

4連ノルパックネット採集における濾過効率と海洋環境との関係： 夏季の南極海インド洋区での例

前田百合香¹⁾・松野孝平^{1,2)*}・杉岡陸人¹⁾・村瀬弘人³⁾

¹⁾ 北海道大学大学院水産科学研究院 〒041-8611 北海道函館市港町3-1-1

²⁾ 北海道大学北極域研究センター 〒001-0021 北海道札幌市北区21条西11丁目

³⁾ 東京海洋大学 〒108-8477 東京都港区港南4-5-7

Relationship between filtering efficiency estimated using quad-NORPAC net sampling and ocean conditions: Example from the Indian sector of the Southern Ocean during summer

YURIKA MAEDA¹⁾, KOHEI MATSUNO^{1,2)*}, RIKUTO SUGIOKA¹⁾ AND HIROTO MURASE³⁾

¹⁾ Faculty/Graduate School of Fisheries Sciences, Hokkaido University, 3-1-1 Minato-cho, Hakodate, Hokkaido 041-8611, Japan

²⁾ Arctic Research Center, Hokkaido University, North 21 West 11 Kita-ku, Sapporo, Hokkaido, 001-0021, Japan

³⁾ Tokyo University of Marine Science and Technology, 4-5-7 Konan, Minato-ku, Tokyo 108-8477, Japan

* Corresponding author: E-mail: k.matsuno@fish.hokudai.ac.jp

Abstract Quantitative net sampling has been essential for zooplankton-related studies historically. However, currently, no information regarding the relationship between ocean conditions and filtering efficiency using quad-NORPAC nets is available. In this study, the influences of mesh size and ocean conditions on filtering efficiency were evaluated using data from field sampling in the Indian sector of the Southern Ocean during summer. When the impact of mesh size (63, 100, 150, and 335 μm) on filtering efficiency was assessed, the 63- μm net demonstrated the lowest efficiency, indicating that this mesh size was unsuitable for quantitatively collecting whole zooplankton during net towing. The 100- and 150- μm nets also showed lower filtering efficiencies than the 335- μm net due to clogging by phytoplankton. Moreover, excessive towing caused the overestimation of the filtering efficiency when the waves were over 2.4 m high. Thus, to collect whole zooplankton quantitatively, using nets with a mesh size of 100 μm or more is considered appropriate in the Indian sector of the Southern Ocean during summer.

Key words: clogging, quantitative net sampling, wave height, zooplankton

はじめに

海洋生態系において、動物プランクトンは一次生産を高次生物に受け渡す重要な役割を持つ (Lalli & Parsons 1997)。動物プランクトンの個体数やバイオマスは、生態系構造および鉛直的な物質循環の把握に欠かせない情報であるため (Michaels & Silver 1988)，それらの定量的な採集方法を確立することは、大変重要である。

動物プランクトンの定量採集には、従来よりプランク

トンネットが用いられており、現代においてもその扱いの容易さから広く受け入れられている (Riccardi 2010)。プランクトンネットによる定量採集を判断する指標の一つとして、濾過効率がある。これは、プランクトンネットのフレーム枠が通過した水柱の体積に対する、実際にネット地が濾過した海水の量の割合で示される。この濾過効率を変動させる要因としては、ネットの曳網距離と採集物の分類群組成 (瀬ほか 2019)，植物プランクトンの量 (朝岡・大和田 1960)，およびうねりの高さ (小達ほか 1998, 1999) がある。ネット目合による採集物

の過小評価への影響については、多くの報告があり (e.g. Hosie & Stolp 1989, Huntly & Escritor 1992, Hwang et al. 2007, Riccardi 2010), ネット目合いが粗い場合、小型カイアシ類や大型カイアシ類の初期発育段階が定量採集できないことがある。例えばHwang et al. (2007) によると、目合い100 μm と333 μm のネットで小型カイアシ類の *Oithona* spp. を採集したところ、100 μm の方が1桁ほど高い個体数を示している。また、使用するネットの目合いが大きすぎると種の多様性を過小評価するだけでなく、個体数や群集構造の季節変動も捉えられなくなる可能性が指摘されている (Riccardi 2010)。これらの問題に対して、Nicoles & Thompson (1991) は、カイアシ類の体幅とネット目合いを比較することで、目合いによって定量採集できるサイズが特定できることを提案している。

南極海は、典型的なHNLC (High Nutrient Low Chlorophyll) 海域であり、海水融解による鉄の供給や (Martin et al. 1990, Lannuzel et al. 2016), フロント付近での湧昇による栄養塩供給により (Chiba et al. 2000, Davidson et al. 2010), 大型の珪藻類が増殖する海域が不連続で出現する。そのような海域において、動物プランクトン群集の時空間変化をモニタリングする場合、上述のような植物プランクトンによるネットの目詰まりの影響を最小限にするために、比較的荒い目合いが選択される。実際に、南極海インド洋区では、335 μm のNORPACネットを使用して1972年から2021年まで継続的に調査が行われており (Takahashi et al. 2021), フロントによって区分される海域毎に動物プランクトン湿重量の経年変化が報告されている (Takahashi et al. 1998)。一方で、目合い335 μm のネットによる長期モニタリングでは、小型な動物プランクトンは定量的に採集されていない (Hwang et al. 2007, Riccardi 2010)。その解決策として、同時に目合い100 μm ネットによる試料採集を行い、それらのネット目合いとカイアシ類の採集効率を比較することで、個体数換算

ファクターが求められている (Makabe et al. 2012)。しかしながら、近年考案された4連NORPAC (濱ほか 2019) を用いて、当該海域における動物プランクトン群集の定量採集 (濾過効率) と海洋環境を比較した例は未だ報告されていない。

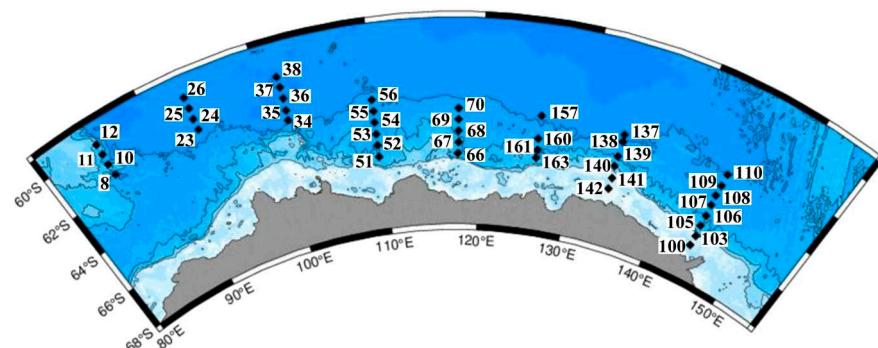
そこで、本研究では南極海東インド洋区において4連NORPACネットを使用し、異なる目合い毎に、濾過効率と海洋環境 (クロロフィルa濃度と波高) とを比較することによって、定量採集における目合いと海洋環境の影響を評価することを目的とする。

材料と方法

野外採集および衛星データ取得

調査は、2018年12月17日-2019年2月15日に、水産庁漁業調査船「開洋丸」によるKY1804航海にて行った。動物プランクトン試料は、南極海東インド洋区の84.93-144.53°E, 60.00-66.46°Sで囲まれる範囲に設けた42観測点にて、4連NORPACネット (水平に連結する4つの口径45 cm枠に目合い63 μm , 100 μm , 150 μm および335 μm を別々に装着、濱ほか 2019) を用いた水深150 mから海面までの鉛直曳きによって採集した (Fig. 1)。曳網速度は、1 m s^{-1} とし、曳網時のワイヤーの傾角を測定し、ネット枠が水深150 mに到達するようにワイヤー長を補正した。得られた試料は、船上で直ちに5%中性ホルマリンで固定した。

4連NORPAC記載論文 (濱ほか 2019) と比較のため、プランクトンネットの性能評価に関する濾水量、濾過効率、沈殿量を後述の通り測定した。動物プランクトン試料採集時、それぞれのネット開口部には、キャリブレーション済みのフローメーター (型式5571-A, 離合社) を装着し、試料採集時の濾水計の回転数 (Cs) を記録した。濾水計のキャリブレーション (無網試験) は、航海の前



後(2018年12月13日と2019年2月21日)の穏やかな海況時に行なった。ネット地をつけない4連NORPACフレームに4つのフローメーターをネット枠ごとに装着し、ワイヤーアウト100 mから 1 m s^{-1} の速度で鉛直曳きし、濾水計の回転数を記録した。これを、合計10回(航海前後で5回ずつ)行い、最大最小を除く8回の平均値をキャリブレーション回転数(Cca)とした。このキャリブレーション結果を用いて、まず試料採集時の濾水量を以下の式から求めた。

$$V = (\pi \times (0.45/2)^2 \times 100 / \text{Cca}) \times \text{Cs}$$

この時、V(m^3)は濾水量である。

次に、以下の式から濾過効率(Filtering Efficiency, FE)を計算した。

$$\text{FE} = V / 23.86$$

この時、 23.86 m^3 は口径45 cmのネット枠が150 mの水柱を鉛直に濾した際の海水の体積($= \pi \times (0.45/2)^2 \times 150$)である。

ネット採集時の波高(Wave Height, WH, m)は、マイクロ波式波高計(鶴見精機, WM-II)で1秒ごとに測定し、各観測点での観測開始時刻から10分間の平均値をその観測点の値とした。

また、GlobColour project(The European Service for Ocean Colour, 2020, <http://www.globcolour.info/>)によって2018年12月から2019年2月までの調査海域における海面クロロフィルa濃度(mg m^{-3})を、時空間分解能4 kmと8日間平均で取得した。

試料分析

ホルマリン固定試料は陸上実験室にて、元田式分割器を用いて1/2に分割した。その後、試料瓶を1日以上静置し、 1 mL の精度で沈殿量(Settling Volume, SV, mL m^{-3})を測定した。

データ解析

335 μm ネットの濾水量と150 μm , 100 μm , 63 μm ネットの濾水量との関係及び、濾過効率と沈殿量の関係については、Stat view v5を用いて目合いごとに原点を通過する回帰分析を行なった。

ネット採集時の濾水量に影響を与える要因を明らかにするために、波高と海面クロロフィルa濃度を説明変数とする一般化線形モデル(GLM)を作成した。GLM解析時に、濾過効率はガンマ分布として扱った。説明変数については、VIF(variance inflation factors)を計算し、説明

変数間の共線性を排除した。これらの解析は、R(R version 4.1.2; The R Foundation for Statistical Computing, 2021)を用いて行った。

結果

目合い335 μm のネットによる濾水量に対し、いずれの目合い(150 μm , 100 μm , 63 μm)の濾水量も有意な相関関係があった(Fig. 2a)。目合い335 μm のネットは、南極海インド洋区において動物プランクトン群集の長期モニタリングに使用されているため(Takahashi et al. 1998), その濾水量を1としたとき、目合い150 μm , 100 μm , 63 μm のネットの濾水量はそれぞれ0.973, 0.930, 0.686であり、目合い63 μm のネットの濾水量が著しく低かった(Fig. 2a)。各ネットの濾過効率は目合いによって差があり、目合い100 μm , 150 μm , 335 μm のネットの濾過効率は0.708–1.265であったが、目合い63 μm のネットでは0.490–0.875と1から有意に低かった(U-test, $p < 0.0001$) (Fig. 2b)。濾過効率と沈殿量は、目合い63 μm , 100 μm , 150 μm のネットの場合に有意に負の関係が認められたが、335 μm のネットでは認められなかった(Fig. 2c)。

波高および海面クロロフィルa濃度が濾過効率へ及ぼす影響を見ると、全ての目合いのネットで波高が高いほど濾過効率が高かった(Fig. 3)。一方で、海面クロロフィルa濃度が高いほど濾過効率は低い傾向が見られた(Fig. 3)。一般化線形モデルでこれらの関係を確認すると、波高の影響は前述の通り、全ての目合いに有意な影響が見られたが、海面クロロフィルa濃度は目合い150 μm 以下のネットの場合のみ影響を及ぼすことが示された(Table 1)。

考察

本研究において、濾水量は目合いが細かくなるほど小さくなつたが、100, 150, 335 μm の目合い間では差が少なかった(Fig. 2a)。また、濾過効率も目合い100, 150, 335 μm での0.708–1.265に比べて63 μm では0.490–0.875と低かった(Fig. 2b)。目合い100–335 μm のネットと比べて、63 μm ネットだけが濾過効率が低下する傾向は、濱ほか(2019)と一致している。定量採集には85%以上の濾過効率が必要であるため(Smith et al. 1968), 本研究では63 μm ネットでは定量的な試料採集ができていなかったと考えられる。

濾過効率が低下する要因としては、ネット地の目詰まりが挙げられる(朝岡・大和田 1960, Smith et al. 1968, 濱

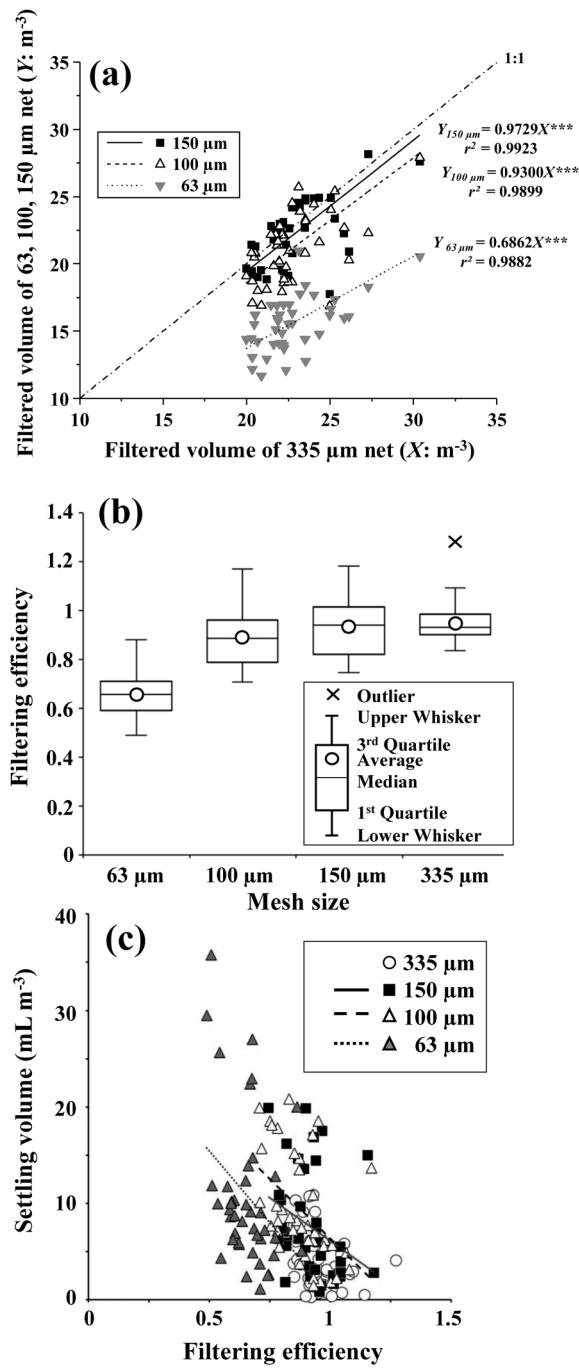


Fig. 2. Relationships between filtered volumes of the nets with three smaller mesh sizes (63, 100, and 150 μm) and that of the 335-μm mesh (a). ***: $p < 0.0001$. Comparison of filtering efficiencies among the different mesh sizes (b). Comparison of the zooplankton settling volume and filtering efficiency for each mesh size (c). The solid, dashed, and dotted lines indicate significant relationships between the parameters.

ほか 2019). 朝岡・大和田 (1960) によると、理論上網目をすり抜けられる大きさの植物プランクトンでも目詰まりの原因になり得る。本研究では、目合い 150 μm 以下

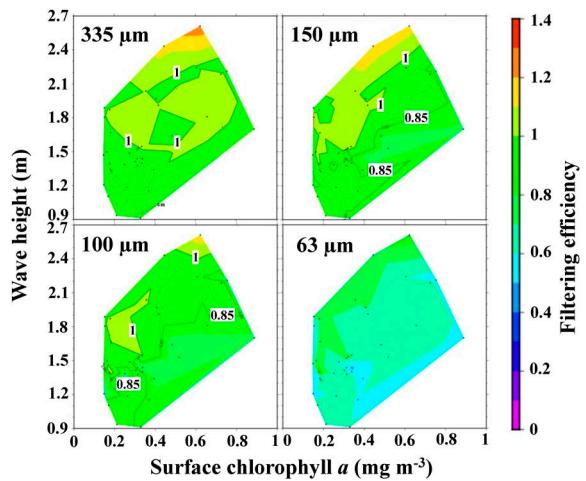


Fig. 3. Effects of physical and biological parameters on the filtering efficiency of the net towing. The solid and dashed lines indicate filtering efficiencies of 100 and 85%, respectively.

Table 1. Results of GLM analysis for filtering efficiency using each mesh size. Int.: intercept, Chl. *a*: surface fluorescence, WH: wave height, AIC: Akaike Information Criterion. *: $p < 0.05$; **: $p < 0.01$; ***: $p < 0.001$.

Mesh size (μm)	Int.	Chl. <i>a</i>	WH	AIC
335	0.715	-0.0215	0.155***	-99.928
150	0.751	-0.358***	0.190***	-80.035
100	0.739	-0.319**	0.163***	-67.480
63	0.523	-0.192*	0.121**	-77.599

において沈殿量が多くなるほど濾過効率が低下する傾向がみられ (Fig. 2c), さらに, 海面クロロフィル *a* 濃度が高くなると濾過効率が低下する傾向があった (Fig. 3, Table 1)。このことから, 目合い 150 μm 以下では植物プランクトンによる目詰まりが濾過効率低下の原因になったと考えられる。実際に, 沈殿量の測定時に 150 μm 以下の試料中に多量の植物プランクトンが含まれていることを確認している。

動物プランクトンネット採集において, 植物プランクトン量や組成は, ネット地の詰まりやすさに直結すると考えられる。試料採集を行った夏季の南極海インド洋区では, 海氷からの鉄の供給と (Martin et al. 1990, Lannuzel et al. 2016), 海洋フロント付近での湧昇による栄養塩の供給 (Chiba et al. 2000, Davidson et al. 2010) によって植物プランクトンブルームが局所的に発生する。実際に, 本研究の航海中では, 調査海域の西側 (125°E 以西) では, クロロフィル *a* 濃度は低かったが, 東側 (125°E 以東) では高く, 植物プランクトンブルームが発生していた (Matsuno et al. 2023)。本研究で測定した濾過効率を調査海域の東側と西側で比較したところ, 有意な差は見られ

なかった。一方で、沈殿量に関して東側と西側で比較したところ、 $100\text{ }\mu\text{m}$ および $63\text{ }\mu\text{m}$ 試料において、ブルームが発生していた東側の方が有意に高かった(*U*-test, $p<0.05$)。このことより、植物プランクトンの多寡が沈殿量に影響を及ぼしていたことが明らかとなった。珪藻類の組成としては、本研究と同航海に基づく調査の結果、*Fragilariopsis curta*に代表される*Fragilariopsis*属が調査海域全体で優占していた(Matsuno et al. 2023)。*Fragilariopsis*属は、1細胞の大きさは本研究で用いた目合いで $63\text{ }\mu\text{m}$ 以下であるが、多くの場合複数細胞が連鎖している。このことから、夏季の南極海インド洋区では、連鎖細胞を形成する珪藻類が多く出現していたために、細かな目合いで植物プランクトンによる目詰まりの影響を受けやすかったと考えられる。

一方で、濾過効率が過大評価される要因としては、波浪による船の動搖を起因とする過剰曳網が挙げられる(小達ほか 1998, 1999)。過剰曳網は、静穏時でのネット曳網に比べて、高い波高による船体動搖に伴ってネット曳網中の昇降を繰り返してしまい、その結果、ネットの曳網距離が過大になると指す(小達ほか 1998, 1999)。これは、特にネット観測時の海況が悪いほど発生しやすく、風速やうねりと相関がある(小達ほか, 1998)。本研究では全ての目合いで波高が高いほど濾過効率が上昇する傾向がみられ(Fig. 3, Table 1)，特に波高が 2.4 m を超えると、目合いで $100\text{--}335\text{ }\mu\text{m}$ において濾過効率100%を必ず超えることが分かった。ただし、この波高 2.4 m は、本研究で使用した開洋丸(喫水 6 m)の場合であり、船舶の大きさによって、波高の影響が変化することに留意されたい。

上述のような海洋環境が濾過効率に及ぼす影響については、これまで具体的に数値として示されておらず(小達ほか 1998)，また複合的な影響を統計解析された例もなかった。本研究で目詰まりの影響を受けていないと考えられた $335\text{ }\mu\text{m}$ ネットの濾過効率に注目すると、波高が 1.4 m 程度になると過剰曳網が起き始めると考えられる。また、それを踏まえて、過剰曳網と目詰まりの両方の影響を受けていると考えられる $150\text{ }\mu\text{m}$ ネットの濾過効率を見ると、海面クロロフィル a 濃度が約 0.3 mg m^{-3} 以上になると定量採集ができなくなっていると判断できる。本研究によって示された4連NORPACネット採集時の濾過効率は、試料間比較時の海洋環境による影響の排除や動物プランクトンネット試料の選定に活用されることが期待できる。

Chiba et al. (2001) はカイアシ類中心の動物プランクトン群集の時空間変動を把握するために細かな目合い(e.g.

$<330\text{ }\mu\text{m}$)のネットを低速で曳網することを推奨している。一方で、 $335\text{ }\mu\text{m}$ のネットでは目詰まりの影響がないものの、目合いが大きいことで小型生物の過小評価につながることが指摘されている(Hwang et al. 2007, Riccardi 2010)。濱ほか(2019)では、濾過効率と採集効率の高さから $150\text{ }\mu\text{m}$ ネットが中型動物プランクトンの定量採集にふさわしいことを示している。また、Makabe et al. (2012) はカイアシ類のノープリウス幼生を除けば、南極海において $100\text{ }\mu\text{m}$ ネットが動物プランクトンの群集構造を把握するのに適した目合いであることを示している。本研究では動物プランクトンの採集効率について検討していないが、濾過効率から判断すると、夏季の南極海において動物プランクトン相を満遍なく採集するためには、 $100\text{ }\mu\text{m}$ 以上の目合いで用いるのが適切であると考えられる。一方で、ノープリウス幼生を含む小型な分類群を定量採集する場合は、濾過効率を求めた上で、より目合いで細かなネットによる採集が適切と考えられる。動物プランクトンの定量的な比較のために、調査海域における研究対象生物のサイズとネット目合いとの関係を正確に把握し、適切なネット目合いで選択すべきと考えられる。

謝辞

本研究に用いた試料や観測データの採集に際し、多大なご協力を頂いた水産庁所属漁業調査船「開洋丸」船長、乗組員の方々及び同乗された研究者各位に心から御礼申し上げます。

引用文献

- 朝岡 治・大和田 守(1960) プランクトンネットの汎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.
- Chiba S, Hirawake T, Ushio S, Horimoto N, Satoh R, Nakajima Y, Ishimaru T, Yamaguchi Y (2000) An overview of the biological/oceanographic survey by the RTV *Umitaka-Maru III* off Adelie Land, Antarctica in January–February 1996. Deep-Sea Res II 47: 2589–2613.
- Chiba S, Ishimaru T, Hosie GW, Fukuchi M (2001) Spatio-temporal variability of zooplankton community structure off east Antarctica (90 to 160°E). Mar Ecol Prog Ser 216: 95–108.
- Davidson AT, Scott FJ, Nash GV, Wright SW, Raymond B (2010) Physical and biological control of protistan community composition, distribution and abundance in the seasonal ice zone of the Southern Ocean between 30 and 80°E. Deep-Sea Res II 57: 828–848.
- 濱 齊之・阿部義之・松野孝平・山口 篤(2019) 4連ノルバッケネットを用いたネット目合いで違いが濾過効率と採集効率に与える影響に関する研究. 北海道大学水産科学研究彙報 69: 47–56.
- Hosie GW, Stolp M (1989) Krill and zooplankton in the western Prydz Bay region, September–November. 1985. Proc NIPR Symp Polar

- Biol 2: 34–45.
- Huntly M, Escritor F (1992) Ecology of *Metridia gerlachei* Giesbrecht in the western Bransfield Strait, Antarctica. Deep-Sea Res 39: 1027–1055.
- Hwang J, Kumar R, Dahms HU, Tseng LC, Chen QC (2007) Mesh size affects abundance estimates of *Oithona* spp. (Copepoda, Cyclopoida). Crustaceana 80: 827–837.
- Lalli CM, Parsons TR (1997) Biological Oceanography: An introduction second edition. Butterworth-Heinemann, Oxford, 326 pp.
- Lannuzel D, Vancoppenolle M, de Jong J, Meiners KM, Grotti M, Nishioka J, Schoemann V (2016) Iron in sea ice: Review and new insights. Element Sci Anth 4: 000130.
- Makabe R, Tanimura A, Fukuchi M (2012) Comparison of mesh size effects on mesozooplankton collection efficiency in the Southern Ocean. J Plankton Res 34: 432–436.
- Martin JH, Fitzwater SE, Gordon RM (1990) Iron deficiency limits phytoplankton growth in Antarctic waters. Global Biogeochem Cycles 4: 5–12.
- Matsuno K, Sumiya K, Tozawa M, Nomura D, Sasaki H, Yamaguchi A, Murase H (2023) Responses of diatom assemblages and life cycle to sea ice variation in the eastern Indian sector of the Southern Ocean during austral summer 2018/2019. Prog Oceanogr 218: 103117.
- Michaels AF, Silver MW (1988) Primary production, sinking fluxes and the microbial food web. Deep-Sea Res 35: 473–490.
- Nichols JH, Thompson AB (1991) Mesh selection of copepodite and nauplius stages of four calanoid copepod species. J Plankton Res 13: 661–671.
- 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・日黒敏美・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.
- Riccardi N (2010) Selectivity of plankton nets over mesozooplankton taxa: Implications for abundance, biomass and diversity estimation. J Limnol 69: 287–296.
- Smith PE, Counts RC, Clutter RI (1968) Changes in filtering efficiency of plankton nets due to clogging under tow. J Cons Perm Int Explor Mer 32: 232–248.
- Takahashi KT, Hosie GW, McLeod DJ, Kitchener JA (2011) Surface zooplankton distribution patterns during austral summer in the Indian sector of the Southern Ocean, south of Australia. Polar Sci 5: 134–145.
- Takahashi KT, Makabe R, Odate T (2021) Zooplankton monitoring using a twin NORPAC net during the 61st Japanese Antarctic Research Expedition in austral summer 2019–2020. Polar Data J 5: 69–79.
- Takahashi K, Tanimura A, Fukuchi M (1998) Long-term observation of zooplankton biomass in the Indian Ocean sector of the Southern Ocean. Mem Natl Inst Polar Res 52: 209–219.
- The European Service for Ocean Colour (2020) GlobColour project. <https://www.globcolour.info/> (2024年11月12日アクセス)