

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

遠藤 仁彦*・梅沢 信敏*・谷野 賢二*

1. ま え が き

北海道の一部の港において、近年、防波堤などの外郭施設の整備にともない港内静穏度が向上する一方で冬期間に港奥部が結氷するという現象が見られる。このため冬期間に港の機能が十分に発揮されないという寒冷地特有の問題を抱えている。これらの問題が水産業などに与える経済的影響も少なくなく、港内結氷を制御することは寒冷地問題を取り扱う上で重要な課題である。しかしながら、その対策が十分に確立されていないのが現状である。

そこで北海道開発局では港内結氷対策としてエアバブル工法を考え、その効果について検討することとした。当工法は、水中に配管された気泡発生管から噴出したエアバブルによって生じる表層付近の水平流により海水を排除したり、その流れによる鉛直循環や海面の動揺により結氷を遅延させようというものである。

本研究では、当工法を採用するにあたり考えられるいくつかの課題のうち、第一段階として効率的な流れをつくる技術の確立と海水を制御できる影響範囲の把握を目的として、室内実験と現地実証実験より検討を行った。まず気泡発生管形状が流況に及ぼす影響について示し、次に海水を移送することによる影響範囲を示す。また、現地実証実験を行った水域周辺の水質観測よりエアレーション効果について述べる。さらに、エアバブル発生装置の運転経費について報告するものである。

2. 実験概要

(1) 室内実験

a) 実験装置 実験は長さ 85.0m、深さ 3.0m、幅 1.6m の2次元水路を用いて行った。エアバブル発生装置は6種類の気泡発生管、レギュレーター、5.5kW アンローダー式コンプレッサー、圧力計、流量計より構成されている。なお、気泡発生管は小孔の直径、中心間隔、並列数を変えたものを用い、その種類は表-1のとおりである。流速測定には直径3mmの超小型プロベラ

式流速計を用いた。

b) 実験内容 エアバブルを発生させたときの吐出空気量別の表面流速および水深ごとの水平流速を測定した。測定位置は水平方向には気泡発生管より0.5, 0.8, 1.1, 1.4, 1.8, 2.2, 2.6, 3.0, 3.5, 4.0mで、鉛直方向には水面より3, 8, 13, 18, 23, 28, 33, 38, 43, 48cmである。なお、実験を行った水深は100, 140, 180cmで、気泡発生管は底面上7cmの位置に固定した。

表-1 気泡発生管の種類

	直 径	中心間隔	並列数
気泡発生管A	1 mm	5mm	1
気泡発生管B	1 mm	10mm	1
気泡発生管C	1 mm	20mm	1
気泡発生管D	1 mm	20mm	2
気泡発生管E	1 mm	30mm	3
気泡発生管F	2 mm	20mm	1

(2) 現地実証実験

a) 実施場所 現地実証実験は北海道東部の十勝川河口付近に位置する大津漁港において、昭和63年10月下旬と平成元年1月中旬の2回にわたり行った。図-1に大津漁港の位置と実験箇所を示す。大津漁港は昭和54年度に開港となった掘込み式の港であり、最近防波堤の整備にともなって港内結氷が生じるようになった。

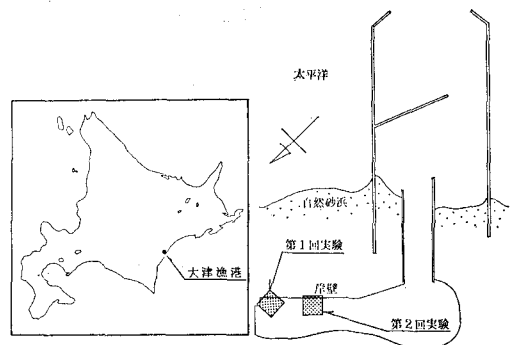


図-1 現地実証実験の実施位置

b) 実験装置 実験で用いたエアバブル発生装置の構成は図-2 に示すとおりである。気泡発生管は小孔の直径が 2 mm, 中心間隔 16 cm で 1 列配置となっており, 実延長が 20m のものを用いた。また設置水深は, 第 1 回実験が水深 3.1m, 第 2 回実験が水深 4.0m であり, 水抜き用として気泡発生管の下側に直径 2 mm の小孔を 30 cm おきに配置している。送風用のコンプレッサーは, 第 1 回実験では 50 ps のものを 1 台, 第 2 回実験では 50 ps, 100 ps のものを各 1 台用いた。

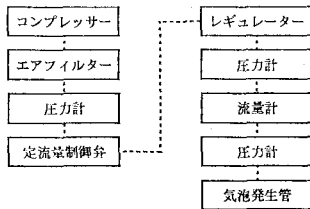


図-2 エアバブル発生装置の構成

c) 実験内容 第 1 回実験では, エアバブルによる流況観測と気泡発生管周辺の水質観測を行った。流況観測はパラフィン为原料とした大きさの違う 3 種類の模擬氷を用いたフロート追跡と, 電磁流速計を用いた流速測定 の 2 種類が行われた。模擬氷フロートは円盤状のものを使用しており, その種類は表-2 のとおりである。水質観測は水温, 塩分量, 溶存酸素量をエアバブル発生前後に 3 地点で測定した。

第 2 回実験では, 実際に結氷した海水を用いてエアバブルによる流況観測を行った。このときの氷の状態は厚さが 1~3 cm で比較的柔らかいものであった。実験中には風向, 風速やコンプレッサーの燃料消費量も測定した。さらに, 昭和 63 年 12 月より平成元年 3 月まで港内結氷状況の定時観測を行っており, 観測内容は水温, 気温, 塩分量の測定, 多方向自動撮影装置を用いた昼夜連続の写真撮影である。

表-2 模擬氷フロートの種類

	直径 (cm)	厚さ (cm)
フロート A	10	2
フロート B	30	6
フロート C	50	10

3. 室内実験結果

図-3 は気泡発生管 A と F について, 表面最大流速 U_{max} と 1 気圧換算空気量 Q を $1/3$ 乗した値との関係を示したものである。過去の空気防波堤などの研究(栗原, 1954; 岩垣, 1977) でいわれているように, U_{max} と

$Q^{1/3}$ が比例関係になっていることがわかる。気泡発生管 A と F は表-1 に示したように, 小孔の直径と中心間隔, 配列が異なる形状のものである。この図より気泡発生管 A のほうが F より効率よく流速がでていることから, 同じ空気量でも効率よく流速がでるような気泡発生管形状が存在することがわかる。

図-4 は気泡発生管 B と E について, 図-3 と同様の関係を示したものである。これより今回行った実験の空気量の範囲では比較的大きな空気量で気泡発生管 E が効率よく流速がでている。図-4 は水深が 180 cm の場合であるが, 他の水深についても同様の傾向がみられた。そこで, 流況に及ぼす要因として小孔の直径, 中心間隔, 配置が関与していることがわかったが, 今回の実験では定量的な把握までには至っていない。

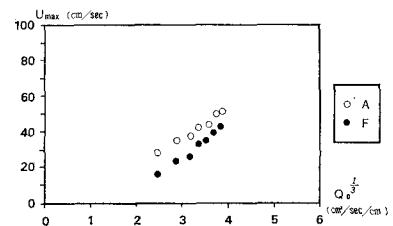


図-3 気泡発生管 A と F の比較 (水深 180 cm)

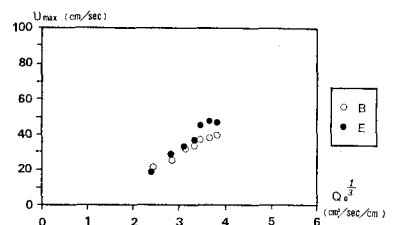


図-4 気泡発生管 B と E の比較 (水深 180 cm)

4. 現地実証実験結果

(1) 模擬氷フロートによる流況観測

図-5 は 1 気圧換算空気量が $0.10 \text{ m}^3/\text{min}/\text{m}$ で, フロート A を用いた場合のフロート位置の経時変化を示したものである。なお, 測定期間中には風向 S, 平均風速 5 m/s の風が吹いていた。このとき 10 分間のフロートの最大移送距離は気泡発生管より 32m である。この図で中央に投入したフロートのエアバブル発生後 6 分から 10 分における移動位置をみると, その移動方向は測定中の風向とほぼ同じである。このことからフロートが移送されてエアバブルによる影響範囲より外れてくると, 風による影響が大きくなり吹送流によって移送されていることが推察される。そこで気泡発生管の平面配置を考え

る場合にはエアバブルによる流れのほかに風の影響が大きな要因になるものと思われる。その他の要因としては潮流や港の形状によっては副振動が考えられ、これらの海水に及ぼす影響を定量化することは今後の重要な検討課題である。

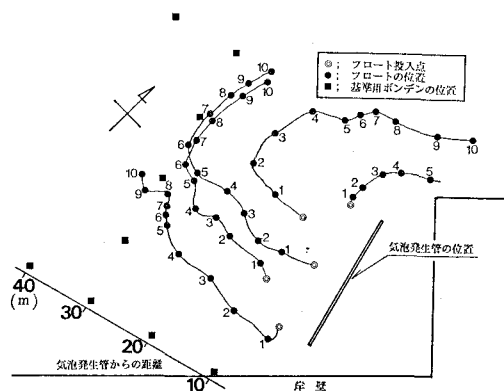


図-5 フロート位置の1分ごとの経時変化 ($Q=0.10\text{ m}^3/\text{min}/\text{m}$, フロート A)

図-6 は気圧換算空気量が $0.10\text{ m}^3/\text{min}/\text{m}$ のフロートの最大移送距離と時間の関係を示したものであり、このときの風向、風速は表-3 のとおりである。測定中の風向、風速が同一でないので一概には比較できないが、フロートの大きさによって移送距離が変わっている。このことから対象とする海水の規模によって、同じ空気量でもエアバブルによる移送範囲が異なってくることが予想される。そこで当工法を考える際には海水の厚さや大きさなどの結氷状態を把握することが重要となってくる。

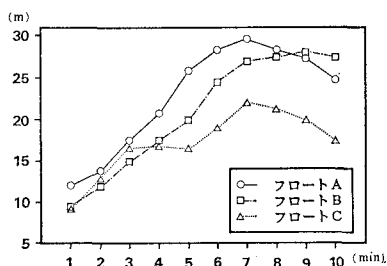


図-6 フロートの最大移送距離と時間 ($Q=0.10\text{ m}^3/\text{min}/\text{m}$)

(2) 海水による流況観測

図-7 は実際に結氷した海水を用いてエアバブルを発生させたときの経時変化を図示したものである。これは 100 ps コンプレッサーを全開に稼働させた場合で、この

表-3 実験中の風の状態

	観測経過時間	風 向	風速 (m/s)
フロート A	開始	S	5
	5 分後	S	4
	10 分後	SSW	6
フロート B	開始	S	5
	5 分後	SSW	5
	10 分後	S	6
フロート C	開始	SSW	2
	5 分後	SSW	6
	10 分後	SSW	4

ときの平均風速は 4.4 m/s 、風向は N の頻度が多くエアバブルによる流れを妨げる方向になっていたが、40 分後には海水移送範囲は 75 m にまで達していた。また、エアバブル発生 25 分後に投入したフロートは 40 分後には 85 m の位置まで移動していた。なお、実験中の海水の大きさは平均径にして数 10 cm から数 m のものまでであった。この結果より、当工法は技術的に港内結氷対策としての役割を十分に果たすものであると期待できる。

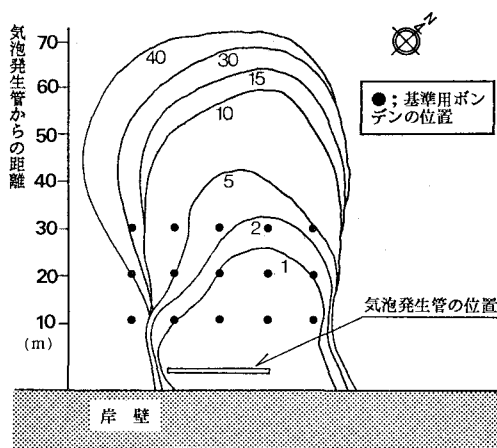


図-7 エアバブル発生中の海水制御範囲

図-8 は空気量が異なった場合の海水移送範囲と時間との関係を示したものである。ここで、50 ps コンプレッサー全開と 100 ps コンプレッサー全開のケースの空気量については流量計の適用範囲を越えていたため計測できなかった。この図では風の変動の影響があるので一概には比較できないが、空気量が大きくなるにつれて影響範囲も大きくなる傾向がある。また、50 ps コンプレッサー全開と 100 ps コンプレッサー全開のケースを比較してわかるように海水の移送距離と空気量は単純な比例関係にないことが推察される。このことから実際に当

工法を用いる場合には、経済性を考慮して制御しなければならない海水面の範囲に応じて最適の空気量を選択する必要があるものと考えられる。

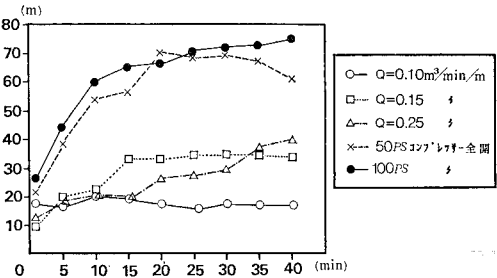


図-8 海水の移送距離と時間

(3) 水温および塩分量の観測

図-9 は第1回現地実証実験でのエアバブル発生前後の水温および塩分量の分布を示したものである。今回の実験において水温や塩分量は水深方向に顕著な違いがなかったためにははっきりした効果が見られないが、エアバブル発生後に水温や塩分量が一樣になる傾向がある。これはエアバブルによって海水の鉛直拡散が生じているものと考えられる。海水は塩分量が小さいほど結氷温度が高いので、港内に淡水の入り込む港や降雪があった後の港では結氷しやすい状況にある。このような場合には、エアバブルによる海水の鉛直拡散の効果によって結氷を起りにくくできるものと考えられる。

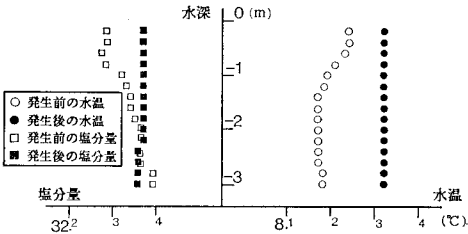


図-9 エアバブル発生前後の水温及び塩分量 (Q=0.25m³/min/m, 気泡発生管より5mの地点)

(4) 溶存酸素量の観測

図-10は第1回現地実証実験を行った日の始めとその日の実験終了後の溶存酸素量の分布を示したものである。なお、この日のエアバブル発生延べ時間は約4時間である。エアバブル発生後に溶存酸素量が上昇していることより、当工法は中村ら(1976)の研究でいわれているようにエアレーション効果があることがわかった。中村らの研究によると溶存酸素量の増加は水面での暴気が大きく影響しているようである。そこで当工法は冬期間の

港内結氷対策ばかりでなく、多目的な港の利用のための水質浄化対策と合わせて通年利用の可能性も考えられる。

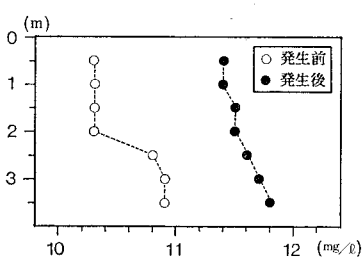


図-10 エアバブル発生前後の溶存酸素量 (昭和63年11月9日 気泡発生管より20mの地点)

5. 運転経費の試算

港内結氷状況観察の結果をもとに、昭和63年度に大津漁港において当工法を用いて港内結氷対策を行った場合のエアバブル発生装置の運転経費を試算したものである。なお、燃料消費量は第2回現地実証実験を行った際に測定した実績をもとに算出したものである。

(1) 昭和63年度の港内結氷状況

昭和63年度は例年に比べて暖冬であり、港内結氷もそれほど生じていない。表-4 は昭和63年12月より平成元年3月までの港内結氷の状態を5つに分類して、その頻度を示したものである。

表-4 港内結氷状況 (昭和63年12月より平成元年3月まで)

港内結氷状況	頻度(日)
結氷なし	55
僅かに薄氷あり	21
港内1/2以下結氷	7
港内1/2以上結氷	3
港内全面結氷	3
欠測	3

(2) エアバブル発生装置

気泡発生管形状は現地実証実験と同様のものを使うと仮定する。気泡発生管の配置は例年の結氷位置を考慮して図-11のとおりとし、その総延長は300mである。対象とする海水制御範囲は岸壁から30m程度とし、空気量は1気圧換算で0.15m³/min/mを供給するものとする。50psのコンプレッサーを使用すると最大吐出空気量が1気圧換算で5m⁴/minであるから気泡発生管33mにつき1台必要とするので、軽油を燃料とする50psコンプレッサーを9台使用する。

(3) コストの試算

エアバブル発生装置の運転時間は薄氷のときにコンプレッサー 9 台で 6 時間, 1/2 以下の結氷のときにコンプレッサー 4 台で 24 時間, 1/2 以上の結氷のときにコンプレッサー 6 台で 24 時間, 全面結氷のときにコンプレッサー 9 台で 24 時間とする。また, 燃料消費量は 10.8 l/h とし, 軽油は 60 円/l として算出した。以上に基づき試算すると, 昭和 63 年度に当工法を用いた場合の運転経費の概算は 1870 千円となった。また, 結氷時期が 12 月中旬から 3 月中旬までとすると気泡発生管 1m につき 1 日当り約 70 円の費用がかかる。試算では表-4 のデータをもとに行ったが, 実際にはエアバブルを発生させることにより結氷の状態や頻度が低下すると考えられるので費用は今回の試算よりも少なくなることが予想される。また, エアバブルの発生と終了のタイミングを最適に制御できるシステムや効率のよい気泡発生管の平面配置を開

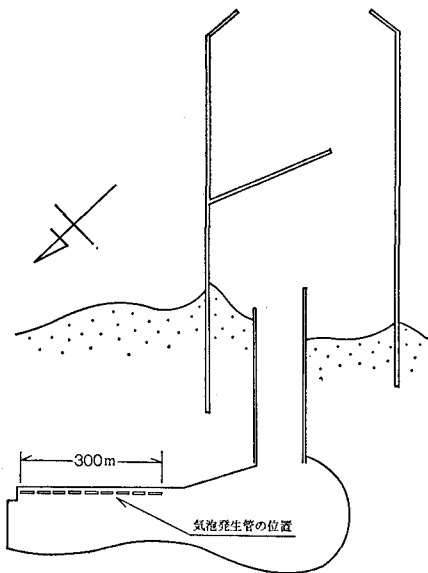


図-11 気泡発生管の位置

発することによりさらに経済的になると思われる。

6. 結 語

本研究は, 当工法が港内結氷対策の一工法として技術的に可能であることを明らかにし, 海水を制御できる範囲をある程度把握することができた。また, 結氷を制御するために効率的な平面配置や最適なエアバブル発生の制御システムを研究開発していくことにより実用化できる可能性が高いものと考えられる。

7. おわりに

北海道の港において海水を制御することは意義のあることであるが, 非常に難解な問題である。北海道で港内結氷対策に対する具体的な試みは今回の実験が初めてであり, 今回の研究では風の影響など残された問題も多い。それらは現地実証実験で得られた貴重なデータを十分活用して解明に努めるつもりである。また, 今後は気泡発生管の平面配置や最適なエアバブル発生の制御システムの研究を行っていく予定である。

最後に現地実証実験を行った際にご協力して頂いた十勝港湾建設事業所の方々や実験を計画する際に御助言して頂いた北海道大学工学部佐伯浩教授, 岩手大学工学部平山健一教授に深く感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 泉 洵・佐伯 浩・後藤克人・浜中 建一郎 (1988): 港湾の結氷防止に関する一考察, 第 4 回寒地技術シンポジウム, pp. 322~329.
- 岩垣雄一 (1977): 空気防波堤, 自然災害科学特別研究成果「海岸における波の制御に関する研究」.
- 梅沢信敏・遠藤仁彦・水野雄三 (1988): 北海道沿岸の港内結氷について, 第 4 回寒地技術シンポジウム, pp. 277~282.
- 遠藤仁彦・梅沢信敏・水野雄三 (1988): 港内結氷対策 (エアバブル工法) に関する実験的研究, 第 32 回北海道開発局技術研究発表会講演概要集 (4), pp. 223~228.
- 栗原道徳 (1954): 空気防波堤について, 第 1 回海岸工学研究発表会, pp. 93~97.
- 中村 充・乃万俊文・萩野静也 (1976): DO改善を目的としたエアバブルカーテンの設計, 第 23 回海岸工学講演会論文集, pp. 545~548.