

Environment Research and Technology Development Fund

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

積雪寒冷地における気候変動の影響評価と適応策に関する研究 (2-2009)

令和2年度～令和4年度

Assessment of Climate Change Impacts and Adaptation Measures in Cold, Snowy Regions

〈研究代表機関〉

地方独立行政法人 北海道立総合研究機構

〈研究分担機関〉

北海道大学

国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構

帯広畜産大学

東北工業大学

国立研究開発法人 国立環境研究所

○図表番号の付番方法について

「Ⅰ. 成果の概要」の図表番号は「0. 通し番号」としております。なお、「Ⅱ. 成果の詳細」にて使用した図表を転用する場合には、転用元と同じ番号を付番しております。

「Ⅱ. 成果の詳細」の図表番号は「サブテーマ番号. 通し番号」としております。なお、異なるサブテーマから図表を転用する場合は、転用元と同じ図表番号としております。

令和5年5月

目次

I. 成果の概要	・・・・・・・・・・	1
1. はじめに（研究背景等）		
2. 研究開発目的		
3. 研究目標		
4. 研究開発内容		
5. 研究成果		
5-1. 成果の概要		
5-2. 環境政策等への貢献		
5-3. 研究目標の達成状況		
6. 研究成果の発表状況		
6-1. 査読付き論文		
6-2. 知的財産権		
6-3. その他発表件数		
7. 国際共同研究等の状況		
8. 研究者略歴		
II. 成果の詳細		
II-1 雪に関する気候変動影響の評価とその指標開発 （地方独立行政法人 北海道立総合研究機構）	・・・・・・・・・・	22
要旨		
1. 研究開発目的		
2. 研究目標		
3. 研究開発内容		
4. 結果及び考察		
5. 研究目標の達成状況		
6. 引用文献		
II-2 農業分野における影響評価と適応策 （北海道大学）	・・・・・・・・・・	36
要旨		
1. 研究開発目的		
2. 研究目標		
3. 研究開発内容		
4. 結果及び考察		
5. 研究目標の達成状況		
6. 引用文献		

II-3 北海道における気候リスク評価および適応策ローカライゼーション 50
(東北工業大学)

要旨

- 1. 研究開発目的
- 2. 研究目標
- 3. 研究開発内容
- 4. 結果及び考察
- 5. 研究目標の達成状況
- 6. 引用文献

III. 研究成果の発表状況の詳細 65

IV. 英文Abstract 71

I. 成果の概要

課題名 2-2009 積雪寒冷地における気候変動の影響評価と適応策に関する研究
 課題代表者名 野口 泉（地方独立行政法人 北海道立総合研究機構 産業技術環境研究本部 エネルギー・環境・地質研究所 環境保全部 研究参事）

重点課題 主：【重点課題⑧】気候変動への適応策に係る研究・技術開発
 副：【重点課題②】ビジョン・理念の実現に向けた研究・技術開発

行政要請研究テーマ（行政ニーズ） （2-4）地域特性に応じた気候変動影響及び適応策に関する研究

研究実施期間 令和2年度～令和4年度

研究経費

87,123千円（合計額）

（令和2年度：31,113千円、令和3年度28,004千円、令和4年度：28,004千円）

予算額は間接経費を含む

研究体制

（サブテーマ1）雪に関する気候変動影響の評価とその指標開発（地方独立行政法人 北海道立総合研究機構）

（サブテーマ2）農業分野における影響評価と適応策（北海道大学）

（サブテーマ3）北海道における気候リスク評価および適応策ローカライゼーション（東北工業大学）

研究協力機関はない。

本研究のキーワード 気候変動、積雪寒冷地、降雪、積雪、インパクトチェーン、農業影響、アダプテーションパスウェイ、社会実装、適応策検討手法開発

1. はじめに（研究背景等）

「気候変動適応法」が2018年6月に公布され、12月に施行された。この法律は、IPCC第五次評価報告書において、気候変動による影響が今後深刻化し今世紀末に産業革命以降の気温上昇を2℃程度に安定させたととしても、被害増加は避けられず「適応策」を講じて予想される影響に備えることが急務であると指摘されたことと対応している。この適応法により、地域気候変動適応計画の策定が努力義務となり、気候変動適応情報プラットフォーム（A-PLAT：<https://adaptation-platform.nies.go.jp/>）を中心とした地域気候変動適応に対する情報提供や、地域気候変動適応センターからの支援体制が整備されつつある。しかし現状では、地域での適応の検討で必要となる精度の情報は不十分であり、更なる調査研究が必要とされている。

北海道は、一次産業を中心とした日本全体への資源・食糧の一大供給基地であるが、積雪期間が4～5ヶ月に及ぶなど本州とは異なる寒冷気候や地理的特徴を持ち、雪に関する適応を進めていく必要がある。また、北海道で急速に進むとされる人口減少の問題は、気候変動影響とともに大きな影響をもたらす可能性があると考えられる。

そこで、北海道に特徴的な気候要素である雪に着目し、気候変動影響とその適応策に関する研究を進める必要があると考えられた。

2. 研究開発目的

本研究は、北海道に特徴的な気候要素である降雪・積雪に着目し、インパクトチェーンやアダプテーションパスウェイなどの新しい手法・概念を導入し、気候変動影響を科学的に評価するとともに、その適応策を選択する手法を研究開発する。特に農業分野では道内の豊富な研究蓄積・ネットワークを活かし、現場レベルで対応できる調査研究を実施する。これらの結果に基づき適応計画立案など、参与型の気候変動適応の推進等のための、科学的根拠を伴った支援を行うことを目的とする。

3. 研究目標

全体目標	北海道に特徴的な気候要素(降雪・積雪)に着目し、新しい手法・概念(インパクトチェーンなど)を導入し、多分野における順応的適応を研究開発する。特に農業分野では現場レベルでの適応方針を提示する。その成果を基に、事業者・自治体等における適応策の社会実装を目指し、計画策定のための参与型のワークショップ等を試行的に開催する。さらに、将来的により多くの事業者・自治体等での適応策導入を期待し、開発されたインパクトチェーンや適応経路を含むフレームワークを、気候変動の適応を推進する組織と共有する。
サブテーマ1	雪に関する気候変動影響の評価とその指標開発
サブテーマリーダー/所属機関	野口泉/北海道立総合研究機構
目標	降雪・積雪に着目し、気候変動による変化とそれに伴う影響の連鎖について図示したインパクトチェーンを作成する。次にサブテーマ3 と共に、重要な影響連鎖についてコストや地域性を考慮して複数の適応策案を作成し、さらにその中から影響の程度や時期に応じた適応策導入の計画立案手法を整理する。それらを基に、北海道内の市町村、団体・企業などと共に、計画策定のための参与型のワークショップ等を試行的に開催する。また適応策導入の計画策定に至るフレームワークを道庁や地域気候変動適応センター等と共有する。
サブテーマ2	農業分野における影響評価と適応策
サブテーマリーダー/所属機関	鮫島良次/北海道大学
目標	北海道全域を対象として、予想される積雪変動を5区分(積雪増・湿雪化、積雪増・乾雪化、積雪減・湿雪化、積雪減・乾雪化、変化なし)する。各区分での正負の農業影響を明らかにし、適応方針を策定する。さらに、約50mメッシュで積雪深と消雪日を推定し、春季の適切な農作業管理を可能とする。これらの成果についてサブテーマ1及び3と協力し、農業関係団体への普及を実施する。

サブテーマ3	北海道における気候リスク評価および適応策ローカライゼーション
サブテーマリーダー /所属機関	大場真/東北工業大学
目標	北海道における気候リスク評価および適応策ローカライゼーションに関する理論的研究を実施し、対象地域における地域社会の将来予測と、それがもたらす気候変動の影響予測を実施し、その上で北海道に合った適応経路に関する研究を行い、サブテーマ1と共に北海道における地域気候変動適応策立案に貢献する。そのためのインパクトチェーンや適応経路をそれぞれの分野とインタラクティブに開発する。また開発成果は、国内他地域や海外での活用を目指し、国立環境研究所気候変動適応センターなど国内適応研究や、気候変動適応情報プラットフォームなどの情報基盤と共有する。

4. 研究開発内容

図0.1に本研究の概要と3つのサブテーマの関係性を示す。

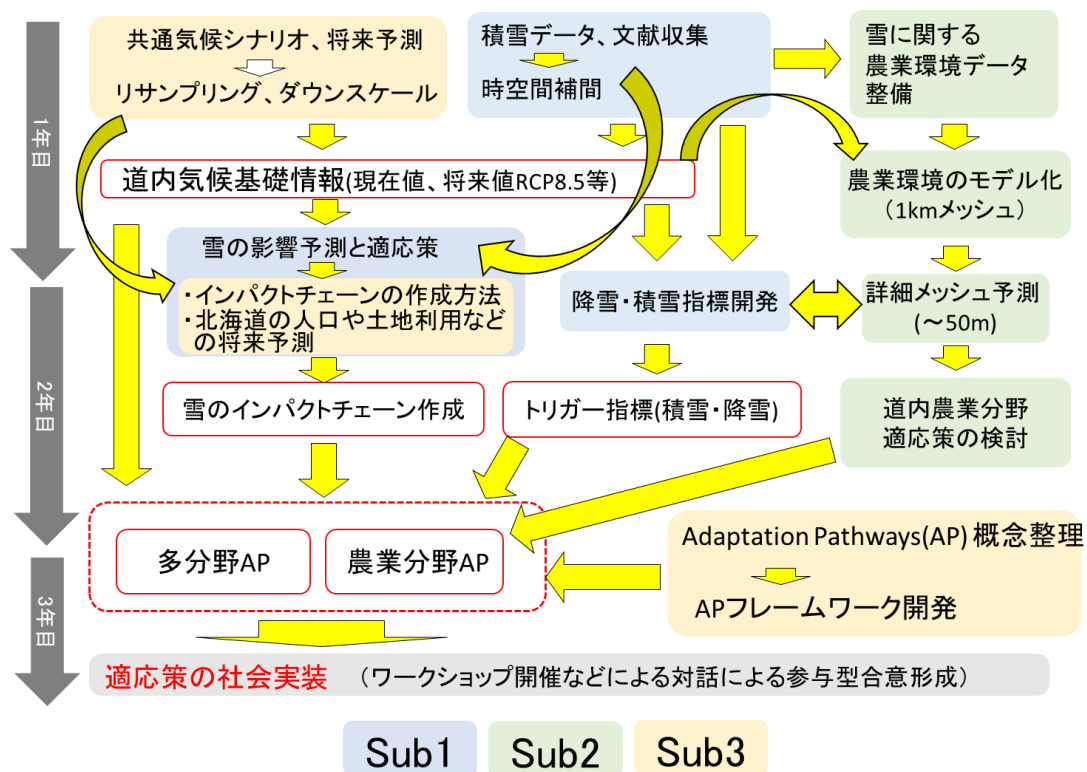


図0.1 本研究の概要と3つのサブテーマの関係性

サブテーマ1では、気候変動による雪に関する変化とそれに伴う影響、およびその連鎖について解析し、適応策の社会実装のための情報収集を行う。サブテーマ2では北海道全域を対象に、積雪の変化を予測し、それらが農業に与える影響を明らかにする。また春季の適切な農作業管理に向け、詳細な積雪深、消雪日および凍土の消失日の推定を行う。サブテーマ3では北海道における気候リスク評価および適応策ローカライゼーションに関する理論的研究を実施し、対象地域における地域社会の将来予測と、それがもたらす気候変動の影響予測を行い、その上で北海道に合った適応経路に関する研究を行う。さらに、サブテーマ1および2と共に参与型のワークショップ等を試行的に開催し、北海道における地域気候変動適応策立案に貢献する。

以下に各サブテーマにおける具体的研究内容を示す。

【サブテーマ1】雪に関する気候変動影響の評価とその指標開発

(1) 雪の変化およびその影響に関する評価

1) 雪の変化およびその影響に関する情報の収集・解析

研究者への聞き取り調査、印刷物および電子媒体の調査を行い、論文・報告書・書籍、講演・学会発表、新聞・Web掲載等の情報を収集・分類した。また市町村を対象に温暖化対策や気候変動適応策計画、環境基本条例などの情報を収集し、さらにアンケート調査や聞き取り調査を実施した。また使用可能な8種の将来予測ダウンスケーリングデータについて、予測データの解析を専門とする研究者等への聞き取り調査を行い、雪の変化に関連するデータや項目についてバイアス補正などを考慮して、8種類の将来予測ダウンスケーリングデータから解析に用いるデータセットを選定した。

2) 雪に関する気象要素についての長期変化傾向の解析

北海道内の気象データを解析し、冬季の道内の雪に関する気象要素について、長期変化傾向の解析を行った。

3) 積雪調査による積雪の空間分布の把握

2021年2月中旬～3月上旬にかけ、積雪調査を全道で実施した。また過去の調査結果（1988、1992、1996、2000、2004、2008、2012、2016年）と併せて解析した。

4) 衛星画像解析による積雪期間の変化

衛星画像（MODIS）などの解析から、山間部を含む積雪状況の情報収集・解析を行い、全道の積雪開始、終了および積雪期間の変化について解析した。

(2) インパクトチェーンの作成と指標開発

1) インパクトチェーンの作成

情報収集結果をまとめ、雪の変化に関する影響及び適応について一般的なインパクトチェーンを作成し、影響要素間の関連性の分析も行った。作成されたインパクトチェーンはサブテーマ3に提供し、ローカライゼーション化の基礎資料となった。

2) 雪の変化に関する指標開発

民間委託により、独自寒冷指数、水道凍結指数などの指標開発を行った。また国立研究開発法人防災科学技術研究所 雪氷防災研究センターの協力により導入した積雪変質モデル（SNOWPACK）を用いた除雪日数やスキー場滑走可能日数（積雪30cm以上）などの指標開発を行った。さらにそれら指標の変動傾向について過去と予測される未来の変化についての解析結果をまとめた。

(3) 社会実装に向けた適応策検討手法の開発

収集した情報から、雪などに関する冬の気候変動影響と適応策についてまとめ、イベントなどを通じて広く雪の変化に対する実感を伴った気候変動影響評価結果の情報を普及した。さらに適応策導入に向けて参与型検討会を開催し、サブテーマ3と協力して、気候変動影響への適応の道筋を示す適応経路の概念を導入した適応策検討手法を開発した。

【サブテーマ2】農業分野における影響評価と適応策

(1) 広域の降積雪の量的変動と質的変動およびその影響

1) 冬季気温（積雪堆積環境）変動の特徴抽出

冬季気温（積雪堆積環境）変動の特徴抽出については、農研機構の提供するメッシュ農業気象データ（農研メッシュ値）を使用して過去、現在、近未来、将来について1月の日平均気温を求め、石坂の気候的区分式^{*1}）に適用して、乾き雪、濡れ雪、および中間の3区分に分類した。積雪の量的変化については、将来予測シナリオデータから積雪量を推定するための簡易積雪モデルを開発した。モデルについては、当初計画では月平均気温と月積算降水量を用いる月単位積雪水量推定モデルであったが、日平均気温と日降水量から日々の積雪水量を計算するモデルに変更し、このモデルを20世紀気候再現実験（historical）データセットにより妥当性を検証した上で将来予測に用いた。今世紀末までの積雪の増減を推定し、上記の積雪堆積環境の区分とを面的に重ね合わせて、積雪の量的・質的変動の複合パターンマップを作製した。

2) 積雪変動の農業影響の調査

積雪の量的変動（主に少雪）による農業影響について文献調査を行った。

(2) 高解像度積雪深・消雪日推定マップの作成

本項目の目的は50mメッシュの積雪深情報（積雪深実況および予想消雪日）の提供である。データ収集は、サブテーマ1と協力して行った。2021年2-3月には、道内全域（道総研との協力）および岩見沢周辺での積雪深調査を行った。積雪深の連続測定データは帯広、札幌、および江別で取得した。また、これらと平行して、1kmメッシュで提供されている積雪深データを50mメッシュにダウンスケールするモデル、消雪予想日を計算するための融雪モデルについて検討を行った。両モデルとも基本的データとして、メッシュ農業気象データを用いることとした。ダウンスケールモデルは地形因子を説明変数とする重回帰式で、地形因子の計算において計算領域を大きく拡大した移動窓を用いた。融雪モデルは、降雨や積雪の影響も考慮した熱収支式ベースのモデルである。

(3) 凍土消失日の推定

帯広畜産大学内の気象観測露場では、1981年から気温や降水量などの観測が行われている。原田ら（2009）*²⁾は、ここで1981～2006年に観測された土の凍結深と積雪深のデータを用い、土の凍結融解特性について分析し、積算寒度と積算暖度を用いた最大凍結深および凍土消失日の推定方法を提案した。一方、学内での気象観測は2007年以降も継続的に行われているが、観測データを用いた詳細な検討は行われていない。そこで、原田らの研究から10年以上経過したことから、2007年以降のデータも加えて冬期の状況を改めて検討することとした。

(4) 栽培の可能性が高くなる作物の将来予測

将来予測気候データの解析を進めていく中で、気候変動時の北海道の将来予測気候が、現在の東北地方の気候に類似していることが明らかになった。そこで、現在東北地方で栽培されているが、北海道では栽培されていない作物について、気候変動時の栽培可能性を解析することにした。対象作物として、国内のりんごの約半数の生産量を占める主力品種「ふじ」を選定した。「ふじ」は生育に好適な気温を長期間必要とする晩生りんごであり、現在の青森県で栽培されているが、気温の低い北海道では栽培されていない。「ふじ」の好適な気候条件を明らかにして、北海道での栽培可能性を検討する。

*1) 石坂（1995）メッシュ気候値から推定した日本の雪質分布，雪氷，23-24.

*2) 原田ら（2009）長期観測に基づく積雪下の土の凍結融解特性，雪氷，71，241-251.

【サブテーマ3】北海道における気候リスク評価および適応策ローカライゼーション

(1) 寒冷積雪地における地域社会他の将来予測

A-PLATが提供しているデータセットから、将来の気候変動予測などを参考にしながら、地域社会の変化も予測した。本サブテーマでは、気候変動影響分野（後述）と関連する地域人口と土地利用の予測を行った。公開されているSSP(shared socio-economic pathways)に基づいた人口予測を1kmメッシュへダウンスケールし、人口変動などの予測を行った。さらにこれを用い、推進費2-1708で開発した手法を採用し、土地利用の予測を100mメッシュでの推定を行った(Estoque et al., 2019)*³⁾。計算量が膨大であるため予測は札幌市のみで行った。また人口減少によって空き家や無管理農地が生じることが予測されたため、現在の土地利用種からの遷移確率を推定し、2030年における該当土地利用を推定した。

(2) 気候変動影響インパクトチェーンとローカライゼーション

気候変動が地域もたらす影響について、地域特性を考慮したインパクトチェーン（IC）を作成した。このICは、以下の4つのステップに基づいている。1) 可能性のあるリスクの特定、2) ハザードと中間的な影響の特定、3) 脆弱性の把握、4) 暴露をうける要素の把握である。なお、このICには、気候変動の正の影響も考慮に入れ、図示した。

対象とした分野・課題は、北海道の気候変動影響、特に雪・寒冷に深く関係する、国民生活・都市生活分野（雪道）、農業分野（水稲・土地利用型作物（秋まき小麦））、災害分野（土砂災害）の3分

野の4課題である。

雪道・秋まき小麦については、外力・暴露・脆弱性を評価するための指標を選定した。各種公開されている統計データから、市町村別のデータを収集した。収集した各統計データを正規化し、外力・暴露・脆弱性のそれぞれ平均値によるリスク評価を行った。また、これら課題に対する適応策の事例を情報収集し、データベース化した。ここでは、文献調査やインパクトチェーン作成、および後述するヒアリングの過程で収集した情報を修正、追加、整理した。

(3) 社会システムへの影響連鎖評価

地域社会における気候変動影響及び気候変動適応の影響を地域情報に基づいて評価するために、必要な調査や開発を行った。具体的には、(2)で特定した3分野について選定し、文献や資料などの情報を基に、地域レベルにおける課題や計画の対応状況を整理した。

北海道内の自治体や試験研究機関などにおいて、各地域の当該分野において関与するステークホルダーを具体的に抽出し、リスト化した。その上で、選定されたステークホルダーに対してインタビュー調査を実施した。次に、各ステークホルダーが気候変動適応に関して果たす役割や、自治体の担当部局を中心として各ステークホルダーとのつながりを可視化し、ステークホルダー関連構造図（ステークホルダーマップ）としてまとめた。

(4) インタラクティブな適応経路開発

北海道における様々な気候変動とその影響に関する予測や、地域社会特性、また多様なステークホルダーの課題やニーズを踏まえて、2050年や2100年に向けた適応策の選択とスケジュールは、科学的合理性のみで決まるものではない。そこで、(2)における適応策に関する定量的なデータに基づき、多様なステークホルダーが将来の地域社会像や、それに基づいた妥当な適応策の検討と現実的な計画を議論することにより、適応経路を検討する手法を開発した。

既に開発されている気候変動に対するインパクトチェーン開発の手法を参考に、気候変動と地域社会の将来像、そこから導き出される課題と対応する適応策、適応策のスケジュールリングをグループで行うワークショップの進行と教材について検討を行った。研究期間中は、感染症拡大防止の観点から出張や対面が大きく制限された状況で検討は困難であった。しかし、制限の少ない機会を利用し、ワークショップ手法研究チーム内部におけるインパクトチェーンワークショップを含めた試行を繰り返した。また研究期間最後には、外部参加者を招いて2回の検討を行った。

*3) Estoque et al. (2019) Scenario-based land abandonment projections: method, application and implications. *Science of the Total Environment*, 692, 903-916.

5. 研究成果

5-1. 成果の概要

(1) 雪が人々の生活や産業に及ぼす影響

1) 雪の変化、これまでとこれから

全道の積雪調査の結果、実測の積雪深や積雪水量は農研機構の提供するメッシュ農業気象データ（農研メッシュ値）と良い相関関係が得られ、標高を考慮した推定値が得られることが分かった。その結果、図1.7に示すように、道北および日本海側で積雪深は大きく、積雪水量も多い傾向が認められた。また密度においては道南および日本海側で大きい傾向がみられた。北海道の降雪・積雪の変化傾向については、過去の気象データ（1961～2021年1、2月の北海道内14の気象官署における気温、湿度、降水量、積雪深の日毎の値および1991年以降の1時間毎の値）を解析した結果、北海道内の多くの地点で降雪・積雪は全体的に減少傾向にあり、重い濡れた雪が増え、気温が上昇し、ゼロクロッシング日数（1日の内に最低気温が氷点下かつ最高気温が0℃を上回る日数）などが有意な増加傾向を示し、融雪・再凍結を繰り返す場合が多くなりつつあることが分かった。

また積雪期間については、主に道東で積雪開始日が遅く、積雪終了日が早くなる傾向が認められ、その結果、積雪期間が短くなっていることが示された。なお、アメダスデータ（1983～2021年）の解

析によると、海岸部でも積雪日数は減少しており、より長期の解析によつては、積雪期間が短くなる地域が増えると考えられた。

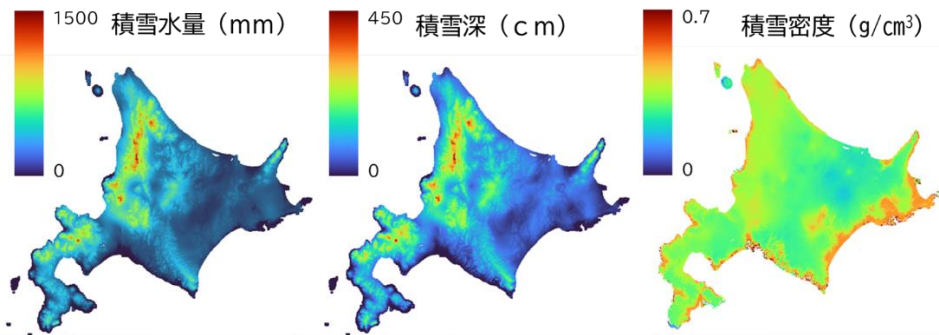


図1.8 2021年北海道内の積雪水量、積雪深、積雪密度の分布図

積雪の雪質について、今世紀半ばおよび今世紀末について計算した結果、図2.1に示すようにRCP2.6（2℃上昇シナリオ）では、道南の沿岸部を除き、全道は乾き雪地帯のままとなった。一方、RCP8.5（4℃上昇シナリオ）では、今世紀半ばに道南の沿岸部が湿り雪地帯化し、今世紀末には十勝を除くほとんどの沿岸部で湿り雪地帯となった。また根釧地域では内陸部まで広く中間地帯となった。この様相は図1の右端の現在気候における本州北部とよく似ており、RCP8.5の状況では今世紀末の北海道の雪質は、現在の東北地方と類似していると考えられた。

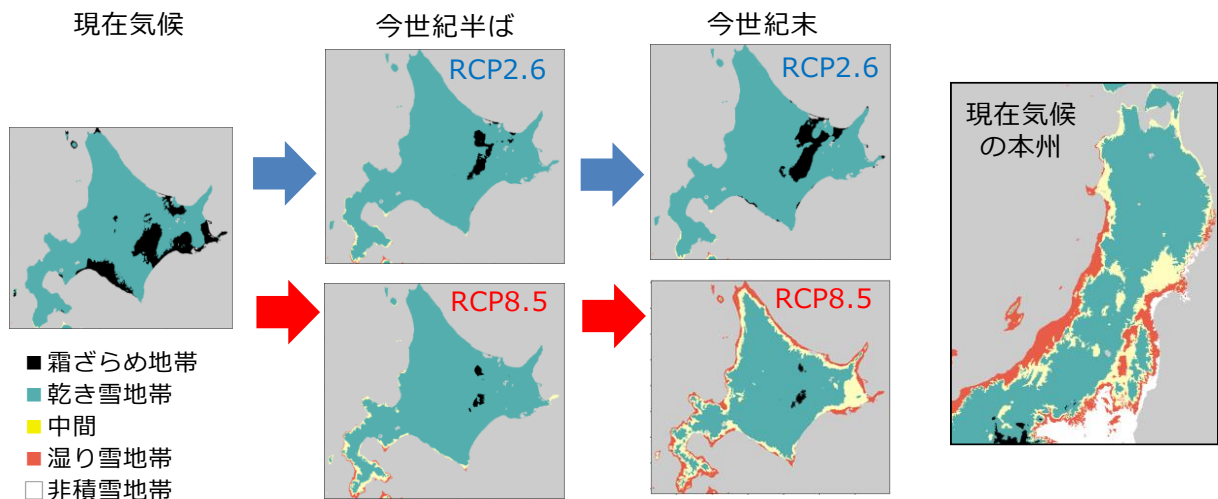


図2.1 北海道における雪質地域区分の将来変化および現在の本州北部の雪質区分

「現在気候」は2021年～2020年、「今世紀半ば」は2041年～2060年、「今世紀末」は2081年～2100年のそれぞれの20年平均値から求めたもの。モデルはMRI-CGCM3で、1kmメッシュにダウンスケールされたデータセットを用いた。「今世紀半ば」および「今世紀末」は上がRCP2.6、下がRCP8.5。右端図は現在気候における本州北部の状況。

また積雪の量的な変動においては、今世紀半ば（2041年～2060年）および今世紀末（2081年～2100年）の予測値を現在気候と比較した結果、RCP2.6ではオホーツクや後志の一部を除いて変化がないか増加傾向を示し、増加傾向は特に日高や十勝など太平洋側で大きかった。一方、RCP8.5では今世紀半ばまではRCP2.6と同様の傾向がみられるが、今世紀末にはほぼ全道で減少すると予測された。減少量が多い地点はRCP2.6と同様にオホーツクや後志である。積雪終日（積雪無が10日以上継続）については、RCP2.6ではオホーツクでは早まる傾向、日本海側や日高ではやや遅れる傾向にある。積雪水量が増加する地域でも、必ずしも積雪終日が遅れないのは、春先の気温上昇が影響すると考えられた。RCP8.5では、より気温上昇が顕著なため、ほぼ全道で長期積雪終日が早まる。

2) 雪の変化の影響

(ア) 除雪・排雪から融雪へ

北海道内の気象官署およびアメダス官署では、1980～1999年度ではいずれの地点も初冬と初春にゼロクロッシング日数が多い二山形を示した。しかし、RCP2.6の将来（2076～2095年度）においては、気象官署の江差、浦河（図1.5）などの7地点で真冬にゼロクロッシング日数が多い一山型となり、RCP8.5の将来（2076～2095年度）では内陸部などを除く109地点で一山型になっていた。RCP2.6で一山型になった地点ではRCP8.5において最低気温が0℃以上となる日数の増加に伴い、ゼロクロッシング日数は42～74%と減少していた。一方、東北の山形や長岡では過去の実測値で既に一山型であり、青森は1980～1999年度では二山形であったが、2000～2020年では一山型を示した。これらのことから、北海道においても将来は現在の東北地域と同様に除雪・排雪だけでなく、消雪パイプ等の融雪のためのインフラ整備が望まれることが考えられた。

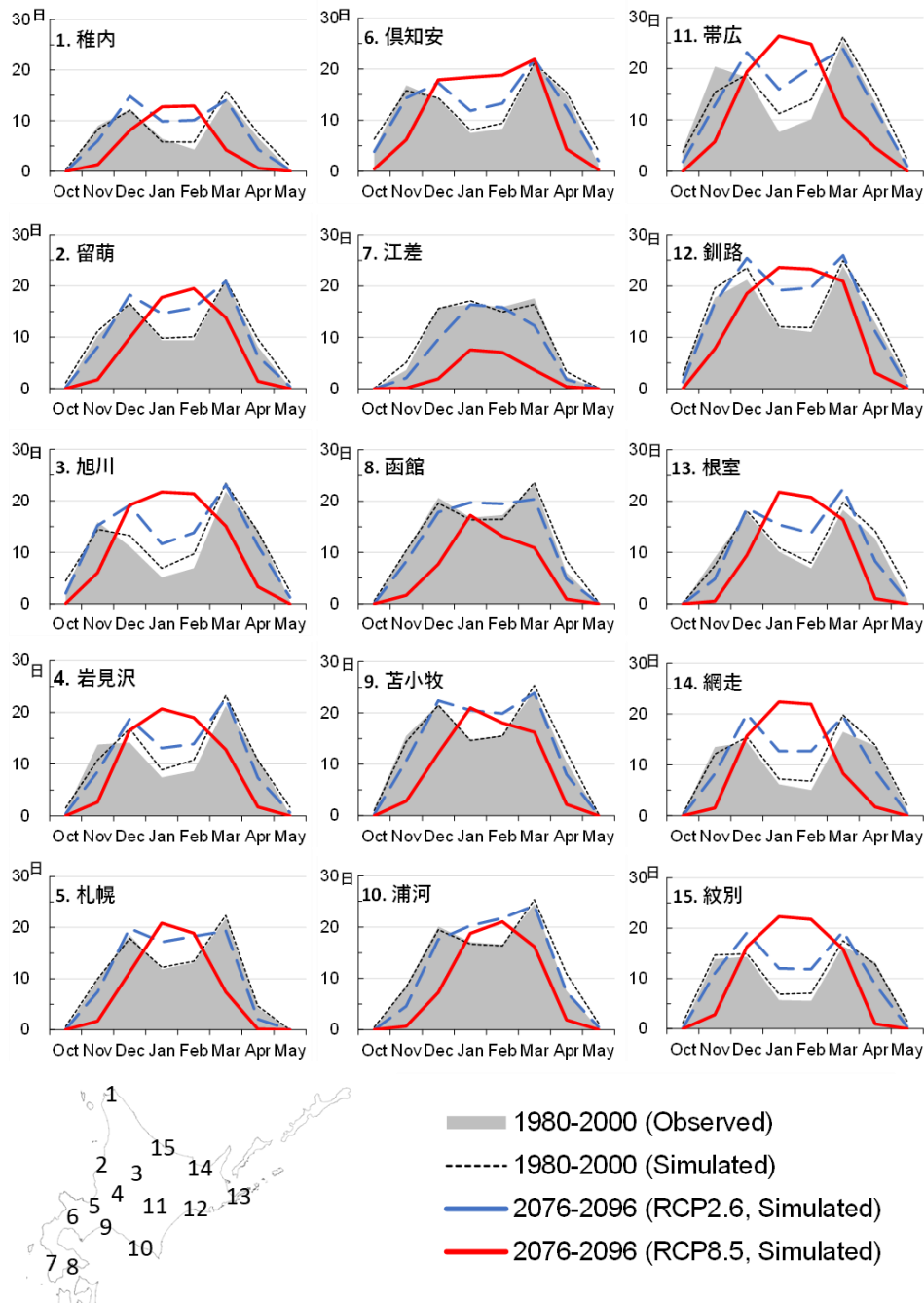


図1.5 10～5月の北海道内の15気象官署におけるゼロクロッシング日数の変化傾向

(イ)生活に及ぼす影響

重い濡れた雪が増え、気温が上昇することで融雪・再凍結が繰り返され、除雪作業が困難になることや、着雪の増加、積雪荷重の増加による建築物損壊や倒木、落雪事故の増加が予想されます。また、つるつる路面が増え、転倒者も増え、そのため高齢者の外出が減少することが懸念され、増える道路の穴（ポットホール）による事故や車の損壊も増加する可能性が考えられた。一方で内陸部の雪はあまり減らないため、内陸部のスキー場などへの影響は限定的と考えられた。

(ウ)農業に及ぼす影響

- a) 北海道農業の営農形態は、現在の気候条件に適応して形成されており、全道における長期の積雪や道東地域で見られる土壤凍結に対処しているが、今後の冬季の気候変動によっては農業生産にとって大きな影響を及ぼす可能性があり、様々な将来予測が有効な適応策となる。高解像度消雪日予測マップでは、融雪モデルにおけるパラメータの調整やデータとして使用するメッシュ農業気象データの各気象要素に含まれる誤差を緩和するための誤差モデルを作成し、適用することで精度が向上することを確認された。また凍土については、気温と積雪深から凍土の最大深さと融解深さを推定し、最終的に凍土消失日を推定できた。この推定結果では、過去の十勝地方の全ての地域で根雪と凍土の消失日は早まる傾向にあり、特に中部と南部で顕著であることが明らかになった。これらの知見は、春季の適切な農作業管理に有効な成果となると考えられた。
- b) 積雪の量的変動（多雪化と少雪化）のメリットデメリットを表2.1に示す。雪を利用している事例では、積雪の中で貯蔵効果（糖度上昇、出荷時期の調整など）があることにより、雪下キャベツや雪下ニンジンなどが生産されている空知・上川・羊蹄山麓などの地域は当面は継続可能だと思われる。一方で多雪化は雪害を増加させる恐れがあり、地域によっては湿り雪化と相まってハウス用パイプや果樹への着雪などの機械的な雪害が増加する可能性がある。また土壤凍結深の減少により、野良イモの増加などの影響が生じることもある。積雪期間の短縮については、風食害による土壤の飛散が増える可能性がある。
- c) 質的変動に関しては、RCP8.5の結果では今世紀半ば以降はほぼ全道で量的には減少し、十勝地方を除く沿岸部全てで湿り雪地帯化することが予測された。そのため、内陸部まで湿り雪地帯が分布する道南や札幌周辺、根釧地域では濡れ変態により密度が増加するため、除排雪の労力（負荷）が増大し、ハウス屋根からの雪塊の滑落による衝撃増加などが考えられた。なお、作物の生理的消耗や雪腐れ病のまん延は、0℃付近の積雪下環境に長時間置かれることにより甚大化する。湿り雪化する地域は量的には減少し、期間は長くはならないため、その影響の可能性は低いと考えられた。

表2.1 多雪化と少雪化それぞれのメリットとデメリット
多雪化に伴う消雪の後退、少雪化に伴う消雪日の前進は独立して整理。

	メリット	デメリット
多雪化	<ul style="list-style-type: none"> 断熱効果による保温（醸造用ブドウ、春堀長イモ、雪下キャベツなど） 冷熱源としての利用 雪室（ゆきむろ） 春先の用水の確保（雪ダム機能） 	<ul style="list-style-type: none"> 機械的 snow 害（果樹、施設の物理的被害） 生理的 snow 害（暗呼吸による作物体の消耗、雪ぐされ病など） 土壤凍結深の減少（野良イモの増加）
圃場の消雪後退	<ul style="list-style-type: none"> 特にメリットはない 	<ul style="list-style-type: none"> 圃場が乾かず機械が入れない 生育遅延や栽培期間の短縮による収量減
少雪化	<ul style="list-style-type: none"> 機械的 snow 害、生理的 snow 害の減少 防雪コスト、除雪コストの低減 	<ul style="list-style-type: none"> 保温不足による凍害増加 土壤凍結深の増大 冷熱エネルギーの希薄化（集雪コスト増） 春先河川流量の減少
圃場の消雪前進	<ul style="list-style-type: none"> 栽培期間が確保される 品種の選択幅が広がる 融雪材が不要になる。 	<ul style="list-style-type: none"> 遅霜被害の危険性が増加 圃場が乾きすぎて風食害が増加

d) リンゴ「ふじ」の北海道導入可能性の将来予測を行った。MIROC5のRCP8.5によると、2040年代に沿岸産地で栽培可能性が高まり、2050年代には内陸産地でも栽培可能性が広がることが分かった（図2.7）。一方、RCP2.6では、沿岸部産地では栽培可能性がある一方、内陸産地では2060年代でも生育基準を満たさないことが分かった。今後の排出動向を踏まえて、産地ごとに適切な品種選択をおこなう必要があると考えられた。

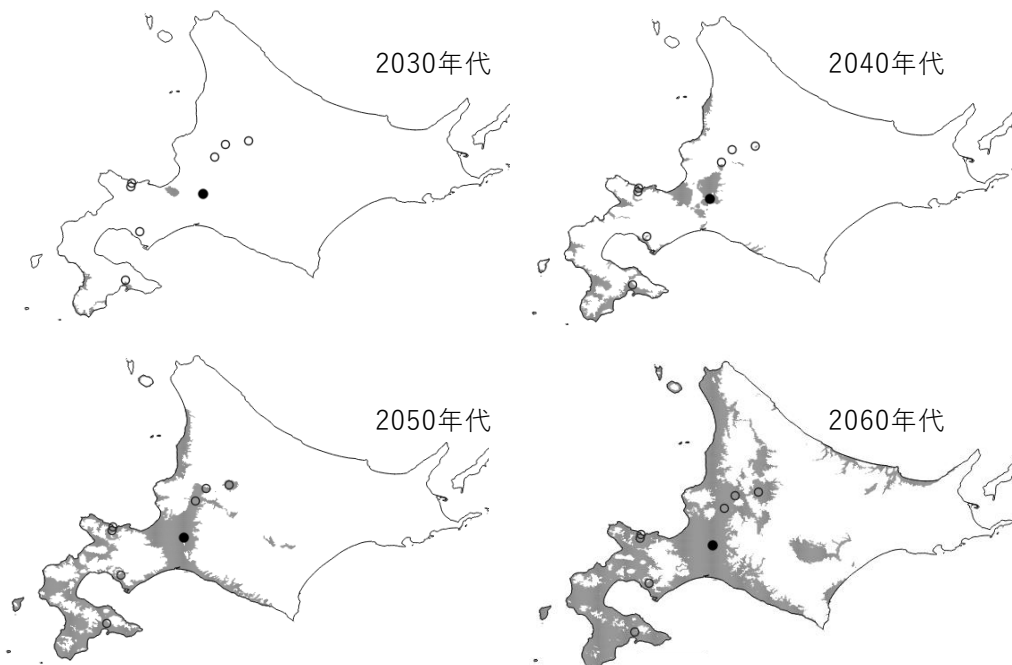


図2.7 MIROC5 RCP8.5におけるふじ栽培適地予測結果

○はりんご産地、●は道総研試験地

3) 連鎖する影響

雪の変化およびその影響に関する情報の収集・解析」における情報収集結果をまとめ、都市域を対象に雪の変化に関する影響及び適応についてインパクトチェーンの概略を作成し、要素間の関連性の分析を行った。その結果、「雪の減少」により「除雪作業の収入源」となり、「除雪作業員/熟練者の不足」、「大雪時の除雪不足」、「交通障害の長期化」につながる連鎖が生じることなどが予想された。

サブテーマ3では、国民生活・都市生活分野（雪道）、農業分野（秋まき小麦、水稻）、災害分野（土砂災害）の3分野における4つの課題に対して、ローカライズドインパクトチェーンの開発を行った。国民生活・都市生活分野（雪道）については、以下のような連鎖する影響が考えられた（図3.3）。

- (ア) いわゆるドカ雪などの極端な現象や含水率の高い雪の増加により交通等のインフラについては、路面凍結、街路樹・標識等への着雪・着氷などが発生し、それらが交通渋滞・停電等を引き起こし生活に支障をきたすと考えられた。
- (イ) 家屋等については、含水率の高い雪の影響により倒壊や破損が増加する可能性があり、またライフスタイル・健康については、濡れた衣服による風邪等が発生しやすくなることが予想された。
- (ウ) 雪期間の短縮により、冬季の外出機会が増えるというプラスの影響がある一方で、交通インフラの影響に加え、路面凍結のために歩行者の転倒が増加することなどで外出機会の減少等の影響も懸念される。その結果、住民の体力の低下や鬱などの増加にもつながる恐れがある。

適応策としては、これらの影響を踏まえ、積雪期間も負担の少ない生活を送れるような交通インフラの整備、除雪体制の構築、克雪住宅の建築、各種情報の周知、共助システムの充実等が必要となる。特に北海道では含水率の高い雪や路面凍結をこれまであまり経験していないことから、雪質の変化の理解不足が脆弱性の一つとして挙げられた。そのため、住民への情報発信を通じて、雪質の変化を分かりやすく説明することが重要と考えられた。

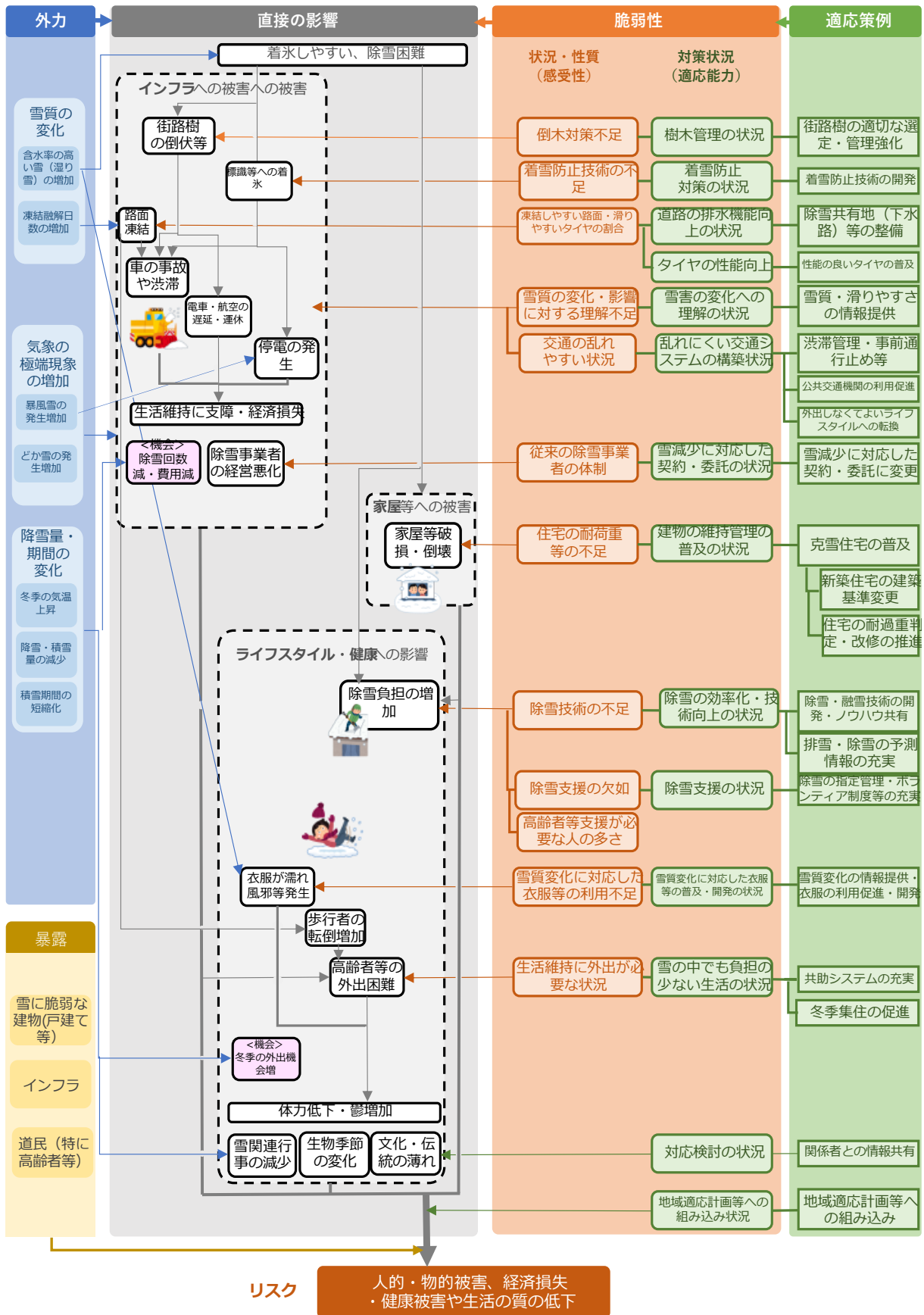


図3.3 インパクトチェーン (国民生活・都市生活分野 (雪道))

(2) 気候変動に適応するためには

1) 住民に理解されやすい指標開発

除雪日数（日降雪量10cmを基準）などの指標開発を地域ごとに行った。さらに、それら指標の変動傾向について過去と予測される未来の変化についての解析結果をまとめた。例えば、図1.13は振興局ごとの年平均除雪日数を示している。対象は20世紀末（1980～1999年度）とRCP2.6および8.5（2076～2095年度）である。この結果、除雪日数は平均的には全道の多くの地域で減少すると予測されているが、内陸部に限るとあまり減少しないと予測された。また10年に一度の多雪年のみを対象とした平均の除雪日数でも、あまり減少しないと予測された。

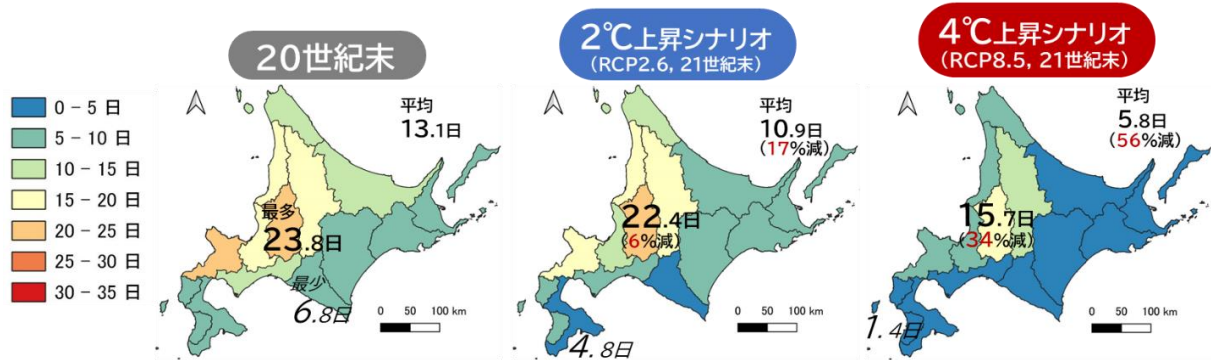


図1.13 20世紀末とRCP2.6および8.5（2076～2095年度）の除雪日数

2) 住民の理解と合意形成の必要性

適応策の社会実装のためには、気候変動の影響を的確に予測するだけでなく、地域社会の変化も予測することが必要となる。人口の減少は税収の減収につながり、除雪・排雪の費用は集落再編を促す要因ともなる。このため、気候変動の影響に関する理解を住民に広める必要があり、それに伴い、税金の使い方やライフスタイル、地域社会の在り方についての合意形成が必要である。

地域社会の将来予測については、日本版SSPにおける市区町村別人口推計を1kmメッシュにダウンスケールしたものをを用いた。より現実的な人口予測を得るため、札幌市に限り土地利用変化を推定した。図3.2には、札幌市における土地利用変化予測を示す。南部（南区）は森林が広がり、中心部は北西に位置する。現在、建物用地では、2030年には都市域周辺部から空き家が発生することが予測された。また人口減少に伴い、2050年には空き家がさらに増えることが予想された。

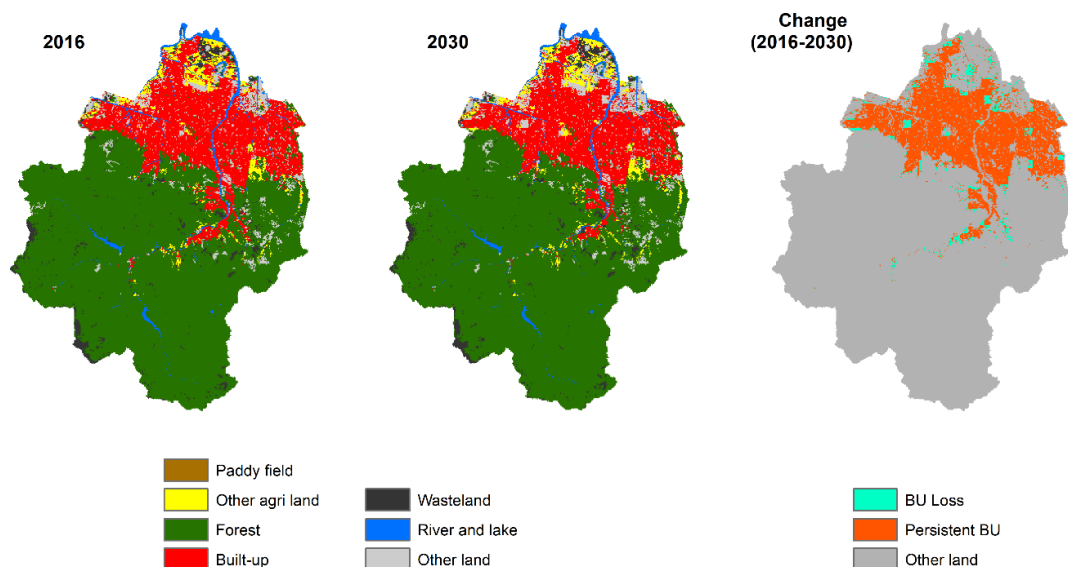


図3.2 2016年（基準年）と2030年における土地利用分布予測

3) 社会実装する適応策の検討手法の開発（アダプテーションパスウェイ）

国民生活・都市生活分野（雪道）、農業分野（秋まき小麦、水稻）、災害分野（土砂災害）の3分野4課題について、社会実装する適応策の検討手法の開発を行った。ここでは、例として国民生活・都市生活（雪道）について説明する。

除雪は道路、家回りなど生活、健康、産業に係る重要な課題であり、札幌市では13年連続で1位となる最も力を入れるべき政策とされている。また、つるつる路面の増加は、健康に悪影響を与え、融解および再凍結で増える道路の穴（ポットホール）は事故の発生など生活や産業に係る課題となっている。

（ア）自治体による除雪（道路）

自治体は除雪事業者に委託し、幹線道路等の除排雪を行っている。ヒアリングによると、札幌市では、一定の除雪基準を市で設けているものの、実際の出動はある程度受託者の判断で行われているとのことである。留意点としては、雪捨て場の確保、除雪事業の建設企業所有の除雪機械台数の減少や老朽化の進行、除雪オペレーターの減少や高齢化等といった大きな課題がある。除雪不足によって交通事故の可能性が増えたり、救急車両・公共交通機関の通行が妨げられたり、ガタガタ路面による部品落下や車両火災の危険性が増大するなどの影響連鎖が想定される。

適応策としては、除雪事業者との連携による除雪の効率化を図りつつ、将来にわたっても持続的に除雪体制が確保されるようにするために、夏期の道路維持作業と冬期の除雪作業を一体として発注し、建設企業等が通年の仕事量を確保しやすくすることが提案されている。また、除雪予測、自動運転技術の導入、雪に覆われた道路の見える化、技術研修会の開催などの取組みも考えられる。

（イ）住民・自治会等による除雪（生活道路、家回り）

生活道路や家回りの住民・自治会等による除雪は、パートナーシップ制度や共同除雪のような形で、住民や自治体と連携して実施されている。自治体は、近隣の雪置き場の清掃、道路への砂撒きによる転倒防止等などの協力を住民に依頼している。また、高齢者などの除雪作業が困難な住民への影響は大きく、個人が除雪事業者に依頼を行う場合もあるが、費用負担の問題もある。さらに雪下ろし時の転落や落雪による事故も懸念される。一方で、除雪トラブルによる傷害事件なども発生している。特に、自治体の除雪した雪を住宅前に置く「置き雪」に関しては、不満が多く、法律に違反して道路に戻す場合もある。また転倒を恐れ、外出しなくなるなどの影響もある。

適応策としては、今後大雪の増加や、乾雪から湿り雪へ雪質が変化することも予測されるため、研究機関、気象予報会社、メディア、ICT関連企業などが、積雪量だけでなく雪質の変化に関する情報、本州で行われている「雪おろシグナル」のような適切な除雪を促す情報、雪による交通渋滞の情報などを発信することが有効である。また、除雪依頼の補助、除雪作業のマッチングアプリの開発普及、雪下ろしや除雪時の見守り方法の開発、除雪器具の開発、無理のない雪かき方法の普及、滑りにくい靴や凍結しにくい舗装の開発などが挙げられる。自治体がきめ細やかな除雪を行うことが有効であるが、人口減少・高齢化が進む中、自治体の財政は今後一層厳しくなると予想され、多くの自治体で除雪水準を高めることは困難であり、住民・自治会等による除雪の自助・共助は今以上に必要になると考えられた。

（ウ）道路管理者・交通機関による交通確保等

道路管理者や交通機関は、大雪時の重要路線の交通の確保、通行制限、渋滞情報の発信等を実施しているが、十分な効果が得られていない場合がある。

ホワイトアウトによる視界不良、雪山による視界不良や道幅減少、凍結防止剤による塩害、雪害による倒木、公共交通機関のダイヤの乱れによる待ち時間の増加などの影響連鎖が挙げられる。

適応策としては、地吹雪予測や避難場所の確保、交通事故危険地点の抽出、凍結防止剤の適正使用や代替品開発、倒木対策のための事前伐採、バス運行情報のリアルタイム化などが考えられる。また大雪時には自家用車の規制、外出自粛も検討されるべきである。さらに、ポットホール対策としては舗装技術、穴埋め技術の開発が必要である。

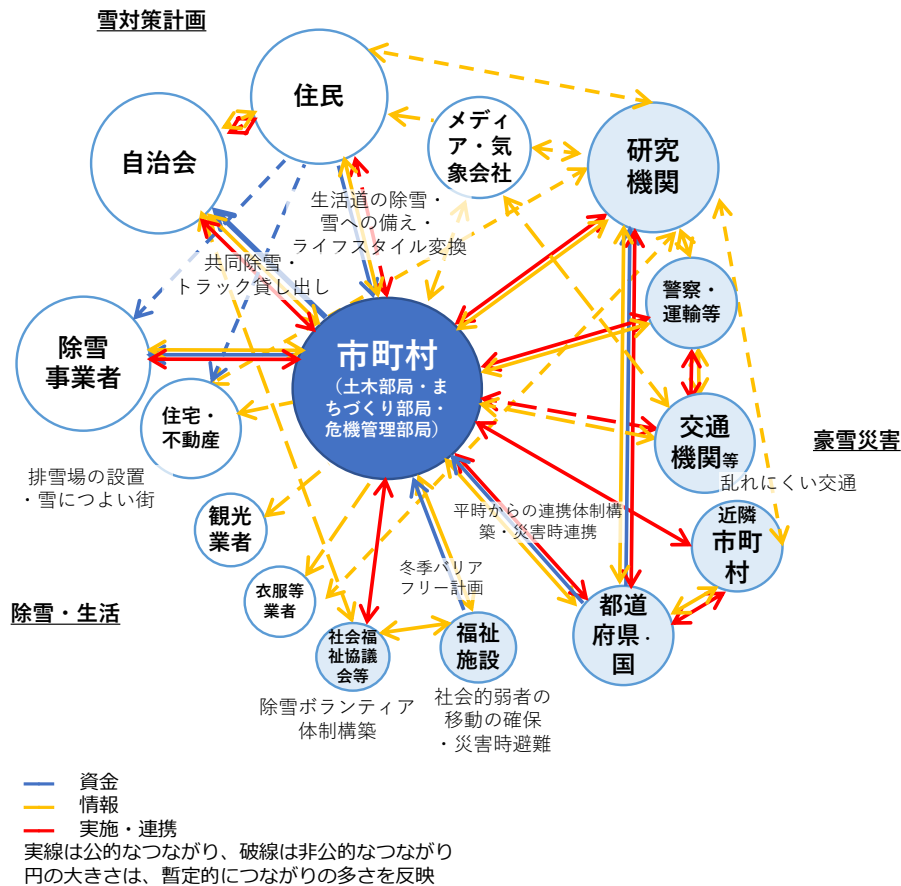


図3.8 ステークホルダー分析（雪道）

(エ) 適応策の参与型検討会（アダプテーションパスウェイワークショップ）

ワークショップを開催する前には、気候変動による影響の種類や地域に応じたその影響はどのようなものがあるかを十分に理解する必要がある。そのため、図1.17に示す啓蒙用動画「未来の天気予報北海道2100冬」を用い、さらに図1.18に示すようなイベントを開催するなどにより、住民や地域の行政担当者などの理解を進めたいうでワークショップを開催する（図1.21）。

ワークショップの目的は以下の3つです。a) 気候変動の影響の不確実性を理解し、長期的な視点で、柔軟な適応計画を立案することの必要性を認識すること、b) 自治体レベルにおける気候変動適応計画（適応策の時系列での実施順序等）について、ステークホルダー間での議論を促すこと、c) 適応計画の議論とともに、気候変動適応や地域特性の理解を促進し、ステークホルダーの価値観を共有することです。

参加者には、「班に分かれ、「△△」と「□□」への気候変動への影響と適応策を、時系列に沿って考え、ストーリーを作る」ことを目的として示す。

ワークショップの内容と典型的な進め方、時間の目安は以下の通りである。

【準備】開会・開催概要説明（5分）－ 解説アダプテーションパスウェイとは（10分）

【グループワーク】自己紹介、ファシリテーター説明（35分）－ ステップ1: 将来状況の推定（20分）－ ステップ2: 適応策カードの配置（20分）－ ステップ3: パスウェイ、ストーリーの検討（15分）班ごとまとめ（15分）

【全体まとめ】全体共有（班の代表が発表）（10分）

グループワークにおける各ステップの作業内容は以下の通りである。

ステップ1：将来状況の推定（気候変動、地域社会）では、ファシリテーターのリードの基、2030年、2050年、および2070年における気候変動の種類と大きさ（外力）を考える。次に、あらかじめ用意されたカードを使って時間軸に沿って「地域の状況変化」を整理し、それに伴う「社会課題・リスク」付せん書き出す。

ステップ2：適応策カードの配置(適応策の優先順位、タイムスケジュール)では、班ごとに用意された「適応策」カード等を使いながら、各人が考える時間軸に沿った対応(パスウェイ)をマッピングする。

ステップ3：パスウェイ、ストーリーの検討では、各対象に対してストーリーを考え、記録する。他の参加者や班の成果について、意見交換をする。



図1.17 動画「未来の天気予報北海道2100冬」(6分程度)
予測値(RCP8.5)に基づく動画(道総研 監修、日本気象協会 作成、HP公開中)

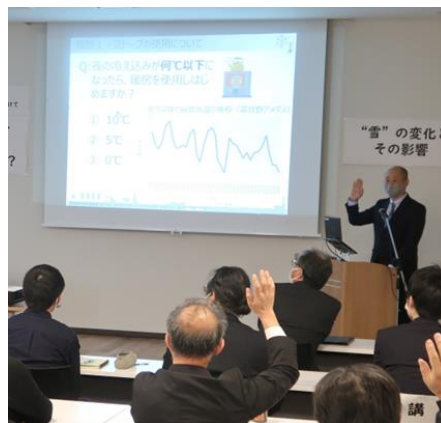


図1.18 富良野市市民セミナー(2022年10月9日)



図1.21 富良野市ワークショップ(2022年11月10日)

5-2. 環境政策等への貢献

<行政等が既に活用した成果>

富良野市に対して、本研究成果を活用して防災および農業分野における影響評価および適応策の検討結果を提出し、市の適用計画に貢献した。また北海道庁からの依頼に応じて2023年1月に道民向けセミナーで講演を行い、2023年3月には道民向けパンフレットに研究成果を反映した。さらに環境省主催令和4年度気候変動適応全国大会（2023年3月）において、講演を行い、公開された動画作成にも協力した（インタビュー）。

<行政等が活用することが見込まれる成果>

- 雪の変化などの気候変動影響評価について、科学的予測データに基づいた指標開発や普及啓発用動画作成が行われ、これによって住民や農家が気候変動影響を実感できることが明らかとなった。この取り組みにより、住民の合意を得て、適応策の参与型検討会（アダプテーションパスウェイワークショップ）を開催し、地域の適応策計画を推進することができた。この成果は、地域気候変動適応センター等の活動に大きく寄与すると考えられた。
- 雪に関する気象要素の長期変化傾向から雪の量は全体的には減少傾向にあるが、大雪の頻度はあまり減らず、湿った重い雪や雨・みぞれの頻度が増加し、積雪の融解・再凍結が増える傾向が明らかになった。また道東や海岸部では積雪期間が短くなる傾向がみられた。このような変化から、除雪方法の改善、つるつる路面や路面の穴対策などが必要となり、これらの情報は、行政機関で活用されることが期待される。
- 雪の変化などの気候変動影響に関するインパクトチェーンを作成することで、多岐にわたる影響連鎖が明らかになった。また家庭の除雪日数などの指標によって住民が気候変動影響を実感できることが明らかとなった。これらの成果を活用して、適応策の社会実装するために、住民の理解と適応策に関する合意を得ることが重要と考えられた。
- 北海道における将来の積雪の量的と質的変動の予測を1枚の図にまとめたパターンマップを作製した。これにより、現在行われている営農形態の継続可能性や新規作物導入・作型の変更などを検討するための材料を提供することができる。
- 圃場サイズレベル（50mメッシュ）での積雪情報および予想される消雪日を提供するモデルを開発した。将来の気候変動下で予想される局所的あるいは時季外れの降雪に対する農業適応策としてこのモデルが活用されることが期待できる。
- 長期にわたる観測データをもとにした凍土消失日の推定方法を作成したことにより、春期の営農計画に寄与できる。さらに、この推定方法により、過去の気温や積雪深のデータを取得すれば、凍土の消失時期の変動に関する情報を提供できる。
- 積雪地における農業適応策として、現在北海道で栽培ができていないりんごの国主力品種「ふじ」の導入可能性を調べた。温室効果ガス排出削減が行われないRCP8.5シナリオでは、2050年代に冷涼な道内内陸部産地でも栽培が可能性となることが明らかになった。
- 北海道の気候特性を考慮した気候変動影響の脆弱性評価を行い、可視化した。さらに全国版で開発した脆弱性評価・インパクトチェーンを北海道内へとローカライズする研究を行った。その結果、同じ道内でも地域特性が異なることが分かり、地域や分野を特定した適応策の重要性が強調された。また、可視化によって細分化された適応策を俯瞰でき、セクター連携の推進に寄与することが示された。
- 北海道内における適応策の調査を踏まえ、実施スケジュールなどを検討するアダプテーションパスウェイを、インタラクティブに検討する手法を開発した。また、教材・マニュアルを整備し、北海道内外の関係者が参加する参与型検討会（アダプテーションワークショップ）を通じて、手法の実用化を進めた。

5-3. 研究目標の達成状況

全体目標	目標の達成状況
<p>北海道に特徴的な気候要素(降雪・積雪)に着目し、新しい手法・概念(インパクトチェーンなど)を導入し、多分野における順応的適応を研究開発する。特に農業分野では現場レベルでの適応方針を提示する。その成果を基に、事業者・自治体等における適応策の社会実装を目指し、計画策定のための参与型のワークショップ等を試行的に開催する。さらに、将来的により多くの事業者・自治体等での適応策導入を期待し、開発されたインパクトチェーンや適応経路を含むフレームワークを、気候変動の適応を推進する組織と共有する。</p>	<p><u>目標を上回る成果をあげた。理由は以下に示す通り、サブテーマ1および2で当初予定以上の成果が、サブテーマ3で当初の予定通りの成果が得られたからである。</u>サブテーマ1では、適応策検討のためのイベント・参与型検討会の開催等において、オンライン参加が一般的となり、会場参加のみを想定していた当初の研究目標以上の参加を得られた。サブテーマ2では、当初目標としていなかった、北海道では栽培されていない作物(リンゴ「ふじ」)についても気候変動時の栽培可能性を明らかにした。サブテーマ3では目標通りの成果が得られた。</p>

サブテーマ1目標	目標の達成状況
<p>降雪・積雪に着目し、気候変動による変化とそれに伴う影響の連鎖について図示したインパクトチェーンを作成する。次にサブテーマ3と共に、重要な影響連鎖についてコストや地域性を考慮して複数の適応策案を作成し、さらにその中から影響の程度や時期に応じた適応策導入の計画立案手法を整理する。それらを基に、北海道内の市町村、団体・企業などと共に、計画策定のための参与型のワークショップ等を試行的に開催する。また適応策導入の計画策定に至るフレームワークを道庁や地域気候変動適応センター等と共有する。</p>	<p><u>目標を上回る成果をあげた。理由は以下に示す通り、1-5)で当初の予定通りの成果を、6)で当初予定以上の成果が得られたからである。</u></p> <p>1) 雪の変化およびその影響に関する情報の収集・解析については、コロナ禍の影響を受け、現地での聞き取り調査などはスケジュール調整を含め、難しい場合が多かったが、多くの機関でWeb会議などのシステム導入が行われたことから、オンラインによる聞き取り調査が可能となり、当初の研究目標通りの成果を得た。2) 積雪調査による積雪の空間分布の把握においては、移動などが許可されていた時期での調査ができ、当初の目標を達成できた。また3) 衛星画像解析による積雪期間の変化、4) インパクトチェーン作成、5) 雪の変化に関する指標開発においても、当初の研究目標を達成できた。6) 適応策検討のためのイベント・参与型検討会の開催と手法開発においては、特にイベントにおいてはオンライン参加が一般的となり、会場参加のみを想定していた当初の研究目標以上の参加を得られた。またセミナー開催およびパンフレット作製など、研究成果を北海道気候変動適応センターと共有した。</p>

サブテーマ2 目標	目標の達成状況
<p>北海道全域を対象として、予想される積雪変動を5区分（積雪増・湿雪化、積雪増・乾雪化、積雪減・湿雪化、積雪減・乾雪化、変化なし）する。各区分での正負の農業影響を明らかにし、適応方針を策定する。さらに、約50mメッシュで積雪深と消雪日を推定し、春季の適切な農作業管理を可能とする。これらの成果についてサブテーマ1及び3と協力し、農業関係団体への普及を実施する。</p>	<p><u>目標を上回る成果をあげた。理由は以下に示す通り、1-3) で当初の予定通りの成果を、4) で当初目標としていなかった成果が得られたからである。</u></p> <p>1) 今世紀末までに予想される積雪の質的変動と量的変動を重ね合わせた区分図を作成、正負の影響を明らかにした。2) 圃場サイズレベルである50mメッシュでの積雪・消雪日推定マップ作成方法を開発した。3) 春季の圃場作業開始時期を規定する十勝地方の凍土消失時期について推定法を開発し、長期的な変動傾向を明らかにした。4) 当初目標としていなかった、北海道では栽培されていない作物（リンゴ「ふじ」）についても気候変動時の栽培可能性を明らかにした。</p>

サブテーマ3 目標	目標の達成状況
<p>北海道における気候リスク評価および適応策ローカライゼーションに関する理論的研究を実施し、対象地域における地域社会の将来予測と、それがもたらす気候変動の影響予測を実施し、その上で北海道に合った適応経路に関する研究を行い、サブテーマ1と共に北海道における地域気候変動適応策立案に貢献する。そのためのインパクトチェーンや適応経路をそれぞれの分野とインタラクティブに開発する。また開発成果は、国内他地域や海外での活用を目指し、国立環境研究所気候変動適応センターなど国内適応研究や、気候変動適応情報プラットフォームなどの情報基盤と共有する。</p>	<p><u>目標どおりの成果をあげた。理由は以下に示す通り、1-4) で当初の予定通りの成果が得られたからである。</u></p> <p>1) 寒冷積雪地における地域社会他の将来予測では、SSPシナリオによる将来人口予測を1kmメッシュにダウンスケールした。この予測に基づき空き家予測も含め土地利用予測を行った。2) 気候変動影響インパクトチェーンとローカライゼーションでは、3分野4課題の気候変動影響インパクトチェーンのローカライゼーションを行った。脆弱性・気候リスク評価と適応策データベース開発を行った。3) 社会システムへの影響連鎖評価では、3分野のステークホルダーマッピングを行い、適応策実施に向けた地域社会における諸課題を整理した。4) インタラクティブな適応経路開発では、アダプテーションパスウェイを、ステークホルダーが参加したグループワークで検討する手法を開発した。地域適応センターに情報提供を行うとともに、A-PLATにマニュアル、教材などの資料を掲載する予定である。</p>

6. 研究成果の発表状況

6-1. 査読付き論文等

<件数>

8件

<主な査読付き論文>

- 1) 戸川卓哉、高野剛志、森田紘圭、大場 真、ESTOQUERONALD CANERO、近藤美沙希：土木学会論文集 G (環境)、76、5、I_461-I_470 (2020) 気候変動が住民の生活の質 (QOL) に与える影響評価フレームワークの提案.
- 2) 野口 泉、山口高志、濱原和広、芥川智子、鈴木啓明、長谷川祥樹、小野 理：第 37 回寒地技術シンポジウム論文集、81-84、(2021) 北海道における気候変動に関する研究-降雪・積雪の変化傾向-.
- 3) M. Ooba, S. Nakamura, T. Togawa: *Global Environmental Research*, 24, 191-198 (2021) Promoting local revitalization to solve issues on degraded forests in Japan: A case study in Oku-Aizu, Fukushima.
- 4) Estoque, R.C., Ishtiaque, A., Parajuli, J., Athukorala, D., Rabby, Y. W., Ooba, M. : *Ambio*, 52, 376-389, <https://doi.org/10.1007/s13280-022-01806-z> (2022) Has the IPCC' s revised vulnerability concept been well adopted?.
- 5) Estoque, R.C., Ooba, M., Togawa, T., Yoshioka, A., Gomi, K., Nakamura, S., Tsuji, T., Hijioka, Y., Watanabe, M., Kitahashi, M. : *Reg Environ Change* 22, 133, <https://doi.org/10.1007/s10113-022-01982-4> (2022) Climate impact chains for envisaging climate risks, vulnerabilities, and adaptation issues.
- 6) 小南靖弘、井上 聡、山口高志：日本農業気象学会誌「生物と気象」、23、1-8、<https://doi.org/10.2480/cib.J076> (2023) 北海道における積雪状況と春先の圃場乾湿の将来予測.
- 7) 井上 聡、小南靖弘：日本農業気象学会誌「生物と気象」、23、29-34、<https://doi.org/10.2480/cib.J077> (2023) (in press) 気候変動適応策としてのリンゴ「ふじ」の北海道導入可能性.

6-2. 知的財産権

なし

6-3. その他発表件数

査読付き論文に準ずる成果発表	2件
その他誌上発表 (査読なし)	2件
口頭発表 (学会等)	35件
「国民との科学・技術対話」の実施	23件
マスコミ等への公表・報道等	9件
本研究に関連する受賞	0件

7. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

8. 研究者略歴

研究代表者

野口 泉

北海道大学大学院工学研究科中退、博士（農学）、地方独立行政法人 北海道立総合研究機構 産業技術環境研究本部 エネルギー・環境・地質研究所 環境保全部長、現在、地方独立行政法人北海道立総合研究機構 産業技術環境研究本部 エネルギー・環境・地質研究所 環境保全部 研究参事

研究分担者

1) 濱原 和広

北海道大学大学院地球環境科学研究科博士課程中退、現在、地方独立行政法人 北海道立総合研究機構 産業技術環境研究本部 エネルギー・環境・地質研究所 環境保全部 主査

2) 山口 高志

北海道大学大学院地球環境科学研究科卒業、博士（地球環境）、現在、地方独立行政法人 北海道立総合研究機構 産業技術環境研究本部 エネルギー・環境・地質研究所 環境保全部 主査

3) 鈴木 啓明

東北大学大学院理学研究科地学専攻修士課程修了、北海道庁、現在、地方独立行政法人 北海道立総合研究機構 産業技術環境研究本部 エネルギー・環境・地質研究所 環境保全部 研究主任

4) 長谷川 祥樹

北海道大学大学院工学研究科修了、現在、地方独立行政法人 北海道立総合研究機構 産業技術環境研究本部 エネルギー・環境・地質研究所 環境保全部 研究主任

5) 芥川 智子

北海道大学大学院理学研究科修了、地方独立行政法人 北海道立総合研究機構 産業技術環境研究本部 エネルギー・環境・地質研究所 環境保全部 研究主幹、現在、地方独立行政法人北海道立総合研究機構 産業技術環境研究本部 エネルギー・環境・地質研究所 研究推進室 主幹

6) 小野 理

京都大学大学院農学研究科中退、地方独立行政法人 北海道立総合研究機構 産業技術環境研究本部 エネルギー・環境・地質研究所 循環資源部 研究主幹、現在、地方独立行政法人北海道立総合研究機構 産業技術環境研究本部 エネルギー・環境・地質研究所 循環資源部 部長

7) 鮫島 良次

北海道大学農学部卒業、博士（農学）、現在、国立大学法人北海道大学大学院農学研究院 教授

8) 平野 高司

北海道大学大学院農学研究科修士課程修了、博士（農学）、現在、国立大学法人北海道大学大学院農学研究院 教授

9) 岡田 啓嗣

北海道大学大学院農学研究科修了、博士（農学）、現在、国立大学法人北海道大学大学院農学研究院 講師

10) 井上 聡

北海道大学大学院農学研究科修了、博士（農学）、国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構 北海道農業研究センター 上級研究員、現在、国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構 東北農業研究センター 水田輪作研究領域 ICT 活用技術グループ長補佐

11) 小南 靖弘

九州大学農学部卒業、博士（学術）、国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構 中央農業総合研究センター上級研究員、現在、国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構 北海道農業研究センター 寒地畑作研究領域 環境病虫害グループ長

12) 木村 賢人

北海道大学大学院農学研究科修了、博士（農学）、現在、国立大学法人 北海道国立大学機構 帯広畜産大学 准教授

13) 大場 真

北海道大学大学院地球環境科学研究科単位取得済み退学、博士（地球環境科学）、国立研究開発法人国立環境研究所気候変動適応センター 主席研究員、現在、学校法人東北工業大学 ライフデザイン学部 生活デザイン学科 教授

14) 戸川 卓哉

名古屋大学大学院環境学研究科単位取得済み退学、博士（工学）、現在、国立研究開発法人国立環境研究所 福島地域協働研究拠点 主任研究員

14) 肱岡 靖明

東京大学大学院工学系研究科博士課程修了（工学博士）、現在、国立研究開発法人 国立環境研究所 気候変動適応センター 副センター長

II. 成果の詳細

II-1 雪に関する気候変動影響の評価とその指標開発

地方独立行政法人 北海道立総合研究機構

産業技術環境研究本部	エネルギー・環境・地質研究所	環境保全部	研究参事	野口 泉
産業技術環境研究本部	エネルギー・環境・地質研究所	環境保全部	主査	濱原 和広
産業技術環境研究本部	エネルギー・環境・地質研究所	環境保全部	主査	山口 高志
産業技術環境研究本部	エネルギー・環境・地質研究所	環境保全部	研究主任	鈴木 啓明
産業技術環境研究本部	エネルギー・環境・地質研究所	環境保全部	研究主任	長谷川 祥樹
産業技術環境研究本部	エネルギー・環境・地質研究所	研究推進室	主幹	芥川 智子
産業技術環境研究本部	エネルギー・環境・地質研究所	循環資源部	部長	小野 理

[要旨]

本研究では、気候変動による降雪・積雪に関する変化の影響についての適応策の社会実装に向けた手法を開発することを目的とした。具体的には、地域ごとに異なる気候変動の影響を実測および科学的予測データ等に基づいて評価し、降雪・積雪は多くの地域で減少するが、大雪はあまり減らないこと、湿った重い雪が増えること、積雪期間が短くなること、融解・再凍結によりつるつる路面や舗装道路の穴が増えることなどを示し、その影響連鎖について解析した。また、住民の合意形成に向け、除雪日数などの実感を伴う指標を開発した。その成果を北海道内の市町村などにおいて、イベントおよび動画作成により情報提供を行った。さらに、モデル地域である富良野市等で、住民への情報提供に加え、手法開発を行ったサブテーマ3の協力を得て、気候変動影響への適応の道筋を示す適応経路を考慮した適応策導入計画立案のためのワークショップを開催した。

1. 研究開発目的

本研究は、降雪・積雪および寒さという北海道に特徴的な冬の気候要素に着目し、気候変動の影響連鎖（インパクトチェーン：Impact Chain）や適応経路（アダプテーションパスウェイ：Adaptation Pathway）などの新しい手法・概念を導入し、多分野における順応的適応を研究開発するものである。サブテーマ1では、道内の豊富な研究蓄積・ネットワークを活かし、北海道内の市町村において、適応計画立案などの適応策の社会実装に向けた手法を開発することを目的とした。

2. 研究目標

降雪・積雪に着目し、気候変動による変化とそれに伴う影響の連鎖について図示したインパクトチェーンを作成する。次にサブテーマ3と共に、重要な影響連鎖についてコストや地域性を考慮して複数の適応策案を作成し、さらにその中から影響の程度や時期に応じた適応策導入の計画立案手法を整理する。それらを基に、北海道内の市町村、団体・企業などと共に、計画策定のための参与型のワークショップ等を試行的に開催する。また適応策導入の計画策定に至るフレームワークを道庁や地域気候変動適応センター等と共有する。

3. 研究開発内容

サブテーマ1では北海道立総合研究機構が以下について実施した。

- ① 雪の変化等とその影響に関する情報を収集・解析し、多分野におけるインパクトチェーンを構築する。また気候変動影響を住民が実感できるよう指標化し、地域単位で明らかにする。
- ② ①を北海道内の市町村、団体・企業、住民に提供し、地域適応計画立案等、気候変動適応の推進に資する参与型での支援に関する手法開発を行う。

具体的には1) 雪の変化およびその影響に関する情報の収集・解析、2) 積雪調査による積雪の空間分布の把握（一部サブテーマ2と共同）、3) 衛星画像解析による積雪期間の変化、4) インパクトチェ

ーン作成、5) 雪の変化に関する指標開発、6) 適応策検討のためのイベント・参与型検討会の開催と手法開発（サブテーマ3と共同）である。

4. 結果及び考察

1) 雪の変化およびその影響に関する情報の収集・解析

印刷物および電子媒体の調査を行い、論文・報告書・書籍、講演・学会発表等403件、新聞・Web掲載等1223件の情報を収集し、気象変化、その影響、適応策、緩和策に分類してデータベース化した^{1,2)}。また市町村における気候変動適応策の推進状況の把握のために、6市、1町で聞き取り調査を実施し、また15の市町村の温暖化対策や気候変動適応策計画、環境基本条例などの情報を収集した。さらに北海道気候変動対策課と協力して、全道179市町村に対するアンケート調査を行い（2021年7月）、雪や冬の変化に伴い、近年実感している影響や将来想定される影響について把握した。

本研究では、予測データの解析を専門とする研究者など6名に対して聞き取り調査を行い、表1.1に示す8種類の将来予測ダウンスケーリングデータについて³⁾、雪の変化に使用可能なデータと項目についてバイアス補正などを考慮し、検討を行った。その結果、表1.2に示すように、ゼロクロッシング日数の算出などにあたっては「地球温暖化予測情報第9巻データセット」を使用し、防災科学技

表1.1 解析に用いた将来予測データセット

データセット	気象要素の項目数 (日平均気温、降水量等)	GCM (モデル) の数	将来シナリオ	アンサンブル数 または海面水温パターン数	時間数 [データの時間単位]	格子間隔
国立環境研究所 2020 データセット (CMIP6)	8	5	RCP8.5, RCP4.5, RCP2.6	1	365日×85年(2015-2100) [日毎]	1 km
国立環境研究所 2019 データセット (CMIP5)	7	4	RCP8.5, RCP2.6	1	365日×95年(2005-2100) [日毎]	1 km
農研機構地域気候シナリオデータセット	7	5	RCP8.5, RCP2.6	1	365日×95年(2005-2100) [日毎]	1 km
北海道1km統計的ダウンスケーリングデータ	8	1	RCP8.5	4	365日×20年(2081-2100) [日毎]	1 km
地球温暖化予測情報第9巻データセット	6	1	RCP8.5, RCP2.6	4	365日×20年(2076-2095) [日毎]	5 km
創生・統合プログラム 5km格子 NHRCM 日本域気候予測データセット	37	1	RCP8.5	4	2×24時間×365日×20年(2076-2095) [30分毎]	5 km
創生・統合プログラム 2km格子 NHRCM 日本域気候予測データセット	45	1	RCP8.5	4	24時間×365日×20年(2076-2095) [1時間毎]	2 km
d4PDF	14	6	RCP8.5, RCP2.6	15 (RCP8.5), 9 (RCP2.6)	365日×60年(2051-2110, 2031-2090) [時間毎]	20 km

表1.2 解析した雪・冬の指標等とそれに用いたダウンスケーリングデータセット

雪・冬の指標等	ダウンスケーリングデータ
未来の天気予報	気象庁気候変動予測情報第9巻 気象研5km力学的ダウンスケーリング
ゼロクロッシング日数・気温別日数	気象庁気候変動予測情報第9巻
除雪日数(日降雪量10cmを基準)	気象庁気候変動予測情報第9巻
暖房の使用を始める日	気象研5km力学的ダウンスケーリング
防寒具の使用を始める日	気象研5km力学的ダウンスケーリング
夏→冬タイヤへの交換時期	気象研5km力学的ダウンスケーリング
自宅周辺の朝の除雪回数(ピンポイント)	気象研5km力学的ダウンスケーリング
イベントに適した積雪日数(積雪30cmを基準)	気象研5km力学的ダウンスケーリング
積雪深別日数	気象研5km力学的ダウンスケーリング
新雪日数(積雪30cmかつ、新雪またはこしまり雪5cmを基準)	気象研5km力学的ダウンスケーリング
降雪・降雨日数	国立環境研究所2020 CMIP6

術研究所雪氷防災研究センターの協力により導入した積雪変質モデル「SNOWPACK」を用いて算出した指標などの場合は、「創生・統合プログラム5km格子NHRCM日本域気候予測データセット」を使用した。また、降雪・降雨日数の算出は「国立環境研究所2020データセット（CMIP6）」を用いた。

2) 雪に関する気象要素についての長期変化傾向の解析

北海道内の気象データ（1961～2021年1、2月の北海道内14の気象官署における気温、湿度、降水量、積雪深の日毎の値および1991年以降の1時間毎の値）を解析し、冬季の道内の雪に関する気象要素について、5か年の移動平均値を用いて長期変化傾向の解析を行った⁴⁾。その結果、表1.3および図1.1～4に示す通り、気温、絶対湿度、ゼロクロッシング日数（1日の内に最低気温が氷点下かつ最高気温が0℃を上回る日数）、濡れ雪日数（雨、みぞれ及び湿り雪の推定日数）は有意な増加傾向を示し、相対湿度、降水量、最大積雪深、2006年以降の積算降雪深、雪水比は有意な減少傾向を示す地点が多く、北海道内の多くの地点で降雪・積雪は全体的に減少傾向であること、また重い濡れた雪が増え、気温が上昇し、融雪・再凍結を繰り返す場合が多くなりつつあることが示された。この結果、重い雪で除雪作業が困難になることや、着雪の増加、積雪荷重の増加による建築物損壊や倒木の増加、落雪事故の増加、つるつる路面が増えることによる転倒者の増加と高齢者の外出減少などが、また融雪・再凍結により増える道路の穴（ポットホール）による事故や車の損壊の増加なども懸念された。一方で内陸部の雪はあまり減らないことなどから、内陸部のスキー場などへの影響は限定的と考えられた。

表1.3 1961～2021年1、2月の北海道内の気象官署における5か年の移動平均値の変化傾向

	気温 °C	絶対湿度 g/m ³	相対湿度 %	降水量 mm	最大積雪深 cm	積算降雪深 cm		雪水比 cm/mm		ゼロクロッシング 日数 日	濡れ雪 日数 日
						-2005 2006-	-2005 2006-				
稚内	+	+	-	-	-	-	-	-	-	+	+
旭川	+	+	-	-	-	+	-	+	-	+	+
留萌	+	+	-	-	-	-	-	+	-	+	+
岩見沢	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	+
札幌	+	+	-	-	-	-	-	-	-	+	+
倶知安	+	+	-	-	-	-	-	+	-	+	+
網走	+	+	-	-	+	-	-	+	-	+	+
根室	+	+	-	-	+	-	-	+	-	+	+
釧路	+	+	-	-	-	-	-	-	-	+	+
帯広	+	+	-	-	-	-	-	-	-	+	+
室蘭	+	+	+	-	-	-	-	-	-	+	+
浦河	+	+	-	-	-	-	-	-	-	+	+
函館	+	+	-	+	-	-	-	-	-	+	+
江差	+	+	-	-	-	-	-	-	-	+	+

+：危険率1%で有意な増加傾向、-：危険率1%で有意な減少傾向を示す。

降雪深に関わる項目は2006年から自動測定値となり、それ以前の目視による方法と区別した

また北海道内の気象官署およびアメダス官署153地点において、「地球温暖化予測情報第9巻データセット」の予測データ（バイアス補正済み）を用いて10～5月の月別ゼロクロッシング日数とその時期的分布について解析した。その結果、過去（1980～1999年度）においては、いずれの地点も初冬と初春にゼロクロッシング日数が多い二山形を示した。しかし、RCP2.6の将来（2076～2095年度）では、気象官署の江差、浦河などの7地点で真冬にゼロクロッシング日数が多い一山型になり（図1.5）、RCP8.5の将来（2076～2095年度）では内陸部などを除く109地点で一山型になると予想された。RCP2.6で一山型になった地点では、RCP8.5において最低気温が0℃以上となる日数の増加に伴い、ゼロクロッシング日数は42～74%と減少することが示された。また、東北の山形や長岡では過去の実測値で既に一山型であり、青森は1980～1999年度では二山形であったが、2000～2020年では一山型を示した2（図1.6）。これらのことから、北海道においても将来は現在の東北地域と同様に除雪・排雪だけでなく、消雪パイプ等の融雪のためのインフラ整備が望まれることが考えられた^{5～7)}。



図1.1 1961～2021年1、2月の北海道内の気象官署における気温の変化傾向
(赤枠は有意な増加傾向である。)

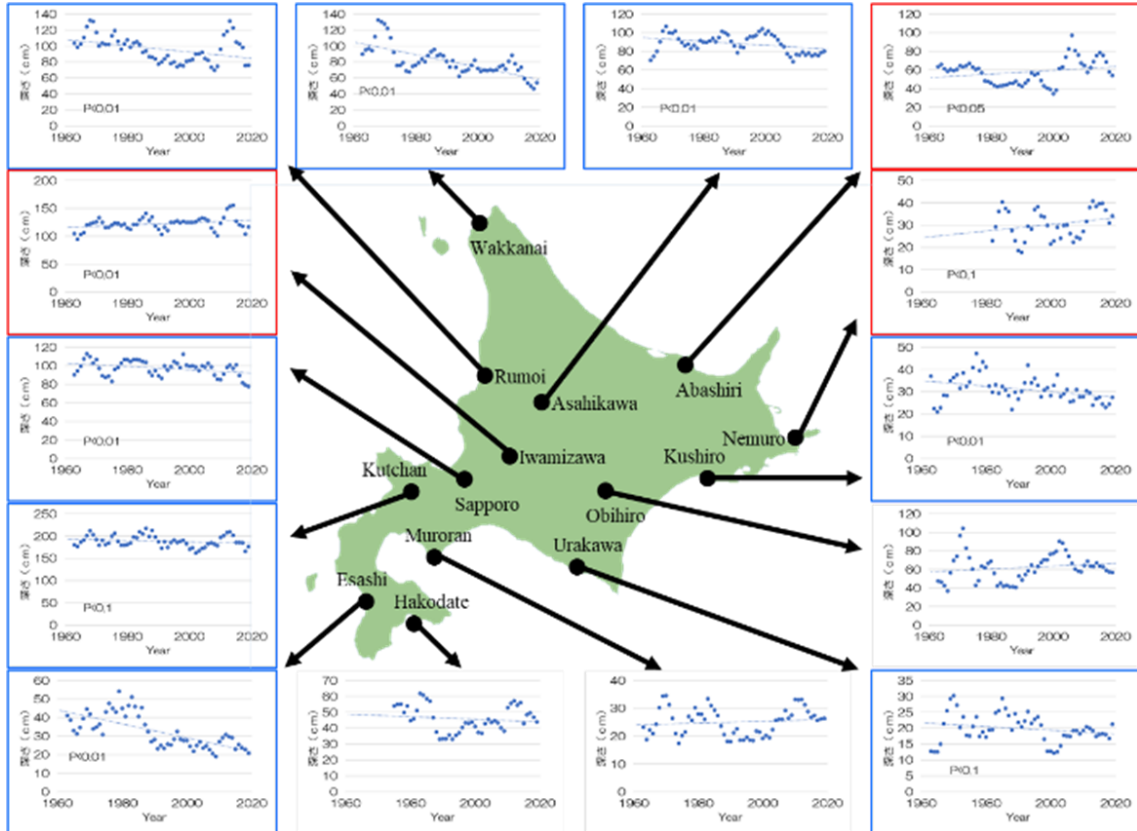


図1.2 1961～2021年1、2月の北海道内の気象官署における最大積雪深の変化傾向
(青枠は有意な減少、赤枠は有意な増加傾向である。)



図1.3 1961～2021年1、2月の北海道内の気象官署における濡れ雪（曇または雨）の変化傾向（赤枠は有意な増加傾向である。）



図1.4 1961～2021年1、2月の北海道内の気象官署におけるゼロクロッシング日数の変化傾向（赤枠は有意な増加傾向である。）

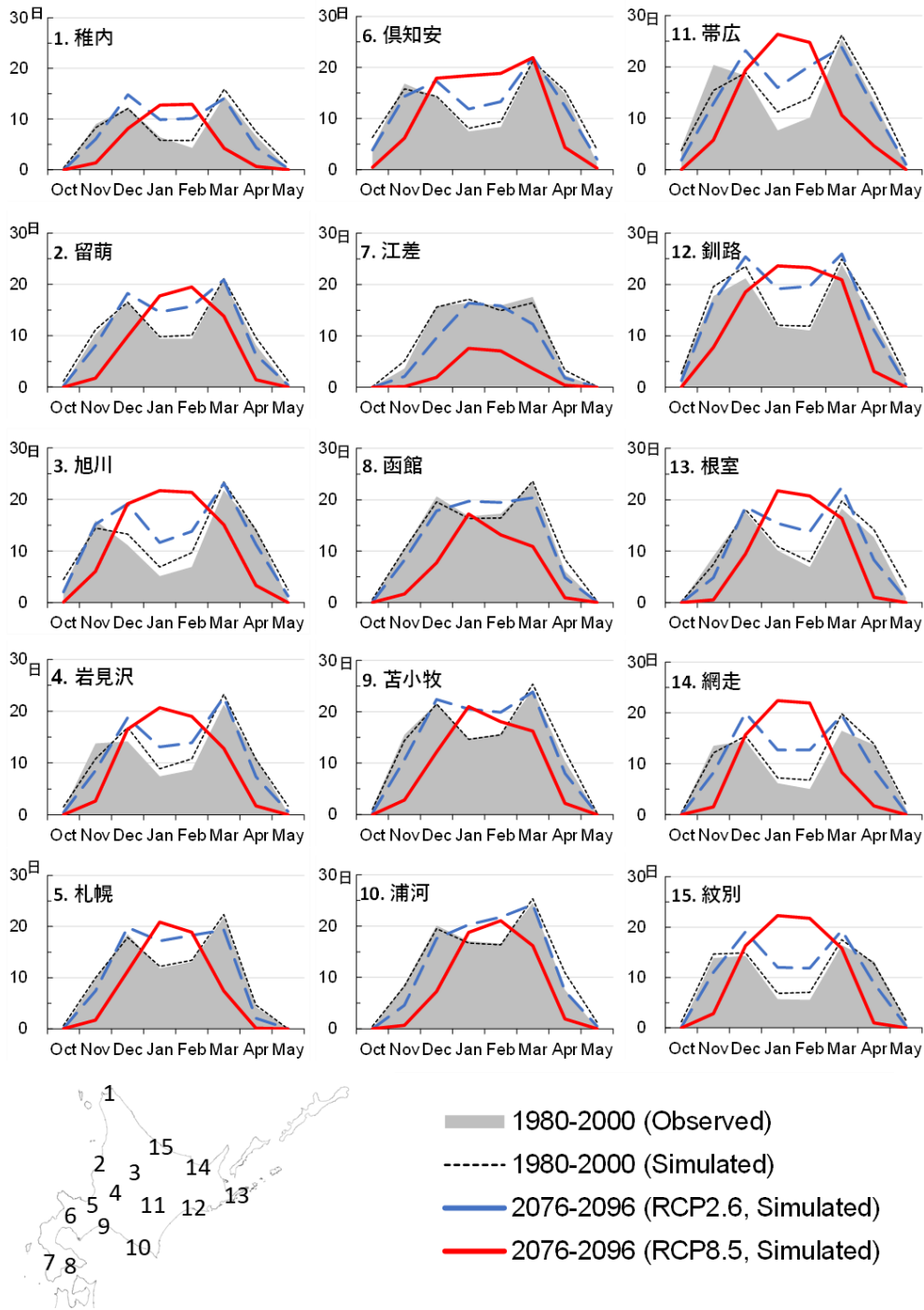


図1.5 10～5月の北海道内の気象官署におけるゼロクロッシング日数の変化傾向

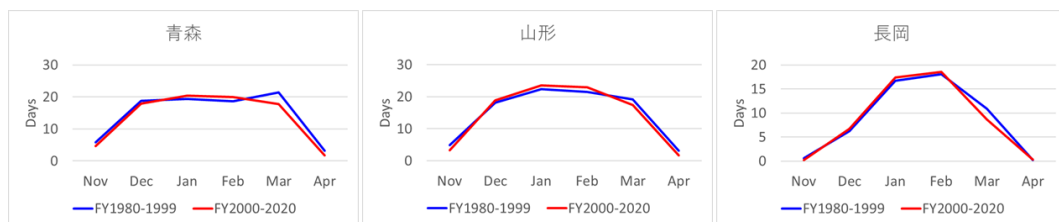


図1.6 1981～1999年および2000年～2020年の東北におけるゼロクロッシング日数の変化傾向 (青森、山形および長岡)

3) 積雪調査による積雪の空間分布の把握（一部サブテーマ2と共同）

全道の積雪調査を、2021年2～3月にかけて56地点で実施した。この調査はサブテーマ2と共同で行った。過去の調査結果（1996、2000、2004、2008、2012、2016年）と併せて解析すると、現地測定結果の適合度は、アメダスの空間補間と比べて、高度補正が行われている農研機構メッシュ農業気象データ（農研メッシュ値）のほうが高いことが明らかとなった（図1.7）。これは将来の積雪水量予測のモデル検証（過去～現在の値を用いた検証）に有効な知見であり⁸⁾、さらには融雪水流出やその時の濁度推定、また積雪に含まれる汚染物質把握などに関する活用が期待される。

また2021年の積雪水量、積雪深、積雪密度について農研メッシュ値を用いて分布図を作成した（図1.8）。その結果、積雪水量と積雪深はよく似た分布を示し、道北および日本海側の山間部で積雪水量が多く、積雪深も大きい傾向にあった。一方、密度は、積雪深が小さく、積雪水量が少ない海岸部などで大きい傾向があるが、道東では積雪深が小さく、積雪水量が少なくても密度が低い地域がみられた。

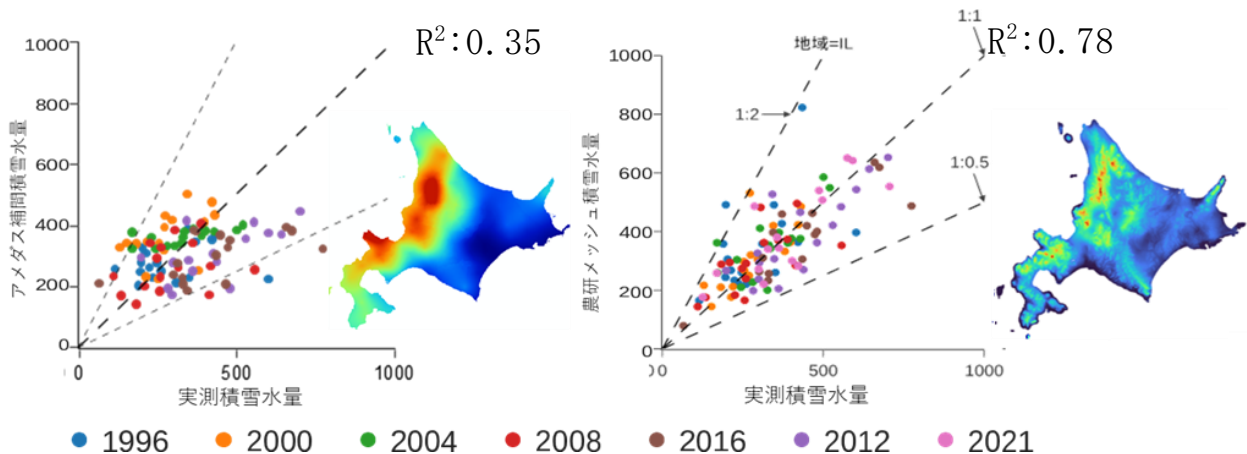


図1.7 積雪水量の実測値と農研メッシュ値の相関（左：アメダスデータ、右：農研メッシュ値）

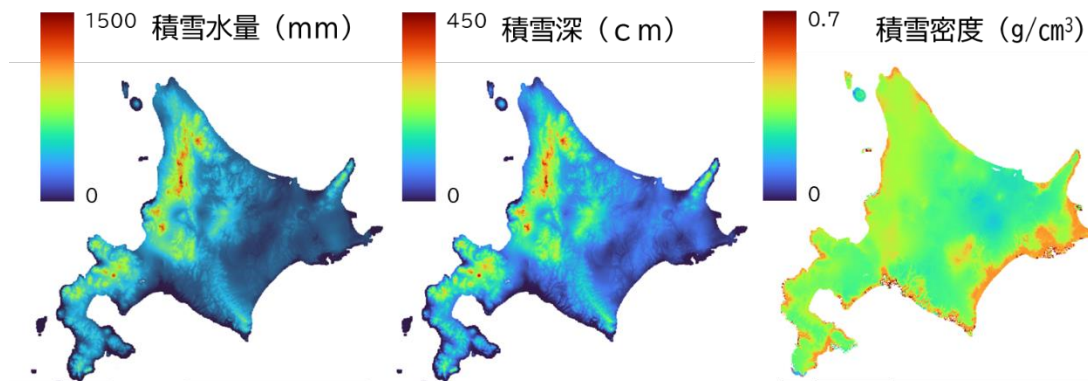


図1.8 2021年北海道内の積雪水量、積雪深、積雪密度の分布図

注) 農研機構メッシュ農業気象データは農業・食品産業技術総合研究機構が運用する気象情報サービスで、約1kmグリッドの国土数値情報3次メッシュフォーマットで日別気象データを提供している。

4) 衛星画像解析による積雪期間の変化

2000-2019年の衛星画像（MODIS）から得られる積雪の有無を北海道全体をカバーするヘキサグリッドに設定し、それぞれのグリッドについて空間自己相関を考慮した状態空間モデルを構築した。このモデルを用いて、山間部を含む全道の積雪開始、終了および積雪期間の変化について解析した。その結果、図1.9および10に示す通り、主に道東で積雪開始日が遅く、積雪終了日が早くなり、積雪期間が短くなる傾向が認められた⁸⁾。なお、アメダスデータ（1983～2021年）の解析では、図1.11に示すように海岸部でも積雪日数は減少しており、より長期の解析では、さらに積雪期間が短くなる地域があることが考えられた¹⁰⁾。

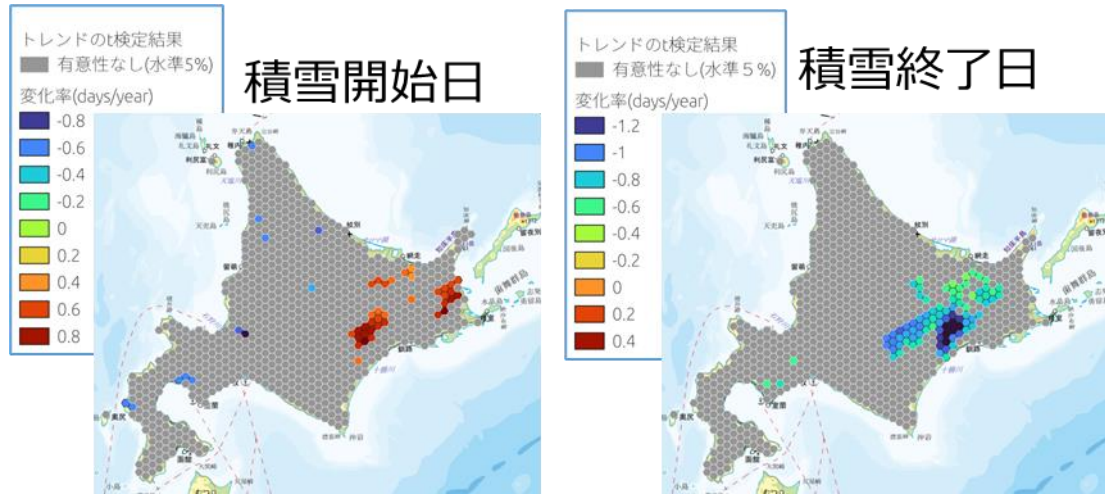


図1.9 積雪開始日と積雪終了日の変化

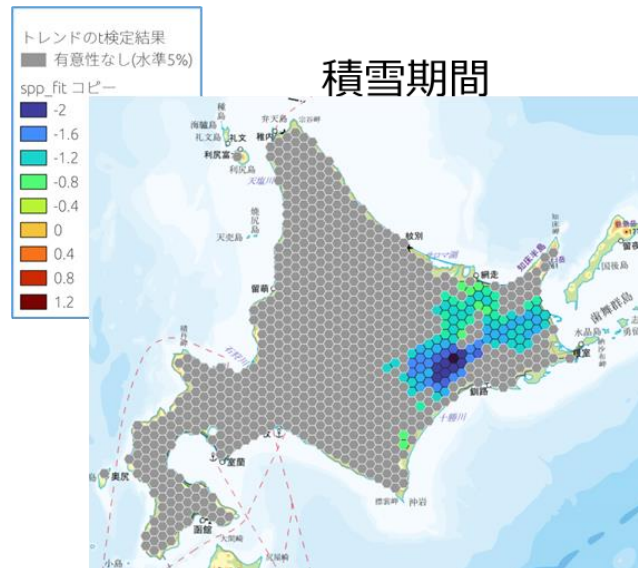


図1.10 積雪期間の変化

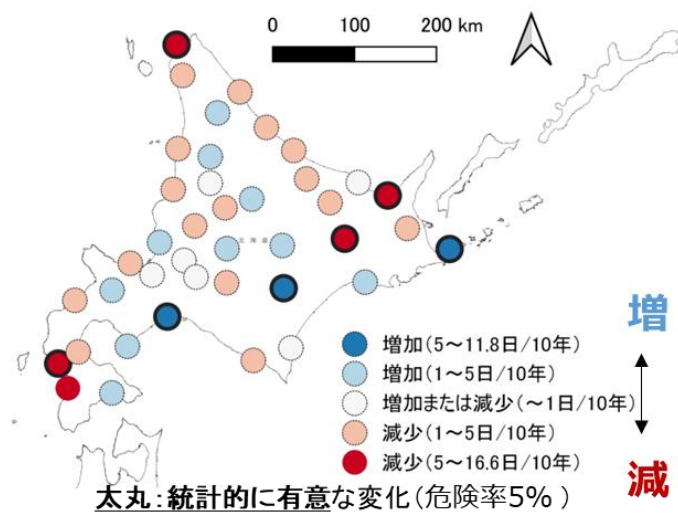


図1.11 アメダスデータ (1983~2021年) における積雪日数の変化

5) インパクトチェーンの作成と指標開発

「1) 雪の変化およびその影響に関する情報の収集・解析」における情報収集結果をまとめ、雪の変化に関する影響及び適応について図1.12に示すインパクトチェーン概略図を作成し、影響要素間の関連性の分析を行った^{14, 15)}。その結果、「雪の減少」により「除雪コスト削減」となる反面、「除雪作業の経済活動も減少」となり、「除雪作業員/熟練者の不足」に繋がり、「大雪時の除雪不足」、「交通障害の長期化」に発展する連鎖が生じることが示された。これらの結果はサブテーマ3に提供され、地域に応じてローカライズされ、各テーマ毎により詳細なインパクトチェーンが作成された。

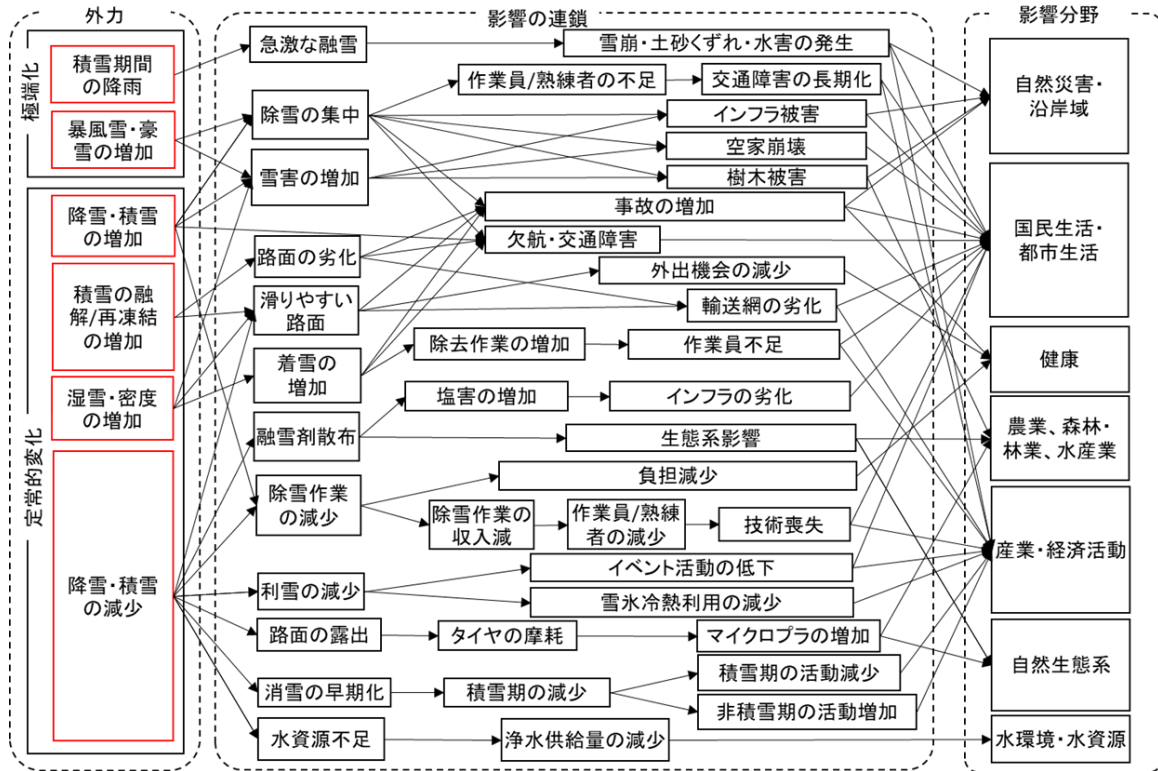


図1.12 雪の変化およびその影響に関するインパクトチェーン

6) 雪の変化に関する指標開発

民間委託（（一財）日本気象協会北海道支社）による算出結果、また国立研究開発法人 防災科学技術研究所 雪氷防災研究センターの協力によって導入した積雪変質モデル(SNOWPACK)による算出結果から、除雪日数（日降雪量10cmを基準）、暖房の使用を始める日、防寒具の使用を始める日、夏→冬タイヤへの交換時期、自宅周辺の朝の除雪回数、イベントに適した積雪日数（積雪30cmを基準）などの指標開発を地域ごとに行った。さらにそれら指標の変動傾向について過去と予測される未来の変化についての解析結果をまとめた¹²⁻¹⁵⁾。

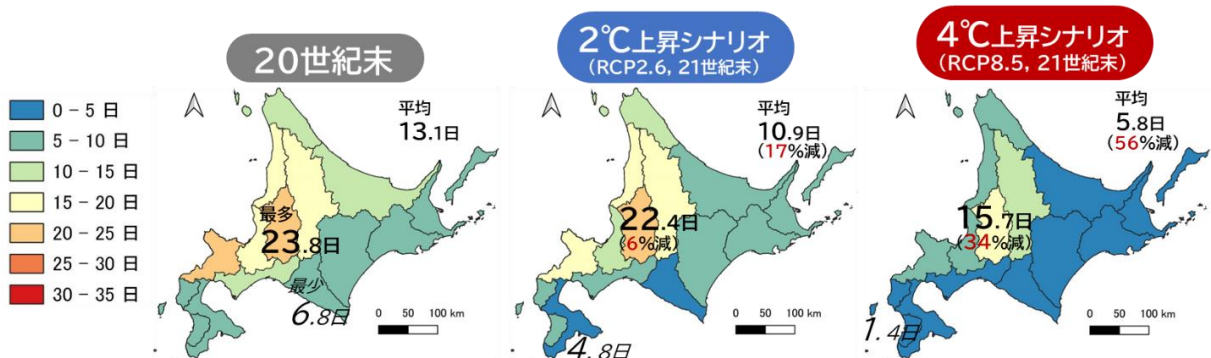


図1.13 20世紀末とRCP2.6および8.5（2076～2095年度）の除雪日数

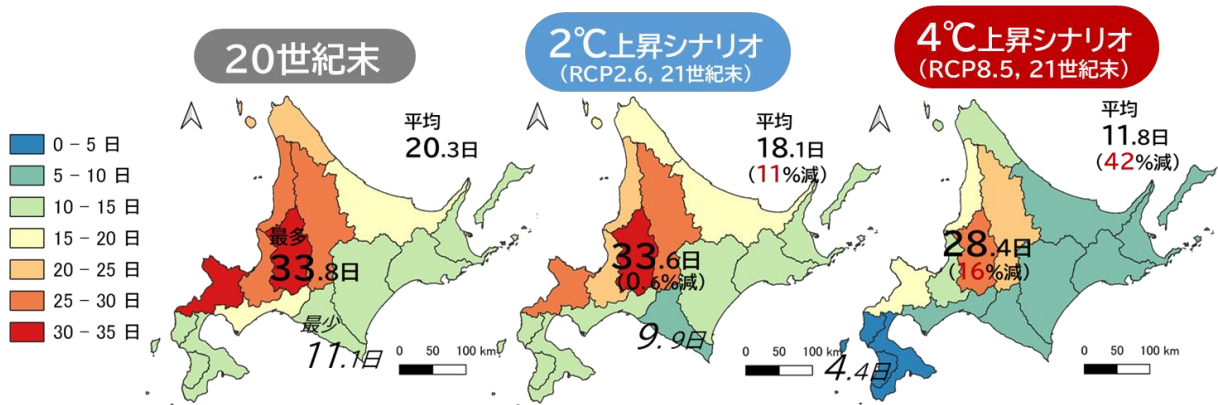


図1.14 多雪年（10年に1度）の20世紀末とRCP2.6および8.5（2076～2095年度）の除雪日数

例えば、図1.13では振興局ごとの年平均除雪日数を示し、図1.14では10年に一度の多雪年のみを対象とした平均の除雪日数を示した。対象期間は20世紀末（1980～1999年度）と21世紀末（2076～2095年度）のRCP2.6および8.5である。これらの結果から、平均的には全道の多くの地域で除雪日数が減少すると予測されるが、多雪年や内陸部ではあまり減少しない傾向があることが示唆された。

7) 社会実装に向けた適応策検討手法の開発（サブテーマ3と共同）

収集した情報から冬の気候変動が雪や寒さに及ぼす影響とその適応策についてまとめた。例えば、除雪に関しては図1.15に示すように多様な情報提供が必要なが考えられた。また、除雪全体においても図1.16に示すように効果・利便性とコストについて検討を行った^{14, 15)}。

また図1.17に示すように住民に気候変動による雪や寒さの変化をわかりやすく周知するために、「未来の天気予報北海道2100冬」という動画を制作し¹⁶⁾、図1.18および19に示すイベントや図1.20に示すホームページを通じて気候変動影響評価結果に基づいた雪の変化に対する実感を伴った情報提供を行っている。また、北海道気候変動適応センターが発行する気候変動適応のハンドブックに成果を提供した¹⁷⁾。さらに、市町村などで気候変動適応策の推進状況を確認し、サブテーマ3と共同で実現性の高い適応策をカード化し、図1.21に示すように社会実装に向けた適応策導入のための参与型検討会（ワークショップ）を開催し、適応への道筋を示す適応経路の概念を導入した適応策検討手法の開発を行った。



図1.15 適応策としての情報提供の検討

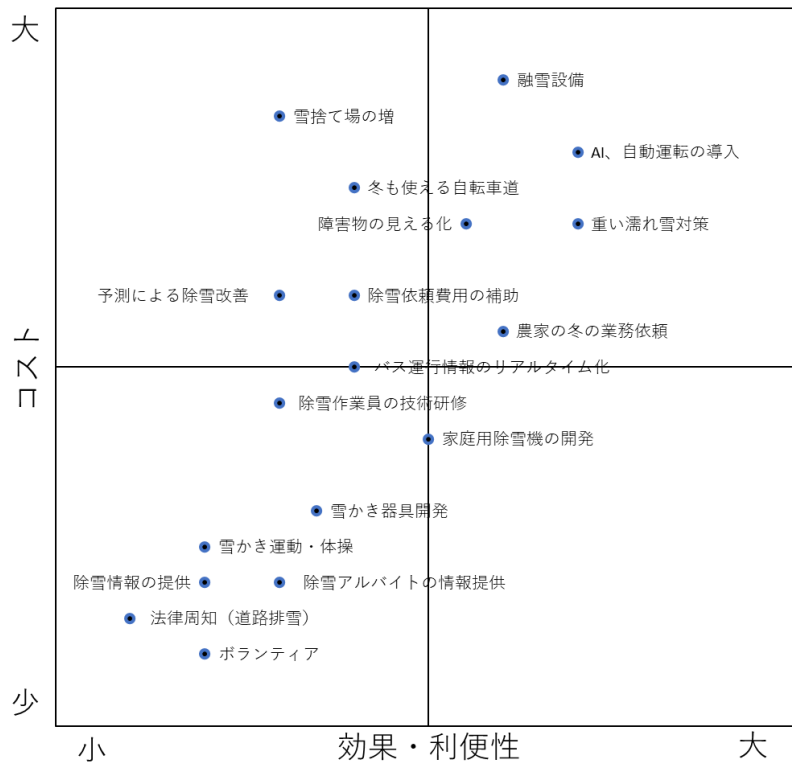


図1.16 除雪に関する効果・利便性とコストの関係図
 (コストや効果・利便性は地域によっても異なるため、一つの事例である)



図1.17 動画「未来の天気予報北海道2100冬」(6分程度)
 予測値 (RCP8.5) に基づく動画 (道総研 監修、日本気象協会 作成、HPで公開中)

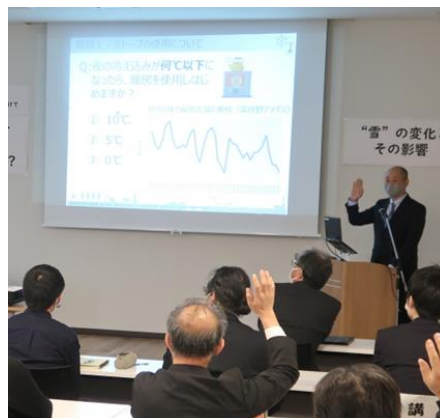


図1.18 富良野市市民セミナー (2022年10月9日)



図1.19 成果発表シンポジウム（2023年2月17日）



図1.20 成果普及用のホームページ¹⁶⁾（北海道気候変動適応センターからリンクが貼られている）
https://www.hro.or.jp/list/industrial/research/eeg/development/climate_c/yukinosuishinhi/introduction.html



図1.21 富良野市ワークショップ（2022年11月10日）

5. 研究目標の達成状況

当初の研究目標は以下の通りである。

- 1) 降雪・積雪などの冬の気候要素に着目し、気候変動による変化とそれに伴う影響およびその連鎖であるインパクトチェーンについて解析し、住民が実感できる気候変動影響を地域単位で明らかにする。
- 2) サブテーマ3 と共に、重要な影響連鎖についてコストや地域性を考慮して複数の適応策案を作成し、さらにその中から影響の程度や時期に応じた適応策導入の計画立案手法を整理する。
- 3) それらを基に、北海道内の市町村、団体・企業などと共に、計画策定のための参与型のワークショップ等を試行的に開催する。
- 4) また適応策導入の計画策定に至るフレームワークを道庁や地域気候変動適応センター等と共有する。

1)、2) および4) においては研究目標どおりの成果を得ることができ、3) のイベント等においては、オンライン参加が一般的となり、当初の研究目標以上の参加を得ることができたため、目標を上回る成果をあげたと判断した。具体的には、1) 雪の変化およびその影響に関する情報の収集・解析において、オンラインによる聞き取り調査が一般化したため、当初の研究目標通りの成果を得たこと、2) 積雪調査による積雪の空間分布の把握においては、当初の目標を達成できたこと、3) 衛星画像解析による積雪期間の変化、4) インパクトチェーン作成、5) 雪の変化に関する指標開発においても、当初の研究目標を達成できたこと、6) 適応策検討のためのイベント・参与型検討会の開催と手法開発においては、特にイベントにおいてはオンライン参加が一般的となり、会場参加のみを想定していた当初の研究目標以上の参加を得られたことから目標を上回る成果をあげたと判断した。またセミナー開催およびパンフレット作製など、研究成果を北海道気候変動適応センターと共有することもできた。

6. 引用文献

- 1) 野口 泉、濱原和広、芥川智子、山口高志、鈴木啓明、長谷川祥樹、小野 理：北海道立総合研究機構エネルギー・環境・地質研究所報告、1、69-74 (2021) 「積雪寒冷地における気候変動の影響評価と適応策に関する研究 I -降雪・積雪の変化の影響-
- 2) 鈴木啓明、濱原和広、芥川智子、小野 理、長谷川祥樹、山口高志、野口 泉：令和3年度エネルギー・環境・地質研究所成果発表会[札幌(web)] (2021) 「気候変動は道民にどう影響するのか？ - 適応策の推進に向けた影響情報データベース -」
- 3) 鈴木啓明、濱原和広、長谷川祥樹：令和4年度エネルギー・環境・地質研究所成果発表会[札幌(web)] (2022) 「あなたの地域の未来予想図、示します -気候変動予測データベースの開発-
- 4) 野口 泉、山口高志、濱原和広、芥川智子、鈴木啓明、長谷川祥樹、小野 理：第37回寒地技術シンポジウム論文集、81-84 (2021) 「北海道における気候変動に関する研究 -降雪・積雪の変化傾向-
- 5) 野口 泉、濱原和広、芥川智子、山口高志、鈴木啓明、長谷川祥樹、小野 理：北海道立総合研究機構エネルギー・環境・地質研究所報告、2、27-34 (2022) 「積雪寒冷地における気候変動の影響評価と適応策に関する研究 II -ゼロクロッシング日数の変化とそれに伴う適応策について-
- 6) Suzuki H, Noguchi I, Hamahara K and Yamaguchi T : The 36th International Symposium on the Okhotsk Sea & Polar Oceans (2022) “Impact of climate change on snow and lifestyle in winter Hokkaido, Japan.” .
- 7) 鈴木啓明、野口 泉、濱原和広、山口高志：雪氷研究大会 (2022・札幌) B1-10 (2022) 「北海道におけるゼロクロッシング日数の将来変化」
- 8) 山口高志、野口 泉、丹羽 忍、小南靖弘、岡田啓嗣、木村賢人：第62回大気環境学会年会 (2021) (ポスター発表) 「積雪水量などの実測値と推測値の比較」

- 9) 濱原和広、野口 泉、鈴木啓明、山口高志、長谷川祥樹、芥川智子、小野 理：第48回環境保全・公害防止研究発表会（2021）「積雪寒冷地における気候変動研究 - 降雪・積雪の変化とその影響 -」
- 10) 鈴木啓明：第75回気候情報連絡会（2021）（書面開催）「積雪期における気象要素の長期変化傾向の解析について」
- 11) 野口 泉：大気環境学会気候変動研究会令和4年度研究集会－気候変動と大気汚染、およびその影響（2023）「気候変動による降雪・積雪に関する影響とその適応策」
- 12) 芥川智子、野口 泉、濱原和広、鈴木啓明、山口高志、長谷川祥樹、小野 理：第28回大気環境学会北海道東北支部総会及び学術集会（2021）「北海道の気象に関する指数情報の変化傾向と将来予測」
- 13) 濱原和広：富良野市民セミナー 2050年ゼロカーボンシティに向けて 気候変動によって富良野はどう変わるのか？「“雪”の変化とその影響」（2022）「気候変動が進んだ未来、冬の富良野（の生活）はどうなる？」（2022年10月9日）
- 14) 鈴木啓明：北海道気候変動適応セミナー（2023）「気候変動で冬の北海道はどうなる？－生活への影響を示す指標はどう変化するか－」（2023年1月18日）
- 15) 鈴木啓明：積雪寒冷地における気候変動の影響評価と適応策に関する研究公開シンポジウム 気候変動が進んだ将来、北海道の冬はどうなる？どうする？-変化を知り、備えるために-（2023）「気候変動で冬の北海道はどうなる？」（2023年2月17日）
- 16) 野口 泉：富良野市民セミナー 2050年ゼロカーボンシティに向けて 気候変動によって富良野はどう変わるのか？「“雪”の変化とその影響」（2022）「未来の天気予報 北海道2100冬」（2023年10月9日）
- 17) （地独）北海道立総合研究機構エネルギー・環境地質研究所ホームページ
https://www.hro.or.jp/list/industrial/research/eeg/development/climate_c/yukinosuishinh
 i/（2023年4月28日確認）
- 18) 北海道環境生活部ゼロカーボン推進局気候変動対策課／北海道気候変動適応センター
 （2023）：「気候変動適応ハンドブック【生活・健康編】」（2023年4月20日確認）
https://www.pref.hokkaido.lg.jp/fs/8/2/7/2/3/6/5/_/adaptation-handbook2023.pdf

II-2 農業分野における影響評価と適応策

北海道大学

大学院農学研究院 教授

鮫島 良次

大学院農学研究院 教授

平野 高司

大学院農学研究院 講師

岡田 啓嗣

国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構

東北農業研究センター 水田輪作研究領域 ICT 活用技術グループ長補佐

井上 聡

北海道農業研究センター 寒地畑作研究領域 環境病虫害グループ長

小南 靖弘

帯広畜産大学 准教授

木村 賢人

【要旨】

農業分野において気候変動による降積雪などの変化が与える影響について予測するとともに、特に春先の営農計画にとって重要な消雪時期と凍土消失時期について、高解像度消雪日推定マップの開発と土壌の凍結・融解に関する気象状況の長期的傾向の解析を実施した。

降積雪の予測はRCP2.6 (2°C上昇シナリオ) およびRCP8.5 (4°C上昇シナリオ) について行い、RCP8.5の場合は今世紀後半以降はほぼ道内全域で積雪量が減少し、現在気候の東北地方と似た雪質分布になるという結果が得られた。その結果を受け、適応策の一例として現在は東北で栽培されているりんご品種「ふじ」の導入可能性を検討した。高解像度消雪日予測マップについては、積雪水量ベースの融雪計算を1kmメッシュで行い、その結果をダウンスケールモデルにより50mにダウンスケールし消雪判定を行って高解像度の消雪日予測マップを作成するというアプローチを選択した。地形因子を説明変数とするダウンスケールモデルには機械学習モデルであるExtra Tree Regressorを採用した。さらに融雪モデルにおけるパラメータの調整やデータとして使用するメッシュ農業気象データの各気象要素に含まれる誤差を緩和するための誤差モデルを作成して適用した結果、精度が向上することを確認した。凍土の長期的傾向については、まず長期間定点観測されている気温、積雪深、土壌の凍結・融解深さのデータより、気温と積雪深から凍土の最大深さ、融解深さの推定を経て最終的に凍土消失日を推定する回帰式を得た。これを用いて過去の十勝地方の凍土消失日の面的分布を再現して長期傾向を解析したところ、全ての地域で根雪と凍土の消失日は早まる傾向にあり、特に中部と南部で顕著であることが明らかになった。

1. 研究開発目的

農業は北海道の代表的な産業であり、特に畑作物については多くの作目の生産量が国内産地の上位を占める食料生産基地となっている。かつ、北海道農業の営農形態は現在気候の全道における長期の積雪や道東地域で見られる土壌凍結に適応して形成されており、冬季の気候変動は農業生産にとって正負の両面で大きな影響を及ぼすと考えられる。そこで、これらの降積雪や土壌凍結について長期的な傾向を解析して農業影響を検討すると共に、特に作業計画に対して影響の大きい消雪日について圃場レベルで推定する手法を開発する。

2. 研究目標

北海道全域を対象として、予想される積雪変動を5区分（積雪増・湿雪化、積雪増・乾雪化、積雪減・湿雪化、積雪減・乾雪化、変化なし）する。各区分での正負の農業影響を明らかにし、適応方針を策定する。さらに、約50mメッシュで積雪深と消雪日を推定し、春季の適切な農作業管理を可能とする。これらの成果についてサブテーマ1及び3と協力し、農業関係団体への普及を実施する。

3. 研究開発内容

1) 北海道全域を対象とした積雪変動予測

積雪の堆積環境より推定される気候学的な雪質区分の変動と、積雪水量や根雪期間・消雪日などの量的な変動をそれぞれ将来気候シナリオによって推定し、それらを面的に組み合わせることにより複合的な積雪変動（積雪増・湿雪化、積雪増・乾雪化、積雪減・湿雪化、積雪減・乾雪化、変化なし）に区分して農業影響を評価する。まず雪質については、石坂¹⁾の方法により1月の平均気温を用いた評価式で、乾き雪地帯（厳冬期に積雪が含水しない地域）、湿り雪地帯（積雪期間を通じて積雪が含水し、濡れ変態が卓越する地域）、それらの中間地帯に3区分した。さらに以下で説明する簡易積雪モデルから推定した1月2月の積雪深も加えて、しもざらめ地帯（乾き雪地帯の中で特に寒さが厳しく少雪で、積雪層内に大きな温度勾配が生じる地域）の抽出も行った。量的変動は、気温と降水量のみを用いて積雪水量を推定する簡易積雪モデルによって評価した。簡易積雪モデルは、当初は入力データセットの汎用性を確保するためロバストな月単位モデルを採用したが、2年目以降は入力データセットを農研機構メッシュ農業気象データに搭載された「農研機構シナリオ 2017」^{注釈1)}に限定することにより、日単位で計算できるモデルとした。モデルの概要は以下である。降雪量については、まず日平均気温で雨雪判別をした後に降雪成分について捕捉率補正を行う。後者は降水量計の受水口付近の空気の乱れにより降雪粒子の一部が捕捉されない観測誤差の補正だが、将来気候シナリオデータのベースラインも現在気候の観測値に合わせこまれているため必要となる。融雪量の推定は日平均気温に融雪係数を乗じるDegree-Day法を用いた。ただし、気温と日射量との関係は歴日と緯度によって変化することから、新たに月単位で融雪係数を緯度の関数で表現する推定式を作成した。これら降雪量と融雪量の差分を日々積算して積雪水量を計算する。モデルの妥当性は1981年～2000年の20年間について、各モデルのhistorical（20世紀気候再現実験）データから計算した積雪日数等の指標と観測値との比較によって検証した。将来予測には5種のモデルの中で中庸な振る舞いを示すMRI-CGCM3を採用し、RCP2.6（2℃上昇シナリオ）およびRCP8.5（4℃上昇シナリオ）で今世紀末までの最大積雪水量や長期積雪の終日、月単位の積算融雪量などを1kmメッシュで計算した。また、積雪変動予測が現在の北海道各地で行われている営農に対してどのような影響を及ぼすのかについて、文献調査から抽出した²⁾。

2) リンゴ「ふじ」の北海道導入可能性の将来予測

R2年度の研究成果として、将来の北海道の雪質が、現在の東北地方と類似することが明らかになった。そこで、R3年度は、研究担当者（井上）の東北農研への異動のため、東北地方積雪地農業の営農について調査を行った。R4年度は、調査結果に基づき、現在の東北農業で実施されていて、北海道に未導入な農業について導入可能性を取りまとめた。具体的には、日本および世界におけるりんごの主力品種である「ふじ」について、以下の手法により北海道導入可能性を調べた。

「ふじ」は、日本および青森県におけるりんご生産量の約5割を占める。また、世界規模でも、りんご生産量の半分近くを占めている中国でのふじの生産量は6割以上と推測されている。その他、アメリカ、チリ、ニュージーランド、アフリカ大陸など世界各国でも栽培され、世界で最も生産量が多い。晩生種であり、貯蔵性に優れている。寒冷地である北海道では従来、生育期間が短く積極的に栽培されてこなかった。しかし、気候変動・温暖化によって生育期間が確保されれば、農業における気候変動適応策の優良事例となる可能性がある。そこで、栽培に好適な温度環境を推定し、将来予測気候データを用いて導入可能性を検討した。「ふじ」が青森県品種別生産量一位となった1982年から10年間の弘前市りんご産地メッシュ気温より、①年平均気温②4月1日から10月31日までの栽培期間平均気温中央値を計算し、①②を同時に満たす栽培下限温度とした。

3) 高解像度消雪日推定マップの開発

将来の気候変動下で予想される局所的あるいは時季外れの降雪に対する農業適応策として、圃場サイズレベル（50mメッシュ）での積雪情報および予想消雪日を提供するモデルを開発した。本研究では、積雪水量ベースの融雪計算を1kmメッシュで行い、その結果をダウンスケールモデルにより50mにダウン

スケールした後、得られたダウンスケールの結果から消雪判定を行って高解像度の消雪日予測マップを作成するというアプローチを選択した。

地形データとして国土地理院の数値標高モデル10mメッシュデータを50m単位に平均化したものから、1kmメッシュ用地形因子と50mメッシュ用地形因子を用意し、それぞれ用途に応じて使い分けた。地形因子は、1kmメッシュ・50mメッシュともに標高・起伏・凹凸度・位置（緯度・経度）・傾斜・方位（東西・南北成分）の8つを採用した。気象データとして基準メッシュ単位（約1km四方）で作成されている農研機構のメッシュ農業気象データの14項目を使用した。

各モデルの内容は以下のとおりである。ダウンスケールモデルは1kmメッシュで得られるデータ（実況値・予測値）を、地形因子のみを用いて50mメッシュのデータへとダウンスケールするもので、機械学習モデルであるExtra Tree Regressorを使用した。ダウンスケールモデルはシーン毎（毎日）作成して運用する。融雪量の推定には、単層モデルである水津（2001）の簡易融雪量推定モデルを一部改良して用いた³⁾。計算途中で、アルベド、顕熱伝達量、潜熱伝達量、降雨熱伝達量、放射収支、地中熱伝達量を得ることができる。今回はメッシュ農業気象データの提供する日平均気温・全天日射量・長波放射量・積雪水量を入力として使用した。このモデルから得られた日融雪熱量を前日の積雪水量から減じることで当日の積雪水量を得ることができる。融雪モデルにおける調整が必要なパラメータおよびメッシュ農業気象データの各気象要素における地形や推定モデルなどの影響を受けたメッシュ毎の誤差を緩和するために、地形因子、気象データおよび融雪モデルからの出力を説明変数とする機械学習モデルを誤差モデルとして作成した（Extra Tree Regressor）。入力する気象要素と融雪モデルからの出力は試行錯誤により決定した。消雪判定は、融雪計算および誤差計算を行い以下の手順で行った。ダウンスケールした後の各50mメッシュに対して、①融雪完了したメッシュの翌日以降の積雪水量は0、②しきい値以下を融雪完了、③前日の積雪水量より大きくなった時は規定量を減らす、の処理である。ただし、ダウンスケールにおいては、消雪面積が一定値になるまではExtra Tree Regressorのみを使用し、その後はExtra Treeと線形モデル（Lasso）の両者を比較し、値の小さい方を使用するという処理を行った。

4) 北海道十勝地方における土壌の凍結・融解に関する気象状況の長期的傾向

長期間定点観測されている気温、積雪深、土壌の凍結・融解深さの経年変化を明らかにするとともに、各年の積雪状況から積雪型に分類し、各積雪型における土壌の凍結過程と融解過程について検討した。さらに、(a)積雪深20cmとなった日の積算寒度 F_{20} と凍土の最大深さ D_{max} との関係、(b)凍土の最大深さ D_{max} と凍土の融解深さ d_r との関係、(c)凍土の融解深さと根雪完了日から凍土消失日までの積算暖度との関係について観測データから検証し、既往の研究と比較した。(a)~(c)のそれぞれの関係を示す回帰式によって凍土の最大深さから凍土の消失日までの推定が可能となる。そこで、得られた回帰式とメッシュ農業気象データを用いて、十勝地方の農地を対象に、凍土の消失日を推定した。その結果から、凍土の消失日とそれに関連する気象要素の長期的傾向から営農への影響を検討した。

注釈1) 農研機構メッシュ農業気象データは農業・食品産業技術総合研究機構が運用する気象情報サービスで、約1kmグリッドの国土数値情報3次メッシュフォーマットで日別気象データを提供している。これに搭載されている将来気候シナリオデータは気候変動適応技術社会実装プログラム（SI-CAT）において作成されたものでモデルはMIROC5、CSIRO-Mk3-6-0、GFDL-CM3、HadGEM2-ES、MRI-CGCM3の5種、シナリオはRCP2.6、RCP2.5の2水準およびhistorical（20世紀気候再現実験）である。ダウンスケール手法は正規分布型スケール法を採用して平均値および分散が観測統計値に合うように補正しているので（西森ら、2019）⁴⁾、降雪・融雪のような複数の気象要素が絡む現象についても日単位での再現が可能だと考えられる。また、極端現象の出現頻度が関心の対象となる災害研究などでは多数回のアンサンブル気候予測データベース（d4PDF）が有効だが、農業における収量予測や適地評価などは10年や20年といった期間平均値を重視するので、平均値が信頼できるという特質が適している。

4. 結果及び考察

1) 北海道全域を対象とした積雪変動予測

雪質について今世紀半ばおよび今世紀末について計算した結果、RCP2.6（2℃上昇シナリオ）では道南の沿岸部で中間地帯の区分が見られる他はほぼ全道は乾き雪地帯のままとなった（図2.1）。霜ざらめ地帯は現在気候では日高・十勝・根釧・斜里などで見られるが、今世紀半ばではほぼ十勝のみとなり、今世紀末ではやや拡大する傾向となった。これは後で述べるように積雪量が今世紀半ばでいったん増加することを反映していると考えられる。RCP8.5（4℃上昇シナリオ）では今世紀半ばに道南の沿岸部が湿り雪地帯化し、今世紀末には十勝を除くほとんどの沿岸部で湿り雪地帯となった。また根釧地域では内陸部まで広く中間地帯となった。この様相は図2.1の右端の現在気候における本州北部とよく似ており、RCP8.5の状況では今世紀末の北海道の雪質は現在の東北地方から類推できると考えられる。

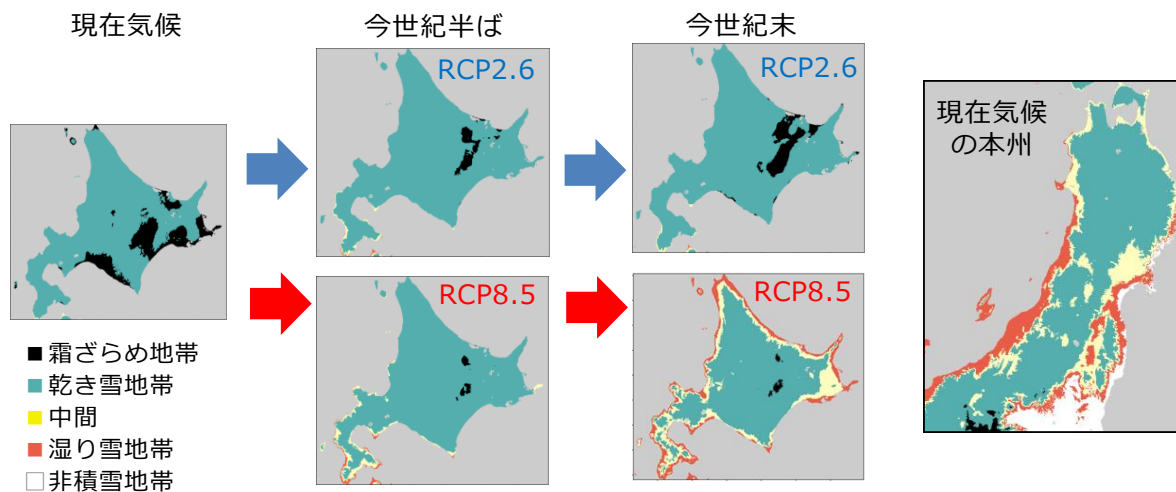


図2.1 北海道における雪質地帯区分の将来変化および現在の本州北部の雪質地帯区分

「現在気候」は2021年～2020年、「今世紀半ば」は2041年～2060年、「今世紀末」は2081年～2100年のそれぞれの20年平均値から求めたもの。モデルはMRI-CGCM3で、1kmメッシュにダウンスケールされたデータセットを用いた。「今世紀半ば」および「今世紀末」は上がRCP2.6、下がRCP8.5。右端図は現在気候における本州北部の状況。

積雪の量的な変動を計算する簡易積雪モデルの妥当性を確認するため、1981年～2000年について、

- ① 日平均気温と日降水量の観測値から推定した日々の積雪水量
- ② 5種の気候モデルによるhistorical（20世紀気候再現実験）の日平均気温と日降水量から推定した日々の積雪水量

を道内のアメダス地点ごとに計算し、その時系列から得た積雪日数や長期積雪の始日・終日などを観測値と比較した。その結果、気温と降水の観測値を用いた場合、積雪日数は観測値に比べてやや少なめ、長期積雪開始日はやや早め、最大積雪水量はやや多めの評価となったが、いずれの回帰線の傾きも 1.0 ± 0.1 程度に収まっており、系統的には誤差10%程度では推定できることがわかった（図2.2）。モデルのhistoricalデータの気温と降水を用いた場合は決定係数は下がるが、大半のモデルでは回帰線の傾きは 1.0 ± 0.1 程度で変わらないことから（図2.3）、本簡易積雪モデルで積雪水量の将来予測が可能だと判断した。

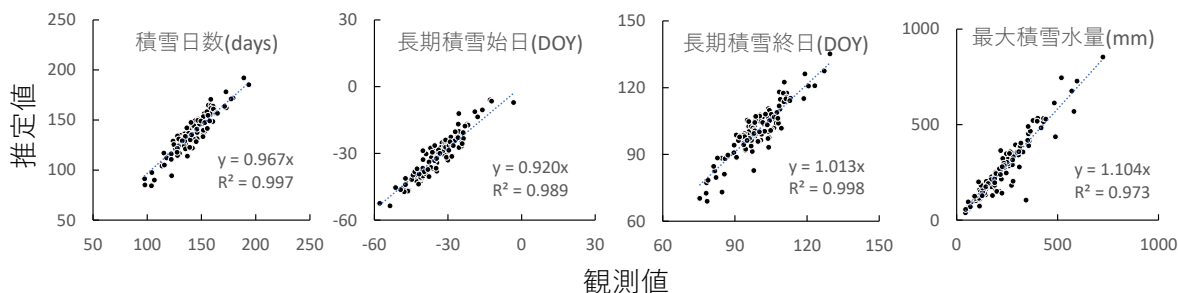


図2.2 積雪日数、長期積雪始日、長期積雪終日、最大積雪水量の観測値と推定値との比較

横軸は観測値、縦軸が簡易積雪モデルの推定値で、各点は北海道内で積雪を観測しているアメダス・官署における1981年～2000年の20年平均値。ただし、最大積雪水量は観測点の座標における農研機構メッシュの積雪水量を観測値と見なした。長期積雪始日および長期積雪終日は10日以上連続する積雪期間の初日と最終日（複数ある場合はそれぞれ最初と最後）。単位は1月1日を1とするDay of Yearだが、10～12月は負値で表現している。

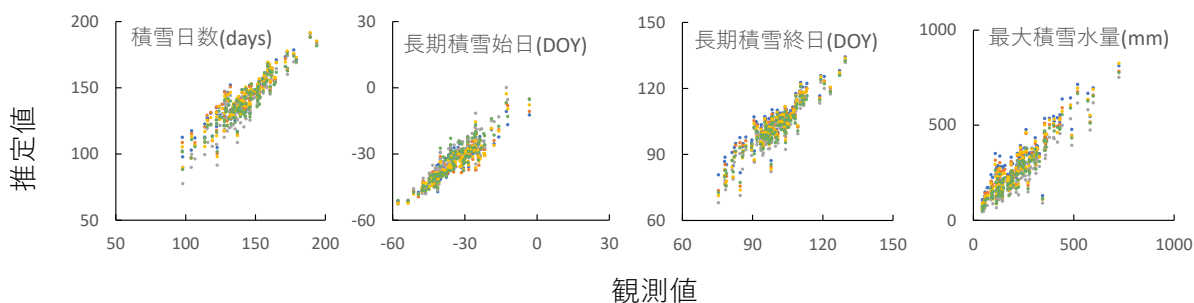


図2.3 積雪日数、長期積雪始日、長期積雪終日、最大積雪水量の観測値と5種類の気候モデルのhistorical（20世紀気候再現実験）から簡易積雪モデルで推定した値との比較

説明は図2.2と同じ。各要素における各モデルの回帰係数の範囲は、積雪日数で0.961～1.003、長期積雪始日で0.922～0.986、長期積雪終日で1.005～1.049、最大積雪水量で1.017～1.197。決定係数の範囲は積雪日数で0.826～0.956、長期積雪始日で0.804～0.842、長期積雪終日で0.820～0.837、最大積雪水量で0.821～0.874。

年最大積雪水量について今世紀半ば（2041年～2060年）および今世紀末（2081年～2100年）の予測値を現在気候と比較した結果、RCP2.6ではオホーツクや後志の一部を除いて変化なしか増加傾向で、特に日高や十勝など太平洋側で増加量が大きくなった。RCP8.5では今世紀半ばまではRCP2.6と同様の傾向だが、今世紀末にはほぼ全道で減少した。減少量が多い地点はRCP2.6と同様にオホーツクと後志である（図2.4）。10日以上継続する積雪の終日については、RCP2.6ではオホーツクでは前進傾向、日本海側や日高ではやや後退傾向である。積雪水量が増える地域で必ずしも長期積雪終日が後退しないのは、春先の気温上昇の影響だと考えられる。より気温上昇が顕著なRCP8.5ではほぼ全道で長期積雪終日が前進する（図2.5）⁵⁾。

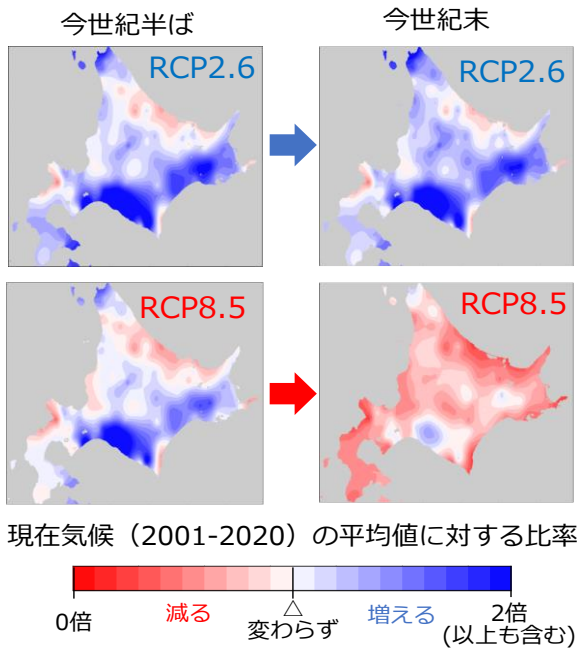


図2.4 年最大積雪水量の変化（MRI-CGCM3）
アメダス観測地点ごとに現在気候の平均値に対する比率を求め、線形空間補間したもの。それぞれの期間区分の年次は図+2.1と同じ。

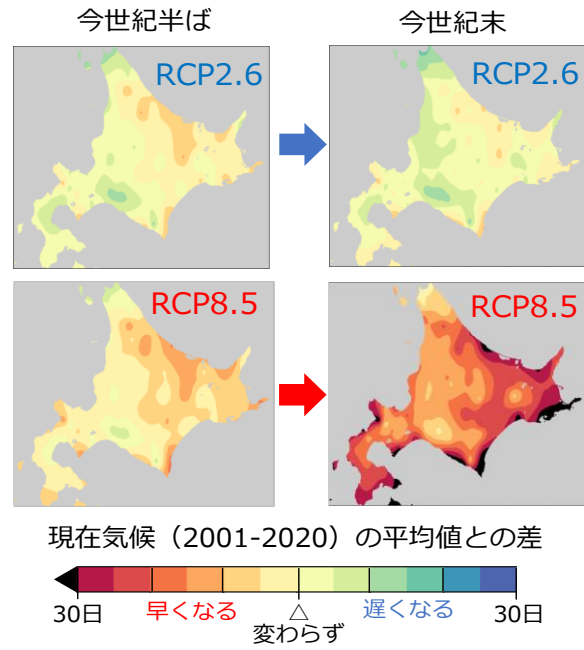


図2.5 長期積雪終日の変化（MRI-CGCM3）
アメダス観測地点ごとに現在気候の平均値に対する差分を求め、線形空間補間したもの。それぞれの期間区分の年次は図+2.1と同じ。

表2.1 多雪化と少雪化それぞれのメリットとデメリット
多雪化に伴う消雪の後退、少雪化に伴う消雪日の前進は独立して整理。

	メリット	デメリット
多雪化	<ul style="list-style-type: none"> 断熱効果による保温（醸造用ブドウ、春堀長イモ、雪下キャベツなど） 冷熱源としての利用 雪室（ゆきむろ） 春先の用水の確保（雪ダム機能） 	<ul style="list-style-type: none"> 機械的的雪害（果樹、施設の物理的被害） 生理的的雪害（暗呼吸による作物体の消耗、雪ぐされ病など） 土壌凍結深の減少（野良イモの増加）
圃場の消雪後退	<ul style="list-style-type: none"> 特にメリットはない 	<ul style="list-style-type: none"> 圃場が乾かず機械が入れない 生育遅延や栽培期間の短縮による収量減
少雪化	<ul style="list-style-type: none"> 機械的的雪害、生理的的雪害の減少 防雪コスト、除雪コストの低減 	<ul style="list-style-type: none"> 保温不足による凍害増加 土壌凍結深の増大 冷熱エネルギーの希薄化（集雪コスト増） 春先河川流量の減少
圃場の消雪前進	<ul style="list-style-type: none"> 栽培期間が確保される 品種の選択幅が広がる 融雪材が不要になる。 	<ul style="list-style-type: none"> 遅霜被害の危険性が増加 圃場が乾きすぎて風食害が増加

以上の量的変動に対して整理したメリットとデメリットを表2.1に示す。積雪は農業にとって利雪と雪害という正負の効果をもたらすため、多雪化と少雪化のメリットデメリットはトレードオフの関係となる。現状で雪を利用している事例では、収穫物を積雪内で貯蔵して糖度を上げたり、出荷時期を調整するなどの付加価値をつける雪下キャベツや雪下ニンジンなどがある。多雪地帯の空知・上川・羊蹄山麓などが主産地だが、これらの地域はRCP2.6下では今世紀末まで、RCP8.5下では今世紀半ばまでは極端な積雪の減少は見られないので、当面は継続可能だと思われる。一方で多雪化は雪害を増加させる恐れがあるが、多雪化が予測されている太平洋側はもともと積雪が少ない地域のため、現在気候との比率は

増えても増加量の絶対値は多くない。ただし、既往の研究では温暖化に伴って降水量の変動幅が大きくなるとの報告もあり、湿り雪化ともあいまってハウス用パイプや果樹への着雪などの機械的雪害が増加する可能性はある。また土壌凍結深の減少により、野良イモの増加などの影響がある。積雪の終日については、現在気候の北海道では秋まき小麦圃場を中心としてほぼ全道で融雪促進資材の散布が行われていることからわかるように、消雪時期の遅さが農業生産の制限要因となっている。したがってRCP8.5で見られるほぼ全道での消雪時期の前進傾向は、その点では農業生産に正の効果をもたらすと考えられる。ただし一方では春先の土壌の乾燥も促進され、いわゆる「十勝の馬糞風」のような春先の乾燥したフェーン風による風食害が他地域でも頻発するようになる可能性もある。

質的変動と量的変動の重ね合わせた面的な複合パターンマップを図2.6に示す。RCP2.6についてはほぼ全道で雪質は現在と変わらず乾き雪地帯のまま、量的には全道の7割程度では±20%以内の変動となり、現在気候から大きな変化は見られない。したがって、多くの地域では現状と大きく変わらない営農形態が維持できると考えられる。一方、RCP8.5では今世紀半ば以降はほぼ全道で量的には減少し、十勝地方を除く沿岸部全てで湿り雪地帯化するという結果となった。特に道南や札幌周辺、根釧地域では内陸部まで湿り雪地帯が分布する。湿り雪地帯では濡れ変態によるザラメ化で急激に密度が増加するため、除排雪の労力（負荷）増大、ハウス屋根からの滑落雪塊の衝撃増加などが生じる。なお、湿り雪化する地域は必ず量的には減少しており、「湿り雪化して増える」というパターン（凡例左端の紺色に相当）は見られなかった。作物の生理的消耗や雪腐れ病のまん延は0℃付近の積雪下環境に長時間置かれることにより甚大化するが、本研究の結果からはそのような機会が平均的に増える可能性は低いと考えられる。

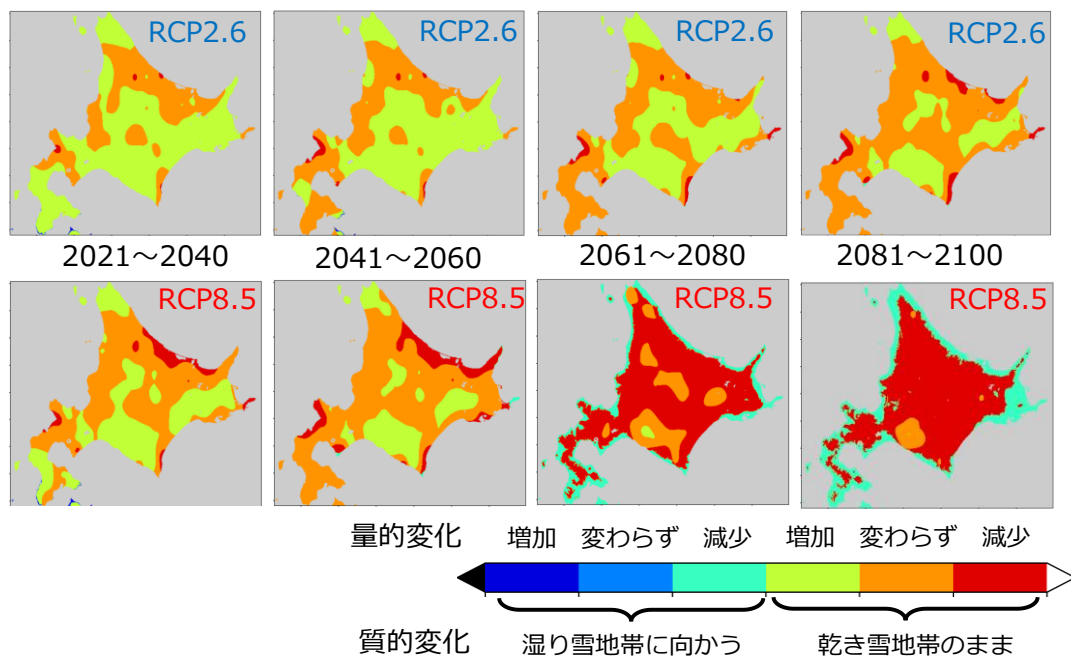


図2.6 積雪の量的変動と質的変動の複合パターンマップ

2021年以降今世紀末までを20年毎に区分して平均値を求めたもの。量的変化（最大積雪水量）は±20%以内を「変わらず」と区分した。質的変化は湿り雪地帯および中間地帯を「湿り雪地帯に向かう」と区分した。

2) 高解像度消雪日推定マップの開発

ダウンスケールモデル適用の一例として、2016年2月19日の石狩・空知・十勝領域のダウンスケール結果を図2.7に示す。なお、空知領域は石狩領域のおよそ2倍、十勝は4倍のメッシュ数となっている。3領域とも元のデータの分布と地形の特徴を再現していたが、領域が広く、積雪のない地域の存在した十勝領域では標高の高い場所で元データと異なる分布がいくつかみられた。

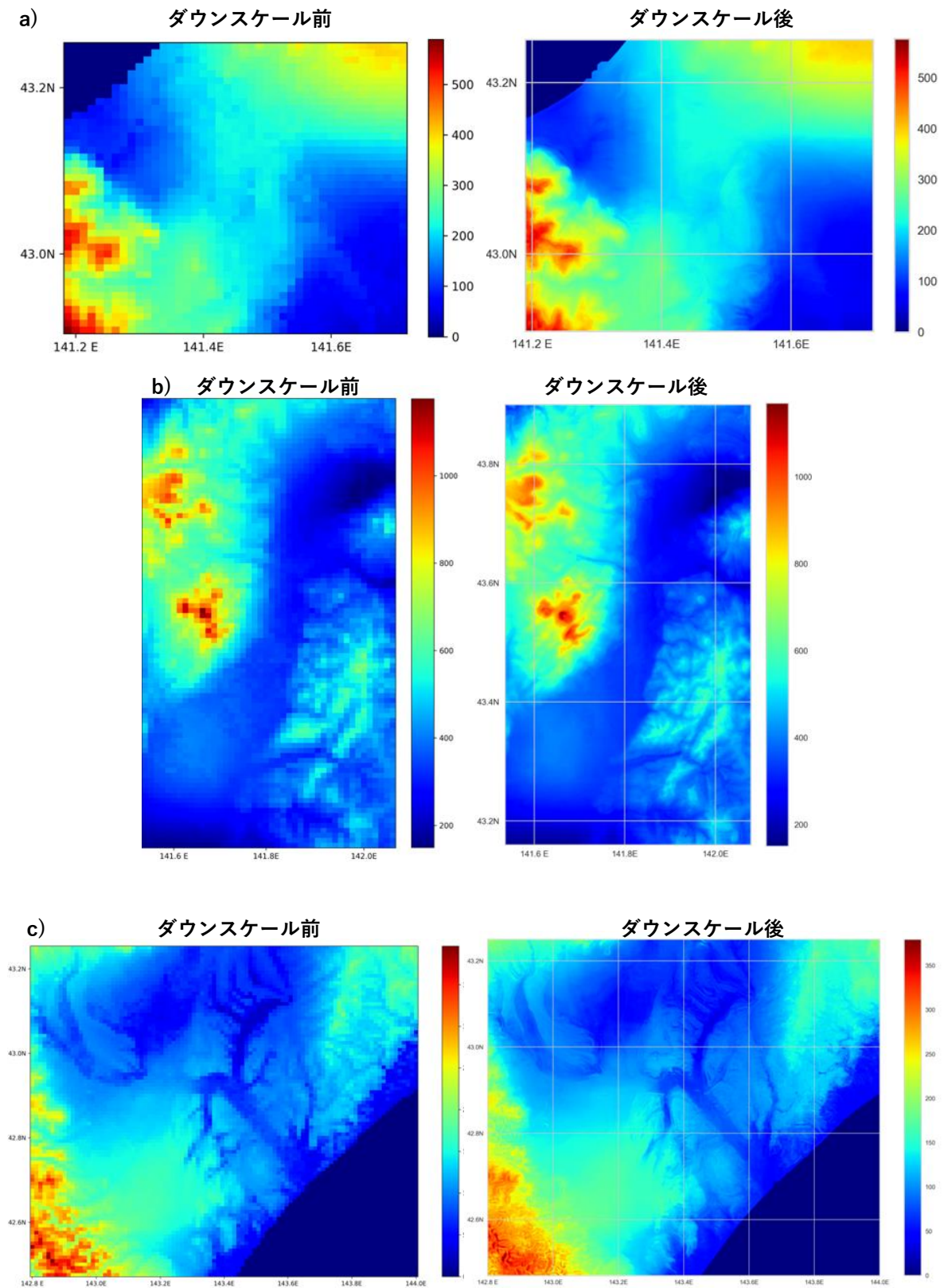


図2.7 ダウンスケールモデル適用の一例

a) : 石狩、 b) : 空知、 c) : 十勝；いずれも2016/02/19の実況値。石狩は42.90～43.25N、141.185～141.725E、空知は43.10～43.85N、141.575～142.125E、十勝は42.47～43.25N、142.80～144.00Eをそれぞれ範囲とする。

融雪モデル適用の一例として、前日の積雪水量（SWE）と気象データについて実況値（メッシュ農業気象データ）を与えたときの2021年シーズン（2月2日～4月20日）の石狩領域4地点の計算結果を図2.8に

示す。どの地点も概ね実況値の変動に追随し、実況値を上回ることがあまりないが、ときどき融雪量の大きな過大評価（積雪水量の値としては低下）をする傾向がある。また、地点毎に過大評価が生じる日とその大きさにはばらつきがある。ここでは実況値を与えたのでこれらの過大評価の影響は1日で消失するが、予測値を与えた場合には誤差が累積し、実際の積雪状況と大きな差異を生じる可能性がある。

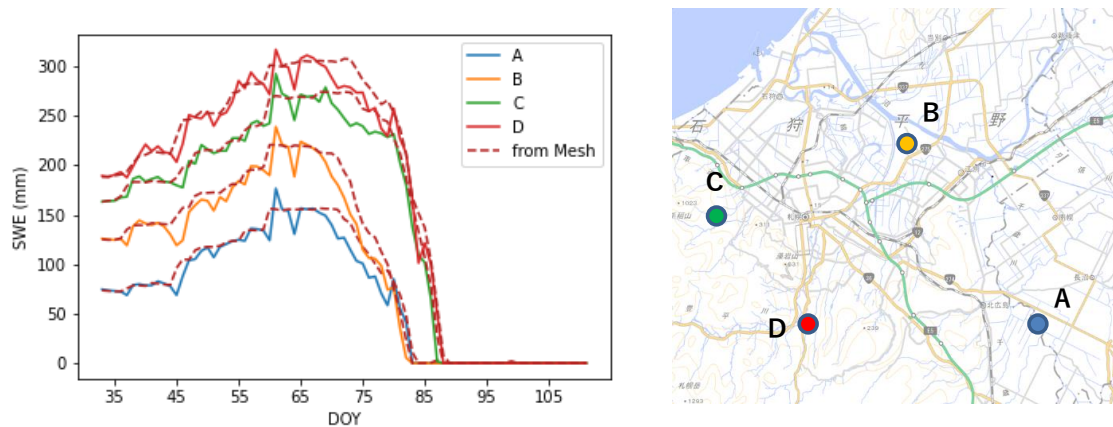


図2.8 融雪モデル適用の一例：石狩(2021シーズン)

誤差モデル適用の一例として、2021年シーズンの石狩領域について実況値、融雪モデル単体の結果を図2.9に示す。なお、この誤差モデルは2016年と2017年の2年間のデータから作成したものである。積雪水量(SWE)予測値は入力気象データとして平年値を用いているため、推定期間が長くなるにつれ、誤差も大きくなっていく。しかし、融雪モデル単独と誤差モデル+融雪モデルを比較した場合、 R^2 は0.940から0.962、RMSEはよりは精度が高かった。

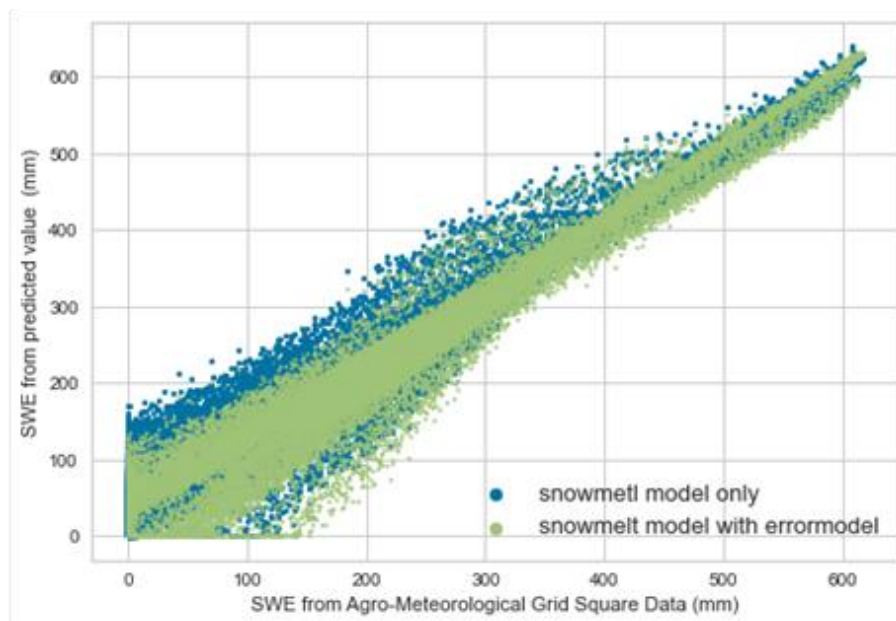


図2.9 融雪モデルの有無と実況値の比較（石狩(2021シーズン)

高解像度消雪日予測マップの一例を図2.10に示す。これは、2021年3月11日(DOY70:DOYは1月1日から数えた日数)のメッシュ農業気象データの実況値をもとに、3月12日以降は気象データとして平年値を用いてモデルを稼働させた結果である。結果的にDOY80前後の積雪量マップに類似した分布をみせた。A(藻岩山の麓)、B(石狩湾新港)の周辺はやや不合理な推定だと思われるが、これは消雪判定のアルゴリズムが融雪末期においてやや不安定になることによるものだと考えられる。

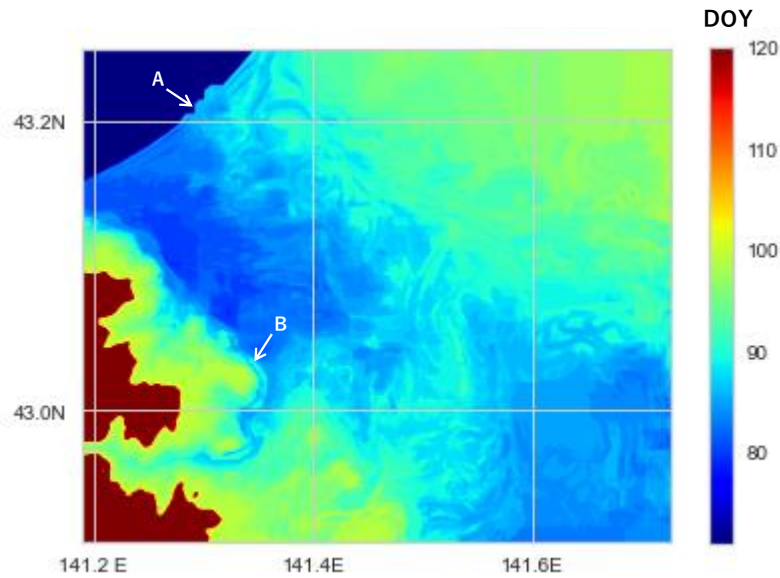


図2.10 高解像度消雪日予測マップの一例

3) 北海道十勝地方における土壌の凍結・融解に関する気象状況の長期的傾向

帯広畜産大学で観測された1981～2021年の積算寒度、最深積雪、凍土の最大深さの経年変化を図2.11に示す。なお、積算寒度とは0℃未満の日平均を積算した絶対値であり、冬期の寒さの指標として用いられる。この期間の積算寒度、最深積雪、凍土の最大深さの平均値はそれぞれ、815.7℃ day (°Cd)、79cm、26.0cmであった。経年変化の傾向をみると、積算寒度は1985年頃までは高かった。したがって、この期間は厳冬であった。その後、急激に低下し、暖冬傾向が続いたが、1997年頃から再び上昇した。2000年以降は年変動を繰り返しながら低下傾向にあった。一方で、最深積雪は、積算寒度のような明確な傾向はみられなかった。凍土の最大深さは積算寒度の影響を受けるものの、総じて最深積雪が高い年は低い値となった。この理由は、雪の断熱効果によって凍土の進行が抑制されるためである。

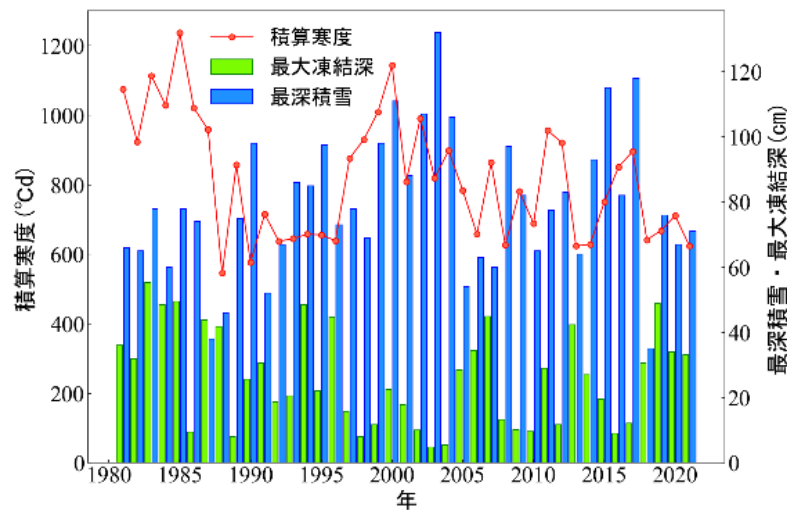


図2.11 大学構内で観測された積算寒度、最深積雪、最大凍結深の経年変化

凍土の深さと積雪状況の関係は積雪型に分類することで明確に示されることが知られている⁷⁾。その積雪型は、積雪深20cmとなった日が12月末日かそれ以降で早い、遅いとし、さらに最深積雪が50cm未満を少雪、それ以上を多雪とすることで、「早少雪型」、「早多雪型」、「遅少雪型」、「遅多雪型」の4つにそれぞれ分類したものである。図2.12にそれぞれの積雪型に該当した年の積雪深、土壌の凍結・融解の推移を示す。なお、遅少雪型に該当する年は観測期間中になかった。早少雪型となった年は3例あり、

近年は2018年にあった(図2.12 a)。この積雪型は雪による断熱効果が小さいため、凍土が深くまで形成されやすい。同様に、遅多雪型も12月の気温が低ければ凍土が深くまで形成された。この積雪型は8例あった。近年は2019~2021年にあり、いずれの年も比較的深くまで凍土が形成された(図2.12 c)。これらの積雪型のときは、凍土の融解深さも大きい。特に、遅多雪型は根雪と凍土の消失に時間を要することから春期の営農計画・作業に影響するとされている³⁾。早多雪型は最も多く、30例あった。この積雪型は積雪状況になるのが早いため、凍土が深くまで形成されにくい(図2.12 b)。

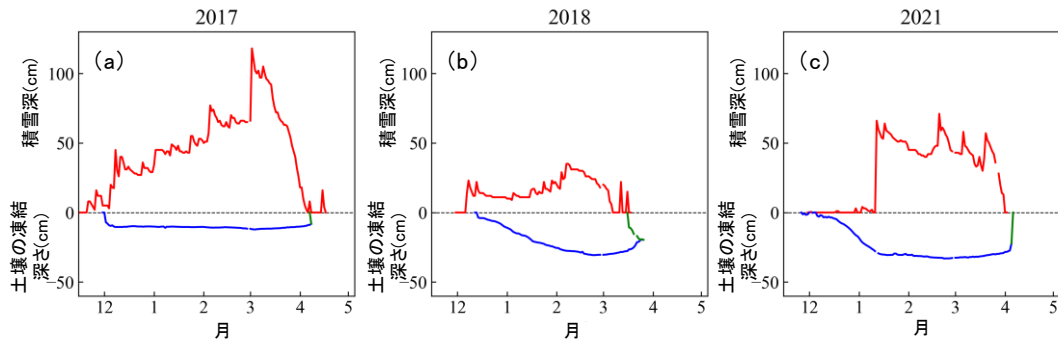


図2.12 2017年(早多雪型；a)、2018年(早少雪型；b)、2021年(遅多雪型；c)の積雪深、凍結深および融解深の推移

大学構内の長期観測の結果から、凍土の凍結・融解深さは気温と積雪深の影響を受けることが示された。既往の研究から凍土の最大深さは積雪深20cmとなった日の積算寒度と平方根に比例関係にあった⁷⁾、⁸⁾。さらに、凍土の融解深さは最大凍結深さおよび根雪完了日から凍土消失日までの積算暖度と比例関係にあることを示した³⁾。なお、積算暖度とは、0℃以上の日平均気温の積算値である。これらの関係について新たな観測データも加えて改めて検証した。その結果、図2.13に示すように、高い相関関係が得られるとともに、図内に示す直線または曲線で近似できた。また、それぞれの式の係数および相関係数も既往の研究と大きな違いはなかった。

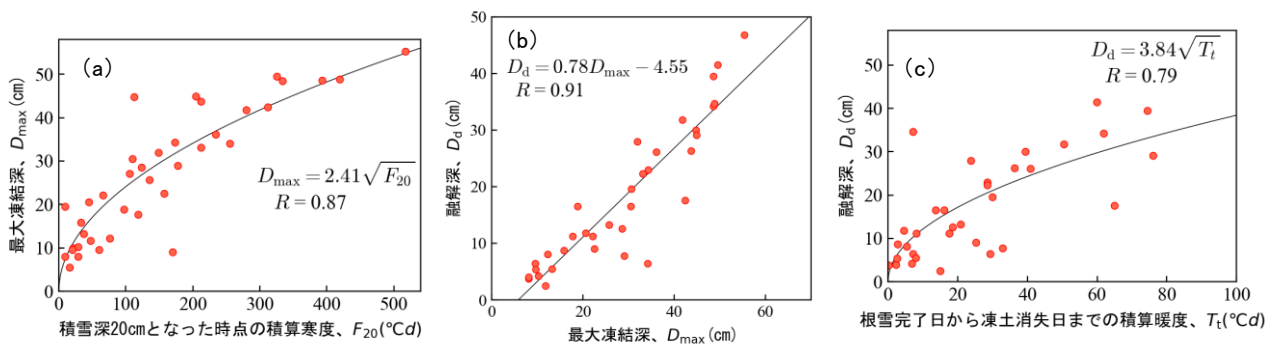


図2.13 (a)積雪深20cmとなった日の積算寒度 F_{20} と凍土の最大深さ D_{max} との関係、(b)凍土の最大深さ D_{max} と凍土の融解深さ D_d との関係、(c)凍土の融解深さと根雪完了日から凍土消失日までの積算暖度との関係

図2.14 に示すように、図2.13中の一連の式により、気温と積雪深のデータがあれば、最終的に根雪完了日から凍土の消失日までの積算暖度が推定できる。つまり、根雪終了日が得られれば、過去の気温から凍土の消失日が推定できる⁹⁾。そこで、メッシュ農業気象データにある気温と積雪深を用いて十勝地方における土壌の凍結深さおよび融解深さを推定した。ただし、メッシュ農業気象配信サーバにある地理情報からその他の農用地が1%以上のメッシュを解析対象とした。

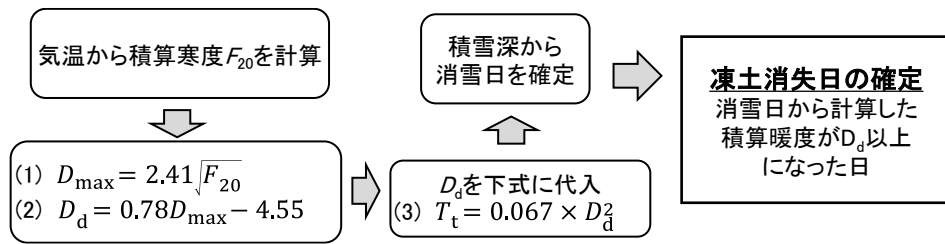


図2.14 凍土消失日の推定方法のフローチャート

図2.15および16は、十勝地方の北部、中部、南部にそれぞれ位置する足寄町、帯広市、大樹町の最深積雪と凍土の最大深さを10冬期ごとにまとめたものである。最深積雪は、1990年代において北部と中部で増加し、北部は2000年も増加した。一方で、南部は顕著な変化はみられなかった。凍土の最大深さは、すべての地域で1990年代に減少した。一方で、中部と南部は2000年代と2010年代はやや増加傾向にあった。

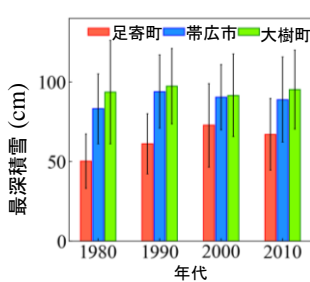


図2.15 10冬期ごとの最深積雪の平均値。エラーバーは標準偏差

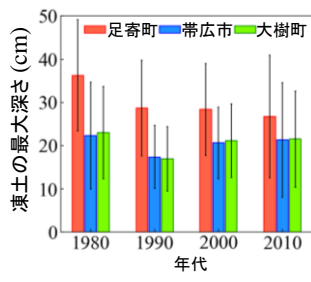


図2.16 10冬期ごとの凍土の最大深さの平均値。エラーバーは標準偏差

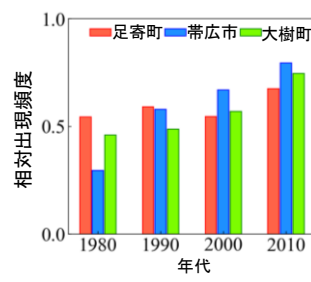


図2.17 3～4月上旬に根雪期間終了となった日の10冬期ごとの相対出現頻度

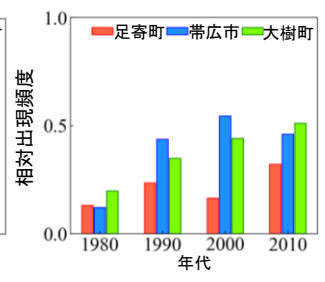


図2.18 3～4月上旬に凍土の融解完了となった日の10冬期ごとの相対出現頻度

図2.19および20は、根雪終了日および凍土の消失日が3～4月上旬となった日を相対出現頻度として10冬期ごとにそれぞれまとめたものである。すべての地域で根雪と凍土の消失は早まる傾向にあり、特に、中部と南部において80年代に比べてすべて年代で顕著な増加傾向を示した。この理由として、3月の気温の上昇によるものと考えられる。図2.21に3月下旬の積算暖度を10冬期ごとにBoxplotで示す。積算暖度も上昇傾向にあり、特に2010年代に大きく上昇した。この傾向は3月上・中旬においても確認された。上述したように積雪型によって凍土の深さは変動するが、根雪と凍土の消失は3月の気温の上昇によりも早まっていることが示された。したがって、このことは春期の営農計画・作業に影響することが示唆された。

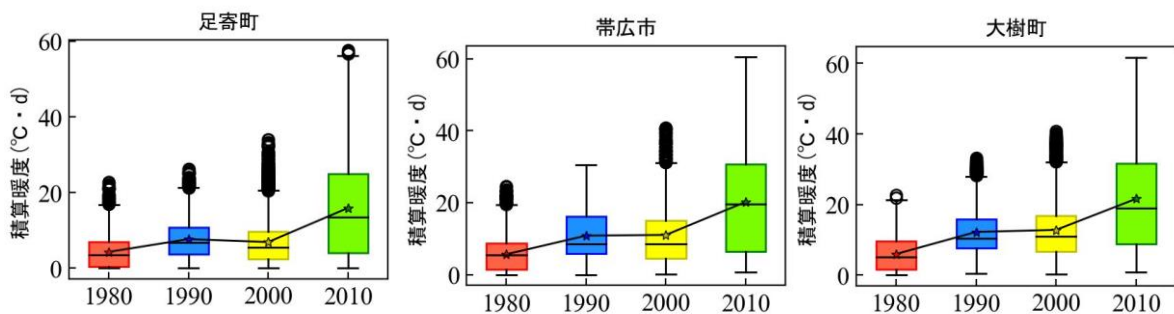


図2.19 足寄町、帯広市、大樹町における10冬期ごとの3月下旬の積算暖度のBoxplot

4) リンゴ「ふじ」の北海道導入可能性の将来予測

将来予測についてMIROC5のRCP8.5では2040年代に沿岸産地で栽培可能性が高まり、2050年代には内

陸産地でも栽培可能性が広がることが分かった。一方、RCP2.6では、沿岸部産地では栽培可能性があるが、内陸産地では2060年代でも生育基準を満たさないことが分かった。今後の排出動向を踏まえて、産地ごとに適切な品種選択をおこなう必要がある（図2.20、図2.21）⁶⁾。

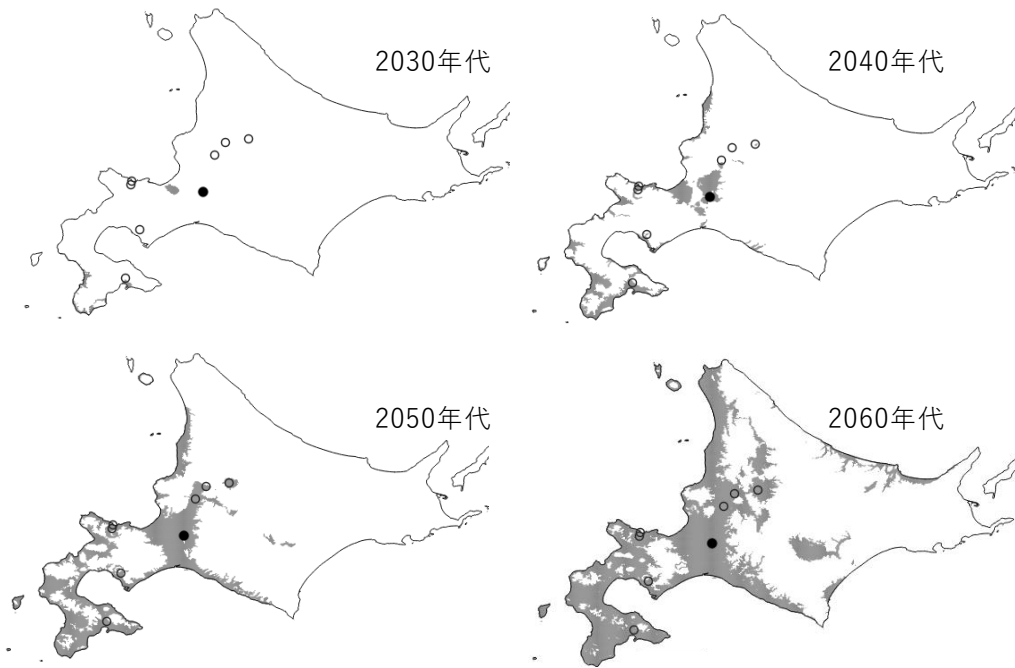


図2.20 MIROC5 RCP8.5におけるふじ栽培適地予測結果

○はりんご産地、●は道総研試験地

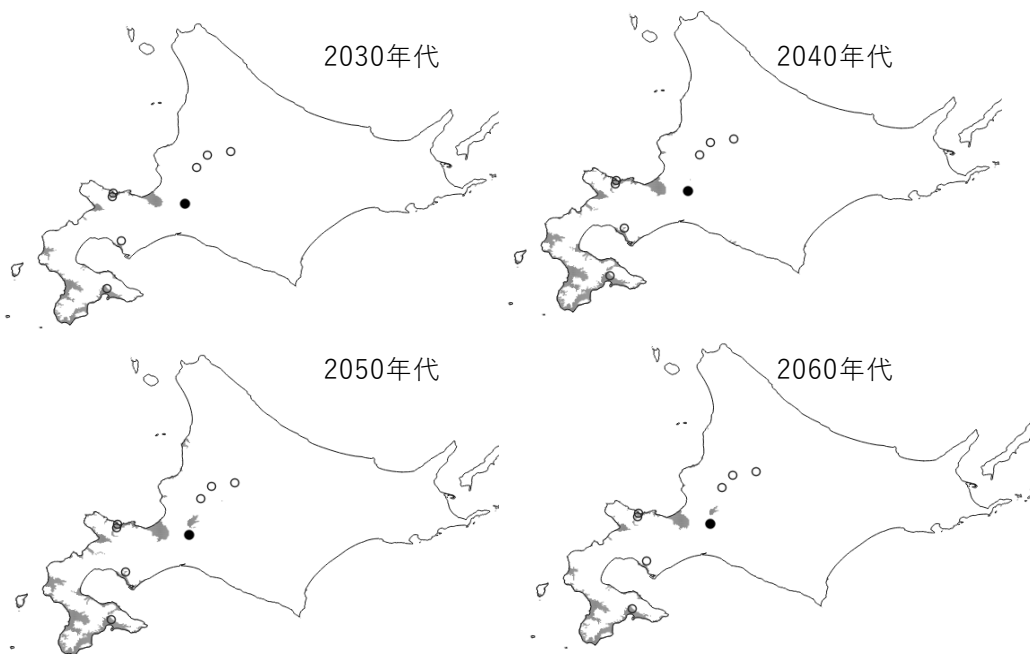


図2.21 MIROC5 RCP2.6におけるふじ栽培適地予測結果

○はりんご産地、●は道総研試験地

5. 研究目標の達成状況

将来気候シナリオを用いて今世紀末までに予想される積雪の質的変動と量的変動を重ね合わせた区分図を作成し、正負の影響を明らかにすると共に適応事例の検討を行った。また圃場サイズレベルである50mメッシュでの積雪・消雪日推定マップ作成方法を開発した。さらに春季の圃場作業開始時期を規定する十勝地方の凍土消失時期について推定法を開発し、消失時期の長期的な前進傾向を明らかにした。当初目標としなかった栽培の可能性が高くなるリンゴ「ふじ」についても、将来予測を行った。これらの結果については、富良野市における市民セミナー、農業気象学会北海道支部と共同開催の講演会、研究公開シンポジウム等を通じて生産者を含む一般市民へ情報発信を行い、本研究課題の目標を上回る成果をあげた。

6. 引用文献

- 1) 石坂雅昭：雪氷、57、23-24（1995）「メッシュ気候値から推定した日本の雪質分布」.
- 2) 井上 聡：日本雪工学会、36(3)、122-124（2020）「少雪が農業に及ぼす影響」.
- 3) 水津重雄：雪氷、65、307-318（2001）「簡易熱収支法による融雪・積雪水量モデル」.
- 4) 西森基貴、石郷岡康史、桑形恒男、滝本貴弘、遠藤 伸：日本シミュレーション学会誌、38、150-154（2019）「農業利用のためのSI-CAT 日本全国1km 地域気候予測シナリオデータセット（農研機構シナリオ2017）について」.
- 5) 小南靖弘、井上 聡、山口高志：生物と気象、23、1-8（2023）「北海道における積雪状況と春先の圃場乾湿の将来予測」.
- 6) 井上 聡、小南靖弘：生物と気象、23、<https://doi.org/10.2480/cib.j077> (in press)（2023）「気候変動適応策としてのリンゴ「ふじ」の北海道導入可能性」.
- 7) 原田祐介、土谷富士夫、武田一夫、宗岡寿美：雪氷、71(4)、241-251（2009）「長期観測に基づく積雪下土の凍結融解特性」.
- 8) 土谷富士夫：土の凍結と室内凍上試験方法に関するシンポジウム発表論文集、131-136（2001）「気候変動が土の凍結深さ及びその特性に及ぼす影響」.
- 9) 原田祐介、土谷富士夫、武田一夫、辻 修：日本雪工学会誌、27(3)、3-11（2011）「寒冷地域の農地における凍土融解前の消雪日の推定」.

II-3 北海道における気候リスク評価および適応策ローカライゼーション

学校法人東北工業大学

ライフデザイン学部 生活デザイン学科 教授

大場 真

国立研究開発法人国立環境研究所

福島地域協働研究拠点 主任研究員

戸川 卓哉

気候変動適応センター 副センター長

肱岡 靖明

【要旨】

北海道における気候リスク評価および適応策ローカライゼーションに関する理論的研究を行った。1) 寒冷積雪地における地域社会他の将来予測 SSPシナリオによる将来人口予測を1kmメッシュにダウンスケールした(北海道内)。この予測に基づき空き家予測も含め土地利用予測を行った(札幌市内) 2) 気候変動影響インパクトチェーンとローカライゼーション 3分野4課題の気候変動影響インパクトチェーンのローカライゼーションを行った。このために文献調査、ヒアリング調査を行った。整理された課題に対応する脆弱性・気候リスク評価と適応策データベース開発を行った 3) 社会システムへの影響連鎖評価 文献調査とともに北海道の基礎自治体・関係機関を対象にインタビューを行い、ステークホルダーマッピングを行い、適応策実施に向けた地域社会における諸課題を整理した 4) インタラクティブな適応経路開発 既往研究、規格、ガイドラインの調査を行い課題を整理した。地域気候変動適応ニーズに沿ってアダプテーションパスウェイを、ステークホルダーが参加したグループワークで検討する手法を開発した。

1. 研究開発目的

北海道における気候リスク評価および適応策ローカライゼーションに関する理論的研究を行う。北海道における地域社会の将来予測と、それがもたらす気候変動の影響予測を行う。北海道における社会制度や構造に合ったAdaptation Pathwayに関する研究を行う。これまで適応策立案を支援してきた経験を活かし、地域気候変動適応センター等と連携し、道内各セクターの適応策を支援する研究を実施する。本サブテーマと課題全体の結果は、北海道における気候変動適応の計画や実施に向けた取り組みに大きく貢献し、同様の気候帯における国内外の適応にも資すると期待される。

2. 研究目標

北海道における気候リスク評価および適応策ローカライゼーションに関する理論的研究を実施し、対象地域における地域社会の将来予測と、それがもたらす気候変動の影響予測を実施し、その上で北海道に合った適応経路に関する研究を行う。サブテーマ1と共に北海道における地域気候変動適応策立案への貢献を目指す。そのためのインパクトチェーンや適応経路をそれぞれの分野とインタラクティブに開発する。また開発成果は、国内他地域や海外での活用を目指し、国立環境研究所気候変動適応センターなど国内適応研究や、気候変動適応情報プラットフォームなどの情報基盤と共有する。

3. 研究開発内容

1) 寒冷積雪地における地域社会他の将来予測

A-PLATより提供されているデータセット、「環境省環境研究総合推進費S-8(2010~2014)」における影響評価の研究成果、「地球温暖化予測情報第9巻データセット」、また公開されている地理データ(国土数値情報など)を収集したGISデータとして整備した。また気候シナリオ(気温と降水量)は、同A-PLATで提供されているMIROCからのダウンスケールデータセット(1 km)を使用した。

気候変動だけでなく、社会的プロセスの影響により、2050年には地域社会が変化する。この予測のため、国立環境研究所が公開している、「社会経済シナリオに応じた市区町村別の人口推計」(推進費2-

1805)によって2030年、2050年の人口予測とした。このデータはSSP(shared socio-economic pathways)と呼ばれる社会シナリオに基づいており、本課題ではSSP2(中庸)シナリオを採用した。このデータは市区町村ごとであるので、本課題では1kmメッシュへダウンスケールした。分布は2010年の国勢調査に基づくとした。人口変動などの予測を元に、土地利用の予測を、推進費2-1708で開発した手法

(TerraSet, Clark Labs)を採用して100mメッシュでの推定を行った(Estoque et al., 2019)¹⁾。北海道全体での予測のため、最初の予測試行対象として札幌市を選択した。人口減少によって建物用地に空き家が発生し、水田や農地の無管理地が発生することが予測されるので、先行研究と同様に空き家や無管理農地を土地利用種類として追加し、現在の土地利用種からの遷移確率を推定し、2030年における土地利用を推定した。

2) 気候変動影響インパクトチェーンとローカライゼーション

○気候変動影響インパクトチェーン

地方公共団体や地域気候変動適応センターは、地域の状況に応じた「適応計画」の策定が求められている。気候変動の影響は様々なプロセスを得て地域社会に波及し、地域に固有の脆弱性や暴露要素と相関することで、その効果が増幅したり低減したりするために、地域の状況に応じた計画づくりには、それらの評価が欠かせない。

北海道の基礎自治体を念頭におき、文献調査・ヒアリング調査を経て気候変動に関する影響の連鎖を、先行するドイツ国際協力公社(GIZ)および大場ら(2019)²⁾が開発した気候変動影響インパクトチェーンを用いて可視化を行った。国内外の先行研究を基に、気候変動が地域もたらす影響についてインパクトチェーンを4つのステップに基づいて作成した。4つのステップとは、i 可能性のあるリスクの特定、ii ハザードと中間的な影響の特定、iii 脆弱性の把握、iv 暴露を受ける要素の把握である。インパクトチェーンにおいて気候変動影響の正の影響も要素に組み込み、図示した。

対象とした分野・課題は、北海道の気候変動影響、特に雪・寒冷に深く関係する、国民生活・都市生活分野(雪道)、農業分野(水稲・土地利用型作物(秋まき小麦))、災害分野(土砂災害)の3分野4課題とした。

○脆弱性・リスク評価

雪道・秋まき小麦について、外力・暴露・脆弱性を評価するための指標を選定した。各種公開されている統計データより、市町村別のデータを収集した。対象の市区町村は、北海道内の179市区町村、気象庁の振興局別のデータしか存在しない統計は該当する市町村別のデータに整理し直した。

収集した各統計データの正規化を行った。また、外力・暴露・脆弱性の3分野でそれぞれ平均値によりリスク評価を行った。また、評価に当たって、以下の仮定をした。

- ・評価に当たっては指標よっての重みづけを行うべきか検討をしたが、重みづけの根拠となる有力な科学手法は確認できなかった。慣例的な全ての指標を同じ重みで扱うこととした。
- ・該当する統計データのうち市町村別でのデータは少なく、より大きいスケールのデータで代替した。
- ・暴露と脆弱性で同じ統計データを元に行っているものがあるが、暴露は気候変動によって被害を受ける対象そのものの数、脆弱性はその割合として扱っている(例えば、同じ人口統計を利用して暴露は高齢者数、脆弱性は高齢者割合を利用)。

○適応策データベース

以上の作業より、選定された課題における、適応策の事例の情報収集を行い、データベース化した。ここでは、文献調査、インパクトチェーン作成や後述のヒアリング過程で収集した情報の、修正・追加・整理を行った。適応策データベースは、雪道で32項目、小麦で17項目を作成した。

3) 社会システムへの影響連鎖評価

地方公共団体やセンターは、地域の状況に応じた「適応計画」の策定が求められている。気候変動の

影響は様々なプロセスを得て地域社会に波及し、地域社会システムに固有の脆弱性や暴露要因と相関することで、その効果が増幅したり低減したりするために、地域の状況に応じた計画づくりには、地域社会システムの適切な理解が欠かせない。

気候変動影響及び気候変動適応が地域社会にもたらすインパクトについて、地域社会システムにおける、動学的・実態的な情報に基づいて評価するため、適応プロジェクトでの分析に関する文献(Paloma Esteve et al., 2018)³⁾を参考に、以下のステップを定めて評価を行った。

ステージ1. ステークホルダーマッピング

適応プロジェクトの成果を最大化するために、どのようなステークホルダーが関わるべきかを特定した。選定は、プロジェクトの中身、期待する成果、インパクト、使える資源、巻き込む目的、プロジェクトに関わろうというステークホルダーのモチベーションや能力などをベースに、巻きこむべきステークホルダーを選定した。

ステージ2. ステークホルダーマッピングプロセスの評価、優先づけ

ステークホルダーの評価と分析を行い、優先づけした。各ステークホルダーが必ずしも同じ段階あるいは同時期に関わり合う必要はない。また同じステークホルダーが様々な段階で異なる方法で関わる場合もある。そのため膨大なステークホルダーリストになるが、各種の因子によって優先づけを行った。

ステージ3. ステークホルダーマップの分析

特定したステークホルダーとその関連について、以下のポイントを考慮し分析を行った。

- ・現状の適応プロジェクトとステークホルダーとの関係
- ・ステークホルダーが持っているかもしれない知識、ノウハウ
- ・ステークホルダーの適応プロジェクトに対する賛成・反対意見。またステークホルダー同士、あるいはステークホルダーとプロジェクトの間に持ち上がる衝突の可能性
- ・コミュニケーションの手段
- ・意欲や逆にコミットしたくない理由について。参加への障壁

4) インタラクティブな適応経路開発

最初に国内外の適応経路(アダプテーションパスウェイ)に関する定義・既存研究・実践事例や、その他関連する情報を文献調査によって収集した。特に、農業や災害等の複数の分野アダプテーションパスウェイの既存研究・事例等を収集、特徴を整理した。

この成果と、北海道における様々な気候変動とその影響に関する予測や、地域社会特性、また多様なステークホルダーの課題やニーズを踏まえて、2050年、2100年に向けた適応策の選択とスケジュールは、科学的合理性のみで決まるものではない。2)における適応策に関する定量的なデータに基づき、多様なステークホルダーが将来の地域社会像や、それに基づいた妥当な適応策の検討と、現実的な計画を議論することによって適応経路を検討する手法を開発した。

既に開発されている気候変動に対するインパクトチェーン開発の手法を参考にして、気候変動と地域社会の将来像、そこから導き出される課題と対応する適応策、適応策のスケジューリングをグループで行うワークショップの進行と教材について検討を行った。研究期間中が、感染症拡大防止の観点から出張や対面が大きく制限された状況で検討は困難であった。しかし、制限があまりない機会を利用し、ワークショップ手法研究チーム内部におけるインパクトチェーンワークショップを含めた試行を繰り返した。また研究期間最後に外部参加者を招いた検討を行った。

4. 結果及び考察

1) 寒冷積雪地における地域社会他の将来予測

日本版SSPにおける市区町村別人口推計を、本サブテーマ独自に1kmメッシュへダウンスケールした結果を示す(図3.1)。

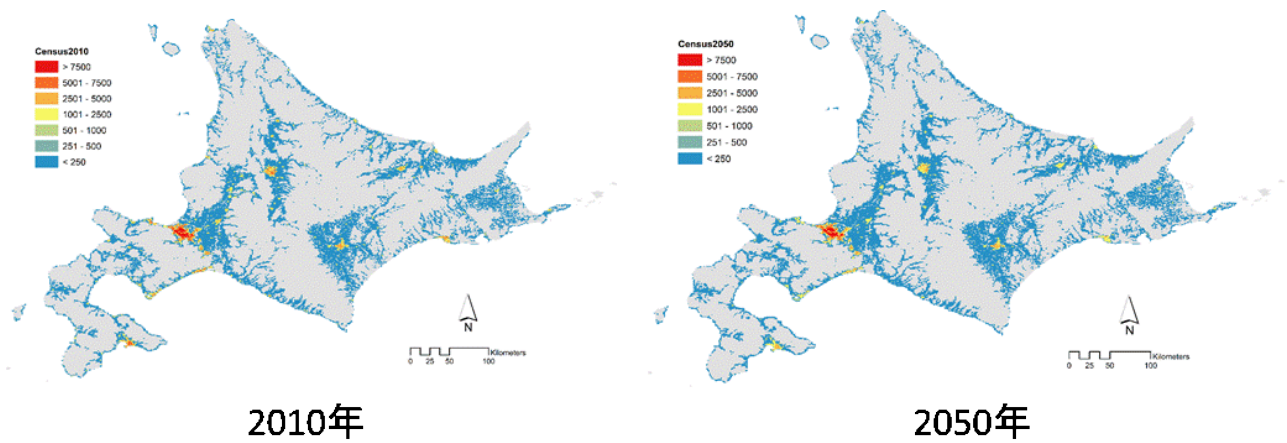


図3.1 2010年と2050年における日本版SSPにおける市区町村別人口推計結果

課題としては、集落構造等を考慮せずにダウンスケールしたため人口減少が平滑化されている。このまま土地利用を推定するとあまり変化のないものとなる恐れがあった。しかし北海道内各市区町村において、詳細な人口減少をGISにより示すことは、気候変動影響のみならず社会的要因からも将来を予測必要があることを可視化している。

人口のダウンスケールがより現実的である札幌市に限り土地利用変化を推定した。札幌市における土地利用変化予測を図3.2に示す。札幌市の南部(南区)は森林が広がり、中心部は北西に位置する。現在、建物用地は2030年において都市域周辺部から空き家が発生することが予測された。2050年には人口減少に伴って、さらに空き家が増えることが予想された。

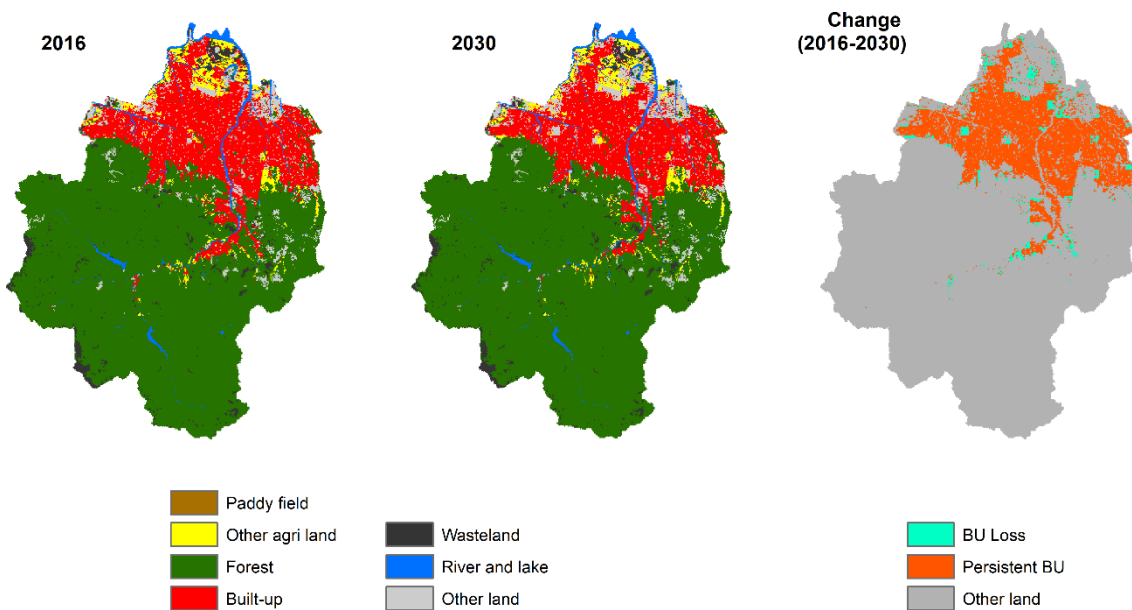


図3.2 2016年(基準年)と2030年における土地利用分布予測

2) 気候変動影響インパクトチェーンとローカライゼーション

○気候変動影響インパクトチェーン

選定した3分野4課題のローンライズ土インパクトチェーンを、文献調査、ヒアリングに基づいて開発を行った。

・国民生活・都市生活分野(雪道)(図3.3)

気候変動の影響により北海道では積雪期間の短縮化が見込まれるものの、含水率の高い雪の増加といった雪質の変化や、いわゆるドカ雪などの極端現象の増加が予測されている。

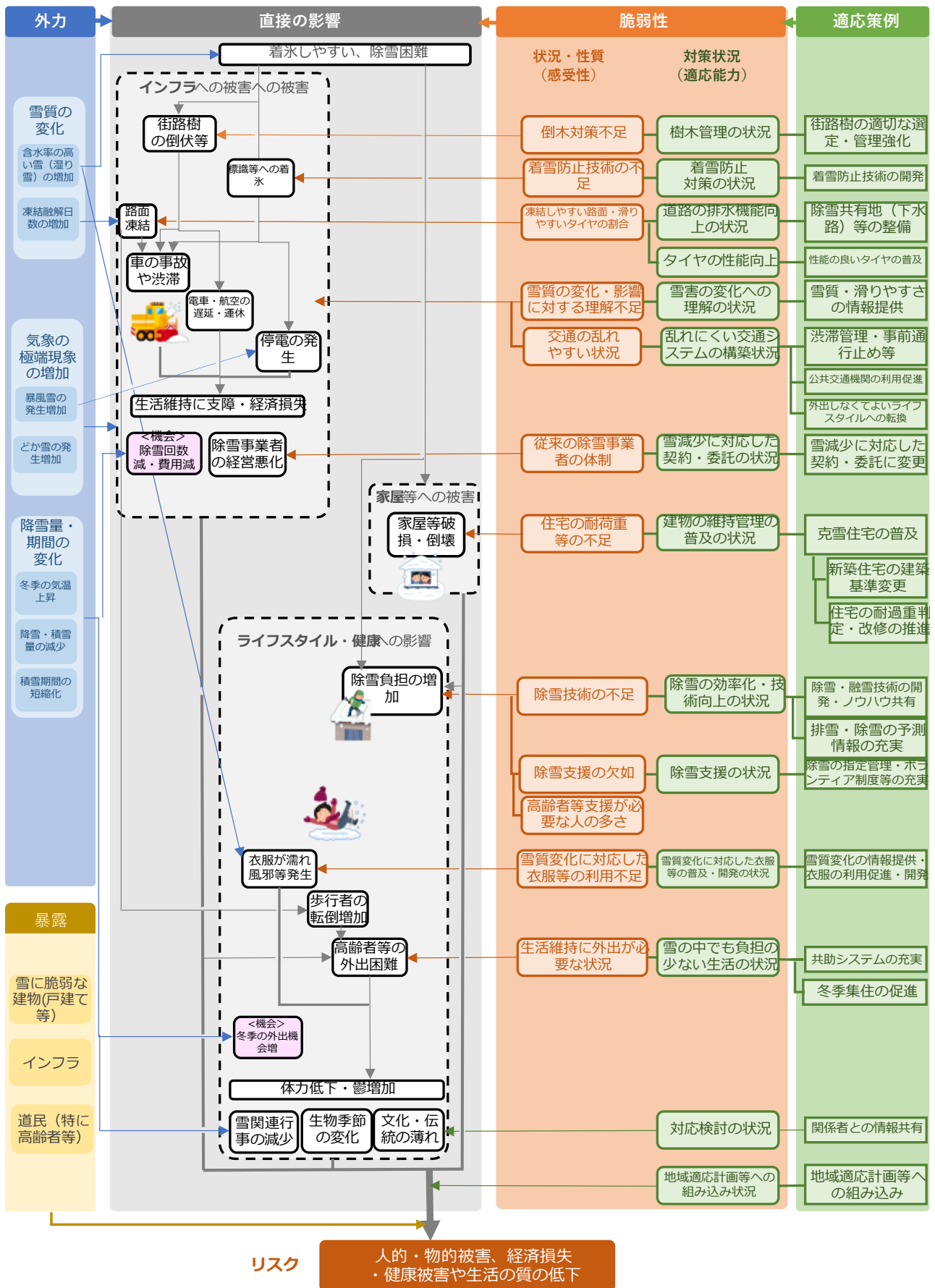


図3.3 インパクトチェーン（国民生活・都市生活分野（雪道））

それにより交通等のインフラについては、路面凍結、街路樹・標識等への着氷などが発生し、それらが交通渋滞・停電等を引き起こし生活に支障をきたすと考えられる。家屋等については、含水率の高い雪のために家屋倒壊・破損の増加が懸念される。ライフスタイル・健康については、衣服が濡れて風邪等が発生しやすくなることが予想される。雪期間の短縮により冬季の外出機会増となるプラスの影響も予想されるものの、交通インフラの影響に加え、路面凍結のために歩行者の転倒が増加することなどで外出機会の減少等の影響も懸念され、住民の体力の低下、鬱等の増加にもつながる恐れがある。これらの影響により最終的には、人的・物的な被害の他、生活の質の低下、経済損失のリスクとなり得る。

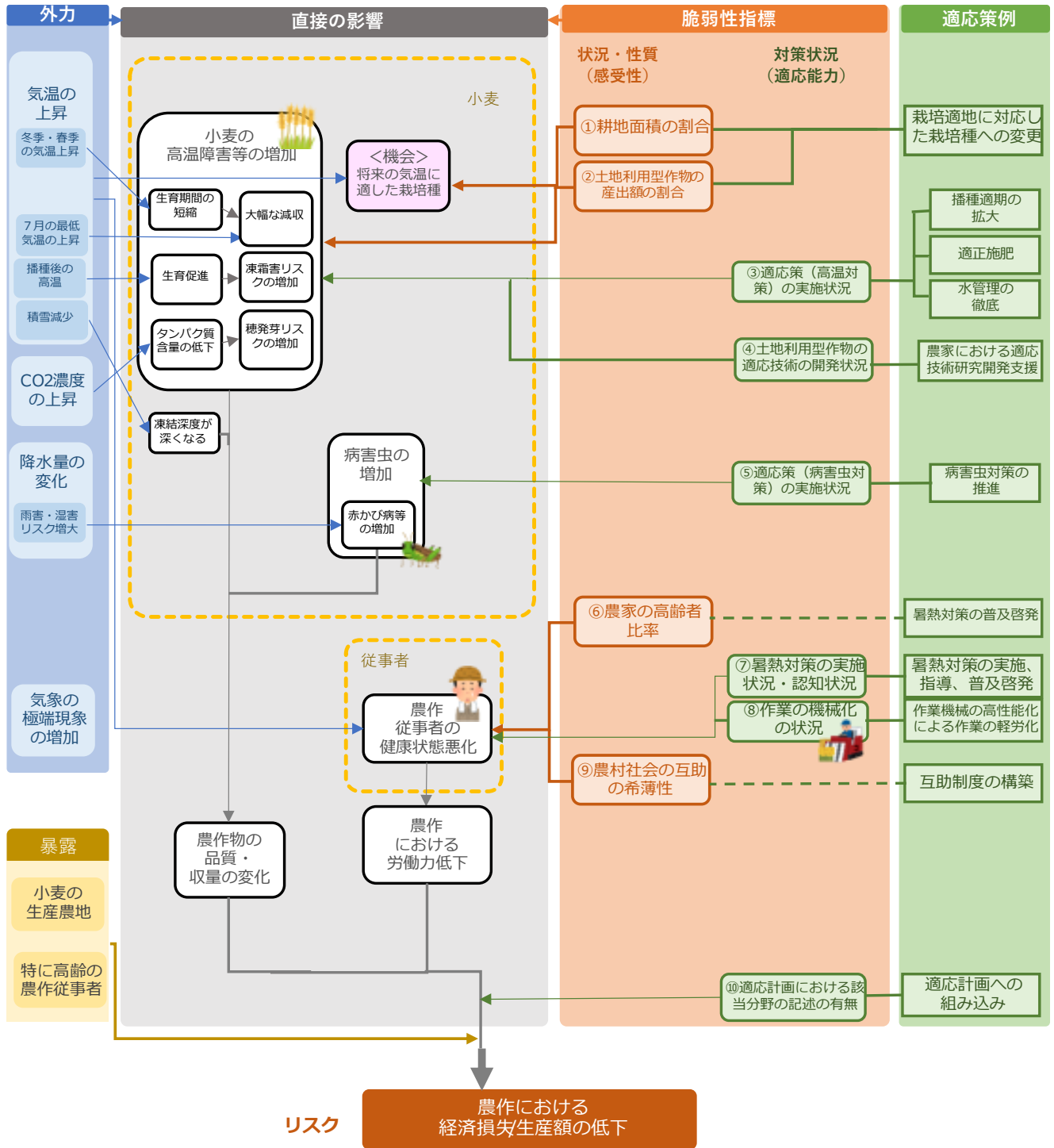


図 3.4 インパクトチェーン（農業分野（秋まき小麦））

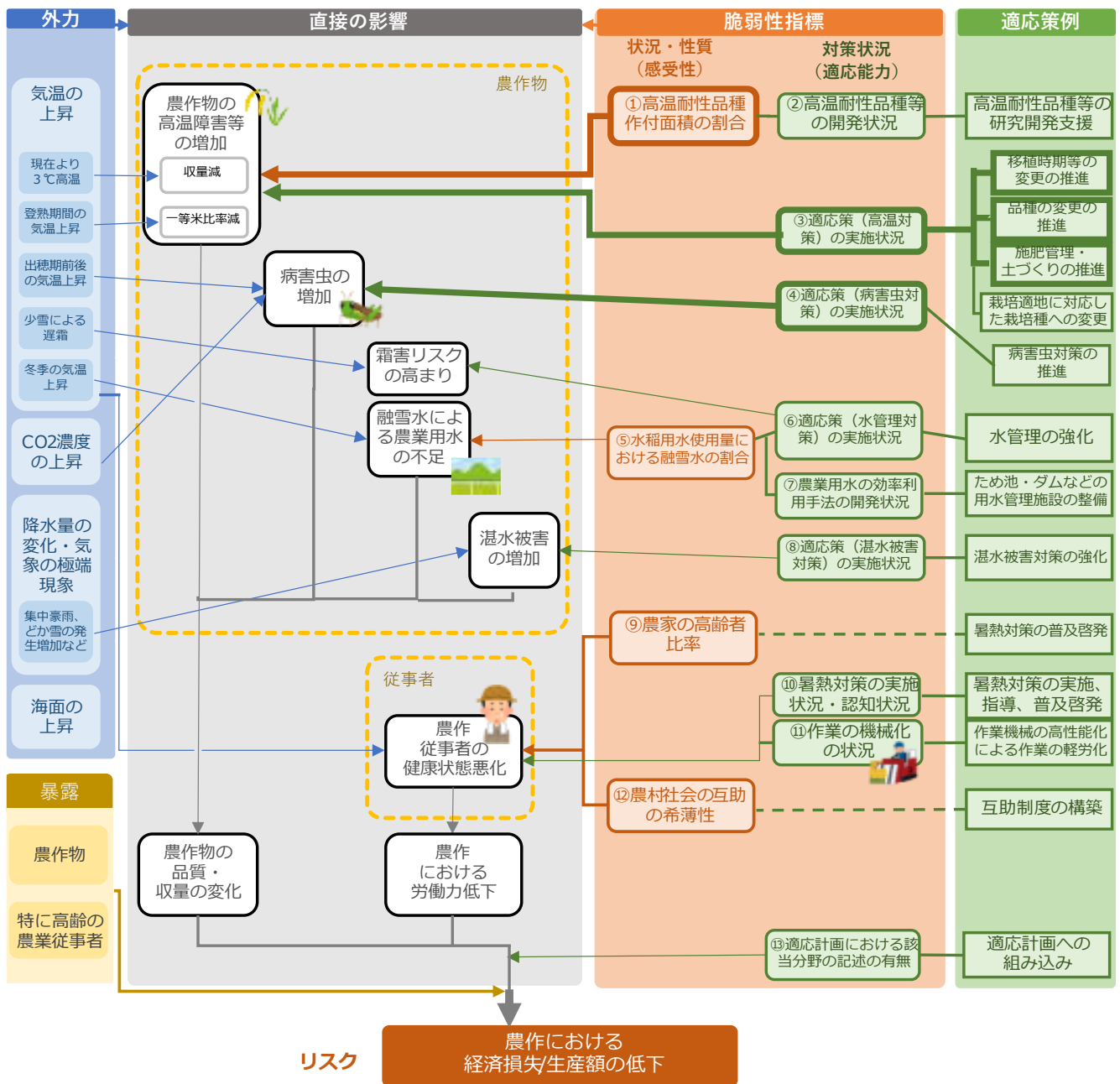


図3.5 インパクトチェーン（農業分野（水稻））

適応策としてはこれらの影響を踏まえた交通整備、除雪体制の構築、克雪住宅の建築、情報周知、積雪期間も負担の少ない生活が送れるような共助システムの充実等が必要となる。ヒアリングでは、特に北海道の人は本州とは違い含水率の高い雪や路面凍結をこれまであまり経験していないことから、雪質の変化の理解不足が脆弱性の一つとして挙げられ、その適応策として雪質の変化が分かりやすいように住民への情報発信を行うことが重要になるのではないかと指摘もあった。

・農業分野（小麦・水稻）の影響連鎖について（図3.4-5）

小麦については、特に播種後の高温や積雪減少などの外力による収量減少や品質低下、あるいは降水量・気温の変化による病虫害の増加などの影響が想定される。それに対応した栽培技術の変革や品種開発などの適応策を講じることが必要となる。水稻については、上記に加え、積雪減のため越冬しやすくなるツマグロヨコバイなどの害虫の増加や、小雪による遅霜からの霜害リスクが高まる恐れがある。冬の気温上昇からの融雪水による農業用水不足の影響も懸念され、水管理も含めた栽培技術の変革が必要となる。

農業全般の気候変動の影響として他にも、ドカ雪の発生による農業ハウス倒壊の増加、積雪の質・量の変化による土壌凍結・土壌風食、越冬作物への影響、病虫害の変化、集中豪雨による被害等の発生の懸念がある。現状、農業分野では特別な適応策をせず、影響が顕著になってから対応すれば良いという認識を持たれがちであるが、将来を見据え、着実に適応策を講じていくことが肝要である。

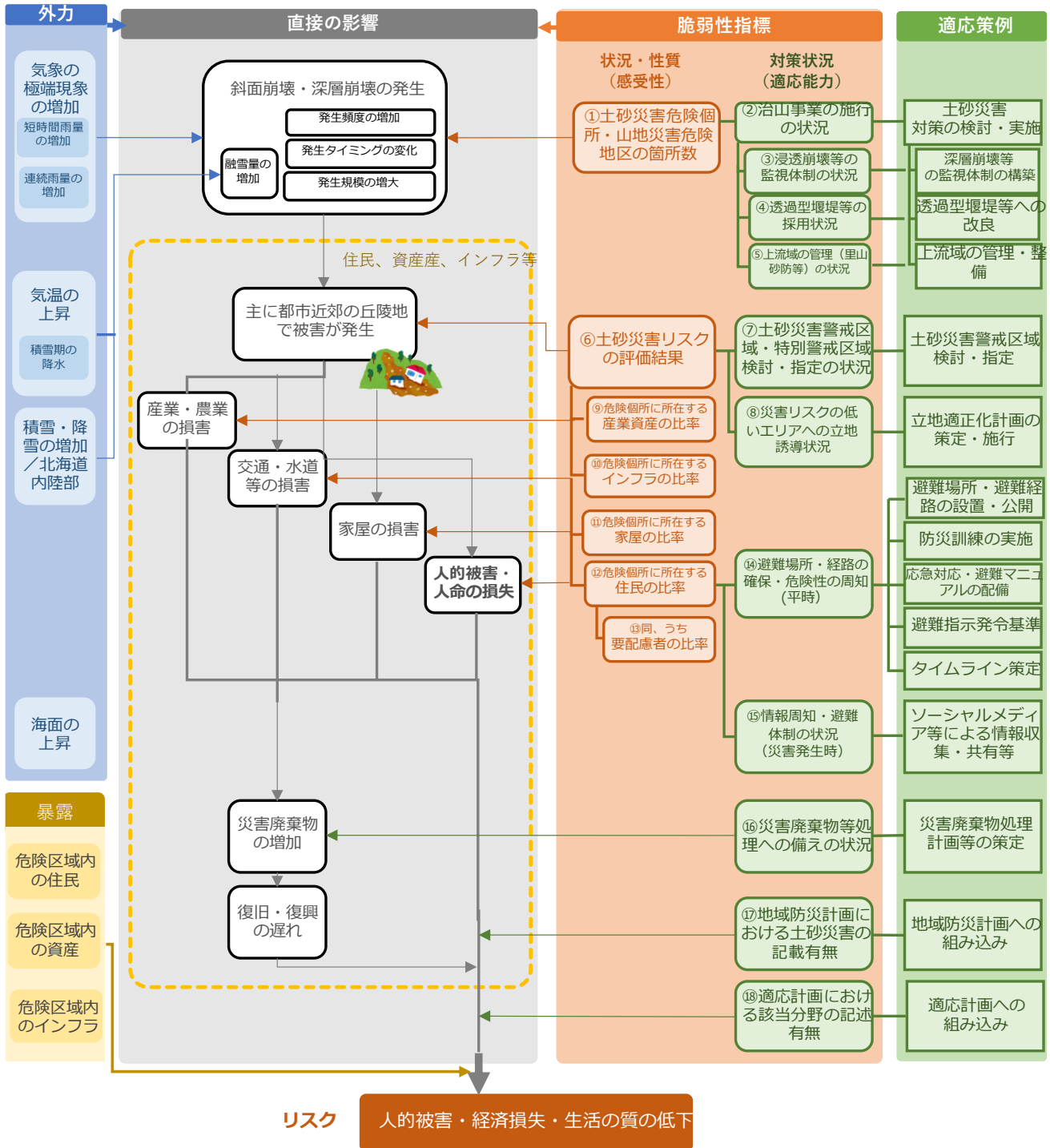


図3.6 インパクトチェーン（災害分野（土砂災害））

・災害分野（土砂災害）の影響連鎖について(図3.6)

土砂災害については、気候変動の外力として短時間雨量や連続雨量の増加に加え、北海道内陸部では積雪・降雪の増加も予測される。積雪期の降水は、短期間で融雪量の増加に拍車をかけることに

なり、よりいっそう土砂災害が増加する影響が想定される。脆弱性としては、感受性で土砂災害危険個所の個数、危険個所に所在する家屋の比率、要配慮者の比率等が挙げられる。適応能力で、地産事業の施行状況、防災計画・避難体制の状況等がある。

適応策としては、ハード的な整備とともに、訓練や避難マニュアルの配備などソフト的な対策を講じることが必要となる。

○脆弱性・リスク評価

選定した各分野について、リスク評価の考察を行った。

雪道について、外力評価は積雪の多い倶知安観測所に属する市町村が1.0と高い。暴露評価は、人口・建物が集中する大都市が高い傾向にある。脆弱性評価は逆に、高齢化率が低く、自動車の交通分担率が低い大都市が比較的低い傾向にある。リスク評価では、これらがある程度相殺されて道内で際立ってリスクが高い・低いという市町村は見られなかった。

秋まき小麦について、外力評価は気温が高くなりやすい南部が高い傾向がある。暴露評価は、小麦の生産高や高齢の高齢従事者等を評価している。脆弱性は、小麦生産の多い農村部が高い傾向にあった(図3.7)。

なお、もともと該当する市町村別での統計データが少ない上に、統計によっては一部の市町村でデータ欠損(事実のないもの・個人又は法人その他の団体に関する秘密を保護するため、統計数値を公表しないもの)があるために、データ欠損がある市町村では十分な評価ができず、更なる検討が必要だと判明した。市町村毎のリスク評価の今後の課題と考える。

○適応策データベース

選択した3分野に対する、適切な分類、適応策名称、暴露・外力対応、効果、準備期間、コスト(インシヤル、維持)、コベネフィット、トレードオフなどを一覧にまとめたデータベースを開発した。

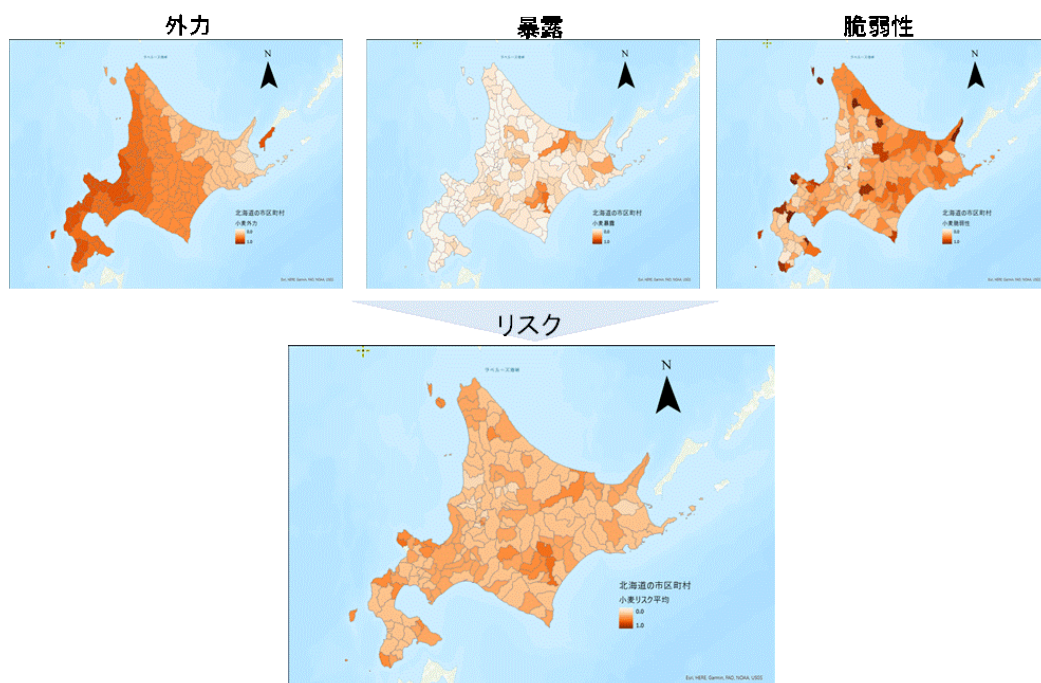


図 3.7 リスク評価 (秋まき小麦)

3) 社会システムへの影響連鎖評価

気候変動適応について、北海道の基礎自治体を対象に、北海道に特徴的な雪・寒冷に関わる気候変動

影響のうち特に影響の大きいと3分野の検討を行った。さらに、地域レベルにおける課題や計画の対応状況を整理した。

インタビューは計6回、延べ25名の専門家にインタビューを実施した。文献調査・インタビュー調査で取得したデータから、各ステークホルダーの役割や、つながりを可視化しステークホルダーマップとして取りまとめた。また、適応の影響と適応への関心の2軸から、ステークホルダーを4つに分類し適応推進のための今後の連携方法を分析した。

○国民生活・都市生活（雪道）（図3.8）

①事業者による除雪

- ・自治体は除雪業者に委託し、幹線道路等の除排雪を行っている。ヒアリングによると、札幌市では一定の除雪基準を市で設けているものの、実際の出勤はある程度受託者の判断で行われている。留意点として、除雪事業の建設企業所有の除雪機械台数の減少や老朽化の進行、除雪オペレーターの減少や高齢化等といった大きな課題がある。
- ・住民が個別に除雪業者に依頼を行う場合もある。

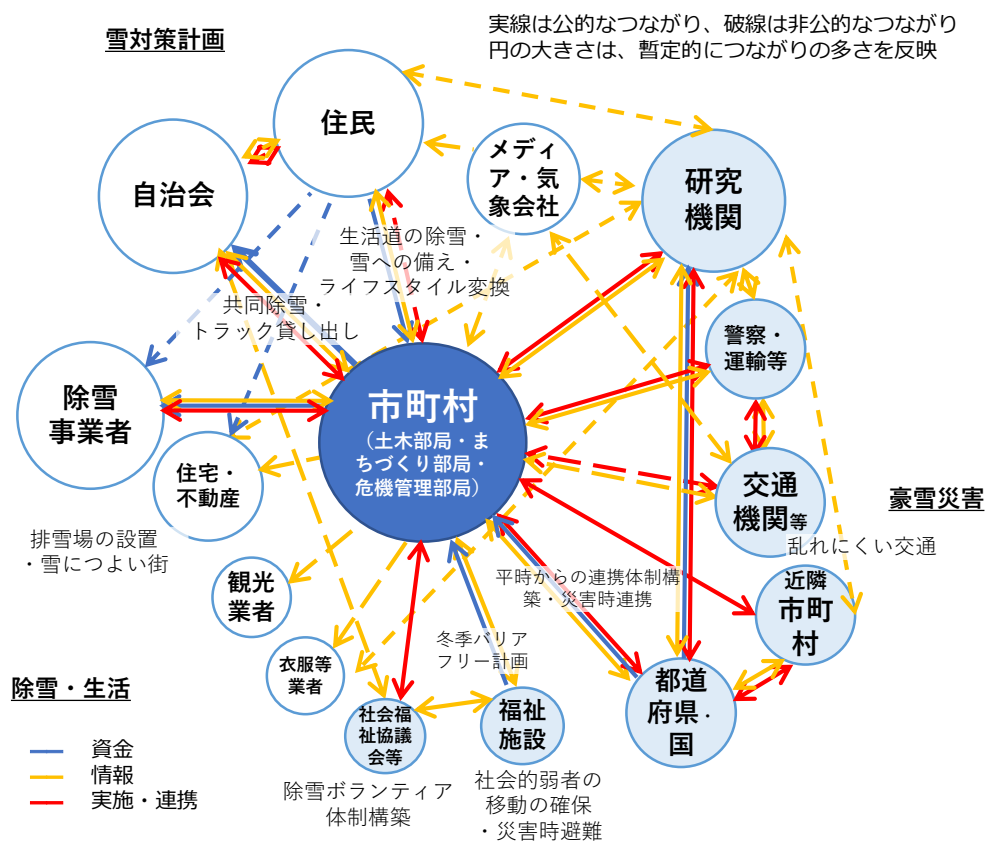


図3.8 ステークホルダー分析（雪道）

②住民・自治会等による除雪

- ・生活道等の住民・自治会等による除雪は、パートナーシップ制度、共同除雪のような形で住民や自治体と連携して実施されている。また、近隣の雪置き場の清掃、道路への砂撒きによる転倒防止等を自治体から住民等に協力を依頼している。

③研究機関による影響や適応策の研究・情報共有

- ・研究機関等で気象研究、適応の研究が行われている。より精緻な気候変動予測や、適応策の研究や情報発信は、各ステークホルダーの備えにつながる。

④道路管理者・交通機関による交通確保等

- ・道路管理者や交通機関は、豪雪時の重要路線の交通の確保、通行制限、渋滞情報の発信等を実施している。

⑤今後の連携方法検討

- ・除雪事業者との連携に当たっては、国土交通省の提言では、除雪の効率化を図りつつも将来にわたっても持続的に除雪体制が確保されるように、夏期の道路維持作業と冬期の除雪作業を一体として発注し、建設企業等が通年の仕事量を確保しやすくしたりするなどの取り組みの重要性を指摘している。
- ・ヒアリングを行った自治体でも除雪体制確保を課題と感じていた。短期的な課題解決方法としては、除雪事業者への過不足の少ない発注と、適切な除雪体制の整備につなげるために、積雪シーズン前に研究機関等から自治体に対して積雪量予測等の情報提供の協力があるとよいと意見があった。
- ・都市部では、堆雪スペースが不足する傾向にある。近隣の堆積スペースがない場合はトラックでの雪の運搬距離が長くなるため除雪費用の増加にもつながる。ヒアリングでは公共用地の確保に加えて、自治体が民間の不動産会社や住宅メーカー等と連携して、排雪・耐雪を考慮した住宅づくりやスペースの確保を促すことが重要ではないかという意見があった。
- ・北海道では、今後、ドカ雪の増加や、乾雪から湿り雪へ雪質が変化することも予測されることから、住民がそうした気象状況の変化を理解し、備えることも必要となる。ヒアリングでは、研究機関・気象予報会社・メディア・ICT関連企業などが、積雪量だけでなく雪質の変化に関する情報や、本州で行われている「雪おろシグナル」のような適切な除雪を促す情報、雪による交通渋滞の情報などの発信を行うことが有効ではないかという指摘があった。
- ・自治体への除雪水準を上げるよう求める住民の声も多い。特に、除雪した雪を住宅前に置く「置き雪」に関しては、不満が多いようだ。しかし他方、人口減少・高齢化が進むなかにおいて、自治体の財政は今後一層厳しくなると予想されており、多くの自治体でこれ以上除雪水準を高めることは困難である。ヒアリングでも、このような状況から、住民・自治会等へによる除雪の自助・共助は今以上に必要になるといった指摘があった。将来の気候変動影響や、社会経済的な状況も共有し、ワークショップを行い、住民と一緒に適応策を考え、住民に主体的に策を考え行動してもらう手法も有効ではないか、という指摘があった。

○農業分野（小麦）（図3.9）

①適応策に関わる研究開発

- ・気候変動適応計画において、高温耐性を付与した品種の開発を基本とするとしており、その主体は、地方自治体の農業試験場などが主である。

②適応策に関わる実証事業等

- ・気候変動適応計画において、高温耐性品種の作付拡大を図るため、各関係機関が一体となった高温耐性品種の導入実証を行うものとしている。

③情報提供・理解促進

- ・農林水産省は適応計画を作成し、適応策関連レポートをホームページ等で掲載する等、適応策に関する情報を行っている。また国立研究開発法人の農業・食品産業技術総合研究機構等でも、研究・情報提供が行われている。
- ・ヒアリングでは、全国・都道府県にある農業改良普及センターや、農協の営農技術員等を通して、適応策等は速やかに農家に情報共有されるということであった。

④今後の連携方法検討

- ・確度の高い将来の気候変動・温暖化の程度や年次変動の拡大程度の情報がない中では、適応策の検討・実施を進めることは難しい（特にハードインフラ整備が必要な適応策）。適応策の研究開発主体である農業試験場等は気象の研究機関でないことから、農研機構等や、適応センター等との専門の研究機関との連携はより重要となってくる。
- ・ヒアリングでは気候変動の影響の検証や高温耐性品種の開発・適応策の検討には、高温下での研究情報も必要となってくることから、他都道府県の農業試験場等との広域的な連携を一層強化す

る必要があるという意見もあった。

- ・効果的な適応技術の開発・普及に向けて、農業試験場や研究機関等と、ICT関連企業・スマート農業などの民間企業との共同研究などは今後も継続・強化していく必要がある。
- ・ヒアリングでは、地域の農業の状況は、加工産業、流通業などの地域の産業や雇用にも大きく関わってくることが指摘された。品種や耕種を変更が必要と見込まれる地域では、検討段階からそのような地域の関連産業と連携して検討を行うことが肝要と思われる。
- ・高温耐性品種等の栽培を増やしたとしても、消費者が既存の品種・ブランドを愛好し思うように販売につながらない懸念がある。消費者の気候変動等の状況の理解を促進し新しい取り組みを受け入れる土壌づくりや、流通業、レストラン等を巻き込んだ新品種の利用促進も望まれる。

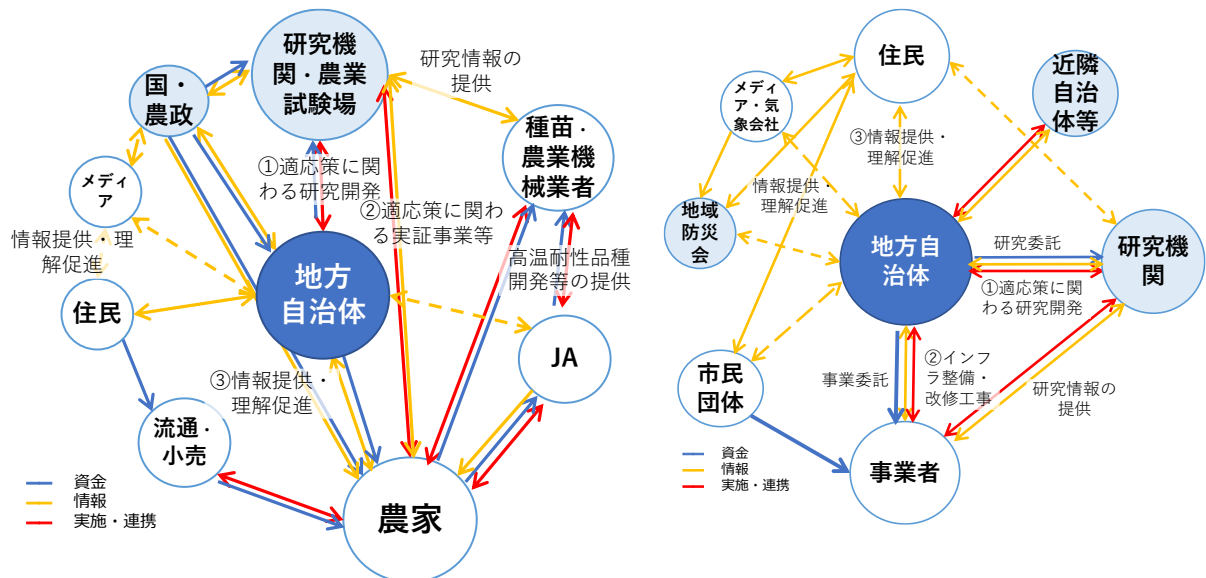


図3.9 ステークホルダー分析（左・農業分野（小麦）右・土砂災害）

○災害分野（土砂災害）

①適応策に関わる研究開発

- ・気候変動適応計画でも、水害、高潮・高波、土砂災害いずれについても、ソフト・ハード両面における調査研究の必要性が記載されている。

②インフラ整備・改修工事

- ・気候変動適応計画でも、比較的発生頻度の高い外力に対する防災対策、施設能力を上回る外力に対する減災対策として、地域の実情に即したインフラ整備や改修工事を行うものとしている。

③情報提供・理解促進

- ・気候変動適応計画（閣議決定）でも、避難、応急活動、事業継続等のための備えとして、分かりやすい情報の提供に努めるものとしている。

④今後の連携方法検討

- ・気候変動の影響と思われる豪雨、大規模台風により、近年多くの土砂災害が発生しており、今後もこの傾向が続くと考えられる。自治体の施策強化や、住宅事業者、金融機関等と協働して、事前に手戻りの少ない取り組みを進めることが重要である。
- ・メディア・近隣自治体等との情報共有を密にし、これまでの経験が通用しない規模の豪雨であるなど分かりやすい情報発信、避難情報の発信等を行うことも大切である。

4) インタラクティブな適応経路開発

○既往研究、規格、ガイドライン

国内外の適応経路に関する定義・既存研究・実践事例やその他関連する情報を研究論文、書籍、報告書等の文献調査によって、農業や災害等の複数の分野アダプテーションパスウェイの既存研究・事例等

を収集、特徴を整理した。

まず、現時点でアダプテーションパスウェイに、十分コンセンサスがとれた定義はなく、多様な研究者がそれぞれの定義付けを行っている。

IPCC AR5⁴⁾では、第5章Coastal Systems and Low-Lying Areas(p. 389)に例を挙げながら

- 既存の対策では足りなくなる局面 (adaptation tipping points (ATPs)) を定める
- それがいづなのかを正確に求めることの重要度が高い訳ではない
- 代替戦略を利用できるようにしておくことが重要

としている。同AR6⁵⁾ではより踏み込んで、気候変動適応分野における、アダプテーションパスウェイの考え方の普及を目指している(例、第3章p. 136)

Haasnootら⁶⁾によるアダプテーションパスウェイの経済評価は、アダプテーションパスウェイの概念が分かりやすい例である。しかし、この例で出てくる堤防建設のような適応策のコスト・予想便益(経済評価)が算出できる例は、むしろまれな例と考えられる。その後のHermansら⁷⁾による沿岸タイプと適応オプションでは、経済評価は簡素化され、可能な適応策、それらが対処する影響、その機会と適応策の転換点を図示している。複数の適応策を組み合わせる適応を行う場合にも有効な図示方法であると考える。

その他にはRuigら⁸⁾はロサンゼルスにおける海岸都市における、複数の条件下で費用便益分析を実施した。Manocha and Babovic⁹⁾によるシンガポールにおける雨水対策のアダプテーションパスウェイマップは、パスウェイごとの費用便益分析を実施し、気候シナリオごとの適切なパスウェイを同定した研究を紹介している。Babovic and Mijic¹⁰⁾によるロンドン北東部での降水量と都市排水のアダプテーションパスウェイがある。他にも多数の研究例がある。

また、本研究課題実施中に、イギリスにおけるアダプテーションパスウェイの国家規格が公開された¹¹⁾。対象となるステークホルダーとともに、用語の定義、ガイドラインが定められ、ケーススタディが示された。

また、国内でのガイドラインとしては、農林水産省の「農業生産における気候変動適応ガイド」では、適応策の導入には、準備期間が必要であり、中長期的な観点で対策を検討する必要があるとしている。農研機構が示す「果樹の適応策」では、適応策を3つのステージ(短期・中期・長期的)に分類し紹介している。

以上アダプテーションパスウェイについて現状をまとめると、バリエーションはまだ大きいものの、重要性については研究者・気候政策ポリシーメーカーレベルでは認識が高まった。定める手順や、スケジューリングの指標とその評価は、研究が進んでいるものの、重要と考えられているステークホルダー間の合意形成等には、まだ改善の余地があると指摘できた。

○地域気候変動適応のための適応経路開発

本報告書執筆時点(2023年3月)において、地域気候変動適応計画の最初の策定は、多くの都道府県で進んでいる。また市区町村レベルでの関心も高まり、独自の計画が公表されている。地域気候変動適応は、次のフェーズとしての詳細な実行計画と実施、その見直しなどのツールが求められている段階である。本サブテーマでは次のようなアダプテーションパスウェイを、ステークホルダーが参加したグループワークで検討する手法を開発した。本課題で開発した予測、データなどを適宜可視化して、気候変動の影響や地域社会の将来を、参加者に実感してもらうことを目指した。また適応データベースは後述する「適応策カード」にまとめイラストを追加するとともに、グループワークの中核として利用した。

・スコープ、目的

- a. 気候変動の影響の不確実性を知る。また長期的な視点で、柔軟な適応計画を立案することの必要性を理解する。
- b. 自治体レベルにおける気候変動適応計画(適応策の時系列での実施順序等)について、ステークホルダー間での議論を促す。

c. ワークショップを通じて、適応計画の議論とともに、気候変動適応や地域特性の理解促進や、ステークホルダーの価値観の共有を行う。

参加者には、「班に分かれ、影響分野「△△」と「□□」への気候変動への影響と適応策を、時系列に沿って考え、ストーリーを作る」ことを目的として示す。

- ・タイムスケジュール(短縮版、ミニマム構成、時間は目安、約2時間)

【準備】

開会・開催概要説明 5分

解説アダプテーションパスウェイとは 10分

【グループワーク】

自己紹介、ファシリテーター説明 35分

Step1 将来状況 20分

Step2 適応策カードの配置 20分

Step3 パスウェイ、ストーリーの検討 15分

班ごとまとめ 15分

【全体まとめ】

全体共有(班の代表が発表) 10分

閉会

- ・ステップごとの作業

ステップ1 将来状況の推定(気候変動、地域社会)

2030年、2050年、2070年における気候変動の種類と大きさ(外力)をファシリテーターと考える。次に、時間軸に沿ってあらかじめ用意されたカードで「地域の状況変化」を整理し、「社会課題・リスク」を考えて付せんに書く。

ステップ2 適応策カードの配置(適応策の優先順位、タイムスケジュール)

班ごとに用意された「適応策」カード等を使いながらマッピングし、各人ごとに時間軸に沿った対応(パスウェイ)を考える。

ステップ3 パスウェイ、ストーリーの検討

対象ごとにストーリーを考え、記録しましょう。他の参加者や班の成果について聞いて、意見交換をする。

- ・ワークショップの開発経緯

以下のように開発のための試行と、外部参加を交えたデモンストレーションを行った。

年度	種類	日時	会場	参加者
2021	①試行	2021年12月9日 9:30~14:30	北海道立総合研究機構 大会議室	サブテーマ1, 3, 委託業者
	②試行	2022年3月9日 13:00~14:00	オンライン	サブテーマ1, 3, 委託業者
2022	③試行、デモンストレーション	2022年8月3日 13:00~16:00	東北工業大学	サブテーマ1, 3, 東北工業大学学生, 宮城県内高校生, 委託業者
	④試行	2022年9月21日 13:30~17:00	北海道立総合研究機構 大会議室	サブテーマ1, 3, 委託業者
	⑤試行	2022年10月27日 13:00~16:00	東北工業大学	サブテーマ3, 東北工業大学学生
	⑥自治体職員向けデモンストレーション	2022年11月10日 13:00~16:30	北海道富良野市市役所	サブテーマ1, 3, 富良野市関係者(12名), 東北工業大学学生, 委託業者
	⑦地域適応センター向けデモンストレーション	2023年3月6日 14:00~17:00	仙台市内会議室	サブテーマ3, 地域適応センター関係者(7名), 東北工業大学学生

本ワークショップのマニュアルや教材の整備を課題全体で進めている。今後A-PLATを始めてとして資料を掲載するほか、ワークショップの開催などを積極的に担うことにより、地域気候変動適応センターなどの地域適応について支援を行う予定である。

5. 研究目標の達成状況

目標どおりの成果をあげた。北海道における気候リスク評価および適応策ローカライゼーションに関する理論的研究を行った。1) 寒冷積雪地における地域社会他の将来予測 SSPシナリオによる将来人口予測を1kmメッシュにダウンスケールした(北海道内)。この予測に基づき空き家予測も含め土地利用予測を行った(札幌市内)。2) 気候変動影響インパクトチェーンとローカライゼーション 3分野4課題の気候変動影響インパクトチェーンのローカライゼーションを行った。脆弱性・気候リスク評価と適応策データベース開発を行った。3) 社会システムへの影響連鎖評価 3分野のステークホルダーマッピングを行い、適応策実施に向けた地域社会における諸課題を整理した。4) インタラクティブな適応経路開発アダプテーションパスウェイを、ステークホルダーが参加したグループワークで検討する手法を開発した。地域適応センターに情報提供を行うとともに、A-PLATに資料を掲載する予定である。

6. 引用文献

- 1) R. C. Estoque, K. Gomi, T. Togawa, M. Ooba, Y. Hijioka, C. M. Akiyama, S. Nakamura, A. Yoshioka, K. Kuroda 2019: Scenario-based land abandonment projections: Method, application and implications. *Science of The Total Environment*, 692, 903-916. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.204>.
- 2) 大場 真、戸川卓哉、渡邊 学、榎原友樹 2019: 気候変動に対する地域適応策のための脆弱性・リスク評価手法の開発: 地域レベル解像度-可視化システムと気候リスクコミュニケーション. *環境情報科学論文集*, 33, 295-300. https://doi.org/10.11492/ceisapers.ceis33.0_295
- 3) P. Esteve, C. Varela-Ortega, T. E. Downing 2018: A stakeholder-based assessment of barriers to climate change adaptation in a water-scarce basin in Spain, *Regional Environmental Change*, 18, 2505-2517. <https://doi.org/10.1007/s10113-018-1366-y>
- 4) IPCC AR5 (Chapter5 Coastal Systems and Low-Lying Areas、5.5.3. Adaptation Decision Making and Governance (P389)
- 5) IPCC AR6 (Chapter3 Oceans and Coastal Ecosystems and their Services (p136), Chapter6 Cities, Settlements and Key Infrastructure、6.3. Adaptation Pathways (p47) など)
- 6) M. Haasnoot, J. H. Kwakkel, W. E. Walker, J. ter Maat 2013: Dynamic adaptive policy pathways: A method for crafting robust decisions for a deeply uncertain world. *Global Environmental Change*, 23, 485-498. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2012.12.006>.
- 7) L. M. Hermans, M. Haasnoot, J. ter Maat, J. H. Kwakkel 2017: Designing monitoring arrangements for collaborative learning about adaptation pathways. *Environmental Science and Policy*, 69, 29-38. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2016.12.005>.
- 8) L. T. de Ruig, P. L. Barnard, W. J. W. Botzen, P. Grifman, J. F. Hart, H. de Moel, N. Sadrpour, J. C. J. H. Aerts 2019: An economic evaluation of adaptation pathways in coastal mega cities: An illustration for Los Angeles. *The Science of the total environment*, 678, 647-659, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.308>.
- 9) N. Manocha, V. Babovic 2017: Development and valuation of adaptation pathways for storm water management infrastructure. *Environmental science and policy*, 77, 86-97, <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.08.001>.
- 10) Babovic, F. and A. Mijic, 2019: The development of adaptation pathways for the long-term planning of urban drainage systems. *Journal of Flood Risk Management*, 12(S2), e12538, <https://doi.org/10.1111/jfr3.12538>
- 11) British Standards Institution 2022: Adaptation to climate change. Using adaptation pathways for decision making. Guide. <https://shop.bsigroup.com/products/adaptation-to-climate-change-using-adaptation-pathways-for-decision-making-guide/standard>. (2023.3.31 閲覧)

Ⅲ. 研究成果の発表状況の詳細

(1) 誌上発表

<査読付き論文>

【サブテーマ1】

- 1) 野口 泉、山口高志、濱原和広、芥川智子、鈴木啓明、長谷川祥樹、小野 理：第37回寒地技術シンポジウム論文集、81-84（2021）、北海道における気候変動に関する研究 -降雪・積雪の変化傾向-

【サブテーマ2】

- 1) 小南靖弘、井上 聡、山口高志：日本農業気象学会誌「生物と気象」、23、1-8、
<https://doi.org/10.2480/cib.J076>（2023）、北海道における積雪状況と春先の圃場乾湿の将来予測。
- 2) 井上聡、小南靖弘：日本農業気象学会誌「生物と気象」、23、29-34、
<https://doi.org/10.2480/cib.J077>（2023）（in press）、気候変動適応策としてのリンゴ「ふじ」の北海道導入可能性。

【サブテーマ3】

- 1) 戸川卓哉、高野剛志、森田紘圭、大場 真、ESTOQUERONALD CANERO、近藤美沙希：土木学会論文集G（環境）、76、5、I_461-I_470（2020）気候変動が住民の生活の質（QOL）に与える影響評価フレームワークの提案。
- 2) M. Ooba, S. Nakamura, T. Togawa: *Global Environmental Research*, **24**, 191-198 (2021), Promoting local revitalization to solve issues on degraded forests in Japan: A case study in Oku-Aizu, Fukushima.
- 3) Estoque, R. C., Ishtiaque, A., Parajuli, J., Athukorala, D., Rabby, Y. W., Ooba, M. : *Ambio*, **52**, 376-389, <https://doi.org/10.1007/s13280-022-01806-z> (2022) Has the IPCC's revised vulnerability concept been well adopted?
- 4) Estoque, R. C., Ooba, M., Togawa, T., Yoshioka, A., Gomi, K., Nakamura, S., Tsuji, T., Hijioka, Y., Watanabe, M., Kitahashi, M. : *Reg Environ Change* **22**, 133, <https://doi.org/10.1007/s10113-022-01982-4> (2022) Climate impact chains for envisaging climate risks, vulnerabilities, and adaptation issues.

<査読付論文に準ずる成果発表>

【サブテーマ1】

- 1) 山口高志：北海道の農業気象、73、5-12（2021）
「北海道積雪中の硝酸・アンモニウムイオン動態の経時変化」

【サブテーマ2】

- 1) 井上 聡：日本雪工学会誌、36、122-124（2020）
「少雪が農業に及ぼす影響」

<その他誌上発表（査読なし）>

【サブテーマ1】

- 1) 野口 泉、濱原 和広、芥川 智子、山口 高志、鈴木 啓明、長谷川 祥樹、小野 理：北海道立総合研究機構エネルギー・環境・地質研究所報告、1、69-74（2021）
「積雪寒冷地における気候変動の影響評価と適応策に関する研究」

I -降雪・積雪の変化の影響-

- 2) 野口 泉、濱原和広、芥川智子、山口高志、鈴木啓明、長谷川祥樹、小野 理：北海道立総合研究機構エネルギー・環境・地質研究所報告、2、27-34 (2022)
「積雪寒冷地における気候変動の影響評価と適応策に関する研究 II -ゼロクロッシング日数の変化とそれに伴う適応策について-

(2) 口頭発表等 (学会等)

【サブテーマ1】

- 1) 野口 泉、濱原 和広、芥川 智子、山口 高志、鈴木 啓明、長谷川 祥樹、小野 理：第61回大気環境学会 (2020)。(口頭発表登録だが新型コロナウイルス蔓延により書面開催)
「雪に関する気候変動の影響連鎖 (インパクトチェーン)」
- 2) 野口 泉、山口 高志：第61回大気環境学会 (2020) (口頭発表登録だが新型コロナウイルス蔓延により書面開催)
「気温上昇に伴う大気中硝酸ガスおよび硝酸塩の沈着量変化」
- 3) 野口 泉、山口高志：第 62 回大気環境学会年会 (2021)
「気温上昇に伴う大気中硝酸ガスおよび硝酸塩存在比の変化とその影響」
- 4) 野口 泉、山口高志、濱原和広、芥川智子、鈴木啓明、長谷川祥樹、小野理：第 62 回大気環境学会 (2021) (ポスター発表)
「北海道における降雪・積雪の長期変化」
- 5) 山口高志、野口 泉、丹羽 忍、小南靖弘、岡田啓嗣、木村賢人：第 62 回大気環境学会年会 (2021) (ポスター発表)
「積雪水量などの実測値と推測値の比較」
- 6) 野口 泉、山口高志、濱原和広、芥川智子、鈴木啓明、長谷川祥樹、小野 理：第 28 回大気環境学会北海道東北支部総会及び学術集会 (2021)
「北海道における降雪・積雪に対する気候変動影響」
- 7) 芥川智子、野口泉、濱原和広、鈴木啓明、山口高志、長谷川祥樹、小野 理：第 28 回大気環境学会北海道東北支部総会及び学術集会 (2021)
「北海道の気象に関する指数情報の変化傾向と将来予測」
- 8) 濱原和広、野口泉、鈴木啓明、山口高志、長谷川祥樹、芥川智子、小野 理：第 48 回環境保全・公害防止研究発表会 (2021)
「積雪寒冷地における気候変動研究 - 降雪・積雪の変化とその影響 -」
- 9) 野口 泉、山口高志、濱原和広、芥川智子、鈴木啓明、長谷川祥樹、小野 理：第 37 回寒地技術シンポジウム (2021)
「北海道における気候変動に関する研究 -降雪・積雪の変化傾向-
- 10) 鈴木啓明：第 74 回気候情報連絡会 (2021) (書面開催)
「気候変動は道民にどう影響するのか?-適応策の推進に向けた影響情報データベース-
- 11) 鈴木啓明：第 75 回気候情報連絡会 (2021) (書面開催)
「積雪期における気象要素の長期変化傾向の解析について」
- 12) Suzuki H, Noguchi I, Hamahara K and Yamaguchi T: The 36th International Symposium on the Okhotsk Sea & Polar Oceans (2022)
“Impact of climate change on snow and lifestyle in winter Hokkaido, Japan.”
- 13) 山口高志、野口 泉、丹羽 忍、小南靖弘、岡田啓嗣、木村賢人：第 63 回大気環境学会年会 (2022) (ポスター発表)
「北海道の積雪中の大気汚染成分蓄積量変化」
- 14) 野口 泉、鈴木啓明、濱原和広、山口高志、長谷川祥樹、三上英敏、芥川智子、小野 理：第63回

大気環境学会(2022)

「北海道におけるゼロクロッシング日数の変化と適応策」

- 15) 野口 泉：第29回大気環境学会北海道東北支部総会及び学術集会（2022）「大気沈着に関する研究－地方自治体だからできたこと－」
- 16) 鈴木啓明、濱原和広、野口 泉：雪氷研究大会（2022）
「北海道におけるゼロクロッシング日数の将来変化」
- 17) 野口 泉：大気環境学会気候変動研究会令和4年度研究集会－気候変動と大気汚染、およびその影響（2023）
「気候変動による降雪・積雪に関する影響とその適応策」

【サブテーマ2】

- 1) 小南靖弘、井上聡：2021年日本農業気象学会全国大会（2021）
「1980年代以降の北海道内の降雪状況の変化」
- 2) 井上聡、小南靖弘：2021年日本農業気象学会全国大会（2021）
「気候変動時における雪質（積雪堆積環境）の予測」
- 3) 石塚帆名子、岡田啓嗣、鮫島良次、今野直道：2022年日本農業気象学会全国大会（2022）
「深層学習による気象要素の推定」
- 4) 小南靖弘、井上 聡：2022年日本農業気象学会全国大会（2022）
「農研機構メッシュ農業気象データを用いた将来の積雪予測」
- 5) 木村賢人、明石 萌、原田裕介、宗岡寿美、中島直久：2022年日本農業気象学会全国大会（2022）
「北海道十勝地方の土壌の凍結・融解に関連する気象状況の長期的傾向」
- 6) 井上 聡、小南靖弘：日本農業気象学会北海道支部大会（2022）
「気候変動適応策としてのリンゴ「ふじ」の北海道導入可能性」
- 7) 小南靖弘、井上 聡、山口高志：日本農業気象学会北海道支部大会 環境研究総合推進費 [2-2009]「積雪寒冷地における気候変動の影響評価と適応策に関する研究」講演会「広域の降積雪の量的変動と質的変動およびその影響」（2022）
「気候モデルから予測される北海道の積雪の変化と農業への影響」
- 8) 岡田啓嗣：日本農業気象学会北海道支部大会 環境研究総合推進費 [2-2009]「積雪寒冷地における気候変動の影響評価と適応策に関する研究」講演会「広域の降積雪の量的変動と質的変動およびその影響」（2022）
「高解像度積雪・消雪日推定マップの開発」
- 9) 木村賢人：日本農業気象学会北海道支部大会 環境研究総合推進費 [2-2009]「積雪寒冷地における気候変動の影響評価と適応策に関する研究」講演会「広域の降積雪の量的変動と質的変動およびその影響」（2022）
「十勝地方の土壌の凍結・融解に関連する40年間の気象状況」
- 10) 井上 聡：2023年日本農業気象学会全国大会（2023）
「気候変動時のリンゴ「ふじ」の北海道導入可能性」

【サブテーマ3】

- 1) 肱岡靖明：第1回富山県気候変動適応研究会（2020）
「気候変動適応推進に向けた最近の取り組みについて」
- 2) 肱岡靖明：環境研究総合推進費S-18 気候変動影響予測・適応評価の総合的研究 公開シンポジウム（2020）
「国立環境研究所の気候変動適応研究プログラムについて」
- 3) 大場 真、戸川卓哉、中村仁明：第16回バイオマス科学会議プログラム、バイオマス科学会議発表論文集、16、91-92（2020）

「福島県における木質バイオマス利活用動向:復興に向けた課題」

- 4) Ooba M., Togawa T., Estoque R. C., Nakamura S., Tsuji T., Yoshioka A., Hijioka Y. : *The Sixth International Conference on Structure, Engineering & Environment (SEE2020)* (2020)
 “Development of an interactive and visualization system for determining climate risk.”
- 5) 大場真、戸川卓哉、中村省吾、辻岳史、五味馨、吉岡明良、肱岡靖明：日本農業気象学会2021年全国大会、同講演要旨、18. (2021)
 「地域特性に応じた気候変動影響の定性予測-インパクトチェーンとその適用」
- 6) 大場真、中村省吾、大西悟、2022年日本農業気象学会全国大会 (2022)
 「スギ林内における直達短波放射量と樹木形状の関係：レーザー計測による生態系モデルパラメタリゼーション」
- 7) 大場真、中村省吾、第133回日本森林学会大会(2022) (ポスター発表)
 「バイオマス利活用促進のための個体ベース森林生態系モデル開発と可視化」
- 8) 戸川卓哉、森田紘圭、辻岳史、第66回土木計画学研究発表会・秋大会 (2022)
 「機能共鳴分析手法による水害対応過程の検証-郡山市における令和元年東日本台風への災害対応を対象として-」

(3) 「国民との科学・技術対話」の実施

本研究においては「国民との科学・技術対話」は必須ではない。

【サブテーマ1】

- 1) 野口 泉、濱原 和広、芥川 智子、山口 高志、鈴木 啓明、長谷川 祥樹、小野 理：第16回北海道気候変動適応会議[札幌(web)] (2020) 「雪に関する気候変動の影響連鎖(インパクトチェーン)」(R2年10月7日、環境研究総合推進費2-1905 とともに主催-参加者約30名)にて成果紹介
- 2) 野口 泉、山口 高志：第16回北海道気候変動適応会議[札幌(web)] (2020) 「気温上昇に伴う大気中硝酸ガスおよび硝酸塩の沈着量変化」(R2年10月7日、環境研究総合推進費2-1905 とともに主催-参加者約30名)にて成果紹介
- 3) 濱原 和広、鈴木 啓明、長谷川 祥樹、山口 高志、芥川 智子、小野 理、野口 泉：2021エネ環地研成果発表会[札幌(web)] (2021) 「雪はこれからどう変わる？何が起きる？」(R3年5月26-27日、Web開催-参加者306名)にて成果紹介
- 4) 鈴木啓明、濱原和広、芥川智子、小野理、長谷川祥樹、山口高志、野口泉：令和3年度エネルギー・環境・地質研究所成果発表会[札幌(web)] (2021) 「気候変動は道民にどう影響するのか？-適応策の推進に向けた影響情報データベース-」(R3年5月26-27日、Web開催-参加者306名)にて成果紹介
- 5) 鈴木啓明、令和3年度 北海道地球温暖化防止活動推進員学習会(第2回) (2021) 「北海道への様々な気候変動影響とこれからの地域づくり」(R3年9月22日、オンライン配信、参加者18名)
- 6) 野口泉：雪を守るシンポジウム[札幌(web)] (2021) 「気候変動が北海道の雪にもたらす影響」(R3年11月2日、札幌市などとともに主催-Web視聴回数931、2022年11月現在)にて成果紹介
- 7) 鈴木啓明、野口泉、濱原和広、山口高志、第17回北海道気候変動適応会議(2021) 「北海道の冬季積雪環境の変化とその生活影響」(R3年12月17日、参加者約20名)にて成果紹介
- 8) 鈴木啓明、令和3年度『環境経営普及セミナー』江別市(2022) 「気候変動は道内産業にどう影響するのか？」(R4年3月11-18日、オンライン配信、視聴回数136回)にて成果紹介
- 9) 野口 泉、富良野市民セミナー 2050年ゼロカーボンシティに向けて 気候変動によって富良野はどう変わるのか？「“雪”の変化とその影響」(2022) 「未来の天気予報 北海道2100冬」(R4年10月9日、会場参加44名、オンライン参加35名)にて成果紹介
- 10) 濱原和広、富良野市民セミナー 2050年ゼロカーボンシティに向けて 気候変動によって富良野

- はどう変わるのか？「“雪”の変化とその影響」(2022)「気候変動が進んだ未来、冬の富良野(の生活)はどうか？」(R4年10月9日、会場参加44名、オンライン参加35名)にて成果紹介
- 11) 鈴木啓明、北海道気候変動適応セミナー(2023)「気候変動で冬の北海道はどうか？ー生活への影響を示す指標はどうか？ー」(2023年1月18日、会場参加17名、オンライン参加99名)にて成果紹介
 - 12) 鈴木啓明、積雪寒冷地における気候変動の影響評価と適応策に関する研究公開シンポジウム 気候変動が進んだ将来、北海道の冬はどうか？どうする？-変化を知り、備えるために- (2023)「気候変動で冬の北海道はどうか？」(2023年2月17日、会場参加55名、オンライン参加103名)にて成果紹介
 - 13) 鈴木啓明、令和4年度気候変動適応全国大会(2023)「北海道の気候変動影響とその適応策に関する研究～雪の変化を中心に～」(2023年3月22日、オンライン参加120名：発表開始時の参加者数120名)

【サブテーマ2】

- 1) 小南靖弘、富良野市民セミナー 2050年ゼロカーボンシティに向けて 気候変動によって富良野はどうか？「“雪”の変化とその影響」(2022)「富良野圏における雪の将来予測と農業にもたらす影響」(R4年10月9日、会場参加44名、オンライン参加35名)にて成果紹介
- 2) 井上聡、積雪寒冷地における気候変動の影響評価と適応策に関する研究公開シンポジウム 気候変動が進んだ将来、北海道の冬はどうか？どうする？-変化を知り、備えるために- (2023)「農業はどうか？」(2023年2月17日、会場参加55名、オンライン参加103名)にて成果紹介

【サブテーマ3】

- 1) 辻 岳史、日本環境共生学会2021年度地域シンポジウム[郡山(web)](2021)こおりやま広域圏における気候変動適応・SDGsの推進と地域協働研究の展開。にて成果紹介
- 2) 大場 真、戸川卓哉、辻岳史、こおりやま広域圏気候変動対策推進研究会(全4回、2021年度)アドバイザー。にて成果紹介
- 3) 大場 真、中部気候変動アクションプラン策定事業 分科会3 アドバイザー。にて成果紹介
- 4) 大場 真、大阪府気候変動適応普及強化ワークショップ(全4回、2021年度)ファシリテーター。にて成果紹介
- 5) 戸川卓哉、令和3年度気候変動適応セミナー(福島県環境共生課主催、2022/2/28)、講演、Q&Aトークセッション・ファシリテーター。にて成果紹介
- 6) 大場 真、富良野市民セミナー 2050年ゼロカーボンシティに向けて 気候変動によって富良野はどうか？「“雪”の変化とその影響」(2022)「未来の富良野市からの環境・適応メッセージ」(2022年10月9日、会場参加44名、オンライン参加35名)にて成果紹介
- 7) 大場 真、積雪寒冷地における気候変動の影響評価と適応策に関する研究公開シンポジウム 気候変動が進んだ将来、北海道の冬はどうか？どうする？-変化を知り、備えるために- (2023)「未来の北海道からの環境・適応メッセージ」(2023年2月17日、会場参加55名、オンライン参加103名)にて成果紹介
- 8) 脇岡靖明、積雪寒冷地における気候変動の影響評価と適応策に関する研究公開シンポジウム 気候変動が進んだ将来、北海道の冬はどうか？どうする？-変化を知り、備えるために- (2023)「気候変動適応への挑戦ー北海道への期待ー」(2023年2月17日、会場参加55名、オンライン参加103名)にて成果紹介

(4) マスコミ等への公表・報道等>

【サブテーマ1、2】

- 1) 毎日新聞（2020年12月8日、全国版、15頁）「降雪変化 北海道に「野良イモ」（対応 野口泉、鈴木啓明）。

【サブテーマ1】

- 1) 雑誌「プラクティス」36号 【リレーインタビュー】地球温暖化と北海道（2021）「気候変動への適応策を考える 影響の連鎖を可視化する対策を」（対応 野口泉）。
- 2) Youtube上でのスキー番組M's Ski Salon（2022）snow!!snow!!snow!!「遂にこの2人がM's resort Ashibetsuに乗り込む！滑走シーン万歳！見応えたっぷりの30分間をご覧あれ！環境問題についても考えます」（対応 野口泉）。
- 3) FMラジオAir-G「札幌オリンピック50周年記念ラジオ広報番組」（2022）Road to 2030 —オリパラがもたらす北海道・札幌の未来— 第8回放送分「環境について」（後編）（対応 野口泉）。
- 4) 北海道新聞（2022年3月13日、「温暖化 消える粉雪」）（対応 野口泉、鈴木啓明）。
- 5) u h b 北海道文化放送（2022年4月15日18:10-19:00の報道番組の中で放送）：温暖化の影響・対策に関する高校生インタビュー取材（対応 鈴木啓明）。
- 6) 令和4年度気候変動適応全国大会（2023年3月22日、北海道の気候変動影響・適応策に関する動画約30分のうち約5分間で紹介）：本事業の成果に関するインタビュー取材（対応 野口泉）。
- 7) 気候変動適応ハンドブック（生活・健康編）（2023年3月、北海道環境生活部ゼロカーボン推進局気候変動対策課／北海道気候変動適応センター発行）：北海道民を対象とした気候変動影響・適応策に関する啓発ガイドブック（全8ページ）のうち2ページで本事業の成果を紹介。

【サブテーマ2】

- 1) ニューカントリー2021年秋季臨時増刊号「北海道の最新農業気象」（2021）、第2章1節「雪害対策」（対応 小南靖弘、井上 聡）。

(5) 本研究費の研究成果による受賞

特に記載すべき事項はない。

(6) その他の成果発表

- 1) 北海道環境生活部ゼロカーボン推進局 気候変動対策課／北海道気候変動適応センター：北海道気候変動適応ハンドブック、5-6（2023年3月）「4 冬の北海道はどうなるのでござるか」（https://www.pref.hokkaido.lg.jp/fs/8/2/7/2/3/6/5/_/adaptation-handbook2023.pdf）（対応 鈴木啓明）。

IV. 英文Abstract

Assessment of Climate Change Impacts and Adaptation Measures in Cold, Snowy Regions

Principal Investigator: Izumi Noguchi

Institution: Local Independent Administrative Agency Hokkaido Research Organization, Sapporo, JAPAN

Tel: +81-117473554 / Fax: +81-117473254

E-mail: izumi@hro.or.jp

Cooperated by: Hokkaido University, National Agriculture and Food Research Organization, Obihiro University of Agriculture and Veterinary Medicine, Tohoku Institute of Technology, National Institute for Environmental Studies

[Abstract]

Key Words: Climate change, Cold snowy region, Snowfall, Snowpack, Impact chain, Agricultural impact, Adaptation pathway, Social implementation, Adaptation methodology development

This study aimed to promote adaptation measures for snow changes associated with climate change in Hokkaido, a prefecture centered in the primary sector and positioned as Japan's resource and food supply base, with snow cover that lasts for 4–5 months. We performed a detailed evaluation of the snow-linked changes and their corresponding effects and developed adaptive measures to ensure the sustainability of Hokkaido's livelihood and primary industries.

We detected a decrease in snowfall and snowpack across many areas of Hokkaido. Additionally, although the average days of snow removal are expected to decrease in the future, these changes are expected to be limited in years with heavy snowfall and inland regions. We also expect an increase in heavy wet snow, thawing, and refreezing of snow and ice in midwinter. These changes could result in various consequences, such as increased snow accretion and snow loads, accidents due to snowslides or slippery roads, and potholes. Furthermore, secondary and tertiary impacts, expressed as an impact chain, include a decrease in average snowfall that would force snow removal workers to leave their jobs, making it difficult to maintain snow removal skills; this would result in inadequate snow removal systems in the event of occasional heavy snowfalls. Predicted impacts on agriculture include unexpected plant growth due to decreased soil freezing depth, increased wind erosion damage, and increased dispersal of soil due to a shorter snow cover period; some positive impacts were also identified, such as Hokkaido potentially becoming a region where one of the main apple varieties in Japan (i.e., “Fuji”) can be harvested.

To promote the widespread implementation of adaptive measures, in addition to appropriately predicting climate- and community-linked changes, it will be necessary to gain a comprehensive understanding of the inhabitants, as this would help implement context-driven adaptive strategies based on the appropriate selection of adaptation measures as climate change scenarios progress (adaptation pathway). The methodology was developed to ensure the sustained implementation of adaptive measures and includes visualization of changes in lifestyle-related indices during the winter based on simulated forecast data, the creation and use of an educational video to help people realize specific future changes and introducing participatory discussions for local stakeholders to propose local adaptation pathways.

The results of this study will encourage efforts by regional climate change adaptation centers and local governments in cold snowy regions, contributing to the promotion of adaptation measures in Japan.