

Ice Gouging の メカニズム

Mechanisms of Ice Gouging

木岡信治* 佐伯浩** 水野泰広***

Shinji Kioka, Hiroshi Saeki, Yasuhiro Mizuno

Sea ice is carried to the coast of Hokkaido by wind and water currents every year. In low pressure systems or when there is much sea ice, it drifts out toward the Pacific Ocean. When sea ice moves in shallow water areas, the sandy subgrade on the sea bottom is gouged by the sea ice. This phenomenon is generally called "Ice Gouging". Substantial damage to sea food i.e. (shellfish) and to structure embedded in the seabed is reported every year. However, the mechanism and behavior of ice gouging is not known sufficiently enough for discussion. Therefore, we have conducted a suitable experiment to clarify this phenomenon and have suggested formulas to measure ice gouging. Keyword: Ice force, Gouging Distance, Gouging Curve, Passive Earth Pressure

1. はじめに

Ice Gouging は浅海部で着底した海氷盤がその沖合いの氷野から押されて、より浅海部へ移動する間に海底部を削っていく現象である。またこの作用により岩礁地帯では岩礁表面に氷盤移動による強い摩擦力が作用しそこに生息するウニや昆布に被害を与える一方、磯掃除の作用もあり海草を取り除き、岩肌を直接露出させる効果もある。また砂質海岸ではその海氷自体の圧力で貝類を圧死させたり、陸上に貝類を運ぶ作用があり浅海部の貝類への影響は大きい。また、そこに存在する埋設構造物にも被害を及ぼすことがある。そこでこれらの対策として将来的には防氷構造物などGougingを阻止するような施設の設置、したがってその設計にあたって、そこに掛かるであろう氷力を見積もることや、あるいは埋設構造物をGougingから保護できるような埋設深さの推定などが考えられる。そこでまずIce Gouging の力学的モデルを構築し、その作用力（氷力）に関する計算式を提案するとともに実験によりこれを検証した。

2. 実験概要

2.1 実験条件

氷盤が浅海部のほうへ移動する際に水面上に露出する体積が増え、徐々にそれ自身の浮力が減少し氷盤の底面に作用する地盤反力が増加する。よってこの環境を再現するために図-1に示すような実験装置を用意した。あわせて図-2にそのようすの写真を示す。

鉄製のモデル氷盤の寸法は50×50×34cmで重量は57Kgfであった。

実際の海底勾配はほとんど1/50から1/100であるが、よりはっきりとgougingさせるためあえて実際より急勾配（1/5と1/10）を適用した。また次に示すように砂の特性、すなわち透水係数、粒径の異なる2種類を用いた。それによってモデル氷盤に作用する抵抗力がどれくらい異なり影響を受けるか考察しようというものである。

Sandy Type 1		Sandy Type 2	
粒径	0.147mm	粒径	0.381mm
水中単位体積重量	0.0016kg/cm ³	水中単位体積重量	0.0016kg/cm ³
水中内部摩擦角; ϕ	37°	水中内部摩擦角; ϕ	36°
水中安息角; β	32°	水中安息角; β	34°

* 学生会員 北海道大学大学院
 ** 正会員 北海道大学工学部教授
 *** 東日本ハウス（株）

2.2 実験方法

図-1に見られるように、水平方向に50cmまで動くストロークを有する油圧ジャッキを水槽の一端に固定する。それからモデル氷盤をその油圧ジャッキの前にとりつけ、何種類かの速度でもってそれを水平方向にゆっくりと押す。1つの速度については一定に保ち、それを0.4cm/s, 0.9cm/s, 1.7cm/sの3種類とした。このことは、移動速度によって、どの程度、氷力に影響を及ぼすのか考察するためである。ここで、氷力とはジャッキで押す力に相当する。

油圧ジャッキとモデル氷盤の間には鉛直方向に比較的、拘束力がない"FREE"を介した。それで、油圧シリンダー内の油圧を測定することによって氷力を測定し、同時にモデル氷盤が動き出してから水平距離である"Gouging distance" およびそれによって削られる深さ"Gouging depth"をも測定した。

厳密に言えば、モデル氷盤が徐々に押されると、砂の性質の変化すなわち内部摩擦角、間隙水圧、砂の相対密度などが幾分変化すると思われるが、これらを考慮するのは非常に難しく、複雑であるため、すべての位置においてこれら一定と仮定し、理論的な氷力式を導いた。

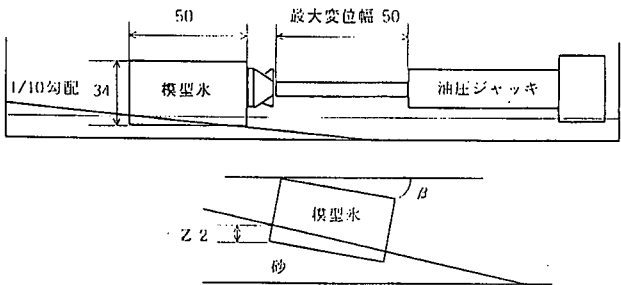


図-1 実験装置の概略図

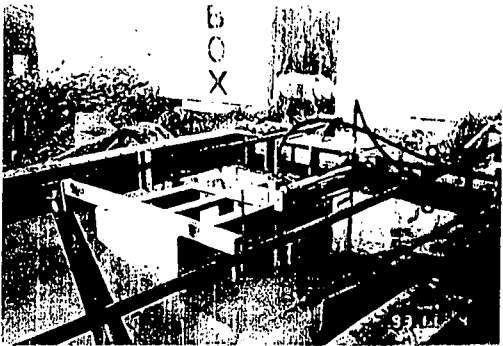


図-2 実験中の様子

3 力学モデルによるIce Gougingに伴う氷力式の理論的な誘導

図-3に示したようにモデル氷盤が一定の速度で動いているとすればGouging Distanceが増加するにつれてある種の抵抗力を受け氷力も増加する。その抵抗力とはモデル氷盤前面部および側面部に作用する土圧、底面部における地盤反力、その地盤反力に動摩擦係数を乗じた動摩擦力(底面摩擦項)、そしてモデル氷盤自身に作用する浮力などである。

ここで、モデル氷盤はある関数 $\xi(x)$ いわゆる"Gouging curve"に沿って運動するものとする。もし $f(x)$ がどのように振る舞うか分かればこのような抵抗力を処理することによって氷力を導くことができると確信する。しかしながらこの"Gouging-curve"は後で述べるように非常に複雑である。したがって我々はこの $\xi(x)$ を実測値を用い最小自乗法により決定する。

我々は次に示すような方法により氷力式を導出する。

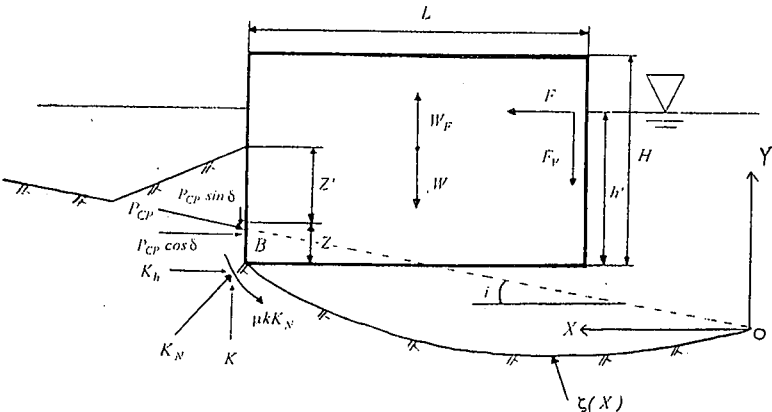


図-3 Ice Gouging の力学モデル

モデル氷盤に作用する外力と非保存力のなす仕事量はそれ自体の力学的エネルギーの増加に等しいとすれば(1)式を得る。

$$\int_S \{ F_S - (\Sigma N)_S \} ds = \Delta E \quad (1)$$

ここに、 ΣN ; 氷盤に作用する抵抗力の総和
 F ; 油圧ジャッキで押す力

(1)式を簡単にすれば(2)式を得、($V_0 = \text{CONST}$) その力学的エネルギーの増加は(3)式となる。

$$\int_X \{ F_X - (\Sigma N)_X \} dX = \Delta E - \int_Y K(X, \zeta(X)) d\zeta \quad (2)$$

$$\Delta E = W\zeta(X) + \frac{1}{2} MV_0^2 \left\{ \left(\frac{ds}{dX} \right)^2 - \left(\frac{ds}{dX} \right)_{X=0}^2 \right\} \quad (3)$$

ここに、 W はモデル氷盤の重量

また、次式を考慮して(2)式より x 軸方向について整理すれば(5)式が得られる。

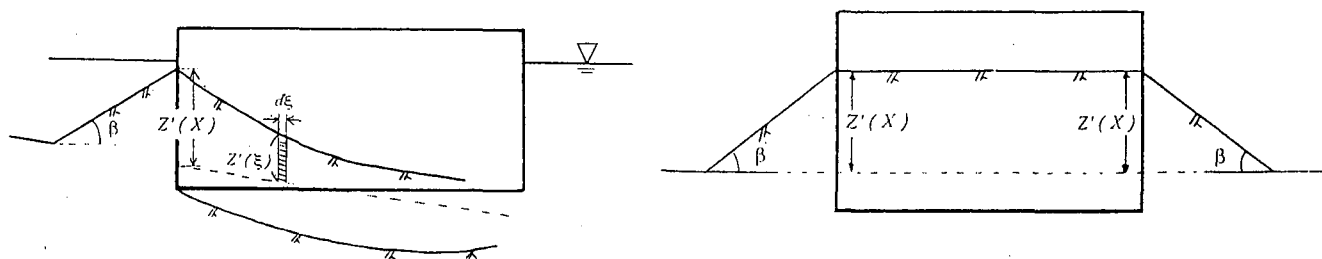
$$\frac{ds}{dX} = \sqrt{1 + (d\zeta/dX)^2} \quad (4)$$

$$F = F_X = (\Sigma N)_X - K \frac{d\zeta}{dX} + \frac{d\zeta}{dX} \left(W + MV_0^2 \frac{d^2\zeta}{dX^2} \right) \quad (5)$$

(5)式により氷力 $F=F(X)$ が既知であればこの方程式をとくことにより $\zeta(x)$ または "Gouging Depth" が分かる。逆に $\zeta(x)$ が与えられれば $F=F(X)$ を知ることができる。しかしながら $\zeta(x)$ に考えるとき、モデル氷盤が運動するときその前面部における非線形の関係となるであろう連続的な砂の力学特性の変化、移動速度、ないしはモデル氷盤の形状に依存するため、非常に複雑である。したがって残念ながら理論的には $\zeta(X)$ の解析は困難なため、実測により曲線 $\zeta(x)$ を最小自乗法 (6 次まで) で解析し (測定には縦軸に偶然誤差のみを発生しているとしている。)、氷力の計算式を提案した。

次に、氷盤に作用する種々の抵抗力 (ΣN) x についてのべる。

3.1 モデル氷盤前面部における砂の堆積高 " Z' " の検討



(a) 横から見た図

(b) 前面から見た図

図-4 堆積高算定のためのモデル図

砂の圧縮、間隙の減少がないとして、モデル氷盤によって押し退けられた砂の量はその前面部に堆積する量と横に流出する量との和に等しいと仮定し、砂の水中安息角はいたるところで一定と仮定すれば、その関係は近似的に次式で表される。(図-4 参照)

$$\frac{1}{2} Z'^2(X) \frac{L}{\tan \beta + \tan i} = L \int_0^X \{ \xi \tan i - \zeta(\xi) \} d\xi - \cot \beta \int_0^X Z'(\xi) d\xi \quad (6)$$

上式の解は容易に(7)式で表される。

$$Z'(X) = \sqrt{e^{AX} \left\{ -2 \int e^{-AX} \{ (X \tan i - \zeta(X)) (\tan \beta + \tan i) dX + C \right\}} \quad (7), \quad A = \frac{2 \cot \beta (\tan \beta + \tan i)}{L}$$

3.2 喫水深 "h'"

"h'"は(8)式で示される。

$$h' = h_0 - \zeta(X) \quad (8)$$

ここに、 h_0 :初期喫水深

3.3 地盤反力 "K"

鉛直方向の運動方程式より(9)式を得る。

$$MV_0^2 \frac{d^2\zeta}{dX^2} + K \left\{ 1 \pm \frac{d\zeta/dX}{1+(d\zeta/dX)^2} \right\} - W + \gamma wh' L^2 \pm F_V + P_{CP} \sin \delta = 0 \quad (9)$$

また(9)式において $\zeta(x)$ の微分係数の符号に注意し、Kについてあらわせば、

$$K = \left(W + F_V - \gamma wh' L^2 - MV_0^2 \frac{d^2\zeta}{dX^2} + P_{CP} \sin \delta \right) / \left(1 - \frac{d\zeta/dX}{1+(d\zeta/dX)^2} \right) \quad \left(\frac{d\zeta}{dX} \geq 0 \right) \quad (10.a)$$

$$K = \left(W - F_V - \gamma wh' L^2 - MV_0^2 \frac{d^2\zeta}{dX^2} + P_{CP} \sin \delta \right) / \left(1 + \frac{d\zeta/dX}{1+(d\zeta/dX)^2} \right) \quad \left(\frac{d\zeta}{dX} \leq 0 \right) \quad (10.b)$$

3.4 モデル氷盤に作用する抵抗力 "(ΣN) x"

"ΣN"は(11)式で現される。

$$(\Sigma N)_x = P_{CP} \cos \delta + \mu k \left(2P_s + \frac{1}{1+(d\zeta/dX)^2} K \right) + K \frac{d\zeta}{dX} \quad (11)$$

3.5 モデル氷盤前面部に作用する受動土圧 "P_{CP}"

受動土圧はクーロン土圧とし、土圧係数((14)式)に含まれている内部摩擦角はモデル氷盤が水平方向に徐々に押されるとき、間隙水圧あるいは有効応力の変化にともない、影響を受けると考えられるが、非常に複雑であるため、これらの影響を無視する。

Gouging Depth "Z", 受動土圧は(12), (13)式で現される。

$$Z = X \tan i - \zeta(X) \quad (12)$$

$$P_{CP} = \frac{1}{2} \gamma H^2 L K_p \quad (13)$$

ここに、

$$K_p = \frac{\cos^2(\alpha + \phi)}{\cos^2 \alpha \cos(\alpha - \delta) \left[1 - \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi + i)}{\cos(\alpha - \delta) \cos(\alpha - i)}} \right]^2} \quad (14)$$

$$H = \frac{Z}{1 - \tan i \tan \alpha} \quad (15)$$

$$\alpha = \cot^{-1} \left\{ (Z/Z')^2 (\tan \beta + \tan i) + \tan i \right\} \quad (16)$$

3.6 モデル氷盤側面部に作用する土圧 "P_S"

3.5で議論したように同じように(17)式で与えられる。

$$P_S = \int_0^{Z \cot i \epsilon \tan i} \int_0^\pi \gamma \eta K_{PS} d\eta d\epsilon \quad (17)$$

$$K_{PS} = \tan^2(\pi/4 + \phi/2) \quad (18)$$

3.7 モデル氷盤後方に作用する摩擦力 "FV"の検討

"FREE"とモデル氷盤との間に働く摩擦力について検討する。

このとき、B点に関するモーメントの釣合により、

$$F_V = \frac{1}{L} \left[\gamma w h' \frac{L^3}{2} - \frac{LW}{2} - \frac{H}{3} P_{CP} \cos \delta + M V_0^2 \frac{d^2 \zeta}{dX} \frac{L}{2} - M_B + \{h - \zeta(X)\} F \right] \quad (19)$$

ここに、

$$M_B = \int_0^{Z \cos i \tan i} \int_0^{\epsilon \tan i} \frac{\epsilon \tan i}{3} \gamma \eta K_{PS} d\eta d\epsilon \quad (20)$$

これらを用いて、結局(5)式を用いることにより氷力が計算される。

4. 結果および考察

氷力に関する計算値と実験値との比較を斜面勾配が1/10については図5(a)～(c), および1/5のものについては図6(a)～(c)に示す。また、各々の下にはそれに対応する $\zeta(X)$ の実測値と計算値に用いた最小自乗近似曲線を示す。

まずSandy Type 1 と Sandy Type 2 について見てみるととくに注目すべきちがいは見られなかった。一般に粒径の大きな砂は透水係数が大きく、Gouging Distance の増加にともなう有効応力の増加率は粒径の小さなものよりも大きくなると考えられる。内部摩擦角については粒径が大きくなると小さいときに比べて小さい。したがってそのほかの要因も含めて粒径の違う砂によるIce Force の影響はきわめて予測しがたい。実際、実測値において両者のばらつきは多少あるものの、その相関関係を見いだすまではいかない。計算上でも実測値に頼ると (X) 以外にはこれらを示すパラメーターをあらわには含んでいない。この $\zeta(X)$ は図をみても、明かなようにSandy Type 2, すなわち粒径の大きいほうが全体的に小さく、すなわち砂がよく削れていることを示している。しかしながら、上述したように、必ずしもSandy Type2 の方が氷力が大きくならないのは、 $\zeta(x)$ のその位置における微分係数にも大きく依存している(結局は砂の性質なのだが)。したがって、また注意すべきことは、ここでモデル氷盤は微妙に傾きながら運動するがその範囲は $0 \sim 3^\circ$ であり計算では水平と近似している。

計算値と実測値の比較についてほぼ一致しているものものが多かった。多少、ズレがあるのは前述したように砂の内部摩擦角の変化、間隙水圧の減少による有効応力の増加を考慮していないこと、砂の相対密度が一様でないこと、計算上、 $\zeta(x)$ を厳密に再現していないこと、すなわち、横軸 X にも偶然誤差を発生しており、この最小自乗近似が適切でない可能性があること、などである。

本研究では実測値 $\zeta(X)$ の補助を受け、氷力 F を理論的に誘導し、実測値と計算値とを比較検討した。しかし、残念ながら現段階では、これを、現場で用いることは困難である。前述したように実用化するには、我々は F と $\zeta(X)$ を同資格、同程度に予測しなければならない。したがって、将来的には $\zeta(X)$ をも理論的、あるいは系統的実験で明らかにしなければならず、これからの課題である。本研究はその基礎的研究に値するであろう。

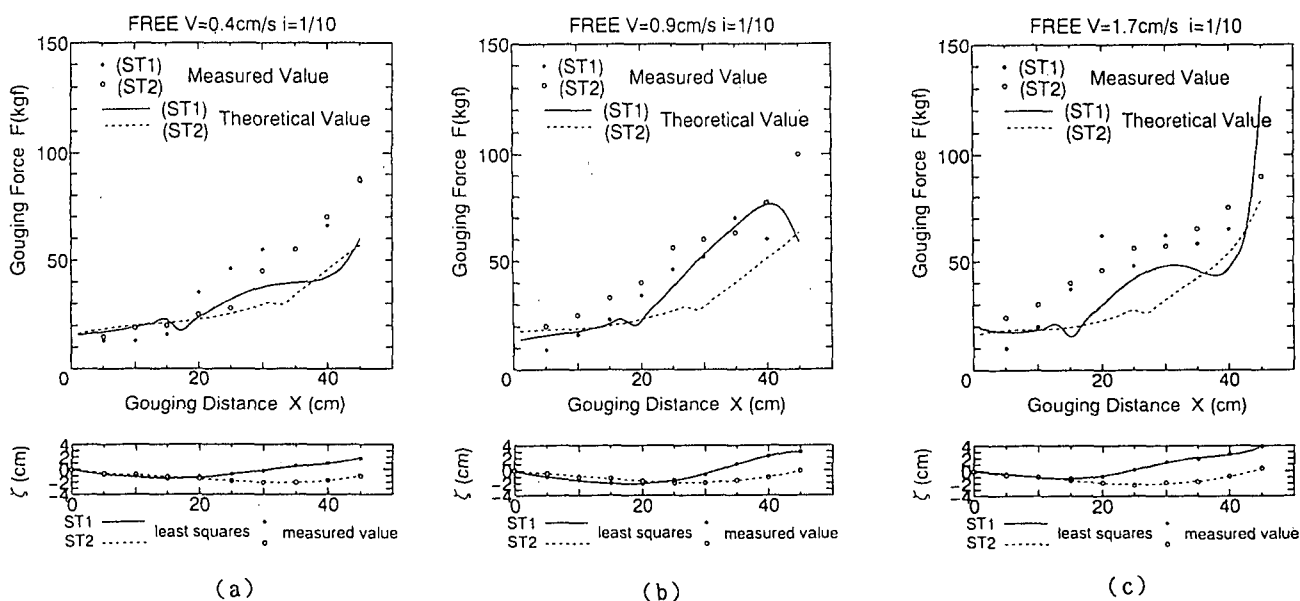


図-5 計算値と実測値との比較(勾配 1/10)

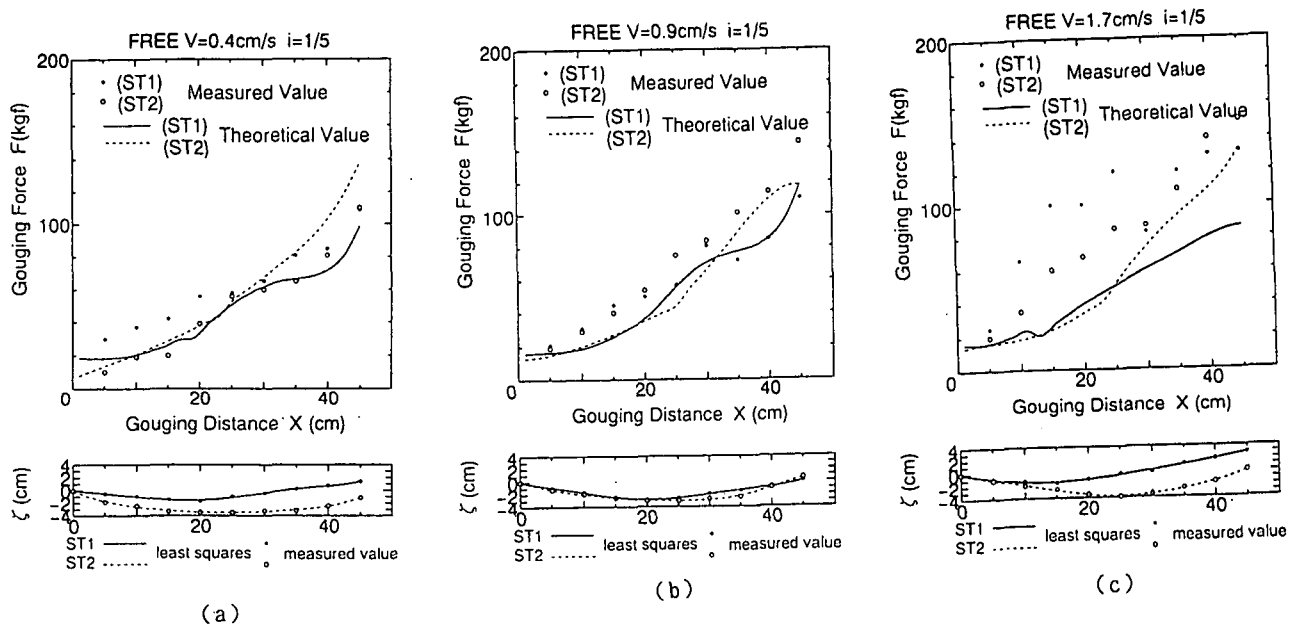


図 - 5 計算値と実測値との比較 (勾配 1/5)

5. 結論

- 1) 実験によりIce Gouging の実態を把握し、それにとまうIce ForceとGouging Distance との関係を明らかにした。この成果は寒冷地域における石油や天然ガス採掘施設と陸上間のパイプライン埋設深さの決定、防氷構造物の設計にも役立つと思われる基礎的研究を行った。
- 2) 本実験において2種類の粒径の違う砂を用いたがIce Forceにおいて両者とも大きな違いが見られなかった。
- 3) モデル氷盤移動時における砂の連続的な力学的性質の変化を無視しているが計算値と実験値とほぼ一致するものは多く、オーダー的にはこの影響を無視できる。
- 4) 氷力推定には $\zeta(X)$ の振る舞いに大きく依存する。

参考文献

- 1) 国松他、Ice Gouging による底棲生物の被害について、寒地シンポジウム '93
- 2) 川森他、海氷盤と海底との相互作用について、寒地シンポジウム '92
- 3) 木岡他、Ice Gougingの力学モデル、寒地シンポジウム'94
- 4) K.K.Sukhorukov and V.N.Smirnov, IN SITU INVESTIGATION OF THE SHORE-ICE-GROUNDED HUMMOCK INTERACTION, IAHR Ice Symposium 1994
- 5) 木岡他、Ice Gouging に関する研究、第10回オホーツク海と流氷/氷海の民に関する国際シンポジウム