Nippon Suisan Gakkaishi　　**78**(5), 903–912 (2012)

レーザー式プランクトンカウンター（Laser Optical Plankton Counter, LOPC）による動物プランクトン群集に対する種別計測に関する検討

山下由起子,[1] 藤 森 康 澄,[2*] 向 井　徹,[2] 清 水　晋[2]

（2011 年 9 月 2 日受付，2012 年 5 月 18 日受理）

[1]長崎大学大学院水産・環境科学総合研究科，[2]北海道大学大学院水産科学研究院

Performance of laser optical plankton counter (LOPC) for *in situ* measurement of multispecies aggregation of zooplankton

YUKIKO YAMASHITA,[1] YASUZUMI FUJIMORI,[2*] TORU MUKAI[2] AND SUSUMU SHIMIZU[2]

[1]*Graduate School of Fisheries Science and Environmental Studies, Nagasaki University, Bunkyo, Nagasaki 852–8521,* [2]*School of Fisheries Sciences, Hokkaido University, Hakodate, Hokkaido 041–8611, Japan*

The Laser Optical Plankton Counter (LOPC) has been used to evaluate abundance structure of micro-organisms like a zooplankton speedy. The sea experiments were conducted at twelve stations near Funka Bay, Hokkaido to examine the performance of the LOPC for *in situ* measurement of multispecies aggregation of zooplankton. The LOPC was mounted with ring net (80 cm mouth diameter) and towed vertically. Size and volume composition data of LOPC and net samples were compared each other. The particle size composition detected by the LOPC showed similar pattern with wet weight composition of copepods and amphipods in net samples. However, the ranges of equivalent spherical diameter of these species were overlapped. To measure *in situ* zooplankton community by species using LOPC, the measurement properties of each particle by specie should be identified and discriminated from LOPC data.

キーワード：LOPC，鉛直分布，動物プランクトン，モニタリング，レーザー式プランクトンカウンター

動物プランクトンの調査では，従来からプランクトンネットなどに代表される採集用漁具が用いられてきた。この手法は，得られる採集物の体サイズや生物学的特徴などを直接に調べられるので，さまざまな調査・研究に利用されている。しかし，曳網調査で得られる定量的情報は，濾水した水柱に対してのみに限られる。空間的・時間的に高分解能な情報，すなわち，広域に分布する動物プランクトンについて詳細な分布情報を得るためには，多くの努力量が必要となる。さらに，採集物の分析（同定，計数，計量）には多くの時間や労力を要する。また，動物プランクトンは一様に存在せず，パッチを形成し，さまざまな体サイズ/時間/空間スケールで存在するため，採集用漁具だけでこれらの分布に対応したモニタリングを行うのは困難である。

そこで，広範囲に分布する動物プランクトンの生物量をリアルタイムに把握するため，これまで音響や光を利用した水中リモートセンシングの技術が開発されてきた。[1–3] 現在調査船などで広く搭載されている計量魚群探知機やドップラー式流向流速計（Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP）に代表される音響系の測器は，音波が届く限り広範囲を把握することができ，魚類や大型の動物プランクトンの分布量計測に有用である。ただし，音響測器の計測対象となった生物の種や体サイズ，生物量を確認するために採集法を併用しており，調査にはやはり多くの時間や労力が必要である。一方，動物プランクトンを対象とした光学系の測器では，画像記録系の測器であるビデオ式プランクトンレコーダー（Video Plankton Recorder, VPR）[4] や，粒子検出系の測器である光学式プランクトンカウンター（Optical Plankton Counter, OPC）[5,6] が普及してきている。VPR は海中生物の画像記録をとりながら水中を曳航でき，日本ではクラゲ類などネット採集では壊れやすい生物の調査に主に活用されている。[7] しかし，画像データの処理速度，画像記録面積，VPR 曳航中の撮影照明光によるプランク

* Tel : 81–138–40–8829. Fax : 81–138–40–8829. Email : fujimori@fish.hokudai.ac.jp

トンの逃避などの問題から，海洋観測では今のところ一部の小型動物プランクトン種に対してのみ用いられている。一方，OPCはプランクトン（粒子）が計測部の光ビーム内を通過する際に生じる遮光量を光学センサーによって検出し，4096段階のデジタルサイズユニットに分別した遮光量から半経験的非線形回帰式[6]を用いて通過物体のサイズを等価球直径（Equivalent Spherical Diameter, ESD）に換算する（計測サイズ範囲：250～20000 μm）。リアルタイムにサイズ階級ごとの粒子数を記録できるため，動物プランクトンの生物量の連続的な計測器として用いられる。OPCには曳航型（submersible type）と設置型の2種類があり，曳航型LOPCを用いて北西部大西洋[8]，イベリア海[9]，インド洋[10,11]などにおいて広域な動物プランクトンの分布を調べた研究例がある。日本では，設置型OPCが調査船の表層モニタリングシステムの一部や研究室の計測装置として普及しており，市川ら[12]はポンプで汲み上げた表層水から親潮水域および混合水域の動物プランクトン現存量を調べている。また，横井ら[13]は設置型の一種である実験室型OPCユニットを用いて過去のホルマリン固定試料の分析を行い，初夏の西部北太平洋における動物プランクトン群集構造を解析している。

OPCは計測部を通過する粒子の遮光量を検出するという計測原理上，計測対象となった粒子の生物種を遮光量から判定することはできない。しかし，種組成が単純な海域で，かつ，採集法によってそれらの種が特定出来る場合は，粒子サイズ範囲から優占種を推察できることが報告されている。[6] そのため，調査対象とする生物種に該当する粒子サイズを対象生物の分布量として分析する方法がとられる場合が多い。また，対象生物を決めずに，調査海域のサイズ別生物量の変化から動物プランクトンの群集構造の変化を調べる研究事例も多く見られる（例えばZhou and Huntley,[14] Herman and Harvey,[15] Yurista *et al.*[16]）。このような研究は曳航型LOPCを用いて非常に広域なスケールで行われているものが多い。

近年Herman *et al.*[17]はOPCの問題点のいくつかを改良したレーザー式OPC（Laser Optical Plankton Counter, LOPC）を開発した。LOPCの基本的な計測原理はOPCと同様だが，用いる光源と受光部およびマイクロプロセッサが改良され，単体検出性能（粒子密度～10^6個 m^{-3}）と検出サイズ範囲（15 μm単位，100～35000 μm）が向上した。LOPCでも計測対象となった生物種は確認できないが，1500 μm以上の粒子についてはその輪郭の再現が可能となった。このことから，LOPCでは，おおまかな生物種の特定も期待されるところである。曳航型LOPCを用いた調査例としては，南カルフォルニア湾における頭胸甲長1 mm以上の大型カイアシ類（*Metridia pacifica*成体，*Calanus pacificus* C5と成体，*Pleuromamma borealis*成体など）の分布量の解析[18]やコロンビア川の河口付近における群集構造の調査[19]があるが，いずれもOPCを用いた研究事例と同様に既知の優占種のみを対象として解析を行なっており，対象種以外も含めた種判別には触れていない。しかし，OPCより対象サイズ範囲が広く分解能の高いLOPCでは，計測データからの種判別およびそのサイズ組成の推定を行うことも不可能ではないと考えられる。

本研究では，地点によって優占する動物プランクトンが変化すると思われる北海道噴火湾湾口付近において，曳航型LOPCを用いて海水中に分布する動物プランクトンを計測し，LOPCの粒子の計測特性を調べた。さらにLOPCによる計測と同時にプランクトンネットによるプランクトン採集を行い，両者の計測結果の比較から，LOPCによって種別の動物プランクトンのサイズ組成を得るための解析方法について検討を行った。

試料および方法

LOPCの計測原理[17] LOPCはレーザー光による計測面を備えたサンプリングトンネル（7×7 cm）と光センサー本体で構成される（Fig. 1a）。LOPCの曳航中はアーマードケーブルを介して電力の供給，データ通信が行われ，リアルタイムに計測データが取得される。レーザー光による計測面は，レーザービーム（35 mm幅，1 mm厚）の放射ビームと，ミラーを介した反射ビームによって，70 mm平方の有効計測範囲を構成している（Fig. 1b）。レーザー光の出力は光センサー本体のマイクロプロセッサで一定の強さに調整されている。フォトダイオードアレイは反射ビームを受光し，35 μsごとに光量変化を感知する。計測面を通過するプランクトン（粒子）は，粒子が光を遮ることによって生じる光量変化で検出される。フォトダイオードアレイには長さ4 mm，幅1 mmのフォトダイオードエレメント（以下，エレメントとする）が35個配置され，通過粒子がレーザービームを遮った位置も検出される（Fig. 1c）。なお，遮光量はエレメントごとに214段階で検出され，信号レベル100未満のものはノイズであるとして検出しても出力されないように設定されている。通過粒子の大きさは，各粒子に由来する遮光量を元に換算して求めるが，詳細は次で述べる。

LOPCの計測データの解析とバイオマスの算出法 LOPCによって検出された粒子は，光量変化を検出したエレメントの数によって機械的に2種類に分けられ，それぞれ異なった形式で出力される。そのため，粒子サイズの換算方法など，計測データの解析方法もそれぞれ異なる。2つ以下のエレメントで検出される粒子はsingle-element particle（SEP），3つ以上のエレメントで検出される粒子はmulti-element particle（MEP）に

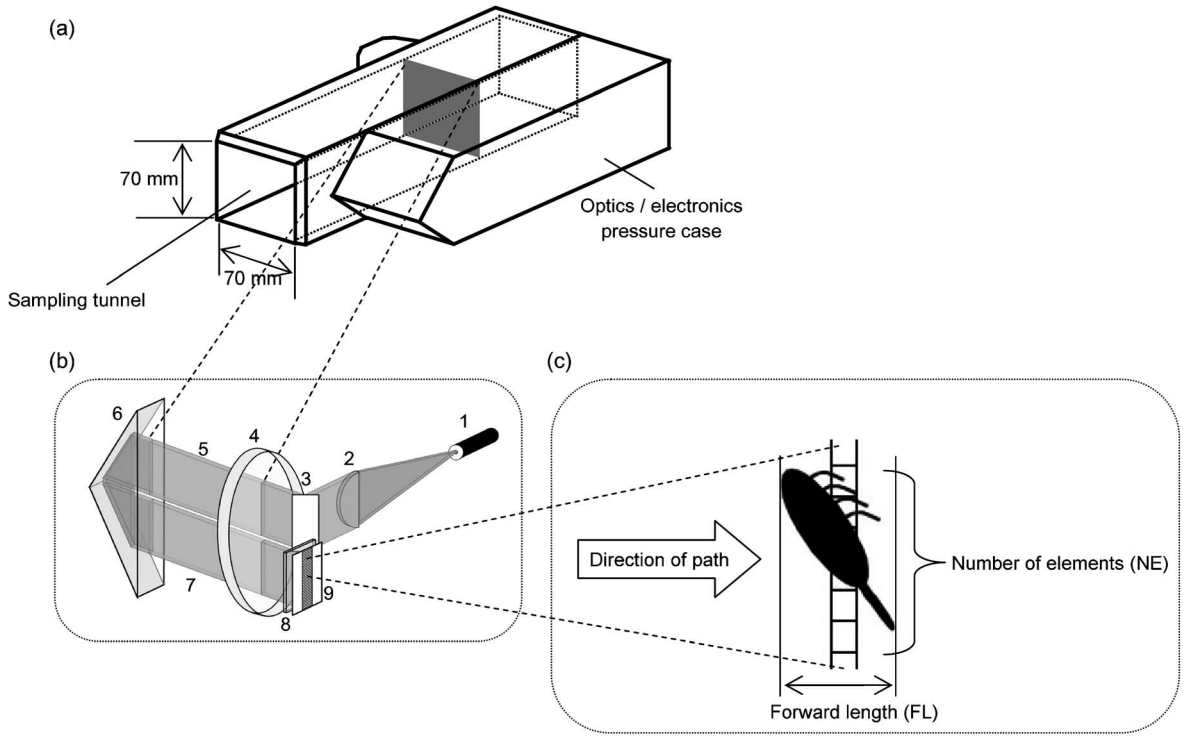

Fig. 1 Schematic diagram of (a) the LOPC housed in its pressure case and sampling tunnel, (b) operating principle of the parallel light beam emerging from a laser diode and its return path reflected onto a multi-element photodiode and (c) schematic diagram of multi-element plankton and its shape indices that represents forward length (FL) and number of elements (NE) (modified from Herman et al. 2004). 1, Laser diode line generator; 2, cylindrical lens; 3, mirror; 4, window (air-water interface); 5, emitting light beam (1×35 mm cross-section); 6, reflecting prism; 7, returning light beam (1×35 mm); 8, filter; 9, 35–element photodiode.

区別される。本研究では，LOPC で検出したすべての SEP と MEP について，粒子数を LOPC カウント，各粒子の体積から比重を 1.00，体積＝質量と仮定して算出した重量を LOPC バイオマスとして求め，LOPC データとした。

SEP の計測データは，筐体に内蔵されているマイクロプロセッサにより，計測間隔 0.5 秒（2 Hz）ごとに，15 μm 幅，128 階級の等価球直径（ESD，有効最小階級値は ESD 105～120 μm，最大階級値は 1920 μm）に分けて計数，出力される。SEP については，計数されている ESD 階級の中央値を ESD 階級値とし，これを直径とする球体（比重は 1.0，体積＝質量と仮定）に近似して各粒子の LOPC バイオマスが算出される。

一方，3 つ以上のエレメントで検出される粒子 MEP は，粒子を検出したエレメントごとにエレメントの位置，遮光量，検出時間（検出開始時刻と検出間隔）が記録され，検出される都度その計測時刻の SEP データの出力と同時に MEP に関するデータとして出力される。ここから，粒子サイズである ESD に加えて，MEP の通過形状を表す指標として，MEP を検出したエレメントの数 Number of Elements（NE, 1 mm 単位）と粒子が計測面を通過する時の通過方向の長さ Forward Length（FL）の 2 つを算出する（Fig. 1c）。

MEP の ESD（単位：μm）は，粒子を検出したエレメントの数を i，各エレメントが検出した遮光量を DS_k（$k=1, ..., i$），総遮光量を DS とする開発者 Herman 博士による解析法（http://www.alexherman.com/pdf/LOPC_AnalysesMethods_V104.pdf）によって求めることができる。

$$ESD = a_1 + a_2 \cdot DS + a_3 \cdot DS^2 + a_4 \cdot DS^3 \quad (1)$$

$$DS = \sum_{k=1}^{i} DS_k \quad (2)$$

なお，$a_1 = 0.1806059$, $a_2 = 0.00025459$, $a_3 = -1.10988 \times 10^{-9}$, $a_4 = 9.54 \times 10^{-15}$ である。この時のエレメントの数 i が NE である。また，計測面通過方向の長さ FL は，検出時間とサンプリングトンネル内流速 F_S を用いて次式で求めることができる。

$$FL = F_S(t_{end} - t_{begin}) \quad (3)$$

ここで，t_{begin} は MEP が計測面を通過し始めた時刻，t_{end} は通過し終えた時刻である。

サンプリングトンネル内の流速は，ESD 150～300 μm の SEP が計測面（1 mm 厚）の通過に要した時間から統計的に推測できる。[17] 計測時刻 t のときのサンプリングトンネル内流速 F_{S_t} は先述の開発者 Herman 博士に

よる解析法のうち，次の非線形回帰式を用いて算出できる。

$$F_{S_t}=f_1 \cdot EXP\{f_2(\sqrt{\bar{F}_{C_t}})^{1/2}\}+f_3 \cdot \sqrt{\bar{F}_{C_t}} + f_4 \cdot (\sqrt{\bar{F}_{C_t}})^2+f_5 \cdot (\sqrt{\bar{F}_{C_t}})^3 \quad (4)$$

$$\bar{F}_{C_t}=F_{C_t}/n_t \quad (5)$$

ここで n_t は 0.5 秒間に通過した ESD 150～300 μm の SEP の数，F_{C_t} は n_t 個の SEP が計測面の通過に要した時間の合計である。また，f_1 から f_5 は回帰式の係数であり，$\bar{F}_{C_t} \leqq 13$ のとき，$f_1 = 23.10410966$, $f_2 = -1.481499106$, $f_3=1.566460406$, $f_4=0.196311142$, $f_5=-0.05$, $\bar{F}_{C_t} > 13$ のとき，$f_1 = 0.198996019$, $f_2 = -2.603059062$, $f_3=0.892897609$, $f_4=0.006191239$, $f_5=-0.0013$ となる。本研究では 0.5 秒ごとに算出したサンプリングトンネル内流速から，さらに 5 秒間の移動平均を求め，これをサンプリングトンネル内流速とした。

MEP の体積については粒子ごとに ESD を算出した後，SEP と同様に ESD を直径とする球体（比重は 1.0 と仮定）に近似して各粒子の LOPC バイオマスを算出する。他の研究例[10, 12, 13]では，一般的な動物プランクトンは球体よりも楕円体に近い形状をしていることから，ESD を長径とする楕円体に近似して LOPC バイオマスの算出が行われることがある。ただし，ESD や長・短径の比はプランクトンの種（形状）に影響を受けて変化するため，季節や海域，計測対象種別に長・短径の比を推定する必要がある。本研究における計測対象種は複数であり種別の混合率が一定でないことから，このような補正は行わなかった。

解析においては，SEP と MEP それぞれの粒子から得られた LOPC バイオマスと LOPC カウントは，計測時刻ごとに全粒子を次の小型粒子，中型粒子，大型粒子にクラス分けして合算し，一秒ごとの時系列の計測結果とした。この時の各クラスは，ESD 検出下限の 100 μm から後述する動物プランクトンの採集に用いたリングネットの目合と同じ 500 μm までの粒子を小型粒子，500～4000 μm の粒子を中型粒子，4000 μm 以上の粒子を大型粒子とした。また，サンプリングトンネル内流速から一秒ごとの濾水量を算出した。

LOPC データの計測と動物プランクトンの採集　動物プランクトンの計測は，2007 年 4 月 18 日，19 日の昼間に北海道噴火湾湾口周辺の 12 点（Fig. 2）において実施された。調査点ごとの曳網条件を Table 1 に示す。LOPC を口径 80 cm リングネット（目合 500 μm）の網口に装着し（Fig. 3），リングネットを鉛直曳網することで，LOPC データの収録および動物プランクトンの採集を同時に行った。曳網範囲(ワイヤの繰り出し長さ)は鉛直曳き直前に計量魚群探知機で音響散乱層を基準に決定した。データの収録は巻き上げ開始直前に始め，LOPC が空中に出るまで継続した。巻き上げ速度は

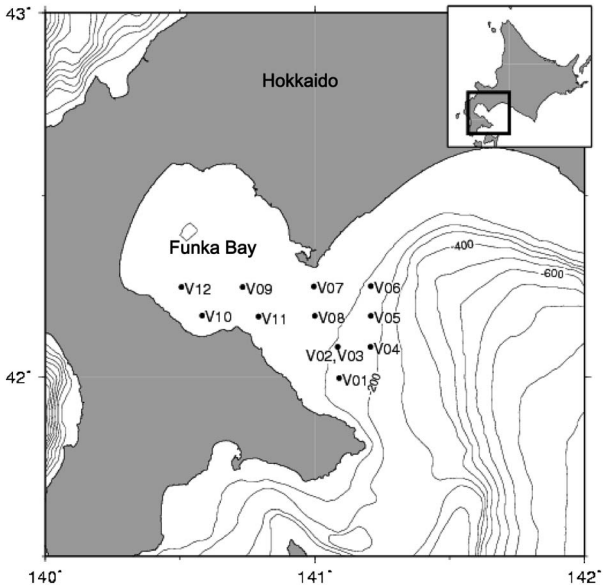

Fig. 2　Study area and sampling location in Funka Bay, Hokkaido.

Table 1　Net/LOPC towing condition at each station

Station	Date	Time (JST)	Wire out (m)
V01	2007/4/18	10:19	40
V02	2007/4/18	11:04	15
V03	2007/4/18	11:08	40
V04	2007/4/18	11:56	10
V05	2007/4/18	12:42	30
V06	2007/4/18	14:51	20
V07	2007/4/19	6:33	20
V08	2007/4/19	14:00	30
V09	2007/4/19	7:55	40
V10	2007/4/19	11:46	20
V11	2007/4/19	12:52	40
V12	2007/4/19	9:06	40

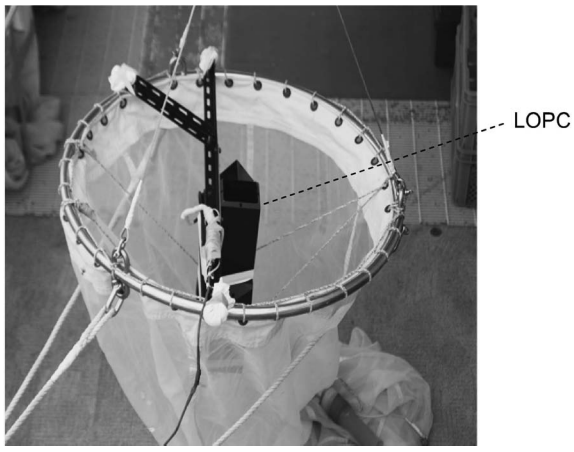

Fig. 3　The LOPC-mounted mouth of the ring net.

1 ms^{-1}とした。そのため，LOPCは1秒間に水柱1mに存在する動物プランクトンを計測したことになる。なお，リングネット網口面の水流の乱れを極力抑えるため，フローメータ等は取り付けず，LOPCのサンプリングトンネル内流速と網口面積をもとにリングネットの濾水量を算出した。リングネットによる採集物は船上でカイアシ類，端脚類，ヤムシ類，オキアミ類，ゼラチン状生物，その他（プランクトン），その他（魚類など）に分類し，それぞれの大きさを目視観察した後に湿重量を0.1 g単位で測定した。

結　　果

各調査点のLOPC計測結果と採集物の比較　LOPCが各調査点で検出した最大粒子はいずれもMEPで，最も小さいものでESD 4,837 μm，最も大きなものでESD 16,588 μmであった（Table 2）。LOPCが検出した粒子は，いずれの調査点においても小型粒子が多いのに対し，LOPCバイオマスでは中型，大型粒子がおよそ90%を占め，これらの総数量は調査点ごとに異なっていた（Fig. 4）。

リングネットでの採集物は，多くの調査点においてカイアシ類が優占し，次いで端脚類や尾虫類を含むゼラチ

Table 2　Analysis duration and filtered volume, total LOPC counts, LOPC biomass and maximum ESD detected by LOPC at each station

Station	Duration (sec)	Filtered volume of LOPC (m^3)	Calculated filtered volume of net (m^3)	Total LOPC count	Total LOPC biomass (g)	Maximum ESD (μm)
V01	39	0.146	14.920	65006	55.26	16,271
V02	17	0.060	6.151	24268	38.58	10,570
V03	42	0.161	16.557	81242	53.55	10,476
V04	20	0.036	3.718	13372	11.40	10,645
V05	33	0.114	11.713	29231	12.98	6,067
V06	21	0.073	7.500	13149	5.64	5,659
V07	20	0.073	7.485	35916	15.85	4,837
V08	32	0.123	12.591	52800	51.05	16,588
V09	36	0.149	15.251	86280	45.86	16,815
V10	27	0.079	8.069	43670	27.99	13,286
V11	43	0.169	17.276	100391	41.89	11,753
V12	44	0.178	18.205	88851	65.58	13,740

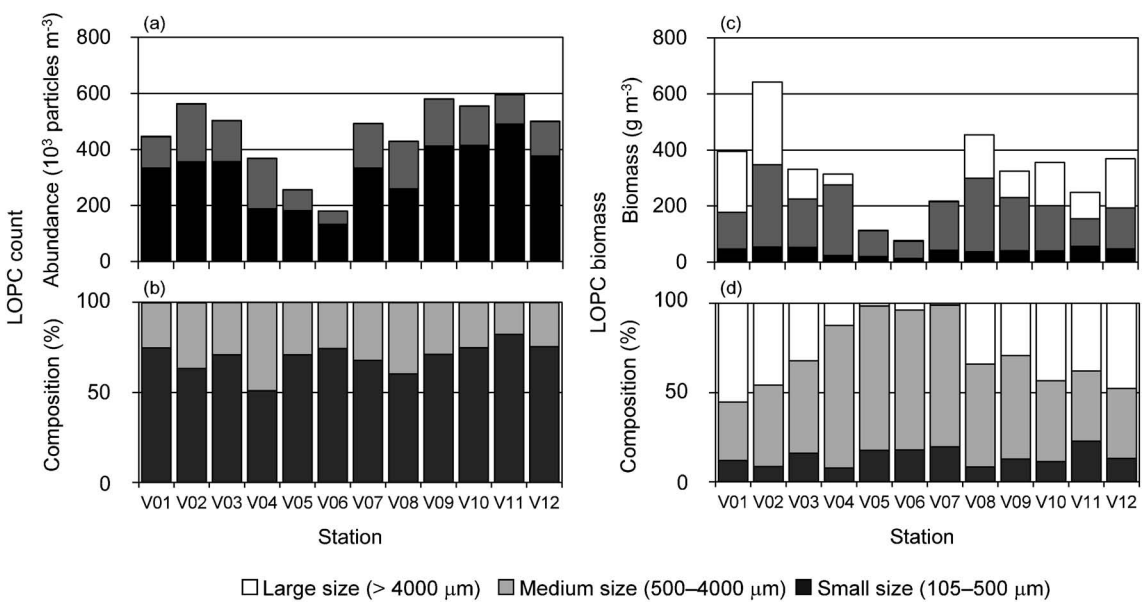

Fig. 4　(a) LOPC count, (b) its size composition, (c) LOPC biomass, and (d) its size composition derived from LOPC at each station.

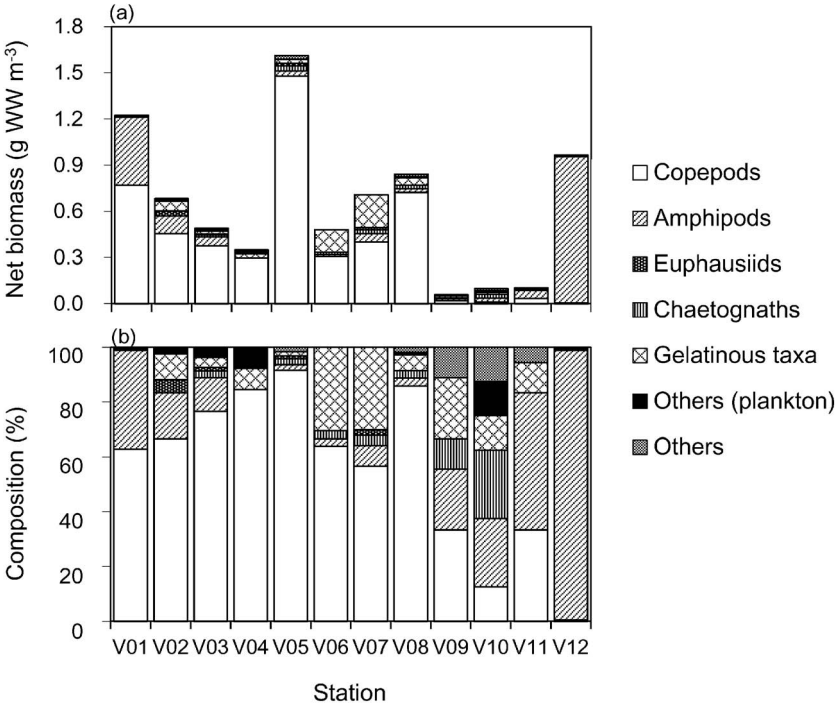

Fig. 5 Taxonomic wet weight (upper) and its composition (lower) of zooplankton collected by ring net.

ン状生物が多く，少数ではあったが，まれに頭足類や魚類の稚魚，腹足類で構成されていた（Fig. 5）。ほとんどの採集物は体長または頭胸甲長がおよそ 2～5 mm のプランクトンで構成されていたが，V01 から V05 のカイアシ類と V01, V02, V10 の端脚類は頭胸甲長が 6～10 mm のものも見られ，複数の種や成長段階のもので構成されていた。また，いずれの調査点でもリングネットには主に珪藻類に由来すると考えられる粘液状の物質が付着していた。

LOPC バイオマスは，総量比較で，リングネットによる採集量の 70～5000 倍であった。頭胸甲長 5 mm 程度のカイアシ類が多く採集された V05 では，ネット採集物の湿重量は最も多かったが，LOPC によって計測された粒子数やバイオマスは 2 番目に少なかった。一方，カイアシ類が優占した調査点（V01～V09）では，LOPC バイオマスの総量に占める中型粒子の割合と採集量全体に占めるカイアシ類の割合が近く，端脚類が採集量の 30% 以上を占めた調査点（V01, V11, V12）では，大型粒子の割合と端脚類の割合が近い傾向を示した（Figs. 4d, 5b）。中型粒子の LOPC バイオマスとカイアシ類の採集量には 100 倍近い差がみられ，カイアシ類の採集量が全体の 50% 以上のとき，カイアシ類の採集量の増加とともに中型粒子の LOPC バイオマスが増加する傾向がわずかにみられた（Fig. 6a）。ただし，頭胸甲長 5 mm 程度のカイアシ類が多く採集された V05 ではこの傾向は見られなかった。また，大型粒子の LOPC バイオマスと端脚類の採集量にも 100 倍近い差がみられ，端脚類の採集量が全体の 30% 以上のとき，端脚類の採集量の増加とともに大型粒子のバイオマスが増加する傾向がみられた（Fig. 6b）。

一曳航における LOPC の計測結果　調査点 V03 では，いずれの深度帯でも LOPC カウントは小型粒子が最も多く，LOPC バイオマスは中型，大型粒子の方が多かった（Fig. 7）。また，LOPC カウントや LOPC バイオマスの総数量やサイズ別バイオマス量は深度ごとに異なっており，特定の深度に偏って分布する傾向がみられた。このような傾向は，他の調査点においても頻繁に観察された。

調査点 V03 や V12 において検出された MEP は，計測面通過方向の長さ FL の値の散らばり方に差がみられるものの，ESD と検出エレメント数 NE の関係は類似していた（Fig. 8）。V03 と V12 で検出された MEP の NE と ESD の間には強い正の相関（それぞれ $r = 0.906$, 0.921）が見られた（Fig. 8b, e）。NE に対する FL 値は広い範囲でばらついたが，NE 値が大きくなっても（MEP を検出するエレメント数が増えても）FL 値の範囲は変わらなかった（Fig. 8a, d）。FL と MEP の関係も同様に，ESD に対する FL のばらつきは大きく，ESD が大きくなっても FL のとる範囲は変わらなかった（Fig. 8c, f）。これらの調査点における採集物の優占種は，カイアシ類（V03）と端脚類（V12）であるが，多くの MEP の ESD や NE は同じような値であり，生

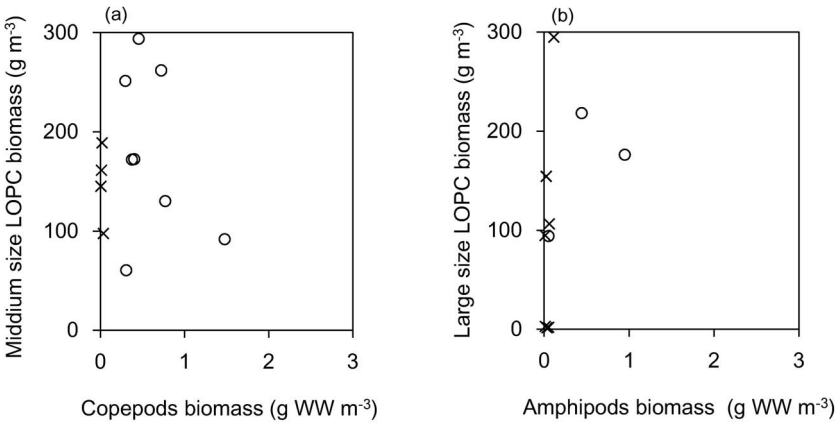

Fig. 6 Relationship between (a) medium-size LOPC biomass and wet weight of copepods collected by ring net and (b) large-size LOPC biomass and wet weight of amphipods collected. Open circles and crosses represent stations which were dominated (copepods: ≥50% of total, amphipods: ≥30% of total) and not dominated, respectively.

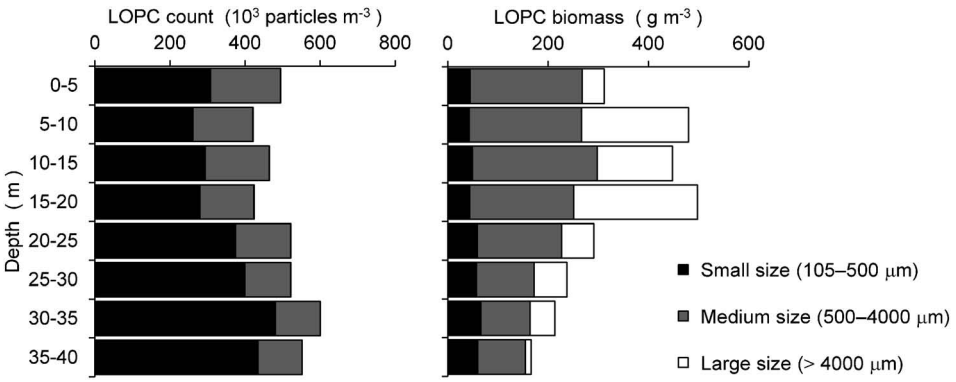

Fig. 7 Vertical distributions of LOPC count (left) and LOPC biomass (right) measured at station V03.

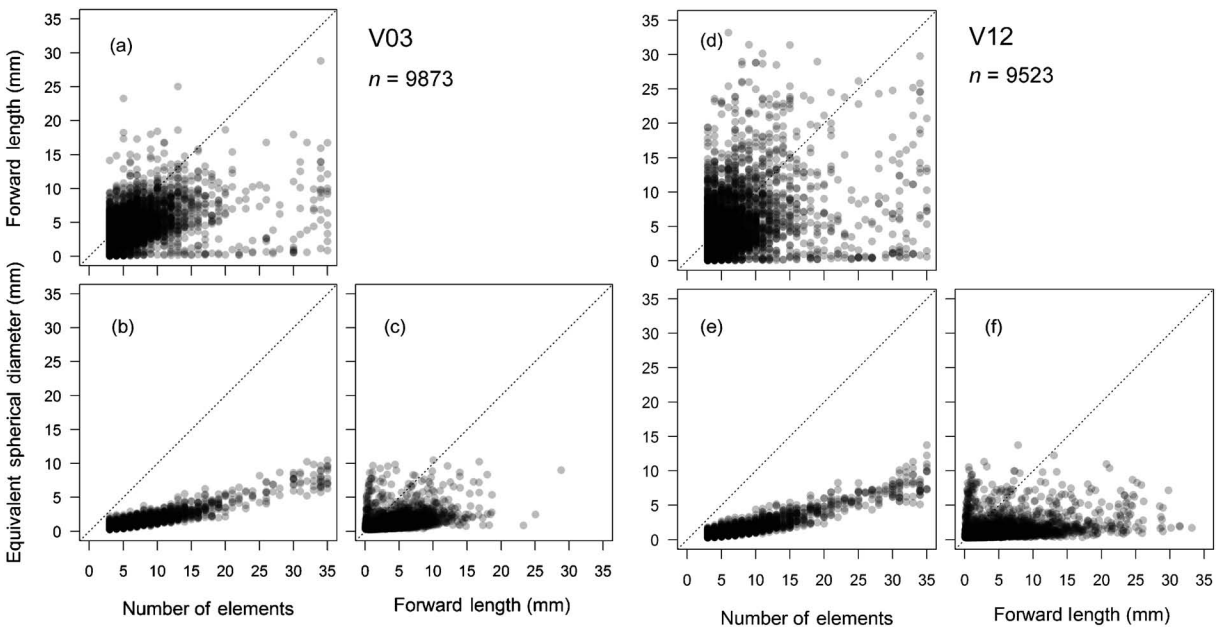

Fig. 8 Relationships between (a, d) forward length (FL) and number of elements (NE), (b, e) equivalent spherical diameter (ESD) and NE and (c, f) ESD and FL measured at station V03 (left side) and V12 (right side). The translucent circles represent each multi-element particle, and the dashed lines represent one-to-one correspondences.

物種に由来する明確な違いは見られなかった。しかし，カイアシ類に比べて端脚類ではNEに対して大きなFLをもつ粒子が多く検出される傾向がみられた。

どちらの調査点においても，NE別のMEP検出数はNEが10を超える辺りから減少傾向を示すが，NE 30を境に増加傾向に転じた。実際にV03では，NE 20～24のMEP数は27，NE 25～29では16であるのに対し，NE 30～35のMEP数は45であった。また，NE 25未満で検出されたMEPからはNEの増加とともにFLが増加する傾向が見られたが，NEの値が25以上では増加する傾向は見られなかった。これらのことから，計測部における放射ビームと反射ビームの境界近傍までおよぶ特に大きなプランクトンは，計測部を往復するレーザー光の放射ビームと反射ビームそれぞれで分割されて検出され，重複して計数されている可能性が考えられた。

考　　察

LOPCによる検出粒子をおおまかなサイズ範囲に分けて解析し，カイアシ類と端脚類の湿重量と比較したが，カイアシ類や端脚類が優占した調査点では，それぞれに対応するサイズの粒子を含むESD範囲のLOPCバイオマスと種別採集量には正の相関があることが示唆された（Fig. 6）。したがって，動物プランクトンが混在する海域でも優占するプランクトンをネットサンプリングなどにより事前に確認することで，LOPCによって計測されたESDのサイズ組成から優占種の分布計測は可能であると考えられる。ただし，LOPCバイオマスと各種生物量には100倍近い差がみられた。これは，リングネットによるプランクトン分布量（密度）の過小評価とLOPCによるバイオマスの過大評価によると考えられる。これらについて，以下で考察する。

本調査では，リングネットの網口に治具を介してLOPCを取り付けて（Fig. 3）LOPCによる計測とネット採集を同時に行った。そのため，調査中にリングネット内に水を通すことができた網口面の面積は実際の網口面積より狭く，網内に入った水量が少なかった可能性がある。一方，LOPCのサンプリングトンネル入口前には水流を妨げるものはない。したがって，リングネットの網口面積とLOPCのサンプリングトンネル内流速から推定したリングネットの濾水量は過大推定であったと考えられる。また，調査で用いたリングネットの目合いは500 μmであり，小型粒子（105～500 μm）と中型粒子（ESD 500～4000 μm）として検出されたプランクトンの一部は，網目から抜けていたことも考えられる。さらに，採集されたプランクトンは付属肢などを持ち詳細な形状の差異はあるものの，おおよそ球体より楕円体に近い形状である。LOPCのバイオマスは，計測面通過時の姿勢によらず，ESDを直径とする球体近似により質量を算出したため，LOPCバイオマスは計測したプランクトン量より過大に評価された可能性がある。つまり，リングネットによる採集量は過小に，LOPCが計測したバイオマスは過大に評価されたため，両者の生物量に大きな差が生じたと考えられる。LOPCによってある動物プランクトン単体を計測した結果を知るためには，水槽等の条件をコントロールできる環境で実験する必要があるだろう。しかし，種別採集量とそれぞれに対応するサイズ範囲のLOPCバイオマスとには正の相関が示唆されたことから，LOPCデータを適切に解析することで，LOPCを用いた種別分布量の計測は可能となると考えられる。

また，ネットで採集されたカイアシ類と端脚類は同程度の体サイズのものもみられ，カイアシ類または端脚類が優占した調査点でのMEPの多くは，同範囲のESD, NE, FLで検出されていた（Fig. 8）。したがって，カイアシ類と端脚類を検出したMEPのESDは重複しているものもあると考えられる。このような場合，プランクトンの体サイズに合わせてESD範囲を限定するだけでは，種ごとの分布量を正確に知ることはできない。LOPCの計測データからある程度の種判別をしなければ，各種の分布量を誤解する可能性がある。カイアシ類または端脚類が優占した調査点でのMEPは，FL値のばらつきは非常に大きいものの，端脚類の方がカイアシ類よりNEに対して大きな値のFLで検出される傾向がみられた（Fig. 8）。この値には，各プランクトンの形状や通過時の姿勢の違いが反映されたと考えられる。ただし，FLのばらつきにはプランクトン形状の違いの他，その算出原理より，船体動揺によるリングネットの曳網速度の変化も影響していると考えられる。一方，MEPとして計測された粒子のESD値はNEより小さく，プランクトンは計測面を通過する際に各エレメント（レーザービーム厚1 mm，エレメント幅1 mm）を完全に遮光していないことがわかる。プランクトン形状の違いを判別するには，ESD, NE, FLの値に加えて，船体動揺の影響を受けない各粒子を検出したエレメントごとの遮光量を用いることが有効だろう。ちなみに，Checkley *et al.*[18] は，大型のカイアシ類の判定基準として，ESDサイズ範囲の限定と各エレメントの遮光率を用いている。したがって，各粒子を検出した個々のエレメントの遮光率を調べることで，生物種の判別はある程度可能かもしれない。

OPCで単一種同成長段階のプランクトンを計測した場合，ESDの組成において1つのピークが得られるが，姿勢によってばらつくことが報告されている。[6] 生物種ごとのESD範囲を特定するには，こうした通過姿勢の影響も検討すべきであろう。また，各粒子のバイオ

マス算出においても，単純な比率による楕円体近似などの一義的な補正より，このようなエレメントごとの遮光率や通過姿勢の影響を反映させることが望ましい。様々な形状の複数種が確認された計測データの解析に一義的な補正を加えた場合，分布量を誤推定する可能性がある。

本調査で計測された粒子（MEP）の中には，計測部を往復するレーザー光の境界近傍を通ったため分割されて計量，および，重複して計数されたと考えられるものがあった（Fig. 5）。これは30個以上のエレメントで検出されたMEPにおいて顕著に確認できた。このような大きさのプランクトンの正確な個体数または生物量を推定するのは困難である。分割して計測されたプランクトンの断片がその他多くのMEPと同等の時刻に同等の値で検出される場合，断片から分割前のプランクトンの情報を推測することは難しい。ただし，これらは分割されていないMEPに比べて圧倒的に少ないと考えられるため，計測結果におよぼす影響は小さいと考えられる。本調査において採集された動物プランクトンは大型のものでも頭胸甲長が6～10 mm程度のカイアシ類や端脚類であるが，これらは頭胸甲長くらいの長い触角を持っていた。したがって分割して計測されたプランクトンとは，カイアシ類や端脚類か，形状が崩れやすくネットによる採集では大きさが確認できなかったゼラチン状生物であると考えられる。大型のカイアシ類や端脚類は運動能力が高く，LOPCの計測トンネルから逃避している可能性があるので，LOPCのみでは正確な分布量を計測することは難しい。後者も，光の透過度がその他多くのプランクトンと異なるためにLOPCのみで正確な計測は難しい。[17] したがって，30個以上のエレメントによって検出されるMEPは計測結果から除くほうがよいと思われる。

以上のことより，LOPCを用いた種別動物プランクトンの計測を行うには，その計測結果においてESDの値だけでなく，LOPCによって得られる各粒子のNEやFLと，粒子を検出した各エレメントにおける遮光量の差などを合わせ，計測対象となった個々のプランクトンに由来する各情報を活かすべきである。今後は，水槽など限定的環境においても種別の各計測量を比較し，種ごとの計測特性の違いから種判別の基準を明らかにしたい。

謝　辞

本調査にご協力いただいた北海道大学水産学部附属練習船うしお丸の乗組員はじめ関係各位に深く感謝する。また，LOPCデータの解析についてご助言いただいた同機器開発者であるベッドフォード海洋研究所のAlex Herman博士に厚く御礼申し上げる。なお，本研究の一部は科学研究費（基盤研究(B) No. 14360103）によった。

文　献

1) Harris R, Wiebe P, Lenz J, Skjoldal HR, Huntley M. *ICES zooplankton methodology manual*. Academic Press, San Diego. 2000.
2) Wiebe PH, Benfield MC. From the Hensen net toward four-dimensional biological oceanography. *Prog. Oceanogr*. 2003; **56**: 7–136.
3) Benfield MC, Grosjean P, Culverhouse PF, Irigoien X, Sieracki ME, Lopez-Urrutia A, Dam HG, Hu Q, Davis CS, Hansen A, Pilskaln CH, Riseman EM, Schultz H, Utgoff PE, Gorsky G. RAPID: Research on automated plankton identification. *Oceanography* 2007; **20**: 12–26.
4) Davis CS, Gallager SM, Berman MS, Haury LR, Strickler JR. The Video Plankton Recorder (VPR): Design and initial results. *Arch. Hydrobiol. Beih. Ergebn. Limnol*. 1992; **36**: 67–81.
5) Herman AW. Simultaneous measurement of zooplankton and light attenuance with a new optical plankton counter. *Cont. Shelf Res*. 1988; **8**: 205–221.
6) Herman AW. Design and calibration of a new optical plankton counter capable of sizing small zooplankton. *Deep Sea Res*. 1992; **39**: 395–415.
7) 市川忠史．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．水研センター研報 2008; **24**: 23–104.
8) Herman AW, Cochrane HA, Sameoto DD. Detection and abundance estimation of Euphausiids using an optical plankton counter. *Mar. Ecol. Prog. Ser*. 1993; **94**: 165–173.
9) Nogueira E, González-Nuevo G, Bode A, Varela M, Morán XAG, Valdés L. Comparison of biomass and size spectra derived from optical plankton counter data and net samples: application to the assessment of mesoplankton distribution along the Northwest and North Iberian Shelf. *ICES J. Mar. Sci*. 2004; **61**: 508–517.
10) Labat JPh, Mayzaud P, Dallot S, Errhif A, Razouls S, Sabini S. Mesoscale distribution of zooplankton in the Sub-Antarctic Frontal system in the Indian part of the Southern Ocean: a comparison between optical plankton counter and net sampling. *Deep Sea Res*. 2002; **49**: 735–749.
11) Gallienne CP, Conway DVP, Robinson J, Naya N, William JS, Lynch T, Meunier S. Epipelagic mesozooplankton distribution and abundance over the Mascarene Plateau and Basin, south-western Indian Ocean. *J. Mar. Biol. Ass. U.K*. 2004; **84**: 1–8.
12) 市川忠史，加藤　聡，田中　薫．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．中央水研研報 1999; **13**: 1–14.
13) 横井　裕，山口　篤，池田　勉．光学式プランクトンカウンター（OPC: Optical Plankton Counter）を用いた初夏の西部北太平洋における動物プランクトン群集構造の緯度・経年変動解析．日本プランクトン学会報 2008; **55**: 9–24.
14) Zhou M, Huntley ME. Population dynamics theory of plankton based on biomass spectra. *Mar. Ecol. Prog. Ser*. 1997; **159**: 61–73.
15) Herman AW, Harvey M. Application of normalized biomass size spectra to laser optical plankton counter net intercomparisons of zooplankton distributions. *J. Geophys. Res*. 2006; **111**: C05S05.

16) Yurista PM, Kelly JR, Miller SE. Lake Superior zooplankton biomass: Alternate estimates from a probability-based net survey and spatially extensive LOPC surveys. *J. Great Lakes Res*. 2009; **35**: 337–346.
17) Herman AW, Beanlands B, Phillips EF. The next generation of Optical Plankton Counter: the Laser-OPC. *J. Plankton Res*. 2004; **26**: 1135–1145.
18) Chekley DM, Davis RE, Herman AW, Jackson GA. Assessing plankton and other particles in situ with the SOLOPC. *Limnol. Oceanogr*. 2008; **53**: 2123–2136.
19) Peterson JO, Peterson WT. Influence of the Columbia River plume (USA) on the vertical and horizontal distribution of mesozooplankton over the Washington and Oregon shelf. *ICES J. Mar. Sci*. 2008; **65**: 477–483.