

# S1

## 地球温暖化によるオホーツク海の海水変動 Sea ice and global warming in Okhotsk Sea

西尾文彦

Fumihiko NISHIO

北海道教育大学 地球惑星科学科

Hokkaido University of Education, Earth and Planetary Science Division

**Abstract** Sea ice in the Okhotsk Sea is constrained by land and is existing in the most southern region in the Northern Hemisphere where no sea ice survives in summer season. The interannual variability of the total sea ice extent in winter is from approximately  $1.3 \times 10^6 \text{ km}^2$  (maximum in 1978 and 1979) to  $0.7 \times 10^6 \text{ km}^2$  (minimum in 1984). Investigation on the interannual variability of sea ice extent in the Okhotsk Sea and the sea surface temperature of the eastern equatorial Pacific Ocean suggested the negative correlation between the larger ice extent of the Okhotsk Sea and El Nino, and followed by the smaller ice extent of it after the El Nino events. In this study, satellite passive microwave data, mainly SMMR and SMM/I data (1979-1995), were used to calculate the interannual variation of sea ice extent in this area. The derived interannual validation graph showed a small peak in each summer under the ice-free condition. In the former analysis, this phenomena was explained as land effect. We have re-evaluated the trend of the sea ice extent in this area. We could result in almost the same interannual trend of sea ice extent, however, the smaller sea ice extent of the Okhotsk Sea, which was obtained by the former algorithm of sea ice concentration. It also becomes very important for monitoring the interannual variability of sea ice extent in Okhotsk Sea because Noda (1996) pointed out that a notable  $\text{CO}_2$  - induced warming has firstly appeared around the Okhotsk Sea, although the model resolutions are not enough to resolve local climate changes and sea ice model is simple. However, these transient response is plausible because the Okhotsk Sea locates at the southernmost boundary of sea ice formation in the Northern Hemisphere.

### はじめに

オホーツク海は北半球の中で最も低緯度で、冬の期間、海氷が形成される広い海域である。二酸化炭素ガスを現在の2倍まで徐々に増加させる気象研究所の大気・海洋結合モデルによると、オホーツク海とその周辺は、海氷と大気の相互作用の結果、温暖化が最も顕著に現われる。もし、このことが事実とするならば、オホーツク海の海氷の拡がりや海氷の年々の変動および生産量に大きな影響があらわれるはずである。そして、オホーツク海やその周辺で気候と雪氷圏の変動にともなうさまざまな変化がおこっていることが予想される。したがって、オホーツク海での海氷研究は大気・海洋・雪氷圏の総合的な地球科学的な研究課題として重要である。そのとき衛星はたいへん重要な道具となる。衛星を利用して雪氷圏の研究を進めていく上では、雪氷圏にひそむ温暖化のシグナルを検知することが重要な課題である。温暖化の影響が海氷にどのような変化として現われるのかをモデルと組み合わせてモニタリングし検知していくことが必要である。

### 気象学的背景

冬季、オホーツク海の北西に位置するユーラシア大陸の北東シベリア地域は、北半球の寒極となる。シベリア大陸からの寒気団は、オホーツク海北部沿岸で北東風、西部では北西風となってオホーツク海上を吹き抜け、ベーリング海やアリューシャン列島に中心をもつ低気圧へと流れ込む。カムチャッカ半島ではベーリング海からの東風が卓越している。

一方、夏季には中国北東部から北東シベリアにかけては周辺より暖かくなり、オホーツク海は南西風が卓越するようになる。東西断面の気温プロファイルで見ると、オホーツク海の西側で冬は冷たく、夏は暖かくなり、冬も夏も東西断面の温度傾度の激しい地域である。オホーツク海は大陸と海洋の間のコントラストが非常に大きいところに位置している。同様に北米東岸も似た気象学的条件にある。

上層500hPaの対流圏中層では、冬季オホーツク海付近は極渦の一つの中心である。チベット高原の影響

でトラフの位置が日本付近にあたり、寒気が南下しやすくなる。シベリア大陸とオホーツク海の熱的なコントラストとチベット高原の効果により、上層のトラフがオホーツク海付近に発生して、大気の下層から上層の対流圏全層にわたり寒極となっているためにオホーツク海の海水が北半球で最も南で存在できる気象学的背景であると考えられる（山崎孝治、1996）。

## 衛星によるオホーツク海の海水研究

「衛星によるオホーツク海の海水の研究」をテーマに掲げて4年が過ぎた。1993年2月から始めて、毎年2月にサロマ湖をモデル海水観測地として、オホーツク海を中心にして、日本の国内の多くの研究機関と研究者が参加して、衛星による海水の研究を実施してきた。オホーツク海の海水の広がりや密接度を衛星搭載のマイクロ波放射計から精度よく求めるために、アルゴリズムの見直しから取り組み、オホーツク海の海水分布の経年変動を評価しなおすことが、われわれの実力で出来るようになった。その結果、従来、南北両極域で確立されてきた海水のアルゴリズムに、オホーツク海では大気の水蒸気分布が大きく影響することが明確になり、改良されたアルゴリズムでオホーツク海の海水分布をNASAの研究者グループよりも精度よく求めていくことができるようになった。このことは日本独自の自前のセンサーで、オホーツク海の海水の変動をほぼリアルタイムで、データを取得してモニターしていくことができるようになったことを意味している。そして、1999年8月に打ち上げ予定のADEOS II/AMSRによるオホーツク海の海水の研究は飛躍的に進展することを期待できるとともに、野田（1996）が指摘するように、地球温暖化の影響がオホーツク海に顕著に現われるならば、オホーツク海の冬期の海水は21世紀始めに急速に減少していくことをモニタリングし、検知できる可能性を秘めている。同時に南北極域の海水や雪氷圏変動の詳細な研究へと広がりをもつことができる。

「衛星によるオホーツク海水研究」には、はじめは2つほどの課題があった。その一つは、合成開口レーダ（SAR: Synthetic Aperture Radar）をいかに利用できるか、利用するのか、という課題があった。SAR画像データは雲を透過し、夜でも悪天候でも利用でき、かつ可視画像データと同等の分解能をもつことから、海水の成長過程の研究に応用できないのか、とくに、塩分量や海水の生成量など、また海洋の構造と関連する物理量の抽出は出来ないか、という大きな期待があった。しかし、SARは現在までのところ、海水の分類や形状、動きなどの動的な情報の抽出には適しているといえるところである。サロマ湖の海水の実験から得られた成果に、ERS1のCバンドでは海水の厚さと後方散乱係数に負の相関を持つという結果を得た（Wakabayashi, et al., 1995）。また、Cバンドは海上風が強い場合には（約8m以上のとき）、海水と海水面の区別がつかないほど後方散乱が大きくなるので、海水の分布や密接度の検出には、JERS1のLバンドがCバンドよりも適していることなども明らかになってきた（若林他、1994）。さらに、実利用の分野では、SAR画像の氷海航行などへの応用があるが、リアルタイムでのデータ提供のシステムの構築とオペレーション上の経験を必要としている。

二つ目の課題として、オホーツク海の海水の分布の変動と同時に、海水の厚さの経年変化が起こっているのか、いないのか。海水厚の変化を衛星で、または航空機搭載のレーザー高度計で検出できないものか。あるいはSARで、またはマイクロ波放射計で出せないのか、というのが大きな目標であった。前述したように海水分布と同時に海水厚分布の変動がオホーツク海の海水が気候システムへの関わりを地球科学的に結びつける重要な観測項目であると考えからである。

このような視点で「衛星によるオホーツク海の海水の研究」を進めているうちに、大気大循環のモデルをやっている研究者から、温室効果ガスの2倍増シナリオによる温暖化の影響は、北半球の北極の陸域でもっとも大きい、という従来の結果から、オホーツク海周辺が大きな影響を受けそうだ、という研究成果が出てきた（野田他、1996）。当然、海水の広がりや年々の海水の生産量の変動に大きな影響があらわれるはずで、オホーツク海における衛星による海水の経年変化、詳細な海水の動向の研究は、たいへん重要になってきたと言わざるをえない。そのためには、衛星による海水研究はオホーツク海での大気・海洋・雪氷圏の総合的な研究へと視野を広めていく必要がある。とくに、なぜオホーツク海周辺が温暖化の影響をもっとも強く受けるのか、大気と海水・海洋の相互作用の観点から、その現象と原因の解明に力をそそぐ必要がある。

## オホーツク海における雪氷圏の変動と温暖化傾向

地球温暖化とオホーツク海の海水のモニタリングの重要性については前述したとおりである。雪氷圏の変動は温暖化にたいして感度が高く、いち早く変化を検知し温暖化の影響を調べていくうえで良い研究対象であり、オホーツク海の海水はその中心的な存在であろう。

オホーツク海水変動について、海水面積が多い年は、ベーリング海の海水が少ない年である（Parkinson, 1990）。また、エルニーニョ発生の前年には海水面積が広がることを指摘した研究例がある（西尾他、

1996)。大気大循環の観点から調べると、オホーツク海で海氷面積が大きい年はアリューシャン低気圧が発達している傾向がある。アリューシャン低気圧が発達すれば、シベリア大陸からの北西季節風が強まり、シベリア高気圧による寒気の移流が起こり、海面を冷やして海水の生産量の増加が考えられる(Parkinson, 1990)。このようにしてアリューシャン低気圧とオホーツク海およびベーリング海の海氷面積の増減はシーソー現象を起こすことが説明され、モデル実験においても明瞭に示されている(Honda, et al., 1997)。

さて、最近30年間のシベリア大陸や北海道各地での地上気温の変化傾向を調べると、年平均気温の上昇傾向が見られ、とくに冬季の積雪期の温暖化が顕著である。大気大循環の研究からはアリューシャン低気圧の活動の弱い十年変動の期間にシフトしたという指摘があるが(Tachibana, et al., 1996)。もしこの温暖化が二酸化炭素増大の影響であるとすれば、非可逆な変化となるのではないか。シベリア寒気団が温暖化によって弱まれば、オホーツク海の海氷の生成は少くなり、アリューシャン低気圧の発達も弱まる。野田(1996)のモデルの結果でも示されているように、温暖化が顕著に進行するならば今世紀後半から21世紀はじめにかけてオホーツク海の海氷面積と海氷の厚さの減少は急激に起こる可能性がある。これらの変化を検知するために、衛星によるリモートセンシングのはたす役割は大きく、オホーツク海の海氷面積および生成量をよりよい精度で求める手法の開発は重要である。また、地球科学的情報の少ない地域であるシベリアや北方圏、極地域の雪氷圏にはたいへん有用な手法である。

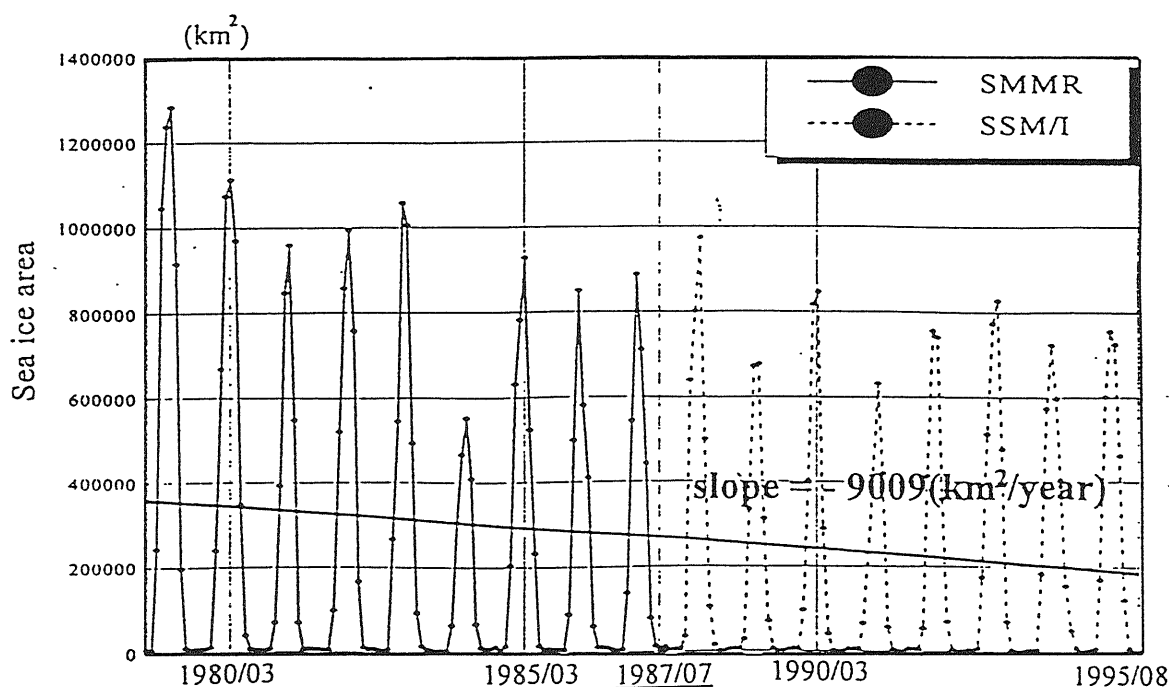


Fig.1. Interannual variation of sea ice extents in the Okhotsk Sea derived from SMMR (1979-1987) and SSM/I(1987-1995). Weather and land filter are applied for the NASA algorithm in the Okhotsk Sea region (Cho and Nishio,1996).

### オホーツク海の海氷と大気・海洋との相互作用

いままでの研究でオホーツク海の海氷と大気・海洋との相互作用で明らかになってきたことがらを整理しておく。また、衛星によるオホーツク海の海氷研究課題を列記した。

- シベリア高気圧・オホーツク海海氷・アリューシャン低気圧・ベーリング海海氷との関連。  

|         |   |          |   |            |   |          |
|---------|---|----------|---|------------|---|----------|
| シベリア高気圧 | — | オホーツク海海氷 | — | アリューシャン低気圧 | — | ベーリング海海氷 |
| (気圧)    |   | (海氷面積)   |   | (気圧)       |   | (海氷面積)   |
| 高い      |   | 広い       |   | 低い         |   | 狭い       |
| 低い      |   | 狭い       |   | 高い         |   | 広い       |

- オホーツク海の海氷面積と海水量の経年変化。

1970年以降、海氷面積の年々の変化は、70万km<sup>2</sup>から150万km<sup>2</sup>の変化がある。1984年が最小で、1978年に最大の海氷面積を示した。1970年代後半から海氷面積は減少傾向にある。50度以南では著しい減少傾向にある。オホーツク北部、中部では著しい減少傾向は見られない。海氷面積は密度9-10が最も広い面積を占める。オホーツク海の海氷面積の変動には、十年周期

(decadal variation) の変動が見られる。

3. 海氷面積と海面温度の関連。  
オホーツク海の海面温度が高いとき、海氷面積は小さい。1973-74年、1979年、1982年、1983年、1984年、1989年、1990年、1991年、1993年、1995-96年などの年に海氷面積が少なく、海面温度が高い。ただし海面温度のデータは海氷のあるときを除いたデータである。
4. 海氷面積の算出方法について。  
海氷図（気象庁作成）とSMMRおよびSSM/Iによる衛星マイクロ波（密接度 $>10\%$ ）での海氷面積の算出では、海氷図の方が10-20%ほど衛星マイクロ波による方法よりも多く面積を見積もっている。
5. 海氷の密接度と海氷厚の関係。  
密接度が大きくなると海氷の厚さが増大する傾向が、オホーツク海沿岸の砕氷船による限られた調査結果からみられる。たとえば密接度が9-10で45cm、密接度が7-8で35cm、密接度が4-6で25cm、密接度が1-3で15cmとなる。また、オホーツク海をサハリン沖合いの北方へ向かうにつれて海氷の厚さが増える傾向も報告されている。

今後、衛星によるオホーツク海の海氷の研究課題として、

1. マイクロ波による海氷密接度の高精度化と各種物理量への変換またはパラメーター化を行う。  
Heat flux、海氷生産量など
2. オホーツク海での海氷発生-生産-移動-融解のプロセスの詳細な研究。
3. アムール川の水量と海氷面積、生産との関連について。  
アムール川の水量の変動とオホーツク海海氷の生産量。降水量からアムール川の水量を推定することも必要である。
4. オホーツク海の海氷の変動に地球温暖化の影響を見る。  
オホーツク海の海氷変動に温暖化のシグナルはどう現われるのか。モニタリングの必要は言うに及ばず、何を検知すれば温暖化の影響を知ることになるのか。大気・海洋結合モデルによる海氷分布モデルと衛星データとの結合が今後、必要ではないか。
5. 衛星による研究課題として
  - 1) オホーツク海（ベーリング海）の海氷分布、海面水温、海色の変動。
  - 2) ユーラシア（シベリア）大陸での積雪分布、凍土の分布、植生の分布。
  - 3) カムチャッカでの氷河の変動に潜むシグナルの解読。
  - 4) 衛星による温暖化の検地と影響のモニタリング手法の開発。

以上、今まで明かになってきたこと、および今後の課題を列記した。

## 参考文献

- 長幸平、西尾文彦(1996): オホーツク海におけるSSM/Iデータを用いた海氷密接度推定アルゴリズムの評価と改良. 日本リモートセンシング学会誌. Vol.16, No.2, 47-58.
- Honda, M., Yamazaki, K., Tachibana, Y. and Takeuchi, K. (1997): Influence of Okhotsk sea-ice extent on atmospheric circulation. Geophys Res. Lett., ( to be published ).
- 西尾文彦、長幸平 (1996): Sea Ice Extents in the Okhotsk Sea. J. Remote Sensing Soc. Japan. Vol.16, No.2, 26-31.
- 野田 彰(1996): Global warming induced by CO<sub>2</sub> and the Okhotsk Sea. J. Remote Sensing Soc. Japan. Vol.16, No.2, 33-13.
- Parkinson, C.L. (1990): The impact of the Siberian High and Aleutian Low on the sea-ice cover of the Sea of Okhotsk. Ann of Glaciol. Vol.14, 226-229.
- Tachibana, Y., Honda, M. and Takeuchi, K. (1996): The Abrupt Decrease of the Sea Ice over the Southern Part of the Sea of Okhotsk in 1989 and Its Relation to the Recent Weakening of the Aleutian Low. J. Meteorol. Soc. Japan. Vol.74, No.4, 579-584.
- 山崎孝治(1995): グローバルな視点から見たオホーツク海の気候。オホーツク海海氷ワークショップ。NASDA (ed. Nishio).
- Wakabayashi, H., Hirano, K., Nishio, F., Aota, M. and Takahashi, S. (1995): A study of sea ice in the Sea of Okhotsk with SAR data. Polar Rec., Vo.31, No.178, 305-314.
- 若林裕之、西尾文彦、青田昌秋、高橋修平(1994): 合成開口レーダによるオホーツク海の海氷研究 Vol.103, No.6(935), 674-683.