

海水盤を利用した冬期レクリエーションの安全性に関する研究

Safety for Utilization of Sea Ice Cover

大久保泰宏* 渡部靖憲* 木岡信治* 佐伯浩**

Yasuhiro Okubo, Yasunori Watanabe, Sinji Kioka and Hiroshi Saeki

Nowadays people enjoy a variety of sports and recreations on frozen surfaces in winter. It is important to estimate the bearing capacity of an infinite ice sheet in order to ensure their safety. In this study, (1) we show in charts and graphs the estimated bearing capacity of ice sheets obtained by the deflection of ice sheets per unit load without breaking the ice; (2) we obtain an equation to calculate the bearing capacity of ice sheets with holes and indicate the results in charts; and (3) we describe in charts the critical traveling speed of loads moving on ice sheet when the bearing capacity is at minimum.

Keywords : safety, bearing capacity, ice sheets, recreation

1. はじめに

寒冷地の港湾や漁港あるいは汽水湖や灌漑湖では、冬期の結氷時期に氷盤を利用したレクリエーションが年々盛んになってきている。港内においては氷盤に穴を開けての魚釣り、湖沼ではスノーモービルや自動車を用いてのカーレースやパラセーリングなどがその例である。公の水面をレクリエーションやスポーツ、その他各種イベントに利用する場合には安全性が重視されなければならない。実際の浮氷盤上での事故のほとんどは氷上を歩行または走行中に氷盤がたわみ、曲げ破壊を起こし氷盤が割れて水中へ転落することが多い。しかし、寒冷地域のレクリエーションは限られていることから、冬期の結氷盤を利用したレクリエーションも重要であり、今後ますます盛んになるとと思われる。

本研究では静的荷重については無限氷盤の耐荷力を推定するための図表を示すとともに、魚釣り用の穴をあけた場合の耐荷力への影響度も計算し、穴がある場合とない場合の耐荷力の違いを明らかにした。また氷盤上を移動する荷重に対しては氷盤と下部流体の共振現象を起こす移動限界速度を示し、耐荷力増加のための対策を明らかにする。

2. 氷盤の耐荷力について

半径 a の等分布荷重に対する無限氷盤の耐荷力については過去に Bernshteyn、久保等によって理論解が求められている。Wyman は半径 a の等分布荷重に対する無限氷盤の耐荷力として式(1)を求めている。

$$P_{cr} = \frac{\pi \sigma_f \lambda a h^2}{3(1+\nu) k e i'(\lambda a)} \left[\lambda = \sqrt{\gamma/D} \quad D = \frac{E h^3}{12(1-\nu^2)} \right] \quad (1)$$

この式において、 σ_f は氷盤の曲げ強度、 h は氷厚、 γ は水の単位体積重量、 E は氷の曲げ弾性率、 D は平板剛度である。また ν は氷のポアソン比であり $\nu=0.3$ とした。この式において a 、 σ_f 、 h 、 E が与えられれば氷盤の耐荷力 P_{cr} が求められることになる。しかし実際の氷盤の E 、 σ_f は氷温や気泡量などに強く依存し、現地で曲げ試験を行い E 、 σ_f を求めることは大変困難である。そこで氷盤の耐荷力を非破壊のまま単位荷重における氷盤のたわみから推定する方法について述べる。載荷面を円として、載荷半径 a 、載荷重 P としたときの無限氷盤の載荷位置でのたわみ W は式(2)で示される。

$$W = \frac{P}{\pi a^2 \gamma} (1 + \lambda a k e r'(\lambda a)) \quad (2)$$

この式からある荷重に対してたわみ W を測定することによって氷の曲げ弾性率を求めることができる。また過去の研究において曲げ強度 σ_f と氷の曲げ弾性率 E との間には式(3)のような関係が成り立つ。

$$E = K \cdot \sigma_f \quad (3)$$

* 学生会員 北海道大学大学院 (060 札幌市北区北13条西8丁目)

** 正会員 北海道大学工学部土木工学科

過去の実験によって海水におけるKの値については3000～4000程度であることがわかっている。以上により既知の荷重PによるたわみW、氷厚h、Kの値によって氷盤の耐荷力P_{cr}を求めることができる。この計算結果の一部を図-1の(a)(b)それに(c)を示す。Kの値はそれぞれ3000、3500、4000である。この図-1を用いて氷盤の耐荷力を算定することが出来る。つまり、まず氷厚を測定しておき、半径a=50cmの円に一定荷重Pを与えたときの氷盤の撓み量Wを測定し、hとW/Pを与えることにより図-1より氷盤の耐荷力P_{cr}の推定が可能である。実際には、ソリ（半径50cm程度）に100kgf程度の荷重を乗せ、所定の位置の載荷前とソリを移動させて載荷したときの撓みの差からWが推定される。同一の荷重でも撓み量が小さいほど耐荷力が大きいことを示している。この方法により、随時氷盤の耐荷力を推定することができる。

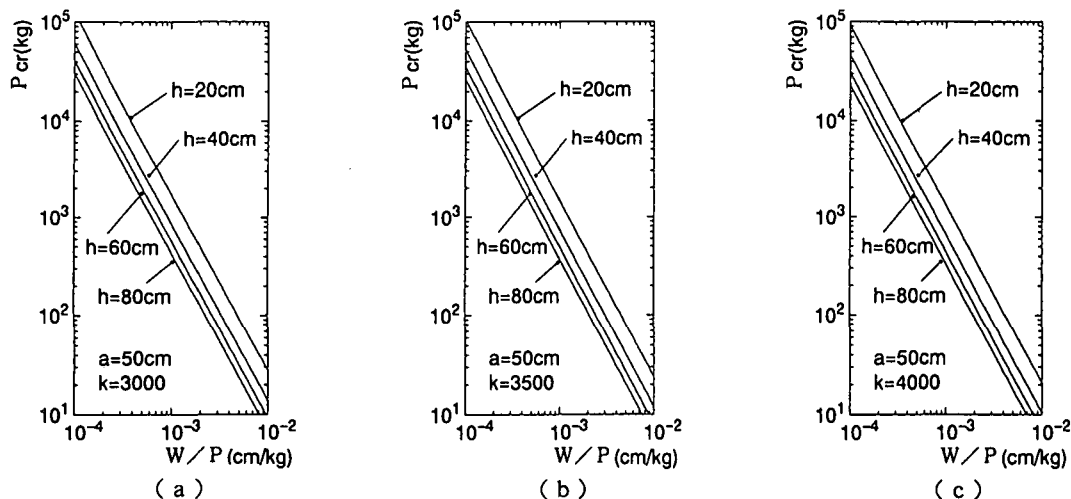


図-1 耐荷力推定図

3. 穴あきの氷盤の耐荷力について

氷盤を魚釣りなどに利用する場合には、アイスオーガーあるいは突き棒などで穴をあけ、その穴を利用して魚釣りをする。そのような場合を考慮して、無限氷盤に半径aの穴をあけた場合について考え、穴の縁に対しては線荷重として $P/2\pi a$ を作用させることとする。この場合の耐荷力aとするとP_{cra}は式(4)で表される。穴のない場合の耐荷力P_{cr}との比較はWymanの式(1)を用いる。

$$P_{cra} = \frac{\pi \sigma_f h^2}{3} \frac{\nu(\lambda a)^2 \{ kei(\lambda a) ker'(\lambda a) - kei'(\lambda a) ker(\lambda a) \} - (1-\nu) \lambda a \{ (ker'(\lambda a))^2 + (kei'(\lambda a))^2 \}}{(1-\nu^2) \{ kei(\lambda a) kei'(\lambda a) + ker(\lambda a) ker'(\lambda a) \}} \quad (4)$$

そして穴のある場合とない場合についての耐荷力(P_{cra}とP_{cr})の計算結果を図-2に示す。両計算結果とも λa の増加とともに耐荷力は増加するが、当然のことながら、穴のない場合のほうが耐荷力は大きくなる。魚釣り用の穴をあけることは耐荷力を低下させることになる。次に耐荷力の比P_{cra}/P_{cr}を求めたものが図-3である。図-3より、P_{cra}/P_{cr}の値は λa により大きく変化する。 λa が0.3程度のときP_{cra}/P_{cr}は最大値を示し約62%で、 λa が小さいときと大きいときではその比が約55%となる。以上から、氷盤に穴を開けたときの耐荷力は、穴のない場合の55～62%に低下する。よって、魚釣りなどの場合には図-1により推定される耐荷力の半分程度であることを十分知っておくべきである。

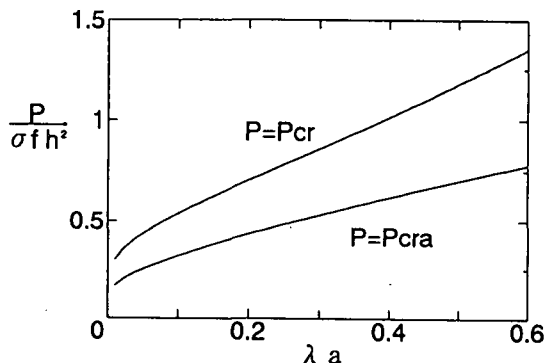


図-2 耐荷力と λa との関係

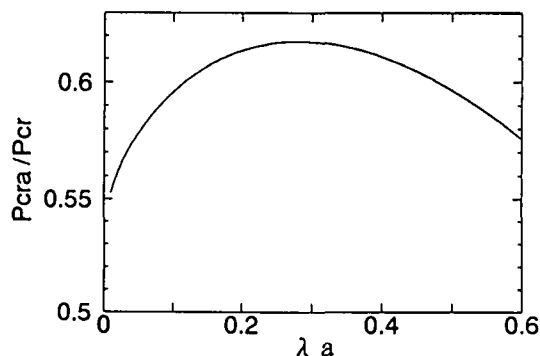


図-3 λa と耐荷力P_{cra}/P_{cr}の関係

4. 穴の間隔と氷盤の耐荷力について

氷盤上からの魚釣りにおいては、魚釣り用の穴を開けるが一般には一人が1個の穴を用いる。よって多くの釣人が来る場合は氷盤上に多くの穴が開けられることとなる。ここでは半径 a の穴を間隔 L で2個あけたときの相互の影響を考える。 $a \ll L$ と考えると一方の穴に作用する氷盤の耐荷力 P_{crd} は式(5)で表される。

$$P_{crd}(a, L) = \frac{\sigma_f \cdot h^2}{6} \frac{1}{X(a) + X(L)} \quad (5)$$

$$X(r) = \frac{D\lambda}{r} \left[A_1 \{ (1-\nu) \ker'(\lambda r) + (\lambda r) \operatorname{kei}(\lambda r) \} + A_2 \{ (1-\nu) \operatorname{kei}'(\lambda r) - (\lambda r) \ker(\lambda r) \} \right]$$

$$A_1 = \frac{\nu \lambda a \ker(\lambda a) + (1-\nu) \operatorname{kei}'(\lambda a)}{2\pi a D \lambda^3 \left[\nu \lambda a \{ \operatorname{kei}(\lambda a) \ker'(\lambda a) - \ker(\lambda a) \operatorname{kei}'(\lambda a) \} - (1-\nu) \{ (\ker'(\lambda a))^2 + (\operatorname{kei}'(\lambda a))^2 \} \right]}$$

$$A_2 = \frac{\nu \lambda a \operatorname{kei}(\lambda a) - (1-\nu) \ker'(\lambda a)}{2\pi a D \lambda^3 \left[\nu \lambda a \{ \operatorname{kei}(\lambda a) \ker'(\lambda a) - \ker(\lambda a) \operatorname{kei}'(\lambda a) \} - (1-\nu) \{ (\ker'(\lambda a))^2 + (\operatorname{kei}'(\lambda a))^2 \} \right]}$$

穴が一つだけの場合のものの耐荷力との比 P_{crd}/P_{cra} を表したものが図-4である。ここでは、氷厚が50cmの場合を示す。穴の半径を10cmと20cmについて計算を行った。穴の間隔が300cmくらいになると、穴が1つの場合に対して90%程度に耐荷力が減ることになる。また穴間隔を100cm以下にすると耐荷力は、他の穴の影響を受けて70%以下と小さくなる。よって魚釣り用の穴を開ける場合は穴相互の間隔を十分とることが重要で少なくとも2mくらいとるのが望ましい。

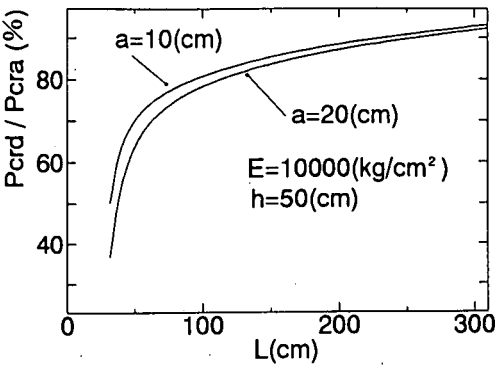


図-4 間隔 L と耐荷力比 P_{crd}/P_{cra} の関係

5. 移動荷重による氷盤のたわみへの影響

浮氷盤上を車輛が走行する場合に移動荷重による氷盤と下部流体との連成振動の問題として考えられ、氷厚、水深、氷盤の弾性係数、車両の速度の組合せによって氷盤が大きくたわむ事が知られている。そのときの走行速度を移動限界速度といっており、その速度近傍での走行時における氷盤の最大たわみ量は静止時のたわみ量の3倍以上となる(図-5)。また氷盤のたわみの状況については滝沢や Sanberg & Falkenmarkの研究に示されているように走行速度によって複雑に変わることが知られている。Nevelは浮氷盤を移動する荷重の移動限界速度を求めている。計算される移動限界速度 U_c を図-6に示す。 H は水深、 h は氷厚である。氷盤上を車輛などで走行するときには図-6によって求められる移動限界速度近傍で走らないことが望ましい。

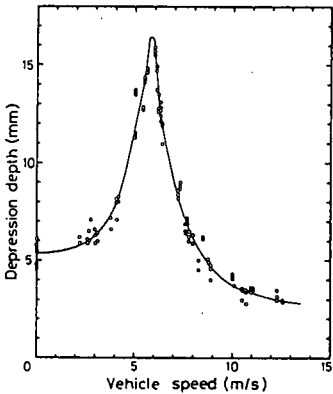


図-5 氷板の最大沈下量と荷重速度の関係(滝沢)

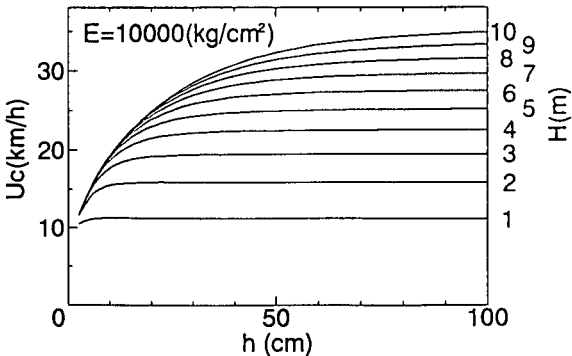


図-6 氷厚 h と移動限界速度 U_c との関係

6. 氷盤を利用するときの安全度の向上の対策

レクリエーションやイベント等に氷盤を利用する場合には安全性を充分考慮しておく必要がある。ここでは氷盤を利用する場合の安全度の向上と注意すべき事について述べる。

(1) 氷盤の耐荷力の正確な推定

図-1を用いて、氷盤へかけた荷重とたわみ、それに氷厚から耐荷力を推定することが出来る。これは、半径50cmへの等分布荷重であるから、荷重を分散させると耐荷力はより大きくなる。過去の海水等からの実験では、上述した等分布荷重の影響範囲は、半径10m程度であるのでそれを考慮すべきである。また多雪地帯における氷盤は、氷と雪氷の層となっており、氷盤の耐荷力が低下することも考えられるので、あらかじめ充分な調査（強度及び氷盤構造など）が必要となる。また、氷盤に穴を開ける場合には、それによる耐荷力の低下と穴相互間隔に十分な注意を払うべきである。

(2) 氷盤の耐荷力の向上

氷盤の耐荷力の向上のためには、氷厚の増加と純粹の柱状氷をつくることである。多雪地帯の自然氷の場合、降雪の影響で氷盤の構造は層状になり氷盤の強度は著しく低下する。よって可能な限り除雪を行い、場合によっては散水して良質の氷を製作すべきである。また、河岸や湖岸では氷厚も薄く、クラックの発生も予測されるので、柳の枝や白色系のジオテクスタイルなどで補強して耐荷力を増大させることも重要であるし、載荷面積を増大させるために板などを乗せておくことも重要である。

(3) 安全性の向上

氷盤の利用に関して安全性を向上させるためには、まず河岸や湖から氷盤上に移動するときが最も危険である。よって湖岸や河岸の耐荷力向上については前述したような注意が必要である。また穴を開ける場合、一度つくった穴が翌日にはすでに表面が凍結し始め、その後降雪があるとその穴は見えなくなってしまう、また新たな穴が開けられることになる。また、一度つくったその古い穴に足をつっこんで転落してしまうことがあり危険なので、一度つくった穴を可能な限り利用することが望ましい。危険防止と穴の数を減らす為には、一度つくった穴には目印を残しておき、後日穴をつくるときはそれを利用することが望ましい。またスノーモービルなどを氷上で走行させるときには前述の移動限界速度の近傍で走行させないことが望ましい。さらに、泥などで汚れた靴で氷盤上を移動すると、氷盤表面を汚染することになり、アルベドの低下を招き、氷盤を融解させる原因となりこれが氷厚低下と強度の低下を起こす。よって、氷盤上のアルベドの低下を起こさせないように注意すべきである。

7. 結論

(1) 耐荷力の推定の実用化のため、実際の氷盤の氷厚、載荷面の半径および単位荷重によるたわみ量を測定することによって氷盤の耐荷力を推定する図表(図-1)を作製し、これらを利用することによって無限氷盤の利用の安全性の確認が可能となった。

(2) 魚釣りを行うような穴のあいた氷盤の耐荷力は式(4)によって求められ、穴のない場合に対して耐荷力と比較して約60%となる。

(3) 湖沼などの氷盤をスノーモービルなどのレースや車両の通行で利用する場合、図-6で求められた移動限界速度近傍で走らない方が望ましい。

8. 参考文献

- 1) Kerr A.D. : The bearing capacity of floating ice plates subjected to static or quasi-static loads, Journal of Glaciology, Vol.17, No.76, 1976
- 2) Wyman M.1950. : Deflections of an infinite plate. Canadian Journal of Research, Ser.A, Vol.28, p.293-302
- 3) Nevel D.E. : Moving loads on a floating ice sheet, CRREL. Res. Rep. 261, 1975
- 4) 佐々木、日比、他：浮氷盤上における交通の安全性について、第2回寒地技術シンポジウム'86 p.192-p.200, 1986
- 5) 北条、原、佐伯：浮氷盤の利用と課題、第8回寒地技術シンポジウム'92 p.406-p.412, 1992
- 6) 滝沢：水に浮いた氷板の運動荷重による変形、寒地技術シンポジウム'85 p.133-p.137, 1985