

福田 正己 (2007)

シベリア永久凍土と地球温暖化

財団法人 建築保全センター

Re 2007年 1月 No.153 33-39

Re

2007. 1 NO. **153**

Building Maintenance & Management

特集 | 大気

シベリア永久凍土融解と地球温暖化

ふくだ まさみ
福田 正己

北海道大学 低温科学研究所 教授

1 はじめに

北極地域では、最近の地球温暖化の影響を強く受けている。例えば、東シベリアのヤクーツクでは200年に及び長期の気温の記録が得られている(図1)。

その変動記録を見ると、最近100年間の年平均気温の上昇は2.5℃にも達する。図2にGCMによる気温上昇予測結果の一例を示すが、こうした急激な温度上昇は今世紀半ばでの温暖化予測結果と比較すると、既にそれが先取りして現実には発生していることになる。こうした急激な温暖化の影響を受けて、シベリアの永久凍土地域ではさまざまな異変が発生している。それはシベリア地域の、図3に示す広域に分布している永久凍土にも当然、影響が及んでいる。この永久凍土分布図では、いくつかの特徴が読み取れる。永久凍土とは、文字通り年間を通じて大地が凍結した状態である。最も深い場所では1,000mにも達する。

また、エニセイ川を境にして、東西の分布に差が見られる。東シベリアでは、分布南限は中国国境を越えて大興安嶺にまで広がる。一方、西シベリアでは北極海沿岸に分布域は狭まっている。東シベリアのチタでは永久凍土は200mに達するが、同じ緯度のオムスクでは永久凍土が存在しない。この両地点の現在の気候環境は類似するにもかかわらず、東西シベリアでの永久凍土分布が異なるのは、最終氷期の氷床分布に起因している。

2万年前の最終氷期には、西シベリアの一部(オビ川下流、エニセイ川河口)には、北ヨーロッパから拡大した氷床が発達していた。推定の氷床厚は2,000m以上であり、そのため氷床基底は凍結することがなかった。これは現在の南極氷床も基底

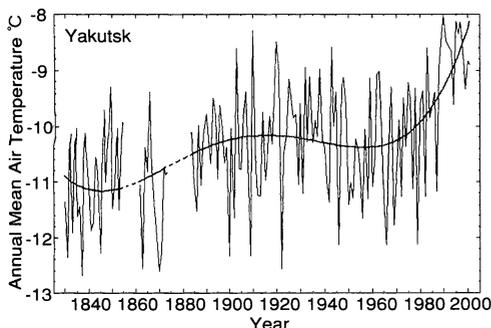


図1 東シベリア ヤクーツクの年平均気温の長期変動

IPCC SRESA1B-CCSM stc.air temperature
 Annual change/SD from (1980-1999)2040-2059

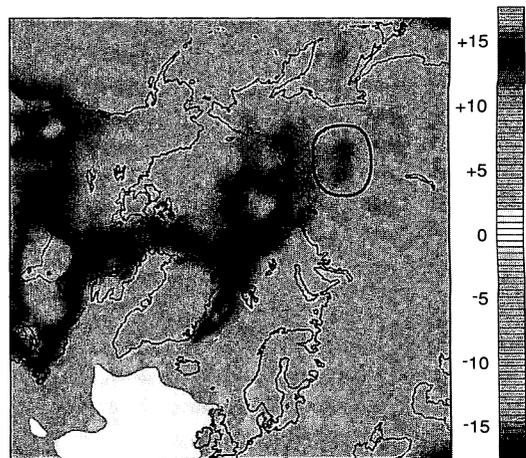


図2 IPCC CCSMによる気温上昇予測
 (図中で丸で囲んだ地域が東シベリアヤクーツク付近)

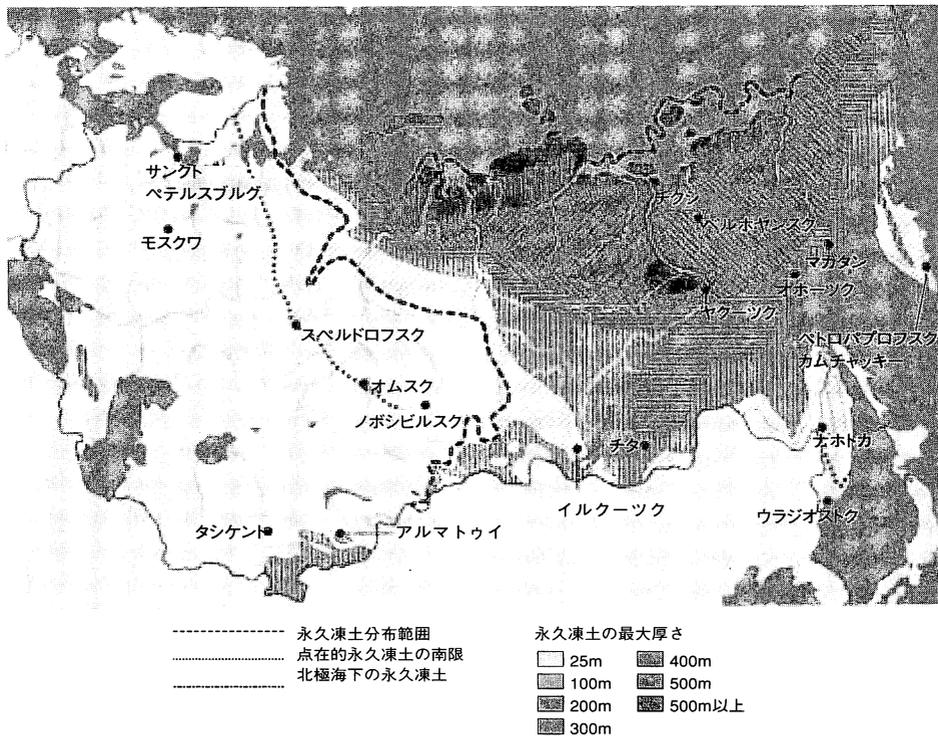


図3 シベリア永久凍土の分布図

部では未凍結状態にあるのと同じ理由による。最終氷期が終わって氷床が退いて、基盤が露出してから地盤凍結が進行した。このために、西シベリアでは永久凍土が現在の気候環境に平衡していないために、永久凍土が深くまで発達しきれていない。他方、東シベリアでは最終氷期には氷床に覆われず、より寒冷な環境下に置かれて永久凍土はより深くにまで達した。最終氷期が約1万4千年前に終了し、後氷期に入ってシベリアでは急激な温度上昇が起こった。当然、永久凍土も温暖化で融解が進行するはずであるが、永久凍土の底面にまで温暖化の影響が達するには時間的なずれがあり、厚みの変化には至っていない。つまり、図3の現在の分布は過去の(最終氷期の)条件を反映している訳である。

シベリア永久凍土地域の特徴は、永久凍土とその上を覆う植生との関係である。最終氷期の寒冷

期は同時に乾燥期でもあった。最終氷期に北半球を覆っていた氷床分布を図4に示す。先の説明にあったように、ヨーロッパから西シベリアにはフェノスカンディナビア氷床が発達していた。このために、この地域では永久凍土は氷床下には形成されていなかった。また、北米には現在の南極氷床と同規模のローレンタイト氷床が分布していた。図4中、点線で囲った東シベリアには氷床が発達せず、このために、永久凍土がより深くまで形成されていた。氷床が覆わなかったのは、積雪をもたらす大気への水蒸気供給が少なかったからである。このために、最終氷期には東シベリアは寒冷と乾燥した気候が卓越していた。1万4千年前の後氷期になってから、東シベリアでは気温の上昇と降水量の増加があり、砂漠化していた永久凍土地域には植生が回復してきた。急速な植生の回復によって、いわばその断熱効果で、気温上昇

の影響が永久凍土中に伝播するのが抑制されてきた。東シベリアでは、現在の年間降水量は300mm前後と少ないにもかかわらず、世界最大規模の森林「タイガ」が表面を覆っている。こうした植生分布を、NOAA衛星による植生指数分布と気候要素で表す(図5)。

図6はヤクーツク付近の永久凍土断面を示している。ここでは永久凍土の厚さは約400mであるが、表層の約1mは夏季には融解する。これを活動層と呼ぶ。シベリア永久凍土地域の気候上の特徴は、寒冷と乾燥条件にある。ヤクーツクの年平均気温は -10.1°C で年降水量は236mmに過ぎない。こうした乾燥状態にありながら世界最大の森林タイガが成立するのは、永久凍土の存在にある。永久凍土はまったく水を浸透させない。そのために、夏季融解層(活動層)に僅かな降水が蓄積され、これがタイガを涵養している。タイガの繁茂で永久凍土は夏季の日射が遮られ、現在の気候環境下での融解が阻止されている。タイガの生育には永久凍土の存在が不可欠であり、永久凍土が後氷期以降の温暖化でも大規模融解せずに存続するのは、タイガのおかげである。つまり、永久凍

土とタイガは「共生関係」にあると言える。最終氷期に形成・発達したシベリア永久凍土は熱的な不安定状態にあり、表面を覆う植生が失われると、永久凍土表面の熱収支バランスが崩れ、永久凍土の大規模融解が発生しやすい。

2 永久凍土に貯留されている高濃度メタンガス

北極海沿岸の永久凍土中には、巨大な地下氷が

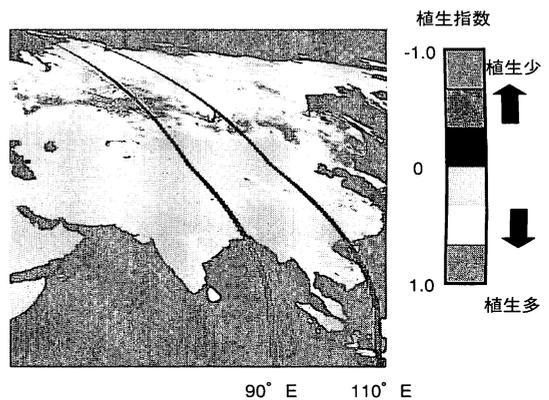


図5 NOAAによる植生指数分布(1995年7月1-10日)

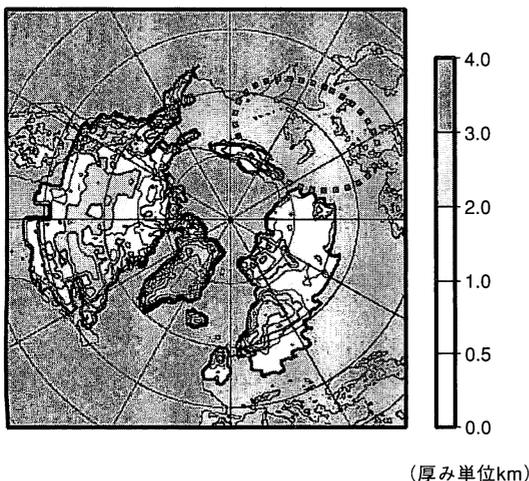


図4 最終氷期北半球の氷床分布
(図中 点線で囲んだ地域は東シベリア)



図6 タイガの下に分布する永久凍土地下水
(東シベリア レナ河中流河岸)

露出している。これをエドマと呼んでいる。図7にその露出状態を示す。この場所での地下水の厚みは約40mである。氷の層には、円柱状の凍土層が一定の間隔で分布している。このエドマ層の形成時期は、最終氷期の約6万年前から2万3千年前と推定されている。また、その成因から、氷には多くの気泡が含まれている。それらの気泡に含まれているメタンガス濃度の分布解析結果を図8に示す。2ヶ所は相互に600km隔たっているが、変動のカーブおよび年代測定結果はよく類似

している。広域で、類似の環境下で、ほぼ同時期に地下水が集積したことを示唆している。ここでyBP(year Before Physics)は炭素年代測定結果を示す年代値で1950年が紀元0年である。地表から10mまでの表層部には、0.1%を超える高濃度のメタンガスが集積していた。

さらに、東シベリア・ヤクーツク周辺のタイガ地域で、永久凍土の表層部分でボーリングを行い、永久凍土中に含まれるメタンガス濃度の分布を測定した結果を図9に示す。やはり2m付近では、6,000ppmを超えるメタンガスが検出された。これらの高濃度のメタンガスがどのようにして永久凍土中に集積したかについては、まだ明らかにされていない。集積の時期は最終氷期の終わり頃であることから、当時の嫌気的な環境下で生成され、凍土中に貯留されたのであろう。こうした永久凍土中の高濃度のメタンガス集積は、シベリ

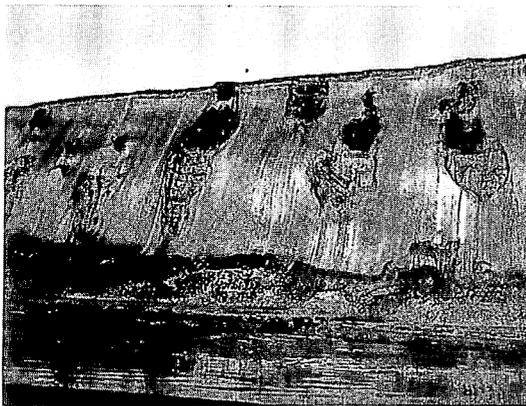


図7 永久凍土中の地下水「エドマ」
(北極海 新シベリア諸島 大リャホフスキー島)

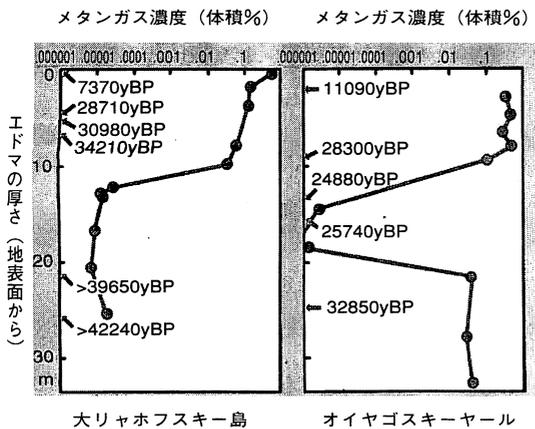


図8 エドマ氷に含まれる気泡中のメタンガス濃度分布
(図中の yBP は堆積物中の年代測定結果)

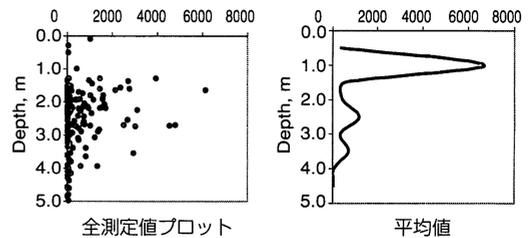


図9 タイガ地域の永久凍土上層部の気泡中のメタンガス濃度

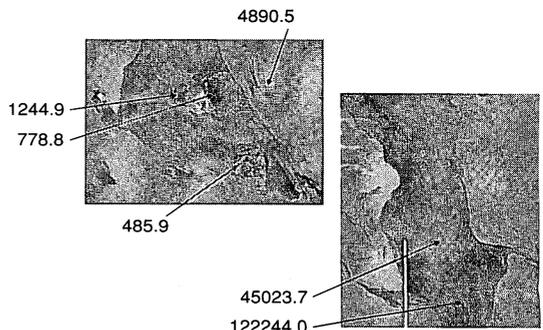


図10 アラスカ・フェアバンクス永久凍土中に含まれるメタンガス濃度(単位 ppm)

アだけでなくアラスカの永久凍土でも検出されている。

図10はアラスカ・フェアバンクス周辺の永久凍土と氷に含まれているメタンガス濃度分布を示す。この場所では、気泡からメタンガスを抽出し、その炭素年代測定が行われた。その結果、このメタンガスは28,000yBPであることが判明し、シベリアのエドマと同じ時期に集積したものと推定された。

以上の事例が示すように、シベリア各地およびアラスカの永久凍土中には、最終氷期に集積した高濃度のメタンガスが貯留されている。そこで、最近の温暖化の影響で永久凍土が融解することで、こうした高濃度のメタンガスが大気へ放出され、それが更なる温暖化を促進することが懸念されている。

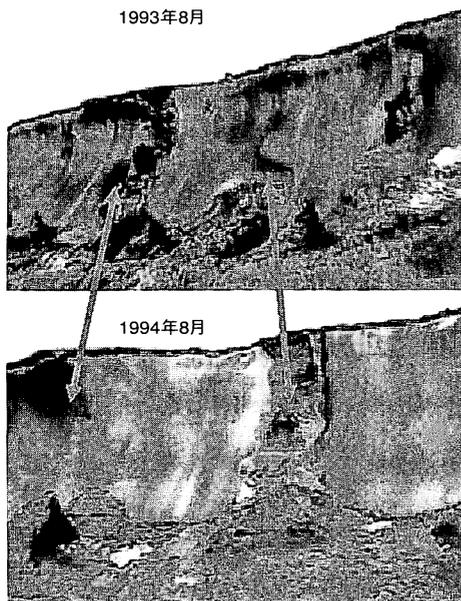


図11 エドマの浸食後退
(大リャホフスキー島)

3 永久凍土の融解に伴うメタンガスの放出
北極海沿岸やレナ河、コリマ河沿いには、図7に示したような、地下氷エドマが広く分布している。これらが温暖化の影響を受けて熱浸食されている。図11は、大リャホフスキー島で観察された浸食による崖の後退を示している。ほぼ同一地点でエドマの浸食後退の様子を撮影した。1993年8月と1994年8月の1年間の間に、この崖は形状を保ったまま約4.5m後退した。図中の矢印で、左側では1年間の間に永久凍土の円柱部分が融解して消失した。右側矢印では、浸食後退で地下水から新たに円柱状の凍土が露出した。こうした活発な浸食後退については東シベリアでの観測結果があり、それを図12に示す。当然、こうした浸食後退過程で永久凍土中のメタンガスは大気へ放出されている。エドマの総延長長さおよび年間後退量から、推定される発生メタンガスは年間約10~50万tである。

これはエドマの浸食後退による放出であるが、タイガ地域では森林火災などの植生攪乱で地表面からの熱の流入が増加し、その結果、活動層が深



図12 東シベリア海岸及び河岸でのエドマの浸食後退速度

くまで到達する。東シベリアでの攪乱前後の熱流量増加と融解の観測例を図13に示す。通常、永久凍土表層部には氷を多く含むために、こうした活動層の増加(表層永久凍土の融解深増加)によって、過剰の融解水が供給される。このために地表面は沈下して窪地が形成され、そこに水が蓄えられ湖沼となる。この凹地をアラスと呼ぶ。図14は、そうした湖沼化の初期の様子である。実際にこうした場所では、温度の高い夏季には活発なメタン生成が進行している。現地でチャンバー法による実測では、こうしたアラス湿地からのメタンガスフラックスは $300\sim 400\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ にも達する。この数値は、日本の湿原での観測値に等しい。また、内訳は永久凍土の融解によって貯留されていたメタンガスと、現在の嫌気環境でのメタン生成との合成成分である。

そこで、東シベリア・タイガ地域での永久凍土融解による発生量を見積もる。森林火災の後に夏季融解層(活動層)が増加する過程を観測した結果を図15に示す。攪乱前の活動層は100cmであった。年々の増加率は7%であることから単位面積当たりでの永久凍土融解によるメタンガスは、平均濃度を $2,000\text{ppm}$ とすれば 20cc である。年々の活動層が深くなる効果を7%とすると、永久凍土がより深くまで融解することで発生するメタンガスは 150cc となる。東シベリアでは2003年には約40万haが火災で焼失したので、攪乱跡地から発生するメタンガスは約 $1.8 \times 10^{12}\text{g}$ となる。この状態を永久凍土融解によるメタンバーストと表現している。

これは活動層が深くなることで、過去に生成され貯留されていたメタンガスの放出分のみである。一旦形成されたアラス湿地で、現在の嫌気的環境で生成されるメタンガスは、そこでの滞水の時期や水温に依存しており、さらにそれらは季節

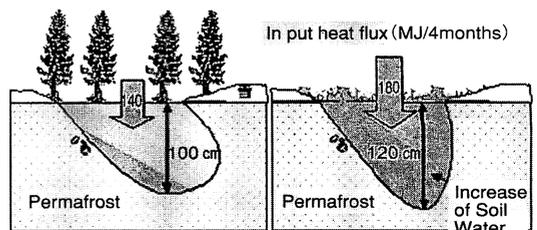


図13 植生攪乱による熱バランス変動と活動層厚み増加

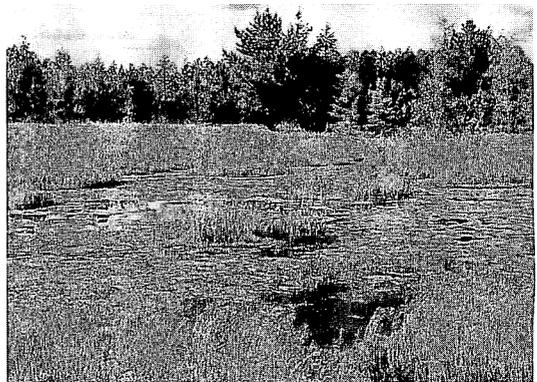


図14 アラスの形成と湖沼(東シベリア)

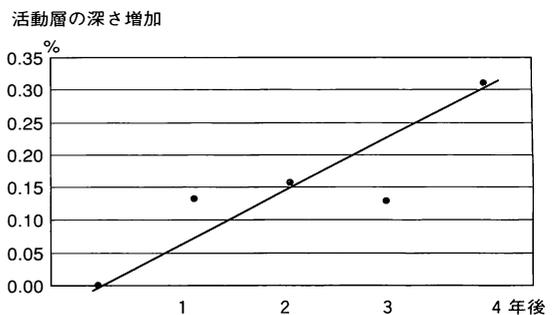


図15 活動層厚の増加

変動するので、正確に見積もるのは困難である。目安として、凍土融解分と同じ程度と推測されている。

4 おわりに

地球規模の温暖化の影響を受けて、シベリアでは大規模な森林火災が多発している。1haのタイガが焼失すると、炭素換算で約40tの二酸化炭素が放出されており、2003年の火災多発異常年に

は2～4億tもの二酸化炭素が直接、大気へ放出され、地球温暖化を加速させた。

一方、永久凍土には過去に生成され、凍土に貯留された高濃度のメタンガスが存在している。ツンドラ地域である北極海沿岸では、活発な海岸と河岸浸食で凍土が失われ、その結果、メタンガスが大気に放出されている。タイガ地域では火災による攪乱で、表層分凍土が融解し、その結果、やはり大量のメタンガスが大気に放出されている。こうしたメタンガスの放出量の見積もりはまだ誤差を含むが、年間数100万tに達するであろう。二酸化炭素の約20倍もの温室効果を考慮すると、地球温暖化に無視できない影響となる。こうしたメタンガス放出は、地球温暖化を促進し、それがまた永久凍土の融解を促すという、正のフィードバック効果が生まれている。

最近、さらにショッキングな事実が報告された。

東シベリアのコリマ川下流では、冬季にも湖沼が凍結しない部分がある。そこでは湖底から大量のメタンガスが発生しているからである。しかも、その濃度は直ちに燃焼を引き起こすほどである。図16は、実際にコリマ川で湖沼から発生したメタンガスが燃焼している様子である。こうしたメタンガス発生分を加算すると、シベリア地域でのメタンガス放出量は、優に年間500万tを超えるであろう。こうした状態についてロシアの有力誌(イズベスチャ)は、温暖化の時限爆弾と表現している。これに加えて、多発するシベリア天然ガスからの漏洩も無視できない。森林火災の原因の70%以上は人為である。パイプライン事故と同様に、シベリアでのメタンガス発生のお多くは人為によるものだ。温暖化を抑制する上で、こうした人為によるメタンガス放出の軽減に、一層の努力が強く望まれている。



図16 永久凍土地域の湖沼底で発生したメタンガス燃焼
コリマ川河口付近

(読売新聞社提供)