

風の氷盤に及ぼす力と氷盤の移動速度に関する研究

Wind Force Acting on Floating Ice Floes and Their Drifting Velocity

北條紘次* 上田俊也** 服部卓也*** 村木義男**** 佐伯浩*****
 Koji.hojo, Toshiya.Ueda, Takuya.Hattori, Yoshio.Muraki and Hiroshi.Saeki

Estimating the ice forces acting on offshore structures constructed in cold region, it is very important to forecast the environmental force acting on ice floes and their drifting velocity. This paper deals with the wind force and fluid resistance acting on ice floes and their drifting velocity and systematic experiments on wind force, fluid resistance and velocity were carried out.

Keywords : floating ice floes, ice force, environmental force, drifting velocity

1. はじめに

一般に、氷海域や凍結の起こる貯水池等に建設される構造物を設計する場合、その支配外力は氷力となる事が多い。氷力とは浮氷盤に風や流れが作用し、それらの環境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が、環境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。以上のような理由から、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は、一般に氷盤を破壊させる力とされている。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 10km^2 もあるような海域に建設される海洋構造物の場合、環境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環境力は小さく氷盤は破壊までには至らないことが多い。このような場合、氷盤破壊時の氷力を持って構造物を設計すれば、過大な設計をすることになる。このため環境力を算出する方法を確立することが必要である。環境力は、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環境力を見積るような方法は未だ確立されていない。

また、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作用する環境力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計算できることになる。

本研究は、模型実験により氷盤に加わる種々の要因によってどのような環境力が発生するのか、またその環境力によって氷盤がどのような速度で移動するのかということについて、模型による実験をもとに考察しようとするものである。

2. 実験

(1) 風によって浮体が受ける力の測定

実験は、図1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 d 、長さ l を変えて行った。風速は、対

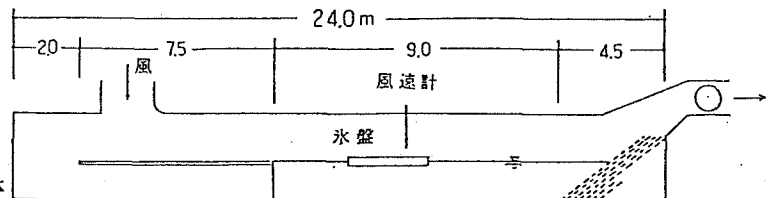


図1 実験装置(1)

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。風速、浮体の寸法を変えて行った。風速と力の関係、浮体寸法と力の関係を図2、図3に示す。

風が浮体に及ぼす力としては、浮体表面と空気との摩擦によって生ずるせん断力と、浮体の水面から出ている部分に風が当たることによる抗力とが考えられる。前者を F_{sa} 、後者を F_{Da} と定義する。幅を B とすると次式が成立する。

$$F_{sa} = \tau_a \cdot A = \tau_a \cdot B \cdot L \quad (1)$$

$$F_{Da} = C_{Da} \cdot (\rho_a / 2) \cdot B \cdot 0.1d \cdot U_{10} \quad (2)$$

ここで τ_a は風が浮体に及ぼすせん断応力、 ρ_a は空気の密度、 C_{Da} は浮体の形状抵抗係数である。浮体の受けてい

* 正会員 北海道開発庁

** 北海道大学大学院

*** 建設省

**** 正会員 北海道工業大学

***** 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)

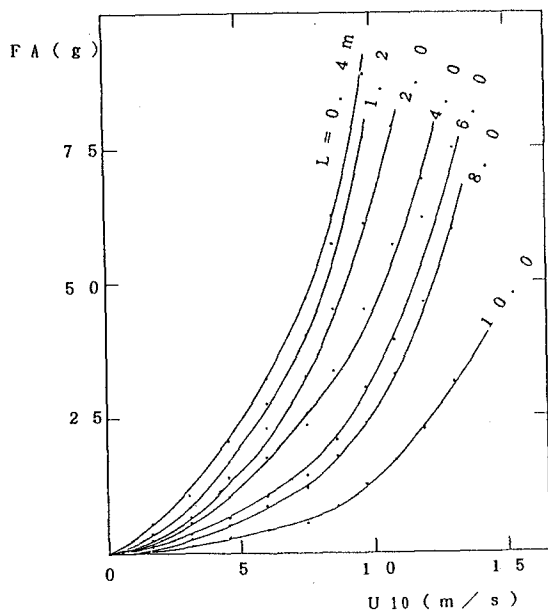


図2 風速と浮体を受ける力の関係

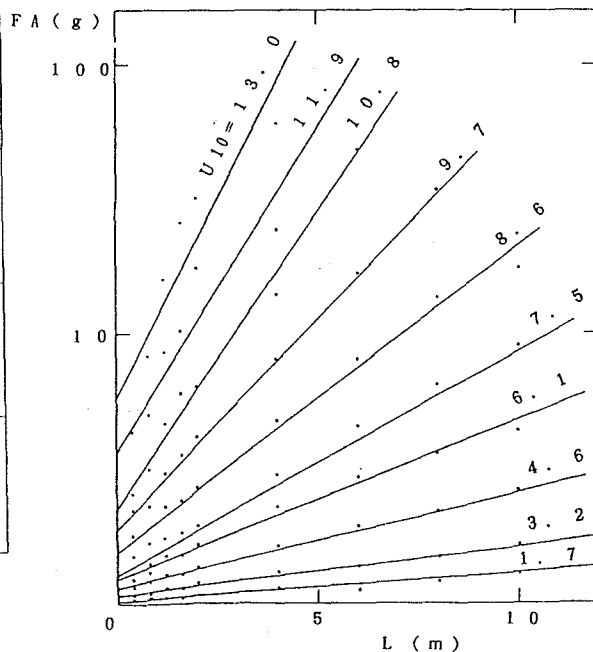


図3 浮体の寸法と受ける力の関係

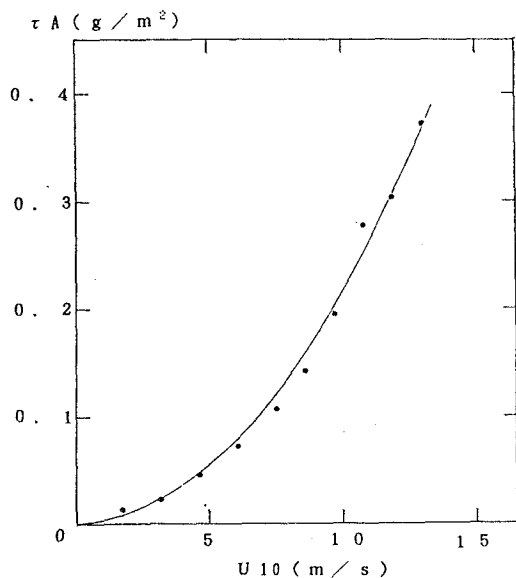


図4 せん断応力と風速の関係

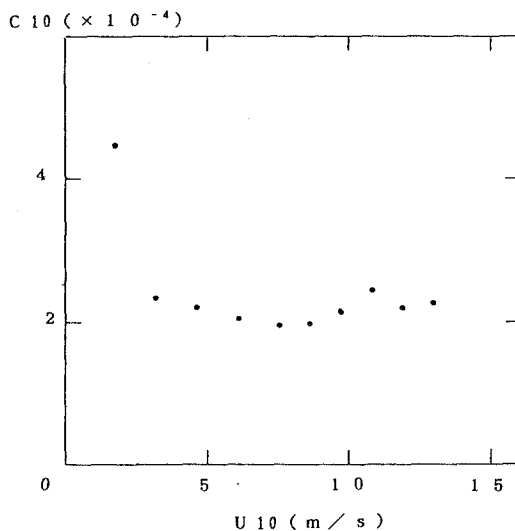


図5 風速とC10の関係

る力はこれらの和として与えられるから、

$$F_a = \tau_a \cdot B \cdot L + C_{Da} \cdot (\rho_a / 2) \cdot B \cdot 0.1d \cdot U_{10} \quad (3)$$

図3の直線の傾きが右辺第1項の $\tau_a \cdot B$ に、 $L=0$ の切片が第2項に相当すると仮定して、 τ_a と U_{10} との関係を示すと図4のようになる。 τ_a はおおむね U_{10}^2 に比例しており理論と一致する。また τ_a は次式のように表される。

$$\tau_a = \rho_a \cdot C_{10} \cdot U_{10}^2 \quad (4)$$

ここに、 C_{10} は浮体と空気との間の摩擦係数である。 $\rho_a = 0.1293 \times 10^3 \text{ g/m}^3$ を代入し、図4から $\tau_a / U_{10}^2 = 0.14$ を代入すると

$$C_{10} = 1.08 \times 10^{-3}$$

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} として 0.92×10^{-3} と 1.06×10^{-3} を得ている。また、Allisonなどは南極のMawson基地の近くの積雪のある氷盤で C_{10} を測定しており、風速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。北極海の海上で測定したLeavittらの結果では 2.7×10^{-3} としている。これに対して青田らは、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} は風速に依存することを示している。これに対して本研究で得られたデータから個々に C_{10} 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。

図3の $L=0$ の切片は浮体の水面から出ている部分に風が当たることによる抗力に相当すると考えられ、(2)式から浮体の形状抵抗係数 C_{Da} を求めると図7のようになる。横軸には $Re=0.1d \cdot U_{10}/\nu_a$ をとって整理した。

(2)水によって浮体を受ける力の測定

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に、モーターを取り付け自走できるようにした台車に測定装置であるバネばかりおよびひずみゲージをのせ、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測定する。測定では主としてバネばかりを用い、バネばかりで測定不能の範囲ではひずみゲージを用いた。浮体の長さとする関係を図8、浮体の厚さと受ける力の関係を図9に示す。

風による環境力と同様に、水から浮体を受ける力のうちで、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を F_{Dw} と定義すると次式が成立する。

$$F_M = F_{Sw} + F_{Dw} \quad (5)$$

$$F_{Sw} = \tau_{Sw} \cdot BL \quad (6)$$

$$\tau_{Sw} = \rho_w / 2 \cdot C_{Sw} \cdot V^2 \quad (7)$$

$$F_{Dw} = \rho_w / 2 \cdot C_{Dw} \cdot B \cdot (0.9d) \cdot V^2 \quad (8)$$

ここに、 τ_{Sw} は単位面積当りに浮体が水から受けるせん断応力、 C_{Sw} は水と浮体の間の摩擦係数、 C_{Dw} は形状抵抗係数である。

図8の直線の傾きから τ_{Sw} を求めると、

$$\tau_{Sw} = 1.8 \times 10^{-2} \text{ g/m}^2 \quad (V=0.05 \text{ m/s})$$

$$3.0 \times 10^{-2} \text{ g/m}^2 \quad (V=0.10 \text{ m/s})$$

$$4.0 \times 10^{-2} \text{ g/m}^2 \quad (V=0.15 \text{ m/s})$$

$$4.3 \times 10^{-2} \text{ g/m}^2 \quad (V=0.20 \text{ m/s})$$

となる。

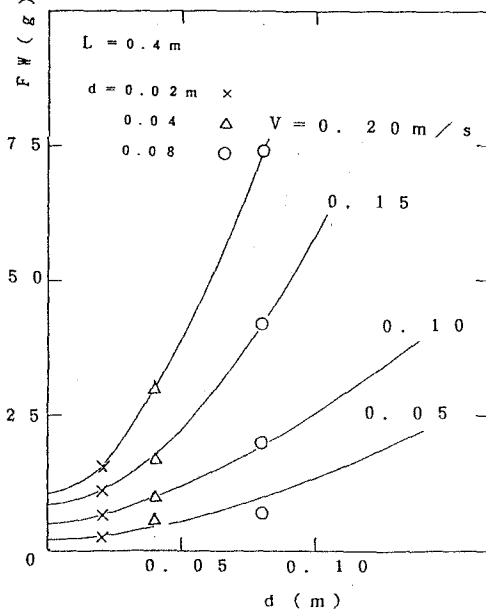


図9 浮体の厚さと受ける力の関係

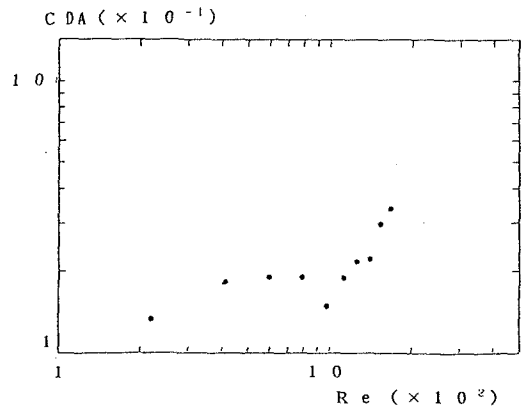


図6 Reと C_{DA} の関係

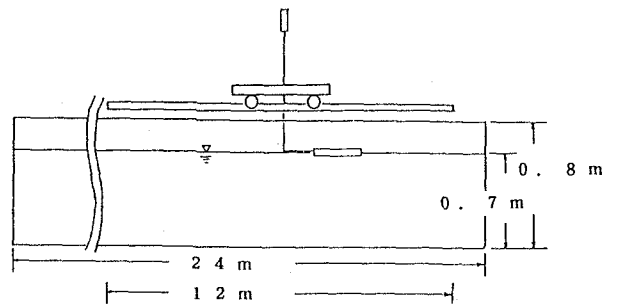


図7 実験装置(2)

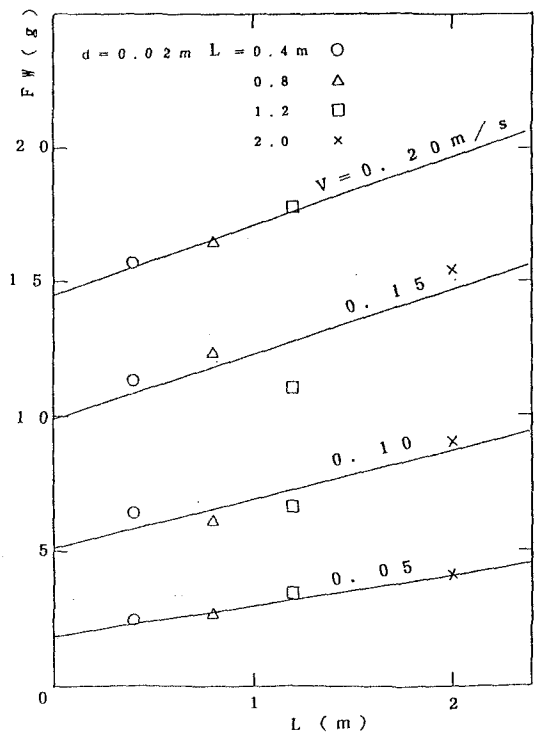


図8 浮体の長さとする関係

また、個々のデータに対して C_{SW} を求めると図10のようになる。これによると C_{SW} は浮体速度の影響を受けていることがわかる。また図8の $L=0$ の切片を F_{DW} に相当すると仮定して、(8)式より C_{DW} を求めると図11のようになる。ここで $Re=0.9dV^2/\nu_w$ とした。

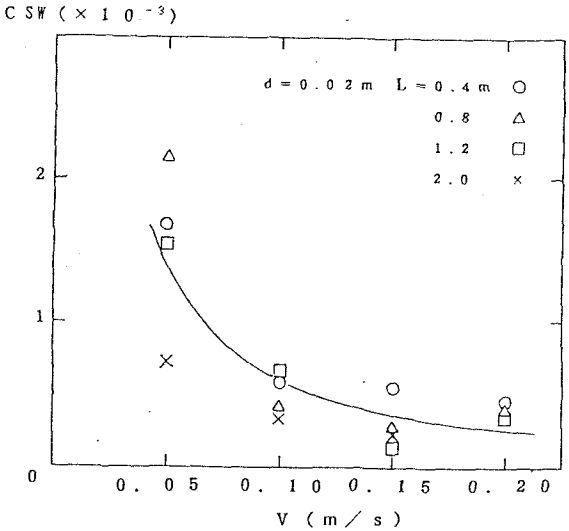


図10 浮体速度と C_{SW} の関係

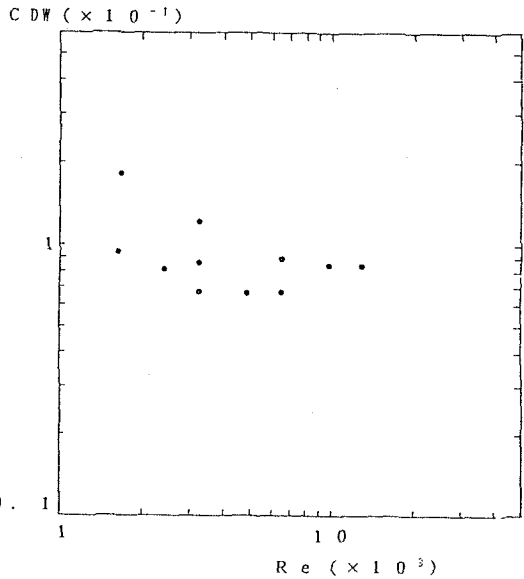


図11 Re と C_{DW} の関係

(3) 浮体の移動速度の測定

実験(1)と同じ装置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、浮体に運動を観察した。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 $B=0.6m, d=0.02m, L=0.4m, 0.8m, 1.2m, 1.6m, 2.0m$ 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。得られた実験データを表2に、 U_{10} と $V_t \rightarrow \infty$ の関係を図12に示す。 U_{10} と $V_t \rightarrow \infty$ の関係は浮体の寸法によらずほぼ一本の直線で表された。また浮体の厚さが一定の場合、風速、浮体の面積によらず $V_t \rightarrow \infty/U_{10}$ の値はほぼ一定となった。個々のデータに対して $V_t \rightarrow \infty/U_{10}$ の値を計算し、その平均値を求めると0.0175となった。

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の求めた氷盤の実測による値との比較を行っている。(表2)本実験の値はこれらと比較してやや低くなっている。

3. 考察

(1) 浮体の移動速度の計算

計算法1.

北條らは氷盤の移動方向に風が作用するときの運動方程式から氷盤の速度を計算する式を提案している。それによると氷盤の運動方程式は

表1 実験条件と結果

浮体寸法 m		風速 U_{10} (m/s)									
d	L	3.2	4.6	6.3	7.5	8.6	9.7	10.8	11.9	13.0	
0.02	0.4	4.3	7.6	10.1	12.4	15.6	17.8	20.8	22.3	26.1	
	0.8	5.9	8.9	12.1	13.7	15.8	18.5	20.8	24.3	27.2	
	1.2	4.5	7.5	9.5	13.4	16.8	18.3	19.5	23.2	23.6	
	1.6	4.6	7.6	9.3	11.6	14.4	15.9	18.7	22.4	22.4	
	2.0	5.3	7.4	9.9	12.0	14.3	15.5	18.2	21.4	28.8	
0.04	0.4			8.8							
	0.8			9.5							
	1.6			9.0							
0.08	0.4			5.7							
	0.8			5.3							
	1.6			5.8							

(10^{-2} m/s)

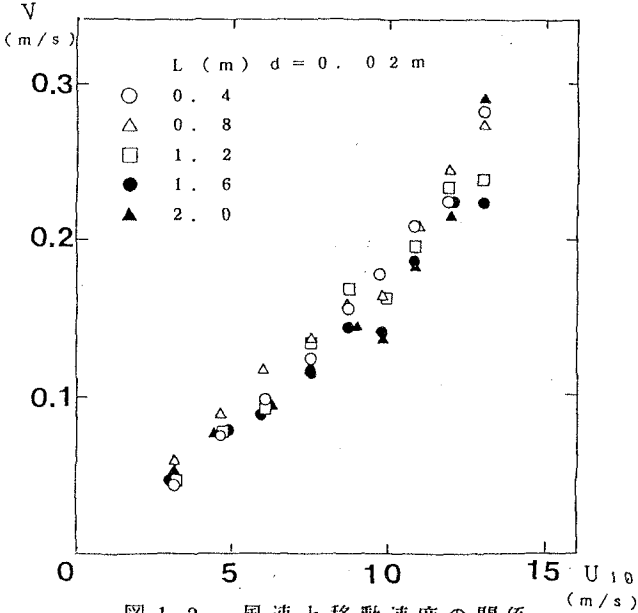


図12 風速と移動速度の関係

表 2 Timokhov の計算値と Gordienko の実測値

	Individual fields > 500 m ²	Field fragments	Small ice floes
After P.A. Gordienko	0.018	0.039	0.050
Computed by equation	0.025	0.025	0.048

$$\rho_i A h \cdot dV/dt + \rho_w C_{DW} A \cdot V^2 = T_a \cdot A \quad (9)$$

$$T_a = \rho_a \cdot C_{i0} \cdot U_{i0}^2$$

ここで ρ_i 、 ρ_w 、 ρ_a は氷、水、及び空気の密度、 A は氷盤の面積、 h は氷厚、 C_{DW} は氷と水の間の摩擦係数、 C_{i0} は風と氷盤あるいは雪面間の摩擦係数である。(9)式を $t=0$ で $V=0$ として解くと次式が得られる。

$$t = \rho_i h / \rho_w C_{DW} \cdot T_a \cdot \tan^{-1} \rho_w C_{DW} / T_a \cdot V$$

$$V_{t \rightarrow \infty} = \pi/2 \cdot T_a / \rho_w C_{DW} = \pi/2 \cdot \rho_a \cdot C_{i0} \cdot U_{i0}^2 / \rho_w C_{DW} \quad (10)$$

北條らはここで氷盤の喫水は小さいとして形状抵抗を無視し、 C_{DW} は一定であるとして計算を行っている。しかしながら本実験では C_{DW} は浮体速度の影響を受けることがわかっているので C_{DW} に V の関数を仮定して繰り返し計算により速度を求め、実験値との比較を行った。

計算法 2.

浮体に働く環境力は風による力、水による力とも浮体の上面及び下面が受けるせん断力と、浮体の前面が受ける流体抵抗とに分けることができる。上述の計算ではこれらを一まとめにして単に風による力、水による力として方程式を立てたが、計算法 2 ではこれらを分けて考える。すると浮体の運動方程式は

$$\rho_i B dL \cdot dV/dt + F_w = F_a \quad (11)$$

$$F_a = \rho_a/2 \cdot C_{i0} \cdot U_{i0}^2 \cdot A_s + \rho_a/2 \cdot C_{Da} \cdot U_{i0}^2 \cdot A_f \quad (12)$$

$$F_w = \rho_w/2 \cdot C_{Sw} \cdot V^2 \cdot A_s + \rho_w/2 \cdot C_{Dw} \cdot V^2 \cdot A_f \quad (13)$$

となる。ここに A_s は浮体上(下)面の面積、 A_f は浮体前面の投影面積である。ここで C_{Sw} 、 C_{Dw} はそれぞれ V の関数であり、実験結果から

$$C_{Sw} = (-0.153 + 0.085/V) \cdot 10^{-3}$$

$$C_{Dw} = (0.5 + 0.05/V) \cdot 10^{-1}$$

と仮定して(11)式を解くと、

$$V_{t \rightarrow \infty} = (\beta + \beta^2 - 4\alpha\gamma)/\alpha \quad (14)$$

$$\alpha = -0.05 \rho_w / \rho_i 2L$$

$$\beta = -0.005 \rho_w / \rho_i 2L$$

$$\gamma = \rho_a / \rho_i \cdot (C_{i0} \cdot U_{i0}^2 / 2d + C_{Da} \cdot U_{i0}^2 / 2L)$$

を得る。これに風の条件を入れて、 $V_{t \rightarrow \infty}$ を計算した。

計算法 1 及び 2 の結果と実験結果とを比較すると図 1 3 の様になる。これをみると、計算法 2 のほうがより実験結果に近い値を与えている。

(3) 環境力に及ぼすせん断力と形状抵抗の効果の比較

一般に環境力は式(13)(14)のように表すことができる。

ここで図 5、図 6、図 1 0、図 1 1 から分かるように、環境力のうち、浮体と流体の間の摩擦によるせん断力に関する係数 C_{Sw} 、 C_{i0} は $10^{-3} \sim 10^{-4}$ のオーダーであるのに対して形状抵抗に関する係数 C_{Dw} 、 C_{Da} は 10^{-1} と非常に大きなオーダーとなっている。このため、本実験の模型に関しては形状抵抗(浮体前面による抵抗)の方が卓越する結果となった。浮体に働くせん断力及び形状抵抗力はそれぞれ A_s 、 A_f にも依存しており、一般に、一方の力が環境力全体の 1% 未満であれば無視できると考えると、以下のようなことが考察される。

$(A_s/A_f) > 10^4 \sim 10^5$ のとき

形状抵抗はほぼ無視できる。

$10^4 \sim 10^5 > (A_s/A_f) > 1 \sim 10$ のとき

形状抵抗とせん断力の両方の効果を考慮することが必要である。

$1 \sim 10 > (A_s/A_f)$ のとき

せん断抵抗の効果は小さくなる。

4. 結論

(1) 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。

(2) 浮体に働く環境力についてはせん断力と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。

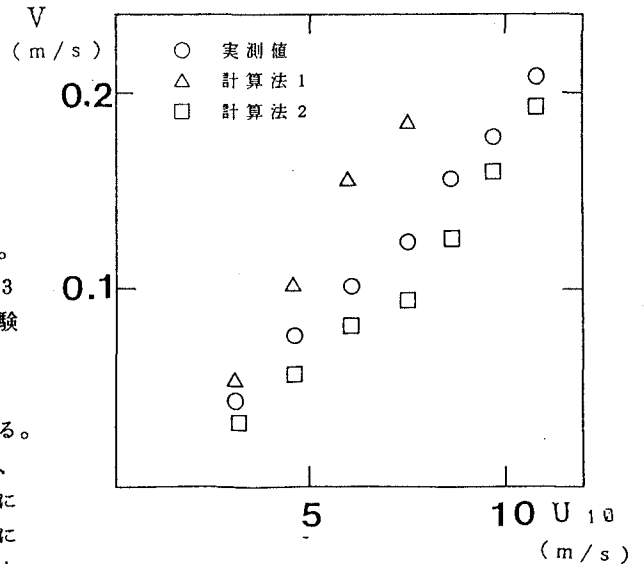


図 1 3 実験値と計算値との比較

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)Timokhov, L. A. : Horizontally Uniform Wind Drift of Variously Packed Ice Cover, Ed, L. A. Timokhov, A. A. Balkema, P123-135, 1984
- 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1, 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