

令和 3 年度研究成果報告書

『東北地域における気象・気候情報の高度利用』

令和 4 年 11 月

ヤマセ研究会

目次

ヤマセ研究会.....	3
令和3年度成果	4
1. 大型産業用ドローンによるヤマセ観測の試み	5
2. ヤマセ日の判定アルゴリズム (3/3)	6
3. 2019年7月上旬に東日本で発生した低温の事例解析	10
4. 七ヶ浜町の気象観測——七ヶ浜町の気候と気象情報の利用——.....	12
5. 冬季の太陽光発電出力予測の課題と積雪モニタリング.....	26
6. 中部山岳域における気候変化の水平分布と標高依存性の解析	29
7. 長期日本領域再解析の降水の再現性の検証.....	33
8. NHRCMによる地上風のバイアス評価と沿岸海上気象データの活用.....	36
9. 気象庁における気候情報利活用促進の取組.....	37
10. 東北農業研究センターの気象情報発信の歴史	40
11. 長野県でのリンゴ凍霜害リスクの将来変化の解析 ～休眠打破時期の遅れに関する評価～.....	44
12. 東北地方における大雨の将来予測について	50
13. 地域気候モデルによる東北南部及び北信越の山岳域の積雪将来変化予測実験... ..	54
14. 湖沼凍結モデルの開発	57

ヤマセ研究会

ヤマセ研究会は、東北地域で最も関心の持たれる気象現象の一つであるヤマセへの理解を深め、予測精度の向上と気象情報の高度利用を目指して、2009年に発足した。2017年開催の第13回研究会からは、研究会のテーマはヤマセに限らず幅広く以下の内容を対象としている。

- (1) 東北地域の温暖化とその適応策
- (2) 気象観測、気象予測・気候予測情報の高度利用
- (3) 関連する数値モデル技術の向上

本研究会での議論とこの報告書が、東北地域での気象・気候情報の活用に資し、今後の新しい研究、応用の種となることを願ってやまない。

東北大学 山崎 剛

第17回ヤマセ研究会の開催

第17回ヤマセ研究会は2022年3月1日にオンライン形式にて開催した。新型コロナウイルス感染症の影響により、2020年度は開催を見送ったことにより、前回から2年3ヶ月あまりの間を空けることとなった。オンラインというこれまでにない形式にもかかわらず、多数の方にご参加いただき感謝を申し上げます。本研究会は、本研究は文部科学省統合的気候モデル高度化研究プログラム領域テーマC「統合的気候変動予測」JPMXD0717935561の助成を受けた。

令和 3 年度成果

1. 大型産業用ドローンによるヤマセ観測の試み

吉田龍平 (福島大学共生システム理工学類)

a) 要旨

福島県南相馬市で気象観測測器を搭載した大型産業用ドローン 5 台を同時に自動飛行させ、2022 年 8 月 1 日の沿岸気象を観測した。陸上と海上の気温分布や海上風の鉛直分布が得られ、数値予測モデルに同化する基盤データを整理した。福島県浜通りの海岸部は仙台空港を離発着する航空機の経路と重なっており、飛行可能高度に制限がかかっている。今後、福島ロボットテストフィールドや国土交通省といった関係各所との調整を行っていく。

b) 本文

2010 年以降、ドローンを用いた気象観測が盛んになっている。人間が立ち入ることが容易ではない地点を観測できることがドローン観測の利点で、飛行する高度を変化させることで任意の空間分布を取得できる。3 台のドローンによる気象観測値を数値気象モデルに取り込むことで霧の表現が改善された例が報告されており (Leuenberger et al., 2020)、ドローンによる気象観測が数値気象予測の向上に有用である可能性がある。

大型産業用ドローンの一つである ALTA-X は高度 1,500 m まで飛行可能であり、最大ペイロードが 15.9 kg と高いことから気象観測測器を搭載することでヤマセに伴う下層大気を観測できると期待される。さらにドローン ALTA-X が飛行できる高さはヤマセに伴う下層雲が出現する雲底高度と対応しており、この点からもヤマセ観測に適した機器といえる。ドローンは海上飛行することが可能であるが、場所を問わず常に目視による確認が必要であり海上気象の観測における有効性は明らかではない。そこで実用性の検証とヤマセ発生時の気象条件を取得することを目的に、複数台のドローンによる気象観測実験を実施した。

2021 年 8 月 1 日 6 時、9 時、12 時に福島県南相馬市の福島ロボットテストフィールド付近の海岸で 1 km 間隔にドローン ALTA-X を 5 台配置した。各ドローンは海岸から東に 1 km 進み、高度 450 m まで上昇しそこから開始地点上空まで 1 km 西に戻った後に開始地点へと下降させた。発着はマニュアルで行い、それ以外の飛行は予め設定した緯度経度情報に沿って自動飛行させた。1 km 沿岸の海上気温は海岸と比較して 1 °C 程度低温であり、この傾向は 3 回のフライトを通して共通であった。2021 年度は 5 台の同時飛行オペレーションが実施可能であることを確認した。2022 年度は福島県沿岸部を 25 km 間隔でカバーする飛行試験を行い、数値予測モデルに取り込む気象観測データを取得する。

c) 参考文献

Leuenberger, D., A. Haefele, N. Omanovic, M. Fengler, G. Martucci, B. Calpini, O. Fuhrer, and A. Rossa, 2020: Improving high-impact numerical weather prediction with lidar and drone observations. *BAMS*, **101**(7), E1036–1051.

2. ヤマセ日の判定アルゴリズム (3/3)

土屋 幸男 (五戸再生可能エネルギー研究所)

a) 要旨

本研究の目的は、イネの出穂期にヤマセが吹走し低温被害（不稔）をもたらす現象を、有効温度により説明することである。その過程は3つである。第一に各日の有効温度を全日とヤマセの有効温度に分離し、第二にそれぞれの有効温度を累積し全日及びヤマセ有効積算温度とする。最後にこれらとヤマセ出現マップを組み合わせて説明することである。2021年、青森県五戸町の一部の米生産者が被った不稔現象に適用する。

b) 本文

(1) はじめに

前回の報告（土屋 2020）ではヤマセ出現マップを提案した。このヤマセ出現マップから日付、時間の詳細やヤマセ強度のマクロ推移に関する潜在的な情報を得ることができるとしたが、具体的な適用例が示されていない。一方、2021年青森県五戸町の一部の米生産者は出穂期に低温被害を被っている。そこで本報告ではヤマセ全日有効温度の考え方を新たに導入し、ヤマセ出現マップと組み合わせてこの低温被害を説明する手法を示す。

(2) 有効温度と有効積算温度

植物の生育においては一定の温度量の累積が必要とされるという考えがある。本報告もこの考えをヤマセ吹走現象の分析に適用する。ここで温度量として有効下限温度（base temperature）以上の温度を有効温度（effective heat unit, EHU）としてこれを積算する有効積算温度（effective heat unit summation, EHUS）を用いる。その基本的な考え方は文献（France, 他 1984, 江幡 1990）と同じである。違いは対象とする日の有効温度を①全日有効温度（all-day effective heat unit, AEHU）と②ヤマセ全日有効温度（yamase all-day effective heat unit, YEHU）の2つに分離し、それぞれの温度量の積算値を全日有効積算温度（AEHUS）、ヤマセ有効積算温度（YEHUS）とすることである。なお YEHUS の算定ではヤマセが1日の中で連続、不連続を問わず閾値として60分以上吹走するという制約条件を付けている。AEHUS と YEHUS の計算式を (3-1) に示す。

$$\begin{cases} AEHUS \\ YEHUS \end{cases} = \sum_j H(\bar{T}_j - T_{jc})(\bar{T}_j - T_{jc}) \quad [^{\circ}\text{C} \cdot \text{days}] \quad (3-1)$$

ここで \bar{T}_j は通日 j 番目に計測された平均温度であり、全日側では当日の最高気温と最低気温の平均温度、ヤマセ側ではヤマセ吹走時間帯の最高気温と最低気温の平均温度である。 T_{jc} は通日 j 番目の有効下限温度であり、求め方は次の3つの過程を経る。まずヤマセ吹走時間

が当日 50 分以下で、複数年（本報告では 19,20 および 21 年。）の各日の平均気温を求め、次にこれらの平均気温と対応する通日を基に回帰モデル式を作りこれを基準平均温度とする。その後、基準平均温度の半分の値を有効下限温度とする。稲作研究では有効下限温度として 10[°C]が用いられることが多いが、本報告では通日 N の回帰モデル式で算定するところが違う。また記号 H はヘビサイド関数である。

$$H(\bar{T}_j - T_{jc}) = 0 \text{ for } \bar{T}_j < T_{jc}, \quad H(\bar{T}_j - T_{jc}) = 1 \text{ for } \bar{T}_j \geq T_{jc} \quad (3-2)$$

図 1 に回帰後の基準平均温度と有効下限温度の関係を図示する。横軸の N は通日である。

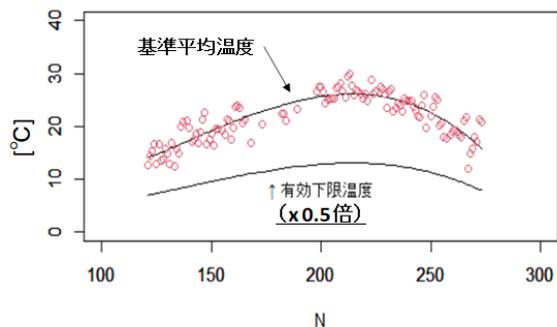


図 1. 基準平均温度と有効下限温度

(3) 方法

(i) AEHU 月別平均値の比較

図 2 に 19~21 年の AEHU 月別平均値の推移を示す。まず AEHU のピーク発生月は 19, 20 年では 8 月であるが、21 年では 7 月である。稲作の立場でみると AEHU の高温期が 19 年や 20 年に比べてひと月早いため、地域の水田の多くでは出穂・開花が 7 月中に済んでいる。

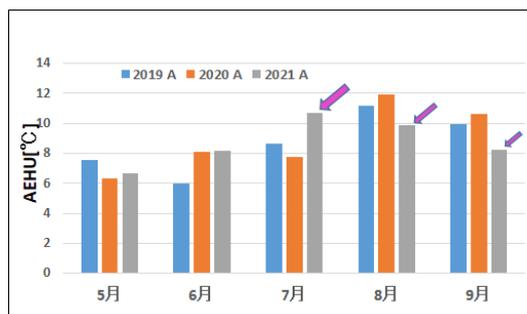


図 2. 月別の AEHU 平均値

(ii) 有効積算温度の増分

図 3 に 2021 年の有効積算温度を示す。横軸の N は 121~273 であり、5~9 月に相当する。ここでは AEHUS や YEHUS の軌跡の 4 箇所の点で数値微分を行い、それらの増分値を合わせて示す。まず N:201 付近は AEHUS 側が 11.8 [°C]、YEHUS 側が 0.0[°C]であり (i) で述べた過去 2 年と比較して 7 月に AEHU 平均値のピークが移動する原因となっている。さらに N:228 付近で AEHUS 側は 3.8~5.4[°C]、YEHUS 側は 4.2~5.2[°C] とほぼ同値であり 8 月の AEHU の低下の原因となっている。

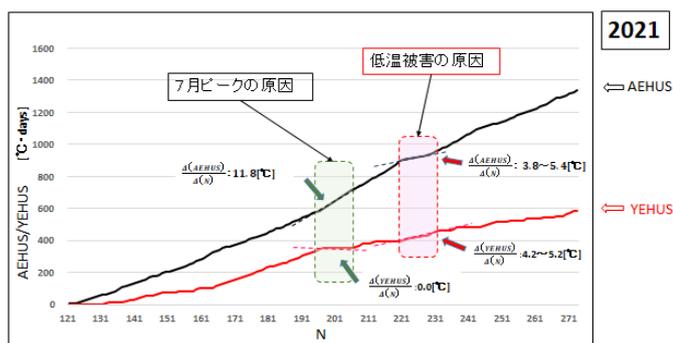


図 3 2つの有効積算温度の増分値

(iii) YEHU/AEHU 散布図上の特異日
(ii) より N:228 付近が AEHUS と YEHUS の増分がともに低いことより、この N を含みさらに出穂期を考慮し、19, 20 および 21 年で N:200~240 の範囲に拡張し YEHU/AEHU の特徴について散布図 (図 4) を使って調べる。まずこの図からは YEHU 値がゼロで AEHU の変域を 8~17[°C]とする集団(a)

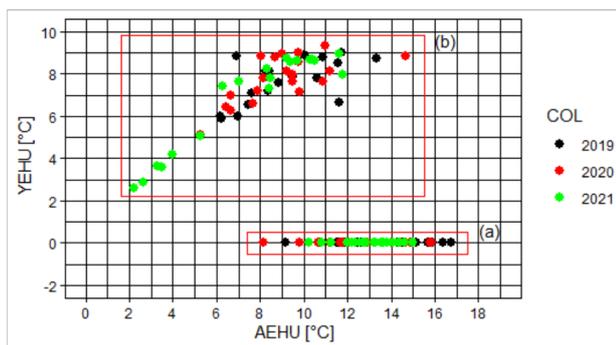


図 4 有効温度の散布図 (2019-2021)

(ヤマセ吹走のない日の特性。) と、YEHU の変域を 2~9[°C]とする集団 (b) (ヤマセ吹走のある日の特性。) の存在がわかる。更に {AEHU, YEHU} の座標が {5, 5} (単位は[°C。]) から原点 {0, 0} に向かうベクトル上に 21 年の値が数点あることが特徴的である。ここで対応する通日を調べると N:221~232 である。念のため図 5

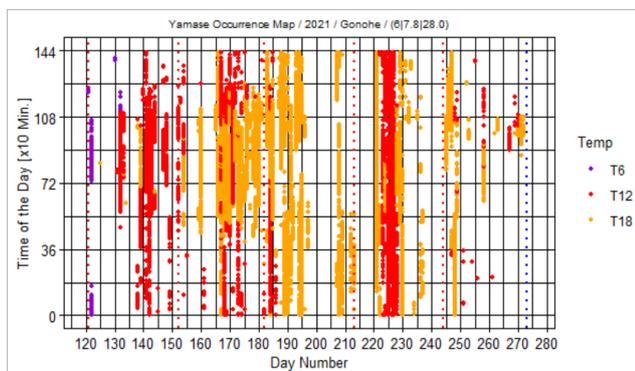


図 5 ヤマセ出現マップ 2021 年

の 21 年ヤマセ出現マップでこれらの期間を確認すると「T12」と「T18」の温度域に属している。N:140 付近でも同様の傾向は見られるが、これよりも低温の強度は強い。よってヤマセ吹走の特異日と名付ける。なお「T12」や「T18」の意味はヤマセ吹走時の気温を T_0 とするとそれぞれ $12 \leq T_0 < 18$ [°C]、 $18 \leq T_0 \leq 22.2$ [°C]である。

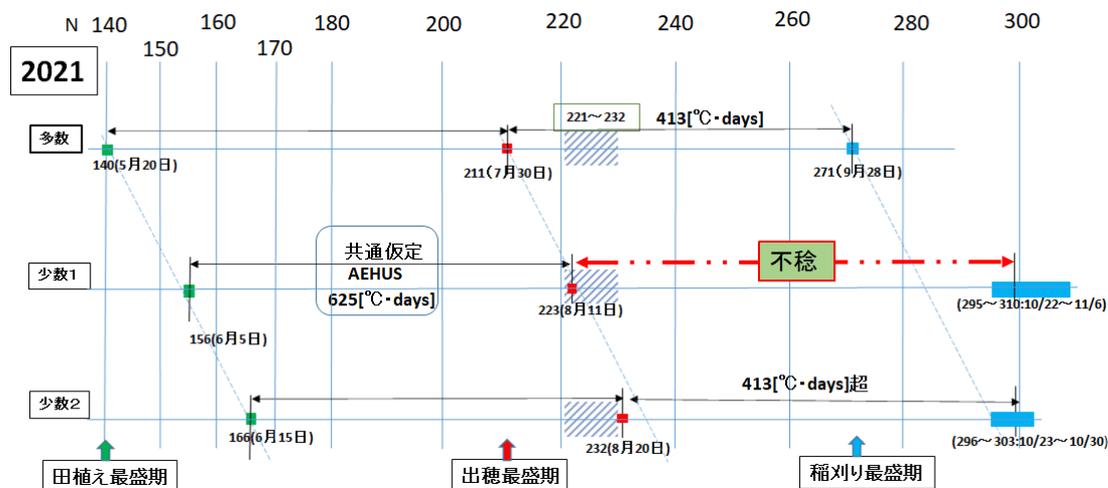


図 6 稲作主要期のタイムチャート 2021 年

(4) 出穂期の低温被害

図6は21年青森県五戸町で観察された稲作主要期を簡素に表現したタイムチャートである。ここでは田植えの最盛期の違いに応じて「多数」、「少数1」および「少数2」という米生産者を導入し、検討を進める。

このチャートでは列方向に通日や主要作業の最盛期等、行方向には米生産者を配置する。まず三者に共通する数値は田植え最盛期(緑□)から出穂期(赤□)までのAEHUSの625[°C・days]である。なお「多数」に付す3種類の日付は(作物統計調査、2021)に合わせた。一方、「少数1、少数2」の田植え最盛期は実際値であり、出穂最盛期は算定された日ではあるが水田の観察状況とほぼ一致している。中央部のハッチング領域は3章(iii)で検出された特異日N:221~232である。

以上の条件設定で出穂最盛期と特異日の関係を調べる。まず「多数」の出穂最盛期は特異日の10日前、「少数1」では特異日の初期に位置し、「少数2」では特異日の最終日に位置している。

刈取り最盛期は青□で示す。「多数」は遅くとも10月初旬までに済み、平年並みの作柄を得ている。また「少数2」はこの方式での平年並みの作柄を得ている。しかし「少数1」は出穂期に特異日が重なり低温被害(不稔)を被り、減収となっている。

(5) まとめ

- ①有効温度をAEHUSやYEHUSに分離する手法を示した。
- ②AEHU月別平均値の3年比較により、21年のピーク発生月が19年、20年の8月から7月に移ったことを示した。
- ③AEHUSやYEHUSの軌跡の数値微分、YEHU/AEHUの散布図及びヤマセ出現マップを組み合わせ、21年のヤマセ吹走の特異日N:221~232を抽出した。
- ④21年6月初旬に田植えをした米生産者「少数1」は③のヤマセ吹走の特異日の期間で出穂期と重なり、ヤマセによる低温被害(不稔)を被った。

c) 参考文献

土屋, “ヤマセ日の判定アルゴリズム(2),” ヤマセ研究会, 令和元年度研究成果報告書, 4, 2020.

J.France and J.H.M.Thornley, “Mathematical Models in Agriculture,” pp.152-153, Butterworths, 1984.

江幡, “有効積算温度とイネの生長,” 日本作物学会紀事, 59(2), pp.225-232, 1990.

作物統計調査, “令和3年産水稻の作付面積及び予想収穫量(10月25日現在)(青森),” 東北農政局, 2021.

3. 2019年7月上旬に東日本で発生した低温の事例解析

島田照久 (弘前大学大学院理工学研究科)

a)要旨

ヤマセが卓越している時の地上天気図の特徴の一つは、地上気圧の高圧域が、北日本の太平洋沿岸を南向きに伸びていることである(木村 1995; Shimada et al. 2014)。この高圧域は、オホーツク海・亜寒帯域から伸びる低温域に対応する。しかしながら、この南向きに伸びる高圧域の実態や詳細な解析は少ない。ヤマセは、北太平洋亜寒帯域に分布する下層の冷気が北日本に向かって吹き寄せる過程とみることができるが、太平洋沿岸の高圧域を下層冷気の分布や進入と関連づけた研究も行われていない。そこで、北日本・東日本で低温・低日射となった2019年7月上旬のヤマセの事例解析を、気象シミュレーションを用いて行った。その結果、太平洋沿岸の沖合から、東日本に向かって西向きに吹き寄せる下層冷気の寄与が示唆された。

b)本文

(1) 研究の目的

ヤマセが卓越している時の気圧分布図には、北日本の太平洋側で、オホーツク海付近から北日本の地形に沿って南向きに伸びる高圧域がよくみられる(木村 1995; Shimada et al. 2014)。しかしながら、この南向きに伸びる高圧域の実態や詳細な解析は少ない。本研究では、気象シミュレーションデータの解析を中心に、北日本・東日本で低温・低日射となった2019年7月上旬について、太平洋沿岸の下層冷気の構造と日射分布への影響を明らかにする。

(2) データと方法

衛星観測(ひまわり8号、海上風データなど)と気象モデルWRFによるシミュレーションを用いて、2019年7月上旬の事例解析を行う。

(3) 結果

まず、ひまわり8号の可視画像により、対象事例の期間中は、北日本・東日本の太平洋側が継続して雲に覆われていた。このようなヤマセの特徴がもっとも明瞭に現れたのは7月7日である。7月7日12時について、ひまわり8号から導出された日射分布には、太平洋側に沿った地域の日射量の少なさ($< 300 \text{ W m}^{-2}$)と日本海・日本海沿岸の日射の多さ($\sim 1000 \text{ W m}^{-2}$)のコントラストが特に顕著に現れていた。次に、東日本・北日本の温位の3次元構造を調べた。北日本から関東地方にかけて高度1500 m以下に冷気層がみられた。7月6日から7月7日にかけては、関東沖で冷気層の高度が2000 m付近に上昇していた。冷気層の高度は、296 Kの等温位面にほぼ対応しているため、この等温位面を基準にした下層冷気の分布を考察した。その結果、太平洋の沖合から北日本・東日本に向かって、西向きに下層冷

気が吹き寄せていることがわかった。特に、仙台平野から関東平野において、冷気の進入と蓄積が顕著であった。今後は、日本列島に吹き寄せる下層冷気の起源・日本列島への進入の経路などを、詳しく調べる予定である。

c)参考文献

木村龍治, 1995: ヤマセの地球流体力学的側面, 気象研究ノート, **183**, 91-107.

Shimada, T., M. Sawada, and T. Iwasaki 2014: Indices of cool summer climate in northern Japan: Yamase indices, J. Meteor. Soc. Japan, **92**, 17-35.

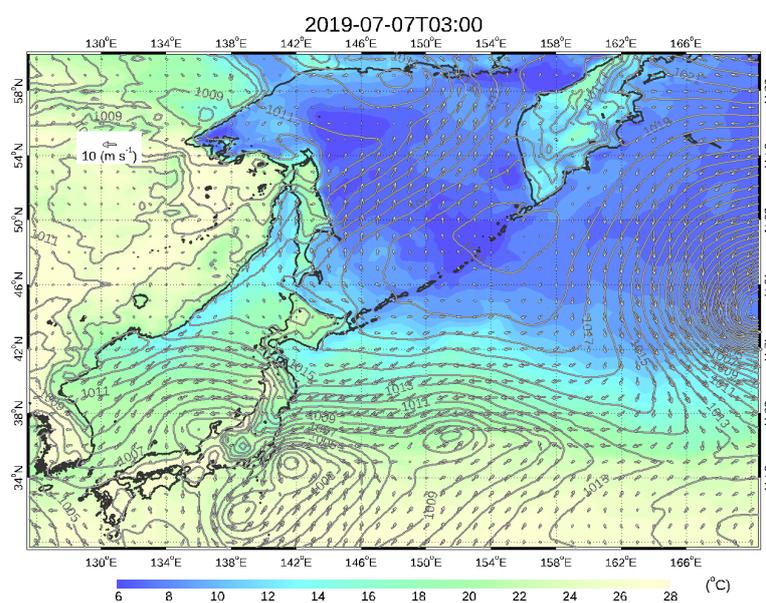


図1 海面気圧 (コンター)、気温 (カラー)、地表風 (ベクトル)。
ERA5 データを用いた。

4. セツ浜町の気象観測——セツ浜町の気候と気象情報の利用——

岩崎俊樹（東北大学大学院理学研究科）

a) 要旨

東北大学災害科学研究拠点では、地域活動のモデルケースとしてセツ浜町プロジェクトを推進してきた。理学研究では、当プロジェクトの一環として、セツ浜町の気候特性を理解し気象情報の利活用を図るために、気象観測を実施することにした。特に、太平洋に突き出したセツ浜に対する海洋の影響を考察するために、町役場と菖蒲田浜海水浴場の2か所で2020年6月から2022年3月まで気象観測を実施した。本稿では、これまでの観測記録に基づき気候と気象情報の利用について整理する。

観測の実施及び本稿の作成等

に協力していただいた、セツ浜町役場並びに町民の皆様、東北大学災害科学研究拠点および研究室のスタッフ・学生各位に感謝したい。

b) 本文

(1) はじめに

セツ浜町は、東は広く太平洋に面し、北は日本三景の松島湾を臨む、風光明媚な町である。「七つの浜」には漁港があり、水産業が営まれている。仙台に近く、夏には菖蒲田浜などの海浜公園に多くの人を訪れる。菖蒲田の北隣りの高山海岸は、明治時代から外国人別荘地として知られている。町の北西側には貞山堀（運河）があり、かつては北上川から松島湾を経て阿武隈川をつなぐ交通の要衝だった。歴史のあるセツ浜町の自然環境を理解するために、町の気象・気候を調査した。

セツ浜町には気象庁のアメダス観測点はない。このため、町の協力を得て、新たに気象観測を実施した。太平洋に小さく突き出したセツ浜町は、海洋の影響を強く受ける。セツ浜町の気候に海洋が与える影響を理解するために、気象測器（POTEKA, 明星電気社製）は、海からやや離れた町役場（3階屋上）と海岸近くの菖蒲田浜海水浴場（パトロールセンターの拡声器の支柱）の2か所に設置した。以下、二つの観測点をセツ浜、菖蒲田と呼ぶ。セツ浜は町全体を見渡せる小高い丘の上であり、測器の設置海拔高度は67mである。菖蒲田はセツ浜のほぼ南に位置し、直線距離で2.5 kmほど離れており、測器の設置海拔高度は4mである。観測は2020年6月に開始し、2022年の3月まで実施した。

観測データを整理し季節変化の概略をとりまとめた。セツ浜町の気候の特徴を明らかにするために、近隣の塩釜や仙台のアメダスの気象データと比較した。特に、海風が卓越する夏は、他地域との相違が大きく、「セツ浜らしさ」が顕著であった。

気象観測やデータ処理は簡単かつ廉価で実施できるようになり、様々な活用法が考えられている。とりわけ防災は重要な活用分野である。セツ浜町には洪水を起こすような大河川はなく、土砂崩れを起こすような急斜面も少ない。このため、県内でも比較的気象災害が少

ない地域と考えられてきた。しかし、気象災害は多種多様であり、油断は禁物である。将来、東北地方でも台風の影響が強まることが予測されており、警戒を怠ってはならない。七ヶ浜町は東日本大震災で大きな被害を受け、現在も復旧・復興の作業が続いている。安全で快適な町づくりに、気象情報が役立つことを期待する。地球温暖化の影響下で高齢化社会を迎え、熱中症への関心が高まっている。環境省と気象庁では、暑さ指数に基づき熱中症の注意喚起を実施するようになった。農業や漁業では、経験に基づく豊富な気象知識が蓄積されている。客観的なデータで裏付けることにより、有効活用が促進される。七ヶ浜町には海浜リゾートがある。安全に海のレジャーを楽しむためにも、気象情報の有効活用を期待したい。観光客にも積極的に提供することで、地域への愛着が増すことが期待される。

* 塩釜、仙台の観測点は、塩釜市伊の保石地区（市西方の丘陵、標高 105m）と仙台管区気象台である。

(2) 七ヶ浜の気象の季節変化

(i) 気温の季節変化

2020年7月から2021年の6月までの1年間のデータを利用し、七ヶ浜町の日平均気温、日最低気温、日最高気温の月平均値の季節変化を見る（図1）。七ヶ浜および菖蒲田の月平均気温は、夏場の最高気温を除けば、塩釜・仙台との差は1℃程度である。4つの観測点の気候は基本的にはよく類似している。

詳細に見れば、七ヶ浜町は海洋の影響を強く受ける。海洋は実効的な熱容量が大きいので、表面温度の季節変化は陸面に比べて小さい。このため、気温の季節変化の振幅は海岸からの距離が離れるに従い大きくなる。七ヶ浜町は、仙台平野の内陸地域と比べれば、夏は涼しく冬は暖かい傾向がある。特に夏は海風が支配的となるため海の影響が強い。日最高気温は菖蒲田や七ヶ浜の方が塩釜や仙台より1~2℃低い。海岸からの距離が近く、海風のために日中の気温上昇が抑えられたためである。日変化は3節で詳しく見ることにする。冬、七ヶ浜は仙台を除く内陸のアメダス観測点より暖かい。仙台は七ヶ浜よりわずかに暖かいが、これは人工排熱や人工地表面などの都市生活によるヒートアイランドの影響である。都市化の影響がなく自然の植生が広がっていれば、仙台の気温は2℃程度低いと考えられる。

図1で目を引くのは、7月と8月で気温差が大きいことである。平年の7と8月の気温差は1.5℃程度であるが、2020年は5.2℃と大きかった。この理由は2020年7月にはヤマセによる低温の日が多く8月には夏型で暑い日が多く、**2020年夏**の特殊事情であった。

(ii) 風の季節変化

表1は両観測点で最も頻度の多い地上風向を月ごとに示したものである。5月から8月までは南東風の頻度が高いが、10月から4月までは北西風が多い。夏の南東風と冬の北西風は、仙台を含む平野部の多くの地域で観測され、周辺地域での比較的一般的な風と言える。七ヶ浜町では夏は南東からの海風が吹き、冬は北西に位置する船形山方面からのおろし風が吹くことが多い。夏の海風は上端が数百m程度の背の低い風だが、秋から春にかけての偏西

風は地上から高度 7~8 km のジェット気流につながる背の高い風である。

図 2 は日平均風速の季節変化（2020 年 7 月より 2021 年 6 月まで）である。仙台管区気象台の風速は年間を通して強めである。建物の影響を避けるために測風塔を地上 52m と高くしていることが影響している。月平均風速は 3、4 月に最大となる地点が多い。早春に風が強い理由は、秋から春にかけて温帯低気圧活動が盛んであること、特に春は地上気温が上昇すると大気の運動量の鉛直混合が盛んになり上空の偏西風が地上風に強く影響することが考えられる。夏は水平気圧傾度が小さく県内全般に風が弱い。興味深いのは、菖蒲田では夏の風速が他の地点と比べてそれほど弱くならないことである。海風は高度が低いほど（丘陵地より平地の方が）風速が大きい傾向があること、陸上に比べて海上では大気に対する摩擦が弱く海風が強くなることなどを反映し、海岸に近い菖蒲田で風が強くなると考える。

(iii) 2020 年 7 月から 2021 年 6 月までの月合計降水量の変化

気象データの中でも降水量はとりわけ関心が高い。降水は気象災害の大きな要因であると同時に、農業などの貴重な資源である。降水量は 1 か月積算しても年々変動が大きく、多すぎれば根腐れカビなどの原因となり、少なければ水不足で作物の成長を阻害する。図 3 は 2020 年 7 月から 2021 年 6 月までの降水量の月合計値の季節変化を表したものである。参考のため仙台の気候値（1991 年～2020 年の 30 年平均値）も示した。4 つの観測点では、2020 年の各月の降水量は 1~2 割の相違はあるものの、ほぼ同様な季節変化を示した。4 地点を隔てるような山岳がないため、共通の気象状況下で発生した降水が、月合計値の大半を占めることを示唆している。反面、1 年間の観測データで見た季節変化は、気候値とは大きく異なる。2020 年 7 月は仙台で平年の 2 倍以上の降水を記録した。オホーツク海高気圧と太平洋高気圧の勢力が拮抗し、その間に発生する梅雨前線の活動が活発で、太平洋側でも降水量が多かった。2020 年 8 月は逆に暑く乾燥した夏で、降水量は平年の半分程度にとどまった。以上のように、月合計降水量は年々の変動が大きく、1 年間の観測で降水量の気候特性を知ることは難しい。水資源の管理のためには、長期間の観測データにより、気候値（平年値）と年々の変動の大きさ把握することが大事である。

東北地方では、月合計降水量の平年値は、日本海側で梅雨期の 7 月に、太平洋側で 9 月に最大となるところが多い。7 月は梅雨の季節である。梅雨の場合は水蒸気の主たる輸送経路が日本海経由であり、奥羽山脈でブロックされるため、日本海側で集中豪雨が起きやすい。太平洋側では日本海側ほど降水量は多くない（2020 年は例外的に太平洋側でも降水量が多かった）。9 月は台風が襲来する頻度が高くなる。台風が東北地方付近を北上する際には、太平洋側で多量の水蒸気が南方より輸送され、台風北側の東風により太平洋沿岸地域に多量の降水を発生させる。特に、9 月には秋雨前線が東北地方に停滞していることも多く、その場合には前線付近で強い降水が継続し、大きな災害を引き起こすことがある。

(iv) 暑さ指数

気候変動や都市のヒートアイランドの影響が深刻になるに伴い、気温が徐々に上昇している。夏には、最高気温が 35℃以上の猛暑日や最低気温が 25℃以上の熱帯夜などが増えて

いる。2019 年は、熱中症の救急搬送人員数が約 71000 人（消防庁調べ）、死者数は 1224 人（厚労省調べ）であった。患者数はその年の“暑さ”に影響されるので年々変動が大きい、10 年程度で平均すればいずれも相当な勢いで増加している。高齢者が熱中症となるケースが多く、社会の高齢化が熱中症被害を一層深刻にしている。また、児童生徒が授業や課外活動中に熱中症となることを避けるため、教育指導の在り方にも関心が集まっている。

熱中症の要因は、気温の高さだけではなく、発汗を妨げる湿度の高さも大きいとされている。熱中症の発症数を推定するために、相関の高い暑さ指数（WBGT）が考案されている。暑さ指数は以下の経験式で表される。

$$\text{WBGT}(\text{C}) = 0.7 \times \text{湿球温度} + 0.2 \times \text{黒球温度} + 0.1 \times \text{乾球温度}$$

黒球温度は近似的な日射および赤外放射の平衡温度である。暑さ指数（WBGT）は温度の単位で表されるが、気温だけではなく水蒸気量（湿度）と日射・輻射の効果も考慮している。日本では黒球温度を含む正規の観測を実施しているのは仙台などの 12 の気象官署のみで、通常は簡便な気温と湿度のみによる表参照で求めている。七ヶ浜町の気象観測（POTEKA）システムでも簡便法による暑さ指数を出力している。POTEKA の暑さ指数はスマホやパソコン画面等でもご覧いただけます。

環境省と気象庁は、2021 年より気象予測データで、WBGT が 33℃以上となることが予想されたとき、各県単位で熱中症警戒アラートを発表するようになった。夏、七ヶ浜町では海風の影響で最高気温は抑えられるが、湿度が高いので熱中症の危険は低いとは言えない。図 4 の例では、七ヶ浜では周辺地域より気温は低い、暑さ指数は高い。暑さ指数は地域差が大きく全県一律ではない。特に、七ヶ浜は海風の影響が大きいので、他地域とは特徴が異なる。独自の観測データに基づく情報提供が望ましい。

(3) 七ヶ浜の夏

(i) 夏の七ヶ浜の天気分類

夏、七ヶ浜町は海風が卓越する。夏の海風には 2 種類ある。正式名称ではないが、ここでは、**晴天型海風**と**曇天型海風**と呼ぶことにする。晴天型海風は宮城が亜熱帯に中心を持つ太平洋高気圧の勢力下にはいる夏型の天気の日に見える。天気が良いため、地上の気温と風の日変化は大きい。海上には暖かい南風が吹いている。陸上では、早朝は冷えて気圧が高くなるので海風はほとんど吹かない。日中、強い日射が地表面を温めると内陸には熱的低気圧が形成され、海風を強化する。海風は、通常、朝の陽が高く昇る頃に海岸付近で吹き始め、1～2 時間ほどで仙台平野全体を覆う。海風の先端部には海風前線が形成されることが多く、前線の通過と海風が吹き始める。海岸近くでは冷たい海風により気温上昇が抑えられるが、内陸に侵入するに従い地表面加熱により海風自体の気温が上昇する。図 5 は典型的な晴天型海風日の気温変化で、菖蒲田と大衡では 10 度以上の気温差が見られた。海風の厚さは 300 m 程度で、風速は 5m sec⁻¹ に達する。海風の強さや侵入時刻、侵入距離は高気圧の張り出しなどの気象条件と、海岸線の形状や山岳などの地理的条件により変動する。

曇天型海風の代表は、ヤマセである。南岸に梅雨前線が停滞し、オホーツク海、千島列島、三陸沖などに中心を持つ亜寒帯系の高気圧圏内に入ると、曇天型海風が発生する。北方海域で涵養された冷気が高気圧に押し出されて太平洋を南下する。海面から熱と水蒸気の供給を受け、下層雲（層積雲）を形成する。牡鹿半島の先端付近で向きを変えて東風となり、七ヶ浜町では花渚浜方面より下層雲と共に陸上に侵入する。下層雲が多いので、日中の昇温が抑えられ、沿岸と内陸の気温差は小さく、日変化も小さい。仙台平野全体を冷気が覆い、冷たい雨が続くこともある。このような気圧配置が長期間続くと、日照不足と低温により冷害が発生する。社会経済へのダメージの大きいヤマセは、長期予報の重要な予測対象である。夏の七ヶ浜町では、頻度は少ないが、西風により気温が上昇することもある。2020年8月15日は七ヶ浜、菖蒲田の両観測点で海風は吹かず西寄りの風となり、七ヶ浜の気温が35°Cを超えた。このような日は宮城全体で高温となる。夏の高気圧が西日本に居座ると（鯨の尾と呼ぶこともある）、暖気は日本海側から山越えや関東方面から阿武隈川沿いに北上し、暑く乾いた空気が宮城に流れ込む。

夏～秋の気象で忘れてはならないのが2.3節で述べた台風である。台風が宮城来襲する頻度は西日本に比べれば多くはないが、それでも宮城の豪雨災害の主役である。2020年は9月下旬に12号台風の影響で雨が降った。9月25日に七ヶ浜で日降水量72mm、最大風速9.8m/s（最大瞬間風速14m/s）、菖蒲田で日降水量87.5mm、最大風速9.8m/s（最大瞬間風速14m/s）を記録している。日降水量は2020年7月～2021年6月で最大である。2021年7月には初めて宮城に台風が上陸した（末尾のトピック参照）。

(ii) 気温と風の日変化

2020年8月のデータで夏の気温の日変化を見る（図6）。暑さ厳しい年であり、月平均した気温の日変化は晴天型海風日の特徴が反映された。最低気温は、海岸から離れるに従い菖蒲田、七ヶ浜、塩釜の順番で低くなる。仙台の最低気温は内陸にもかかわらず比較的高いが、仙台ではヒートアイランドの影響で夜間の気温があまり下がらないためである。最高気温は、七ヶ浜、塩釜、仙台と内陸に向かうに従い高くなる。菖蒲田は最高気温が仙台より2度も低く、仙台の避暑地として昔から親しまれてきたことも頷ける。2020年8月の真夏日（最高気温が30°C以上）の日数は菖蒲田5日、七ヶ浜13日、塩釜16日、仙台21日である。猛暑日（最高気温35°C以上）は、菖蒲田、七ヶ浜、塩釜が1日、仙台が2日である。ちなみに、山形8日、福島13日である。仙台も東北地方の内陸の都市に比べれば、海風の影響で猛暑日の発生日数が抑えられている。

8月の風向風速（図7）と風速（図8）の日変化を見る。夏、太平洋高気圧の影響で宮城では南東風が卓越する。早朝は、菖蒲田と七ヶ浜とも風速1m sec⁻¹程度と弱いが、徐々に海風が強まり、午後早い時間に最大となり、菖蒲田で南東3.5m sec⁻¹、七ヶ浜でも南南東2m sec⁻¹となる。菖蒲田の海風が強い理由は、海風は高度が低いほど強いこと、海上は摩擦が弱いため風速が強いことなどが考えられる。塩釜や仙台の海風強度との関係はやや複雑で地理的・地形的条件なども考える必要がある。

(4) 七ヶ浜の冬

冬、東北地方は西高東低の気圧配置となり地上では北西風が吹くことが多い。この時期は、南北温度傾度が大きい。南北温度傾度が大きいと、地球の自転の関係で、上空では強い偏西風が吹く。7-8 km上空では、風速が 100m/s に達することもある。地上の北西風は上空の偏西風に接続し、高度が増すにつれて強まる。七ヶ浜町でも、10月から4月までは、船形連峰方面から吹き降ろす北西風に支配される（表 1）。二つの観測点を比較すると、夏とは逆に、七ヶ浜町役場屋上の観測点の方が菖蒲田より風が強い。理由として、七ヶ浜の方が菖蒲田より観測点高度が高いこと、および、菖蒲田の観測点は丘陵の風下側の麓に位置することが考えられる。このため、上空の偏西風の影響の大きい七ヶ浜の方が風は強い。ただし、低気圧の通過時などはその限りではない。秋～春は温帯低気圧の季節である。様々な経路を取りながら、日本周辺を頻繁に通過し、その都度強い風が吹く。地上気温が上昇する春は特に風が強くなり、しばしば突風により災害を起こすことがある。早春期は乾燥していて森林火災もしばしば発生するので、強風に対する警戒が必要である。

1月の時刻ごとの平均風速は、夏と同様に午後に最大となる（図 9）。しかし、午後に風速が最大となる理由は夏の海風の場合とは大きく異なる。日中、地上気温の上昇により間の大気の運動量の鉛直交換が盛んになり、地上風が上空の強い偏西風の影響を受けることが主な理由である。従って、両地点の日最大風を比較すると、夏とは異なり、七ヶ浜町役場屋上の方が菖蒲田より強い。これは上で述べた高度や地形の相違で説明される。ただし、冬は平均的に気圧傾度が大きいために、夜間でも夏に比べて風が強いことが多い。温帯低気圧の通過時などは、時間とは関係なく強風となる。常に午後に風が強くなるとは限らないので注意を要する。

図 10 は七ヶ浜町の冬の気温の日変化である。冬は北西風となることが多いため、南東風が卓越する夏に比べ、気温に対する海洋の影響は小さい。図 10 に示された菖蒲田や七ヶ浜の気温の日変化の振幅は、塩釜や仙台と同程度である。県内平野部のアメダス観測点の 2021 年 1 月の日較差（日最高気温と日最低気温の差）は 6.8℃から 9.8℃である。七ヶ浜（町役場屋上）の日較差は 6.7℃、菖蒲田は 7.4℃で、平野部のアメダス観測点と同程度である。夏に比べ海の影響が少なくなることで、平野部内陸側の観測点と日変化の振幅が似てきたと言える。

興味深いのは、町役場屋上より菖蒲田の方が、日較差は大きいことである。夏の場合は、海風の影響で、菖蒲田の 2020 年 8 月の日較差 4.7℃は、町役場の 6.3℃より 1.6℃も小さい。冬の日較差は逆に菖蒲田の方が 0.7℃大きい。冬は北西風が多くなるために日格差を抑制するという海の影響が小さくなることに加え、山谷風による夜間の冷却効果により菖蒲田の最低気温が低下する。町役場から菖蒲田にかけて楯状の斜面となっている。夜間、大気は放射冷却により冷えた地表面と熱交換しながら下降し、冷気は平地に溜まる。その結果、夜間の最低気温は菖蒲田の方が七ヶ浜より低い。日中は、日射による地表面加熱で大気は鉛

直に混合し、断熱減率の効果で、標高の低い菖蒲田の方が最高気温は高い。冬の風と気温の日変化に関する両観測点の関係は、夏とは異なり、盆地の縁（周囲の山地）と底の関係に似ている。

(5) セツ浜町における気象観測データの利用

気象を観測し、記録し、保存し、検索することは、かつて多くの労力と経費を要する作業であり、気象台など限られた機関でしか実施できなかった。しかし、今日では、各プロセスで低コスト化が進んだ。気象観測は簡単に実施できるようになり、そのデータは多くの分野で広く活用されるようになった。気象情報を役立てるためには、利用する側の知識と経験が必要である。セツ浜プロジェクトで試験的に実施した気象観測の活用法を考える。

a. 防災

気象災害の発生が予測される時、雨や風、気圧などのリアルタイムの気象観測データは実況監視のために有効である。気象機関が提供する予測データを身近な実況データで検証・確認しながら、災害発生と町民避難の判断等に利用する。また、町民に身近な観測データを直接提供することにより、自主的な防災行動を促すことができる。

気象観測記録を残すことは、災害に強い町づくりに有益である。気象災害が発生した際には、事後検証を実施し次の災害に備えることができる。過去の災害事例について、気象状況と災害との関係を明らかにすることで、防災システムの設計や改修に役立てる。

b. 健康管理

気象情報は生活を健康で快適にすることにも役立つ。最近では気候変動（地球温暖化）に関連して、熱中症が話題に上ることが多くなった。2021年から環境省・気象庁は暑さ指数に基づく熱中症警戒アラートの発表を始めた。暑さ指数は高齢化社会への対応や児童生徒の指導のために不可欠な情報となりつつある。2.4節で示したように、セツ浜では夏には海風の影響で最高気温は抑えられるが、湿度が高いので熱中症の危険が低いとは言えない。快適で健康な生活を送るためにも、気象データの積極的な活用を期待したい。

c. 農業と漁業

農業や漁業では、気象情報の活用に関する豊富な経験を持っている。長期間の客観的な数値気象データがあれば、それを有効利用できるだろう。農業の場合、降水量や気温、日射量により、作物の収穫量・品質や病虫害の発生などが変化する。圃場の水没や強風による果物の落果などの気象災害情報も必要である。漁業では、風向・風速や降水の情報が安全操業に役立つ。ただ、特定の地点、特定の時刻の情報だけでは不十分である。予測情報と地域の気象観測データを対照しながら利用する。

d. エネルギー産業

再生可能エネルギーでは水力、風力、波力、太陽光など気象とかわりの深い自然エネルギーを利用する。発電設備設置前の事前調査や運用時の効率向上のために、気象情報が必要である。他方、町民のエネルギー消費量も暑さ寒さや降水の有無などによって変化する。気

象情報はエネルギー需要を推定するための要素としても利用される。

e. 観光

七ヶ浜は表情の異なる美しい海浜公園に恵まれ、多くの観光客を受け入れている。風向風速や暑さ指数などの気象情報はレジャーの安全情報として活用できる。観光客にも気象情報を提供し、安全に海のレジャーを楽しむのに役立ててもらうことも期待される。

f. 教育

大気は生命の生存に不可欠な要素だが普段は忘れがちである。気温、湿度や風など日々変動する気象観測データは、大気と自然環境の成り立ちを客観的に考えるのに適切な教材である。また、防災や水資源など気象と社会との関わりについて学ぶことも大切である。

g. 町の気象の記録と気候変動への適応

長期観測には毎日の天気以外にも様々な情報を含む。地域の土地利用変化や、ヒートアイランドの影響なども含まれる。温室効果気体の増加による気候変動影響は避けられないことが世界共通の認識となりつつある（パリ協定、2015年）。2018年に気候変動適応法が施行され、地球温暖化の対策が検討されている。気象・気候と生活、防災、産業との関係についての理解を深め、地域の気候変動適応策について考える。

トピック

2021年7月27-28日には、台風8号が宮城県に上陸した。記録が残る1951年以降初めてのことである。図11に示すように、七ヶ浜の海面更正気圧の最低値は石巻と同程度であり、台風中心が七ヶ浜町の近くを通ったことが分かる。

表1 七ヶ浜と菖蒲田の最多頻度地上風向（2020年7月から2021年6月までの記録による）

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
七ヶ浜	北西	北西	北西	北西	南	南東	南東	南東	北東	北北西	北西	北西
菖蒲田	北西	北西	北北西	北北西	東南東	東南東	東南東	東南東	北東	北北西	北西	北西

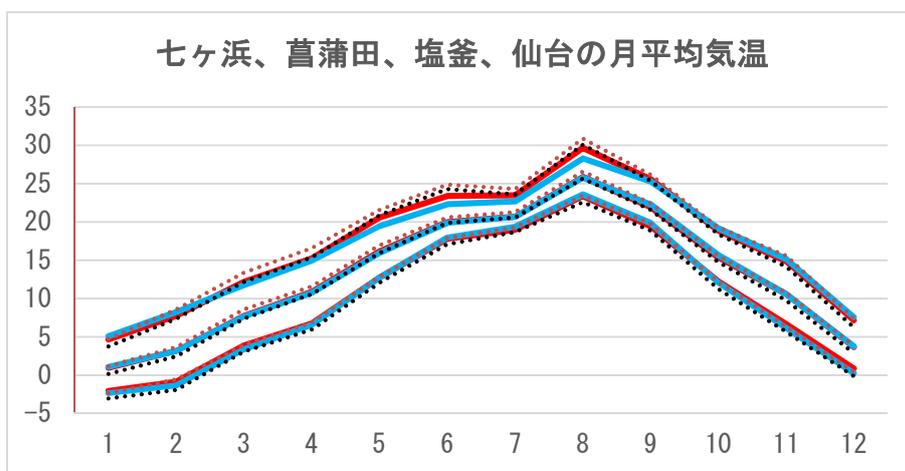


図1. 2020年7月～2021年6月の月平均気温の季節変化（1月～12月に並べ替え）。
下から、それぞれ日最低気温、日平均気温、日最高気温。
赤：七ヶ浜（役場屋上）、青：菖蒲田、黒点線：塩釜、赤点線：仙台

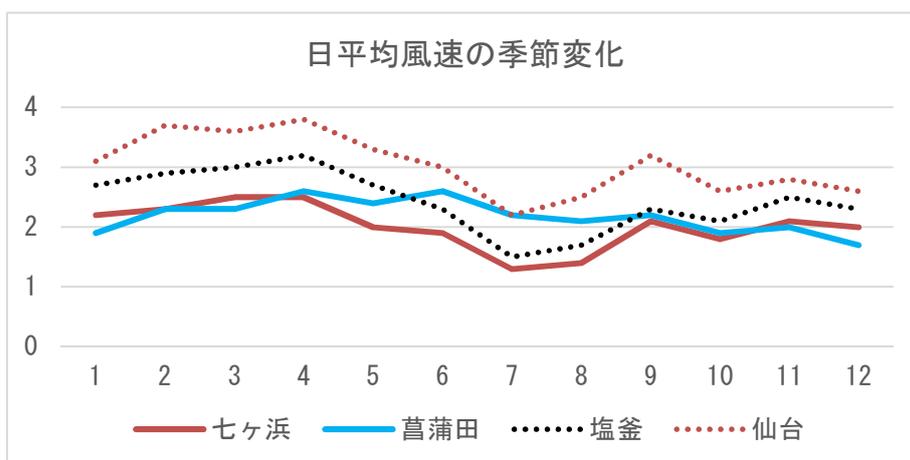


図2. 2020年7月～2021年6月の月平均気温の季節変化

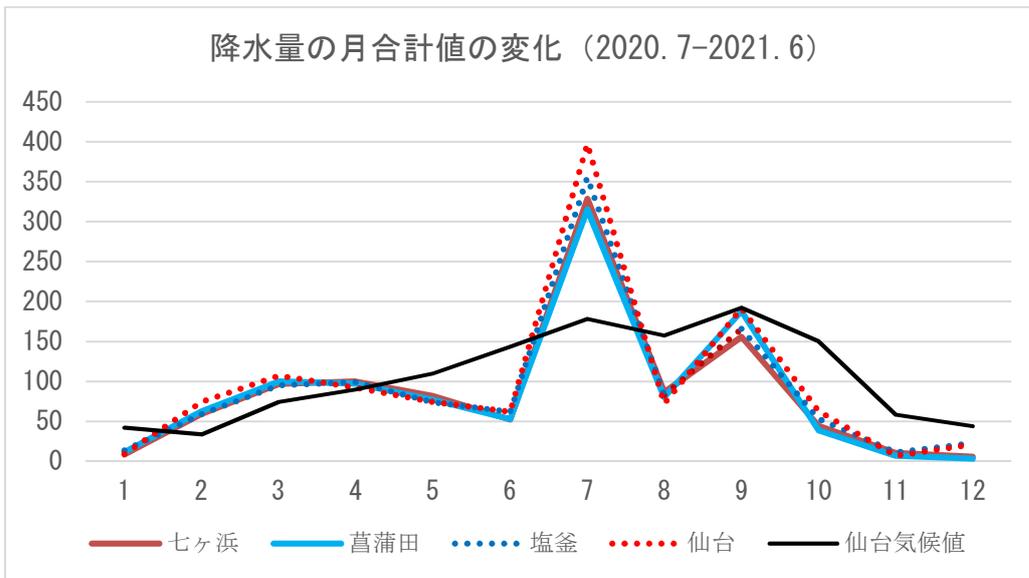


図 3. 2020 年 7 月-2021 年 6 月までの降水量の月合計値 (mm/月) の季節変化

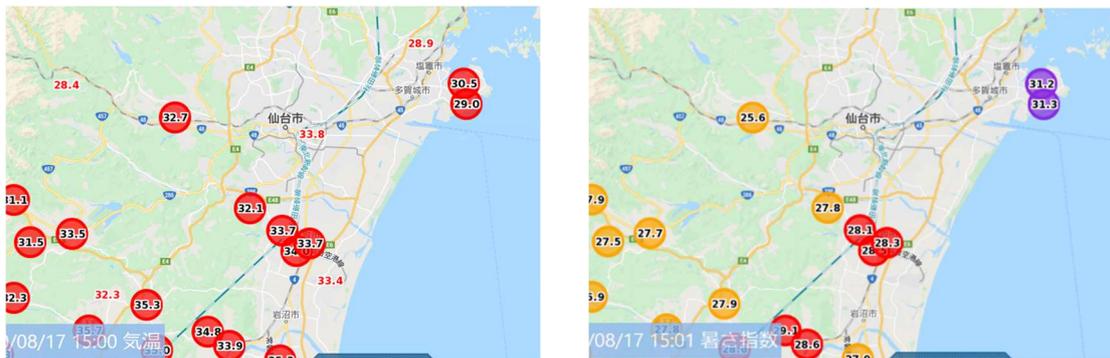


図 4 2020 年 8 月 17 日 15 時の気温 (左) と暑さ指数 (右)

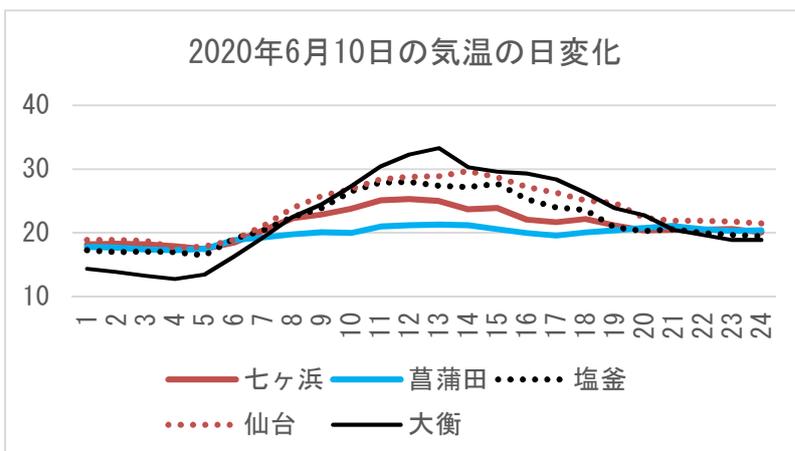


図 5.2020 年 6 月 10 日の気温の日変化 (七ヶ浜、菖蒲田、塩釜、仙台、大衡)
菖蒲田、七ヶ浜は POTECA による観測で、他はアメダスの観測である。

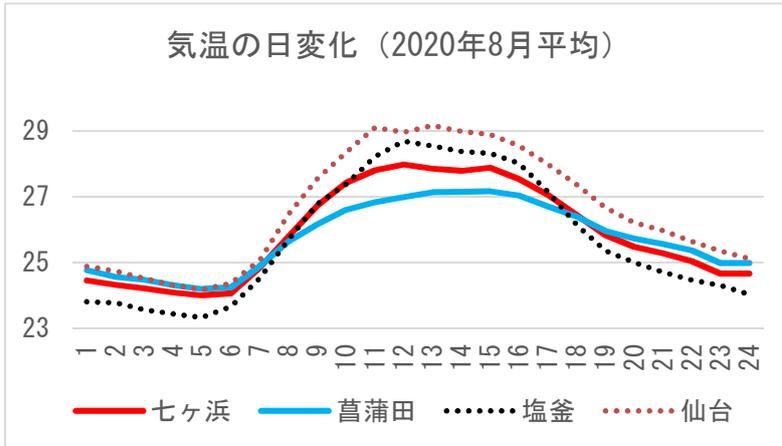


図 6 時刻ごとに月平均した 2020 年 8 月の気温の日変化。

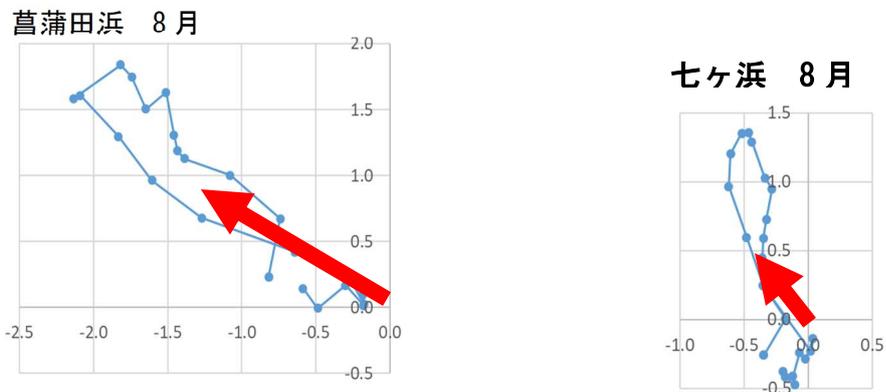


図 7.2020 年 8 月の月平均 (ベクトル平均) の風向風速の日変化。赤は日平均風向風速。午前 1 時より 1 時間ごとに 24 時まで線で結ぶ。菖蒲田の始点は西風成分 -0.6 m sec^{-1} で終点は同 -0.8 m sec^{-1} 。七ヶ浜では始点は -0.2 m sec^{-1} で終点は -0.4 m sec^{-1} である。

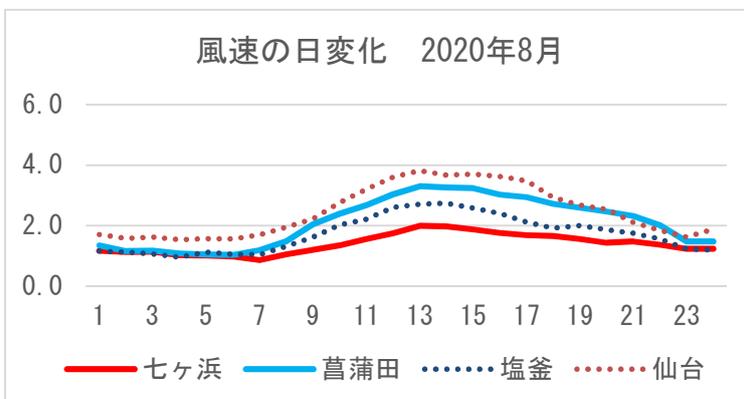


図 8. 時刻ごとに月平均した 2020 年 8 月の風速 (m s^{-1}) の日変化。

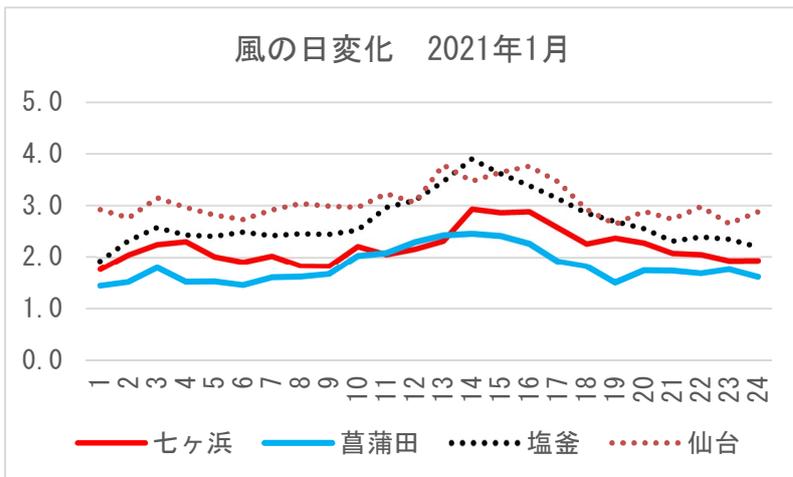


図9 時刻ごとに月平均した2021年1月の風速 (m s^{-1}) の日変化。

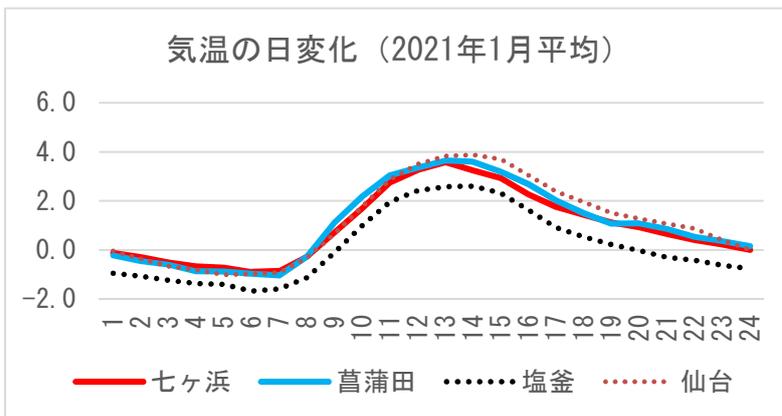


図10 時刻ごとに月平均した2021年1月の気温の日変化。

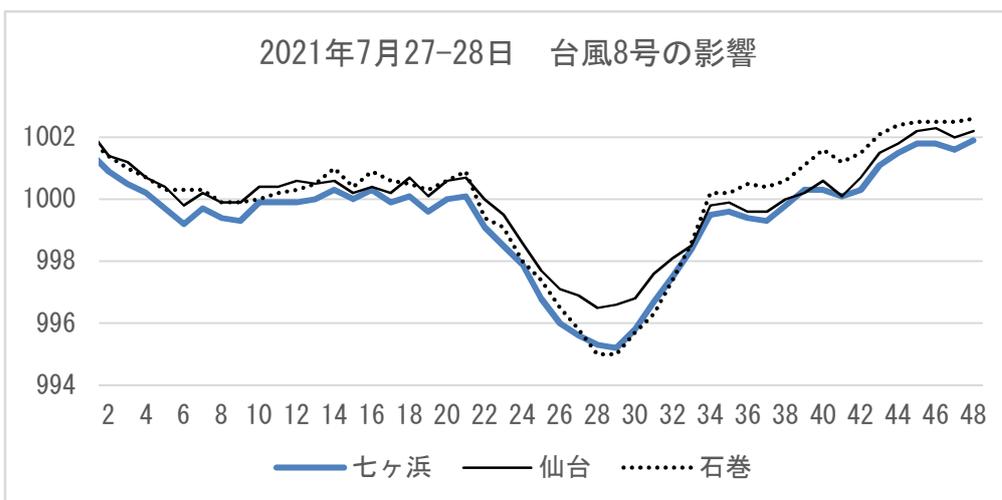


図11. 2021年7月27-28日に、七ヶ浜、仙台、石巻で観測された海面更正気圧。

付録： 観測地点及び観測項目の基本情報

七ヶ浜町の気象・気候は海洋に大きく影響される。本計画では海洋の影響を明らかにするために、七ヶ浜町役場と菖蒲田海水浴場の 2 か所の観測点を設置した。観測点情報は以下のとおりである。測器は明星電気社製 POTEKA 小型気象計で、七ヶ浜観測点は町役場 3 階屋上に据え置き型を、菖蒲田海水浴場観測点はパトロールセンターの拡声器の支柱に柱状型をそれぞれ設置した。七ヶ浜観測点は太陽電池パネルを電源に用いるが、菖蒲田観測点は外部電源とし、七ヶ浜町のご厚意によりパトロールセンターより配電していただいた。以下に設置状況の写真を示す。

観測点名：七ヶ浜

住所： 宮城郡七ヶ浜町東宮浜丑谷辺 5-1 七ヶ浜町役場

位置： 北緯 38.3046 東経 141.0592

海拔高度： 49m (GL) + 18m (設置高度)

小型気象計 据置型、太陽電池

観測点名：菖蒲田海水浴場

住所： 宮城郡七ヶ浜町花刈浜長須賀 パトロールセンター

位置： 北緯 38.2892 東経 141.0647

海拔高度： 1m (GL) + 3m (設置高度)

柱状型、外部電源



観測測器の設置状況（左、七ヶ浜観測地点：右、菖蒲田海水浴場観測地点）

七ヶ浜と菖蒲田の観測地点の位置を以下の地図上に示す。菖蒲田の観測地点は七ヶ浜のほぼ南に位置し、直線距離でおおよそ 2.5 km 離れている。設置高度は七ヶ浜がおおよそ 67m、菖

蒲田がおよそ 4m である。POTEKA の観測要素は、気温、相対湿度、気圧、風向、風速、日射、感雨、降水量の 8 項目である。これを処理し、気温、相対湿度、海面更正気圧、風向、風速、日射、感雨、降水量、天気、暑さ指数の 10 項目の情報を提供する。海面更正気圧は現地気圧の観測値を気温の観測値と海拔高度を用いて海面更正する。正規の「暑さ指数」は湿球温度、黒球温度および気温を用いて求める。しかし、POTEKA では黒球温度は観測していないので、気温と湿度を利用し簡易法(経験式)*で求める。

POTEKA 小型気象計で観測された気象データは、POTEKANET により収集される。リアルタイムデータ(実況値)は同ホームページから誰でも閲覧できる(公開サービス)。特定の観測地点の契約者は、当該観測地点(七ヶ浜と菖蒲田海水浴場)に限り、アーカイブ(記録保管)された過去の観測データも閲覧することができる(契約者サービス)。公開サービスと契約者サービスの詳細は下記ホームページに記載されている。

POTEKA 小型気象計 <https://www.meisei.jp/poteka/system/smallweathermeter.html>

公開サービスと契約者サービス <https://www.meisei.jp/poteka/cando/realtime.html>

気象データ閲覧用ホームページ：<http://www.potekanet.com/>

*岡田牧、岡田益己、日下博幸、2013：岡田・日下の黒球温度推移式の広域適用とパラメータ調整、日本ヒートアイランド学会論文集 Vol8、13-21.



観測地点 (七ヶ浜、菖蒲田海水浴場)

5. 冬季の太陽光発電出力予測の課題と積雪モニタリング

大竹秀明（所属）国立研究開発法人産業技術総合研究所 福島再生可能エネルギー研究所

a) 要旨

太陽光発電の出力予測の外れ事例には冬季の積雪による遮蔽に伴う発電出力の低下がある。出力の予測の精度向上のためには、太陽光発電システム上の積雪の動態（降雪から積雪、融雪、落雪までの過程）を把握し、予測技術に適用する必要がある。本研究では、電力事業者の協力のもとメガソーラーサイトにおいて積雪のモニタリングを開始したので、その研究の概要と初期モニタリング結果を報告する。

b) 本文

(1) 背景

降雪時には広域エリアで太陽光発電システムからの発電電力量の出力低下が観測されることがある。図1は産業技術総合研究所 福島再生可能エネルギー研究所（福島県郡山市）にある積雪が確認された太陽光発電システムの事例である。太陽光発電システム上の積雪により遮蔽されると、日射があっても発電できない事象が生じる。これまで、太陽光発電の出力予測には雲・日射の予測が特に重要であったが、その天候だけでなく、積雪情報も冬季には大事となる。また、太陽光発電システム上の積雪が、融雪、落雪後、発電出力の増加のタイミングも電力供給が過多にならないように事前に把握できることが望まれる。太陽光発電システム上の積雪による出力予測の課題については、日本太陽エネルギー学会におけるディスカッションもあるので参照されたい（大竹, 2020）。



図1：福島再生可能エネルギー研究所（福島県郡山市）における積雪が確認された太陽光発電システム（著者撮影）。

(2) 研究計画

本研究では本年度から科研費・基盤 B「太陽光発電システム上の積雪動態の解明と予測への展開」(21H01873、研究期間 2021~23 年度、研究代表者 大竹秀明)により北海道電力総合研究所、ほくでんエコエナジー株式会社の協力のもと「ワインの里池田ソーラー発電所」(北海道中川郡池田町清見、発電出力：1,500kW)において、太陽光発電システム上の積雪のモニタリングを含めた研究を開始した。本研究課題の目的は、大きく 3 つある。

(a) 積雪のモニタリング

・太陽光発電システム上の積雪のモニタリングを実施し、降雪、積雪、融解、落雪の一環したプロセスを理解すること。

(b) 積雪時の発電予測

・積雪変質過程を考慮した積雪の開始、融解・落雪のタイミングを含めた積雪動態のモデル化と予測不確実性の分析を行う。

(c) 予測のインパクト評価

・発電予測を活用した電力市場取引や電力経済の分野における予測のインパクト評価を行う。

(3) 初期積雪モニタリング結果

本稿では 2022 年 1 月 28 日から「ワインの里池田ソーラー発電所」で開始されたモニタリング結果の速報として、その一例を示す。



図 2：2022 年 2 月 20 日 9 時 50 分の太陽光発電システム上の積雪のモニタリング事例。(a) 日射量観測値、(b)可視画像、(c) 赤外画像をそれぞれ示す。

図 2 は太陽光発電システム上の積雪事例であり、左から日射量観測値、可視画像と赤外画像 (2022 年 2 月 20 日 9 時 50 分) をそれぞれ示している。観測データは日射量、カメラ画像 (可視・赤外) とともに 10 分毎に取得している。北海道付近には石狩湾北部に低気圧があり、道東付近は東寄りの風が入りやすい環境場にあった。20 日早朝にまとまった降雪があり、日中は約 18cm 程度まで積雪が確認された。しかし、9 時 50 分には太陽光発電シス

テム上の積雪の一部が落雪した。「ワインの里池田ソーラー発電所」の太陽光発電システムの傾斜角は約 40 度程度である。また、赤外画像で確認すると、雪面は低温であるが、落雪した箇所では相対的に温度が高いことも確認できる。

北海道地方では冬季は降雪があることが多いため、太陽光発電システムの傾斜角が大きく、積雪を落雪させるように工夫されている点もある。しかし、融雪を促進させる設備は実証実験で行われている例も報告されているが多くはない。降雪から落雪・融雪に至る積雪の動態の観測を今後継続しデータ蓄積を進め、分析する予定である。

本プロジェクトでは、気象、雪氷学、太陽光発電、人工知能技術、電力工学の各分野の専門家が連携して積雪時の発電予測の基礎的な研究と予測技術向上を狙った研究計画となっている。

謝辞 メガソーラーサイトでの気象センサー設置については北海道電力総合研究所、ほくでんエコエナジー株式会社にご協力を頂いた。

c) 参考文献

大竹秀明, 2020 : 特集 II 太陽光発電システムの大量導入と太陽光発電量予測技術の課題
総合討論「太陽光発電予測に関するディスカッション」, 日本太陽エネルギー学会誌, **46(1)**,
57-62.

6. 中部山岳域における気候変化の水平分布と標高依存性の解析

栗林正俊 (長野県環境保全研究所)

a) 要旨

本研究では、中部山岳域における各気象要素の経年変化の水平分布や標高依存性について明らかにすることを目的に、地域気候モデルによる 5 km 格子の 1981~2015 年の長期気象再現計算値を解析した。この結果、年平均気温はほぼ一様に上昇傾向であるのに対し、年降水量は高標高域の方が低標高域に比べて年変化率が小さい傾向があった。特に、年降雨量ではこの傾向がより顕著になる反面、年降雪量は日本海側の低地では減少傾向だが内陸域ではむしろ僅かに増加していることが明らかになった。

b) 本文

(1) はじめに

2018 年 12 月に気候変動適応法が施行され、長野県は 2019 年 4 月に信州気候変動適応センターを設置するとともに、2021 年 6 月に長野県ゼロカーボン戦略を策定し、緩和策と適応策を推進する体制を整えた。具体的な対策を講じる上では、多岐にわたる分野への詳細な影響評価が必要になるが、このためには様々な気象要素を含む高解像度の気候データが不可欠である。また、地域毎の気候変化の実態を観測に基づいて把握することと、高解像度の気候データの精度を検証することも、影響評価の精度を高める上で欠かせない。特に、長野県は中部山岳域の中心に位置し高山帯も広く分布していて、ここに降る雪は水資源、観光、生態系など幅広い分野において重要視されているので、高山帯も含めて気候変化の実態を詳細に解析することは重要な課題である。しかしながら、山岳域で高精度な気象観測を長期にわたり継続することは困難なため、標高 1500 m 以上の地域には気象庁の観測点が乏しく、富士山を除くと御嶽山(標高 2195 m)、宮田高原(標高 1660 m)、上高地(標高 1510 m)にアメダスの雨量計が設置されているのみである。栗林ら(2019)は、これらの観測点を含む長野県のアメダスによる夏季降水量の観測値を解析して、6 月の降水量の年変化率と標高の間には弱い負の相関があることを示しているが、高標高域では冬季降水量の観測精度を保つことが難しく、年降水量の年変化率と標高の関係はよく分かっていない。そこで、本研究では地域気候モデルを用いて 1981~2015 年の中部山岳域の気候を再現した計算結果を解析し、気象庁の観測値と比較して再現性を検証しつつ、各気象要素の経年変化の水平分布や標高依存性について明らかにすることを目的とする。

(2) 方法

気候再現計算は、気象庁気象研究所で開発した非静力学地域気候モデル NHRCM (Sasaki et al., 2008)の初期値・境界値に気象庁 55 年長期再解析(JRA-55)を用いて、2 重ネストにより東アジアを 20 km 格子、本州・四国・九州をカバーする領域を 5 km 格子で実施された。計算条件の詳細は Kawase et al. (2018)と同じで、この計算は 1 年毎に前年 7 月末から 8 月

末までの約1年1ヵ月間を連続積分され、1980～2015年の合計36年分実行された。解析には、1981～2015年の中部山岳域の結果を使用した。この計算値の再現性の検証には、気象庁による長野県内の観測値を利用した。観測点の詳細は、栗林ら(2019)にまとめられている。本研究では、この観測値のうち気象観測統計指針の正常値と準正常値(資料数が全体の80%以上)に分類された値のみ解析に使用した。観測点の移転がある場合、移転前後の統計値の均質性については、気象観測統計指針に示されている条件に従った。気候変化の解析をする際、気温については各観測点や各モデル格子で単回帰分析して得られる回帰係数に100をかけた値(単位:°C/100年)として計算したのに対し、降水量や積雪深など降水現象に関係する気象要素については、各観測点や各モデル格子で単回帰分析して得られる回帰係数を解析対象期間の平均値で割り、100をかけた値(単位:%/年)として計算した。

(3) 結果と考察

1981～2015年の年平均気温について、NHRCMは観測された年々変動を良く再現し、経年的な上昇傾向も再現したが、観測に比べて経年変化率を0.80～2.05(°C/100年)過小評価した(表1)。この原因として、観測値には気候変化の影響だけでなく、気象官署の周辺が都市化したことによるヒートアイランドの影響が入っているのに対し、NHRCMには都市化の影響が入っていないことが考えられる。NHRCMにより再現された気温の経年変化率は、中部山岳域全体としてほぼ2～3(°C/100年)で一様であり、標高に応じた違いもほぼ見られなかった。

表1 長野県の気象官署における1981～2015年の年平均気温の変化率に関する観測とモデルの比較

観測点	標高 (m a.s.l)	観測 (°C/100年)	モデル (°C/100年)
長野	418	3.07	2.27
松本	610	3.97	1.98
飯田	516	3.31	2.19
軽井沢	999	4.26	2.21
諏訪	760	3.50	2.00

年降水量については、御嶽山(標高2195m)の観測値が正常値として得られているのが1993年以降であることから、1993～2015年を対象に年変化率を評価した結果、標高の高い地点の方が低い地点に比べて年降水量の年変化率が小さい傾向が見られた。NHRCMによる同期間の年降水量の年変化率にも同じ傾向が捉えられ、NHRCMは年降水量の年変化率と標高の関係をよく再現した。NHRCMで1981～2015年を対象に同じ解析をしても、同様の傾向が見られた(図1a-b)。年降水量の年変化率の水平分布に着目すると、飛騨山脈、木曾山脈、赤石山脈、八ヶ岳といった標高2500m超えの山岳が連なる地域では、周辺に比べて年変化率が小さい(図1a)。栗林ら(2019)は、御嶽山のアメダスの6月の降水量が1979～2015年の間に有意水準5%で有意に減少していることを示しており、梅雨時期の降雨量が山岳域で減少している可能性がある。

NHRCMによる降水量を液体降水(降雨)と固体降水(降雪)に分けて解析した結果、降雨量に関しては、より顕著に標高の高い地点の方が低い地点に比べて年変化率が小さい傾向が見られた(図1c-d)。特に、標高2000m以上の地域では、標高が上がるほど降雨量の年変化率

が減少している(図 1d)。一方、年降雪量の年変化率は、日本海側の低地で低く内陸域で高い傾向があり(図 1e)、標高 1000 m 以上の地域で概ね正であることが明らかになった(図 1f)。標高 1000 m 以下の地域における年降雪量の年変化率はばらつきが大きく、内陸の盆地と沿岸域の特徴の違いを反映していると考えられる。NHRCM による年最深積雪の年変化率は、年降雪量と類似した傾向を示し、日本海側の低地では負であるのに対し、標高 1000 m 以上の地域では正であった。

月別の解析を行った結果、12 月の気温が低下傾向で、降水量が増加傾向のため、山岳域を中心に降雪と積雪が増加傾向になっていることが明らかになった。この 12 月の気温と降水量の変化傾向の特徴は、Yasunaga and Tomochika (2017)が観測に基づいて示した結果とも整合していた。一方、2 月は顕著に気温が上昇傾向で、降水量は日本海側で減少傾向、太平洋側で増加傾向となっていた。このため、降雪量は赤石山脈周辺を除いて減少傾向だった。赤石山脈は標高が高く非常に寒冷なため、2 月の気温が上昇しても雪が雨に変わらず、むしろ太平洋側での降水量の増加により降雪量が増加したと考えられる。

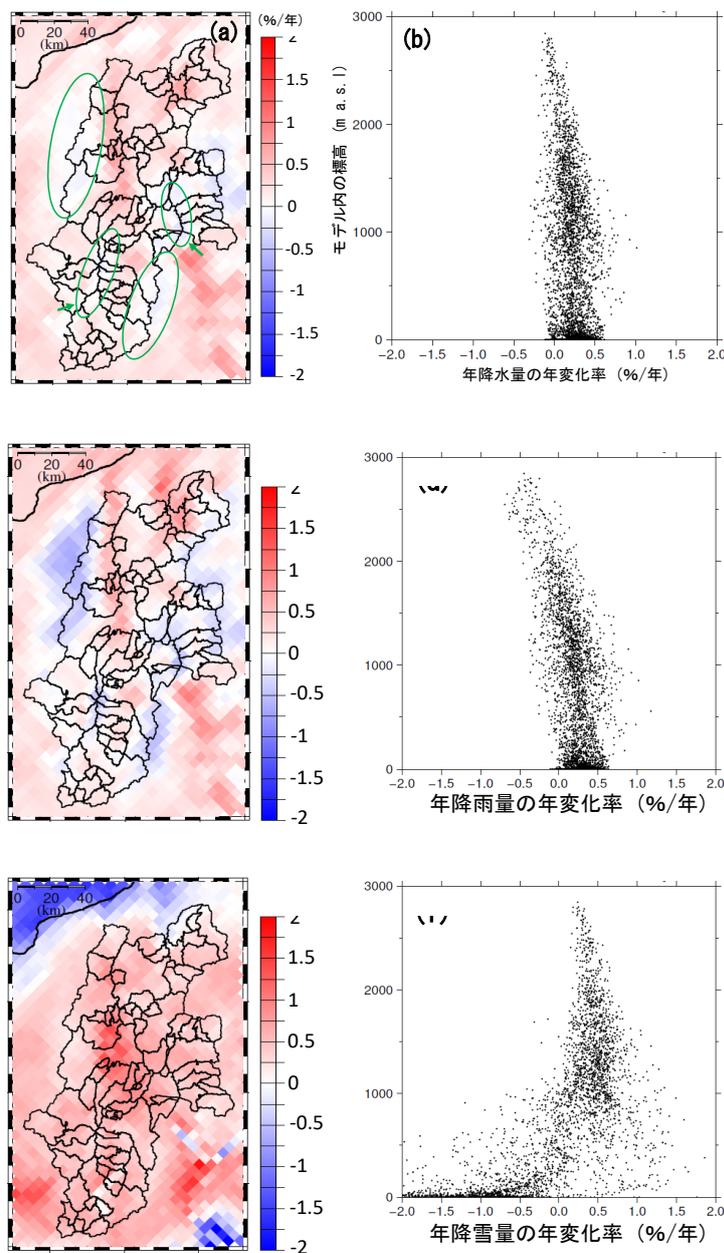


図 1 NHRCM による年降水量(a, b)、年降雨量(c, d)、年降雪量(e, f)の 1981~2015 年の年変化率の水平分布と標高依存性。

c) 参考文献

- 栗林正俊, 大和広明, 浜田崇, 2019: 長野県における 1979~2015 年の夏季降水量の経年変化の標高依存性, *地学雑誌*, **128(1)**, 21-30.
- Sasaki, H., K. Kurihara, I. Takayabu, and T. Uchiyama, 2008: Preliminary experiments of reproducing the present climate using the non-hydrostatic regional climate model. *SOLA*, **4**, 25-28.
- Kawase, H., T. Sasai, T. Yamazaki, R. Ito, K. Dairaku, S. Sugimoto, H. Sasaki, A. Murata, and M. Nosaka, 2018: Characteristics of synoptic conditions for heavy snowfall in western to northeastern Japan analyzed by the 5-km regional climate ensemble experiments, *J. Meteor. Soc. Japan*, **96(2)**, 161-178.
- Yasunaga, K., and M. Tomochika, 2017: An increasing trend in the early-winter precipitation during recent decades along the coastal area of the Sea of Japan. *J. of Hydrometeorology*, **18**, 2893-2906.

7. 長期日本領域再解析の降水の再現性の検証

福井真, 曾我大輝, 小原涼太, 臼井健, 瀧口海人, 小野佳祐, 廣瀬大河, 松島沙苗, 白川栄一, 伊藤純至, 岩崎俊樹, 山崎剛 (東北大学), 斉藤和雄 (気象業務支援センター/東京大学大気海洋研究所/気象研究所), 瀬古弘(気象研究所)

a) 要旨

日本域を対象とした水平格子間隔 5km の領域再解析を 20 年分(2001 年 7 月-2020 年 6 月)実行し、その再現性について評価した。期間を通じて概ね安定した解析が行われたことが確認できた。月降水量に着目すると、特に台風に伴う降水の影響が大きい 9 月において、極大となる季節進行や西日本の東斜面で降水量が多くなる水平分布の再現性が、領域再解析では JRA-55 と比べて改善することが分かった。なお、本報告は福井ほか(2022)での発表内容を基にしている。

b) 本文

(1) はじめに

全球的な高層観測網が整備されて 60 年程度が経過した。その間に、計算資源拡充の助けも借りつつ、数値予報技術が進展し精度の向上がなされてきた(Bauer et al. 2015)。観測と数値予報技術を活用し、過去数十年間に渡る大気の状態を推定する長期再解析が可能な環境が整ってきた。長期再解析は、これまでも世界の主要な現業気象予報機関で全球を対象に実施されてきており、気象や気候に関する現業から研究まで幅広く活用されてきている。しかしながら、豪雨などの顕著現象や細かな地形の影響を対象とするには、全球再解析は最新のものでも格子間隔 30-50 km 相当であり粗いため、更に解像度が高い長期再解析が求められる。そこで、我々は、領域を日本域に限定する代わりに水平格子間隔 5km の高解像度モデルを用いた日本域を対象とした長期領域再解析のためのシステム構築を行ってきた(Fukui et al. 2018)。そして、長期再解析の実行に着手し、その再現性を評価する段階に入ってきた。現時点で 2001 年 7 月から 2021 年 6 月までの 20 年分の再解析が完了した。本報告では、降水に着目した領域再解析の再現性を評価した結果について紹介する。

(2) 領域再解析システム

領域再解析システムは、気象庁 55 年長期再解析(JRA-55, Kobayashi et al. 2015)を境界条件として、東アジア域を対象に水平格子間隔 25 km で再解析を行い、さらに日本域を対象に水平格子間隔 5 km で再解析を行うよう構築されている(Fukui et al. 2018)。第一推定値やその誤差共分散を評価するためのモデルとしては気象庁非静力学モデル(NHM, Saito et al. 2007)を用い、解析値を求めるデータ同化手法としては局所アンサンブル変換カルマンフィルタ(LETKF, Hunt et al. 2007)を用いた。同化するデータには、地上気圧観測及びラジオゾンデの高層観測に加え、海上のみで台風中心位置を利用した。なお、LETKF によ

る解析においては、第一推定値として解析中心からの予報を用い、予報誤差共分散は 30 メンバーの摂動を与えた予報を用いて評価した。対象期間は 2001 年 7 月から 2021 年 6 月までの 20 年間とした。計算実行は 1 年分を 1 ストリームとなるように分割し、各年の開始時刻を 25km 格子の再解析では 6 月 20 日 12UTC、5km 格子の再解析は 6 月 29 日 12UTC とした。評価には、スピニアップ期間を除いた 7 月から翌年 6 月までを用いた。

(3) 結果

まず、期間を通じて概ね安定して動作することを確認した。同化された観測数は、ラジオゾンデによる斉時観測の有無によって 00/12UTC と 06/18UTC で異なることを除くと、概ね一貫していた。第一推定値が観測から離れすぎ、同化された観測数が極端に少なくなることはなかった。海面更正気圧における JRA-55 に対する根平均二乗差(RMSD)は、夏季(JJA)は平均 $0.66 \pm 0.14 \text{hPa}$ で、冬季(DJF)は平均 $0.87 \pm 0.22 \text{hPa}$ で推移した。冬季の RMSD が夏季に比べて大きくなった要因としては、観測の少ない日本の南海上を温帯低気圧が発達・通過することが冬季に多いことが挙げられる。

台風の中心位置の平均誤差は 60km で、台風ボーガスと同化している JRA-55 と同程度となった。中心気圧については、領域再解析では台風の強度情報は直接同化していないものの、中心気圧の誤差は平均で、16hPa から 13hPa まで減少し、台風ベストトラックとの対応が JRA-55 に比べて改善した。側面境界付近では JRA-55 と同じくバイアスが大きかったが、日本の南岸を中心に改善した。側面境界付近では台風のスピニアップの問題があるものの、側面から離れると、台風の内部コアをある程度解像できる高解像度モデルを用いた再解析の有効性が表れることを示唆する。

20 年平均した月降水量の季節進行に着目すると、気象庁 AMeDAS による地上観測では、日本域平均すると 7 月及び 9 月で極大をとる。7 月は主に梅雨、9 月は主に台風の影響を受けるためである。JRA-55 では 7 月は観測とよく対応していたが、9 月は過小評価しており極大が観測ほど明瞭ではなかった。領域再解析では、9 月も観測に近い降水量となり、観測同様に明瞭な極大をとるようになった。月降水量の水平分布については、9 月の観測では、九州および、四国、紀伊半島の山地の東斜面で降水量の多いという結果であった。JRA-55 この分布のコントラストを過小評価していたが、領域再解析では観測の分布の特徴をよく再現できていた。高解像度化に伴い、地形の影響を反映できるようになったこと、台風強度の日本付近での再現性が改善したことが要因と考えられる。

c) 参考文献

- Bauer, P., A. Thorpe, and G. Brunet, 2015: The quiet revolution of numerical weather prediction. *Nature*, **525**, 47-55.
- Fukui, S., T. Iwasaki, K. Saito, H. Seko, and M. Kunii, 2018: A feasibility study on the high-resolution regional reanalysis over Japan assimilating only conventional

- observations as an alternative to the dynamical downscaling. *J.Meteor. Soc. Japan*, **96**, 565-585.
- 福井真, 曾我大輝, 小原涼太, 臼井健, 瀧口海人, 小野佳祐, 廣瀬大河, 松島沙苗, 白川栄一, 伊藤純至, 岩崎俊樹, 山崎剛, 斉藤和雄, 瀬古弘, 2022: 長期 (2001-2020) 日本領域再解析の再現性の検証. 日本気象学会 2022 年度春季大会講演予稿集, **121**, 208.
- Hunt, B. R., E. J. Kostelich, and I. Szunyogh, 2007: Efficient data assimilation for spatiotemporal chaos: A local ensemble transform Kalman filter. *Physica D*, **230**, 112-126.
- Kobayashi, S., Y. Ota, Y. Harada, A. Ebita, M. Moriya, H. Onoda, K. Onogi, H. Kamahori, C. Kobayashi, H. Endo, K. Miyaoka, and K. Takahashi, 2015: The JRA-55 Reanalysis: General specifications and basic characteristics. *J.Meteor. Soc. Japan*, **93**, 5-48.
- Saito, K., J. Ishida, K. Aranami, T. Hara, T. Segawa, M. Narita, and Y. Honda, 2007: Nonhydrostatic atmospheric models and operational development at JMA. *J. Meteor. Soc. Japan*, **85B**, 271-304.

8. NHRCM による地上風のバイアス評価と沿岸海上気象データの活用

鈴木智恵子、杉本志織 (JAMSTEC)

a) 要旨

地域気候モデル NHRCM による力学的ダウンスケーリング実験の結果を用いて、日本周辺域における地上風の再現性を調査した。気象庁の気象官署データと比較した場合、水平格子間隔 5km の実験では年平均風速で過大評価となる地点が多かったが、水平格子間隔 2km の実験では全体的に過大バイアスが改善された。海上保安庁による沿岸海上気象データも加えて比較すると、実験により再現された風速に対して気象官署とは異なる対応関係を示すことがわかった。

b) 本文

地域気候モデル NHRCM を用いた日本の地域気候の再現実験では、気温や降水量、降雪積雪と比較してその他の気象要素のモデルバイアスを示した研究例は非常に限定的である。そこで、本研究では統合的気候モデル高度化研究プログラムで実施された地域気候モデル NHRCM によるダウンスケーリング実験の結果を用いて地上風の再現性を調査した。

まず、日本周辺域で再現された地上 10m 風速は、陸上海上とも明瞭な季節変化があり、どちらも冬季に大きく夏季に小さくなった。どの季節も海上の風速は陸上の風速と比較してより大きく、とくに冬季の太平洋上では 12m/s を上回る風速が再現された。このような季節性と空間パターンは水平格子間隔によらず共通する特徴であった。一方、両実験の異なる特徴として、山頂付近で再現される強風域を除くと水平格子間隔 5km の実験と比較して水平格子間隔 2km の実験の方が陸上風速は小さく、海上風速はやや大きく再現された。実験により再現された地上 10m 風速を気象庁の気象官署で観測された風速と比較した結果、水平格子間隔 5km の実験では年平均風速が過大に再現される地点が多かった。しかし水平格子間隔 2km の実験では過大バイアスが低減し、より観測に近い地上風速が再現された。季節別にみても同様の結果が得られたが、夏季以外の季節では水平格子間隔 2km の実験で過小バイアスに転じる地点もやや増加した。

次に、海上保安庁により観測された沿岸海上気象データを入手して品質管理を行い、バイアス評価への利用を検討した。観測地点が比較的近接する太平洋側の 6 地点に着目して気象官署と沿岸海上気象データの月平均風速を比較すると、両観測データには線形の関係がみられた。ただし実験により再現された風速がどちらの観測データと近い値を示すかは地点により異なることがわかった。沿岸域では隣接する格子点であっても海陸比が急変するため、今後各格子点の海陸比についても考察する必要がある。さらに風の定常度を調べることで、水平格子間隔 2km の実験では風向の季節性も再現可能なことがわかった。

c) 参考文献

森征洋、1983: 日本における平均風向と風向の定常度について、天気、30、217–223.

9. 気象庁における気候情報利活用促進の取組

熊谷小緒里（気象庁大気海洋部気候情報課）

a) 要旨

気象庁では2011年度の交通政策審議会気象分科会提言等を受け、利用者との共同研究・調査やデータ利用に便利なツールの整備を通して気候情報の利活用促進に取り組んできた。これらの取組により、2週間先までの気温予測の利用は着実に広がっており、今後は対象を2週間より先の予測期間にも広げていく予定である。本稿では、利用者との連携及び利便性向上に関する当庁の取組について紹介する。

b) 本文

(1) 背景とこれまでの取組

2011年度に、気候変動や異常気象に対応するための気候情報とその利活用のあり方について」をテーマとして交通政策審議会気象分科会が開催され、以下の提言（参考文献[1]）が取りまとめられた。

- ・気候変動や異常気象による影響に対して、気候情報を利用した対応策を普及させるため、気候情報の作成者と利用者側が協力しその成功事例を創出する仕組みを構築すること。
- ・各分野の利用者が気候情報を用いて、気候変動や異常気象による影響を定性的あるいは定量的に分析・評価することなどがより容易になるように、気候情報の利便性の向上を図ること。

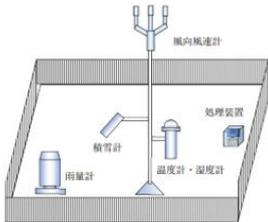
この提言に基づき、当庁では、利用者と協力した共同研究・共同調査を実施し、創出した成功事例を農業普及指導員向けセミナー等を通じて普及するとともに、「過去の気象データツール」や「確率予測資料のダウンロードツール」をホームページで公開することにより気候情報の利便性の向上を図っている。

最近の活動としては、アメダス気象計変更にともなう過去の気象データ・ダウンロードツールでの推計日照データの公開開始（図1）やリーフレットのリニューアル等（図2）がある。

【アメダスの新しい気象計】
 アメダスは、降水量、風向・風速、気温、相対湿度の観測を自動的に行います。雪の多い地方では、積雪の深さの観測も自動的に行います。

(気象計に含まれる主な機器)
 ・気温を観測する温度計と、相対湿度を観測する湿度計（露風筒に収納されます）
 ・風向、風速を観測する風向風速計
 ・降水量を観測する雨量計
 ・積雪の深さを観測する積雪計
 ・観測データを収集し、計算処理する処理装置

(これまでのアメダス気象計からの主な変更点)
 ・新たに温度計を導入します。
 ・最高気温計が従来の風向風速計から経度式温度計に変更されます。
 ・日照時間については、積算風量分布（日照時間）の観測値に置き換えることから日照計を廃止します。



検索結果 データの表記と意味 CSVファイルの形式

メニューページに戻る CSVファイルをダウンロード

年月日	曜日	気仙沼 日照時間(時間)	気仙沼 平均気温(℃)	気仙沼 降水量の合計(mm)	気仙沼 平均風速(m/s)
2021年2月25日	木	///	-0.4	0.0	2.5
2021年2月26日	金	///	1.9	0.0	2.5
2021年2月27日	土	///	-0.3	0.0	2.1
2021年2月28日	日	///	1.8	0.0	2.0
2021年3月1日	月	///	7.9	0.0	1.9
2021年3月2日	火	0.0	7.9	12.5	2.8
2021年3月3日	水	10.7	1.7	0.0	2.5
2021年3月4日	木	10.4	2.9	0.0	2.3
2021年3月5日	金	4.2	7.9	0.0	1.4
2021年3月6日	土	10.4	6.3	0.0	2.6

図1 アメダス気象計変更と推計日照データの表示例

季節予報の紹介
 気候変動、大気汚染などにより、従来の気象予報とは異なる気象現象が頻発しています。季節予報は、気候変動や大気汚染の影響を考慮し、最新の気象観測データに基づいて、季節予報の精度を向上させています。

季節予報の活用
 季節予報を活用することで、気候の急激な変動を事前に察知し、適切な対応を講ずることができます。詳細は気候リスクポータルサイトへ。

気候リスクの認識と評価
 気候リスクの認識と評価は、気候変動の影響を事前に察知し、適切な対応を講ずるための重要なステップです。

香川県～水稲刈り適期の予測～
 特産品の水稲「おいでまい」の刈り取り適期の予測に活用し、品質向上を図っています。

図2 リニューアルしたリーフレットと活用事例集の公開

(2) 今後

これまで当庁では、2週間先までの気温予測を中心に利活用促進に取組み、その利用は着実に広がっている。

現在は、2018年度の交通政策審議会気象分科会提言（参考文献[2]）に基づき、以下のような活動を行っている。

- ・1か月先までの気温予測（確率予測資料）提供環境の改善とその普及
- ・将来予測に平年値を用いている事例に対する予測値利用への移行促進

今後も利用者との連携及び利便性向上を柱に、2週間より先も対象とした気候情報の利活用促進に取組む予定である。

c)参考文献

[1]交通政策審議会気象分科会提言(2012年2月27日)

<https://www.mlit.go.jp/common/000192957.pdf>

(2022年1月閲覧確認)

[2]交通政策審議会気象分科会提言(2018年8月20日)

https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/kishou00_sg_000077.html

(2022年1月閲覧確認)

10. 東北農業研究センターの気象情報発信の歴史

大久保さゆり（農研機構東北農業研究センター）

a) 要旨

東北農業研究センターでは、ウェブサイト「水稲冷害早期警戒システム」を通じて 30 年以上にわたり農業気象情報を発信してきた。「水稲冷害早期警戒システム」は 1993 年冷害を契機とし、生産者を含む一般向けに水稲の生育と気象の情報をリアルタイムに発信する目的で 1996 年に開設された。2009 年には、ユーザー登録制で個別に詳細な栽培支援情報を提供する「農作物警戒情報」もスタートし、2 つの情報提供システムを並行して運用してきた。その後、運用経費や計算環境の問題から「農作物警戒情報」は 2018 年に終了し、2021 年 1 月には「水稲冷害早期警戒システム」も運用を中断した。2 つのシステムの経緯を踏まえ、「水稲冷害早期警戒システム」は公設機関として誰でも見られる情報発信と安定運用とを柱とし、改修を経て 2021 年秋に運用を再開した。

b) 本文

ウェブサイト「水稲冷害早期警戒システム (<http://www.reigai.affrc.go.jp/>)」は、1993 年冷害をきっかけに発足した東北農政局、仙台管区气象台、東北地方各県、東北農研での「東北地域水稲安定生産推進連絡協議会」による活動の一環として、1996 年に一般向けのホームページとして開設された（神田 2007）。東北地域の気象や水稲の生育の情報を随時発信することで生産者の栽培管理の意思決定を支援する目的に加え、消費者に対しても、東北の水稲作への理解を通じ冷害時の社会的混乱の抑制につなげるねらいがあった（神田ほか 2007）。特に、水稲の栽培期間中に掲載されるテキストによる“早期警戒情報”が注目された（図 1）。これは気象庁の 1 ヶ月予報の内容を踏まえた栽培管理に関するコメントで、週 1 回の 1 ヶ月予報の発表を参照し担当者が記載した（鳥越 1997）。また提供する情報には東北各地のモニター農家から収集した各地の生育情報も分析、反映された。2000 年代に入り、アメダスデータに基づくメッシュデータの作成や利用が進むと「水稲冷害早期警戒システム」でも 1km メッシュデータを利用した冷却量分布図などのコンテンツも掲載される。日々更新の情報に加え、冷害や栽培技術などを解説するページなども充実していった。「水稲冷害早期警戒システム」が開設されたのは国内にインターネットが普及し始めて間もない時期であり、ホームページを通じてその時期の気象、生育状況に応じた情報をタイムラグなく発信する試みとして画期的であったといえる。

他方、2009 年には東北農研と岩手県立大学ソフトウェア情報学部との共同で「GoogleMap による 気象予測データを用いた農作物警戒情報」（以下、農作物警戒情報）の運用を開始した（小林ほか 2010）。このシステムでは、ユーザーが毎年の利用開始時に「移植日（いつ）」「品種（何を）」「圃場位置（どこに）」および「移植時の葉齢」を登録し、以降はそれらの情報と当該地点の 1km メッシュ気象データに基づき、閲覧した時点での生

育予測や生育ステージに応じた栽培支援のコメントがブラウザに表示された(図2)。また、低/高温、いもち病などのリスクが予測されたユーザーにはメールによるプッシュ通知も行っていた。これらの機能は、情報技術の専門家と共同で取り組んだことにより実装された。気象データは、実況値にはアメダスデータを用いて東北農研で独自に作成した1kmメッシュデータを、予測値としては外部の気象予測会社より購入した7日先までの1kmメッシュデータを使っていた。このシステムの立ち上げ当初は高解像度気象データの利活用が研究の対象であったこともあり、ハードウェアやソフトウェア、気象データ購入などの経費は運用を担った東北農研、岩手県立大の双方が主に研究費から負担していた。システム自体は生産者、行政関係者などから好評を得ていたものの、研究としてのフェーズを過ぎてからは運用コストを担いきれず、運用の継続が困難となり2018年10月をもって終了した。

一方「水稻冷害早期警戒システム」は、後発の「農作物警戒情報」や、各自治体でもホームページを通じて迅速に地域に応じた技術指導の情報を出せるようになったことで、これらと重複するテキストによる注意喚起を終了し、2014年からはメッシュデータによる少数のコンテンツに限って運用を続けていた。しかし、こちらも所属機関の計算環境の変更によって独自に作成していた1kmメッシュデータを作成できなくなり、2021年1月に更新を中断した。

中断した「水稻冷害早期警戒システム」の再開に向けて、これまでの経緯を踏まえ、公設機関による情報発信基盤として運用の安定性を重視した。そのためのハード面の対応として、従来どおり所属機関が管理するホームページ用のサーバを用いることでコスト負担や運用停止のリスクを軽減した。また利用するデータを従来の独自作成のメッシュデータから運用体制がより強固である農研機構メッシュ農業気象データ(大野ほか2016)へと変更した。発信する内容については、発足当初からの「誰でも見られる」を基本とした。そのうえで、近年は東北地方でも高温障害のリスクが高まるなど注意すべき気象リスクも広がっているため、水稻の冷害に限らず広く普遍的に利用できる指標を掲載することとした。一方で作物、品種、作付け時期などの多様化が進む中で、特定の目的の情報を一律に発信することも難しい。そこで、再開するシステムでは、特定の事象に対する閾値を用いる指標ではなく、なるべくシンプルな指標を用いることとした。こうしてデータの変更や項目の追加などを経て、「水稻冷害早期警戒システム」の運用を2021年11月に再開した(表1)。「葉いもち感染好適条件」については、データの仕様変更に伴い現在は算出できないため更新はせず、2020年までに作成したマップを掲載している。その他の項目は気象データの平均値、積算値などとして示すことで、作物や品種、地域の事情に応じて参照できるようにした。今後も、広く活用可能なコンテンツの開発を進めたい。

表 1：水稲冷害早期警戒システム（2021 年版）掲載項目

名称	掲載期間	内容
日平均気温の平年偏差	毎日更新（1980 年以降）	メッシュごとの平年偏差の地図表示。日毎の寒暖の目安。
気象の経過	毎日更新（2014 年以降）	アメダス観測値（26 地点）のグラフ表示。
気温・日照時間の 平均値、積算値※	7-10 月更新（1980 年以降）	メッシュごとの 20 日平均気温、40 日積算気温などの地図表示。
過去 1/2/4 週間の 平年差／比※	毎日更新（2021.9 月以降）	気象庁によるコンテンツの転載およびアーカイブ。
葉いもち感染好適条件	更新なし(2020 年までを掲載)	メッシュごとの葉いもち感染好適条件の地図表示。

※印は 2021 年版で追加した項目を示す。

水稲冷害の早期警戒情報（1996 年 5 月 24 日）

本情報は警戒担当者が現在のところ注目している点をお知らせするものです。

仙台管区気象台 5 月 24 日発表の 1 ヶ月予報によると、

- 5 月 25 日から 5 月 31 日までの期間、高気圧に置かれ晴れの日が多い。平均気温は平年より高い見込み。
- 6 月 1 日から 6 月 7 日までの期間は、低気圧と高気圧が交互に通り、天気は周期的に変わる。平均気温は平年より高い見込み。

現在、ほとんどの地域において、苗の活着と初期分げつ形成の重要な時期となっています。気温が高いという予報ですが、引き継ぎ次の点が心配されます。

- 移植期の遅延
- 移植後の苗の活着不良・葉の白枯れ・代枯れなど
- 苗質の劣化や苗の活着不良による生育の遅延
- 植え揃い苗の高温による衰弱
- 初期の分げつ発生への懸念

水稲冷害の早期警戒情報（7 月 29 日）

本情報は警戒担当者が現在のところ注目している点をお知らせするものです。

仙台管区気象台 7 月 26 日発表の 1 ヶ月予報によると、

- 7 月 27 日から 8 月 2 日までの期間は、晴れの日が多い。平均気温は平年並みの見込み。（詳しくは週間天気予報を参照）
- 8 月 2 日から 8 月 9 日までの期間は、予報の信頼度は小さい。晴れの日が多い。平均気温は平年並みの見込み。
- 8 月 10 日から 8 月 23 日までの期間は、予報の信頼度は小さい。晴れの日が多いが、低気圧や前線の影響で、曇りや雨の日時がある。平均気温は平年並みの見込み。

現在、早いところで減数分裂期に入りつつあると推察されます。天気予報によると、向こう 1 ヶ月の平均気温は平年並みと予想されています。

今後減数分裂期、出穂・開花期を向かえます。これからの天候が稲の作柄を大きく左右します。

低温時の深水灌漑、異常高温時の水管理、追肥、いもち病防除等に関して県の技術情報や病害虫予察情報を参考に気象変動に対応したきめ細かな管理が重要となります。

ホームページ参照：

- 早期警戒地点の気象経過
 - 気象経過図
 - 障害不穏評価のための冷却量
- 早期警戒地点の水温経過
- 図説東北の冷害
 - イネの低温障害の種類
 - 前歴深水灌漑
 - 深水灌漑
 - ヤマセと水温の変化
- 東北 6 県技術情報
- 東北 6 県病害虫予察情報
- 7 月 26 日発表 1 ヶ月予報

図 1. 「早期警戒情報」の例（1996 年 5 月 26 日, 1996 年 7 月 29 日）



図 2. 「GoogleMap による気象予測データを利用した農作物警戒情報」表示例

c) 参考文献

- 神田英司, 2007: 東北地方における水稲冷害の早期警戒システムの開発に関する研究. 東北農業研究センター研究報告, 107: 71-117. DOI: 10.24514/00001207.
- 神田英司, 鳥越洋一, 小林隆, 2007: 東北地域を対象とした水稲冷害早期警戒システムの開発と運用. 第 223 回日本作物学会講演会要旨集. DOI:10.14829/jcsproc.223.0.438.0.
- 小林隆, 菅野博光, 神田英司, 南野謙一, Prima O.D.A., 浅野真澄, 大場淳司, 藤井弘志, 早坂剛, 吉永悟志, 2011. Google マップによる気象予測データを用いた水稲栽培管理警戒情報システム. 農研機構 2010 年度東北農業研究成果情報. <https://www.naro.go.jp/project/results/laboratory/tarc/2010/tohoku10-03.html>. (2022 年 3 月 25 日閲覧)
- 大野宏之, 佐々木華織, 大原源二, 中園 江, 2016: 実況値と数値予報、平年値を組み合わせたメッシュ気温・降水量データの作成. 生物と気象, 16, 71-79. DOI: 10.2480/cib.J-16-028.
- 鳥越洋一, 1997: 早期警戒システムを基幹とする冷害克服型営農技術の確立. 日本作物学会東北支部会会報, 40, 75-78. DOI:10.20725/tjcs.40.0_75.

1 1. 長野県でのリンゴ凍霜害リスクの将来変化の解析 ～休眠打破時期の遅れに関する評価～
 瀬崎歩美・原田昌・池田友紀子（気象庁気候情報課）、浜田崇（長野県環境保全研究所）

a) 要旨

地方公共団体の気候変動適応の支援に関する取組の一環として、気象庁大気海洋部気候情報課は長野県環境保全研究所（信州気候変動適応センター）と協働し、「地球温暖化予測情報第9巻」データセットを活用した地域産業における影響評価と適応策での事例創出の検討を進めてきた。リンゴの生育を対象にした結果、将来気候では発芽日が前進することで、凍霜害リスクが高まることが示された。さらに、凍霜害リスクが高い期間が前進することで、発芽以降の日々の対策に必要な期間が現在気候と比べて短くなる可能性も示された。

b) 本文

(1) はじめに

近年、果樹の晩霜害発生が報告されている（農林水産省，2014；果樹研究所，2016）。温暖化が進行しても果樹の凍霜害リスクは必ずしも減少するとは限らないことが指摘されており（杉浦ほか，2007）、果樹の凍霜害における今後の気候変動適応策の必要性が高まっている。

安達ほか（2018）では、温暖化に伴う果樹の生育変化について述べられている。図1にこの変化の模式図を示すが、ここで問題となるのが以下の2点である。

- ・ 温暖化に伴い低温要求量を満たさないために自発休眠覚醒ができなくなること
- ・ 温暖化に伴い発芽日が前進した場合の急な寒気の入りによる凍霜害

これらの点について評価するため、次項に記載の手法により調査を行った。

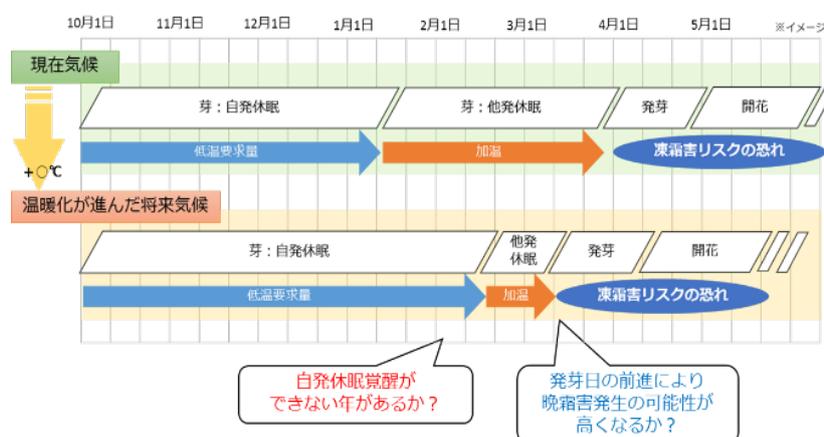


図1. 温暖化に伴う果樹の生育期間の変化のイメージ（安達ほか（2018）をもとに作成）と問題点

(2) 調査手法

(i) 利用データ

① 観測データ：長野県果樹試験場での定例調査結果

長野県果樹試験場のホームページではリンゴ「ふじ」の発芽期等の生態調査結果（1961年以降の毎年）や10月1日以降に気温が7.2℃以下となる時間（「7.2℃以下の低温遭遇積算時間」）が公開されている。本調査では果樹生育の実測データとして、これらの値を用いた。（<https://www.pref.nagano.lg.jp/kajushiken/chosa/teirei/index.html>）

② 予測データ：「地球温暖化予測情報第9巻」データセット

本データセットは、文部科学省「気候変動リスク情報創生プログラム」（平成24～28年度）及び「統合的気候モデル高度化研究プログラム」（平成29年度～令和3年度）のもと、気象庁気象研究所が開発した水平解像度5kmの非静力学地域気候モデル（NHRCM05）（Sasaki et al., 2011）を用いて将来予測を解析した、日本域を対象とした気候変動予測データセットである。本調査では、現在気候（1980年9月～2000年8月；1メンバー）及び将来気候（2076年9月～2096年8月；4メンバー）の2つのシナリオ（RCP2.6、RCP8.5）の場合の将来変化の評価を行う。シナリオの概要は以下のとおりである。

- ・RCP8.5：現時点を超える追加的な緩和策を行わないことを想定した高位参照シナリオ
- ・RCP2.6：工業化以前を基準とした世界平均気温の上昇をおおむね2℃未満に抑えることを想定した低位安定化シナリオ

なお、本データセットは、文部科学省の補助事業により開発・運用されているデータ統合解析システム（DIAS）にて提供されている（http://search.dias.jp.net/ja/dataset/JMA_GWP9）。

（ii）凍霜害リスク日の算出

本調査では、長野県におけるリンゴ凍霜害リスクを対象として、以下①～③の指標による評価を行う。

① 低温要求を満たす日（Day1）

長野県でリンゴの栽培に適する自然条件に関する基準として用いられている、10月1日以降に気温が7.2℃以下となる時間（日低温時間）の積算が1,400時間に達した日を「低温要求を満たす日（Day1）」とした（長野県，2021）。日低温時間は、清野ほか（1981）及び和田・村上（1972）の手法を用い、日最高気温及び日最低気温から推定した1時間値を積算した。

② 発芽日（Day2）

藤沢・小林（2007）では3月の平均気温と発芽日の間には密接な線形関係があると報告されている。本調査では長野県の果樹試験場の発芽日と長野地方気象台の3月の平均気温の関係から得た近似式（ $y = -3.70x + 106.0$ ）を予測データに適用して発芽日（Day2）を求めた。

③ 凍霜害リスク日（Day3）

発芽後に凍霜害に遭うリスクのある日として、最低気温が0、1、2℃以下の3通りの閾値を凍霜害リスク日（Day3）の指標に用いた。なお、長野地方気象台が発表する長野県の霜注意報の発表基準は、最低気温2℃以下が予想される場合である（https://www.jma.go.jp/jma/kishou/now/ki_jun/nagano/0_nagano.pdf）。

（iii）解析地点

リンゴの生育調査が行なわれている長野県果樹試験場と、果樹試験場から約10km西に位置する長野地方気象台を採用した。なお、予測データは各地点の最近接格子を用いた。また、長野地方気象台のデータでもおおむね同様の結果であったことから、本稿では果樹試験場の結果のみを

示す。

(3) 解析結果

(i) 低温要求を満たす日 (Day1)

表1に長野県果樹試験場におけるDay1の20年平均値を示す。括弧内は現在気候と将来気候の差、すなわち将来変化量を示している。現在気候を見ると、現在気候の期間と観測データの存在する期間は異なるものの、現在気候のDay1は観測結果(2001-2021年の平均:1月13日)とほぼ同じ日であった。これより、予測データを用いたDay1が妥当であると仮定する。

将来気候の20年平均値を見ると、現在気候に比べてRCP2.6で10日程度、RCP8.5で1ヶ月程度Day1が後退していた。各メンバー・年のDay1を示した結果(図2)、RCP8.5ではDay1が3月以降となるメンバー・年もあることが分かる。

以上より、安達ほか(2018)で示した福島県と同様に、温暖化の進行が低温要求に抑制的に作用して、長野県においても自発休眠覚醒を遅らせることが確かめられた。

(ii) 発芽日 (Day2)

Day2の20年平均値について、現在気候で推定した値は、長野県果樹試験場の観測値(実測)と3日程度の差に収まっており(表2)、予測データを適用したDay2も有効であると仮定する。

将来気候でのDay2の20年平均値はRCP2.6では5日前後、RCP8.5では20日弱前進しており、最早日(ここでは各年の9月~翌年8月にかけて最もDay2が早い日)は、RCP2.6で10日弱、RCP8.5で20日程度前進している(表3)。図3を見ても明らかのように、温暖化による自発休眠覚醒の遅れを相殺し、さらに発芽日が前進することが示されている。

発芽日が前進することによって、凍霜害リスクにさらされる期間が長くなるという可能性も考えられるが、次項の凍霜害リスク日で確かめる。

表1. Day1の20年平均値(果樹試験場)

観測値		—
現在気候		1/13
RCP2.6	_c0	1/21 (+8日)
	_c1	1/21 (+8日)
	_c2	1/22 (+9日)
	_c3	1/23 (+10日)
4メンバー平均		1/21 (+8.7日)
RCP8.5	_c0	2/10 (+28日)
	_c1	2/9 (+27日)
	_c2	2/13 (+31日)
	_c3	2/13 (+31日)
4メンバー平均		2/11 (+29.2日)

表2. Day2の20年平均値(果樹試験場)

観測値(実測)		4/2
観測値(回帰式)		—
現在気候		4/5
RCP2.6	_c0	3/31 (-4日)
	_c1	4/1 (-3日)
	_c2	3/30 (-6日)
	_c3	3/30 (-6日)
4メンバー平均		3/31 (-4.9日)
RCP8.5	_c0	3/18 (-18日)
	_c1	3/22 (-14日)
	_c2	3/19 (-17日)
	_c3	3/17 (-19日)
4メンバー平均		3/19 (-17.1日)

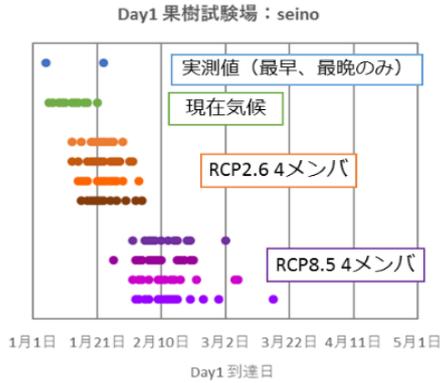


図 2. 各年の Day1 (果樹試験場)

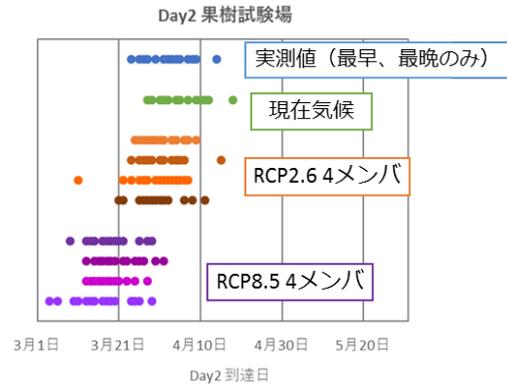


図 3. 各年の Day2 (果樹試験場)

表 3. Day2 の 20 年最早、最晩、標準偏差 (果樹試験場)

果樹試験場 バイアス補正なし	実測値 (2001-2021年)	現在気候	RCP2.6 全4メンバ	RCP8.5 全4メンバ
20年 最早	1/5	1/6	1/13	1/26
20年 最晩	1/23	1/21	2/4	3/17
20年 標準偏差	—	3.87	4.71	8.59

(iii) 凍霜害リスク日 (Day3)

図 4 は、長野県果樹試験場における Day3 の年間日数 20 年平均を示したものである。現在気候に比べ、将来気候では 1~3 日程度 Day3 の年間日数が減少している。RCP8.5 シナリオの結果は、RCP2.6 の結果に比べて Day3 年間日数の減少傾向は大きい、0 日にはならない。これは、たとえ温暖化が進んでも凍霜害リスク日が発生する可能性があることを示唆する。

凍霜害リスクが高まる日については、Day3 の年間日数のほか最晩日 (ここでは各年の 9 月~翌年 8 月にかけて最も Day3 が遅い日) も重要である。表 4 及び図 5 に 20 年間における Day3 の最晩日を示す。将来気候での Day3 は、現在気候に比べて、RCP2.6 の場合は最大 15 日弱、RCP8.5 の場合は最大 25 日弱の前進がみられる。前項の発芽日 (Day2) の最早の前進程度 (RCP2.6: 10 日弱、RCP8.5: 20 日程度) に比べると、Day3 はさらに 5 日程度前進している。発芽日の最早日から凍霜害リスク日の最晩日の期間、すなわち、凍霜害が発生する可能性がある期間は、将来気候は現在気候に比べて同程度あるいは短くなる可能性が示された。

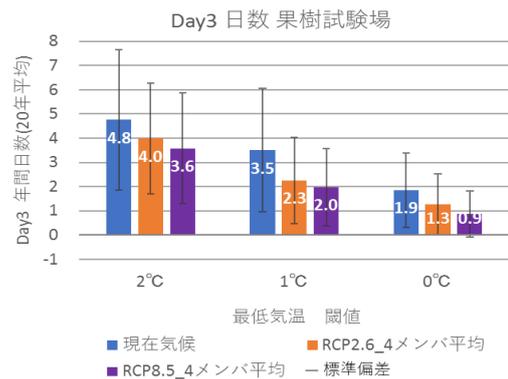


図 4. Day3 の年間日数 20 年平均 (果樹試験場)

表 4. Day3 の 20 年最晩（果樹試験場）

凍霜害リスク日 (Day3) 20年最晩 果樹試験場			
最低気温 閾値	2°C	1°C	0°C
観測値	—		
現在気候	5/7	4/30	4/27
RCP2.6_c0	5/2 (-5日)	4/22 (-8日)	4/14 (-13日)
_c1	5/8 (1日)	5/4 (4日)	4/19 (-8日)
_c2	4/28 (-9日)	4/28 (-2日)	4/15 (-12日)
_c3	4/28 (-9日)	4/28 (-2日)	4/15 (-12日)
RCP8.5_c0	4/22 (-15日)	4/22 (-8日)	4/3 (-24日)
_c1	4/22 (-15日)	4/22 (-8日)	4/12 (-15日)
_c2	4/19 (-18日)	4/12 (-18日)	4/6 (-21日)
_c3	4/15 (-22日)	4/13 (-17日)	4/5 (-22日)

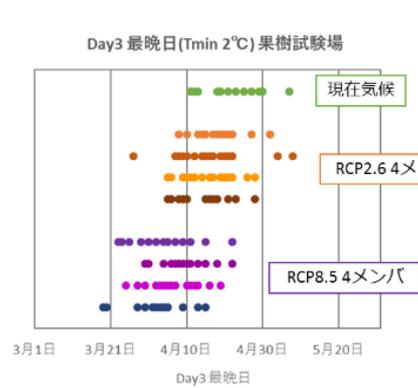


図 5. 各年の Day3 最晩日（果樹試験場）

(4) まとめ

本調査では、「地球温暖化予測情報第9巻」を用いて、将来気候における長野県の特産農作物であるリンゴへの影響評価を行った。その結果、将来気候では発芽日が前進することで凍霜害リスクが高まることが示され、さらに、凍霜害リスクが高い期間が前進することで、凍霜害が発生する可能性がある期間が現在気候と比べて短くなる可能性も示された。今後は、本調査での評価結果から、行政担当者が適応策の検討に必要な情報を精査、抽出した資料に近づけることも課題と考える（資料の事例として図6を示す）。この取り組みが他自治体にも展開され、自治体自らが、地球温暖化予測情報を活用促進し、フィードバックとして更なるニーズが寄せられることを期待している。

果樹試験場

	10月~2月 最低気温	低温要求量を満 たす日 (Day1)	3月 平均気温	発芽日 (Day2)	凍霜害リスク日 (Day3) 年間日数			
					2°C以下	1°C以下	0°C以下	
現在気候	-0.3°C	1月13日	2.9°C	4月5日	4.8日	3.5日	1.9日	
将来気候	RCP2.6 4メンバ 平均	1.5°C (+1.9)	1月21日 (+8.7)	4.3°C (+1.3)	3月31日 (-4.9)	4.0日 (-0.8)	2.3日 (-1.2)	1.3日 (-0.6)
	RCP8.5 4メンバ 平均	5.1°C (+5.5)	2月11日 (+29.2)	7.6°C (+4.6)	3月19日 (-17.1)	3.6日 (-1.2)	2.0日 (-1.5)	0.9日 (-1.0)

- ・ 現在気候は1980-1999年、将来気候は2076-2095年の20年平均値
- ・ ()内の数値は将来変化量（将来気候 - 現在気候）

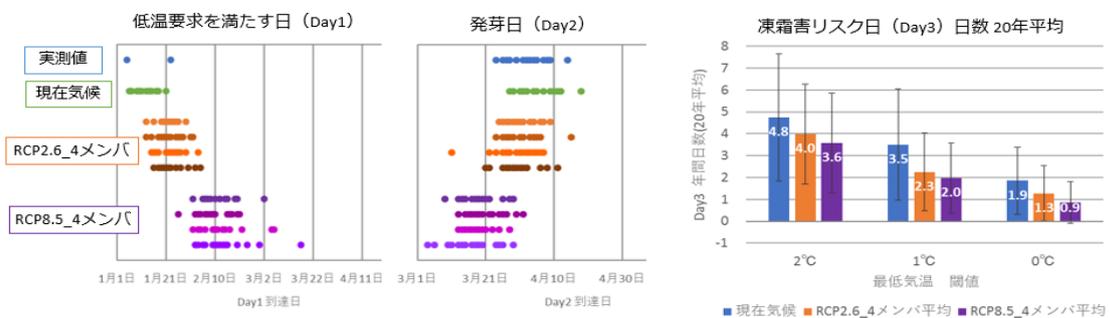


図 6. 長野県におけるリンゴ凍霜害リスクの将来変化評価（案）

c) 参考文献

- 安達義輝, 志村浩雄, 額田光彦, 斎藤祐一, 桑名篤, 安部充, 2018: 温暖化傾向における果樹の発育速度 (DVR) モデルの検証. 福島県農業総合センター研究報告, 9, 11-21.
- 藤沢茉莉子, 小林和彦, 2007: 日本におけるリンゴの発育早期化に見られる温暖化の影響. 農業気象, 63, 185-191.
- 果樹研究所, 2016: 気候温暖化条件での晩霜害発生の特徴と危険度評価.
- 長野県, 2021: 長野県果樹農業振興計画書 (令和3年3月策定).
- 農林水産省, 2014: 平成25年度 食料・農業・農村白書 (平成26年5月27日公表).
- Sasaki, H., A. Murata, M. Hanafusa, M. Oh' izumi, and K. Kurihara, 2011: Reproducibility of present climate in a non-hydrostatic regional climate model nested within an atmosphere general circulation model. SOLA, 7, 173-176.
- 清野裕, 木村悟, 岸田恭允, 1981: 最低・最高気温による低温時間・高温時間の推定. 農業気象, 37, 123-126.
- 杉浦俊彦, 黒田治之, 杉浦裕義, 2007: 温暖化がわが国の果樹生産に及ぼしている影響の現状. 園芸学研究, 6, 257-263.
- 和田道宏, 村上利男, 1972: 気温の日変化に関する研究階層別気温出現時間の算出方法. 東北の農業気象, 17, 34-36.

1 2. 東北地方における大雨の将来予測について

諸岡 浩子, 佐々井崇博, 山崎剛, 岩崎俊樹 (東北大学大学院理学研究科)

a) 要旨

将来の防災上の観点から, 東北地方の大雨が気候変動に伴ってどのように変化するかを多数のアンサンブルメンバによる詳細な (解像度 5 km) 温暖化予測データを利用して調べた. 東北地方で 30 年に一度の割合で出現する年最大日降水量や年最大時間降水量は, 温暖化が進むほど顕著に増加する. 気温上昇量が同じ場合には, 時間降水量の増加率の方が大きかった. 東北地方で 30 年に一度より低頻度で起こる大雨が発生する時期は, 現在気候で, 7 月に日本海側, 8 月にほぼ全域, 9 月に太平洋側で多い傾向がみられ, その他の月はほとんどなかった. 温暖化が進んでもその傾向は大きく変わらないことがわかった.

b) 本文

(1) はじめに

世界各地で気候変動の影響が顕在化しており, その原因物質である温室効果ガスの排出量を削減する「緩和策」とともに, 温暖化の影響に備える「適応策」への関心が高まっている. 日本では, 気候変動適応法が施行され, 地方自治体は気候変動への適応策の具体化を求められている. 適応策の検討には信頼できる気候変動予測が必要である.

気候変動適応技術社会実装プログラム (SI-CAT : Social Implementation Program on Climate Change Adaptation Technology) では, 地球温暖化対策に資するアンサンブル予測データベース(d4PDF, Mizuta et al. 2017; Fujita et al. 2019) を力学的ダウンスケーリングして, 大規模な高解像度予測データセットが作成された (解像度 5 km, 「大気近未来予測力学的ダウンスケーリングデータ (東北から九州) by SI-CAT」. 以下 SI-CAT DDS5TK と略す). SI-CAT DDS5TK は, 近未来に相当する 2040 年ころ (2°C 上昇実験) を含むことと, 多数のメンバーを含み確率的な検討が可能なが特徴である. データの詳細は Sasai et al. (2017) を参照.

これまで東北地方は, 西・東日本に比べて雨の降り方が比較的穏やかで大雨災害は少ないと考えられてきたが, 近年はこれまでになかったような大雨で災害が発生している. 本稿では, SI-CAT DDS5TK を用いて温暖化が進んだ場合の東北地方の大雨の将来変化を調べた.

(2) 30 年に一度の降水量の将来変化

現在気候, 2°C 上昇実験, 4°C 上昇実験のそれぞれについて, 各格子点の年最大日降水量および年最大時間降水量 (31 年×12 メンバ=372 個) を降順に並べて, 12 番目と 13 番目の平均を「30 年に一度の降水量」, すなわち再現期間 30 年の降水量と定義し (372/30=12.4 より), 1~13 番目の発生時期 (月) を「30 年に一度の降水」の発生時期と定義する.

(i) 年最大日降水量

図 1 左は、モデルの現在気候の 30 年に一度の日降水量を示す。奥羽山脈や出羽山地では地形のピークにあわせて 200 mm~300 mm の極大値が現れており、北上山地や阿武隈山地では、東側斜面に沿って極大値が現れる傾向がみられる。2°C 上昇時および 4°C 上昇時の 30 年に一度の年最大日降水量と比較すると (図 1)、分布の傾向はあまり変化せず、全体的に増加している。東北地方における 30 年に一度の年最大日降水量の頻度分布を見ると、温暖化の程度が進むほど、降水量が増加することがわかる (図 2)。

(ii) 年最大時間降水量

東北地方の 30 年に一度の年最大時間降水量は、太平洋側で多い一方、日本海側では山間部を除いて少ない特徴がみられる。太平洋側の沿岸部が最大である、温暖化が進むと、現在気候と地理的分布は大きく変わらないものの、全体的に増加する。東北地方における頻度分布から、日降水量と同様に、30 年に一度の時間降水量は、2°C 上昇時に比べて 4°C 上昇時の方が増加する傾向が明瞭である (図 3)。温暖化時の 30 年に一度の降水量の増加率は、時間降水量の方が日降水量に比べて大きい (図 2, 3)。

(iii) 発生時期

東北地方において、現在気候で 30 年に一度の年最大日降水量および年最大時間降水量が発生するのは 7~9 月に集中しており、他の月はほとんどない。現在気候では、7 月に日本海側、8 月にほぼ全域、9 月に太平洋側で発生が多い傾向がみられた。この地理的分布は、温暖化が進んでも大きく変化しないことがわかった。

(3) まとめ

水平解像度 20 km の d4PDF から力学的ダウンスケーリングによって作成した 5 km 解像度の大規模アンサンブル予測データを用いて、東北地方における 30 年に一度の割合で発生する大雨について、温暖化が進んだとき (2°C 上昇時および 4°C 上昇時) の変化を調べた。温暖化すると、東北地方における「30 年に一度の日降水量」、「30 年に一度の時間降水量」はいずれも全体的に増加するものの、地理的な分布はあまり変化しないと予測されている。両者の増加率は温暖化が進むほど大きくなるとともに、特に北部で大きく、場所によっては 4°C 上昇時で 2 倍近くになっている。4°C 上昇時の大雨の増加率は、東北地方全域 (陸上) の平均で、「30 年に一度の日降水量」が約 1.3 倍なのに対し、「30 年に一度の時間降水量」は約 1.5 倍だった、このように、時間降水量の方が日降水量よりも大きな増加率を示していた。また、温暖化時の「30 年に一度の日降水量」、「30 年に一度の時間降水量」の発生時期も 7~9 月に集中し、各月の発生出現率の地理的な分布も、現在気候と大きな変化はみられなかった。

東北地方で大雨や短時間強雨の増加率が大きくなる要因の一つは、気温上昇に伴う水蒸気の増加の影響が示唆されるが、さらに循環場の変化や大雨をもたらす熱帯低気圧の将来変化も調べる必要がある。

c) 参考文献

- Fujita, M., R. Mizuta, M. Ishii, H. Endo, T. Sato, Y. Okada, S. Kawazoe, S. Sugimoto, K. Ishihara, and S. Watanabe, 2019: Precipitation changes in a climate with 2-K surface warming from large ensemble simulations using 60-km global and 20-km regional atmospheric models. *Geophys. Res. Lett.*, 46, 435–442, doi:10.1029/2018GL079885.
- Mizuta, R., A. Murata, M. Ishii, H. Shiogama, K. Hibino, N. Mori, O. Arakawa, Y. Imada, K. Yoshida, T. Aoyagi, H. Kawase, M. Mori, Y. Okada, T. Shimura, T. Nagatomo, M. Ikeda, H. Endo, M. Nosaka, M. Arai, C. Takahashi, K. Tanaka, T. Takemi, Y. Tachikawa, K. Temur, Y. Kamae, M. Watanabe, H. Sasaki, A. Kitoh, I. Takayabu, E. Nakakita, and M. Kimoto, 2017: Over 5,000 years of ensemble future climate simulations by 60-km global and 20-km regional atmospheric models. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 98, 1383–1398, doi:10.1175/BAMS-D-16-0099.1
- Sasai, T., H. Kawase, Y. Kanno, J. Yamaguchi, S. Sugimoto, T. Yamazaki, H. Sasaki, M. Fujita, and T. Iwasaki, 2019: Future projection of extreme heavy snowfall events with a 5-km large ensemble regional climate simulation. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 124, 13,975–13,990, doi:10.1029/2019JD030781.

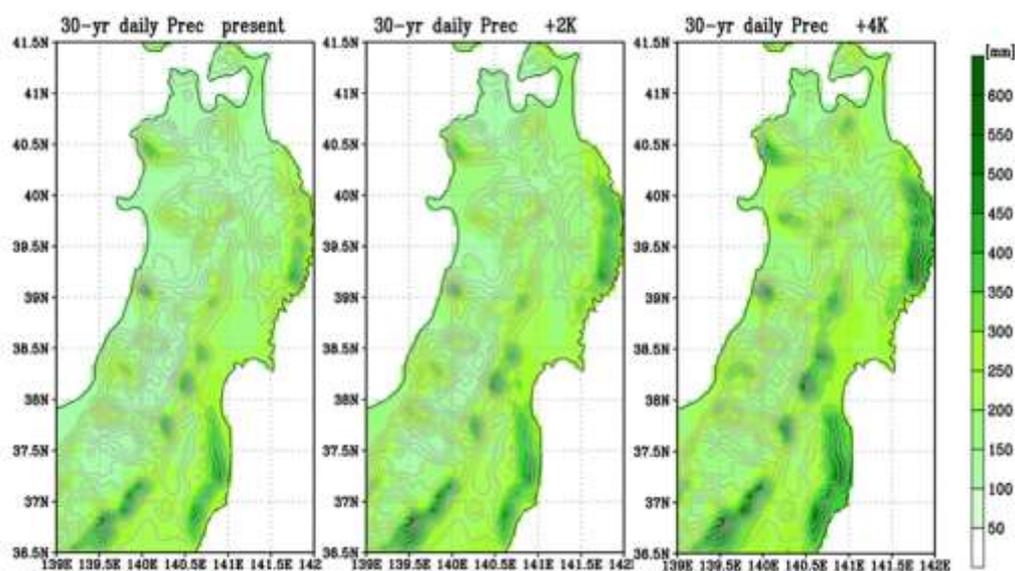


図 1 : 30 年に一度の年最大日降水量 (mm/day) . 現在気候 (左)、2°C 上昇時 (中央)、4°C 上昇時 (右) 等値線は 200m 間隔の標高

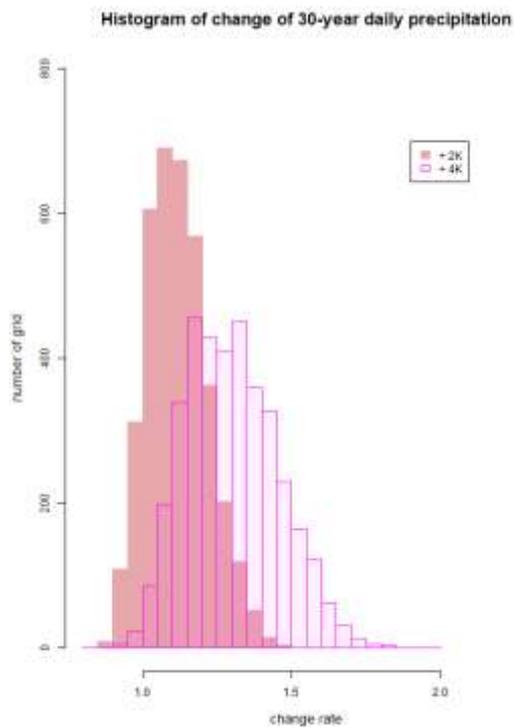


図 2：地球温暖化に伴う 30 年に一度の日降水量の変化率の頻度分布. 2°C 上昇時と現在気候の比 (薄いピンク) と 4°C 上昇時と現在気候の比 (濃いピンク)

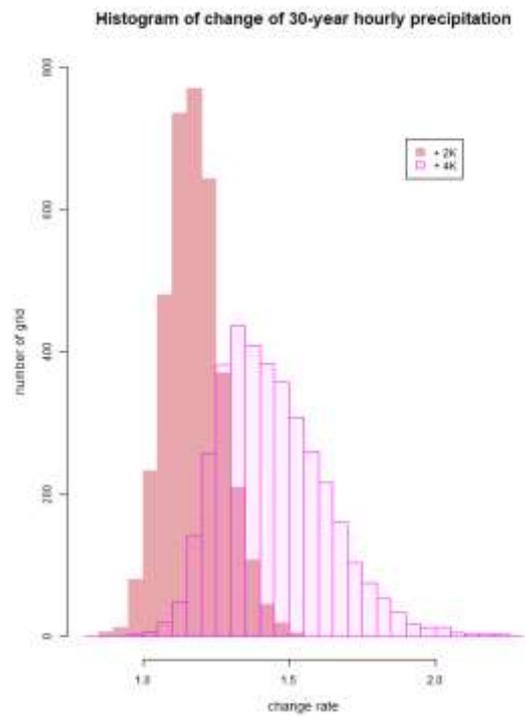


図 3：地球温暖化に伴う 30 年に一度の時間降水量の変化率の頻度分布. 2°C 上昇時と現在気候の比 (薄いピンク) と 4°C 上昇時と現在気候の比 (濃いピンク)

1.3. 地域気候モデルによる東北南部及び北信越の山岳域の積雪将来変化予測実験

福井真(東北大/気象研), 山崎剛(東北大), 高橋直也(ハワイ大/東北大), 川瀬宏明(気象研), 野坂真也(気象研)

a) 要旨

東北南部及び北信越の山岳域での温暖化に伴う積雪の影響を調べるために、現在気候、2K 上昇気候、4K 上昇気候の各気候下を対象に、水平 1km 格子の地域気候モデルを用いた力学的ダウンスケール実験を行った。現在気候下の実験は観測された山岳域の積雪の季節進行や年々変動をよく再現した。気温上昇に伴い降雪量の減少に加え、冬季の融雪量の増加によって、山岳域でも 4K 上昇気候下で積雪が大幅に減少する年が出てくる可能性を示唆する結果を得た。なお、本報告は福井ほか(2022)を基にしている。

b) 本文

(1) はじめに

山岳域における積雪は、水を貯蔵し供給する重要な役割を果たす。温暖化に伴い雪の降り方や融け方が変化することで、積雪の水資源として役割に大きな影響を受ける可能性が示唆されている(e.g. Barnett et al., 2005)。ただし、循環場が変化し降水分布が変わったり、温暖化しても氷点下のままであったりすれば、積雪への影響はより複雑になることが考えられる。日本はユーラシア大陸東岸に位置し、冬季は大陸で生成された寒気の南方への吹き出し口にあたる(Iwasaki et al. 2014)。ここで、大陸からの寒気は日本列島との間の日本海上で水蒸気を補給しながら流れ込む。そのため、比較的低緯度にある日本においても冬季は多くの降雪がもたらされ、山岳域の積雪が農業や水力発電にとって重要な水資源となってきた。日本域の降雪の温暖化に伴う将来変化予測にとして、北陸山岳域での極端降雪事例の増加の可能性(Kawase et al., 2016)や極端イベントにおける降雪量が増加(Sasai et al., 2019)する可能性が指摘されている。また、冬季の平年的な総降雪量は、RCP8.5 シナリオ下でも北海道の一部では増加する一方で、本州日本海側では減少する可能性が報告されている(Kawase et al., 2021)。積雪に着目すると、北アルプス(標高 2000m 以上)において積雪の少ない年は積雪量が減少するのに対して、積雪の多い年は全球平均地上気温が 4K 上昇した気候下でも現在と同程度の積雪量となるという予測実験の結果がある(Kawase et al., 2020)。温暖化に対する降雪や積雪の応答は、狭い日本列島上でも地域性が強く、同じ地域でも年によって異なる可能性がある。そこで、本研究の目的は、これまで十分検討されていなかった東北南部及び北信越の山岳域における積雪の温暖化影響について明らかにすることである。

(2) 手法

水平格子間隔 1km の気象研究所非静力学地域気候モデル(NHRCM; Sasaki et al.

2008)を用いた力学的ダウンスケール実験を行った。ここで、積雲対流も陽に扱う。積雪の消長も陸面モデル iSiB によってオンラインで評価する。領域は東北南部と北信越をそれぞれ設定した。境界値には、現在気候、2K 上昇気候、4K 上昇気候の各気候下のアンサンブル気候データセット d4PDF(Mizuta et al. 2017)を水平格子間隔 5km に力学的ダウンスケールした結果(Sasai et al. 2019, 山崎ほか 2019)を与えた。ただし、各気候下において、372 年分の 5km 格子データのうち、各領域の山岳域の年最大積雪深が上位/中位/下位の 5 年ずつを抽出して用いた。なお、山岳域として、東北南部ではモデル標高 500m 以上の地域、北信越ではモデル標高 800m 以上の地域とした。

(3) 結果

東北南部の代表地点として月山志津、北信越の代表地点として奥只見丸山をとり、積雪深について観測と現在気候実験の結果を比較する。中間的な積雪の年の結果は、観測の範囲に含まれていた。極端に多い(少ない)年については、観測の最大(最小)値に比べてやや多く(少なく)なった。観測は 30 年程度であるのに対し、実験で抽出したものは 372 年に 5 度程度の極端な年であることを踏まえると、現在気候下における山岳域の積雪を各年における推移や年ごとの違いをよく再現できていたと考えられる。

降雪量を比べると、現在気候に対して 2K、4K と温暖化が進むにつれて減少する。少雪年に着目すると、4K 上昇気候下では、真冬(DJF)に限ると、奥只見丸山では現在気候の 64%まで、月山志津では 54%まで減少した。一方、DJF の平均積雪水当量で比べると、奥只見丸山では現在気候の 17%まで、月山志津では 7%まで減少する結果となった。気温上昇に伴う降雪量の減少に加え、真冬の融雪量の増加により、山岳域においても 4K 上昇気候下において積雪が大幅に減少する年が出てくる可能性を示唆する。

c) 参考文献

- Barnett, T. P., J. C. Adam, and D. P. Lettenmaier, 2005: Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature*, **438**, 303–309.
- 福井真, 山崎剛, 高橋直也, 川瀬宏明, 野坂真也, 2022: 地域気候モデルを用いた東北南部及び北信越の山岳域における積雪の将来変化予測. 日本気象学会 2022 年度春季大会講演予稿集, **121**, 53.
- Iwasaki, T., T. Shoji, Y. Kanno, M. Sawada, M. Ujiie, and K. Takaya, 2014: Isentropic analysis of polar cold airmass streams in the Northern Hemispheric winter. *J. Atmos. Sci.*, **71**, 2230–2243.
- Kawase, H., A. Murata, R. Mizuta, H. Sasaki, M. Nosaka, M. Ishii, and I. Takayabu, 2016: Enhancement of heavy daily snowfall in central Japan due to global warming as projected by large ensemble of regional climate simulations. *Climatic Change*, **139**, 265–278.

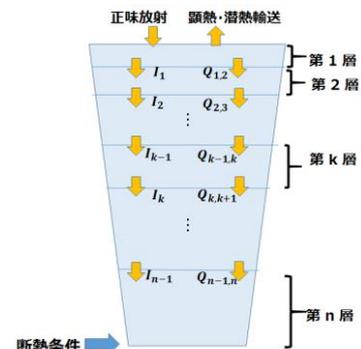
- Kawase, H., T. Yamazaki, S. Sugimoto, T. Sasai, R. Ito, T. Hamada, M. Kuribayashi, M. Fujita, A. Murata, M. Nosaka, and H. Sasaki, 2020: Changes in extremely heavy and light snow-cover winters due to global warming over high mountainous areas in central Japan. *Prog. Earth Planet. Sci.*, **7** 10.
- Kawase H, A. Murata, K. Yamada, T. Nakaegawa, R. Ito, R. Mizuta, M. Nosaka, S. Watanabe, and H. Sasaki, 2020: Regional characteristics of future changes in snowfall in Japan under RCP2.6 and RCP8.5 scenarios. *SOLA*, **17**, 1-7.
- Mizuta R, A. Murata, M. Ishii, H. Shiogama, K. Hibino, N. Mori, O. Arakawa, Y. Imada, K. Yoshida, T. Aoyagi, H. Kawase, M. Mori, Y. Okada, T. Shimura, T. Nagatomo, M. Ikeda, H. Endo, M. Nosaka, M. Arai, C. Takahashi, K. Tanaka, T. Takemi, Y. Tachikawa, K. Temur, Y. Kamae, M. Watanabe, H. Sasaki, A. Kitoh, I. Takayabu, E. Nakakita, and M. Kimoto, 2017: Over 5000 years of ensemble future climate simulations by 60 km global and 20 km regional atmospheric models. *Bull Amer Meteor Soc* **98** 1383–1398.
- Sasai, T., H. Kawase, Y. Kanno, J. Yamaguchi, S. Sugimoto, T. Yamazaki, H. Sasaki, M. Fujita, and T. Iwasaki, 2019: Future projection of extreme heavy snowfall events with a 5-km large ensemble regional climate simulation. *J. Geophys. Res.*, **124**, 13975-13990.
- Sasaki, H., K. Kurihara, I. Takayabu, and T. Uchiyama, 2008: Preliminary experiments of reproducing the present climate using the non-hydrostatic regional climate model. *SOLA*, **4**, 25-28.
- 山崎剛, 佐々井崇博, 川瀬宏明, 杉本志織, 大楽浩司, 伊東瑠衣, 佐々木秀孝, 藤田実季子, 2019: 5km 力学的ダウンスケーリングデータセット (SI-CAT DDS5TK) の概要. シミュレーション. **38**, 145-149.

大泉三津夫、浦田知哉（気象大学校）、水口知世（佐賀地方気象台）

1. はじめに

ここ数年、NHRCM への組み込みを見据えて行ってきた当研究室での湖沼モデルの開発状況について報告する。気象研究所の非静力学領域気候モデル (NHRCM) は 2017 年当時、モデル内の湖沼が海面格子点として扱われており、湖面水温の初期値・境界値には湖沼と同緯度帯の海面温度 (SST) 平均値に基づく水温が用いられていた。そのため、特に厳冬期において山岳部の湖沼水面水温が周囲の陸面に比べて 10°C 以上も高く、大気への顕熱・潜熱フラックスに大きな系統誤差が生じていた。そこで、田村 (2017) は第 1 図に示す湖沼熱モデルを新たに構築し、湖面水温の再現性を向上させる研究を行った。

このモデルは、湖を多層化し、深さによる湖水断面の変化と日射の減衰を考慮し、乱流渦による熱拡散をパラメタライズした熱伝導方程式を解く鉛直一次元モデルであった。以下、これを「田村モデル」と呼ぶ。田村モデルによって霞ヶ浦や猪苗代湖の水温時系列がかなりの精度で再現されたが、その一方で、冬季凍結するような北海道の湖では、水温の再現が



第 1 図. 田村モデル

できなかつた。これはモデルの単純化のため、凍結課程や降雪水の影響、成層不安定による対流等が考慮されていないことに起因する。この田村モデルの欠点を解決したのが水口 (2020) のオフライン湖沼凍結モデルであり、今後「水口モデル」と呼ぶ。水口モデルは NCAR の気候モデルに組み込まれている陸面モデル CLM4 の湖沼モデル LISSS を参照し、田村モデルを大幅に拡張したモデルである。

田村モデルは大泉・小室 (2017) によって NHRCM に組み込まれ、猪苗代湖周辺の地上気温に対する予備的なインパクト実験が行われた。その結果、郡山周辺で気温に対するインパクトが認められ、高分解能の領域気候モデルに湖沼モデルを組み込む利点が明らかにされた。浦田 (2022) はこのような状況を受け、NHRCM での田村モデルと NHRCM 接地境界層とのインターフェースを参照し、水口モデルの NHRCM への組み込みを行った。これを以下では「浦田結合モデル」と言う。

本稿では、先ずオフライン版の水口モデルの詳細とオフライン実験の結果を述べ、次いで、水口モデルと NHRCM とのインターフェース、および水口モデルを導入した浦田結合モデルの予備実験の結果について述べる。

2. モデルの概要と結果

2-1 オフライン水口モデル

水口モデルのあるタイムステップでの計算順序を第2図に示す。番号4, 5, 7, 8が「田村モデル」から変更のあった計算過程、1~3が「水口モデル」で新しく導入された計算過程、6番は変更がなかった計算過程である。

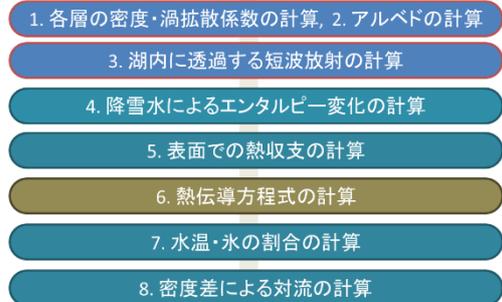
水口モデルでは計算で用いる層平均の物理量に対して、凍結氷の割合 f と非凍結水 $(1 - f)$ との4つの組み合わせによって f を重みとして平均物理量を計算する。第3図に例として拡散係数の計算方法を示す。青と桃が湖水、黄が湖氷を表す。

湖表面では熱容量が無視できるスキン層を考え、診断式でスキン温度を計算する。これによって田村モデルの表層第1層の予報式に比べて、湖水面の 대기への応答が向上した。

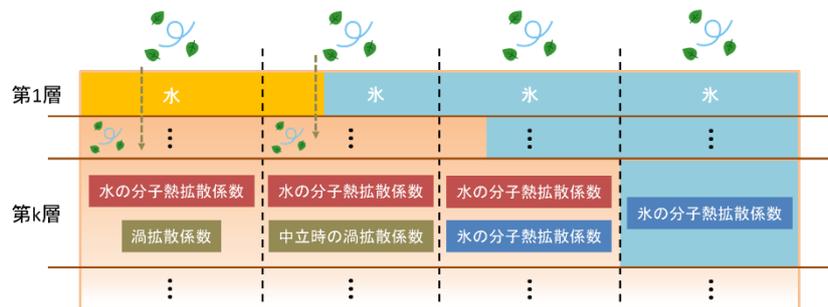
対流過程では、1) 水中での氷の浮力による上下移動、2) 湖水内部の密度成層による安定化、の2つを考慮した。

あるタイムステップで複数の層で湖氷形成が計算される場合、下層の氷を上層に移動させ、上層から氷で満たしていくことによって氷の密度と水の密度の差による移動現象を表現した。また、密度成

層による対流では4℃より高温での不安定密度成層の解消の他に、水の密度が最大となる3.98℃を挟む水温プロファイル時の不安定解消を別途用意した。このような2段の不安定解消によって、より精緻な対流表現が可能となった。



第2図. 水口モデルでの1タイムステップでの計算

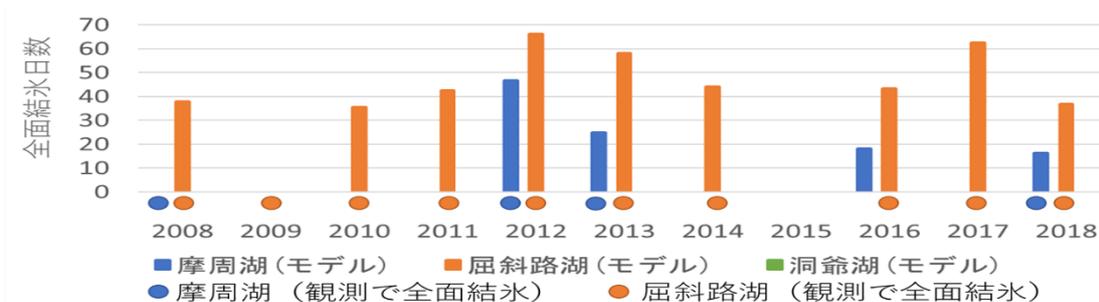


第3図. 水と氷の割合による熱拡散率の計算方法の違い

2-2 オフライン水口モデルの計算結果

水口(2020)は洞爺湖・摩周湖・屈斜路湖の3つの湖を対象としてオフラインの水口モデルのパフォーマンスを調べた。この中、洞爺湖は結氷しないが、摩周湖と屈斜路湖は比較的北に位置し、屈斜路湖は水深が浅く湖全体の熱容量が小さいため、ほぼ毎年全面結氷する。一方、摩周湖は水深が深いため、全面結氷する年としない年がある。これらの湖はいずれもカ

ルデラ湖であり、地熱の流入がある。その効果を見るために、摩周湖について想定される地熱を与えて計算を行ったところ、全面結氷の日数に大きな影響は生じなかったため、どの湖も底面に断熱条件を与えてモデル計算を行った。田村(2017)では積分時間間隔を 30 分、水温初期値を全層 4.0℃としていたが、水口はそれぞれ 3 分と 3.9℃に変更した。さらに、降雪水の熱的影響を考慮するため、大気強制力として降水量と湿球温度が追加されている。これらの強制力の作成に必要なアメダスデータは、摩周湖と屈斜路湖では同じ川湯のものを、

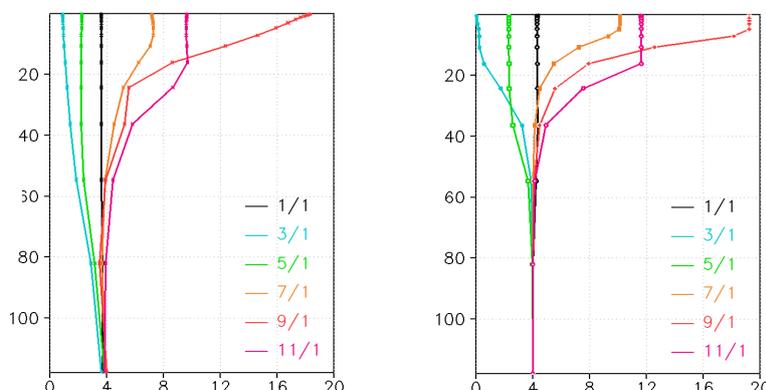


	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
摩周湖	×	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○
屈斜路湖	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○
洞爺湖	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

第4図. モデルの全面結氷の日数と観測での結氷の有無（上）と全面結氷の有無で見た正誤表

洞爺湖については大岸のものを使用した。第4図に 2008 年から 2018 年の 11 年間についてモデルの全面結氷（第 1 層が全て氷となることと定義）日数を棒グラフで示す（上図）。観測で全面結氷した年は丸印で示し、青を摩周湖、橙を屈斜路湖、緑を洞爺湖としている（洞爺湖では結氷していないので、図中に現れない）。第4図の下部の正誤表によれば、洞爺湖は観測・モデル共に全面結氷せず結果が一致、屈斜路湖は 2009 年を除く 10 年、摩周湖は 2008 年と 2016 年を除く 9 年について結氷の有無が一致する結果となった。従って、水口モデルは完全ではないものの、結氷する湖としない湖の再現を可能としたと言える。

次に、観測とモデルの内部の温度分布について通年で比較を行った。図5の左図に観測、右図にモデルの内部の 2 カ月おきの温度分布を示す。観測では湖の中層の温度がある程度季節変化するが、モデルではほとんど変化せず、内部水温の再現性はあまり良くない。深い湖では、モデルにおける中下層の熱輸送は弱い傾向にある。これを



第5図. 湖内の水温鉛直分布（左）とモデルによる再現地（右）

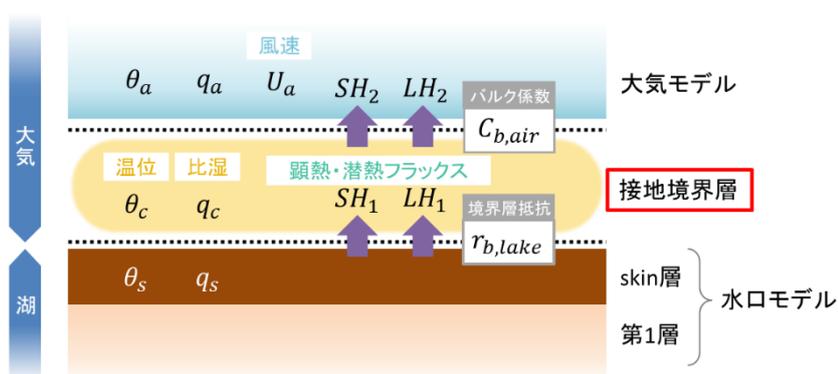
受け、温度構造の再現性を良くできるように渦熱拡散のパラメータを中心に再チューニングを行った。その結果、内部温度の鉛直分布能力は向上したが、逆に、全面結氷日数の再現性が低下した（第6図）。従って、現在、内部の温度構造と全面結氷の有無についての再現性を両立させるチューニングには至っていない。



第6図. 再チューニング後の全面結氷日数再現性

2-3 浦田結合モデルでの NHRCM とのインターフェース

ここでは水口モデルと NHRCM との結合方法について説明する（第7図）。水口モデルでは、湖面から接地境界素への顕熱・潜熱フラックスは湖沼モデルでよく用いられているバルク係数で計算されて

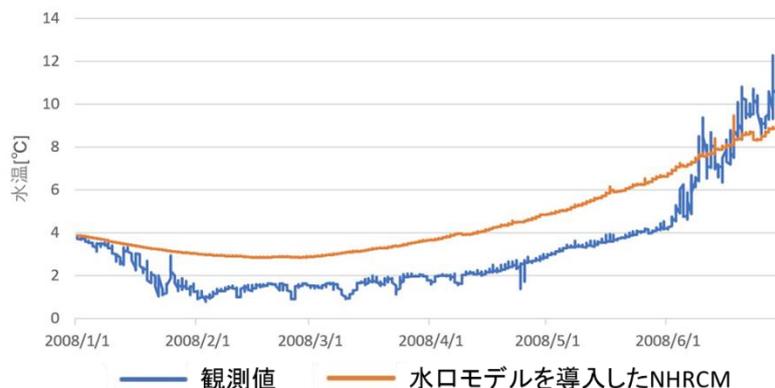


第7図. 浦田結合モデルでの水口モデルと NHRCM との結合方法

いる。一方、NHRCM の大気最下層+接地境界層では、水口モデルとは異なる Beljaar のバルク係数によって顕熱・潜熱フラックスが計算されている。計算式に含まれるバルク係数・境界層抵抗はそれぞれのモデル内で設定されるため、NHRCM 内の陸面モデル MJ-SiB でとられている手法に倣って大気モデルと湖沼モデルの結合を行った（これは田村モデルを組み込んだ方法と同じである）。即ち、両モデルの間に仮想的な「接地境界層」を考え、湖面からこの接地境界層への熱や水蒸気乱流輸送量と、接地境界層から大気最下層へのこれらの輸送量が一致するように、この仮想的な接地境界層の温度・湿度を診断量として計算した。NHRCM 導入後の水口モデルではこの接地境界層での診断量としての温度・湿度をオフラインモデルでの強制力としての湖面気温・湿度と見立てて計算を進めている。

2-4 浦田結合モデルの予備的計算結果

上記のインターフェースで水口モデルを組み込んだ浦田結合モデルの摩周湖での湖面水温の変化を第 8 図に示す。図中、橙は今回の浦田結合モデルによる計算結果で、青が環境研究所による観測結果である。計算開始から数か月

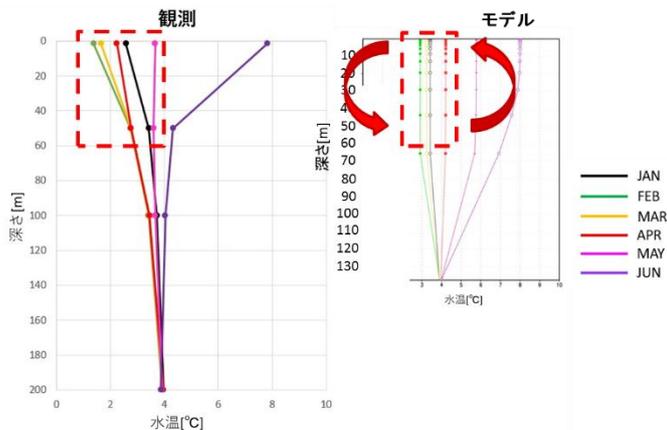


第 8 図. 摩周湖の湖面水温の推移. 橙は浦田結合モデル, 青は観測.

間の冬季、湖面水温が観測値よりも高くなり、2008 年の摩周湖の全面結氷を再現できなかった。また、日変化量も観測値より小さくなった。

この原因として、i) 湖内下層からの熱伝導が実際より大きく計算された、ii) 湖面上での気温の予測値が高かった、の 2 つが考えられる。

まず、i) を説明するために第 9 図に 1 月から 6 月までの月平均湖内水温鉛直分布を示す。観測を左に、モデルを右に示す。観測は湖の最深地点(200m)で行われ、モデル計算は平均水深(138m)で計算を行ったが、水面からの深さは等しくとってある。湖底に近付くほど密度最大水温の 3.98°C に収束し、安定な密度成層が実現している点は再現できているが、冬季の観測でみられる“水中から湖面に



第 9 図. 摩周湖の鉛直湖内水温分布の推移. 左図は観測, 右図はモデル.

近付くにつれて水温が低下する“分布は、計算では再現できていない。上下層間の密度勾配が解消されるほど層間熱輸送が活発に計算されたためと考えられる。渦拡散係数については摩擦速度の調整や下層での減衰を考えるために様々なパラメータが導入されており、これらにはオフライン版の水口モデルで最適化された値を用いたが、これらが浦田結合モデルでは最適ではなく渦拡散が大きくなり計算されてしまった可能性が高い。渦拡散に大きな影響を与える地上風速を例にとると、結合モデルの地上風速はオフラインモデルで使用したアメダス観測値より平均値および瞬間値共に数倍大きかった。これによって渦拡散係数の過大評価が説明できる。

次に、ii) については、摩周湖の湖面付近の気温の時系列を第 10 図に示す。青は摩周湖に近い川湯のアメダスデータを標高補正した観測値（補正を施しているため、以下、観測参考値と呼ぶ）、橙は今回のモデル計算結果である。1 月から 3 月にかけて、気温が観測値に比べて最大で 10℃高く計算されている。

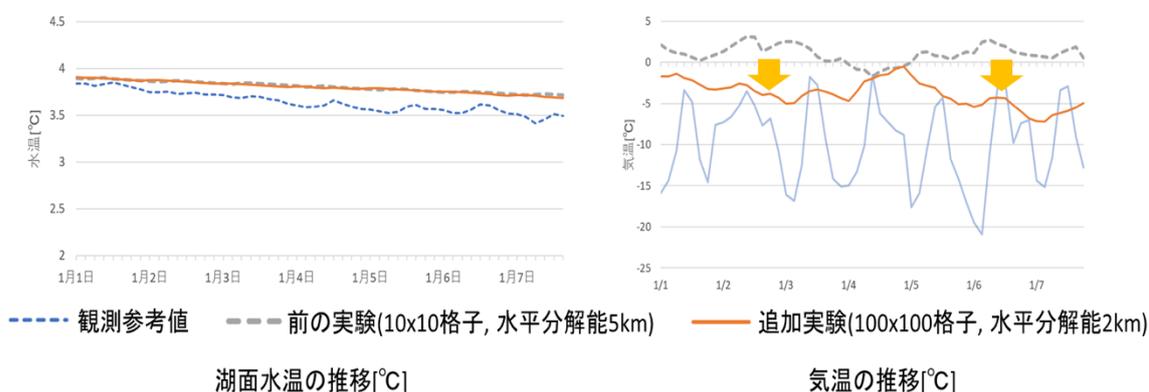


第 10 図. 摩周湖の湖面付近の気温の推移. 青は観測、橙はモデル。

このため、湖面水温が結氷に至るような低い温度まで下がりきら

なかったと考えられる。このような傾向は、湖の格子以外でも確認でき、1 月から 6 月までの平均気温・温位の領域分布を見ると領域の境界部にあたる格子ではメソ解析データによる境界値が与えられているが、領域内部の多くの格子点において、高温寄りに計算されてしまっている。浦田(2020)では水口モデルを NHRCM に組み込むことを最優先とし、デバッグし易いように 1 CPU で計算が済む水平分解能 5km, 10×10 格子として計算を行ったが、これでは空間分解能が十分でなく、格子間での急激な標高の変化などで水平方向の移流の計算に悪影響が生じたと考えられる。

このことを確認するために、計算領域を拡大し (100 x 100 格子)、分解能を 2km に細かくした追加実験を行ったところ、先ほどの実験結果でみられたような過度な高温域は確認されなかった (但し、並列計算の MPI にバグが混入しており、ノード間での値の受け渡しで不都合が発生し、1 週間より長い期間の計算を行うことが出来なかった)。この追加実験での摩周湖での水温・気温の推移を第 11 図に示す。先と同じく、橙が計算結果、青が観測参考値である。計算値はまだ観測参考値より高いが、気温は先の実験に比べて平均で 4.8℃



第 11 図. 摩周湖の湖面水温 (左図) と湖面付近の気温 (右図) の推移. 青は観測、橙はモデル。

観測参考値に近付いた。一方、湖面水温は殆ど改善されなかった。これは湖面の熱容量が陸面に比較して大きく気温予測値の変化が 1 週間という短い期間では湖面水温に反映されな

かったためと考えられる。

3. 今後

結合モデルの開発に関して、NHRCM の大気部分と湖沼サブモデルとのインターフェースの開発が不十分であり、今後、MPI 部分のデバッグを行って長期間の時間積分を行い、気温予測値がどれだけ改善するか、それによって湖面水温の計算結果がどのように変化するかを確認する必要がある。

参考文献

- 浦田知哉, 2022: 湖沼凍結モデルの NHRCM への導入と局地気候へのインパクト, 気象大学校卒業論文集
- 大泉三津夫, 小室美沙, 2017: NHRCM に実装した多層湖沼熱モデルのパフォーマンス, 日本気象学会 2017 年度秋季大会講演予稿集, D211.
- 田村美沙, 2017: 領域気候モデルでの湖沼熱モデルの開発, 気象大学校卒業論文集
- 水口知世, 2020: 雪氷圏に適用可能な湖沼モデルの開発, 気象大学校卒業論文集