

サロマ湖湖口部アイスブームに作用する氷力に関する研究

Study on the Ice Force Acting on Ice Boom at the Mouth of Lake Saroma

関口浩二*・遠山哲次郎**・荒田 崇***・清水敏晶****

Kouji Sekiguti, Tetujirou Touyama, Takasi Arata and Tosiaki Simizu

Lake Saroma is an inland sea-lake on the Sea of Okhotsk. As the lake's environment is suitable for aquaculture, it is widely used for natural sea farming.

Ice floes usually reach Okhotsk Sea coast of Hokkaido from late January through early February. When ice floes arrived before Lake Saroma had sufficiently frozen up, the inflow of ice into the lake damaged aquaculture facilities. As a countermeasure for this, construction of ice booms to control ice floes began in 1994 and 10 spans out of 13 planned have since been completed.

In this study, the effectiveness of ice booms in controlling ice floes in an actual sea area is confirmed, factors concerning the tension of the main wire, an important point in design, are analyzed using research results, and the design and actual values are compared.

keywords : ice floe, ice boom, tension, ice forces

1. はじめに

サロマ湖は、オホーツク海に面する周囲 91 km、面積 152 km²の海跡湖で、長さ 25 kmの細長い砂州によって隔たれ、砂州中央部の幅約 250 mの第1湖口と幅約 50 mの第2湖口により外海に通じている。湖内では比較的深い水深、外海と同等の塩分濃度、高い静穏性により、ホタテやカキをはじめとする養殖業に最適の環境を有し、天然の栽培漁業の場として広く利用されている。

一方、オホーツク海沿岸には通常1月下旬から2月上旬にかけて流氷が接岸する。サロマ湖では冬季に湖内結氷するが、流氷の到来時に湖内が十分結氷していると結氷した氷盤によって流氷流入が阻止される。しかし結氷する前に流氷が到来した場合は、流氷が湖内に流入し、養殖施設に多大な被害を与えることとなる。近年は湖内結氷時期が年々遅くなっており、今年も未結氷であったためアイスブーム未設置区間から流入した氷盤により数千万円に上る被害となった。このような多大な被害を防止するため、湖内への流氷流入対策の必要性が高まり、平成3年度より構造・設計・配置等に関する検討を行い、その結果、第1湖口に流氷制御機能を有するアイスブーム工法が採用された。また、平成6年度より建設が始まり、現在全13スパン中10スパンが完成している。アイスブームは、これまで米国やカナダの河川で氷盤制御に用いられているが、これほど大規模で実海域での採用は世界的にも類のない技術である。

本研究では、実海域でのアイスブームによる流氷制御効果を確認するとともに最大荷重のかかる固定構造 No.7 (特殊部)において現地観測を行い、設計上の課題であるメインワイヤーの張力について、設計値と実測値を比較検証し、流氷の制御状況下における張力の特性を把握するとともに、設計手法の妥当性を評価した。

2. アイスブームの概要

サロマ湖漁港防氷堤は、全長 1,430m で 14 基の固定構造物とその間に設置される 13 スパンのアイスブームによって構成されている (図1)。アイスブームは流氷を制御する浮体構造で、メインワイヤー、フロート、ネットワイヤー、下部チェーン等からなり、流氷の環境力を受け止め、これを張力として固定構造物に伝える。固定構造物は4本の鋼管杭と上部コンクリートからなり、アイスブームを介して伝達される張力を水平力として負担する。

アイスブームの形式には、下部にネットを有する特殊型とネットを有しない一般型からなる (図1・2)。両者はそれぞれ流氷を制御できる限界流速が異なり、氷盤の形状と規模によって異なるが、一般的には特殊型で流速 1.4m/sec、一般型で 1.0m/sec であり、設置位置の流速によって使い分けられている。

* 北海道開発局 農業水産部水産課

** 北海道開発局 網走開発建設部 網走港湾建設事務所

*** (社)寒地港湾技術研究センター 調査研究部 (060 札幌市北区北7条西2丁目北ビル9階)

**** 日本データサーブিস (株) 技術開発室

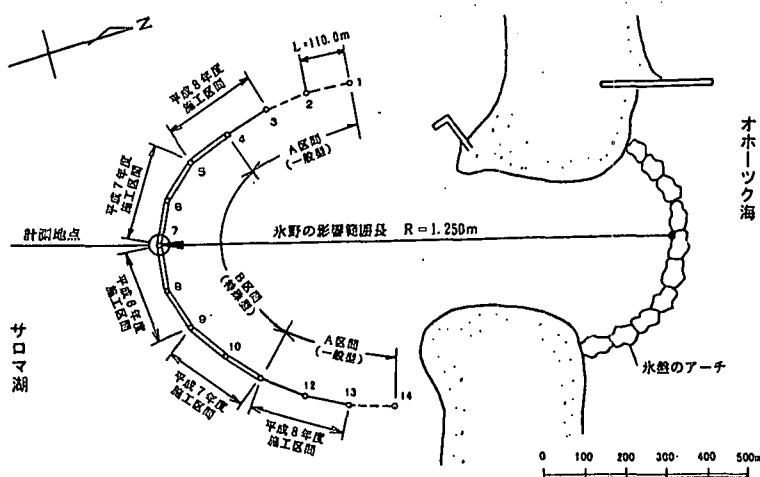


図1 防水堤配置図

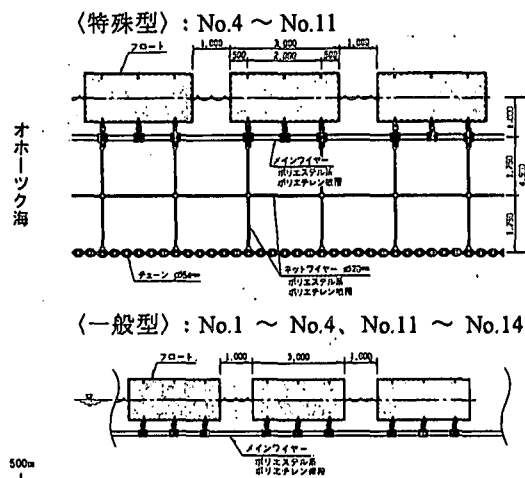


図2 アイスブームの構造

3. 設計時における張力の算出

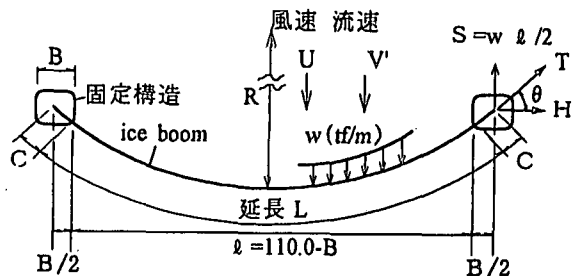
設計計算時の荷重条件は、氷盤が湖口から設置位置までの水域を覆った氷来時と氷盤がなく波浪を受ける波浪時の2ケースであるが、ここでは荷重条件が大きな氷来時の環境力の算出手順と結果を特殊型区間について示す。

氷来時にメインワイヤーの張力に影響を及ぼす要因は、アイスブームに制御された氷盤群に作用する流れや風による流体力と、その時の氷盤群の底面形状である。

3.1 荷重の伝達

アイスブームのメインワイヤーに作用する外力は、流水制御時に氷盤に作用する流れと風の力が氷盤を通してアイスブームに環境力として働き、メインワイヤーの張力として固定構造に伝える構造となっている。

メインワイヤーに作用する環境力は、単位長さ当たりの荷重強度 W として受け、その作用によりアイスブームは放物線を描き、メインワイヤーには固定点での角度 θ に応じた張力 T が発生する。



ワイヤー総延長: 140.0m

上部工天端幅 B : 7.5m

上部工遮蔽部 C : 10.1m

氷野の影響長 R : 1,250m (特殊部)

図3 荷重の伝達

3.2 環境力の算出

(1) 流れによる荷重強度 τ_{wt} (tf/m)

$$\tau_{wt} = \frac{W_0}{2g} \cdot C_w \cdot V'^2 \cdot R \quad (1)$$

W_0 : 海水の単位体積重量 (=1.03t/m³)

C_w : 氷盤の抵抗係数 (Mcphee の北極海での実測値=0.011)

g : 重力加速度 (=9.8m/sec²)

V' : 氷野の影響範囲内の平均流速 (=1.65m/sec)

R : 氷野の影響範囲長 (湖外側アーチ部まで=1,250m)

アイスブーム単位長さ当たりに作用する流れの力

$$\tau_{wt} = 1.967 \text{ tf/m}$$

(2) 風による荷重強度 τ_{at} (tf/m)

$$\tau_{at} = \frac{W_a}{g} \cdot C_a \cdot U^2 \cdot R \quad (2)$$

W_a : 空気の単位体積重量 (=0.0013t/m³)

C_a : 抵抗係数 (青田らによるオホーツク海での実測値=0.004)

g : 重力加速度 (=9.8m/sec²)

U : 風速 (海面上 10m での実測値=20.0m/sec)

R : 氷野の影響範囲長 (=1,250m)

アイスブーム単位長さ当たりに作用する風の力

$$\tau_{at} = 0.265 \text{ tf/m}$$

(3) アイスブーム (特殊部) の単位長さ に働く氷盤の環境力 W

$$W = \tau_{wt} + \tau_{at} = 1.967 + 0.265 = 2.232 \text{ tf/m}$$

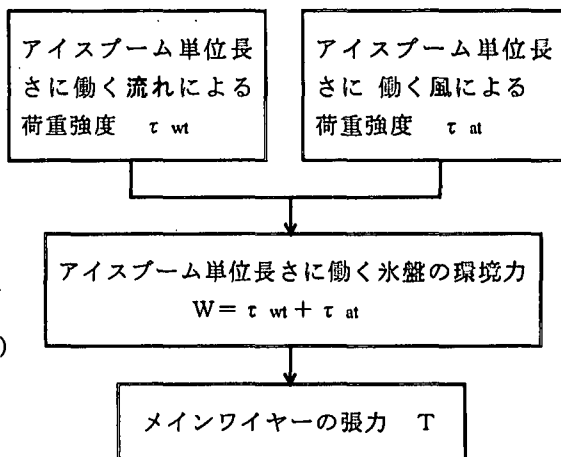


図4 計算フロー

3.3 メインワイヤーの張力の算出

(1) ワイヤー長と荷重条件

固定構造間距離 上部工天端幅
スパン長 $\ell = 110.0\text{m} - 7.5\text{m} = 102.5\text{m}$
仕上がり総延長 上部工遮蔽部長
延長(働き長) $L = 140.0\text{m} - 10.1\text{m} \times 2\text{基} = 119.8\text{m}$
荷重強度 $W = 2.232\text{tf/m}$ (氷来時)

(2) 張力の算出

ワイヤーの描く放物線を $y = \frac{1}{2a}x^2$ とすると、延長 L は次式で示される。

$$\frac{L}{2} = \frac{X_0}{2a} \sqrt{X_0^2 + a^2} + \frac{a}{2} \log_0 \frac{x_0 + \sqrt{X_0^2 + a^2}}{a} \tag{3}$$

$X_0 = \ell / 2 = 102.5 / 2 = 51.25\text{m}$ 、 $L = 119.8\text{m}$ として、左右両辺が等しくなる a の値を試行的に求めた結果、 $a = 49.95$ となる。

これから張力 T を算出する。

端部 X_0 地点での放物線の傾き： $y' = \frac{1}{a} X_0 = \frac{1}{49.95} \times 51.25 = 1.026$

端部 X_0 地点での角度： $\theta = \tan^{-1} y' = \tan^{-1} (1.026) = 45^\circ - 44'$

張力の y 成分： $S = W X_0 = 2.232\text{tf/m} \times 51.25\text{m} = 114.4\text{tf}$

張力の x 成分： $H = S / \tan \theta = 114.4 / \tan (45^\circ - 44') = 111.5\text{tf}$

張力： $T = \sqrt{S^2 + H^2} = \sqrt{(114.4)^2 + (111.5)^2} = 159.7\text{tf}$

4. 現地観測調査

4.1 観測項目と概要

氷来時の設計計算上のパラメーターは、流速・風速・氷野の影響範囲長である。表 1 の調査項目について 1995 年から毎年冬期間に施設中央の固定構造 No.7 の上部工とその周辺海面下において観測を行っている。尚、観測時の完成スパンは以下の通りである。

1995 年：No.7～No.9, 2 スパン

1996 年：No.5～No.11, 6 スパン

1997 年：No.3～No.13, 10 スパン

表 1 現地観測項目

観測項目	計測機器等	計測間隔等
潮位	水圧計	15分毎10秒間1秒
流向流速	電磁流速計	15分毎10分間1秒
風向風速	風向風速計	同上
メインワイヤー張力	ロードセル	同上
氷野の範囲長	航空写真 C.C.Dカメラ	流氷流入時 15分毎静止画像

4.2 観測結果

観測項目の中から、1996 年と 1997 年に湖口から流氷流入があった以下の期間について、流速とメインワイヤー張力の変化を図 5 に、また両者の関係をまとめて図 6 に示す。

1996 年 2 月 19 日～2 月 25 日、1997 年 2 月 9 日～2 月 14 日

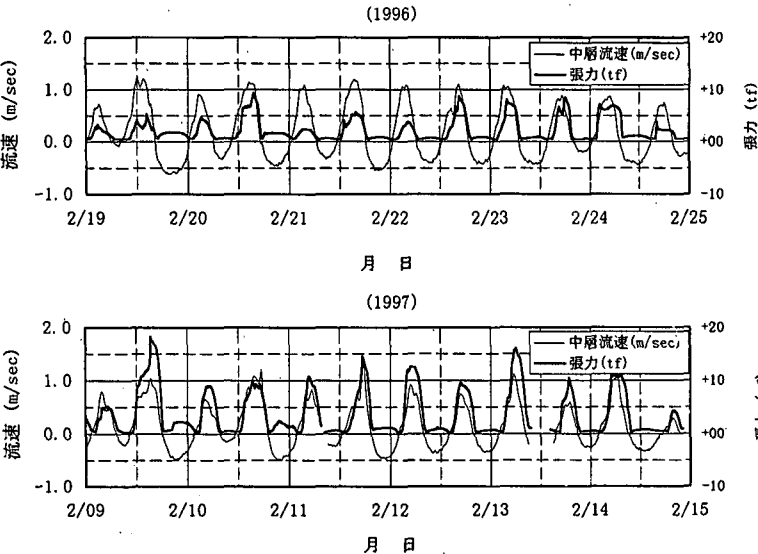


図 5 流速と張力の変化

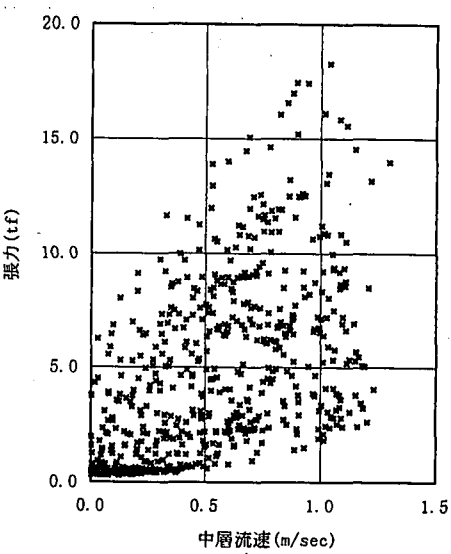


図 6 流速と張力の関係

図5によると、流入時の流速がピークになる時間帯とメインワイヤー張力がピークになる時間帯は完全に一致しており、流速が張力発生の大きな要因であることがわかる。しかし、図6によると両者には相関が認められないことから、張力の発生は、単にアイスブーム自身が受ける流体力に起因しているものではないことがわかる。

5. 氷力の検証と考察

観測期間の内、氷野の影響範囲長が観測された3日間について張力の実測値と計算値を比較し、流水制御状況下における張力の特性を把握するとともに、設計手法の妥当性を評価する。

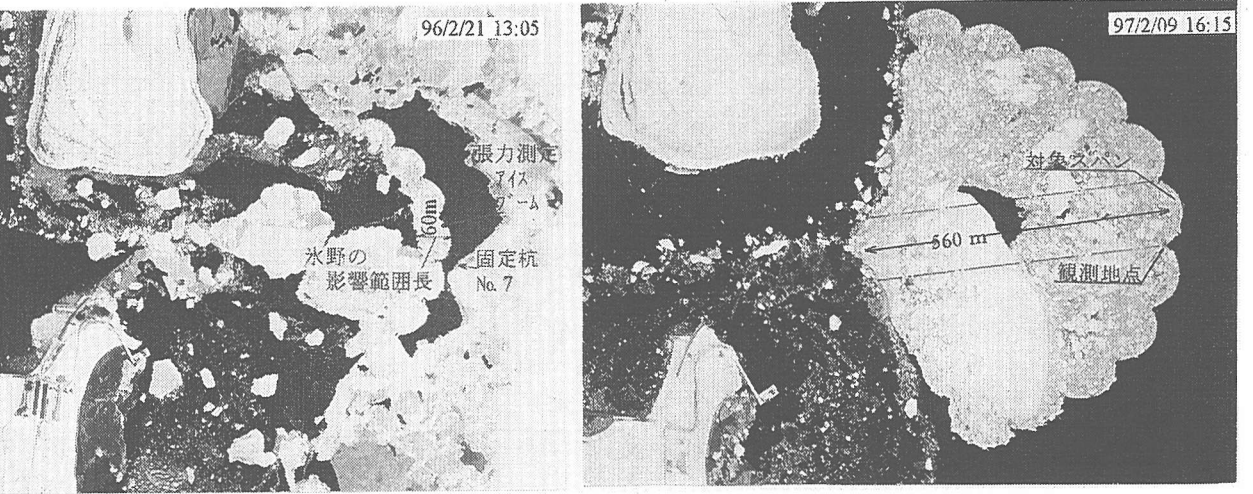


図7 航空写真による流水制御状況

5.1 設計値と実測値の比較

比較対象期間の流速・風速・氷野の影響範囲長ならびに張力の実測値を表3に示す。

表3 張力の実測値と設計値の比較

1996年 2月	時刻	流速 V (m/sec)	風速 U (m/sec)	範囲長 R (m)	張力 T (tf)	
					実測値	設計値
21日	12:30	0.38	-1.01	20	1.22	0.11
	12:45	0.48	-1.82	60	2.16	0.56
	13:00	0.59	-1.49	60	4.05	0.83
	13:15	0.74	-1.75	60	2.91	1.30
	13:30	0.84	-1.09	60	2.75	1.69
	13:45	0.85	-1.15	60	3.36	1.71
22日	13:30	0.44	0.09	40	0.67	0.32
	13:45	0.54	0.09	50	0.81	0.59
	14:00	0.56	1.19	50	1.64	0.62
	14:15	0.59	0.95	80	2.24	1.12
	14:30	0.60	0.73	80	2.65	1.16
	14:45	0.64	0.46	120	2.84	2.03
1997年 2月	時刻	流速 V (m/sec)	風速 U (m/sec)	範囲長 R (m)	張力 T (tf)	
					実測値	設計値
9日	11:00	0.16	-0.36	0	0.38	0.00
	11:30	0.30	1.31	100	2.24	0.40
	12:00	0.58	1.81	560	8.66	10.41
	12:30	0.70	2.40	560	9.06	14.55
	13:00	0.69	2.31	560	10.78	13.95
	13:30	0.79	1.84	560	10.93	17.42
	14:00	0.76	2.12	560	11.66	16.35
	14:30	0.82	0.87	560	11.92	18.55
	15:00	1.02	1.07	560	13.05	27.83
	15:30	0.94	0.65	560	17.42	24.03
	16:00	0.88	0.45	560	16.98	21.22
	16:30	0.82	0.10	560	16.07	18.89
	17:30	0.20	0.40	560	9.10	2.14

・流速は中層の値、風速は流軸方向成分に換算した値。

流速・風速および張力の実測値は、いずれも観測結果であり、氷野の影響範囲長は上部工上に設置したC.Dカメラの画像と航空写真から読み取った値である。観測結果に基づき設計時と同手法によってメインワイヤーの張力の値を計算し、実測値と比較した結果を図8に示す。

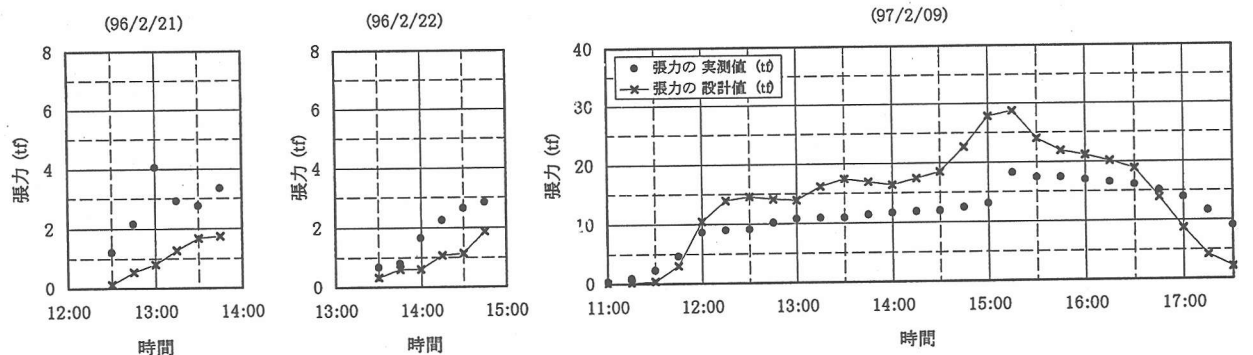


図8 メインワイヤー張力の実測値と設計値の比較

96/2/21 と 96/2/22 の両日は、流氷の流入が少なかったため、影響範囲長も比較的短い（それぞれ最大で 60m,120m）時の結果である。一方、97/2/09 は、干潮から満潮にかけて大量の流氷の流入があり、影響範囲長は最大で 560m に達した時の結果である。実測値と設計値を比較すると、値の増加あるいは低減の傾向はよく一致しており、氷盤に作用する環境力を外力としている設計計算手法の妥当性を確認することができる。しかし、その値を比較すると 96/2/21 と 96/2/22 の両日においては、設計値が実測値を下廻っており、これとは逆に 97/2/09 においては、設計値が上廻っている。ただし、97/2/09 にあっても影響範囲長が増加途上の 11:45 以前の時間帯では、96 年の両日同様に設計値が実測値を下廻る傾向を示している。

以上の結果から、氷野の影響範囲長が長い場合には安全側となるが、短い場合には外力となる環境力を過小に評価してしまう傾向が見られる。

5.2 抵抗係数の検討

氷盤の環境力は流れと風によって生じる流体力が氷盤を通じ構造物に作用する氷力である。比較期間の場合、風速の成分は小さく、風による力の影響は微小である。従って、流れによる荷重の算出に関する項目として、設計では一定値としてした氷盤の抵抗係数 C_w について検討する。

設計時に使用した氷盤の抵抗係数は、Mcphee の北極海での実測値 $C_w = 0.011$ を使用しているが、氷盤の厚さや底面形状については考慮されていない。河合らの研究¹⁾によると、氷盤に働く流体力を考える場合、通常氷盤は平板と仮定される場合が多いが実際の氷盤には凹凸があり、氷盤による流体抵抗は氷盤底面と水の間の摩擦によるせん断力に依存する。また、せん断係数は氷盤底面の粗度によって大きく影響し、流れによる荷重強度 τ_{wt} は、流れによるせん断力 F_{sw} と流れによる形状抵抗力 F_{dw} の合力で表されるとしている。

$$\tau_{wt} = F_{sw} + F_{dw}$$

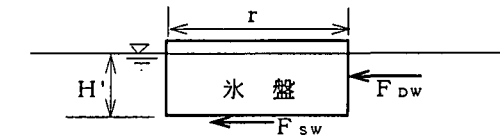
また、上田らは流体力に関する実験的研究²⁾から、氷盤に作用する流体力を次式で示している。

・流れによるせん断力

$$\begin{aligned} F_{sw} &= \frac{1}{2} \rho_w \cdot C_{sw} \cdot V^2 \cdot r \\ &= \frac{W_0}{2g} \cdot C_{sw} \cdot V^2 \cdot r \end{aligned} \quad (4)$$

・流れによる形状抵抗力

$$\begin{aligned} F_{dw} &= \frac{1}{2} \rho_w \cdot C_{dw} \cdot V^2 \cdot H' \\ &= \frac{W_0}{2g} \cdot C_{dw} \cdot V^2 \cdot H' \end{aligned} \quad (5)$$



ρ_w : 海水の密度 g : 重力加速度 ($=9.8\text{m/sec}^2$)

W_0 : 海水の単位体積重量 ($=1.03\text{t/m}^3$)

C_{sw} : 海水と氷盤の摩擦係数 ($=0.007$)

C_{dw} : 海水と氷盤の形状抵抗係数 ($=0.6$)

r : 氷盤の長さ (m) H' : 氷盤の喫水深さ (m)

設計計算においては、流れの力をせん断力と形状抵抗力に分けず、一体として (1) 式で算出しているが、(4)、(5) 式の合計と (1) 式を比較して、 C_w を C_{sw} と C_{dw} で示す。

$$\begin{aligned} \tau_{wt} = F_{sw} + F_{dw} &= (4) + (5) \\ &= \frac{W_0}{2g} (C_{sw} + \frac{H'}{R} C_{dw}) \cdot V^2 \cdot R \end{aligned} \quad (6)$$

ゆえに、

$$C_w = C_{sw} + \frac{H'}{R} \cdot C_{dw} = 0.007 + 0.6 \frac{H'}{R} \quad (7)$$

となり、抵抗係数 C_w は、氷盤の喫水深さ H' と氷野の影響長 R の関係から求まることになる。

(7) 式によって C_w を求めた結果を図 9 に示す。図中の点線が設計時に使用した $C_w = 0.011$ の線である。

これによると、 R が小さい場合は形状抵抗の影響が大きくなり C_w は大きくなる。 R が大きい場合はその影響が薄れて C_w は小さくなる傾向が分かる。尚、施設の設計条件である $R = 1,250\text{m}$ の場合には、いずれの H' についても C_w は 0.011 以下となる。

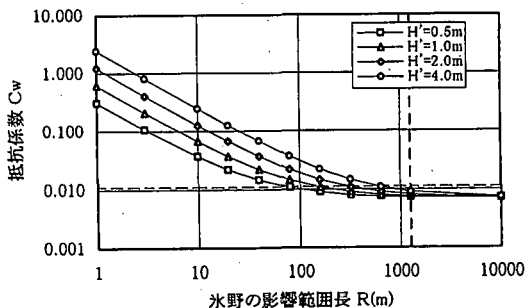


図 9 R と C_w の関係

5.3 抵抗係数を変えた場合の比較

氷野の影響範囲長に応じて、抵抗係数 C_w を変えてメインワイヤー張力を計算し、結果を実測値および先に計算した設計値と比較して図10に示す。

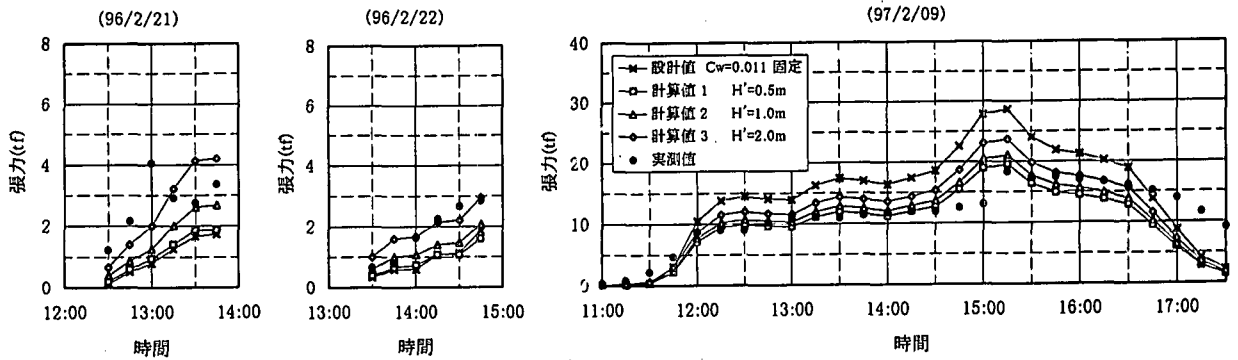


図10 メインワイヤー張力の実測値と計算値 (C_w を変えた場合) の比較

これによると、氷厚 H' の違いにより抵抗係数 C_w が異なるため計算結果も異なる値を示すが、影響範囲長が短い96/2/21、96/2/22両日では、張力は設計値よりも増加し実測値に近づく。一方、97/2/09では逆に張力は設計値よりも低減するか、やはり設計値に近づく結果となる。

6. まとめ

- (1) 流氷制御の効果については、3年間とも建設されたスパンの中で氷盤群を確実にトラップしており、アイスブームの流氷侵入制御機能の有効性を確認した。
- (2) アイスブームに作用する外力は、流入時の流速に応答するが、両者の相関は認められないことから単に流体力のみに起因するものではないことが確認された。
- (3) 外力をアイスブームが制御している氷盤を介して伝達される環境力としている現設計計算手法によって、メインワイヤー張力を計算し、実測値と比較した結果、両者の経時的変化の傾向は概ね一致していることから、その手法の妥当性を確認した。
- (4) 設計時に採用した抵抗係数 $C_w = 0.011$ を用いた計算結果は、本施設のような長い影響範囲長を条件とする場合には、実測値よりも大きい値が得られることから、抵抗係数値の安全性を確認した。
- (5) しかし、影響範囲長が短い場合には、実測値よりも小さい値を与えてしまう傾向が生じた。このことについては、氷盤に作用する流れの力の内、形状抵抗力の影響に着目し、影響範囲長に応じて抵抗係数を変えて計算することで、実測値に近い値を求めることができることを確認した。

7. おわりに

3年間の調査において、平成8年度の冬季は比較的長い影響範囲長を観測することができた。これにより、影響範囲長と氷盤の抵抗係数および張力との関係について検討することができ、設計手法の妥当性、安全性について確認することができた。しかし、抵抗係数値については、今後、施設が延長され影響範囲長の増加が予想されることから、その場合の両者の関係についてはさらに確認する必要があるため、引き続き調査検討を行っていくこととしている。今後の調査を進める上で、氷野の影響範囲長の把握は、氷盤の流入する状況や撮影のタイミングが難しく、より効果的な調査方法の確立が課題となっている。

今後もアイスブームの建設に伴い、調査データの蓄積と解析を進めていくことが、流氷制御技術確立ために重要であると考えられる。

参考文献

- 1) 河合、原、榎、國松、長野、佐伯：氷盤群の流体抵抗：第11回ホツツ海と流氷に関する国際シンポジウム, 1996
- 2) 上田、佐伯、山下、村木、榎：浮氷盤に作用する流体力に関する実験的研究：海洋開発論文集 vol.8, 1992
- 3) 北海道開発局網走開発建設部：平成7年度サロマ湖漁港防波堤(防氷)調査検討報告書, 1996
- 4) 北海道開発局網走開発建設部：平成8年度サロマ湖漁港防波堤(防氷)調査検討報告書, 1997