

北海道を対象とした地域気候予測研究の動向

¹佐藤 友徳・²山田 朋人・³稲津 将・^{1,4}中村一樹・¹杉本 志織・⁵宮崎 真・⁶久野 龍介

(¹北海道大学大学院地球環境科学研究院、²北海道大学大学院工学研究院、

³北海道大学大学院理学研究院、⁴現所属：防災科学技術研究所雪氷防災
研究センター、⁵国立極地研究所、⁶株式会社アーク情報システム)

1. はじめに

気候変動は人類の文化的生活にかかわる重要な問題として、近年大きく取り上げられている。我が国においても、気候変動による影響は、農林水産業、水資源、生態系、住環境、疫病など広範に及ぶことが懸念されており、気候変動予測研究と予測データを用いた影響評価研究が行われてきた（例えば、文部科学省ほか, 2013）。自然生態系においても気温の長期的な上昇に対応して植生の分布域が変遷していく可能性が指摘されている（Nakao *et al.*, 2011 など）ほか、水温や気温の上昇に伴って水系感染症や蚊媒介性感染症の検出域の北上（倉根, 2009）などが危惧されている。日本は、亜熱帯から亜寒帯までの気候帯に位置しているため、適確な影響予測を行うためには、地域詳細な気候予測データが必要となる。

気候データを用いて得られた影響予測をもとに、適応策の策定が行われる。気候変動に対する適応策は、気温や降水量の将来変化やそれに伴って予見される様々な影響に備え、人類の営みや自然環境が受ける深刻な影響を最小化することが目的である。たとえば、治水・利水の観点では、ダムや堤防の建設計画の見直しや運用方法の改善等が挙げられる。また農業分野においては、気温特性の変化に合わせた作物や品種の変更、さらには種まきや収穫時期などの農業歴を修正すること（Nemoto *et al.*, 2012 など）が対策として考えられる。適応策では、気候変動による影響の特性だけでなく、人口構成や産業構造の特徴も考慮する必要があり、地域ごとに最も適切な適応策が採用されるべきである。

このような背景から、文部科学省は適応策検討への科学的知見の提供、気候変動による影響に強い社会の実現に貢献することを目的として 2010 年に「気候変動適応研究推進プログラム (Research Program on Climate Change Adaptation; RECCA)」を立ち上げ、全国から 12 地域の課題がスタートした。本稿では、北海道の農業気象に関連の深い課題「北海道を対象とした総合的ダウンスケーリングの開発と適応（課題代表・山田朋人）」（以降、本課題と表記する）で実施中の研究について解説する。本課題は 2010 年度から 2014 年度まで、北海道大学と日本気象協会を中心とした産学連携プロジェクトとして実施されており、得られた成果を北海道内の地方自治体や関連機関、あるいは一般市民へと普及する予定である。

2. ダウンスケーリングによる地域詳細化と不確実性

2.1 力学的ダウンスケーリング

地域スケールの影響予測に求められる気候予測データは上述の通り地域気候の特徴を十分

に表現したものでなければならない。しかし、全球の気候モデル（以降、気候モデルと呼ぶ）による全世界の気候シミュレーションは、現在の計算機性能では100 km程度の間隔でしか計算することができない。この場合、日本は30点程度の代表点でしか表現できず、脊梁山脈を表現することすら困難である。そこで領域気象モデル（以降、領域モデルと呼ぶ）を用いて地域詳細な気象情報を作成する力学的ダウンスケーリングと呼ばれる手法が広く採用されている（稲津・佐藤, 2010）。力学的ダウンスケーリングでは計算領域を対象地域に限定し、その領域の大気側面境界や海面水温をメッシュの粗い気候モデルから得て、領域内の気象を詳細に計算する（これをネスティングという）。領域モデルで10 km程度の解像度があれば、脊梁山脈はもちろんのこと、平野や盆地、海岸線もかなり現実的なものになる。このような地域特有の自然地理的条件も領域気象の計算に取り入れられるので、地域特有の気候を表現することができる。さらに、その予測は領域モデルによって計算されるため、物理的に一貫性のある格子点の情報となる。ただし、力学的ダウンスケーリングは計算負荷が大きい。全世界に対して気候モデルを100 kmの間隔で計算する場合と、全世界の1/100の面積を持つ地域に対して領域モデルを10 kmの間隔で計算する場合とを比較すると、後者は前者の10倍の計算量を必要とする。

2.2 地域気候予測における不確実性の評価

図1に力学的ダウンスケーリングの計算手順を示す。IPCC の第4次報告書によると、将来の社会経済シナリオのうち、経済重視でグローバル化が進んだ未来社会（SRES A1b シナリオ）では、全球の年平均気温が20世紀末と比較して21世紀末に2～4 K程度上昇すると予測されている。予測値にみられる気温上昇量の幅は気候モデルの不確実性と呼ばれ、複数の気候モデル間で温室効果気体の濃度変化に対する応答のばらつきを表しており、気候感度と呼ばれている¹。北海道のようにある限られた地域のみを力学的ダウンスケーリングによって詳細化する場合に、どの気候モデルを領域モデルの境界条件として採用するかによって、北海道の気候予測結果が大きく影響を受けることは容易に想像できるだろう。すなわち、気温上昇の大きい気候モデルを用いるほど、北海道の気温上昇も大きくなる傾向がある。残念ながら、これまで都道府県レベルの影響評価研究に必要な地域気候予測データは、ごく一部の気候モデルを用いた力学的ダウンスケーリングによって作成されてきた²。そのため、気温変化量は気候感度の影響を強く受けていると考えられる。

地域気候予測では社会経済シナリオの多様性と上述の気候モデルの予測の不確実性に加えて、領域モデルの不確実性が加わることとなる。例えば、仮に同じ気候モデルを境界条件としても、地形に対する対流活動の応答が領域モデルによって異なることにより降水量に違いが生

¹例えば、「排出した温室効果気体が雲や放射の効果を介してどの程度気温の上昇に寄与するのか」、という問題に対する答えが気候モデルによって異なっていることを表している。これは、気候モデルを構成する物理式に含まれる係数や定式化の方法がモデル間で微妙に異なることや、エアロゾルと雲の関係など未だ物理的に定量化が困難な過程が気候モデルの中に含まれることが原因となって生じる。

²例えば、気象庁が公開している日本の気候予測情報の最新版（気象庁, 2013）は、気象庁が開発した気候モデルと領域モデルを用いた力学的ダウンスケーリングの結果である。

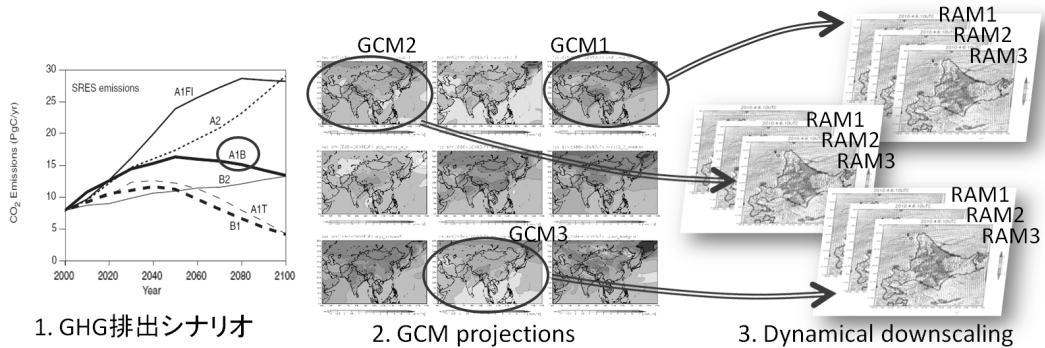


図1 北海道の気候予測を行うための手順の模式図。3つの気候モデル出力それぞれを境界条件として、3つの領域モデルを使った力学的ダウンスケーリングを実施する。

じたり、領域モデルによって積雪分布などの局地的な陸面状態が微妙に異なることにより気温の極値に違いが生じる可能性がある。このように、北海道の将来気候データを手にしたとき、社会経済シナリオ、気候モデル、領域モデルの不確実性が含まれていることに留意する必要がある。

本課題では、図1に示す通り3つの気候モデルと3つの領域モデルを使用し、計9通りの力学的ダウンスケーリングを実施することで、不確実性を考慮した地域気候予測情報の提供を目指している。気候モデルは、北海道における気候再現性を十分考慮し、東京大学などのMIROC3.2(hires)（以降、MIROC）、ドイツ・マックスプランク研究所のECHAM5/MPI-OM（以降、MPI）、および米国大気科学研究所のCCSM3（以降、NCAR）を利用した。これらの空間解像度は100 km前後である。上述の通り、これらの気候モデルは異なる気候感度を持っている。したがって、将来の特定の年代を対象期間とすると気候感度の違いが北海道の気候予測結果に強く反映されてしまうことは想像に難くない。そこで、全球年平均地上気温が1990年代に比べ約2 K上昇した年代をそれぞれの気候モデルで定義し、力学的ダウンスケーリングの対象期間とした³。この方法により、気候モデルの不確実性のうち、気候感度に起因する不確実性と総観場の気圧配置の違いに起因する不確実性とを分離することが可能となり、ここでは後者のみを評価することができる。

領域モデルは、気象庁のJMA/MRI NHM（以下、JMA; Saito *et al.*, 2006）、米国スクリプス海洋研究所のRSM (Juang and Kanamitsu, 1994)、及び米国を中心に開発されているWRF-ARW（以下、WRF; Skamarock *et al.*, 2008）の3つを使用している。それぞれの計算領域は北海道全域を含み、解像度は10 kmに統一した。力学的ダウンスケーリングは、将来予測（10年）と現在の気候再現（10年）を図1に示した9通りのモデルの組み合わせに対して行った。

また、気候モデルを境界条件とする力学的ダウンスケーリングとは別に、気象庁再解析データ（JRA25; Onogi *et al.*, 2007）を境界条件とした力学的ダウンスケーリングも実施した。次節では、過去の気象観測データを用いた領域モデルの精度検証について述べる。

³ 具体的には、MIROCでは2050年代、MPIでは2060年代、およびNCARでは2080年代である。

2.3 領域モデルのバ ィアス評価

ここでは、気象庁再解析データを境界条件として3つの領域モデルを用いた力学的ダウンスケーリングを行い、その結果を過去の観測データ（1984 年から2000 年までの17 年分）と比較した。観測データとしてアメダスの気温および APHRO-JP の降水量(Kamiguchi *et al.*, 2010) を使用した。図2に日本海側、太平洋側、オホーツク海側の3地域に分けた月平均気温の気候値の季節変化を示す。3つの領域モデルが北海道の3地域の平均的な季節変化を十分な精度で再現できることが確認できる。また、年々変動の振幅もすべての月、地域でおおむね観測と一致している。観測値に対する気温の誤差は日本海側でどの領域モデルも低温バイアスがみられた。暖候期には、どのモデルも2K程度の低温バイアスであるが、寒候期にはJMAでは約1K、RSMとWRFでは2~4K程度の低温バイアスがあり、気温の絶対値に対するバイアスの大小関係が領域モデルによって異なることが分かる。太平洋側およびオホーツク海側でも、寒候期においてJMAでは高温バイアス、WRFは低温バイアスであることが分かった。

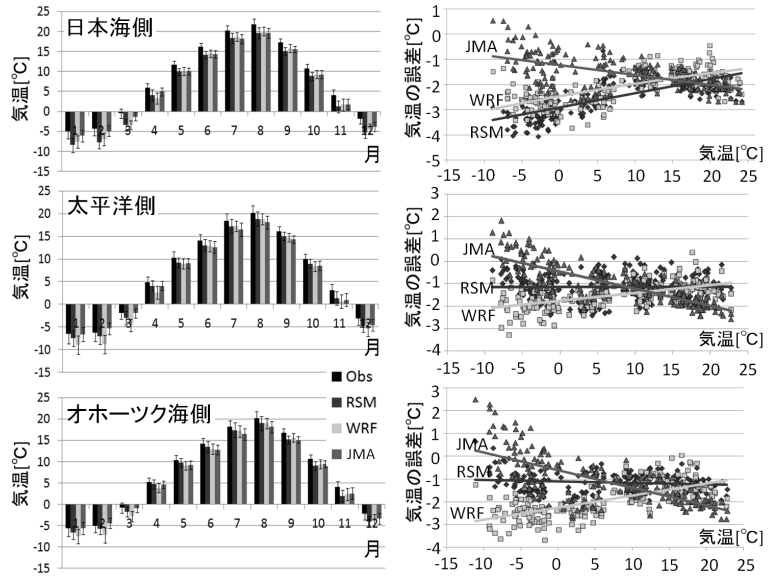


図2 (左) 日本海側、太平洋側、およびオホーツク海側における地上気温の気候値の季節変化。黒はアメダスによる観測、赤、緑、および青はそれぞれ領域気候モデル RSM、WRF、および JMA を表す。エラーバーは経年変動の標準偏差を示す。(右) 地上気温の観測値（横軸、°C）と誤差（縦軸）の関係および回帰直線。

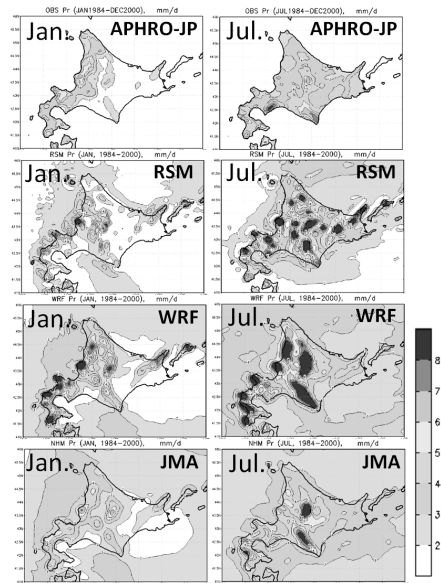


図3 再解析データを境界条件とした力学的ダウンスケーリングで得られた1月（左）および7月（右）における月平均日降水量の気候値(mm/day)。上段から APHRO-JP（観測）、RSM、WRF、JMA の順。

このように気温の絶対値に応じて誤差が変化する場合には、これらの特性を考慮したバイアス補正方法を採用する必要がある、それが領域モデルに起因する不確実性の低減につながると考えられる。また、3 つの領域モデルによる誤差は寒候期に最大となることから、低温期における地上気温の誤差要因についてさらなる解析が必要である。

3つの領域モデル実験によって得られた降水量の分布を図3に示す。1月の降水はJMAでは降水量の極大値が概ね観測データと一致しているが、WRFとRSMでは8 mm/dayの地域が見られることからやや過大傾向である。特にWRFでは、北海道西岸の広い範囲で降水量が過大である。ただし、固体降水に対する雨量計の捕捉率は、雪比率の低い新潟においても0.7～0.8程度であることが知られているため、実際の降水量はAPHRO-JPによるデータよりもかなり多いことが予想される。太平洋側の降水量は、JMAで観測に比べてやや過大であるが、RSMとWRFでは観測とほぼ同程度である。ただし、日高山脈ではWRFとJMAの降水量が観測の2倍程度となっている地域がみられる。

7月の降水量は室蘭から苫小牧にかけてのエリアと日高山脈で多いことが特徴である。この特徴は3つの領域モデルで概ね再現できているといえるが、冬季降水量と異なりどのモデルでも観測に比べると極大値が過大である。空間パターンはJMAが最も観測に類似している。WRFは日本海沿岸や大雪山でも多量の降水があることから、山岳地（あるいは斜面近傍）の降水の誤差が大きいことが推察される。RSMは山岳と低地に対応した降水分布が北海道全域でやや誇張されている。

以上、長期平均した気温と降水量データを用いて、3つの領域モデルの再現性評価を行った。気温の絶対値に依存した気温バイアスが確認でき、将来予測を行う際のバイアス補正に有用な誤差特性情報が得られた。降水量は全般的に過大傾向が目立つものの、アメダス観測地点に限れば、従来の力学的ダウンスケーリングの研究で見積もられた誤差とほぼ同程度であり、過去気候の再現性は十分高いと言える。

3. 地球温暖化予測

本節では、第2節で述べた手順で行われた地球温暖化予測の結果を示す。ただし、RSMによる計算結果はデータ変換等の都合でまだ解析できない状況である。ここでは、WRFおよびJMAによる結果の概略を紹介する。

3.1 降水量

図4は現在に対する将来の夏季降水量の変化率である。多少のばらつきは認められるものの、定性的にも定量的にも側面境界条件（すなわち気候モデル）が夏季降水量の変化をおおそく制御している。例えば、MIROCを境界条件とすれば、WRFであってもJMAであっても降水量は40%以上増加することを予測しているし、MPIやNCARを境界条件とすれば、領域モデルの選択に依らず顕著な降水の増大はみられない。第2節で述べた通り、本課題において気候モデルに起因する不確実性は、気圧配置の違いを反映していることから、夏季であれば蝦夷梅雨

が明瞭になるか、あるいは小笠原高気圧の勢力が強まるかによって、降水量の変化率が大きく異なることと関係していると考えられる（図略）。

図 4 に示した冬季降水量の変化率では、どの予測結果も概ね 20 % 程度の増加を示している。気温が高くなるにつれて大気を含みうる水蒸気量は多くなるため、同じ気圧配置であれば温暖化した気候の方が可降水量が大きく、降水量も増加する傾向がある。ただし、温暖化時に西高東低の気圧配置の弱化を予測する気候モデルもあるため、この弱化の程度によっては日本海側の降水の増分は相殺される可能性もある。また、どの予測にも共通している点は、太平洋側とくに日高地方の降水量の増加である。これは西高東低の冬型の気圧配置の弱化に伴って南岸低気圧が増加すること（Inatsu and Kimoto, 2005）と関係しているものと推測される。一方、オホーツク海側では、NCAR 以外の気候モデルを使用した予測で降水の微減が見られる。全般的には、夏季と同様に気候モデルが冬季降水量の変化傾向をお

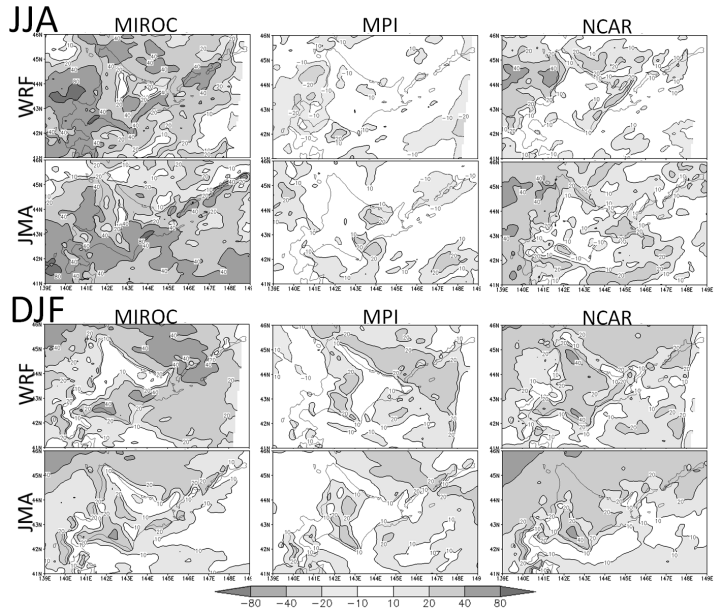


図 4 3つの気候モデル（左から MIROC、MPI、NCAR）を境界条件にした2つの領域モデル（上が WRF、下が JMA）による力学的ダウンスケーリングで得られた降水量の変化（将来気候の現在気候に対する比；%）。上半分は夏季（6～8月）、下半分は冬季（12月～2月）。

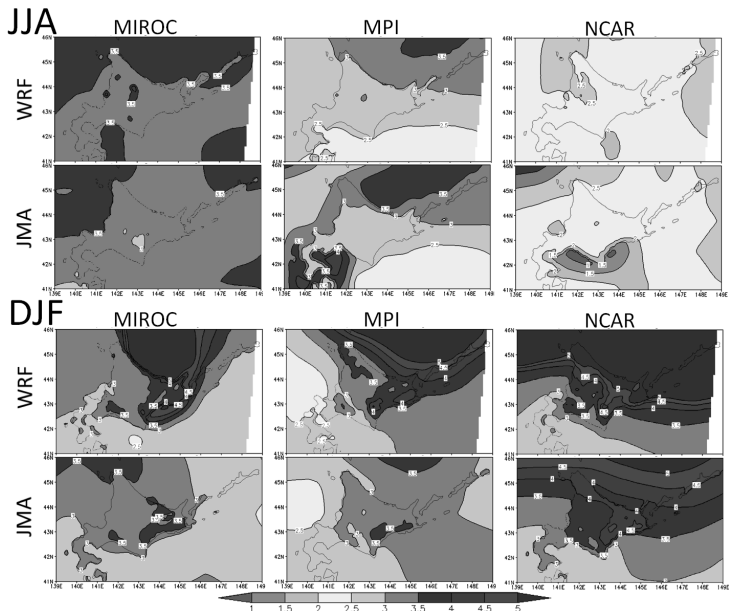


図 5 図 4 と同じ。ただし、地上気温の変化 (K)。上半分は夏季（6～8月）、下半分は冬季（12月～2月）。

およそ制御していることが分かった。

3.2 気温

図 5 は夏季および冬季における地上気温の変化量である。夏季の地上気温の変化量は全球年平均気温の変化量 (2 K) と同程度であり、北海道内ではほぼ水平一様である。一方、冬季における地上気温の変化量は全球年平均気温の変化量より大きく 3~4 K である。これは、気温上昇によって融雪が促進され、露出した地面でより多くの日射を吸収し、さらに気温が上昇するというアイス・アルベド・フィードバックと呼ばれる機構が局地的にも働くためと考えられる (Matsumura and Sato, 2011)。また、冬季の気温変化ではオホーツク海上が特徴的である。WRF の予測はどれも 5 K 超の昇温であるが、JMA の予測はどれも 4 K 程度である。これは WRF の予測には昇温による流氷の消失の効果を考慮しているのに対し、JMA の予測には昇温によっても流氷は現在と変わらないと仮定しているためである。オホーツク海上の気温はオホーツク海側の気温上昇量の予測にも大きく影響するが、流氷の動態予測は極めて難しい問題であり、領域モデルの海面境界条件に起因する不確実性として別途研究する必要がある。

4. 先進的なダウンスケール手法の開発

本課題では、前節までに紹介した気候予測研究だけでなく、気候予測情報の改善に貢献することを目的に新しいダウンスケール手法の開発や観測研究を行っている。本節、次節でそれらを紹介するが、紙面の制約のため、ここでは概要のみを示す。

土地利用変化による北海道の地域気候への影響

北海道は明治初期以降、本州からの開拓民によって大規模な農地開墾が行われ、顕著な土地利用の変化があった。地域気候に対する土地利用の変化の影響を領域モデルを用いた感度実験によって調べた。その結果、全道を平均すると土地利用変化の影響は無視できるほど小さいものの、現在の都市域では土地利用変化によって顕著な気温上昇が生じていることや、農地化された地域では降水量をわずかに減少させる効果があることが分かった (Sato and Sasaki, 2011)。

力学的ダウンスケーリングと統計的ダウンスケーリングの融合

力学的ダウンスケーリングに求められる膨大な計算コストを低減するための手法 (サンプリング・ダウンスケーリング ; Kuno and Inatsu, 2013) を開発した。これは特異値分解解析を利用して、北海道の冬季降水と高い相関をもつ上空の高度場を求め、力学的ダウンスケーリングの計算対象年の抽出に利用する方法である。この手法で抽出したわずか 4 年に対する力学的ダウンスケーリングは、予め実施しておいた 30 年に対する力学的ダウンスケーリングとほぼ同等の統計値を示すことが分かった。目下、サンプリング・ダウンスケーリングの理論的な有効性を検証しており、それが確立すれば任意の領域に対して力学的ダウンスケーリングの計算負荷を低減することが可能となると期待される。

ハイブリッドダウンスケーリング手法の開発

降雨・降雪の量や分布は水文過程において極めて重要な要素であるが、局所性が強いため、10km メッシュ程度の格子で力学的ダウンスケーリングを行ったとしても、10km メッシュのデータとしてそのまま利用できるとは限らない。そこで、集中豪雨をもたらす線状降水帯などの事例に着目して、密な観測データを用いて特徴的な空間分布を特定するとともに、これらの現象に共通して見られる気圧配置を抽出した(Yamada *et al.*, 2012)。これらの成果をもとに、力学的ダウンスケーリングの計算結果に誤差付きの確率情報を付加するための手法を開発している。

水文気象・農業気象のための陸面モデリング

人間活動を考慮した陸面モデル (Pokhrel *et al.*, 2012) をもとに、将来の北海道における水循環 (水の需要と供給) の解析を行うためのモデルを開発している (河野ほか, 2013)。ここでは、陸面過程モデル MATSIRO に、TRIP (Oki and Sud, 1998) の河道網モジュール、および農業灌漑、家庭用水、工業用水による取水を考慮したダム貯留モジュール (H08; Hanasaki *et al.*, 2008) と地下水くみ上げによる取水量を組み込んでいる。さらに、各グリッドの土地利用 (田、畑、果樹園、森林、荒地、建物用地、幹線交通用地、湖沼、河川等)、葉面積指数、標高、平均傾斜角、土質を考慮することができる。

5. そのほかの研究活動と成果

北海道における水文気象観測

河川や農業あるいは防災にかかわる適応策策定のためには、特定地域の水文気象や雪氷の状況を解像度 10 km より細かく把握する必要がある。北海道内には、気象庁アメダスデータのほか、国土交通省や札幌総合情報センター等が展開する水文・気象観測網がある。しかし、山岳地域や過疎地域には空白域が散在するため、本課題では独自に石狩平野の 8 地点に加えて、石狩川と十勝川の分水嶺付近に位置するトマムに重点サイトを設け、風速、放射量、降雨量、積雪深や土壌水分の観測を実施している (図 6)。これらのデータは領域モデルの精度検証に用いられるほか、土壌水分量や地温

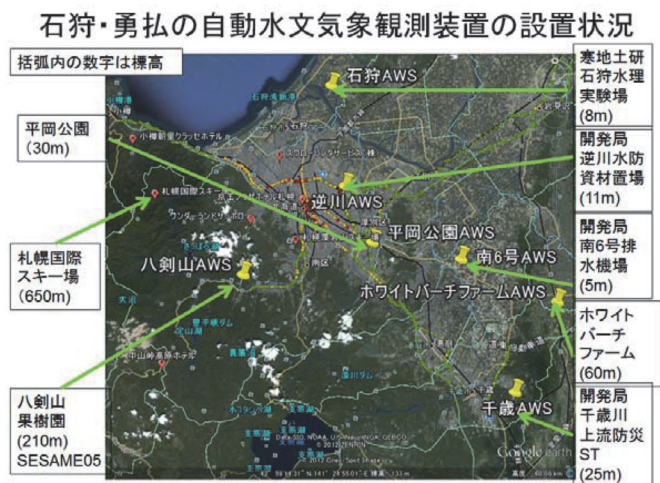


図 6 2010～2012 年度に設置した水文気象観測装置の分布。

等のデータ (Miyazaki and Yamada, 2011) は上述の陸面モデルの開発にも役立てる予定である。

雪氷気象観測

2012/13 年の冬季に、札幌で観測史上最も遅い初雪を記録したことは記憶に新しいが、その後低気圧が北海道に接近・通過する事例が多く、多くの地点で急激に積雪深が増加した。このように特異な気象条件のなか、トマム山の斜面で 12 月から 2 月にかけて多くのクラック (斜面上の雪面の割れ目) が発生した。この斜面はササで覆われており、平年であれば、ササが直立した状態のまま徐々に積雪深が増加し、ササが積雪に刺さった状態になる。しかし、積雪初期の急激な湿雪によりササの倒伏が生じ、積雪の底面でササが倒れた状態となっていた。これによって、雪面下部の摩擦抵抗が小さくなりクラックの拡大につながったと考えられる。このように、斜面における積雪の安定性を考察する際に、斜面傾斜や積雪密度・硬度のプロファイルだけでなく、底面の土地被覆 (植生) の状態が極めて重要となるケースがあることが観測によって確認された (中村ほか, 2013)。

道東における霧日数の長期変化

釧路地方気象台において観測された 1931 年から 2010 年までの夏季霧日数の長期変化傾向を調べたところ、釧路の霧日数は過去 80 年間で有意に減少していた。特に 1970 年代後半以降、霧日数が少ない年が増加傾向にある。霧日数が少ない年には、太平洋高気圧の北または西への張り出しの弱化和オホーツク海高気圧の発達に伴って、北海道南東部に到達する南からの暖湿移流が抑制されていた。また、2000 年秋の釧路地方気象台の移転によって近年の霧日数が減少していることが示唆された (Sugimoto *et al.*, 2013)。

6. まとめと注意

北海道を対象とする気候変動適応策策定のため、複数の気候モデルを境界条件とした複数の領域モデルによる力学的ダウンスケーリングを実施した。これにより気温や降水量の変化を社会経済シナリオ、気候モデル、および領域モデルの不確実性を含んだ確率情報として提供することが可能となりつつある。夏季の降水では、蝦夷梅雨型か小笠原高気圧の張り出し型かによって変化傾向が大きく異なり、冬季のオホーツク海側では流氷の動態が気温の予測にばらつきを与えることが分かった。また、各モデル間のばらつきが小さい予測は信頼性が高いと考えることもできる。例えば、冬季の降水はどの予測でも 10~30 % の増加が予測されていた。

最後に本稿で考慮できなかった不確実性について 2 点補足したい。一つは経十年変動である。SRES シナリオで 100 年先の予測を行えば、長周期の自然変動に比べて温暖化による気温上昇のシグナルが卓越する。しかし、向こう 20 年先の予測に置き換えると、気温上昇のシグナルは 5 分の 1 程度と考えることができる。具体的には 100 年後に 3 K の上昇ならば、20 年後は 0.6 K の上昇である。これは環太平洋の海洋循環に伴う経十年変動 (すなわち自然変動、PDO と呼ばれる。) の振幅と同程度となる。このため PDO の効果により短期的には気温が低下する

ような可能性も否めない。とくに、北海道の気候には PDO が大きな影響を与えるが、PDO の予測は依然として困難である。本課題では現在・将来気候ともに 10 年分しか計算していないため、このような十年以上の周期の変動を考慮できない点に注意されたい。

もう一つは台風である。近年の気候モデルは、解像度が高くなってきたため、「台風」とみなせる渦擾乱を表現できるようになってきたが、深い低圧部の再現は依然として困難である。また、夏季から秋季における日本周辺の気圧配置を正しく予測できなければ、台風の経路を予測することはできない。北海道において台風の接近はまれな現象であり、仮に気候モデルで台風を再現できたとしても、温暖化によって台風がどのように変化するかを定量するのは難しい。過去に大きな影響を及ぼした気象イベントの発生確率が、人間活動によってどの程度影響を受けているのかを定量的に調べるイベント・アトリビューションと呼ばれる手法が提案されている。台風に限らず、低頻度で大きな被害をもたらす現象は、それだけに特化した研究を別個に行う必要があるだろう。

謝 辞

本稿は文部科学省・気候変動適応推進プログラムの課題「北海道を対象とする総合的のダウンスケーリングの開発と適応」で実施した内容である。ここに記して謝意を表する。

引用文献

- Hanasaki, N., Kanae, S., Oki, T., Masuda, K., Motoya, K., Shirakawa, N., Shen, Y. and Tanaka, K., 2008: An integrated model for the assessment of global water resources – part 1: model description and input meteorological forcing. *Hydrology and Earth System Sciences*, **12**, 1007–1025.
- Inatsu, M. and Kimoto, M., 2005: Two types of interannual variability of the mid-winter storm-tracks and their relationship to global warming. *SOLA*, **1**, 61–64.
- 稲津 将・佐藤友徳, 2010: 大は小を兼ねるのか「ダウンスケーリング」. *天気*, **57**, 193–211.
- Jung, H.-M. and Kanamitsu, M., 1994: The NMC nested regional spectral model. *Mon. Wea. Rev.*, **122**, 3–26.
- Kamiguchi, K., Arakawa, O., Kitoh, A., Yatagai, A., Hamada, A. and Yasutomi, N., 2010: Development of APHRO_JP, the first Japanese high-resolution daily precipitation product for more than 100 years. *Hydro. Res. Lett.*, **4**, 60–64.
- 河野剛典・山田朋人・Yadu Nath Pokhrel, 2013: 人間活動を考慮した陸面過程モデルの北海道への適用. 土木学会論文集(G), 印刷中.
- 気象庁, 2013: 地球温暖化予測情報 第 8 巻, 145pp.
- Kuno, R. and Inatsu, M., 2013: Development of sampling downscaling: A case for wintertime precipitation in Hokkaido. *Clim. Dyn.*, submitted.
- 倉根一郎, 2009: 感染症への地球温暖化影響. *地球環境*, **14**, 279–283.
- Matsumura, S. and Sato, T., 2011: Snow/Ice and Cloud Responses to Future Climate Change around

- Hokkaido. *SOLA*, **7**, 205–208.
- Miyazaki, S. and Yamada, T. J., 2011: Soil Moisture monitoring in Ishikari river basin of Hokkaido, *Proceedings of Soil Moisture Workshop 2011*, 29–32.
- 文部科学省・気象庁・環境省, 2013: 気候変動の観測・予測及び影響評価統合レポート「日本の気候変動とその影響」(2012 年度版), 84pp.
- 中村一樹・佐藤友徳・下山 宏・石川 嵩, 2013: 2012-13 年冬季初めの低気圧に伴う降雪に起因するトマム山の全層雪崩. *北海道の雪氷*, 投稿中.
- Nakao, K., Matsui, T., Horikawa, M., Tsuyama, I. and Tanaka, N., 2011: Assessing the impact of land use and climate change on the evergreen broad-leaved species of *Quercus acuta* in Japan. *Plant Ecology*, **212**, 2, 229–243.
- Nemoto, M., Hamasaki, T., Sameshima, R., Kumagai, E., Ohno, H., Wakiyama, Y., Maruyama, A., Goto, S. and Ozawa, K., 2012: Probabilistic risk assessment of the rice cropping schedule for central Hokkaido, Japan. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **51**, 1253–1264.
- Oki, T. and Sud, Y. C., 1998: Design of Total Runoff Integrating Pathways (TRIP) - A global river channel network. *Earth Interactions*, **2**, 1–37.
- Onogi, K., Tsutsui, J., Koide, H., Sakamoto, M., Kobayashi, S., Hatsushika, H., Matsumoto, T., Yamazaki, N., Kamahori, H., Takahashi, K., Kadokura, S., Wada, K., Kato, K., Oyama, R., Ose, T., Mannoji, N. and Taira, R., 2007: The JRA-25 reanalysis. *J. Meteor. Soc. Japan*, **85**, 369–432.
- Pokhrel, Y. N., Hanasaki, N., Yeh, P. J. F., Yamada, T. J., Kanae, S. and Oki, T., 2012: Model estimates of sea-level change due to anthropogenic impacts on terrestrial water storage. *Nature Geoscience*, doi:10.1038/ngeo1476.
- Saito, K., Fujita, T., Yamada, Y., Ishida, J. I., Kumagai, Y., Aranami, K., Ohmori, S., Nagasawa, R., Kumagai, S., Muroi, C., Kato, T., Eito, H. and Yamazaki, Y., 2006: The operational JMA nonhydrostatic mesoscale model. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 1266–1298.
- Sato, T. and Sasaki, T., 2011: Impact of historical deforestation and urbanization on regional climate in North Japan. *2011 AGU Fall Meeting*, San Francisco.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M., Huang, X.-Y., Wang, W. and Powers, J. G., 2008: A description of the Advanced Research WRF Version 3. *NCAR Technical Note*.
- Sugimoto, S., Sato, T. and Nakamura, K., 2013: Effects of synoptic-scale control on long-term declining trends of summer fog frequency over the Pacific side of Hokkaido Island. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **52**, 2226–2242.
- Yamada, T. J., Sasaki, J. and Matsuoka, N., 2012: Climatology of line-shaped rainbands over northern Japan in boreal summer between 1990 and 2010. *Atmos. Sci. Lett.*, **13**, 133–138, doi: 10.1002/asl.373.