

# 東シベリア、ブイコフスキー半島周辺の永久凍土の形成年代

長岡大輔<sup>1</sup>・曾根敏雄<sup>2</sup>・中村俊夫<sup>3</sup>・福田正己<sup>2</sup>・仲山智子<sup>4</sup>・V. クニツキー<sup>5</sup>

- |                     |                    |
|---------------------|--------------------|
| 1 北海道大学大学院地球環境科学研究科 | 〒060 札幌市北区北10条西5丁目 |
| 2 北海道大学低温科学研究所      | 〒060 札幌市北区北19条西8丁目 |
| 3 名古屋大学年代測定資料研究センター | 〒464-01 名古屋市千種区不老町 |
| 4 北海道大学大学院理学研究科     | 〒060 札幌市北区北10条西8丁目 |
| 5 ヤクーツク永久凍土研究所      | ロシア、サハ共和国ヤクーツク     |

## 1. はじめに

東シベリア、ブイコフスキー半島には、標高40mの高位の平坦面が分布しており、北東岸には融解侵食により永久凍土が露出する。この侵食崖では、円柱状の凍土とその周辺を取り囲む巨大な地下氷からなるアイスコンプレックスが観察できる（写真1）。このアイスコンプレックスは、堆積物と氷の特徴から、土砂の堆積にともなうアイスウェッジの成長により発達したと考えられる。このアイスコンプレックスは、形成当時のまま融解することなく保存されたものであり、形成当時の環境を知る上で非常に貴重である。また、高位の平坦面のところどころには、永久凍土の融解沈下によって形成された大きな窪地が分布しており、アラスと呼ばれている。

このような高い含水率をもち、年々融解し後退していくアイスコンプレックスを、“腐蝕されつつある大地”という意味で、“エドマ”とシベリアでは呼ばれている。エドマ

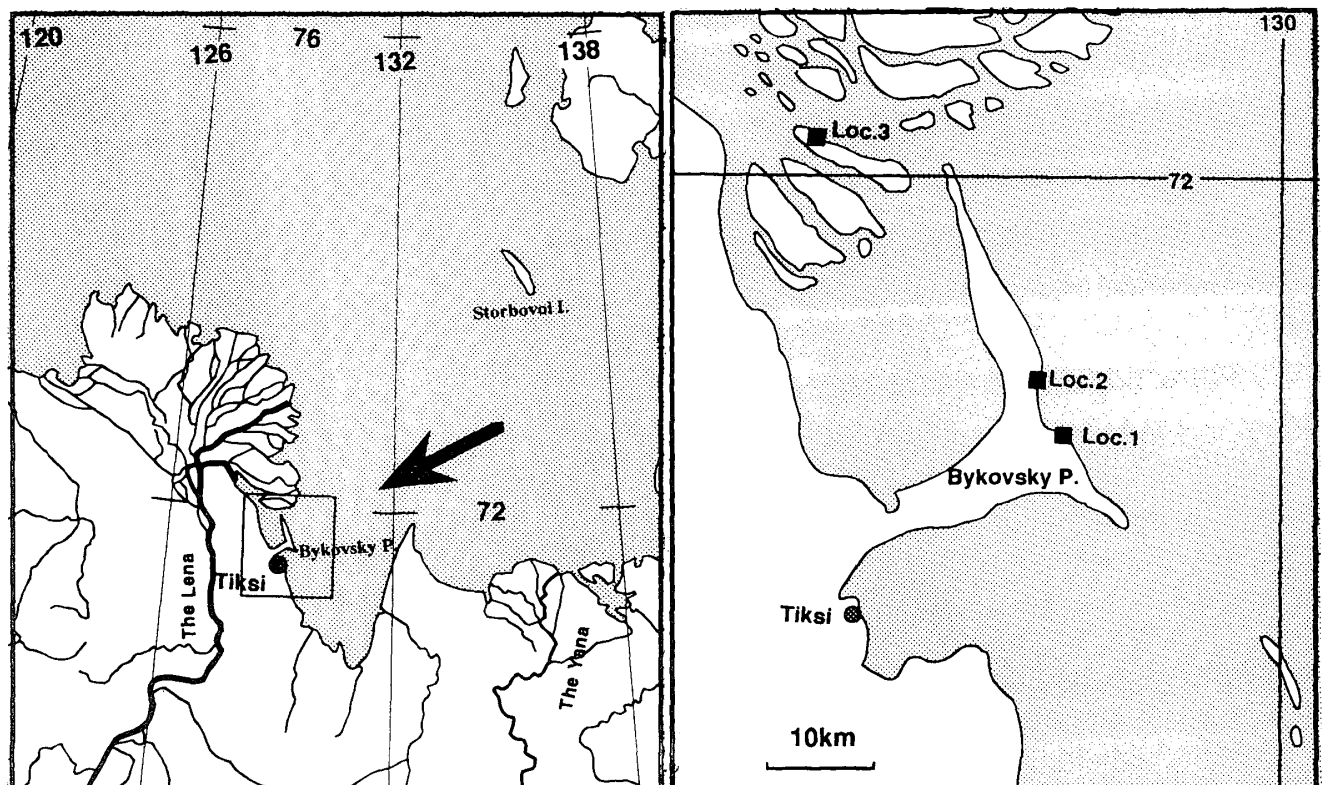


図1 研究地域

層は、東シベリア地域に分布が限られ、その形成年代を知ることが極北地域の古環境を復元する上で非常に意義深い。

## 2. 研究地域の概要

本研究地域は、東シベリアの港町チクシの東北東約25km、ブイコフスキー半島の北東岸(北緯71° 46′ 東経

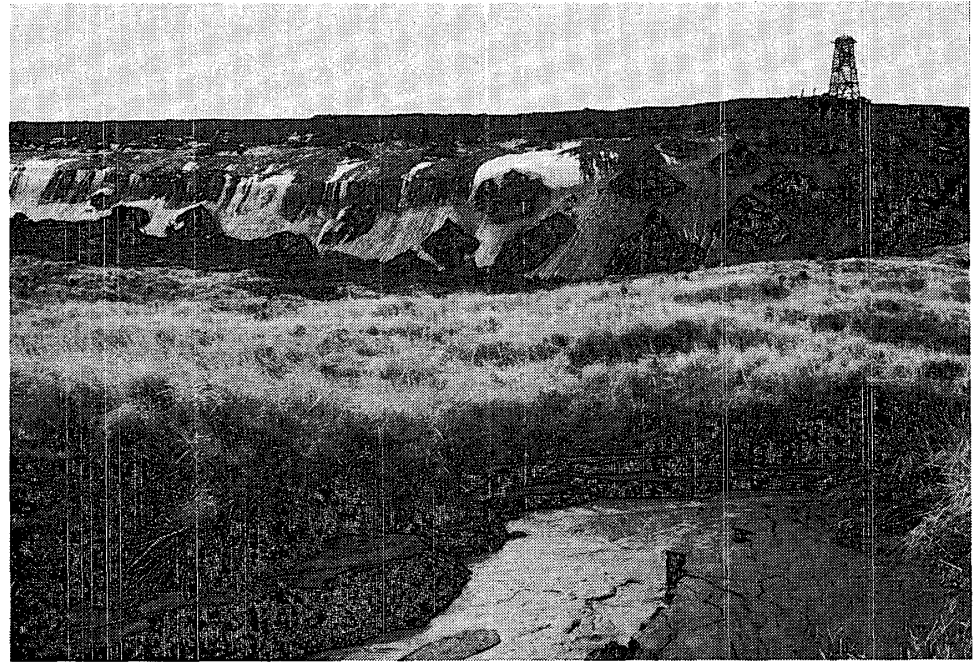


写真1 ブイコフスキー半島におけるアイスコンプレックス

129° 30′ )およびブイコフスキー半島から北西約10kmのカラハリ島(北緯72° 02′ 東経128° 45′ )である(図1)。この地域は、東シベリア最大の河川であるレナ川が形成した巨大な三角洲の最末端部にあり、地表面にはアイスウェッジポリゴン(ツンドラ構造土)が形成され、ツンドラ植生が広がっている。

チクシでの年平均気温は-14℃、永久凍土の厚さは650mであり(Katasonov and Solov'ev, 1969)、本地域は連続的永久凍土地域に含まれる。

## 3. 試料採取地点

アイスコンプレックス中の堆積物は、有機物に富んだシルト質細砂、砂質シルトおよびシルトが主体であり、途中に泥炭を数枚挟在させる。堆積物は、アイスウェッジの成長にともない周囲から圧縮を受け、氷との境界付近がめくり上がる構造がみられる。永久凍土の崖は毎年融解して後退し、凍土のなかから産出したマンモス、バイソン、馬等の化石が露頭を覆う泥のなかに散在しているが、層準は不明である。今回、アイスコンプレックス中の<sup>14</sup>C年代試料は、この堆積物に挟まれる泥炭層の5層準から採取した(図2)。採取地点

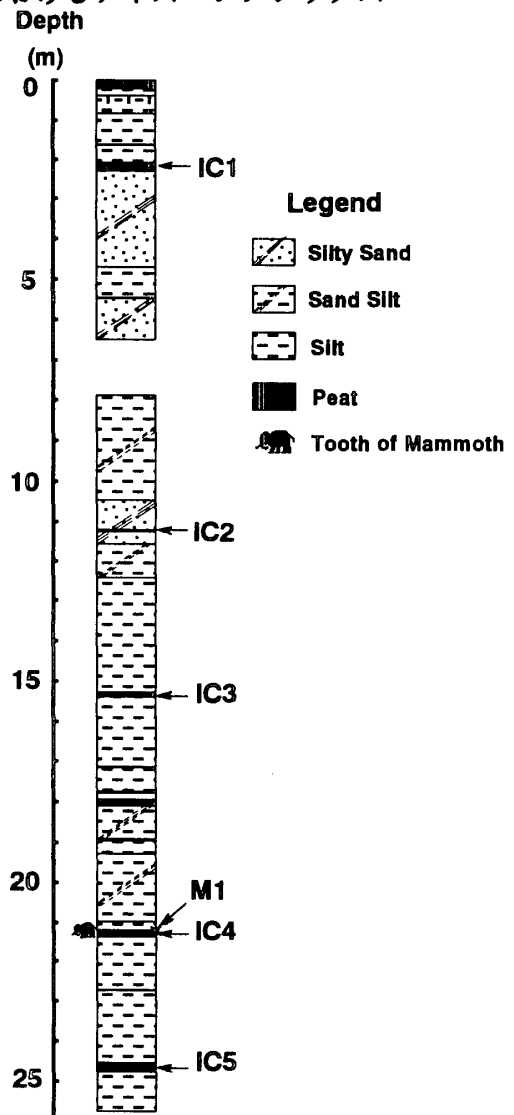


図2 地点1の柱状図および試料採取位置

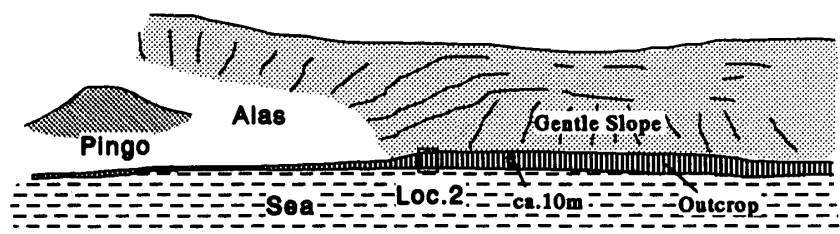
は、地表からの深さで、2.2m (IC1)、11.2m (IC2)、15.4m (IC3)、21.3m (IC4) および 24.7m (IC5) である。また、深さ21.3mの地点で凍結した土層中からマンモスの臼歯を発見した(写真2)。これが試料M1である。永久凍土中に凍結保存



写真2 マンモス臼歯の産状

されたため歯の保存状態は良好である。

このアイスコンプレックスの露頭の北側にはアラスが広がり、その中央には比較的大きなピングが存在する。このアラスの北側には、標高約10~20mの緩斜面が、海に沿って分布する。ここが地点2である。その堆積物は、細砂とシルトの細かい互層からなり、泥炭を薄く挟在させている(図3)。試料S1は、海面から約2mの高さの位置に包含されていた木材化石である。



地点3はブイコフスキー半島から北西へ約10km離れたカラハリ島にある。カラハリ島には、砂の薄層を挟む泥炭層からなる標高約3-4mの沖積平坦面が発達している。この平坦面上にはアイスウエッジポリゴンがみられ、レナ川に面する崖では、アイスウエッジが露出する。試料K1

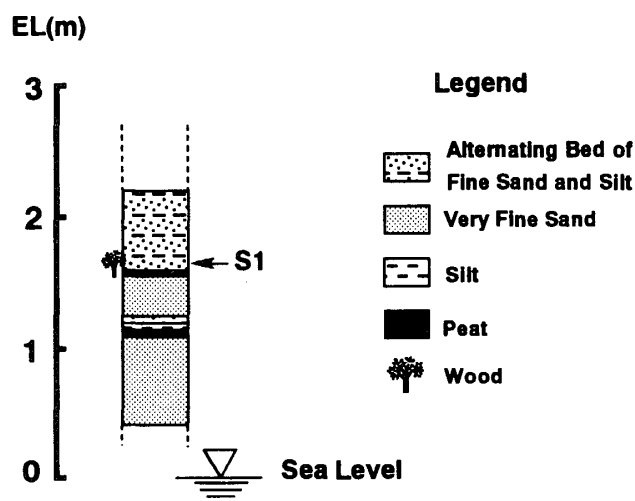


図3 地点2の位置および試料採取位置

は、アイスウエッジ直上の部分から採取した泥炭である(図4)。泥炭層は現在のレナ川の水面より下方にもみられる。

#### 4. 年代測定方法と結果

##### 1) マンモスの歯の試料の調製

まずマンモスの歯を少量分取し、その表面の汚れをカッターナイフ、真鍮製のブラシや電動ヤスリを用いて剥離す

る。次に、蒸留水を用いて、水が濁らなくなるまで超音波洗浄を繰り返し不純物を除去する。さらに、0.2規定水酸化ナトリウム水溶液で超音波洗浄を行なって、アルカリ水溶液に可溶性有機質の不純物を除去する。蒸留水で洗浄の後、試料を凍結乾燥し、ステンレス製の乳鉢を用いて粉碎する。

前処理を終えた粉末試料約3gを、一端をクリップで止めた長さ約15cmのセルロースチューブに入れ、他端をクリップで止め密封する。これを1.2規定塩酸を満たした500mlのビーカーに入れ、マグネティック・ステアラーで攪拌しながら冷蔵庫内で約4℃に一晩保っておく。こうして、歯の無機成分を完全に分解する。

次にビーカーの塩酸溶液を捨て、蒸留水を入れて冷蔵庫内で攪拌し、セルロースチューブ内の塩酸を透析して溶出する。1時間おきに5~6回蒸留水を交換したあと、一晩冷蔵庫内に放置し、翌日さらに蒸留水を交換して、塩酸を完全に透析して除去する。透析の完了は、溶液のpHが6~7になることから確認する。

塩酸による脱灰処理を終えたあと、セルロースチューブには、塩酸や水に可溶性コラーゲンと塩酸や水に不溶性コラーゲン成分の2種類が存在している。セルロースチューブの内容物を遠心分離して、2種類のコラーゲンを分離する。可溶性成分については、遠心分離した上澄み液を吸引ろ過して回収し、これを凍結乾燥してコラーゲンを得る。一方、不溶性成分については、ヒューミン、フミン酸、灰分などの不純物が混入しているので、ゼラチン化により精製する。すなわち、遠心分離で得た残留固形分をフタ付きの試験管に移し、蒸留水を20ml加え、90℃で10時間加熱すると、コラーゲンはゼラチン化して水に溶解する。試験管内の溶液を吸引ろ過して回収し、凍結乾燥してゼラチンコラーゲンを得る。

一般に、保存の良い骨・歯牙化石では、ゼラチンコラーゲンの方が収率が高く、また、ゼラチンコラーゲンの方が、一般に試料が本来持っていたコラーゲンにより近い

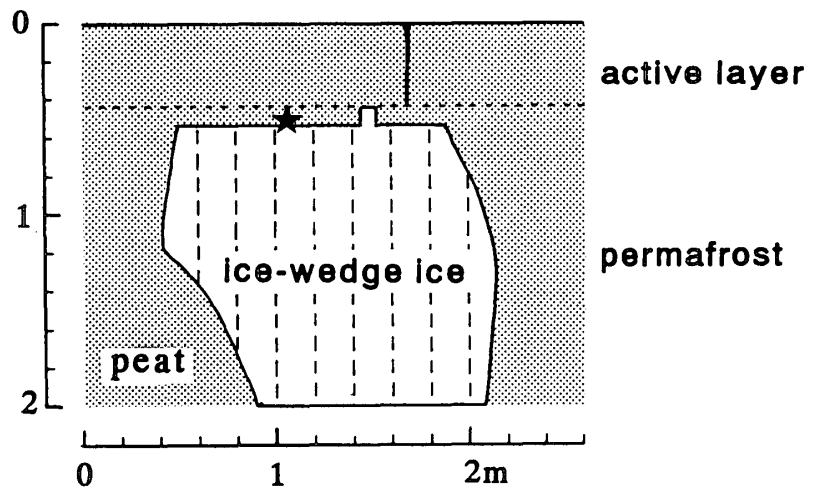


図4 地点3の断面スケッチ

性質を示すことから、本研究ではゼラチンコラーゲンについて年代測定を行なった。

抽出されたコラーゲン試料約10mgと銀粉末とを混合して、アルミホイルに包んで、長さ300mm、外径9mmのパイレックス管に入れ、真空装置を用いて封管した。パイレックス管は、前もって1.2規定の塩酸を用いて80℃に加熱処理したあと蒸留水でよく洗浄しておく。コラーゲンを真空封入したパイレックス管を500℃で約2時間加熱し、コラーゲンを炭化した。パイレックス管を割り、よく乾燥したあと、圧縮装置でコラーゲンと銀粉末の混合物を圧縮整形して、直径3mm、厚さ約1mmのC-Agペレットを作成した。これをタンデトロン加速器質量分析計のイオン源のターゲットとして使用した。

## 2) 木片や泥炭試料の調製

木片や泥炭試料から植物質である葉片、茎片、枝片や木質をピンセットを用いて選別する。これらの植物質を蒸留水で超音波洗浄して、土・砂を取り除く。次に、植物質に吸着されている不純物を化学処理によって取り除く。まず、1.2規定塩酸で90℃で2時間の処理を2回繰り返し炭酸塩等を溶解除去する。次に、1.2規定水酸化ナトリウム水溶液で90℃で2時間の処理を2回繰り返し、フミン酸を溶解除去する。さらに、1.2規定塩酸で90℃で2時間の処理を2回行ない、蒸留水で洗浄して塩酸分をよく取り除いたあと、乾燥した。これを上述の処理がなされたパイレックス管に入れて真空封管し、500℃で2時間加熱して、植物質を完全に炭化した。炭化試料をよく乾燥し、その約5mgを銀粉末45mgと混合し、C-Agペレットを作成した。

## 3) <sup>14</sup>C年代測定の実際とその結果

歯や植物質から調製したC-Agペレットについて、タンデトロン加速器質量分析計を用いて<sup>14</sup>C年代測定を行なった。すなわち、放射性炭素<sup>14</sup>Cと炭素同位体である<sup>13</sup>Cとの存在比 (R、すなわち<sup>14</sup>C/<sup>13</sup>C比) が未知試料 ( $R_{\text{sample}}$ ) と、<sup>14</sup>C濃度が既知の標準体 ( $R_{\text{AD1950}}$ ) とについて交互に繰り返して測定され、 $R_{\text{sample}}/R_{\text{AD1950}}$  比が得られる。この比から試料の<sup>14</sup>C/<sup>13</sup>C比、さらに<sup>14</sup>C年代値が算出される。<sup>14</sup>C濃度の標準体としては、国際的な標準体であるNBS-RM-49蓆酸を用いて<sup>14</sup>C濃度を検定した木炭(木曾ヒノキの1840-1860年の年輪から調製された)が用いられた。また、<sup>13</sup>C年代値の算出にあたっては、<sup>14</sup>Cの半減期としてLibbyの半減期5,570年が用いられた。

測定結果を表1にまとめる。

## 5. 考察

### 1) アイスコンプレックスの年代

今回、アイスコンプレックスから採取した5つの試料うち、2つの試料が他の試料に比べ著しく新しい年代となった。この原因として考えられるのは、アイスコンプレックスがみられる崖が毎年、2~3mの速さで融解しながら後退しているため、地表面付近にあった比較的最近に形成された泥炭が、崖の途中で、その位置にあった泥炭

に付着した可能性がある。アイスコンプレックス中の泥炭は、下部の古いものと上部の新しいものとは、分解度の違いなどの差はあまりみられず、いずれも繊維質である。このため、上部にあったものが崩れ落ちてきたとしても、その層相から違いを見出すことが困難である。また、周囲が氷や凍土であるため、崩れた落ちた泥炭が土の中で再び凍り、本来の堆積物と見分けが困難になる危険性がある。

以上のように、アイスコンプレックス露頭における泥炭の採取は、その泥炭が原位置のものか、再堆積したものを吟味する必要がある。また、再堆積したものは、露頭を覆っている場合と、氷に取り込まれているものとがあるが、氷に取り込まれているものは、水平方向の分布が限られているので、周囲の状況を良く判断する必要がある。今回、採取したIC2の試料は、氷に取り込まれていたため、原位置のものと間違っ  
て判断したものであろう。IC4の試料は、本来の泥炭層を切って再堆積した新しい泥炭を誤って採取したものであろう。

シベリアのアイスコンプレックスの年代は、これまでの研究で約5万年から1万年前以前という年代が得られている（Kaplina and Lozhkin, 1984）。今回試料の得られた層準は、最下位の試料（海拔約15m）で、約32,250年前であった。地点1では、海水準付近までアイスコンプレックスが確認でき、さらに少なくとも海水面下10数m程度まで存在するという報告もある（Куницыкий, 1989）。したがって本地点では、約5万年前のアイスコンプレックス形成開始期からのアイスコンプレックスが存在する可能性がある。

表1 試料の年代測定結果

サンプル番号	地点(深度*)	材料	年代	コード番号
IC1	地点1(2.2m)	泥炭	11,090 ± 270	NUTA-2231
IC2	地点1(11.2m)	泥炭	1,200 ± 260	NUTA-2232
IC3	地点1(15.4m)	泥炭	25,740 ± 1100	NUTA-2234
IC4	地点1(21.3m)	泥炭	80 ± 240	NUTA-2236
IC5	地点1(24.7m)	泥炭	32,850 ± 1030	NUTA-2237
M1	地点1(21.3m)	マツの白歯	34,250 ± 820	NUTA-2669
S1	地点2	木材	9,030 ± 220	NUTA-2235
K1	地点3	泥炭	890 ± 170	NUTA-2239

\* 地点1の地表面からの深度

## 2) 海成堆積物の年代

アラスの縁に分布する堆積物の年代は、海面から約2mの位置で約9,030年前という値が得られた。この海成堆積物には小さな貝化石が含まれており、おそらく汽水性の環境で堆積したと考えられる。このことから、完新世になり、海水面が上昇したときにアイスコンプレックスを開析して谷を形成し、その後、海岸付近に干潟のような環境が形成され、約9,000年前以降谷を約10m程度まで埋積した。そして南側で凍土が局所的に融解し、アラスを形成したものと考えられる。

## 3) マンモスの年代

これまでにシベリアで得られているマンモスの年代のいくつかを表2にまとめた。

本研究と同じブイコフスキー半島のエドマ層の崖から出土したマンモスの年代は、約35,800年前とされ（Верещагин, Тихонов, 1990）、今回得られた年代とほぼ同じである。今回の試料は出土した層準が判明している点で意義深い。

シベリアのマンモスは、プリミゲウスゾウあるいはケナガマンモスとよばれ、その年代は層位的あるいは年代的に3つに区分されるという（Minato, 1967）。第1は最終間氷期、第2は約5万年前～2万3千年前のカルギンスキー亜間氷期、そして第3は約1万1千年前頃のアレレード温暖期である。マンモスの絶滅は、その年代が約10,000年までであること、ヤクーツク中央アルダンにおいてはマンモスの骨器を使用した形跡のある遺跡が10,000年前であることから、10,000～12,000年前と考えられている（Vereshchagin, 1974）。絶滅の原因は、最終氷期末から後氷期にかけての気候変化や古地理の変化に伴う植生の変化と考えられ、当時の人々の狩猟によるものではないら

表2 シベリアのマンモスの年代

採取場所	年代	備考
コリマ川の支流	44,000年B.P.	ベレゾフカ川
コリマ川上流の支流	39,000年B.P.	マンモスの子
ヤナ、インディギルカ低地*	29,500年B.P. 43,000年B.P.	
インディギルカ川の東支流**	50,000年B.P.	皮と肉
インディギルカ川の西支流*	12,240 ± 160年B.P.. 13,700 ± 400年B.P.	象牙 皮とジン帯
ブイコフスキー半島*	35,800年B.P.	エドマ層
ゲダンスキー半島*	10,000 ± 70年B.P.	
タイミール半島*	11,500年B.P.	

\* Верещагин, Тихонов (1990) \*\* Vereshchagin (1974)

しい。それは、マンモスの分布域が、当時の人々の生活域よりかなり北方にずれていたからである（河村、1989）。

日本ではこれまでに得られているマンモスの年代としては、 $23,816 \pm 884$ y.B.P.（知床沖海底）、 $20,243 \pm 670$ y.B.P.（別海2号標本海底）があり、ナウマンゾウがほぼ4万9千年前～3万年前、マンモスはほぼ2万4千年前から2万年前に日本に分布していたことから、ナウマンゾウが最終氷期中頃まで棲息し、つづいて最終氷期最寒冷期に近づいてマンモスが南下してきたものと考えられている（中井ほか、1991）。このほかにも日本ではマンモスの化石が発見されているが、直接その年代は測られていないようである。

#### 4) カラハリ島のアイスウエッジポリゴンの形成年代

アイスウエッジの断面形態から、カラハリ島のアイスウエッジは基本的に泥炭層の堆積後に発達したものと考えられる。試料を採取した断面では、大きなアイスウエッジの上に幅10cmの小さなアイスウエッジが載っているように見えるが、これは最近の活動層の深さが以前の最大値よりも浅いためであろう。アイスウエッジ氷の直上の泥炭の年代から、このアイスウエッジの形成は約900年前以降であることが判明した。少なくとも数10cmの厚さの活動層があったと考えられるので、形成は約5-600年前以降であろう。アイスウエッジの正味の幅を約1mとすると、アイスウエッジの年平均成長速度は約2mm/年と見積られる。永久凍土表面に露出する凍結割れ目の幅は、約10～6mmであり、このアイスウエッジは現在の環境下でも形成されつつあることが示唆される。

## 6. おわりに

今回レナ川河口付近の一部の地形を調査し、いくつかの年代資料を得ることができた。これらの結果から次のような地形発達史が編めるのではなかろうか。ブイコフスキー半島でみられたようなアイスコンプレックスが少なくとも約3.6万年から1万年以前にかけて形成された。河床高度は、アイスコンプレックスの成長に伴い上昇し、約1万年前には約40mになった。その後約9千年前には約2m以浅まで河川は下刻した。その後この谷を汽水性の堆積物が埋積し、約10mまで河床が上昇した。カラハリ島では、おそらく数千年前には現在よりも河床は低下し、泥炭の形成が開始した。

Grosswald et al. (1992)は、チクシ湾の南西部まで大陸棚氷床の一部が後期更新世に広がっていたと考えた。しかし、チクシの北東方向にはアイスコンプレックスからなるブイコフスキー半島とムスタハ島が、この湾を閉塞する形で位置している。ここではアイスコンプレックスは埋没氷河起源ではないと考えられ、また今回の年代測定値からアイスコンプレックスの年代は後期更新世であることが判明した。したがって、少なくとも本地域においては、Grosswald et al. (1992)の提唱する大陸棚氷床の存在を認め



ることは困難である。

今回の調査では短期間であったが、この地域の概略を掴むことができた。今後は、この地域の永久凍土、アイスコンプレックスの形成環境や古環境変遷についての研究をより発展させていきたい。

#### 謝辞

本研究は文部省海外学術調査「気候変動がシベリアの永久凍土地域の凍土圏・生物圏に与える影響の研究」（代表福田正己教授）によった。野外調査の際にはヤクーツク永久凍土研究所の協力を得た。ロシア語文献の翻訳に関して、森淳子さん（北海道大学大学院地球環境科学研究科修士課程）にお世話になった。以上の方々に感謝致します。

#### 文献

- Верещагин Н.К., Тихонов А.Н.(1990): Экстерьер мамонта. Якутск Институт Мерзлотоведения. СО АН СССР, 80 с.
- Grosswald M.G., Karen W., Shishorina Z. and Bodin A.(1992): Glacial Landforms and the Age of Deglaciation in the Tiksi Area, East Siberia. *Geografiska Annaler*, 74A, 295- 304.
- Kaplina T.N. and Lozhkin A.V.(1984) : Age and History of accumulation of the "Ice Complex" of the maritime lowland of Yakutiya. In "Late Quaternary Environments of the Soviet Union" Velichko A.A. ed., University of Minnesota Press, Minneapolis, 147-151.
- Katasonov E.M. and Solov'ev P.A.(1969) : Guide to trip round central Yakutia. International symposium Paleogeography and Periglacial phenomena of Pleistocene, 87p. Yakutsk.
- 河村善也 (1989) : マンモスと先史モンゴロイド. *モンゴロイド*, No.2, 19-20
- Кунцкий В.В.(1989) : КРИОЛИТОЛОГИЯ НИЗОВЬЯ ЛЕНЫ. Якутск Институт Мерзлотоведения. СО АН СССР, 165 с.
- 中井信之・有田陽子・中村俊夫・亀井節夫・秋山雅彦・沢田 健 (1991) : ナウマンゾウ、オオツノシカのAMS<sup>14</sup>C年代と<sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C比による最終氷期の気候変動. 名古屋大学加速器質量分析計業績報告書 (II) , 26-39
- Minato M. (1967) : On the age of Mammoths in Japan and Siberia. *Earth Science*, Vol.21, No.2, 13-17
- Vereshchagin N.K.(1974) : The mammoth "cemeteries" of north-east Siberia. *Polar Record*, 17, 106,3-12.

## **Radiocarbon Ages of Permafrost in The Bykovsky Peninsula and Kalakhari Island, Eastern Siberia**

Daisuke NAGAOKA<sup>1</sup>, Toshio SONE<sup>2</sup>, Toshio NAKAMURA<sup>3</sup>,  
Masami FUKUDA<sup>2</sup>, Tomoko NAKAYAMA<sup>4</sup> and Victor KUNITSKY<sup>5</sup>

1. Graduate School of Environmental Earth Science, Hokkaido University, Sapporo, 060, Japan
2. Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, Sapporo, 060, Japan
3. Dating and Materials Research Center, Nagoya University, Chikusa, Nagoya, 464-01, Japan
4. Graduate School of Science, Hokkaido University, Sapporo, 060, Japan
5. Yakutsk Permafrost Institute, Yakutsk, Sakha Republic, Russia.

The field survey of permafrost was conducted at the Bykovsky Peninsula and Kalakhari Island, which are located in the delta region of Lena River, eastern Siberia along the coast of Arctic sea.

The permafrost depth was estimated as 650m at the town of Tiksi near surveyed sites. At the Bykovsky Peninsula, there developed the terrace with the height of 40 m above sea level. Major part of terrace is composed of the massive ground ice, which is termed as Ice complex or Edoma. In special relation to the origin of Ice Complex, organic materials from the frozen layers were sampled at that site. These samples were subjected to <sup>14</sup>C dating by means of the AMS. At a horizon, a tooth of Mammoth was also collected so that <sup>14</sup>C dating was made. Similar samples were also collected from the organic sediments, which overlain the active ice wedge at Kalakhari Island.

Obtained <sup>14</sup>C dating data from the Bykovsky Peninsula suggested the accumulation of Ice Complex initiated at 50,000 yBP or older and terminated older than 10,000 yBP. On the alluvial terrace at Kalakhari Island, typical tundra polygon with active ice wedge distributes. Overlain peat sediment on tundra polygon was dated as 900yBP. Based upon this datum, the initiation of accumulation of ice wedge was also estimated with the value of ice wedge growth rate under present climatic condition.