

黒潮海域における動物プランクトンの 小規模および中規模分布

加藤 聡*¹ 伊藤 信夫*² 郡司 光三*²
青木 一郎*³ 西田 周平*⁴

動物プランクトンの不均一分布を把握し、その要因を解明することを目的として、光学式プランクトン計測装置 (Optical Plankton Counter: OPC) を用いた調査を行った。まずOPCによる計測とネット曳きによるプランクトン採集とを行い、OPC計測データとネットサンプルから得られたプランクトン組成との比較を行った。その結果、OPCは等比換算球体直径が2mm以下の群集の定量的把握に適していることが明らかとなった。この知見をもとに、春季の黒潮海域において動物プランクトンの各深度層における小規模及び中規模水平分布を把握した。計測の結果、表層では小規模の不均一分布が観察された。深度が深くなるにつれ小規模の不均一分布はみられなくなり、よりスケールの大きい不均一分布となっていた。考察では深度により不均一分布の規模が異なる要因について論じた。

キーワード：動物プランクトン，光学式プランクトン計測装置，不均一分布

Small- and Meso-scale Zooplankton Distributions in the Kuroshio Area

Satoshi KATO*⁵ Nobuo ITO*⁶ Kozo GUNJI*⁶
Ichiro AOKI*⁷ Syuhei NISHIDA*⁸

Small- and meso-scale horizontal patchy distributions of the zooplankton community in the Kuroshio area, near eastern Japan, were measured by using an Optical Plankton Counter (OPC), aiming at elucidation of a main cause. First, OPC data were compared to the data obtained from net samples. The profiles of body lengths and individual numbers measured by OPC showed good agreement in the diameter range from 0.5 to 2 mm. On the basis of this information, long horizontal distributions (tens of kilometers scale) of the

-
- * 1 海域開発・利用研究部
 - * 2 日本海洋事業株式会社 (研究当時：海域開発・利用研究部)
 - * 3 東京大学大学院農学生命科学研究科
 - * 4 東京大学海洋研究所
 - * 5 Coastal Research Department
 - * 6 Nippon Marine Enterprises, Ltd.
 - * 7 Graduate School of Agriculture, University of Tokyo
 - * 8 Ocean Research Institute, University of Tokyo

zooplankton were observed at several depths. As a result, small-scale patches were observed at upper layers. As the layers went deep, the horizontal patchy scales got longer. We discussed the physical and biological factors which influenced the zooplankton patchy scale.

Key Words : Zooplankton, Optical Plankton Counter, Patchy distribution

1 はじめに

動物プランクトンの分布に関しては古くから研究が行われており、その分布が水平的及び鉛直的にランダムではなく不均一となっていることが明らかにされた（例えばHardy (1936)¹⁾; Longhurst *et al.* (1966)²⁾; Wiebe (1970)³⁾）。これらの研究はプランクトンネットを用いて行われてきたが、ネットを用いたサンプルから得られる個体数及び重量はろ過された水量の積算値であり、鉛直分布及び水平分布に関する定量的な知見を得ることは今なお難しい。

本研究ではプランクトンネットにより得られる情報を補完し、不均一分布の解明を進めることを目的として、光学式プランクトン計測装置 (Optical Plankton Counter (OPC), Focal Instruments, Canada) を用いて動物プランクトン調査を行った (写真1)。OPC原理の概略図を図1に示す。この装置は、幅250mm、高さ20mmのサンプリングトンネルの中を通るプランクトンを計測できる。Light transmitter sectionからは波長640nmの赤色光が発せられており、この光の中を通過したプランクトンは receiver sectionによって影として捉えられ、0.5秒間隔で個体数及び等比換算球体直径が記録される^{4), 5)}。この装置は曳航体 (Scanfish Mk II, Geological & Marine Instrumentation, Denmark) に取り付けられており、1~8ktで曳航することによって、直径が0.25mmから20mmまでの範囲にある動物プランクトンを計測することができる。この曳航体は水平曳航に加えて、設定された深度幅間で上下動を行う動作が可能である。

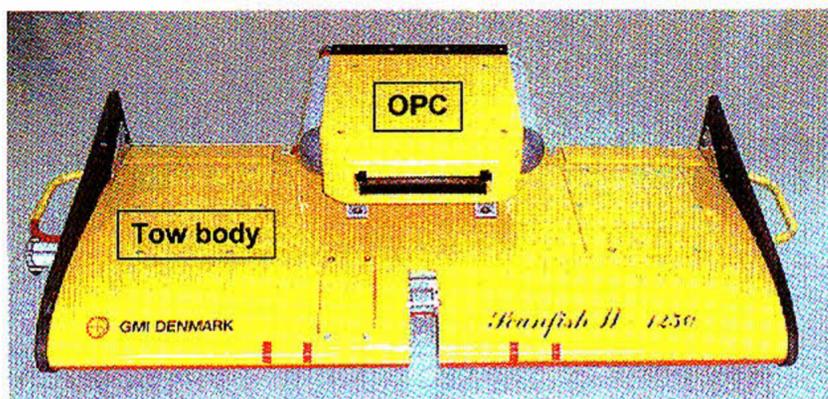


写真1 曳航体に搭載された光学式プランクトン計測装置
Photo.1 Optical plankton counter (OPC) mounted on the tow body.

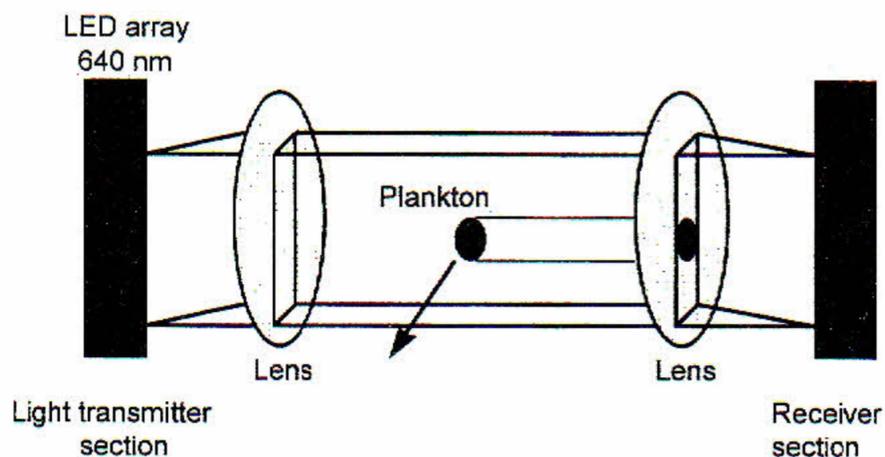


図1 光学式プランクトン計測装置の概念図 (Herman (1992) より改変)

Fig. 1 Diagrammatic representation of optical plankton counter (revised from Herman (1992)).

今後、OPCを現場計測に活用していくために、まずOPCによる計測とネット曳きによるプランクトン採集とを行い、ネットサンプルから得られたプランクトン組成とOPC計測データとの比較を行った。さらにその知見をもとに、春季の黒潮域において動物プランクトンの各深度層ごとの小規模 (数百m) 及び中規模 (数km~数十km) 分布を把握した。

2 調査方法

調査は東京大学海洋研究所研究船「白鳳丸」によるKH-96-2次航海上で、1996年5月23日及び24日に、伊豆沖合海域のLine A及びLine Cにおいて行った (図2)。日中、約35kmの距離を6ktの速度で沖合から沿岸に向かって曳航し、Line Aでは20~100m間を、Line Cでは10~140m間をそれぞれ上下動させて計測を行った。上下動の速度は0.5ms⁻¹に設定した。Line Cにおける計測時には曳航体にCTD (OS-200, Ocean Sensors, USA) を装着し、水温塩分の観測を行った。OPC計測後、この計測線上の一部分において目合い0.33mmのネットを取り付けた1+8型RMT (Rectangular Midwater Trawl) を用いて水平曳網を行い、各測線ごとに3層で動物プランクトンの採集を行った。これらOPC計測結果とRMTにより得られた試料の検鏡結果とを比較した。

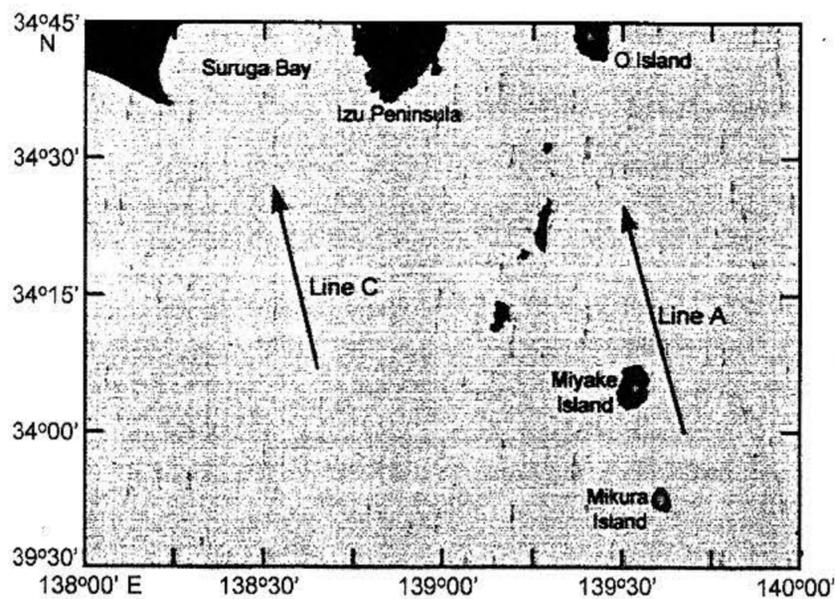


図2 黒潮海域における調査測線図 沖合から沿岸に向かって OPCを曳航した

Fig. 2 Location of sampling lines on the Kuroshio area, near east of Japan. OPC was towed from offing to coast.

3 結果

3.1 OPC計測結果とRMT試料解析結果の比較

KH-96-2次航海時に行った2測線の曳航体+OPCの航跡及びRMTの曳網深度を図3に示す。OPC計測結果とRMT試料の結果とを比較する際には、RMTの水平曳網場所とOPCの航跡とが交わる点のOPCデータだけを使用した。また、RMT試料から得られた体長組成には、各プランクトンの体長及び体幅から円体として体積を求め、等比球体直径に換算したものをを用いた。

OPCによる計測結果では、Line AにおいてRMTによる曳網を行った32, 54, 72m層のすべてで、直径0.3~0.5mmのサイズ範囲において最も個体数が多い(図4)、計測された全個体数に対して0.5mm以下の個体が71~80%を占めていた。直径が0.5mm以上の個体は大きくなるにつれ急激に少なくなり、1mmを超える個体はわずかしかなかった。Line CにおいてRMTによる曳網を行った41, 67, 98m層においても、直径が0.3~0.4mmの範囲の個体が最も多く記録されたが、全個体数に占める割合はLine Aに比べてやや低く(60~77%)、直径が1mmを超える個体が多かった(図5)。

RMTにより得られたプランクトン試料の結果では、個体数が多かったサイズ範囲はそれぞれの層で異なっていたが、いずれの層でも出現数が最も多かったサイズ範囲はOPCによって捉えられたサイズ範囲よりも大きかった。また、球体換算直径が0.5mm以下の個体が占める割合は低く、最大でも17%(Line A, 72m層)であった。0.5mm以下の粒子についてはマリンスノーによる影響が大きいことや、*Ceratium*などの植物プランクトンが多

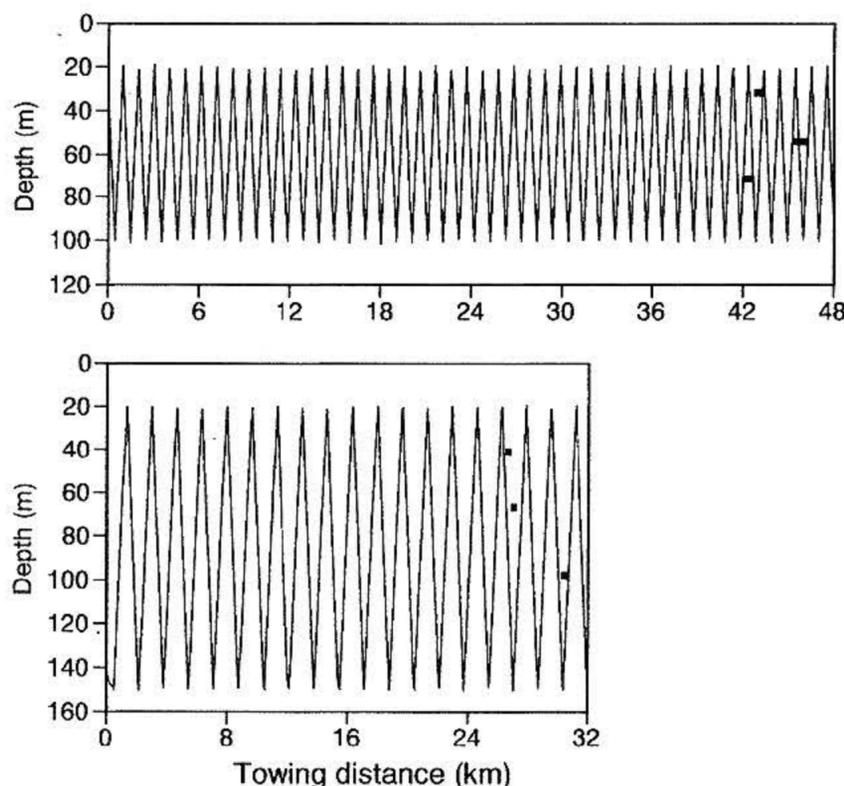


図3 Line A(上)及びLine C(下)におけるOPCの航跡(細線)とRMTの航跡(太線)

Fig. 3 Undulating paths of OPC (narrow lines) and towing paths of RMT (bold lines) on the Line A (top) and the Line C (bottom)

く存在する場合、0.25~0.5mmの範囲の粒子として捉えられることから、0.5mm以下の粒子を除外したほうがよい場合がある⁹⁾。今回捉えられた0.5mm以下の粒子のピークは、粒状有機物及び植物プランクトンに由来するものと推測できる。また、今回RMTに用いたネットの目合いは0.33mmであったが、このことによって0.5mmよりも小さい個体が採集できなかった可能性もある。いずれにしても直径が0.25~0.5mmの範囲にある粒子の特定ができなかったことから、本報告の中ではこの範囲にある粒子を除外し、0.5mm以上の粒子を大型動物プランクトンとして扱った。

Line Aにおいて、OPCによって得られた54m層における粒子のサイズ分布は動物プランクトンのサイズ分布と比較的よく似ていたが、32m層ではOPC計測粒子のサイズピークは動物プランクトンのピーク(1.15~1.2mm)よりも小さい0.5~0.55mmにみられた。また、72m層ではピークがみられたサイズには大きな違いはなかったが、ピークの高さ(個体数)についてはOPCの方が約7倍高かった。Line Cの67m層及び98m層ではそれぞれのサイズ分布とピークの高さは似ていたが、15m層ではRMT試料にみられた直径2mm以上の個体はOPCでは捉えられていなかった。また、41m層ではOPCによって0.85~1.2mmまでの間に40indiv.m⁻³を超える粒子が計測されたが、RMT試料中にはその範囲の動物プラン

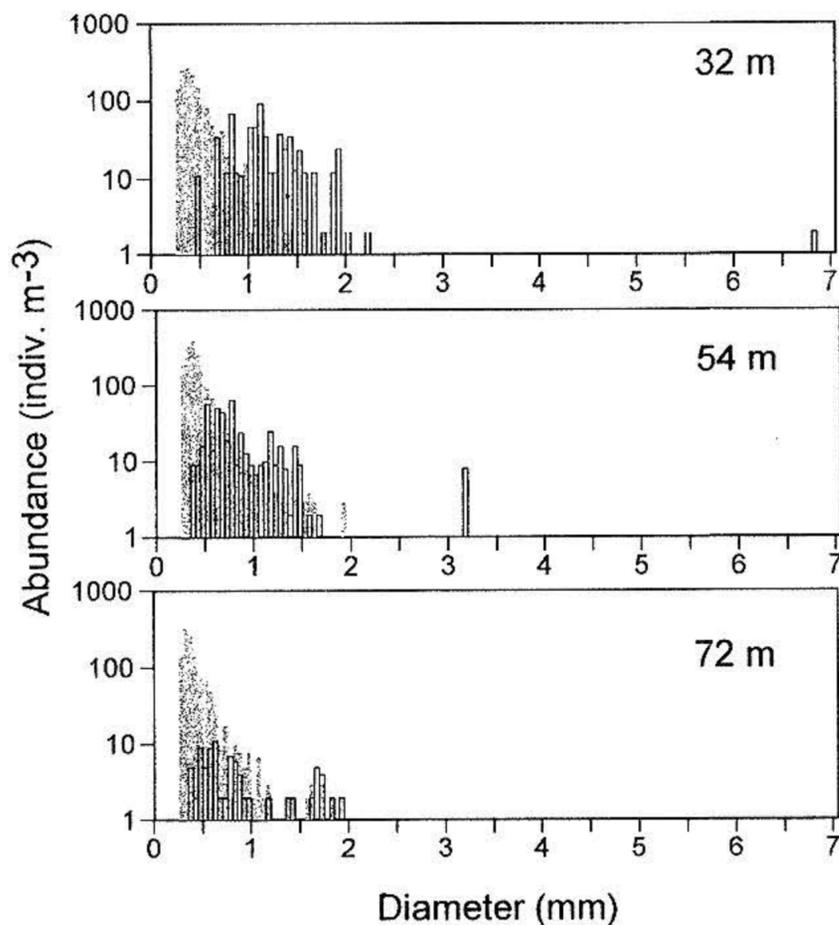


図4 Line AにおいてOPCにより計測された粒子のサイズ分布 (影の部分) 及びRMTから得られた動物プランクトンのサイズ分布 (縦棒)

Fig. 4 The equivalent spherical diameter distributions of particles as measured by OPC (shaded areas) and those of zooplankton obtained by RMT (bars) from 3 depths on the part of Line A.

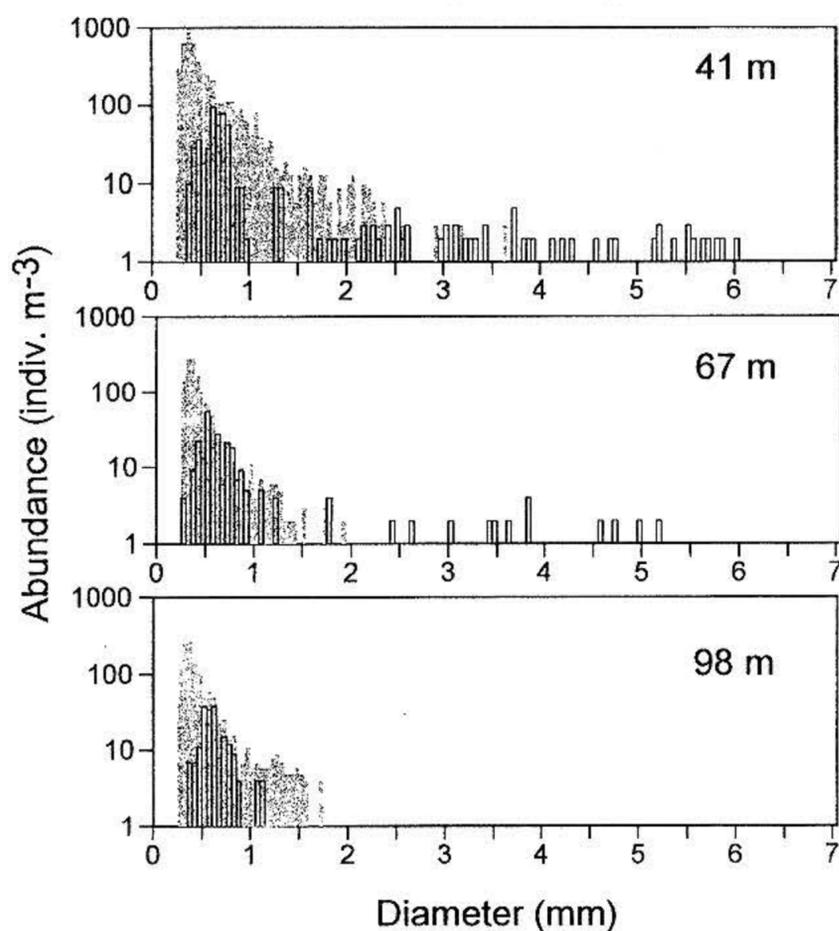


図5 Line CにおいてOPCにより計測された粒子のサイズ分布 (影の部分) 及びRMTから得られた動物プランクトンのサイズ分布 (縦棒)

Fig. 5 The equivalent spherical diameter distributions of particles as measured by OPC (shaded areas) and those of zooplankton obtained by RMT (bars) from 3 depths on the part of Line C.

表1 RMTにより得られた各動物プランクトングループの個体数 (indiv. m⁻³)

Table 1 Abundances of zooplankton groups in individual number (indiv. m⁻³) obtained by RMT.

Group	Line A			Line C		
	32 m	54 m	72 m	41 m	67 m	98 m
Amphipoda	2	1	1	0	0	0
Appendicularia	1	0	0	3	0	0
Copepoda	567	388	81	435	212	185
Euphausiacea	3	3	1	0	0	1
Gastropoda	1	2	0	1	2	0
Hydroida	0	0	0	0	0	0
Macrura	3	0	0	0	0	0
Mysidacea	0	0	0	0	0	0
Ostracoda	2	55	2	12	9	4
Polychaeta	0	1	1	3	2	2
Sagittidea	28	14	8	83	53	6
Salpida	0	1	1	6	0	1
Siphonophora	4	1	0	1	1	5

表2 RMTにより得られた各動物プランクトングループの平均等比球体直径 (mm)

Table 2 Average equivalent spherical diameters (mm) of zooplankton groups obtained by RMT.

Group	Line A			Line C		
	32 m	54 m	72 m	41 m	67 m	98 m
Amphipoda	1.051	0.865	1.347	-	-	-
Appendicularia	1.124	-	-	3.212	-	-
Copepoda	1.162	0.855	0.827	0.686	0.630	0.622
Euphausiacea	1.400	1.260	1.440	-	-	1.020
Gastropoda	1.386	2.504	-	4.263	3.444	-
Hydroida	-	-	-	-	-	-
Macrura	2.549	-	-	-	-	-
Mysidacea	-	-	-	-	-	-
Ostracoda	0.822	0.772	0.712	0.658	0.677	0.710
Polychaeta	-	1.319	1.263	1.476	0.922	1.034
Sagittidea	1.902	2.036	2.232	3.644	3.783	2.554
Salpida	-	5.497	4.494	3.192	-	4.288
Siphonophora	2.026	3.557	-	3.265	1.939	1.939

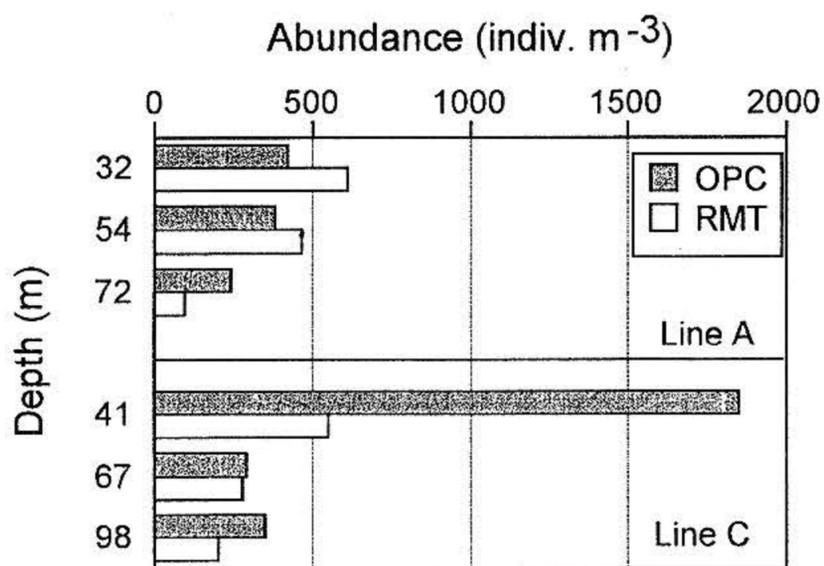


図6 Lines A及びCの各層において、OPCにより計測された直径0.5mmから20mmまでの粒子数及びRMTにより得られた動物プランクトンの個体数

Fig. 6 Numbers of particles from 0.5 to 20mm in diameter measured by OPC and zooplankton abundances obtained by RMT on the part of Lines A and C.

クソンはほとんど出現しなかった。

この海域に出現した動物プランクトングループのうち、Lines A, Cともにcopepodaが卓越していた(表1)。また、出現したcopepodaの各層における平均球体直径は0.622~1.162mmの範囲にあった(表2)。また、球体直径が大きいグループとしてはsagitta類(1.902~3.783mm)が多くみられた。これらのことから、0.5~2mmのサイズ範囲では主としてcopepodaによって、それ以上のサイズ範囲ではsagitta類によってピークが形成されていたと考えられる。

2測線の各層において、OPCによって得られた0.5~20mmのサイズ範囲の粒子数と、RMTによって得られた全動物プランクトン個体数とを比較すると、Line Aの72m層及びLine Cの41m層では、RMT試料から得られた動物プランクトン個体数はOPC計測粒子数の約1/3であり、大きく異なっていたが、その他の採集層では動物プランクトン個体数はOPC計測粒子数の0.6~1.4倍の間に収まっていた(図6)。

3.2 黒潮海域における動物プランクトンの小規模及び中規模分布

Line Aの20m及び40m層では、沖合から沿岸域にかけて300~800indiv. m⁻³の範囲内で個体数の増減が起こっていた(図7)。最も沿岸に近い海域では個体数が急激に増加し、最後の計測時には約1200indiv. m⁻³に達した。個体数の平均値は20m層及び40m層でそれぞれ558514indiv. m⁻³であった。平均値と計測値を結んだ線とが交わる点数は17及び21点であった。60m層では個体数は170~760indiv. m⁻³の間で増減を繰り返したが、上層と同様に曳航距離46km付近から急激に増加した。個体数の平均値(425indiv. m⁻³)と計測値を結んだ線とが交わる点数は9点であった。80m及び100m層では100~700indiv. m⁻³の範囲内で個体数の増減が起こっており、平均値は上3層よりも低かった。80m層及び100m層において個体数の平均値と計測値を結んだ線とが交わる点数はそれぞれ7点及び3点であった。

Line Cの20m層では曳航距離6km及び12kmの地点で個体数の著しい増加がみられた(図8)。平均値(2722indiv. m⁻³)と計測値を結んだ線とが交わる点数はわずか3点であった。40m層では個体数が曳航区間を通じて534~2934indiv. m⁻³の間で増減を繰り返した。個体数の平均値(1693indiv. m⁻³)と計測値を結んだ線とが交わる点数は19点であり、Line Aと同様に交差点数が最も多かった。60m層では曳航開始から8kmまでは計測された

個体数は少なく(<500indiv. m⁻³)、変動も小さかったが、8km以降は増加するとともに、500~3000indiv. m⁻³の範囲内で増減を繰り返した。個体数の平均値(717indiv. m⁻³)と計測値を結んだ線とが交わる点は10点であった。80m、100m及び120m層では、曳航距離8kmから24kmにかけて個体数の変動が大きかったが、そのほかの区間で計測された個体数は少なく(<300indiv. m⁻³)、変動も小さかった。また、深度が深くなるにつれ変動幅は小さくなった。個体数の平均値と計測値を結んだ線とが交わる点数は80m、100m及び120m層でそれぞれ14、10、7点であった。140m層では80~120m層と同様に、曳航距離0~10kmの間では個体数が少なく(<200indiv. m⁻³)、変動も小さかった。また、10kmから22kmにかけては各計測点間で平均値を超える変動がみられた。22kmから32kmにかけては80~120m層とは異なり変動が大きかった。個体数の平均値(227indiv. m⁻³)と計測値を結んだ線とが交わる点数は7点であった。

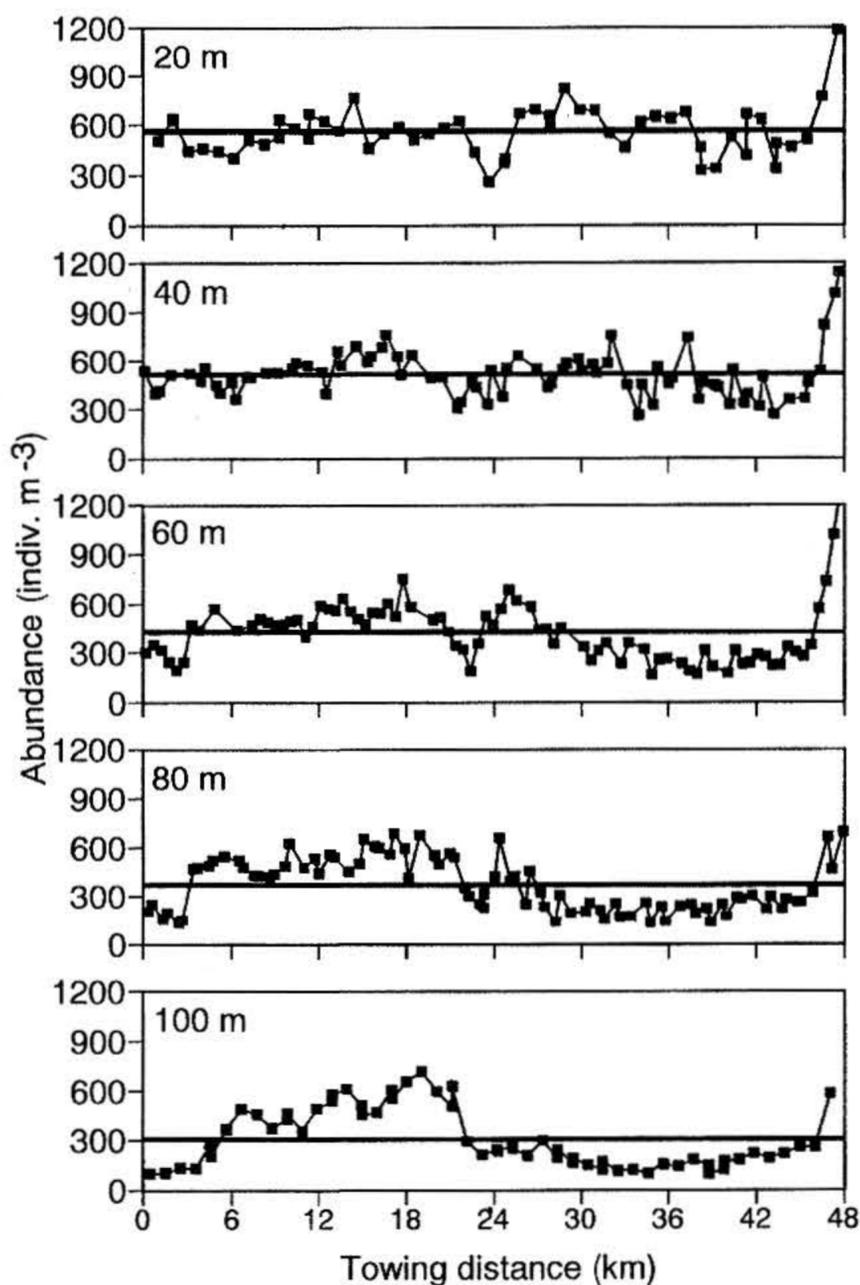


図7 Line Aの各層における動物プランクトン群集の不均一分布及びそれらの平均値(太線)

Fig. 7 Patchy distributions of zooplankton communities and the average abundances (bold line) of the each layers on the Line A.

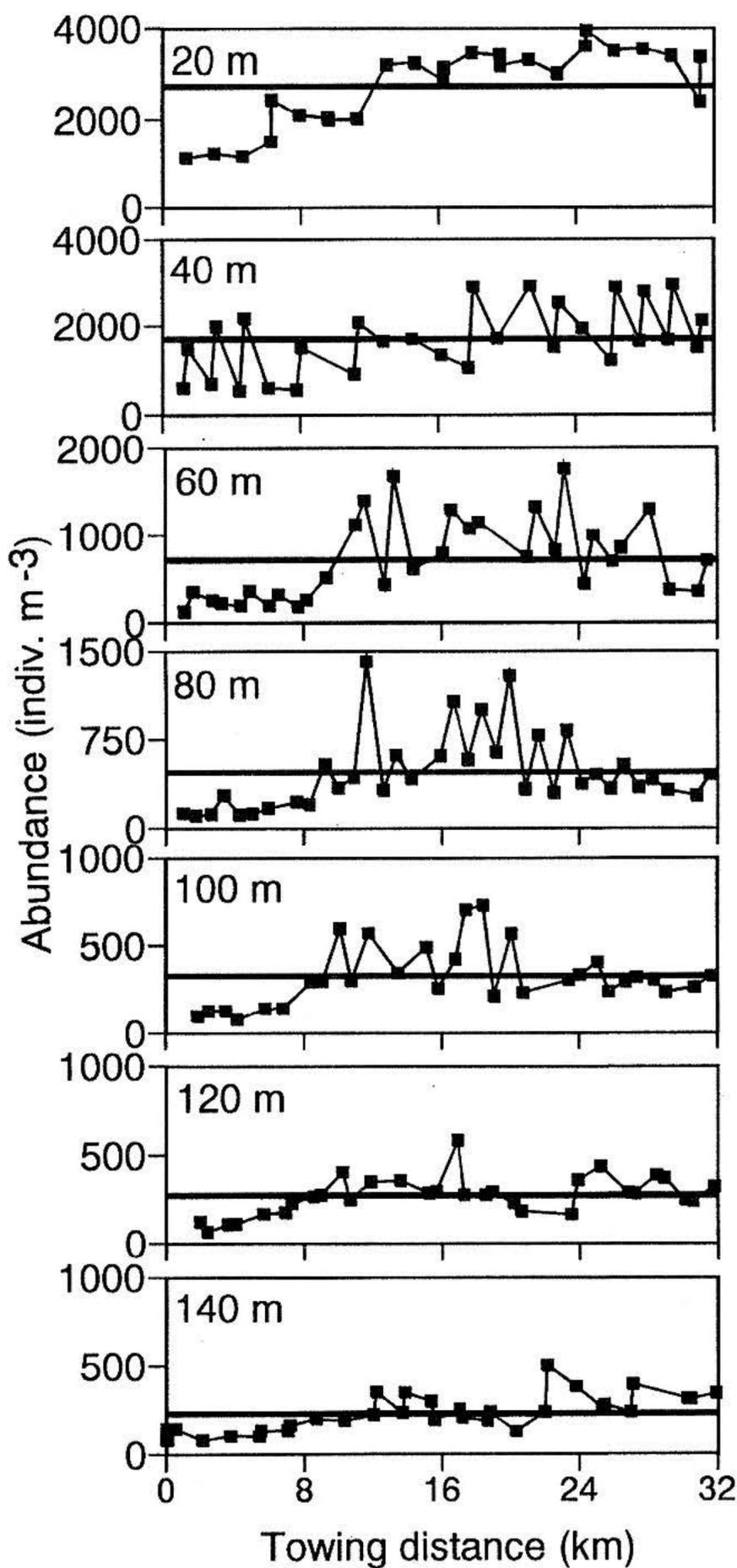


図8 Line Cの各層における動物プランクトン群集の不均一分布及びそれらの平均値(太線)

Fig. 8 Patchy distributions of zooplankton communities and the average abundances (bold line) of the each layers on the Line C.

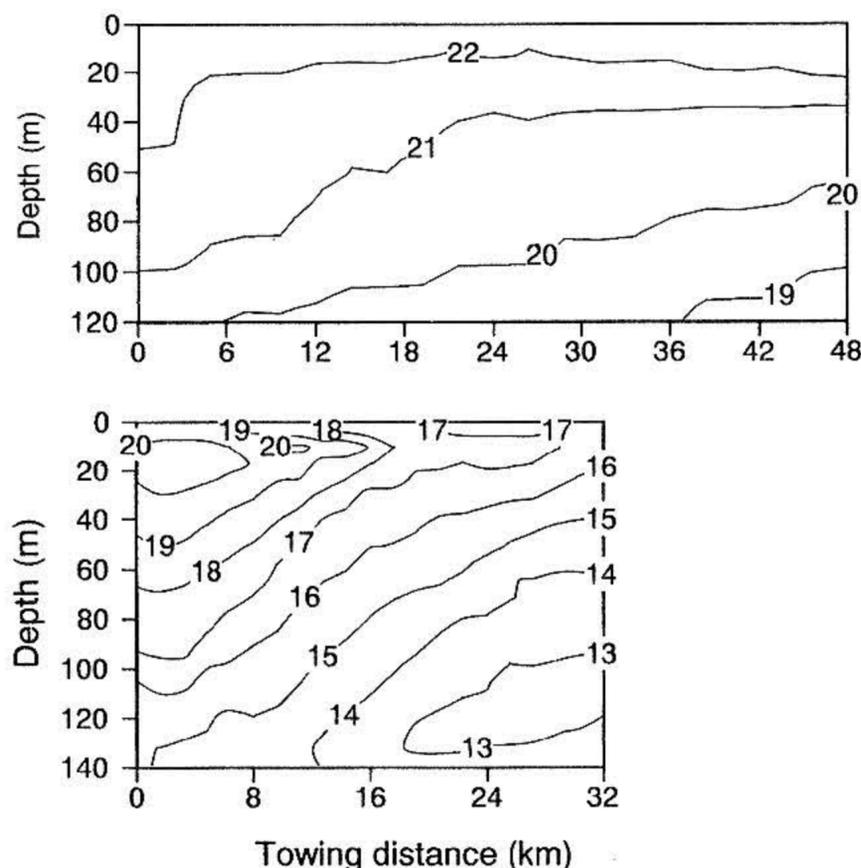


図9 Line A(上)及びLine C(下)における水温の鉛直断面図 Line AではXBTを用いて、Line Cでは曳航体に搭載されたCTDにより、それぞれ計測を行った

Fig. 9 Distributions of temperature (°C) in vertical section measured by XBT on the Line A (top) and by CTD mounted on the tow body on the Line C (bottom).

3.3 調査測線の水温分布

Lines A, Cにおける水温の鉛直断面図を図9に示す。Line AについてはXBTにより得られた値を、Line Cについては曳航体に搭載されているCTDの値をそれぞれ用いた。Line Aでは全曳航測線を通じて表面から120m層までの水温変化は小さく、18.7~22.2°Cの範囲内にあった。Line Cでは曳航開始点にみられた20m以浅層の20°Cを超える水塊の下層に、曳航距離36~48km、深度100~120m層間に存在していた13°C以下の低温水塊が潜り込んでおり、Line Aに比べて水温変化が大きかった。

4 考察

4.1 OPC計測結果とRMT試料解析結果との比較

OPCを用いて計測した粒子数とネット採集により得られた個体数が異なる場合、OPCによる動物プランクトン以外の粒子の計測、OPCのサンプリングトンネルの面積とRMTネットの面積の違い、OPCが発する光に対するプランクトンの走行性、プランクトンの視覚による計測機器からの逃避、が主たる原因として考えられる^{5,7)}。

今回の調査では、各層において動物プランクトンの最小直径と仮定した0.5mmよりも小さい粒子がOPCにより

計測された全粒子数の約70%を占めていた。この部分は大型植物プランクトン及び粒状有機物によって占められていたとすると、ブルームの時期の調査では大型植物プランクトンに、沿岸域で使用する場合には粒状有機物の存在をそれぞれ考慮して計測を行う必要がある。また、OPCによる計測を行う際にはプランクトンネットによる採集を行い、優占する植物及び動物プランクトン群集を把握し、それによって最小サイズを調査海域に合わせた値を検討する必要がある。

OPCのサンプリングトンネルの面積とRMTの網口面積の違いについては、OPCのサンプリングトンネルの面積が0.005 m²であるのに対して、RMTの面積は1 m²であり、双方が大きく異なっている。このことが今回の計測においてsagitta類に代表される等比換算球体直径が2 mmを超える群集がOPCでは捉えられなかった原因と考えられる。一方、直径が2 mm以下の個体については、双方の体サイズ分布に良い対応がみられたことから、OPCはamphipoda, copepoda, euphausiacea類の定量的把握に適していると考えられる。

OPCが発する光に対するプランクトンの走行性については、波長640nmの光源を搭載したネットを用いた比較実験が行われており、その結果から光によるプランクトンの走行性による影響は小さいと報告されている⁹⁾。

プランクトンの視覚による計測機器からの逃避については、OPCは通常のプランクトンネット曳網速度(1ms⁻¹)の3~4倍の速度で曳航できることから、OPCを用いた場合、計測機器から逃避する割合はネットよりも少なくなると考えられる。

4.2 黒潮海域における動物プランクトンの小規模及び中規模変動

Lines A, Cの各層において、動物プランクトン群集の中規模分布は非ランダムであった。Line Aでは平均値と計測値を結んだ線とが交わる点の数は上層から順に17, 21, 9, 7, 3であり、40m層より下層では徐々に減少した(図7)。Line Cにおいても80m以深ではLine Aと同じく、深度が深くなるにしたがって平均値と計測値を結んだ線とが交わる点の数は減少し、それぞれ14(80m層), 10(100m層), 7(120m層), 7(140m層)であった(図8)。このことは上層において数百mから数kmのスケールの不均一分布が卓越し、深度が深くなるにしたがってこのスケールの不均一分布はみられなくなり、数十km単位のよりスケールの大きい不均一分布となっていたことを示している。なお、Line Cの20m層において

交差した点の数がわずか3点であるのは、曳航距離6 km及び12kmの地点において個体数が著しく増加したためである。これは水温分布から、この層においてそれぞれ異なる水塊が存在していたことによると考えられる(図9)。

動物プランクトンが数mmから数百mのスケールで不均一分布を形成していることは、Cassie (1959)⁸⁾; Wiebe (1970)⁹⁾; McGowan (1971)⁹⁾; Smith (1976)¹⁰⁾; Mackas *et al.* (1985)¹¹⁾; Davis *et al.* (1992)¹²⁾などにより報告されている。また、Cushing and Tungate (1963)¹³⁾は小規模の不均一分布に加えて60~100kmの動物プランクトンの不均一分布を見出した。不均一分布のスケールを決定する要因については、数百m以下のスケールではラングミュア循環流による群集の集合と離散及び捕食集合などが、数kmから数十kmのスケールでは日周鉛直移動、捕食、被捕食及び増殖などが挙げられている¹³⁾。本調査はLine Aについては8時から12時にかけて、Line Cについては10時から14時にかけてそれぞれ行ったことから、日周鉛直移動の影響は少なかったと考えられる。動物プランクトンの捕食、被捕食及び増殖は表層に限らずすべての層で起こっていることから、数kmから数十kmのスケールの不均一分布も、表層から深層までのすべての層で起こっていると考えられる。一方、ラングミュア循環流による集合と離散及び捕食集合行動は海面の風の影響が及ぶ表層に限られる。したがって、数百m以下の不均一分布は主として表層に形成され、その頻度が高いためにより大きなスケールの不均一分布を覆い隠していたと推察される。

5 おわりに

本研究で用いた装置は、数十kmの距離にわたり、異なる深度層の動物プランクトン分布を把握できる数少ない測器である。これにより水平及び垂直方向のデータを蓄積していくことによって、動物プランクトンの分布に関するさらに詳しい知見が得られると期待できる。今後は、動物プランクトン群集の季節による分布パターンの違い、及び日周鉛直移動について調査、解析を行っていく予定である。

なお、本調査を行うにあたり、東京大学海洋研究所研究船「白鳳丸」の船長及び乗組員の方々から非常に多くの協力をいただき、本調査を遂行することができました。ここに記して厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) Hardy, A. C.: The continuous plankton recorder. Discovery Report, 457-510. (1936)
- 2) Longhurst, A. R., A. K. Keith, R. E. Bower and D. L. R. Seibert: A new system for the collection of multiple serial plankton samples. Deep-Sea Research, **24**, 385-397. (1966)
- 3) Wiebe, P. H.: Small scale spatial distribution in oceanic zooplankton. Limnology and Oceanography, **15**, 205-217. (1970)
- 4) Herman, A. W.: Simultaneous measurement of zooplankton and light attenuation with a new optical plankton counter. Continental Shelf Research, **8**(2), 205-221. (1988)
- 5) Herman, A. W.: Design and calibration of a new optical plankton counter capable of sizing small zooplankton. Deep-Sea Research, **39** (3/4), 395-415. (1992)
- 6) Herman, A. W.: Detection and abundance estimation of euphausiids using an optical plankton counter. Marine Ecology Progress Series, **94**, 165-173. (1993)
- 7) Huntley, M. E., M. Zhou and W. Nordhousen: Mesoscale distribution of zooplankton in the California Current in late spring, observed by Optical Plankton Counter. J. Marine Research, **53**, 647-674. (1995)
- 8) Cassie, R. M.: Micro-distribution of plankton. New Zealand J. Science, **2**, 398-409. (1959)
- 9) McGowan, J. A.: Oceanic biogeography of the Pacific. p3-74. In: The micropaleontology of oceans. Edited by B. M. Funnell and W. R. Riedel, University Press, Cambridge. (1971)
- 10) Smith, L. R., C. B. Miller and R. L. Holton: Small-scale horizontal distribution of coastal copepods. J. Experimental Marine Biology and Ecology, **23**, 241-253. (1976)
- 11) Mackas, D. L., K. L. Denman and M. R. Abbott: Plankton patchiness: biology in the physical vernacular. Bulletin of Marine Science, **37**(2): 652-674. (1985)
- 12) Davis, C. S., S. M. Gallagher and A. R. Solow: Microaggregations of oceanic plankton observed by towed video microscopy. Science, **257**, 230-232. (1992)
- 13) Cushing, D. H. and D. S. Tungate: Studies on a calanus patch. I. The identification of a calanus patch. J. Marine Biology Association United Kingdom, **43**, 327-337.

(原稿受理 : 1997年6月3日)