

港内結氷のメカニズムに関する調査研究

梅 沢 信 敏*・ 平 沢 充 成*・ 杉 本 義 昭*
水 野 雄 三*・ 遠 藤 仁 彦**

1. ま え が き

北海道内にある比較的寒冷域の港湾、漁港では、冬期間に港内が結氷し、また、オホーツク海沿岸を中心とする地域では流水の来襲もみられ、これらの現象は観光や水産資源育成などの面を除けば、経済活動においてマイナスの面が多い。しかしながらそれら海水の制御が可能になれば、対象地域の経済活動の活性化が一層促進されることが期待される。港内結氷対策としては、熱供給法や強制排除法などいくつかの対策工法が考えられるが、それらを有効に活用していくためには、海域別の結氷特性やどのような条件のときに結氷が始まるのかといった各港の結氷機構を解明することが不可欠である。本研究は北海道沿岸における港内結氷特性を解明することを目的に、太平洋、日本海、オホーツク海の3海域別に対象港を選定し、昭和62年度～平成元年度までの3か年分の現地調査結果をとりまとめたものである。

2. 調 査 概 要

本調査は、港内結氷に関する基礎データを収集することを目的に昭和62年度より、毎年11月末～3月末までの気温・水温測定および波内結氷状況観測などを実施してきた。調査対象港は図-1に示す計7港において行った（ただし、昭和62年度は大洋漁港を除く）。

(1) 気温・水温測定

港内の1箇所、気温2点と水深別の水温8点を連続測定した。測定位置の水深はおおよそ5m前後である。測定装置は測定値をアナログとデジタルで同時に表示可能な記録計と白金測温抵抗体のセンサーより構成されている。水温測定用センサーは水深方向に水面から0.25, 0.50, 0.75, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 5.0 (m) に設置するのを標準とし、最深部センサーの設置水深は干潮時に海底面に接触しないように各港決定した。また、調査開始前と終了後の2回、水温・気温測定装置のキャリブレーションを行った。記録紙にデジタル表示された毎正時の気温・水温データは測定終了後、フロッピーディスクに



図-1 調査港位置図

データファイルを作成し、パソコンにより異常値処理、キャリブレーション補正を施した後、諸計算を行った。

(2) 港内結氷観測

調査期間中の結氷状態を調査票に毎朝1回記入した。調査票には港内平面図に結氷している場合はその位置を記入することの他に結氷の程度を7段階に分類し、水温測定位置の結氷状態や前日からの港内全体の結氷状態の変化、港外波浪状況、流水状況、砕氷作業状況などを記入するものである。また、これとは別に大洋漁港において昭和63年度と平成元年度に港内のほぼ全域を夜間も撮影可能な自動カメラを用いて1時間毎の結氷状況の定時撮影も併せて行った。

3. 調査結果と考察

(1) 海域別の港内結氷特性

港内結氷は、海水が結氷温度に達することによって生じる現象である。海水の結氷温度 T_f (°C) は、海水中の塩分量を S とすると一般に次式で示される。

$$T_f = -0.0137 - 0.051990S - 0.000072S^2 \dots (1)$$

(1) 式によると、北海道周辺3海域の結氷温度の概略値は表-1のように求められる。また、港内の海水温度変化は、主に外海水との海水交換と海面での熱量交換により生じると考えられる。

それらの影響因子を挙げると前者は、外海水の水

表-1 海域別の結氷温度

海 域	塩分量 S	結氷温度 (°C)
オホーツク海	約32.5	-1.78
太 平 洋	35.0	-1.92
日 本 海	35.0	-1.92

* 正会員 北海道開発局開発土木研究所港湾研究室

** 正会員 運輸省港湾技術研究所耐波研究室

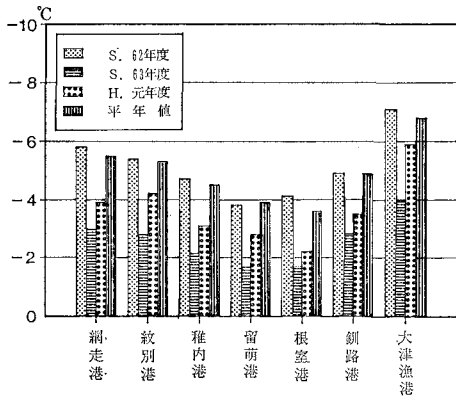
温, 潮位差, 外郭施設の平面配置および構造型式, 来襲波浪などがあり, 後者は, 気温, 港内水温, 太陽輻射熱, 降雪, 風速などが関係する。以下, 海域別の港内結氷特性を把握するため, 上記因子の中で影響が大きいと考えられるものをいくつか選んで検討を行ってみた。

図一2は結氷調査を実施した3か年分の12月~2月までの平均気温を平年値と併せて示したものである。ここでの気温データはすべて気象庁の測候所およびアメダスによる。また, 平年値とは1951~1980年までの30年間の平均値である。これより, 平年並に冷え込んだのは昭和62年度だけで, その後の2年間はいわゆる暖冬であったことがわかる。特に, 昭和63年度は平年に比べて平均気温で 2°C 前後も高かった。次に岸壁付近での気温測定データから積算寒度を計算したものが図一3である。ここでの積算寒度 ΣT とは, 日平均気温が表一1に示した海水の結氷温度以下の場合にその温度差を累積したものである。なお積算開始日は概ね日平均気温が結氷温度に達した日とした。図一3より, 全体の傾向としては積算寒度もS.63→H.1→S.62の順で大きな値をとり, 昭和62年度は $\Sigma T=190\sim 370^{\circ}\text{C}\cdot\text{day}$, 昭和63年度は $\Sigma T=120\sim 230^{\circ}\text{C}\cdot\text{day}$ であり, 積算寒度は約2/3であった。また, 個別にみると例年, 釧路港が積算寒度が一番大きく, 留萌港が一番小さい。他の5港はその年に

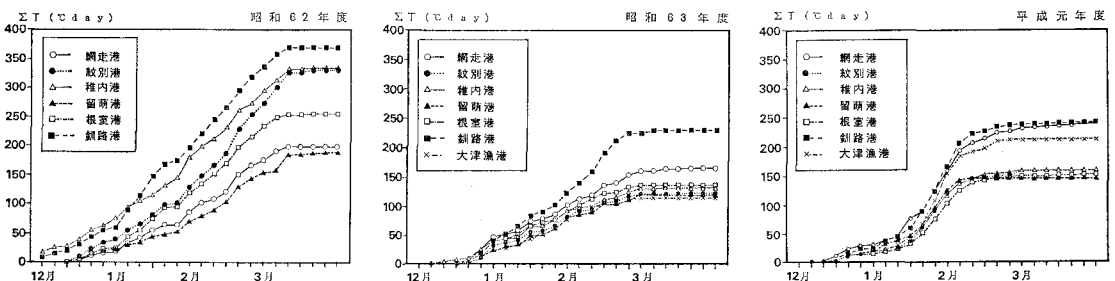
より順位が前後した。

では, このような気温変動において実際の港内結氷の状況がどうであったかを調査票の記録をもとに整理したものが図一4である。これをみると特に暖冬であった昭和63年度は大津漁港を除いて港内で全面結氷した港はなく, また, 日本海側の稚内港, 留萌港, 太平洋側の釧路港では冬期間一度も結氷せず, 気温特性と同様に特異な年であったことがうかがえる。海域別の傾向をみるとオホーツク海側の網走港, 紋別港が最も結氷しやすく2月上旬から下旬にかけて港内が全面結氷することが多い。日本海側の2港は1月下旬から2月上旬にかけて港内の一部が結氷するケースが多いが, 稚内港では昭和62年度にみられるように3月頃まで結氷するケースがあった。太平洋側の3港は釧路港(西港区)がほとんど結氷しないのに対して, 根室港(花咲地区)では1月から3月にかけて断続的に結氷・融解を繰り返し, 多いときで港内の東側半分が結氷した。大津漁港は3港の中で唯一全面結氷が一時期みられる港であり, 結氷期間は1月初旬から2月中旬までが大半である。以上のように各海域あるいは同じ海域の中でも各港によって結氷状況が異なることがわかるが, このことは先の気温特性のみでは説明できない。

そこで, 次に水温特性に着目してみる。図一5は観測期間中の港別の海水の保有する日平均熱量を5日おきにプロットしたものである。これによると全体的に12月から1月にかけて海水の保有熱量が減り続け, その後, 昭和62, 63年度は2月下旬まで横ばいとなり, それ以降は上昇していくという傾向がみられる。また, 平成元年度は熱量の上昇期が2月中旬から始まり, この時期から冷え込みが緩んだことと対応している。海水の熱量減少期間の特徴として熱量がほぼ直線的に減少していることがあげられる。ほぼ, 12月1か月間の熱量減少勾配, 言い換えると 1cm^2 当り1日に海水から奪われる熱量を回帰直線より求めると, 太平洋側が $56\sim 104\text{cal}/\text{cm}^2/\text{day}$, 平均 $74\text{cal}/\text{cm}^2/\text{day}$ と最も大きく, オホーツク海側が $32\sim 77\text{cal}/\text{cm}^2/\text{day}$, 平均 $53\text{cal}/\text{cm}^2/\text{day}$, 日本海側が $34\sim 76\text{cal}/\text{cm}^2/\text{day}$, 平均 $51\text{cal}/\text{cm}^2/\text{day}$ とほぼ同じで



図一2 港別平均気温 (12月~2月)



図一3 港別積算寒度変化

あった。図-6 は北海道周辺海域の12月の表面水温の平年値を示したものである。日本海側の北部は対馬暖流の影響でこの時期でも表層の海水温が8~10℃と高く太平洋側の東部は6~8℃、また、オホーツク海側は千島海流(寒流)の影響で4~6℃と最も低い。このように海水の熱量減少期のもととの保有熱量に各海域ですでに差があることが、ほ

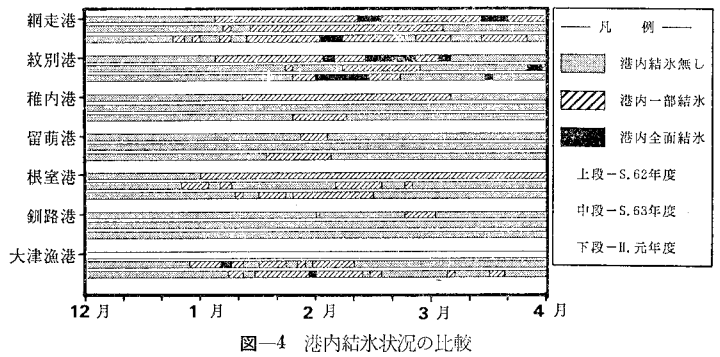


図-4 港内結氷状況の比較

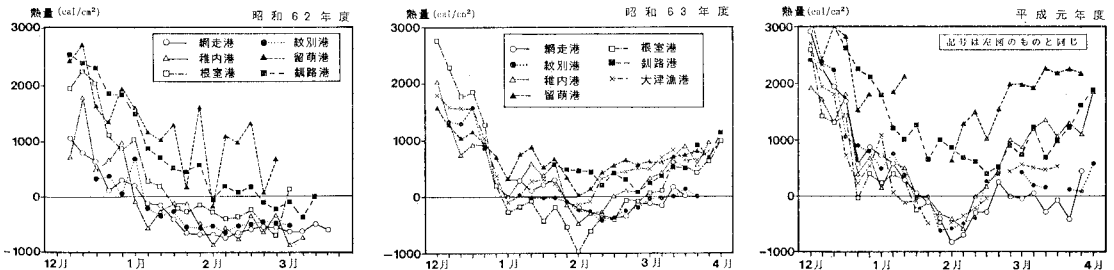


図-5 海水の日平均保有熱量変化

ぼ同じ熱量減少勾配でも結氷状況に違いを与える一つの要因になっているものと考えられる。

図-7 は年別の12月~2月までの日平均日照時間を平年値と併せて示したものである。図は海域別の特徴をよく表しており、太平洋側は冬期間晴れの日が多く、日平均6時間前後の日照時間があり、続いて、オホーツク海側が4時間前後、日本海側が2時間前後となっている。また、全港とも各年平年並かそれ以上であった。このような海域別の日照時間の違いは、太陽輻射熱による海面への熱供給量にも大きな影響を及ぼすと考えられ、このことが例えば平均気温では日本海側よりオホーツク海側の方が低いにも係わらず、海水の熱量減少勾配がほぼ同じ値をとっている理由の一つであると推定される。

次に、オホーツク海が他の海域に比べて港内結氷が生じやすい理由として、海水温がもともと低いことその他に、もう一つ大きな要因として流水の来襲があげられ

る。流水による影響は、港内結氷の結氷過程から2つのケースに分類できる。第一の影響は流水の直接的な影響であり、流水が港内に流入する場合である。これは主に通常の港内結氷が融解した後に、沖合に後退していた流水帯が風向きにより再接岸するような場合にみられる。その例として昭和63年度および平成元年の3月下旬に紋別港において、このような現象により港内の全域が流水で埋めつくされた。第二の影響は流水の間接的な影響であり、流水が沖合に見えるいわゆる流水初日の後、流水の接近に伴って港内結氷の範囲が急速に拡大することである。そのような状況の一例を示したものが図-8である。これは昭和62年度の網走港の場合であるが、流水初日の後、港内の結氷範囲が広がっていくようすがよ

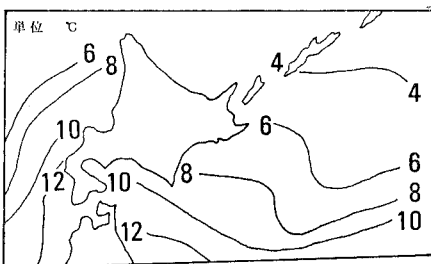


図-6 北海道周辺海域の表面水温 (12月)

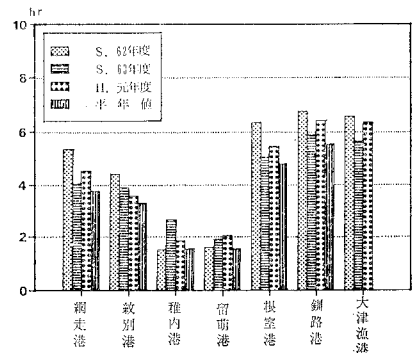
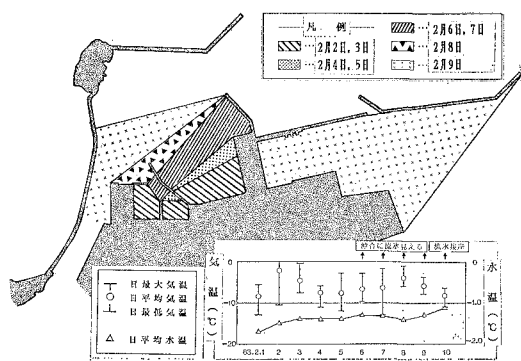


図-7 日平均日照時間 (12月~2月)



図—8 流水接近時の港内結氷の変化（網走港，昭和 63 年 2 月）

くわかる。また、図中には同時期の気温と水温の変動も示しているが、これを見る限り、特に急激な気温や水温の低下はみられない。このことは宮部(1988)の報告にあるとおり、流水の襲来によっても波浪エネルギーが減衰し、港内の静穏化が促進されたためと推察される。

また、太平洋側で天津漁港が結氷しやすい理由として平均気温が低いこと、あるいは港内の水深が比較的浅く海水が冷やされやすいことのほかに、港が掘込み式であるために静穏度が高いことも一因であると推察され、港内の静穏性が結氷範囲の拡大に影響を及ぼしているものと考えることができる。

以上、海域別の港内結氷状況を整理すると次のとおりである。

- 日本海側～1月から3月にかけて港内が一部結氷する場合があるがその範囲は小さい。これは暖流の影響で、初冬の外海水の温度が高いことが大きく影響している。また、日本海特有の冬期風浪のため日照量は少ないが、高波高と強風により海水交換が盛んであることも関係していると考えられる。

- オホーツク海側～結氷期間は12月下旬から3月下旬までと3海域中で一番長い。暖冬のときはこの期間で結氷しないときもあるが平年並の寒さのときは厳冬期に港内が全面結氷する。これは寒流の影響で初冬の海水温が低いことと流水の来襲により港内の静穏化が進むことが大きく影響している。また、3月中旬過ぎに港内結氷がない場合には流水が港内に流入する場合がある。

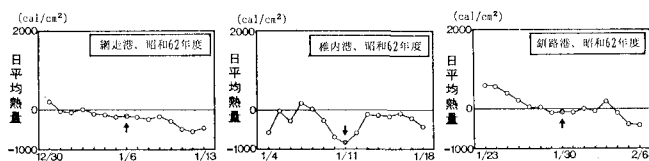
- 太平洋側～根室港および天津漁港は12月下旬から3月下旬にかけて港内結氷が生じる。天津漁港では厳冬期、港内が全面結氷する。これに対して、釧路港はほとんど結氷しない。これは観測を行った西港区は

外郭施設など現在整備中の港であるため、外海水との海水交換が盛んであることと日照率が高いことが大きな要因であると考えられる。

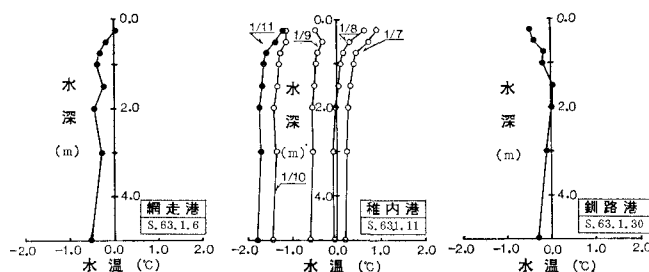
(2) 港内結氷パターン

ここでは、どのような状況のときに実際に結氷が生じるのかという点と港内結氷の日変化について説明する。

図—9 は結氷が生じた各海域の結氷初日前後1週間の海水の熱量変化を示したものである。結氷初日とは、港内結氷観測により対象港内の任意点で結氷が初めて観測された日を示す。図中の↓印は結氷初日を示すが、稚内港を除く各港とも日平均熱量 0 cal/cm^2 、すなわち水深方向の平均水温が 0°C 前後で結氷が始まっていることがわかる。海水の結氷温度を約 -1.8°C と考えると、全層が結氷温度に達した場合の水深 5 m 当りの熱量は約 -900 cal/cm^2 となるが、今回の観測ではそれより高い熱量を保有していても結氷が生じたことになる。この原因の一つとして、降雪の影響が考えられる。図—10 は結氷初日の各海域の日平均水温分布であるが、網走、釧路港は表面水温がほぼ 0°C となっており、両港でその前日あるいは前々日に雪または吹雪となっていたことから降雪が海水より比重の小さい雪泥状あるいは融解した水となり海面上に淡水層を形成することにより、結氷が早期に生じたと考えられる。稚内港については結氷初日 4 日前からの水温変化を示したが、水深方向に均一に海水が冷却され、水深方向の水温がほぼ結氷温度に達してから結氷したことがわかる。また、天津漁港において港内結氷時に氷片および港内のごく表層と底層の海水の塩分を分析した結果、表層の塩分が 27.4、底層の塩分が 32.6 と表層の塩分の方が低くなっていることがわかった。これは測定日の前々日に 8 mm の降雪があったことや背後



図—9 結氷初日前後の日平均熱量



図—10 結氷初日の日平均水温分布

の低湿地からの地下水の流入が原因しているものと推定されるが、氷片の塩分が 12.7 とかなり低いことから、結氷・融解の繰り返しによって表層に塩分濃度の低い層が形成されるものと考えられる。以上のことから結氷初期の港内結氷機構は、次の 2 ケースに分類されると考えられる。

① 水深方向の海水温が結氷温度に達して結氷する。

② 降雪や結氷の融解などにより、海面に淡水層あるいは低塩分層が形成され、海水温が通常の結氷温度に達する前に結氷する。

次に、大津漁港において実施した港内結氷状況の定時撮影結果をもとに 1 日の結氷状況の変化と気温、水温および日照時間との関係を調べた結果を図-11 に示す。この結果から判明すると、大津漁港では概ね結氷状況の変化パターンを以下のとおりに整理できる。

① 港内が 1 日中結氷している条件

- ・ 日平均水温が -1°C 以下
- ・ 日平均気温が -10°C 以下

② 港内が 1 日中結氷しない条件

- ・ 日平均水温が 0°C 以上
- ・ 日最低気温が -10°C 以上
- ・ 日平均気温が -5°C 以上

③ 港内が朝は結氷するが昼間には融解する条件

- ・ 上記①と②の中間の場合

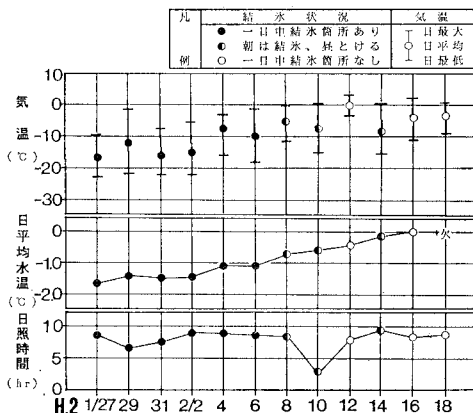


図-11 結氷状況の日変化 (大津漁港)

表-2 結氷初日の予測結果

港 名	昭和62年度		昭和63年度		平成元年度	
	予 測 日	結氷初日	予 測 日	結氷初日	予 測 日	結氷初日
網走港	1. 1	1. 6	データ欠測多し	1. 6	1. 5	12.24
紋別港	1. 1	1. 4	データ欠測多し	1.13	1. 5	1.16
稚内港	1. 6	1.11	——	結氷せず	1. 7	12.26
留萌港	2. 1	1.26	——	結氷せず	1.17	1.17
根室港	1.11	12.31	12.30	12.26	1. 1	1. 6
釧路港	1.24	1.30	——	結氷せず	——	結氷せず
大津漁港	——	——	1. 3	12.27	12.31	12.29

(3) 港内結氷開始時期の簡易予測

前節より港内結氷が早期に生じる条件は、海水の日平均熱量が 0 cal/cm^2 付近の場合が多いことから、この値を結氷開始の目安とし、熱量減少期の減少勾配を回帰直線より求めて結氷初日を予測した結果を表-2 に示す。この方法によると、今回の場合、概ね10日程度の差で結氷初日が予測できた。

4. あとがき

今回実施した北海道沿岸の港内結氷調査により、海域別のおおよその港内結氷パターンと全道的な港の水温変化特性が把握できた。また、今後の港内結氷予測手法の開発に向けて、一つの方向を示すことができたものと考えられる。

この種の調査は年変動あるいは長期的な気候変動が伴うため、今後ともデータの蓄積を図るとともに精度の高い港内結氷予測システムを開発し、港内結氷対策工法の有効的活用につぎ付けていきたい。

最後に現地調査の実施にあたり、北海道開発局各港湾建設事務所、同事業所の関係者の方々には厳冬期にもかかわらず計測器の設置やメンテナンスおよび日々の結氷観測など多くの面で御協力いただいた。ここに記して、深謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- (財)日本気象協会北海道本部編：北海道の気象, 1987.12~1990.3.
- 日本海洋データセンター編 (1985)：海洋情報便覧, pp. 132.
- 宮部秀一 (1988)：紋別海域の波浪特性, 第 31 回北海道開発局技術研究発表会講演概要集, pp. 893~898.