

* 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。

永久凍土地帯ではツンドラ構造土（地表の模様）、ピング（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、地下集塊水を有するなだらかな丘、などの特有の地形が見られる[1]。これら特有の地形の生成過程や水の起源については、地下集塊水を除けば、ほぼ解明されたものと考えて良い状況にある。しかし、地下集塊水については、ピングと同じ析出水説[2-4]（土が凍結するとき、そ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水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。氷体にボーリングしてえられた氷コア中から見い出された少量の泥質堆積物について、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 ^{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、氷コアのみならず、地下集塊水の上に乗っている堆積物（表土と凍土）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、地下集塊水の生成年代、ひいては生成過程や水の起源について検討した。

2 研究方法

2-1 試料

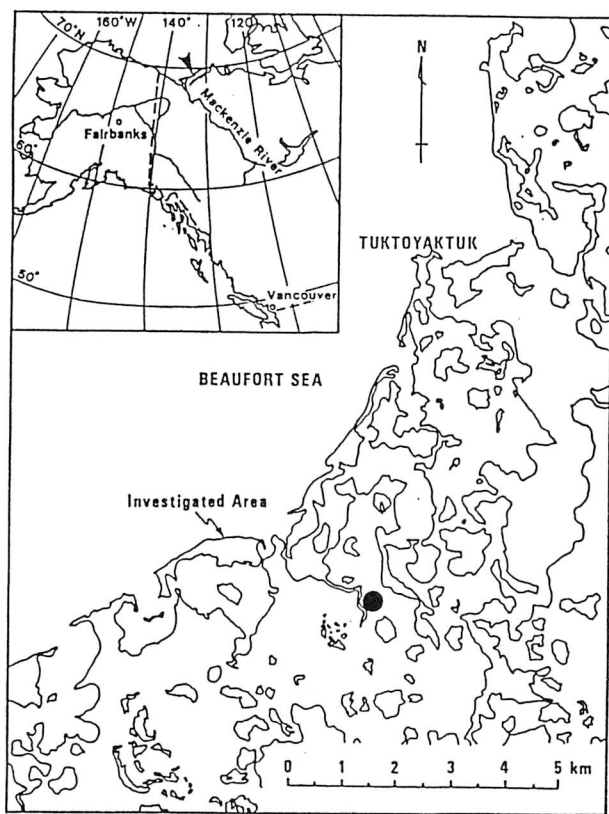


図1 北極域カナダ西部のマッケンジー・デルタ地帯の調査地域 (●: イブークピング)

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

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) 西部のポ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、氷コアの最下部に存在した氷河底部の流水により良く sorting された砂試料、ならびに堆積物コア中から見い出された小枝2試料について ^{14}C 年代測定を行った。

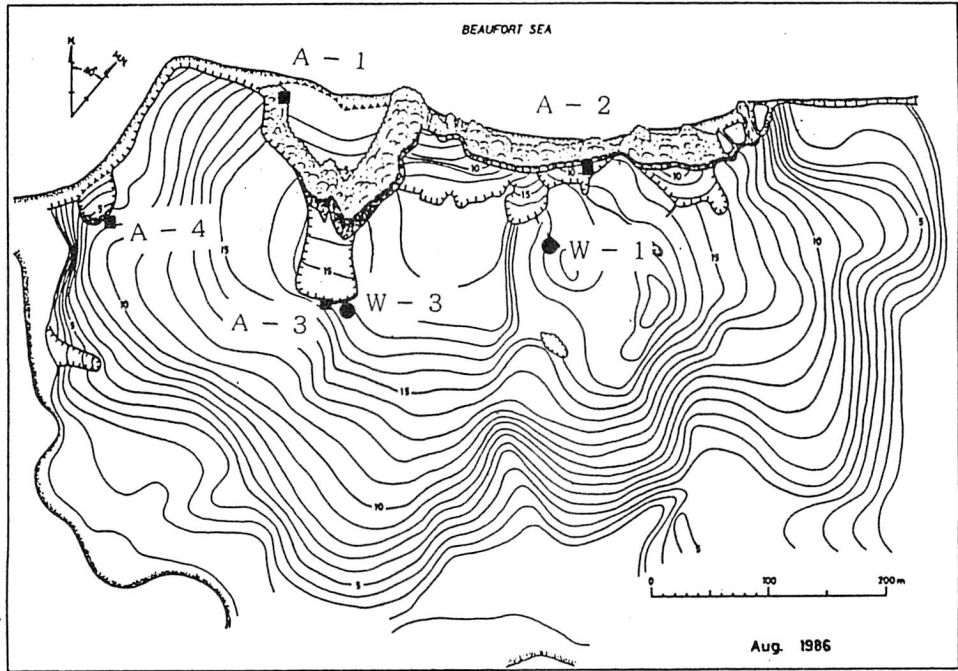


図2 ボーリング地点(W)と試料採取地点(A)
 Fig. 2 Boring sites(W) and sampling sites(A).

さらに、W-1地点からえたおよそ1.5mの堆積物コアから2試料、A-1地点のおよそ10mの厚さの堆積物最下層部の2試料、A-4地点のおよそ1mの厚さの堆積物最下部の試料、ならびにA-1地点の堆積物中で見つけれられた植物根、A-2地点の堆積物中で見つけれられた淡水性の非常に薄い貝殻、A-3地点の水直上で見つけれられたピートについても、 ^{14}C 年代測定を実施した。

2-2 年代測定

加速器質料分析装置による ^{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3~5 mg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テドロン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

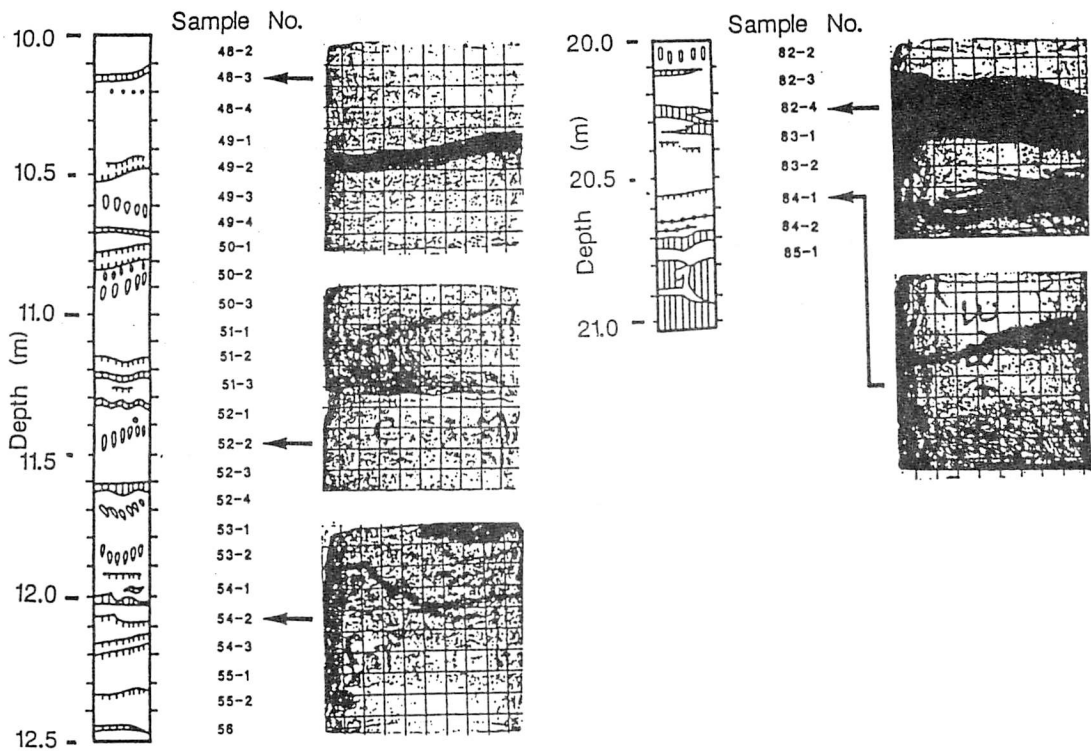


図3 W-3 氷コアに見られる泥質堆積物層 (20.8m 以下は砂層)

Fig. 3 Mud layers in W-3 ice core (sand layers below 20.8m).

地下集塊氷の生成過程と水の起源については、ピンゴと同じ析出氷説が有力である。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

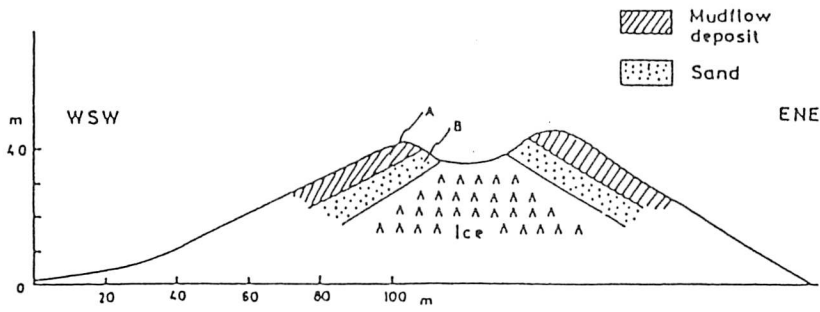


図4 イブークピンゴの断面図 (Muller[14]による)

Fig. 4 Cross section of Ibyuk Pingo (After Muller[14]).

らなる氷河性の泥流堆積物で、背後に後退した氷河に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、PEAT、木片について¹⁴C年代が測定されており、それらの測定年代を表1に示した。

表1 イブークピngo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

Mackay[15]はイブークピngoについてベンチマーク測定を実施し、1973～1983年におけるピngo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ngoが成長し始めたのはおよそ1500年前であると推定した。この推定は、氷体の上に乗っている堆積物中から見い出された木片の¹⁴C年代[15-16]からも裏付けられる。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は1650yrBPである。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ngo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。

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。氷河の最下部に存在し、氷河底部の流水によって円磨され、良く sorting された、氷体の下に位置する砂層の年代が最も古い。イブークピngo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、木片（流木ではない）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[1]。

表 2 W-3 地点からえられたコアの¹⁴C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 ± 150
Twig 75cm below top of ground surface	9880 ± 130
[Ice core]	
Mud 10.2m below top of ice body	14270 ± 250
Mud 20.2m below top of ice body	17000 ± 250
Mud 20.5m below top of ice body	17070 ± 180
Sand 21.0m below top of ice body	25400 ± 330

しかし、この集塊氷がピングと同じ折出氷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説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¹⁴C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堆積物、および A-1地点の 10mほどの厚
 さの堆積物と A-4地点の 1 mほどの厚さの堆積物の最下部層の凍土について測定し
 た¹⁴C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、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

間違いでないとしても、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 ± 490yrBPと16849 ± 860yrBP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、地下集塊水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起源ではないことを意味している。

表3 地下集塊氷の上に乗っている堆積物と植物根、貝殻の¹⁴C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
Clay just above top of ice body [Site A-4]	42300 ± 1230
Root 50cm above top of ice body [Site A-1]	10560 ± 200
Shell on clayey re-worked till [Site A-2]	8570 ± 170
Peat just above top of ice body [Site A-3]	8960 ± 90

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。

A-1地点のおよそ10mの厚さのre-worked tillの最下部層から見い出された植物根(表3)、およびW-3地点のre-worked tillのコアから見い出された小枝(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。W-3地点の活動層中に存在している深度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、淡水性の大変薄くもろいもので、1986年8月に既に植生と表土がずり落ちた崩れかけた崖(凍土)の上で偶然見つけられた。この貝殻はre-worked

till上にできた湖沼に棲息していたと考えられる。したがって、このtillが再堆積したのは貝殻の年代である8570yrBP以前へと遡ることになる。また、A-3地点の氷体直上で見出されたピート層（凍土）は、このtillが再堆積したときに堆積したものと考えられるので、tillの再堆積の年代は8960yrBP以降ということになる。

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re-worked tillとピングのUnit-Aの再堆積の年代は8600yrBP～8900yrBP頃で一致し、当然のことながら、これらのtillの再堆積は同時に起こったことになる。

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8600～8900yrBP頃に移動してきたre-worked tillであると判断される。それゆえ、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、re-worked tillがその氷体の上に8600～8900yrBP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、この二千年間、大きく見積っても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水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、タンテドロ加速装置質量分析装置による¹⁴C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, Montreal (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.

Date and process of formation 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 this re-worked till overlay this 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 root and peat in the re-worked till and also shell found on this till, it is seen that the till had re-worked in 8600~8900yrBP. These dates agree with those for wood fragments in the re-worked till of Ibyuk Pingo near this ground massive ice body.

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.

1)加藤喜久雄： 永久凍土中の地下集塊水の生成過程と気候変動。 名古屋大学加速器質量分析計業績報告書， No. 1 (1988) 36-41.

2)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. Characteristics of massive ground ice in the western Canadian Arctic related to paleoclimatology 1986-1987 (Edited by K. Fujino). Inst. Low Temp. Sci., Hokkaido Univ., Sapporo (1988) 58-69.

3)K. Fujino, S. Sato, K. Matsuda, G. Sasa, O. Shimizu, and K. Kato: Characteristics of massive ground ice in the western Canadian Arctic (II). Permafrost. 5th Intl Conf., Tapir Publishers, Trondheim, Norway (1988) 143-147.

4)加藤喜久雄： 北極域カナダ・マッケンジー・デルタの地下集塊水の生成過程。 名古屋大学加速器質量分析計業績報告書， No. 2 (1991) 40-50.