

## 要旨

永久凍土は、北半球陸地の約 1/4 という広範な面積を占め、その表層の融解による温室効果気体放出の可能性や、大気、植生などとの複雑な熱と物質のフィードバックなどを通じて、北極環境の変動を左右する主要な因子である。一方で、広範囲に分布する永久凍土の現況に関して、科学的な知見が不足しており、変動の将来予測においては不確実性の幅が非常に大きい。この理由は、永久凍土の特性として、空間的な不均一性が大きく観測点の代表性が狭く限定されることと、衛星からの観測が困難であることが主に挙げられる。そのため今後は、新たな凍土観測手法の開発および既存手法の改良と同時に、国際連携も交えた現地観測の拡充と多点観測の実施が必要となる。それによって、永久凍土の分布と、構成物質の不均一性をより正確に把握するとともに、永久凍土の地温変化や固定されている氷や有機炭素

の量や状態についても情報を増やしていくことが重要となる。これら「場」の情報に基づいて凍土の状態変化プロセスを定量化し、合わせて永久凍土を含む陸域システムのモデル化と挙動の把握、北極システムの変動研究へと国内外の知見を統合していく必要がある。

このテーマで取り上げる Questions は以下の 4 つである。

- Q1: 北極圏の永久凍土はどのような広がりと深さをもって存在しているのか？
- Q2: 永久凍土はどのような物質から構成され、どの程度の不均一性があるか？
- Q3: 永久凍土はどのような様態・規模で昇温・融解するのか？
- Q4: 永久凍土—大気—積雪—植生サブシステムはいかなる構造と挙動の特性をもつのか？

## まえがき

### a. はじめに

永久凍土 (以下、下線の用語は p127、ボックス8の解説を参照のこと) は環北極陸域のほぼ全域に分布し (図 52a)、北半球の陸地面積に対する比では約 24% を占めるとされる (Brown, 1997)。面積的に地球上最大規模の雪氷現象であるのみならず、大気や植生などとも複雑に熱と物質をやりとりしており、北極環境の変動を考える上で極めて重要な要素の一つである。また、地下水の融解に伴う温室効果気体の放出や海底永久凍土の不安定化によるメタンハイドレート放出の将来気候への影響など、グローバルな影響も懸念されている。温暖化の影響により不可逆性の強い変化が生じる可能性が高いことも、永久凍土の特徴である。例えば、サーモカルスト は、永久凍土の融解に起因してローカルな水循環や物質循環および生態系に連鎖的な変化をもたらす。東シベリアでは、針葉樹林帯の地下に分布していた含氷率の高い永久凍土が融解し、地盤沈下を伴って凹地に湿地や湖沼が形成されている。こうした変化には、数十から数百年を要するが、その過程でこれまで万年単位の期間固定化されていた有機炭素が流動化する。これら生態系・水文過程へのインパクトも地域社会的に大きな問題となるが、地盤沈下による建物・パイプ

ライン・道路・線路など社会基盤の損傷は既に顕在化している。北極海の沿岸や島嶼では、波による海岸侵食が凍結地盤の融解を伴って激化し、移住を余儀なくされた地域社会も存在する。

これまで、永久凍土の存在に起因する様々な現象、問題については、典型的、特徴的ないくつかの地点を対象として多くの研究がなされ、知見が蓄積されてきた (例えば、Harris et al., 2009; 松岡・池田, 2012)。しかし、広域を対象として永久凍土の融解が水循環・植生・気候や人間社会に及ぼす影響を定量的に予測するには、永久凍土に関する基礎的な情報 (例えば、物性値や貯留炭素量、地下水などの空間的な分布情報) や、フィードバックプロセスの理解 (例えば、永久凍土変動による植生変化と、その結果生じる気候への影響など) が、現時点では不十分と言わざるをえない。永久凍土は基本的に地表に存在しないため、遠隔から非接触で観測する手法 (リモートセンシング) が確立されておらず、直接的な観測にも掘削という労を伴う。そのため、広域的な永久凍土の現状や変動を理解するための観測やモニタリング事例は限定されている。他の雪氷要素 (海氷、積雪、氷河) に比較して、永久凍土の空間分布や変動パターンの理解が大きく立ち遅れており、温暖

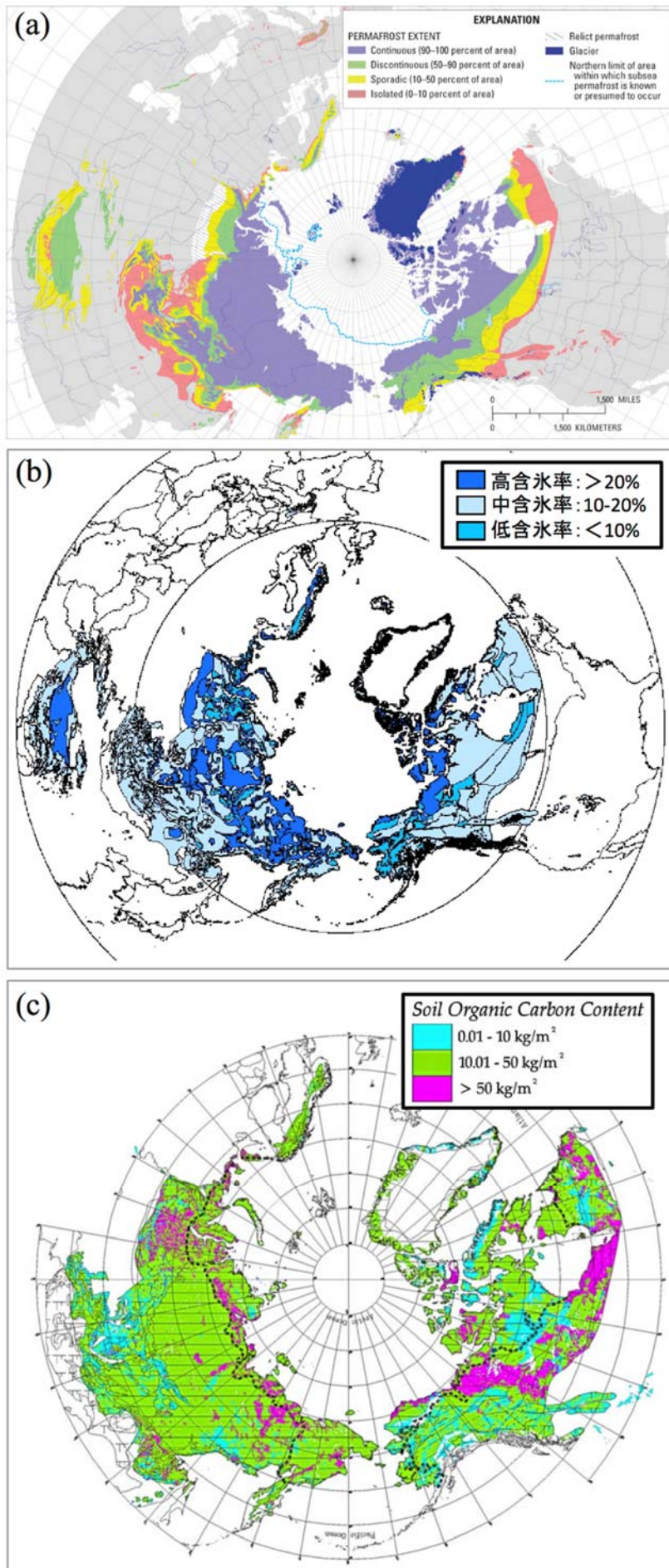


図 52

(a)地温に基づく永久凍土分布図 (USGS Professional Paper 1386-A に収録)。IPA Circum-Arctic Map (Brown et al., 1997) に基づき、Dmitri Sergeev (UAF) が作図。

<http://pubs.usgs.gov/pp/p1386a/gallery5-fig03.html>

(b)含水率分布。IPA Circum-Arctic Map を改変。石川・斉藤、雪氷(2006)

(c)永久凍土中の有機炭素量の分布。Tarnocai et al. (2009)

化に対する応答についての予測も不確実性の幅が大きくなっている。

その一方で、本報告書の中でも生態系の変化(テーマ 3)、雪氷要素の変化に伴う水循環への影響(テーマ 4)、古環境復元情報源としての重要性(テーマ 6)などと深く関連し、また、永久凍土の融解が北極域の地域社会に与える影響についても言及される(テーマ 7)など、様々な研究テーマにおいて理解の進展が求められている。地球環境変化の将来予測の中に永久凍土の影響を定量的に反映させる必要から、国際的にもデータの集積を行う動きがあり、観測データとモデルを連携させるプロジェクトも始まっている。本テーマにおいては、広域(北極域)の永久凍土に関して理解が不十分である点を整理し、今後生じうる変化と気候・環境への影響を明らかにするために取り組むべき研究課題を挙げることにする。

#### b. 永久凍土の特徴的な性質

永久凍土の特徴的な性質は、そこに含まれる水の動態によるものが多い。例えば、湿潤な地盤の透水性は凍結によって大きく低下するため、永久凍土層は難透水層として作用し、その上の植生の生育環境を決定する。また、土壌間隙水の凍結・融解時に放出、吸収される潜熱の効果で、永久凍土の地温変化は特に 0°C 付近では抑制される傾向にある。サーモカルストや、凍上に伴う地盤の沈下や上昇によるインフラへの被害については前述した通り、地下水の消長に起因する。このように、永久凍土変動とそれに起因する諸現象を理解するには、地中水の動態(量、相)もあわせて評価していくことが重要である。Zhang et al. (1999) は、北半球全体の地下 20m までに含まれる地下水の総量を、海水準面変動相当で 3~10cm と見積もっているが、分布の不均一性は非常に大きく、推定値の信頼度は高くない(図 52(b))。

永久凍土中に含まれる有機炭素の動態も、気候変動との関連で注目される。これまでに全球規模での土壌データベースから、永久凍土中に貯蔵されている有機炭素の総量を、Zimov et al. (2006) は約 1,000Gt、Tarnocai et al. (2009) は 1,700Gt と見積もっている(図 52(c))。これらは陸上の有機炭素の約半分、大気中の炭素量の約 2 倍に相当する。仮にこれら有機炭素を含む永久凍土が全て融解すると、この炭素が二酸化炭

素、または、メタンの形で大気中に温室効果気体として放出され(Permafrost carbon feedback)、温暖化をさらに加速する可能性が指摘されている(Schuur et al., 2011)。ただし、このプロセスには数千から数万年を要し、また、現状では多くの仮定をおいた上で限られた現地調査結果に基づく算出であるため、大きな推定誤差を含む。

#### c. 永久凍土の分布と変動の時間スケール

永久凍土の地温変動は、近似的に地表面からの熱伝導に支配されると見なすことができ、地表面温度の変動が減衰・遅延して伝播した結果としてほぼ説明できる(Lachenbruch and Marshall, 1986)。そのため、永久凍土地温変化の応答時間は浅部で短く、深くなるほど長くなる。

シベリアに分布する地下数百メートルに達する厚い永久凍土には、過去の数万年スケールでの気候変動の履歴が残されている。これは、地表面の温度変化は数千から数万年の時間をかけて数百メートルの地温に影響を与えるからである。その一方で、浅い深度の永久凍土温度には現在の気候環境が反映されるため、永久凍土表層の平面的な分布境界は、現在の気候条件に追従してほぼ決定される。

#### d. 本テーマで取り上げる Key Questions

永久凍土の成立と変遷過程の基本的理解を進めるため、ここ 5~10 年で埋めるべきギャップ、問われるべき課題として以下の 4 つを挙げる。

- Q1: 北極圏の永久凍土はどのような広がりや深さをもって存在しているのか?
- Q2: 永久凍土はどのような物質から構成され、どの程度の不均一性があるか?
- Q3: 永久凍土はどのような様態・規模で昇温・融解するのか?
- Q4: 永久凍土—大気—積雪—植生サブシステムはいかなる構造と挙動の特性をもつのか?

これらの課題は相互に密接な関連がある。すなわち Q1 と Q2 で問題となるのは、永久凍土とその上の活動層の温度(Q1)あるいは構成物質(Q2)の、水平および垂直方向の違いを、これまでの見積もりよりも分解能を上げて評価することであり、直接観測できない部分の推定の確度を向上させることである。Q1 と Q2 への解答

ボックス 8

永久凍土の成立と変遷過程の基本的理解

**永久凍土:** 連続した2年間以上0℃以下の温度状態にある土地(氷や有機物を含めた堆積物や岩盤)と定義される。永久凍土は気候変動や人為的な操作によって融解する可能性があり、字義通り“永久に”凍結している土地を意味しない。永久凍土の温度変化・消長を表現するために多年凍土という用語も提唱されている。永久凍土を含む地域としての永久凍土帯は高緯度地域と高標高地域に分布し、後者は特に地形によって複雑な分布を持つ。図53は高緯度地域の永久凍土の3次元分布と、水平分布による区分を模式的に表している。地表面の面積に対しその何割を永久凍土が占めているかの割合によって連続的・不連続的・点的的永久凍土に区分する。

**活動層:** 永久凍土の表層部で夏期に融解し冬期に凍結することを繰り返す層。土壌水分の移動や植物活動、微生物活動の主要な場となる。

**サーモカルスト:** 氷に富む永久凍土の融解により凹凸のある地形を形成するプロセス。融解による地盤沈下のほか、氷脈に沿った侵食や、沿岸や傾斜地での大規模な斜面崩壊をもたらす。サーモカルストにより生じた凹地に形成される湖をサーモカルスト湖(融解湖)と呼ぶ。シベリアのヤクーツク周辺に多いアラスと呼ばれる凹地もサーモカルストによる地形である。

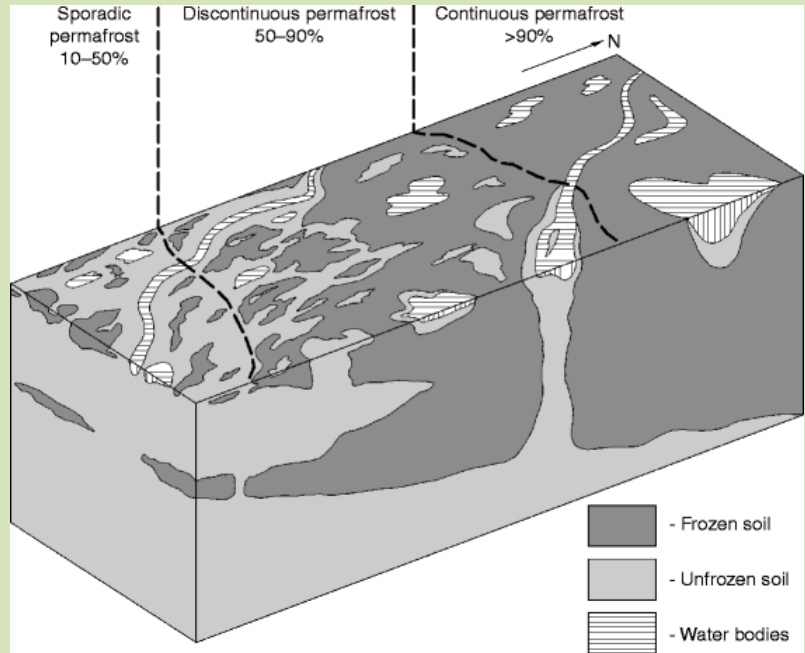


図53 永久凍土の3次元的な広がり方と、連続的・不連続的・点的的永久凍土の区分を示す模式図(Encyclopedia of Snow, Ice and Glaciers)。

**タリク:** 永久凍土中の融解部。永久凍土に囲まれているものの、通年融解したままである部分を指す。

**エドマ層:** 65~90%という高い体積含氷率を持ち、大量の有機炭素を貯留している永久凍土層。名称はシベリア北東部の現地語に由来し、アイスコンプレックスと呼ばれることもある。東シベリア北東部および中央部、またアラスカ北中部やカナダ北西部に分布し、数mから数十m以上の層厚を持つ。

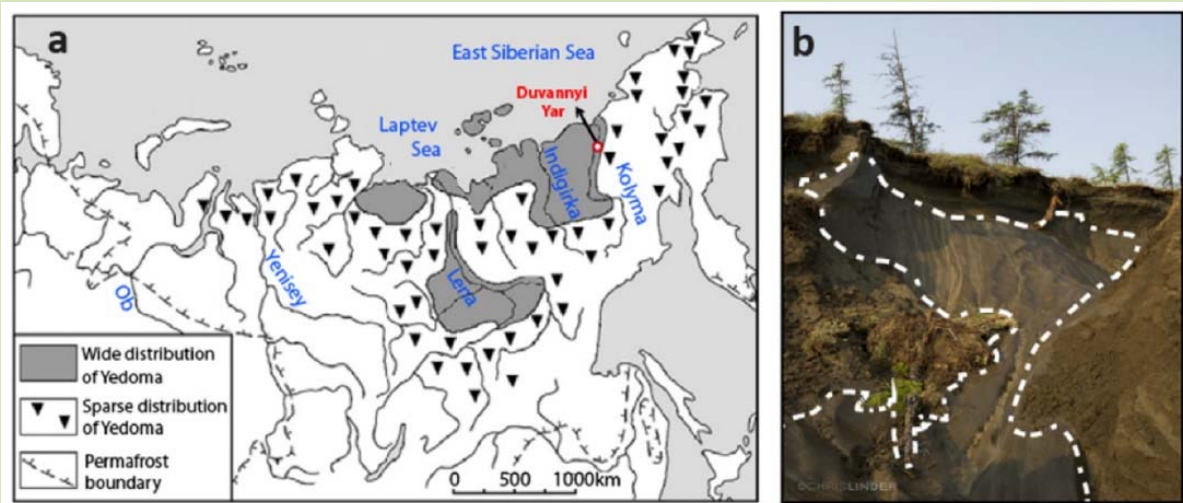


図54 (a)シベリアにおけるエドマ層の分布。(b)コリマ川岸のDuvannyi Yarサイトにおける侵食されるエドマ層の露頭(破線で囲んだ部分が氷体)。Vonk et al. (2013) による。

が、Q3 で問題とする変化の空間的な規模、あるいは変化の早さ等の評価を左右する。活動層の変化(Q3(1))やサーモカルスト(Q3(2))といった比較的短い期間で発現しうる状態変化に注目する一方、百年以上の時間スケールでの変化の履歴や今後の変動予測のための

情報となり、気候学的に重要な永久凍土深部の地温変化(Q3(3))についても取り上げる。Q4 では、永久凍土が植生、積雪、大気と持つ相互作用に注目し、この凍土を含む気候・生態系システム自体の理解と挙動解明が必要である点を強調する。

## Q1: 北極圏の永久凍土はどのような広がりと深さをもって存在しているのか? \_\_\_\_\_

### a. 研究の重要性と現状

分布は、永久凍土の最も基本的な情報である。先行研究をベースに国際永久凍土協会<sup>117</sup>(IPA)によって永久凍土分布図がまとめられてきた(図 52(a))。現在も、IPA が進める GTN-P<sup>118</sup>という国際的な観測ネットワークの中で、地温変化<sup>119</sup>および活動層厚の変化<sup>120</sup>に関する観測結果が集約されつつある。しかし、永久凍土が温度によって定義されるために、以下の理由から現状では正確な分布は「観測不能」である。①直接観測としては、ボアホール(掘削孔)による地温の測定が唯一の手法であるが、個々のデータの空間的な代表性には限界がある。②特に凍土の深さについては、十分な深さのボアホールが限られるため、垂直分布の推定精度は低くならざるを得ない。③衛星観測などの遠隔観測によって、確定的な同定ができない。これらの結果として、現在我々が知る永久凍土分布は、地理上の広がりや深さの分布の両者について、限られた観測点から内挿して推定したものである。

一方で、永久凍土の分布は、大きな不均一性に特徴付けられる。永久凍土の分布を模式的に表す図 53(ボックス 8)を見ると、例えば湖や大きな河川の下ではタリクが形成され、また、分布の境界付近では様々な条件を反映して空間的に複雑な構造になることなどが示されている。現在の分布図で用いられる連続的・不連続的・点状的永久凍土という区分は、連続的な分布からまだら状、島状の分布へと変化する凍土環境を表現することに一定レベルでは成功している。しかし、図中には区分境界が線で記入されているが、実際にどこに境界線を引くべきかが、永久凍土の分布比率を算出するための範囲の取り方で変わってしまう。また、永久凍土分布の連続性が悪くなるにしたがい、活動層が場所によって非常に厚かったり、過去の寒冷期に形成され融解途上に

ある永久凍土(化石永久凍土)が深部に存在したりするため、永久凍土境界の空間パターンは図のように複雑になる。同様に、急峻な山岳地域の永久凍土は、斜面方位や積雪分布などによって地表面条件が大きく異なるため、それらの条件に規定されて分布の不均一性が高くなる。そのようなばらつき具合は現状の広域分布図には情報としては含まれていない。

このような現状の理解では、気候変動にตอบสนองした分布の変化を検出することは困難である。さらに観測点が限られるという条件が加わるため、気温変化にตอบสนองし進行する永久凍土分布の変化を、気温以外の要因による分布の不均一さから分離して検出することは容易ではない。分布図に示された大掴みの理解から一歩進めて、この不均一性を把握し、その情報を含んだ形で凍土分布を理解することが広域的な凍土の変化に関わるあらゆる議論の出発点として重要である。

### b. 今後の研究

より良い永久凍土の分布の把握のため、以下の方向性が考えられる:

#### (1) 観測・検出技術の開発

新しい原理に基づく観測手法の新規開発、あるいは衛星データから永久凍土分布と相関の高い情報を抽出できるアルゴリズムの開発、改良を検討する。現状では地盤の構造を衛星データから明らかにすることに原理的な困難があり、何かしらのブレイクスルーが必要であるが、可能性の模索は常に必要である。

#### (2) 既存技術の改良・組み合わせ

分布の変化の検出などを可能にするには、既存の観測に関しても手法の改良が求められる。これまでに行われ、GTN-P に集約されてきたボアホールによる地温の

<sup>117</sup> 国際永久凍土協会: International Permafrost Association(IPA)

<sup>118</sup> GTN-P: Global Terrestrial Network for Permafrost

<sup>119</sup> 地温変化: Thermal State of Permafrost(TSP)

<sup>120</sup> 活動層厚の変化: Circumpolar Active Layer Monitoring(CALM)

直接観測を継続・拡充するだけでなく、例えば以下のような方向性での開発が考えられる。

### (3) 衛星データの活用、あるいは気候モデルと組み合わせたデータ解析

面的な情報を扱うために、衛星データの活用は今後必要である。例えば地表面分類・地表の輝度温度・積雪に関する情報を衛星から求め、これらの組み合わせから凍土の状況を推定する。また、これらの情報を陸面モデルに入力することでモデル出力として地温分布を得ることも考えられる。

### (4) 複数の観測手法を組み合わせた推定手法の開発

上記の衛星データに加えて、物理探査データ、地表面温度観測など、複数の指標となるデータを組み合わせて永久凍土分布を推定する統合的な手法を開発する。

### (5) 永久凍土分布の表現方法の改良

これまでの一面的な分布表現に加えて、例えば想定

しているグリッドサイズ以下のスケールの分布情報を確率分布関数的に取り扱う、あるいは幅を持った分布境界を定義するなど、分布表現を改良する。永久凍土分布をモデル出力と対応させる時、あるいは衛星観測から得られた物理量と対応させる時など、必要に応じたデータの表現形式を準備し、多様な表現を可能にする。

### (6) 不均一性の評価

地温、活動層厚、熱物性値、積雪など、地表面状態には様々なレベルでの不均一性があると考えられるが、測定点が一点ではその不均一性を評価できない。前述した CALM (脚注 120)の観測サイトは活動層厚に関して 100m×100m としたグリッドを設定して多点観測を行っているが、他の大半の観測点では一点ないし限られた数点の観測にとどまっている。簡易な観測手法であっても、サイトごとに空間的な広がりや考慮した多点観測を展開し、不均一性(値のばらつき)を評価する。

## Q2: 永久凍土を構成する物質はどのような分布を持ち、どの程度の不均一性があるか？ ——

### a. 研究の重要性と現状

永久凍土はその地中温度の状態と定義される一方、母材(土粒子、基盤岩)、水(氷、不凍水)、有機炭素といった物質を様々な比率で含有する混合物でもある。これらの含有比は、土壌の力学特性や熱物性を決定し、気温や降水といった外的因子とあわせて、Q3 で論じる永久凍土の状態変化を制御することになる。一方で、永久凍土の融解はこれらの物質を流動化させ、地形の変容、土壌の湿潤化、温室効果気体の放出などの形態で陸面や大気組成を介して気候へのフィードバックを持つ。永久凍土を構成する物質群、特に炭素と氷の含有比を解明することは北極圏陸面での炭素動態、水循環過程およびその将来像を理解する上で必須であり、グローバルな気候変動予測にも貢献する。

このような問題意識は、古くから様々な分野で共有されてきたにも関わらず、広域を対象とした理解はあまり進んでいない。先に示した有機物や地下水の見積もり(図 52(b)、(c))には、大きな不確実性が含まれている(Zhang et al., 1999; Zimov et al., 2006; Tarnocai et al., 2009)。定量的なデータが決定的に足りないこと

がその要因である。加えて、これらの見積もりは、総量値であることにも留意が必要である。これは、永久凍土が全て消失した際のポテンシャルとしての影響を評価するには有益であるが、実際の永久凍土の変動およびその影響は時間的にも空間的にも多様になる。このような相互作用動態の遷移過程(Q3)を理解するには、凍土を構成する物質群の含有比とその分布を空間的な不均一性も考慮して解明していく必要がある。

数値モデルを用いた研究では、永久凍土中の地下水の分布や炭素循環を扱ったものはまだ少なく、あっても単純化されたものに限られる。炭素循環モデルを含む地球システムモデルは既に存在するが、永久凍土環境を上記の目的に合うようにシミュレートするには、計算を最終氷期から開始してその変化を追う必要がある。高度な気候モデルと結合してそのような長期間の実験を行うのは、現状の計算機の能力とモデルの再現能力、そして境界条件となるデータ不足の面から、実現は極めて難しい。現状では、このような物質循環の解析において地質・地形的制約条件の不均一性を考慮するには至っていない。

## b. 今後の研究

現状では炭素と氷に限って見ても分布の情報は不足しており、存在量について推定の不確実性の幅を把握することから始めなければならない。母材についての情報も、かなり解像度が粗いのが現状である。先行研究は限られた情報を駆使して氷や有機炭素の存在量を推定しているが、この情報はまだ不十分であることを確認し、それぞれの手法がどの程度の誤差を含むか定量的な議論が必要である。

今後の方向として観測の拡充と、過去に得られた情報の集約によって推定精度を向上させることは、地道だが必須である。衛星データから得られる地表面区分を利用した観測地点の選択など、効率よく観測を展開していく工夫が求められる。また、分布情報の表現の仕方についても改善の余地がある。一般に、永久凍土の温度や構成物質の含有比は、Q1でも論じられたように空間的に不均一性が高く、スケールに依存するが、観測で得られている情報を失わないような表現方法が必要である。ある地点の地下氷の含有量には、そこでの母材の風化度、気候、地形、植生などの現在の状態と、過去の履歴が反映されている。これらの情報を活かし、地域ごとに支配要因を見出すことができれば不確実性の幅を狭めることが期待できる。

一つの方向性として、サブグリッド(グリッドサイズ以下)の地理的情報を含んだデータの作成が考えられる。一般的なデータ表現では、各グリッド内での状態値(地形、植生、積雪、気温、土壌熱物性・粒度特性)を暗黙のうちに均一と仮定するが、グリッド内での不均一性が顕著になる山岳域や不連続永久凍土帯などのデータが扱いづらい。この問題に対し、さらにグリッドを小さくしていく微分的手法は現実的ではない。そこでグリッドサイズはそのまま、グリッド内での各状態量の組み合わせにより、不均一性を含めた統計的表現(確率分布、分散、最大、最小など)として永久凍土の構成物質比を示

す枠組みを構築することが望まれる。これは世界的にもまだ十分に行われていないので、以下のように日本が先行する可能性が大いにある。

現在進んでいる研究の一例として、中緯度高山域や不連続永久凍土帯(アラスカのフェアバンクス周辺、西シベリア、モンゴル・日本の高山帯)では、上述した永久凍土組成を表現する様々なアプローチを試行するのに適している。ここでは、永久凍土の分布や組成が気候によって一義的に決まるのではなく、ローカルな地形・水文・生態条件にも強く規制され、大きなバリエーションを持っている(例えば、Ishikawa et al., 2012)ため、説明変数(状態値)と目的変数(永久凍土組成)とを比較検討しやすい。

これまで様々な方法でなされてきた現地でのポイント観測から、多点観測への展開、航空機や衛星観測による広域評価へと、系統的かつシームレスなスケールアップへと繋げる観測デザインとモデルの精緻化、汎用化が求められる。さらに、過去の履歴として氷期サイクルに伴う数万年以上の時間スケールでの永久凍土発達過程の理解も、並進していく必要がある(テーマ3のQ2、テーマ6; テーマ12のQ4)。

永久凍土中に貯留される炭素量の上限をおおまかに押さえる意味で、炭素循環モデルを用いて、永久凍土中の炭素貯留量を推定するアプローチも有効であろう。長い時間スケールの計算を行うため、現状ではシンプルなモデルを用いた研究に限定されるが、定量的な議論から得られる示唆はあると思われる。ただし、永久凍土の炭素循環を適正に表現したモデルの開発と、適切な境界条件の与え方を工夫することが求められる。将来的には計算機能力の向上により、気候モデル・物質循環モデルを結合した地球システム結合モデルを用いたアプローチが可能になると期待できる。観測データの蓄積により、複雑なモデルの性能を活かせるだけの情報をそれまでに手にしていることが望ましい。

## Q3: 永久凍土はどのような様態・規模で昇温・融解するのか？

### a. 研究の重要性と現状

Q3では、生じうる永久凍土の状態変化として、活動層の変化(Q3(1))、サーモカルスト(Q3(2))、永久凍土の深度地温(Q3(3))に分けて議論する。なお、Q3(2)とQ3(3)については、永久凍土の近年の変化を考えるうえ

でも、長い時間スケールの永久凍土発達史を念頭に置く必要がある。最近1万年間のような温暖な時期(間氷期)をはさんで、数万年間続く氷期という寒冷期が繰り返し訪れた古環境のもと、形成された永久凍土が現存するためである。

## (1) 活動層の変化

活動層融解部の時空間的な広がりの変化は、比較的短期間に地表面の生態系と水文過程に影響を及ぼす。これは、活動層融解部の広がりや永久凍土地域における植物の根系や土壌微生物などの生物活動の場であり、地域の水文動態を規定するからである。活動層の変化は、最大融解深(活動層厚)の変化だけではなく、地表面からの融解開始および凍結開始時期の変化として表れる。温暖化による活動層の時間的な変化は、融解開始時が早まることと凍結開始時が遅くなることである。さらに、地表面熱・水収支の変化に伴って地中に入る熱量が増加し、活動層厚が増加する。こうした季節的な広がりの変化は、長期平均的な温暖化が無い場合でも、降水の量、タイミングや消雪時期の変化によってもたらされる場合がある。活動層の動態は空間的な非一様性が高いため、変化傾向とその原因を捉えるためには、永久凍土上部を含んだ地表層の地温と土壌水分量の変化を、高い時空間密度で測定する必要があるが、CALMのように空間分布の観測に特化した観測点を除くと、スーパーサイト的な一点の観測でモニターされているのが現状である。

## (2) サーマカルスト

まえがきでも述べたように、地形変化を伴う永久凍土の融解であるサーモカルストは、地表面の生態系と水文環境を大きく変化させるため、その現状と変化の把握が急務である。特に、以下に述べるエドマ層の安定性、空間的な分布および融解速度を評価することは重要である(Schirrmeister et al., 2013 など)。東シベリア北東部および北西部に分布するエドマ層は、極端に多くの氷を含んだ(体積含水率で 65~90%)永久凍土層であり、有機炭素を大量に含有する堆積層である。体積の半分以上を氷が占め、広い範囲に分布しているため、エドマ層の融解は大規模なサーモカルストを引き起こす。これは、現間氷期の温暖な気候によって、あるいは人間活動による地表面攪乱や地球温暖化のために、主に氷期に蓄積され、凍土中に固定されてきた大量の炭素が再び循環し始めることを意味しており、そのインパクトを定量的に評価することは重要である。しかしこうした永久凍土層は遠隔地であることから、地理的あるいは鉛直方向の分布状況とその変化の実態は詳しく理解されていない。サーモカルストを伴う永久凍土の変化は、北

極域の変化と気候変動の予測に大きな不確定要素をもたらす原因となっている。

サーモカルストは活動層の深化や永久凍土の昇温だけでなく、河川や波浪による側方侵食によっても引き起こされる。すなわち、先に述べた CALM や GTN-P のプロトコルに従っていただけでは動態を十分に理解できない現象であり、その意味で新たな観測体制を構築していく必要がある。(→テーマ A: モニタリング)

## (3) 永久凍土層における地温の変化

先に述べた国際的な観測ネットワーク GTN-P の中で、地温変化(TSP)および活動層厚の変化(CALM)に関する観測結果が集約されてきた。北極地域においては、近年の温暖化傾向を反映して永久凍土の地温上昇やタリクの形成が報告されている。例えば、Romanovsky et al. (2010)は、ロシアの永久凍土について、地温年振幅がなくなる深度における地温が、最近 20~30 年間の間に 0.5~2°C 上昇し、特に、不連続的永久凍土地帯において最終氷期に発達した永久凍土の融解が観察されており、連続的永久凍土の南限が北上していると結論付けている。活動層厚の変化については、観測サイトによって増加傾向を示す場所がある一方、明確な変化傾向が見られないサイトも多い。

これら TSP および CALM の観測活動は、サイト毎に異なる研究グループ、プロジェクトによって実施されており、研究資金や人材確保の制限から長期的な観測例はまだ少ない。モニタリング活動は、ネットワーク内で標準化されておらず、研究組織によって測定の実施様式はさまざまである。例えば、永久凍土の変化に重要な影響を及ぼす要素である気温や積雪深は、すべての観測サイトではモニタリングされていない。また、観測サイトはアクセスがよくインフラが整っている地域に集中している。GTN-P に携わる研究組織によって、これまでに多くの永久凍土モニタリングが実施されてきたが、上記のような観測サイトによる実施様式の違いと偏った測定ポイントの分布のために、永久凍土の変化速度に関する実測値に基づく広域的な評価は難しいのが現状である(Schaefer et al., 2012)。

将来の永久凍土変化については、数値計算による予測がいくつかの研究グループによって報告されている。図 55 は気候将来予測の結果を用いて、永久凍土面積の変化を求めたものである(Slater and Lawrence,



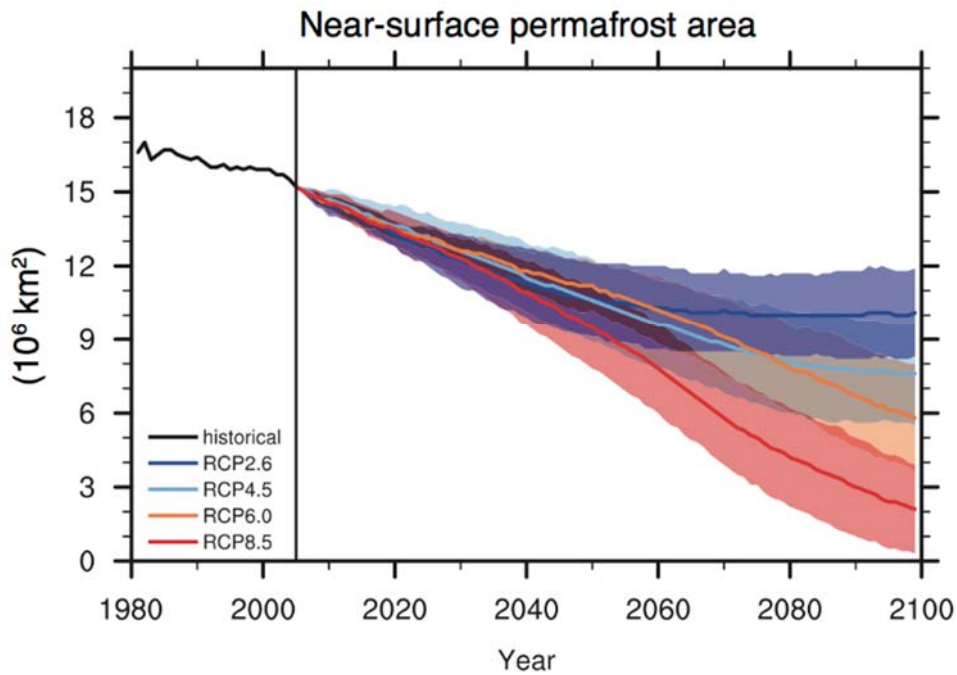


図 55 今世紀末までの永久凍土面積予測 (Slater and Lawrence, 2013; IPCC AR5)。CMIP5 で公開されている気候将来予測の結果を用いて、バイアス補正された月平均気温と積雪量を入力として診断的に求めたもの。代表的濃度パス (RCP シナリオ) によって色分けされており、太線がモデル平均を、帯がモデル間のバラつきを表す。

2013; IPCC AR5)。太線がモデル平均を表し、帯状の部分でモデル間のバラつきを表す。傾向は一致するものの、温室効果気体濃度のシナリオ (RCP) の違いまで含めると、予測の不確実性の幅は非常に大きく、今世紀末の永久凍土面積の予測値は、2 割減からほぼ消失までのバラつきがある。同様に表 2 は、社会経済シナリオ A1B に基づいて計算された西暦 2100 年までに起こ

る地表面付近の永久凍土分布域の減少割合と、活動層厚の増加量についてまとめたものである (Schaefer et al., 2012)。それぞれのモデルによって陸面物理過程の表現が異なり、二酸化炭素の増加による気温上昇予測にも差があるため、予測結果に大きな幅があることがこの結果でも示されている (Koven et al., 2011; IPCC, 2013)。

表 2

西暦 2100 年までの地表面付近の永久凍土分布域の減少率と活動層厚増加量の予測 (Schaefer et al., 2012)

Study	Decrease in Permafrost Area (%)	Increase in Active Layer (cm)
Marchenko et al. [2008]	7 <sup>a</sup>	162 <sup>b</sup>
Schaefer et al. [2011]	20-39	56-92
Euskirchen et al. [2006]	27 <sup>a</sup>	-
Saito et al. [2007]	40-57	50-300
Eliseev et al. [2009]	65-80 <sup>a</sup>	100-200
Lawrence and Slater [2010]	73-88	-
Lawrence et al. [2008]	80-85	50-300
Zhang et al. [2008a]	16-20 <sup>a</sup>	30-70
Schneider von Deimling et al. [2011]	16-46	-
Zhang et al. [2008]	21-24	30-80
Koven et al. [2011]	30	30-60 <sup>a</sup>
Lawrence and Slater [2005]	60-90	50-300

<sup>a</sup> calculated from numbers or tables in text

<sup>b</sup> calculated from estimated trends

## b. 今後の研究

永久凍土の状態の変化に関しては、今のところ状況把握が不十分で、確固たる変化傾向が広域的に捉えられているとは言い難い。変化速度の決定要因としては、影響の大きいものだけでも初期条件としての地温プロファイル、氷の存在量分布、外部境界条件としての気温変化、積雪変化、地表面擾乱が挙げられるが、気温変化以外では観測が不足している。目下の課題は現状把握にあると考え、以下に挙げる方針のもとモニタリング研究を進めるとともに予測モデルの開発を通じて、将来予測につなげる必要がある。

### (1) 現地モニタリングの強化

活動層の地温変化のモニタリングは、遷移層(テーマ4: 雪氷圏、Q2 参照)と今後 100 年程度では融解しない深い永久凍土層の上部を含む深度まで高密度に行い、活動層厚の変化に留まらず、その融解期の季節的な広がりをつまえる観測を増やす。また、永久凍土の変化を決定する微気象要素も併せて測定する観測デザインを確立する。永久凍土の温度変化のモニタリングも含めて、GTN-P の方針を押し進める形で研究を進めるとともに、観測様式の国際的な標準化を早急に進める必要がある。アクセスとインフラ設備の制限に影響を受けないよう、観測サポート体制強化と測定機器の開発を進め、大規模なサーモカルストが予測される永久凍土地域をカバーするように観測サイトを展開する。サーモカルストによる地盤沈下・地形変化の現地測量観測例はほとんどなく、早急な実施検討が望まれる。

## Q4: 永久凍土－大気－積雪－植生サブシステムはいかなる構造と挙動の特性をもつのか？

### a. 研究の重要性と現状

テーマ3(Q2、Q3)、テーマ4(Q2)、また、本テーマのQ1～Q3ですでに指摘されているように、永久凍土、季節凍土の動態(つまり、その生成、成長、維持、衰退)は、その時の大気からはもとより積雪、水文、植生、地形といった周囲の環境条件から大きな影響を受ける(図56、Saito et al., 2013)。例えば、大気のある程度以上低くなければ凍土は形成されないが、一度成立した凍土は、積雪や地表層上部の有機物層、その上の植生層の断熱効果により、大気温暖化に対してある程度の頑健さを保つことができる(Shur and Jorgenson, 2007)。一方で、永久凍土の存在により地

### (2) 衛星リモートセンシングによる永久凍土監視方法の確立

永久凍土の変化が主に地下部の現象で、また、対象の空間的スケールがメートルオーダーであるため、衛星による広域的なモニタリング研究は困難である。しかし、サーモカルストに伴う地表面状態の変化は、今後提供される予定の高空間分解能の衛星プロダクツの利用を通じて研究が大きく発展する可能性がある。例えば、衛星からのレーダーによって、永久凍土の融解による地盤沈下が観測された研究の報告や、地表面の凍結・融解情報を与えるプロダクツも提供されつつあり、今後の活用が期待される。こうした衛星データを効率よく利用できるように、現地観測デザインと実施期間は研究目的に対応した衛星の運用期間と測定内容と併せるように設定するべきである。

### (3) 永久凍土層を古環境復元に利用する

過去の永久凍土変化の履歴は、ある程度永久凍土自体に保存されていることが分かってきた(テーマ6参照)。過去の変動を調べることで、将来の永久凍土の変化についても有用な情報が得られると考えられる。永久凍土帯の地表面上層部を活動層/永久凍土層という2層構造で捉える従来の認識から離れ、活動層/遷移層/永久凍土層という3層構造として捉え(テーマ4、Q2参照)、過去の活動層変化幅を把握する作業が必要である。さらに、永久凍土の深層掘削を行う際には、地温測定に加えて、不攪乱のコア試料を採取し、成分分析を行って古環境復元に利用できるようにする。

表層中の生物活動や水文過程は活動層(季節融解層)に限られ、これは地上部の植生状況を左右する。また、表層付近の温度が低く保たれるため、有機炭素の分解は遅く泥炭として土壤中に堆積することで過去の有機炭素が保存される。

しかし、大気温度上昇があるレベルを超えて持続したときには、鉛直方向および水平方向に凍土の縮退(活動層厚の増加、地下水の融解など)が起こり、地形、植生の変化など周囲の環境に対して影響を及ぼすとともに、土壌有機物の分解促進に伴う温室効果気体の放出やアルベドの変化、地下水の貯蓄や河川への栄養塩類(無機炭素や窒素、燐、カリウムなど)の輸送の変

動を通して北極域以外の地域へも影響をおよぼすことが懸念される(テーマ3:物質循環、テーマ4:水文)。すなわち、凍土を取巻く現象は、凍土自体を一要素として含む環境因子群が上記のような相互作用を持つ(すなわち、システムを構成している)ということであり(Francis et al., 2009)、現在の凍土の状況を理解して今後の動態の予測を行うには、凍土のみを考えるのではなく、総体をシステムとして捉えることが必要だということを示している。

永久凍土-大気-積雪-植生サブシステムに関して、個々の要素間での相互作用やフィードバック(fb)については、これまでの研究で認識されているものもある(例えば、積雪-放射fb、積雪-植生(灌木)fb、温室効果気体-気温fb、火災などの攪乱による地表層変化-積雪・水文・凍土間の相互作用、降水量-森林fbなど:図56参照)。しかし、システム総体として各要素間の相互作用の強さや向き、システムとしての安定性とその範囲(すなわち、それぞれの要素がどのような条件のと

きにどのような強さや向きの相互作用、フィードバックを持つのか、どのようなときに安定であり、また、その安定性に関して閾値、分岐が存在するのか)、また、タイムスケールによって卓越するfbの違いなど、基礎的な動態特性については検討、理解が不十分である。

特に、氷期-間氷期スケールに代表されるような大きな時定数の現象については、泥炭層などの有機炭素層の堆積、保存、分解など、物質循環や温室効果気体収支と密接に関わっているものの、これらの過程をシステム間の相互作用として一貫して取扱った研究は非常に限られ、現段階ではその生成から衰退までを記述することにどまるものが多い。

各国の研究コミュニティにおいても、同様の現状認識を持っているようで、ほぼ時を同じくして永久凍土に関した多角的な研究プロジェクトがスタートしている。欧州ではPAGE21<sup>121</sup>、米国では、RCN Permafrost<sup>122</sup>がそれにあたり、どちらも永久凍土環境の脆弱性(vulnerability)を定量化することに目的をおく点で共

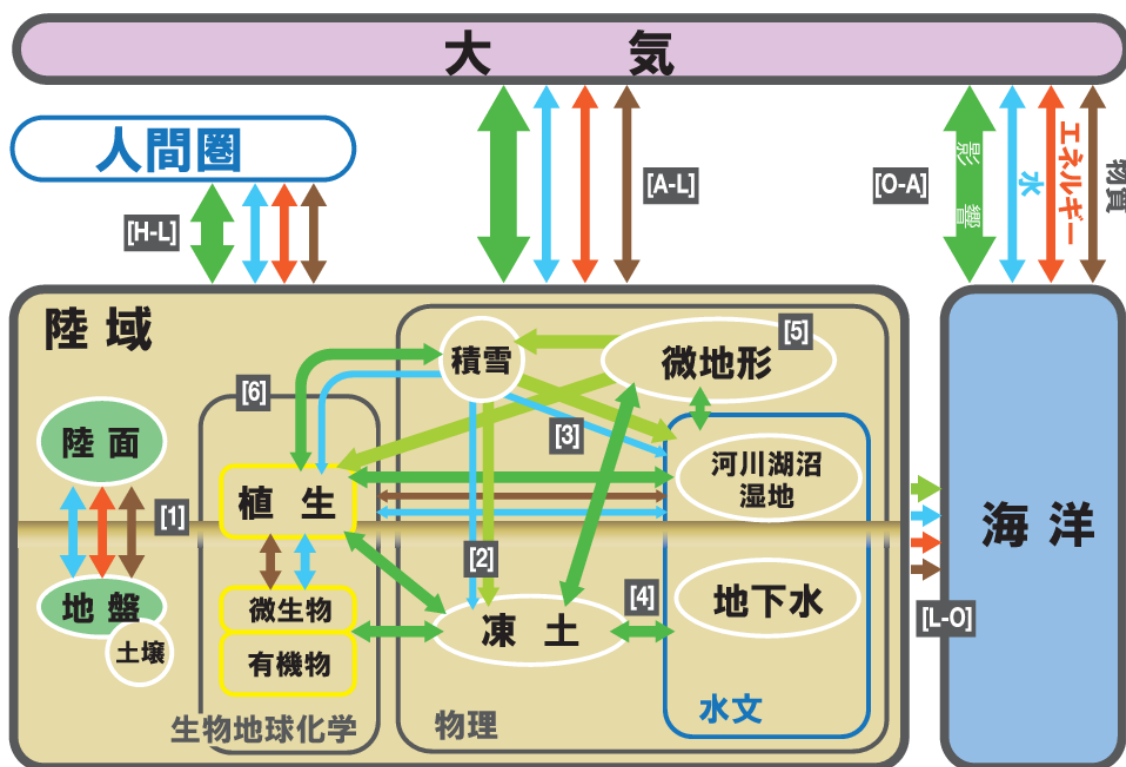


図 56 北極陸域(大気-積雪-水文-植生-地形)システム概念図(Saito et al. 2013 より)。<sup>[1]</sup> 地表面-地下間の熱・水・物質移動、<sup>[2]</sup>-<sup>[4]</sup> はそれぞれ積雪-凍土間、積雪-水文間、凍土-水文間での相互作用、<sup>[5]</sup> 微地形のこれら 3 要素への影響、<sup>[6]</sup> 生態系と物理系の連関を示す。また、陸域システムは大気([A-L])、海洋([L-O])、人間圏(H-L)とも相互作用を持つ。「O-A」は大気-海洋の相互作用を示す。

<sup>121</sup> PAGE21: Changing permafrost in the Arctic and its Global Effects in the 21st Century

<sup>122</sup> RCN Permafrost: Vulnerability of Permafrost Carbon Research Coordination Network

通している。日本においても GRENE 北極気候変動研究事業の一環として、観測とモデル研究の連携により陸域変動の気候へのインパクトの定量化を目指しており、各プロジェクトの間で相互に研究交流を行っている。

## b. 今後の研究

異なるタイムスケールにわたって、相互作用、フィードバックによって結ばれた北極陸域のシステム(大気-積雪-凍土-土壌-植生)は、個々の要素を単体で見ているだけでは、あるいは個々の要素間の相互作用を見ているだけでは、全体の動態の特性(変動の大きさや影響の範囲、また、その原因)について知り得ず、総合的理解のためには動的システム解析(力学系解析)的なアプローチが必要となる。ただし、対象とする時間・空間規模に伴って主要となる要素(及び要素間の相互作用)の重みや範囲が変わるという意味で開放的で仮説的なシステムであるため、Q1~Q3 で提議された観測の充実、表現の方法、モデルの開発などの結果を十分に利用するとともに、それら観測やモデル構築(数値モデル、プロセスモデル、あるいは概念的理解のための数理モデルなど)を連関させて、対象とするシステムの大きさと複雑さや時空間規模に関して段階的に、適宜最適な方法を模索しつつ把握を進めていく手順になる。具体的な対象としては、例えば以下のような現象及びタイムスケールが考えられよう。

- ・森林火災などの「攪乱」による変遷過程(10~100年規模)。大気条件(積雪、気温など)と風景規模(10km以下程度)の植生および地表層上層の変化や回復。
- ・中世温暖期、小氷期、「人為的温暖期」での変動過程(~1000年規模)。気候の変動に伴う「凍土-水文-植生」の地域規模での共変動。
- ・最終氷期最盛期からの氷床後退、海水準変動に伴う海岸線の前進(海進)、完新世の変化(2万年規模)。大規模な気候変化(温暖化)下における、「氷床後退-地表層露出-凍土成長-地表層形成・泥炭蓄積」サイクルや「海進-永久凍土の海没-海底永久凍土の形成・保存」の北半球規模での変遷。

また、10~100年規模の部分では陽には含めなかったが、人間活動、社会活動(経済、社会基盤の構築と維持、農業)からの、または、それへの影響や、(植生のみではなく)広く動物も含む生物圏との相互作用についても同様のアプローチが必要である。総体をシステムとし

て捉える視野で考えるとき、従来は異なる学問領域で取り扱われていた様々な因子が関連しているために、システムの同定や中心となる過程の抽出、観測・モデル化戦略の策定、その実施など、多分野にまたがった研究体制(凍土学、気候学、土壌学、地形学、生態学、生物学、数学、情報学など)が必要となる。現在、欧州や米国で進む永久凍土変動研究についても、現時点では「凍土-炭素」部分への着目が主ではあるものの、今後はこのようなシステム全体を見据えた方向性に進んでいく可能性は高い。観測サイトやデータの共有、モデル比較や共通プロジェクトの参加など情報収集から共同研究に至るまで国際連携の一層の推進も重要となろう。

北極環境研究の長期構想  
(Long-term Plan for Arctic Environmental Research)

北極環境研究コンソーシアム  
(JCAR, Japan Consortium for Arctic Environmental Research)

2014年9月 発行  
2015年3月 改訂

連絡先: 北極環境研究コンソーシアム事務局  
〒190-8518 東京都立川市緑町 10-3  
国立極地研究所 内

E-mail: [jcar-office@nipr.ac.jp](mailto:jcar-office@nipr.ac.jp)

ホームページ <http://www.jcar.org/>

# 北極環境研究の長期構想

## 目次

巻頭言 .....	i
1章 報告書で目指すこと .....	2
2章 背景と内容 .....	3
3章 北極環境の現在までと近い将来に起こりうる変化 .....	4
4章 北極環境研究の歴史 .....	7
5章 「現在進行中の地球温暖化に伴う北極の急激な環境変化を解き明かす」研究テーマ .....	9
テーマ 1： 地球温暖化の北極域増幅 .....	9
Q1： 下層から上層の大気における水平・鉛直熱輸送は、北極温暖化増幅にどう影響するか？ .....	10
Q2： 陸域積雪・凍土・植生・氷床の役割は重要か？ .....	12
Q3： 季節変動をもつ海洋の熱蓄積と海氷アルベドの役割はどの程度か？ .....	14
Q4： 雲とエアロゾルがもつ役割を定量化できるか？ .....	16
Q5： 北極温暖化増幅はなぜ起こっているのか？ その予測と不確実性はどれほどか？ 北極域における放射強制力とフィードバック・プロセスはどう変化するのか？ .....	17
テーマ 2： 海氷減少のメカニズムと影響 .....	19
Q1： 風のパターンや海氷の流動性の変化は海氷減少を促進するか？ .....	20
Q2： 海氷の熱的減少はどのように進むのか？ .....	21
Q3： 海氷減少が雲や低気圧に及ぼす影響は？ .....	23
Q4： 海氷減少が海洋内部に及ぼす影響は？ .....	23
10～20年後を見据えた戦略 .....	24
テーマ 3： 物質循環と生態系変化 .....	30
Q1： 大気中の温室効果気体やエアロゾルなどの濃度はどう変化するのか？ .....	31
Q2： 陸域生態系にかかわる物質循環はどう変わるのか？ .....	34
Q3： 陸から海への物質輸送の定量的解明には何が必要か？ .....	36
Q4： 海洋生態系にかかわる物質循環はどう変わるのか？ .....	38
テーマ 4： 氷床・氷河、凍土、降積雪、水循環 .....	42
Q1： 氷床・氷河の変化は加速するか？ .....	42
Q2： 永久凍土の変化は気候変動とどう連鎖するのか？ .....	46
Q3： 北極域の降積雪はどう変化しているのか？ .....	48
Q4： 環北極陸域の水文過程はどう変化するのか？ .....	50
テーマ 5： 北極・全球相互作用 .....	53
Q1： <大気の影響について> 北極振動などの大気変動は強まるか弱まるか？ .....	54
Q2： <海洋の影響について> 大西洋・太平洋間の海水循環は強まるか？ 深層水形成は減るか？ 中緯度海洋大循環は変わるか？ .....	56

Q3 : <陸域の役割について> 植生と凍土の変化による炭素収支や物質循環への影響は？ 積雪と植生の変動による広域エネルギー水循環への影響は？ .....	58
Q4 : <超高層大気の役割について> 極域超高層大気が下層大気・超高層大気全球変動に 及ぼす影響は？ .....	60
Q5 : <多圏相互作用について> 超高層大気、大気、陸面積雪と植生、海洋のどれを經由 する影響が大きいのか？ .....	61
テーマ 6 : 古環境から探る北極環境の将来 .....	64
Q1 : 過去の北極温暖化増幅は現在とどれほど異なり、その要因は何か？ .....	66
Q2 : 過去のグリーンランド及び大陸の氷床はどう変動し、その要因は何か？ 気候変動 との関係と海面水位への寄与は？ .....	68
Q3 : 過去の北極海の環境はどのようなものであったか。とくに海氷と生物生産について .....	70
Q4 : 過去の北極陸域環境は現在とどれほど異なり、大気組成や気候とどう関係したのか？ ...	72
Q5 : 過去の北極において、数年～数百年スケールにおける自然変動の強度や時空間 パターンは現在と異なっていたか？そのメカニズムは何か？ .....	74
【ボックス 1】古環境プロキシや年代推定手法の開発と解釈 .....	76
テーマ 7 : 北極環境変化の社会への影響 .....	77
Q1 : 地球温暖化も含めた気候変動による影響は？ .....	78
Q2 : 地球温暖化に起因する陸域環境の変化による影響は？ .....	82
Q3 : 地球温暖化に起因する海洋環境の変化による影響 .....	83
Q4 : 太陽活動と北極超高層大気の影響 .....	85
Q5 : 北極圏人間社会の対応 .....	86
6 章 「生物多様性を中心とする環境変化を解き明かす」研究テーマ .....	89
テーマ 8 : 陸域生態系と生物多様性への影響 .....	89
Q1 : 人為的な要因で起こる環境変動は北極陸域生態系にどのような影響を及ぼすか？ .....	90
Q2 : 生物多様性はどのような影響を受けるか？ .....	93
【ボックス 2】生物多様性とは？ .....	93
【ボックス 3】学名の不一致問題 .....	94
Q3 : 北極陸域生態系の変化が動物や気候に与える影響はどうなるか？ .....	95
【ボックス 4】トナカイの生息変化 .....	95
【ボックス 5】水鳥のモニタリング .....	96
テーマ 9 : 海洋生態系と生物多様性への影響 .....	97
Q1 : 陸域・大気物質は北極海の生態系・多様性に大きな影響を与えるのか？ .....	98
Q2 : 北極海の生物は物質をどのように輸送・変質しているのか？ .....	99
Q3 : 北極海食物連鎖と生態系変化・多様性はどうか関係しているか？ .....	101
【ボックス 6】表層-底層生態系のカップリング .....	102
【ボックス 7】バイオロジカル・ホットスポット .....	102
Q4 : 成層化、脱窒、および海洋酸性化は北極海の生態系・多様性にどのような影響を 及ぼすのか？ .....	103
7 章 「北極環境研究の広範な重要課題」研究テーマ .....	105
テーマ 10 : ジオスペース環境 .....	105
Q1 : ジオスペースからの超高層大気や、より下層の大気への影響は？ .....	107

Q2: 超高層大気が下層・中層大気に与える影響は？ .....	108
Q3: 下層・中層大気変動が超高層大気に与える影響は？ .....	110
Q4: 超高層大気を通した極域から中低緯度へのエネルギー流入は？ .....	112
テーマ 11: 表層環境変動と固体地球の相互作用 .....	114
Q1: 現在活動する北極海海嶺熱水系と海洋環境との相互作用は？ .....	115
Q2: 氷床変動に伴い固体地球はどのように変形してきたか？ .....	117
Q3: 北極海が形成されていく過程で、大気-氷床-海洋の相互作用がどのように変化 していったか？ .....	119
Q4: 数千万年～数十億年といった時間スケールでの地球表層環境変動に北極海と周辺 大陸の発達過程はどのように影響を与えたか？ .....	121
テーマ 12: 永久凍土の成立と変遷過程の基本的理解 .....	124
【ボックス 8】 永久凍土の成立と変遷過程の基本的理解 .....	127
Q1: 北極圏の永久凍土はどのような広がりと深さをもって存在しているのか？ .....	128
Q2: 永久凍土を構成する物質はどのような分布を持ち、どの程度の不均一性があるか？ .....	129
Q3: 永久凍土はどのような様態・規模で昇温・融解するのか？ .....	130
Q4: 永久凍土-大気-積雪-植生サブシステムはいかなる構造と挙動の特性をもつのか？ .....	133
8 章 「環境研究のブレークスルーを可能にする手法の展開」 テーマ .....	136
テーマ A: 持続するシームレスなモニタリング .....	136
海洋圏モニタリング .....	137
雪氷圏モニタリング .....	140
【ボックス 9】 氷河質量収支の観測 .....	142
大気圏モニタリング .....	143
陸域圏モニタリング .....	145
テーマ B: 複合分野をつなぐ地球システムモデリング .....	148
Q1: 地球システムモデルについて開発課題は何か？ .....	149
Q2: 大気モデルについての開発課題は何か？ .....	153
Q3: 海洋・海氷モデルについての開発課題は何か？ .....	154
Q4: 陸面・雪氷モデルについての開発課題は何か？ .....	158
テーマ C: モニタリングとモデリングをつなぐデータ同化 .....	160
北極圏におけるデータ同化研究の現状 .....	161
【ボックス 10】 データ同化技術の解説 .....	162
データ同化を北極環境研究に展開する方針 .....	164
北極圏データ同化研究の実現に向けた環境整備 .....	169
9 章 研究基盤の整備 .....	173
砕氷観測船 .....	173
衛星観測 .....	175
航空機 .....	177
海外の研究・観測拠点 .....	178
データおよびサンプルのアーカイブシステム .....	181
人材育成 .....	183
研究推進体制 .....	185



	分野別研究機器等 .....	187
10 章	長期にわたる方向性と取り組み体制のまとめ.....	195
11 章	資料 .....	198
	引用文献.....	198
	執筆者等一覧.....	209