

ICE GOUGINGに関する実験的研究

Experimental Study on Ice Gouging

大久保 周一郎* 國松 靖** 原文宏*** 山下 俊彦**** 佐伯 浩****

Okubo Syuichiro, Kunimatsu Sei, Hara Fumihiro, Yamashita Toshihiko and Saeki Hiroshi

The pack ice drifts south along the east coast of Sakhalin and occupies completely the Okhotsk coast of Hokkaido. It is carried along by winds and watercurrents and continually reaches and leaves the shores, depending on the wind direction. Sand beaches of the Okhotsk coast are the habitat of scallops and surf clam. Also, in some parts of the sea live a lot of littleneck clams. When the sea ice moves toward the shores, it gouges part of sandy sea bottom and transports the shells ashore.

In addition, there are many shells that are crushed to death by ice floes. This paper clarified the mechanisms of ice gouging by model test.

1. はじめに

北海道のオホーツク海沿岸には、毎年流水が来襲する。また、低気圧や流水の量によっては、一部の流水が太平洋に、まれには日本海にも流出することがある。これらの流水が浅海域を移動する際に、氷盤が海底砂地盤を削ってゆく。この現象を、Ice Gougingといい、毎年のように水産資源に大きな被害を与えている。それに加え、浅海部の埋設構造物にも影響を与えていることが報告されている。しかし Gouging の実態調査、そのメカニズムに関する研究はあまり進んでいないのが実状である。そこで、本研究では、Ice Gouging の実態を報告するとともに、実験よりそのメカニズムを明らかにすることを、目的としている。

2. Ice Gouging の実態

1992年3月、著者らは、オホーツク海に位置する斜里漁港付近の海岸でRVOを用いて、海底の様子を調査した。この調査結果の一部を図-1に示す。主に沖側より岸側に向かって、溝状に氷盤が砂地盤を削っていった様子が見られる。調査地点の水深は2.5~3.0m、その幅は70~200cm程度、最大深さは50cm程度であった。この時、沖にかなり多くの流水があったため、汀線近くでは波浪がなく、Gougingの跡がはっきり残っていた。図-2は、1993年3月の網走付近の海岸においてGougingの際に削られ氷盤とともに陸上に遡上した底棲生物（主にアサリ貝）である。また、Svein et.alのCanada Beaufort Seaでの水深5~50mにおける調査によると、水深10~20mにおいてGougingによる削られた溝が多数発見されている。またその深さは、水深にほぼ比例し水深20mでは約0.7m程度であり、幅はその深さの約10倍となっている。このような現象は、海底パイプラインのような構造物を設置する中で無視することはできない。著者の一人である佐伯らは、この氷盤移動に伴うGougingについての理論的研究を行ってきているが、その成果は川森等(1991)、川森等(1992)に発表されている。

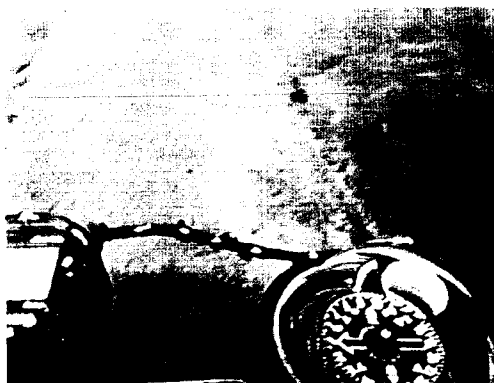


図-1 Ice Gouging

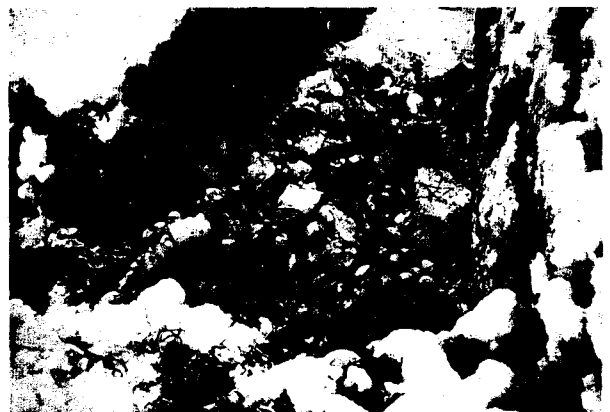


図-2 罫浦海岸におけるIce Gougingによる被害

* 正会員 竹中土木(株)
** 正会員 運輸省港湾局企画課

*** 正会員 北海道大学大学院工学研究科
**** 正会員 北海道大学工学部

3. Ice Gouging に関する模型実験とその結果

Ice Gouging は、浅海部で着底した海水盤がその沖合の水野から押されて、より浅海部へ移動する時に、海底部を削っていく現象である。氷盤は、より浅海部へ移動する際に、海面へ露出する体積が増えることにより、浮力が減少するため、砂地盤に作用する鉛直方向圧力が増加する。この現象を再現するために、図-3に示すような実験装置を作製した。

模型氷の大きさは 長さ50cm、幅50cm、高さ34cmの鋼製の箱で砂と鋼との動摩擦係数は0.39である。砂の中央粒径は0.147mm、内部摩擦角は 37° 、水中安息角 33° で水底勾配は $1/5$ と $1/10$ の2種類とした。また水槽の大きさは長さ3.0m、幅2.0m、高さ0.5mとした。

水槽の一端に、ストローク 50cmの油圧ジャッキを固定し、それに模型氷を接続して、それを水平方向に移動させて水底砂地盤に押しつけ、Gouging させる。

氷盤の水平方向移動速度 V はヒンジ統合の場合0.4、0.9、1.7 cm/sである。また、フリーの接合条件については0.9cm/sとし、各速度において、それぞれ5回の実験を行った。

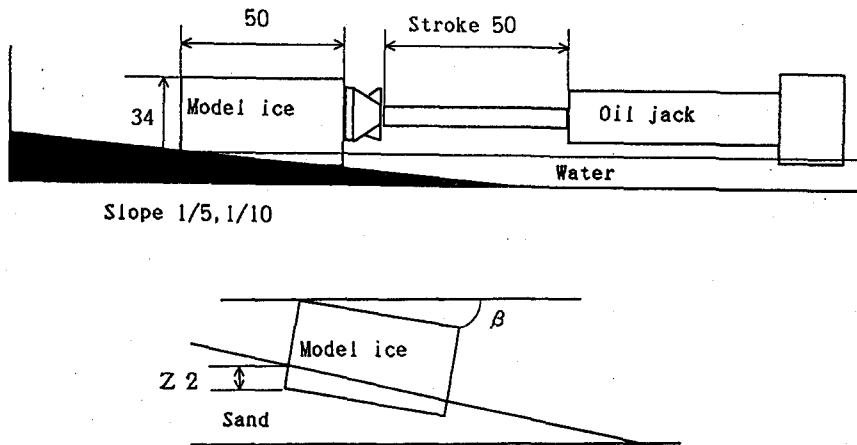


図-3

Ice Gougingのモデル試験装置

実際の海岸勾配は、 $1/50$ から $1/100$ であるが、水槽の規模とより明確にGouging をおこさせるために急な海底勾配とした。この際、油圧シリンダー内の油圧を測定することにより模型氷にかかる力 (F) を測定した。また、変位計により水平変位 (X) を、ビデオカメラで撮影することにより Gouging Depth ($Z 2$) と傾斜角 (β) を、それぞれ測定した。また、模型氷の移動速度は、シリンダーの油量を調節することにより調節可能である。この実験の様子を図-4に示す。

実験は各勾配において、模型氷とジャッキをヒンジで固定し、氷盤の沖合い側が回転のみするものについて、単純に押しつけ氷盤自体が自由に上下するもの（フリー）で、それぞれ5回ずつ行った。

まず、同一条件での各測定値の変動を調べたが、その分散が比較的大きくなることがある。このことは、各実験において砂地盤を同一の状態となるようにしたが、水底の砂が Gouging されることにより締め固められ、相対密度等が空間的に変化していくことによると考えられる。

次に、速度の違いによる変動を見てみると、勾配 $1/5$ の図-5 (a-c) (これらは、それぞれの実験条件においての平均的な値を選びだし、その際の各データを示している) によると、 β 、 $Z 2$ は、 $V = 0.4, 0.9\text{cm/s}$ ではほぼ同様の値を取りながら増加してゆくが、 $V = 1.7\text{cm/s}$ では、 β は大きな値、 $Z 2$ は小さな値を取り単調に増加することが分かるが、 β が小さいと $Z 2$ は大きくなることは当然である。このことは、勾配 $1/10$ でも $V = 0.4, 0.9\text{cm/s}$ ではあてはまるが、 $V = 1.7\text{cm/s}$ では、それとはかなり異なる値をとる。それに対して、 F は勾配 1

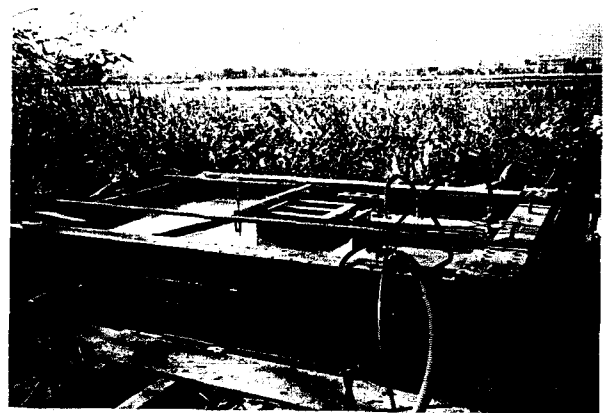


図-4

実験の様子の写真

1/5 の $V = 0.4\text{cm/s}$ では小さく、0.9, 1.7 ではほぼ同様の値となって増加してゆくが、その値は勾配 1/10 の約3倍である。またここでも、勾配 1/10 の $V = 1.7\text{cm/s}$ では、30~40 cm進んだところで、大きく減少し、他とは異なった変化を示す。これらの結果は、砂の内部摩擦角が変形速度に依存していることと傾斜角が異なっていることによると考えられる。

最後に、同じ速度での氷盤とジャッキとの固定方法がヒンジの場合と、フリーの場合を比較したものが、図-5(b), 6(b), 7, 8である。フリーの場合、どちらの勾配も前半部では β はあまり変化しない、つまり水平を保ちながら進んで行くが、中盤以降はヒンジとあまり変わらない変化をする。このため、勾配 1/10 では、フリーのZ2は、ほぼ水深変化に比例してヒンジよりも大きな値となっている。しかし1/5 では、フリーの場合は水深変化の8割程度の値であるが、ヒンジは β が初めマイナスの値をとり、Z2はフリーよりも大きな変化を見せるが、最終的にはほぼ同じ値となる。どちらの場合も、ヒンジの方がFの値は2割程度大きくなっている。

以上のことより、Ice Gouging の研究においては、ヒンジの場合を中心に考えていってよいと思われる。

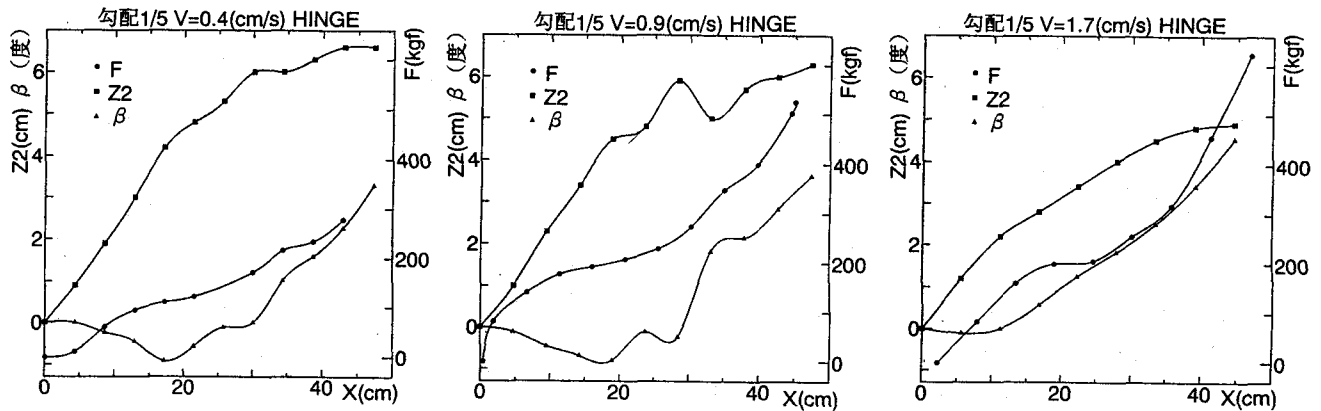


図-5(a)

図-5(b)

図-5(c)

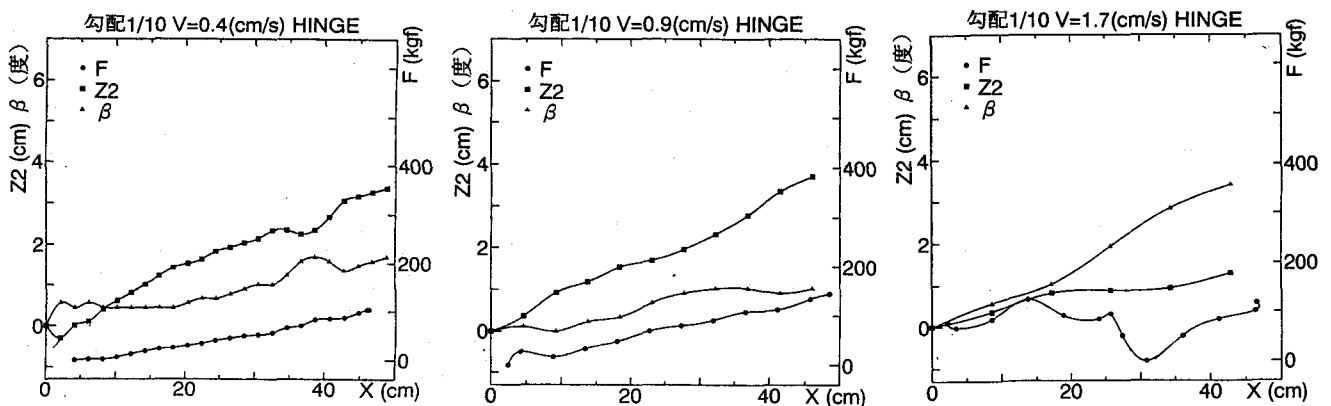


図-6(a)

図-6(b)

図-6(c)

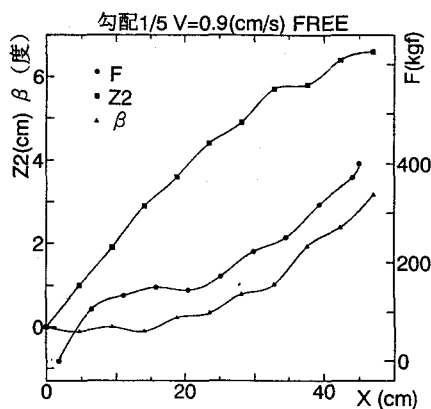


図-7

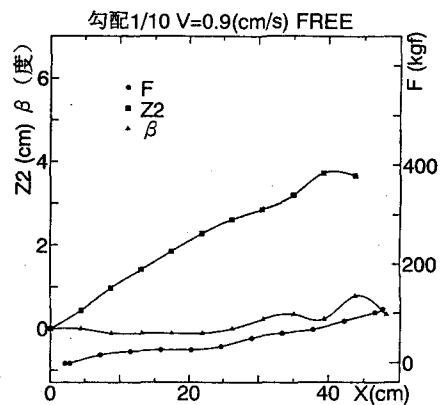


図-8

4. Gouging Depthと氷盤に作用する氷力の関係

直方体の氷盤を仮定し、それを沖合い側から氷力Fで押しつけるものとする。その様子を示したものが図-9である。

氷盤の大きさを長さL₁、高さh、幅をL₂とする。また、Gouging 前の喫水深をh'とする。また、傾斜角をβ、水底勾配をi、Gouging DepthをZ₂、Gouging DistanceをL'とし、実験との照合をしやすいようにL' < L₁としておく。また、氷盤の移動による Gouging により削られた砂は、全て氷盤の岸側（進行方向）に堆積するものとする。この時の堆積高さZ₂'は砂の安息角をβ' とすると次式で示される。

$$Z_2' = \sqrt{(\tan \beta' + \tan i) Z_2^2 L'} \quad (1)$$

なお、本実験に用いた砂の水中安息角は、実験により33°であった。

仮定より、図-9に示す氷盤の岸側には、在来水底の上に Gouging による砂が堆積していることになる。そのため、氷盤の岸側の水底面の傾斜は非常に複雑になるが、ここでは簡単のため深さZ₂'で水平面となると仮定する。また、本実験結果では氷盤の傾斜角βは0~7°の範囲で非常に小さいため、近似的にβ≒0と仮定する。

また、本実験に用いた砂の内部摩擦角φは、Gouging によって前方に堆積した部分は小さく、押されている水底部は大きくなっていると思われるが、ここでは変化なく一定のままと仮定すると、模型氷の前面に作用する力は受働土圧式により次式で計算される。

ランキン土圧による氷盤前面部に作用する受働土圧式は(2)式で示される。

$$P_A = \frac{1}{2} \gamma L_2 (Z_2 + Z_2')^2 \tan^2(45^\circ + \frac{\phi}{2}) \quad (2)$$

クーロン土圧による氷盤前面部に作用する受働土圧式は(3)式で示される。

$$P_A = \frac{1}{2} \gamma (Z_2 + Z_2')^2 \frac{\cos^2 \phi}{\cos(2\phi/3) \left(1 - \sqrt{\frac{\sin(5\phi/3) \sin \phi}{\cos(2\phi/3)}} \right)^2} \quad (3)$$

また模型氷の側面に作用する土圧は、氷盤の幅が完全に一樣でないことおよび、働土圧式を用いて計算すると次式が得られる。

ランキン土圧による側面部に作用する受働土圧式は(4)式で示される。

$$P_s = \frac{1}{6} L_2^2 \tan^2(45^\circ + \phi/2) \quad (4)$$

クーロン土圧による側面部に作用する受働土圧式は(5)式で示される。

$$P_s = \frac{1}{6} \gamma L_2 Z_2^2 \frac{\cos^2 \phi}{\cos(2\phi/3) \left(1 - \sqrt{\frac{\sin(5\phi/3) \sin \phi}{\cos(2\phi/3)}} \right)^2} \quad (5)$$

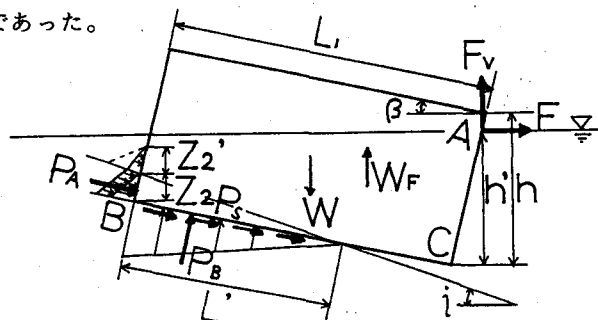


図-9
力の作用方向の記号

また、図-9のA点、B点、およびC点の各点で、それぞれモーメントを0とおくと、 P_B 、 F 、 F_V が求められる。ここで $\beta \approx 0$ とする。

$$P_B = \frac{1}{(\mu k h' - L_1 + L'/3)} \left\{ -P_A \left(h' - \frac{Z_2 + Z_2'}{3} \right) - 2 P_S \mu k (L_1 - L'/3) \right\} \quad (6)$$

$$F = \frac{1}{h'} \left\{ P_A \frac{Z_2 + Z_2'}{3} + P_B (L_1 - L'/3) - 2 P_S \mu k (L_1 - L'/3) \right\} \quad (7)$$

$$F_V = \frac{1}{L_1} \left\{ -F h' + P_A \frac{Z_2 + Z_2'}{3} - P_B \frac{1}{3} L' + 2 P_S \mu k \frac{2}{9} Z_2 \right\} \quad (8)$$

ここで、上式を用いて計算を行ってみる。勾配1/10のヒンジ $V = 0.4(\text{cm/s})$ の場合では、図-8(a)より Gouging Distance $L' : 40\text{cm}$ 、Gouging Depth $Z_2 : 2.5\text{cm}$ 、また鋼と砂の動摩擦係数 $\mu k : 0.39$ 、砂の内部摩擦角 $\phi : 37^\circ$ とする。また、砂の安息角 β' を実験より 33° 、水底勾配は1/10なので $i : 5.71^\circ$ とする。

まず、(1)式より、Gougingにより削られた砂の量から Z_2' は 8.7cm となる。

式(2),(4)より、ランキン土圧式では $P_A = 20.4\text{ kgf}$ 、 $P_S = 0.3\text{ kgf}$ となる。また式(3),(5)より、クーロン土圧式では、 $P_A = 63.6\text{ kgf}$ 、 $P_S = 0.9\text{ kgf}$ となる。

これらの値を用いて、(6)式以下で計算すると、ランキン土圧式では、 $P_B = 14.5\text{ kgf}$ 、 $F = 26.4\text{ kgf}$ 、 $F_V = -14.5\text{ kgf}$ となる。またクーロン土圧式では $P_B = 45.1\text{ kgf}$ 、 $F = 82.2\text{ kgf}$ 、 $F_V = -45.1\text{ kgf}$ となる。

この場合の F は、本実験ではジャッキで押す力に相当することになる。ここで計算された、クーロン土圧の値は図-7(a)で示されている F の値にほぼ一致する。また、図-10(a)に示すように、勾配1/5でもよく一致している。しかし、図-10(b,c)に示すように、クーロン土圧での計算値は $V = 0.4(\text{cm/s})$ の場合はよく一致するが、速度が速くなるとこのモデルではあまり妥当とはいえない。しかし、速度に応じた係数をかけると、クーロン土圧式で得られる理論値は、Gouging に当てはめることができると思われる。

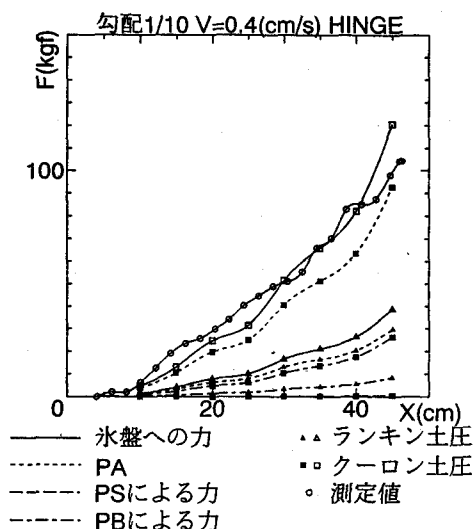


図-10(a)

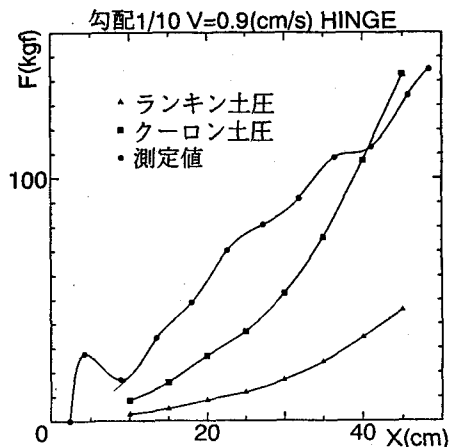


図-10(b)

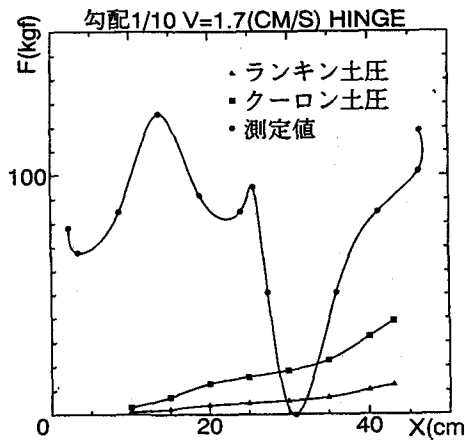


図-10(c)

5. まとめ

本研究の成果をまとめると以下ようになる。

- (1) 実海域の調査より、浅海部における Ice Gouging の実態とその被害の一部を示した。
- (2) 実験により、同一の条件であっても、氷力 F 、傾斜角 β 、Gouging Depth Z_2 は、必ずしも同一の結果とはならない。このことは、海底砂の相対密度が空間的に一様でないことによると思われる。
- (3) 氷盤に作用する力 F 、Gouging Depth Z_2 は、氷盤移動速度が大きくなるにつれて大きくなるが、その増加率は、移動速度の増加率より小さい。
- (4) 本実験結果では、氷盤の傾斜角 β は $-2 \sim 7^\circ$ であり、0 とみなしてもよいと思われる。実際にオホーツク海沿岸で流水を調査した結果でも、傾斜角の大きなものは極めて少ない。
- (5) ある力 F で押され、Gouging を起こしている氷盤には、その岸側（進行方向）には受働土圧が、側壁部では、形状により主働、静止あるいは受働土圧が作用し、氷盤移動に伴い、土圧に動摩擦係数をかけた力が移動の反対方向に作用する。また、底面には、海底面に作用する力の反力に砂と氷盤間の動摩擦係数をかけた力が作用している。
- (6) (5)に基づき、削られた砂が岸側に堆積するとして、クーロン土圧を用いて計算すると、速度が遅い場合は実験結果とよく一致し、速度でも、改善すれば利用することができるとと思われる。
- (7) (6)の結果により、氷盤の形状、大きさ、その氷力が判れば、それによって削られる深さがわかり、構造物の安全な埋設深を決定することができる。
- (8) 水で飽和された砂の内部摩擦角 ϕ と変形速度の関係をより詳細に明らかにする必要がある。

参考文献

- 川森 晃、榎 国夫、佐伯 浩：海水氷盤の移動と海底間の相互作用に関する研究
海洋開発論文集、Vol. 7、pp331-335、1991
- 三浦 均也、松本 古英、土岐 祥介：種々の砂の安息角—強度との関係について—
第25回土質工学研究発表会、pp503-506、1991
- 前田 健一、三浦 均也、花巻 省、土岐 祥介：一次的性質の異なる砂の変形・破壊挙動の相対密度依存性
第26回土質工学研究発表会、pp449-452、1992
- 三浦 均也、長谷川敬寿、前田 健一、土岐 祥介：砂の変形・破壊挙動の拘束圧依存性
第25回土質工学研究発表会、pp511-514、1991
- 大久保 周一郎、国松 靖、原文宏、佐伯 浩：第9回オホーツク海と流氷に関する国際シンポジウム論文集
pp19-24、1994