

* 名古屋大学水圏科学研究所 〒464-01 名古屋市千種区不老町

1 はじめに

永久凍土地帯はカナダ北部、アラスカ、シベリアおよびチベットなどに広く分布している。これらの永久凍土地帯でも、夏には地表面は融解する。この夏に融解する地表近くの層を活動層と呼ぶ。この活動層には、凍土が水を通さないため、凍土の融水や降水が蓄えられる。このため、一般的には永久凍土地帯でも植生が見られる。

永久凍土地帯では、前回[1] 報告したように、ツンドラ構造土（地表の模様）、ピンゴ（析出水体の生成によりできた丘）、アラス（氷体の融解によりできた凹地）、アイスウェッジ（凍土中にくさびを打ち込む形にできた氷体）や、地下集塊氷を有するなだらかな丘、などの特有の地形が見られる。これら特有の地形の生成過程や水の起源については、地下集塊氷を除けば、ほぼ説明されたものと考えて良い状況にある。しかし、地下集塊氷については、ピンゴと同じ析出水説[2-4]（土が凍結するとき、そこの土中水分のみならず、凍結線に向かって下方の未凍土からの水分までもが移動してきて析出水ができる。その結果、氷体は上部から下部へと成長し、地面が盛り上がる）がこれまで有力であったが、疑問が続出してきた[5-9]。

1984年以来、北極域カナダ西部のマッケンジー・デルタ地帯にある地下集塊氷の生成過程や水の起源を気候変動と関連づけて研究を行っている。氷体およびその上に乗っている堆積物（表土と凍土）にボーリングしてえられたコアを主に扱っている。前回報告[1] したように、極微量の炭素試料で ^{14}C 年代測定が可能なタンテドロン加速器質量分析装置により、氷コア中から見い出された少量の泥質堆積物の ^{14}C 年代が測定され、世界で初めて凍土地帯の氷体に年代が刻み込まれた[1, 10-11]。その年代が氷体の最下部で 17000yrBP頃、中程で 14000yrBP 頃（表2 参照）という予想外の結果であったことを受けて、現在最も注目を集めているのはその氷体自体の生成年代である。

そこで、氷コア試料のみならず、地下集塊氷の上に乗っている堆積物や貝殻などについてもタンテドロン加速器質量分析装置を用いて ^{14}C 年代測定を行い、地下集塊氷の生成過程や水の起源について探求した。

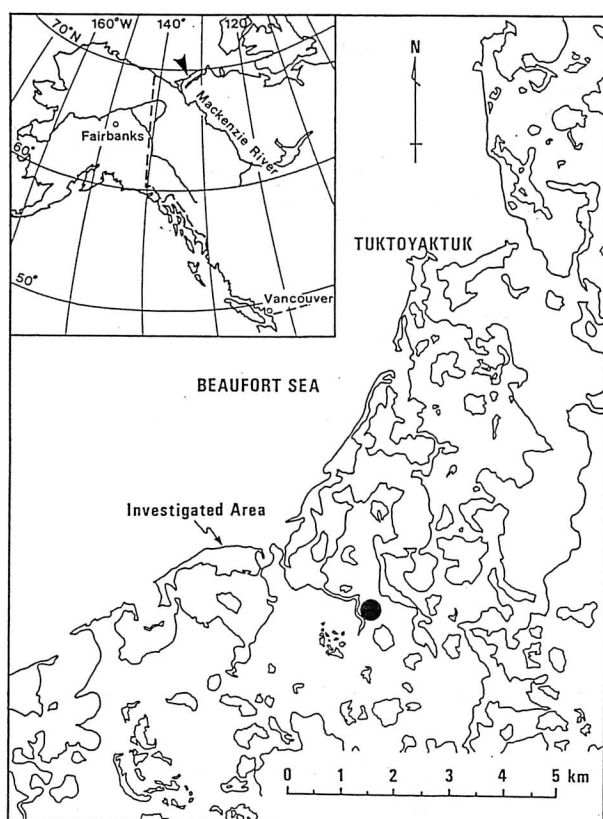


図1 北極域カナダ西部のマッケンジー・デルタ地帯の調査地域 (●: イブークピング)

Fig. 1 Location map of Mackenzie Delta, Western Arctic Canada (●: Ibyuk Pingo).

2 研究方法

2-1 試料

研究対象とした地下集塊氷は、図1に示すように、カナダ、ノースウェスト準州 (Northwest Territory) 西部のボーフォート海に面したマッケンジー・デルタ地帯、 $69^{\circ}22'N$ 、 $133^{\circ}07'W$ に位置している。この氷体に乗っている堆積物の厚さは10mに及ぶ所もある。活動層 (表土) の厚さは、50~70cm程度である。

図2におけるW-3地点で表土、凍土および氷体を貫通したボーリングを行った。およそ1mの表土と凍土の堆積物コアとおよそ21mの氷コアをえた。氷コア中には、図3に示すような泥質堆積物層が幾つか見い出された。これらのなかで3mg以上の炭素量がえられた3試料と、堆積物コア中から見い出された小枝2試料については前回[1]報告した。今回は氷コアの最下部に存在した氷河底

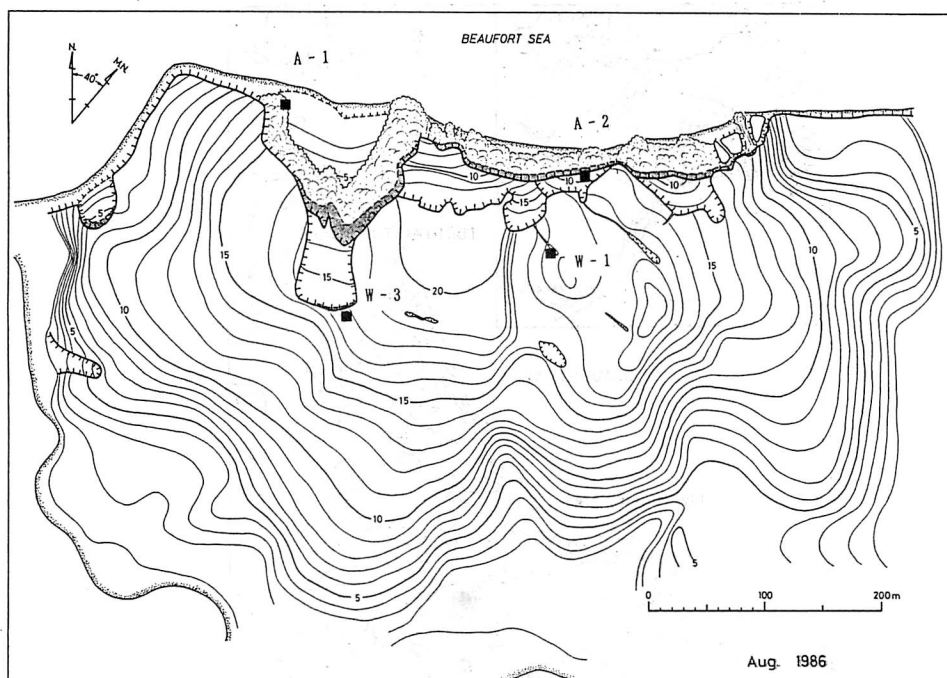


図2 ボーリング地点(W)と試料採取地点(A)
Fig. 2 Boring sites(W) and sampling sites(A).

部の流水により良く sortingされた砂試料の ^{14}C 年代測定を行った。

さらに、W-1地点からえたおよそ1.5mの堆積物コアからの凍土2試料、およそ10mの厚さの堆積物最下層部の凍土(A-1地点)2試料、ならびに淡水性の非常に薄い貝殻(A-2地点)1試料についても ^{14}C 年代測定を実施した。

2-2 年代測定

加速器質量分析装置による ^{14}C 年代測定を行うには、すべての試料を元素態炭素にする必要がある。その前処理は、Nakai et al. [12]と Tans et al. [13]の方法により行った。えられた3~5mgの元素態炭素と高純度の銀を混合してペレット状ターゲットを作成し、1.9MVのターミナル電圧下でタンデム加速器質量分析装置により ^{14}C 計数を行う。

測定年代は ^{14}C 半減期として5570年を用いて計算した。

3 結果と考察

地下集塊氷の生成過程と水の起源については、ピングと同じ析出水説が有力である。対象とした地下集塊氷から3kmほど離れたところに、世界的に有名な

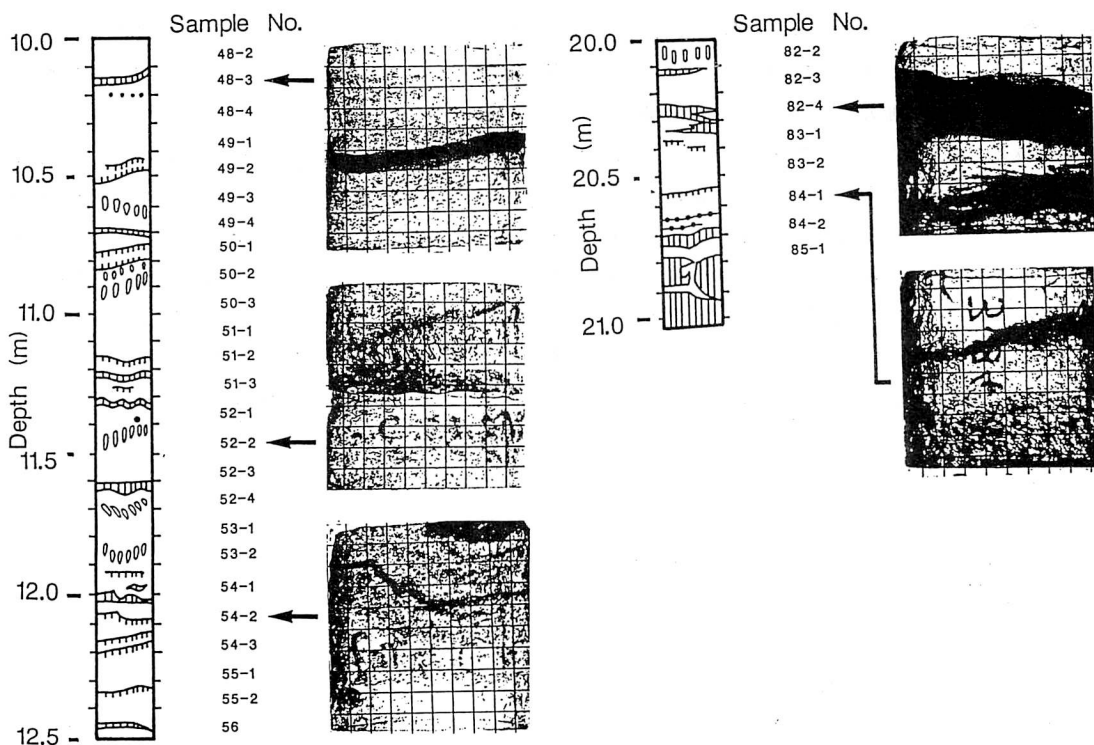


図 3 W-3 氷コアに見られる泥質堆積物層 (20.8m 以下は砂層)
 Fig. 3 Mud layers in W-3 ice core (sand layers below 20.8m).

イブークピンゴがある。このピンゴについては、良く研究が行われている。図 4 にはMuller[14]によるイブークピンゴの断面図を示した。このピンゴ氷体の上には、およそ5.4mの厚さのUnit Aとおよそ8.7mのUnit Bが乗っている。Unit A は主にシルト質粘土からなる氷河性の泥流堆積物で、背後に後退した氷河に

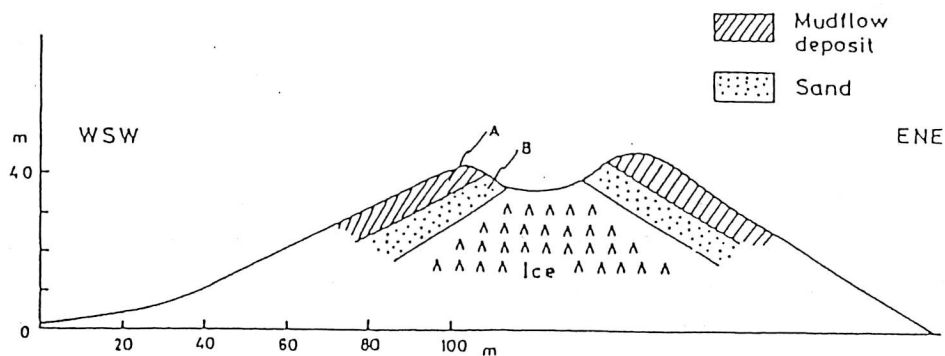


図 4 イブークピンゴの断面図 (Muller[14]による)
 Fig. 4 Cross section of Ibyuk Pingo (After Muller[14]).

由来するものと考えられる。Unit Bは、氷河底部の流水により円磨され、良く sorting された砂層である。これらの堆積物中の有機物、ピート、木片について¹⁴C年代が測定されており、測定年代を表1に示した。

Mackay[15]は、イブークピングについてベンチマーク測量を実施し、1973年～1983年におけるピングの成長（高度の上昇）の速度を求め、その測定結果からこのピングが成長し始めたのはおよそ1500年前であると推定した。このことは、氷体の上に乗っている堆積物中の木片の¹⁴C年代[15-16]から裏付けられる。表1から、堆積物Unit Aの最上部から採取された流木片の年代が1650yrBPであることが分かる。このことは、堆積物の最上部が1650yrBPには湖水面近くの高度にあったことを意味している。したがって、ピングが成長を始めたのは1650yrBP以降であることになり、およそ1500年前であるとするベンチマーク測定結果による推定と良く一致しているのである。

表1 イブークピング堆積物中の有機物、木片の¹⁴C年代[15,16]
Table 1 Radiocarbon dates for materials from Ibyuk Pingo[15,16].

Description	Age (yrBP)	Lab No.
Water-worn twigs from top of Unit A	1650 ± 100	UQ-1067
Water-worn wood 1m below top of Unit A	8625 ± 210	GX-7013
Wood just from base of Unit A	8855 ± 205	GX-7014
Organic matter 1.5m above base of Unit A	12000 ± 300	S-69
Peat 15cm above base of Unit A	17800 ± 260	GSC-481
Peat 5cm above base of Unit A	14130 ± 440	GSC-512
Water-worn wood 60cm below top of Unit B	>42900	GSC-485
Water-worn wood 1.8m below top of Unit B	>37500	GSC-486
Water-worn wood 3.6m below top of Unit B	>26000	Be-49
Water-worn wood 6.3m below top of Unit B	>33000	L-300A

次に、地下集塊氷の W-3地点でボーリングによりえられた、およそ1mの堆積物コアおよび、およそ 21mの氷コア中の堆積物について測定された¹⁴C年代を表2に示した。表土と凍土の堆積物コアと氷コアを通して、下部ほど古い年代を示していることが分かる。氷体の下に位置する、氷河の最下部に存在した、氷河底部の流水によって円磨され、良く sortingされた砂層の年代が最も古い。イブークピングでは、これに相当する砂層は氷体の上に乗っているが、その砂層中の流木の年代（表1）は地下集塊氷の砂層の年代よりもさらに古くなって

いる。したがって、この砂層がかっては氷河の下に存在したことが裏付けられたことになる。

その砂層上に位置している氷体、さらにその上に乗っている堆積物中の小枝の順に年代が若くなっている。したがって、前回の報告[1]でも述べたように、流木ではない木片が取り込まれる以前のおよそ 10000yrBPには、氷体は既に存在したと考えるのに、不自然さは全くないといえる。

表 2 W-3 地点からえられたコアの ^{14}C 年代

Table 2 Radiocarbon dates for materials from W-3 core.

Description	Age (yrBP)
[Sediment core]	
Twig 40cm below top of ground surface	7520 $\pm$ 150
Twig 75cm below top of ground surface	9880 $\pm$ 130
[Ice core]	
Mud 10.2m below top of ice body	14270 $\pm$ 250
Mud 20.2m below top of ice body	17000 $\pm$ 250
Mud 20.5m below top of ice body	17070 $\pm$ 180
Sand 21.0m below top of ice body	25400 $\pm$ 330

しかし、この集塊氷がピングと同じ析出水によって生成したとする観点に立てば、これらの堆積物は元来この氷体の成長（凍結）面付近に存在していたものであり、氷体の成長に伴って取り込まれたものである、ということになる。もしそうならば、この氷体とその上に乗っている堆積物の関係を解明することが不可欠になる。そこで、この氷体の上に乗っている堆積物について ^{14}C 年代測定を実施した。

W-1地点からボーリングによりえられた凍土および A-1地点の10mほどの厚さの堆積物の下部層の凍土について測定した ^{14}C 年代を表3に示した。堆積物の年代は 26000yrBP以上の大変古い年代を示しており、また、両地点において、より新しい堆積物の上により古い堆積物に乗っていることが分かる。したがって、これらの堆積物は再堆積した氷河性堆積物（re-worked till）であると判断される。

他方、表1から分かるように、イブークピングの氷体の上に乗っている堆積物中のレンズ状ピートについても、14130yrBPと17860yrBPの年代[16]が逆転している。その上に乗っていた有機物（Muller[14]によって採取された）の年代は12000yrBPであり、これらピートの年代と逆転していない。しかし、この有

機物の存在については、その後誰も発見できないことから疑問が持たれている[16]。仮にこの年代が間違いでなくても、このような僅かな有機物ならば、ピンゴが生成される以前に、氷河の融解によって氷河やtillの中に存在したものが湖へ運び込まれた可能性が十分ある。また、北極域カナダ東部のBaffin島、Arctic Bayのピート堆積層においても、 $14185 \pm 490\text{yrBP}$ と $16849 \pm 860\text{yrBP}$ の間での逆転が確認されている[17]。

これらのことは、14000yrBP以降の暖かかった時期に、北極域カナダ全体で、氷河の融解水によって堆積していたtillの再移動が大々的に起こったことを示している。この再移動のときに、上に堆積していたtillほど先に削り取られて再堆積したため、re-worked tillでは年代が逆転しているのである。それゆえ、地下集塊氷の氷体中に見い出された堆積物の年代が氷体の最下部で17000yrBP頃、中程で14000yrBP頃と逆転していないことは、逆に氷体中の堆積物がここに堆積していたre-worked tillではないことを示す。

表3 地下集塊氷の上に乗っている堆積物と貝殻の ^{14}C 年代
Table 3 Radiocarbon dates for materials on the massive ice body.

Description	Age (yrBP)
Clay 105cm below ground surface [Site W-1]	33500 ± 980
Clay 130cm below ground surface [Site W-1]	26600 ± 750
Clay 90cm above top of ice body [Site A-1]	38500 ± 1050
Clay 50cm above top of ice body [Site A-1]	33600 ± 660
Shell just above top of ice body [Site A-2]	8570 ± 170

そこで次に、このtillの再堆積が起こった年代が問題となってくる。

W-3 地点のre-worked tillのコアから見い出された小枝の年代(表2)のうち、深度75cmのものはtillの再堆積以来凍土中に存在し続けたものと考えられるので、tillの再堆積のときに持ち込まれたものといえよう。活動層中に存在して、深度40cmの小枝は、tillの再堆積後に生育したものと考えられる。したがって、このtillが再堆積した年代は7500yrBPと10000yrBPの間であることになる。

表3の貝殻は、淡水性のもので、大変薄くもろいもので、1986年8月に既に植生がずり落ちた、崩れかけた崖の上で偶然見つけられた。次に調査を行った1988年8月には、この崖は既に荒波に削り取られて、なくなっていた。この貝殻の年代は8570yrBPであるので、このtillが再堆積したのはそれ以前へと遡ることになる。

他方、イブークピングの氷体に乗っているUnit A (re-worked till) の最上部から1mの深度で見い出された流木の年代が8625yrBPであることは、このときピングの最上部が湖水面近くの高度にあったことを示している。ところが、Unit A の最下部で見い出された木片（流木ではない）は、8855yrBPという年代を示す。この木が、Unit Bの砂層の上に生えていたものであれ、あるいは移動前のtillの上に生えていたものであれ、この木片の年代はtillの再堆積の年代より古いはずである。

したがって、地下集塊氷の氷体の上に乗っているreworked till とピングのUnit Aの再堆積が同時に起こったとすれば、tillの再堆積の年代は8600yrBP～8900yrBP頃になる。

以上に示してきたように、地下集塊氷の氷体の上に乗っている堆積物は、氷体中に見い出された堆積物の年代より大変古く、既に存在した氷体の上に8600yrBP～8900yrBP頃に移動してきたre-worked tillであると判断される。したがって、氷体の最下部で17000yrBP頃、中程で14000yrBP頃という氷体中の堆積物の年代は、reworked tillがその氷体の上に8600yrBP～8900yrBP頃に移動してきたことと、大変整合性が良いのである。いいかえれば、この氷体は、イブークピングのように、この数千年間に生成したものではないと判断できる。

したがって、この地下集塊氷の氷体は下部から上部へと成長したことになり、ピングの氷体のように、上部から下部へと成長する析出水によって生成されたものではないことになり、その生成過程も水の起源もピングのとは異なることが明らかである。このことは、地下集塊氷からえた氷コアに関する、酸素同位体[10,11]や花粉[18]の研究結果とも一致するのである。析出水説では、氷体の上部から下部へ向かって順次大きくなっていく酸素同位体組成の垂直分布の傾向が説明できない。さらに、保存の良い花粉が、泥層からよりも、きれいな氷層から数多く見い出されていることは、ピングのような地下水からの析出水では説明不可能である。

地下集塊氷の氷体が、析出水によって生成されたものではなく、移動してきた堆積物によって埋没された氷体であるとなると、それが氷河の残体なのか、あるいは積雪が氷化したものなのか、ということが次の問題になる。

水の酸素同位体組成や花粉が古気温の指標になることは、良く知られたところである。この地下集塊氷からえた氷コアにおける酸素同位体組成[10,11]や花粉[18]の垂直分布の傾向は、下部から上部へと順次気温が低くなっていったことを示している。ここで、氷体が成長した年代が決定的な重要性を持つことになる。氷体の最下部で17000yrBP頃、中程で14000yrBP頃という氷体中の堆積物が示す年代は、最終氷期の最寒期末期からの気温が順次高くなっていく傾向の時期であり、氷コアにおける酸素同位体組成[10,11]や花粉[18]の垂直分布が意味する傾向とは全く逆である。また、氷コアや凍土における花粉[18]の種類は、この地域に見られる植生のものは大変少なく、もっと大きな灌木のも

のが圧倒的に多い。したがって、この氷体は、現地にあった積雪が氷化したものとは考えられず、ローレnciaイド氷床の中心部から北へ流動してきた氷河氷の残体であると判断される。

謝辞

本研究は文部省科学研究費（国際学術研究）によって行われた。また、タンデロン加速器質量分析装置による ^{14}C 年代測定は、名古屋大学年代測定資料研究センター天然放射性元素測定装置の学内共同利用研究として行われた。同センターの中村俊夫助教授には多大のご助力を頂いた。ここに記して、厚く感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 加藤喜久雄, 名古屋大学加速器質量分析計業績報告書, 1 (1988) 36-41.
- [2] Mackay, J. R., Can. Jour. Earth Sci., 8 (1971) 397-422.
- [3] Mackay, J. R., Permafrost. 2nd Intl Conf., Natl Academy Press, Washington, D.C. (1973) 223-228.
- [4] Mackay, J. R., Konishchev., V. N. and Popov, A. L., Permafrost. 3rd Intl Conf., Vol. 2, Natl Res. Council Can., Ottawa (1978) 1-18.
- [5] 加藤喜久雄, 福田正巳, 藤野和夫, 雪氷, 44 (1982) 131-139.
- [6] Kato, K. and Fujino, K., Joint studies on physical and biological environments in the permafrost, North Canada. Inst. Low Temp. Sci., Hokkaido Univ., Sapporo (1982) 13-20.
- [7] Fujino, K., Horiguchi, K., Shinbori, M. and Kato, K., Permafrost. 4th Intl Conf., Natl Academy Press, Washington, D.C. (1983) 316-321.
- [8] Michel, F. A. and Fritz, P., Proc. 4th Can. Permafrost conf., Vol. 2, Natl Res. Council Can., Ottawa (1982) 207-221.
- [9] Lorrain, R. D. and Demeuer, P., Arctic Alpine Res., 17 (1985) 89-98.
- [10] Kato, K., Sato, S. and Fujino, K., Characteristics of massive ground ice in the western Canadian Arctic related to paleoclimatology 1986-1987. Inst. Low Temp. Sci., Hokkaido Univ., Sapporo (1988) 58-69.
- [11] Fujino, K., Sato, S., Matsuda, K., Sasa, G. Shimizu, O. and Kato, K., Permafrost. 5th Intl Conf., Tapir Publishers, Trondheim, Norway (1988) 143-147.

- [12] Nakai, N., Nakamura, T., Kimura, M., Sakase, T., Sato, S. and Sakai, A., Nucl. Instr. Meth. Phys. Res., B5 (1984) 171-174.
- [13] Tans, P. P., deJong, A. F. M. and Mook, W. G., Nature, 271 (1978) 234-235.
- [14] Muller, F., Arctic, 15 (1962) 278-288.
- [15] Mackay, J. R., Quaternary Res., 26 (1986) 68-80.
- [16] Fyles, J. G., Heginbottom, J. A. and Rampton, V. M., 24th Intl. Geol. Conf. Guidebook A-30, Montoreal (1972) 23pp.
- [17] Short, S. K. and Andrews, J. T., Geographie phys. Quaternaire, 42 (1988) 75-82.
- [18] Fujino, K. and Sato, S., Characteristics of the massive ground ice in the western Canadian Arctic related to paleoclimatology 1984-1985. Inst, Low Temp. Sci., Hokkaido Univ., Sapporo (1986) 9-36.

Formation process of a massive ground ice body
in Mackenzie Delta, Western Arctic Canada

Kikuo Kato*

*Water Research Institute, Nagoya University. Chikusa, Nagoya 464-01

Massive ground ice bodies are one of the typical ground features in permafrost of the Arctic region. However, their formation processes and origin still remain in need of research. So in order to determine dates of a massive ground ice body in Mackenzie Delta, AMS radiocarbon dating has been carried out on the sediment and ice cores from it, and on sediment and shell samples overlying it. Radiocarbon dates for the muddy sediments from 21.0m ice core are 14270, 17000 and 17070 yrBP at 10.2, 20.2 and 20.5 m in depth, respectively. Date for sand at 21.0m in depth is 25400yrBP. On the other hand, dates for the frozen clays overlying the ice body are >26600yrBP and the shallow one predates the deeper one. These facts show that the sediment overlying the ice body consists of re-worked till, that the original till must date >17070yrBP, and that this re-worked till overlay the ice body at that time.

Radiocarbon dates for twigs in the sediment overlying the ice body are 7520yrBP in the active layer and 9880yrBP in the permafrost layer. From these dates and those for wood fragments in the re-worked till of Ibyuk Pingo near this ground massive ice body, the till had re-worked in 8600yrBP~8900yrBP.

Accordingly, this massive ice body is not of segregated ice origin but of buried ice origin. Taking into consideration the variations in the vertical profiles of oxygen isotopes and both number and kind of pollen in the ice core, this ice body is considered to be the relic glacier ice of the Laurentide ice sheet.

口頭発表

- 1)加藤喜久雄：極域カナダ，マッケンジーデルタの地下集塊氷体の生成年代．雪氷学会全国大会，1990，October，23-26.

論文発表

- 1)K. Kato, S. Sato, and K. Fujino:Radiocarbon dating by accelerator mass spectrometry on sediment in a core from a massive ice body in Mackenzie Delta, N.W.T., Canada: Preliminary report.
(ed. by K. Fujino) Characteristics of the Massive ground ice body in the western Canada Arctic related to paleoclimatology 1986-1987. Inst. of Low Temp. Sci., Hokkaido University, p.58-69.
- 2)K. Fujino, S.Sato, K. Matsuda, G. Sasa, O. Shimizu, and K. Kato:
Characteristics of the massive ground ice body in the Western Canadian Arctic(II). Permafrost, Tapir Publishers, Trondheim, Norway, 1988, p.143-147.