

様々な条件下におけるIce Scour Event に関する実験的研究

Model Tests On Ice Scour Events Under Various Conditions

木岡信治¹・安永喜勝²・松尾優子²・佐伯浩³

Shinji KIOKA, Yoshikatu YASUNAGA, Yuko MATUO and Hiroshi SAEKI

¹学生会員 工修 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)

³フェロー 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 Scour (Ice Gouge) is a phenomenon that occurs when ice comes into contact with seabed. Ice gouge has been reported to have caused damage to communication cables and water intake pipelines. Since oil and natural gas exploration projects in offshore areas of arctic seas are becoming popular, more care must be taken over the design and installation of oil pipelines in such areas in order to avoid accidents due to ice scour. It will be very important to acknowledge mechanisms (ice motions, sub-seabed conditions on gouge events). In addition to our previous tests (Kioka and Saeki, 2000), we have performed many series of model tests under various conditions. We revealed relationships between pore water pressure in the sand and bulldozing force due to velocity of the model keel, and we also prospected depression of model keel during scour events.

Key Words : *Ice Scour, bulldozing force, scour curve, pore water pressure, ridge keel*

1. はじめに

Ice Scourとは風や流れそれに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, hummok ice, pressure ridge, stumkha等)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、取水パイプラインや各種ケーブル等の破損例が報告がされている。特に近年の氷海域での油田・ガス田の開発において重要な技術課題であるにも関わらず、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。

著者等は従来から様々な条件下でice scourに関する模型実験を行ってきており、bulldozing force (地盤への掘削力)、あるいはscour curve (掘削線)について考察してきた¹⁾²⁾³⁾。上記は氷海域において埋設構造物を敷設する場合に極めて重要なパラメータである。またice scourに関する力学モデル¹⁾²⁾を構築し、そのメカニズムを間接的に明らかにしようとしてきた。特にBulldozing forceはモデルkeel (keel: ice ridge等大きな喫水をもつ氷の水面下の部分)の移動速度に大きく依存し、速度が増大すればBulldozing forceも増大するという事が認められる。Keelの移動速度が小さい間は力学モデルを

用いたBulldozing forceの推定値(計算値)は実測値と比較して、その増減も含めよく表現していたが、keel速度が大きくなると、実測値は計算値を遥かに上回るという事が分かった。この速度による増加分あるいは計算モデルでは考慮していない要素は様々な考えられるが、主として①keelの強制変位による砂中の間隙水圧発生、②後述する見かけ上の砂の堆積高の増大(削られた砂がkeel前面部に堆積)に起因する砂の抵抗力の増大、等が考えられる。本研究では、実際、砂中に間隙水圧計を取り付け、様々な条件下での間隙水圧の発生機構に関する考察をおこなう。Bulldozing forceの速度依存性についてその主な増大要因を推定した。また埋設構造物等の埋設深を推定する際に重要な概念であるscour curveのkeel速度依存性、keelの沈下特性についても要素実験を行い考察した。

2. 実験方法および実験条件

実験は図-1(a)に示す装置を用いて行った。基本的には従来¹⁾²⁾と同一の実験システムである。まず、60cmの幅を有する水路に一定勾配(1/25)となるように砂(表-1参照)を敷き詰め、鋼製のモデルKeel(3種類のattack angle, 図-2(b))を最大長5mの

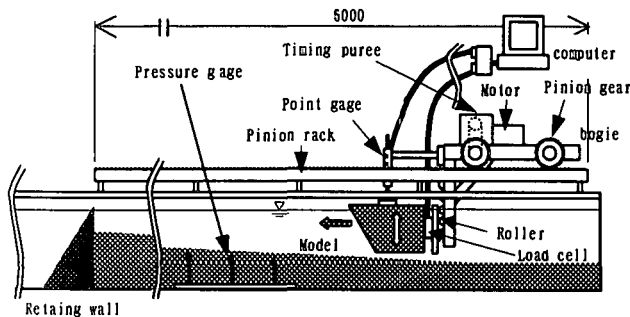


図-1(a) 実験装置の概要図

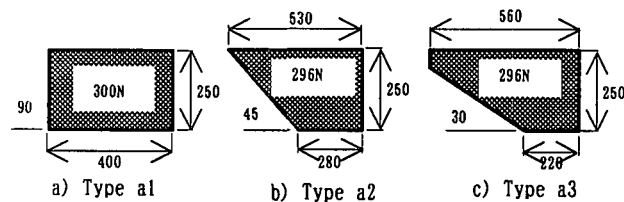


図-1(b) モデルkeel

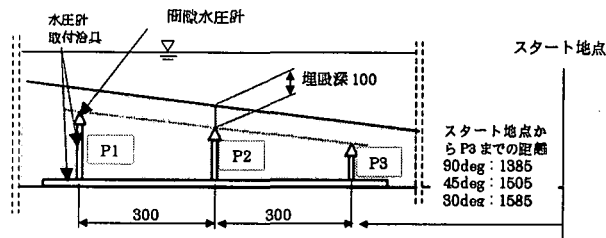


図-2 間隙水圧計の配置図

ピニオンラックを走行する台車で水平方向に一定速度 (1cm/s~30cm/sの各5種類) で押すというものである。これは十分な環境力により、沖合いの水野 (Ice field, rubble field) から押された水を模擬している。また、従来の研究により、水荷重 (bulldozing force) の局部変動は水の掘削面形状の局部変動に应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に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 を計測した。ここに定義する水平方向水荷重とは、台車で押す力であり、モデル Keel が受ける水平方向の抵抗力そのものである。また図-2 に示すように砂地盤中に間隙水圧計を水路中央部に地表面より 10cm の位置に 3 点埋め込み、イベント中に発生する間隙水圧を測定した。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。使用したモデル Keel は図-2 (b) 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 (20cm $\pm$ 1cm) 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。

表-1 使用した市販桂砂

中央粒径	0.147mm
内部摩擦角	37°
安息角	32°
飽和単位体積重量	15.68kN/m ³

3. 実験結果及び考察

(1) bulldozing force と curve の氷の移動速度及び attack angle 依存性

(a) bulldozing force に対する間隙水圧の影響

図-3 に、各水圧計における計測値の一例を示す。尚、図-2 のように間隙水圧計をモデル Keel のスタート地点より遠い順に P1, P2, P3 と名づける。

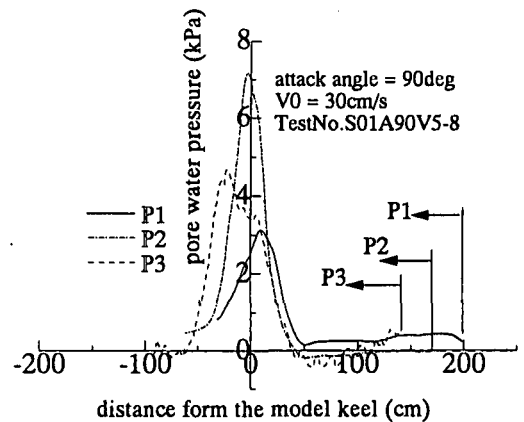


図-3 keel 直下での間隙水圧のピーク値 (一例)

横軸はモデル Keel のスタート地点からの距離であり、0 の時モデル Keel (隅角部) がその水圧計の直上に来た状態を示す。図より、モデル Keel の隅角部がその水圧計の近傍もしくは直上にきたときピークを示し、比較的鋭いピークを呈している。またピークを通過すれば上昇時と同様な割合で水圧が消散していることが分かる。Keel の隅角部と水圧計との距離が減少すれば水圧は増大している。本実験の場合、用いた水路は比較的狭く (底面・側部の拘束), 間隙水は主に砂層上面 (表面) から排水され则认为される。またモデル Keel 自体が不透水層であることを考慮すると、Keel 部から感知されるべき水圧計までの距離が長いと、その間で間隙水が排出されるべき表面のエリアが相対的に大きく、水圧が消散されやすいことが考えられる。次に、ある水圧計について、keel 部からの水平距離が一定 (例えば 0 の時) の時、keel 部と水圧計の鉛直距離による水圧の変化を調べた。これは実験ケースによって (同一ケースであっても) 削られる深さが個々に異なり、keel 部と水圧計の鉛直距離が一般には異なっているためこの試行が可能である。ところが鉛直距離と水圧の関係はほ

ば無相関という結果となった(図略)。これはkeel部と水圧計の鉛直距離が相対的に変化しても、水圧計と砂層上面までの排水距離は不変であることに起因しているものと考えられる(ただし削られ深さは大きくは異ならず数cm程度であって、keel部と水圧計の鉛直距離は7cmから9cmで検査しているに過ぎないことを付記しておく)。

したがって、本実験で用いた水路においては(拘束、不透水層の存在)、水圧の増減は水平距離に顕著に応答し、鉛直距離にはあまり応答しないという結果となった。また、殆どのケースで見かけ上、水圧が上昇する直前に一時水圧が減少あるいは負圧状態になることが確認された。これはせん断が進行した正のダイレイタンシー領域にあると推定され、即ち砂の膨張破壊(体積増加)によって、見かけ上、水圧の一時減少・負圧状態になると考えられる。

次に図-4(a)に、水圧計の違いによるモデルKeelの移動速度と水圧計のピーク値(平均値)との関係を示したものである。この場合attack angle=90degで例示しており、縦軸は水圧のピーク値(5から8回の繰り返し実験の平均値)を水圧計の位置における静水圧で除したものである。また図-4(b)は、ある水圧計における(P1で例示)、attack angleの違いによるモデルKeelの移動速度と水圧計のピーク値(平均値)との関係を示したものである。

これらの図はあくまで平均値で示されており、実際には変動係数が0.4程度までのバラツキがあり、速度が大きくなればバラツキも大きくなる傾向にある。これらの図の特性をバラツキを考慮して統計的(客観的)に分析する必要があるので、ここでは2元配置の分散分析と、共分散分析の2種の分析法を用いた(危険率5%、1%で判定)、この2種の分析結果は本質的には同一となったが、その結果を端的

に集約すると以下ようになる。

- ① 速度が増加すれば明らかに間隙水圧が上昇する(回帰の有意性)
- ② 各水圧計、各attack angleによらず、速度による上昇傾向はほぼ同一である(回帰直線の平行性、交互作用がない)
- ③ 各水圧計、各attack angleによらず、速度が一定であれば間隙水圧は等しいと仮定できる(水準間の有意差がない)

つまり、水圧が速度に比例して増大し、直線で表現するなら、各水圧計、各attack angleによらず、1つの直線で表すことができることを意味する。しかしながら、あくまで上記は全体の総評であり、場合によっては、危険率5%、1%では異なる判定となり、微妙にも水準間の有意差が確認される場合もあった。これはバラツキも含め、①attack angleの違いによる掘削深の相違、②削られた砂の前面への堆積高の相違(排水距離の相違)、等が挙げられる。

次に図-5に各attack angle毎の速度とbulldozing forceとの関係を示す。実線はbulldozing forceの測定領域における最大値(Fmax)を自重で除したもののサンプル数の標本平均、破線は測定領域における時間平均(Fmean)のサンプル数の標本平均である。やはり多少のバラツキがあるため、同様に2元配置の分散分析と、共分散分析の2種の分析法により評価した。速度が増大すればbulldozing forceも増大する。速度が5cm/sまでなら、速度・attack angleによらずbulldozing forceに有意差がない。これらは従来の実験と同一な傾向となった。しかしながら速度がそれ以上になると各attack angleに有意差が現れ、その増加傾向に差がある(交互作用の存在)。この現象は今回新たに判明したものであるが(従来

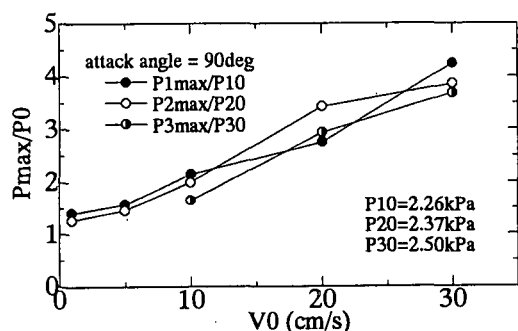


図-4(a) 各水圧計・速度と間隙水圧との関係

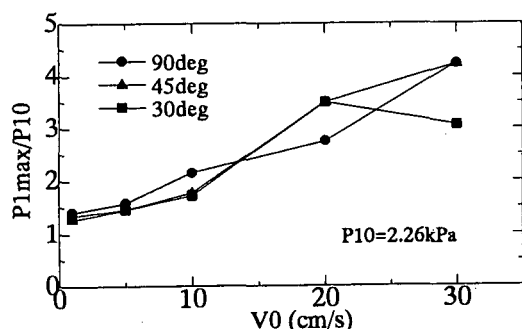


図-4(b) attack angle・速度と間隙水圧との関係

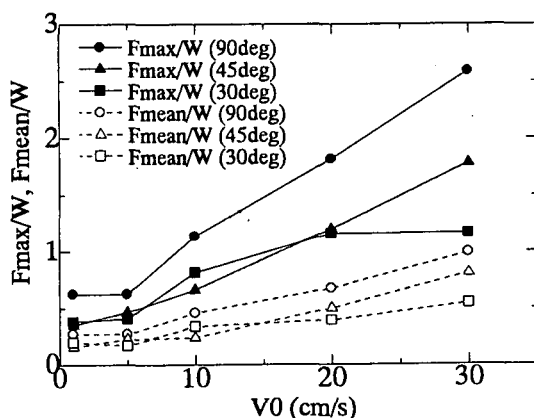


図-5 移動速度とbulldozing forceの関係

の実験では $V_0=5\text{cm/s}$ の条件下における各attack angle依存性の特性を議論していたに過ぎない)、これは速度が小さい場合、bulldozing forceが小さく、単にその差が検出できなかった事もあるが、本質的には後述するscour curveのattack angle及び速度の依存性に起因するものと思われる。また速度が増大すれば、bulldozing forceも増大するというメカニズムは簡単なモデルによっても説明できるも

のと考えられる。例えば、断面積Aの水層に断面積aの孔がN個開いた載荷板を一定の速さ V_0 ($X=V_0 t$)で圧縮することを考える。むろん、水層内部では水圧が作用し、圧力差により、水は表面に別の速度 v で排出される。砂(有効応力)を表現するなら、水層内にバネやスライダーを配備してもよいが、今は考えないことにする。最終的には単位面積あたりの F (bulldozing force)は(1)式で表される。分母 Na/A は透水性(透水係数 k)に関する項であると解釈され、結局、形式的には F は速度の二乗、透水係数の逆数に比例するものと理解される。

$$F/A = \frac{\rho V_0^2}{Na/A} \propto V_0^2, 1/k \quad (1)$$

これらは水層内の水圧とも関連付けられる。実際の現象では、極めて複雑なメカニズムではあるが、速度に応じて、間隙水圧、bulldozing forceが増大するという事実は、実験結果及び簡単なモデルより明らかである。また述べたように透水係数の逆数に比例するということは、同一の速度でも粒径が大きくなれば、間隙水圧は減少する事が言える。結局、主として間隙水圧は構成する砂の粒径と氷の移動速度に起因していることが分かった。従って、小規模な模型実験を行う場合には、状況に応じ、砂の粒径と移動速度を制御すべき事を確認した。また速度が大きくなれば著者の力学モデルを用いたbulldozing forceの推定値は実測値を過小評価するという傾向にあり、その原因を解明することは重要なテーマでもあった。当初も、間隙水圧の存在が予想されていたが、一応はこの原因の一つとして挙げられることを実証したことになる。他の主な要因としては堆積高さの速度依存性が考えられる¹⁾²⁾³⁾。堆積高さが大きくなればその分抵抗が大きくなるばかりでなく、(下層からの水の)排水距離が長くなるので、間隙水圧をさらに上昇させる原因になるとも考えられる。

(b) scour curveの移動速度及びattack angle依存性

次に図-6(a)に各attack angle毎のscour curve ($V_0=5\text{cm/s}$ で例示)を、図-6(b)にモデルkeelの移動速度毎のscour curve (angle=90degで例示)をそれぞれ示す。ただし、図中のcurveは数回の実験から得られたもののアンサンブル平均である。

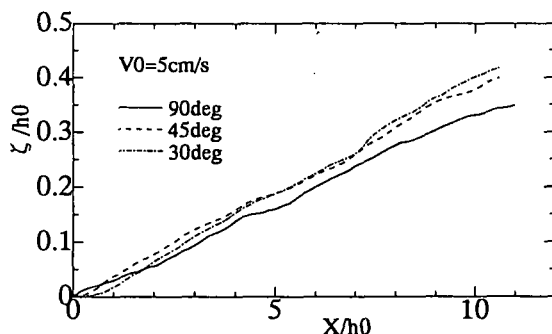


図-6(a) scour curveのattack angle依存性

まず図-6(a)を見ると、 $V_0=1\text{cm/s}$ の場合もほぼ同様な傾向となるが、一般に $V_0 \leq 5\text{cm/s}$ ではattack angleが小さくなるほどcurveは上方に推移しており(30degと45degではあまり大差ないが)、即ち砂があまり削られない傾向にある。これは従来の実験とほぼ同一な傾向である。これは従来の解釈にもあるが¹⁾²⁾³⁾、主として砂とkeelとのすべりが存在するためであると考えられる。しかしながら $V_0 \geq 10\text{cm/s}$ では、90degのkeelの場合、3者のうち最も砂を削るのは変わらないが、45degのkeelの方が30degよりも、そのcurveは上方に推移してきて逆転傾向になった。これはkeel前面砂中の間隙水圧の上昇により、前述の砂とkeelとのすべりが顕著なったためと考えられる。むろん単にすべりのみを考慮した場合、30degよりも45degの方が同一距離において上昇量が多いことから推察できる。次に図-6(b)について考

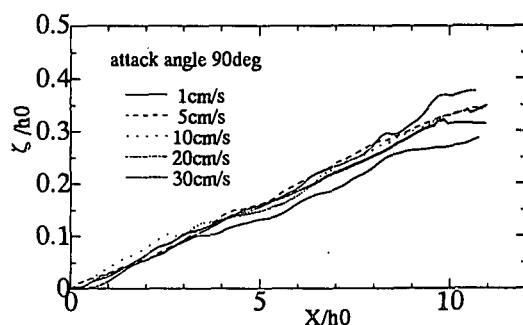


図-6(b) scour curveの速度依存性

察してみる。この図はangle=90degで例示されているが、他のangleにおいてもほぼ同様な傾向になっている。速度 $V_0=1\text{cm/s}$ におけるcurveは他の速度の場合と比べて低くなっていて、速度が大きくなると上昇する。ただし $V_0 \geq 5\text{cm/s}$ 以上ではあまり目立った差はない。これは後述するkeelの沈下特性にも依存しているが、まず一般に速度が大きくなればcurveが上昇傾向にあるのは、間隙水圧とも関連し、極論すればkeelの近傍では非排水せん断状態にあり、内部摩擦角が相対的に小さくなることに起因していると考えられる(直感的には受動領域のすべり線が上方向に近づく)。また速度が増大すればbulldozing forceが増大するという事実からkeelの鉛直変位が幾分拘束され(keel後方部の拘束状態により)、またその水平方向の強制変位より、逆にその上昇量が抑えられるためであると考えられる。

以上、bulldozing force、scour curveは間隙水圧との関連でkeelの移動速度によってその特性が大きく異なることが分かった。

(2) モデルkeelが急停止した場合のscour curveの変化及びモデルkeelの沈下特性

(a) keelの沈下特性

次にscour event中にモデルkeelを急停止させ、10秒停止後、再度同じ速度でスタートさせるという実験を行った。この実験の目的は主として、

- ① 本来（速度一定に保った場合）のscour curveと比較しどの程度変化するか？
 - ② モデルkeelの沈下特性について考察
- であり、①は実現象では氷の移動速度は常に一定であるとは限らず、減速・停止している場合もある。実験が容易である「速度一定」とした場合の掘削線を参照できるかどうかの検討、②もこれに準じるが、掘削過程のメカニズムを間接的に把握し、また将来的な掘削線シミュレーションに必要な要素実験となり得るかどうかの検討、と位置づける事ができる。尚、便宜上この実験をSG(Stop & Go)実験と呼ぶことにする。

まずはモデルkeelの沈下特性について考察する。図-7にscour curveとbulldozing forceの関係の経時間変化の一例を示した。尚、Stop・Goの位置は図中に記している。実線はscour curveであり、Stopした後は、有限時間内ではあるが、即座に沈下し、一定量に漸近している。一般に土の沈下は即時沈下と圧密沈下からなるが、本実験のように砂質土であれば最終沈下量（即時沈下量）を知ることは10sストップで十分である。また再スタート後はスタート前より（モデルkeelが）急勾配で上昇し、元のレベル近くまで回復している。bulldozing forceもこれに回答し、停止状態は0レベルに近いオーダーとなっている。

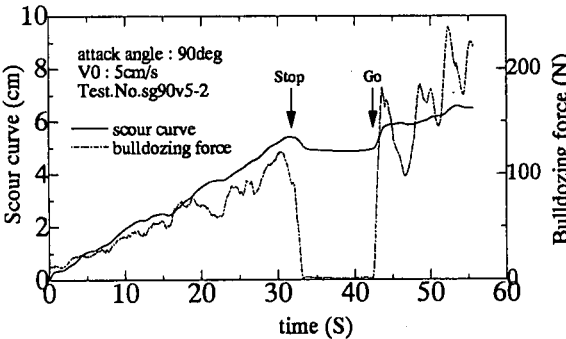


図-7 keelが急停止した場合のforceとcurveの関係

次に速度と沈下量についてまとめたのが図-8(a)である。沈下量はむしろその自重（応力レベル）に依存し、本実験の場合、モデル上昇による浮力の減少分が該当する。したがって、この効果をできるだけ退けるため（速度による影響のみを評価するため）、沈下量をスタート地点からのモデルの上昇量(hinc)で無次元化したものの採用した。図を見てみると、ぱらつきはあるものの、速度が小さい場合は沈下量も小さく(1cm/sの時、殆ど沈下が見られない)、速度が増加すれば、沈下量も増大し、ある一定値に漸近するように見て取れる。これはモデルkeelが沈下しながら、掘削線を形成していく事を示している。つまり極めて速度が小さい間は、急停止しても、すでに最終沈下量近くに達しているため、それ以上の沈下はない（あるいは少ない）。逆に速度が大きい時は、前述のように間隙水圧とも関連があり沈下の過程に入っても、すぐに次の新しい状態・ステップに

移るため、沈下過程において常に初期状態にある。あるいは間隙水圧との関連性もある。時即沈下といっても有限時間で最終沈下量に達することを考慮すれば、上記を想定するのは困難なことではない。極論すれば、速度が十分大きい場合、Scour curveの形成には沈下は含まれず、急停止した時の沈下曲線は、正規の $t=0$ からの沈下曲線と等価であることが期待できる。ここで、速度が極めて小さい時、沈下量は0、速度が極めて大きい時、沈下量はある値に漸近するような、簡便かつ実測値にもっともフィットする関数形は図中に記されている。パラッキがあり、適合度は決して良いとは言えないが、傾向をよく捕らえている。この時、定数aは上記の「正規に载荷した時の最終沈下量」と見なせる。次に $V0=5\text{cm/s}$ を固定し、各attack angleによる沈下量(hincで無次元化)について考察した。まずattack angleが小さくなれば沈下量もかなり小さくなる結果となった。これは同一の鉛直载荷荷重であっても、その受圧面積に依存することを示す。つまりattack angleが小さくなれば砂との鉛直方向の接触面が大きく（鉛直の投影面積が大きい）、载荷圧力レベルは小さくなっていると考えられる。投影面積を表現する量($1/\tan \theta$)でデータを整理すると図-8(b)のようになり、沈下量は载荷面積に逆比例していることが分かる。

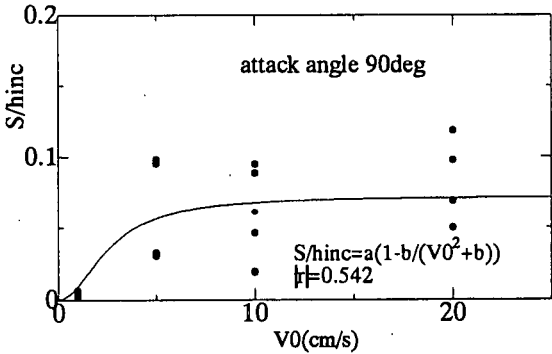


図-8(a) 移動速度とkeel沈下量の関係

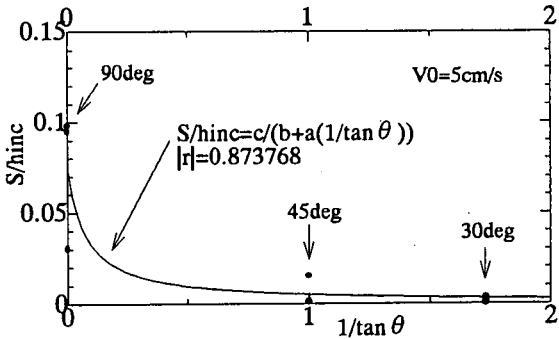


図-8(b) attack angleとkeel沈下量の関係

また詳細は省略するが、時間-沈下曲線について、簡単な1自由度のフォークトモデル（過減衰状態）によって得られる関数形で実測値をよく表現できることが分かった。この曲線は、理想的には速度によらず一本の曲線で表され、速度が十分大きい場合は

$t=0$ から、速度が極めて小さい場合 $t=T$ から、切断した曲線をもつと仮定できる。これらの知見は将来的にはscour curveをシミュレーション（掘削深の予測プログラムの開発）する場合に有用であると考えられる。すなわちcurveは、主として①keelが形成される破壊すべり線に沿う運動、②keel部表面と砂とのすべり、③ダイレタンシー効果、④沈下、等による効果が寄与し実現したものと考えられる。沈下特性がさらに明らかになれば（精度のよい要素実験を行う等）、ある種の仮定を設けることにより、curveをシミュレーションできる可能性があり、現在、手法を検討中である。

(b) 速度不連続の場合のscour curveの変化特性

次に、正規（Non-stop状態）で速度一定の場合のscour curveとSG実験で得られたcurveとの比較を行った。図-9に一例として $\text{angle}=90\text{deg}$, $V_0=5\text{cm/s}$ の場合を示す。太線は本来（速度一定）のscour curveのアンサンブル平均、細線は同一条件下でのSG実験で得られた幾つかのcurveを示す。この際10sの停止状態は除去している。

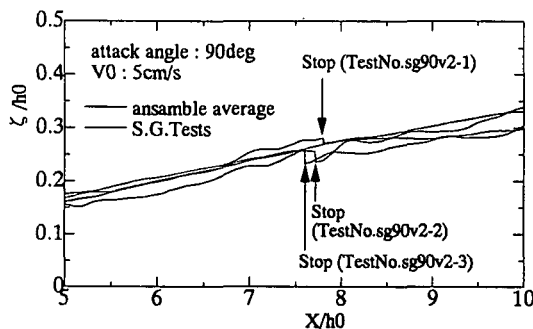


図-9 SG実験とのscour curveの比較

この図を見ると沈下した分、再スタート後は正規のcurveより若干は低めに推移するが、その勾配はほぼ同一であり、正規のcurveも個々には変動することを考慮すれば、大きな大差はないように思われる。また沈下量が少ない $V_0=1\text{cm/s}$ の場合やattack angleが 30deg , 45deg の場合はなお更（図略）の事であり、正規のcurveのアンサンブル平均周りにばらつき、有意な差がない結果となった。現実のridge keelが有するattack angleは $20\sim 45\text{deg}$ のものが多く⁴⁾⁵⁾、述べたようにその鉛直方向の投影面積が大きく、載荷圧力レベルは軽減され、沈下もあまり大きくないものと考えられる（実験ではほぼ0）。

以上より、実験によって掘削線を推定するときは、実験が容易である「速度一定」とした場合の掘削線を参照できることが分かった。

4. まとめ

- 1) 本実験における条件下では、keel移動速度が増大すれば間隙水圧も速度の1～2次のオーダーで比例して増大する。また水平方向に配備された水圧計の位置やattack angleの変化によって大きな違いは見られなかった。
- 2) 間隙水圧発生に関連し、bulldozing force、Scour curveもkeel速度によって大きく変化する。小規模な模型実験を行う場合には、状況に応じ、砂の粒径と移動速度を制御すべき事を確認した。また著者らの力学モデルを用いたforceの推定値は実測値を過小評価するという傾向にあったが、間隙水圧の存在が原因の一つとして挙げられることを実証した。
- 3) Scour Event 時のkeelの沈下特性について考察した結果、Keelの移動速度が小さい場合はすでに沈下を生じて掘削しているが、速度が大きくなるにつれ沈下を生じずに次のステップへ移行しているものと推定される。
- 4) 実験によって掘削線を推定するときは、実験が容易である「速度一定」とした場合の掘削線を参照できることが分かった。

謝辞：本研究は石油開発技術センター（JNOC）との平成12年度技術交流調査のもとに実施されたものである。同社の多大なご支援に対し、記して感謝の意を表わします。

参考文献

- 1) Kioka, S., Yasunaga, Y., Watanabe, Y., and Saeki, H : Evaluation of Ice Forces Acting on Seabed Due to Ice Scouring, Proc. of 10th International Offshore and Polar Engineering (ISOPE-2000), Seattle, Vol.1, pp.749-755, 2000.
- 2) 木岡信治, 安永喜勝, 西楨秀如, 佐伯浩 : 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, 海洋開発論文集, Vol. 16, pp185-190, 2000.
- 3) 木岡信治, 安永喜勝, 松尾優子, 佐伯浩 : Ice Scour Eventに伴う氷の挙動特性に関する一考察, 寒地技術論文集, Vol. 16, pp. 199-206, 2000.
- 4) Beketsky, S.P., et al : Structure of grounded hummock in the sea of Okhotsk, the 11th International Symposium on Okhotsk Sea and Sea ice, Mombetsu, Hokkaido, Japan, pp339-342, 1996.
- 5) Beketsky, S.P., et al : Morphology of hummocks in the sea of Okhotsk, the 12th International Symposium on Okhotsk Sea and Sea ice, Mombetsu, Hokkaido, Japan, pp42-48, 1997.