

寒冷地港湾における港内結氷特性に関する研究

山本 泰司* ・水野 雄三**・笹 島 隆彦***
 山 中 浩 次****・時 川 和 夫*****

1. 緒 言

北海道内の比較的寒冷な地域の港湾・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る。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。このような地域で、外海に海水が存在せず港内が結氷するような場合、港内に適切な結氷対策を施すことにより漁船などの小型船舶の離着岸・出入港の利便性が飛躍的に向上すると考えられる。結氷対策としては熱供給法や強制排除法などがあるが、それらの対策工法を有効に活用するためには、各港の結氷特性や結氷発生要因を解明することが重要である。これら港内結氷の基本特性を把握するため、1987年度から北海道内の港湾・漁港において港内結氷調査を実施している。

港内結氷は、海水が結氷温度まで冷却されて生じる現象であるが、梅沢ら(1990)は、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している。

- パターン①：海水温が水深方向に一樣に結氷温度に達し結氷を開始する。
 パターン②：降雪や海水の融解などにより海面に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を開始する。

本研究は、これらの結氷機構を室内実験により確認し、また過去5ヶ年の現地観測データに基いて、結氷の発生条件や結氷発生場所に関する各港の特性について検討したものである。

2. 海水の結氷機構

2.1 急激に冷却された場合の結氷機構

室内温度を任意に設定可能な低温実験室において、水槽内の塩分量35‰の人工海水が結氷に至るまでの水温変化と結氷状況を観察した。水槽は、底面および3側面

を5cm厚のスタイロフォームで断熱しており、1側面は観察用にガラス張りとなっている。室温を一定に保ち、水槽内の水温が7°Cに下るまで攪拌したのち放置し、水温が5°Cになった時点から観測を開始した。実験装置および水温測定位置を図-1に示す。

海水の結氷温度 T_f (°C) は海水中の塩分量 S (‰) により式(1)で示される。

$$T_f = -0.0137 - 0.05199S - 0.000072S^2 \dots\dots (1)$$

また同様に、最大密度温度も塩分量 S の増加にともなって低下するが、両者の減少勾配が異なることから $S = 24.7‰$ を境に結氷機構が異なる。すなわち、真水の場合は外気温が下がると水深方向に温度勾配が生じ表層が結氷温度に達して結氷を開始するが、海水は通常35‰程度の塩分を含むため水面が冷却されると、海水が鉛直循環し全層が結氷温度まで冷却されてから水面から結氷が生じることになる。

図-2は室温が-5°Cの場合の水温の鉛直分布の時間変化を示している。観測開始後、水温は鉛直方向にほぼ一樣に降下し、67時間後に結氷し始めた。このときの水深1cmでの水温は-1.8°Cであり、 $S = 35‰$ として式(1)から得られる結氷温度 $T_f = -1.92°C$ に近い温度まで下がっている。同様の実験を、室温を-5、-10、-15、-20°Cとした場合の結氷開始時の水温分布を図-3に示す。室温が低いほど水温が高い状態で結氷を開始しているが、いずれの室温の場合でも表層の水は $T_f = -1.92°C$ に達しているはずである。このことは、外気温と海水の温度差が大きく海水が急激に冷却される場合は、鉛直循

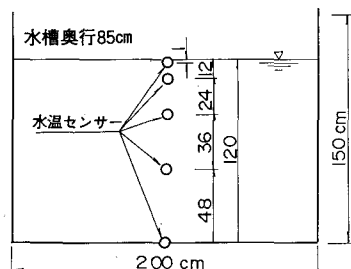


図-1 結氷特性実験装置

* 正会員 工修 北海道開発局開発土木研究所水工部港湾研究室
 ** 正会員 工博 北海道開発局開発土木研究所水工部港湾研究室長
 *** 正会員 北海道開発局開発土木研究所水工部港湾研究室副
 室長
 **** 正会員 北海道開発局開発土木研究所水工部港湾研究室
 ***** 正会員 工博 (社)寒地港湾技術センター参与

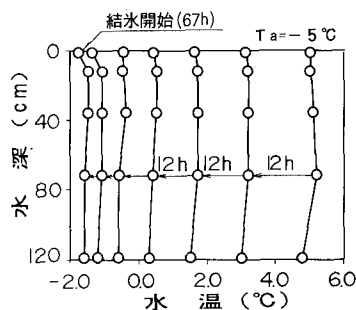


図-2 結氷開始までの水温変化

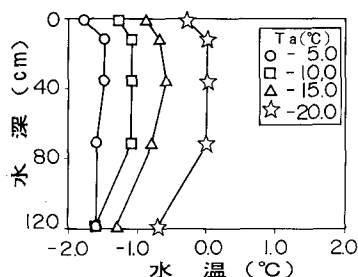


図-3 結氷開始時の水温分布

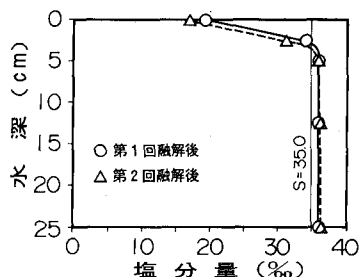


図-4 凍結融解後の塩分量

環が十分行われないうま表層が結氷温度に達し結氷を始めることを示している。なお、水深 120 cm での水温が中層部に比較して低くなっているのは、水槽底面での断熱が不完全のため、底面からも熱が奪われているためと思われる。

2.3 凍結融解にともなう塩分量変化

前記の低温実験室において、人工海水 ($S=35\text{‰}$) の水深を 25 cm とし、室温を 24 時間サイクルで $+5\sim-10^{\circ}\text{C}$ に変化させて水槽内の人工海水を凍結融解させ、融解時の塩分濃度をサリノメーターを用いて測定した。塩分測定は水面から 0, 2.5, 5.0, 12.5, 25.0 cm の 5 点で行った。図-4 に実験開始前、1 サイクルおよび 2 サイクル終了時の塩分濃度分布を示す。実験前の塩分量は水深方向に一樣に 35‰ であったが、1 度結氷した後の表面水の塩分量は 19.2‰ と開始前に比べ小さくなっている。これは、海水が結氷するとき含まれる塩分の多くが海水中に放出され、海水の塩分量は海水の $1/3\sim 1/6$ 程度となり(木下, 1988), こうした水が融解することにより水面に低塩分層が形成される。塩分が減少すると結氷温度は上昇するため、水が融解したあとの水面の低塩分層はより凍結しやすくなる。さらに、このままの状態再度凍結融解させた後の水面の塩分量は 17.0‰ となった。

以上の実験から、海水が緩やかに冷却された場合は前述の結氷パターン①となり、海水の凍結融解等により水面の塩分量が低下した場合はパターン②となる。また、気温が相当低くなった場合は水面のみが結氷温度まで低下し結氷を開始する(パターン③)ことが確認された。

3. 現地結氷調査の概要

本調査は、北海道内の 6 港湾において 1987 年度に開始され、毎年 11 月末～3 月末までの気温・水温測定および港内の結氷状況を観測しており、1991 年度までに漁港 2



図-5 調査港位置図

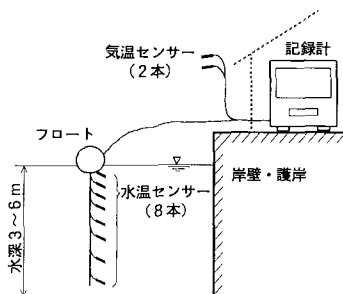


図-6 水温気温測定装置概念図

港を加え計 8 港で実施している。これは、各港の護岸から近い水深 3～6 m の位置で水温を連続的に測定するとともに、毎日 1 回港内の結氷状況を観察し結氷箇所を港内平面図に記録するものである。調査港の位置を図-5 に、水温測定装置の概念図を図-6 に示す。

4. 現地調査の結果

4.1 気温・水温特性からみた各港の結氷状況

北方海域あるいは河川や湖沼における氷厚の成長は、積算寒度すなわち零度以下の日平均気温の和(度・日)により、比較的良く説明できることが知られている。しかし、梅沢ら(1990)は、北海道の港内結氷現象をこのような気温特性のみから説明することは困難であると指摘している。その理由としては、気候的に北海道は亜寒帯の最南端に位置し冬季においても気温及び港外の海水温が比較的高いこと、及び港内の水深が浅く外郭施設に囲まれた港内の水塊容積が比較的小さいため、港内外での海水交換や気温変動の影響を受けやすいことが考えられる。

初めに各港における結氷の状況と気温の関係に着目してみる。図-7 に、各港の結氷状況を示す。紋別港、網走港、根室港、大津漁港では毎年結氷が発生しているが、留萌港、稚内港、羅臼漁港では、一度も観測されない年もある。また、釧路港では 1988 年度以降は結氷は観測されていない。図-8 に、1987～1991 年度の 12 月～2 月の

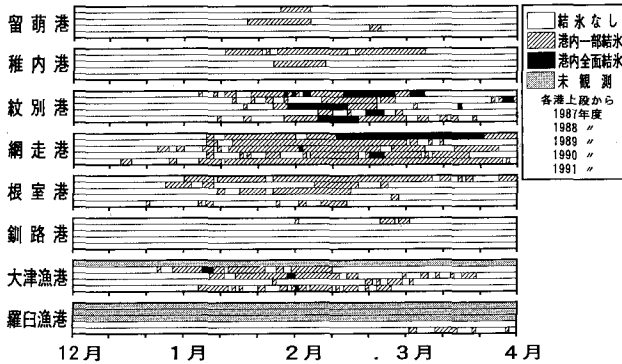


図-7 各港の結氷状況

平均気温を平年値と併せて示す。調査を開始した1987年度は平年並みの気温であったが、それ以降の平均気温は平年値よりも高く暖冬であり、隔年で高い低いを繰り返している。この気温条件と図-8の結氷状況を対比してみると、各港とも1987年度には結氷頻度や結氷の程度が高く、暖冬になるほど低くなる傾向にある。

次に、結氷状況の日変化と気温・水温の関係について検討する。図-9は、1990、1991年度の調査で結氷が観察された代表港における結氷状況と日平均気温・日平均水温の推移を示している。図-9(a)は1990年度の留萌港の場合であるが、全道的に気温が低下した2月20日前後に、港内の貯木場のみが全面結氷した。この時の日平均気温は -10°C まで低下しているが、水温は $+2^{\circ}\text{C}$ 以上となっている。これは、水温が航路泊地に面した護岸前面で測定されていることによる。貯木場は閉鎖性が高いため静穏性が高くかつ海水交換による熱移動がされにくい。また、水深が浅く熱容量が小さいため結氷が生じやすい。さらに、貯木場が留萌川に面しており導流堤堤体間に隙間があることから、河川水の流入により塩分量が低下し結氷温度が高くなっている可能性も考えられる。図-9(b)は1990年度の紋別港であり、流水の来襲状況も併せて示している。2月上旬に港奥部の一部で結氷が生じたが、この時期は沖合に流水が存在している期間に重なっている。また、2月中旬以降の約一週間は流水の来襲により港内が全面結氷した。この期間で特徴的なのは気温は変動しているが、水温は -1.6°C で一定値を保っていることである。図-9(c)は1991年度の大津漁港であり、1月から3月にかけて何度も結氷・消滅を繰り返している。1月中の水温は 0°C 前後と比較的高いにもかかわらず、気温が低下すると結氷を生じ、高くなると消滅しているようである。これは、気温が相当低い場合に表層の水温が下がり結氷するパターン③であると考えられる。また、2月18日は平均気温が -2.6°C 、平均水温が 0.1°C で結氷が発生しているが、これは結氷・融解の繰り返し

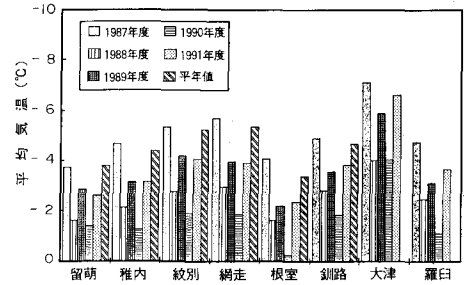
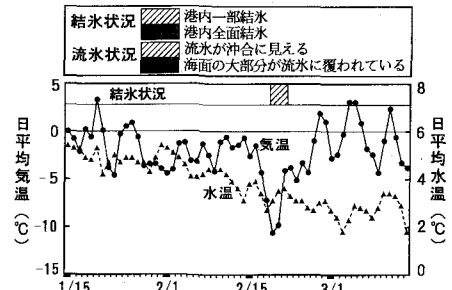
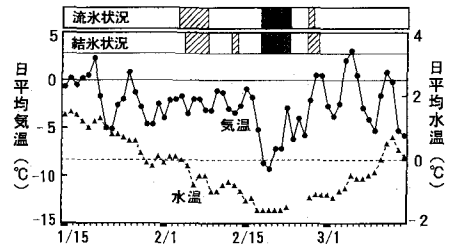


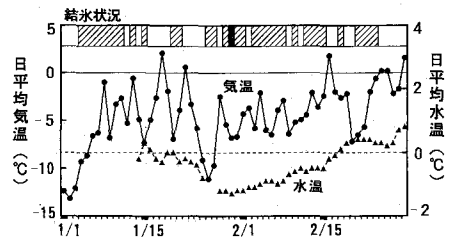
図-8 12～2月の平均気温



(a) 留萌港 (1990年度)



(b) 紋別港 (1990年度)



(c) 大津漁港 (1991年度)

図-9 日平均気温・水温の変化と結氷状況

により水面に低塩分層が形成され、高い温度で結氷するパターン②と考えられる。

4.2 水温変化の気象要因

港内結氷は、海水が結氷温度に達して生じる現象であるから、水温の変化に及ぼす要因を知ることは重要である。水温変化の要因は、前述のとおり非常に多く考えら

表-1 回帰に用いた目的変数と説明変数

変数	変数の内容	単位	水温変化に及ぼす現象
目的変数	Y 前日の水温-当日の水温 水温=0時前後2時間の平均水温	°C	
説明変数	x_1 日平均気温-日平均水温	°C	水面での熱伝導, 海水の気化
	x_2 日平均風速	m/s	海水の気化, 水面での熱伝導の促進外海水との海水交換
量	x_3 日照時間	h	太陽からの放射熱
	x_4 日降水量×温度差 x_1	mm・°C	降水による熱の流入

表-2 回帰式の検定結果 (危険率 $\alpha=5\%$)

	留萌港	稚内港	紋別港	網走港	根室港	釧路港	大津漁港	羅臼漁港
回帰式全体	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000
x_1 気温-水温	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000
x_2 日平均風速	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000
x_3 日照時間	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000
x_4 降水量× x_1	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000

※各枠内, 左から 1987, 1988, 1989, 1990, 1991 年度, 「-」は欠測を表す。

れる。そこで, いくつかの気象要因について, 水温変化への相関の有無を知るために重線形回帰による相関分析を行った。ここでは, 毎 0 時前後 2 時間の平均水温の日変化を目的変数 Y とし, これをいくつかの説明変数 x_i を用いて次の重回帰式で表せるとする。

$$Y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 \dots\dots\dots (2)$$

ここで, $a_0 \sim a_4$ は回帰係数である。このとき, この回帰式自体およびそれぞれの説明変数 x_i が Y の予測に有効であるかを年度別, 港別に検定した。説明変数は, 日平均気温と日平均水温の温度差 (x_1), 日平均風速 (x_2), 日照時間 (x_3), 日降水量×温度差 $x_1(x_4)$ を選択した。これらを表-1 にまとめる。表-2 は 5 年間のデータを用いた危険率 $\alpha=5\%$ の検定結果であり, 表の上段から回帰式全体の有効性, 各説明変数 $x_1 \sim x_4$ の有効性を表しており, ○印は有効と判定されたものである。表から各説明変数のうち, x_1 , すなわち気温との相関が比較的強く, 他の要因とはほとんど相関がないことが分かる。

4.3 結氷発生の条件

次に, 結氷の発生条件を結氷発生と相関が強いと思われる気温と水温について検討した。図-10 は, 1988~1991 年度の大津漁港において, 前日に結氷がなくその翌日に結氷が観測された日の気温・水温条件を, 結氷面積をパラメータとして示したものである。大津漁港で 1 ha 以上の結氷が発生した日は, 日平均水温が $+0.5^\circ\text{C}$ 以下で日最低気温が -10°C 以下であった。従ってこ

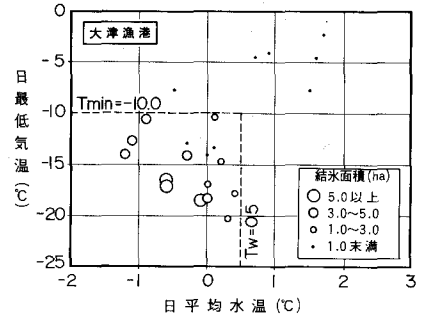


図-10 結氷発生日の気温・水温条件

の条件を満たすことが予想されれば, 結氷が発生する可能性が高いと考えられる。同様に根室港では, 日平均水温が $+1.0^\circ\text{C}$ 以下で日最低気温が -7°C 以下であった。オホーツク海側の 3 港では日最低気温が $0 \sim -3^\circ\text{C}$ と比較的高くてもある程度の結氷発生が観測されている。

4.4 結氷面積の変化と気温条件

これまでの検討から, 結氷発生及び融解は気温の影響を強く受けていることが伺える。図-11(a) は, 1987~1991 年度の稚内港における結氷面積の日変化量を前日の最高気温と当日の最低気温により示したものであり, 図中の斜線を境界にして結氷面積が増加する領域と減少する領域に分けられる。これは, 結氷面積減少量が前日最高気温により表され, 反対に増加量が当日最低気温により表されると考えるとよく説明できる。留萌港, 根室港, 大津漁港も同様に整理できる。ただし大津漁港では境界線の傾きがやや水平に近くなっている。図-11(b) は, 紋別港の場合であるが, 稚内港のような整理はまったくできない。同じオホーツク海側の網走港, 羅臼漁港も同様である。この原因として, 先に述べたようにオホーツク海側では流水の影響を強く受けていることが考えられる。

5. 港内結氷発生場所に関する特性

港内結氷は通常, 静穏性が高く, 水深が浅く, また海水交換がされにくい貯木場などの閉鎖水域や港奥部などで生じやすい。図-12 は, 港内のどの場所で結氷がよく観測されたかを表す頻度図で, 1 期間中の結氷観測日数によりランク分けして示している。図-12(a) は 1987 年度の稚内港の結氷状況であり, 貯木場および港奥部で多く結氷している。図-12(b) は, 1988 年度の大津漁港であり, 結氷が観測された日の平均風速と最多風向より作成した風速階級別風配図も併せて示してある。この漁港では, 岸壁側がその向かい側 (図では左側) に比べ水深が深くなっており結氷し難い条件であるにもかかわらず, 岸壁側で多く結氷が観測されている。この時期は北西の風が卓越するため海水が岸壁側に吹き寄せられることが

原因していると考えられる。同様の現象は根室港においてもみられる。

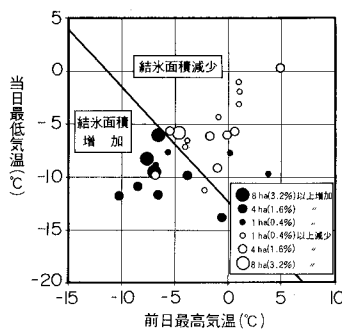
6. 結 論

本研究の主要な結論を以下に示す。

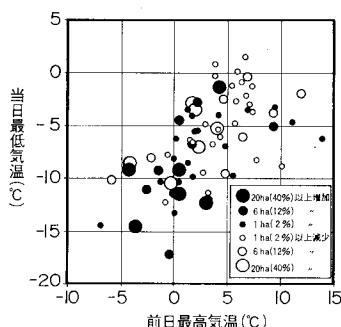
- (1) 海水が水面から急激に冷却される場合は、海水の鉛直循環が十分行われないうちに結氷を開始する。
- (2) 海水の凍結融解により、水面に低塩分層が形成されることが室内実験により確認された。
- (3) 海水温度の変化は、いくつかの気象要因のうち気温の影響を比較적으로よく受ける。
- (4) 気温の日変動が港内の結氷・融解に直接影響することが多く、前日最高気温と当日最低気温で結氷面積の増減を予測できる。しかし、オホーツク海側の港は流氷の影響を強く受け、これが接近すると結氷が発生しやすい。
- (5) 結氷頻度は、閉鎖性が高く水深も比較的浅い貯木場や港奥部で高い。
- (6) 海水が生じる時期の季節風の影響により、海水が一定の方向に吹き寄せられる現象が見られる。

寒冷地においては、以上に述べた港内結氷の基本特性を踏まえ、地域における気象・海象特性をよく考慮した港湾施設の配置あるいは港内結氷対策を進めることが必要である。

謝辞：本調査の実施にあたり北海道開発局の各港湾建

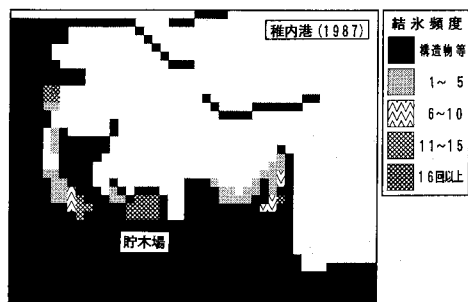


(a) 稚内港

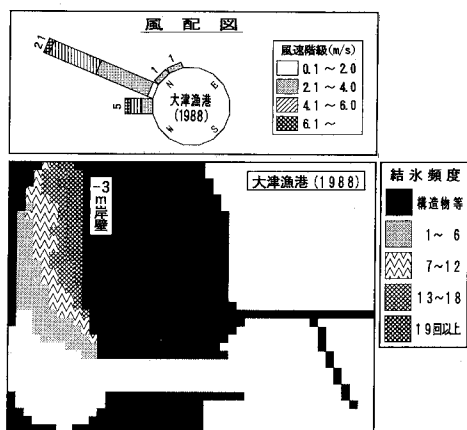


(b) 紋別港

図-11 気温条件と結氷面積変化



(a) 稚内港 (1987年度)



(b) 大津漁港 (1988年度)

図-12 結氷観測頻度の平面分布

設事務所の方々には、厳冬期にもかかわらず計測機の設置やメンテナンス、日々の結氷観測など多くの面でご協力頂いたことを記して、心からお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 梅沢信敏・平沢充成・杉本義昭・水野雄三・遠藤仁彦 (1990): 港内結氷のメカニズムに関する調査研究, 海岸論文集, 第37巻, pp. 858-862.
- 木下誠一編著 (1988): 雪と氷のはなし, 技報堂出版.
- (財)日本気象協会北海道本部 (1992): 1991年版 北海道の気候.
- (財)日本気象協会北海道本部: 北海道の気象, 第32~36巻 特別号, 第36巻 第1・2号, 1988-1992.