HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	北極圏海氷調査　III ： 海氷表層に生じる熱応力状態の測定
Author(s)	小野, 延雄
Citation	低温科學. 物理篇, 34, 221-226
Issue Date	1977-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18315
Type	departmental bulletin paper
File Information	34_p221-226.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

Nobuo ONO 1976 Arctic Sea Ice Research. III. Measurements of State of Thermal Stress Induced in Surface Layer of Sea Ice Cover. *Low Temperature Science, Ser. A, 34.* (With English Summary p. 226)

北極圏海氷調査 III*,**

——海氷表層に生じる熱応力状態の測定——

小野延雄
(低温科学研究所)

(昭和51年10月受理)

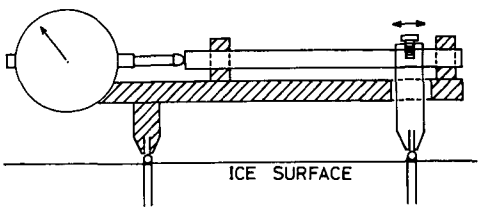
I. まえがき

水面に浮かぶ氷層では，表面温度は気温につれて変化するが，下層の温度は気温の日変化には追従せずゆっくりした変化を示すので，表層の氷の熱膨脹は下層によって拘束される。熱膨脹が拘束されて生じる応力状態は，熱応力あるいは温度応力と呼ばれる。もし，このような熱応力状態にある氷の表層を切り取ると，切り取った氷は拘束されていた熱膨脹が解放されて伸びるか縮むかするはずである。それゆえ，氷の表面に標点をいくつか埋め込んで各標点間の距離を精度よく測り，つぎにその氷を切り取って再び測定すれば，その変化からこの表層に生じていた応力状態を知ることができる。

このような測定を気温の日変化の大きい大雪ダムの氷でまず試み，測定が可能なことを知った[1]。そして1976年4月下旬から5月中旬にかけて，米国アラスカ州最北端のバロー付近の海氷で同様の測定を行なった。また現地では，アラスカ大学の Shapiro 博士らが，海氷中に埋めたフラットジャッキに圧力をかけて氷を破壊する実験を，前回[2]の継続として行なっていた。その実験域の氷にも標点を埋めて，圧力をかけたときに表層に生じるひずみを測定した。この報告は，バロー付近の海氷で行なったこれらの測定結果について述べたものである。

II. 測定方法

標点間の距離の精密測定には，微少ひずみ計（協同精機製作所製マイクロストレンゲージ）を用いた。これは，筒がその内径より若干大きい球に接するときの適合性のよさを利用して測るものである。第1図にその構造を略画で示した。あらかじめ標準長 l として100 mmだけ離して埋めた2標点に微少ひずみ計の固定筒と可動筒とを合わせ，最小目盛1/1000 mm，測定範囲 ±1 mm のダイヤルゲージを使ってこの可動筒の位置を読む。前後2回の測定か

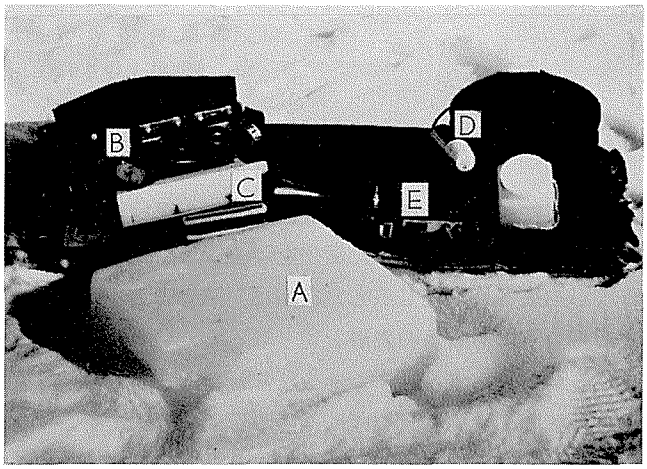


第1図 微少ひずみ計の構造（略画）

* 北海道大学低温科学研究所業績 第1788号
** 北海道大学低温科学研究所 流氷研究施設 研究報告 第51号

らダイヤルゲージの読みの変化 Δl を求めれば，この間に生じたひずみ $\Delta l/l$ を，1×10^{-5} を最小単位として知ることができる。なお，微少ひずみ計自身の熱膨脹は，スーパーインバー鋼の基準尺を測ることにより補正するようになっている。

氷表面に埋め込む標点としては，直径1.6 mmの鋼球を直径およそ1.8 mmの楊子の頭に接着したものを用いた。氷に2 mm径のドリルで穴をあけ，35 mmの長さに仕上げた鋼球付楊子片を水でぬらして，鋼球がちょうど氷の表面から顔を出すところまですばやく差し込んで凍りつかせた。この鋼球標点を一辺が100 mmの正三角形格子あるいは正方格子の各頂点に配置して，測定する辺の数を増すようにした。



第2図 測定状況
A: 標点格子を埋め切り取った氷
B: 微少ひずみ計
C: スーパーインバー鋼基準尺
D: 表面温度計感温部
E: 熱起電力計測用デジタルテスター

各辺の長さを測定したのち，その標点格子の周囲に鋸の切れ目を入れ，氷のみと鋸とを使ってその氷を厚さ20～30 cmの氷塊として切り取ったのち，再び各辺の長さを測定してその長さの変化を求めた。標点格子の計測の前後には，熱電対を組み合わせた手製の表面温度計を使って，格子付近の氷の表面温度を測定した。第2図は，一辺が10 cmの正六角形の各頂点と中心とに鋼球標点を埋め込み，その氷を切り取った状況を示す写真である。その氷の背景には，微少ひずみ計と表面温度計とが写っている。

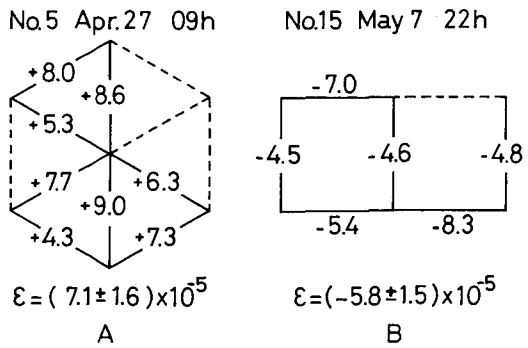
また，氷野内の一地点で，表面から0, 5, 10, 20, 30, 50, 100, 150 cmの各深さに白金抵抗温度計を埋めて氷の温度を測定した。

III. 測定結果

測定は1976年4月25日から5月11日にかけて，バロー付近の沿岸結氷で行なった。この沿岸には毎年チクチ海の流氷が押し寄せて大氷丘群ができるが，夏には流れ去って開水面が現われる。ところが1975年の夏にはこの大氷丘群が流れ去らなかったために，測定域の沿岸結氷は2年氷となっていた。測定域はアラスカ大学のレーダ観測所からおよそ150 m沖のところで，水深は約4 m，氷の厚さは2.1 mであった。また，海水の塩分量は約33.6‰，海氷の塩分量は4～5‰である。

測定域では21カ所に標点格子を作成したが，氷を切り取る実験を行なったのはそのうちの13カ所であった。各辺の長さは数回ずつ測ったが，鋼球標点のできぐあいによって測定値の再現性のよいものと値のばらつくものとがあった。それぞれの辺の測定値について平均値と

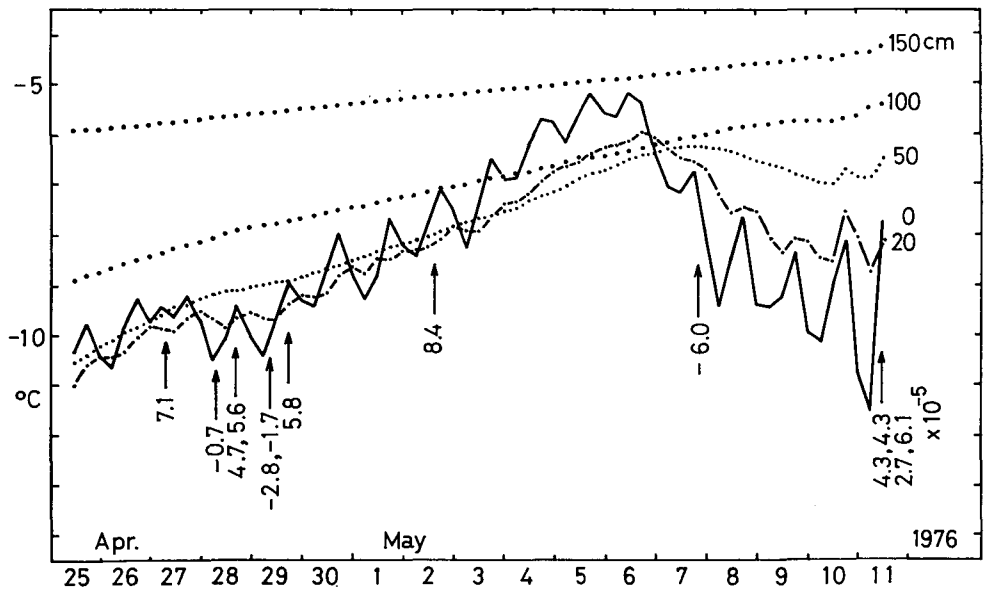
標準偏差とを求め，標準偏差が2×10^{-5}を越える辺の値を除外して全体の平均値を計算した。氷を切り取ることによって伸びた例と縮んだ例とをそれぞれ第3図**A**，**B**に示した。伸びを＋，縮みを－で表わしてある。破線はその辺の測定値の標準偏差が2×10^{-5}を越えたことを意味している。**A**の氷には約7×10^{-5}の伸びが見られ，**B**の氷には約6×10^{-5}の縮みが見られた。



第3図　切り出した氷に生じる伸び縮みの例
格子につけた数値$\times10^{-5}$ストレン，＋は伸び，－は縮みを示す

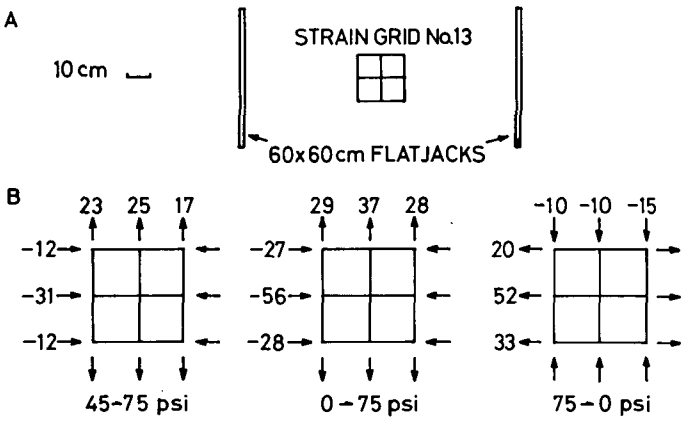
このような測定を行なった13例のうち，切り取ることによって伸びたのが9例，縮んだのが4例あった。それぞれの伸びや縮みの大きさは，測定日時を示す矢印と共に，第4図の中に数値で記してある。第4図は期間中の6時間ごとの氷温の推移を示したものである。厚さ2.1 mの氷層の1 mと1.5 mの深さの温度は，それぞれ$0.2°C\cdot day^{-1}$および$0.1°C\cdot day^{-1}$位の割合で単調に上昇していたことがわかる。氷温に日変化が見られるのは表面から20～30 cm位までであり，50 cm以深にはほとんど認められない。表層の温度は日変化をしながら5月6日まで上昇を続けたが，それ以後下降に転じている。この図から，氷を切り取ったときの伸び縮みと表面あるいは表層の氷の温度とのあいだには直接の関係がないことがわかる。

Shapiroらが用いていたフラットジャッキは，2枚の鋼板を重ねてその縁を溶接したもので，2本の管が上部両端につけられている。その一方から油か圧縮空気かを送り込み，もう一方には別のフラットジャッキを直列につないだり，圧力計をとりつけたりする。第5図は，



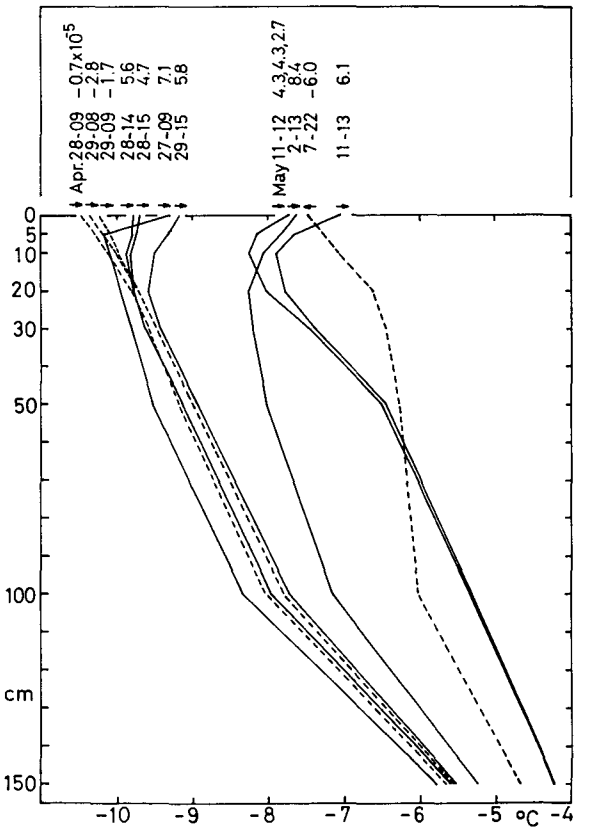
第4図　氷温の推移と伸び縮みの測定結果

120 cm 離して埋めた 60×60 cm の 2 枚のフラットジャッキの中央に標点格子をつくり，圧力をかけたときに生じるひずみを測った例である。圧力のかけはじめには伸び縮みがまちまちに起るが，15 psi (1 psi=0.07 kgw·cm^{-2}) を越えると力の方向に縮み，それと直角な方向に伸びが見られる。第 5 図 **B** の左の図は



第 5 図 フラットジャッキ内の圧力を変えたときに生じる伸び縮み

45 psi から 75 psi に圧力を上げたときに生じたひずみである。伸びも縮みも共に中央線に大きな値が得られている。中および右の図は，それぞれ 0→75 psi と圧力をかけたとき，および 75→0 psi と圧力をぬいたときに生じたひずみを示したものである。両者の値を比較すると，ほぼ弾性的なひずみを生じていたことがわかる。Shapiro-Hoskins[2] によれば，フラットジャッキの内圧を P とするとき，フラットジャッキの中央から垂直にフラットジャッキの長さだけ離れた点でのその方向の応力は約 0.37 P となる。それゆえ，標点格子の中央では両側のフラットジャッキの影響でおよそ 0.75 P の応力がかかっていたと考えられる。中央線にそっての圧縮応力は，45→75 psi のとき 1.6 kgw·cm^{-2} の増加，0⇌75 psi のとき 4.0 kgw·cm^{-2} の増減となり，この応力によってそれぞれ 3×10^{-4} および 5×10^{-4} のひずみを生じたとして弾性率を求めると，それぞれ 5×10^{9} および 8×10^{9} dyn·cm^{-2} となって従来知られている海氷の弾性率と同程度の大きさが得られた。

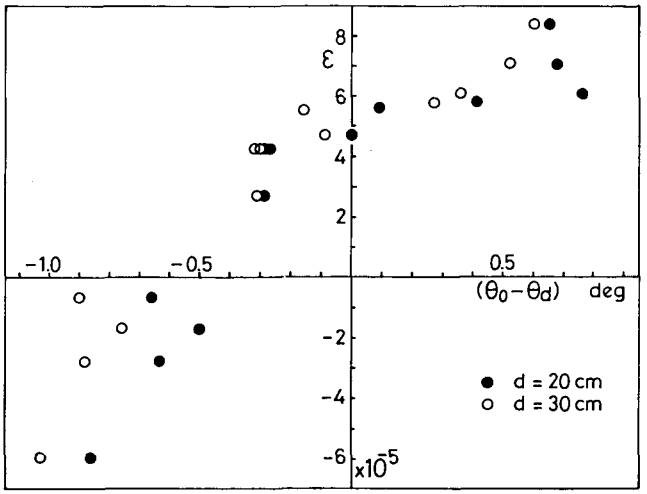


第 6 図 伸び縮みと氷中の鉛直温度分布との関係

IV. 結果の考察

海氷の表層を切り取った場合，どのような条件のもとで伸び，どのよう

な条件のもとで縮むかを知るために，切り取ったときの氷中の鉛直温度分布を調べたのが第6図である。図の上部には氷を切り取った日時と生じた伸び縮みの大きさを記し，またそのときの表面温度の変化の方向を矢印で示した。伸びの場合の鉛直温度分布を実線で，縮みの場合を破線で表わした。この図から伸びの場合には表層に温度の極小が見られ，縮みの場合は深さと共に単調に昇温していることがわかる。また切り取った氷の厚さは20～30 cm であったから，その底面付近の温度と表面温度との温度差をとって伸び縮みの値と比較したのが第7図である。黒丸は表面と 20 cm 深との温度差，白丸は表面と 30 cm 深との温度差を横軸にとったものである。表面から下層に向かって $0.025°C \cdot cm^{-1}$ 程度の割合で温度が上がるような温度分布のとき切った氷に生じる伸び縮みが少なく，それより大きな温度の傾きで氷が縮み，それより小さな温度の傾きや下層に向かって温度が下がる場合に氷が伸びるという関係が認められる。



第7図　伸び縮みと表層の温度勾配との関係

氷を切ることにより生じた最大のひずみは 8.4×10^{-5} の伸びであった。海氷の弾性率として上述の $8 \times 10^{9}\ dyn \cdot cm^{-2}$ を用いると，切り取る前にこの氷を拘束していた応力が $0.7\ kgw \cdot cm^{-2}$ 程度であったことがわかる。

V. 結　　語

海氷の表層を切り取ると，下層によって拘束されていた熱応力が解放されて，切り取った氷は伸びるか縮むかする。この伸び縮みは表層の温度勾配に関係して定まる。表層に生じていた拘束応力としては，$0.7\ kgw \cdot cm^{-2}$ という値の例が得られた。

この報告を書くにあたって，フラットジャッキの実験域での測定を許して下さったアラスカ大学の Shapiro 博士，実際に測定を手伝って下さった Metzner 氏に厚く御礼を申し上げます。また，現地での観測に種々の御便宜を計って頂いた ONR の McGregor 氏，NARL の Shaws 氏，Denner 博士，Underwood 博士をはじめ同研究所の職員の方々に深く感謝の意を表わします。さらに流氷研究施設の青田昌秋助教授，石川正雄技官には現地での諸測定に助力を頂き，田畑忠司教授には結果の整理にさいして適切な御教示を頂いた。ここに記して厚く謝意を表わします。

なお，この研究は流氷研究施設のアラスカ調査費によったことを付記します。

文 献

1) 小野延雄 1976 大雪ダムの結氷調査. 低温科学, 物理篇, **34**, 173-179.
2) Shapiro, L. H. and Hoskins, E. R. 1976. The use of flatjacks for the in-situ determination of the mechanical properties of sea ice. (印刷原稿による)

Summary

The surface temperature of a floating ice sheet follows the rapid change of air temperature, whereas the temperature of a lower layer alters gradually. Thermal expansion or contraction of the surface layer is therefore restrained by the lower layer. If an ice block is cut from the surface layer, the block can expand or contract by the release of the restraint. An attempt was made on shore ice at Barrow, Alaska, in April and May of 1976, to measure the distance between pins embedded on the surface of the ice block both before and after cutting it out from the surface layer. Examples of the results of expansion (+) and of contraction (−) are shown in Fig. 3. Results of a total of thirteen cases are summarized in Fig. 4 with curves of ice temperature versus time in several depths. In Fig. 6, the results are related with the vertical profiles of ice temperature. Solid lines represent the case of expansion and dashed lines the case of contraction. It is recognized from the figure that the expansion occurs in the case that the temperature minimum is observed in the surface layer on its profile. These results are related in Fig. 7 with the temperature differences between the surface and the depth of 20 or 30 cm.

Measurements of mechanical properties of sea ice were conducted by using flatjacks by L. H. Shapiro, University of Alaska, at that time on the same shore ice. Pins were also embedded on the ice surface between two flatjacks. The results are illustrated in Fig. 5. Young's modulus of 8×10^{9} dyn·cm^{-2} is obtained from the values of stress and strain in the central part between two flatjacks. The restraint stress in the surface layer is estimated as 0.7 kgw·cm^{-2} from values of Young's modulus and the released strain of the ice block.