

港内氷の結氷について (2)

○ 東海大 正会員 泉 列
北大 工 正会員 佐伯 浩
北大 工 正会員 尾崎 晃

§ 1. 緒論

北海道東北部に位置する根室市は根室港と花咲港の二つの港を有している。根室港は釧路、網走、サトロの各港と同じく港がオホーツク海に面しており、冬期間には港内が完全に凍結し、港の使用は不可能となる。これに対し(根室港から南へ約6.0 Km離れて太平洋に面している花咲港は港内の一部が結氷しても港内が完全に凍結してしまうことはなく不凍港として港の機能を果してきた。しかし近年になって急速に進められて来り港内の拡張工事に伴い港内での氷の発生が著しくなり、船舶の航行に支障をきたす日も出るようになった。このため我々はこの氷の発生を防止すべく対策を考えて来た。1977年から始めた調査はまず現地観測から行つた。図-1、図-2はそれぞれ花咲港の位置図と港内図を示し、又図-2には観測Stationを記してある。現在までの調査の内容はまず(i) 過去と現在において気温、水温、等に入ってきた変化が表れてはいないか。(ii) 防波堤の延長、港内拡張等によって港内水の流向、流速等の港内潮流変化がないか。(iii) 海水の塩素量、PH、電気伝導度、海水の淡水化等の海水の物理的性質に変化が起っていないか。(iv) 花咲港のような凍結限界域においては、日射による熱供給が、水温変化に影響を与えるのではないか、等の項目で(i)については、東海大水産研究所の報告によるデータと我々の現地観測からその変化がないことがわかった。(ii)については、現地観測と室内模型実験の結果から、港内と外海との海水の交流は少なくなり、したがって(iii)の海水の物理的性質も変り、海水の結氷に最も大きな影響を与える塩素量も外海水より少なくなり、このため港内での結氷温度が高くなることわかった。(iv)については、海水面への熱供給について、輻射量と海面工の気象条件との大きな関係性をつかんだが、その後の観測結果を後述する。

§ 2. 結氷の理論

浅海域の海水の結氷に及ぼす因子を挙げるならば、気温、水温、風速、輻射量等のほか多数の因子が考えられる。しかし海面における、熱の出入れを考えると、その機構は、大きく分けて次の3つを考える事ができる。

1) 気温と海水温の温度差によっておこるAir-Sea間の熱伝達による熱の出入。

2) 海水の蒸発散による熱の出入。

3) 日光及び天空からと、海面からの熱輻射に伴う熱の出入。

(しかし、これらの熱の出入以外に、降雪、降雨による、地からの熱源と、海の場合、当然、海水の流動に伴う、地からの熱の移流が考えられる。また海面における熱の出入り考える事ができる。

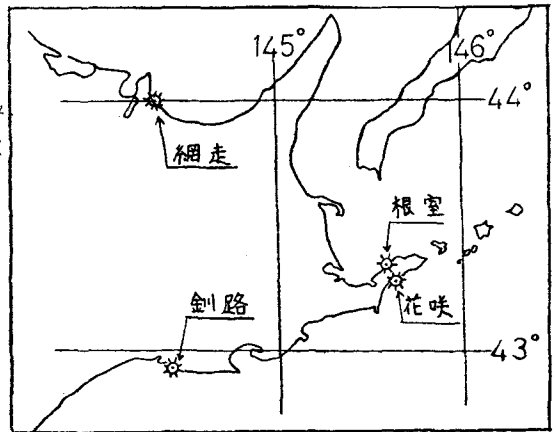


図 - 1

QA: 海面工の気温(℃)

QS: 海水温(℃)

A: 封符面積 (cm²)

K: Air-Sea間の熱の伝達係数 (cal/day/℃/cm²)

QK: Air-Sea間の熱伝達に伴う熱量 (cal/day/cm²)

QRS: 日光及び天空からの短波長放射による有効熱量 (Cal/day/cm²)

QRE: 海面から天空へ放射される熱量 (cal/day/cm²)

QRN: 熱放、輻射に伴う海水へ入る, Netの熱量

QE: 水面からの蒸発、あるいは凝結によって出入する熱量 (cal/day/cm²)

(Cal/day/cm²)

Q_S 降雪、降雨に伴って出入する熱量 (cal/day/cm²)

Q_T 他から熱が移流してくる熱量 (cal/day/cm²)

ある地点での熱の出入量は厳密には次式で表わされる。

$$\Delta Q = Q_K + Q_{RN} + Q_E + Q_S + Q_T \quad \text{--(1)}$$

ここで

$$Q_K = K(\theta_A - \theta_S) \quad \text{--(2)} \quad Q_{RN} = Q_{RS} - Q_{RE} \quad \text{--(3)}$$

Q_S については、降雨の場合と降雪の場合で熱の交換機構は異なるが、ここでは一般的に Q_S としておく。(1)式において

Q_S は、雨量と雨の温度あるいは雪量を測定しておけば、ある程度の予測がつく。

Q_T は、対象とする海域の流れが非常に小、エければ無視する事ができる。 Q_{RS} については、太陽からの距離、太陽の高度、空気の混濁の程度、太陽自身から発する輻射量の波長等によって値が変化する事になる。この理論日射量の計算はHannやAngotによりなされているが、奥工に海面に達する熱量は、雲のあり、なし、雲の厚さ等によって大きく変化する。よって直接RADIOMETERで測定せねばならない。

これに対して Q_{RE} は、海水が完全黒体として輻射を受けらるのと考え、ステファン-ボルツマンの法則から次式により求める事ができる。

$$Q'_{RE} = 0.827 \cdot \sigma \cdot (273 + \theta_S)^4 \quad \text{--(5)}$$

$$\sigma = 8.068 \times 10^{-12} \text{ cal/cm}^2\text{/min} \quad \text{--(4)} \quad Q'_{RE} \text{ は1分間当りの水面からの輻射量である。}$$

§3. 実測結果

(i) 港内の流況

港内の流況を明らかにするために、現地海岸でフロート観測を行なうと共に、水平縮尺 1/100、鉛直縮尺 1/100 の垂模型実験を行ない、模型の水底を荒モデル仕上げる事により、現地でのフロート観測の結果と一致させる事ができた。その結果、潮汐にする港内の流速の最大は 15cm/sec 程度となり、極めて少ない事が明らかとなった。

また以下の水温分布、PH分布から推定できるが、(1)式における、熱の移流項 Q_T は無視する事ができる。

(ii) 港内海水の水質 - PH -

港内と外海水との交流状況と港内への淡水の流入状況を調べのために、港内外のPHを調べた。その結果を図一三、図一四に示す。花咲港においては、夏季から秋季にかけて、漁獲量が多いため、周囲の工場排水はこの時期が一帯多く、冬季は、わずかの都市下水に限定されている。

この図一三の港内部分のPH値が低いのは、明らかに、淡水の流入が原因である。淡水流入が多い10月の場合、港外と港内部分のPH差は大きい。1月になると、淡水の流入が極めて少ないがやはり港外海水、港内の海水のPHの差はある。これは、この時期の淡水の流入がほとんどない事から、外海との交流が少しいたため、夏季から秋季に流入した淡水の影響が、冬季まで影響を示している。このPHの季節別な変化からも港内においては海水交流が悪く、(1)式におけると仮定する事は可能である。また港外のPH値が10月と1月で異なっているがこれは、海流の影響によるものである。

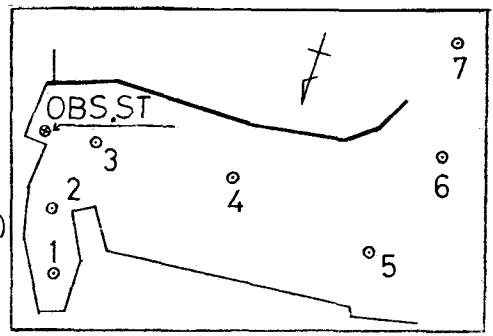


図 - 2

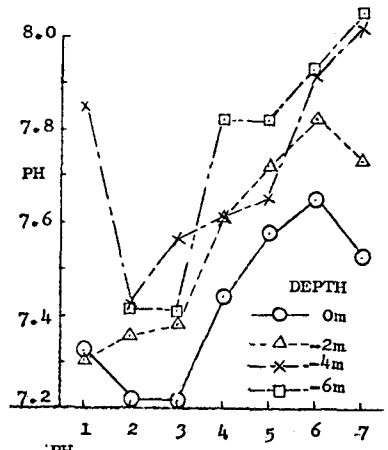


図 - 3

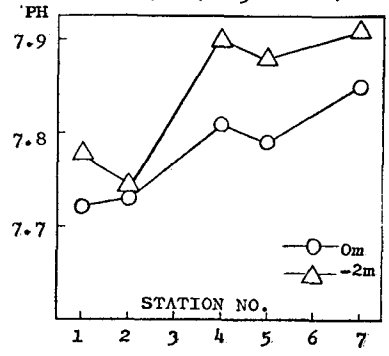


図 - 4

(iii) 港内の海水の性質—電導度—

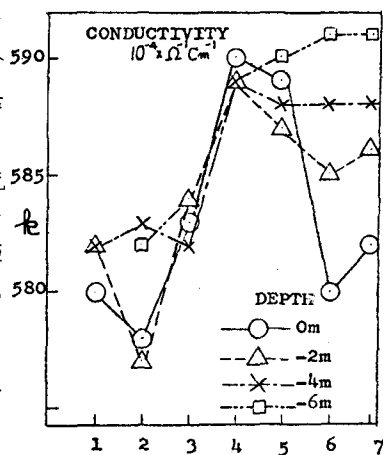
港内の海水の物理的性質を明らかにするために、電導度の測定例が図一五、図一六、に示す。電導度を測定する事により、塩分量、あるいは塩分量を明らかにする事ができるため、その地点の電導度が得られれば、結氷温度を求める事が可能であり、また淡水の流入状況及び海水交流を明らかに出来る。この図一五及び、図一六より、前の pH の場合と同じく、港奥部ほど電導度が少く、塩分量が少ない事を示している。また 1 月の方が電導度が小さくなっているが、これも pH の場合と同じく、海流の影響によるもので、一年間の外海水の塩分量の変化が、東海区水研によって細沙布岬ではなされているが、夏季から秋季にかけては塩分量が 99、冬季間は塩分量が少なくなっている。この事は、港内の結氷に対しては、結氷温度が上がるために、非常に困る事である。以上の pH と電導度の季節的な変化と港内の場所による変化から以下の事が明らかとなった。(1) 港内にばかりの淡水が流入している。(2) 港外海水と港内の海水の交流は非常に弱い事である。(3) 港外の海水の物理的性質も季節によって大きく変化しているが、これは海流の影響と思われる。(4) 港奥部、つまり St. 2.3 の領域は淡水の流入が多く、塩分量が他の領域に較べて少ないため、花咲港では一番結氷しやすい場所である事が予測される。(5) (1) 式における移流項 Q_T は日の単位であれば $Q_T = 0$ としてよい。

(iv) 港内の海水温について

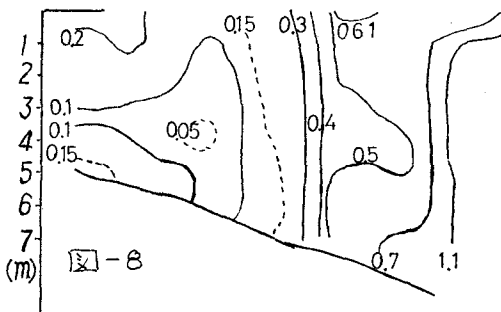
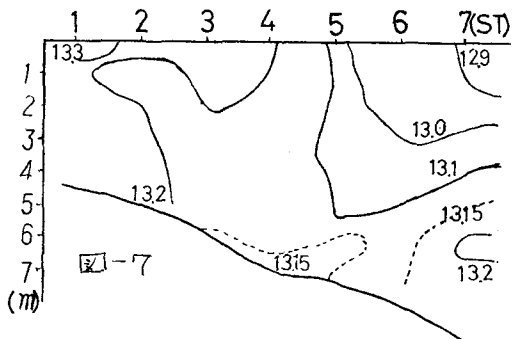
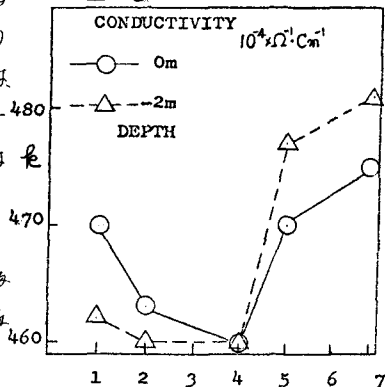
東カラフト海流の影響を受ける根室港の海水温は、1 月にはこの近辺の海水の結氷点である、 -1.7°C であるのに対し、1 月～2 月の花咲港近辺の水温は -1.0°C ～ -0.5°C であり、結氷点に近い状態であるといえる。

図一七、図一八、には各 Station を横断した水温分布を 10 月と 1 月にわけて図示したが、一般に夏季は港奥に行くに従って水温は高くなるのに対し、冬季は逆に港外の方が水温が高くなっている。又、夏季は表面の水温が高くなるため成層になり易く、冬季は表面からの冷却のため、対流により、鉛直方向の熱交換が盛んになり、鉛直方向の温度分布はほぼ一様である。さらに図一八、の温度分布から明らかになるように、St. 4 を境に港奥と港口との温度差が著しい。この温度分布は 2 月頃まで続き、港内の結氷範囲に大きな影響を与える。図一九、に 2 月初旬の結氷範囲を示したが、花咲港においては、まず A 領域から結氷が始まり、次に、B、C と広がって行く。さらに出来上がった氷はこの領域を越える北西の風によって港内の東南の隅に寄せられる。過去の港内の結氷状況をみて、一番広範囲に凍った領域は St. 4、5 ままであることと、図一八、の温度分布から明らかになる。外海水との交流は St. 5 より港奥へはあまり影響がないといえる。この図一七、図一八、の

図一五



図一六



水温分布は、 P け、電導度とも非常に似かよった傾向を示している事が明らかとはった。港内と港外の結氷度を各月別に表にしたのが表-1. である。これから明らかになるように塩分量から求めた結氷温度は、2月には 0.02°C 違う事になる。

§4. 海水温の変動について

§3の測定結果より、花咲港における結氷時期の海水の結氷水温は、塩分量より求める事ができた。また、海水温変動は(1)式で表わされるが、移流項 $Q_T \equiv 0$ がある事が明らかになったので(1)式は次の如くなる。

$$\Delta Q = Q_K + Q_{RN} + Q_E + Q_S \quad --(6)$$

ここで Q_S は、降雪・降雨による熱の出入に関する量で、雪量・降雨量が明らかになれば簡単に求める事ができる。我々の実測では、このような場合は除いたので、 $Q_S = 0$ とした。(6)式により単純となって(7)式の如く表わされる。

$$\Delta Q = Q_K + Q_{RN} + Q_E \quad --(7)$$

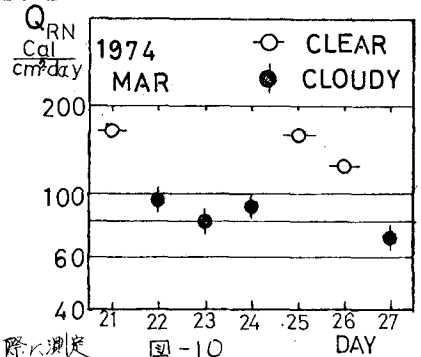
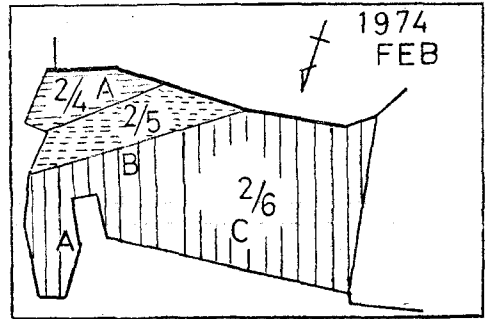
$Q_{RN} = Q_{RS} - Q_{RE}$ であり、 Q_{RE} は(7)式より求められるが、実際に測定してみると、必ずしも(7)式を満足していないため、我々は FUNK 示差輻射計を用いる事により、NETの輻射量を実際に測定を行なった。このNETの輻射量は、緯度と季節と天候によって変わる事になる。我々は2月から2月にかけて測定を行なった。港内の一部に結氷があったり、また2月には淡水が港内に入ってきたので充分なデータがとれなかったが測定結果の一部を図-10、図-11. に示す。 Q_{RN} はNETの輻射量である。図-10は2月の花咲と小樽のデータで、この時期は天候に関係なく Q_{RN} はマイナスの値をとる。晴れの時で $Q_{RN} \approx -110 \text{ cal/cm}^2/\text{day}$ 曇りで $Q_{RN} \approx -55 \text{ cal/cm}^2/\text{day}$ となつた。これに対して8月になると、図-11. より晴れの日には $Q_{RN} \approx 120 \sim 180 \text{ cal/cm}^2/\text{day}$ 曇りで $Q_{RN} \approx 80 \sim 100 \text{ cal/cm}^2/\text{day}$ となり、 Q_{RN} はプラスとなる。以上のように、

Q_{RN} は海水温の変動に大きな比重を占めている事が判る。この Q_{RN} の季節的な変動を明らかにする事は今後の課題であらう。この Q_{RN} が測定で求まる事になつたが Q_K と Q_E を直接求める事は困難である。 Q_E については、直接蒸発計を用いて測定する事は可能であるが、これらから測定された蒸発量は、実際の蒸発量との差が大きい事が数多く発表されている。これに対して、Edinger あるいは Dingman 等は、この(7)式の Q_K と Q_E を分けて考えないで、平衡水温あるいは水面熱損失係数と云うものを用いて表わした。

$$Q_K + Q_E = Q_{KE} = - \{ Q_0 + K'(\theta_S - \theta_A) \} \quad --(8)$$

この考えを用いると(7)式 次式で表わされる。

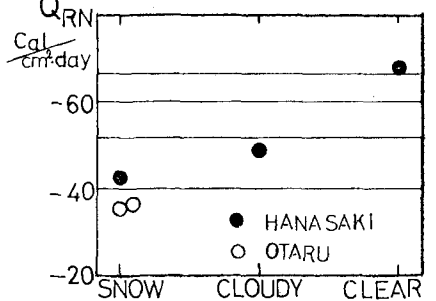
図-9



港内 (ST.123)		港外 (ST.7)	
塩分量 (%)	結氷温度 (°C)	塩分量 (%)	結氷温度 (°C)
34.0	1.84	34.6	1.87
28.8	1.56	29.0	1.57
28.2	1.52	29.0	1.57

表-1 (上から10月, 1月, 2月)
の順

図-11



$$\Delta Q = Q_{KE} + Q_{RN}$$

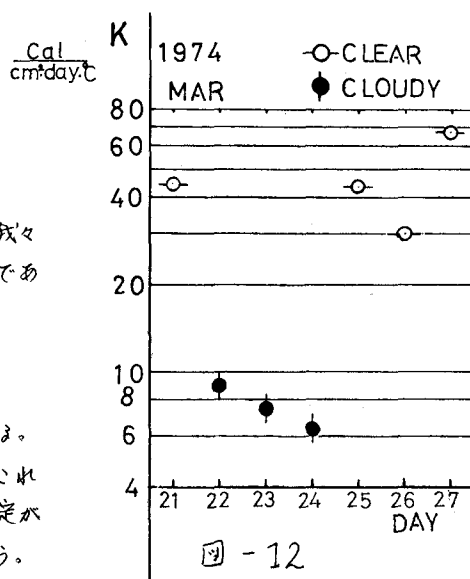
$$= Q_{RN} - \{Q_0 + K'(\theta_S - \theta_A)\}$$

$$= Q_{RN} - K'(\theta_S - \theta_A) - Q_0 \quad \text{--(9)}$$

ここで Q_0 及び K' は、風速と気温によって決まる。ここで我々は、 Q_0 を求めるにはデータが少ないために、一応(9)式の変形である(10)式を用いた。

$$\Delta Q = Q_{RN} + K(\theta_A - \theta_S) \quad \text{--(10)}$$

水温分布と気温と Q_{RN} を測定する事により K を求める事になる。この K の値を同一に示す。この時の風速は、ほぼ零であった。これで一応 Q_{RN} と K の値が求まったが、 Q_{RN} については通年測定が必要であり、 K については、風速の影響を考慮する必要があろう。



1. 港内の潮流観測及び実験の結果より港内水と港外水の海水交流は悪い事が明らかとなった。港内の潮流による最大流速は 1.5 cm/sec. であった。
2. 港内海水の PH. 及び電導度の測定から、海水交流が良くない事が明らかとなり、港内への淡水の流入により、塩分量が低下し港奥部(船舶の利用頻度が最も大の領域)では港の他の領域に較べて結氷温度が高く、結氷しやすい。
3. 水温分布より、結氷期には、海水の鉛直方向の拡散が顕著なため、港外水の流入による、港内水の温度上昇はふたふたの領域くらいに範囲である。
4. 海面での熱交換の重要な要素である。輻射量と熱損失係数を求めたが、それによると結氷期では輻射量と他の要因による損失熱量は、ほぼ同量である事が明らかとなった。
5. 結氷期の花咲港の海水温度は1℃以下前後で、この時期の塩分量から求めた結氷温度が-1.5℃となり、花咲港が、結氷するかもしれない境界にある事が明らかとなった。以上の事から結氷を防止する対策としては、まず港内海水を氷りにくくするためには、塩分量が多い方が良く、まず港内に流入している都市下水、工場废水等は港内に流出させないようにすべきである。さらに、港内水に較べて暖かい港外の海水との交流を良くするために、港奥部に近い所に、防波堤の一部をとり除き、港奥まで、港外水との交流が行なわれるようにすべきである。また、これによって、塩分量の多い外海水が入る事にもなる。花咲港の結氷の始まる地点が、この港奥部である事から、この結氷を押える事によって全体の結氷がなくなるから遅れる事になると思われる。

あとがき、本研究の調査を行こなうにあたり御協力戴いた、開港局建設課の方々と並びに、釧路開発建設部、釧路建設事業所の方々に深甚なる謝意を表するとともに、調査に参加された、茨口寛、佐々間忍、山室裕一の諸氏に紙面をかりて、謝意を表す次第であります。

参考文献、1. Dingman, S.L: Equilibrium Temperatures of Water Surfaces as Related to Air Temperature and Solar Radiation, Vol 8, No.1, Water Resources Research, Feb 1972

2. 尾崎、佐伯、泉 港奥内の結氷について (1), (2) 年次学術講演会論文、土木学会、S 48, 49 年。

3. 福富孝治他 海水の研究 (第1報 ~ 第18報) 低温科学研究所業績

4. H. H. プーボフ 北氷洋の水