



Title	X線CTスキャナによる海氷の内部構造の観察
Author(s)	河村, 俊行; KAWAMURA, Toshiyuki; 福土, 博樹 他
Citation	低温科学. 物理篇, 45, 59-67
Issue Date	1987-03-10
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18537
Type	departmental bulletin paper
File Information	45_p59-67.pdf



X線CTスキャナによる海水の内部構造の観察^{*,**}

河村俊行・福士博樹

(北海道大学低温科学研究所)

(昭和61年10月受理)

I. 緒 言

海氷は純氷とは異なり、特有な構造をしている。表面近くの薄い層は、結晶方位の乱雑な小さな結晶粒からできているが、その下の結晶では、純氷からなる薄板 (platelet) を重ねたような構造となっている。薄板は何枚かが平行に並び、いわゆる海氷の結晶粒 (grain) を構成している。薄板の結晶主軸 (c 軸) は薄板に垂直となっている。結晶粒は複雑にからみ合っており、モザイク構造をなしている。成長とともに c 軸が水平面に近い結晶粒が優先的に成長し、他の結晶粒を侵食し、くさび状に成長する。従って、 c 軸が水平面に近い (薄板が鉛直向きの) 結晶粒が残ることになる。

海氷の成長とともに、海水の大部分は排出されるが、その一部は濃縮された海水 (brine) となって結晶粒界および、薄板の間に孤立したブライン細胞となって閉じ込められる。従ってブラインは一つの結晶粒の中では平行な列となって並ぶことになる¹⁾。

ブラインは海氷の成長ともなって、種々の原因によって徐々に脱落して、海水の中に排出される²⁾。その際、ブライン細胞は次第に連なり合っており、枝を張った樹木のような形態をしたブライン排出路 (brine drainage channel) が形成される³⁾。ブラインは木の枝の部分を通して中央の幹にあたる場所に集められ排出される。このブライン排出路は、ブライン細胞とともに海氷に特有な構造の一つとなっている。

それら結晶粒、ブライン細胞、ブライン排出路など海氷の内部構造の観察は、鉛直または水平の断面を試料から切り出し、1~2 cmの厚さに行なわれている。その際、ブライン排出路などを顕著に露わすために“スス”を表面にぬって観察するという工夫もとられてきた⁴⁾。それらの結果、何枚かの水平断面の観察からブライン排出路の立体構造が想像されている³⁾。また、それらの“厚片”を約1 mmまで削り、偏光を用いて結晶粒の大きさ等の観察もなされてきた⁵⁾。さらに、散乱光による“薄片”の観察からブライン細胞の分布が調べられ、走査型電子顕微鏡により、ブライン細胞の中の構造も観察されている⁶⁾。

しかし、これら従来の方法は必然的にサンプルの破壊をとめない、同一箇所については水平断面か鉛直断面かのどちらかしかとることができない。さらに、破壊をとまらぬ力学的性

* 北海道大学低温科学研究所業績 第2903号

** 北海道大学低温科学研究所 流氷研究施設報告 第118号

質の試験に用いる試料の内部構造の観察のために断面をとることはできないという欠点があった。

そこで我々は、近年医学の分野で生体内部を観察する方法として、著るしい成果をあげている X 線を用いたコンピュータ断層撮影装置 (Computed Tomography, CT スキャナ)^{7~9)} により海水の内部構造を非破壊的に観察し、従来からの方法と比較した結果について報告する。

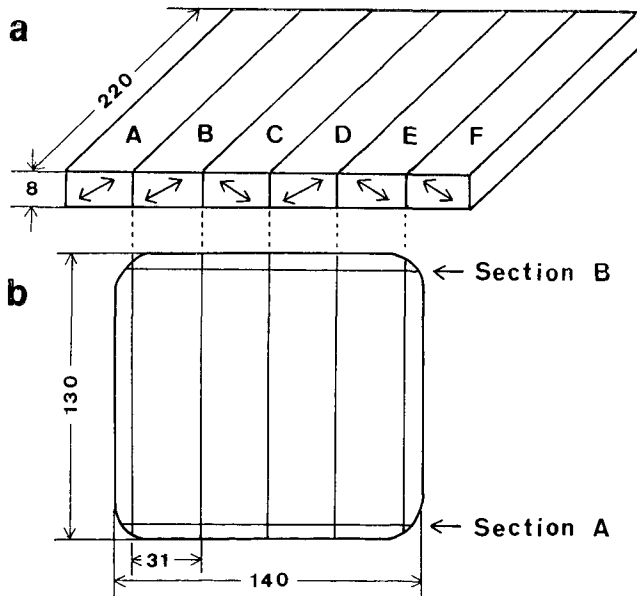
II. 観察試料および方法

観察試料には以下の 2 つの海水を用いた。

i) 海水の内部構造—特にブライン細胞およびブライン排出路—を観察するという目的から、海水の結晶粒が大きく、ブライン排出路が形成される位置が予測できる¹⁰⁾ という理由で、結晶方位の既知な純氷を種氷として、実験室で成長させた海水を観察に用いた。種氷および海水の作成法の主要な手順は、既に報告したもの¹¹⁾ と同じである。

種氷は厚さ 8 mm、幅 31 mm、長さ約 220 mm の板状のものを 6 枚平行に並べて凍着させて、海水に浮かべ、それから海水を成長させた。種氷の結晶主軸 (c 軸) 方位は種氷の板の長軸と直交し、かつ水平面からある角度だけ傾むいている (第 1 図 a)。種氷 A から F の c 軸の水平面からの傾き角はそれぞれ 36° , 36° , -34° , 32° , -36° , -36° (反時計廻りを正とする) となっている。

ii) 一方, i) の海水と比較するため, 種氷を用いず低温実験室内で成長させた海水も試料として用いた。



第 1 図 種氷の配置と結晶主軸方位および試料断面の模式図

(a) 種氷の見取図 (矢印は結晶主軸方位)

(b) 観察試料上面図

いずれの海水も実験室内の水槽（高さ 85 cm, 口径 50 cm, 底の直径 42 cm の円筒ポリエチレン製容器）の中で、一定速度 (1 mm/h) で成長させた。海水が厚さ約 90 mm になった時、これを回収し、断面積 140×130 mm に切断した。数日後これをドライアイスとともに発泡スチロール製の断熱箱の中に入れ、CT スキャナで水平断面および鉛直断面の像を得た。

観察に用いた CT スキャナ (横河メディカルシステム社製 CT 8600) は、北海道立紋別病院で通常業務として稼動中のものである。CT スキャナは技術的進歩に応じて X 線

管、検出器の数およびこれらの運動方式を異にし⁸⁾、現在第 4 世代まで存在する。ここでの装置は第 3 世代と呼ばれるものである。第 1 表に用いた CT スキャナの主な諸元を示す。画素寸法は試料 i), ii) でそれぞれ 1.0×1.0 mm および 0.8×0.8 mm であった。

撮影間隔はいずれも装置の X 線ビームの厚さの最小値である 2 mm とした。試料 i) は厚さ約 92 mm で、そのうち種水の部分は 5 mm であった。表面下の 5 mm 層から固液界面 (底面) より約 10 mm 層まで 39 層の水平断面の像を得た。また水平断面で観察されたブライン排出路の中心付近と、試料の縁付近の計 20 層の鉛直断面の像を撮影した。厚さ約 88 mm の試料 ii) では、表面下 2 mm の層から底面より約 10 mm まで、39 層の水平断面と、やはりブライン排出路がみられた箇所付近と縁付近の計 19 層の鉛直断面の像を得た。

CT スキャナで得た像を従来からの方法による断面像と比較するために、第 1 図 (b) に示した縁から約 7 mm の A, B 断面において鉛直断面を作成した。さらに残った部分 (従って CT スキャナによって得られた像より鉛直断面用の部分が欠落している) を水平に 7.5 mm おきに切断し、これらの表面を鉋で削り、厚さ 5 mm に仕上げた (これを厚片とよぶ)。それを黒い布の上におき斜上から光を当て、試料からの散乱光を観察した。さらに結晶粒界を確認するために偏光においても観察した。

III. 観察結果

CT スキャナによって得られた像 (CT 像) は、次式で定義される CT 値 (N) を濃淡で表現したものである。

$$N = \frac{\mu_s - \mu_w}{\mu_w} \times 1000 \quad (1)$$

ここで μ_s , μ_w はそれぞれ物質および水の X 線吸収係数である。 N は空気では -1000, 水では 0 となり、骨緻密質では 1000 付近の値となる⁸⁾。 μ_s の値は同じ物質であれば、物質の状態に無関係で密度に比例するため、氷では $\mu_s = 0.92 \mu_w$ となり、氷の CT 値は -80 となる。海水観察

第 1 表 CT スキャナの主な諸元

X 線管:	GE 社製 Maxiray 100-CT
X 線検出方式:	キセノンガス封入電離箱方式
検出素子数:	511 個 (測定用)+6 個 (補正用)
スキャン方式:	扇状ビーム 360 度連続回転方式
スキャン時間:	3.5~11.5 秒
画像再構成 マトリクス数:	320×320
X 線ビーム の厚さ:	2 mm, 5 mm, 10 mm
画素寸法:	0.13×0.13~1.3×1.3 mm
CT 値範囲:	-1024~3071
画像計算時間:	4~10 秒
空間分解能:	1 mm
処理方法:	逆投影法

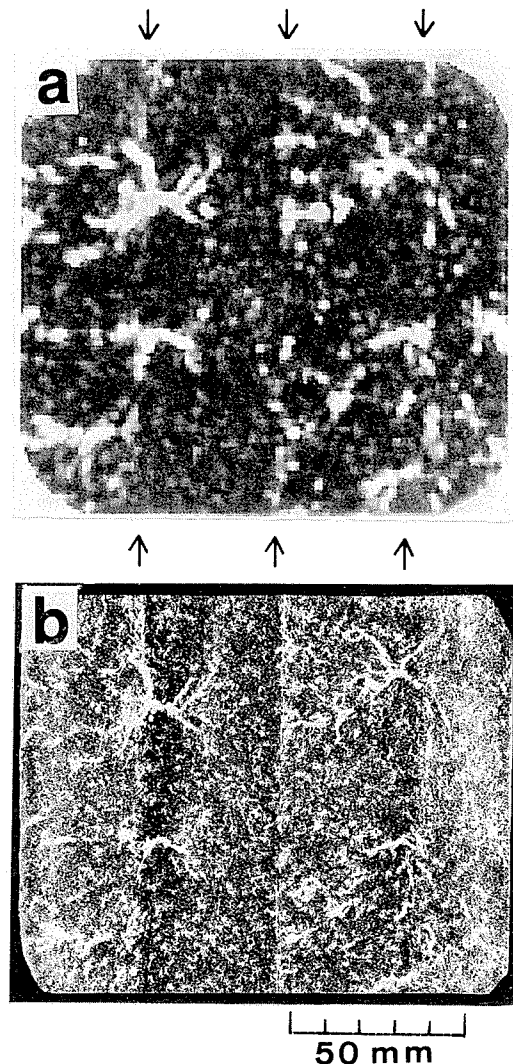
時に 15, 30, 45‰ の海水の CT 値も実測した。それらの値はそれぞれ 19, 44, 67 と濃度の増加とともに増大した。

CT 像上に表現される CT 値の中心値(レベルという)と上下の広がり(ウィンドウという)とは任意に変え得る。ここではレベルを -150, ウィンドウを 500 に設定して最も解像度の高い像を得た。この設定値では -400~100 の範囲の CT 値を 256 階調の濃淡として表現される。-400 以下および 100 以上の CT 値のものはそれぞれ -400, 100 に丸められる。CT 像では X 線の吸収(従って CT 値)が大きくなるに従い、黒から白くなるように表わされている。それがフィルムの形で得られる。しかし、この論文で示した図では、途中の操作による分解能の低下を防ぐため、X 線フィルムを反転したものを示した。従って、海水では、X 線の吸収の大きい氷の实质部分が黒く、吸収の小さい空隙でブライン細胞またはブライン排出路に相当する部分は白く表現されている。

第 2 図 (a) に試料 i) の表面から 23 mm 層の水平断面の CT 像を示す。第 1 図 (a) に示した種氷の c 軸方位とその配置からブライン排出路は種氷の B・C および D・E の結晶粒界に顕われることが予想される¹⁰⁾。図の左上および右上の部分の顕著なブライン排出路をはじめいくつかの排出路が、それらの結晶粒界に近い線上にみられる。

さらにブライン細胞や気胞による孤立した空隙も見られる。結晶粒界 B・C, C・D, D・E は、種氷の幅は全て 31 mm 間隔であったが、海水の成長にともなう優先成長のため、種氷 C, D がそれぞれ B, E に侵入し、結晶粒界は図の上下の矢印をつなぐ線上に移動していた(C と D はほぼ同じ優先度のため結晶粒界の移動はない)。B・C と C・D の結晶粒界に相当する所にブライン細胞の分布の模様の違いによる縦の線がうっすらと見られる。

第 2 図 (b) は (a) に対応する深さでの厚片を散乱光で観察した写真である。(a) と (b) とを比較すると極めて類似していることが分かる。CT スキャナの空間分解能が



第 2 図 海水試料 i) の水平断面像(深さは表面より 23 mm)

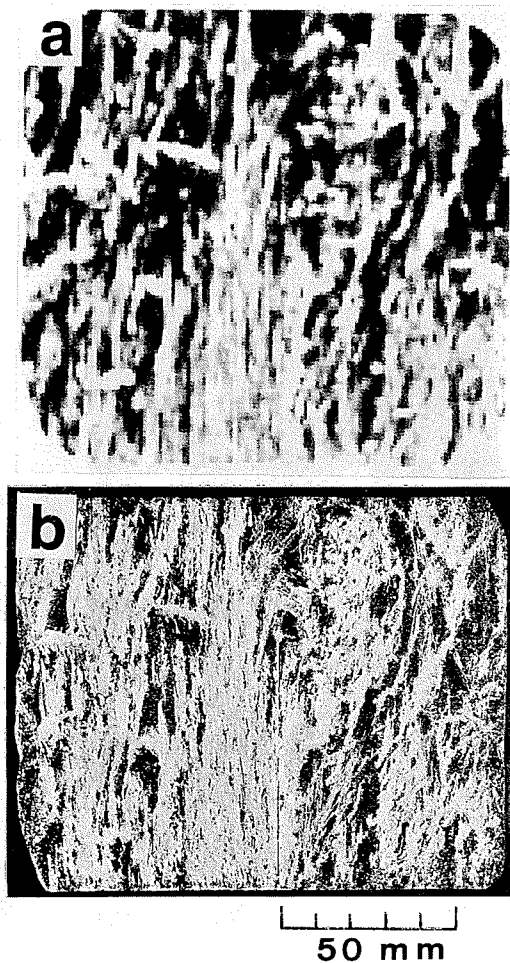
(a) CT 像, (b) 厚片の散乱光写真

1 mm のため、(b) のごく細部については幾分像が欠落している部分もあるが、かなり細かい構造まで CT 像に写ることが分かった。

ブライン排出路は、種氷—海氷の界面の直下の水平断面に既にみられている。そして第 2 図に見られるように樹木状の形をなし、枝の形を少しずつ変えながら下層の方まで成長しているが、底面に近づくにつれて空隙の多い構造となるため、ブライン排出路の形は定かでなくなる。その変化の様子は 7.5 mm おきの厚片と比較して、2 mm おきに得られた CT 像では詳細に追跡することができた。

第 3 図 (a) に試料 i) の底面から約 15 mm の水平断面の CT 像を示す。また第 3 図 (b) は対応する深さの厚片の散乱光写真である。これまた両者はかなり細部まで極めて一致した像が得られた。この試料では、第 1 図 (a) に示したように、全ての種氷の c 軸が試料の上下の辺に平行であるので、 c 軸に鉛直に延びる純水の薄板の列は縦に並ぶことになる。いくつも見られる白い縦の太い線は、薄板の間のブライン細胞、または氷回収の時点でブラインが落下してできた空隙を示している。底面に近い空隙の占める面積が多くなっている。CT 値の度数分布においても、この層から下では、上の層とは異なった分布をしていた。図の右半分は種氷以外の、外から侵入した異結晶、または新たに発生した結晶が入り込んでいた。それに対応して白い縦の線は乱されている。左半分においても一部に短い横の白い線が見られる。これも異結晶のためではあるが、CT 像でも明確にとらえられている。

第 4 図 (a) には試料 i) の鉛直断面の CT 像を示す。第 1 図 (b) の A 断面を手前から観察したものである。第 4 図 (b) には対応の鉛直断面の厚片を、結晶粒界とブライン排出路とを同時に観察するために、偏光を一部かけて（上下の偏光板を消光位置より 45° 回転させた）撮った写真である。前に述べたように、種氷 C、D から成長した海氷は、それぞれ B、E からのものに侵入している。また下層では種氷の外部から侵入したか、または新たに発生した異結晶が成長している。この面では顕著なブラ

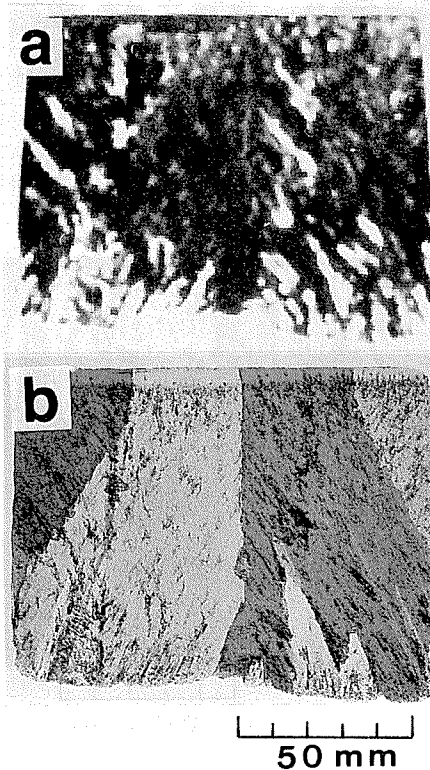


第 3 図 海氷試料 i) の水平断面像（深さは底面より約 15 mm）

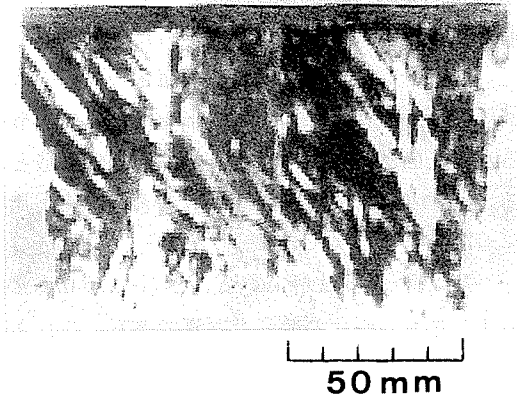
(a) CT 像, (b) 厚片の散乱光写真

イン排出路は現われていない。しかし第4図(a)の左側にはブライン排出路の中心らしき部分および枝の一部が、また右側には枝の一部がみられる。さらに下層の空隙の多い構造も現われており、薄板にそって空隙が存在していることが分かる。薄板にそうブライン細胞の並びもよく見られ、その並びの方向の違いから結晶粒界も分かる。特に中央の結晶粒界にはブライン細胞か気泡による空隙が明瞭に見られる。純水からなる種氷の中の気泡（種氷作成時に入ってしまったもの）の像も写っている。

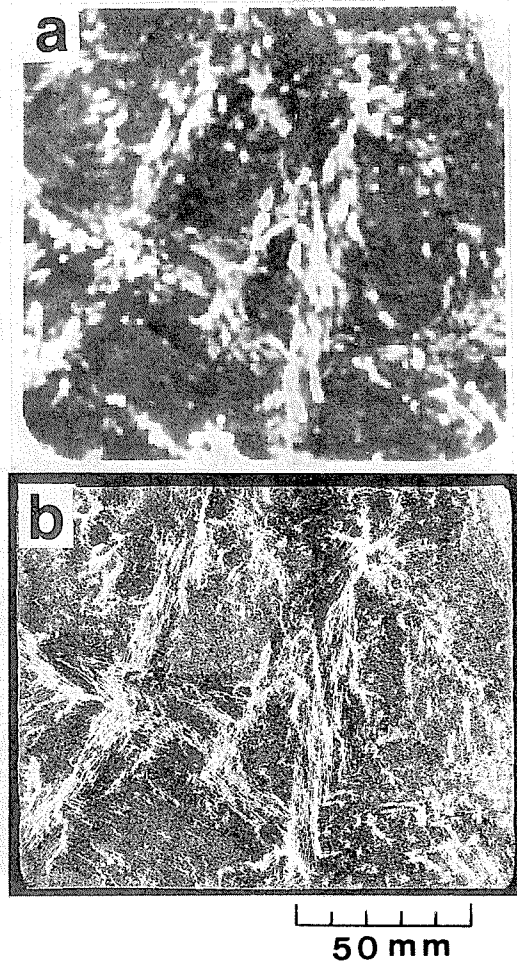
第5図は第2図の左上の顕著なブライン排出路の中心を通る線の鉛直断面をやはり手前側から見たCT像である。従って右上のブライン排出路の中心は少しずれてい



第4図 海水試料 i) の鉛直断面像
(a) CT 像, (b) 厚片の“半偏光”写真

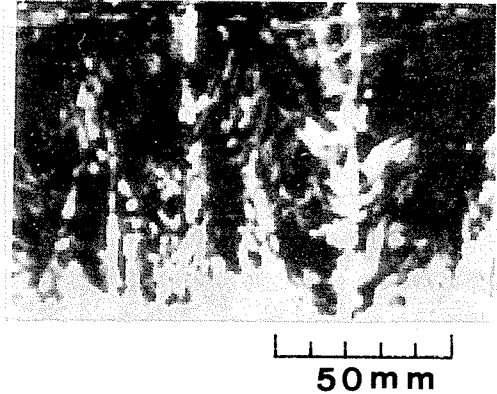


第5図 海水試料 i) の鉛直断面 CT 像



第6図 海水試料 ii) の水平断面像（深さは表面より 50 mm）
(a) CT 像, (b) 厚片の散乱光写真

る。両方のブライン排出路の幹および枝にあたる部分がこの鉛直断面にもよく表われている。枝は薄板の方向と一致している。また下層は空隙が多いとともに、空隙の形がかなり乱されていることが分かる。さらに、この図でも中央の結晶粒界がはっきりと見られる。ただ種氷 C から成長した海氷の薄板の配列は右上から左下への斜の方向であるにもかかわらず、逆方向に走るブライン排出路に当るものが見られる。これは新たに発生した異結晶によるのかも知れない。この図に対する厚片写真は、試料の中央部分のため得ることはできない。注目地点の水平断面と鉛直断面（しかも任意方向の）とを同時に得ることができるのが、CT スキャナの長所である。



第7図 海氷試料 ii) の鉛直断面 CT 像

第6図(a), (b)には試料 ii) の表面より 50 mm の水平断面の CT 像およびそれに対応する深さの厚片の散乱光写真を示す。図の右上にブライン排出路がみられる。薄板間のブライン細胞の列は CT 像では、その分解能のため一列ごとには見えないが、概ねよく表われている。同様に他の層についても、ブライン排出路、ブライン細胞列がよく表現されており、対応の厚片写真との一致も極めて良い。

第7図に第6図の右上の顕著なブライン排出路の中心を通る線で切断した鉛直断面の CT 像を示す。注目したブライン排出路ばかりでなく、もう一つの排出路も中心が少しはずれて見られる。この図には表面近くに水平方向に白い線が見られる。これは表面の細かな結晶粒からいわゆる海氷構造に移る層においてブラインまたは気泡が取り込まれたものであろうと思われる。

CT 像で観察して海氷の実質部分であると思われる箇所の CT 値は -50 付近の値を示した。この部分が氷の理論値 (-80) よりも大きな値を示すのは、氷と海水 (ブライン) とが共存しているためであることが分かる。ブライン排出路の中央付近の CT 値は -500 前後となった。下層のブラインが落下してできた空隙の部分は、 -900 付近の値を持つものもあった。空気の CT 値は -1000 であるので、ピクセル全体が完全に空隙となっているものではなく、氷と空気とが共存している状態であることを示している。もし水と空気のみから成るとすると、CT 値から各ピクセルでの氷と空気の比率が分かり、密度も知ることができる。このことから極地のコアサンプルの密度測定にも応用ができるのではないかとと思われる。

IV. 結 論

2つの海氷試料の水平断面および鉛直断面の CT 像を 2 mm おきに得、それらと従来からの海氷の内部構造の観察法とを比較した。その結果、CT 像にはブライン細胞の列およびブライン排出路、下層の空隙、さらに気泡も見ることができ、従来からの方法とも極めて良い一致

を示した。このことから、X線 CT スキャナは海氷の内部構造の観察において、試料を破壊することなく行なうことができることから、極めて有力な手段であることが分かった。

近年 CT スキャナは医療用ばかりでなく、セラミックス、プラスチック、金属等を対象とした産業用のものも実用化され、分解能の向上、撮像時間の短縮等が図られている⁹⁾。また X 線の他、 γ 線、中性子線、プロトン、超音波、核磁気共鳴などを用いたものも開発されている。このため適当な組合せのものを利用すれば、海氷ばかりでなく他の地球物理学的試料の内部構造の観察にも適用できるものと思われる。また、ここでは海氷を引き上げた後の試料を観察に用いているが、海氷成長用の水槽を装置の中に設置できれば成長中のブラインの挙動をも観察できるのではないかと期待される。

この研究を遂行するにあたり、CT スキャナは北海道立紋別病院で通常業務として稼動中のものを使用させていただいた。同装置の使用を御許可いただいた同病院院長・鳥居豊博士ならびに同装置使用の際、操作していただいた同病院放射線科・安部喜幸科長に心から感謝致します。

画像データのフロッピーディスクからの読み出しに際して、その記録方式を御教示いただいた横河メディカルシステム(株)に感謝の意を表します。

計算の一部は北大大型計算機センターを利用した。

文 献

- 1) 田畑忠司 1977 海氷. 海洋物理 IV. 東京大学出版会, 323 pp.
- 2) Untersteiner, N. 1968 Natural desalination and equilibrium salinity profile of perennial sea ice. *J. Geophys. Res.*, **73**, 4, 1251-1257.
- 3) Lake, R. A. and Lewis, E. L. 1970 Salt rejection by sea ice during growth. *J. Geophys. Res.*, **75**, 3, 583-597.
- 4) 斎藤 隆・小野延雄 1980 海氷の透水性 II. —新生氷におけるブライン排出路—. 低温科学, 物理篇, **39**, 127-132.
- 5) 田畑忠司・小野延雄 1957 海氷の構造について. 低温科学, 物理篇, **16**, 197-201.
- 6) Sinha, N. K. 1977 Technique for studying structure of sea ice. *J. Glaciol.*, **18**, 79, 315-323.
- 7) Hounsfield, G. N. 1973 Computerized transverse axial scanning (tomography): Part 1. Description of Systems. *British J. Radiology*, **46**, 1016-1022.
- 8) 有水 昇 1982 CT スキャン検査 I. 新内科学大系, 追補第 2 巻, 中山書店, 287 pp.
- 9) 中村滋男 1984 産業用 X 線 CT スキャナとその適用. 計装, **27**, 2, 48-51.
- 10) Wakatsuchi, M. and Kawamura, T. 1986 Formation processes of brine drainage channels of sea ice. *J. Geophys. Res.*, in press.
- 11) Kawamura, T. 1986 A method for growing large single crystals of sea ice. *J. Glaciol.*, **32**, 111, 302-303.

Summary

Sea ice has a complex crystal structure, e.g. thin layers of brine and brine channels. The internal structure of sea ice has been studied commonly using thin sections sliced horizontally or vertically at selected intervals from sea ice specimens. However, because the method invariably results in the destruction of the samples, it is not possible to determine the

mechanical properties of the ice that has been structurally characterized. In order to overcome these difficulties non-destructive observations of the internal structure of sea ice were made with X-ray computed tomography (CT scanner).

In the present study we used sea ice specimens grown experimentally, the one from seed ice whose crystallographic orientations were known and the other using no seed ice. When sea ice was grown up to the thickness of approximately 90 mm at a constant growth rate of 1 mm/hr, it was removed and then cut vertically to a cross-sectional area of 140×130 mm. An insulation box in which the specimen was packed with dry ice was mounted on the CT scanner operated for medical treatment.

Horizontal CT images of 39 layers were obtained at intervals of 2 mm from both specimens. Horizontal CT images of the upper part of the ice layers were shown in Figs. 2 (a) and 6 (a), in which the X-ray absorption rate is indicated by the degree of shading. Characteristic brine channel patterns are clearly identifiable in the figures. A noticeable increase in the light areas corresponding cavities is clearly seen in Fig. 3 (a), showing that the lower portion of the sea ice specimen is extremely porous. Figures 2 (b), 3 (b) and 6 (b) illustrate the corresponding photographs, taken by the conventional method, of horizontal sections at the same depth as Figs. of (a). It is clearly shown that CT images represent the internal structure of sea ice in great accuracy. Vertical CT images of 20 layers were also taken at the same intervals as the horizontal. Brine channels were evidently observed to grow vertically and brine layers included between pure ice platelets were obviously recognized (Figs. 5 and 7 of vertical CT images). Some of the brine layers were connected with the brine channels and formed the tributary tubes of the main channels.

The results demonstrate that the CT scanner is useful in examining the internal structure of sea ice, in which the CT scanner can reveal many characteristic sea ice features without destroying the test specimen.