

オホーツク海における北海道とサハリン沿岸域海水の一軸圧縮強度について

Uniaxial Compressive Strength of Sea ice along Okhotsk Sea coast of Hokkaido and Sakhalin

正木 孝治* 本田 秀樹* 河合 孝治* 大塚 夏彦** 黒木 幹男*** 佐伯 浩***

Takaharu Masaki, Hideki Honda, Takaharu Kawai, Natsuhiko Ohtsuka, Mikio Kuroki, Hiroshi Saeki

Uniaxial compressive Strength is one of the main parameters, which determines the value of load on marine structures in ice-infested sea area. Sea ice has different properties by maritime and weather condition, and strength of natural sea ice has much dispersion, because it depends on a number of factors (ice temperature, salinity, structure, etc.). therefore, it is necessary for the exploitation in Okhotsk Sea to estimate the applicability of formula and factor influencing on uniaxial compressive strength of sea ice in Okhotsk Sea.

KEY WORDS: uniaxial compressive strength, porosity volume, dispersion, variation factor

はじめに

氷海地域において建設される港湾や海洋資源開発のための各種施設の設計にあたって、設計条件の一つとして考慮される氷力の提案式は 30 近くにも及ぶ。その提案式のいずれもが、海氷の一軸圧縮強度を明確に関連づけており、氷厚などとともに氷力算定においてもっとも支配的な条件の一つである。一軸圧縮強度については本研究中で紹介する Weeks と Assur、Timco と Frederking などが、北極海、アラスカなどの海氷について強度式を提案している。しかし、強度の依存因子には氷温、塩分量、密度の他、多様なものがあり、例えば海象条件によって氷の生成過程に大きな影響がある。この生成過程の違いが結晶径、気泡量などといった他の強度の依存因子を大きく変えており、提案式はそのまま他の地域の強度算定に適用できるものではない。例えば、石油の埋蔵が確認され、将来大規模な資源開発が行われようとしているオホーツク海に面するサハリン東岸部、また、その南岸部である北海道オホーツク海沿岸の施設設計のために氷の強度を入力する際、提案式について気象、海象条件の違いによる適合性を検証する必要がある。また、氷力計算における氷の強度の入力には平均値を用いているが、同じような氷象条件のもとでも強度のばらつきが大きいことが知られている。このばらつきの原因としては位置的な影響が大きいとされているが、ばらつきの影響をとりこむために強度の確率特性を把握することも今後、必要となるだろう。本研究は、オホーツク海沿岸の一軸圧縮強度について、著者らの調査結果と他の研究機関の調査結果をまとめ、他海域や、オホーツク海各沿岸の海水特性、強度、確率統計量などの比較を行ったものである。

1. 各寒冷地における海氷強度特性の比較

(a) 高緯度地域

Weeks と Assur は Peyton のアラスカ・クック湾の調査結果をまとめ、次式を得ている。

$$\sigma_c = 16.17 \left(1 - \sqrt{\frac{v_b}{275}} \right) \quad (1)$$

ここで、 v_b はブラインの体積量(%)であり、Frankenstein によりブライン体積は

$$v_b = S \cdot 10^{-3} \left(0.532 + \frac{48.185}{|T|} \right) \quad (2)$$

$$-22.9^\circ\text{C} < T < -0.5^\circ\text{C}$$

のように、氷温と塩分量の関数となっていることから、Weeks らの示した(1)式より、一軸圧縮強度は氷温と塩分量で表されることになる。同様の結果は北極海での強度試験のデータにおいても見られる。

* 学生会員 北海道大学大学院工学研究科土木工学専攻 (〒001 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

** 正会員 北日本港湾コンサルタント

*** 正会員 北海道大学工学部土木工学科

(b) オホーツク海沿岸

次に、サハリン北東岸の一軸圧縮強度 σ_c について、Truskov は膨大な実験を行っている。それらの調査に基づき、Truskov は次式で示されるような一軸圧縮強度 σ_c の推定式を提案している。

$$\sigma_c = -72.72 - 1.376T + 1.43S + 113.43\rho - 8.30 \frac{S}{|T|} \quad (3)$$

T: 氷温(°C), S: 海水の塩分量(‰)

ρ : 海水の密度(gf/cm³)

σ_c : 海水の一軸圧縮強度(kgf/cm²)

これによると、海水の一軸圧縮強度は、氷温と氷の密度及び塩分量に依存することになる。ここで、(3)式を

$$\sigma_c = -72.72 - 1.376T + S \left(1.43 - 8.30 \frac{1}{|T|} \right) + 113.43\rho \quad (4)$$

のように変形すると、氷温 T が $T < -5.81$ の範囲では第3項が正の値に転じ、同一の密度とすると塩分量 S が大きくなるほど σ_c が大きくなり、他の研究者らの調査結果と矛盾することになる。しかし、Saeki らの実測結果にもあるように、現実の海水においては、海水の塩分量 S や密度 ρ は結氷開始時からの経過時間が長くなるほど小さくなる傾向があり、密度は塩分量の関数と考えられる。第4項より海水の密度 ρ の変化は強度に強く影響することから、Truskov の得た経験式には妥当性がある。

また、オホーツク海南岸に位置する北海道のオホーツク海沿岸における Saeki らの強度試験の結果においては、氷の強度は塩分量 S によっては明確な依存性を示さず、氷温と密度に強く影響されていることを明らかにしている。

(c) Timco と Frederking の強度推定式と各地域の強度の比較

Timco と Frederking は以下に示すような強度推定式を提案した。

$$\sigma_c = 382.2 \left(\dot{\epsilon} \right)^{0.26} \left(1 - \sqrt{\frac{v}{320}} \right) \quad (5)$$

$10^{-5} \text{ sec}^{-1} < \dot{\epsilon} < 10^{-3} \text{ sec}^{-1}$
 $\dot{\epsilon}$: 氷の歪速度(sec^{-1})

これによると、強度は歪速度を一定にすれば、全空隙量 v (porosity volume) のみで決まると言える。また、一般に氷の全空隙量 v は、

$$v_t = v_a + v_b$$

v_b : 氷中のブライン体積
 v_a : 気泡の体積

であるから、全空隙量 v が占める v_b と v_a の割合によって次の3つの場合が考えられる。

- ① v_b の割合が大きく、よって、氷温と塩分量で強度が決まる場合。
- ② v_a の割合が大きく、よって、氷温と密度で強度が決まる場合。
- ③ v_b と v_a が同じオーダーで、氷温、塩分量、密度で決まる場合。

北極海やベーリング海などの高緯度の海域では、ブライン量の占める割合が極めて高いことにより、(1)式のように一軸圧縮強度はブライン量 v_b のみで表され、①の場合に該当する。北海道のオホーツク海沿岸のような中緯度海域においては、全空隙量に対する気泡の占める割合が大きいため、 v_a が卓越して②の場合、サハリン東岸においてはこれらの中間であり、③に該当する。

2. サハリン東岸と北海道オホーツク海沿岸の海水の一軸圧縮強度の比較

(a) Truskov の強度式のサロマ湖海水の強度との比較

次に、(3)のサハリン北東岸での強度推定式と北海道オホーツク海沿岸のサロマ湖での実測データ($\rho = 0.85 \sim 0.91$)との比較をしたものが図-1である。同図からも明らかなように Truskov の経験式は氷温 T がおよそ $T < -6^\circ\text{C}$ の範囲では、密度に関係なく、氷温の低下とともに一軸圧縮強度 σ_c は直線的に大きくなっている。これと同様の傾向は、サロマ湖においても岡本らの調査によって確認されている。サロマ湖の実測値が Truskov 式の曲線よりややばらついている傾向もあるが、これは実測データでは塩分量が $3.8 \sim 7.0\%$ と広範囲であるため、前述したように密度が大きいと塩分量も大きくなることにより塩分量の大きな $\rho = 0.91$ のデータが塩分量の大きい領域に、 $\rho = 0.85$ のデータが塩分量の小さい領域に集中しているためと思われる。また、推定式より実測値がやや大きいことについては後で述べるように両地域のグレインサイズの違いによる構造上の欠陥部の多少の影響も加味されると思われる。以上のことにより同一には比較できないが、全体的な比較をしてみると、およそ Truskov の経験式に一致しているといえる。

(b) 強度と各依存因子との関係

この Truskov の経験式と著者らが測定したオホーツク海沿岸の流氷とサロマ湖の氷の強度について、強度と塩分量の関係で調べたものが図-2である。

実測値とも Truskov の経験式と比較的良好一致を示している。また、同図より、長時間経過している流氷は、塩分量が小さく、密度も小さくなっているのに対し、サロマ湖の氷は塩分量は大きい、密度も大きいため、流氷に比べてより強い一軸圧縮強度を示している。

次に、各氷温に対する、一軸圧縮強度 σ_c と密度 ρ の関係を示したものが図-3である。実測値は Truskov の式より計算される各直線にほぼ一致している。しかし、密度の比較的小さい領域においては、実測値のほうが大きめの強度を示している。これは、低密度の海水では小さな気泡と大きな気泡が混在した状態となっているが、サハリン北部と北海道沿岸部では緯度の違いによる日射量の違い、気温の違い、それに積雪量の違いからそれら空隙の大きさ分布の違いがあると思われる、この違いによるものと推測される。

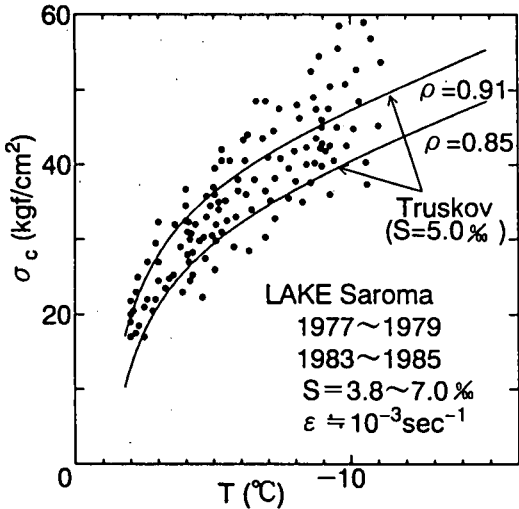


図-1 Truskov の強度式とサロマ湖の実測値の比較

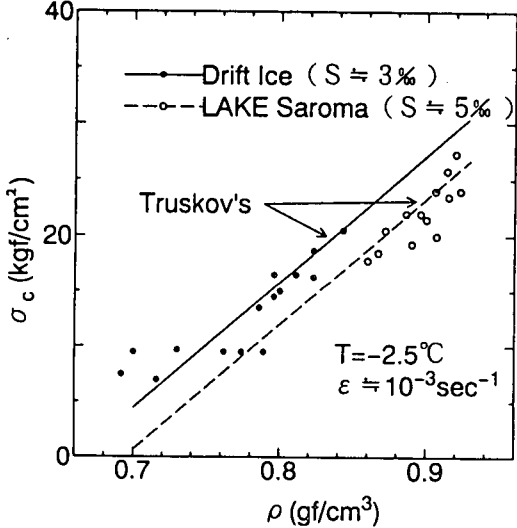


図-2 流氷とサロマ湖海水の強度比較

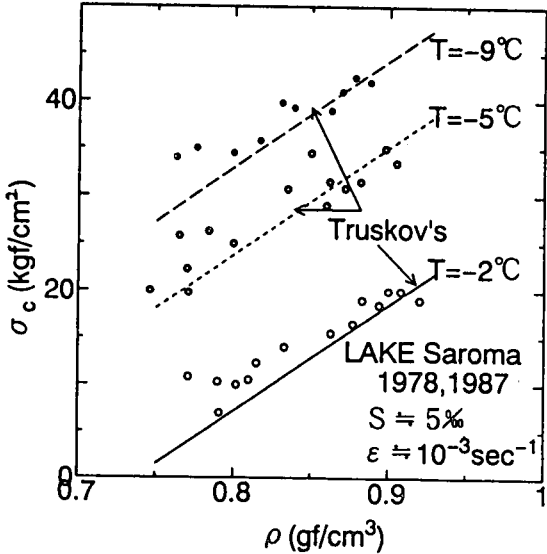


図-3 各氷温ごとの強度比較

3. サハリン東岸と北海道オホーツク海沿岸の海水強度分散特性の比較

現地海水の強度は、氷温、密度および塩分量が比較的小さい範囲であっても多くのばらつきがあることが知られている。そこで次に、ばらつきの度合いとその性質について、サハリン東岸と北海道オホーツク海沿岸で行われた海水の強度試験の変動係数を用いて両地域の比較を行う。竹内らは1994年と95年にサロマ湖で同一測線上に15cm間隔で38mにわたって採取した海水の一軸圧縮強度の分散特性を詳細に調べた。一方、サハ

表-1 各地の一軸圧縮強度試験の海水強度ばらつき比較

		氷温	サンプリング方法	標本数	変動係数
北海道オホーツク海沿岸 (サロマ湖) 竹内ら	1994 年	-1.7℃付近	同一測線上 (38m. 15cm 間隔)	256	26.0%
	1995 年				29.0%
北海道オホーツク海沿岸 (能取湖)	1996 年	-2.0℃付近	同一地点 (約 2m 四方)	190	20.9%
サハリン東岸 (Chaivo Bay) Truskov ら	1991 年		同一地点	130	42.2%
			同一測線上	125	44.8%
			任意地点	191	56.2%

リン側については、Truskov らが Chaivo Bay で行った 3 種類のサンプリング方法（同一地点、同一測線上、任意の地点）での強度試験結果における分散特性の比較についての研究がある。ここで、Truskov らは、強度試験を何回かに分けて行っているため、一軸圧縮強度値をその試験群の平均値でわった値を相対強度 (Relative ice strength) と定義して相対強度の変動係数を求めている。また、著者は 1996 年の能取湖において 2 月に 1 カ月にわたり同一地点（約 2 m 四方）で採取した 15 本の供試体の強度試験を 15m ずつ離れた 4 つの地点で 3 組、計 12 回行った。この試験結果も Truskov らの研究にならい、各試験の平均値で商をとり、相対強度について変動係数を求めた。以上、3 つの研究の強度試験から求めた変動係数を表-1 に示す。これによるとサロマ湖や能取湖など北海道オホーツク海沿岸側のデータは、変動係数は 20%~30% となっておりほぼ同じである。これに対して、サハリン側のデータは変動係数が 40% 以上と北海道に比較して非常にばらつきがあることがわかる。また両地域とも同一地点で採取した供試体の強度変動係数よりも測線上のそれの方が大きい、これは測線上にわたって存在する海水には強度の周期があり、その影響のためと思われる。このサハリンと北海道側のばらつきの違いの原因の一つとして、積雪による断熱効果や平均気温の違いによる氷の成長過程の違いがあげられる。積雪量が多い北海道側では、その積雪により外気による影響を受けないこと、また、その断熱効果からグレインサイズが大きくなることにより、単位体積あたりの構造上の欠陥が少なくなり、ばらつきの少ない均質な氷となっていると思われる。一方、サハリン側では積雪が少なく、かつ海水形成時の平均気温が低いこと逆の結果となっており、ばらつきの大きい氷となっていると予想される。

このことを能取湖での強度試験結果により検証する。海水が形成され始めてから供試体を採取するまでの平均気温と 1 回の試験 15 個の相対強度の変動係数の関係を示したものが図-4 である。この図より、平均気温が低く急速に形成された海水ほど変動係数が大きいことがわかる。このことは平均気温が低いサハリンの方が北海道側よりばらつきが大きいことと一致している。

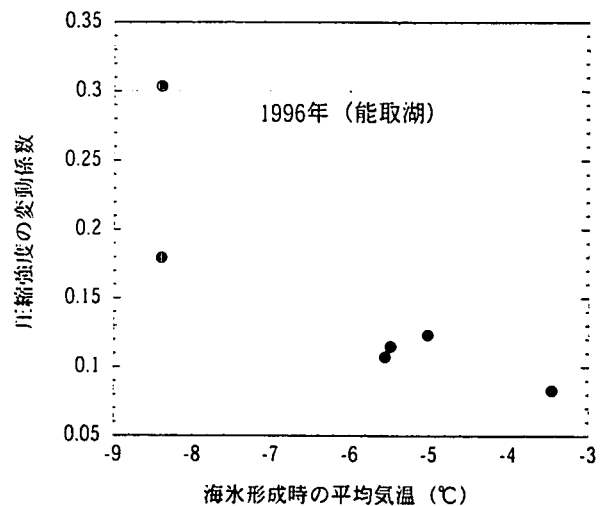


図-4 海水形成の平均気温と強度のばらつき比較

4. 確率分布解析

実際に構造物に作用する氷力を計算する場合、一軸圧縮強度は平均値を用いてきたが、以上述べたように氷の強度はばらつきの度合いが大きく、そのばらつきを取り込むために最適な確率分布モデルを取り入れようとする試みもある。岡本らは、1992 年にサロマ湖の同一地点で 400 本を越える海水の強度試験を行い、その強度分散は正規分布に近いこと、また、強度の頻度分布形の氷温への依存は見られないことを示している。竹内らは上記の実験において、さらに圧縮強度と 4 種類の確率分布関数（正規分布、対数正規分布（2 母数と 3 母数）、ワイブル分布）との適合度の検定をした結果、対数正規分布（3 母数）との適合度が高いという結果を得ている。

ここでは、上記の能取湖での強度試験とサハリン東岸の Truskov らの研究の相対強度について対数正規分布（3 母数）との適合性を検定する。対数正規分布（3 母数）の確率密度関数は次式で表される。

表-2 確率密度関数の適合度検定結果

	相対強度	
	χ^2_0	χ^2
北海道オホーツク海沿岸（能取湖）	5.50	9.49
サハリン東岸（Chaivo Bay）	2.06	11.07

$$f(x) = \frac{1}{(x-a)\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(y-\mu_y)^2}{2\sigma_y^2}\right\} \quad (6)$$

ここで $y = \log(x-a)$

母数は平均値 (μ_y)、標準偏差 (σ_y)、係数 (a) である。

母数の推定には積率法を用いた。それぞれの相対強度のヒストグラムを 15 階級に分け、データの度数と理論度数を示したものが図-5 である。表-2 に χ^2 検定（危険率 5%）の結果を示したが、北海道オホーツク海沿岸である能取湖の海水ばかりでなく、サハリン東岸の海水についても対数正規分布（3 母数）はよい一致をしている。

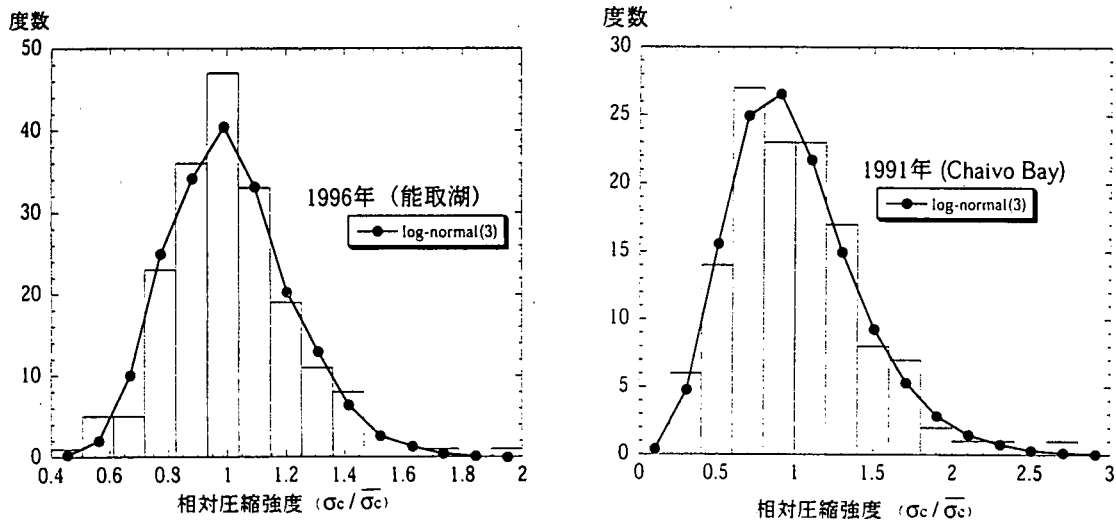


図-5 実測度数と理論度数との関係

5. 主要な結論

- 1) Truskov のサハリン東岸での海水強度の実測データから求めた経験式によると、強度は水温、塩分量、それに密度の関数で示される。しかし、特に水温と密度が強度に強い影響を与える。
- 2) 北極海の海水は基本的には水温と塩分量に依存し、サハリン東岸の海水は水温、密度に強く依存し、塩分量の影響も受けている。それに対して、オホーツク海南部海域である北海道のオホーツク海沿岸においては、強度は水温と密度に依存し、塩分量の影響はほとんどない。これら海域による違いの原因の一つは、日中の太陽からの輻射と気温と考えられ、北極海やベーリング海では海水の全空隙はブラインで占められ、サハリン東岸はブラインと気泡で、北海道沿岸は気泡が卓越しているためと考えられる。
- 3) サロマ湖の海水と流水の一軸圧縮強度は Truskov の経験式で十分近似可能と考えられる。この事実は、サハリン東岸の平坦氷の強度値については、北海道沿岸の海水強度の試験から十分推定が可能であることを示している。
- 4) 北海道沿岸の海水に比較して、サハリンのオホーツク海沿岸の海水強度のばらつきは大きい。これは、積雪量の違いによる断熱効果と平均気温の違いにより、グレインサイズの大きさが異なっているからと思われる。
- 5) 北海道オホーツク海沿岸の海水ばかりでなく、サハリン東岸においても海水強度のばらつきは 3 母数の対数正規分布に適合することを示した。

<参考文献>

- 1) Truskov, P. A., Astafiev, V. H., Surkov, G. A.: "Problems of Choice of Sea Ice Cover Parameters Design Criteria", Proc. of the 7th International Symposium on Okhotsk Sea and Sea Ice, p21-25, 1992
- 2) Saeki, H., Ono, T., Ozaki, A. and Abe, S.: "Estimation of Sea Ice Forces on Pile Structures", IAHR Proc. of International Symposium on Ice Problems, 1978
- 3) Frankenstein, G. E. and Garner, R.: "Equation for Determining the Brine Volume of Sea Ice from -0.5°C to -22.9°C", Journal of Glaciology, Vol. 6, No. 48, pp943-944
- 4) Weeks, W. F. and Assur, A.: "Mechanical Properties of Sea Ice", CRREL Monograph 11c3, 1967
- 5) Timco, G. W. and Frederking, R. M. W.: "Confined Compressive Strength of Sea Ice", Proc. of the International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, Vol. 1, p243-253, 1983
- 6) Sinha, N. K.: "Uniaxial Compressive Strength of First Year and Multi Year Sea Ice", Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 11, p82-91, 1984
- 7) 竹内貴弘、岡本智、国松靖、田淵浩文、佐伯浩:「海氷強度の空間分布と供試体の採取方法」, 寒地技術シンポジウム講演論文集 Vol. 8 p400-405, 1992
- 8) G. A. Surkov and P. A. Truskov: "Analysis of Spatial Heterogeneity of Ultimate Ice Compressive Strength", ISOPE Proc. of 3rd, p596-599, 1993
- 8) 岡本智:「氷の強度特性に関する実験的研究」、平成4年度北海道大学大学院修士論文 第1章
- 9) 竹内貴弘、赤川敏、岩井俊之:「現地海氷盤の強度分布特性について」、海洋開発論文集 vol. 11 p241-245, 1995