



Title	4連ノルパックネットを用いたネット目合いの違いが濾過効率と採集効率に与える影響に関する研究
Author(s)	瀧, 育之; 阿部, 義之; 松野, 孝平; 山口, 篤
Citation	北海道大学水産科学研究彙報, 69(1), 47-56
Issue Date	2019-08-07
DOI	10.14943/bull.fish.69.1.47
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/75200
Type	bulletin (article)
File Information	bull.fish.69.1.47.pdf



[Instructions for use](#)

4連ノルパックネットを用いたネット目合いの違いが濾過効率と 採集効率に与える影響に関する研究

濱 齊之^{1)*}・阿部 義之²⁾・松野 孝平^{3,4)}・山口 篤^{3,4)}

(2019年4月26日受付, 2019年5月17日受理)

Study on Effect of Net Mesh Size on Filtering Efficiency and Zooplankton Sampling Efficiency using Quad-NORPAC Net

Nariyuki HAMA^{1)*}, Yoshiyuki ABE²⁾, Kohei MATSUNO^{3,4)} and Atsushi YAMAGUCHI^{3,4)}

Abstract

To evaluate the effect of net mesh size on filtering efficiency and zooplankton collection efficiency, we developed Quad-NORPAC net equipped four-different mesh sizes (63, 100, 150, and 335 μm). Based on zooplankton samples collected by Quad-NORPAC net at 13 stations off Fukushima during 2-12 June 2016, zooplankton settling volume and wet weight (335 μm) measured, and size and taxonomic data were captured by imaging analysis (ZooScan). As net mesh property, mesh porosity ranged between 22.8% (63 μm) and 45.5% (150 μm). Filtering volumes of four mesh nets were highly correlated ($r^2 = 0.97-0.99$), while those of 63 μm was greatly lower than the others (i.e. that of 63 μm was factored as 0.598 of 335 μm). Zooplankton collection efficiency, which evaluated an abundance of 63 μm mesh as 100%, ranged for 66.8-120.1% for 100 and 150 μm , while was extremely low (6.5-32.3%) for 335 μm . Zooplankton collection efficiency varied with size and taxa. Thus, collection efficiencies of Gastropoda, Copepoda, Cladocera, and Appendicularia, the smaller-sized taxa (<500 μm in equivalent spherical diameter [ESD]), were substantially low (<10%), while those of *Noctiluca scintillans*, Cnidaria, and Euphausiacea, large-sized taxa (>500 μm ESD), were relatively high (40-80%). From the viewpoint of filtering efficiency and collection efficiency, within the four mesh sizes, 150 μm mesh net is considered to be sufficient for quantitative collection of zooplankton.

Key words : Plankton net, Mesh, Zooplankton, ZooScan, Imaging analysis

緒 言

近年、気候変動に伴う低次食段階の変動が、海洋生態系構造の改変をもたらしていることが様々な海域で報告されている (Beaugrand et al., 2002; Drinkwater et al., 2003; Edwards and Richardson, 2004; Hays et al., 2005)。海洋生態系において動物プランクトンは植物プランクトンが生産した有機物を高次生物に受け渡す、エネルギーの転送者としての役割を果たしている (Lalli and Parsons, 1997)。また動物プランクトン群集構造は、海洋表層から深海への物質輸送である生物ポンプの量を左右する要因としても大きな影響を及ぼしている (Michaels and Silver, 1988;

Ducklow et al., 2001)。このように、海洋生態系構造を理解する上で、動物プランクトンの質と量を正確に評価することは重要である。動物プランクトンの現存量や群集構造、個体群構造の評価には、従来よりプランクトンネット採集が行われている (大森・池田, 1976)。近年の衛星などのリモートセンシング技術の発達により、植物プランクトンの分類群や量は、リモートセンシングが可能になっているが、動物プランクトンに関する簡便で正確な代替定量方法に未だ決定的なものはなく、プランクトンネットによる採集が不可欠となっている (Miller and Wheeler, 2012)。

プランクトンネットによる採集は、従来より決められ

¹⁾ 北海道大学水産学部
(Faculty of Fisheries, Hokkaido University)
²⁾ 東京大学大気海洋研究所
(Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo)
³⁾ 北海道大学大学院水産科学研究院
(Graduate School of Fisheries Sciences, Hokkaido University)
⁴⁾ 北海道大学北極センター
(Arctic Research Center, Hokkaido University)
* 現所属 株式会社読売広告社
(Yomiko Advertising Inc.)

た定量方法で行われている。例えば口径 45 cm, 濾過部側長 180 cm のノルパックネットでは目合い 335 μm による水深 150 m からの鉛直曳き採集が行われている (元田, 1957)。ネットを使った定量採集においては, 濾過効率の推定, それに関わる開孔率, 開口比, 目詰まり, 網目逸出など様々な要素について研究がなされており (Tranter and Heron, 1967; Tranter and Smith, 1968; 森岡, 1979; 上野, 1988; 小笹・木元, 1988 など), 正確な定量評価を行うにはこれらの要因を考慮することが欠かせない。従来の採集方法による歴史的動物プランクトン採集試料の解析は, 気候変動に伴う動物プランクトン群集の変化を評価する上で, 欠かすことの出来ない知見をもたらしてきた (Sugimoto and Tadokoro, 1997; Chiba et al., 2009)。一方, 従来プランクトンネットに用いられてきた目合いは, カイアシ類の初期発育段階を採集するには大きすぎるため, 正確な個体群構造を把握できないという問題点も指摘されつつある (Hwang et al., 2007; Di Mauro et al., 2009; Riccardi, 2010)。また海外では, それぞれの国で独自の目合いを用いている。例えば米国でよく使われるのは 53, 150, 335, 505 μm である (Hopcroft et al., 2005; Sigler et al., 2011)。これら目合いの異なるネットに基づく結果を比較するには, 各ネット目合いによる採集効率や, 目合い間でのキャリブレーションが必要であるが, これらに関する知見は乏しいのが現状である。

本研究は目合い 63, 100, 150, 335 μm のネットを同時に曳網することの出来る 4 連ノルパックネットを開発し, 各目合いによる濾過効率および採集効率を比較し, どの目合いのネットが定量採集により相応しいかを明らかにするものである。各目合いのネットは, 濾過効率の差を明らかにし, 採集物の湿重量および沈殿量を測定すると共に, 採集物を画像イメージングを用いた ZooScan を用いた解析を行い (Gorsky et al., 2010), 分類群の同定とサイズ (等価粒径: ESD) の測定を行い, 各目合い間で採集効率の比較を行った。

材料及び方法

ネットの形状, 開孔率と開口比

本研究で用いる 4 つの目合いのプランクトンネット (NXX25, NXX13, NXX9, および NMG52) の形状と網目開孔率 (porosity; 大森・池田, 1976) を求めるため, 網目を 2 枚のプレパラートガラスに挟んで固定し, 40~600 倍の倒立顕微鏡下で無作為に選んだ 50 個の網目について, 網目面積をソフト ImageJ (<https://imagej.nih.gov/ij/>) を用いて, 0.001 μm^2 の精度で測定した。網はソフト Inkscape (<https://inkscape.org/>) を用いてスケッチを行うと共に, 網目開孔率 (porosity [P], %) を以下の式により求めた (森岡・小牧, 1977)。

$$P = m \cdot s^{-1} \times 100$$

網地総面積 (s, mm^2) は 1 種類の網地あたり無作為に選んだ 10 ヶ所について, 12 個 (NMG52)~100 個 (NXX13, NXX25) の網目の占める平均網地面積で, 網目面積 (m, mm^2) は平均網目面積に同じ網目数を乗じた値である。

また口径 45 cm, 濾過部側長 180 cm のノルパックネット (元田, 1957) を用いた時の開口比 (open area ratio, R) を以下の式により求めた (大森・池田, 1976)。

$$R = (a \times [P / 100]) / A$$

ここで a は網地面積 (1.272 m^2), A は網口面積 (0.159 m^2), P は前述の網目開孔率である。これ以降, 各目合いの呼称は各目合いのサイズの NXX25 は 63 μm , NXX13 は 100 μm , NXX9 は 150 μm , NMG52 は 335 μm とする。

野外採集

2016 年 6 月 2~12 日の日中に, 北海道大学水産学部附属練習船おしよろ丸第 26 次航海の途上, 福島沖の水深 29~122 m の全 13 定点 (Fig. 1A) において, 目合い 63 μm , 100 μm , 150 μm 及び 335 μm のノルパックネットを装着した 4 連ノルパックネット (Quad NORPAC net, Fig. 1B) による海底直上 5 m からの鉛直曳き採集を行った。各ネットには離合社製フローメーターを装着し, 濾水量 (V, m^3) を計算した。また濾過効率 ($FE, \%$) を以下の式から求めた。

$$FE = 100 \times V / (\pi \times (0.45/2)^2 \times D)$$

ここで D は採集層 (m) である。試料は 5% 中性ホルマリン海水で固定した。

試料処理

実験室で全試料は沈殿量を 0.1 ml の精度で測定した。目合い 335 μm の試料は, 元田式分割器 (Motoda, 1959) で分割し, 片方の副試料をあらかじめ秤量した目合い 100 μm のメッシュ上に濾し取り, 電子天秤 (Mettler Toledo, MS1003S/02) を用いて, 1 mg の精度で湿重量を測定した。

各定点における, 採集層 (m), 濾水量 (m^3), 濾過効率 (%), 湿重量 (mg m^{-3}) および沈殿量 ($\mu\text{l m}^{-3}$) データを $\log(X+1)$

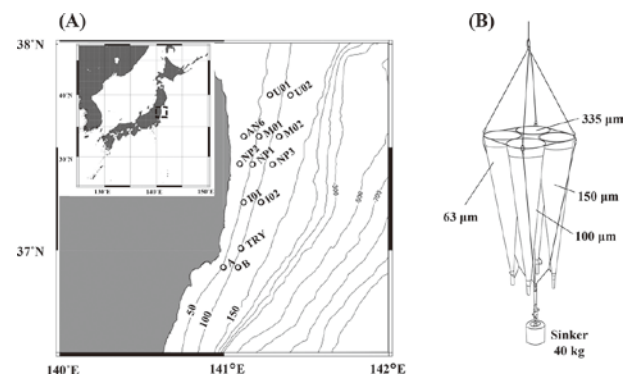


Fig. 1. Location of sampling stations off Fukushima during 2-12 June 2016 (A). Diagram of Quad-NORPAC net equipped with 63, 100, 150, and 335 μm mesh (B).

変換した値に基づく Bray-Curtis クラスタ解析を行った。このクラスタ解析により特徴的であった4定点 (AN6, M01, M02, NP2) の試料について、ZooScan (ZooScan MIII, Hydroptic Inc., France) による種同定及びサイズ測定を行った。

ZooScan による計測

ZooScan による試料測定法は、Gorsky et al. (2010) に従った。まず、脱イオン水のみを走査セルに満たした状態でバックグラウンドの画像を記録した。その後、動物プランクトン試料を元田式分割器を用いて試料の多寡に応じて1/16-1/256に分割した後、ZooScanにより画像を記録した。試料測定の際には、試料が水面に浮かないように注意し、重なっている試料は解剖針などを用いて、手作業で重なりを解消してからスキャンを行った。得られた画像はソフトウェア ZooProcess により個体ごとの画像に切り分けて保存した。試料画像は2,400 dpiの分解能でデジタル化し、この際1ピクセルは10.58 μmに相当していた。保存した各個体の画像をウェブサイト EcoTaxa (<http://ecotaxa.obs-vlfr.fr/>) にアップロードし、ウェブ上で半自動で各個体の分類同定を行った。ここで multiple 及び detritus と分類された画像は、以降の解析から除外した。

ZooScan によるサイズの測定は、個体に最も適合する楕円の長軸長 (L_{major} , mm) および短軸長 (L_{minor} , mm) の測定によるものであり、ここで測定された長・短軸長から楕円の体積 ($Volume$, mm³) を算出した。

$$Volume = 4/3 \times \pi \times (L_{major}/2) \times (L_{minor}/2)^2$$

その体積と同等の球体の等価粒径 (Equivalent Spherical diameter: ESD, mm) を以下の式により算出した。

$$ESD = \sqrt[3]{\frac{Volume \times 3}{4\pi}}$$

結 果

ネットの形状、開孔率と開口比

本研究で使用した4種類の網のスケッチを Fig. 2 に示す。各網の糸の太さは目合い 335 μm が 170 μm、目合い 150 μm が 70 μm + 60 μm 2本、目合い 100 μm が 60 μm + 50 μm

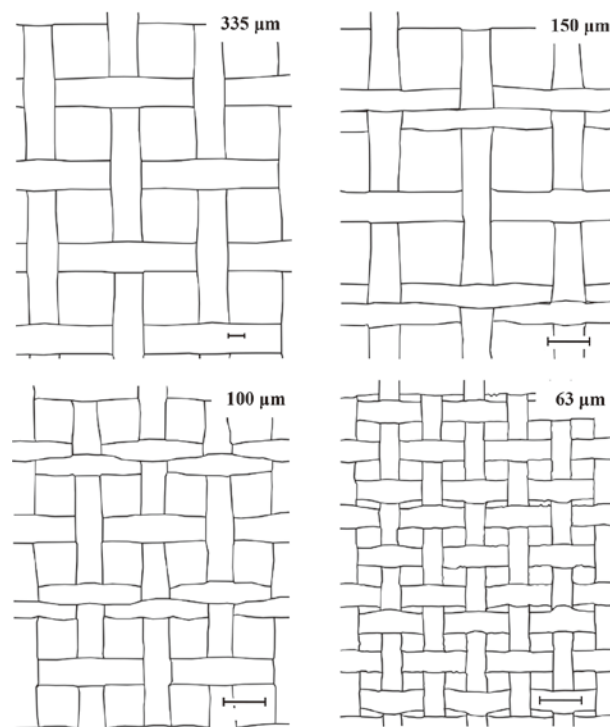


Fig. 2. Sketches of plankton filtering gauzes used in this study. Scales are 100 μm.

2本、63 μm が 43 μm + 43 μm 2本となっており (田中三太郎商店カタログ, <https://www.tanaka-sanjiro.com/products/mesh.php>), スケッチからも確認できた。網目はいずれもほぼ正方形であった。網目面積、網地総面積および両者から算出される網目開孔率を Table 1 に示す。4種の網の網目開孔率は22.80%~45.47%の間にあり、最も低かったのは目合い63 μmで、最も高かったのは目合い150 μmであった。各網でノルパックネットの形状の開口比を計算したところ、目合い63 μmは1.82、100 μmは2.93、150 μmは3.64、335 μmは3.38であった (Table 1)。

濾水量と濾過効率

同一定点における各ネットの濾水量を比較すると、いずれのネットの濾水量も高い比例関係にあった ($r^2 = 0.97-0.99$, $p < 0.0001$)。目合い335 μmのネットの濾水量を1と

Table 1. Mean mesh width, mesh area, total area of cloth examined, and calculated porosity of the four plankton gauzes used in this study. Open area ratio by using NORPAC net was also calculated at right column.

Gauze	Mean width	Mesh area ($\times 10^{-3}$ mm ²)		Total area of cloth examined (mm ²)				Mean mesh area of the Samples (mm ²) (a×b) ^d	Porosity, % (d/c×100)		Open area ratio	
		Number of samples	Mean ^a	Number of samples	Number of meshes in a sample (warp×weft) ^b	s.d.	Mean ^c		Range	Median	Range	Median
NXX25	63	50	2.93 ± 0.11	10	100 (10×10)	0.008	1.28 ± 0.006	0.29 ± 0.01	21.84-23.76	22.80	1.75-1.92	1.82
NXX13	100	50	9.73 ± 0.11	10	100 (10×10)	0.032	2.66 ± 0.026	0.97 ± 0.01	35.79-37.35	36.57	2.86-2.99	2.93
NXX9	150	50	22.79 ± 0.44	10	36 (6×6)	0.024	1.81 ± 0.019	0.82 ± 0.02	44.11-46.82	45.47	3.53-3.57	3.64
NMG52	335	50	104.94 ± 0.81	10	12 (3×4)	0.024	2.98 ± 0.020	1.26 ± 0.01	41.71-42.92	42.31	3.34-3.43	3.38

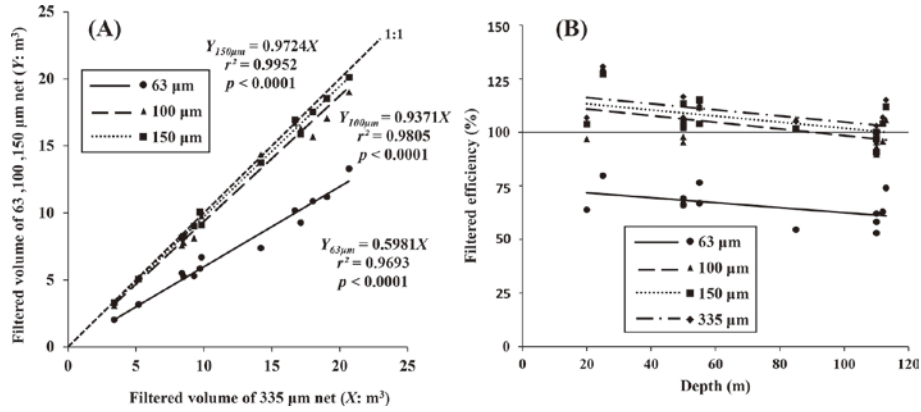


Fig. 3. Comparison of filtered volume of 63, 100, and 150 µm and that of 335 µm mesh net (A). Relationship between filtered efficiency (%) and net towed depth for 63, 100, 150, and 335 µm mesh nets (B).

した時に、目合い 100 µm と 150 µm のネットの濾水量はそれぞれ 0.937 と 0.972 であったが、目合い 63 µm のネットの濾水量は 0.598 と明らかに少なかった (Fig. 3A)。各ネットの濾過効率は目合いによって異なり、目合い 100-335 µm のネットの濾過効率は 89.6-130.7% であったのに対し、63 µm のネットの濾過効率は 53.0-79.8% と明らかに低かった (Fig. 3B)。またいずれの目合いも、採集層が深くなるにつれて濾過効率は有意に低下していた ($r^2 = 0.24-0.30$, $p < 0.0001$) (Fig. 3B)。

各定点の特徴

各定点における採集層、濾水量、濾過効率、湿重量および沈殿量の多寡を Fig. 4 に示す。採集層の浅い定点では濾水量も少ないが、濾過効率は高く、1 立方メートルあたりの湿重量と沈殿量が多い。逆に採集層の深い定点では

濾水量が多く、濾過効率は低く、湿重量と沈殿量は少ない傾向が伺えた (Fig. 4)。これらのデータに基づきクラスター解析を行った所、定点は大きく A と B のグループと、2 定点を含むアウトグループに分けられた (Fig. 5A)。各グループの分布は地理的に異なっており、等深線に沿ったものであった (Fig. 5B)。これら A, B グループから各 1 定点 (St. M01 と M02) とアウトグループの 2 定点 (St. AN6 と NP2) について、ZooScan による分類群およびサイズ測定を行った。

分類群およびサイズの比較

ZooScan による個体数密度に基づき、同一定点における各目合いネットの採集効率を比較した (Fig. 6)。最も細かい目合い 63 µm の出現個体数密度を 100% とした時の各ネットの採集効率は、目合い 100-150 µm では 66.8-120.1%

Parameters	Station													
	U02	U01	AN6	M01	M02	NP3	NP1	NP2	I02	I01	TRY	A	B	
Towed depth (m)	10	4	2	3	11	9	5	1	13	6	8	7	12	
Filtered volume (m³)	335 µm	11	5	2	3	13	12	4	1	10	7	8	6	9
	150 µm	11	5	2	3	13	12	4	1	9	6	8	7	10
	100 µm	9	5	2	3	13	12	4	1	10	6	8	7	11
	63 µm	11	4	2	5	13	12	3	1	9	7	8	6	10
Filtered efficiency (%)	335 µm	3	12	13	5	11	8	7	6	2	10	4	9	1
	150 µm	3	11	13	5	10	9	7	6	1	8	4	12	2
	100 µm	1	8	13	3	9	5	7	6	2	11	10	12	4
	63 µm	4	8	13	10	11	5	7	6	1	12	2	9	3
Wet weight (mg m⁻³)	335 µm	6	10	11	12	1	3	9	13	2	8	4	7	5
Settling volume (µL m⁻³)	335 µm	2	7	1	5	3	4	12	6	8	13	10	11	9
	150 µm	4	10	9	12	3	1	11	13	7	8	2	6	5
	100 µm	8	11	7	12	1	3	10	13	4	9	2	5	6
	63 µm	4	11	6	10	1	2	12	13	3	9	8	7	5

Fig. 4. Ranked parameters with net samples (towed depth, filtered volume, filtered efficiency, wet weight, and settling volume) at each station. The parameters are ranked with low (1-4, shade), middle (5-9, white), and high (10-13, black).

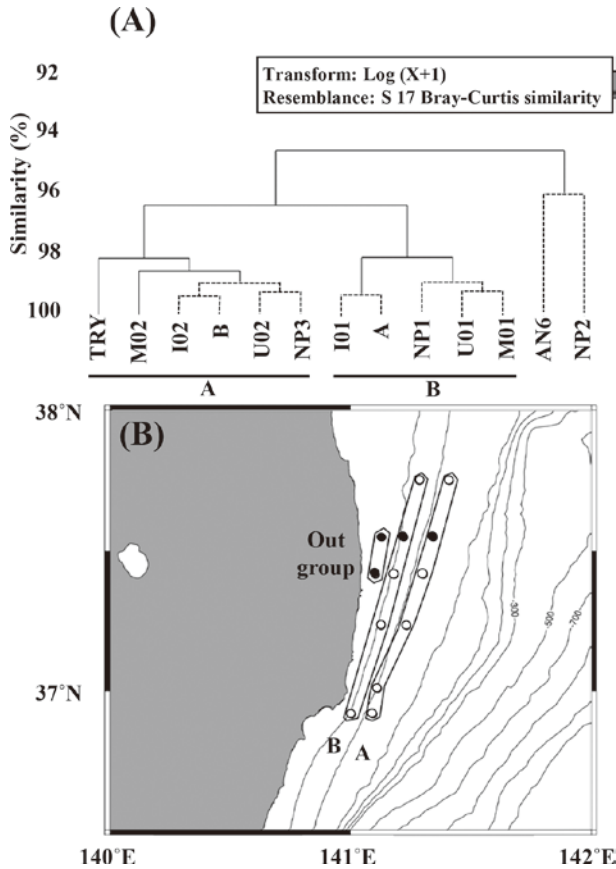


Fig. 5. Results of cluster analysis by log-transformed Bray-Curtis based on raw data presented in Fig. 4 (A). Two station groups (A and B) were identified. Horizontal distribution of each group (B). ZooScan analyses were made for solid symbol stations.

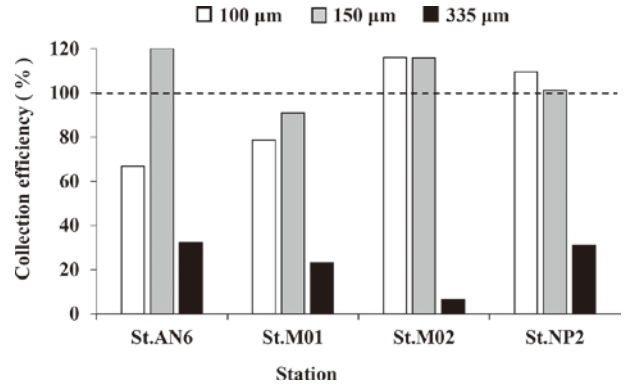


Fig. 6. Collection efficiency of 100, 150, and 335 μm mesh nets normalized based on abundance of 63 μm mesh net treated as 100%. Dashed line indicates 100% collection efficiency.

と、両ネットとも100%を超えることがあったが、目合い335 μm は6.5-32.3%と明らかに低かった。

ZooScanでは17種/分類群が同定された(Table 2)。各分類群の出現個体数密度をネット目合い間で比較したところ、尾虫類、枝角類およびカイアシ類について、目合い間の有意差が検出された(one-way ANOVA, $p < 0.05$)。いずれの分類群も目合い335 μm で少なく、特にカイアシ類は目合い335 μm での出現個体数は他の3つの目合いよりも有意に少なかった。

各目合いネットの出現個体数に占める平均分類群組成をFig. 7に示す。いずれの目合いでも夜光虫(*Noctiluca scintillans*)が最優占分類群で、全体の55.1-84.3%を占めていた。夜光虫の占有率は目合いが大型なほど高くなっていった。これは目合い63-150 μm では2番目の優占分類群

Table 2. Mean abundance of each taxon in four mesh nets (63, 100, 150, 335 μm) collected at four stations off Fukushima during 2-12 June 2016. Differences were tested by one-way ANOVA and post-hoc (Tukey) test.

Taxon	Abundance (ind.m ⁻³ : mean \pm sd)				one-way ANOVA	Turkey		
	63	100	150	335		62-100	62-150	62-335
Amphipoda	0.0 \pm 0.0	0.0 \pm 0.0	0.0 \pm 0.0	0.8 \pm 0.0				
Appendicularia	1,042.6 \pm 593.8	766.5 \pm 334.5	635.0 \pm 296.1	56.0 \pm 31.2	*		*	
bipinnaria	0.0 \pm 0.0	0.0 \pm 0.0	0.0 \pm 0.0	0.8 \pm 0.0				
Bivalvia	78.5 \pm 118.5	75.6 \pm 54.1	36.6 \pm 27.2	1.9 \pm 3.3				
Cladocera	498.2 \pm 250.4	491.4 \pm 245.9	556.0 \pm 222.7	59.4 \pm 36.8	*			
Cnidaria	546.9 \pm 243.4	369.6 \pm 148.6	606.1 \pm 158.5	386.6 \pm 210.1				
Copepoda	5,070.9 \pm 2,211.6	4,163.3 \pm 1,417.4	4,128.7 \pm 1,518.0	151.4 \pm 79.0	**		*	* *
Coscinodiscus	129.1 \pm 95.5	75.7 \pm 49.2	111.1 \pm 96.3	0.0 \pm 0.0				
cypris	0.0 \pm 0.0	0.0 \pm 0.0	0.0 \pm 0.0	0.8 \pm 0.0				
Decapoda	0.0 \pm 0.0	0.0 \pm 0.0	0.0 \pm 0.0	0.8 \pm 0.0				
egg	15.8 \pm 27.3	0.0 \pm 0.0	7.3 \pm 12.6	7.4 \pm 6.9				
Euphasiacea	180.4 \pm 69.6	111.1 \pm 46.3	133.5 \pm 82.9	71.5 \pm 38.4				
Gastropoda	315.7 \pm 119.6	352.3 \pm 207.6	330.9 \pm 199.9	14.4 \pm 11.6				
nauplii	124.2 \pm 100.3	67.2 \pm 61.3	100.7 \pm 64.0	0.0 \pm 0.0				
<i>Noctiluca scintillans</i>	9,932.5 \pm 6,928.5	10,125.7 \pm 8,485.5	11,998.1 \pm 7,601.5	4,049.2 \pm 2,859.8				
pluteus	30.9 \pm 29.2	7.3 \pm 7.1	0.0 \pm 0.0	2.5 \pm 2.5				
Polychaeta	56.5 \pm 67.1	0.0 \pm 0.0	3.2 \pm 6.0	1.5 \pm 2.9				
Total	18,022.2 \pm 8,191.0	16,605.6 \pm 9,365.7	18,647.2 \pm 7,628.8	4,805.1 \pm 3,037.5				

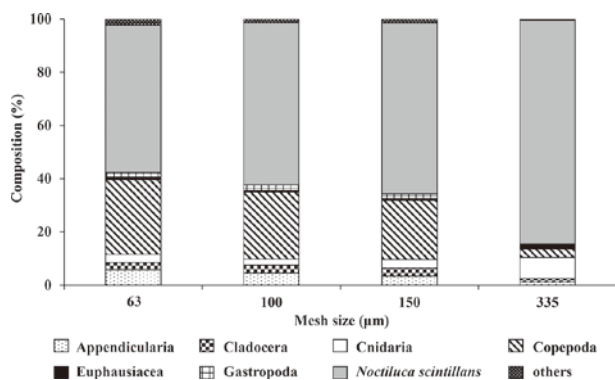


Fig. 7. Mean taxonomic composition in zooplankton abundance based on 63, 100, 150, and 335 µm mesh nets collected off Fukushima during 2–12 June 2016.

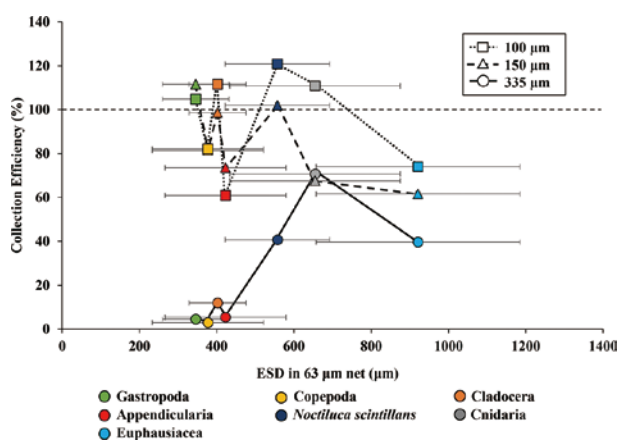


Fig. 8. Relationship between collection efficiency of various taxa in 100, 150, and 335 µm mesh nets normalized with abundance of 63 µm mesh net treated as 100%. Dashed line indicates 100% collection efficiency.

であったカイアシ類の占有率が、目合い 335 µm では低かったことに起因していた。目合い 335 µm ではクラゲ類の占有率がやや高く、夜光虫に次ぐ分類群であった。

分類群組成の各ネット目合いによる差は、分類群の体サイズに関係していた。各分類群の目合い 63 µm ネットに基づく体サイズ (ESD) と採集効率の関係を見ると、ESD が 400 µm 前後の分類群の目合い 335 µm での採集効率は 10% 以下と他の目合いに比べて明らかに低かった (Fig. 8)。一方、全目合いで優占していた夜光虫のサイズは ESD で $557.2 \pm 134.9 \mu\text{m}$ (平均±標準偏差) と大きく、目合い 335 µm の採集効率も 40% 程度あった。このように、目合い 335 µm の採集効率は、ESD が 500–600 µm にかけて急激に上昇していた。

考 察

ネットの形状と濾過効率

網地全体に占める網目空隙の面積の割合である開孔率

(porosity) は、水の濾過効率など曳網における流体力学的諸条件に影響をもたらす (元田, 1974)。そのため、定量採集に用いる動物プランクトンの各目合いについて、開孔率は事前に把握しておく必要がある。本研究で用いた各目合いのネットの開孔率は 21.84%~42.92% の範囲にあり、目合い 150 µm と 335 µm は重複していたが、それ以外の目合いの開孔率の範囲は重ならず、目合いが大きくなるにつれて開孔率は大きくなっていった (Table 1)。7 種の網地の開孔率を調べた森岡・小牧 (1977) によると、開孔率は小型プランクトン用でおよそ 25–36%、中型プランクトン用で 28–43% の範囲内にあるとされる。本研究の目合い 63 µm と 100 µm (22.8% と 36.6%) は小型プランクトン用の開孔率に一致し、目合い 150 µm と 335 µm (45.5% と 42.3%) は中型プランクトン用の開孔率によく一致していた。

ネット開孔率とネット側長 (網地面積) の間には、濾過効率を確保するための実験式が存在する (Tranter and Smith, 1968)。たとえば、ノルパックネットなど口径 45 cm の円錐形ネットがどれほどの側長を必要とするかといえば、Tranter and Smith (1968) の実験式を適用すると、開孔率が 40% であれば 180 cm、35% ならば 200 cm、そして 25% ならば 270 cm となる。この例では開口比が 3 の場合であるが、およそ 95% の濾過効率を得ようとするれば、開口比は 5 以上が要求されるため (元田, 1974)、側長はさらに延長し、それぞれ 310 cm、330 cm そして 450 cm となる。そのため、濾過効率を上げるためには側長を長くすればよいとも考えられるが、小笹・木元 (1988) は開口比 15 のネットの曳網について、網口面積に対して網地面積が広すぎて、網地の外圧の方が内圧より部分的に高まり外圧が網地にかかり、その部分の網地が内側に凹んで大きく振れて、濾過効率を低下させることを報告している。そのため、むやみに測長を伸ばし、網地面積を広げることは得策とは言えない。

ネットの濾過効率は、ネット開口比 (= 網地面積×網地開孔率÷網口面積) と密接に関係することはよく知られている (上野, 1988)。本研究で用いた各目合いの開口比は、1.82~3.64 の間にあった。澤本ら (1983) や小笹・木元 (1988) によれば、開口比 6 以上のネットであれば生物量の多い時期や海域であっても有効な採集を行い得て、濾過効率はネット開口比が 5~7 の範囲で高いとされている。大森・池田 (1976) によると、十分な濾過効率を確保するにはネット開口比を少なくとも 3 以上にする必要があり、開口比がそれ以下では開口比が小さいほど濾過効率は低下する。本研究で用いたネットの開口比は、目合い 150 µm と 335 µm では 3 以上であるが、目合い 63 µm と 100 µm ではこれよりも低い。このように目合い 63 µm と 100 µm では開口比が低いため、濾過効率の低下が予想される。

ノルパックネットの濾過効率はおおよそ 65~100% の範囲にあるとされている (森岡, 1979)。濾過効率を低下させる要因として、採集物の分類群組成が重要で、珪藻類、

クラゲ類や被囊類(サルパ類, ウミタル類, 尾虫類)などのゼラチン質動物プランクトンが多い時に濾過効率は70-80%になる(森岡, 1979)。濾過効率に影響を与える要因として, ネット口輪部における特殊な水流や(朝岡・大和田, 1960), ワイヤ降下時の上下揺動による過剰曳網(小達ら, 1998)がある。本研究の濾過効率は目合い63 μm で53.0-79.8%, 100-335 μm で89.6-130.7%であり, 63 μm の濾過効率は低く, それ以外の目合いは既往の範囲より高かった(Fig. 3B)。これらのことは目合い63 μm では濾過効率が低下するような要因(目詰まり等)があり, 目合い100-335 μm では濾水量の過大評価が行われていたことを示唆している。また, 曳網距離が長くなるにつれて濾過効率が有意に低くなっていることから(Fig. 3B), すべてのネットで曳網するにつれて採集物による目詰まりが少なからず起きていることも考えられる。上野(1988)や小谷(1994)で述べられているように, 定量採集の条件として濾過効率が85%以上であることが必要とされている(Smith et al., 1968; Smith and Richardson, 1977; 元田, 1974)。そのため, 本研究の目合い63 μm は定量採集とは言えない。

ネット目詰まりを起こす要因として, 植物プランクトンの多寡が挙げられ, 沈殿量が少ない時は目詰まりは無く, 植物プランクトン細胞数密度が約20 cells mL^{-1} を越えると急に目詰まりが起こるとされている(朝岡・大和田, 1960)。本研究の最も小さな目合いの63 μm は濾過効率が低く, 目詰まり気味であったことが考えられる。本研究では各目合いの分類群組成においてヤコウチュウが55-84%を占めて卓越していた(Fig. 7)。森岡(1979)は体が軟弱なために目詰まりの原因になると思われたヤコウチュウ, 枝角類およびヤムシ類が個体数で優占する場合でも, ノルパックネットの濾過効率は100%であったと報告している。また上野(1988)は採集物の大半がヤコウチュウで占められた際にも, ネットの濾過効率が極めて大きいことから, 本分類群は目詰まりの要因にならないと報告している。これらの研究はいずれも目合いが326-357 μm と, 大型な目合いを用いた研究である(森岡, 1979; 上野, 1988)。一方, 本研究を行ったのは福島沖の6月で, 植物プランクトンの高密度は観察されず, 同時に測定されたクロロフィルの量も0.01-2.14 mg m^{-3} (0.37 \pm 0.40: 平均 \pm 標準偏差)と比較的低く(平譯 未発表資料), ZooScanにも植物プランクトンは検出されなかった(Fig. 7)。目詰まりの影響は, 開口比の低いネットから始まる(大森・池田, 1976)。本研究で使用した4つの目合いのうち, 最も開口比が低いのは目合い63 μm である(Table 1)。このことは4つのネットのうち最も開口比の低い目合い63 μm では目詰まりが起こっており, その要因分類群は植物プランクトンではなく体の軟弱なヤコウチュウであったことが考えられる。

一方, 濾過効率が100%を超えることが, 目合い100-335 μm の曳網水深の浅い定点において観察された(Fig. 3B)。濾過効率が100%を超える要因として, 海況が

悪い際にネット降下時にネットが上下動することによる過剰曳網が挙げられている(小達ら, 1998, 1999)。しかし, 本研究を行った海況は概ね良好であった。本研究で観察された濾過効率が100%を超える現象は, より水深の浅い定点に集中し, かつ大型目合いにおいてその傾向は顕著であった(Fig. 3B)。小型な目合い63 μm では水深が浅い定点で濾過効率が低い傾向は検出されたものの, その濾過効率は常に100%以下であった。水深の浅い定点の特徴として, 所定水深までのワイヤ降下速度を緩やかにせざるを得ないという点が挙げられる。水深の浅い定点では, ワイヤ降下速度が遅く, 所定水深までのワイヤ繰り出しに長い時間がかかるのに対し, 実際の曳網は所定の曳網速度(=1 m s^{-1})で行うため短い時間で終わる。このネット降下時の上下動による過剰曳網が長時間あるのに対し, 実際の曳網が短時間に終わることが, 水深の浅い定点において濾過効率が100%を超えていた要因であると考えられる。つまり, 実際の曳網を行う時間が短く, 濾水量も少ないのに対し, ネットを所定水深にまで下ろす時間が相対的に長く, この間の上下動による過剰曳網が, 濾水量の少ない水深の浅い定点では顕著であったと言える。ネット降下時の上下動による過剰曳網は短時間に起こる現象であり(小達ら, 1998, 1999), 目合いが大きいネットほどネット口部での水流はスムーズであるため(西沢・安楽, 1956), 目合いが大きいネットにおいてのみ濾過効率が100%を超える現象が起こったと考えられる。

採集効率に影響を及ぼす要因

目合い毎の出現個体数による採集効率を, 63 μm を基準として比較したところ, 採集効率は150 μm が最も高く, 100, 63 μm が同程度で, 335 μm が一貫して少なかった(Fig. 6)。目合いの違いが採集効率に及ぼす影響について, 特に小型なプランクトン(カイアシ類のノープリウス等)は小型な目合い(67, 80, 100 μm)を用いた際の採集量は大型の目合い(220, 200, 333 μm)での採集量に比べて大幅に多く, 大型の目合いによる過小評価が大きい分類群として知られている(Hwang et al., 2007; Di Mauro et al., 2009; Riccardi, 2010)。ノープリウスの採集は, 目合い60 μm ぐらいの細かいメッシュにより定量すべきとされている(Nichols and Thompson, 1991; Makabe et al., 2012)。対象とする動物プランクトン分類群の大きさに応じて, 各目合いでの採集効率は大きく変わると考えられる。また細かい目合いでも, さらに小型の種を過小評価している可能性も指摘されている(Nichols and Thompson, 1991; Chen et al., 2016)。しかし, あまりにも細かい目合いは開口比の低下をもたらしてしまうので(Table 1), 注意が必要である。本研究では採集効率は目合い150 μm が高かったが, これは開口比が本目合いで最も高いことを併せて考えると(Table 1), 整合的である。また今回の採集効率は出現個体数に基づいて算出したが, 重量バイオマスに基づく採集効率はこれとは異なる結果となる可能性もある。例えば小城ら

(1998)は海洋微小プラスチックの採集において、2つのネット(OBI ネットとJM ネット)で採集された個々のプラスチック粒子重量は殆どが0.01 g以下であり、そこに1 g以上の大型粒子が1個採集されただけで、重量は大きく変化する結果となることを報告した。このように採集効率、一般的には出現個体数から求められるが、バイオマスによる評価では結果が異なる可能性もあることに注意が必要である。

各目合い間の出現個体数の差は分類群により異なり、本研究では尾虫類、枝角類およびカイアシ類について、目合い間の有意差が検出された(Table 2)。いずれの分類群も目合い335 μm で少なく、特にカイアシ類は目合い335 μm の出現個体数は他の3つの目合いよりも有意に少なかった。Gjosacter (2000)は目合い180 μm の代わりに333 μm のネットを用いると、カイアシ類コペポダイトI~III期のような、初期発育段階の網目逸出をもたらし可能性を報告している。このように目合い63-150 μm ではノープリウスやカイアシ類の初期発育段階を採集し得るのに対し、大型な目合い335 μm ではそれらは網目逸出してしまい、カイアシ類の個体群構造(発育段階組成)を観察する上でも、正確な評価は困難であると考えられる。

各目合いネットの出現個体数に占める分類群組成では、いずれの目合いでも夜光虫(*Noctiluca scintillans*)が最優占分類群で、その占有率は目合いが大型なほど高くなり、これは目合い63-150 μm において2番目の優占分類群のカイアシ類の占有率が目合い335 μm で低かったことに起因していた(Fig. 7)。これも前述のように、目合い335 μm ではカイアシ類の正確な個体群採集が困難なことを示す結果である。一方で、目合い335 μm ではクラゲ類の占有率が他の目合いに比べてやや高くなっていった。これは、クラゲ類の体サイズが大きかったことによると考えられる。本研究で定量的に扱った分類群の中で、クラゲ類の体サイズ(ESD)は $654.8 \pm 220.4 \mu\text{m}$ (平均 \pm 標準偏差)と2番目に大きく、大型な目合い335 μm において採集効率が高かったのは妥当であると考えられる(Fig. 8)。

分類群の体長と網目逸出については様々な研究がなされており、プランクトンネットの網目選択について、対象生物の断面最大径が網目の対角線長より小さいとき、網目逸出が生じることが知られている(Smith et al., 1968; 上野, 1986, 1988)。本研究で用いた目合い335 μm の対角線は474 μm である。本研究において、目合い335 μm の出現個体数に、他の目合いでの出現個体数に有意差のあった各分類群(尾虫類、枝角類およびカイアシ類)の体サイズはいずれもESDで400 μm 前後と小さかった(Fig. 8)。カイアシ類の網目逸出についてNichols and Thompson (1991)は、カイアシ類の幅/メッシュサイズの比が1.33を超えると、カイアシ類を完全に採集でき、カイアシ類の幅がメッシュサイズの2/3のときに5%の保持率が生じることを示した。一方、Chen et al. (2016)は各目合いのネットで採集されるカイアシ類の最小サイズは、正方形のメッ

シュサイズの対角線の1/3~メッシュサイズの1/2の間にあることを報告している。このように、甲殻類のカイアシ類や枝角類の採集可能サイズは、その体幅とメッシュサイズの関係から説明ができる。一方、尾虫類はESDがカイアシ類や枝角類と同じ位なのにも関わらず、目合い100 μm や150 μm での採集効率も低かった(Fig. 8)。これは、長くて細長いという尾虫類の体型に起因していると考えられる。Chute and Turner (2001)は、アンチョビの仔魚は長くて薄い体型であるため、同じ体サイズの他分類群に比べて網目逸出の可能性が高くなることを報告している。このように各分類群の体型も、網目逸出に影響を及ぼす要因である。

分類群による各目合いによる採集効率の差は、各分類群の体サイズに関係していた。すなわちESDが400 μm 前後の分類群の目合い335 μm での採集効率は10%以下と、他の目合いに比べて明らかに低い(Fig. 8)。一方、全目合いにおいて優占していた夜光虫のサイズはESDで平均557.2 μm と大きく、目合い335 μm の採集効率も40%程度あった。このように、目合い335 μm の採集効率はESDは500-600 μm にかけて急激に上昇していた。採集効率を各目合い(445 μm と195 μm)で比較した研究では、採集効率の違いは主に最小サイズクラスに限られており、体長が1 mmを超えると、2つのネット間の採集効率の差ははるかに少なくなり、2つのネット間の開口面積の差と一致することが報告されている(Ward et al., 2012)。本研究においても、目合い335 μm の採集可能最小サイズに位置する、ESDが400 μm 前後の分類群は採集効率に差が大きく、500-600 μm 以上で体サイズの差による採集効率の差は小さく、1 mm以上の大型の種であれば本研究の目合いの範囲であっても採集効率に差はさらに少なくなることが予想される。

網目逸出と並んでネットの採集効率に影響を及ぼす要因として、網目逃避が挙げられる。本研究で用いた目合い63 μm のネットは、開口比の低さに起因する低い濾過効率により、目詰まりを起こしていた可能性があった(Fig. 3B)。ネットが目詰まりを起こすことにより、ネットが海水を濾過しなくなり、網目逃避をもたらしことはよく知られている(小笹・木元, 1987; 上野, 1988; Makabe et al., 2012)。本研究の目合い63 μm でも、低い濾過効率から考えると、網目逃避が起こっていたかも知れない。オキアミ類などの大型動物プランクトンの網目逃避は口径の大きなネットを高速で曳網することにより減らすことが出来る(Sameoto et al., 2000)。4連ノルパックネットでは濾過効率の高い目合い100-335 μm のネットを並列的に曳網することになるので、従来のノルパックネットより口径が大きくなり、いずれかのネットにオキアミ類などの大型動物プランクトンが採集される可能性も高まると考えられる。

結 論

本研究は4連ノルパックネットを用いて、4つの目合い(目合い63, 100, 150 および335 μm)での採集効率を比較した。4つのネットの開口比は1.82~3.64の間にあり、良好な濾過効率を確保するのに必要な3以上の開口比は目合い150 μm と335 μm であった。濾過効率は目合い63 μm では53.0-79.8%と低く、一般的に定量採集に必要なとされる85%を下回っていたため、定量採集には不適と考えられた。また、目合い100-335 μm の濾過効率は89.6-130.7%の間にあり、水深の浅い定点において100%を超えた濾過効率が見られた。これは水深の浅い定点におけるネット降下時の上下動による過剰曳網が原因と考えられた。出現個体数で採集効率を比較したところ、採集効率の高さは150 > 63 > 100 > 335 μm の順であった。ただし335 μm 以外の目合い間ではそれほど差はなく、体サイズ(ESD)が400 μm 前後の分類群は採集効率に差が生まれ、500-600 μm 以上で体サイズの差による採集効率の差は小さくなり、1 mm以上の大型の種であれば本研究の目合いの範囲であっても採集効率の差はさらに少なくなると考えられた。この採集効率の差は小型サイズの網目逸出によるもので、網目逃避による影響は小さいと考えられた。濾過効率と採集効率の観点から、4つの目合いのプランクトンネットのうち、いずれも良好なパフォーマンスを示した目合い150 μm が定量採集に相応しいと考えられた。従来、ノルパックネットの定量採集には目合い335 μm が用いられてきたが、カイアシ類の初期発育段階の定量などの観点から、目合い150 μm による採集も双子型ノルパックネットや4連ノルパックネットで追加すると、歴史的試料との比較も可能となるだけで無く、採集時のカイアシ類個体群構造の評価も可能になり、より正確な中型動物プランクトンの定量評価に繋がるであろう。

謝 辞

本研究に用いた試料採集にご協力を頂きました北海道大学水産学部附属練習船おしよろ丸の船長、士官ならびに乗組員の方々、同乗された研究者の方々に厚く御礼申しあげます。本研究は科学研究費補助金(基盤研究(A)17H01483, 新学術領域研究24110005, 若手研究18K14506, 基盤研究(B)19H03037)の成果の一部です。本研究の一部は北極域研究推進プロジェクト(ArCS)において実施されました。また本研究の一部は、公益財団法人水産無脊椎動物研究所の個別研究助成および北極域研究共同推進拠点研究者コミュニティ支援事業の補助を受けて実施しました。

引 用 文 献

朝岡 治・大和田守(1960) プランクトンの沓過水量に及

ぼすプランクトン・その他の影響について. 日本海洋学会誌, **16**, 36-39.

Beaugrand, G., Reid, P., Ibanez, C.F., Lindley, J.A. and Edwards, M. (2002) Reorganization of North Atlantic marine copepod biodiversity and climate. *Science*, **296**, 1692-1694.

Chen, H., Hao, Y. and Guangxing, L. (2016) Comparison of copepod collection efficiencies by three commonly used plankton nets: A case study in Bohai Sea, China. *J. Ocean Univ. China*, **15**, 1007-1013.

Chiba, S., Sugisaki, H., Nonaka, M. and Saino, T. (2009) Geographical shift of zooplankton communities and decadal dynamics of the Kuroshio-Oyashio currents in the western North Pacific. *Glob. Change. Biol.*, **15**, 1846-1858.

Chute, A.S. and Turner, J.T. (2001) Plankton studies in Buzzards Bay, Massachusetts, USA. V. Ichthyoplankton, 1987 to 1993. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **224**, 45-54.

Di Mauro, R., Capitanio, F. and Viñas, M.D. (2009) Capture efficiency for small dominant mesozooplankters (Copepoda, Appendicularia) off buenos aires province (34°s-41°s), argentine sea, using two plankton mesh sizes. *Braz. J. Oceanogr.*, **57**, 205-214.

Drinkwater, K.F., Belgrano, A., Borja, A., Conversi, A., Edwards, M., Greene, C.H., Ottersen, G., Pershing, A.J. and Walker, H. (2003) The response of marine ecosystems to climate variability associated with the North Atlantic Oscillation. *Geophys. Monogr. Ser.*, **134**, 211-234.

Ducklow, H.W., Steinberg, D.K. and Buesseler, K.O. (2001) Upper ocean carbon export and the biological pump. *Oceanography*, **14**, 50-58.

Edwards, M. and Richardson, A.J. (2004) Impact of climate change on marine pelagic phenology and trophic mismatch. *Nature*, **430**, 881-884.

Gjosaeter, H., Dalpadado, P., Hassel, A. and Skjodal, H.R. (2000) A comparison of performance of WP2 and MOCNESS. *J. Plankton Res.*, **22**, 1901-1908.

Gorsky, G., Ohman, M.D., Picheral, M., Gasparini, S., Stemmann, L., Romagnan, J.-B., Cawood, A., Pesant, S., Garcia-Comas, C. and Prejger, F. (2010) Digital zooplankton image analysis using the ZooScan integrated system. *J. Plankton Res.*, **32**, 285-303.

Hays, G.C., Richardson, A.J. and Robinson, C. (2005) Climate change and marine plankton. *Trends Ecol. Evol.*, **20**, 337-344.

Hopcroft, R.R., Clarke, C., Nelson, R.J. and Raskoff, K.A. (2005) Zooplankton communities of the Arctic's Canada Basin: the contribution by smaller taxa. *Polar Biol.*, **28**, 197-206.

Hwang, J., Kumar, R., Dahms, H.U., Tseng, L.C. and Chen, Q.C. (2007) Mesh size affects abundance estimates of *oithona* spp. (Copepoda, Cyclopoida). *Crustaceana.*, **80**, 827-837.

小谷祐一(1994) ネット(丸特, NORPAC, 及び改良型 NORPAC)の相互比較と標準化について. pp. 16-24, 水産庁作業部会(プランクトンネット採集法標準化作業部会)報告書, 中央水産研究所, 横浜.

小笹悦二・木元克則(1987) 開口比の異なる2種類のプランクトンネット内の水流. 西海区水研報告, **64**, 83-89.

小笹悦二・木元克則(1988) プランクトンネットの開口比が濾過効率と採集量に及ぼす影響. 西海区水研報告, **66**, 13-19.

Lalli, C.M. and Parsons, T.R. (1997) *Biological Oceanography: an introduction second edition*. Butterworth-Heinemann, Oxford.

Makabe, R., Tanimura, A. and Fukuchi, M. (2012) Comparison of mesh size effects on mesozooplankton collection efficiency in the Southern Ocean. *J. Plankton Res.*, **34**, 432-436.

- Michaels, A.F. and Silver, M.W. (1988) Primary production, sinking fluxes and the microbial food web. *Deep-Sea Res.*, **35A**, 473-490.
- Miller, C.B. and Wheeler, P.A. (2012) *Biological Oceanography second edition*. Wiley-Blackwell, Chichester.
- 森岡泰啓 (1979) プランクトンネット, 特に Norpac ネットと MTD ネットの濾過効率. 日水研報告, **30**, 123-130.
- 森岡泰啓・小牧勇蔵 (1977) プランクトンネット網地の網目幅と開孔率. 日水研報告, **28**, 59-62.
- 元田 茂 (1957) 北太平洋標準プランクトンネットについて. 日本プランクトン研連報, **4**, 13-15.
- Motoda, S. (1959) Devices of sample plankton net. *Mem. Fac. Fish. Hokkaido Univ.*, **7**, 73-94.
- 元田 茂 (1974) プランクトンの採集. pp. 191-217, 丸茂隆三 (編), 海洋プランクトン, 東京大学出版会, 東京.
- Nichols, J.H. and Thompson, A.B. (1991) Mesh selection of copepodite and nauplius stages of four calanoid copepod species. *J. Plankton Res.*, **13**, 661-671.
- 西沢 敏・安楽正照 (1956) 濾水計によるプランクトンネット濾水量の測定について. 北大水産彙報, **6**, 298-309.
- 小達恒夫・今井圭理・福地光男 (1998) 高緯度海域におけるノルパックネット標準採集の特性. 日本プランクトン学会報, **45**, 1-8.
- 小達恒夫・坂岡桂一郎・梶原善之・今井圭理・小林直人・目黒敏美・福地光男 (1999) 高緯度海域におけるノルパックネット標準採集の特性—その2. 荒天下に起こる過剰曳網とプランクトン現存量評価. 日本プランクトン学会報, **46**, 134-142.
- 小城春雄・馬場徳寿・石原昭治・柴田康行 (1998) 二種類のニューストネットによるプラスチック粒子採集と海洋のプラスチック汚染. 北大水産彙報, **50**, 77-91.
- 大森 信・池田 勉 (1976) 動物プランクトン生態研究法. 共立出版, 東京.
- Riccardi, N. (2010) Selectivity of plankton nets over mesozooplankton taxa : implications for abundance, biomass and diversity estimation. *J. Limnol.*, **69**, 287-296.
- Sameoto, S., Wiebe, P., Runge, J., Postel, L., Dunn, J., Miller, C. and Coombs, S. (2000) Collecting zooplankton. pp. 55-81, Harris, R., Wiebe, P., Lenz, J., Skjoldal, H.R. and Huntley, M. (eds), *ICES Zooplankton Methodology Manual*, Academic Press, London.
- 澤本彰三・吉田正人・塩田喜夫 (1983) プランクトンネット3種の採集効率相互検定 (予報). 東海大海洋研究所研報, **5**, 45-48.
- Sigler, M.F., Renner, M., Danielson, S.L., Eisner, L.B., Lauth, R.R., Kuletz, K.J., Logerwell, E.A. and Hunt, G.L.Jr. (2011) Fluxes, fins, and feathers : relationships among the Bering, Chukchi, and Beaufort Seas in a time of climate change. *Oceanography*, **24**, 251-265.
- Smith, P.E. and Richardson, S. (1977) Standard techniques for pelagic fish egg and larval surveys. *FAO Fish. Tech. Pap.*, **175**, 1-100.
- Smith, P.E., Counts, R.C. and Clutter, R.I. (1968) Changes in filtering efficiency of plankton nets due to clogging under tow. *J. Cons. Perm. Int. Explor. Mer.*, **32**, 232-248.
- Sugimoto, T. and Tadokoro, K. (1997) Interannual-interdecadal variations in zooplankton biomass, chlorophyll concentration and physical environment in the subarctic Pacific and Bering Sea. *Fish. Oceanogr.*, **6**, 74-93.
- Tranter, D.J. and Heron, A.C. (1967) Experiments on filtration in plankton nets. *Aust. J. Mar. Freshwater Res.*, **18**, 89-111.
- Tranter, D.J. and Smith, P.E. (1968) Filtration performance. pp. 27-56, Tranter, D.J. and Fraser, J.H. (eds), *Zooplankton Sampling. Monographs on Oceanographic Methodology 2*, Unesco, Paris.
- 上野正博 (1988) プランクトンネットの濾水率が採集結果に与える影響. 水産海洋研究会報, **52**, 1-6.
- Ward, P., Tarling, G.A., Coombs, S.H. and Enderlein, P. (2012) Comparing Bongo net and N70 mesozooplankton catches : using a reconstruction of an original net to quantify historical plankton catch data. *Polar Biol.*, **35**, 1179-1186.