

4. シベリア寒冷圏と地球気候

北海道大学低温科学研究所 大畑 哲夫

1. 気候システムとは

(1) 気候の形成

地球の気候形成の原動力となっているのは太陽からやってくる太陽放射である。その中で大気・海洋・陸域が相互作用を起こしながら形成されている温度・水についての環境が気候であり、それを一つのシステムと考え気候システムと呼ぶ。図1に地球の水・エネルギーを中心とした気候システム概念図を示した。この図に示されているように雪氷、植生が重要な部分を占めていることがわかる。

地球では、太陽光とそれが散乱、反射している波長の短い電磁波である太陽放射（短波放射）とともに、大気、地球表面が出す波長の長い電磁波である長波放射によって放射状態が決まっている。それらが大気中で吸収・放出され、エネルギーの変換が起こる。大気中では吸収された放射が熱となり、地球表面では放射が吸収され顕熱、潜熱と

いう別の形の熱になり、輸送される。ここで顕熱は暖かい気塊が冷たい場へ移送することに伴い輸送される熱でありその増減は温度変化として表れる。それに対し、潜熱は液体の水が水蒸気になった時、水蒸気が新たに保持した潜在的な熱（凝結、蒸発する際の相変化に費やされる熱に相当）であり、水蒸気の移動とともに輸送される熱をさす。これら二つは放射とともに気候システムの維持に重要な役割を果たす。

また、これらとともに水が1つの重要な気候要素であるが、その循環（水循環）がエネルギー輸送で大きな役割を果たす。

(2) 海洋と陸域

地球表面は物理的特性の異なる海洋と大陸で構成され、水・エネルギー循環に対する特性が大きく異なる。海洋は太陽放射という形で受けた熱を良く蓄積するが温度は余り変化せず、その後の季節にその熱を放出する。陸域はすぐ加熱し、また太陽放射が弱くなると冷却する。このような熱的

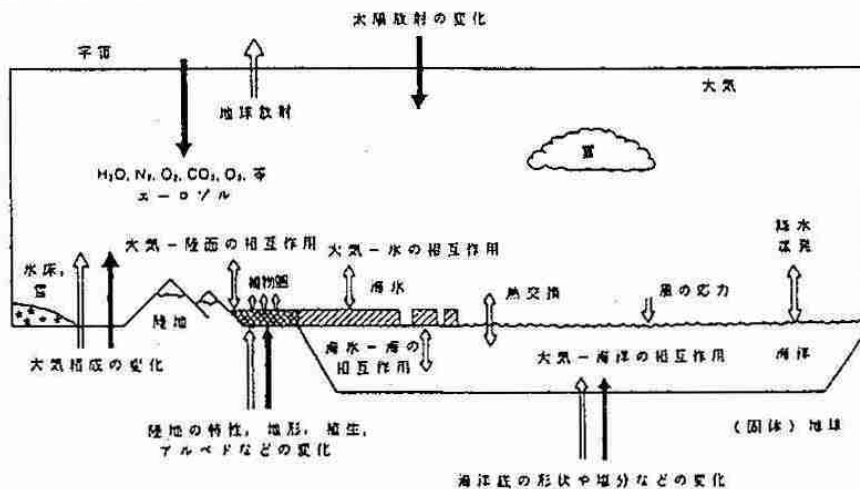


図1：気候システム概念図

性質の違いが、海洋上と大陸上の大気加熱状態に差異をもたらしている。また、海洋は十分水分がある一方（水で出来ている）、大陸は水がある場所とない場所、また年によりその配分が変化する。これが蒸発量の場所と時期に差異をもたらし、大気温度状態に影響を与える。このような過程を通して、海洋上と大陸上の温度状態に差が生ずる結果、大気循環の様式がモンスーン循環が発生するようである特徴を持つてくる。陸域上の大気加熱・振る舞いは、陸域の性質に強く依存している。たとえば、シベリアや北米北部の陸域には雪水が多く存在し、また森林帯も存在するという特徴を有しているため、大陸の中でも一種独特の性質を持つ。

(3) 雪水とその役割

シベリア地域で特に注目しなければならない雪水は、積雪と凍土である。

a. 積雪：降雪の結果、地上に積もった雪の集合体。春になると融解し、消滅する。夏を経過しても融解しきらない場所では、氷河になる。積雪は日本で最もなじみ深い雪水体である。積雪は極域から緯度30°近辺まで分布するが、地域、季節によって量はもちろんのこと密度や雪質が大きく異なる。雪質としては地上に積もったばかりの新雪、雪結晶の結晶形が失われ密度が大きくなったしまり雪、さらに水の作用により結晶が大きくなったざらめ雪、積雪中の水蒸気移動が活発であり結晶が大きくなったしもざらめ雪などが主要なものである。

積雪の次の特徴が気候に影響を与える。

- 1) 表面での短波長域の高反射率（この反射率のことをアルベドという）
- 2) 融解点が0℃
- 3) 低い熱伝導率；
- 4) 表面の凹凸が小さい；

b. 凍土：0℃以下の温度の地中のことをさす。低温のため土中に存在する水の一部または全部が氷になっている。凍土は雪水と土壌、岩石との混合系であるという点で、今までの4つとは異なる。冬に凍結し、夏に完全解けてしまうものを季節凍土という。2年以上連続して凍結している場合を永久凍土という。永久凍土でも夏には当然表面付

近が解け、その層を融解層とよび、年間を通して一番深くまで融解した時の層を活動層と言い、その深さを活動層の深さという。多くの地域では冬期に入る前、9月頃に最も深くなる。永久凍土が分布する地域は、その空間分布に応じて連続永久凍土帯、不連続永久凍土帯、そして点在永久凍土帯の3種類に区分される。凍土は、土中の構造物として、また長期的には地下の水貯留の1つとして気候に影響を与える。

(4) 植生とその役割

シベリア地域には広大な森林帯が分布し、その南北には草原帯が存在する。森林は生存するため、蒸発散を行い、この活動が水循環の一部を規定している。蒸発散の量は、樹種などで異なる。

2. シベリア地域の気候

(1) シベリアの気候要素の特徴

シベリアは大陸の一部であり、大陸域の基本的特性として、夏期暑くなり、また冬期寒くなりやすい、つまり気温の年較差が大きい。これは陸というものが海に比べ熱容量が小さく、日射によって暖められるとすぐ暑くなり、また日射がなくなると放射冷却によりすぐ寒くなりはじめるのである。また大陸内部は海洋から遠いため水蒸気が多く供給されることはなく、その結果、降水量が少ないことが上げられる。これらの基本的状況に、積雪や凍土、森林が味付けをしているのである。

シベリアの雪氷圏は1年の内、半年ないしそれ以上の期間積雪で覆われ、気候は大規模大気場の影響とともに陸域での雪氷要素、生物・水文過程の複合作用によって形成されている。

a. 気温の年較差が大きい

図2から気温の季節変化を見ることが出来る。気温は夏期20℃、冬期-50℃と年較差が70℃と非常に大きい。これはシベリア地域を中心とした大陸積雪域共通である。東京の年較差が高々25℃であることを考えると、いかにヤクーツクの年較差が大きいかがわかる。

積雪の存在が少なからず影響していると考えられる。

b. 地球上の最低気温の記録はシベリアで記録されていた

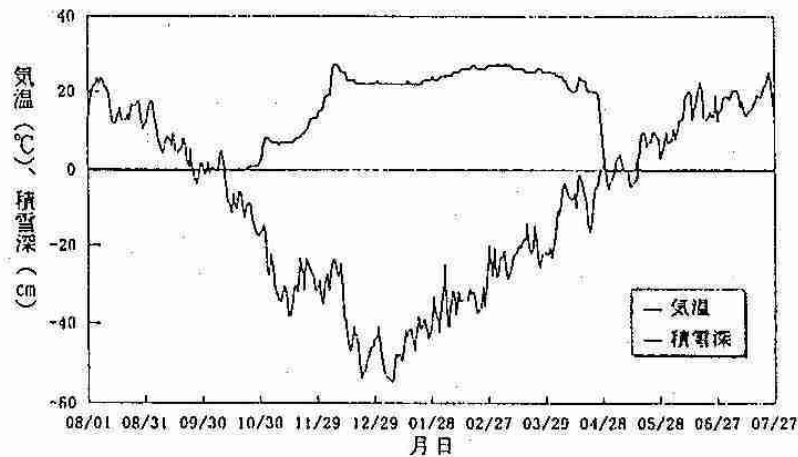


図2：シベリア地域（ヤクーツク）の気温と積雪深の季節変化。1986—87年。

南極のポストーク基地で -89.2°C が観測され、記録が更新される1983年まで、観測記録のある所としてはオイミヤコンが地球上一番寒い場所であった。標高もたいして高くなく、また緯度も $60-70^{\circ}\text{N}$ と本当の極でもないに関わらず、非常に低い気温がシベリアでは記録されている。大きな大陸の内部であるということが一つ大きな理由である。それと、地形がお椀型でないことが、幸いしているようである。南極のようにお椀型だと冷えた空気は、外へ外へと流れ出てしまうが、シベリアでは冷やされた空気が滞り、さらに冷やされるため極端に寒くなる。このた

め、気温逆転層の厚さはシベリアの方が遙かに高い。多くの地域の標高が500m以下と南極内陸部より遙かに低いにも関わらず、結果として気温は同じがより低くなるのである。

c. 寒い、しかし風は沿岸部の一部以外は強くない

北極海は、冬になると全面凍結するため、大陸が冷えても、海洋—大陸の間であまり気温差が生じず、強い低気圧もそう多く発生しない。また、南極氷床と異なり地形が平坦であるため、冷えることによって風が発生せず、むしろ地上では弱くなる傾向がある。

d. 積雪が多いと地面は冷えない

あたり前ではあるが、年によって積雪の量は異なる。積雪が厚いとその断熱効果（第1章）が強く働くため、積雪量の多い年には地中は冷えず、逆に少ない年にはよく冷える。これはその後の地中の融解を含めた温度状況に影響を及ぼす。同じ地域でも、積雪の多少によって、気温と地温の差に違いが表れる。図3にカナダの例を示したが、積雪が多い地域では地温が気温に比べてかなり高い、つまり気温は低下しても地温はなかなか下がらないことが起こる。

e. 降水量は日本の20—50%であり、半分近くが雪である。

気温が全般的に低いため、降水量は少ない。その少ない水分を植物は利用し、育っている。

(2) 気候変化

ユーラシア大陸積雪域は温暖化傾向の最も強い

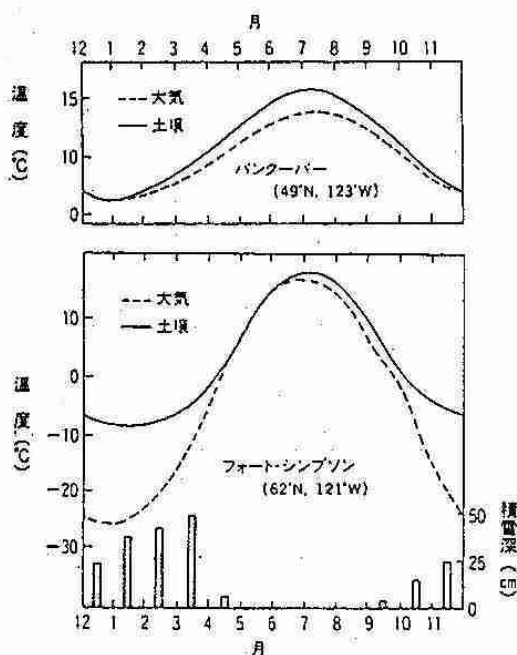


図3：積雪深と地面下1cmの地温の関係（カナダの例）

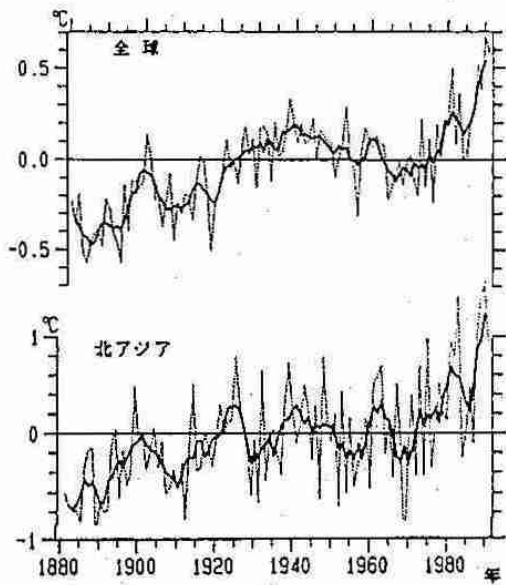


図4：ここ100年の北アジアと全球の気温変化。
 毎年の値が期間平均値からの偏差として表
 されている（破線）。移動平均値が実線で
 示されている。
 縦軸の違いに注意。（気象庁、1992）

地域である。図4にシベリアを中心とした北アジアと全球の地上気温の長期変化を示した。全球平均がここ100年で0.5°C程度であるに関わらず、北アジアでは0.9°Cと倍程度の上昇が起こっている。全球平均に比べて北アジアは2倍程度高い値を示し、地球上で最も温暖化が激しい地域である。特に冬期を中心とした時期の上昇が大きい。これに雪氷の影響が含まれているのかは定かではないが、ただ、温暖化によって雪氷の状態が影響を受けることだけは確かである。またこの気温上昇は気圧の低下、雲量増加、日射量減少を伴っていると言われている。

(3) シベリア地域のフィードバック

フィードバックという現象は多因子が関与するほとんどあらゆる自然のシステムで生じている。フィードバックとは、あるシステムに関し、その中の第一因子がある方向へ強制的に変化させられた時、その変化に伴い第二因子以下の他の因子も当然変化する。その変化はまた、第一次因子を変化させる、すべての因子が何処の状態で落ち着くこともあれば、場合によってはシステムが暴走してしまう。このような系で変化が押さえられる過程を負のフィードバック、変化が強調される過程

を正のフィードバックと呼んでいる。

a. 積雪域の分布は年々変動し、積雪面積が多い年は寒い

日本は温暖な海洋の影響を受けているので暖かいが、ユーラシア大陸の大部分は寒いのである。大陸域では北緯28°まで1月の月平均気温が0°C以下になる。積雪が広範囲に分布し、また永久凍土を含めた凍土に至る所に存在している。図5に積雪分布の季節変化を示した。これを見ると分かるように、積雪は10月頃から形成され、1月に最大面積となり、5月頃にほとんど消えてしまう。

白い雪は日射の反射率を増加させることを通して放射収支を小さくさせ、冬をより寒くする。モンゴルでの調査によると、11月頃、降雪により積雪が形成されると、気温が極端に低下する現象が見られる。ユーラシアの中でもより南の地域であるため積雪のアルベド効果が効く。大陸全体をとった平均値で見ると、積雪面積が大きい年は気温が低く、その逆の場合は高いという傾向が見られる（図6）。地域的にも、また大陸全体としてもこの効果が効いていると言えそうである。正のフィードバックが働いていると考えられる。

b. 森林がアルベドに影響する

ユーラシア大陸域の北部の雪氷圏には「あかまつ、からまつ、白樺」などで構成される北方針葉樹林帯（タイガ）という大森林帯が存在する。この樹林の存在のため、この地域に積雪が積もったとしても、上空から見る限りは地球表面が南極のように白い雪に完全に覆われることはなく、アルベドもあまり低くならない。北緯40~50°は高いアルベド値を示すが50~70°にかけては数値が低いことが分かる。雪で覆われていても、森林の影響の方が強く出ている。シベリアを中心とした北方針葉樹林帯はアルベドが低い、つまりかなり黒っぽいのである。これでは、積雪が放射収支を大きく変化させ、この地域を極端に寒くさせる効果は南極よりは小さい。日射量がまだ多い冬期の始め、また2-3月の春季にはその効果が一定の形で顕在化している。積雪は冷やす効果を、そして植生は暖かく保つ

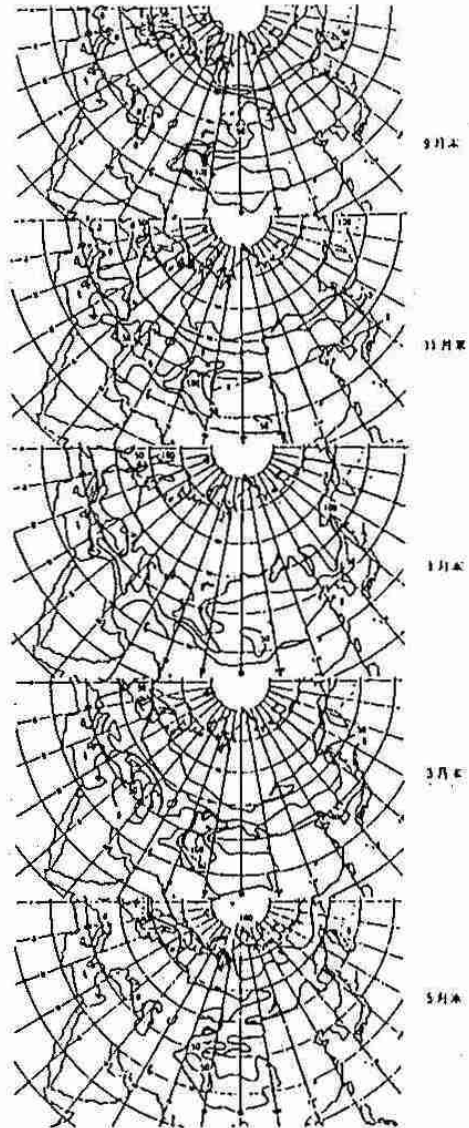


図5：ユーラシア積雪分布の季節変化
(9月末-5月末)。図中の0、50、100の
数値は各時期に積雪が存在する確率。

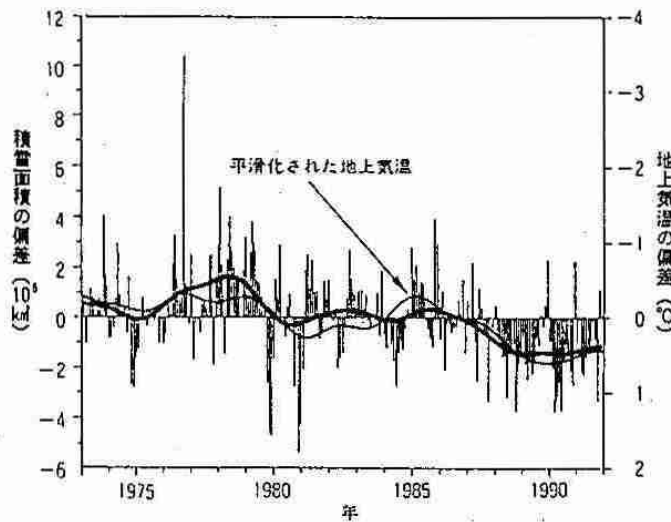


図6：積雪面積と気温の関係。面積が広いと気温が低いという逆相関が見られる。(IPCC,1982)

効果を持ち、その兼ね合いで温度状況が決まっていると言える。森林の量が変化すると、アルベドの変化を通して気候は変化していく。

c. 植生が凍土融解層の間で複雑な相互作用を起している

地域の気候形成に対して陸域の性質は大きく影響する。南極と異なり大陸積雪域は上から見ると大気・植生・土壌という構造の中に積雪や凍土が存在する複雑な陸面系を構成している(図7)。これによって、この地域の気候、特に地上付近は特徴づけられている。

シベリアのアルベドがどの程度であるかという事は、真冬(11-2月)には関係しないが、日射が強い秋期(9-10月)、春季(3-5月)には大いに影響する。積雪は年によって差があるが、アルベドを決めているのは森林である。面白いことに、森林があることに寒さが影響しているようである。冬期の積雪は、春期に融け始める。同時に冬の間凍結していた地表層も融けだし、春から冬にかけてその層の厚さが増す。融雪水は地面を湿潤化し、一時的に蒸発が増大する。これが大気に水蒸気を供給する。これを積雪の水文学的効果と言ひ、その影響力につい

てはまだ分かっていないことが多い。

その後の降水は、地表層の融解している層に捕捉される。水分は地中深く浸透せず、高々深さ2m程度の層に対流する。この深さは、つまり根がはっている程度の深さであり、水分が植生に有効に利用されるような構造になっている。これを利用し、森林は成長する。

つまり、寒いため凍土と冬期の水タンクである積雪があり、それが森林の成長を許容していると考えられる(酒井、1984)。森林が分布することにより、アルベドが低く保たれ、秋期、春期は極端には寒くならない。また森林は効果的に水分を大気に戻す媒体である。その量、状態によって陸面からの蒸発効率が変化するのである。このように地表面が一つの独特のシステムを形成し、それがこの地域の気候・陸域間の水と熱の交換過程とさらに大気環境を制御している。

3. おわりに

シベリア地域に関しては、炭酸ガス、メタンガスなど微量元素の挙動に関して関心が持たれているが、水・エネルギー循環に直接効く雪氷・植生も気候変化という視点から見るとより重要な現象である。シベリア地域は地球温暖化過程において、それに対する増幅作用があるか?という疑問に答えなければならない。

現在、地球では温暖化が進んでいると言われている。図4に示されているように、その中でも、シベリア地域の冬期を中心とした温暖化の量は地球上で最も大きい(IPCC、1992)。この地域に温暖化を引っぱっていく何らかの過程が見られるのか、また変化を増幅させる作用があるのか?それに積雪が関与しているのか?第6章で述べた地表面システムが機能しているのか?水分を含めた地表面システムがまだ正確にはGCMに取り込まれてはいない。

これらの過程をはっきりさせ、GCMに組み込める様にする事が、緊急の課題であると言える。

(文献)

IPCC(1992): Climate Change: The IPCC scientific assessment. (Eds. Houghton, J.T., Callendar, B.A., Varney, S.K.), Cambri

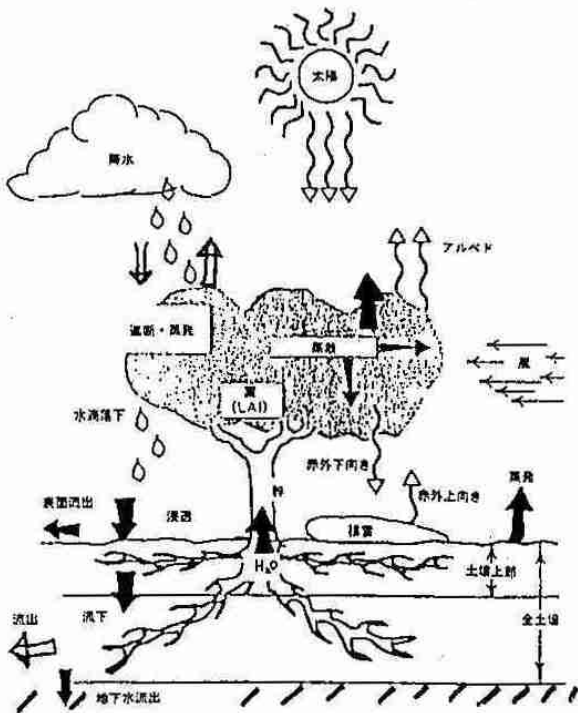


図7: シベリアで見られる複雑な陸域(大気・植生・土壌)系の様子

dge Univ. Press., 200p.

気象庁 (1992) : 地球温暖化監視レポート1991. 大蔵省印刷局、231pp.

日本雪氷学会 (1990) : 雪氷事典. 古今書院、pp.196.

小倉義光 (1984) : 一般気象学. 東大出版会、東京、374pp.

大畑哲夫 (1993b) : アジアモンスーンとユーラシア大陸寒冷圏. 科学、63(10), 646-658.

大畑哲夫 (1995a) : 積雪と積雪現象。雪氷基礎講座「積雪」、古今書院、153-188.

大畑哲夫 (1995b) : 積雪と凍土。「大気水圏科学からみた地球温暖化」(半田暢彦編)、名古屋大学出版会、名古屋、227-240.

酒井 昭 (1984) : 寒冷地域の森林の気候特性。「寒冷地域の自然環境」(福田・小野上編)、北海道大学図書刊行会、19-38.