

海水盤の移動と海底間の相互作用に関する研究

A Study Regarding the Interaction Movement of Sea Ice and Sea - bottom

川森 晃*・榎 国夫**・佐伯 浩***

Akira. Kawamori, Kunio. Enoki and Hiroshi. Saeki

Abstract

The coast along the Sea of Okhotsk in Hokkaido is an area greatly affected by freezing and drift ice.

It is well known that the ice floe moved by winds, currents or waves has various influences on the sea bottom along the coast of such a sea area. For example, fish reefs at the sea - bottom are broken by the drift ice, or seaweed is detached in rocky sea areas. Furthermore, it has been reported that Hokkaido clams are dying out because of the pressure of sea ice. Therefore, it is very important for the planing and designing of undersea pipelines, undersea water - intake/drain, and coast/offshore structures which are constructed along this coast area to know the amount of deformation of the sea - bottom caused by the sea ice. This study is an theoretical approach concerning the interaction between the horizontal movement of sea ice and the sea - bottom along the coast area.

keywords: sea ice, coast area, design, structure

1. はじめに

我が国の中でも北海道のオホーツク海沿岸は冬季、結氷や流水の影響を受ける海域である。このような海域の沿岸域では、風・流れおよび波浪によって動かされた氷盤が海底に種々の影響を与えていることは知られている。例えば流水によって海底の魚礁が破壊したり、岩礁地帯においては昆布が削り取られたりする。さらにホッキ貝が海水の圧力によって死滅するという例も報告されている。米国やカナダにおいては図-1に示すように、取水管、下水管それに送油管を海底近くに敷設することが多いが、波浪による氷盤や氷塊の動揺、あるいはRafted IceやIce RidgeあるいはHammock Iceにより、パイプラインの保護層が削り取られ、パイプラインそのものにも大きな被害を与えたことが報告されている。特に図-2に示されるような取水口や下水管の排水口は波による浮遊砂の吸入等を防止するため海底上に突き出ていることが多いため、氷盤の影響を受け易い。このようなことからこの沿岸域に設置される海底パイプライン、海底取水・排水施設それに海岸・海洋構造物の計画および設計に際しては海水による海底変形量を知ることは重要なことである。本研究は沿岸域に於ける氷塊の水平移動に伴う海水と海底の相互作用について理論的に取り扱ったものである。

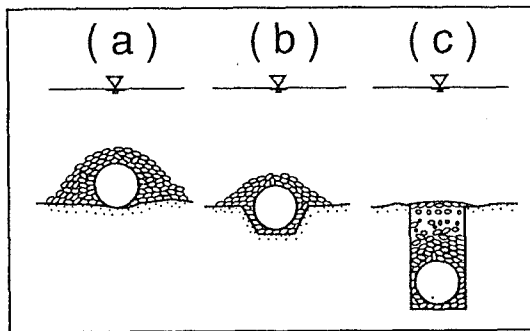


図-1 海底パイプライン

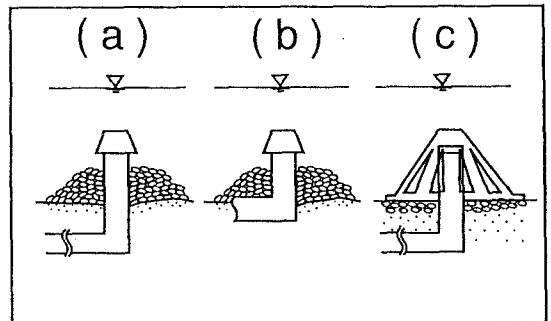


図-2 取水口, 排水口

2. 浅海域における氷盤の水平移動による海水と海底の相互作用の形態

(1) 砂浜海岸の場合

砂浜海岸に沖側から氷盤が浅海域に進行してくる場合、あるいは沿岸に結氷した氷盤が流れや風それに沖側の流水が岸側へ向けて押される場合、図-3に示すように種々の形態が観察される。(a)～(c)の場合は、一

* 正会員 (株) アルファ水工コンサルタンツ (〒063 札幌市西区発寒9条14丁目)
 ** 正会員 秋田工業高等専門学校
 *** 正会員 北海道大学工学部

枚の大きな氷盤が陸岸に向かって押される場合の形態で、(a)の場合は氷盤の一部が陸岸へ遡上した状態で、この時陸岸との接触部に氷力が作用する。(b)は(a)の状態がさらに進行したもので、氷盤は曲げ破壊し、その破壊した氷盤は後ろから押されて陸上を遡上する場合で、この現象をRide upと呼んでいる(c)の場合は、(b)の場合とは異なり、破壊した氷盤が積み上がり、いわゆるPile up現象を呈している。(d)は個々の氷盤の大きさが小さい流水の場合で、この時水平方向氷力が作用しても、氷盤形状はいびつであり、力が逃げることになり、海底にはそれ程大きな影響は与えない。次に(e)や(g)はRafted Iceや、氷厚の大きい氷盤あるいはIce Ridgeが沖側から陸岸へ向かって押される場合で、この時、海底地盤に氷圧が作用するし、摩擦力が作用することになる。また、場合によっては図(f)、(h)に示すように、海底を削っていく現象も発生する。ここ10数年前からポーホート海をはじめ多くの氷海域の海底がスキャンナーで詳細に調べられているが、その結果によると、海底には多くの氷塊によって削られた傷こんが残されていることが明らかになっていて、中には深さが1mを越えるものもあるとされている。よって、氷海域においてはパイプライン等の埋設深さも、海水のGougingを充分考慮すべきであることが判る。また、図-3の(c)の場合のように汀線近傍で大規模なPile up現象が発生し、海明け後も残ると、波浪にとっては海岸堤防が建設されたのと同様の機能をもつようになり、反射波による浅海域の侵食といった海岸変形にも影響を及ぼすことになる。また、Gougingを受けるような状態になると、他の構造物や施設、例えば魚礁等にも影響を与えるし、砂地に棲息する魚貝類にも被害を与えることになる。

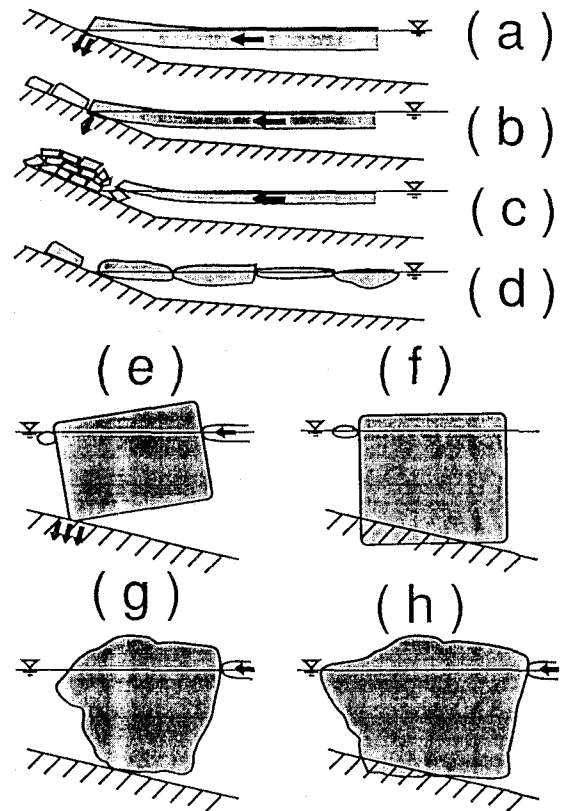


図-3 砂浜海岸の氷盤と海底の相互作用
(氷の水平移動の場合)

(2) 岩礁海岸の場合

図-4に岩礁海岸の場合の氷盤と岩礁帯の相互作用を示す。(a)は一枚の厚い大きな氷盤が岩礁に作用する場合で、汀線近傍等浅い水域で鉛直方向の氷圧と氷盤移動による摩擦力が作用するし、(b)の場合も同様の力が作用することになる。

なお、波浪による氷盤運動については、一般に海面が氷盤により覆われている場合には浅川等の研究にもあるように、波浪の減衰は大きい。流水帯が汀線から波長の20倍以上あると、浅海域の波高は、流水帯の沖側の波高の数%となり、海底にはそれ程影響を与えることはない。

3. 海底地盤へ作用する氷圧及び摩擦力

図3の(a)、(b)、図-4の(a)の場合には、移動する氷盤が海底との接触部に氷圧と摩擦力を及ぼすことになるし、(a)の状態水位が低下すると氷圧はさらに増加することになる。このような状態は図-5に示す状態にモデル化される。図-5に示すように、半無限平板に撓み Δ を生じさせる時の地盤反力Pを求めればよい。北条等の計算によると単位幅当りの地盤反力P、最大の単位幅当り地盤反力(氷盤の破壊時)Pmax、その時の撓み量 Δ_{max} 、それに曲げ破壊の位置 r_B は次式で示される。

$$P = \frac{KA}{2\lambda} \dots (1), P_{max} = 0.517 \cdot \lambda \cdot \sigma_f \cdot h^2 \dots (2)$$

$$\Delta_{max} = 1.034 \cdot \frac{\lambda^2 \cdot \sigma_f}{K} \cdot h^2 \dots (3)$$

$$r_B = \frac{\pi}{4} \left(\frac{1}{3K} \right)^{\frac{1}{4}} \cdot \left(\frac{Eh^3}{1-\nu^2} \right)^{\frac{1}{4}} \dots (4)$$

$$D = \frac{E \cdot h^3}{12(1-\nu^2)}, \lambda = \left(\frac{K}{4D} \right)^{\frac{1}{4}}$$

ここで、 K ：海水の単位体積重量， ν ：氷のポアソン比， E ：氷の弾性率， h ：氷厚， σ_f ：氷の曲げ強度
 よって、海底との接触長を m とすると、最大の平均圧力強度 \bar{P} は次式で示される。

$$\bar{P} = \frac{0.157 \cdot \lambda \cdot \sigma_f \cdot h^2}{m} \quad \dots (5)$$

この時の氷盤移動による海底に作用する摩擦力 F は次式で示される。

$$\left. \begin{aligned} F_k &= P_{max} \times \mu_k \\ F_s &= P_{max} \times \mu_s \end{aligned} \right\} \dots (6)$$

F_k, F_s はそれぞれ動及び静止摩擦力であり μ_k, μ_s はそれぞれ氷盤との海底の動及び静止摩擦係数である。

また接触長を m とすると、平均摩擦応力度は次式で表される。

$$\left. \begin{aligned} \bar{F}_k &= \frac{P_{max} \cdot \mu_k}{m} \\ \bar{F}_s &= \frac{P_{max} \cdot \mu_s}{m} \end{aligned} \right\} \dots (7)$$

海水氷盤と砂地盤あるいは岩盤との摩擦係数に関する実験例は極めて少ない。Shapiro等はアラスカのバロー岬で、1/10勾配の砂利浜の上を2つの氷盤（Block 1は12,050Kg，Block 2は10,650Kg）をそれぞれ0.3m/secの早さで約2mブルドーザーで引っ張り、動及び静止摩擦係数を調べた。その結果を図-6に示す。1つのブロックを少しずつ15~21回引っ張って実験をしていて、()内の σ_k は標準偏差である。実験結果より、砂利浜と海水間の摩擦係数は静止摩擦係数 μ_s が約0.5，動摩擦係数 μ_k が0.39である。

また、回数をふやすにつれて静止摩擦係数が大きくなるのは、氷盤下面に砂利が傷をつけるためと、前縁部が砂利浜を少しずつ削っているためと考えられる。また、コンクリートに対しては、佐伯等の結果によると、 μ_s が0.4~0.6， μ_k が0.23となっていることから、比較的滑らかな岩礁表面の場合は、コンクリートと同程度と考えることができる。

次に図-3の(e)や図-4の(b)のような直方体に近い厚い氷盤の場合の海底の法線方向の力と摩擦を考えてみる。それをモデル化したものが図-7である。ここで、沖合からこの直方体の氷塊を押す氷力を F_i 、この時海底地盤に作用する力を F_E とする。この時氷塊は変形しないものとし、氷盤と氷塊はスリップするものとする。また、海水、海水の密度をそれぞれ ρ_i, ρ_w とする。また $\rho_i / \rho_w = 0.9$ とし、海底勾配は θ とし、さらに α, δ については以下の関係がある。

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{D}{L}, \quad \delta = \tan^{-1} \left(\frac{1}{L \cdot \cos \beta} (0.9 \cdot D - l \cdot \tan \theta - L \cdot \sin \theta) \right)$$

傾斜角 β を求めるために次式を用いる。

$$D \cdot L \cdot \rho_i \cdot \frac{1}{2} \sqrt{D^2 + L^2} \cos(\alpha + \beta) =$$

$$\frac{L^2 \cdot \rho_w}{\cos \beta} (0.9 \cdot D - l \cdot \tan \theta - L \cdot \sin \theta) \left(\frac{1}{2 \cos \beta} - \sin \beta \cdot \tan \beta \right)$$

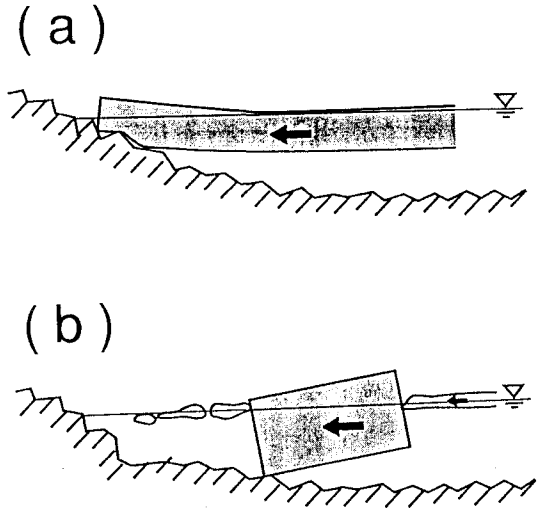


図-4 岩礁海岸の氷盤と岩礁の相互作用

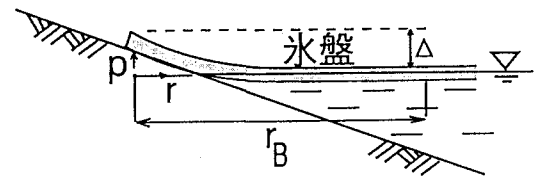


図-5 浮氷盤面の座標系モデル

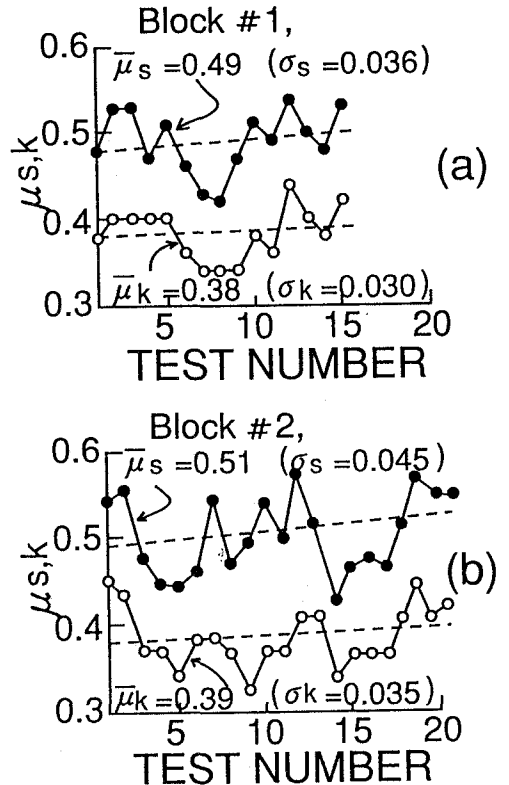


図-6 海水と砂利浜の摩擦係数

$$+\frac{L^3}{6} \sin \beta \cdot \rho w + F_1(0.9 \cdot D - l \cdot \tan \theta) \quad \dots (8)$$

次に地盤に作用する力 F_E は次式より求められる

$$F_E \cdot \sqrt{L^2 + \frac{1}{\cos^2 \beta} (0.9 \cdot D - l \cdot \tan \theta - L \cdot \sin \beta)^2} \cdot \sin (90 - \delta - \beta - \theta)$$

$$+\frac{L}{\cos \sigma} (0.9 \cdot D - l \cdot \tan \theta - L \cdot \sin \beta) \cdot \rho w \cdot \left\{ \frac{L}{2 \cos \beta} - \frac{1}{2} (0.9 \cdot D - l \cdot \tan \theta - L \cdot \sin \beta) \times \tan \beta \right\}$$

$$+\frac{L^2}{2} \tan \beta \cdot \rho w \cdot \left\{ \frac{L}{3} \cos \beta - (0.9 \cdot D - l \cdot \tan \theta) \tan \beta \right\}$$

$$= D \cdot L \cdot \rho i \left\{ \frac{1}{2} \sqrt{D^2 + L^2} \cdot \sin (\alpha + \beta) - (0.9 \cdot D - l \cdot \tan \theta - L \cdot \sin \beta) \times \tan \beta \right\} \quad \dots (9)$$

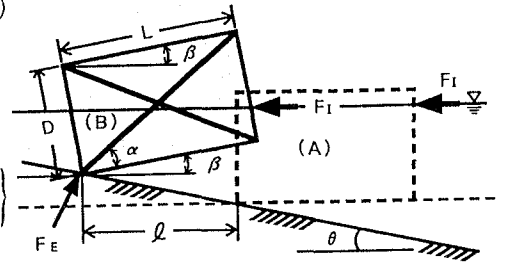


図-7 モデル図

(8) 式で傾斜角 β を求め、(9) 式で F_E を求めることができる。 F_E の作用点では、海水は圧壊が起こるので、接触長を m とし、圧壊強度を σ_0 とする接触長さ m 及び摩擦応力度 T_s はそれぞれ次式で求められる。

$$m = \frac{F_E}{\sigma_0} \quad \dots (10)$$

$$T_s = (\mu_s, \mu_k) \times \sigma_0 \quad \dots (11)$$

4. Ice Gouge による海底地形の変化

図-8 に示すように、海底勾配 i の所に直方体の大きな氷塊が背後から氷力を受けて、砂地盤を削るとする。この時、氷塊は水平に移動するものとする。

(1) ランキン土圧理論による計算 (前面が直立の場合)

氷盤は前面でランキンの受働土圧が、側面では主働土圧に摩擦係数を乗じた摩擦応力が作用し、底面で摩擦力が作用し、氷力と平衡したところで停止すると仮定する。砂の内部摩擦角を ϕ 、砂の水中の単位体積重量を γ_i とすると氷塊前面に作用する全受働土圧 P_p と側面に作用する主働土圧 P_A は次式で示される。

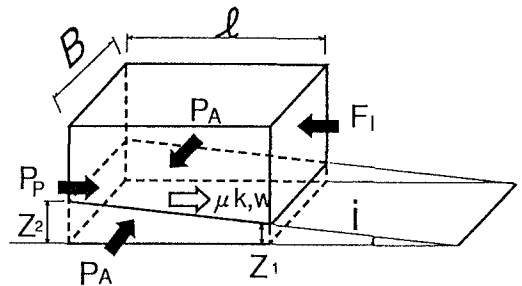


図-8 模式図 (1) ランキン土圧使用の場合

$$P_p = \frac{1}{2} \cdot \gamma_i \cdot Z_2^2 \cdot B \cdot \cos i \frac{\cos i + \sqrt{\cos^2 i - \cos^2 \phi}}{\cos i - \sqrt{\cos^2 i - \cos^2 \phi}} \quad \dots (12)$$

$$P_A = \frac{1}{2} \cdot \gamma_i \cdot Z^2 \cdot \cos i \frac{\cos i - \sqrt{\cos^2 i - \cos^2 \phi}}{\cos i + \sqrt{\cos^2 i - \cos^2 \phi}} \quad \dots (13)$$

ここで $Z = Z_1 + i x$ とすると側面に作用する全主働土圧 P_A は次式で計算できる。

$$P_A = \int_0^l \frac{1}{2} \cdot \gamma_i \cdot Z^2 \frac{1 - \sqrt{1 - \cos^2 \phi}}{1 + \sqrt{1 - \cos^2 \phi}} dx = \frac{\gamma_i}{2} \frac{1 - \sqrt{1 - \cos^2 \phi}}{1 + \sqrt{1 - \cos^2 \phi}} \left(Z_1^2 \cdot l + i \cdot Z_1 \cdot l^2 + \frac{i^2}{3} \cdot l^3 \right) \quad \dots (14)$$

水中での氷塊の重量を W とし、この氷塊に作用する水平方向氷力を F_1 とすると次式を得る。

$$F_1 = P_p + 2\mu_k \cdot P_A + \mu_k \cdot W \quad \dots (15)$$

$$(Z_2 = l + Z_1)$$

μ_k は氷塊と砂との摩擦係数で 0.39 程度と考えてよい。 F_1 , μ_k , l , W , B , ϕ , γ_i , i が与えられたら、 Z_1 , Z_2 が求まることになる。

(2) クローン土圧理論による計算 (前面が斜面の場合)

氷塊の前面が傾斜している場合はクローン土圧式を用いればよい。図-9 に示すように氷塊の前面の傾斜角を θ 、側面の傾斜角を θ_1 とし、海底の傾斜を i とする。

氷塊の前面に作用する全受働土圧は次式で示される。

$$P_p = \frac{1}{2} \cdot \gamma_i \cdot Z_2^2 \cdot B \cdot \frac{\sin^2(\theta + \phi)}{\sin^2 \theta \sin(\theta - \delta) \left(1 - \sqrt{\frac{\sin(\delta + \phi) \sin(\phi + i)}{\sin(\theta - \delta) \sin(\theta - i)}} \right)^2} \quad \text{但し } \delta = \frac{2}{3} \phi \quad \dots (16)$$

次に、側面に作用する主動土圧式は次式である。θ₁は氷塊側面の傾斜角、i=0である。

$$P_A = \frac{1}{2} \cdot \gamma_i \cdot Z^2 \cdot \frac{\sin^2(\theta_1 - \phi)}{\sin^2 \theta_1 \sin(\theta_1 + \delta) \left(1 + \sqrt{\frac{\sin(\delta + \phi_1) \sin(\phi - i)}{\sin(\theta_1 + \delta) \sin(\theta_1 - i)}} \right)^2} \quad \dots (17)$$

$$P_A = \frac{1}{2} \cdot \gamma_i^2 \cdot \frac{\sin^2(\theta_1 - \phi)}{\sin^2 \theta_1 (\theta_1 + \delta) \left(1 + \sqrt{\frac{\sin(\delta + \phi) \sin(\phi)}{\sin(\theta_1 + \delta) \sin(\theta_1)}} \right)^2} \left(Z_1^2 \cdot l + i \cdot Z_1 \cdot l^2 + \frac{i^2}{3} l^3 \right) \quad \dots (18)$$

図-9の状態での氷塊の重量をWとすると

$$F_1 = P_p + 2\mu k P_A + \mu k W \quad \dots (19)$$

氷塊の形状に応じて(15)あるいは(19)式よりGouge depth Z₁, Z₂が計算されることになる。

以上、海底と氷盤あるいは氷塊との相互作用について述べてきた。北極海に面する浅海域においては、海底が氷の移動や運動によって局所変形を受けているが、北海道のオホーツク海沿岸においては、調査結果もなく不明な点が多い。今後の調査が望まれるところである。

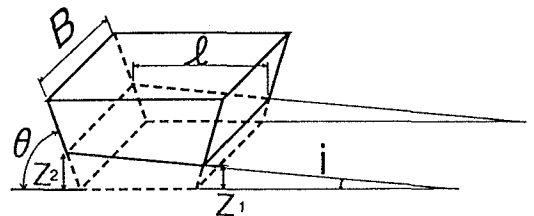


図-9 模式図(2) クーロン土圧使用の場合

参考文献

- 1) Noble : Design of Submerged and Floating Structures, Design for Ice Forces, Ed. by Caldwell and Crissman, ACSE
- 2) Green, Reddy, Chari : Iceberg Scouring and Pipeline Burial Depth, Proc of 7th POAC, 1983
- 3) Lien : Iceberg Scouring on the Norwegian Continental Shelf, Boc of OTC, 1983
- 4) Lewis : The Frequency and Magnitude of Ice Drift Grounding from Ice-Scour Tracks in the Canadian Beaufort Sea, Proc of 4th POAC, 1977
- 5) Shapiro, Metzner : Coefficients of Friction of Sea Ice on Beach Gravel, Jour of OMAE, ASME, 1987
- 6) 泉山, 佐伯, 尾崎 : 波浪による氷盤の運動に関する研究, 土木学会北海道支部論文報告集, 1981
- 7) Lever, Reimer, Diamand : A Model Study of the Wave Induced Motion of Small Icebergs and Bergy, Bits, Jour. of OMAE, ASME, 1987