

Ice Gougingのモデル化とその適用性に関する研究

Mechanical Model of Ice Gouging and Its Applicability

木岡信治* 寺井由利子** 西植秀如*** 松田敦美**** 田畑真一***** 佐伯浩*****
 Shinji Kioka, Yuriko Terai, Hideyuki Nishimaki, Atsumi Matsuda, Shinichi Tabata, Hiroshi Saeki

The coastal area facing the sea of Okhotsk in Hokkaido is annually covered with drifting ice. When these ice floes with a deep draft move toward the shore, they gouge sandy sea bottoms. Due to this ice gouging, marine resources along the shallow sandy coast are damaged. For example, sea shells, buried structures, pipelines. In this study, the Authors understand the mechanism of ice gouging and obtain basic knowledge necessary to take preventive measures in future against damage by ice floes.

Keywords : Ice gouging, Sea Ice, Drifting Ice

1. はじめに

Ice Gouging と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砂地盤を削っていく現象である。この作用により、海産資源（ウニ等）が陸上に運ばれたり、海氷自体の自重で圧死させたりする被害を及ぼしたり、埋設構造物などを破損させたりする被害が報告されている。著者等はこのメカニズムを明らかにするため簡単な力学モデルを構築し、実験的、理論的にこの現象を研究してきた。従来から海氷盤を直方体として取り扱ってきたが、本研究は後に示すように氷盤前面部を傾斜させ、実在に近いような台形状の模型氷盤を取り扱った。それによって砂地盤に及ぼす作用力（氷力）や掘削面形状がどのように変化するかを考察するためである。これにより Ice Gouging のメカニズムを把握し、将来的には上述した被害の対策を考える上での基礎的な知識を得ることを目的とする。

2. 研究方法

実験は図-1 に示すような装置を用いて行った。水槽の底には一定勾配（1/10, 1/5の2種類）となるように砂を敷き詰める。実際の海底勾配はこれより緩やかであるが、よりはっきりと Gouging させるためあえて急勾配とした。用いた砂は、以下に示すとおりである。また水平方向に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し、後に示すようなモデル氷盤をその油圧ジャッキの前に取り付け、一定速度

（0.4cm/s, 0.9cm/s, 1.7cm/sの3通り）で水平方向にモデル氷盤を押す。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、さらに“FREE”とジャッキとの間にはロードセルを介した。そこで、ロードセルにより、氷力を測定し（ジャッキで押す力）、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“Gouging Depth”をも測定した。ここで氷盤は多少回転しながら運動するがその回転角は微小なため近似的に水平としている。

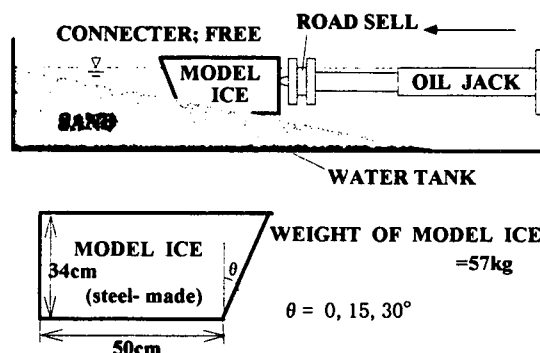
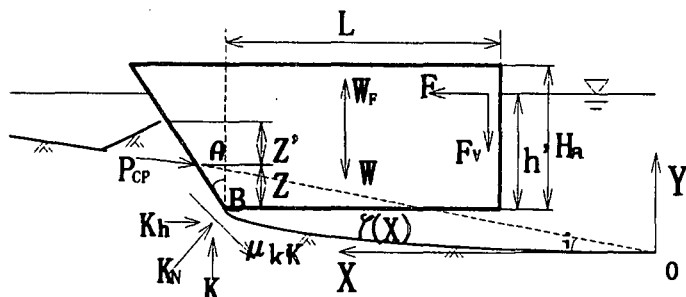


図-1 実験装置の概略図

- * 日立造船(株)
- ** 日本建設コンサルタント(株)
- *** 株島田建設
- **** 北日本港湾コンサルタント(株)
- ***** 北海道パブリックコンサルタント(株)
- ***** 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)

用いた砂
粒径 0.147mm
内部摩擦角 37°
安息角 34°
水中単位体積重量 0.0016kgf/cm ³

3. 簡単な力学モデルを用いた氷力に関する計算式の導出



記号の説明

Z' ; 砂の堆積高, Z ; Gouging Depth, W ; モデル氷盤の重量, W_F ; 浮力, K ; 鉛直方向の地盤反力
 F ; 氷力, F_v ; モデル氷盤とコネクターとの鉛直方向摩擦力, h' ; モデル氷盤の喫水深
 H_h ; モデル氷盤の高さ, μ_k ; モデル氷盤と砂との動摩擦係数, P_{cp} ; 受動土圧

図-2 Ice Gouging の力学モデル

図-2に示したようにモデル氷盤に様々な外力が作用する。モデル氷盤前面部及び側面部に作用する土圧、底面部における地盤反力、動摩擦力、モデル氷盤全体に作用する浮力などである。また連続的な砂の内部摩擦角の変化、砂の相対密度の不均一性、透水性に伴う諸問題は、複雑であるためここでは無視する。

今、モデル氷盤はある関数 $Y=\zeta(X)$ (ここではGouging-Curveと呼ぶことにする) に沿って運動するものとする。この ζ は実測値をもとに最小2乗法により6次曲線とした。このGouging-Curveが確定すればモデル氷盤について (1) 水平方向の運動方程式 (2) 鉛直方向の運動方程式 (3) 氷盤の安定条件 より氷力 F を導出することができる。この時 F は実験においては油圧ジャッキで押す力に相当する。

3.1 氷盤前面部に作用する土圧 " P_{cp} "

氷盤前面部に作用する土圧は、受動土圧でありクーロンのモデルを用いると、(1)式のように表される。ここに、氷盤前面部の砂は、2段階に傾斜している。

$$P_{cp} = \frac{1}{2} \gamma H^2 B K_p \quad (1)$$

ここに、

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

$$\alpha = \cot^{-1} \left[\frac{\{ \tan(\beta - \theta) + \tan(i + \theta) \} \cos i + (z'/z)^2 \sin i}{(z'/z)^2 \cos i + \sin \theta \{ \tan(\beta - \theta) + \tan(i + \theta) \}} \right]$$

$$H = \frac{Z \cos(i + \theta) \cos i}{\cos(i + \alpha) \cos \theta}$$

ここに、 B は氷盤の幅、 δ は氷盤と砂との摩擦角である。

3.2 氷盤側面部に作用する土圧“ P_s ”

氷盤側面部に作用する土圧は場合により、主動、静止、受動土圧となり得るが、ここでは大きめの受動土圧を採用する。

$$P_s = \gamma K_{ps} \left[\int_{\kappa}^X \int_0^{Z'(\xi)} \eta d\eta d\xi + \int_X^{X+(Z+Z')\tan\theta} \int_{\xi \cot\theta}^{Z'(\xi)} \eta d\eta d\xi \right] \quad (2)$$

ここに、 κ は $Z'(\kappa) = 0$ を満たす。

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

また Gouging Depth “ Z ”は以下で表される。

$$Z = X \tan i - \zeta(X) \quad (3)$$

ここに、 $\zeta(X)$ は Gouging-Curve であり、図-2においてB点の軌跡で表せるものとする。

3.3 氷盤移動時における砂の堆積高“ Z' ”

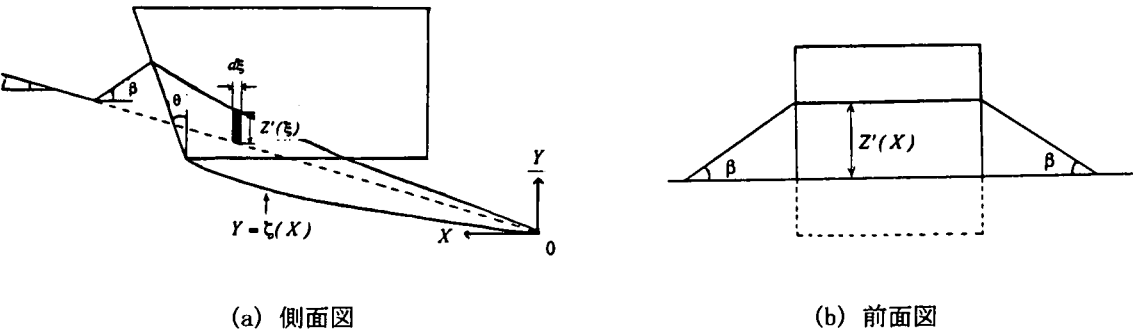


図-3 砂の堆積高算定のためのモデル

砂の圧縮、間隙の減少がないとし、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側面部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、その関係は次式で表される。

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \frac{\cos(\theta - \beta) \cos(i + \theta)}{\sin(\beta + i) \cos^2 \theta} Z'^2(X) B \\ &= B \left[\frac{1}{2} Z'^2 \tan \theta (1 - \tan \theta \tan i) + \int_0^X (\xi \tan i - \zeta(\xi)) d\xi \right] - \cot \beta \int_0^X Z'(\xi) d\xi \quad (4) \end{aligned}$$

ここで、

$$N = \frac{B}{2} \left[\frac{\cos(\theta - \beta) \cos(i + \theta)}{\sin(\beta + i) \cos^2 \theta} - \tan \theta (1 - \tan \theta \tan i) \right]$$

とおくと、(4)式的一般解は、

$$Z'(X) = \frac{1}{N} \left[\exp \left\{ -\frac{\cot \beta}{N} X \right\} \left[\int \exp \left\{ \frac{\cot \beta}{N} X \right\} (X \tan i - \zeta(X)) + C \right] dX \right]^{1/2} \quad (5)$$

3.4 水平方向の運動方程式

氷盤についての運動方程式は次式で表される。

$$F - P_{cp} \cos(\alpha - \delta) - \mu_k (2P_s + K) - K \frac{d\zeta}{dX} = 0 \quad (6)$$

3.5 鉛直方向の運動方程式

氷盤は、水平方向には速度一定だから加速度は0だが、関数 $\zeta(X)$ に沿って運動しているとしているので鉛直方向には加速度が発生する。したがって、

$$-MV_0^2 \frac{d^2 \zeta}{dX^2} + K \left(1 \pm \mu_k \frac{d\zeta}{dX} \right) - W + \left(h'B + \frac{1}{2} h'^2 \tan \theta \right) B \gamma_w \pm F_v - P_{cp} \sin(\alpha - \delta) = 0 \quad (7)$$

ここに h' は喫水深であり、 h_0 を $X=0$ における初期喫水深とすると次式で表される。

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

3.6 氷盤後方に作用する氷盤とフリーの摩擦力 “Fv”

前述したように、氷盤は微妙に回転しながら運動するが、水平と仮定し、B点に関するモーメントのつり合いより、次式が得られる。

$$F_v = \frac{1}{L} \left[\left(h'B + \frac{1}{2} h'^2 \tan \theta \right) B \gamma_w L_G - W L_G - \frac{H}{3} P_{cp} \cos(\alpha - \delta) - M V_0^2 \frac{d^2 \zeta}{dX^2} L_G - M_B + (h - \zeta(X)) F \right] \quad (9)$$

ここに、 M_B は側面土圧が及ぼすB点に関するモーメントであり、 L_G は氷盤の重心位置(B点から)である。

以上、未知量として、 F 、 K 、 F_v の3つであり、式(6)、(7)、(9)よりすべてが定まり、したがって氷力 F を算定することができる。しかしながら、 $d\zeta/dX < 0$ のとき地盤反力 K の分布あるいは、作用位置も未知量になり得るが、近似的に $d\zeta/dX > 0$ のときと同一としている。

4. 実験結果及び考察

図-4 (a)～(c)には斜面勾配が1/5、(d)～(f)には斜面勾配が1/10を示し、それぞれ一つのグラフには氷盤前面の傾斜角 $\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ における結果を比較した。ここでプロット点は実測値、曲線は計算値を表す。また各々のグラフの下にはそれに対応する Gouging-Curve を示している。 $\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ における氷力の比較であるが、多少ばらつきがあり明らかな相互関係が確認されず系統的大差はなかった。一方ではそれに対応している Gouging-Curve は、ほぼ系統的な関係が確認され、 θ が大きくなるにつれ $\zeta(X)$ が大きくなり、あまり削られない傾向にある。結局 $\zeta(X)$ が異なるにもかかわらず氷力において系統的大差がないのは、その氷盤のなす仕事量を極力最小ならしめるために $\zeta(X)$ を必然的に選定しているとも考えることができるであろう。著者等は、実測値 $\zeta(X)$ の補助により氷力式を導出したが、上述したことが事実であれば、さらなる砂の力学特性のパラメータを導入することにより、 $\zeta(X)$ をも理論的に誘導することがであろう。また氷力が多少、波をうって増加しているのは $\zeta(X)$ の形状にきわめて密接に関係している。実際、 $\zeta(X)$ の勾配が(その点での)大きいと氷力が若干、急に増加し、 $\zeta(X)$ の勾配が鈍くなったり、負になったりすると、氷力が若干落ち込むことが確認された。これは理論上でも説明することができるが、計算上でそのところを厳密に再現していないのは、実測値 $\zeta(X)$ 、及びその最小自乗曲線が不適切であること、または厳密に再現していないことにあるであろう。

次に実測値と計算値の比較であるが、勾配 $i = 1/5$ が比較的一致しているものが多かったが、 $i = 1/10$ の場合は実測値のほうがやや大きく、あまり一致しなかった。これは、前述したように、 $d\zeta/dX < 0$ のときの地盤反力 K の作用位置が不明なうえ、氷盤の回転角を無視しているためだと考えられる。また、① 氷盤移動時における連続的な砂の力学特性の変化を無視していること ② 氷盤と砂との動摩擦係数が一定でないこと ③ Gouging-Curve $\zeta(X)$ を厳密に再現していないこと等である。したがって、今後、計算式の改良が望まれる。同時に Gouging-Curve、 $\zeta(X)$ の理論的な導出あるいは系統の実験により、この曲線のふるまいを明らかにしなければならず、今後の課題であり、本研究はあくまで基礎的なものである。

5. まとめ

本研究で得られた結果をまとめると以下のようである。

- (1) 氷盤前面の傾斜角 θ により削られる深さが異なり、 θ が大きいほど砂が削られない傾向にある。
- (2) 氷力において、 θ の違いによる系統的な違いが見られなかった。
- (3) 氷力において、この程度の氷盤の移動速度の変化に対し、多少ばらつきはあるものの系統的な違いは見られなかった。
- (4) 氷力の計算値と実測値との比較において、砂の勾配が1/10のとき、やや実測値の方が大きく、あまり一致したとは言えないが、1/5のときは、ほぼ一致した。
- (5) 氷力の実測値において、Gouging-Curve または、その位置での曲線勾配(微分係数)に大きく依存する。

参考文献

- (1) 国松他(1993) : 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講演論文集 pp381-386
- (2) 木岡等(1995) : Ice Gouging のメカニズム、第11回海洋開発論文集vol.11 pp223-228
- (3) S.Kioka & H.Saeki(1995), "Mechanisms of Ice Gouging"; Proceeding of Fifth International offshore and Polar Engineering conference (ISOPE) Vol.2, pp398-402

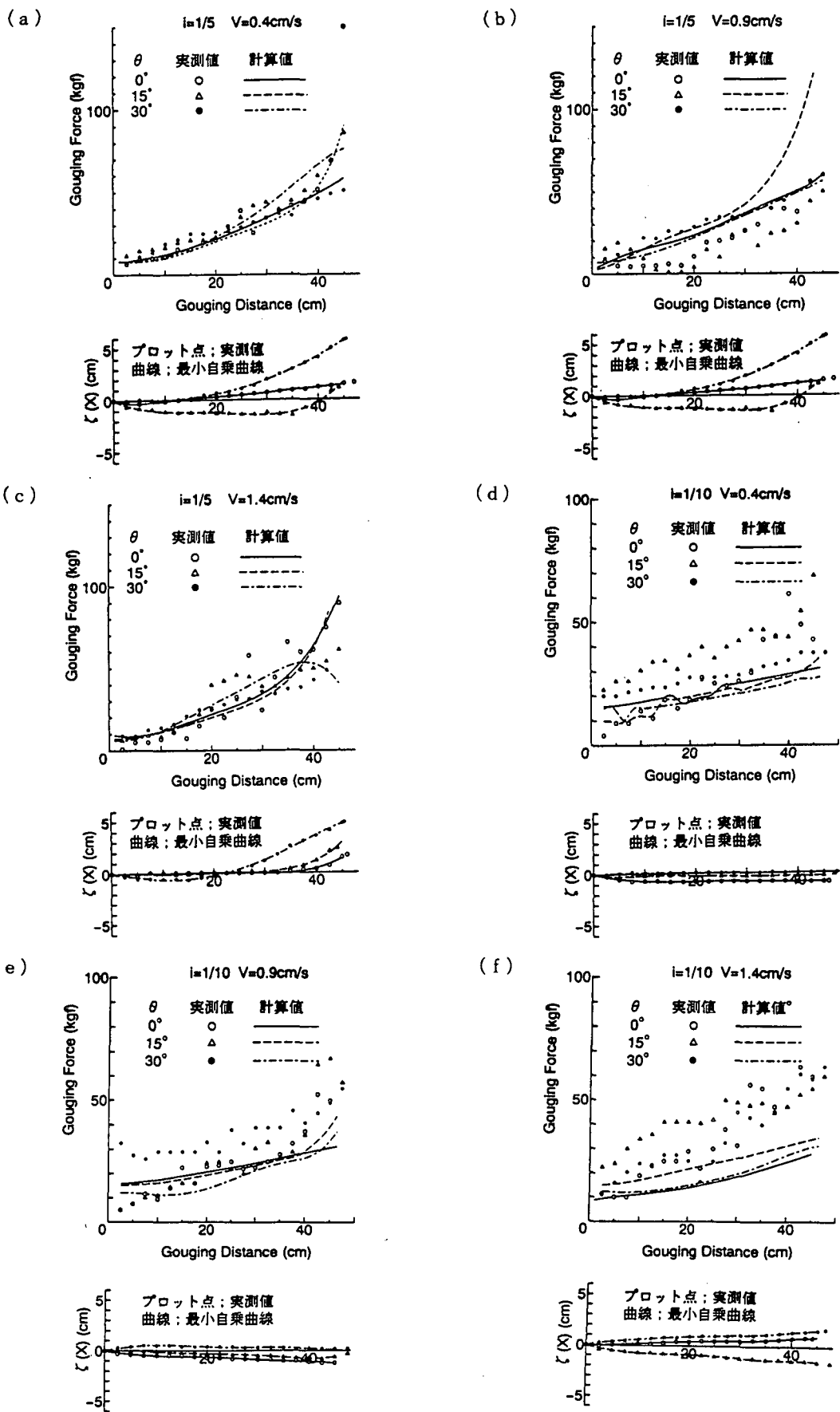


図-4 氷力の実測値と計算値との比較、及び掘削面形状との関係