

Ice Scour による氷の挙動・メカニズム及び 氷荷重に関する基礎的研究

STUDY ON THE BEHAVIOR OF ICE, MECHNISMS AND ICE FORCES DUE TO ICE SCOURING

木岡信治¹・安永喜勝¹・西槇秀如²・佐伯浩³

Shinji KIOKA, Yoshikatu YASUNAGA, Hideyuki NISHIMAKI and Hiroshi SAEKI

¹学生会員 北海道大学大学院工学研究科(〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

²正会員 島田建設株式会社 工事部 (〒093-0032 網走市港町 8 番地 1)

³正会員 工博 北海道大学大学院工学研究科 教授(〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

Ice scouring is a phenomenon which occurs when moves in contact with seabed. It has been reported to have caused damage to communication cables and water intake pipelines. Therefore, it will be very important to estimate rational maximum scour depth due to complicate behavior of ice, and will also be very important to evaluate forces acting on sea bed and stress that is transmitted via the seabed and deformation of soil.

We have developed the rational experimental device system as compared to previous device system. Under the renewal conditions, we conducted a lot of test series, and we revealed relationships between ice forces and behavior of ice, variations of its behavior due to varies condition (attack angle, travelling velocity). And we also revealed the probability distribution of some random variable under the same experimental condition.

Key words : Sea ice, ridge keel, ice force, scour curve, scour depth

1. はじめに

Ice Scour とは風や流れ、コリオリ力等の環境力により沖合いの氷野から押された氷(Iceberg, drifting hummock, pressure ridge, stumkha)が海底地盤に接触し、削っていく現象であり、大きな氷荷重が海底地盤に作用する。この現象により各種ケーブル、取水パイプラインの破損等の被害例が報告されている¹⁾²⁾³⁾。したがって、これらの現象が起り得る領域に埋設構造物が存在すれば、その動的、静的な力によってパイプラインの変形、破断、油漏れ等の深刻な被害をもたらすことが予想されるが、未だこの現象に対処すべく埋設構造物の設計指針が体系化されていないのが現状である。

本研究は特に氷の挙動特性に立脚し、系統的模型実験によりその基本的なメカニズムを明らかにすることを目的とする。この際、従来の実験方法・条件⁴⁾をさらに改良し、実海域に近づけるよう努めた。また Ice Scouring における測定量 (bulldozing force, scour depth 等) の確率分布特性、Keel の形状、速度による測定量の変動特性、力学モデルを用いたシミュレーション等を通じ、Ice scouring という現象を追求するものである。

2. 実験方法及び実験条件

実験は図-1 に示す装置を用いて行った。まず、60cm の

幅を有する水路に一定勾配 (1/50) となるように砂 (表-1 参照) を敷き詰め、鋼製モデル Keel (3 種類の attack angle) を最大長 5m のピニオンラックを走行する台車で水平方向に一定速度 (各 4 種類) で押すというものである。また、従来の研究により⁴⁾、氷荷重(bulldozing force)の局部変動は氷の掘削面形状の局部変動に応答するという結果を考慮し、モデル Keel は回転は許さないが、鉛直方向には自由に運動できるよう走行台車との間にはローラーを配備し、モデル Keel の重心位置の鉛直方向の相対変位量を変位計により計測した。また、モデル Keel とローラ当たり板との間にロードセルを介し水平方向の荷重 F (台車で押す力) を計測した。モデル Keel の水平変位は、走行台車の速度設定と計測データ処理ソフトウェアによる経過時間との関係、あるいはモニタリングによって、若干の補正を施して算出した。

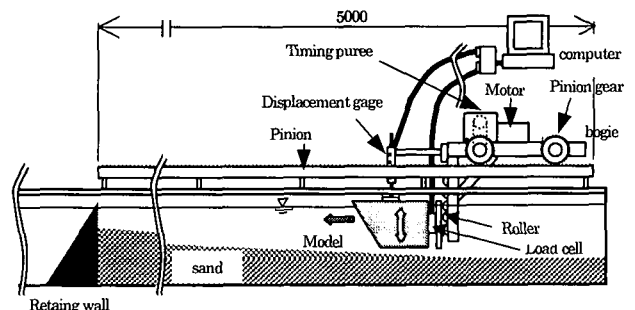


図-1 実験装置の概要図

使用したモデル Keel は図-2 に示すように、スチール製（幅 30cm）で attack angle（水平から計った keel の傾斜角）が 3 種類（ $\theta=30,45,90\text{deg}$ ）のものを用いた。これは attack angle の変化による、氷の挙動変化、氷荷重の変化を分析するためである。これらの 3 種類のモデルは重量（本体、ロードセル、ローラ当たり板）、初期喫水深（ $20\text{cm}\pm 1\text{cm}$ ）が極力同一となるよう設計し、ウェイトまたはフロートで調整した。また、使用した砂は市販されている砂質土を用いた（桂砂）。表-1 にその性質を示す。実海域では少なからず、シルト質や粘性土において Scour の跡が発見され（逆にシルト、粘土であるから跡が残っている）、他の研究でもシルト、粘土を用いた実験、シミュレーションが行われている場合が多いが、本研究は、①多数の実験ケースを必要とする氷の基本的挙動の分析、したがって②取り扱い・管理の簡便さ、③極力同一の土の条件で実験を行えること、を念頭に、まず砂質地盤に Keel が貫入することに想定し、限定した。従って③よりできるだけ同一の土の条件で行うため、1 ケースの実験が終了するごとに、すきで慎重に砂を整理し、十分時間をおいて次の実験ケースに備えた。

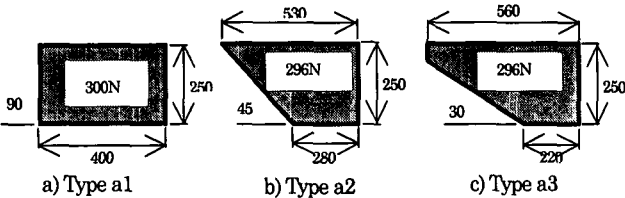


図-2 モデル Keel

表-1 使用した市販桂砂

Mean grain diameter	0.147mm
Angle of internal friction(CD.tests)	37°
Submerged angle of repose	32°
Saturated unit weight	15.68kN/m ³

また、モデル Keel の移動距離(Scour length)は最大で 5m（最大ラック長）であるが、削られた砂が水面上に出てしまったり、モデル Keel の挙動の安定性が損なわれる可能性を考慮し、事実上の測定領域を 3m とした。上述したように本実験は従来の Kioka and Saeki⁴⁾の実験を更に発展させ短所を改善したものであるが、大きな相違点を表-2 に示す。下表より、本実験は従来型の実験と比較し、条件は現実に近づいたといえる。

表-2 従来の実験条件との比較

	Kioka and Saeki (1999)	Author(2000)
氷の移動速度	0.4~1.4cm/s	1~20cm/s
Attack angle	60, 75, 90 (deg)	30, 45, 90 (deg)
移動距離	50cm	300cm
海底勾配	1/10, 1/5	1/50
駆動システム	Oil jack system	Pinion rack system

3. 実験結果及び解析結果

計測値は、多少のバラツキが予測されたため、同一ケース毎に、実験を複数回繰り返し行われた。表-3 に本実験で行った項目とその繰り返し回数(n)を示す。

表-3 測定項目および測定回数

実験名	項目		測定回数	
	Attack angle	Velocity	$\zeta(Z)$	F
alv1	90 (deg)	1(cm/s)	5	5
alv2	90(deg)	5(cm/s)	29	22
alv3	90(deg)	10(cm/s)	6	6
alv4	90(deg)	20(cm/s)	7	6
a2v2	45(deg)	5(cm/s)	5	4
a3v2	30(deg)	5(cm/s)	5	4

上記 ζ (scour curve) と F (bulldozing force) の測定回数の違いは予めトラブル等の原因で不備なものを省いたためである。また、1 ケースのみ多数回測定した (alv2)。

(1) 測定量の確率分布特性

上述したように、1 ケース(alv2)について多数回測定し、その測定量 F_{max} , F_{mean} , Z_{max}/h_0 , Ω (測定領域($0 < X < L$, $L=300\text{cm}$)) の確率分布特性を調べた。

ここに、
 F_{max} ; F の最大値 ($L=300\text{cm}$), F_{mean} ; F の時間平均、 Z_{max}/h_0 ; maximum scour depth を初期喫水深 h_0 で無次元したもの、 Ω ; Keel によって削られた砂の量を、Keel が領域 $0 < X < L$ で水平に移動すると仮定したとき削られる砂の量で除して無次元化したもの。(概念的には Z の時間平均を示す)。

まず、一例として、図-3 に F_{max} の実測値を対数正規確率紙にプロットした。これはほぼ直線性を有しており、 F_{max} は対数正規分布に従うといえる。また有意水準 5% の χ^2 検定を行ったところ同様な結果が得られた。

同様に、確率変数 F_{mean} , Z_{max}/h_0 , Ω を検定したところ対数正規分布に従うという結果が得られた。従って、他のケースの測定量も対数正規分布に従うと仮定し、代表値として、平均 μ 及びメジアン X_m を採用する。また母数の推定には積率法を用いた。

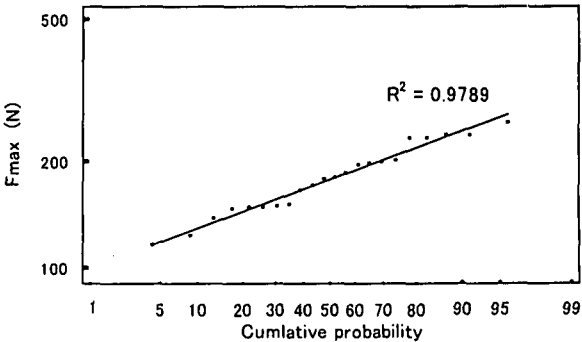


図-3 対数正規確率紙へのプロット (F_{max})

(2) Ice force (bulldozing force) 及び Scour depth の速度依存性

(a) F_{max}/W , F_{mean}/W と移動速度との関係

まず、 F_{max} , F_{mean} を氷の自重 W で無次元化した F_{max}/W , F_{mean}/W の Keel の速度依存性について考察する。ただし、attack angle は $90(\text{deg})$ に固定している。図-4 に移動速度 V_0 と氷の自重で無次元化した F_{max} , F_{mean} のとの関係を示す。基本的には速度が大きくなれば Ice force も増大する傾向にある。 V_0 が 5cm/s 程度以下の時は速度に依存せずほぼ一定をとり、 $0.4\text{cm/s} < V_0 < 1.4\text{cm/s}$ の範囲で行われた従来の実験結果⁹⁾と同様な傾向を示した。また、 F_{max}/W , F_{mean}/W とともに 5cm/s 程度以上で増加が始まり、 $5\text{cm/s} \sim 10\text{cm/s}$ で急に増加し、 10cm/s 程度以上で増加率が減少する。従って、 $5\text{cm/s} \sim 10\text{cm/s}$ の範囲内で変曲点が存在し、増加率の遷移領域であると推定される。

速度が大きくなれば Ice force が大きくなる原因としては様々考えられるが、主として、

- ① Keel により削られた砂の Keel 側部への流出速度あるいは砂の安息角を形成する速度よりも Keel の移動速度が早くなれば、Keel 前面部に堆積する砂の見かけ上の安息角が増大し、側部への砂の流出も減るから、砂の抵抗力が増大する
- ② 間隙水圧の発生、等が挙げられる。

(b) Z_{max}/h_0 , Ω と移動速度との関係

図-5 に上述で定義した Z_{max}/h_0 , Ω と移動速度との関係を示す。この図より Z_{max}/h_0 , Ω はほとんど速度には依存しないことがわかる。この傾向も従来の実験結果⁹⁾と同様な傾向を示した。

(c) 移動速度と各測定量の変動係数(C.O.V)との関係

各測定量 (F_{max}/W , F_{mean}/W , Z_{max}/h_0 , Ω) の変動係数の移動速度による推移を考える。まず、 F_{max}/W 及び F_{mean}/W の変動係数は、速度による依存性がない。

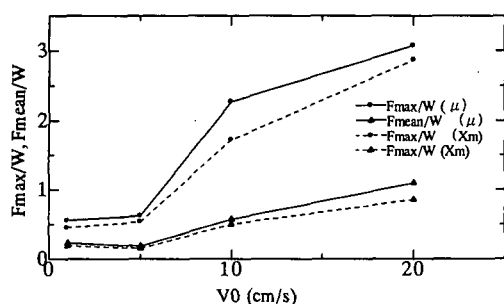


図-4 F_{max}/W , F_{mean}/W と V_0 の関係

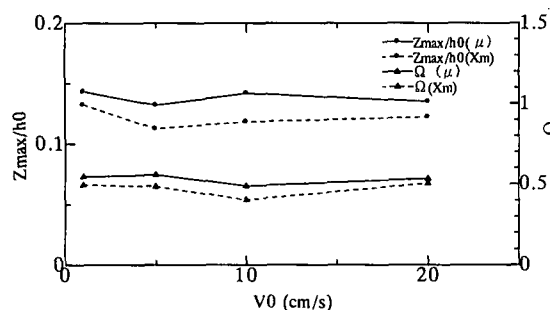


図-5 Z_{max}/h_0 , Ω と V_0 の関係

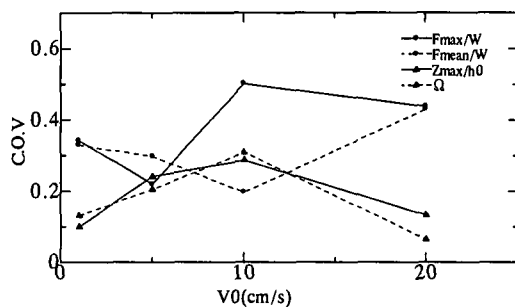


図-6 V_0 による COV の推移

(3) Ice force (bulldozing force) 及び Scour depth の attack angle (θ) 依存性

(a) F_{max}/W , F_{mean}/W と attack angle (θ) との関係

図-7 に $V_0=5\text{cm/s}$ に固定した時の F_{max}/W , F_{mean}/W と attack angle との関係を示す。Attack angle が増加すれば、 F_{max}/W は若干増加傾向を示し、一方 F_{mean}/W は若干減少傾向を示し、両者は相反関係にある。attack angle が大きいと scour depth が増え、砂の抵抗力を増す。そこで複雑な砂のすべり面を形成 (複雑な砂の破壊機構) による荷重の負荷、除荷の激しい変動が発生していることが起因しているものと考えられる。実際、attack angle が増加すれば変動係数も大きくなっている (後述)。しかしながら、上述したように上記の F_{max}/W 及び F_{mean}/W の attack angle による増減の程度は若干であり、attack angle の依存性はあまり大きくないといえる。

(b) Z_{max}/h_0 , Ω と attack angle (θ) との関係

図-8 に Z_{max}/h_0 , Ω と attack angle との関係を示す。この関係は系統的な関係が見られ、attack angle が減少すればあまり砂が削られない傾向にあることを示しており、従来の研究⁹⁾と同様な傾向を示した。これは Keel 移動による砂の剪断抵抗が大きくなった時、keel 前面と砂との境界面ですべりが生じやすくなり、相対的に上方向に変位する率が大きくなるものと考えられる。

(c) attack angle (θ) と各測定量の変動係数との関係

この関係もほぼ系統的な関係が見られ (図-9)、attack angle が大きくなれば変動係数も大きくなる。これは attack angle の増加による複雑かつ不確実性のある砂の抵抗力がその分増しすことであり、attack angle が小さくなればその複雑な要因 (破壊機構) から解放 (少なくとも) され、極論するならば、Ice scouring は水と砂との摩擦運動が卓越し安定した状態にあることを概ね間接的に示している。

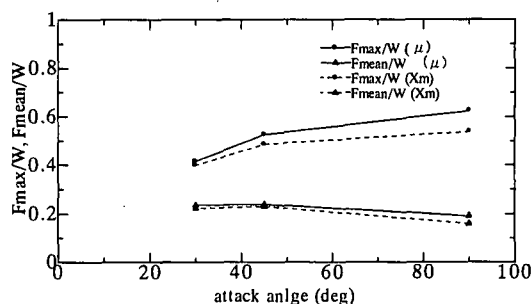


図-7 F_{max}/W , F_{mean}/W と θ の関係

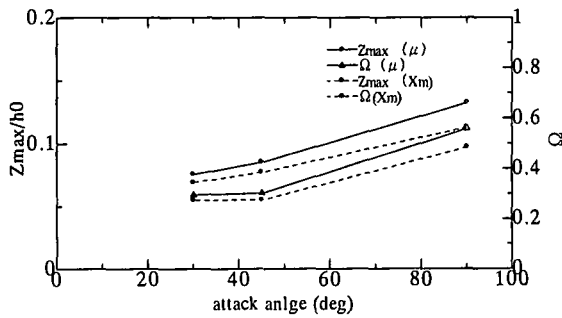


図-8 $Z_{max}/W, Q$ と θ の関係

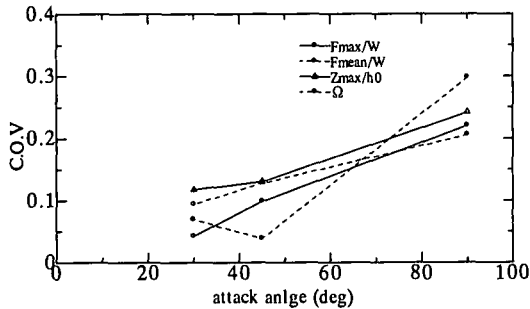


図-9 θ による COV の推移

(4) Ice Scouring におけるモデル Keel の挙動特性

(a) Scour curve (氷によって削られる掘削曲線) と scour depth (削られ深さ) について

まず Scour curve について、基本的に氷は全てのケースで上方に変位していく (図-10(a)-(c))。この鉛直変位機構は、①keel 前面部の砂のすべり面の発生 (瞬時には土の塊が一体となって破壊し、氷もその方向に変位しようとする)、②砂の剪断抵抗が大きくなったとき Keel 前面と砂とのすべりが卓越するため、と思われる。やはり測定値が同一条件でもばらつき、前節でも述べたように attack angle が小さくなるにつれて変動係数が小さくなり、そのバラツキの程度は減少していく。また attack angle が小さくなるにつれて氷が上方に変位する割合が増加する。

次に Scour depth の振る舞いも照らし合わせて考察すれば、Scour depth は Scour length 即ち Keel の移動距離が増加すれば、単調に増加するのではなく、その値は概ね頭打ちになった。すなわち極値または最大値が存在し、Scour-curve は線形 (直線形) ではあり得ない。極論するならば、基本的に氷は海底面を基準とした周期運動を呈し、attack angle が小さくなるにつれ、その周期は小さくなっていくと解釈できる。力学的メカニズムとしては、Keel が地盤に貫入し、砂の抵抗力が増大すると氷は鉛直上方向に変位していき、大きな砂の抵抗力から解放されると初期状態にもどり、この運動を繰り返していく。また、その振幅は小さくなっていくことが予想され、実験ではその初期の一周期を観測すれば十分であることを示している。

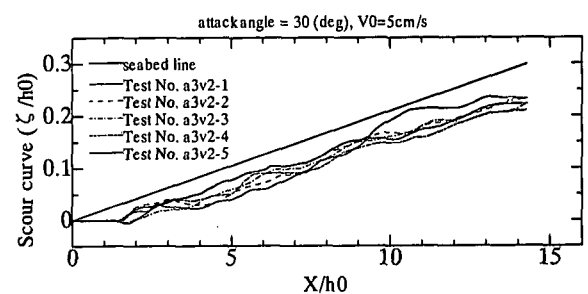
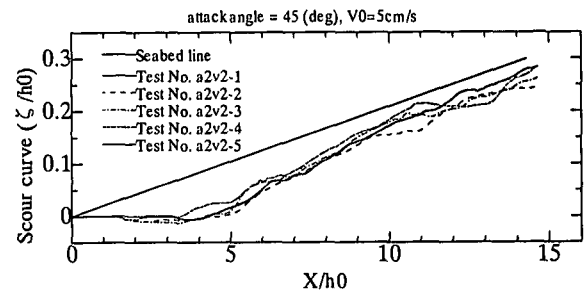
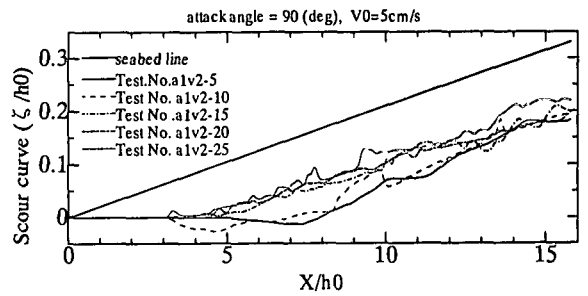


図-10 (a)-(c) attack angle の変化による scour curve の形状 ($V_0=5\text{cm/s}$ の場合)

(b) Scour depth の最大値と平均値の関係

確率変数として Z_{max}/Z_{mean} を考え、前述と同様な方法で分析すればこの量は同一条件下で対数正規分布に従う。また Z_{max}/Z_{mean} は Keel の移動速度や attack angle に依存せず、概ね一定値を示した。95%信頼区間は、 $1.55 < Z_{max}/Z_{mean} < 1.90$ (平均 1.73) と推定される。また Z_{max}/Z_{mean} の変動係数は個々の Z_{max} 及び Z_{mean} の変動係数よりも小さくなった。実用上 Z_{max} の推定は重要であるが、一般に困難である。これらの結果は現地調査で部分的に消失した Scour 跡を調査する場合や、測定点が比較的少ないときなど、その平均値により Z_{max} を推定できることを示す。あるいは何らかの方法論を用い、Scour curve の挙動をシミュレーションしたときのその全区間の平均値で比較的精度よく Z_{max} を推定できる。(c) Scour curve と Ice force (bulldozing force) の局所変動応答特性

図-11 に Scour length に伴う Scour curve と F/W の局所変動 (一階微分値) の一例を示す。この図より明らかに、測定誤差による若干の位相のズレはあるものの、両者の波形は相似であり、互いのピークに対応する。これは前述したように、主として、氷が Scour curve に沿った束縛運動と見なしたときの Scour curve の微分値に比例する水平方向の束縛力の変化に起因する。したがって、Ice force (bulldozing force) の局所変動は Scour curve の局所変動に応答すると解釈できる。

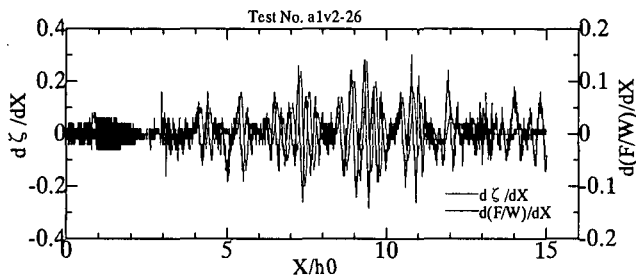


図-11 ζ と F との局部変動応答特性

(5) 力学モデルの評価

(a) 実測値と計算値の比較

計算に用いた力学モデルは Kioka and Saeki⁴⁾等に表示されているものを用いた。各実験ケースの典型的なものを1例ずつ示した。図-12(a)～(c)には $V_0=5\text{cm/s}$ 一定で、attack angle=90, 45, 30(deg) の場合をそれぞれ示し、図-13(a)～(d) は attack angle=90(deg) 一定で、 $V_0=1, 5, 10, 20(\text{cm})$ の場合をそれぞれ示す。尚、横軸には Scour length を初期喫水深 h_0 で除したもの(事実上の時間軸)を採用している。まず、図-12(a)～(c)を見てみると、 F の変動は attack angle が小さくなるにつれて、小さくなっている。これは前節で議論したことに対応する。また F の絶対値は attack angle によってあまり変わらないことが理解でき、この要因も前節で議論したことに対応している。またシミュレーション結果と測定値の比較も、絶対値において若干、測定値の方が大きい、波形やピークの位相が概ね一致することから、この場合シミュレーションはよく実験の挙動を再現している事を示している。この波形の一致は $d\zeta/dX$ に比例した水平方向の束縛力の増減に起因しており、氷がある曲線に沿って運動する束縛運動であることを間接的に示しており、この実験条件下でのモデルが妥当であることを意味する。

次に図-13(a)-(d)を見てみると、前述したように、Keel の移動速度が大きくなれば F が増加していくことが分かる。またシミュレーション結果と測定値の比較では移動速度が 5cm/s 以下ではその絶対値と波形が概ね一致するが、 10cm/s 以上では測定値の方が大きくこの現象を再現しているとは言えない。これは前述(3. (2))した要因意外に、水面上に砂が露出するという計測上の不都合が生じた事(露出した砂の単位堆積重量、コンシステンシーの増大、メニスカス、見かけ上の粘着力の発生)等の要因が考えられ、計算では上記の事を考慮していないのが主たる原因であり、上記の影響を計算に取り込む必要性を認識した。

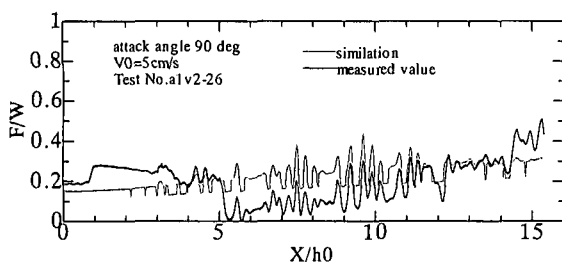


図-12(a) 計算値と実測値 (attack angle=90deg)

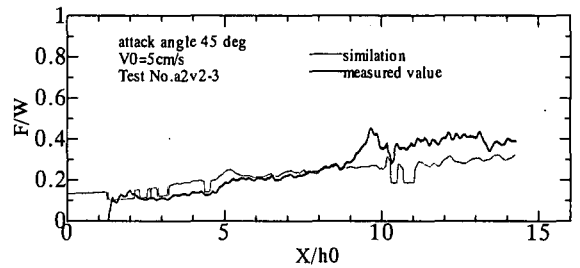


図-12(b) 計算値と実測値 (attack angle=45deg)

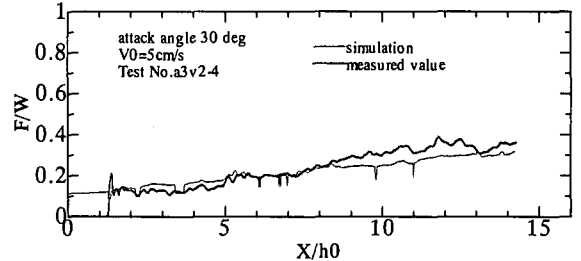


図-12(c) 計算値と実測値 (attack angle=30deg)

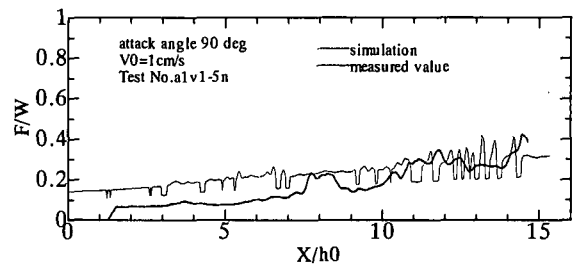


図-13(a) 計算値と実測値 ($V_0=1\text{cm/s}$)

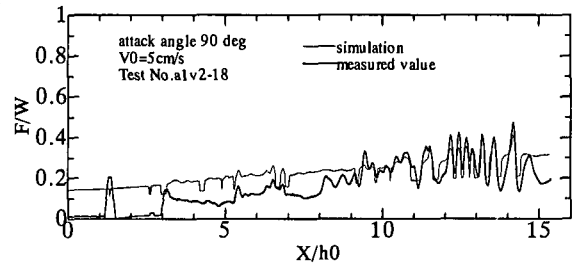


図-13(b) 計算値と実測値 ($V_0=5\text{cm/s}$)

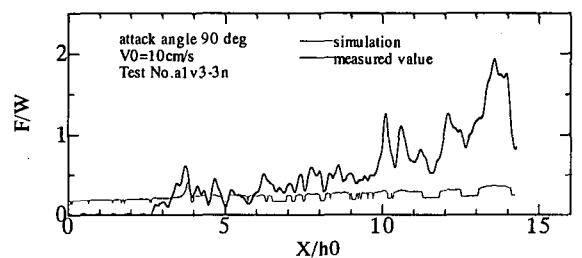


図-13(c) 計算値と実測値 ($V_0=10\text{cm/s}$)

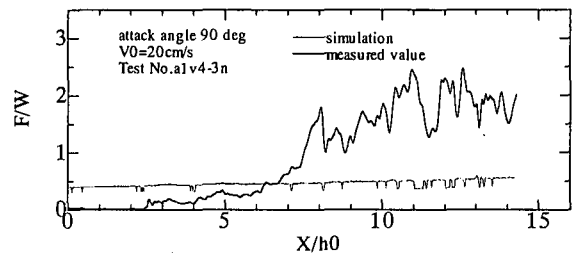


図-13(d) 計算値と実測値 ($V_0=20\text{cm/s}$)

以上より、Ice force(bulldozing force)の局部変動は Scour curve の局部変動に应答すると解釈しなければならず、ただ Scour depth を与えただけ(氷が静止状態にあ

ると仮定)の F (あるいは地盤表面に作用する K)の推定は最大荷重を見落とす危険がある。言い換えるならば、同じ Scour depth を通過しても、その位置における地盤に作用する氷荷重は異なり、結局その経路に依存するため、Scour curve の概念が重要となる。埋設構造物を氷から保護する場合、最大 Scour depth 以下に埋設構造物を設置しても安全であるとは限らず、sub-scour deformation とよばれる Keel 以下の砂の変形、応力伝達があるため地盤に作用する K の推定は重要である。この K について次節で若干議論する。

(b) Ice force F と地盤反力 K_v との関係

一例として、図-14 に地盤表面に作用する荷重 K_v と F の比の関係を示す。これは測定値 F と比較的良い一致性を呈した実験ケースのシミュレーション結果である。これより、 K_v は F より大きく、これは attack angle に関係なく、また scour length に関係なくほぼ一定値 1.6 程度を示す。このシミュレーションは、他の研究結果と比較すれば、力の定義が若干異なるものの、概して、鉛直氷荷重は水平氷荷重の 1~1.5 倍であるという実験結果⁹⁾や有限要素法によるシミュレーション結果(およそ3倍)等⁹⁾、他の研究者の結果と同様な傾向を示した。従って、 F が推定できれば地盤に作用する氷荷重を推定できることを暗に示している。

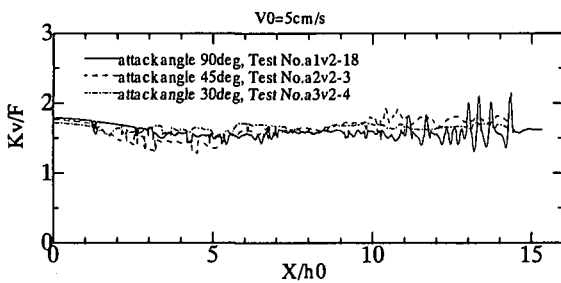


図-14 F と K_v との関係

4. まとめ

1. 同一条件下での各測定量 (F_{max} , F_{mean} , Z_{max} , Ω (Z_{mean})) は対数正規分布に従う。
2. Keel の速度 V_0 が増加すれば基本的に Ice force (bulldozing force) F は増加し、 $V_0 \leq 5 \text{ cm/s}$ ではほぼ一定値、 $5 \leq V_0 \leq 10 \text{ cm/s}$ で急に増加、 $10 \text{ cm/s} \leq V_0$ では増加率は減少する。また、Scour depth Z , maximum scour depth Z_{max} は Keel の移動速度には概ね無関係である。
3. Attack angle による明確な F の変化は見られないが、attack angle が小さくなればあまり砂が削られない傾向にあり、各測定値の変動係数も小さくなる。削られる砂の量が異なるに関わらず F は変化しない。
4. 最大 Scour depth と平均 Scour depth の比 Z_{max}/Z_{mean} は Keel の移動速度、attack angle に無関係でほぼ一定値 1.73 をとる。観測やシミュレ-

ーションで Z_{max} を推定するときは Z_{mean} をもって推定することは合理的であると考えられる。

5. 全実験ケースにおいて基本的にモデル keel は上方向に変位していき、attack angle が小さくなれば上昇率が大きくなる。Scour depth は scour length が大きくなれば単調に増加するのではなく極値あるいは最大値が存在し、Scour-curve は liner であり得ない。氷は海底面を基準とした周期運動を呈し attack angle が小さくなるにつれその周期は小さくなり、その振幅も減少していくことが予想される。
6. Ice force あるいは地盤反力 K の局部変動は Scour-curve の局部変化に応答する。すなわち、同じ地点 (scour depth) を通過しても、氷荷重は異なり、その経路 (Scour-curve) に依存する。
7. 計算値と実測値の比較において、その経時変化の変動特性 (波形、ピークの位相)、および絶対値は、実験の性格を考慮するならば、概ね良い一致がみられたといえる。しかしながら $10 \text{ cm/s} \leq V_0$ では遙かに実測値の方が大きく、速度依存性に伴う砂の力学的変化を考慮しなければならぬことを確認した。
8. シミュレーション結果による F と鉛直方向の地盤反力 K_v との比 K_v/F は attack angle, scour length によらずほぼ一定値 1.6 を示し、他の研究者による実験結果、シミュレーション結果と同様な傾向を示した。

謝辞：本研究は石油開発技術センター (JNOC) の研究助成を受けたもので、記して感謝の意を表わします。

参考文献

- 1) Duval, B.C.: Exploratory drilling on the Canadian continental shelf, Labrador Sea, Offshore Technology Conference, Paper No.2155, pp.59-67.
- 2) Grass, J.D.: Ice Scour and ice ridging studies in lake Erie, *Proc. of Int. Symp. on Ice*, Hamburg, Vol.2, pp.33-43, 1984.
- 3) Green, H.P., Reddy, A.S and Chari, T.R.: Iceberg scouring and Pipeline burial depth, " *Proc. of 7th International Conference on Port and Ocean Eng. Under Arctic Conditions* (POAC-83), Vol.1, pp.280-288, 1983.
- 4) Kioka, S., Abe, S., Sasaki, H and Saeki, H : Mechanical model of Ice Scour, *Proc. of 15th International Conference on Port and Ocean Eng. Under Arctic Conditions* (POAC-99), Helsinki, Vol. II, pp.537-544, 1999
- 5) Paulin, M.J.: Physical model analysis of iceberg scour in dry and submerged sand, M.Eng. Thesis, Memorial University of Newfoundland, St. John's Newfoundland, 1992.
- 6) Yang, Q.S., Poorooshasb, F and Poorooshasb, H.B.: Analysis of Subscour Deformation by Finite Element Method, *Proc. of 4th Canadian Conference on Marine Geotechnical Engineering*, St. John's, Newfoundland, Canada, pp.739-754, 1993.