



Title	河口周辺の海水の塩分量および結晶構造と氷下の水塊の関係（序報）
Author(s)	青田, 昌秋; AOTA, Masaaki; 白澤, 邦男 他
Citation	低温科学. 物理篇, 47, 197-211
Issue Date	1989-03-10
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18575
Type	departmental bulletin paper
File Information	47_p197-211.pdf



河口周辺の海水の塩分量および結晶構造と 氷下の水塊の関係 (序報)^{*,**}

青田昌秋・白澤邦男・石川正雄

(低温科学研究所)

R. Grant Ingram

(マギル大学気象学研究室)

(昭和63年11月受理)

I. はじめに

河口周辺の海水下には、下層の高塩分水と海水底面の間に、河川からの真水の層(ブルーム)が拡がり、水塊の二重構造が形成される。このため、海水直下に顕著な水温、塩分躍層、密度躍層が形成される。海水下の水塊の水温、塩分、密度、日射量さらに流れの構造などの特異な物理現象の変動は、生物環境に大きな影響を与える。

海水が存在すると、風波の影響が少なく、海水の鉛直混合が低下すること、海水底面の摩擦による海水の水平流動の抑制などのために、河口付近の河川水の分布は、海水の存在しない暖候期とは著しく異なってくる。

著者らの一人、Ingram¹⁾は、ハドソン湾南東域の Great Whale River 河口付近の海水下のブルーム(河川系水塊)の分布状態を調べ、暖候期に較べ、河川水の流入量は減少しているにもかかわらず、ブルームの厚さ、面積とも増大していると述べている。

1988年4~5月、海洋物理—生物—水産学の学際的研究計画が McGill 大学、Laval 大学、カナダ海洋漁業省の協同行なわれ、北大流氷研究施設もこの計画に参加した。北大—McGill 大は同海域の河口周辺海水下の水塊構造、海水の結晶構造および海水の塩分量の予備的観測を行った。

海水中の塩分量は、母体の海水の塩分量、成長速度、その後の、ブライン落下などによって多少変化する。しかしながら、海水の結晶構造は、結氷当時の成長速度、その下面に接する海水の塩分量を反映していると考えられる。すなわち、海水の結晶構造は、その結氷時点の水塊の性質を示す“化石”であろうという観点から、海水の結氷構造の観測と塩分量の測定を行った。ここでは、その予備的観測の結果について報告する。

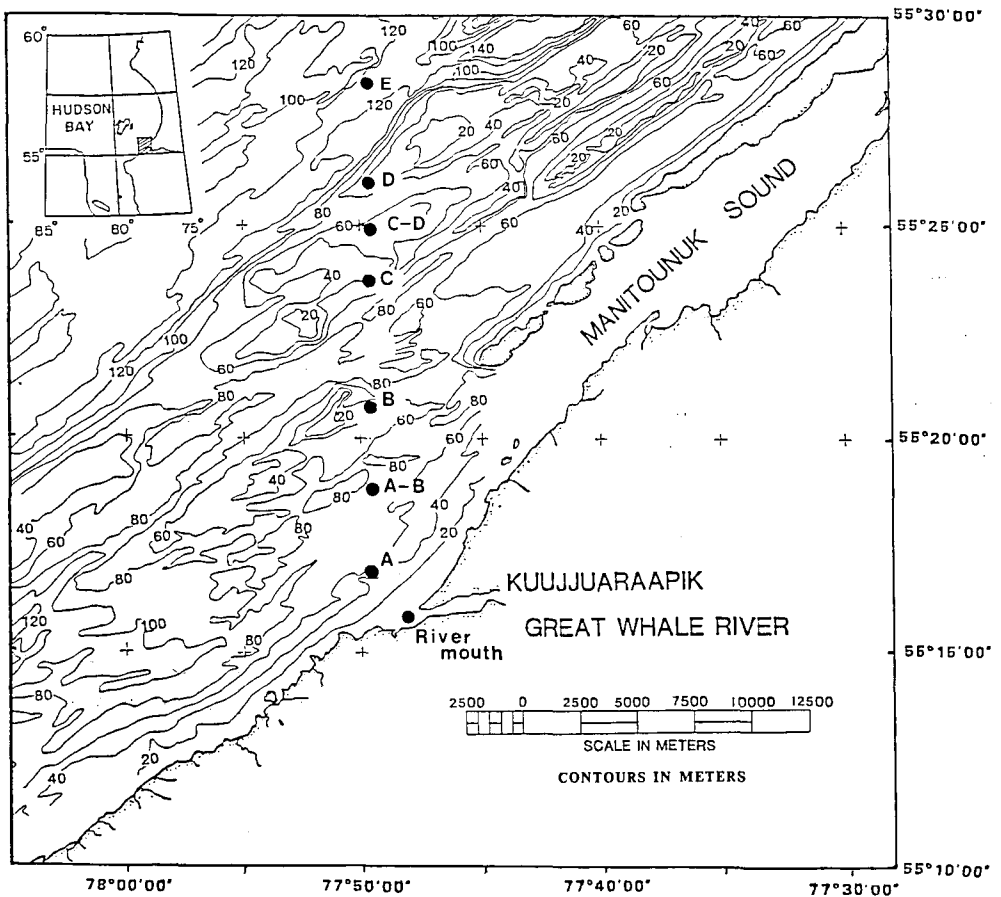
* 北海道大学低温科学研究所業績 第3190号

** 北大低温科学研究所附属流氷研究施設研究報告 第126号

II. 観測海域

海水の採集および水塊構造の観測は、1988年4月15～5月4日、ハドソン湾南東海域、Great Whale River 河口から西径77度50分の線上、北緯55度15分～55度26分の約25 km間の8点で行った。第1図に観測海域の海底地形図と海水採集、水下の水温、塩分の観測点を示す。

1988年3月以降の、この海域の気温は、平年に較べ著しく温暖で、観測を行った4月下旬には、平年より約1カ月早く、海水の融解期に入っていた。したがって、観測時期は、この年の最大氷厚時で、氷厚は110～120 cm、表面の約10 cmが氷雪あるいは積雪で覆われていた。



第1図 観測海域。Hudson Bay 南東海域、Great Whale River の河口北方8点の観測位置を黒丸で示す

III. 観測・測定方法

海水資料の採集は、第1図の河口 (River Mouth Station) で1988年4月15日、沖合で4月24～25日に行なった。採氷方法は、CRREL型海水コア・サンプラー (コア・ドリル) を用いて、手動で行った。融解期に近かったため、氷柱が破壊、切断するため、結晶軸の方向

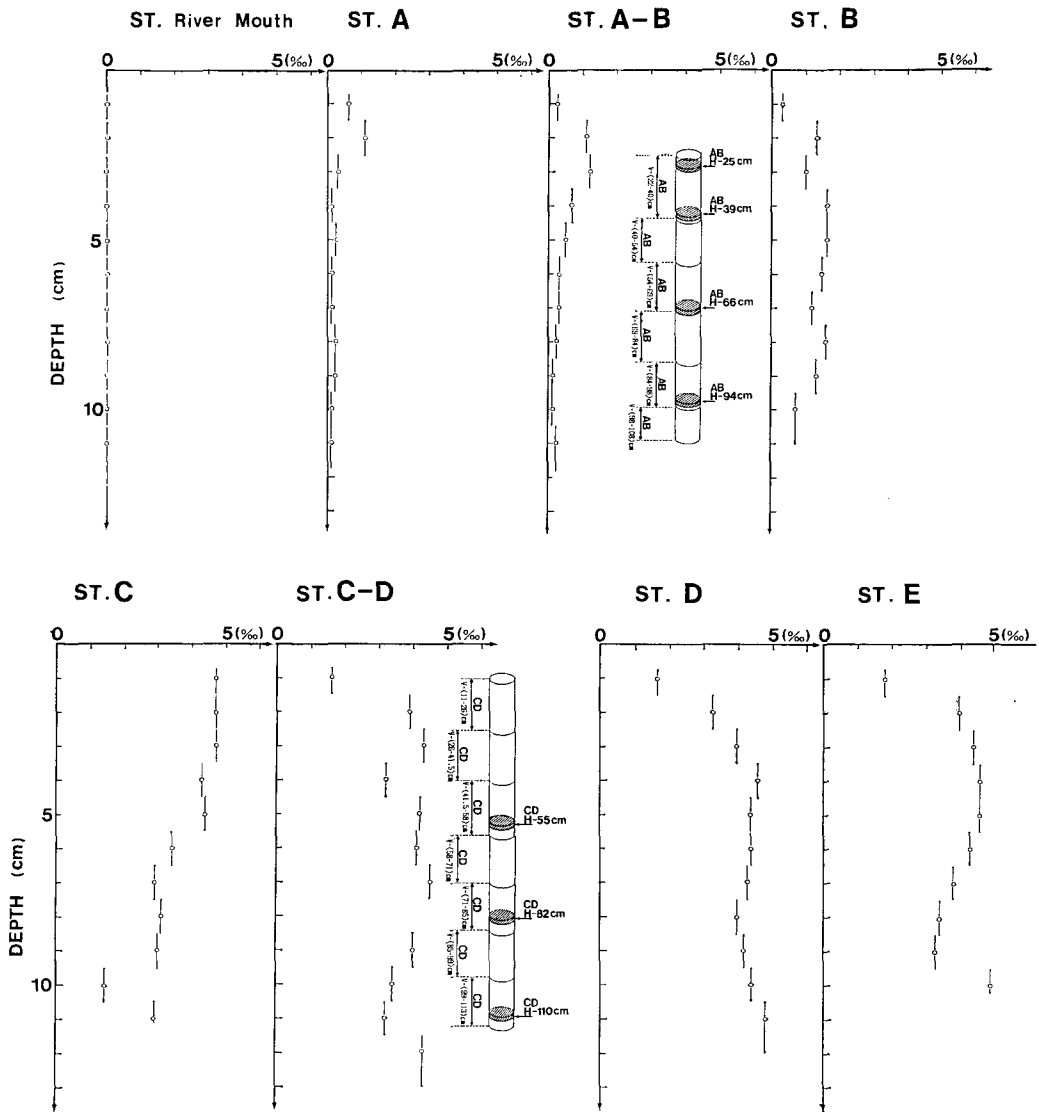
に関する測定は断念せざるを得なかった。

また各観測点で、CTD プロファイラー (Sea-Bird 社製 Model SBE19 SEACAT PROFILER) による氷下の水温、塩分の測定を行なった。

資料は、各観測点で2本ずつ、海水面から厚さ約120 cmの氷底面までの全層を採集した。

塩分検定用には、採氷後直ちに表層の積雪を除き、各10 cmの長さに切断し、ポリエチレンの袋に収納し、観測基地の実験室に持ち帰り、融かして、完全に室温に達してから、塩分量を測定した。使用した塩分計はSOLOMAT MPM 2009で、測定精度は0.1‰である。

結晶構造観測用の資料は、採氷現場で、円筒型ポリエチレン袋に納め、塩化ビニール製パ



第2図 海水の塩分量の鉛直分布。ST. A-B, ST. C-D には結晶構造用の結晶資料の配置を示す

イプに入れて、実験室へ持ち帰り、冷凍庫に保存した後、ドライ・アイスとともにアイスボックスに入れ、北大流水研究施設に輸送した。当施設低温実験室において、水平、垂直断面の薄片を製作、偏向写真を撮った。今回の予備観測では、都合により、全資料の日本への輸送が困難であったため、結晶構造に関してはその一部しか解析できなかった。結晶構造の解析には、第1図の St. A-B, St. C-D の2測点の資料について行なった。

IV. 海水の塩分量と結晶構造

1. 海水の塩分量

第2図に、第1図に示した各測点の海水の表層から各10cm毎の塩分量の鉛直分布を示す。

なお、同図中、St. A-B, St. C-D では塩分量の鉛直分布と同時に、結晶構造観察のための資料とした薄片の位置と符号を示した。

2. 海水の結晶構造

第3-1, 3-2図に、St. A-B の、氷の表面下22~108cmの結晶構造の鉛直断面と、25, 39, 66および94cm層の水平断面の偏向写真を示す。

また、第4-1, 4-2, 4-3図には、St. C-D の11~113cm層の鉛直断面、55, 82, 110cm層の水平断面図を示す。各写真に示した結晶の位置は、第2図 St. A-B, St. C-D の塩分分布図中に示してある。

なお、鉛直断面の写真中の白い矢印は、その左側の水平断面図の位置を示す。

V. 気温と河川流量の季節変動

1. Great Whale River 地域の気温変動と氷厚の推定

第5図に、Great Whale River 河口に近いカナダ大気環境庁・気象観測所による1987年12月から1988年4月21日までの日平均気温の変化を示す。氷厚は、結氷開始後の、海水の結氷温度を基準とする積算温度に比例する。すなわち、結氷開始時を時間の原点として、時刻を t (日)、日平均気温を $T(t)$ ($^{\circ}\text{C}$)、結氷温度を T_0 ($^{\circ}\text{C}$) とし、比例定数を α とすると、氷厚 $I(t)$ (cm) は、

$$I(t) = \alpha \sqrt{\int_{t_1}^{t_2} |T(t) - T_0| \cdot t dt} \quad (1)$$

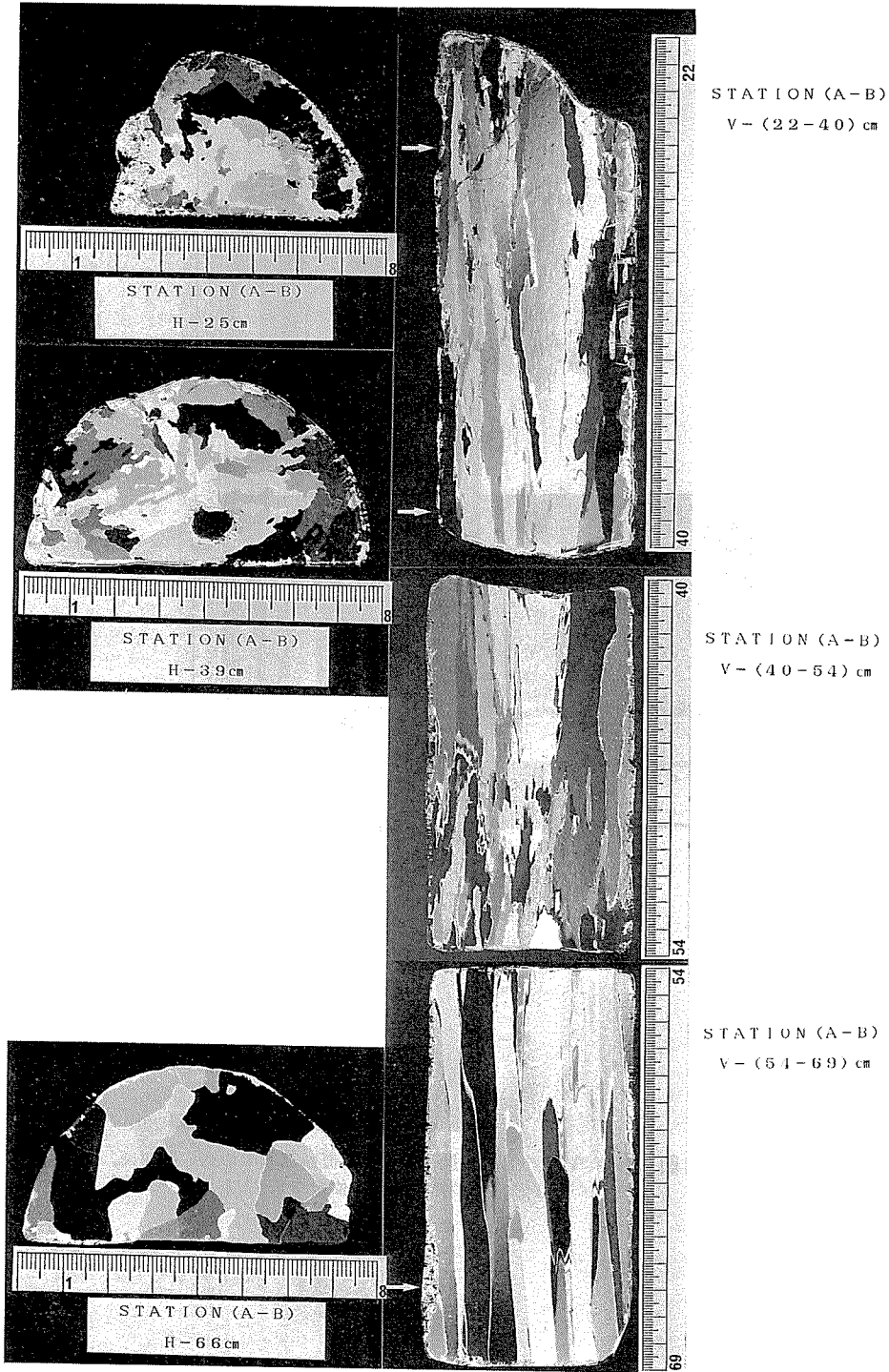
で表わされる。

前記気象観測所による目視観測によると、この沿岸の結氷開始日は1987年12月13日であった。また1988年4月21日全観測点の平均氷厚は112cmであった。第5図に示した日平均気温から得られる、結氷開始時から1988年4月21日までの積算寒度と氷厚の実測値から、比例定数 α を求めると、 $\alpha = 2.3$ となる。

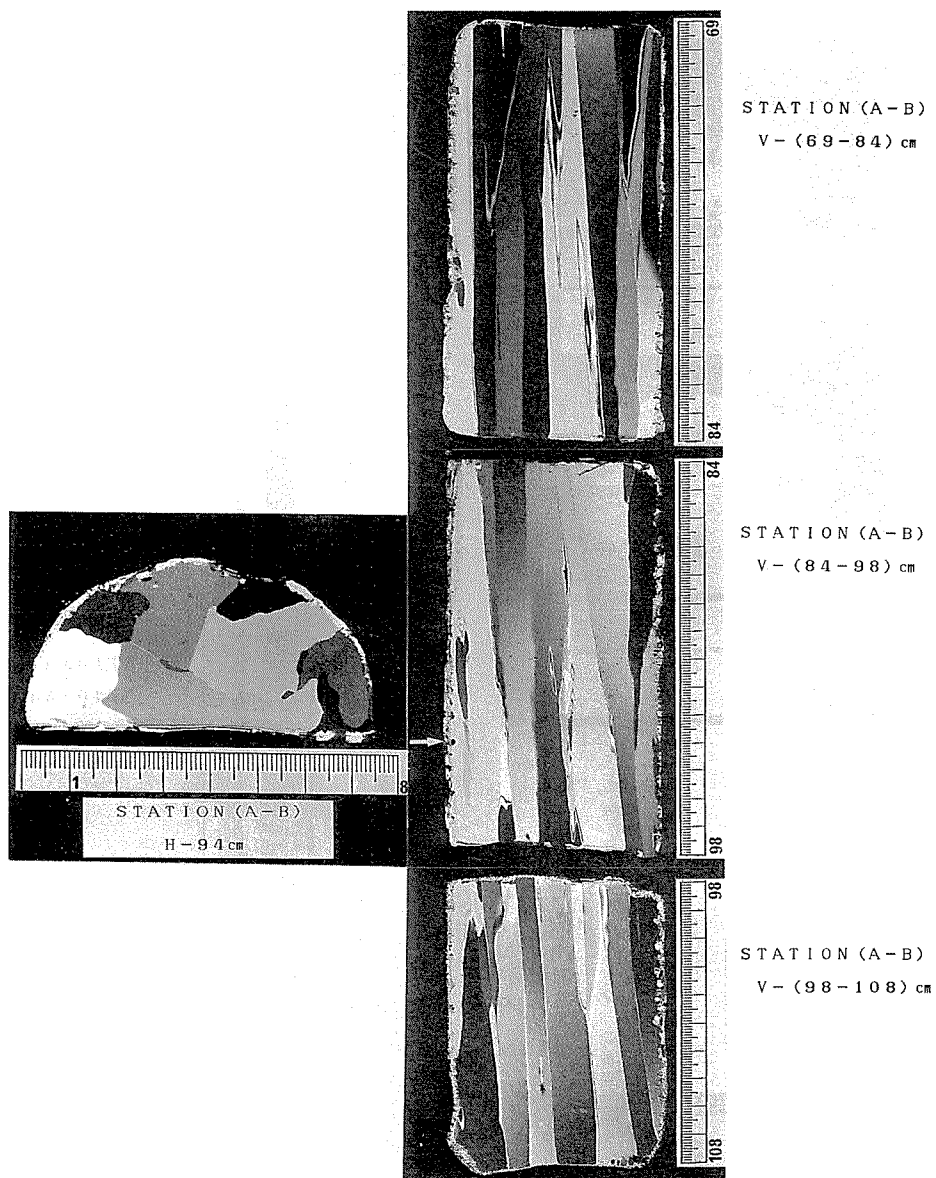
第5図には、式(1)で $\alpha = 2.3$ として、日平均気温から推定される氷厚の変化も同時に示した。これによって、海水各層のおおよその生成時期が推定される。

2. Great Whale River の河川流量の季節変動

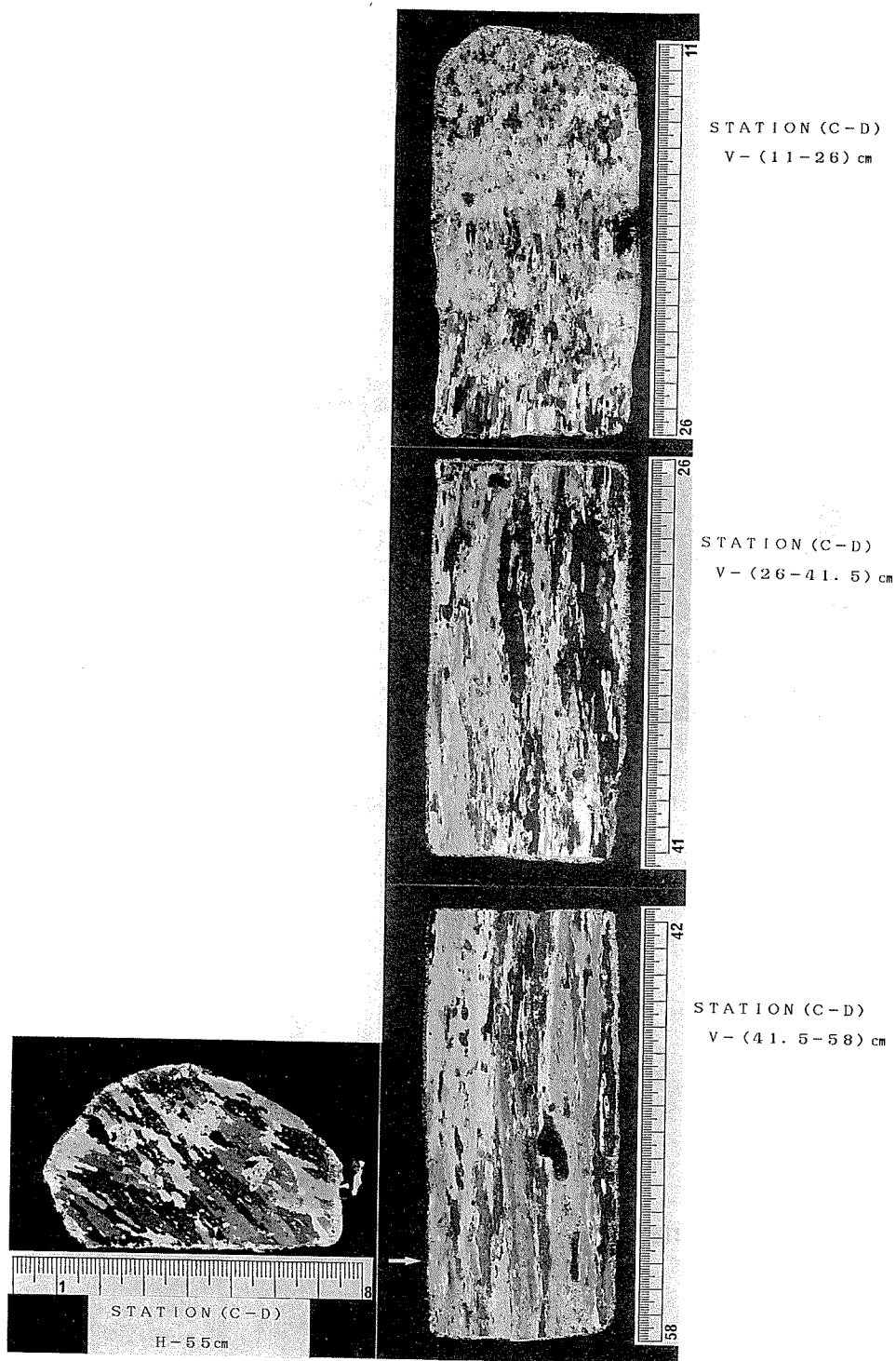
海水の塩分量を支配するものの一つは、海水成長時それに接している海水の塩分量である。



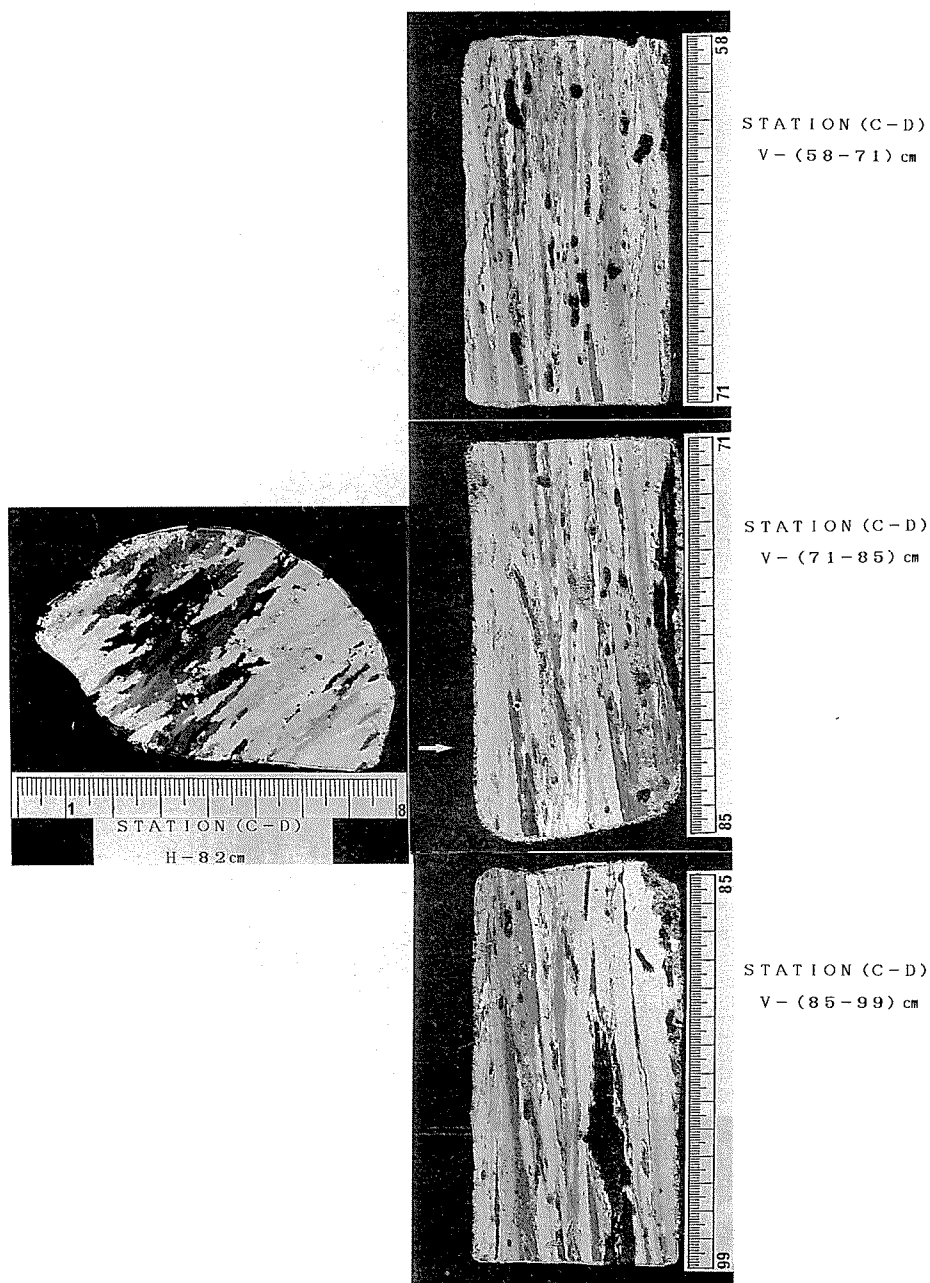
第3-1図 ST. A-Bの海水の結晶構造。垂直断面図中の白い矢印は、左側の水平断面図の結晶資料の位置を示す



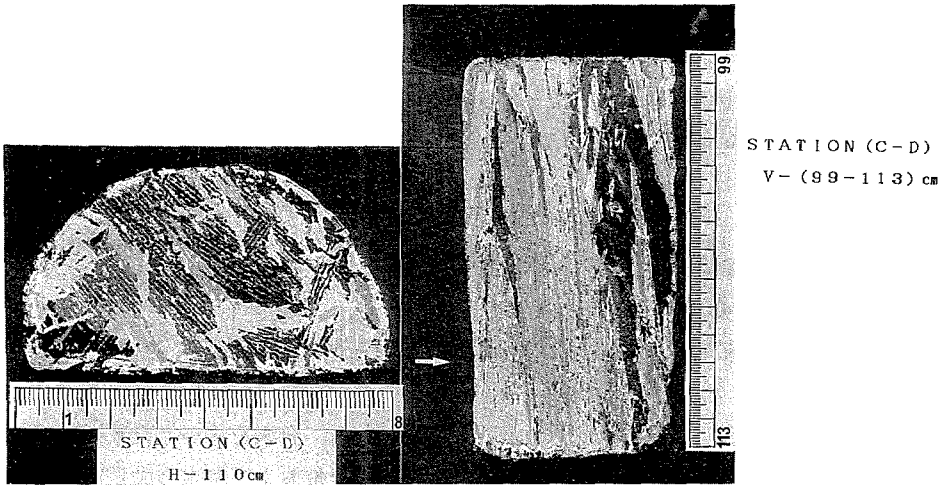
第3—2図 ST. A-Bの海氷の結晶構造。垂直断面図中の白い矢印は、左側の水平断面図の結晶資料の位置を示す



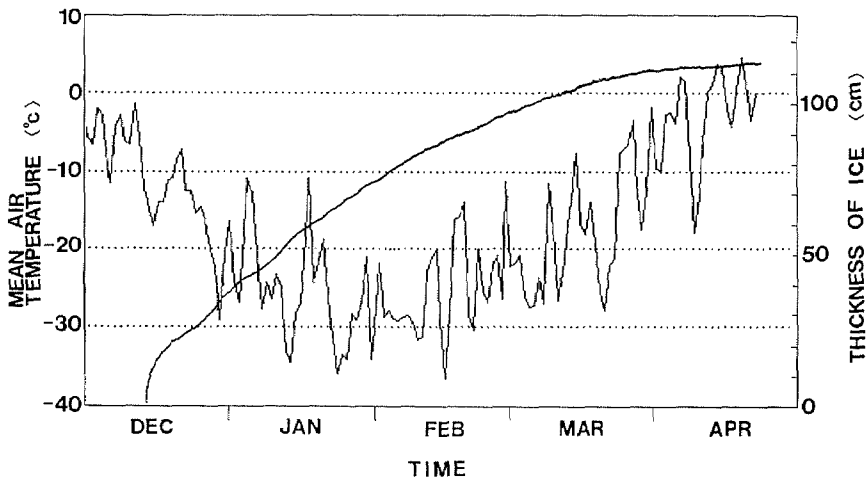
第4-1図 ST. C-Dの海水の結晶構造。垂直断面図中の白い矢印は、左側の水平断面図の結晶資料の位置を示す



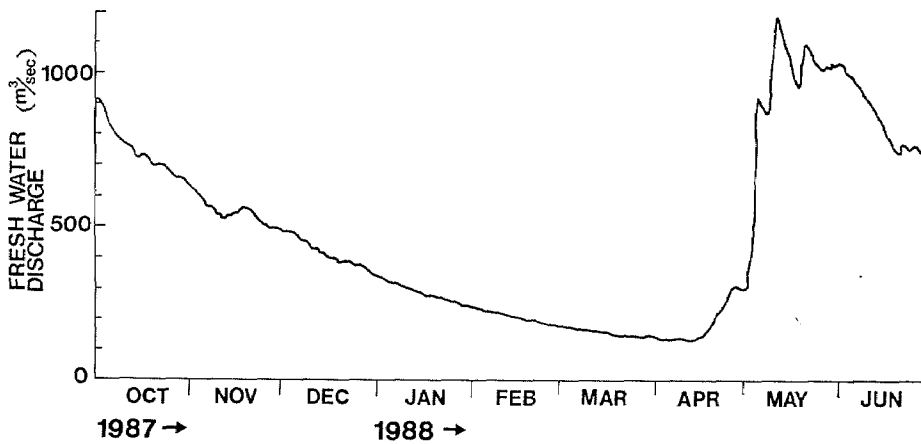
第4-2図 ST. C-Dの海水の結晶構造。垂直断面図中の白い矢印は、左側の水平断面図の結晶資料の位置を示す



第4-3図 ST. C-Dの海氷の結晶構造。垂直断面図中の白い矢印は、左側の水平断面図の結晶資料の位置を示す



第5図 Great Whale River 河口周辺の日平均気温の変動 (1987年12月1日～1988年4月21日)。図中の実線は積算寒度から求めた推定氷厚である



第6図 Great Whale River の流量の変動 (1987年10月1日～1988年6月28日)

また、後に述べるように、その母体である水塊が、海水であるか河川水(真水)であるかによって、できる結晶構造は異なってくる。

ここでは、結晶生成の背景としてケベック州環境局による、Great Whale River の1987年10月から1988年6月28日までの流量変動を示す(第6図)。

VI. 考 察

1. 海水の塩分量鉛直分布と氷下の水塊構造

1.1 海水の塩分量鉛直分布

海水は、主に生成時の海水中の真水の部分が凍結したものであるが、結晶の間に、気泡や海水中の塩類(ブライン)が閉じ込められる。

したがって、海水の融解水は多少の塩分を含んでいる。海水を溶かした水の塩分量を“海水の塩分量”という。この値は、それを生じた海水の塩分量および海水の成長速度に支配される。また表面付近、すなわち、結氷初期の海水では、波など海の状態にも関係する。

Weeks^{2,3)}によると、海水の塩分量は、もとの海水の塩分量および氷の成長速度に比例する。一方、海水の氷厚の増加速度は、気温が一定ならば、氷厚に反比例する。すなわち、海水の塩分量、気温が一定とすると、海水の塩分量は氷が厚くなるほど小さくなっていく。しかし、実際の気温は、例えば第5図に見るように一定ではなく、結氷開始から、気温は降下して、厳冬期の最低気温を経て、それ以降再び上昇して融解期に至る。このため、一般の海洋の一年氷の塩分量の鉛直分布はアルファベットのCのような形になる^{4,5)}。

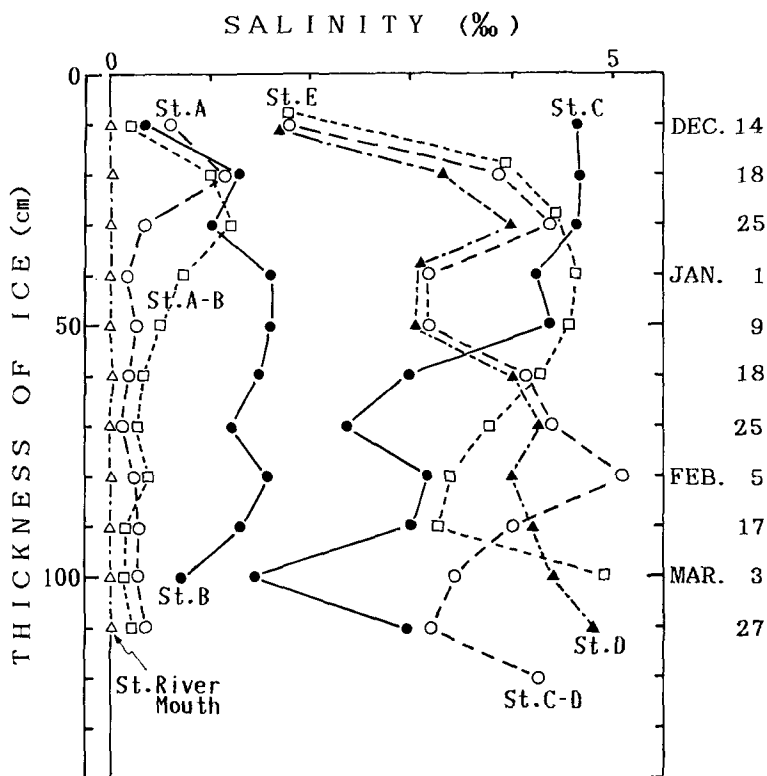
第2図の塩分の鉛直分布をみると、ほぼ等しい気象条件下の海域でありながら、海水の塩分量は測点によって著しく異なっている。また、塩分の鉛直分布の形も一様ではない。

第7図は、第2図の塩分鉛直分布を同一図面上に表わしたものである。図右側縦軸には、第5図に示した、Great Whale River 河口近くの日平均気温から推定した、各層の結氷時期を示す。

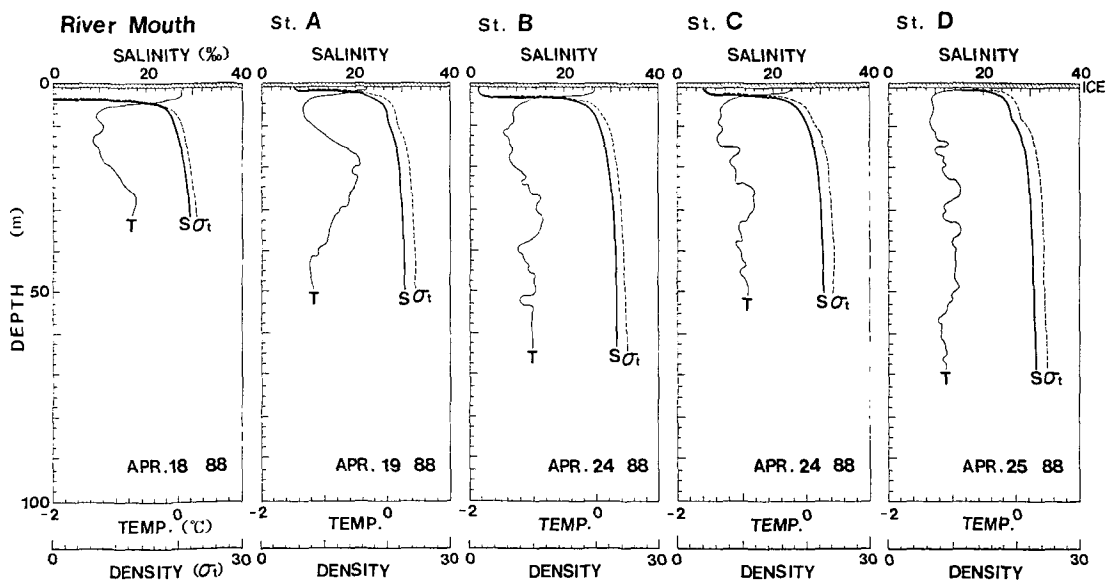
第7図で、河口、すなわち、St. River Mouth では、表層から底層の110 cm まで塩分はほぼ0である。

St. A, St. A-B と沖合になるに従って、全層的に塩分は若干増加している。鉛直方向に注目すると、12月18日ころまでに成長したと推定される20 cm 層までは、St. A, St. A-B, St. B もほぼ等しい塩分量であるが、それ以後、St. A では40 cm 層以深、St. A-B では60 cm 層以深で塩分量は減少し、0.5% 以下の一定値を示し、その沖合のSt. B とは著しく異なっている。また第7図において、St. B を境に、その沖側(St. C, St. C-D, St. D, St. E)の塩分量は、岸側の測点に較べて著しく大となっている。第5図に示す氷厚増加曲線から、40 cm 層以深の海水が生成されたと考えられる1月以降の海水の成長速度の変化はゆるやかであることが分かる。にもかかわらず、40 cm 層以深の塩分量およびその鉛直分布の形は、各測点で著しく異なっている。

観測範囲は、沿岸定着水域であり、氷厚がある程度成長してからの、氷塊の移動はあまり考えられない。従って、第7図に示した測点(同一氷厚の塩分量の海域による差)および時期(同一海域の海水の塩分量の厚さによる差)による海水の塩分量の著しい相違は、主に、成長時



第7図 海水の塩分量の鉛直分布。第2図に示す全測点の塩分量の鉛直分布をまとめたものである



第8図 Great Whale River 河口沖の氷下の水塊構造

の氷下の水塊の相違によるものと考えざるを得ない。

1.2 氷下の水塊構造

第8図に4月18~25日の時点で行なった、氷下の水塊の水溫、塩分量の鉛直分布およびそれから求めた水塊の密度の鉛直分布を示す。全測点とも、水深数m以深には、30‰内外の高塩分水が存在しているが、氷下1~2mには水溫、塩分の顕著な躍層が認められる。この層は同時に密度躍層でもあり、下層に較べて著しい低塩分水が、氷下に安定した状態で広がっていることを示している。St. River Mouthでは、この氷下の低塩分水層の厚さは3m、塩分量は0である。沖合いのSt. A, B, Cでは、この厚さはやや薄くなっているが、塩分量は2~7‰に増加している。最も沖合いのSt. Dでは、この厚さはさらに薄く1m以下となり、塩分量はかなり高塩化して15‰以上である。

この水溫、塩分の観測時は融解期に近い4月下旬以後であるため、この氷下の水塊は多少は海水の融解の影響も受けていると考えられる。しかしながら、測点毎の氷下の低塩分水層の厚さの相違は、これからだけでは説明できない。これは主にこの時点の河川水の広がりを示しているといえよう。

1.3 海水の塩分分布についての解釈

著者らの一人、Ingram¹⁾やIngram and Larouche⁶⁾によると、Great Whale Riverからの河川水のプルームの分布は、年によって放射状、舌状と変化し、一様ではないが、プルームの面積は河川水の流量に支配されている。さらに、彼らは、河川水による低塩分水層の厚さ、広さとも、暖候期よりも結氷期に著しく、これは氷板の存在によるものと述べている。気象擾乱、内部波、海潮流等による、氷直下の低塩分水と下方の高塩分水との混合も考えられる。

しかしながら、氷板形成後は開氷期に較べて水塊の上下混合はより抑制されること、海水の成長はゆるやかであり、その塩分量はかなり長時間の平均的値であること、対象海域が広範囲でないこと等から、第7図の海水の塩分の場所、時期による相違は、プルームの分布の影響の方が支配的でなかろうかと考える。

今回の観測は、河口から北へ向かう一直線上の8点、距離25kmに限られている。そのため、プルームの二次元的分布については議論できないが、第7図から以下のことが推察される。すなわち、a) 結氷初期(12月中旬(第7図参照))には、第6図に示すように、河川の流量も多く、プルームはSt. Cを除く、全測点の氷下に流入していた。St. Cのみは他と異なるが、プルームの広がりが、河口を中心とする放射状ではなく、曲んだ舌状の分布をしていたものと考えられることもできる。b) 12月下旬以後、各測点よも、河川水の減少あるいは上下混合の発達によって、氷下に比較的高塩分水が存在していた時期が1月上旬まで続いた。c) プルームの影響は1月中旬以降、St. A, St. A-B, St. Bに強く表われているが、沖合いの測点、St. C, St. C-D, St. D, St. Eでは比較的弱くなっている。つまり、1月中旬以後のプルームの主な分布域は、岸からSt. Bまでといえる。d) 沖合いの測点の1月中旬以降(氷厚50cm以深)の塩分量の相違から、プルームの広がりは、定常ではなく、かなり位置の変動を起こしているものと考えられる。

2. 海水の結晶構造と氷下の水塊

海水が凍った海水と真水の氷とは結晶構造が異なる。水平断面で見る海水の結晶構造は、

厚さ 0.2~0.8 mm の薄い短冊状の氷板が、本のように重なりあっており、一枚一枚の結晶板の間には円形のブラインが並んで閉じ込められている。この一方向に並んだ結晶板の一群を結晶粒 (grain) と呼ぶ。海氷は、この結晶粒の集合体である。

この本を立てたような結晶粒は、鉛直下方にくさび状に伸びていく。一方、真水の氷の結晶は単純で、ブラインの列も存在しない。そのため、結晶構造を見ることによって、結氷時の水塊が海水であるか否かの推定が可能である。

第 3-1, 3-2 図には St. A-B, 第 4-1~4-3 図には St. C-D の氷の水平および垂直断面の偏向写真を示した。まず、沖合の測点 St. C-D の結晶構造は、11 cm 層から底層 110 cm 層の全垂直断面 (V-(11-26)~V-(98-112)) にみるように、海氷独自のくさび状の結晶成長をしており、詳細に見ると、縦に並んだブライン空隙、気泡も認められる。また 55 (H-55), 82 (H-82), 110 (H-110) 層の水平断面でみると、この海域の氷が、海水の凍結によるものであることがさらに明らかとなる。すなわち、海氷の結氷に独特な、短冊構造、ブライン列が明らかに認められる。

一方、河口に近い St. A-B の構造をみよう。20 cm 層から 54 cm 層の垂直断面の結晶はやはりくさび状の伸びかたをしており、25 cm 層 (H-25), および 39 cm 層 (H-39) の水平断面も海氷独自の結晶構造に近い模様である。しかし、その下層の 54~69 cm 層の垂直断面 (V-(54-69)) および 66 cm 層の水平断面 (H-66) にみるように、ともに結晶構造は単純で、個々の結晶も大きくなっている。

以上の結晶構造の特徴と第 7 図海氷図の塩分量の鉛直分布を比較すると、St. A-B の表面側 50 cm 以浅の海水の塩分は、その下層に較べて大きく、下層が 0.5‰ 以下の低塩分となっていることとよく対応している。また、沖合の測点 St. C-D は、10 cm 層で 1.7‰、その下では 3~4‰ のかなりの高塩分であり、全層の結晶構造が海氷型であることとよく一致している。

さきに述べたように、海氷の塩分量は、その海水の塩分量、成長速度によって変化する。また、結氷後ブラインの脱落も伴い、一定不変ではない。しかしながら結晶構造は、生成当時の形状をほぼ保存し続けていると考えられる。

すなわち、海氷の結晶構造は、その生成時点の水塊構造をしめす“化石”と考えることができよう。これによって、結氷期の各時期の氷下のブルームの分布およびその変動を検知することが可能であろう。

VII. おわりに

ハドソン湾南東海域の河口周辺の海水の塩分量と結晶構造との関係について予備的観測を行なった。その結果、海氷中の塩分量の分布と河川からのブルームの分布がよく対応していること、さらに、海水の結晶構造から結氷時点の氷下の水塊についての知見が得られること、いしかえると、結晶構造は水塊の化石と考えることができることについて報告した。

現在、低温室内実験において、段階的に塩分濃度を変えた海水から海水をつくり、如何なる塩分濃度を境に海氷型—淡水型の結晶構造の変化が生じるかを定量的に実験、観察中である。この結果を野外観測にも適用して、河口周辺の水塊構造の時間的変動の推定、氷下生物環

境の変化について研究を進めていきたいと考えている。

謝 辞

本研究は、McGill 大学—Laval 大学—Maurice Lamontagne Institute (カナダ海洋漁業省) による協同研究計画の一端を担うものである。現場観測に当たっては、上記各機関の多大な御協力、御援助をいただいた。

とくに、現場観測に御協力いただいた McGill 大学の P. Peltola, M. Cloutier の両氏、データ整理に御協力いただいた流氷研究施設の皆様に併せてお礼申し上げます。

この調査に要した経費は、Natural Sciences and Engineering Research Council Canada, FCAR (カナダ), Donner Canadian Foundation (カナダ), 流氷研究施設外国地域観測旅費 (文部省) によった。

文 献

- 1) Ingram, R. G. 1981 Characteristics of the Great Whale River plume. *J. Geophys. Res.*, **86** (C3), 2017-2023.
- 2) Weeks, W. F. and Lofgren, G. 1967 The effective solute distribution coefficient during the freezing of NaCl solutions. In *Physics of Snow and Ice. Part I*, (H. Oura ed.), *Inst. of Low Temp. Sci.*, Sapporo, 579-597.
- 3) Weeks, W. F. and Lofgren, G. 1967 The effective solute distribution coefficient during the freezing of salt solutions. *CRREL Res. Rept.*, 200.
- 4) Weeks, W. F. and Lee, O. S. 1958 Observation on the physical properties of sea ice at Hopedale, Labrador. *Arctic*, **11**, 134-155.
- 5) Schwarzscher, W. 1959 Pack-ice studies in the Arctic ocean. *J. Geophys. Res.*, **64**, 2357-2367.
- 6) Ingram, R. G. and Larouche, P. 1987 Variability of an under-ice river plume in Hudson Bay. *J. Geophys. Res.*, **92** (C9), 9541-9547.

Summary

Observations were made of the salinity and the crystallographical structure of landfast ice at eight stations up to 25 km offshore along the axis of the fresh water plume of the Great Whale River in the southeast Hudson Bay during April, 1988 (Figure 1). Two ice cores about 120 cm long were taken at each station using a CRREL core sampler. One core was used to make a thin section of ice. The other was used to measure the salinity of each 10 cm long section cut from the whole core; after it was melted, the salinity of each section was measured by a salinometer (Solomat MPM 2009) with an accuracy of 0.1‰ (Figure 2). Figures 3-1 and 3-2 show horizontal sections at the depths of 25, 39, 66 and 94 cm from the ice surface and vertical sections at the depths from 22 to 108 cm from the surface of the ice core obtained at station A-B. Meanwhile, Figures 4-1, 4-2 and 4-3 show horizontal sections at the depths of 55, 82 and 110 cm from the surface and vertical sections at depths from 11 to 113 cm from the surface of the ice core obtained at station C-D.

The salinity and the crystallographic structure of ice are strongly related to atmospheric and oceanic conditions at the time of ice formation on the basis of the records of air temperature and the amount of discharge available at local meteorological and hydrological stations. The ice thickness was estimated by using equation (1),

$$I(t) = \alpha \sqrt{\int_{t_1}^{t_2} |T(t) - T_0| t dt} \quad (1)$$

where $I(t)$ is the ice thickness, α is a proportional constant, $T(t)$ is the daily mean air temperature, and T_0 is the freezing point of sea water. Air temperature was recorded at a meteorological station near the river mouth. Figure 5 shows time series of ice thickness and of the daily mean air temperature from December, 1987, to April, 1988.

The salinity and the crystallographic structure of ice were strongly related to water salinity at the time of ice formation. Upper layer salinities in the study region are mainly controlled by the isohaline distribution of the fresh water plume of the Great Whale River, i. e., river discharge strength (Figure 6).

Figure 7 shows the salinity of ice as a function of ice thickness and time. It is suggested that the water salinity at the time of ice formation changed significantly by late December; salinity at stations A, A-B and B was fresher in December, and salinity at stations C, C-D, D and E was salty in December.