

平成 30 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』

平成 31 年 1 月

ヤマセ研究会

# 目次

ヤマセ研究会.....	3
平成 30 年度成果.....	4
1. 国立環境研究所で進める災害環境研究	
- 放射性物質の大気環境シミュレーションを中心として.....	5
2. SOMs を用いたヤマセ解析.....	8
3. ヤマセに伴う下層冷気と日本海への流出.....	10
4. ヤマセ日の判定アルゴリズム (1) .....	12
5. 積雪地域における融雪期の風速の将来予測.....	15
6. MJ-SiB 積雪 3 層モデルの多層化としもざらめ雪の導入.....	17
7. さくら開花日の地球温暖化による影響.....	22
8. 2 週間気温予報の紹介とガイダンスの活用について.....	28
9. 結露対応版イ葉面濡れ確率予報に向けた気象庁週間アンソングルダウンスケール予報実験...32	
10. 区内気象観測データを利用した長期気候変動データセットの作成.....	35
11. リンゴ生育モデルによる生育予測と外し事例の気象要因調査.....	37
12. 気象データの EMS 分野との連携研究 -CREST HARPS の取り組み-.....	39
13. 日本域を対象とした長期領域再解析に向けた取り組み.....	44
14. SICAT データを用いた極端降雪の将来予測.....	46
15. 20 世紀の地球温暖化に伴う日本の極端降水の変化.....	48
16. キリバス共和国における NINO.3SST を利用した降水量予測.....	52

# 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。第13回の研究会からは、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15回ヤマセ研究会の開催

第15回ヤマセ研究会は2018年11月29日から30日にかけて、福島県三春町の福島県環境創造センター交流棟（愛称：コミュタン福島）において開催した。研究会の冒頭に環境創造センターの角山茂章所長からご挨拶をいただいた。開催にあたり、国立環境研究所福島支部研究総括の大原利眞氏をはじめとする方々に大変お世話になった。また、気候変動適応技術社会実装プログラム（SI-CAT）の補助を受けた。

## 平成 30 年度成果

# 1. 国立環境研究所で進める災害環境研究

—放射性物質の大気シミュレーションを中心として—

大原利眞 (国立研究開発法人国立環境研究所福島支部)

## a)要旨

国立環境研究所では、東日本大震災の直後から、地震、津波、さらには原発事故によって引き起こされた環境放射能汚染とその環境回復、被災地の復興に関する「災害環境研究」に取り組んできた。2016年に福島県三春町に開設した福島支部を現地拠点として、研究機関の立場から福島の復興・再生を支援する取組を進めている。本稿では、災害環境研究とその中で進めている大気シミュレーションを用いた被ばく線量評価について紹介する。

## b)本文

### (1) 福島支部で進める災害環境研究

国立環境研究所では、東日本大震災後、直ちに災害と環境に関する研究に着手し、激甚な津波被害に伴う災害廃棄物の処理や沿岸生態系への環境影響、放射性物質の環境中での動態解明や汚染廃棄物の処理システムといった課題に取り組んだ。また、比較的早い時期から、被災地の復興まちづくりをモデルシミュレーションや情報通信技術 (ICT) を活用して支援する研究も進めてきた。現在では、これらを発展させた災害環境研究プログラムとして、①原発事故による環境汚染からの着実な回復 (環境回復研究プログラム; 図1)、②復興プロセスでの新たな環境づくり (環境創生研究プログラム; 図2)、③将来の災害への環境面からの備え (災害環境マネジメント研究プログラム; 図3) の3つの視点に立った研究を総合的に進めている。これらの研究は、いずれも現場に近いフィールドにおいて、被災地や社会のニーズを踏まえつつ、多様な連携のもとで実施している。

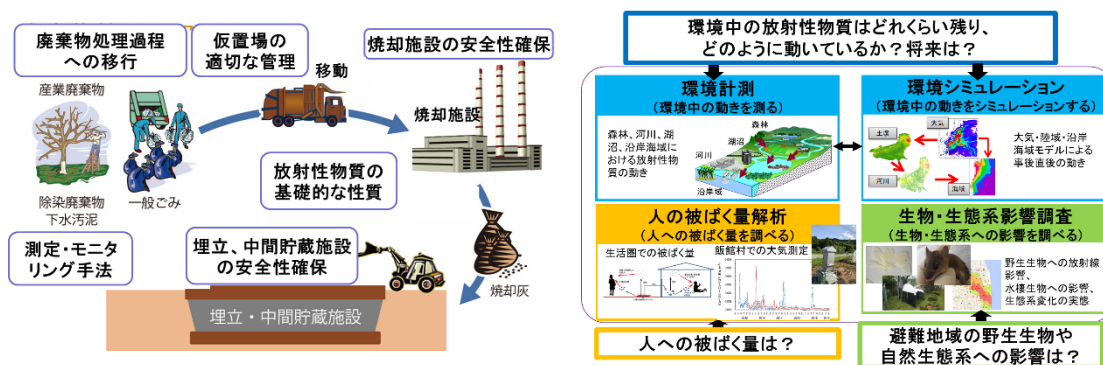


図1 環境回復研究の概要 (左) 汚染廃棄物管理研究、(右) 環境動態・影響研究



図2 環境創生研究の概要



図3 災害環境マネジメント研究の概要

(2) 大気輸送沈着・ばく露評価統合モデルを用いた呼吸由来の甲状腺被ばく線量推計

東京電力福島第一原子力発電所の事故による健康リスクについては、これまでにUNSCEAR（原子放射線の影響に関する国連科学委員会）やWHO（世界保健機関）による評価が行われてきたが、事故後初期の実測データが極めて少ないことから、初期被ばくによるリスクが解明されていない。そこで、2015～2017年度に環境省の環境研究総合推進費による研究プロジェクト（課題名：原発事故により放出された大気中微粒子等のばく露評価とリスク評価のための学際研究、研究代表者：森口祐一・東京大学大学院教授）を実施した。このプロジェクトでは、大気汚染物質の一種である浮遊粒子状物質（SPM）の常時監視装置のろ紙上に捕集された放射性物質を分析することにより、多地点において大気中の放射性物質の1時間濃度の連続データを取得した。そして、このデータを使って大気シミュレーションモデル（ATDM）を改良し、このモデル計算濃度（図4）をもとに呼吸由来のヨウ素I-131摂取による内部被ばく線量を推計して（図5）、高い被ばくを受けた可能性のある日時、地域を明らかにした（表1）。本研究は環境研究総合推進費 5-1501 の支援を受けて実施した。

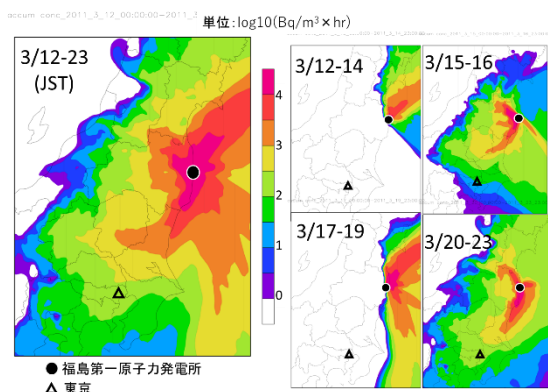


図4 Cs-137 期間積算濃度の地域分布

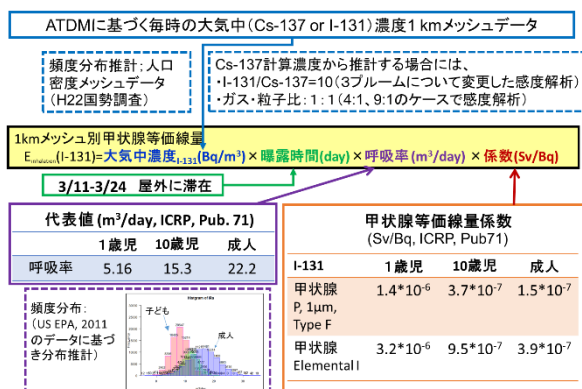


図5 甲状腺等価線量の推計手順

表1 高い被ばくを受けた可能性のある日時・地域、不確実性の程度・要因

ブルーム到達日 ブルーム番号 対象地域		日 (2011年3月)								
		12-13 P1	15 P2 P3		16 P4	18 P5	19 P6	20-21 P8	21 P9 P9'	
福島県 浜通り	原発北	12日夕方～ 13日午前		午後		午後	昼頃	20日午後～ 21日午前		
	原発北西			午後						
	原発南西		午前		未明、昼頃					
	原発南		午前		未明、昼頃			20日朝	未明	朝～午後
福島県 中通り				午後			20日午後～ 21日午前			
関東	茨城・千葉北西部		午前						朝	
	茨城南東・千葉北東部				朝、午後					
	栃木・群馬・埼玉		午後							
不確実性 の主な 要因	主要な問題・課題	ブルームを再現できない	原発近傍の再現性、山岳域での湿性沈着計算に課題	左記に加えて、原発北西方向の湿性沈着計算に大きな課題	原発北西方向への輸送の再現が困難、ソースタームの不確実性が大きい	ブルームを再現できない、ソースタームの不確実性が大きい	—		ブルームを再現できず、関東の高濃度を過小評価、浜通り南部では過大評価	
	気流拡散場	○			○	○			○	
	ソースターム	○			○	○				
	湿性沈着(降水を含む)		○	○	○				○	
	I/Cs比、I存在形態	○ (I/Cs比が大)				○ (I/Cs比が大)				○ (I/Cs比が大)

c)参考文献

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書「原発事故により放出された大気中微粒子等のばく露評価とリスク評価のための学際研究 (5-1501)」(平成30年5月)  
[https://www.erca.go.jp/suishinhi/seika/pdf/seika\\_1\\_h30/5-1501\\_2.pdf](https://www.erca.go.jp/suishinhi/seika/pdf/seika_1_h30/5-1501_2.pdf)

## 2. SOMs を用いたヤマセ解析

川添祥 (海洋研究開発機構・JAMSTEC)

### a) 要旨

「地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース(d4PDF)」を用いて、極端な低温日をもたらす「ヤマセ」現象の循環場とその将来変化の解析を行った。本発表では、将来にも発生し続けると予測されているヤマセの循環場に大きな変化は見られるかをクラスター分類法の一つ、自己組織化写像マップ (Self-Organizing Maps; SOMs) を用いて考察した。

### b) 本文

#### (1) データと手法

本研究では、d4PDF 大規模アンサンブル実験 (Mizuta et al. 2017) の 60km 格子全球大気モデル (MRI-AGCM3. 2) と日本域をカバーする 20km 格子領域気候モデル (NHRCM) を活用。将来変化は 4K 上昇世紀末実験と 2K 上昇近未来実験 (Fujita et al. 2018) を使用した。

極端低温日の定義としては、10 日移動平均気候値からの偏差を用いる気温偏差が 1 パーセンタイル以下の日と特定。気温偏差の抽出地点は AMeDAS 八戸 (d4PDF は隣接位置) とし、循環場は JRA55 から 1958-2010、d4PDF からは 1951-2010 (x 48 メンバー) の夏季 (6 月~8 月) を解析。将来実験の低温日は各  $\Delta$ SST パターンからの 8 メンバーの 1 パーセンタイル以下を抽出し、過去実験と同じサンプル日数を用いた。

東北地方において低温日をもたらす典型的な循環場として、発達したオホーツク高気圧からの冷たく湿った空気の流入、通称「ヤマセ」が大きな要因とされている。地球温暖化の影響により、ヤマセに関わる循環場の変動も可能性としてある。しかし、大量なアンサンブルデータを扱うには極めて困難であることから、次元削減・データ圧縮を目的とするクラスター分類が望ましい。そこで本稿では、クラスター手法の一つである SOMs (Kohonen 1995) を活用した。SOMs とは教師なし学習の人工ニューラルネットワークであり、多次元データを低次元空間 (主に 2 次元平面) に表示することができる。SOMs に関しての具体的な詳細はここでは述べないが、気候関連でも様々な先行研究があるので、それらを参照頂きたい。

#### (2) 結果

まず初めに、低温をもたらす循環場の再現性検証を行った。ここでは 1958-2010 夏季 (6 月~8 月) すべての日を学習用入力データとし、計 35 種類の循環場 (海面気圧) パターンの二次元 SOMs マップを作成した。出力されたマップを使い、観測及び d4PDF 過去実験で発生する極端低温時を分類した。多少なばらつきは見られるが、アクセスされたノードの上位 2 は観測・d4PDF 共々同じで、発達したオホーツク高気圧の存在を示しているパ



ターン（典型的なヤマセ時の循環場）である事を確認することができた。

次に循環場の将来変化を検証を行った。入力データは d4PDF 過去実験の極端低温時の海面気圧とし、出力されたマップで 2K/4K 上昇の低温時を分類し、将来気候において発生頻度が増加・減少するかを検証。基本的な気圧パターン抽出を目的とした再現性検証に比べ、より細かな違いの循環場抽出が望ましい為、計 120 種類の海面気圧パターンを出力した（図 1a）。2K/4K における発生頻度変化（図 1b, 1c）を調べてみると、増加傾向を示しているパターンはマップの右上/左下などに固まっており、南岸低気圧・台風が主な要因で極端低温が発生している。減少するパターンは左上や右下に示され、非常に発達したオホーツク高気圧パターンや南岸低気圧・台風の影響が小さい循環場に集まっている。将来のヤマセは南からの水蒸気流入を強調する循環場であり、東北で発生する低温気象の特徴に影響をもたらす可能性がある。

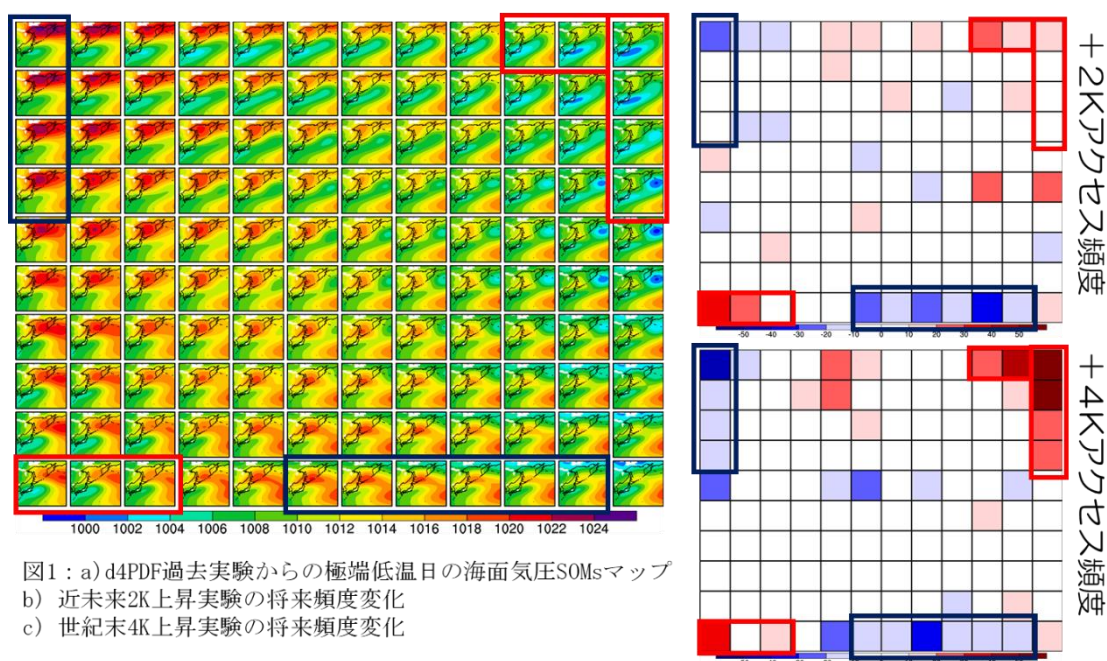


図1 : a) d4PDF過去実験からの極端低温日の海面気圧SOMsマップ  
 b) 近未来2K上昇実験の将来頻度変化  
 c) 世紀末4K上昇実験の将来頻度変化

## 参考文献

- Kohonen, T., 1995: *Self-Organizing Maps*. Springer Series in Information Sciences, Vol. 30, Springer-Verlag, 362 pp.
- Mizuta, R., and Coauthors, 2017: Over 5000 years of ensemble future climate simulations by 60 km global and 20 km regional atmospheric models. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*
- Fujita, M., Mizuta, R., Ishii, M., Endo., Sato, T., Okada, Y., Kawazoe, S., Sugimoto, S., Ishihara, K., and Watanabe, S., 2018: 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.*

### 3. ヤマセに伴う下層冷気と日本海への流出

島田照久 (弘前大学大学院理工学研究科)

#### a)要旨

夏季に北太平洋亜寒帯域・オホーツク海上に分布する下層の冷気が、北日本とサハリンの地峡・海峡から、日本海に流出することがある。この流出した冷気が大陸の日本海沿岸の山脈に捕捉されて大規模な地形性強風を引き起こすことを、衛星観測と気象シミュレーションによって確認した。

#### b)本文

##### (1) 研究の目的

ヤマセは、北日本に沿って南下してくる下層冷気といえ、ヤマセに関する研究の主な研究対象域は北日本のオホーツク海/太平洋沿岸である。しかし、ヤマセ卓越時には、北日本の太平洋沿岸とユーラシア大陸沿いの日本海上に、低温高圧域が舌状に南下することが多い(木村 1995)。本研究では、このユーラシア大陸沿いの低温高圧域とヤマセとの関連、発生の原因と実態を明らかにすることを目的とする。

##### (2) データと方法

衛星観測の海上風データと気象モデル WRF によるシミュレーションを用いる。2005 年 7 月上旬の事例研究を行う。

##### (3) 結果

衛星観測の海上風データによると、2005 年 7 月 3-5 日にかけて津軽海峡以北の地峡海峡の日本海側で強風が発生しており (Shimada et al. 2010; Shimada and Kawamura 2011)、ユーラシア大陸に向かって伸び、やがて地形に沿う様子が見られた。このとき、日本の北海道付近に向かって、下層の冷気が亜寒帯域から伸びていることが確認できる (図 1)。この状況について、気象モデルで再現実験を行った。その結果、地峡・海峡の日本海側で発生する強風は、低温・低比湿の気流の流出に対応しており、ヤマセに伴う冷気が地峡・海峡から日本海に流出していることがわかった。この結果を確認するために、主要な地峡・海峡を仮に閉じて、周辺部の平均的な標高の山岳で置き換えた感度実験も行った。その結果、どこの地峡・海峡から冷気が流出するかによって日本海での冷気の振る舞いが変わることが確認できた。

### 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.

Iwasaki, T., T. Shoji, Y. Kanno, M. Sawada, M. Ujiie, and K. Takaya, 2014: Isentropic analysis of polar cold air mass streams in the Northern Hemispheric winter. *J. Atmos. Sci.*, 71, 2230–2243. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JAS-D-13-058.1>

Shimada, T., M. Sawada, W. Sha, and H. Kawamura, 2010: Low-level easterly winds blowing through the Tsugaru Strait, Japan. Part I: Case study and statistical characteristics based on observations. *Mon. Wea. Rev.*, **138**, 3806-3821.

Shimada, T. and H. Kawamura, 2011: Summertime gap winds of the Soya Strait induced by the developed Okhotsk high. *Atmos. Sci. Lett.*, **12**, 316-320.

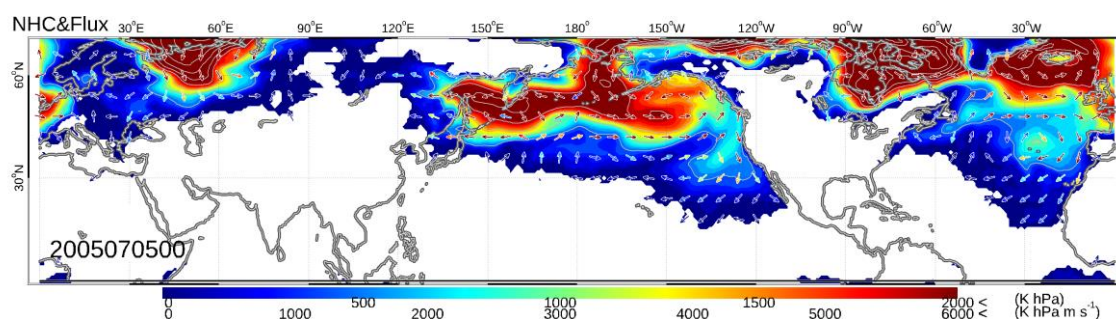


図1 下層冷気の分布 (2005-07-05T00:00)。Iwasaki et al. (2014)で定義された Negative Heat Content とそのフラックスで冷気分布を示している。ここでは等温位面 (296K) 以下を冷気としている。

#### 4. ヤマセ日の判定アルゴリズム (1)

土屋 幸男 (五戸再生可能エネルギー研究所)

##### a)要旨

ヤマセが吹走する日と平常日のオフグリッド住宅の消費電力量の違いを調べる目的のため、ヤマセ日を判定するアルゴリズムを提案した。本論文ではアルゴリズムに使用する制約量の決定過程を述べる。また風向と風速の条件を追加した。このアルゴリズムの検証を兼ねてヤマセ状態にあることを検知できるヤマセモニタリングシステムを試作し、2018年5月から観測試験を続けている。2017～8年の観測記録をもとに制約量を更新した。

##### b)本文

###### (1) はじめに

オフグリッド住宅では、ヤマセの頃が太陽光と風力に関わる再生可能エネルギーの取得が困難であることを報告した(土屋, 2011)。一方、対象とするヤマセ吹走地点において、ヤマセ日 (ヤマセ状態が半日以上続く日。) を判定するアルゴリズムを提案した(土屋, 2018)。しかし、この提案では制約式に使う制約量は所与として表現されているものの、その過程が示されていない。そこで本論文では制約量の決定過程を述べる。また同アルゴリズムの検証を行うシステムを試作し、これを2018年5月から観測試験を続けている。

###### (2) ヤマセモニタリングシステム

ヤマセが吹走している時に、リアルタイムでヤマセ状態にあることを示す簡易なシステムがあればありがたい。結果は例えば農業被害の軽減とか、再生可能エネルギーの抑制対応などに役立つ。この目的のためにヤマセモニタリングシステム (以下では YMS。) を試作した。YMS はデータ処理装置、センサ及びタッチパネルで構成される。データ処理装置には通信制御 PLC (土屋, 2017) を用い、開発したアルゴリズムを搭載した。センサは強制通風筒 (福岡、他, 2011) 内に設置した温湿度計、及び風向速計を使う。時系列値の表示・監視及び制約量の更新設定、さらにヤマセ状態の判定表示ではタッチパネルを多用し、実用性・操作性を高めている。

###### (3) ヤマセ日の判定アルゴリズム

以下にヤマセ日の判定アルゴリズム 1)～5)を示す。既報で示したアルゴリズムと本論文に述べるアルゴリズムの違いは、4)の項目に示す①から④の制約量の値、及び⑤と⑥の風向と風速に関する追加記載である。制約量の決定過程は (4) 章に記す。

1)気温( $T$ )と湿度( $H$ )を10分毎に観測する。

2)過去6時間 (観測対象期間: time span) の $T$ と $H$ の集合をそれぞれ $\{T_i\}$ ,  $\{H_i\}$ とする。

ここで  $i = 0, -1, -2, \dots, -35$ 。

3)同時に以下の2値を求める。

①6 時間最高最低気温差：

$$T_{\Delta} = \text{Max}\{T_i\} - \text{Min}\{T_i\} \text{ [}^{\circ}\text{C]}.$$

②6 時間最高最低湿度差：

$$H_{\Delta} = \text{Max}\{H_i\} - \text{Min}\{H_i\} \text{ [%]}.$$

4) ヤマセ日の制約条件。以下の 6 条件を満たす場合を仮定する。

①  $T^{\text{max}} \geq T_0$ , ここでは  $T^{\text{max}} = 22.2 \text{ [}^{\circ}\text{C]}$ 。

②  $H^{\text{min}} \leq H_0$ ,  $H^{\text{min}} = 73.2 \text{ [%]}$ 。

③  $T_{\Delta}^{\text{max}} > T_{\Delta}$ ,  $T_{\Delta}^{\text{max}} = 8 \text{ [}^{\circ}\text{C]}$ 。

④  $H_{\Delta}^{\text{max}} > H_{\Delta}$ ,  $H_{\Delta}^{\text{max}} = 45 \text{ [%]}$ 。

⑤ 風向は 3 秒毎サンプリングで、その 10 分間最頻値が北東～東南東に入ること。

⑥ 風速は 3 秒毎サンプリングで、その 10 分間平均値が 1[m/s]以上あること。

ここで  $T^{\text{max}}$ ,  $H^{\text{min}}$ ,  $T_{\Delta}^{\text{max}}$ ,  $H_{\Delta}^{\text{max}}$  は 4～8 月でそれぞれ共通に使用する定数。

5) ヤマセ日の判定。

4)の①～⑥制約を満たし、その延べ時間が半日を超える日とする。

#### (4) 制約量の決定過程

本章で取り扱う気温と湿度に関わる制約量は、当地五戸町上市川での観測値を基準にして定める。該当する期間は 2017、18 年の 5～8 月（延べ 123 日）の中でヤマセの出現または消滅が含まれるヤマセ吹走日であり、2017 年は 23 日、2018 年は 25 日を対象とする。

(i) ①  $T^{\text{max}}$  と ②  $H^{\text{min}}$  の決定 既報では  $T^{\text{max}} = 22 \text{ [}^{\circ}\text{C]}$ 、 $H^{\text{min}} = 70 \text{ [%]}$  を仮定した。両値は高温期の 8 月で、ヤマセが数日間安定して吹走するときの気温の最高値及び湿度の最低値を基準にした。まず気温に関しては 2017、18 両年を通じて最高気温 22.1[ $^{\circ}\text{C}$ ]が得られたので、余裕をみて  $T^{\text{max}} = 22.2 \text{ [}^{\circ}\text{C]}$  とする。一方、湿度については両年の最低値 73.3[%] が得られたので、余裕をみて  $H^{\text{min}} = 73.2 \text{ [%]}$  とする。

(ii) ③  $T_{\Delta}^{\text{max}}$  と ④  $H_{\Delta}^{\text{max}}$  の決定 既報では  $T_{\Delta}^{\text{max}} = 5 \text{ [}^{\circ}\text{C]}$ 、 $H_{\Delta}^{\text{max}} = 10 \text{ [%]}$  を仮定した。この 2 値は当地ではガスヤマセ、ケガジヤマセと呼ばれている低温、日照不足の凶作風が全日続く場合を想定しており、条件が厳しい。そこで本論文ではヤマセの出現または消滅が含まれる日も含めることとし、以下に述べるように制約を緩くした。

$T_{\Delta}^{\text{max}}$ ：ヤマセが吹走した日の  $T_{\Delta}$  の度数分布を求め、最大階級値とする。結果としては両年とも 8[ $^{\circ}\text{C}$ ]が得られたので、 $T_{\Delta}^{\text{max}} = 8 \text{ [}^{\circ}\text{C]}$  とする。なおヤマセが吹走しない日の度数分布も作成し、前者と合成作図すれば  $T_{\Delta}$  全体の俯瞰に役立つ。

$H_{\Delta}^{\text{max}}$ ：同様にヤマセが吹走した日の  $H_{\Delta}$  の度数分布を求める。最大階級値として 2017 年で 27[%]、18 年で 45[%]を得たので、 $H_{\Delta}^{\text{max}} = 45 \text{ [%]}$  とする。

(iii) ⑤ 風向と ⑥ 風速の条件設定 既報では風向と風速の制約条件は設けなかった。しかしヤマセの判定では東よりの風向は基本的事項であるので追加する。風向風速計は地上高 10[m]に設置した。風向と風速の制約値はすでに示した通りである。

#### (5) まとめ

特定のヤマセ吹走地点において、ヤマセ日を判定するアルゴリズムを提案し、同アルゴリズムに基づく YMS を試作した。さらにアルゴリズムで使用する制約量の決め方を明らかにした。また風向と風速の条件を既報の条件に追加した。2017 年と 2018 年の観測記録か

ら新たな制約量が得られたので、これらを更新し 2019 年以降の研究に供する。

#### c)参考文献

土屋, “非連系再生可能エネルギー利用住宅での電力需要特性”, 東北の農業気象, Vol.55, pp.13-14, Mar, (2011).

土屋, “再生可能エネルギー利用オフグリッドの電気設備”, 平成 29 年度電気関係学会東北支部連合大会, 1C11, (2017).

土屋, “オフグリッド住宅のヤマセ日消費電力量特性”, 平成 30 年度電気関係学会東北支部連合大会, 2B04, (2018).

福岡・桑形・吉本・山田, “建築資材を活用した低コスト強制通風筒「NIAES-09」の製法”, 生物と気象, 11, A10-16, (2011).

## 5. 積雪地域における融雪期の風速の将来予測

野坂真也 (気象研究所)

### a)要旨

地球温暖化による冬季モンスーンの弱化に伴い、総観場の季節風は弱まる。一方、温暖化による積雪の減少は、局地的に地表付近の気温上昇を加速させ、積雪面上に存在していた安定層を破壊することが分かった。安定層が壊れることで、地上の風速強化とさらなる気温上昇が引き起こされる。この傾向は低地や盆地で顕著に現れた。一方、高地のような現在気候において安定層がはっきりしない地域では、安定層の崩壊が起こらないため、消雪による地表加熱があったとしても、風速の上昇や局地的な気温上昇の拡大は発生しなかった。つまり、積雪地域の現在気候における安定度の違いが、将来の局所的な風速の変化と極端な気温上昇に影響していることが分かった。

### b)本文

#### (1) 冬季風速の将来変化

気候変動リスク情報創生プログラムで作成された解像度 2km の NHRCM による気候計算データ(Murata et al. 2017)を用いて冬季における風速の将来変化を調べた。

日本周辺において、将来の温度上昇が大陸と海洋で異なることが原因で西高東低の弱まり、冬季モンスーンが弱まることがこれまでに指摘されている。そんな環境場の風が弱まるなか、東北地方の一部地域において風速が強まっている地域がみられる(図 1)。

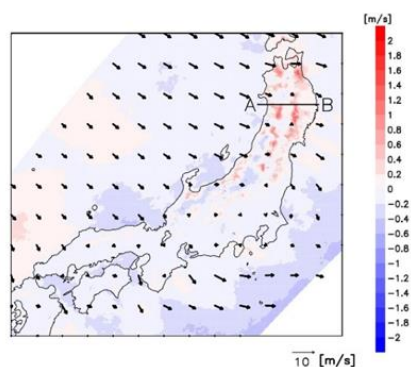


図 1 3月の日最大風速の将来変化(ベクトル：現在気候の風、シェード：将来変化)

#### (2) 積雪の減少と局地的な風の強まり

積雪日数の変化と風速の変化をみると、積雪日数の減少に応じて風速が強化されていることが分かった(図 2)。この特徴は特に標高の低い地点で強く、高標高地点では風速の強化はほとんど見られない。また、気温についても同様の傾向がみられ、高標高地点よりも低標高地点で気温上昇が大きく、雪のない地点よりも気温上昇が大きい。断面で現在気候の安定



度と安定度の将来変化をみると、現在気候において安定度が高い平地や盆地において、安定度が悪化していることがわかる(図 3)。このことから、東北地方の一部における風速の強まりは、温暖化による積雪の減少が気温上昇を引き起こし、安定度が悪化するために上部空気との運動量や熱の交換が進み、気温上昇の加速と風の強化が起こったと考えられる。この風速強化は現在気候において安定層が存在する平地や盆地において発生し、安定層の存在しない高標高地点では見られない特徴である。

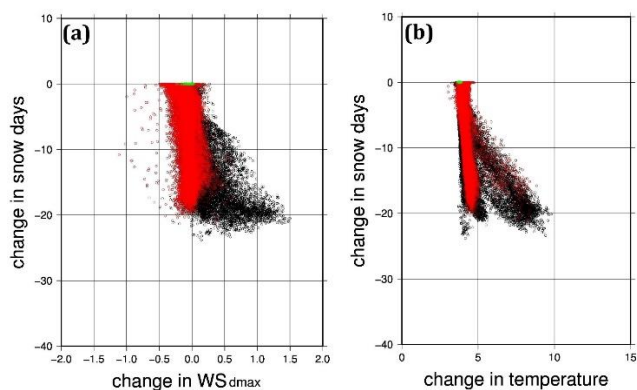


図 2 積雪日数の将来変化と日最大風速の将来変化(a)及び気温の将来変化(b)の関係(赤：標高 500m 以上の地点、黒：標高 500m 以下の地点、緑：現在気候において積雪のない地点)

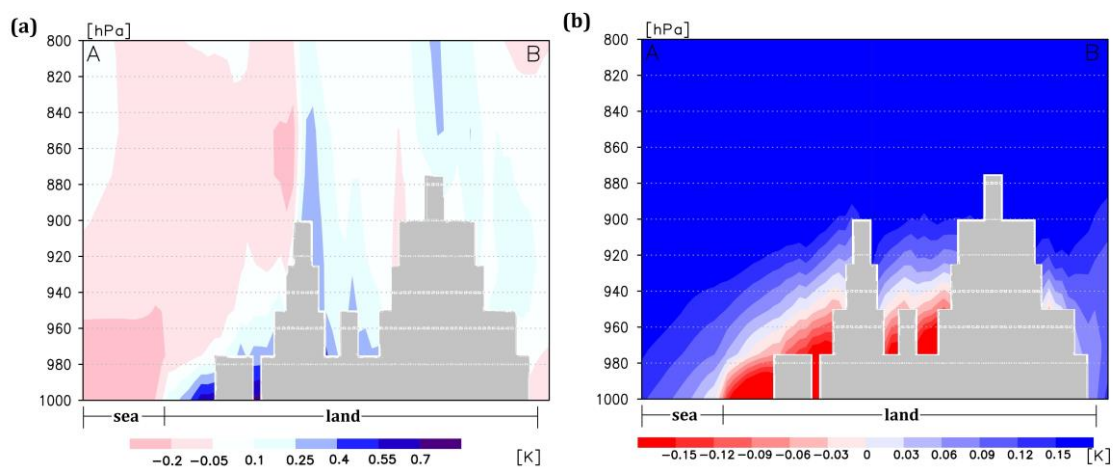


図 3 現在気候における安定度(a)と安定度の将来変化(b)

### c)参考文献

Murata, A., H. Sasaki, H. Kawase, M. Nosaka, T. Aoyagi, M. Ohizumi, N. Seino, F. Shido, K. Hibino, K. Ishihara, H. Murai, S. Yasui, S. Wakamatsu, and I. Takayabu, 2017: Projection of Future Climate Change over Japan in Ensemble Simulations Using a Convection-Permitting Regional Climate Model with Urban Canopy. SOLA, 13, 219-223.



## 6. MJ-SiB 積雪 3 層モデルの多層化としもぎらめ雪の導入

大泉三津夫（気象大学校）、池上慶希（釧路地方気象台）

### a) 要旨

陸面モデル MJ-SiB に、積雪のしもぎらめ雪パラメタリゼーションを新たに導入した。しもぎらめ雪は低熱伝導率・高圧縮粘性係数という物理的性質をもつ。このパラメタリゼーションには山崎(1998)の有効温度勾配の方法を用いた。これの時間積算値からしもぎらめ雪発達を判断し、熱伝導率と圧縮粘性係数の値を補正する。このパラメタリゼーションをオリジナルの 3 層積雪層からなる MJ-SiB 積雪サブモデルとこれを多層化したものの 2 つに組み入れ、そのパフォーマンスを検証した。その結果、3 層モデルでは温度勾配の表現が十分でなく、しもぎらめ雪形成を適切に表現できなかったが、多層モデルではしもぎらめ雪を導入することで積雪の温度構造をより観測に近づけることができた。しかし、多層モデルではしもぎらめ雪の導入の有無に関わらず積雪水量の再現性が低下したため、種々のパラメータの再調節が必要である。

### b) 本文

#### (1) はじめに

積雪が強い温度勾配にさらされると、それを構成する雪粒子は霜の結晶へと成長する。この現象は「しもぎらめ雪への変態」と呼ばれる。しもぎらめ雪はシベリア等の寒冷地でよく見られ、日本でも積雪深が浅く気温の低い山岳部や北海道道東地方で生じている。しもぎらめ雪は、同じ密度のしまり雪のような等方性の雪よりも小さい熱伝導率・大きい圧縮粘性係数という物理的性質があり、更に鉛直方向と水平方向で熱伝導と圧縮性に異方性を有する。そのため、しもぎらめ雪は積雪内部での種々の物理量の経時変化はもちろんのこと、積雪表面への伝道熱および積雪表面アルベドを通じて等方性のしまり雪とは異なる影響を大気との熱交換に及ぼす。

気象研究所非静力学領域気候モデル NHRCM で現在使われている陸面モデル MRI/JMA-SiB（以後、簡単のため MJ-SiB）の積雪モデルは 3 層の積雪層からなり、積雪物理過程としてしまり雪を想定し、しもぎらめ雪の効果は考慮されていない。そこで本研究では、オリジナルの積雪 3 層モデル、及び、土田（2013）により積雪 3 層モデルをベースに多層化された積雪多層モデル、の両方にしもぎらめ雪のパラメタリゼーションを組み入れ、その影響を検証した。

#### (2) モデル

山崎(1998)の手法に倣い、しもぎらめ雪の効果をデフォルトの 3 層及び土田(2013)により多層化された MJ-SiB 積雪サブモデルの両方に組み入れた。このしもぎらめ雪のパラメタリゼーションを以下に記す。

### ( i ) 有効温度勾配の導入

山崎(1998)がしもざらめ雪変態の速度を表現するために導入した「有効温度勾配 $gt$ 」は、積雪内部の雪温温度勾配 $\Gamma$ と、飽和水蒸気圧と大気中での水蒸気分子拡散係数の2つの温度依存性を考慮した積雪温度を変数とする関数 $f(T)$ の積である。この $gt$ を時間積分した積算有効温度勾配 $Gt$ でしもざらめ雪形成の進行程度を評価する。ただし、 $\Gamma < 10^\circ\text{C/m}$  の場合は $gt = 0$  とし、最大含水量の90%以上の水を含むと $Gt$ をリセットする。

### ( ii ) 熱伝導率、圧縮粘性係数の計算方法

しもざらめ雪変態が進んだときの熱伝導率 $k$ と圧縮粘性係数 $\eta$ の変化は、現行積雪モデルに組み込み済みの等方性の雪の物理量(各々、 $k_0$ 、 $\eta_0$ )に、 $Gt$ に依存する関数 $f_t(Gt)$ 、 $f_v(Gt)$ を掛けることで表現した(図1)。山崎(1998)に従って、最もしもざらめ雪変態が進んだ場合に、 $k$ は等方性の雪の熱伝導率 $k_0$ の0.3倍、 $\eta$ は $\eta_0$ の10倍となるようにした。しもざらめ雪の効果が現れ始めるのは $Gt$ が $1.0 \times 10^7$ を超えた時で、その後、 $k$ は最小まで、 $\eta$ は最大まで、各々、線形で変化する。 $k$ が最小、あるいは $\eta$ が最大に達した以後は、それ以上 $Gt$ が増加しても、各々、一定値を保つ。

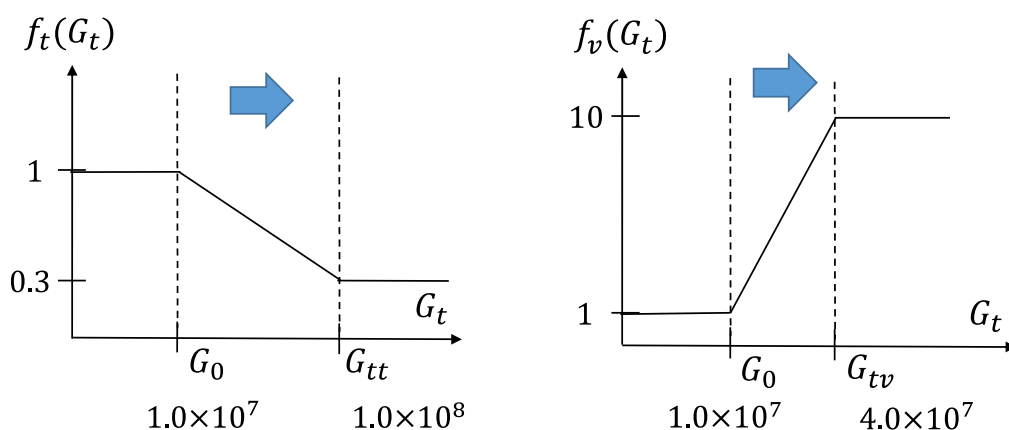


図1：しもざらめ雪変態によりしまり雪の熱伝導率 $k_0$ にかかる積算有効温度勾配  $Gt$  の関数  $f_t(Gt)$  (左図) と圧縮粘性係数 $\eta_0$ にかかる関数  $f_v(Gt)$  (右図)。

### (3) 数値実験

3層及び多層化された積雪モデルの計算をオフライン MJ-SiB で行い、しもざらめ雪の効果を入れた場合(test)と、入れない場合(cnt)のパフォーマンスを比較する。大気強制力として北海道大学低温科学研究所の露場で得られた地上気象観測データ(直達・散乱短波放射、下向き大気放射、気温、水蒸気圧、風、降水量)を与えた。積雪の検証データには同所での積雪断面観測結果を用いた。計算年は、2006年10月～2007年4月と2007年10月～2008年4月である。計算でのタイムステップは120秒とした。なお、しもざらめ雪への変態が進む12～2月の札幌の平均気温と最深積雪は、2006～7年は $-1.3^\circ\text{C}$ と78cm、2007～8年は $-2.8^\circ\text{C}$ と106cmであった。最初の冬(2006～7年)は暖冬年であり、2007～8年は寒

冬年である。

#### (4) 結果と考察

##### (i) 3層モデル

積雪深について、図2に3層モデルでの test と cntr の計算結果と観測値を示した。左図が2006～7年冬の結果、右図が2007～8年冬の結果である。赤線は test、青線は cntr、黒線は積雪深の観測値である。2006～7年冬ではあまり差が見られないのに対して、2007～8年冬では test が cntr を大きく上回った。これより、しもざらめ化が大きく進行すると、想定通りにしもざらめ雪を考慮しないものに比べて雪層の密度が小さくなって積雪深が増加することが分かる。但し、2007～8年冬ではしもざらめ化を考慮することで、観測値からの正バイアスが増加し、悪化した。

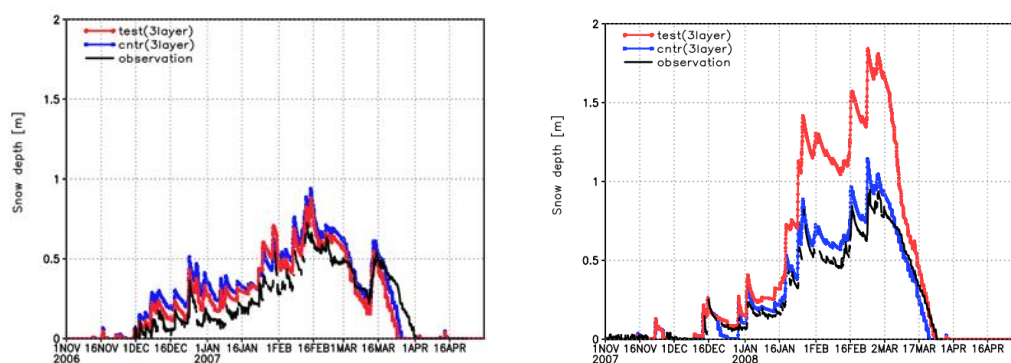


図2：3層モデルでの積雪深(m)2006～7年の推移（左図）と2007～8年の推移（右図）。赤線は test，青線は cntr，黒線は観測値を表す。

図3に test の積算有効温度勾配  $Gt$  の分布を示した。左図は2006～7年冬で、右図は2007～8年のものである。2007～8年冬の方がしもざらめ化が進んでいる。2006～7年冬にしもざらめ雪へ変態したのは、1月中旬から下旬にかけての積雪の半分より上の部分だけである。2007～8年冬では2月上旬までは全層でもしもざらめ雪が形成されたが、中旬以降は上方の1、2層でもしもざらめ雪への変態が継続しているものの、地面に近い3層目はしもざらめ雪ではなくなっている。3層目は地面からの熱の影響で融けやすく、積雪含水率が大きくなり、しもざらめ雪がリセットされて濡れざらめ雪へと変化した。自然状態のしもざらめ雪は積雪の下部に形成しやすく、中～上層にしもざらめ雪が発達することは、（ごく薄い表面霜が形成される場合を除いて）殆ど無く、3層積雪では適切なしもざらめ雪形成を表現できないことが分かる。

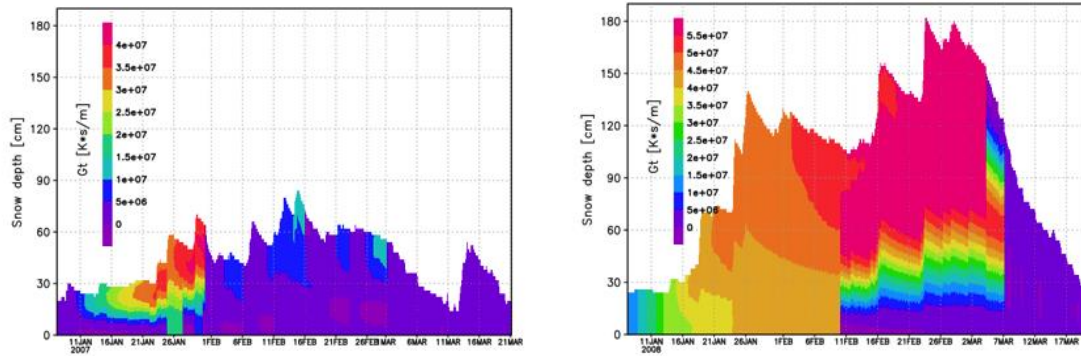


図 3: 3層モデル(test)での積算有効温度勾配  $Gt(Ks/m)$  の 2006~7 年冬の分布 (左図) と 2007~8 年冬の分布 (右図). 縦軸は積雪深(cm), 横軸は日付で, カラーバーで範囲を示す.

### (ii) 多層モデル

積雪深について、図 4 に多層モデルと観測値、また参考として 3 層モデルの test を示す。左図が 2006~7 年冬、右図が 2007~8 年冬の結果である。多層化によって観測値からの正バイアスが解消され、逆に 2006~7 年冬では多層の cntr が観測値よりも小さくなる。しもざらめ雪による積雪深への影響は 3 層モデルと同じで、しもざらめ雪変態が少ない 2006~7 年冬は test と cntr の差は小さく、しもざらめ雪が発達した 2007~8 年冬は 1 月から 3 月にかけて test が cntr を大幅に上回った。なお、しもざらめ雪変態がより進んでいた 2007~8 年冬の計算では、多層モデルで最大 26 層を使用した。

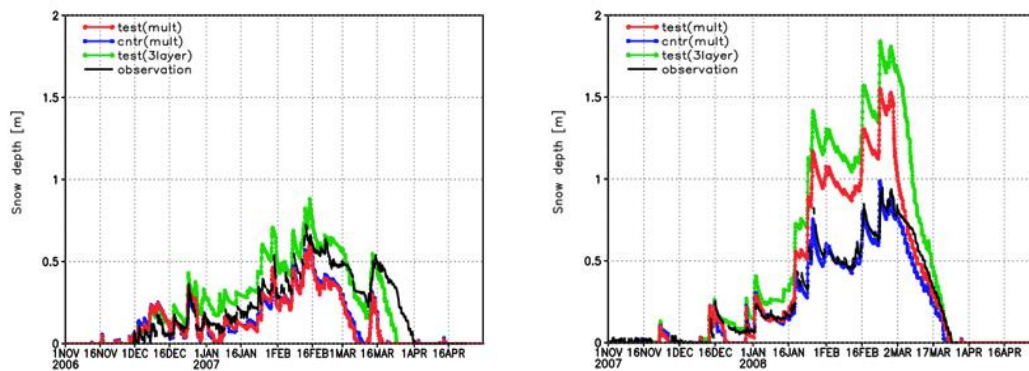


図 4: 積雪深(m)の 2006~7 年の推移(左図)と 2007~8 年の推移(右図). 赤線と青線は多層モデルでの test 及び cntr, 緑線は 3 層モデルでの cntr, 黒線は観測値を表す.

図 5 にしもざらめ雪を考慮した多層モデル test による 2006~7 年冬の積算有効温度勾配  $Gt$  の推移 (左図) と 2007~8 年冬の推移 (右図) を示す。図 3 の 3 層モデルでは温度勾配

が形成される高さを適切に与えることができず、しもざらめ雪形成の表現は十分でなかったが、図5での多層モデルではしもざらめ雪変態を適切に表現できている。その結果、testでは積雪上部の圧縮が進まず積雪深が大きくなり、低密度によって熱伝導率が低下して雪温が低下している。また、(図示しないが)雪温分布に関して、多層モデルのcntrでは雪温が積雪全体で高くなり内部の温度構造をうまく表現できなかったが、testではより観測に近づけることができた。

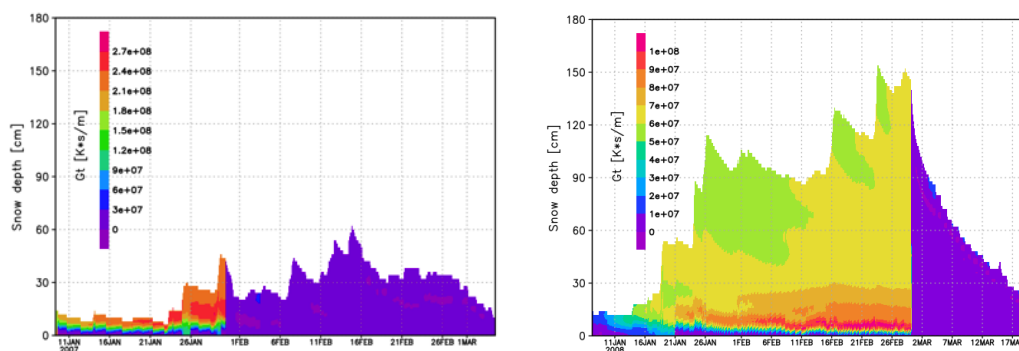


図5：図3と同じ，ただし，多層モデル(test)での実験結果.

### (iii) しもざらめ雪形成パラメタリゼーションと多層モデルの改善点と今後の開発方針

しもざらめ雪パラメタリゼーションの問題点として、3層・多層の両モデルにおける積雪深が観測値と較べて過大になることが挙げられる。これは現在の積雪3層モデルがしまり雪の物理過程を仮定しているにもかかわらず、しもざらめ雪が発達するような地点・年の観測値も使ってチューニングが施されたためである。今後、しまり雪のみが発達する地点・年のデータで再チューニングする必要がある。また、多層モデルではしもざらめ雪変態の導入の有無に関わらず、積雪水量の再現性が低下している。これは初冬の融雪量が多くなるため、この時期の再現性の向上が必須である。多層モデルとしもざらめ雪パラメタリゼーションをNHRCMのMJ-SiB積雪モデルとして採用する場合、上記2つの課題を解決する必要がある。

### c)参考文献

- 土田尚侑, 2013: MJ-SiB 積雪サブモデルの多層化. 気象大学校平成 25 年度卒業論文  
 山崎剛, 1998: 厳寒地に適用可能な積雪多層熱収支モデル. 雪氷 60 巻 2 号, 131-141.

## 7. さくら開花日の地球温暖化による影響

川上新吾 (仙台管区気象台 気象防災部 地球環境・海洋課)

### a)要旨

RCP8.5 シナリオと SRES-A1B シナリオの気温予測結果を用いて、既存の開花モデルにより将来気候におけるさくら開花日を予測した。その結果、温暖化が進むと、北日本では開花が早まる傾向が確認できたものの、他の地域では、開花が現在の開花平年日より遅れる地点も出てくる可能性が分かった。また、高レベルの温室効果ガス排出シナリオの下では、開花はするが、年によっては満開しない地点が増加する可能性があることも分かった。

### b)本文

#### (1) はじめに

気象庁の生物季節観測では、近年、気温上昇により、さくら開花日が早くなってきている。一方で、暖地での暖冬時は休眠打破が遅れ、開花が遅くなることも知られてきている。これらのことから、今後、温暖化が進むと、将来気候において開花日が変化すると考えられる。本稿では、地球温暖化予測情報第 8 巻(気象庁,2013) (以下、「第 8 巻」とする)と地球温暖化予測情報第 9 巻(気象庁,2017) (以下、「第 9 巻」とする)の予測実験結果を用いて、丸岡ら(2009)が作成した「そめいよしの」の開花モデルから将来気候におけるさくら開花日を予測する。また、本調査では「そめいよしの」の開花を対象とし、以下で「さくら」という言葉についても「そめいよしの」を指すこととする。

#### (2) 予測シナリオ別の推定時別気温データ

開花予測の対象地点は、現在気象庁でさくらの開花・満開を長期間観測している 48 地点とする(図 2・3 参照)。

第 8 巻と第 9 巻の予測実験では水平解像度 5 km の地域気候モデルを用いている。なお、現在気候とは第 8 巻・第 9 巻ともに 1980~1999 年の計算結果となり、将来気候とは第 8 巻・第 9 巻ともに 2076~2095 年の計算結果となる。第 8 巻の予測実験で用いた温室効果ガス排出シナリオは比較的中庸な SRES-A1B シナリオである(図 1 参照)。一方、第 9 巻では、IPCC の温室効果ガス排出シナリオの中で最も高レベルの排出量となる RCP8.5 シナリオを用いている(図 1 参照)。

将来気候の日別の最高・最低気温データは、まず第 8 巻と第 9 巻の各予測実験で再現・予測された現在気候と将来気候の半月毎の(振興局、都道府県単位となる)領域平均気温差データから spline 補間により、日毎の気温差データを求めた。次に、前述の日毎の気温差データを各地点の日毎の平年値に加えて将来気候の気温データを算出した。本調査で用いる開花モデルでは時別気温データが必要になるが、これは、日別の最高・最低気温を用い、Parton et al. (1981)の正弦-指数モデルを適用して時別気温データを作成した。この正弦-指

数モデルは、日最高・最低気温、日の出・日の入時刻から毎日の気温の推移を推定するものである。

### (3) さくらの開花モデル

最初に、開花モデルで用いる指標、チルユニットと DTS について述べる。チルユニットは Richardson et al.(1974)によって提案された休眠打破のための温度指標である。DTS は温度変換日数のことで、ある温度における 1 日の植物の成長量が、特定の「標準温度」における成長量に換算すると何日分に相当するものなのかを比で表した指標である。例えば、ある日の日平均気温が  $T(K)$  の場合、標準温度  $T_S(K)$  での成長量を 1 とした場合の DTS は以下の式で表される。

$$DTS = \exp\left(\frac{E_a(T - T_S)}{RTT_S}\right)$$

ここで、 $E_a$  は温度特性値( $J \text{ mol}^{-1}$ )、 $R$  はモル気体定数( $8.314JK^{-1}mol^{-1}$ )である。次に、丸岡ら(2009)が作成した開花モデルの概要について述べる。まず、前年のチルユニット起算日からチルユニットを積算し、チルユニット積算値が閾値  $C1$  に達した日を DTS 第一起算日、閾値  $C2$  に達した日を DTS 第二起算日とする( $C1 < C2$ )。そして、DTS 第一起算日から DTS 第二起算日までを半休眠打破期、DTS 第二起算日以降を完全休眠打破期とした。休眠打破後は DTS を積算し、ある一定の DTS 積算値に達した日がその地点の予測開花日となる。半休眠打破期では、その時のチルユニット積算値に対応した重み付きの DTS を積算しており、暖地での早い時期からの成長を捉えることができるよう工夫してある。また、現実のさくらにおいても突然、全てのつぼみの休眠打破が完了するわけではなく、数週間かけて徐々に完了すると考えるのが自然であり、半休眠打破期を設けることで、より実態に近い成長を表せる。この開花モデルでは、全国一律に同じパラメータを仮定し、かつ気温のみで休眠打破の時期、及び開花日を予測した。パラメータは、過去の気温データを用いて各地点・各年で開花日を予想し、実際の開花日との RMSE が最小となるように調節している。パラメータや開花モデルの詳細については丸岡ら(2009)を参照されたい。

### (4) 開花モデルの再現性

将来気候の開花予測では、気候値(20年平均値)を用いるので、平年値と開花モデルを用いて算出・再現した開花日と現在の開花平年日とを比較した。図 2 に再現した開花日と開花平年日との差を示した。再現開花日と開花平年日の全地点 RMSE 平均は 1.77 日となり、開花モデルによって現在の気候の開花日を概ね表現できていると考える。対象地点が異なるので、単純な比較はできないが、丸岡ら(2009)の研究では RMSE 平均は 2.87 日であった。

### (5) 将来気候におけるさくら開花日の予測

図 3 に将来気候の気温データと開花モデルによって算出した各地点における予測開花日



を示す。図 4 には平年値及び各巻における年平均気温と開花日のグラフを示す。4 月 1 日の開花日線に注目して図 3 を見ると、図 2 に比べ、さくら開花日が遅くなる地点があることがわかる。そして、第 8 巻に比べ、第 9 巻では、開花はするが、年によっては満開しない地点が西日本を中心に増えることが確認でき、第 9 巻の、鹿児島と宮崎では開花しないことが予測された。ただし、この予測で用いたデータは気候値(20 年平均値)なので、現実の気温が与えるゆらぎ(年々変動)を考慮していないことに留意しなければならない。元々年平均気温が低い北日本では、東日本・西日本に比べて、将来気候における開花日の早まりが顕著で、開花平年日に比べて第 8 巻では 13 日程度、第 9 巻では 17 日程度早まる結果となった。次に、図 4 を見ると、年平均気温が 18℃を超える辺りから、開花日は早まる傾向は見られず、開花日のバラつきが大きくなり、開花日が遅くなる地点もあることが確認できる。開花が遅れることは、温暖化によって気温が上昇し、冬季に期待される休眠打破が遅れるためだと考えられる。このことは、年平均気温が 19℃を超える辺りから DTS 第二起算日が算出されない(完全休眠打破期が訪れないことを示す)地点が増加するという予測結果と整合的である(図 4 参照)。

#### (6) まとめ

開花日の再現性については、丸岡ら(2009)が作成した開花モデルによって、現在の気候の開花日を概ね再現できた。

将来気候におけるさくら開花日の予測では、元々年平均気温が低い北日本では、温暖化が進むと他の地域に比べて、開花日が早まる傾向が予測された。ただし、地球温暖化が進むと、単純にさくら開花時期が早まるわけではなく、年平均気温がある程度まで上昇すると、休眠を打破する十分な低温が得られないことにより、さくら開花日は早まらず、開花日のバラつきが大きくなり、開花が現在の開花平年日より遅くなる可能性も出てくる。更に、第 9 巻では開花しない地点が出現し、第 9 巻は第 8 巻に比べて、開花はするが、年によっては満開しない地点が増加する可能性があることが分かった。

本調査では、将来気候におけるさくら開花日の定量的な評価を行ったが、気候値を用いて予測したので、実際は年々変動によって開花日などが変化することに留意しなければならない。尚、丸岡ら(2009)はさくら開花の南限付近では、開花日の予測精度が悪くなることを指摘している。このため、休眠打破や開花の有無に関する植物学的なアプローチを含む開花モデルの改良が、今後の課題として残る。



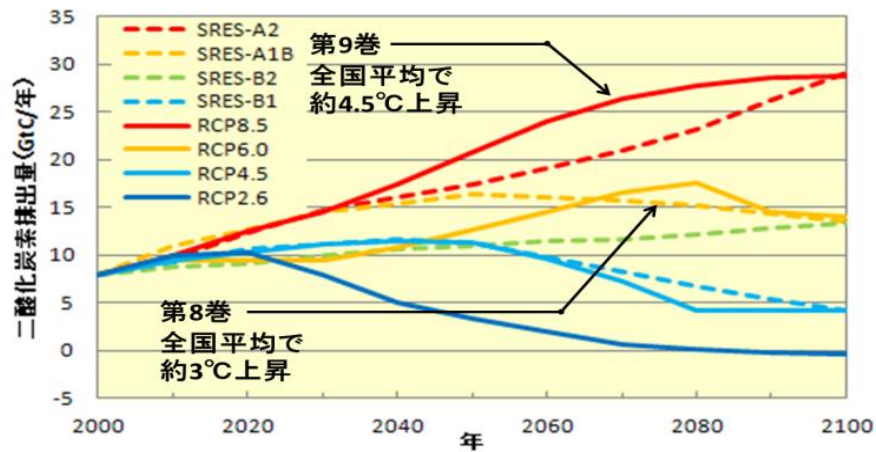


図1 SRES シナリオと RCP シナリオに基づく二酸化炭素排出量  
RCP シナリオを実線で、SRES シナリオを破線で示す。

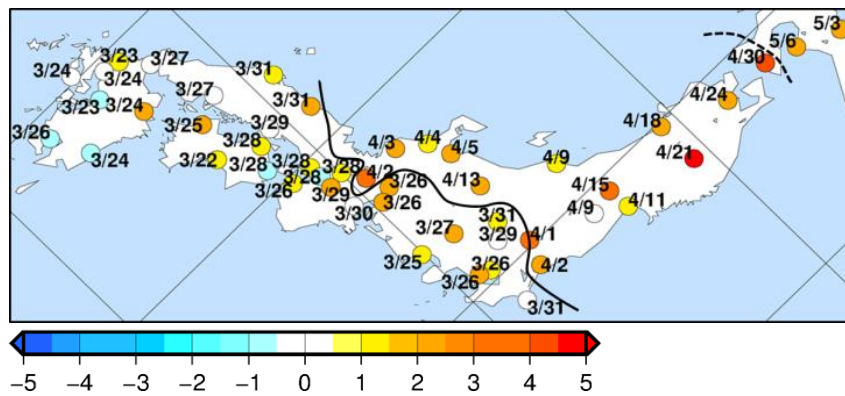


図2 各地点における開花平年日とモデルで再現した開花日の差  
スケールの単位は日。開花平年日と比べて暖色系は遅く、寒色系は早く再現したことを示す。また、実線は4月1日、破線は5月1日の開花日線を表す。

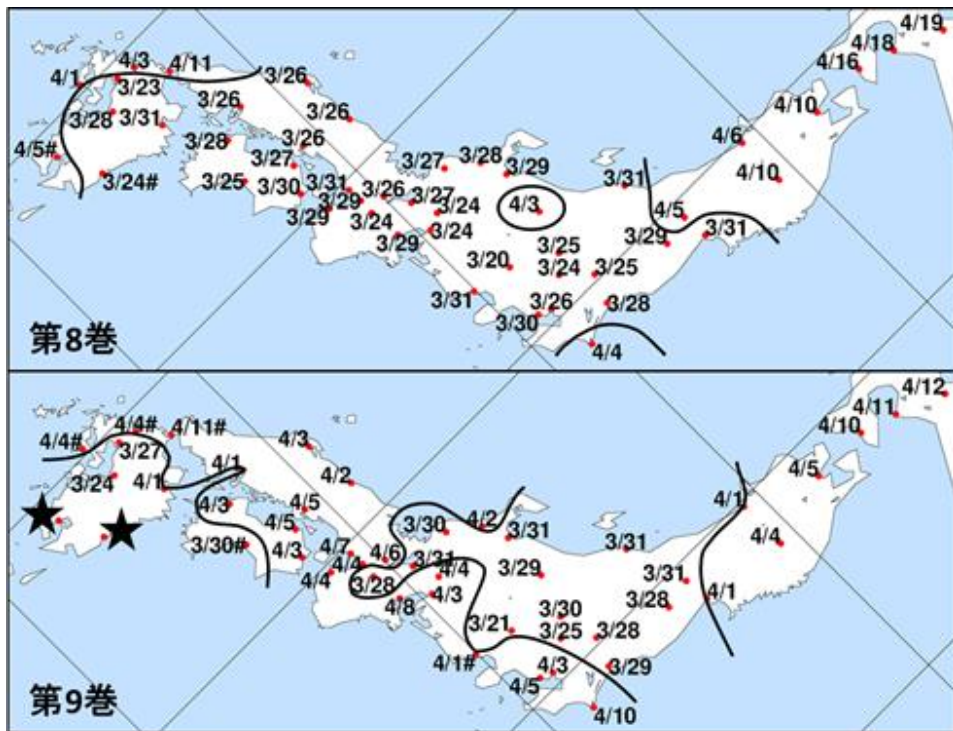


図3 第8巻(上図)と第9巻(下図)において予測した開花日  
 実線は4月1日の開花日を表す。また、『★』は開花しない地点を、月日の横に付されている『#』は開花するが、年によっては満開しない地点を表す。

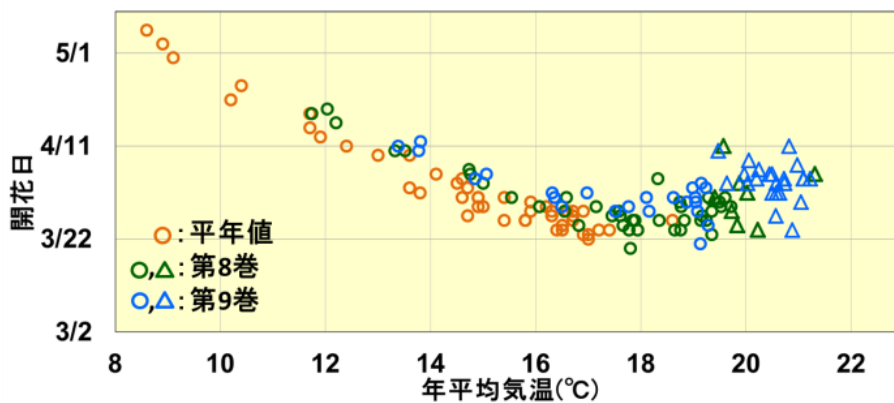


図4 平年値及び各巻における年平均気温と開花日の関係  
 △はDTS第二起算日が算出されなかった地点を表す。

### c)参考文献

気象庁,2013 : 地球温暖化予測情報第 8 巻.

気象庁,2017 : 地球温暖化予測情報第 9 巻.

気象庁,1996 : 「新しいサクラの開花予想」 解説資料第 24 号.

青野靖之と小元敬男,1990 : 「チルユニットを用いた温度変換日数によるソメイヨシノの開花日の推定」 農業気象,45,243-249.

青野靖之と守屋千晶,2003 : 「休眠解除を考慮したソメイヨシノの開花日推定モデルの一般化」 農業気象,59,165-177.

丸岡知浩と伊藤久徳,2009: 「わが国のサクラ(ソメイヨシノ)の開花に対する地球温暖化の影響」 農業気象,65(3),283-296.

斎藤平蔵,1974 : 「建築機構」 共立出版,pp.121-127.

Parton,W.J.,and Logan,J.A.,1981:A model for diurnal variation in soil and air temperature. Agric.Meteorol.,23,205-216.

Richardson,E.A.,Seeley,S.D.,and Walker,D.R.,1974:A model for estimating the completion of reset for 'Redhaven'and 'Elberta'peach trees.Hortsci.,9,331-33.

## 8. 2週間気温予報の紹介とガイダンスの活用について

宮脇祥一郎（気象庁気候情報課）

### a)要旨

気象庁では2019年6月頃から「2週間気温予報」を開始する予定である。ウェブサイトでは直近の実況から2週間先までの予測を一括表示し、気温の推移が時系列的に把握可能となる。また、2018年12月頃から先行して、この基礎資料である数値予報ガイダンスデータについて、ウェブサイトからの試行提供を予定している。

### b)本文

#### (1) 2週間気温予報について

気象庁では2019年6月頃から「2週間気温予報」を開始する予定である。気象庁では現在、概ね2週間先の、その時期として顕著な高温・低温が予測される場合に「異常天候早期警戒情報」をアラート情報として発表しているが、気温が“何℃”という値として表示される“予報”はこれまではなかった。2週間気温予報により2週間先までの気温が値として、時系列的に把握可能となる。また、予報の毎日更新や、これまでの平均気温に加え最高・最低気温への対応などの各種改善も行われる予定である。図1に現在と2019年6月以降の2週目の気温予報関連の比較図を示す。

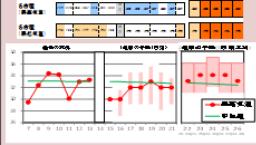

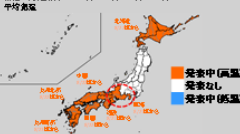
	現在（平成20年3月～）		2019年6月以降	
<b>予報</b>	なし		<b>2週間気温予報</b> (地域・地点) 	毎日 14時30分頃
予測データ (気象庁HP) ※確率予測資料 (ガイダンス)	<b>日平均気温</b> (7日移動平均)	毎週月・木曜日 9時30分頃	<b>日平均気温</b> <b>日最高気温</b> <b>日最低気温</b> (各5日移動平均)	毎日 9時30分頃 ※今冬から気象庁HPで 試験公開予定
<b>アラート 情報</b>	<b>異常天候 早期警戒情報</b> 	原則として 毎週月・木曜日 14時30分頃	<b>早期天候情報</b> 	原則として 毎週月・木曜日 14時30分頃

図1：2週目の気温予報の新旧比較図

新しいプロダクトである 2 週間気温予報について、一例として、業務実験用の開発版データを用いたシミュレーション（図 2）を示す。2 週間気温予報ウェブサイトでは、直近 1 週間の実況、週間天気予報の気温についても一括で表示する予定である。これにより、図 2 の事例では、目先の気温はかなり高くなるが、その後 2 週間先にかけては一転してかなり低くなるという推移が見て取れる。これにより、ユーザーは目先の高温には気を緩めず、その先の厳しい低温に備えることが可能となる。

平成30年01月15日14時30分発表 埼玉県2週間気温予報																																
1月		8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27											
		月	火	水	木	金	土	日	月	火	水	木	金	土	日	月	火	水	木	金	土	21	22	23	24	25						
		発表日														25	26	27	28	29												
熊谷 (最高気温[℃])	8.1	17.3	13.2	10.5	7.6	7.3	8.9	発表日	14	12	16	12	10	12	8	9	8	8	8	8	21	22	23	24	25							
熊谷 (最低気温[℃])	0.9	4.0	-0.9	-1.1	-4.6	-5.0	-0.7	発表日	0	1	5	1	-1	0	0	0	-1	-2	-2	-1	25	26	27	28	29							

図 2：2 週間気温予報のシミュレーション（2018 年 1 月の熊谷）

(2) 2 週間気温予報関連プロダクト

2 週間気温予報の関連プロダクトは、以下、

- ① 2 週間アンサンブル数値予報モデル
- ② 2 週間気温予報ガイダンス
- ③ 2 週間気温予報
- ④ 早期天候情報

の 4 つがある。①②については、現在、気象業務支援センターから試験的に提供されており、詳細については、配信資料に関する技術情報（参考文献[1][2]）を参考にしていきたい。また、②については 2018 年 12 月頃よりウェブサイト経由でも試行提供を予定している。③④については、ウェブサイトからの情報提供並びに関連電文データの配信（参考文献[2]）を、2019 年 6 月頃から予定している。

想定しているユーザー層は、①は気象事業者やプロダクト開発者、研究者、②は農業モデル等の入力データとして気温の数値データが必要なデータ利用者向け、③は暮らしの情報として一般の方、気温の値に影響を受けるビジネスパーソン等、である。④については、現在の「異常天候早期警戒情報」と同様のもので、アラート情報として広く一般への周知を目的としている。

①②についてはコンピュータープログラムにより自動作成される。③については②をもとに数値予報モデルの特性等を踏まえ検討し、必要な場合は予報担当者による修正を加えて発表されるものである。④は③に基づき、平年と比較し著しい高温・低温が予想される場合に発表される。

### (3) ガイダンスの活用について

現在、「異常天候早期警戒情報」と「1 か月予報」のガイダンス（確率予測資料）をウェブサイトより提供している（参考文献[3]）。ガイダンスは、数値予報モデルの格子点値を、統計処理等により特定の観測地点や地域平均のデータに翻訳したプロダクトであり、数値予報モデルの系統的な誤差が取り除かれ、誤差情報（予測の幅）も最適化されている。データは CSV 形式ファイルで取得でき、ファイルには 0.1℃単位の累積確率値として気温予測データが格納されており、表計算ソフト等を利用した数値的な利用に適している。

ガイダンスデータは全国の農業・水産分野で、栽培管理情報を作成するための入力用データとして活用されている。現在確認されている活用事例について図 3 に示す。


作物	項目	具体的な情報参考例
 水稻	冷害・高温障害対策	農研機構 東北農研センター 栽培管理のためのメッシュ情報 <a href="http://www.data.jma.go.jp/qmsd/risk/taio_suitou.html">http://www.data.jma.go.jp/qmsd/risk/taio_suitou.html</a>
	収穫適期予測	山形県 おきたま米づくり情報（H26・・・）※ <a href="http://www.data.jma.go.jp/qmsd/risk/taio_kensho.html">http://www.data.jma.go.jp/qmsd/risk/taio_kensho.html</a>
		香川県 「おいでまい」通信（H28・・・）
新潟県 稲作技術情報（H28・・・）		
 小麦	開花日予測	農研機構 西日本農研センター リアルタイムアメダスを用いた麦の発育ステージ予測 <a href="http://www.data.jma.go.jp/qmsd/risk/taio_komuqi.html">http://www.data.jma.go.jp/qmsd/risk/taio_komuqi.html</a>
 果樹	モモの開花日予測	山梨県 モモの開花予想と開花日（H29・・・）
 病害虫	発生予察	沖縄県 技術情報カンシャコバナネナガカメムシ（ガイダー）の防除適期について（H26・・・）
その他	農業気象メッシュ情報	農研機構 栽培管理支援システム <a href="https://amu.rd.naro.go.jp/">https://amu.rd.naro.go.jp/</a> <a href="https://www.maqis.jp/">https://www.maqis.jp/</a>
 ワカメ	水産 養殖関連情報	宮城県 養殖通報（H26・・・）
ノリ		有明海（福岡県、佐賀県）情報等（H28・・・）
 ホタテ		サロマ湖養殖漁業協同組合 養殖漁業（H28・・・）

図 3：農業・水産分野での活用事例

(1 か月予報・異常天候早期警戒情報ガイダンスを利用した例)

前セクションの通り、2 週間気温予報ガイダンスについても、2018 年 12 月頃よりウェブサイトから試行提供予定である（図 4）。本サイトからは、全国 151 地点、24 地域の予測データが CSV 形式ファイルで取得可能である。本サイトを公開する際は、気候リスク管理ポータルサイト（参考文献[4]）よりリンクを掲載する予定である。

なお、2 週間気温予報の開始に伴い、異常天候早期警戒情報のガイダンスについては、2020 年 6 月頃に提供を終了する予定である。当該データの利用者においては、それまでに、より新しいデータである 2 週間気温予報ガイダンスへの移行をお願いしたい。

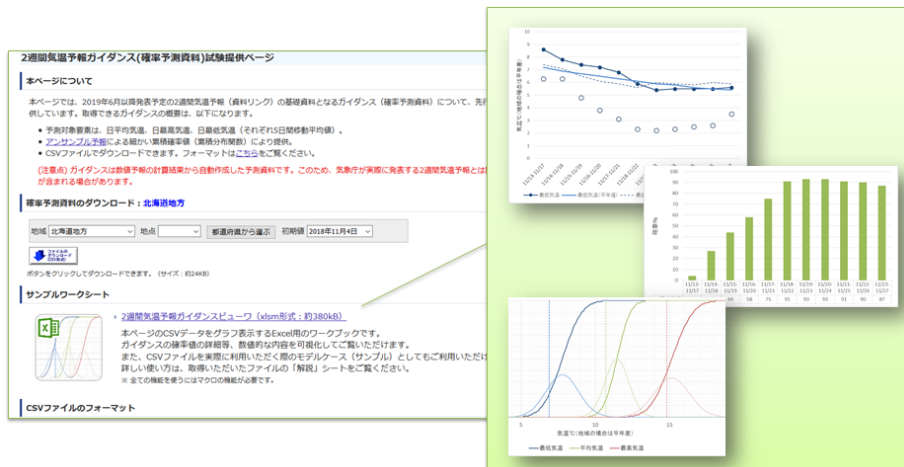


図 4 : 2 週間気温予報ガイダンス取得ウェブサイト (開発中イメージ)

### c)参考文献

- [1] 気象庁地球環境・海洋部,2018 : 配信資料に関する技術情報 第 495 号 ～2 週間気温予報及び早期天候情報に関連する格子点形式データ配信等について～  
<https://www.data.jma.go.jp/add/suishin/jyouhou/pdf/495.pdf>  
 (2018 年 12 月閲覧確認)
- [2] 気象庁地球環境・海洋部,2018 : 配信資料に関する技術情報 第 499 号 ～2 週間気温予報等の電文と数値予報ガイダンスの提供開始等について～  
<https://www.data.jma.go.jp/add/suishin/jyouhou/pdf/499.pdf>  
 (2018 年 12 月閲覧確認)
- [3] 気象庁ウェブサイト : 各種予測資料 (異常天候早期警戒情報・1 か月予報)  
<https://www.data.jma.go.jp/risk/probability/>  
 (2018 年 12 月閲覧確認)
- [4] 気象庁ウェブサイト : 気象情報を活用して気候の影響を軽減してみませんか? (気候リスク管理ポータルサイト)  
<https://www.data.jma.go.jp/risk/>  
 (2018 年 12 月閲覧確認)



## 9. 結露対応版イネ葉面濡れ確率予報に向けた気象庁週間アンサンブルダウンスケーリング予報実験 池田翔・山崎剛（東北大）、菅野洋光・大久保さゆり（農研機構）

### a)要旨

本研究では、①東北地方の相対湿度を対象としたメソアンサンブル週間予報（7日予報）、②宮城県内の試験圃場を対象としたイネ葉面濡れ予報について、実験期間を2015年6-8月とし、確率的な検証を行った。

### b)本文

#### (1) はじめに

気象庁は、「確率予報の強化」、「気象データの利活用」などの「生産・流通計画の最適化等に役立つ高精度な気象・気候予測の実現」にむけ取り組んでいる[1]。いもち病の感染には適温と葉面の持続した濡れが必要であり、それらを把握することで、適切な薬剤の散布が可能になる[2]。梅雨前線・ヤマセによる降水に加え、早朝の葉面結露でも感染の可能性がある[3]。病気の発生予測には、時別気象データが必要で、非常に気象に敏感である[4]。近年の自然志向の高まりとともに農薬の使用回数も制限されることが多く、効果的な薬剤散布が求められ[4]、気象予報データによる適期防除が必要となる。ヤマセ・梅雨が遅延する温暖化予測[5][6]もあり、作物体の濡れによる病害発生リスクには今後も注意が必要である。病害発生時は必ずしも冷害をもたらすほどの低温であるとは限らず[7]、温暖化でいもち病害が増える予測もある[8]。アンサンブル予報を用いたBLASTAM予報実験[9]は行われているが、結露には未対応であることが問題となる。BLASTAM濡れ判定の解決策として、湿度法や陸面過程モデル(物理モデル)による葉面濡れ推定手法の導入が考えられる[7]。

#### (2) 方法

気象庁週間アンサンブル予報システム(JMA-WEPS)を初期値・境界値とし、気象庁非静力学モデル(JMA-NHM)を用いて、東北地方を対象に水平解像度5kmで27メンバーのダウンスケーリングを行った。JMA-NHMで出力された気象予報データを利用し、湿度法(相対湿度89%以上で濡れと推定)[2]、または陸面過程モデル[10]を用いて、イネ葉面濡れ確率予報を行った。検証には、①気象官署の相対湿度データ、②水田観測した葉面濡れセンサーを用いた。

#### (3) 結果と考察

##### ①相対湿度を対象としたメソアンサンブル週間予報

27メンバーそれぞれにバイアス補正を施し、ランダムエラーによる予測誤差をブライアスキルスコア(BSS)を用いて検証した(図1)。図1(a)は、全事例日(92初期値)に対するBSSで、概ね1週間程度は確率予報が気候値予報に対し有効であることを示す。なお、



スプレッドスキルの関係は、1日予報は0.2弱、それ以降は0.4~0.6程度であった(図1(b))。図1(c)、(d)はそれぞれ降水日、非降水日に対するBSSであり、降水日は4日先予報まで、非降水日は7日先予報にかけて確率予報が有効であることを示す。

#### ②宮城県内の試験圃場を対象としたイネ葉面濡れ確率予報

27メンバーをバイアス補正して得られた確率を用いて湿度法により葉面濡れ確率予報を行い、Reliabilityダイアグラムを用いて濡れ予報信頼度をみたところ、濡れ推定の手法にドライバイアスがあった(図略)。その原因について、全球解析値をダウンスケーリングしたところ、相対湿度の日較差の大きい内陸・山地では日中に葉面濡れを捕捉しづらく、陸面過程モデルを用いることで朝の葉面濡れ継続時間の再現・予報に有利と考えられる(図2、3)。確率予報においても、陸面過程モデルを用いることでROC面積が大きく、期間を通して高い検出力が得られた(図略)。

#### (4) まとめ

時別相対湿度に対するメソアンサンブル週間予報の予測可能性は、降水日は4日先予報まで、非降水日は7日先予報にかけて、気候値予報に対して確率予報が有効だった。陸面過程モデルを用いることで、湿度法が苦手とする、朝の濡れ継続時間の再現・予報に有利と考えられる。結露への解決策として、湿度法または2LM法による、結露対応版の確率濡れ予報が提案できた。今後、農業分野と連携した「結露対応版BLASTAM2」が期待されると考えられる。

#### c)参考文献

- [1] 気象庁, 2018, 平成30年報道発表資料.
- [2] 菅野ほか, 2018, 日本地理学会発表要旨集.
- [3] 越水, 1988, 東北農業試験場研究報告.
- [4] 菅野ほか, 2010, 天気.
- [5] Endo, 2012, *J. Meteor. Soc. Japan*.
- [6] Kitoh and Uchiyama, 2006, *J. Meteor. Soc. Japan*.
- [7] 大久保ほか, 2015, 天気.
- [8] 北海道立総合研究機構農業研究本部中央農業試験場, 2011, 北海道立総合研究機構農業試験場資料第39号.
- [9] 紺野ほか, 2015, 天気.
- [10] Yamazaki et al., 2004, *J. Hydrometeor.*

謝辞: 本研究の一部は、内閣府戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「次世代農林水産業創造技術」(管理法人: 生研支援センター)によって実施されました。

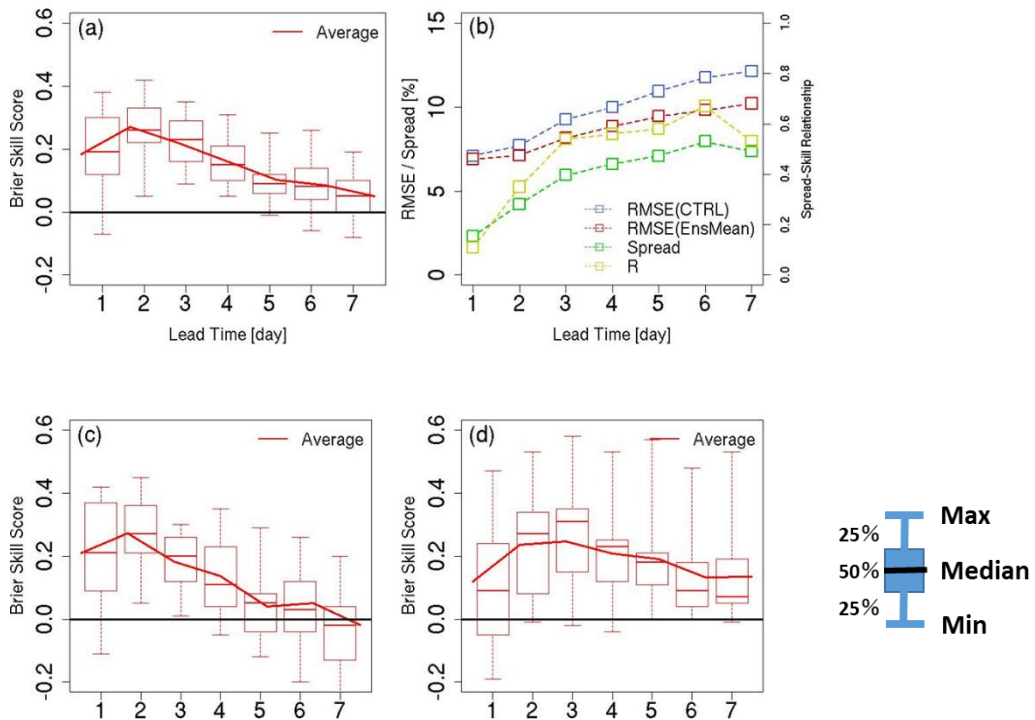


図1. ブライアスキルスコアとスプレッドスキルの関係  
 (a) 全事例日 (92 初期値) (b) スプレッドスキルの関係 (c) 降水日 (d) 非降水日

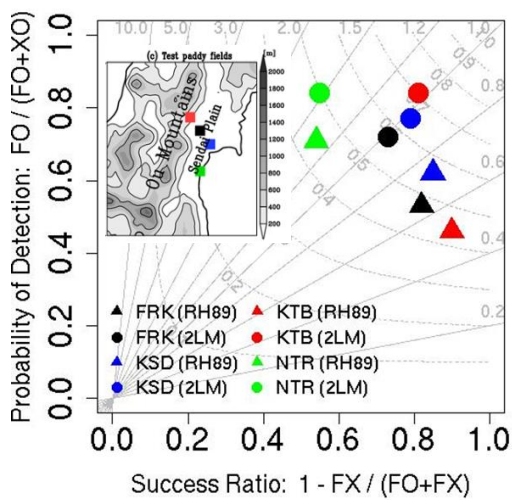


図2. POD-SR ダイアグラム  
 横軸：1-(空振り率) 縦軸：捕捉率  
 直線：頻度バイアス  
 曲線：スレットスコア  
 RH89：湿度法 2LM：陸面過程モデル  
 FRK：古川農試 KTB：川渡  
 KSD：鹿島台 NTR：名取

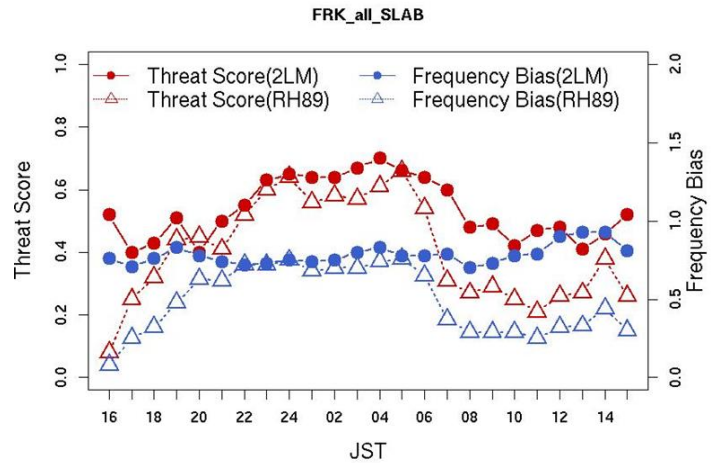



図3. 葉面濡れの時系列スコア (古川農試)  
 右軸：頻度バイアス  $FB = (FO+FX) / (FO+XO)$   
 左軸：スレットスコア  $TS = FO / (FO+FX+XO)$

contingency table	濡れ再現	
	あり	なし
2×2		
	あり	FO
	なし	FX
		XO
		XX

## 10. 区内気象観測データを利用した長期気候変動データセットの作成

石郷岡康史（農研機構・農業環境変動研究センター）

### a)要旨

農業気候変動研究に利用可能な長期気温変動データを構築することを目的として、AMeDAS 観測点設置以前に委託観測を行っていた区内気象観測データの電子化を進めている。今回は、区内気象観測地点のメタ情報を収集し、AMeDAS 観測地点との接続のための基準を設定し、農耕地長期モニタリング地点の候補を抽出した。今後、日界や統計方法の違いが統計値に与える影響を明らかにし、接続の際の補正方法について検討する。

### b)本文

#### (1) 背景と目的

将来予測される気候変化が作物生産に及ぼす影響を適切に評価するためには、過去に観測された気候変動により実際に生じた作物生産への影響の事例を詳細に把握しておくことが重要である。そのためには、対象とする農耕地を代表する、長期にわたり周辺観測環境の変化の影響を受けない均質な気象データが必要不可欠である。気象庁（前身を含む）で実施している気象観測施設としては、地上気象観測（官署）と地域気象観測（AMeDAS）があるが、官署は観測期間が100年以上長いが設置地点が都市や海岸に偏っており、またAMeDASは地点数が930地点と多いが観測期間が1970年代後半からと限られている。一方、AMeDAS設置以前には、多地点で委託による簡易気象観測が行われており（区内気象観測）、これらをAMeDAS観測と接続できれば農耕地を代表する長期で均質な気象データが得られると期待できる。今回は、区内気象観測地点とAMeDAS地点との接続のための基準を設定し、農耕地長期気候モニタリング地点の候補を抽出することを目的とする。

#### (2) 手順

区内気象観測所は気象庁所管の観測所であり、自治体や学校等の公的機関や個人に観測業務を委託した簡易な観測所である（気象庁，1975）。観測データは冊子や画像の状態で保管されており、デジタル化は降水量を除いて殆ど実施されていない（藤部ら，2008）。また、観測地点のメタ情報（名称、位置（住所、緯度経度）、ID、種別、観測期間、土地利用、等）も系統的に整備されていない。今回、AMeDAS地点との接続による長期モニタリング地点候補抽出のため、都道府県別の年報等冊子資料から、区内観測地点に関する上記メタ情報を入手し、データベース化した。

区内気象観測所および接続するAMeDAS観測所について、地点周辺の都市化や農耕地代表性を定量化するため、国土数値情報（国土交通省）の土地利用細分メッシュデータ（約100m空間解像度）を使用し、観測地点周辺の都市化の度合いや、各土地利用の面積割合から、以下の基準により、接続可能地点を判断した。

- ①  $r_0=0.3\text{km}$  とした UI (以下、UI0.3) の値の差が 30 未満
- ② 半径 0.5km 以内の農耕地 (水田およびその他農用地の合計) の割合の差が 30%未満
- ③ 半径 5km 以内の水域 (海洋、湖沼、河川の合計) の割合の差が 30%未満

ここで、UI (Urban Index) は、周辺の都市化の度合いを表す指標であり、都市化によるローカルな気象への影響を表す指標としての有効性が示されている (村上ら, 2011)。

$$UI = \sum_i(w_i \cdot u_i \cdot a_i) / \sum_i(w_i \cdot a_i) \quad (1)$$

$$w_i = \exp[-(r_i/r_0)^2] \quad (2)$$

但し、 $u_i$ : メッシュの都市域割合、 $a_i$ : メッシュ面積、 $r_i$ : 観測点からメッシュ中心までの距離、 $r_0$ : 距離パラメータである (ここでは 0.3 とした)。

### (3) 結果

位置情報が得られた区内気象観測所約 1600 地点のうち、280 地点が AMeDAS 観測所との接続が可能と判断された。図は、抽出された地点の分布を示したものであり、各プロットは当該地点の周辺農耕地面積に応じて色分けして表した。接続可能地点は、地域やさらに都道府県により偏り見られ、特に東海地方から紀伊半島にかけてと山陰地方沿岸、九州の内陸でやや少ない。また、周辺農耕地面積の値が一定値以上の地点にも偏在が見られ、農耕地長期モニタリング候補地点の選定が困難な都道府県も多くみられる (南関東、北陸、山陰等)。しかしながら、気候区分ごとに幾つかの地点を選択することは十分可能と推察された。各年の地点情報等観測方法や統計方法も AMeDAS 観測システムとは異なるため、これらを接続するためには各種の補正が必要となる。

### c)参考文献

- 気象庁, 1975: 区内気象観測. 気象百年史, 気象庁, 299-301.
- 藤部文昭・松本淳・小林健二, 2008: 区内観測による日降水量データのデジタル化と気候研究への利用における問題点, 天気 55(4), 283-287.
- 村上雅則・桑形恒男・石郷岡康史・西森基貴, 2011: 農耕地モニタリング地点の選定とその気温変化傾向に関する地域的な特性, 生物と気象, 11, 41-50.

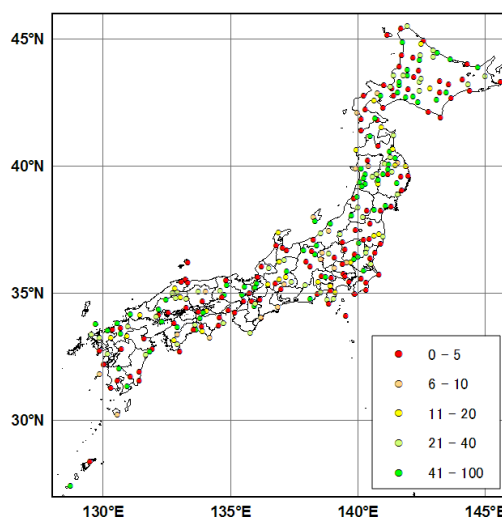


図 区内気象観測点-AMeDAS 統合可能地点の分布 (移行時の地点移動や周辺土地利用変化より判断)。シンボルの色は、2006 年版土地利用データに基づく観測地点周辺農耕地面積割合を表す。

## 1 1. リンゴ生育モデルによる生育予測と外し事例の気象要因調査

眞崎良光 (弘前大学)

### a)要旨

リンゴ栽培における気候変動影響評価のため、利用を検討しているリンゴの生育モデルについて、新しく提唱されたモデルの精度を確認するとともに、さらなる精度向上の余地を探究した。

### b)本文

#### (1) 背景・方法

リンゴは、東北の厳寒にも耐えて冬を越すものの、春の新芽や花蕾は耐寒性が弱く、春先に低温に見舞われると凍霜害を受けることがある。温暖化により、同じ暦日の気温は現在よりも将来の方が高くなる傾向があるため、直感的には凍霜害が減ることが想起される。しかし、同時にリンゴの生育が早まるため、同じ生育ステージに現在より早い暦日で達することになる。つまり、将来の凍霜害リスクの評価は、現在より早い暦日における低温遭遇の存否を検討しなければならない。与えられた気象条件で生育ステージを推定するには、その品種に合った生育モデルを用いる必要がある。今回、新たに開発されたリンゴ生育モデルを用いて、その精度を確認した。

伊藤 (2018) が開発した生育モデルは、気象条件 (気温) に応じて生育速度が決まる、DVI を用いたリンゴ ‘ふじ’ のプロセスモデルである。リンゴは冬季に休眠するため、冬季に一定規模の冷涼条件に置かれないと、温暖な春先に生育が順調に進まなくなる。このモデルでも休眠を考慮し、必要な冷涼条件が満たされたか判定した上で、春先の気温上昇とともに生育が進み、発芽日や開花日を予測する構造となっている。

#### (2) 結果・展望

北東北で過去に観測されたリンゴ ‘ふじ’ の発芽日や開花日は、各年の気象条件によって大きく変動し、過去 40 年間程度における最早年と最遅年とでは 30 日弱も異なる。本モデルは、このような年々変動を精度良く表現している。なお、モデルの生育は実際の生育より若干早めになるバイアスを持っている。今回の解析では、伊藤 (2018) が提唱した 4 通りのパラメータセットの一つ (④) を用いたが、同氏は暫定的ながら③のパラメータセットが最適と考えている。提唱された別のパラメータセットを用いることで、本結果より良好な結果が得られる可能性があり、さらに追試を進めていきたい。

複数の地点に共通して誤差が大きかった年を調査した。これらの年では発芽日・開花日いずれも観測に比べてモデルの方がかなり早い傾向を示し、発芽日推定の大きな誤差が開花日の推定誤差に伝播したことが疑われる。

果樹に関する温暖化の影響評価に対する需要は、今後増すものと予想される。現在、

DVI を用いたリンゴの生育モデルは、最主力品種の‘ふじ’を対象にしたものだけである。国内では様々な品種が栽培されており、品種によって生育速度が異なることから、全般的な影響評価のためには、他品種も含めた生育モデルの構築が望まれる。

**c)参考文献**

伊藤大雄, 2018: 広域に適用できるリンゴ‘ふじ’の発芽・開花予測モデルの開発, 2018年度日本農業気象学会東北支部大会 (東北の農業気象, (63), 印刷中)

1 2. 気象データの EMS 分野との連携研究 ―CREST HARPS の取り組み―  
大竹秀明 (国立研究開発法人 産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター)

a)要旨

本稿では気象観測・予測技術の電力・エネルギー分野への応用について、JST CREST EMS 事業の中で HARPS グループが進めている研究について紹介する。

b)本文

(1) 気象データの利用用途

今後、再生可能エネルギーが大量に普及するにつれて、生成されたエネルギーをどのように活用するかが将来の課題となっている。2018 年 10 月には九州電力エリアにおいては、太陽光発電や風力発電によって生成されたエネルギーは電力需要を上回ることも発生している。図 1 にエネルギーネットワークのイメージを示す。再生可能エネルギーによって生成したエネルギーを蓄電池や今後普及するであろう電気自動車 (EV) にも蓄電することで、有効に自家消費を行い、化石燃料の代わりとして活用することで、CO<sub>2</sub>削減の効果も期待される。蓄電池を電力系統に接続することで自然災害時や必要な電力を一時的に供給することも可能であり、EV からの電力供給も災害普及時に役立つ可能性もある。本稿では、再生可能エネルギーの大量普及時の気象データの EMS 分野での利活用の可能性と、CREST HARPS 研究での取り組みの成果、及びシステム構築の現状について述べる。



図 1.エネルギーネットワークのイメージ

### ( i ) 火力発電

現在国内の電力供給の多くを火力発電機に依っているところが多いが、今後太陽光発電システムの大量導入時には、太陽光発電による出力が大きい場合は火力発電機の出力を絞り、また、太陽光発電による出力が小さい場合は火力発電機の出力を上げる必要がある。火力発電機は短時間に起動することが難しいため、前日の夕方までに翌日の火力発電の運転計画を決めることになっている。そのため、翌日の日射量（太陽光発電による発電電力量）がどの程度期待されるか、気象予報をベースとした情報提供はますます重要となってきた。予測誤差はあるものの、翌日の予測のため、39 時間先までの予測が可能な気象庁メソモデルの予測データは有効に使えると見込まれる。

### ( ii ) 揚水発電

揚水発電所は太陽光発電の出力が多くなった場合には揚水運転を行い、電力を位置エネルギーの形で保持し、出力が少ない場合には上池から下池に水を落として発電する。この場合も、太陽光発電の出力が多くなるかどうかの予測情報が揚水発電所の運転のために必要となる。揚水発電所の運用は 1 週間の間で上池と下池間の水の量の管理・計画を行うことから、週間予報情報の利用も今後期待される。

### ( iii ) 蓄電池・EV

現在は、蓄電池や EV の普及はそれほど多くはないものの、太陽光発電が今後大量に普及すると同時に、また蓄電池や EV の価格が下がってきた場合には、それらを組み合わせた運用も考えられる。EV は動くバッテリーとも言える。揚水発電所の運用と同様に、太陽光発電が期待される場合には充電し、夜間や翌日の天候が悪化した場合に備えて利用することも可能であろう。翌日が快晴であると事前にわかれば、その前に積極的に蓄電池からの発電エネルギーを活用することも考えられる。蓄電池の容量を管理する上でも気象予報データは重要となる。

## ( 2 ) CREST HARPS 研究での予測の活用例

本節では、HARPS における気象データの利活用の例を 2 つ紹介し、また実施しているシステム構築の内容についても解説する。

### ( i ) 蓄電池運用

Udawalpola et al., (2018)の研究では、太陽光発電が大量の導入された状況下における電力需給時の火力発電機の運転計画と蓄電池の導入の供給電力の変化について分析を数値シミュレーションを通して行っている。太陽光発電の出力予測について、気象予報データを利用して組み合わせることで、日中に蓄電池が利用できる場合には、太陽光発電の出力を蓄電池に充電し、夜間や朝方の需要が高まる時間帯に放電することで活用することができる。そ



の場合、燃料費の高い火力発電機の運転も減らすことが期待できるため、燃料費コストの低減にもつながる可能性がある。

#### ( ii ) 送電線の設備管理

送電設備の設計段階にも気象データを活用している (Sugihara et al. 2017)。送電設備の設計には、送電容量を計算する際に気象環境の最悪事例を想定して検討を行っている。これは、送電線に電流が流れる際に、送電温度が上昇しすぎないように、送電線に流せる電力量や熱容量をあらかじめ決めて設計を行なう必要があるためである。そこでは、最高気温 (国内では 40 度)、弱風時、日射量が 1kW 程度など場合を想定している。風速は熱を輸送するために、送電線の温度を下げる方向に働くため、送電線の温度上昇を防ぐ役割がある。将来温暖化した場合を想定すると、最高気温 40 度の温度想定は、もはややや過小に見積もられている状況になっている。温暖化時の最高気温シナリオなどの数値データを組み合わせた、送電設備の再設計も必要となろう。

#### ( iii ) システム構築

JST CREST HARPS では、各専門分野の研究者間で気象予測データや気象衛星から推定された日射量データなどを利活用するために、気象データ提供システム (HARPS FORECAST、図 2) と気象データの可視化システム (HARPS OASIS、図 3) を構築している。HARPS OASIS は、すでに一般に公開され利用可能であるが、FORECAST システムは現在、HARPS グループ内の利用に留まっている。

FORECAST システムでは、特定非営利活動法人 太陽放射コンソーシアムから提供されている気象衛星ひまわり 8 号から推定した地上の日射量データ (AMATERASS データ) と気象庁現業予報モデル (GSM, MSM, LFM) の気象予報パラメータをダウンロードすることができる。多くの分野では MATLAB によるシミュレーションツールを利用しているため、CSV 形式のデータに変換し、多くのユーザーが使いやすい形でデータのダウンロードが行えるように設計されている。また、地域を選択するときには、市町村や県別、電力エリア毎などのようにエリアを視覚的に複数選択・確認することも工夫されている。

OASIS システムでは、気象衛星ひまわり 8 号の可視画像に加え、AMATERASS データの実測データ (図 3a)、MSM による日射量の予測データ (2016 年度分を 2018 年 12 月現在整備済み) を可視化し (図 3b)、アーカイブしている。太陽光発電システムの出力予測では、どの程度の予測誤差があるか、地域的な違いなども重要になってくるため、AMATERASS データと MSM 日射量予測値の差分値もプロットすることが可能であるため (図略)、日射量予測の誤差分布を面的に表示させ、研究者間の議論の足掛かりを提供している。

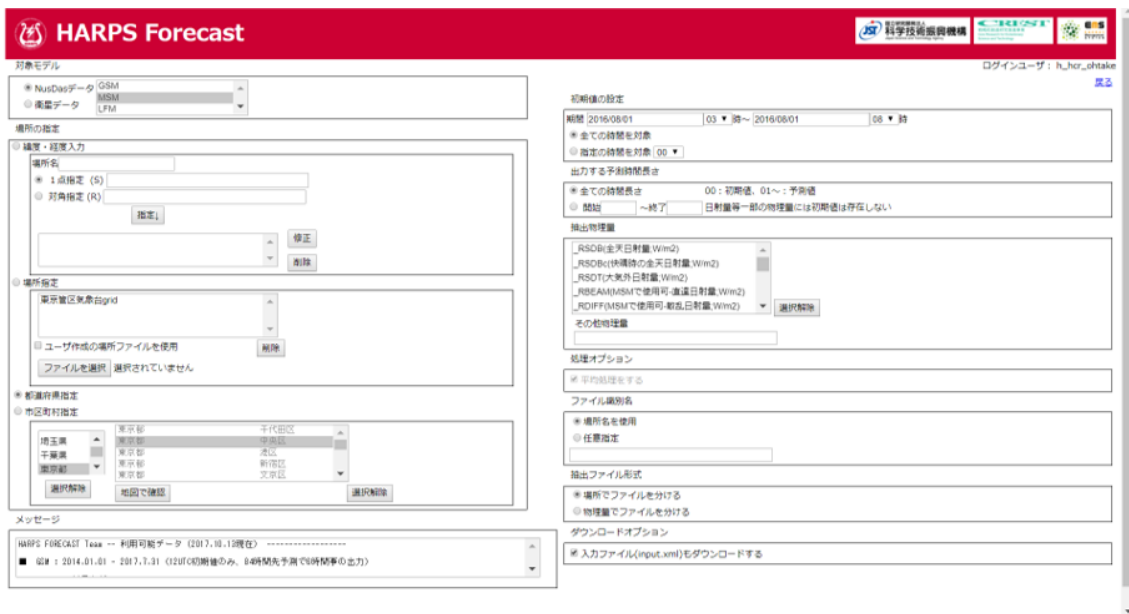
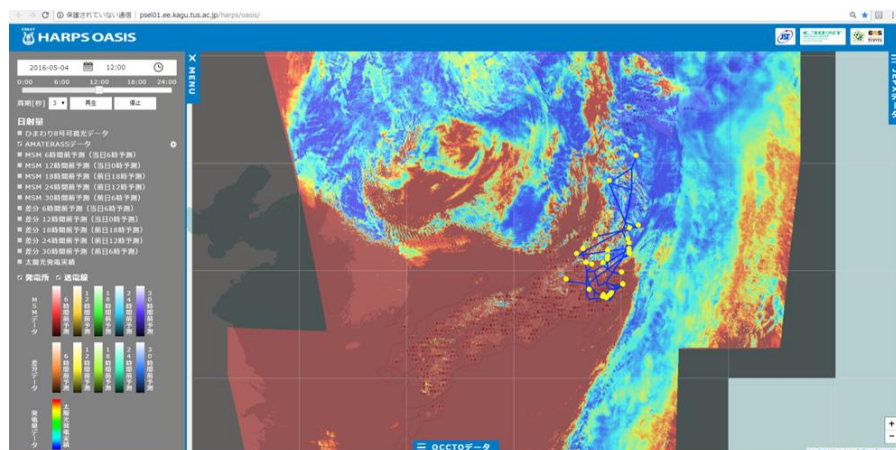


図 2 HARPS FORECAST

(a) 衛星から  
推定日射量  
(AMATERASS)



(b) MSM  
24時間前予測

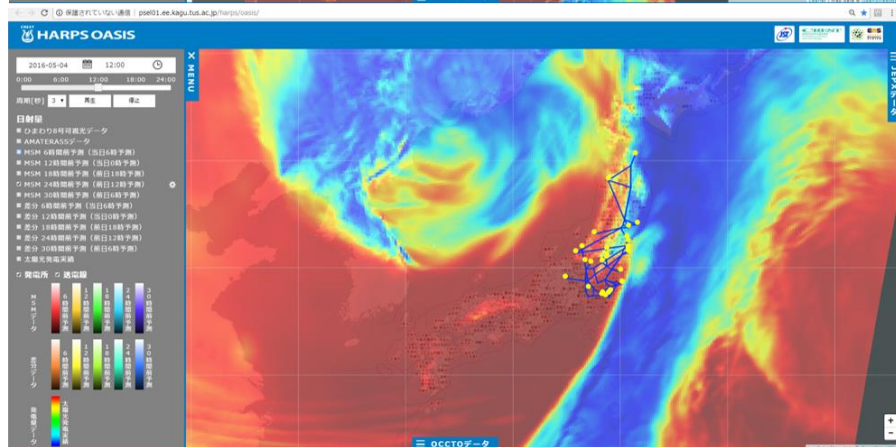


図 3 HARPS OASIS による (a) 日射量推定値と(b)気象庁 MSM による予測の比較例

### (3) まとめ

JST CREST HARPS においては、太陽光発電が大量に普及した将来を見据えて、気象予報を活用した太陽光発電の有効利用、あらゆる電力機器などネットワークに接続して制御する将来の在り方を数値シミュレーションや理論的な分析を含めて研究を行っている。気象データを電力システム、電力需要、送電・配電、制御理論、数理科学などの各分野の専門家に提供し、分析・議論をすることで、気象データの新たな価値を見出すことにもつながり始めている。これまで、天気予報、防災情報を中心に利活用されてきた気象データの新たな応用先が徐々に広がりつつある。

### 謝辞

本研究は、JST CREST「分散協調型エネルギー管理システム構築のための理論及び基盤技術の創出と融合展開」(研究総括 東京工業大学工学院 藤田 政之教授)の「太陽光発電予測に基づく調和型電力系統制御のためのシステム理論構築(HARPS)」(研究代表者 東京工業大学大学院情報理工学研究科 井村 順一教授, グラント番号 JPMJCR15K1)の一部として実施された。

### c)参考文献

- 特定非営利活動法人 太陽放射コンソーシアム ホームページ, <http://amaterass.org/>  
(2018年12月13日閲覧確認)
- HARPS OASIS システム <http://psel01.ee.kagu.tus.ac.jp/harps/oasis/> (2018年12月13日閲覧確認)
- JST CREST EMS「分散協調型エネルギー管理システム構築のための理論及び基盤技術の創出と融合展開」,  
[https://www.jst.go.jp/kisoken/crest/research\\_area/ongoing/bunyah24-1.html](https://www.jst.go.jp/kisoken/crest/research_area/ongoing/bunyah24-1.html)  
(2018年12月13日閲覧確認)
- JST CREST HARPS「太陽光発電予測に基づく調和型電力系統制御のためのシステム理論構築」, <http://harps-crest.jpn.org/> (2018年12月13日閲覧確認)
- Sugihara et al. (2017): Evaluation Method for Real-Time Dynamic Line Ratings Based on Line Current Variation Model for Representing Forecast Error of Intermittent Renewable Generation, *Energies*, Vol. 10, 4, pp.1-16.
- Udawalpola, R., Taisuke Masuta, T., Ohtake, H, Fonseca Jr., 2018, Demand and Supply Operations of Power Systems with Battery Energy Storage System Using Photovoltaic Forecasting with Prediction Intervals, 2018 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST), DOI: 10.1109/SEST.2018.8495857

### 1.3. 日本域を対象とした長期領域再解析に向けた取り組み

福井真 (東北大学)

#### a)要旨

日本域を対象とした長期領域再解析の実施に向けたシステム構築を進めている。その一環として、気象庁 55 年長期再解析を境界条件として与えた水平格子間隔 5km の気象庁非静力学モデルに従来型観測のみを同化する実験を行い、その有効性について調査した。同化をしない場合、積分時間が長いと実況から場の乖離がみられ、積分時間が短いと不十分なスピニングに伴い降水量が過小であったが、領域再解析では、観測の同化により実況からの乖離の問題を、第一推定値として前の結果を引き継ぐことでスピニングの問題を軽減することを確認した。

#### b)本文

長期領域再解析データは、過去のメソスケール極端現象の解析、気候変動に対する領域気候への応答把握、さらに、農業やエネルギー分野などの産業支援を目的とした気象情報を高度利用など、広範な分野での利用が期待される。我々は日本域を対象として 1958 年以降をカバーする長期領域再解析実施に向けたシステムの最適化を進めている。なお、本報告はその成果(Fukui *et al.*, 2018、福井ほか, 2018)に基づく。

本領域再解析システムは、気象庁 55 年長期再解析(JRA-55)を境界条件とした一方向二重ネスティングにより水平格子間隔 5km の気象庁非静力学モデルに局所アンサンブル変換カルマンフィルタを用いて同化するものである。ここで、再解析の品質の一貫性を担保するために、同化する観測は従来型観測（地上での気圧観測及びラジオゾンデによる高層観測）のみとする。本システムの有効性を調査するために、従来型観測のみを同化する実験を行い、観測を同化しない 2 種類の力学的ダウンスケール実験（長期間を一連の時間積分により行う実験(DS1)と Kayaba *et al.* (2017)に倣い初期時刻をずらした短期間の時間積分をつなぎ合わせる実験(DS2)）と比較した。なお、実験対象期間は、1958 年から長期間を対象とするのは高コストなため、今回は夏季(2014 年 8 月)と冬季(2016 年 1 月)とした。検証データとして、海面更正気圧は気象庁現業メソ解析(MA)、降水量は気象庁解析雨量を用いた。

海面更正気圧について MA に対する根平均二乗誤差(RMSE)は、領域再解析は夏冬共に一カ月平均で 1 hPa 以下であり JRA-55 並みの精度で安定して動作していることを確認できた。一方、DS1 では RMSE が 2hPa を越える日も多く、温帯低気圧の再現を失敗するなど実際の場を再現できていなかった。また、DS2 では RMSE は領域再解析と同程度であったが、場が滑らかで台風の強度も同じ解像度の領域再解析や DS1 に対して弱かった。期間中の降水量については、DS1 は実際の気圧場を再現できていたため時空間パターンの不一致が大きく、DS2 では特に強雨について過小評価傾向が見られた。領域再解析ではこうした DS1 や DS2 の誤差について顕著な改善を確認できた。DS1 の結果はモデル内部の場を精度よく

再現するにはモデルの物理法則と境界値による拘束条件のみでは不十分であること、DS2はスピンアップの問題を抱えていることを示唆するものである。これらの問題を領域再解析では改善できていた。領域再解析では、従来型観測のみではあるが同化することでDS1での問題に対して、また、前の結果を第一推定値として引き継ぐことでDS2での問題に対して、対処することができていたものと考えられる。今後は、実験期間を延ばし、領域再解析の季節変動や年々変動の再現性やメソスケール極端事例の解析を行っていく。さらに、積雪水資源推定など領域再解析の高度利用の可能性についても検討していく。

## 謝辞

本研究は気象研究所と東北大学の共同研究の一環として行われた。

## c)参考文献

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. DOI:10.2151/jmsj.2018-056.

福井真, 岩崎俊樹, 斉藤和雄, 瀬古弘, 2018: 従来型観測のみを用いた領域再解析の冬季降水の再現性. 2018年度日本気象学会秋季大会講演予講集, **114**, P371.

Kayaba, N., T. Yamada, S. Hayashi, K. Onogi, S. Kobayashi, K. Yoshimoto, K. Kamiguchi, and K. Yamashita, 2016: Dynamical Regional Downscaling Using the JRA-55 Reanalysis (DSJRA-55). *SOLA*, **12**, 1-5.

## 1 4. 5km解像度の大規模アンサンブル温暖化実験データを用いた日本の豪雪の将来予測

佐々井崇博 (東北大学大学院理学研究科)

### a)要旨

5km 解像度大規模アンサンブル実験を実施して、日本の極端降雪に関する将来予測を行なった。産業革命前から全球平均気温が2度、ないし4度上昇した気候場における降雪がどのように変化するかを調べた後、極値統計解析のアプローチで降雪の極端現象を解析した。372年分というアンサンブルメンバー数と統計手法を組み合わせることで、現在と将来の気候場におけるより極端現象の違いをより正確に把握できた。極端降雪は太平洋側で有意に減るが、日本海側ではほとんど減っておらず、気象災害への早期警戒に寄与するためには寒気流出の極端イベントを把握することが益々重要になることがわかった。

### b)本文

#### (1) 研究の目的

5km 解像度の大型アンサンブル温暖化実験を実施して、極端に強い降雪現象(豪雪)を将来予測することを目的とする。現在と将来の気候場における比較をとして温暖化の影響を理解することや、西高東低型と南岸低気圧型で降雪を経験する場所をわけて降雪パターンの違いを理解することを目指す。最終的には、既存の降雪メカニズムを踏まえ、温暖化影響下における豪雪メカニズムを明らかにする。

#### (2) データと方法

20km 解像度の d4 PDF、および d2 PDF データセットを境界条件とする 5km 力学ダウンスケールを実行する。現在気候、産業革命前から2度、および4度上昇した気候場を想定し、それぞれ372年分のアンサンブル実験を実施した。ただし、極端現象を把握するには統計的に十分なサンプル数ではないため、気象の極端現象抽出で実績のある一般化極値分布を用いて極端現象の頻度と強度を解析した(Coles, 2001; Fujibe et al., 2011)。また、寒気流出と降雪との関係性を調べるため、寒気流出解析ツール(Iwasaki et al., 2014)を用いて寒気質量フラックスを計算した。

#### (3) 結果

現在と将来の気候場における降雪を比較した結果、温暖化により降雪はほぼ全域で減ることがわかった。極端降雪は、南岸低気圧型の降雪エリアで昇温により大きく減ったが、西高東低型の降雪エリアではあまり減らなかった。その違いは、日本海側の標高の高い寒冷な場所では温暖化によって大気中の水蒸気量が増え、冬季の降水量が増えたことや、昇温場では寒気流出の極端現象と降雪の極端現象が一致し、極端降雪の日に寒気質量フラックスが増えたことに起因していた。将来、日本海側の山間部では極端降雪の強度が増す可能性が高

い。気候変動の適応策として、寒気流出の常時モニタリングによる雪害への早期警戒が益々重要であると言える。

#### c)参考文献

- Coles, S. (2001). *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*. Springer, 208 pp.  
<https://doi.org/10.1007/978-1-4471-3675-0>
- Fujibe, F. (2011). Discussion of Fitness Analysis for Selecting Distribution Functions in Extreme Value Analysis. *Tenki*, 58(9), 765-775 (in Japanese with English abstract). [available online at [https://www.metsoc.jp/tenki/english/tenki\\_abst11.html](https://www.metsoc.jp/tenki/english/tenki_abst11.html)]
- 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. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JAS-D-13-058.1>

## 1.5. 20世紀の地球温暖化に伴う日本の極端降水の変化

川瀬宏明 (気象庁気象研究所)

### a) 要旨

人為起源の温室効果ガスの増加に伴い、地球上の気温が上昇する地球温暖化が深刻な問題となっている。地球温暖化の進行に伴い、日本でも短時間強雨や大雨が増加してきていることが過去の観測データの解析から指摘されている。本研究では、大規模アンサンブル過去気候再現実験及び非温暖化実験の結果を解析し、地球温暖化が日本の大雨に及ぼす影響を調査した。その結果、温暖化に伴う大雨の増加には地域差があり、九州西部は東部に比べ、温暖化に伴って大雨が発生しやすくなる地域であることが分かった。

### b) 本文

#### (1) はじめに

温室効果ガスの増加に伴い、世界平均気温は100年あたり0.73度上昇している。また、過去の観測データの解析から、短時間強雨の増加や日降水量の増加が指摘されている(気象庁, 2018)。平成24年以降、気象庁が命名した豪雨は西日本を中心に5回発生している。2018年に発生した平成30年7月豪雨は、多くの観測点でこれまでの72時間積算降水量の記録を塗り替え、西日本などに甚大な被害をもたらした。そのため、豪雨と地球温暖化の関連がたびたび注目される。しかし、豪雨は様々な要因の重ね合わせで発生するため、地球温暖化が豪雨の主要因であるとは言えない。一方、気温が上昇することで大気中に含みうる水蒸気量も増加するため、地球温暖化が既に日本の豪雨に影響を及ぼしている可能性は高い。そこで本研究では、過去気候再現実験と人為起源の地球温暖化を除去した非温暖化実験の結果を分析し、20世紀の地球温暖化が日本の夏の大雨にどのように影響を及ぼしたかを評価する。

#### (2) 使用データ

文部科学省気候変動リスク情報創生プログラムが作成した「地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース」(d4PDF)の過去実験の20km領域版を用いた。d4PDFの実験の詳細はMizuta et al. (2017)を参照されたい。本研究ではd4PDFの非温暖化実験の60km全球版を20kmの地域気候モデル(NHRCM)(Sasaki et al., 2008)を用いてダウンスケーリングし、過去実験と比較した。過去実験、非温暖化実験ともに1950年から2010年までの計61年を対象としており、それぞれ100アンサンブルメンバーの実験を有している。

#### (3) 結果・考察

図1に過去実験の7月最大日降水量の地域分布及び過去実験と非温暖化実験の差を示す。



日本で降水量が多いのは、関東北部、東海、北陸、紀伊半島、四国、九州等である。これは、梅雨期に多量の降水が観測される地域と対応している。ただし、モデルの格子間隔が 20km と粗いため、日本の細かな山岳に対応した降水は再現されていない。過去実験と非温暖化実験の差 (図 1 右) を見ると、過去の温暖化に伴って日本の広い範囲で降水量が増加していることが分かる。増加率は日本以北で大きく、中国や台湾の北の海上では、10%以上の増加が見られた。一方、日本の南海上では減少する領域もある。

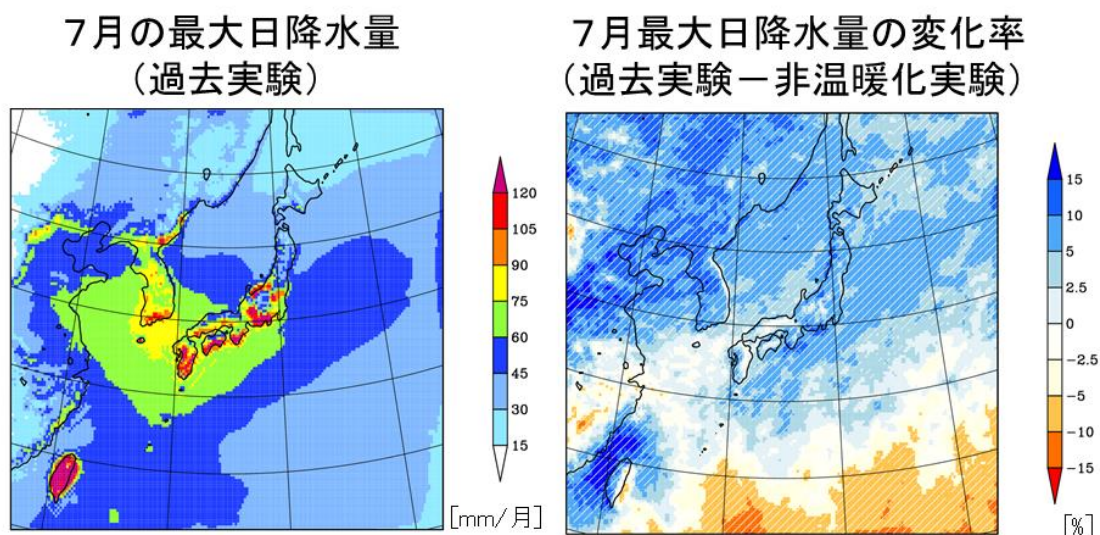


図 1 過去実験における 7 月最大日降水量 (左図) と過去実験と非温暖化実験の差 (右図)。

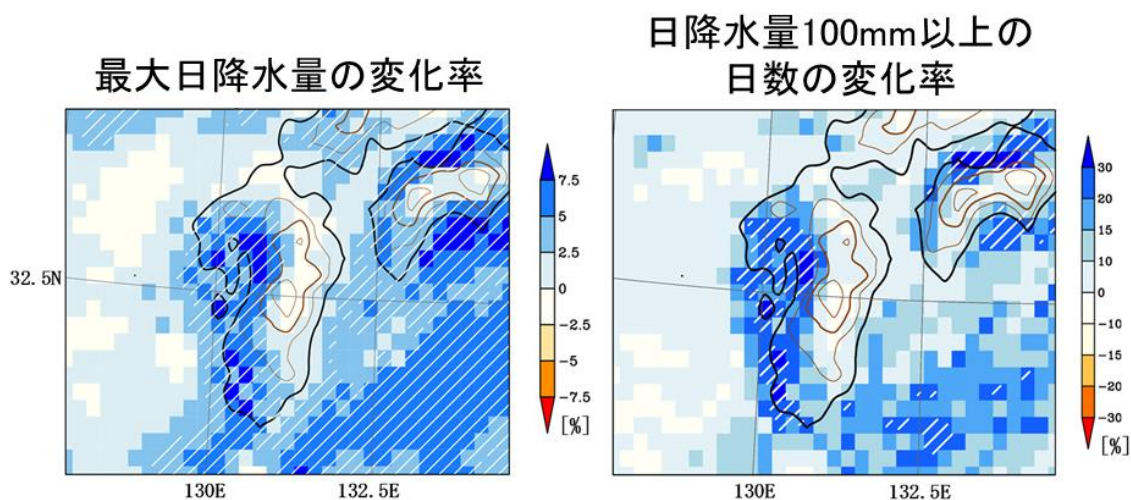


図 2 7 月最大日降水量 (左図) 及び日降水量 100mm 以上の日数 (右図) の変化。寒色 (暖色) 系は過去実験が非温暖化実験より多い (少ない) 格子。斜線は Student の t 検定において信頼区間 95% で有意な差を示す格子。

九州付近に着目すると、九州西部では有意な降水量の増加が見られたが、東部ではほとんど差が見られなかった（図2）。つまり、最大日降水量は九州西部と東部で大きく変わらないが、過去の温暖化に伴う影響は大きな違いがあった。同様の傾向は日降水量 100mm 以上の日数でも見られた（図2右）。

九州西部と東部の大雨日数の年々変動を図3に示す。メンバー間のばらつきは大きいですが、アンサンブル平均すると九州東部と西部は同程度の日数となる。一方、平均した年々変動を九州西部と東部で比較すると、両者の相関はほとんど見られなかった（相関係数 0.179）。これは、九州西部と東部で大雨の降る背景場が異なることを示唆している。

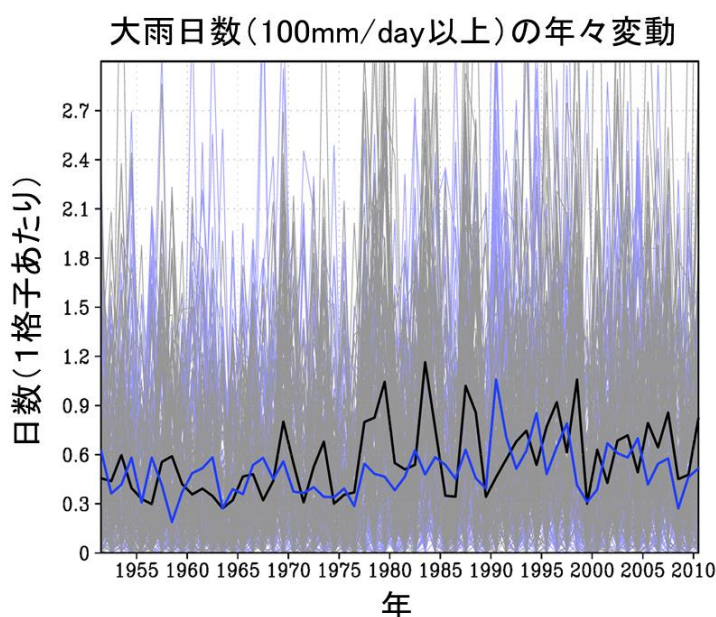


図3. 九州西部と東部における7月の日降水量 100mm 以上の日数の年々変動。細線は各メンバー、太線はアンサンブル平均。黒太線と灰細線は九州西部、青太線と青細線は九州東部。

次に、九州西部と東部の年々変動と大気場及び台風の年々変動との関連を調べた。九州西部の大雨が発生しやすい年は、850hPa の高度は太平洋上で正の相関、日本海上では負の相関がみられた（図省略）。九州西部には南西からの水蒸気移流と北西からの水蒸気移流が収束することで大雨が発生するといえる。これは梅雨前線によって大雨が降る典型的なパターンである。一方、九州東部の大雨の年々変動は、九州の南西海上の台風の存在密度の年々変動と高い正の相関が見られた。つまり、九州西部の大雨は梅雨前線に伴う大雨、九州東部の大雨は台風によって大雨が降ることが分かる。

大雨をもたらす総観場の違いにより、地球温暖化の寄与が異なる理由を考察する。九州西部では水蒸気移流と収束が大雨の主要因となるため、温暖化に伴う水蒸気量の増加が直接降水量の増加に繋がると考えられる。過去実験と非温暖化実験の 850hPa の気温と可降水量の差を調べると、可降水量の差は+3.35mm、比率に直すと 6.9%であった。過去実験と非温暖

化実験の九州付近の気温差は+0.95 度であり、Clausius-Clapeyron 関係式から求められる水蒸気量の増加の理論値 7%/K と同程度であった。一方、九州東部の大雨は台風と強い相関を持つ。九州に接近する台風に関して、過去実験と非温暖化実験の差を調べると、過去実験が 0.330、非温暖化実験が 0.363 と非温暖化実験が 10%程度多かった（ただし、統計的に有意な差ではない）。九州東部では台風の接近数の減少が水蒸気量の増加と相殺し、大雨の増加が顕著ではなかったと考えられる。

#### c) 参考文献

気象庁, 2018, 気候変動監視レポート 2017.

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.

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.

## 16. キリバス共和国における NINO.3SST を利用した降水量予測

菅野洋光・西森基貴 (農研機構農業環境変動研究センター)、

野中章久・山下善道 (農研機構東北農業研究センター)

### a)要旨

気候学的大気・海洋の解析により、キリバス共和国における降水量変動予測の可能性について解析した。その結果、NINO.3 における SST を用いて3ヶ月前程度までの降水量予測が可能であることが示された。

### b)本文

#### (1) はじめに

ENSO(エルニーニョ・南方振動)による地球規模での気候変動に関しては多くの研究があるが、熱帯島嶼地域への小気候学的影响については未解明な部分が多い。特に平均標高が2mのキリバス共和国においては、海面高度の上昇や地下水の過剰な汲上による地盤沈下に伴う国土縮小・水没の可能性のほか、塩分濃度の上昇による地下水の水質悪化、降水量の変動による飲料水・農業用水の不足が深刻である。これらの社会的脆弱性を解消するためには、降水量の変動特性を明らかにし、リスク管理システムにフィードバックしていくことが重要である。本研究では、気候学的大気・海洋の解析により、降水量変動予測の可能性について探っていく。

#### (2) 方法

キリバス共和国 Betio 気象観測所の気象観測データをウェブサイト(<https://www.worldweatheronline.com>)よりダウンロードし、JRA55 客観解析データ、SST、OLR などのグローバル気象データとの関連を解析した。ウェブサイトからダウンロードできる気象要素は、2009年1月以降の最高最低気温、降水量、風向風速、相対湿度、気圧の各日データである。また、エルニーニョ監視海域(NINO.3)の SST データを気象庁 HP よりダウンロードし、さらに、Tarawa の南太平洋大学(USP)では2017年3月より降水量の独自観測を開始しており、Betio での観測データとの比較検証を行った。

#### (3) 結果および考察

図1には Betio 気象観測所における2009年1月～2018年6月の月降水量の時系列を示す。キリバスの雨季は11月～4月であるが、雨季と乾季の季節変化よりは、ENSOによる変動の方が明瞭である。すなわち、エルニーニョ期間(2009夏～2010春、2014夏～2016春)に降水量が多く、ラニーニャ期間(2010夏～2011春、2017秋～2018春)に少ない。年降水量も928mm(2017年)～3978mm(2009年)と変動が大きい。USPで観測中の降水量と比較すると、地域的な差異は認められるが、大きな外れ値はなく、観測データの品質には問

題ないと考えられる。

図2には Betio の降水量と SST の回帰を示す。ENSO の偏差パターンが明瞭であり、エルニーニョ期間に降水量の大きいことが把握できる。同様の解析で、850hPa の u 成分では西風偏差で正の相関を持ち、また OLR ではキリバスを中心とした強い負の相関が見られた。なお、図2の SST 正偏差領域は、気象庁のエルニーニョ監視海域 NINO.3(5S-5W, 150W-90W)と重なっている。そこで、図1で NINO.3 の SST 偏差を比較すると、降水量変動とよく一致している( $R=0.58$ )。特に Betio の風の u 成分とはよく一致しており(図3、 $R=0.71$ )、キリバスの気象は太平洋熱帯海域の SST 変動に大きく影響されていることがわかる。

ところで、太平洋熱帯海域の SST 変動は時間スケールが長く、気象庁からも予測情報が出されている。キリバスにおける天候の予測可能性を検討するために、NINO.3 の SST と Betio の降水量とのラグ相関を計算したところ、5ヶ月前の SST まで危険率1%以下で統計的に有意であり、3ヶ月前でも  $R=0.50$  の強い相関が得られている。したがって、2~3ヶ月前程度の NINO.3 の SST 予測値を用いることで、キリバスの天候変動を早期に予測できる可能性がある。今後は、SST による降水量予測の可能性の確認とともに、降水量変動情報のウェブ配信システムの構築、降水量変動に適合した農業技術の導入などを進めていきたいと考えている。

本研究では気象庁 iTacs を使用しました。また、本研究は JSPS 科研費 17K08025 の助成を受けたものです。

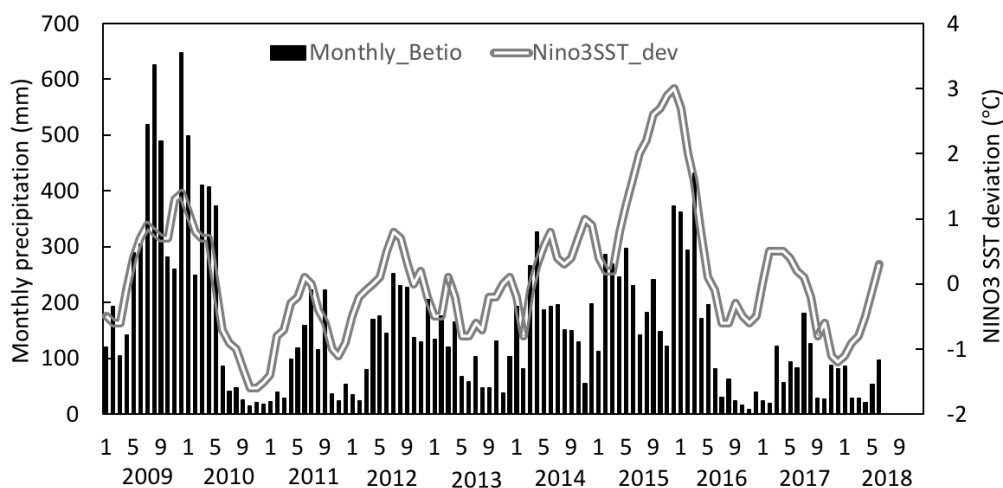


図1 Betioにおける月降水量とエルニーニョ監視海域 NINO.3 の SST 偏差の時間変化(2009年1月~2018年6月)。

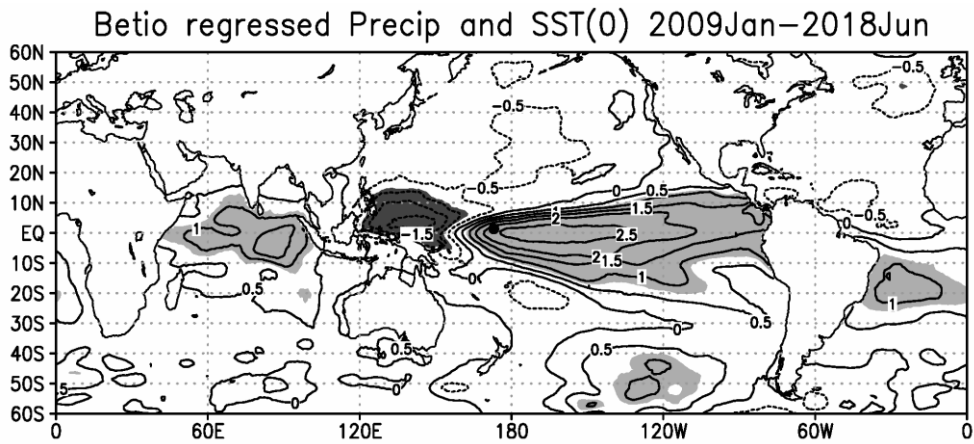


図2 Betioにおける月降水量と SST の回帰(2009 年 1 月～2018 年 6 月). 中心にある黒点が Betio 気象観測所を示す. 単位は $^{\circ}\text{C}$ 、薄い陰影は正の、濃い陰影は負の危険率 5%以下で統計的に有意な相関を示す.

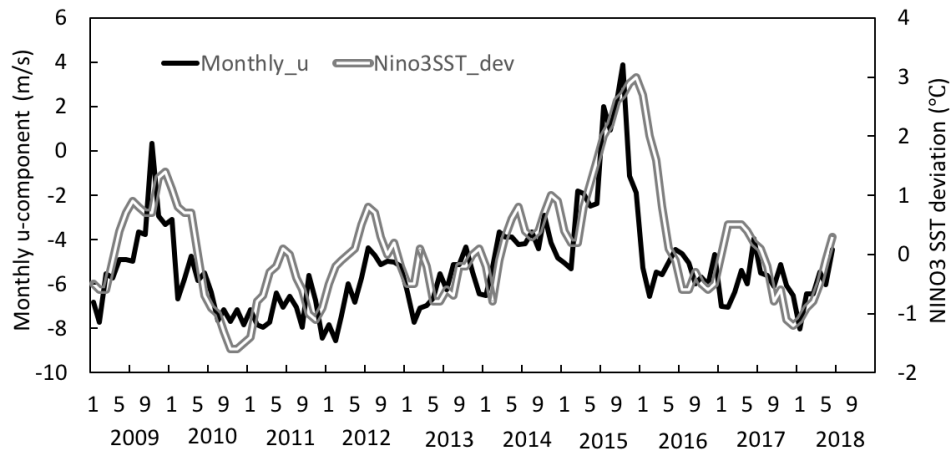


図3 Betioにおける月平均u成分(m/s)とNINO.3のSSTの時間変化(2009年1月～2018年6月).