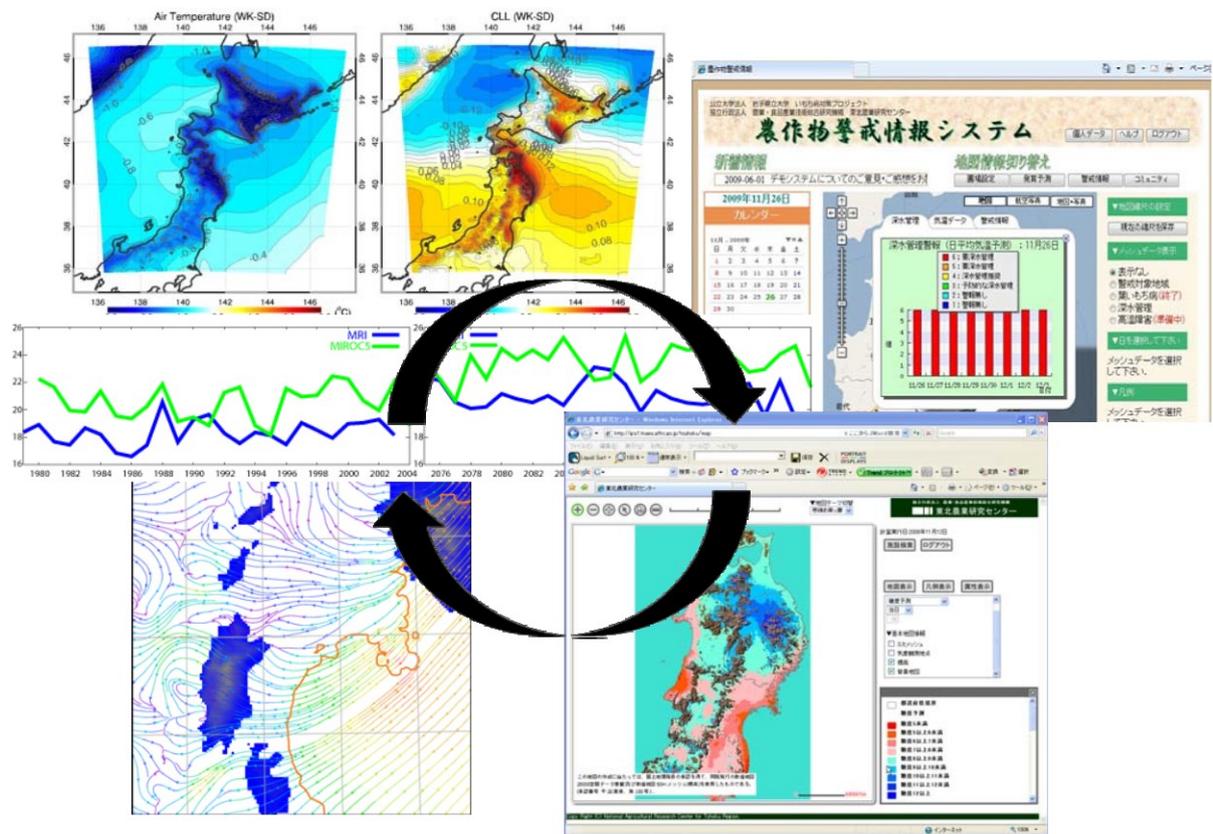


# 気候変動適応推進プログラム

## 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 24 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24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 24 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 24 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、沢田雅洋 吉田龍平
	弘前大学大学院理工学研究科	児玉安正
	東北農業研究センター	菅野洋光、神田英司、大久保さゆり
	岩手県立大学	プリマ・オキ・ディッキ、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、佐藤克成、西畑秀則
	岩手大学	下野裕之

## 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24年度の研究概要	p. 5
2.1 平成24年度の研究体制	
2.2 局地気候の研究	
2.2.1 ダウンスケール研究	
2.2.2 雲の観測データの解析とヤマセのマルチ気候モデル解析	
2.3 ヤマセの気象研究の研究	
2.3.1 データ同化とアンサンブルダウンスケール予測実験	
2.3.2 農業気象情報の高度化に関する研究	
3. 各研究分担者および協力者における研究	p. 8
3.1 局地気候の研究	
3.1.1 気候モデルデータのダウンスケーリングによるヤマセの将来変化	
3.1.2 南東北沖の冷水域がヤマセに与える影響	
3.1.3 中緯度の海上下層雲の鉛直構造、霧の発生頻度、及び気象要素との関係	
3.1.4 東北地方における気象庁メソモデルの日射量予測誤差と雲のタイプの出現頻度	
3.1.5 CMIP5 マルチ気候モデルにおけるヤマセに関連する大規模大気循環の再現性と将来変化	
3.2 局地気象予測の研究	
3.2.1 ヤマセによる冷夏を対象としたアンサンブルダウンスケール予報実験	
3.2.2 六ヶ所村で実施したヤマセの高層気象観測	
3.2.3 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	
3.2.4 データ同化を用いた側面境界の最適化手法の開発と検証	
3.2.5 アンサンブル予測実験結果を用いた葉いもち病2週間予測の試行	
3.2.6 高度農業気象情報による農業支援システムの高度化	
3.2.7 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	
4. 研究成果	p. 73
4.1 査読付論文（印刷済、印刷中 or 投稿中）	
4.2 そのほかの著作	
4.3 研究会での発表	

5. 研究会活動と官学連携	p. 75
6. 平成25年度計画	p. 76
6.1 平成25年度の研究体制	
6.2 ヤマセの気候研究	
6.3 ヤマセの気象予測の研究	

## 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

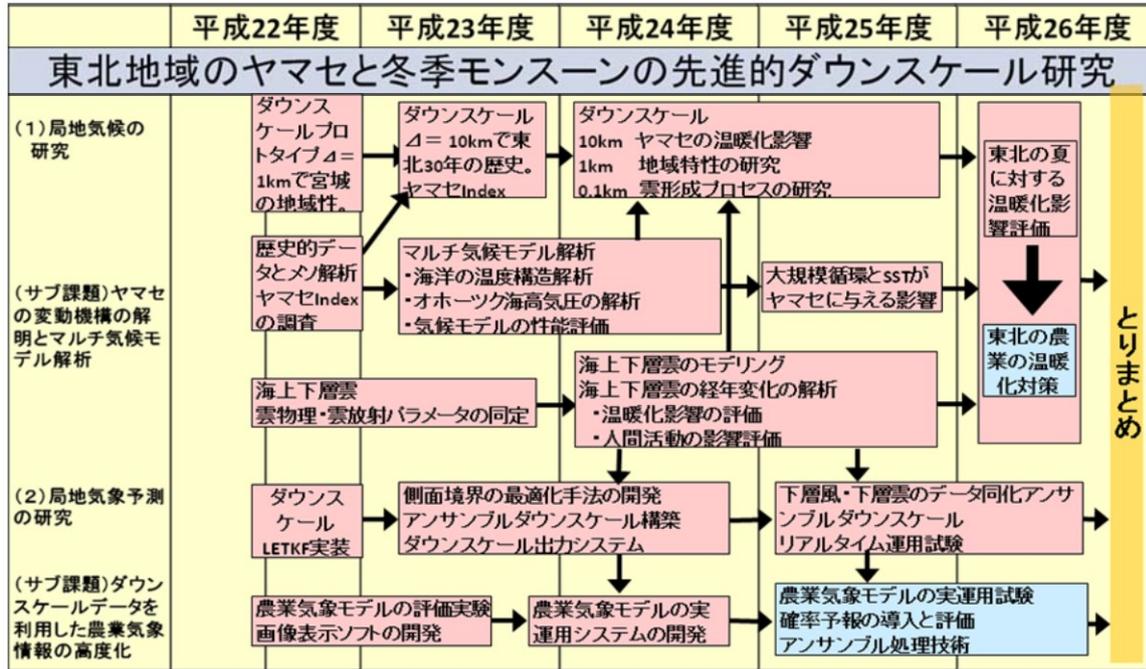
#### 平成 25 年度

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

# 気候変動適応イニシアチブ年度計画



東北の農業の温暖化対策。ダウンスケール予測情報を利用した農業気象情報。

## 2. 平成 24 年度の研究概要

### 2.1 平成 24 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。東北大学では気候研究および気象予測のための力学的ダウンスケールシステムの開発・改良およびその実行、性能評価を担当した。今年度は気候モデルによる温暖化予測結果のダウンスケール研究を開始した。気象予測研究では、ダウンスケールシステムのためのデータ同化において、側面境界を最適化するシステムを開発し、観測システムシミュレーション実験(OSSE)を行った。また、アンサンブルダウンスケール予測実験を実施した。弘前大学はヤマセの青森県太平洋沿岸で高層観測を実施し、当地でのヤマセの構造に関する地形効果に対する理解を深めるとともに、ダウンスケールシミュレーションの結果を検証した。東北農業研究センターでは、ダウンスケールデータを利用した農業気象情報の作成手法に関する研究を実施している。平成 24 年度は、いもち病発生に関する農業気象モデルにより過去の発生頻度を推定し、実際の発生地域との比較を行った。岩手県立大学では、農業気象情報提供のためのインターフェースを開発した。特に、アンサンブル予測を利用した農業気象情報の発信システムも開発した。また、利用者アンケートを実施し、システムの利便性の改善を図った。

当プロジェクトでは、分担機関のほか、気象庁気候情報課、気象研究所、仙台管区气象台に研究協力を依頼した。気象研究所では、気候モデルによる予測結果を利用して、ヤマセの背景場の温暖化影響に関する研究を実施した。データ同化では、水蒸気に感度のある GPS 掩蔽データのヤマセ予測へのインパクトを調べた。下層雲の研究では、混合層の詳細な構造を考慮し、パラメータ化の改善法について検討した。気象庁・気候情報課では、1 か月予報の農業利用に関する調査結果について情報提供した。また、現在および将来の長期予報システムについて解説した。仙台管区气象台では東北地方の気象官署におけるヤマセの研究の歴史について調査した。ヤマセに焦点を当てた東北地方の長期予報について解説した。東北地方の各県の試験研究機関等は、それぞれの地域における農業気象問題について情報を交換した。岩手大学農学部では、冷夏に適応するため、水稻の耐冷性の研究を実施した。

RECCA の課題、「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」(二宮正士代表)および「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」(西森基貴代表)と農業課題間で情報交換のための研究打ち合わせ・講演会を実施した。ヤマセ課題は気象予測に、二宮代表の課題は農業の適応策に力点が置かれているので、情報を相互に補完することができる。また、東北、北陸、四国の異なる地域間の比較を通じて、農業気象モデルの共通の課題を検討することができた。特に、農業においては、風、降水、気温に加えて、日射、湿度(結露)の情報の重要性が認識された。今後、さらに農業課題に共通する議論を深めることに努力する。

## 2.2 局地気候の研究

### 2.2.1 ダウンスケール研究

気象庁の全球大気再解析(JRA25)を力学的にダウンスケールし、ヤマセの再現精度を確認するとともに、時空間の変動特性を調べている。今年度、ダウンスケールシステムを用いて、北日本の太平洋沿岸の海面水温(SST)が陸上の気温に与える影響を評価した。ヤマセが卓越した 2003 年 7 月 4-20 日について、仙台湾沖まで南下した冷水域は、南東風時、仙台の気温を最大で 1.2 度低下させることがあり、沿岸域の冷水が陸上の気温低下に相当寄与することが確認された。

気象研究所の超高解像度全球大気モデル(MRI-GCM, 20km 解像度)を 10km 解像度にダウンスケールし、ヤマセの将来変化について調査した。将来気候(2075-2099年)では、現在気候と比べて約3°Cの気温上昇がみられた。ヤマセの発生指標となるヤマセインデックスは、夏季を通じて、現在気候とほぼ同じ変動特性を持つことがわかった。つまり、MRI-GCMをダウンスケールした結果では、地球温暖化によって気温が上昇した後も、将来気候の平年偏差で見るとヤマセが出現することがわかった。今後、他の気候モデルのダウンスケール結果と比較し、予測の信頼性を調査する。

## 2.2.2 雲の観測データの解析とヤマセのマルチ気候モデル解析

衛星観測データを用いて雲水量、雲粒子の有効半径等の海陸別の特徴、季節変化および経年変動を調査した。雲物理パラメータと再解析データ(JRA25)などの気象データとの関係を調べた。北太平洋北部では、雲頂高度が夏には1000m以下まで低く、冬には2000m程度まで高くなるという顕著な季節変化が見い出された。また、霧の発生頻度が夏に多く冬に少なくなる。

気候モデルによる現在気候と温暖化予測データ(CMIP3/CMIP5)を収集し、オホーツク海高気圧の再現性とその将来変化について調査した。マルチ気候モデル解析により、ヤマセに影響を与える大規模場の特徴について確認した。北西太平洋付近の500hPa高度の南北差で定義されるインデックス(JPZI)は、ヤマセ現象の年々変動と強い相関がある。気候モデルで予測されたJPZI指数の温暖化効果は、相当ばらつきが大きく、ヤマセ予測はまだ不確実性が大きいことを示唆している。

青森県六ヶ所村等で、GPSゾンデを用いてヤマセの際の大気の鉛直構造を調べた。この観測データを用いて、当地域のヤマセの複雑な地形効果を理解するとともに、ダウンスケールモデルの精度の検証を行った。気候変動にともなう低温・寡照に対する対策を検討するために、照度を人工的に変更した水稻の生育実験を行い、少照が耐冷性に及ぼす影響を定量的に評価した。

## 2.3 ヤマセの気象予測の研究

### 2.3.1 データ同化とアンサンブルダウンスケール予測実験

ヤマセが数年ごとに発生することは、温暖化が進行しても変わらない可能性が高い。ヤマセへの適切な対処法は、気象予測の精度を高め、それを高度利用することである。短期予測精度を高めるためには、データ同化により初期条件の精度を高めることが必要あり、中期予測(週間予報)では、アンサンブル予測に基づく確率予報を実施することが望ましい。

短期予測の精度向上のために、アンサンブルカルマンフィルターを利用したデータ同化研究を行っている。COSMIC衛星によるGPS掩蔽観測により得られた屈折率の鉛直分布のデータ同化が、水蒸気分布の変化を通じてヤマセ予測を改善させることを、事例解析により確認した。また、ダウンスケールのためのデータ同化では、側面境界値の最適化技術が有効で、観測システムシミュレーション実験(OSSE)でその効果を確認した。

中期予測では、平成23年度に構築したアンサンブルダウンスケール予測システムを用いて、東北地方の夏季の2週間予報実験を実施した。高解像度モデルの予測は一般に変動度が大きいために、低解像度モデルの予測誤差を増幅される傾向がある。このため、バイアス修正、アンサンブル平均、経験的直行関数によるフィルタリングなどにより、予測のS/N比を向上させることが有効である。また、ダウンスケールを行うことによってアンサンブルスプレッドが増加する。

これは主に局地循環の予測の不確実性を反映したものであり、とりわけ気温予測の場合、下層雲の発現の影響が大きいとみられる。以上の結果は、アンサンブルダウンスケール予測を利用すれば、局地循環を反映した確率予報が可能であることを示唆している。

### 2.3.2 農業気象情報の高度化に関する研究

平成23年度には、葉いもち病発生予察モデル(BLASTAM)をダウンスケールデータにより駆動するシステムを開発した。本年度はさらに、BLASTAMにアンサンブル予報のデータを利用できるように改良した。気象庁で実施したアンサンブルハインドキャストの結果を利用して、葉いもち病発生予察モデルの予測実験を試みた。アメダス観測値に基づいた結果との比較や、アンサンブル計算と再解析データとの気圧配置の比較から、BLASTAMの精度はアンサンブル予測自体の精度に依存することが確認された。予測実験での総観場が実際と整合する場合には、力学的ダウンスケールを経たデータによる感染好適条件の分布も精度よく表現されていた。また、BLASTAMについては、アンサンブル平均値を用いるより、アンサンブルメンバーによる確率情報として示すほうが妥当であることが示された。

平成23年度に行っ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結果をもとに、農業情報をより有効に発信できるように高度化した。東北農業研究センターと気象庁の協力のもと、水稻気象被害予測システムにおいて、2週目予測の7日移動平均および低温確率(20℃以下)・高温確率(27℃以上)のデータを、他の予測農業情報と統合しユーザが理解しやすい情報として発信した。ほかの農業気象情報も利用しやすいように、提供方法を改良した。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メールアンケート形式で行った。調査結果から2週目予測について、平成23年に比べ肯定的な回答が増加した。また、平成23年度に引き続き、実稼動に必要な地図データをWeb上で可視化、解析することのできるサーバシステムの開発を行った。

平成24年度には、産業技術総合研究所から研究打ち合わせに参加者があった。太陽エネルギー利用の研究では、農業気象情報と同様に、日射量や気温の予測が重要である。今後、協力して研究を続けることにした。

### 3. 各研究分担者および協力者における研究

#### 3.1 局地気候の研究

##### 3.1.1 気候モデルデータのダウンスケーリングによるヤマセの将来変化

島田照久・沢田雅洋・岩崎俊樹(東北大学)

#### a) 要旨

東北地方の夏季気候に重要な役割を果たすヤマセの将来変化を解析するために、気象研究所が開発した超高解像度全球大気モデル(20km 解像度)を 10km 解像度にダウンスケーリングしたデータセットを作成して、ヤマセの将来変化について解析した。将来気候(2075-2099年)では、東北地方全体で、現在気候と比べて約 3°C の気温上昇がみられた。ヤマセの発生の指標となるヤマセインデックスは、夏季を通じて、現在気候とほぼ同じ変動幅を持つことがわかった。そして、この将来気候データには、ヤマセ傾向(脊梁山脈等を境にした東西気温のコントラスト)が現在気候とほぼ同じ程度に現れていた。つまり、地球温暖化によって気温上昇した後も、将来気候の年間偏差でみるとヤマセが出現していると言え、下層大気に対する地形の影響は現在気候のものと同様であることがわかった。

#### b) 本文

##### 研究の目的

東北地方の夏季について、局地気候や将来気候の理解を進めるために、ヤマセに関する局地気候を解析できる長期(現在気候、将来気候)データを作成し、そのデータ解析を進めている。平成 23 年度は、現在気候のダウンスケーリングを実施した。再解析データ JRA-25 と最適内挿法によって作成された海面水温データ NOAA OISST を境界条件とし、気象庁・気象研究所の非静力学モデルを用いて、北日本全体について 10km 解像度のダウンスケーリングデータを 33 年分(1979-2011)作成した。10km 解像度では、計算時間を適切な範囲に抑えつつも、北日本の地形を、平野や地峡海峡といったスケールまで解像する。このダウンスケーリングデータにより、33 年間の地域特性や日変化を解析できるようになった。平成 24 年度は、気候モデルデータのダウンスケーリングを実施し、長期間(現在気候、将来気候)にわたって地域スケールの気象・気候解析ができるデータセットを作成し、ヤマセとその将来変化について研究を行った。その結果と今後の方針についてまとめる。

##### データ

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(図 1)。ダウンスケールの仕様は、平成 23 年度に行った、再解析データ JRA-25 を境界条件とする現在気候データを作成したのと同じである。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。

今回用いた気候モデルデータは、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) によるタイムスライス実験データである。現在気候(1979-2003 年)、将来気候(2075-2099 年)の各 25 年間を解析対象とする。このデータを用いた理由は、すでに将来気候実験が終了していること、力学的ダウンスケーリングのために必

要なデータが保管されていること、20km という高解像度によってより精度の良い現在気候の再現性、将来気候の予測が期待されること、にある。温室効果気体の濃度は、SRES A1B シナリオに基づいている。下部境界条件の海面水温は、現在気候実験では、英国ハドレーセンターの HadISST データセットを用いている。将来気候実験については、第3次結合モデル相互比較プロジェクト (CMIP3) の 18 の大気海洋結合モデルの平均から作成されており、線形トレンドを除去した後の経年変動については、現在気候の経年変動に置き換えられている (Murakami et al. 2010)。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 (25, 33 年) 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。

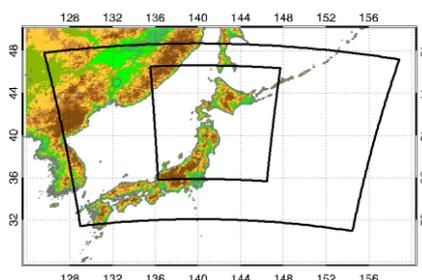


図1 モデルの計算領域 (外側が 30km 解像度、内側が 10km 解像度)。

## 結果

### (1) 気温変動

現在気候の再現性と将来の気温上昇を確認するために、地表気温をデータセット間で比較した。図2には、八戸について、各データセットのヒストグラムと、観測値に対する Q-Q プロットを示す。現在気候のデータセット (JRA-25 と MRI-AGCM) は観測に対しやや高温のバイアスを持つが、分布形はほぼ一致することが確認できる。将来気候の気温は、夏季平均では現在気候よりも 3.2°C 上昇するが、将来気候の気温のヒストグラムの全体の形状は現在気候のものに近い。高温バイアスの原因の一部は、MRI-AGCM で用いられた海面水温の解像度の問題、雲物理過程の解像度依存性にあることがわかっている。

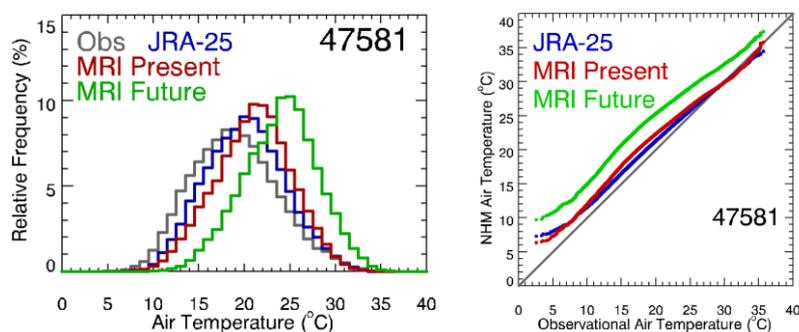


図2 八戸における気温のヒストグラム (左) と観測に対するモデルの気温の Q-Q プロット (右) (6-8 月)。気象官署における観測 (灰色)、JRA-25 からのダウンスケーリングデータ (青)、MRI-AGCM からの現在気候 (赤) と将来気候 (緑) のダウンスケーリングデータ。現在気候について

ては 1979-2003 年で共通で、将来気候は 2075-2099 年である。

各データセット間で気温の頻度分布には違いが見られるものの、ヤマセに伴う気温の変動パターンを検証してみると、各データセット間でよい一致が見られる。図 3 には、各データセットについて、気象官署の観測点における気温の主成分解析による第 3 モードの空間パターンを示す。北日本全体の気温変動を表す第 1 モード(寄与率 80%)、南北変動パターンを示す第 2 モード(寄与率 7%)に加えて、北日本の山地を境にした太平洋側と日本海側の変動パターンを示す第 3 モード(寄与率 3%)が各データセット間に共通してみられる。このモードは、ヤマセ卓越時に特に強調される。この結果は、現在気候の再現性の良さを示すとともに、ヤマセ卓越時の気温変動パターンが将来気候データにおいても見られることを示す。ただ、MRI-AGCM の結果では、福島から茨城にかけては、日本海側と同符号になっており、気候モデルではヤマセによる冷気の南下の表現が弱いことが示唆される。

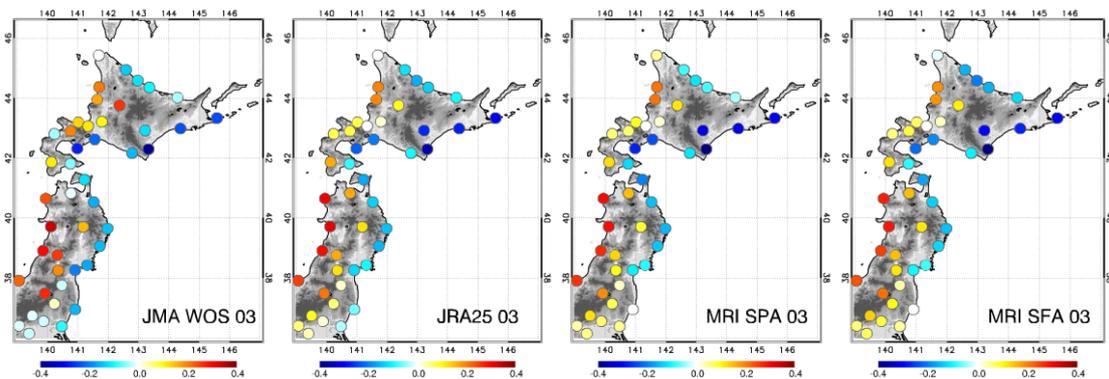


図 3 気象官署の観測地点における気温の主成分解析の第 3 モードの空間分布(6-8 月)。左から、気象官署の観測、JRA-25 からのダウンスケーリングデータ、MRI-AGCM からの現在気候と将来気候のダウンスケーリングデータを用いた結果を示す。

## (2) ヤマセの変動と将来変化

ヤマセが卓越する頻度が現在気候と将来気候でどのように違うかを、ヤマセを特徴づけるヤマセインデックス(Kanno 2004; Shimada et al. 2013)を用いて検証した(図 4)。ここでも、ヒストグラムと観測に対する Q-Q プロットを示す。ヒストグラムの分布は各データセット間でほぼ一致し、極値にわずかな違いがみられるものの変動幅がほぼ同じであることがわかる。図 5 には、データセット毎に 1 標準偏差を越える頻度の変化を 5 日毎に示す。6, 7 月におけるヤマセの発生頻度の減少と、8 月の増加が示唆される。この結果は、第 3 次結合モデル相互比較プロジェクト(CMIP3)のモデルの結果を解析した Endo (2012)の結果と一致する。

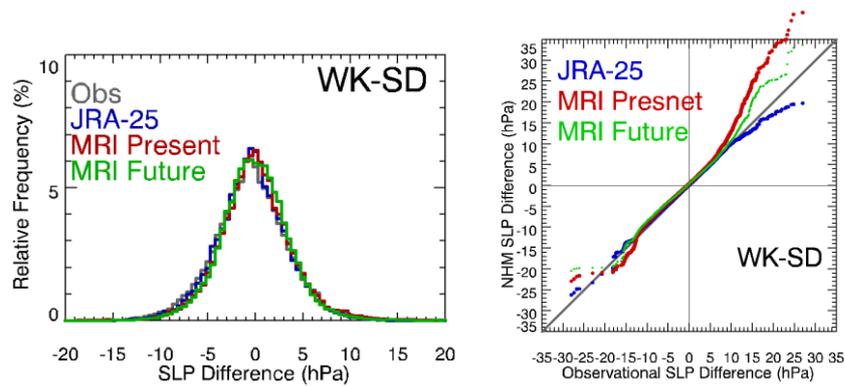


図4 ヤマセインデックス(稚内と仙台の海面気圧差)のヒストグラムと観測に対するモデルのQ-Qプロット(6-8月)。気象官署の観測(灰色)、JRA-25からのダウンスケーリングデータ(青)、MRI-AGCMからの現在気候(赤)と将来気候(緑)のダウンスケーリングデータ。

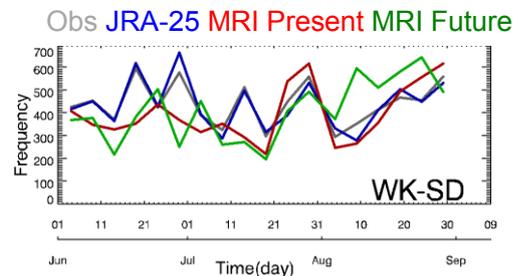


図5 ヤマセインデックス(稚内と仙台の海面気圧差)がデータセット毎に、1標準偏差を越える頻度。5日毎にプロットした。

実際に、ヤマセ卓越時の海面気圧を比較してみる。ヤマセインデックスが、1標準偏差を越えるときのコンポジット場を作成した(図6)。海面気圧の分布は、MRI-AGCMとJRA-25からダウンスケーリングした現在気候、MRI-AGCMからダウンスケーリングした現在気候と将来気候は、ともに北高型の気圧配置を示す。上記の結果は、MRI-AGCMの現在気候の再現性の良さを示すとともに、気温上昇した将来気候においても、北高型の海面気圧分布が現在気候と同様に出現することを示す。つまり、前述の結果と合わせると、ヤマセは将来気候においても現在気候とほぼ同じ頻度と強度で発生していると言える。ただし、将来気候と現在気候の差を詳しく見ると、将来気候においては、北日本全体で南北方向に約1hPaの気圧差の減少がみられ、ヤマセの弱化を示唆する。

次に、地表気温場を図7に示す。気温の分布についても、再解析データからダウンスケーリングした現在気候データと比べると、現在気候データと将来気候データともに類似している。将来気候においては、ヤマセ卓越時についても、現在気候と比べて気温は上昇(2.5-3.3°C)している。各データの気候平均からの偏差場を比較すると、気温上昇した将来気候においても、将来気候の平年偏差にしてみると、現在気候にみられるヤマセ卓越時の気温分布が出現することがわかった。ただし、低温偏差は0.2°Cほど小さくなっている。以上より、将来気候データには、現在気候よりはヤマセが弱化することが示唆されるが、ヤマセ傾向(脊梁山脈等を境にした東西気温のコントラスト)が現れていることがわかった。つまり、ヤマセに伴う下層大気に対する地形の影響は現在気候のものと同様であることがわかった。

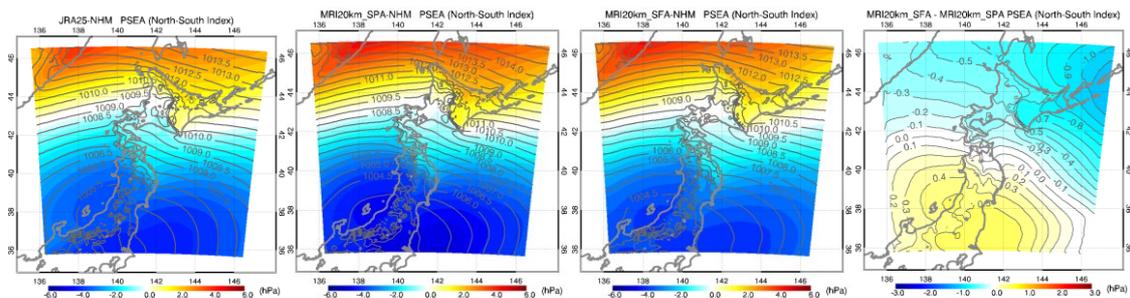


図 6 ヤマセ卓越時の海面気圧のコンポジット(コンター)と各データセットの気候平均からの偏差(カラー)。左から、JRA-25 からのダウンスケーリングデータ、MRI-AGCM の現在気候と将来気候からのダウンスケーリングデータ。右端は、MRI-AGCM の将来気候と現在気候の差である。

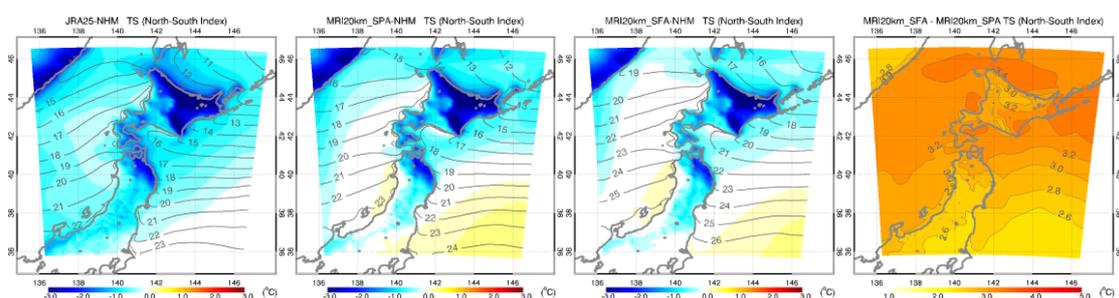


図 7 ヤマセ卓越時の 2m 気温のコンポジット(コンター)と各データセットの気候平均からの偏差(カラー)。左から、JRA-25 からのダウンスケーリングデータ、MRI-AGCM の現在気候と将来気候からのダウンスケーリングデータ。右端は、MRI-AGCM の将来気候と現在気候の差である。

## 今後の方針

MRI-AGCM の将来気候データでは、地球温暖化によって気温上昇した後も、将来気候の年間偏差で見るとヤマセが出現していると言え、下層大気に対する地形の影響は現在気候のものと同様であることがわかった。平成 25 年度は、気候モデルによる将来気候の不確実性を考慮するために、別の気候モデルのダウンスケーリングを行うことを予定している。さらに、多数の気候モデルの中で、ダウンスケーリングに用いた気候シナリオと気候モデルの位置づけを把握する必要がある。ヤマセの再現性においても、気候モデルの再現性の差が大きいことが示されている(Endo 2012)。ここでは、最新の気候モデルデータを用いて、オホーツク海南部の領域(東経 140-155 度、北緯 45-50 度)の平均海面気圧(オホーツク海高気圧の消長の指標となる)について、7 月の統計(2075-2099 年)を気候モデルごとに比較してみる(図 8)。これらの気候モデルは、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の第 5 次報告書に用いられる、第 5 期結合モデル相互比較計画(CMIP5)の気候モデルのうち、本報告の作成時に入手可能なものである。ここでは、CMIP5 に採用されている気候変動予測シナリオ(RCP: Representative Concentration Pathways)のうち、RCP4.5 のデータを用いた。気候モデル間で、平均値の差は最大約 7hPa にもなり、変動幅の違いも大きいことがわかる(RCP8.5 でも同様な傾向を示す)。MRI-AGCM は、この中ではオホーツク海高気圧の気

圧が高い方から 11 番目に位置する。この位置は、現在気候の比較においても同じで、かつ再解析データ JRA-25 の結果に最も近いことを確認している。現在、これらの気候モデルの比較や解析利用が世界中で進んでいる。今後、各モデルの特徴(現在気候の再現性や気候感度)が明らかになるにつれて、ダウンスケーリングに利用した気候モデルの位置づけがより明確になると考えられる。

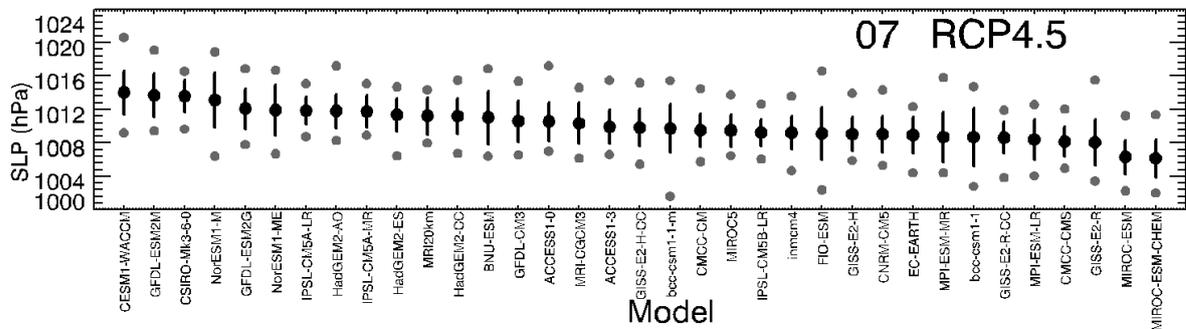


図 8 CMIP5 の RCP4.5 シナリオを用いた気候モデルと MRI-AGCM(図中の MRI20km) から求めた 7 月平均のオホーツク海南部の領域平均海面気圧の 2075-2099 年の統計。黒丸と棒が平均値と  $\pm 1$  標準偏差、灰色の点が、最大値と最小値を示す。左から平均値の大きい順に並べた。

### c) 参考文献

- Endo, H., 2012: Future changes of Yamase bringing unusually cold summers over northeastern Japan in CMIP3 multi-models. *J. Meteor. Soc. Japan*, 90A, 123-136.
- Kanno, H., 2004: Five-year cycle of north-south pressure difference as an index of summer weather in northern Japan from 1982 onwards, *J. Meteor. Soc. Japan*, 82, 711-724.
- Murakami, H. and B. Wang, 2010: Future Change of North Atlantic Tropical Cyclone Tracks: Projection by a 20-km-Mesh Global Atmospheric Model. *J. Climate*, 23, 2699-2721.
- Saito, K., J. Ishida, K. Aranami, T. Hara, T. Segawa, M. Narita, and Y. Honda, 2007: Nonhydrostatic atmospheric models and operational development at JMA. *J. Meteor. Soc. Japan*, 85B, 271-304.
- Shimada, T., M. Sawada, and T. Iwasaki, 2013, Indices of cool summer climate in northern Japan: Yamase indices, (改訂中).

### 3. 1. 2 南東北沖の冷水域がヤマセに与える影響

島田照久・沢田雅洋・岩崎俊樹(東北大学)

#### a) 要旨

北日本の太平洋沿岸の海面水温 (SST) の経年変動をみてみると、南東北沖まで親潮起源の冷水が南下している時期がある。本研究では、ヤマセが卓越した 2003 年 7 月 4-20 日について、仙台湾沖まで南下した冷水域のヤマセに対する影響を、数値気象モデルを用いた比較実験で検証した。冷水(気候平均値より最大 1.6°C の低下)があることにより、冷水域上で、気温低下とそれに伴う気圧増加、下層安定化による鉛直混合の抑制による風速の減少、下層の冷却効果による相対湿度と雲水量の増加がみられた。また、日中に冷気の陸域への進入上昇が増加することがわかった。これは、日中の陸域の加熱による対流混合層の影響を示唆する。一方、仙台に対応するグリッドで気温の変化を調べてみると、気温減少は南東風時に間欠的に発生していることがわかった。その気温低下は、最大 1.2°C 程度であった。2003 年 7 月の仙台の気温の平年偏差は、-2.9°C (14 時) であるが、沿岸域の冷水が、陸上の気温低下に大きく寄与することが確認できた。

#### b) 本文

##### 研究の目的

ヤマセに対して重要な役割を果たす要素として、海面水温 (SST) が古くから注目されてきた。沿岸域に着目してみると、南東北沖まで冷水域が南下する時期がある。東北沿岸海域の SST の変動には、親潮第一分枝の南下の程度の経年変動が大きく影響する(花輪、熊谷 1996)。しかし、表層の水温構造は、黒潮水の分布、暖水塊や冷水塊の影響を受けており、その結果東北沿岸海域の SST の分布は複雑になっている。図 1 に仙台湾沖の SST の月平均の経年変動を示す。海面加熱が卓越する夏季においても、この地域の水温フロントは顕著であり、夏季を通してほぼ同じ程度の水温の経年変動がある(6-8 月の標準偏差は約 1.1-1.2°C)。この変動は、表層の水塊変動の複雑さにより、親潮の第一分枝の南限緯度だけでは説明できないことを確認している。また、冷夏のように冷水域が南下していることが多いと言われているものの必ずしもそうではないこともある(例えば、1984 年)。特に、毎年発生する数日程度のヤマセにとっては、沿岸域に冷水が南下していることもそうでないこともあると言える。

このように経年変動の大きい冷水分布が、ヤマセに対して影響を与えていることは、ヤマセが卓越し冷夏となった年の代表的な月平均場から明瞭にわかる。図 2 には、SST と地表面温度の平均と気候平均からの偏差を示した。1983 年 6 月、2003 年 7 月は、仙台湾からその沖にかけて低温傾向になっており、気温の負偏差が局所的に大きくなっていることがわかる。この分布は、気温分布に反映されており、低比湿、相対湿度の増加、下層雲水量と雲量の増加に対応することを確認している。しかしながら、ヤマセ時の東北地方沿岸海域において、中規模スケールの SST 分布が海上と陸上の気象に与える影響には、明示的に着目されたことはない。そこで本研究では、この関係をより詳細に検討する。ヤマセ時に、南東北沿岸に冷水域があることによって、大気がどのような影響を受けるのか、海上から陸上にかけてどのような影響がどのように検証する。局所的な低 SST 域の下層大気に対する影響を扱った研究(e.g., Tokinaga and Xie, 2009)にならひ、局所的に SST を変化させて冷水域を除去した SST を用いた数値実験と本来の SST を用いた数値実験の比較によって検証する。

## 比較実験

平成 23 年度に作成した 10km ダウンスケーリングデータを用いる。気象庁・気象研究所の非静力学モデル (JMA-NHM) を用いて、再解析データ JRA-25/JCDAS (Onogi et al. 2007) と NOAA OISST ver2 (Reynolds et al. 2007) を境界条件として、6-8 月についてダウンスケーリングを行ったデータセットである (島田他 2013)。本研究では、南東北沖に冷水南下が見られた 2003 年について着目し、2003 年の実験を基準実験とする。2002 年 6 月以降の SST 場は、赤外放射計による観測に加え、雲の影響を受けずに観測できるマイクロ波放射計の観測も用いて構築されており、ヤマセによって雲が多い時期も、中規模スケールの構造が解像されている。2003 年の事例はこの点においても適している。

比較実験として、南東北沖の冷水域を除去した SST を境界条件として同様の実験を行った。具体的には、仙台湾からその沖の冷水域を囲む領域 (北緯  $36.5-39^{\circ}$ 、東経  $141-143^{\circ}$ ) について、2003 年の日別の SST データを、日別の SST の気候値に緩和させることで、冷水域を除去した。図 3 には、南東北沖の領域平均の SST の修正量の時系列を示す。SST の修正量がほぼ一定で、東風が卓越していた 7 月 4-20 日を今回の対象期間とした。その期間の平均の SST を、本来のデータと冷水域を除去したものについて図 4 に示す。本来の SST データでは、仙台湾からその沖にかけて冷水域が分布しているが、冷水を除去した後は、その緯度の平均的な SST に置き換えられ、SST の分布は東西分布に近くなる。つまり、冷水構造を除去することにより、その領域の SST を上昇させたことになる。以降の結果では、両実験の差分は、(本来の SST の実験結果)-(冷水域を除去した SST の実験結果) で定義する。つまり、冷水が南下することによってどのように変化するかを考察する。

## 結果

まず、本来の SST による実験について、対象期間 (7 月 4-20 日) の平均場を示す (図 5)。オホーツク海高気圧の縁が東北地方に及んでおり、低温域 ( $<18^{\circ}\text{C}$ )、高相対湿度域 ( $>90\%$ ) が北方から南東北に及び、東-南東風が吹いている。冷水域の影響は、仙台湾沖で南に伸びた低温域と高相対湿度の分布に確認できる。

次に、冷水が南東北に及んだ時の影響を考察するために、2つの実験の差分を検証する (図 6)。冷水南下により、SST が低くなる領域では、気温減少、海面更正気圧 (SLP) の増加、風速の弱化、比湿の減少、相対湿度の増加、下層雲量の増加、短波放射の減少が見られる。気温の減少とそれによる SLP 増加は、SST コンターよりも風下にずれて陸上に及んでおり、これは冷氣移流の影響と考えられる。それとは対照的に、相対湿度と下層雲量の増加とそれに伴う比湿の減少は、冷水域上にみられ、陸上への影響はほとんど見られない。海面での短波放射 (14 時) 分布を見ると、分布は複雑であるが、冷水域上で組織的に  $10\text{ Wm}^{-2}$  の減少が見られる。これは、雲量増加を反映した結果と考えられる。風速の減少は、冷水域上での下層の安定化により鉛直混合が抑制されたためと考えられる。

仙台湾を北西-南東に横切る断面について、下層大気の鉛直構造と日変化をみる (図 7)。温位の差分をみると、冷水域上で気温差が生じるのは、高度 200m 以下に限定されていることがわかる。また、夜間に比べて日中は、陸面の加熱によって気温の低下は抑制されているものの、冷氣が陸域により進入、上昇していることをしめす。これは、日中の陸域の対流混合層の発達の影響

を示唆する。

最後に、沿岸陸域での気温低下のタイミングを検証する(図 8)。仙台の気象官署のグリッドにおける、2m 気温の二つの実験の差は、仙台湾上での南東風成分と逆相関の関係にあることがわかった。つまり、地表の気温は、冷水の上を吹いて冷やされた風が陸域に流入してくるのに合わせて間欠的に減少することがわかった。今回の対象期間では、最大の気温差は、1.2°C になっている。2003 年 7 月の仙台の気温の平年偏差が -1.5°C (5 時) と -2.9°C (14 時) であることを考慮すると、沿岸海域の局地的な冷水の、沿岸陸域の気温低下に対する影響は大きいと言える。

#### 次年度の研究への発展

本研究によって、ヤマセが卓越した 2003 年 7 月 4-20 日について、仙台湾沖に南下した冷水の影響を比較実験で検証した。沿岸の冷水域が、下流にあたる陸域の気温を下げることを確認された。毎年起こる数日程度のヤマセイベント時にも、冷水域が存在する時には、本研究の結果と同様な下層大気の応答(気温低下、気圧増加、風速の減少、相対湿度と雲水量の増加、比湿の減少)が起こるといえる。

図 2 に示したように、ヤマセが卓越した時の低温域の分布は、事例毎に相違点が多い。今後は、他のヤマセ事例についても、沿岸に沿って南下する冷水域がヤマセによる低温域の分布にどのように影響しているのかも含めて、ヤマセ事例毎の特徴をまとめたいと考えている。一方で、より詳細に下層大気の応答や日変化の影響を考察するためには、より高解像度(例えば格子間隔 1km)で陸域を解析することが有効と考えられる。今回と同様な、感度実験も有効かもしれない。しかし、この場合、SST データの空間解像度とモデルの解像度のアンバランスが顕著になる。より現実に近い実験の一つとして、仙台湾周辺の夏季特有の SST 分布を境界条件として用いることが考えられ、解像するスケールに合わせた重要な示唆が得られると思われる。

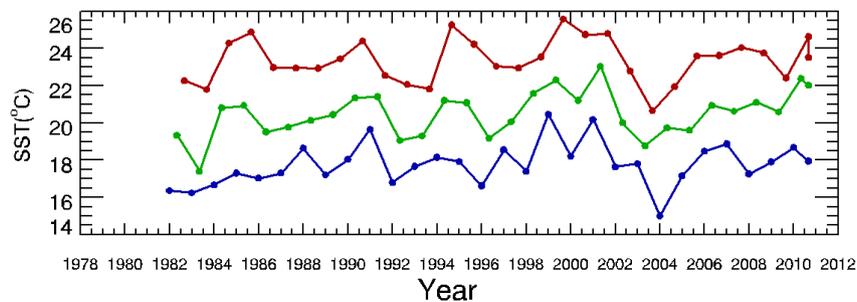


図 1 南東北沖(北緯 36.5-39 度、東経 141-143 度)の月平均 SST の経年変動。(青が 6 月、緑が 7 月、赤が 8 月)

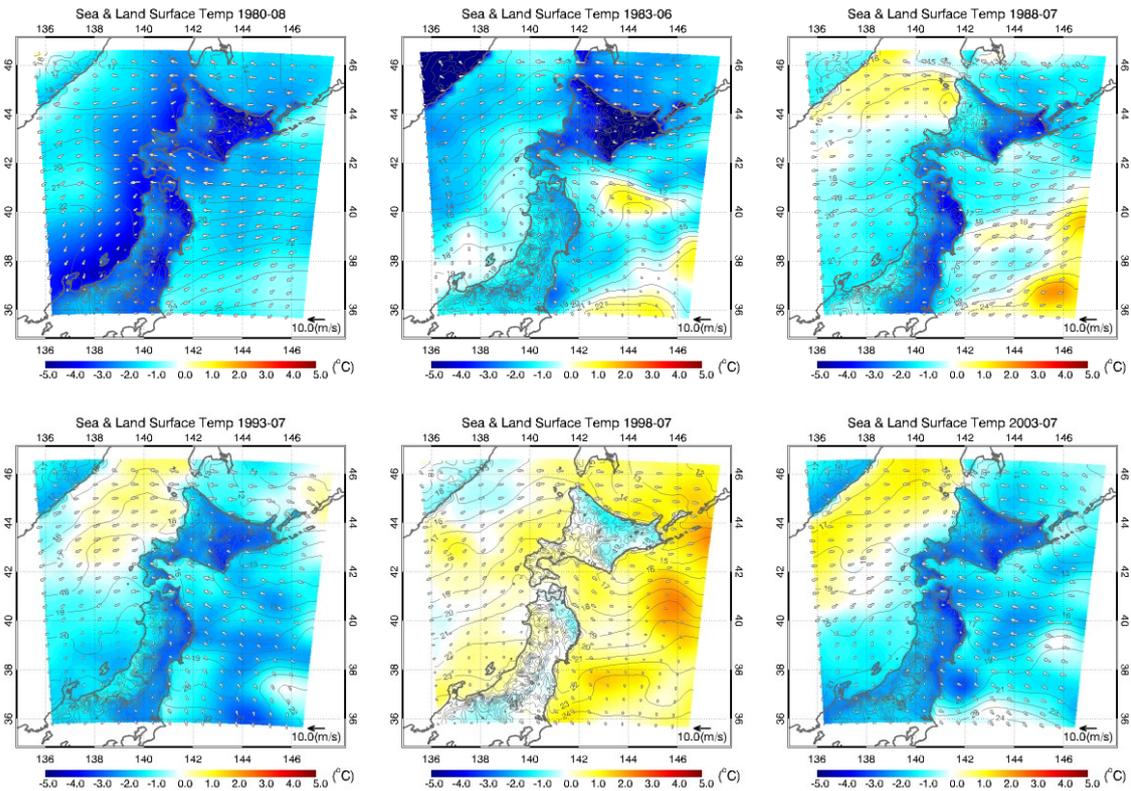


図2 ヤマセが卓越した年の代表的な月についての、SSTと地表面温度の平均(コンター)と気候平均からの偏差(カラー)。左上から、1980年8月、1983年6月、1988年7月、1993年7月、1998年7月、2003年7月。

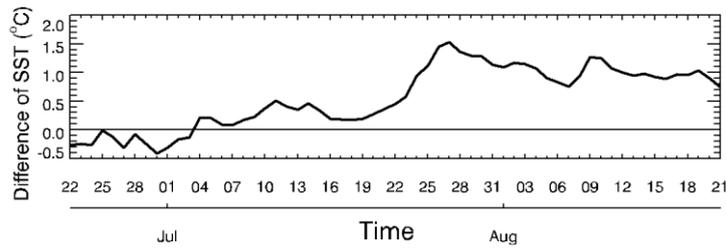


図3 領域(北緯36.5-39度、東経141-143度)平均のSSTの修正量の時系列。

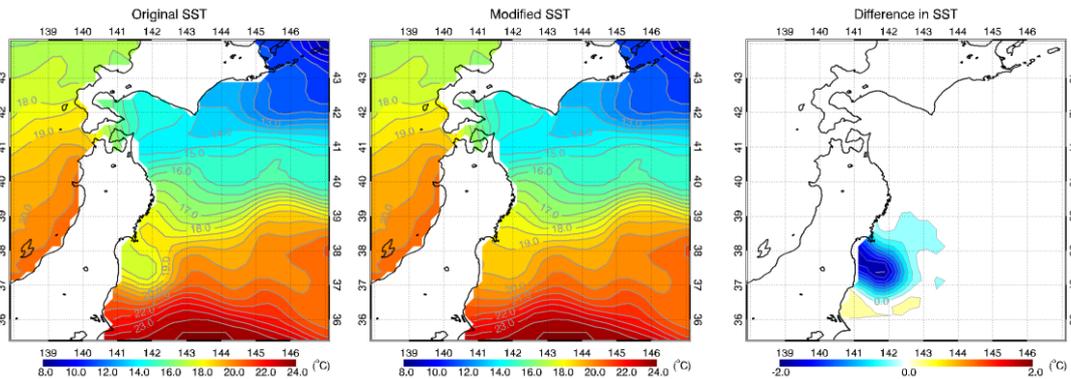


図4 2003年7月4-20日の平均SST。(左)NOAA OISSTver2の本来のSSTデータ、(中)冷水域を除去したSST、(右)二つのSST場の差。

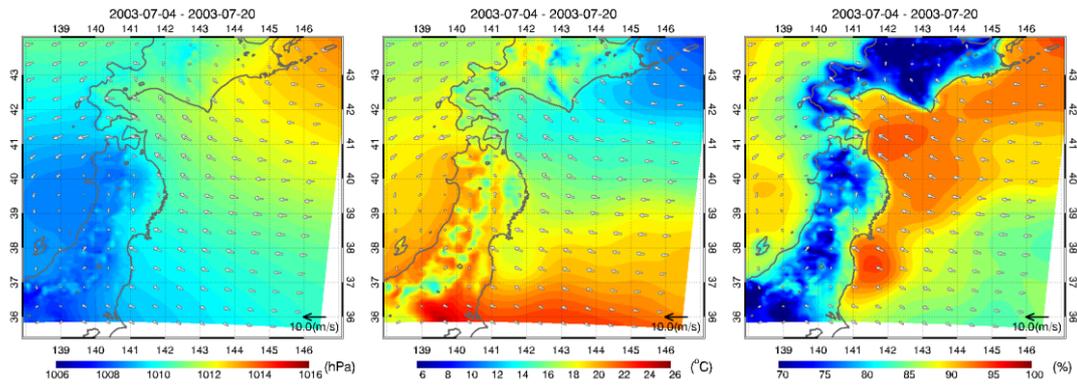


図5 対象期間(2003年7月4-20日)の平均場。左から、SLP、2m気温、2m相対湿度。

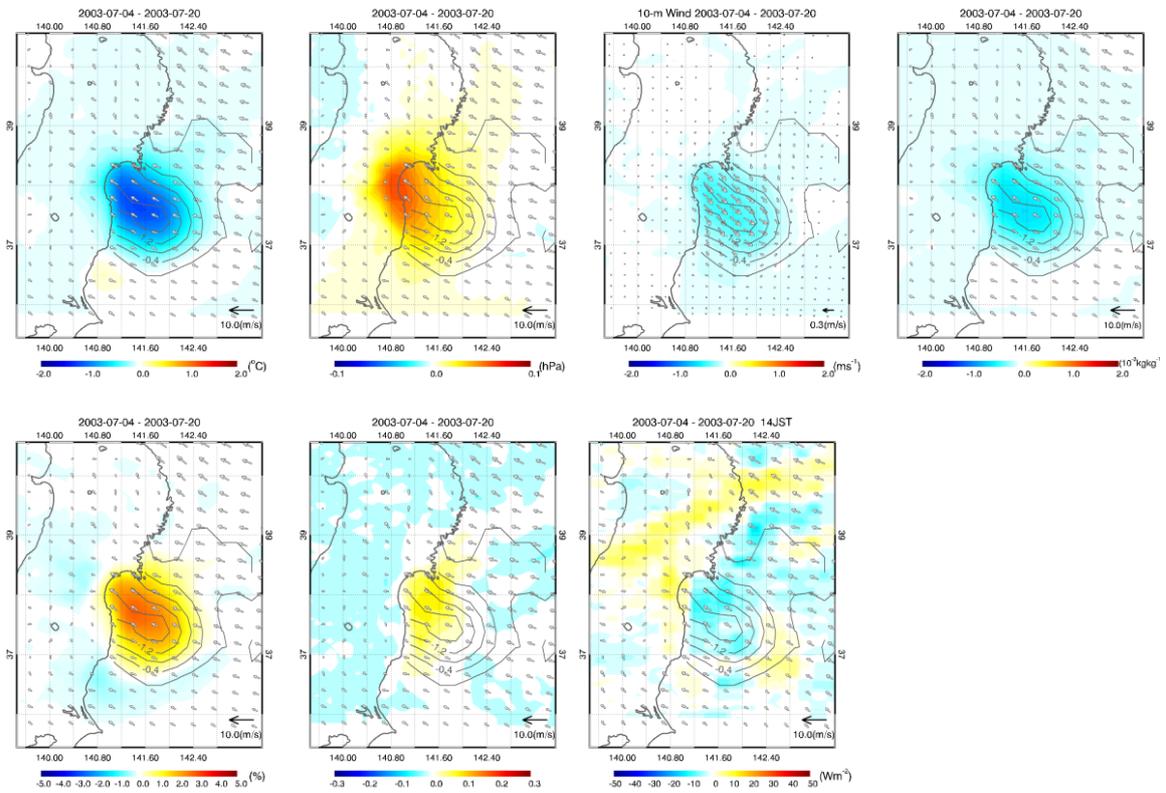


図6 地表面パラメータの差分(本来 SST 実験-冷水なし SST 実験)の期間平均場。左上から、気温、SLP、スカラー風速と海上風ベクトル、比湿、相対湿度、下層雲量、短波放射(14時)である。共通してプロットしているコンター(0.4°C間隔)は、SSTの差(図4右)が負になるところである。

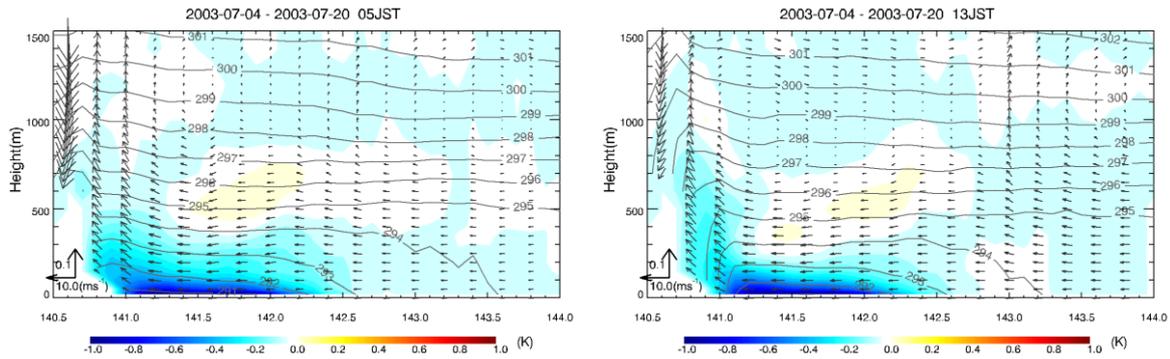


図7 仙台湾を北西-南東に横切る断面図。温位の差分(本来 SST-冷水なし SST)をカラーで示す。コンターとベクトルは、本来 SST 実験による温位と断面方向の成分をそれぞれ示す。

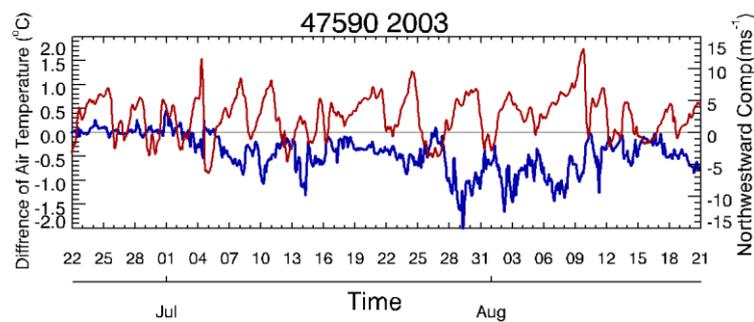


図8 仙台の気象官署のグリッドにおける、地表気温の差分(本来 SST-冷水なし SST;青線)と仙台湾上での南東風成分(北西方向に向かって吹く時が正)の時系列。

c)参考文献

島田照久, 沢田雅洋, 岩崎俊樹, 2013: ヤマセ研究のための再解析・気候モデルデータのダウンスケーリング, SENAC, 46, 9-15.

花輪公雄、熊谷明典、1996; 親潮第一貫入南限位置の予測モデル、月刊海洋、307, 56-61.

Onogi, K., J. Tsutsui, H. Koide, M. Sakamoto, S. Kobayashi, H. Hatsushika, T. Matsumoto, N. Yamazaki, H. Kamahori, K. Takahashi, S. Kadokura, K. Wada, K. Kato, R. Oyama, T. Ose, N. Mannoji and R. Taira, 2007: The JRA-25 Reanalysis, J. Meteor. Soc. Japan, 85, 369-432.

Reynolds, R. W., T. M. Smith, C. Liu, D. B. Chelton, K. S. Casey and M. G. Schlax, 2007: Daily High-resolution Blended Analyses for sea surface temperature. J. Climate, 20, 5473-5496.

Tokinaga, H., and S.-P. Xie, 2009. Ocean tidal cooling effect on summer sea fog over the Okhotsk Sea. J. Geophys. Res., 114, D14102, doi:10.1029/2008JD011477.

### 3.1.3 中緯度の海上下層雲の鉛直構造、霧の発生頻度、及び気象要素との関係 川合秀明(気象研究所)

#### a) 要旨

ヤマセに関連する、オホーツク海や北日本太平洋側周辺海域の海上下層雲の特徴をよく理解するため、衛星搭載雲レーダー・雲ライダーのデータを使い、中緯度の海上下層雲の鉛直構造や霧の発生頻度について調査した。その結果、北太平洋北部では、夏季に雲頂高度が 1000m 以下まで低くなり、冬には 2000m 程度まで高くなるという顕著な季節変化があると共に、霧の発生頻度にも、夏季に多くなり冬に少なくなるというはっきりした季節変化があることも確認された。また、大気再解析データを用いて、これらの特徴と気象場の関係を調べたところ、雲頂高度は大気下層安定度と、霧の発生頻度は海上 2m 気温と海面水温の差と非常に高い相関があるという結果が得られた。また、ヤマセに関連の深い夏季の日本の東海上の雲の鉛直構造の地理的な分布も調査し、日本の東海上では、北に行くほど雲頂高度も雲底高度も下降していくこと、霧の発生頻度が高まること、下層大気安定度、及び 2m 相対湿度は高くなり、持ち上げ凝結高度は低くなることなどが示された。

#### 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。だが、亜熱帯の海洋下層雲は、上・中層雲がかかることが少ないこともあり、比較的詳しく研究されてきた一方で、中緯度の海洋下層雲は、研究が遅れており、基本的な性質も十分には解明されていない。こうした背景から、昨年度より、中緯度の海上下層雲について調査を行い、下層雲量や光学的厚さの地理的、季節的特性については、昨年度の研究報告書で、その一部を紹介した。今年度はさらに踏み込んで、海上下層雲の鉛直構造、霧の発生頻度、及び、それらと気象要素との関係を調査した。

下層雲の鉛直構造は、下層雲の基本的な特徴の一つであり、それを理解することは重要である。地上に設置された雲レーダーや雲ライダーを使えば、それらはある程度正確に測定できるが、そうした観測機器は、設置されている地点が限られていると同時に、海上のデータは特別観測をしない限り得ることはできなかった。一方、海上の広い範囲の雲の高度分布を知りたい場合には、従来は、静止衛星などの赤外チャンネル等から推定される雲頂高度データが使われてきた。しかし、こうしたセンサーでは、雲頂のみしか観測できないと同時に、雲頂の高度を正確に推定することも難しかった。だが、2006 年から運用されている CloudSat、CALIPSO の登場により、全球規模の雲の雲頂高度が正確に測定できるようになり、かつ、雲の鉛直プロファイルまでもが得られるようになった。しかも、このデータは、水平方向に 1.1km ごとに存在し、1 時間半で地球を一周する連続的で膨大なデータ量を誇る。本報告書では、これらの衛星データからリトリブされた雲マスクデータを使用して行った、下層雲の鉛直構造についての調査の結果を報告する。また、この鉛直構造が、どのような気象要素・気象条件によって決定されているかを解析した結果も報告する。さらに、海上の霧についても、従来は、広い領域の観測は難しかったが、ここで使用した観測データは、そうした霧もある程度とらえており、それらと気象要素の関係についても得ら

れた結果も合わせて報告する。

## (2) 観測データとデータ処理

さて、CloudSat 及び CALIPSO 観測データは、こうした研究に有用であるが、これらの観測データから、雲のありなしを判別する際には、エアロゾルのシグナルの混入の排除などを行う必要がある。Hagihara et al. (2010)は、この判別に関する高度なアルゴリズムを開発して、信頼性の高い雲マスク軌道データを作成している。本研究では、そのデータを使用した。このデータを確認したところ、240m 以下の雲の全球分布は、全球の霧の分布 (e.g., Teixeira 1999) と、季節変化も含めてよく一致しており、また、カリフォルニア沖の層積雲の鉛直断面についても、カリフォルニア付近では雲層が 500m 以下で、陸から離れるに従いこの雲層が上昇していくというよく知られた様子をはっきりととらえられていた。そうしたことから、このデータの信頼性は 1km 以下の下層でも高く、極めて利用価値は高いと考えられる。

さて、上・中層がある程度の厚さの雲で覆われていると、1km 以下の下層雲の検出の主体となっている CALIPSO は、より下の雲を観測できないため、このデータを用いても、信頼性の高い結果は得られない。また、日射にとって特に重要な下層雲は、上・中層に雲のない場合の下層雲である。したがって、ここでは、5km より上に雲がある場合は除外して統計を取り、5km より上に雲がない場合の下層雲の構造をとらえることにした。また、気象要素との関係を調べるため、ERA-Interim データを用いて気象要素を計算した。統計期間は、いずれも 2007–2009 年の 3 年間

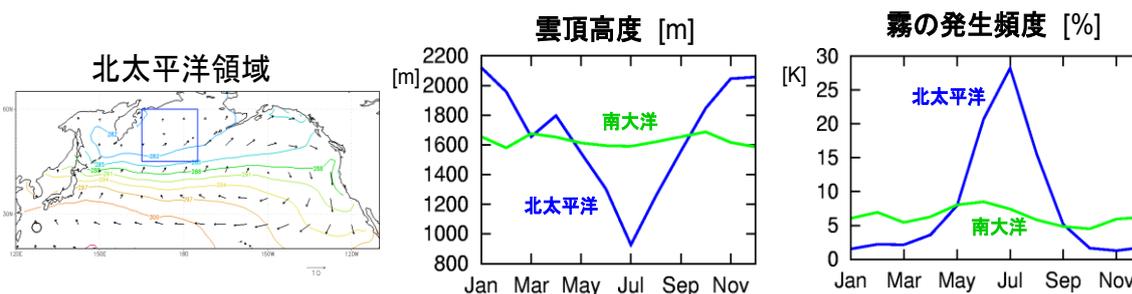


図 1：調査に使用した北太平洋領域（左図の青枠内、背景は海面水温（等値線）及び海上風（矢印））。Hagihara 雲マスクデータから計算した雲頂高度（中図）、及び霧の相対発生頻度（右図）の季節変化。霧の相対発生頻度は、雲が存在する場合に、その雲底高度が 0–240m にある相対頻度である。青線は北太平洋領域で、緑線は 45S–60S の帯状平均。2007–2009 年の 3 年分のデータを用いて計算した。

である。

## (3) 下層雲の鉛直構造・霧発生頻度の季節変化、及び、気象要素との関係

まず、北太平洋域の下層雲の鉛直構造及び霧の発生頻度の季節変化を調査した。本研究で用いた北太平洋域は図 1 の左図に示された領域であり、図 1 の中図に雲頂高度の季節変化を示している。この図から、夏季には雲頂高度は非常に低くなり、7 月には 1000m 以下となり、冬季には 2000m を超えるという明瞭な季節変化があることがわかる。この図には南半球の同じ緯度帯の海上の雲頂高度の季節変化も描いているが、南半球ではほとんど季節変化がないのに対し、北太平洋領域

の季節変化は極めて明瞭である。また、霧の相対発生頻度の季節変化を図1の右図に示しているが、北太平洋では、夏季には霧の発生頻度が非常に高くなり、冬季には霧がほとんど発生しないことがわかる。それとは対照的に、南半球では、霧の発生頻度の季節変化もほとんどないこともわかる。

次に、こうした季節変化の特徴が何によってもたらされているかを考える。図2（左図）に、下層大気安定度（LTS、Klein and Hartmann 1993）の季節変化を示す。北太平洋では、下層大気は夏季に非常に安定となり、冬季には非常に不安定になる一方、南大洋では大気安定度の変化の振幅は非常に小さい。この下層大気安定度と下層雲の雲頂高度の関係をプロットしたのが、図2の右図で、この図から、下層大気安定度が大きい[小さい]場合には下層雲の雲頂高度は低く[高

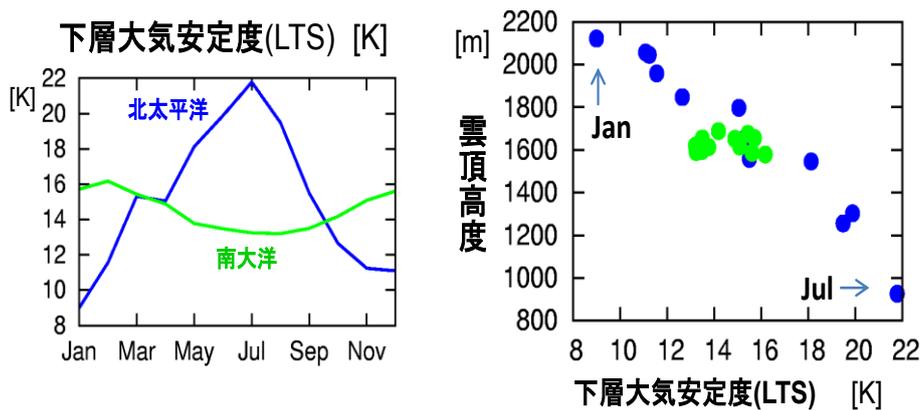


図2：下層大気安定度の季節変化（左図）、及び下層大気安定度と雲頂高度の散布図（右図）。大気安定度の計算には、ERA-Interim 再解析データを用いた。青線・青点は北太平洋領域で、緑線・緑点は45S-60Sの帯状平均。散布図には、各月の点がプロットされている。データ期間は図1に同じ。

く]なるという明瞭な関係があることがわかる。

また、図3の上段には、海上2m気温と海面水温の差（左図）、2m相対湿度（中図）、持ち上げ凝結高度（右図）の季節変化を示す。北太平洋の夏季には、亜熱帯高気圧が存在しており、中緯度北太平洋西部は、南風が卓越し、暖気移流の場となっている。そのため、海上2m気温は夏季には海面水温より高く、したがって、南風によってもたらされる湿った暖かい空気は海面で冷やされて2m相対湿度が上昇し、そのため、持ち上げ凝結高度も低くなる。そうした季節変化がこの図からもよくわかる。また、図には示さないが、北太平洋で霧の発生が多い月の平均海上風は南風である。下段は、それらの気象要素と霧の発生頻度の散布図である。霧の発生頻度と2m相対湿度や持ち上げ凝結高度の相関が高いのは物理的にもきわめて自然であるが、海上2m気温が海面温度より高い状態で霧が多く発生しているという結果は、北太平洋を広く覆うような霧の多くは、こうした条件下で発生する移流霧であることを示唆していると言えるだろう。

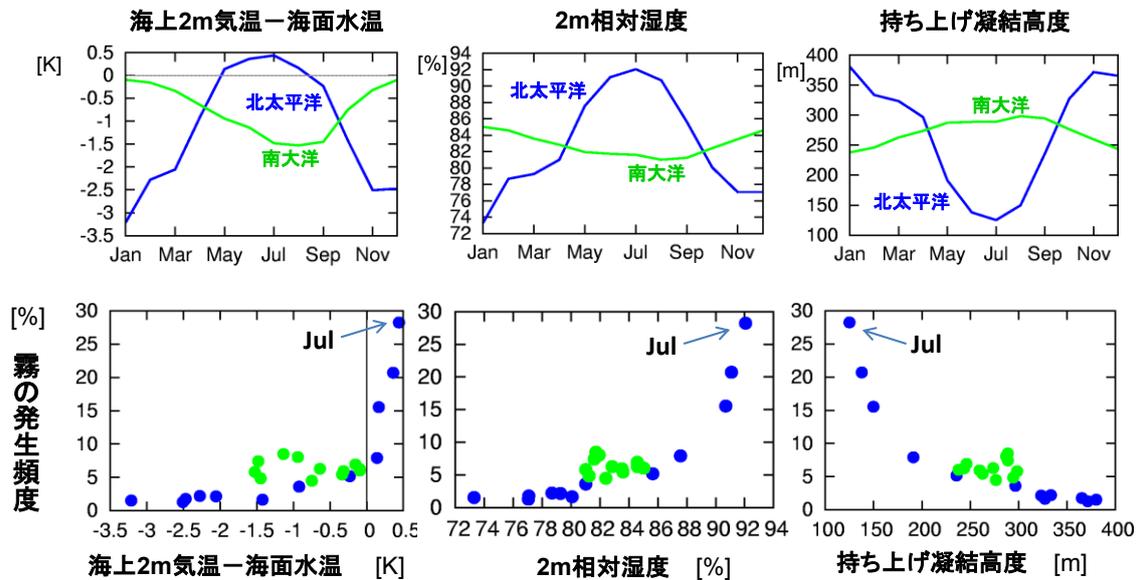


図3：上段は、海上 2m 気温と海面水温の差（左図）、2m 相対湿度（中図）、持ち上げ凝結高度（右図）の季節変化。下段は、それらの気象要素と霧の発生頻度の散布図。その他は、図1、図2に同じ。

#### （4）夏季の日本の東海上における雲の鉛直構造の地理的特徴

次に、ヤマセに関連の深い、夏季のオホーツク海から日本の東海上の雲の鉛直構造の地理的分布を示す。使用データは7月であり、統計領域は、図4の左図に示す。図4より、雲頂高度、雲底高度共に、北に向かうにしたがって低くなっていくことがわかる。また、雲底高度は、0-240mに出現する頻度が北に向かうほど増加していることから、霧の発生頻度も北に向かうほど多くなっていることが示唆される。図5には、この海域の気象要素の緯度分布を示すが、雲頂高度と相関の高い下層大気安定度も北に向かうほど大きくなっている（左図）。また、霧の発生頻度と相関の高い2m相対湿度も北に向かうほど高くなっている（右図）と共に、暖気移流の結果もたらされる、海上2m気温と海面水温の差も、北に向かうほどおおむね正の値を示すようになっていく（中図）ことがわかる。

以上は、この海域の下層雲の気候学的な特性であるが、今後は、ヤマセの事例に絞ってこのような調査を行うことで、ヤマセの下層雲の特徴をさらに明らかにできるだろうと考えられる。

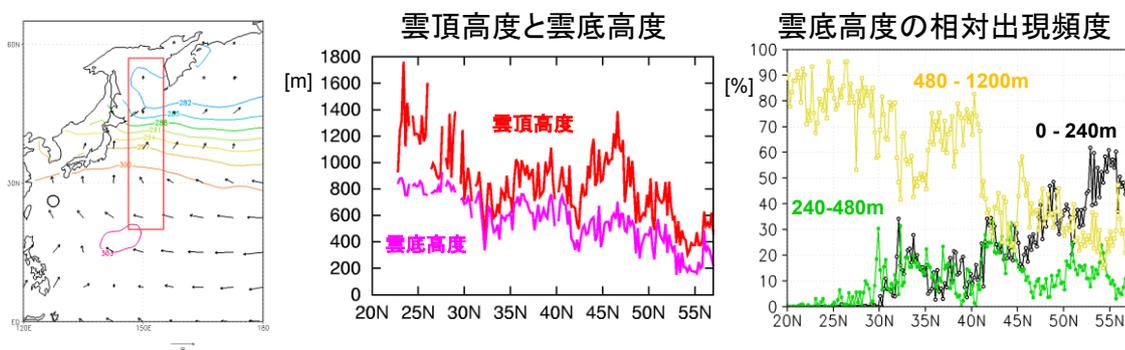


図4：左図は、統計に使用した日本の東海域（赤枠内）。中図は、雲頂高度（赤線）と雲底高度（ピンク線）の緯度分布。右図は、雲底高度が出現する高度の相対的な頻度分布（0-240m：黒、240-480m：緑、480-1200m：黄）。データ期間は図1に同じ。

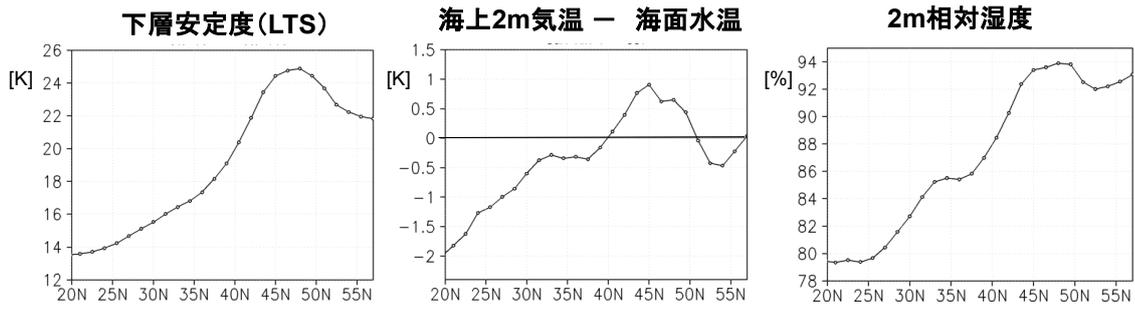


図5：日本の東海域（図4）の、下層大気安定度（左図）、海上2m気温と海面水温の差（中図）、2m相対湿度（右図）の緯度分布。データ期間は図1に同じ。

### c) 参考文献

- Klein, S.A., and D.L. Hartmann, 1993: The Seasonal Cycle of Low Stratiform Clouds. *J. Climate*, **6**, 1587-1606.
- Hagihara, Y., H. Okamoto, and R. Yoshida, 2010: Development of a combined CloudSat-CALIPSO cloud mask to show global cloud distribution, *J. Geophys. Res.*, **115**, D00H33, doi:10.1029/2009JD012344.
- Teixeira, J., 1999: Simulation of fog with the ECMWF prognostic cloud scheme. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **125**, 529-552. doi: 10.1002/qj.49712555409.

### 3.1.4 東北地方における気象庁メソモデルの日射量予測誤差と雲のタイプの出現頻度

大竹秀明・下瀬健一・Joao Gari da Silva Fonseca Jr.・高島工・大関 崇

((独) 産業技術総合研究所)

山田芳則 (気象研究所)

#### a) 要旨

日射量予測値の予測誤差情報は太陽光発電の発電量予測にとって電力の需給バランスや他の電力システムとの運用計画上重要な情報になる。本研究ではヤマセがしばしば発生する東北地方に焦点を当てた、気象庁メソモデル (MSM: 水平解像度 5 km) の日射量の予測の季節特性と予測誤差が大きくなる場合の目視観測される雲のタイプや状態の統計的な傾向を調べた。

まず日本全国の平均的な MSM の日射量予測値の予測誤差の季節変化をみると、平均誤差 (MBE) は冬季の過大傾向 (最大 40 W/m<sup>2</sup> 程度) と夏季の過小傾向 (-60 W/m<sup>2</sup> 程度) が顕著であった。冬季は平均二乗誤差 (RMSE) が小さく約 90 W/m<sup>2</sup> 程度、夏季では最大約 170 W/m<sup>2</sup> 程度であった。東北地方でも同様な季節変化の傾向が見られていた。また、どのような雲のタイプや状態の時に日射予測が外れやすいのかを統計的に調べた。予測誤差の大きい事例で予測過大の場合では特に下層雲 (層積雲や積雲) の出現頻度が高く、逆に予測過小の場合では下層雲の出現頻度はやや低いが大気上層の巻雲や中層の薄い高積雲の出現頻度が高かった。

#### b) 本文

##### 1. はじめに

太陽光発電が今後大量に導入されることが想定されている。太陽光発電では太陽からの日射エネルギーを源としている。電力の需給バランスや他の電力システムを含めた電力の運用計画を考える上で太陽光発電システムによってどのくらいの発電量が得られるかが重要であり、そのためには日射予測値の情報やその誤差情報が必要になる。しかし、大気中では雲が発生・移動・消滅するために、その時間的・空間的な変動も大きく、これは直接的に発電量に影響する。特に夏季には太陽高度が高くなり日射量も多くなることから、日射量と雲の分布の理解 (種類、光学的厚さ、広がり) は重要である。東北地方では夏季を中心としてヤマセ時の雲の分布や気温、日射量の予測が農業の分野で注目されている。しかし農業の分野にのみならず、太陽光発電などのエネルギー分野においてもヤマセをキーワードとした雲や日射量に関する研究が求められる。

気象庁はメソモデル (MSM) の日射量予測値の予測誤差の特性について調べており、日本全国の平均として夏季の日射過小と冬季の日射過大の傾向があることを報告している (気象庁, 2008)。MSM の詳細な地域的な日射予測特性の調査もされ始めており (大竹ら, 2012)、東北地方においても気象非静力学モデルによる日射量予測特性について議論されているが (例えば、吉田ら 2011)、MSM の東北地方における予測誤差に関する様々な時間・空間スケールの予測誤差の検証が必要である。また、どのような雲のタイプの場合に日射量の予測誤差が大きくなるのかがわかれば、どの雲にターゲットを絞りモデルの改良・開発を行うか検討をつける意味で有用な情報となりうる。しかし、未だこの点について詳細に調べた研究例は少ない (例えば、Ohtake et al. 2012)。

そこで本稿ではまず現業で用いられている MSM の東北地方における日射量予測特性について調べた。また、MSM の日射量予測値が観測値から大きく外れる場合にはどのような雲のタイプが出現しているのかを統計的に調べた。

## 2. 観測データとモデル

解析した日射量データは東北地方の各気象官署（青森，秋田，盛岡，仙台，福島，山形の6地点）で観測された全天日射量データ（時別値）である。解析期間は2008年から11年であるが本稿では2011年の結果を紹介する。各気象官署では「雲のタイプ」と「雲の状態」の目視観測による結果を「地上気象観測統計値ファイル」としてアーカイブ化している（気象庁観測部，2011）。雲のタイプは10種類の雲の形を分類している。また、「雲の状態」は雲のタイプに加えて，上層，中層，下層の雲を各10分類し，雲の広がり方や雲量などの目視による情報を付加している。本解析では日本時間09時と15時に観測された雲の「タイプ」と「状態」を解析した。

検証したMSMは水平解像度5kmであり，1日8回（15時間または33時間）予測の出力が行われているが，そのうち4回（03，09，15，21UTCの初期値を与えた6時間毎）の予測では33時間予測が行われている。電力の運用計画では前日の夕方に翌日の発電量を30分間隔で行うため，33時間予報値を解析に用いた。モデルの詳細には気象庁資料を参照されたい（気象庁，2008）。

## 3. 日射量予測の季節的特性

図1は2011年における日本全国の平均的なMSMの日射量予測値（時別値）の月毎の平均誤差(MBE)と平均二乗誤差(RMSE)を示している。MBEの時系列から冬季の過大傾向（最大40 W/m<sup>2</sup>程度）と，夏季の過小傾向（-60 W/m<sup>2</sup>程度）が全国的に顕著である。また，冬季はRMSEが小さく約90 W/m<sup>2</sup>程度，夏季では最大約170 W/m<sup>2</sup>程度であった。次に季節毎に日積算日射量の相関を調べた。図2は冬季三か月（DJF）におけるMSMと観測値の相関（散布図）を気象官署毎に示している。冬季は太陽高度も低く日積算値も小さいが一対一の直線状に近い分布をしている。青森や盛岡ではやや日射予測過大の傾向も見られる。一方，夏季（JJA）については日積算値では冬季よりもややばらつきが大きい（図3）。ほとんどの地点でMSMによる日射量予測値の過小傾向が顕著で，夏場のモデルの雲の表現がやや過剰か広がりすぎと考えられ，結果的に光学的に厚くなる傾向がみられた。これは全国の平均的な傾向とも整合的な結果である（図1）。

## 4. 雲の出現頻度

### (i) 雲のタイプ

表1aは2011年（通年）に東北地方の各気象官署（青森，秋田，盛岡，仙台，福島，山形）で地上から目視観測された雲のタイプの出現頻度を示したものである。通年で積雲(Cu)の出現頻度が最も高く，次いで巻雲(Ci)，高積雲(Ac)の頻度が高い。また層積雲(Sc)や層雲(St)も年間の約20%の割合で出現している。表1bは冬季三か月（DJF）の日射量予測誤差が大きい事例のうち，過大予測をした場合の事例のみ抽出し，その時の雲の出現頻度を示している。ここで翌日の日射量予測誤差の大外れの事例を抽出するために，大外れの定義を次のようにした。前日の12時初期値の予測値（03UTC初期値）をベースに，雲の目視観測が実施された時間の前後を含んだ3時間の時別値の積算予測誤差（＝予測値－観測値）を大気外日射量で除した絶対値が0.2を超えた場合とした。その結果，Cuと積乱雲(Cb)の出現頻度が他の雲のタイプよりも高くなっており，一方でCiやAcは観測されるものの通年に比べて出現頻度が小さくなっていった。同様に，夏季三か月（JJA）の日射量予測の過小予測を示した事例を同様な方法で抽出し，その時の雲のタイプを調べた（表1c）。その結果，通年で見られる雲のタイプとほぼ同様の雲が出現する時に日射量予測誤差が大きくなっているが，CuやAc及びCiの出現する割合が通年時の場合よりも高くなっているのが特徴である。以上から，日射量予測誤差が大きくなる場合の雲のタイプは夏季の日射過小の場合と冬季の日射過大の場合では異なることがわかった。

## (ii) 雲の状態

次に雲の状態について同様の解析を行った。気象庁では雲の状態に関する情報を地上の目視観測から各層10タイプに分類し、記録している(表2)。表3では各気象官署で冬季の日射過大の事例の場合において、上層、中層、下層にわけて雲の状態をまとめたものである。下層では「中程度以上に発達したCu(コード2)」が30~40%、もしくは「雲頂が羽毛・かなとこ状でないCb(コード3)」が約50%の割合を占めていた。上・中層の雲の状態では下層の雲の影響により観測できないため、ほとんどの事例で状態が「不明(コード15)」を示している。

また、夏季(JJA)の日射過小予測時の上層の雲では「薄い毛状のCiが他のCiより多い(コード1)」、「濃いCiと房状Ciが他のCiより多い(コード2)」, また中層では「薄いAc(太陽・月がわかる)(コード3)」の出現頻度が高い(表4)。また、下層の雲の状態では「晴天時のCu, ほつれ・盛り上がりがある(コード1)」や「中程度以上に発達したCu(コード2)」によってほとんどが占められていた。

以上から、日射量の予測が大きく外れる場合における東北地方の雲の状態としては、ヤマセ時にしばしば注目される下層雲(ScやSt)のみならず、上層のCiが広く覆う場合や中層をAcが薄く広がる場合も見られることがわかった。

## c) 参考文献

- 大竹秀明, 下瀬健一, 山田芳則, Joao Gari da Silva Fonseca Jr, 高島工, 大関崇, 太陽光発電量予測研究グループ 2012: 発電量予測で利用される気象庁メソモデルの日射量予測誤差マッピング. 日本気象学会秋季大会講演予稿集, 102, C301, p407.
- 気象庁予報部, 2008: 「気象庁非静力学モデル」, 数値予報課報告・別冊第54号, pp. 272.
- 気象庁観測部, 2011: 「地上気象観測統計値ファイルフォーマット表」.
- 吉田龍平, 沢田雅洋, 山崎剛, 岩崎俊樹, 2011: 「放射量連続観測とAMeDASを利用した宮城・山形・福島県北部における非静力学モデル放射量の評価」, 天気, Vol158, No. 7, pp. 599-605.
- Ohtake H., K-I. Shimose., J. G. S. Fonseca. Jr., T. Takashima., T. Oozeki and Y. Yamada, 2012: Accuracy of the solar irradiance forecasts of the Japan Meteorological Agency mesoscale model for the Kanto region, Japan. *Solar Energy*, (in press).

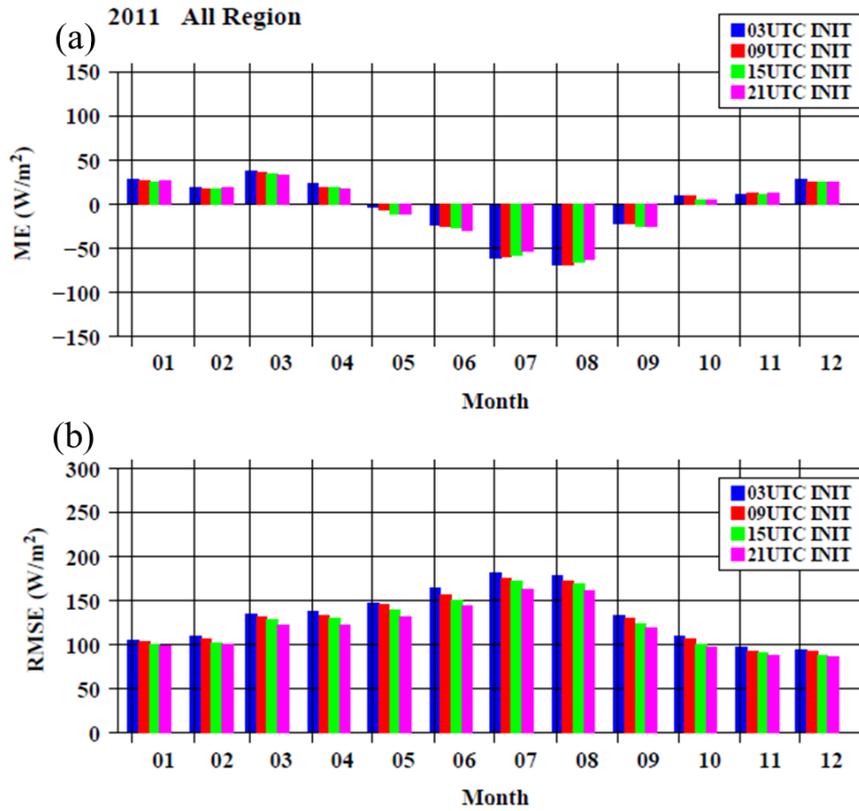


図1. 全国48地点の各気象官署のデータを用いたMSMの各月毎の日射量予測の(a)平均誤差(ME)と(b)平均二乗誤差(RMSE)。期間は2011年。カラーは03, 09, 15, 21UTC初期値の結果を示す。

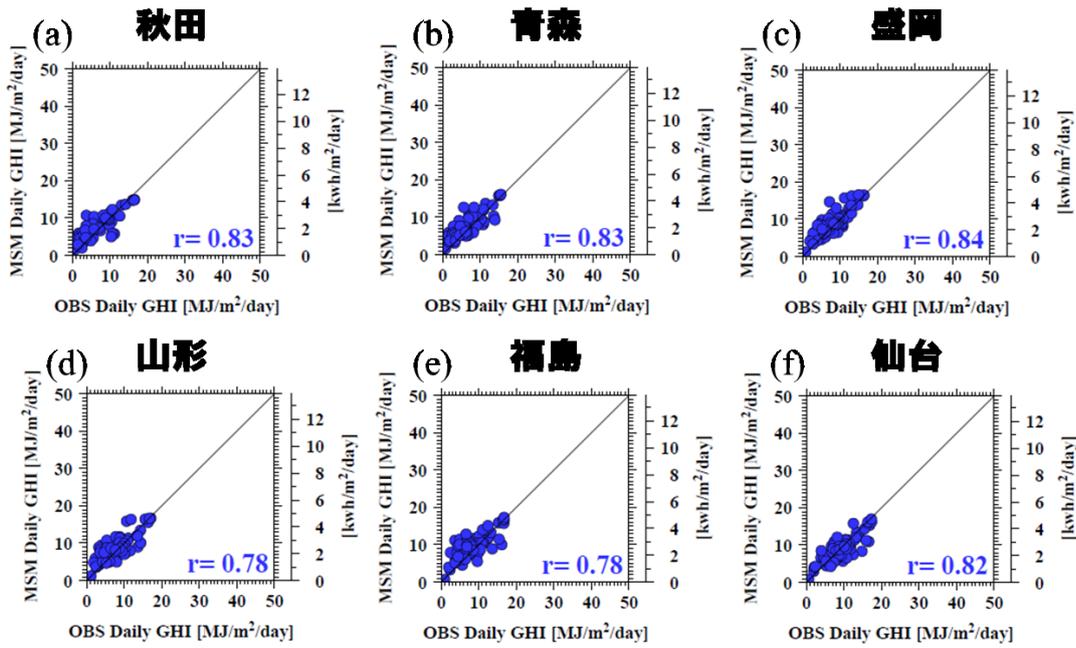


図2. 冬季 (DJF) の東北地方の各気象官署における日積算日射量(MJ/m<sup>2</sup>)の観測値とモデルの予測値の比較。横軸は観測値, 縦軸は MSM(03UTC 初期値)の予測値である。数値 (r) は相関係数を示す。

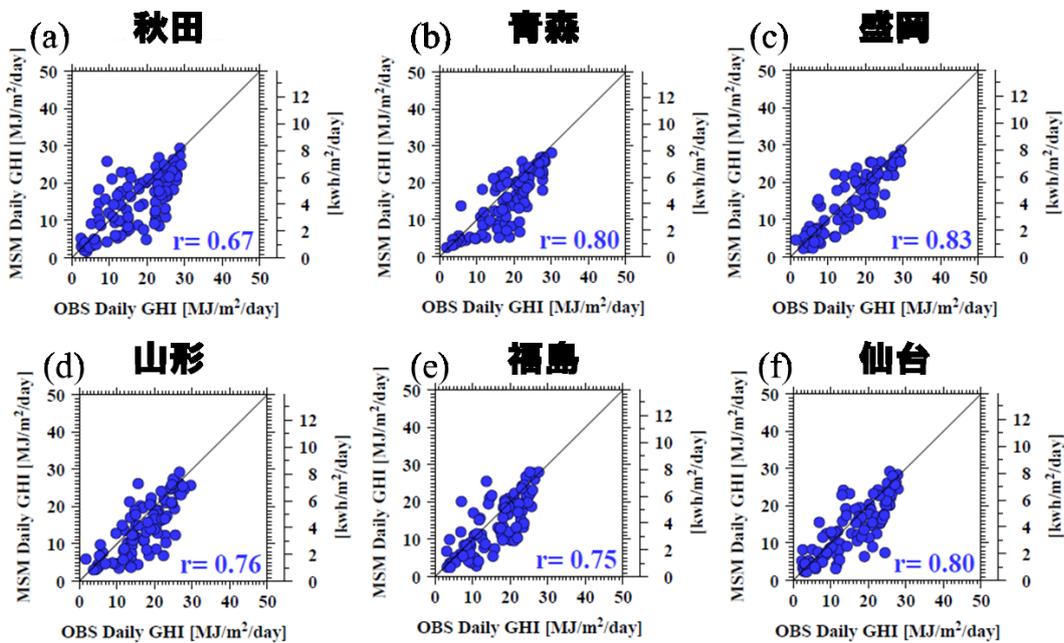


図3. 図2と同じで夏季 (JJA) の結果。

(a) 2011_09JST	Ci	Cc	Cs	Ac	As	Ns	Sc	St	Cu	Cb	NO	Num
Aomori	29.9	1.1	1.1	32.7	2.7	0.0	14.3	25.0	61.3	18.7	4.0	364
Akita	30.8	1.9	3.3	44.0	4.1	0.8	18.7	23.6	67.3	18.1	3.0	364
Morioka	34.6	2.5	2.5	26.4	4.7	0.3	19.2	25.5	65.4	14.6	7.0	364
Sendai	39.3	3.8	2.2	40.9	6.3	1.4	29.7	22.5	61.3	12.1	5.0	364
Fukushima	40.7	1.1	1.6	37.9	7.7	0.8	34.6	22.3	62.9	8.0	7.0	364
Yamagata	36.0	1.4	1.6	38.7	4.4	0.8	17.0	25.5	71.4	9.9	8.0	364

(b) 2011_09JST	Ci	Cc	Cs	Ac	As	Ns	Sc	St	Cu	Cb	NO	Num
Aomori	6.7	0.0	0.0	0.0	6.7	0.0	6.7	6.7	60.0	53.3	0.0	15
Akita	0.0	0.0	0.0	5.0	0.0	0.0	10.0	15.0	50.0	65.0	0.0	20
Morioka	0.0	0.0	0.0	5.9	0.0	0.0	5.9	5.9	64.7	58.8	0.0	17
Sendai	33.3	22.2	0.0	33.3	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	55.6	0.0	9
Fukushima	27.8	0.0	0.0	11.1	5.6	0.0	22.2	16.7	61.1	50.0	0.0	18
Yamagata	12.5	0.0	0.0	18.8	0.0	0.0	6.2	37.5	68.8	50.0	0.0	16

(c) 2011_09JST	Ci	Cc	Cs	Ac	As	Ns	Sc	St	Cu	Cb	NO	Num
Aomori	68.8	6.2	0.0	81.2	6.2	0.0	18.8	18.8	68.8	0.0	0.0	16
Akita	86.7	13.3	0.0	86.7	0.0	0.0	20.0	6.7	100.0	0.0	0.0	15
Morioka	54.5	27.3	9.1	72.7	0.0	0.0	18.2	18.2	81.8	0.0	0.0	11
Sendai	73.7	21.1	0.0	73.7	0.0	0.0	5.3	10.5	100.0	0.0	0.0	19
Fukushima	72.2	5.6	0.0	66.7	0.0	0.0	16.7	16.7	94.4	0.0	0.0	18
Yamagata	73.7	5.3	0.0	57.9	0.0	0.0	5.3	0.0	100.0	0.0	0.0	19

表1. 09時における雲のタイプの出現頻度.(a)2011年通年, (b)冬季(DJF)の日射予測過大, (c)夏季(JJA)の日射予測過小の事例。「NO」は快晴日, 「Num」は解析したデータ数(日数)を示す。

雲の状態

コード	CH (上層雲)	CM (中層雲)	CL (下層雲)
0	Ci, Cc 及び Cs なし	Ns, As 及び Ac なし	Cu, Cb, Sc 及び St なし
1	薄い毛状の Ci が他の Ci より多い	薄い As(太陽・月がわかる)	晴天時の Cu, ほつれ・盛り上がりがある
2	濃い Ci と房状 Ci が他の Ci より多い	厚い As, あるいは Ns	中程度以上に発達した Cu
3	Cb からできた濃い Ci	薄い Ac(太陽・月がわかる)	雲頂が羽毛・かなとこ状でない Cb
4	地平線から空に広がりがつつある Ci	外観が絶えず変わる Ac	Cu が広がってきた Sc
5	地平線上 45° 以上に広がっていない Cs	地平線から空に広がりがつつある Ac	Cu が広がったものではない Sc
6	地平線上 45° 以上に広がっている Cs	Cu, Cb が広がってきた Ac	St, St のちぎれ雲
7	全天をおおう Cs	Ac または Ac と As, Ns	悪天の際のちぎれ雲, Cu・St
8	空に広がる傾向のない Cs	塔状またはふき状の Ac	雲底の高さが違う Cu と Sc
9	Cc のみ, または Cc が Ci・Cs より多い	こんとんとした険悪な空模様	雲頂が羽毛状でかなとこ状の Cb
15	不明	不明	不明

表2. 各層における雲の状態のコード番号との対応表。参考文献「地上気象観測統計値ファイルフォーマット表」気象庁観測部(2011)から抜粋。

2011 09JST	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	15	Num
<b>上層雲</b>												
Aomori	0.0	6.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	93.3	15
Akita	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	20
Morioka	41.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	58.8	17
Sendai	33.3	0.0	33.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	33.3	9
Fukushima	27.8	5.6	22.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	44.4	18
Yamagata	6.2	6.2	6.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	81.2	16
<b>中層雲</b>												
Aomori	6.7	0.0	6.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	86.7	15
Akita	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.0	0.0	0.0	95.0	20
Morioka	35.3	0.0	0.0	5.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	58.8	17
Sendai	33.3	0.0	0.0	22.2	0.0	0.0	0.0	11.1	0.0	0.0	33.3	9
Fukushima	44.4	0.0	5.6	11.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	38.9	18
Yamagata	12.5	0.0	0.0	12.5	0.0	0.0	6.2	0.0	0.0	0.0	68.8	16
<b>下層雲</b>												
Aomori	0.0	0.0	40.0	53.3	0.0	0.0	0.0	0.0	6.7	0.0	0.0	15
Akita	0.0	0.0	25.0	65.0	0.0	5.0	0.0	0.0	5.0	0.0	0.0	20
Morioka	0.0	0.0	35.3	58.8	0.0	5.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	17
Sendai	0.0	11.1	33.3	55.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9
Fukushima	0.0	0.0	33.3	50.0	0.0	11.1	5.6	0.0	0.0	0.0	0.0	18
Yamagata	0.0	0.0	31.2	50.0	0.0	0.0	12.5	0.0	6.2	0.0	0.0	16

表3. 冬季 (DJF) の日射量予測過大時の東北地方各気象官署にける 09 時の雲の状態の出現頻度。2011 年の結果。0-9 及び 15 の各番号は表2の各層のコード番号に対応する。「Num」は解析したデータ数を示す。

2011 09JST	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	15	Num
<b>上層雲</b>												
Aomori	12.5	12.5	56.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	18.8	16
Akita	0.0	26.7	60.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	13.3	15
Morioka	0.0	18.2	27.3	0.0	0.0	0.0	9.1	0.0	0.0	18.2	27.3	11
Sendai	15.8	15.8	57.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.5	19
Fukushima	16.7	16.7	55.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.1	18
Yamagata	10.5	21.1	52.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	15.8	19
<b>中層雲</b>												
Aomori	12.5	0.0	6.2	81.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	16
Akita	20.0	0.0	0.0	53.3	0.0	0.0	0.0	20.0	0.0	0.0	6.7	15
Morioka	18.2	0.0	0.0	54.5	0.0	0.0	0.0	18.2	0.0	0.0	9.1	11
Sendai	26.3	0.0	0.0	73.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	19
Fukushima	27.8	0.0	0.0	61.1	0.0	0.0	0.0	5.6	0.0	0.0	5.6	18
Yamagata	42.1	0.0	0.0	36.8	0.0	0.0	0.0	21.1	0.0	0.0	0.0	19
<b>下層雲</b>												
Aomori_CL	6.2	18.8	50.0	0.0	0.0	18.8	0.0	6.2	0.0	0.0	0.0	16
Akita_CL	0.0	20.0	60.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	20.0	0.0	0.0	15
Morioka_CL	0.0	18.2	54.5	0.0	0.0	9.1	9.1	0.0	9.1	0.0	0.0	11
Sendai_CL	0.0	10.5	84.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.3	0.0	0.0	19
Fukushima_CL	0.0	16.7	66.7	0.0	0.0	5.6	0.0	0.0	11.1	0.0	0.0	18
Yamagata_CL	0.0	52.6	42.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.3	0.0	0.0	19

表4. 表3と同様で, 夏季 (JJA) の日射量予測過小時の結果。

### 3.1.5 CMIP5 マルチ気候モデルにおけるヤマセに関連する大規模大気循環の再現性と将来変化 遠藤洋和（気象研究所）

#### a) 要旨

CMIP5 気候モデルを用いて、ヤマセに関連する大規模大気循環の再現性と将来変化を調べた。500hPa 高度における北西太平洋と東シベリアの南北差で定義されるインデックス (JPZI) は、ヤマセ現象の年々変動と強い相関がある。すなわち JPZI 低指数年において、オホーツク海高気圧の発達と亜熱帯ジェット以南の南偏を背景場として、東北地方の太平洋沿岸では冷湿な北東気流（ヤマセ）が卓越する。CMIP5 気候モデル群は、このような特徴をある程度再現するもの、オホーツク海高気圧と下層寒気の南下が弱いバイアスを示す。このため、気候モデルにおけるヤマセ強度（頻度）は弱い（少ない）傾向にある。将来気候実験では、500hPa 高度はシベリアなどの高緯度陸域で相対的に上昇する一方、梅雨前線帯付近で低下することが多くのモデルで予測されている。その年々変動については、60N 以北の増加と 40N 付近の減少が予測されているが、これら変化におけるモデル間一致率は高くない。

#### b) 本文

##### (1) 解析データ

観測データとして、JRA-25 (Onogi et al. 2007) と気象官署の地上気象観測データを使用した。CMIP5 実験（第5期結合モデル相互比較実験）データについては、20世紀気候再現実験と長期予測実験のデータを使用した。再現実験では45個、長期予測実験では36個の気候モデルを対象に、各モデル1ランずつ解析した。大気モデルの水平解像度は、最も細かいものはMIROC4hの約60km、平均的には200km前後である。ヤマセ現象が良く現れる7月を解析対象とした。

##### (2) ヤマセ現象に関連する大気循環インデックス

ヤマセは、東北地方太平洋側に初夏に現れる局地的な現象であるが、大規模な大気循環場に大きく影響されることが知られている (Kanno, 2004; Nakamura and Fukamachi, 2004)。Tachibana et al. (2004) は、下層気温の南北勾配が逆転する6～7月の時期にオホーツク海高気圧が現れやすくなるという観測事実に着目し、東シベリア (60-65N, 140-150E) と北西太平洋 (40-45N, 150-160E) の対流圏温度 (500hPa～1000hPa 層厚) の差をインデックスとして定義し、その年々変動はオホーツク海高気圧や北日本の気温変動と強い相関をもつことを示した。本研究では、対流圏大気循環を代表する500hPa 高度を用いて、ヤマセ現象と関連深いインデックスを定義し、それを軸にモデルの再現性や将来変化を調べる。具体的には、Tachibana et al. (2004) にならって、北西太平洋 (JPZI\_S: 35-45N, 135-160E) と東シベリア (JPZI\_N: 55-65N, 125-150E) の500hPa 高度差をインデックス (JPZI: JPZI\_S-JPZI\_N) とした。なお、気候モデル間で平均場が異なることを考慮し、彼らよりも広い領域でインデックスを定義した。

定義されたインデックスに対する循環場の回帰係数と相関係数の分布を図1に示す。JPZI\_N は、地上のオホーツク海高気圧や東北地方太平洋側の局地的な気温変動と相関が高い。一方 JPZI\_S は、東アジアの亜熱帯ジェットの変動やこれに伴う広範囲の気温変動と相関が高い。両インデックスの差として定義される JPZI は、両インデックスが捉える変動と相関が高い。

図2は、JPZI と東北地方太平洋側の気温および日照時間との関係である。JPZI は、ヤマセ現象を特徴づける気温および日照時間の変動と強い相関がある。気温偏差 (日照時間平年比) との

相関係数は 0.80 (0.73)、八戸の地上観測データにおけるヤマセ吹走日数 (管野(1993)) との相関係数は 0.81 である (図略)。このように、大規模循環場から定義される JPZI は、東北太平洋側地域にローカルに現れるヤマセ現象の年々変動と強い相関がある。

### (3) CMIP5 気候モデルの再現性

図 3 は JPZI の下位 7 か年で平均した大気循環場である。JRA では、東アジアでの亜熱帯ジェット南偏と東シベリアでのリッジ発達 (500hPa 高度) が見られ、これに伴い極東域のジェット気流は分流傾向にある。また、対流圏下層では、オホーツク海高気圧の発達と北日本への寒気南下が見られる。CMIP5 モデルはこのような特徴をおおむね再現する。しかし、東シベリアのリッジの振幅が小さい、オホーツク海高気圧と下層寒気の南下が弱い、などのバイアスが見られる。ただし、これらバイアスは CMIP3 モデルと比べてやや改善している。

個々のモデルの偏差を図 4 に示す。上述のように、気候モデルではオホーツク海高気圧と下層寒気の南下が弱い傾向が明らかに認められる。このような循環場のバイアスと整合して、北日本東方海上の北東風頻度 (ヤマセ頻度) は多くのモデルで過少傾向にある (遠藤, 2012))。

### (4) 将来変化予測

RCP8.5 シナリオに基づく将来予測実験データを解析した。500hPa 高度およびその年々変動の将来変化を図 5 に示す。図 5 a では、将来変化の空間パターンを見やすくするため北半球平均増加量を差し引いている。500hPa 高度は、ユーラシア大陸や北米大陸の高緯度陸域で相対的に上昇する一方、熱帯域や梅雨前線帯付近で低下することが多くのモデルで予測されている。その年々変動については、60N 以北の増加と 40N 付近の減少が予測されているが、これら変化におけるモデル間一致率は高くない。

## 謝辞

八戸のヤマセ吹走日数データを東北農業研究センターの管野洋光博士から提供頂いた。

## c) 参考文献

- 遠藤洋和, 2012: CMIP5 マルチ気候モデルのオホーツク海高気圧とヤマセの再現性、「東北地域と冬季モンスーンの先進的ダウンスケール研究」平成 23 年度研究成果報告書, 49-53.
- 管野洋光, 1993: 青森県八戸におけるヤマセと海風の気温・湿度の差異とその季節変化. 天気, 40, 751-757.
- Kanno, H., 2004: Five-year cycle of north-south pressure difference as an index of summer weather in northern Japan from 1982 onwards. J. Meteor. Soc. Japan, 82, 711-724.
- Nakamura, H., and T. Fukamachi, 2004: Evolution and dynamics of summertime blocking over the Far East and the associated surface Okhotsk high. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 130, 1213-1233.
- Onogi, K. and Coauthor, 2007: The JRA-25 reanalysis. J. Meteor. Soc. Japan, 85, 369-432.
- Tachibana, Y., T. Iwamoto, M. Ogi, and Y. Watanabe, 2004: Abnormal meridional temperature gradient and its relation to the Okhotsk high. J. Meteor. Soc. Japan, 82, 1399-1415.

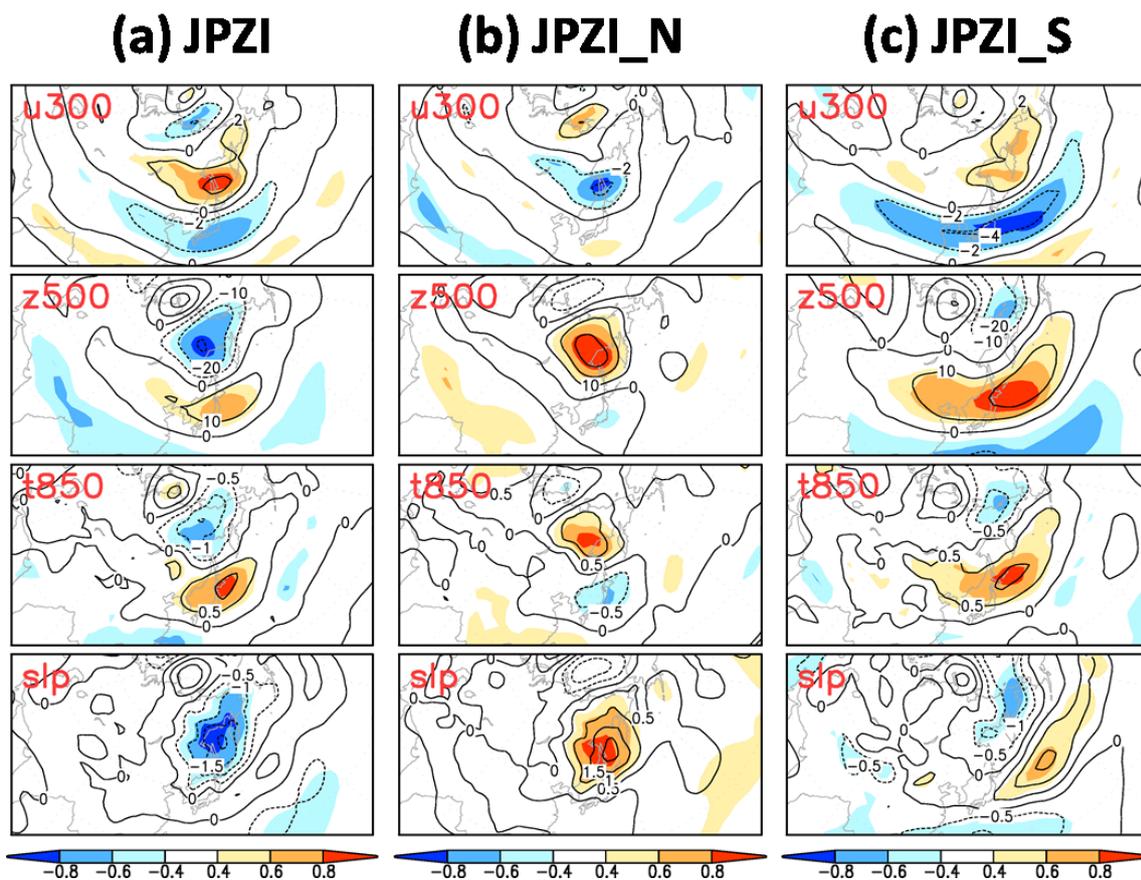


図1 7月の循環インデックスに対する回帰係数(線)と相関係数(陰影)の分布。上から300hPa東西風(m/s)、500hPa高度(m)、850hPa気温(°C)、海面更正気圧(hPa)。期間は1981~2005年。

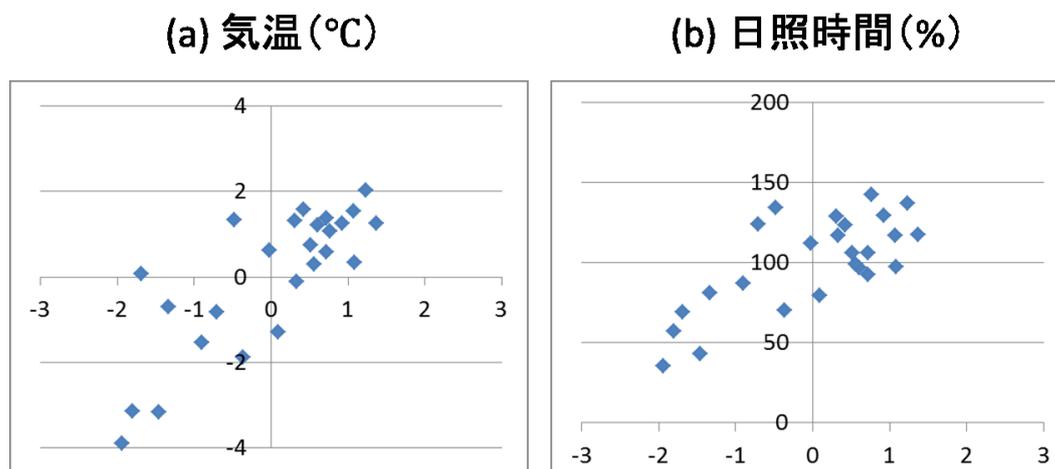


図2 7月の東北地方太平洋側の(a)気温偏差および(b)日照時間平年比とJPZIの関係。期間は1981~2005年。

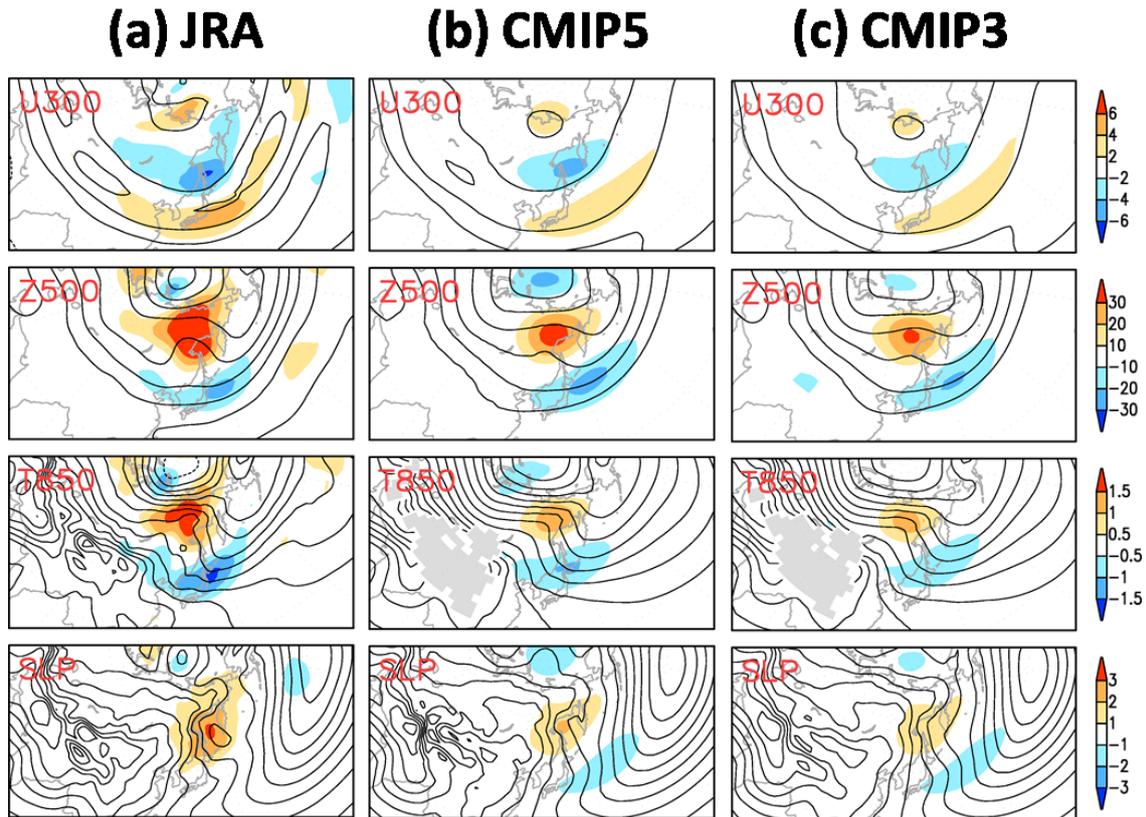


図3 7月のJPZI低指数年(7か年)平均の合成図。(a) JRA、(b) CMIP5の45モデル平均、(c) CMIP3の23モデル平均。線は合成値、陰影は平年偏差。上から300hPa東西風(m/s)、500hPa高度(m)、850hPa気温(K)、海面更正気圧(hPa)。(b)と(c)では、モデル毎に下位7か年で平均した後、全モデルで平均。対象期間は、(a)と(b)は1981~2005年、(c)は1975~1999年。

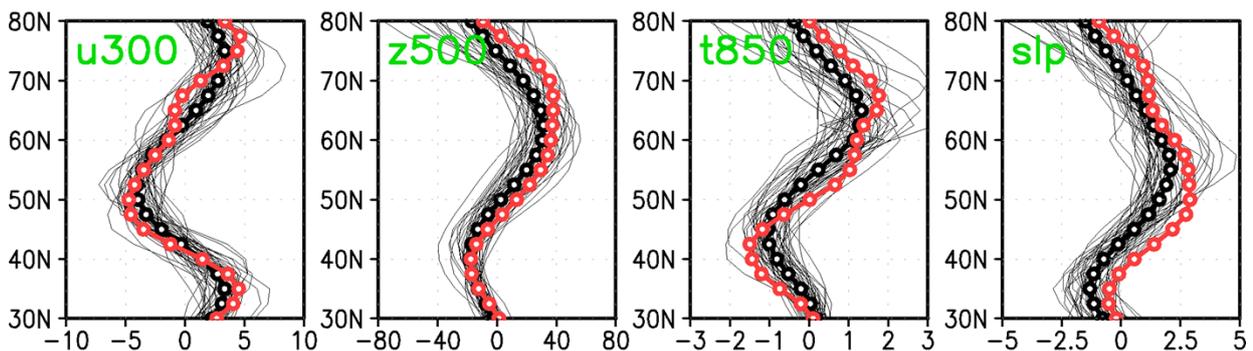


図4 7月のJPZI低指数年(7か年)平均の平年偏差。300hPa東西風(m/s)と500hPa高度(m)は125-160E平均、850hPa気温(K)と海面更正気圧(hPa)は140-150E平均。黒細線はCMIP5の各モデル、黒太線は全モデル(45モデル)平均、赤太線はJRA。期間は1981~2005年。

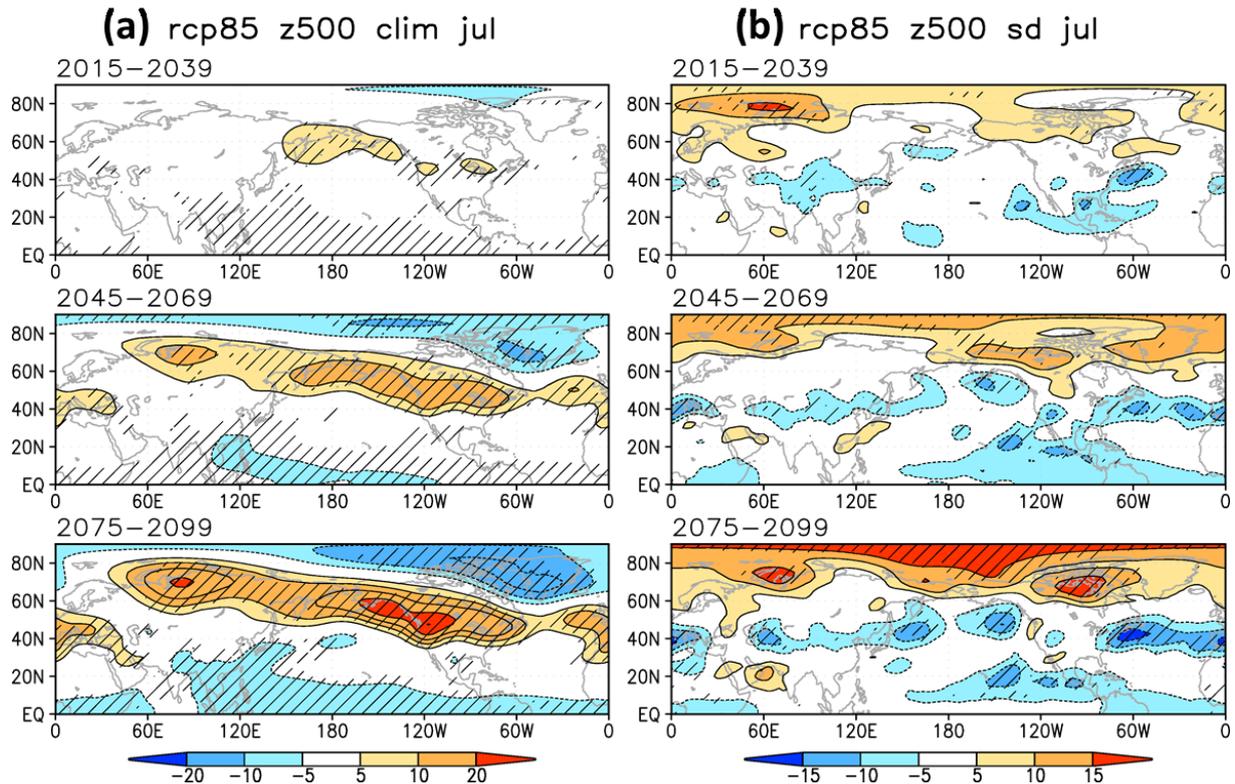


図5 長期予測実験(RCP8.5シナリオ)における7月の(a)500hPa高度の将来変化(m)、(b)500hPa高度の年々変動の標準偏差の将来変化率(%). 上から2015-2039年平均、2045-2069年平均、2075-2099年平均。基準は1981~2005年。(a)では北半球平均上昇量を差し引いた。(b)では対象期間内のトレンドを差し引いた上で標準偏差を計算した。70%以上のモデルで変化の符号が一致する領域に斜線。

## 3.2 局地気象予測の研究

### 3.2.1 ヤマセによる冷夏を対象としたアンサンブルダウンスケール予報実験

福井真・岩崎俊樹・余偉明（東北大学）

#### a) 要旨

本研究の目的は、力学的ダウンスケールを用いた、ヤマセの地域的な影響を対象とする中期予報の可能性について調べることである。予報誤差を考慮するために、アンサンブル手法の導入と、力学的ダウンスケールの後処理として、バイアス補正と Empirical Orthogonal Function (EOF) モードによるフィルタリングを含むアンサンブルダウンスケールシステムを構築した。そして、ヤマセによる冷夏予報への適用可能性を調べるため、東北地方の夏季の気温場に着目し検証を行った。Automated Meteorological Data Acquisition System (AMeDAS) の観測に対し、力学的ダウンスケールの出力そのものは、ダウンスケール前と比べ、誤差が拡大した。事例によらない地点別・予報時間別のバイアスを補正することで、効果的に RMSE を減らすことができた。さらに、アンサンブル手法を取り入れることで、アンサンブル平均をとることによる改善率とスプレッドがダウンスケール後により大きくなった。これは、アンサンブルダウンスケールにより、予報の信頼度をより適切に捉えられることを示唆するものである。さらに、EOF 解析ベースのフィルタリングから、高次モードは予報初期で予報が困難になるのに対し、ヤマセ卓越時に特有な気温の東西偏差モードを含む低次モードはダウンスケールにより、5~7 日程度は予測可能であることが示された。

#### b) 本文

##### 1) 背景・目的

ヤマセは、冷湿な北東風であり、たびたび東北地方太平洋側の地域に冷害をもたらしてきた。冷害を軽減するためには、ヤマセの地域的な影響を対象とした中期予報が必要となる。ヤマセ自体は、海洋性極気団を起源とする 1000km 規模の気団の流出として捕えられる (Kodama et al. 2009)。この観点からは、現業である水平解像度約 100km の 1 ヶ月アンサンブル予報モデルでも、ヤマセを十分解像でき、有効な予報を与えることが期待できる。しかしながら、ヤマセは、背が低く、地形の影響を大きく受ける (工藤 1984)。そのため、ヤマセの影響は、非常に地域性に富んだものとなる。こうしたヤマセの地域性を含めて解像するには、水平解像度約 100km のモデルでは粗すぎる。一般に、地形の影響などのより細かい現象を陽に扱う手法の一つとして、力学的ダウンスケールが挙げられる。力学的ダウンスケールでは、高解像度の領域モデルを用い、対象領域のみを計算することで、同じ解像度の全球モデル用いるのに対し、計算コストを大きく抑えることが可能である。ただし、力学的ダウンスケールによる予報には、初期値・境界値として用いるデータの不確実性に起因する誤差と、力学的ダウンスケールに用いる領域モデルの不完全性に起因する誤差が含まれる。予報を提供する上で、これらの誤差を見積もることは非常に重要である。

本研究の目的は、このような力学的ダウンスケールによる予報の誤差を考慮しながら、ヤマセの地域的な影響を対象とする中期予報を目指したアンサンブルダウンスケールシステムを構築し、気温場に着目しながらヤマセによる冷夏の予報への有効性を調べることである。

## 2) 実験概要

本研究では、力学的ダウンスケールに加え、モデルによる不完全性を考慮するバイアス補正、力学的ダウンスケールの初期値・境界値の不確実性を考慮するアンサンブル手法、予測可能性の高いモードを抽出するための Empirical Orthogonal Function (EOF) モードによるフィルタを導入したアンサンブルダウンスケールシステムを構築した。

### 力学的ダウンスケール

力学的ダウンスケールに用いたモデルは、気象庁非静力学モデル (Saito et al. 2007) で、水平解像度については、25km、5km と段階的に上げた。計算期間は 2000～2009 年 6 月 20、30 日、7 月 10、20 日を初期日とした各 2 週間で、計 40 事例である。

### バイアス補正

力学的ダウンスケール予報による地上日平均気温を、モデルの地形と実際の地形の違いを考慮しつつ、5km 計算領域内に含まれる Automated Meteorological Data Acquisition System (AMeDAS) 117 点 (図 1; ただし、対象期間内の気温観測値に欠損値を含まない地点のみ) に内挿した。そして、予報値と観測値の差の事例平均を、各 AMeDAS 地点・各予報時間における、事例によらないダウンスケール予報によるバイアスと定義する。補正は、そのバイアスを予報値から引くことで行った。

### アンサンブル手法

初期値・境界値の不確実性を考慮するために、気象庁による 1 ヶ月アンサンブルハインドキャスト (1.25° : 9 メンバー) の各メンバーに対して、力学的ダウンスケールを行なった。

### EOF 分解

実験対象期間 (2000～2009 年の 6 月 20 日～8 月 5 日) の 5km 計算領域内に含まれる AMeDAS 観測 (117 点) による日平均気温に対して EOF 解析を行い、モードを抽出する。そして、バイアス補正したアンサンブルダウンスケール予報の日平均気温を各モードに射影し得られた値と、AMeDAS による観測値を各モードに射影し得られた値とを比較し、各モードの予測の信頼性を評価した。

## 3) 結果

力学的ダウンスケールにより、AMeDAS の地上日平均気温に対する誤差がダウンスケール前に比べ拡大した。これは、力学的ダウンスケールモデルのバイアスによる影響と、より細かい現象を解像することにより表現できる変動度が大きくなるためと考えられる。

まず、力学的ダウンスケール予報におけるバイアス補正の効果について述べる。各解像度における予報結果の AMeDAS 観測に対するバイアスを見ると、ダウンスケール後の高温バイアスが顕著であった。予報 5 日目におけるバイアスの領域平均が、ダウンスケール前では -0.7K であったのに対し、水平解像度 25 km の場合で +2.8K、水平解像度 5km の場合では +2.6K であった。図 2 は、摂動を加えない単独予報に対する、バイアス補正前とバイアス補正後の地上気温の RMSE 及び改善率の事例平均を示している。バイアス補正を行うことで、特にダウンスケール後の RMSE が効果的に改善されたことが分かる。予報日 2 日において、バイアス補正による改善率は、ダウンスケール前が 20%程度であったのに対し、ダウンスケール後は 40%を超えた。ダウンスケール予報による出力にはバイアスが大きく、それを利用するためにはバイアス補正が必要であり、また、今回のような単純なバイアス補正が有効に機能することが示された。ただし、依然としてバイアス補正後もダウンスケール後の誤差が大きい。変動度が大きくなることに伴う誤差が、バイアス補正では除去されないためであると考えられる。

続いて、アンサンブル手法を取り入れた効果について述べる。図 3 は、解像度毎にバイアス補正された、アンサンブル平均予報と摂動を加えない単独予報の地上気温の RMSE、改善率の事例平均を示している。ダウンスケールにより、摂動を加えない単独予報に対するアンサンブル平均予報の改善率が大きくなり、RMSE がダウンスケール前と同程度までになった。これは、アンサンブルダウンスケールにより、変動度の拡大に伴う不確実性を見積もることができることを示している。さらに、図 4 は、領域平均の成分と領域平均からの差(地域性)の成分に分解し、RMSE、アンサンブル平均による改善率、スプレッドを示したものである。ダウンスケールすることで、特に地域性のスプレッドが大きく増加し、それに対応しアンサンブル平均をとることによる改善率が上がり、RMSE とスプレッドの比も 1 に近づいた。これらのことから、アンサンブルダウンスケールを行うことで、地域性に対応した信頼度をより適切に表せることがわかる。

ここで具体的に、典型的なヤマセ日(2003 年 6 月 24 日)に注目する。水平解像度 5km へのダウンスケールにより、宮城県西部及び青森県南東部に、気温のスプレッドの大きい領域が出現した(図 5)。この領域は、ヤマセが平野から山地へ侵入する地域に該当する。高解像度化により地形が詳細に扱えるようになり、ヤマセ層の高さによるヤマセの影響範囲の違いをより強く反映できることを示唆している。また、宮城県西部では下層雲量のスプレッドもダウンスケールにより大きくなっており、下層雲の分布の違いが気温のスプレッドの局地性を生じさせたことを示している。以上のことから、アンサンブルダウンスケールによって、全球モデルのメンバー間の差に起因する、地形の影響や雲の予報の不確実性をより適切に反映することができることが分かる。ヤマセの影響のような地域的な気象状態を予報するには、決定論的ダウンスケール予報では大きく外す可能性があり信頼度が低い予報しかできず、また、水平解像度が粗い全球アンサンブルだけでは地域性を反映したスプレッドが過小で確率的予報には不十分である。アンサンブルダウンスケールにより、より信頼度があり且つ適切に信頼性を考慮した予測情報の提供が可能になる。

さらに、中期予報にとって予測可能性のあるモードを取り出すために、EOF モードを用いたフィルタリングを導入した。第 1 EOF モードは、東北地方全体の寒暖の変動を示している(図 6a)。第 1 モードの成分のアンサンブル平均予報と観測の対応をみると、相関係数は、解像度に依存せず、予報 7 日程度まで高い相関を持っていた。このことから、事例による東北地方全体の寒暖の変動について、解像度 100 km 程度の全球モデルでも、傾向をある程度予報できていることがわかる。しかし、回帰係数に関しては、力学的ダウンスケールを行うことで、1 に近づいた。このことは、力学的ダウンスケールにより、その変動度をより適切に予測可能となることを示している。寄与率をみると、解像度依存の小さい、側面境界に支配されている第 1 モードの占める割合が 8 割以上と非常に大きく、ダウンスケールによる予報の改善には、親モデルである全球モデルによる予報の改善が不可欠である。次に、第 2 EOF モードは、東西の気温偏差パターンを示している(図 6b)。これは、ヤマセの卓越する期間に特徴的なパターンである(Takai et al. 2006、島田・岩崎 2012)。相関係数から、予報 5 日程度までの事例による変動の傾向は、ダウンスケール前からある程度予報できており、ダウンスケールの予測は側面境界に支配されていることが伺える。しかし、回帰係数から、変動の幅に関して、ダウンスケール前ではほとんど表現できていない。ダウンスケールにより初めて、ヤマセが卓越する際に特徴的な東西偏差の変動幅を適切に扱うことができるようになることを示している。第 3 EOF モードは、気温の南北偏差パターンを示している(図 6c)。南部は南からの暖気が、北部は北東からの冷氣(弱いヤマセ)が流入する日に目立つパターンである。予報 2 日目には解像度によらず、相関係数、回帰係数ともに小さくなってい

る。全球モデルによる前線の予報の精度に依存し、予報可能性の低いモードであるといえる。第4EOFモードは、内陸-沿岸偏差パターンを示している（図6d）。相関係数、回帰係数ともにダウンスケールにより1に近くなっており、予報可能性が改善するモードであり、予報可能性自体もダウンスケール後に4日程度ある。さらに高次のEOFモードについては、寄与率も各々1%以下と低く、また、予報の初期で相関係数、回帰係数ともに小さくなっており、予報可能性の低いモードであるといえる（図略）。EOF解析ベースのフィルタリングにより、ヤマセ時に特有な気温の東西偏差モードを含む5~7日程度は予測可能なモードと、高次モードを中心とした予報初期で信頼性が低くなるモードが存在することが示された。

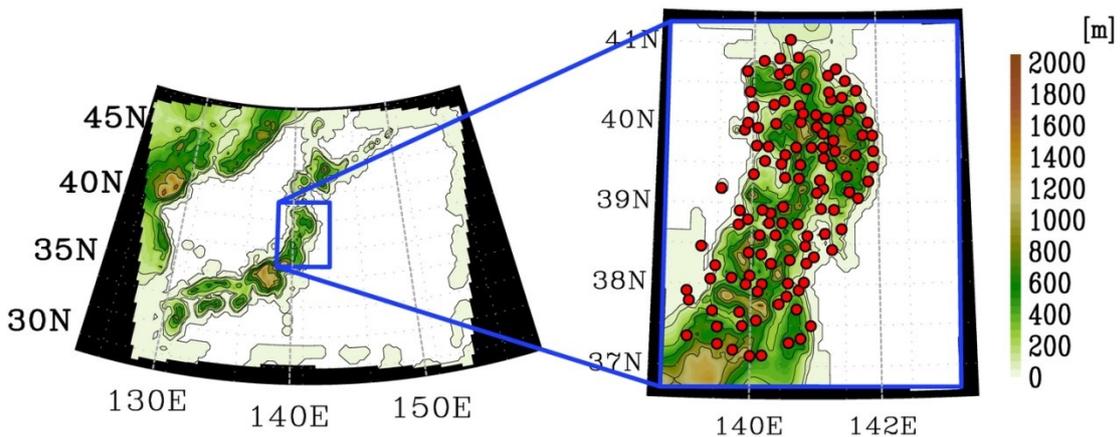


図1 計算領域

左図：水平解像度 25 km

右図：水平解像度 5km（赤点は検証に用いた AMeDAS）

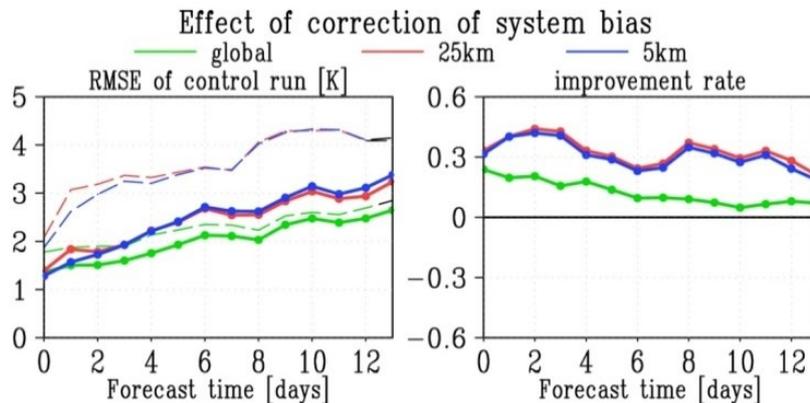


図2 解像度毎のバイアス補正の効果（決定論的予報；40事例の平均）  
 左図：地上気温のRMSE（破線がバイアス補正前、実線がバイアス補正後）  
 右図：バイアス補正による改善率

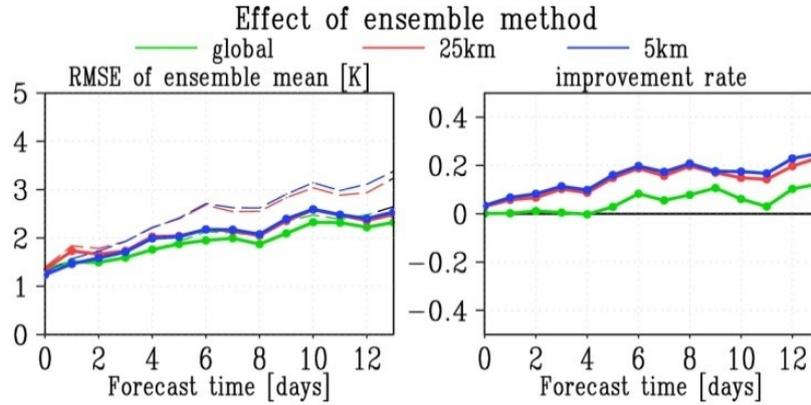


図 3 解像度毎のアンサンブル手法導入の効果 (バイアス補正後: 40 事例の平均)  
 左図: 地上気温の RMSE (破線: 単独予報、実線: アンサンブル平均)  
 右図: アンサンブル平均をとることによる改善率

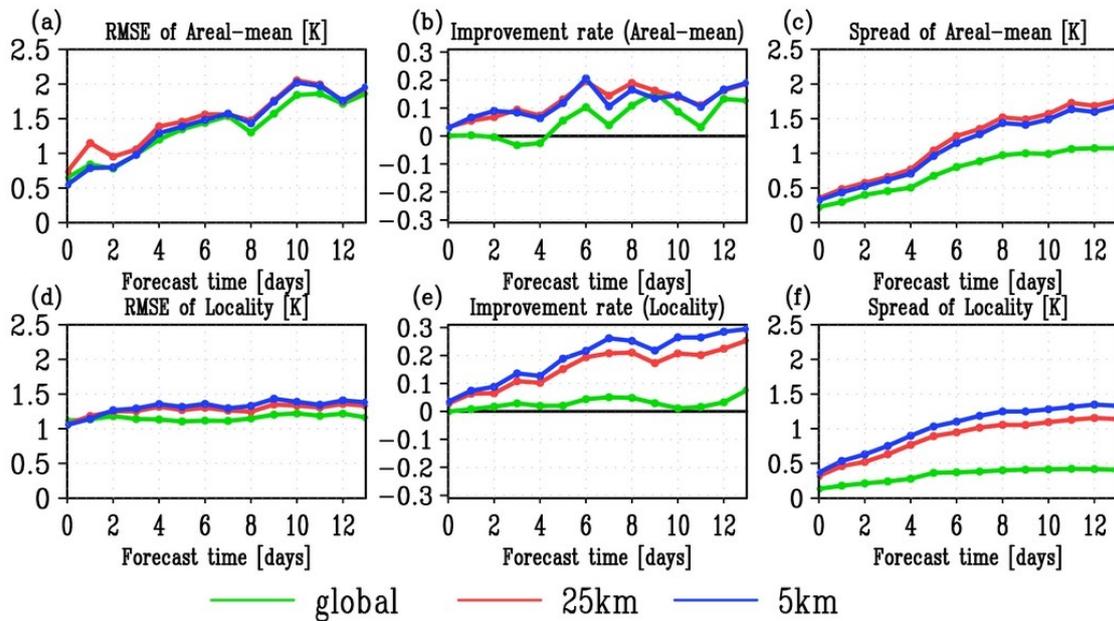


図 4 地上気温のアンサンブル平均予報の RMSE とスプレッド (40 事例の平均)  
 領域平均の (a) アンサンブル平均の RMSE、(b) アンサンブル平均予報の単独予報に対する改善率、(c) スプレッド、地域性の (d) アンサンブル平均の RMSE、(e) アンサンブル平均の領域平均の RMSE、(f) スプレッド

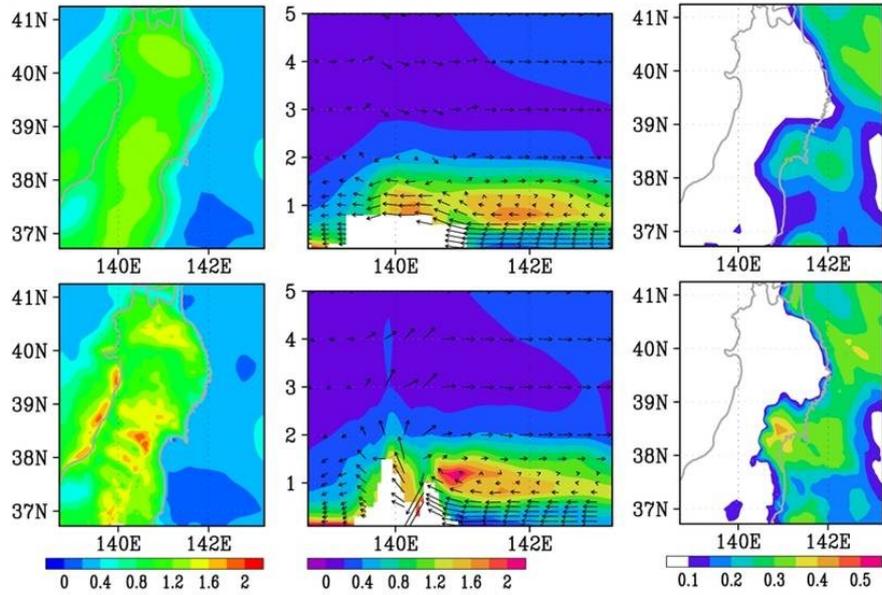


図 5 典型的なヤマセ日 (2003 年 6 月 24 日 : 予報 4 日)  
 左列 : 地上気温のスプレッド、  
 中央列 : 気温のスプレッドと風の北緯 28.3° における鉛直断面  
 右列 : 下層雲量のスプレッド。  
 上段が解像度 25 km、下段が解像度 5km。

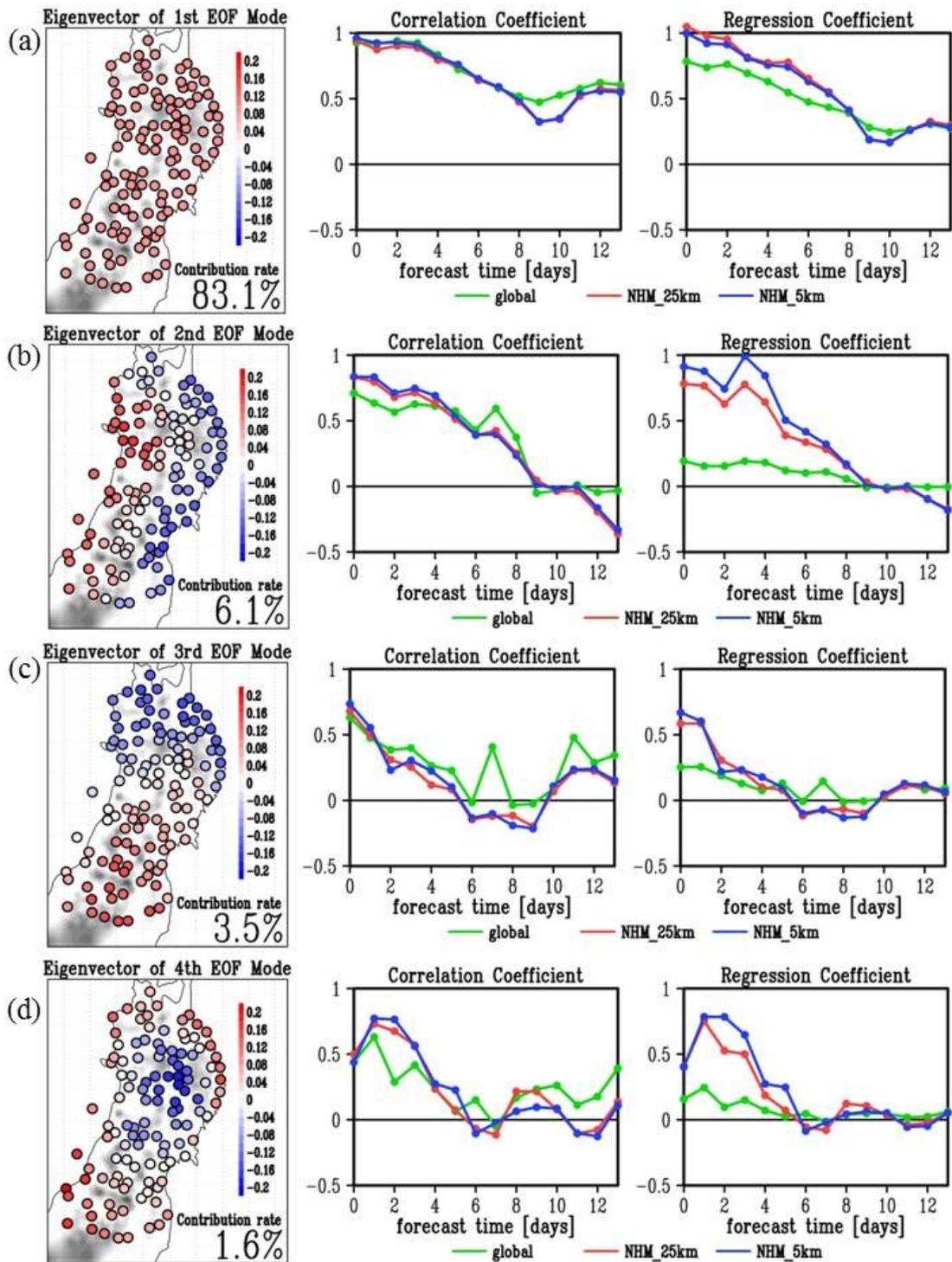


図 6 各 EOF モード(左列)における、観測の成分と予報の成分の相関係数(中央列)及び回帰係数(右列)。

上から(a)第1モード、(b)第2モード、(c)第3モード、(d)第4モード。

### 謝辞

1ヶ月アンサンブルハインドキャストデータは、気象庁気候情報課よりご提供賜りました。ここに深謝の意を表します。

c) 参考文献

- Kodama, Y., Y. Tomiya and S. Asano, 2009: Air mass transformation along trajectories of airflow and its relation to the vertical structures of the maritime atmosphere and clouds in Yamase events. *J. Met. Soc. Japan*, **87**, 665-685.
- Saito, K., J. Ishida, K. Aranami, T. Hara, T. Segawa, M. Narita, and Y. Honda, 2007: Nonhydrostatic atmospheric models and operational development at JMA. *J. Met. Soc. Japan*, **85**, 271-304.
- Takai, H., H. Kawamura, and O. Isoguchi, 2006: Characteristics of the Yamase Winds over oceans around Japan observed by the scatterometer-derived ocean surface vector winds, *J. Met. Soc. Japan*, **84**, 365-373.
- 工藤泰子, 1984: 典型的なヤマセ時のオホーツク海気団の特性 —1981年6月18~21日の事例解析—. *天気*, **31**, 411-419.
- 島田照久・岩崎俊樹, 2012: ヤマセの長期変動評価のためのインデックス, 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23年度研究成果報告書, 26-31

### 3.2.2 六ヶ所村で実施したヤマセの高層気象観測 児玉安正（弘前大学）

#### a) 要旨

陸上のヤマセの詳細な振る舞いについて、モデルの検証に役立つ観測データを得ることを目的として、青森県六ヶ所村で、ヤマセの高層観測を行った。2011年夏に続き、2012年夏もヤマセの観測に成功し、詳細なデータを得ることができた。気象庁メソ数値予報モデル(MSM)で用いられている初期値と観測データを比較した。

#### b) 本文

弘前大学では、2009年より青森県内でヤマセや冬季季節風を対象とした高層気象観測を実施している（児玉，他，2013）。2011年夏から、観測場所を六ヶ所村に移してヤマセの高層気象観測を実施している。六ヶ所村は、八甲田山地と下北丘陵の間の鞍部に位置し、太平洋と陸奥湾を結ぶ風力発電も盛んな風の通り道であり、陸上を吹き抜けるヤマセを観測するに適している。2011年に引き続き、2012年も7月21日~22日にヤマセの高層気象観測に成功し、3時間毎の放球によりヤマセの鉛直分布の詳細な情報を得ることができた。放球地点は、北緯40° 57' 15" 東経141° 19' 10" の日本原燃（株）再処理事業所構内である。

図1に7月21日9時（JST）の地上天気図を示す。オホーツク海に中心を持つオホーツク海高気圧から、リッジが東北地方の太平洋側と沿海州に沿って伸びるN字型パターンと呼ばれるヤマセ時の典型的な天気図型（工藤1984）がみられる。

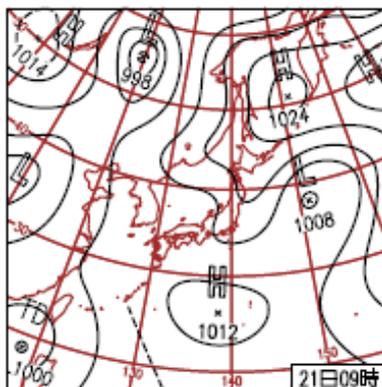


図1 観測時の天気図

本観測は、気象庁のメソ解析に利用されていないため、独立のデータとして気象庁MSM（メソスケールモデル）の検証に利用できる。そこでMSM（分解能5 km）のために3時間毎に作られている初期値（メソ解析）と3時間毎のゾンデ風速（東西成分・南北成分）を比較した（図2）。両者は良く一致しているが、東西成分では西風時にはバイアスがみられる。

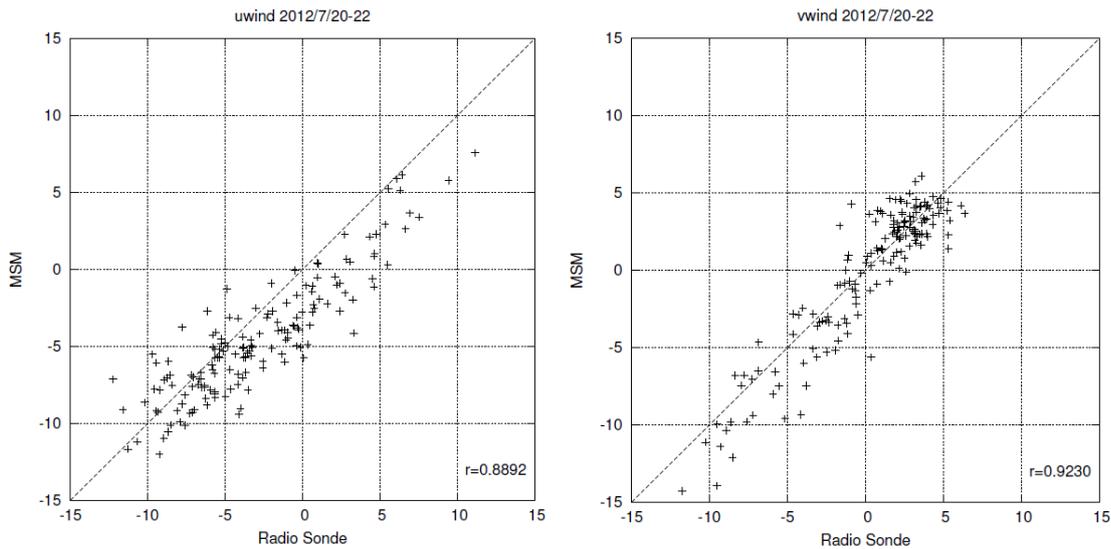


図2 MSM初期値とゾンデの風の散布図. 縦軸はMSM, 横軸がゾンデの風速. 左図は風の東西成分, 右図は南北成分. 両データの高度と時刻は完全には一致しないが, 近いデータが選ばれて比較される. 解析期間は日本時間の2012年7月21日~7月22日.

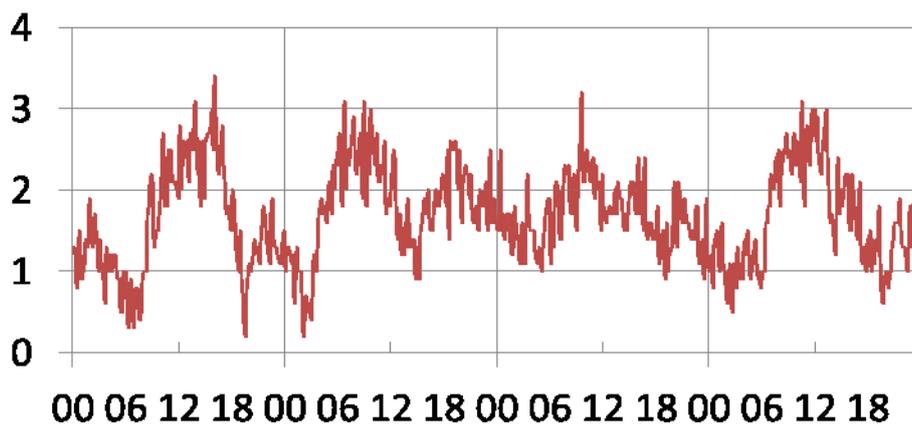


図3 アメダス六ヶ所(北緯 $40^{\circ} 53.1'$ , 東経 $141^{\circ} 16.3'$ , 標高80m)で観測された地上風速(10分毎). 期間は2012年7月19日~22日(JST).

次に, ヤマセ卓越時に六ヶ所村で観測される風の日変化について検討した. これは風向は変化しないが, 風速が日中に増加し, 夜間に減少する特徴を持ち, 2011年夏にも六ヶ所村で観測された. 図3に気象庁アメダス六ヶ所で観測された例を示す. この風速の日変化は, 高層観測やMSMでも確認され, 地上高およそ100m以下に限られる, 背の低い現象であることがわかっている.

MSMのメソ解析を用いて環境場との関係を調べた. 図4に, 7月21日の日中と夜間の地上風速の偏差と地上風流線を示す. 地上風速の日変化は, 六ヶ所に限らず, 海上を含む広域で発生している. 図5に同日の日中と夜間の海面気圧分布を示す. 青森県の太平洋側で, 気圧傾度が日中に増加することが示されており, 風の日変化との関係に興味を持たれる. ただし, 地上風速の日変化の原因は気圧傾度だけでなく, 大気境界層の安定度も関係するので, 日変化の要因について検討する必要がある. 今後も観測を継続すると共に, 本データをダウンスケールモデルの検証に生かしていきたい.

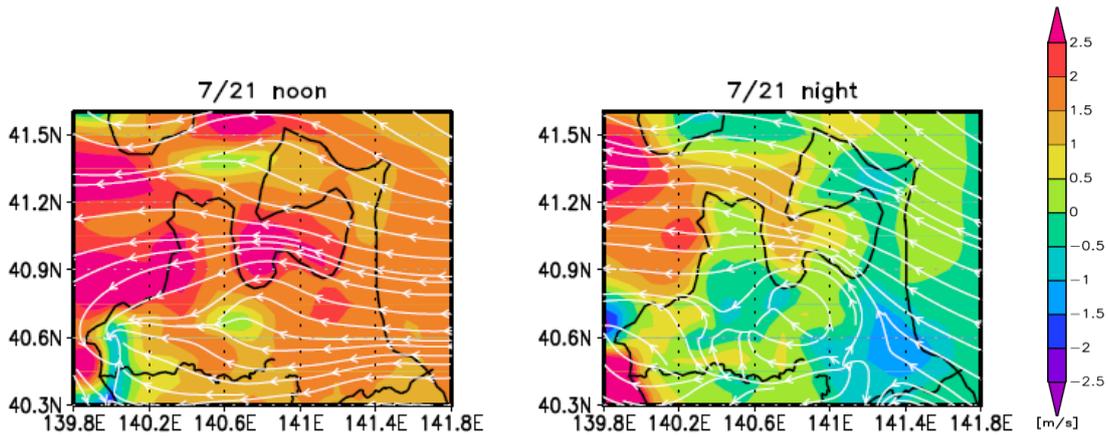


図3 MSM メソ解析データによる, 地上風速の日平均からの偏差(カラー:m/s)と地上風(流線). 左図は2012年7月21日12-14JST, 右図は同日23-25JST.

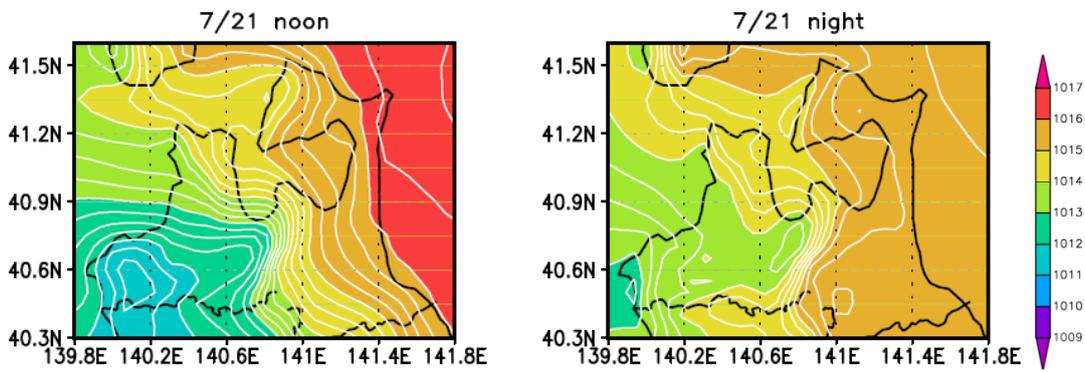


図4 図3と同じ, ただしMSMメソ解析データによる海面気圧分布を示す.

### c) 参考文献

児玉安正・佐藤悠・石田祐宣・堀内征太郎・瀬古弘・津田敏隆・橋口宏之・古本淳一・東邦昭, 2013: 青森県津軽地方で行われた冬季季節風とヤマセの高層気象観測, および気象庁非静力学モデルを用いたダウンスケール再現実験. 天気, 60(1), 11-20.

### 3.2.3 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、2011年7月30日から31日に発生したヤマセについて、局地アンサンブル変換カルマンフィルター（LETKF）をネストさせたシステムを用いてアンサンブル予報実験を行い、親 LETKF（格子間隔 15km）が東北地方の東海上に発生していた層雲を再現したこと、子 LETKF（格子間隔 1.875 km）では、奥羽山地の東側や岩手県の沿岸に沿った雲域やアメダスで観測された地上付近の気温、水平風分布を再現したことを報告した。また、より良い解析値を得るために、低軌道衛星で観測した掩蔽データの同化実験を行い、ヤマセの層雲へのインパクトについても報告している。しかし、これらの結果をよく見ると、アンサンブルメンバー間のばらつき（スプレッド）が小さく、掩蔽データのインパクトも小さいものであった。今回は、これらを改善するために行った“複数の海面水温を用いたアンサンブル実験”や“掩蔽データの観測誤差を変えた実験”について報告する。また、期待できる同化データの一つとして、掩蔽データから得られる逆転層の高度についても報告する。

#### b) 本文

##### 研究背景

‘ヤマセ’は、夏季の北日本に冷涼な気候をもたらす冷たい北東風で、長期間持続すると農産物に影響を与えるため、より正確な予報が望まれている。ヤマセについて述べる場合、季節予報等の数か月以上の問題として議論されることが多い。しかし、たとえば、数日間のリードタイムを持って正確な予報ができれば、防風柵などによりヤマセの影響を軽減することが期待できることから、ヤマセの短時間予報も重要と考えられる。本研究では、実際に発生したヤマセの事例について、LETKF をネストさせたシステムを用い、気象庁の現業データや、低軌道衛星で観測された掩蔽データ等を同化し、ヤマセによる下層の層雲や低温な東風域の広がり等を定量的に評価することを目標にしている。

##### 実験概要

本報告では、ヤマセを引き起こす北東風や地形の影響を受けた地上風の風系や気温分布などを評価するために、気象庁非静力学モデル用に構築された LETKF（Miyoshi and Aranami, 2006）を、二重にネストさせたシステムを用いることを想定している（図 1）。ネストシステムの外側の親 LETKF（格子間隔 15 km）

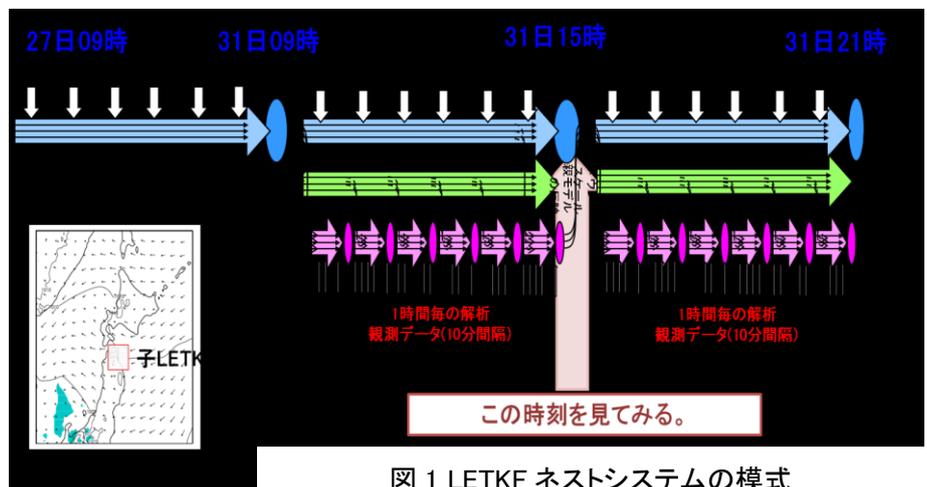


図 1 LETKF ネストシステムの模式

は、東北地方の東海上の北東風を含むメソ  $\alpha$  スケールからメソ  $\beta$  スケールを再現するために、親 LETKF 内に配置した子 LETKF (水平格子間隔は 1.875 km) は、対流スケールの降水現象や地形の影響をより正しく再現するために用いる (図 1)。ネストシステムを適用した事例は、2011 年 7 月 30 日から 31 日に発生したヤマセで、親 LETKF は、7 月 27 日 9 時から、子 LETKF は、31 日 9 時からアンサンブル予報を開始した。親 LETKF の境界値と初期シードを気象庁のメソ解析から作成し、子 LETKF の境界値や初期シードは、親 LETKF の予報値から作成した。同化データには、気象庁の現業で用いられたデータを、親 LETKF は 1 時間毎に、子 LETKF は 10 分毎に同化した。

#### アンサンブル予報結果：海面水温の影響

図 2a は、親 LETKF で再現した高度補正した高度 20m の気温と水平風、雲水積算量のアンサンブル平均とスプレッドの分布である。東北地方の東海上では、北東風が優勢で、そこでは、気温が日本海側に比べて低く、層状の雲域が広がっていた (計算領域の東端では境界条件により発生していない)。この雲は高度 0.5 km から 1.5 km にあり、雲域内の気温が周囲よりも低いという特徴を持っていた。メンバー間のばらつきであるスプレッドは、水平風は北東風域の先端、つまり、西や南に進むにしたがって次第に大きくなるものの、北東風の風上にあたる東北地方の東海上ではとても小さかった。また、気温も、東北地方の東海上で、等値線が計算領域の内側に凹んでおり、境界からの同じ距離の他点と比較すると、スプレッドがより小さい状態であったことがわかる。スプレッドが小さい原因として、親 LETKF の摂動を与えていない境界条件の他に、アンサンブルメンバーで共通の海面水温を利用していることが挙げられる。ヤマセによる下層の層雲や低温な東風域を定量的に評価するためには、スプレッドが適切な大きさを持つことが望ましい。そこで、アンサンブルメンバーの半数の海面水温を、東北大学大学院理学研究科大気海洋変動観測研究センターの外洋域新生代海面水温データに置き換えて、同じ実験を行った (図 2b)。外洋域新生代海面水温は、気象庁の海面水温に比べて東北地方の東側の水温がやや低い。外洋域新生代

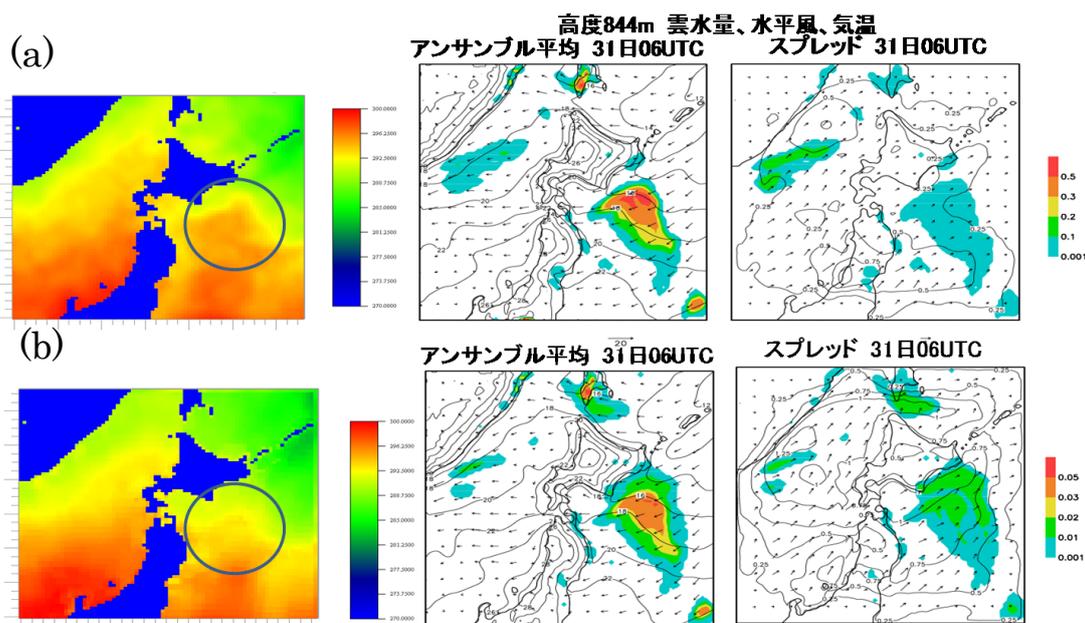


図 2 (a)気象庁の海面水温と、それを用いて解析した高度 20m の水平風と気温、雲水量のアンサンブル平均とスプレッド。(b)外洋域新生代海面水温と、メンバーの半数を外洋域新生代海面水温に置き換えて求めたアンサンブル平均とスプレッド。

海面水温を用いると、東北地方の東側で水平風や雲水量のスプレッドが大きくなり、アンサンブル平均の雲域もやや東側に広がった。この結果は、海面水温がヤマセの北東風や層雲に影響を及ぼすこと、海面水温に摂動を導入した方が望ましいことを示している。

### アンサンブル予報結果：掩蔽データの利用

東北地方の東海上の気温や湿度分布が改善できれば、ヤマセによる層雲や低温な北東風域の広がり等の予報精度の向上が期待できる。本研究では、掩蔽観測衛星である FORMOSAT-3/COSMIC (F3C) で観測された、GPS 衛星と F3C 衛星までの視線上で最も地球に近い点(タンジェント点)での屈折指数  $((\text{屈折率}-1) \times 10^{+6})$  の鉛直プロファイルに注目する。屈折指数は気温や水蒸気量の関数であり、同化によって、雲分布等の改善が期待できる。ここでは、親 LETKF を用いて屈折指数の鉛直プロファイルを同化し、得られた層雲を比較して、掩蔽データのインパクトを調べた。

図 3 は、計算領域内で観測された 7 月 28 日から 31 日までの屈折指数プロファイルを同化して得られた雲域の分布である。屈折指数の観測誤差の鉛直プロファイルは、観測値とモデルの第一推定値の差 (D 値) から算出した。屈折指数を同化すると、図の中段に示すように、特に赤い丸で示した領域で、雲分布に変化がみられている。観測誤差を 0.3 倍にすると、解析がより観測に寄るため、変化がより明瞭になっていることがわかる

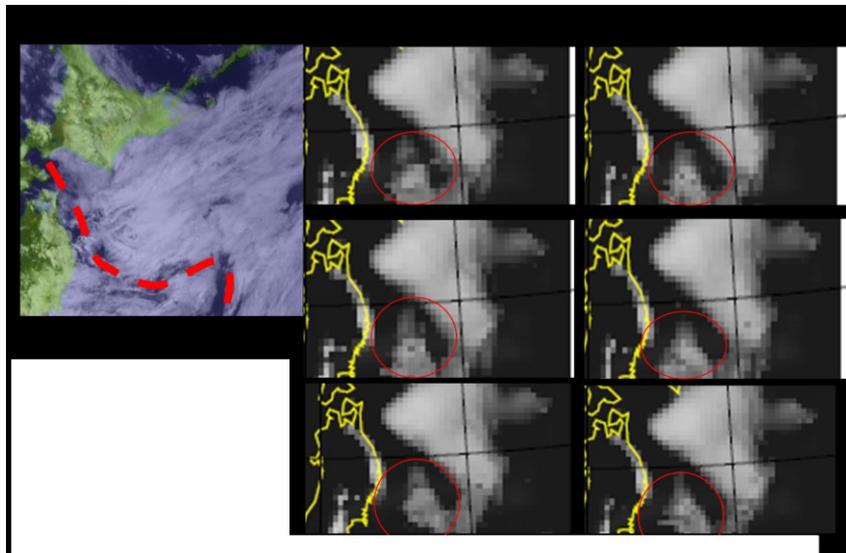


図 3 掩蔽データのインパクト。上段は現業データを同化して得たアンサンブルメンバー#000と#001の雲域。中段と下段は、D 値から求めた観測誤差をそれぞれ、1.0 倍と 0.3 倍にして掩蔽データを同化した。

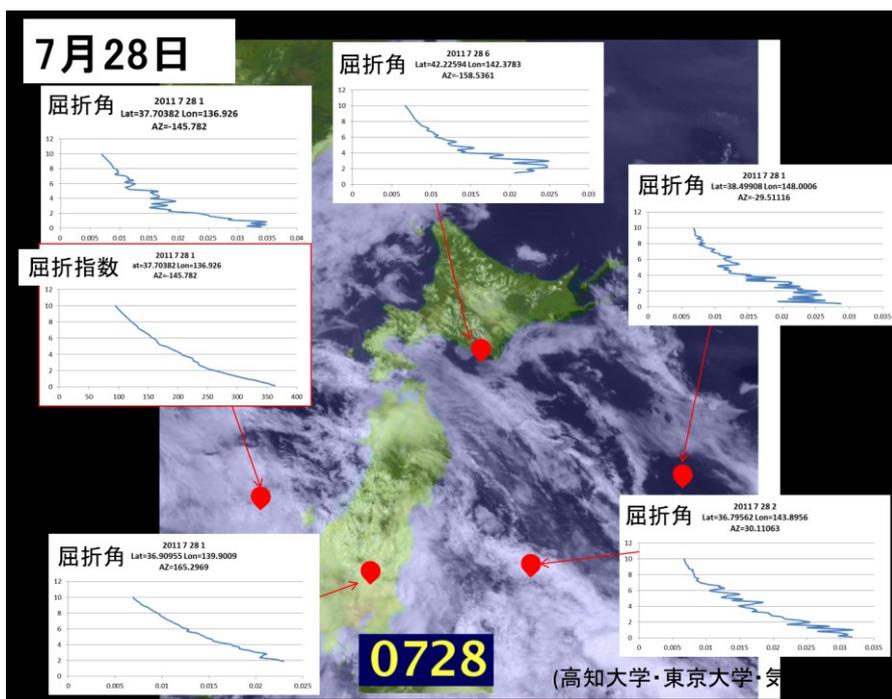


図 4 F3C 衛星で観測された 7 月 28 日の屈折指数と屈折角の鉛直プロファイル。

(図 3 下段)。しかし、全体的にインパクトは小さい。これはタンジェント点が注目する東北地方の東側の層雲周辺にないためと考えられる。

ヤマセの層雲が広がっている時には、層雲より上側では沈降による昇温、雲頂では放射冷却により、逆転層が形成されることが予想される。掩蔽観測で求められる屈折率は、強い逆転層があると誤差が生じるため、逆転層が予想される場合は、屈折率以外の情報を同化する必要がある。LETKF は、位置情報も同化することができることから、逆転層の高度の同化を考え、その第一段階として F3C 衛星で観測された 7 月 28 日から 31 日までの屈折指数と屈折角（電波が GPS 衛星から低軌道衛星に到達する間に大気によって曲がる角度）の鉛直プロファイル調べた。図 4 に示すように、屈折指数に比べて、屈折角の方が逆転層にともなう特徴的なプロファイルがより明瞭に見えている。しかし、観測された屈折角の鉛直プロファイル等の形状から逆転層の高度を決めるアルゴリズムを開発するには、7 月 28 日から 31 日までだけではデータ数が十分でないため、さらに事例を増やして検討する必要がある。

## 今後

ヤマセに伴う層雲や北東風に影響を与える海面水温について、適切な摂動の与え方を検討するとともに、より正確な解析値を得るために、掩蔽観測データ等の同化法の工夫を継続する。これらの改善について、実際に発生したヤマセの事例に適用して、インパクトを調べる。

## 謝辞

FORMOSAT-3/COSMIC の掩蔽データは、University Corporation for Atmospheric Research の COSMIC Data Analysis and Archival Center が作成したデータを、京都大学生存圏研究所から、頂きました。LETKF の海面水温に、東北大学大学院理学研究科大気海洋変動観測研究センターの外洋域新生代海面水温データを利用させていただきました。ここに記して謝意を表します。

## c) 参考文献

Miyoshi, T. and K. Aranami, 2006: Applying a four-dimensional local ensemble transform Kalman filter (4D-LETKF) to the JMA nonhydrostatic model (NHM). *SOLA*, **2**, 128-131.

### 3.2.4 データ同化を用いた側面境界の最適化手法の開発と検証

沢田雅洋、岩崎俊樹(東北大学)

#### a) 要旨

ダウンスケーリングの予測精度は計算領域が狭く、予報期間が延びるほど側面境界の精度に大きく影響する。高解像度のダウンスケーリングによる精度向上を目指し、局所アンサンブル変換カルマンフィルタ (LETKF) を用いた側面境界の最適化する手法を開発し、検証した。新しく開発した手法が期待とおりに動作するのか調べるため、ライダーを用いた観測システムシミュレーション実験を行った。海風の事例に対して、同化なし実験、初期値のみ同化した実験、側面境界の最適化した実験の3つを比較した。初期値のみ同化した場合は、観測値による修正は15分ではほぼ失われるが、側面境界を最適化した場合の60分予測の誤差は初期値のみ同化した場合の15分予測よりも小さいことが示された。側面境界の最適化はダウンスケーリングの延長予報に有効な手法と期待される。今後は、雲・降水などの湿潤過程を含む現象にも適用し、手法の有効性を調べる必要がある。

#### b) 本文

##### 研究背景・目的

冷夏の頻度などを信頼度の高い気候モデルで評価することは、将来の気候変化に備え長期的な視野を持つことが重要である。それとともに、短期的な予報精度の向上も、現在の農業・防災・生活において重要である。農業の現場では、圃場ごとにきめ細かな対応するには水平1km程度の気象情報が必要となる。このような高解像度の予報を行うには、ダウンスケーリングにより対象領域を絞った予報が計算機資源的に現実的である。しかし、計算領域が狭い場合、解像度の粗い親モデル(GCMなど)から作成される側面境界が予測限界を決める(Errico and Baumhefner 1987; Gustafsson et al. 1998)。これは側面境界から気象情報が絶えず出入りするので、初期値の影響がすぐになくなってしまいうためである。これまでの先行研究では、データ同化は主に初期値の修正に用いられているが、側面境界を積極的に修正するための研究は少ない(Kawabata et al. 2007; Gustafsson 2012)。Gustafsson (2012)では、4次元変分法に同化ウィンドウ内での側面境界も解析変数として含めることで、側面境界を修正した。風上側で強風がある場合、側面境界の修正が誤差発展を抑えるのに有効であることを述べている。この研究では、側面境界の修正は同化ウィンドウの時間内に限られるため、せいぜい数時間しか修正の効果は期待できない。そこで、本研究ではデータ同化による側面境界の修正を同化ウィンドウの幅を超えて適用するスキームを提案し、側面境界の最適化システムを構築する。そして本システムが延長予報にどの程度有効なのかを調べる。

ここでは、同化スキームとして、局所アンサンブル変換カルマンフィルタ (LETKF、Miyoshi and Kunii 2012) を使用する。LETKF を狭領域に用いる際の問題点として、主に2点あげられる。1つは側面境界での摂動の与え方で、もう1つは側面境界の修正方法である。側面境界の摂動の問題とは、狭領域の場合、初期値に摂動を与えても擾乱は発達せず、アンサンブルスプレッドが広がらず、同化によって解析を行っても観測情報を取り込めなくなるということである。修正方法の問題とは、LETKF は予測値の側面境界を修正する場合、背景誤差共分散を何らかの方法(仮定)で作成し、現在の観測情報から未来(予測値)の側面境界を修正する必要がある点である。

### 側面境界の最適化手法

図 1 に側面境界の最適化 (lateral boundary optimization, LBO) がない場合とある場合の模式図を示す。初期値のみを同化した場合、予報時間が長くなるにつれ各予報は側面境界に近づき、観測情報は失われる。側面境界を最適化した場合、予報が側面境界に近づいても側面境界の誤差が小さくなっていけば、予報誤差の成長は抑えられる。

以下に、本研究で提案した具体的な側面境界の最適化方法について記述する。まず、LETKF ではアンサンブル平均の解析方程式は

$$\bar{x}_i^a = \bar{x}_i^f + \delta \mathbf{X}_i^f \tilde{\mathbf{P}}_i^a (\mathbf{H} \delta \mathbf{X}_i^f)^T \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{y}_i^o - \overline{H(x_i^f)}), \quad (1)$$

となる (Miyoshi 2010)。 $x$  はモデル変数、 $\delta \mathbf{X}$  はアンサンブル摂動行列、 $\tilde{\mathbf{P}}_i^a$  と  $\mathbf{R}$  は解析誤差共分散行列と観測誤差共分散行列。 $H$  は観測演算子、 $\mathbf{H}$  はその接線形、 $\mathbf{y}_i^o$  は観測値である。上線はアンサンブル平均、添え字  $a$  と  $f$  は解析と予報、を添え字  $i$  は時間を表す。式 (1) の右辺第 2 項は解析インクリメントである。全予報期間に対して側面境界のアンサンブル平均を修正するため、 $\delta \mathbf{X}_i^f$  以外を一定と仮定する。解析方程式は以下のようにかける。

$$\bar{x}_{i+n}^a = \bar{x}_{i+n}^f + \delta \mathbf{X}_{i+n}^f \tilde{\mathbf{P}}_i^a (\mathbf{H} \delta \mathbf{X}_i^f)^T \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{y}_i^o - \overline{H(x_i^f)}). \quad (2)$$

$n$  は予報時間を表す。式 (2) は  $n=0$  のとき、式 (1) と等価である。ここではアンサンブル摂動は修正せず、アンサンブル平均のみ修正する。LETKF のアンサンブル変換行列を用いないのは、アンサンブルスプレッドが徐々に小さくなり、同化による修正がかからなくなるためである。また、背景誤差共分散行列を一定という仮定は、flow dependent な性質を失うことになるかもしれない。これらは今後の課題である。

### 数値モデル・データ同化システムの概要と実験設定

本研究では気象庁・気象研究所の非静力学モデル (JMA-NHM) を使用した。実観測データの同化に取り組む前に境界修正の最適化が正常に動作するか検証するため、ドップラーライダーデータを想定した観測システムシミュレーション実験 (OSSE) を行う (図 2)。ライダーは局地循環の 3 次元構造を高時空間分解能で捉えるのに強力な測器であり、晴天域の風を捉えることができ (Ishii et al 2007, Iwai et al 2008)、羽田空港や成田空港にはすでに導入されている (山本 2009)。OSSE では、真値 (TRUE)、疑似観測値、予報値を数値モデルによって作成することで、観測システムや同化スキームの評価をすることができる。真値はメソ客観解析値 (10km) から 2km、0.4km へとダウンスケーリングした結果を用いる。この真値から、ドップラーライダー観測を想定した動径風を作成し、それに標準偏差が 1.0m/s の摂動を加えたものを観測値とする。観測データは、ライダー設置点から半径 10km、高度 2km 内で、動径方向に 55 点 (360m から 10080m まで 180m 間隔)、方位角方向に 20 点 (18 度間隔)、仰角に 20 点 (1°, 2°, 4°, 6°, 8°, 10°, 12°, 14°, 17°, 20°, 25°, 30°, 35°, 40°, 45°, 50°, 55°, 60°, 70°, 80°) に与えた (図 3)。予報実験の初期値・境界値には、気象庁の全球週間アンサンブル予報 11 メンバー (コントロールランと 10 個の摂動ラン) を用いる。1.25 度から 12km、2km、0.4km とダウンスケーリングする。側面境界の摂動は、全球週間アンサンブル予報の摂動ランを 2km までダウンスケールしたものを使用する。境界摂動は、コントロールからの差分を反転させて、新たに 10 メンバーを作成し、計 21

メンバーのアンサンブル予報を行う。対象とした事例は2007年6月16日14-18時の4時間で、海風前線の通過時刻が17時頃で、予報誤差の大きい事例を選んだ。

データ同化スキームはMiyoshi and Kunii (2012)で使用されたLETKFとほぼ同様のものである。ここでは、誤差共分散膨張には、multiplicative inflationで0.1を用い、水平局所化は2km、鉛直局所化は500mとした。同化ウィンドウは15分、タイムスロットは1つとし、現時刻の観測値のみを同化した。本研究では主に3つの実験を行った。1つは同化なしの実験(NOAS)、2つめは初期値のみ同化した解析-予報サイクルの実験(AS)、3つめは側面境界を最適化した解析-予報サイクルの実験(ASLB)となる。これらを比較することで、初期値の同化、側面境界の最適化の効果を調べる。

### 予報実験の結果

#### (1) 同化の有無による構造の違い

ライダーデータの同化が予報を改善するのか調べるため、図4に再現された東西風の水平分布を上からTRUE, NOAS, AS, ASLBの順に示す。TRUEでは、海風前線が仙台空港を通過前(17時前)は北西風が卓越している。同化なしのNOASは、海風がすでに内陸に侵入している。初期値のみ同化したASでは、海風の侵入のタイミングはTRUEに近いが、側面付近で東風が過剰に再現されている。ASLBはASで見られた側面での過剰な東風は見られず、海風の侵入するタイミングもTRUEと一致している。

再現された海風の鉛直構造を調べるため、計算領域中央(仙台空港)を通る東西風の高度-経度断面図を示す(図5)。NOASを見ると、高度500mより上では西風がみられるものの、500mより下層では東風がすでに仙台空港を通り過ぎている。ASとASLBでは海風前線の構造がTRUEによく一致していることがわかる。

#### (2) 誤差の空間分布・時間変化

誤差の空間分布を見るため、下層1km以下で鉛直平均したRMSEを示す(図6)。RMSEは真値を正解として計算した。NOASでは計算領域東側で10m/sのRMSEに達している。ASの解析値を見ると、計算領域中心付近で大きくRMSEが減少しており、ライダー観測値が密にある部分での改善が顕著にわかる。そこからの15分予報である第一推定値では、計算領域中心付近でのRMSEはNOASに比べて2-6m/s小さいもの、側面境界付近ではRMSEの差は2m/s以下であった。特に上流側(北西側)でRMSEは大きくなっている部分が見られた。これは側面から誤差の大きい流れが入り、第一推定値の誤差が大きくなるためである。ASLBの解析値は、計算領域中心付近だけではなく、側面付近でもASに比べてRMSEが小さいことがわかる。ASLBの第一推定値を見るとその傾向はより顕著に示される。これは側面から流入する風が側面境界の最適化によって改善されたため、側面での誤差成長が抑えられたことを示す。言い換えると、側面境界の最適化によって観測情報を未来にまで有効に利用できることを示唆する。

次に誤差の時間発展の様子を見るため、解析-予報サイクルでの風のRMSEを示す(図7a)。RMSEは下層1kmで東西風と南北風それぞれについてのRMSEを計算し、その大きさを領域平均した値である。NOASはRMSEが8m/sを超え、徐々に小さくなり6m/sになる。ASの解析値はRMSEが約4m/sまで減少するが、それを初期値として15分予報を行う(第一推定値)とRMSEが急速に大きくなり、6-7m/sに達することがわかる。ASLBは解析値のRMSEが3-4m/sでASとの差は大きくな

いが、15分予報のRMSEはほとんど増加せず、ほとんどの時刻で3-4 m/sの誤差となる。これは側面境界の最適化が誤差成長するのを抑制していることを示す。

側面境界の最適化はどれくらいの時間まで有効か調べるため、各解析時刻から1時間予報を行い、そのRMSEを示す(図7b)。ASを見ると、15分予報で急速にRMSEが増加し、30分後にはほとんどがNOASと同程度のRMSEまでに増加する。45分以降はNOASよりRMSEが大きくなるが、これはデータ同化によって修正された場が側面境界と徐々にかみ合わなくなったためと考えられる。ASLBは30分後もRMSEが急増加することなく、60分後でもNOASよりRMSEが小さいことがわかる。つまり、本研究で提案した側面境界の最適化手法は、OSSEの枠組みにおいて延長予報に有効であることが示された。

#### 次年度に向けての課題

本年は海風前線の再現性向上を目的として、ドップラーライダーによる動径風を想定した同化実験を行い、主に風場の修正を行った。ヤマセの予報延長には、下層雲などの湿潤過程の初期値化が重要と考えられる。そのため、衛星による輝度温度データの活用やGPSによる視線遅延量(鉛直積算水蒸気量)などの同化によって、雲・降水・水蒸気場のより精度の高い初期場を作成するシステムを開発していく予定である。また、本年はOSSEで側面境界の最適化の有効性を示しただけなので、現実場でどの程度有効なのか研究を拡張することも重要である。

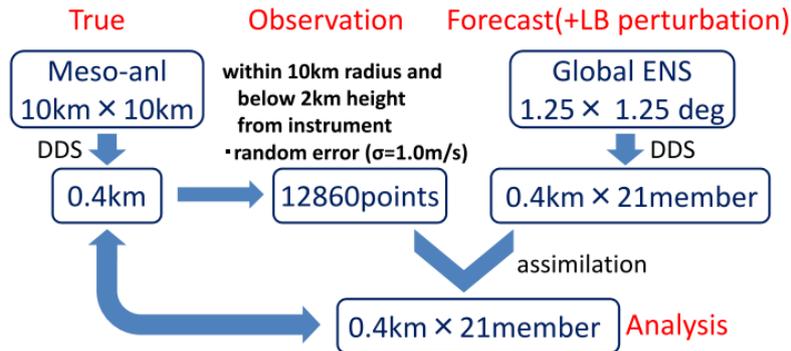


図1 OSSEの模式図。真値、疑似観測値の作成の流れ、及び全球週間アンサンブル(ENS)からの予報値作成の流れを示す。メソ解析からダウンスケールし真値を作成し、その真値から疑似観測値を作成する。対応する予報実験を気象庁の全球週間アンサンブル予報からダウンスケールして作成する。

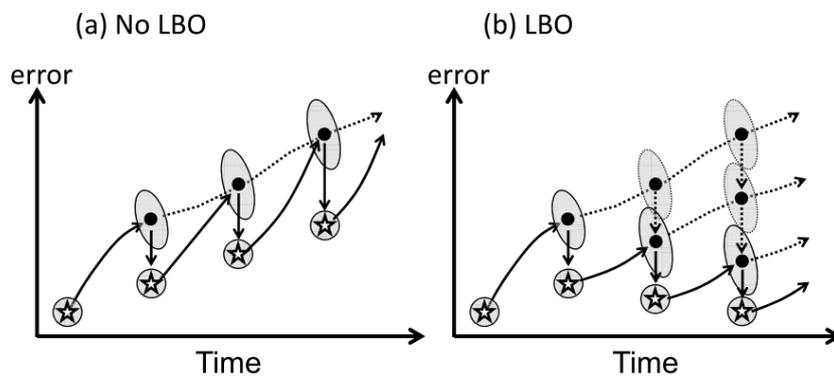


図2 左図：初期値のみ同化した場合、右図：初期値と側面境界を同化した場合の模式図。x軸は予報時間、y軸は予報誤差を表す。☆は初期値、●は予報値（第一推定値）、実線の矢印はアンサンブル平均の予報トラジェクトリ、点線の矢印は側面境界のアンサンブル平均の予報トラジェクトリ、灰色の楕円はアンサンブルスプレッドを表す。

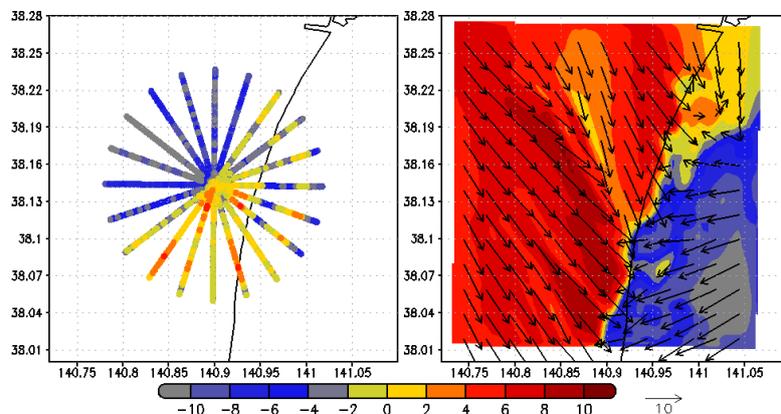


図3 左図：ライダーによる動径風の疑似観測値。暖色系は遠ざかる風、寒色系は近づく風。右図：真値の東西風の水平分布の例。暖色系は西風、寒色系は東風。

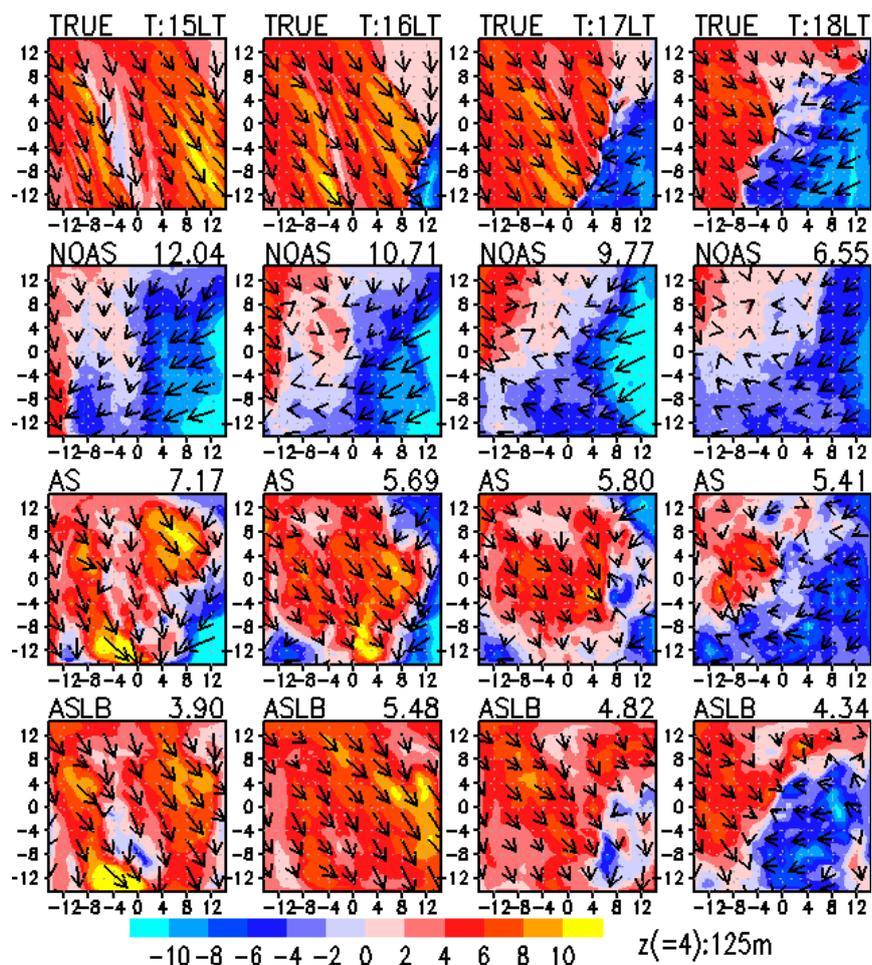


図4 上から真値、同化なし、初期値のみ同化、側面境界を最適化した実験のアンサンブル平均した東西風分布 ( $z=125\text{m}$ )。左から予報 1, 2, 3, 4 時間目を示す。暖色系は西風、寒色系は東風。各パネル上の数字は、真値との RMS。

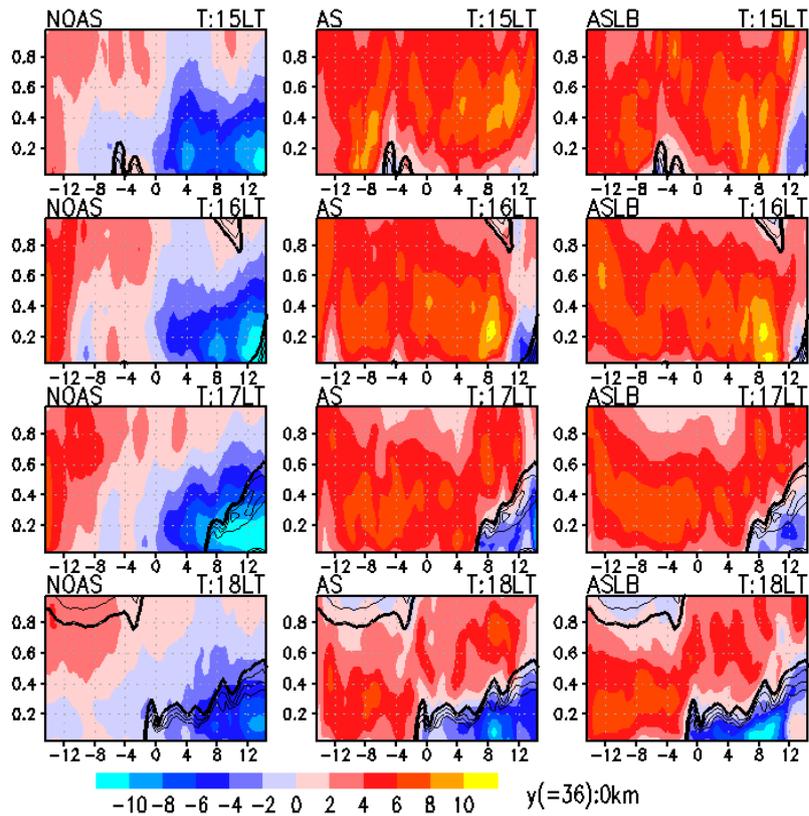


図5 左から同化なし、初期値のみ同化、側面境界を最適化した実験の東西風の鉛直構造。等値線は真値の東西風（間隔は3m/s、太い実線は0m/s）、暖色系は西風、寒色系は東風を表す。

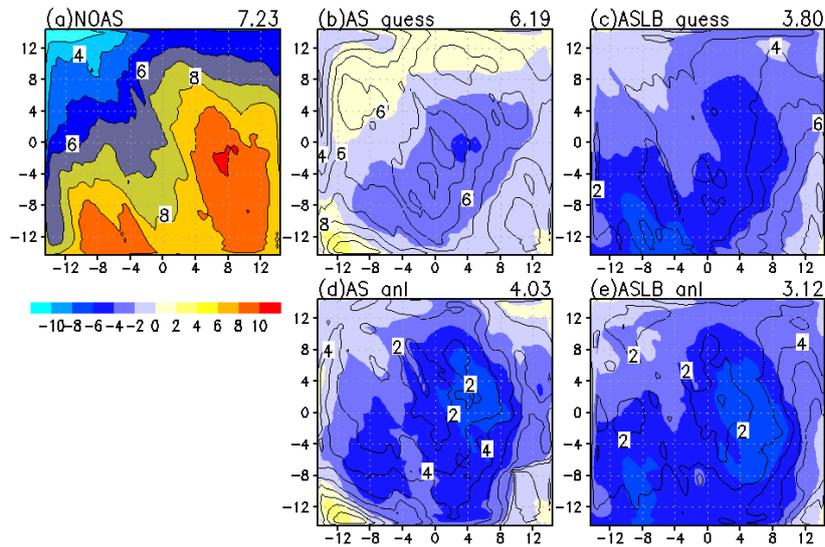


図6 風速のRMSEを地上から高度1kmまでを鉛直平均した図。上図は予測値（第一推定値）、下図は解析値。左からNOAS、AS、ASLB。ASとASLBはNOASからの差。値が小さい(青色)ほどRMSEの現象を表す。

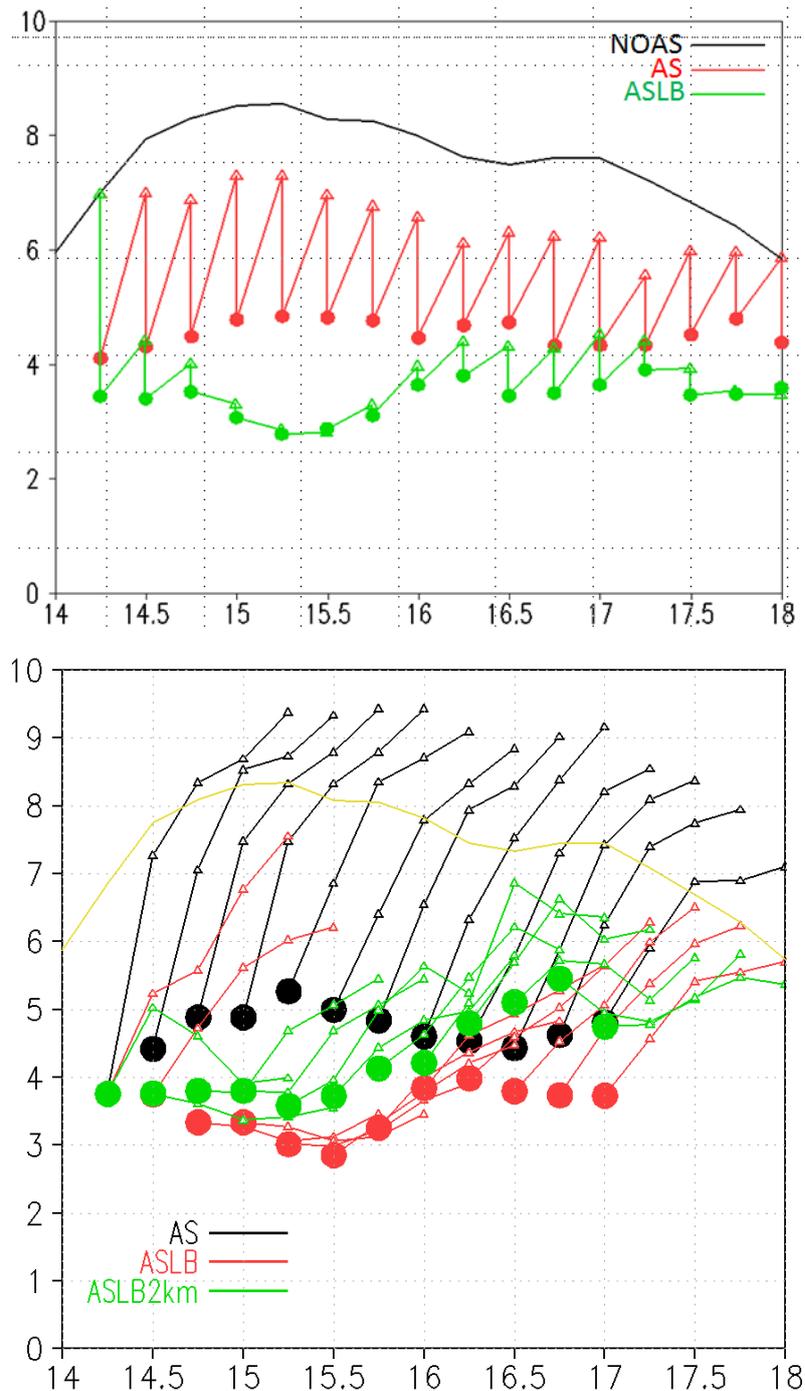


図7 高度 1km 以下で領域平均した風の RMSE の時系列。上図：解析-予報サイクル実験で黒線：NOAS、赤線：AS、緑線：ASLB。下図：1 時間予報実験。横軸が時刻、縦軸が RMSE。黄色線：NOAS、黒線：AS、赤線：ASLB。

c) 参考文献

境剛志, 局地気象予測システムによる仙台空港周辺の海風に関する数値的研究, 東北大学大学院理学研究科修士論文, 2009 年  
 山本健太郎, 2009: 空港気象ドップラーライダーによる非降水低層ウィンドシアアの観測, 天気, 56, 848-854

- Errico, R., D. Baumhefner, 1987: Predictability Experiments Using a High-Resolution Limited-Area Model. *Mon. Wea. Rev.*, **115**, 488-504.
- Gustafsson, N., 2012: Control of lateral boundary conditions in four-dimensional variational data assimilation for a limited area model. *Tellus*, **64**, 17518.
- Gustafsson, N., E. Källén, and S. Thorsteinsson, 1998: Sensitivity of forecast errors to initial and lateral boundary conditions. *Tellus*, **50**, 167-185.
- Ishii, S., K. Sasaki, K. Mizutani, T. Aoki, T. Itabe, D. Matsushima, W. Sha, A. Noda, M. Sawada, M. Ujiie, Y. Matsuura, and T. Iwasaki, 2007: Temporal evolution and spatial structure of the local easterly wind “Kiyokawa-Dashi” in Japan Part I: Coherent Doppler lidar observations. *J. Meteor. Soc. Japan.*, **85**, 797-813
- Iwai, H., S. Ishii, N. Tsunematsu, K. Mizutani, Y. Murayama, T. Itabe, I. Yamada, N. Matayoshi, D. Matsushima, W. Sha, T. Yamazaki and T. Iwasaki, 2008: Dual-doppler lidar observation of horizontal rolls and near-surface streaks. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, 1-5
- Kawabata, T., H. Seko, K. Saito, T. Kuroda, K. Tamiya, T. Tsuyuki, Y. Honda, and Y. Wakazuki, 2007: An assimilation and forecasting experiment of the nerima heavy rainfall with a cloud-resolving nonhydrostatic 4-dimensional variational data assimilation system. *J. Meteor. Soc. Japan*, **85**, 255-276.
- Miyoshi, T. 2010. NHM-LETKF. *Tech. Rep. MRI* **62**, 159-163.
- Miyoshi, T. & Kunii, M., 2012: The Local Ensemble Transform Kalman Filter with the Weather Research and Forecasting Model: Experiments with Real Observations, *Pure and Appl.*, **169**, 321-333.

### 3.2.5 アンサンブル予測実験結果を用いた葉いもち病2週間予測の試行

## a) 要旨

アンサンブルハインドキャスト予測実験結果を用いて、気象予測データの農業モデルへの適用を試みた。農業モデルには、気象4要素を用いる葉いもち病発生予察モデル（BLASTAM、越水、1988；林・越水、1988）を使用した。

アンサンブル予測結果を5kmメッシュに力学的ダウンスケールした気象データをBLASTAMに適用し、葉いもち病の2週間先までの予測計算を行なった。アメダス観測値に基づいた結果との比較や、アンサンブル計算と再解析データとの気圧配置の比較から、BLASTAMの精度はアンサンブル予測自体の精度に依存することを確認できた。予測実験での総観場が実際と整合する場合には、力学的ダウンスケールを経たデータによる感染好適条件の分布も精度よく表現されていた。また、BLASTAMについては、アンサンブル平均値を用いるより、アンサンブルメンバーによる確率情報として示すほうが妥当であることが示された。

## b) 本文

### 研究の方法

近年の東北地方での代表的な冷夏年および暑夏年である2003、2004年夏季を対象として行われた1ヶ月アンサンブルハインドキャスト実験結果を使用した。対象期間は2003、2004年夏季の、それぞれ6/20、6/30、7/10、7/20を初期値とする2週間×4期間とした。予測実験の結果を、力学的ダウンスケールによって空間解像度を $1.25^\circ$ （約110km）間隔から5km間隔に高めたものを入力値とし、BLASTAMで葉いもち病の感染好適条件を求めた。9メンバーの予測結果それぞれを用いてBLASTAMを計算し、メッシュ毎に9メンバーの感染好適条件および準感染好適条件の出現割合を求め、葉いもち発生確率とした<sup>※</sup>（図1）。

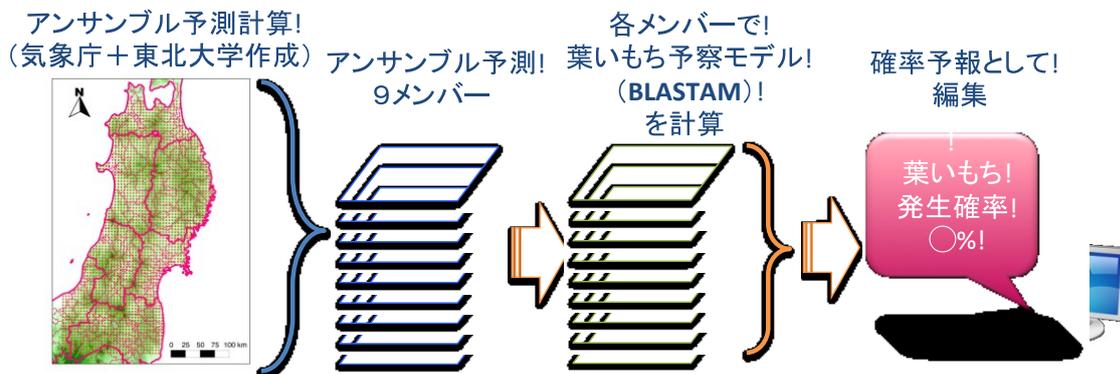


図1 アンサンブル予測結果による葉いもち病発生確率予測の概念図

※) 本解析ではBLASTAMの結果が1, 2, 3, 4, 10のいずれかであれば「感染あり」とした。

## 結果

計算対象とした2003年、2004年の各4期間のうち、対照的な事例である2003年6/20、6/30を初期値とする期間を例に結果を記載する。

(1) 2003年6/20初期値による結果では、感染好適条件の出現確率の分布が、アメダス観測値の統計的ダウンスケールによる1kmメッシュ気象データを用いて求めた感染好適条件の分布と

期間を通じておおむね一致していた（例として、図2-a）。それに対して、2003年6/30を初期値とした期間は、やませの吹走が続き予測自体が大きく外れたため、感染好適の分布も計算によるものと観測値によるものとは大きく異なる場合が多かった（例として、図2-b）。

(a) 2003年6/20初期値、11日目の例

(b) 2003年6/30初期値、8日目の例

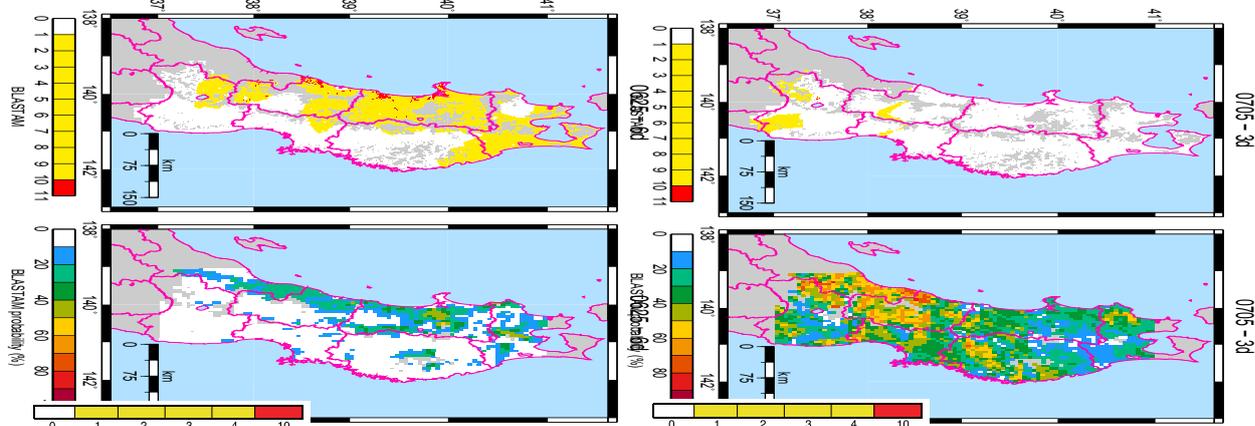
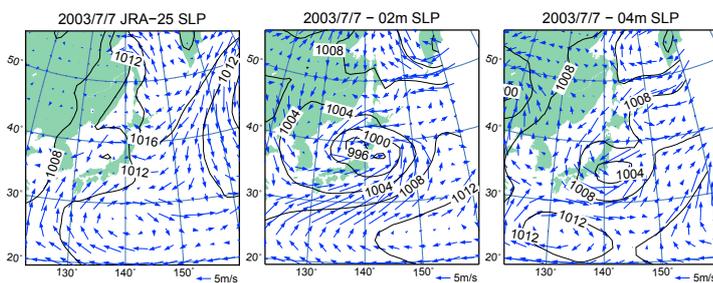


図2 アメダス観測値により求めた感染好適条件とアンサンブル予測結果による感染好適条件の出現確率の分布  
いずれも左図がアメダス観測値による感染好適条件を、右図がアンサンブル予測結果による感染好適条件の出現確率を示す。

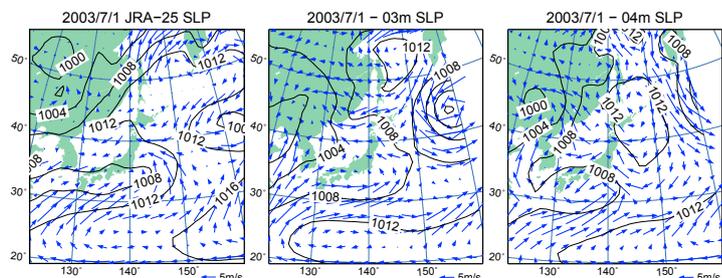
(2) 次に、力学的ダウンスケールを施す前のアンサンブル予測計算結果について、気圧配置の再現性を検討した。図3は、図2の2事例の当日の気圧配置を、再解析データ(長期再解析データ JRA-25)とアンサンブル計算結果によってそれぞれ示したものである。2003年6/20初期値による図3-aでは、再解析データとアンサンブルメンバーとで類似した気圧配置型であり、東北地方太平洋側での東寄りの風系となるなど一致している。その一方、2003年6/30初期値による図3-bでは、再解析データでは北日本付近では高気圧性の循環となっているのに対し、アンサンブルメンバーでは多くに低気圧性の循環が現れるなど、大きく異なる気圧配置であった。

(a) 2003年6/20初期値、11日目の例



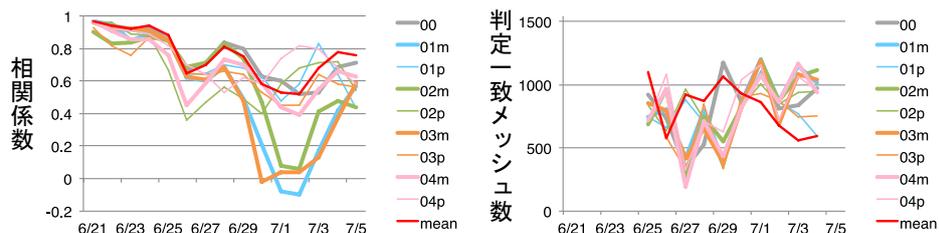
b) 2003年6/30初期値、7日目の例

図3 再解析データとアンサンブル予測実験による気圧配置の比較  
a, bともに、左図が再解析データによるもの、中・右図がアンサンブルメンバー(9メンバーより2つを抜粋)によるものを示す。



(3) 続いて、ダウンスケールを実施する前の気圧配置と、ダウンスケール後のデータにより計算した BLASTAM の判定とについて、それぞれの空間分布を実際のデータに基づくものと比較した。気圧配置については再解析データと各アンサンブルメンバーとの空間相関係数を求め、空間分布の類似度とした。BLASTAM については、アメダス観測値の統計的ダウンスケールによる 1km メッシュデータから求めた BLASTAM と比較し、アンサンブル各メンバーによる感染好適条件の判定が一致したメッシュ数を求め、それぞれの空間分布の類似度の指標とした。両者の期間中の推移を図 4 に示す。

(a) 2003 年 6/20 初期値



(b) 2003 年 6/30 初期値

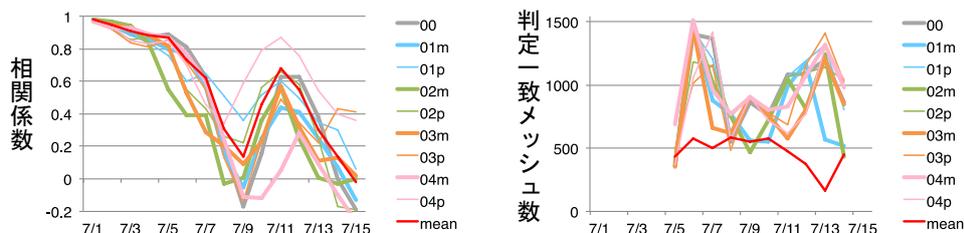


図 4 予測結果による気圧配置型および BLASTAM の観測値との一致度の推移  
 左図：再解析データとの気圧配置の空間相関係数  
 右図：アメダス観測地による BLASTAM と判定の一致したメッシュ数  
 赤線がアンサンブル平均値による結果を、その他の線は各アンサンブルメンバーによる結果を示す。  
 ※ BLASTAM の計算結果は期間の 5 日目から出力される。

2003 年 6/20 初期値による結果 (図 4-a) では、2 / 3 ほどのメンバーが再解析データと 0.6 程度の相関係数を保って推移しており、期間を通じて気圧配置型の再現性が比較的好かったことを示していた。これらのアンサンブルメンバーにより求めた BLASTAM の判定結果は、期間中の変動はあるものの、3 割から 6 割程度の地点で観測値による感染好適条件の分布と一致していた。その一方で、2003 年 6/30 初期値 (図 4-b) では、期間の初盤から中盤にかけて気圧配置の相関係数が著しく低下しており、多くのメンバーで気圧配置が再現されていなかった。BLASTAM の分布も、気圧配置の相関が低下した時期に観測値との一致度が低下していた。一方、期間の後半にかけては、気圧配置と BLASTAM との双方で観測値と近い分布を示していた。期間の後半については、前半からの総観場の推移過程そのものは正確ではないものの、気圧配置型の再現性が高い時期には、BLASTAM の結果も観測値によるものと近い空間分布となることがわかった。

## 考察

アメダス観測値による結果との比較やダウンスケール前の気圧配置型の再現性の検討から、アンサンブル予測実験結果による BLASTAM の判定は、元となるアンサンブル予測の精度に依存することがわかった。あわせて、総観場が正しく予測されている場合には、力学的ダウンスケール後のデータによる BLASTAM の結果も、空間的に精度よく表現されることを確認できた。

一方、個々のアンサンブルメンバーの値を平均したアンサンブル平均値を用いた場合には、気圧配置では各メンバーと同様の経過を示したものの、BLASTAM の結果は各メンバーとは異なり、予測精度は著しく低かった (図 4)。このことは、個々のメンバーの降水量など気象要素の値が平均されることが、BLASTAM での葉面の濡れの継続時間の判定に影響していることが考えられた。BLASTAM を用いた葉いもち病の発生予測については、アンサンブル平均値をそのまま用いるよりも、確率予報の形で提供するほうがより実用的である可能性が示唆された。

次年度は、対象年を増やして引き続き BLASTAM に対するダウンスケールアンサンブル予測結果の適用について検討するとともに、他の農業モデルも加えて試行する予定である。

## c) 参考文献

越水幸男(1988):アメダス資料による葉いもち発生予察法. 東北農業試験場報告, No. 78, 67-121.

林 孝・越水幸男 (1988): 葉いもち発生予察のコンピュータプログラム (BLASTAM) の開発.  
東北農試研究報告, No. 78, 123-138.

## 謝辞

本研究には、気象庁気候情報課によるアンサンブルハインドキャスト実験結果に、東北大学流体地球物理学講座にて力学的ダウンスケールを実施したものを使用しました。

### 3.2.6 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・プリマ オキ ディッキ(岩手県立大学)

#### a) 要旨

平成 23 年度に行っ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結果をもとに、ダウンスケール予測農業情報をより有効に発信できるように高度化した。

具体的には、水稻気象被害予測システムにおいて、東北農業研究センターと気象庁の協力のもと、平成 23 年度に試行した 2 週目予測の、平均気温の 7 日移動平均および低温確率 (20℃以下)・高温確率 (27℃以上) のデータを、他の予測農業情報と統合しユーザが理解しやすい情報として発信できるようにした。2 週目予測の平均気温の 7 日移動平均については、生育予測で得られる生育ステージと連動させた。また、2 週目予測の低温・高温確率については、それぞれの平年の出現確率を提示して平年の出現確率と比較できるようにし、単独および栽培管理の 1 週目予測と合わせた警戒情報の発信ができるようにした。そして、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。本調査は、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。高度化した 2 週目予測は、平成 23 年度と同様に試行として情報提供し調査した。調査結果から 2 週目予測について、肯定的な回答が平成 23 年度に比べ増加したことから、高度化により有効に発信できたことが分かった。また、マルチ解像度グリッドデータ配信システムについても、平成 23 年度に引き続き、実稼動に必要な地図データを Web 上で可視化、解析することのできるサーバシステムの開発を行った。

#### b) 本文

平成 23 年度に行っ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結果をもとに、ダウンスケール予測農業情報をより有効に発信できるように高度化した。具体的には、水稻気象被害予測システムにおいて、東北農業研究センターと気象庁の協力のもと、平成 23 年度に試行した 2 週目予測の、平均気温の 7 日移動平均および低温確率 (20℃以下)・高温確率 (27℃以上) のデータを、他の予測農業情報と統合しユーザが理解しやすい情報として発信できるようにした (図 1~4)。

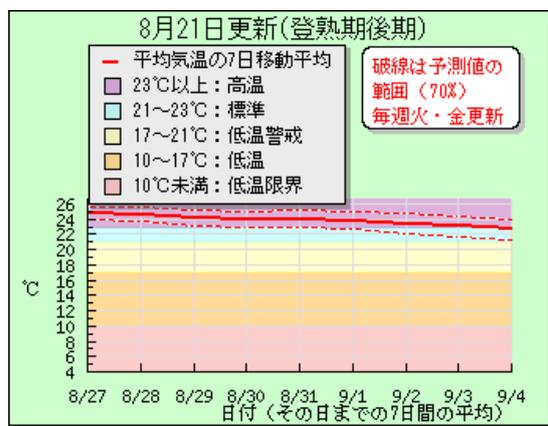


図 1 2 週目予測の 7 日移動平均

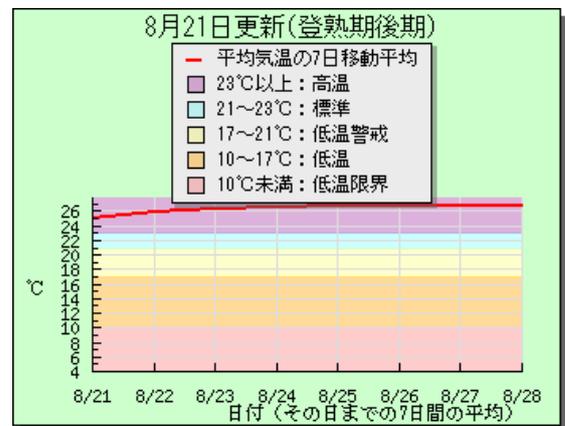


図 2 1 週目予測の 7 日移動平均

図1に示すように、2週目予測の平均気温の7日移動平均については、生育予測で得られる生育ステージと連動させた。なお、図2に示すように、1週目予測においても同様に生育予測で得られる生育ステージと連動させた。これを実現するため、生育予測で得られる生育ステージをもとに、1. 育苗 (4月)、2. 田植え (6月)、3. 活着期、4. 分けつ期、5. 幼穂発育期間 (前歴深水)、6. 幼穂発育期間 (危険期深水)、7. 開花・受精期、8. 登熟初期、9. 登熟後期、10. 成熟期以降、を判別し、それぞれにおいて低温、高温となる温度区分を定めた。また、このグラフのデータをもとに、テキストの警戒情報も定め、ユーザにWeb、メールでの情報発信を行った。図1、2では、登熟後期の温度区分が色分けされ表示されており、容易に判別できるようになっている。なお、登熟後期以外の生育ステージでは温度区分は異なる。

図3、4に示すように、2週目予測の低温・高温確率については、それぞれの平年の出現確率を提示した。これをもとに警戒情報を生成させ、平年の出現確率よりも大きく、かつ2週目予測が20%以上の確率の場合に発信することにした。また、栽培管理の1週目予測の警戒情報に、2週目予測の低温・高温確率を加え発信した (図5)。この発信の条件は、1週目予測で低温、高温の警戒が出ており、なおかつ2週目予測が30%以上の確率の場合とした。

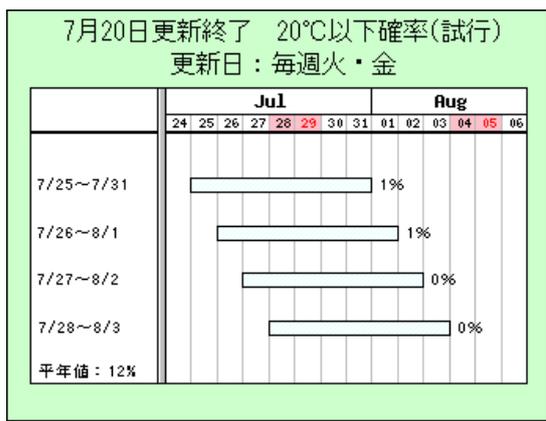


図3 2週目予測の低温確率 (20°C以下)

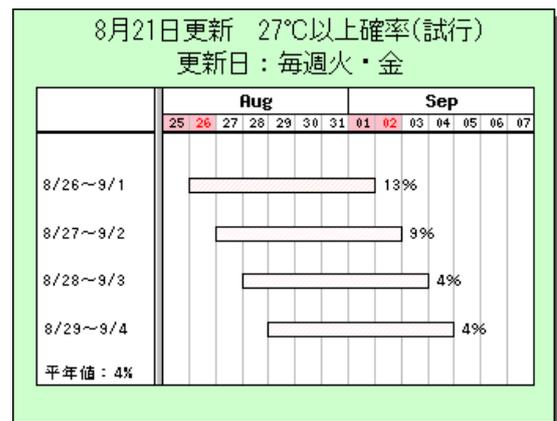


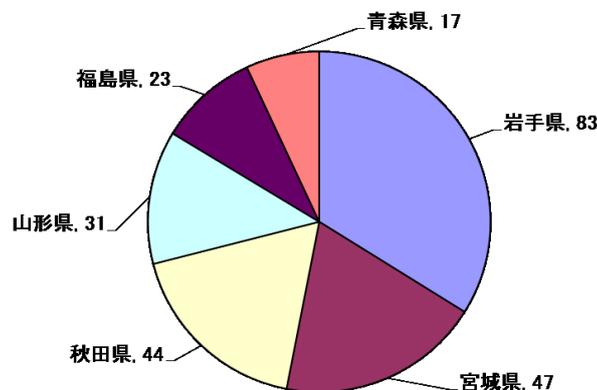
図4 2週目予測の高温確率 (27°C以上)

日付	件数	警報						
		いもち病	栽培管理	低温障害	2週目予測 低温確率	高温障害	2週目予測 高温確率	紋枯病
6/27	74	41	11	-	-	-	-	-
7/4	138	16	18	-	69	-	-	-
7/11	219	148	1	3	-	-	-	-
7/18	282	162	152	4	-	-	-	-
7/25	153	39	11	20	-	2	39	1
8/1	229	49	110	18	-	25	12	24
8/8	279	27	16	14	-	21	107	78
8/14	301	180	128	9	-	32	31	-
8/22	316	153	192	1	-	38	6	39
8/29	276	48	161	1	-	29	-	96
9/5	339	80	114	1	-	14	-	104

図5 警戒情報のメール配信数（平成24年）

図5に示すように、各種予測に基づき警戒情報のメール配信数を行った。平成24年は、7月上旬に低温が観測され、8～9月に高温が観測されたが、2週目の低温・高温確率により、それらを予測し警戒情報をメール配信できていた。

水稻気象被害予測システムを利用し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。本年度の東北地域のユーザの分布を図6に示す（2012年8月10日時点の登録ユーザ）。ユーザのニーズ及び提供可能な予測情報に関する調査は、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、2012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のあった155名に対して行った（ユーザ登録は随時受け付けている）。96名のユーザから回答があった（回答率62%）。2週目予測についての調査結果を図7、8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2週目予測について、肯定的な回答が平成23年度に比べ増加したことから、高度化により有効に発信できたことが分かった。



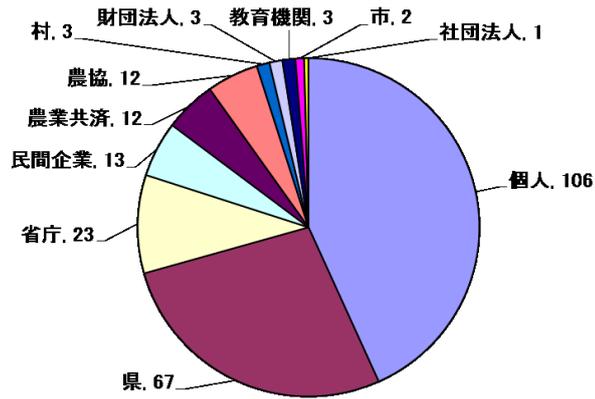


図6 水稲気象被害予測システムのユーザの分布 (N=245)

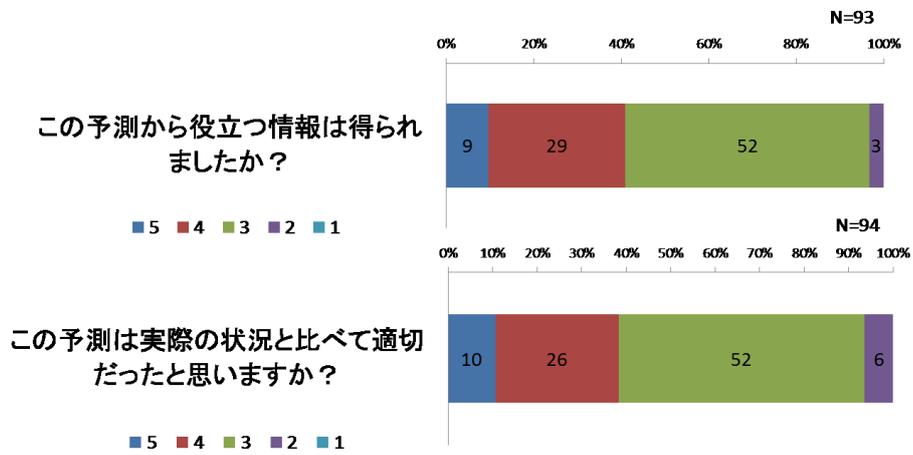


図7 2週目予測：7日平均気温についてのアンケート調査結果

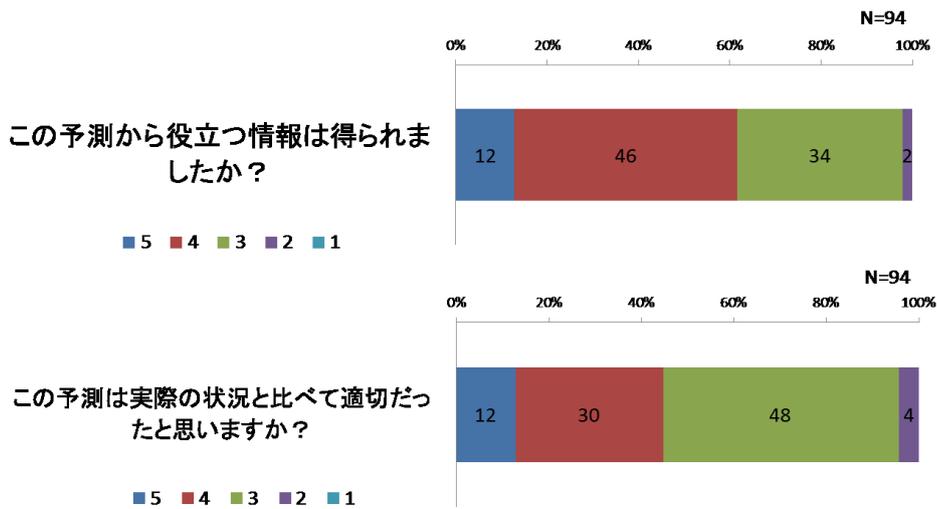


図8 2週目予測：高温・低温警戒確率についてのアンケート調査結果

図 7、8 は、アンケート調査結果の一部であり、これ以外にも、意見・要望を自由記述で回答したものもある。今後、これらをもとにシステム改善を行う予定である。

マルチ解像度グリッドデータ配信システムについては、平成 23 年度に引き続き、実稼動に必要な地図データを Web 上で可視化、解析することのできるサーバシステムの開発を行った。サーバシステム上で作成した各種分析結果のコンテンツを ArcGIS サーバまたは ArcGIS Online (ArcGIS サーバを所有しない場合) に登録することによって、本システムを利用するユーザは、Web ブラウザまたは携帯端末用の専用のアプリ (ArcGIS for Smartphones) を利用してコンテンツの観覧や地図データ (点、線、ポリゴン) の編集・追加を行うことができるようになる。なお、ArcGIS for Smartphones は、iOS や Windows Phone、Android などの OS に対応しており、各 OS のアプリストアから無償でダウンロードできる。図 9 は、ユーザが Web ブラウザまたは携帯端末を介して、コンテンツの観覧・更新に対応できるシステムの画面の一例を示す。

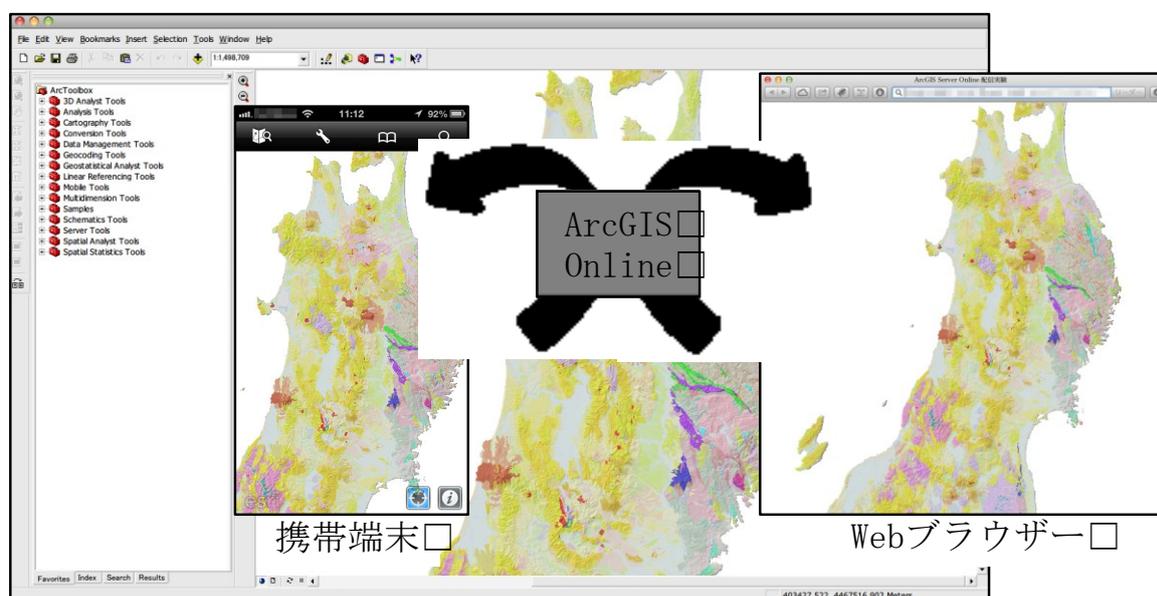


図 9 ArcGIS Online を介したコンテンツの配信

### c) 参考文献

農林水産省東北農業試験場(1999)：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。

### 3.2.7 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 3.30（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.

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

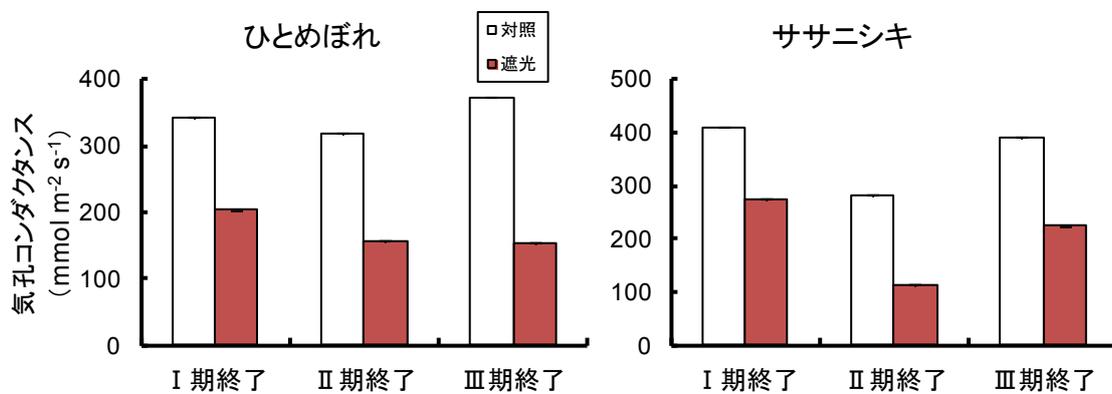
ことは、ヤマセに伴う栄養成長期の寡照が冷害常襲地域の耐冷性を弱めることで、冷害時の被害を拡大していることを示し、より正確な被害程度の予測にはこの影響の評価を考慮する必要があることを示した。

今後の課題

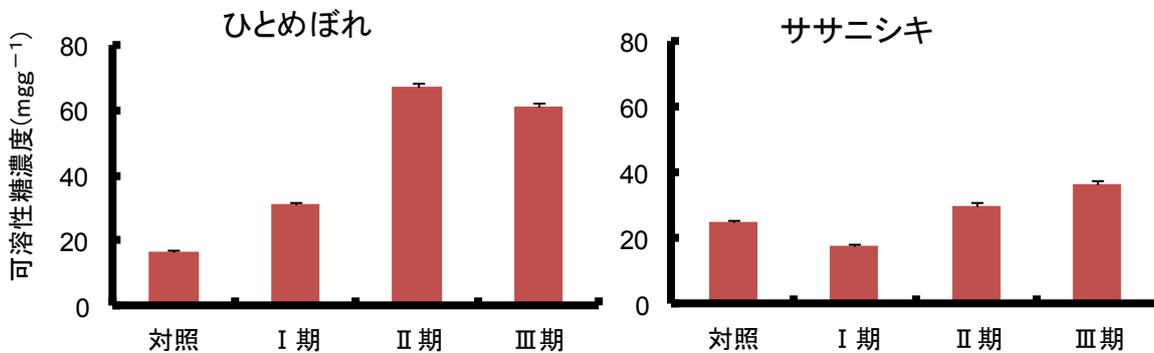
本研究ではじめて明らかにした本事象の再現性を確認する必要があり、次年度以降に実施する。

**第1表. 遮光処理がイネの幼穂形成日に及ぼす影響.**

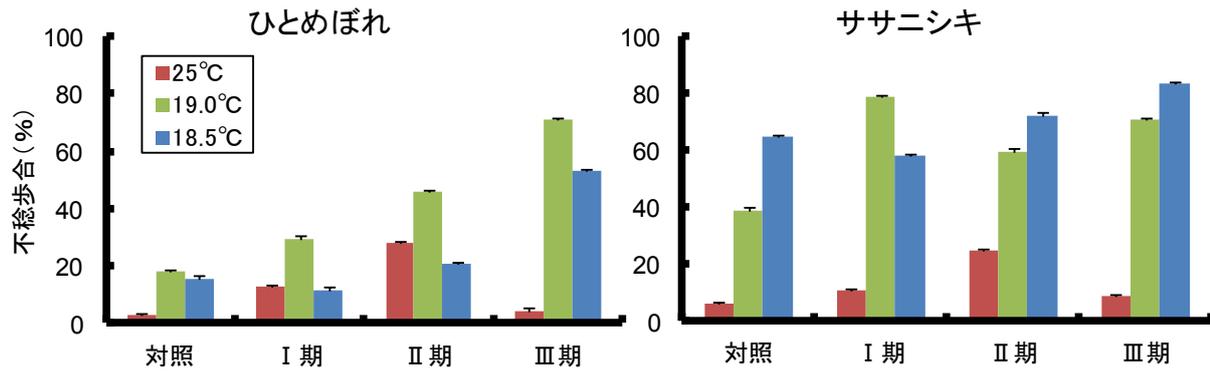
品種	対照	遮光		
		I	II	III
ササニシキ	7月12日	7月15日	7月17日	7月17日
ひとめぼれ	7月13日	7月17日	7月19日	7月20日



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 そのメカニズムと対策 (ISBN : 9784540112911). 2012 農山漁村文化協会 (農文協), pp. 1-114.

#### 4. 研究成果

##### 4.1 査読付論文（印刷済、印刷中 or 投稿中）

児玉安正, 佐藤悠, 石田祐宣, 堀内征太郎, 瀬古弘, 津田敏隆, 橋口宏之, 古本淳一, 東邦昭, 2013: 青森県津軽地方で行われた冬季季節風とヤマセの高層気象観測, および気象庁非静力学モデルを用いたダウンスケール再現実験. 天気, 60(1), 11-20.

Shimada, T., M. Sawada, W. Sha, and H. Kawamura, 2012: Low-level easterly winds blowing through the Tsugaru Strait, Japan. Part II: Numerical simulation of the event on 5-10 June 2003, Monthly Weather Review, 140, 1779-1793.

Iwasaki, T., T. Shoji, M. Sawada, M. Ujiie, and K. Tanaka, Isentropic analysis of polar cold air mass streams in the northern hemispheric winter, Journal of Atmospheric Science (改訂中)

Shimada, T., M. Sawada, and T. Iwasaki, Indices of cool summer climate in northern Japan: Yamase indices, Journal of the Meteorological Society of Japan (改訂中).

Yoshida, R., T. Iizumi, and M. Nishimori, Development of impact functions for land-use-change-induced surface warming and their application to uncertainty analysis: A case study in Shikoku, western Japan, Environmental Research Letters (改訂中)

##### 4.2 そのほかの著作

島田照久, 沢田雅洋, 岩崎俊樹, ヤマセ研究のための再解析・気候モデルデータのダウンスケーリング, SENAC, 46, 2013.

##### 4.3 研究会での発表

Endo H. and M. Matsueda, 2012: Long-term variations of circulation in East Asian summer during the past half century. 4th WCRP International conference on reanalysis, Maryland, USA, 7-11 May 2012.

遠藤洋和, 2012, CMIP5 マルチ気候モデルにおけるヤマセに関連する大規模大気循環の再現性と将来変化, 第6回ヤマセ研究会, 東北農業研究センター.

遠藤洋和, 2013, CMIP5 マルチ気候モデルにおけるヤマセに関連する大規模大気循環の再現性と将来変化(その2), 第7回ヤマセ研究会, 弘前大学.

Kawai, H., S. Yabu, and Y. Hagihara, 2012: Characteristics of vertical structures of marine boundary layer clouds over mid-latitudes. Joint EUCLIPSE - CFMIP meeting, in Paris, 29 May - 1 June 2012.

川合秀明, 神代剛, 2013: モデルにおける夏季の中緯度の海上下層雲表現の改善. 第7回ヤマセ研究会, 青森県弘前市, 2013年3月7-8日.

川合秀明, 藪将吉, 萩原雄一郎, 2012: 中緯度の海洋下層雲の鉛直構造—夏の南大洋と北太平洋における地理的特徴—. 日本気象学会, 2012年度秋季大会, 102, D355, 札幌, 2012年10月3-5日.

川合秀明, 2012: 夏の中高緯度海上には、なぜ下層雲が多いのか?. 第6回ヤマセ研究会, 岩手県盛岡市, 2012年9月24-25日.

川合秀明, 藪将吉, 萩原雄一郎, 2012: 中高緯度の海洋下層雲の鉛直構造及び気象要素との関係. 日本気象学会, 2012年度春季大会, 101, P126, つくば, 2012年5月26-29日.

- Sawada M., T. Sakai, T. Iwasaki, H. Seko, K. Saito and T. Miyoshi (2012), Assimilating high-resolution winds from Doppler lidar with lateral boundary optimization, Second International Workshop on Nonhydrostatic Numerical Models, Sendai, Japan, 28-30, November 2012.
- 沢田雅洋, 境剛志, 岩崎俊樹, (2012), 領域モデルのための側面境界の最適化, 日本気象学会 2012 年度秋季大会, 札幌, 2012 年 10 月 3-5 日
- Shimada, T., M. Sawada, and T. Iwasaki, Future changes in cool summer climate in northern Japan based on dynamical downscaling, Second International Workshop on Nonhydrostatic Numerical Models, Sendai, Japan, November, 2012.
- 島田照久、沢田雅洋、岩崎俊樹、ダウンスケーリングを用いたヤマセの北日本への影響の将来変化、日本気象学会 2012 年度秋季大会、札幌、2012
- 島田照久、ヤマセに伴う北日本の太平洋・オホーツク海沿岸の波高変動、日本海洋学会 2013 年度春季大会、東京、2013
- 南野謙一、農業支援システムの概要と運用実験、RECCA 農業課題打合せ会、宮城県仙台市、2012 年 8 月 20 日
- 南野謙一、農業支援システムの 2012 年度運用実験（途中経過）と課題、第 6 回ヤマセ研究会、岩手県盛岡市、2012 年 9 月 24, 25 日

## 5. 研究会活動と官学連携

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、9月に平成24年度の第1回(第6回ヤマセ研究会)、3月に同第2回(第7回ヤマセ研究会)の研究打ち合わせを実施した。この研究会はプロジェクトの会議ではあるが、ヤマセ研究会と称し、ヤマセに興味を持つあらゆる研究者にオープンに開催している。ヤマセと一言でいっても、立場によって見えるものが異なる。隣の研究者から多くのことを学ぶことができる。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ることができた。また、8月20日には、RECCAの課題「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」(二宮正士代表)「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」(西森基貴代表)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た。

活動	時期	場所
第6回ヤマセ研究会	2012年9月24-25日	東北農業研究センター(盛岡)
第7回ヤマセ研究会	2013年3月7-8日	弘前大学(弘前)

## 6. 平成 25 年度計画

### 6.1 平成 25 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と岩手県立大学が研究を分担する。平成 25 年度はヤマセに対する地球温暖化の影響の評価、予測情報の精度向上と高度利用に力点が置かれる。

気象庁の気候情報課、気象研究所、仙台管区气象台には、平成 25 年度も引き続き研究協力機関となることを依頼した。また、東北農業の温暖化適応策の研究を強化するために、岩手大学農学部にも研究協力機関となることを依頼した。平成 25 年度より新たに、産業技術総合研究所と協力し、太陽エネルギー分野への気象情報の利用について情報を交換する。

RECCA の課題「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」（二宮正士代表）および「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」（西森基貴代表）と、課題間でさらに積極的に情報交換を行う。

### 6.2 ヤマセの気候研究

再解析の力学的ダウンスケール結果を利用し、冷害の規模が大きかった過去のいくつかのヤマセの特徴を整理する。力学的ダウンスケールシステムにおけるヤマセの再現性について、解像度と物理過程スキームに関する感度を明らかにし、ダウンスケールシステムによる再現精度の向上を図る。異なる気候モデルによる温暖化予測をダウンスケールし、ヤマセの温暖化予測とその不確実性について考察する。

衛星データおよび気象データから得られたヤマセ雲の雲水量及び有効半径の 3 次元分布とその変動特性に関する推定精度の向上を図る。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する。また、農業に重要な光合成有効放射量を調査する。

平成 24 年度に引き続き、マルチ気候モデルデータ解析を行い、ヤマセに関連する大規模循環について、気候モデルの予測とその精度を明らかにする。青森県六ヶ所村等で高層気象観測を行い、ダウンスケールモデルの検証に必要となるヤマセの鉛直構造や時間変動に関するデータを整備する。また、水稻の障害型冷害の被害を予測する簡易なモデルを作成するために、平成 24 年度の研究において世界で初めて見出した、ヤマセを想定した少照が耐冷性に及ぼす影響の再確認および定量化を行う。

### 6.3 ヤマセの気象予測の研究

ヤマセの短期予測の精度向上を目指して、局所アンサンブルカルマンフィルターによるダウンスケールのデータ同化研究を推進する。GPS 掩蔽データの同化がヤマセの短期予測に対するインパクトを評価する。平成 24 年度に開発したダウンスケールデータ同化のための側面境界の最適化手法を利用して、ドップラーライダーデータの実データ同化試験を行う。ヤマセの中期予測の精度向上を目指して、ヤマセのアンサンブルダウンスケール予測手法の改良を図る。経験的直交関数を利用し地域に有効な予測情報を引き出すための統計手法を開発する。

アンサンブルダウンスケール予測を利用した農業気象情報の作成手法を開発する。2000 年以降の夏を対象としてアンサンブル予測システムの農業モデルへの適応性を調べ、有効な情報発信方法を試作する。高度農業気象情報システムを利用しダウンスケール予測を利用した農業気象情報の発信に関する運用試験を行う。農業気象情報の利用者に対するアンケートを実施し利用者の利便性の向上を図る。日射量や気温の予測に関連し、エネルギー分野の研究との情報交換を行う。