



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	巡視船「そうや」を用いたオホーツク海における海水観測のあゆみ
Author(s)	豊田, 威信; Toyota, Takenobu
Citation	低温科学, 82, 25-44
Issue Date	2024-03-29
DOI	https://doi.org/10.14943/lowtemsci.82.25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/91849
Type	departmental bulletin paper
File Information	03_p025-044_LT82.pdf



巡視船「そうや」を用いたオホーツク海における 海水観測のあゆみ

豊田 威信^{1), 2)}

2023 年 10 月 12 日受付, 2023 年 12 月 14 日受理

オホーツク海の流水は北海道の冬の風物詩として知られ, 沿岸での観測の歴史は約130年におよぶ。しかしながら, 海水の成長・融解に関わる実態がわかりだしたのは巡視船「そうや」を用いて海上保安庁と低温研の共同観測が開始した1996年以降とあって差し支えないであろう。爾来28年間, COVID-19 感染症対策で中止した2021年を除き観測を継続しており表面熱収支や海水サンプル, 氷盤分布などの解析を通して少しずつ成長・融解の仕組みが解明されつつある。最近では生物地球化学的な海水の役割にも着目しながら観測を実施している。本稿では, これまでの観測のあゆみを振り返り「そうや」観測がオホーツク海, さらに極域の海水に関する知見に果たした役割を概観し, 今後の展望についても考察したい。

Contribution of the sea ice observations with PV ‘Soya’ in the southern Sea of Okhotsk

Takenobu Toyota^{1, 2}

Drifting ice in the Sea of Okhotsk is known widely as one of the winter scenic features in Hokkaido, and the observational history near the coast spans over 130 years. However, it can be said that it is since the cooperative observations with PV “Soya” between Japan Coast Guard and Hokkaido University started in 1996 that the real situation about sea ice growth and melting has been revealed. Since then, the observations have been continued for 28 years except for 2021 when it was canceled due to the COVID-19. Through the analysis of surface heat budget, inner structure of sea ice, floe size distribution and whatever, the various characteristics of sea ice have been elucidated step by step. Recently our focuses are extended to the roles of sea ice in biogeochemistry. In this article, looking back over the past observations, we briefly describe how they contributed to the knowledge of the sea ice in this region and also in the polar regions, and consider the future prospects.

キーワード: オホーツク海の海水, 季節海水域, 海水の物理的性質, 海水の生物地球化学

Sea ice in the Sea of Okhotsk, Seasonal ice zone, Physical properties of sea ice, Sea ice biogeochemistry

1. はじめに

オホーツク海は北太平洋の北西に位置する縁辺海であり, 北半球の冬季海水域の南限(沿岸結氷を除く)に位置す

る。平年値(1991 ~ 2020年平均)で見ると, 冬季オホーツク海の最大海水域面積($1.12 \times 10^6 \text{ km}^2$)は北半球全体の最大海水域面積($15.44 \times 10^6 \text{ km}^2$)の約7%を占め(https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/db/seaice/global/global_

連絡先

豊田 威信

北海道大学 低温科学研究所

〒060-0819 北海道札幌市北区北19条西8丁目

Tel: 011-706-7431

Email: toyota@lowtem.hokudai.ac.jp

1) 北海道大学 低温科学研究所

Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, Sapporo, Japan

2) 北海道大学 低温科学研究所 環オホーツク観測研究センター
Pan-Okhotsk Research Center, Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, Sapporo, Japan



図1：巡視船「そうや」（2022年2月12日ドローンより。撮影者：猪上淳氏）

Figure 1: A photo of P.V. SOYA, taken from a drone by Dr. Jun Inoue on February 12, 2022.

normal.html). 北半球では北極海を除く亜極域に分布する最大の海水域と言える (Granskog et al., 2010). 比較的低緯度(北緯44–60度)に位置しており、北半球の寒極シベリア (<-30℃) と比較的温暖な北太平洋 (>0℃) に挟まれて大気と海洋の循環の影響を受けやすく、その海水域は季節変動も経年変動も大きな海域として知られる (Parkinson & Gratz, 1983; Ohshima et al., 2006). 一方、海水の高アルベドや断熱効果により、オホーツク海海水域の変動は局所的な熱収支への影響のみならず (Inoue et al., 2001; Toyota et al., 2001; Ohshima et al., 2003), 北半球規模の大気循環場にも影響を及ぼすことが知られている (Honda et al., 1999; Screen, 2017; Williams et al., 2021; Ueda et al., 2023). 近年、地球温暖化に伴い北半球全体で海水域面積の減少傾向が明らかになっているが、オホーツク海は北半球の中でも特に減少傾向が著しい海水域の一つである (Nakanowatari et al., 2007; Comiso & Nishio, 2008; Parkinson & Cavalieri, 2008, 2012; Onarheim et al., 2018).

これらのことからオホーツク海およびその周辺の気候システムを考える際に海水は非常に重要な要素であることがわかる。海水は生成の仕方に様々なプロセスがあること、成長の過程で熱力学的特性が変化すること、氷厚は熱力学的にも力学的にも海水密接度と並んで重要な要素であること、海水域を構成する個々の氷盤は大きさも形態も様々で海水力学過程を考える上で本質的であることなどを考えると、海水–大気–海洋システムを理解するうえで人工衛星から見える面的な海水分布特性のみの把握では不十分であり、やはり現場の海水観測を通してこの海域の海水の実態を知る必要があることは明らかである。加えて、海水にはアイスアルジが棲息していて海水下あるいは海水融解後の植物プランクトンの増殖を促し、高緯度の海洋生態系の重要な一次生産者としての役割を

担う働きがある (青田, 2013). 特にオホーツク海南部に位置する知床は海水に関わる豊かな生態系のゆえにユネスコ世界自然遺産に指定されており (<https://whc.unesco.org/en/list/1193/>), 現場観測を通してオホーツク海の海水が生態系に及ぼす影響を監視し明らかにしてゆく必要がある。

以上のように様々な観点からオホーツク海の海水の現場観測が望まれていたが、このために重要なのは観測を継続的に実施するためのプラットフォームである。海上保安庁をはじめ関連機関のご協力により巡視船「そうや」(図1) はオホーツク海の海水研究にプラットフォームとして一定の役割を果たしてきた。観測が開始してから四半世紀が過ぎた今、本稿では観測の成果を振り返ってそれらの意義と今後の展望を考察してみたいと思う。

2. オホーツク海南部の海水観測の歴史

「そうや」観測が始まったところの研究背景を知るために、オホーツク海の海水観測の歴史を振り返っておきたい。オホーツク海沿岸における組織的な海水観測は、北海道の産業と海上交通に重要という開拓使の認識に基づき、網走・根室候所等で1892年1月に始められた (宮川, 1991). 当時の観測項目は結氷初日や流水初終日など、海水の状況についての記述的な記録であった。そのころは海水用語も統一されておらず、観測手法についても手探りの状態であったと推測され、1930年ころまでは海水の状況について記述的な研究が中心であったようである (楠, 1954). ちなみに、国内で海水の術語の定義が初めて行われたのは1939年であった (宮川, 1991). その後、世界気象機関 (WMO) が海水用語を正式に承認したのが1956年、現在標準的に用いられている海水用語の定義が気象庁海洋観測指針の中で出版されたのは1958年であった。

その中でオホーツク海の海水が気候との関係で注目され始めたきっかけは19世紀末～20世紀初頭にかけて数年おきに見舞われた、東北地方と北海道の凶作を伴う冷害 (凶冷) であった (赤川, 1984). 原因解明に向けて、農学関係者を中心に調査が進められ、親潮に流れ出た春季の海水の融け水による低温水とやませによる影響がさかんに議論されるようになった。たとえば、岡田 (1935) はオホーツク海・三陸沖の低水温を春先のオホーツク海・千島付近の海水融解水により強化された親潮に要因を求めている。こういった背景のもと、1934年の冷害を契機として、夏の天候を予測するために1935年3月から農林水産省が中心となってオホーツク海の流水の航空機観測が開

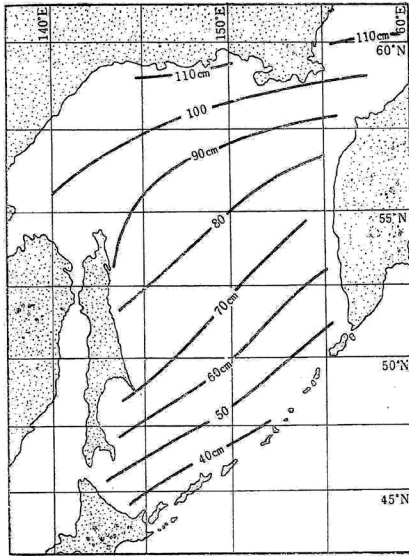


図2：福富(1950b)が推定したオホーツク海全域の最大氷厚分布図(論文より抜粋)

Figure 2: Theoretically estimated maximum ice thickness distribution in the Sea of Okhotsk. (cited from Fukutomi (1950b))

始された。この観測は1944年まで続けられた(航空機観測は戦後1956年に自衛隊機により再開され現在に至る)。このようにして、オホーツク海南部、少なくとも北海道周辺の海水分布についての海水の資料は戦前戦後にかけて局所的とはいえ徐々に蓄積されていった。

一方で、この当時のオホーツク海海水に関する研究で特筆されるのは福富(1950ab)によるオホーツク海沿岸および中央部における結氷についての理論的考察である。塩分が24.7 psu以上の均質な海水の場合、純水とは異なり海水密度は結氷点で最も重い。従って、概ね32 psu以上の塩分をもつオホーツク海では秋口に気温の降下とともに表面が冷やされると対流が生じ、海水全体が結氷点になるまで結氷が起らず、結氷点になる前に春を迎えると海水が生成されないことになる。すなわち、海水ができるためには気象や水深の条件が必要であることを意味する。福富(1950ab)は熱力学的な考察から、均質な海水ではオホーツク海西岸北緯48度以南の水深300m以上の海域では凍結できないと結論づけた。然るに現実にはこれより深い水深の海域でも結氷が生じているのは結氷開始期に表層約40 mにおそらくシベリア大陸起源の河川水流入による対流混合層があるためだと、限られた海洋観測データをもとに推測した。これはのちに田畑(1978)や青田(2013)がオホーツク海で海水ができる理由として指摘した、表面低塩分層の存在という概念の原案となっている(ただし、表層の対流混合層の厚さについてはその後の「そうや」観測から北風応力

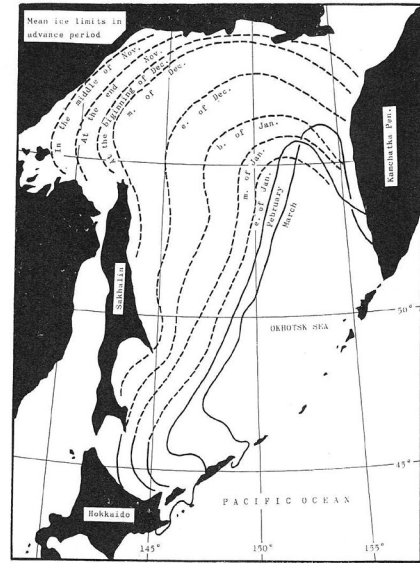


図3：Watanabe(1967)が衛星データなどから推定したオホーツク海海域の1961-66年の平均的な氷縁の季節変化(論文より抜粋)

Figure 3: Representative seasonal evolution of ice edges in the Sea of Okhotsk during 1961-1966, estimated from satellite images. (cited from Watanabe (1967))

によるエクマン輸送の力学的な効果の重要性が示されており(Mizuta et al., 2004)、この点は修正が必要である)。さらに、各海域で結氷開始時期を予測することにより冬期オホーツク海全体のおおよその氷厚分布を推定した(図2)。観測データが限られていた時代に現在の知見と遜色ない結論を導き出した卓見には驚かされる。

このころのわが国の海水に関する知見は楠(1954)や福富ら(1954)に総括されているように、主にオホーツク海を対象とした沿岸の現場観測や理論に基づくものであった。戦後の困難な時期にありながら北海道沿岸に押し寄せる流水について、海水温度や塩分の季節変化、密度の測定方法、機械的性質、うねりとの相互作用、氷盤の運動の観察など、今日でも興味深いテーマが調べられていることには頭が下がる。その後、この流れを汲んでか1960年代中頃までは海水の物質としての特性に注目した基礎研究が盛んであった。強度などの力学的特性は北大低温研の田畑氏、藤野氏、石田氏などによって、比熱などの熱的特性は同じく小野氏によって詳しく調べられた(Ono, 1966)。

1960年代の画期的な出来事は人工衛星による海水観測であろう。世界最初の気象衛星TIROS (Television and Infra-red Observation Satellite) は1960年4月に打ち上げられた。日本で(おそらく世界でも)初めて衛星画像を用いた海水分布の解析が渡辺氏によって行われ(赤川1982)、衛星観測の開始間もない時期にWatanabe (1967)がオホーツク海の海水域分布の季節変化を初めて描出したのは注

表1：巡視船「そうや」を用いたオホーツク海南部の海水観測の概要

Table 1: Summary of sea ice observations with PV SOYA in the southern Sea of Okhotsk

Year	Observation period	Ta (°C)	Ea (hPa)	Ice thickness by video		Ice thickness by ASPeCt				Three major topics
				Hi_v (m)	N	Hi_al (m)	Hi_ar (m)	Hi_am (m)	N	
1996	February 03 - 05	-5.0	3.0	0.18±0.06	153	-	-	-	-	表面熱収支、海水サンプリング、海洋観測
1997	February 02 - 09	-5.4	2.9	0.55±0.23	4119	0.50	2.30	1.01	46	表面熱収支、海水サンプリング、海洋観測
1998	February 04 - 11	-8.1	2.1	0.30±0.13	2910	0.26	1.61	0.54	45	表面熱収支、海水サンプリング、海洋観測
1999	February 03 - 10	-5.0	3.3	0.29±0.20	1658	0.21	1.48	0.36	68	表面熱収支、海水サンプリング、海洋観測
2000	February 13 - 17	-6.7	2.9	0.27±0.13	4697	0.16	1.39	0.44	43	氷厚分布、海水サンプリング、海洋観測
2001	February 17 - 21	-9.8	2.2	0.36±0.19	1553	0.38	2.41	0.80	36	海水サンプリング、大気光学環境、積雪
2002	February 10 - 15	-5.7	3.0	0.45±0.19	1889	0.31	1.59	0.68	52	放射フラックス観測、海水サンプリング
2003	February 06 - 13	-5.2	3.3	0.42±0.25	7118	0.46	2.57	1.15	48	海水サンプリング（バスケット）、氷盤分布
2004	February 06 - 13	-4.1	3.2	0.60±0.26	1860	0.59	2.54	1.33	42	EM氷厚、海水サンプリング、漂流ブイ
2005	February 12 - 16	-10.1	2.0	0.42±0.33	1441	0.33	1.99	0.84	31	EM氷厚、海水サンプリング、表面凹凸観測
2006	February 11 - 15	-6.9	2.8	0.37±0.25	1521	0.18	1.26	0.33	36	EM氷厚、CO ₂ flux、マイクロ波放射計
2007	February 10 - 13	-3.4	3.3	0.43±0.16	1372	0.21	0.99	0.33	32	EM氷厚、マイクロ波放射計、氷上CO ₂ flux
2008	February 09 - 13	-4.8	3.2	0.42±0.19	1108	0.18	1.56	0.47	37	EM氷厚、マイクロ波放射計、表面凹凸観測
2009	February 09 - 12	-4.4	3.7	0.24±0.15	1246	0.16	1.28	0.31	32	EM氷厚、マイクロ波放射計、表面凹凸観測
2010	February 05 - 09	-4.7	3.6	0.31±0.10	887	0.12	0.58	0.17	25	EM氷厚、マイクロ波放射計、海水サンプリング
2011	February 14 - 16	-3.3	3.7	0.50±0.19	1607	0.35	1.50	0.64	16	生物化学、マイクロ波放射計、ALOS検証
2012	February 11 - 14	-8.9	2.3	0.30±0.15	2080	0.24	1.13	0.40	42	生物化学、EM氷厚、マイクロ波放射計
2013	February 25 - March 01	-5.9	3.2	0.41±0.20	2535	0.27	1.46	0.65	44	生物化学、EM氷厚、マイクロ波放射計
2014	February 14 - 18	-4.1	3.9	0.36±0.16	2039	0.26	1.43	0.56	41	生物化学、EM氷厚、マイクロ波放射計
2015	February 13 - 17	-3.1	4.4	0.46±0.20	2036	0.37	1.48	0.85	32	EM氷厚、マイクロ波放射計、フラジリアイス
2016	February 06 - 10	-5.6	3.2	0.19±0.12	1415	0.11	0.80	0.19	33	生物化学、フラジリアイス、ALOS2検証
2017	February 11 - 15	-2.6	4.6	0.38±0.17	1992	0.24	1.43	0.54	47	生物化学、フラジリアイス、ALOS2検証
2018	February 09 - 13	-5.0	3.6	0.46±0.23	3770	0.44	2.50	1.74	35	生物化学、海洋乱流、ドローン氷盤
2019	February 07 - 11	-10.9	1.8	0.17±0.10	2275	0.15	0.99	0.26	41	生物化学、海洋乱流、フラジリアイス
2020	February 10 - 14	-2.1	4.6	0.42±0.16	3037	0.27	1.66	0.72	35	生物化学、波浪観測、ドローン氷盤解析
2021	(cancelled)									
2022	February 11 - 15	-4.5	3.5	0.32±0.13	3632	-	-	-	-	生物化学、雲形成、フラジリアイス
2023	February 10 - 14	-5.3	3.4	0.26±0.12	3176	0.19	2.06	0.59	45	生物化学、波浪ブイ放流、クリオネ
Total		-5.6	3.2	0.36	63126	0.28	1.60	0.64	984	

* 表中、Ta と Ea はそれぞれオホーツク海を航行中に船舶で海面上14.3 m で測定された平均気温と水蒸気圧を表す。

* Hi_v はビデオによる氷厚の(平均)±(標準偏差)、Hi_al, Hi_ar, Hi_am はそれぞれASPeCt 観測から見積もった平坦氷、リッジ氷、全体の平均氷厚を表す。

* N は計測の個数あるいは観測の回数を表す。

* 2021年は感染症のため観測中止、2022年の目視観測は回数が少ないため割愛した。

目される（図3）。衛星観測はその後改良を重ねて1970年に NOAAの現業気象衛星が打ち上げられたあとは全球規模で可視、近赤外、赤外、マイクロ波の波長帯を用いて継続的に海水分布が観測され、日々の変動から季節変化、経年変動まで明らかにされてきたことは周知の通りである。このため1970年は気象庁において衛星等のデータをもとに見積もったオホーツク海海水域面積の統計開始年となっている。ちなみに、オホーツク海海水の監視業務において、1970年は別の特別な意味合いがある。それは択捉島単冠湾で生じた海水による海難事故である。1970年3月、時化を避けるために単冠湾に避難していた日本漁船に太平洋側に流出していた流水が押し寄せて日本の漁船が集団で遭難し、死者・行方不明者30名が発生した。これをきっかけに気象庁や海上保安庁による海水観測通報体制が強化された（日本水路協会，2022）。

一方、海水の物質としての特性に着目した研究は、1966年1月に紋別に沿岸約50 kmの範囲の海水分布を監視する流水観測用レーダーが北海道大学により設置されたのに伴い、よりスケールの大きな海水の特性、すなわち海水の動きやそれに伴う歪などの特性が田畑氏、河村氏、石田

氏、小野氏、青田氏らによって研究されるようになった（流水レーダーは2004年まで存続）。これは1970年代中頃に実施された大がかりな北極域の国際プロジェクト、Arctic Ice Dynamics Joint Experiment (AIDJEX) に刺激を受けて海水の力学的特性に関する研究が活発化したものと推測される。1980年代後半になると流水レーダーで得られたオホーツク海沿岸海水データも蓄積して海水量の年々変動も論じられるようになり、オホーツク海全体の海水面積とは変動特性が異なることも指摘された（青田ほか，1988）。また、北大低温研流水観測施設の青田氏、白澤氏らが中心となって、大気－海水－海洋システムの理解を目指して1986年秋にはオホーツク海に面する紋別港に氷海観測塔を設置して大気境界層の観測も実施された（青田ほか，1987）。同じ目的で同時期、サロマ湖での海水観測も彼らによって継続的に実施されてきた（たとえば石川と小林，1984）。

以上を総括すると、1990年ころまでには衛星、航空機、船舶、それに流水レーダーによる観測研究によってオホーツク海の海水分布の季節変動や年々変動の特性がある程度把握されてきた。海水自体の特性も沿岸付近に限られ

ていたものの、少しずつ知見は蓄積されてきていた。しかしながら、オホーツク海の広い領域における海水の特性はデータがほとんどなかったため推測の域を出ていない状況にあった。

そういった状況の中で1990年代に入ってオホーツク海研究に対する気運は次第に高まってきた。気運の高まりの要因は、我々の身近に位置しながら、いまだに未知の海であること、また、当時気象研究所の研究結果によれば地球温暖化の影響が最も顕著に現れる場所であることであった（若土, 1996）。主役の一つである海水の特性を明らかにしてゆかねばならないという思い、また海洋の分野では広い視野からみて北太平洋亜熱帯循環のほぼ全域に分布する北太平洋中層水の起源がオホーツク海であるという仮説を検証する必要がある。このようにしてオホーツク海の特徴ともいえる低緯度海水域を生み出す環境を把握して全球的気候への関わりを評価することを目的として本格的なオホーツク海研究が開始された。その端緒となるシンポジウム「オホーツク海研究の展望」が関連する研究者約100人を集めて北大低温研で1995年12月に開催され、オホーツク海研究プロジェクトが3つの柱を掲げて立案された。1) 海水の生成・発達・消滅過程の解明、2) 北太平洋中層水の起源の解明、3) 海水域における大気・海洋相互作用の機構の解明（若土ほか, 1996）。「そうや」観測はこの一環として始められた観測であった。

3. 「そうや」観測の概要

前節で述べた背景をもとにオホーツク海のより広範囲な海水特性を把握するために、1996年2月から海上保安庁第一管区海上保安本部の協力を得て巡視船「そうや」を用いた本格的な航海観測が開始された。実施時期は概ね2月上旬～中旬の約一週間の観測である（表1）。それまでの観測データが限られていただけに、当初の目的は比較的シンプルなものであった。海水の特性に関しては、①北半球南限のオホーツク海南部の海水の構造特性には極域海水との違いがあるか、②どのくらいの厚さの海水が分布しているか、③この海域で海水はどのように成長しているか、といった問いかけに答えを見出すことであった。同じく季節海水域が大半を占める南極海水の特性が現場観測から明らかになり始めたのが1980年ころであったので、南極域に比べて約15年のビハインドであったと言える。地理的な特徴に加え、より一般化して季節海水域の振舞を数値海水モデルでどのように表現すべきかを考えるモデル海域という意識は常に根底にあった。一方、

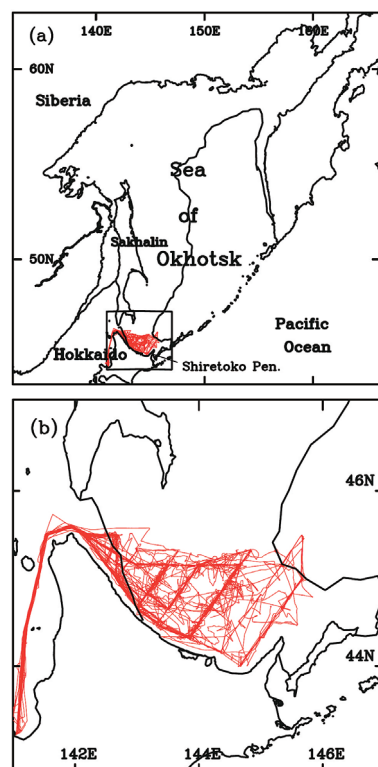


図4：過去28年間（1996～2023年）の「そうや」観測の全航跡図
黒実線は平年（1991～2020年）の2月15日の氷縁位置を示す。

(a) オホーツク海全体図

(b) 図4aの四角で囲った領域を拡大した図

Figure 4: All the ship tracks of SOYA observations in the past 28 years (1996-2023). Black solid lines denote the ice edge on February 15 in the normal year (1991-2020).

(a) The whole map of the Sea of Okhotsk

(b) A magnified map of the square area in Fig. 4a.

大気や海洋との関わりからの観点からは、④海水域は大気の熱収支にどのような影響を及ぼしているか、⑤海水下の海洋にどのような影響を及ぼしているか、⑥北太平洋中層水（NPIW）へのオホーツク海の果たす役割、といった課題が挙げられる。

実施の仕方は、これまで第一管区海上保安本部海洋情報部が長年継続して実施されてきた広域を覆う定線に沿う海洋モニタリング観測に便乗し、基本的には航路上で遭遇する海水を対象に研究調査を実施することとした。巡視船「そうや」は全長98.6 m、幅15.6 m、ヘリを一機搭載した砕氷型巡視船であり厚さ1.0 mの平坦氷に対して砕氷航行する能力をもつ（Matsuzawa et al., 2023）。オホーツク海南部の平坦氷の厚さは0.3～0.5 mであることを考慮すると（Toyota et al., 2004; Fukamachi et al., 2006）、比較的平坦な氷を航行する分には大きなバイアスもなくこの海域の一般的な海水の特性を調べることが可能と考えられる。また、搭載ヘリを用いて上空から比較的広い範囲で

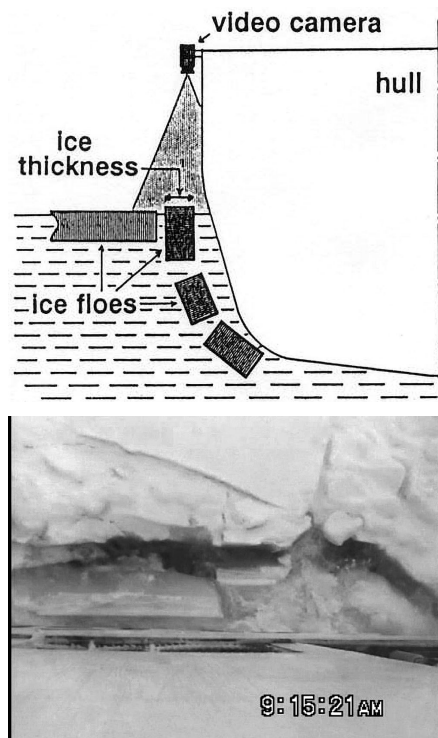


図5：ビデオシステムによる氷厚計測

(a)システムの概略図(Shimoda et al. (1997)より引用)

(b)氷盤が割れて側面を上になっている様子の画像(2023年2月12日の例)

Figure 5: Ice thickness measurement by a video system

(a)A schematic picture of the system. (cited from Shimoda et al. (1997))

(b)One example image on February 12, 2023, showing a broken ice piece turned into the up-side position.

海水の特性を知ることも期待される。これまでの全観測期間に「そうや」が航行した全航路を図4に示す。特定の観測航路に沿う形でオホーツク海南部の広い範囲をカバーしていることがわかる。

長期継続した観測を想定して、観測ポリシーは1) 氷況や大気海洋環境の長期変動を探るためのモニタリング観測、2) 数年間で区切る課題解決型の観測の二つのスタンスをもたせることにした。観測経費は当初は戦略的創造研究推進事業や科研費など、関連する研究者の個々の研究予算を持ち寄って実施されていたが、2015年以降は北大低温研環オホーツク観測研究センターの予算を定常的に確保して実施されるようになった。

1)について具体的には、船上で大気環境のモニタリングとして気温・相対湿度・風・海面気圧、それに期間は限られるが短波・長波放射フラックスを定常観測として実施してきた。また、氷況モニタリングとしては、ビデオシステムを用いた氷厚観測(Shimoda et al., 1997)、それに南極海水向けに確立された国際的なプロトコル(Antarctic

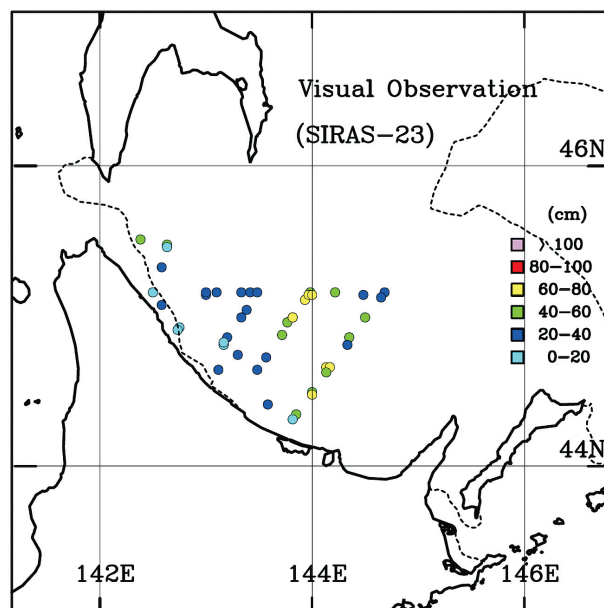


図6：ASPeCtプロトコルによる目視観測地点(2023年2月の例) 各々の地点で最も厚い氷盤の氷厚を色で表した。

Figure 6: One example of visual observation sites in February 2023, conducted according to the ASPeCt protocol. The thickness of the thickest ice at each site is shown by color.

Sea Ice Processes & Climate (ASPeCt) protocol; <http://aspect.antarctica.gov.au/>) に準拠した毎正時の目視観測(Worby and Allison, 1999)を実施してきた。前者は1996年の開始年から実施しており、船の舳先で割れて氷の側面が上向きになった氷盤を対象にしてビデオ画像上の氷厚を一つ一つ計測することにより氷厚を求めるものである(図5)。主に平坦氷を対象とした観測であり、航路に沿って広域の氷厚分布を把握できるのが特徴である。後者は観測時の船舶の周囲半径約1 km以内の氷況を観察し、大まかに3種類以内の氷種に分類して各々の氷種の特徴(氷厚、リッジの高さや割合、氷盤の大きさ、積雪状況など)を記録するものである。アイソスタシーの仮定のもと、リッジも含めた氷厚が推定できる点に特徴がある。南極海の周極的な氷厚分布を初めて明らかにしたのはこの手法であり(Worby et al., 2008)、オホーツク海南部についても同様にリッジを含む氷厚分布の全体的な特性を把握することを目指した。図6に2023年2月の事例を示す。

一方、2)の課題解決型について取り組んだテーマは、

- ・海水が成長する熱的な環境(乱流熱フラックス、表面熱収支、海水成長率)
- ・海水の成長過程(構造解析、氷厚分布、氷盤分布)
- ・衛星データ検証観測(マイクロ波放射計, ALOS/PALSAR, ALOS2/PALSAR2)

- ・生物地球化学的な特徴（化学物質の分析、物質循環における役割）

などがある。これまでに実施した1996～2023年の28年間（2021年は感染症のため中止）の大まかな観測内容とモニタリング観測の結果を表1に示す。多岐にわたる観測に取り組んできたことがわかる。2004年以降、毎年の観測は「巡視船そうや海水観測速報」にまとめて出版・公開されている（<https://sites.google.com/view/pan-okhotsk/home>、出版物）。次節ではこれらのうち、海水に関連するいくつかのトピックを取り上げてその成果を紹介する。

4. 「そうや」観測によって得られた知見

海水の特性に関して前節に掲げたScience questionsに応えるべく様々な試みがなされてきた。この章ではこの海域の海水を特徴づける研究課題として、表面熱収支から見積った結氷環境、海水の構造特性、氷厚分布や氷盤分布の特性、生物地球化学的な特性、それに海水量の長期変動特性について取り上げたい。

4-1 表面熱収支から見積った結氷環境

海水拡大期のオホーツク海南部は冬季に温帯低気圧が東アジアを通過する主経路にあたっており（Chen et al., 1991）、発達した低気圧の影響を受けやすい海域である（Nakamura et al., 1986; Gyakum et al., 1989）。従って、この海域で冬期に大気が海水域から受け取る熱は低気圧活動に有意な影響を及ぼしうするため、海水域の表面熱収支の特徴を観測に基づいて定量的に把握する必要がある。また、表面熱収支の見積もりは海水の結氷速度の推定を可能とし、この海域の結氷環境を特徴づけることにもつながる。海水は生成する際に重い高塩分水（ブライン）を掃き出して沈降させるため、海洋の鉛直循環を理解するうえでも有用な情報となる。しかしながら、当時は季節海水域、特に氷縁域の熱収支の観測データは非常に限られており、確立した手法もない状況にあった。

海水域の表面熱収支を見積もるにあたっては現場気象データのほかに海水に関連して、①海水密接度、②海水のアルベド、③海水厚分布が重要な要素となる。各時刻で船から計測できる範囲や要素は限られるので、約一週間の航海期間中は氷況に大きな変化はないと仮定し、航海期間全体を通して得られたデータを集計して、オホーツク海南部全体の平均的な表面熱収支の見積もりを行うことを目指した。海水データのうち、海水密接度は毎正時に船上から行った目視観測の統計を基とした。海水ア

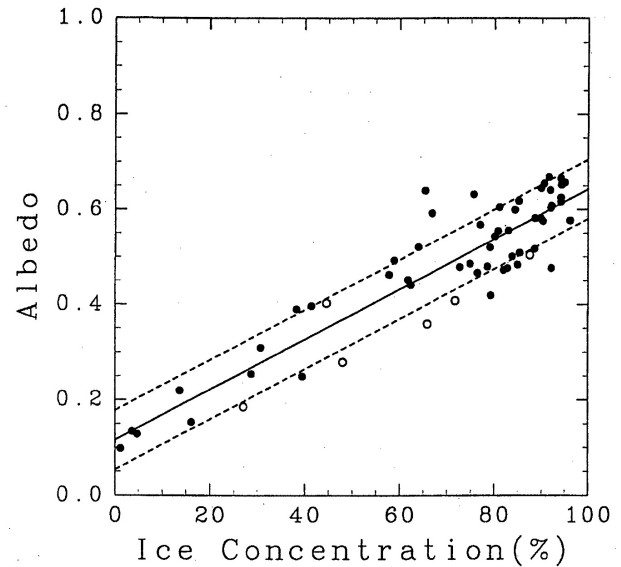


図7：海水域の表面アルベドと海水密接度の相関
白丸は1996年、黒丸は1997年のデータを示す。（Toyota et al. (1999)より抜粋）

Figure 7: Scatter plots between surface albedo and sea ice concentration in the sea ice area.
White and black circles denote the data in 1996 and 1997, respectively. (Cited from Toyota et al. (1999))

ルベドと氷厚分布はこの海域の熱収支解析には特に重要となる。海水アルベドは低緯度ゆえに冬季でも短波放射フラックスの寄与は大きいと予想されるためであり、氷厚分布は海水域の熱収支は（特に極域では）氷厚40 cm以下の薄い海水域の氷厚分布が本質的とされており（Maykut, 1978）、この海域ではこのような薄い海水が卓越するため重要である。

当時海水アルベドの知見は主に安定した定着氷での計測値を基にしており、様々な形態の海水が存在する氷縁域での値はデータがなく新たに計測する必要があった。そこで我々はこの海域の海水の代表的なアルベドを計測することから始めた（Toyota et al., 1999）。船体の影響を最小限にして入射・反射短波放射フラックスを測定するために船首部分に長さ3 mの梯子を取り付け、その先端にジンバル付きの全天日射計を設置して表面アルベドの連続データを取得した。海水密接度はマストに正面方向を撮影するビデオカメラを設置して取得された連続画像データを解析することにより定量的に求め、海水密接度とアルベドの相関から海水（密接度100%）のアルベドは95%の信頼区間で 0.64 ± 0.03 と推定された（図7）。一方、氷厚分布に関しては前節で述べたビデオシステムを用いて各年毎に作成した頻度分布を与えた。

次に、海水域を航海期間中の気象データを時別に平均

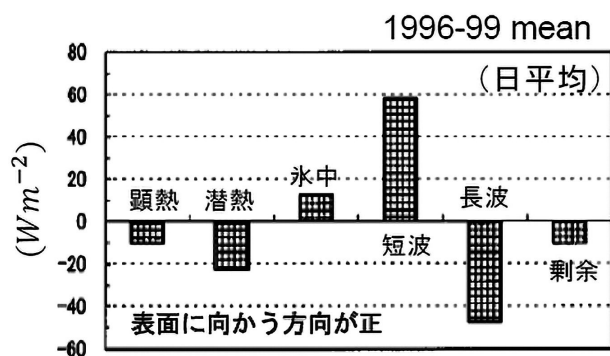


図8：オホーツク海南部海水域における表面熱収支の各成分 (Toyota and Wakatsuchi (2001)より)

Figure 8: Daily mean individual fluxes of the surface heat budget in the sea ice area of the southern Sea of Okhotsk. (cited from Toyota and Wakatsuchi (2001) with some modifications)

してこの時期この海域の各要素の平均的な日変化を求めてMaykut (1978)の手法に倣って表面熱収支の各フラックスを計算した。顕熱フラックスと潜熱フラックスの計算にあたってはバルク法を用い、下向き長波フラックスは雲量と気温から推定する経験式を用いた。海水を10 cm毎の水厚カテゴリーに分けて各々のカテゴリーの表面では乱流(顕熱・潜熱)フラックス、放射フラックス、それに氷中熱伝導フラックスがバランスしているとした。鉛直一次元熱力学モデルを用いて海水表面温度を算出し、これを基に各フラックスを見積もるという手法である。海水の結氷速度は氷中熱伝導フラックスが結氷潜熱に付随したものとみなすことによって計算される。解析期間は1996～1999年の4年間とし、オホーツク海南部を特徴づけるために北部と中部の海域についても気象再解析データセット(ECMWF)を用いて見積もりを行った(Toyota & Wakatsuchi, 2001)。解析結果は下記のように要約される(図8)。

- ・海水が比較的薄いため、南部海水域全体としては乱流熱フラックスを大気へ放出。
- ・乱流熱フラックス($\sim 33 W/m^2$)の半分以上は開放水面とニラス域が担う。
- ・北部や中部と比較した南部海水域の特徴は、短波放射フラックスの寄与が大きいこと。このため、結氷は夜間に限られ日中は融解が生じて一日当たりの結氷量は数cm程度で海水アルベドの変化に対する感度も大きい。

これらの特性は2002年以降に短波長波放射計(EKO MR-40)を用いて上向き・下向きの短波・長波放射フラックスを直接測定した結果からも確かめられた。

また、1998年には気団変質への影響という観点から、レーウィンゾンデを「そうや」から飛揚する観測も行われた(Iwamoto et al., 2001)。「そうや」と知床斜里で得られた気温鉛直プロファイルと寒気移流の上流側のサハリン・ユジノサハリンスクのプロファイルと比較することにより、海水域からどの程度の乱流熱フラックスを受けたかを推定する観測であった。その結果、大気下層約1～2 kmで確かに上記の見積もり程度の熱の供給を海水域から受けていることがわかり、この海域特有の結氷環境の特徴が明らかになった。

4-2 海水の構造特性

かつて福富(1950ab)が指摘したように、また前節でも述べたようにオホーツク海南部は気象条件から海水が熱力学的に成長しうる限界に近い領域である。然るに現場では氷厚が50 cmを超える氷盤が散見される。もちろん寒冷な北方でできた海水の移流もあるだろうが、状況を理解するには、現場海水の構造特性から成長過程を詳しく調べる必要がある。しかしながら船からの海水サンプリングは決して容易な作業ではなかった。当初は停船中に周辺の手ごろな氷塊を直接ロープに括りつけて引き上げるという手法を取ったため、引き上げられる氷塊の厚さには自ずと限界があり、厚さ70 cmほどの海水が精々であった。それでも、1996～2000年の5年間にサンプリングされた約50個の海水について結晶構造や海水塩分、酸素同位体比などを詳細に調べた結果、

- ・フラジライス起源の粒状氷が全氷厚の64%を占め、底面結氷によって生じる柱状氷よりもはるかに卓越していること、
- ・結晶の鉛直構造においてどの年も層状構造(平均層厚：5～10 cm)が顕著であること

が明らかになった(Toyota et al., 2004)。これらの特徴は、この海域の海水の成長過程においては静穏な環境下での底面結氷よりも、擾乱下で生成されるフラジライスの集積と固化(Martin & Kauffman, 1981)、そして薄氷が互いに乗り重なる変形過程(ラフティング)が重要であることを示しており、熱力学的な成長に限られると結論付けた熱収支結果と整合する。示された結晶構造の特性は多年氷が卓越する北極海よりも、同じ季節海水域である南極海の特徴(Lange & Eicken, 1991; Jeffries et al., 1997)に類似していた。

このようにこの海域の海水の構造特性をある程度示すことができたものの、これらは基本的には平坦氷を対象としたものであった。オホーツク海南部にはリッジも数多



図9：バスケットを用いて海水や積雪のサンプリングをしている様子

Figure 9: A photo, showing the sampling observations of sea ice and snow using a basket.

く存在するので、より一般的な海水の構造特性を把握するためには厚い海水を取得できるよう、サンプリング方法を開発する必要があった。試行錯誤のうえ、Ian Allison 博士（豪）から着想を得て低温研技術部の方と協力して生み出されたのがアルミ製のバスケットを用いた観測である。図9に示すように、バスケット本体は1.5 m四方、高さ1 mのアルミ製の枠組みで構成されており、船体のクレーンで吊り下げてヘリ甲板から海水表面に直接人と機材を運ぶ。バスケットは太いロープを介して船上の人とつながっており、風によって回転する動作が最小限になるようにロープで制御する。床の中心部には直径24 cmの孔が2つ空けられていてここからコアラーで海水コアを採取する。2003年2月初めに製作されて以来18年間、無事故で観測研究に大いに貢献してきた。

バスケット観測の導入により厚い海水（最大厚225 cm）のサンプリングが画期的に容易になった。効率の良いサンプリングが海水現場温度の測定を可能にした点も重要である。このことにより、海水温度と塩分の関数として計算されるブライン体積比（海水内の高塩分水が占める体積の割合）の鉛直プロファイルが描けるようになった。ブライン体積比は海水の強度や浸透性の目安となる重要なパラメータであるため、この海域の海水の特性を定量的

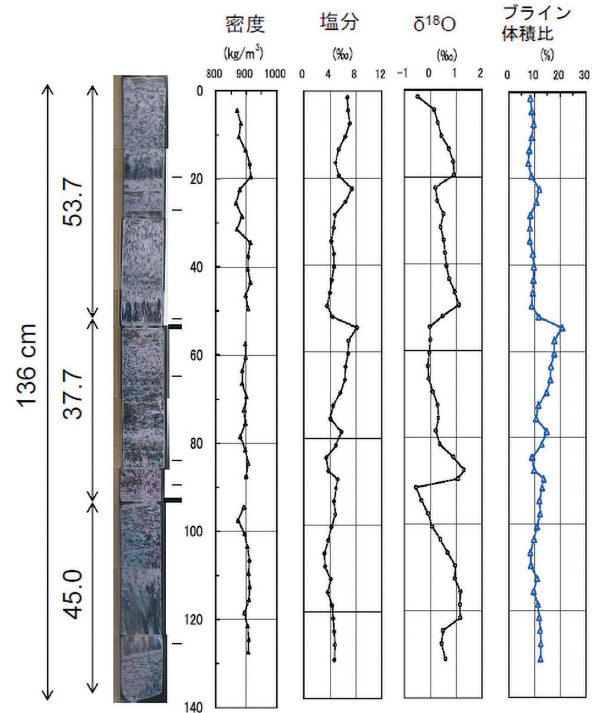


図10：バスケットを用いて採取した海水の内部構造を解析した結果のサンプル

Figure 10: One example of the inner structure of sea ice collected with a basket.

に論じることが可能になった。図10に一例として海水の結晶構造や各種パラメータの鉛直プロファイルを示す。この海水は約40 cm程度のブロックが積み重なったものであり、各ブロックは層状に積み重なった構造が顕著に見られる。ブライン体積比は5%以上であれば浸透性が良いとされており、この海域の海水は全体的に浸透性が良いことが判る。約30本のコアを採取して解析した結果、フラジリアイス起源の粒状氷が卓越していること（約50%）、層状構造が顕著であり（平均層厚12 cm）氷厚発達には氷盤が積み重なる過程が重要であることなどが明らかになり、平坦氷を対象とした解析結果を確認し、より一般化することができた（Toyota et al., 2007）。得られた解析結果をまとめると、この海域のおおよその氷厚発達過程は図11の概念図に要約される。これは同じく季節海水域である南極海に対する概念（Worby et al., 1996）とほぼ合致するものである。

また、バスケット観測は海水上の積雪調査を可能にしたことも重要な点である。積雪は断熱効果により海水の成長量を抑制する働きがある一方で、積雪の荷重が大きくなって積雪－海水境界に海水が浸水して凍結すると雪ごおりの生成により海水の成長を促進する働きもある。また、何よりもほとんどの海水は雪に覆われているため、

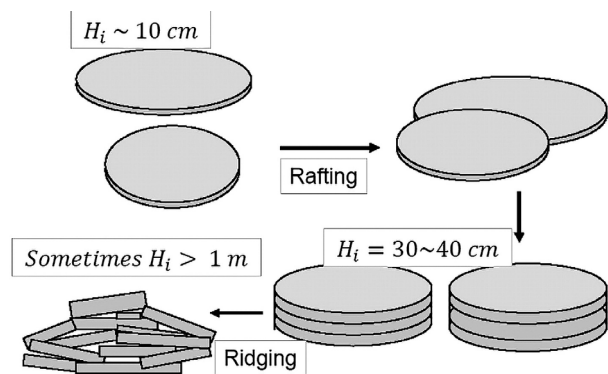


図11：海水の構造から推測される海水の成長過程の概念図

Figure 11: A schematic picture of sea ice growth processes inferred from the sea ice structure obtained.

衛星から見る海水の特性を解釈するには雪の特性を知る必要がある。しかしながら、特にこの海域のように比較的小さな氷盤が卓越する海域では積雪調査は非常に困難であった。数年間にわたる調査の結果、雪ごりの海水全氷厚に対する比率は約10%、平均積雪深は 10 ± 4 cm、平均雪密度は 225 ± 109 kg/m³、最も卓越する雪質は南極海水と同様にしもざらめ雪であることなど積雪の基本的な特性を明らかにできた点も重要な成果と考えられる。

4-3 氷厚分布観測

氷厚分布は海水の体積量を知る上で不可欠であること、海洋一大気間の熱交換を制御すること、海水域の強度を制御すること、氷厚の発達過程を知る上で重要な情報を提供することなど様々な観点から海水の重要な基礎パラメータである。しかしながら同時に計測が難しく長年研究者を悩ませてきた物理量でもある。「そうや」観測では第3章で述べたようにモニタリング観測としてビデオシステムを用いた手法と国際プロトコルに準拠した目視観測を実施してきた。これによりこの海域の氷厚分布を初めて明らかにすることができた。図12は1996～2023年の各年平均値を時系列で示したものである。これらの図から、平均氷厚の年々変動は結構大きく、年によって2倍以上も異なる様子が見える。28年間の平均を取るとビデオ氷厚は 0.36 ± 0.11 m、目視氷厚は平坦氷が 0.28 ± 0.12 m、変形氷（リッジ）が 1.60 ± 0.55 m、両者を含めた平均氷厚が 0.64 ± 0.37 mと見積もられる。ビデオ氷厚は主に平坦氷に対応し、目視の平坦氷厚とほぼ合致している（相関係数0.82）こと、また、目視観測の平均氷厚が北海道紋別沖で係留系を用いて測定された海水氷厚の平均0.60 m（Fukamachi et al., 2006）とほぼ合致することを考慮すると、目視観測

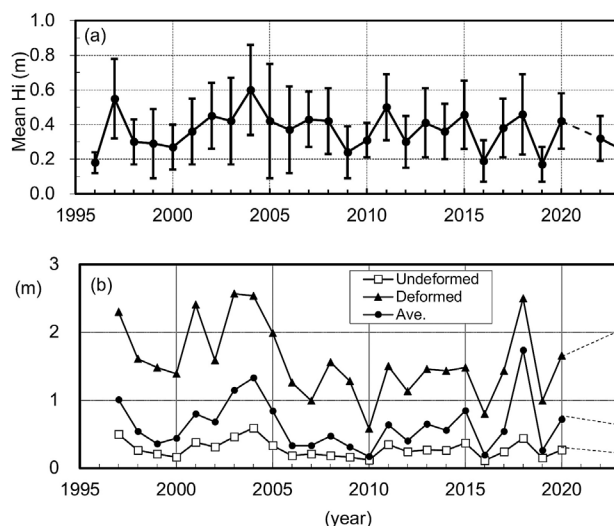


図12：観測された平均氷厚の経年変化図

(a) ビデオシステムで計測された平均氷厚（エラーバーは標準偏差を表す）

(b) 目視観測に基づく氷厚（平坦氷、変形氷、全体平均）

Figure 12: Interannual variability of

(a) Mean ice thickness measured by a video system with an error bar of the standard deviation.

(b) Ice thicknesses estimated from visual observations. Open squares, solid triangles, and solid circles denote level ice, ridged ice, and average, respectively.

といえどもおおそ実情に近いと考えて良いだろう。図12bにおいて注目される点はこの海域の平均氷厚は変形氷の厚さ（すなわち変形過程の度合い）に支配されているという事実である。これは前節で述べた海水成長には力学的な乗り重なりが本質的という結論と符合する。また、目視観測の統計によれば変形氷が海水表面の面積に占める割合は4分の1程度であるものの、体積に換算するとリッジ部に海水体積全体の約7割が含まれる。この特性は南極域の海水とも重なり（Worby et al., 1996）、広く季節海水域の氷厚発達過程において力学過程が本質的であることを示している。なお、図12からは観測期間内では現在のところ北極海水に見られたような（e.g. Kwok, 2018）氷厚の明瞭な減少傾向は見られない。

ただし、変形氷を含む氷厚分布についてはやはり定量的な別の手段による実測が望ましい。1990年代後半から非破壊型の氷厚を計る手段として現場で頻繁に利用されるようになったのは電磁誘導（electromagnetic induction, 略してEM）を用いた手法である。これは、計測装置から磁場を発信して海洋―海水境界面（海水底面）に誘導された電場に伴って生じた二次磁場の強さを装置で測定することにより、装置から海水底面までの距離を推定するという手法であり、海水表面上の装置の高さを距離計で

測定して差し引けば氷厚が得られる。平坦氷もリッジも区別なく比較的厚い氷も含めて連続的に測定できる点に特長がある。航路選択によるバイアスを考慮する必要があるものの、この手法により船舶は走行しながら広域の氷厚分布を定量的に把握することが可能となった (Haas, 1998)。「そうや」でも海上技術安全研究所や北見工業大学が中心となって2004～2015年まで約10年間にわたって実施された (表1)。この手法を運用するにあたり重要なことは、磁場を扱うため計測装置を船体から十分離すこと、それにキャリブレーションと検証を実施することである。前者のために「そうや」設置用の治具を開発し (図13)、後者のために厚さ2 mを超える氷盤上で実測値との比較を行い海水の内部構造も考慮に入れて計測値を氷厚に換算するためのオホーツク海向けのモデルを構築した (Uto et al., 2006)。この観測によりこの海域でも氷厚4 mを超える海水が時折みられることが明らかとなった (Matsuzawa et al., 2023)。

これまでに述べた手法はいずれも有用ではあるもののスナップショットという欠点をもつ。季節を通した氷厚分布の変動を知るにはやはり衛星データを活用するのが望ましい。氷厚0.2 m以下の薄い海水については誘電率の特性の違いから受動型マイクロ波の衛星センサーを用いて推定する手法がすでに確立されており、一方、数mを超えるような厚い海水については衛星高度計を用いてフリーボードを測定し、アイソスタシーの関係から氷厚を推定する手法が確立されている。しかし、この海域のような数10 cm～数mの氷厚が卓越する季節海水域における氷厚を衛星から推定する手段は未だ確立されていない。

そこで我々は「そうや」観測を通してその手法の開発を試みてきた。アイデアは、この海域の海水の発達には力学的な変形過程が卓越することが確かめられたので、海水の厚さに比例して表面の凹凸が発達しているに違いないというものであった。すなわち、表面の凹凸の度合いを測ることにより氷厚を推定できないかと考えた。この目的に最も有望なのは衛星合成開口レーダー (SAR)であろう。表面粗度に対する感度が高く、マイクロ波を用いるので昼夜によらず、雲の影響も少なく100 m程度の高水平分解能データが得られるためである。海水上の乾雪の影響が少ない点も好都合である。これまでの極域での観測から、変形氷を検出するにはC-bandよりもL-bandの方が適していることが知られる (Dierking and Busch, 2006) ため、これまでL-band SARと現場海水の表面凹凸や氷厚との関係性を比較検証する観測を実施してきた。2005年2月には航空機に搭載したL-band SARの観測に合わせて船舶から超

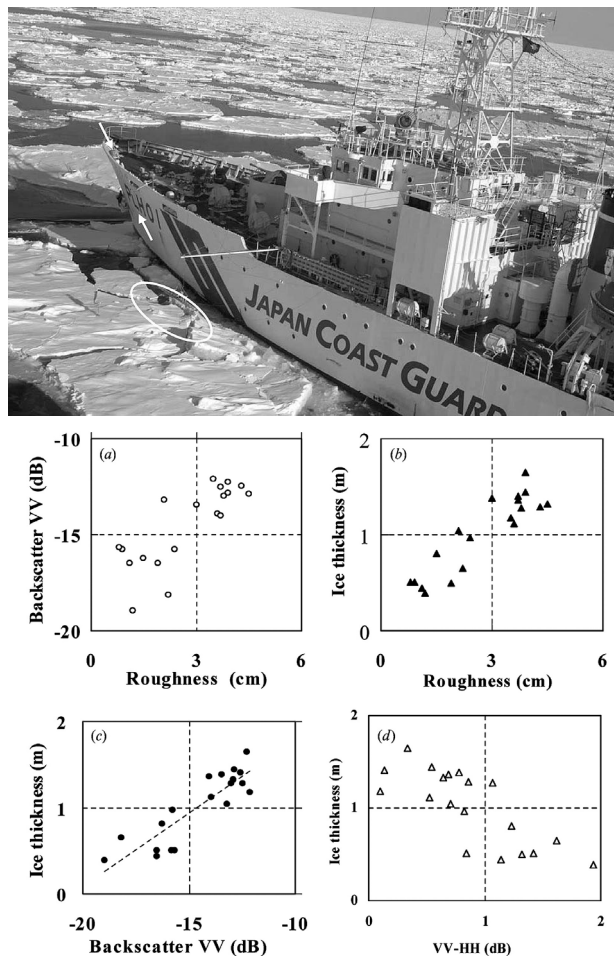


図13：Pi-SAR (L-band SAR) と氷厚・表面凹凸の比較検証観測の結果

写真：EM氷厚観測の様子 (白枠内に吊り下がっているのが計測装置)

(a) 表面凹凸と後方散乱係数 σ_{VV}^0 との相関 (b) 表面凹凸と氷厚との相関 (c) 氷厚と σ_{VV}^0 の相関 (d) 氷厚と $\sigma_{VV}^0 - \sigma_{HH}^0$ の相関 (Toyota et al. (2009) より抜粋)

Figure 13: Comparison between Pi-SAR backscatters (L-band), ice thickness, and surface roughness with a photo, showing ice thickness measurements using an EM sensor (white ellipse), and scatter plots between (a) surface roughness and backscatter coefficient, (b) surface roughness and ice thickness, (c) backscatter coefficient and ice thickness, and (d) polarization ratio (VV-HH) and ice thickness. (Cited from Toyota et al. (2009))

音波距離計を用いて航路に沿った表面凹凸の計測とEM手法による氷厚計測を行い、L-band SARの後方散乱係数が偏波によらず確かに表面凹凸の度合いや氷厚と良い相関をもつことが確かめられた (図13; Toyota et al., 2009)。その後2008年2月にはALOS衛星に搭載されたPALSARと同期観測を行い、海水の表面凹凸や氷厚と良い相関をもつことが確認できた (Toyota et al., 2011a)。さらに事例を増やして約10年間にわたる観測から衛星PALSAR, PALSAR-2を用いて変形氷やニラスを抽出するアルゴリズムも開発

した (Toyota et al., 2021). しかしながら, これらのアルゴリズムは北極海のような多年氷が存在する海域では修正が必要なことも明らかとなり, 現在はより一般化を目指して改良を試みているところである. 広く季節海水域における氷厚発達の様子が衛星から捉えられるようになると数値海水モデルの精度改善につながるので, できればこれからも継続してゆきたいと考えている.

4-4 氷盤の大きさ分布

季節海水域には大小様々な氷盤が存在する. 同じ密接度の海水域で同じ外力が与えられても, 個々の氷盤の大きさや周囲長に応じて移動速度や融解速度が異なるため, 海水域の消長や変動を論ずるにあたっては氷盤の大きさや形状の分布を把握することは重要な課題である. しかしながら, 従来, 解析の煩雑さ等のため, ボーフォート海など一部の海域を除いてあまり調べられてはいなかった (Holt and Martin, 2001). また, これらの海域においてもデータの分解能の限界のため, 大きさ数100 m以上の大きさの氷盤の解析が中心であった.

これらの海域の解析結果によると, 積算個数 $N(r)$ (大きさ r 以上の氷盤の 1km^2 あたりの個数) は良い近似で $N(r) \propto r^{-\alpha}$ と書き表される. このことは解析された氷盤の大きさ分布には自己相似性があり, 特徴的なスケールを持たないことを意味する. ここで α はフラクタル次元に相当し, $r \rightarrow 0$ で氷盤の面積が有限となるためには $\alpha < 2$ であることが要請される (Rothrock and Thorndike, 1984) が, これまでに解析された多くの事例で α は2を超えるという問題を抱えていた. 従って, この分布は100 mよりも小さな大きさのどこかで崩れているはずであり, 観測から確かめる必要があった.

そこで, 大きさ1 m ~ 数kmにわたる幅広い氷盤の大きさ分布を捉えることを目的として, 2003年2月にこの海域でLandsat衛星, 「そうや」搭載ヘリ, 船舶による同期観測を実施した. ヘリコプターと船舶ではビデオカメラを設置して連続撮影を行い, 氷況をモニターした. 解析には, 船舶・ヘリコプターのビデオ画像を合成した帯状画像と, その画像を含むように切り出したLandsat-7/ETM+衛星画像を使用し, オホーツク海南部における38 km×26 kmの領域 (図14a) に分布する氷盤を調べた. 個々の氷盤は各画像で開放水面との輝度の違いから画像解析により抽出された. すなわち, 各画像をグレイスケール化した後, ①閾値を設定して, 各画像を白 (氷盤) と黒 (海) に二値化して氷盤の縁に線を引き, ②氷盤同士の一部が不自然に接合している部分を手動で切り離す, という手順で慎重に

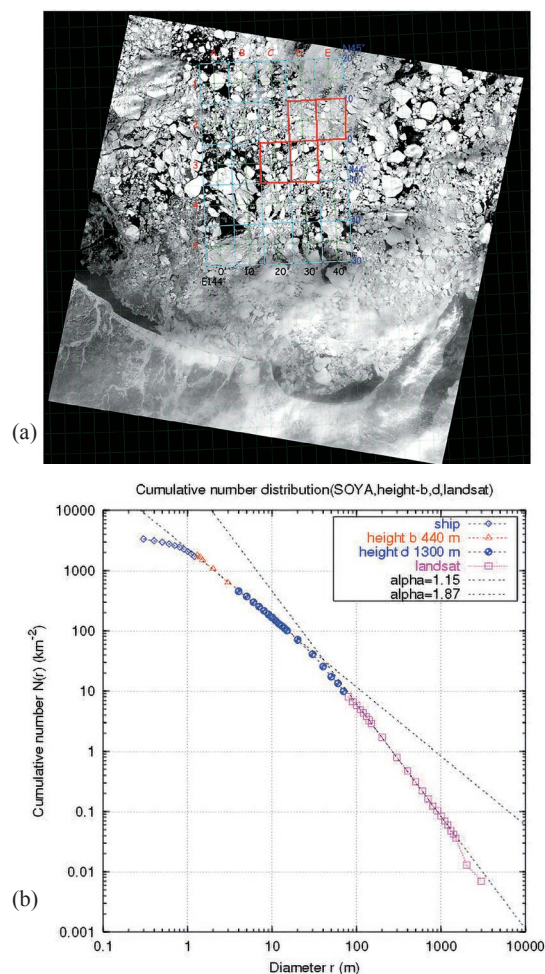


図14：オホーツク海南部の氷盤分布観測

(a) 当日のLandsat-7画像 (赤枠内28 km×38 km が解析領域)

(b) 解析された積算個数分布 (両軸とも対数軸であるため, 直線の傾きが指数 α に相当)

(Toyota et al. (2006)より抜粋)

Figure 14: Measurements of floe size distribution of sea ice in the southern Sea of Okhotsk.

(a) Landsat image on the observation day with a study area (28 km x 38 km) framed by red.

(b) Analyzed cumulative number distribution with logarithmically scaled axes. The slopes of the lines correspond to the exponents of power law functions. (cited from Toyota et al. (2006))

行った. 抽出した個々の氷盤について面積や周囲長等を測定して統計処理を行った結果, $N(r)$ の分布は大きさ約40 mを境に特徴が変化し, 大きさ1 ~ 20 mでは $\alpha = 1.15$ で, 100 m以上の領域に比べて次元の小さな自己相似性の分布となることが確かめられた (図14b; Toyota et al., 2006).

これで当初の面積発散の問題は解決されたのであるが, 以下のような新たな問いが生まれる. ①得られた特徴は広く南極域のような季節海水域に共通した特性なのだろうか? ②大きさ40 m付近の閾値を境として特性が変化する物理的要因は何か? ③そもそも自己相似な氷盤サイズ分

布を形成するメカニズムは何であろうか？④氷盤の大きさのみならず形状にも自己相似性が認められるのであろうか？⑤今回の解析ですら対象から外れた1 m以下の大きさの小さな氷盤には何か異なる特性があるのだろうか？

これらの問いに応えるべく、次のステップとして南極海への応用を試みた。これまで融解期の南極域で大きさ100 m以下の氷盤に焦点を当てた観測が実施され (Lu et al., 2008; Steer et al., 2008), どちらの観測結果も大きさ数10 m以下で $N(r)$ のグラフの傾きが減少することが示されていた。ただし季節が異なり、 α 値がオホーツク海で観測された値よりも大きいため検証が必要とされていた。そこで晩冬期に南極ウェッデル海 (2006年8-10月) と東南極海ウィルクスランド沖 (2007年9-10月) における国際共同観測航海に参加する機会が得られたので同様にヘリを用いた氷盤分布観測を行い、①と④を確かめることができた (Toyota et al., 2011b)。②と③については氷盤分布の観測データのみから答えを見出すのは難しく、氷盤分布の形成に関わる物理量 (たとえば氷厚や波浪データなど) と合わせた研究が必要で今も未解決の問題である。

続いて、⑤に取り組むために2020年2月の「そうや」航海ではじめてドローンを用いて小さな氷盤の分布観測を実施した。観測期間中、天候は穏やかで気温も高く海水温も結氷温度よりも高く融解過程との関わりを見るには適した状況であった。小さな氷盤の大きさ分布は融解過程と密接に関わるため (Perovich and Jones, 2014), 得られた特徴から融解過程についての定量的な解析も試みた。大きさ10 m以下の氷盤を対象として同じ手法で画像解析を行った結果、0.8 m以上の大きさの氷盤の積算個数分布 $N(r)$ は基本的にはべき乗関数 ($\propto r^{-1.35}$) に従うことが分かった。一方、0.8 m以下の氷盤は側面融解と氷盤崩壊が氷盤分布の特性変化に強く影響を及ぼしたものと考えられる (Toyota et al., 2022a)。観測された環境は氷縁域に共通した特徴があるため、これらの結果はこの海域に限らず広く氷縁域の海水融解過程の理解に役立てられることが期待される。

4-5 生物地球化学の特性

海水の特徴の一つは、内部にブラインと呼ばれる高塩分水の液体相が散在し、この液体相は様々な化学物質や栄養塩を含有してアイスアルジのような微細な生物に棲息環境を提供していることである。海水は風や海流の作用により流動して内部の化学物質や生物を運搬する役割を担う。春先に海水の融解とともにこれらが海洋に放出されると植物プランクトンのブルームが生じて繁殖し、極域海洋の一次生産を支える (Arrigo, 2003; Mustapha and

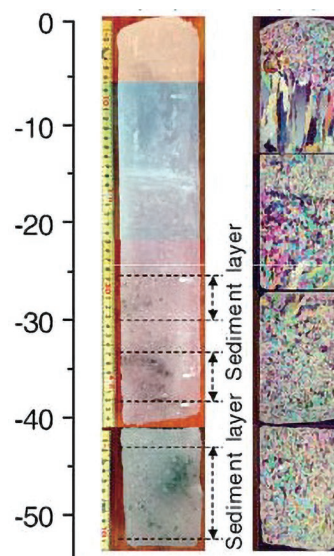


図15：海水内部に見られた有色のセディメント層と海水の結晶構造 (Nomura et al. (2010) より抜粋)

Figure 15: Colored sediment layers and crystal alignments of sampled sea ice. (cited from Nomura et al. (2010))

Saito, 2008)。従来、オホーツク海の海水研究は主に物理的な特性が対象となることが多く、生物や化学に関するデータは非常に限られていた。しかし、海水は生物地球化学的な視点から見るとオホーツク海の物質循環の一翼を担うと考えられるため、この海域の海水にはどのような化学物質や生物が存在して生態系や物質循環にどのように寄与しているのか、観測から実態を明らかにすることは重要である。

観測においては採取時にブラインが脱落してしまわないように効率良く海水をサンプリングする必要があり、バスケット観測がここでも大変有効に機能した。2007～2008年に取得したサンプルを分析した結果、海水にはしばしば有色のセディメント層が見られ (図15)、そこには海水直下の海水に比べて特にリン酸やケイ酸などの栄養塩が顕著に多く含まれること、大気起源の NO_3 や NH_4 が積雪層に多く見られ雪ごおりの生成というプロセスを通して海水内部に取り込まれていることなどが明らかになった (Nomura et al., 2010)。

また、2010～2011年に取得したサンプルからは海水中の鉄濃度が直下の海水に比べて極めて高いことが判明し (図16)、鉄とアルミニウムの濃度の相関が良いことから鉱物起源とも推定された (Kanna et al., 2014)。すでに南極海では海水中に高濃度の鉄が存在することが報告されていたが (e.g. Lannuzel et al., 2007), オホーツク海で実証されたのは初めてであった。このように海水は栄養塩や

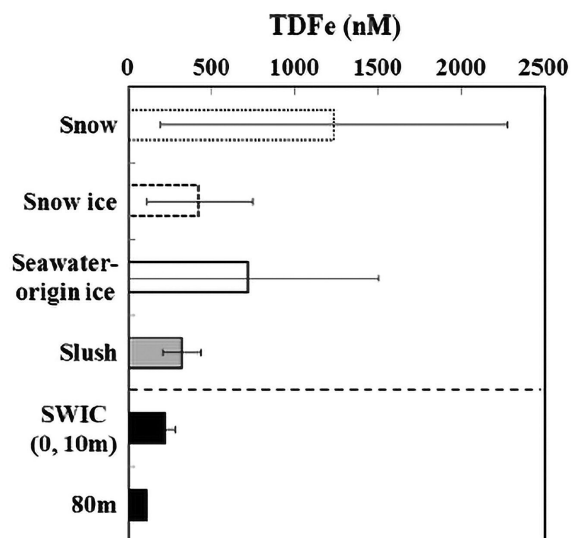


図16: 海水上の積雪、雪ごおり、海水起源の海水、スラッシュ、海水下の海水に含まれる鉄濃度（2010年と2011年に採取された計9つのサンプルの解析結果をまとめたもの）

(Kanna et al. (2014) より抜粋)

Figure 16: Iron concentrations within overlying snow, snow ice, seawater-origin sea ice, slush, underlying seawater, compiled from 9 samples collected in 2010 and 2011. (cited from Kanna et al. (2014))

鉄などを取り込んで輸送する役割が示されたのであるが、とりわけ鉄の輸送は重要な意味がある。鉄は光合成を促進する働きがあるため、春先に海水がオホーツク海南部で融解して放出された大量の鉄が生物活動を活発化することが予想される。海水によって運ばれた鉄が春先の融解後に海洋表層に供給されて植物プランクトンのブルームに寄与していることは、その後同じ海域で実施された海水のない2013年11月と海水に覆われた2014年2月の海洋の鉄濃度鉛直分布との比較観測によって明らかにされた(Kanna et al., 2018)。一方、2019年に実施された観測で採取された海水サンプルの解析および培養実験からは、海水中のアイسالジが植物プランクトンのブルームの際にシーディングの役割を果たしている可能性も指摘された(Yan et al., 2020)。海水中の鉄分とアイسالジのシーディングのどちらの効果がブルームにより多く寄与しているのか興味深い。いずれにせよ、観測海域はオホーツク海北方から東樺太海流に乗って海水が流れ着く終着点である。春先に海水が融解することにより、大量の淡水を供給して海洋構造に影響を与えると同時に、海水中に含まれる微量栄養物質である鉄分やアイسالジを供給することで春季ブルームをもたらし、知床周辺の豊かな生態系を支える要因の一つとなりうることが示唆された。今後さらにデータを収集してこのことを実証してゆく必要がある。

4-6 海水面積・体積の長期変動特性

「そうや」観測は四半世紀を過ぎて年々変動の特性もある程度議論できるデータが蓄積した。気象データからは、年による変動は大きいものの気温($+0.72 \pm 1.33^\circ\text{C}/\text{dec}$)も水蒸気圧($+0.45 \pm 0.39 \text{ hPa}/\text{dec}$)も増加傾向を示し温暖化の兆候が認められた。海水データは厚さや変形氷の情報を含む点にこの観測の新規性があり、衛星から得られる海水面積データを組み合わせると海水体積の年々変動についてもある程度議論が可能となる。世界の海水域を見渡してもこれほど継続した実測の水厚データは稀有なため、この海域の解析結果は他の季節海水域にも参考になるであろう。そこで、これまで得られた観測データを基に、衛星データを組み合わせることでこの海域の氷況の年々変動の特性とその要因を考察した(Toyota et al., 2022b)。ここではその概略を紹介する。

海水面積を求めるための海水密接度データは同一基準でできるだけ長い期間をカバーするデータセットとして、衛星マイクロ波SSM/I-SSMISから導出されたデータ(1988～2020年、水平解像度25 km)を用いた。南部(N46°以南)の特徴を見出すためにオホーツク海全域を解析の対象としてオホーツク海を6つの海域に区分し(図17)、観測期間の代表として2月15日を解析対象日としてそれぞれの海域における海水面積の経年変動を調べた。また、力学的な変動要因を探るためにAMSR-E&2(36GHz)から導出された海水漂流速度データ(2003～2020年、水平解像度60 km)を、熱力学的な海水結氷環境を診断するために気象再解析データ(ERA5, 1988～2020年、0.25度間隔)も併せて解析した。

解析の結果、北緯46度以南の海水面積は顕著な減少傾向を持つ中部・北部($\sim -10\%/\text{decade}$)とは異なる変動特性を示し、観測から昇温傾向が見られたにもかかわらず微増傾向($+0.83\%/\text{decade}$)を示すことがわかった(図17)。オホーツク海全体の減少傾向($-7.13\%/\text{decade}$)を制御するのは北部・中部と言える。海水面積の相関係数でみると、北緯46度以南と99%の有意水準で有意な相関をもつのは直北の北緯46～50度の領域のみであり、北部や中部との相関は低い。

海水体積の多い年は変形氷が卓越した年にほぼ対応しており(図18)、熱力学的な結氷環境にはほとんど依らないことが示された。この海域の海水量を支配する要因として海水の力学的な変形過程の重要性が窺える。漂流速度分布の解析結果からは、①顕著なピークが現れる年は60 km間隔のグリッドデータから計算される単純な収束量では説明がつかず、海水レオロジーの理論(Rothrock,

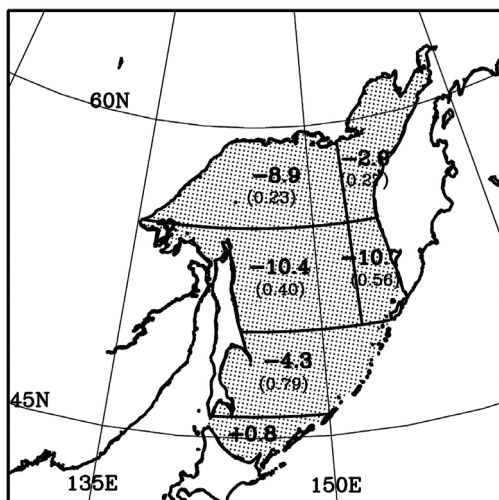


図17: 各海域の結氷期(2月15日)の海水面積の経年変化傾向(単位は % / decade、カッコ内の数字は海水面積について北緯46度以南の領域との相関係数、オホーツク海内の衛星データのグリッドも合わせてプロットした)

Figure 17: Interannual trends of sea ice area in the growth season (February 15) for individual regions (unit: % per decade). The parenthesized numbers denote correlation coefficients between each region and the region south of N46°. The grids of satellite data sets used for calculating sea ice area are also shown by dots.

1975) を基に、変形場におけるシアー成分を考慮する必要があること、②変形氷の発達は平均的な漂流速度場の影響よりも、散発的な変形イベントの有無が効いていそうなことなどがわかった。

以上の結果から、海水の体積量の多寡を本質的に決定づけるのは海水の変形過程と言えそうであるが、変形過程はあくまで海水の再分配であり、新たに海水を生み出すわけではないことには留意する必要がある。一見、矛盾に見えるがこの結果は以下のように解釈される。すなわち、海水が変形過程で乗り重なることにより創り出された開放水面では熱が海面から盛んに放出されるため、より多くの海水が生み出されることになる。このため結果として、変形過程が活発なほど海水量は増えることになる。実際、変形過程が活発に生じるのは低気圧の通過時であり、低気圧の通過後には寒気の流入により開放水面で多くの海水が生成される様子がしばしば観察される。

見方を変えると、現在、海水量の多寡を制御するのは変形過程であったとしても、将来温暖化により結氷そのものが生じにくくなった場合には熱力学的な結氷環境はより本質的に海水体積の支配要因となる可能性がある。この海域の結氷量に最も寄与するのは気温に敏感な顕熱フラックスであることを考慮すると、近い将来、そのような状況は十分想定される。現在はその過渡期であり、活

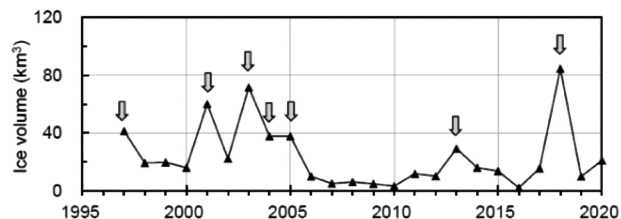


図18: オホーツク海南部(北緯46度以南)の海水体積量の経年変化

海水面積は衛星マイクロ波データから求め、目視観測の結果から得られた氷厚を乗じることにより計算した。矢印は顕著に海水体積が多い年を表す。(Toyota et al. (2022b)より抜粋)

Figure 18: Interannual variability of sea ice volume in the southern Sea of Okhotsk (south of N46°), which was estimated by multiplying satellite-derived sea ice area with average ice thickness obtained from visual observations. Arrows show the significantly prominent ice volume years. (cited from Toyota et al. (2022b))

発な力学過程により海水量が増加するのは海水生産量が減少しつつある状況下での一種の負のフィードバックと見ることができるかもしれない。

ここで得られた結果は氷況変動の予測の難しさを示すとともに、海水の変形過程を数値モデルで再現するためには適切なパラメタリゼーションが必要であることを示唆している。この点は他の季節海水域にも適用可能な結論と言えるであろう。

5. 海水研究の中で「そうや」によるオホーツク海観測が果たしてきた役割

本節では前節で紹介したいくつかの観測成果の海水研究における位置づけについて少し考察してみたい。まず、表面熱収支の解析は北極域を対象に見積もった手法(Maykut, 1978)をオホーツク海南部に適用することにより、北極域とは気候が異なるこの海域の平均的な結氷環境を特徴づけることができた。北極海では1%にも満たない開放水面が表面熱収支に非常に重要な役割を担うことが報告されたが、この海域でもフラックスの値こそ10分の1程度であるものの、やはり開放水面は海水域全体の表面熱収支に本質的な寄与をしており気団変質に影響を及ぼしていることが示された。これらの結果は、その後、より直接的な航空機観測を通してオホーツク海の氷盤間のリードが気団変質に果たす重要性を明らかにしたInoue et al. (2005)の研究、衛星マイクロ波データを用いて表面熱収支をオホーツク海全海域、全季節に拡張したOhshima et al. (2003)、さらに塩分収支も含めてデータセットを構築したNihashi et al. (2012)、開放水面やポリニヤでの

海水生産量がオホーツク海の海水量を決める上で本質的であることを示したKashiwase et al. (2014) などの研究につながる下地となったと見ることもできよう。特に氷縁域での気団変質は極域に共通した重要なテーマである (Renfrew et al., 2021) ので今後も発展性がある課題と考えられる。

海水の構造特性で特に強調したい点は、フラジリアイス起源の粒状氷が卓越していること、それに多くの海水が何枚もの氷盤が重なった構造をもつことである。これらは海水の生成・成長過程において力学的プロセスが非常に重要な役割を果たすことを示す。解析結果は定量的にも南極海水と類似していることから、波や風の影響を受けやすい季節海水域に共通した性質と考えられる。ただし、これらのプロセスは実態がよくわかっていないため、気候モデルの中では十分に表現されておらず海水予測の精度を上げるためには改善が必要とされている課題である。

たとえば、フラジリアイスの生成から粒状氷が生成されるまでは波による輸送・集積、波の減衰、グリースアイスの固化などいくつかの段階があって (Martin and Kauffman, 1981)、実はそう単純ではない。現在、北極海では季節海水域化が進んでおり (Onarheim et al., 2018)、現場海水観測からは粒状氷の割合の増加も報告されている (Wang et al., 2020)。粒状氷は今後益々重要となる可能性があるため現場観測や室内実験などを通して実態を定量的に解明してゆく必要がある。力学的な変形過程 (ラフティングとリッジング) は平均氷厚の経年変動からもその重要性が示され、季節海水域の海水の成長過程や氷厚分布の形成において重要な役割を果たしていることがわかった。しかしながら、観測の困難さもあってこのプロセスは今なお十分には解明されておらず、気候モデルで氷厚変動の予測精度を下げる一因となっている (Rampal et al., 2011)。今後、衛星観測などから変形氷を精度よくモニタリングする手法を開発して変形過程をパラメタライズする研究が必要とされる。我々の観測結果はこれらの課題に対して改めて問題提起したと言えるかもしれない。

結氷過程におけるフラジリアイスの重要性は生物地球化学の観点からもうかがえる。海水内のセディメントを含む有色層は粒子氷の層にみられた (Nomura et al., 2010)。このことはフラジリアイスが生成される際に海底から巻き上がった粒子を取り込んでいることを示唆する。実際、サハリン北部沿岸に設置したADCP係留計からはフラジリアイスが鉛直対流で30 m深まで達していること、水深約100 mの海底からのセディメントの巻き上がりがこの深さ

まで達していることが示された (Ito et al., 2017)。Kanna et al. (2014) が示した海水内の高濃度の鉄もこのようにして海底の鉱物から海水中に取り込まれている可能性がある。これは南極など他海域にも共通する課題なので、詳細なプロセスの解明が期待される。

最後に、氷盤の大きさ分布の解析結果で強調したい点は次の通りである。①直径100 m以下の小さな氷盤の大きさ分布の特性が初めて示されたこと、②氷盤分布の形成にはスケールに応じて複数のプロセスがあること、③小さな氷盤にも自己相似性が見られること。①は以前から海水の移流や融解過程でその重要性が指摘されていたが、限られた領域とはいえ詳細な解析を通して端緒を開くことができた。②は小さな氷盤の分布は波-海水相互作用による破碎過程の重要性を示唆しており、その分野の研究者と共同で南極海水縁域での波-海水相互作用の現場観測の実施に結び付けることができた (Kohout et al., 2014)。③は氷盤分布が組織的な構造を持っておりパラメタリゼーションの実現可能性を示せた点に意味がある。このことは氷盤同士が作用する海水の力学的なふるまいにも自己相似性が存在することを示唆しており、海水レオロジーを考察するうえでも重要な基本的な性質と言える。現在、氷盤分布を気候モデルに予測変数として取り入れる試みもなされており (Roach et al., 2018)、今後の発展が期待される課題である。

6. 結語

前節の議論から、本稿で取り上げたトピックは互いに関連しあっていて海水特性の全体像を理解するには多角的に研究を進める必要があることがわかる。現在、北極海は季節海水域化が進んでおり、また、南極域も海水面積はこれまでの微増傾向から2016年以降は減少傾向に転じて変動が大きい。このことは、これまで海水の安定した状態を前提に成り立っていた概念や定式化を実態に基づいて再考することを促す。すなわち、海水についてより本質的な問題を解決してゆく必要がある。オホーツク海は典型的な季節海水域であり年々変動も激しい。従って、様々な状況の中での季節海水の振る舞いを理解するためのモデル海域とみなすこともできよう。これまでの30年近い観測結果からこの海域ならびに季節海水域の特性が少しずつ見えてきた。また、波-海水相互作用の重要性など新たな問題提起をすることもできた。今後もオホーツク海の海水分布の変動予測のための基礎資料はもちろんのこと、北極・南極域の海水分布の変動予測に繋がる

ような普遍的な研究を進めてゆく必要がある。巡視船「そうや」を用いた観測はそのためのプラットフォームとしての役割を今後も担ってゆくことができれば幸いと考えている。

謝辞

本研究を推進するに当たっては第一管区海上保安本部および巡視船「そうや」の各関係者の皆様には大変お世話になりました。また、北海道大学低温科学研究所の関係者、特に本観測の立ち上げに尽力された若土正暁氏と大島慶一郎氏、協働して観測を実施してきた西岡純氏をはじめとする多くの同僚や大学院生、それに多くの技術職員、事務職員にもお世話になりました。この場を借りて感謝申し上げます。

参考文献

- 青田昌秋, 白澤邦男, 大井正行, 石川正雄, 福士博樹(1987) 北大氷海域気象・海象観測システムとそれによる研究計画について. 低温科学, Ser. A, **46**, 179-183.
- 青田昌秋, 石川正雄, 植松恵理子 (1988) 北海道沿岸の流氷量の変動. 低温科学, Ser. A, **47**, 160-175.
- 青田昌秋 (2013) 流氷の世界, 気象ブックス038, 成山堂, 158PP.
- 赤川正臣 (1982) 海氷の観測, 気象研究ノート, **145**, 247-277.
- 赤川正臣(1984) 海氷と気候, 測候時報, **51**(6), 1-28.
- Arrigo, K.R. (2003) Primary production in sea ice. In Sea Ice. edited by D.N. Thomas and G.S. Dieckmann, Blackwell Science, Oxford, 143-183.
- Chen, S.-J., Y.-H. Kuo, P.-Z. Zhang and Qi-F. Bai (1991) Synoptic climatology of cyclogenesis over East Asia, 1958-1987. *Monthly Weather Review*, **119**(6), 1407-1418. doi:10.1175/1520-0493(1991)119<1407:SCOCOE>2.0.CO;2
- Comiso, J. C. and F. Nishio (2008) Trends in the sea ice cover using enhanced and compatible AMSR-E, SSM/I, and SMMR data. *J. Geophys. Res.*, **113**, C02S07. doi:10.1029/2007JC004257
- Dierking, W. and T. Busch (2006) Sea ice monitoring by L-band SAR: An assessment based on literature and comparisons of JERS-1 and ERS-1 imagery. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **44**(2), 957-970. doi: 10.1109/TGRS.2005.861745
- Fukamachi, Y., G. Mizuta, K. I. Ohshima, T. Toyota, N. Kimura and M. Wakatsuchi (2006) Sea ice thickness in the southwestern Sea of Okhotsk revealed by a moored ice-profiling sonar. *J. Geophys. Res.*, **111**, C09018. doi:10.1029/2005JC003327
- 福富孝治 (1950a) 海水の研究 (第3報) 沿岸海水の生成についての理論的考察. 低温科学, **3**, 131-142.
- 福富孝治 (1950b) 海水の研究 (第4報) オホーツク海中央部に於ける結氷の生成についての理論的考察. **3**, 143-157.
- 福富孝治, 楠宏, 田畑忠司 (1954) 海水の研究 (第21報) — 北海道オホーツク海沿岸の海氷調査一. 低温科学, Ser.A, **13**, 59-103.
- Granskog, M.A., H. Kaartokallio and H. Kuosa (2010) Sea Ice in Non-Polar Regions. In “Sea Ice” 2nd ed., 531-577, Blackwell Publishing Ltd.
- Gyakum, J.R., J.R. Anderson, R.H. Grumm and R.L. Gruner (1989) North Pacific cold-season surface cyclone activity: 1975-1983. *Mon. Weather Rev.*, **117**(6), 1141-1155. doi:10.1175/1520-0493(1989)117<1141:NPCSSC>2.0.CO;2
- Haas, C. (1998) Evaluation of ship-based electromagnetic-inductive thickness measurements of summer sea-ice in the Bellingshausen and Amundsen Seas, Antarctica. *Cold Reg. Sci. Technol.*, **27**, 1-16.
- Holt, B. and S. Martin (2001) The effect of a storm on the 1992 summer sea ice cover of the Beaufort, Chukchi, and East Siberian seas. *J. Geophys. Res.*, **106**(C1), 1017-1032.
- Honda, M., K. Yamazaki, H. Nakamura and K. Takeuchi (1999) Dynamic and thermodynamic characteristics of atmospheric response to anomalous sea-ice extent in the Sea of Okhotsk. *J. Climate*, **12**, 3347-3358.
- Inoue, J., M. Honda and M. Kawashima (2001) Air mass transformation processes over the southwestern region of the ice-covered Sea of Okhotsk during cold air outbreaks. *J. Meteorol. Soc. Japan*, **79**, 657-670.
- Inoue, J., M. Kawashima, Y. Fujiyoshi and M. Wakatsuchi (2005) Aircraft observations of air-mass modification over the Sea of Okhotsk during sea-ice growth. *Boundary-Layer Meteorology*, **117**, 111-129. Doi: 10.1007/s10546-004-3407-y
- 石川信敬, 小林俊一 (1984) 薄い海氷上における熱収支の特徴. 雪氷, **46**(3), 109-119.
- 一般財団法人 日本水路協会 (2022) 日本水路史百五十年 1871-2021, 524pp.
- Ito, M., K.I. Ohshima, Y. Fukamachi, G. Mizuta, Y. Kusumoto and J. Nishioka (2017) Observations of frazil ice formation and upward sediment transport in the Sea of Okhotsk: A

- possible mechanism of iron supply to sea ice. *J. Geophys. Res.-Oceans*, **122**, 788-802. doi:10.1002/2016JC012198
- Iwamoto, K., K. Domon, M. Honda, Y. Tachibana and K. Takeuchi (2001) Estimation of surface heat flux based on rawinsonde observation in the southwestern part of the Sea of Okhotsk under ice-covered condition. *J. Meteor. Soc. Japan*, **79**(2), 687-694.
- Jeffries, M.O., A.P. Worby, K. Morris and W.F. Weeks (1997) Seasonal variations in the properties and structural composition of sea ice and snow cover in the Bellingshausen and Amundsen Seas, Antarctica. *J. Glaciol.*, **43**, 138-151.
- Kanna, N., T. Toyota and J. Nishioka (2014) Iron and macro-nutrient concentrations in sea ice and their impact on the nutritional status of surface waters in the southern Okhotsk Sea. *Prog. Oceanogr.*, **126**, 44-57. Doi:10.1016/j.ocean.2014.04.012
- Kanna, N., Y. Shibano, T. Toyota and J. Nishioka (2018) Winter iron supply processes fueling spring phytoplankton growth in a sub-polar marginal sea, the Sea of Okhotsk: Importance of sea ice and the East Sakhalin Current. *Mar. Chem.*, **206**, 109-120. Doi:10.1016/j.marchem.2018.08.006
- Kashiwase, H., K. I. Ohshima and S. Nihashi (2014) Long-term variation in sea ice production and its relation to the intermediate water in the Sea of Okhotsk. *Prog. Oceanogr.*, **126**, 21-32. Doi: 10.1016/j.pcean.2014.05.004
- Kohout, A.L., M.J.M. Williams, S.M. Dean and M.H. Meylan (2014) Storm-induced sea-ice breakup and the implications for ice extent. *Nature*, **509**, 604-607. doi: 10.1038/nature13262
- 楠宏 (1954) 日本 の 海 氷 研 究 概 要 . 低 温 科 学 物 理 篇 , **12**, 145-159.
- Kwok, R. (2018) Arctic sea ice thickness, volume, and multiyear ice coverage: losses and coupled variability (1958-2018). *Environ. Res. Lett.*, **13**, 105005. Doi: 10.1088/1748-9326/aae3ec
- Lange, M.A. and H. Eicken (1991) Textural characteristics of sea ice and the major mechanism of ice growth in the Weddell Sea. *Ann. Glaciol.*, **15**, 210-215.
- Lannuzel, D., V. Schoemann, J. de Jong, J.-L. Tison and L. Chou (2007) Distribution and biogeochemical behaviour of iron in the East Antarctic sea ice. *Mar. Chem.*, **106**, 18-32. doi:10.1016/j.marchem.2006.06.010
- Lu, P., Z.J. Li, Z.H. Zhang and X.L. Dong (2008) Aerial observations of floe size distribution in the marginal ice zone of summer Prydz Bay. *J. Geophys. Res.*, **113**, C02011, doi:10.1029/2006JC003965.
- Martin, S. and P. Kauffman (1981) A field and laboratory study of wave dumping by grease ice. *J. Glaciol.*, **27**, 283-313.
- Matsuzawa, T., H. Shimoda, T. Takimoto, D. Wako, K. Izumiyama and S. Uto (2023) Full-scale experiments of JCG Patrol Vessel SOYA from 1991 to 2013 in the southern Sea of Okhotsk. *Okhotsk Sea and Polar Oceans Research*, **7**, 7-12.
- Maykut, G.A. (1978) Energy exchange over young sea ice in the central Arctic. *J. Geophys. Res.*, **83**(C7), 3646-3658.
- 宮川和夫 (1991) 網走ニクルの丘から. 月刊気象, **35**(3), 4-6.
- Mizuta, G., K.I. Ohshima, Y. Fukamachi, M. Itoh and M. Wakatsuchi (2004) Winter mixed layer and its yearly variability under sea ice in the southwestern part of the Sea of Okhotsk. *Cont. Shelf Res.*, **24**, 643-657. doi:10.1016/j.csr.2004.01.006
- Mustapha, M.A. and S. Saito (2008) Observation of sea ice interannual variations and spring bloom occurrences at the Japanese scallop farming area in the Okhotsk Sea using satellite imageries. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, **77**, 577-588.
- Nakamura, H., T. Toyota and M. Ohbayashi (1986) Geographical distribution of the ratio of lengths of warm fronts to cold fronts in the northern hemisphere during 1978-1979 winter. *J. Meteor. Soc. Japan*, **64**(4), 519-529.
- Nakanowatari, T., K. I. Ohshima and M. Wakatsuchi (2007) Warming and oxygen decrease of intermediate water in the northwestern North Pacific, originating from the Sea of Okhotsk, 1955-2004. *Geophys. Res. Letters*, **34**, L04602. Doi: 10.1029/2006GL028243
- Nihashi, S., K. I. Ohshima and N. Kimura (2012) Creation of a heat and salt flux dataset associated with sea ice production and melting in the Sea of Okhotsk. *J. Climate*, **25**, 2261-2278. doi: 10.1175/JCLI-D-11-00022.1
- Nomura, D., J. Nishioka, M.A. Granskog, A. Krell, S. Matoba, T. Toyota, H. Hattori and K. Shirasawa (2010) Nutrient distributions associated with snow and sediment-laden layers in sea ice of the southern Sea of Okhotsk. *Mar. Chem.*, **119**, 1-8.
- Ohshima, K. I., T. Watanabe and S. Nihashi (2003) Surface heat budget of the Sea of Okhotsk during 1987-2001 and the role of sea ice on it. *J. Meteor. Soc. Japan*, **81**(4), 653-677.
- Ohshima, K. I., S. Nihashi, E. Hashiya and T. Watanabe (2006) Interannual variability of sea ice area in the Sea of Okhotsk: Importance of surface heat flux in fall. *J. Meteor. Soc. Japan*,

- 84(5), 907-919.
- 岡田武松(1935)気象学, 下巻, 岩波書店, 263-270.
- Onarheim, I. H., T. Eldevik, L. H. Smedsrud and J. C. Stroeve (2018) Seasonal and regional magnification of Arctic sea ice loss. *J. Climate*, **31**, 4917-4932. doi:10.1175/JCLI-D-17-0427.1
- Ono, N. (1966) Specific Heat and Heat of Fusion of Sea Ice, *Proceedings of International Conference on Low Temperature Science*, **1**(1), 599-610.
- Parkinson, C. L. and A. J. Gratz (1983) On the seasonal sea ice cover of the Sea of Okhotsk. *J. Geophys. Res.*, **88**(C5), 2793-2802. doi:10.1029/JC088iC05p02793
- Parkinson, C. L., and D. J. Cavalieri (2008) Arctic sea ice variability and trends, 1979-2006. *J. Geophys. Res.*, **113**, C07003. doi:10.1029/2007JC004558
- Parkinson, C.L. and D.J. Cavalieri (2012) Arctic sea ice variability and trends, 1979-2010. *The Cryosphere*, **6**, 881-889. doi:10.5194/tc-6-881-2012
- Perovich, D.K. and K.F. Jones (2014) The seasonal evolution of sea ice floe size distribution. *J. Geophys. Res.*, **119**, 8767-8777. doi:10.1002/2014JC010136.
- Rampal, P., J. Weiss, C. Dubois and J. - M. Campin (2011) IPCC climate models do not capture Arctic sea ice drift acceleration: Consequences in terms of projected sea ice thinning and decline. *J. Geophys. Res.*, **116**, C00D07. Doi: 10.1029/2011JC007110
- Renfrew, I.A., C. Barrell, A.D. Elvidge, J.K. Brooke, C. Dusch, J.C. King, J. Kristiansen, T. Lachlan Cope, G.W.K. Moore, R.S. Pickart, J. Reuder, I. Sandu, D. Sergeev, A. Terpstra, K. Vague and A. Weiss (2021) An evaluation of surface meteorology and fluxes over the Iceland and Greenland Seas in ERA5 reanalysis: The impact of sea ice distribution. *Q. J. R. Meteorol Soc.*, **147**, 691-712. Doi: 10.1002/qj.3941
- Roach, L.A., C. Horvat, S.M. Dean and C.M. Bitz (2018) An emergent sea ice floe size distribution in a global coupled ocean-sea ice model. *J. Geophys. Res.: Oceans*, **123**, 4322-4337. Doi: 10.1029/s017JC013692
- Rothrock, D.A. (1975) The energetics of the plastic deformation of pack ice by ridging. *J. Geophys. Res.*, **80**(33), 4514-4519.
- Rothrock, D. A. and A.S. Thorndike (1984) Measuring the sea ice floe size distribution. *J. Geophys. Res.*, **89**(C4), 6477-6486.
- Screen, J.A. (2017) Simulated atmospheric response to regional and Pan-Arctic sea ice loss. *J. Clim.*, **30**(11), 3945-3962.
- Doi:10.1175/JCLI-D-16-0197.1
- Shimoda, H., T. Endo, K. Muramoto, N. Ono, T. Takizawa, S. Ushio, T. Kawamura and K. I. Ohshima (1997) Observations of sea-ice conditions in the Antarctic coastal region using ship-board video cameras (in Japanese), *Antarctic Record*, **41**, 355-365.
- Steer, A., A. Worby and P. Heil (2008) Observed changes in sea-ice floe size distribution during early summer in the western Weddell Sea. *Deep-Sea Res. Part II*, **55**, 933-942.
- 田畑忠司(1978)流水：北海道の自然7, 北海道新聞社.
- Toyota, T., J. Ukita, K. I. Ohshima and M. Watsuchi (1999) A measurement of sea ice albedo over the southern Okhotsk Sea. *J. Meteor. Soc. Japan*, **77**(1), 117-133.
- Toyota, T. and M. Wakatsuchi (2001) Characteristics of the surface heat budget during the ice-growth season in the southern Sea of Okhotsk. *Ann. Glaciol.*, **33**, 230-236.
- Toyota, T., T. Kawamura, K.I. Ohshima, H. Shimoda and M. Wakatsuchi (2004) Thickness distribution, texture and stratigraphy, and a simple probabilistic model for dynamical thickening of sea ice in the southern Sea of Okhotsk. *J. Geophys. Res. - Oceans*, **109**, C06001. doi:10.1029/2003JC002090
- Toyota, T., S. Takatsuji and M. Nakayama (2006) Characteristics of sea ice floe size distribution in the seasonal ice zone. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L02616, doi:10.1029/2005GL024556
- Toyota, T., S. Takatsuji, K. Tateyama, K. Naoki and K. I. Ohshima (2007) Properties of sea ice and overlying snow in the southern Sea of Okhotsk. *J. Oceanogr.*, **63**, 393 - 411.
- Toyota, T., K. Nakamura, S. Uto, K. I. Ohshima and N. Ebuchi (2009) Retrieval of sea ice thickness distribution in the seasonal ice zone from airborne L-band SAR. *Int. J. Remote Sens.*, **30**(12), 3171-3189. Doi:10.1080/01431160802558790
- Toyota, T., S. Ono, K. Cho and K. I. Ohshima (2011a) Retrieval of sea-ice thickness distribution in the Sea of Okhotsk from ALOS/PALSAR backscatter data. *Ann. Glaciol.*, **52**(57), 177-184.
- Toyota, T., Haas, C., Tamura, T. (2011b) Size distribution and shape properties of relatively small sea-ice floes in the Antarctic marginal ice zone in late winter. *Deep-Sea Res. II*, **58**, 1182-1193.
- Toyota, T., J. Ishiyama and N. Kimura (2021) Measuring deformed sea ice in seasonal ice zones using L-Band SAR images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **59**(11), 9361-9381. Doi: 10.1109/

- TGRS.2020.3043335
- Toyota, T., Y. Arihara, T. Waseda, M. Ito and J. Nishioka (2022a) Observations of ice cakes with a drone in the southern Sea of Okhotsk. *Proceedings of the 36th International Symposium on Okhotsk Sea & Polar Oceans 2022*, Mombetsu, Japan, February 21-23, 237-240.
- Toyota, T., N. Kimura, J. Nishioka, M. Ito, D. Nomura and H. Mitsudera (2022b) The interannual variability of sea ice area, thickness, and volume in the southern Sea of Okhotsk and its likely factors. *J. Geophys. Res.*, **127**, e2022JC019069. Doi: 10.1029/JC019069
- Ueda, H., M. Kuramochi and H. Mitsudera (2023) Interannual variations of sea-ice extent in the Okhotsk Sea – Pan-Okhotsk climate system perspective. *Atmosphere-Ocean*, **61**(4), 234-245. Doi: 10.1080/07055900.2023.2175639
- Uto, S., T. Toyota, H. Shimoda, K. Tateyama and K. Shirasawa (2006) Ship-borne electromagnetic induction sounding of sea-ice thickness in the southern Sea of Okhotsk. *Ann. Glaciol.*, **44**, 253-260.
- 若土正暁 (1996) オホーツク海研究の展望. 月刊海洋, **28**(9), 523-526
- 若土正暁, 大島慶一郎, 竹内謙介 (1996) オホーツク海研究プロジェクトの提案. 月刊海洋, **28**(9), 579-582.
- Wang, Q., P. Lu, M. Lepparanta, B. Cheng, G. Zhang and Z. Li (2020) Physical properties of summer sea ice in the Pacific sector of the Arctic during 2008-2018. *J. Geophys. Res.*, **125**(9), doi:10.1029/2020JC016371.
- Watanabe, K. (1967) Summary of drift ice in the Okhotsk Sea, Proceedings of Sapporo Conference 1966, Part I, *Physics of Snow and Ice*, published by Institute of Low Temperature Science, 667-686.
- Williams, M.Z., M. Gervais and C. E. Forest (2021) Causes and impacts of sea ice variability in the Sea of Okhotsk using CESM-LE. *Clim. Dyn.*, **56**, 2007-2021. doi:10.1007/s00382-020-05572-0
- Worby, A. P., M. O. Jeffries, W. F. Weeks, K. Morris and R. Jana (1996) The thickness distribution of sea ice and snow cover during late winter in the Bellingshausen and Amundsen Seas, Antarctica. *J. Geophys. Res.*, **101**, 28,441-28,455.
- Worby, A.P. and I. Allison (1999) A technique for making ship-based observations of Antarctic sea ice thickness and characteristics. Part I: Observational technique and results. *Antarctic Cooperative Research Centre Research Report*, **14**, 63 pp., University of Tasmania, Hobart, Australia.
- Worby, A.P., C.A. Geiger, M.J. Paget, M.L. Van Woert, S.F. Ackley and T.L. Deliberty (2008) Thickness distribution of Antarctic sea ice. *J. Geophys. Res.*, **113**, C05S92, doi:10.1029/2007JC004254.
- Yan, D., K. Yoshida, J. Nishioka, M. Ito, T. Toyota and K. Suzuki (2020) Response to sea ice melt indicates high seeding potential of the ice diatom *Thalassiosira* to spring phytoplankton blooms: a laboratory study on an ice algal community from the Sea of Okhotsk. *Front. Mar. Sci.*, **7**, 613. Doi: 10.3389/fmars.2020.00613