

# 北海道周辺海域における年6回の定期海洋観測で得られた動物プランクトン生物量の長期変動（総説）

嶋田 宏<sup>1</sup>, 有馬大地<sup>2</sup>, 浅見大樹<sup>3</sup>

<sup>1</sup>北海道立総合研究機構水産研究本部, <sup>2</sup>北海道立総合研究機構中央水産試験場,

<sup>3</sup>北海道立総合研究機構さけます・内水面水産試験場

Long-term fluctuations in zooplankton biomass collected during six research cruises around Hokkaido (Review)

HIROSHI SHIMADA<sup>\*1</sup>, DAICHI ARIMA<sup>2</sup> and HIROKI ASAMI<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Fisheries Research Department, Hokkaido Research Organization, Yoichi, Hokkaido, 046-8555,

<sup>2</sup> Central Fisheries Research Institute, Fisheries Research Department, Hokkaido Research Organization, Yoichi, Hokkaido, 046-8555,

<sup>3</sup> Salmon and Freshwater Fisheries Research Institute, Fisheries Research Department, Hokkaido Research Organization, Eniwa, Hokkaido, 061-1433, Japan.

The results of the zooplankton research conducted by the Hokkaido Research Organization over the past 30 years were reviewed. To elucidate the fluctuations in lower trophic level production, we examined long-term changes in zooplankton biomass and species composition of samples collected using the NORPAC net almost six times a year around Hokkaido. Regarding the long-term fluctuation of zooplankton biomass, it was revealed that the biomass remained almost unchanged, although the annual fluctuations at each station were largely based on the wet weight dataset from 1989 to 2019 obtained from the subsurface layer (depth 150 m) at the six stations. However, the species composition of the dominant large copepods obtained from the mesopelagic layer (depth 500 or 300 m) from 2008 to 2019 varied by area. The dominant large copepod species were *Neocalanus* spp., *Eucalanus bungii*, and *Metridia* spp., which fluctuated significantly annually. Because these large copepods are cold-water species that prey on important fishery resources such as chum salmon, walleye pollock, and arabesque greenling, it is important to monitor these large copepod species, considering the relationships among their biomass, ocean warming, and fishery resource status from a long-term perspective.

キーワード：カイアシ類, 湿重量, 長期変動, 動物プランクトン

近年、気候変動とりわけ海洋温暖化が水産資源に与える影響が注目されている（例えばSumaila *et al.*, 2011; Mills *et al.*, 2013; Cheung *et al.*, 2013）。我が国周辺においても、ほぼ全ての海域で海面水温の上昇傾向が認められており（気象庁 [http://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/data/shindan/a\\_1/japan\\_warm/japan\\_warm.html](http://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/data/shindan/a_1/japan_warm/japan_warm.html), 2023年3月8日）、水産資源の長期変動との関係が注目されている（水産庁 [https://www.jfa.maff.go.jp/j/kikaku/wpaper/h29\\_h/trend/1/t1\\_1\\_2\\_3.html](https://www.jfa.maff.go.jp/j/kikaku/wpaper/h29_h/trend/1/t1_1_2_3.html), 2022年3月6日）。サケ、スケトウダラ、ホッケ、サンマ等といった北海道周辺の重要魚種

は甲殻類動物プランクトンを主な餌としており（例えば小達, 1977; 小岡ら, 1997; 浅見ら, 2010）、重要魚種の資源量が長期的に減少傾向にあることの一因として、餌環境の悪化が想定される。日本周辺北西太平洋海域で50年以上の長期にわたって採集された動物プランクトン試料（Odate Collection）の解析により、気候変動が動物プランクトン組成に影響を与え、これらを餌とする魚種の資源動態にも影響を与えたことが示唆されている（Sugisaki, 2006; 杉崎, 2008）。動物プランクトンと水産資源の関係を調べるためには、長期的かつ海域を網羅した動物プラ

報文番号A623 (2023年6月27日受理)

\*Tel: 0135-67-7621. Fax: 0135-74-3135. E-mail: shimada-hiroshi@hro.or.jp

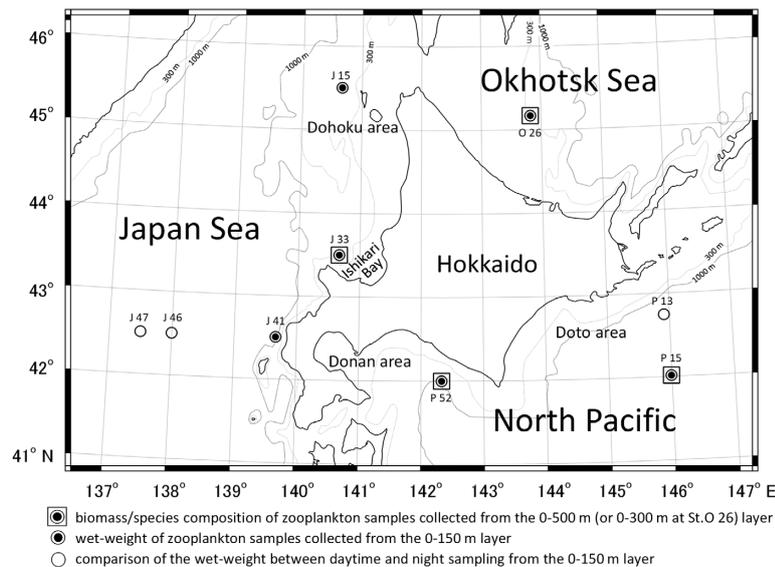


Fig.1 Map showing the sampling stations around Hokkaido

ンクトンの採集と分析が必要であるが、我が国において、そのような長期的、広域的なプランクトン調査は上述の Odate Collectionのみであった。

北海道立水産試験場および北海道立総合研究機構水産研究本部（以下「道水試」と略称）は、北海道周辺における水産資源変動と餌環境の関係を長期的かつ網羅的に調べるため、1989年から、年6回の「定期海洋観測」においてプランクトン採集を開始した（小鳥, 2001；吉田ら, 2004）。当初は動物プランクトンの生態に関する知見および調査船の装備の不足から、亜表層（深度150 m）からの鉛直曳きのみを行っていたため、海域によって採集時間帯による生物量の差（夜間生物量>昼間生物量）が大きいことが問題であった（嶋田ら, 2012）。観測開始から20年を経た2008年に、夜間に表層に浮上する日周鉛直移動種の入網量が試料の生物量に与える影響を軽減するため、中層（深度500 mまたは300 m）からの鉛直採集を新たに開始して（嶋田ら, 2012）、現在に至っている。

本稿は、道水試が実施した「定期海洋観測」の長期観測結果に基づいて、本道周辺海域において重要魚種の主な餌となる動物プランクトン生物量の長期変動について気候変動等との関連を総説し、水産資源の変動機構解明ならびに持続的利用の一助とするものである。なお本稿においては、著者らが新たに取得したデータおよび解析結果を加えた記述については、その旨を明記した。

#### 亜表層の鉛直採集で得られた 動物プランクトン湿重量の長期変動

動物プランクトン試料は、1989-2019年に北海道周辺6

定点（道東／道南太平洋, 道南／道北日本海, 石狩湾, オホーツク海, Fig.1）において、原則として年6回の頻度で、網目合0.33 mmの改良型ノルパックネット（元田, 1994）を用いて、深度150 mから鉛直曳きによって採集し、約10%の中性ホルマリンで固定した。湿重量は、原則として1/2分割した試料について、網目合0.1 mmのプランクトンネットをつけた減圧濾過装置を用いて水分を除去し（元田, 1975）、0.01 g単位で秤量した。目視によって植物プランクトンまたはゼラチン質プランクトンの大量混入が確認された試料については、季節変動／長期変動解析の対象外とした。採集時間帯による生物量の差を調べるため、定点を変更せずに採集した20年間（1989-2008年）における4海域毎の夜間採集試料と昼間採集試料の湿重量を比較した。ここで、比較に用いるデータ期間を上記の20年間に限った理由は、沿岸から沖合まで網羅した当初の採集定点を維持していたのは20年間である（2009年に廃止した定点のデータを含んだまま同年以降のデータを更新するとバイアスが生じる）ためである。比較の結果、日本海とオホーツク海で採集時間帯による湿重量の差が認められたのに対して、道東／道南太平洋では差が認められなかった（Fig.2, 嶋田・栗林, 2012）。採集時間帯による湿重量の差が明らかとなった日本海とオホーツク海については、海域別の夜間採集試料と昼間採集試料の比（夜間採集湿重量の平均値／昼間採集湿重量の平均値、以下「f」）を求め、fを昼間採集湿重量に乗じて昼夜補正済湿重量とし、季節変化／長期変動解析に用いた（Fig.2, 嶋田・栗林, 2012）。日出没前後約30分の薄明／薄暮時の採集試料については、試料全体の8.52%と頻度が低く海域毎の比較が困難であったため、便宜的に

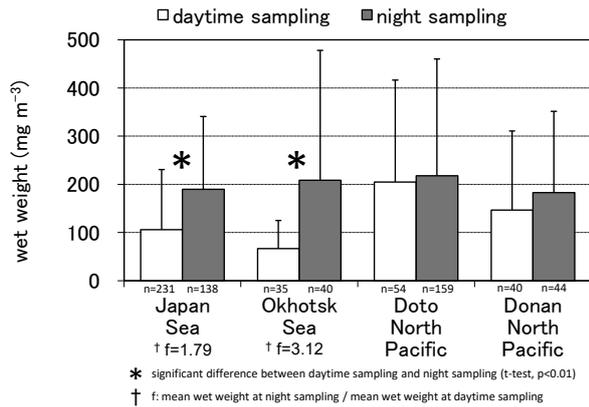


Fig.2 Comparison of the wet weights of zooplankton samples between daytime sampling and night sampling in the four areas around Hokkaido (modified from Shimada and Kuribayashi 2012). Error bars indicate the standard deviations

f/2を乗じて昼夜補正済湿重量として取り扱った。長期変動解析については、Mann-Kendall傾向検定によって調査期間全体の変動傾向を調べた。なお、上記解析に用いたデータのうち、道東/道南太平洋の2008-2011年の試料については、嶋田ら(2012)によって湿重量のほか優占種バイオマス組成が明らかにされている。

20年間(1989-2008年)における海域別の夜間採集試料と昼間採集試料の比(f)の値は日本海で1.79、オホーツク海で3.12であった(Fig.2, 嶋田・栗林, 2012)。fを昼間採集湿重量に乗じた昼夜補正済湿重量について1989-2019年の定点別動物プランクトン湿重量の季節変化をみると、年間ピークは4-8月にあり、日本海ではピーク時期は亜表層の水温が高めの道南で早く、道北で遅い傾向が認められた(Fig.3, 嶋田・安永, 2012)。一方、太平洋では、季節的に津軽暖流の影響を受けて亜表層の水温が高

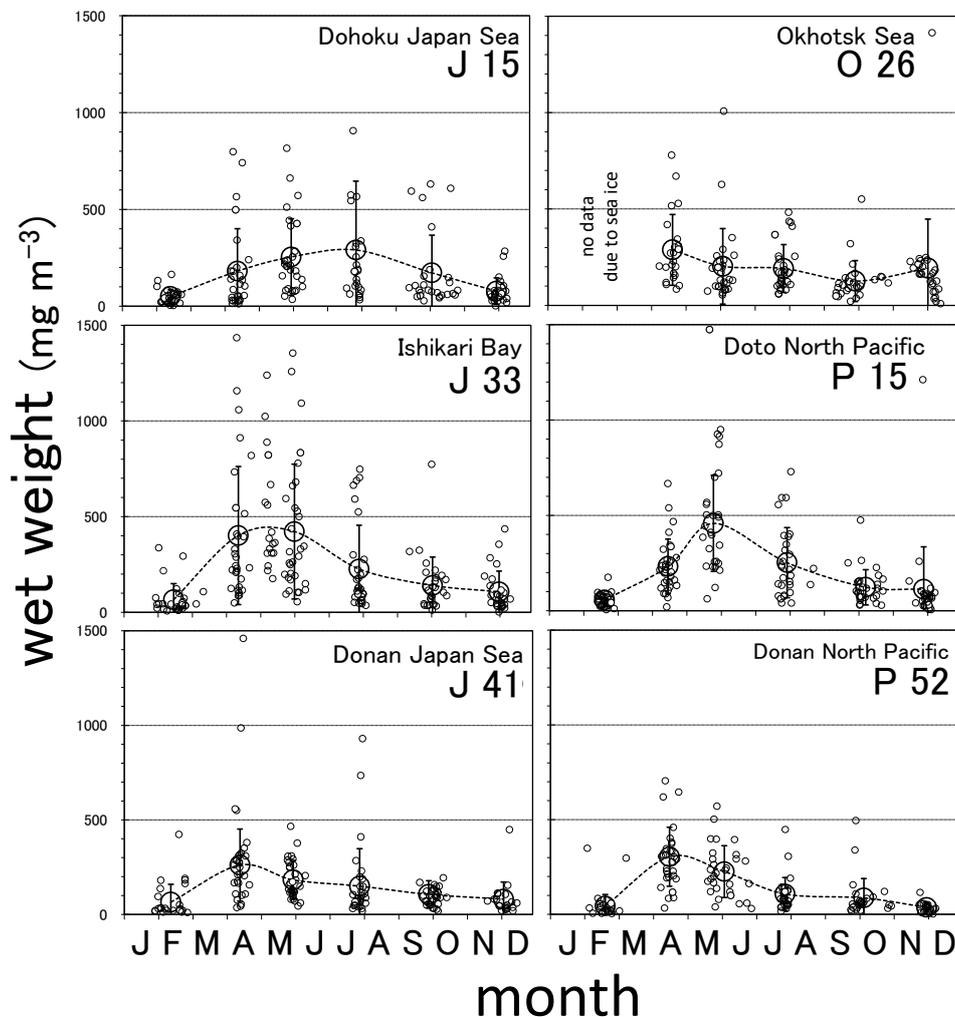


Fig.3 Seasonal changes of zooplankton biomasses (wet weight) at the six sampling stations around Hokkaido from 1989 to 2019 (modified from Shimada and Yasunaga 2020)

The large open circles with dashed lines indicate the seasonal means and their fitting curves, and the error bars show the standard deviations

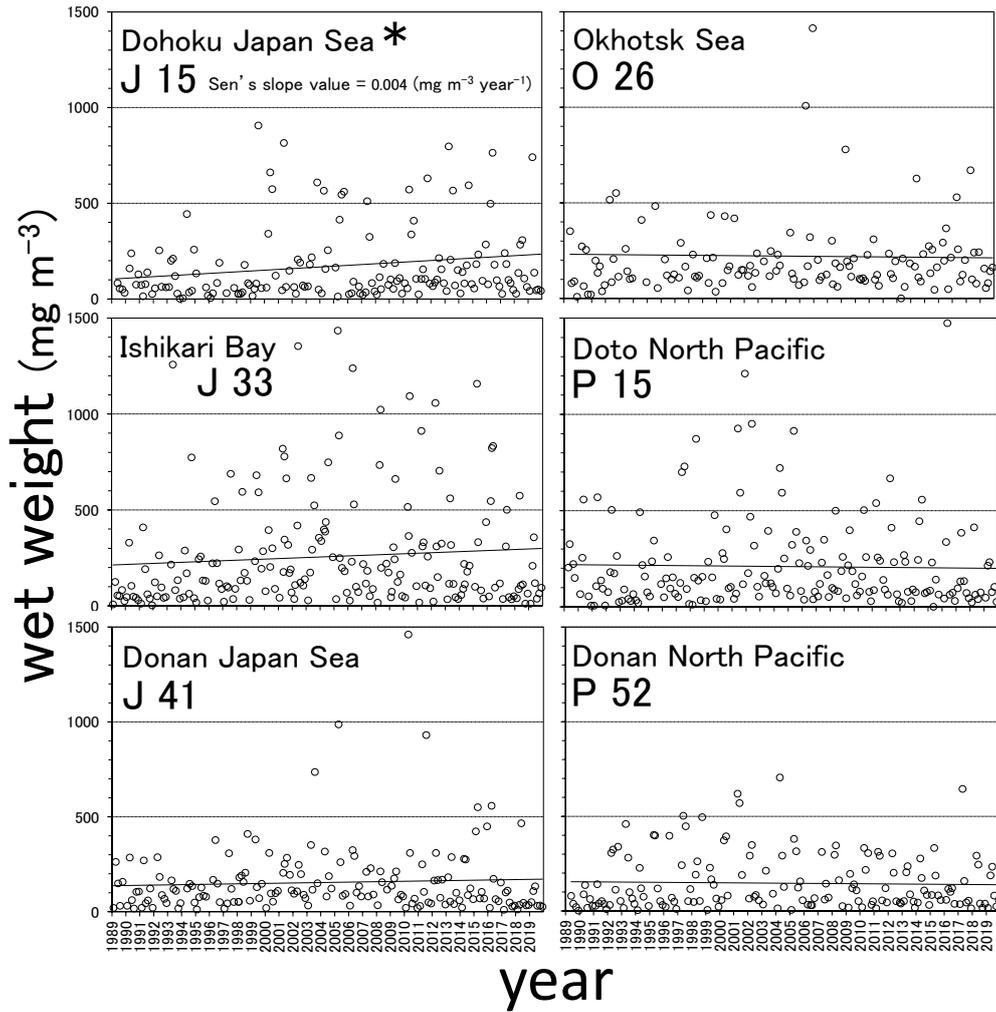


Fig.4 Scatterplots and regression lines showing the long-term changes of zooplankton biomasses (wet weight) at the six sampling stations around Hokkaido during 1989-2019 (updated from Shimada 2016). Asterisk (\*) indicates a significant increasing trend (Mann-Kendall test,  $p < 0.05$ )

めとなる道南で早く、親潮が卓越する道東で遅い傾向が認められた (Fig.3, 嶋田・安永, 2012)。長期変動をみると、日本海の一部定点で増加トレンドが認められた他は、ほぼ横ばいであった (Fig.4, 嶋田, 2016にデータを追加)。

1989-2019年に得られた定点別の垂表層採集試料の湿重量の季節変化は、「動物プランクトンバイオオマスの年間ピークは暖水域で早く冷水域で遅い」すなわち、バイオオマスの年間季節ピークは温度依存的に決定されることを示唆する (嶋田, 2016)。今後、海洋温暖化が進行するにつれて本道周辺における動物プランクトンの季節ピークは早まることが予想され、稚魚期に動物プランクトンを餌として春季に成長するサケ、スケトウダラ、ホッケ等重要魚種の再生産過程との時空間的ミスマッチが将来的に危惧される。

一方、定点別の長期変動をみると、日本海の一部定点で増加トレンドが認められた (Fig.4, 嶋田, 2016にデータを追加)。日本海は魚類相が貧弱であり (例えば 本間、

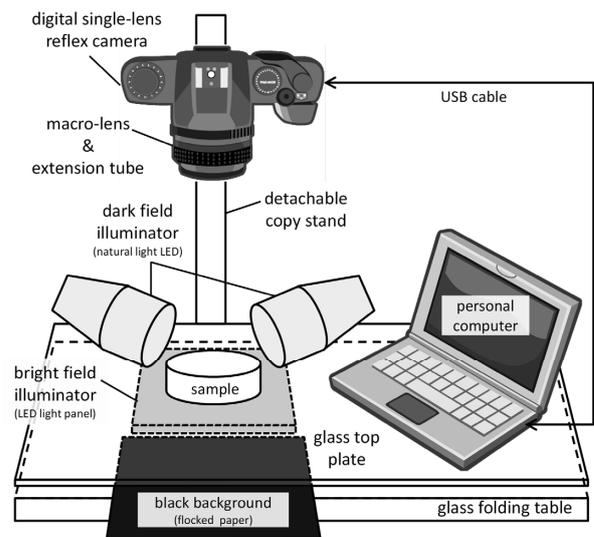


Fig.5 Schematic diagram showing the system for zooplankton imaging (modified from Shimada and Oku 2014)

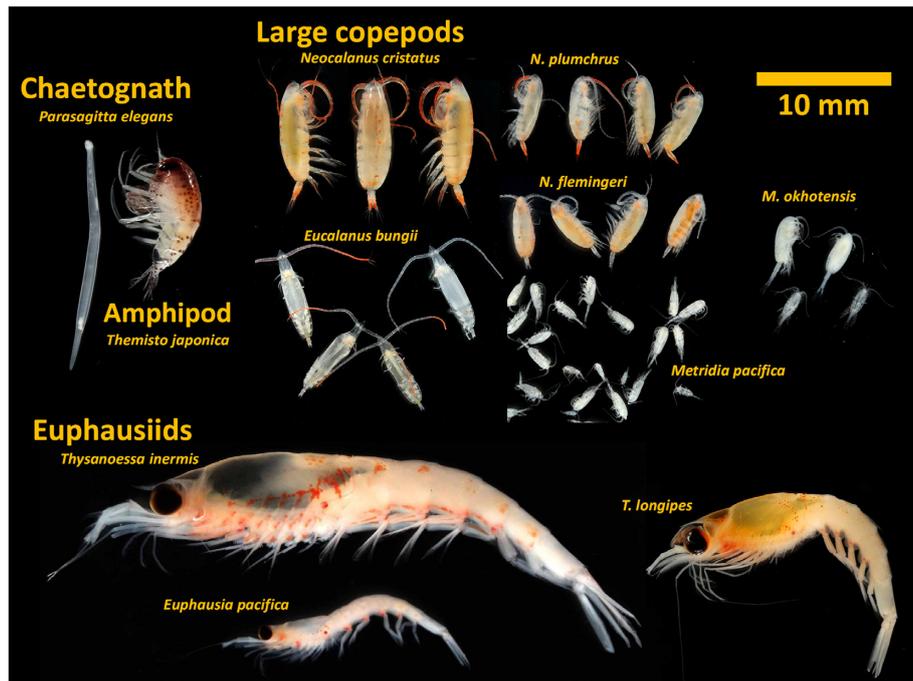


Fig. 6 Dominant large zooplankton species collected using the modified NORPAC net (vertically towed from mesopelagic layer) in the four areas around Hokkaido from 2008 to 2019 (modified from Shimada 2018)

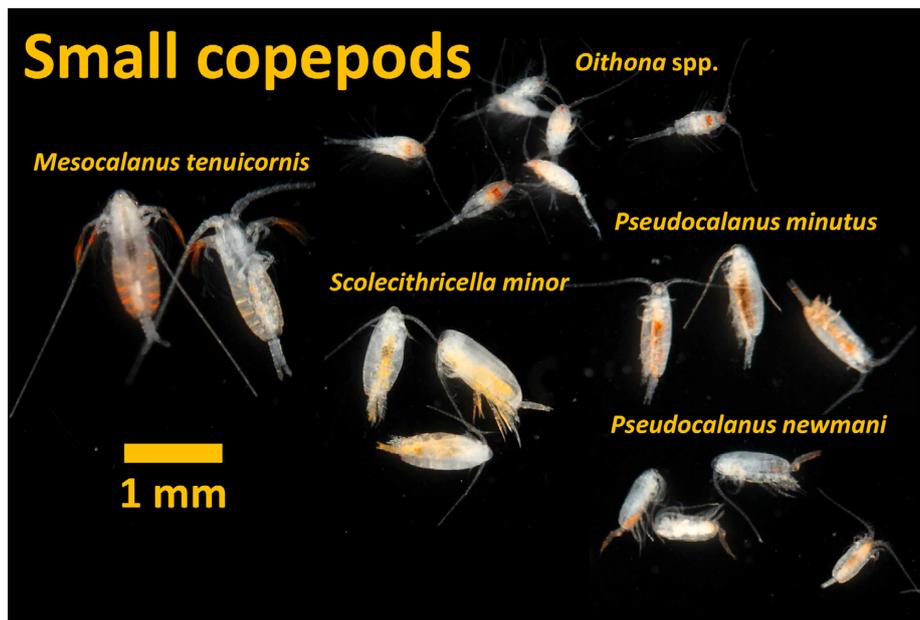


Fig. 7 Dominant small copepod species collected using the modified NORPAC net (vertically towed from mesopelagic layer) in the four areas around Hokkaido from 2008 to 2019 (modified from Shimada 2018)

1987), 調査期間中においてスケトウダラおよびホッケの資源状態が急速に悪化(水産庁・水産研究・教育機構 <https://abchan.fra.go.jp/digests2022/index.html>, 2023年3月8日)していることから, 魚類による捕食圧の減少が動物プランクトンの増加の一因である可能性も考えられる(嶋田, 2016)。今後モニタリングを継続することにより, 海洋温暖化および酸性化の進行によって新たな変動傾向

(冷水/暖水種の減少/増加, 炭酸カルシウムの骨格や殻を持つ生物の減少等)が現れる可能性もある。温暖化傾向が著しい日本海(気象庁 [https://www.data.jma.go.jp/kaiyou/data/shindan/a\\_1/japan\\_warm/cfig/warm\\_area.html?area=F#title](https://www.data.jma.go.jp/kaiyou/data/shindan/a_1/japan_warm/cfig/warm_area.html?area=F#title), 2023年3月28日)とオホーツク海(例えば 気象庁 [https://www.data.jma.go.jp/kaiyou/shindan/a\\_1/series\\_okhotsk/series\\_okhotsk.html](https://www.data.jma.go.jp/kaiyou/shindan/a_1/series_okhotsk/series_okhotsk.html), 2023年3月28日)

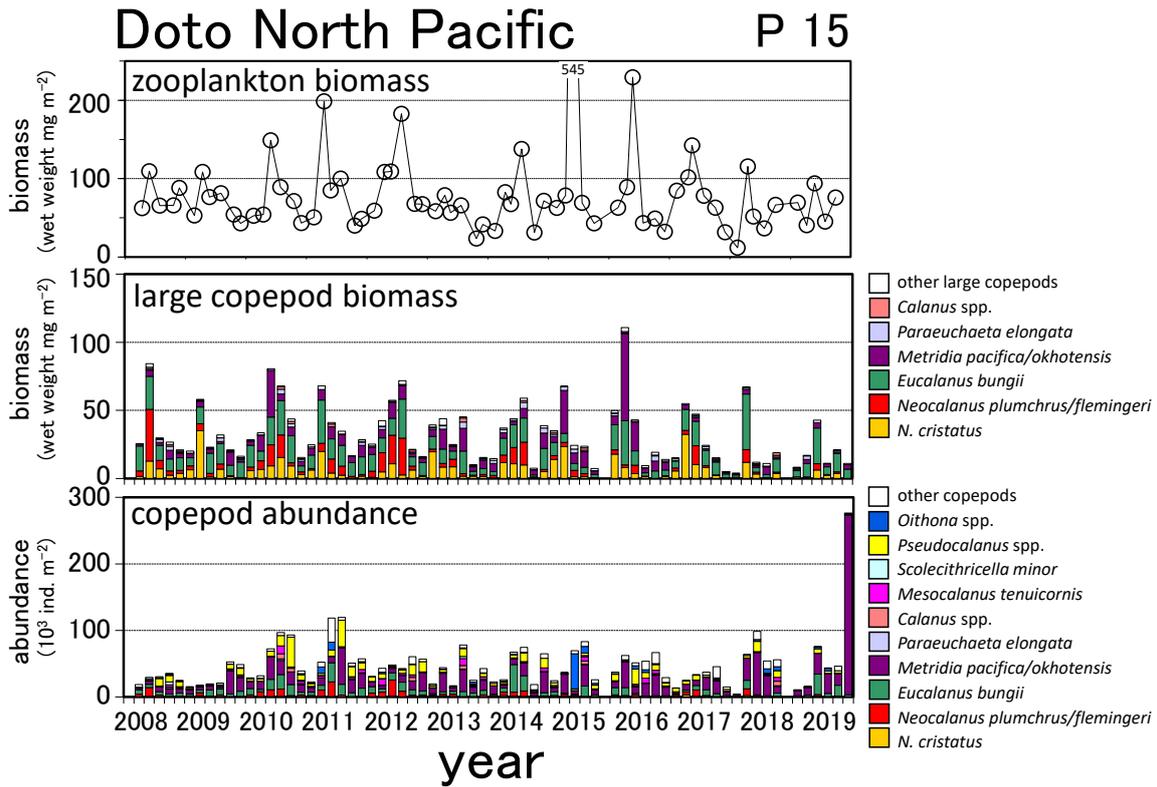


Fig. 8a Annual/seasonal changes of zooplankton biomass and dominant copepod species in the Doto North Pacific from 2008 to 2019 (updated from Shimada et al. 2012)

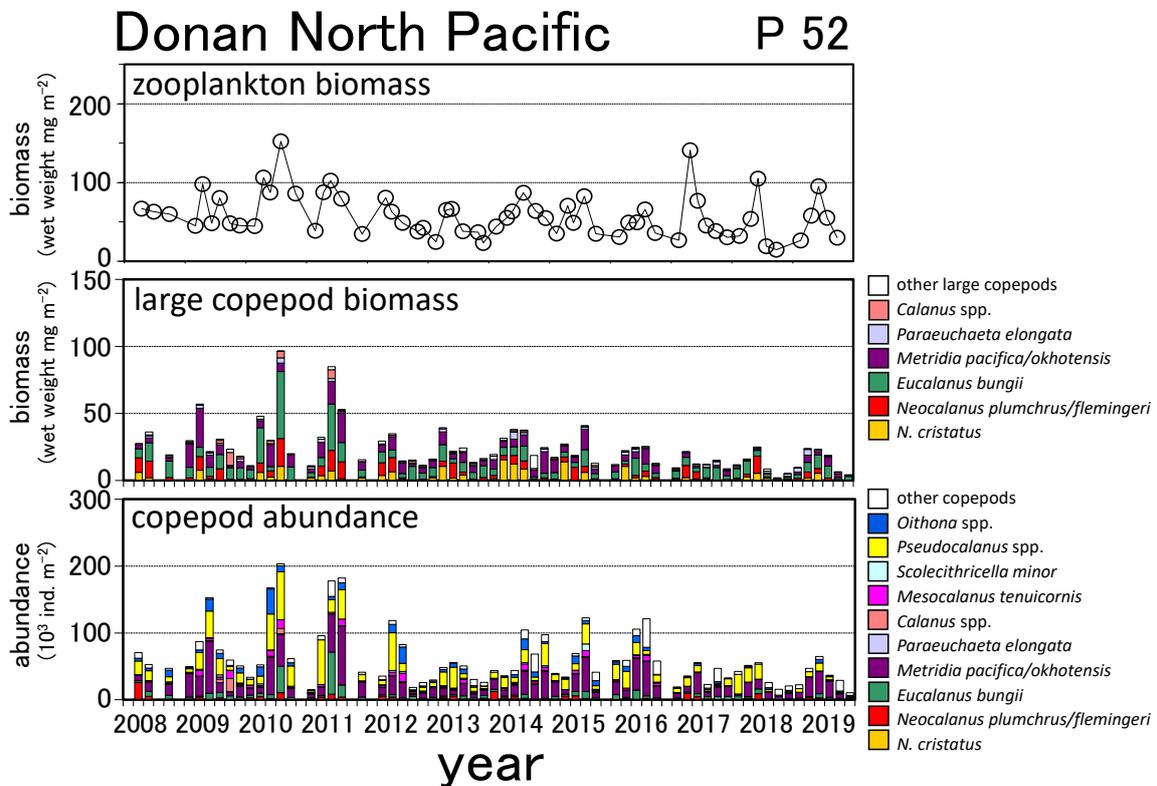


Fig. 8b Annual/seasonal changes of zooplankton biomass and dominant copepod species in the Donan North Pacific from 2008 to 2019 (updated from Shimada et al. 2012)

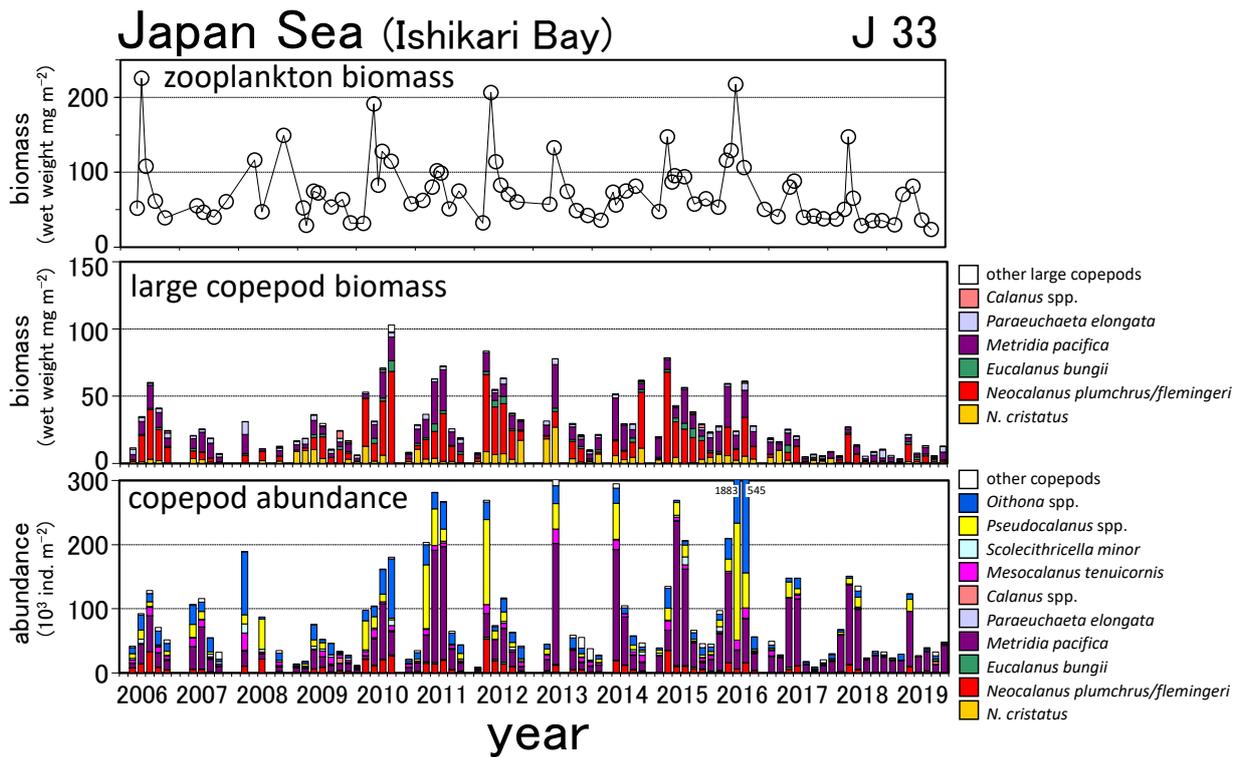


Fig. 8c Annual/seasonal changes of zooplankton biomass and dominant copepod species in the Sea of Japan from 2008 to 2019 (updated from Shimada et al. 2012)

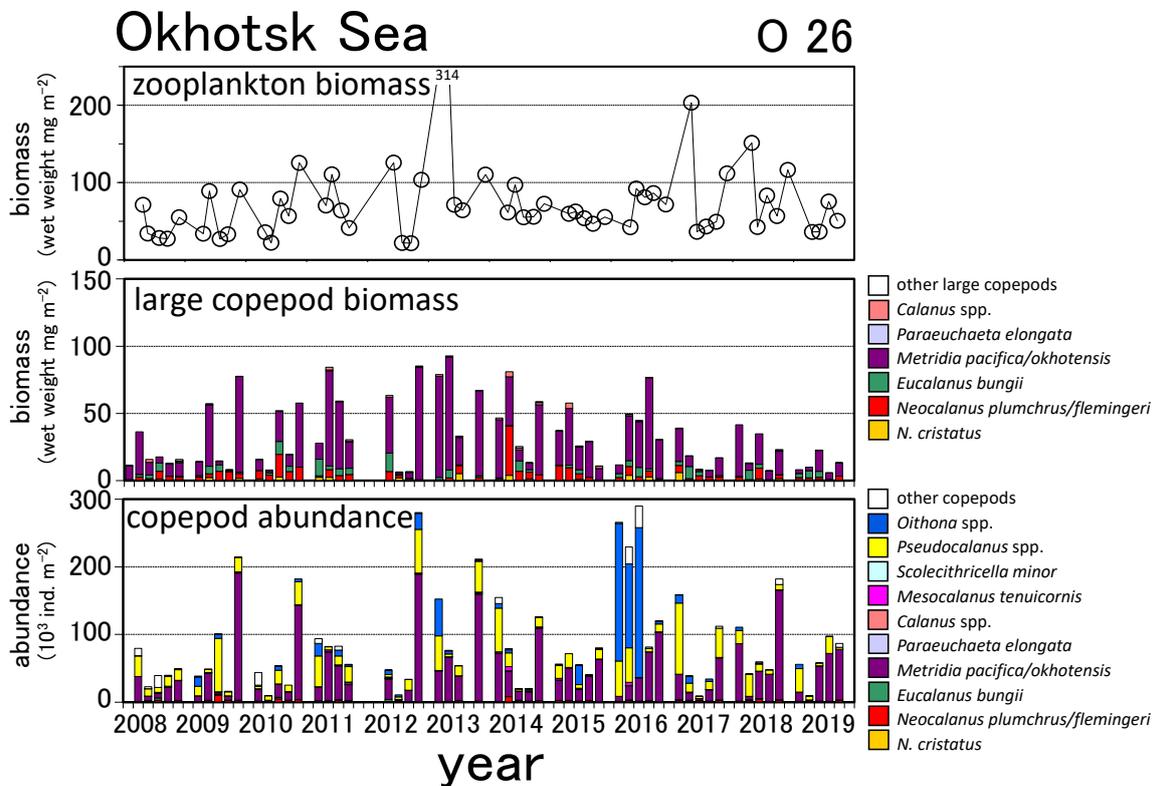


Fig. 8d Annual/seasonal changes of zooplankton biomass and dominant copepod species in the Okhotsk Sea from 2008 to 2019 (updated from Shimada et al. 2012).

の動向に注目しつつ,北海道周辺4海域におけるモニタリングを並行して継続することが重要である。

道水試において亜表層採集試料の多くは湿重量のみを測定した状態で保管されており,種組成の分析は進んでいない。今後はデジタルカメラを用いた分析を進め,大型カイアシ類優占種について種組成の長期変動を解明する一方,採集時間帯による生物量の差の原因を特定することが課題として残されている。後者については恐らく,日周鉛直移動性の大型種すなわち*Metridia*属カイアシ類 (Hattori *et al.*, 1989; Hirakawa, 1991) や,視覚的な逃避行動を行うオキアミ類および端脚類等の大型甲殻類

(Brinton, 1967; Shulenberger, 1978) が昼間に採集されにくいことが原因と想定される。特にオホーツク海は,夜間に亜表層に浮上する*Metridia pacifica*および*M. okhotensis*が圧倒的に優占する海域であるために(嶋田ら, 2012),採集時間帯による生物量の差が大きいものと考えられる。一方,採集時間帯を考慮する必要のない道東/道南太平洋の亜表層試料については,気候変動や海洋温暖化との関係を考慮しつつ,大型優占種の年間ピーク時のバイオマス(温暖化が進行するほどピークの時期は早化,バイオマスは低下)に着目して長期変動を解析し,水産資源変動との関係を明らかにすることが重要である。

Table 1 Length-weight equations of dominant zooplankton species/taxa collected around Hokkaido (modified from Shimada 2018)

Species/Taxa	Measuring length (X) of body parts	Length-weight equation ( $W = a X^b$ ) and/or Wet weight (WW)-dry weight (DW) equation ( $WW = c DW$ )					References	
		Constant values for calculation formula for Wet weight (WW mg)			Dry weight (DW mg)			
		a	b	c	a	b		
<b>Crustacea</b>								
Copepoda	<i>Neocalanus</i> spp.	prosome length (mm)	$5.70 \times 10^{-2}$	2.84	7.22	$6.90 \times 10^{-3}$	2.77	Shimada (2018)
	<i>Eucalanus bungii</i>	prosome length (mm)	$6.60 \times 10^{-3}$	3.70	9.98	$1.20 \times 10^{-3}$	3.39	Shimada (2018)
	<i>Metridia</i> spp.	prosome length (mm)	$6.13 \times 10^{-2}$	3.24	4.82	$1.20 \times 10^{-3}$	5.42	Shimada (2018)
	<i>Paraeuchaeta elongata</i>	prosome length (mm)	$5.19 \times 10^{-2}$	3.19	5.39	$2.50 \times 10^{-3}$	4.03	Shimada (2018)
	<i>Calanus</i> spp.	prosome length (mm)	$3.25 \times 10^{-2}$	3.45	5.79	$5.00 \times 10^{-3}$	3.42	Shimada (2018)
	other large copepods	prosome length (mm)	$7.66 \times 10^{-2}$	2.93	6.22	$1.04 \times 10^{-2}$	2.97	Shimada (2018)
Amphipoda	<i>Themisto</i> spp.	prosome length (mm)	$2.47 \times 10^{-1}$	2.81	7.84	$2.01 \times 10^{-2}$	3.16	Shimada (2018)
	other amphipoda	prosome length (mm)	$2.90 \times 10^{-1}$	2.33	6.18	$4.14 \times 10^{-2}$	2.33	Shimada (2018)
Euphausiacea	<i>Euphausia pacifica</i>	carapace length (mm)	$3.18 \times 10^{-1}$	2.96	5.19	$3.68 \times 10^{-2}$	3.20	Shimada (2018)
	<i>Thysanoessa</i> spp.	carapace length (mm)	1.05	2.31	3.68	$1.03 \times 10^{-1}$	2.75	Shimada (2018)
<b>other Crustacea</b>								
Mysidacea	<i>Meterythrops microphthalma</i>	carapace length (mm)	$7.07 \times 10^{-1}$	2.13	6.43	$4.86 \times 10^{-2}$	2.54	Shimada (2018)
Ostracoda		standard length (mm)			7.78	$1.20 \times 10^{-3}$	2.53	Nakamura <i>et al.</i> (2017)
Chaetognatha		body length (mm)			11.1	$1.00 \times 10^{-4}$	3.13	Nakamura <i>et al.</i> (2017)
Cordata	Appendicularia	trunk length (mm)			8.83	$5.01 \times 10^{-2}$	1.99	Nakamura <i>et al.</i> (2017)
	other Cordata	body length (mm)			19.6	$2.29 \times 10^{-3}$	2.73	Nakamura <i>et al.</i> (2017)
Cnidaria		total length (mm)			18.9	$1.30 \times 10^{-3}$	3.24	Nakamura <i>et al.</i> (2017)
Annelida		total length (mm)			11.8	$3.09 \times 10^{-2}$	1.53	Nakamura <i>et al.</i> (2017)
Mollusca		total length (mm)			9.05	$1.95 \times 10^{-1}$	1.13	Nakamura <i>et al.</i> (2017)

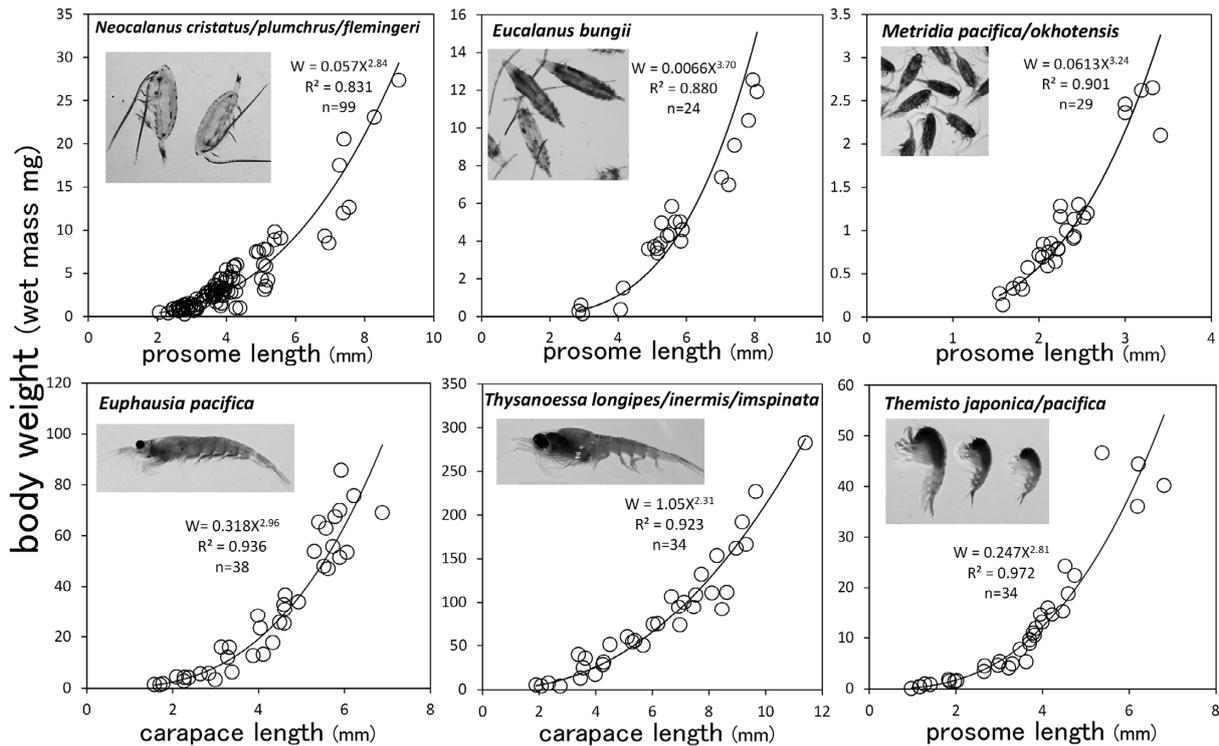


Fig.9 Relationships between body size and body weight of the six large zooplankton species (modified from Shimada et al. 2018)

### 中層からの鉛直採集で得られた 動物プランクトン組成の年変動

本調査は、上述の亜表層採集の問題点、すなわち採集時間帯による生物量の差を最小限としたうえで、動物プランクトンのバイオマス組成を明らかにする目的で、嶋田ら(2012)が下記のとおり新たに開始したものである。

動物プランクトン試料は、2008-2019年(日本海のみ2006-2019年)に北海道周辺4海域(道東太平洋, 道南太平洋, 日本海, オホーツク海, Fig.1)において、原則として年6回の頻度で、前述の改良型ノルパックネットを用いて、中層(深度500 m, ただし海底水深の浅いオホーツク海では300 m)から鉛直曳きによって採集し、前述同様に固定、湿重量を測定した。動物プランクトン組成については、適宜分割した試料について大型優占種(体長2 mm以上, ただしヤムシ類は5 mm以上)を選別、0.1 mg単位で秤量してバイオマス組成を求めたほか、小型優占種(体長2 mm未満)については実体顕微鏡下で種別に計数して個体数組成を求めた(嶋田ら, 2012)。ただし2017年以降の採集試料については、次のようなデジタルカメラを用いた分析法によって、バイオマス組成および個体数組成を求めた。

簡便迅速に動物プランクトンを分析するため、嶋田・奥(2014)は、デジタル一眼レフカメラを用いた動物プ

ランクトンのマクロ撮影システムを開発した(Fig.5)。また、Nakamura et al. (2017)と嶋田(2018)は、大型優占種別の体サイズ、湿重量および乾重量データを蓄積して、体サイズとバイオマスの関係式(アロメトリ式)をとりまとめた。種組成の分析については、上述のマクロ撮影システムを用いてΦ90 mmシャーレに展開した未選別の動物プランクトン試料の画像(撮影倍率:0.15および0.37倍, それぞれ透過明視野/落射暗視野照明で撮影)を撮影し、大型ディスプレイ上に映出して優占種を同定して、画像解析ソフト(ImageJまたはMotic Images Plus)を用いて体サイズを記録した(嶋田, 2018)。

動物プランクトン組成の分析の結果、十数種の大型種(Fig.6, 嶋田, 2018)および数種の小型カイアシ類(Fig.7, 嶋田, 2018)が優占種であることが明らかとなった。海域別の優占種バイオマスの変動をみると、冷水性大型カイアシ類(*Neocalanus* spp., *Eucalanus bungii*, *Metridia* spp.)が優占する点は各海域で共通するが、種組成は海域別に異なり、優占種バイオマスは年変動が大きいことが明らかとなった(Fig.8a-d, 嶋田ら, 2012に未発表データを追加)。道水試のモニタリングで得られた海域別の優占種組成は既往知見(Anraku, 1953; Anraku, 1954; 鈴内・渡辺, 1982; Ikeda et al., 2008; 浅見ら, 2010)とほぼ同様であり、優占種別の季節変化の傾向についても、各種の生活史に関する既往知見と同様であった(Kobari and

Ikeda, 1999 ; 2001a ; 2001b ; Tsuda *et al.*, 1999 ; Padmavati *et al.*, 2004 ; Tsuda *et al.*, 2004 ; Shoden *et al.*, 2005)。小型種を含めた個体数組成をみると, *Metridia* spp.の未成体に加えて, 小型種の *Pseudocalanus* spp., *Oithona* spp.が多く出現し, 個体数全体の変動はバイオマス以上に大きかった (Fig. 8a-d, 嶋田ら, 2012に未発表データを追加)。

Nakamura *et al.* (2017) と嶋田 (2018) がとりまとめた体サイズとバイオマスの関係式 (Table 1, Fig. 9) を用いることによって, 未選別試料のデジタル一眼レフカメラを用いたマクロ撮影画像 (0.15倍) (嶋田・奥, 2014) から大型優占種のバイオマスが推定可能となった。小型優占種についても, 拡大画像 (0.37倍) の画像解析により同定および計数が可能であることが明らかとなった (嶋田, 2018)。

海域別の大型優占種のバイオマス組成をみると, 太平洋では優占6種 (*Neocalanus cristatus*, *N. plumchrus*, *N. flemingeri*, *Eucalanus bungii*, *Metridia pacifica*, *M. okhotensis*) が混在する (Ikeda *et al.*, 2008) のに対し, 日本海では *N. plumchrus* および *M. pacifica*, オホーツク海では *M. okhotensis* および *M. pacifica* に偏った単純な種組成であることが特徴であった (嶋田ら, 2012)。これら2海域の単純な種組成は環境変動に対して脆弱であることを暗示するため, 海洋温暖化の影響 (例えば, 大型優占種バイオマスの減少) を注意深く観察することが重要である。

年変動をみると, 種別のバイオマスは年毎に大きく変動することが明らかとなった (Fig. 8a-d, 嶋田ら, 2012に未発表データを追加)。特に閉鎖的な縁辺海として知られる日本海においては, 一次生産が二次生産を支配している可能性が示唆され (嶋田, 2020), 冬季の鉛直混合による有光層への栄養塩供給と春季の植物プランクトンブルームの発生規模が, 本海域の大型カイアシ類優占種のバイオマスをコントロールしている可能性がある。ともあれ, 大型優占種バイオマスのモニタリングを本道周辺4海域で並行して継続することは, 水産資源変動のバックグラウンドデータの取得に他ならず, 極めて重要である。例えば, 日本海では年毎の *N. plumchrus* の豊度がスケトウダラの再生産と関係がある可能性が示唆されていることから (北海道立総合研究機構 [http://www.hro.or.jp/info\\_headquarters/domin/pdf/20200828\\_pressrelease.pdf](http://www.hro.or.jp/info_headquarters/domin/pdf/20200828_pressrelease.pdf), 2023年3月8日), 大型優占種の豊度データを海域別に蓄積し, 水産資源変動との関係を探ることが重要である。一方, 道東および道南太平洋における亜表層の動物プランクトンの生物量と種組成は, 水温等の物理環境の季節変化の影響を強く受けるために, 中層のそれよりも季節変化が大きいことが知られている (嶋田ら, 2012)。従って, 浮魚等の水産資源の餌料生物としての動物プランクトンをモ

ニタリングするためには, 中層からの採集と併せて, 亜表層の採集を行うことが望ましい。

プランクトンの自動分析に関する先行事例としては, 調査船設置型のEPCS (平野, 1993), 実験室設置型のOPC (横井ら, 2008) および卓上VPR (市川, 2008) 等があげられる。近年はZooScanを用いた方法が人気だが (例えば Gorsky *et al.*, 2010), 液浸試料を薄く展開する必要があるため, 大型種の分析には不向きである。そこで道水試では2013年から新たな分析法の構築に取り組み, 2017年にデジタルカメラによる分析法を実用化した (嶋田・奥, 2014 ; Nakamura *et al.*, 2017 ; 嶋田, 2018)。新たな分析法によって従来法 (優占種を実体顕微鏡下で選別, 精密電子天秤で秤量) よりも作業効率が4倍程度になった (1日あたり分析本数の2本から8本への増加) が, さらなる時間短縮および精度向上に向けて, 次のような課題が残されている。現状ではディスプレイ上の目視観察で優占種を同定しているが, 将来的にはAIによる自動認識 (例えば Cornils *et al.*, 2022) の導入が理想である。また, フォルマリン固定標本の分析では *N. plumchrus* および *N. flemingeri* のように形態が酷似した種を判別することが難しいため, 将来的には生鮮/凍結試料を用いた分子同定の併用も視野に入れてモニタリングと研究を進めるべきと考えられる (平井, 2021 ; Moseid *et al.*, 2021)。

デジタルカメラを用いた分析法は, プランクトン種別, 発育段階別の詳細な生態研究には向かないが, 水産資源の変動研究を目的としたモニタリングに有効と考えられる。例えば, サンマ (小達, 1977 ; 小達, 1994), スケトウダラ (小岡ら, 1997 ; 小岡ら, 2001 ; Yamamura *et al.*, 2002 ; Yamamura *et al.*, 2013), ホッケ (Kitagawa *et al.*, 2011) 等の大型カイアシ類を主な餌とする魚種の索餌回遊期の餌料環境把握には, 本分析法を用いたバイオマスベースの大型優占種のモニタリングが有効である。一方, スケトウダラ (中谷・前田, 1983), サケ (関ら, 1984 ; 関・清水, 1998 ; Asami *et al.*, 2005 ; 2007), ニシン (浅見ら, 2010 ; Arima *et al.*, 2014a ; 2014b) 等の稚魚期の餌料環境把握には, 小型種の個体数ベースのモニタリングが有効と考えられる。海洋温暖化が水産資源に及ぼす影響が危惧されるなか (品田, 2021), 餌料生物としての動物プランクトンの変動を簡便迅速に把握しておくことは極めて重要である。

## 水産資源の変動研究以外の プランクトン研究の意義

カイアシ類以外の分類群に関する研究も重要である。特に, 水塊指標となるヤムシ類 (例えば Kotori, 1976 ; Kotori, 1999), 春季に表層に浮上して産卵するオキアミ

類（例えば Taki, 2003; Iguchi and Ikeda, 2004）、肉食性の端脚類（例えば Yamada and Ikeda, 2004）等のマクロ動物プランクトンは、バイオマスとしてはカイアシ類に及ばないが、重要な生態的地位を占める（例えば Tait, 1968; Redden *et al.*, 2009）。本道周辺に分布するマクロ動物プランクトンの多くは冷水性であるため、これらの動態を海域別に把握することは、気候変動と低次生産の関係解明のために重要である。他方、これらの大型種は遊泳力が強いので、採集時のネット逃避を減らす採集方法の工夫が必要であり（Brinton and Townsend, 1981）、従来の改良型NORPACネットではなくBONGOネット等の大型の器具を用いて採集することが望ましい。

気候変動と低次生産の長期変動における関係の知見として、18.6年潮汐振動やPDO等の10年規模の周期的環境変動が低次生産に及ぼす影響が報告されており（Chiba *et al.*, 2002; Chiba *et al.*, 2004; Tadokoro *et al.*, 2005; Chiba *et al.*, 2006）、これらを考慮しつつモニタリングデータを解釈することが重要である。これらの既往知見はそれぞれ単一の海域（親潮域または日本海）について考察したものであり、複数海域を網羅的に解析したものではない。対して、北水試の動物プランクトンデータは4海域（道東／道南太平洋、日本海、オホーツク海）でほぼ同時期に採集されたものであり、西部北太平洋とその縁辺海で起きている低次生産イベントを網羅的に解析できるデータセットである。しかしながら北水試のデータは、大型優占種のバイオマスを把握するために中層から鉛直採集を始めた2008年から10年あまりと歴史が浅いため、長期変動の解析に必要な30年のデータ蓄積を目標にモニタリングを継続する必要がある。

気候変動と関連した海洋温暖化／酸性化が低次生産に及ぼす影響の評価は重要な社会科学的課題であるが（Cheung *et al.*, 2013; Mills *et al.*, 2013; 伊藤ら, 2018）、モニタリングに必要な人材、予算および設備の問題から道水試単独での対応は難しい。世界の状況を注視しながら、大学との共同研究等に柔軟に対応していく必要がある。

### 海洋の低次生産に関する アウトリーチ活動の必要性

デジタルカメラを用いた動物プランクトン分析法の導入によって、作業の効率化が実現する一方、湿重量測定／画像解析済の試料が相当量発生するようになった。標本庫の収納スペースには限りがあるため、永久保存用の分割標本を除いて、分析済みの試料は順次処分する必要がある。一方、分析済み試料には希少な種も含まれることから、一般向けの展示・教育用としての活用を目的と

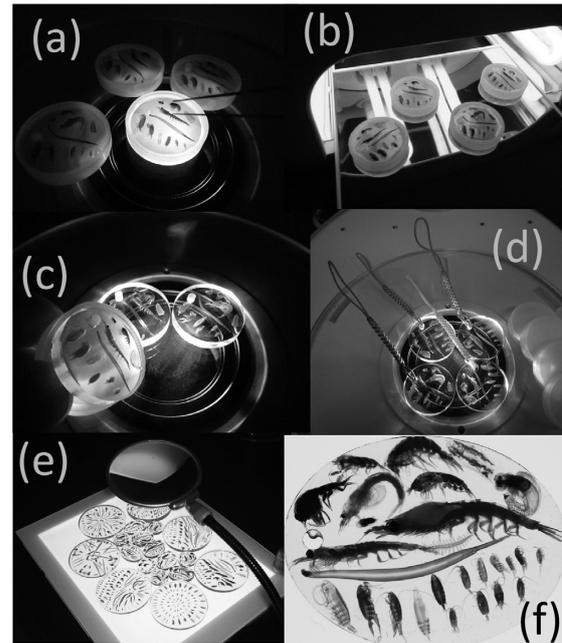


Fig. 10 Zooplankton specimens embedding in UV-curable resin for accessory and exhibition (modified from Shimada 2021)

- (a) Arranging zooplankton individuals in resin liquid on the silicone molds
- (b) Curing in UV light box
- (c) Removing the products from the molds
- (d) Accessory strap with plaited cord
- (e) Observation using a stand loupe on an LED light panel
- (f) Close-up image of the final product with >20 individual specimens

して、嶋田（2021）は、動物プランクトンのレジン封入標本の製作法を検討した（Fig. 10）。その結果、分析済みのホルマリン固定試料を水道水に置換してから染色を施し、数日かけて浸液を水道水からグリセリンに置換して、UVレジンを封入する方法が考案され、一般向けの安全で効果的な展示が可能となった。樹脂封入標本については、国立極地研究所において、他の方法による製作が試みられ、環境教育の素材として利用を進めている（櫻井ら, 2020）。今後はこのような展示、広報活動によって、動物プランクトン研究の重要性を一般向けに発信していくことも必要であろう。

近い将来、動物プランクトンの分析自動化が進んでも、調査船による海洋観測を基本とするモニタリングの重要性は今後も変わらない。しかしながら近年、動物プランクトン分析業務は民間企業への外注で行われるのが通常となっており、水産試験研究機関の多くにおいては、専門人材の不足のために、動物プランクトン研究に関する技術継承（例えば、実体顕微鏡を用いた種同定と選別や、得られたデータの意味を正しく理解すること等の訓練）が困難になりつつある。本稿に記したような地道な長期

モニタリング業務に携わる人材を将来にわたって確保するためには、SDGs達成のための環境教育の一環として、研究者自らが教育機関等に出向いたり、インターネットを通じて動物プランクトンの生態を紹介する等のアウトリーチ活動によって、海洋の低次生産に関する一般の知識の普及に努める必要がある。

## 謝 辞

道水試の定期海洋観測におけるプランクトン調査を設計し、モニタリングの継続に尽力された元中央水産試験場の小鳥守之博士および平野和夫氏をはじめとする諸先輩に深謝いたします。中央水産試験場おやしお丸（2010年用途廃止）、稚内水産試験場北洋丸、釧路水産試験場北辰丸および函館水産試験場金星丸の各試験調査船の船長ならびに乗組員各位には、長きにわたり現場採集にご協力頂きました。ここに記して御礼申し上げます。

## 引用文献

- Anraku M. Seasonal distribution of pelagic copepods at Oshoro Bay, west coast of Hokkaido. *Bull. Fac. Fish. Hokkaido Univ.* 1953 ; 3 : 187-192.
- Anraku M. Distribution of plankton copepods off Kitami, Hokkaido, in Okhotsk Sea in summer, 1949 and 1950. *Bull. Fac. Fish. Hokkaido Univ.* 1954 ; 4 : 249-255.
- Arima D, Yamaguchi A, Abe Y, Matsuno K, Saito R, Asami H, Shimada H, Imai I. Seasonal changes in zooplankton community structure in Ishikari Bay, Japan Sea. *Bull. Fish. Sci. Hokkaido Univ.* 2014 ; 64 : 17-23.
- Arima D, Yamaguchi A, Abe Y, Matsuno K, Saito R, Asami H, Shimada H, Imai I. Seasonal changes in body size and oil sac volume of three planktonic copepods, *Paracalanus parvus* (Claus, 1863), *Pseudocalanus newmani* Frost, 1989 and *Oithona similis* Claus, 1866, in a temperate embayment: what controls their seasonality? *Crustaceana* 2014 ; 87 : 364-375.
- Asami H, Sato H, Shimada H, Sawada M, Miyakoshi Y, Ando D, Nagata M. Fluctuations of the zooplankton community during early ocean life of chum salmon in the coastal waters of eastern Hokkaido, Okhotsk Sea. *NPAFC Tech. Rep.* 2005 ; 6 : 54-56.
- Asami H, Shimada H, Sawada M, Sato H, Miyakoshi Y, Ando D, Fujiwara M, Nagata M. Influence of physical parameters on zooplankton variability during early ocean life of juvenile chum salmon in the coastal waters of eastern Hokkaido, Okhotsk Sea. *NPAFC Bull.* 2007 ; 4 : 211-221.
- 浅見大樹, 嶋田宏, 石田良太郎, 高柳志朗. 春季の石狩湾において優占するカイアシ類数種の年変動. 北海道水産試験場研究報告2010 ; 77 : 1-11.
- Brinton E. Vertical migration and avoidance capability of euphausiids in the California Current. *Limnol. Oceanogr.* 1967 ; 12 : 451-483.
- Brinton E, Townsend AW. A comparison of euphausiid abundances from Bongo and 1-m CalCOFI nets. *CalCOFI Rep.* 1981 ; 22 : 111-125.
- Cheung WWL, Watson R, Pauly D. Signature of ocean warming in global fisheries catch. *Nature* 2013 ; 497 : 365-368.
- Chiba S, Saino T. Interdecadal change in upper water environment altered spring diatom community structure in the Japan Sea: an early summer hypothesis. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 2002 ; 231 : 23-35.
- Chiba S, Ono T, Tadokoro K, Midorikawa T, Saino T. Increased stratification and decreased lower trophic level productivity in the Oyashio region of the North Pacific: a 30-year retrospective study. *J. Oceanogr.* 2004 ; 60 : 149-162.
- Chiba S, Tadokoro K, Sugisaki H, Saino T. Effects of decadal climate change on zooplankton over the last 50 years in the western subarctic. *North Pacific Glob. Change Biol.* 2006 ; 12 : 907-920.
- Cornils A, Thomisch K, Hase J, Hildebrandt N, Auel H, Niehoff B. Testing the usefulness of optical data for zooplankton long-term monitoring: Taxonomic composition, abundance, biomass, and size spectra from ZooScan image analysis. *Limnol. Oceanogr. Methods* 2022; <https://doi.org/10.1002/lom3.10495>.
- Gorsky G, Ohman MD, Picheral M, Gasparini S, Stemmann L, Romagnan J, Cawood A, Pesant S, Garcia-Comas C, Prejger F. Digital zooplankton image analysis using the ZooScan integrated system. *J. Plankton Res.* 2010 ; 32 : 285-303.
- Hattori H. Bimodal vertical distribution and diel migration of the copepods *Metridia pacifica*, *M. okhotensis* and *Pleuromamma scutellata* in the western North Pacific Ocean. *Mar. Biol.* 1989 ; 103 : 39-50.
- 平井惇也. 分子生物学的手法を用いた動物プランクトンの群集構造解析と多様性に関する研究. 海の研究 2021 ; 30 : 1-13.
- Hirakawa K. Vertical distribution and reproduction of planktonic copepods in Toyama Bay, southern Japan

- Sea, with special reference to *Metridia pacifica*. *Bull. Plankton Soc. Japan* 1991 ; Spec Vol: 373-382.
- 平野和夫. EPCSによる動物プランクトン計数とサイズ分け. 北海道水産試験場研究報告1993 ; 40 : 43-45.
- 本間義治. 日本海の成立ちから探る魚類相の特徴. 動物分類学会誌 1987 ; 36 : 65-66.
- 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. 水産総合研究センター研究報告 2008 ; 24 : 23-104.
- Iguchi N and Ikeda T Vertical distribution, population structure and life history of *Thysanoessa longipes* (Crustacea: Euphausiacea) around Yamato Rise, central Japan Sea. *J. Plankton Res.* 2004 ; 26 : 1015-1023.
- Ikeda T, Shiga N, Yamaguchi A. Structure, biomass distribution and trophodynamics of the pelagic ecosystem in the Oyashio region, western subarctic Pacific. *J. Oceanogr.* 2008 ; 64 : 339-354.
- 伊藤進一, 船本鉄一郎, 志田修, 上村泰洋, 高橋素光, 白井厚太郎, 樋口富彦, 小松幸生, 横井孝暁, 坂本達也, 郭晨籟, 石村豊穂. 気候変動が水産資源の変動に与える影響を理解する上での問題点と今後の展望. 海の研究 2018 ; 27 : 59-73.
- Kitagawa T, Nakagawa T, Kimura R, Niino H, Kimura S. Vortex flow produced by schooling behavior of arabesque greenling *Pleurogrammus azonus*. *Fish. Sci.* 2011 ; 77 : 217-222.
- Kobari T, Ikeda T. Vertical distribution, population structure and life cycle of *Neocalanus cristatus* (Crustacea: Copepoda) in the Oyashio region, with notes on its regional variations. *Mar. Biol.* 1999 ; 134 : 683-696.
- Kobari T, Ikeda T. Life cycle of *Neocalanus flemingeri* (Crustacea: copepoda) in the Oyashio region, western subarctic Pacific, with notes on its regional variations. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 2001a ; 209 : 243-255.
- Kobari T, Ikeda T. Ontogenetic vertical migration and life cycle of *Neocalanus plumchrus* (Crustacea: Copepoda) in the Oyashio region, with notes on its regional variations in body size. *J. Plankton Res.* 2001b ; 23 : 287-302.
- Kotori M. The biology of chaetognaths in the Bering Sea and the northern North Pacific Ocean, with emphasis on *Sagitta elegans*. *Memoirs of the Faculty of Fisheries Hokkaido University* 1976 ; 23 : 95-183.
- Kotori M. Life cycle and growth rate of the chaetognath *Parasagitta elegans* in the northern North Pacific Ocean. *Plankton Biol. Ecol.* 1999 ; 46 : 153-158.
- 小鳥守之. 北海道近海における動物プランクトンの長期変動. 月刊海洋号外 2001 ; 27 : 19-24.
- 小岡孝治, 高津哲也, 亀井佳彦, 中谷敏邦, 高橋豊美. 北部日本海中層に生息するスケトウダラの春季と秋季における食性. 日本水産学会誌1997 ; 63 : 537-541.
- 小岡孝治, 和田昭彦, 石田良太郎, 武藤卓志, 安部幸樹, 三宅博哉. 北部日本海北海道西岸沖に生息するスケトウダラ成魚の夏季・冬季における食性. 北海道水産試験場研究報告 2001 ; 60 : 25-27.
- Mills KE, Pershing AJ, Brown CJ, Chen Y, Chiang F-S, Holland DS, Lehuta S, Nye JA, Sun JC, Thomas AC, Wahle RA. Fisheries management in a changing climate Lessons from the 2012 ocean heat wave in the northwest Atlantic. *Oceanography* 2013 ; 26 : 191-195.
- Moseid CVS, Falkenhaus T, Slettan A. Development of a TaqMan PCR assay for the identification of the non-native copepod *Acartia tonsa*, and detection of this species in Norwegian coastal waters. *J. Plankton Res.* 2021 ; 43 : 497-499.
- 元田茂. プランクトン標本の処理. 日本プランクトン学会報1975 ; 21 : 115-134.
- 元田茂. 簡単なプランクトン器具の考案 (第8報). 日本プランクトン学会報1994 ; 40 : 139-150.
- Nakamura A, Matsuno K, Abe Y, Shimada H, Yamaguchi A. Length-weight relationships and chemical composition of the dominant mesozooplankton taxa/species in the Subarctic Pacific, with special reference to the effect of lipid accumulation in copepoda. *Zoological Studies* 2017 ; 56 : 56-13.
- 中谷敏邦, 前田辰昭. 噴火湾およびその周辺海域におけるスケトウダラ仔魚の分布と餌生物環境. 日本水産学会誌1983 ; 49 : 183-187.
- 小達和子. サンマの食性について. 東北区水産研究所研究報告 1977 ; 38 : 75-88.
- 小達和子. 東北海道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. 東北区水産研究所研究報告 1994 ; 56 : 115-173.
- Padmavati G, Ikeda T, Yamaguchi A. Life cycle, population structure and vertical distribution of *Metridia* spp. (Copepoda: Calanoida) in the Oyashio region (NW Pacific Ocean). *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 2004 ; 270 : 181-198.
- Redden AM, Kobayashi T, Suthers IM, Bowling L, Rissik D, Newton G. Plankton processes and the environment. In: Plankton (Suthers IM, Rissik D eds), CSIRO Publishing, Collingwood. 2009 ; 15-38.
- 櫻井久恵, 佐野雅美, 高橋邦夫, 真壁竜介, 小達恒夫. 極

- 域動物標本コレクションの新シリーズ「プランクトン樹脂封入標本」～海洋教育の推進のために～. 日本プランクトン学会報 2020 ; 67 : 19-23.
- 関二郎, 真山紘, 清水幾太郎. 石狩湾沿岸におけるサケ稚魚の餌料環境と食性について - I - 春季の沿岸部における餌料生物の水平分布 -. 北海道さけ・ますふ化場研究報告1984 ; 38 : 1-23.
- 関二郎, 清水幾太郎. 北海道中部太平洋沿岸域における動物プランクトンの昼夜移動とサケ幼稚魚の摂餌生態. さけ・ます資源管理センター研究報告1998 ; 1 : 13-27.
- 嶋田宏, 栗林貴範. 2.1.3 低次生産環境に関する調査. 中央水産試験場事業報告書 2012 ; 68-70.
- 嶋田宏, 坂口健司, 森泰雄, 渡野邊雅道, 板谷和彦, 浅見大樹. 北海道周辺4海域 (道東・道南太平洋, 北部日本海および南部オホーツク海) における動物プランクトンバイオマスおよび種組成の季節変化と年変動. 日本プランクトン学会報 2012 ; 59 : 63-81.
- 嶋田宏, 奥修. デジタル一眼レフカメラとマクロレンズを用いた動物プランクトン試料の撮影と生物測定. 日本プランクトン学会報 2014 ; 61 : 87-90.
- 嶋田宏. 北海道周辺海域における植物・動物プランクトンの変動. 水産海洋研究 2016 ; 80 : 155-156.
- 嶋田宏. デジタル一眼レフカメラと画像解析による簡便迅速な動物プランクトンの分析法. 北水試だより 2018 ; 97 : 1-8.
- 嶋田宏. 北海道周辺海域の定期海洋観測で捉えられた低次生産の年変動. 水産海洋研究 2020 ; 84 : 250.
- 嶋田宏, 安永倫明. 2.3 低次生産環境に関する調査. 中央水産試験場事業報告書 2020 ; 50-53.
- 嶋田宏. UVレジンを用いた動物プランクトン封入標本の製法. 日本プランクトン学会報 2021 ; 68 : 10-17.
- 品田晃良. 北海道周辺沿岸海域における海面水温の近未来予測値 (資料). 北海道水産試験場研究報告2021 ; 99 : 19-23.
- Shoden S, Ikeda T, Yamaguchi A. Vertical distribution, population structure and life cycle of *Eucalanus bungii* (Copepoda: Calanoida) in the Oyashio region, with notes on its regional variations. *Mar. Biol.* 2005 ; 146 : 497-511.
- Shulenberg E. Vertical distributions, diurnal migrations, and sampling problems of hyperiid amphipods in the North Pacific central gyre. *Deep Sea Research* 1978 ; 25 : 605-623.
- Sugisaki H. Studies on long-term variation of ocean ecosystem/climate interactions based on the Odate collection: outline of the Odate Project. *PICES Press* 2006 ; 14 : 12-15.
- 杉崎宏哉. 東北海域の動物プランクトンの長期観測 (小達コレクションの解析). 日本プランクトン学会報 2008 ; 55 : 30-32.
- Sumaila UR, Cheung WWL, Lam VWY, Pauly D, Herrick S. Climate change impacts on the biophysics and economics of world fisheries. *Nature Climate Change* 2011 ; 1 : 449-456.
- 鈴木孝行, 渡辺安廣. 襟裳岬以西太平洋海域における動物プランクトンの周年変化. 北水試月報1982 ; 39 : 39-60.
- Tadokoro K, Chiba S, Ono T, Midorikawa T, Saino T. Interannual variation in *Neocalanus* biomass in the Oyashio waters of the western North Paific. *Fish. Oceanogr.* 2005 ; 14 : 210-222.
- Tait RV. Marine zooplankton. In: *Elements of Marine Ecology* (Tait RV ed), Butterworths, London. 1968 ; 32-36.
- Taki K. Distribution and life history of *Euphausia pacifica* off northeastern Japan. *Fish. Oceanogr.* 2003 ; 13 : 34-43.
- Tsuda A, Saito H, Kasai H. Life histories of *Neocalanus flemingeri* and *Neocalanus plumchrus* (Calanoida:Copepoda) in the western subarctic Pacific). *Mar. Biol.* 1999 ; 135 : 533-544.
- Tsuda A, Saito H, Kasai H. Life histories of *Eucalanus bungii* and *Neocalanus cristatus* (Copepoda: Calanoida) in the western subarctic Pacific Ocean. *Fish. Oceanogr.* 2004 ; 13 : 10-20.
- Yamada Y, Ikeda T. Comparative life-history study on sympatric hyperiid amphipods (*Themisto pacifica* and *T. japonica*) in the Oyashio region, western North Pacific. *Mar. Biol.* 2004 ; 145 : 515-527.
- Yamamura O, Honda S, Shida O, Hamatsu T. Diets of walleye pollock *Theragra chalcogramma* in the Doto area, northern Japan: ontogenetic and seasonal variations. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 2002 ; 238 : 187-198.
- Yamamura O, Funamoto T, Chimura M, Honda S, Oshima T. Interannual variation in diets of walleye pollock in the Doto area, in relation to climate variation. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 2013 ; 491 : 221-234.
- 横井裕, 山口薦, 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.
- 吉田英雄, 中多章文, 浅見大樹, 田中伊織. 北海道における海洋環境モニタリングの現状・成果と今後の取り組み. 月刊海洋 2004 ; 36 : 5-10.