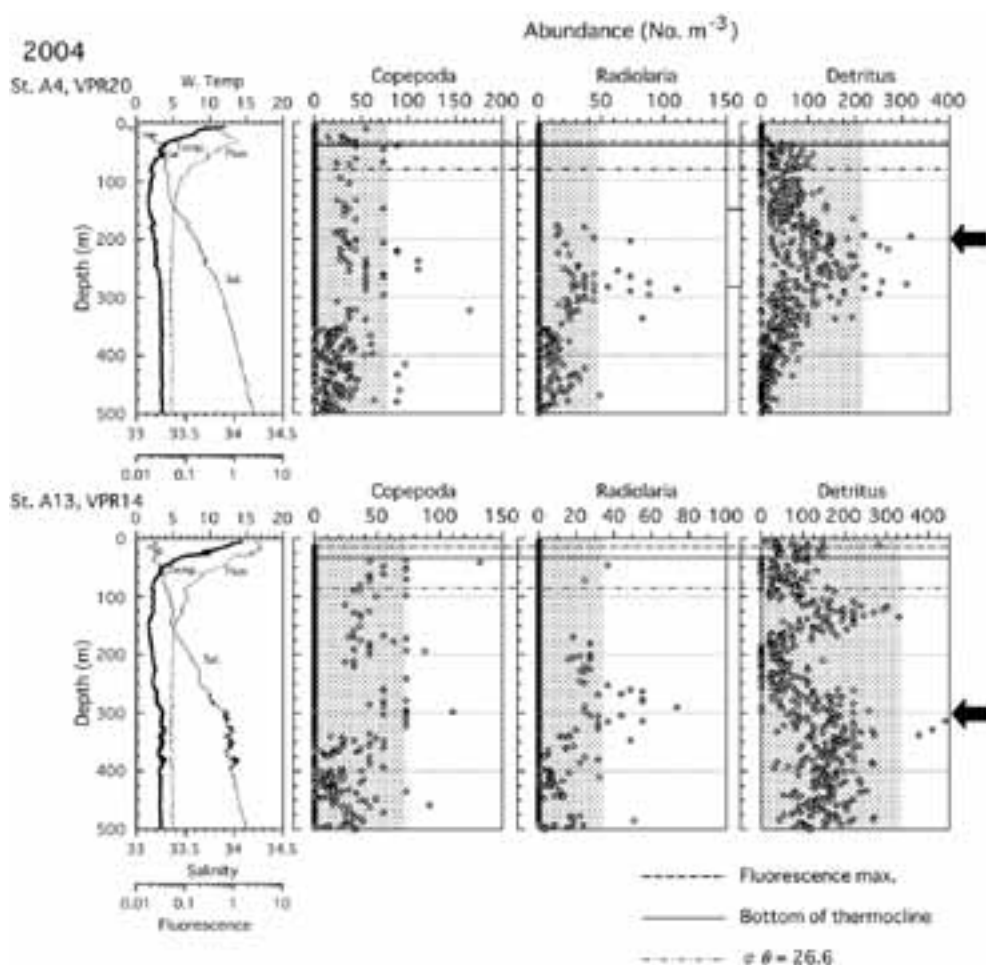


Fig. 5-6. Continued. Data from VPR20 (St. A4) and VPR14 (St. A13) during 2004 cruise.

た深度), 1m単位では各分布極大の完全な一致は認められなかった。

放散虫類では, 2003年のVPR13でカイアシ類と同様に躍層底部および中層で分布が認められたが, それ以外のVPR IIの観測では表層に分布極大層は認められず, 中層にのみ多く分布した。特に2004年のVPR20では280 m深付近に極大層が認められた。中層の鉛直分布の傾向はカイアシ類と類似しており, 2003年は塩分極小以深, 2004年は水温極小以深に分布の極大層が認められた。さらに, 中層の放散虫類の鉛直分布は, VPR14以外で懸濁粒子の分布とも類似していた。VPR IIで記録された放散虫類は主にフェオダリア綱(Phaeodaria)と考えられた。

懸濁粒子は, 2003年の観測(VPR7, VPR13, VPR18)では, カイアシ類および放散虫類の分布と同様に表層および中層に分布の極大層が認められ, 分布極大層の深度もほぼ同じであった。しかし, 2004年のVPR14では, カイアシ類や放散虫類とは異なり, 表層, 120~130 m深および300~350 m深の3層に極大層が,

VPR20では200~300 m深に分布の極大層が集中した。また, 2004年の粒子密度は2003年に較べて5~10倍高かった。

5.3.5. 中層における分布極大層と物理構造

中層における分布の特徴を明らかにするため, NPIWの指標とされるポテンシャル密度が $26.6 \sigma_\theta$ 以深について水温, 塩分の鉛直構造ならびに $0.001 \sigma_\theta$ あたりのカイアシ類, 放散虫類および懸濁粒子密度の鉛直分布を示した(Fig. 5-7)。Fig. 5-6と同様に $0.001 \sigma_\theta$ あたりの個体数密度の平均値(x)および標準偏差(σ)を求め, $x + 3\sigma$ よりも大きな値となった層を分布の極大と定義し, Fig. 5-7では $x + 3\sigma$ 以下を影の部分で示した。

カイアシ類の分布極大は2003年は $26.77 \sigma_\theta$ 以深, 2004年は $26.62 \sigma_\theta$ 以深に存在した。これらは, 2003年は塩分極小以深, 2004年は水温極小以深に相当した。2003年はFig. 5-6の矢印で示した分布極大以外に, VPR7およびVPR18の $26.86 \sigma_\theta$ 前後, ならびにVPR13

の $26.95 \sigma_\theta$ 前後にカイアシ類と放散虫類の分布極大が認められた。2004年はVPR20の $26.94 \sim 26.9695 \sigma_\theta$ にかけて放散虫類と懸濁粒子の分布極大が認められたが、カイアシ類では明瞭な分布極大が認められなかった。

水温または塩分の逆転層と関係した密度層 (Fig. 5-7 の丸で囲んだ部分) ではカイアシ類, 放散虫類および懸濁粒子の分布極大が認められた。しかし, 2003年のVPR 7 の $26.76 \sim 26.78 \sigma_\theta$ とVPR18の $26.96 \sigma_\theta$, 2004年の

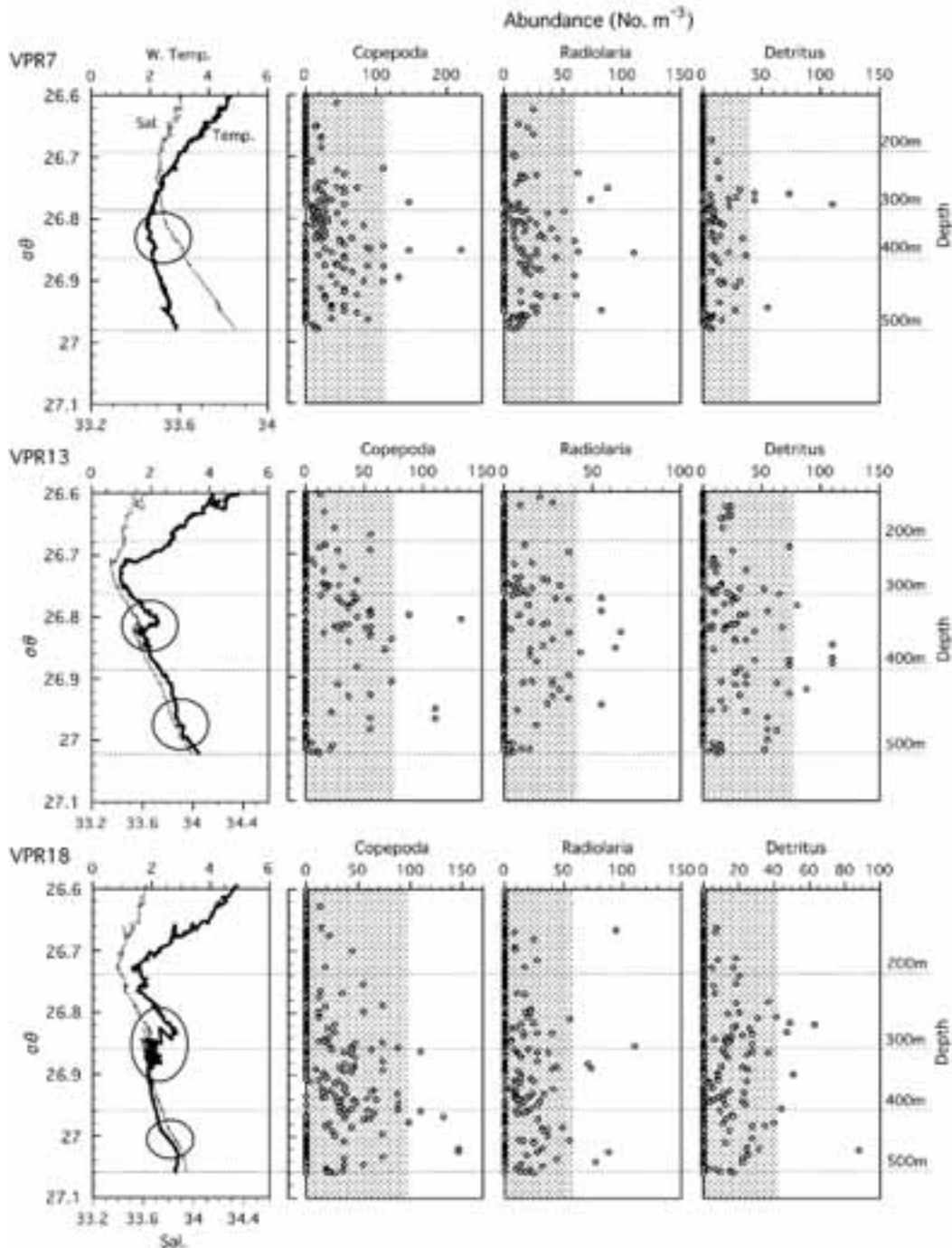


Fig. 5-7. The potential density profile of temperature and salinity structure (far left), and the potential density profile of Copepoda, Radiolaria and detritus abundance from the east of VPR7 (St. OY1), VPR13 (St. OY2) and VPR18 (St. JB1) during 2003 cruise. The density of abundance was averaged from every $0.001 \sigma_\theta$. The shadowed area shows less than 3 times the standard deviation. The circles denote the temperature-salinity inversion layers.

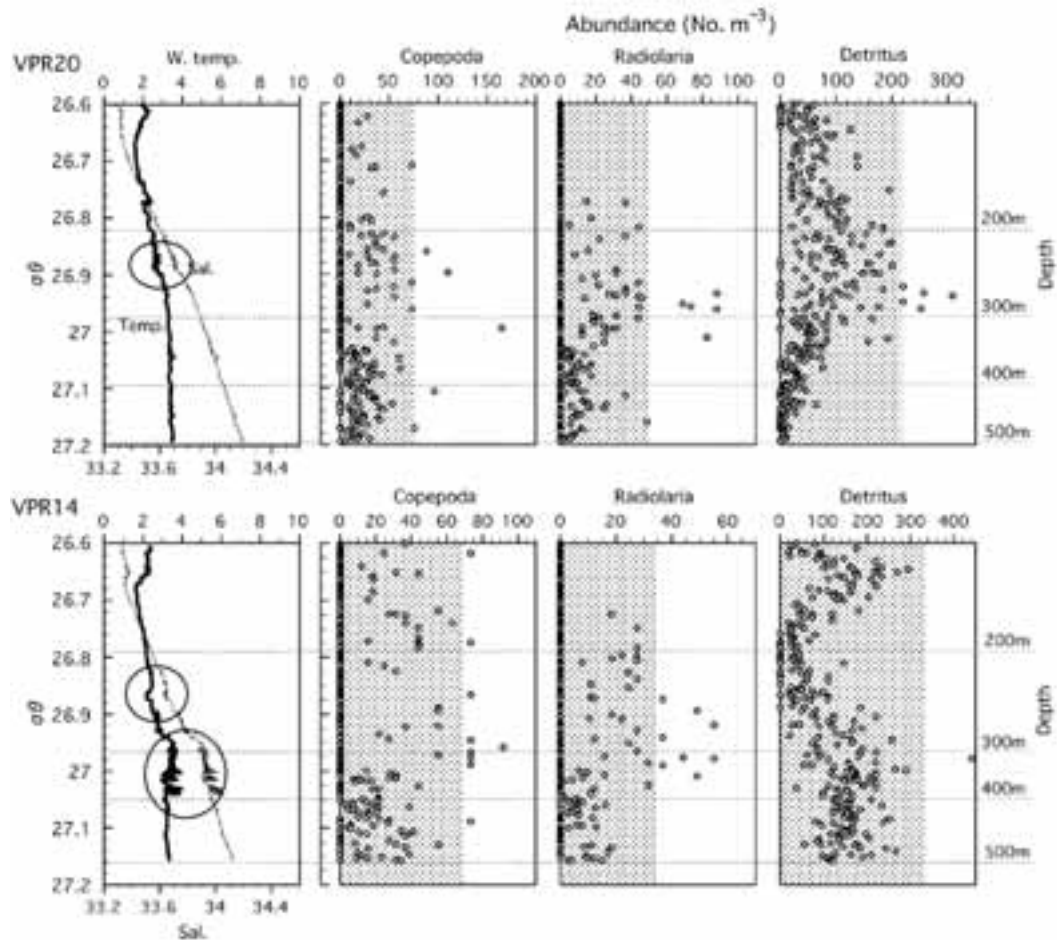


Fig. 5-7. Continued. Data from VPR20 (St. A4) and VPR14 (St. A13) during 2004 cruise

VPR20の26.94~26.96 σ_θ とVPR14の26.78 σ_θ の分布極大では逆転層は認められなかった。カイアシ類および放散虫類の分布極大となった σ_θ は、水深を指標にした場合と同様に測点ごとで異なり、全ての測点に共通するような特定の密度面における分布の集中は認められなかった。

各VPR II観測で得られたTSダイヤグラム上に、Fig. 5-6で示した1m深あたりのカイアシ類個体数密度が極大となった深度をプロットした(Fig. 5-8)。Fig. 5-6あるいはFig. 5-7で示したように、中層の全ての分布極大層は塩分または水温極小で深に分布していた。また、2003年のVPR7、VPR13およびVPR18は、100 m深(密度躍層の直下に相当)から塩分極小となる深度までカイアシ類分布密度が低く(Fig. 5-6)、その深度範囲は、26.5~26.7 σ_θ の水塊に相当した。しかし、2004年のVPR14およびVPR20は、26.5~26.7 σ_θ の水塊でもカイアシ類分布密度が顕著に低くなる傾向は認められなかった。また、26.5~26.7 σ_θ に相当

する水塊では、カイアシ類だけでなく放散虫類の分布密度も非常に低かった。

5.4. 考察

5.4.1. ヒドロクラゲ類およびクシクラゲ類の現存量

Roe *et al.* (1984) は、北東大西洋において多段式中層トロールネットのRMT 1+8 (Baker *et al.*, 1973) を用い、600 m以浅の5層についてヒドロクラゲ類の鉛直分布を昼夜にわたって詳細に調べた。Roe *et al.* (1984) が報告したヒドロクラゲ類の種毎の個体数密度とBouillon (1999) が報告した傘幅、傘高の値を引用し、本章と同じ方法で炭素量を見積もったところ、ヒドロクラゲ類の600 m以浅の昼間の現存量は約0.002 mgC/m³程度と推定された。Roe *et al.* (1984) は採集時に破損し、同定できない断片が試料に含まれていたことを記述しているが、本章における採集層ごとの平均現存量は0.035 mgC/m³であり、北東大西洋にお

けるプランクトンネット採集結果に較べ桁多い現存量を示した。一方、夏季のベーリング海において1990年代以降クラゲ類現存量の急増が報告されている (Brodeur *et al.*, 1999; 2002)。沿岸に近いアラスカ湾

のPeninsula海域では1994年の現存量が約50 kg/haと最も高く、沖合域では現存量が増加していた1990年代において約10 kg/haであった (Brodeur *et al.*, 2002)。この値を本章と同じ係数で換算した場合、最大で3.4

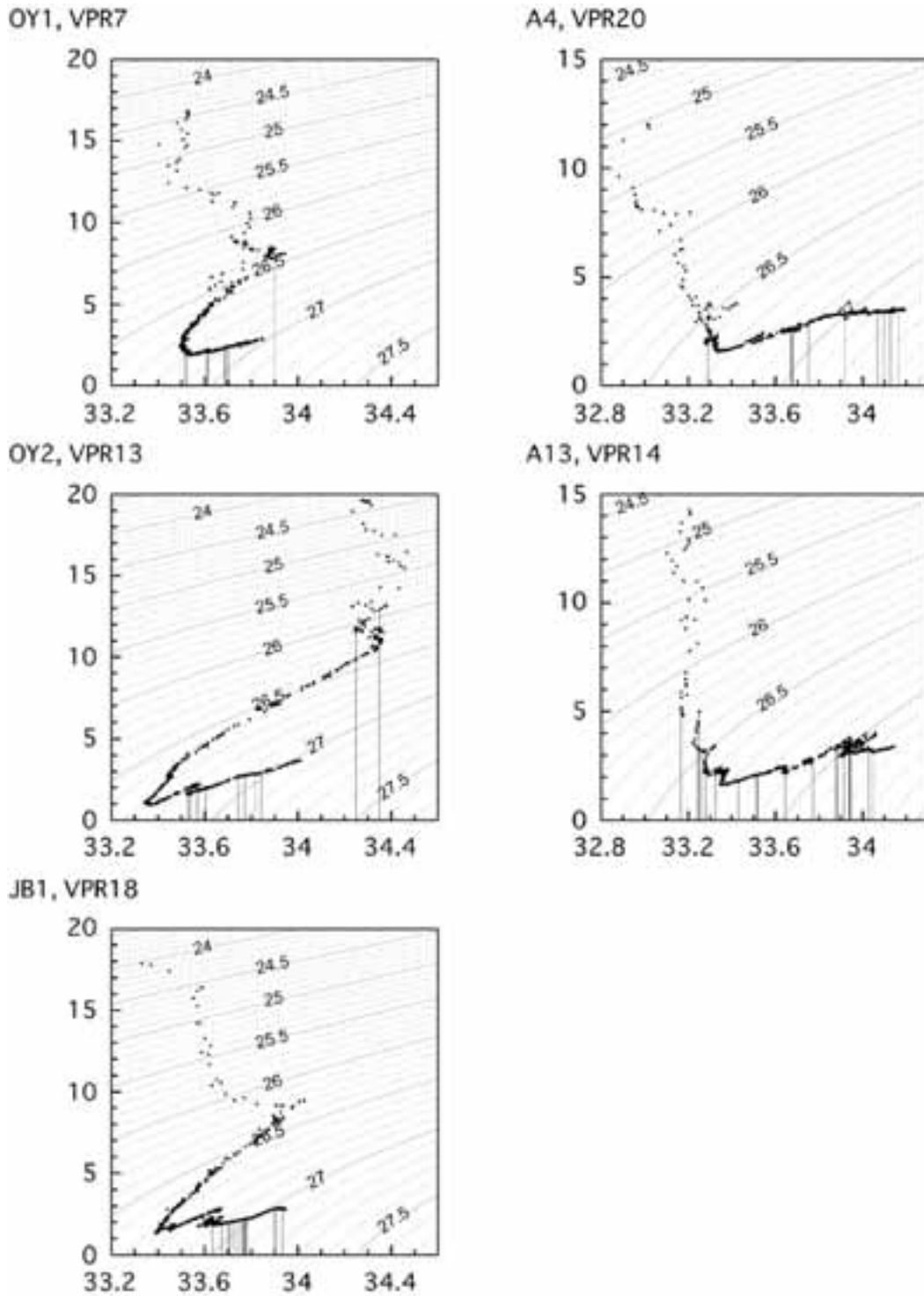


Fig. 5-8. T-S diagram of every VPR cast. The cross positions between the straight line and T-S were maximum layer of Copepoda.

mgC/m² (沖合域では0.7 mgC/m²) に相当する。Brodeur *et al.* (1999, 2002) が示した現存量はコッドエンド網目幅が38 mmのトロールで採集された大型のクラゲ類 (主に鉢虫類, Scyphozoa) を対象とした結果であるが, 本章で示した25~500 mの現存量 (約10~30 mgC/m², Table 5-2) の1/10程度であった。

一方, Remsen *et al.* (2004) は, 本研究と同様にプランクトンネットと複数のプランクトンセンサーを用いて, メキシコ湾の100 m以浅の10層において手法間の比較を行った。プランクトンセンサーは, VPR IIと記録原理は異なるがプランクトンを画像として記録するShadow Image Particle Profiling and Evaluation

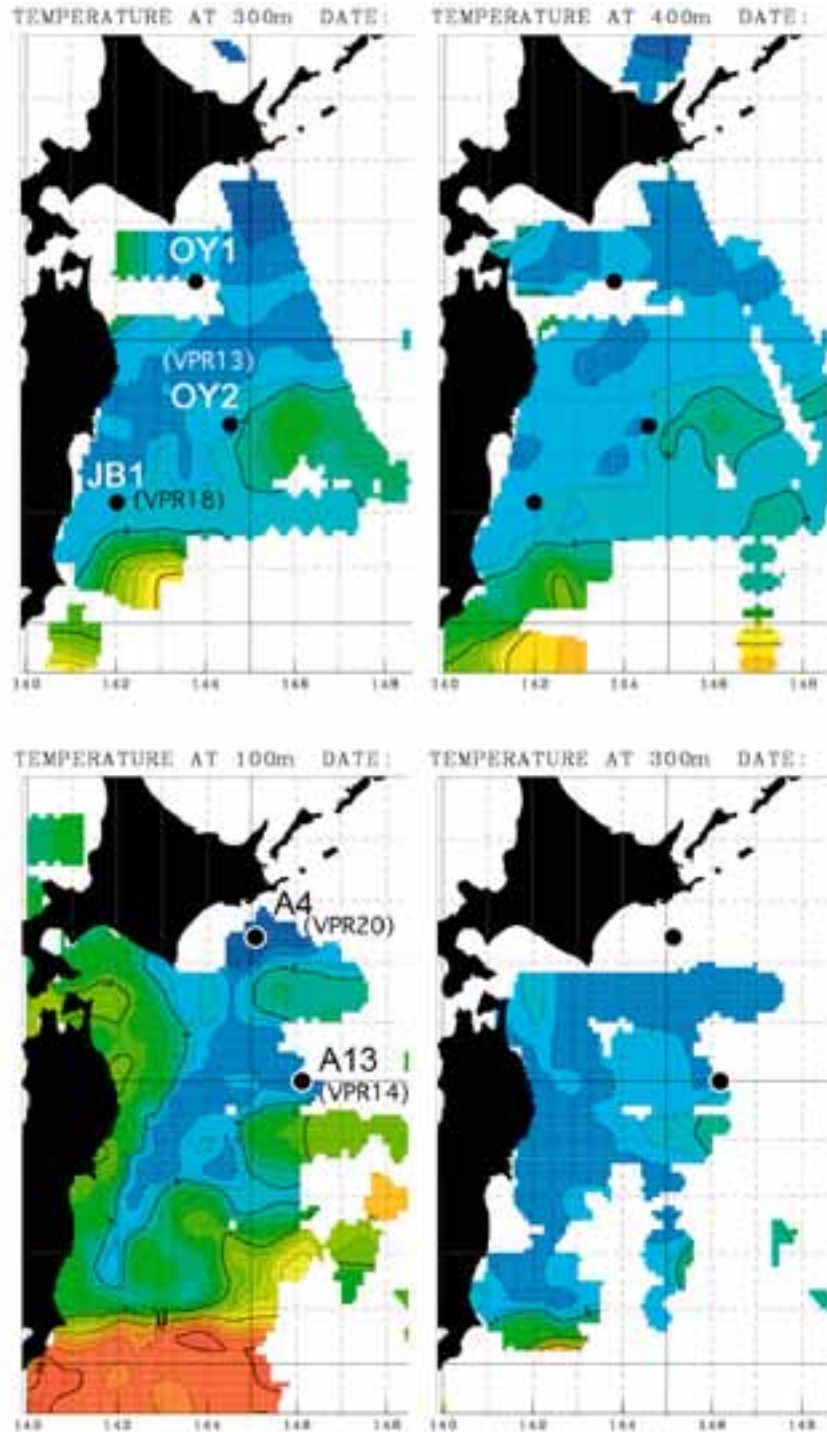


Fig. 5-9. Water temperature distribution published from Tohoku National Research Institute, FRA.

Recorder (SIPPER; Samson *et al.*, 2001) が用いられた。1 測点のみの結果であるが、SIPPERで得られたクラゲ・クシクラゲ類の現存量はプランクトンネットと比較して約10倍多かった (Remsen *et al.*, 2004)。本章でも、ヒドロクラゲ類とクシクラゲ類の現存量は、25~500 mの平均でVPR IIがプランクトンネットに比べ平均14倍高い事が示され、観測深度や海域は異なるが、プランクトンネットとの現存量の差に関して Remsen *et al.* (2004) とほぼ一致した結果となった。しかし、ヒドロクラゲ類、クシクラゲ類の鉛直分布は均一でなく (Fig. 5-3)、大型の個体の現存量はVPR IIの視野が限られ、濾水量も少ないことから過小評価の可能性はある (Benfield *et al.*, 1996)。したがって、従来のプランクトンネットによるクラゲ・クシクラゲ類の現存量の見積もりと、実際に分布している現存量の差はさらに大きいと考えられた。

本章では、炭素量への換算にBailey *et al.* (1995) が示したクラゲ類で1.5~16.9 % carbon of dry weight、クシクラゲ類で0.4~3.7 % carbon of dry weightの最小値を用いたが、他にクラゲ類は3 % carbon of dry weight、クシクラゲ類は1~5 % carbon of dry weight (Parsons *et al.*, 1984)、あるいはクラゲ類では3~16 % carbon of dry weight (Larson, 1986) などがある。本章で用いた換算係数は、他の係数を用いた場合に比べ現存量が少なく見積もられる。それにも関わらず、本章で見積もったクラゲ・クシクラゲ類の現存量は従来の報告の10倍以上多く、従来のプランクトンネット採集による結果が過小評価であったことを示したものと推察された。

5.4.2. ヒドロクラゲ類、クシクラゲ類の鉛直分布

プランクトンの分布は連続的でなく、群集団を形成または不均一に分布する (Lalli and Persons, 1997)。中層に分布するクラゲ・クシクラゲ類は種類によって分布深度が異なるとともに (Mackie, 1985; Hunt and Lindsay, 1999)、ビデオカメラによる観測では、プランクトンネット採集で捉えられないクラゲ類の分布の極大層 (Båmstedt *et al.*, 2003) やクシクラゲ類の一種である *Bolinopsis infundibulum* の海底直上での群集団形成 (Toyokawa *et al.*, 2003) が観測されている。従来、ビデオカメラによる観測は主に数10 mm以上の大型個体を対象としていたが、本章では親潮域ならびに移行域における小型ヒドロクラゲ類、クシクラゲ類の詳細な鉛直分布を初めて示し、その鉛直分布が断続的であることを示した (Fig. 5-3)。今回の観測だけでは、事例が十分でないため全て分布極大の形成要因について議論を深めることは難しいが、クシクラゲ類に

ついては表層の蛍光光度極大の直下に分布極大が形成される場合が多かった (Figs. 5-2, 5-3)。表層では深度によってカイアシ類に対するクラゲ類の影響が異なり (Larson, 1987)、表層に分布するニシン仔稚魚との競合 (Moller, 1984; Purcell and Grover, 1990) が報告されていることから、表層におけるクシクラゲ類の鉛直分布は餌料環境と関係していた可能性を示唆したものと考えられた。

本章では、クラゲ類、クシクラゲ類の全現存量を見積もるため、VPR IIの結果とともに、ヒドロクラゲ類およびクシクラゲ類では10 mm以上、管クラゲ類は全サイズについてプランクトンネットの結果を合わせて用いた (Fig. 5-5)。そのため分布極大ごとにクラゲ類、クシクラゲ類の全現存量の見積もりはできなかった。しかし、VPR IIとプランクトンネットを合わせた結果から見積もったクラゲ・クシクラゲ類全体の平均現存量の最大値は0.106 mgC/m³ (St. A 4の100~200 m層)であったのに対し (Fig. 5-5)、VPR IIの結果だけから得られた同じSt. A 4の150~160 m層におけるヒドロクラゲ類のみの現存量は0.304 mgC/m³と100~200 m層の平均現存量の約2倍高く (Fig. 5-3)、110~120 m層におけるクシクラゲ類のみの現存量 (0.048 mgC/m³)と較べてもクラゲ類全体の平均現存量の約半分となっていた (Fig. 5-3)。これは、分布極大層においてクラゲ類、クシクラゲ類の全現存量がさらに高い可能性を示すものである。

一方、本研究では、VPR IIの視野の関係からヒドロクラゲ類では傘幅14.0 mm、クシクラゲ類では体長18.4mmがそれぞれ最大であり、10 mm以上のヒドロクラゲ類、クシクラゲ類はVPR IIでは過小評価になると考えた (Fig. 5-4)。Toyokawa *et al.* (2003) は、潜水艇による観測で、本研究のSt. A 4に近い釧路沖で直径100 mm前後のクシクラゲ (*B. infundibulum*) の個体数密度を0.9 個体/m³、現存量を70 mgC/m³と見積もっており、この現存量は本章で示したクシクラゲ類現存量の最大値より3桁も高かった。一方、St. A 4で現存量の極大層が認められた140~150 m層のヒドロクラゲ類個体数密度は6.7 個体/m³、110~120 m層のクシクラゲ類個体数密度は7.5 個体/m³であり、Toyokawa *et al.* (2003) が観測した個体数密度より一桁高かった。クシクラゲ類は、大型個体でもプランクトンネットによる破損が大きいと考えられ (Harbison *et al.*, 1978)、Toyokawa *et al.* (2003) の報告のように大型個体が群集団を形成した場合、本章で見積もられた現存量よりさらに高くなると推察された。VPR IIでは小型個体の記録が中心となるため、大型クシクラゲ類については、今後、視野の広いカメラまたは潜水

艇による観測と合わせた検討が必要である。

プランクトンネットによる採集結果と合わせて見積もったクラゲ・クシクラゲ類の現存量が従来の報告の10倍以上であったにも関わらず、層別で比較したカイアシ類の現存量に対するクラゲ類の現存量の割合は最大でも5%に過ぎず(Fig. 5-5), 25~500 mで平均したクラゲ・クシクラゲ類の日間餌料要求量もカイアシ類の日間生産速度に比べて小さかった(Table 5-2)。しかし、分布の極大層におけるクラゲ類, クシクラゲ類の現存量はネット採集深度, あるいは25~500 mで平均した現存量より数倍高く, その結果, 日間餌料要求量も高くなり, 餌として利用していると考えられるカイアシ類 (Toyokawa *et al.*, 2003) への影響もより大きくなると考えられた。一方, クラゲ類の捕食速度は, 主要な餌生物であるカイアシ類の生産速度は超えず, クラゲ類による捕食だけで餌生物の減少は説明できないことが報告されており (Daan, 1989; Purcell *et al.*, 1994; Schneider and Behrends, 1994), 喜多村(2003)が指摘したように沖合域においてはクラゲ類, クシクラゲ類だけでなく, 毛顎類や端脚類のような他の肉食性動物プランクトン, さらに頭足類や魚類との関係も含めて考えること, 水柱の平均でなくクラゲ類, クシクラゲ類の分布極大層における生物相互の関係について検討することが必要である。従来のプランクトンネットを用いた観測のみで詳細な鉛直分布構造を把握することは困難であるが, VPR IIを用いることでこうした観測が可能となる。

クラゲ類は, 高い増殖速度 (成長に必要なエネルギーが少ない), 高い摂餌能力 (体組成に対する有機物に比べて相対的に広い表面積), 高い浮力による低い代謝が指摘されている (Larson, 1986)。さらに, 魚類や甲殻類などの代謝速度は深度が深くなると低下するが (Childress *et al.*, 1980), クラゲ類では変わらないとされる (Thuesen and Childress, 1994)。本章の炭素量の見積もりは文献値の中でも小さいこと, また本章で用いたIkeda (1985) では, クラゲ類, クシクラゲ類の日間餌料要求量は温度と個体の炭素量によって変化すること, さらに鉛直分布では顕著な現存量の極大層が認められることを考えると, クラゲ類の日間餌料要求量は本章で示した値より高い可能性があり, その場合には, 生態系への影響も大きいと考えられる。

5.4.3. 表層におけるカイアシ類の鉛直分布構造

VPR IIと同様に, 高い空間分解能でプランクトンの分布を把握できるOPCを用いた観測では, カイアシ類の種類ごとに表層分布極大の深度が異なり, 種によって蛍光光度の極大値と一致, 不一致が観測された

(Herman, 1983)。MOCNESS および Bedford Institute of Oceanography Net and Environmental Sensing System (BIONESS; Sameoto *et al.*, 1977) を用いた詳細な鉛直分布構造の解析においても, 種ごとに鉛直的な分布の棲み分けをしていたことが示されており (Sameoto, 1987; Mackas *et al.*, 1993), こうした分布の違いは水塊の乱流構造 (Mackas *et al.*, 1993; Incze *et al.*, 2001) およびそれと関係した餌の質や種類, 量によって決まると考えられている (Paffenhofers, 1983; Mackas *et al.*, 1993)。VPR IIの画像からはカイアシ類の正確な種類まで判別できないが, 表層には常にカイアシ類の鉛直分布の極大層が出現し, それらは密度躍層 (30~50 m深) の直下に位置していた (Fig. 5-6)。この深度は蛍光光度の極大値とは異なっていたが, 懸濁粒子の極大層と一致していた (Fig. 5-6)。懸濁粒子の鉛直分布は, 表層の生産や物理構造に影響を受けると考えられる。今回の観測でも懸濁粒子の極大層は密度躍層直下に存在したことから, 物理構造の影響を強く受けていたと考えられた。一方, カイアシ類の鉛直分布は, 物理構造による受動的な影響だけで決まっていたとは考えにくい。季節鉛直移動を行う *Neocalanus* 属では, 7月までは表層に分布するため (Tsuda *et al.*, 1999; 2004), 餌料環境との関係も考えられる。プランクトンネットによる25~100 m層の採集結果では, VPR IIで識別できる2 mm以上のカイアシ類として2003年は *Metridia okhotensis* と *Heterorhabdus tanneri* が, 2004年は *Neocalanus plumchrus* および *Pleuromamma abdominalis* が個体数で優占していた。 *Heterorhabdus* 属は肉食とされるが (Nishida and Ohtsuka, 1996), *M. okhotensis* や *N. plumchrus* は微小動物プランクトンや懸濁粒子も摂餌する (Hattori, 1989; Gifford, 1993)。また, 亜寒帯域で優占するカイアシ類では, 珪藻の増殖期以降, 微小動物プランクトンの摂餌割合が高く, 二次生産の鉛直輸送に貢献していることも示されている (Kobari *et al.*, 2003)。2003年の観測は7月中旬, 2004年は6月下旬に実施されたが, この時期, 観測海域の増殖最盛期は既に過ぎていたと考えられた (Saito *et al.*, 1989)。VPR IIで記録された懸濁粒子は大きく, カイアシ類が直接摂餌できる大きさとは考えられないが, 懸濁粒子の鉛直分布が表層の物理構造の影響を受けていたと考えた場合, カイアシ類が摂餌可能な小型粒子, または遊泳能力が低い微小動物プランクトンも同様に集積すると考えられる。したがって, カイアシ類の分布が餌環境に影響されていた可能性を指摘できる。ただし, 日周鉛直移動をせず, 表層にとどまるカイアシ類でも摂餌は昼間でなく夜間に活発になることが指摘されて

いる (Head *et al.*, 1985; 鮎貝・石井, 1989)。本研究の観測は全て昼間であるため、夜間、蛍光光度が極大値となった深度まで移動していた可能性も否定できない。夜間に蛍光光度の極大層まで10 m程度を移動して摂餌していたと仮定した場合、昼間の密度躍層直下のカイアシ類の分布の極大層は、餌料環境より物理構造の影響をより強く受けていた可能性がある。

5.4.4. 中層におけるカイアシ類、放散虫類および懸濁粒子の鉛直分布

親潮域、黒潮親潮移行域の中層における動物プランクトンの詳細な鉛直分布構造に関する報告は、カイアシ類、毛顎類の一部の種について個体数密度に関する知見があるのみである (Terazaki and Marumo, 1979; Hattori, 1989; Kobari and Ikeda, 1999)。Hattori (1989) や Kobari and Ikeda (1999) はカイアシ類の個体数密度が表層直下で減少し、鉛直分布が表層および中層で二極分布することを示した。日本近海と同じ亜寒帯水域である千島海溝においても、表層 (> 50m) 直下の中冷水 (75~200 m) で動物プランクトン現存量が急激に減少し、200~500 m で再び増加したことが報告されている (Vinogradov, 1997)。本章でもカイアシ類の鉛直分布が同様な構造を示すことを示したが (Fig. 5-6), その深度をより具体的に、すなわち中層におけるカイアシ類の分布極大層は塩分または水温極小以深 (26.7 σ_{θ} 以深) に出現することを明らかにした。

中層におけるカイアシ類の分布極大層と水塊構造を詳細に検討した場合、水温または塩分の逆転層と関係した密度層 (以下、逆転層) に分布極大が認められ (Fig. 5-7), 放散虫類あるいは懸濁粒子でも同じ逆転層に分布極大が存在した (Fig. 5-7)。特に大きな逆転層が認められたVPR13 (St. OY 2) とVPR14 (St. A13) は暖水塊の、VPR18 (St. JB 1) は黒潮の縁辺に位置し、逆転層が存在した深度に近い水深300 mにおいても等水温線の間隔が狭かった (Fig. 5-9)。したがって、逆転層は黒潮や暖水塊の影響による水塊の水平貫入 (または移流) が起きた結果と考えられた (永田, 1974)。水塊の移流面では鉛直方向の流れができるため、水塊の貫入によってカイアシ類、放散虫類および懸濁粒子が物理的に集積したか、あるいは、逆に集積した懸濁粒子などの餌料環境によってカイアシ類の分布極大が形成された可能性が指摘できる。ただし、逆転層以外にも分布極大が認められることから、物理構造以外の餌料や捕食者といった生物要因によっても分布極大層が形成された可能性もある。Osgood and Checkley (1997) はカリフォルニアのサンタバーバラ湾でOPCを用いて *Calanus pacificus* の詳細な鉛

直分布を解析し、休眠期に500 m深付近にある貧酸素水の直上に分布極大層が存在することを明らかにするとともに、極大層は鉛直移動において貧酸素水塊にトラップされた結果として形成されたこと、逆に貧酸素水塊によって捕食の影響を少なくしている可能性を指摘した。逆転層と貧酸素水塊は異なるが、日周鉛直移動を行う種が、こうした物理構造によって一時的にトラップされた可能性も考えられる。

中層の各極大層で出現した大型カイアシ類は、2003年では日周鉛直移動を行う *M. okhotensis*, 肉食性の *Heterorhabdus* 属および *E. bungi* が多く、2004年は季節鉛直移動を行う *Neocalanus* 属の占める割合が高かった。Hattori (1989) は親潮域および黒潮親潮移行域において、中層にカイアシ類の分布極大が存在し、日周鉛直移動を行う *M. pacifica*, *M. okhotensis* および *P. scutullata* についても、夜間、中層に分布極大が残ることを報告した。Hattori (1989) は、夜間、中層に分布する *M. pacifica* の消化管内に糞粒 (fecal pellet) などの懸濁粒子や放散虫類の殻が多く存在し、中層で活発に摂餌活動を行っていたと考えられたことから、中層における分布の極大層は、水温などの物理環境や捕食者以外の要因、すなわち餌料環境によるものと考察した。また、*N. plumchrus* および *N. cristatus* でも原生動物や懸濁粒子の摂餌が示されている (Gifford and Dagg, 1991; Gifford, 1993; Kobari *et al.*, 2003)。VPR II で識別できた放散虫や懸濁粒子は2 mm以上とカイアシ類が直接利用できるサイズより大きいと考えられるが、カイアシ類、放散虫類および懸濁粒子の分布極大が重なる深度があったことは (Figs. 5-6, 5-7), 物理構造以外の要因としてHattori (1989) の結果を間接的に支持していたと考えられた。

前節で述べたように、表層におけるカイアシ類の鉛直分布構造は物理構造 (または物理環境) とそれに関係した餌料環境 (Paffenhofer, 1983; Mackas *et al.*, 1993), さらに捕食者からの逃避など (Lalli and Parsons, 1997) によって決まると考えられている。中層における鉛直分布も同様な要因によると推察されるが、日周鉛直移動と季節鉛直移動による分布深度、あるいは鉛直移動を行わない種類の分布深度の持つ意味や分布要因はそれぞれ異なると考えられる。また、個々の種類の鉛直分布は生産と死亡率とのバランスの上で成立するとともに (Stich and Lampert, 1981), 死亡率に関わる捕食者の重要性が、中層における分布深度の決定要因として指摘されている (Richter, 1995; Dale *et al.*, 1999)。カイアシ類または放散虫類の個体数密度が減少した26.5~26.7 σ_{θ} の水塊 (ほぼ密度躍層直下から200 m深に相当) では、ヒドロクラゲ類、ク

シクラゲ類の分布極大が出現していなかったが (Fig. 5-3), 逆に, ヒドロクラゲ類, クシクラゲ類の分布極大深度において, カイアシ類や放散虫類の個体数の顕著な減少は認められなかった。また, カイアシ類の現存量に影響をおよぼすほどクラゲ類の餌料要求量は高くなかった (Table 5-2)。しかし, 5.4.3節で述べたように, 捕食圧が高い大型のクラゲ類, クシクラゲ類についてVPR IIで得られたデータは過小評価となっていたこと, 種によっては限られた深度層に分布すること (西田, 2000; Toyokawa *et al.*, 2003) から, クラゲ類との関係についても詳細な検討が必要と考えられる。さらに, 本研究では, 他の生物, 特にカイアシ類の主な捕食者と考えられる魚類や甲殻類などマイクロネクトンについて論じるデータはない。今後, VPR IIなどで得られたカイアシ類の詳細な鉛直分布構造を考慮し, 特定深度におけるプランクトンネット採集や潜水艇などの観測を通して, クラゲ類やマイクロネクトンなどの現存量を把握することも必要と考えられた。また, VPR IIを用いることで, こうした深度を特定することも可能となる。

VPR IIで識別できた懸濁粒子の大きさ下限は, VPR IIカメラの解像度の関係からESD換算で約1 mmであった。粒径1 mmの懸濁粒子の沈降速度は最低でも10 m/dと考えられる (Stemmann *et al.*, 2004)。観測時期が6月下旬 (2004年) または7月下旬 (2003年) であったことを考えると, 中層の懸濁粒子の極大層は, 植物プランクトンの春季増殖期に形成され, それが沈降した結果, 形成されたとは考えにくい。Shimizu *et al.* (2004) は, オホーツクモード水の指標とされる26.7 ~ 26.8 σ_θ の水塊 (Yasuda *et al.*, 2002) に等密度面追従型フロートを投入し, 中層にも流動構造が存在すること, 1年間で釧路沖から黒潮統流域にまで移動することを示した。また, 陸起源の懸濁粒子が沖合へ水平輸送されていることも示されている (Honjo *et al.*, 1982; Nakatsuka *et al.*, 2002)。本研究で対象とした懸濁粒子は大きく, 物理的な輸送だけで説明することは難しいが, 懸濁粒子の分布が流動構造が指摘された密度層と重なったこと, 中層に懸濁粒子が滞留・集積するような密度躍層は認められなかったこと (Fig. 5-2), さらに観測時期に中層の懸濁粒子密度が高くなるような表層の生産は期待できないと考えられることから, 26.7 σ_θ で深での懸濁粒子密度の増加は, 中層における物理的な輸送によって形成された可能性を指摘できる。さらに, 親潮水の上流域となる千島海溝域の200 ~ 500 m深において放散虫類 (フェオダリア綱) が多く出現したことが報告されている (Vinogradov, 1997)。フェオダリア綱と考えられる放散虫類の分布

は主に26.7 σ_θ で深であったことは (Figs. 5-6, 5-7), 中層における物理的な輸送の考えを支持できると考えられた。Bryant *et al.* (1998) は北大西洋のノルウェー海において季節的鉛直移動を行う *Calanus finmarchicus* の移流を輸送モデルを用いて計算し, 10年スケールでの分布と個体数が観測結果と矛盾しないこと, 分布のメカニズムについて考察した。親潮域, 移行域においても炭素の鉛直輸送における生物の役割を明らかにするため, カイアシ類の現存量と季節鉛直移動の知見を用いて中層における輸送量が見積もられている (清水ら, 2006)。本章の結果は, 中層における粒子の物理的な輸送を支持できるとともに, 数メートル以下の微細な空間の尺度でカイアシ類の分布構造に関する知見を提供することで, 精度の高い物質輸送の見積もりを可能にすると考えられる。

本章では, VPR IIで得られた結果からカイアシ類, 放散虫類および懸濁粒子の詳細な鉛直分布構造を示すことができた。しかし, カイアシ類の分布極大層について, 生物が積極的にその深度を選択しているのか, あるいは物理現象などの影響により, 受動的にその深度に分布 (集積) していたのか明確に区別することはできなかった。今後, 時間経過に伴う鉛直分布の変動, 中層における絶対流速の変化, さらに観測海域における鉛直断面構造を把握することで, より詳細な集積過程とカイアシ類の水平輸送機構が明らかになると思われる。

第6章 総合考察

6.1. VPR IIにおけるデータの信頼性

VPR IIで得られたプランクトンデータの信頼性に関して, 従来のプランクトンネットなどで得られた結果と比較した場合も含め, 主に2つの問題を指摘できる。第1はカメラを用いた画像記録の特性に起因する問題である。VPR IIでは, 高い空間の分解能でプランクトンの分布を把握し, かつ現場におけるプランクトンの生態を正確に記録するため, 第2章で述べたようにネットによる濃縮を行わず, 枠などで囲われていない開放的な空間を記録する方式を採用した (Davis *et al.*, 1992)。しかし, 3次元の空間を記録した1枚の画像 (フレーム) から, 記録された空間の体積 (視野体積, Image Volume) を正確に見積もることは難しい (Akiba *et al.*, 2000)。これに対し, カメラの前にフローセル (flow cell) を置き, これを通過するプランクトンを記録する場合 (閉鎖的な空間の記録), 常に一定の視野体積を記録することができる (津田, 1994;

Akiba *et al.*, 2000)。しかし、フローセル方式は、記録までに時間差が生ずるため高い空間分解能での観測が難しいこと、脆弱な個体が破損するといった問題がある。VPR IIでは、事前の較正と照明の調整によって、合焦したプランクトンだけをフレーム内から抽出・記録できるように設定することで、一定の被写界深度内、すなわち一定の視野体積内にあるプランクトンのみを記録可能とした。しかし、較正過程においてROIの抽出に関わる条件値（パラメーター）の決定方法に客観的な基準が示されておらず、また、パラメーターの設定によってはプランクトンが記録されない場合もあった（市川ら, 2003）。本研究では、分類群ごとの記録特性および適切なROIの抽出パラメーターを明らかにするとともに、客観的な数値として得られた画像の輝度階調を基準にして、一定の視野体積内にある合焦したROIを抽出する手法を開発した（第3章；市川ら, 2005）。その結果、枠などで囲われていない開放的な空間を記録するVPR IIにおいても、記録される視野体積の見積り精度を上げることでデータ信頼性を向上させることが可能となった。分類群や観測海域によって異なる光学的特性に対しては、今後、全てのフレームを記録し、観測後または観測と並行して適切な条件ごとにROIの抽出を行うような改良を図ることが望ましいと考えられる。ただし、VPR IIも含め、二次元で記録する測器ではプランクトンの向きによって正確な大きさを把握できない問題点がある。今後、技術的にはSIPPERのような3次元からの記録、画像解析からの復元による解決も可能と考えるが、本研究で行ったような換算式から平均サイズとして見積もるための精度の向上や誤差範囲の検証も必要と考えられる。

第2は、現場におけるプランクトン密度が正確に反映されているかという問題である。プランクトンの分布密度は均一でなく、種や分類群によって分布密度は変わるため（Lalli and Parsons, 1997）、従来の手法であるプランクトンネットにおいても同様の問題を含んでいる。Davis *et al.* (1992)は、分類群ごとに典型的なプランクトンの個体数密度を仮定し、個体間の距離、VPRの視野および曳航速度との関係を見積もり、観測対象に合わせた視野と適切な曳航速度を示した。また、翼足類などのように平均的な分布密度が希薄なものほど群集を形成するため、分布密度が低い場合でもVPRによる検出が可能とした。本研究で対象とした親潮域、黒潮親潮移行域における主要なメソ動物プランクトン上位40種の150 m以浅における平均個体数密度は1~40個体/m³程度であり（小達, 1994）、VPR IIの視野（0.0045 m³/sec）と曳航速度（0.3 m/sec以上）から計算した場合、観測海域においてVPR IIは少なく

とも5 mの空間分解能でプランクトンの分布を把握していたと推定できる。MOCNESSとの比較では、曳網深度幅である50 mまたは100 mの空間分解能で比較したため濾水量不足による問題は少ないと考えられた。実際、採集による物理的破損の影響を受けにくいカイアシ類について、VPR IIとMOCNESSでほぼ等しい結果が得られた（第4章；市川ら, 2006a）。一方、VPR IIの濾水量と個体数密度を用いてプランクトンが検出できない確率（ p_{nd} ）を算出し、プランクトン個体数密度の過小評価の有無およびその要因について考察した結果では、濾水量不足と考えられる過小評価の要因以外に、逃避の影響（毛顎類）、VPR II自身の視野の狭さや照明方法に起因する影響（管クラゲ類）が示唆された（第4章；市川ら, 2006a）。観測対象に合わせた視野と曳航速度の選択の重要性を示す結果であると考えられる。現在のVPR IIの画像だけでは、種組成が複雑な親潮域、移行域において種の同定が行えないという問題点がある。データ信頼性の検証のためだけでなく、種組成に関する情報を得るためにも、VPR IIの観測と従来のプランクトンネットによる採集との併用は不可欠である。照明およびカメラ視野と画素数のような技術的な問題については、VPR II自身、現在も改良・開発が継続されている測器であり、将来的に解決が図られていくと思われる。

6.2. プランクトンの群集構造

第1章で述べたように、クラゲ類、クシクラゲ類をはじめ、動物プランクトンの群集構造およびその変動機構を把握するためには、動物プランクトンの分布構造と現存量を正確に把握することが不可欠である。沿岸域においては、クラゲ類、クシクラゲ類の増加による社会生活への影響や漁業資源への被害が指摘される（安田, 1988; Zaitsev, 1992; Mills, 2000; Shiganova and Bulgakova, 2000; Oguz *et al.*, 2001; Purcell and Arai, 2001）、大西洋においては気候変動と関係したクラゲ類の増加が報告されている（Lynam *et al.*, 2004; 2005）。しかし、これらの研究が対象としたクラゲ類は、大型かつネット採集で破損しにくい鉢虫類が中心であり、沖合域における報告もBrodeur *et al.* (1999; 2002)など限られている。本研究では、知見が少なかった沖合域におけるヒドロクラゲ類、クシクラゲ類の現存量および鉛直分布構造を、VPR IIとプランクトンネットの併用により明らかにした。従来行われてきたプランクトンネットのみの採集結果に較べ、25~500 m層におけるヒドロクラゲ類の平均個体数密度は4.5倍（第4章；市川ら, 2006a）、現存量では14倍高い

結果が示された(第5章;市川ら, 2006b)。しかし, 25~500 m層におけるカイアシ類の平均現存量や生産速度と比較した場合, クラゲ類の平均現存量あるいは餌料要求量は2桁かそれ以上小さい結果であった(第5章;市川ら, 2006b)。本研究では, クラゲ類, クシクラゲ類の現存量および餌料要求量は既存の換算式から見積もっており, また, クラゲ類では種や餌料密度によって餌料対象や摂食速度も変わるとされるが(Arai, 2001), その点も考慮していない。一方, クラゲ類の捕食速度は主要な餌生物であるカイアシ類の生産速度は超えず, クラゲ類による捕食だけで餌生物の減少は説明できないこと(Daan, 1989; Purcell *et al.*, 1994; Schneider and Behrends, 1994), 親潮域の躍層以浅におけるメソ動物プランクトン現存量に占めるクラゲ類の割合は, 5月に20%近くと多かったがそれ以外の季節は数%以下に過ぎなかったことも示されている(Shinada *et al.*, 2001)。したがって, 観測を行った6~7月においては, 25~500 mの水柱の平均で考えた場合, クラゲ類, クシクラゲ類の個体群がカイアシ類個体群に直接影響を与えていた可能性は少ないと考えるのが妥当である。沿岸域では, 大量発生したクラゲ類, クシクラゲ類の単一種が, 生態系や社会生活へ影響をおよぼしているが(安田, 1988; Shiganova and Bulgakova, 2000), 沖合域においては, クラゲ類, クシクラゲ類だけでなく, 喜多村(2003)が指摘したように毛顎類や端脚類のような他の肉食性動物プランクトン, さらに頭足類や魚類との関係も含めて考えることも必要である。

Larson (1987) は, バンクーバー島のSaanich Inletにおいて観測を行い, 25 m以浅におけるクラゲ類, クシクラゲ類の捕食量は, カイアシ類現存量の1%/day以下で影響は小さいが, 5 m以浅では, 現存量の5~10%/dayと高くなり, 深度によってカイアシ類への影響が異なること, ノープリウス幼生やオキアミ卵に対するクラゲ類, クシクラゲ類の捕食は現存量の10~40%/dayに相当するため, 餌の競合者である魚類(サケ類)への影響も否定できないとした。本研究では, クラゲ類, クシクラゲ類の鉛直分布はカイアシ類とは異なって不均一であり, 表層だけでなく中層においても分布極大層が存在すること, さらに10 m深ごとに計算したクラゲ類, クシクラゲ類の現存量は, 25~500 mの平均現存量に較べて平均5~10倍高いことを示した(第5章;市川ら, 2006b)。Toyokawa *et al.* (2003) は, 中層においてクシクラゲ類の群集団形成を観測しており, Larson (1987) の報告と同様に, こうした分布の極大層におけるクラゲ類, クシクラゲ類の他の生物群に対する影響は無視できないと考えられる。特に

表層においては, ニシン仔稚魚との競合(Moller, 1984; Purcell and Grover, 1990), 0歳魚と4種のクラゲ類との関係(Purcell and Sturdevant, 2001), 毛顎類との競合(Baier and Purcell, 1997)が示されている。本研究でも, 表層においてクシクラゲ類の顕著な極大層が観測されており(第5章;市川ら, 2006b), クラゲ類, クシクラゲ類の餌料となるプランクトンだけでなく, 餌料競合者である仔稚魚や他の動物プランクトンとの関係についても検討していく必要があると考えられた。

本研究では, 中層におけるカイアシ類や放散虫類, 懸濁粒子の鉛直分布構造が水塊構造によって影響を受けていた可能性を示すとともに, カイアシ類と懸濁粒子の分布の関係は物理構造だけでは決まっていなかった可能性も指摘した(第5章)。一方, クラゲ類, クシクラゲ類の鉛直分布要因については, 観測事例が十分でないこと, 個体数密度が低いことためカイアシ類と同じ空間分解能で比較できないことから, 他の生物との関係や物理構造との関係について議論できなかった。しかし, 中層におけるクラゲ類は, 化学反応による餌の捕獲(探査)を行うこと(Tamburri *et al.*, 2000), 深度によって出現種が異なり(Mackie, 1985), 餌の選択性も違うことから(Arai, 2001), 中層におけるクラゲ類, クシクラゲ類の分布がカイアシ類や懸濁粒子の分布に影響を受けていた可能性は否定できない。今後, VPR IIなどで得られたカイアシ類の詳細な鉛直分布構造を考慮し, 特定深度におけるプランクトンネット採集や潜水艇などの観測を通して, クラゲ類やマイクロネクトンなどの現存量を把握することも必要と考えられた。また, VPR IIを用いることで, こうした深度を特定することが可能になると考えられる。塩分極小以深の北太平洋中層水に分布するカイアシ類, 放散虫類, 懸濁粒子は, 水塊の移流・循環によって水平輸送されると考えられ(第5章), 大型カイアシ類では季節鉛直輸送量の15~20%が物理過程によって水平輸送される可能性が指摘されている(清水ら, 2006)。顕著な鉛直移動を行わないクラゲ類, クシクラゲ類の分布深度または分布水塊が, 餌料によって影響を受けていたと仮定した場合, 同一水塊内で共に輸送されるカイアシ類など他の生物との関係は興味深い。表層において深度ごとに生態系の群集構造が変わることが示されていると同様, 中層においても深度という指標だけでなく物理性質が同じ水塊, あるいはプランクトンの分布が集中している水塊ごとの評価が必要であろう。VPR IIでは画像の記録と同時に, 水深, 水温, 塩分などの物理環境データを記録できる。言い換えれば画像自身が水温, 塩分, 水深など物理データを情報として保持しているといえる。従来のプランクトンネットによる採

集では、ある幅を持った水深によってしかデータを得る事ができなかったが、VPR II では、観測後、必要に応じて水温、塩分、密度のような水深以外の条件を用いて、新たなデータ系列の構築が可能である。

動物プランクトンの大きさは数 μ mから数mにおよび、分布や形態もさまざまであるので (Lenz, 2000), 幅広い範囲をひとつの手法によって全て把握し解析することは不可能であり、対象生物や研究目的に合わせた選択が必要である。一方、従来とは異なる手法を用いることで、新たな知見が得られる可能性も高い。メソ動物プランクトン群集については、従来、用いられてきたプランクトンネット採集などの手法に加え、VPR II を用いることで、プランクトンの詳細な分布構造と、脆弱なプランクトンの現存量に関する情報が新たに得られた。VPR II は、新たな視点から生態系構造を解析するためにも有用な測器であると考えられる。

要 約

動物プランクトン群集は、海洋生態系において物質輸送、生物生産および魚類資源加入における仲介者として重要な役割を担う。動物プランクトンの現存量を把握し、分布構造と群集構造を明らかにすること、さらに、変動機構を解明して他生物への影響を明らかにしていくことは、海洋生態系の研究や水産資源の研究において重要な課題である。しかし、従来行われてきたプランクトンネットによる採集だけでは、クラゲ類、クシクラゲ類のような脆弱な動物プランクトンの正確な現存量の把握、あるいは詳細な分布構造の解明は困難であり、また採集試料のデータ化に時間と労力を要する問題もあった。

本研究では、このようなプランクトン研究における問題解決のため、国内では使用例がない画像記録系測器であるビデオプランクトンレコーダー (new Video Plankton Recorder, VPR II) を用いた観測および解析手法の確立を行った。また、本州東方海域のメソ動物プランクトン群集を対象に、VPR II で記録された画像データとプランクトンネットによる採集結果を比較し、それぞれの長所・短所を検討した。さらに、水産資源的に、かつ環境変動に関わる物質循環の観点から重要な海域と考えられる親潮域、黒潮・親潮移行域において、魚類仔稚魚やカイアシ類などの捕食者として重要なクラゲ類、クシクラゲ類の正確な現存量をVPR II を用いて見積るとともに、カイアシ類を中心としたメソ動物プランクトンの詳細な鉛直分布構造の解析を行い、メソ動物プランクトンの群集構造ならびに生

物相互の関係について考察した。

1. VPR II における画像取得パラメーターの特性

VPR II を用いてゼラチン質プランクトンを画像として確実に記録するため、画像取得過程において重要な2つのパラメーター (設定条件, Segmentation Threshold; 以下Seg-T, Sobel Threshold; 以下Sob-T) の特性を把握するため、また、VPR II が記録した一定の空間の体積 (視野体積) を正確に見積もり、合焦した画像のみ選択する手法を検討するため、カイアシ類 (*Neocalanus plumchrus*) とクラゲ (管クラゲの一種) を材料に用いた室内実験を行った。

実験の結果、カイアシ類はSeg-TおよびSob-Tがそれぞれ160以上と70以上、管クラゲは130以上と80以下の場合にのみ合焦画像が記録されること、この時のパラメーターはカイアシ類とクラゲで異なることが明らかになった。従って、複数の分類群の画像を確実に記録するためは、非合焦画像も含め広い範囲で記録できるようなSeg-TおよびSob-Tの条件が不可欠であることが示された。そこで非合焦画像を含むプランクトン画像から一定の視野体積内にある合焦画像のみ選択するため、客観的な数値として得られた画像の輝度階調の値を用いてカメラからの距離および合焦の適否を判断する手法を開発した。本研究では画像の輝度階調の最大値が150以上の場合に合焦した画像と判断された。本研究により画像記録パラメーターの特性が明らかになり、さらに客観的な判断基準に基づいて一定の視野体積内の合焦画像を選択することで、精度の高い動物プランクトンの定量化が可能となった。

2. メソ動物プランクトンの個体数密度把握におけるVPR II とMOCNESSとの比較

VPR II で得られた動物プランクトン個体数密度の有効性を検討するため、2003年7月に本州東方の黒潮・親潮移行域に設定した測点の25~500 m深の8層において、VPR II で記録された画像とMOCNESSで採集された動物プランクトンの個体数密度を比較した。また、VPR II 画像の自動解析結果と肉眼による計測結果を比較・検討し、主要な分類群について画像の自動解析結果からプランクトンの主要部位の長さを求める換算式を作成した。

2-1. VPR II とMOCNESSの個体数密度の比較

プランクトンが検出されない確率 (p_{nd}) が0.05以下を満たす場合について検討した結果、MOCNESS採集において物理的な破損を受けにくいと考えられたカイアシ類の個体数密度では、VPR II とMOCNESSの間で

有意な正の相関 ($n = 29, p < 0.5$) が認められた。一方、脆弱な放散虫類、ヒドロクラゲ類およびクシクラゲ類の個体数密度は、手法間に有意な相関はなく、VPR II が高い傾向を示した。特に、ヒドロクラゲ類およびクシクラゲ類では常にVPR II の個体数密度が高くなり、プランクトンネット採集による物理的な破損や固定による溶解・収縮の影響を受けやすい分類群に対し、VPR II を用いた観測が有効であることが示された。これに対して毛類類の個体数密度はMOCNESSよりVPR II で低く、VPR II からの逃避による影響の結果と推察された。管クラゲ類、サルパ・ウミタル類および尾虫類の個体数密度は、VPR II が高い場合、逆にMOCNESSが高い場合のいずれも観測され、一定の傾向は認められなかった。これは、群集団の形成などプランクトンの分布形態による影響、あるいはネット採集試料の計数・計測結果に起因した結果と考えられた。

2-2. VPR II によるヒドロクラゲ類、クシクラゲ類の個体数密度の把握

2003年7月の黒潮・親潮移行域においてVPR II で記録されたヒドロクラゲ類の25~500 m層の個体数密度は0.8~1.3個体/m³、クシクラゲ類の個体数密度は0.5~0.8個体/m³であった。ヒドロクラゲ類の個体数密度は、VPR II で得られた結果がMOCNESS採集結果より2.2~4.5倍高かった。また、VPR II で記録されたヒドロクラゲ類は全個体数の89%が傘幅10 mm以下、クシクラゲ類は87%が体長5 mm以下の個体が占めた。MOCNESSで採集された試料から3 mm以下の個体は確認できず、従来のプランクトンネットによる採集では特に小型個体が過小評価となっていたことが示された。ヒドロクラゲ類のカイアシ類に対する個体数密度の比は、MOCNESSが0.03、VPR II が0.07~0.16であり、VPR II がMOCNESSに比べて最大5倍高かった。また、カイアシ類の個体数密度に対するクシクラゲ類の個体数密度の割合は、ヒドロクラゲ類に匹敵するほど高い場合があることが明らかとなった。

3. VPR II を用いた親潮域および黒潮・親潮移行域中表層におけるメソ動物プランクトンの現存量および鉛直分布特性の把握

2003年7月および2004年6月に、本州東方の親潮域および黒潮・親潮移行域の25~500 m深においてVPR II による観測ならびにプランクトンネットによる層別採集を行い、従来のプランクトンネット採集では過小評価されてきたクラゲ類、クシクラゲ類の現存量を正確に見積もった。さらに、カイアシ類を中心とした動

物プランクトン群集の詳細な鉛直分布構造を把握し、水塊構造が動物プランクトン群集に与える影響および生物相互の関係について考察した。

3-1. ヒドロクラゲ類、クシクラゲ類の鉛直分布および現存量

ヒドロクラゲ類、クシクラゲ類の鉛直分布はカイアシ類とは異なり断続的であった。ヒドロクラゲ類の分布の極大層は、北太平洋中層水 (NPIW) の指標とされる26.6 σ_{θ} よりも深い深度に形成され、密度躍層以浅 (表層) には分布極大層が認められなかった。一方、クシクラゲ類の分布の極大層は、表層およびNPIWのいずれにも認められた。表層のクシクラゲ類の分布極大層は、蛍光光度が極大となった深度の直下に認められ、餌料環境との関係が推察された。VPR II とプランクトンネット双方のデータを用いて採集層別に見積もったクラゲ類・クシクラゲ類の平均現存量は0.002~0.106 mgC/m³ (平均±標準偏差 = 0.035±0.031, $n = 40$) の範囲にあった。この値は、プランクトンネットの結果のみを用いて見積もった場合に比べ平均14倍高く (0.3~260, 標準偏差 = 43.8, $n = 40$)、従来のプランクトンネット採集による結果が過小評価であったことが示された。クラゲ類現存量のカイアシ類現存量に対する割合は0.01~5.13%となった。1%以上となった分布層は全てNPIW内にあり、ヒドロクラゲ類またはクシクラゲ類の分布極大層と一致した。カイアシ類の日間生産速度に対するクラゲ類の日間餌料要求量の割合は1.5%~5.4%の範囲であった。クラゲ類は群集団を形成する可能性が高く、分布の極大層では、他の生物群に対してより大きな影響を及ぼすと考えられた。

3-2. カイアシ類を中心とした表層~中層におけるメソ動物プランクトン

カイアシ類および懸濁粒子の鉛直分布の極大層は、密度躍層以浅の表層では蛍光光度が極大値となった直下に認められ、カイアシ類の分布と餌料環境との関係が推察された。密度躍層以深の中層におけるカイアシ類の全ての分布の極大層は、塩分または水温極小以深 (26.7 σ_{θ} 以深) のNPIW内に存在した。NPIW内で最も浅い深度に出現したカイアシ類の分布の極大層は、VPR II の1キャストを除き、26.8 σ_{θ} 付近に出現した。また、水塊の水平貫入 (または移流) があったと考えられた水塊に分布の極大層が出現する傾向が認められた。放散虫類もNPIW内で同様な分布が認められた。懸濁粒子の鉛直分布との関係ならびに過去の研究事例から検討した結果、中層におけるカイアシ類の分布深度は、餌料環境との関係が示唆され、また放散虫類、

懸濁粒子と同様に、カイアシ類の鉛直分布構造も水塊構造による影響を受けていた可能性が指摘された。中層においても深度または水塊構造ごとに群集構造の解析が必要と考えられた。

以上、本研究では、VPR II の画像取得パラメータの特性を明らかにし、定量性の高いデータを得るための手法を開発するとともに、クラゲ類、クシクラゲ類を中心とした脆弱な動物プランクトンの現存量の把握およびメソ動物プランクトンの詳細な分布構造の把握にVPR II を使った観測が有効であることを示した。また、VPR II とプランクトンネット採集の双方の結果をあわせることで動物プランクトンの詳細な鉛直分布構造と脆弱なプランクトンの現存量に関する新たな知見が得られ、新たな視点から動物プランクトン群集構造を解析できる可能性を示した。

謝 辞

本研究をまとめるにあたり、懇切なご指導をいただいた東京大学海洋研究所所長の寺崎 誠教授に心より感謝の意を表します。また同研究所海洋生態系動態部門の西田周平教授、津田 敦准教授、ならびに東京大学大学院の青木一郎教授、古谷 研教授には本稿に有益なご助言とご校閲をいただきました。深く感謝申し上げます。

共同研究者としてVPR II による観測およびデータ解析に協力していただき、研究過程において多くの有益な助言や議論をいただいた遠洋水産研究所海洋研究グループの瀬川恭平氏に感謝いたします。測器を使った新しい研究への道を開いていただき、本稿をまとめる過程において数々の有益なご助言とご指導をいただいた水産総合研究センター業務企画部の中田 薫博士に深謝いたします。

中央水産研究所海洋生産部の広田祐一博士にはプランクトン採集や計測について基本的な考え方を改めてご教授いただき、また、中央水産研究所海洋生産部の宮地邦明博士と共に研究期間にわたって激励をいただきました。元中央水産研究所海洋生産部の松川康夫博士、佐々木克之博士には研究過程や海洋観測における基本的な考え方を教えていただきました。深く感謝申し上げます。VPR II による観測手法やデータ解析に関して有益な意見をいただいたウッズホール海洋研究所のCavel S. Davis博士ならびにScott M. Gallager博士に感謝いたします。Davis博士には論文の内容について議論をしていただきました。改めて謝意を表します。

(株) エス・イー・エイの中川拓郎氏および田中照喜

氏、Sea Scan (株) のPierre Tillier氏にはVPR II に発生したトラブルに迅速かつ柔軟に対応していただき、新しい測器による観測に多大なご尽力をいただきました。また、(株) 日本海洋生物研究所の清沢弘志氏、古澤一思氏、平田敦洋氏にはVPR II で記録されたプランクトンの同定に有益なご助言をいただきました。ここに感謝の意を表します。

プランクトンの生態と画像選別に関して有益な助言をいただいた中央水産研究所海洋生産部の豊川雅哉博士、日高清隆博士、森田 宏氏、データ解析および解釈について真摯な議論をいただいた中央水産研究所海洋生産部の秋山秀樹博士、清水 学博士、小松幸生博士、研究の機会を与えていただき、研究過程において有益なご助言をいただいた中央水産研究所資源評価部の大関芳沖博士、東北区水産研究所の齋藤宏明博士、杉崎宏哉博士(現中央水産研究所)に感謝いたします。本研究期間において中央水産研究所高知黒潮研究拠点に在籍された研究者、職員、ならびに非常勤職員の皆様には公私に渡り多大なご協力をいただきました。深く感謝いたします。最後に、新しい測器による観測に熱意と誠意をもって取り組んで下さった水産総合研究センター漁業調査船俊鷹丸の小野田勝船長ほか乗組員の皆様に謝意を表します。

この研究の一部は農林水産技術会議委託プロジェクト研究「海洋生物資源の変動要因の解明と高精度変動予測技術の開発」の一環として行ったものである。

引用文献

- Akiba T., and Kakui Y., 2000: Design and testing of an underwater microscope and image processing system for the study of zooplankton distribution. *IEEE J. Oceanic Eng.*, **25**, 97-104.
- Arai M. N., 1988: Interactions of fish and pelagic coelenterates. *Can. J. Zool.*, **66**, 1913-1927.
- Arai M. N., 2001: Pelagic coelenterates and eutrophication: a review. *Hydrobiologia*, **451**, 69-87.
- Ashjian C. J., Davis C. S., Gallager S. M., and Alatalo P., 2001: Distribution of plankton, particles, and hydrographic features across Georges Bank described using the Video Plankton Recorder. *Deep Sea Res. II*, **48**, 245-282.
- 鮎貝天志, 石井晴人, 1989: カイアシ類の摂食, 「海洋生物学 - 低次食段階論 -」(西沢 敏 編), 恒星社厚生閣, 東京, pp.49-71.
- Båmstedt U., Kaartvedt S., and Youngbluth M., 2003:

- An evaluation of acoustic and video methods to estimate the abundance and vertical distribution of jellyfish. *J. Plankton Res.*, **25**, 1307-1318.
- Backus R. H., and Barnes H., 1957: Television-echo sounder observations of midwater sound scatterers. *Deep Sea Res.*, **4**, 116-119.
- Baier C. T., and Purcell J. E., 1997: Trophic interactions of chaetognaths, larval fish, and zooplankton in the South Atlantic Bight. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **146**, 43-53.
- Bailey T. G., Youngbluth M. J., and Owen G. P., 1995: Chemical composition and metabolic rates of gelatinous zooplankton from midwater and benthic layer environments off cape Hatteras, North Carolina, USA. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **122**, 121-134.
- Baker A. DE C., Clarke M. R., and Harris M. J., 1973: The N. I. O. combination net (RMT 1 + 8) and further developments of rectangular midwater trawls. *J. Mar. Biol. Assoc. U. K.*, **53**, 167-184.
- Baumgartner M. F., 2003: Comparisons of *Calanus finmarchicus* fifth copepodite abundance estimates from nets and an optical plankton counter. *J. Plankton Res.*, **25**, 855-868.
- Beaulieu S. E., Mullin M. M., Tang V. T., Pyne S. M., King A. L., and Twining B. S., 1999: Using an optical plankton counter to determine the size distributions of preserved zooplankton samples. *J. Plankton Res.*, **21**, 1939-1956.
- Benfield M. C., Caron D. A., Michaels A. F., Gallager S. M., and Davis C. S., 2002: Video plankton recorder reveals high abundances of colonial Radiolaria in surface waters of the central North Pacific. *J. Plankton Res.*, **24**, 797-805.
- Benfield M. C., Davis C. S., and Gallager S. M., 2000: Estimating the in-situ orientation of *Calanus finmarchicus* on Georges Bank using the Video Plankton Recorder. *Plankton Biol. Ecol.*, **47**, 69-72.
- Benfield M. C., Davis C. S., Wiebe P. H., Gallager S. M., Lough R. G., and Copley N. J., 1996: Video Plankton Recorder estimates of copepod, pteropod and larvacean distributions from a stratified region of Georges Bank with comparative measurements from a MOCNESS sampler. *Deep Sea Res. II*, **43**, 1925-1945.
- Benfield M. C., Rouge B., Trevorrow M. V., and Mackas D. L., 2004: In situ and experimental observations of the relationships between euphausiid orientation, vessel lights, and acoustical scattering. *J. Acoust. Soc. Am.*, **115**, 2558.
- Benfield M. C., Schwehm C. J., Fredericks R. G., Squyres G., Keenan S. F., and Trevorrow M.V., 2003: Measurement of zooplankton distributions with a high resolution digital camera system, in "Handbook of Scales in Aquatic Ecology: Measurement, Analysis and Simulation" (ed. by P. Strutton and L. Seuront) , CRC Press, Boca Raton, pp.17-30.
- Biggs D. C., Bidigare R. R., and Smith D. E., 1981: Population density of gelatinous macrozooplankton: *in situ* estimation in oceanic surface waters. *Biol. Oceanogr.*, **1**, 157-173.
- Bouillon J., 1999: Hydromedusa, in "South atlantic Zooplankton" (ed. by D. Boltovskoy) , Backhuys publishers, Leiden, pp. 385-466.
- Boyd C. M., 1973: Small scale spatial patterns of marine zooplankton examined by an electronic in situ zooplankton detecting device. *Neth. J. Sea Res.*, **7**, 103-111.
- Boyra G., Irigoien X., Aristegieta A., and Arregi I., 2005: Plankton Visual Analyser. *GLOBEC Internat. Newsletter*, **11** (1) , 9-10.
- Brodeur R. D., Mills C. E., Overland J. E., Walters G. E., and Schumacher J. D., 1999: Evidence for a substantial increase in gelatinous zooplankton in the Bering Sea, with possible links to climate change. *Fish. Oceanogr.*, **8**, 296-306.
- Brodeur R. D., Sugisaki H., Hunt G. L., 2002: Increases in jellyfish biomass in the Bering Sea: implications for the ecosystem. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **233**, 89-103.
- Brodeur R. D., and Ware D. M., 1992: Long-term variability in zooplankton biomass in the subarctic Pacific Ocean. *Fish. Oceanogr.*, **1**, 32-38.
- Bryant A. D., Hainbucher D., and Heath M., 1999: Basin-scale advection and population persistence of *Calanus finmarchicus*. *Fish. Oceanogr.*, **7**, 235-244.
- Cappo M., Speare P., and De'ath G., 2004: Comparison of baited remote underwater video stations (BRUVS) and prawn (shrimp) trawls for assessments of fish biodiversity in inter-reefal areas of the Great Barrier Reef Marine Park. *J.*

- Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **302**, 123-152.
- Checkley D. M., Dotson R. C., and Griffith D. A., 2000: Continuous, underway sampling of eggs of Pacific sardine (*Sardinops sagax*) and northern anchovy (*Engraulis mordax*) in spring 1996 and 1997 off southern and central California. *Deep Sea Res. II*, **47**, 1139-1155.
- Checkley D. M., Ortner P. B., Settle L. R., and Cummings S. R., 1997: A continuous, underway fish egg sampler. *Fish. Oceanogr.*, **6**, 58-73.
- Chiba S., Tadokoro K., Sugisaki H. and Saino T., 2006: Effects of decadal climate change on zooplankton over the last 50 years in the western subarctic North Pacific. *Global Change Biol.*, **12**, 907-920.
- Childress J. J., Talor S. M., Cailliet G. M., and Price M. H., 1980: Patterns of growth, energy, utilization and reproduction in the some meso- and bathy pelagic fishes off Southern California. *Mar. Biol.*, **61**, 27-40.
- Cooke R. A., Terhune L. D. B., Ford J. S., and Bell W. H., 1970: An opto-electronic plankton sizer. *Fish. Res. Board of Canada. Technical Report*, **172**, 1-40.
- Cushing D. H., 1962: Patchiness. *Rapp. Proc.-Verb. Cons. int. Explor. Mer.*, **153**, 152-164.
- Cushing D. H., 1995: The long-term relationship between zooplankton and fish. *ICES J. Mar. Sci.*, **52**, 611-626.
- Daan R., 1989: Factors controlling the summer development of copepod populations in the southern bight of the North Sea. *Neth. J. Sea Res.*, **23**, 305-322.
- Dale T., Bag_ien E., Melle W., and Kaartvedt S., 1999: Can predator avoidance explain varying overwintering depth of Calanus in different oceanic water masses? *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **179**, 113-121.
- Davis C. S., Gallagher S. M., Berman M. S., Haury L. R., and Strickler J. R., 1992: The video plankton recorder (VPR) : design and initial results. *Arch. Hydrobiol. Beih. Ergebn. Limnol.*, **36**, 67-81.
- Davis C. S., Gallagher S. M., Marra M., and Stewart W. K., 1996: Rapid visualization of plankton abundance and taxonomic composition using the Video Plankton Recorder. *Deep Sea Res. II*, **43**, 1947-1970.
- Davis C. S., Hu Q., Gallagher S. M., Tang X., and Ashjian C. J., 2004: Real-time observation of taxa-specific plankton distributions: an optical sampling method. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **284**, 77-96.
- Davis C. S., Thwaites F. T., Gallagher S. M., and Hu Q., 2005: A three-axis fast-tow digital Video Plankton Recorder for rapid surveys of plankton taxa and hydrography. *Limnol. Oceanogr. Methods*, **3**, 59-74.
- Donaghay P. L., Rines H. M., and Sieburth J. M., 1992: Simultaneous sampling of fine scale biological, chemical and physical structure in stratified waters. *Arch. Hydrobiol. Beih. Ergebn. Limnol.*, **36**, 97-108.
- Edgerton H. E., 1977: Silhouette photography of small active subjects. *J. Microsc.*, **110**, 79-81.
- Edwards M., and Richardson A. J., 2004: Impact of climate change on marine pelagic phenology and trophic mismatch. *Nature*, **430**, 881-884.
- Eisma D., Schuhmacher T., Boekel H., Vanheerwaarden J., Franken H., Laan M., Vaars A., Eijgenraam F., and Kalf J., 1990: A camera and image-analysis system for in situ observation of flocs in natural-waters. *Neth. J. Sea Res.*, **27**, 43-56.
- Falkenhaug T., 1996: Distributional and seasonal patterns of ctenophores in Malangen, northern Norway. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **140**, 59-70.
- Flinkma J., Aro E., Vuorinen I., and Viitasalo M., 1998: Changes in northern Baltic zooplankton and herring nutrition from 1980s to 1990s: top-down and bottom-up processes at work. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **165**, 127-136.
- Gallagher S. M., Davis C. S., Epstein A. W., Solow A., and Beardsley R. C., 1996: High-resolution observations of plankton spatial distributions correlated with hydrography in the Great South Channel, Georges Bank. *Deep Sea Res. II*, **43**, 1627-1663.
- Gallagher S. M., Yamazaki H., and Davis C. S., 2004: Contribution of fine-scale vertical structure and swimming behavior to formation of plankton layers on Georges Bank. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **267**, 24-43.
- Gallienne C. P., and Robins D. B., 2001: Is *Oithona* the most important copepod in the world's oceans? *J. Plankton Res.*, **23**, 1421-1432.

- Gifford D. J., 1993: Protozoa in the diets of *Neocalanus* spp. in the oceanic subarctic Pacific Ocean. *Prog. Oceanogr.*, **32**, 223-237.
- Gifford D. J., and Dagg M. J., 1991: The microzooplankton-mesozooplankton link: Consumption of planktonic protozoa by the calanoid copepods *Acartia tonsa* Dana and *Neocalanus plumchrus* Marukawa. *Mar. Microb. Food Webs*, **5**, 161-177.
- Gorsky G., Aldorf C., Kage M., Picheral M., Garcia J., and Favole J., 1992: Vertical distribution of suspended aggregates determined by a new Underwater Video Profiler. *Ann. Inst. Océanogr. Paris*, **68**, 13-23.
- Gorsky G., Flood P. R., Youngbluth M., Picheral M., and Grisoni J. M., 2000a: Zooplankton distribution in four Western Norwegian fjords. *Est. Coast. Shelf Sci.*, **50**, 129-135.
- Gorsky G., and Picheral M., 2002: In situ investigations of gelatinous zooplankton and marine snow. *GLOBEC Internat. Newsletter*, **8** (2), 19-20.
- Gorsky G., Picheral M., and Stemmann L., 2000b: Use of the Underwater Video Profiler for the study of aggregate dynamics in the North Mediterranean. *Est. Coast. Shelf Sci.*, **50**, 121-128.
- Gorsky G., Prieur L., Taupier-Letage I., Stemmann L., and Picheral M., 2002: Large Particulate Matter in the Western Mediterranean I. LPM distribution related to mesoscale hydrodynamics. *J. Mar. Syst.*, **33**, 289-311.
- Graham W. M., Martin D. L., and Martin J. C., 2003: In situ quantification and analysis of large jellyfish using a novel video profiler. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **254**, 129-140.
- Grosjean P., Picheral M., Warembourg C., and Gorsky G., 2004: Enumeration, measurement, and identification of net zooplankton samples using the ZOOSCAN digital imaging system. *ICES J. Mar. Sci.*, **61**, 518-525.
- Hamner W. M., 1975: Underwater observations of blue-water plankton - Logistics, techniques, and safety procedures for divers at sea. *Limnol. Oceanogr.*, **20**, 1045-1051.
- Harbison G. R., Biggs D. C., and Madin L. P., 1977: The associations of Amphipoda Hyperiidia with gelatinous zooplankton-II. Associations with Cnidaria, Ctenophora and Radiolaria. *Deep Sea Res.*, **24**, 465-488.
- Harbison G. R., Madin L. P., and Swanberg N. R., 1978: On the natural history and distribution of oceanic ctenophores. *Deep Sea Res.*, **25**, 233-256.
- Harrison N. M., 1984: Predation on jellyfish and their associates by seabirds. *Limnol. Oceanogr.*, **29**, 1335-1337.
- Hattori H., 1989: Bimodal vertical distribution and diel migration of the copepods *Metridia pacifica*, *M. okhotensis* and *Pleuromamma scutullata* in the western North Pacific Ocean. *Mar. Biol.*, **103**, 39-50.
- Haury L. R., and Wiebe P. H., 1982: Fine-scale multi-species aggregations of oceanic zooplankton. *Deep Sea Res.*, **29**, 915-921.
- Head E. J. H., Harris L. R., and Aboudebs C., 1985: Effect of daylength and food concentration on insitu diurnal feeding rhythms in arctic copepods. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **24**, 281-288.
- Herman A. W., 1983: Vertical distribution patterns of copepods, chlorophyll, and production in northeastern Baffin Bay. *Limnol. Oceanogr.*, **28**, 709-719.
- Herman A. W., 1988: Simultaneous measurement of zooplankton and light attenuation with a new optical plankton counter. *Cont. Shelf Res.*, **8**, 205-221.
- Herman A. W., 1992: Design and calibration of a new optical plankton counter capable of sizing small zooplankton. *Deep-Sea Res. II*, **39**, 395-415.
- Herman A. W., Beanlands B., and Phillips E. F., 2004: The next generation of Optical Plankton Counter: the Laser-OPC. *J. Plankton Res.*, **26**, 1135-1145.
- Herman A. W., Cochrane N. A., and Sameoto D. D., 1983: Detection and abundance estimation of euphausiids using an optical plankton counter. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **94**, 165-173.
- 廣田 薫, 1993: ファジィと画像パターン認識. 情報処理, **34**, 864-870.
- Hirota Y., and Hasegawa S., 1999: The zooplankton biomass in the Sea of Japan. *Fish. Oceanogr.*, **8**, 274-283.
- Honjo S., Spencer D. W., and Farrington J. W., 1982: Deep advective transport of lithogenic particles in Panama Basin. *Science*, **216**, 516-518.

- Hunt J., and Lindsay D. J., 1999: Methodology for creating an observational database of midwater fauna using aubmersibles: results from Sagami Bay, Japan. *Plankton Biol. Ecol.*, **46**, 75-87.
- 市川忠史, 2006: 黒潮生産力-VPR. 平成17年度資源動向要因分析調査報告書, 水産庁増殖推進部漁場資源課・水産総合研究センター, 100-101.
- 市川忠史, 加藤 聡, 中田 薫, 1999: 親潮水域および混合水域における動物プランクトン現存量把握のためのプランクトンカウンターの有効性. 中央水研報, **13**, 1-14.
- 市川忠史, 加藤 聡, 瀬川恭平, 2003: プランクトンセンサーで何が分かるかー水産海洋学の視点から. 日本プランクトン学会報, **50**, 29-35.
- 市川忠史, 瀬川恭平, 清沢弘志, 古澤一思, 寺崎 誠, 2006a: マクロ動物プランクトンの個体数密度把握におけるVPRⅡとMOCNESSとの比較ークラゲ類・クシクラゲ類に対するVPRⅡの有効性ー. 日本プランクトン学会報, **53**, 87-97.
- 市川忠史, 瀬川恭平, 寺崎 誠, 2005: VPRⅡにおける画像取得パラメーターの特性. 日本プランクトン学会報, **52**, 65-71.
- 市川忠史, 瀬川恭平, 寺崎 誠, 2006b: VPRⅡを用いた親潮域および黒潮・親潮移行域中表層におけるクラゲ類, クシクラゲ類の現存量および鉛直分布特性. 水産海洋研究, **70**, 240-248.
- Ikeda T., 1985: Metabolic rates of epipelagic marine zooplankton as a function of body mass and temperature. *Mar. Biol.*, **85**, 1-11.
- Incze L. S., Hebert D., Wolff N., Oakey N., and Dye D., 2001: Changes in copepod distributions associated with increased turbulence from wind stress. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **213**, 229-240.
- Iwamoto S., Checkley D. M., and Trivedi M. M., 2001: REFLICS: Real-time flow imaging and classification system. *Machine Vision and Applications*, **13**, 1-13.
- Jeffries H. P., Berman M. S., Poularikas A. D., Katsinis C., Melas I., Sherman K., and Bivins L., 1984: Automated sizing, counting and identification of zooplankton by pattern recognition. *Mar. Biol.*, **78**, 329-334.
- Kasuya T., Ishimaru T., and Murano M., 2000: Seasonal variations in abundance and size composition of the lobate ctenophore *Bolinopsis mikado* (Moser) in Tokyo Bay, central Japan. *J. Oceanogr.*, **56**, 419-427.
- 川合英夫, 1972: 黒潮と親潮の海況学. 海洋科学基礎講座 2 海洋物理Ⅱ, 岩下光男, 小牧勇蔵, 星野通平, 堀部純男, 増沢譲太郎 編, 東海大学出版会, 東京, pp. 129-320.
- 喜多村稔, 2003: 淡水と海洋のプランクトン研究の比較: 捕食者ー被食者関係に注目して 4) クラゲ類の摂餌生態. 日本プランクトン学会報, **50**, 103-109.
- Kobari T., and Ikeda T., 1999: Vertical distribution, population structure and life cycle of *Neocalanus cristatus* (Crustacea: Copepoda) in the Oyashio region, with notes on its regional variations. *Mar. Biol.*, **134**, 683-696.
- Kobari T., Shinada A., and Tsuda A., 2003: Functional roles of interzonal migrating mesozooplankton in the western subarctic Pacific. *Prog. Oceanogr.*, **57**, 279-298.
- Lalli C. M., and Parsons T. R., 1997: Zoogeography of the holoplankton, in "Biological oceanography: an introduction, 2nd edition", Butterworth-Heinemann, Oxford, pp. 100-108.
- Larson R. J., 1986: Water content, organic content, and carbon and nitrogen composition of medusae from the northeast Pacific. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **99**, 107-120.
- Larson R. J., 1987: Daily ration and predation by medusae and ctenophores in Saanich Inlet, B.C., Canada. *Neth. J. Sea Res.*, **21**, 35-44.
- Lenz J., 2000: Introduction, in "Zooplankton Methodology Manual" (ed. by Harris R., Wiebe P. H., Lenz J., Skjoldal H. R., and Huntley M.), Academic Press, San Diego, pp. 1-32.
- Lenz J., Schnack D., Petersen D., Kreikemeier J., Hermann B., Mees S., and Wieland K., 1995: The Ichthyoplankton Recorder: a video recording system for in situ studies of small-scale plankton distribution patterns. *ICES J. Mar. Sci.*, **52**, 409-417.
- Longhurst A. R., Reith A. D., Bower R. E., and Seibert D. L. R., 1966: A new system for the collection of multiple serial plankton samples. *Deep Sea Res.*, **13**, 213-222.
- Lunven M., Gentien P., Kononen K., Le Gall E., and Dani_lou M. M., 2003: *In situ* video and diffraction analysis of marine particles. *Est. Coast. Shelf Sci.*, **53**, 1127-1137.
- Luo T., Kramer K., Goldgof D. B., Hall L. O., Samson S., Remsen A., and Hopkins T., 2004: Recognizing

- plankton images from the Shadow Image Particle Profiling Evaluation Recorder. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. B.*, **34**, 1753-1762.
- Lynam C. P., Hay S. J., and Brierley A. S., 2004: Interannual variability in abundance of North Sea jellyfish and links to the North Atlantic Oscillation. *Limnol. Oceanogr.*, **49**, 637-643.
- Lynam C. P., Heath M. R., Hay S. J., and Brierley A. S., 2005: Evidence for impacts by jellyfish on North Sea herring recruitment. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **298**, 157-167.
- Mackas D. L., Sefton H., Miller C. B., and Raich A., 1993: Vertical habitat partitioning by large calanoid copepods in the oceanic subarctic Pacific during spring. *Prog. Oceanogr.*, **32**, 259-294.
- Mackie G. O., 1985: Midwater macrozooplankton of British Columbia studied by submersible PISCES IV. *J. Plankton Res.*, **7**, 753-777.
- Mackie G. O., and Mills C. E., 1983: Use of the PISCES IV submersible for zooplankton studies in coastal waters of British Columbia. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **40**, 763-776.
- Maddux W. S., and Kanwisher J. W., 1965: An *in situ* Particle Counter. *Limnol. Oceanogr.*, **10** (suppl.), 162-168.
- Malkie M., Alquaddoomi O., and Katz J., 1999: Measurements of plankton distribution in the ocean using submersible holography. *Meas. Sci. Technol.*, **10**, 1142-1152.
- Mianzan H., 2001: Feeding on survival-food: gelatinous plankton as a source of food for anchovies. *Hydrobiologia*, **451**, 45-53.
- Mills C. E., 1995: Medusae, siphonophores, and ctenophores as planktivorous predators in changing global ecosystems. *ICES J. Mar. Sci.*, **52**, 575-581.
- Mills C. E., 2001: Jellyfish blooms: are populations increasing globally in response to changing ocean conditions? *Hydrobiologia*, **451**, 55-68.
- Moller H., 1984: Reduction of a larval herring population by jellyfish predator. *Science*, **224**, 621-622.
- Moore P. G., Rainbow P. S., and Larson R. J., 1993: The mesopelagic shrimp *Notostomus robustus* Smith (Decapoda: Oplophoridae) observed *in situ* feeding on the Medusan *Atolla wyvillei* Haeckel in the Northwest Atlantic, with notes on gut contents and mouthpart morphology. *J. Crustacean Biol.*, **13**, 690-696.
- Mullin M. M., Checkley Jr. D. M., and Thimgan M. P., 2003: Temporal and spatial variation in the sizes of California current macrozooplankton: analysis by optical plankton counter. *Prog. Oceanogr.*, **57**, 299-316.
- 永田 豊, 1974: 微細構造, 「海洋物理学 I」(寺本俊彦編), 東京大学出版会, 東京, pp.207-239.
- 中野 洋, 1994: 画像解析による自動判別. 月間海洋, **26**, 57-63.
- Nakatsuka T., Yoshikawa C., Toda M., Kawamura K., and Wakatsuchi M., 2002: An extremely turbid intermediate water in the Sea of Okhotsk : implication for the transport of particulate organic carbon in a seasonally ice-bound sea. *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 10.1029/2001GL014029.
- 西田周平, 2000: 親潮域におけるネット動物プランクトンの生物量-鉛直構造と成立要因. 日本プランクトン学会報, **47**, 125-128.
- Nishida S., and Ohtsuka S., 1996: Specialized feeding mechanism in the pelagic copepod genus *Heterorhabdus* (Calanoida: Heterorhabdidae), with special reference to the mandibular tooth and labral glands. *Mar. Biol.*, **126**, 619-632.
- Nishida S., Percy W. G., and Nemoto T., 1988: Feeding habits of mesopelagic shrimps collected off Oregon. *Bull. Ocean Res. Inst. Univ. Tokyo*, **26**, 99-108.
- Nishizawa S., Fukuda M., and Inoue N., 1954: Photographic study of suspended matter and plankton in the sea. *Bull. Fac. Fish. Hokkaido Univ.*, **5**, 36-40.
- Nishikawa J., and Terazaki M., 1996: Tissue shrinkage of two gelatinous zooplankton, *Thalia democratica* and *Doliolletta gegenbauri* (Tunicata: Thaliacea) in preservative. *Bull. Plankton Soc. Japan*, **43**, 1-7.
- Noto M., and Yasuda I., 1999: Population decline of the Japanese sardine, *Sardinops melanostictus*, in relation to sea surface temperature in the Kuroshio Extension. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **56**, 973-983.
- Norrbin M. F., Davis C. S., and Gallager S. M., 1996: Differences in fine-scale structure and composition of zooplankton between mixed and

- stratified regions of Georges Bank. *Deep Sea Res. II*, **43**, 1905-1924.
- 小達和子, 1994: 東北海域における動物プランクトンの動態と長期変動に関する研究. 東北水研報, **56**, 115-173.
- Oguz T., Ducklow H. W., Purcell J. E., and Malanotte-Rizzoli P., 2001: Modeling the response of top-down control exerted by gelatinous carnivores on the Black Sea pelagic food web. *J. Geophys. Res. Oceans*, **106**, 4543-4564.
- 岡崎耕三, 1996: 画像の前処理方法, 「画像処理工学」(谷口慶治編), 共立出版, 東京, pp. 59-78.
- Olney J. E., and Houde E. D., 1993: Evaluation of in situ silhouette photography in investigations of estuarine zooplankton and ichthyoplankton. *Bull. Mar. Sci.*, **52**, 845-872.
- Ono T., Watanabe Y. W., and Sasaki K., 2000: Annual anthropogenic carbon transport into the North Pacific intermediate water through the Kuroshio/Oyashio interfrontal zone: an estimation from CFCs distribution. *J. Oceanogr.*, **56**, 675-689.
- 大関芳沖, 木村 量, 2002: 日本周辺海域の卵稚仔プランクトンモニタリング. 水産海洋研究, **66**, 262-264.
- Ortner P. B., Cummings S. R., and Aftring R. P., 1979: Silhouette photography of oceanic zooplankton. *Nature*, **277**, 50-51.
- Ortner P. B., Hill L. C., and Edgerton H. E., 1981: In situ silhouette photography of Gulf Stream zooplankton. *Deep Sea Res.*, **28**, 1569-1576.
- Osgood K. E., and Checkley, Jr. D. M., 1997: Observations of a deep aggregation of *Calanus pacificus* in the Santa Barbara Basin. *Limnol. Oceanogr.*, **42**, 997-1001.
- Ottersen G., Planque B., Belgrano A., Post E., Reid P. C., and Stenseth N. C., 2001: Ecological effects of the North Atlantic Oscillation. *Oecologia*, **128**, 1-14.
- Paffenhöfer G. A., 1983: Vertical zooplankton distribution on the northeastern Florida shelf and its relation to temperature and food abundance. *J. Plankton Res.*, **5**, 15-33.
- Parsons T. R., and Lalli C. M., 1988: Comparative oceanic ecology of the plankton communities of the subarctic Atlantic and Pacific Oceans. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.*, **26**, 317-359.
- Parsons T.R., Takahashi M., and Hargrave B., 1984: *Biological Oceanographic Processes*, 3rd Edition. Pergamon Press, Oxford, 330pp.
- Pingle K. K., 1969: Visual perception by a computer, in "Automatic Interpretation and Classification of Images" (ed. by Grasselli A.), Academic Press, New York, pp. 277-284.
- Platt T., Sathyendranath S., and Longhurst A., 1995: Remote-sensing of primary production in the ocean - promise and fulfillment. *Phil. Trans. R. Soc. B*, **348**, 191-201.
- Postel L., Fock H., and Hagen W., 2000: Biomass and abundance, in "Zooplankton Methodology Manual" (ed. by Harris R., Wiebe P. H., Lenz J., Skjoldal H. R., and Huntley M.), Academic Press, San Diego, pp. 83-192.
- Purcell J. E., 1991: A review of cnidarians and ctenophores feeding on competitors in the plankton. *Hydrobiologia*, **216/217**, 335-342.
- Purcell J. E., and Arai M. N., 2001: Interactions of pelagic cnidarians and ctenophores with fish: a review. *Hydrobiologia*, **451**, 27-44.
- Purcell J. E., and Grover J. J., 1990: Predation and food limitation as causes of mortality in larval herring at a spawning ground in British Columbia. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **59**, 55-61.
- Purcell J. E., and Sturdevant M. W., 2001: Prey selection and dietary overlap among zooplanktivorous jellyfish and juvenile fishes in Prince William Sound, Alaska. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **210**, 67-83.
- Purcell J. E., White J. R., and Roman M. R., 1994: Predation by gelatinous zooplankton and resource limitation as potential controls of *Acartia tonsa* copepod populations in Chesapeake Bay. *Limnol. Oceanogr.*, **39**, 263-278.
- Remsen A., Hopkins T. L., and Samson S., 2004: What you see is not what you catch: a comparison of concurrently collected net, Optical Plankton Counter, and Shadowed Image Particle Profiling Evaluation Recorder data from the northeast Gulf of Mexico. *Deep Sea Res.*, **51**, 129-151.
- Richardson A.J., and Schoeman D. S., 2004: Climate impact on plankton ecosystems in the Northeast Atlantic. *Science*, **305**, 1609-1612.
- Richter C., 1995: Seasonal changes in the vertical distribution of mesozooplankton in the

- Greenland Sea Gyre (75°N) : distribution strategies of calanoid copepods. *ICES J. Mar. Sci.*, **52**, 533-539.
- Roe H. S. J., James P. T., and Thurston M. H., 1984: The diel migrations and distributions within a mesopelagic community in the North East Atlantic. 6. Medusae, ctenophores, amphipods and euphausiids. *Prog. Oceanogr.*, **3** /4, 425-460.
- Roemmich D., and McGowan J., 1995: Climatic warming and the decline of zooplankton in the California current. *Science*, **268**, 352-353.
- Runge J. A., Pepin P., and Silvert W., 1987: Feeding behavior of the Atlantic mackerel *Scomber scombrus* on the hydromedusa *Aglantha digitale*. *Mar. Biol.*, **94**, 329-333.
- 齊藤宏明, 2007: 物質輸送の物理・生物過程の解明. 平成18年度「海洋生物資源の変動要因の解明と高精度変動予測技術の開発」報告書. 8-11.
- Saito H., Kasai H., Kashiwai M., Kawasaki Y., Kono T., Taguchi S., and Tsuda A., 1998: General description of seasonal variations of nutrients, chlorophyll-*a*, and netzooplankton biomass at A-line transect, Oyashio region, from 1990 to 1994. *Bull. Hokkaido Natl. Fish. Res. Inst.*, **62**, 1-61.
- Sameoto D. D., 1984: Vertical distribution of zooplankton biomass and species in northeastern Baffin Bay related to temperature and salinity. *Polar Biol.*, **2**, 213-224.
- Sameoto D., Wiebe P. H., Runge J. A., Postel L., Dunn J., Miller C., and Coombs S. H., 2000: Collecting zooplankton, In "Zooplankton Methodology Manual" (eds. Harris, R., Wiebe, P. H., Lenz, J., Skjoldal, H. R. and Huntley, M.), Academic Press, San Diego, pp.55-81.
- Samson S., Hopkins T., Remsen A., Langebrake L., Suttén T., and Patten J., 2001: A system for high-resolution zooplankton imaging. *IEEE J. Oceanic Eng.*, **26**, 671-676.
- Salmon M., Jones T. T., and Horc K. W., 2004: Ontogeny of Diving and Feeding Behavior in Juvenile Seaturtles: Leatherback Seaturtles (*Dermochelys coriacea* L) and Green Seaturtles (*Chelonia mydas* L) in the Florida Current. *J. Herpetology*, **38**, 33-43.
- 佐藤恭司, 2002: 三陸沖海域におけるゼラチン質動物プランクトン現存量の長期変動. 東北大学大学院農学研究科 修士論文, 39pp.
- Schneider G., and Behrends G., 1994: Population dynamics and the trophic role of *Aurelia aurita* medusae in the Kiel Bight and western Baltic. *ICES J. Mar. Sci.*, **51**, 359-367.
- Schulze P. C., Williamson C. E., and Hargreaves B. R., 1995: Evaluation of a remotely operated vehicle (ROV) as a tool for studying the distribution and abundance of zooplankton. *J. Plankton. Res.*, **17**, 1233-1243.
- Shiganova T. A., and Bulgakova Y. V., 2000: Effects of gelatinous plankton on Black Sea and Sea of Azov fish and their food resources. *ICES J. Mar. Sci.*, **57**, 641-648.
- Shimizu Y., Iwao T., Yasuda I., Ito S., Watanabe T., Uehara K., Shikama N., and Nakano T., 2004: Formation process of North Pacific Intermediate Water revealed by profiling floats set to drift on 26.7sq isopycnal surface. *J. Oceanogr.*, **60**, 453-462.
- 清水勇吾, 高橋一生, 伊藤進一, 笥 茂穂, 中山智治, 2006: 亜寒帯大型カイアシ類による親潮域から混合域中層へ炭素輸送. 2006年度日本海洋学会春季大会, 講演要旨, 355.
- Shinada A., Ikeda T., Ban S., and Tsuda A., 2001: Seasonal dynamics of planktonic food chain in the Oyashio region, western subarctic Pacific. *J. Plankton Res.*, **23**, 1237-1247.
- Sieracki C. K., Sieracki M. E., and Yentsch C. S., 1998: An imaging-in-flow system for automated analysis of marine microplankton. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **168**, 285-296.
- Spencer M. L., Stoner A. W., Ryer C. H., and Munk J. E., 2005: A towed camera sled for estimating abundance of juvenile flatfishes and habitat characteristics: Comparison with beam trawls and divers. *Est. Coast. Shelf Sci.*, **64**, 497-503.
- Sprules W. G., Bergstrom B., Cyr H., Hargreaves B. R., Kilham S. S., MacIsaac H. J., Matsushita K., Stemberger R. S., and Williams R., 1992: Non-video optical instruments for studying zooplankton distribution and abundance. *Arch. Hydrobiol. Beih. Ergebn. Limnol.*, **36**, 45-58.
- Stemmann L., Gorsky G., J. Marty C., Picheral M., and Miquel J. C., 2002: Four years survey of large particles (>0.15 mm) vertical distribution (0-1000 m) in the NW Mediterranean. *Deep Sea Res. II*, **49**, 2143-2162.

- Stemmann L., Jackson G. A., and Ianson D., 2004: A vertical model of particle size distributions and fluxes in the midwater column that includes biological and physical processes-Part I: model formulation. *Deep Sea Res.*, **51**, 865-997.
- Stich H. B., and Lampert W., 1981: Predator evasion as an explanation of diurnal vertical migration by zooplankton. *Nature*, **293**, 396-398.
- Sutton T., Hopkins T., Remsen A., and Burghart S., 2001: Multisensor sampling of pelagic ecosystem variables in a coastal environment to estimate zooplankton grazing impact. *Cont. Shelf Res.*, **21**, 69-87.
- Tadokoro K., Chiba S., Ono T., Midorikawa T., and Saino T., 2005: Interannual variation in Neocalanus biomass in the Oyashio waters of the western North Pacific. *Fish. Oceanogr.*, **14**, 210-222.
- 高橋素光, 2001: カタクチイワシの仔稚魚期における成長・発達様式と資源加入機構. 東京大学農学生命科学研究科 学位論文, 107pp.
- 谷口 旭, 1986a: 海とプランクトン—浮遊生物学概説〔1〕. *海洋と生物*, **8**, 82-87.
- 谷口 旭, 1986b: 海とプランクトン—浮遊生物学概説〔2〕. *海洋と生物*, **8**, 162-167.
- Tamburri M. N., Magdalena N. H., and Robison B. H., 2000: Chemically regulated feeding by a midwater medusa. *Limnol. Oceanogr.*, **45**, 1661-1666.
- Tang X., Stewart W. K., Vincent L., Huang H., Marra M., Gallager S. M., and Davis C. S., 1998: Automatic plankton image recognition. *Artificial Intelligence Review*, **12**, 177-199.
- 寺崎 誠, 浜口正巳, 薄 浩則, 石岡宏子, 2001: 画像解析システムを用いた二枚貝幼生の自動識別法の試み. *La mer*, **39**, 87-93.
- Terazaki M., and Ishii T., 1986: Examination of the possibility of automated identification of Chaetognatha utilizing an image processor. *Bull. Plankton Soc. Japan*, **33**, 95-100.
- Terazaki M., and Marumo R., 1979: Diurnal vertical migration of *Sagitta elegans* Verrill in the Western North Pacific Ocean. *Bull. Plankton Soc. Japan*, **26**, 11-17.
- Thibault-Botha T., and Bowen T., 2004: Impact of formalin preservation on *Pleurobrachia bachei* (Ctenophora). *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **303**, 11-17.
- Thuesen E. V., and Childress J. J., 1994: Oxygen consumption rates and metabolic enzyme activities of oceanic California medusae in relation to body size and habitat depth. *Biol. Bull.*, **187**, 84-98.
- Tian Y., Akamine T., and Suda M., 2004: Modeling the influence of oceanic-climatic changes on the dynamics of Pacific saury in the northwestern Pacific using a life cycle model. *Fish. Oceanogr.*, **13** (sup.1), 125-137.
- Tiselius P., 1998: An *in situ* video camera for plankton studies: design and preliminary observations. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **164**, 293-299.
- 豊川雅哉, 2001: クラゲ類・クシクラゲ類の生物量と食物網. 月刊海洋 号外, **27**, 166-172.
- Toyokawa M., Toda T., Kikuchi T., Miyake H., and Hashimoto J., 2003: Direct observations of a dense occurrence of *Bolinopsis infundibulum* (Ctenophora) near the seafloor under the Oyashio and notes on their feeding behavior. *Deep Sea Res.*, **50**, 809-813.
- Trevorrow M. V., Mackas D. L., and Benfield M. C., 2005: Comparison of multifrequency acoustic and *in situ* measurements of zooplankton abundances in Knight Inlet, British Columbia. *J. Acoust. Soc. Am.*, **117**, 3574-3588.
- Tsuda A., and Nemoto T., 1992: Distribution and growth of salps in a Kuroshio warm-core ring during summer 1987. *Deep Sea Res.*, **39**, S219-S229.
- Tsuda A., Saito H., and Kasai H., 1999: Life histories of *Neocalanus flemingeri* and *Neocalanus plumchrus* in the western subarctic Pacific. *Mar. Biol.*, **135**, 533-544.
- Tsuda A., Saito H., and Kasai H., 2001: Life histories of *Eucalanus bungii* and *Neocalanus cristatus* (Calanoida: Copepoda) in the western subarctic Pacific. *Fish. Oceanogr.*, **13** (sup.1), 10-20.
- 津田良平, 1994: 光・画像計測. 月刊海洋, **26**, 50-56.
- Tsuji T., and Nishikawa T., 1984: Automated identification of red tide phytoplankton *Prorocentrum triestinum* in coastal areas by image analysis. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **40**, 425-431.
- Tsunogai S., Ono T., and Watanabe S., 1993: Increase in total carbonate in the western North Pacific water and a hypothesis on the missing sink of

- anthropogenic carbon. *J. Oceanogr.*, **49**, 305-315.
- Ulhman D., Schimpert O., and Ulhman W., 1978: Automated phytoplankton analysis by a pattern recognition method. *Int. Rev. ges Hydrobiol.*, **63**, 575-583.
- Vinogradov M. E., 1997: Some problems of vertical distribution of meso- and macroplankton in the ocean. *Adv. Mar. Biol.*, **32**, 1-92.
- Warren J. D., Stanton T. K., Benfield M. C., Wiebe P. H., Chu D., and Sutor M., 2001: In situ measurements of acoustic target strengths of gas-bearing siphonophores. *ICES J. Mar. Sci.*, **58**, 740-749.
- Wiebe P. H., and Benfield M. C., 2003: From the Hensen net toward four-dimensional biological oceanography. *Prog. Oceanogr.*, **56**, 7-136.
- Wiebe P. H., and Holland W. R., 1968: Plankton patchiness: effects on repeated net tows. *Limnol. Oceanogr.*, **13**, 315-332.
- Wiebe P. H., Morton A. W., Bradley A. M., Backus R. H., Craddock J. E., Barber V., Cowles T. J., and Flierl G. R., 1985: New developments in the MOCNESS, an apparatus for sampling zooplankton and micronekton. *Mar. Biol.*, **87**, 313-323.
- Wiebe P. H., Stanton T. K., Greene C. H., Benfield M. C., Sosik H. M., Austin T., Warren J. D., and Hammar T., 2002: BIOMAPER II: an integrated instrument platform for coupled biological and physical measurements in coastal and oceanic regimes. *IEEE J. Oceanic Eng.*, **27**, 700-716.
- Yasuda I., 1997: The origin of the North Pacific Intermediate Water. *J. Geophys. Res.*, **102**, 893-909.
- Yasuda I., Kouketsu S., Katsumata K., Ohiwa M., Kawasaki Y., and Kusaka A., 2002: Influence of Okhotsk Sea Intermediate Water on the Oyashio and North Pacific Intermediate Water. *J. Geophys. Res.*, **107**, 3237, doi:10.1029/2001JC001037.
- 安田 徹, 1988: ミズクラゲの研究. 水産研究叢書 37, 日本水産資源保護協会, 東京, 139pp.
- Youngbluth M. J., and B_mstedt U., 2001: Distribution, abundance, behavior and metabolism of *Periphylla periphylla*, a mesopelagic coronate medusa in a Norwegian fjord. *Hydrobiologia*, **451**, 321-333.
- Zaitsev Y. P., 1992: Recent changes in the trophic structure of the Black Sea. *Fish. Oceanogr.*, **1**, 180-189.
- Zhou M., and Tande K., 2002: Introduction. Optical Plankton Counter workshop. *GLOBEC Report*, **17**, 1-2.

付 図 -VPR II で記録されたプランクトン-

原生動物門 (Protozoa)

放散虫上綱 (Radiolaria)

フェオダリア綱 (Phaeodaria)

フェオスフェラ目? (Phaeosphaerida)

オーロスフェラ科? (Aulosphaeridae)

カノスフェラ科? (Cannosphaeridae?)

目以下不明の放散虫 (フェオスフェラ目?)

刺胞動物門 (CNIDARIA)

ヒドロクラゲ綱 (Hydrozoa)

硬クラゲ目 (Leptomedusae)

剛クラゲ目 (Trachymedusae)

その他のヒドロクラゲ綱

管クラゲ目 (Siphonophora)

有櫛動物門 (CTENOPHORA)

有触手綱 (Tentaculata)

カプトクラゲ目 (Lobata)

フウセンクラゲ目 (Cydippida)

その他目以下不明

無触手綱 (Atentaculata)

ウリクラゲ目 (Beroida)

軟体動物門 (MOLLUSCA)

腹足綱 (Gastropoda)

有殻翼足目 (Thecosomata)

裸殻翼足目 (Gymnosomata)

ハダカカメガイ科 (Clionidae)

環形動物門 (ANNELIDA)

多毛綱 (Polychata)

節足動物門 (ARTHROPODA)

甲殻亜門 (CRUSTACEA)

介形亜綱 (Ostracoda)

カイアシ亜綱 (Copepoda)

カラヌス目 (Calanoida)

ユウキータ科 (Euchaetidae)

Paraeuchaeta sp.

ユウカラヌス科 (Eucalanidae)

Eucalanus bungi

カラヌス科 (Calanidae)

Neocalanus sp.

Neocalanus cristatus

メトリディア科 (Metridiidae)

Metridia sp.

軟甲綱 (Malacostraca)

アミ目 (Mysidacea)

端脚目 (Amphipoda)

タルマワシ科 (Phronimidae)

その他 科以下が不明

オキアミ目 (Euphausiacea)

Euphausia sp.

毛顎動物門 (CHAETOGNATHA)

脊索動物門 (CHAETOGNATHA)

被囊動物亜門 (TUNICATA)

タリア綱 (Thaliacea)

筋帯亜綱 (Myosomata)

ウミタル目 (Doliolidae)

尾虫綱 (Appendiculata)

尾虫目 (Appendicularia)

サイズチボヤ科 (Fritillaridae)

尾虫目の虫体

その他の動物群

ヒトデ綱 (Asterozoa)

頭足綱 (Cephalopoda)

上腕形上目 (Decapodiformes)

硬骨魚綱 (Osteichthyes)

懸濁粒子 および 分類群不明

原生動物門 (Protozoa)

放射虫上綱 (Radiolaria)

フェオダリア綱 (Phaeodaria)

フェオスフェラ目? (Phaeosphaerida)

オーロスフェラ科? (Aulosphaeridae)

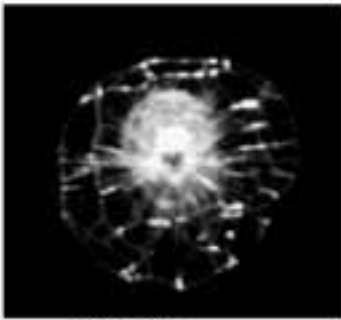


4mm

2003.7.24
St. JB1 水深384m

カノスフェラ科? (Cannosphaeridae?)

1mm



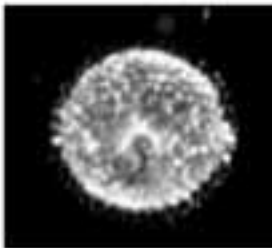
2004.6.29
St. A4 水深195m



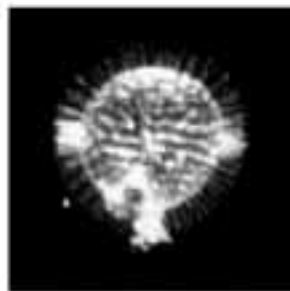
2003.7.23
St. OY2 水深378m

フェオスフェラ目? (Phaeosphaerida)

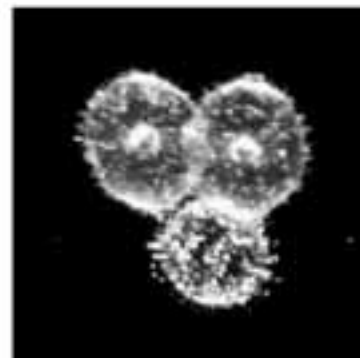
1mm



2003.7.23
St. OY2 水深435m



2003.7.24
St. JB1 水深272m



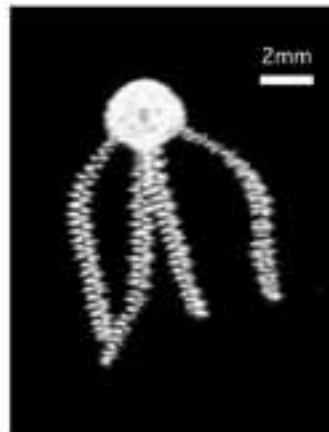
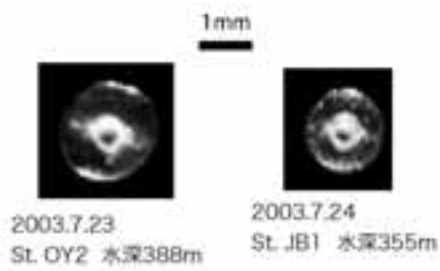
2003.7.24
St. JB1 水深496m



2003.7.24
St. JB1 水深294m


放散虫上綱/ヒドロクラゲ綱

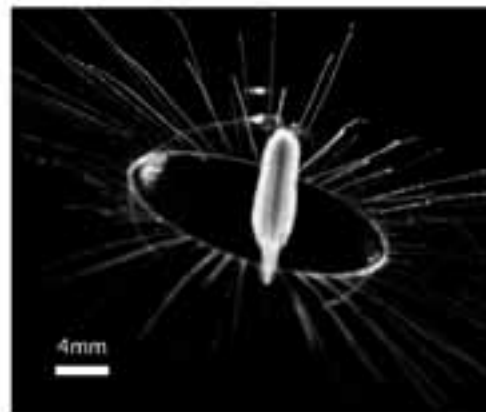
目以下不明の放散虫 (フェオスフェラ目?)



刺胞動物門

ヒドロクラゲ綱

硬クラゲ目 



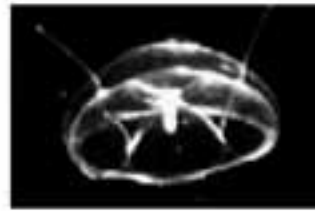
ヒドロクラゲ綱

剛クラゲ目

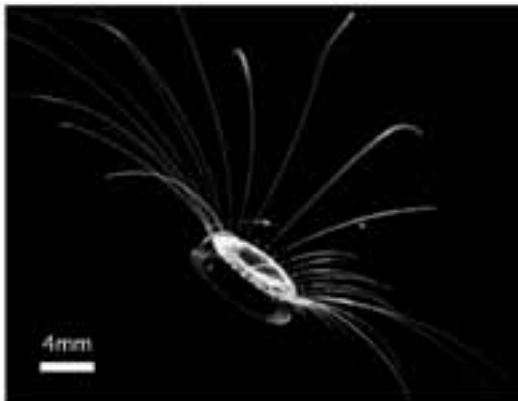
1mm



2003.7.21
St. OY1 水深498m

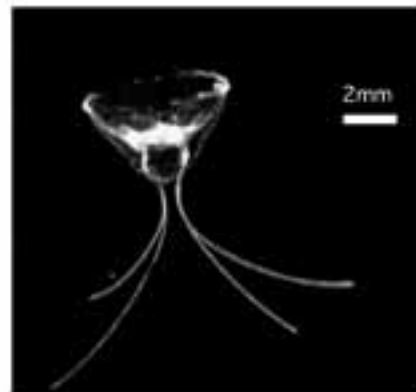


2003.7.21
St. OY1 水深328m



4mm

2003.7.21
St. OY1 水深500m



2mm

2003.7.21
St. OY1 水深481m

その他のヒドロクラゲ綱

1mm



2003.7.21
St. OY1 水深500m



2003.7.25
St. JB1 水深 86m



2003.7.21
St. OY1 水深501m



2003.7.21
St. OY1 水深496m



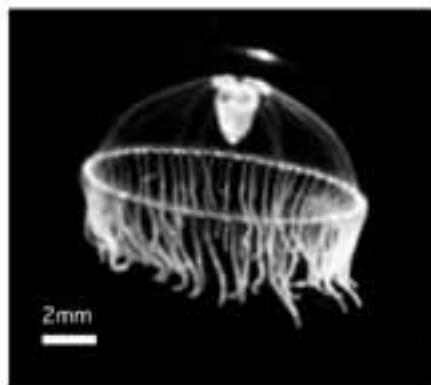
2004.6.29
St. A13 水深350m



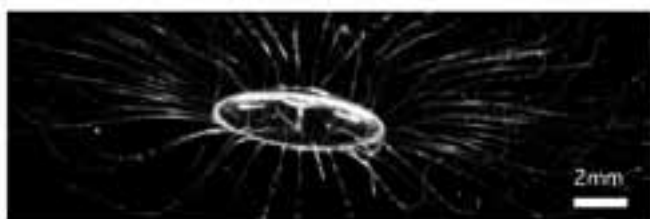
2003.7.25
St. JB1 水深494m

ヒドロクラゲ綱

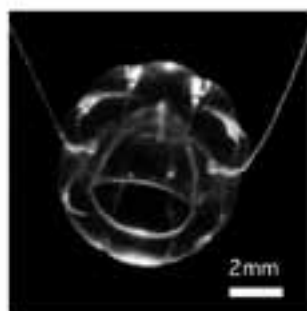
その他のヒドロクラゲ綱 続き



2003.7.25
St. JB1 水深481m



2003.7.25
St. JB1 水深191m



2004.7. 1
St. A4 水深 27m



2004.6.29
St. A13 水深477m

ヒドロクラゲ綱

管クラゲ目

2mm



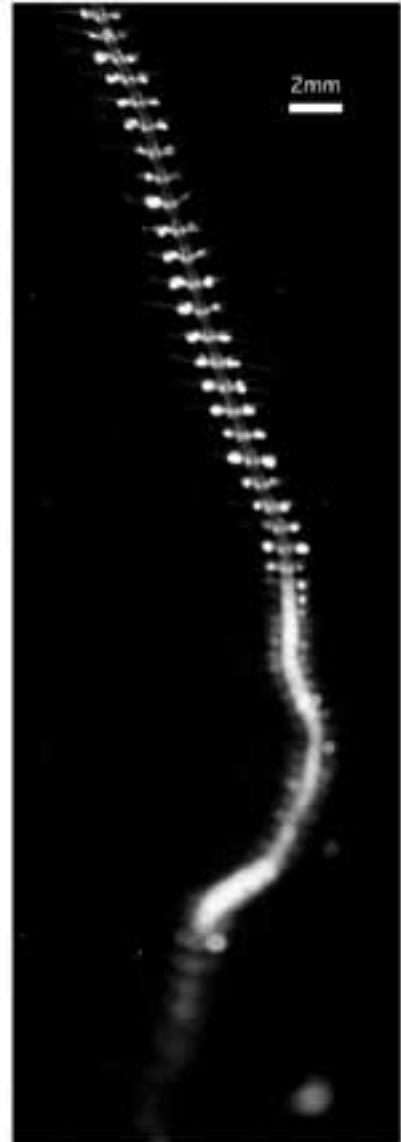
2003.7.21
St. OY1 水深498m



2003.7.21
St. OY1 水深495m



2004.6.29
St. A13 水深497m



2mm

2003.7.22
St. OY1 水深308m



2mm

2004.7.1
St. A4 水深486m



2mm

2003.7.24
St. OY2 水深 90m

有触手綱

有櫛動物門

有触手綱

カプトクラゲ目

2mm



2003.7.23
St. OY2 水深268m



2004.7.1
St. A4 水深114m

フウセンクラゲ目

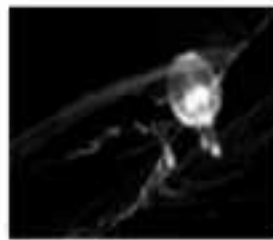
1mm



2003.7.25
St. JB1 水深361m



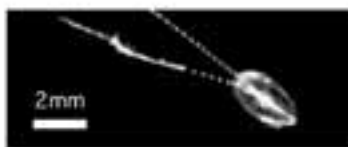
2003.7.25
St. JB1 水深438m



2003.7.23
St. OY2 水深494m

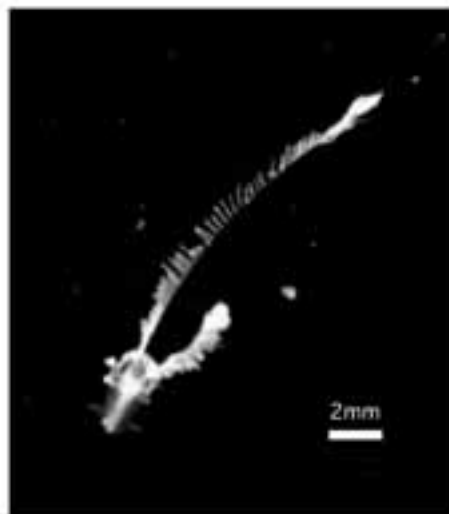


2003.7.25
St. JB1 水深 29m



2mm

2004.7.1
St. A4 水深491m



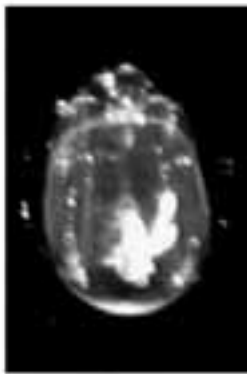
2mm

2003.7.21
St. OY1 水深499m

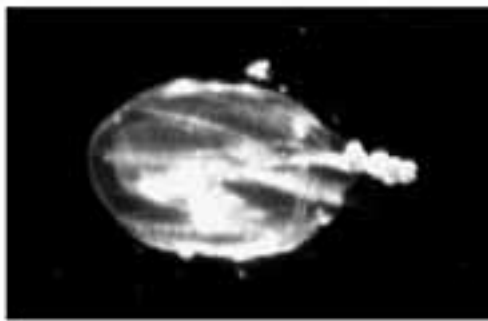
有触手綱

その他 目以下不明

1mm



2003.7.21
St. OY1 水深371m



2003.7.25
St. JB1 水深238m



2003.7.21
St. OY1 水深503m



2003.7.23
St. OY2 水深 35m

無触手綱

ウリクラゲ目



2004.6.29
St. A13 水深 26m

軟体動物門

腹足綱

有殻翼足目 2mm



2004.7.1
St. A4 水深 93m

裸殻翼足目

ハダカカメガイ科 4mm



2004.6.28
St. A13 水深491m

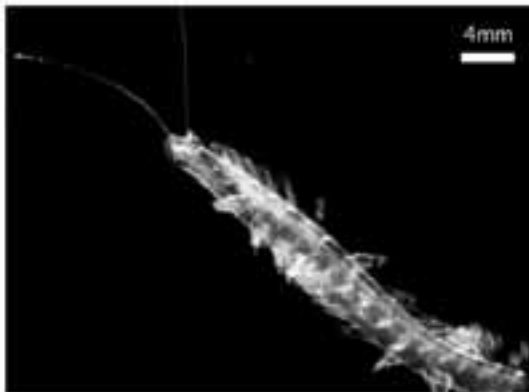
腹足綱/多毛綱



2003.7.25
St. JB1 水深483m

環形動物門

多毛綱



2007.7.1
St. A4 水深483m



2007.7.2
St. A4W 水深490m



1mm
2003.7.25
St. JB1 水深105m



2mm
2004.6.30
St. A4 水深398m

介形亜綱/カイアシ亜綱

節足動物門

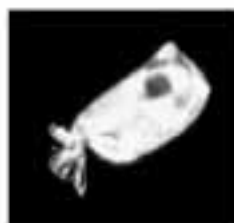
介形亜綱 1mm



2003.7.21
St. OY1 水深468m



2003.7.21
St. OY1 水深483m



2003.7.21
St. OY1 水深500m

カイアシ亜綱

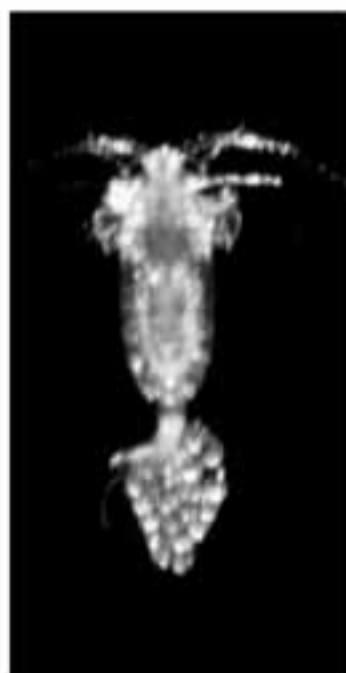
カラヌス目

ユウキータ科 (Euchaetidae)

Paraeuchaeta sp. ? 1mm



2004.6.29
St. A13 水深392m



2004.7.1
St. A4 水深469m



2004.7.1
St. A4 水深253m



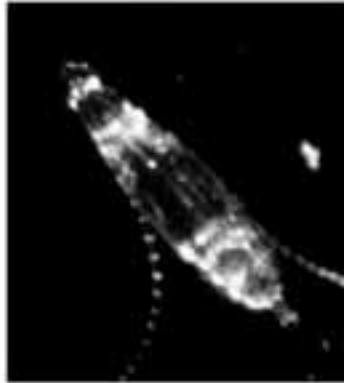
2003.7.20
St. OY1 水深396m

カイアシ亜綱

カラヌス目

ユウカラヌス科 (Eucalanidae)

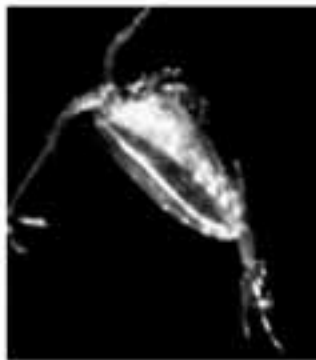
Eucalanus bungi? 1mm



2003.7.25
St. JB1 水深365m

カラヌス科 (Calanidae)

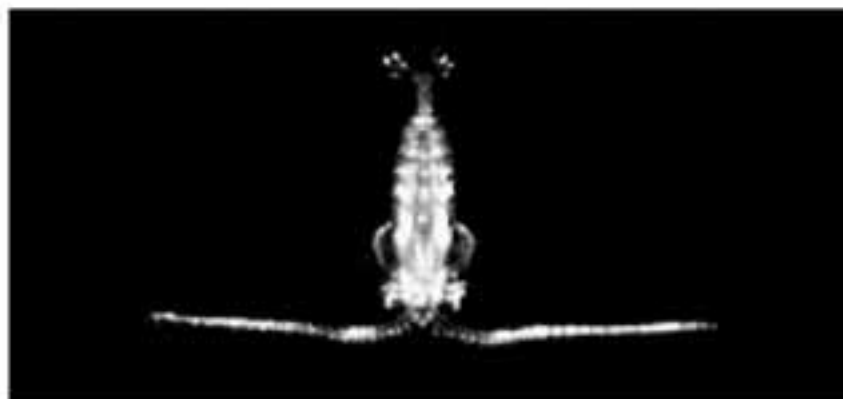
Neocalanus sp.? 1mm



2004.7.1 VPR22
St. A4 水深17m



2004.6.29
St. A13 水深503m



2004.8.30
St. A4 水深495r

カイアシ亜綱

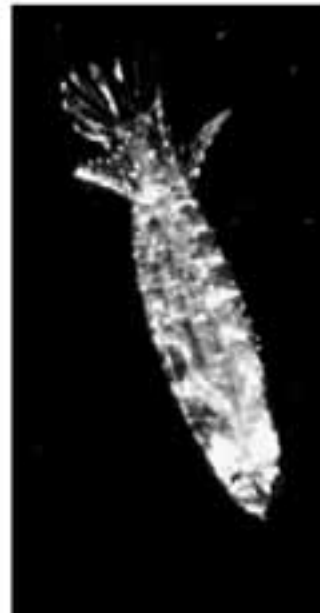
カラヌス科 (Calanidae)

Neocalanus cristatus ?

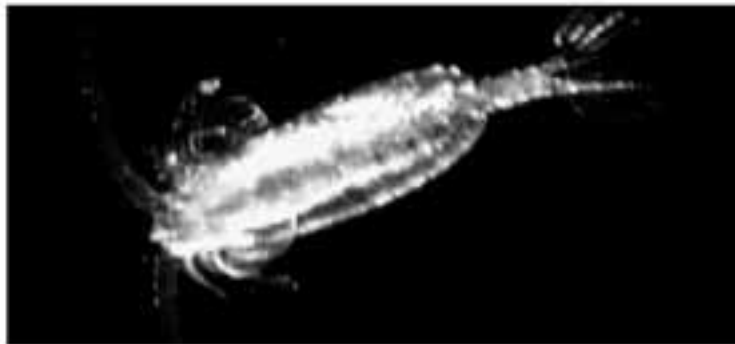
1mm



2004.7.1 VPR22
St. A4 水深 27m



2003.7.25
St. JB1 水深283m



2004.6.29
St. A13 水深503m

メトリディア科 (Metridiidae)

Metridia sp. ?

1mm



2003.7.23
St. OY2 水深487m



2003.7.23
St. OY2 水深484m



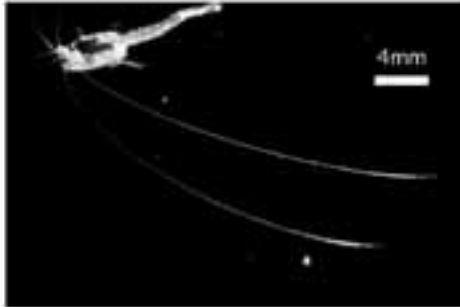
2003.7.23
St. OY2 水深420m



2003.7.20
St. OY1 水深484m

軟甲綱

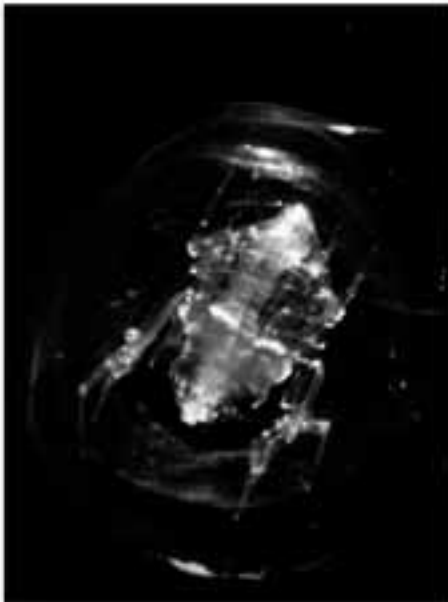
軟甲綱
アミ目



2003.7.24
St. OY2 水深495m

端脚目

タルマワシ科 (Phronimidae)



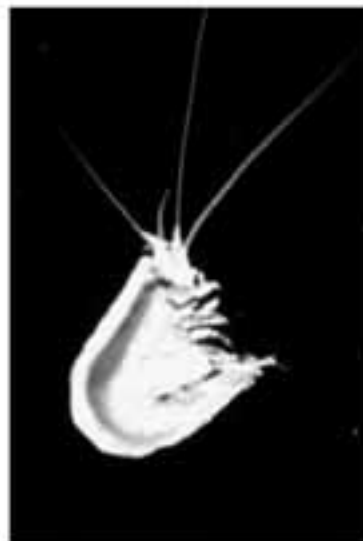
2mm
2004.6.30
St. A4 水深313m

その他 科以下が不明

2mm




2003.7.23
St. OY2 水深359m



2003.7.23
St. OY2 水深401

軟甲綱

オキアミ目

Euphausia sp. 



2003.7.21
St. OY1 水深318m



2003.7.21
St. OY1 水深226m



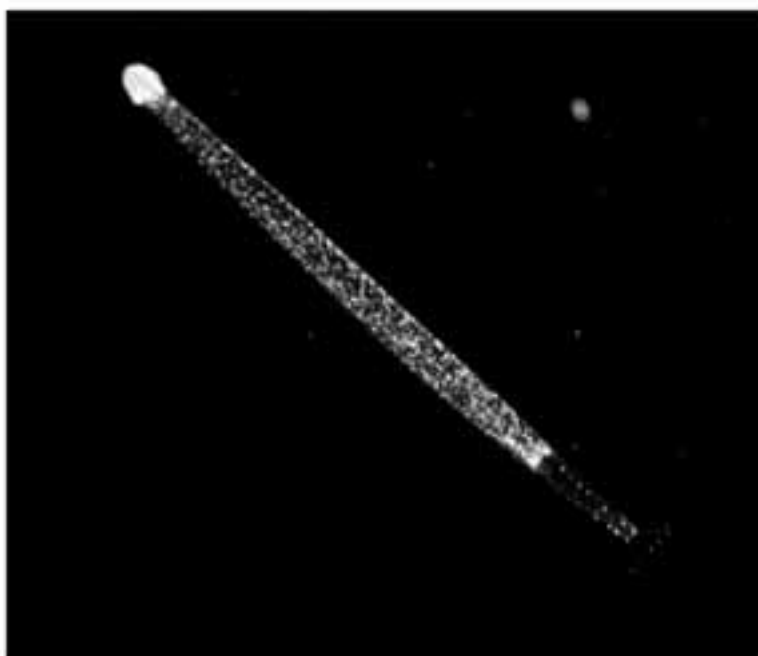
2003.7.25
St. JB1 水深220m



2003.7.22
St. OY1 水深215m

毛頭動物門

2mm



2003.7.21
St. OY1 水深328m



2003.7.21
St. OY1 水深296m



2003.7.23
St. OY2 水深259m



2003.7.23
St. OY2 水深389m

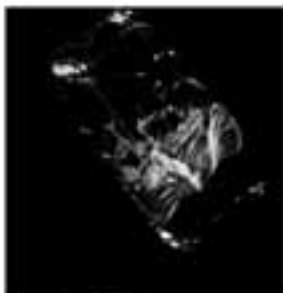


2003.7.21
St. OY1 水深500m

脊索動物門
 被囊動物亜門
 タリア綱
 筋帯亜綱
 ウミタル目

タリア綱

2mm



2003.7.21
 St. OY1 水深500m



2003.7.21
 St. OY1 水深487m



2003.7.21
 St. OY1 水深483m

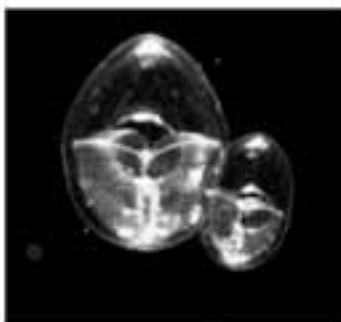


2003.6.28
 St. A13 水深181m

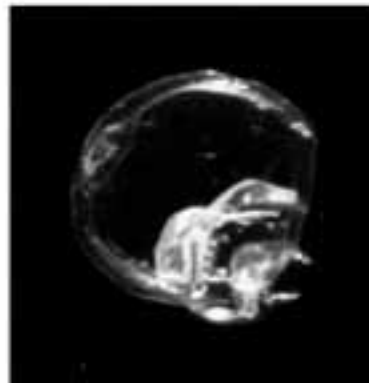
2mm



2003.7.21
 St. OY1 水深502m



2003.7.21
 St. OY1 水深489m



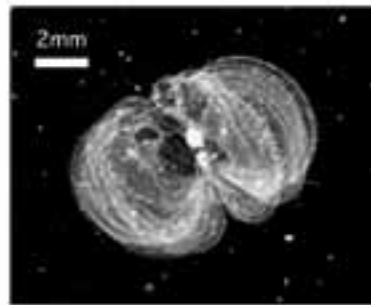
2003.7.21
 St. OY1 水深482m

尾虫綱

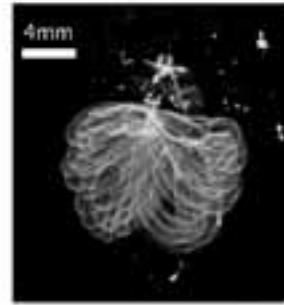
尾虫綱

尾虫目

サイズチボヤ科 (Fritillaridae)



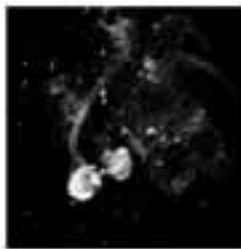
2003.7.24
St. OY2 水深459m



2003.7.23
St. OY2 水深507m

尾虫目の虫体

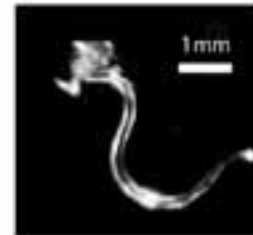
2mm



2003.7.21
St. OY1 水深330m



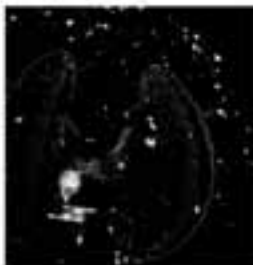
2003.7.21
St. OY1 水深501m



2003.7.21
St. OY1 水深505m

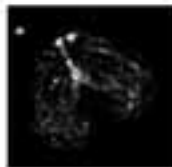
尾虫目?

4mm



2003.7.20
St. OY1 水深249m

2mm



2003.7.25
St. JB1 水深390m

その他の動物群

ヒトデ綱

1mm



2003.7.20
St. OY1 水深409m

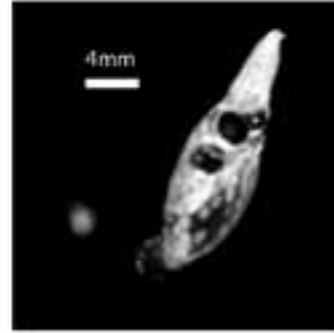
頭足綱
十腕形上目

2mm



2004.7.1
St. A4 水深421m

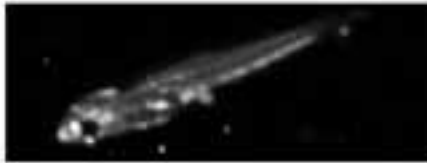
4mm



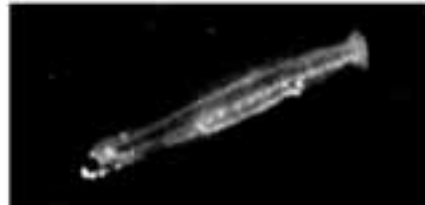
2003.7.22
St. OY1 水深365m

硬骨魚綱

1mm



2003.7.23
St. OY2 水深 54m



2003.7.23
St. OY2 水深 6m

懸濁粒子

画像は全てSt.OY2 (2003.7.23) で記録されたもの

1mm



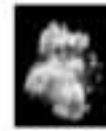
水深 77m



水深 81m



水深 99m



水深134m



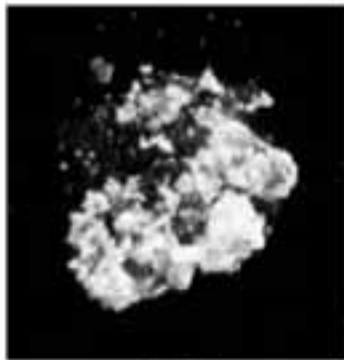
水深149m



水深138m



水深152m



水深168m



水深199m



水深339m



水深399m



水深397m



水深400m



水深414m



水深445m



水深402m



水深490m



水深495m

分類群不明 ネット採集試料からは確認できなかったが、VPRでは全測点で記録された。例えばSt.OY1のVPR7 (2003.7.21) で約2個体/m³出現 (25-500m平均)。

St.OY1 (2003.7.21) で記録



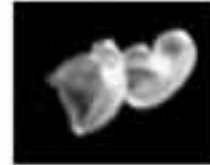
水深 482m



水深 481m



水深 500m



水深 508m

1mm

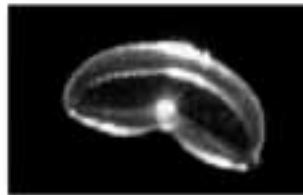


水深 473m

St.OY2 (2003.7.23) で記録



水深 491m



水深 489m

1mm

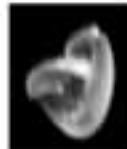
St.JB1 (2003.7.25) で記録



水深 432m



水深 495m

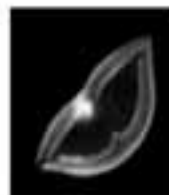


水深 496m



水深 493m

1mm



水深 333m

水深 492m

