

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

メタデータ	言語: Japanese
	出版者: 水産総合研究センター
	公開日: 2024-10-02
	キーワード (Ja):
	キーワード (En): Video Plankton Recorder(VPR);
	zooplankton; community structure; Hydrozoa;
	Ctenophora
	作成者: 市川, 忠史
	メールアドレス:
	所属:
URL	https://fra.repo.nii.ac.jp/records/2010863

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.



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)

市川忠史

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 \pm 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 σ_{θ}), and tended to appear in the near 26.8 σ_{θ} 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VPRII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 -VPRII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。ペ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

26

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

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 合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

存量を把握する上での障害となっている。

質プランクトンは採集時に壊れやすく (Harbison *et al.*, 1978; Falkenhaug, 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 ク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決める 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) $_{\circ}$ 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 一特に光学系 測器を中心に一

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しての定量性 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較 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 いため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(standalone)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の電気的な大きさ 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 ν - 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 情報量は非常に少ない。

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($12\sim14$ 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ッ 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 フィルム容量が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。 フィルムの現像、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)。

- μm~kmの尺度で連続的かつ自動的に電気的画 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0.6~26×10³ mm³)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 VPRII(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 × 1024 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 他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 Ovservatory, AVPPO; http://4 dgeo.whoi.edu/vpr/) などに搭載された。また、フ ローセルと組み合わせ, 航走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UVPⅢ (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× 10⁻³m³と6.5×10⁻³m³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が分類群 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)。UVPIIやVPRI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のイーサネットで光ケーブルを通じて船上の 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) o

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・計測するのと同様に、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).

VPRII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 Intrest, 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)、事前の較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。VPRII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,例えばノルパックネットの口径と同 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 VPRII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Uunderwater 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ため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 定範囲を把握し較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 I の画像取得パラメーターについて

本研究で使用したVPRI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)。事前の較正で設定したパ 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。VPRII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。

- 面像を二値化し、ROIとして抽出する際の境界 (輪郭)を判定
 - $\cdot \cdot \cdot$ Segmentation Threshold
- 2)対象物の合焦の度合いを判定
 - $\cdot \cdot \cdot$ 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
 - \cdot \cdot \cdot 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。VPRIIの較正では生きたカ 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,透過などの特性が違うため,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,VPRII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 VPRII. 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(VPRI, Davis et al., 2005)の光学ユニット(CCDカメラとス トロボ部分),室内較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 のカッティングシートで覆い、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。較正の対象プラ 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) は較正の際, 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て設定 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。較正の対象とし 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



市川忠史

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, プラネトロン(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、140mm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、185mm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, 155mm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.

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

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、各パラメーター値におい 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ー 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ーとして適 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)。VPRⅡ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, VPRⅡ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。VPRI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VPRⅡ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 大きいほど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)。VPRII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)。VPRⅡ 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VPRII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

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 Dzg/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
- 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。

VPRI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ろう。

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VPRI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VPRII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VPRIIと MOCNESS間で比較し、VPRII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、VPRII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

St.	Date	Cast Name	Start time	e End time	Loc	ation	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

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

(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 時に各データを取得した(Fig. 4-2)。VPRI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。VPRI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 VPRII system on the R. V. Shunyo-Maru.

ともに、合焦範囲決定に必要な輝度諧調の最大値に関 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VPRⅡ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VPRⅡ観測,ネッ ト曳網,VPRⅡ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VPRⅡ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VPRⅡ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 I 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 × 10⁻⁴ m³ 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, VPRI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),放散虫類(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) および毛顎類 (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 ンの長さと幅(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:

Prosome length = 0.84 Lbl + 0.66

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

放散虫類:

Diameter (major axis) = 1.42 ESD - 0.04

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

ヒドロクラゲ類:

Bell hight (major axis) = 0.97 Lbl + 0.22

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

クシクラゲ類:

Body length = 0.87 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,VPRII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VPRII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VPRII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,VPRII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 nondetection, p_{nd})を計算した(Benfield *et al.*, 1996)。す なわち,

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

ここで λ は個体数密度, ν 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. JB1 (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 ℃ 台であり黒潮親潮移行域,St. JB1 は 100 m深で4 ℃ 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ダイヤグ 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. JB1においてもVPR18,VPR19の水塊構造は一致して おり,VPRII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. VPRI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×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以下を〇で示した。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pndが0.05以下となった採集層では, VPRⅡ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(r²)は得られなかった。回帰 式から大きく外れたのはSt. JB1の450~500 m層で, ネットの個体数密度は34.4 個体/m³ であったのに対 し, VPR18, VPR19はそれぞれ18.7, 15.7 個体/m³で あった。放散虫類はVPRI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VPRⅡ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pnd 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 pnd 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pnd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た が、個体数密度の最大値はpnd が 0.05以上となった採 集層のVPRⅡで得られ、ネット個体数密度に較べ10倍 以上高かった。



VPR Abundance (No. m⁻³)

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VPRⅡ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、VPRⅡと ネットで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pnd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VPRⅡとネッ トの個体数密度の比はほぼ1となった。VPRIIで得ら れたヒドロクラゲ類の個体数密度は, St. OY2の VPR13, VPR14でそれぞれ1.2, 1.3 個体/m³, St. JB1

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。VPRII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、VPRII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	$9.59 \hspace{0.2cm} \pm 2.1$	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較べ, VPRII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VPRII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VPRIIのみで確認された。また,解像度の関係から VPRII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, VPRII 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 I とプランクトンネットとの比較

本章では、VPRII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。VPRⅡ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、VPRII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 nondetection, 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。VPRII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らず、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VPRIIで高い傾向が認 められた(Fig. 4-6)。さらに,VPRII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VPRII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。VPRIIでは,ほぼ全 ての放散虫類が1個体づ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 VPRⅡ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; Falkenhaug, 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; Falkenhaug, 1996), また, VPRⅡ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、VPRII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pnd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VPRII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pnd 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VPRIの濾水量 不足だけで説明することはできない。VPRIIでは体を 曲げた毛顎類が数多く記録されており(Fig. 4-8), VPRII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。 VPRII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.

トンを記録する (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,管クラゲ類や毛顎類が過小評価と 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, pnd 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VPRII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)。VPRⅡ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. VPRI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/m³), 1980年代は6月に14.8 個 体/m³ (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VPRⅡ 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,500m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 /m³), 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/m³ 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、VPRIIの結果はMOCNESSに較べ、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、VPRII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VPRⅡ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。VPRⅡ 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VPRⅡ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, VPRⅡ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 VPRI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

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)。VPRⅡ(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)。VPRⅡ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 HC4) 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.

市川忠史

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 11:31 38-30°N 144-30°E 506 9:42 July 23, 2003 MOC 13:51 38-30°N 144-30°E 500 12:31 JB1 July 25, 2003 **VPR18** 37-10°N 142-00°E 9:37 11:26 504 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 42-15°N 145-08°E NOR 12:13 14:14 500 A13 June 29, 2004 VPR14 40-00°N 146-15°E 502 9:4811:11 June 28, 2004 NOR 12:12 14:13 40-00°N 146-15°E 500

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

5.2.2. VPRI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 1.9×10^{-4} m³であった。VPR II の 濾水量は、VPR II が通過した時間を1m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(m³)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, VPRII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 hight, 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 いな場合は,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。

 Log_{10} DW = 3.889 Log_{10} PL -11.203 C = 0.454 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℃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. OY 2 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 σθ 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50m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. 52)。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 σ₀ 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

VPRⅡ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。VPRII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 σ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. A 4 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490~500m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. OY 1 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

VPRII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VPRII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 σ_{θ} =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VPRIIとプランクトンネットで比較したとこ ろ、10 mm以上では、VPRIIとプランクトンネットで ほぼ同じ値となった(Fig. 5 - 4)。一方、VPRII 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VPRIIの個体数密度が高かった(Fig. 5-4)。さらに、管クラゲ類はVPRII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VPRII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0.002~0.106 mgC/m³(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 VPRII 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 σ_{θ} =26.6 and dotted lines show water temperature or salinity minimum depth.
Station	Area	Copepoda		Jellyfish			Iolly fish total	
				Hydromedusa	Siphonophora	Ctenophora	Jenynsh total	
		В	Р	В	В	В	В	F
		$(mgC \cdot m^{-3}) (mgC \cdot m^{-3} \cdot d^{-1})$		$(10^{-3} mgC \cdot m^{-3})$	$(10^{-3}\text{mgC}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1})$			
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

Table 5-2. Jellyfish biomass $(B, mgC/m^3)$ and food requirement $(F, mgC/m^3/d)$ estimated from VPR II images and plankton net samples averaged over 25 to 500m in the Oyasio and Transition region, and Copepoda biomass $(B, mgC/m^3)$ and production $(P, mgC/m^3/d)$ estimated from the plankton net samples only

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)。

25~500mにおけるカイアシ類の平均現存量,日間

生産速度とVPRII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



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

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1m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1m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 σ 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 σ 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VPR 7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/m³) based vertical distribution of Copepoda (left panel) and jellyfish (Cnidaria and Ctenophora, right panel) estimated from VPRII images at every 10m depth. Copepoda biomass was estimated from plankton net samples. Jellyfish biomass was estimated from VPRII images and plankton net samples, as <10mm sized Hydromedusa and Ctenophora used for VPRII 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 σ_{θ} =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VPRII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。 VPR1I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 σ_{θ} 以深 について水温,塩分の鉛直構造ならびに0.001 σ_{θ} 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 σ_{θ} 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 σ 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 σ 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 σ_θ以深, 2004年は26.62 σ_θ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, VPR 7 およびVPR18の26.86 σ_θ前後,ならびにVPR13 の26.95 σ₀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26.94~26.9695 σ₀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 VPR7の26.76~26.78 σ_θとVPR18の26.96 σ_θ,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 cast of VPR7 (St. OY1), VPR13 (St. OY2) and VPR18 (St. JB1) during 2003 cruise. The density of abundance was averaged from every 0.001 σ_{θ} . 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以深に分布し 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_0 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_0 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_0 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RMT1+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一桁多い現存 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較 ベ平均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 の可能性がある(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 合に較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、VPRⅡ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、VPRII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VPRⅡ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), 25~500m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較べて小さかった(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 に較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

VPRIL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 (Paffenhofer, 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、VPRⅡで識別できる2mm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)。 VPRⅡ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10m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。日本近海の同じ亜寒帯水 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 $(26.7 \sigma_{\theta}$ 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. JB1) 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300m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). VPRⅡで識別できた放散虫や懸濁粒子は2mm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), さらには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に 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VPRⅡ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, VPRⅡ 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。

VPRⅡ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1mmで あった。粒径1mm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続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 σθ以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 𝑘 以深であったことは(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、VPRI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. VPRI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。VPRⅡ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 のほど群集団を形成するため、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), VPRⅡ 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VPRⅡは少なく

とも5m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、VPRIとMOCNESSでほぼ等しい結 果が得られた(第4章;市川ら,2006a)。一方, VPRI 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 (pnd) 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、濾水量不足と考えれる過小評価の要因以外 に,逃避の影響(毛顎類), VPRⅡ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, VPRⅡ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, VPRⅡ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 (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、25~500m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、5m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10m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い可 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 のと同様、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。VPRⅡ 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,VPRⅡ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µm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, VPRII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。VPRII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を用いて見積もるとともに、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 I 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。

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

VPRII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、VPRII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、VPRII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 I 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、 VPRⅡ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VPRI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。これに対して毛顎類の個体数密度はMOCNESSよ りVPRIIで低く、 VPRII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. VPRI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VPRI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、VPRII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、VPRIIで記録されたヒド ロクラゲ類は全個体数の89%が傘幅10mm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、VPRIIがMOCNESSに較べて最大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 I 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/m^3 (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較べ平均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,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,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,VPRI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 VPRIIを使った観測が有効であることを示した。ま た,VPRII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。VPRII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VPRI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VPRI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., Gallager 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., Gallager 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., Gallager S. M., Tang X., and

Ashjian C. J., 2004: Real-time observation of taxaspecific plankton distributions: an optical sampling method. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **284**, 77-96.

- Davis C. S., Thwaites F. T., Gallager 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.
- Gallager 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.
- Gallager 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 Hyperiidea 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 multispecies 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 attenuance 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-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VPRIとMOCNESSとの比較 - クラゲ 類・クシクラゲ類に対するVPRIIの有効性-.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: VPR II 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: 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-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, 2 nd 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., Pearcy 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 *Dolioletta 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 topdown 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: Insitu 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, 3 rd 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 $(75^{\circ}N)$: 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 Aline transect, Oyashio region, from 1990 to 1994. Bull. Hokkaido Natl. Fish. Res. Ins t., 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., Sutten T., and Patten J., 2001: A system for highresolution 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,筧 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. Plankron 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., Hargraves B. R., Kilham S. S., MacIsaac H. J., Matsushita K., Stemberger R. S., and Williams R., 1992: Nonvideo 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. *Linmol. 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 triestinium* 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 -VPRI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) カブトクラゲ目 (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) 有殼翼足目 (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) 甲殼亜門 (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

84

```
メトリディア科 (Metridindae)
```

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) 被嚢動物亜門(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(Asteroidae) 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

放散虫上綱

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)



2003.7.24 St.JB1 水梁384m

4mm

カノスフェラ科? (Cannosphaeridae?)



2004.6.29 St. A4 水深195m



1mm

2003.7.23 St. OY2 水深378m

1mm

フェオスフェラ目? (Phaeosphaerida)



2003.7.23 St. OY2 永深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?)

1mm





2003.7.23 St. OY2 本梁388m

2003.7.24 St. JB1 水菜355m



2004.7.2 St. A4W 水深486m

刺胞動物門 ヒドロクラゲ綱

Zmm 硬クラゲ目



2003.7.23 St. OY2 水源572m



2004.6.30 St. A4 水深297m



2003.7.21 St. OY1 水深501m



2003.7.25 St. JB1 水運188m



2003.7.21 Aglantha sp. ? St. OY1 水源500m

ヒドロクラゲ綱



2003.7.21 St. OY1 水深498m



2003.7.21 St. OY1 水深328m



2003.7.21 St. OY1 水深500m



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



2003.7.21 St. OY1 水深496m



2003.7.25 St.JB1 水束 86m



2004.6.29 St. A13 水深350m



2003.7.25 St. JB1 水深494m



2003.7.21 St. OY1 水深501m

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



2004.6.29 St A13 水深477m



ヒドロクラゲ綱

Zmm



St. OY1 水深308m



2003.7.24 St. OY2 水菜 90m

管クラゲ目



2003.7.21 St. OY1 水课498m



2mm

2003.7.21 SL OY1 木梁495m



2004.7.1 St. A4 木深486m

有触手綱

有櫛動物門

有触手綱

カブトクラゲ目



2003.7.23 St. OY2 水深268m





2004.7.1 St. A4 水菜114m



2003.7.25 St. JB1 水深361m



1mm

2mm

2003.7.25 St.JB1 水深438m



2003.7.23 SL OY2 水深494m



2003.7.25 St.JB1 水课 29m



2004.7.1 St. A4 水深491m



2003.7.21 St. OY1 水梁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 水源503m







2003.7.23 St. OY2 水沫 35m



2004.6.29 St A13 水東 26m

軟体動物門

腹足綱

有殼翼足目 2mm



2004.7.1 St. A4 水津 93m

裸殻翼足目 ハダカカメガイ科
4mm



2004.6.28 St. A13 水深491m



2003.7.25 St. JB1 水原483m

環形動物門

多毛綱



2007.7.1 St. A4 水深483m



Imm

2007.7.2 St. A4W 水深490m



2004.6.30 St. A4 水深398m

腹足綱/多毛綱
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 水漠468m



2003.7.21 St. OY1 水深483m



2003.7.21 St. OY1 水源500m

カイアシ亜綱

カラヌス目 ユウキー夕科 (Euchaetidae)

Paraeuchaeta sp. ?

1mm



2004.6.29 St A13 水菜392m



2004.7.1 St. A4 水菜469m



2004.7.1 St. A4 水深253m



2003.7.20 St. OY1 水菜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 水梁365m

カラヌス科 (Calanidae)

Neocal anus sp. ? 1mm



2004.7.1 VPR22 St.A4 水梁17m



2004.6.29 St. A13 水潭503m



2004.6.30 St. A4 水深495r







2003.7.23 St OY2 水県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

アミ目



2003.7.24 St. OY2 水菜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 水梁359m



2003.7.23 St. OY2 水渾401

軟甲綱

軟甲綱

オキアミ目 Euphausia sp. 2mm



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

毛頸動物門

2mm



2003.7.21 St. OY1 水深328m



2003.7.21 St. 0Y1 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

2mm



2003,7.21 St. OY1 水深500m



2003.6.28 St A13 水深181m



市川忠史

2003.7.21 SL OY1 水渠487m



2003.7.21 St. OY1 水梁483m



2003.7.21 5t. OY1 水深502m





2003.7.21 St. OY1 水深489m



2003.7.21 St. OY1 木菜482m

タリア綱

尾虫綱

尾虫綱

尾虫目

サイズチボヤ科 (Fritillaridae)



2003.7.24 St. OY2 水菜459m



2003.7.23 St. OY2 水理507m

尾虫目の虫体

2mm



2003.7.21 St. OY1 水彈330m

4mm



2003.7.21 St. OY1 水源501m



2003.7.21 St. OY1 水源505m

尾虫目?



2003.7.20 St. OY1 水源249m



2mm

2003.7.25 St. JB1 水深390m

その他の動物群

ヒトデ網



2003.7.20 St. OY1 水深409m

頭足綱 十腕形上目



2004.7.1 St. A4 水深421m



2003,7.22 St. OY1 水深365m

硬骨魚網 1mm



2003.7.23 St. OY2 水梁 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



水课 77m





1mm



水流134m





水流149m



水菜152m



水菜168m



水深199m



水深339m



水原399m



水深397m



水深402m



水深400m



水深414m



水深445m





木深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SLOY1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 481m



水菜 500m



水漂 508m

1mm



水课 473m

St.OY2 (2003.7.23) で記録





1mm

水漂 491m

水深 489m

SLJB1 (2003.7.25) で記録





水深 493m





水深 496m

水深 495m



木菜 492m



1mm



水深 333m

プランクトン現存量を把握し,分布構造と群集構造を 明らかにすることは重要な課題である。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では脆弱 な動物プランクトンの正確な現存量や詳細な分布構造 の把握は困難であり,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、こうした動物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ビデオプラ ンクトンレコーダー(VPRI)を用いた観測および解 析手法を確立し、その結果を用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ならびにカ イアシ類を中心としたメソ動物プランクトンの詳細な 鉛直分布構造を把握し、メソ動物プランクトンの群集 構造ならびに生物相互関係について考察することを目 的とした。

1. VPRIにおける画像取得条件の特性を把握し,定 量性の高いデータの取得に必要な手法を検討するため カイアシ類と管クラゲを用いた室内実験を行った。そ の結果,カイアシ類と管クラゲで合焦画像の取得条件 が異なること,複数の分類群の画像を確実に記録する ために非合焦画像も含めて記録する設定が不可欠であ ることが示された。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を選択するた 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有無を判断す る手法を開発した。一定の視野体積内の画像を客観的 に選択する手法を開発することで定量性の高いVPRII のデータ取得が可能となった。

2.動物プランクトン個体数把握におけるVPRIIの有 効性を検討するため,親潮域〜黒潮・親潮移行域にお いてVPRII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。ネット 採集で物理的な破損を受けにくいと考えられたカイア シ類個体数密度はVPRIIとMOCNESSの間に有意な正 の相関 (n=29, p<0.5)が得られた。一方,脆弱なヒ ドロクラゲ類およびクシクラゲ類は常にVPRIIで個体 数密度が高く,ネットに対するVPRIIの優位性が示さ れた。これに対し毛顎類,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VPRIIが高い場 合,逆にMOCNESSが高い場合のいずれも観測され, プランクトンの分布形態や逃避行動の影響,あるいは VPRIIの視野や照明など技術的な問題が影響したと考 えられた。

3. VPRIとプランクトンネット双方のデータを用 いて親潮域〜黒潮・親潮移行域のクラゲ類,クシクラ ゲ類の正確な現存量を見積もった。採集層別の平均現 存量は0.002~0.106mgC/m³(平均±標準偏差=0.035±

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

市川 忠史(中央水産研究所海洋生産部)

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 0.031, n=40) で, プランクトンネットの結果のみを 用いた場合より平均14倍高く(0.3~260, 標準偏差 =43.8, n=40), 従来のネット採集結果が過小評価で あったことが示された。カイアシ類現存量に対するク ラゲ類, クシクラゲ類現存量の割合は0.01~5.13%であ り, 1%以上となった深度は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, クシクラゲ類の日間餌料 要求量の割合は1.5%~5.4%と低かったが, クラゲ類が 群集団を形成した場合の影響は少なくないと考えられ た。

4. 親潮域~黒潮・親潮移行域においてクラゲ類、ク シクラゲ類と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ならびに生物相互関 係について考察した。カイアシ類の鉛直分布は連続的 で表層と躍層以深の北太平洋中層水(NPIW)内に複 数の分布極大層が存在したが、ヒドロクラゲ類、クシ クラゲ類の鉛直分布は断続的であった。NPIW内にお 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,以深)に存在し、26.8 σ,付近ならびに水塊 の水平貫入(または移流)があったと考えられた水塊 直下に出現する傾向があった。放散虫類もNPIW内で はカイアシ類と同様な分布が認められた。懸濁粒子の 鉛直分布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極大は放散虫、懸濁粒 子と同様に水塊構造による影響を受けていた可能性が 高く, また, 餌料環境と関係していた可能性も指摘さ れた。VPR Ⅱを用いた観測により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が示され た。

No.24, 23-104 (2008)