

要旨

本テーマの学術的Questionsとして以下の5つを示す。

- Q1: 地球温暖化も含めた気候変動による影響は如何に？
- Q2: 地球温暖化に起因する陸域環境の変化による影響は如何に？
- Q3: 地球温暖化に起因する海洋環境の変化による影響は如何に？
- Q4: 太陽活動と北極超高層大気の影響は如何に？
- Q5: 北極圏人間社会の対応は如何に？

北極域では前世紀から開発が進められて来たことに加えて、ますます顕著になりつつある地球温暖化のために、海氷減少、凍土融解から陸域植生や野生動物の変化まで、自然環境が急速に変化している。今後、経年変動が大きくなるとの指摘もあり、経験したことのない異常な気象に見舞われる可能性が高くなる。気候と気象の変動は地域によって異なるので、農業生産には栽培に適した品種を事前に選ぶことが有効となる。森林火災も含めて陸域植生と野生動物が打撃を受け、狩猟に生活基盤を置いている住民にとって大きな問題となる。太陽活動による攪乱は極域に比較的大きな通信障害などの影響を及ぼす。一方で、温室効果気体の放出を低減する方策をとることによって、環境と生活条件の保全を図る試みが必要である。

まえがき

本長期構想において、現在までの環境変化と、今世紀に予想される変化に関するほとんどの記述は、自然科学に基礎を置き、地球温暖化の進行のメカニズムと影響、そして他の開発なども含めた人為的变化による生態系への影響などに焦点を当てている。テーマ7の独自性は、さらに人間社会への影響と対策について、人文社会科学の知見も含めた研究の方向性を示していることである。現地住民の生活への影響も注視しつつ、悪影響・災害の低減方法としては、異常気象、森林火災、凍土融解、野生動植物相の変化、太陽活動を取り上げる。北極環境の変化が及ぼす産業活動への影響としては、北極海を通る航路開通、気候変化に伴う農業と水産業の将来について、可能性と問題点を指摘する(図26)。さらに、現在起きつつある、あるいは将来起きる可能性を持つ影響に関する情報の、住民への有効な

海氷減少に伴い、基本的には現在の季節海氷域が北極海に拡大するが、北極海全体が半閉鎖海域であり、また、流入する河川水、深層や海底堆積物の影響があるので、栄養塩分布などの変化は複雑であるし、また酸性化が全海洋で最初に現れる。北極海に適した水産資源については、資源量の管理にも留意すべきであり、漁業や海獣狩猟に依存する住民には大きな影響が及ぶ。北極海で航路を運航するには、その安全確保について効果的な海氷予測が必須である。座礁などの事故による汚染に加えて、運航が生活基盤を変えるならば、住民への影響に配慮した開発が求められる。

地震と津波に対する我が国の警報システムも例にあげ、北極圏に生活基盤を持つ住民社会に受け入れられる環境問題への対処法を提示する。先進国の環境問題への取り組みをそのまま押し付けられれば済むものではなく、大多数を占める先住民との協働が重要である。人間社会への影響と対策について、人文社会科学の知見も含めた研究の方向性を示し、国際関係、国家、地方自治体の各レベルでとるべき施策を提示する。長期的にわたる方向性の基本は、自然科学と人文社会科学の連携を北極域にも展開することであり、環境研究コミュニティを越えた連携が必須である。

伝達については、地域住民との協働による取り組みが必須であることを示す。その上で、国際関係、国家、地方自治体の各レベルでとるべき施策を提示している。

社会が持つ関心に焦点を当てて、予想される課題をあげてみよう。気候が変わると気温が昇降し降水量が変わるが、その傾向は地域によって異なる。農業生産は気温と水資源に敏感であり、栽培に適した品種を事前に選んでおかなければならない。ある傾向で継続する気候変化に加えて、経年変動が大きくなると、陸域植生は打撃を受けるであろう。そこに生息する野生動物にも影響が出て、狩猟に生活基盤を置いている住民にとって大きな問題である。

北極海(本構想ではシベリア陸棚域、バレンツ海も含む)とその隣接海域(ベーリング海、グリーンランド海など)では、進行しつつある海氷の減少に伴い、海水に含

まれる栄養塩なども変わるであろう。現在も進行しているように季節海水域が北極海に拡大するが、北極海全体が半閉鎖海域であり、また、河川水の流入が海域に比べて多く、深層や海底堆積物の影響があるので、もっと複雑な変化も想定しておかねばならない。さらに、海洋酸性化は低温海域から顕著になる。その上で、温暖化した北極海に適した水産資源もありうるので、資源量の管理にも留意すべきである。漁業や海獣狩猟に依存する住民には大きな影響が及ぶであろう。近年の生態保全学的観点からは、人間活動が攪乱要因となるばかりでなく、生物多様性の維持に活用できる可能性を持つ。また、生物多様性は文化的多様性と相互依存する関係にあると指摘する意見もある。

海水減少に伴い、アジアと欧州を結ぶ北東航路を北極海で運航する時代が近づいている。その安全確保について効果的な海水予測が必須である。もし漂流氷山との衝突や座礁などの事故が発生すると、汚染が長引くであろう。カナダ側を通る北西航路も合わせた北極航

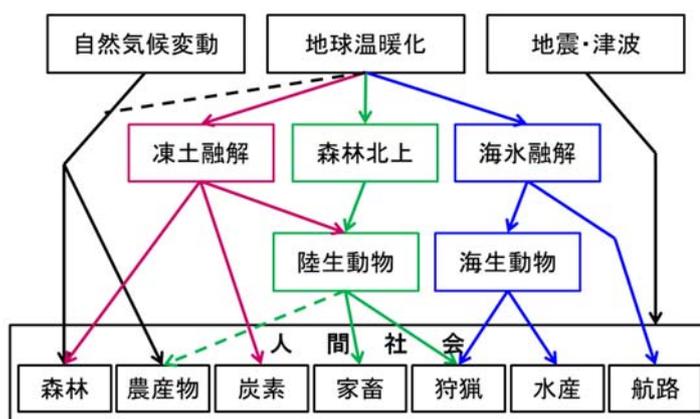


図 26 北極環境変化の人間社会への影響(概念図)

路については、汚染に加えて、運航が生活基盤を変えることも予想されるので、住民が受ける様々な影響にも配慮した開発が求められる。地震と津波に対する我が国の警報システムも例にあげ、北極圏の先住民に受け入れられる環境問題への対処法を提示する。先進国の環境問題への取り組みをそのまま押し付ければ済むものではなく、先住民との協働が重要であることを示していく。

Q1: 地球温暖化も含めた気候変動による影響は？

a. 異常気象

(1) 異常気象の状況

地球温暖化は地表面気温を上昇させるだけでなく、気象の季節変動に大きな変化をもたらすことが指摘されている(テーマ 1)。すなわち夏季は世界各地で観測史上最高となる気温の大幅な上昇をもたらす、熱中症による人身災害や干害・高温障害による農業被害を引き起こしている。一方、冬季には世界各地で未曾有の寒波が襲い近代化した都市化社会が大きな災害に見舞われている。この季節変動の拡大に付随し世界各地で大規模集中豪雨と水害、豪雪さらに竜巻の多発など、異常気象による大規模な自然災害が増加している。

(2) 社会への影響

身近な例として、2014年2月には普段雪の少ない関東地域に30~80cmの積雪があり、大雪警報が発令され、家屋の倒壊や交通網の寸断など大きな社会混乱を経験した。これは積雪の量的変動が地域により異なる閾値を超えることによる災害発生である。同年に同じような

雪氷災害が北米大陸でも起こり、最も近代化の進んだ航空路線でさえ壊滅的打撃を受けている。また、東シベリア内陸部では湿潤化による降雪量の増加がみられ、中央アジア、ヨーロッパでも寒波や大雪による災害が発生している。このような寒冷化・大雪による災害は近年の温暖化傾向のもと、ヨーロッパ、中央アジアを含め世界各地で頻繁に起こっている。

一方、温暖化が進んで平均的には雪氷の減少が見られるが、積雪が減る場合でも、それまでの環境に最適化を目指してきた社会は、やはり災害を受けることとなる。例えば、小麦は世界の主要食糧であるが、北米では冬小麦の被害が積雪の深さに依存している。良質の断熱材である積雪が少ないと地中の冬小麦は凍害で枯れてしまう。ある条件においては積雪1cmあたり約3億米ドルの損益の増減があるとされている(Steppuhn, 1981)。また、多くの都市では、山地積雪や氷河の融雪水を水源として住民の生活や産業を維持している。温暖化に伴って大多数の氷河の縮小が報告されており、特に内陸都市における近未来の深刻な水資源枯渇が

心配される。

多雪・少雪による災害を例としたが、異常気象による災害には豪雨・干ばつ、竜巻、台風・ハリケーン等の巨大化、高潮等による人身災害、農業・工業生産への直接被害、また、社会インフラへの被害が世界各地で多発している。

(3) 今後の研究

科学的に将来の温暖化や気候変動の傾向を予測し、そこで災害の起きる確率を推定すると共に、災害に対して強靱な生活基盤を築くことが必要である。そのためには、人類の歴史を顧みて、古環境再現の手法を用いた分析も選択肢のひとつとして確保すべきである。温暖化、寒冷化の繰り返しの中、歴史的転換と言われる事件は異常気象の影響を抜きにしては語れないことが多い。古くは水を支配し繁栄を極めたメソポタミアのウル王国は、温暖乾燥化の波で滅亡し、砂漠の廃墟となった。中世温暖期にヴァイキングの築いたグリーンランドやカナダ北西の入植地あるいは野営地は、小氷期の始まりの寒冷化により海氷に閉ざされて交易が不可能となり放棄されてしまった。

これらは、いずれも頻繁に生ずる小さな気候変動に対応して築いてきた文明が、ある閾値を超えた大きな変動、異常気象には対処しきれなかったか、あるいは居住の移動を選択したことを教えてくれる。環境決定論に与する必要はないが、環境の大きな変動が歴史の主要な

担い手となったことを真摯に研究する必要がある。

近年、研究の進展しているアイスコアや花粉分析など多くの気候変動記録の解読分析結果と、歴史的イベントの詳細な対比研究が期待される。すなわち、人類の営みは異常気象、豪雨・干ばつ、高温・低温、豪雪・少雪などからどのような影響を受け、それらに対処したのか敗退したのか、学問分野間の研究連携を進めることによって、定量的に研究する必要がある。この成果によって、北極および環北極域の将来の気候変動に対する社会的対応力を検討する根拠が形成される。

一方、現在まで極北環境に暮してきた先住民の気象に関わる在来知は、人類の無形文化遺産として価値があり、これを収集・記録化するとともに、将来の異常気象への対処の可能性を期し、その自然科学的評価も行う。

b. 森林火災

(1) 森林火災の現状とその研究

北方林(タイガ)は北米とユーラシア大陸の北側に分布し、世界の森林面積の約1/3(世界の陸地の約10%)を占め、陸地の炭素量の30~40%を有している。ここでの森林火災は、天然更新の一プロセスでもあり、最大の攪乱要因で、永久凍土や林床の有機物とも深い関連がある。アラスカでの森林火災の近年の特徴は、雷により発生した森林火災の焼損面積を、大きい順から並べた図27より把握できる。焼損面積が6,500km²を越えるような大規模火災年は過去58年で11回観測され、

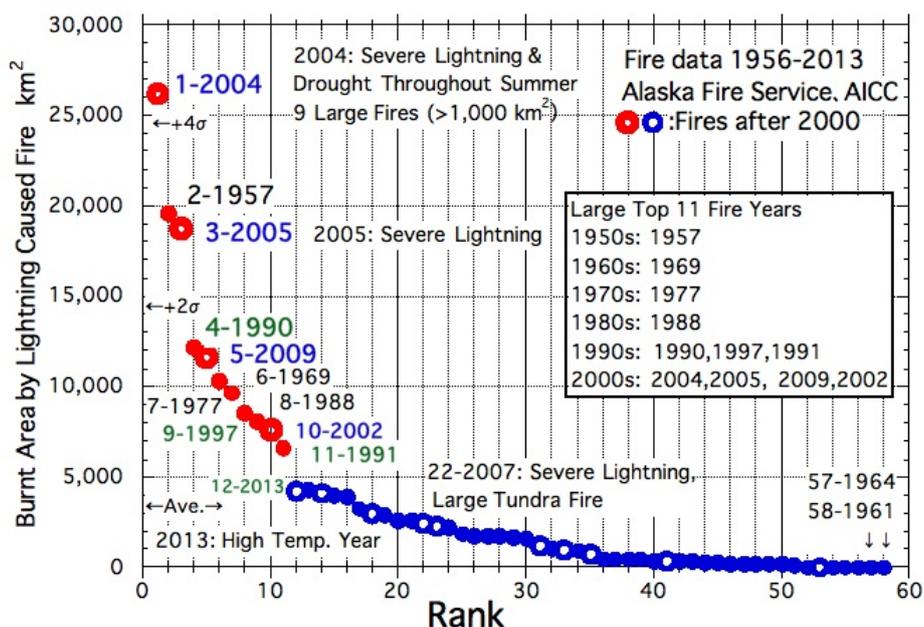


図27 アラスカでの雷で発生した森林火災の1956年からの焼損面積(大きい順)

1950、1960、1970、1980年代には10年に一回程度であったものが、1990年代頃からは年3回、2000年代は4回と頻発していることがわかる。2004と2005年の焼損面積の合計約46,000 km²は、アラスカの森林面積の約10%にも達する激しさである。一方、シベリアの森林火災も、開発に伴う人為火災が急増し、また、極端気象現象によって増加している。

アラスカ中央部での森林火災と植生に関する研究では、過去1万年での植生変化と火災挙動の分析がなされ、気候変動に伴う過去の植生変化と火災挙動を基に、近年の激しい森林火災は燃え方の限界を超えたとしているものの、火災は中世の温暖期(MWP)と同様に植生変化で収まる可能性を示唆した(Kelly et al., 2013)。しかし、MWPと同様に近年の“燃え方の限界を超えた”原因は明確ではない。

(2) 社会への影響

近年の急激な気候変動下で頻発する大規模森林火災は、植生の更新、炭素循環、永久凍土などに影響を及ぼすばかりでなく、二酸化炭素やメタンの排出による温暖化の加速効果を持ち、さらに熱火災雲(pyrocumulus)の形成は火山の噴火と同様に煙に含まれる炭素粒子による日傘効果、そして雪や氷面への沈着によるアルベド低下も考えられ、地球規模での環境問題を抱えている。また、各地域社会では、火災への備えと大気汚染の軽減、火災の影響評価、住民への情報伝達など、広範囲な観点からの研究を推し進める必要がある。

(3) 今後の研究

最近の研究は、アラスカの大規模森林火災の原因の一つに、カナダ方面からの乾燥し比較的強い東寄りの風にあることを示した。この背景には、北極海の海水の急激な減少現象に伴い、高緯度と低緯度の温度差が小さくなって、高緯度ジェット気流が弱まったことで、アラスカ上空での気圧の尾根とポーフォート海高気圧とが発達する現象が確認されている(テーマ5参照)。今後もMWPに見られた植生変化による対応とは異なった火災現象が起きることが危惧されており、詳細な解析を進める必要がある。また、森林火災に伴う二酸化炭素やメタンの排出の詳細なモニタリングを進め、温暖化の加

速効果を明確にする事も重要である。

2004、2005年の焼損面積2万km²級の大規模森林火災を予測し対策を講じれば、11大火災以外の平均年間焼損面積は約2千km²であるので、約1/10程度に二酸化炭素などの排出を抑制できる可能性がある。大規模森林火災による大気汚染は、計画的火災(prescribed fire、燃料すなわち植生の蓄積量が増加した森林などへの計画的な火入れ)による緩和が有効であり、衛星画像およびホットスポットデータを基にした予報も可能である。また、火災に強く関わるブロッキング高気圧などによる極端現象の予報は難しいものの、極端現象の発生は風向きにより判断できる。これらの情報伝達は、アラスカ省庁間調整センター⁹¹を介することで可能である。アラスカの火災研究は、アラスカ火災科学共同体⁹²が取り纏めを始めており、最新の研究成果を入手できる。

c. 農業生産

(1) 大気循環の変動

北極環境の変化により農業生産可能地域の拡大が期待されているが、一方で、気象条件の影響が懸念されている。気象条件は気圧分布に大きく依存するので、大気科学で広く用いられている大気圧の主成分解析の結果を示す。北半球500hPa(高度約5000m)の大気圧データに経験直交関数 EOFを用いて解析すると、振幅の一番大きな第1主成分として北極振動が得られる(気圧場についてはテーマ1と5を参照)。この成分は北半球の様々な地域で異常気象との関連が指摘されている(田中博、2008)。第2主成分以降も振幅の大きい方から順に定められ、第2成分(双極モード、テーマ5を参照)に次いで、第3成分まで求めた。一方で、カナダのプレーリー地域を選び、春小麦の単位面積あたりの収量について、作付期から収穫期までの積算気温と積算降水量に注目した。冬季(12月から2月)にカナダの西海岸において、極低温現象⁹³(AOE)が発生すると低温で乾燥した状態となり、その年の収量は減ると思われる。AOEの回数が多い年を約30年のうち上から5年分とり、500hPaの気圧場偏差の平均値を求めた(図28)。同データの第3主成分と類似しており、カナダ西海岸で北風が強まって低温乾燥状態が起きると収

⁹¹ アラスカ省庁間調整センター: Alaska Interagency Coordination Center

⁹² アラスカ火災科学共同体: Alaska Fire Science Consortium

⁹³ 極低温現象: Arctic Outflow Event(AOE)

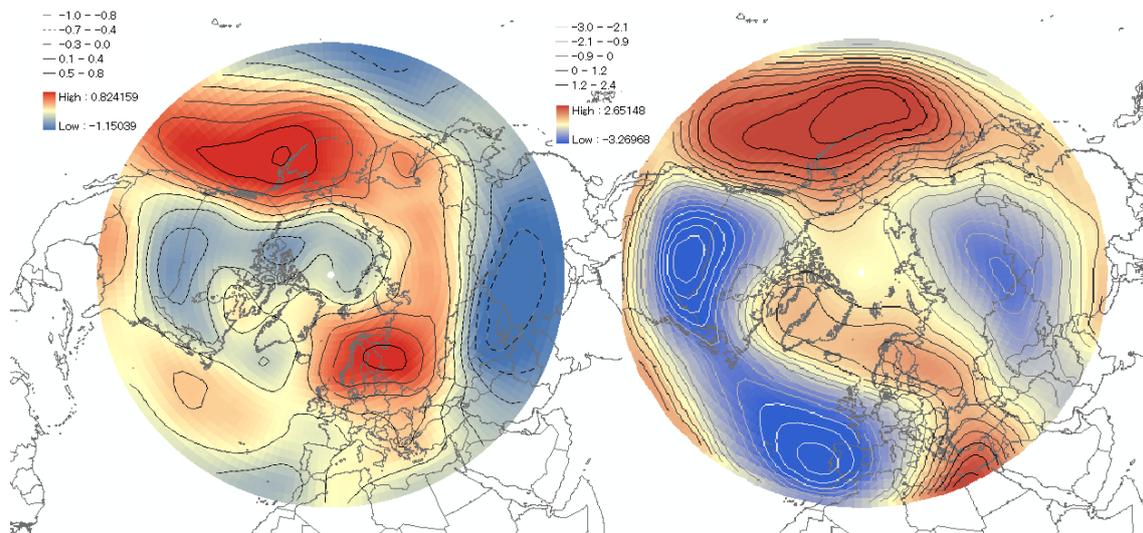


図 28 極低温現象が最も発生した上位 5 年の冬季の 500hPa 気圧場偏差の平均値(左)と同データに対する経験直交関数の第 3 主成分の空間パターン(右)。気圧場のデータについてはECMWFを使って解析を行なった。ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts), 500hPa geopotential height, 2012, available at <http://www.ecmwf.int/research/era/do/get/era-interim>

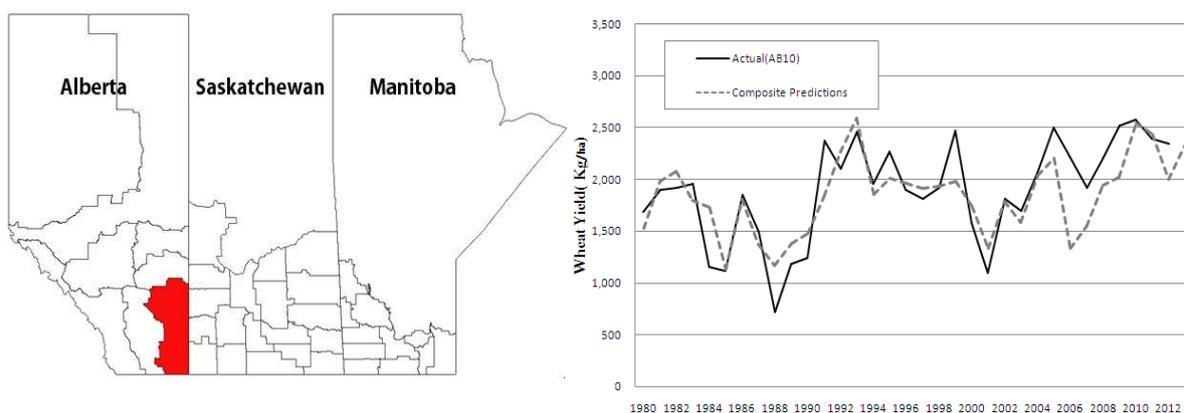


図 29 カナダのプレーリー地域(下左の赤色地)における春小麦の実測値と予測値
出典 Canadian Prairie Crop yield data (2012), Agricultural Division of Statistical Canada

量が減る可能性が示唆された。

(2) 農業生産への影響

気温、降水量、前年の収量に加えて、第 3 主成分も説明変数に入れて収量の変動を見ると、予測値が実際の収量に近づいた(図 29)。第 3 主成分はある程度の持続期間があるので、収穫期の数ヶ月前に予測して作付け品種の選択などに役立てることが可能である。

現在交渉中の環太平洋戦略的経済連携協定(TPP)において、遺伝子組み換え食品に対する世界的な安全性意識の高まりにより、遺伝子組み換え技術を使わない

穀物への需要が高まりつつあるが、非遺伝子組み換え品種は生産性が落ちるだけでなく、異常気象などへの対応力が弱まる可能性が指摘されている。飼料用大豆については、除草剤への耐性をもたせるため、その多くが遺伝子組み換えになってしまっており、非遺伝子組み換えを選択することは難しい状況になっている。

(3) 今後の研究

カナダのプレーリー地域で確立しつつある手法を、北半球の他の地域へも展開することで、収穫の数か月前の収量予測を行う仕組みを構築する必要がある。ロシア

極東アムール地区において北海道寒冷地農法が試行されているが、これらの地域において収量予測の情報提供を行うことで、北極域における農業生産の安定性に資することが期待できる。2014年3月に開催された第39回国際食品・飲料展(FOODEX Japan 2014)でのヒアリングによると、オーストラリアにおけるアーモンド

の2013年秋から2014年春にかけての収穫量は多いことが期待されている一方で、カリフォルニア州の収穫量は少ない傾向にある。北半球と南半球の顕著な農業生産の違いについても言及することで研究の対象と幅が広がると考えている。

Q2: 地球温暖化に起因する陸域環境の変化による影響は？

a. 凍土融解と炭素放出

(1) 凍土融解によって何が起きるか

凍土が融解しつつあることは確信を持って語られているし(テーマ4、12参照)、メタンと二酸化炭素が大気に放出される傾向は確かめられている(テーマ3参照)。しかし、その結果、どの温室効果気体がどの程度放出されるかについては十分に確認されていない。融解した凍土からの流水がさらに融解を進めて湖沼を拡大し、また、ツンドラとタイガの土壌面においてもフラックスを部分的に計測すると、メタンが大気に出ている。凍土融解はある地域では土壌水分を極度に増やして、森林劣化につながり二酸化炭素吸収を減らす。凍土融解が乾燥化を招く場合は、土壌から二酸化炭素が発生するはずである。二酸化炭素を放出する顕著なものは森林火災である。大気中の濃度を継続して計測すると、メタンが増加しており、また、二酸化炭素の放出も植生の活性化による吸収を半分程度打ち消すと推定されている。

陸域の凍土だけでなく、大陸棚海底下にある凍土層に含まれるメタンハイドレードも、気化することによって大気に放出するであろう。どのくらいの量が存在するのか、どの程度の速度で放出するようになるのかについては、大きな謎と言わざるをえない。

(2) 社会に与える影響

まず凍土融解そのものが与える物理的な影響として、建物の損壊、ガスパイプラインとオイルパイプラインの損傷がある。耕作可能な面積が拡大し、期間も延びることは、それだけ見ると好影響のように思える。しかし、融解水による水没や逆に土壌の乾燥化が起きることもあり、一概に良いこととは言えない。

もしメタンと二酸化炭素が、凍土融解に影響を受ける土壌から放出していくと仮定すると、何らかの措置をす

ることによって放出を抑えることができれば、REDD+⁹⁴の一例として、放出を抑えると同時に炭素クレジットを獲得できる。インドネシアでは統合的泥炭地管理を行う提案を出しており、決して夢物語ではない(SATREPSプロジェクト)。ただし、措置をとらない場合ととった場合の放出量をモニタリングし、定量的な推定が求められる。

(3) 今後の研究

REDD+獲得を実現するための研究として遂行すべきは、メタンと二酸化炭素の放出を定量的に測定し、それを低減する方策を提案することである。凍土融解による水環境の変化を打ち消すことにより、温室効果気体の放出を低減する技術的開発を提言する。火災による森林の更新では、過剰な森林火災を防ぐことができれば、それへの取り組みについても炭素放出削減量に換算することは可能である。

温室効果気体の放出低減に向けた社会の取り組みを可能にする施策の提言はできるであろう。しかし、科学的・工学的知見に基づいた提案を一方的に住民へ提示しても、実行に移せるものではない。生活基盤を奪われつつある住民にとって、さらに生活様式を変更する必要が出る場合があるろうし、さらに開発に同調することしか選択肢がない状況に置いて、提案に賛同させることは避けるべきである。炭素クレジットを糧に、従来の生活基盤を保持することも選択に加えられれば、住民の合意を得る一助となるであろう。その際にも、一方的な提案の押し付けではなく、価値観の違いは認識しつつも、先住民の知見を活かすことが不可欠であり、それに続いて先住民と近年の移住者の間に互助が生まれる。人文社会科学研究の取り組みとしては、経済的影響を記録し、支援のあり方を分析する社会政策論からのアプローチが求められる。

⁹⁴ REDD+: Reducing Emissions from Deforestation and Degradation

b. 植生変化・野生動物・家畜

(1) 植生と野生動物・家畜にみられる変化

温暖化やそれに伴う水循環の変化(乾燥化や湿潤化、降雪・降水量の変化など)は、生物に対して基本的に寒冷適応種の分布域縮小と南方種の北方・高標高域への進出を促し、それらに直接・間接の生物間相互作用(捕食や競合など)や多様なフィードバックが加わることで、群集・生態系・景観レベルの複雑な変化を生むと考えられる(テーマ 8Q1、Q2 参照)。そして実際にもすでに、温暖化や林野火災、土地利用変化等が主要因と考えられる植生変化が進み、その直接・間接の影響が個別の種の行動や生態、さらには生態系の構造や機能に変化をもたらしつつあると考えられる(Post et al., 2013ほか、テーマ 8Q3、ボックス4、ボックス5を参照)。

(2) 社会への影響

上記のような極域の野生生物の行動、個体数、分布域の変化は、先住民にとって伝統的な狩猟・漁労・採集活動(直接的資源利用)のコストを増加させ、ときに不可能にさえしている。北極圏における定着氷の離岸が先住民による伝統的海獣猟や漁労を困難にすることはよく知られるが、陸上の狩猟活動においても気候変動の影響は顕著になっている。特に、内陸部で主要蛋白源となる野生獣類や家畜(ウシ、ウマ、家畜トナカイなど)については、氷雨や氷板形成による大量死、増加したオオカミなどによる捕食、移動してきた野生トナカイによる食物競合や連れ去りなど、多様な問題が生じている。つまり、極北に暮らし伝統的にトナカイ遊牧・狩猟・漁労を生業としてきた北方先住民は、狩猟コスト増と遊牧コスト増という二重の負荷を受け、結果として気候変動は伝統的生活から都市生活への社会構造転換を加速している

と考えられる。

これらの問題への社会的対処は、現状では狩猟期間の延長や有害駆除の推進、ハイテク機器の導入、伝統的生活への経済的補助など対症療法的であり、その結果、生物多様性保全や資源動物の持続的利用という点で、問題は今後より深刻化すると予想される。

(3) 今後の研究

温暖化による北極圏の変容は、そこに国土を持たないわが国にも様々な形で影響を及ぼし、そして、その変容の責任の一端はわが国にもある。北極域の生物研究に参加する日本人研究者はまだ少ないが、わが国が秀でた分野での技術協力や教育支援など、国際的な責任を果たしうる場面は多々ある。今後は「研究推進体制」でも述べられている北極国と非北極国との連携や、現地国の研究者や政策担当者との協働を基本とし、生物生態と管理政策の両面から研究を進める必要がある。具体的には、衛星発信機等の高度技術を用いた生物多様性モニタリング、シミュレーションを取り入れたハビタット評価(テーマ 8Q3)、順応的管理概念などの導入による保護と利用(保護区・猟区等)の一体的管理などが考えられる。

また、渡り鳥や大型哺乳類(トナカイなど)は、異なる地域生態系(ビオトープ)間を物質的・機能的につなぐ役割を担っており、極域における個体数や種構成の変動は、日本をはじめ遠く離れた中継地・越冬地の生態系や社会・生態系サービスに影響を及ぼす。そのため、多国間での共同管理体制構築を前提とした移動性動物の生息実態・機能解明の共同研究は特に重要である。

Q3: 地球温暖化に起因する海洋環境の変化による影響

a. 海水減少、水産業進出、生態系劣化

(1) 海水減少の海洋生態系への影響

北極海へのクジラを含む温暖種の移入、外洋表層と海底近くの間で物質循環に重要な役割を持つ生物ポンプの変化、サケなどの大型魚類の生物量や分布の変化が観測されている(テーマ 9 参照)。特に、夏季の海水面積の減少が、どのように基礎生産、植物プランクトン群集組成(多様性)の変化に影響をあたえるようになるか、ボトムアップの視点からの研究もまだ不十分である。

一方、トップダウンの視点から、クジラ類、サケなどの魚類などの生物量の増加などの影響についてもまだ解析は不十分である。

(2) 社会への影響

水産業への影響は、太平洋側と大西洋側ではその漁業形態により異なるものと思われる。たとえば、北極ダラを水産物として扱うか扱わないかで、北極海の魚類の生産量変動が水産業へ直接的に影響する場合(大西

洋)と間接的に影響する場合(太平洋)に分かれる。しかし、鍵種となる北極ダラ以外の、スケトウダラやマダラなどのタラ類の生産量と分布は、それらの輸入先への水産物供給の面からも影響を考慮せねばならない。そこには、生物学的な要素ばかりでなく経済学的な要素を加味した漁業者の行動、国際関係にも左右されている水産業の動向など複雑な系を理解していく必要がある。

(3) 今後の研究

地球温暖化が促進されることにより、サケ属魚類の分布域が北極海へ拡大することが予測されている(テーマ9 参照)。サケ属魚類が、海洋起源の栄養塩(MDN)を陸域生態系へ大量に輸送することはよく知られている(例えば、Kaeriyama et al., 2012; Koshino et al., 2013)が、北極海の環境変化に伴うその周辺海域と陸域生態系へのこのようなサケ属魚類によるMDN輸送メカニズムが待たれる。水産資源の北上によって、北極海と周辺域の利用は増加する傾向にある。水産資源をめぐる北極海域のグローバル化を分析すると共に、北極圏沿岸部社会の生態・社会経済に及ぼす影響を総合的に評価する。また、海運、エネルギー産業など水産業に影響を与える関連業界への提言も出せるように、他分野の専門家と協力していく。

b. 海氷減少、北極航路、海洋汚染の危険性

(1) 海氷減少と北極航路の実現性

今世紀に入ってからシベリア側は季節海氷域と呼ぶのが相応しい状態が続いているが、年によって開氷期間が異なり(テーマ2 参照)、北東航路(北極海航路とも言う)の貨物船航行が可能となる期間もそれに応じて決まる。カナダ側は依然として厚い多年氷が存在し、北西航路を現実的にするには革新的な手段が必要である。北極海を貨物船の航路として利用することが現実味を帯びてきたが、その実現のためには、海氷状態の把握と将来予測、氷海航行時に船体が受ける影響の把握、効果的な輸送計画の立案などが必要であり、理学、工学、経済学にまたがる分野横断的な連携が不可欠である(北川他、2000; Yamaguchi, 2013)。

もし北極航路が使われるようになれば、輸送時間とコストを削減できるばかりでなく、輸送に伴う温室効果気体の排出量も減らすことが可能である。その第一の条件は、海氷分布の予測手法を確立することである。海氷の分布、氷厚、融解度(7~8月)、結氷開始(9~10月)を

総合的に把握し、氷海航行支援システム(氷海ナビゲーション、航行安全指標)を構築する計画が進行中である。

(2) 解決すべき点と社会に与える影響

航路が航行可能であることに加え、いくつかの解決すべき点がある。海氷域が衰退すると波浪が発達する。荒れた海象の寒冷域では海水飛沫が即座に結氷し、船舶に固着する。着氷が増加すると、大型船でもレーダー等の航行支援機器に悪影響が出たり、甲板作業性の低下、荷役設備の支障等が起きる。さらに、漁船等の小型船では、重心が上がって転覆する危険性がある。海氷の移動を予測できないと、リッジングによって極端に厚くなった海氷が船体を損傷することもある。また、温暖化により漂流冰山、冰山片の数が増し、とりわけ遠方から発見することが難しい冰山片や海水氷片との衝突の危険が増す。たとえ人命救助を果たしても、燃料流出による環境汚染は生態系に打撃を与え、海産物に依存する住民に大きな影響を及ぼす。

順調な航路利用が進んでいても、それに伴う問題が起こりうる。航路の途中には寄港地が必要となる。航行する船は多くないが、その経済効果によって住民の生活様式は変わってしまうであろう。これまでも頻繁に見られてきた開発に伴う問題が発生することになる。

(3) 今後の研究

まず安全航行を確保し、経済的に成り立たせるために、海氷諸量の予測を信頼できるものにする。安全性には1週間スケールの短期予報、経済性には数ヶ月におよぶ中期予報と1年から数十年の長期予測が有用である。氷と船舶が接触した際の力学的影響、船体着氷の影響と防止技術について研究を進める。これらを基盤にして、北極航路利用の可否判断および効率的利用のための航行支援システムを作成する。また、タンカー、砕氷船等新しい船種の着氷量予測に加えて、北極海の豊富な水産資源を求めて今後増加が予想される漁船等中小型船舶の安全性を確立し、甲板作業の危険を払拭するため、総合的な船体着氷の予測モデルを構築する。

寄港地の選択に際しては、事故の可能性と環境影響を住民に説明することが必要であるが、科学的・工学的知見に基づいた説明を一方向的に示しても、同意を得るのは難しい。様々な生活基盤、言語、伝統などを持って

いる住民グループの間で、お互いの意思疎通を図れる関係を築くため、人文社会科学に基づいた研究が必要である。その成果が住民と開発側の相互理解を可能にするであろう。

航路の利用に関しては、世界的物流システムの経済

地理学的評価を本格的に進める必要がある。同時に、国際法や関係諸国の法体系の分析を踏まえて北極海のガバナンスのあり方を解明するアプローチが求められる。

Q4: 太陽活動と北極超高層大気の影響

a. 太陽活動によって何が起きるか

地球の超高層大気で発生する多くの物理現象は、太陽からのエネルギーの流出である太陽風・太陽放射の変化に起因する。特に、太陽から吹き出したプラズマ（太陽風）は地球の磁気圏と相互作用し、極域へのプラズマおよび電磁エネルギーの流入が起こる。この結果、超高層大気において、オーロラを伴う大電流、大気の膨張や擾乱、さらに電波伝搬の環境変化などが起こる。また、太陽系外から飛来する銀河宇宙線量も太陽活動によって変動するが、宇宙線は、大気を電離し、雲生成を増加させるため地球の気候に影響を及ぼす可能性がある。このように、太陽に端を発した擾乱は、地球大気に大きな影響をもたらすが、この一連の物理過程を体系的に理解するには未だ至っておらず、また、現象の発生を予測することも現段階では難しい(テーマ10を参照)。

b. 社会にどのような影響を与えるか

図30に示すように、太陽フレア等により加速された高

エネルギー粒子は、地球大気の成層圏下部から対流圏において空気シャワーを生じさせ、大量の放射線を生成する。最大級の放射線は、一度で航空機乗務員の年間管理目標値の線量に匹敵する被曝をもたらすことがある。このため、航空機乗務員・乗客の健康被害を最小化するための方策を検討する必要がある。

太陽から放出されたプラズマと地球磁場との相互作用や極域におけるオーロラ活動により発生する地磁気変動は、地上において誘導起電力を起し、送電線やパイプラインに誘導電流を生じさせる。これにより、制御システムの障害や、金属腐食が促進される。1989年3月に発生した地磁気急変現象に伴って地上に誘導された電流によって、カナダ・ケベック州の送電線網の変電所トランスに許容限度を越す電流が流れ、600万人に影響する停電事故が起きたことは有名である。

また、近年、人工衛星や有人宇宙船による宇宙利用や、GPSをはじめとする衛星測位の飛躍的普及により、これらに対する超高層大気の影響の低減が必要とされている。現在、衛星測位の航空利用が国際的な方針と

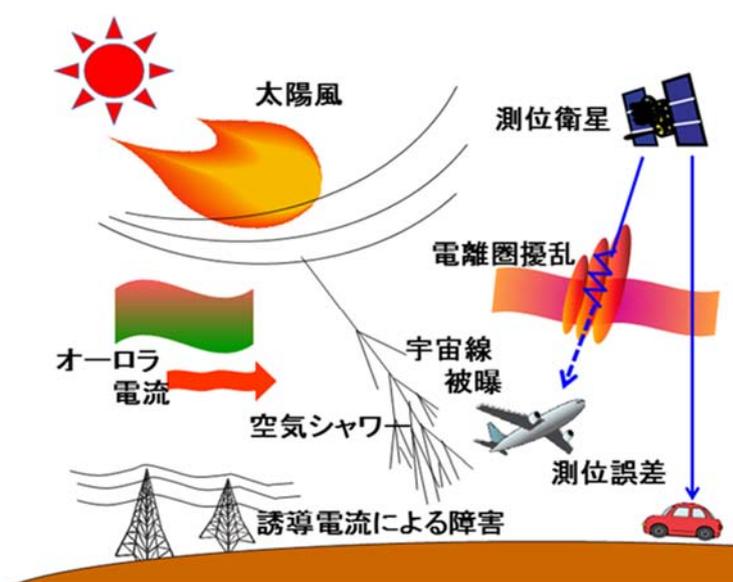


図30 太陽活動が社会に与える影響の例(地球電磁気学・地球惑星圏科学の現状と将来、2013年の図を一部改編)

して進められている。極めて高い安全性が要求される航空利用の分野においては、電離圏擾乱の特性を適切に反映した安全確保のための技術開発が求められている。一方、衛星通信を使って船舶の位置を把握する船舶長距離識別追跡⁹⁵システムにおいては、太陽や超高層大気変動の影響を軽減するために、光ファイバー網を用いるなどの対策が検討されている。

c. 今後の研究

人類社会を支える重要な知識基盤整備事業の一つとして、極域超高層大気のリモートセンシング、及び電離圏擾

乱現象の有効かつ確実な検出と予測につながる研究を工学分野と連携して進める。特に、人工衛星や、地上からのレーダーや分光機器・電磁場計測機器による超高層大気の観測、また、太陽高エネルギー粒子の地球到達を正確に予測するモデルの開発、磁気圏－電離圏－熱圏結合シミュレーションの高精度化、リアルタイム化を目指す必要がある。

上記の内容については、地球電磁気学・地球惑星圏科学の現状と将来(地球電磁気学・地球惑星圏学会、2013年1月)の第3章に詳しくまとめられている。

Q5: 北極圏人間社会の対応

a. 地震と津波の危機通報

(1) 地震・津波の状況と研究

太平洋プレートが沈み込むアラスカ州南部は過去から繰り返し大地震が発生し、それに伴った津波が発生している(例えば、1964年3月28日のアラスカ地震(マグニチュード9.2))。また、2002年にはアラスカ内陸部の活断層を震源としたデナリ地震(マグニチュード7.9)も発生している(Tsuboi et al., 2003)。北極海沿岸ではこれまで大きな津波が発生した記録はないが、2011年東北地方太平洋沖地震のように、従来大地震の発生が考えられていなかった地域でも地震とそれに伴う津波の発生があり得ることがわかっている。最近、グリーンランド氷床の融解が急速に進みグリーンランド下部のマントルが隆起することで地殻に歪みがたまり、数100年後には周辺で大地震を起こして津波が発生する可能性もある。

(2) 我が国における地震・津波への対策

日本では、沿岸域の災害を最小にするため、地震発生後直ちにその規模と位置から津波警報を発するための津波予報システムが開発されている。津波警報を迅速かつ正確に発するには、高精度の地震観測網と震源決定システムの整備が必要であるが、このようなシステム開発の技術は、既存の地震観測網を用いた津波予報システムにも生かすことが可能である。地震が発生してから津波が到来するまでには、地震の発生位置にも依るが10数分の猶予がある場合が多く、既存の地震観測システムを用いて津波警報が正しく発せられれば、そ

れにより避難することで被害を最小限にすることは可能である。

(3) 北極圏住民への提案

津波警報が発せられたときに、それに基づいて住民が避難を始めることができるためには、日常的に津波災害の評価により住民に注意を喚起しておくことが必要である。地震と津波についての知識を、科学的な基礎のない住民に受け入れられるように、啓蒙活動が必要なことは、日本における津波災害の歴史を見ても明らかである。正しい科学的知識の基に、地震が発生した場合に津波が起こる可能性があることを教育し、海岸で揺れを感じた場合には、また、揺れを感じなくとも津波警報が発せられたら一刻も早く高い場所に逃げることを日常的に啓蒙しておくことが極めて重要である。

さらに、住民が受け入れやすい災害情報伝達の方法を提示することも必要である。そのためには、地元自治体などとの協力により、津波高の想定、避難場所の選定、避難経路の確保を行うことから始める必要がある。これらの準備が整った後には、実際に現地住民と共に避難訓練を実施し、避難が現実的な時間で終了するかなどを確認することが必要である。このような実際の訓練を定期的に行い、津波災害に対する意識を住民に持ち続けてもらうことが重要であり、日本の災害研究者が持つ経験はこのような地域でも生かすことができると考えられる。

⁹⁵ 船舶長距離識別追跡: Long-Range Identification and Tracking of Ships(LRIT)

b. 先住民社会と都市部における持続可能な社会システム構築

(1) 北極圏の人間社会とは？

人類史と北極圏国家

北極圏の人間社会を理解する基盤は、先住民諸集団と北極海(社会科学では北極圏海域)を囲む諸国家(カナダ、デンマーク(グリーンランドおよびフェロー諸島を含む)、フィンランド、アイスランド、ノルウェー、ロシア、スウェーデン、米国)との関係にある。

近代国家の国境概念が北極圏社会で本格化するのには、20世紀初頭以降である。国家支配が及ぶ以前からの住民である「先住民」は、言語・文化・民族的に多様な諸集団である。20世紀初頭の民族学的調査によれば、その経済は狩猟採集、漁業、トナカイ牧畜、海獣狩猟によって支えられ、地域間をまたぐ交易が活発に行われていた。

国家にとって、北極圏は資源埋蔵地であった。ロシアやカナダが北極圏に進出するのは、毛皮資源獲得のためであったし、19世紀、米国は捕鯨産業のためにベーリング海においても活動を広げた。先住民との関係は、戦争、交易、服属という形で進展したが、いずれの地域も類似する過程を経て近代国家の領土支配が確立した。

冷戦と資源問題

移住者は、動物資源・鉱物資源のための資源開発基地を形成し、それらがネットワークで結びつく社会を形成した。一方の先住民社会に対しては、1950年前後から国家による定住化政策や国民化教育政策が本格化した。

20世紀中葉以降、グリーンランド等の米軍基地や、ソ連の核実験場ノバヤゼムリヤに象徴されるように、北極圏は高度に軍事化された空間だった。同時に北極圏は科学研究のための空間でもあった。1957～58年の国際地球観測年(IGY)の成果である南極条約の理念と対照的に、北極は科学領域でも冷戦体制下にあった。この点で20世紀の北極圏人間社会は、先住民・移住者・軍人・科学者による分断的構造だった。

先住民と環境問題

これが変化するのは冷戦崩壊後である。1987年ソ連のゴルバチョフが北極圏の平和的利用を唱え、1989年にはフィンランドの牽引で北極圏環境保護を実現するために前記8カ国が集まり、それが後の北極評議会(AC)形成(1996年)につながった。従来、国家主権に基づき排他的な統治の対象だった空間に、先住民を含む北極圏住民の福祉、持続的発展、環境保護に関与

するための政府間協議を行う組織が形成されたのだ。

北極評議会の決定は加盟国8カ国によってなされるが、常時参加者として先住民組織の関与が保証されていることは重要である。先住民は、単に8カ国の国民としてだけでなく、先住民組織として国家に準じる立場で協議に関わることができる。これは、近年の国連等でみられる国際機関における意思決定制度を踏襲したものである。

近年、西欧諸国や東アジア、インドなどが経済的利害から北極圏への関心を強めている。これらの国々は、関係するNGO等とともに陪席者として北極評議会に参加している。この点で21世紀の北極圏人間社会は、従来の構成集団の統合と新たな参加者で構成されるようになった。

(2) 研究の現状

開発と健康問題

北極圏人間社会の探究を従来行ってきたのは人文科学で、その主要課題は先住民の歴史と文化だった。現代的課題の一つは資源開発の影響である。ソ連崩壊後本格化した西シベリアの石油・ガス開発と先住民社会への影響分析からは、先住民社会への否定的影響が報告されている。地域意向の無視、パイプラインによる放牧地の分断、廃棄物による環境劣化、強制的移住などが発生しているからである。一方で、先住民のトナカイ牧畜が開発地区の食糧供給に寄与し、活性化したという報告もある。開発と伝統的生業が共存する可能性も示唆されている。一方、中緯度・低緯度の環境汚染物質が北極海に流入・滞留することで、沿岸部の海に生きる哺乳類や魚類を主食とする先住民社会の健康被害についても調査が進められている。

アイデンティティと先住民運動

近代化、現代化の進展とともに、文化的アイデンティティは希薄となり、国民化が進行するとかつては見なされていた。しかし、先住民運動の組織化に見られるように、民族的・文化的象徴性は、状況に応じて多様な人間集団の主観的同一化を促している。特に近年、先住民概念は、地域・民族横断的となり、国際政治のアクターのひとつとなった。一方で、カムチャツカ半島のカムチャダール人形成に見られるように、移民の子孫が牽引するかたちで独自のアイデンティティを生み出す現象も発生している。北極圏人間社会のエスニシティは動的な過程にある。

気候変動の影響

自然資源に依存する地域社会に温暖化が正否いずれの影響を与えるのか、文理融合による研究プロジェクトが近年進められた結果、地域社会の在来知やその社会的役割が解明されるようになった。また、環境変化を吸収するレジリエンスの観点からの分析も行われている。その一方で、氷河・氷床の融解による水面上昇、そして積雪と凍土の融解および降水増加に伴う湿潤化による洪水増加が、都市部、村落部双方の浸水・浸食被害となっていることも判明している (Symon et al., 2005)。

(3) 今後の研究

方向性

北極圏人間社会研究において必要なのは、従来の先住民研究の視座を移住者にも適用し、さらに、従来国家毎に行われてきた政治・経済分析も総合化することで、北極圏人文社会科学を構築することである。次いで、日本を含む東アジア世界との視座のなかで北極人間社会分析を実施することである。

内容

① 北極海ガバナンスにおける先住民運動

北極評議会のような地域的ガバナンスのなかで、先住民運動がどのように組織化されるのか、その政治的主張や組織間連携や対国家政策が、どのように行われているのか分析する。

② 北極圏多文化主義とアイデンティティ

資源開発や観光等に従事する移住者と先住民は、相互に社会的、経済的、文化的にも関わりながら生活している。この点についての理解を深めるため、文化混交現象とアイデンティティの再編過程を分析する。

③ 文化遺産としての在来知と発展

数千年の歴史的過程のなかで、極北環境に暮らしてきた先住民の気象・生態等に関わる在来知は、人類の無形文化遺産として価値がある。これを収集・記録するとともに、その価値を自然科学的評価も踏まえ、次世代に発展させる応用実践を行う。

④ 温暖化による環境変化と北極圏自然災害

温暖化は海氷の減少にとどまらず、永久凍土を含む森林域にも作用している。そこで発生する災害を類型化し、これに地域社会・都市がどのように対応しうるのが評価する。

⑤ 北極海航路開発と漁業資源開発の沿岸部社会への環境評価分析

温暖化によって中低緯度地帯と北極圏を結ぶ海域の利用は、増加する傾向にある。このことが、北極圏沿岸部社会の生態、社会経済に及ぼす影響を総合的に評価する。

⑥ 東アジアとシベリア・北極海の社会動態分析

東アジア諸国は、資源開発、科学観測の観点で北極問題に取り組んでおり、同時に陸続きの東シベリアには、中国、韓国の移住者、資本が導入されている。これらを総合的にとらえることで、北極圏人間社会と東アジアの接合の地政学・社会経済的分析を行う。

方法

北極圏人間科学研究のための研究ネットワーク構築。先住民中心の人文科学、国家中心の社会科学、人間環境に関わる自然科学の相互交流と相互理解を促進する場を構築する。とりわけ、人類学と法学分野で検討されてきた先住民概念とその社会的実態に関わる知見を土台に、共有可能な北極圏人間社会モデルを構築し、個々の分析を総合化する。

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

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か？	48
Q4： 環北極陸域の水文過程はどう変化するか？	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