

- 系の関わり, 研究ジャーナル, 12(8), 14-19.
- _____, 1990: 土壤肥料学会要旨集 36, シンポジウム, 松戸.
- Seiler, W., Conrad, R., and Scharffe, D., 1984: Field studies of methane emission from termite-nests into the atmosphere and measurements of methane uptake by tropical soils, *J. Atmos. Chem.*, 1, 171-186.
- Takai, Y., and Kamura, T., 1966: The mechanisms of reduction in waterlogged paddy soil, *Folia Microbiol.*, 11, 304-313.
- 高井康雄, 三好 洋, 1977: 土壤通論, 朝倉書店, 5-6.
- 武田博清, 1989: 土壤生物と分解, 森林生態学, 堤利夫編, 朝倉書店, 111-123.
- 鶴田治雄, 1990: 大気中のメタンの発生源とその挙動, 化学工業, 41, 572-578.
- Ueda, S. *et al.*, 1989: Proc. Annual Meeting Geochem. Soc. Japan, 212.
- Wada, E., Yoshida, N., Yoh, M., and Kabaya, Y., 1990: ^{15}N abundance of N_2O in aquatic ecosystems with emphasis on denitrification, "Cycling of Reduced Gases in the Hydrosphere", D. D. Adams, S.P. Saitzinger, and P.M. Crill(ed.), E. Schweizerbartsche Verlagsbuchhandlungen, Stuttgart, FRG (in press)
- 和田英太郎, 1990: 窒素安定同位体比による N_2O 発生源の評価「人間環境系」研究報告集(印刷中)
- 和田秀徳, 1989: メタンへの対応と課題, 化学技術誌 MOL, 27, 53-60.
- Yoshida, N., Morimoto, H., Hirano, M., Koike, I., Matsuo, S., Wada, E., Saino, T., and Hattori, A., 1989: Nitrification rates and ^{15}N abundances of N_2O and NO_3^- in the western North Pacific, *Nature*, 342, 895-897.
- Zimmerman, P.R., Greenberg, J.P., Wandiga, S.O. and Crutzen, P.J., 1982: Termites: A potentially large source of atmospheric methane, carbon dioxide and molecular hydrogen, *Science*, 218, 563-565.

05: 305 (永久凍土; 気候変動; ツンドラ; タイガ; 古気候; 最終氷期)

3. 永久凍土と気候*

福田 正己**

1. はじめに一永久凍土の分布一

永久凍土は地球の全陸地の約15%を占め, シベリアからアラスカ・極地カナダに広範囲に分布している。この永久凍土を分類して第1表に示す。この分類は, 凍土表面を覆う植生の違い, 垂直的・水平的な凍土の分布, 凍土が形成されている場所によっている。寒冷の度合で植生の種類と永久凍土の分布深さの双方が独立に決ってくるので, 永久凍土の表面植生を見れば, 地中の永久凍土の状態がある程度推定できる。タイガとツンドラを比較すれば, ツンドラがより寒冷な地域に分布し, その下の永久凍土も深くまで存在する。しかし, 植生の分布状態には, 冬の寒冷度と夏の温暖度, 降水量とが関わっている。極地砂漠とツンドラとの差は必ずしも永久凍土の深さや分布を反映しない。極地砂漠の形成には, 夏の冷涼さと乾燥が関わっているからである。一例として, 南極半島の露岩地域 (Seymour 島南緯 64 度年平均気温 -9.5°C) では無植生で, 永久凍土の深さは約 200 m で

ある。一方, 極地カナダ (Tutkutuyaktuk 北緯 70 度年平均気温 -12.0°C) ではツンドラ 地域で永久凍土の深さも 400 m 以上となっている。年平均気温は極地カナダの方が低く, 永久凍土も深くまで形成されているが, 最暖月平均気温は $+8^\circ\text{C}$ まで上昇するのに, 南極半島では最暖月平均気温は -0.9°C に過ぎない。植物の生育条件としては, 冬の寒さよりも夏の温暖さがより重要である。東シベリアのオイミヤコンでは最低気温 -71.2°C を記録しているが, 夏には $+30^\circ\text{C}$ にまで温度が上昇するので, カラマツから成り立つタイガ地域となっている。

次に北半球の永久凍土の分布を第1図に示す。(福田, 1980)。分類の基準と凡例は第1表に挙げてある。東シベリアでは, 北緯 60 度まで永久凍土の連続的分布が広がるが, 西シベリアでは北極海に寄って狭くなっている。

アラスカから極地カナダでの連続的永久凍土分布でも, 東側でより南まで分布が広がり, 西側で北に寄っている。こうした分布状態を決めるのは, 永久凍土を形成

* Permafrost and Climate.

** Masami Fukuda, 北大・低温科学研究所.



写真1 水田土壌から水稻体経由で大気中へ放出されるメタン捕集方法(本文(P731~P736)および第3図参照)。



写真2 永久凍土中の地下水(Massive Ice) (西シベリア, 北極海沿岸, ヤマル半島)。

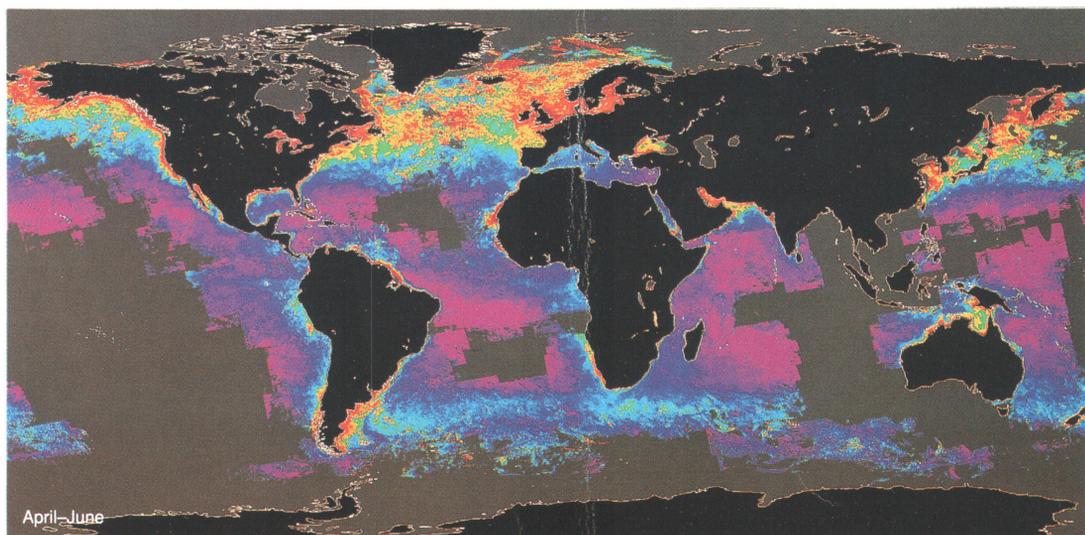


写真3 人工衛星 Nimbus-7 で計測した1979年春季(4~6月)の世界の海洋の表面クロロフィル濃度, 赤に向うほど高濃度を示し, 紫が最低濃度(NASA資料より)。

第1表 永久凍土の分類

表面を覆う植生の違いによる分類

分類	名称	特徴	主な分布地域
タイガ	(Taiga)	樹木が密林を構成する	北極海沿岸シベリア, アラスカ, 極地カナダ
ツンドラ	(Tundra)	樹木を欠く草本植生	東西シベリア, 中央アラスカ, 極地カナダ
極地砂漠	(Polar Desert)	無植生	南極 (マクマード入り江), 極地カナダ (エルズメアー島)

分布の状態による分類

分類	名称	特徴
連続的永久凍土	(Continuous Permafrost)	水平的にも垂直的にもいたるところに永久凍土が分布 主として永久凍土が分布するが, 存在しない場所もある 主として永久凍土が分布しないが, 場所によって存在する
不連続的永久凍土	(Discontinuous Permafrost)	
点的永久凍土	(Sporadic Permafrost)	

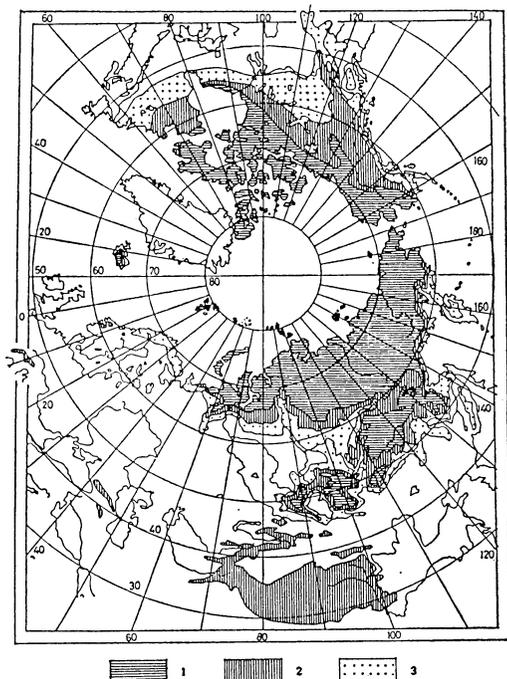
その他

山岳永久凍土 (Alpine Permafrost)
沿岸海底永久凍土 (Off shore Permafrost)

中緯度地域で, 高山地域に分布 (チベット高原, 大雪山)
北極海沿岸の海底に分布

させるような低い地表面温度であり, 近似的にはその場所の年平均気温である。冬季の凍土が夏季にも融解せずに永久凍土として残るには, 年平均地表面が 0°C 以下であればよい。しかし, 局所的な条件で気温と地表面温度の差が大きくなり, 永久凍土が部分的に融解して分布が途切れたり, あるいは永久凍土の存在しない地域に狭い範囲で永久凍土が形成されることがある。アラスカから極地カナダでは, 永久凍土の南限は年平均気温 -2°C に一致している。

永久凍土は地表部だけでなく, 北極海沿岸の大陸棚斜面の海底でも発見された。海水の結氷点が -1.6°C であり, 海底まで海水が形成されることはないので, 海底面の年平均温度は 0°C 以下にはなり得ない。つまり, 数 100 m の深さまで形成された沿岸海底永久凍土は, 現在の気候環境下で形成されたのではない。最終氷期には海水面は現在よりも約 100 m 低下していた。北極海沿岸では, 永久凍土が現在よりも広く海側に広がっていた, その後, 1.3 万年以降の温暖化で海面が上昇し, 沿岸の永久凍土地域は沈水した。最終氷期末期には, 永久凍土は約 1,000 m 深さまで形成されていたが, 沈水したのちに表面温度の上昇のため, 永久凍土の厚みを減少させつつある。



永久凍土の分布。1: 連続的永久凍土分布帯, 2: 不連続的永久凍土分布帯, 3: 点的永久凍土分布帯

第1図 永久凍土の分布図 (福田, 1980)

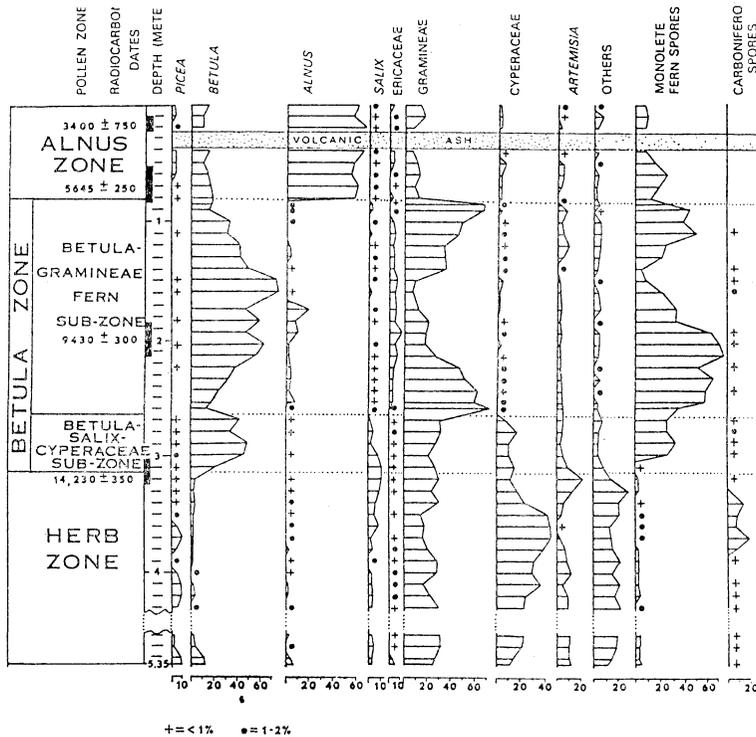
2. 氷床の消長と永久凍土

第1図に示した現在の永久凍土の分布は, いろいろに成り立っただろうか。CLIMAP (1976) による1.8万

年前の最終氷期の古環境復元図, それに基づく阪口 (1984) の復元図を見ると, 永久凍土の分布地域は, 第1図に比べてはるかに狭まり, 北ヨーロッパからウラル山脈東側 (オビ川) までにはフェノスカンジナビア氷床が, 北アメリカではハドソン湾を中心とするローレンタイド氷床が覆っていた. この北半球の2つの氷床は, 現在の南極大陸氷床の1.5倍にも達していた. 南極氷床の基底にまで達するボーリング調査の結果, 数1,000mの厚みのある氷床では, その基底温度は0°C以上であることが確認された. 氷床に覆われていた地域では, 氷床と地盤の境界温度は0°Cに近く, 永久凍土は形成されなかったであろう. 後氷期 (1.3万年以降) になって, 地球全体の温暖化による氷床の後退によって, 西シベリアやカナダでは, 氷床の退いた後に永久凍土が形成されていった. 氷床の退いた地域は永久凍土を形成させる程に寒冷環境下にあった. 地球の温暖化→氷床の縮小→永久凍土の拡大によって現在の分布が成立したことになる. 地球の温暖化が結果的に永久凍土の拡大を促したわけで, カナダ南部では化石化した永久凍土現象と温暖化

を示す花粉とが同一の層準で見いだされる.

氷床が退き永久凍土が形成されると, 裸地であった地表面を植生が覆い始める. 氷床の退いた直後には, 乾燥に強い草本植生がまず侵入する. その後, 永久凍土地域の堆積物に土壌層が形成され, やがて樹木が生育してタイガとなる. こうした植生変化は, 永久凍土地域の堆積物に含まれる花粉分析から復元することが出来る. その1例を第2図に示す. (Anger, 1982). アラスカのユーコン川デルタ地域での湖沼堆積物から得られた花粉分析結果で, 14,230±350年前より古い堆積物中では, 草本花粉が主体であるが, 下部ほど花粉の存在量が少なく, 氷床の影響を受けていることが分かる. イネ科 (Graminea) やカヤツリグサ科 (Cyperaceae), ヨモギ科 (Artemisia) の草本花粉が次第に増加し, その後のツンドラの拡大が示唆される. 9,000年前頃には, カンパ (Betula) が最初の樹木として広がりはじめ, ツンドラからタイガへの移行 (ツンドラステップ植生) を示している. 6,000年前以降には, ハンノキ (Alnus) が増加してきて, タイガへ移行した. こうした永久凍土地域での花粉分析か



第2図 永久凍土地域での堆積物花粉分析結果 (アラスカ・ユーコン河デルタ地域: A. Ager, 1984)

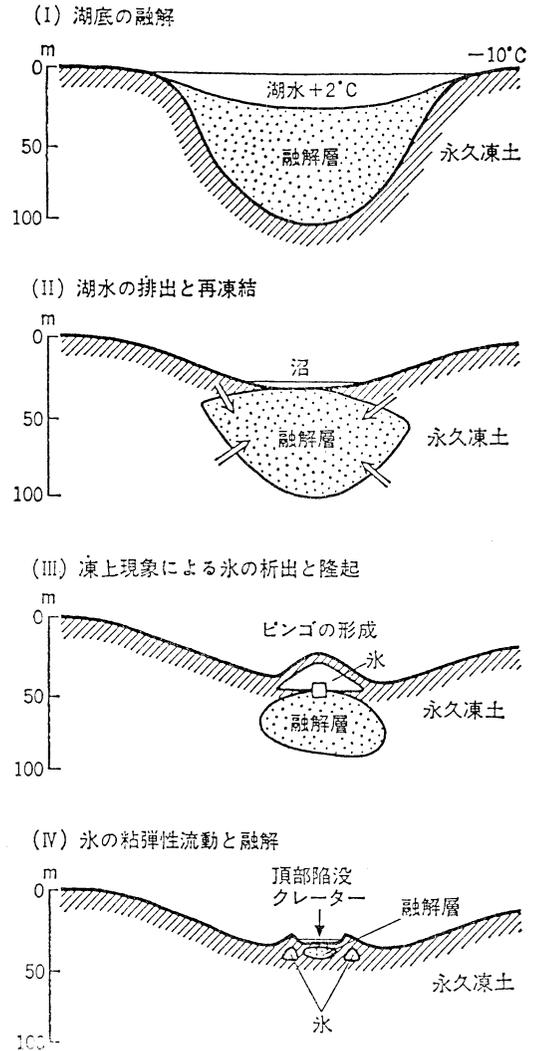
ら、第1図に挙げた現在の永久凍土の分布は、約6,000年前頃に成立したことが分かる。

3. 環境の変化と永久凍土

永久凍土には、大量の氷が存在している(写真2、P737)に西シベリア永久凍土地域で見られる地下氷の様子を示す。このような地下氷(Massive Ice)の成因は、まだ明確に説明されていないが、数1,000年前の温暖期に永久凍土の上層が融解し、再凍結する過程で後述する凍上現象によって氷の析出があったと考えられている。

(Mackay, 1971). 地下氷の厚さは数10~100m程度である。現在の気候環境下では、表面の植生条件が変化しないかぎり、地下氷の存在する深さまで融解が及ぶことはない。しかし、タイガ地域での森林火災や河川氾濫によるツンドラ植生の破壊で、永久凍土の表面条件が変化することがある。すると地表面の熱収支バランスがくずれ、地表面の受ける日射量が増加して夏季の融解が深くまで達する。このため地下水が融解し、地表面が沈下して凹地が形成される。これをサーモカルスト(Thermokarst)と呼ぶ。

サーモカルスト凹地に地下水の融解水が蓄えられ湖沼化し、湖沼底の年平均温度は $+4^{\circ}\text{C}$ となってさらに地中の凍土と氷の融解が進行する。湖沼壁が河川侵食で切られて湖水の排出が生じたり、乾燥が卓越して湖水が干上がると、一旦融解した湖沼底の地中では表面と側面から再凍結が始まる。すると、湖沼底の中心では凍結面に向かって水が吹寄せられ、氷を析出させる。これは、北海道などの季節凍土地域で観察される凍上現象に他ならない。また地表面で氷が析出したのが霜柱である。融解層が完全に再凍結するまで、氷の析出が継続し、厚さ数10mの氷の層が形成される。そこに結果地表が隆起して、ピンゴ(Pingo)と呼ばれる永久凍土地域に独特の地形が発達する。このピンゴの形成過程を第3図に示す。(福田, 1989). ピンゴは極地カナダ、アラスカ、グリーンランド露岩地域、シベリア、スピツベルゲン永久凍土地域に見ることができる。最大のピンゴは高さ60m、直径800m以上の円錐形となる。ピンゴの中心は、析出した氷の核からできている。湖沼底の融解層がすべて再凍結して、地中の氷の析出が停止すると、氷自身の重みで粘弾性流動を生じて、ピンゴは次第に潰れてくる。ピンゴの成長・発達に要する時間は、はじめに出来上がったサーモカルストの大きさに依存する。直径100~200m程度のサーモカルストでは、ピンゴの高さは5m程度



第3図 ピンゴの形成過程(福田, 1989)

で数100年で成長が停止する。しかしサーモカルストの直径が800mにもなると、ピンゴの高さは50m以上となり、成長期間は数1,000年にも達する。イギリス中央部にはかつてそこに形成されたピンゴの跡が地形に残されている。氷床の退いたあとに永久凍土が一旦形成され、その後の温暖化で融解したことが分かる。

4. 最近の地球規模の温暖化と永久凍土の変化

最近の地球規模の温暖化は、永久凍土へも影響を与えている。さきに述べたように、永久凍土は現在の気候環

境下で微妙なバランスを保っている。地表面植生の破壊のような外的擾乱で、融解が促進されることがある。極地カナダの北極海沿岸や、シベリアの北極海沿岸では、海岸に露出している地下水が大規模に融解し、海岸線の後退が進んでいる。極地カナダ (Banks 島) での観測によれば、年間 10m 以上海岸線が後退しているが、その原因は地下水の融解であると報告されている。(Lewkowitz, 1987)。東シベリアのコリマ川デルタ地域でも、地下水が融解し、大量の細粒物質が沿岸海洋へ拡散している。ヤクト語でこうした永久凍土の融解をエドマ (Edoma) と呼んでいる。こうした永久凍土の融解で、海岸線の後退、あるいは沿岸低地の海面下への沈水が生じようとしている。いつごろから、どの程度の融解が進行しているのか、まだ十分に調査されていないので不明な点が多い。

永久凍土は外的な環境と微妙なバランスを保っているので、気候環境の変動へはいち早く応答する。その意味で、地球規模の気候変動を察知する鋭敏なセンサーの役割をもっている。今後の研究の成果に期待したい。

引用文献

- Ager, T.A., 1982: Vegetation history of western Alaska during the Wisconsin glacial interval and the Holocene. *Palaeoecology of Berigia*, ed. D. Hopkins, Academic Press, New York, 75-93.
- Climap Project Memers, 1976: Surface of the Ice-Age Earth, *Science*, 191, 1131-1137.
- 福田正己, 1980: 永久凍土圏, 月刊地球, 2, 221-227.
- _____, 1989: ビンゴー永久凍土地域の生きている地形一, 科学, 59, 145-152.
- Lewkowitz, A.G., 1987: Nature and importance of thermokarst processes, sand hills moraine, Banks Island. Canada, *Geografiska Annaler*, 69A, 321-327.
- Mackay, J.R., 1971: The origin of massive icy bed in permafrost, western arctic coast, Canada *J. Earth Sci.*, 8, 397-422.
- 阪口 豊, 1984: 寒冷地域の気象変化, 寒冷地域の自然環境, 福田・野上・小崎 編, 北海道大学図書刊行会, 183-212.

306 (プランクトン; エルニーニョ; 赤潮)

4. 海洋プランクトン*

寺 崎 誠**

1. はじめに

海洋は全地球表面の約70%を占めるが、この世界には無数の生物がひしめいている。これらの海洋生物は生態学的に大きくプランクトン (Plankton), ネクトン (Nekton), ベントス (Benthos), 海洋細菌 (Bacteria) に区分することができる。そもそもプランクトンという名称はギリシャ語の放浪者という語から由来したもので、1887年にドイツの Hensen が初めて提唱したものである (Hensen, 1887)。

プランクトンは水中に浮遊して生活する独特の生物群で、動植物の両者を含み、その形態は比較的小さく、運動能力はすこぶる弱いか、または全く運動能力を欠き、移動は水の流動に支配される。また、ベントスやネクトンの中にも幼生期をプランクトンとして過ごすものも極

めて多い。近年、プランクトンネットで採集される小型魚類や遊泳性エビ類はマイクロネクトンと呼ばれるようになった。プランクトンの大きさも小は数 μm の単細胞生物から大は直径 1m 以上もあるクラゲ類までさまざまであるが、顕微鏡的な大きさのものが種類数においても、量のうえからも多い。プランクトンの大きさは第1表に示すように超微小プランクトン、微小プランクトン、小型プランクトン、中型プランクトン、大型プランクトン、巨大プランクトンの6つに区分される (Cushing *et al.*, 1958; Dussart, 1965)。超微小プランクトン、微小プランクトンの大部分は海洋細菌か植物プランクトンであり、中型プランクトン以上はすべて動物プランクトンである。

2. 海洋の基礎生産量

海洋の生産量とは、一定面積の海面下で一定時間に生

* Marine Planktons.

** Makoto Terazaki, 東大・海洋研究所.