

寒冷地における有限沿岸域の結氷防止対策に関する一考察

北海道東海大学	正会員	泉	洵
北海道工業大学	同上	村木	義男
北海道大学工学部	同上	小野	敏行
同上	同上	後藤	克人
同上	同上	佐伯	浩

1. まえがき

北海道のオホーツク海沿岸域は、毎冬流水で覆われるし、港湾、湖沼も完全に結氷する。また、道東の太平洋岸においても、根室半島から釧路にかけての港湾や漁港の全体あるいはその一部が結氷するし、また、春先には太平洋に流出した流水が沿岸部に押し寄せる。

また、日本海に面した一部の漁港は港内の一部が結氷するし、利尻・礼文両島の沿岸も低気圧が北海道の太平洋岸を北上する時、宗谷海峡から流れ出た流水で覆われることがある。このように北海道沿岸の港湾や漁港のかなりの数が、港内結氷や流水の影響を受ける。特に最近では、港内静穏度を高めるための防波堤の延伸工事が進むにつれて港奥部の海水交換が悪くなり、冬期の一時期結氷する漁港あるいは港湾がふえる傾向にある。結氷を防止して港湾及び漁港を通年利用可能にすることは、それらの存在する地域の活性化にもつながるし、また、有限沿岸域の結氷防止技術を開発することは、今後の寒冷地域の開発にとって意義あるものと考えられる。本研究は、港湾や漁港に代表される閉水域の結氷防止法に関する問題点について述べるものである。

2. 閉水域の結氷防止法

漁港など閉水域の結氷防止法については、本間などの研究や泉などの研究が発表されているが、その中でも可能性のある方法として、熱供給による方法と氷晶排除方法が挙げられる。熱供給による結氷防止法は、表1に示すように4つの方式に分けられる。鉛直混合方式は、水底に設置した管のノズルからコンプレッサーで空気を送り、エアバルブを発生させて鉛直流を造り、下層水と表層水を混合する方式で、下層の水温が高いことが必須条件である。淡水の場合は4℃で最大密度を示すため、冬期になると下層の水温が高いため、この方式は有効であり、五大湖の内スペリオール湖に面した小麦の積み出し港であるサンダーベイ港が、この方式で結氷を防止しているし、ノルウェーのレナ川河口のレナ港もこの方式で成功している。しかし、海水の場合には、塩分量が28%以上では、水温が低い程密度は大きくなるので、結氷近くになると水温の鉛直方向の勾配はなくなり、一定水温となるので、この効果は期待できない。また、外海水導入方式は、外海水の水温が高く、また、結氷の発生しやすい港奥部と外海が近い場合には、管理費も安く利用可能な方法である。加温水供給方式は、近くに大量の熱を出す施設がある場合は可能であるが、結氷防止のためのみで加温することは、経済的に問題が大きい。また、加熱空気供給方式も熱源が近くに必要である。次に氷晶排除方式についてであるが、この方式は、水面で結氷が始まり、氷晶が形成されるのは許容するが、それが成長し、氷盤を形成しないように氷晶のうち排除しようとする方式で、その排除の方式として表2に示す4つの方法が挙げられる。人工造波方式は、波の質量輸送速度を利用して、氷晶を波の進行方向へ輸送しようとする方式であるが、漁港や港湾のように港口以外を直立の防波堤や岸壁で囲まれている水域では、反射波も発生するため、期待する方向へ氷晶を排除することが可能かどうか疑問の残るところである。ただ、この方式は、Andersonが自然の池を利用して実験を行なっていて、その効果を確かめている。また、効率のよい造波機の開発も必要となる。次に人工流方式であるが、この方式は、ポンプや水中ファンにより海面に流れを強制的に発生させ、それにより氷晶を排除しようとするものである。エアバルブ方式は、表1にも示したように、低層部の水温が高い場合は熱供給の効果もあるが、海水の場合はその効果はなく、表層に持ち上げられた下層水は水平方向に広がるが、その水平方向の流れで氷晶を排除しようとするものである。機械方式は、機械力によって氷晶を排除しようとするものであるが、氷晶そのものの大きさが非常に小さいため、能率的な排除は期待できない。以上の考察より、可能性のある方式として、熱供給方式としては外海水導入方式、氷晶排

除方式としては人工流方式、エアバルブ方式、港の線形が単純な場合は、人工造波方式が可能となる。以上述べた方法のうち、氷晶排除方式は、海面近くの流れあるいは波の質量輸送により氷晶を排除する方式なので、表層の流れが非常に重要となる。本研究は、おもに上述した結氷防止法に対する風の影響について述べる。

3. 風による氷晶の生産

海面上を風が吹くことにより、氷晶の生産量が增大することはよく知られている。Ushio等は、低温室内の水槽で水面に平行に風を吹かせて、氷晶の生産量を調べている。水槽の周りは断熱材を用いて断熱し、熱の出入りは水面からだけとしている。水面の面積は4.0 m × 0.2 mである。風下側に氷晶(Frazil Ice)が堆積することになる。図1にUshio & W.Nakatsuchiの実験結果を示す。同図からも明らかなように、生産される氷晶の量は、気温が低い程、多く、また、風速6 m/sの場合には、単位時間、単位面積あたりの氷晶の生産量は、 $5 \sim 6 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^2/\text{s}$ となっている。この量は、風上側に成長する氷の量の4~5倍となっているそうである。この氷晶の生産速度からすると、10,000 m²水域で風速6 m/sとすると50~60 kg/sとなり、一時間当たり約180~216tの氷晶が生産されることになる。これを融解するためには、効率100%としても $4 \sim 4.8 \times 10^6 \text{ cal}$ を必要とし、2℃高い水温の海水で融解するとするならば、2~2.4 m³/sの流量の高い水温の海水を導入する必要がある。このように、風の影響は大気-海面間の乱流熱伝達に大きな影響を与え、それが冬期の水温低下と氷晶生産、それに氷厚増加を加速することになる。

4. 風により発生する吹送流

水面上を風が吹くと当然のことながら、水面にせん断力が作用する。そのせん断力の作用により、水面近くの氷粒子は風下側に流され、閉じられた水域の場合は循環流が生じることになる。エネバル等により水面近くに水平方向流れを発生することにより、氷晶を排除しようとする場合、この風により発生する吹送流のことを十分考慮に入れておく必要がある。また、波の質量輸送を利用した人工造波方式の場合もこの流れの影響を受ける。

まず、閉じられた水深一定の水域を考え、水面上を一定風速の風が吹くものとし、コリオリ力が無視できると仮定する。また、流れを層流と仮定すると、図2に示すように水平方向の流速分布は理論的に次式で表わされる。

$$u_s = u_s \cdot \left[3 \left(\frac{z}{H} \right)^2 - 2 \left(\frac{z}{H} \right) \right] \quad (1)$$

u_s は表面流速で、 H は水深である。表層より($H/3$)は風下側に流れ、下層($2H/3$)は風上側に流れることになる。また、水面勾配は次式で示される。 ν は海水の動粘度係数、 H は水深である。

$$\frac{dh}{dX} = \frac{6 \nu u_s}{gH^2} \quad (2)$$

また、表面と底面のせん断応力の関係は次式となる。

$$\tau_s = 2 \tau_b = 4 \mu \cdot u_s / H \quad (3)$$

また、KeuleganやVan Dornは、表面流速について詳細な観測を行なっているが、それによると、Keuleganは次式を得ている。

$$\frac{u_s}{V} = K \left(\frac{u_s H}{\nu} \right)^{1/2} \quad K = 7.61 \times 10^{-6} \quad (4)$$

$(u_s \cdot H / \nu)$ はReynolds数である。これによると十分に大きなReynolds数の領域では、表面流速と風速の間に次の関係が得られる。

$$u_s / V = 0.04 \quad (5)$$

よってReynolds数の大きな領域では、風速からすぐ表面流速が求められるが、このような流域は完全な乱流状態であるので、層流の仮定で得られた(1)式は使えないことを意味する。

光易等は、風が水面に及ぼすせん断応力について詳細な実験を行なっている。その結果を図3に示す。図には、Miller及びKunishi等の結果も示してある。界面活性剤を入れると表面張力がなくなり、波が発生し難くなるため測定が容易になる。光易は、風速8 m/s以下は、界面活性剤を入れた結果から摩擦速度 u_* と高さ10 m地点の風速 U_{10} との関係を最小自乗法で求め、風速10 m以上に対しては、普通の水道水の結果から求めている。

その関係は、次式で示される。単位はすべてm/sである。

$$u_* = 4.21 \times 10^{-2} \cdot U^{0.878} \quad (U_{10} < 8 \text{ m/s}) \quad (6)$$

$$u_* = 1.61 \times 10^{-2} \cdot U^{1.327} \quad (U_{10} > 8 \text{ m/s}) \quad (7)$$

ここで摩擦速度は次式で示される。

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau_s}{\rho a}} \quad (8)$$

ここで τ_s は界面に作用するせん断応力、 ρa は空気密度である。また、光易等は併せて水面勾配に関する実験を行ない、次式を得た。この水面勾配については、水道水でも界面活性剤を入れた場合でも有意な差はなかった。

$$\frac{dh}{dX} = \frac{1.01 \tau_s}{\rho \omega gH} = \frac{1.01 \rho a u^*}{\rho \omega gH} \quad (9)$$

前式において、 $\rho \omega$ は水の密度である。水面勾配については、実験的に裏付けのある (9) 式の方が実用性が高い。この吹送流の実験については、W.G.Baines と D.J.Knapp の研究が有名である。実験結果の一部を図4に示す。この時の Reynolds 数は $R = u^*H/\nu$ で定義されていて、 ν は動粘性係数である。また、Baines 等は傾斜面上でも実験を行なっているが、その分布状態は図4とほぼ一致している。図4には Reid の理論曲線と Keulegan の表面流速も記入してあるが、いずれも Baines 等の結果とほぼ一致している。また、層流理論から得られる式(1)と比較すると、流向の変わる位置はほぼ一致しているが、風上に向かう下層の流れの分布形状がかなり異なっている。また、表面の最大流速 u_s に対して、逆流の最大流速は、層流理論では $(u_s/3)$ であるが、実験結果では $(u_s/6)$ となっている。この Baines 等の流速分布形は信頼に足る値を示している。

以上の結果より、風速が与えられると (6) あるいは (7) 式で摩擦速度 u^* が求まり、その u^* と水深 H より、図4から流速分布が求められることになる。この方法で計算すると、風による海面の流速はかなり速いことがわかる。

5. エアバルブによる表層の水平方向流速

水底に設置された管のノズルから空気を出すと、エアバルブの上昇とともに水も連行し、それが上昇流を形成する。水面近くまで持ち上げられた水は、水平方向の流れとなる。このエアバルブに伴って起こる流れによって、短周期の波は水粒子の軌道が破壊され、消波される。また、表層近くの水平流によって、水面にある氷晶を排除することもできる。このエアバルブにより発生する最大水平流速は、一般に次式で示される。

$$\frac{u_{\max}}{3\sqrt{gQ_0}} = \alpha \left(\frac{h+h_0}{h_0} \right)^{-1/3} \quad (10)$$

この式で $u_{\max}$ は最大水平流速、 Q_0 は単位時間、単位長さ当りの空気供給量、 h_0 は大気圧の水柱高さ (10 m)、 h はノズルの設置水深、 α は係数で、栗林は 1.994、Bulson は 1.46 としている。この無次元最大流速とノズルの設置水深 h の関係は、岩垣等により求められているが、それを図5に示す。

Bulson は広範囲の実験を行なっているが、理論曲線は Kobus の理論が最も適合している。また、海面の最大水平流速の発生位置はノズルの直上部近傍に位置していて、そこから遠ざかるにつれて流速は指数関数的に低下していく。この流速低下の関係は、中村によって求められている。さて、このエアバルブに連行されて発生する表面の水平流速により氷晶を排除することを考える場合、前節で述べた風による吹送流の効果を十分考慮に入れねばならない。風下側に氷晶を排除する場合は、風上側にエアバルブを設置すればよい効果を示すが、そうでない場合には、エアバルブの効果が低下することになる。冬期間、風の強い場所においては、このエアバルブ方式の設置に当たっては、氷晶の排除方向と風向の関係、それに余裕をもった空気量の設置を考慮に入れておくべきであろう。

5. 人工造波による氷晶移動

この方法は、造波機により人工的に波を起こし、その波の持つ質量輸送により氷晶を波の進行方向に排除しようとする方法である。波の質量輸送速度 ut は次式で表わされる。

$$ut = \left(\frac{C}{2} \right) \cdot \left(\frac{H}{2} \right)^2 \cdot k^2 \cdot \frac{\cosh 2k(h+Z)}{\sinh^2 kh} \quad (11)$$

$$C = \sqrt{g/k \tan kh} \quad k = 2\pi/L$$

水深一定の場合の破砕の近似式は、次式で示される。

$$H/L = 0.142 \cdot \tan kh \quad (12)$$

Hは波高、Lは波長、hは水深である。今、水深を6m、周期を6秒とすると、波速Cは6.81 m/s、波長Lは40.86 mとなり、この時の限界波高は4.04 m/sとなる。

このような限界の波でも高々1 m/sであり、それを発生させるエネルギーは、膨大となり、かつ港湾や漁港の本来の目的である静穏度を保てないことになる。閉水域の波高を40 cm程度に抑え、上記の条件で計算すると、質量輸送速度は約1 cmとなり、微風でも氷晶を排除できないことになる。

結 語

本研究は、港湾等閉水域の結氷防止のためには、エアバルブ方式あるいは人工造波方式が可能であることを述べたが、それに風の影響を考えると、人工造波方式はかなり無理があることが明らかとなった。また、エアバルブ方式においても、風向、風速と氷晶の排除方向の関係から不可能な場合もありえることを明らかにした。寒冷地域において、結氷が予測されるような地域に、港湾・漁港を新たな建設する場合には、風向と港の形状の関係を充分に考慮しておく必要がある。

本研究は文部省科学研究費試験研究（1）「氷海域における海洋構造物の耐氷設計法の開発」によったものであることを付記する。

参考文献

1) 佐伯 浩：海水の制御について，海と港，No.1，P33－39，1988
2) 本間，竹田，佐伯：北海道北部日本海側の港内結氷について，寒地技術シンポジウム論文集，P95－102，1985
3) 泉 冽，小野 敏行，浜中 健一郎，山下 俊彦：海水制御構造物について，海洋開発論文集，Vol 2，P139－144，1986
4) 泉 冽，齊藤 拓也，佐伯 浩：海水の制御について，寒地技術シンポジウム論文集，P339－345，1987
5) Ushio,S. and M.Wakatsuchi：An Experimental Study on Rapid Frazil Ice Production in Wind-Generated Polynya, Proc. of IAHR Ice Symposium，Vol.2, P179-188, 1988
6) 光易 恒：高潮の発生外力，自然災害特別研究成果報告書「高潮の発生機構とその極値に関する研究」，代表 土屋 義人，1981
7) 光易 恒，本多 忠夫：風による水面波の発達，日本海洋学会秋季大会講演要旨集，P145－146，1978
8) Van Dorn, W.G.：Wind Stress on an Artificial Pond, J.Mar.Res., 12, P249－276, 1953
9) Baines, W.D. and D.J.Knapp：Wind Driven Water Current, Proc. ASCE, HY2, P205－221, 1965
10) 岩垣 雄一：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」，1977

表1 熱供給方式

熱供給方式	条 件	手 法
鉛直混合方式	鉛直水温分布を形成	エアバルブ用 コンプレッサー
外海水導入方式	外海水温が高い	ポンプ、波浪 潮汐
加温水供給方式	火力・原子力発電所の立地 下水の熱交換 地下水その他の排水	ポンプ
加熱空気供給方式	廃熱工業立地	エアバルブ用 コンプレッサー

表2 氷晶排除方式

氷晶排除方式	原 理	機 材
人工造波方式	波の質量輸送による 氷晶輸送	造波機
人工流方式	流れによる氷晶輸送	水中ファン ポンプ
エアバルブ方式	空気速行流による氷晶輸送	コンプレッサー
機械力方式	機械力による氷晶輸送	可動式アイス ブーム スキマバージ等

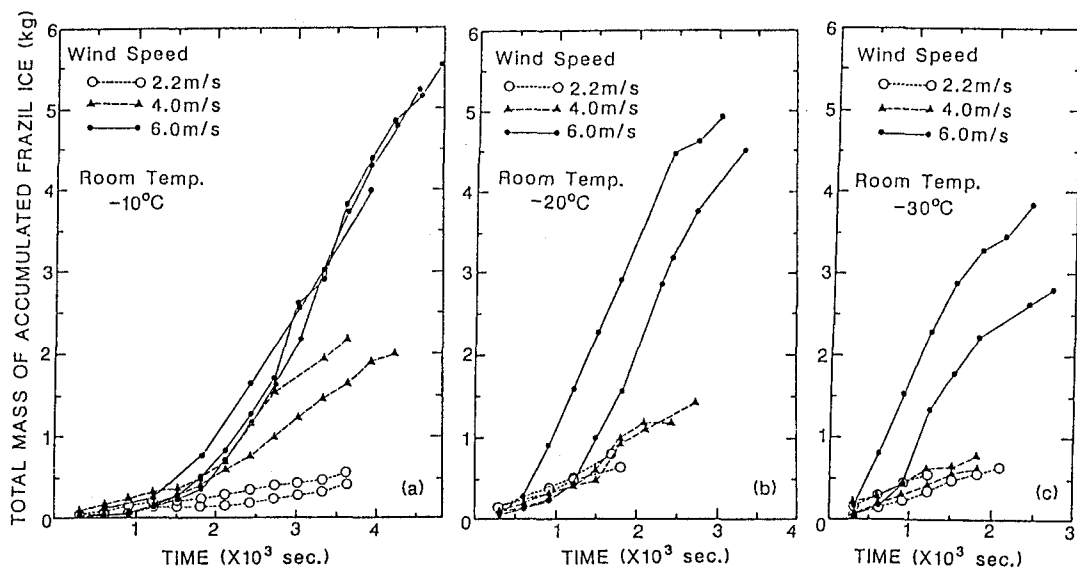


図1 氷晶生産速度

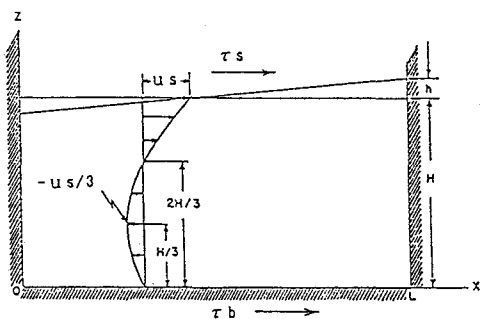


図2 層流の場合の流速分布

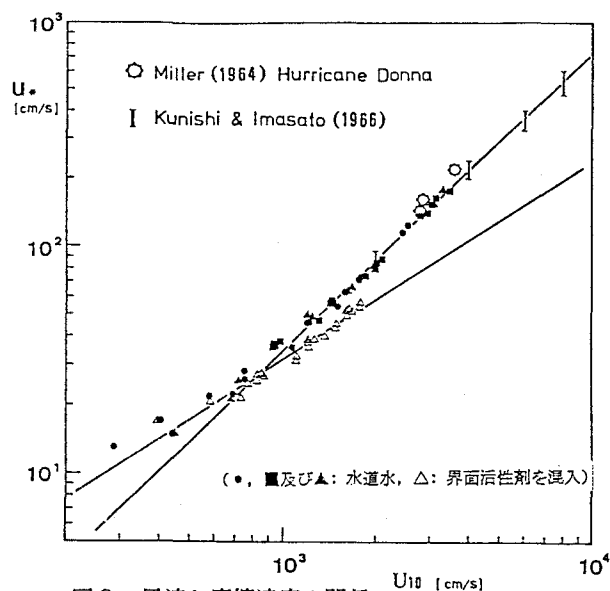


図3 風速と摩擦速度の関係

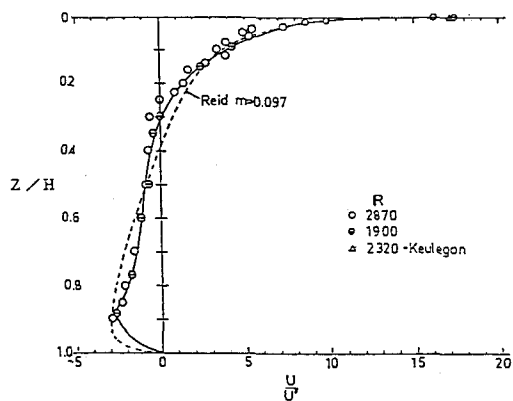


図4 乱流の場合の流速分布

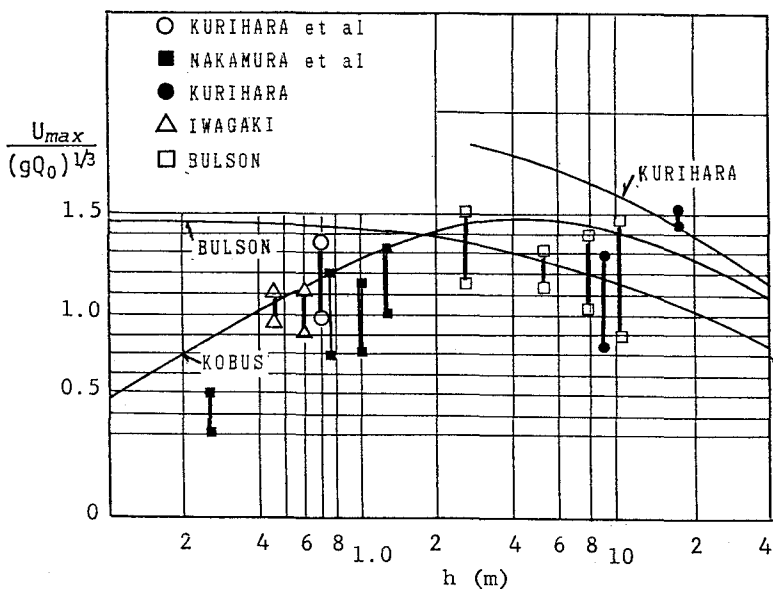


図5 無次元最大水平流速とノズルの設置水深の関係