

## 永久凍土中の地下集塊氷の生成過程と気候変動

加藤喜久雄\*

\* ) 名古屋大学水圏科学研究所、464、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する。その厚さは通常100m以上にも及び、500m以上に達するところもある。永久凍土地帯でも、夏には地表面は融ける。この夏に融ける地表近くの層を活動層と呼ぶ。この活動層には、その下の永久凍土が水分を透さないため、凍土の融水や降水が蓄えられる。このため、永久凍土地帯でも一般的には植生はある。

永久凍土地帯では特有の地形が見られる。ピングゴ（小さな丘、写真1）、ツンドラ構造土（地表の模様）、アラス（地下氷の融解により出来た凹地）、地下集塊氷を有するなだらかな丘（写真2）、氷楔（凍土中へ楔を打ち込む形にできた氷体、図3参照）などがそれである。これらの地形を生成する原因として、次のようなものがある。1) 土が凍結するとき、その土中水分が凍結するのみでなく、凍結線に向かって下方の未凍土から水分の移動が起こり、析出氷ができる。そのため、体積増、つまり凍上が起こる。2) 凍土の地表面が極寒にさらされる時、凍土中に温度勾配に基づく熱応力が正じ、鉛直な割れ目が出る。そこへ夏に透みこんだ水が凍結する。3) 地下氷の融解により、地表面が陥没する。

これらの永久凍土中に存在する様ざまの水体に関する安定同位体の研究例は少なく[1-2]、これらの氷体がどのような安定同位体特性をもつのか明らかでなかった。しかし、これらの氷体が水の起源や生成過程を反映した安定同位体特性を示し、このことから逆に、これらの氷体の水の起源や生成過程に関する情報が得られる可能性は十分にある。

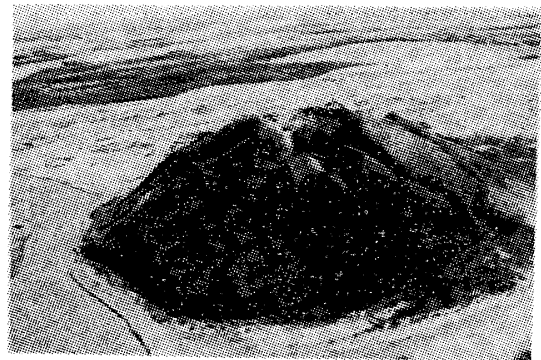


写真1 ピングゴ（イブークピングゴ）

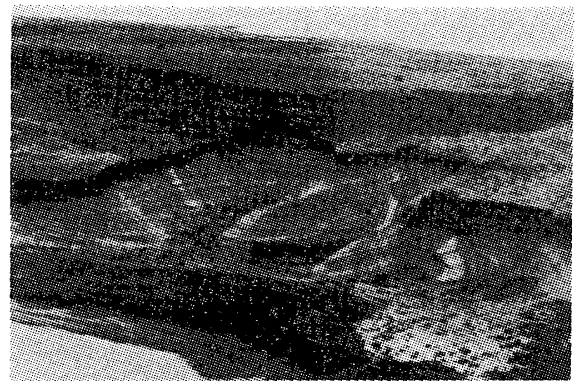


写真2 地下集塊氷（本研究の対象氷体）

カナダ北西部にある、北極海に面したマッケンジー河口デルタ地帯（図1）は厚さ350~400mの連続永久凍土地帯である。ここでは、永久凍土特有の地形の典型的なものが見られる。そこで、この永久凍土中に存在する様ざまの形態の氷体について酸素同位体特性の解明を行った[3-5]。その結果、氷体が自身の水の起源や生成過程を反映した安定同位体特性を示すことが明らかになった。これらの同位体特性は、地下集塊氷を除くピngo、ツンドラ構造土、氷楔については、これまでの水の起源や生成過程に関する考え方を裏付けるものであった。地下集塊氷については、並行して行われた氷物性に関する研究からも、これまでの水の起源や生成過程に関する考え方に疑問が投げかけられた[4-7]。

1984年からは、文部省科学研究費（海外学術研究）として、地下集塊氷の水の起源や生成過程を気候変動と関連づけて研究を行っている。表土、凍土、氷体にボーリングしてえたコアを主に扱っているが、現時点では氷体の年代決定が最重要課題となっている。そこで、氷コア中に僅かに存在する泥と、表土や凍土のコア中に存在する木片の $^{14}\text{C}$ 年代測定をタンデム加速器質量分析計により行った。

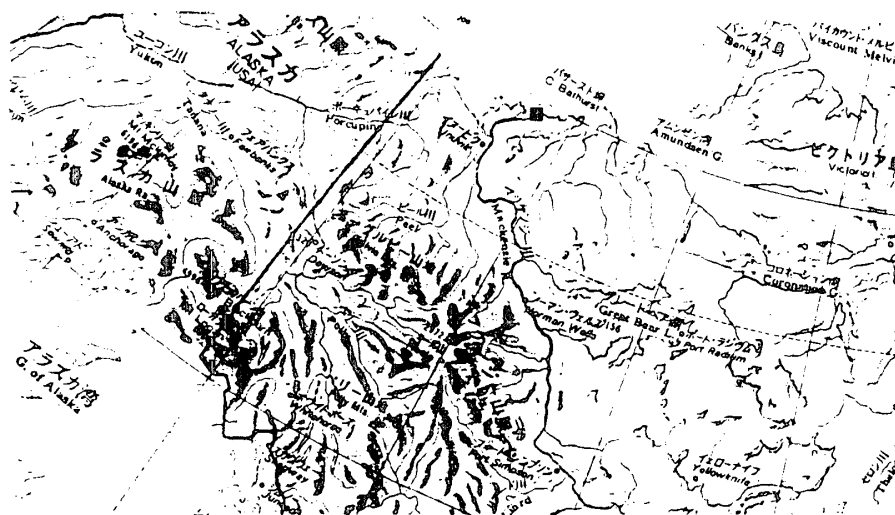


図1 北米西北地域の地図 (■:本研究の調査地域)

## 2. 研究方法

### 2-1. 試料

カナダ、ノースウェスト準州（Northwest Territory）の北極海、ポーフォート湾に面したマッケンジー河口デルタ地帯（図1）、 $69^{\circ}22'N$ 、 $133^{\circ}7'W$ にある地下集塊氷（写真2）を調査対象とした。氷体の上に位置する表土や凍土の厚さは1~10mに及ぶ。表土や凍土の厚さの薄いところを選び、ボーリングを行った。およそ1mの表土および凍土のコアとおよそ22mの氷のコアをえた。氷コアの最下部には、氷河底部の流水により、良くsortingされ、やや円磨された砂層が存在した[7]。

氷コア中に僅かに存在した泥層から、3mg以上の炭素量がえられた三試料と、凍土のコア中に存在した木片二試料を測定に供した。

## 2-2. 測定

加速器質量分析計による測定には、すべての試料を元素態炭素にする必要がある。

泥試料については、まず炭酸塩態炭素を除去するために、1.2N-HCl水溶液を加え、water-bath上で加熱し、炭酸塩を分解する。遠心分離を行い、上澄み液を取り除く。このHCl抽出操作は二回以上行う。次に、HCl抽出を終えた試料に蒸留水を加え、加熱することによりHClを除去する。遠心分離を行い、上澄み液を取り除き、100°Cで真空乾燥する。有機態炭素をCO<sub>2</sub>にするため、試料に約三倍量の酸化コバルトを加え、真空中で15分間950°Cに保つ。生成したCO<sub>2</sub>は、2時間30分間950°Cに加熱し、熱金属マグネシウムにより還元して非晶質炭素にする。

木片試料については、まず二次汚染炭素物質の除去を行う。木片を4%NaOH水溶液に入れ、water-bath上で1~2時間加熱したのち、放冷する。NaOH抽出液が着色しなくなるまで、この操作を繰り返す。NaOH抽出液を取り除いた試料に、1.2N-HCl水溶液を加え、water-bath上で加熱し、炭酸塩を分解する。このHCl抽出操作は二回以上行う。次に、HCl抽出を終えた木片試料に蒸留水を加え、加熱することによりHClを除去した後、100°Cで真空乾燥する。この試料を真空封管し、電気炉で400°Cで3時間加熱し、炭化する。封管が充分冷えてから、炭化した試料を取り出して、2N-HCl水溶液に入れてwater-bath上で加熱し、炭酸塩を分解する。炭化試料に蒸留水を加え、加熱することによりHClを除去した後、100°Cで真空乾燥する。

非晶質炭素は高純度の銀粉とモル比で1:1の割合で混合され、手動のプレス器で直径3mm、厚さ1~2mmのペレット状ターゲットに成型される。このターゲットを用いて、タンデム加速器質量分析計により<sup>14</sup>C計数を行う。

測定年代は<sup>14</sup>Cの半減期として5570年を用いて計算した。

## 3. 結果と考察

表土（活動層）および凍土からえたコアについては、地表から40cmと75cmの深さで見いだされた木片の年代は、おのおの7520±150年BPと9880±130年BPであった。氷コアについては、コア最上部から11.2m、21.2m、21.5mの深さの泥の年代は、14270±250年BP、17000±250年BP、17070±180年BPであった。

地下集塊氷の水の起源と生成過程に関する最も有力な説は、ピングゴと同じ地下水の析出氷説である。写真1のピングゴは、対象とした地下集塊氷から3kmほど離れたところにある、有名なイブークピングゴである。このピングゴについては、良く研究が行われ、年代測定値もいくつか出されている [8-10]。図2にイブークピングゴの断面図 [8] を示した。A層はおもにシルト質粘土からなる泥流堆積物であり、背後に後退した氷河に由来するものと考えられる。この層に含まれる流木の年代としては12000±300年BP、泥炭の年代としては17860±250、14130±440年BPがえられている。B層は、氷河底部の流水により、やや円磨され、良くsortingされた砂である。ここから採取された木片を用いて、>42900、>37500、>26000年BPの年代がえられている。これらの結果から、氷河とピングゴは共存できないと考えられることから [11]、イブークピングゴは少なくとも12000年BP以降に生成したことになる。

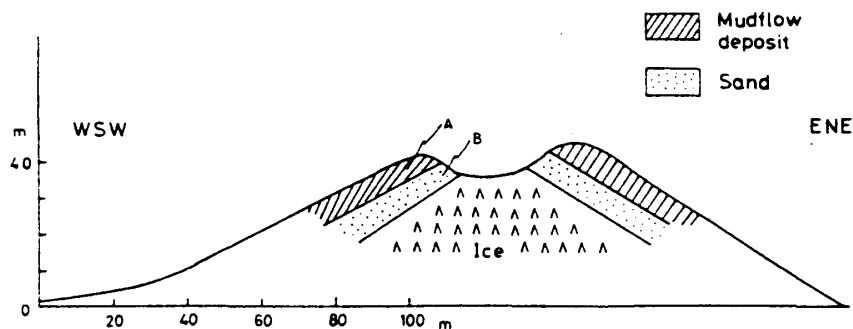


図2 イブークピンゴの断面図（[8]より）

本研究で対象とした地下集塊氷の上部にある、泥流堆積物からえたコア中の木片の測定年代は $9880 \pm 130$ 、 $7520 \pm 150$ 年BPであった。図3に、この地下集塊氷の上部の非常に厚い泥流堆積物の凍土中に生成した氷楔の断面を示した[2]。この断面の中ほどで見いだされた木片の年代は $9980 \pm 140$ 年BPであり、本研究の1mの厚さの泥流堆積物からえたコアにおいて、75cmの深さのところから見いだされた木片の測定年代とよく一致していることは注目される。

ところが、地下集塊氷からえたコア中の泥層の年代は最下部で $17070 \pm 180$ 年BP、中ほどで $14270 \pm 250$ 年BPである。このことは、泥流堆積物の年代よりかなり以前、上記の12000年BP以前に既に氷体が生成していたことを暗示している。

他方、写真2からも分かるように、泥流堆積物は地下集塊氷を不整合に覆っている。このことは、泥流堆積物の被覆以前に、氷体が既に生成していたことを示している。さらに、地下集塊氷中の泥層の年代が氷体そのものの年代を示しているとしたほうが、泥流堆積物と氷体の両者の年代のつながりに不自然さがない。

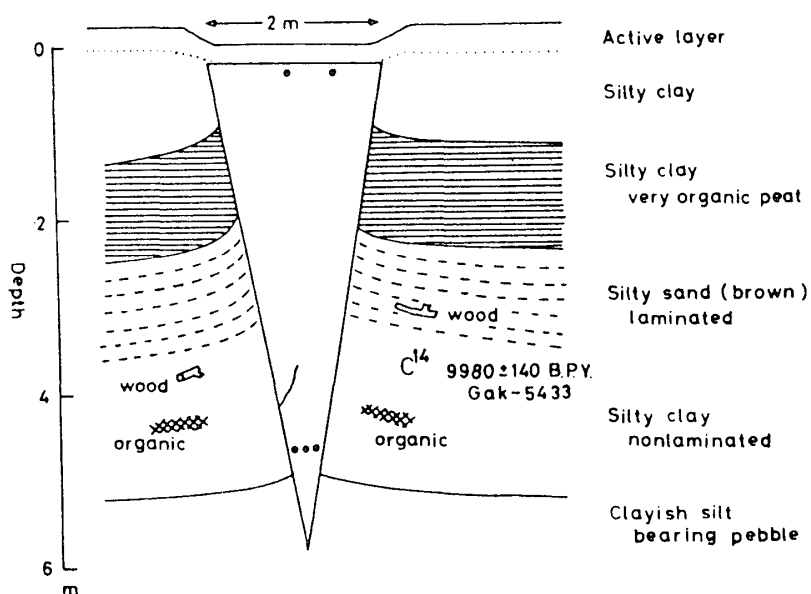


図3 地下集塊氷の上部に生成した氷楔の断面図（[2]より）

以上のように、この地下集塊氷は、下部から上部へ向かって順次生成していったものであり、ピングのような上部から下部へ向かって順次生成していった析出水ではないと考えられる。また析出水説では、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比の垂直分布の傾向を説明できない[12]。さらに決定的なことは、氷体における花粉の存在である[13]。泥層からよりも、泥の存在しない氷からのほうが、保存の良い花粉が数多く見いだされたことである。このような花粉の存在は、ピングのような地下水からの析出水においては説明しがたいものである。

したがって、地下集塊氷の生成に関しては、現在の最有力説である析出水説は否定され、埋設氷説が妥当と考えられる。埋設氷としては、氷河氷と、現地で雪が氷化したものが考えられる。氷の酸素同位体比や花粉が古気温の指標となりうることは、良く知られたところである。これらの地下集塊氷の酸素同位体比や花粉の分析結果は、氷体が下部から上部へと生成していった期間には、古気温が順次低くなっていったことを示している[12-13]。ここで、最下部で $17070 \pm 180$ 年BP、中ほどで $14270 \pm 250$ 年BPという氷体の年代が指し示す、古気温変動の傾向が決定的な重要性をもつことになる。

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るとするれば、酸素同位体比や花粉が示す古気温の傾向とは全く逆であり、この地下集塊氷がローレントイド氷床の中心部から北へ流動してきた氷床氷河の埋設氷であることになる。この地下集塊氷がローレントイド氷床の氷河の残体であることになれば、ローレントイド氷床の氷体の発見ということになり、この氷体は最終氷期におけるローレントイド氷床そのものと、氷床の最大拡大期以降の気候変動に関する情報を提供してくれることになる。一方、17000年BPごろは亜間氷期であり、その後また気温が順次低くなっていったとする考えもある。この場合には、氷床氷河の埋設氷説も現地性の雪の氷化説も妥当と考えられる。後者の場合には、氷床の最大拡大期以降の気候変動のみならず、北極海沿岸域における環境変動に関する情報を、この氷体は提供してくれることになる。

現在、この地下集塊氷の研究は日本-カナダ共同研究として進められているが、タンテドロ質量分析計による $^{14}\text{C}$ 年代測定の寄与するところは大変大きい。

## 謝辞

本研究は文部省科学研究費（海外学術研究）によって行われた。またタンテドロ質量分析計による $^{14}\text{C}$ 年代測定は、名古屋大学アイソトープ総合センター天然放射能測定装置の学内共同利用研究として行われた。また、同センターの中村俊夫博士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] Mackay, J.R., Problem in the origin of massive icy bed, Western Arctic, Canada. Permafrost. Proc. 2nd Intl Conf., Natl Academy Press, Washington, D.C. (1973) 223.

- [2] 福田正巳, 永久凍土地域の地形発達と第四紀地史. アラスカ・カナダ北部の永久凍土における寒冷地形及び生物環境の総合調査. 北海道大学, 札幌 (1975) 62.
- [3] Fujino, K. and Kato, K., Determination of oxygen isotopic composition in the ground ice of a tundra area. Joint studies on physical and biological environments on the permafrost, Alaska and North Canada. Hokkaido Univ., Sapporo (1979) 77.
- [4] 加藤喜久雄, 福田正巳, 藤野和夫, 永久凍土中の氷体の酸素同位体特性. 雪氷, 44 (1982) 131.
- [5] Kato, K. and Fujino, K., Oxygen isotopic composition of massive ice at Tuktoyaktuk, North Canada. Joint studies on physical and biological environments in the permafrost, North Canada. Hokkaido Univ., Sapporo (1982) 13.
- [6] 藤野和夫, 堀口薫, 新堀邦夫, 加藤喜久雄, 地下集塊氷の掘削とコア解析. 低温科学, 41 (1982) 143.
- [7] Fujino, K., Horiguchi, K., Shinbori, K., and Kato, K., Analysis and characteristics of cores from a massive ice body in Mackenzie Delta, N.W.T., Canada. Permafrost. Proc. 4th Intl Conf., Natl Academy Press, Washington, D.C. (1983) 316.
- [8] Müller, F., Beobachtungen über Pingos. Mød. om Grønland, 153 (1959) 1.
- [9] Müller, F., Analysis of some stratigraphic observations and radiocarbon dates from pingos in the Mackenzie delta area, N.W.T. Arctic, 15 (1962) 278.
- [10] Mackay, J.R., Rampton, V.N. and Fyles, J.G., Relic pliocene permafrost, Western Arctic, Canada. Science, 176 (1972) 1321.
- [11] Mackay, J.R. and Black, R.F., Origin, composition and structure of permafrost frozen ground and ground ice. Permafrost. 2nd Intl Conf., Natl Academy Press, Washington, D.C. (1973) 158.
- [12] Kato, K., Fujino, K., Horiguchi, K. and Sato, S., Oxygen isotope profile in a massive ice body in Mackenzie Delta, N.W.T., Canada: Preliminary report. Characteristics of the massive ground ice body in the Western Canadian Arctic related to paleoclimatology. Hokkaido Univ., Sapporo (1986) 46.
- [13] Fujino, K. and Sato, S., Stratigraphic analyses of the massive ground ice body in Tuktoyaktuk, Mackenzie Delta, N.W.T., Canada. *ibid*, (1986) 9.