

# Ice Scour Event [氷による地盤掘削現象]に関する計算モデルの現地への適用性に関する一考察

## APPLICATION OF THE MECHANICAL MODEL FOR ICE SCOUR EVENT TO A FIELD SITE

木岡信治<sup>1</sup>・窪内篤<sup>2</sup>・佐伯浩<sup>3</sup>  
Shinji KIOKA, Atsushi KUBOUCHI and Hiroshi SAEKI.

<sup>1</sup>正会員 博 (工) (独)北海道開発土木研究所港湾研究室 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

<sup>2</sup>正会員 (独)北海道開発土木研究所港湾研究室 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

<sup>3</sup>正会員 工博 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)

Ice-Scour Event is a phenomenon that occurs when deformed ice such as an ice ridge comes into contact with seabed. Ice-Scour has been reported to cause damage to communication cables and water intake pipelines. Our final goal is to develop the method for estimation of scour depth, or optimal depth of a buried structure such as a pipeline in order not to contact an ice keel.

This paper reports on the application of the *mechanical model* that we had developed to field site. As a result of calculations using the model, orders similar to those in the field observation data – the scour length of several tens of meters to several kilometers and the scour depth of several tens of centimeters to several meters – were found. We also found that the interactions of pack ice/level ice surrounding an ice ridge as a driving force would greatly affect the performance of scour events.

**Key Words :** Ice Scour, Scour depth, Scour length, ice ridge, driving force

### 1. はじめに

Ice Scour Eventとはice ridgeなど喫水の大きな氷塊の移動による海底地盤の掘削現象であり、パイプラインなど海底構造物の被害が報告されている(例えば, Duval [1975]<sup>1)</sup>, Grass[1984]<sup>2)</sup>). 著者等が意図する最終目的は氷による掘削深(scour depth), ないしは, 氷と海底構造物とが直接干渉しないような合理的な埋設深度の推定手法である. 著者等は従来から様々な条件下における小規模・中規模程度の模型実験を通じてIce Scour Eventにおける力学的相似や海底掘削プロセスを明らかにしてきた<sup>3)4)5)6)</sup>. また, 氷と地盤との相互作用のモデル化と氷の運動方程式を含む力学的(計算)モデルを構築し<sup>3)</sup>, 小規模・中規模実験によりその妥当性を示し, 実規模へ適用できる根拠を得た<sup>4)6)</sup>. 本研究では, 上記の最終目的に鑑み, まずは, その力学モデルを現地(実規模)へ適用(変換)することを試み, 幾つかのモデルケースを設定して感度分析を実施した. そこで本モデルの妥当性について検討すると同時に, ice ridgeを取り巻く環境条件の相違に応じたice scourの特性について推論した. また同時に, 入力値となるice ridgeの質量分布についても検討した.

### 2. Scour curveと掘削深の推定手法

Scour curveとは, 氷の運動を側面から追跡したとき, 実現するであろう掘削跡(軌跡)と定義するが, それは, ほぼ例外なく直線近似可能であることを確認した<sup>6)</sup>. これは氷が水平に貫入していくのではなく, 上方に変位(ライドアップ)していく事を意味し, 中規模程度<sup>4)</sup>, あるいは実規模レベル<sup>7)</sup>においてもこの傾向が報告されている. また, このcurveは小規模・中規模模型実験の結果より, 実用的には幾何的相似が仮定できることを示した<sup>4)</sup>.

一方, 本実験では模型氷を水平方向に一定速度の強制変位を与えたに過ぎない<sup>3)</sup>. 実現象では, 流れ・風・さらにはridgeを取り巻く氷盤群・平坦氷による相互作用(破壊が生じるため無限ではない)を含む環境力(driving force)は有限である限りridgeが地盤に接触したのち, 減速しつつ, いずれ停止する. 一方, 氷と地盤との相互作用のモデル化と氷の運動方程式を含む基本力学モデル<sup>3)</sup>を構築し, bulldozing force(掘削状態の氷の移動速度を一定に保つために必要な水平方向の力)<sup>4)</sup>の実験値と計算値の比較により間接的にその妥当性を示してきた<sup>4)6)</sup>. Scour-curveは既知(実験値を与える)である

として、計算した場合である。この理論的導出が困難な Scour curve を与えれば、その力学モデルにおける bulldozing force を環境力に置き換える事により、停止距離が算定でき、その幾何的關係により、任意の水深における掘削深が算定できる。また curve については直線性の仮定と、代表パラメータを与えることによって簡略化できる<sup>8)</sup>。これには予め様々な条件を変える事によって得られた実験データを学習・汎用化するため一つの方法としてニューラルネットワークを用い、任意の環境条件を入力した場合の、Scour curve のパラメータを推定（出力）するためのシステムを構築し、その有効性を示した<sup>8)</sup>。以上のアイデアは、理論的手法のみでは困難な部分を実験データの情報を合理的に利用するという試みであり、理論と実験的な手法を融合した手法である。ここで掘削深算定の手順例を以下に示す。

- ① プロジェクトの決定・実験の実施
- ② Scour curve の実験データの学習・汎用化
- ③ 確定量と見なされる環境パラメータの入力
- ④ 種々の環境パラメータの乱数発生
- ⑤ 学習済ニューラルネットワークへの接続 (Scour curve のパラメータ出力)
- ⑥ 力学モデルを用いて掘削深を算定する (運動方程式を解く、停止距離・掘削深の算定)。
- ⑦ ④～⑥を所定の回数繰り返し、掘削深分布 (水深別) を獲得

本研究範囲では上記⑥について紹介し、次節に、上記の模型実験用に構築された力学モデルを現地へ適用できるようなモデルに変換することを試みる。

### 3. Scour Event の基礎方程式と環境力

氷と地盤との相互作用のモデルおよび氷の運動方程式から成り立つ力学モデル<sup>3)</sup>を、前述の観点より、bulldozing force を次式の環境力に置き換え、Scour length ( $X$ ; 氷の地盤接触地点からの水平変位)に関する常微分方程式に帰着させる。

$$F_{driv} = \frac{1}{2} \rho_a C_{da} B H_s V_a |V_a| - \frac{1}{2} \rho_w C_{dw} B h_b \left\{ \frac{\partial X}{\partial t} - V_s \right\} \left| \frac{\partial X}{\partial t} - V_s \right| + U \left( \frac{\partial X}{\partial t} - V_i \right) F_i \quad (1)$$

式(1)の右辺第1項は風による形状抵抗力、第2項は ridge の移動と流れによる形状抵抗力である。また  $\rho_a$ ,  $\rho_w$  はそれぞれ空気と海水の密度、 $C_{da}$ ,  $C_{dw}$  はそれぞれ、氷と空気の形状抵抗係数、流れによる形状抵抗係数、 $V_a$ ,  $V_s$  は風速と海流 (潮流) 速度で、風速は氷の移動速度より十分大きいと仮定している。また風によるせん断抵抗力、流れによるせん断力、揚力などは無視している。最後の項は単位ユニット関数  $U(\cdot)$  を用いた ridge を取り巻く氷との相互作用 (Pack

ice driving force) による付加的な力  $F_i$  を表す。即ち Event 中の ridge の移動速度  $V$  が初期の移動速度  $V_0$  もしくは周りの平坦氷や氷盤群 (あるいは Pack ice) の移動速度  $V_i (=V_s)$  よりも遅い場合に発生し、ここでは、フィールドワークの結果より Pack ice driving force として提案されている次式を用いた (例えば Croasdale(2000)<sup>9)</sup>)。

$$\begin{aligned} & \text{構造物 (氷) の幅を } B, \text{ 氷厚を } h_i \text{ として,} \\ & 0 < B < 100m, \quad F_i = 500 B h_i^{1.25} \text{ (kN)} \\ & B > 500m, \quad F_i = 150 B h_i^{1.25} \text{ (kN)} \\ & 100 \leq B \leq 500m, \quad \text{linear-interpolation} \end{aligned} \quad (2)$$

上記は氷海構造物に作用する力をベースとした知見であるが、ice ridge も一種の構造物と見なすということである。したがって ice ridge の周辺に無限の平坦氷もしくは Pack ice が広がっていても、破壊や ridge 形成の発生によりその力には限界があり、Ice driving force limit と言われている。後にも示すよう、理論的には、この環境力が Event 中に作用する地盤の抵抗を上回っていけば一定速度で運動し、逆に地盤の抵抗が氷の水平変位とともに上昇していき遂に環境力を超えれば、必ず減速して停止に至る。春先など Open water の時期には、単独 ridge となる場合が多く、 $F_i = 0$  となるであろう。

前述のように、Scour curve ( $\zeta(X)$ ) を  $\zeta(X) = aX$  として直線近似し、運動方程式は最終的には、

$$\frac{d^2 X}{dt^2} = f \left[ \left( \frac{dX}{dt} \right)^2, \frac{dX}{dt}, X \right] \quad (3)$$

の形にまとめられる。また、初期条件として、

$$\frac{dX}{dt}(t=0) = V_0, \quad X(t=0) = 0 \quad (4)$$

を考慮して方程式 (3) を数値的に解いて、最終的には、 $dX/dt(t=tf) = 0$  となるような、氷の停止位置 (最大 Scour length, 以下掘削長とよぶ)  $X_f = X(tf)$  を算出することになる。この  $X_f$  が算定できると、その幾何關係により掘削深を算定することができる。

### 4. Ridge の形状モデルと重量 (質量) 分布

上記の運動方程式には ice ridge の質量や氷の形状 (attack angle) が含まれているが、これらについて検討しておくことは重要なプロセスの一つである。Iceberg についてはキュービック形や直方体で近似されることが多いが、今対象とする変形海氷である ice ridge は、極めて複雑な形状や内部構造を有しており、それはまた海域や生成過程、年齢等多くの環境条件に依存し、単純には同定できない。しかし

従来から現地のプロファイルデータに基づいて単純化したridgeモデルが提案されている。その中でも Beketsky (1997, 1998)<sup>10)11)</sup>はサハリン沿岸域の調査データに基づいて、着底して発達したstumkha, 三角形の断面形状をもつ比較的若い浮遊状態のridgeモデル, それに台形状断面の発達したice ridgeモデルについての単純化した幾何構造等を提案している。本研究では、まずは、Beketskyの提案した発達したridgeモデルを多少改良して採用することにした。この発達したridgeモデルは、浮遊ridgeが他のridgeや平坦氷とのraftingなど複合的相互作用によって形成されたものと考えられる。そのモデルと、各幾何パラメータの関係を図-1に示す。

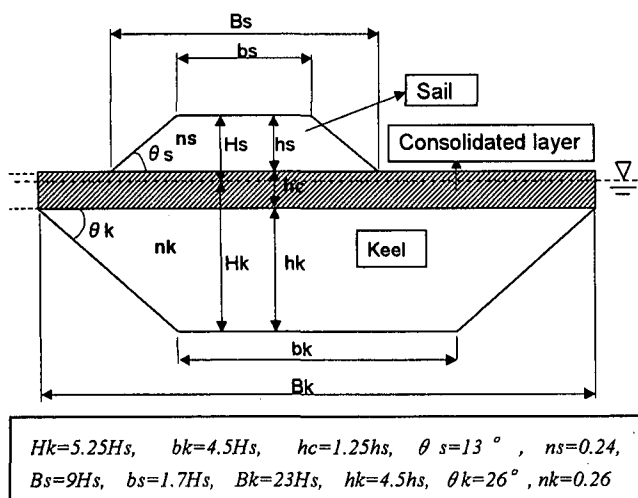


図-1 ice ridge の形状モデル (Beketsky1997, 1998)

上図のうち、水面上下の部分はそれぞれ、sail, keelと呼ばれる。各幾何パラメータの添字 $s, k$ はそれぞれ、Sail, Keelを表す。また主なパラメータの説明として、 $Hk$ は喫水深 (keelの長さ= $h_0$ )、 $hc$ は固結層部 (Consolidated layer) の厚さ、 $Hs$ は水面からridgeのSailトップまでの距離、 $ns, nk$ はそれぞれSail, Keelの間隙率、 $\theta k$ はattack angleである。これらの主張するものは、観測しやすい量 $Hs, hs$ が分かればridgeの全体構造が推定できるということである。しかしながら上記は間隙率やattack angleが具体的に与えられた確定量となっており、あくまでこの条件における幾何パラメータの関係である。本研究では将来的には、喫水深やattack angle等を確率変数として扱うことを想定しており、上記の関係式をやや補正する必要がある。この場合、任意の喫水深 ( $Hk=h_0$ ) とattack angleが与えられた場合を考え、上記のうち、 $bk=4.5Hs, hc=1.25hs, hk=4.5hs, bs=1.7Hs$ の関係は成り立つと仮定し ( $Bk$ と $Bs$ は従属的に求まる)、そのまま用いる。一方この条件で $hs$ を未知数とし、間隙率を考慮した氷の自重と浮力との釣り合い関係により $hs$ を算出すれば、ridgeの幾何構造と氷の重量 (質量) が求まり、式(5)にその簡略

形を示す。ただし、重量( $Wg$ )は単位幅当りのものであり、 $\Omega(), \Omega'()$ は関数を示す。

$$hs = \Omega(nk, ns, \theta k, \theta s)h_0 \quad (5a)$$

$$Hs = hs + hc + hk - h_0 = 6.75hs - h_0 \quad (5b)$$

$$Wg = \Omega'(nk, ns, \theta k, \theta s)h_0^2 \quad (5c)$$

このように考えるとkeelの空中重量( $Wg$ )は初期喫水深 $h_0$ の2乗に比例することが分かる。なお、固結層部の横一面には平坦氷が連続しているものと考えられるが、暗に氷厚が薄い部分で分離していることを想定し、図に示すような領域のみを考えた。以上は、Beketskyモデルの改良型であるが、実際には各幾何パラメータ相互の相関がありえ、上記の仮定は正しいとは言えないが、ridgeの構造は本来極めて複雑で、ここでは喫水深 ( $h_0$ ) と氷の重量 ( $Wg$ ) を結びつける一つの根拠として導入していることになる。ゆえに確率変数である喫水深とattack angleが与えられれば式(5c)より従属的に氷の重量が求められ、計算上都合が良い。ここで、やや定性的ではあるが、上記の補正されたモデルを用い、その重量分布(式(5c))について検討してみる。その場合、確率変数であるattack angle ( $\theta k$ )、喫水深 $h_0$ の分布を与えなければならないが、詳細な情報に乏しく以下のように仮定した。まず、attack angle ( $\theta k$ ) の値は、他の実海域においても、ridgeのプロファイルデータより幾つか提案されており、30deg.前後といった報告が多く、このBeketskyモデルも26deg.と提案している。ここでは、平均30deg., 変動係数0.2, 上限値90deg., 下限値を20deg.をもつベータ分布と仮定した ( $\theta s$ は $\theta k$ と1の相関があるとし、その平均はこれより6 deg.小さいものとした)。また $h_0$ を平均10m, 変動係数0.5の対数正規分布と仮定した。また本来それらの同時分布を考慮する必要があるが、述べた様に情報に乏しく、簡単のため互いに独立とした。

ridgeの奥行き $B$  (length) を $Bk(h_0)$  (width) に一致すると仮定される場合があるが、まずこの場合のシミュレーションにより生成された氷の重量の頻度分

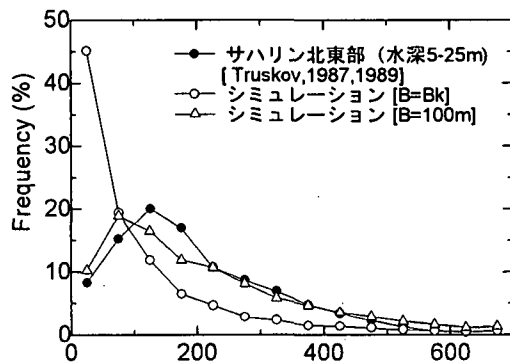


図-2 ice ridgeの重量分布 (サハリン北東部, Truskov, 1987, 1989) とシミュレーションによる分布との比較例

布を図-2 (○印) に示す。このとき氷の重量は $h_0$ の3乗に比例するため見た目は指数分布に近い形状となっている。 $h_0$ を対数正規分布と仮定したから、その2乗、3乗も対数正規分布に従う。実際の海域の分布と比較すると、例えばTruskov(1987, 1989)<sup>12)13)</sup>によればサハリン北部における水深5m~25mの海域では、およそ10~30kt(98~294MN)と報告しており、そのモードは125MNと推定される。この頻度分布も図-2 (●印) に示した。この分布も比較的強い正の歪みをもっているが、シミュレーション結果程ではなく、現実には $B$ (length)が $h_0$ と相関をもつとは限らない事が予想される。事実、参考までにサハリン北部におけるstamukhaの形状(水深6~15m程度)に関する調査結果(Beketsky, 1998)<sup>14)</sup>から奥行き $B$ と幅との標本相関(標本数18)を推定した結果、相関は0.5程度となり、決して高いとは言えなかった。

次に、 $B=100$ mとして計算したものを図-2 (△印) に示す。この分布形状はやや歪みが緩和され、実測の分布形に近づいたのが分かる。この場合平均値はやや大きくなっているが、中央値で比較すると同程度であった。次に別の検証例を示す。D.F.Dickins(1981)<sup>15)</sup>等はQueen Elizabeth island海域におけるmulti-year ice ridgeに関する調査結果を実施し、そのプロファイルデータから、 $B=200$ mとして、平均的には $Wg=340 \times 10^9$ kgf (3.3GN)と報告している。またこの海域における $h_0$ は21.3m、変動係数0.43程度であった。ここで、この条件で同様に氷重量をシミュレーションした。ただし、multi-year ridgeであることを考慮して、 $nk=ns=0$ 、氷の比重を高め0.92とした。この場合の平均値は2.8GNであり、3.3GNに近いオーダーとなった。

以上は、あとに示す計算あるいは将来的に実施するEventのシミュレーションに必要なridgeの質量の計算モデルを得るための検討を行った。現地の詳細な情報の乏しさから、仮定した入力値(母数や確率分布)には任意性があり、厳密には本モデルの妥当性を検証したとは言えないが、本モデルにおけるridge重量は観測値と比べて近いオーダーを示し、分布形も実測値と比べて類似していることから、本モデルを採用できる根拠が得られたと思われる。

## 5. 計算によるScour Eventのパフォーマンス

本来、計算の入力値である環境パラメータ(表-1)は確率変数であるが、本節では、感度分析の一つとして、喫水・初期移動速度、相互作用力 $F_i$ の有無によるEventのパフォーマンスを見るため、まずは表-1に確定値として与えた(地盤は砂質土を想定)。

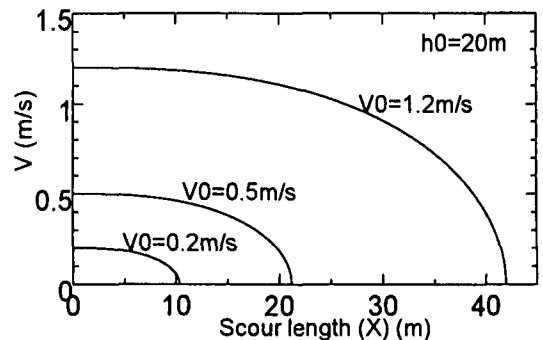
表-1 環境パラメータの初期入力値

Scour curve のパラメータ(a)	0.006	慣性力係数	1
Attack angle	30deg.	Keel部の間隙率	0.26
砂の内部摩擦角	35deg.	Sail部の間隙率	0.24
砂の安息角	33deg.	抗力係数	0.6
海底勾配	1/100	地盤と氷の動摩擦係数	0.1
砂の水中比重	1	ridgeの長さ(m)	100
海水の比重	1.03	ridgeの喫水深(m)	20
氷の比重	0.9	初期速度(m/s)	0.5
氷と空気の 形状抵抗係数	2	流れの速度(m/s)	0.5
空気密度(比重)	$1.2 \times 10^{-3}$	有効基礎幅低減率	1
風速(m/s)	10	周辺氷厚の限界値(m)	1

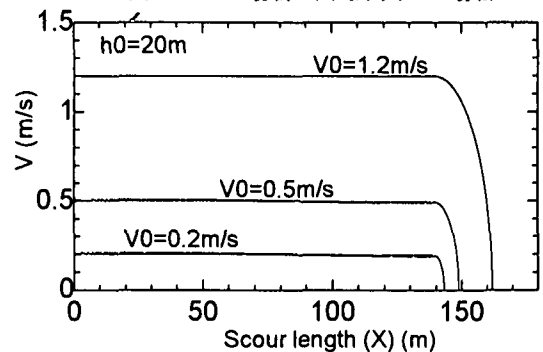
### (1) ridgeの移動速度とScour lengthとの関係

まず、環境力の一つである周辺氷との相互作用力 $F_i$ を考慮しない場合、即ち単独のridgeの場合について、初期移動速度( $V_0$ )が変化した場合のScour Event時におけるridgeの速度( $V$ )とScour length( $X$ )の関係を図-3(a)に示す。直感的にも明らかのようにridgeは減速しつつ、いずれ停止し、その停止距離(掘削長; $X$ )は $V_0$ に応じて増加する。また図は省略するが、喫水深( $h_0$ )すなわちridgeの質量に応じて $X$ は増大する。即ち、初期の運動エネルギーが大きいほど、停止距離はより延長され最大掘削深( $Z_{max}$ , 以下単に掘削深と呼ぶ)も大きくなる。表-1より海底勾配は一樣、Scour curveは直線と仮定しているから掘削深( $Z_{max}$ )は $0.004X$ で表される。

次に、 $F_i$ を考慮する場合(図-3(b))について検討した。 $F_i$ を考慮しない場合に比べ、かなり異なっ



(a)  $F_i=0$ の場合(単独氷)の場合



(b)  $F_i$ を考慮した場合(周辺平坦氷による相互作用考慮)

図-3 Scour length( $X$ )と移動速度( $V$ )との関係

た挙動であるのが分かる。これはkeel前面の地盤の抵抗力が環境力よりも小さい間は等速で運動し、いずれ超えると急減速し、停止に至る。この急減速する理由は、地盤による抵抗力は $X$ の2乗に近いオーダーで増大し、増加率が顕著になってくる。したがって地盤の抵抗力が環境力を超えた時点ではかなりの抵抗力の増加率が発生しているからであると考えられる。また同じく $V0$ が増大すれば $Xf$ も増大するがその増加率は $Fi=0$ の場合ほど顕著ではなかった。次にも述べるが、運動エネルギーの増大より $Fi$ の寄与が大きいためである。

## (2) 氷の相互作用力 $Fi$ に関する考察とその必要性

上記で $Fi$ を考慮しない場合とする場合では掘削長( $Xf$ )あるいは掘削深( $Zmax$ )に大きな差異が生じ、上記の例では4~7倍異なってくる。現地観測より掘削長は数十m~数km、掘削深は数10cm~数mのオーダーである(例えば、Blasco, 1998<sup>16)</sup>; Weeks et al., 1983<sup>17)</sup>; Beketsky, 1998<sup>14)</sup>)。上記の例では海底勾配が1/100であったが、1/1000としても $Fi$ を考慮しない場合せいぜい200mであり、実現象を過小評価している傾向にある。[有効基礎幅低減率]を考慮して、 $Fi$ を考慮した場合における掘削長あるいは掘削深( $Zmax$ )を計算すると、最大でおよそそれぞれ8km、4mであり、現地観測結果の最大値のオーダー(例えばLewis, 1978<sup>18)</sup>)程度になる。なお、ここで定義する「有効基礎幅低減率」とは、多くの場合ridgeの底部が奥行方向(長さ)に沿ってフラットとは限らず不規則があることを考慮したものである。もしEventの途中で掘削深は数10cmであり、その凹凸の高低差がそれ以上であるとすれば、本来受けるであろう地盤の抵抗力はその分軽減する。この時、底部がフラットであると仮定した場合(B)に対する実際の地盤の抵抗を受ける有効幅の割合と定義した(この場合0.3とした)。また初期には単独の氷であっても停止しておれば、いずれ後方より他の氷群と遭遇する可能性もあるし、やはり $Fi$ の考慮は有効であると思われる。また特により浅海域でのLand fast ice zone等では逆に氷の運動が拘束される場合があるが、本研究においては未だそのような状況については考えていない。

一方、 $Fi$ の計算にはridgeを取り巻く平坦氷(あるいはPack ice)の氷厚( $hi$ )が重要なパラメータとなる。ridgeの大きさは統計的独立とすることもでき、特に2年以上(multi-year)経過したridgeは無相関であると仮定できる。しかしながら1年(first-year)ridgeはもともと周囲の平坦氷の相互

作用によって形成されたものが多いのでridgeの大きさとやや相関性をもつと考えることは自然である。まずは1年ridgeを想定し、ひとつの根拠として、平坦氷の氷厚として次の仮定を採用する。Beketsky (1997)<sup>14)</sup>はSail高さ( $Hs$ )を推定する手法として、
$$Hs = 4.7\sqrt{hi0} \quad (6)$$
を提案している。ここに $hi0$ はridgeを構成する氷片の氷厚である。これを逆算し、多少乱暴ではあるが、平坦氷の氷厚とすることが考えられる(結果として $h0$ を与えると $hi$ が決まる)。むしろ熱損失に応じて $hi$ は増大するから、ridgeの年齢と実際のEventを発生する時期に依存し、常に $hi0$ に近いとは限らない。さらに一旦形成したridgeが分離した場合は1年ridgeであっても周囲の平坦氷厚とは相関を示さないであろう。いずれにしても該当する現場サイトにおける詳細な調査データが必要であるが、将来的なEventのシミュレーションでは式(6)を採用して対応する。このridgeの大きさと相関性に固執する理由は $Fi$ を考慮した時、それに比べて運動エネルギーの寄与が少なく、小さなridgeと大きなridgeとのパフォーマンスにあまり差がなくなってきた、観測結果の傾向とやや異なってくるからであり、実際は相関性が1ではないにしろ、幾分はあると考えたためである。従って将来的なシミュレーションでは、事実上の $hi$ のバイアスを考慮(やや成長しているものと仮定)してかつ相関性を薄くするため、例えばその補正係数を1~1.5の一樣乱数で与えるなどの方法が考えられる。一方、式(6)に応じて $hi$ はいくらでも増大するのではなく、それには限界がある。海域にもよるが、通常first-year iceでは氷厚の最大値は1~2mであるが、特に北極海等でのmulti-year iceは4~6mにまで成長する。前の計算では氷厚の最大値(制限値)を $himax=1m$ としていた。ここで $himax$ の違いによる $Zmax$ の応答性を図-4に示す。制限値である $himax$ を与えることによって、 $h0$ の増大によって最初は $Zmax$ (あるいは $Xf$ )も増大するがある値で漸近値となる。また $himax$ に応じて、 $Zmax$ 、漸近する $h0$ の値は大きく異なる。 $h0$ またはridgeの質量が増大す

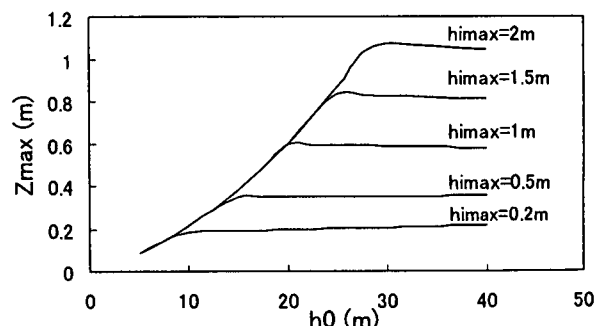


図-4 周辺氷厚に制限値を設けた場合の $Zmax$ の応答

るのに、漸近値に近づくのはridgeのライドアップによる浮力減少にともなう摩擦抵抗成分が増大し、その効果が相殺されるためである。Blasco[1998]<sup>17)</sup>はカナダボーフォート海沿岸において実施されたScour 跡の調査結果より、水深20m以上では水深とともに掘削深は増加しないと述べているが、本検討結果もそれを示唆しているものと考えられる。

以上より、 $h_i$ の算定の正当性に関わらず、ridgeの大きさと $h_i$ との相関性の有無、 $h_{max}$ は非常に重要なパラメータの一つであることが推察される。

## 6. 結論及び今後の課題

本研究では、まず、模型実験用に構築され、かつその妥当性が示されている力学モデルを現地へ適用することを試み、冒頭にのべた最終目標に対応できる基礎を構築した。それは、そのモデルをScour lengthに関する常微分方程式に帰着させ、その解より掘削長や掘削深を求めることにあった。またその方程式に含まれるridgeの質量を、Beketskyの改良モデルを用いて、喫水深、attack angleから従属的に求める手法を提案し、現地観測結果より、その改良型モデルを用いる事のできる根拠を得た。また、モデルの感度分析の一部を実施した。仮定した環境パラメータには任意性があるが、掘削深の計算値が数十cm～数mという現地観測結果のオーダーとなったことから、まずは大局的に本モデルの妥当性が示された。また比較的大きな掘削深を実現する駆動力(環境力)は、ridgeのもつ運動エネルギー(規模、初期移動速度)よりも、ridgeを取り巻く平坦氷・氷盤群との相互作用による寄与が遙かに大きいことが推察された。また、その周辺氷厚の制限値のため、ridgeの規模が大きくなっても、他の条件が同一であれば、掘削深にはおのずと上限値がある事が示され、「水深とともに掘削深は増大するが、ある水深を超えれば、その増大傾向は示さない」という現地観測結果を示唆しているものと考えられる。故に、現地調査の際には、ridgeの規模に関する調査のみならず、ridgeを取り巻く周辺氷の有無や割合、その周辺の氷の厚さやridgeの喫水深との相関性などの調査が重要であると思われる。

今回は、特に環境力によるEventの感度分析を実施したが、その他の表-1にあげたパラメータによる感度分析も重要である。それによって、将来的なEventのモンテカルロシミュレーションを実施する場合、応答結果にあまり寄与しないパラメータを削除して計算コストを節約できるし、重要なパラメータを抽出し、現地での必要な調査項目を提案できる。また、紙面数の都合上、重要なパラメータの一つである「有効基礎幅低減率」なるものの詳しい概念の説明や感度分析が足りなかった。またkeel低部の破壊現象による効果も本来重要な検討項目であり、上述の残された感度分析と合わせて次回報告する。

## 参考文献

- 1) Duval, B.C.: Exploratory drilling on the Canadian continental shelf, Labrador Sea, *Offshore Technology Conference*, Paper No.2155, pp59-67, 1975.
- 2) Grass, J.D.: Ice Scour and ice ridging studies in lake Erie," *Proc International Symp.on Ice*, Vol.2, pp33-43, 1984.
- 3) Kioka,S., Yasunaga,Y., Watanabe,Y. and Saeki,H. (2000). "Evaluation of Ice Forces Acting on Sea bed Due to Ice Scouring," *Proc 10<sup>th</sup> International Offshore and Polar Engineering Conference*, ISOPE, Vol.1, pp749-755.
- 4) 木岡信治, 安永喜勝, 松尾優子, 河合邦弘, 佐藤正樹, 佐伯浩:「Ice Scour Eventに関する中規模野外実験」*海洋開発論文集*Vol. 17, pp. 613-618, 2001.
- 5) 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*Vol. 17, pp. 607-612, 2001.
- 6) 木岡信治, 安永喜勝, 松尾優子, 佐伯浩:「Ice Scour Event の地盤掘削プロセスと実験条件の制御」*海洋開発論文集*Vol. 18, pp. 749-754, 2002.
- 7) Shearer,J.,et al.: Canadian Beaufort Sea 1984 Repetitive Mapping of Ice Scour, Environmental Studies Research Funds, FSRF Report No.32, by Geoterrex Ltd., Ottawa, Ontario,1986.
- 8) 木岡信治, 佐伯浩:「Ice Scour Event に関する実験データの学習と汎用化」*寒地技術論文・報告集* Vol. 18, pp. 198-203, 2002.
- 9) Croasdale,K.: The Aspects of Ice Scour, *Proc.of 2<sup>nd</sup> Ice Scour and Arctic Marine Pipelines Workshop*, Hokkaido, Japan. Published by C-CORE, pp.135-139,2000
- 10) Beketsky,S.P., et al. : Structure of grounded hummock in the sea of Okhotsk, *the 11<sup>th</sup> International Symposium on Okhotsk Sea and Sea ice*, Mombetsu, Hokkaido, Japan, pp.339-342,1996.
- 11) Beketsky,S.P., et al.: Morphology of hummocks in the sea of Okhotsk, *the 12<sup>th</sup> International Symposium on Okhotsk Sea and Sea ice*, Mombetsu, Hokkaido, Japan, pp.42-48,1997.
- 12) Truskov,P.A.:Ice effects in development of offshore oil and gas fields, in :*Offshore Engineering Facilities*.Vladivostok: DVGU, pp.89-94,1987.
- 13) Truskov,P.A. : Ice conditions for design of oil and gas production facilities Cand. Sci.(Geor.) Dissertation, Leningrad :AANII.(in Russia),1989.
- 14) Beketsky,S.P.: Sakhalin Ice Gouge Measurement through Stamukha Drilling, *Proc.of Ice Scour and Arctic Marine Pipelines Workshop*, Hokkaido, Japan. Published by C-CORE, pp.47-51,1998.
- 15) Dickins,D.F., et al. : Multi-year pressure ridge study Queen Elizabeth Islands, *Proc.of the 6<sup>th</sup> International Conference on Port and Ocean Eng. Under Arctic Condition (POAC'81)*, Vol.2, pp.765-775, 1981.
- 16) Blasco,S.M.: Seabed Scouring by Sea-Ice: Scouring Process and Impact Rates: Canadian Beaufort Shelf, *Proc. of Ice Scour and Arctic Marine Pipelines Workshop*, Hokkaido, Japan. Published by C-CORE, pp.53-58,1998.
- 17) Weeks,W.F.,et al. : Statistical Aspects of Ice Gouging on the Alaskan Shelf of the Beaufort Sea, U.S. Army Cold Regions Research and Eng. lab. Rep't 83-21,34 pps,1993.
- 18) Lewis,C.F.M. : The Frequency and Magnitude of Drift-Ice Grounding From Ice-Scour Tracks In The Canadian Beaufort Sea, *Proc.of the 4<sup>th</sup> International Conference on Port and Ocean Eng. Under Arctic Condition (POAC'77)*, Memorial University, Newfoundland, pp.567-576, 1978.