

港 湾 内 の 結 氷 に つ い て

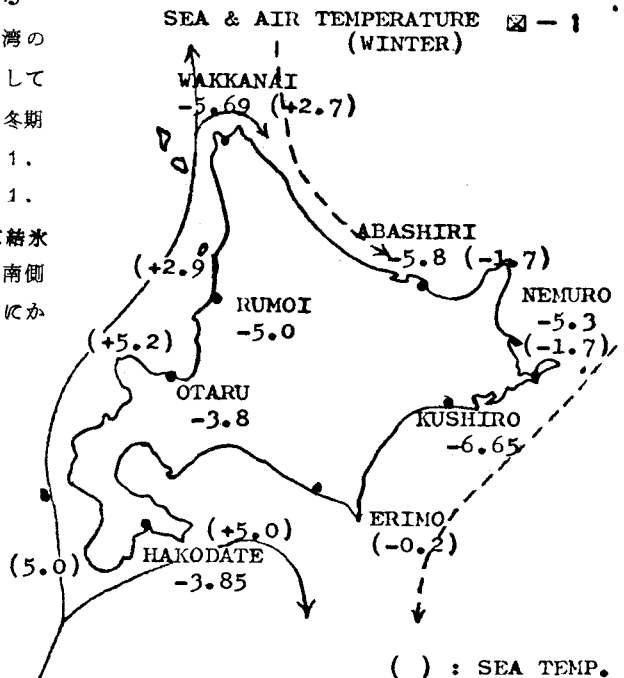
○ 東海大海洋	正員	泉 湧
北大工	学生員	小室 裕一
北大工	正員	浜中建一郎
北大工	正員	佐伯 浩
北大工	正員	尾崎 晃

1. 緒 論 北海道においては、オホーツク海に面する、紋別、網走、宇登呂、根室の各港は、冬期間は、港内の結氷と、流水の襲来により、港湾としての機能を果す事が出来ない。これに対して太平洋に面している、根室の花咲港、釧路港、厚岸港等は 港内の一部が結氷することはあつても、冬期間も充分に港の機能を果していた。しかし近年になつて花咲港においては港湾の各施設の整備に伴つて、港内の凍結が著しくなつてきた。このため年によつては、冬期間の何日かは、港湾の機能を果せない事となつている。本研究は港内のような、浅海域における部分的に外海との交流が悪い場合の海水の結氷についての調査結果についてまとめたものである。調査の対象港は根室市の花咲港である。

2. 結氷の要因

図-1に、北海道各地の1～2月の平均海水温と平均気温を示した。海水温の測定は東海区水産研究所の報告によるものである。これによると、海水温の分布は、寒流系の影響を受ける部分と暖流系の部分によつて大きく二つに分ける事が出来る。暖流系の領域はプラスの水温であり、寒流系はマイナスとなる。また、暖流系においても、函館から神威岬、汐首崎では海水温も5℃近くであるが、焼尻島より北方では、2.7℃～2.9℃となり、神威岬より北方で急に水温が低下している事から、二つに分ける事が出来る。寒流系では、オホーツク海沿岸から納沙布岬までは、-1.7℃で、海水の結氷点に近い水温であるのに対して、釧路から、襟裳岬にかけては、水温はマイナスであるが、オホーツク沿岸に較べて暖かく、二つの部分に分ける事が出来る。これは図に示している

ように海流にもよく対応している事が判る。港湾の結氷に対しても、この外海の水温が非常に影響していることは明らかで、オホーツク沿岸の諸港が冬期結氷するのは、この近辺の海水の結氷温度が-1.8℃前後であるのに対して、海水の温度が-1.7℃であるので、浅水域にある港湾は容易に結氷するものと思われる。これに対して根室半島の南側（歯舞港、花咲港、落石港等）沿岸から、釧路にかけての水温は、我々の測定では、冬期の1～2月の水温が-1.0℃～-0.5℃である事から、浅水域で、外海水との交流が少ない場合には結氷する可能性がある事は予測できる。そこで、前にも述べたように、我々は、花咲港を対象として、港内の水温分布、港内水の塩分量、電導度、PH等、水の物理的性質を明らかにする事により、花咲港の結氷状況を明らかにしようとし



た。

5. 海水の結氷温度と塩分濃度、最大密度との関係

水の最大密度と結氷温度との関係を図-2に示すが、この関係はクヌードセンの研究により、次の実験式で示されている。

$$t_f = -0.0086 - 0.064633\sigma_0 - 0.0001055\sigma_0^2 \quad (1)$$

ここで、 t_f : 海水の氷点、 σ_0 : 海水の比重

上式で与えられる氷点の誤差は、 0.003° であり、 σ_0 は同じくクヌードセンの求めた実験式により、

$$\begin{aligned} \sigma_0 &= -0.069 + 14.7080\text{Cl} - 0.00150\text{Cl}^2 + 0.0003980\text{Cl}^3 \\ &= -0.093 + 0.8149\text{S} - 0.00048\text{S}^2 + 0.000063\text{S}^3 \quad (2) \end{aligned}$$

ここで、 Cl : 塩素濃度 (%) S : 塩分量 (%) で与えられる

σ_0 は塩分だけで変化するものであるから、結氷点は塩分又は塩素量で決ることになり図からもわかるように塩分増加とともに結氷点は下降するが -2.0° 以下になることはない。又、塩分が 24.695% より少ない場合、最大密度は結氷点より高い温度で与えられ塩分が 24.695% より多い場合、最大密度は結氷点より低い温度で与えられる。海洋水の塩分量は平均して 35% 程度であるから、後者に属するものといえる。塩分が 24.695% において結氷点と最大密度はともに -1.332° で一致しており、この塩分量 24.695% を境にして淡水性の氷と海洋性の氷の成生の相違が表われる。

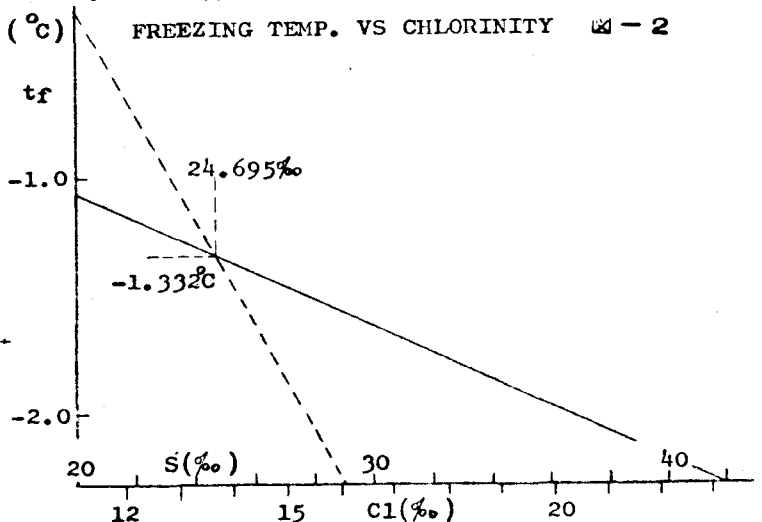
海洋性の水で氷が発生する場合、 24.695% 以上の一般の海洋水において、最大密度温度が結氷点より低い温度で与えられるので、海面の水温が結氷点に近づくにつれ、下層の暖い水より比重が大きくなり下方に沈み、下層の暖く軽い水が上層に向って流れる。この作用が続き海水全部が結氷温度に達した後に凍結が始まり、最初は海水中の純水部分だけが凍り、数mm程度の小針状又は円板状の氷晶となり、これらが表面に集合して氷泥をつくり、次第に氷着してある程度の厚さと堅さをもつた板状軟氷となる。このように氷が成長してゆく過程で又は成長してから、これらの氷が波の作用、風の作用により互にぶつかり合ったり、構造物などに当って緑片のまくれ上つた氷をハス葉状氷といい、花咲港に発生する氷はこのハス葉状氷が主でこれが互に重なり合い大きくなつて船舶の航行を防たげる程の氷板に成長する事もある。以上のように、海水の結氷に対しては海水中の塩分量あるいは塩素量が結氷温度に非常に影響することが判る。特に、花咲等のように、結氷するかしないかの境界の所では、塩分量の精密な測定が必要である。 Cl と塩分量 S との

関係は次式で示される。

$$\text{S} = 0.030 + 1.8050 \times \text{Cl} \quad (3)$$

4. 調査方法

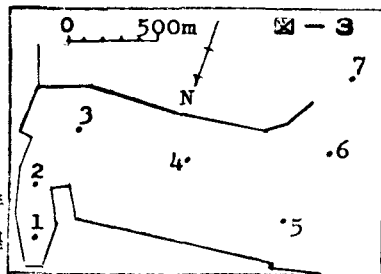
調査は昭和47年8月、48年1、2、4、10月の5回行い、調査項目は、花咲港内の流向、流速及び海水の物理的性質を調べるため、水温、PH、電気電導度、を測定し、水温と電気電導度から海水の塩素量を求めた。電気電導度から塩素量を求める式は、THOMAS、THOMPSON、UTTERBACKらによつて示めされているが、この式は一般の外海水に適用されるものであるため、花咲港のような沿岸海



水には適用できないことが明らかであるので我々は、硝酸第二水銀法を用いて、塩素量を求め、目盛合せを行つた。又冬期間完全凍結の状態となる、同市の北側に位置する根室港に於ても部分的にこの調査を行い花咲港と比較してみた。図-3に花咲港の観測箇所を示す。

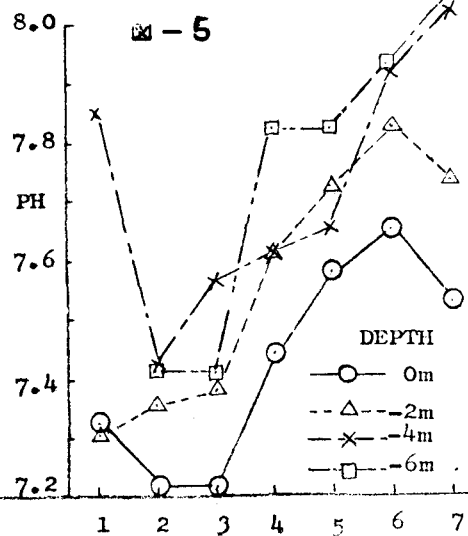
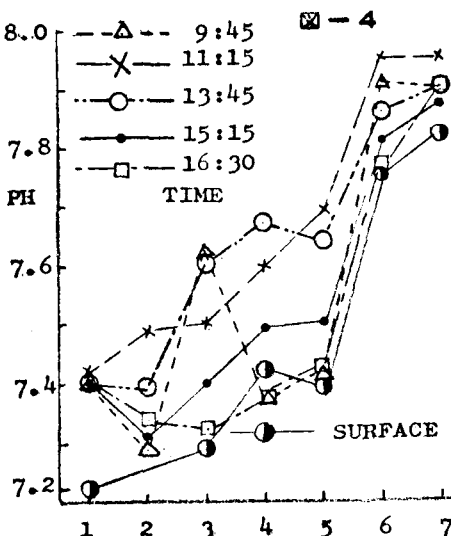
5. PHの測定結果について

海水の物理的性質の一つとして、PHを右図の8地点について測定を行こなつた。測定はPHメーターを用いて行こなつた。図-4は、一日、約2時間々隔の測定結果を示す。測定水深は-2mである。この時の満潮時刻は19:00で干潮は12:00である。時間の経過に伴う変化は明確ではないが、観測地点による変化は明瞭で、港奥になる程



PH値は小さくなり、港外のS-7では7.9で、この値は外洋のPH値に一致し、また標準海水のPH値とも一致している。本来は満潮時に近づくにつれて、港外の海水が流入するのであるから、時間の経過と共にPH値は大きくなるのであるが、これは後の流況のところでも述べるが、港内の流れは、かなり複雑で数ヶ所で大きな過流が見られるためと思われる。図-5は、10月24日に行つたもの

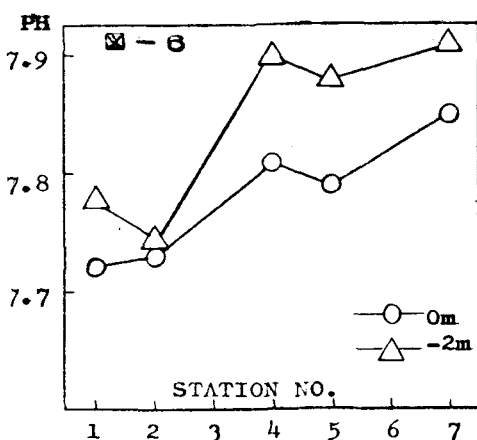
である。測定の水深別に分けて記してある。この時も、図-4と同じく、港奥に行くに従つてPH値は小さくなつてゐる。また水深別に見ると、一般に表層PH値が小さく、水底に近づくにつれて、PH値が大きくな



つてゐる。この日の10:00の測定値も、この図-5と全く同じ傾向であつた。また時間の経過に伴う差違は顕著でなかつた。図-6は、1月5日のPH値である

。表層と水深-2mの点の値定値が示されているが、図-5と同じように、表層の方がPH値は小さい。また、8月10月では、港奥部ではPH値が7.4前後であるが、1月では、7.6で、港奥部でもかなり大きいPH値を示している。また港外でのPH値は7.9~8.0で季節による変化は見られない。この港奥部でのPH値の増加の原因は、次の電導度とも関係するが、港内に流入する都市下水、工場廃水、等の淡水に近い水質の流体の流入と考えられるが、これについては後で述べる。

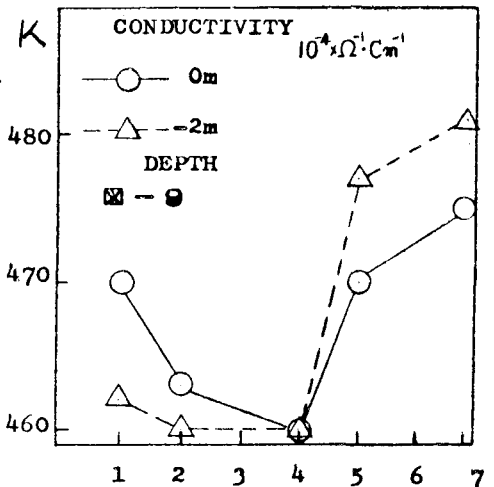
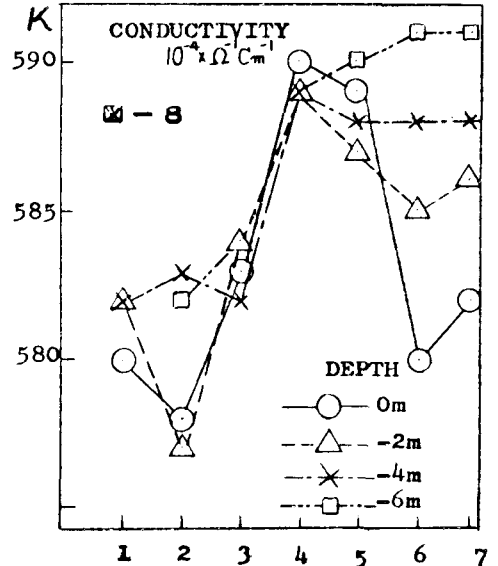
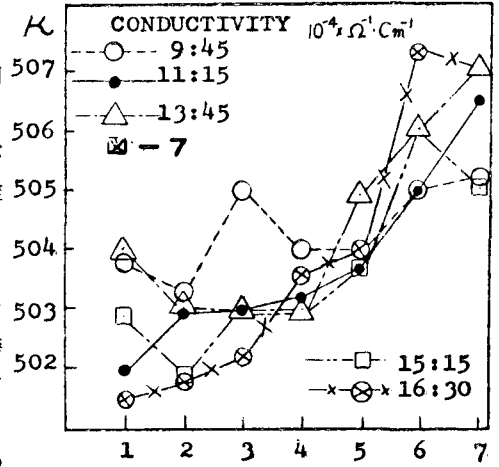
港口から港奥まで数百米しかない花咲港においても、港口と港奥のPH値の差は大きく、潮差は1m以上あるのであるが、これだけのPH値の差がある事は海水交流があまりよくない事を示している。また冬期と夏期の廃水



量についても後で述べる事とする。

6. 電気伝導度と塩素量について

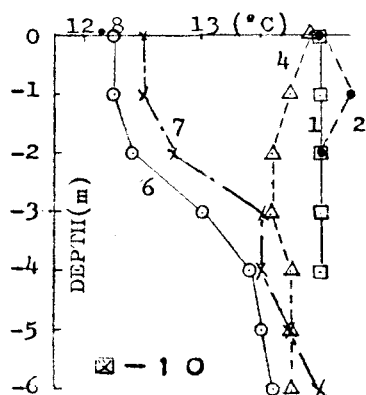
前にも述べたように、塩素量と塩分量との間には一定の関係が得られている。この塩分量は海水の結氷温度を決定する事になる。この塩分量の測定には滴定法によつて求める事が出来るが、時間がかかるのが欠点である。そこで簡単に測定できる電導度を測定し、あとで電導度と塩分量の目盛合せを行なえば良い事となる。図-7は8月の測定結果である。これは、時間の経過による、電導度を調べたものであるが、その時間の変化に対する傾向は明確ではない。しかし港口近傍に較べて港奥の方が電導度は小さい。云いかえるなら、港口に較べて、港奥の方は塩分量が小さい事になる。測定番号5番を界にして電導度がかかなり違っているが、この測定点5の港奥部では過去の結氷限界に一致している。この点については後に述べる。図-8は、10月下旬の測定である。これも港奥部に行くに従つて電導度は小さくなる傾向がある。また各水深に対する値が示されているが、一般に深い所程電導度が大きく、港口近傍ではそれが明確である。これは次の水温の所でも述べるが、この時の水温の鉛直分布は一様であるので海水の状態は安定の状態にある事になる。図-9は1月の測定結果である。この場合も測点4までは一定値で港口近傍に較べて電導度は小さい。また表層よりも-2mの水深の方が電導度は大きい。8、10、1月の三つの結果から、電導度は各月によつてかなり違っている。10月下旬の結果が一番大きく、次に8月、一番小さいのが1月の結果である。東海道水産研の昭和20年～昭和24年の納沙布岬のDLの測定結果では10月、11月が一番大きく18.6(%)、1月、2月、3月が一番小さく17.5(%)で、8月中旬くらいで18.0(%)である。納沙布岬が最大、最小の差は1.1(%)で、塩分量にして2(%)くらい違う事になる。我々の滴定による目盛合せの結果から $K=0.046$ は塩分量は27(%)に相当する。 K の単位は($ohm^{-1}cm^{-1}$)である。 $K=0.060$ で $S=29$ (%)、 $K=0.060$ で $S=35$ (%)である。よつて1月の塩分量は、港奥の測点番号4までは27(%)で港口近傍では28(%)である。これに対して10月は港奥部では32.5(%)である。又納沙布では1月で塩分量は31(%)、10月では33.5(%)である。これは花咲港が花咲湾の最奥部に在るための差と思われる。この事から、花咲港内での結氷の水温は港奥部では-1.42°で港口部では-1.52°前後となる。以上の結果から、花咲港の1月2月の塩分量は小さく、結氷温度も-1.5°前後となつてゐる事が判ると共に、港奥に行くに従い



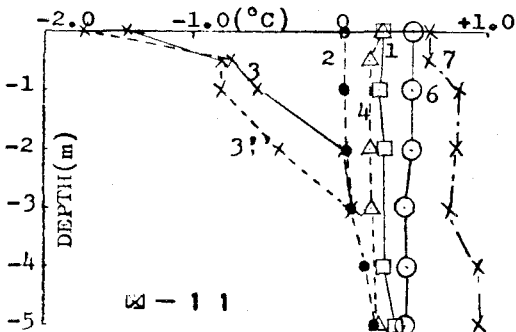
結氷温度が上がつていて、結氷限界と塩分量の関係はよく一致している。

7. 水温分布について

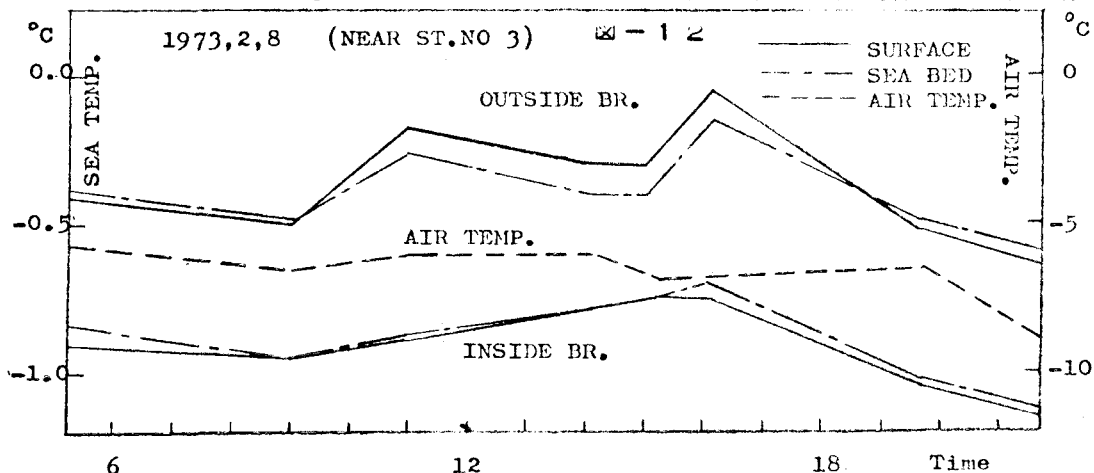
浅海域の海水温の季節的な変動は、外洋とは異なつて気温に敏感に
 応答する。図-10に10月の各観測点の海水温の鉛直分布を示した
 。水深の変化に対する水温の変化は非常に小さい。この時期では、港
 奥部の方が港口近傍より若干水温が高い。この時期は、寒流系の影響
 が花咲沖に進出している。図-10に1月の各地点の水温の鉛直分布
 を示す。測定点3は、結氷している部分の水温、測定点3は、結氷し
 てる所としてない所の境界である。これによると結氷してない所では
 鉛直方向での温度分布は一様であるのに対して、結氷部分では水面近
 傍では水温変化は著しい。これは外洋での一般の海水の生成される
 時の鉛直方向の水温分布とかなり異なっている。これは、この時期に
 は北西の風で、この結氷地点が吹きだまりとなるため、この地点の水
 がこの地点で生成されとは限らないためとも思われるし、この点まだ
 未解決である。さらに詳しい測定が望まれる。場所



的な水温分布を見ると一般に港奥ほど水温が低く、
 港奥と港口との水温差は約0.7°Cである。2月の
 傾向もこれと同じである。図-12に48時間連続
 水温観測の一部である。これは観測点3の近くの港
 内と港外の水温の変化を示したもので、鉛直方向に
 平均したものである。この48時間連続測定の記録
 から、気温は-5°C~-8°Cであるから海水は常に
 冷却されるべきであるが、港内、港外ともに9:0
 0時~16:00時まで水温の上昇が見られる。こ
 れは、潮汐の流入とも関係なく、明らかに日射量



の影響と思われる。これは他の測定点でも全く同じ傾向で、前日も全く同じ傾向である。花咲港が結氷するの
 としないのとの境界にある事から、また海水温が結氷温度に非常に近い事から、凍結防止にこの日射量が大き
 い働きをしている事が判る。根室近辺の海域において晴天の場合に太陽より1日に供給される熱量は約9



$0.2 \text{ Cal/cm}^2 \sim 2.0 \text{ Cal/cm}^2$ と推定され、これによつて港内の水温は約 $0.2^\circ \sim 0.4^\circ$ くらい上昇すると考えられる。

8. まとめ

今回の花咲港における調査結果から次の事が云える。(1) PH と電導度の測定から港外の海水と港奥の海水の交流は極めて穏やかと考えられる。また港奥は港口近傍に較べて PH、電導度ともに小さい値を示しているが、これは港内に流入する下水、工場排水、漁船等による汚染と考えられる。(2) 季節によつて、電導度が大きく変化するが、これは海流の流況によつて左右されるようで、10月、11月が最高の値を示し、1月2月頃が最低である。また1月2月では、港奥部の塩分量は27(%)で、結氷水温は -1.5° くらいとなり非常に結氷しやすい状態となる。これは、外海部では、塩分濃度の小さい寒流系の海流が強くなる事とこの時期の風向が北西で陸風となり、外洋の海水の交流と港内の海水の交流が夏期程大きくないものと施われるのと、潮汐の影響が冬期は一回潮が多く、潮汐による交流を期待できない。(3) 水温の測定から、冬期は港奥部程水温が低くなる。また、結氷する時でも水温の鉛直分布は一樣になるわけではなく、水面近傍での水温変化が著しい。また水温の時間変化から、日射による熱供給が大きい事が判つた。

一般に冬期における港内の海水の冷却源は、まず(イ)気温の低下(ロ)降雪が一番大きい影響と思われる。一般に空気と海水の界面の熱伝達係数は風速、温度差によつて、かなり大きく変化する事が知られている。また、海水の中における熱の移動も、海水それ自体のもつ熱伝導度と運動による運動熱伝導それに、水平方向の熱の移動として流れの効果、また密度差に判り対流と、海水内部における熱の移動、拡散現象も非常に複雑であるが、過去の大まかな値としては、海水自体の熱伝導は他の影響に較べて無視できるようである。

今後は熱の伝導、伝達の過程を明らかにする必要がある。また熱源として大きな影響を与えるものは、外海水の流入、日射量と考えられる。このために、目的による、熱の供給を正確に見積る必要がある。以上、浅海域における半分閉じられた水域の結氷の調査の一部を報告する。

おわりに当たり、本調査に協力して戴いた現鹿島建設の浜口寛君、フジタ工業の佐久間忍君、北大工学部の小野敏行氏、佐々木幹夫氏、大谷守正氏、それに現地の観測に協力して戴いた開発局根室港建設事業所の方々に深甚なる謝意を表する次第であります。

参考文献

- 1) 海洋の科学：須田 晴次
- 2) 海洋観測指針：日本海洋学会
- 3) 海洋調査要報：東海区水産研究所 第73報
- 4) 海洋物理 I：増沢謙太郎編
- 5) 石狩川結氷問題に関する調査について：福島久雄、柏村正和 開発局出版
- 6) 北氷洋の氷：H. H. プーゴフ
- 7) 海洋の分子物理学：V. V. シュレイキン
- 8) 海水の研究(第1報)～(第18報)：低温科学研究所業績果 福富孝治 他