

Ice Scour Eventに関する中規模野外実験

MEDIUM-SCALE MODEL TESTS ON ICE SCOUR EVENT

木岡信治¹・安永喜勝²・松尾優子²・河合邦弘³・佐藤正樹³ 佐伯浩⁴
 Shinji KIOKA, Yoshikatu YASUNAGA, Yuko MATSUO, Kunihiro KAWAI
 Masaki SATO 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正会員 樹西村組 (〒099-6404 紋別郡湧別町栄町113-1)

⁴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 is a phenomenon that occurs when ice comes into contact with seabed. Ice Scour has been reported to have caused damage to communication cables and water intake pipelines. It will be very important to acknowledge the mechanisms. We have performed a series of small-scale(1-g) model experiments. Furthermore, we performed a series of medium-scale model experiments on ice scour events at a sandy beach in order to try to determine the effect of scale. The model ridge-keel was placed in the sea and pulled at a constant velocity toward the shore by a crane, and the bulldozing force and the motion of the model keel were measured. Furthermore, a model pipeline to which a strain gauge had been attached was buried at a depth of 15-20 cm from the predicted scour surface, and stress and strain acting on the model pipeline during a gouging event were measured. We showed our mechanical model¹⁾ could be applied to scour events not only on a small scale but also on a medium scale. We also discuss similarity law between medium-scale test results and small-scale test results, stress and deformation acting on the model pipeline.

Key Words : *Ice Scour, ridge- keel, Medium scale model test, bulldozing force, similarity law, Pipeline, Scour curve*

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、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。別編「様々な条件下におけるIce Scour Eventに関する実験的研究」²⁾にもあるよう、著者等は従来から様々な条件下でice scourに関する室内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³⁾⁴⁾。また著者らの提案する力学モデル¹⁾を介して実験結果と比較することによりそのメカニズムを間接的に議論してきた。しかしながら、実現現象の規模は数十m級であり、小規模な模型実験のみでice scourの挙動特性を一般的に理解するには相似性の面からも不確定要素が多く、定性的な域を脱していなかったのが現状である。実際、遠心載荷模型実験等が実施され(特に地盤が粘性土の場合)、実現現象の挙動をよく再現できたという報告も

ある⁴⁾。本研究では中規模程度の野外実験を実施し、従来から行われている室内模型実験と合わせて新たな考察を加えることを目的とする。その際、①上記力学モデルを中規模程度の実験にも適用できるかの検証、②模型実験との力学的相似性の検討、を主目的としているが、さらに、地盤中に模型パイプラインを埋設し、scour eventにおけるパイプラインの挙動特性についても考察した。一般にIce scourから構造物を保護するために、推定される掘削深以下にパイプライン等の構造物を埋設しても、地中を伝わる土の移動・応力伝達があるため決して安全であるとは保障できない。上記の試みは、小規模模型実験で計測することは困難であり、現地に合流して行ったものであるが、懸念されるsub-scour deformation⁶⁾⁷⁾についても検討することを目的としている。

2. 実験方法

実験場所は海底勾配の異なる、サロマ湖(三里浜)

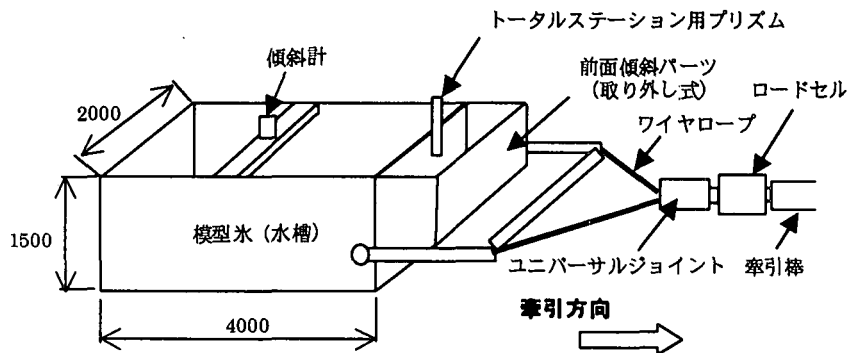


図-1(a) モデル氷の概要図

備考

模型氷：鋼製
 模型氷寸法：幅2000mm 長さ4000mm
 高さ1500mm
 模型氷喫水深：ターゲット約1m
 模型氷重量：74kN(ウエイト込み総重量、ポリタンクで調整)
 牽引重機：クローラークレーンまたはパワーショベル使用

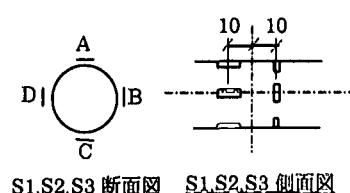
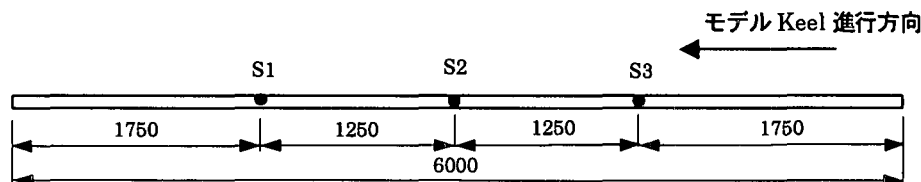


図-1(b) 鋼パイプにおける歪ゲージ取り付け部

(勾配1/6～1/8)，石狩湾（新港西地区）（勾配1/15～1/20）の砂浜にて行われた。基本的には、図-1(a)に示すよう、幅2m、長さ4m、高さ1.5mの寸法を有する氷を模擬した箱型の水槽（自重25kN、ウエイト込み総重量74kN）を喫水約1m地点に浮かべ、牽引棒を介して陸方向に重機で牽引した。なおウエイトとして現地海水入りのポリタンク（18個）を使用し、上述した所定の喫水を調節し、あるいは模型氷のバランスをとるために用いた。氷が牽引されると、模型氷（モデルkeel）が海底を掘削していく。その場合の模型氷の挙動（掘削線）またBulldozing force(重機による牽引力)を計測した。氷の挙動については、自動追尾型トータルステーション、傾斜計を用いて計測し、また予備的にレベル計測（模型氷にレベルを取り付けビデオカメラで追跡）も行い、後に状況によっては補足的な面で利用した。また牽引力はユニバーサルジョイントと牽引棒との間に取り付けられたロードセルによって計測した。また氷の挙動は模型氷の前面形状に大きく依存し、模型氷の前面部の傾斜角は水平から測って90度、45度の2種類について行った。なお、45度のテーパを有するパーツ（自重2.45kN）は取り外し式となっている。ここで、小規模模型実験との力学的相似の検討を行うとともに、提案されている力学モデルを用いてBulldozing forceの推定を行い、実測値と比較することで、間接的にこの力学モデルの現地適応性の可能性への評価を行った。また実験ケースによっては、削られることによって生じる砂の堆積高さを計測し計算値と比較した。さらに歪ゲージを取り付けた模型パイプライン（ステンレス製：外径30mm、肉厚1mm、長さ6000mm）を模型氷の進行方向に平行に、所定の深さで埋設し、イベント中にパイプラインに作用する応力、歪みを計測してその挙動を調べた。図-1(b)に歪ゲージの取り付け位

置を示す。歪ゲージは3箇所のグループに貼り付け、その位置を岸側よりS1, S2, S3と名づける。1箇所につき、パイプの周方向に4点、その各点に縦横2枚づつ、計8枚取り付けた。パイプラインは海底勾配に平行に所定の深さに埋設した。なお所定の深さのターゲットは海底面から20cmとしたが、厳しい環境条件の中、正確に埋設することは困難であり、±5cmの誤差はあるものと認識している。一般にパイプライン等埋設構造物が直接的に氷と接触しなくても、前述したsub-scour deformationが懸念されており、未だ定性的ではあるが、その現象について検討するものである。実験後、模型氷と砂との動摩擦試験が行われた。方法は母体を陸に揚げ、平坦な位置を選び、上記と同様な方法で重機で牽引した（本実験と同じ速度）。ここで摩擦はクーロン摩擦と仮定し、母体のウエイト（ポリタンクの数）を変化させる事により4回測定し、摩擦角を算定した。また海底砂は資料として持ち帰り、後日、一面せん断試験、ふるいわけ試験等がおこなわれた。表-1に実験が実施された場所での現地砂についての情報を示す。

表-1 現地砂の特性

	サロマ湖	石狩湾
実施エリアの海底勾配	1/8～1/6	1/20～1/15
中央粒径(mm)	1.325	0.371
均等係数	4.66	1.54
内部摩擦角(間隙比0.6)	33°	39°
安息角	32°	37°
比重	2.72	2.69
水中単位重量(kN/m³)	10.5	10.4
模型氷と砂との動摩擦係数	0.29	0.26

注：1) 内部摩擦角、水中重量は間隙比0.6と仮定した場合の値
 2) サロマの砂は礫が多少含まれていたが予め20mm以上のものは除去している。

尚, Ice scour eventにおいて無論, 地盤が継続的に破壊し, 常に砂の相対密度 (間隙比) 等が変化しており, 現位置での砂を調査するのは (技術的にも) 困難であるので, 間隙比を0.4~0.8の間で仮定している (次章参照). また上記の砂の内部摩擦角, 水中単位体積重量は間隙比0.6の場合の値である.

3. 実験結果及び考察

(1) 力学モデルの検証及び掘削線の比較

力学モデル¹⁾を用いて推定されるbulldozing force (計算値) と実測値の比較の一例を図-2(a) (サロマ), 図-2(b) (石狩) に示す. 尚, 砂の特性値についての要素試験 (表-1) は行っているものの, 現地での不確実性があるため, 内部摩擦角, 安息角を $\pm 5^\circ$, 間隙比0.4~0.8の範囲を, 砂と模型氷との動摩擦係数については変動係数0.3程度のバラツキを仮定した. 従ってこれらの範囲の値を用いた計算値ではその最小値と最大値を図に示している.

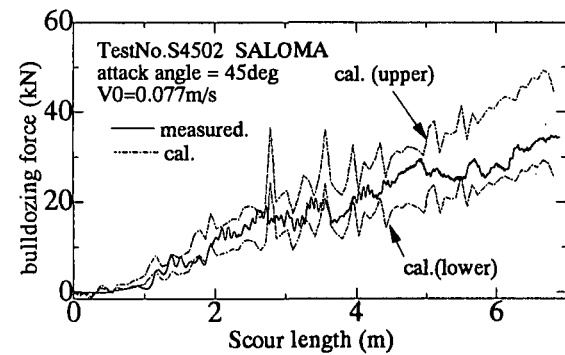


図-2(a) 計算値と実測値 (サロマ)

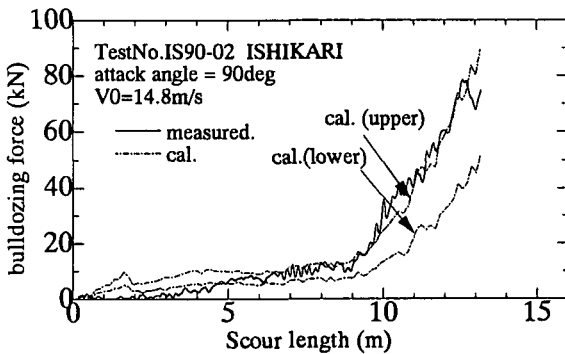


図-2(b) 計算値と実測値 (石狩湾)

図は一例ではあるが, 多くの結果において実測値は計算値の上側 (最大値) と下側 (最小値) の間にある. また, 図-3は, イベント中の (氷の前面に堆積する) 砂の堆積高の実測値と計算値を比較したものである. 堆積高の測定は, 水中域では困難であるので, 堆積した砂が水面上に露出した時から測定を開始し, ビデオカメラで追跡することにより行った. 厳密には空中に露出した砂は負圧状態となっており

(メニスカス), 若干の引張抵抗を示す. 従って見かけ上の安息角が大きくなり, 堆積高も水中域と比較して大き目になる事が予想される (計算ではこの効果を考慮していない). 図-3を見てみると, やはり後半部で実測値は計算値より若干大き目に推移している. しかしながらこの条件の違いを認識しながらも, 比較的, 計算値は実測値をよく表現していると言える. これは砂の側部への流出機構モデルが概ね妥当であることを示し, 上記力学モデルが妥当である一つの根拠を示している.

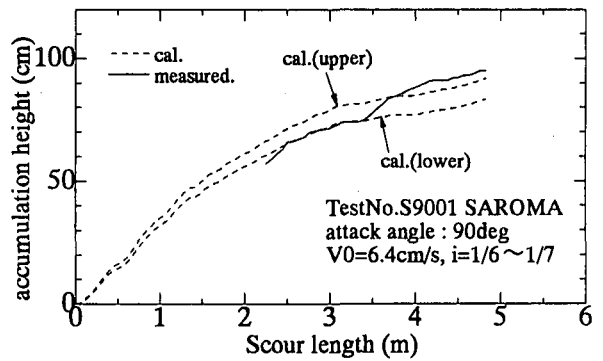


図-3 砂の堆積高の計算値と実測値 (サロマ, 一例)

以上の事は, 本力学モデルが小規模模型実験のみならず中規模程度の現象にも適応できる (移動速度が比較的遅く間隙水圧が発生しない砂質土において) ものと思われ, さらに実規模の現象にも適用できることを主張するものである. また, 別編「様々な条件下におけるIce Scour Eventに関する実験的研究」²⁾とも関連するが, 移動速度が20cm/s近くの場合のbulldozing forceの計算値と実測値は概ね一致していることを確認している. これは模型実験の際に用いた砂の粒径より現地砂の方が遥かに大きく, また間隙水圧を考慮していないモデルから得られる計算結果と一致していることから, 現地においてはこの速度では間隙水圧の発生はなかったかあるいは極めて小さかった事が考えられる.

次に掘削線 (scour curve) の実測値について考察する. 図-4にattack angle (模型氷の前面傾斜角) が45deg (破線), 90deg (実線) の場合のscour curveを示す.

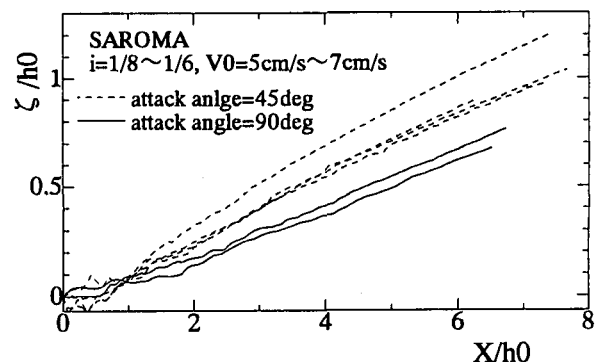


図-4 各attack angleにおけるscour curve (サロマ)

なお縦軸，横軸はそれぞれcurveとscour length（移動距離）を模型氷の初期喫水深（ h_0 ）で除したものである。図を見ると，45degの場合の方が上方への上昇量が大きく，あまり削られない傾向にあるが，主として砂と氷の前面部とのすべりが顕著なるためであると考えられる。これらは従来から行われている室内模型実験と同様な結果となった。

(2) 力学的相似に関する検討

ほぼ同一条件で行われた小規模模型実験のデータ（数回のデータのアンサンブル平均）を用いて，中規模実験（石狩湾:attack angle=90deg）とのbulldozing forceと掘削線（模型氷の移動軌跡）の相似性を調べた（縮尺比約1:5）（図-5上）．図中のBulldozing forceについては小規模模型実験のデータをフルードの相似側を用いて中規模実験規模のオーダに変換した値である． $X>9m$ で現地の実測値（実線）の方が模型実験の結果（破線）より上側に推移しているが，その付近でちょうど現地の海底が急勾配になっているためであると思われる．このBulldozing forceの急変は，力学モデルを用いたシミュレーションでも実証することができた（図-2(b))．この事を考慮すれば，両者は概ね一致していると考え，即ちbulldozing forceはフルードの相似則を満足することが推察される．また掘削線（図-5下）も野外実験の勾配の不均一性を考慮すれば，両者は大きく異ならないものと考えられる（幾何学的相似性）．ただし，上記において，室内模型実験については模型氷を後方から牽引台車で押している等の相違はあることを付記しておく．

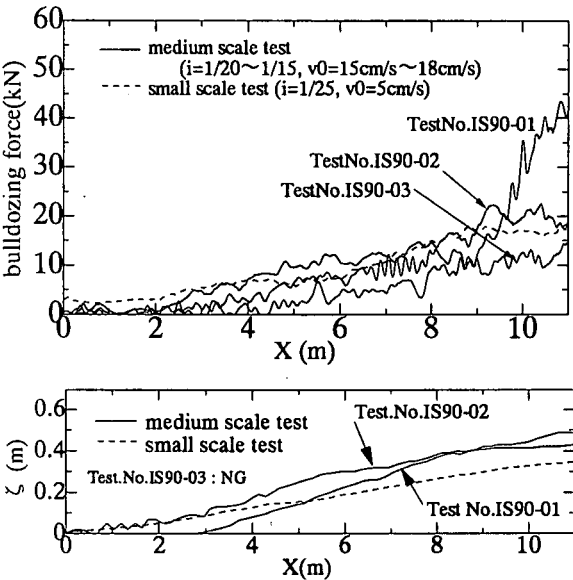


図-5 Bulldozing forceとscour curveの相似性の検討

しかしながら，上記のような実験において本質的に相似則を満足するかは別途考慮が必要である．一般に，構造物等，主に自重によって生じる砂の変形・発生応力は，1-gの模型実験では再現できず，相似

とはならない．本実験の場合も浮力の減少分による自重の増加がこれに該当する．従って厳密には砂の変形・発生応力は相似となっていないと考えられる．しかしながら上記より相似則を概ね満足していると思なせるということは（詳細は省略するが），①応力レベル・変形の相似性に鈍感な物理量で比較している（応力レベルではなく全体量を比較している），②curveは自重による沈下を含めた変形の連続量であるが，モデルkeelの地盤への接地面積が現地の方が相対的に大きく応力レベルに換算すれば模型実験と大差がない，あるいは本質的にこの項の寄与が小さい（その他の寄与，angle効果によるすべり，すべり線の効果の方が大きい），等が考えられる．

次に前述の力学モデルを用いたシミュレーションによってその相似性を検討してみた．まず室内実験規模（代表長さ L_1 ；喫水深20cm，氷自重600N，移動速度8cm/s，angle=90deg）を基準とし，scour length $X(<3m)$ に沿ってbulldozing force(F_1)を算定しておく．次に相似比(L_n/L_1)が10, 30, 50, 100におけるbulldozing force(F_n)を算定する．scour length（相似比で除したもの）に沿った各相似比における F_n/F_1 の3乗根を示したものが図-6である．

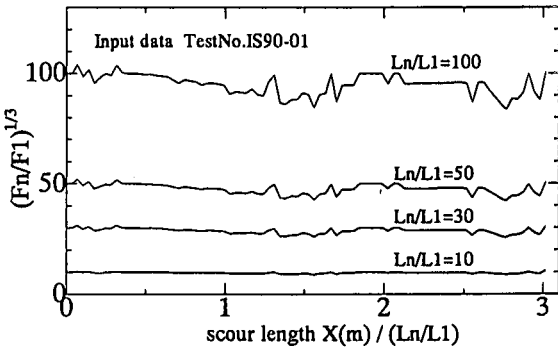


図-6 シミュレーションによる相似則の検討

尚，入力に与えた砂の特性，海底勾配等は相似比によらず全て同じ値とした（今の場合，前述の石狩湾での値を採用している）．ただし，力学モデルは氷の速度項を含んでいるが，その移動速度 V_0 は相似比の平方根（フルードの相似側）を乗じたものを与えた．また重要な概念である掘削線（scour curve）は幾何学的な相似が成り立つとして相似比によらず，すべて同じものを与えている．図を見てみると，あくまでscour curveを同一と仮定した場合bulldozing forceはフルードの相似則を概ね満足している事が分かる．ただ相似比が大きくなればその値が不安定（力の3乗根がその相似比を中心に正負に振動している）になる傾向にある．これは主として単なる数値的な誤差であると考えられる（scour curveを離散データとして与えた時，規模が大きくなれば，力学モデルに含まれる微分項の誤差が大きくなる）．いづれにしても，シミュレーションにおいても形式的には，scour curveを同一と仮定した場合bulldozing forceはフルードの相似則を満足

する事が保障される。従って実験でbulldozing forceのみを模型実験で推定する場合は、該当する現地と同一な砂と海底勾配、それに速度はフルードの相似則を考慮したもので実験すればよいことになる。しかしながら、別編「様々な条件下におけるIce Scour Eventに関する実験的研究」にも論じたように、速度が上昇すれば間隙水圧の発生（結局は砂の粒径に依存）があり、上記の相似則を満足できず、場合によっては、砂の粒径、移動速度を制御しなければならない（上記力学モデルでは間隙水圧の上昇は考慮していない）。さらにscour curveについても自重による沈下の概念より厳密には相似則を満足しないであろうことは前述した。これらの取り扱いについては別途考慮が必要で現在検討中である。

(3) 埋設された模型パイプラインの挙動特性

図-7に一例として、パイプラインに作用する軸力、曲げ応力、それにkeelによって削られ深さ（Scour depth）を示した。尚、このデータはサロマで実施した場合のものである。まず図-7(上)には各ゲージのポイント毎（S1, S2, S3）の軸力を示したものである。横軸には、keelの移動距離（keel隅角部を基準とする）を表し、この例では、keelスタート地点から模型パイプラインの先端部までの水平距離は140cmである。また軸力で、負の値は圧縮を、正の値は引張を表す。また図中には、keel隅角部がそれぞれS1, S2, S3の直上に来た時の位置が記してある。図を見てみると、数MPa程度の軸力が存在し、これは水平方向のkeel移動に伴ってパイプに沿った砂の変形、移動によるせん断応力が作用していると見なせる。S1, S2, S3共に、keel隅角部がパイプ先端を通過する丁度140cmあたりから急上昇し、一つのピーク（圧縮力）を迎え、一旦減少している。①この付近でkeelは最もパイプに近づいている、②パイプの端部（断面）にも応力伝達（砂の移動・変形）が及んでいる。等が挙げられる。以後一旦減少するのは主に、上記の効果が除去されるためであると考えられる。この付近で大きさの順位は $S3>S2>S1$ であり遠方へはせん断応力は伝わりにくく、またパイプに沿った局所的な砂の移動による非一様な軸力であることが分かる。以後の増減は、scour depth, 事実上の海底勾配の局所的な増減、砂の空間的不均一性、膨張・収縮破壊等に起因する不規則性であると考えられる。しかしながら、keel隅角部がそれぞれS1, S2, S3の直上付近に来た時、軸力が0レベルまたは引張に転じているのが分かる。これは前述した「局所的な砂の移動によるもの」であり、keel隅角部が各ポイントを通り過ぎれば、それ以降のパイプのみに圧縮力が作用し、通過後のパイプが拘束されていれば、逆に引張に転じると考えられる（厳密には通過前からkeel隅角部より前面に砂の移動領域が広がっていることを考慮すべき）。事実、keelの移動が進むほど、引張力が大きくなっている。このことは更に、①各S1, S2, S3を通過するまで、（非一様な）各軸力は同じように増減している、②通過後は

互いの軸力はそれぞれ一致するようになる（通過後のパイプに沿う砂の局部移動はないから一様な軸力となっていると考えられる）ことから分かる。

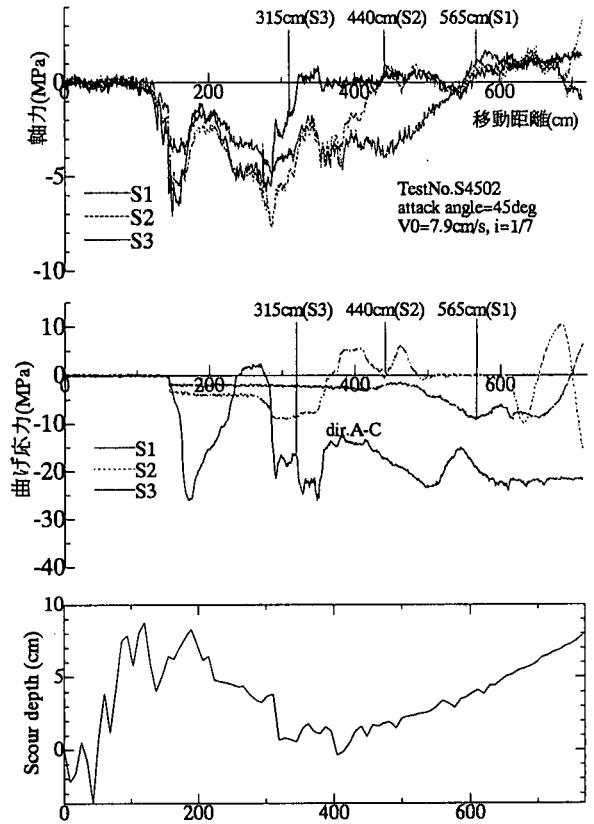


図-7(上) パイプラインに作用する軸力
図-7(中) パイプラインに作用する曲げ応力
図-7(下) Scour depth

次に図-7(中)に各S1, S2, S3地点に発生するA-C方向の曲げ応力を示す。AからCの方向に曲げが作用した場合をマイナス表示している。曲げ応力発生は、keelの浮力減少による鉛直力の増大（鉛直方向の砂の移動・変形）、上記の弾性座屈的な要素から構成される。keel隅角部が各ポイントの直上に来た時に極値を示しているものの、複雑な挙動を呈しており、グラフから直接考察することは困難である。二次元の弾性計算（弾性床土）から推察される挙動から、実測値に見られるような「プラスの曲げ応力の存在」や、「最大値はkeel直下で生じるとは限らない事」等が説明される。しかしながら本質的な挙動まで二次元の弾性計算では表現する事ができなかった。理由は様々挙げられるが、まず実験のセットアップに問題がある可能性があり、述べたように水中作業等、極めて厳しい環境状態の中での作業性にともなうパイプラインの埋設深さの不均一性、パイプに沿って存在する砂の状態に関する情報不足（埋め戻し砂も含む）等、反省すべき点があることも認識しなければならない。また本質的に二次元で近似できない事、また地盤反力係数の与え方ひとつで、かなり大きく変動し、またそれは杭径や貫入量によって変化する量であり、またパイプに沿った砂の不均一

性を考慮すれば、なお更である。また砂の塑性変形が原因であるとも考えられる。S3の後半部の挙動に見られるように、パイプ自体は弾性域にあっても、砂が塑性変形し、パイプが拘束されている可能性がある。本来、砂の破壊が連続的に生じており、内部要素は連続体として取り扱えないのでこのような曲げ応力の挙動の再現は容易ではない。しかしながら別編「様々な条件下におけるIce Scour Eventに関する実験的研究」で得られた知見を利用するとともに、ある種の仮定を設け、3-D弾塑性FEMでシミュレーションすることにより現象の傾向を把握する余地がある。

いづれにしても、本実験の場合、模型パイプラインには数十MPaの曲げ応力が作用し、実験ケースによってはパイプライン自体が塑性変形に至る場合もあった事には注目に値する。本実験において、未だ定性的ではあるが、パイプライン等埋設構造物の設計または敷設には直接氷にヒットしないことはもちろん、地盤の砂の移動・応力伝播を考慮しなければならないことを確認した。

5. おわりに

本研究で得られた主な成果・知見を以下に示す。

1. 間隙水圧が顕著に上昇しない場合（無視できる場合）、著者らが従来から用いている力学モデルが中規模程度における現象にも適応できることを示し、さらには実規模においても適応できる可能性があることを示した。
2. 掘削線 (scour curve) において、attack angle が90degの場合、45degに比べて下側に変位し、室内模型実験と同様な傾向を示した。
3. やや条件の相違はあるものの、bulldozing forceについて概ねフルードの相似則を満足していることが分かった。またシミュレーションによる相似性の検討でも、scour curveが幾何的な相似性を仮定し、かつ間隙水圧を考慮しない場合、フルードの相似則を満足することを形式的に示した。
4. 実施した実験条件下では模型氷直下での砂の局部移動・応力伝達を確認された。模型パイプラインには数十MPaの曲げ応力が作用し、実験ケースによってはパイプライン自体が塑性変形に至る場合もあった。未だ定性的ではあるが、パイプライン等埋設構造物の設計または敷設に

は直接氷にヒットしないことはもちろん、地盤の砂の移動・応力伝播を考慮しなければならないことを確認した。

前述のように相似則に関しては、間隙水圧の取り扱い（従って構成する砂の粒径、氷の速度の依存性）、あるいは掘削線の相似性を明確にしていかななくてはならず、別途考慮が必要である。また現地実験に際して日程・費用あるいは現地の厳しい状況下という面で、数多くの実験を実施することができなかったため、さらに本年度も現地での追加実験を予定している。さらには前述のとおり特にパイプラインの挙動実験に際し、精度を高めるための工夫も必要で今後の課題は多い。

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り、同社の多大なご支援を頂いた。また石狩湾新港での現地実験の際には、北旺建設(株)取締役大川氏にご協力を頂いた。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 Sacki, 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, 松尾優子, 佐伯浩: 様々な条件下におけるIce Scour Eventに関する実験的研究, 海洋開発論文集(投稿中), Vol.17, 2001.
- 3) 木岡信治, 安永喜勝, 西根秀如, 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, pp.185-190, 2000.
- 4) 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.
- 5) Clark, J.I., et al.: Development of a design methodology for pipelines in ice scoured seabeds, Pipeline Technology ASME, Vol.5, pp.107-125, 1994.
- 6) Woodworth-Lynas, C.M.T.: Sub-Scour Deformation and the Development of Ideas from Field Work in the Last Decade, Proceeding of Ice Scour and Arctic Marine Pipelines Workshop, Hokkaido, Japan. Published by C-CORE, pp.33-38, 1998.
- 7) Eyles, N. and Clark, B.M.: Storm-influenced deltas and ice scouring in a late Pleistocene glacial lake, Geological Society of America Bulletin, 100, pp.793-809, 1988.