

エアバブル流による港内結氷盤の排除効果に関する一検討

PRIMARY CONSIDERATIONS FOR REMOVAL OF SEA ICE FLOES IN PORT USING CURRENT CAUSED BY AIR BUBBLES

木岡信治¹・本間大輔²・山本泰司¹・竹内貴弘³

Shinji KIOKA, Daisuke HONMA, Yasuji YAMAMOTO and Takahiro TAKEUCHI

¹正会員 工博 独立行政法人寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1番34号)

²北海道開発局釧路開発建設部 釧路港湾事務所 (〒084-0914 釧路市西港1丁目)

³正会員 工博 八戸工業大学大学院教授 環境建設工学科 (〒031-8501 八戸市妙大開88-1)

Sea freezing in harbors during winter causes considerable economic damage to ports, harbors and fishing ports in Hokkaido due to the prevention of fishing and anchorage, damage to ships and other problems.

While countermeasures against sea freezing are proposed, we have been focused on the countermeasure using current caused by air bubbles. We examined the effect of removal of sea ice using simple analytical models which were verified using some experimental data in this report. Displacement of sea ice due to the air bubbles current was not proportional to the air flow rate and did not increase at more than $1 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s/m}$ ($0.1 \text{ m}^3/\text{min/m}$) of air flow rate. Also, the displacement of sea ice depended greatly on wind speed and direction.

Key Words : Sea ice, freezing, air-bubble, wind, countermeasure

1. はじめに

冬季に港内水面が凍結する港内結氷は、北海道各地の港湾・漁港において、出漁不能、船舶の待機・損傷など、大きな経済的被害を与えており¹⁾、結氷対策の地元の要請は高い。この結氷対策には比較的水温が高い外海水供給や港形改良、氷盤・氷晶排除など様々な案が考えられる²⁾。当研究所では、このうち氷盤・氷晶排除による対策案の一つであるエアバブル工法について、過去に室内実験や現地実験を実施しており³⁾⁴⁾⁵⁾など、やや定性的ではあるが一定の効果が確認された。一方、水質改善や空気防波堤など別の目的で、エアバブルが検討されていて、流況などに関する解析解も提案されている⁶⁾⁷⁾など。

本検討では、当所が過去に実施したエアバブルにともなう水流等に関する実験データや他の研究者らによる実験データを整理し、既存の解析解と比較し、その有用性を検証した。さらに、本検討では、中村ら(1974)⁷⁾による表面流速の減衰に関する解析解に習い、新たに風の影響を考慮した解を示し、これらを外力とした浮氷盤の運動方程式を種々の条件を与えて解き、エアバブル工法による結氷対策案の効果・有用性について検討を行った。

2. エアバブル流による結氷抑制の原理

図-1 に示すように、エアバブル工法とは圧縮した空気を水中に配管した気泡発生管(空気管)より噴出して水中に強制的に対流をおこし、この流れを利用して、空気防波堤、水質浄化対策、など様々な用途への応用が考えられている。結氷対策への応用としては、水面近くの水平流によって氷晶や氷盤を排除するか、低塩分(24.5‰以下)の場合には下層の比較的温暖な水との混合によって表層の水温を上昇させ、氷晶の生成を遅らせるというものである。エアバブルは湖沼等でよく用いられる。これは後者

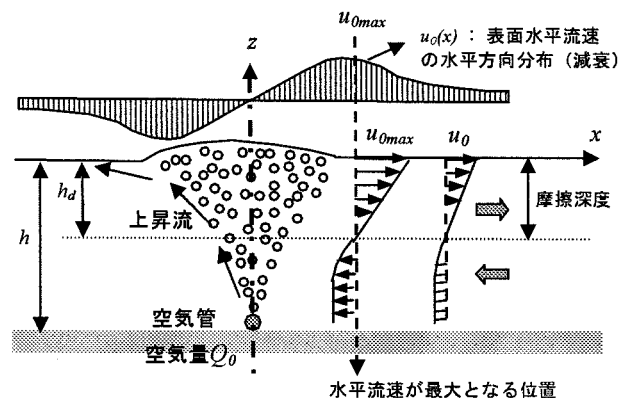


図-1 エアバブルによる流況のモデル図

の原理を期待したものであるが、24.5%以上の海域では、その効果はなく、前者の原理に期待するものである。またエアバブルは、エアレーション等の用途もあるので、結氷対策ばかりでなく、夏季の水質改善など、多目的な通年利用も考えることができる。図-1 に示すように、気泡群とともに連行する上向きの水流が水面に到達すると水平流に転向し、あとに示すよう距離に応じて指数的に減少する。巨視的には対流が生じ、3 次元的な複雑な流況となる。また上層と下層の流れが反転する位置が存在し、表層からその位置までの距離は摩擦深度と言われる⁷⁾。

3. エアバブル流およびそれによる氷盤の動きの検討—既存式および新たな式の導出—

(1) 表面水平流の最大流速 u_{0max}

Kobus(1972)⁸⁾は気泡群とともに上昇する水塊の運動量変化が浮力に等しいとして2次元的な解析を行い、表面水平流の最大流速 u_{0max} と単位長さ当たりの空気供給量(1気圧換算) Q_0 との関係式を理論的に導いたが、その後、岩垣ら(1983)⁶⁾らが、過去の実験結果や観測値の平均的傾向、それに次元解析的考察から、次式を提案した。

$$\frac{u_{0max}}{\sqrt[3]{gQ_0}} = 1.22 \left(1 - \frac{0.075}{h_a} \right) \quad (1)$$

h_a : 水深(または気泡発生管から水面までの距離)

(2) 表面水平流速の減衰の検討

中村ら(1974)⁷⁾は、風のない水面での水平流速の減衰(1次元)を解析的に導いている。本研究では、中村ら(1974)⁷⁾の導出過程にならい、風のせん断力を考慮した場合の、表面水平流速の減衰式の導出を試み、後に示すよう1次元での理想(単純)条件下で、エアバブルにともなう氷の移動に及ぼす風速・風向の影響について検討するためのツールとした。距離 x における上層平均流速を u_1 とすれば、この位置から dx だけ離れた位置での上層平均流速は運動量法則から次式が得られる。

$$\rho_w \frac{dh_d u_1^2}{dx} = \tau_x \quad (2)$$

ここに、 τ_x は摩擦深度における接面抵抗、 ρ_w は水の密度、 h_d は x 位置での摩擦深度、連続の条件より、

$$\frac{dh_d u_1}{dx} = -v \quad (3)$$

ここに、 v は摩擦深度面を通過する下向き流速、 τ_x は h_d 面を通じ上層から下層に輸送される運動量と粘性逸散、それに風のせん断力 τ_b (エアバブルによる流れと逆向きの場合を正とする)によって次式のように表される。

$$\tau_x = -\rho_w v(u_1 + u_2) - \rho_w f u_1^2 - \tau_b \quad (4)$$

ここに、 u_2 は x 位置における下層流速(注:中村らは下層流速を一樣であると仮定している。ここでは暗に平均流速と仮定しておく)、 f は h_d 面の摩擦抵抗係数、また連続の式より、

$$u_1 h_d = u_2 (h - h_d) \quad (5)$$

式(3)、(5)を式(4)に代入すれば、

$$\tau_x = \rho_w \left(\frac{u_1 h}{h - h_d} \right) \frac{dh_d u_1}{dx} - \rho_w f u_1^2 - \tau_b \quad (6)$$

式(6)を式(2)に代入して、変形すれば、

$$\frac{du_1}{dx} = - \frac{f u_1^2 + \tau_b / \rho_w}{h_d \left(u_1 - \frac{u_1 h_d}{h - h_d} \right)} \quad (7)$$

ここで、 $x/h = \xi$, $u_1/u_{0max} = u_0'/u_{0max} = \eta$, $h_d/h = F_d$ (u_0 は x 位置での表面流速、 u_{0max} は最大表面水平流速)とおき、境界条件を $\xi=0$ のとき $\eta=1$ とすれば、表面流速の水平減衰の式

$$\eta = \left[\frac{1}{f} \left(f + \frac{\tau_b}{\rho_w u_{0max}^2} \right) \exp \left\{ - \frac{(1-F_d)2f\xi}{F_d(1-2F_d)} \right\} - \frac{\tau_b}{f \rho_w u_{0max}^2} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (8)$$

を得る。なお、風によるせん断力は、次式の風によるバルク応力を用いるものとする。

$$\tau_b = \rho_a \gamma_a^2 V_a |V_a| \quad (9)$$

風速 V_a が0のときは、式(8)で $\tau_b=0$ とし、

$$\eta = \exp \left\{ - \frac{(1-F_d)f\xi}{F_d(1-2F_d)} \right\} \quad (10)$$

となつて、中村ら(1974)⁷⁾の式に一致し、流速は指数的に減少する。風があるときは、 u_{0max} も変化すると考えられるが、Kobus⁸⁾の水面での上昇流=水平流の最大表面流速、にならつて、風があるときでも u_{0max} はその影響を受けないと仮定した。さらに式(10)と式(1)より、風がない場合の水平減衰は、次式となる。

$$\frac{u_0}{\sqrt[3]{gQ_0}} = 1.22 \left(1 - \frac{0.075}{h_a} \right) \exp \left\{ - \frac{(1-F_d)f\xi}{F_d(1-2F_d)} \right\} \quad (11)$$

(3) 単純なモデルによる氷の動きのモデル

港内の氷の動きは非常に複雑であるが、本検討では、風やエアバブル流による氷の動きの基本的な検討が主目的であるので、まずは1次元の単体の氷の動きを考える。運動方程式は、氷の内部応力、コリオリ力、海面傾斜による力を無視して、次式となる。

$$\rho_i (h_i + h_i' C_m) \frac{d^2 X}{dt^2} = F_{sa} + F_{dw} + F_{sw} \quad (12)$$

ここに、 ρ_i , h_i , h_i' はそれぞれ氷の密度、氷厚、喫水深、 X は氷の移動距離、また C_m は付加質量係数であるが、ここでは0.5と仮定した(Russel et al.,1977)⁹⁾。 F_{sa} は風によるせん断力であり、次式で表される。

$$F_{sa} = \rho_a C_{sa} L \left(u_a - \frac{dX}{dt} \right) \left| u_a - \frac{dX}{dt} \right| \quad (13)$$

ここに、 ρ_a , u_a はそれぞれ空気密度、海上10mでの風速、 L は氷の辺長である。 C_{sa} は大気と氷とのせん断抗力係数で、本報では0.002を用いる¹⁰⁾。

また、 F_{dw} , F_{sw} はそれぞれ流れによる形状抵抗力(圧力抗力)、流れによるせん断抵抗力(摩擦抗力)であり、上田等(1992)¹⁰⁾の表示を参照すれば、

$$F_{dw} = \rho_w C_{dw} h_i' \left(u_0 - \frac{dX}{dt} \right) \left| u_0 - \frac{dX}{dt} \right| \quad (14a)$$

$$F_{sw} = \rho_w C_{sw} L \left(u_b - \frac{dX}{dt} \right) \left| u_b - \frac{dX}{dt} \right| \quad (14b)$$

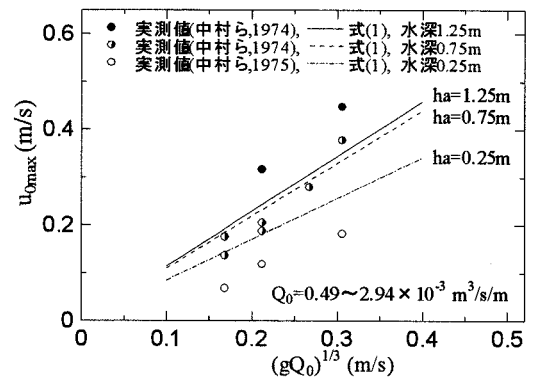
ここに、 ρ_w , h_i' はそれぞれ空気と海水の密度、氷の喫水深、 u_0 は表面流速、そして C_{dw} , C_{sw} はそれぞれ形状抵抗係数およびせん断抗力係数であり、平坦氷ではそれぞれ0.6, 7×10^{-3} が報告されている¹⁰⁾。

3. 実験値との比較

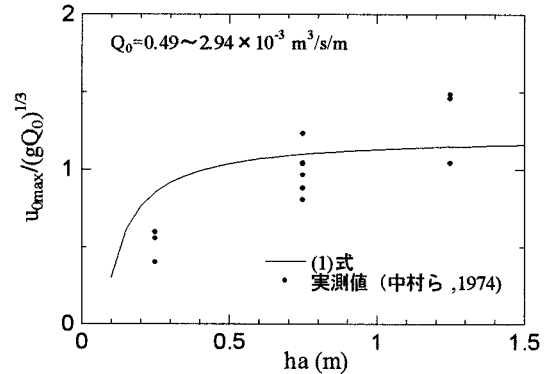
本節では、前節に示した計算式と既存の実験結果との比較を行う。比較のために参照した実験値は、主に空気防波堤の消波機構の解明を目的とした研究を行い、前節の(1)式を導出した岩垣ら(1975)¹¹⁾、それに、主に水質改善を目的とした研究を行い、式(10)を導出した中村ら(1975)⁷⁾を用いた。さらに、結氷対策を目的とした当所の実験結果を用いた³⁾⁴⁾⁵⁾¹²⁾。

まず、図-2(a)には表面水平流の最大流速 u_{0max} と $gQ_0^{1/3}$ (Q_0 は1気圧換算の空気量)との関係について、例として、中村らの実験結果⁷⁾と式(1)との比較を示した。また、同図(b)には縦軸・横軸の表現を変え、気泡発生管の設置水深(ha)と $u_{0max}/gQ_0^{1/3}$ との関係を示している。これらの図より、 u_{0max} は Q_0 の $1/3$ 乗に比例すること、設置水深に反比例(設置水深の増大とともに、 u_{0max} も増大するが、ある値に漸近)することなど、実測値は、概ね式(1)の傾向を表している。また、当所の実験結果も既に概ね(1)式の傾向を表すことが示されている⁵⁾。

次に、エアバブルにともなう表面流速 u_0 の減衰に関する実験結果と、岩垣ら⁹⁾の式(1)と中村ら⁷⁾による式(10)を合成した式(11)の計算値との比較例を図-3に示す。この場合、Bulson(1961)¹³⁾、岩垣(1975)¹¹⁾、中村ら(1974)⁷⁾、当研究室の過去の実験結果などから、摩擦深度は水深の0.3倍前後である場合が多いと推論されることから、摩擦深度を



(a) 最大表面流速 u_{0max} と $gQ_0^{1/3}$ との関係



(b) $u_{0max}/gQ_0^{1/3}$ と設置水深 ha の関係

図-2 最大表面流速 u_{0max} を表す式(1)と実験値との比較例 (この例では中村等(1974)⁷⁾の一部の実験結果を使用)

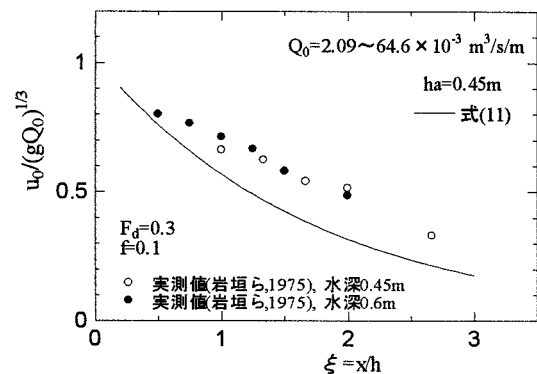


図-3(a) 表面水平流速の減衰の実験結果 (岩垣ら,1975)¹¹⁾と計算値(式11)との比較例

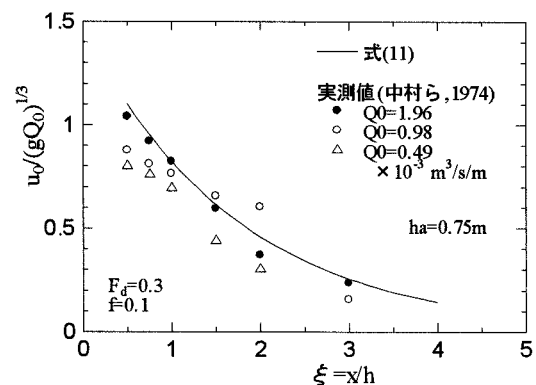


図-3(b) 表面水平流速の減衰の実験結果 (中村ら,1974)⁷⁾と計算値(式11)との比較例

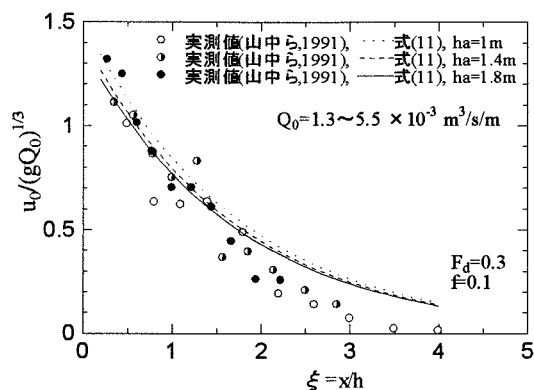


図-3(c) 表面水平流速の減衰の 実験結果 (山中ら,1991)⁵⁾と計算値(式11)との比較例

$h_d = 0.3h$ と仮定した。また h_d 面の摩擦抵抗係数 f は中村ら (1974)⁷⁾ の実験では 0.085~0.12 の間にあり、ここでは 0.1 を与えた。これらの図より、実験結果の表面流速は距離に応じて指数的に減少しており、その傾向をよく表現しているといえる。したがって、風があった場合にもその拡張型である式(8)の妥当性も推論でき、単純なモデル (1 次元) を用いて風の影響も考慮したエアバブルの氷の排除効果を検討する場合にこの理論式を用いる根拠が得られた。

次に、気泡発生管近傍に直立壁があった場合について検討した。現実には利用頻度の多い岸壁直下に敷設することが考えられる。このような場合、山中ら (1991)⁵⁾ も指摘しているように、計算上は、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と考える。ここで、図-4 に、気泡発生管の近傍に直立壁がある場合と無い場合での表面流速の比較、および壁ありの場合に空気量を 2 倍として計算した場合の式(11)の計算値と実測値との比較例を示した。実験データは当研究室が過去に行ったものを用いた¹²⁾。これらより、壁ありのほうが壁無しに比べて大きくなっており、また、計算値は実測値の傾向をよく表していることから、実用的には $Q_0 \rightarrow 2Q_0$ として計算できるものと思われる。この場合、壁ありのほうが、 $2^{1/3} = 1.26$ 、つまり 26% の流速の増分となる。

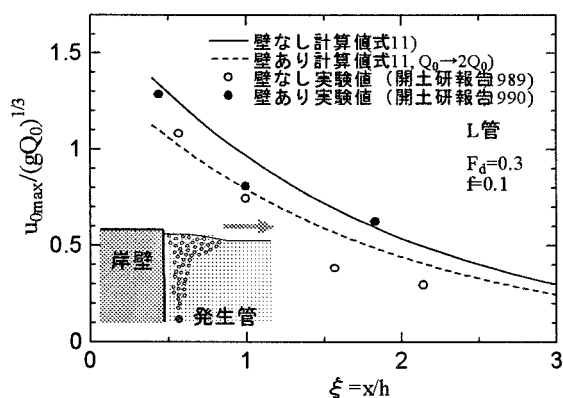


図-4 空気管の近傍に壁がある場合と無い場合での表面流速の比較、および壁ありの場合 $Q_0 \rightarrow 2Q_0$ として計算した場合の計算値と実験値¹²⁾との比較例

最後に、エアバブルにともなう氷の移動量の計算値と実測値との比較例を図-5 に示す。エアバブルにともなう氷の運動は、外力としてエアバブルによる流れ(式 11) を考慮して運動方程式 (式 12) を数値的に解いたものである。ここで、対象とした実験結果は当研究所が過去に実施した 2 次元水路での実験結果のうち遠藤ら (1988)⁴⁾ によるものを用いた。この実験は、氷と比重がほぼ同じのパラフィンを原料にして作った直径 10cm、厚さ 2cm の円盤型の模擬氷を 1 ケースにつき 5 個を水路に投入するというものである。なお図中にはそれらの平均値を示している。図より、計算値は実験値の傾向をよく再現している。また参考に、氷盤の速度の計算値も示したが、氷盤投入後、瞬時に最大値に達し、指数的に減少しているのが見て取れる。

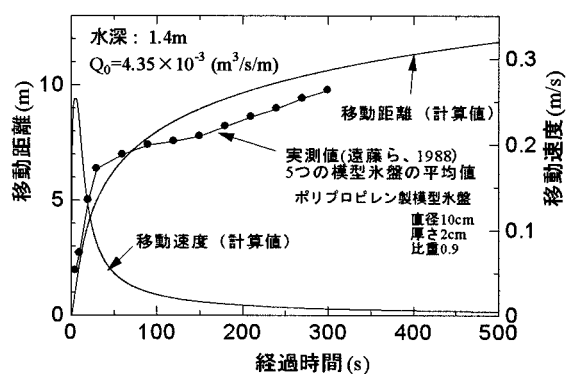


図-5 エアバブルにともなう氷 (模擬氷) の移動量の計算値と実測値⁴⁾との比較例

4. エアバブル流による氷の排除効果に関する検討

前節より、エアバブル流ならびにそれによる氷盤の移動についての計算方法が概ね妥当性であることが分かった。本節ではさらに風による影響を考慮して、エアバブル工法による結氷対策案の効果・有用性について基礎的な検討を行った。具体的には、式(1)、式(8)、式(12)を用い、以下の計算例では、水深 5m、氷盤長 10m、また前項と同様に、 $f = 0.1$ 、 $h/h_d = 0.3$ 、それに $\gamma_a^2 = 1.3 \times 10^{-3}$ (中田ら, 1985)¹⁴⁾ として計算し、氷厚、エアバブル空気量 (一気圧換算) Q_0 、風速 V_a をいくつか変えて計算した。

まず、図-6 には風速が 0 の場合について、エアバブルによる氷の移動速度の例を示した。氷厚が小さいほど、早く速度のピークが現れ、その最高速度も大きい。しかし、徐々に気泡発生管から離れ、速度が減衰してくると、逆に氷厚の大きな氷盤は慣性力が大きいため速度減速が小さく、移動距離の氷厚によるオーダーも逆転してくる。

図-7 に風速をパラメータとした場合のエアバブルによる表面流速の水平減衰例を示した。エアバブルによる表面流と同じ向き (正) で、0 より大きな風速では、気泡発生管から離れた位置でも、風によ

る吹送流があるため流速は0にはならない。一方、エアバブル流とは逆向き（負）の風があった場合は、風による減衰が著しく、いずれ流速が0となる地点が存在する事が見て取れる。

図-8には、風速と氷盤の移動距離との関係例（風速が0以上のときは代表として10分後の距離）を示した。これらの図より、氷の移動距離は風速に大きく影響を受けることが分かる。とくに風速が負（エアバブルによる流れと逆向）の場合、10分以内に停止しており、これが最終の移動量となっている。同図

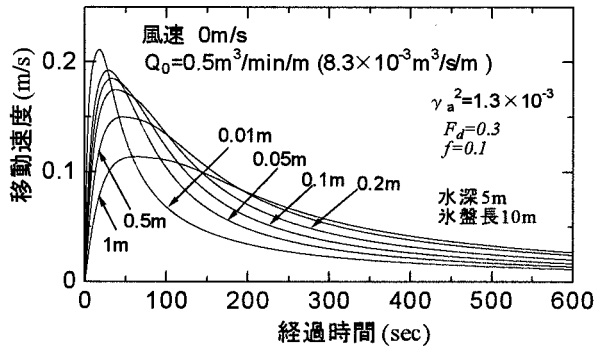


図-6 氷厚をパラメータとした場合のエアバブルによる氷の移動の計算例
(風速0m/s, $Q_0=0.5\text{ m}^3/\text{min}/\text{m}=8.3\times 10^{-3}\text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$)

(b)は氷厚をパラメータとした場合の関係例を示しているが、風速の正負で移動距離の氷厚によるオーダーが逆転しているのを見て取れる。これは、大きな氷厚の場合、流体抵抗の一つである圧力抗力が大きくなり、つねに風向に逆向きの抵抗として作用することになるためである。

最後に、図-9には空気量 Q_0 と氷盤の移動距離との関係例（風速が0以上のときは代表として10分後の距離）を示した。いずれの風速にも移動距離は空気量に比例して大きくなり、およそ $1\times 10^{-3}\text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$

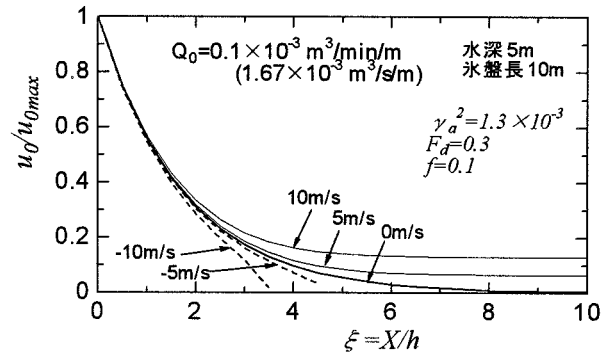
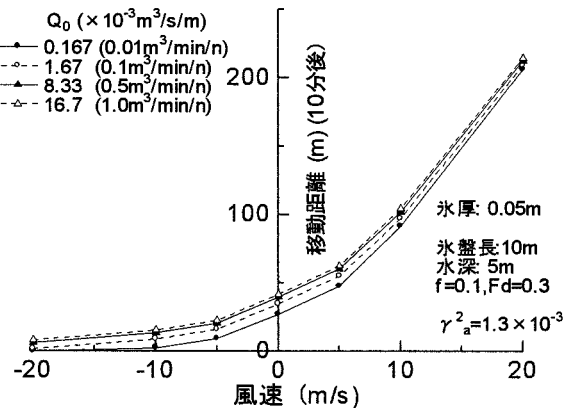
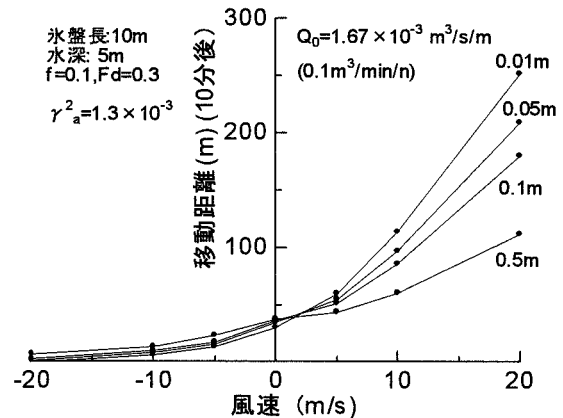


図-7 風速をパラメータとした場合のエアバブルによる表面流速の水平減衰の例
($Q_0=0.1\text{ m}^3/\text{min}/\text{m}=1.67\times 10^{-3}\text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$)

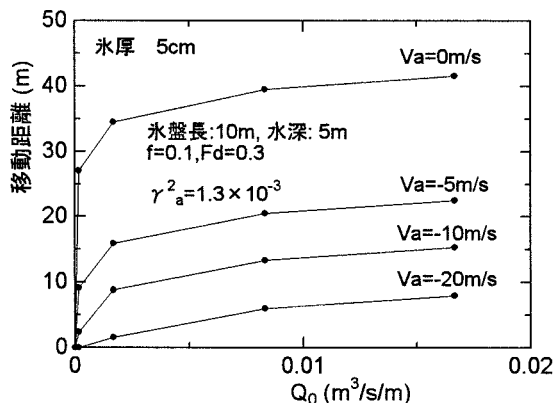


(a) 空気量 Q_0 をパラメータとした場合
(氷厚5cm)

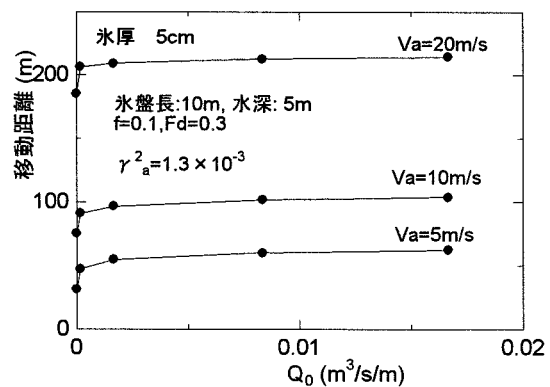


(b) 氷厚をパラメータとした場合
($Q_0=0.1\text{ m}^3/\text{min}/\text{m}=1.67\times 10^{-3}\text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$)

図-8 風速と氷盤の移動距離との関係例（風速が0以上のときは代表として10分後の距離）



(a) 風向がエアバブル流と逆向きの場合



(b) 風向がエアバブル流と同じ向きの場合

図-9 空気量 Q_0 と氷盤の移動距離との関係例（風速が0以上のときは代表として10分後の距離）（氷厚5cm）

以上（あるいは $0.1\text{m}^3/\text{min}/\text{m}$ ）の空気量では、大きな増加はない。とくに、風速が正の場合に移動距離は大きくなるが、これは風によるせん断力が氷盤へ作用するためであり、エアバブル流による直接的な寄与が大きいのではない。一方、風速が負の場合（0含め）には移動距離は数10mのオーダーであるが、風速が増大するにつれ小さくなる。実用上、船舶が停泊、航行する程度の水路を確保するため、完全に氷盤を排除しようとする観点からは、エアバブルのみによる効果は必ずしも期待できる保障はないことを示唆している。さらに、現実には、周囲の護岸や構造物による拘束や、気泡発生管から遠方の水域の結氷などにより、氷盤の排除スペースが徐々に狭くなると考えられる（逃げ道がなくなる）。

以上、本節では、単純なモデルを用いて、風速、空気量、それに氷厚が氷盤の移動距離に及ぼす影響について考察した。ここで推察されたことは、空気量に比例して氷盤の移動距離は大きくなり、その増加率は減少すること、氷の移動距離は風速・風向に極めて大きく依存し、エアバブル工法の導入には、港形（氷盤・フラジルアイスなどを港外へ排除されやすい形）などのほか、特に風向風速に注意すべき必要があることが分かった。

5. まとめ

主要な結論を以下にまとめる。

- 1) エアバブルによる表面最大流速 $u_{0\text{max}}$ は Q_0 の $1/3$ 乗に比例することなど、岩垣らによる式⁶⁾は、実験値の傾向を表した。また、表面流速は距離に応じて指数的に減少し、中村ら(1974)⁷⁾の解析解は実験値の傾向をよく表現することを確認した。さらに、現実には利用頻度の多い岸壁直下に空気を敷設することを想定した場合、空気量が2倍になった条件での計算値は実験値の傾向をよく表し、実用的には $Q_0 \rightarrow 2Q_0$ として計算できると考えた。
- 2) エアバブル流による氷盤移動に関する室内実験結果を、外力としてエアバブル流を考慮した浮氷盤の運動方程式による計算値と比較した結果、実験値の傾向を良く再現した。また、計算結果から氷盤速度は、氷盤投入直後に最大値に達し指数的に減少するのが推察された。
- 3) 妥当性が示されたエアバブル流ならびにそれによる氷盤の移動についてのモデルに、風による影響を加味したモデルから、エアバブル工法による結氷対策案の効果・有用性について基礎的な検討を行った。風速に関わらず氷の移動距離は空気量に比例して大きくなり、およそ $1 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ 以上（あるいは $0.1 \text{m}^3/\text{min}/\text{m}$ ）の空気量では、大きな増加はないことが推察された。また、氷の移動距離は風速・風向に極めて大きく依存し、エアバブル工法の導入には、港形（氷盤・フラジルアイスなどを港外へ排除されやすい形）などのほか特に風向風速に注意が必要である事が推察された。

以上より、本対策案は、他のメインの対策工法と併用して補助的に用い（風向にも注意）、さらにはエアレーション効果による夏季の水質改善などの副次的効果も期待できるものが望ましいと推論される。

また、既に開発済の港内結氷シミュレーション¹⁵⁾¹⁶⁾にこのモデルを組み入れ、さらにフラジルアイスやグリースアイスなど氷盤とは見なせない状態の氷の挙動も工夫することにより、実際の漁港を対象としたエアバブル流の結氷抑制効果等の詳細な検討を行いつつある。これを次の機会に報告したい。

参考文献

- 1) 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, Vol.16, pp.151-155, 2000.
- 2) 本間薫, 小玉茂義, 梅沢信敏, 沖野晃一, 寺島貴志, 佐伯浩: 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, 海洋開発論文集, Vol.17, pp.619-624, 2001.
- 3) 遠藤仁彦, 梅沢信敏, 谷野賢: 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, 1989.
- 4) 遠藤仁彦, 梅沢信敏, 水野雄三: 港内結氷対策（エアバブル工法）に関する実験的研究, 第32回北海道開発技術研究発表会講演概要集(4), pp.223-228, 1988.
- 5) 山中浩次, 水野雄三, 杉本義昭: エアバブル流の流況特性, 第35回北海道開発技術研究発表会講演概要集, pp.239-244, 1991.
- 6) 岩垣雄一, 浅野敏之: 空気防波堤の相似則と必要空気流量, 土木学会論文報告集第337号, pp.101-110, 1983.
- 7) 中村充, 及万俊文, 荻野静也, 稲垣基, 矢内正樹: エアバブルカーテンによる水質改善に関する研究, 第21回海岸工学論文集, pp.281-286, 1974.
- 8) Kobus, H.: Berechnungsmethode für Luftschleier-Strömungen zur Auslegung von pressluft-Ölsperren, Wasserwirtschaft, Band 62, Heft 6, pp.159-166, 1972.
- 9) Russell, W.E., Riggs, N.P. and Robe, R.Q.: Local iceberg motion - a comparison of field and model studies. *Proc. POAC77, St. John's, Canada*, pp.784-798, 1977.
- 10) 上田俊也, 山下俊彦, 榎国夫, 原文宏, 佐伯浩, 折谷徳弘: 氷盤の移動速度と流体抵抗, 第8回寒地技術シンポジウム講演論文集, pp.428-431, 1992.
- 11) 岩垣雄一, 安井誠人: 空気防波堤に関する研究（第1報）, 第22回海岸工学論文集, pp.563-569, 1975.
- 12) 昭和63年度・平成2年度 港内結氷対策工法実験業務報告書, 北海道開発土木研究所
- 13) Bulson, P.S.: Dock and Harbour Authority, Vol. XLII, No.487, p.15., 1961.
- 14) 中田喜三郎, 石川公敏, 松川康夫: 内湾の流動場の数値実験, 沿岸海洋研究ノート, 22(2), pp.96-108, 1985.
- 15) Kioka, S., Honma, D., Yamamoto, Y. and Terashima, T.: Numerical Calculation Model of Sea Freezing in Fishing Port During Winter, *Journal of Offshore and Polar Engineering*, Vol.15, 3, pp.215-222, 2005.
- 16) 木岡信治, 本間大輔, 山本泰司, 窪内篤, 西多道祐: 実用的な港内結氷シミュレーション手法の構築とその活用方法, 海岸工学論文集, 第52巻, pp.1131-1135, 2005.