

# 研究展望

## 海水の結氷機構と強度特性

### GROWTH MECHANISMS AND MECHANICAL PROPERTIES OF SEA ICE

佐伯 浩\*

By Hiroshi SAEKI

#### 1. ま え が き

海水の影響を受ける海域は、全海洋面積の10%程度といわれている。冬期間結氷するような寒冷地の海岸・海洋ではバルト海などごく一部の海域を除くと、冬期間ほとんどすべての人間の活動が停止するのが常であった。日本近海ではオホーツク海がその例で、1月下旬から2月上旬に北部オホーツク海から冬の季節風と東カラフト海流に乗って移動してくる流水と沿岸域の結氷によりオホーツク海の約70%は海水で覆われ、北海道のオホーツク海沿岸ではすべての海での活動が停止する。そのため海水に関する研究も、海水の物性の面からの研究、あるいは、地球規模の気象に及ぼす海水の効果といった地球科学の面からの研究が主であった。しかし、一部には、海上運輸・海上警備の必要性から砕氷船に関する研究の歴史は比較的長く、砕氷船と海水の相互作用の研究はすでに多くの研究成果を挙げている。これに対して、河川や湖沼の水理構造物と淡水氷の相互作用については、その研究成果そのものは少ないが経験的な積重ねで、航路標識、棧橋等が多数建設されてきている。しかし、最近になって海水に関する工学的な研究が世界各国で非常に活発になってきているが、その背景には次のような目的があると思われる。

1) オイルショック以来のエネルギー危機に対応して、寒冷地の海岸、海洋底にその存在が確認されている石油・ガスの採掘装置あるいは、それら資源の探査装置の海水に対する設計法を確立することおよび海水に対して有効で経済的で安全な構造物の開発のため

2) 寒冷地の開発に伴う航路維持のためと、寒冷地に

ある国々の経済活動の活発化と国際化に伴う物資輸送に対する航路維持のため、新しい型式の砕氷船、砕氷貨物船、砕氷タンカー、耐氷タンカー等の設計法を確立するため

3) 海水盤を氷上滑走路、氷上軌道、氷上貯蔵基地等のように氷盤を交通施設あるいは貯蔵施設等に利用するためと、人工氷床として海底下の埋蔵エネルギー資源の探査、掘削施設として利用するため

4) ある限られた海域、あるいは海岸域の海水の動きを制御し、養殖施設や養殖水産資源を保護する必要があるため

現在は上述したような諸問題の解決に迫られていることから、海水の成長機構、海水の強度特性の解明も重要となってきている。特に、海水と海岸・海洋構造物間の相互作用については、海水の厚さ、海水の圧縮強度、曲げ強度、せん断強度それに弾性率やポアソン比といった弾性諸定数の特性が明らかにされねばならないし、また、海水と種々の構造物間の摩擦係数や凍着強度も重要である。本研究は主として海水の結氷および成長機構と海水の強度特性についての現在までの研究成果のとりまとめと今後の展望について述べることにする。

#### 2. 海水の結氷機構

##### (1) 海水の結氷温度

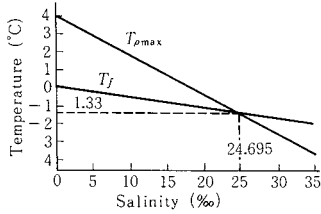
海水は含まれる塩分量によって結氷温度が異なるし、結氷機構が異なっている。海水の結氷温度は、クヌードセン、シュレイキンにより<sup>1)</sup>次式で示される。

$$T_f = 0.008 - 0.0527 S - 0.00004 S^2 - 0.0000004 S^3 \dots\dots\dots (1)$$

ここに、S: 塩分量 (‰),  $T_f$ : 結氷温度 (°C)

これに対して、海水の最大密度を示す水温  $T_{\text{max}}$  は次式

\* 正会員 工博 北海道大学教授 工学部土木工学科  
(〒060 札幌市北区北13条西8丁目)



図一 海水の結氷温度および最大密度と  
海水中の塩分量の関係

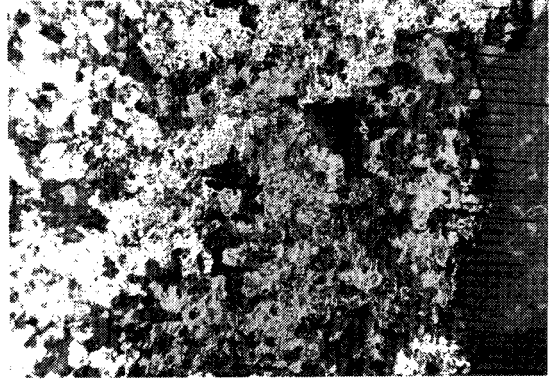
で示される。

$$T_{\rho\max} = 3.95 - 0.2 S - 0.0011 S^2 - 0.00002 S^3 \dots (2)$$

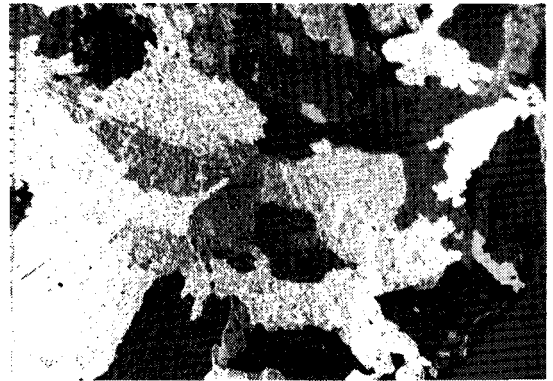
この両式を図示したものが図一である。図より塩分量が24.695‰以下では、最大密度を示す水温  $T_{\rho\max}$  が  $T_{\rho\max} > T_f$  なので、海水温が  $T_{\rho\max}$  より高い範囲までは冷却されるに従い対流により鉛直方向の水温が一定になるが、 $T_{\rho\max}$  より表層が低い温度になってくると、対流は止まり熱伝導により熱が移動する。それに対して、塩分量  $S$  が  $S > 24.695$ ‰ の場合は、 $T_f > T_{\rho\max}$  であるので水温は結氷温度に対するまで鉛直循環し、表層から下層まで一様に結氷温度に達してから表層から結氷が始まる。一方、寒冷地の海洋の塩分量は  $S \geq 32$ ‰ なので、その凍結の仕方は後者に属することになる。

## (2) 海水の結氷過程

海水の結氷過程は、海水が表層から水底まで一様に結氷温度に対してから表層から結氷が始まる。このとき、ごく表層では過冷却の状態にあり、これが核となる微粒氷晶の生成に寄与するといわれている。結氷初期にはまず多くの針状の氷片が形成され、これを板状の薄氷が埋めるといようにして結氷が進み、これを Sheet Ice とよんでいる。この針状の結晶氷片は大気温度  $-20$ °C で  $1 \sim 3$  cm、 $-50$ °C で  $7 \sim 9$  cm 程度にまで成長することがある。これは低温室内での結氷の様子であるが、実際の海面では、波浪や対流、移流の影響で Sheet Ice は形成されにくい。これは生成された針状氷片や板状薄氷片は波浪等により破壊され、分裂・結合を繰り返し、Pancake Ice とよばれる蓮葉状の円くまわりがめくり上がった氷板が形成される。この Pancake Ice で海面が覆われると、急激に波浪が減衰し、この Pancake Ice の間を埋めるように結氷が起こり、海面全体を覆う Ice Field を形成する。実際の海面では降雪があるため結氷機構はより複雑である。たとえば、海水温が氷点下になった状態で降雪があると、水面に落下した雪の結晶は融解することなく海面に浮かぶ。これにより、海面は急に穏やかになり、そのまま結氷が始まることある。このように雪まじりの氷をその結晶構造から雪氷り (Granular Ice) とよんでいて、図二に示すように氷中に雪の粒子が残っている。この Granular Ice の下層



図二 Granular Ice の結晶構造 (水平断面)

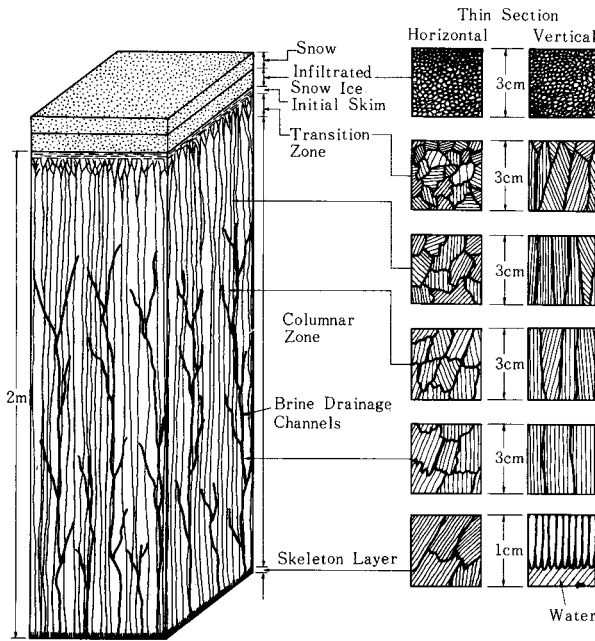


図三 Columnar Ice の結晶構造 (水平断面)

に、図-3に示すようにいわゆる Columnar Ice が成長することになる。また、ある場合には通常の結氷が始まった後に降雪があると、雪の重みで氷盤は沈み込むが、海水の透水係数が比較的大きいため、海水が表層にしみ上がり、雪とともに結氷することになり、この場合も氷盤の表層部は Granular Ice が形成される。以上述べたように実際の海水は、成長時に降雪等の影響を受けるため、その氷厚増加の過程は非常に複雑である。一般的な海水の状態を図-4<sup>2)</sup>に示す。また海水の結氷には、その成長に伴い下面で大量のブラインを氷中に取り込み、氷厚の増加とともに塩分を失っていく。この氷厚の正確な予測を行うためには、氷厚の成長に伴う海水中の塩分量の変化を十分に考慮せねばならない。

## (3) 氷厚増加の理論

氷の氷厚増加に関する研究は熱伝導の問題に帰着する。氷の成長に関する理論では、古くは Stefan<sup>3)</sup> や Neumann<sup>4)</sup> の研究が報告されているが、これらの研究は淡水氷の成長である。両研究において、Stefan の場合は、氷の表面は大気温度に常に等しく氷盤の底では結氷温度の  $0$ °C で、水中の水温は常に  $0$ °C との条件での解であり、Neumann の場合は、Stefan の境界条件を



図—4 海水の構造 (Schwarz, 1977)

現実に合うように氷の表面は大気温度に等しく、水底では水の最大密度を示す 4 °C、氷の下面では結氷温度という条件で、氷盤中と水中の熱伝導式を界面で接続する手法で解を求めている。しかし係数は異なるものの、両式とも結氷開始時から  $t$  時間後の氷厚は次式で示される。

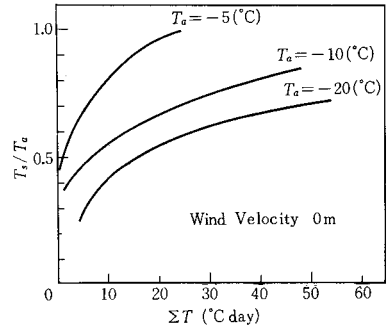
$$h = K' \cdot (t)^{1/2} \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 $h$ : 氷厚、 $K'$ : 気温、氷の融解潜熱、密度、熱伝導率、温度伝導率で決まる定数

この式 (3) を変形すると次式で示される。

$$h = K \cdot (\Sigma T)^{1/2} \dots \dots \dots (4)$$

$\Sigma T$  は積算寒度である。  $\sqrt{K}$  を一般的に氷厚係数とよんでいる。つまり両理論とも基本的には、氷厚増加は積算寒度の 1/2 乗に比例することを示している。また、海水の氷厚の増加については、福富らの研究<sup>5)</sup>、Tabata<sup>6)</sup>らの研究から、海水に対しても式 (4) が満足されていることを示した。しかし、実際の現象の観察から結氷初期の海水の成長については、成長に伴う水中の塩分量の変化とそれが氷厚成長に及ぼす効果が重要なことが Zubov や Malmgren や小野<sup>9)</sup>によって報告され、海水成長に対する理論モデルが種々の研究者により提案された<sup>10)~12)</sup>。長谷美<sup>13)</sup>は、海水の結氷時の塩分捕捉量については、Weeks らの結果を用い<sup>14)</sup>、また成長に伴って、氷の中のブラインの温度が徐々に低下するときのブライン内の氷の析出による体積増加のためのブラインの放出量は Untersteiner の結果を用いて、氷厚増加のシミュ



図—5 積算寒度と氷盤の表面温度の関係 (Saeki et al. 1978)

レーションを行った。計算結果は実測結果と必ずしも一致を示したわけではないが、結氷初期においては式 (4) に示されているような積算寒度の 1/2 乗にはならないことが示されるとともに、その理由として、結氷初期には海水からの熱の補給もあり、海水の表面温度はなかなか気温に一致していないことを明らかにしている。佐伯も同様な実験を行っていて、その結果を図—5 に示

す。  $T_s$  は氷盤の表面温度、  $T_a$  は大気温度、横軸は積算寒度で、気温が低いほど氷盤の表面温度は気温に一致するのに時間がかかる。このため、結氷初期においては氷厚  $h$  は積算寒度の 1/2 乗に比例しないことになる。以上、海水の結氷機構と成長について述べてきたが、海水の成長機構そのものも重要ではあるが、それ以外に大気と海面、海水間の熱交換過程も今後の研究が望まれている。工学的にみるならば、海水の結氷にかかわる諸問題は、模型実験のための氷の作製、実際の海水の氷厚の推定に関連している。海水の影響を受ける海域における海岸・海洋構造物の設計、砕氷船の航路選定にあたっては、的確な氷厚を推定することが重要である。気象条件から氷厚を推定する方法、実験値、観測値から得られた実験式から推定する方法が今までとられてきているが、これは、氷海域での氷厚の測定が非常に困難だからであった。しかし、現在は、レーザープロファイラー<sup>15),16)</sup> や電磁波を使った氷厚測定法や赤外線と気温から氷厚を推定する方法が開発され始めていて、これら新しい測定法の一層の進歩が望まれるところである。

### 3. 海水の強度特性

海水が構造物に作用するとき、最大の氷力は、氷盤そのものが破壊するときが発生する。よって各種の構造物に作用する氷力を求めるためには、海水の強度および弾性定数が与えられねばならないので、海水強度を明らかにすることは設計にとっても非常に重要である。海水の

強度は、海洋の性質がきわめて複雑で、等方等質とはいえないこともあって、強度に及ぼす影響因子も非常に多い。ここでは、構造物の設計にとって重要な、海水の一軸圧縮強度と曲げ強度それに弾性率とポアソン比について最近の研究現況と今後の研究展望について述べることにする。

### (1) 海水の強度試験方法

ほとんどすべての材料がそうであるように、強度試験をする場合、材料供試体の形状・寸法と試験方法によって異なった強度を示す。淡水氷も含めて、氷の強度試験方法についてはいまだ完全な標準強度試験方法は確立していないのが実情である。この理由の1つは、過去に行われた氷の試験が主として物性の面からが主であって、河川や湖沼それに海岸の構造物の水力に対する設計を対象としたものでなかったためである。しかし、最近の氷工学あるいは氷に対する技術の発展に伴い、標準強度試験法の確立の要求が強まり、国際水理学会 (IAHR) の氷問題に関する委員会の強度試験方法に関する作業部会で試験方法に対する大枠が提案されている<sup>17), 18)</sup>。それによると、一軸圧縮強度試験については、供試体形状は円柱で直径  $\phi$  は 75 mm 以上、径  $\phi$  と高さ  $l$  の比  $l/\phi$  は  $l/\phi \geq 2.5$  が望ましいとしていて、強度試験時の応力速度  $\dot{\sigma}_c$  やひずみ速度  $\dot{\epsilon}$  については規定がない。また供試体の載荷板については従来から用いられている鋼板でもよいが、新しい方法として硬質ウレタンを用いることを推奨しているが、これは載荷時の端面の半径方向の拘束を減らすことを目的としている。これに対して佐伯ら<sup>19), 20)</sup>は、硬質ウレタンのひずみにより海水供試体のひずみの測定が困難であることと硬質ウレタンが温度の影響を強く受けるとの理由で反論している。また曲げ強度  $\sigma_r$  の試験方法については、Frederking & Häusler<sup>21)</sup> や Lavrov<sup>22)</sup> の研究成果に基づいて、桁のスパン長  $l$  は桁高  $d$  の 7~10 倍にすべきこと、桁の幅  $b$  は桁高  $d$  の 1~2 倍にすべきことと、平山ら<sup>23)</sup> の結果をもとに、桁幅と氷のグレインの平均径  $D_g$  の関係にも注意すべきことが述べられてはいるが、供試体の絶対的な寸法には言及していない。このように強度試験方法が不確定であることが強度の測定結果の相互の比較ができない理由となっている。今後は、より詳細な試験方法の規準化、標準化に向けての研究が重要となってきている。

### (2) 海水強度への影響因子

海水は純水とブラインポケットそれに気泡より成り立っている。海水の構造モデルについては、Assur & Weeks<sup>24)</sup> が提案したモデルがよく知られている。淡水氷の場合には、同一の試験条件であれば、強度は水温に強く依存するが、それは水温が低いほど、結晶そのものも、結晶と結晶の界面も強度が強くなる。これに対して

海水の場合には、気泡や結氷時に取り込まれたブラインの影響も強く受ける。気泡を全く含まないか、ブライン量に比べて気泡量が少ない場合には、強度はブライン量によって決まる。これは海水が結氷する過程で、海水はその成長する結晶と結晶の間に海水を閉じ込めながら成長する。このときの閉じ込められた海水をブラインといっているが、このブラインは結氷温度に対応する塩分量をもっている。氷厚が増加するにつれて、あるいは水温の低下によってブラインの温度は低下していくことになる。そうすると、その低下した水温を結氷温度とする塩分量をもつ海水になるためには、ブラインの一部が凍結して塩分量を高めることになる。そのためブラインの体積が減ることになる。よって、ブラインの体積が強度に影響を与えることの中味は水温の効果もその中に含まれていることを意味している。ブラインや気泡が応力に無関係と考えるならば、海水は多孔質の材料と考えることができる。多孔質の材料の場合、材料の強度は空隙率(気孔率)に強く依存することが知られている<sup>25)</sup>。低緯度のオホーツク海等では、直達日射量も多く、結氷後も、日中は氷盤の表層部が融解することがあるが、そのため海水中には気泡のほかに水みちができたりすることが多い。そのような場合にはブライン体積と気泡の体積の和が強度に影響を与えるし、そのような場合には水温も強度に影響を与える。また、気泡量がブライン量よりもはるかに多くなると海水強度は気泡量と水温あるいは海水密度  $\rho$  と水温に依存することになる。以上述べてきたように、海水はコンクリートやモルタル等と同様に複合材料であり、強度への影響因子は他の材料に比べて多く、複雑である。また海水は表層から下層へ向かって成長するため、異方性の強い材料であるため、海水の成長方向に対する荷重の方向によっても強度に差が出ることになる。特に空気量が少なく、水温が低い場合には異方性が強くなることが明らかになっている<sup>19), 26), 27)</sup>。

### (3) 海水の一軸圧縮強度

氷の一軸圧縮強度がひずみ速度  $\dot{\epsilon}$  の影響を受けることが Korzhavin<sup>28)</sup> や Carter & Michel<sup>29)</sup> それに Frederking<sup>30)</sup> らの研究成果からよく知られている。また、Schwarz<sup>27)</sup> はバルト海の海水を用いて、海水の成長方向に平行および垂直に荷重をかけて一軸圧縮強度  $\sigma_c$  とひずみ速度  $\dot{\epsilon}$  の関係を各水温別にまとめているが、これには 10 cm 角の立方体の供試体を用いている。図-6 に佐伯らの結果<sup>20)</sup>の一部を示す。これは径  $\phi$  が 10 cm、高さ  $l$  が 20 cm の円筒供試体で載荷板はなめらかな鋼板を用いたものである。この結果からも明らかなように、一軸圧縮強度  $\sigma_c$  はひずみ速度の影響を受け、 $\dot{\epsilon}$  が  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$  のオーダーで最大の強度を示しているが、この結果は Schwarz<sup>27)</sup> らの結果とも非常によい一致を示している

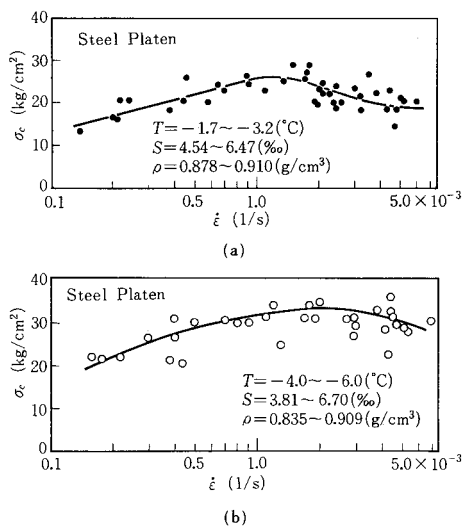


図-6 海水の一軸圧縮強度とひずみ速度の関係 (Saeki et al. 1978)

し、淡水氷で行った Gold & Krausz<sup>31)</sup>、それに Mellor & Smith<sup>32)</sup> の結果ともよい一致を示している。これに対して、Michel & Toussaint<sup>33)</sup> は  $-10^{\circ}\text{C}$  の淡水氷で行った Indentation test の結果をもとに、他の研究者のデータも用いて、ひずみ速度  $\dot{\epsilon}$  と Indentation Force  $\sigma$  の関係を広範囲にわたって調べているが、その結果が図-7

である。図からも Michel らは  $\dot{\epsilon} < 4 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  の範囲を Ductile Region,  $\dot{\epsilon} > 10^{-2} \text{ s}^{-1}$  の範囲を Brittle Region とし、この中間を Transition Region と名づけている。これは直接一軸圧縮強度を示しているわけではないが、海水の一軸圧縮強度と Indentation Test の関係が Linear な関係にあることから、一軸圧縮強度のひずみ

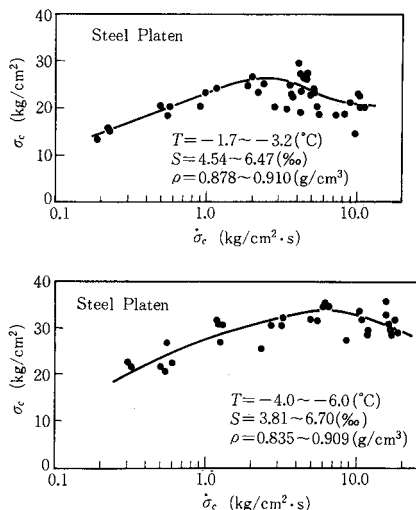


図-8 海水の一軸圧縮強度と応力速度の関係 (Saeki et al. 1978)

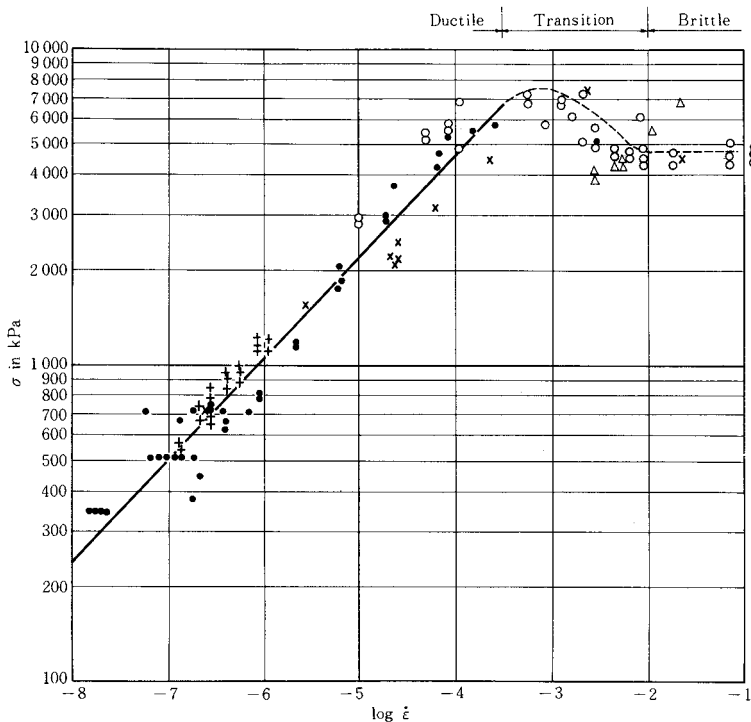


図-7 海水の Indentation Force とひずみ速度の関係 (Michel & Toussaint, 1977)

強度との関係もこれとほぼ同様の関係があると思われる。次に一軸圧縮強度  $\sigma_c$  と応力速度  $\dot{\sigma}_c$  の関係を調べたものが図-8である。図からも明らかなように、一軸圧縮強度はひずみ速度と同様に応力速度にも依存する。軸圧縮強度  $\sigma_c$  は、 $2 \text{ kg/cm}^2/\text{s} < \dot{\sigma}_c < 20 \text{ kg/cm}^2/\text{s}$  で最大の強度を示している。

Peyton<sup>26)</sup> はクック湾の海水を用いて  $\sigma_c$  と  $\dot{\sigma}_c$  の関係を調べているが、その結果では  $\dot{\sigma}_c = 2.0 \text{ kg/cm}^2/\text{s}$  で最大の氷力を示している。その応力速度の範囲は広くはないが傾向としては佐伯らの結果と一致している。以上の結果より、海水の強度はひずみ速度、応力速度に依存して他の材料と違ってそれらのある値でピーク値を有し、かつ氷温が低いほどそのピークは顕著になることが明らかとなる。このような事実を十分理解しないと構造物に作用する氷力を見積るときに大きな誤りをおかすことになる。前にも述べたように、強度には種々の影響因子があり、次式で示される

$$\sigma = f(\nu_b) = f(S, T) \quad \nu_a \ll \nu_b \quad \dots \dots \dots (5)$$

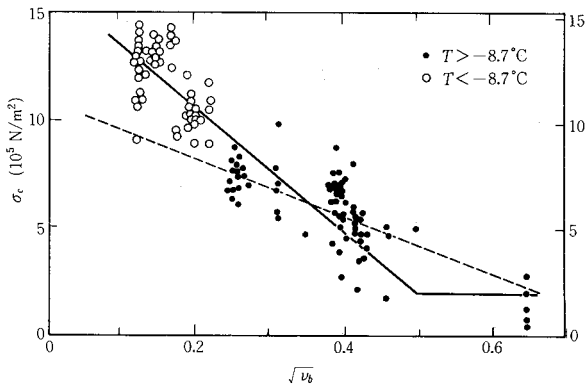


図-9 海水の一軸圧縮強度とブライン量の関係 (Peyton, 1966)

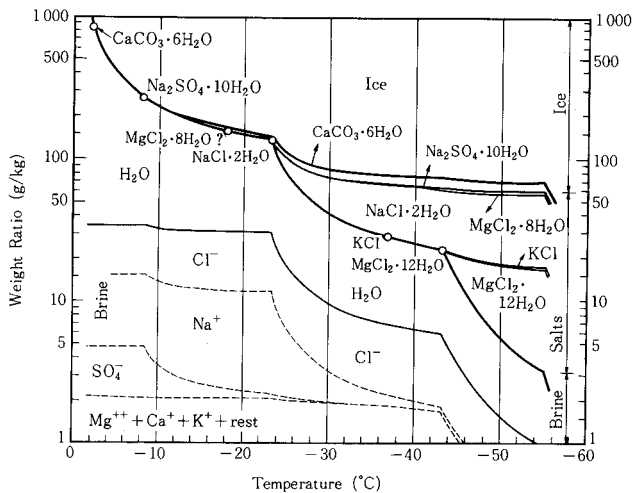


図-10 ブライン中の相変化 (Assur, 1958)

$$\sigma = f(\nu_b + \nu_a) = f(S, \rho, T) \quad \dots \dots \dots (6)$$

$$\sigma = f(\nu_a, T) = f(\rho, T) \quad \nu_b \ll \nu_a \quad \dots \dots \dots (7)$$

気泡率  $\nu_a$  がブライン体積率  $\nu_b$  に比べてはるかに少ない場合には、前述したように一軸圧縮強度  $\sigma_c$  はブライン体積率  $\nu_b$  のみにより決定され式 (5) で示される。その諸量を図-9 に示す。図中の実線は Weeks & Assur<sup>24)</sup> の結果であり、破線は Peyton<sup>26)</sup> の結果である。Weeks らの結果では  $\nu_b < 0.25$  の範囲では、ブライン量の増加とともに強度は小さくなる。このブライン量の変化は、水中のブライン量を表わすだけでなく、氷温の変化によってブラインの量が変化するときになる。図-10 に氷温に対するブライン中の相変化を示す<sup>24)</sup>。海水中のブラインは、そのときの氷温を結氷温度とする塩分量になる。図-10 より明らかなように、温度の低下とともにブライン中の氷の量がふえて塩分濃度が高まる。これは、温度の低下とともにブラインポケットの体積が減ることにより、強度が強くなることになる。また  $-3.0^\circ\text{C}$  から炭酸カルシウムが析出を始めるがその量は微量である。  $-23^\circ\text{C}$  より低くなると塩類の析出量が急に多くなり、  $-43^\circ\text{C}$  より低くなるとさらに析出量がふえてくる。このように、海水中のブラインは氷温によってその塩分量が変化していることになり、ブライン体積の変化には氷温効果も含まれていることになる。よって別の表現をすれば式 (5) に示されているように強度は海水の塩分量  $S$  と氷温  $T$  で決定される。これに対して、オホーツク海南部海域の海水では、気泡量もブライン量と同程度に多く、そのため強度とブライン量の相関は非常に悪くなり、ブライン量と空気量の和と強度の相関が強くなってくる。この海水の空気量の測定は困難であるため、これを簡単に測定できるもので表わすと式 (6) に示されているように塩分量  $S$  と氷温  $T$  それに海水の密度  $\rho$  が与えられれば求まることになる。ブライン量が気泡量に比べて少なくなると、海水の強度  $\sigma$  は式 (7) に示されてい

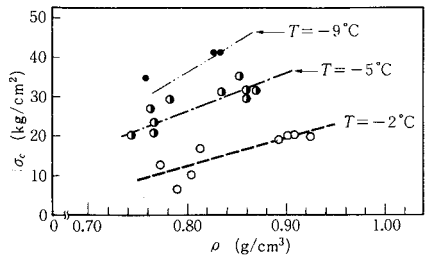


図-11 海水の一軸圧縮強度と氷温と密度の関係 (Saeki et al. 1978)

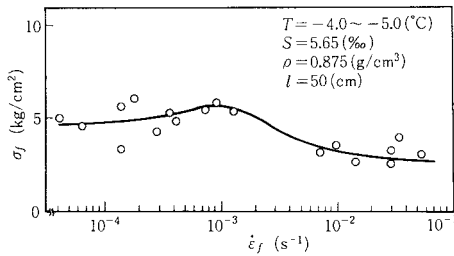


図-12 海水の曲げ強度とひずみ速度の関係

るように  $\nu_a$  あるいは  $\rho$  と  $T$  で決まることになる。その結果の一例を図-11に示す。このように、空気量の多い海水では、 $\rho$  と  $T$  で決まることになる。海水の破壊は、結晶の界面あるいはグレインの界面で起こるためと、ブライン・気泡が必ずしも均一ではないため、同一の試験法で同一の条件であってもデータは非常に分散が大きい。現在、式(5)、(6)、(7)については明確な適用区分がなされていないのが実情で、今後の研究成果に期待しなければならない。また、 $\nu_a$ 、 $\nu_b$  は測定が困難であることから測定のための簡単な  $S$ 、 $\rho$ 、 $T$  のみで海水強度が表示されているのが望ましい。

(4) 海水の曲げ強度

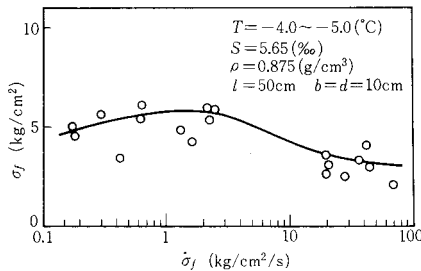


図-13 海水の曲げ強度と応力速度の関係

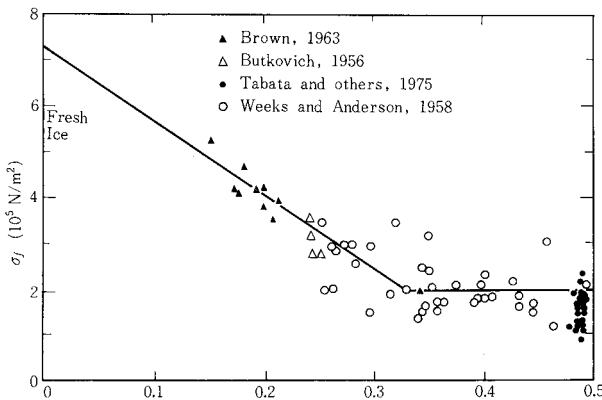
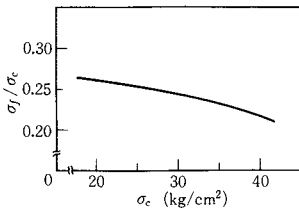


図-14 海水の曲げ強度とブライン量の関係 (Schwarz & Weeks, 1977)

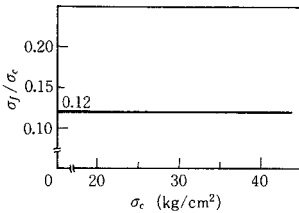
海水の曲げ強度も、一軸圧縮強度と同様にひずみ速度、応力速度に強く影響を受ける。図-12に曲げ強度  $\sigma_j$  とひずみ速度  $\dot{\epsilon}_j$  の関係を示す。一軸圧縮強度の場合と同様に、 $\dot{\epsilon}_j \approx 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  近傍で最大の強度を示す。これは水温に関係なく同様の結果を示す。また、 $\sigma_j$  と応力速度  $\dot{\sigma}_j$  の関係を示したものが図-13であるが、これによると  $1 < \dot{\sigma}_j < 10 \text{ kg/cm}^2/\text{s}$  で最大の強度を示す。これらのことから海水の曲げ強度試験を行う場合には応力速度、ひずみ速度を十分考慮に入れて試験を行う必要があるし、また構造物と海水間の相互作用に関する問題の解決にあたっては十分考慮に入れられなければならない。同一の試験法であると、一軸圧縮強度の場合と同様に空気量が少ない場合には、強度はブライン量に依存することになる。その結果を図-14<sup>24)</sup>に示す。 $\sqrt{\nu_b} \leq 0.33$  の範囲では、 $\sigma_j$  は  $\sqrt{\nu_b}$  の増加とともに直線的に低下し、 $\sqrt{\nu_b} \geq 0.33$  では  $\sqrt{\nu_b}$  に関係なく一定の強度を示す<sup>24), 34)</sup>。この結果は Dykins らの結果<sup>35)</sup>も同様である。これに対して、空気量の多い海水では、強度  $\sigma_j$  は水温と密度に依存することになる。曲げ強度の試験については、単純桁による中心点載荷法、三等分点載荷法それに、現地氷盤による片持ばり試験、それと同様に現地氷盤による耐荷力試験から求めることができる。試験方法によって求まる差より、供試体の寸法効果の方が強度に及ぼす影響が大きいことが佐伯らの結果で示されている<sup>36)</sup>。

(5) 各強度間関係

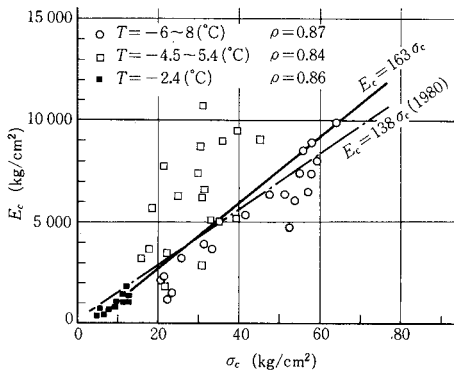
今まで、海水の一軸圧縮強度および曲げ強度の特性の概略について述べてきたが、海水強度の試験にあたって各種強度を求めることは時間もコストもかなり大変である。海水は現地氷盤から採取してからの経過時間や運搬時の振動によって、塩分量や塩分量の分布形が変化するため、可能な限り現地で行うことが望ましい。しかし寒冷地の辺地での試験には多くの困難が伴う。コンクリートの場合には過去に行われた多くの研究成果に基づいて、各強度間関係が明らかになっているので、強度の判定にあたっては、一軸圧縮強度試験を行うことによって他の強度も推定が可能となっている<sup>37)</sup>。海水においても各強度間関係が明らかになっていると非常に便利であり、工学上有意義である。コンクリートの場合、砂利、砂、セメントそれに水などの配合を任意に選択できるが、海水の場合は気象や海象条件によって海水の組成も微妙に異なることになるのでその点がやっかいである。同一の氷塊を用い、決められた試験方法で強度相互の関係を調べた研究はきわめて少ない。図-15に佐伯らの一軸圧縮強度  $\sigma_c$  と曲げ強度  $\sigma_j$  の関係を示す<sup>20)</sup>。一軸圧縮強度試験は径 10 cm、高さ 20 cm の円筒供試体を用い、ひずみ速



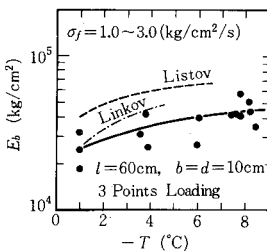
図一15 一軸圧縮強度と曲げ強度の関係 (Saeki et al. 1978)



図一16 海水の一軸圧縮強度と引張強度の関係 (Saeki et al. 1978)



図一17 海水の圧縮弾性率と一軸圧縮強度の関係



図一18 海水の曲げ弾性率と水温の関係 (Saeki et al. 1982)

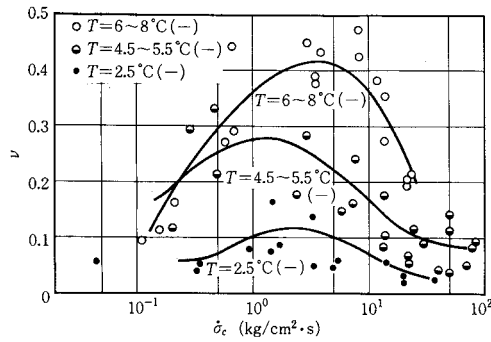
度 $\epsilon$ は最大の強度を示す $\dot{\epsilon}=10^{-3}\sim 3\times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$ で試験を行った。また曲げ強度も最大の強度を示すひずみ速度 $\dot{\epsilon}_f\approx 10^{-3}\sim 3\times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$ で、供試体寸法はスパン長40cm、高さ10cm、幅10cmで試験を行っている。一軸圧縮強度 $\sigma_c$ の増加とともに、両強度の比 $\sigma_f/\sigma_c$ は小さくなっている。コンクリートに対する Graf の結果によれば<sup>37)</sup>、

$\sigma_f/\sigma_c$ は0.24~0.21の範囲で、海水の場合と非常に似かよった変化を示している。また、佐伯らは引張強度についても特殊な形状の供試体と固定用具を用いて、最大の強度を示す応力速度で求めた引張強度 $\sigma_t$ と $\sigma_c$ の関係を調べたものが図一16である<sup>20)</sup>。図からも明らかなように、 $\sigma_t/\sigma_c\approx 0.12$ とほぼ一定値を示すが、Gonnerman や狩野のコンクリートでの結果<sup>37)</sup>では $0.07\leq\sigma_t/\sigma_c\leq 0.12$ で両材料の $\sigma_t/\sigma_c$ は比較的近い値を示している。また海水のせん断強度 $\tau_s$ の場合は $\tau_s/\sigma_c\approx 0.21$ であるのに対し<sup>20)</sup>、コンクリートの場合は $\tau_s/\sigma_c\approx 0.23$ となっている<sup>37)</sup>。以上の結果をみる限り、各強度間の関係は海水とコンクリートでは非常に似かよった傾向を示している。しかし、その後の佐伯らの研究によると氷質によって各強度間の関係は少しずつ異なることが明らかにされ、今後この面からの研究が望まれる。

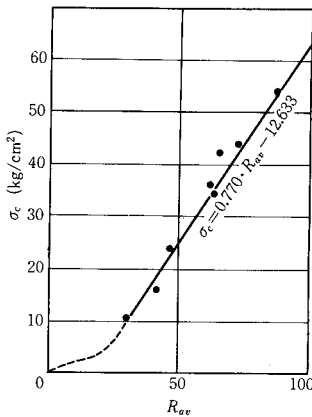
(6) 海水の弾性定数

海水の場合も、他の材料と同様に圧縮弾性率 $E_c$ と曲げ弾性率 $E_b$ は異なった値を示す。両弾性率とも、強度の場合と同様にひずみ速度や応力速度に依存していて、ひずみ速度では $10^{-3}\text{ s}^{-1}$ 近傍で、応力速度では $1\sim 20\text{ kg/cm}^2/\text{s}$ で最大の値を示す。佐伯らの結果によると圧縮弾性率 $E_c$ については図一17に示すように、データの分散は大きい $E_c$ と一軸圧縮強度 $\sigma_c$ の間には、 $E_c=138\sim 163\sigma_c$ の関係がある。前にも述べたように一軸圧縮強度 $\sigma_c$ は塩分量、密度それに氷温に依存していることから $E_c$ も当然それらに依存していることになる。次に、オホーツク海の海水の曲げ弾性率 $E_b$ と氷温の関係を図一18に示す<sup>39)</sup>。Listov のデータはラプチュエフ海の海水で地震法によって求めたものであり、Lin'kov の場合は、シベリヤのシュミット岬の近くの海水で地震法で求めたもので、佐伯らの結果より大きい曲げ弾性率を示している。一般に海水の強度や弾性定数(弾性率やポアソン比)については、動的方法で求めた値の方が静的方法で求めたものより大きい値を示すし、Lin'kov や Listov は高緯度の海水を用いていて、空気量の少ない海水であることが想像される。海水の弾性率については、動的手法によるものと、ひずみ量あるいはたわみ量から求める静的手法による2種類の方法で求められるが、静的手法により求められる弾性率の方が実用的であると思われるが、今後は両方法で得られる弾性率の関係を明確にする必要があると思われる。次に海水のポアソン比 $\nu$ については Oliver, Crary & Cotell<sup>40)</sup>の北極海の Pack Ice での地震法による測定結果によると $\nu=0.32\sim 0.37$ となり、Peshansky によると $\nu=0.29$ である<sup>41)</sup>。オホーツク海の海水については石田が振動法に $\nu=0.38$ の値を得ている<sup>42), 43)</sup>。これに対して佐伯らは Poisson Gage を開発し、円筒供試体の一軸圧縮試験に

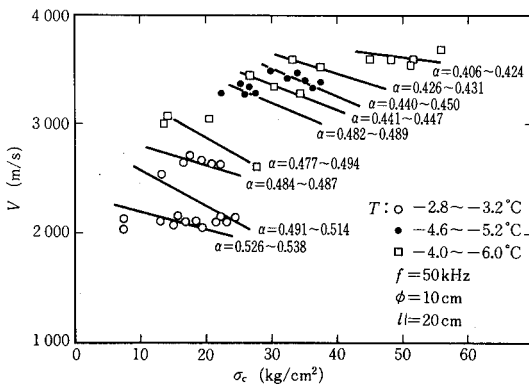




図—19 海水のポアソン比と氷温と応力速度の関係 (Saeki et al. 1981)



図—20 シュミットハンマー (PT型) の反発硬度と一軸圧縮強度の関係 (Tsuetae et al. 1983)



図—21 海水の一軸圧縮強度と超音波の音速と減衰定数の関係 (Saeki et al. 1984)

よりポアソン比  $\nu$  を求めている<sup>36), 38)</sup>。その結果が図—19 であるが、ポアソン比は氷温と応力速度  $\dot{\sigma}_c$  に依存し、 $\dot{\sigma}_c = 1 \sim 10 \text{ kg/cm}^2/\text{s}$  で最大のポアソン比を示すし、氷温が低いほど、応力速度  $\dot{\sigma}_c$  の影響を強く受ける。以上の結果から、強度、弾性率それにポアソン比はひずみ速

度および応力速度の影響を受け、ひずみ速度が  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$  のオーダーで、応力速度が  $1 \sim 20 \text{ kg/cm}^2/\text{s}$  の範囲でそれぞれ最大値を示すことが明らかになっている。これらの値を現実の問題に用いる場合には十分注意しておくことが必要である。

(7) 海水強度の簡易測定法

海水の強度をより簡単な方法で知ることができれば、実際の氷盤の強度に関するデータも広範囲に多量に集めることが可能となり、構造物の設計に大いに役立つ。前にも述べたように、単純で、軽量で、現地で測定できるような強度試験法が開発されることが期待されている。Gerard は、Windsor 打込針装置を用いた強度の推定法を提案している<sup>44)</sup>。Tsuetae らは PT 型のシュミットハンマーの反発硬度  $R_{av}$  から海水強度を求める手法を開発した<sup>45)</sup>。その結果を図—20 に示す。反発硬度と一軸圧縮強度 (径 10 cm, 高さ 20 cm の円筒供試体でひずみ速度  $10^{-3} \sim 3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  で求めた強度) の関係は次式で示される。

$$\sigma_c = 0.770 \cdot R_{av} - 12.633 \quad R_{av} \geq 30 \dots \dots \dots (8)$$

この式は 9 種類の塩分量、氷温それに密度の異なる海水から求めたものであるが、このシュミットハンマーの打撃による方法は、氷盤の表面の強度が強く反発硬度に影響を与えることが予測される。佐伯らは氷盤の平均的な強度を求める手法として、超音波の海水中の音速と、減衰定数  $\alpha$  から一軸圧縮強度を判定する方法を提案した<sup>46)</sup>。棒状の供試体中の音速  $V$  は海水の弾性率と密度を  $E$  と  $\rho$  で表わすと次式で示される。

$$V = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \dots \dots \dots (9)$$

また、減衰定数  $\alpha$  は次式で示される。

$$P_t = P_0 \cdot \exp(-\alpha \cdot l) \dots \dots \dots (10)$$

$P_0$  は発振子の音圧、 $P_t$  は距離  $l$  離れた点の受振子の音圧である。 $\sigma_c$  と  $V$  と  $\alpha$  の関係を図—21 に示す。このときの一軸圧縮強度  $\sigma_c$  はシュミットハンマーの場合と同じ手法で求めたものである。図からも明らかなように音速  $V$  の増加とともに強度  $\sigma_c$  は大きくなるが、減衰定数  $\alpha$  が与えられて、強度が確定することになる。この手法は開発途中であるため、この試験では氷の供試体を発振子と受振子ではさんでいるが、現実の氷盤から直接、強度を推定するためには氷盤の下面での音波の反射率を明確にする必要がある。以上述べた海水強度の簡易推定法はすべて開発途中であり、より精度のよい簡単な強度判定法の開発が望まれている。

4. 結 論

以上、海水の結氷機構と強度特性についての最近の研究動向について述べてきた。この海水の問題は、最終的

には氷海域における各種構造物の設計、施工あるいは、海岸環境の保全にとって重要な課題である。しかし海水に対する工学の面からの研究の歴史は浅く、そのため今後に残された課題は多い。海水の結氷機構については、海水の物性および氷厚の予測が最終的な目的であるが、そのためには、①実際の海水の氷厚分布および組成の観測結果が非常に少ない。これは寒冷であるという気象的な条件と、辺地であるという不便さのためである。これを解決するためには、最終的には、リモートセンシング技術の応用を考えるべきである。②実際の海水は平坦な水平氷だけではなく、氷脈 (Ice Ridge) や重なり合った海水盤 (Rafted Ice) があり、構造物の設計等にとっては、このような海水の方がより重要ともいえる。このような海水の成氷機構の解明も重要である。③海水は常に変形、移動している。海水の結氷機構と同様に海水盤の変形、移動機構の解明も必要である。④最近、海水と構造物や船舶間の相互作用に関する模型実験が行われてきているが、模型実験で最も困難な課題は、任意の強度と弾性定数の海水を造る技術である。海水の結氷機構の解明を前進させて、模型氷の製造技術の開発も重要である。⑤寒冷地における海面および氷盤面と大気間の熱交換過程の解明は結氷開始日、解氷日の予測と氷厚予測に重要であるが、今後は降雪の効果も考慮すべきである。

また、海水の強度特性について今後解明せねばならない課題を列挙すると、①海水の組成 (塩分量、密度、氷温) と結晶構造と海水の強度の関係をより明確にすること。②海水は粘弾性体であるが、海水の粘弾性体としての取り扱い方法を確立すること。③海水の強度試験方法の確立を急ぐとともに、各海域別の強度特性を明らかにすること。④各強度間の関係を明確にすること。⑤平坦な Level Ice だけでなく、Ice Ridge 等の強度特性も明らかにすべきであること。⑥今までは一部の研究者でしか行われていなかった、二軸あるいは三軸応力条件下の海水の強度特性を明らかにすること。⑦広い海域の海水の強度を測定できるような非接触型の強度測定技術の開発。

以上、海水の結氷機構、それに強度特性に関しては、今後解決すべき問題は多い。わが国の氷工学の技術と知識が寒冷地の海岸、海洋の問題の解決に積極的に活用される時代が来ることを願ってやまない。

#### 参 考 文 献

- 1) V.V. シュレイキン：海洋の分子物理学，ラティス，pp. 92～99.
- 2) Schwarz, J. and Weeks, W.F. : Engineering Properties of Sea Ice, Jour. of Glaciology, Vol. 19, No. 81, pp. 499～530, 1977.
- 3) Stefan, J. : Ueber die Theorie der Eisbildung, insbesondere

- 4) 川下研介：熱伝導論，河出書房，pp. 416～421, 1941.
- 5) 福富孝治・楠 宏・田畑忠司：海水の研究 (第 6 報) 海水の氷厚増加に就いて，低温科学，3，169, 1950.
- 6) Tabata, T. : On the Formation and Growth of Sea Ice especially on the Okhotsk Sea. Arctic Sea Ice, pp. 169～180, 1958.
- 7) Zubov, N.N. : Arctic Ice, p. 491, 1943.
- 8) Malmgren, F. : On the Properties of Sea Ice, The Norwegian North Polar Expedition with "Maud", Sci. Results, 1 (5), p. 67, 1927.
- 9) 小野延雄：海水の熱的性質の研究Ⅳ. 海水の熱的諸定数，低温科学，物理篇，26，pp. 329～349, 1968.
- 10) Kolesnikov, A. G. : On the Growth of Sea Ice, Nat. Acad. Sci., Nat. Res. Council, U.S.A., Pub. 598, pp. 157～161, 1958.
- 11) Maykut, G. A. and Untersteiner, N. : Numerical Prediction of the Thermodynamic Response of Arctic Sea Ice to Environmental Changes, The Rand Corporation, Memorandum RM-6039-PR, p. 166, 1969.
- 12) Maykut, G. A. and Untersteiner, N. : Some Results from a Time-dependent Thermodynamic Model of Sea Ice, Jour. of Geophysical Res., Vol. 76, pp. 1550～1575, 1971.
- 13) 長谷美達雄：薄い一冬氷の成長について，低温科学，物理篇，第 32 号，pp. 207～218, 1974.
- 14) Weeks, W. F. and Lofgren, G. : The Effective Solute Distribution Coefficient during the Freezing of NaCl Solutions, Physics of Snow and Ice, Institute of Low Temperature Science, Hokkaido Univ., Vol. 1, No. 1, pp. 579～597, 1967.
- 15) 青田昌秋・田畑忠司：北海道オホーツク海沿岸の氷高分布，低温科学，物理篇，第 39 輯，pp. 141～151, 1980.
- 16) Hibler, W. D. : Removal of Aircraft Altitude Variation from Laser Profiles of Arctic Ice Pack, Jour. of Geophysical Res., Vol. 77, pp. 7190～7195, 1972.
- 17) International Association of Hydraulic Research, Committee on Ice Problems : Report of Task-Committee on Standardizing Testing Methods for Ice, Proc. The Third International Symposium on Ice Problems, pp. 607～611, 1975.
- 18) IAHR-Working Group on Standardizing, Ed. by J. Schwarz : IAHR-Recommendations on Testing Methods of Ice Properties, Division of Water Resources Engineering, Univ. of Lulea, Bulletin Series, A, No. 24, 1978.
- 19) Saeki, H., Saito, S., Hamanaka, K. and Ozaki, A. : Experimental Study on the Compressive Strength of Sea Ice and the Ice Forces on a Circular Pile, Coastal Engineering in Japan, Vol. 19, pp. 73～87, 1976.
- 20) Saeki, H., Nomura, T. and Ozaki, A. : Experimental Study on the Testing Methods of Strength and Mechanical Properties for Sea Ice, Proc. IAHR Symposium on Ice Problems, Part 1, pp. 135～149, 1978.

- 21) Frederking, R. and Häusler, F.U. : The Flexural Behavior of Ice from In-situ Cantilever Beam Test, IAHR Symposium on Ice Problems, Lulea, 1978.
- 22) Lavrov, V. V. : The Nature of the Scale Effect in Ice and the Strength of an Ice Cover, Doklady Akademiia Nauk SSSR, Vol. 122, pp. 570~573, 1958.
- 23) 平山健一・赤松久生・近藤 肇 : 淡水氷の曲げ強度における供試体の大きさの効果について, 土木学会第 33 回年次学術講演会概要集, II, p. 700, 1979.
- 24) Weeks, W. F. and Assur, A. : Fracture of Lake and Sea Ice, U.S. Cold Regions Res. and Eng. Lab., Res. Report 296, 1969.
- 25) 近藤連一編 : 多孔材料, 技報堂出版, pp. 165 ~ 183, 1973.
- 26) Reyton, H. R. : Sea Ice Strength, Geophysical Institute, Univ. of Alaska, Report No. NR-307-247/7-6-55, pp. 1~273, 1966.
- 27) Schwarz, J. : The Pressure of Floating Ice-Field on Piles, IAHR Symposium, Ice and Its Action on Hydraulic Structure, 1970.
- 28) Korzhavin, K. N. : The Effect of Local Crushing on the Mechanical Properties of River Ice, Tr. Transportno-Energeticheskogo Institut, Vol. 11, pp. 13~23, 1961.
- 29) Carter, D. and Michel, B. : Lois et Mécanismes de L'apparente Fracture Fragile de la Glace de Rivière et de Lac, Univ. Laval, Faculté des Sciences, Département de Genie Civil, Rep. S-22, 1971.
- 30) Frederking, R.M.W. : Preliminary Results of Plane Strain Compression Tests on Columnar-Grained Ice, IAHR Symposium, Ice and Its Action on Hydraulic Structures, pp. 26~29, 1972.
- 31) Gold, L.W. and Krausz, A.S. : Investigation of the Mechanical Properties of St. Lawrence River Ice, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 8, No. 2, pp. 163~169, 1971.
- 32) Mellor, M. and Smith, J. H. : Creep of Snow and Ice, Proc. of Physics of Snow and Ice, Vol. 1, Pt. 2, pp. 843 ~ 855, 1967.
- 33) Michel, B. and Toussaint, N. : Mechanisms and Theory of Indentation of Ice Plates, Jour. of Glaciology, Vol. 19, No. 81, pp. 285~300, 1977.
- 34) Schwarz, J. and Weeks, W. F. : Engineering Properties of Sea Ice, Jour. of Glaciology, Vol. 19, No. 81, pp. 499 ~ 530, 1977.
- 35) Dykins, J. E. : Tensile Properties of Sea Ice Grown in a Confined System, Proc. of Physics of Snow and Ice, Institute of Low Temperature Science, Hokkaido Univ., Vol. 1, No. 1, pp. 523~537, 1967.
- 36) Saeki, H., Ozaki, A. and Kubo, Y. : Experimental Study on Flexural Strength and Elastic Modulus of Sea Ice, Proc. of 6th International Conference on Port and Ocean Eng. under Arctic Conditions, 1981.
- 37) 近藤泰夫・坂 静雄 : コンクリート工学ハンドブック, 朝倉書店, pp. 276~328, 1965.
- 38) 佐伯 浩・西谷一典・小野敏行・金 洗洛・尾崎 晃 : 海水の弾性定数と氷盤の耐荷力について, 第 27 回海岸工学講演会論文集, pp. 353~357, 1980.
- 39) 佐伯 浩・田中祐人・酒井雅史・小野敏行・尾崎 晃 : 氷盤凍着に伴う直立杭構造物に作用する軸方向氷力について, 第 29 回海岸工学講演会論文集, pp. 482~485, 1982.
- 40) Oliver, J., Crary, A. P. and Cotell, R. : Elastic Waves in Arctic Pack Ice, Trans. American Geophysical Union, Vol. 35, 282, 1954.
- 41) Peschansky, I. S. : Physical and Mechanical Properties of Arctic Ice and Method of Research, Proc. Arctic Sea Ice Conference, National Research Council, Pub. 598, pp. 100~104, 1958.
- 42) Ishida, T. : Velocity of Elastic Waves in Ice, Low Temperature Science, A. 17, pp. 99~107, 1958.
- 43) Ishida, T. : Propagation of Elastic Waves in Sea Ice, Low Temperature Science, A. 18, pp. 157~169, 1959.
- 44) Gerard, R. : A Simple Field Measure of Ice Strength, Proc. of 3rd International Symposium on Ice Problems, pp. 589~600, 1975.
- 45) Tsutae, S., Itoh, Y., Izumi, K., Ono, T. and Saeki, H. : Estimation of the Compressive Strength of Sea Ice by the Schmidt Test Hammer, Proc. of 7th International Conf. on Port and Ocean Eng. under Arctic Conditions, Vol. 2, pp. 1080~1090, 1983.
- 46) Saeki, H., Ono, T., Nakazawa, N., Izumi, K. and Sakai, M. : Determination of Compressive Strength of Sea Ice by Using an Ultrasonic Pulse, Proc. of IAHR Ice Symposium, Vol. 2, pp. 339~348, 1984.

(1985. 4. 22・受付)