

## 2. オホーツク海の流氷と気象・気候

北海道大学低温科学研究所附属  
流氷研究施設

白 澤 邦 男

### 1. はじめに

オホーツク海は、北はアジア大陸の東シベリア地域に、西はサハリンに、東はカムチャッカ半島に、そして南は千島列島と北海道に囲まれた、南北約2000km、東西約1000km、平均水深838m、面積はおよそ153万km<sup>2</sup>で日本海の1.5倍に相当する広さの沿海です。

秋から冬にかけては、シベリア上空に発達する強大な高気圧からの寒気がオホーツク海に吹き込み、この海を冷やし、11月終り頃には北西沿岸部では海水が凍り始めます。「流氷」の誕生です。海水の凍結はこの北西海域から徐々に南へ東へと広がり、またこの流氷は風と海流に乗って南へと流され1月半ばには北海道へ押し寄せ、海面を閉ざして一面の白い氷原に変えます。冬のオホーツク海はまさに厳寒の極地の白く凍った海と化します。そして、やがて春を迎え、日差しがまぶしくなると、流氷に閉じ込められていた生物の活動がまた始まり、氷は割れ、融け出して、やがてまた青い海原へと変身してゆきます。では、この流氷はどのようにして生まれ、人間や生物とどのような関わりをもっているのか、また、地球の温暖化がこのまま続くとオホーツク海の流氷はどうなるのか考えてみましょう。

### 2. 流氷の分類

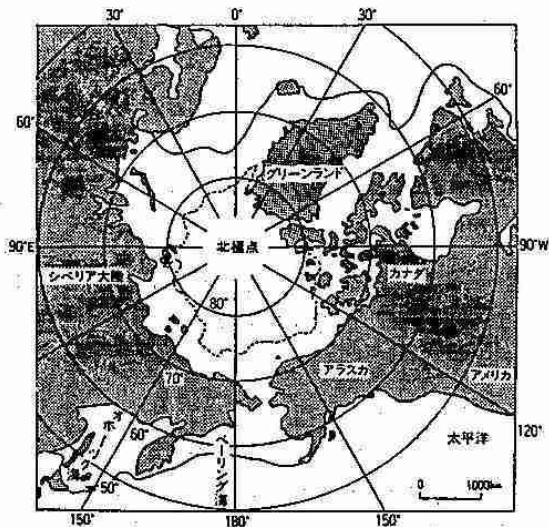
私たちはテレビや新聞などでよく「流氷」(Drift Ice 又は Pack Ice) とか「海水」(Sea Ice) という言葉を耳にしますが、これは同じものでしょうか。一般に広い意味では、海面に浮かんでいる氷全てを「流氷」と呼んでいます。一方、狭い意味での「流氷」とは「流れる」という運動形態による分類で、

海面に浮かび、流れ漂う氷のことです。これに対して、流れ動いていない氷は「定着氷」(Fast Ice) 又は「沿岸定着氷」(Landfast Ice) と呼ばれ、主に、沿岸の水深の浅い大陸棚上の海水が凍って出来た氷です。運動形態による分類に対してその組成、出生場所によって分類すると、「海水」、「湖水」、「河川氷」、「陸氷」などがあります。また、北極海や南極大陸周辺で夏の終わりになっても融けきらずに残り越年する流氷を「多年氷」(Multi-Year Ice) と、また、オホーツク海の流氷のように夏までには完全に融けきってしまう流氷を「一年氷」(First-Year Ice) と呼びます。また、それらの流氷が存在する海域は、それぞれ「多年海水域」(Perennial Sea Ice Zone) および「季節海水域」(Seasonal Sea Ice Zone) と呼ばれています。

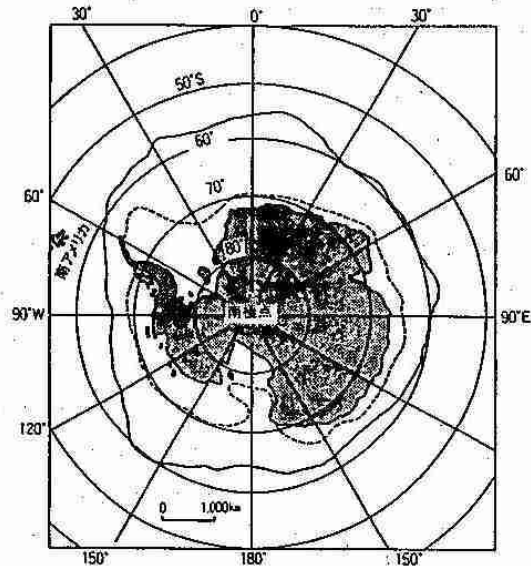
### 3. 地球上の流氷分布

青い海原が白い氷原へと化すのは、地球上どこでも起こるわけではありません。流氷のできる海は世界の海の10%程です。第1図に北半球における流氷域の存在する海域を示します。北極点を中心とする海域は多年海水域ですが、その周辺のボフォート海、バレンツ海、バルト海、ベーリング海、オホーツク海等は季節海水域です。最も低緯度の流氷域は中国の渤海湾であり、北緯40°でも流氷が生じることがわかります。ユーラシアと北アメリカの両大陸の東側で流氷域が中緯度にまで広がっているのが特徴であり、冬に大陸上の寒気が海上に吹き出して海を冷やし、流氷が生成されます。北半球では海水面積の約50%が多年海水域になりますが、海水の厚さは3~4mに達します。一年氷では高々2m位です。一方、南半球では(第2図)、南極大陸を取り囲ん

で流水域が存在し、冬には南極大陸の面積を上回る面積にまで拡大しますが、南緯55°を大きく越えて北に広がることはありません。南半球では、一年氷のしめる季節海水域の海水面積は多年海水域のそれよりは大きいと思われます。南極の中央部は大陸であり、平均気温は北極海に較べてはるかに低く、そこから吹き出す斜面下降風による寒気と飛雪のために、南極大陸周辺の氷厚は北極海より厚いといえるでしょう。



第1図：北半球の流水分布。実線は流水限界、点線内は多年海水域を示す。

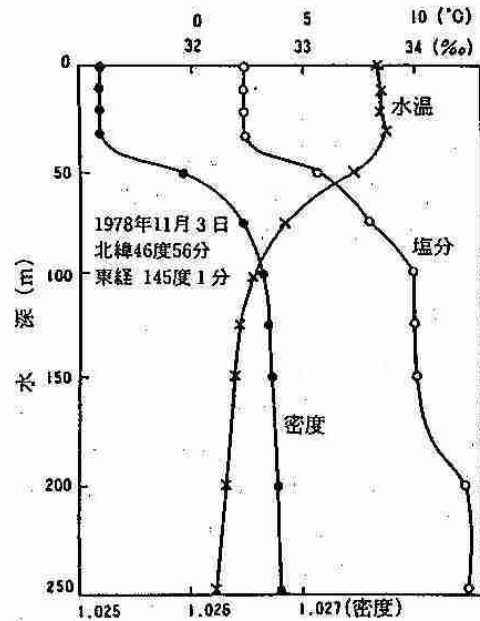


第2図：南半球の流水分布。実線は流水限界、点線内は多年海水域を示す。

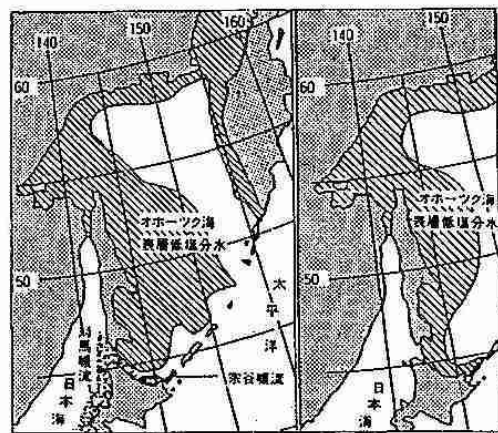
## 4. オホーツク海の流氷

### (1) オホーツク海はどうして凍るのか？

それは、オホーツク海の海洋の構造が顕著な「二重構造」という特殊な海洋構造をしているためです(第3図)。オホーツク海へは北東ユーラシアで最長のアムール川をはじめ周辺の河川から冷たい淡水が大量に供給され続けます。その結果、表面から深さ約50mの表層は塩分濃度が薄く軽い海水層となり、「オホーツク海表層低塩分水」が形成されます(第4図)。水面下40~50mを境に



第3図：オホーツク海の水塊の二重構造。1978年11月3日、カラフト東岸(北緯46°56′、東経145°1′)の水温、塩分、密度の鉛直分布。気象庁(1980)により作成。



第4図：オホーツク海表層低塩分水の分布。左図は夏季、右図は秋季。(渡辺(1966)による)。

塩分の急増がみられます。この層は「塩分躍層」と呼ばれています。すなわち、オホーツク海は上下で塩分が著しく異なる二重構造をしているという特徴があります。秋から冬に寒気が進むにつれて、海表面が冷却されると、冷やされて重くなった表面の海水は「対流」を起こしながら次第に深くまで冷えていきます。ところが、深さ約50m以深はより高塩分で密度の高い海水層が存在し、密度的に安定しており、冷却されて密度が増加した表層水もその躍層より下へは下降できません。すなわち、寒気によって起こる「対流」は表層50mの浅い範囲に限られます。更に冷却が進むとこの深さ50mの表層水のみが更に冷やされてゆき、その海水が凍る温度、つまり「結氷温度」まで到達すると、「海氷」が形成されます。オホーツク海では結氷温度はおよそ $-1.8^{\circ}\text{C}$ です。このように、「オホーツク海表層低塩分水」の存在こそがオホーツク海の海水の生成の主因といえます。

また、オホーツク海はシベリア大陸、カムチャッカ半島や千島列島によって周囲を囲まれているために、太平洋の水の流入が比較的少なく、二重構造という特殊な海洋構造が保たれやすいという地形条件や、冬には西高東低の気圧配置が卓越し、シベリアからの寒気がオホーツク海を吹き抜けるという気象条件も、海氷の生成の要因といえましょう。

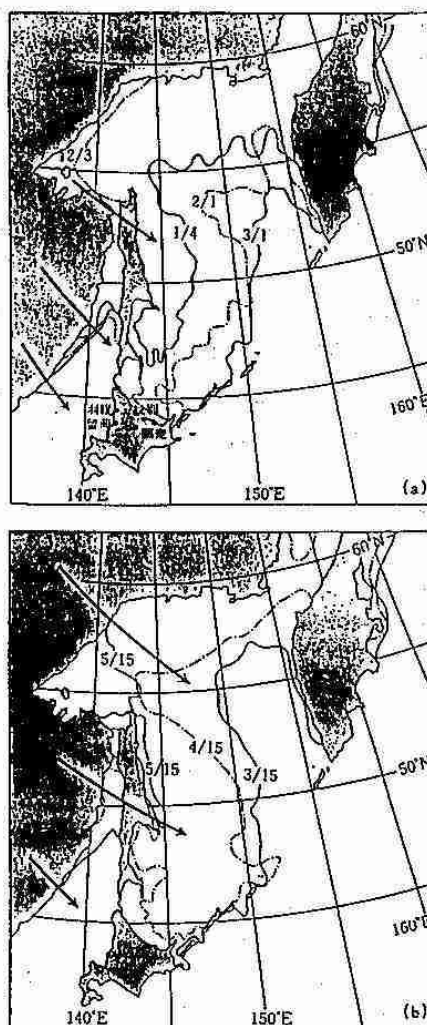
### (2) 流氷の発生

さて、表層の対流混合層の海水が一様に結氷温度まで冷やされ、更に大気の冷却が続くと、海面の薄い層が「過冷却」して「結晶核」が生まれます。それを基にして「氷晶」(Frazil Ice Crystals)が生成し始めます。氷晶は針状あるいは樹枝状結晶に発達します。風がなく、海の表面に波やうねりもなければ、これらの氷晶は静かに成長していきます、互いに凍りつきながら、「ニラス」(Nilas)と呼ばれる比較的硬い氷となって一面に広がっていきます。しかし、普通の海面は絶えず風波やうねりがあり、氷晶はもまれ砕かれながら、ある厚さをした、どろどろした「グリースアイス」(Grease Ice)を形成していきます。このグリースアイスの層は、波の上下運動により、その波の波長の半分程度の大きさに集められます。それら

は、互いにつぶかり合って縁がめくれ上がり、円盤を形成しますが、その形状から「蓮葉氷」(Pancake Ice)と呼ばれています。やがて、蓮葉氷の間のすき間も凍り固くなってきます。その後、次第に固さを増しながら厚くなっていき、厚さ0.1~0.3mの「板状軟氷」(Young Ice)となります。しかし、お互いの氷板が重なり合っ時には数mにも達する「氷丘」(Hummock Ice)を形成することもあります。また、氷板どうしがぶつかり合っ、数kmも続く「氷丘脈」(Ice Ridge)を形成することもあります。

### (3) 流氷の分布

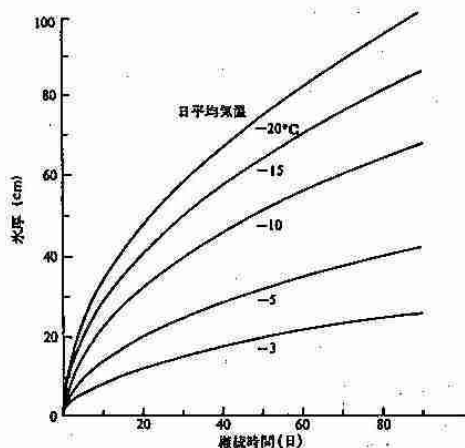
第5図に気象衛星ひまわりによる1982~1983年の流氷域の平均的季節変動を示します。例年、11



第5図：オホーツク海の流氷分布。矢印は季節風。(a)拡張期。1982年12月-1983年3月。(b)後退期。1983年3月-5月。(小崎ら(1994)による)。

月下旬から12月上旬頃オホーツク海の北西沿岸が先ず結氷し始めます。流氷域はオホーツク海の南へまた東へと伸びていきます。1月中旬には北海道沿岸に接近するが、この時期にはこの沿岸の海水も結氷温度に達して、沿岸定着氷を形成しており、北方から流されてきた流氷と沿岸定着氷と混在した氷野を形成します。流氷域は3月中旬まで拡張し、オホーツク海全面積の約80%を覆います。千島列島のカムチャッカ半島寄りにはウルップ水道を通して太平洋の海水が流入しており、またここでは対流層が深いために、この海域にはほとんど流氷が存在しません。3月中旬以降、気温の上昇とともに流氷は融解しながら後退していき、オホーツク海の流氷は6月になればほとんど消滅してしまいます。オホーツク海の流氷はすべて一年氷で年を越すことはありません。

氷の厚さは、結氷が始まった後は流氷の表面からどれだけ熱が奪われたかによって決まります。気温、風速、日射、雲量や積雪等によって変わりますが、近似的には氷厚は結氷開始以降の「積算寒度」の平方根に比例します。積算寒度とは結氷温度以下の気温の総和で、海面から奪われる熱量を表している値です。第6図に気温と日数から氷厚を推定するグラフを示します。平均的には、オホーツク海の北海道沿岸では40~50cmの、北部では約1mの厚さの一年氷となります。



第6図：日平均気温と継続時間から推定される氷厚  
(青田(1986)による)。

#### (4) 流氷の動き

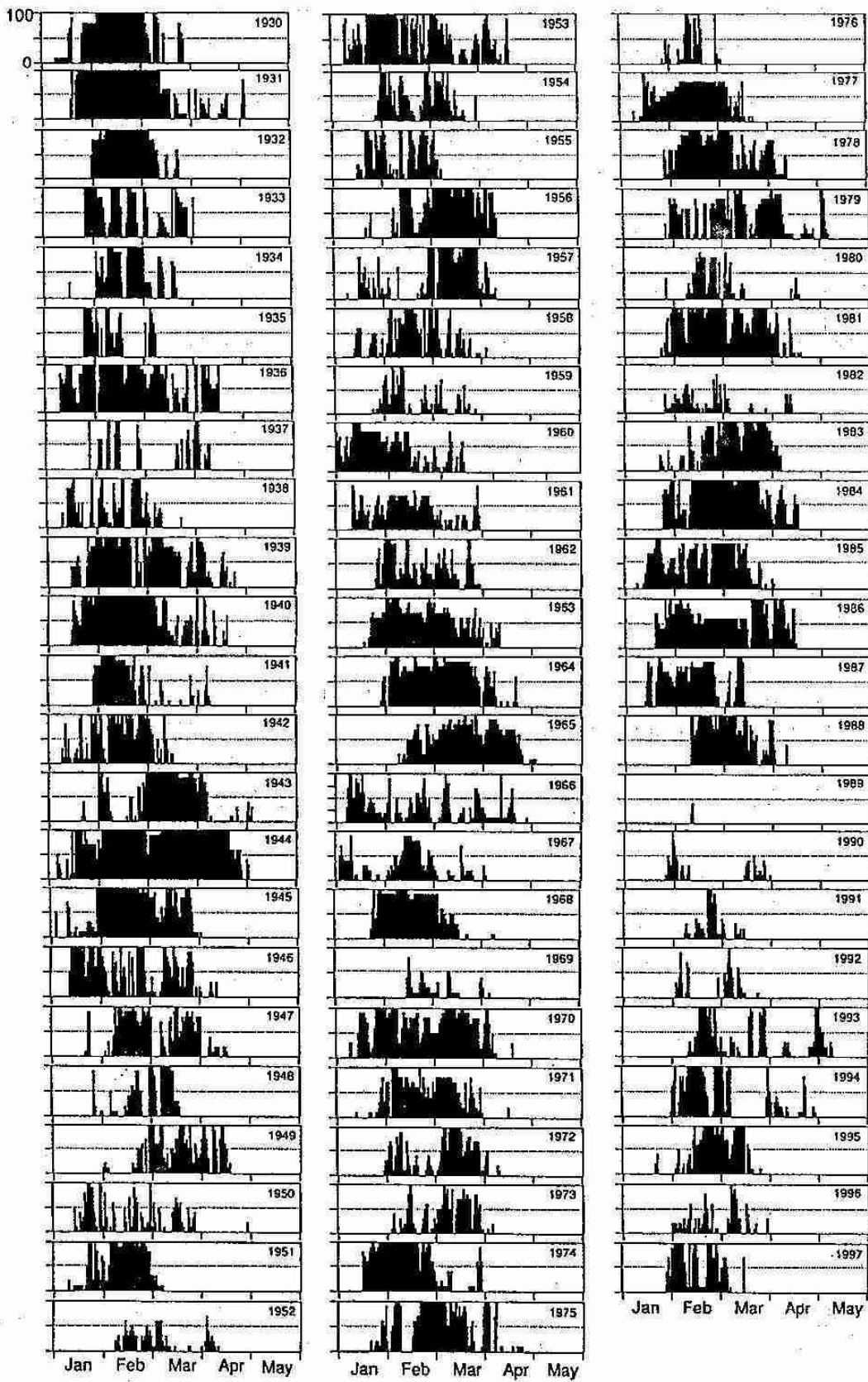
流氷を動かす力は色々ありますが、最も大きく影響するのは、風の力です。ノルウェーの科学者

ナンセンは、フラム号で北極海に乗り出して、氷野と一緒に漂流しました。その時に、船は風下の方向ではなく、風下から30~40度右にそれて流されていることに気がきました。これは、地球が回転しているために生じる見かけの力、「地球自転による転向力」、または「コリオリ力」が作用しているためです。また、流氷の漂流速度は風速の数%であることも調べられました。流氷の漂流速度と風速の比を「風圧係数」と呼んでいますが、北海道周辺では、風圧係数は0.01から0.05です。海流による力も流氷の漂流に大きな影響を及ぼしています。また、流氷はお互いに、押し合ったり、引きずり合ったりしながら、動いていきます。このような、氷野と氷野の間に出来る力を、「氷野の相互作用力」と呼んでいます。流氷は、風、海流、氷の凹凸、氷野の相互作用力、コリオリ力が重なり合っるとても複雑に動きます。

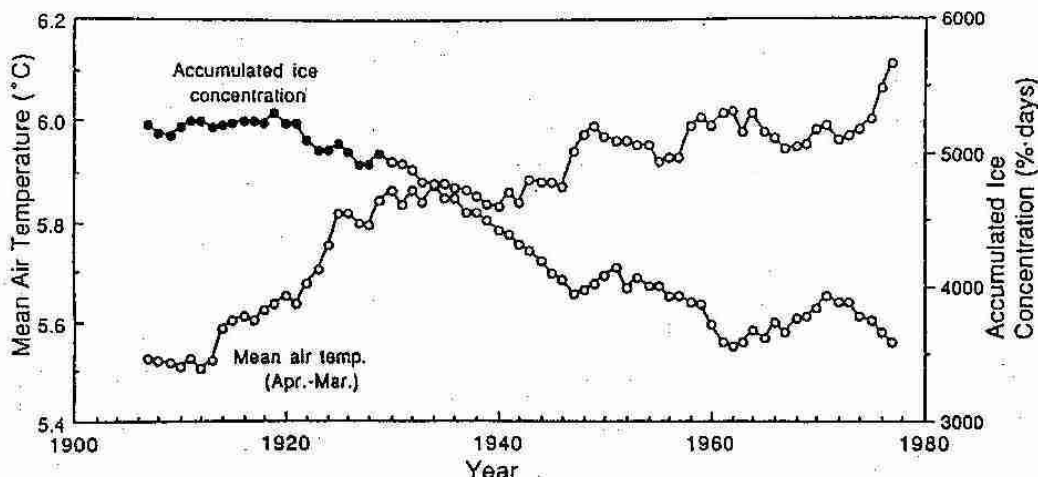
## 5. 流氷と温暖化

### (1) 網走の最近100年の目視流氷観測

北海道庁・網走測候所(現網走地方気象台)では1892年(明治25年)から目視による流氷観測を始め、網走地方気象台に引き継がれ現在にいたっています。第7図に1930年から1997年までの「日別流氷量」(日別流氷密接度)の変化を示します。1989年からは流氷量が極端に減少しているのがわかります。ある年の流氷初日から終日までの流氷期間中の日別流氷量の総和、「流氷勢力」と、「年平均気温」との関係を示す第8図に示します。1910年から1930年にかけての20年間に年平均気温が0.4℃弱も上昇し、その後も上昇傾向にあります。一方、流氷勢力は、1920年代から減少し続け、1960年代初期には1920年代の65%まで低下しています。このように、最近約100年間の北海道沿岸の資料からは、気温は上昇、流氷勢力は減少している傾向が見られます。



第7図：1930年から1997年までの網走における目視観測による日別流水量。(網走地方気象台の資料による)。



第8図：網走における1892年から1992年までの目視流量量の積算密接度(流水勢力)と30年移動平均の年平均気温。黒丸は1892年から1929年までの流水期間から推定した積算密接度；白丸は1930年以降の日々の密接度から算出した積算密接度。(青田ら(1993)による)。

(2) リモートセンシングによる流水観測

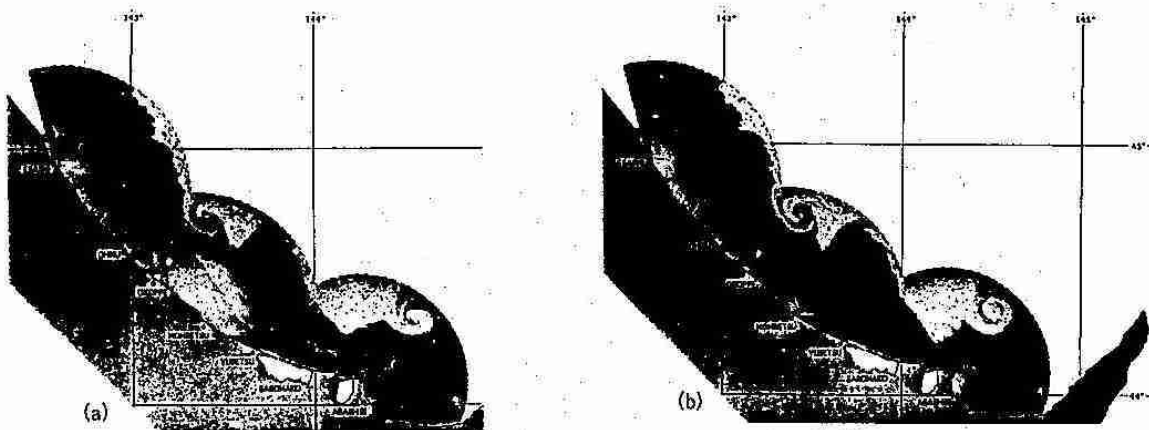
北海道大学低温科学研究所附属流水研究施設では1969年から「流水レーダ」による北海道オホーツク海沿岸から約50～60km沖までの海域の流水分布の観測を続けています。このレーダーにより昼夜天候に左右されることなく、北海道オホーツク海沿岸域の流水の動き、分布の観測が可能です(第9図)。

1960年代になると、人工衛星による流水観測が始まりました。雲の隙間から北極海の海水域を捉えたのが最初で、人工衛星は広域な海水域の面積を調べるのに有効です。衛星による観測から見積られたオホーツク海の海水域面積の変動から、海水面積が減少の傾向にあることが示されています

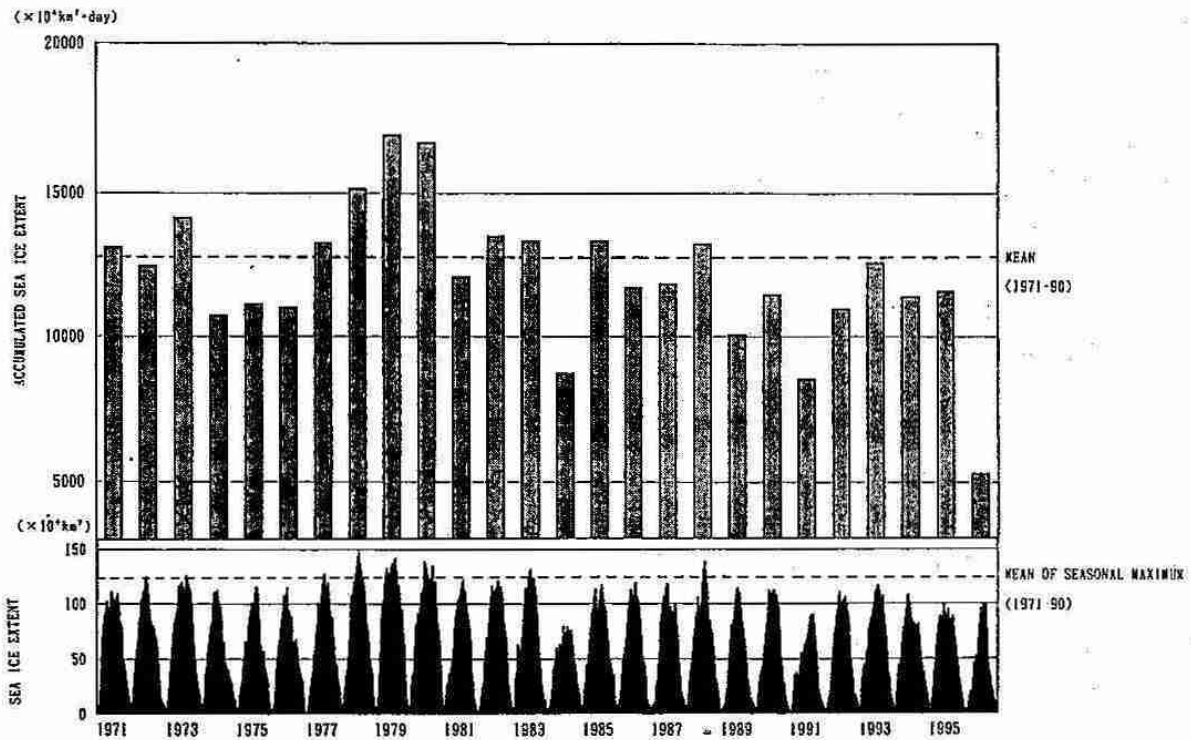
(第10図)。

1958年のアメリカの原子力潜水艦ノーチラス号による北極海の海水の厚さの情報と、1970年のアメリカの原子力潜水艦クイーンフィッシュの情報とから、北極海の多年海水域の厚さがこの12年間に約20%減少していることが示されました。また、グリーンランド北方の多年海水域では海水の厚さが1976年から1987年までの11年間に約15%薄くなっていることも示されました。

凍る海のほぼ南限に位置するオホーツク海は、地球の暖かい熱源と冷たい冷源との境にあり、温暖化の影響を受けやすい海です。海水域の分布及び海水の厚さの長期的、広域的な観測を続け、データを蓄積することが重要です。



第9図：北大・流水観測レーダ網による北海道オホーツク海沿岸域の流水分布。(a)1995年3月28日12時、(b)1995年3月28日18時。



第10図：オホーツク海の海水域面積（下段）とその積算（上段）の経年変化。（気象庁海水観測資料第14号（1996）による）。

## 6. 海の資源と流水

流水は豊かな水産資源をもたらすと言われてい  
 ます。流水の底面やその近くには「アイス・アルジー」  
 と呼ばれる珪藻類が閉じ込められています。海水中  
 には、「ブライン」と呼ばれる「濃縮塩」が存在し  
 ており、「ブライン・チャンネル」という木の葉の  
 葉脈のような管を通して栄養塩が供給されると思わ  
 れます。このように、海氷底面近傍はアイス・アル  
 ジーにとって極めて住み心地のよい場所であるよう  
 です。このアイス・アルジーは、春になり日射が強  
 くなると、光合成が活発になり増殖が始まります。  
 このアイス・アルジーを餌にしている動物プランク  
 トン等が増え、これが貝などの海底の動物を育て、  
 また哺乳動物や鳥類も集まり、「食物連鎖作用」が  
 形成されます。海水域の水縁域や、「ポリニヤ」と  
 呼ばれる海水域の中の開水面や水路では、海洋生産  
 性が他と比べ極めて高く、特徴的な「海水圏生態系」  
 を形成しています。

## 7. おわりに

オホーツク海は特徴的な海です。オホーツク海は  
 大気中の二酸化炭素を効果的に吸収して、それを有  
 機炭素、窒素にして海底に蓄積する能力の高い海で  
 す。人類は化石燃料を大量に消費し、これを大気中  
 に排出してきたが、これが原因で地球の温暖化が進  
 んでいます。これを防ぐには、大気中の二酸化炭素  
 を除去しなければならず、オホーツク海は他のどの  
 海域よりも効果的に吸収する能力を持っている海で  
 す。このため有機炭素等を求めて魚介類が集まって  
 くる好漁場を形成しています。このような特徴的な  
 海であり、まだまだ未知の海であるオホーツク海を  
 今後も監視し、観測を続けていくことが重要です。

参考図書

- 海洋科学基礎講座 4 「海洋物理IV」(増沢譲太郎、蓮沼啓一、田畑忠司、渡辺貫太郎著)：東海大学出版会。
- 基礎雪氷学講座VI「雪氷水文現象」(小野延雄、石川信敬、新井正、若土正暁、青田昌秋著)：古今書院。
- 月刊海洋科学「オホーツク海と流氷」第18巻2号、1986年：海洋出版株式会社。
- 白い海、凍る海(青田昌秋著)：東海大学出版会。積雪寒冷地の水文・水資源(水文・水資源学会編集出版委員会編)：信山社サイテック。
- 日本の自然 地域編1「北海道」(小疇尚、福田正己、石城謙吉、酒井昭、佐久間敏雄、菊地勝弘編)：岩波書店。
- フラム号 北極海横断記ー北の果てー(フリッチョフ・ナンセン著 太田昌秀訳)：ニュートンプレス。
- 北海道の自然7「流氷」(田畑忠司著)：北海道新聞社。
- 流氷ーその謎と人々の生活ー(合地信生、中川元、松田功、滝澤大徳著)：斜里町立知床博物館。
- 流氷の来る街(中村圭三著)：古今書院。

「北大流氷観測レーダーによる流氷分布図」のホームページ：

<http://www.hokudai.ac.jp/lowtemp/sirl/sirl.html>

「北海道立流氷科学センター」のホームページ：

<http://www.ohotoku26.or.jp/organization/center/index.htm>