

## 論文内容の要旨

### 論文題目 A Study on the Response of the Permafrost Layer to Climate Change

#### 気候変動に対する永久凍土層の応答に関する研究

氏名 末吉 哲雄

#### はじめに

永久凍土は高緯度地域や高山地帯に広く分布し、北半球高緯度陸面はあまねく永久凍土地域であると言っている。永久凍土の水平分布・厚さは気候条件の影響を受けて変動するが、一方で凍土層は凍結・融解に伴う潜熱の解放や、土壌水分への影響を通して、大気側へもフィードバックを持つため、その分布は気候システムの中においても重要な境界条件となる。気候変動に対する永久凍土分布の応答を明らかにすることは気候システムの特性を理解する上で重要である。凍土の形成・融解過程は、基本的には地中の熱伝導によって支配されており、地表の気候条件の変化に対する応答時間は気候変動のタイムスケールと比較して非常に長くなる特徴を持つ。このため、現在の凍土分布は過去の気候変動の履歴を反映したのとなっており、現在の気候変動に対する応答も過去の気候の影響を受けることになる。

本研究では、数値モデルとデータ解析の両面から凍土の気候変動に対する応答を明らかにすることを目標とする。現在の永久凍土分布の特徴は、シベリアと北米の凍土分布を比較することで明瞭になり、以下の2点が特徴的である：

- ・シベリアで南部に張り出した水平分布
- ・北米と比べ、年平均気温が同じでもより深いシベリアの永久凍土深分布（図1）

この分布から、北米の永久凍土が現在の気候条件・地殻熱流量に対してほぼ平衡に達している一方でシベリアの永久凍土は非平衡である、と考えられる。シベリア南部の凍土帯においては、年平均気温がプラスの地域にも永久凍土が分布しており、このこともシベリアの永久凍土が非平衡であると考えられる理由となっている。

以下、まずシベリア凍土帯が現在の気候条件に対して安定であるかどうかを地温データの解析を中心に検証し、続いて数値モデルを用いて、過去の気候変動を考慮して凍土の温度構造の変化を計算することで現在の状態、すなわち現在の凍土の深度分布がどのように形成されたのかを検討する。

## シベリア凍土帯の現在の安定性

シベリア地域は、地球上で最も広く、かつ深い永久凍土が分布しているが、分布の南限付近はごく浅い凍土が分布しており、気候の変動には敏感に応答すると考えられる。また、シベリアの気温が上昇しつつあるという報告(IPCC,1996)もあり、その気温上昇に対する応答が注目されている地域でもある。

この地域の凍土層の変動を調べるため、ロシアの地温データベースから、地表面熱流量の解析を行った。鉛直一次元の系において、2点 ( $x_1, x_2$ ) 間を流れる熱流量  $q$  は、2点の温度をそれぞれ  $T_1, T_2$  とし、熱伝導率を  $k$  とおくと、以下のように表される；

$$q = k \cdot \frac{T_1 - T_2}{x_1 - x_2}$$

データベースには深さごとの毎日の地温データが収録されており、上式を適用して地温勾配から熱流量を計算することで、着目した2点間を流れる熱流を計算できる。これを一年間累算し、年間の熱収支を調べた。

この結果、永久凍土の南限に近いIrkutskなどでは融解を示す傾向は見られなかった一方、約500mの凍土が存在するとされるYakutskでは値は明確に負に偏っており、シベリア中央部の凍土の融解を示唆する結果となった(図2、図3)。これは、1930年代以降の気温データと比較したところ、最近約10年間のシベリア中央部の急激な気温上昇に対応している可能性が高い。

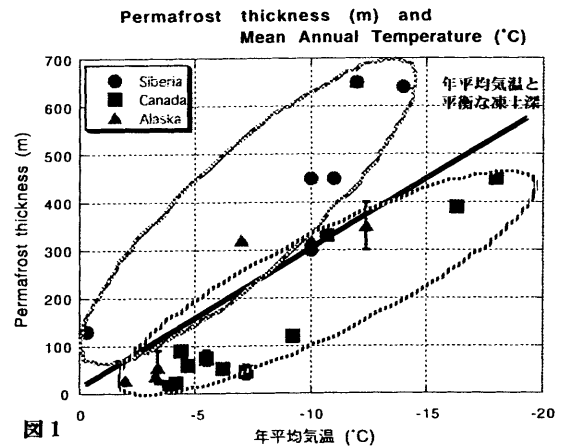


図1

図1：北半球の永久凍土凍土深度と年平均気温の関係。横軸に年平均気温、縦軸に永久凍土の深さを示す。図中、二重線の直線は気温と平衡な凍土深を示している。北米とシベリアの地域ごとに囲んで示した。

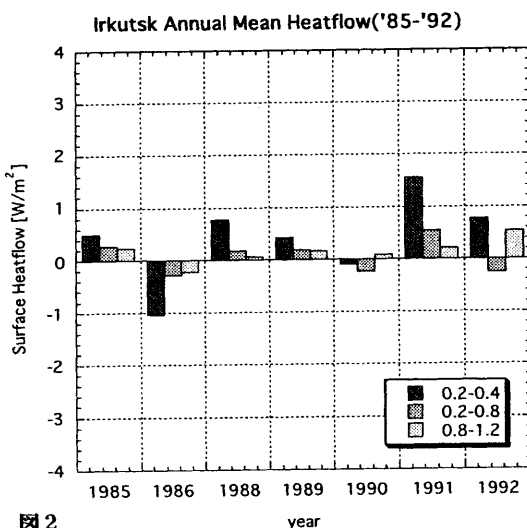


図2

図2：Irkutskにおける地表熱流量の年間平均値。正または負の明瞭な傾向は見られない。

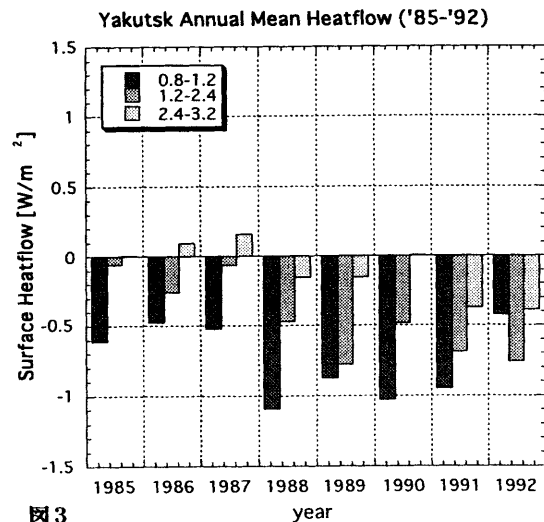


図3

図3：Yakutskにおける地表熱流量の年間平均値。負の温度勾配により負の熱流量が生じている。

## 最終氷期以降の凍土深変化と気候変動

永久凍土の南北断面について見ると、北米とシベリアでは著しい違いが見られる。北米では北端で一層深く、南に向かって単調に薄くなるのに対し、シベリアでは中央部と北端部でほとんど深さが変わらない分布を示し、これは過去に経験した気候条件の違いによるものと考えられる。この分布から北米とシベリアが最終氷期以降に経験した気候条件の違いを調べるため、潜熱を考慮した一次元モデルを用いて数値実験を行い、凍土の深さの時間変化を計算した。表面地温の入力条件はグリーンランド氷床コアから復元された過去の気候変動に基づいて与える。さらに、氷期と現在の温度差はパラメータとし、最終氷期の冷却条件が異なるケースについても計算した。

計算は以下のパラメーターを考慮する。

- 1) Location (=年平均気温、年間気温変動) の違い
- 2) Heatflowの違い: 30,40,50,60 [mW/m<sup>2</sup>]
- 3) 最終氷期の冷却
  - a) グリーンランド氷床コアによる古気候曲線に従う
  - b) 変動のパターンはa)と共通、氷期との気温差を変化させる
- 4) 氷床の存在による地表面温度の上昇

計算の対象としては、凍土深と気候条件の違いを代表する地点として、以下のシベリアの3地点と北米の2地点を選んだ。

都市 (北緯・東経)	永久凍土の深さ	年平均気温
Tiksi (71°N, 129°E)	650m	-15℃
Yakutsk (62°N, 130°E)	500m～	-8.8℃
Irkutsk (52°N, 104°E)	25m	0～+0.5℃
Resolute (74°N, 95°W)	395m	-12℃
NormanWells (65°N, 125°W)	45m	-4℃

Yakutskの条件で熱流量を変化させた結果を図4に、同じくTiksiの条件の場合を図5に示す。縦軸に入っている大きい矢印は現在の凍土深を示す。両者から、凍土の深さは熱流量に敏感であることが分かる。

地殻熱流量のデータを解析した結果、シベリアの地殻熱流量としては安定大陸の典型的な値である45～50 [mW/m<sup>2</sup>] が妥当であることが示されたが、この値を用いる限りは、シベリア北部 (=Tiksi) においては現在の凍土深と調和的であるのに対し、中央部 (=Yakutsk) においては、現在の凍土深を満足する結果にはならない。ここで、さらに上述した3)、4)の条件を考慮して計算を行う。

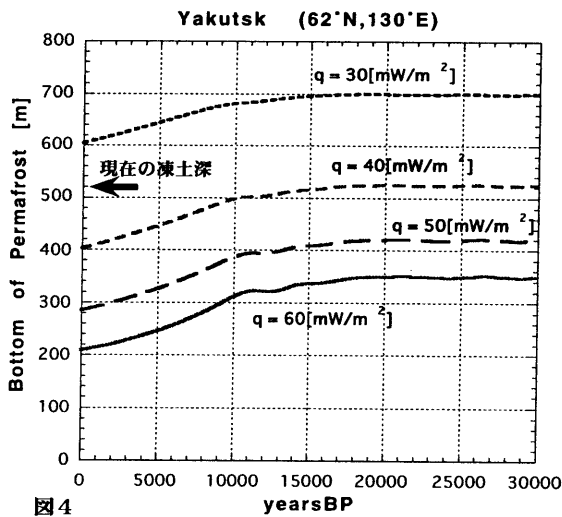


図4: Yakutsk周辺の凍土深変化

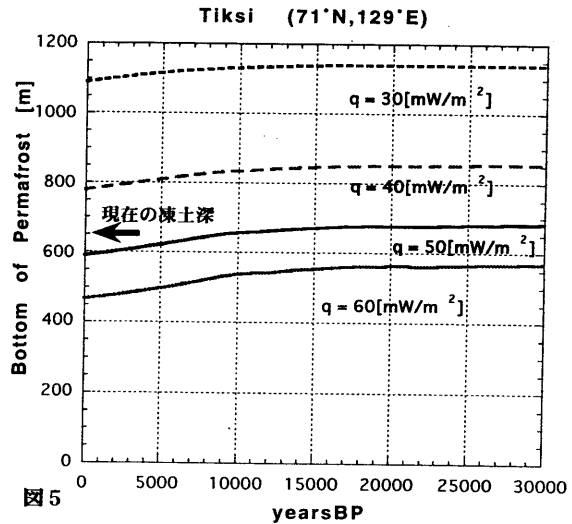


図5: Tiksi周辺の凍土深変化

Yakutskの条件で地殻熱流量を50[mW/m<sup>2</sup>]に固定し、最終氷期の冷却を変化させた時の結果を図6に、Tiksiの条件で最終氷期に氷床が存在した場合の結果を図7に示す。氷床が存在する場合、氷床下の地面温度は氷床が存在しない場合と比較して温度が高くなる(地殻熱流量による)ため、厚い氷床の存在は氷期間の凍土の成長を抑制する効果を持つ。図7の結果は、この効果をよく示しており、氷床が存在した場合、現在の凍土の深さを説明することは難しくなることが分かる。北東シベリアの北極海岸地域(Tiksi周辺)では、最終氷期に氷床が存在した可能性が報告された研究が過去にあるが、本研究からは氷床の存在に対して否定的な結果となった。

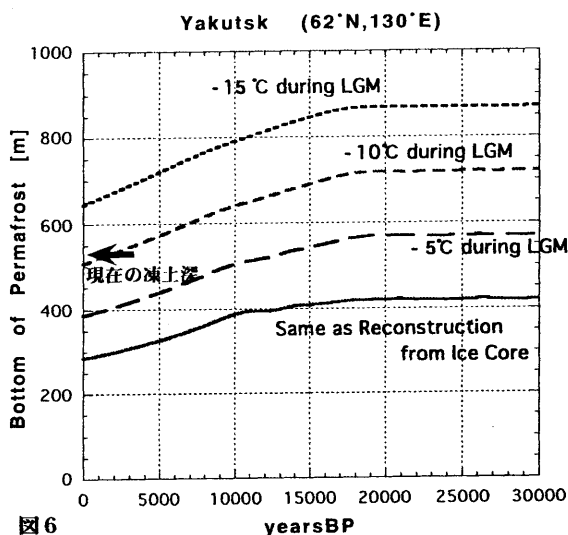


図6

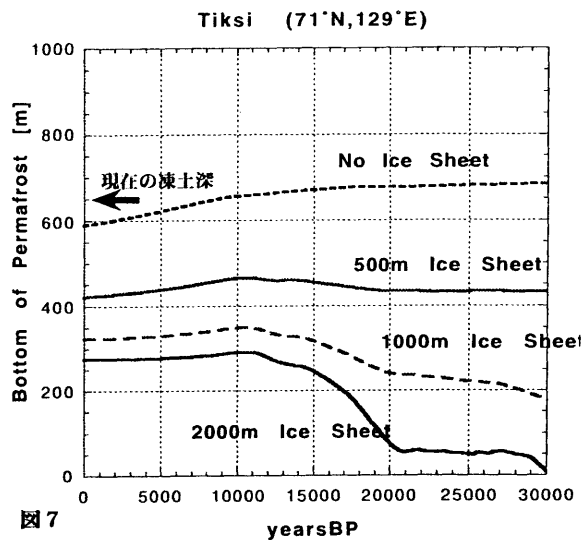


図7

図6：Yakutsk周辺での凍土深変化。現在の凍土深は最終氷期中の冷却が強かったことを示唆する。

図7：Tiksi周辺での凍土深変化。氷床を想定すると現在の凍土深を説明することが出来ない。

以上の結果から、過去のシベリアの気候条件に対して、現在の凍土分布を良く再現するための制約条件として、次の2点を得る。

- ・シベリア内陸部では、シベリア北端と比較して、最終氷期との温度差が大きかった
- ・シベリア北端の地域が氷床に覆われた可能性は低い

シベリア南部のIrkutskの凍土深についても計算を行ったが、最終氷期の冷却が強かったとしても後氷期の温暖な時期に融解し、現在の分布を過去の履歴から説明することは出来ない。現在の凍土深が浅いシベリア南部のケースでは、凍土は気候変動に敏感であると考えられるため、過去の履歴の効果は残っておらず、また熱流量解析からも融解を示す結果は得られなかったため、現在の表面地温を反映した分布を持っていると考えるべきである。

一方、北米の凍土深変化を同様に計算した結果を図8に示す。北米地域はローレンタイド氷床が存在していたことはほぼ確かであるので、氷床を仮定した場合の結果を示す。地殻熱流量は同じく $50[mW/m^2]$ に固定してある。Norman Wellsの現在の凍土深（ $\sim 45m$ ）は氷床が存在した場合のみ再現され、現在の凍土深を実現する上で氷床の存在が不可欠であったことが分かる。

凍土深曲線の $t=0$ （現在）での変化率（傾き）に注目すると、シベリアの、特にYakutskのケースでは現在も融解の進行を示す一方で、北米ではほぼ平衡に達しており変化がないことが図から読みとれる。図1から予想された、シベリアの凍土が非平衡であるという考えはこのことから示されている。

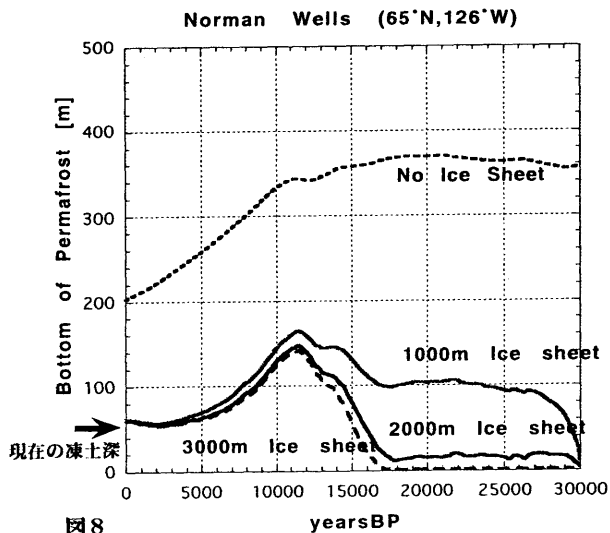


図8

図8：カナダのNorman Wells 周辺での凍土深の変化。氷床を想定することで現在の凍土深が実現される。