ヤクーチャ(シベリア), バロー(アラスカ),
マッケンジーデルタ(カナダ)における
いくつかの典型的な永久凍土地形

木 下 誠 一*

Some Typical Landforms of Permafrost at Yakutia (Siberia),
Barrow (Alaska) and Mackenzie Delta (Canada)

Seiiti KINOSITA

Abstract

Scientific expeditions in permafrost regions were carried out at Yakutia, Siberia in the middle of August, 1972 and at Barrow, Alaska and Tuktoyaktuk, Mackenzie Delta in the summers of 1974 and 1977.

I Yakutia, Siberia

Field observations were conducted on permafrost around Lake Surdakh, which is located 250 km northeast from Yakutsk, Siberia. Lake Surdakh is an alas, which is a depression formed by a thermokarst development in which local deep thawing has taken place in permafrost masses accompanied by the melting of ground ice. The shape of the alas is nearly round and the diameter of Lake Surdakh is about 4 km. The lake is surrounded from all sides by a larch forest. The height of the basin cliffs is about 20 m. At some places along the cliffs underground ices are exposed. The top of the ices is 1.5 m below the top of the cliffs and the ices sink into the ground in a wedge-like shape. Observations were made as to the exposed ice, the soil around the exposed ice and the forest above the ground, and also on the some alases in the vicinity.

II Barrow and Tuktoyaktuk

Field observations were conducted on high center polygons, pingos, ice wedges and exposed massive ground ice, all of which showed characteristic land feature of the tundra area composed of permafrost.

a. High center polygon

Spreading gregariously, high center polygons formed an orthogonal net pattern near Footprint Creek, 3 km southwest of NARL, Barrow. Each mound was 5–10 m in width and 50–100 cm in height. A crack ran along the trough between two neighboring mounds. The surface at the raised center of a mound was covered with vegetations including willow, birch and crowberry. Core samples showed the structures of layers; namely, the upper layer of 5–10 cm in thickness was composed of mixture of roots,

* 北海道大学低温科学研究所

Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University

organic material, and silt, while the layer underneath was composed almost of ice-rich peat, which had such an extremely high water content as amounts to 1000–2000%, the ice being uniformly contained not in the form of ice lenses. Meanwhile, as for the trough, its surface was covered with gramineae or formed puddles, while the layer above the depth of 40–50 cm was composed of silty soil and contained distinct ice lenses, whereas the layer below this depth was composed of ice, which was polycrystalline with ice crystals several cm in length and almost stretching vertically. Polygons studied by the authors exemplified the type of ice-wedge polygons.

b. *Pingo*

The most spectacular landform associated with permafrost in the pingo formed in the shape of a conical hill. More than 1000 pingos have been mapped in the Mackenzie Delta. Some pingos which stands along the sea coast has been eroded by sea waves, some parts being cut open. The pingo is a small mound which has risen as the result of ice segregation taking place inside. It was made clear that some pingos studied had started to rise long before because the ground at the top contained such a driftwood piece, shells and pebbles that exist in the lowland at present. At the top the layer structure of core samples was firstly sand formed by weathering, and secondly silt, and then clay, which was in the form of conspicuous angular clods of clay and contained ice as orthogonal nets. At the crater ice was found at the depth of about 100 cm, which was polycrystalline with ice crystals having almost the same size both in the vertical and horizontal dimensions. At the foot angular clods of clay were also found at some depths.

c. *Ice wedge and exposed massive ground ice*

A terraced land developed along the sea coast ranging from 4 to 5 km to the southwest of Tuktoyaktuk PCSP Camp. Exposed along the cliff facing the Beaufort Sea were a massive ground ice body and ice wedges being formed at some intervals between the top of the cliff and the ground ice. The ground ice contained horizontal sand layers at some intervals. The ice structures of the ground ice and ice wedges were polycrystalline with ice crystals having the size as large as 5–10 cm.

文部省科学研究費補助金による 海外学術調査として“シベリア学術調査”(昭和47年)、“永久凍土圏学術調査”(昭和49年, 52年, 55年)が行なわれた。この調査は、物理及び生物の両面からの総合調査で、その結果については昭和55年度のを除き、既に報告がなされている^{1,2,3)}。これらの調査で得られた知見のうち、特にヤクーチャ(シベリア)、バロー(アラスカ)、マッケンジーデルタ(カナダ)の永久凍土地域における典型的な永久凍土地形について、その若干を紹介しよう。

I. ヤクーチャ(シベリア)

シベリアのヤクーチャ(ヤクーツク地方)は、冬の最低気温が -60°C 以下になることもある世界の寒極と称される地域である。地下は250mにもわたって永久に凍っている。しかし、この永久に凍る大地の上にはタイガと云われる大樹林帯が存在する。ヤクーツク市の年平均気温は -10°C で、冬期間の積算寒度は7,000~8,000 $^{\circ}\text{C day}$ もある。しかし、夏、特に7月は暑く、 30°C をこすことも稀でない⁴⁾。永久に凍った地面とはいえ、夏には融ける。勿論冬になると凍るが、この夏に融け冬に凍る地面近くの層を活動層と呼ぶ。特にヤクーツク地方のよう

第1図 調査地点の地図

写真1 3カ月前に裸地になった所で、地面がすでに1m沈下し、亀甲模様(円形土)が出来ている アラスの始まり

写真2 40年前に木を切って裸地にした所で、地面が2m沈下

写真3 直径数百メートルの皿状に凹んだアラス、牧草地である

な内陸は夏に暑く、裸地では2mほども融ける。樹林帯のなかでは、立木密度が密なほど、活動層の厚さは減る。

年間の降水量は僅か200mm前後で、そのうち冬の雪は35mm前後である。この降水量は活動層から下へは滲透して行かない。従って年間を通じて僅かの降水量にすぎなくても、それが活動層内に蓄えられる(地表からの蒸発も勿論ある)。それが植物の涵養源になる。樹林の形をとる植物は主としてダフリアカラマツという針葉樹である⁵⁾。立木密度は密林で1ha当り15,000本位で、各樹木の太さは10~15cm、高さ10~15m、樹齢100年前後で、相互の間隔は50~100cmの樹林帯を形成する。これがタイガと呼ばれるものである。

昭和47年の調査において主として対象となった地域は第1図に示されるヤクーツク市から北東約250kmのスイルダッハ湖周辺である。ここでの典型的な永久凍土地形はアラスである。

アラス

アラスは樹林帯のなかにポツンと開け

る皿状に凹んだ裸地である。熱カルストの一種である。

アラスができるきっかけは、木を切るとか山火事などで樹林帯の一部が裸地になることであ

る。写真1はアラスの始まりで、6月に木を切って裸地にした所を3カ月後の9月に撮影したものである。今まで樹林に被われて、夏の間でも深さ70cm位しか融けなかった凍土が、木を切られたため地面が直接暖気にさらされ、又日射をうけることで、融解が2mにも及んだ。今まで活動層の下永久凍土内に融けないうでいた氷が融け、地面は1mほども沈下した。しかも、氷塊がある間隔を置いて亀甲模様に配置していたため、その部分が特に沈下し、地面に亀甲模様の凹みが出来た。このときの凸凹の間隔はほぼ10mである。

凹んだ地面も冬には凍る。しかし、又夏に融け出して再び沈下する。40年もたつと、2mほども沈下する(写真2)。皿状に凹んだ側面においても夏の融解が起るので、その上の立木が倒れ、皿状に凹んだ部分を更に側方へと広げて行く。このようなことを繰返すうちに、広さ数百メートル(写真3)から数kmにも達する大きなアラスが出来た。側端面には亀甲模様の円形構造土が依然として形を残す(写真4、5)。深さの方は10mから20mでとまってしまう。

地下の氷が豊富な所では、融け水が溜って湖を作るものがあるが、一般には蒸発して次第に湖が小さくなって行く。

スイルダッハ湖は、アラスに出来た水溜りで、直径4kmほどの円形の湖であり、その水源は湖岸の崖に露出する地下水氷である。この氷が夏に融けて流入するだけで、他には流入する川も流出する川もない。湖水面からの水の蒸発と地下水氷の夏期の融解による流入とがほぼつり合っていて、現在では一定の湖水面位を保っている。地下水氷の露出する湖岸は夏期の融解で1mほど後退する。湖の深さは6

写真4 直径数百メートルのアラスの側端面

写真5 アラス側端面に残る円形構造土

写真6 スイルダッハ湖、湖岸の高さ20m、その上の樹林の高さ10~15m

写真7 スイルダッハ湖、湖岸に地下水氷が露出して融解しているのが見える

第2図 バローとタクトヤクタークの地図

写真 8 バローにおける構造土

m, 湖の底は2~5m 融解した土であるが, その下には250m もの厚い永久凍土が続く。勿論湖水は冬には凍る。10月始めには凍り始め, 厚さは2m 以上にもなる。春になって完全に氷が融けるのは6月にもなるということである。

II. バロー(アラスカ), マッケンジーデルタのタクトヤクターク周辺(カナダ)

バローはアラスカの北極海岸に位置し, アメリカ大陸の最北端である。年平均気温が -12.4°C , 月平均気温が 0°C をこえてプラスになるのは, 6, 7, 8 の3カ月にすぎない。最高気温も高々 10°C である。年間の降水量も100 mm を少しこすだけで, 活動層の厚さは40 cm をこえることはない。そのため立木が育たず, 苔, 地衣, スゲの類や, 柳, ポプラの小さな灌木が植生としてあるだけで, ツンドラと云われる。永久凍土の厚さは300m をこす。地表近くは洪積期堆積物でシルト質あるいは有機化したピートであるが, その下には砂質土がある。

タクトヤクタークは, カナダ北部のマッケンジー川のデルタ地帯にある。年平均気温は -12.0°C , 年間降水量130mm とバローと殆ど変わらない。永久凍土の厚さも300m をこす程度

写真 9 構造土群の凹部に見られる割れ目

である。マッケンジーという大きな川のデルタ地帯であるため、到る所に水たまりがある。降水量の少ないわりには、水の補給が多いということで、地面の凍結に際しての凍土作用が著しい。そのため永久凍土特有の典型的な地形が各所に見られる。

a. 構造土

前述のアラスの底部又は側面に見られるような規則的な地面模様のくりかえしで、一つの模様の幅は10m から20m で

ある。このようなものを構造土とよんでいる。バローやタクトヤクタークのようなツンドラ帯では広く見られる。模様の特徴から、円形、網状、多角形、階段、線状の5種類に分類される。各模様の境界に沿って割れ目が配置するものが多い。

写真8は各模様の中央部がもり上っている構造土群で、地表はイネ科の草に被われている。写真9は模様間の凹部に沿って見られる割れ目である。写真10は割れ目の所の断面を掘り起してみたところで、約40cm も地下深くまで達している。土質はシルト質である。

このような地表面に見られる割れ目は、冬期間に凍った活動層内の上下の温度差にもとづく熱応力によるものである。一つの模様の大きさをきめる割れ目と隣りの割れ目との間隔 x は、活動層内の上下の温度勾配 dT/dz と次の関係にある。 $x = \tau^{1/2} \alpha G (dT/dz)$ 、ここで、 τ , α , G はそれぞれ凍土の剪断強度、線膨張係数、剪断弾性率である⁶⁾。

バローにおける中央が凸になっている構造土群の等高線図の一例を第3図に示す。高さは20~50cm で、凹部の幅は1~3m である。ひとつの構造土について、凸部の中心と凹部でボーリングを行なった。採取した試料について、断面構造や土質状況を観察し、更に含水比や現

写真 10 割れ目の断面

第3図 バローにおける構造土群の等高線図

第4図 バローの構造土における断面観測の結果，右上は形の模式図 破線は融解層の最深位置を示す。左側は凸部，右側は凹部における測定結果， G_s は構成粒子の比重，C, SI, SA はそれぞれ構成する粒子の粘土分，シルト分，砂分の％である

写真 11 イブークピンゴ，マッケンジーデルタ，タクトヤクタークの部落から南南西4.4 kmにある 高さ48m

場密度，構成粒子の比重等の測定を行なった。昭和52年7月12～14日の結果を第4図に示す。

この構造土の表面は，厚さ2～6cmのイネ科の草で被われていた。凸部では表面から地下へ14.5cmだけ融けていた。土質状態は，表面から地下13cmまでが草根，ピート，粘土の混合物で，13cmから90cmまでがピートと粘土の混合物，以下氷を多く含むピートの順になっていた。氷はレンズ状氷のような無垢の形ではなく，組織のなかに一様に分散していた。その含水比は非常に大き

く，第3層では2000%にも達するものが見られた。

第2層に含まれていた粘土分を取り出して粒度分析をしたところ，粘土質ローム（粘土分24.5%，シルト分45.5%，砂分31%）に分類された。又，地下100cm及び130cmにあるピートを ^{14}C によって年代分析したところ，それぞれ 2670 ± 170 B.P. 年と 4530 ± 150 B.P. 年と

第5図 イブクピングの頂上 a, クレーター b, ふもと c におけるボーリング試料の解析結果

いう結果が得られた。

凹部は凸部のボーリング地点よりも45cm 低く、やはりイネ科の草に被われていた。融解は20cm の深さに達していた。土質構造は、地下16cm までが草根とシルトの混合物、16cm から41cm までがシルトと粘土の混合物、以下は無垢の氷であった。第2層は厚さ1～3mm のレンズ状氷をほぼ2～4mm ごとに含んでいた。凍土性の強い土質にみられるレンズ状氷の層と同じものである。含水比は高々180%程度で、凸部のピート層に比べると遙かに小さい。このため凹部の方が融解が凸部よりも深く進行したわけである。

写真 12 高さ 5 m の小さなピンゴ タクトヤクターク部落から南へ 2.5 km

写真 13 崩れた表土の内部に氷塊が見える

第 1 層に含まれるシルトと第 3 層の粘土・シルトの混合物を粒度分析したところ、ローム（粘土分 18%，シルト分 39.5%，砂分 43%）と、粘土質ローム（粘土分 26%，シルト分 46%，砂分 28%）に分類された。

氷は多結晶氷で、ひとつの結晶は水平に 2～5 mm，鉛直に 2～5 cm の大きさで、多数の気泡（大きさ 0.5 mm ほど）を含んでいた。

構造土の凹部の下に無垢の氷が得られたが、これは後に述べる氷楔と同じものである。

b. ピンゴ

平らな湿地帯の中に盛り上る小丘で、丘の内部には氷がつまっている。高さは数メートルから数十メートルである。写真 11 はイブークピンゴと呼ばれるもので、海面からの高さは 48 m である。ピンゴはエスキモー語で円錐形の丘という意味である。ピンゴはシベリアにもあるが、ヤクート語ではブルグニヤルと呼ばれている。永久凍土地帯に存在するものであるが、どこにでもあるというもので

はない。氷の塊が盛り上る条件がそなわった所に出来る。特にマッケンジーデルタのタクトヤクターク周辺に多く、ここはピンゴ公園と云われている。

ピンゴの成因として、土が凍るときに凍結線へ未凍土から水が吸いよせられて氷が析出する、いわゆる凍上現象が考えられている。イブークピンゴは成因が次のように考えられている。始めに広く浅い沼があって、沼の水は冬に凍るが、その下に冬でも凍らない層があって、更にその下に永久凍土層があったのが、あるとき、より寒い気候におそわれて、沼の水が完全に凍り、その下の不凍層も凍り始めた。この不凍層は、上下前後左右の四周を凍土でつつまれているので、凍結のときの凍上現象で体積増が起ると、上部を押し上げて丘が出現する。上方へ氷の析出が起るのであるが、この氷が丘の内部に存在するのである。

イブークピンゴの頂上は裸地（さらさらとしたシルト質土）で、その下のクレーターでは、表層砂地の裸地が半分ほどで、他は、イネ科の草やヤナギの灌木が生い茂っていた。底部には小さな沼もある。

斜面には、サマニヨモギ、トチナイソウのような草の他に、ヤナギやカンパの灌木が被っていた。特に溝の所には、ヤナギの高さ 1 m ほどの灌木が密集していた。ピンゴのふもとには、ガンコウラン、コケモモ、アカノウラシマツツジ等の日本の高山地帯で見られる草花が一面に

第6図 小ピングの等高線図 カケ印がボーリング点 丸印が氷塊の見た所

クレーターでは、ボーリングが裸地で行なわれた。表面から104cm までが砂でその下は氷であった。融解も58cm の深さまで達していた。砂であるため、含水比も非常に小さい。

ふもとでは、ボーリングがヤナギの灌木の所で行なわれた。融解は40cm まで達していた。土質は頂上の第2層と同じく、粘土の角団状粒と氷の網とからなるものであった。

イブークピングとは対照に、高さ5m ほどの小さなピングについてもボーリングを行なった。このピングは写真12に示されるように、一面の流木で被われた湿地のなかから突き出た形になっている。測量地形図を写真13に示す。このピングの南側の斜面に表土が崩れて、中味の氷塊が見えていた。第6図がその状況である。頂上、中腹、ふもとでボーリングをし採取試料について解析を行なった。その結果を第7図に示す。

頂上の一部に裸地があったが、土質はイブークピングの頂上と同じくさらさらしたシルト質土であった。しかし、沢山の小さな貝殻(大きさ1mm ほど)を含み、昔は海浜であったことが推測された。70cm ほど下からは、粘土の角団粒と氷の網とからなる土質状態が現われた。この辺のピングの氷生成を引き起す土質は、この粘土のようである。

頂上の40cm 地下に、流木が埋まっていた。この流木はふもとを敷きつめているものと同じで、ピングの隆起によって、一緒に持ち上げられたもののようである。流木の状態からせいぜい100年位前に流れ着いたもののようなので、このピングも成長を始めてから100年以内の若いものらしい。昭和55年の調査では、この辺の解析の詳しいものが得られると思う。一方イブークピングの場合、成長を始めてから1万年前後とされている。

タクトヤクターク周辺には多くのピングがある。海岸にあるもののうちには、海の波の侵蝕をうけて、海側の半分ほどが削りとられたものがある(写真14)。

表面に亀甲状模様の構造土をつけたピングもある(写真15)。

c. 氷楔と集塊氷

活動層と永久凍土との境界面から下に向って頂点を下に、地中に楔を打ちこんだ形になっている氷塊のことを氷楔と呼んでいる。上面の幅が2m、深さが10m 位のものを写真16に示す。

敷きつめられている。

昭和52年7月24~31日に、ピングの頂上、クレーター、ふもとでボーリングを行なった。前述のパローの構造土と同じく種々の測定を行なった。その結果をまとめて第5図に示す。

頂上は裸地で、融解も深く50cm にまで達していた。土質構造は50cm までが、砂とシルトの混合物で、50cm から120cm までは、粘土の角団状粒(1cm 角位のもの)とその間を幅1~2mm ほどで埋める氷の網とからなるもので、更にその下は粘土であった。含水比は100%前後で、前述のピートに比べると非常に小さい。

第7図 小ピンゴにおけるボーリングの結果

(a) 頂上(裸地), (b) 中腹(ヤナギの灌木), (c) ふもと(裸地)

写真 14 タクトヤクターク部落から南西 6 km の海岸にある半かけピンゴ頂上の崖に氷が露出している

写真 16 タクトヤクターク部落から南西 6 km の海岸に露出する氷楔群

写真 15 山腹に構造土をつけるピンゴ

写真 17 タクトヤクターク部落から南西の 4~5 km にかけて、ほぼ 1 km にわたって露出する巨大集塊氷

この氷は構造土凹部に位置するもので、たまたま海岸の侵蝕で、露出したものである。活動層内の冬期間の温度差にもとづく熱応力がもとで出来るクラックに、夏の水がしみこむことで氷が出来るのが最初のきっかけである。詳しい説明は他の文献^{2,4)}にゆずるが、構造土の凹部の地下深くに亀甲模様の氷楔が網目をなしているわけである。

集塊氷は、海岸や湖沼の岸に露出する巨大な氷塊で、写真17に示されるように、高さ十数m、横幅は1kmにもわたって、びったりと張りついている。タクトヤクターク周辺ではこのような大氷塊が到る所に見られる。しかし、すべての所にあるというわけではない。いったん露出した氷塊は、夏期の融解で、毎年とけて行く。まだ露出せず地下に眠ったままの氷塊も多くある。このような大氷塊がどうして出来たかについて色々の考えがあり、まだ定説がないのであるが、アイソトープ等を使用する新しい手法により、徐々に解明されつつあると云えよう。

昭和54年11月、ノルデンショルドの日本周航100周年を記念するシンポジウムにおいて、筆者等の永久凍土調査において見聞した若干の典型的な永久凍土地形について紹介した次第である。

文 献

- 1) 木下誠一・鈴木義男(1973): シベリアヤクーツクの永久凍土調査. 低温科学, 物理篇, **31**, 271-277.
- 2) 木下誠一編(1975): 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, 昭和49年6~7月. 北海道大学低温科学研究所, 143pp.
- 3) Seiiti KINOSHITA ed. (1978): Joint studies on physical and biological environments in the permafrost, Alaska and North Canada, July to August 1977. Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University. 149pp.
- 4) 木下誠一(1980): 永久凍土. 古今書院, 202pp,
- 5) 木下誠一・酒井 昭(1973): 永久凍土地帯の森林の生態的特性. 日本生態学会誌, **24**, 166-122.
- 6) Достовалов, Б. Н. и Кудрявцев, В. А. (1967): Общее Мерзлотоведение. Издательство Московского Университета. 403pp.