

掘込式漁港における港内結氷メカニズムと対策 に関する研究

STUDY ON FACTORS OF FREEZING IN EXCAVATED-TYPE FISHING PORT

本間薫¹・小玉茂義²・梅沢信敏³・沖野晃一⁴・寺島貴志⁵・佐伯浩⁶

Kaoru HONMA, Sigeyoshi KODAMA, Nobutoshi UMEZAWA, Kouichi OKINO,
Takashi TERASHIMA, Hiroshi SAEKI

¹正会員 国土交通省北海道開発局帯広開発建設部(〒080-8585 帯広市西4条南8丁目)

²正会員 国土交通省北海道開発局農業水産部水産課(〒060-8511 札幌市北区北8条西2丁目)

³正会員 国土交通省北海道開発局開発土木研究所(〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

⁴正会員 (社)寒地港湾技術研究センター(〒060-0807 札幌市北区北7条西2丁目)

⁵正会員 博士(工) パシフィックコンサツタンツ(株)(〒206-8550 東京都多摩市関戸1丁目7-5)

⁶正会員 工博 北海道大学 工学部(〒060-0813 札幌市北区北13条西8丁目)

Blockage by ice floes and freezing of the seawater in ports along the coast of Hokkaido, the only coastal sea area in Japan that freezes over in winter, have serious direct and indirect economic impacts on various industries such as shipping and fishing industries. In order to devise strategies to deal with the problem of port closure in winter, the mechanism by which the water in the ports freezes must be elucidated. Elucidation of this mechanism and the establishment of measures to resolve the problem of freezing in ports would be very beneficial for industries operating in such ports.

The aim of this study was to elucidate the mechanism of freezing in Otsu Fishing Port, an excavated-type fishing port in which the water freezes almost every winter, and to try to establish effective measures for dealing with the problem of port closure due to freezing.

Key Words: *economic impact, freezing in port, port closure*

1. はじめに

北海道沿岸は我が国唯一の結氷海域であることから、港湾・漁港における港内結氷や流氷の来襲は、物流や漁業など種々の産業に直接的・間接的に影響を及ぼしている。このような港内結氷や流氷の来襲・港内への侵入による被害に関する研究例は極めて少ないが、例えば泉ら¹⁾は特に水産物の被害に関する研究を、大村ら²⁾は詳細なアンケート・ヒアリングに基づいて海氷による物流・漁業活動などへ与える影響に関する研究を実施している。これらの研究から、地元漁業者など港湾・漁港利用者の港内結氷対策に対する要請の声は極めて強く、港内結氷対策を講ずることによる経済的メリットも大きいことが明らかにされている。

一方、港内結氷対策を講ずるためには、当然のこと

ながら港内結氷に至るメカニズムを明らかにする必要がある。港内結氷メカニズムや対策に関する研究は Saeki³⁾、梅沢ら⁴⁾、山本ら⁵⁾、遠藤ら⁶⁾、早川ら⁷⁾により実施されているが、必ずしも個別の港湾・漁港毎に港内結氷メカニズムが明らかにはなっていないのが現状である。また、過去には、港内結氷対策の1つであるエアバブル工法の漁港への適用を試みた事例もあるが、未だ我が国の港湾・漁港においては港内結氷対策は実施されていない。したがって、港内結氷メカニズムを明らかにし、港内結氷対策技術を確立することは、結氷海域における産業活性化の1つの手段として急務である。

このような背景から、本研究は、流氷の影響はほとんど皆無であるにもかかわらず、ほぼ毎年結氷する掘込式の大津漁港において、港内結氷メカニズムを明らかにし、本漁港における港内結氷対策の適用可能性を模索するこ

とを目的として実施する。

2. 港内結氷被害と結氷要因

(1) 大津漁港における港内結氷による被害

大津漁港は、北海道東部の太平洋に面し、十勝川河口の南西部に位置する掘込式の第4種漁港である。本漁港は、沿岸漁業の根拠地として、現在第9次漁港整備計画により鋭意整備が進められている。本漁港においては、冬期間、ケガニ、ホッキ、ツブ等の操業が行われているが、前述したように例年港内結氷が発生する。この港内結氷により、プロペラに氷片を巻き込むためにプロペラが損傷したり、船体が損傷することにより浸水するなどの被害が発生している。また、出漁不能、漁獲物の陸揚げや船揚場からの漁船の上下架などの漁業活動に支障が生じていると同時に、避難港としての機能も著しく低下している状況下にある。このような事態を事前に回避するために、冬期間操業しない漁船については船揚場より上架して陸上保管し、冬期間操業する漁船については結氷しにくい港口側に退避したり、他港を拠点として水揚げしているケースもある。更に、結氷後については、漁船や作業船による砕氷作業が実施されている。

以上のような港内結氷による被害が防止できたり、あるいはより少ない労力・負担により港内結氷防止が可能となれば、操業日数、操業隻数を増加させることが可能となり漁業経営の安定化にも繋がることから、港内結氷対策に対する地元の要請は極めて強い。

(2) 港内結氷の要因

一般に港内結氷の自然条件的要因として、①気温・水温が低い、②塩分濃度が低い、③降雪量が多い、④流水の侵入、⑤夜間の放射冷却などを挙げることができる。また、港形からみた結氷要因として、①防波堤の整備に伴い静穏度が向上する、②海水交換が起りにくい、③氷晶や蓮葉氷が港内に留まりやすい、あるいは、流水が侵入しやすく排出しにくいなどの要因を挙げることができる。

大津漁港の場合には、掘込部の港内のみが結氷し、外海は全く凍結しない。また、隣接する埠頭式の港湾・漁港の結氷頻度は、本漁港と比較すると極めて低い。したがって、自然条件は隣接する港湾・漁港とほぼ同様とみなせるため、港形からみた結氷要因と結氷状況との関係を把握することが、本漁港の港内結氷メカニズムの解明に繋がる。

このような観点から、本研究においては、以下に示す風況調査、水質調査、流況調査、港内結氷現況調査及び氷晶実験を実施した。

3. 現地調査と現地実験

(1) 風況調査

a) 調査内容

海面の表層の流れ、氷晶の生成及び堆積方向、大気と海面との熱交換等の港内結氷の要因を把握することと、風力を活用することによる港内結氷対策の実現可能性

を模索することを目的として、風況調査を実施した。

調査期間は平成12年12月1日～同13年3月16日とし、地上高20m地点において風向・風速を測定した。

b) 調査結果

調査期間の大津漁港における冬期の風向はNNWの一方向が卓越し、風速は0～5m/sが41.0%、5～10m/sが54.0%、10m/s以上が5.0%となっており、平均風速は5.8m/sであった。

(2) 水質調査

a) 調査内容

港内結氷の要因の1つと考えられる海水交換の有無（混合の有無）を把握することと、海水交換がない場合には外海水を港内に導入することによる港内結氷対策の実現可能性を模索することを目的として、水質調査を実施した。

調査時期は夏季、結氷前、結氷時の計3回で、1回の調査につき上げ潮時と下げ潮時の2回計測し、合計6回測定した。

調査地点は図-1に示すとおり、平面的には港内の掘込部3点、水路3点、港口・港外3点の計9地点である。また、鉛直方向には、表層より-1mまでは20cm間隔、-1m～-5mまでは50cm間隔、-5m以深は1m間隔程度で測定した。

測定項目は塩分濃度、水温、DO、pH、電気伝導度及び濁度である。

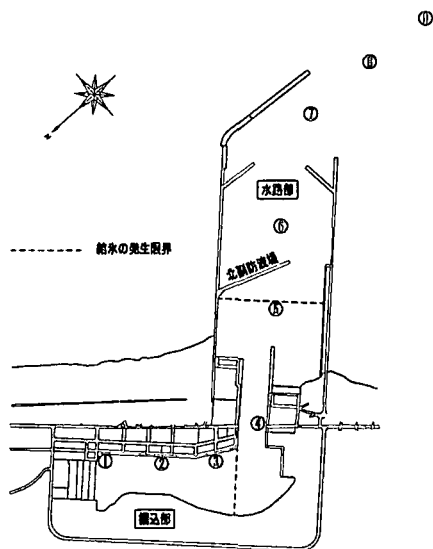
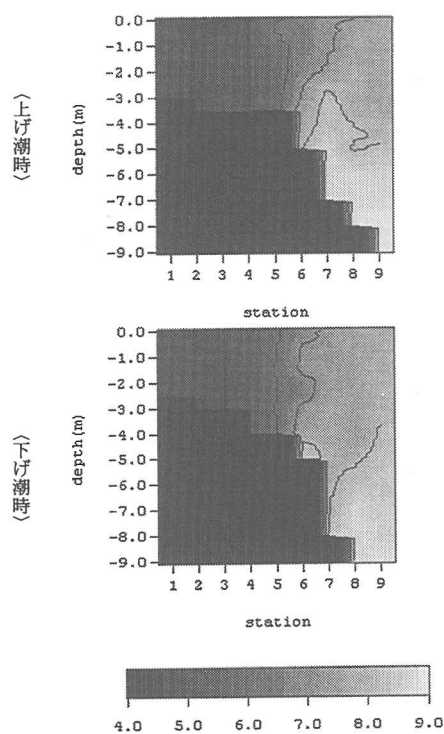


図-1 大津漁港調査位置図

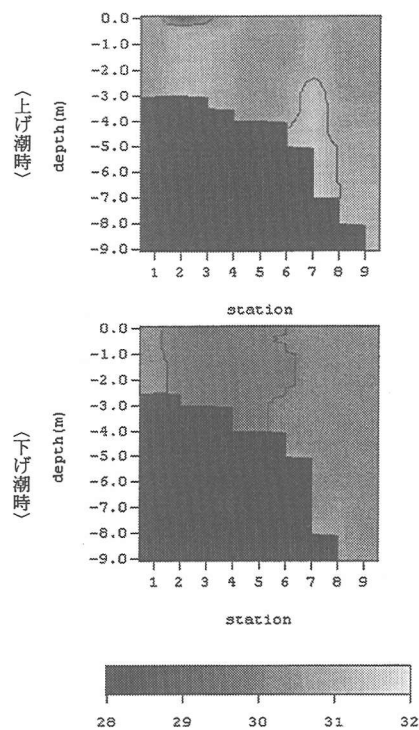
b) 調査結果

図-2に水温の調査地点毎の断面分布を示す。

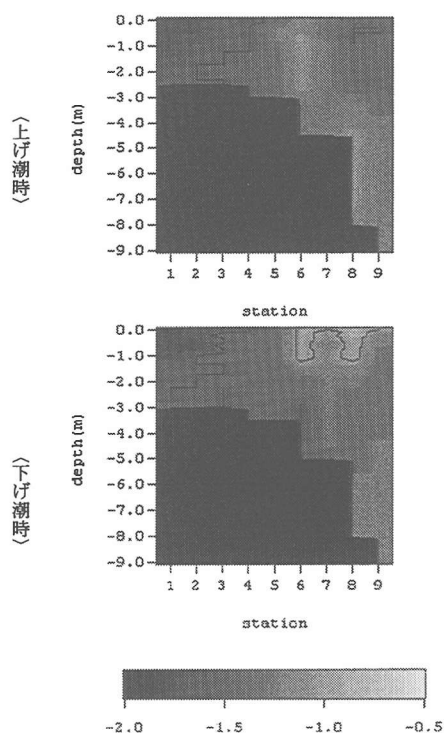
平成12年11月26日においては、上げ潮時・下げ潮時ともに同様の傾向を有している。すなわち、港内においては4～5℃程度で鉛直方向に一様であるが、北副防波堤より港外にかけては表層が6～8℃程度となっており、温度分布が鉛直方向に一様でないことから、いまだ対流が継続している状況である。



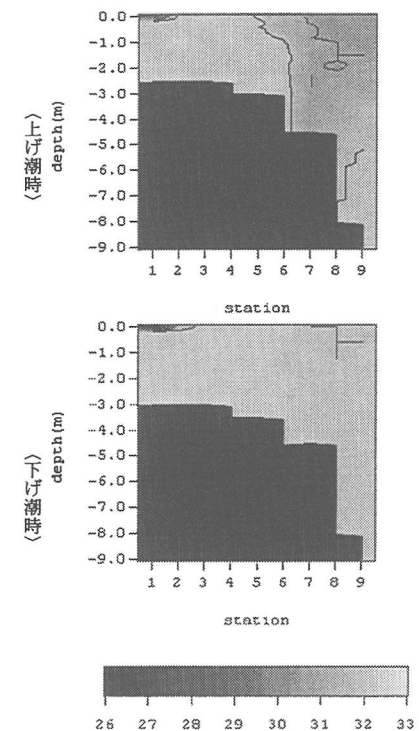
①平成 12 年 11 月 26 日



①平成 12 年 11 月 26 日



②平成 13 年 2 月 17 日



②平成 13 年 2 月 17 日

図-2 水温の断面分布

図-3 塩分濃度の断面分布

平成 13 年 2 月 17 日においては、上げ潮時・下げ潮時ともに鉛直方向においてほぼ一様であるが、港内においては -1.6°C 程度、北副防波堤より港外にかけては $-1.3\sim-0.5^{\circ}\text{C}$ 程度となっている。

図-3 に塩分濃度の調査地点毎の断面分布を示す。

平成 12 年 11 月 26 日及び平成 13 年 2 月 17 日においては、上げ潮時・下げ潮時共に鉛直方向においてほぼ一様であるが、港奥部-3.0m 岸壁の塩分濃度が低い。これは港奥部-3.0m 岸壁の排水溝からの淡水の流入による影響と推定できる。

なお、電気電導度は塩分濃度と同様の傾向であったが、濁度、DO、pH については明確な特徴を見出すことはできなかった。

（3）流況調査

a) 調査内容

海水交換の状況、氷晶の堆積方向等を把握することを目的として、港内の海水面表層における流向・流速を測定した。

調査時期は夏季、結氷前の計 2 回で、1 回の調査につき上げ潮時と下げ潮時の 2 回計測し、合計 4 回測定した。

調査地点は掘込部 7 点、水路 2 点、港口 1 点の計 10 地点である。

b) 調査結果

平成 12 年 9 月 29 日及び同年 11 月 26 日の上げ潮時及び下げ潮時において、前述した調査方法により流況調査を実施した。

上げ潮時においては、表層における流向は“掘込部→水路→港口”方向となっており、計測時の風向と一致していることから、潮汐よりも風（NW系）の影響が卓越していた。また、掘込部においては流向に明確な特徴が認められなかった。一方、流速については、港口から港内においては $11\sim23\text{cm/s}$ 、港奥においては $2\sim23\text{cm/s}$ となっており、港奥に向かって流速は小さくなっている。

下げ潮時においては、表層における流向は“港口→水路”方向となっており、上げ潮時と同様に有風時には風（S系）の影響を受けている。一方、流速については、港口から水路において $13\sim19\text{cm/s}$ 、港奥においては $3\sim11\text{cm/s}$ となっており、上げ潮時と同様に港奥に向かって流速は小さくなっている。

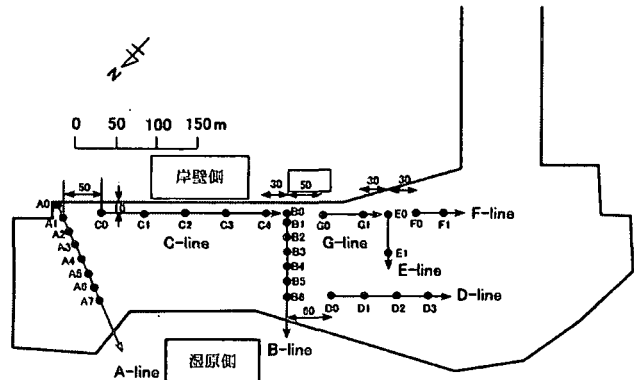


図-4 コア採取位置図

（4）港内結氷現況調査

a) 調査内容

港内結氷状況と結氷要因を把握することを目的として、港内の氷盤の氷厚を測定し、氷盤の結晶構造を調査した。

氷厚測定箇所・コア採取位置図を図-4 に示す。氷厚は氷盤のコア採取地点においてコア採取後に氷厚測定器により測定し、氷盤の結晶構造については、コア採取後に偏光写真を撮影することにより、結晶構造が氷晶、雪氷、成長氷かを判定した。

b) 調査結果

港内の氷盤の氷厚は、港奥部の-3.0m岸壁の隅角部における氷厚が最も厚く 58 cmに達していた。また、港内全体では $30\sim40\text{cm}$ でほぼ一様な氷厚となっていた。

ここで、結晶構造の定義であるが、雪氷は偏光写真により判定した氷晶を含む空気気泡が混入している氷、成長氷は偏光写真により判定した氷盤の鉛直下方への氷の成長部分とした。図-4 に示したように A-line は港奥部より NW 方向、B-line は岸壁と直角方向、C-line は岸壁側の岸壁法線方向、D-line は湿原側の岸壁法線方向である。

A-line については氷厚は $36\sim58\text{cm}$ であり、この内雪氷が $6.8\sim8.8\text{cm}$ 、成長氷が $28.5\sim49.2\text{cm}$ 、特に岸壁側の成長氷の厚さが厚いのが特徴的であった。

B-line については氷厚は $34\sim37.5\text{cm}$ であり、この内雪氷が $4.3\sim6.5\text{cm}$ 、成長氷が $29.5\sim32.7\text{cm}$ 、地点によらずほぼ一様であった。

C-line については、氷厚は $29.5\sim43\text{cm}$ であり、この内雪氷が $4\sim8.5\text{cm}$ 、成長氷が $24.5\sim34.5\text{cm}$ 、港口方向の成長氷の厚さと雪厚が薄いのが特徴的であった。

D-line については、氷厚は $30.5\sim37\text{cm}$ であり、この内雪氷は $4.2\sim5.7\text{cm}$ 、成長氷は $24.8\sim32.7\text{cm}$ 、地点によらずほぼ一様であった。

（5）氷晶実験

a) 実験内容

港内における氷晶の発生条件、氷晶の堆積方向と風向との関係、水深と面積の違いによる氷晶の発生量の相違、氷晶移動の阻止効果などを把握することを目的として、現地実験を実施した。

図-5 に示すとおり、木製フレームによる $15\text{m}\times1\text{m}$ の水路を 2 本連結し、そのうち 1 本については、長手方向を 5m と 10m の 2 分割に仕切ることにより、合計 3 本の水路を形成した。

木製フレームの湿原側には係留ロープを取り付け、湿原側陸上部に打設された係留用杭に係留ロープを緊結し、木製フレームを係留した。

実験時には木製フレームは湿原側の係留杭の 1 点で係留されているため、風向に応じて木製フレームの向きが変化する仕組みとなっている。

実験項目は、①現地における氷晶の発生の有無と堆積方向の確認、②水温及び塩分濃度の測定、③氷晶量の測定である。

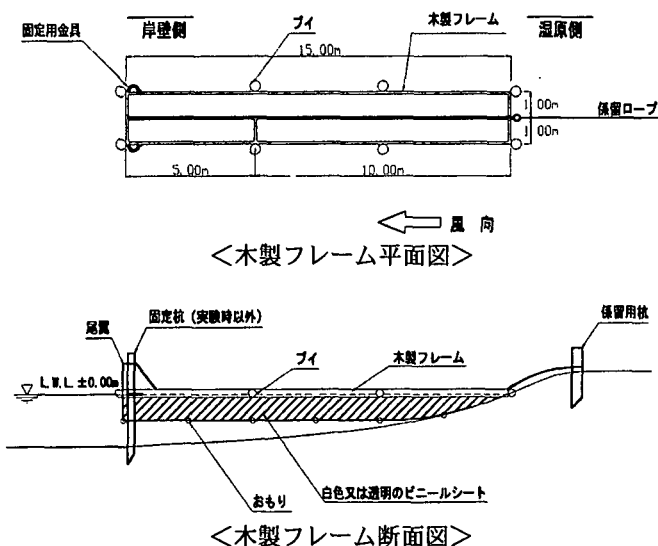


図-5 実験装置

b) 実験結果

① 氷晶発生の有無

平成 12 年 12 月 14 日午後 16:00 に木製フレームの据え付けを完了し、午後 17:30 時点では木製フレーム内に氷晶は認められなかった。

午後 19:00 時点では木製フレーム内に氷晶が発生していたことから氷晶を採取し、水温・塩分濃度の測定などを実施した。なお、このとき氷晶は港内全域で発生していた。

② 氷晶の推積方向

午後 19:10 より午後 23:35 の時間帯で合計 3 回の観測・測定を実施したが、風速が 1~2m/sec と小さかったことから、氷晶は岸壁側に吹き寄せられず、木製フレーム内全体に浮遊していた。

ただし、港内の蓮葉氷は実験実施中に岸壁側に吹き寄せられ、また、翌朝には木製フレーム内の氷晶は、小さな蓮葉氷状となって岸壁側に吹き寄せられていた。

また、今回の実験時における風速、波高などの環境条件下においては、今回製作した木製フレームのスペックで十分に氷晶移動は阻止できた。

③ 水温及び塩分濃度

木製フレーム内外、氷晶採取前後において、水温及び塩分濃度の鉛直分布に明確な差はなかった。

ただし、木製フレーム内外における表層の水温については、フレーム外に比べてフレーム内の水温が低い傾向が認められた。このことは、木製フレーム内に比較して木製フレーム外の氷晶発生量が少ないことを示唆している。

岸壁側（水深深い）と湿原側（水深浅い）を比較すると水温については明確な差異はないことから、氷晶発生量にも差異はないものと想定できる。また、塩分濃度については岸壁側が低い傾向が認められた。このことは、港奥部岸壁の排水溝からの淡水の流入が影響しているものと考えられる。

④ 氷晶量の測定

前述したように木製フレームは 3 つの水路により構

成され、延長 5m の水路を NO. 1、10m の水路を NO. 2、15m の水路を NO. 3 とした。氷晶の採取順序は作業性から NO. 2 → NO. 1 → NO. 3 の順とした。

図-6 に氷晶発生量の経時変化を、また、図-7 に 1m² 1 分当たりの氷晶発生量の実測値と平均値を示す。各水路での氷晶発生量の累積値は、第 1 回採取時において NO. 2 (10m) と比較して NO. 1 (5m) の水路での氷晶発生量が多くなっているが、それ以外については各時刻において水路の面積の大きい順に氷晶発生量が多くなっている。また、各採取時における実測値にはバラツキがあるが、各水路における平均値は 2.1~2.4g/m²/min (最低 1.0 g/m²/min, 最大 3.9 g/m²/min) であった。一方、牛尾ら⁸⁾の室内実験では、今回の現地での実験条件に近い、室温-10℃、風速 2.2m/s の条件下での氷晶発生量は 10.1 g/m²/min 程度であることから、今回の現地実験における氷晶発生量は室内実験と比較して少ない量であった。

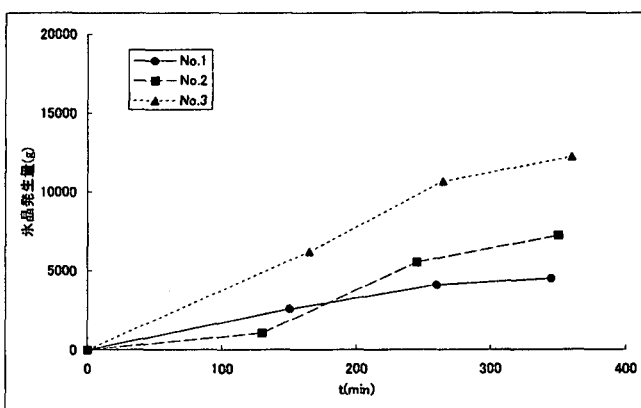


図-6 氷晶発生量の経時変化

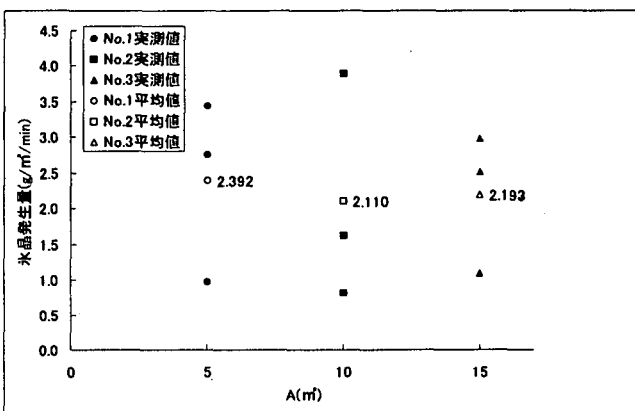


図-7 面積・時間当たりの氷晶発生量

4. 港内結氷要因と対策

以上の調査及び実験結果より、大津漁港の結氷要因を要約すると以下に示すとおりである。

- (1) 12 月には外海の水温は 7℃ 程度であるが、平均気温は氷点下となることから、掘込部の水域のみ水温度は一気に 0℃ 程度となる。これは、港内の水深が浅く海水の熱容量が小さいことと、水質調査で明らかとなったように海水交換がほ

とんどないことに起因している。

- (2) やがて、最低水温が結氷温度に達すると、港内全体において氷晶が発生する。本漁港においてはNW系の一方向の風が卓越することから、氷晶や蓮葉氷は風下の岸壁側に吹き寄せられる。
- (3) 風下の岸壁側に堆積した氷晶や蓮葉氷は、海水交換がないことから融けにくく、また、港外へも排出されにくいことから、氷晶や蓮葉氷の堆積する範囲は拡大し、やがて結氷に至る。

以上の結氷メカニズムは、太平洋側では根室港（花咲地区）、日本海側では苫前漁港がほぼ同様と考えられる。

一方、港内結氷対策としては、結氷前に対応する事前対策と結氷後に対応する事後対策の2つに大別される。事前対策としては、①熱供給方式、②氷晶排除方式及び③港形対応方式を挙げることができる。また、事後対策としては、砕氷方式が代表的な対策である。

上記した大津漁港における港内結氷メカニズムと大津漁港における結氷対策の適用性を考慮すると、

事前対策として、

- ①外海水導入方式
- ②人工流方式
- ③機械力方式
- ④結氷しにくい港形

事後対策として、

- ⑤砕氷方式

等が適用可能と考えられるが今後詳細な検討が必要である。

等の検討が必要である。

参考文献

- 1) 泉冽, 浜中健一郎, 佐伯浩: 1984 年, 1985 年の流水による水産物の被害について, 寒地技術シンポジウム講演会論文集, pp119-123, 1985.
- 2) 大村高史, 平澤充成, 寺島貴志: 北海道沿岸の港湾・漁港周辺における海水被害の現状について, 海洋開発論文集 Vol. 16, pp151-155, 2000.
- 3) Saeki, H: Ice Control in Northern Harbors, Proc. of IAHR Ice Symposium, pp1221-1241, 1992.
- 4) 梅沢信敏, 平澤充成, 杉本義昭, 水野雄三, 遠藤仁彦: 港内結氷のメカニズムに関する調査研究, 第 37 回海岸工学講演会論文集, pp858-862, 1990.
- 5) 山本泰司, 水野雄三, 笹島隆彦, 山中浩次, 時川和夫: 寒冷地港湾における港内結氷特性に関する研究, 第 40 回海岸工学講演会論文集, pp1011-1015, 1993.
- 6) 遠藤仁彦, 梅沢信敏, 谷野賢二: エアバブル工法による港内結氷制御に関する実験的研究, 第 36 回海岸工学講演会論文集, pp693-697, 1989.
- 7) 早川哲也, 坂本洋一, 水野雄三, 石川成昭, 金川均: 北海道の港湾・漁港における港内結氷の特性に関する研究, 海洋開発論文集, Vol. 13, pp847-851, 1997.
- 8) Ushio, S. and Wakatuchi, M.: An experimental study on rapid frazil ice production in wind-generated polynya, Proc of IAHR Ice Symposium, Vol. 2, pp179-188, 1988.

5. 結論と今後の展望

本研究により得られた主要な結論を要約すると次の通りである。

- (1) 大津漁港において水質調査及び流況調査を実施することにより、掘込式漁港という港形に起因して、掘込部においては外海水との海水交換がないことを明らかにした。さらに、冬期においては、掘込部は結氷温度（ -1.6°C ）に達しているが、港外は結氷温度よりも高いことを明らかにした。
- (2) 港内結氷現況調査を実施することにより、氷厚分布と結晶構造を明らかにし、初期における結氷盤が雪と氷晶を含む雪氷であることを明らかにした。
- (3) 氷晶実験を実施することにより、氷晶の堆積方向を明らかにし、氷晶発生量を実測した。また、別途実施した風況調査により、観測期間中の平均風速が 5.8m/s に対して、氷晶量測定時の風速が $1\sim 2\text{m/s}$ であったことから、実際には氷晶実験時よりも多くの氷晶が発生している可能性がある。
- (4) 以上の調査、実験結果により、大津漁港における結氷要因を推定した。さらに、結氷要因より有効と考えられる結氷対策を示したが、今後、現場において結氷対策を適用する場合には、結氷要因の精査、対策毎の結氷防止効果の定量化