北水 試研報 Sci. Rep. Hokkaido Fish. Res. Inst. CODEN: HSSKAJ ISSN: 2185-3290

北海道水產試験場研究報告

第 105 号

SCIENTIFIC REPORTS OF HOKKAIDO FISHERIES RESEARCH INSTITUTES No.105

併載 定期海洋観測30年取りまとめ論文(2) With special papers for the Periodical marine research 30 years report article Part 2

北海道立総合研究機構水産研究本部 北海道 余市 町 2024年3月

Hokkaido Research Organization Fisheries Research Department

Yoichi, Hokkaido, Japan

March, 2024

北海道立総合研究機構水産研究本部は次の機関をもって構成されており、北海道水産試験場研究報告は、 これらの機関における研究業績を登載したものです。

In addition, the Fisheries Research Department of the Hokkaido Research Organization will now comprise the following seven local Fisheries Research Institutes. The study achievements of these institutes will be published in the "Scientific reports of Hokkaido Fisheries Research Institutes".

地方独立行政法人 北海道立総合研究機構 水産研究本部

(Local Independent Administrative Agency Hokkaido Research Organization Fisheries Research Department)

中央水産試験場 046-8555

(Central Fisheries Research Institute) 余市郡余市町浜中町238

(Hamanaka-cho, Yoichi, Hokkaido 046-8555, Japan)

函館水産試験場 040-0051

(Hakodate Fisheries Research Institute) 函館市弁天町20-5

函館市国際水産・海洋総合研究センター内

(Benten-cho, Hakodate, Hokkaido 040-0051, Japan)

釧路水産試験場 085-0027

(Kushiro Fisheries Research Institute) 釧路市仲浜町4-25

(Nakahama-cho, Kushiro, Hokkaido 085-0027, Japan)

網走水産試験場 099-3119

(Abashiri Fisheries Research Institute) 網走市鱒浦1-1-1

(Masuura, Abashiri, Hokkaido 099–3119, Japan)

稚内水産試験場 097-0001

(Wakkanai Fisheries Research Institute) 稚内市末広4-5-15

(Suehiro, Wakkanai, Hokkaido 097–0001, Japan)

栽培水産試験場 051-0013

(Mariculture Fisheries Research Institute) 室蘭市舟見町1-156-3

(Funami-cho, Muroran, Hokkaido 051-0013, Japan)

さけます・内水面水産試験場 061-1433

(Salmon and Freshwater Fisheries 恵庭市北柏木町3-373

Research Institute) (Kitakashiwagi-cho, Eniwa, Hokkaido 061-1433, Japan)

北海道水産試験場研究報告

第105号

目 次

堀井貴司,清水洋平,川崎琢真,山口浩志	
2018年に根室海峡で急増したニシン(Clupea pallasii)を構成する3集団 ······	. 1
奈須亮耶,秋野雅樹,加藤慎二,小玉裕幸,武田浩郁	
ナガコンブSaccharina longissimaの品質と加工特性に及ぼす凍結の影響	. 9
定期海洋観測30年取りまとめ論文(2)	
西田芳則,伊藤 雅,森本昭彦,広瀬直毅	
日本海北部海域における表層水平循環の流動特性	· 17
中多章文, 田中伊織	
道西日本海における対馬暖流の流量分布の季節および経年変化	· 29
品田晃良,黒田 寛	
北海道東部太平洋で発生した赤潮がえりも以西海域に移流する短期的なリスク評価 (短報)	37

SCIENTIFIC REPORTS

OF

HOKKAIDO FISHERIES RESEARCH INSTITUTES

No.105

CONTENTS

TAKASHI HORII, YOHEI SHIMIZU, TAKUMA KAWASAKI and HIROSHI YAMAGUCHI Three populations of the Pacific herring <i>Clupea pallasii</i> in Nemuro Strait in 2018 ······	1
RYOUYA NASU, MASAKI AKINO, SHINJI KATOU, HOROYUKI KODAMA and HIROHUMI TAKEDA Effect of freezing on the quality of nagakombu (Saccharina longissima)	9
With special papers for the Periodical marine research 30 years report article Part 2	
YOSHINORI NISHIDA, MASASHI ITO, AKIHIKO MORIMOTO and NAOKI HIROSE Flow characteristics of surface horizontal circulation in the northern Japan Sea	17
AKIFUMI NAKATA and IORI TANAKA Seasonal and interannual changes in the distribution of the volume transport of the Tsushima warm current in the western Japan Sea off Hokkaido, Japan	29
AKIYOSHI SHINADA and HIROSHI KURODA Short-term risk assessment of the drift of red tide occurrence in the western waters off Erimo, Hokkaido, Japan (Short Paper)	37

2018年に根室海峡で急増したニシン(Clupea pallasii)を構成する3集団

堀井貴司*1,清水洋平2,川崎琢真2,山口浩志3

1北海道立総合研究機構釧路水産試験場,2北海道立総合研究機構栽培水産試験場,

Three populations of the Pacific herring Clupea pallasii in Nemuro Strait in 2018.

TAKASHI HORII*1, YOHEI SHIMIZU2, TAKUMA KAWASAKI2 and HIROSHI YAMAGUCHI3

The catch of Pacific herring suddenly increased on the coast north of the Notsuke Peninsula in the Nemuro Strait in 2018, although it had been low since 1959. In this study, we attempted to determine the population of Pacific herring caught on the coast of Betsukai, Shibetsu, and Rausu, by sequencing a 410 base pair segment of the mitochondrial DNA control region, number of vertebrae, and maturity stage of the ovary. It was thought that the Pacific herring caught off Betsukai, Shibetsu, and Rausu coasts belonged to the East Hokkaido Lagoon population, the Ishikari Bay population, and the Hokkaido-Sakhalin populations, respectively. However, the Pacific herring caught off Shibetsu was suggested to be independent as the subpopulation, which was different from the Pacific herring caught in Ishikari Bay, although the Pacific herring caught off Shibetsu belonged to the Ishikari Bay population, similar to the Pacific herring caught in Ishikari Bay.

キーワード: Clupea pallasii, 石狩湾系集団, 道東湖沼性集団, ニシン, 根室海峡, 北海道サハリン系集団

根室海峡におけるニシンの漁獲量は、1985~1997年に145~735トンへと増加したが、その後減少して、1998~2010年には38~180トンで推移した。しかし、2011年以降再び増加して2014年に1,156トンとなり、2015~2017年には708~802トンで推移し、2018年に急増して3,081トン、2019~2021年にはさらに増加して3,142~5,353トンとなった(Fig.1)。

1985~2017年の漁場の中心は別海町と根室市にまたがる風蓮湖と根室湾にあって(Fig.2)、その漁獲量は根室海峡全体の79~100%を占めていた(Fig.1)。一方、標津町と羅臼町沿岸におけるニシンの漁獲量は、1985年に30トンが漁獲されたが、1986~2013年には0~6トンで推移し、2014~2017年に11~116トンへと漸増したものの、それでも根室海峡全体の4~14%を占めるに過ぎなかった。しかし、2018年に標津町と羅臼町の漁獲量の合計が1,911トンに急増して別海町と根室市を合わせた漁獲量1,170

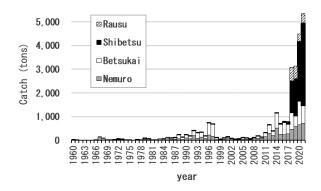


Fig.1 Annual catch of Pacific herring from each town in Nemuro Subprefecture.

トンを超えた。さらに、2019~2021年には、別海町と根室市の漁獲量が1,021~1,650トンであったのに対し、標津町と羅臼町の漁獲量は2,121~3,896トンへと増加した。これによって2018~2021年の根室海峡の漁獲量は、全国の

³北海道立総合研究機構中央水産試験場

¹ Kushiro Fisheries Research Institute, Hokkaido Research Organization, Kushiro Hokkaido 085-0024,

² Mariculture Fisheries Research Institute, Hokkaido Research Organization, Muroran Hokkaido 051-0013,

³ Central Fisheries Research Institute, Hokkaido Research Organization, Yoichi Hokkaido, 046-8555, Japan

報文番号A626 (2023年10月27日受理)

^{*}Tel: 81-154-23-6222. Fax: 81-154-23-6225. Email: horii-takasi@hro.orjp

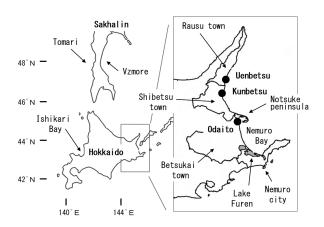


Fig. 2 Sampling point in Nemuro Strait.

ニシン漁獲量の21~38%を占めるに至った。

本海域には、風蓮湖に産卵場を有する風蓮湖系群の存在が報告されており(小林、1995)、1985~2017年の漁獲量の変動は、風蓮湖系群によるものであるとされている(小林、1995、堀井、2020a)。しかし、2017年までは少なかった標津町と羅臼町の漁獲量が2018年に急増し、2019~2021年にさらに増加したことは、風蓮湖系群の資源増大のみならず、別系統のニシンの増大をも予想させた。根室振興局管内では2000年以降、漁業協同組合が中心となって風蓮湖系群を親魚とした人工種苗が毎年放流されている。そのため、増加したニシンが風蓮湖系群であるのか、あるいは、他の系統のニシンであるのかは、放流効果の検証や今後の栽培漁業の方針を定めるにあたって極めて重要である。また、資源管理を行うためにも漁獲されるニシンの系統を明らかにする必要がある。

根室海峡には風蓮湖系群の他に、目梨ニシンあるいは羅臼ニシンと呼ばれた地域性ニシン(石田、1952)、北海道サハリン系群(石田、1952、プロバートフ・ダルダ、1957)、テルペニア系群(小林、1982)の分布、繁殖、来遊が報告されている。また、ニシンの系統についてはこれまで、形態的生態的特性に基づいて数多くの系群の存在が報告され(藤田・小久保、1927、入江、1980、菅野、1982、小林、1993など)、アイソザイムやDNA、耳石微量元素を用いた研究が行われてきた(小林、1993、Sugaya

et al, 2008, 山根, 2011, 清水ら, 2018など)。そこで本研究では、遺伝情報を用いた研究の中で最も詳細に北海道周辺海域を網羅し、かつ、サハリンで採集した標本を解析に用いた清水ら(2018)の方法と、公開されているミトコンドリアDNA(以下, mtDNAとする)のデータを利用して、2018年に根室海峡で漁獲されたニシンの集団を判定し、これまでに報告されてきた系群の形態的生態的特徴を加えた検討を行った。

試料及び方法

漁獲量には漁業生産高報告を用いた。また、2018年に標津漁業協同組合で漁獲状況等に関する聞き取り調査を行い、標津、羅臼漁業協同組合から2018年の日別漁獲量情報を得た。解析に供した標本は、2018年3月17日に別海町尾岱沼(Bets-18)、4月7日に標津町薫別(Shib-18)、5月19日に羅臼町植別(Raus-18)において、小定置網あるいは底建網によって漁獲された(Table 1, Fig. 2)。これらの標本について、北海道立水産試験場の測定マニュアル(山口、2013)に準じて尾叉長、体重、内臓除去重量、生殖腺重量を測定し、雌の成熟度は目視観察により以下のとおり判定した。年齢査定には鱗を用いた。

recovering spent: 生殖腺は未発達でリボン状, 卵粒は認められない。

pre-mature:卵は成熟期に入り半透明になるが、水子状態ではない。

mature: 放卵中, 卵粒がバラバラとなって腹部を軽く押すと卵が流出する, 解凍個体の場合, 卵粒同士が固着していわゆる「数の子」となっている。

spent:放卵後。

なお、未成熟(immature)および発達中(developing)の 個体は観察されなかったため、本稿ではこれらの成熟区 分を設定しなかった。

生殖腺重量指数(GSI)は次式により求めた。

 $GSI = GW / EW \times 100$

GW: 生殖腺重量 (g), EW: 内臓除去重量 (g)

測定した標本の一部について脊椎骨数計数のために軟

Table 1 Sampling location, sampling day, and number of sampled individuals of Pacific herring

Sample code	Location	Gear	Date	n1	n2	n3
Bets-18	Betsukai Town - Odaito	small set net	2018/3/17	156	48	36
Shib-18	Shibetsu Town - Kunbetsu	bottom trap net	2018/4/7	73	60	45
Raus-18	Rausu Town - Uenbetsu	small set net	2018/5/19	284	160	38

n1: Number of samples measured

n2: Number of samples whose number of vertebrae were counted among the measured samples

n3: Number of samples whose mitochondrial DNA were sequenced

エックス線撮影を行い、さらに、軟エックス線撮影に供した標本の一部についてDNAを抽出した(Table 1)。DNAの抽出およびmtDNA調節領域410塩基の塩基配列の解析は清水ら(2018)と同様の方法で行い、新たに検出されたハプロタイプの塩基配列を日本DNAデータバンク(DDBJ)に登録した(LC716427, LC716428, LC716459, LC716462 - LC716467, LC716469)。清水ら(2018)と同様の方法によって、清水ら(2018)の90標本に本研究の3標本を加えた計93標本間のペアワイズ $F_{\rm ST}$ 値を算出し、近接接合樹を作成した。

3標本 (Bets-18, Shib-18, Raus-18) 間の年級群組成 および脊椎骨数組成の差を検討するために多試料の χ^2 検 定を行った。有意差が認められた場合には2標本間それぞれについて独立2試料の χ^2 検定を行い,ボンフェローニ補正をかけた。年級群間の尾叉長の平均値の差を検討するためにt検定を行い,3標本間の平均脊椎骨数の差を検討するためにボンフェローニの多重比較検定を行った。有意水準は0.05 (ボンフェローニ補正0.0167) とした。

なお、本研究における「集団」とは、清水ら (2018) がmtDNAによって示した7集団を指す。一方、「系群」とは資源変動の単位であり、遺伝的に他の生物集団と区別できる集団を指し、遺伝的に区別できなくとも、産卵期、産卵場、分布、回遊、成長、成熟、生残など、独自の生

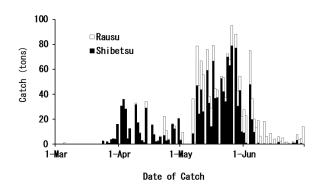


Fig. 3 Daily catch of Pacific herring at Shibetsu and Rausu fishery cooperatives from May to June in 2018.

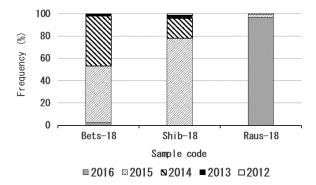


Fig. 4 Year class structure in each sample.

物学的特徴を有する場合が多く("わが国周辺の水産資源の評価 "水産庁・国立研究開発法人水産研究・教育機構(Web):(https://abchan.fra.go.jp/about/yougo/)(2023.6.19)), それぞれの系群は独自の数量変動を示す(田中, 1985)。したがって、清水ら(2018)によって同じ集団に属すると判定された標本であっても、生物学的特徴が異なる、あるいは、独自の数量変動を示す場合には、異なる系群と判定した。

結 果

聞き取り調査と日別漁獲量 標津漁業協同組合で「いったん漁が途切れた後に獲れるようになったニシンは魚体が小さく、ニシンが変わったと漁業者は言っていた」との証言を得た。標津、羅臼漁業協同組合の日別漁獲量は、4月下旬に減少した後、再び増加した(Fig.3)。

年級群組成 Bets-18とShib-18は共に2014年級群と2015 年級群で全体の96%を, Raus-18は2016年級群が97%を占 めていた (Fig.4)。標本の96%以上を占めていた2014~ 2016年級群の組成は、3標本間で有意差が認められた

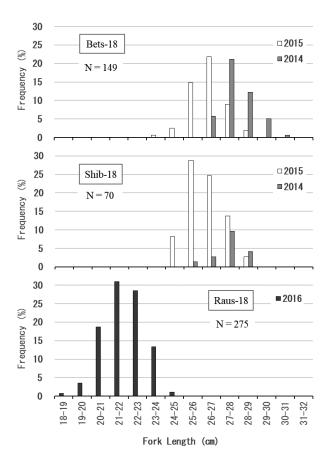
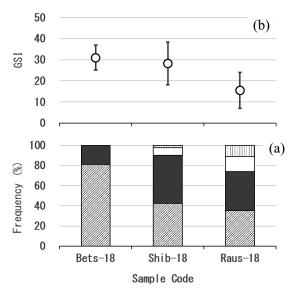


Fig. 5 Fork length frequency distributions of the year classes that accounted for more than 90% of the number in each sample.

 $(\chi^2=295.42,\ df=4,\ p=0.000)$ 。Raus-18の年級群組成は他の2標本とは明らかに異なっていた。また,Bets-18は2014年級群:45%,2015年級群:51%であったのに対してShib-18は2014年級群:18%,2015年級群:78%であり,有意差が認められた($\chi^2=17.53,\ df=1,\ p=0.000$)。**尾叉長組成** 2014年級群の平均尾叉長は,Bets-18が27.9 cm(範囲:26.1~30.2 cm),Shib-18が27.4 cm(範囲:25.3~28.9 cm)であり(Fig.5),2標本間に有意差は認めら



□ pre-mature □ mature □ spent □ recovering spent

Fig. 6 Maturity composition (a) and gonadosomatic index (GSI) (b) of female in each sample.

Vertical bars in (b) indicate standard deviation.

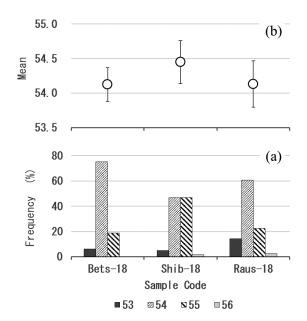


Fig. 7 Frequency distribution (a) and mean (b) of vertebral numbers in each sample.

Vertical bars in (b) indicate standard deviation.

れなかった(t=1.98, df=81, p=0.051)。2015年級群の平均尾叉長は、Bets-18が26.2 cm(範囲:23.7~28.9 cm)、Shib-18が26.2 cm(範囲:24.1~28.7 cm)であり、2標本間に有意差は認められなかった(t=0.34, df=134, p=0.736)。また、Raus-18の2016年級群の平均尾叉長は21.8 cm(範囲:18.9~24.5 cm)であった。

卵巣の成熟状態 卵巣の成熟段階は、Bets-18ではpre-matureが81%、matureが19%を占め、Shib-18ではrecovering spentが3%、pre-matureが43%、matureが48%、spentが8%を、Raus-18ではrecovering spentが11%、pre-matureが35%、matureが39%、spentが15%を占めていた(Fig.6a)。GSIの平均値は、Bets-18が31、Shib-18が28、Raus-18が16であった(Fig.6b)。これらのことから、Bets-18は産卵期直前、Shib-18は産卵期初期、Raus-18は産卵中の状態にあると判断された。

脊椎骨数の特徴 Bets-18の脊椎骨数は、54個が最も多く、全体の75%を占め、次いで55個が19%であった (Fig. 7a)。Shib-18は、54個と55個がそれぞれ47%を占めていた。Raus-18は、54個が61%、55個が23%を占め、53個は14%であった。脊椎骨数組成は3標本間で有意差が認められた($\chi^2 = 20.41$ 、df = 6、p = 0.002)。2標本間では、Bets-18とShib-18($\chi^2 = 10.32$ 、df = 2、p = 0.006)、Shib-18

Table 2 Number of each haplotype in each sample and haplotype diversity of each sample

Bets-18		Shib-	18	Raus-18		
Haplotype	number	Haplotype	number	Haplotype	number	
HKD_CP-001	3	HKD_CP-001	5	HKD_CP-001	3	
HKD_CP-006	1	HKD_CP-002	1	HKD_CP-008	2	
HKD_CP-010	3	HKD_CP-008	2	HKD_CP-010	6	
HKD_CP-030	5	HKD_CP-010	7	HKD_CP-015	1	
HKD_CP-033	2	HKD_CP-018	1	HKD_CP-016	4	
HKD_CP-037	1	HKD_CP-020	1	HKD_CP-018	1	
HKD_CP-043	4	HKD_CP-030	6	HKD_CP-030	7	
HKD_CP-069	7	HKD_CP-032	1	HKD_CP-032	1	
HKD_CP-070	2	HKD_CP-043	6	HKD_CP-039	1	
HKD_CP-102	1	HKD_CP-050	1	HKD_CP-056	1	
HKD_CP-181	1	HKD_CP-062	1	HKD_CP-071	1	
HKD_CP-191	1	HKD_CP-069	1	HKD_CP-124	1	
HKD_CP-378	1	HKD_CP-071	2	HKD_CP-181	1	
HKD_CP-426	1	HKD_CP-077	2	HKD_CP-238	1	
HKD_CP-433	1	HKD_CP-104	1	HKD_CP-272	1	
HKD_CP-482	1	HKD_CP-163	1	HKD_CP-517	1	
HKD_CP-483	1	HKD_CP-308	1	HKD_CP-518	1	
		HKD_CP-464	1	HKD_CP-519	1	
		HKD_CP-514	1	HKD_CP-520	1	
		HKD_CP-519	2	HKD_CP-521	1	
		HKD_CP-524	1	HKD_CP-522	1	

Haplotype diversity $0.9286\,\pm\,0.0231 \qquad 0.9343\,\pm\,0.0182 \qquad 0.9346\,\pm\,0.0233$

three population of this study

[&]quot;HKD_CP-001 - 464" are Haplotype number that were reported by Shimizu $et\ a/.$ (2018) "HKD_CP-482 - 524" are Haplotype number that were found out in

とRaus-18 (χ^2 = 12.32, df = 2, p = 0.002) との間に有意差が認められたが、Bets-18とRaus-18との間には有意差が認められなかった(χ^2 = 3.76, df = 2, p = 0.153)。平均脊椎骨数は、Bets-18が54.13、Shib-18が54.45、Raus-18が54.13であった(Fig.7b)。ボンフェローニの多重比較検定によって全群比較を行った結果、Bets-18とShib-18(t = 2.64, df = 265, p = 0.008)、Shib-18とRaus-18(t = 3.32、df = 265、df = 0.001)との間に有意差が認められたが、Bets-18とRaus-18との間には有意差は認められなかった(t = 0.06、df = 265、df = 0.952)。

mtDNAによる集団判定 Bets-18 (N = 36) には17のハプロタイプが検出され、ハプロタイプ多様度は0.9286 ± 0.0231であった。Shib-18 (N = 45) では21のハプロタイプが検出され、ハプロタイプ多様度は0.9343 ± 0.0182であった。そして、Raus-18 (N = 38) では21のハプロタイプが検出されてハプロタイプ多様度は0.9346 ± 0.0233であった(Table 2)。清水ら(2018)の90標本のデータにBets-18、Shib-18、Raus-18のデータを加えて作成した系統樹では、Bets-18は道東湖沼性集団に、Shib-18石狩湾系集団に、Raus-18は北海道サハリン系集団に位置した(Fig.8)。

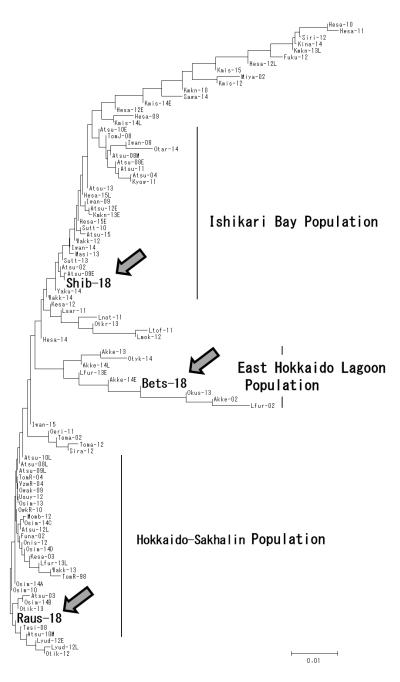


Fig. 8 Neighbor-joining tree based on the pairwise Fst values among the Pacific herring population samples. The figure was created by adding three datasets of this research to the data of Shimizu et al. (2018)

考察

Bets-18は、系統樹では道東湖沼性集団に位置した。脊椎骨数の特徴と卵巣の成熟状態から推定された産卵期は、風蓮湖系群の特徴(脊椎骨数:平均53.8~54.1、範囲52~56,モード54、産卵期:3月中旬~4月下旬、小林、1995)に一致した。清水ら(2018)は4月に風蓮湖で採集した標本を道東湖沼性集団に属するとしたが、この標本の特徴(平均53.92、範囲53~55、モード54、産卵中)は風蓮湖系群の特徴(小林、1995)と一致していたことから、風蓮湖系群であると考えられていた(堀井、未発表)。また、風蓮湖系群を親魚として作られ風蓮湖で放流された人工種苗が野付湾で再捕されたとの報告がある(山本、2000)。これらの知見から、風蓮湖系群は道東湖沼性集団に属するとみなされ、別海町尾岱沼で採集されたBets-18は道東湖沼性集団に属する風蓮湖系群であると推定された。

Shib-18は、系統樹では石狩湾系集団に位置した。脊椎骨数の特徴は石狩湾系群の特徴(平均54.6,範囲52~57,モード55,小林,1993)に類似した。卵巣の成熟状態から、産卵期は石狩湾(2~3月,小林,1993)よりも遅く、留萌から稚内にかけての産卵期(3月上旬~4月下旬,高柳・石田,2002)にあたると推定された。

石狩湾系群の漁獲量は1997年以降に増加し、近年では1~2千トンで変動していると報告され(山口,2019a),漁獲の中心となった石狩湾で千トンを超えた2008年以降、留萌沿岸では2~81トン,稚内沿岸では0~1トンで推移していた(山口,2019b)。しかし、標津町における漁獲量はそれらと同様の変動を示しておらず、石狩湾を中心に漁獲されている石狩湾系群と標津町で漁獲されて石狩湾系集団と判定されたニシンとが現在、直接繋がっているとは考え難い。Shib-18は、遺伝的には石狩湾系群と同じ石狩湾系集団と判定されたものの、石狩湾系群とは異なる資源単位に属していると推定される。

石狩湾系群と同様の脊椎骨数の特徴を有するニシンは Shib-18の他に, 1919年5月の羅臼 (平均54.52, 範囲52~56, モード55, 藤田・小久保, 1927), 2006年4月の標津 (平均54.45, 範囲53~56, モード55, 堀井, 未発表), 2020年4月の標津 (平均54.46, 範囲53~56, モード55, 堀井, 未発表) でも採集されている。このことは, 石狩湾系集団と判定された標本 (Shib-18) が, 偶発的に採集されたものではない可能性を示している。根室海峡北部海域には地域性ニシンの存在が示唆されていたが (石田, 1952),情報は断片的である。石狩湾系集団に属する地域性ニシンが, 石狩湾系群とは独立した系群として根室海峡に存在していることを確認するためには, 継続的な生物学的調査が必要である。

Raus-18は、系統樹では北海道サハリン系集団に位置した。Raus-18の脊椎骨数は北海道サハリン系群(平均54.1~54.3、範囲52~56、モード54、小林、1995)と同様の特徴を有し、卵巣の成熟状態から推定された産卵期は、北海道西岸の産卵期(3月下旬~5月上旬、小林、1995)よりも遅く、国後島の産卵期(4月中下旬~5月中旬、プロバートフ・ダルダ、1957)の後縁に当たると考えられた。また、全体の97%を占めていた2歳(2016年級群)全てが成熟していたRaus-18は、北海道サハリン系群の成熟年齢(まれに3歳、多くは4歳、小林、1995)より若齢で成熟に達していたと考えられた。しかし、1950年代に北海道サハリン系群であると推察された2歳成熟群がサハリン南西岸に出現しており(近藤、1965)、2歳で成熟していたことは、Raus-18が北海道サハリン系群であることを否定するものではないと考えられる。

1887~1905年の根室湾 (別海町・根室市沿岸) では6千 ~4万トン、1887~1958年の標津町・羅臼町沿岸では数百 ~数千トンの漁獲量があり(堀井, 2020b), そのほとん どは北海道サハリン系群であると考えられていた (石田, 1952, 菅野, 1983)。2018年の標津, 羅臼漁業協同組合の 日別漁獲量は4月下旬に減少した後に再び増加しており, 聞き取り調査では「漁が途切れた時期を境にニシンが変 わった」との証言を得た。Shib-18を採集した標津町薫別 とRaus-18を採集した羅臼町植別は直線距離にして約 8 kmに過ぎない。両所で同じニシンを漁獲していたと仮 定し、4月上中旬までは石狩湾系集団 (Shib-18)、4月下 旬以降は北海道サハリン系集団 (Raus-18) が漁獲されて いたとすれば、2018年3~6月にこれら2漁協で漁獲された ニシン1,872トンのうち、4月20日以前に漁獲された274ト ンは石狩湾系集団、4月21日以降に漁獲された1,598トン は北海道サハリン系集団であったと推計される。この北 海道サハリン系集団の漁獲量推計値は、標津町・羅臼町 沿岸の1940~1950年代の漁獲量に近い水準である。2019 年以降も北海道サハリン系集団に属する可能性があるニ シンの漁獲量は増加しており(堀井, 未発表), 過去の状 況を鑑みれば、標津町・羅臼町沿岸における北海道サハ リン系集団の漁獲増は今後も続く可能性があり、それに 伴って漁場が拡大して根室湾に達する可能性もある。

本研究によって,2018年の根室海峡には道東湖沼性集団,石狩湾系集団,北海道サハリン系集団が分布していたことが明らかになった。根室振興局管内ではこれまで,漁業協同組合が主体となって,風蓮湖系群の栽培漁業や産卵場である風蓮湖での漁業規制,漁網に付着した卵の保護,産卵量調査などが実施されてきた(堀井,2009)。しかし,北海道サハリン系集団と石狩湾系集団の動向次第では,風蓮湖系群だけではなく,それら2集団を考慮し

た取り組みが必要となる。

風蓮湖系群を親魚として生産される人工種苗は毎年 100~300万尾, 放流効果を示す回収率(放流数に対する 再捕数の割合)は5~10%と報告されており(堀井. 2020a), 生産技術と放流技術は確立されている。標津町 で採集された石狩湾系集団に属するとされたニシンが根 室海峡固有の地域性ニシンであることが明らかになり. 人工種苗生産と放流に係る生物学的情報が得られた場合 には、風蓮湖系群同様、栽培漁業の対象になり得ると考

本研究によって、北海道サハリン系集団の漁場が根室 湾にまで拡大する可能性が示された。また、2013年5月18 日に風蓮湖で採集された成熟したニシンが北海道サハリ ン系集団であると判定されている (清水ら,2018)。これ らのことから、北海道サハリン系集団の資源が増大した ときには風蓮湖および風蓮湖周辺海域への来遊量の増加 が予想される。そして、北海道サハリン系群の国後島に おける産卵期は4月中下旬~5月中旬(プロバートフ・ダ ルダ、1957) と報告されており、風蓮湖系群の産卵期(3 月中旬~4月下旬、小林、1995) と重なる時期がある。北 海道サハリン系群は高塩分域で産卵し、回遊範囲が広い 海洋性広域型ニシン, 風蓮湖系群は汽水域で産卵し, 回 遊範囲が狭い湖沼性地域型ニシンに分類されていること から (小林, 1993), 北海道サハリン系集団と風蓮湖系群 との間には、天然環境では生殖隔離が働いていた可能性 がある。このため、それらを区別せずに人工種苗生産に 用いる採卵用親魚として使用した場合は、人為的な遺伝 的攪乱によって生殖や回遊などの生態に変化を引き起こ す恐れがある。現在、風蓮湖系群の人工種苗生産に用い る親魚の採集は、3月最終週から4月初週に風蓮湖内で行 われており、北海道サハリン系集団が混じる可能性は極 めて低いと考えられる。しかし、過去には4月中下旬に採 卵が行われた年もあり、北海道サハリン系集団が増大し た時期に4月中旬以降採卵する際には、事前に集団判定を 行う等、細心の注意が必要となる。

これまでの漁業モニタリングは、風蓮湖系群を対象と して風蓮湖と根室湾で行われてきたが、これからは対象 海域を野付半島以北に拡げ、3集団それぞれを判別しなが ら漁獲実態を把握することが望ましい。本研究では、清 水ら(2018)の方法によって集団判定を行い、脊椎骨数 などの情報によって系群推定を試みた。しかし、遺伝子 情報による判定は高価で専門的な解析技術を要するため、 モニタリングとして地域で長く続けるための方法として は現実的ではない。現時点では,石狩湾系集団を他の2集 団と判別するためには脊椎骨数の特徴を比較すること. 北海道サハリン系集団と風蓮湖系群を判別するためには

卵巣の成熟状態を考慮しつつ、 産卵来遊時期を比較する ことが実用的な方法である。

本論文をまとめるにあたり助言を賜った小林時正博士, 情報提供や標本採集等にご尽力いただいた風蓮湖産にし ん資源増大対策連絡協議会. 根室管内種苗生産運営委員 会, 羅臼漁業協同組合, 標津漁業協同組合, 野付漁業協 同組合の関係各位に深謝いたします。

引用文献

- 藤田経信, 小久保清治. 鰊の研究. 水産研究彙報 1927; 1(1).
- 堀井貴司. 風蓮湖ニシン, 資源増大への挑戦. 豊かな海 2009; 19: 24-28.
- 堀井貴司. ニシン風蓮湖系群. 令和元年度道総研釧路水 産試験場事業報告書, 北海道立釧路水産試験場, 北 海道. 2020a;41-43.
- 堀井貴司. 根室海峡におけるニシン漁場の変遷~明治期 から現在に至る~. 北水試だより 2020b;100:13-16.
- 入江隆彦. 北海道・樺太周辺水域のニシンの系統群につ いて. 北海道区水産研究所研究報告 1980;45:1-14. 石田昭夫. ニシン漁業とその生物学的考察. 漁業科学叢 書第4号,水産庁調査研究部,東京. 1952;57pp.
- 菅野泰次. オホーツク海北海道近海におけるニシン Clupea pallasii の系群構造. 日本水産学会誌 1982; 48(6): 755-762.
- 菅野泰次. 日本周辺海域に分布するニシンの系統群とそ の生態. 栽培漁業技術開発研究1983;12(2):59-69.
- 小林時正. 風蓮湖のニシンについて. 昭和56年度根室海 域総合開発事業調査報告書(北海道区水産研究所担 当分), 北海道区水産研究所, 北海道. 1982;89-92. 小林時正. 太平洋ニシンの集団遺伝学的特性と種内分化 に関する研究. 遠洋水産研究所研究報告 1993;30: 1-77.
- 小林時正. 風蓮湖系群. 日本の希少な野生水生生物に関 する基礎資料2, 日本水産資源保護協会, 東京. 1995; 192-194.
- 近藤平八. 近年の北海道・カラフト周辺のニシン (Clupea pallasii C. et V.) の状態について. 北海道水産試験場 報告 1965;3:1-18.
- ア・エヌ・プロバートフ, エム・ア・ダルダ. 国後島産 卵ニシンの生物学的特性. ソ連北洋漁業関係文献集

- 第13集(中場穂訳), 北洋資源研究協議会, 東京. 1957;62-74.
- 清水洋平, 高橋洋, 高柳志朗, 堀井貴司, 山口幹人, 田中伸幸, 田園大樹, 瀧谷明朗, 川崎琢真, 高畠信一,藤岡崇, 三宅博哉. 北海道周辺沿岸海域において産卵するニシン(Clupea pallasii)のmtDNA情報を用いた集団構造の検討. 北海道水産試験場研究報告2018;94:1-40.
- Sugaya T, Sato M, Yokoyama E, Nemoto Y, Fujita T, Okouchi H, Hamasaki K, Kitada S. Population genetic structure and variability of Pacific herring *Clupea pallasii* in the stocking area along the Pacific coast of northern Japan. *Fisheries Science* 2008; 74(3):579–588.
- 高柳志朗,石田良太郎.石狩湾系ニシンの繁殖特性.北 海道水産試験場研究報告 2002;62;79-89.
- 田中昌一. 資源動態考察の基礎単位. 水産資源学総論, 恒

- 星社厚生閣, 東京. 1985; 24-25.
- 山口浩志. 石狩湾系ニシンの漁況予測調査. 平成30年度 道総研中央水産試験場事業報告書, 北海道立総合研 究機構水産研究本部, 北海道. 2019a; 74-76.
- 山口浩志. ニシン. 平成30年度道総研中央水産試験場事業報告書, 北海道立総合研究機構水産研究本部, 北海道. 2019b; 25-26.
- 山口幹人. ニシン. 北水試魚介類測定・海洋観測マニュアル(改訂版), 北海道立中央水産試験場, 北海道. 2013
- 山本和久. 厚岸事業場におけるニシンの技術開発結果(昭和56年~平成6年). 協会研究資料No.76, 社団法人日本栽培漁業協会, 東京. 2000; 1-42.
- 山根広大. 日本沿岸域におけるニシンの個体群構造に関する研究. 博士論文, 東京大学, 東京. 2011.

ナガコンブSaccharina longissimaの品質と加工特性に及ぼす凍結の 影響

奈須亮耶*1, 秋野雅樹², 加藤慎二¹, 小玉裕幸¹, 武田浩郁¹

1北海道立総合研究機構釧路水産試験場,2北海道立総合研究機構中央水産試験場

Effect of freezing on the quality of nagakombu (Saccharina longissima)

Ryouya NASU*1, Masaki AKINO², Shinji KATOU¹, Hiroyuki KODAMA¹ and Hirohumi TAKEDA¹

Recently, kombu catch has decreased in Hokkaido, Japan. One of the reasons for this decline is ageing and a decrease in the population of fishery workers. Dried kombu accounts for most of kombu products. However, labor-intensive drying of kombu is a significant problem in terms of efficiency. Herein, we focused on nagakombu ($Saccharina\ longissima$) caught in Eastern Hokkaido and proposed replacement of the drying process for nagakombu products with freezing. We examined the effect of quality on frozen nagakombu compared with dried nagakombu. The yield and breaking strength of frozen nagakombu were lower than those of the dried nagakombu. Further, the nutritional content of frozen nagakombu was higher than that of dried nagakombu. Kombumaki (a food item made from nagakombu) was prepared by both frozen and dried nagakombu. The results were compared using a sensory evaluation. The differences between frozen and dried nagakombu were significant (p<0.01). The preference tests were not significantly different between frozen and dried nagakombu; however, sensory panelists showed a tendency to prefer texture-dried nagakombu to frozen nagakombu. These results suggest that frozen nagakombu maintained a high nutritional value and that the texture of the products became soft.

キーワード:官能評価, 昆布巻き, 凍結, ナガコンブ, 破断強度, 歩留り

ナガコンブSaccharina longissimaは北海道東部の太平洋沿岸に分布する大型の褐藻類であり、釧路から根室地方における重要な水産資源である。道内で漁獲されるコンブは主に出汁用途と調理・加工用途に分けられる。ナガコンブは他のコンブと比較して呈味の主体となるグルタミン酸やアスパラギン酸の含有量が少ないため(西塔ら、2005)、出汁素材として不向きであるが、加熱調理によって煮えやすいことから昆布巻きや佃煮、おでんの具材など食べるコンブとして利用されている。

近年では北海道のコンブ類の生産量は減少傾向にある (北海道水産林務部, 1991~2021)。その原因は海洋環境 の変化によって海藻類の生息域が縮小していることに加 え,漁業者の高齢化および新規就業者の減少による労働 力不足と考えられている(幡宮, 2014)。漁獲されたナガ コンブはそのほとんどが乾燥品に加工される。コンブ乾燥品の製造に至っては漁獲から、乾燥、切断、選別、荷造の工程を漁業者が自ら行っている。特にコンブの乾燥工程には多くの時間と労働力が必要であり、その効率化が喫緊の課題である。その課題解決策の一つとして、乾燥に伴う品質形成のメカニズムの解明(福士ら、2021)や、天日乾燥を機械乾燥に代替する実証試験(福士ら、2016)が行われてきた。

我々は上述した乾燥工程の効率化とは別の視点からコンブの生産を支援するために、凍結ナガコンブの生産流通の可能性について検討した。ナガコンブの冷凍素材化が可能となれば、従来のコンブに必須の乾燥工程は省略され、そこにかかる労力を削減できるだけではなく、ナガコンブの新たな加工原料としての活用も期待できる。

¹ Kushiro Fisheries Research Institute, Hokkaido Research Organization, Kushiro, Hokkaido, 085-0027,

² Central Fisheries Research Institute, Hokkaido Research Organization, Yoichi, Hokkaido, 046-8555, Japan

しかしながら、これまでにコンブの凍結に関する研究 例は少なく、凍結したナガコンブの性状に関する知見は ない。そこで本研究では、ナガコンブの品質と加工特性 に及ぼす凍結の影響を歩留りと物性、成分量の変化から 検討した。また、凍結ナガコンブから昆布巻き製品を調 製し、その品質を官能試験によって評価した。

試料及び方法

貯蔵試験用のナガコンブ試料の調製 2021年7月に漁獲 されたナガコンブを散布漁業協同組合から調達し試験に 供した。ナガコンブは、葉元50 cmを除く葉状部を10 cm 幅に切断して試験片とした。凍結品は試験片をチャック 付きポリエチレン袋 (ユニパック, セイニチ) に入れ, -10 ℃および-30 ℃で12か月間貯蔵し, 分析した。対照の 乾燥品は、試験片の重量がおよそ10%程度になるまで 50℃で熱風乾燥し、上記と同様の袋に入れ室温で12か月 間貯蔵した。

凍結品の解凍歩留りと乾燥品の水戻し歩留りの測定 凍 結品は袋に入れたまま4℃に設定した恒温槽中に3~4時 間静置することで解凍した(以下,解凍品とする)。解凍 品に付着したドリップはペーパータオルでふき取り、解 凍品の重量を計量した。解凍歩留りは、試験片の重量に 対するドリップふき取り後の解凍品の重量の割合とした。 乾燥品は個別に25 ℃設定の恒温槽中で500 mlの蒸留水 を入れたガラスビーカー中に3時間浸すことで水戻しし た(以下,水戻し品とする)。水戻し歩留りは,試験片の 重量に対する水戻し品の重量の割合とした。

物性の測定 試料は生鮮のナガコンブおよび解凍品, 水 戻し品として、沸騰水中で10秒間加熱(以下、ボイル加 熱とする)した後に物性の測定を行った。物性は直径 2 mmの円柱状プランジャー(進入速度1 mm/sec)を装着 したレオメーター (CR-500DX, サン科学) を用いて, 試 料の中帯部の破断強度を測定した。測定回数は試料1枚に つき3回とし、その平均値を使用した。

灰分、粗タンパク質、マンニトール、アルギン酸の分析 各種成分の分析には生鮮のナガコンブおよび解凍品、水 戻し品をボイル加熱したものを用いた。それらを真空凍 結乾燥 (FD-550, EYELA) して得られた乾燥物を粉砕 (FLabo Milser LM-PLUS,岩谷産業)し,各種成分の分析 に供した。固形物量は解凍品および水戻し品の重量に対 する乾燥物の重量の割合とした。灰分は550℃直接灰化 法(堤·安井, 1996) を用いた。アルギン酸は50 ml容量 のサンプリングチューブに粉末試料を約0.3g秤量し、 1%(w/v)のNa₂CO₃を25 ml加えて沸騰水中で加熱抽出し て, Galambos法 (瀬野ら, 1972) により定量した。マン

ニトールは粉末試料約0.5gに蒸留水を加えて100 mlに定 容し,5分間超音波処理 (MCS-2,アズワン) した後,75% アセトニトリルを溶離液とし、分離カラム (Asahipak NH2P-50 4E, Shodex) とRI検出器 (L-2490, 日立) を 装備した高速液体クロマトグラフィー(Elite LaChrom, 日 立)を用いて定量した。粗タンパク質はスミグラフ (NC TRINITY, 住化分析センター) を用いた改良デュマ法(日 本食品分析センター,2001)で得られた全窒素量に6.25 を乗じて求めた。その他成分は固形物量から灰分. アル ギン酸、マンニトール、粗タンパク質量の値を差し引い て算出した。

官能評価 加工原料は2021年8月に漁獲されたナガコン ブを散布漁業協同組合から入手し、-20℃で7か月間貯蔵 した凍結ナガコンブと前述の方法にて乾燥した乾燥ナガ コンブとした。これらの加工原料を水産加工会社に提供 し、ニシンを具材とした昆布巻き製品を製造した。パネ ルは20代から60代の水産試験場職員および釧路地区水産 技術普及指導所の15名(男性13名,女性2名)とした。官 能評価は3点識別法(佐藤, 1985a)により凍結原料と乾 燥原料から製造した昆布巻き製品の違いを識別可能かど うか調べた。また2点嗜好試験(佐藤, 1985b)により外 観,味,香り、食感の4項目を評価した。なお、嗜好試験 では判断の根拠や感想についての自由記述欄を設けた。 有意差検定は統計解析ソフトR (ver.4.2.1) を用いて二項 検定により行った。

凍結品および乾燥品の煮熟時間に伴う物性変化 試料は 2022年7月に漁獲されたナガコンブを散布漁業協同組合 から入手し、-20℃で3か月間貯蔵した凍結品および室温 で3か月間貯蔵した乾燥品とした。それらを解凍品と水戻 し品にした後、沸騰水中で60分間加熱して、経時的に破 断強度を測定した。

結 果

貯蔵に伴う凍結品および乾燥品の歩留りの変化 凍結品 と乾燥品を12か月間貯蔵して、解凍歩留りおよび水戻し 歩留りの変化を経時的に測定した (Fig.1)。

解凍歩留りと水戻し歩留りは貯蔵1か月目で83% (-30 ℃貯蔵),84% (-10℃貯蔵),92% (乾燥品)であった。 解凍歩留りと水戻し歩留りは貯蔵1か月目以降ではほと んど変化しなかった。-10℃で貯蔵した凍結品の解凍歩 留りは、-30℃で貯蔵した解凍歩留りよりも低い傾向を 示した。

貯蔵に伴う凍結品および乾燥品の物性の変化 生鮮ナガ コンブ、解凍品および水戻し品をボイル加熱して破断強 度の変化を検討した (Fig.2)。 生鮮ナガコンブの破断強

度は999±87gであった。解凍品と水戻し品の破断強度は 1か月間貯蔵するとそれぞれ707±95g (-30 $\mathbb C$ 貯蔵), 677±77g (-10 $\mathbb C$ 貯蔵), 821g±89 (乾燥品) であり, 生鮮ナガコンブよりも低い値であった。貯蔵1か月目以降では、解凍品と水戻し品ともに破断強度に顕著な変化はみられなかった。

貯蔵に伴う凍結品および乾燥品の栄養成分の変化 生鮮 ナガコンブ,解凍品および水戻し品をボイル加熱して主 な成分含量と貯蔵期間の関係について検討した。その結 果、解凍品と水戻し品の成分含量は貯蔵期間に関係なく一定であったことから、貯蔵12か月目の結果のみを示した(Table 1)。ボイル加熱前の生鮮ナガコンブの固形物量は湿重量あたり11.4%であり、各成分量は灰分(3.8%)、アルギン酸(3.3%)、マンニトール(2.2%)、粗タンパク質(0.9%)の順に多かった。ボイル加熱後の生鮮ナガコンブおよび解凍品、水戻し品の固形物量はそれぞれ、8.6%(生鮮)、8.7%(-30 $\mathbb C$ 貯蔵)、8.3%(-10 $\mathbb C$ 貯蔵)、5.5%(乾燥品)であった。各成分量については、灰分は

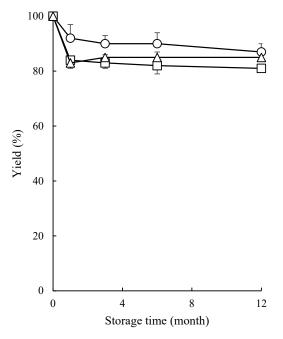


Fig. 1 Changes in the yield of frozen and dried nagakombu. Nagakombu was stored at −10 °C (□) and −30 °C (△) for up to 12 months. The frozen nagakombu was subsequently thawed in water. To estimate yield, frozen nagakombu was weighed before freezing and after thawing. Dried nagakombu was stored at room temperature for up to 12 months (○). Dried nagakombu was reconstituted by soaking in water at 25 °C for 3–4 h. Error bars indicate standard deviation (n=3).

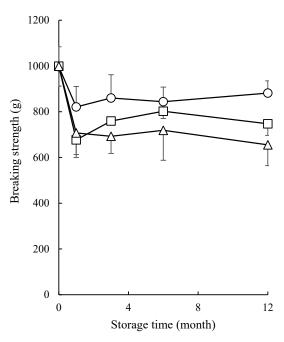


Fig. 2 Changes in the breaking strength of frozen and dried nagakombu after heating. Freeze-thawed and dried nagakombu after reconstitution were heated in boiling water for 10 s. The explanations of the symbols are given in Fig. 1. Error bars indicate standard deviation (n=3).

Table 1 Nutritional contents, alginic acid content, and mannitol content in frozen and dried nagakombu after heating.

Samples	Dried content	Ash	Alginic acid	Mannitol	Crude Protein	Other
Raw nagakombu (before heating)	11.4	3.8	3.3	2.2	0.9	1.2
Raw nagakombu	8.6	2.2	3.0	1.3	0.8	1.4
Frozen(-30°C)-thaw nagakombu	8.7	2.1	3.6	1.2	0.6	1.2
Frozen(-10°C)-thaw nagakombu	8.3	2.0	3.6	1.1	0.6	1.0
Dried nagakombu after reconsitution	5.5	0.8	3.4	0	0.6	0.7

Raw nagakombu was defined as nagakombu before freezing. The frozen and dried nagakombu were stored for 12 months (Fig. 2). The component values are presented as percentages of the wet weight.

2.2% (生鮮), 2.1% (-30℃貯蔵), 2.0% (-10℃貯蔵), 0.8% (乾燥品) であった。アルギン酸は3.0% (生鮮), 3.6% (-30℃貯蔵), 3.6% (-10℃貯蔵), 3.4% (乾燥品) であった。マンニトールは1.3% (生鮮), 1.2% (-30℃貯蔵), 1.1% (-10℃貯蔵) であり, 水戻し品からは検出されなかった。粗タンパク質は生鮮で0.8%, 解凍品と水戻し品はいずれも0.6%であった。その他成分は, 1.4% (生鮮), 1.2% (-30℃貯蔵), 1.0% (-10℃貯蔵), 0.7% (乾燥品)であった。

官能評価 凍結ナガコンブおよび乾燥ナガコンブを原料として、それぞれから昆布巻きを調製し、その官能評価を行った(Table 2)。3点識別試験では、15名のパネルのうち正答者は13名であり、原料の異なる昆布巻きの違いは有意に識別された(p<0.01)。続いて、先の識別試験に正答したパネル13名により2点嗜好法を用いて評価を行った結果、いずれの設問においても有意な差は認められなかったが、外観、味、香りについては凍結原料の昆布巻きを選択したパネルが多かった。食感については凍結原料を選択したパネルは13名中3名と少なかった。

Table 2 Sensory evaluation of frozen and dried nagakombu products.

Triangle difference test	Number of correct panelist		
	13*		
Pairing preference test	Number of panelist indicating for		
	Dried	Frozen	
Appearance	5	8	
Taste	5	8	
Flavor	3	10	
Texture	10	3	

The difference test was performed by 15 panelists. The preference test panel consisted of participants who had correctly identified frozen and dried nagakombu in the difference test. Significant difference is indicated with * (p<0.01).

凍結品および乾燥品の煮熟時間に伴う物性変化 解凍品および水戻し品の煮熟時間に伴う物性の変化をFig.3に示した。解凍品の加熱前の破断強度は1162±183gであった。解凍品の破断強度は5分間の加熱によって954±64gに低下した。また、解凍品の破断強度は加熱時間が長くなるに従って減少し、60分間の加熱によって552±100gまで低下した。

水戻し品の加熱前の破断強度は1066±134gであった。 水戻し品の破断強度は5分間の加熱によって875±92gに 低下したが、5分以上長く加熱してもわずかな増減はみられたが破断強度の値は概ね一定であった。

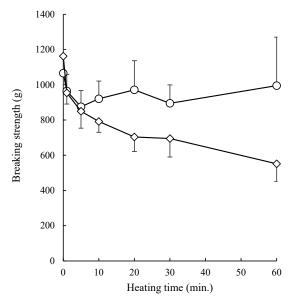


Fig. 3 Effect of heating on the breaking strength of frozen and dried nagakombu. Frozen (\diamondsuit) and dried nagakombu (\bigcirc) were heated in boiling water for up to 60 min.

Error bars indicate standard deviation (n=5).

考 察

解凍品および水戻し品の重量は生鮮ナガコンブの重量よりも低下した(Fig.1)。解凍品の歩留りの低下は、凍結と解凍に伴ってナガコンブに含まれる水分がドリップとして葉体外に滲出したためであると考えられた。一方、水戻し品の歩留りの低下は、熱風乾燥によってナガコンブから蒸発した水分量が水戻しによって完全に戻らなかったことを示す。また、解凍歩留りと水戻し歩留りは貯蔵期間中に大きな変化は認められなかったが、凍結品では貯蔵温度を高めることで解凍歩留りがわずかに低下傾向を示したことから、凍結障害が起こった可能性が示唆された。凍結障害は食品を凍結貯蔵することで起こる品質劣化の原因の一つである(御木,2005)。これは凍結中に生成される氷結晶による組織損傷であり、ナガコンブは凍結貯蔵時の温度の条件によっては組織中の氷結晶の成長が進行し、その品質に影響すると推察された。

凍結ナガコンブの品質を物性の面から把握するため、 貯蔵試験において解凍品および水戻し品のボイル加熱後 の破断強度を経時的に調査した結果、解凍品の破断強度 は水戻し品よりも低かった(Fig.2)。このことは、凍結 品を原料として加工品を製造した場合、その製品品質は 乾燥品を原料とした製品と比べて食感が柔らかく変化す ると推測された。また貯蔵期間中に解凍品と水戻し品の 歩留りやボイル加熱後の破断強度に顕著な変化はみられ なかったことから、凍結品は乾燥品と同様に貯蔵中の品 質変化が起こりづらいことが示唆された。

凍結ナガコンブの品質を栄養成分の含有量から検討し た (Table 1)。凍結品の解凍歩留りの低下量を解凍時の ドリップ生成量とみなすと凍結品の栄養成分は、解凍ド リップを通じて流出することが懸念されたが、解凍品は 水戻し品よりボイル加熱後の固形物量が高く、水戻し品 において著しく少なかったマンニトールや灰分を多く保 持していた (Table 1)。マンニトールはコンブに含まれ る炭水化物のおよそ半分を占める糖質であり、コンブの 乾製品の表面に析出する白粉の主成分として知られてい る (飯田, 2005)。また, 乾燥昆布製品に含まれるミネラ ル類は水戻しの操作によってその多くが溶出することが 知られている (関本ら、1983)。したがって、乾燥品は水 戻しの操作によって栄養成分の多くを損失し, 一方の凍 結品は水戻しの操作を行っていないことから、多くの栄 養成分を保持していたと推察された。また、生鮮ナガコ ンブに含まれている灰分とマンニトールはボイル加熱に よって低下したが、生鮮ナガコンブと解凍品のボイル加 熱後の灰分とマンニトール量は同程度であったことから (Table 1), 凍結品は加熱調理による栄養成分の損失が生 鮮ナガコンブを加熱調理した場合と同等であることが示 唆された。

凍結ナガコンブの加工原料としての特性を検討するた め、凍結ナガコンブから昆布巻きを試作し、乾燥ナガコ ンブから製造した昆布巻きとの比較を官能評価によって 行った (Table 2)。

その結果, 昆布巻きの原料の違いは有意に識別され, 凍 結ナガコンブの加工特性は乾燥ナガコンブと異なること が示唆された。また、識別正答者の嗜好試験結果からは、 凍結原料と乾燥原料の昆布巻きの間に嗜好の偏りは認め られなかった。しかしながら、自由記述の欄には凍結原 料の昆布巻きについて、食感の柔らかさを指摘する意見 が多かった。このことは、Fig.2に示した凍結品の破断強 度が乾燥品よりも低かった結果が製品品質に反映された ためであると考えられ、凍結ナガコンブは加熱調理によ って物性の軟化が起こりやすいことが示唆された。

そのことを確認するために、解凍品と水戻し品を沸騰 水中で60分間煮熟して経時的に物性の変化を検討した (Fig.3)。その結果, 解凍品の破断強度は加熱時間の経過 とともに低下したのに対して, 水戻し品の破断強度は加 熱時間に関わらず、ほとんど一定であった。

加熱調理に伴うコンブの軟化現象は組織の構造変化 (奥田・中川、1987) やコンブの食物繊維であるアルギン 酸の性状変化との関連から検討されている(奥田・中川、 1991:岩田ら、1997)。アルギン酸は褐藻類に存在する細 胞間粘質多糖であり、葉体を保持している(野田、1993)。

凍結したナガコンブでは解凍後にアルギン酸の含有量は ほとんど変わらなかったが (Table 1). その構造につい ては未検討である。また、ナガコンブの葉体の構造につ いても検討していないことから、今後は凍結したナガコ ンブの物性低下のメカニズムについて、加熱の影響も加 味して詳細に検討するとともに、凍結品を原料とする加 工品の製造を想定して、加熱条件の最適化についても検 討する必要があると考えられる。

以上の結果から、ナガコンブの凍結品は、従来の乾燥 品と異なり、水戻し処理を必要としないことから、栄養 成分の損失機会が少なく、加熱調理によって食感が柔ら かくなる特徴を有する素材であることが明らかとなった。 これは従来の乾燥品とは異なる性状の新たな加工原料で ある。なお、官能評価用の昆布巻きを試作した水産加工 会社は、凍結品を原料とした製品の品質に問題はないと 評価をしている。今後、我々はナガコンブの凍結解凍や 加熱の影響. 他の加工品への利用についても詳細に検討 する必要はあるが、ナガコンブの凍結品は十分に活用可 能な優れた食品素材であると考えられた。

謝辞

試験を実施するにあたりナガコンブの調達に協力いた だいた散布漁業協同組合代表理事組合長の秋森新二氏と 専務理事の中村雅人氏にお礼申し上げる。また、官能評 価に協力いただいた釧路地区水産技術普及指導所の皆様 にお礼申し上げる。

引用文献

- 福士暁彦, 宮崎亜希子, 加藤慎二, 武田忠明. 羅臼コン ブの熟成プロセスの把握と新たな出汁コンブ加工技 術の開発(経常研究). 令和2年度道総研釧路水産試 験場事業報告書, 釧路. 2021;69-77.
- 福士暁彦、阪本正博、武田浩郁、木村稔、道産コンブの 生産安定化に関する研究(重点研究). 平成26年度道 総研釧路水産試験場事業報告書, 釧路, 2016;127-130. 幡宮輝雄. コンブの安定生産に向けた北海道の取り組み.
- 水産工学 2014:51:75-77.
- 北海道水產林務部. 平成3年度~令和3年北海道水產現勢. 札幌. 1991~2021.
- 飯田訓之、コンブの機械乾燥における注意点、北水試だ より2005;67:19-20.
- 岩田一幸, 西澤信, 山岸喬, 辻啓介. コンブの調理にお ける低分子アルギン酸の生成量. 日本家政学会誌 1997;48:803-807.

- 御木英昌. 凍結貯蔵中の物理的変化. 「水産食品の加工と 貯蔵(小泉千秋・大島敏明編)」恒星社厚生閣, 東 京. 2005;77-79.
- 日本食品分析センター. たんぱく質:燃焼法(改良デュ マ法). 「分析実務者が書いた五訂日本食品標準成分 表分析マニュアルの解説」中央法規出版,東京. 2001;271.
- 西塔正孝, 平野絵美, 國崎直道. 食用昆布5種類の遊離ア ミノ酸含量について. 女子栄養大学紀要 2005;36:71-
- 野田宏行. 「海藻の化学海藻の科学(大石圭一編)」朝倉 書店, 東京. 1993;14-28.
- 奥田 弘枝, 中川 禎人. 乾燥コンブの軟化度に及ぼす調味 成分の影響 (第2報). 調理科学1987;20:347-354.

- 奥田 弘枝、中川 禎人、乾燥コンブのアルギン酸の性状 に及ぼす調味成分の影響. 調理科学1991;24:108-112. 佐藤信. 3点識別法. 「統計的官能検査法」日科技連出版 社, 東京. 1985a;89-92.
- 佐藤信. 2点嗜好法. 「統計的官能検査法」日科技連出版 社, 東京. 1985b;37-56.
- 関本邦敏, 星野信行, 戸塚耕二, 渡部昭, 山下光雄. 水 戻し処理による海藻中のミネラル類の溶出. 日本・ 食料栄養学会誌 1983;36:21-24.
- 瀬野信子, 河合由美子, 阿武喜美子. 定量実験法. 「化学 の領域増刊96号 ムコ多糖実験法」南江堂,東京, 1972;85-125.
- 堤忠一, 安井明美. 灰分. 「新·食品分析法(日本食品化 学工学会編)」光琳, 東京. 1996;99-104.

定期海洋観測30年取りまとめ論文 (2)

With special papers for the Periodical marine research 30 years report article Part 2

日本海北部海域における表層水平循環の流動特性

西田芳則*1, 伊藤 雅², 森本昭彦³, 広瀬直毅⁴

1北海道立総合研究機構中央水産試験場,2航空自衛隊府中基地,

Flow characteristics of surface horizontal circulation in the northern Japan Sea

YOSHINORI NISHIDA*1, MASASHI ITO2, AKIHIKO MORIMOTO3 and NAOKI HIROSE4

Using satellite sea-level altimeter data and research vessel observational data, we investigated the flow characteristics of surface horizontal circulation in the northern part of the Japan Sea. The main flow that makes up the circulation was the baroclinic geostrophic flow, which has been reflected seasonal variations in the volume transport passing through the Tsushima Strait. Furthermore, from spring to autumn (winter), when the volume transport through the strait increased (decreased), northward (southward) barotropic flow occurred, making the circulation stronger (weaker). Therefore, the strength of the surface horizontal circulation was maximum in summer and minimum in winter. However, in winter, the baroclinic geostrophic current increased owing to wind stress; therefore, the circulation did not weaken as much as the decrease in volume transport through the strait. Therefore, the volume transport estimated from the inflow and outflow through the strait was not consistent with the baroclinic geostrophic transport estimated in the northern Japan Sea.

キーワード:亜寒帯循環、海峡通過流量、対馬暖流、冬季季節風、日本海

対馬海峡を通過して日本海に流入した対馬暖流は、日本海を2~3の分枝にわかれ北上する。対馬暖流の第1分枝は日本列島の深度200 m以浅を岸沿いに沿岸境界流(花輪,1984)として流れ、第2分枝は第1分枝の沖合を流れるが、渦の発達度合いによっては常に確認できるわけではない(Hase et al., 1999)。第3分枝は朝鮮半島沿いを流れ、北緯38度付近で離岸し東流する(Kawabe,1982 a,1982 b)。これらの分枝は本州沿岸の北緯40度付近で1本に収束し、その一部は津軽海峡から津軽暖流として太平洋へ流出し、残りは北海道西岸沿いを北上し、宗谷海峡から宗谷暖流としてオホーツク海へ流出する。この対馬暖流は、大気海洋相互作用によって水温変動の大きい東

シナ海と冷たい亜寒帯循環の西端である津軽海峡東方海域との間の水位差により駆動されると考えられている (Toba et al., 1982)。また、日本海の北部には反時計回りに亜寒帯循環が流れており、その南方境界には亜寒帯フロント (磯田、1999) が形成されている。

対馬海峡および津軽海峡を通過する流量は、超音波流速計ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler)を用いた実測により評価されている。対馬海峡では、フェリーの船底に装備したADCPにより海峡を通過する対馬暖流の流量がモニタリングされている(Takikawa et al., 2005;Fukudome et al., 2010;Shin et al., 2022)。内海(2018)は、フェリー搭載ADCPによる流速観測の測線を再定義し、

³愛媛大学沿岸環境科学研究センター,

⁴九州大学応用力学研究所付属大気海洋環境研究センター

¹ Central Fisheries Research Institute, Hokkaido Research Organization, Yoichi, Hokkaido, 046-8555,

² Japan Air Self Defense Force Fuchu Base, Fuchu, Tokyo, 183-0001,

³ Ehime University Center for Marine Environmental Studies, Matsuyama, Ehime, 790-0826,

⁴ Kyushu University Research Institute for Applied Mechanics Center for Oceanic and Atmospheric Research, Kasuga, Fukuoka,816–0811, Japan

流速データの使用範囲を設定して品質管理することで、対馬海峡の通過流量を再推定し、1997年から2017年までの平均流量は2.25 Sv($1 \text{ Sv} = 1 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$)とした。津軽海峡では、西田ら(2003)が調査船のADCPを用いた4往復観測を1993年から2000年まで季節毎に計22回実施し、その平均流量は約1.5 Svであり、流量の変動幅は小さいと報告している。また、Ito et al. (2003) は、1999年11月から2000年3月の期間、フェリーに搭載したADCPにより、平均流量は約1.5 Svと報告している。

宗谷海峡では、Fukamachi et al. (2008) が宗谷海峡近海に設置した海底設置型ADCPの鉛直プロファイルと宗谷岬、猿払沿岸の海洋レーダーから得られた海面流速の水平構造から通過流量を見積もり、2004~2005年の平均流量は約1.0 Svであった。また、Fukamachi et al. (2010)ではFukamachi et al. (2008)と同様の観測を2006~2008年に実施し、平均流量は約0.6 Svと報告している。したがって、海峡を通過する平均流量は、対馬海峡、津軽海峡、宗谷海峡の順に2.3 Sv、1.5 Sv、0.6~1.0 Svであり、流量収支は概ね整合する。

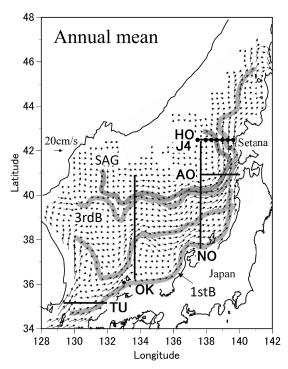


Fig. 1 Solid lines (HO, AO, NO, OK, and TU in figure) denote the observation lines indicating the horizontal circulation of the surface layer in the Japan sea. The black circle denotes the CTD (Conductivity Temperature Depth Profiler) observation points over the J4 line off Hokkaido. The arrows in figure denote annual mean field of the current velocity vector on the sea surface in the Japan Sea. Subarctic Gyre (SAG) and the first, and third branches (1 stB, 3 rdB) of the Tsushima Warm Current are shown as shaded areas.

ところが、青森県産業技術センターが青森県艫作崎沖 の定点で水温,塩分観測を実施した結果のうち,1964~ 2001年のデータ (青森県産業技術センター, 1964~2001) を用いて著者が品質管理した後に算出した傾圧地衡流量 の平均値は2.8 Svで, これは前述の対馬海峡を通過する 平均流量よりも0.5 Sv多い。また、1988~2001年におけ る北海道西岸の対馬暖流の傾圧地衡流量をまとめた中多 ・田中(2002) によると(Fig.1の黒丸), 全体の平均値 は1.2 Svであり、この値は前述した宗谷暖流の平均流量 (Fukamachi et al., 2008; Fukamachi et al., 2010) \$\frac{1}{5}\$ \\ \dagge 0.2\$ ~0.6 Sv多い。したがって、対馬、宗谷海峡を通過する 平均流量から想定される青森県, 北海道沖の流量と, 同 沖の水温・塩分を基に計算された傾圧地衡流量とは一致 せず、流量はいずれの地点でも後者の方が多い。このよ うに、日本海では流量変動に関する数々の報告はあるが、 日本海の表層水平循環を一つのシステムとして捉えた場 合には,流量収支は整合していない。そこで本研究では, 日本海における表層水平循環システムの理解に向け、そ の循環を構成する流動構造とその変動特性を明らかにす ることを目的とする。

試料及び方法

海面絶対流速の推定 本研究では、日本海における深度 200 m以浅の表層水平循環を構成する傾圧流・順圧流の 季節変化などから同循環の変動特性を把握するため、衛星海面高度計から得られる海面高度偏差と日本海の平均流速を用いて日本海における海面絶対流速場を推定する。この流速場を推定するにあたり、海面の絶対流速 (u, v) は海面平均流速 (ū, v) と海面流速偏差 (u', v') との 和で表されると定義する。ここで、u, vは順に流速の東西、南北成分を表す。

海面の絶対流速の算出にあたり、海面平均流速は、Ito (2014) が作成した日本海の月平均海表面流動場MMFSC (Monthly Mean Fields of Sea Surface Circulation) 引用した。このMMFSCは森本 (2001) が開発した縁辺海にも適用可能な衛星海面高度計データの潮汐補正方法を用いて作成されている。MMFSCには、北緯30~50度、東経125~145度の海域における平均流速ベクトルの東西、南北成分が月別に収められており、解像度は緯度、経度ともに4分の1度 (0.250度) である。

次に、海面流速偏差の算出にあたり、フランス国立宇宙研究センターCNES (Le Centre National d'Etudes Spatiales) が提供する海洋データアーカイブAVISO (Analysis, Validation and Investigation of Satellite Oceanography) の海面高度偏差 (DT-MSLA "Upd", 以

下MSLA) を引用した。解析に使用した期間は1992~2009 年で、MSLAの範囲は日本海をカバーする北緯34~48度、 東経128~142度, 解像度は緯度が4分の1度(0.250度), 経 度が3分の1度(0.333度),時間分解能は7日である。海面 流速偏差の算出には、東西成分(u')については(1)式、 南北成分(v) については(2)式により求めた。

$$u' = -\frac{g}{f} \frac{d\zeta'}{dy} \tag{1}$$

$$v' = \frac{g}{f} \frac{d\zeta'}{dx} \tag{2}$$

ここで、gは重力加速度、fはコリオリ係数、 $d\zeta'/dx$ 、 $d\zeta'/dx$ dyは順に海面高度偏差の東西、南北勾配である。なお (1), (2) 式により算出した海面流速偏差(u', v') はグ リッド値の差分であるためグリッド上の値にはならない。 隣り合う南北方向。東西方向の流速偏差をそれぞれ平均 し、グリッド上における流速偏差の東西成分 (u')、南北 成分 (v') とした。また、MSLA とMMFSCのグリッド位 置は一致しないため、以後の解析にはMSLAグリッドに MMFSCを線形内挿したMMFSCを使用した。

表層水平循環の時系列 日本海における表層水平循環の 経年変化を推定するため、Fig.1に示す日本海にMSLAグ リッド上を東西・南北方向にHO, AO, NO, OK, TUラ インを設定した。ここで、TUを除く各ラインでは対馬暖 流第1~3分枝と亜寒帯循環を捉えられるようにするため、 まず、それらの平均的な流路を推定した。各月のMMFSC を平均し (Fig.1に示す流速ベクトル), その流速ベクト ルの東西, 南北成分をそれぞれ(1),(2)式に代入して 海面高度偏差を算出し、その偏差データを基に海面高度 の水平分布を作成した。その海面高度の水平分布から特 定の等高線を抽出し、対馬暖流第1~3分枝と亜寒帯循環 の流路とした。なお、等高線の抽出にあたっては、Yabe et al. (2021) が開発した対馬暖流の海流システムを体系 化するためのアルゴリズムに倣い、対馬海峡起源の東韓 暖流は朝鮮半島沿いを流れるため、ここでは簡単に等高 線の端が朝鮮半島付近から発しているものを対馬暖流の 分枝流とした。かつ、その中で、宗谷海峡まで達する特 定の等高線を対馬暖流第3分枝とした。また、TUライン は対馬海峡から日本海への流入を捉えられるように海峡 を東西に横断する設定とした。加えて、HOライン(緯 度:北緯42.561度) は、後述する道総研中央水産試験場 が定期的に海洋観測を実施している観測ライン (J4線) とほぼ同じ緯度(北緯42.5度)に設定した。なお、各ラ イン上のグリッド数は、HO, AO, NO, OK, TUライン の順に, 6, 8, 21, 19, 8点である。このラインに配置さ れたグリッド上の絶対流速を単純平均して各ラインにお ける絶対海面流速とした。なお、各ラインにおいて循環

流の再現に用いた流速成分は、傾圧地衡流速との比較の ため、ラインに垂直な成分とした。

海面の傾圧地衡流速と傾圧地衡流量 道総研では北海道 せたな沖に設定した観測ライン (J4線) の7点の観測定点 (J4線, Fig.1の黒丸) において, 偶数月に1回を基本に調 査船を用いた海洋観測を実施している。J4線の緯度は北 緯42度30分で、定点名は最も沿岸よりの観測点がJ41で、 順次沖に向かって数字が1ずつ増加し、西端がJ47である。 本研究では、北海道西岸における海面の流動構造、その 季節変化の推定のため、海洋観測でCTD (Conductivity Temperature Depth Profiler) によって得られた水温・塩分 の鉛直データから力学計算により求めた傾圧地衡流量, 海面の傾圧地衡流速を使用する。ここでの力学計算の無 流面はそれぞれ500 mとした。なお、解析に使用した期 間は1990~2009年である。

風応力による運動量フラックス 一般に海洋の循環は風 応力により変動することが知られている。日本海の表層 水平循環に与える風応力の影響を調べるため、J-OFURO (Japanese Ocean Flux datasets with Use of Remote sensing Observations) から北緯36~47度, 東経130~141度の海域 における風応力による運動量フラックスの東西、南北成 分 (τ_x, τ_y) を引用した。運動量フラックスの格子間隔 は、緯度、経度共に1度である。また、両フラックスを (3) 式に代入し、運動量フラックスの回転成分 (curl τ) を見積もった。

$$curl\tau = \frac{d\tau_y}{dx} - \frac{d\tau_x}{dy}$$
 (3)

なお、解析した期間は1999年から2008年である。

結 果

亜寒帯循環と対馬暖流分枝流の位置関係 各月の MMFSCの年平均流速ベクトルと(1),(2)式を基に推 定した対馬暖流第1~3分枝と亜寒帯循環の流路を陰影で Fig.1に示す。南から3本が対馬暖流分枝流で、北の1本が 亜寒帯循環である。この循環は東経132度からよくみられ る。対馬暖流第3分枝と亜寒帯循環の境界が亜寒帯フロン トであり、従来の知見通り、この前線は北緯40度付近に 形成されている。ここで、北海道沖に着目すると、亜寒 帯フロントの東端はおおよそ東経139度付近にあり, 亜寒 帯循環が北海道に接近しており、北海道沖のJ4線を亜寒 帯循環と対馬暖流が通過している。

J4線の海洋構造と海面の流動構造 このような亜寒帯 循環と対馬暖流の配置の空間的な変動を把握するため、 J4線における1990年から2009年の期間で平均した水温, otの鉛直断面を10月と2月を例にFig.2に示す。10月の水 温断面では、全地点の深度20~50 mにかけて強い水温成 層がみられる。水温の鉛直構造はJ45(位置:北緯42度30 分, 東経138度20分) を境に変化し, J47からJ45では等温 線はほぼ水平であるが、J45からJ41にかけては等温線が 岸に近づくほど深くなっている。このような特徴は、塩 分がほぼ一定なため、otの鉛直断面にも共通して認めら れる。すなわち、J45から沿岸にかけては等密度線が傾い た傾圧構造となっている。一方,2月では,海面水温は沿 岸側で高く、沖へ向かうほど等温線が海面に露出するよ うになり、J47からJ45にかけては、海面から深度100 mま で3~4℃の水温の水塊で覆われている。otの鉛直断面で は、10月と同様に、J45から沿岸側では傾圧構造が認めら れる。以上のことから、Fig.2に示す各鉛直断面は、J45 から西側が亜寒帯循環, 東側が対馬暖流を捉えたものと 判断出来る。このような、J45を境に等密度線の傾きが変 化する現象は4, 6, 8, 12月にも共通して認められた(図 省略)。したがって、北海道西岸のJ4線では周年にわたり J45から沿岸域に対馬暖流, その沖合に亜寒帯循環が分布 していると考えられる。

次に、亜寒帯循環域、対馬暖流域における海面流速の季節変化を比較する。HOラインにおいてMMFSCとMSLAを用いて算出した絶対流速、J4線の水温、塩分デ

ータを基に計算した傾圧地衡流速,順圧流速(海面における絶対流速と傾圧地衡流速との差)を月別にFig.3に示す。まず, 亜寒帯循環が分布するJ47~J45間では, 海面の絶対流速, 傾圧地衡流速はともに何れの月においても10 cm/s以下と弱い。したがって,基本的に亜寒帯循環内部の流れは弱いことがわかる。J45より東では,海面の絶対流速,傾圧地衡流速は,何れの月においても,ともに沿岸に近づくほど増加する傾向にあり,両者の流速は,6,8,10月のJ42~J41間の流速を除き,ほぼ一致している。したがって,対馬暖流域のほとんどの流動構造は500 m以浅の傾圧構造によって説明できる一方,順圧流速は全般的に傾圧地衡流速に比べ小さく,冬季の12月と2月には、J45~J42間では南下流になっている。

順圧流速の算出は、単に絶対流速と傾圧地衡流速との差とした。このため、どちらかの流速に誤差が多く含まれれば、南下流の発生も見かけ上生じてしまう。そこで、南下流の発生を評価するため、スナップショット的ではあるが、2021年12月のJ4線でのADCPによる絶対流速、CTDの測定値から求めた傾圧地衡流速、両者の差分である順圧流速の鉛直プロファイルをFig.4に示す。傾圧地衡流速に対して絶対流速は全ての観測点間の全層でマイナス側にあり、このことは順圧南下流の発生を意味する。し

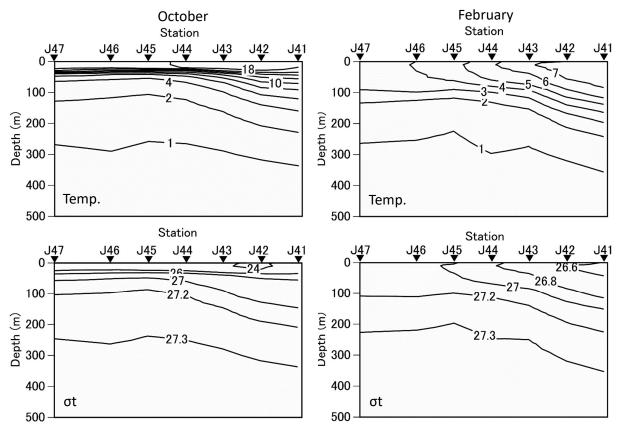


Fig. 2 Vertical sections at the J4 line occupied in (left) October and (right) February. Sections depict (top to bottom) temperature and σt. Values are averages for 1990–2009.

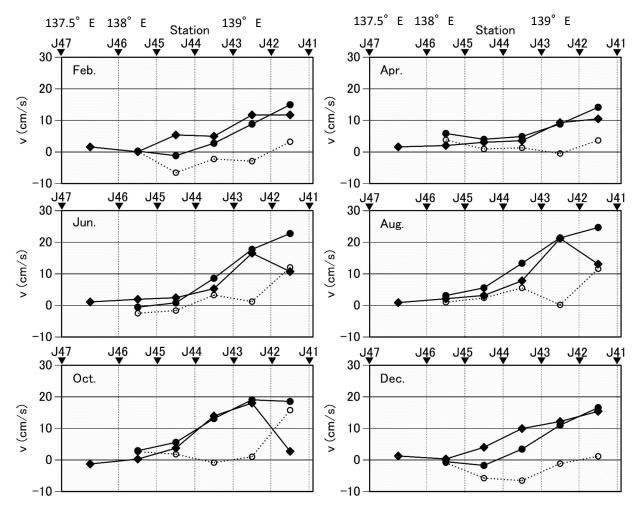


Fig. 3 Diagram of the monthly mean sea surface (●) absolute velocity, (◆) baroclinic geostrophic velocity, and (○) barotropic velocity at the west coast of Hokkaido in the Japan sea. The averaged period for velocity is 1990–2009. HO and J4 are the observation lines representing the calculated absolute velocity and baroclinic geostrophic velocity, respectively.

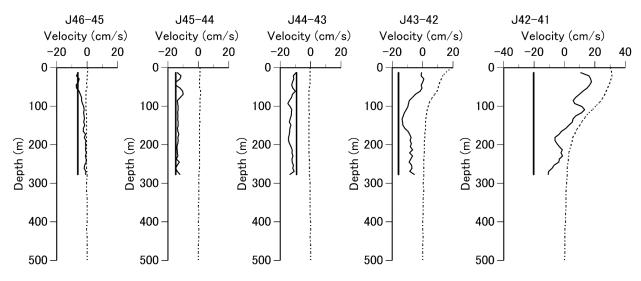


Fig. 4 Vertical distribution of (solid) absolute velocity, (dotted) baroclinic geostrophic velocity, and (thick solid) barotropic velocity at the J4 line in December 2021. Absolute velocity was measured by the ship mounted-ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) with a frequency of 150 kHz.

たがって、Fig.3に示す冬季の12月、2月にみられたJ45~J42間の南下流は実際に生じていると判断できる。

J4線における海面流動構造の季節変化 ここでは、Fig.3

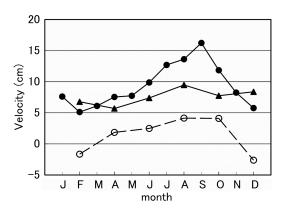


Fig. 5 Seasonal variations in the sea surface (●) absolute velocity, (▲) baroclinic geostrophic velocity, and (○) barotropic velocity at the west coast of Hokkaido in the Japan sea. The averaged period of each velocity is 1990–2009. HO and J4 are the observation lines representing the calculated absolute velocity and baroclinic geostrophic velocity, respectively.

に示した北海道西岸における各海面流速の季節変化を概観するため、絶対流速、傾圧地衡流速、順圧流速をライン間で平均した結果をFig.5に示す。絶対流速は夏季の9月に最大の約16 cm/s、冬季の12,2月に最小の約5 cm/sとなった。順圧流速は全体的に絶対流速よりも小さいが、その季節変化は絶対流速のそれとほぼ同じになった。ただし、前述したとおり、冬季の12月と2月では2~3 cm/sの南下流になっている。一方、傾圧地衡流速の季節変化は絶対流速のそれとは若干異なり、夏季に最大になるのは同じだが、冬季に最小にはなっていない。また、傾圧地衡流速は4~10月は絶対流速よりも小さく、逆に冬季の12,2月では絶対流速よりも大きくなっている。したがって、力学計算により求めた海面の傾圧地衡流速は、実際の流速よりも4~10月では過小、12,2月では過大評価していたことになる。

日本海表層水平循環の推定 MMFSCとMSLA を基に求めたHO, AO, NO, OK, TUライン (Fig.1参照) における海面流速の経年変化をFig.6に示す。なお, 比較のため, 各図にはHOラインの流速を破線で示した。また, 各ラインの海面流速は (4) 式により標準化し9ポイント (63日

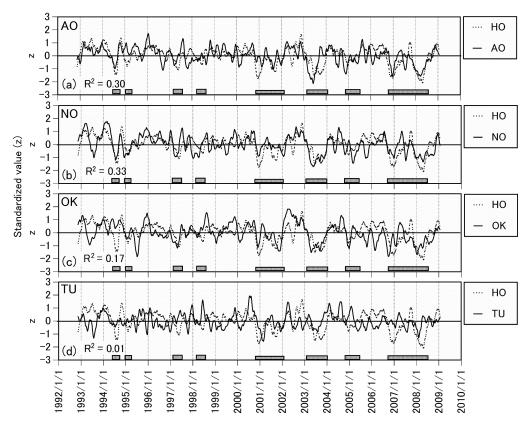


Fig. 6 Time-series of the line mean sea surface absolute velocity (solid) calculated using MMFSC (Monthly Mean Fields of sea Surface Circulation) and MSLA (Mean Sea Level Anomaly) at (a) AO, (b) NO, (c) OK, and (d) TU. For comparison, time progression of HO (dotted) was calculated in a manner same as described above and has been drawn in each figure. The velocity shown in each figure was standardized using Eq. (4). The horizontal bars in the figure denote the periods when the anomaly of current velocity in HO was negative.

間) の移動平均を施している。

$$v_z = \frac{v_i - \overline{v_m}}{s_m} \tag{4}$$

(4) 式の添え字のmは月を表し $\overline{v_m}$ はm月の平均値. s_m は m月の標準偏差、 v_i はm月におけるi番目のデータを示す。 HOラインの海面流速はおおよそ1995年後半~1996年, 1997年後半, 1998年後半~2000年, 2002年, 2004年, 2005 年後半~2006年が正偏差, 1994年後半~1995年前半, 1997年前半, 1998年前半, 2001年, 2003年, 2005年前半, 2006年後半~2008年前半が負偏差で推移し、正偏差と負 偏差の卓越する期間が数年で交互に入れ替わっている。 このような正偏差と負偏差が数年規模で交互に入れ替わ る周期的な変動はAO, NO, OKラインの海面流速にも同 様に認められる。HOラインの経年変動と各ラインのそれ との決定係数は、AO, NO, OK, TUラインの順に0.30, 0.33, 0.17, 0.01であり、日本海東部の海域で決定係数が 高く、対馬海峡に至っては相関関係が認められない。し たがって、HOラインで見られる海面流速の数年規模の変 動は日本海、特に東部海域における、表層水平循環の強 弱を表していると考えられる。

風応力と表層水平循環の強弱 日本海におけるcurl τの 水平分布を, 1月を例にFig.7に示す。curl τはウラジオス トクと能登半島を結ぶラインを境に西側が負, 東側が正

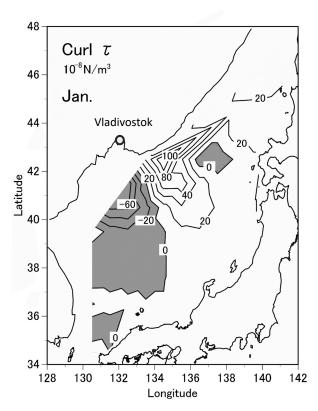


Fig. 7 Horizontal distribution of curl τ averaged for 1999–2008 in the Japan Sea (January).

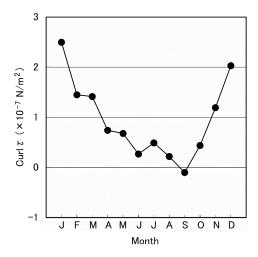


Fig. 8 Seasonal variation in curl τ at the northern part of the Japan Sea (40°-46°N, 134°-141°E). Curl τ was averaged monthly over 1999–2008.

になっている。curl τ が正の海域はFig.1に示す亜寒帯循環域とおおよそ一致している。そこで、北緯40~46度、東経134~141度の海域における curl τ を月毎に経年平均し、その結果をFig.8に示す。curl τ は1月に約2.5×10 $^{-7}$ N/m 2 の最大になり、その後は低下し、9月に最小の約 -0.1×10^{-7} N/m 2 となった。その後curl τ は増加傾向にあり、12月では約2.0×10 $^{-7}$ N/m 2 であった。したがって、日本海北部海域においては、11月~翌年3月の期間は風応力によるエネルギー供給量の多いことがわかる。

そこで、風応力と日本海の表層水平循環との関係について調べる。前述した北緯 $40\sim46$ 度、東経 $134\sim141$ 度の海域の $2002\sim2006$ 年におけるcurl τ の月変化をFig.9に示す。10月のcurl τ の平均値は約 0.5×10^{-7} N/m 2 であるが(Fig.8参照)、2002年 $10\sim11$ 月にかけては、curl τ は平年の約6倍の 3.0×10^{-7} N/m 2 であった。一方、2006年10月では、curl τ は -1.6×10^{-7} N/m 2 と負になっていた。Fig.6か

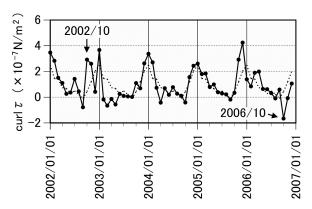


Fig. 9 Time-series of curl τ at the northern part of the Japan Sea (solid). The dotted line denotes seasonal variations in curl τ averaged over 1999–2008.

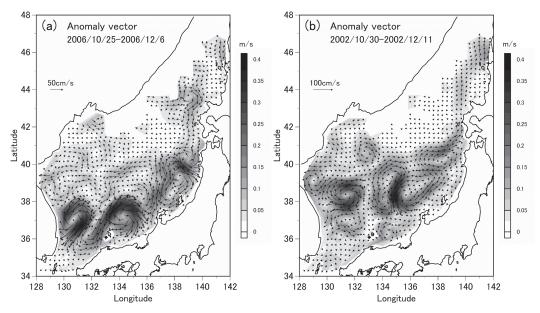


Fig. 10 Horizontal distributions of the sea surface current vector anomaly calculated using MSLA from AVISO (Analysis, Validation and Investigation of Satellite Oceanography). Curl τ was weak in (a) and strong in (b).

ら、HO、AO、NO、OKラインの海面流速はcurl τ が強かった2002年10~11月では増大し、curl τ が弱かった2006年10~12月の期間では平均を下回る月が多かった。これらの関係は日本海表層水平循環の強弱に風応力の関与を示唆している。

日本海北部海域の風応力と流れの応答 風応力,表層水平循環が弱かった例として2006年秋季,逆に風応力,表層水平循環が強かった例として2002年秋季の海面流速偏差ベクトルの水平分布をFig.10に示す。なお,Fig.6に示すTUラインの時系列から,HOラインの海面流速が増大した2002年10~11月ではTUラインの海面流速は負であり,また,2006年においてはTUラインの流速に大きな低下は認められないことから,2002年,2006年の表層循環の強弱に対馬海峡を通過する流量の影響は小さい。

2006年秋季では(Fig.10 a), 流速偏差ベクトルは北海 道西岸から青森県に至る沖合の東経139度の海域が南下 流となっている。この強い南下流は北緯40度30分の海域 で西流に転じ、この西流は、北緯39度、東経138度の海域 に中心を持つ時計回りの渦により一時的に消失するが、 隠岐沖合の東経132度の海域まで達しているように見受 けられる。この南下流、西流が見られる海域はそれぞれ、 亜寒帯フロント域、対馬暖流第3分枝に相当する(Fig.1 参照)。加えて、通常亜寒帯循環に起因した東流が認めら れる北緯40~41度、東経134~138度の海域では、流れは 非常に弱くなっているが西流にはなっていない。

一方、HOラインの流速が増大した2002年では (Fig. 10b)、2006年とは対照的に、北海道西岸では北上流となっており、その北上流は対馬暖流域で強くなって

いる。青森県沖は東流となっており、この東流は通常極前線がみられる北緯40度よりも北の海域で強くなっており、東経134度までみられる。以上のことから、日本海における表層水平循環の強弱は風応力の影響を受けており、その影響は対馬暖流沖合分枝、亜寒帯フロント域で顕著であることがわかった。

考 察

本研究では、日本海北部海域における表層水平循環の時空間変動を明らかにするため、MSLAとMMFSCを用いて同循環の推定を試みた。亜寒帯循環、対馬暖流分枝流を捉えるように日本海内に配置したHO、AO、NO、OKライン(Fig.1)から得られた海面流速の時系列では、4者の変化傾向は概ね一致し(Fig.6)、表層水平循環を捉えることができたと考えられる。よって、本手法は日本海における表層水平循環の推定に有効である。

Fig. 1, Fig. 2から, 平均的にみた場合には, 北海道西岸の東経138度20分以西では, 周年, 亜寒帯循環に覆われていることが明らかになった。しかし, Fig. 3から, J45以西の亜寒帯循環内の流れは非常に弱い。また, J45~J44あたりの海域は亜寒帯循環と対馬暖流の混合域と推察されるが,流れは沿岸部ほどには速くなっていない。したがって, 日本海北部海域の表層水平循環を構成する主な流れは, 第一に対馬暖流域における傾圧地衡流, 次いで順圧流である。なお, Fig. 11に示すとおり, J4線における海面の傾圧地衡流速と深度500m基準の傾圧地衡流量との間には決定係数0.8の高い相関関係にあることか

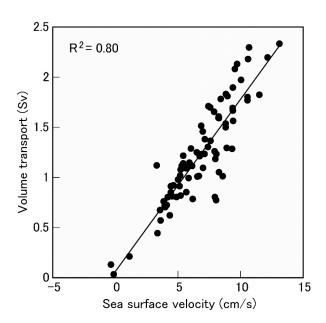


Fig. 11 Relationship between the geostrophic current velocity at the sea surface and the baroclinic volume transport, at the J4 line off Hokkaido (see fig.1 for the observation points.)

ら、海面の傾圧地衡流速を以て傾圧地衡流量の議論も可 能と考えられる。

この順圧流により、日本海北部の表層水平循環は傾圧 地衡流のみでは正確には表しきれないことが明確になり, Fig.5に示すとおり、傾圧地衡流のみだと実際の流量を冬 季には過大評価、それ以外の季節では過小評価すること になる。

この順圧流は傾圧地衡流速が増大する沿岸部で速くな っていた (Fig.3)。また, Fig.5から順圧流の月変化は絶 対流速のそれと同調しているように見受けられる。絶対 流速は夏季に最大となり、1月を除く冬季に最小となる季 節変化を示したが、この季節変化は対馬海峡を通過する 流量のそれと酷似している(内海, 2018)。したがって、 順圧流は対馬海峡を通過する体積輸送に伴い発生してい る可能性が示唆される。順圧流の発生メカニズムについ ては、暖流の流量増加により渦柱が伸び、それに伴い正 の渦度を獲得するため、北海道西岸では北向きの順圧流 が発生する。暖流の流量が減少する場合には上記の逆に なり、北海道西岸では南向きの順圧流が生じる。このメ カニズムはFig.5に示す順圧流の季節変化、ロシア側の亜 寒帯循環は夏季に強化される (Morimoto and Yanagi, 2001) とした知見と整合するが、詳細は今後の課題とし たい。いずれにしても、北海道西岸における表層水平循 環の強弱は、基本的には対馬海峡を通過する流量変動に よりもたらされ、その流量変動に伴い順圧流が発生する ため、対馬海峡を通過する流量の増加(減少)期には循

環がさらに強(弱)化されると考えられる。

一般に, 亜寒帯循環, 亜熱帯循環などは貿易風, 偏西 風などの風応力が駆動力になっている。そこで、本研究 では、日本海における風応力 (curl τ) と亜寒帯循環の強 弱との関連について調べた。Fig.10bに示すように, curl τが強いときには、北緯40~41度、東経134~139度に かけての亜寒帯循環域、対馬暖流沖合分枝の流速アノマ リーは正になっている。一方, Fig. 10 aに示すcurl τが小 さいときでは、北海道沖は南下流、北緯39~40度、東経 132~139度にかけては西向きの流れとなっている。curl τ の低下に伴い対馬暖流の北上流量が低下し、流下方向と は逆向きの順圧流が顕在化されたと考えれば上記の西向 流は理解できる。したがって、日本海においても、風応 力により亜寒帯循環、対馬暖流沖合分枝が強化されてい ることが示唆される。

Fig.5に示す順圧流速は暖流流量の増減に伴う渦柱の 伸縮により生じる流れと考えられ、深い構造を持つこと が予想されることから、海峡からの流出入には影響しな い。したがって、対馬海峡から日本海への正味の流入量 は、北海道西岸においては、傾圧構造に反映されると考 えられる。すなわち、北海道西岸の傾圧地衡流量は対馬 海峡の通過流量を表している。対馬海峡の通過流量は夏 季の8~10月に最大となり、冬季の1~2月に最小となる (内海, 2018)。しかし、Fig.5に示すとおり、北海道西岸 では、冬季の12月から2月にかけては傾圧地衡流速が増加 しており、また、1月には絶対流速の一時的な増加がみら れる。したがって、北海道西岸では冬季の強いcurl τによ り恒常的に流量が増加していることが考えられる。

ところで、Fig. 10 bに示す流速ベクトルのアノマリー では、強い北上流は亜寒帯循環と対馬暖流の境界域では なく北海道沿岸域に形成されている。これは、curl τは北 緯40度以北の海域において広く正となっていることから、 風応力による正の渦度の供給により海面エクマン層内で は水平発散となり、沿岸方向に輸送された海水が岸で沈 降するため、傾圧構造が強化されて流速が速くなったも のと考える。

最後に, 冒頭で述べた, 北海道西岸の水温, 塩分から 計算した傾圧地衡流量の年平均値が、海峡を通過する流 量収支から見積もられる同海域の年平均流量よりも多く なる要因について検討する。北海道西岸における表層水 平循環の強弱はFig.5に示した絶対流速のとおりで、基本 的には、対馬海峡を通過する流量変動によりもたらされ る。このうち、順圧流は海峡を通過せず、かつ津軽海峡 からの流出流量は一定と考えられているので、北海道西 岸の傾圧地衡流量が対馬海峡を通過する流量を反映する ことになる。冬季2月の対馬海峡を通過する平均流量は約 1.9 Sv (内海, 2018) で、津軽海峡からの流出流量を1.5 Svとすると、北海道西岸を北上する流量は0.4 Svとなる。しかし、北海道西岸J4線における2月の傾圧地衡流量の平均は約1.0 Svなので、実際は0.6 Sv多く流れていることになる。前述したとおり、冬季には風応力により北海道沖の傾圧地衡流量は恒常的に増加していることが考えられた。したがって、傾圧地衡流量と海峡を通過する流量収支から見積もられた流量とが一致しなかったのは、日本海北部海域においては冬季の強いcurl τにより傾圧地衡流量が増加するためと考えられる。

Watanabe et al. (2006) は,2000年9~10月に日本海北東部で実施したADCPの4往復観測および水塊解析から,男鹿半島の南では対馬暖流第1分枝が本州沿いに流れているが,男鹿半島の北ではこの第1分枝に対馬暖流の第2分枝と亜寒帯循環に起因した東流が合流し,流量が増加することを報告している。Kawamura et al. (2009) は,亜寒帯フロント沿いの東流により,北海道西岸の対馬暖流が強化される現象を数値モデルで再現している。また,Lee et al. (2006) では亜寒帯フロントで形成されるフロンタルジェットを観測している。しかし,風応力がどのような物理機構を介して循環流を強化するのかについてはわかっていない。今後はこの点について明らかにする必要があると考える。

謝辞

本研究をまとめるにあたり, 道総研の定期海洋観測資料を引用しました。試験調査船の船長をはじめ乗組員,調査員の皆様に深く感謝申し上げます。また, 有益なコメントを頂いた2名の査読者に深謝いたします。

引用文献

- 青森県産業技術センター. 定線海洋観測結果表. 青森. 1964~2001.
- AVISO: Analysis, Validation and Investigation of Satellite Oceanography. Internet web. Download from: (http://www.aviso.oceanobs.com/(2009)) (2009.10.15)
- Fukamachi Y, Tanaka I, Ohshima KI, Ebuchi N, Mizuta G, Yoshida H, Takayanagi S, Wakatsuchi M. Volume Transport of the Soya Warm Current Revealed by Bottom-Mounted ADCP and Ocean-Radar Measurement. *J. Oceanogr.* 2008; 64: 385–392.
- Fukamachi Y, Ohshima KI, Ebuchi N, Bando T, Ono K, Sano M. Volume Transport in the Soya Strait during 2006–2008. J. Oceanogr. 2010;66: 685–696.

- Fukudome K, Yoon JH, Ostrovskii A, Takikawa T, Han IS. Seasonal Volume Transport Variation in the Tsushima Warm Current through the Tsushima Straits from 10 Years of ADCP Observations. *J. Oceanogr.* 2010; 66: 539–551.
- 花輪公雄. 沿岸境界流. 沿岸海洋研究ノート 1984; 22: 67-82
- Hase H, Yoon JH, Koterayama W. The current structure of the Tsushima Warm Current along the Japanese coast. *J. Oceanogr.* 1999; 55: 217–235.
- 磯田豊. 日本海における冬季海面水温の6~8年スケール 変動. 海と空 1999: 74: 156-164.
- Ito M. Seasonal and interannual variations of the Tsushima Warm Current paths in the southwestern part of the Japan Sea. Ph. D. Thesis, Nagoya Univ, Nagoya.2014.
- Ito T, Togawa O, Ohnishi M, Isoda Y, Nakayama T, Shima S, Kuroda H, Iwahashi M, Sato C. Variation of velocity and volume transport of the Tsugaru Warm Current in the winter of 1999–2000. *Geophys. Res. Lett.* 2003; 30: 1678.
- J-OFURO: Japanese Ocean Flux datasets with Use of remote sensing Observations. Internet web. Download from: (http://dtsv.scc.u-tokai.ac.jp(2010))(2010.10.29)
- Kawabe M. Branching of the Tsushima Current in the Japan Sea, Part I. Data analys1 s. *J. Oceanogr.* 1982 a; 38: 95–107.
- Kawabe M. Branching of the Tsushima Current in the Japan Sea, Part II. Numerical experiment. *J. Oceanogr.* 1982 b; 38: 95–107.
- Kawamura H, Ito T, Hirose T, Takikawa T, Yoon JH. Modeling of the branches of the Tsushima Qarm Current in the eastern Japan Sea. *J. Oceanogr.* 2009; 65: 439–454.
- Lee MC, Thomas LN, Yoshikawa Y. Intermediate Water Formation at the Japan/East Sea Subpolar Front. Oceanography 2006; 19: 110-121.
- 森本昭彦. 海面高度計による海表面流動場の推定. 沿岸 海洋研究 2001; 39: 27-37.
- Morimoto A, Yanagi T. Variability of Sea Surface Circulation in the Japan Sea. *J. Oceanogr.* 2001; 57: 1–13.
- 中多章文, 田中伊織. 北海道西岸における対馬暖流傾圧 流量の季節および経年変化. 北海道立水産試験場研 究報告 2002; 63: 1-8.
- 西田芳則, 鹿又一良, 田中伊織, 佐藤晋一, 高橋進吾, 松原 久. 津軽海峡を通過する流量の季節・経年変化. 海の 研究 2003: 12: 487-499.
- Shin HR, Lee JH, Kim CH, Yoon JH, Hirose N, Takikawa T, Cho K. Long-term variation in volume transport of the

- Tsushima warm current estimated from ADCP current measurement and Sea level differences in the Korea/ Tsushima Strait. J. Marine. Systems 2022; 232: 1154-
- Takikawa T, Yoon JH and Cho KD. The Tsushima Warm Current through Tsushima Straits estimated from ferryboat ADCP data. J. Phys. Oceanogr. 2005; 35: 1154-1168.
- Toba Y, Tomizawa K, Kurasawa K, Hanawa K. Seasonal and Year-to-Year Variability of the Tsushima-Tsugaru Warm Current system with its Possible Cause. La mer 1982; 20:

- 41-51.
- 内海勇哉. フェリーADCPデータに基づく対馬海峡流動 構造の再解析.修士論文, 九州大学, 福岡. 2018.
- Watanabe T, Katoh O, Yamada H. Structure of the Tsushima warm current in the northeastern Japan Sea. J. Oceanogr. 2006; 62: 527-551.
- Yabe I, Kawaguchi K, Wagawa T, Fujio S. Anatomical study of the Tsushima Warm Current system: Determination of Principal Pathways and its Variation. Prog. Oceanogr. 2021; 194: 1-13.

道西日本海における対馬暖流の流量分布の季節および経年変化

中多章文*1,田中伊織2

1北海道立総合研究機構中央水産試験場,2元北海道立総合研究機構中央水産試験場

Seasonal and interannual changes in the distribution of volume transport of the Tsushima warm current in the western Japan Sea off Hokkaido, Japan

AKIFUMI NAKATA*1 and IORI TANAKA2

- ¹ Central Fisheries Research Institute, Fisheries Research Department, Hokkaido Research Organization, *Yoichi, Hokkaido, 046–8555*,
- ² Formerly: Central Fisheries Research Institute, Fisheries Research Department, Hokkaido Research Organization, *Yoichi, Hokkaido, 046–8555, Japan*

In order to clarify the seasonal and interannual variability characteristics of the flow path and water temperature distribution of the Tsushima Warm Current in the western Hokkaido Japan Sea, we calculated the average field using our oceanographic observation data from more than 30 years, and described the characteristics of the geostrophic volume transport and water temperature distribution. The long-term annual mean baroclinic volume transport of the Tsushima warm current in the western Hokkaido was approximately 1.0 Sv, which was 0.2 Sv less than that reported before 2000. The seasonal variation in transport became unclear owing to decreasing transport in June, August, and December. The distribution of warm currents was examined, and a stable northward flow off the coast of Iwanai Bay was found, along with a bifurcation flow along the coast of Iwanai Bay. Compared with the long-term mean, the mean temperature in the last decade after decreasing the volume transport showed a wide negative temperature deviation in the middle layer of the Tsushima warm current area, suggesting a decrease in heat transport associated with a decrease in volume transport.

キーワード: 傾圧地衝流量, 暖流流路, 対馬暖流

温暖化や気候変動が注目される以前の1980年代には、当時の道立水産試験場では、資源変動や漁場形成機構の解明の観点から、海洋環境研究の重要性が組織的に検討され、1989年前後から組織的な海洋観測網を整備し(小笠原・田中、1989)定期海洋観測が継続して行なわれてきた。この定期海洋観測により、本道西岸日本海の対馬暖流北上流量の季節および経年変化についての研究報告や(中多・田中、2002)、檜垣ら(2008)によって水系分布や比較的広範囲の流れパターンの季節変化などが記述されてきた。前者においては、茂津多岬西方のJ4線(42.5°N)に注目し暖流の幅や深さを評価した上で、流量の季節変化や経年変化を記述しているが、J4線より南の津軽海峡西方や北の石狩湾沖については調べられていない。後

者では広く道西日本海を解析対象としているが、水系分類を用いた模式的な海洋構造として解析されており、水産生物との関連指標である水温との対応がわかりにくくなっている。さらに両論文ともに2001年以前のデータを解析対象としており、「これまでに経験したことのない」と気象庁発表でよく耳にするように、人々の体感レベルで温暖化や気候変動が認識できるようになった近年にあっては、過去の研究も最新のデータを用いてアップデートしてゆく必要がある。特に、Kida et al.(2021)が指摘する日本海の通過流量の増加傾向の有無は、道西日本海の対馬暖流にも影響を与えると考えられる。そこで、ここでは30年を超える定期海洋観測データを用いて道西日本海における対馬暖流の流路(主流部)の気候値(30年)に近

い季節変化を水温分布と合わせて記述するとともに,年 代別に対馬暖流の流路と海洋構造の変化について調べた。

試料および方法

道総研水産試験場による全道周辺海域の海洋観測は偶数月を基本に2ヶ月に1回の頻度で行っており、ここでは1988年10月以降2021年2月までのおよそ32年間のデータ(4~8月:32年間、10~2月:33年間)を解析対象期間と

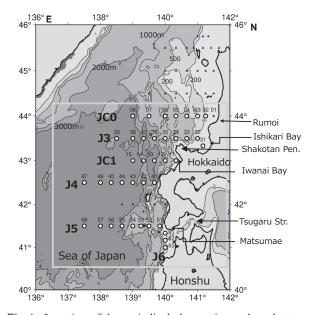


Fig. 1 Location of the periodical observation and sea bottom topography.

した。「流れとしての対馬暖流を調べる」コンセプトで観 測線が設定され、観測線と観測点にはアルファベットと 数字でコード名を付けてデータを管理している。本稿で は留萌西方沖のJC0線から松前西方沖のJ5線までを主な 解析対象海域とした (Fig.1)。各偶数月の観測実施率を Fig.2に示す。荒天の多い冬期間の2,12月の実施率は他 の月より下がるが、J3、J4線では概ね6割以上の実施率と なっている。なお、J3、J4、J5線の最も西側の観測点は 実施率が低くなっており、これは燃油高騰や調査船の減 船のため2009年より観測を中断していることによる。ま た,JC0線(留萌西方沖),JC1線(岩内湾西方沖)の観 測線は時期や年代により観測実施率に濃淡があり、JC0 では6,8月に6割程度,JC1では2,12月が5割,その他の 月は8割程度の実施率となっている。なお, 檜山西方奥尻 島南の42°Nにも観測線があるが、調査頻度や観測範囲が 限られているため今回の解析では取り扱っていない。海 底地形を見ると、積丹半島以南では陸棚が狭く、日本海 盆に続く水深の大きな海域が広がっているのに対して. 積丹半島以北では武蔵堆も含む陸棚が発達しており、傾 圧地衝流の無流面を十分深く設定することができない。 そのため対馬暖流を傾圧流として津軽海峡から宗谷海峡 まで南北連続して解析することが困難である。

そこで、傾圧地衝流の算出に十分な水深のある、Fig.1 に示した道西日本海留萌沖定線(JCO線)から津軽海峡南方(J6線)までの観測データを解析対象とし、一部は公開されている海洋調査要報(1999)から、それ以外の未印刷資料を観測データベース(マリンネット北海道)

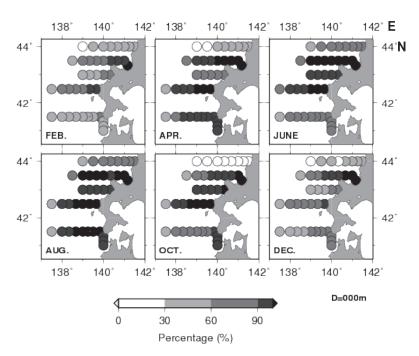


Fig. 2 Diagram of observation rate at each station in 30 years.

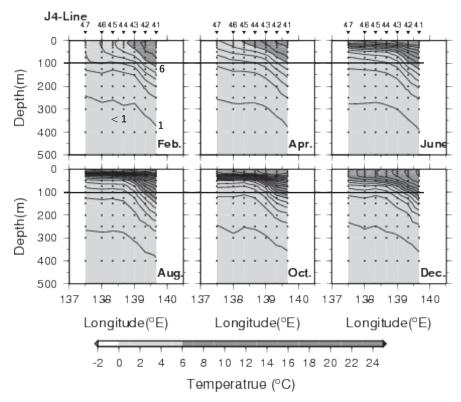


Fig. 3 Vertical distributions of long-term mean temperature on the J4 line.

から抽出した。32年間の1/3以上として11年分以上の観測 数がある地点を解析対象とし、解析対象海域での、おや しお丸(当時北海道立中央水産試験場所属で2012年3月用 途終了廃船)と北洋丸(稚内水産試験場所属). 金星丸 (函館水産試験場所属)で実施された海洋観測データから 基準層 (表面, 10, 20, 30, 50, 75, 100, 125, 150, 200, 250, 300, 400, 500 m) の水温塩分値を用い, 各測点間 の400 m (db) 基準の地衡流量を算出し統計処理を行っ た。石狩湾周辺や留萌西方沖には400 mに満たない陸棚 域が広がっているが、この場合は浅い方(岸側)の水深 を基準として流量を求めた。また併せて、解析対象海域 の水温の累年平均を求めこれを長期平均とした。さらに, およそ10年間を年代の単位としてその年代の観測月別の 統計値を求め比較解析に供した。年代としては観測開始 時の1988年10月から1999年12月(以降1990年代と呼ぶ). 2000年2月から2010年12月 (2000年代), 2011年2月から 2021年2月(2010年代)の3年代とした。なお、流量算出 には観測点間の距離が必要となるが、最も西側の観測点 間(J38-39, J46-47, J57-58) 距離は経度差30分で, 他 の測点間隔(経度差20分)より広くなっているが、流量 として扱っているので補正は行わずそのまま用いている。 対馬暖流の指標となる水温を調べるため、1988年以降 の累年平均からJ4線の水温断面をFig.3に示す。対馬暖流

主流部は、水温断面上では等温線の水平勾配が大きいと

ころとして見ることが出来る。この勾配の大きい箇所に おいて全観測月で100 m深を横切る等温線はおよそ6 ℃ であり、ここでは100 m深で水温6 ℃以上のエリアを対馬 暖流の指標水温として定義した。

結 果

各観測線における流量分布とその季節変化 各観測線に おける流量分布とその季節変化をFig.4に示す。J5線(41.5 。N)では北上流が周年で見られるのはJ53より西側の J53-56間にあり、2~10月ではJ5全北上流量の5割以上を 占めJ53-56間が主流部になっている。沿岸側のJ51-52間 では2,4月では標準偏差は大きいものの平均値としての 北上流量は少なく、4月には平均値でわずかに南下流とな っている。6月から北上流が増えはじめ、12月に0.8 Svを 超え5割程度となり沿岸側が主流部となる。J4線(42.5° N)では10月を除いて岸に近いほど北上流量が多くなっ ており、特にJ41-43間は東西に変化することはない周年 で安定した主流部となっている。10月にJ41-42間で流量 が減少するが、平均としては南下流とはなっておらず、12 月には再び増加する。JC1 (43°N) 線では,沖側のJC14-15間の北上流量が周年で0.2 Sv前後と安定して見られる。 2~4月には岸側のJC11-13に主流部があるが、6~8月に かけて主流部が西へ移動しているように見える。10月に

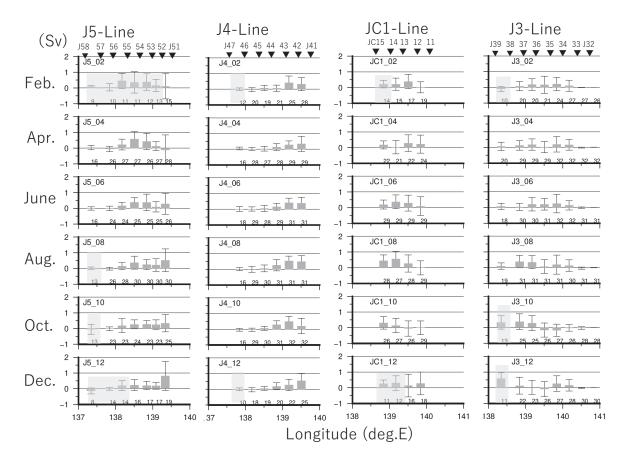


Fig. 4 Mean and standard deviation of northward baroclinic volume transports between each station in the observation month at each observation line. The number on the X axis represents the number of samples. Hatching areas indicate that the number of samples is 15 or less.

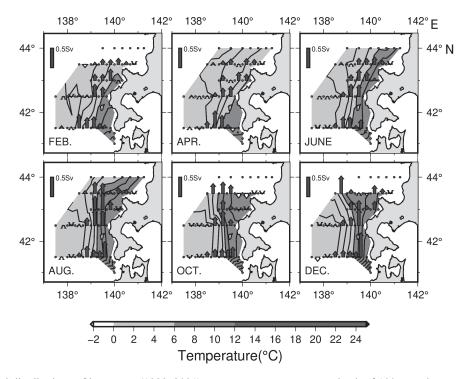


Fig. 5 Horizontal distributions of long-term (1988–2021) mean sea temperature at a depth of 100 m and mean volume transport at the two stations.

はJC12-13間で南下流となり、12月には再び北上流に転 じる。J3線 (43.5°N) では周年で北上流となるのはJ36-37とJ37-38だけで、年間の合計北上流量でも最大となっ ている。J34-35の北上流は2~6月では他より多く、10月 に南下流となるものの、12月に再び北上流となる。年間 の北上流量ではJ36-38間より少なくなっている。

累年平均の100 m 深水温分布と各観測線の流量分布 観測月ごとに累年平均の100 m 深水温分布と流量分布を 合わせてFig.5に示す。また、対馬暖流の水塊指標として 100 m 深水温6 ℃以上のエリアにハッチをつけている。 流量は東西方向の観測線に直行する傾圧地衡流量なので 矢印は南北方向だけとなり北向きを濃い灰色、南向きを 白色の矢印で表示した。流量がゼロに近いところは矢印 の頭だけが南北方向に表示されている。

ここではまず解析対象海域の100 m深の累年平均の水 温分布について、その特徴を整理する。年間の最低水温 に注目すると、調査海域では周年を通じておよそJ4線 (42.5°N) 以南, 沖側ではJ45 (138°40′E) 以西に3℃以 下の海域がある。これより東の岸側は暖流域でありJC11 以南ではおよそ6℃以上の, 松前西方のJ51 (41.5°N) で は7℃以上の対馬暖流に周年覆われている。

各月ごとに見ると、2月では6℃の等温線は岩内湾沖の JC1線まで達している。4月になると6℃以上の海域は縮 小し、年間を通し最も狭くはなるが、以前として岩内湾 JC11では6℃以上を保っている。6月になると6℃の等温 線は北上し、7℃の等温線ともに留萌西方JC0線(44°N) に達する。沿岸側に暖水が入ってくることで沖合と沿岸 との東西方向の水温差が大きくなってくる。8月には沿岸 側では8℃以上となり、岩内湾JC11では9℃以上の暖水域 が出現し、茂津多岬西方のJ41や松前西方J51より水温が高 くなっている。10月にはJ3線積丹半島西方沖からJC1線の 岩内湾にかけて8℃以上の暖水域が広がり,一つの暖水域 にまとまっているように見えている。また,6℃の等温線 は西へ膨らみ蛇行している。12月では6℃の等温線の蛇行 はJ3線ではやや西へ広がるが、JC1線では東へ狭まる。J3 線のJ36-38付近の7℃と8℃の等温線が東西に広がる暖 水域(渦)があり、沿岸では南から9℃の等温線が北に伸 び,一旦J4線で途絶えているが,岩内湾JC11では9℃以上 となっている。また、J33では10 ℃以上、J51でも10 ℃台 と、松前西方J51と石狩湾沖とが同程度の水温となってお り、J33、34では12月が年間で最も水温が高くなっている。 次に流量の分布と100 m深水温との対応についてみ ると、まず、全体として3℃以下の海域ではほぼ流量が ないことと、周年では6℃の等温線に沿って流量の多い 場所が分布していることが分かる。

2~6月では6℃の等温線の西側(沖側の6℃以下の低温

側)で流量が多くなっている。8月から6℃の等温線上か ら東側(岸側)で流量増加が顕著になってくる。J4線か らJC1線の西のJC13-15を経てJ38-36へと流量の多いとこ ろが6℃の等温線に沿って南北に連なり、等温線はJ3線 を超えると急速に東へ向きを変えている。10月のJ3線, JC1線では6℃の等温線が8月より西に広がり、主流部は その6℃の等温線付近のJ36-39やJC15付近にある。12月 になるとJ3線では6℃の等温線上J38-39に流量の多いと ころがあり、岸側にはJ5、J4線やJC1線の北上流量増加と 同時に、J34-36間を北上する流量が再び現われている。 J4線 (42.5°N) の傾圧流量の経年変化 現在のJ4線で対 馬暖流傾圧流量の主流部がほぼ捉えられていることを確

認したことから、このJ4線の流量から対馬暖流の長期的 な変動傾向を示した(Fig.6)。2ヶ月ごとの流量変化は大 きく、季節変動と同等の短期変動が含まれていると思わ れ,季節変化はこの図からは見えてこない。2000年まで は2.0 Svを超える流量は、1990年12月、1993年、1995年、 2000年の8月の4回あり、2001年以降では数回観測された が、2001年以降では2.0 Svを超える流量は2013年8月の1 回のみとなっていた。一方, 負の流量(南下流)は2000 年まで2000年12月の1回だけで、2001年以降ではJ41-42間 の流量であるが2006年, 2008年, 2009年の2月に観測され ており、後半では最大と最小値の振れ幅が大きくなって いるように見える。移動平均をみると,1990年代から2000 年代にかけて6、7年周期で減少傾向であったが、2000年 代以降は減少傾向から横ばいとなるとともに6,7年周期 も見えなくなっているようだ。

ラページ検定を行うと1988年から1996年までとそれ以 降に不連続なジャンプが認められた(危険率5%:前後3 年=36月分の検定による)。10年(60ヶ月分)なら危険率 10%だが、2001年頃が減少傾向から横ばいへの変化傾向 が変わる境になると見られた。

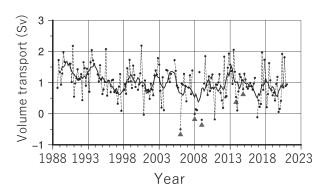
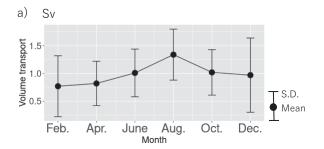


Fig.6 Interannual variability in the northward transport at the J4 line. The thick line indicates the running mean of 14 months. The dot at the top of the gray triangle indicates the volume transport between J41-J42.

次に観測偶数月ごとに集計して季節変化をみると (Fig. 7 a), 流量は2月が最も低く0.8 Svで半年後の8月が 1.4 Svと最も多くなっていた。各月の標準偏差は大きい が、8月に最大流量を示していた。ラページ検定で示され たように経年変化に変調が見られる観測開始から2000年 までと、その後の20年を2つに分けて、30年を3期間に分 けて季節変化を比較すると(Fig.7b), 1990年代は中多ら (2002) で記述されているように, 4月が最小, 8月が最大 で、10月に一度減少し、12月に再度増加する特徴ある変



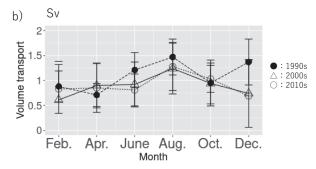


Fig. 7 Seasonal variation of northward transport at J4-Line (a) and decadal mean seasonal variation of transport (b).

化となっていたが、2000年代、2010年代では季節変化の 幅が小さくなり、4月の流量はわずかに増加したが、6、8、 12月の流量は大きく減少していた。

このように、年代別に季節変化を比較することで長期 変動が見やすくなることから,以降の解析でも3年代に分 け,流量の多かった1990年代と流量減少後の2010年代の 2つの年代を比較して解析を進める。

1990年代と2010年代の流量と水温場の比較 Fig.8に両 年代の平均場を示した。年代で分けた場合、年代によっ て欠測の多い海域や観測中断となっている海域が変わる ので, 平均場で比較可能な海域が狭くなっている。例え ば2012年以降、2月の観測海域はJ4線以北となりJ5、J6線 の観測は実施されていない。西端の観測点(J58, J47, J39) も観測が中断しているため,解析対象海域は狭くな っている。またJC1線も1990年代は観測が少ないなど年 代別に比較できる海域に若干差がある。目安として各年 代の10から11年間で半数以上の観測数がある地点の平均 を示している。

まず、水温分布の違いについて1990年代と比較すると、 2010年代では8~12月にJ4, J5線の西側沖に2℃の等温線 が見られない。1990年代では8~12月にJ4線からJ5線の 138° 20'E付近を中心に100 m深で2 ℃以下の冷水域が見 えていたが2010年代では3℃の等温線までしか見当たら ない。2月は1990年代では6℃以上の等温線が積丹半島に 達していたが、2010年代には岩内湾までにとどまってい る。2010年代ではJ3線で8月から西方へ暖水が広がり始 め、その暖水の北側JC0線の140°E付近で南下流となり 5℃以下の海域となっている。10月にはJ3線の6℃以上の 海域が1990年代より西側に分布し、暖水の中心部となる

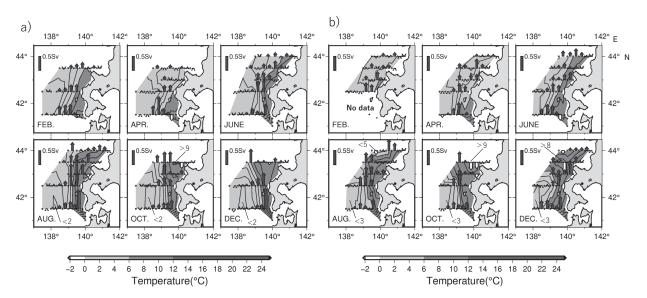


Fig. 8 Comparison of distribution in temperature at a depth of 100 m and volume transport in the 1990 s(a) with those in the 2010s(b).

9℃以上の海域も積丹半島西方に大きく広がっている。 12月ではJ3線とJ5線の暖水の西への広がりが顕著となり, 他方、J4線では沿岸側に狭くなっており、1990年代より 2010年代で等温線の蛇行が大きくなっている。

流量分布について比較すると、12月を除く2~10月で J41-42間の流量が減少しており、J42-43間で流量が増加し 対馬暖流の主流部が沖に変化しているように見える。J5線 では1990年代の2,4月に松前西方で南下流となっており、 その西側140° Eを中心に北上流量が多く、南下流と北上流

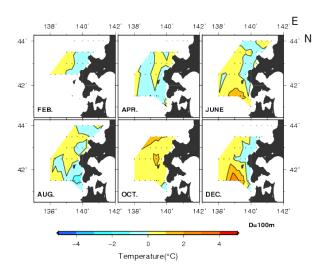


Fig. 9 Distribution of temperature deviation by decadal mean at a depth of 100 m in the 2010s.

が東西に分布する渦構造となっている。2010年代では2月 のJ5線の観測はないもののこの渦構造は6月まで継続して いる。J3線でも10月に南北流が東西に分布する構造が見ら れ、2010年代の方で南下流が大きく、JC11-12間も南下流 となるなど岩内沖JC1線まで影響しているように見える。

水温と流量分布の長期平均から、今回の解析対象海域 において周年の対馬暖流の流路を辿ることができる (Fig. 5)。それらは概ね等温線との対応が見いだせたが,あ る深度の一意の水温を指標値とする場合は、季節によって 主流部の位置が等温線の東西にずれるので注意を要する。 流量と水温の年代比較 1990年代の8月から12月にかけ てJ4線とJ5線の138°Eから138°20′E付近で見えていた 100 m 深で 2 ℃以下の海域 (2 ℃の等温線) は2010年代 には見えなくなった。この冷水域は2010年代では150 m 以深にあり2℃の等温線が深くなっている。佐藤(2022) でも指摘しているように当海域の温暖化の進行がうかが える。また、この海域は道西日本海対馬暖流の沖側の密 度構造を形成することから、これらの等温線の深化(温 暖化)は沖側の力学高度を上げて北上流量減少の要因に もなっていると考えられる。

また, 2月に1990年代で100 m 深6℃の等温線は積丹半 島まで伸びていたが、2010年代には南の岩内湾にとどま

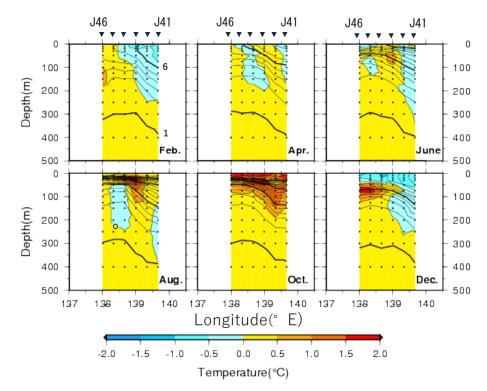


Fig. 10 The decadal mean temperature section (solid line) and its deviation (color bar) from long-term mean field in the 2010s.

っており、積丹半島以北にとって逆に寒冷化となること から、北上暖流の流量減少がうかがえる。

2, 6, 8, 12月のJ4線流量は, 2010年代では1990年代よ り減少しており (Fig.6), 2010年代の沿岸域における水 温低下は流量減少と矛盾しない。留萌以北の北部日本海 では100 m と200 m深の水温の低下傾向について報告(宮 園ら、2008; 美坂ら、2019;) がある。そこで、流量の変 化(ここでは減少)が水温場にどのように現れているか を見るため、2010年代の100 m 深水温について、長期平 均(30年平均)に対する水温偏差を求めた(Fig.9)。沿 岸域は10月を除き南北に負偏差海域となっており、これ に対して対馬暖流域の西側が広く正偏差であった。この 沖合の正偏差については、例えば6月、12月のJ5線、10月 のJ3線の沖合域で見られる暖水渦の発達や移動に伴うも のと、沖合冷水の温暖化で説明できる。一方で沿岸域の 負偏差については負偏差海域が暖流域にそって南北に広 がっていることから暖流の流量減少が示唆される。次に J4線の2010年代の平均水温断面図(実線)とその30年平 均からの偏差をFig.10に示した。流量が1990年代を特に 下回った6,8,12月を見ると、春から秋の昇温期に成層 するあるいは冷却混合期に鉛直混合が盛んになる50 m 深より浅い深度で正偏差となっている一方で、沿岸側50 m以深の等水温線が傾斜している暖流の傾圧構造部分で 30年平均より水温が低いことが分かる。先に指摘した沖 合冷水の温暖化も考慮すると、傾圧流量の減少とともに 熱輸送量も減少し、道西日本海の暖流域とされる海域で はここ10年の平均でみると30年平均を下回る水温環境と なっていたと言える。

謝辞

この海洋観測に従事されたおやしお丸, 北洋丸, 金星 丸の歴代船長をはじめ, 乗組員各位に深く感謝申し上げ ます。また、定期観測の継続実施にお力添えを頂いた関係各位に深謝いたしますとともに、有益なコメントを頂いた査読者の皆様にお礼申し上げます。

引用文献

- 檜垣直幸, 磯田 豊, 磯貝安洋, 矢幅 寛. 北海道西岸 沖における水系分布と流れパターンの季節変化. 海 の研究 2008:17(4):223-240.
- 海洋調査要報 第1~15号 北海道立水産試験場, (1985-1999)
- Kida S, Takayama K, Sasaki Y.N, Matsuura H, Hirose N, Increasing trend in Japan Sea Throughflow transport. *J. Oceanogr.* 2021; 77: 145–153.
- 美坂 正, 星野 昇, 渡野邉雅道, 本間隆之, 志田 修, 三原行雄, 板谷和彦, 三宅博哉. 北海道日本海海域 におけるスケトウダラ産卵群の分布変化. 北海道 水産試験場研究報告 2019;95:55-68.
- 宮園 章, 西田芳則, 田中伊織. 定期海洋観測19年間 (1989-2007) の水温・塩分トレンドからみた北海道 周辺の海況特性. 2008年度日本海洋学会春季大会 講演要旨集 316 2008. 3
- 中多章文,田中伊織.北海道西岸における対馬暖流傾圧 流量の季節および経年変化.北海道立水産試験場研 究報告 2002;63:1-8.
- 小笠原惇六,田中伊織.日本海沿岸(津軽海峡以北)に おける対馬暖流の変動 対馬暖流および津軽暖流の 変動機構と東北・北海道沿岸における津軽暖流の挙 動.文部省総合研究(B)研究報告集63306014 1989;37-44
- 佐藤政俊. 日本海の北海道西岸域における海洋環境の 特徴と変化. 北水試だより 2022; 104:10-13.

北海道東部太平洋で発生した赤潮がえりも以西海域に移流する短期的なリ スク評価(短報)

品田晃良*1, 黒田 寛²

1北海道立総合研究機構さけます・内水面水産試験場,

Short-term risk assessment of the drift of red tide occurrence in the western waters off Erimo, Hokkaido, Japan (Short Paper).

AKIYOSHI SHINADA*1 and HIROSHI KURODA2

The seasonal risk of short-term drift of red tides from the Tokachi coast to the Funka Bay, Iburi, and Hidaka areas around Hokkaido was calculated using particle tracking experiments with a high-resolution model. Particle tracking was conducted for 15 d each month from January to December during 2003–2021, and the drift rate for each area was estimated monthly. Red tides could not occur from January to April because of low water temperatures. From May to December, the drift rate in Funka Bay was negligible and the risk was low. During May–September the drift rate was high in the Iburi and Hidaka areas, and the risk was high. Particularly, in the Hidaka area, the drift rate peaked in June, and the risk was considered to be the highest.

キーワード:赤潮,海況モデル,リスク評価,粒子追跡実験

プランクトンが異常に増殖して海水の色が変化する現象を赤潮と呼び、魚介類に深刻な被害を与える場合がある。赤潮は比較的閉鎖的な内湾で発生することが多く、2003年、2012年の瀬戸内海(瀬戸内海漁業調整事務所、https://www.jfa.maff.go.jp/setouti/akasio/gepou/pdf/2021 nenpou.pdf)(2023.10.6)や、2009年、2010年における九州の八代海(西ら、2012)では赤潮により10億円を上回る漁業被害が発生している。一方、北海道では1970~1980年代の十勝沿岸(嶋田、2021)、2015年秋季の函館湾(嶋田ら、2016)で赤潮の発生記録があるが、本州のような規模の漁業被害は報告されていなかった。しかし、2021年秋季に北海道東部太平洋で発生した赤潮(以下、「北海道赤潮」)は、根室沖からえりも岬までの広範囲でサケ類やウニ類などをへい死させるなど甚大な被害を及ぼし、その被害金額は90.7億円と報告されている(北海

道水産林務部水産局水産振興課, https://www.pref.hokkai-do.lg,jp/sr/ssk/akashio_info.html) (2023.10.6)。

Iwataki et al. (2022)は、Karenia selliformisが北海道赤潮の主な原因種であり、2020年にロシアのカムチャッカ半島沿岸で発生したものと同じ個体群である可能性が高いと推定している。Kuroda et al. (2021 a)は、海沢モデルを用いた粒子追跡実験と衛星情報から、1)2021年夏季は北西太平洋で観測史上最強かつ最大規模の海洋熱波(高水温の状態が5日以上持続する現象)が発生していたこと、2)海洋熱波が収まった1ヵ月後の2021年9月上旬に赤潮が択捉島の南で発生し、9月下旬に北海道東部太平洋に分布を拡大したこと、3)カムチャッカ半島の東岸、サハリンの東岸および日本海がK. selliformisの発生源である可能性を示した。また、Kuroda et al. (2022)は、船舶を用いた現場観測によりK. selliformisが十勝沿岸で高密度で出現

²水産研究・教育機構水産資源研究所釧路庁舎

¹ Salmon and Freshwater Fisheries Research Institute, Hokkaido Research Organization, Eniwa, Hokkaido, 061-1433,

² Fisheries Resources Institute (Kushiro Station), Japan Fisheries Research and Education Agency, Kushiro, Hokkaido, 085-0802, Japan

したのは、現場での増殖と物理的な移流の複合効果であ ると推察している。

2021年秋季に発生した北海道赤潮は、海岸線に沿って えりも岬付近まで分布を拡大した後、先端部は日高沿岸 まで移流したが、大部分はえりも岬付近から南東方向に 転じて胆振・噴火湾海域に分布が拡大することはなかっ た(道総研中央水産試験場海洋環境グループ, http:// www.hro.or.jp/list/fisheries/research/central/section/kankyou/att/202110 GCOM-C.pdf) (2023.10.6)。十勝沿岸, 日 高海域および胆振・噴火湾海域には、沿岸域を流れる沿 岸親潮(磯田ら, 2003)と, 津軽海峡から流出する津軽暖 流 (Conlon, 1982) が存在する (Fig. 1)。2021年に北海道 赤潮が発生した9~11月は一般に津軽暖流の流出形態が えりも岬まで張り出す渦モードになる時期にあたる (Conlon, 1982)。2021年の北海道赤潮が胆振·噴火湾海域 に分布を拡大しなかったのは、このメカニズムが関係し ていた可能性がある。しかし、津軽暖流の流出形態は季 節的に変化するので(磯田・鈴木, 2004), 胆振・噴火湾 海域へ北海道赤潮が移流するリスクは季節的に変化する と考えられる。胆振・噴火湾海域では二枚貝であるホタ テガイやホッキガイの生産が盛んであるが、暴露実験に より二枚貝類はK. selliformisの細胞密度が1,000 cells/ml 程度でへい死が始まると報告されている(北海道太平洋 赤潮共同研究機関, 2023)。また、様々な種類の水産生物 を対象とした暴露実験の結果から、幅広い水産資源に対 する被害軽減対策の目安として, K. selliformisの細胞密 度が少なくとも100 cells/mlに達する前の段階で注意喚

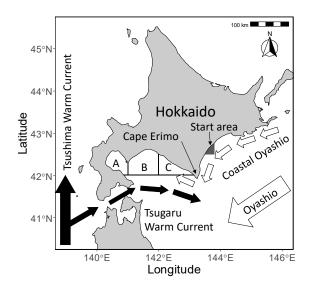


Fig. 1 Map and main currents related to this study. Areas A (Funka Bay), B (Iburi area), and C (Hidaka area) are areas where the possibility of drift was assessed. The start area is where the particle tracking experiment started.

起を行い、各種の対応を進めることが重要とされている (北海道太平洋赤潮共同研究機関, 2023)。本研究は, 過去 の海洋環境を再現した海況モデルを用いた粒子追跡実験 により、北海道赤潮が毎年毎月同じ海域で発生すると仮 定して、短期間にえりも以西海域まで移流するリスクを 季節的に評価することを目的とした。

試料及び方法

赤潮を形成したK. selliformisが属する渦鞭毛藻類の多く は2本の鞭毛により遊泳できるが、流れに逆らってまで移 動するほどの遊泳力がないため、その輸送過程を解明す るためには海流に関する情報が必要となる。北海道立総 合研究機構(道総研)は定期海洋観測を2ヶ月毎に行って おり、水温、塩分および海流等のデータを蓄積している。 しかしながら調査船観測ベースのスナップショットデー タでは、数日で移動する赤潮の輸送過程を把握すること は困難である。そこで本研究では、物理法則によってコ ンピューター上で駆動する海況モデルに、調査船で得ら れた海洋環境データ、人工衛星および海洋ブイ等で取得 した現場データを取り込むことにより作成したデータセ ット(再解析データ)を利用した。再解析データは、時 空間的に欠測がないデータセットであり、その流速場を 利用することで赤潮の輸送過程を推定することができる。

水平解像度約2kmの北海道周辺高解像度モデル (Kuroda et al., 2021 b) は, 北海道周辺海域における10 km 程度以上の海洋変動を再現する海況モデルであり,道総 研が実施している定期海洋観測のデータも活用されてい る。粒子追跡実験は、粒子の初期配置区域と深度、実験 開始日と期間等を設定することでモデルの流速場から粒 子の位置を計算(6時間毎に出力)するものである。今回 は、2021年10月上旬に最大密度の赤潮が観測された十勝 沿岸(北緯42.5°から42.8°, 東経143.5°から143.8°)を初 期配置区域とした (Fig.1)。また、美坂ら(2021)のクロ ロフィルa濃度のセンサー観測結果を参考にして水深0.5 mと10 mの2層を初期配置深度とした。実験の開始日は 2003~2021年における1~12月の1,11,21日として,1回 あたりの粒子数は250個 (0.5 mと10 mの合計), 実験期間 は15日間とした。また、本研究では、えりも岬より西側 の沿岸域を噴火湾, 胆振および日高海域の3つの海域に区 分して、赤潮プランクトンと想定した粒子が十勝沿岸か らこれらの海域に移流することを「移流のリスク」と定 義して検討を行った (Fig.1)。移流のリスクは、実験開 始から5日目,10日目および15日目に各海域に存在する粒 子を実験開始月毎に集計して, その月の総実験粒子数 (750粒子)で除したもの(移流割合)で評価した。

結 果

北海道赤潮が観測された2021年10月11日を実験開始日とした粒子追跡実験の結果をFig.2に示す。実験開始後5日目の粒子は、初期配置区域から海岸線にそって南西方向に移動しており、その先端部はえりも岬から南東方向に向きを変えた。実験開始後10日目には、沿岸域に留ま

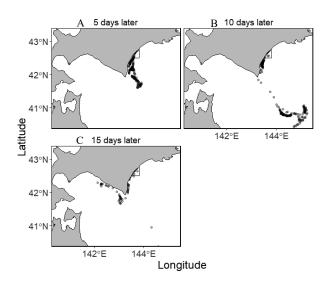


Fig. 2 The results of the particle tracking experiment that started from the Tokachi coast on October 11, 2021.

A) 5 d later, B) 10 d later, and C)15 d later. The circles represent particles.

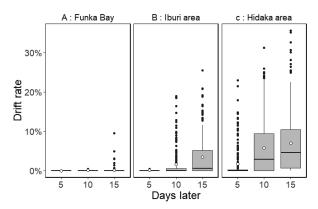


Fig. 3 Relationship between days after the start of the particle tracking experiment and drift rate in A) Funka Bay, B) Iburi area, and C) Hidaka area. The open circle represents the average value for each month. The box represents the interquartile range (IQR), which is the range of values between the first quartile and the third quartile. The median is represented by a horizontal line inside the box. The whiskers represent the range of data outside the IQR, and the outliers are plotted as individual points beyond the whiskers.

った粒子と、えりも岬より南東方向の沖合域に移動した 粒子に分かれた。実験開始後15日目には、沿岸域に留ま った粒子の一部がえりも岬を通過して日高海域に移動し た。2021年10月の実験開始後15日目における日高海域へ の移流割合は約3%であった。

次に、2003~2021年における全ての粒子追跡実験結果について、実験開始から5日、10日および15日目における海域別の移流割合を取りまとめた(Fig.3)。噴火湾海域では、5日目、10日目および15日目における移流割合の平均値はほぼ0%であった。5日目と10日目における移流割合の最大値もほぼ0%であったが、15日目の最大値は約9%であった。胆振海域では、移流割合の平均値が5日目の0%から10日目の2%、15日目の3%と緩やかに増加した。移流割合の最大値は5日目には0%であったが、10日目に19%、15日目に25%と増加する傾向が認められた。日高海域の移流割合の平均値は、5日目から2%を記録した。その後、10日目の6%、15日目の7%と増加した。最大値は、5日目の23%から10日目の31%、15日目の36%と増加した。

次に、各海域で移流割合の平均値が最大となった15日目について、その季節変化を海域毎に示した(Fig.4)。噴火湾海域における移流割合の平均値は、一年を通してほぼ0%であった。最大値は4~8月に1%を超え、7月の9%が最も高い値であった。胆振海域では、3~9月の平均値が3~8%と他の月よりも高かった。最大値は3~9月まで

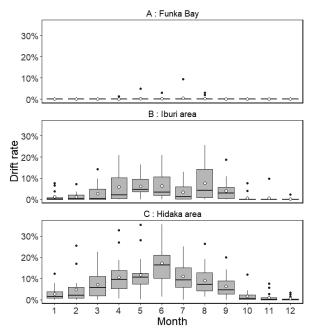


Fig. 4 Seasonal variation in the drift rates after 15 d in A) Funka Bay, B) Iburi area, and C) Hidaka area. The open circle represents the average value for each month. The description of the box plot is the same as that for Fig. 3.

 $13\sim25\%$ と他の月よりも高く、 $10\sim11$ 月も $8\sim10\%$ の値を示した。日高海域では、平均値が1月の3%から徐々に増加して6月に17%のピークを取り、12月にはほぼ0%となった。最大値もほぼ同様な傾向を示し、1月の12%から6月の36%まで増加した後に減少して、 $10\sim11$ 月に $8\sim12\%$ となった。

考 察

北海道赤潮が顕著であった2021年10月11日を開始日と した粒子追跡実験で、粒子の大部分はえりも岬より南東 方向の沖合域に移動した (Fig.2)。この現象は、衛星観 測によるクロロフィルの分布傾向と一致する(道総研中 央水産試験場海洋環境グループ, http://www.hro.or.jp/ list/fisheries/research/central/section/kankyou/att/202110_ GCOM-C.pdf) (2023.10.6)。また, 漁業被害は日高海域 でも発生したが(北海道水産林務部水産局水産振興課、 https://www.pref.hokkaido.lg.jp/sr/ssk/akashio_info.html) (2023.10.6), これは実験開始後15日目に約3%の粒子 (K. selliformis の細胞密度としては300 cells/ml程度: 2021年 10月に十勝沿岸でK. selliformisが約10,000 cells/ml観測さ れていることからの推定(北海道太平洋赤潮共同研究機 関,2023))がえりも岬から日高海域に移流したことが関 係している可能性がある。よって北海道高解像度モデル を用いた粒子追跡実験は、短期的には現実を十分に再現 していると判断できる。

一般に、植物プランクトンは水温により増殖が制限されることが知られている。北海道赤潮から採取されたK. selliformisを用いた培養実験により水温5 $\mathbb C$ で本種は緩やかに死滅することが明らかとなっている(北海道太平洋赤潮共同研究機関、2023)。北海道沿岸域の海面水温情報(気象庁、 https://www.data.jma.go.jp/kaiyou/data/db/kai-kyo/series/engan/engan_SP.html)(2023.10.6) によると、十勝沿岸における $1\sim4$ 月の平年値はほぼ5 $\mathbb C$ 以下であった。このため $1\sim4$ 月は水温条件により十勝沿岸でK. selliformisの増殖が制限され赤潮が発生しない可能性が高いと考えられる。よって、 $1\sim4$ 月については噴火湾、胆振および日高海域にK. selliformisが移流するリスクは低く、漁業被害も生じないと判断できる。

一方、十勝沿岸における5~12月の平年値は5℃以上であるのでK. selliformisによる赤潮が発生する可能性を想定した。5~12月にかけて噴火湾、胆振および日高海域に本種が移流するリスクを、粒子追跡実験による移流割合で評価した。噴火湾海域では実験開始後10日目まで粒子の移流割合はほぼ0%であったことから、十勝沿岸で赤潮が発生したとしても10日間は移流のリスクは低いと考え

られる (Fig.3)。また、15日目についても5~8月のみ粒 子の移流割合の最大値が増加したので、5~8月に若干の 移流のリスクがあると判断できる(Fig.4)。胆振海域で は実験開始から5日目の移流割合はほぼ0%であるため、 十勝沿岸で赤潮が発生しても5日間は移流のリスクが低 いと考えられる (Fig.3)。一方, 15日目における5~9月 の移流割合の平均値が3~8%と他の月よりも高いので、 赤潮が移流するリスクがあると考えられる。また,10~11 月は移流割合の最大値が8~10%であることから、5~9月 に比べ移流のリスクは下がるが注意は必要と判断できる。 日高海域では実験開始から5日目に他の海域に比べ高い 移流割合が記録されていることから、十勝沿岸の状況を 常時注視して赤潮の移流のリスクに備える必要がある。 また、15日目における5~9月の移流割合の平均値が6~ 17%で6月にピークがあることから,5~9月は移流のリス クが高く,特に6月が最も高いと判断できる。また,10~11 月についても胆振海域と同様に最大値が8~12%の移流 割合が記録されており警戒が必要である。

北海道東部太平洋は、沖合を流れる親潮と平行するようにオホーツク海が起源と考えられる沿岸親潮が陸棚上を南西方向に流れている(磯田ら、2003)。また、えりも以西の海域は、津軽海峡から流出する津軽暖流の影響を受けるが、10~11月にはえりも岬付近まで津軽暖流が張り出すことが知られている(磯田・鈴木、2004)。この現象は、胆振・日高海域における移流割合の平均値が10~12月にかけて減少傾向にあることと一致している。よって、えりも以西海域における北海道赤潮の短期的な移流リスクが季節変化する要因として本海域での水塊交代に伴う複雑な海況変動が影響していることが考えられた。ただし、津軽暖流には経年変化も存在することが知られているので(佐藤、2003)、経年変化を考慮に入れた研究も今後の課題である。

本研究は短期的な移流のリスクを評価したものであるので、K. selliformisの細胞密度やその増殖特性等に起因する赤潮そのものの漁業被害については評価していない。よって、実際に赤潮が発生した際に被害を軽減する対策を考える場合には、現場観測により細胞密度を把握して赤潮の規模を知ることが重要となる。また、粒子追跡実験を15日間に限定したものであることから、一度沖合域に移動した赤潮プランクトンが再び沿岸域に接岸するような中期的な移流のリスクも評価していないことにも留意する必要がある。

謝辞

本研究は、農林水産省の「令和3年度北海道赤潮対策緊

急支援事業」の一環として実施したもので、道総研が長 年にわたり続けてきた定期海洋観測によって得られたデ ータが利用されています。試験調査船の船長, 乗組員お よび研究職員の皆様にデータ収集のご協力を頂きました ことを深く感謝申し上げます。さらに、粒子追跡実験の 基盤整備に尽力いただいた方々、そして実験環境の構築 にご協力いただいた佐藤政俊博士および有馬大地氏に心 より感謝いたします。

引用文献

- Conlon DM. On the outflow modes of the Tsugaru warm current. La mer. 1982; 20: 60-64.
- 北海道太平洋赤潮共同研究機関. 令和3年度北海道赤潮 対策緊急支援事業「赤潮の発生メカニズムの解明等 による発生予察手法の開発及び新たな赤潮原因プラ ンクトンの水産生物に対する毒性の影響等の調査事 業成果報告書」. 2023; 77 pp.
- 磯田豊, 黒田寛, 明正達也, 本田聡. 沿岸親潮の海洋構造 とその季節変化. 沿岸海洋研究 2003; 41: 5-12.
- 磯田豊, 鈴木鋼治. 津軽暖流水張り出しの経年変化. 北海 道大学水産科学研究彙報 2004; 55: 71-74.
- Iwataki M, Lum WM, Kuwata K, Takahashi K, Arima D, Kuribayashi T, Kosaka Y, Hasegawa N, Watanabe T, Shikata T, Isada T, Orlova TY, Sakamoto S. Morphological variation and phylogeny of Karenia selliformis (Gymnodiniales, Dinophyceae) in an intensive cold-water algal bloom in eastern Hokkaido, Japan. Harmful Algae 2022; 114: https://doi.org/10.1016/j.

hal.2022.102204.

- Kuroda H, Azumaya T, Setou T, Hasegawa N. Unprecedented outbreak of Harmful Algae in Pacific coastal waters off southeast Hokkaido, Japan. During late summer 2021 after record-breaking marine heatwaves. J. Mar. Sci. Eng. 2021 a; 9: 1335.
- Kuroda H, Tanaka S, Ito S, Setou T. Numerical study of diurnal tidal currents on the Pacific shelf off the southern coast of Hokkaido, Japan. Continent. Shelf Res. 2021 b; https://doi.org/10.1016/j.csr.2021.104568.
- Kuroda H, Taniuchi Y, Watanabe T., Azumaya T, Hasegawa N. Distribution of Harmful Algae (Karenia spp.) in October 2021 off southeast Hokkaido, Japan. Front. Mar. Sci. 2022; https://doi.org/10.3389/fmars.2022.841364.
- 美坂正, 安東祐太朗. 北海道太平洋沿岸で発生した大規 模有害赤潮について. 試験研究は今 2021; No.943.
- 西広海, 田原義雄, 徳永成光, 久保満, 吉満敏, 中村章彦. 2009年及び2010年に八代海で発生したChattonella antiqua 赤潮. 鹿児島県水産技術開発センタ - 研究報 告 2012; 3: 37-44.
- 佐藤晋一. 青森県尻屋崎東方における津軽暖流の流勢指 標について. 青森県水産試験場研究報告 2003; 3: 15-27.
- 嶋田宏. 北海道沿岸における赤潮と貝毒の長期変動 (総 説). 北海道水産試験場研究報告 2021; 100: 1-12.
- 嶋田宏, 金森誠, 吉田秀嗣, 今井一郎. 2015年秋季北海道 函館湾における渦鞭毛藻 Karenia mikimotoi による 有害赤潮の初記録. 日本水産学会誌 2016; 82: 934-938.

2018年に根室海峡で急増したニシン(Clupea pallasii) を構成する 3 集団

堀井貴司,清水洋平,川崎琢真,山口浩志

根室海峡の野付半島以北沿岸で、1959年以降ほとんど 漁獲されていなかったニシンが2018年に急増した。これ らニシンがどの集団に属するのかを解明するために、根 室海峡に面する羅臼町、標津町、別海町で採集したニシ ンのmtDNA調節領域410塩基の塩基配列、脊椎骨数の特 徴、卵巣の成熟状態を解析した結果、別海町で採集した ニシンは道東湖沼性集団、標津町は石狩湾系集団、羅臼 町は北海道サハリン系集団に属すると考えられた。ただ し、標津町で採集したニシンは石狩湾系集団には属する が、漁獲量の変動傾向が石狩湾とは一致しないことから、 現在、石狩湾で漁獲されている石狩湾系群とは異なる系 群であると推定された。

A626 北水試研報 105, 1-8 (2024)

日本海北部海域における表層水平循環の流動特性

西田芳則, 伊藤 雅, 森本昭彦, 広瀬直毅

衛星海面高度計データ及び調査船観測資料を用いて、日本海北部海域における表層水平循環の流動特性について調べた。循環を構成する主な流れは傾圧地衡流で、基本的には対馬海峡を通過する流量の季節変化を反映する。また、海峡通過流量が増加(減少)する春~秋(冬)季には北(南)向きの順圧流が発生するため循環はさらに強(弱)化される。このため、表層水平循環の強弱は夏季に最大で冬季に最小となる。ただし、冬季には風応力により傾圧地衡流速が増加するため、海峡通過流量の減少分ほど循環は弱くはならない。それ故、このことが海峡を通過する流量収支と日本海北部で見積もられた傾圧地衡流量とが一致しない理由と考えられた。

ナガコンブSaccharina Iongissimaの品質と加工特性に 及ぼす凍結の影響

奈須亮耶, 秋野雅樹, 加藤慎二, 小玉裕幸, 武田浩郁

近年,北海道のコンブ生産量は低下しており、その要因はコンブ乾燥品の製造労力が大きいこと,漁業者の減少や高齢化であると考えられている。我々はナガコンブを乾燥せず凍結品としての流通を想定し、凍結品の品質を従来の乾燥品を水戻しした物と比較した結果、凍結品は解凍歩留りと加熱後の破断強度が低く、マンニトールと灰分を多く含んでいた。また、凍結品と乾燥品から昆布巻きを製造し両者を官能試験によって比較した結果、凍結品は識別され、外観、味、香りの嗜好性は同等であり、食感は柔らかかった。以上より、凍結品は乾燥品よりも多くの栄養成分を保持し、凍結品を原料とした加工品は食感の柔らかさが特徴であることが明らかとなった。

A627 北水試研報 105, 9-14 (2024)

道西日本海における対馬暖流の流量分布の季節および経 年変化

中多章文, 田中伊織

道西日本海の対馬暖流の傾圧流量は長期平均でおよそ 1.0 Svであり、2000年頃を境に平均流量は0.2 Sv減少している。月別にみると減少したのは6、8、12月の流量で季節変動が不明瞭になっていた。また、流量分布から暖流の流路を調べ、岩内湾沖合に安定した北上流があることが分かった。流量が減少したここ10年間の平均水温を長期平均と比較すると沿岸の暖流域中層で広く負偏差となっており、流量減少にともなう熱輸送量の減少が示唆された。

A628 北水試研報 105, 17-27 (2024)

A629 北水試研報 105, 29-36 (2024)

北海道東部太平洋で発生した赤潮がえりも以西海域に移 流する短期的なリスク評価(短報)

品田晃良, 黒田 寛

十勝沿岸での赤潮発生時に、噴火湾、胆振および日高海域まで短期間に赤潮が移流するリスクを北海道高解像度モデルによる粒子追跡実験で季節的に評価した。2003~2021年の1~12月に15日間の実験を行い、各海域の移流割合を月毎に集計した。1~4月は低水温のため赤潮は発生しないと考えた。5~12月は噴火湾海域の移流割合はほとんど無く移流のリスクは低いと判断した。胆振海域と日高海域では5~9月に移流割合が高くなる傾向にあり、移流のリスクが高いと評価した。特に日高海域では6月に移流割合がピークを示し移流のリスクが最も高いと考えられた。

A630 北水試研報 105, 37-41 (2024)

水産研究本部図書出版委員会

委員長 杉西 紀元

委 員 美坂 正 萱場 隆昭 中野 敦博 板谷 和彦

嶋田 宏 奥村 裕弥 高畠 信一 清水 洋平

藤原 真

事務局 髙嶋 孝寛 三坂 尚行 加賀 均

水産研究本部出版物編集委員会

委員長 髙嶋 孝寛

委 員 美坂 正 西田 芳則 萱場 隆昭 吉村 圭三

中野 敦博 秋野 雅樹 藤原 真 下田 和孝

楠田 聡 安藤 大成

事務局 三坂 尚行 加賀 均 (作業補助:武田 奈緒子)

北海道水產試験場研究報告 第105号

2024年3月8日発行 ISSN:2185-3290

編集兼 北海道立総合研究機構水産研究本部

発行者 〒046-8555 北海道余市郡余市町浜中町238

電話 総合案内 0135(23)7451 (総務部総務課)

図書案内 0135(23)8705 (企画調整部企画課)

FAX 0135(23)3141

Hamanaka-cho 238, Yoichi-cho, Hokkaido 046-8555, Japan

印刷所 株式会社 総北海 札幌支社

〒065-0021 札幌市東区北21条東1丁目4番6号

電話 011(731)9500