

浮氷盤に作用する流体力に関する実験的研究

Fluid Force Acting on Floating Ice Floes and Their Drifting Velocity

上田 俊也* 佐伯 浩** 山下 俊彦** 村木 義男*** 榎 国夫****
 Toshiya Ueda, Hiroshi Saeki, Toshihiko Yamashita, Yoshio Muraki, Kunio Enoki

Estimating the ice forces acting on offshore structures constructed in cold region, it is very important to evaluate fluid force acting on the ice floes. This force is called environmental force and sea ice drift is also caused by this force. When fluid force is evaluated, the drifting velocity of sea ice floes is able to be estimated. In this paper we carried a series of experiments with paraffin ice model and found the relationship between environmental condition (for example the velocity of wind or water), and forces acting on the ice floes, and the drifting velocity of them.

Keywords: Fluid Force (=Environmental Force), Drifting Velocity

1. はじめに

氷海域や凍結の起こる水域に建設される構造物を設計する場合、重要な支配外力の一つに氷力がある。氷力とは、浮氷盤に風や流れによって生じる流体力が作用し、それらの流体力が浮氷盤を通じて接触している構造物に及ぼす力の事である。氷盤に作用する流体力は、氷盤をとりまく環境が氷盤に及ぼす力という意味で環境力とも呼ばれるが、おもに風と氷盤表面との間の摩擦によって生じるせん断力、風が氷盤の水面上にでている部分に当たることによる形状抵抗力、氷盤下面と水の間の摩擦によって生じるせん断力、水の流れが氷盤の水面下の部分に当たることによる形状抵抗力、の4つが考えられる(図1)。しかし、氷盤に作用する流体力がいかに大きくても、構造物に作用する最大の氷力は氷盤破壊時の氷力を越えることはない。従って、氷海域や凍結水域に建設される構造物に作用する氷力の算定には、一般に氷盤破壊時の力が採用される。実際、北極海やオホーツク海北部のように一枚の氷盤の大きさが数10km²もあるような海域に建設される海洋構造物の場合、作用する流体力は非常に大きくなり、氷盤破壊時の氷力をもって構造物を設計することは妥当であるといえる。しかしながら、個々の氷盤の大きさがそれほど大きくない場合や比較的狭い水域では、流体力は小さく氷盤は破壊までには至らないことが多い。このようなケースの例としては貯水池、湖沼などに建設される取水塔やゲート、湾部等閉水域に建設される構造物、サロマ湖口において計画されている海水制御用アイスブーム等が挙げられる。このような構造物の場合、氷盤破壊時の氷力をもって構造物を設計すれば、過大な設計をすることになる。このため流体力を算出する方法を確立することが必要である。氷盤に働く流体力は、氷盤の形状、大きさや風速、水域の流速等に支配されることが想像されるが、これらの組合せから流体力を見積るような方法は未だ確立されていない。

また一方、氷海域では氷盤の移動する速度がしばしば問題とされるが、氷盤の移動は氷盤に種々の流体力が作用することによって起きるものであり、氷盤の形状、氷盤上における風速、氷盤と空気、水等の流体との摩擦係数等が分かれば氷盤の移動するおおよその速度が推定できることになる。

本研究は、氷盤に作用する流体力及び氷盤の移動速度について、模型実験をもとに考察しようとするものである。実験はおもに風による流体力に関する実験、水の流れによる流体力に関する実験、氷盤の移動速度に関する実験の3種類行った。氷盤の模型として図2のような比重約0.9のパラフィン盤を採用した。以下に実験の詳細について述べる。

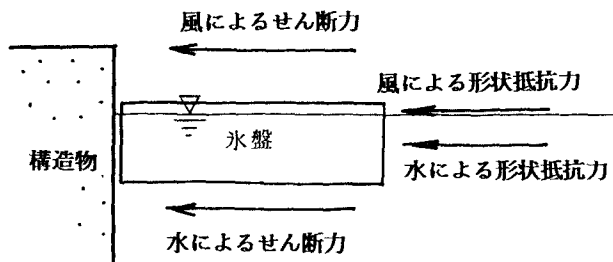


図1 氷盤に働く流体力

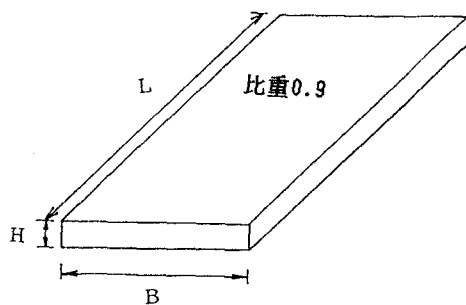


図2 模型氷盤

* 日本道路公団

** 正会員 北海道大学工学部土木工学科 (〒060 札幌市北区北13条西8丁目)

*** 正会員 北海道工業大学

**** 正会員 秋田工業高等専門学校

2. 風による流体力に関する実験

模型氷盤に風を与え、風から模型氷盤が受ける力を測定することによって、風による流体力を調べる実験を行った。実験は、図3のような、長さ17m、水路幅0.57m、高さ1.0mの風洞水路水槽を用いて、水深を0.4mとして行った。浮体は比重0.9のパラフィン盤を使用し、厚さH、長さLを変え、風速を10段階に変えて行った。風速は、風洞水槽内の風速分布を測定し、対数則を仮定して高さ10mでの風速 U_{10} を求め、これをパラメータとしてデータを整理した。風洞水槽内の風速分布は対数則をほぼ満たした。風洞水路水槽に浮体を浮かべて風を与え、浮体の受けている力をバネばかりで測定する。測定の結果、浮体の受ける力は風速の二乗にほぼ比例した。最小自乗法により、単位幅当りの浮体の受ける力 F_A を風速の二乗で除した値 F_A/U_{10}^2 を求め、浮体の風速方向の長さLとの関係を示すと図4のようになる。これを見ると、 F_A/U_{10}^2 はLに対しほぼ直線的に増加している。

氷盤に風が及ぼす力は過去に様々な方法によって測定されてきたが、通常、氷盤表面と空気との摩擦によって生ずるせん断力であると考えられており、

$$F = \rho_A C_{10} U_{10}^2 A$$

で与えられるとされてきた。ここで ρ_A は空気の密度、Aは氷盤の表面積、 C_{10} は氷盤と風との間の摩擦係数である。しかしながら、氷厚に対してさほど表面積の大きくない氷盤においては、氷盤前面に風が当たることによる形状抵抗力も無視できないと思われる。従って本研究では風が浮体に及ぼす力は、浮体表面と空気との摩擦によって生ずるせん断力 F_{SA} と、浮体の水面から出ている部分に風が当たることによる形状抵抗力 F_{DA} との合力であると考えた。これらはそれぞれ単位幅当り、

$$F_{SA} = 1/2 \rho_A C_{SA} U_{10}^2 L$$

$$F_{DA} = 1/2 \rho_A C_{DA} U_{10}^2 (0.1H)$$

であらわされる。ここで ρ_A は空気の密度、 C_{SA} は浮体と空気との間の摩擦係数、 C_{DA} は浮体の形状抵抗係数である。浮体の受けている力はこれらの和として与えられるから、

$$F_A = 1/2 \rho_A C_{SA} U_{10}^2 L + 1/2 \rho_A C_{DA} U_{10}^2 (0.1H)$$

となる。

図4において、この直線の傾きが前式における右辺第1項の $1/2 \rho_A C_{SA} U_{10}^2 L$ に、 $L=0$ の切片が第2項に相当すると仮定して、最小自乗法により回帰直線を求め、 C_{SA} を算出すると

$$C_{SA} = 0.002$$

となる。

田畑らは風速5m/s程度での氷盤に作用する力を直接測定して $C_{10}(=1/2 C_{SA})$ として 0.92×10^{-3} と 1.06×10^{-3} を得ている。また、Allisonらは南極のMawson基地の近くの積雪のある氷盤で風速分布を測定することにより $C_{10}(=1/2 C_{SA})$ を算出しており、風速

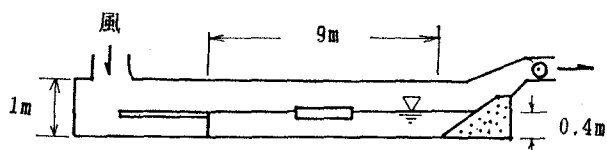


図3 実験装置（風洞水路）

$$F_A/U_{10}^2 = 1/2 \rho_A L C_{SA} + 1/2 \rho_A (0.1H) C_{DA}$$

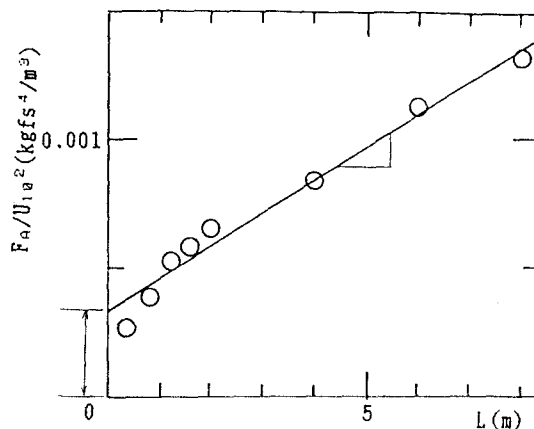


図4

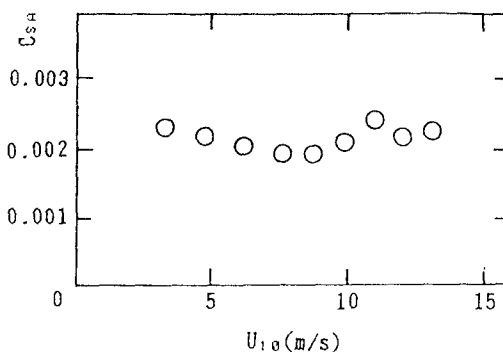


図5 風による摩擦係数

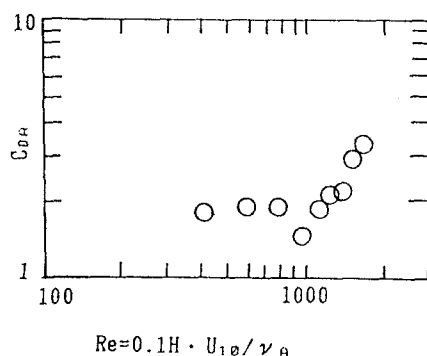


図6 風による形状抵抗係数

6.7~12.5m/sで C_{10} は $0.82 \sim 2.02 \times 10^{-3}$ の範囲としている。また、北極海の海上で測定したLeavittらの結果では、 $C_{10}(=1/2C_{SA})=2.0 \times 10^{-3}$ としている。本研究の結果はこれらによく一致しているといえる。また、青田らは、結氷前の海水面、薄い結氷期、融解後の開水面で C_{10} を測定し、 C_{10} は風速に依存し、風速が大きくなると C_{10} は減少する、としている。本研究で得られたデータから個々に C_{SA} を計算し、風速で整理すると図5のようになり、顕著な風速への依存はみられなかった。

次に図4の $L=0$ の切片を浮体の水面から出ている部分に風が当たることによる形状抵抗力に相当すると考え、浮体の形状抵抗係数 C_{DA} を算出すると

$$C_{DA}=2.45$$

となる。また、 C_{DA} をレイノルズ数で整理すると図6のようになる。レイノルズ数には、 $Re=0.1H \cdot U_{10}/\nu_A$ を採用した。ここで ν_A は空気の動粘性係数である。

3. 水による流体力に関する実験

模型氷盤を一定速度で引き、その時に生ずる抵抗力を測定することにより、水による流体力についての実験を行った。実験は図7のような、長さ24m、幅80cm、の水路水槽を用いて行った。水路の上に取り付けられたレール上を、モーターを取り付け自走できるようにした台車を一定速度で移動させ、これに取り付けたパラフィン盤を強制的に動かし、そのときの水の抵抗をひずみゲージ式荷重計で測定した。測定の結果、浮体の受ける力は浮体の速度の二乗にほぼ比例した。最小自乗法により、単位幅当りの浮体の受ける力 F_w を浮体の速度の二乗で除した値 F_w/V^2 を求め、浮体の速度方向の長さ L との関係を示すと図8のようになる。これを見ると F_w/V^2 は L に対しほぼ直線的に増加している。図中○は厚さ2cmのもの、△は厚さ4cmのものである。

風による流体力と同様に、浮体表面と水との摩擦によるせん断力を F_{sw} 、浮体前面の形状抵抗力を F_{DW} と定義するとそれぞれ。

$$F_{sw}=1/2 \rho_w C_{sw} V^2 L$$

$$F_{DW}=1/2 \rho_w C_{DW} V^2 (0.9H)$$

ここで、 ρ_w は水の密度、 C_{sw} は水と浮体の間の摩擦係数、 C_{DW} は形状抵抗係数、 V は流速あるいは浮体の速度である。氷盤が水から受ける力はこれらの合力であり、単位幅当りの力は

$$F_w = 1/2 \rho_w C_{sw} V^2 L + 1/2 \rho_w C_{DW} V^2 (0.9H)$$

となる。

図8において最小自乗法により回帰直線を求め、直線の傾きから C_{sw} を算出すると、

$$C_{sw}=0.0075(H=2\text{cm}), 0.0070(H=4\text{cm})$$

となり厚さによらずほぼ一定の値となった。

また、個々のデータに対して C_{sw} を求め、浮体の速度ごとに

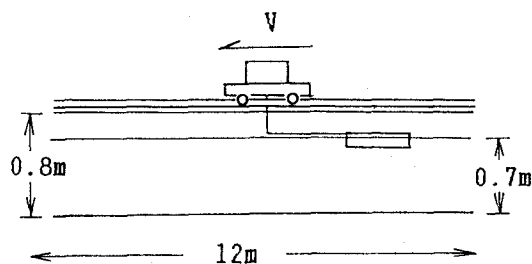


図7 実験装置

$$E_w/V^2 = 1/2 \rho_w L C_{sw} + 1/2 \rho_w (0.9H) C_{DW}$$

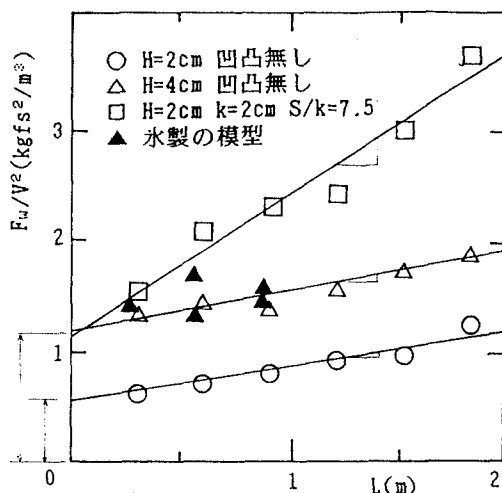


図8

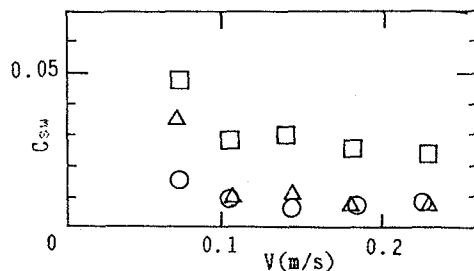


図9 水の流れによる摩擦係数

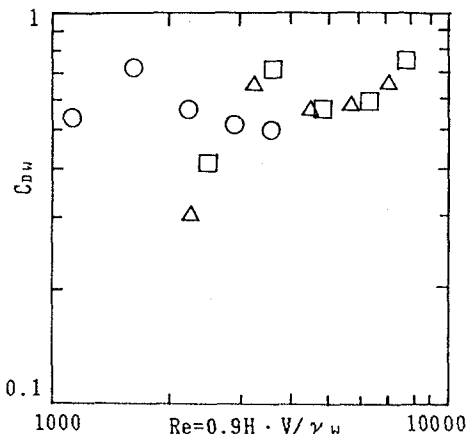


図10 水の流れによる形状抵抗係数

整理すると、図9のようになる。

Mcpheeは夏期北極海の氷の運動を観測し、氷盤と水の流れとの相対速度、10m上空の風速、 C_{10} 値から、力のつり合により水の流れによる流体力を計算し、

$$\tau_w = 0.0055V^2$$

を得ている。これから C_{sw} を算出すると、

$$C_{sw} = 0.011$$

となり、本実験の結果よりやや大きくなる。

図2-8の $L=0$ の切片を F_{DW} に相当すると仮定して、 C_{DW} を算出すると

$$C_{DW} = 0.53 (H=2\text{cm}), 0.65 (H=4\text{cm})$$

となった。さらに C_{DW} をレイノルズ数で整理すると図10のようになる。ここでレイノルズ数には、 $Re = 0.9HV^2/\nu_w$ を採用した。ただし ν_w は水の動粘性係数である。

また、図8中における▲は、氷製の模型を作成して実験を行ったものである。氷製の模型の作成は困難であり、また実験中にも氷がとけるため氷厚を一定に保つことは難しかったが、実験中の氷厚はおおむね4cmであった。実験結果はパラフィン盤における厚さ4cmのものとはほぼ一致しており、パラフィン盤を用いた模型実験の妥当性が検証された。

4. 凹凸の効果に関する実験

氷盤に働く流体力を考える場合、通常氷盤は平盤と考えられている。しかしながら実際の氷盤には凹凸があり、平盤の場合より大きな流体力を受けることが予想される。本研究では氷盤下面の凹凸によって、氷盤に働く流体力がどのような影響を受けるかということ調べるために、氷盤模型下面に規則的な凹凸をつけ、これによる効果を調べた。氷盤模型の下面に図11のような棧形の幅 $t=4\text{cm}$ の凸部をつけ、凸部の高さを2cm、4cmの2通りに変え、凸部の間隔を4通りに変えて、3と同様な実験を行った。実験結果は凸部の間隔 S と凸部の高さ k の比 S/k によって整理した。また、浮体の幅を40cm、速度方向の長さを60cmとした。実験の結果、2、3と同様に浮体の受ける力は浮体速度の二乗にはほぼ比例した。最小自乗法により単位幅当りの浮体の受ける力 F_w を浮体の速度の二乗で除した値 F_w/V^2 を求め、 S/k との関係を示すと図12のようになる。図中の一点鎖線は厚さ2cm、破線は厚さ4cmで凹凸をつけないものの結果である。これを見ると $k=2\text{cm}$ 、 $k=4\text{cm}$ とも、 $S/k=7.5$ で受ける力は最大となることがわかる。足立らは「人口粗度の実験的研究」において開水路の棧形粗度による抵抗を調べる実験を行い、過去の研究成果との比較検討を行っているが、それによると棧形粗度の抵抗は $S/k=8$ 程度で最大値をとるとしている。これらの研究は、棧の高さ、間隔とも数ミリ程度のものについての結果であり、本研究よりかなり小さなものであるにもかかわらず、その結果がほぼ一致していることは興味深い。

さらに、 $S/k=7.5$ のものについて速度方向長 L を変えて実験を行い、3と同様な形で整理したものが図8中の□である。同様に最小自乗法によって回帰直線を求め、 C_{sw} 、 C_{DW} を求めると

$$C_{sw} = 0.0257$$

$$C_{DW} = 0.62$$

となる。 C_{sw} は平盤の場合と比べ約3倍の値となった。また C_{DW} は厚さ4cmの平盤の場合とはほぼ一致した。

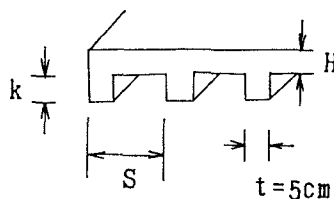


図11 凹凸の形状

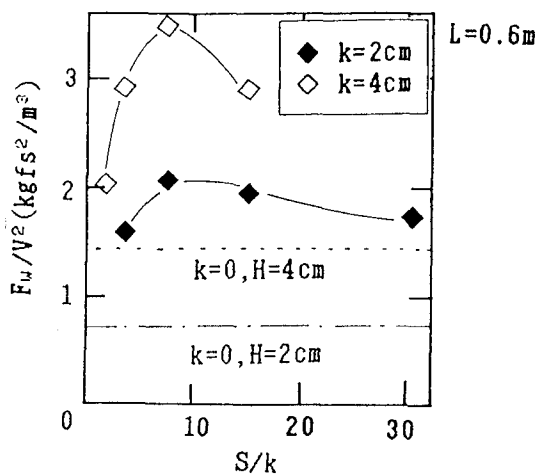


図12 凹凸の効果

5. 流体力の評価について

流体力に関する種々の模型実験により、各々の流体力のおおよその値が推定可能となった。各係数の値はそれぞれ

$$C_{SA}=0.002 \quad C_{DA}=2.5 \quad C_{SW}=0.007 \quad C_{DW}=0.6$$

となった。これを見ると、風の場合は形状抵抗係数は摩擦係数の約1000倍、水の場合は約100倍となっている。通常流体力を考える場合、そのほとんどは流体と氷盤との摩擦によるせん断力として考えられている。それは、氷厚に対し氷盤の表面積がきわめて大きければ、流体力全体に対して形状抵抗力は無視できると考えられているからである。しかしながら、形状抵抗係数は摩擦係数に比べてかなり大きく、また構造物のおかれる条件によっては氷厚に対して氷盤の表面積のさほど大きくない場合もあり、流体力を一律に流体と氷盤との摩擦によるせん断力として考えることは不適当と思われる。

仮にいずれかの力が流体力全体の1%以下であればその力は無視できると考えると、氷盤の表面積を A_0 、風あるいは流れの方向に対する投影面積を A_f として、

$$\text{風については } (A_0/A_f) > 10^5, \quad \text{水の流れについては } (A_0/A_f) > 10^4$$

のときについては、形状抵抗力は無視できると考えられ、それ以下の場合はせん断力と形状抵抗力の両方を考慮して設計に当たる必要があるといえる。

6. 氷盤の移動速度に関する実験

氷盤の移動速度については現地においていくつかの測定結果があるが、本研究では実験1と同じ風洞水路水槽を用いて浮体の移動速度に関する実験を行った。水面上に静止した浮体に風を与え、浮体の運動をVTR撮影した。浮体ははじめ徐々に加速するがやがて平衡状態に達し一定速度となる。この時の速度を $V(t \rightarrow \infty)$ とする。浮体寸法を、幅 $B=60\text{cm}$ 、厚さ $H=2\text{cm}$ 、風速方向長 $L=0.4\text{m}, 0.8\text{m}, 1.2\text{m}, 1.6\text{m}, 2.0\text{m}$ の5つの条件で、風速を9段階に変えてその平衡速度を測定した。5つの条件とも、 $V(t \rightarrow \infty)$ は U_{10} にほぼ比例し、 $V(t \rightarrow \infty)/U_{10}$ の値は約0.02前後であった。この浮体の運動は風及び水による流体力に起因するものであり、それぞれの流体力がわかれば浮体の運動方程式を解くことにより平衡速度は計算できる。

氷盤の運動方程式は、

$$\rho_{IG} B H L \frac{dv}{dt} = -\frac{1}{2} \rho_A B L C_{SA} U_{10}^2 + \frac{1}{2} \rho_A B (0.1H) C_{DA} U_{10}^2 - \frac{1}{2} \rho_W B L C_{SW} V^2 - \frac{1}{2} \rho_W B (0.9H) C_{DW} V^2$$

これを整理して

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\rho_A}{\rho_{IG}} \left(\frac{C_{SA}}{2L} + 0.1 \frac{C_{DA}}{2L} \right) U_{10}^2 - \frac{\rho_W}{\rho_{IG}} \left(\frac{C_{SW}}{2H} + 0.9 \frac{C_{DW}}{2L} \right) V^2$$

これを、 $t=0$ で $V=0$ の条件で解き、 $t \rightarrow \infty$ としたときの V を求めると、

$$\therefore V(t \rightarrow \infty) = \sqrt{\frac{\rho_A (C_{SA} L + C_{DA} 0.1H)}{\rho_W (C_{SW} L + C_{DW} 0.9H)}} U_{10}$$

となる。この計算より得られた値と実験結果とを比較し、図13～17に示す。図中の実線は実験結果を原点を通る直線で近似し、最小自乗法により、 $V(t \rightarrow \infty)/U_{10}$ の値を求めたものであり、破線は計算1によるものである。いずれの条件においても $V(t \rightarrow \infty)/U_{10}$ の値は実験結果よりも計算値の方がやや大きな値を与えた。Timokhovは風速と氷盤の移動速度の比を詳細な理論解析から求めており、Gordienkoの求めた氷盤運動の実測結果との比較を行っているが、本研究の結果もそれらとほぼ一致した。

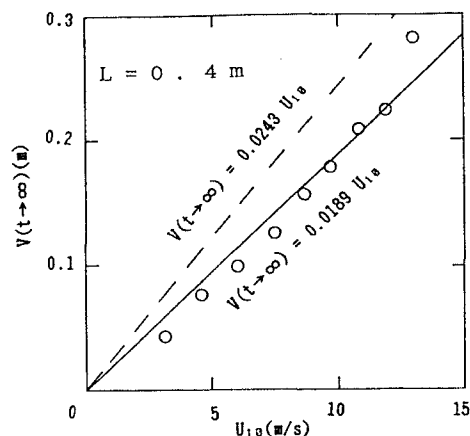


図13 風速と氷盤の移動速度の関係(1)

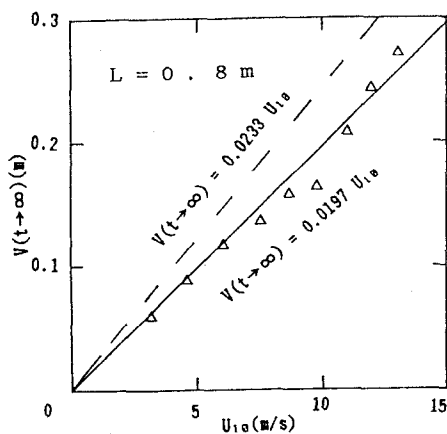


図14 風速と氷盤の移動速度の関係(2)

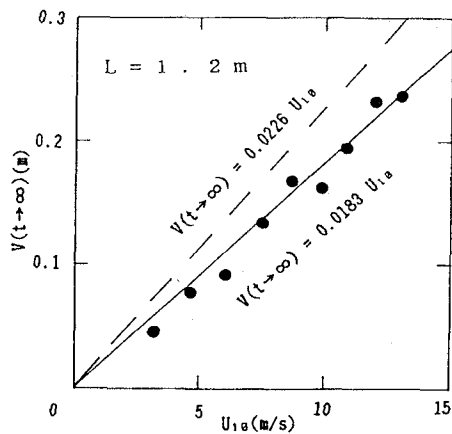


図15 風速と氷盤の移動速度の関係(3)

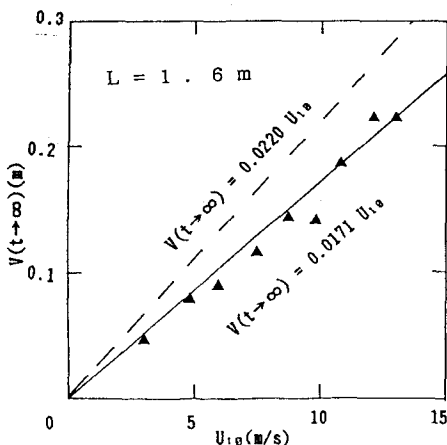


図16 風速と氷盤の移動速度の関係(4)

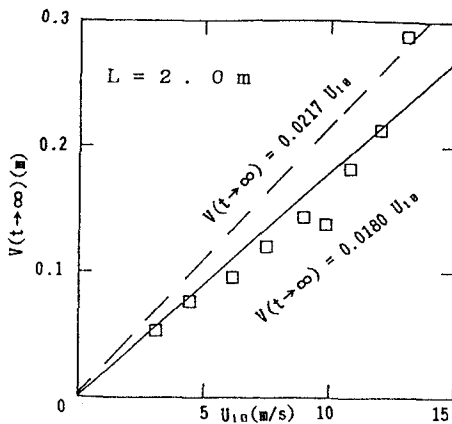


図17 風速と氷盤の移動速度の関係(5)

7. 結論

以上のことから結論として以下のことがいえる。

- (1) 氷盤に働く流体力をせん断力と形状抵抗力に分けることができた。
- (2) 風、水の流れによるせん断力と形状抵抗力がそれぞれ求められ摩擦係数と形状抵抗係数が得られた。
- (3) 実氷盤を用いた実験を行い、パラフィン模型による実験の妥当性を検証した。
- (4) 氷盤下面の凹凸により、流体力はかなり増加し、 C_{sw} は最大で約3倍となった。
- (5) 氷盤下面の凹凸による流体力の増加は $S/k=7.5$ 付近で最大となる。
- (6) 氷盤の移動速度は高さ10mにおける風速の約2% となり既存の実測結果や理論解析結果ともほぼ一致した。
- (7) 浮体の運動方程式を解くことによりある程度浮体の移動速度を予測することができた。
- (8) 氷盤に働く流体力を推定する場合、せん断力、形状抵抗力を分けて考えることが必要であり、浮体の形状(厚さ、上面の面積等)からそれぞれの効果を評価する必要がある。

参考文献

- 1) 北條紘次, 中澤直樹, 山崎一弘, 村木義男, 佐伯浩: 浮氷盤に作用する環境力と氷盤の移動速度に関する研究, 海洋開発論文集vol. 6, 1990
- 2) 北條紘次, 山崎一弘, 中澤直樹, 佐伯浩: 取水塔に作用する氷力について, 第5回寒地技術シンポジウム, 1989
- 3) Allison, I and G. Akerman: Sea Ice and Ocean Energy Balance Studies, Sea Ice Processes and Models, R. S. Pritchard Ed, Washington Univ. Press
- 4) Leavitt, E: Surface-based Air Stress Measurement Made during AIDJEX, Sea Ice Processes and Models, R. S. Pritchard Ed, Washington Univ. Press
- 5) 白沢邦男, 田畑忠司: 海水に及ぼす風の応力測定について I, 低温科学, 物理編
- 6) 青田昌秋, 白沢邦男, 高塚徹: 薄氷域の大気境界層の観測, 低温科学, 物理編
- 7) Mcphee, M. G: An Analysis of Pack Ice Drift in Summer, Sea Ice Processes and Models, R. S. Pritchard Ed, Washington Univ. Press
- 8) Timokhov, L. A: Horizontally Uniform Wind Drift of Various Packed Ice Cover, Ed, L. A. Timokhov, A. A. Balkema, 1984
- 9) 足立昭平: 人工粗度の実験的研究, 土木学会論文集第104号, 1964. 4