解説 UDC 539.375 : 546.212-162

氷の破壊靱性

浦辺浪夫*

Fracture Toughness of Ice

Namio URABE

1. はじめに

南極における学術調査を支援するために砕氷輸送船"ふじ"が海氷の脅威と戦う勇姿に感動してから久しい．一方では地球上の約 30% の炭水化物資源が北極圏に埋蔵されているとの報告もあり世間の耳目が極地方に注がれている．また最近の石油供給情勢からは，その他冬期に結氷する海域においても資源の探索，開発の推進が強く望まれる事態にある．

これら海氷の存在する海域でのエネルギ開発には十分な耐氷機能を備えた資源探索用，生産用の構造物の設置とそれらを支援する強力な砕氷能力を有する作業船や輸送船が必要となる．これら構造物，船舶を設計，建造しいかに安全に操業，運航するかを評価する際に，海氷との相互作用力，更に基本的には海氷の破壊特性を知らねばならない．

反対に天然の海氷上に補強材料を設置しながら水を散布して結氷させ氷の強度と厚さを増し，この上に構造物を建設したり，トラックの輸送路や航空機の滑走路として活用しようという構想もある．これは 20 世紀初頭のソ連邦のバイカル湖や，中葉の満州鉄道の松花江の湖氷上の列車運転の経験を現代に生かした知恵であろう．

以上のように氷をいかにたやすく割つてその脅威から逃れるか，逆に氷のもつ強度を積極的に利用するかの問題に対しては，氷の破壊特性を正確に把握することにより解答が得られ，構造物や船舶の経済性，安全性の評価も可能となる．

従来では氷の実験は野外で行わなければならないという制約もあつたので簡便な圧縮試験や曲げ試験によつて破壊強度を調査する手段が広くとられてきた．しかし湖氷や海氷の内部には微細なき裂状の欠陥が存在するし，温度変化や風浪の影響によりかなり大きな寸法のき裂も存在する．氷を手にもつて指で割つてみるとわかるが，かなり脆く割れる．氷のように脆性的な性質を示す物質は欠陥が内在すると材料試験的な試験法で得られる強度よりも低い応力で破壊してしまう．このような物質の破壊現象を解明し特性を把握するためにはき裂の存在することを明確に取り扱える破壊力学の導入が必要である．

しかし氷に関して破壊靱性試験が実施されるようになつたのは極めて最近のことであり，現時点でも数限られた報告しかなされていないのが実情である．

そこで本稿では，金属の脆性破壊の研究に応用され多大な成果をあげている線型破壊力学の概念に立脚した破壊靱性試験法の氷に対する適応性の是非を検討するとともに，それに付随した諸問題を紹介して読者の興に供したい．

2. 氷の脆性と線型破壊力学の適応

氷が地球上に存在する温度としては最低−50°C が考えられる．後述するが氷は一般にはこのように高い対応温度 (Homologous Temperature) に存在するにもかかわらず脆性的な破壊を提する．そして氷の他には炭化物と珪酸塩のみがこのような性質を有している．

氷の強度を調査する実験としては従来から行われてきた Wu ら[1]による単軸圧縮試験や Hawks と Mellor[2]による単軸引張試験の結果を参考にしてみると，歪み速度が約 10^{-4}/s を境にしてそれよりも低歪み速度域では延性的な破壊様式であり，高歪み速度域では脆性的な破壊様式である遷移現象が観察される．ただし圧縮試験と引張試験における脆性破壊の起こる過程には大きな差違が認められる．すなわち引張荷重下では単一のき裂が最終破断に致るのに対して，圧縮荷重下では始めに多数の微細なき裂が荷重軸方向に平行に発生し，そののちき裂の存在により局所的な応力場が変化してき裂同士が結合し最終的な不安定破壊になる．つまり氷の脆性破壊の発生の現象を掌握するには単一き裂を含んだ材料の問題を明確に取り扱える線型破壊力学の適応性が重要となつてくる．線型破壊力学の概念や破壊靱性試験の意味の詳細は

昭和 55 年 12 月 12 日受付 (Received Dec. 12, 1980) (依頼解説)
* 日本鋼管(株)技術研究所 Ph. D (Technical Research Center, Nippon Kokan K.K., 1-1 Minami-watarida-cho Kawasaki-ku Kawasaki 210)

岡村[3]や金沢と越賀[4]の解説書に記述されているので，ここでは平面歪み条件下での応力拡大係数について簡単に説明する．完全弾性体に存在するき裂は外力により弾性体に与えられたエネルギとき裂先端近傍に貯えられたエネルギの差がき裂が進展することに併う新表面を形成するために必要なエネルギを上まわつたとき単位長さだけ進展する．つまり弾性体のポテンシャルエネルギはき裂の進展に併い減少する．この減少分を歪みエネルギ解放率として g と表わすと，応力拡大係数 K_{IC} は歪みエネルギ解放率 g_{IC} と(1)式に示す関係で結びつけられる．

$$g_{IC}=K_{IC}^2(1-\nu^2)/E \quad \cdots\cdots (1)$$

(1)式で E はヤング率，ν はポアソン比である．言い代えると K_{IC} は既知の寸法のき裂を進展させるのに要する応力の程度を表す材料定数である．K_{IC} の下つき文字のⅠはき裂の面が互いに平行なまま離れていくような荷重下でき裂が進展する破壊様式（モードⅠ）を示し，Cはそのときの限界値であることを意味する．完全弾性体においては g は表面エネルギ γ_S の2倍に等しい．しかし氷のように脆い物質でもき裂先端近傍では塑性変形が起こり，このエネルギを γ_P とすると結局 g は(2)式で記述される．

$$g=2\gamma_S+\gamma_P \quad \cdots\cdots (2)$$

そしてこの塑性変形の起こる領域：塑性域がき裂の寸法に比して十分に小さい場合に限り，K_{IC} は線型破壊力学に基づいて脆性破壊を正確に記述することのできる有要なパラメータとなる．

3. 純氷の破壊靱性

3·1 純氷の生成と結晶構造

気温が低下しはじめると湖沼や河川の水温も低下しはじめる．冷却されて密度の大きくなつた水面近くの水は水底に沈み，その代わりにより高温の低密度の水が水面へ上昇し鉛直方向の対流が開始する．冷却による対流によつて水温の上下方向の差が少くなりながら水温は低下するが，3.98°C になるとこの対流は停止する．この温度で水は最大密度になるからである．引き続き結氷温度まで冷却されると水面近くの水は幾分過冷却されて氷の結晶核が生じ結晶が生成しはじめる．水流や波浪の影響により生成した氷の結晶は破砕されて小さくなるが，水面のある範囲を薄氷が覆うようになると波はしだいに静まつて氷の初期層が形成される．初期層の底部からは水底へ向かつて二次の定状的な氷の成長が始まる．水面近くにできた氷の初期層は成長期のさまざまな攪乱により乱雑な結晶軸方向を持つた多結晶氷である．氷の結晶構造は稠密六方晶であり基底面に含まれるａ軸の一つに沿つて生長しやすい性質を持つので二次的に成長する氷は生長に有利にある方位をもつた結晶粒が選択的に成長し，鋼の一方向凝固組織に似た柱状晶となる．また氷厚が約10cm を越えるようになると基底面に垂直な軸，C軸は水平面内に存在する傾向がでてくる．そして結氷の条件しだいでは圧延集合組織のようにかなりの範囲に渡つてC軸が一方向に揃う場合があり，このとき特に強い異方性を示す．

写真1(a)(b)に自然の結氷条件を模して低温実験室で生成させた純氷の垂直断面および水平断面の結晶組織写真を示す．特に水面近くの多結晶層の再現のため過冷却させた水槽の水面上に霧氷を降らせる手法を採用して生成させた氷であり垂直断面組織の上部に細粒の多結晶層が観察される．これらの写真は氷の試料を約 0.8 mm 厚まで削つて薄くしたものを直交する二枚の偏光板に挟んで白色光を照らして撮られたものである．氷は光学的にも強い異方性を有するので方位の違いにより七色に変化した個々の結晶粒を観察することができる．

また氷の場合C軸は光軸と一致するのでこの性質を利用して個々の結晶粒の方位を同定することもできる[5]．

写真1(c)は生長している純氷の底面に観察された樹枝状晶の一つである．下方に向かつてａ軸の一つが伸びている様子が観察される．

3·2 純氷の破壊靱性値 K_{IC}

純氷の K_{IC} 値は 1963 年に Gold[6] により熱衝撃の手法を用いて測定されたのが初めてでありその値は約58 kPa$\sqrt{\mathrm{m}}$ と算出された．その後破壊力学の手法に則つた破壊靱性試験により系統的な研究が報告されだしたのは1979年になつてからである．

図1にはそれらの四研究機関[7)~10)]においてなされた測定のうち結晶粒径が 5 mm から 10 mm の範囲にある柱状晶組織をもつ純氷の −20°C における値を抜きだして時間に関する応力拡大係数の変化率 $\dot{K}_I(=dK_I/dt)$ の関数として整理したものである．なお試験片形状，荷重方向，柱状晶組織の成長方向と予き裂面との関係は表1にまとめて示してある．特に試験片作製上留意されている点は予き裂先端の形状であり，鋸で導入した切り欠きの底を剃の刃で鋭く成形したり，切り欠き底に脆性き裂を導入したりしてある．また試験の際とられた荷重対荷

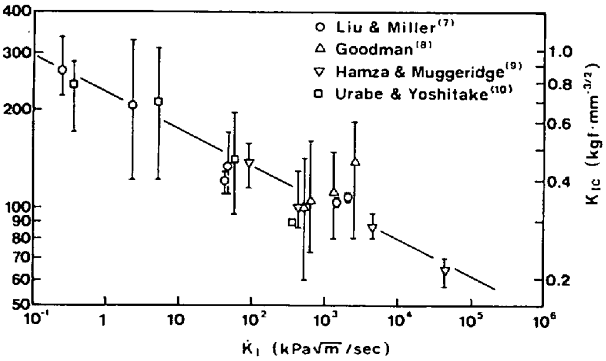
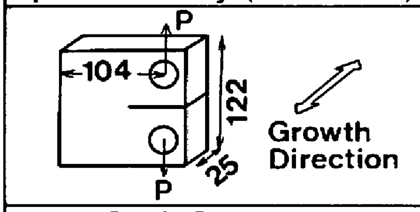
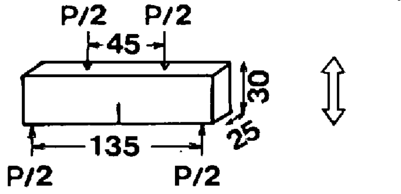
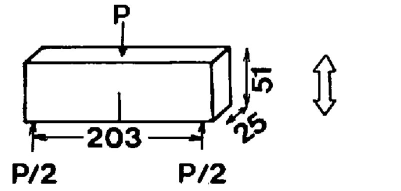
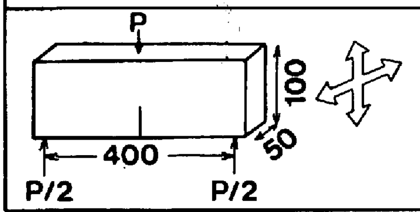


Fig. 1. Relationship between K_{IC} and $\dot{K}_I$ for pure ice ($T=-20°$C, Columnar grain diameter $=5$ mm–10 mm).

Photo. 1. Summary of fracture toughness tests on pure ice.

Spec.Geometry (unit : mm)	Grain Size	$\dot{K}_I$(kPa$\sqrt{m}$/sec)	Authors
	~5mm	10^{-1} ~ 10^3	Liu & Miller(7)
	5~10mm	10^2 ~ 10^3	Goodman(8)
	~8mm	10 ~ 10^4	Hamza & Muggeridge(9)
	~5mm	10^{-1} ~ 10^2	Urabe & Yoshitake(10)

重点変位記録では図1に示すすべての$\dot{K}_I$の範囲で破壊は直線域内で開始しているし，破面の注意深い観察によると平坦な，かつ結晶学的な面であり，破壊が脆性破壊による様相を示している．図1には同一条件下で多数(最小でも21体)の試験片によつて得られたK_{IC}の平均値と最大値と最小値の範囲を示してある．最大値と最小値との差はかなり大きいが，これは試験片の寸法と比較して，鋼の場合と異なり，結晶粒が大きいため予き裂先端近傍で結晶方位が大きく変動することに主に起因していると考えられる．しかし荷重条件が異なるにもかかわらずK_{IC}と$\dot{K}_I$の間にはよい相関があり，鋼や他の金属材料と同様にK_{IC}は$\dot{K}_I$に強く依存することが認められ$\dot{K}_I$の増加とともにK_{IC}は低下している．

3·3 小規模降伏条件の検討

前節のごとく得られたK_{IC}値が材料定数となるためにはき裂先端における塑性域の大きさが試験片の寸法(厚さ，幅)や予き裂長さと比較して十分に小さいことが第一に重要な条件：小規模降伏条件である．式(1)に純氷について代表的な値[11)] $E=8.5$ GPa, $\nu=0.31$を代入して得られる −20°Cにおける歪みエネルギ解放率gは表2に示されるとおりである．

Table 2. Relationship between strain energy release rate g and rate of stress intensity factor $\dot{K}_I$ for pure ice at −20°C.

$\dot{K}_I$(kPa$\sqrt{m}$/sec)	1	10	10^2	10^3	10^4
g (J/m²)	7.4	4.0	2.2	1.2	0.6

一方 KETCHAMAN と HOBBS[12)]は表面に垂直に存在する結晶粒界に関して，表面が水蒸気と液体の水におのおの触れている場合について，二つの結晶粒の接触角を実測することにより表面エネルギγ_Sを得ている．氷と水蒸気が接している場合のγ_Sは約 0.11 J/m² である．$g-2\gamma_S$の値がき裂先端における塑性変形に関与するエネルギγ_Pである．鋼の場合（例えば $2\gamma_S\simeq10$ J/m², $g\simeq5\times10^4$ J/m²）と比較してγ_Pは非常に小さいが，やはりγ_Pが氷の脆性破壊に大きな影響を与えていることがわかる．氷のように高い対応温度に存在する物質では降伏点に至る以前にかなりの低応力レベルでクリープ変形を起こすため，き裂先端近傍の応力はこのクリープ変形により緩和されるおそれがある．そして小規模降伏条件を満すためにはクリープ域が十分に小さい必要がある．

最近 RIEDEL と RICE[13)]は非線型粘弾性体についてクリープ域の大きさr_Cを求める理論式を提案している．き裂先端からの距離r_Cはき裂を含む物体に応力σが加わつてからの時間tとき裂面とのなす角度θとの関数である．今クリープ変形が$\dot{\varepsilon}=A\sigma^n$の NORTON 型で表されるならば$r_C(t, \theta)$はクリープ係数とクリープ指数を用いて(3)式で与えられる．

$$r_C(\theta,t)=\frac{K_I^2}{2\pi E^2}\left\{\frac{(n+1)^2E^nAt}{2n\alpha_n^{n+1}}\right\}^{2/n-1}F_C(\theta)\cdots(3)$$

ここでEはヤング率，nはクリープ指数，Aは温度に依存するクリープ係数，tは時間，α_nは強度因子，そして$F_C(\theta)$はθのみに依存する関数である．

BARNS と WALKER[14]による氷のクリープ試験結果によると定常クリープ域におけるクリープ指数nは-1.5°Cから-21.5°Cの温度範囲では2.77から3.12の範囲にある．一方 Eshelby-Shoeck 機構に基づいた WEERTMAN 理論[15]に依ると$n=3$である．$n=3$とした場合，平面歪み条件下では$\alpha_3=0.912$となり，$\theta=\pi/2$で$F(\theta)=0.25$である．再び BARNS と WALKER[13]によるとクリープ係数Aは-20°Cで$5.80\times10^{-26}Pa^{-3}s^{-1}$である．以上の数値を(3)式に代入すると$-20$°Cにおけるクリープ域の大きさ$r_C$は(4)式で表現される．

$$r_C=2.37\times10^{-6}K_{IC}^3\dot{K}_I^{-1}\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(4)$$

(4)式においてK_{IC}を$kPa\sqrt{m}$，$\dot{K}_I$を$kPa\sqrt{m}/s$で与えればr_Cはmmの単位で求められ，図1のデータを用いて計算すると表3に示す値が得られる．

ここで例えば金属材料の場合と同じく，r_Cが試験片の厚さ，幅や予き裂長さの約5%以下[16]であれば小規模降伏条件を満たすと仮定すれば図1において$\dot{K}_I$が10 kPa$\sqrt{m}$/s以上の試験によつて得られたK_{IC}は有効であり，それらK_{IC}は氷中のき裂の伝播開始を支配する有用なパラメータであると言える．

3·4 K_{IC}の結晶粒度依存性

図2に HAMZA と MUGGERIDGE[9]，URABE と YOSHITAKE[10]および GOODMAN[11]らによる温度が-20°C，$\dot{K}_I$がほぼ10^2kPa$\sqrt{m}$/sの同一条件下における純氷のK_{IC}の結晶粒度依存性を示す．1.5mmから単結晶まで柱状晶の粒径が大幅に変化しているが，一つのデータ点を除いてK_{IC}を対数でとつた場合，結晶粒径dの平方根の逆数と良い相関があることが認められる．ただし鋼や他の金属材料によく知られているPETCHの関係[18]とは全く逆に結晶粒径が大きくなる程K_{IC}は大きくなつている．

この傾向は後述するが純氷に限らず海氷の場合にも認められる．

KETCHAMAN と HOBBS[12]は前述したのと同じ手法をもちいて0°Cにおける結晶粒界の表面エネルギγ_{gb}を求めている．それによるとγ_{gb}はγ_Sの約60%程度と評価されている．この割合が-20°Cにおいても成立すると仮定すると，脆性破壊が結晶粒界に沿つて伝播しているために粒径の大きい程K_{IC}が大きくなるとも考えられる．しかし氷のへき開面は基底面と一致する．これはC軸の方向の水素結合の数が他の結晶学的な面に垂直な方向の水素結合の数と比較して最小であることによる．よつてへき開破壊の場合のγ_Sは決してγ_{gb}より大きいとは言いきれない．また破壊の経路の観察結果によるといまだ定量的な評価はなされていないが，粒内破壊と粒界破壊が混存している場合が多い．

この点の解明は今後に残された課題の一つである．

Table 3. Creep zone size r_C for pure ice at -20°C.

$\dot{K}_I$ (kPa$\sqrt{m}$/sec)	1	10	10^2	10^3
r_C (mm)	43	1.7	6.8×10^{-2}	2.7×10^{-3}

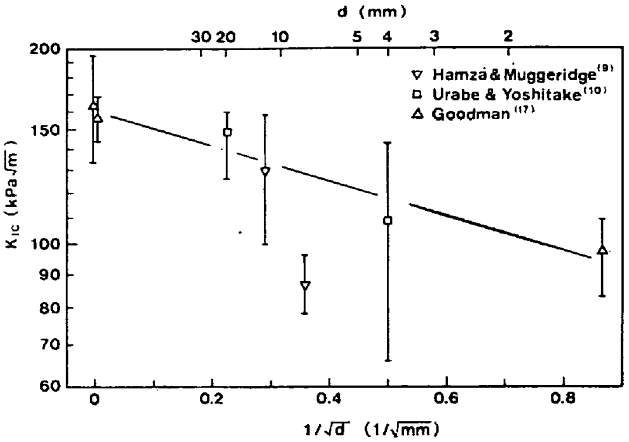


Fig. 2. Relationship between K_{IC} and columnar grain size d for pure ice.

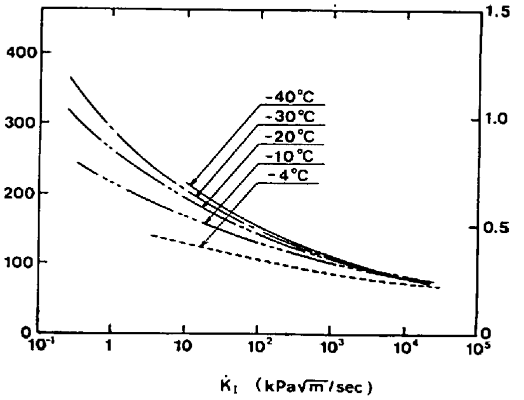


Fig. 3. Effect of temperature on the relationship between K_{IC} and $\dot{K}_I$.

3·5 K_{IC}の温度依存性

図3は表1に示されたデータ源によつて-4°Cから-40°Cの温度範囲の試験によつて得られたK_{IC}を各試験温度について$\dot{K}_I$の関数としてプロットしたものである．各曲線は試験温度ごとに最尤法によつて引かれたものである．結晶粒度依存性と同様，金属に観察される場合とは全く逆に温度が低下するに従つてK_{IC}は増大する．この現象は$\dot{K}_I$の低い領域で特に顕著である．

図3に示した温度域および応力拡大係数変化率域ではK_{IC}は(5)式により精度よく推定できる[10]．

$$K_{IC}=(155\log T+61)\dot{K}_I^{-(0.08\log T+0.03)}\cdots\cdots(5)$$

ただし温度は摂氏であらわした絶対値である．そこで式(5)を用いて各試験温度により得られたK_{IC}を応力拡大係数変化率の領域として区分してみると図4が得られる．-4°Cの純氷のクリープデータ[14]を用い3·3節に

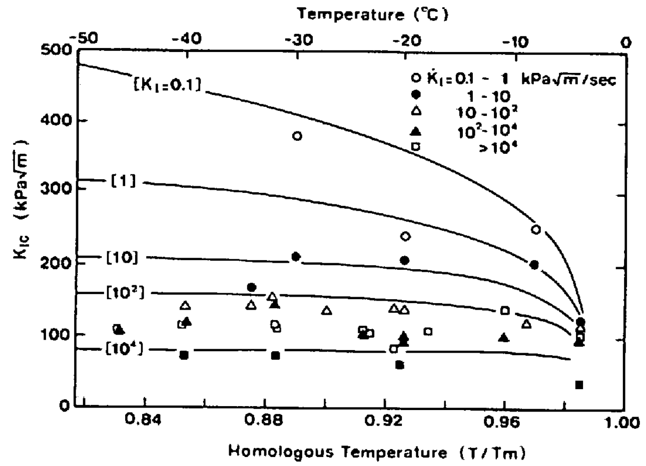


Fig. 4. Division map of critical stress intensity factor K_{IC} assorted by temperature and rate of stress intensity factor (part 1).

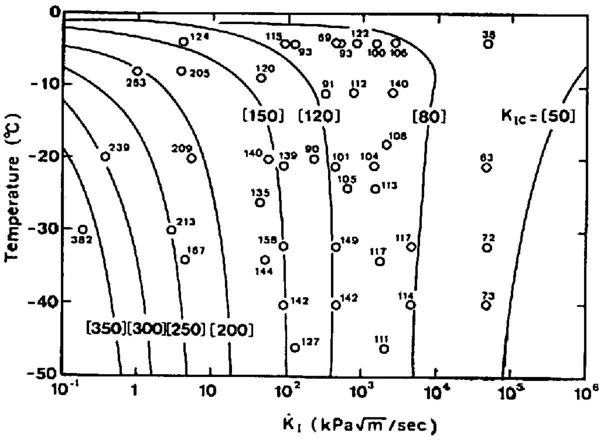


Fig. 5. Division map of critical stress intensity factor K_{IC} assorted by temperature and rate of stress intensity factor (part 2, numerical values in figure denote K_{IC}).

述べた手法でクリープ域の大きさ r_C を求めると $\dot{K}_I$=10kPa$\sqrt{m}$/s で r_C=5.3 mm となる．そこで $\dot{K}_I$ が 10 kPa$\sqrt{m}$/s 以上であれば全温度域で K_{IC} が小規模降伏条件を満たす有効な値であるとみなすと，$\dot{K}_I$ が非常に速い範囲では K_{IC} は温度によらずほぼ一定値となる．しかし $\dot{K}_I$ が遅い範囲では -10°C 以上で温度が上昇すると有効な K_{IC} はやはり低下することが認められる．更に温度と応力拡大係数変化率の領域として K_{IC} の存在する範囲を区分して示したのが図 5 である．高 K_{IC} 域は低温度，低応力拡大係数変化率域に存在することが明確である．

金属の場合には低応力拡大係数，変化率および高温度においては降伏応力が低下するためき裂先端での応力緩和が大きくなり従つて応力拡大係数が大きくなると考えられている．一方氷の場合には低応力レベルによるクリープ試験を除いて弾性域で破壊が開始するので降伏応力の温度依存性や速度依存性はおろか降伏応力そのものも実験的に求めることは不可能である．そこで K_{IC} の温度依存性や応力拡大係数変化率依存性を説明するのに転位の易動性を基にした理論の展開が氷に関しても可能かどうかは不明である．

しかし -10°C 以上の温度では結晶粒界の三重点に液体としての水が存在することが確認されている し[12]，MILLER[19]により定性的に説明されているように -10°C 以上 -2°C 以下の温度範囲では条件しだいで結晶粒界に 0.1Å 程度の薄い水の膜が存在するとすれば，これは当然破壊靱性に影響を及ぼすものと考えられる．

これらの点を解明する糸口を掴むためには低応力拡大係数変化率域においても小規模降伏条件を満す大型試験片を用いた破壊靱性試験を遂行し，その温度依存性を把握する実験がなされることが望まれる．

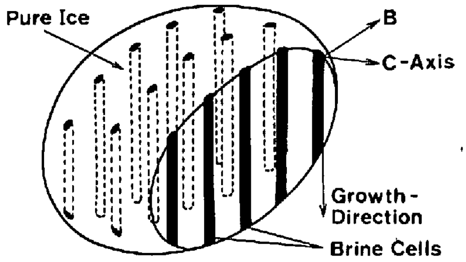


Fig. 6. Schematical representation of sea ice (relationship between orientations of parent phase and brine cells).

4. 海氷の破壊靱性

4·1 海氷の生成と結晶構造

結氷温度 T_f と密度が最大になる温度 $T_{\rho m}$ は水中の塩分濃度に比例して低下する．そして両者の勾配が異なるので塩分濃度が約 25‰(千分率で表した体積率でパーミルとよむ) を越すと，純氷では T_f=0°C, $T_{\rho m}$=3.98 °C であつたものが $T_{\rho m}$ の方が T_f より低い温度になる．そこで塩分濃度により海氷の結氷過程は純氷の場合と若干異なるが[20]海面近くには多結晶層が存在し，その下方には海底に向かつて柱状晶が発達しているところは純氷と同じである．海氷の組織の一例を写真 2 に海氷組織の模型図とともに上層部分の垂直，水平断面組織および下層部分の垂直，水平断面組織を対比して示す．海水が凝固する際には分配係数が 10^{-4} と非常に小さいので氷の部分は純氷と差違はない．しかしその為氷から押し出され，塩分が濃縮された水がブライン晶と称せられ母相の氷と特定の方位関係をもつて針状に存在する．写真 3 には海氷の顕微鏡組織写真および図 6 には ASSUR[21]によつて描かれた母相氷とブライン晶の方位関係を模式的に示してある．

海氷の温度が低下するに従つてブライン晶から氷が析

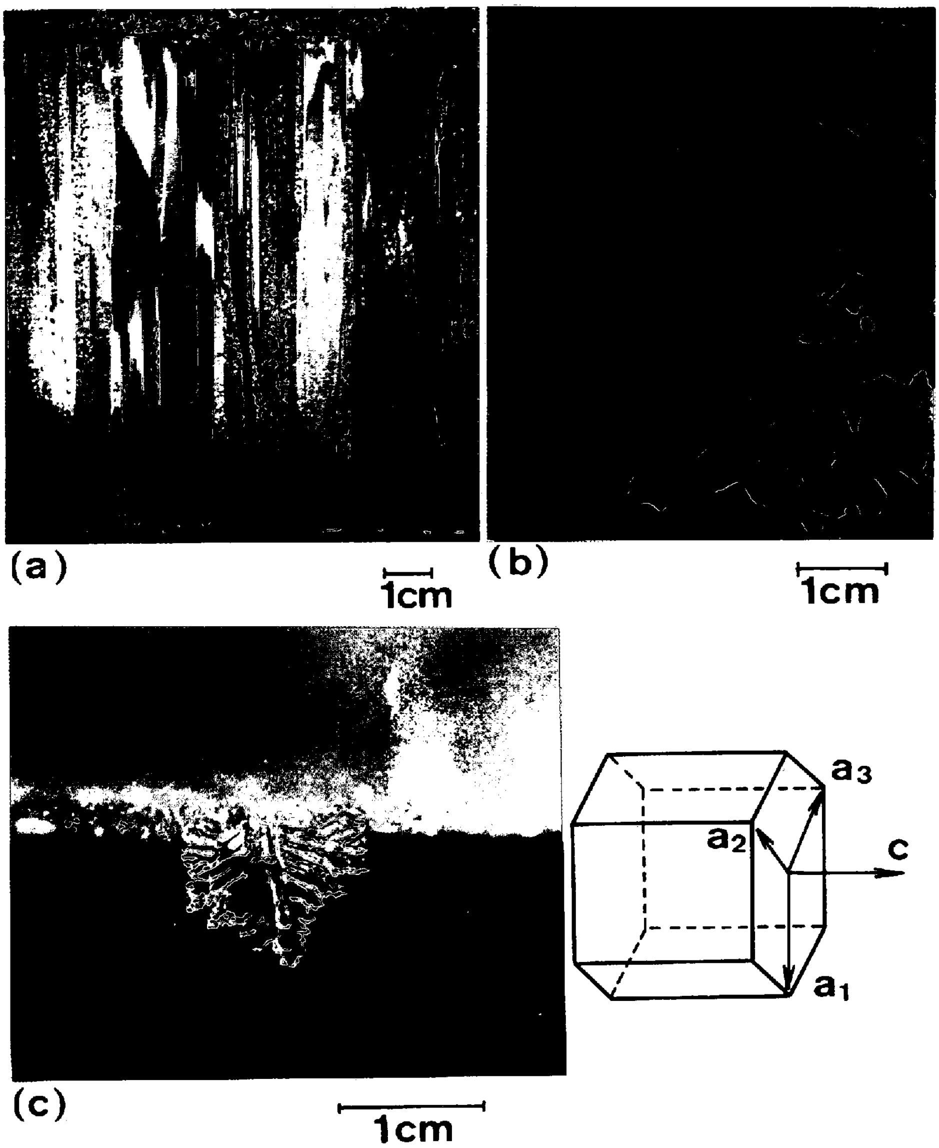


Photo. 1. (a) Structure of pure ice; vertical section, (b) horizontal section, (c) dendrite at bottom of pure ice.

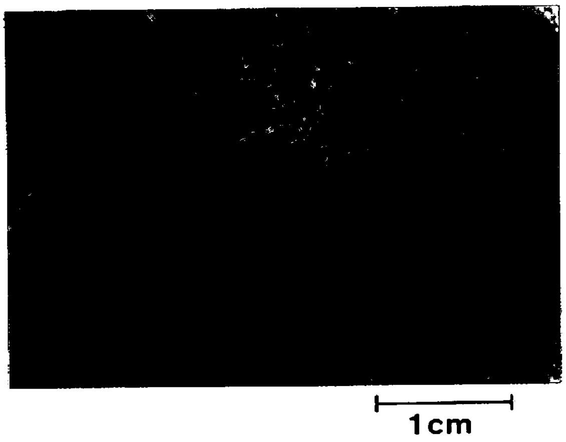


Photo. 3. Microscopic structure of sea ice.

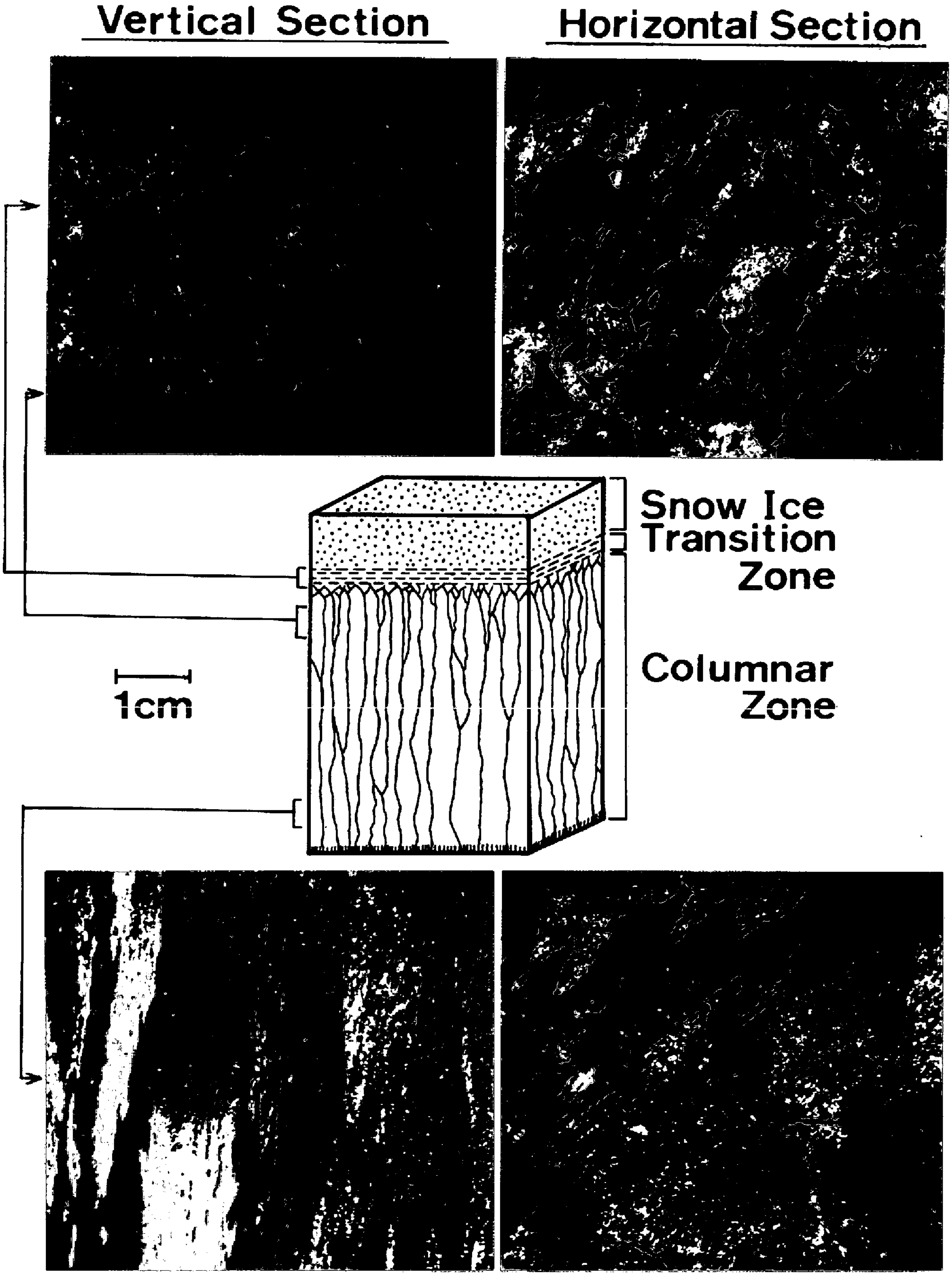


Photo. 2. Structures of sea ice.

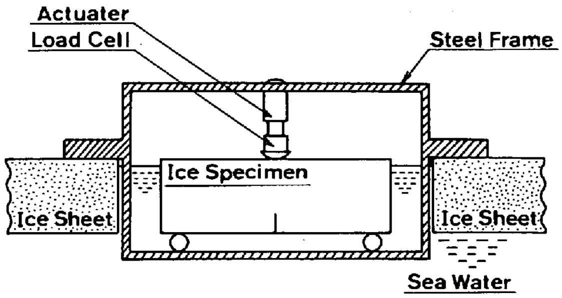


Fig. 7. Set-up for in-situ fracture toughness tests of sea ice.

出してブライン晶の塩分濃度は高くなり，かつ体積は減少する．$-8.2°C$ では $Na_2SO_4\cdot 10H_2O$，$-22.9°$ では $NaCl\cdot 2H_2O$，$-44°C$ では $MgCl_2\cdot 12H_2O$ が析出して海氷の組織には純氷，ブライン晶と析出塩の三相が現れる．更に温度が低下し $-54°C$ に達すると液体のブライン晶はほとんど消失し固体の氷と塩のみとなる．

海氷の組織構造を特徴づけるブライン晶はその形状から天然に存在するき裂と考えられる．一つの柱状晶中において同一の方向性をもつブライン晶の境界として亜結晶粒界が存在するが，この亜結晶粒の寸法と海氷の破壊靱性との関連は興味あるところである．

4·2 海氷の“その場”破壊靱性試験

天然の海氷の破壊靱性値を測定した例は現在のところただ一つ報告[22]されているにすぎない．これは北海道サロマ湖で 1979 年に実施されたものである．サロマ湖はオホーツク海に面して開口を有しており海水の塩分濃度や組成は本質的に外洋のものと変わりはない．ここでは12月の中旬頃に結氷しはじめ徐々にその厚さを増して，2 月中旬頃になるとほぼ 45 cm 程の厚さの海氷ができる．

海氷中のブラインの脱落を防止する目的で図 7 に示す荷重装置を氷板上に設置し平面歪み破壊靱性試験法：ASTM-E 399[16]に合致する三点曲げ試験片を海中で準備して破壊靱性試験を行つたものである．試験片の形状は厚さ 20 cm，幅 40 cm，支持点間距離は 160 cm である．試験片中央部に鋸で切り欠きを付した後，剃で切り欠き底を鋭く成形し試験に供した．また支持点ローラの高さを調整し試験片の自重は浮力により差し引かれるようにくふうを施した．海水の温度はほほ $-2°C$ と試験期間中安定して一値を示したため，気温が $-2°C$ になる時を選んで試験を実施した．写真 2 に示したように海氷の亜結晶粒の大きさは上層部分と底層部分では大きく異なつている．そこで予き裂の長さは約 8 cm と限定し海氷の上面，底面および側面にそれぞれ予き裂を導入し組織と破壊靱性の関連を調査した．

試験の際とられた荷重対荷重点変位記録は破壊荷重に致るまで直線関係を示し，また破面は純氷と同様脆性的な破面であつた．海氷のクリープデータが入手できないので 3·3 節で行つたような小規模降伏の状態にあるか

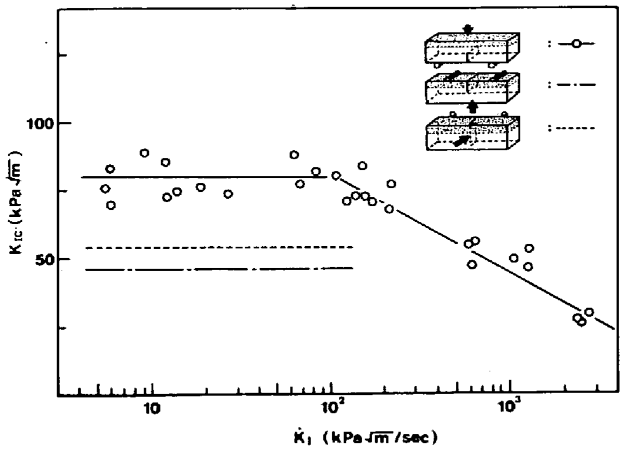


Fig. 8. Effect of sea ice structure on relationship between K_{IC} and $\dot{K}_I$.

否かの検討はできないが，純氷の場合の検討結果の類推によりおおむね有効な K_{IC} が測定されていると考えられる．撓みによる浮力の増加は破壊荷重と比して無視しえる程であつたので K_{IC} の計算の際記録された破壊荷重は無修正で使用した．

海氷の K_{IC} を $\dot{K}_I$ の関数としてプロットしたものを図 8 に示す．上面および側面に予き裂を付した場合のデータ点は図の煩雑になることを防ぐため省略し最尤線のみを示してある．底面に予き裂を付した場合，$\dot{K}_I$ が約 $10^2\,kPa\sqrt{m}/s$ まではほぼ一定値であり，それ以後は $\dot{K}_I$ の対数値に直線的に比例して低下している．上面および側面に予き裂を導入した場合も約 $10^2\,kPa\sqrt{m}/s$ まで K_{IC} はほぼ一定値を示す．この K_{IC} が一定値を示す $\dot{K}_I$ の範囲では，亜結晶粒径の大きな底層部で K_{IC} は大きく逆に亜結晶粒の小さな上層部で K_{IC} は小さな値を示す．また側面に予き裂を付した場合には，あたかも平均値を与えるように前二者の中間の K_{IC} 値を示している．

4·3 圧力溶融現象

ただ一つの海氷の破壊靱性試験は $-2°C$ の非常に高い温度（対応温度$=0.993$）で行われている．このように高い対応温度においては圧力溶融現象およびこれに付随した復氷現象が試験条件にとつて重要な問題になつてくる．これは試験片を支持する点や荷重点において氷と治具の接触面積が狭い時，治具の直下では大きな圧力が加わり，これにより氷の溶融点が下がり一部分が融解する (Pressure Melting) ことと，融解した水は試験片表面へ押し出され，その後治具の周りに再凝固する現象 (Surface Regelation) とである．この再凝固時の潜熱が治具を通して高圧力部分に伝導し加圧溶融現象は加速される．

圧力により低下する分の温度 ΔT(°C) は Clausius-Clapeyron の関係を用いて(6)式で考えられる．

$$\Delta T \cong 7.40\times 10^{-4} P \quad \cdots\cdots(6)$$

ここで P は MPa の単位で与えられる圧力である．

一方サロマ湖における海氷破壊靱性試験で記録された破壊荷重の最大値は約 2 kN である．荷重点および支持点として使用されたローラの直径は 100 mm であるので試験片とローラとの接触幅を 0.01 mm と極端に狭く仮定して圧力を計算すると最大値で 10^2 MPa が得られる．この値を(6)式に代入すると圧力により溶融点の下がる温度は 7.4×10^{-2}°C である．

他方海水の結氷温度 T_f は DOHERTY と KESTER[23] によつて塩分濃度 S (‰) と水深 Z (m) との関数として(7)式のごとく与えられている．

$$T_f=-[1.37\times10^{-2}+5.199\times10^{-2}S+7.225\times10^{-5}S^2+7.58\times10^{-4}Z] \quad \cdots\cdots\cdots(7)$$

電気伝導度の測定により求められたサロマ湖の塩分濃度は平均 23.1‰ でありこれを(7)式に代入すると結氷温度 T_f は -1.217°C となる．試験時の最大荷重 2 kN が試験片に加わつた場合，溶融温度は -1.3°C に低下する．しかし幸いなことに試験温度 -2°C までには達せず，サロマ湖の実験にはこの加圧溶融に付随した問題は起こつていないと判断される．

4·4 K_{IC} と海氷組織との関係

4·2 節で示したように予き裂先端の位置により K_{IC} は大きな影響を受ける．そこで予き裂を付さない試験片を用い破壊靱性を求める場合と同様な三点曲げ試験を行い破壊応力 σ_f を得た．この σ_f と先に求めた K_{IC} 値とから天然に海氷中に内在するき裂の寸法 a を算出することができる．結果を図 9 に示す．測定した応力拡大係数変化率 $\dot{K}_I$ の範囲ではき裂の長さ a はおおむね $\dot{K}_I$ にはよらない一定値を示し，その値は上層部分では約 2.5 mm，底層部分では約 19 mm である．海氷の組織写真より求められた亜結晶粒の粒径は上層部分で平均 4 mm，底層部分で平均 25 mm であり推定したき裂長さとブライン晶の平均長さに匹敵する亜結晶粒径とにはよい相関があると認められる．

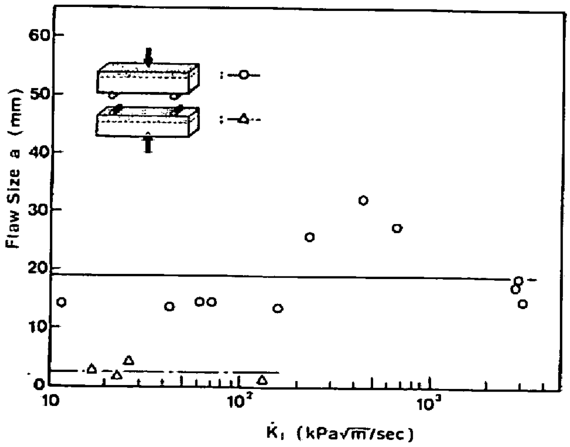


Fig. 9. $\dot{K}_I$ independent flaw size a predicted to be existed at top portion and bottom portion of sea ice sheet, respectively.

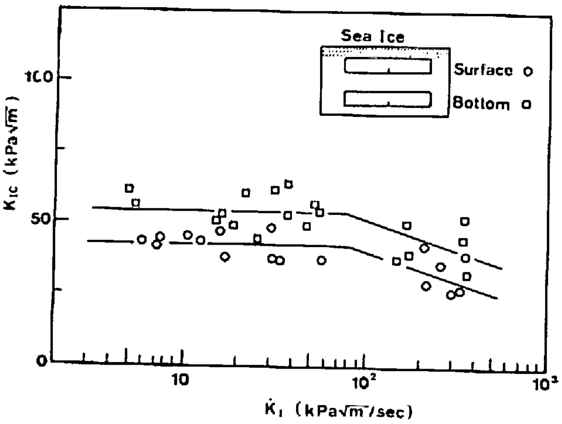


Fig. 10. Relationship between K_{IC} and $\dot{K}_I$ obtained by small scale test piese sampled from sea ice sheet.

4·5 試験片寸法の影響

例えば北極海では 3 m ほどもの海氷が存在し，この氷厚を基準にした試験片を用いて厳寒の地で破壊靱性試験を挙行するのは至難の技である．そこでサロマ湖の海氷から上層部付近および底層付近から厚さ 10 cm，幅 10 cm の試験片を切り出し支持点間距離 40 cm の小型三点曲げ試験を実施して K_{IC} に及ぼす試験片寸法の影響を調査した．その結果を図 10 に示す．図 8 の元厚の試験結果と対比してみると上層部より切り出した小型試験片の K_{IC} は元厚試験片の K_{IC} とほぼ等しい値を示しているが，下層部より切り出した小型試験片の K_{IC} は元厚試験片の K_{IC} と比較して約 35% も低い値になつている．ところが前述したようにブライン晶は天然のき裂と考えられるので，海氷の場合はブライン晶が人工予き裂とあいまつて予き裂長さが長くなつたのと同じ効果があるはずである．元厚大型試験片の場合は亜結晶粒径と比して予き裂長さが十分に長いためにこの補正は測定結果にほとんど影響を及ぼさない．しかし小型試験片の場合は亜結晶粒径の大きい下層部の場合予き裂長さと粒径とはほぼ同等となり効果が大きくなる．サロマ湖における実験では後者の場合の補正係数は 1.7 である．図 10 において下層部より切り出した小型試験片による K_{IC} 値 52 kPa $\sqrt{m}$ を 1.7 倍すると 88 kPa$\sqrt{m}$ の値が得られ元厚試験片の値とほぼ等しくなる．すなわち海氷の場合，亜結晶粒径を併せて測定しておくことによりサンプリングした小型試験片による破壊靱性値を補正することができ元厚の氷板の破壊靱性を評価することが可能である．

4·6 K_{IC} とブライン体積率

天然の条件のもとで海氷の破壊靱性値を測定した報告の他には，海氷の生成条件を模して低温実験室で海氷を生成させ，これを用いて破壊靱性値を求めた報告が二例ある．

その一つは天然の海水を一定の冷却条件で結氷させ，この海水から厚さ，幅とも 5 cm の試験片を切り出し応

力拡大係数変化率が約 10^2 kPa$\sqrt{m}$/s で四点曲げ試験を−10°C と−20°C で実施したものである[24]. 試験温度が−10°C から−20°C に低下すると前述したように海水中に含まれるブライン晶は体積が減少するが, 結氷時の生成条件が同一であれば亜結晶粒径は変化しない. −10°C と−20°C での K_{IC} 平均値はそれぞれ 56.0 kPa$\sqrt{m}$ のと 63.5 kPa$\sqrt{m}$ であり純氷の場合と同様低温度ほど K_{IC} は高い値になつている.

他の一例は真水に海水と同じ組成の塩を添加し塩分濃度が 6‰ および 10‰ とした海水を結氷させ, 生成させた海氷から厚さ 5 cm, 幅 10 cm の試験片を切り出し, −20°C において支持点間距離 40 cm の三点曲げ試験を広範囲な応力拡大係数変化率で実施したものである[25]. −20°C における K_{IC} を $\dot{K}_I$ の関数としてプロットした結果を図 11 に示す. 純氷や天然の海氷と同様 $\dot{K}_I$ が増加するにつれて K_{IC} は減少している.

ところで海氷中に含まれるブライン晶の体積率 ν_B (‰) は Frankenstein と Garner[26] によれば海氷中に含まれる塩分濃度 S (‰) と温度の絶対値 T (°C) とから (8) 式によつて求められる.

$$\nu_B = S\left(\frac{49.185}{T}+0.532\right) \qquad (8)$$

実験室で結氷させた海氷およびサロマ湖の海氷で得られた K_{IC} のうち応力拡大係数変化率が約 10^2 kPa$\sqrt{m}$/s に相当するデータを抽出してこれとブライン体積率の平方根との相関を調査した結果が図 12 である. 海氷同士ではよい相関があるようにみえるが, これらの外挿値と純氷との値は一致していない. 比較的細粒の組織をもつ海氷を用いて得られた K_{IC} を選んだものの, ブライン体積率のように総体的な量をもつて海氷の破壊靱性値を代表させようとする手段には無理があるように思える. 塩分濃度と亜結晶粒径やブライン晶長さとの関連を調査しなければ解決しない問題であろう.

5. おわりに

Liu と Miller[17] はき裂が停止する際の破壊靱性 K_{Ia} を暫定的に実験から求めている. それによると K_{Ia} は K_{IC} と比較して約 30% 低い.

以上のように氷の破壊靱性に関しては極く最近報告がなされはじめたばかりであるので, 本稿では線型破壊力学に基づく破壊靱性試験が氷の破壊に関しても適応可能かどうかを私見を混えて検討し, それらに付随する問題を数多く紹介することに勉めた. データが完備するにつれて氷の破壊機構が明確にされることにより氷海域で構造物や船舶が安全に操業され, かつ陸地の延長として氷板が自由に利用される日は近いと信じている. 筆者が未熟のため独断あるいは偏見が多いことを恐れている.

末尾ながらサロマ湖における海氷実験に便宜を計つていただいた北海道大学田畑教授, また氷の研究を遂行するにあたり貴重な御意見を賜つたり勇気づけていただいた北海道大学東教授および日本鋼管(株)技術研究所の諸先輩に紙上を借りて謝意を表する. 特に綿密な実験と解析を実行してくれた吉武および図面の整備に尽力してくれた平野の両君に感謝しお礼申し上げる.

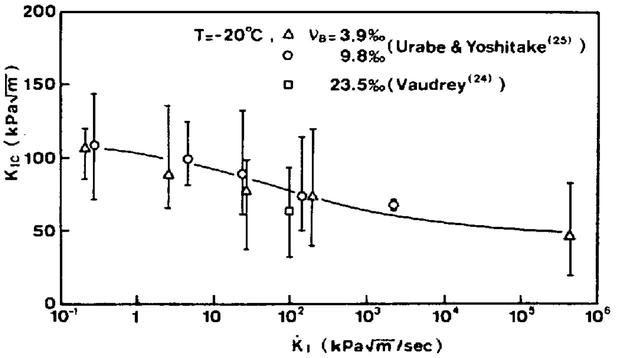


Fig. 11. Relationship between K_{IC} and $\dot{K}_I$ for artificially grown sea ice (ν_B is brine volume in ice).

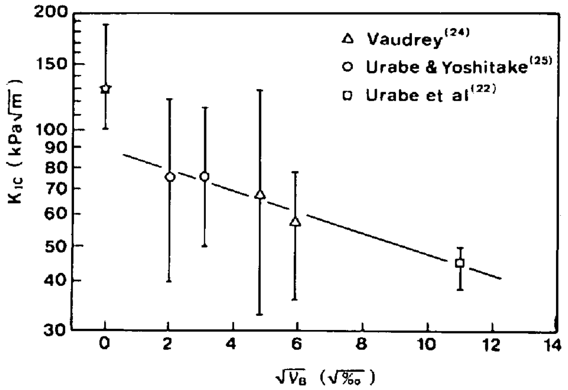


Fig. 12. Relationship between K_{IC} and square root of brine volume.

文献

1) *H. C.* Wu, *K. J.* Chang, and *J.* Schwarz: Engineering Fracture Mechanics, 8 (1976), p. 365
2) *J.* Hawks and *M.* Mellor: Journal of Glaciology, 11 (1972) 61, p. 103
3) 岡村弘之: 線型破壊力学入門, (1978) [培風館]
4) 金沢　武, 越賀房夫: 脆性破壊 2 ＝破壊靱性試験, (1978) [培風館]
5) *C. C.* Langway Jr.: Tech. Rep, 62 (1958) [U. S. Army Snow and Permafrost Research Establishment]
6) *L. W.* Gold: Journal of Glaciology : 19 (1977) 81, p. 197
7) *H. W.* Liu and *K. J.* Miller: Journal of Glaciology, 22 (1979) 86, p. 135
8) *D. J.* Goodman: Physics and Mechanics of Ice. ed. by P. Tryde, (1979) p. 129 [Springer-Verlag]
9) *H.* Hamza and *D. B.* Muggeridge: POAC 79,

Proceedings 1 (1979), p. 697 [Univ. Trondheim and Norwegian Iust. of Tech.]
10) *N.* URABE and *A.* YOSHITAKE: International Symposium on Ice (1981) 印刷中
11) *P. V.* HOBBS: Ice Physics (1974), [Clarendon Press]
12) *W. M.* KETCHAMAN and *P. V.* HOBBS: Phil. Mag, 19(1969), p. 1161
13) *H.* RIEDEL and *J. R.* RICE: ASTM STP 700 (1980) [ASTM] 印刷中
14) *P.* BARNS and *J. C. F.* WALKER: Proc. Roy. Soc., A324(1971), p. 127
15) *J.* WEERTMAN: Ice and Snow (1963), p. 28
16) ASTM: Anual Book of ASTM Standards, Part 10, E399-78 (1978), [ASTM]
17) *D. J.* GOODMAN: 私信
18) *A. S.* TETELMAN and *A. J.* MCEVILY Jr.: Fracture of Structural Materials, (1967), [John Wiley and Sons]
19) *K. J.* MILLER: Physics and Mechanics of Ice, ed. by *P.* TRYDE, (1979), p. 265 [Springer-Verlay]
20) 田畑忠司: 海洋物理IV (岩下光男他編), 海洋科学基礎講座 4, (1977), p. 115[東海大学出版会]
21) *A.* ASSUR: Arctic Sea Ice, Publ. No. 598(1958), p. 106 [U. S. National Academy Science]
22) *N.* URABE, *T.* IWASAKI, and *A.* YOSHITAKE: Cold Regions Science and Technology, 3(1980) p. 29
23) *B. T.* DOHERTY and *D. R.* KESTER: Journal of Materials Research, 32(1974), p. 285
24) *K. D.* VAUDREY: Tech. Rep. R860 (1977) [Civil Eng. Lab. Navy Construction Battalion Center]
25) *N.* URABE and *A.* YOSHITAKE: 未発表
26) *G. E* ·FRANKENSTEIN and *R.* GARNER: Journal of Glaciology, 6 (1967), p. 943