

気候変動適応推進プログラム

東北地域のヤマセと冬季モンスーンの先進的ダウンスケール研究

平成 26 年度研究成果報告書

研究代表者 東北大学大学院理学研究科 岩崎俊樹



本報告書は、文部科学省の地球観測技術等調査研究委託事業による委託業務として、国立大学法人東北大学が実施した平成 26 年度「東北大学地方のヤマセと冬季モンスーンの先進的ダウンスケール研究」の成果を取りまとめたものです。

平成 26 年度研究成果報告書

研究課題 「東北地域のヤマセと冬季モンスーンの先進的ダウンスケール研究」

平成 26 年度 研究体制

研究代表者	東北大学大学院理学研究科	岩崎俊樹
研究分担者	東北大学大学院理学研究科	川村宏、早坂忠裕、島田照久 (H26.11 まで)
		吉田龍平
	弘前大学大学院理工学研究科	児玉安正、島田照久 (H27.12 から)
	東北農業研究センター	菅野洋光*、神田英司**、大久保さゆり
		紺野祥平
	岩手県立大学	南野謙一
研究協力者	東北大学大学院理学研究科	山崎剛、余偉明
	気象庁気候情報課	前田修平、野津原昭二、宮脇祥一郎
		大澤和裕
	気象研究所	遠藤洋和、川合秀明、瀬古弘
	仙台管区气象台	池田友紀子、須田卓夫
	岩手大学	下野裕之

*現所属：中央農業総合研究センター

**現所属：鹿児島大学

目次

1. 研究の背景と目的	p.1
1.1 背景	
1.2 目的	
1.2.1 局地気候の研究	
1.2.2 局地気象予測手法の研究	
1.3 年次計画	
2. 平成26年度の研究概要	p.5
2.1 平成26年度研究体制	
2.2 平成26年度研究計画	
2.3 平成26年度研究実績の概要	
3. 各研究分担者および協力者における研究	p.8
3.1 ヤマセの気候研究	
3.1.1 気候モデルデータのダウンスケーリングによる東北地方の夏季気候の変化 (8-13)	
3.1.2 北太平洋亜寒帯の海洋性寒冷気団 (14-19)	
3.1.3 力学的ダウンスケールにおける東北地方の夏季の気温の再現精度-解像度依存性-(20-24)	
3.1.4 地域気候モデルを用いた東北地方の積雪水資源の再現性 (25-27)	
3.1.5 夏季三陸沖における雲の特徴と海面熱フラックス (28-30)	
3.1.6 オホーツク海と日本周辺の雲分布の二つのレジーム (31-36)	
3.1.7 モデルにおける夏季の中緯度の海上下層雲表現の改善 (37-41)	
3.1.8 CMIP5 マルチ気候モデルにおけるヤマセの将来変化：海面水温変化パターンとの関係 (42-47)	
3.1.9 複数の GCM 出力を用いた葉面保水量の将来変化 (48-51)	
3.1.10 陸面過程モデルを用いたいもち病被害面積の将来予測 (52-54)	
3.1.11 栄養成長期のヤマセを想定した遮光がイネ穂ばらみ期耐冷性に及ぼす影響 (55-56)	
3.1.12 高温障害・冷害を考慮した東日本における水稻最適品種の検討 (57-60)	
3.2 ヤマセの気象予測の研究	
3.2.1 LETKF ネストシステムを用いたヤマセのアンサンブル予報実験 (61-66)	
3.2.2 リアルタイムアンサンブルダウンスケールデータを用いた病害予測システムの構築 (67-70)	
3.2.3 高度農業気象情報による農業支援システムの高度化 (71-74)	
3.2.4 局地モデルの太陽光発電への利用計画とヤマセ時の日射量予測の事例解析 (75-80)	

4. 研究成果	p.81
4.1 査読付論文	
4.2 そのほかの著作	
4.3 研究会での発表	
5. 研究会活動	p.83
5.1 ヤマセ研究会	
5.2 RECCA 農業班の連携	
6. 結語	p.84

1. 研究の背景と目的

1.1 背景

ヤマセは、梅雨期から夏季に北太平洋から東北地方の太平洋側に吹きつける冷涼な東よりの風で、しばしば冷害の原因となり、社会的・経済的に大きな損失をもたらす厄介者である。最近では、1993年、2003年と、ほぼ10年に一度の割合で、深刻なヤマセの洗礼を受けた。また、東北地方の太平洋沿岸では、温暖化にもかかわらず、いまのところ、夏の気温に顕著な上昇が見られない。これは、一つには、ヤマセの影響の可能性がある。地球温暖化によって、ヤマセは将来増えるのか減るのか、東北地方の大きな関心事である。

ヤマセによる低温が顕著な地域は、主として東北地方の太平洋沿岸であり、それほど広くはない。下層寒気は、低地に沿って侵入するため、複雑な地形効果が起きる。このため、ヤマセの諸現象を再現するためには、比較的高解像度のモデルが必要である。しかし、ヤマセは、オホーツク海高気圧と梅雨前線の作る気圧傾度などの、大規模な背景場に大きく影響される。ヤマセを再現するためには、大規模な背景場が正しく与えられなければならない。すなわち、大規模な背景場の、比較的スケールの小さな地形に対する応答が本質であり、その再現は高精度のダウンスケールシステムの恰好の課題である。

ヤマセによる低温高湿の気塊の形成には海上下層雲が大きな役割を果たしている。下層雲は雲頂からの強い放射冷却によって、気温を低下させ、雲形成を促す。それは、大気境界層を不安定化し、浅い対流を強化する。海上下層雲では、強い雲放射-雲形成フィードバックが働くとともに、大気海洋相互作用にも大きな影響を与えている。海上下層雲はまた、人為起源のエアロゾルにも影響され、温暖化を相殺する働きがある。ヤマセにおいても、海上下層雲の経年変化が注目される。

ヤマセによる農業被害を軽減するための長期的対策は、気候変化を考慮した作物を選択することである。そのためには、東北の夏が将来どうなるのか、精度の高い予測が求められる。他方、短期的対策は、日々の天気を的確に考慮した作物管理を行うことである。そのためには、きめ細かく気象予測精度を向上させるとともに、それを反映させた農業気象情報を提供することである。以上の点を考慮して、本研究では、東北地方太平洋側を主な対象とし、高精度ダウンスケールシステムを用いた局地気候と局地気象予測の研究を展開することにした。

なお、ダウンスケールシステムは、あらゆる地域のあらゆる気象現象を正確に扱えることで、その利用価値が著しく高められる。特に、東北地方においては、冬季に、大雪や強風の被害がしばしば発生するため、冬季モンスーンにおいても性能を担保することが望まれている。汎用性の高いダウンスケールシステムを開発するため、必要に応じて、冬季モンスーンについても扱うこととする。本研究課題は東北地域に密着し、基礎から応用まで含む幅広いスペクトルを有している。東北のヤマセに関心のある研究者が幅広く連携して、研究を推進したいと考えている。

1.2 目的

1.2.1 局地気候の研究

本課題の目的は、最先端のダウンスケールシステムを用いて、地球温暖化が東北地方の夏の気候にどのような影響を与えるのか調べ、農業生産活動をそれに対してどのように適応させるか検討することである。

再解析のデータを用いて、過去長期間のダウンスケールシミュレーションを実施し、当該システムの精度を確認する。ヤマセのシミュレーションの鍵となる雲物理・放射、大気海洋相互作用、陸面水文過程のパラメタリゼーションを改良し、ダウンスケールシステムの精度向上を図る。そのうえで、気候モデルの予測結果をダウンスケールし、東北の夏の温暖化影響について詳細に調査する。東北の夏の温暖化影響に基づいて、東北農業の温暖化対策を検討する。

ダウンスケールシステムによる温暖化予測精度は、境界条件に用いる気候モデルの結果の精度に大きく依存する。このため、マルチ気候モデル解析を通じて、ヤマセの背景場に対する気候モデル予測の信頼性を確認する。ヤマセの鍵は下層雲である。下層雲に関する詳細な調査により、雲物理・放射パラメータを同定し、ダウンスケールモデルの改良に利用する。また、雲物理・放射パラメータの経年変動の解析から下層雲に対する温暖化影響や人為的なエアロゾルの効果を評価する。

1.2.2 局地気象予測手法の研究

本課題の目的は、先端的データ同化手法を利用したダウンスケール予測システムの出力結果を利用して農業気象情報を高度化し、それを利用者に提供システムを構築することである。

局所アンサンブル変換カルマンフィルターを利用し、ダウンスケール予測システムのためのデータ同化システムを開発する。ダウンスケールのためのデータ同化の鍵となる側面境界条件の最適化に取り組み、下層風と下層雲のデータ同化手法を確立する。また、予測精度の向上と確率予報の導入に向けて、アンサンブルダウンスケール予測システムを構築し、その精度評価と利用法を開発する。

ダウンスケール予測情報を利用し、高解像度の農業気象モデル(作物の発育や病害虫の発生などを予測する)を開発する。農業気象モデルの結果を提供するため、描画・提供システムを開発する。アンサンブルダウンスケール予測情報を利用し、農業気象情報の確率表現を目指す。

1.3 年次計画

平成 22 年度

ダウンスケールシステムのプロトタイプを作成
統計調査のためのヤマセの指標(インデックス)の調査
海上下層雲の雲微物理・雲放射特性の解析
北日本の夏季気温のトレンド調
CMIP3 の大気海洋結合モデルによる三陸沿岸海面水温の再現性調査
局所アンサンブル変換カルマンフィルター(LETKF)のシステムへの実装
農業気象モデルの整備および農業気象情報の画像表示ソフトウェアの開発

平成 23 年度

再解析データを利用した過去 30 年のダウンスケール実験
マルチ気候モデル解析(海水温度構造、オホーツク海高気圧、予測信頼性)
海上下層雲の雲微物理・雲放射特性の解析
LETKF による側面境界の最適化およびアンサンブルダウンスケール予報
農業気象モデルの整備および農業気象情報の画像表示ソフトウェアの開発

平成 24 年度

気候モデルの予測結果のダウンスケール実験
マルチ気候モデル解析(海水温度構造、オホーツク海高気圧、予測信頼性)
海上下層雲の雲微物理・雲放射パラメータの経年変化の解析
LETKF による側面境界の最適化およびアンサンブルダウンスケール予報
農業気象モデルの実運用システムの開発

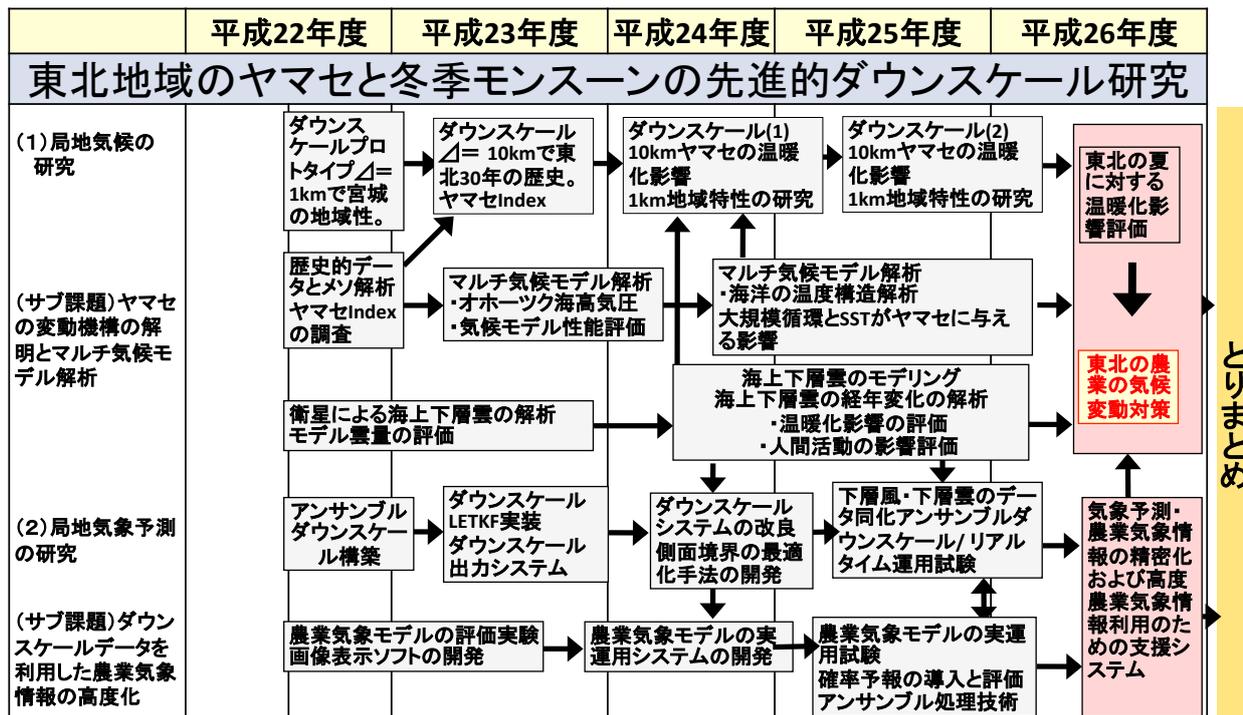
平成 25 年度

気候モデルの予測結果のダウンスケール実験
大規模循環と海面水温がヤマセに与える影響
海上下層雲の雲微物理・雲放射パラメータの経年変化の解析
下層風・下層雲のデータ同化およびアンサンブルダウンスケール予測
農業気象モデルの実運用試験、確率予報の導入

平成 26 年度

東北の夏に対する温暖化影響
東北農業の温暖化対策
下層風・下層雲のデータ同化およびアンサンブルダウンスケール予測
農業気象モデルの実運用試験、確率予報の導入

年度計画と進行状況



東北の農業の気候変動対策とダウンスケール予測を利用した農業気象情報の発信

2. 平成26年度の研究概要

2.1 平成26年度の研究体制

東北大学、弘前大学、東北農業研究センターおよび岩手県立大学の分担機関により研究を実施した。また、研究協力機関として、気象庁気候情報課、気象研究所、仙台管区气象台、岩手大学が参加した。

2.2 平成26年度研究計画（平成26年度計画を再録する。）

（1）ヤマセの気候研究

a. ヤマセの現在と将来に関するダウンスケール研究

平成25年度までに作成した二つの気候モデルからのダウンスケールデータの解析を継続し、ヤマセの将来変化とその不確実性について取りまとめる。過去の顕著なヤマセについての気候学的特徴を取りまとめる。ダウンスケールによるヤマセの再現性について解像度依存性を評価する。

b. ヤマセ雲特性の時空間変動と日射量の関係の解明

平成25年度に引き続き、衛星データおよび気象データを用いて得られたヤマセ雲の雲物理特性を基に、日射量の経年変動を定量的に評価し、気象要素との関係を明らかにし、ダウンスケールの雲解像数値モデルの精度向上を図る。

c. ヤマセのマルチ気候モデル解析と高層気象観測および東北農業の適応策

再解析データを用いてヤマセ時の周辺海域の海面水温データ間の違いや三陸沿岸の気温との関係を調査し、取りまとめる。青森県六ヶ所村等で高層気象観測を行い、これまでの観測結果と合わせて沿岸域でのヤマセの鉛直構造や時間変動について取りまとめる。第5期結合モデル相互比較実験(CMIP5)について、マルチ気候データの解析を行い、気候モデルが予測するヤマセの将来変化とその精度を明らかにし、コメ収量に対する地球温暖化の影響を明らかにする。

（2）ヤマセの気象予測研究

a. ダウンスケールのためのアンサンブル予報とデータ同化の研究

平成25年度に開発したダウンスケールのためのデータ同化手法を用いて、実際の観測データを用いた同化実験を進め、実際の観測モードによる初期値の修正効果について検証する。また、平成25年度に引き続き、ヤマセ事例について、局所アンサンブルカルマンフィルタによるデータ同化試験を行い、GPS掩蔽データ等のインパクトを評価する。

b. アンサンブル予報データを用いる農業気象情報の試作

2000年以降の夏を対象として、アンサンブル予報システムの結果を、いもち病発生などの農業モデルへ入力し、農業気象に関する確率情報の作成と精度検証を行う。

c. 高度農業気象情報による農業支援システムの高度化

農業支援システムによって提供された農業気象情報とその表現方法について総合的に評価する。

2.3 平成26年度研究実績の概要

（1）局地気候の研究

再解析のダウンスケール結果から、これまで、東北地方の夏季の気候の地域特性および各ヤマセ年における平年偏差の特徴を整理してきた。その過程で、海上での冷気塊の形成とそれを三陸沿岸に送り込む北東気流が、大きな鍵であることが明らかとなった。夏季の海洋性寒冷気団の形

成機構に関して、特にオホーツク海では冷たい海面による冷却と雲頂からの放射冷却が冷気塊形成に寄与している。本年度、オホーツク海と日本付近の雲水量は逆相関にあることを見出し、海上下層雲形成の視点からその理由を考察した。また、ダウンスケールの気温の再現性について、解像度依存性を調べた。その結果、解像度を増やすに従い日較差の表現は大幅に改善するが、日平均気温はなかなか改善しない。解像度のみならず、物理過程のバイアスや、検証すべき観測データ(この場合アメダス)の地域代表性などの問題を考える必要があることが分かった。

気象研究所および東京大学・大気海洋研究所の気候モデル(MRI-AGCM および MIROC5)の温暖化予測結果をダウンスケールし、地球温暖化が東北地方に及ぼす影響を調べた。地球温暖化の進行に伴い、平均気温は東北地域でも上昇する。ただし、平均気温からの偏差の大きさはあまり変わらず、同じようなパターンが現われることから、ヤマセは今後とも間欠的に襲来するとみられる。他方、両モデルのダウンスケール結果から、東北地域でも、短時間強雨が増加することが明らかとなった。東北地域は短時間強雨が少なく、脆弱であるため、強雨災害に備えることも重要である。

マルチ気候モデル解析では、海面水温の将来変化のパターンを3つに分類し、対応する気候変化を調べた。赤道太平洋中部～東部で昇温が大きいモデル群では、北東風の頻度が増加していることを確認した。熱帯での海面水温上昇のパターン変化が、ヤマセなどの増加をもたらす可能性が高いことを明らかにした。

気候モデルによる現在気候再現と将来気候予測の結果をダウンスケールし、農業モデルを利用して稲作への影響を調べた。将来、いもち病は若干減少し、逆に、将来は東北地方でも高温障害を警戒する必要がある。収量の観点では、現在の東海地域で栽培されている品種が東北地方の最適品種となる可能性が示された。暖かい地方の水稻は、冷害に対しては脆弱で、耐冷性を強化する必要がある。実験研究により、栄養成長期に日射が少ないと、穂ばらみ期の耐冷性が低下することを見出した。

(2) データ同化とアンサンブルダウンスケール予測実験

ダウンスケールによる短期予報を改善するために、データ同化手法の改善に取り組んだ。平成24年度にはアンサンブルカルマンフィルターを用いた側面境界の最適化手法を開発し、観測システムシミュレーション実験(OSSE)により、動作を確認した。平成25年度には実際に、ドップラーライダーの観測データに適用し、予報が改善することを確認した。現在は空港設置のドップラーライダーを利用するシステムを開発中である。また、ヤマセの予測を向上させるため、COSMIC衛星のGPS掩蔽観測から得られた屈折率データの同化に取り組んだ。GPS掩蔽観測データの同化により雲の予測が若干改善された。

地域性を考慮した中期予報を実現するために、アンサンブルダウンスケール予報の精度評価を行ってきた。予測の不確実性を考慮し、信頼性の高いアンサンブル平均予測と確率情報を得ることができる。全球モデルによる中期予報では、地域性は表現できず、時間的な自然変動も大幅に過小評価している。アンサンブルダウンスケールを実施することにより、自然変動度を大幅に増加することができた。細かな地形効果や海陸分布に関連した局地循環などを考慮した地上気温の確率予報の可能性を示している。さらに、予測結果を経験的直行関数によるモード展開し、モードごとの予測可能性を調べた。その結果、ヤマセに関連するモードの予測可能性は5日程度であり、解像度が高いほど精度が高いことが確認された。

アンサンブルダウンスケール予報結果に基づき、いもち病予測モデル(BLASTAM)に導入し、統計的ダウンスケールデータと比較検証した。特に、日射量の日照時間への変更のため、パラメー

タ調整を行った。アンサンブルデータ平均値による予測結果よりも、個々のメンバーによる結果の方が、より統計的ダウンスケールデータによる結果に近いものとなった。今後さらに、アンサンブルデータの統計的な処理方法について検討を続ける必要がある。

平成22年度に農業気象情報の一般への提供を始め、少しずつ内容を充実させながら毎年続けてきた。平成25年度には高温障害(胴割れ)対策、収穫適期情報の提供も始めた。情報に対する意見はその内容によって若干の相違があるものの、全体として好意的に受け入れられた。

最終年度、アンサンブルダウンスケール予報のリアルタイム実験を実施した。領域が狭いとはいえ、毎日週間予報を27メンバー実行するので、相当の計算機資源とデータストレージ(記憶容量)が必要である。また、データ転送には物理的な転送能力に加えて、セキュリティー問題が存在する。オンラインのデータ転送が難しいため、東北大学と東北農業研究センターでそれぞれ別々に実施していた気象予測と農業気象情報の作成を、リアルタイム実験では東北大学で一括処理することにした。出力結果を農業気象モデルに入力し、農業気象の確率情報を作成した。このサイクルを2週間回して運営上の問題点を整理した。なお、一般への情報提供には十分な検証等が必要であり、今後の課題とした。

(3) 地方自治体向けの小冊子

研究成果の自治体等への普及を図るために、小冊子「東北地方の農業における温暖化適応策と気象情報の高度利用」を作成した。目次は以下のとおりである。

東北地方の農業における温暖化適応策と気象情報の高度利用

1. 本冊子の目的
2. 東北の夏の温暖化
 - 2.1. 東北の夏への温暖化影響(ヤマセ、異常高温、集中豪雨と無降水日)
 - 2.2. 東北農業の将来
3. 気象予測情報の高度利用の手引き
 - 3.1. アンサンブルダウンスケール予報
 - 3.2. 農業気象情報へのアンサンブルダウンスケールデータの利用
—葉いもち予察モデルを例として
 - 3.3. 農業支援システム

3. 各研究分担者および協力者における研究

3.1 ヤマセの気候研究

3.1.1 気候モデルデータのダウンスケーリングによる東北地方の夏季気候の変化

島田照久・吉田龍平・岩崎俊樹（東北大学）

a)要旨

二つの気候モデルの 21 世紀末の将来予測を 10km 解像度にダウンスケーリングして、東北地方の夏季気候の将来変化を検証した。特に、ヤマセによる低温、異常高温、降水量と無降水日という観点に着目した。用いた気候モデルは、気象研究所の超高解像度全球大気モデル(MRI-AGCM)と東京大学大気海洋研究所/国立環境研究所/海洋研究開発機構が共同開発した MIROC5 である。ヤマセについては、温暖化によって気温上昇した後も将来気候の平年値を基準に考えると、将来もヤマセは発生すると言える。また、極端な高温の日の最高気温は約 3℃上昇し、夏季の総降水量と短時間強雨ともに増加する。

b)本文

研究の目的

東北地方の夏季気候に重要な役割を果たすヤマセとその将来変化の理解を進めるために、局地気候を解析できる長期(現在気候、将来気候)データの作成とその解析を行ってきた。そのために、気象研究所の超高解像度全球大気モデル(MRI-AGCM)のダウンスケーリング(平成 24 年度)、東京大学大気海洋研究所/国立環境研究所/海洋研究開発機構が共同開発した、MIROC5 のデータのダウンスケーリング(平成 25 年度)を実施した。これらのダウンスケーリングデータを用いて、本研究では、ヤマセによる低温、異常高温、降水量と無降水日という観点に着目し、東北地方の夏季気候の将来変化を概観する。

ダウンスケーリング

ダウンスケーリングに用いた気候モデルは、気象研究所のグループが開発した水平解像度約 20km (TL959)鉛直 60 層の超高解像度全球大気モデル (MRI-AGCM)と東京大学大気海洋研究所/国立環境研究所/海洋研究開発機構が共同開発した MIROC5 であり、それぞれの現在気候と将来気候(21 世紀末)データを用いる(表 1)。これらの気候モデルデータを初期・境界条件とし、気象庁・気象研究所の数値気象モデル(非静力学モデル JMA-NHM ; Saito et al. 2007)を用いて、北日本全体(東北地方と北海道)を含む領域について、10km 解像度までダウンスケーリングする。鉛直方向には 38 層設定し、1 時間間隔でデータを出力する。データ作成の対象期間は、各年の 6-8 月である。以上のようにして作成したデータセットは、東北地方の地域特性を考慮できる空間解像度(10km)と日変化を解析できる時間解像度(1h)を有し、ヤマセの経年変動を現在気候・将来気候ともに扱える長期間の均質な(同じモデル、スキーム、計算領域)データとなり、このような特徴を持つデータセットは初めてである。なお、今回の解析に用いたデータの期間は、気象庁「地球温暖化予測情報第 8 巻」に対応させて、MRI-AGCM については、現在気候を 1980-1999 年、将来気候を 2076-2095 年の 20 年分のデータで解析した。MIROC5 については、現在気候は 1981-1999 年、将来気候は 2081-2099 年の 19 年分のデータを用いた。

この 2 つの気候モデルは、第 5 期結合モデル相互比較計画 (CMIP5) の気候モデル群において、

オホーツク海高気圧の変動や空間分布の現在気候での再現性がよいグループに属していることを確認している（平成 25 年度成果報告書）。また、2 つの気候モデルのシナリオは、MRI-AGCM が排出シナリオの SRES1Ab, MIROC5 が濃度シナリオの RCP4.5 であるが、気温の将来変化を調べた結果、「2 つの気候モデルは、21 世紀末の東北地方全体の夏季の平均気温が現在気候と比べて約 2.9°C 上昇する気候シナリオ」として位置づけられることを確認している。

表 1 ダウンスケーリングの境界条件に用いた再解析と気候モデルデータ

	気候モデルデータ	
データ/ モデル	MRI-AGCM3.2S (Mizuta et al. 2012)	MIROC5 (Watanabe et al. 2007)
種類	大気モデル	大気海洋結合モデル
期間	現在: 1979-2003 年 (25 年) 将来: 2075-2099 年 (25 年)	現在: 1981-2000 年 (20 年) 将来: 2081-2099 年 (19 年)
シナリオ	SRES A1b	RCP4.5
解像度	20km/6 h	1.4°/6 h
ネスティ ング	1 回	2 回 (気象研究所で 20km, 1h にダウンスケーリングされ たデータを利用*)
海面水温 (SST)	現在気候: HadISST 将来気候: CMIP3 の 18CGCM の平均のトレンド に現在気候の経年変動を加 算 (Mizuta et al. 2008)	-

*環境省 地球環境研究総合推進費戦略研究開発プロジェクト S-5 より提供

ヤマセの将来変化

ヤマセ卓越時の場の将来変化を検証する。ここでは、オホーツク海高気圧が発達し、東北地方の太平洋岸に向かって東風（ヤマセ）が吹いているときの平均的な状況を考えるために、ヤマセインデックスによるコンポジット場を調べる。ヤマセインデックスには、津軽海峡の東西気圧差で定義されるものを用いる(Shimada et al. 2014)。このインデックスは南東北まで南下したヤマセをよく表現する。MRI-AGCM の結果によると、夏季の平均気温と比べると、北日本のオホーツク海沿岸と太平洋沿岸は低温になり、日本海側はやや高温になる(図 1 左)。ヤマセによる低温が顕著な地域は、日高山脈、八甲田山、北上山地、蔵王連峰等の山地の東側に見られ、これには、下層の冷たい空気が山地にせき止められることと、そこで発生する下層雲による放射冷却が寄与している。将来気候においても、ヤマセが卓越する同じ状況では、現在気候とほぼ同様の気温の分布が見られる(図 1 中)。この気温分布は、夏季平均からの差であるので、ヤマセが卓越しているとはいえ、気温は温暖化に伴って、現在気候のヤマセ卓越時より約 3°C 高くなっている (図 1 右)。MIROC5 の結果では (図 2)、MRI-AGCM よりも低温が強調されている。しかし、低温の地理的な分布は、MRI-AGCM と類似していて、地形の東側で低温になる様子がわかる。ヤマセ時の気温の将来変化 (図 2 右) では、陸上では約 2.3-2.8°C となっており MRI-AGCM の結果より

も昇温量は小さい。また、海上における気温の極大域が目立つが、黒潮系の水の北上を反映していると考えられる。まとめると、温暖化によって気温上昇した後も、将来気候の平年値を基準に考えると、ヤマセが北日本に向かって吹き、太平洋側と日本海側の気温差を大きくする状況は、将来も発生すると言える。

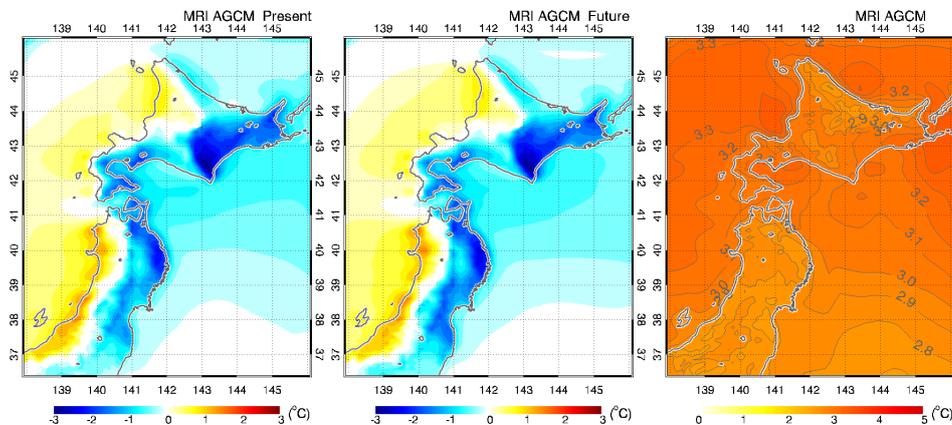


図1 MRI-AGCMによる（左）現在気候と（中）将来気候におけるヤマセインデックスが現在気候の1標準偏差を越える時の、地表面気温の夏季平均からの偏差を示す。（右）将来気候と現在気候の気温差。

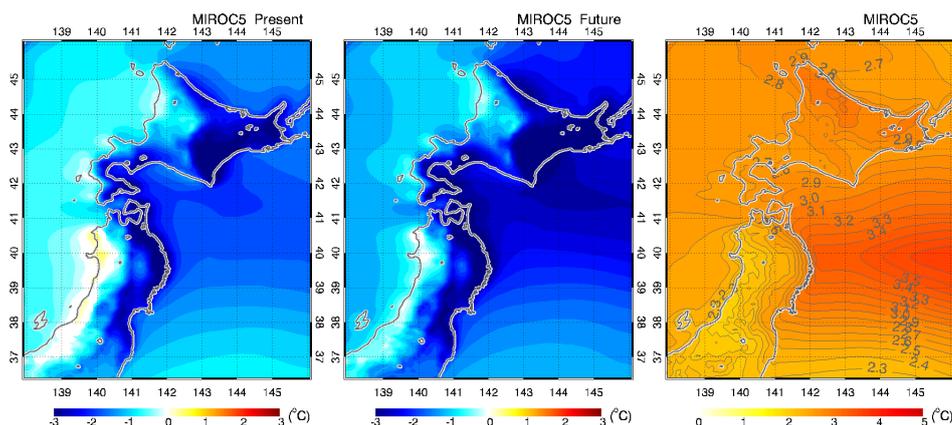


図2 図1と同じ図で、MIROC5の場合。

異常高温の発生

地球温暖化による平均的な気温上昇とともに、猛暑が増加している（2010年は、日本各地で記録的な高温が観測された）。猛暑による異常高温は、健康被害（熱中症、睡眠障害等）を引き起こし、冷房のための電力や都市ガスの供給に影響を与える。また、農作物の高温障害が発生する。気象庁「地球温暖化予測情報第8巻」によると、21世紀末の北日本では、夏季の平均気温は約2.9°C上昇し、一年で最も気温が高くなる時期が約一月早まる傾向が予測されている。また、夏季の極端な高温の日の最高気温についても、将来は2~3°C程度の上昇が予測されている。

ここでは、夏季の極端な高温の日の最高気温の地理的分布を検討する。「地球温暖化予測情報第8巻」と同じく、日最高気温の95パーセンタイル値を指標とする。この値は、特に高い日最高気温を表す統計値となり、極端現象の一つの指標となる。例えば、現在気候における7-8月の

仙台の日最高気温の 95 パーセンタイル値は、32.1°Cである(図 2 左)。7-8 月について、MRI-AGCM について、日最高気温の 95 パーセンタイル値の将来変化をみると(図 3 右)、東北地方の太平洋沿岸で約 3°Cの上昇が見られる一方、日本海側では約 2°Cとなっている。これまでは太平洋側よりも日本海側の平野部で顕著な高温が観測されることが多かったが、MRI-AGCM によると将来気候では太平洋側での異常高温が増え、北日本全体で同じ程度の異常高温が発生することを示している。一方、MIROC5 については、2.5-3.0°Cの上昇が陸域で見られる。しかし、地理的分布はMRI-AGCM とは違い、日本海側と太平洋側の差は見られず、オホーツク海や北海道の南東海域で高温となっている。

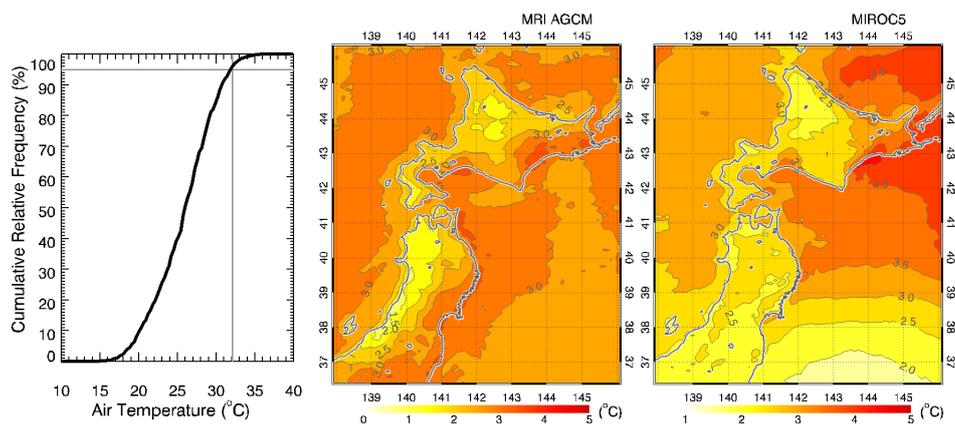


図 3 (左) 仙台における日最高気温の累積頻度分布。灰色の線の交点が 95 パーセンタイル値を表す。(中)MRI-AGCM と(右)MIROC5 による日最高気温の 95 パーセンタイル値の将来変化。

降水

近年、大雨に伴う水害や土砂災害が多く報告されるようになり、地球温暖化との関連性が注目されている。東北地方では、2013 年 7 月に山形県および福島県で梅雨前線に伴う激しい雨が発生し大きな被害が出た。気象庁「気候変動監視レポート」によると、現在のところ、日本全体の降水量の長期的な変化傾向は見られないものの、日降水量が 100 mm あるいは 200mm 以上となる大雨の年間日数は増加傾向にあることが示されている。そして、降水日数は減少する傾向にあることが報告されている。これらの傾向は、「地球温暖化予測情報第 8 巻」で示された将来変化と一致している。つまり、現在観測されている傾向は今後も継続し、将来は大雨の発生回数は多くの地域で増加し、無降水日(日降水量が 1 ミリ未満の日)数も多くの地域で増加すると見込まれている。

現在気候の東北地方について、MRI-AGCM による夏季(6-8 月)の降水量の地理的分布をみると(図 4 左)、山地に沿った地域で特に降水量が多くなっている。将来気候では、降水の地理的分布は似ているものの、夏季降水量は、全体的に約 15%増加すると予測されている(図 4 中)。ただし、将来変化についての系統的な地理的分布は見られない。一方、MIROC5 による結果を見ると(図 5 左と中)、日本海側の降水量が多いことが顕著に現れている。また、東北地方の日本海側と北海道で将来の降水量の増加が系統的に現れている(図 5 右)。

1 時間降水量が 50mm を越える短時間強雨については、現在のところ、東北地方の発生頻度は全国平均の約 20%であり、他の地域と比べて発生頻度は少ない状況である(気象庁「気候変動監視レポート」)。しかし、短時間強雨が将来増加する傾向は、どちらのダウンスケーリングデ

一タからも明らかである（図6）。

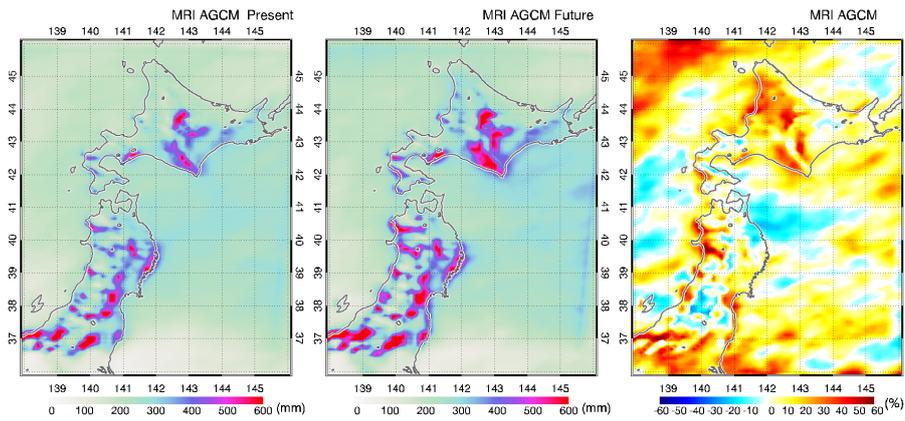


図4 MRI-AGCMによる（左）現在気候と（中）将来気候における6-8月の降水量。（右）現在気候と将来気候の6-8月の降水量の変化。

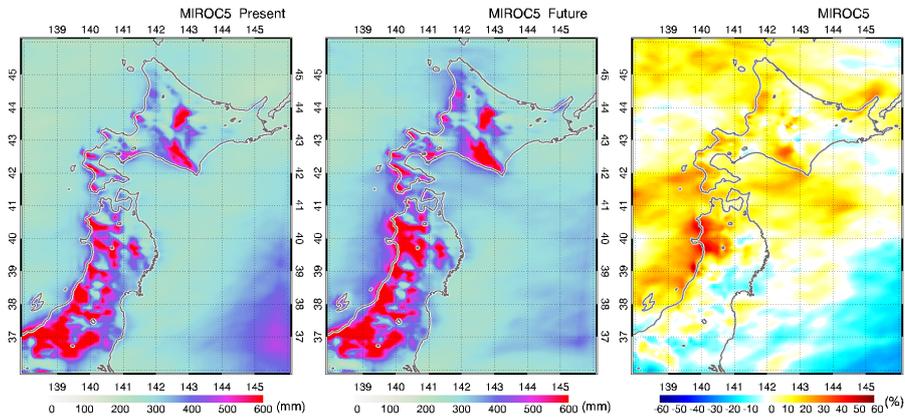


図5 MIROC5による（左）現在気候と（中）将来気候における6-8月の降水量。（右）現在気候と将来気候の6-8月の降水量の変化。

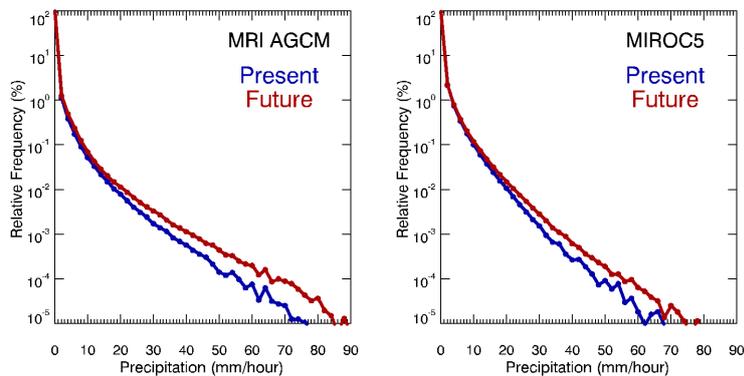


図6 現在気候と将来気候の1時間降水量の発生頻度分布。（左）MRI-AGCM、（右）MIROC5

最後に

MRI-AGCM と MIROC5 に共通する特徴としては下記のことが挙げられる。1) 地球温暖化によって夏季の平均気温が上昇した後も、将来気候の平年偏差でみるとヤマセが出現していると言える。2) 異常高温は約 3°C 上昇する。3) 夏季の降水量と短時間強雨は増加する。しかし、両気候モデルの違いは、1) 異常高温が発生する地域、2) 夏季の降水量の増加の地理的分布、に見られた。この 2 つのモデルの将来変化の原因がどこにあるのかを検証することが今後の課題である。

c)参考文献

平成 25 年度成果報告書

気象庁 地球温暖化予測情報 第 8 巻, 2013.

<http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/GWP/index.html>

気象庁 気象庁気候変動監視レポート 2013, 2014.

<http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/monitor/index.html>

Mizuta, R., Y. Adachi, S. Yukimoto, and S. Kusunoki, Estimation of the future distribution of sea surface temperature and sea ice using the CMIP3 multi-model ensemble mean. MRI Tech. Rep. 56, 28 pp., 2008. [Available at http://www.mri.jma.go.jp/Publish/Technical/DATA/VOL_56/56.html.]

Mizuta, R., H. Yoshimura, H. Murakami, M. Matsueda, H. Endo, T. Ose, K. Kamiguchi, M. Hosaka, M. Sugi, S. Yukimoto, S. Kusunoki, and A. Kitoh, Climate simulations using MRI-AGCM 3.2 with 20-km grid. J. Meteor. Soc. Japan, 90A, 233–258, 2012.

Saito, K., J. Ishida, K. Aranami, T. Hara, T. Segawa, M. Narita, and Y. Honda, Nonhydrostatic atmospheric models and operational development at JMA. J. Meteor. Soc. Japan, 85B, 271–304, 2007.

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

Watanabe, M., and Coauthors, Improved Climate Simulation by MIROC5: Mean States, Variability, and Climate Sensitivity. J. Climate, 23, 6312–6335, 2010.

3.1.2 北太平洋亜寒帯の海洋性寒冷気団

島田照久・岩崎俊樹（東北大学）

a)要旨

夏季の北太平洋亜寒帯における海洋性寒冷気団の気候学的特徴を明らかにするために、温位座標に基づく解析を行った。下層冷気は亜寒帯の海上で生成されており、陸上で冷気が消滅している。亜寒帯海域の下層冷気は、亜熱帯高気圧の東側を回って、大陸の西海岸に沿って南下した後、貿易風帯に入って消滅する。この特徴は、北太平洋と北大西洋で共通である。一方、北太平洋と北大西洋の違いは、北太平洋では、冷気が亜寒帯海域に広がり、ベーリング海峡を通じてだけ北極海の冷気とつながっているのに対し、北大西洋ではほぼ同心円状に冷気が北極海から南下して分布している点である。ヤマセが卓越した 2003 年 7 月についてみると、気候値ではカムチャツカ半島付近に見られる冷気質量が、北海道付近まで南下していた。また、オホーツク海高気圧の周辺に大きい冷気質量フラックスが生じており、これがヤマセとなっていることがわかった。

b)本文

研究の目的

ヤマセに関わる下層冷気は、北太平洋亜寒帯で形成される下層冷気の一部であると言われており、ヤマセは、「北日本に沿って南下してくる下層冷気」と理解することができる。しかし、下層冷気の分布・変動を直接解析した研究はこれまでにほとんどなく、北太平洋亜寒帯において、どのように下層冷気が生成・消滅・維持・分布しているのか、よくわかっていない。また、下層冷気の生成・消滅・維持・分布に対して、オホーツク海や千島列島付近の低い海面水温 (SST)、亜寒帯 SST フロントなどの海洋の特徴がどのように影響しているかも調べた研究はない。つまり、北太平洋亜寒帯域の下層冷気の分布を明らかにすることは、ヤマセの起源を明らかにすることと言える。

下層冷気の分布や変動についての研究があまり行われてこなかった理由は、下層冷気の解析に適した方法が適用されてこなかったからである。本研究では、下層冷気の変動解析に効果的な温位座標解析(Iwasaki et al. 2014)を採用する。そして、温位座標解析と再解析データを用いて、夏季の北太平洋亜寒帯の下層冷気の気候学的月平均場の特徴を明らかにする。また、オホーツク海高気圧が頻繁に発達してヤマセが卓越した 2003 年 7 月の下層冷気の分布の特徴を議論する。

データと方法

再解析データ ERA-Interim (Dee et al. 2011)のモデル面データを用いる。水平格子間隔は 0.75° 、鉛直層数は 60 層 (200hPa より下層で 30 層)、時間間隔は 6 時間である。下層冷気に対する地形の影響を明らかにするために、再解析データの中では、高水平鉛直解像度の ERA-Interim を利用する。また、そのモデル面データを用いることで、再解析の鉛直解像度を最大限活かして、ヤマセの下層(およそ高度 1000m 以下)冷気を捉える。解析期間は、2003-2013 年の 11 年間で、その気候学的月平均を解析する。2003 年以降は、衛星観測 SST の利用により、SST フロントの再現が良くなっている。

特定温位面以下の下層大気を定義して、その中での保存則を検討する。温位座標における連続の式を、下部境界の地表から任意の温位面 θ_r まで鉛直積分した下記の式に基づいて考える

(Iwasaki et al. 2014)。

$$\frac{\partial}{\partial t} DP + \nabla \cdot \int_{p(\theta_T)}^{p_s} v dp = M(\theta_T)$$

ここで、 p は気圧である。 $DP = p_s - p(\theta_T)$ であり (p_s は地表面気圧)、単位面積辺りの冷気質量を表す。また、 $H = \int_{p(\theta_T)}^{p_s} v dp$ を冷気質量フラックスと呼ぶ。 $M(\theta_T)$ は、非断熱過程による冷気の生成消滅を表す。この解析手法の利点は、気圧(あるいは高度)座標における熱力学過程の記述の煩雑さを回避でき、質量保存(連続)の式に従って、冷気の温度・流出入の速度・層厚を同時に考慮して冷気変動を評価できることである。

ここでは、解析に適した温位面(θ_T)の値を決定するために、274K から 300K まで 2K ごとにデータを作成して検討した。下層冷気域が最も縮小する 7 月でも温位面が亜寒帯域を十分な頻度で含み、気候平均場において温位面が亜寒帯海域以北で地表に達しないことを条件とした。図 1 によると、296K 以上の温位面を指定することにより、黒潮続流が存在する北緯 36-40 度あたりでも 70%以上の頻度で下層冷気が定義できる。これにより、亜寒帯フロントから黒潮続流フロント域を高い割合で考慮した気候値が作成可能となる。また、半球や海盆ごとの冷気総量の推定には、温位面が解析対象域の低緯度側で地表に達していた方がわかりやすい。296K 以下の温位面は、北緯 10 度より北で地表に達するが、298K 以上の温位面は低緯度でも地表に達しないで逆に赤道上の低水温域で温位面が上昇する。よって、今回の解析では、296K の温位面下の大気を下層冷気と考えることがよいと判断した。

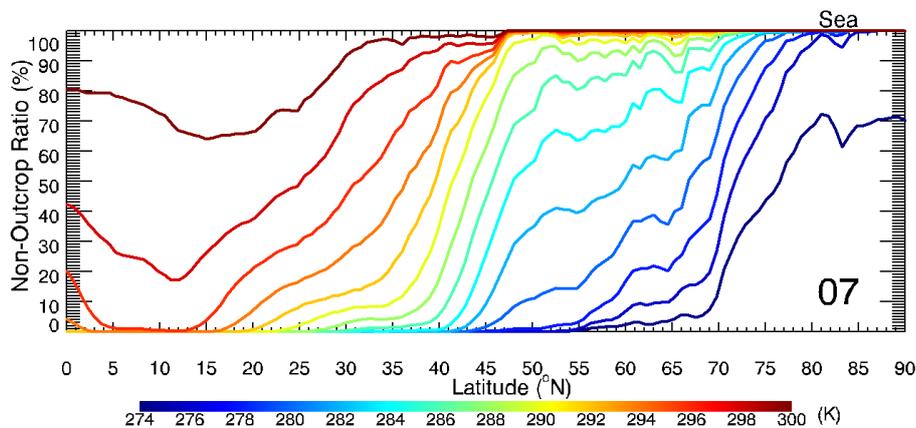


図 1 7 月の北半球の海洋上で経度平均した、ある温位面下に空気塊が存在する割合。

表 1 北緯 10 度から積算した冷気質量

	1 月	7 月
北半球 (陸上、海上) の寒冷気の総量(10^{17} kg)	5.93 (2.69, 3.24) (海上 54%)	1.56 (0.42, 1.14) (海上 73%)
60°, 50°, 40°N 以南の寒気の海上での割合	55.4%, 61.1%, 70.2%	80.8%, 92.1%, 98.9%

海上と陸上の冷気量

冷気質量について、1 月と 7 月について比較した(表 1)。冬は(主要な経路はあるものの)寒気

は北極から全体に広がり、海陸比を反映していると言えるが、夏季の冷気は南ほど海上に多く分布している。特に、北緯 60 度以南では、海上に冷気の 80%以上が存在する。

7月の総観場

7月の総観場を図2に示す。北太平洋では北太平洋高気圧が存在し、亜寒帯海域には低水温域が広がる（特にベーリング海峡から千島列島まで）。北アメリカ大陸西海岸では、地形の影響による北向きの高圧舌がみられる。その一方、海陸面の温度コントラストによる傾圧性起因する南向きの強風が卓越し、沿岸湧昇等によって、アメリカ大陸西海岸沿いに低い SST 域が伸びている。大西洋でも、亜熱帯高気圧が卓越し、北太平洋と同様な特徴がみられる。しかし、亜寒帯循環域はラブラドル海流域に限られており、その東部では、太平洋の同じ緯度帯よりも全体的に SST が高い。

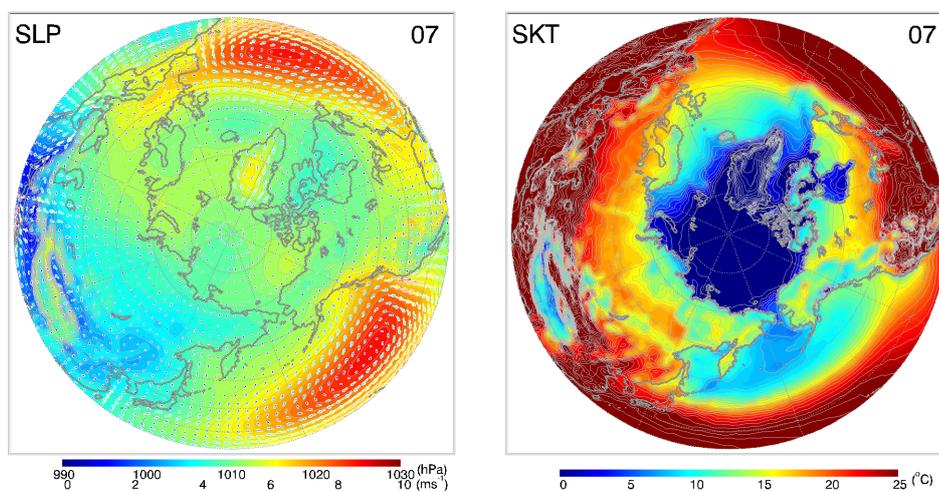


図2 7月の(左)海面気圧(コンターとカラー)と表層風(ベクトル)、(右)海面水温/地表面温度。

このような総観規模の特徴がみられる北半球について、冷気の分布を示す(図3)。北太平洋と北大西洋では、次のような共通の特徴が見られる。1) 北極海から冷気が海洋上を南下して、北緯 60 度付近で、約 180hPa の冷気質量がある。2) 下層冷気は亜熱帯高気圧の北側と東側で大きい冷気質量フラックスを示す。3) 下層冷気は、亜熱帯高気圧の東側を回って、大陸の西海岸に沿って南下した後、貿易風帯に入る。北太平洋と北大西洋の違いは、北太平洋では、冷気が亜寒帯海域に広がり、ベーリング海峡を通じてだけ北極海の冷気とつながっているのに対し、北大西洋では北極海から海域全体に冷気が南下して分布していることである。

このような冷気質量フラックスによって、冷気質量の分布を定常的に維持するために必要な冷気の生成消滅率を推定した(図4左)。全体的にみると、海上で冷気が生成、陸上で冷気が消滅している。また、亜寒帯海域の冷気は、亜寒帯の東部を南下して、貿易風帯に入って消滅している。北太平洋では、冷気の消滅域はハワイの北東にあたる海域である。一方、7月の冷気質量の標準偏差を示したのが図4右である。北極海を囲む陸上での寒冷気変動が大きい。これは、冷気が、北極海から陸域に流出しては消滅していることを示す。

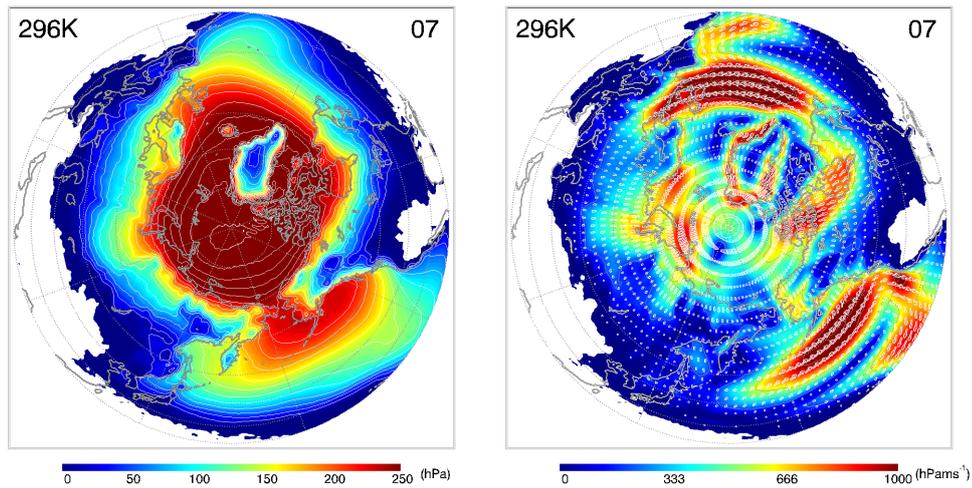


図3 7月の(左)冷気質量の分布と、(右)冷気質量フラックス(ベクトル)と大きさ(カラー)

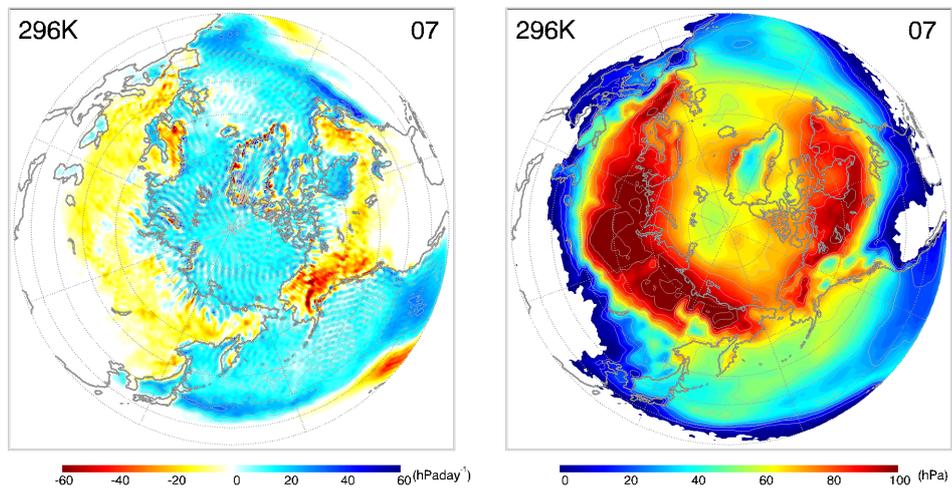


図4 7月の(左)冷気質量の生成消滅率の分布と、(右)冷気質量の標準偏差(カラー)

ベーリング海峡を縦断する経度(190.05°E)に沿って、冷気質量の季節変化を調べた(図5)。50°N以北の高緯度については、5-7月に急激に冷気が北に後退し、7月に最小となり、8月には北極から寒気形成が始まり、8-9月で急激に冷気が北太平洋に南下してくる。一方、50°N以南の低緯度域では、夏季の寒冷気の北への後退は緩やかで、7-8月に最小となる。50°N以南の寒冷気の緩やかな季節変化は、亜寒帯域での夏季の寒冷気の生成を示唆している。なお、大西洋では、北極からの寒冷気の北上と南下は太平洋ほど急激ではない。

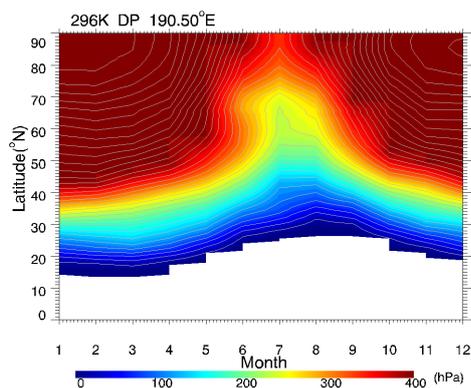


図5 ベーリング海峡を通過する南北方向（190.05°E）の冷気質量の季節変化。

このような海上の冷気形成には、SSTが低いことが重要であるが、SSTの低さだけでは冷気生成が説明できない地域もある。図6には地表気温と地表面温度/海面水温との差を示した。海面水温が気温より低いところは、北太平洋では西部から中央部、北大西洋ではアメリカ大陸東岸付近に限られており、オホーツク海やカリフォルニア沿岸では、海面水温が気温よりも高い。図4左の冷気の生成消滅率によると、オホーツク海やカリフォルニア沿岸においても冷気の生成域となっているので、この地域では、非断熱加熱の効果として、雲の放射冷却の効果が大いことを示唆している。

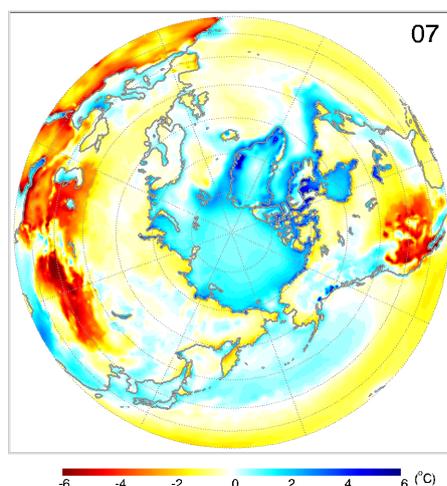


図6 7月の気温(SAT)-地表面/海面温度(SKT)の分布。

最後に、オホーツク海高気圧が頻繁に発達して、ヤマセが卓越した2003年7月の下層冷気の分布を気候値(図3)と比べる(図7)。気候値ではカムチャツカ半島南部付近に見られた150hPa程度の冷気質量域が、2003年7月は北海道付近まで南下していたことがわかる。また、オホーツク海高気圧によって、オホーツク海付近に高気圧性の循環の冷気質量フラックスが生じていた。これが北日本に到達しヤマセとなっている。北太平洋では、このような気候値と違う特徴は、オホーツク海高気圧の周辺にだけ現れている。

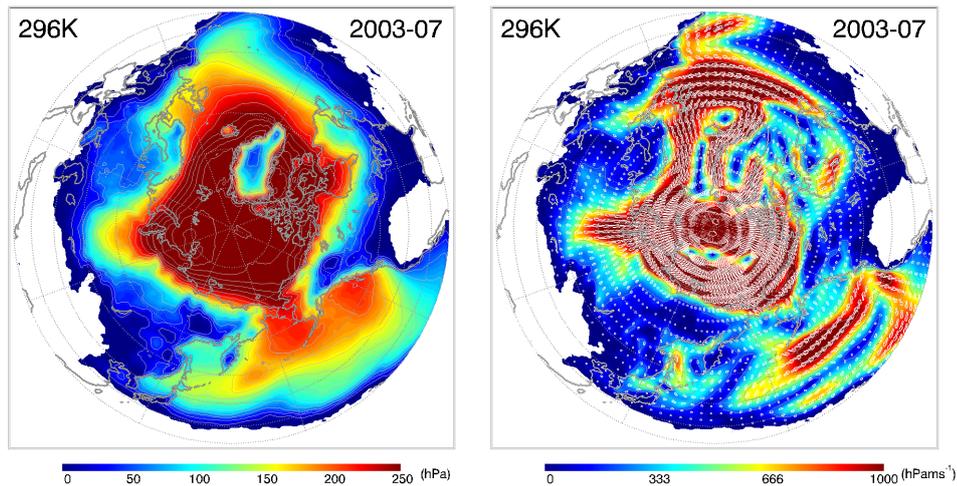


図7 2003年7月の(左)冷気質量の分布と、(右)冷気質量フラックス(ベクトル)と大きさ(カラー)

北日本に到達する冷気の全体像を明らかにするため、夏季の北太平洋亜寒帯域について特定温位面下の冷気の分布と変動を解析し、気候学的な場を明らかにした。本研究をさらに発展させて、北太平洋亜寒帯域の下層冷気に対する、亜寒帯水温前線の役割、千島列島沿いの低水温の影響等を明らかにしていく必要がある。また、下層冷気の変動に対するオホーツク海高気圧の役割も詳しく調べる必要がある。

c)参考文献

- Dee, D. P., and Coauthors, The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 137: 553–597, 2011.
- Iwasaki T., T. Shoji, Y. Kanno, M. Sawada, M. Ujiie, and K. Takaya, Isentropic analysis of polar cold air mass streams in the northern hemispheric winter. *J. Atmos. Sci.*, 71, 2230–2243, 2014.

3.1.3 力学的ダウンスケールにおける東北地方の夏季の気温の再現精度 —解像度依存性— 福井真・岩崎俊樹（東北大学）

a) 要旨

力学的ダウンスケールによる高解像度化の効果を把握するために、側面境界値として、全球予報値ではなく、再解析データ JRA-55を用い、水平解像度が25 km → 5 km → 1.5 km となるよう、東北地方の夏季の気温を対象とした力学的ダウンスケール実験を行った。気温日変化は、解像度を増やすことにより改善された。これは、高解像度化により、局地循環や地形に沿った下層雲の分布の再現性が改善したためである。一方で、日平均気温については、高解像度化による改善が認められなかった。数値モデルの不完全性に起因するバイアスや AMeDAS の代表性の問題を検討する必要がある。

b) 本文

1. はじめに

力学的ダウンスケールでは、より細かい現象を陽に扱うことができるために、時空間的に現実的な変動を再現することができる。Fukui et al. (2014) は、地域性を考慮した確率的な気象情報の作成を目指し、地上気温を対象としたアンサンブルダウンスケール実験を行い、その中期予報への有効性を示した。ただし、力学的ダウンスケールに用いるモデルも、完全ではなく、誤差の原因となりうる。実際に力学的ダウンスケールを行い高解像度化した場合に、こういったところで精度向上が見られるか、或いは、更なる精度向上のためにどのような改善が必要かを明らかにすることは重要である。本研究の目的は、力学的ダウンスケールを行い、東北地方の夏季の気温に着目し、その再現精度の解像度依存性を調べることである。

2. 実験設定

力学的ダウンスケールに使用したモデルは、気象庁非静力学モデル(Saito et al. 2007)である。全球モデルでの予報による誤差を排除するために、側面境界値として、全球予報値ではなく、再解析データである JRA-55(Kobayashi et al., 2015)を用い、水平解像度が25 km → 5 km → 1.5 km となるように力学的ダウンスケールを行った。実験期間は、ヤマセの影響により冷夏であった2003年7月と、オホーツク海高気圧が発達せず暑夏となった2004年7月とした。計算領域は図1、詳細な計算設定は表1のとおりである。

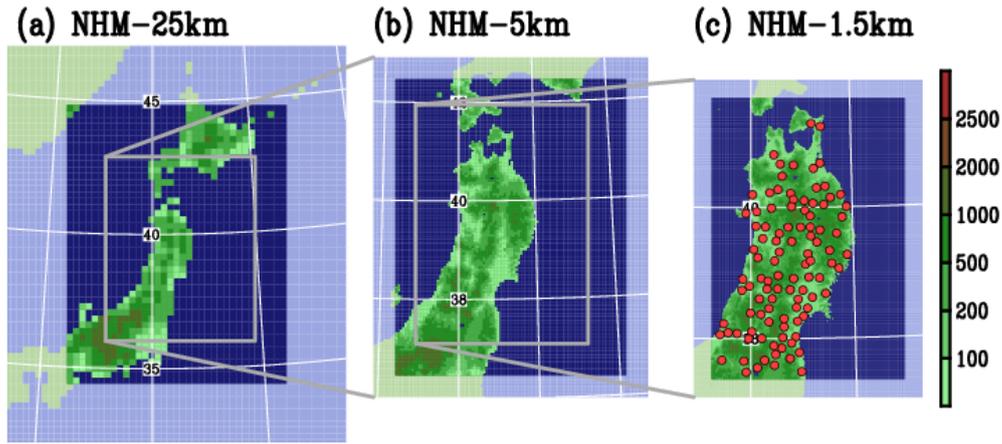


図 1 計算領域（淡色域は緩和領域）(a)水平解像度25km 実験、(b)水平解像度5km 実験、(c)水平解像度1.5km 実験。尚、(c)の赤点は解析に用いた AMeDAS 地点を示す。

表1. 計算設定

使用モデル	気象庁非静力学モデル (Saito et al. 2007)		
水平解像度(格子数)	25km (55×65)	5km (120×150)	1.5km (250×350)
初期値・境界値	JRA-55 (水平解像度1.25度)	水平解像度25km の結果	水平解像度5km の結果
時間間隔	45s	20s	8s
鉛直格子	40層 地形に沿うハイブリッド座標 (モデル上端: 22630m)		
SST	OISST(Reynolds et al., 2007) 1日毎に更新		
陸面過程	Simple Biosphere モデル (SiB; Hirai et al., 2007)		
積雲対流	Kain-Fritsch スキーム (Kain and Fritsch, 1990)	使用せず	
雲微物理	氷相(雲氷、雪、霰)を含むバルクモデル (Ikawa and Saito, 1991)		
放射過程	晴天放射：藪ほか(2005) 、雲放射：北川(2000)		
放射過程における雲	部分凝結スキーム (Sommeria and Deardorff, 1977)		
乱流クロージャー	Improved Mellor-Yamada Level3 (Nakanishi and Niino, 2004,2006)		

3. 誤差の評価方法

1.5 km 解像度の計算の領域に含まれ、且つ、実験対象期間において欠損がない、AMeDAS の観測（図1(c)の赤点；102点）と、モデル値を、AMeDAS 観測点へ内挿し、更に0.0065 Km⁻¹で高度補正を行った値との差を誤差とする。この誤差は以下のように分解できる。

$$\frac{1}{N_x N_t} \sum_{i,t} \delta x_{i,t}^2 = \left(\frac{1}{N_x N_t} \sum_{i,t} \delta x_{i,t} \right)^2 + \frac{1}{N_x} \sum_i \left(\frac{1}{N_t} \sum_t \delta x_{i,t} - \frac{1}{N_x N_t} \sum_{i,t} \delta x_{i,t} \right)^2 + \frac{1}{N_x N_t} \sum_{i,t} \left(\delta x_{i,t} - \frac{1}{N_t} \sum_t \delta x_{i,t} \right)^2$$

ここで、 $\delta x_{i,t}$ は i 地点 t 日における誤差、 N_x は総地点数、 N_t は総日数を示す。左辺は誤差の総量、右辺第一項は時間平均誤差（バイアス）の領域平均、第二項はバイアスの領域平均からの偏差成

分（局地性）、第三項は時間に依存する成分（ランダム誤差）を意味する。2003年7月と2004年7月各々において、バイアスの領域平均の項の2乗する前の値とその他の項の平方根を求め、力学的ダウンスケールの結果を評価する。

4. 結果

まず、気温日較差の誤差の解像度依存性について調べる。図2は、2003/2004年7月の気温日較差について、各解像度の誤差の要素を示す。2003年7月、2004年7月共に、高解像度化により誤差の総量(RMSE)が減少している。2003年7月は、特にバイアスの局地性が、1.0 K (dx = 25 km) 、0.7 K (dx = 5km) 、0.6 K (dx = 1.5 km) と改善されている。この結果は、水平解像度25 km の結果に見られる、奥羽山脈をはさみ、太平洋側で過大評価・日本海側で過小評価が、高解像度化により緩和されていることを反映している(図3)。これは、ヤマセによる下層雲の分布の改善がもたらしたものである。2004年7月は、領域平均バイアスが、水平解像度25 km の結果で-1.2 K と過小評価されていたものが、高解像度化により、水平解像度5 km の結果で-1.0 K、水平解像度1.5 km の結果で-0.8 K と改善がみられる。バイアスの局地性も同等の減少を示している。これは、過小評価の大きかった地域で、高解像度化によるバイアス軽減が見られたことを示す。2004年7月の日射のバイアスは小さく、力学的ダウンスケールによる高解像度化による局地循環の再現性向上が誤差軽減の一因と考えられる。

次に、日平均気温の誤差の解像度依存性について調べる。図4は、2003/2004年7月の日平均気温について、各解像度の誤差の要素を示す。両年とも高温バイアスを持っており、その寄与は約60%であった。これは、バイアス補正が、シグナル抽出に有効である可能性を示すものである。2004年7月の領域平均バイアスでは、ダウンスケールする度にバイアスが、1.3 K(dx = 25 km)、1.7K (dx = 5km)、1.9 K (dx = 1.5 km)と大きくなっている。モデルの不完全性に起因する誤差を付加する効果が、晴天時に顕著になっていることが原因として考えられる。また、AMeDAS 観測自体についても、その空間代表性が地点や場に依存し、必ずしもモデル値と対応するとは限らない。モデル値と観測の代表性の不一致が、バイアスとして現れている可能性も考えられる。

5. 今後の課題

モデルを改善し、暑夏年に顕在化するバイアスを軽減することが必要である。また、力学的ダウンスケールにより得られたデータがバイアスを含むことを考慮し、AMeDAS 観測を基に作成された農業気象モデル等へ応用する際には、キャリブレーションを行うことが必須である。

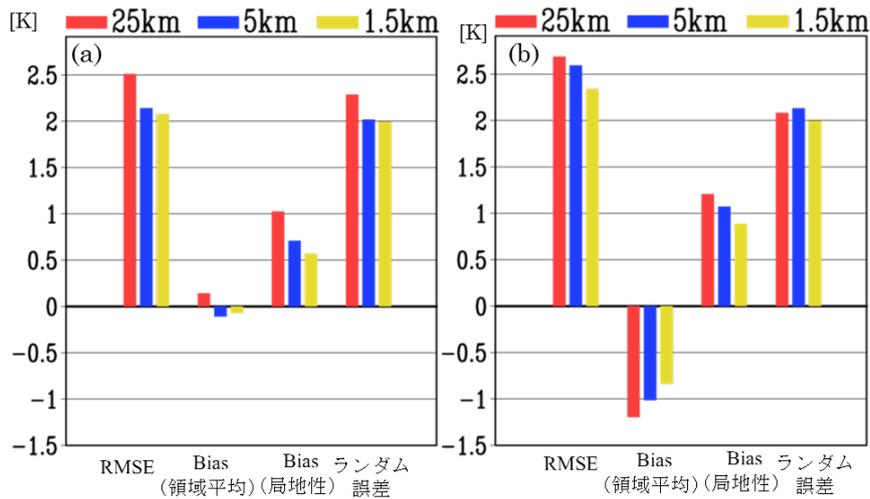


図2 (a) 2003年7月 (b) 2004年7月における気温日較差のRMSE(全誤差)とその成分(バイアスの領域平均、バイアスの局地性、ランダム誤差)。

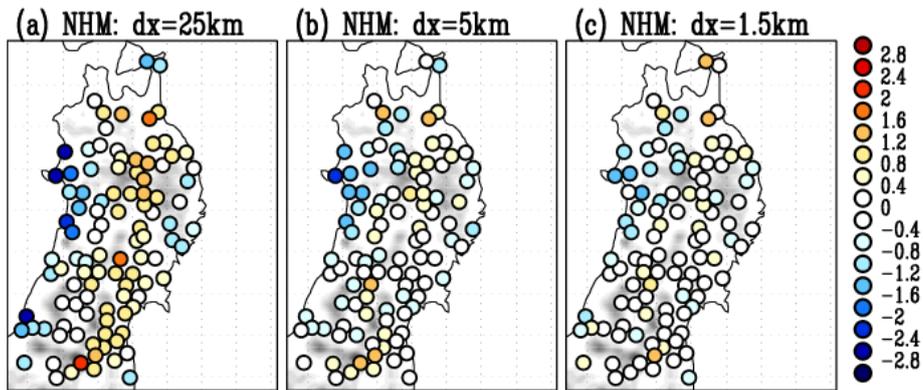


図3 2003年7月における気温日較差のバイアス。(a)水平解像度25km実験、(b)水平解像度5km実験、(c)水平解像度1.5km実験。

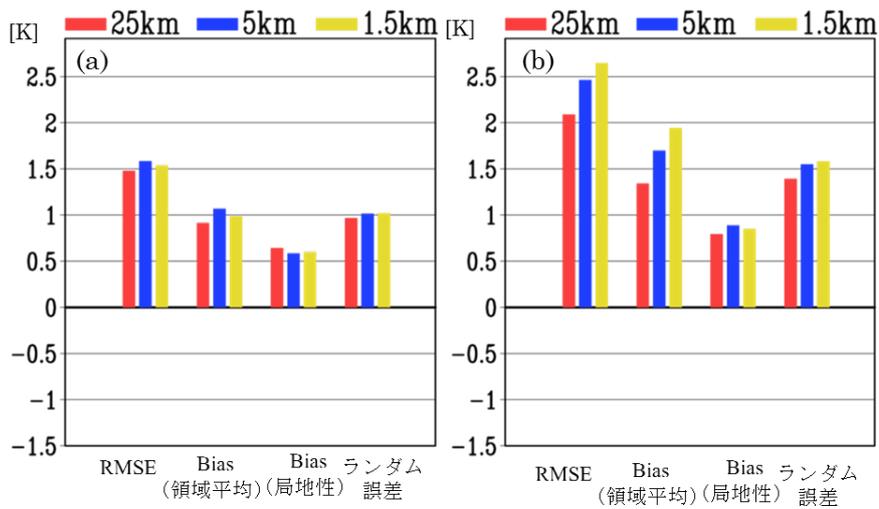


図4 (a) 2003年7月 (b) 2004年7月における日平均気温のRMSE(全誤差)とその成分(バイアスの領域平均、バイアスの局地性、ランダム誤差)。

c) 参考文献

- Hirai, M., T. Sakashita, H. Kitagawa, T. Tsuyuki, M. Hosaka, and M. Oh'izumi, Development and validation of a new land surface model for JMA's operational global model using the CEOP observation dataset. *J. Meteor. Soc. Japan*, 85, 1–24, 2007.
- Ikawa, M., and K. Saito, Description of a non-hydrostatic model developed at the Forecast Research Department of the MRI. *MRI Tech. Rep.*, 28, 238 pp., 1991.
- Fukui, S., T. Iwasaki, and W. Sha, An ensemble downscaling prediction experiment for medium-range forecast of the daily mean surface temperature distribution over northeastern Japan during summer. *J. Meteor. Soc. Japan*, 92, 505-517, 2014.
- Kain, J. S., and J. M. Fritsch, A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization. *J. Atmos. Sci.*, 47, 2784-2802, 1990.
- 北川裕人,放射過程. 数値予報課報告・別冊第46号,気象庁予報部, 16-31, 2000.
- Kobayashi, S., Y. Ota, Y. Harada, A. Ebata, 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. (in press).
- Nakanishi, M., and H. Niino, An improved Mellor-Yamada level 3 model with condensation physics: Its design and verification. *Boundary-Layer Meteorology*, 112, 1-31, 2004
- Nakanishi, M., and H. Niino, An improved Mellor-Yamada level 3 model: Its numerical stability and application to a regional prediction of advection fog. *Boundary-Layer Meteorology*, 119, 397-407, 2006.
- Reynolds, R. W., T. M. Smith, C. Liu, D. B. Chelton, K. S. Casey, and M. G. Schlax, Daily high-resolution-blended analyses for sea surface temperature. *J. Climate*, 20, 5473-5496, 2007
- Saito, K., J. Ishida, K. Aranami, T. Hara, T. Segawa, M. Narita, and Y. Honda, Nonhydrostatic atmospheric models and operational development at JMA. *J. Meteorol. Soc. Japan*, 85B, 271-304, 2007
- Sommeria, G., and J. W. Deardorff, Subgrid-scale condensation in models of non-precipitating clouds. *J. Atmos. Sci.*, 34, 344-355, 1977
- 藪将吉, 村井臣哉, 北川裕人, 晴天放射スキーム. 数値予報課報告・別冊第51号,気象庁予報部, 53-64, 2005.

3.1.4 地域気候モデルを用いた東北地方の積雪水資源の再現性

高松直史・岩崎俊樹・山崎剛（東北大学）

a) 要旨

JMA-NHM を用いて多雪年である 2005-2006 年の積雪の再現実験を行い、アメダスや APHRO_JP、MODIS の積雪被覆データを利用してその再現性を調べた。高解像度モデルは積雪分布をより正確に再現し、積雪水資源予測における力学的ダウンスケーリングの有効性が示された。しかし、主に降水量の誤差によって、再現が不十分な地域も残った。また、少雪年においては、気温の誤差が雨雪判別に影響する可能性があるため、追加検証が求められる。

b) 本文

(1) はじめに

日本の穀倉地帯である東北地方では、積雪は農業にとって重要な水資源である。そのため、将来気候における積雪水資源の予測は大きな関心事である。降雪や融雪は地形に強く依存するため、予測には高解像度の数値モデルが必要になる。しかし、モデルの物理過程は解像度に応じて最適化されているため、高解像度化が必ずしも予測精度を向上させるとは限らない。中でも、陸面過程は積雪の消長を表現するため、積雪水資源の予測において重要な過程であるが、全球モデルから移植することが多く、高解像度での計算には予期せぬ問題をきたす可能性がある。本研究では、気象庁非静力学モデル JMA-NHM (Saito et al., 2007) に陸面過程モデル MJ-SiB (大泉・三浦, 2008) を結合させて、積雪の再現性が解像度に対してどのように依存するか調べた。

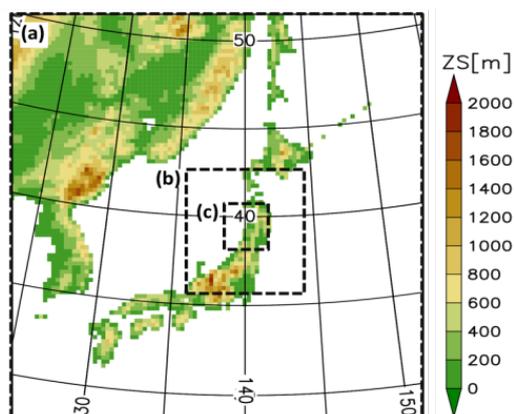


図1 数値モデルの計算領域

(a) 解像度 25km, (b) 5km, (c) 1km

(2) 方法

多雪年である 2005 年 10 月から翌年 5 月にかけて、JRA-55 から 25km、5km、1km と 3 段階ダウンスケーリングを行った (図 1)。また、比較のために、MJ-SiB の代わりに、予報現業で利用されている平板モデルを用いた計算も行った。平板モデルでは積雪の消長は表現せず、地表面被覆は陸 (雪なし) で固定される。

検証には、アメダスの気温や積雪深、APHRO_JP (Kamiguchi et al.2010) の降水量データ、衛星センサ MODIS による日々の積雪被覆プロダクトを利用し、積雪と気温・降水量との関係性について考察した。

(3) 結果と考察

図 2 は DJF における積雪深である。太平洋側ではダウンスケーリングにより過剰な積雪が改善している。しかし、日本海側ではダウンスケーリング後も積雪が不足した状態が続いている。図 3 は融雪期の各日におけるモデルと MODIS の地表面被覆状態の違いである。日本海側沿岸部ではどの解像度でも消雪が早い。太平洋側では低解像度で見られた積雪過多がダウンスケーリングにより改善している (図 2 上段)。これは図 2 で見られた厳冬期の積雪深の分布と矛盾しない

結果である。また、低解像度では山岳域の融雪の空間的なパターンを表現できていないが、高解像度ではそれを表現している（図2下段）。ただし、一部で消雪が遅い地域が残った。

この結果は降水量の分布とよく一致する。つまり、厳冬期の積雪が多く（少なく）、消雪が遅い（早い）地域では降水量が過大（過小）に評価されている（図4）。ただし、APHRO_JPは雨量計ベースのデータであるため、雨量計の少ない山岳域の精度には疑問が残る。また、捕捉率による補正を施していないので、日本海側沿岸部をはじめとした風雪が強い地域では本来の降水量はより多いものと考えられる。次に、それぞれの陸面過程同士を比較すると、SiBを用いた場合には平板モデルと比べて、日本海側を中心に冬季の降水量が2割ほど多くなった。図5はDJFにおけるそれぞれの風速と凝結水物質の断面図である。SiBでは植生を考慮して地表面粗度を与えているが、平板モデルでは一定の値を仮定している。森林地ではSiBの粗度が1桁大きいため、地表付近で季節風が弱くなっている。そのため、海岸線付近で収束・上昇が強化されて、降水雲がより多く発生したと考えられる。

一方、気温はSiBを用いた場合に、全期間において低温側にシフトすることが分かった。特に、積雪がある時期にはダウンスケーリングにより内陸部で低温バイアスが一層強められた。積雪への影響として、初冬に雨を雪と誤って判別した場合が見られた（図6）。しかし、それ以降は観測気温が十分に低かったため、雨を雪と判別することはなかった。ただし、暖冬年においては積雪期に見られる低温バイアスが雨雪判別に影響する可能性があるため、追加検証が求められる。

c) 参考文献

Kamiguchi, K., O. Arakawa, A. Kitoh, A. Yatagai, A. Hamada, and N. Yasutomi, Development of APHRO_JP, the first Japanese high-resolution daily precipitation product for more than 100 years. Hydrol. Res. Lett., 4, 60-64, 2010.

Saito, K., J. Ishida, K. Aranami, T. Hara, T. Segawa, M. Narita, and Y. Honda, Nonhydrostatic atmospheric models and operational development at JMA. J. Meteor. Soc. Japan, 85B, 271-304, 2007.

大泉・三浦, 数値予報課報告・別冊第54号, 187-192, 2008.

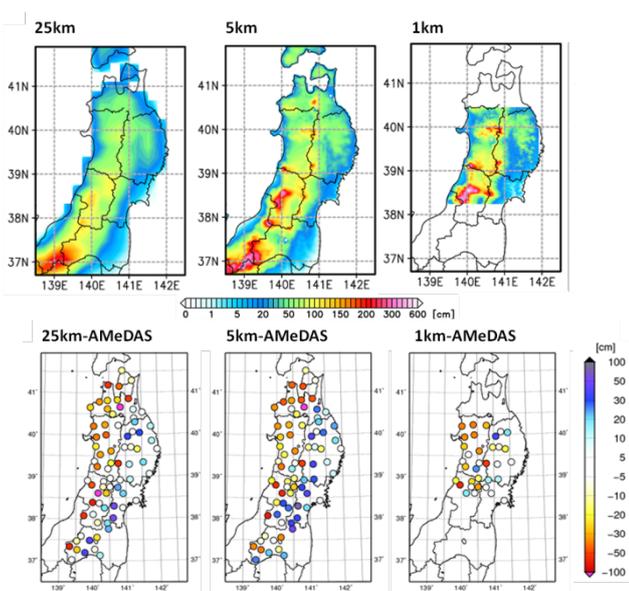


図2 DJFにおける平均積雪深
(上) モデル、(下) モデルー観測

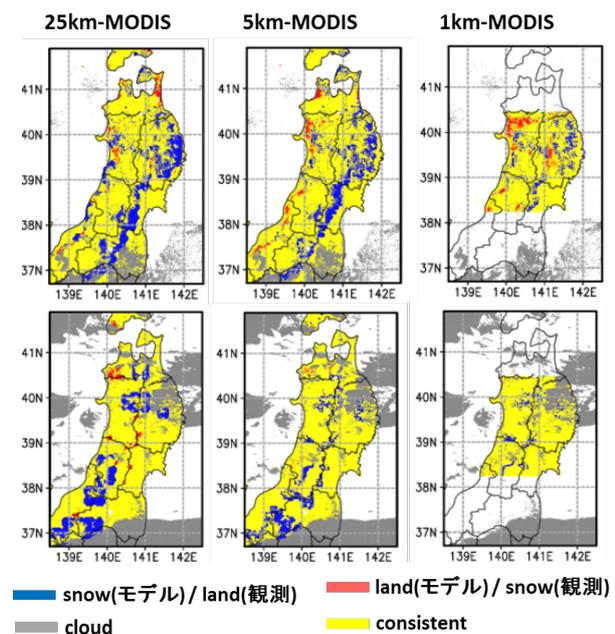


図3 3/7（上段）および4/29（下段）
における被覆状態の違い

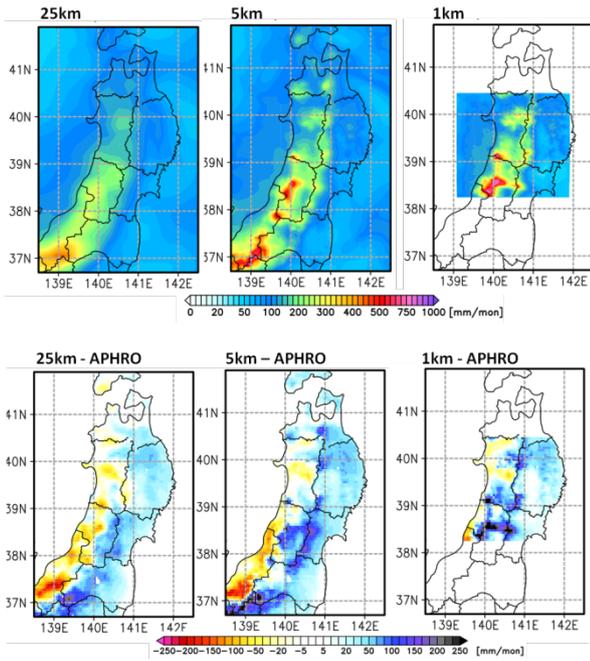


図4 DJFにおける月降水量
(上) モデル、(下) モデル-観測

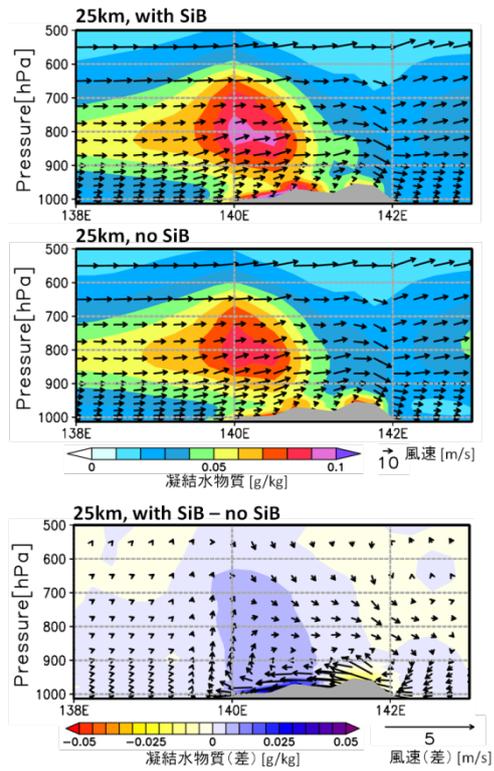


図5 北緯39.3度におけるDJFの凝結水物質と風速（上）SiBを用いた場合、（中）平板モデルを用いた場合、（下）SiB-平板

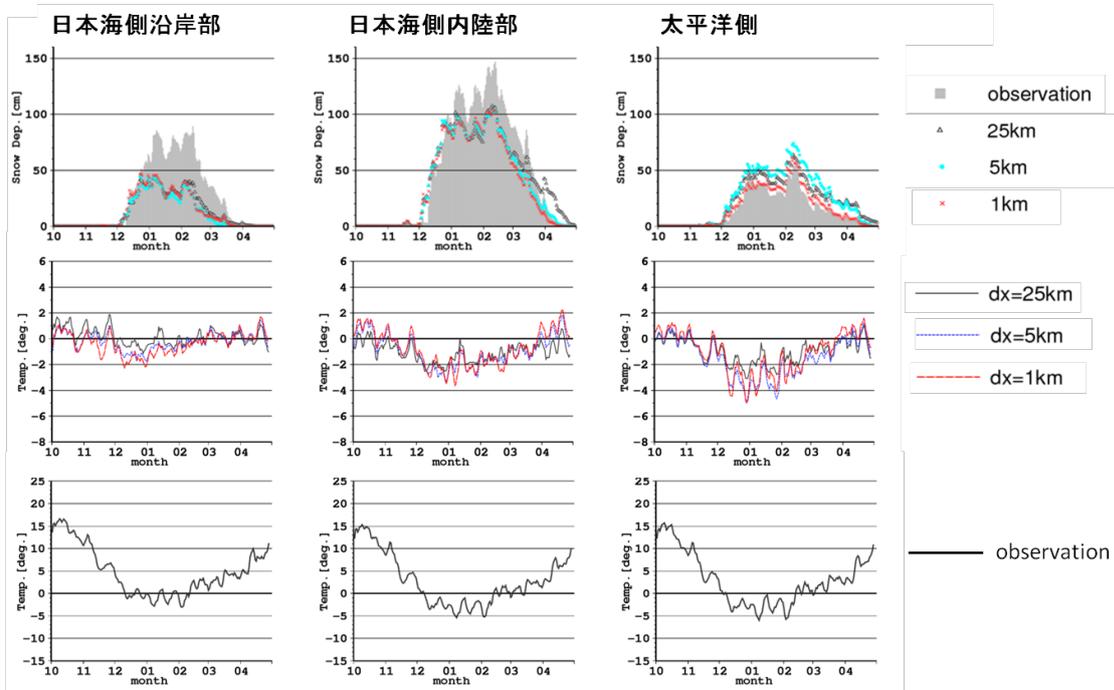


図6 各地域における積雪深の推移（上段）、気温のバイアスの推移（中段）、観測気温の推移（下段）

3.1.5 夏季三陸沖における雲の特徴と海面熱フラックス

早坂忠裕（東北大学）

a) 要旨

衛星データおよび客観解析データを用いてヤマセ雲の特徴と海面熱フラックスの関係を調べた。ヤマセ雲を含む海上の下層雲の形成過程は、大きく二つに分類できる。一つは海面水温が気温よりも高く、熱力学的に不安定な条件の下、対流が生じ、水蒸気が凝結して雲が形成される過程である。もう一つは、海面水温が気温よりも低い場合に湿潤温暖な大気が海面に接し、水蒸気が凝結して雲が形成される過程である。一般に、夏季の三陸沖においては、後者のメカニズムにより雲が形成されるが、ヤマセの場合には、冷たい北東気流が相対的に暖かい海面の上に移流し、前者のメカニズムで雲が形成されることが示された。また、雲の雲粒有効半径と海面熱フラックスの関係から、海面熱フラックスが正（海から大気）の場合、雲粒は凝結過程により成長し、負の場合には衝突併合過程が重要であることが示された。

b) 本文

本研究では、雲の特徴については同一軌道上に複数の衛星を投入した NASA の A-Train シリーズの衛星に搭載された可視赤外のイメージャー MODIS の雲プロダクトを用いた。また、気象データや海面水温については、ECMWF 再解析データおよび NASA ゴダード宇宙飛行センターの客観解析データ MERRA を用いた。

夏季の北太平洋は北部で概ね海面水温 (SST) よりも気温 (SAT) が高く南部では逆になるが、その差は小さい (図 1)。したがって、SST と SAT の関係で対流不安定が強くなるという状況ではない。この海域における雲粒有効半径は 13~17 μm 程度と大きく (図 2)、雲粒の落下速度は約 2cm/sec である。しかしながら、下層雲は継続しており、雲頂における長波放射の冷却が効いているために下層雲が維持されていると考えられる。

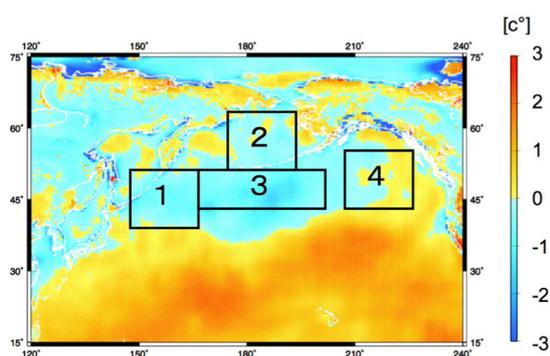


図 1 海面水温 (SST) と海上気温 (SAT) の差。2011 年 7 月の例。1 ~ 4 は解析領域を示す。

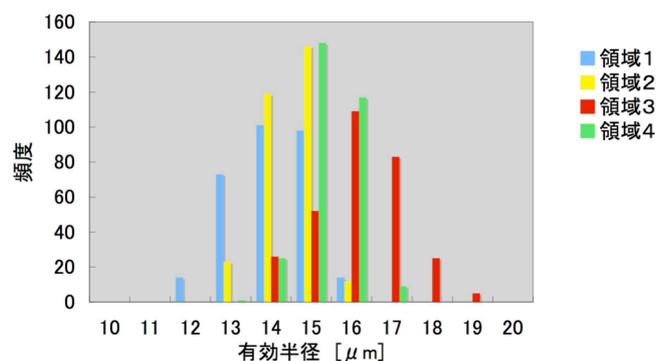


図 2 図 1 の各領域における下層雲の雲粒有効半径の頻度分布。

ところで、MODIS では可視と近赤外の 2 波長を用いて雲粒有効半径を推定しており、用いる近赤外の波長の違い (1.6 μm 、2.1 μm 、3.7 μm) によって 3 種類の有効半径が得られる (以降それぞれの有効半径を R16、R21、R37 と呼ぶ)。3.7 μm 付近の水の吸収が 1.6 μm 、2.1 μm 付近よりも強いため、R37 は雲頂付近の雲粒有効半径を表わしているのに対して、R21 や R16 は雲頂より

も少し下層の雲粒有効半径も反映している。このうち、R37 と R21 の情報を用いて、下層雲の特徴を調べた。ちなみに図 2 の有効半径は R37 を示す。

図 3、図 4 に三陸沖とアリューシャン列島南の領域における雲粒有効半径 (R21) と光学的厚さの関係、およびそれらと R37/R21 の関係を示す。解析期間は 2003 年から 2011 年間の 9 年間の 7 月である。頻度分布を見比べると、アリューシャン列島付近では、R21 の値が広い範囲に分布しており、より大きい値まで高い頻度であることが分かる。また、各領域でそれぞれの分布が似ていることが分かる。一方、三陸沖では、雲粒数濃度が高く、光学的に厚い部分にも頻度がある。これらの領域は他の領域に比べて大陸に近いことから、大陸起源もしくは人為起源のエアロゾルの影響が示唆される。

有効半径、光学的厚さと R37/R21 の関係 (下段) を見ると、どの領域でも雲粒数濃度の等値線上では R37/R21 がほぼ一定であるのに対し、鉛直積算雲水量の等値線上で雲粒有効半径の増加と共に R37/R21 の値が小さくなることが分かる。雲水量の等値線上で雲粒数濃度の減少と共に雲粒が大きくなる成長過程は衝突併合過程であり、どちらの領域でも衝突併合過程で大きな雲粒が雲層の下部に落下し、drizzle を形成することが示唆される。また、三陸沖では R37/R21 の値が全体として小さい場合が多い。これは、雲頂よりも少し下層で雲粒が大きいことを示唆する。一方、アリューシャン列島南の領域では有効半径が比較的大きい場合でも R37/R21 が大きい。

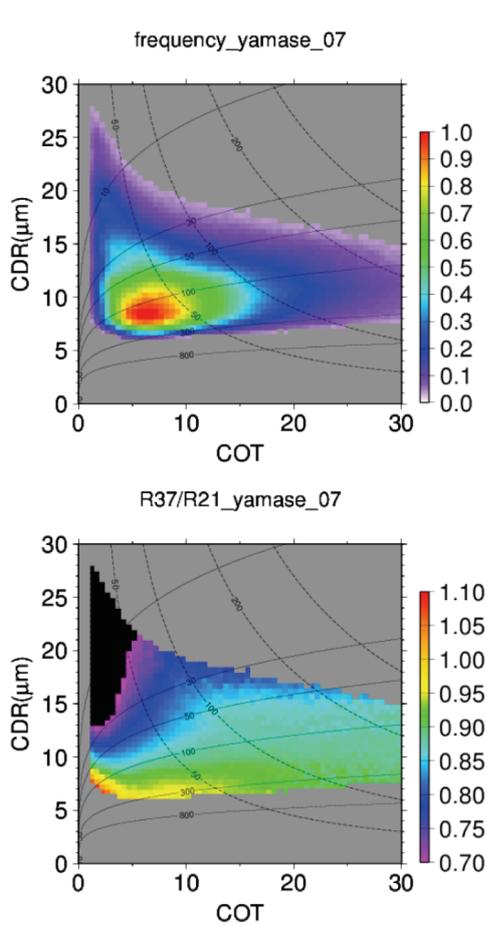


図 3 三陸沖の領域における下層雲の光学的厚さ (COT) と雲粒有効半径 (CDR) の関係。上図は頻度分布、下図は R37/R21 の値を示す。

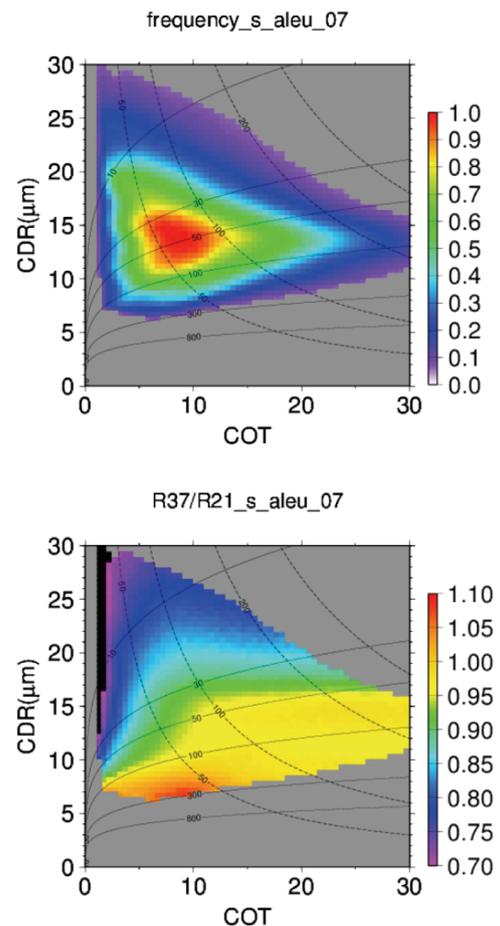


図 4 アリューシャン列島南の領域における下層雲の光学的厚さ (COT) と雲粒有効半径 (CDR) の関係。上図は頻度分布、下図は R37/R21 の値を示す。

すなわち雲頂付近の雲粒が最も大きくなる傾向が示唆される。

次に、図1に示すように、三陸沖では一般には海面水温の方が気温よりも低い、ヤマセの時にはわずかながら海面水温の方が高くなる。このように、三陸沖は海面水温と海上気温の関係が年によって異なるので、次に海面熱フラックスと雲微物理特性の関係について解析を行なった。図5 顕熱フラックス、潜熱フラックスと R37/R21 の関係を示す。これを見ると、海面から大気への熱フラックスが負のときには、R37/R21 が小さくなることが分かる。すなわち、雲頂付近よりも少し下層の方が雲粒有効半径が大きい。これは、衝突併合過程によるものであると推測される。一方、熱フラックスが正のときには雲頂付近の雲粒有効半径も比較的大きく、特にアリューシャン列島南の領域で顕著である。この場合には海面から水蒸気が補給されるため、凝結過程による雲粒の成長が重要になるもともと考えられる。

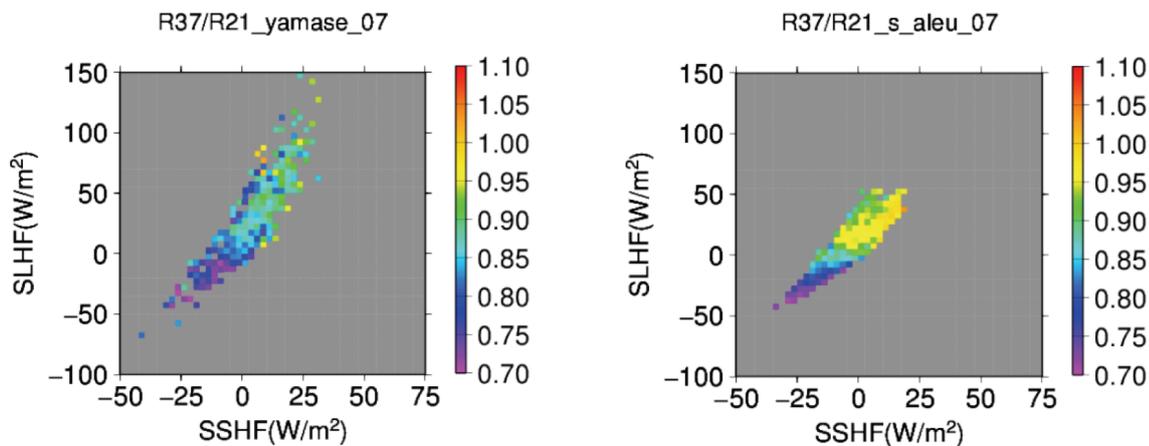


図5 海面からの顕熱フラックス (SSHf)、潜熱フラックス (SLHF) と R37/R21 の関係。左図は三陸沖の領域を、右図はアリューシャン列島南の領域を示す。

以上をまとめると、夏季の三陸沖における下層雲は、一般的には海面水温が海上気温よりも低い、ヤマセのときには逆になる。これにより、海面からの顕熱・潜熱フラックスは正負両方の値を取るが、雲粒の成長過程においては、熱フラックスが正のとき (ヤマセ時) には凝結過程が、一方、負のときには衝突併合過程が重要になることが示唆された。同様のことは、同じ時期の北太平洋の他の領域においても見られるが、定量的な振る舞いが異なっており、今後、詳細に検討する必要がある。

3.1.6 オホーツク海と日本周辺の雲分布の二つのレジーム

島田照久・岩崎俊樹（東北大学）

a)要旨

本研究では、ヤマセインデックスの両符号についてのコンポジット解析により、オホーツク海と日本周辺の雲分布の二つのレジームを示した。1つ目のレジームは、ヤマセが卓越する場で、オホーツク海上では、雲水極大層は高度 500m 付近に限定され、鉛直積算雲水量は平年偏差より少なくなる。日本周辺では、オホーツク海高気圧の南縁の東風や梅雨前線に伴う水蒸気フラックスの収束が顕著で、雲形成を促進する。もう一方のレジームは、オホーツク海上の低気圧性循環によって、オホーツク海に南西風が吹き込む場である。このときは、南よりの風による水蒸気フラックスが亜寒帯フロント上で収束し、雲形成を促進する。また、低い海面水温によって移流霧が発生する。一方、日本列島周辺では、日本列島に沿って南西風が卓越するため、日本周辺の雲水量は平年偏差より少なくなる。このような雲水量のオホーツク海と日本周辺のダイポールパターンは、地表面の正味の短波放射量にも反映されている。

b)本文

研究の目的

中緯度海洋上では夏季に下層雲が頻繁に発生する。北太平洋についてみると、オホーツク海は、下層雲が卓越する海域の北西端にあたり、オホーツク海には下層雲形成に適したメカニズムがあることが指摘されている。オホーツク海の低い海面水温(SST)が、雲形成を促進し、雲の上端での長波放射による冷却が大気下層を安定化し、下層雲形成に適した状況をつくる(e.g., Koseki et al. 2012)。また、千島列島周辺には、海洋の潮汐混合により特に低い SST が表れ(図 1)、これが霧形成を促進している(Tokinaga and Xie 2009; Nishikawa et al., 2014)。一方で、霧の発生時は、SST が気温よりも高く海面付近では不安定であることが観測されている(Tachibana et al. 2008)。

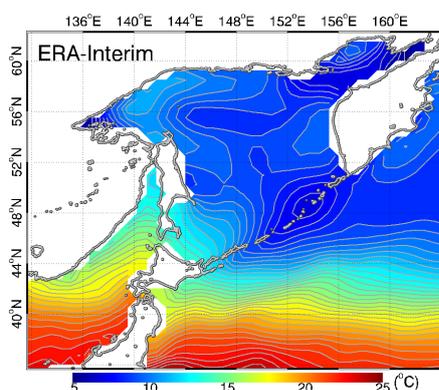


図 1 ERA-Interim 再解析データによる SST の気候平均 (2003-2009, 6-8 月)。

しかしながら、オホーツク海における下層雲の変動とオホーツク海高気圧との関係はあまり議論されたことはない。その結果、「夏季のオホーツク海上では下層雲が多い」、「ヤマセは下層雲を伴って東北地方に吹き寄せる」という二つの描像が、一般的に認識されてきたように思われる。しかし、最近この二つの描像を切り分ける必要があることを示唆する結果が報告されている。まず、水蒸気を多く含んだ南風がオホーツク海上での霧形成を促進することが示されている

(Tokinaga et al. 2009)。また、ヤマセ卓越時のオホーツク海とその周辺(日本海北部、千島列島周辺海域)では、鉛直積算雲水量が平年値に対して負偏差になることが示された(Shimada et al. 2014)。これらの結果は、釧路の霧の発生状況と一致している(Sugimoto et al. 2013)。そこで、本研究では、ヤマセインデックスの両符号で表現される二つのレジームを考察することによって、オホーツク海と日本周辺の雲分布を明らかにする。

データと方法

2003-2009年の6-8月についての夏季気候値を議論する。ヨーロッパ中期予報センターの再解析データ ERA-Interim(Dee et al. 2011)を用いる。グリッド間隔は、 0.75° である。MODISによって観測された雲の光学的厚さのデータ(1° 格子)を用いる。また、地表面での日平均の正味の短波放射量を用いる。これは、ISCCP-FDデータセットからOAFfluxデータの 1° 格子にリサンプリングされたものである(Zhang et al. 2004)。

ヤマセインデックスに基づいたコンポジット解析を行う(Shimada et al. 2014)。ここでは、ヤマセインデックスの一つである津軽海峡インデックスを用いる。このインデックスは、津軽海峡の東西気圧差(函館-深浦)で定義され、オホーツク海高気圧が南下し、東北地方全体にヤマセが影響する状況をよく表現する。インデックスが+1標準偏差より大きい時と、-1標準偏差より小さい時の二つのレジームを考える。この条件における、海面気圧(SLP)、10m風、2-m気温のコンポジット場を図2a,bに示す。インデックスが+1標準偏差を越える時は(図2a)、ヤマセ卓越時を表現し、オホーツク海には高気圧循環(オホーツク海高気圧)がみられ、日本周辺では、低温偏差場になる。オホーツク海高気圧の南では、東風が北日本に向かって吹く。また、日本の南岸には、梅雨前線に対応する東に伸びる低圧の舌がみられる。一方、インデックスが+1標準偏差以下の時は(図2b)、オホーツク海上には低気圧性循環が見られ、日本列島に沿った南西風が、オホーツク海に向かって吹く。このとき日本周辺は高温偏差場になる。この二つのレジームをヤマセ卓越時、南西風時と呼ぶことにする。

結果

二つのレジームについて、鉛直積算雲水量の夏季平均からの偏差を見ると、オホーツク海と日本周辺域でダイポールパターンを示すことがわかる(図2cd)。ヤマセ卓越時(南西風時)には、オホーツク海(日本周辺)で鉛直雲水量が減少し、日本周辺(千島列島を中心にオホーツク海周辺)で増加する。このようなダイポールパターンは、衛星観測(AMSR-EとAIRS)や再解析データJRA-25/JCDASを用いて同様の解析を行った時も見られ、データセットには依存しないことを確認している。また、雲の光学的厚さや地表面での下向き短波放射量についても、鉛直積算雲水量の偏差の分布に対応したダイポールパターンが見られる(図2e,f,g,h)。特に、ヤマセが卓越する時に、鉛直積算雲水量が増加し日射が少なくなるのは、本州周辺に限られており、オホーツク海では、鉛直積算雲水量が減少し、気候値より多くの日射が海面に到達している。

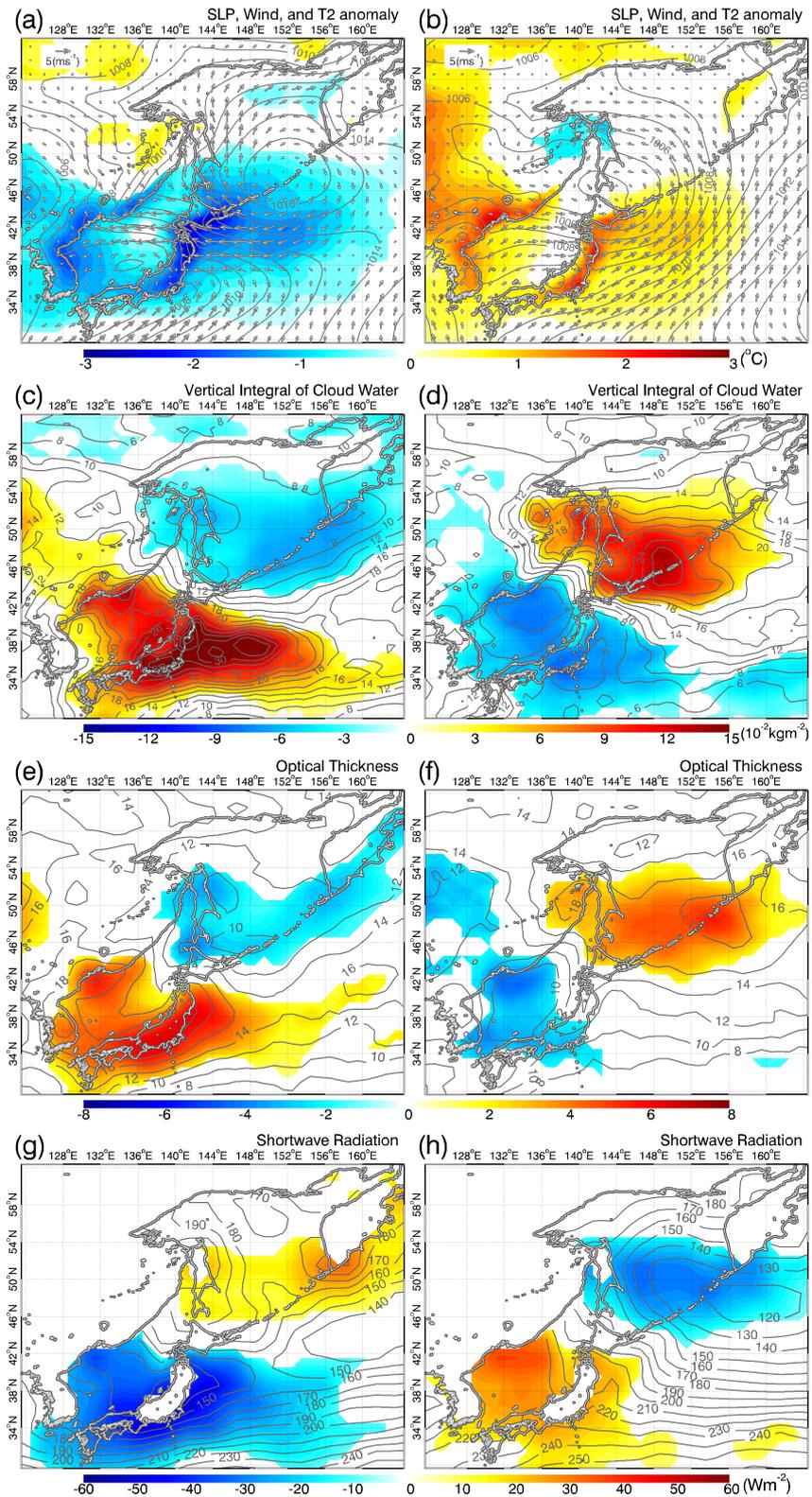


図2 ヤマセ卓越時(左)と南西風時(右)の大気場のコンポジット。(a, b) 海面気圧(コンター)、10m風(ベクトル)、気温の夏季平均からの偏差(カラー)。(c, d) 鉛直積算雲水量、(e, f) 雲の光学的厚さ、(g, h) 地表における正味の下向き短波放射のコンポジット(コンター)と夏季気候値からの偏差(カラー)。

このような二つのレジームの雲水分布を検証するため、下層(1000m以下)で鉛直積算した水蒸気フラックスの発散を示す(図3)。ヤマセ卓越時は(図3a)、日本の南岸から三陸沖、またその東方に水蒸気フラックスの収束が見られ、オホーツク海の南縁の東風(ヤマセ)や梅雨前線が寄与している。一方、南西風時は(図3a)、千島列島のすぐ南、亜寒帯フロント上で水蒸気フラックスが収束しており、低いSSTによる凝結を示す。

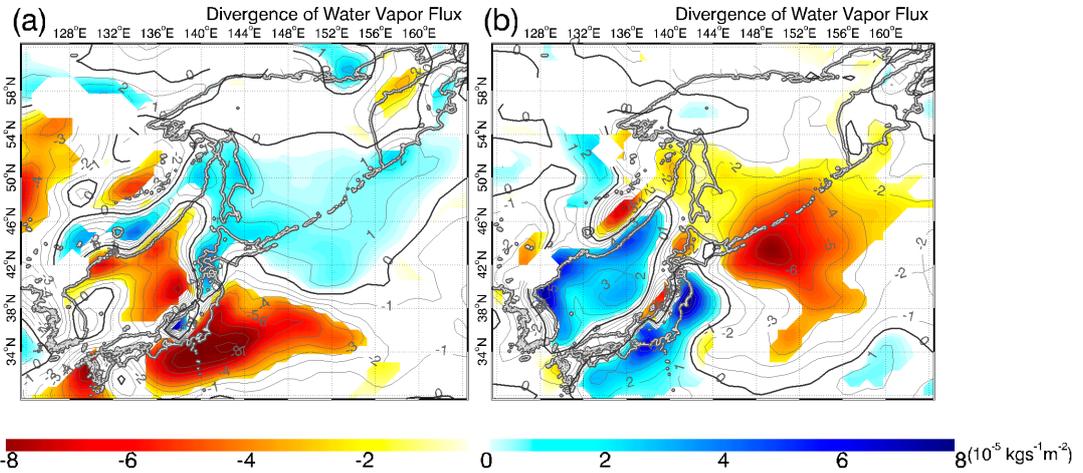


図3 (a) ヤマセ卓越時と (b) 南西風時の下層 (1000m) の鉛直積算水蒸気フラックスの発散。

次に、雲水混合比の鉛直分布をみしてみる。148.50°Eに沿った南北断面を図4に示す。全体的には、鉛直積算雲水量の偏差と一致した鉛直構造を示す。しかし、ヤマセ卓越時は、オホーツク海高気圧下(42°N以北)で、高度500m付近に雲水混合比の極大層がある(図4a)。一方、南西風時は、亜寒帯フロント上の高度300m以下に雲水混合比の正偏差(42°-46°N)が見られる。さらに雲水混合比の極大層は高度800m以下にみられ、海面に達している(図4b)。これは霧の発生を示唆する。

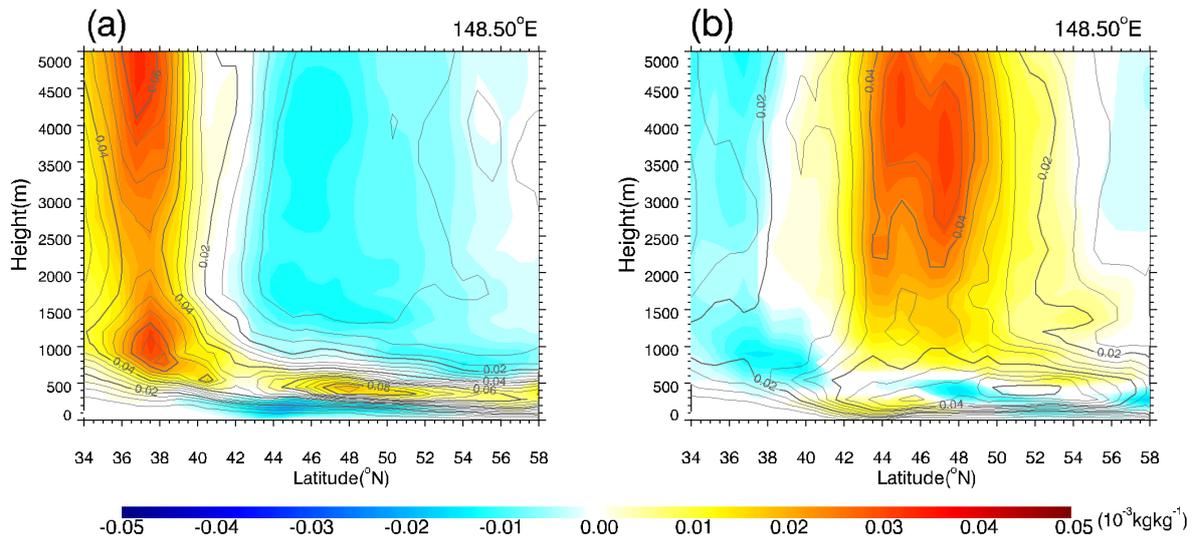


図4 (a) ヤマセ卓越時と (b) 南西風時の雲水混合比のコンポジット(コンター)と気候平均からの偏差(カラー)の148.50°Eに沿った鉛直断面。

図4の断面の位置に対応した気温とSSTの差を図5に示す。ここでは、再解析データの表皮温度(SKT)を海面についてはSSTとして記述する。ヤマセ卓越時については、千島列島付近の低水温域以外は、SSTのほうが気温より高くなっている(図5a)。オホーツク海(46°N以北)では、下層雲が形成されているため、下層雲上端での放射冷却が下層大気気温を減少させているためと考えられる(Koseki et al. 2012)。南西風時は、気温のほうが全体的に高くなっており、南西風が亜寒帯フロントを横切るときに海面からの冷却を受けることがわかる(図5b; Tokinaga et al. 2009)。

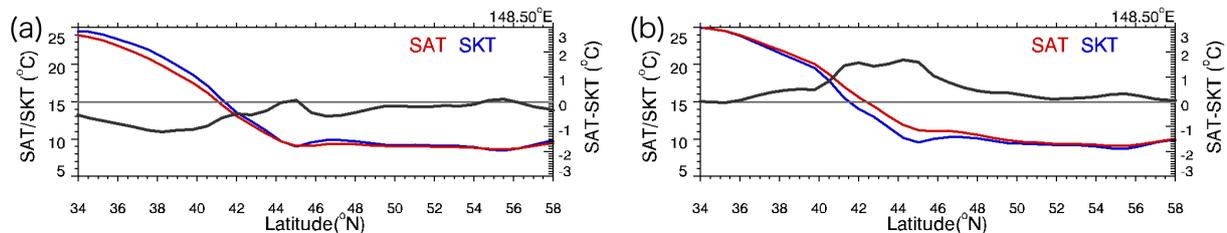


図5 (a) ヤマセ卓越時と (b) 南西風時の 148.50°E に沿った、気温 (赤)、海面水温 (青)、気温と海面水温の差 (黒)。

本研究では、ヤマセインデックスによって表現される二つのレジームを考察することによって、雲分布のダイポールパターンを示し、雲分布の変動に関する先行研究の結果を整理することができた。今後は、それぞれのレジームについて、あるいはレジーム間での、雲形成の時間発展を詳しく調べる必要がある。また、雲の形成が、地形や SST 分布の影響を大きく受ける地域については、ダウンスケーリングデータを用いた解析が必要である。

c)参考文献

- Dee, D. P., and Coauthors, The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 137: 553–597, 2011
- Koseki, S., T. Nakamura, H. Mitsudera, and Y. Wang, Modeling low-level clouds over the Okhotsk Sea in summer: Cloud formation and its effects on the Okhotsk high, *J. Geophys. Res.*, 117, D05208, doi:10.1029/2011JD016462, 2012.
- Nishikawa, H., Y. Tachibana, and Y. Udagawa, Radiosonde observational evidence of the impact of an extremely cold SST spot on a mesoscale anticyclone, *J. Geophys. Res.*, 119, 9183–9195, doi:10.1002/2014JD021538, 2014.
- Shimada, T. M. Sawada, and T. Iwasaki, Indices of cool summer climate in northern Japan: Yamase indices, *Journal of Meteorological Society of Japan*, in press.
- Tachibana, Y., K. Iwamoto, H. Ogawa, M. Shiohara, K. Takeuchi, and M. Wakatsuchi, Observational study on atmospheric and oceanic boundary-layer structures accompanying the Okhotsk anticyclone under fog and non-fog conditions, *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 86, 753–771, 2008
- Tokinaga, H., and S.-P. Xie, Ocean tidal cooling effect on summer sea fog over the Okhotsk Sea. *J. Geophys. Res.*, 114, D14102, doi:10.1029/2008JD011477, 2009.
- Tokinaga, H., Y. Tanimoto, S.-P. Xie, T. Sampe, H. Tomita, and H. Ichikawa, Ocean frontal effects on the vertical development of clouds over the western North Pacific: In situ and satellite observations,

J. Climate, 22, 4241-4260, 2009.

Zhang, Y., W. B. Rossow, A. A. Lacis, V. Oinas, and M. I. Mishchenko, Calculation of radiative fluxes from the surface to top of atmosphere based on ISCCP and other global data sets: Refinements of the radiative transfer model and the input data, J. Geophys. Res., 109, D19105, doi:10.1029/2003JD004457, 2004.

3.1.7 モデルにおける夏季の中緯度の海上下層雲表現の改善

川合秀明（気象研究所）

a)要旨

多くの気候モデルや数値予報モデルでは、海上下層雲の表現は不十分である。気象庁の現業全球モデルにおいても、日本付近の夏季のヤマセとも関連の深い、北太平洋北部の夏季の雲が不足しており、雲による短波放射の反射が過少である。この夏季の北太平洋北部の下層雲について、下層雲スキームを改良することで再現性を向上させることができた。また、それに伴い、短波放射の雲による反射が不十分であるというバイアスもかなり軽減することができた。さらに、ヤマセのような寒気移流場、移流霧の発生しやすい暖気移流場を分けて解析し、その鉛直構造についても調査を行い、モデルがヤマセのような場での下層雲や移流霧の鉛直構造をある程度表現できていることを示した。

b)本文

(1) 背景

中緯度の海上下層雲は、ヤマセ発生時に東北地方の気温を著しく下げること、また、オホーツク海や北太平洋北部の海上下層雲は、オホーツク海高気圧への影響も指摘されていることなどから、ヤマセ現象の非常に重要な要素である。しかし、多くの気候モデルや数値予報モデルでは、こうした海上下層雲の表現は不十分であり、気象庁の現業全球モデルにおいても、日本付近の夏季のヤマセとも関連の深い、北太平洋北部の夏季の雲による短波放射の反射が過少である。そして、そのために海面に過剰な短波放射が入射している。そこで、気象庁全球モデル GSM のそうした欠点を改善し、このバイアスを小さくすることを試みた。

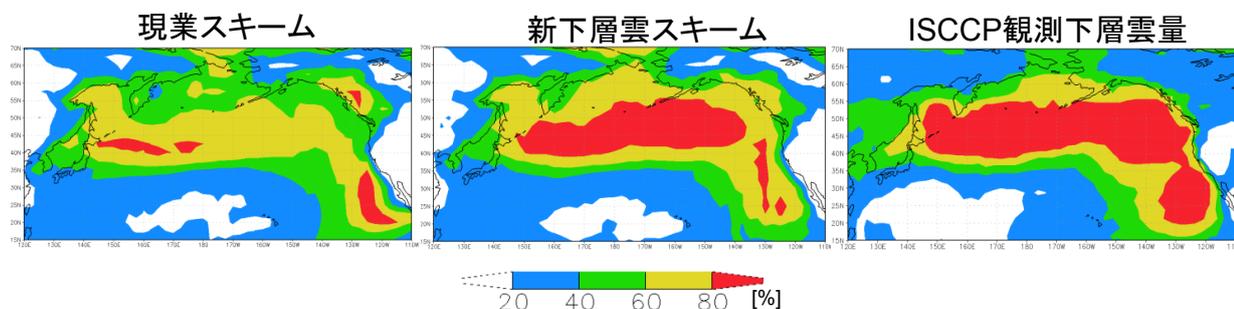


図1 7月の下層雲量。左から、現業下層雲スキーム、新下層雲スキームの結果。1987年から1989年の3年分の7月のデータから求めた気候値である。右は、ISCCP観測下層雲量。ISCCP観測下層雲量は、モデルデータとの比較のため、上の雲に隠されていない部分に占める下層雲量を計算したものである。

(2) モデルの改良と結果の概要

(i) モデルの改良の概要

従来のモデルにおいては、中緯度の下層雲の雲頂における大気の鉛直拡散が過大であった。このために、下層雲が生じようとしても、より乾燥した自由大気から境界層に乾燥空気が流入し、

湿度の高い状態を壊してしまっていた。また、仮に、雲層ができて、雲頂の鉛直拡散が過大であるために、雲水を消散させてしまっていた。そこで、雲層ができる場合とそうでない場合を適切に判定する方法を考案し、雲層ができるような場合には、この過大な拡散が起こらないよう、モデルを改良した (Kawai 2013)。

また、もう一つの問題は、雲水から降水への変換に関わるものである。従来のモデルでは、雲水から降水への変換が過剰に起こっており、そのために、仮に下層雲ができたとしても、その雲水が次々に降水へと変換されて、雲水が失われてしまっていた。そこで、この変換の始まる雲水量の閾値の値を大きく設定することで、この変換が起こりにくくなるよう、モデルを修正した。

以下では、これらの改良の効果を分けて見ていく。

(ii) 結果の概要

まず、これらの改良の主な結果を以下に示す。実験に使用したモデルは、気象庁全球モデル GSM (TL159L60 を使用) である。図 1 より、ISCCP の衛星観測データでは、北太平洋北部の下層雲量は、ほとんどの領域で 80% を超えているが、現業下層雲スキームを用いた場合、下層雲量は 80% に達しているところはほとんどないことがわかる。一方で、モデルの雲頂における拡散過程を改良した場合、80% に達するところがたいへん広くなり、下層雲量が観測値に近づいている。また、図 2 に、大気上端上向き短波放射の誤差を示す。現業下層雲スキームでは、雲量が過少であることに伴い、太陽からの短波放射の雲による反射が足りず、上向き短波放射は大きな負のバイアスを持っていた。新下層雲スキームを使用したところ、雲による反射が増加し、この負のバイアスはある程度緩和されたことがわかる。しかし、まだ、この負のバイアスはかなり残っている。次に、新下層雲スキームの利用に加えて、雲水から降水への変換の際の雲水量の閾値を大きくしたところ、この北太平洋北部の短波放射の負のバイアスはさらに軽減され、短波放射は観測値と近くなった。

(3) モデルで再現された雲の鉛直構造

次に、モデルで表現されたこの雲の鉛直構造を見ていく。図 3 の上段に雲量の鉛直構造を示す。この図から、モデルで再現されている北太平洋北部の雲層は、950hPa 付近を中心として、

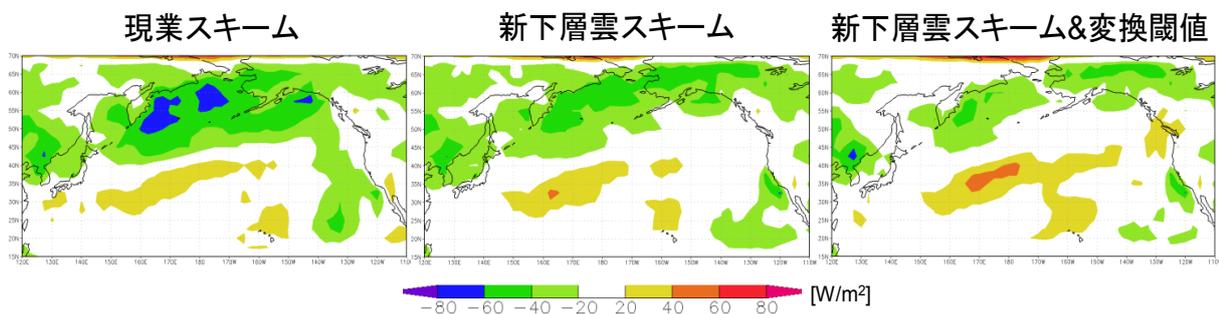


図 2 7月の大気上端上向き短波放射誤差。左から、現業下層雲スキーム、新下層雲スキーム、新下層雲スキームに加え、雲水から降水への変換における雲水量閾値を大きくした実験の結果。モデルのデータ期間等は図 1 に同じ。誤差を計算するための観測値には、ERBE データを用いた。

1km 以下付近の高度に存在していることがわかる。この雲層の雲頂高度は、観測データとも整合的である (Kawai et al. 2014)。新下層雲スキームを用いると、この辺りの雲層の雲量が大きくなっている。また、下段に雲水量の図を載せたが、同時に雲水量も増加している。これらから、新下層雲スキームで、自由大気との空気の混合が抑えられた結果、この雲層がより保たれやすくなっていることがわかる。さらに、雲水量の閾値を大きくして、降水に変換しにくくした場合には、この雲層の雲水量がさらに増加している。また、そればかりではなく、雲量もやや増加していることがわかる。雲水が失われにくくなるだけでなく、境界層内上部の湿りが失われにくくなることで、雲量の増加にもつながっていると考えられる。

さて、北太平洋北部の海域では、ヤマセの場合のように風が北よりの場合と、逆に風が南よりの場合とで、異なるメカニズムで雲が発生する。ここでは、風が北よりと南よりの場合に分けて、実験結果を見ていく。図 4 の左から 2 つが、北よりの風の場合の平均図であり、右の 2 つが、南よりの風の場合の平均図である。これを見ると、北よりの風の際には、雲層は海面から離れて、下層雲となっていることがわかる。また、この時には、海面付近の等温位線は垂直に立っており、混合層が形成されていることがわかる。これは、寒気移流のために海面が大気より温かくなっており、大気がよくかき混ぜられているからである。新下層雲スキーム (雲水量閾値の変更も加えられている) では、この下層雲の雲層の雲量が増加している。ヤマセの場合にも、この場合と同様のインパクトがあると推測される。一方、南寄りの風がある程度強い場合には、釧路などで観測されるような移流霧が発生する。図を見ると、3 m/s 以上の南寄りの風の場合には、海面水温

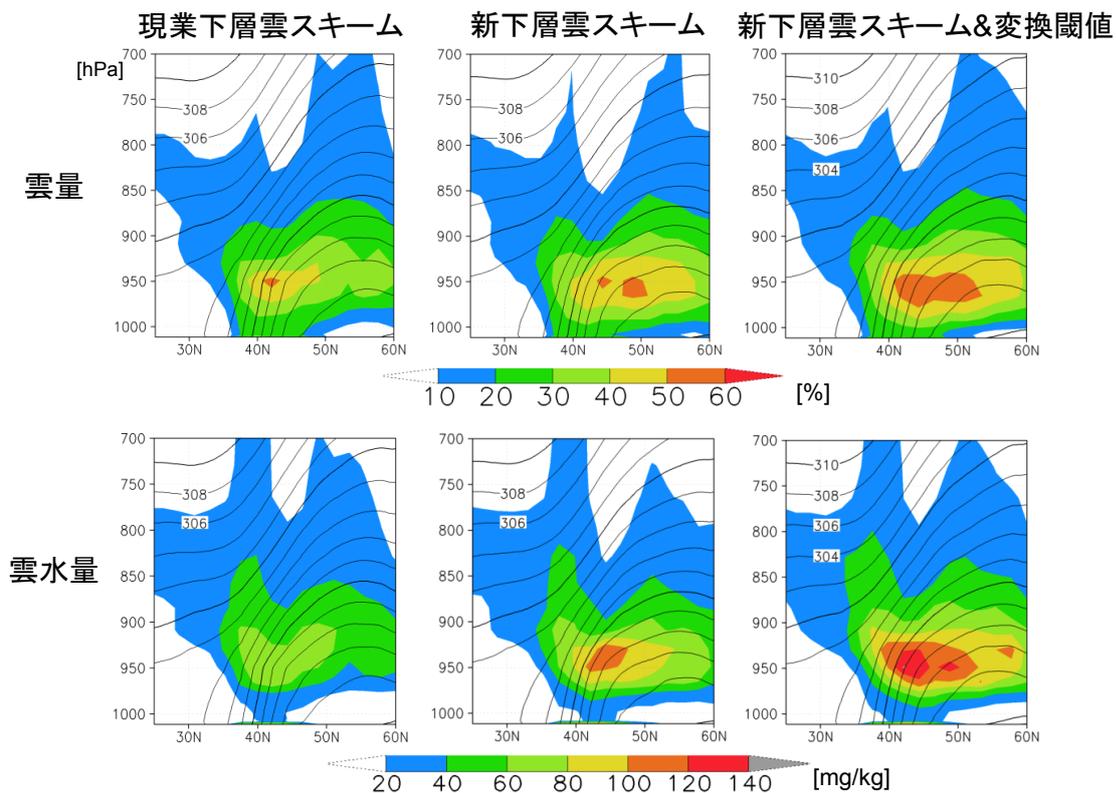


図 3 モデルで再現された雲量 (上段) と雲水量 (下段) の鉛直断面。東経 170 度から西経 170 度まで経度方向に平均したもの。モデルのデータ期間、実験設定等は図 2 に同じ。色が雲量または雲水量で、等値線は温位 (K)。

の温度傾度の大きい北緯 40 度付近を中心として、海面に接した部分でも雲量が見られる。つまり、モデルの中でも暖かい空気が海面に冷やされて発生した移流霧が再現されている。この時、この付近の等温位線は、海面付近で斜めに傾いており、海面に近いところから大気が安定になっていることを示している。今回の変更の結果、この移流霧の頻度の増加は顕著ではないが、南風の場合でも、海面水温の温度傾度の小さい、北緯 50 度以北では海面から離れた下層雲の層が存在しており、今回の変更は、その雲層の維持には大きく寄与していることもわかる。なお、こうした構造は、谷本ら（2006）などの船舶観測データとも整合的である。

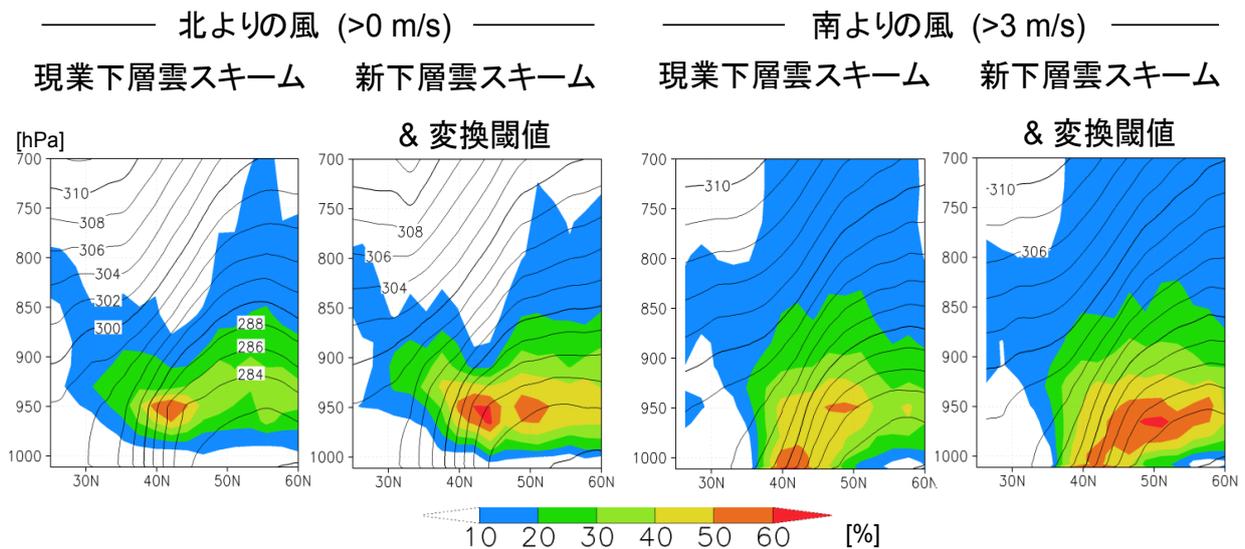


図4 モデルで再現された雲量の鉛直断面。左 2 つが寒気移流場 (0 m/s 以上の北風の場合)、右 2 つが強い暖気移流場 (3 m/s 以上の南風) の平均値。それぞれの組の左が現業下層雲スキーム、右が新下層雲スキームを使用し雲水量閾値を大きくした実験の結果。その他は、図 3 に同じ。

(4) まとめ

気象庁現業全球モデルでも表現が不十分である、夏季の北太平洋北部の下層雲について、下層雲スキームを改良することで再現性を向上させることができた。また、短波放射の雲による反射が不十分であり、海面に過剰な短波放射が入射するというバイアスをかなり軽減することができた。さらに、ヤマセのような寒気移流場、移流霧の発生しやすい暖気移流場を分けて解析し、その鉛直構造などについても調査を行い、モデルがヤマセのような場での下層雲や移流霧の鉛直構造をある程度表現できていることを確認し、その鉛直構造に対するスキーム変更の効果も示した。

c)参考文献

Kawai, H., Improvement of a Stratocumulus Scheme for Mid-latitude Marine Low Clouds. *CAS/JSC WGNE Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling/WMO*, 43, 0403-0404, 2013.

Kawai, H., S. Yabu, and Y. Hagihara, The Evaluation of the Vertical Structures of Marine Boundary Layer Clouds over Mid-Latitude. *CAS/JSC WGNE Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling/WMO*, 44, 0611-0612, 2014.

谷本陽一, 時長宏樹, 甲斐浩平, 黒潮続流域における大気直接観測, 月刊海洋, **44** (号外), 75-80, 2006.

3.1.8 CMIP5 マルチ気候モデルにおけるヤマセの将来変化：海面水温変化パターンとの関係 遠藤洋和（気象研究所）

a)要旨

CMIP5 に提出された気候モデル実験データを用いて、ヤマセに関連する大規模循環場の将来変化について調べた。全モデル平均では、夏季の太平洋高気圧の中緯度への張り出しが現在よりも弱まり、これに伴い北日本東海上で北東風頻度がわずかに増加する傾向が予測された。モデルが予測する熱帯の海面水温変化 (Δ SST) パターンを3つに分類し、対応する夏季の循環場の特徴を調べた。赤道太平洋中部～東部で昇温が大きいモデル群では、太平洋高気圧の中緯度への張り出し弱化と北日本での北東風頻度の増加が、高いモデル間一致度で予測された。これら結果は、現時点で予測される特定の Δ SST パターンの下においては、ヤマセ増加をもたらす気圧配置になる可能性が高いことを示唆する。

b)本文

1. CMIP5 実験データ

CMIP5(第5期結合モデル相互比較実験)で行われた各種実験のうち、過去再現実験(historical)と将来予測実験(RCP8.5)のデータを解析した。月平均場の解析では、28個のモデルを解析対象とした(各モデルにつき1ラン)。日別値の解析では、このうち利用可能な17個のモデルを解析対象とした。なお、月平均場の解析で用いた28個のモデルは、Mizuta et al.(2014)が解析対象としたモデルと同一である。

2. 海面水温の変化パターンに基づくクラスター分類

熱帯域の海面水温分布の違いは、降水量分布の違いをもたらす、大気循環を変える。また、その影響は大気のテレコネクションを通して中高緯度にも及ぶ。このため、温暖化に伴う降水量や循環場の予測の不確実性の一部は、熱帯域の海面水温変化(Δ SST)の予測の不確実性に起因する。Mizuta et al.(2014)は、CMIP5モデルの熱帯の Δ SSTパターンをクラスター解析に基づき3つのグループに分類した。具体的には、28個のモデルの熱帯域の年平均SST偏差(21世紀末と20世紀末の差、RCP8.5シナリオ)を熱帯平均SST偏差で規格化し、クラスター解析を行った。本研究では、彼らの分類にもとづいて、各クラスターの夏季の循環場の特徴を調べた。

図1は全モデルおよび各クラスターで平均した7～8月平均SST偏差(Δ SST)である。 Δ SSTの空間パターンの違いに着目するため、熱帯平均 Δ SSTで規格化されている。全モデル平均(all、28モデル平均)では、赤道太平洋中部～東部、熱帯インド洋西部、赤道大西洋などで周辺海域よりも昇温が大きい。また、北半球は南半球よりも昇温が大きく、特に北太平洋の昇温が顕著である。クラスター別に見ると、クラスター2(c2、14モデル平均)では、赤道太平洋中部～東部、熱帯インド洋西部の昇温が大きく、allを強調した分布である。クラスター1(c1、8モデル平均)では、allよりも太平洋赤道域中部～東部の昇温が小さく、両半球の昇温差が小さい。反対にクラスター3(c3、6モデル平均)では、allよりも両半球の昇温差が大きく、インド洋北部や海洋大陸周辺の昇温が大きい。

3. 各クラスターの合成図

図2に降水量偏差を示す。allでは、赤道太平洋、アジアモンスーン域、梅雨前線帯などで増加、赤道インド洋東部～海洋大陸の一部、北太平洋亜熱帯域、カリブ海～中米などで減少してい

る。クラスター別に見ると、c2 はおおむね all を強調した分布であり、梅雨前線帯の増加も明瞭である。c1 は all よりも赤道太平洋～アジアモンスーン域の降水が少なく、一方で all よりも海洋大陸付近の降水が多い。c3 では海洋大陸～アジアモンスーン域の増加が他よりも顕著である。これら熱帯域の降水偏差は、 ΔSST の空間パターン（図 1）と概ね一致している。

図 3 に海面気圧（SLP）偏差を示す。all では、海洋大陸付近の気圧が相対的に上昇し、太平洋赤道域の東西気圧傾度が減少している。これはウォーカー循環の弱化に対応する。北半球亜熱帯域では正偏差、ユーラシア大陸や太平洋中緯度では負偏差が概ね分布する。クラスター別に見ると、c2 では太平洋赤道域の東西気圧傾度の減少が最も明瞭である。反対に、c1 では東西気圧傾度の減少が小さい。c3 では、ユーラシア大陸の負偏差と周辺海域の正偏差、すなわち海陸間の気圧コントラストが他よりも明瞭である。これはモンスーン循環が他よりも強いことを示唆する。実際、c3 のアジアモンスーンの降水増加は他よりも明瞭である（図 3）。太平洋高気圧の中緯度への張り出しは、すべてのクラスターで弱化する傾向にあり、特に c2 でその傾向が明瞭である。図 4 は 200hPa 速度ポテンシャル偏差である。all では、太平洋のインド洋東部～太平洋西部で正偏差、太平洋東部およびアフリカ付近で負偏差が分布している。クラスター別に見ると、c2 では太平洋東部の負偏差が明瞭で、c1 ではそれは不明瞭である。c3 では海洋大陸～アジアモンスーン域の正偏差が他よりも小さい。これらは、上述の SLP 偏差（図 3）で見られる特徴と整合的である。

図 5 は地上 2m 気温偏差である。all では、陸上は海上よりも昇温が大きく、高緯度は低緯度よりも昇温が大きい。クラスター別に見ると、c3 では北半球の大陸の昇温が他と比べて大きい。これは上述の、c3 でモンスーン循環が相対的に強い傾向と整合的である。北日本付近の昇温は、c3 で最も大きく c2 で最も小さい。

図 6 は日本周辺の SLP 偏差と 850hPa 風偏差である。All では、日本付近の気圧は負偏差（2/3 以上のモデルで一致）で、北日本では北東寄りの風偏差が分布している。クラスター別に見ると、すべてのクラスターで日本付近の気圧は負偏差、北日本では東よりの風偏差である。c2 では、北日本から東海上にかけての気圧は負偏差（90%以上のモデルで一致）で、北日本では北東風偏差が分布している。一方、オホーツク海高気圧の強化は見られない。図 7 は北東風頻度の変化である。日平均の地上 10m 風が東寄りかつ北寄り（ $U < 0$ & $V < 0$ ）の場合を北東風日と定義した。All では、北日本の東海上で北東風頻度がわずかに増加傾向にある。クラスター別に見ると、c2 では北日本から東海上の北東風頻度が増加しており、この傾向は 2/3 以上のモデルで一致している。c1 と c3 では、日本から少し離れた東海上で北東風頻度が増加している。

4. まとめ

CMIP5 モデルが予測する熱帯の ΔSST パターンを 3 つに分類し、対応する夏季の循環場の特徴を調べた。赤道太平洋中部～東部で昇温が大きいモデル群（c2）では、太平洋高気圧の中緯度への張り出しが弱まり、これに伴い北日本で北東風頻度が増加する傾向が、高いモデル間一致度で予測された。この結果は、現時点で予測される特定の ΔSST パターンの下においては、ヤマセ増加をもたらす気圧配置になる可能性が高いことを示唆する。

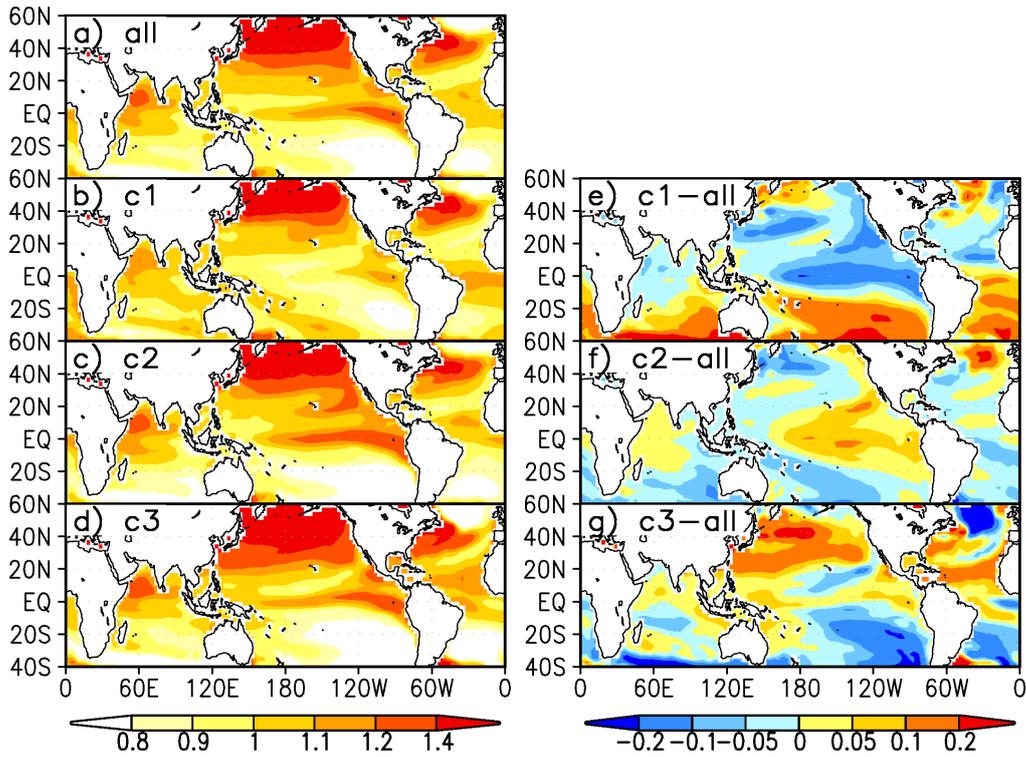


図1 CMIP5 モデルの7～8月平均海面水温 (SST) の将来変化 (°C)。(a)-(d) : 全モデル平均と各クラスター平均。(e)-(g) : 各クラスター平均の全モデル平均からの偏差。現在は 1981～2005 年、将来は 2075～2099 年 (RCP8.5 シナリオ)。各モデルの熱帯平均 SST 偏差で規格化。

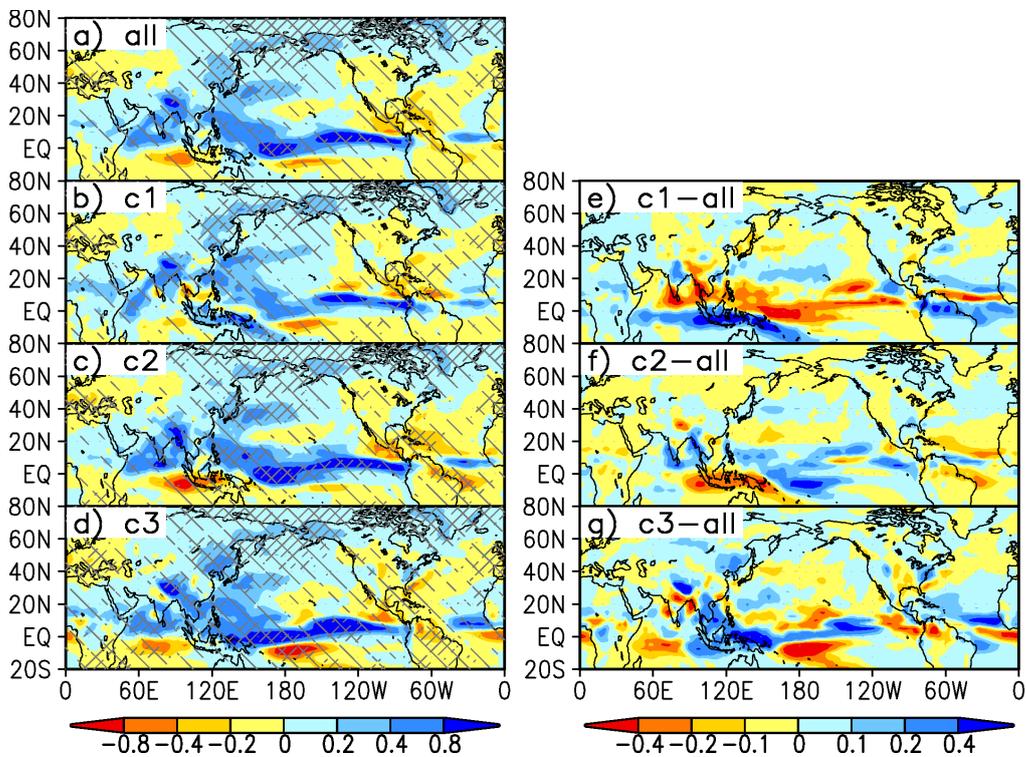


図2 降水量偏差 (mm/day) である以外は図1と同じ。将来変化の符号が 66%(90%)以上のモデルで一致する領域を広い (狭い) 間隔の斜線で示す。

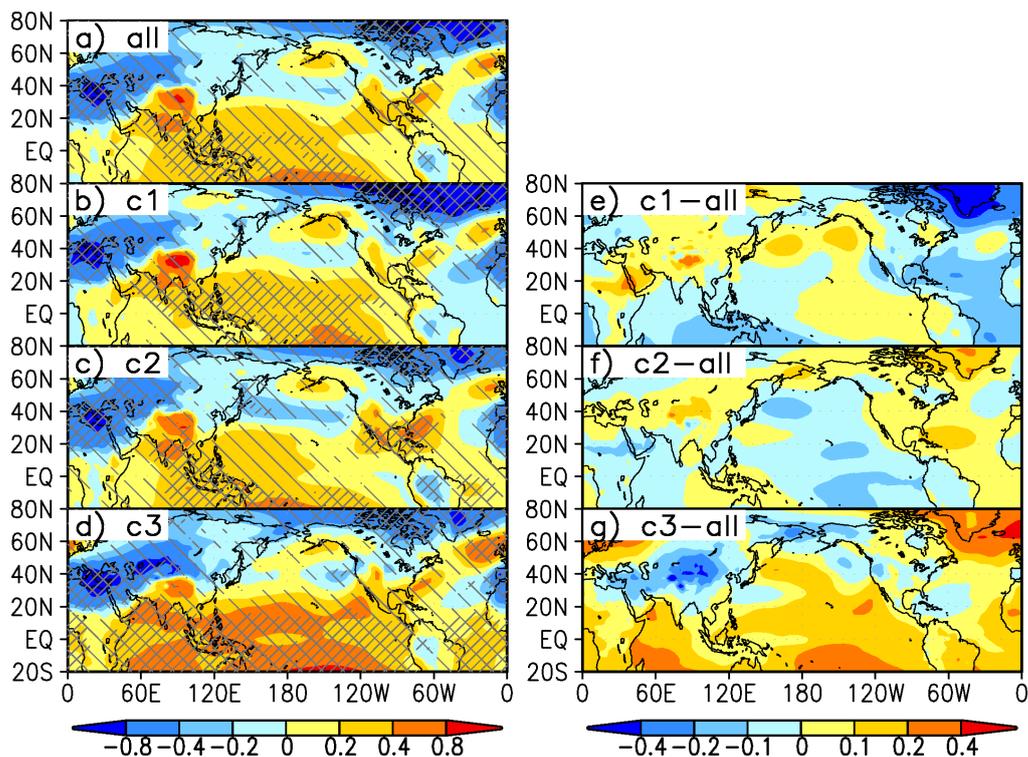


図3 海面気圧偏差 (hPa) である以外は図2と同じ。

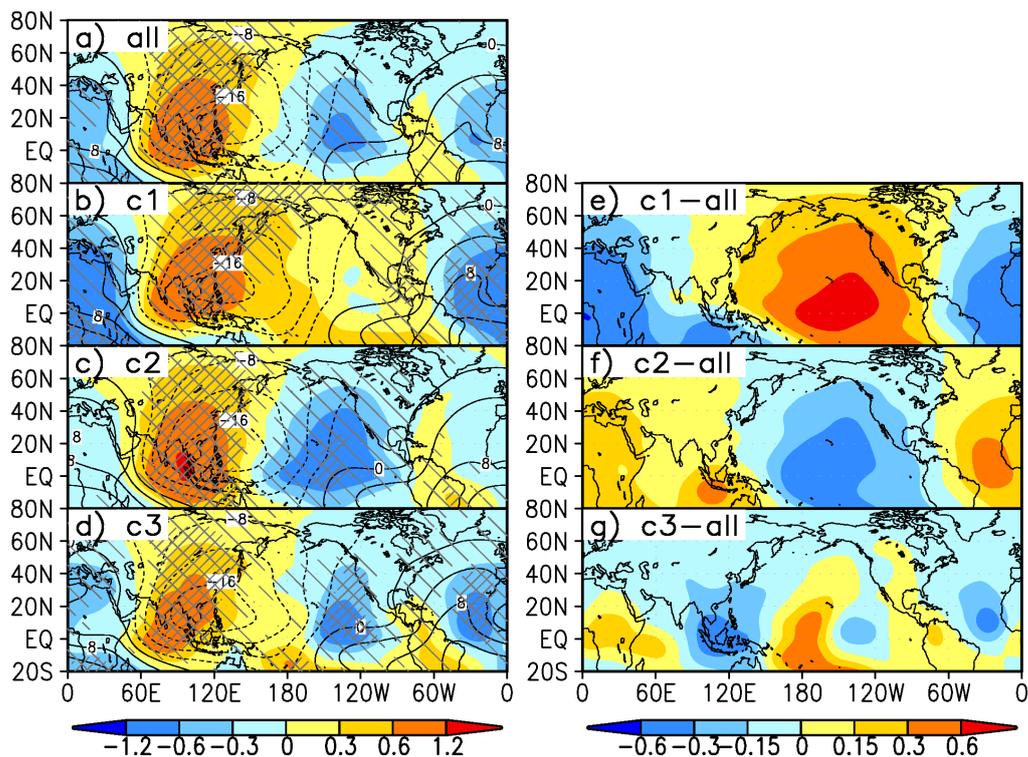


図4 200hPa 速度ポテンシャル偏差 ($\times 10^6 \text{m}^2/\text{s}$)、左列図の太線は現在気候 (等値線間隔: $4 \times 10^6 \text{m}^2/\text{s}$) である以外は図2と同じ。負の値は大規模発散域に対応する。

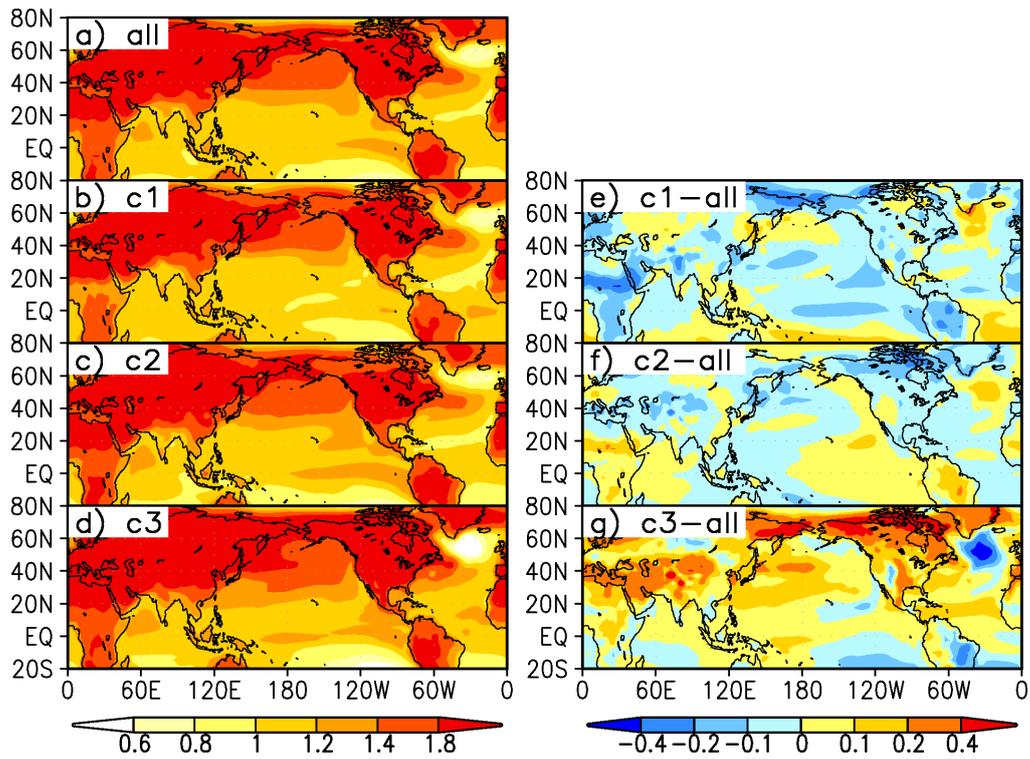


図5 地上2m気温偏差(°C)である以外は図1と同じ。

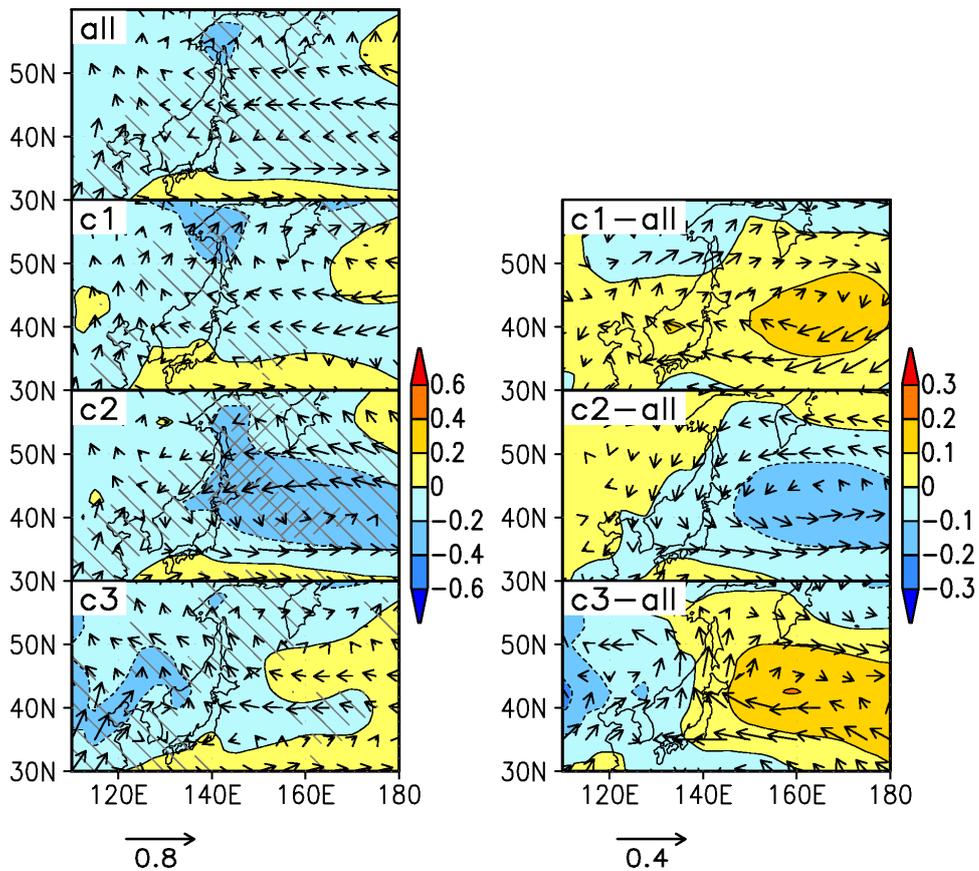


図6 海面気圧(陰影、hPa)と850hPa風(ベクトル、m/s)である以外は図2と同じ。

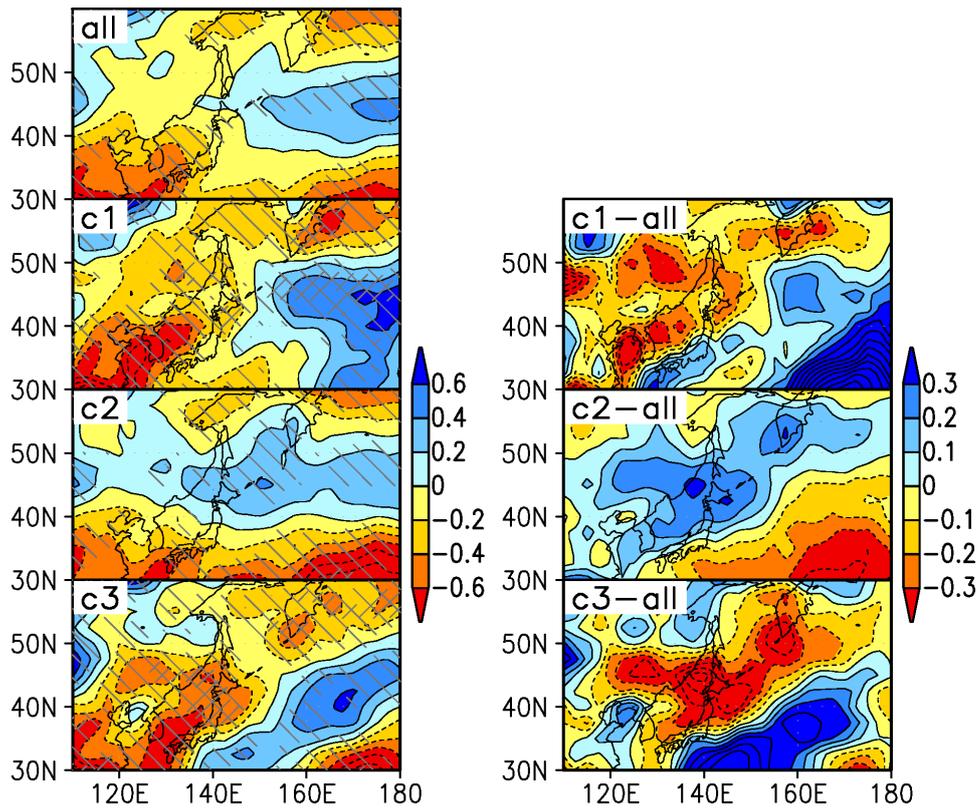


図7 地上北東風の頻度（7～8月合計）である以外は図2と同じ。

c)参考文献

Mizuta, R., O. Arakawa, T. Ose, S. Kusunoki, H. Endo, A. Kitoh, Classification of CMIP5 future climate responses by the tropical sea surface temperature changes, SOLA, 10, 167-171, 2014.

3.1.9 複数の GCM 出力を用いた葉面保水量の将来変化

吉田龍平・山崎剛(東北大学)

a)要旨

平成 25 年度に得られた MIROC5 による葉面保水量の減少傾向が他の全球気候モデル(GCM)でも同様であるか検証を行った。GCM の降水量分布にモデル間差が見られるために地域は一致しないものの、全国平均ではいずれのモデルも保水量の減少が推定された。降水頻度の減少が最も寄与し、降水強度の増加と合わせていもち病の感染リスクは将来減少することが期待される。

b)本文

(1) 背景

気候変化に伴う日本の水稻生育への影響評価が求められている。収量や品質に関する研究がこれまでも行われてきており(例えば Iizumi et al. 2012)、現在比較的冷涼な東北や北海道の増収が見込まれている。一方で減収を引き起こす要素としていもち病が知られており、水稻の葉面上に水分が長時間保持されることで発病する。平成 25 年度報告書では MIROC5 モデルによる東日本の葉面保水量の見通しを報告したが(吉田ほか 2014)、結果のモデル依存性を調べるためその後 2 つの GCM を加えた。解析領域も拡大し、追加解析によって得られた結果を報告する。

(2) 方法

気候変化シナリオとして、「気候変動リスク情報創生プログラム」で利用されている 3 つの GCM データを用いた(CCSM4, MIROC5, MRI-CGCM3)。それぞれは NHRCM モデルで 20km 格子に力学的にダウンスケールされている。代表的濃度パスは RCP4.5 で、現在気候として 1981-2000、将来気候として 2081-2100 の計 40 年を対象とした。解析領域は日本全体とした。

ダウンスケールされた降水量データを用いて、降水指標の気候解析を行った。表 1 に示す 3 つの指標を計算した。各年で指標を算出し、現在・将来気候とも 20 年の平均値を解析に使用した。

葉面保水量を算出するため、20km 格子の気象データを陸面過程モデル 2LM に入力した。Plant Area Index は 6 月 1 日に最小値 0.6 とし、8 月 31 日の最大値 5.0 まで折れ線状に増加させた。

表 1 本研究で使用した降水指標。ただし、 N_w は日降水量が 1 mm day^{-1} を越える日数(降水日と定義)、 N_a は全対象日(1840 日)、 P は日降水量(mm day^{-1})、 P_w は降水日の降水量(mm day^{-1})。

名称	単位	略称	計算式
平均降水量	mm day^{-1}	MEA	$\Sigma P/N_a$
降水頻度	none	FRE	N_w/N_a
降水強度	mm day^{-1}	INT	$\Sigma P_w/N_w$

(3) 結果と考察

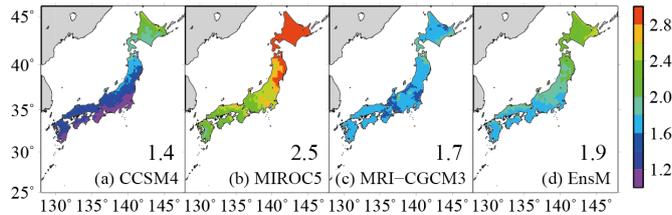


図 1: 日平均気温の将来気候(2081-2100)に対する現在気候(1981-2000)の差。右下の値は領域平均値。(a)CCSM4、(b) MIROC5、(c) MRI-CGCM3、(d) 3モデルアンサンブル平均。

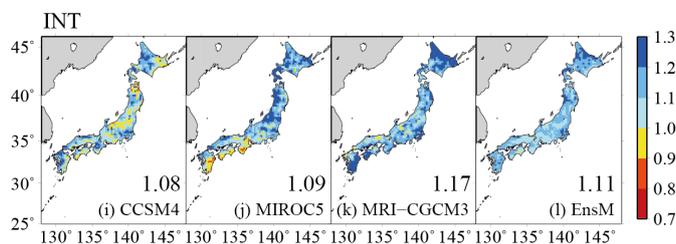
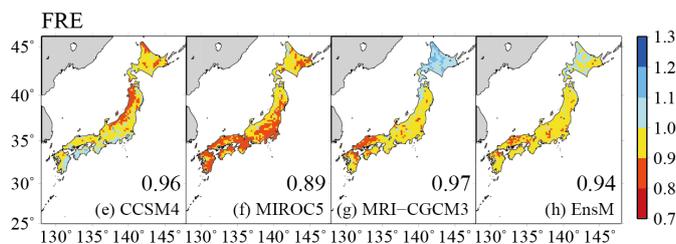
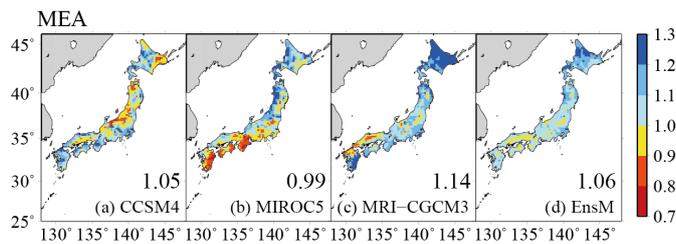
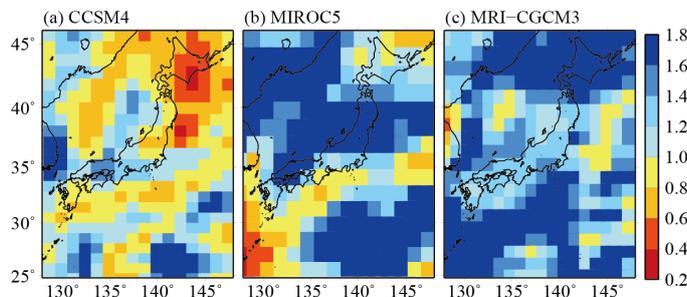


図 2 降水指標の将来変化。各図は 1981-2000 年の平均に対する 2081-2099 年の平均の比。上段：平均降水量(MEA)、中段：降水頻度(FRE)、下段：降水強度(INT)。



地表面気温は 1.4-2.5°C 昇温し、CCSM4 と MIROC5 モデルでは北部ほど強く、一方で MRI-CGCM3 モデルは概ね一様の変化が推定された(図 1)。モデルアンサンブル平均は 1.9°C の昇温で、南部で 1.5°C 前後、北部で 2°C 前後の変化であった。

平均降水量は領域平均で微減かあるいは増加と算出されたが、モデル間差および地域間差が大きく見られた(図 2)。これには、親として使用した GCM の気候が大きく影響しており、GCM による降水分布とダウンスケールした分布が概ね一致している(図 3)。ただし GCM から NHRCM へのダウンスケールには降水量が使用されていないことに注意が必要である。

平均降水量は概ね増加が予測されたものの、降水頻度はどのモデルでも減少であった(図 2)。CCSM4 と MIROC5 では東西のコントラスト、MRI-CGCM3 では南北のコントラストが見られた。MRI-CGCM3 の北海道のみ増加となったが、これは親モデルで見られる強い降水量増加が反映されていると考えられる(図 3)。降水強度は概ねどのモデルでも増加であり、アンサンブル平均で 10% 程度の増加であった。そのため全体として降水量は増加するが頻度の減少および強度の増加が起こり、乾燥・湿潤の振れ幅が大きくなると考えられる。

図 3 GCM から得られる日平均降水量の将来変化。

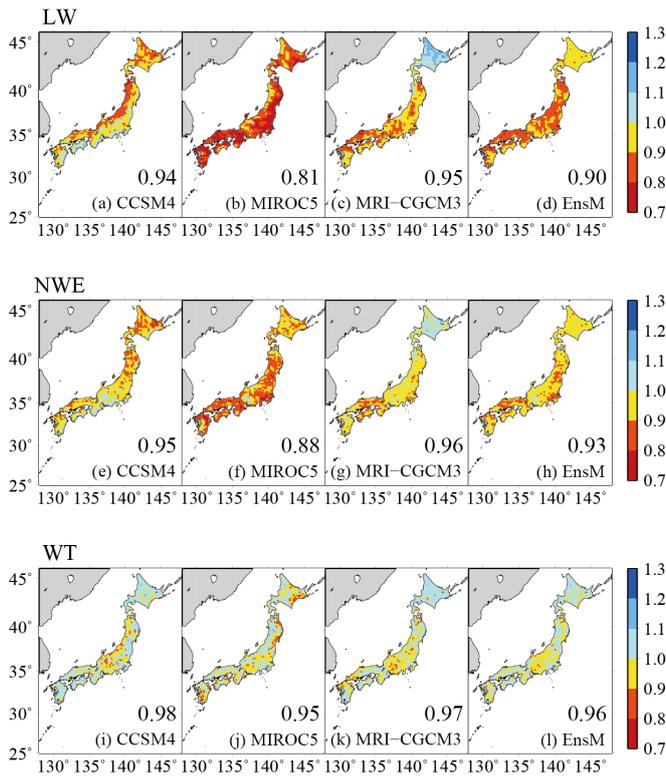
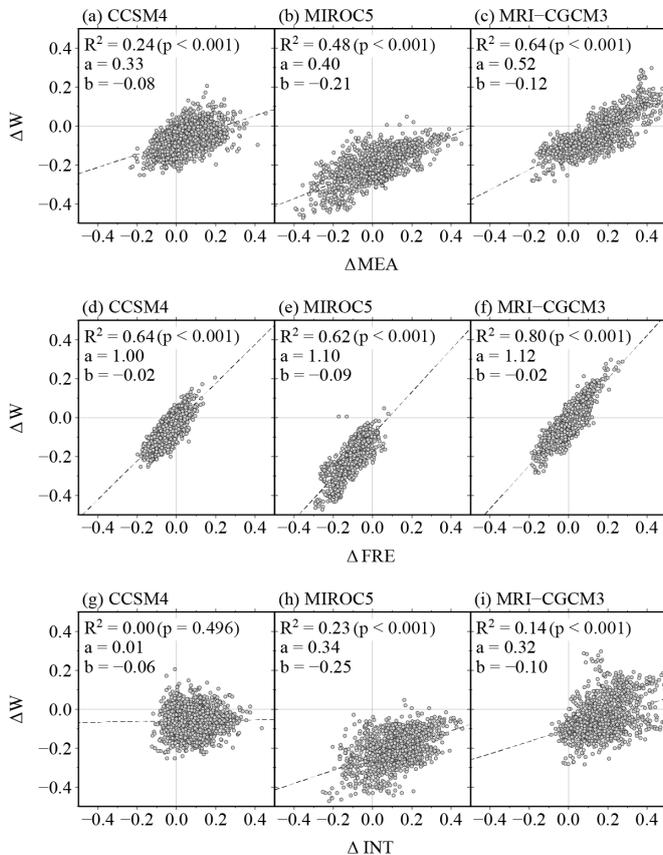


図 4: 葉面水分環境の将来変化。上段: 葉面保水量、中段: 濡れイベントの回数、下段: 濡れイベントの平均継続時間。



平均降水量は増加するにも関わらず、2LM モデルで推定された葉面保水量の変化は減少であった(図 4)。減少量の地域間差にはモデルによる差が大きく、CCSM4 と MIROC5 では分布が対称となった(空間相関係数: 0.6, $p < 0.001$)。また、MRI-CGCM3 の北海道のみ増加が推定された。葉面上の水分を基準に考えると、いもち病リスクは低下することが期待される。保水イベント数は保水量変化を弱めた分布となり、濡れの継続時間では明確なモデル間差および地域間差が見られず変化量は数%であった。

水分を供給する降水量と対応する葉面保水量の将来変化の関係をみると、平均降水量は保水量と正の相関があるが、回帰直線の傾きは 1 よりも小さかった(図 5)。こ

れは葉面で保水できる水の量には限りがあるため、降水を取りこぼしてしまう分だけ小さくなったと考えられる。保水量の変化は、平均降水量よりもむしろ降水頻度の変化に敏感で、3つの降水指標間で最も高い相関係数が得られた。降水強度と保水量の関係は平均降水量や頻度と比べると弱く、これは先の降水の取りこぼしが寄与していると考えられる。強度そのものは直接保水量と結びつかないものの、強い降水はいもち菌を洗い流すこと、また強度は 10% 程度増加すると予測されていることから、降水頻度に加えて降水強度の変化からも、いもち病の感染リスクの低下が見込まれる。

図 5 葉面保水量と降水指標の散布図。上段: 平均降水量、中段: 降水強度、下段: 降水強度。R²、p、a、b はそれぞれ決定係数、p 値、回帰係数の傾きと切片。

(4) 結論

平成 25 年度報告書で行った MIROC5 による解析の他、CCSM4 と MRI-CGCM3 の 2 つの GCM も追加し、日本全域を対象として葉面保水量の将来予測を行った。GCM による降水量分布の違いにより地域間差はあるものの、全体として降水頻度の減少および降水強度の増加による洗い流し効果の強化により、いもち病の感染リスクは低下することが考えられる。本研究は保水量の推定にとどまり、実際の被害面積とリンクしていないため、今後はいもち病被害面積の見通しを含んだ包括的な解析が必要である。

謝辞

本研究の遂行にあたり、東北農業研究センターの菅野洋光氏のサポートをいただいた。NHRCM モデルによる GCM の 20km ダウンスケールデータは、気象研究所の高藪出氏、筑波大学の鈴木パーカー明日香氏より提供していただいた。

c)参考文献

Iizumi, T., M. Yokozawa, and M. Nishimori, Probabilistic evaluation of climate change impacts on paddy rice productivity in Japan. *Climate Change*, 107, 391-415, 2011.

吉田龍平, 小野寺祐美, 東城孝昌, 山崎剛, いもち病発生ポテンシャルとしての水稻葉面保水量の将来変化. 気候変動適応推進プログラム 東北地方のヤマセと冬季モンスーンの先進的ダウンスケール研究 平成 25 年度研究成果報告書, 53-58, 2014.

3.1.10 陸面過程モデルを用いたいもち病被害面積の将来予測

五十嵐健祐・山崎剛・吉田龍平（東北大学）

a) 要旨

陸面過程モデルを用いて北海道、東北地方の夏季における葉面保水率を計算し、葉面保水率に対して葉面濡れの判定値を定め、濡れ日数を算出した。濡れ日数は判定値 0.5 で領域平均 5.9 日となり、東北地方太平洋側・南部で多い傾向があった。次に濡れ日数といもち病被害面積率との関係を調べた。その結果、判定値 0.5 の場合に相関係数が最も高く ($R=0.55$)、濡れ日数といもち病被害面積率との関係性がみられた。判定値 0.5 の相関関係から予測モデルを構築し、濡れ日数の将来変化を調べいもち病被害面積の将来予測を行った。その結果、将来いもち病被害面積は東日本全域で領域平均で減少し (0.72 倍)、東北地方太平洋側・南部で減少率がより大きく、宮城県ではほぼ半減 (0.56 倍) になると推定された。

b) 本文

1. 背景

水稻の代表的な病害としていもち病が知られている。現在、いもち病感染リスクは現業いもち病予察システム BLASTAM を用いて AMeDAS データから経験的に評価されている。ただし、BLASTAM は現在気候における経験的なモデルであるため、水稻の熱・水収支の物理過程が考慮されておらず、将来気候のいもち病感染リスク評価は難しい。この問題点に対して、水稻の熱・水収支の物理過程を計算できる陸面過程モデルを用いて葉面保水率の将来変化を計算し、将来気候のいもち病感染リスクを評価した先行研究がなされている(吉田ほか,2014)。その結果によれば、気温上昇による飽差の減少、降水頻度の減少により葉面保水率は減少するため、いもち病の感染危険度は将来的に低下すると示されている。しかし、この結果は感染リスクの低下を定性的に述べるにとどまり、いもち病被害の定量的な議論はなされていない。そこで本研究では、陸面過程モデルを用いて、いもち病被害面積の将来変化を定量的に評価した。

2. 使用データ

本研究で使用したデータは JRA-25 長期再解析データを気象庁非静力学モデル JMA-NHM(Saito et al., 2007)により水平解像度 10km、時間解像度 1 時間にダウンスケールしたデータ(島田ほか,2014)である。解析期間は 1981 年から 2000 年の夏季 (6 月から 8 月)、対象領域は北海道・東北地方のうち国土数値情報に基づく水田率が 1.0%以上の地点とした。また、いもち病被害に関するデータとして農林水産省作物統計データのいもち病被害面積率データを使用した。

3. 解析方法

ダウンスケールされたデータを陸面過程モデル(Yamazaki et al., 2004)に入力し、葉面保水率を計算した。いもち病被害を水稻葉面の連続的な濡れから評価することを考え、葉面濡れに関する物理量として濡れ継続時間と濡れ日数を定義した。濡れ継続時間は葉面保水率に 6 種類の判定値 (0.75、0.5、0.25、0.1、0.01、0.001) を定め、14 時から翌日 13 時までの間に判定値以上である連続した時間、濡れ日数は濡れ継続時間が 10 時間以上である日の合計日数とした。また濡れ継

続時間の算出にはいもち病感染リスクの観点から、濡れイベント中の平均気温が 15℃から 25℃であるという気温の条件と、濡れイベント中の時間降水量が常に 4mm/h 未満であるという降水の条件の 2 つの条件を課した。北海道・東北地方の各県別に 1981 年から 2000 年の濡れ日数の年変化を算出した。

4.結果

図 1 は判定値 0.5 の濡れ日数の年変化である。東北地方は 1993 年に冷夏、1994 年に暑夏であったが、対応する年の濡れ日数は 1993 年で 8.3 日、1994 年で 3.9 日となり特徴的であった夏の傾向を表現できている。

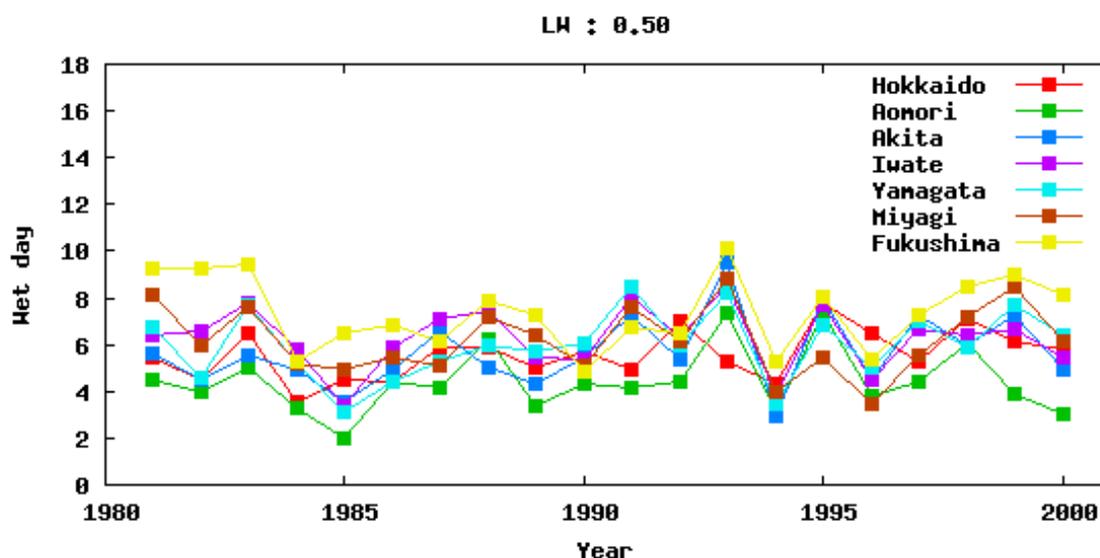


図1 判定値0.5 の濡れ日数の年変化

横軸：年、縦軸：濡れ日数

(赤：北海道、緑：青森、青：秋田、紫：岩手、水色：山形、茶色：宮城、黄：福島)

次に判定値 0.5 の濡れ日数といもち病被害面積率との関係を調べた。相関係数が最も高い判定値 0.5 の場合を採用し濡れ日数といもち病被害面積率から、いもち病被害面積を目的変数、判定値 0.5 の濡れ日数を説明変数とする一次関数のいもち病予測モデルを構築した。この予測モデルを交差検証法で検証したところ、被害面積率の推定誤差平均値は 0.03 であった。構築した予測モデルに濡れ日数の将来変化を入力することで、いもち病被害面積率の将来変化を評価が可能となる。

濡れ日数の将来変化の解析には MIROC5 を JMA-NHM により力学的にダウンスケールしたデータ(島田ほか,2014)を使用した。解析期間は 1981 年から 2000 年(現在)および、2081 年から 2099 年(将来)の夏季(6 月 8 月)、対象領域は北海道・東北地方とした。図 3 は判定値 0.5 の濡れ日数の将来変化である。濡れ日数は将来、領域平均で減少し (2.3 日)、とくに東北地方太平洋側・南部でより減少する傾向を示した。

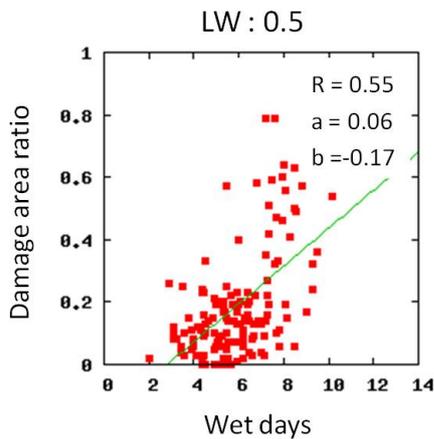


図2 判定値0.5の濡れ日数と
いもち病被害面積率との相関
横軸：濡れ日数、縦軸：いもち病被害面積率
R：相関係数、a：傾き、b：切片

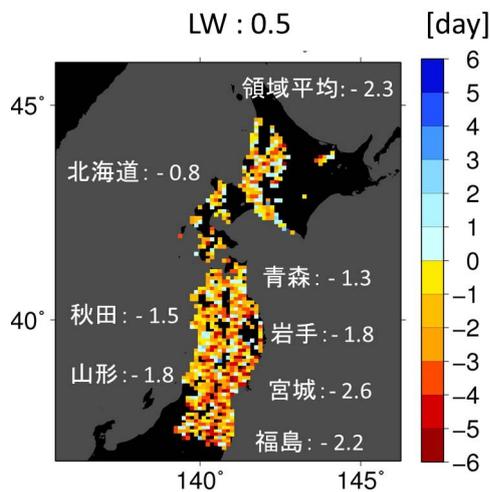


図3 判定値0.5の濡れ日数の将来変化

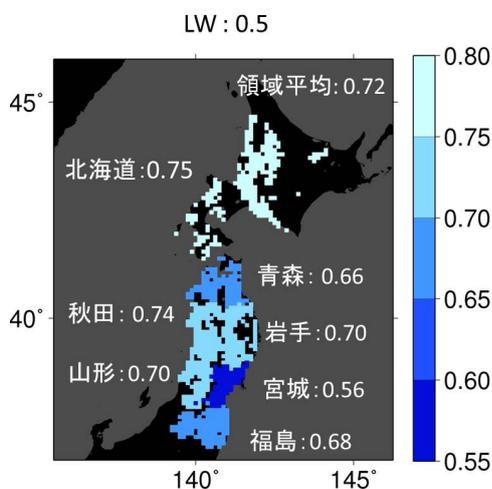


図4 判定値0.5のいもち病被害面積の
将来変化

構築した予測モデルと判定値 0.5 の濡れ日数の将来変化から、いもち病被害面積の将来変化を調べた。その際に現在気候と将来気候とで水稻作付面積が変化しないと仮定して、被害面積率から被害面積に変換しなおした。その結果、将来いもち病被害面積は東日本全域で領域平均で減少し

(0.72 倍)、東北地方太平洋側・南部で減少率がより大きく、宮城県ではほぼ半減 (0.56 倍) になると推定された。

5.今後の予定

本研究では MIROC5 データのみを用いて解析を行ったが、他の温暖化データを用いて結果のばらつきを把握する必要がある。また、対象領域を拡張し西日本も含めて高温障害や冷害見通しも含めた包括的な影響評価をしていく必要がある。

謝辞

本研究の遂行にあたり、東北農業研究センターの大久保さゆり氏の協力をいただいた。

c)参考文献

Saito K., J. Ishida, K. Aranami, T. Hara, T. Segawa, M. Narita, and Y. Honda, J. Meteorol. Soc. Japan, 85B, 271-304, 2007.

Yamazaki T., H. Yabuki, Y. Ishii, T. Ohta, T. Ohata, J. Hydrometeorol. 5, 504-515, 2004.

島田照久・沢田雅洋・吉田龍平・岩崎俊樹, 気候モデルデータのダウンスケーリングによるヤマセの将来変化, SENAC, 47, 59-66, 2014.

吉田龍平、小野寺祐美、東城孝昌、山崎剛, いもち病発生ポテンシャルとしての水稻葉面保水量の将来変化、気候変動適用推進プログラム 東北地方のヤマセと冬季モンスーンの先進的ダウンスケール研究 平成 25 年度研究成果報告書, 53-58, 2014.

3.1.11 栄養成長期のヤマセを想定した遮光がイネ穂ばらみ期耐冷性に及ぼす影響

下野裕之(岩手大学)

a) 要旨

地球温暖化が進行していても東北地方太平洋岸ではヤマセにともなう低温・寡照がコメ生産に多大な影響を与えている(下野 2012). これまで、穂ばらみ期を中心とする生殖成長期の温度環境ならびに光環境が冷害の被害程度に及ぼす影響について精力的に評価されてきた. しかし、幼穂形成期以前の栄養成長期の寡照が穂ばらみ期耐冷性に作用するか、検討した例はない. 本研究にて、はじめて実験的に栄養成長期のヤマセを想定した遮光がイネの穂ばらみ期耐冷性に及ぼす影響を評価したところ、栄養成長期の遮光で耐冷性が低下することを生育実験により明らかにした.

b) 本文

研究目的

栄養成長期にヤマセを想定した遮光処理を実施し、穂ばらみ期耐冷性に影響を及ぼすか、耐冷性の異なる2品種を2段階の冷害誘導処理条件で評価した.

材料と方法

水稻品種「ひとめぼれ」(耐冷性:極強)と「ササニシキ」(耐冷性:やや弱)を1/5000aポットに9個体ずつ移植し(2012/5/16), 岩手大学内(岩手県盛岡市)の屋外条件で土耕栽培した. ポットには「ほくほく培土」(鹿沼産業社製)を3.3ℓ(N1.4g、P3.6g、K1.5g)充填した. 移植から幼穂形成期の数日前までの栄養成長期の3時期に遮光処理(90%遮光)を行い、幼穂形成(幼穂長1mm)を確認後、冷害誘導のための2段階の恒温深水処理(19℃と18.5℃, 30cm)を実施した. また、冷害誘導処理を行わない通常条件(25℃, 5cm)も設置した. 遮光処理の時期は、早い方から時期I(5/14~6/1)、時期II(6/2~6/20)、時期III(6/21~7/10)とし、遮光処理なしを対照とした. 分けつは順次除去した. 各時期の処理終了時ならびに幼穂形成期に、気孔コンダクタンス(SC-1, Decagon)、可溶性糖を計測し、収穫期に不稔歩合(%、不稔粒数/全粒数×100)を計測した.

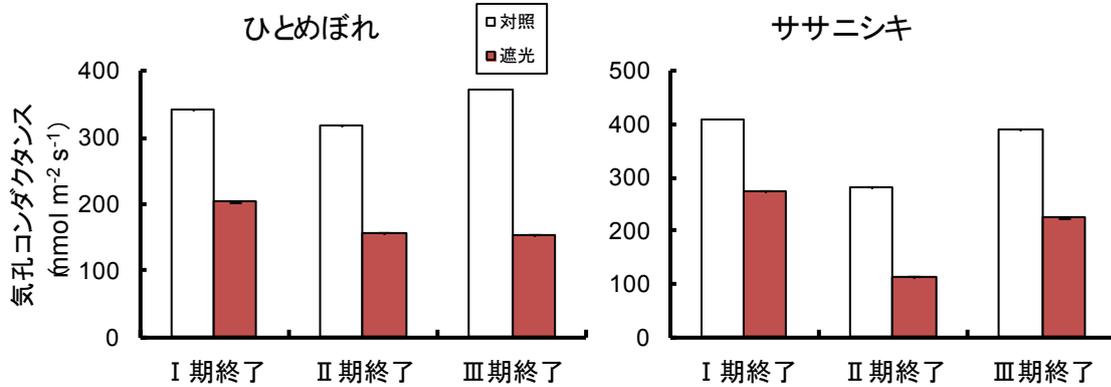
結果

幼穂形成日は遮光処理でいずれの時期においても両品種とも遅延するが、その程度は処理時期が遅いほど大きくなった(第1表). 気孔コンダクタンスは、各処理期間中、両品種ともに遮光処理によりいずれの時期においても低下した(第1図). 可溶性糖の濃度は、各処理終了時には有意に低下したが(図略)、幼穂形成時には、多くの時期の遮光処理においても増加がみられ、その程度は処理時期が遅いほど顕著であった(第2図). 一方、デンプン濃度には一定した傾向は認められなかった(図略). 不稔歩合は、両品種において、冷害誘導処理がない条件でも遮光処理により2~25ポイント(ひとめぼれ)、5~18ポイント(ササニシキ)の増加がみられた(第3図). 冷害誘導処理を行うと、両品種とも不稔歩合が増加するが、その程度が、栄養成長期の遮光処理を経験した場合に大きくなった. 特に、「ひとめぼれ」の場合、遮光処理の処理時期が遅いほど、不稔歩合が増加した. 同一の遮光処理による耐冷性低下についての結果は、翌年2013年、2014年においても確認した.

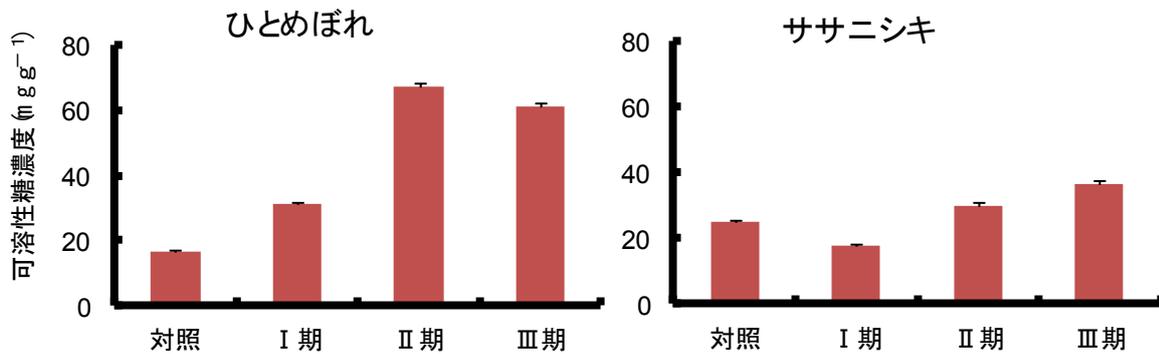
以上、栄養成長期の遮光処理は穂ばらみ期耐冷性を弱めることをはじめて明らかにした. このことは、ヤマセに伴う栄養成長期の寡照が冷害常襲地域の耐冷性を弱めることで、冷害時の被害を拡大してい

ることを示し、より正確な被害程度の予測にはこの影響の評価を考慮する必要があることを示した。

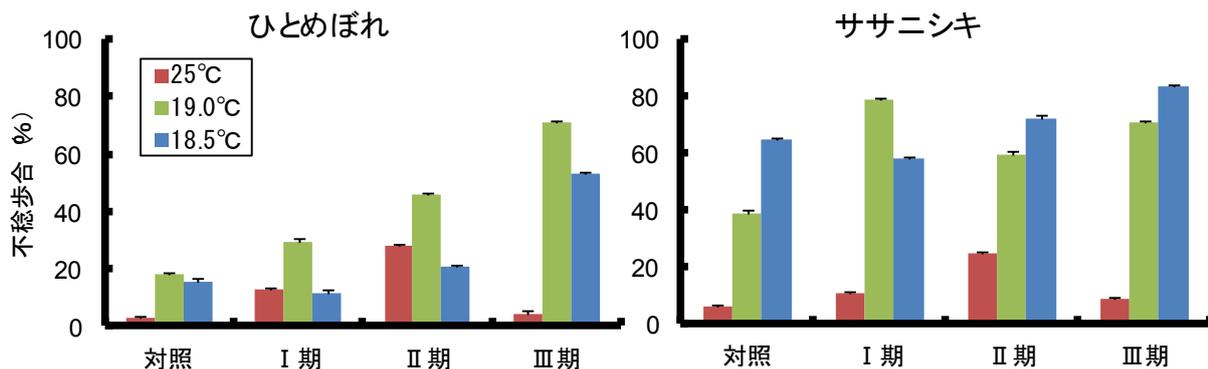
品種	対照	遮光		
		I	II	III
ササニシキ	7月12日	7月15日	7月17日	7月17日
ひとめぼれ	7月13日	7月17日	7月19日	7月20日



第1図. 栄養成長期の遮光処理がイネの気孔コンダクタンスに及ぼす影響



第2図. 栄養成長期の遮光処理がイネの可溶性糖濃度 (幼穂形成時) に及ぼす影響



第3図. 栄養成長期の遮光処理がイネの不稔歩合に及ぼす影響
冷害誘導処理 :18.5°Cと19.0°C, 冷害誘導処理なし 25°C

c) 参考文献

下野裕之 地球温暖化でも冷害はなくなるしない そのメカニズムと対策 (ISBN: 9784540112911), 農山漁村文化協会(農文協), pp.1-114, 2012.

3.1.12 高温障害・冷害を考慮した東日本における水稲最適品種の検討

吉田龍平（東北大学）

a)要旨

MIROC5 モデルによる気候変化シナリオを、領域気候モデルを用いて 10km 格子にダウンスケールし、水稲生育モデルに入力することで現在各地で栽培されている品種が将来も安定した収量を確保しうるかの検討を行った。現行品種を維持した場合でも、気温の上昇と CO₂ の施肥効果によって増収が期待されるが、高温障害の顕在化と冷害の継続が推定された。高収量と気温リスクの低下を指標として最適栽培品種を検討した結果、現行品種の維持と耐高温品種の導入が 2 つの大きな柱となりうることが明らかとなった。

b)本文

はじめに

近年の温暖化に伴って、西日本では水稲生育環境に対する負の影響が報告されている。四国ではコメ収量の減収、九州では品質の低下が起こっている。そのため、温暖化が進行した将来には、水稲栽培における東日本の重要性がより増すことが想定される。

東日本の太平洋側ではヤマセの発生による冷害が深刻な地域である。温暖化は平均気温を押し上げるため、冷害リスクの低下が見込まれるが、一方で高温障害リスクの増加が懸念される。そのため、安定した食糧供給の点から、東日本における気候変化の理解およびリスクを低減できる品種の選定が必要である。本研究は、現在冷涼な地域における温暖化適応策の構築のため、東日本を例として気候変化および適応する品種を明らかにする。

使用データ

気候変化シナリオとして、MIROC5(RCP4.5)の全球結果を領域気候モデル NHRCM で 20km 格子にダウンスケールされたデータを用いた(環境省 S-5-3)。気象条件の地理分布を詳細に表すため、領域気候モデル JMA-NHM を用いて 10km 格子へダウンスケールを行った。現在気候は 20 年(1981-2000)、将来気候は 19 年(2081-2099)を設定し、水稲生育に重要な 6 月 1 日から 8 月 31 日まで各年ダウンスケールを行った。得られた高解像度シナリオから、気候変化差分(気温は差、その他は比)を抽出し、Mesh-AMeDAS の観測値に加えることで通年の気象データを作成した。

構築した気象データを水稲生育モデル Hasegawa/Horie(H/H)に入力し、収量および高温(HD)・低温ストレス(CD)の将来変化を算出した。解析には、北海道品種のきらら 397 や中京品種のあさひの夢といった現在日本各地で栽培されている 10 品種を用いた(表 1)。さらに、農林水産統計を参考に各県で作付面積が最大の品種を現行品種と定義した。

結果と考察

東日本の日平均・最高・最低気温は現在気候に対して 3 度程度上昇し、特に太平洋側での昇温が顕著であった(図 1)。また、下向き短波放射量も同様の地域で増加率が大きく、Kanno et al. (2013)で指摘されるヤマセ頻度の減少が一因であると考えられる。

収量においては、気温の上昇と CO₂ の施肥効果により、現行品種を維持した場合でも 3 割程度の増収が見込まれたが(図 2)、HD の増加および CD の減少が顕著であった(図 3)。東日本の現

在気候では、低温ストレスが高温ストレスに対して顕著であるが(HD:CD)=(1:71)、気候変化に伴い高温ストレスが低温ストレスの 25%程度の大きさになることが推定された(HD:CD)=(1:3.9) (図 3)。

現在気候において、東北・北海道品種(きらら 397、あきたこまち)は高い収量を達成するが、気候変化に伴ってそれらの品種が卓越する地域は北部あるいは山岳域に変わり、中京品種(あさひの夢、あいちのかおり)のような耐高温品種が高い収量を達成する地域が増加した(図 4)。冷涼な地域で開発された品種は気温に対する感受性が大きく、温暖化に伴って生育期間が短期化することで吸収する日射量が不足し、十分な収量が確保できなかつたと考えられる。

収量その他、気温によるストレスも考慮して総合的な面から温暖化後に適応しうる品種を検討した。図 5 は適応品種(現行品種より高収量あるいは低ストレス)数の空間分布である。現在各地で栽培されている品種は、耐冷性が 1 つの拘束条件となって選定されている。気温の上昇した将来気候では、耐冷性よりも耐暑性が重要となり、そのため現行品種より適応する品種は多かつた(高収量・低 HD)。一方で低温ストレスを低下しうる品種数は少なかつた。これら 3 つの要素(高収量・低 HD・低 CD)の複合条件を満たす、将来の東日本の気候に適応する品種は数種類に限られ、現行品種の維持が有効であると判定された地域も多かつた。適応した品種は各地で現在栽培されている品種よりも南の品種であり、安定したコメ生産のためには、現行品種の維持あるいは南の品種の導入(例：北海道品種から東北品種)が有効な適応策の 1 つとなりうる。ただし本研究により得られた結果は、1 つの全球気候モデルおよび排出シナリオによる結果に限られているため、多様なシナリオに対する総合的な適応策の検討が今後必要である。

c)参考文献

Kanno H., M. Watanabe, and E. Kanda, MIROC5 predictions of Yamase(cold northeasterly winds causing cool summers in northern Japan). J. Agric. Meteorol. 69, 117-125, 2013.

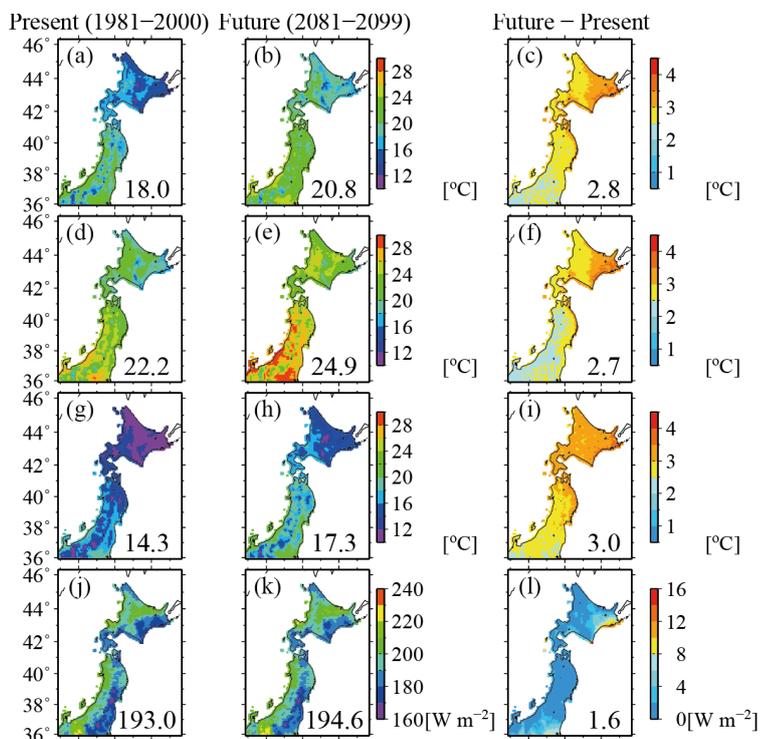


図 1 10km 格子にダウンスケールした(a-c)日平均気温、(d-f)日最高気温、(g-i)日最低気温、(j-l)下向き短波放射の空間分布。全球モデルは MIROC5 で、右下の値は領域平均値。

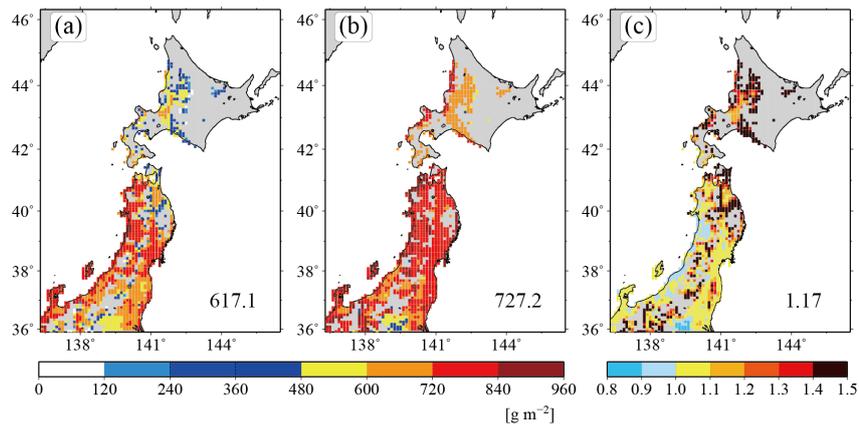


図 2 現在各県で栽培されている品種を将来気候においても維持した場合の収量の空間分布。(a) 現在気候(1981-2000)、(b)将来気候(2081-2099)。灰色は非水田(10km 格子内で1%以下)の地域。

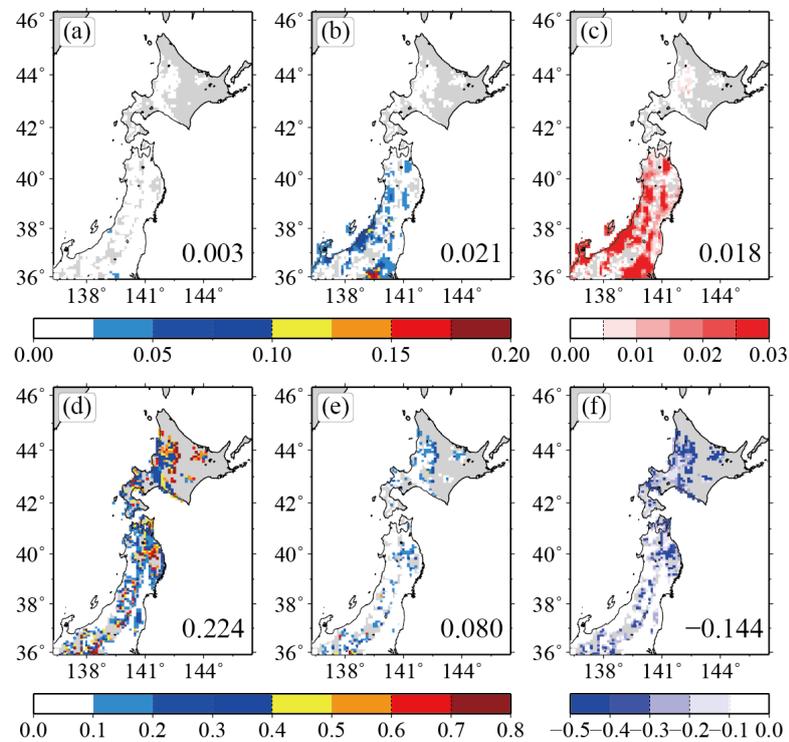


図 3 現行品種を維持した場合の(a-c)高温ストレス、(d-f)低温ストレスの分布。左が現在気候、中が将来気候、右が将来気候-現在気候を表す。

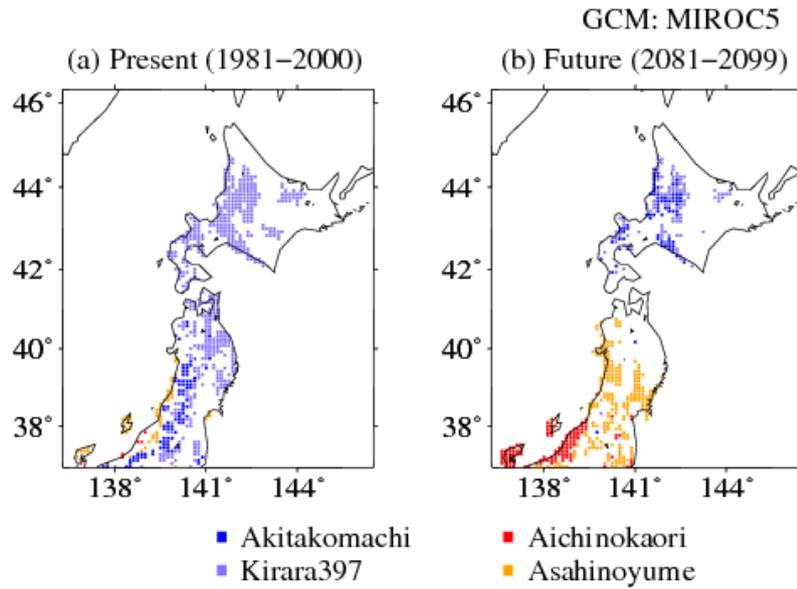


図4 北海道・東北品種および中京品種が解析10品種間で最大の収量となる地点の空間分布。

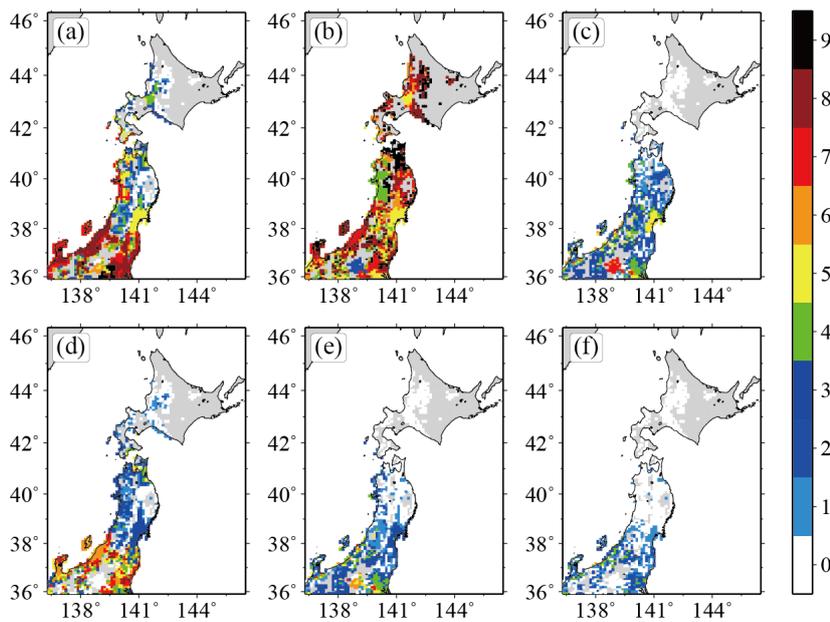


図5 解析に使用した品種の中で、現行品種を超える品種数の空間分布。(a)高収量、(b)高温ストレス低下、(c)低温ストレス低下、(d)高収量かつ高温ストレス低下、(e)高収量かつ低温ストレス低下、(f)高収量かつ高温ストレス低下かつ低温ストレス低下。

表1: H/Hモデルで使用した品種のリスト。

1. あいちのかおり	2. あきたこまち	3. あさひの夢	4. はえぬき	5. ヒノヒカリ
6. ひとめぼれ	7. キヌヒカリ	8. きらら397	9. コシヒカリ	10. こしいぶき

3.2 ヤマセの気象予測の研究

3.2.1 LETKF ネストシステムを用いたヤマセのアンサンブル予報実験

瀬古弘（気象研究所）

a) 要旨

これまでに、局所アンサンブル変換カルマンフィルター（LETKF）を用いて、東北地方の東方海上にある GNSS 掩蔽データの同化実験を行い、大きくないけれどもインパクトがあることを報告した。提供されている掩蔽データは、屈折率等の水平一様性を仮定して求めた値のため、大きな気温の南北傾度が考えられる東北地方の東方海上では、仮定を適用する前の電波の経路上の遅延量として同化するほうが望ましい。本研究で用いる LETKF は格子点ごとに処理するため、経路に沿った積算値をそのまま同化することができない。そのため、昨年度に経路に沿った遅延量などの積算値を経路付近の格子点の値に分配する手法を開発した。本年度は、実際に提供されているタンジェント点の屈折率を用いて経路上の積算値を求め、さらに上記の方法で経路付近の格子点の屈折率に変換して同化した。ここでは、この同化実験の初期的な結果を紹介する。

b) 本文

はじめに

これまで、LETKF を用いて、東北地方の東方海上にある掩蔽データなどを同化して、ヤマセによる北東気流の再現実験を行ってきた。掩蔽データは、観測データの少ない東北地方の東の海上でも観測できることから、ヤマセの予報精度向上に有効な同化データとして期待できる。GNSS 掩蔽データは、水蒸気量等が水平一様に分布しているという仮定を用いて推定したもので、GNSS 衛星から電波を受信する低軌道衛星までの経路上で最も地球に近い点（タンジェント点）での屈折率の鉛直プロファイルが提供されている。2011 年 7 月のヤマセの事例では、このタンジェント点の掩蔽データを同化すると、大きくないけれども雲分布が変わり、ヤマセの予報に影響を及ぼすことを示している（平成 23 年、24 年度報告書）。

しかし、東北地方の東方海上は暖流と寒流の境目であり、大気下層の気温の南北傾度が大きいと考えられるため、電波の経路が南北方向にのびる場合、水平一様の仮定を満たさないと考えられる。したがって、より精度よくヤマセをより正しく予測するためには、タンジェント点ではなく、電波の経路上の屈折率として同化することが望ましい。本研究で用いる局地アンサンブル変換カルマンフィルター（LETKF）と呼ばれる手法では、高い計算効率を得るために格子点ごとに処理することから、経路に沿った積算値を同化することができない。そこで、経路に沿った積算値を経路付近の格子点の値に分配する手法を開発し、模擬観測データを用いた実験により、この手法の有効性を確認した（平成 25 年度報告書）。本年度は、実際に観測されたタンジェント点の屈折率から経路上の積算値を求め、さらに上記の方法で経路付近の格子点の値にしてから、LETKF を用いて同化実験を行った。

推定手法

(1) タンジェント点の屈折率から経路上の積算値にする手法について

タンジェント点の屈折率から経路上の積算値にする手法の模式図を図 1 に示す。GPS 衛星と低軌道衛星の間の経路は大気の広い範囲を通過するため、図 1 の高い高度のタンジェント点の屈

折率 (RI_{tp3})の値が、低い経路の同じ高度の値 (RI'_{tp3}) と必ずしも同じ値であるという保証はない。しかし、水平一様という仮定 ($RI_{tp3}=RI'_{tp3}$) を適用すると、次式のように、低い経路の値から、経路上の高い位置の値を先に求めた高い高度の値と同じとして差し引くことにより、低い高度のタンジェント点の値 (RI_{tp1}) を求めることができる。

$$RI_{tp1} = \frac{RI_{p1}(L_{3a} + L_{2a} + L_1 + L_{2b} + L_{3b}) - (L_{3a} + L_{3b})RI_{tp3} - (L_{2a} + L_{2b})RI_{tp2}}{L_1}$$

ここで、 RI_{tp} はタンジェント点での屈折率、 RI_p は視線に沿った屈折率の平均値である。本国で同化データとして用いたい「経路に沿った屈折率の平均値 (RI_{p1})」は、上記の手順を逆にすれば求めることができる。つまり、式 (1) を次式に変形して、提供されているタンジェント点の値から求めた。

$$RI_{p1} = \frac{L_{3a}RI_{tp3} + L_{2a}RI_{tp2} + L_1RI_{tp1} + L_{2b}RI_{tp2} + L_{3b}RI_{tp3}}{L_{3a} + L_{2a} + L_1 + L_{2b} + L_{3b}} \quad (2)$$

この式は、経路に沿った遅延量（もしくは屈折率の平均値）は、高い高度のタンジェント点の値と経路上の同じ高度内の距離の積の和により求めることができることを示している。

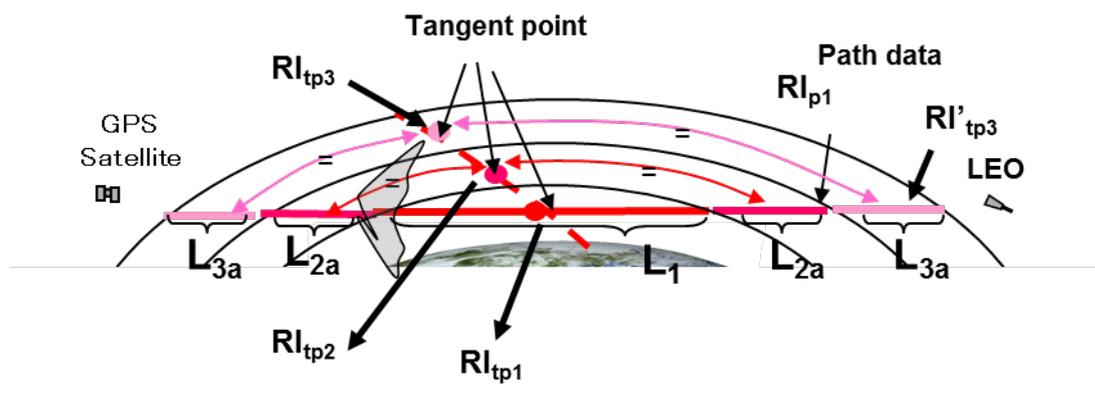


図1 タンジェント点の屈折率から経路上の積算値にする手法の模式図

(2) 積算値を経路の点に振り分ける手法について

本研究では同化システムとして LETKF を用いるため、アンサンブル予報の平均やスプレッド（アンサンブルメンバー間のばらつき）を得ることができる。提案する方法は、「アンサンブルメンバーで求めた経路上の屈折率の平均値と格子点の屈折率との相関が大きく、かつ、アンサンブルのスプレッドが大きいと、経路上のその場所では相関に従ってアンサンブル平均より大きく離れることができる」という仮定を用いる。振り分ける手法の具体的な手順は以下のとおりである（図2）。

1. アンサンブル平均から観測と同じ経路上の屈折率の積算値（第一推定値）を求める。
2. アンサンブル予報の各メンバーの値を用いて、観測値に対応する経路に沿った遅延量と、経路上の格子点の屈折率との相関を求める。
3. 経路上の屈折率を、屈折率のスプレッドと(2)で求めた相関の積に比例させて変化させ、修正した屈折率を積算した遅延量が観測値と合う振幅をイタレーションで求める。

(3)データ同化の概要について

今回の報告では、2011年7月末のヤマセの事例を採用した。データ同化システムには水平格子間隔は15kmの LETKF を使い、計算領域は東北地方を中心とした 1200 km×1200 km、メンバー数は12とした。2011年7月29日00UTCから同化実験を開始し、観測データを1時間毎に与え、6時間毎に解析値を作成した。6

時間分の予報とデータ同化による解析を1サイクルとし、得られた解析値を次のサイクルの初期値にして、サイクルを繰り返した。気象庁現業のゾンデデータ等を同化する実験(コントロールラン)の他に、29日15UTCに観測された掩蔽データ(タンジェント点や経路を考慮した屈折率)を現業データに加えた実験を行った。

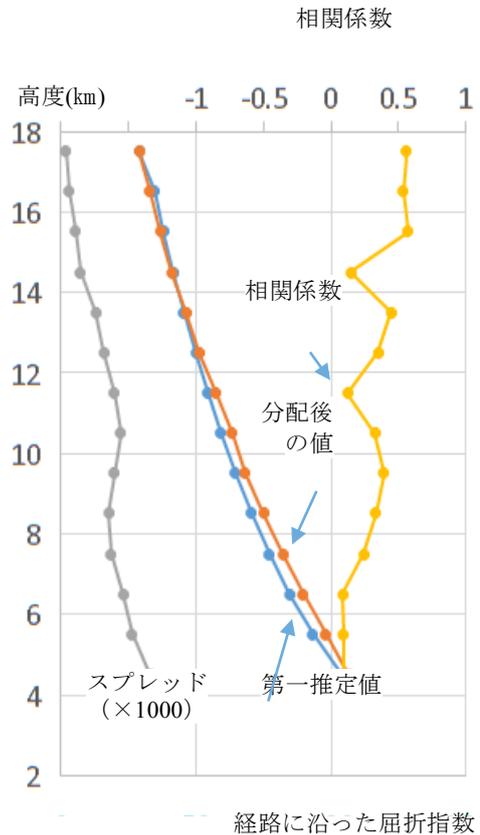


図2 積算値を経路付近の複数の点に振り分ける手法の模式図

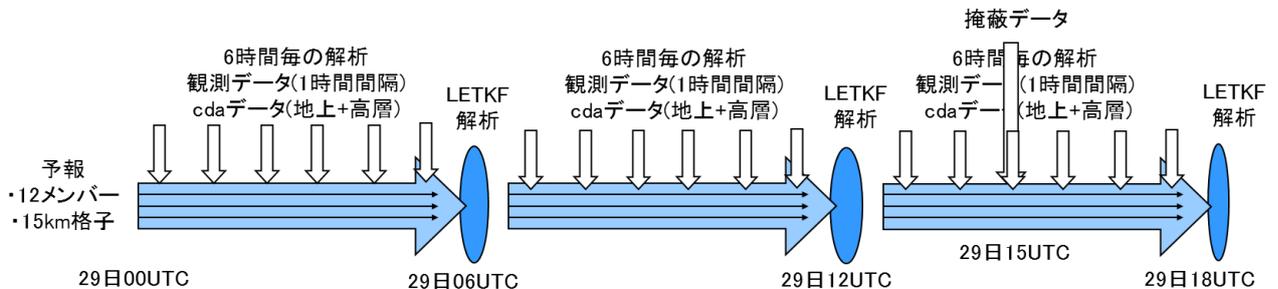


図3 データ同化の模式図

実験結果

(1) タンジェント点と経路に沿った屈折率データについて

本報告では、低軌道衛星である FORMASAT-3/COSMIC で観測された屈折率の鉛直プロファイルを用いた。同化する掩蔽データは、29日 15UTC にタンジェント点が福島県の東側を通過したもので、タンジェント点自体はゆっくりと北に移動し、経路はタンジェント点から南東-北西方向にのびていた (図 4a)。

図 4b,c は、タンジェント点と経路上の屈折率の鉛直プロファイルである。観測された屈折率と第一推定値の屈折率(同化システムのアンサンブル予報で得られたアンサンブル平均の湿度や気温等から作成した)を示している。図 4b,c の縦軸はタンジェント点や各経路のタンジェント点の高度である。

モデル領域の上端高度に近い約 18 km からプロファイルを作成しているが、この観測データでは、上端付近での屈折率の第一推定値と観測値の差はわずかであった。図 1 で示したように、経路に沿った屈折率をタンジェント点の屈折率と比較すると、上端付近ではほぼ同じ値だが、下層のほど高い高度の割合が大きいため、タンジェント点の値に比べて小さくなっていく。タンジェント点の屈折率の観測値と第一推定値を比較すると、観測値の方の値が大きく、高度 7 km 以下でその差が大きくなっている。経路に沿った屈折率では、タンジェント点とは逆に観測値の方の値が小さく、高度 10 km 以下でその差が明瞭になっている。経路にすると観測値と第一推定値の大小が逆になるのは、後述のように気温や水蒸気の分布が一様でないことに起因していると考えられる。

(2) LETKF を用いた同化実験の結果について

今回の報告では、経路に沿って屈折率の同化が正しく行われていることを確認するとともに、経路を同化したことによるインパクトを見るために、1点のみを同化した実験を行った。図 5 は、掩蔽データを同化した解析値が得られる 29日 18UTC の雲域と地上付近の水平風分布である。北海道は北東風が卓越し、東北地方は弱い東風になっていた。北海道の北東側や東北地方の東側に雲域が広がっている。掩蔽データの有無の影響を見ると、この事例については、掩蔽データが 1点であるために雲分布に大きな変化はないが、矢印で示すように、タンジェント点が通過した福島県の東側では雲域の形状が異なっていた。

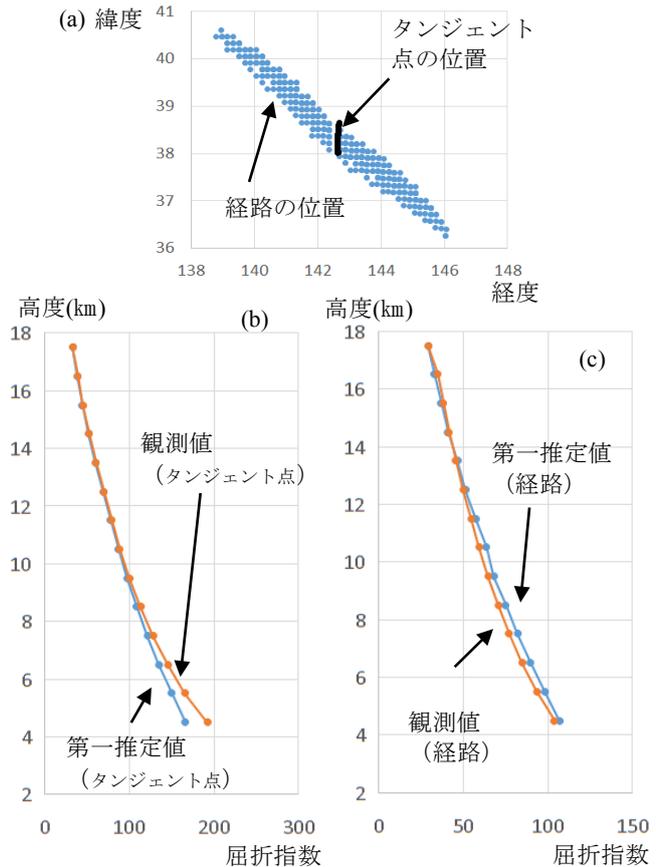


図 4 (a) 経路の位置、(b) タンジェント点と(c) 経路上の観測した掩蔽データと第一推定値の屈折率の鉛直プロファイル

上記に述べたように屈折率は、経路の値にすると、タンジェント点と観測値と第一推定値の大小が逆になっていた。タンジェント点の値を求める際に仮定する水平一様性が満たされているかどうかを確認するために、第一推定値の高度約 10 km における気温分布を確認すると、気温分布は水平一様ではなく、細かな変動が見えていた (図 6)。29 日 18UTC までに同化システムの 6 時間の同化ウィンドウを 2 回通過していることから、図 6 の分布はある程度実況に近いと考えら

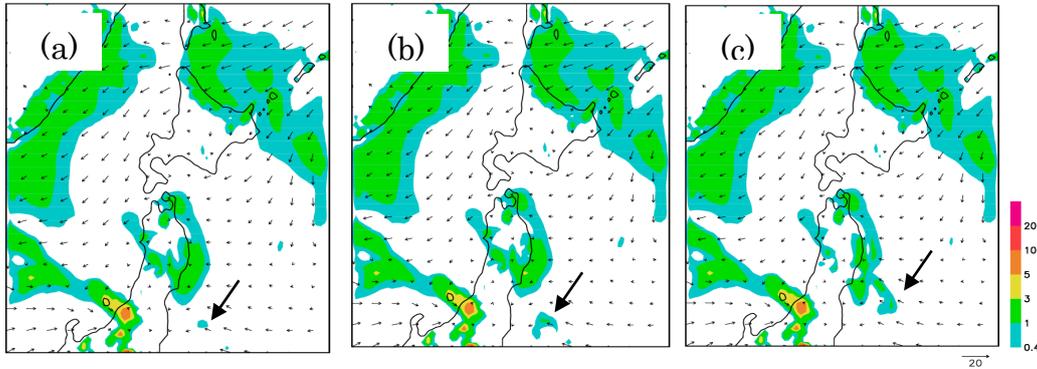


図 5 (a)現業データのみを同化して得た雲水の鉛直積算の分布と地上付近の水平風分布。(b)と(c)は同化データに、タンジェント点の屈折率、経路の屈折率を同化データに加えた (a)と同様の図。

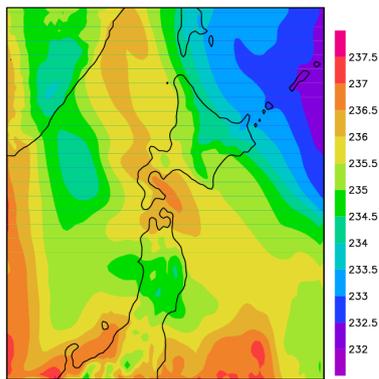


図 6 第一推定値の高度 10 km における気温分布

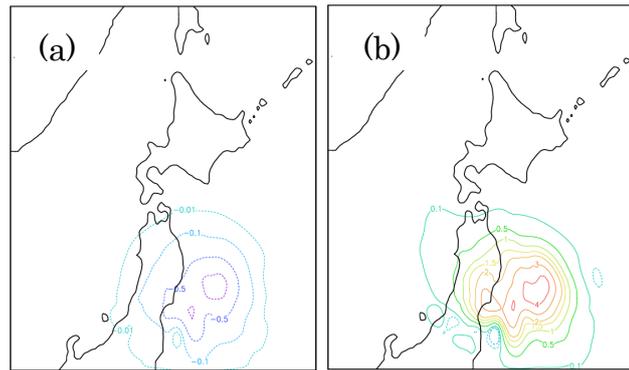


図 7 (a)タンジェント点の屈折率、(b)経路の屈折率を同化データに加えて得られた解析値の高度 10 km の気温分布から、現業データのみを同化して得た気温を差し引いた分布。

れる。この事例では、実況に近い第一推定値が水平一様性を満たしていないことから、タンジェント点ではなく、経路に沿った値で同化するほうが適切と考えられる。

最後に、屈折率を同化して得られた高度 10 km の気温分布から屈折率を同化していないものを差し引いた分布を図 7 に示す (つまり、掩蔽データの同化の影響を示している)。タンジェント点を同化すると、宮城県のある海上に気温が減少した領域 (屈折率が增大した領域) が現れている。それに対して経路の値として与えた場合には、気温が上昇した領域がタンジェント点と同じ場所に現れ、タンジェント点のものに比べてやや北西側に広がっている。この北西側にのびた領域は、屈折率を経路で与えたことによるものと考えられる。

まとめと今後

ヤマセの予測精度の向上させるために、GNSS 掩蔽データの同化手法を開発し、実際に観測された掩蔽データを用いて同化実験を行った。タンジェント点の屈折率を求める際に適用する水平一様という仮定は必ずしも満たされないことから、タンジェント点の屈折率から電波の経路付近の格子点の値に変換する手法を開発した。今回は、初期的な実験として、1点の掩蔽データを同化した実験を行い、タンジェント点付近の雲域が修正されるという結果の他に、大気が非一様であるために観測値と第一推定値の大小が逆転する場合があること、経路に沿った屈折率の方が広い範囲を修正すること、これらから経路を同化するほうが望ましいと考えられることがわかった。実際には、本事例の計算領域で1サイクル間に数個の掩蔽データが得られることや、COSMICの次期衛星である COSMIC II ではさらに多くの掩蔽データが提供される予定であることから、より確かな GNSS 掩蔽データのインパクトを得るためには、できるだけ多くの掩蔽データを同化させた実験をする必要がある。また、気温や水蒸気量の鉛直分布の情報を与える掩蔽データの他に、海面水温もヤマセの低温な気流の形成に寄与すると考えられることから、海面水温に摂動等を与えた実験を行いたいと考えている。

謝辞

FORMAT-3/COSMIC で観測された GNSS 掩蔽データには、University Corporation for Atmospheric Research の COSMIC Data Analysis and Archival Center が作成したデータを、京大大学生存圏研究所から頂きました。本報告では、気象庁の非静力学モデルや理化学研究所計算科学研究機構の三好建正博士の開発した LETKF、気象庁の現業観測データを使用しました。ここに記して感謝します。

c)参考文献

- Miyoshi, T. and K. Aranami, Application a four-dimensional local ensemble transform Kalman filter (4D-LETKF) to the JMA nonhydrostatic model (NHM), SOLA, 2, 128-131, 2006.
- Seko, H., T. Tsuyuki, K. Saito, and T. Miyoshi, Development of a two-way nested LETKF system for cloud-resolving model. Data Assimilation for Atmospheric, Oceanic and Hydrologic Applications (Vol. II), pp. 489-507, 2013.
- Seko, H., Y. Shoji, M. Kunii and Y. Aoyama, Impact of the CHAMP occultation data on the rainfall forecast, Data Assimilation for Atmospheric, Oceanic and Hydrologic Applications, pp 197-218, 2009.

3.2.2 リアルタイムアンサンブルダウンスケールデータを用いた病害予測システムの構築

菅野洋光・大久保さゆり・紺野祥平

(農研機構中央農業研究センター・農研機構東北農業研究センター)

a) 要旨

実際の気象予測データを用いて、アンサンブル気象予測データのダウンスケールと葉いもち予察モデルへの適用を毎日実施するリアルタイム実験を実施した。複数の気象予測データからなるアンサンブル予測データを用いることで、葉いもちの感染危険度の予測を「葉いもち感染確率」として表現した。本実験での予測データによる「葉いもち感染確率」は、事例ごとの気象場や予測データ自体の精度にもよるが、5日間先程度まで地域全体の傾向を捉えることができた。得られる予測データの精度や、手法、計算資源についての課題も示唆されたものの、本実験により、気象予測の信頼度を表現する形での農業気象情報の利用手法の一例が示された。

b) 本文

研究背景

農業の現場では、農業気象情報を圃場レベルの空間分解能に高めるダウンスケールだけでなく、予測データにも需要がある。先んじた農業気象情報の取得によって、作業効率の向上や、気象による被害、病害などのリスク回避などが可能となる。

農研機構東北農業研究センターと岩手県立大学では、「Google Map による気象予測データを利用した農作物警戒情報システム」を開発・運用しており、そこでは、統計的手法を用いて気象データを高解像度化し、予測データも使用しながら、水稻生育予測モデル、病害発生予察モデル等に適用している。一方、本プロジェクトでのこれまでの取り組みを通じて、数値モデルを用いて力学的に解像度を上げる手法が統計的手法より適切であることや、アンサンブル予測の平均値でなく各メンバーの値を用いることが適切な判断を下せることなどが明らかとなってきた。

本プロジェクトではこれまで、ハインドキャスト実験（気象予測モデルで過去の気象を再現する実験）によるアンサンブル予測データのダウンスケールや、アンサンブルダウンスケールデータを用いての葉いもち発生確率情報の作成、検証を行なってきた。今年度は、最終年度の試みとして、実際に当日のアンサンブル気象予測データを用いて、予測データの取得からダウンスケール計算、農業モデル計算、確率情報の web システムへの搭載までをリアルタイムで行なうシステムの構築を行なった。

本稿では、このリアルタイムアンサンブルダウンスケール実験のうち、農業モデルとして葉いもち予察モデル BLASTAM を使用し、ダウンスケールされたアンサンブル気象予測データによる葉いもちの感染危険度を確率情報として表示する試みについて報告する。

研究方法

2014年7月上旬の約2週間を対象期間、計算間隔を1回/日として、以下のリアルタイム実験を実施した。

気象庁、気象研究所の気象研究コンソーシアムより取得した当日分の週間アンサンブル予測データ（27メンバー）を、気象庁非静力学モデル（JMA-NHM）を用いて空間解像度10kmへダウンスケールし、各メンバーのデータを BLASTAM に適用して、感染好適条件（および準感染

好適条件)の出現割合を求め、2-11日先までの「葉いもち感染確率」を日ごとに算出した。出力結果はwebシステムへ転送され、非公開のwebサイトに表示された(図1)。予測データの取得とダウンスケール計算は東北大学が、webシステムでの表示は岩手県立大学がそれぞれ担当した。

通常のBLASTAMは5日前から前日までのアメダスデータを用いて計算し、当日の葉いもち感染好適条件の有無を判定する。本実験にあたり、予測データの精度が良好な初期値から5日目までの予測値を活用するため、2日目から判定を得られるようにBLASTAMのアルゴリズムを調整した。

解像度10kmにダウンスケールされた27メンバーの気象予測結果それぞれを用いて27通りのBLASTAMを計算し、メッシュ毎の感染好適条件および準感染好適条件の出現割合を「葉いもち発生確率」とした。予測結果の検証には、アメダス観測値を空間内挿で1kmメッシュ化した気象データによって算出したBLASTAMの結果を用いた。

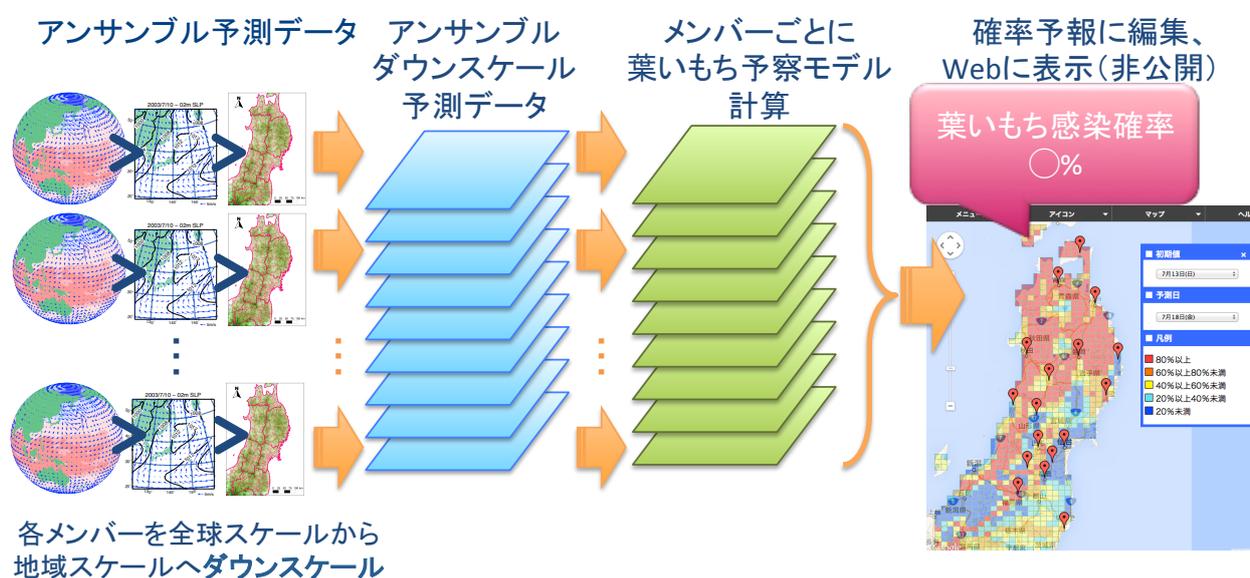


図1 本システムの概念図

結果

図2に、2014年7月5日初期値による、2日目～6日目のアンサンブル気象予測による葉いもち感染確率、およびアメダス実況値に基づく葉いもち感染好適条件の分布を示す(図2)。この日の予測による結果では、多くの地域で感染危険なしであった2日目、多くの地域で感染確率が低かった中で福島県西部での感染好適条件発生を50%程度として予測した3日目など、予測期間の最初の数日間で実況値とよく合致している。

この期間の27メンバーによる葉いもち感染好適条件の有無の判定と、アメダス実況メッシュによる判定との一致率(図3)は、期間の初めには多くのメンバーで7～8割の一致を示し、徐々に下がるという経過を辿った。図3で一致率の低下がみられた6日目には、図2(右端)でも、予測値と実況値で全体の分布が大きく異なっている。期間の後半の一致率の上昇は、途中の経過が正しく予測されたわけでないため、見かけ上の一致にすぎない。このほか、他の初期値の事例も含め、「現象なし」(葉いもち感染危険なし)の予測の的中割合が高い傾向にあった。

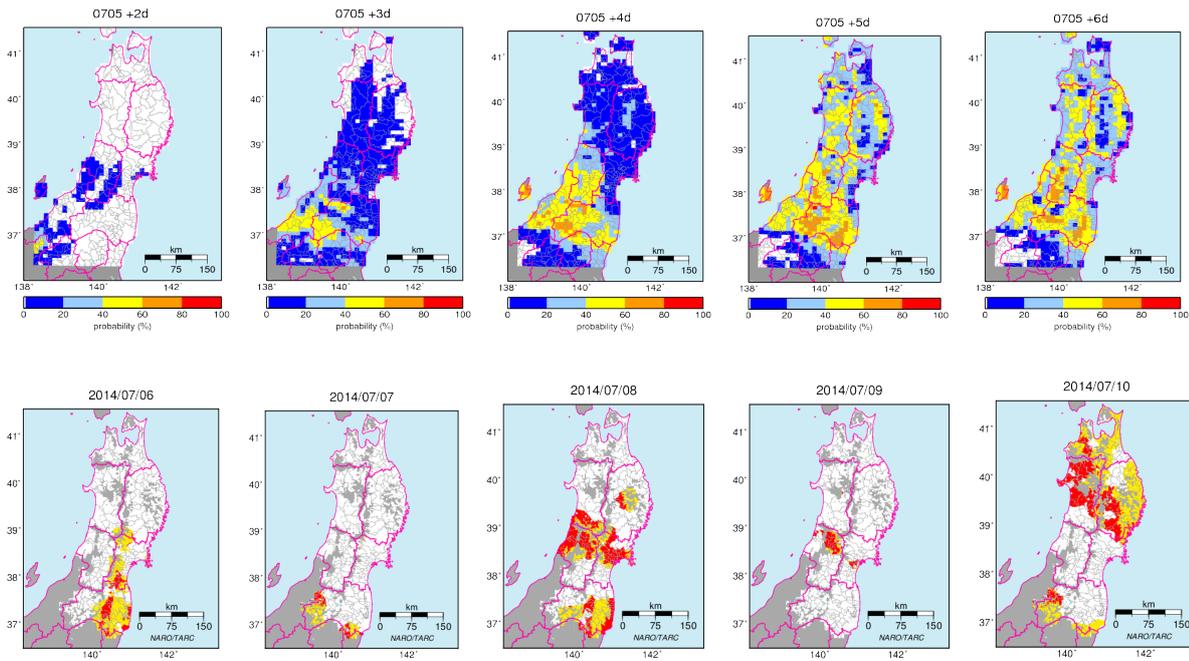


図2 2014年7/5 初期値により予測された葉いもち感染確率（上）と実況値による感染好適条件（下）

予測値による結果は 10km メッシュ。実況値による感染好適条件（赤）、準感染好適条件（黄）はアメダス観測値の空間内挿による 1km メッシュ気象データから算出。上下とも、左端から 2 日目～6 日目の結果を示す。

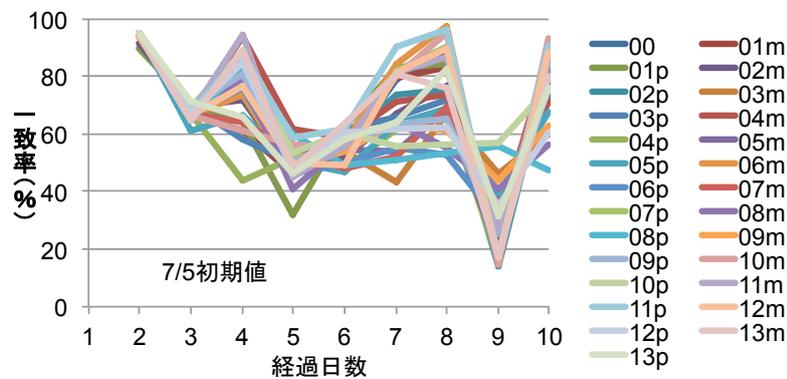


図3 アンサンブル各メンバーによる感染好適条件の有無の一致率

考察

実際の子測データによるアンサンブルダウンスケール気象子測データの葉いもち子察モデルへの適用を試行した。本実験では、ダウンスケールの空間解像度を 10km としているが、中山間地などではメッシュ内の標高差が大きくなり、圃場規模の空間スケールでの利用には適さない可能性がある。特に BLASTAM の場合は降水量の子測が重要であり、地形の再現性が粗いと降水量とともに葉いもち子察の精度も下がる。しかしながら、今回の実験によって、最も計算負荷がかかるのが気象データのダウンスケール計算であることも明らかとなった。今後、実利用に適した空間解像度を得るには、例えば、力学的ダウンスケールの結果に対してさらに統計的ダウンス

ケールをかけるなど、計算負荷を減じるための何らかの工夫が必要であるといえる。

ダウンスケール過程だけでなく、アンサンブル予測データの使用も、複数通りの予測値それぞれを用いるために計算負荷が増す。全体の計算負荷を下げるためには、メンバー数の取捨選択も方法の一つとして考えられる。しかし、アンサンブル予測データによって複数の予測を用いることは利点も大きい。例として、現在運用されている警戒情報システムでは、1つの予測値で7日先までの BLASTAM の計算結果を葉いもち感染好適条件の予測として公開しているが、アンサンブル予測を基にした「葉いもち感染確率」では、予測の確からしさの程度を含んだ情報となる。葉いもちの場合に限らず、現象の発生確率として表現することで、予測の信頼度が受け手に伝わり、ユーザー自身が気象予測の不確実性を踏まえた意思決定をしやすくなる。

アンサンブル予測データを用いた高解像度での農業気象情報について、本プロジェクトを通してその利用事例や利点、課題を得ることができた。実運用に向けては解決すべき課題も多いが、今後、より高度な農業被害軽減システムの構築が期待される。

3.2.3 高度農業気象情報による農業支援システムの高度化

南野謙一（岩手県立大学）

a)要旨

農業支援システムによって提供された農業気象情報とその表現方法について総合的に評価した。具体的には、平成 25 年度に行った、提供可能な予測情報とユーザのニーズの一致不一致に関する調査結果を元に、システム改良を行い運用し、評価を行った。改良点は、出穂期をユーザに入力させ、生育モデルの計算誤差を補正できるようにした点と、いもち病発生予察の過去データ（当日確定値）を閲覧できるようにした点である。そして、平成 26 年度に農業支援システムを利用したユーザのニーズ及び提供可能な予測情報に関する調査を実施した。昨年度のシステムからの変更点についても調査も行った。本調査は、運用実験後にメールアンケート形式で行った。調査結果より改良点について肯定的な回答が多く得られたことから、ユーザニーズに対応した情報発信ができたことが分かった。

また、平成 22 年度に行った寒候期の寒締めハウレンソウ糖度予測のマップデータ配信システムを、東北農業研究センターのウェブサイトで運用開始した。本システムは、岩手県立大学のサーバで動作しているが、ユーザ管理をせず誰でも利用できるように改良し、東北農業研究センターのウェブサイト「寒締め菜っ葉情報ひろば」の中に埋め込み、ユーザがサーバの違いを意識せず利用できるようにした。

b)本文

農業支援システムによって提供された農業気象情報とその表現方法について総合的に評価した。具体的には、平成 25 年度に行った、提供可能な予測情報とユーザのニーズの一致不一致に関する調査結果を元に、システム改良を行い運用し、評価を行った。システム改良は次の 2 点について行った。

(1) 生育モデルの計算誤差の補正

生育モデルと品種パラメータを東北地域で共通に定めているため、地域により誤差が生じていた問題に対処し、出穂日をユーザに入力させ、生育モデルの計算誤差を補正できるようにした。図 1 の出穂日の入力画面により、日付を入力すると玄米の生育モデルを再計算し出穂日以降の生育予測の誤差が修正される。胴割れ注意報や収穫適期情報は、この計算結果をもとに配信される。

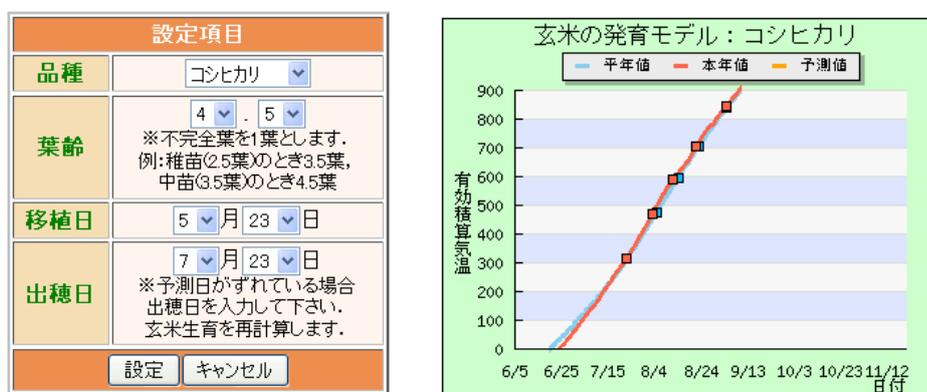


図 1 出穂日の入力画面と玄米の生育モデルの再計算

(2) いもち病発生予察の過去データ（当日確定値）の公開

いもち病は感染から発病までの潜伏期間があるため、過去のデータ（当日確定値）を参照できるようにした（図 2）。前日確定値は、前日までの気象実況データを用いて計算した前日の感染条件を示す値（好適条件、準好適条件、なしの 3 種類）であり、気象予測データを用いて計算した値（当日から 6 日先までの予測値）よりも精度が高い。例えば 6 月 20 日計算の前日確定値では、6 月 18 日 1 時～20 日 0 時までの 48 時間分の時別データで計算した葉面濡れ時間から推定した感染条件である。詳細には、過去 5 日分の日平均気温もグレード分けに用いている（低温・高温では感染力が弱まることを考慮している）。

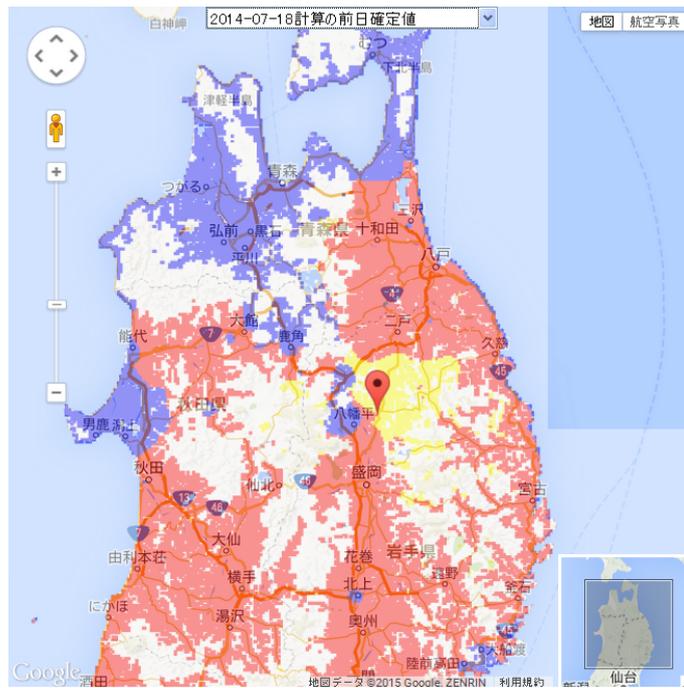


図 2 いもち病発生予察の過去データ（当日確定値）

平成 26 年度に水稻気象被害予測システムを利用したユーザのニーズ及び提供可能な予測情報に関する調査を実施した。本システムに登録されているユーザは、平成 26 年 12 月 22 日現在で、512 名であり、地域別・所属（メールアドレス）別の割合を図 3 に示す。

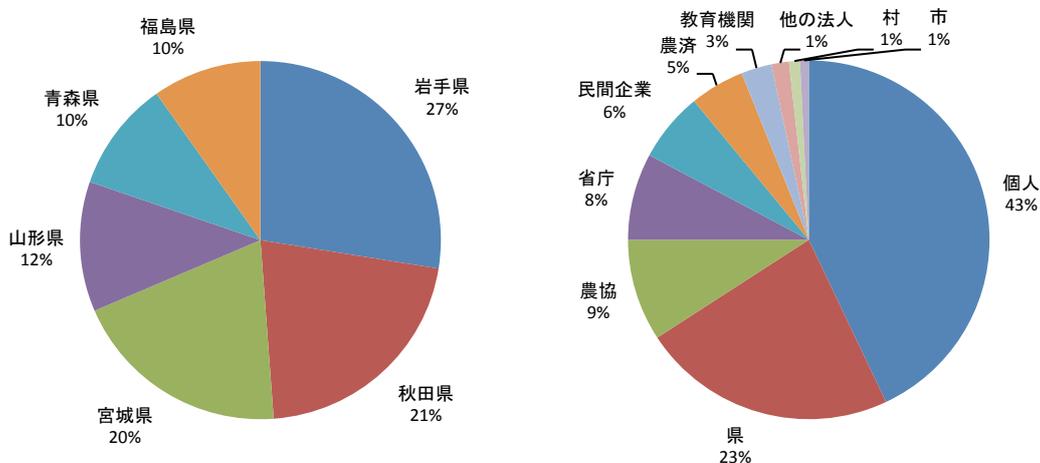


図 3 登録ユーザの地域別・所属（メールアドレス）別割合（N=512）

本年度に配信した警戒情報メールを表1に示す。表1は、パソコン、携帯電話のメールアドレスに配信した合計件数（週1回配信）を示している。警戒情報の配信設定では、警戒情報がある場合に配信、あるなしに関わらずすべて配信のいずれかを選べるようになっているため、各警戒情報の合計数とはなっていない。表1の6/19は配信希望ユーザ全員に最初の案内も兼ねて配信している。

表1 平成26年度の警戒情報メールの配信数

日付	件数	警戒情報									
		いもち病	栽培管理	2週目気温	低温	2週目低温	高温	2週目高温	紋枯病	胴割れ	収穫
6/19*	620	11	15	12	-	-	-	-	-	-	-
6/26	192	43	25	1	-	-	-	-	-	-	-
7/3	252	102	31	1	-	-	-	-	-	-	-
7/10	255	112	4	1	-	-	1	-	-	-	-
7/17	690	379	15	-	-	-	1	-	-	-	-
7/24	582	356	64	6	-	-	2	36	-	-	-
7/31	565	25	343	47	-	-	47	113	-	15	1
8/7	561	321	115	1	-	-	51	-	-	116	5
8/14	690	456	290	-	-	-	35	2	-	251	16
8/21	688	423	363	6	-	-	26	-	-	260	68
8/28	692	335	86	1	-	-	16	-	-	242	221
9/4	692	86	145	-	-	-	5	-	-	147	381
9/11	702	25	166	-	-	-	-	-	-	1	435
9/18	681	-	-	-	-	-	-	-	-	-	458
9/25	701	-	-	-	-	-	-	-	-	-	472

ユーザのニーズ及び提供可能な予測情報に関する調査を、水稻気象被害予測システムの運用実験後にメールアンケート形式で行った。アンケートは、各予測情報について2つの質問：“この予測から役立つ情報は得られましたか？”、“この予測は実際の状況と比べて適切だったと思いますか？”を設け、5段階評価（1. 全くそう思わない、2. そう思わない、3. どちらともいえない、4. そう思う、5. 全くそう思う）で回答する形式とした。アンケートは、2014年10～11月に実施し、この時点の登録ユーザのうち今年度アクセスがあった238名に対して行った（ユーザ登録は随時受け付けている）。127名のユーザから回答があった（回答率53%）。評価の高かった生育予測（移植モデル）、いもち病予測、収穫適期情報についての調査結果を図4に示す（この予測情報を利用したユーザのみ回答しているため回答数に違いがある）。調査結果から前年度と同様、全般的に肯定的な回答が多かったことから、ダウンスケール予測農業情報を高度化により有効に発信できたことが分かった。

また、平成22年度に行った寒候期の寒締めハウレンソウ糖度予測のマップデータ配信システムを、東北農業研究センターのウェブサイトで開催開始した。図5に示すように、本システムは岩手県立大学のサーバで動作しているが、ユーザ管理をせず誰でも利用できるように改良し、東

北農業研究センターのウェブサイト「寒締め菜っ葉情報ひろば」の中に埋め込み、ユーザがサーバの違いを意識せず利用できるようにした。水稻気象被害予測システムの利用期間は、4月～10月であるため、終了後の寒候期（12月～2月）が利用期間であり、1年を通して、生産者に情報提供ができるようになった。

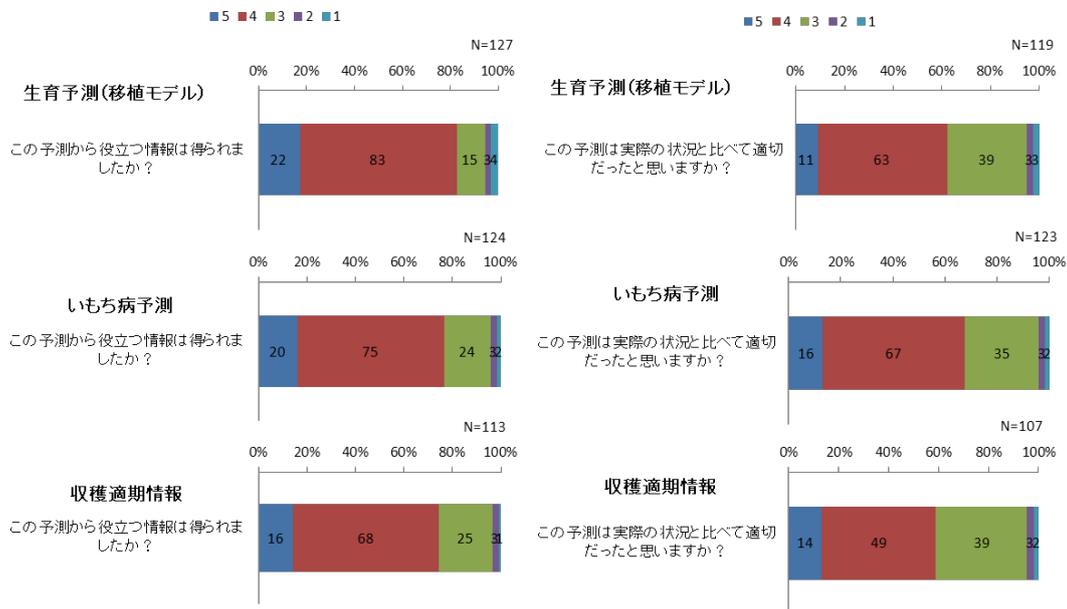


図4 平成26年度のアンケート調査結果の一部

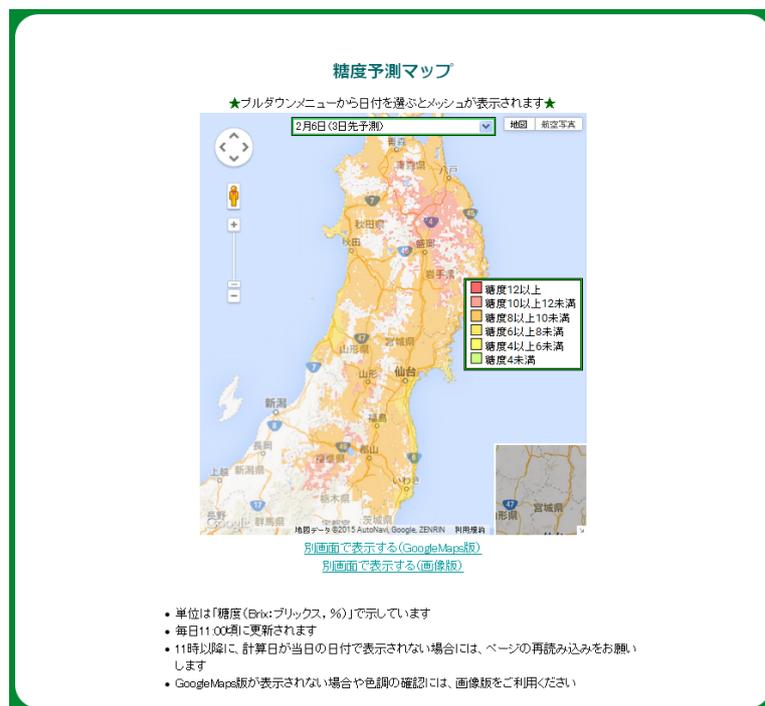


図5 ウェブサイト「寒締め菜っ葉情報ひろば」

c)参考文献

農林水産省東北農業試験場、やませ気候に生きる-東北農業と生活の知恵-、東北農業試験場創設50周年記念事業会、1999.

3.2.4 局地モデルの太陽光発電への利用計画とヤマセ時の日射量予測の事例解析

大竹 秀明・高島 工・大関 崇 ((独) 産業技術総合研究所 太陽光発電工学研究センター)

Joao Gari da Silva Fonseca Jr. (東京大学生産技術研究所)

山田 芳則 (気象研究所)

a)要旨

近年、太陽光（以下、PV）発電システムが大量に導入が進んでいる。しかし、PV 発電は日射量に依存するため、お天気任せの発電システムである。電力エネルギーの安定供給（電力の需要と供給のバランス）のためには、PV 発電だけで調整するのは不可能であり、予備力となる火力発電機などを併用する必要がある。本稿では、ヤマセ時の下層雲が出現した事例に注目し、気象庁の局地モデル（Local forecast model, LFM）から出力される日射量予測、雲の予測の検証を気象官署の日射データや気象衛星から推定された日射量を用いて行った。その結果、現状のメソモデル（Mesoscale model, MSM）及び LFM であっても、下層の雲の予測は難しいことが2つの事例解析から確認された。そして、広域エリアでの雲の予測の大外れは日射量予測に大きなインパクトを与える。そのため、今後は広域エリアで日射量予測の大外れの予測がどの程度可能であるか検討も必要である。

b)本文

1. はじめに

近年、PV 発電システムが大量に導入が進んでいる（資源エネルギー庁、2014）。しかし、PV 発電は日射量に依存するため、お天気任せの発電システムである。電力エネルギーの安定供給のためには、PV 発電だけで調整するのは不可能であり、予備力となる火力発電機などを併用して、電力の安定供給に努める必要がある（例えば、宇田川ら、2014）。東北地方では、現在、青森県八戸市や宮城県亘理町などで、100MW を超える国内最大級のメガソーラの建設が進められている。

一方、東北地方ではヤマセにともなう北東気流が吹くとともに、太平洋側の地域では層積雲などの下層の雲が広域で発生することがある。そのため、下層の雲は光学的に厚い雲であるため、日射が遮られ、PV システムの発電電力量（以下、発電量）は低くなる。大量の PV システムが電力系統に連系した場合、PV の出力が落ちるケースでは他の予備力による調整を行い、電力需要と供給のバランスを取る必要がある。そのためには、事前にヤマセ時の雲の的確な予測が求められる。本稿では、気象庁が開発、運用を開始している LFM の予測誤差の検証をヤマセ事例に注目して解析を行った。著者らは、これまで MSM の予測誤差の実績から予測値の信頼度の推定について報告している（大竹、2014, Ohtake et al, 2014a; 2014b）。本稿では児玉ら（2013）の集中観測に合わせて、特に予測が大きく外れる雲のタイプと LFM の予測の検証結果について報告する。

(a) 衛星推定日射量 (b) MSM(06LST初期値) (c) LFM(06LST初期値)

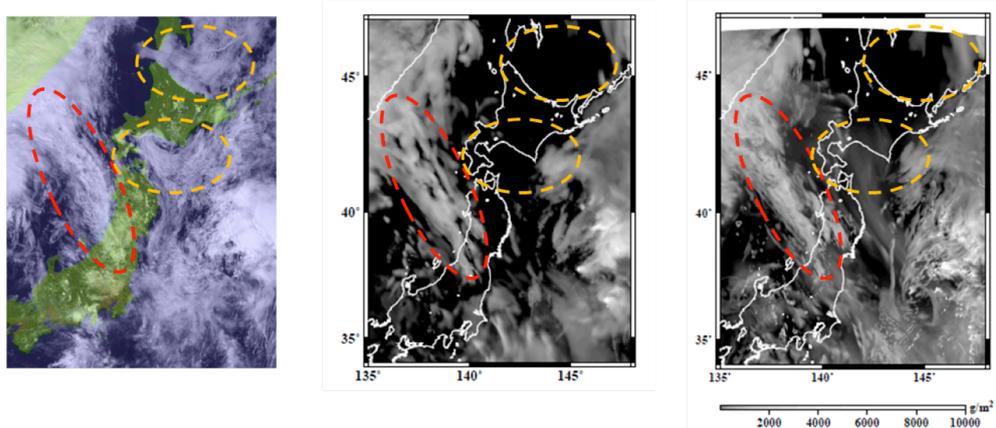


図1 2013年7月21日12時における(a) 衛星可視画像と(b) MSMによる雲の分布(鉛直積算した水物質量)の予測、(c) LFMによる雲の分布の予測を示す。モデルの初期値は21UTC(日本時間06時)のもので、6時間先予測の結果。

2. 観測データとモデル

2-1. 観測値

観測値には全国の気象庁気象官署の全天日射量データ(特別値、47地点)をモデルの検証に用いた。日射量観測測器は英弘精機株式会社のEKO MS-402(First class)が多くの気象官署で現在利用されている。

2-2. 局地モデル

LFMは水平解像度2kmのモデルであり、1日24回9時間先予測を実施している。LFMは2012年8月に本格運用が開始されたが、その時点では東日本領域を中心とした予報が実施されていた。大竹ら(2013)らは東日本領域における本運用版LFMの日射量予測について検証結果を報告している。2013年5月からは予報領域を日本全体が入る領域に拡張された(気象庁、2008, 2013)。また、従来から用いられているメソモデル(MSM、水平解像度5km)もLFMとの比較のために解析を行った。MSMは1日8回39時間予測が実施されている。2013年3月には従来の予測領域から領域が拡張されている。両モデルでは日射量予測に重要な雲物理過程と雲放射過程のプロセスは同様なスキームが採用されている。しかし、雲量の出やすさに関する(部分凝結過程)パラメータは、それぞれのモデルに最適になるように調整されている。雲放射過程では、日射量予測値(下向き短波放射量)は、15分に一回計算されるが、前1時間平均値が毎正時出力されている。

3. 結果

3-1. 2013年7月21日のヤマセ事例

本稿では第8回ヤマセ研究会で児玉ら(2013)が選択したヤマセ事例の一つ、2013年7月21日のケースについて取り上げた。図1aは気象衛星からとらえた可視画像であり、同日12時の雲の分布を示している。この日は東北地方の三陸沖に低気圧があり、東北地方には北東の気流が入りやすく、典型的なヤマセ事例である。そのため、北海道のオホーツク海沿岸や噴火湾沖から三陸沖にかけての海上では下層の雲が広がっていることが確認される。

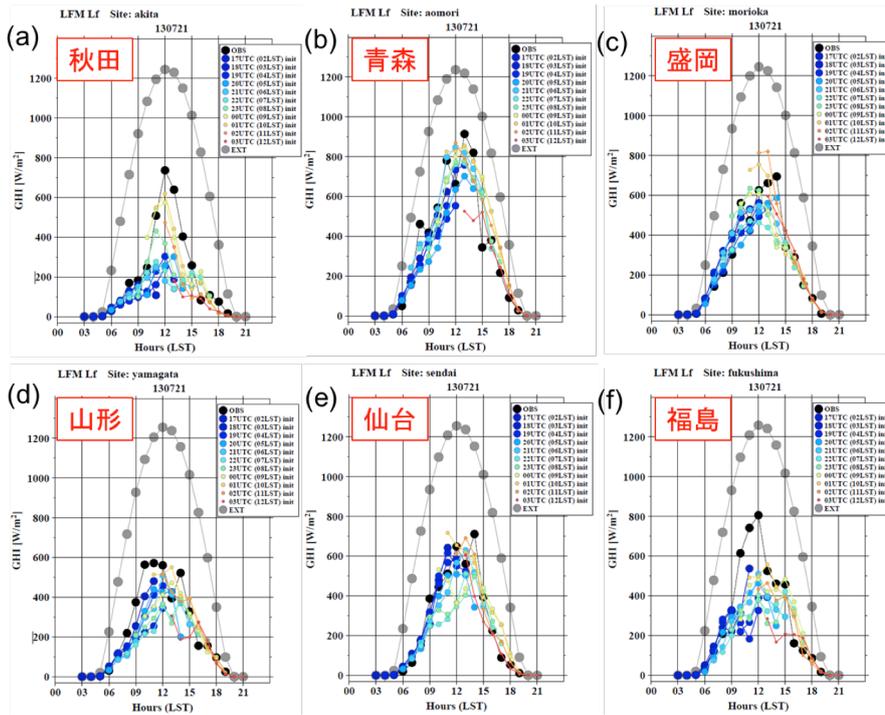


図2 東北地方の気象官署における全天日射量の観測値と予測値の比較で2013年7月21日の事例。(a) 秋田、(b) 青森、(c) 盛岡、(d) 山形、(e) 仙台、(f) 福島の結果。黒丸(●)は観測値、カラーはLFMの予測値で初期値別の予測値で02LSTから12SLTまでを寒色系から暖色系に色分けし、示している。

図1b及び1cは同時刻を対象とした、MSMとLFMによる雲の予測分布(鉛直積算した水物質質量)を示したものである。初期値は21UTC(日本時間06時)のもので、6時間先予測の比較を行ったものである。MSMでは日本海上に見られる帯状の雲域を良く表現しており、LFMでも同様な雲域も表現されているが、高解像度化したLFMの方がより細かな雲の構造を表現している。しかし、MSM、LFMともにオホーツク海上の下層雲は表現されていない。また、三陸沖に見られる下層雲についてはMSMでは表現されていないが、LFMではやや光学的に薄い雲が表現されているのが確認される。

図2にその時の東北地方の気象官署で観測された全天日射量(下向き短波放射量)の時別値とLFMの予測値(初期値別)を時系列で示している。多くの地点ではLFMの予測値は観測値に比べて、過小予測をしている傾向がみられる。予測のリードタイムが短くなるにつれて、予測値が観測値に近づき、予測誤差が小さくなる地点も見られる(例えば、秋田)。しかし、初期値が更新されても日中の日射量の予測が改善しない場合もみられる(例えば、福島)。MSMの初期値は1時間毎に更新されるが、初期値が更新されるにつれて予測結果が大きく変化する場合も見られる官署(青森)や、それほど違いが見られない官署(例えば、秋田)もある(図略)。

(a) 衛星推定日射量 (b) MSM(06LST初期値) (c) LFM(06LST初期値)

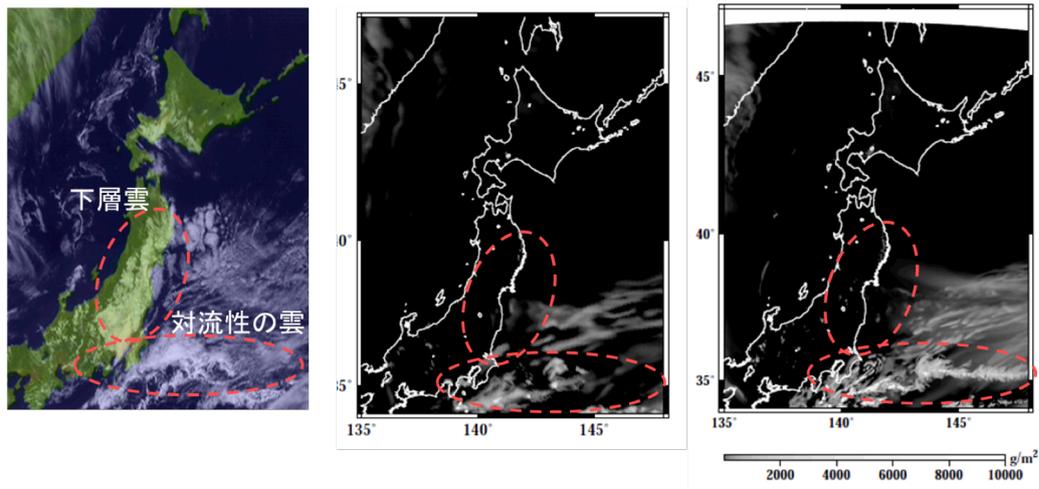


図3 図1と同じで2013年9月23日12時の観測と予測の結果。

(a) 衛星推定日射量 (b) MSM(06LST初期値) (c) LFM(06LST初期値)

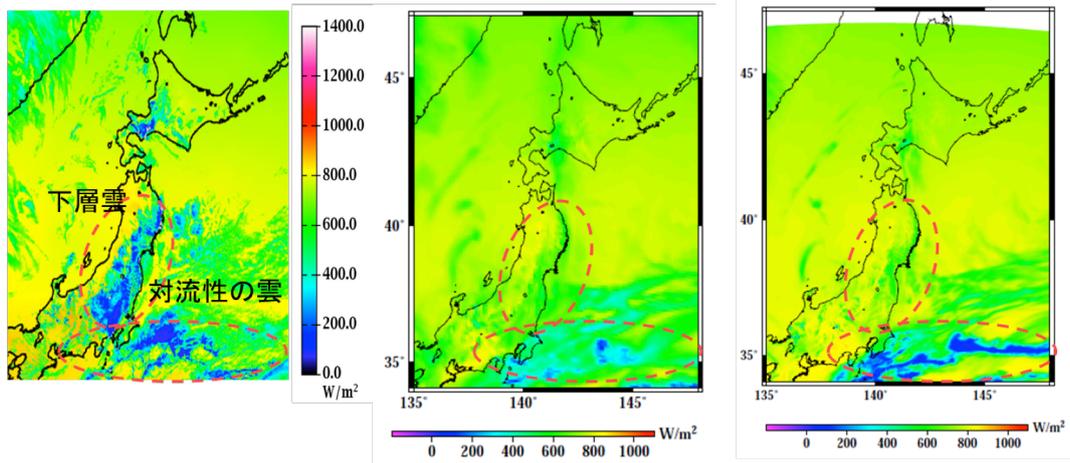


図4 2013年9月23日の全天日射量のマップ。(a) 衛星推定日射量、(b) MSMより予測された地上日射量(下向き短波放射量)、(c) LFMで予測された地上日射量をそれぞれ示す。

3-2. 2013年9月23日の下層雲の事例

図3aは2013年9月23日12時(日本時間)における衛星可視画像である。東北地方から関東地方の太平洋側の地域に南北に下層の雲が観測されている。モデルによる予測値に注目すると、MSMではこの下層の雲に相当する雲域は表現されていない(図3b)。また、LFMにおける予測でも、下層の雲域は表現されていない(図3c)。また、関東の東沖には対流性の雲が存在している。MSMでは雲域の面積は観測に比べて小さいものの、雲域は表現されている。LFMではさらに、その雲域はMSMに比べて広く分布している。雲域の広がり方はLFMの予測結果の方が、観測値に近い印象にあるが、対流性の雲の位置は観測と比較すると、必ずしも合っているとは言えない。MSMでは、層積雲のような下層の雲の表現は難しい。また、高解像度化したLFMであっても下層の雲の表現には課題が残ることが示唆された。

次に、太陽光発電の発電量に直接影響のある地上の日射量の分布について、観測値(推定値、

CREST/EMS TEEDDA チーム) とモデルの予測値を比較した。図 4a は気象衛星から測定された物理量から推定した地上日射量 (以下、衛星推定日射量と略す。) の 2013 年 9 月 23 日 12 時における分布を示す。可視画像で見たように、東北地方では下層の雲が広がっているため (図 3a)、それに対応して日射量の低い地域が東北地方から関東地方の太平洋側に広がっている (図 4a)。しかし、MSM と LFM の日射量予測値の分布に注目すると、雲の予測が過小になっていることから、太平洋沿岸の地域では衛星推定日射量に比べて、高い値を示している (図 4b 及び 4b)。また、対流性の雲域に注目すると、光学的に厚い雲のところでは 200W/m^2 以下の低日射量の地域が観測されている。MSM では観測よりもやや日射量が高めであるが (図 4b)、LFM では日射量の低い地域も表現されているものの、その位置がやはり観測と異なっている (図 4c)。

以上から、MSM と LFM の両モデルでは下層の雲の表現は難しく、日射量予測値にも大きなインパクトを与えている。このように、東北地方全体で日射量を過大に予測し外してしまうことは、実際は期待したほど太陽光による発電量が出力されないため、広域エリアで停電を引き起こす危険が想定される。そのため、このような日射量の予測の大外しは避けたい事例の一つであるので、電力システム側にとっても注意が必要なケースと言える。今後、予測の大外れの対策も求められる。

4. まとめ

本稿では、ヤマセ時の下層雲が出現した事例について、気象庁の局地モデル (LFM) から出力される日射量予測、雲の予測に焦点を当てた検証を気象官署や衛星推定日射量を用いて行った。

まず、2013 年 7 月 21 日の事例では、ヤマセに伴う海上で、下層の雲がオホーツク海、及び噴火湾、三陸沖の海上で観測された。MSM、LFM とともに可視画像に比べて海上の下層雲の表現は不十分であった。また、2013 年 9 月 23 日の事例では、東北地方から関東地方の太平洋側の地域で下層雲が出現した。この事例でも、MSM、LFM とともに日射量予測では表現できなかった。気象衛星から得られた物理量を用いて、物理的手法から推定した日射量と比較すると、モデルの日射量予測の過大傾向が顕著であった。

現状の MSM 及び LFM であっても、下層の雲の予測は難しいことが 2 つの事例解析から確認された。そして、雲の予測の広域エリアでの大外れは日射量予測に大きなインパクトを与える。そのため、今後は日射量予測が広域エリアでどの程度予測可能であるか評価が必要である。日射量予測が大外れしそうであるという予測情報が得られれば、別途電力システム側では対策を打つことも考えられるため、予測大外れの予測も今後検討される必要がある。

謝辞

本研究は、独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の「発電量評価技術等の開発・信頼性及び寿命評価技術の開発」、及び JST CREST 「太陽光発電の予測不確実性を許容する超大規模電力最適配分制御」の中において、気象庁気象研究所との共同研究の一環で実施された。また、気象庁数値予報課、同庁高層气象台、同庁気象研究所予報研究部第一研究室の皆様にも支援を頂いた。気象衛星画像には高知大学気象情報頁を利用させて頂いた。

c)参考文献

- 宇田川 佑介, 電力系統運用のための気象予測情報の利用 —その2—発電機起動停止計画モデルを用いた日射量予測値の信頼区間・予測精度が与える影響、日本気象学会 2014 年度秋季大会講演予稿集、P381, pp.502, 2014.
- 大竹秀明, ヤマセ時の気象庁メソモデルの日射量予測と太陽光発電への応用、第9回ヤマセ研究会、講演資料 <http://wind.gp.tohoku.ac.jp/yamase/reports/data09/Otake_140311.pdf>、(アクセス日、2015.1.25), 2014.
- 大竹秀明、下瀬健一、Joao Gari da Silva Fonseca Jr、高島工、大関崇、山田芳則, 局地予報モデルの日射量予測誤差と太陽光発電分野への応用. 平成25年 電気学会 新エネルギー・環境/メタボリズム社会・環境システム合同研究会 -再生可能エネルギーの発電予測とシステム技術-, FTE-13-061/MES-13-017, pp.97-102, 2013.
- 気象庁予報部, 気象庁非静力学モデル, 数値予報課報告・別冊第54号、272頁, 2008.
- 気象庁予報部, 日本域拡張・高頻度化した局地モデルの特性およびガイダンスの高度化、平成25年度数値予報研修テキスト、134頁, 2013.
- 資源エネルギー庁, News Release (平成26年4月18日)、<<http://www.meti.go.jp/press/2014/04/20140418002/20140418002-1.pdf>>、(アクセス日、2015.1.25), 2014.
- 児玉安正、黒滝あゆみ、横須賀美香、塚本美奈、和田幸恵、佐藤笑、橋口浩之、古本淳一、東邦明、津田敏隆、瀬古弘、青森県六ヶ所村で実施している陸上のヤマセの詳細観測、第8回ヤマセ研究会、講演資料、<http://wind.gp.tohoku.ac.jp/yamase/reports/data08/Kodama_130820.pdf>、(アクセス日、2015.1.25), 2013.
- Ohtake, H., K-I. Shimose, J. G. S. Fonseca. Jr., T. Takashima., T. Oozeki and Y. Yamada, Accuracy of the solar irradiance forecasts of the Japan Meteorological Agency mesoscale model for the Kanto region, Japan. Solar Energy, 98B, 138-152, doi:10.1016/j.solener.2012.10.007, 2012.
- Ohtake. H., Joao Gali da Silva Fonseca Jr, T. Takashima., T. Oozeki and Y. Yamada, Estimation of confidence intervals of global horizontal irradiance obtained from a weather prediction model. Energy Procedia, 59, 278-284. doi:10.1016/j.egypro.2014.10.378, 2014a
- Ohtake. H., K-I. Shimose., Fonseca. Jr., T. Takashima., T. Oozeki and Y. Yamada, Seasonal and regional variations of the range of forecast errors of global irradiance by the Japanese operational physical model. Energy Procedia, 57, 1247-1256. doi:10.1016/j.egypro.2014.10.114, 2014b.
- JST CREST/EMS TEEDDA チーム <<http://helios.aori.u-tokyo.ac.jp/teedda/fs/about.html>>、(アクセス日、2015.1.25)

4. 研究成果

4.1 査読付論文

印刷済、印刷中

- Fukui, S., T. Iwasaki, and W. Sha, An Ensemble Downscaling Prediction Experiment for Medium-Range Forecasts of the Daily Mean Surface Temperature Distribution over Northeastern Japan during Summer. *J. Meteorol. Soc. Japan*, 92(6), 505-517, 2014.
- Iwasaki, T., T. Shoji, Y. Kanno, M. Sawada, M. Ujiie, and K. Takaya, Isentropic analysis of polar cold air mass streams in the northern hemispheric winter. *J. Atmos. Sci.*, 71, 2230-2243, 2014.
- Kanda, E., H. Kanno, S. Okubo, T. Shimada, R. Yoshida, T. Kobayashi, T. Iwasaki, Estimation of cool summer damage in the Tohoku district based on the MRI AGCM, *Journal of Agricultural Meteorology*, 70, 187-198, 2014.
- Kanno, Y., T. Shoji, and T. Iwasaki, Comparison study of the polar cold air mass between Northern and Southern Hemispheric winters based on a zonal-mean two-box model. *Atmos. Sci. Lett.*, 16, 70-76, 2015.
- Sawada, M., T. Sakai, T. Iwasaki, H. Seko, K. Saito and T. Miyoshi, 2015: Assimilating high-resolution winds from a Doppler lidar using an ensemble Kalman filter with lateral boundary adjustment. *Tellus, A*, in press.
- Shimada, T. and T. Iwasaki, Two regimes of cloud water over the Okhotsk Sea and the adjacent regions around Japan in summer, *Journal of Geophysical Research-Atmosphere*, (印刷中)
- Shimada, T., Wave height variability along the Pacific and Okhotsk Sea coasts of northern Japan induced by cool summer climate, *Climate Research* 62, 71-78, 2014.
- Shoji, T., Y. Kanno, T. Iwasaki, and K. Takaya, 2014: An isentropic analysis of the temporal evolution of East Asian cold air outbreaks. *J. Climate*, 27, 9337-9348, 2014.
- Yoshida, R., Y. Onodera, T. Tojo, T. Yamazaki, H. Kanno, I. Takayabu, and A. Suzuki-Parker, An application of a physical vegetation model to estimate climate change impact on rice leaf wetness. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* (印刷中)
- 大久保さゆり・菅野洋光・小林隆、高解像度気象データを用いた東北地方におけるイネ葉いもち発生予察モデル (BLASTAM) の検証. *天気*. 62(1), 5-15, 2015.

投稿中

- Yoshida, R, S. Fukui, T. Shimada, T. Hasegawa, Y. Ishigooka, I. Takayabu, and T. Iwasaki, A new evaluation framework to assess rice adaptation through a cultivar-based simulation. *Climate Research* (投稿中)
- 紺野祥平・大久保さゆり・菅野洋光・小林隆・福井真・吉田龍平・岩崎俊樹・小林隆：アンサンブルハインドキャスト実験結果を用いたイネ葉いもち病の発生確率予報の精度検証. *天気*. (投稿中)

4.2 そのほかの著作

Kawai, H., S. Yabu, and Y. Hagihara, The evaluation of the vertical structures of marine boundary layer clouds over mid-latitude. CAS/JSC WGNE Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modeling/WMO, 44, 0611-0612, 2014.

4.3 研究会での発表

Endo H., Slower warming trend in the northeastern Japan summer during the 20th century as seen in observational data, AOGS 2014, Sapporo, Japan, July 2014.

Kawai, H., T. Koshiro, M. Webb, S. Yukimoto and T. Tanaka, Vertical profile analysis of cloud feedbacks in MRI-CGCM3. EUCLIPSE – CFMIP meeting, Egmond aan Zee, The Netherlands, July 2014.

遠藤洋和, 過去 100 年の地上観測データに基づく夏季日本の気候変動, データレスキュー及び 100 年再解析研究に関するミニワークショップ, 東京大学, 2014 年 9 月.

遠藤洋和, 過去 100 年に観測された夏季日本の気候変動, 第 10 回ヤマセ研究会, 弘前大学, 2014 年 10 月.

遠藤洋和, CMIP5 気候モデルにおけるヤマセの将来変化: 海面水温変化パターンとの関連, 第 11 回ヤマセ研究会, 東北大学, 2015 年 2 月.

川合秀明, 藪将吉, 萩原雄一郎, 神代剛, 岡本創, 中緯度の海洋下層雲の鉛直構造, 東京大学大気海洋研究所国際沿岸海洋研究センター研究集会「中緯度気象・気候研究の現状と展望」, 大槌, 2014 年 8 月.

川合秀明, 藪将吉, 萩原雄一郎, 神代剛, 岡本創, 中緯度の海洋下層雲の鉛直構造 –日変化–, 日本気象学会 2014 年度春季大会, 横浜, 2014 年 5 月.

島田照久, 岩崎俊樹, ホーツク海と日本周辺域における夏季の雲分布の二つのレジーム, 日本気象学会 2014 年度秋季大会, 福岡, 2014 年 10 月.

瀬古 弘, GNSS データによる水蒸気量場推定, 2014 年気象学会春季大会, 横浜, 2014 年 5 月.

瀬古 弘, LETKF を用いた GNSS 掩蔽データの同化法の開発, 2015 年気象学会春季大会, つくば, 2015 年 5 月 (投稿済み)

5. 研究会活動

5.1 ヤマセ研究会

気候変動適応研究推進プログラム「東北地域のヤマセと冬季モンスーンの先進的ダウンスケール研究」では、平成26年10月に第10回ヤマセ研究会、平成27年2月に第11回ヤマセ研究会を実施した。本研究会は東北地域の気象・気候の変動機構を解明し、その予測の改善と気象・気候予測情報の農業高度利用法を研究することを目指している。プロジェクトが主催する会議ではあるが、学際的な発展を念頭に、自由参加で運営してきた。研究分担者のほかにも、大学関係者、気象庁気候情報課、気象研究所、仙台管区气象台、各県の農業試験場から参加を得た。また、産業技術総合研究機構の大竹秀明研究員はエネルギー生産における気象情報の高度利用に関して報告された。

東北地域の気象・気候変動の予測情報の精度向上とその有効活用は、地域にとって共通の重要な課題である。気候変動適応研究推進プログラムは終了するが、東北地域の気象関係者の連携が望まれ、ヤマセ研究会は今後とも継続して開催することを検討している。

活動	時期	場所
第10回ヤマセ研究会	2014年10月8-9日	弘前大学（弘前）
第11回ヤマセ研究会	2015年2月27-28日	東北大学（仙台）

5.2 RECCA 農業班の連携

RECCAの農業班（二宮正士代表「地球環境変動下における農業生産最適化支援システムの構築」、西森基貴代表「流域圏にダウンスケールした気候変動シナリオと高知県の適応策」）では、これまで、合同で農業分野の打ち合わせを行い、ダウンスケール気象情報の農業利用について情報交換を行ってきた。各グループ間で、さまざまな研究情報を交換したほか、RECCAとして、「農業適応策の基本戦略」を整理した。

RECCA： 農業適応策の基本戦略

地球温暖化予測に基づき、栽培奨励品種・作物や土地利用・水資源管理の計画を策定する。地域においては、温暖化適応策と自然変動の適応策を融合させる。

短期・中期・長期の気象予測を利用した数値農業情報システムを開発する。

- 高解像度気象予測（特に地上気象要素）の精度向上を図る。
- 農業気象数値モデル（生育モデル、病害虫の発生予測、他）を開発・改良し、高度利用を推進する。

6. 結語

4年6か月間にわたり、気候変動適応研究推進プログラム「東北地域のヤマセと冬季モンスーンの先進的ダウンスケール研究」を実施した。気象予測・気候予測を不確実性に配慮しつつ活用し、農業気象情報を作成した。気象予測に基づく農業気象情報は、一般の農業従事者にも実験的にリアルタイムで提供した。当該研究では大学・農業研究機関・気象機関の3者が密接に連携した。はじめは考え方の相違を意識することも多かったが、研究を進める中でお互いの理解が深まった。今後とも、気象情報のニーズの把握と利用しやすいシステムの構築を目指して、3者で情報交換を深めていきたい。

最初は東北で最も顕著な気象災害である「ヤマセ」に焦点を当てた。しかしながら、異常高温や集中豪雨などの情報にも大きなニーズがあり、総合的な農業気象情報の提供を目指す必要があることが理解された。また、農業気象情報の作成に必要とされる、基本的な地上気象要素（気温、湿度、風、降水）は、災害、自然エネルギー分野にも有効に活用できる。これらの研究分野とも協力すれば、全体で効率的に研究を推進することができる。

気象予測・気候予測は今後とも精度向上が期待される。ダウンスケールモデルを精密化し、一層精度の高い地域気象・気候情報の作成を目指すべきである。また、様々なアンサンブル手法を駆使し、予測の信頼性の評価と確率的な情報の作成を目指すことが望ましい。

最後に、RECCA全体を強力に推進した、文部科学省環境エネルギー課の皆様、三村信男PD、武若聡PO、太田俊二PO、各研究課題のPIの皆様、運営にあたられた事務局のリモート・センシング技術センターの皆様に謝意を表します。