

第10章 海氷

観測結果

- 北極域の海氷域面積の年最小値は 10 年当たり 85 万 km²、オホーツク海の海氷域面積の年最大値は 10 年当たり 5.1 万 km² の割合で、それぞれ有意に減少している。

将来予測

- 21 世紀末のオホーツク海の海氷面積は 20 世紀末に比べ有意に減少し（確信度が高い）、2°C 上昇シナリオ（RCP2.6）で 32 ± 42%、4°C 上昇シナリオ（RCP8.5）で 78 ± 21% 減少すると予測されている。

10.1 世界

10.1.1 観測結果

海氷は、アルベドの変化等を介して高緯度域における気候場全体へ大きな影響を及ぼす重要な気候要素である。地球温暖化に伴う海氷面積の減少に対して、気候場への様々なフィードバック機構が提案されており、それぞれ温暖化傾向に異なる影響を及ぼすと考えられている。例えば、高アルベドの積雪・海氷が融解して低アルベドの海面が露出することで、地球表面の熱吸収が増え、地球温暖化に正のフィードバックとなる（Curry et al., 1995）。

気象庁では、人工衛星による観測に基づき北極域（北緯 40 度以北）及び南極域（南緯 50 度以南）の海氷域面積を算出している¹⁰¹。

北極域の海氷域面積は、1979 年以降、長期的に減少している（信頼水準 99% で統計的に有意）。特に、年最小値は減少が顕著で、1979 年から 2024 年までの期間において 10 年当たり 85 万 km²（日本の面積の約 2.3 倍）の減少であった。

南極域の海氷域面積には変化傾向が確認できない（図 10.1.1）。

IPCC (2021) では、1979～1988 年と 2010～2019 年との間の北極域の海氷面積¹⁰²の減少（9 月は約 40%、3 月は約 10% の減少）の主な駆動要因は人間の影響である 可能性が非常に高い {SPM A.1.5}、また、2011～2020 年の北極域の年平均海氷面積は少なくとも 1850 年以降で最小規模に達し（確信度が高い）ており、晩夏の北極域の海氷面積は少なくとも過去千年間のどの時期よりも小さかった（確信度が中程度） {SPM A.2.3}、としている。一方、南極域の海氷面積については、地域により相反する変化傾向が見られることや、内部変動が大きいことから、1979 年から 2020 年の間に有意な変化傾向はなかった {SPM A.1.5}、としている。

101 気象庁の観測結果では、人工衛星による観測から北極域と南極域の海氷域面積（海氷密接度（海氷が海面を占める割合）が 15% 以上の海域の面積）を算出しており、同一の特性を持つセンサーによる衛星データが長期間継続して入手可能となった 1979 年以降のデータから、海氷域面積の長期的な変化傾向を求めている。気象庁で海氷解析を行っている北極域と南極域の範囲については、気象庁ホームページ「北極域と南極域の海氷解析の解説」（https://www.data.jma.go.jp/kaiyou/db/seaice/global/global_analyzed.html）を参照。

102 IPCC (2021) では海氷密接度 15% 以上のグリッドの面積（海氷域面積）ではなく、総海氷面積（海氷面積）が議論されている（Notz et al., 2020）{9.3.1}。以下ではそれに倣う。

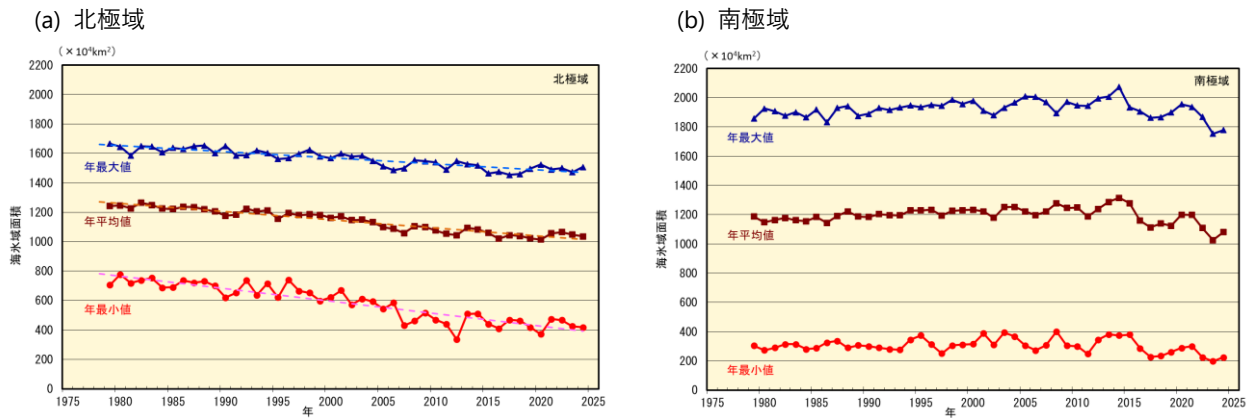


図 10.1.1 (a) 北極域と (b) 南極域の海氷域面積の年々変動 (1979～2024 年)

実線は海氷域面積 (上から順に、年最大値、年平均値、年最小値) の年々変動、破線は各々の長期変化傾向を示す。

10.1.2 将来予測

IPCC (2021) によると、21 世紀の間に北極海の海氷面積は全球気温の変化に依存して減少する可能性が高い。その程度は温暖化シナリオに依存する。例えば、北極海の海氷面積は、20 世紀末 (1995～2014 年) から 21 世紀末 (2081～2100 年) にかけて、3 月 (年最大値) 及び 9 月 (年最小値) には 2℃ 上昇シナリオ (SSP1-2.6) でそれぞれ 14.2 (10.6～25.7) 及び 1.7 (0.0～6.0) $\times 10^6$ km²、4℃ 上昇シナリオ (SSP5-8.5) でそれぞれ 9.7 (3.1～21.6) 及び 0.3 (0.0～2.2) $\times 10^6$ km² にまで減少と予測される (括弧内は 5～95%信頼区間)。また、4℃ 上昇及び中程度の温暖化シナリオ (SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5) では、21 世紀半ばには夏季に海氷がほとんどない年が現れ、21 世紀末までには夏季にほぼ海氷が張らなくなるとの予測がなされている (確信度が高い) (図 10.1.2) {4.3.2.1, 9.3.1}。また、南極の海氷面積に関しては、モデルによる観測結果の再現性が低いうえに、将来予測もモデル間のばらつきが大きいことから、確信度が低い {9.3.2}。

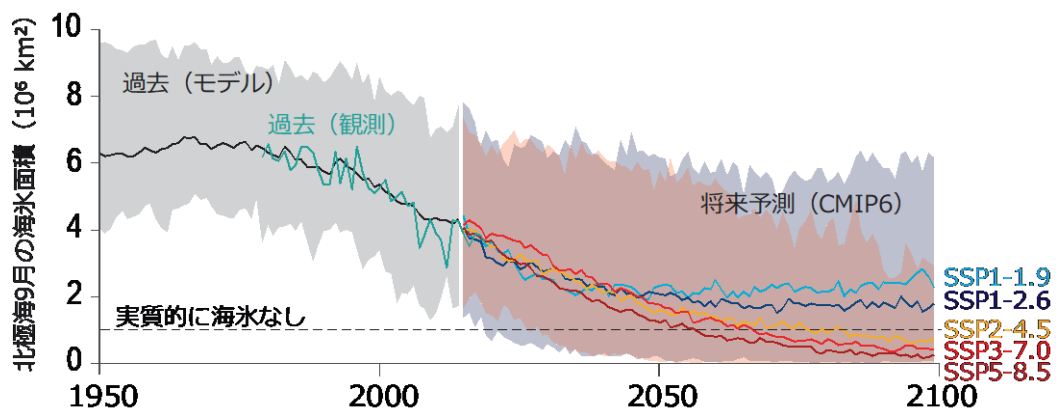


図 10.1.2 CMIP6 モデル及び観測データの北極海における 9 月の海氷面積

陰影は過去再現実験 (灰) と将来予測実験 (青: SSP1-2.6、赤: SSP3-7.0) のモデル間のばらつきを表す。
(IPCC, 2021; Figure TS.8(c) を改変・和訳・転載。)

10.2 日本

10.2.1 観測結果

(1) オホーツク海の海氷域面積

気象庁では、北海道の冬季の気候に大きな影響を与えていると考えられるオホーツク海の海氷について、1971 年から衛星画像を用いた海氷解析により海氷域面積を求めているほか、北海道沿岸の気象官署において 2021 年まで 50 年以上にわたる目視観測を実施していた。なお、オホーツク海の海氷域面積と北海道における沿岸海氷観測については、前年 12 月から当年 5 月までの期間で年の統計を取っている。

オホーツク海の年最大海氷域面積は、地域的な気温、風や海水温の変化による影響を強く受け、年ごとに大きく変動しているが、長期的に見ると、1971 年から 2024 年までの期間において、10 年当たり 5.1 万 km^2 の海氷域が消失している（図 10.2.1）（信頼水準 99% で統計的に有意）。この値は九州と四国を合わせた面積とほぼ同じで、オホーツク海の全面積の 3.2% に相当する。

現時点では統計期間が 50 年程度に限られており、年々変動が大きいオホーツク海の海氷域面積の長期変化傾向と地球温暖化との関連性をより確実に評価するためには、今後の更なるデータの蓄積が必要である。

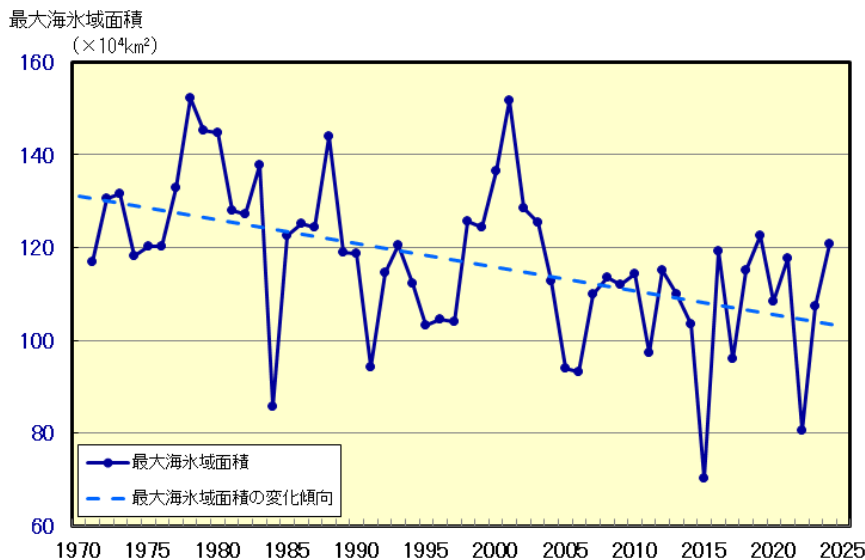


図 10.2.1 オホーツク海の最大海氷域面積の経年変化（1971～2024 年）

実線は最大海氷域面積の経年変化、破線は長期変化傾向を示す。

(2) 北海道沿岸の流氷

目視によるオホーツク海沿岸海氷観測を実施していた網走、北見枝幸、根室について、観測データがそろっている 1946 年から 2021 年までを見ると、北海道沿岸で流氷が観測される頻度が最も高い網走では、流氷初日（視界内の海面で流氷が見られた最初の日）が次第に遅くなっており、流氷終日（同最後の日）も次第に早まる傾向が現れている。流氷初日は 10 年当たり 1.3 日遅くなっており（信頼水準 95% で統計的に有意）、流氷終日は 10 年当たり 3.6 日早まっている（信頼水準 99% で統計的に有意）。（図 10.2.2）。

青田ほか（1992）は、北海道沿岸における 1969 年から 1992 年までの各年の 1 月から 5 月までの海氷の観測結果から、1989 年以降は海氷の勢力が著しく劣勢となっており、当該 4 年間の北海道オホーツク海沿岸の年平均気温及び冬季（1～3 月）の平均気温が直近 101 年間の平均と比べ高くなっていることを指摘した。また、Takahashi et al. (2011) は、1995 年から 2009 年までの観測データから、北海道沿岸の流氷期間と気温との間に高い相関があることを示し、今後気温の上昇幅によっては北海道沿岸に流氷がやって来なくなる可能性を示唆した。Toyoda et al. (2022) は、アリューシャン低気圧の強さの指標として用いられる北太平洋指数が、オホーツク海の 1980 年代以降の海氷変動を 10 年単位の時間スケールで示す確実な指標であることを示唆し、特に、流氷初日の変動は、オホーツク海上空の南北風の偏差を伴うアリューシャン低気圧の変動と、1 月の日本付近の気温の変動によること、流氷終日の変動はアリューシャン低気圧の変動に起因し、その結果として生じたシベリア沿岸を除くオホーツク海の海氷域の変動が 4 月のオホーツク海上空の気温に影響を与えたことを指摘した。

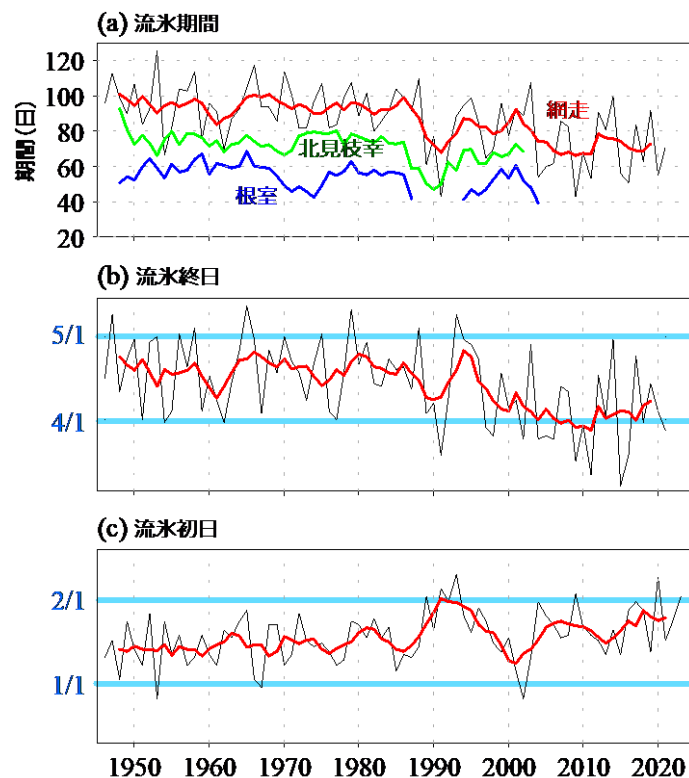


図 10.2.2 北海道オホーツク海沿岸で観測されたデータの経年変化

(a) 流氷期間（網走：1946～2021 年、北見枝幸：1946～2004 年、根室：1946～2004）、(b) 網走の流氷終日（1946～2021 年）、(c) 網走の流氷初日（1946～2023 年）。黒線は年ごとの網走の観測結果、赤線は網走、緑線は北見枝幸、青は根室の 5 年移動平均した観測結果を示す。

10.2.2 将来予測

オホーツク海は季節海氷域¹⁰³である。季節的に1年で最大となる3月の海氷面積は、『気候予測データセット 2022』に含まれる日本域海洋予測データ（付録 A.2.2、コラム 4 参照）による予測では、20 世紀末（1986～2005 年平均）から 21 世紀末（2081～2100 年平均）にかけて減少すると見られる（確信度が高い）。これは、観測の長期変化傾向や気温・海水温の結合モデル相互比較プロジェクト第 6 期（CMIP6）モデル予測とも整合的な結果である。

減少の割合は、2°C 上昇シナリオ（RCP2.6）では $32 \pm 42\%$ 、4°C 上昇シナリオ（RCP8.5）では $78 \pm 21\%$ である（図 10.2.3）。ここで、不確実性の幅は Wakamatsu et al. (2017) に基づく標準偏差を示す。これらの見積もりは北極海の海氷面積の減少率より大きい値となっている。ただし、2°C 上昇シナリオ（RCP2.6）における減少の程度は、現在気候の年々変動の範囲内である。4°C 上昇シナリオ（RCP8.5）では、予測の不確実性（年々変動に加えモデル誤差を含む）に比べても顕著な減少であり、現在気候では経験していないほど海氷面積が小さくなる年が将来的に到来すると考えられる。4°C 上昇シナリオ（RCP8.5）では、オホーツク海の手氷面積の減少は結氷期を通じて有意である。また、海氷が存在する期間の将来変化も明瞭であり、結氷時期が 11 月から 12 月に遅れる一方、海氷が完全に融解する時期が 6 月から 5 月に早まる予測結果となっている。しかしながら、現在気候におけるモデルのバイアス¹⁰⁴（図 付録 A.3.2 参照）を考慮すると、これらの時期の予測の確信度は低い。

形成域であるシベリア沿岸における海氷生産量が減少することに伴い、下流の北海道沿岸での海氷量も減少すると予測される。3 月における北海道沿岸域の手氷密接度は、20 世紀末の 0.5～0.7 から、21 世紀末には、2°C 上昇シナリオ（RCP2.6）で 0.1～0.4、4°C 上昇シナリオ（RCP8.5）では 0.1 以下にまで減少する（図 10.2.4）。これも同様に確信度は低い。

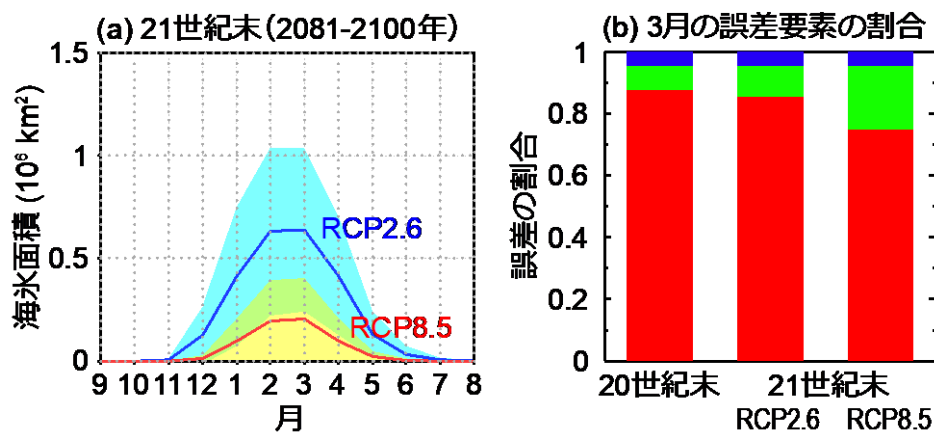


図 10.2.3 日本域海洋予測データによる 21 世紀末におけるオホーツク海の手氷面積の将来予測

(a) 21 世紀末の季節変化。陰影は Wakamatsu et al. (2017) に基づく標準偏差を示す。(b) 3 月の誤差の各要素の割合。赤がモデル間の相違、緑が年々変動、青がサンプル数の少なさに起因する不確実性（付録 B.1.3 を参照）。

103 冬季のみ海氷がある海域

104 モデルごとに異なる特性を反映した系統的な偏り

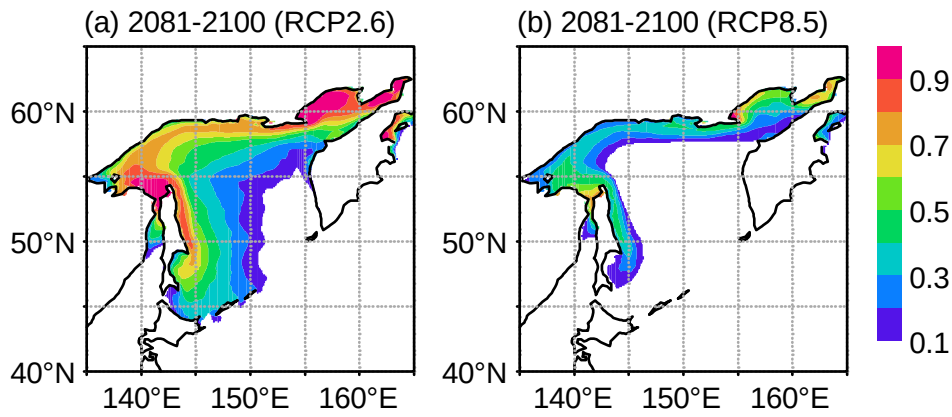


図 10.2.4 日本域海洋予測データによる 21 世紀末における 3 月の海水氷密度分布の将来予測
(a) 2°C 上昇シナリオ (RCP2.6) 及び (b) 4°C 上昇シナリオ (RCP8.5) での予測結果。

網走地方気象台など気象官署における海水氷密度の長期観測を基にした研究 (Aota, 1999; Takahashi et al., 2011) に倣い、網走に対応するモデルグリッドにおける海水氷密度の年積算値 (前年の結氷期から積算; 各日の海水氷密度×日数で%日の単位となる) を示す (図 10.2.5)。網走における海水量の経年変動は道東沿岸の広い範囲 (北見枝幸から根室) の海水量を代表すると考えられる (Toyoda et al., 2022)。網走での海水量は 20 世紀末には約 5000%日であり、モデルの不確実性が高いものの、長期観測の結果とおおよそ整合的であると言える。21 世紀末には、2°C 上昇シナリオ (RCP2.6) では約 2000%日、4°C 上昇シナリオ (RCP8.5) ではほぼ 0%日にまで減少すると予測される。特に、4°C 上昇シナリオ (RCP8.5) の変化は、比較的モデル間で整合的に予測されており、予測の不確実性よりも大きな変化であると言える。ただし、現在気候におけるモデルバイアスを考慮すると確信度は低い。

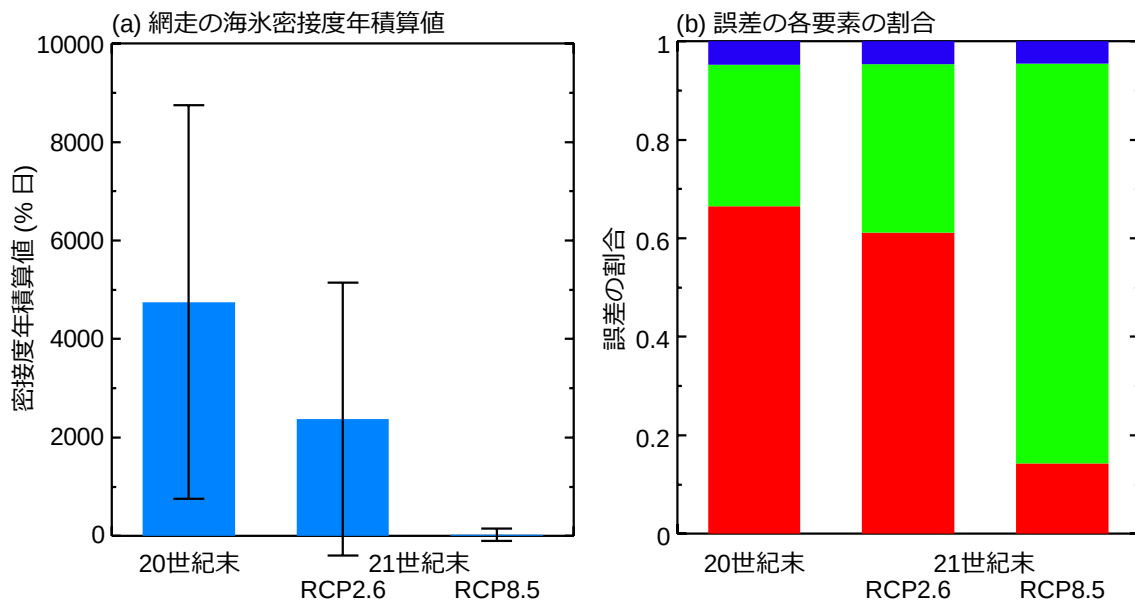


図 10.2.5 日本域海洋予測データによる網走の海水氷密度積算量の将来変化と不確実性

(a) 20 世紀末、2°C 上昇シナリオ (RCP2.6) 及び 4°C 上昇シナリオ (RCP8.5) の 21 世紀末における網走の海水氷密度の年積算値とその不確実性。不確実性の幅は Wakamatsu et al. (2017) に基づく標準偏差を示す。
(b) 不確実性の各要素の割合。赤がモデル間の相違、緑が年々変動、青がサンプル数の少なさに起因する不確実性 (付録 B.1.3 を参照)。

10.3 背景要因

海氷が海面を覆う過程には、沿岸域における結氷と、その海氷が風や海流により沖へ流される移流とがある。オホーツク海の家氷面積の年々変動の要因としては、シベリア沿岸における秋季の冷却が重要であること（Ohshima et al., 2006）や、サハリン東岸以南の家氷の広がりには海水温の影響が支配的であることが指摘されている（Kimura and Wakatsuchi, 2001）。また、近年の地球温暖化に伴う冬季家氷面積の減少は、縁辺海などの氷縁域で顕著であることが報告されている（Screen and Simmonds, 2010b）。第 10.1 節の冒頭でも述べたように、高アルベドの積雪・海氷が融解して低アルベドの海面が露出することで地球表面の熱吸収が増え、温暖化に正のフィードバックとなる（Curry et al., 1995）。オホーツク海と北海道沿岸域における将来の家氷減少についても、上記の形成・移流プロセス及びこの氷縁域での温暖化増幅が影響すると考えられるが、特に北海道沿岸域での家氷量には上記プロセスに加え沿岸域特有の力学（集積）作用が働くため（Toyota et al., 2022）、温暖化の影響の現れ方は複雑である。