

東シベリア各地の永久凍土中の有機質年代測定

福田正己¹・長岡大輔²・西城潔³・中村俊夫⁴・V.クニツキ⁵

- 1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
2北海道大学大学院地球環境研究科 〒060 札幌市北区北10条西5丁目
3東北大学理学部地理学教室 〒980 仙台市青葉区荒巻字青葉
4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
5ロシア科学アカデミー附属永久凍土研究所 ヤクーツク、サハ共和国、ロシア連邦

1 はじめに

1994年に文部省科学研究費国際学術研究の一環として、シベリア永久凍土の形成に及ぼす気候変動の影響の現地調査を実施した。本研究は1992年度、1993年度にも実施し、関連した年代測定については既に報告した。(長岡ほか1994)。本報告は、昨年を引き続いて東シベリア北極海沿岸地域およびコリマ川下流域での地下氷(エドマ)の成因と形成年代に関する調査を実施した。これらの地下氷には高濃度のメタンガスは含有され、近年の地球温暖化傾向のもとで、その大気への放出が果たす役割について注目されている(福田、1993)。またこのエドマの形成環境については、年代情報やメタンガス含有量分布、酸素同位体分布などから、最終氷期の亜間氷期(3-4万年前、カルギンスキー亜間氷期)であると推定されている。(Fukuda、1993)。本報告では1994年7-9月に実施した現地調査で採取したエドマ中の有機物年代測定結果とその持つ意味についてその概要を述べる。

2 調査地域

前回報告したレナ川デルタ地域(ブイコフスキー半島、北緯71°46'、東経129°30')から東へ約600km離れた北極海に浮かぶ大リャホスキー島の南岸(北緯73°19'51"、東経141°21'35")とその対岸のオイヤゴスキーヤール(北緯72°40'34.5"、東経143°36'42")、さらに東のコリマ川下流のドバニヤール(北緯68°37'48"、東経159°10'34")の3ヶ所である。以上の位置図を図1、図2に示す。地質学的には、各地域共に第四紀に属する堆積物(Q2~Q4)に厚く覆われ、また永久凍土の厚さはおおよそ600-800mにも達する。この堆積物中には地下氷の集積(エドマ)が広く分布することが確認されている。地下氷の厚みは50-30mであり、これを超える分布はない。また露頭での産状や特徴は相互に極めて類似しており、ある特定な環境でまたある時期に集中して形成されたことが示唆されている。(Kaplina & Lokin

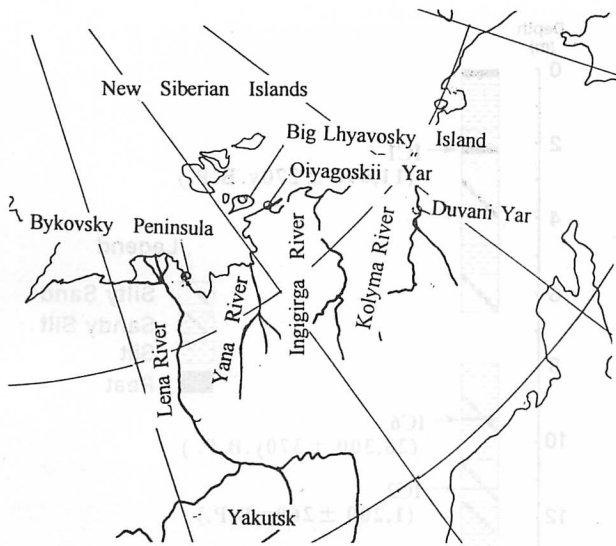


図 1 東シベリア調査地域図

Location Map of Surveyed Area

1984)。本報告では以前の報告以降新たに得られた地下氷（エドマ）層の炭素同位体年代測定結果とそれが示唆するエドマの堆積時期について考察する。調査地域の相互の特徴は、バイコフスキー半島とトバニヤールが各々レナ川、コリマ川の下流域にある点、大リャフオスキー島とその対岸のオイヤゴスキーヤールはヤナ川とシンジギルガ川に挟まれた地域である。すなわち大河川の影響を直接受ける地域と間接的な影響地域に2分される。

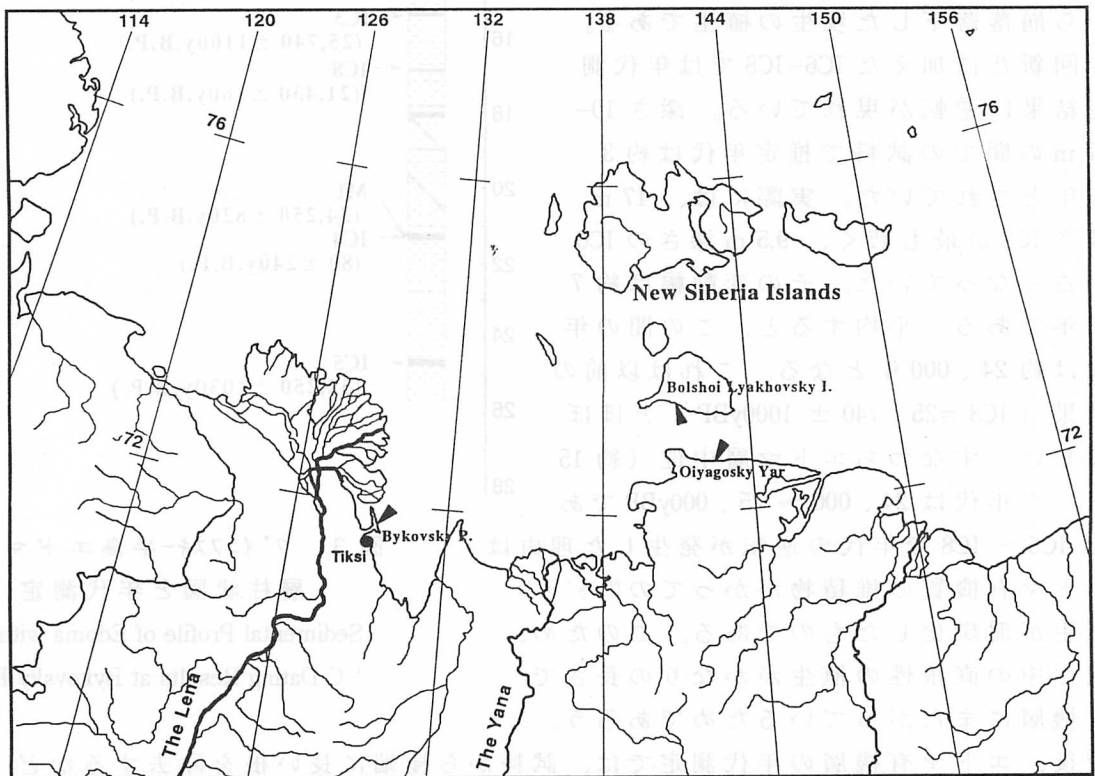


図 2 調査地域拡大図（レナ川からインジギルガ川まで）

Enlarged Map of Surveyed Area (Lena, Yana and Ingigirga Rivers)

バイコフスキー半島（Bykovsky P.）、大リャフオスキー島（Bolishoi Lhyavosky Is.）、オイヤゴスキーヤール（Oiyagoskii Yar）

3 各地点のエドマ層年代結果

3.1 ブイコフスキー半島

この地点での年代測定結果について前報（長岡ほか 1994）で詳細に述べた。今回は図3の柱状図に示した IC6-IC8までの3試料の結果が付け加わった。氷の間に挟まれた円柱状の凍土堆積物は、全層にわたって有機質に富んでいる。堆積物では下層から上に向かってシルト質から砂質へと漸次変化しており、川による堆積環境の変化をうかがわせる。既に前報で述べたように IC2 及び IC4 の結果は、エドマ層の融解過程で、表層部から崩落落下した現生の植生である。今回新たに加えた IC6-IC8 では年代測定結果に逆転が現れている。深さ 10-17 m の間での試料で推定年代は約 3 万年とされていた。実際には、17 m 深さ IC8 が最も若く、9.5 m 深さの IC6 が古くなっていた。その変動幅は約 7 千年である。平均すると、この間の年代は約 24,000 年となる。これは以前の結果（IC3 = 25,740 ± 1000yBP）とほぼ等しい。すなわちエドマ層中位（約 15 m）の年代は 24,000 ~ 25,000yBP である。IC6 ~ IC8 で年代の逆転が発生した理由はエドマ有機質の堆積物がかってのツツラの植生が泥炭化したものである。このため、植生中の直根性の植生がかなりの長さで有機層にまたがっているためであろう。今後、エドマ有機層の年代測定では、試料から極端に長い根を除去するなどの対策が必要とされよう。こうした 7000 年程度の逆転を考慮しても、ブイコフスキー半島のエドマの堆積時期は、下位で 32,250 ± 1030yBP、中位が 24,000-25,000yBP となった。最上部 IC1 は上部の堆積物の特徴や、エドマ表層部に発達する泥炭層に連続することなどから、エドマ堆積時というより、その後の浸食過

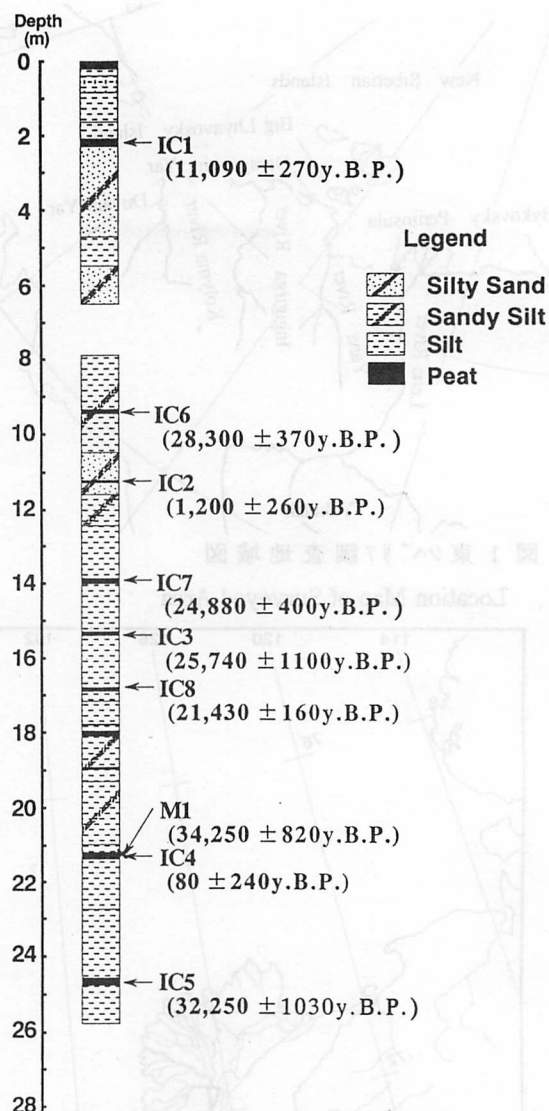


図3 ブイコフスキー半島エドマ層柱状図と年代測定
Sedimental Profile of Edoma with
¹⁴C Dating Results at Bykovsky P.

程の年代を示す可能性が高い。Kaplina からも同様な結果をけ川河口で得ている。以上フイフスキー半島のエドマ層の年代は、下層は3万年前で中位で2万4、5千年前である。これは後述する他の地点の場合よりもやや新しい年代となる。

3. 2大リャホフスキー島南岸

北極海のノボシビルスキー諸島（新シベリア諸島）の南端に位置する大リャホフスキー島の南海岸沿いには写真1のようなエドマ層が連続して露出している。対岸のオイヤゴスキーヤールとともに、東シベリアでエドマ層の下限が確認できる数少ない場所でもある。エドマ層の最大厚みは38 mあ



写真1

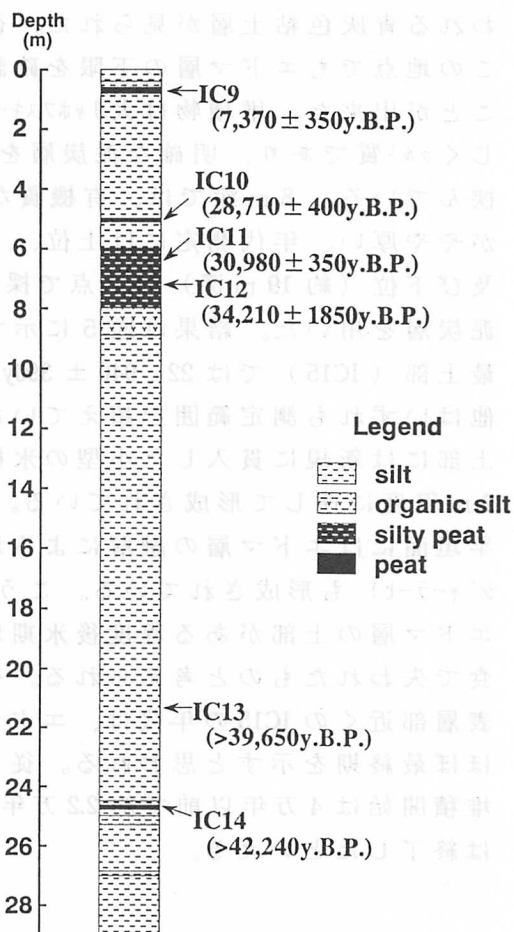
リャホフスキー島のエドマ

Edoma Exposure at Big Lhyavosky Is.

り、その下位には氷の含有量が少ない粘土層が位置する。エドマ層との境界には未分解の樹木片を多数含む層があり、かつての温暖気候があったことを示唆している。この粘土層は最終氷期以前の間氷期（Mikulino 間氷期 - Riss/Wurm 間氷期相当）とする意見もある。（A.Arkhangelov による私信）。更にその下位にはエドマ層と類似した氷と有機物の少ない堆積層とつながる。図4に柱状図と年代結果を示す。堆積物はフイフスキー半島と比べてやや細粒で、シルト質である。包含有機質

図4

大リャホフスキー島のエドマ柱状図と年代結果 Sedimental Profile of Edoma at Big Lhyavosky Is



質もやや少ない。また明確な泥炭層は下位と上位に集中している。最上部のIC9はエドマ層が一旦形成停止後、熱融解でやや沈下した際のアラス性堆積であろう。直接エドマの形成時期の最終期を示すものではない。上位では年代は28,710yBPから34,210yBPに集まっている。また年代の逆転も見られない。20 m以深では2サンプルとも年代測定限界以上を示している。図3のフイロフスキーと比較すると、上位でも年代は古くなっており、エドマ層の形成期に相違のあることが分かる。

3. 3 オイヤゴスキーヤール

大リャホフスキー島の対岸約60 km南東には、比高が約40 mの平坦面が広がり、海岸線沿いで段丘崖となっている。多くの場所でエドマ層が露出しており、地下水とその中に円柱状の凍土を含む構造は大リャホフスキー島に類似している。今回の現地調査でも、厚さ38 m以深に明確な不整合はないものの、間氷期の堆積と思われる青灰色粘土層が見られた。従ってこの地点でもエドマ層の下限を確認することが出来た。堆積物は大リャホフスキー島と同じくシルト質であり、明確な泥炭層を途中で挟んでいる。8 m深では、有機質なシルト層がやや厚い。年代測定には上位、12 m深及び下位(約19 m深)の3点で採取した泥炭層を用いた。結果は図5に示すように最上部(IC15)では22,940 ± 390yBPで、他はいずれも測定範囲を超えていた。最上部には新規に貫入した小型の氷楔が深さ2 m程度に達して形成されている。さらに平坦面にはエドマ層の融解による地形(ハイジャーレヒ)も形成されている。こうした点でエドマ層の上部がある程度後氷期以降の浸食で失われたものと考えられる。そこで、表層部近くのIC15の年代は、エドマ層形成のほぼ最終期を示すと思われる。従って、エドマ堆積開始は4万年以前で約2.2万年前には堆積は終了したといえる。

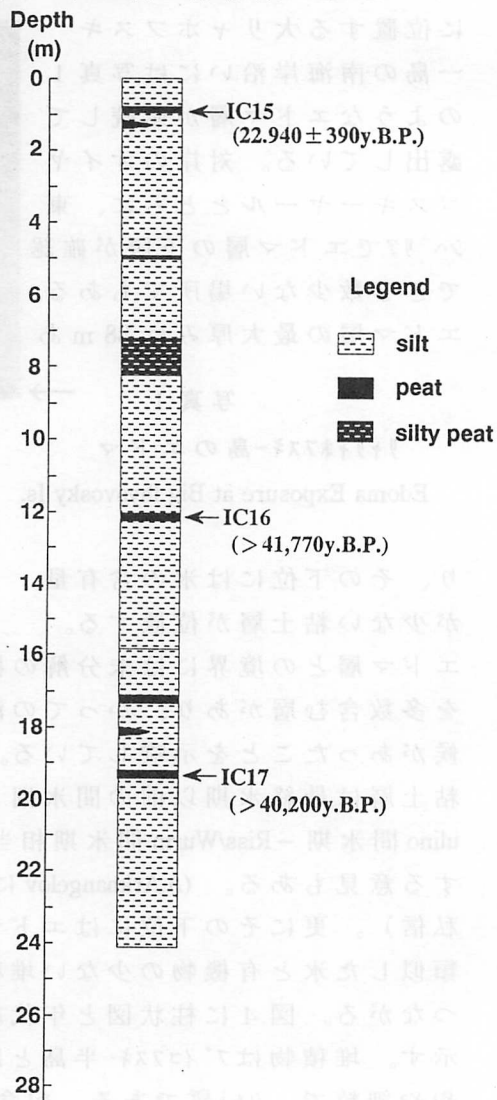


図5 オイヤゴスキーヤールのエドマ
柱状図と年代測定
Sedimental Profile of Edoma at
Oiyagoskii Yar

3. 4 ドバニヤール (コリマ川下流)

コリマ川下流の都市
 チェルスキーの上流に約 80km
 遡ると川はほぼ西に向か
 かって流れる。更に一旦北
 へ大きく蛇行する地点が
 ドバニヤールである。その付
 近の河川と露頭位置を図
 6 に示す。図中 Point とし
 て矢印で示した右岸には
 比高 30 m の河岸段丘が発
 達し、これに沿ってエドマ
 層が露出している。

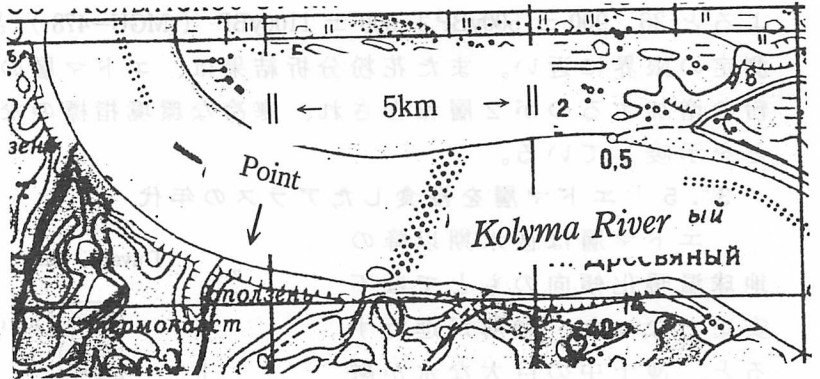


図 6 ドバニヤール (コリマ川) 位置図
 Location Map of Duvani Yar, Kolyma River

露頭での観察によると、露出する地下氷の厚さは約 28m で、露頭の基部は融解した堆積物で覆われ、不整合関係を見ることは出来ない。Giterman ら (1982) によると、エドマ構成する平坦面から約 32 m 下位に、湖成堆積起源の粘土層が存在する。今回の調査でもこれに相当する褐色粘土層の存在を確認した。北極海沿岸のエドマ層との対比を考えれば、これが、間氷期相当層 (Mikulino) にあたる可能性がある。エドマ層の堆積物は全体に褐色で有機質に富んでいる。しかし、最下層を除いて、明瞭な泥炭層は発達していない。そこで、堆積物中で特に有機質な部分を選択し、土壌試料を採取した。それらが上位の IC 18, 中位の IC 19 である。4 m 深での IC 18 は 33、480 ± 260yBP であり、他の地点に比べて上位ながら年代が古い。約 14m 深では年代測定限界を超えている。従ってドバニヤールではエドマの形成終止期が、やや早い可能性がある。

ドバニヤールでは、β線測定による従来の方法

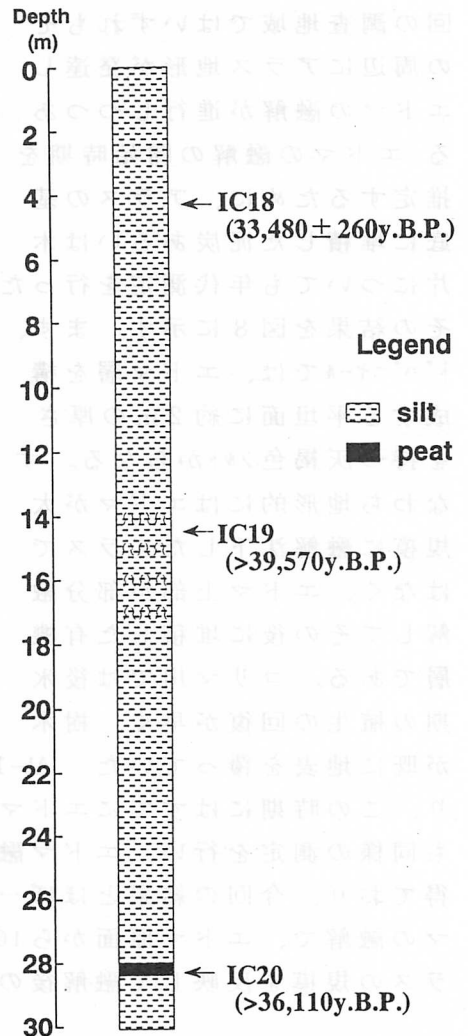


図 7 ドバニヤールのエドマ柱状図 →

Sedimental Profile of Edoma at Duvani yar, Kolyma River

エドマ最下層での年代測定が得られている。(Gitterman et al 1982)。それによると 36、900 ± 500yBP, 37,600 ± 1100yBP (MGU-478) となっており、炭素年代測定の限界に近い。また花粉分析結果は、エドマ層の中位に明らかに樹木花粉の増加するのが2層報告され、寒冷な環境指標のなかに温暖期があったことを示唆している。

3.5 エドマ層を浸食したアラスの年代

エドマ層は後氷期以降の地球温暖化傾向のもとでは不安定となった。融解が進行すると、凍土中の巨大な氷が融解流出するため、地盤の沈下が発生する。この融解陥没地形をアラス (Alas) と呼ぶ。今回の調査地域ではいずれもその周辺にアラス地形が発達し、エドマの融解が進行しつつある。エドマの融解の開始時期を推定するために、アラスの基底に堆積した泥炭あるいは木片についても年代測定を行った。

その結果を図8に示す。まず、ドバニヤルでは、エドマ層を構成する平坦面に約2mの厚さを持つ灰褐色シルトからなる。すなわち地形的にはエドマが大規模に融解沈下したアラスではなく、エドマ上部が部分融解してその後に堆積した有機層である。コリマ川では後氷期の植生の回復が早く、樹木

が既に地表を覆っていた。AI-1 (埋没木片) サンプル年代は 4、200 ± 80yBP であり、この時期にはすでにエドマ融解が進行していたことが分かる。Gitterman からも同様の測定を行い、エドマ融解層の年代を 3、955 ± 80yBP (MGU-161) として得ており、今回の結果とほぼ一致する。次に大リャボフスキー島の場合には、エドマの融解で、エドマ原面から10数m沈下したアラスの基底堆積物である。アラスの規模を反映して融解後の有機堆積層は厚い。その上位 (AI-3) とエドマ

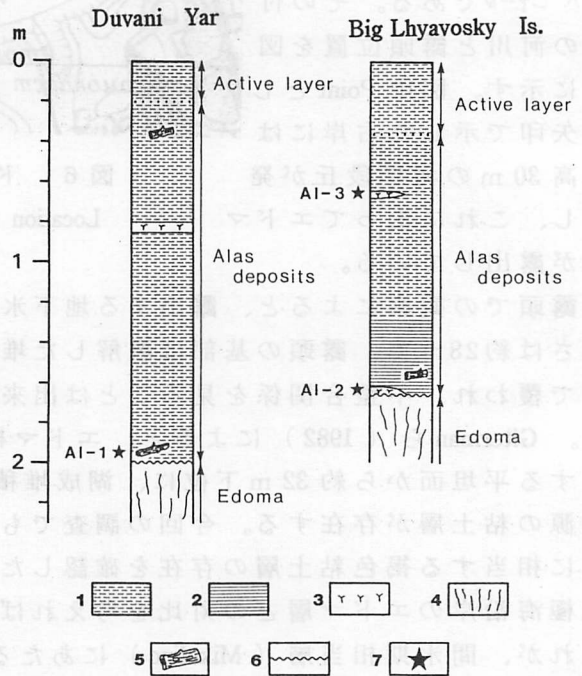


図8 エドマ融解層の堆積柱状図

- 1:シルト 2:粘土 3:泥炭 4:氷(エドマ) 5:木片
6:不整合面 7:年代測定試料採取点

Sedimental Profiles of thawed Edoma Deposit

- 1:Silt 2:clay 3:Peat 4:Edoma(Ice complex) 5:Wood
6:Unconformity 7:Sampling Point for Dating

との境界付近 (AI-2) について、各々 $1,350 \pm 350$ yBP, $8,750 \pm 100$ yBP の値が得られた。少なくとも約 8,000 年前にはこの地域ではエドマ層の融解が活発になっていたことが示唆される。Kaplina & Lozhkin(1984) はヤナ川河口で採取したほぼ同層準の試料で、 $11,500 \pm 210$ (MAG-137) の年代を得ている。またかれらは広範なエドマ分布域で、エドマ融解堆積物の年代測定を比較し、融解の開始期を約 1 万年前と推定している。我々の結果もこれにほぼ一致している。

4 考察とまとめ

本報告及び前回報告した分をまとめて、シベリア永久凍土地域で採取及び年代測定された結果を表 1 に示す。シベリアでの氷期-間氷期の気候変動に強い影響を受けて、他の永久凍土地域には見られないユニークなエドマ層には、過去の気候変動の記録が多数残されている。また、なぜ東シベリアの

サンプル番号	地点	材料	年代	コード番号
IC1	ブコフスキー半島	泥炭	$11,090 \pm 270$	NUTA-2231
IC2	ブコフスキー半島	泥炭	$1,200 \pm 260$	NUTA-2232
IC3	ブコフスキー半島	泥炭	$25,740 \pm 1100$	NUTA-2234
IC4	ブコフスキー半島	泥炭	80 ± 240	NUTA-2236
IC5	ブコフスキー半島	泥炭	$32,850 \pm 1030$	NUTA-2237
IC6	ブコフスキー半島	泥炭	$28,300 \pm 370$	NUTA-2839
IC7	ブコフスキー半島	泥炭	$24,880 \pm 400$	NUTA-2795
IC8	ブコフスキー半島	泥炭	$21,430 \pm 160$	NUTA-2796
IC9	ホルジョイリヤホスキー島	泥炭	$7,370 \pm 820$	NUTA-2840
IC10	ホルジョイリヤホスキー島	泥炭	$28,710 \pm 400$	NUTA-3532
IC11	ホルジョイリヤホスキー島	泥炭	$30,980 \pm 350$	NUTA-2841
IC12	ホルジョイリヤホスキー島	泥炭	$34,210 \pm 1850$	NUTA-2797
IC13	ホルジョイリヤホスキー島	泥炭	$>39,650$	NUTA-2842
IC14	ホルジョイリヤホスキー島	泥炭	$>42,240$	NUTA-2798
IC15	オイヤコフスキーヤール	泥炭	$22,940 \pm 390$	NUTA-3521
IC16	オイヤコフスキーヤール	泥炭	$>41,770$	NUTA-3522
IC17	オイヤコフスキーヤール	泥炭	$>40,200$	NUTA-3542
IC18	トウハニヤール	有機質土	$33,480 \pm 260$	NUTA-3610
IC19	トウハニヤール	有機質土	$>39,570$	NUTA-3611
IC20	トウハニヤール	泥炭	$>36,110$	NUTA-3531
M1	ブコフスキー半島	マンモスの臼歯	$34,250 \pm 820$	NUTA-2669
S1	ブコフスキー半島	木片	$9,030 \pm 220$	NUTA-2235
K1	カラハリ島	泥炭	890 ± 170	NUTA-2239
AI-1	トウハニヤール	木片	$4,200 \pm 80$	NUTA-3546
AI-2	ホルジョイリヤホスキー島	泥炭	$1,350 \pm 350$	NUTA-3596
AI-3	ホルジョイリヤホスキー島	泥炭	$8,750 \pm 100$	NUTA-3547

表 1 シベリア永久凍土地域から得た ^{14}C 年代測定結果
Results of ^{14}C Dating Obtained from Siberan Permafrost Areas

しかも大河川下流域と北極海沿岸にのみ形成されたか。これは、最終氷期の特異な気候変動の反映といえる。本研究報告では、まずエドマ層の形成時期についての第1次情報として、微量な試料での測定可能なタンデム型加速器による年代測定結果をまとめた。環境変動の指標となる氷の同位体分析結果や花粉分析、含有メタンガス濃度分析結果と併せて、総合的に今後検討を加えていく必要がある。従来欠けていた年代測定結果を、今回新たにつけ加えることで、氷期以降のシベリアの環境変動がより詳細に復元出来ると期待される。ここでは、エドマの形成が4万年前以前に開始し、東側では3万年、西のレナ川デルタで2万2千年前には終了したと、エドマの融解が1万年前から活発となったことをとりあえずの結論とする。

5 謝辞

本報告に述べた試料は、文部省科学研究費国際学術（海外調査）「気候変動がシベリア永久凍土地域の凍土圏・生物圏に与える影響の研究」課題番号04041014 代表者福田正己が実施した現地調査で得た。また現地調査にあたってはロシア科学アカデミー永久凍土研究所、モスクワ大学地理学部の関係者の協力を得た。年代測定にあたっては名古屋大学年代測定資料研究センターの諸氏の協力を得た。ここに記して感謝の意を表します。

引用文献

- Fukuda M.(1993):Genesis and Occurrence of Ice Complex(Edoma) in lowland area along Arctic coast of east siberia near Tiksi.Proc. of First Symposium on Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia,ed by M.Fukuda,101-103.
- 福田正己 (1993): 永久凍土中の地下氷に含まれる気泡中のCH₄濃度変化、日本地球化学会年会講演要旨集、50-51.
- Gitterman R.E.,Sher A.V. and Mathews j.V.(1982):Composition of the development of tundra-steppe environments in west and east Beringia:Pollen and Macrofossil evidence from key section. in Paleocology of Beringia, ed by Hopkins D. et al,43-73.Academic Press,New York(489pp)
- Kaplina T.N. and Lozhkin A.V.(1984):Ahe and History of accumylation of the "Ice Complex" of the marinetime lowland of Yakutia. in "Late Quaternary Environments of the Soviet Union" ed by Velichiko A.A.,University of Minnesota Press,Minneapolis,147-151.
- 長岡大輔・曾根俊雄・中村俊夫・福田正己・仲山智子・V.クニツキー (1994): 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.名古屋大学加速器質量分析計業績報告書(V)、197-206.

Radio Carbon Dating Results of Organic Materials Obtained from Siberian Permafrost Areas

Masami FUKUDA¹, Daishuke NAGAOKA², Kiyoshi SAIJYO³,
Toshio NAKAMURA⁴, Victor KUNITSKY⁵

1. Institute of Low Temperature Science, Hokkaido Univ., Sapporo, 060, Japan

2. Graduate School of Environmental Earth Science, Hokkaido Univ., Sapporo,
060, Japan

3. Institute of Geography, Tohoku Univ., Sendai, 980, Japan

4. Dating and Materials Research Center, Nagoya Univ., Nagoya, 464-01, Japan

5. Permafrost Institute, Siberian Branch of Russian Academy of Science, Yakutsk,
Sakha Republic, Russia

In 1994 summer season, the intensive field survey was conducted in the far north-eastern Siberian Permafrost area along Arctic coast, aiming to reconstruct palaeo-environment during last Glacial period. There widely exists the large scale ground ice, termed as Ice Complex or Edoma, in the permafrost. The Ice Complex contains profound records of past climatic change with palaeo-temperature, pollen and gas composition of air bubble in it. These evidences indicate Ice Complex developed under very unique environments. However we had few time records derived from directly Ice Complex. In the sediment parts of Ice Complex, organic layers of peat or other types alternately deposited.

Using organic sediments, radio carbon dating of sediments were attempted at the Dating and Material Research Center, Nagoya Univ. The dating results of samples obtained from four locations suggest that major parts of Ice Complex deposited in earlier than 40,000yBP, and terminated it's deposition after 22,000yBP. The period of sedimentation is denoted as Karginsky Interstadial Period. After beginning of Holocene, under global warming trend Ice Complex occurs to thaw in large scale. Once Ice Complex tends to thaw, thermo-karst depression, locally named as Alas, develops with organic sedimentation in the depression. The radio carbon dating results of organic sediments from Alas indicated that thawing of Ice Complex started at 10,000yBP or later.