

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(2)

——直立壁の影響について——

山中 浩次*・水野 雄三*・杉本 義昭*
時川 和夫**・梅沢 信敏**

1. ま え が き

北海道の一部の港では冬期港内海域が結氷し、船舶の安全航行や港湾機能に支障を来している。これにより物流や道内の重要産業である水産業などに与える影響は少なくなく、何らかの対策を講じる必要がある。北海道開発局では、港内結氷の対策工法としてエアバブル工法の研究を昭和63年度より行っている。エアバブル工法による港内結氷対策は以下に示す効果に期待して行うものである。

- ① 表面水平流による海水排除
- ② 海水面での動揺による結氷遅延
- ③ 鉛直混合による結氷遅延

北海道の港にエアバブル工法を適用する場合、比較的高塩分の海域であるため(山中他 1990)、①の表面水平流による海水排除の効果が最も期待される。表面水平流況を規定する要因としては、空気量、水深、気泡発生管形状(小孔の中心間隔、小孔の直径、小孔の配列)の他(遠藤他 1989)、風や潮流などの環境力や岸壁等の構造物による影響が考えられる。これらの要因から効率良く表面水平流を発生させる条件を把握することを目的として室内実験を行った。また、大津漁港において現地実験を行い、海水排除能力について検討した。一方、河口港や河川水および地下水等の流入のある港、あるいは降雪時においては、海水面表層に低塩分層が存在するため、③の鉛直混合による結氷遅延効果も期待できる。そのため網走川が注ぐ網走港において現地実験を行った。本論文は、以上の実験結果をとりまとめ検討を加えたものである。

2. 実験概要

(1) 室内実験

海水排除能力は表面水平流速および沖向きの表面水平流と岸向き下層流との境界である摩擦深度との相関が強いと考えられるため、これら気泡上昇による流況特性を

把握するため実験を行った。

a) 実験装置

実験は、図-1に示す大型2次元水路(長さ85m、幅1.6m、深さ3.0m)を用いて行った。側面に観測用ビットがあり、後述するタフトによる流況観測はここより行った。気泡発生装置はコンプレッサ(5.5Kw アンロード式)、空気量調整部(フロート式流量計2個使用)、気泡発生管よりなっている。

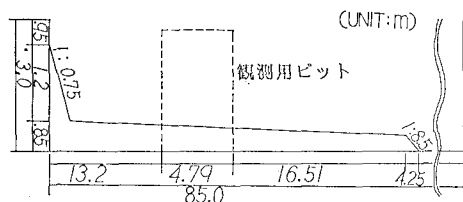


図-1 大型造波水路断面図

b) 実験方法

① タフトによる流況観測 気泡発生にともなう流況の定性的な傾向を把握するためにナイロン糸のタフトにより可視化を行った。タフトは水路側壁より80cmの所に水路に沿って10cm間隔で張った縦糸に水深方向10cmおきに取付けた。このとき取付け部においてタフトの動きを拘束しないため図-2のような細工を施した。タフトに用いたナイロンの密度は $1.12(\text{g}/\text{cm}^3)$ であるが糸状のため水中ではほぼ水平を保っていた。

② 岸壁の影響 エアバブル工法は港内結氷時に航路や繫船水域等の不凍水域を確保しようとするものであ

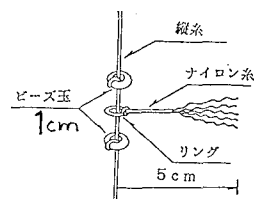


図-2 ナイロン糸のタフト

* 正会員 北海道開発局 開発土木研究所 港湾研究室

** 正会員 北海道開発局 港湾部 空港課

るため岸壁等構造物の影響を把握することが必要である。岸壁近傍に気泡発生管を設置した時、表面水平流に対する岸壁の影響を検討するために水路に岸壁に見立てた直立壁を設け、直立壁からの気泡発生管の設置位置を変え表面水平流速を計測した。

c) 実験条件

使用した気泡発生管の形状を表-1に、実験条件を表-2に示す。計測はプロベラ式流速計（プロベラ径 3 mm）を用いた。プロベラ式流速計によるデータは気泡発生後 30 秒より 3 分後までの 150 秒間の平均値を用いた。

表-1 気泡発生管形状

気泡発生管名	孔径(mm)	孔間隔(mm)	配列
H	1	60	1
L	5	750	1
M*	1	30	1

*はタフト実験

表-2 実験条件

気泡発生管	水深 h (cm)	直立壁との間隔	設定気圧 (kg/cm ²)
H	100	1.0h, 1.5h	7, 6, 5
	140	2.0h	4, 3, 2
L	140	壁直下, 壁無し	7, 5, 3 2,
M*	140	壁直下	7, 5, 3
	180		

*はタフト実験

(2) 現地実験

a) 実験装置

気泡発生装置はコンプレッサ（50 ps および 100 ps, 燃料は軽油）、空気量調節部（フロート式流量計 2 個使用）、気泡発生管よりなる。気泡発生管は長さ 25 m（うち 20 m が気泡発生部）、直径 100 mm の鋼管に直径 2 mm の小孔を間隔 150 mm、配列 1 列にあげ、さらに水抜き用の直径 2 mm の小孔を 300 mm 間隔で発生管下面にあけたものである。

b) 実験内容

① 大津漁港現地実験 空気量を変え、海水の移動状況を観測した。観測は地上 14 m 地点からのビデオ撮影により行い、これをもとに海水排除面積の変化および海水移送速度について解析した。実験水域を図-3に示す。気泡発生管は岸壁より 5 m 離して設置した。バックデータとして水温（2 地点）、気温（1 地点）、港内流

速（1 地点）、風向風速（1 地点）を観測した。

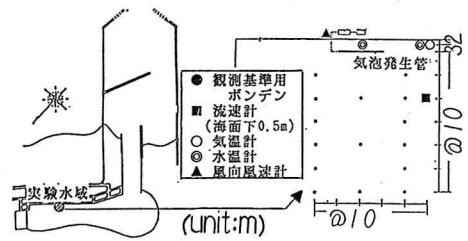


図-3 大津漁港実験水域

② 網走港現地実験 成層をなす実海域での鉛直混合の時間変化について観測を行った。観測は塩分・水温計（塩分：電導率、水温：白金測温抵抗体）を用いて行った。実験水域を図-4に示す。気泡発生管は、ほぼ岸壁直下（岸壁より 80 cm）に設置した。バックデータとし水温、気温、港内流速、風向風速を各 1 地点で観測した。

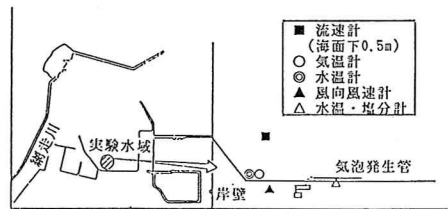


図-4 網走港実験水域

3. 実験結果と考察

(1) タフトによる流況観測

写真-1 は直立壁直下に気泡発生管を設置した場合の流況の一例で、実験開始から 7 分経過後の直立壁から 4 m までの範囲のタフトの状態を示している。上層の冲向きの流れと一樣な下層の岸向きの流れ、その中間層に流れの乱れた層が観測できる。この中間層の位置（摩擦深度）については、今まである程度一定であると考えら

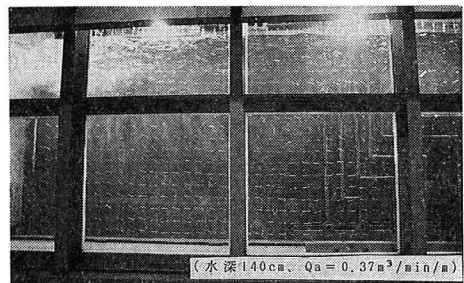


写真-1 タフトによるエアバブル流況の可視化

れていたけれども、実験ではこの摩擦深度がある幅をもって上下に移動していることが分かった。また、空気量が多いほど、気泡発生管近傍での上昇流の卓越する範囲が沖側に広がることを確認できた。

(2) 直立壁による影響

図-5 は直立壁に対する気泡発生管の設置位置が表面流速に及ぼす影響について示したものである。縦軸に最大表面水平流速 $U_{\max}$ (cm/sec), 横軸には1気圧 20°C の条件で換算した空気量 Q_a (cm³/sec/cm) の $1/3$ 乗の値 $Q_a^{1/3}$ をとっている。 $U_{\max}$ は、気泡発生管から 80 cm の位置での表面水平流速である。パラメータは直立壁から気泡発生管までの距離 l で、 h は水深を表している。使用した気泡発生管はH管である。図から分かるように気泡発生管が直立壁に近づくにつれ、 $U_{\max}$ は減少している。これは、直立壁向きの流れによって起こる直立壁と気泡発生管との間の強い循環流のためと考えられる。この循環流のため写真-2 に示すように気泡上昇軌跡に乱れや湾曲部が生じており、その乱れ規模は気泡発生管が直立壁に近づくにつれ大きくなる。

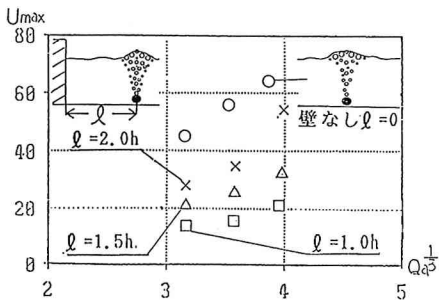


図-5 気泡発生管の設置位置の影響 ($h=140$ cm, H管)

図-6 は水深 100 cm で H 管を用いたケースの結果を、縦軸に $U_{\max}$ を一気圧換算空気量 Q_a と重力加速度 g の積の $1/3$ 乗で無次元化した値、横軸に気泡発生管の直立壁からの距離 l (cm) をとり、まとめたものである。パラメータは気泡発生時の空気調節部における設定気圧 p (kg/cm²) で、この値が同等の場合はほぼ同等の空気量が得られる。この図から直立壁による表面水平流への影響力には極値が存在し、その値までは直立壁に近づくにつれ表面水平流の発生効率は落ちるがそれを越えて近づくとも再び効率が向上していくことが分かる。

図-7 は水深 140 cm で気泡発生管を直立壁直下に設置したときの結果を図-5 と同様にまとめたものである。直立壁直下に設置した方が種々の空気量に対して $U_{\max}$ が大きくなっている。このケースの場合は、壁無しに比べておよそ 12% の流速上昇となっている。この理由として、今まで岸方向、沖方向と 2 方向に分岐して

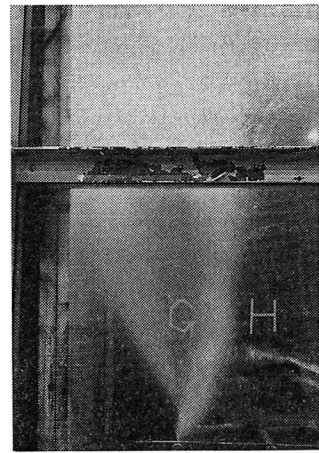


写真-2 直立壁の影響による気泡の乱れ

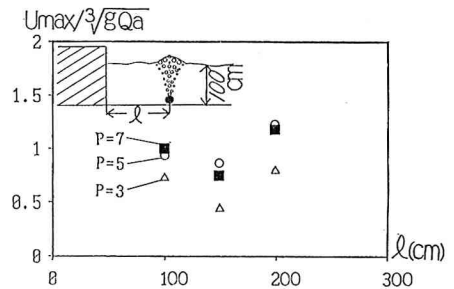


図-6 気泡発生管の設置位置の影響 ($h=100$ cm, H管)

いた流れが沖 1 方向に集約されたためと考えられる。このケースを直立壁を鏡面とした鏡像として考え、空気量が 2 倍になった条件と同等であると仮定できる。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 $Q_a^{1/3}$ が比例関係にあることは本研究においても確認されており、この関係を用いて L 管で空気量 Q_a が 2 倍になったときの $U_{\max}$ を計算するとおよそ 26% の流速上昇となる。この計算結果と実験結果との違いは、計算に用いた L 管と鏡像と仮定した気泡発生管の形状の違いや気泡の吐出速度の違い、気泡が上昇するときの壁面での摩擦や気泡上昇の分布の違いによるものと考えられる。

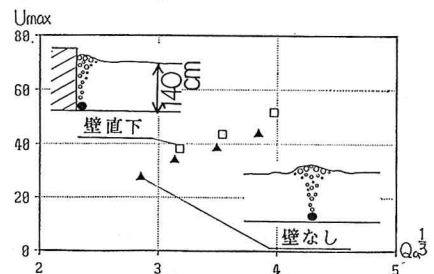


図-7 気泡発生管を直立壁直下に設置したときの影響

(3) 海水排除能力について

実験は、蓮の葉氷が港内を覆った状況で行われた。

写真-3 は Case 1 の気泡発生後10分の状況を、写真-4 は Case 2 の気泡発生後2分の状況を示す。Case 1 は平成2年1月24日14:28~15:58 に $Q_a=0.62 \text{ m}^3/\text{min/m}$ 、Case 2 は平成2年1月23日15:08~16:38 に $Q_a=0.84 \text{ m}^3/\text{min/m}$ 、Case 3 は平成2年1月25日10:10~11:40 に $Q_a=0.2 \text{ m}^3/\text{min/m}$ の条件で実施した。

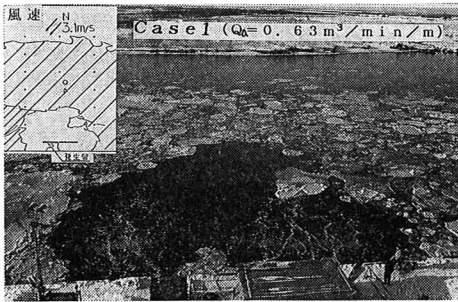


写真-3 海水排除, Case1, 気泡発生10分後

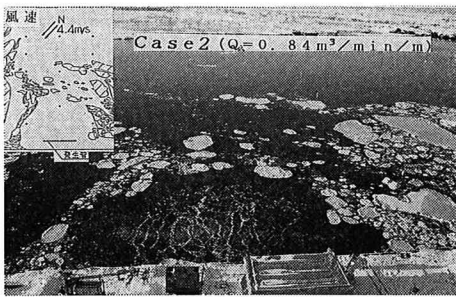


写真-4 海水排除, Case2, 気泡発生2分後

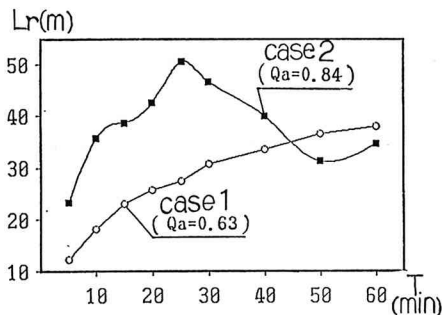


図-8 海水排除距離の空気量による変化

図-8 は、縦軸に海水排除距離 $L_r(\text{m})$ を、横軸に気泡発生後の経過時間 $T(\text{min})$ をとった。海水排除距離は、気泡発生管中央での岸壁から開放水域端までの距離で、ビデオ画像より求めた。海水群の排除速度は空気量の他、海水密接度や海水形状に左右されられると考えられる。

Case 1, Case 2 は、海水形状はほぼ同様であるが海水密接度において Case 2 が小さくなっている。図から分かるように空気量が多く海水密度の小さい Case 2 が移送速度は速く、気泡発生後25分で最大排除範囲に適している。その後、平均流速 7 cm/sec の潮流の影響による海水の流入があり、開放水域が流れ方向に歪んだので気泡発生管中央での排除範囲は減少している。Case 1 では、はじめ海水のすき間が詰まるようにして海水排除範囲が広がり、その後、海水群となり徐々に排除範囲を広げている。これに対して、ほぼ同密接度の海水群であっても写真-5 に示した Case 3 のように氷が1枚氷に近くなると、氷を破壊しながら排除範囲を広げることになり、エアバブル工法においては非常に効率が悪く適用範囲外になると考えられる。

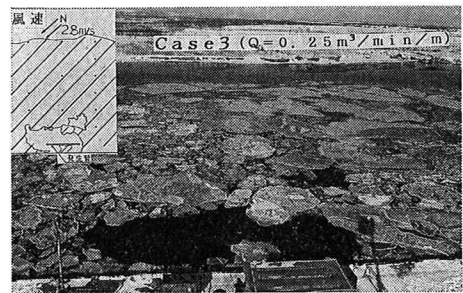


写真-5 海水排除, Case3, 気泡発生10分後

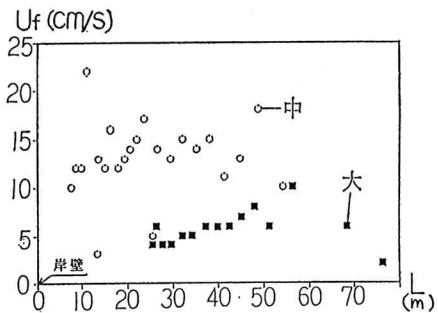


図-9 海水移送速度の海水形状による違い

図-9 は海水排除実験中、海水群から孤立した海水について、その移送速度をビデオ画像より解析したものである。縦軸に海水移送速度 $U_f(\text{cm/sec})$ 、横軸には岸壁からの距離 $L(\text{m})$ をとった。海水は直径 5 m 以上を大、 $2 \text{ m} \sim 4 \text{ m}$ を中、 2 m 未満を小と区分した。風の条件は、共に北 2 m/sec と同様なので、海水排除速度に違いを与える他の要因としては表面水平流により海水の厚み部分に働く推力と抵抗力、および海水底面に働く相対速度差による摩擦力とである。海水の規模が大きくなるにつ

れ厚みに働く推力が海水の重量に対して相対的に小さくなるため加速しづらくなると考えられる。同様に考えると表面水平流が弱まり減速期に入ると規模の大きい海水の方が受ける抵抗に対して相対的に大きな慣性エネルギーを持っているので減速しづらくなるものと考えられる。

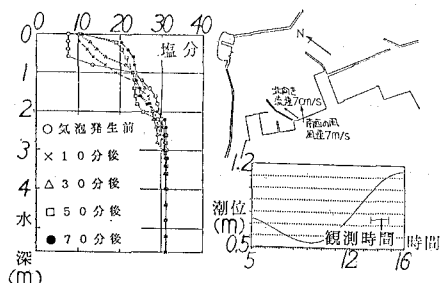


図-10 塩分の鉛直混合の時間変化および実験時状況

(4) 鉛直混合について

網走港で平成3年2月16日13:30~14:50に気泡発生による鉛直混合に関する実験を行った。空気量は気泡発生後45分まで $0.35 \text{ m}^3/\text{min}/\text{m}$ 、その後 $0.61 \text{ m}^3/\text{min}/\text{m}$ とした。計測は気泡発生管中央で行った。図-10は塩分の鉛直分布の時間変化および実験中の潮位等を示す。図にあるように、実験時間中は上げ潮で測点での流向はほぼ一様に北を示し、平均流速は $7.0 \text{ cm}/\text{sec}$ であった。風は北東の風、平均風速 $7\sim 8 \text{ m}/\text{sec}$ であった。気泡発生前は水深 0.6 m 近傍に密度躍層が存在している。上層は塩分 7.7 の低塩分層であり、網走川の影響と考えられる。気泡発生後10分、30分では、躍層の傾きが徐々に緩やかになってきてはいるが十分に準層の高塩分の海水を上昇できず、躍層を破壊するには至っていない。空気量を増加させた後の50分、70分のデータでは水深 2.0 m まで表層を除いて急激に鉛直混合が行われ躍

層が破壊されている。これから密度差のある水塊の上昇量は空気量のよって異なり、これにより鉛直混合の進み方に違いが現れてくるものと考えられる。なお、表層での塩分が低いのは、気泡発生後30分前後に接岸した流氷本体前面の砕け氷群の影響と考えられる。

4. まとめ

①気泡発生管を直立壁前面に設置した場合の流れのパターンを可視化した。

②表面水平流速は、気泡発生管と直立壁の距離によって変化することを明らかにした。

③海水排除能力が空気量および海水形状によって変化することを明らかにした。

④空気量の違いにより鉛直混合の進み方に違いがあることが分かった。

室内実験および現地実験により定性的な傾向はおおよそ把握することができた。今後は、現地での実用化に向けて風や流れ、結氷状況など環境力による影響についての研究を進めていく必要がある。本論文では言及できなかったが、現地実験では、波による表面流速の減少が大きいことが確認されている。このことは港内のみが結氷し、波が入り込んでくる日本海岸や太平洋岸の港にエアバブル工法を適用する場合、重要な要件となる。

また、海面動揺および鉛直混合による結氷遅延効果を把握するために低温室での室内実験も予定しており、さらに研究を進めていきたい。

参考文献

- 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」。
- 遠藤仁彦他 (1989): 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, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 693-697。
- 栗原道徳 (1954): 空気防波堤について, 第1回海岸工学講演会講演集, pp. 93-97。
- 山中浩次他 (1990): 港内結氷対策: エアバブル工法の紹介, 寒地技術シンポジウム '90 講演論文集, pp. 215-229。