

[共同研究成果]

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

岩崎俊樹¹、大久保さゆり²、菅野洋光³、紺野祥平²、島田照久^{1,4}

福井真¹、南野謙一⁵、宮脇祥一郎⁶、吉田龍平¹

1 東北大学 大学院理学研究科

2 東北農業研究センター

3 中央農業総合研究センター

4 弘前大学 大学院理工学研究科

5 岩手県立大学 ソフトウェア情報学部

6 気象庁気候情報課

要旨

地球温暖化が顕在化し、適応策の立案が急務となっています。そこで、高解像度の気候モデルの予測結果を農業モデルに入力し、東北地方の農業における適応策について検討しました。温室効果ガスの排出がこのまま続けば、21世紀末には、20世紀末と比べて、東北の夏季の気候は

(1) 気温は約3℃程度上昇する

(2) (気温の変動幅はあまり変わらず) 温暖化後もヤマセによる冷夏が間欠的に発生する

(3) 短時間強雨が増加する

ことが予想されています。地球温暖化に対する第1の適応策は適地適作です。今後の気温上昇に適応するために高温障害に強い耐高温品種の導入が考えられます。しかし、一般に耐高温品種はヤマセなどの低温には脆弱です。そこで、年々の変動に対処するために、第2の適応策として、農業分野における、日々の気象予測の高度利用を提案します。アンサンブルダウンスケールという予測手法を用いると、ヤマセに特徴的な気温の地域特性も5日程度先まで精度よく予測できます。この気象予測の結果を農業モデルに入力し、確率的な農業気象情報を作成します。また、高解像度気象予測は農作物や農業施設への気象災害対策のためにも有効です。官・学・農業事業者で協力し、気象予測の利用技術の高度化に取り組むことが望まれます。

1. 本稿の目的

地球温暖化については、二酸化炭素をはじめとする温室効果気体の増加を抑えるために、さまざまな緩和策が検討されています。しかしながら、地球温暖化を完全に抑えることは難しく、温暖化時代を乗り切るための適応策の検討が急がれています。本稿では、文部科学省の気候変動適応研究推進プログラムの一環として実施した「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 (http://www.mext-isacc.jp/staticpages/index.php/report_iwasaki_j)」(2010 年 10 月・2015 年 3 月)に基づき、東北農業の温暖化対策について考察します。東北農業の温暖化対策に関心を寄せる多くの皆様にお読みいただき議論していただくことを期待しています。

我々は、21 世紀末を見据えた東北農業には、2 つの温暖化適応策が必要だと考えています。第 1 の適応策は、適地適作や水資源管理の最適化などの長期的な対策です。温暖化に伴い、気温や降水量、日射量などが変化します。そのため、温暖化後の気候に適応した作物品種への変更や既存の品種の改良が必要となります。また、降水特性の変化や生育作物に合わせ、水資源の管理手法と防災対策を変える必要があります。地域の詳細な温暖化予測に基づく長期的な対策について、第 2 節にまとめます。第 2 の適応策は、気象予測情報の高度利用です。本研究においては、実際の気象予報に用いて地域気象を詳細に表現する、アンサンブルダウンスケール予報(詳しくは 2.1 節および 3.1 節を参照)という技術による気象予測と農業モデルを組み合わせ、高解像度の確率的な農業気象情報作成の実験を行いました。ここでは、その手法を紹介し、実用化に向けた課題について議論します。また、本研究の実施期間中、4 年間にわたり、農業事業者等に向けて試験的に農業気象情報を提供し、ニーズを把握するためのアンケート調査を実施しました。以上の研究・調査に基づき、気象予測の高度利用に関する提案を行います。これらの内容は第 4 節にまとめます。

温暖化予測には不確実性がつきものですし、気象予測は完全ではありません。適応策を検討する際には、温暖化予測の不確実性を考慮することが必要です。高度化が進む温暖化予測を常に検証し、適応策を改訂していく必要があります。また、気象予測は将来改善が見込まれます。予測精度を考慮した確率情報の利用を推進することが今後はますます望まれます。

当該研究の参加機関は、東北大学、弘前大学、岩手県立大学および、(独)農研機構東北農業研究センターで、協力機関は、気象庁気候情報課、気象庁気象研究所、仙台管区气象台、岩手大学です。また、東北各県の農業試験場(青森県産業技術センター、岩手県農業研究センター、宮城県古川農業試験場、秋田県農業試験場、山形県農業総合研究センター、福島県農業総合センター)の関係者とも年 2 回開催する研究会等を通じて議論を行いました。本稿の直接の執筆者は標記の通りですが、取りまとめた内容は、当該研究への参加・協力機関および、連携する気候変動適応研究推進プログラムとの共同研究に基づくものです。現在気候および地球温暖化予測のダウンスケールには東北大学サイバーサイエンスセンターのスーパーコンピュータを利用しました。

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、短時間強雨と無降水日）

2.1.1. 地球温暖化の影響は地域スケールではどのように現れるのか？

地球温暖化の影響が顕在化するにつれて、温暖化適応策や温暖化に起因する様々なリスク管理を推進していくことが重要な課題になっています。このような社会的要請に応えるためには、世界の気象機関・研究機関が実施している全球気候モデル（用語解説参照）による地球規模の温暖化予測（起こりうる社会の変化シナリオ（用語解説参照））を想定して、それが気候にどのような影響を与えるかをシミュレーションによって予測することから、地域レベルでの気候変化を明らかにする必要があります。このような社会的要請に応えるための方法の一つが、力学的ダウンスケーリング（領域気象モデルを用いた再計算によるデータの詳細化のこと（用語解説参照）。以下、単にダウンスケーリング）です。温暖化予測を行うほとんどの全球気候モデルの空間解像度は100kmより粗く、このままでは東北地方の気候にとって重要な役割を果たす脊梁山脈を十分に解像することはできません（図1左）。つまり、東北地方の詳細な気候は再現できないことになります。これを解決するために、全球の温暖化予測の結果を反映させながら、着目する地域について、高解像度の地形（ここでは例として10km格子の地形を利用、図1右）を入力してシミュレーションをやり直します。こうして、全球的な温暖化による気候変化が、地域スケールでどのように現れるかが明らかになります。

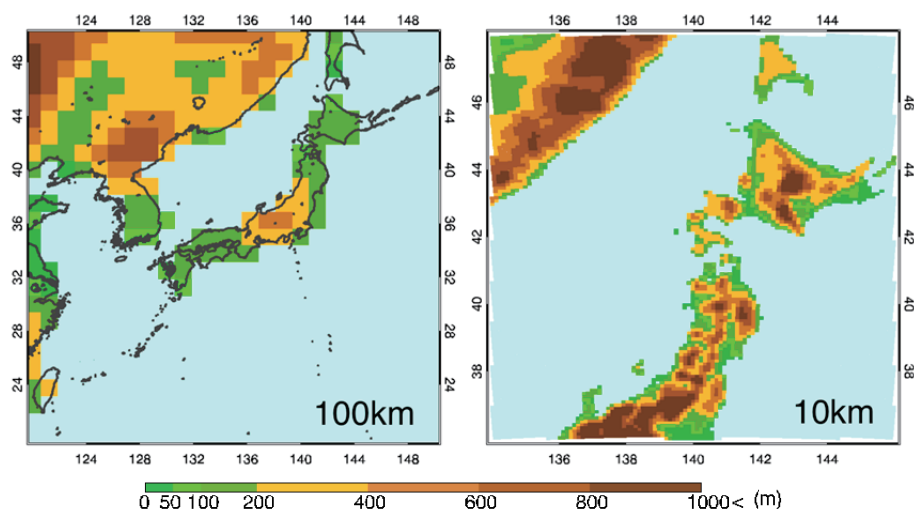


図1 （左）100km と（右）10km の格子間隔で表現される地形。

気象庁では、全球気候モデルによる実験結果を「地球温暖化予測情報」として取りまとめて公開しています[1]。これは、全球気候モデルによる地球全体の温暖化予測を、日本周辺に絞ってダウンスケーリングして、地球温暖化が日本の気候にどのように影響するのかを調べたものです。最新の「地球温暖化予測情報第8巻」では、21世紀末に大気中の二酸化炭素が約700ppmに達す

るとしたシナリオ（SRES A1B: 用語解説参照）を考えています。このシナリオでは、21 世紀末の日本付近で、20 世紀末に比べて、年平均気温が約 3℃上昇し、短時間強雨や無降水日が増加する可能性が示されています。さらに、季節と大まかな気候区分（北日本の太平洋側と日本海側等）に分けて、今後 100 年間に起こりうる気候の変化が示されています。

我々のグループでは、東北地方における地域のニーズ（地域の産業や生活スタイルへの適応策、防災・減災対策）に応えるための温暖化予測情報を提示するために、気象庁の「地球温暖化予測情報第 8 巻」に用いられている全球気候モデルを用いて、独自に力学的ダウンスケーリングを行い詳細に解析しています。ここでは、東北地方の夏季気候に着目し、ヤマセによる低温、異常高温、短時間強雨と無降水日という観点から、気候の将来変化の特徴を示します。なお、解析期間は、「地球温暖化予測情報第 8 巻」に対応させて、現在気候を 1980-1999 年、将来気候を 2076-2095 年としています。

2.1.2. 低温をもたらすヤマセは将来も発生するのか？

東北地方の夏季気候は、間欠的に発達するオホーツク海高気圧から北日本の太平洋側に吹きつける冷たい東風（ヤマセ）の影響を大きく受けます。この東風とともに、背の低い（<1000m）下層の冷気が北日本のオホーツク海側と太平洋側に押し寄せて低温をもたらします。さらに、下層雲や霧が低地を覆い、放射冷却により低温を維持します。ヤマセの発生頻度や低温の程度は、オホーツク海高気圧の消長に合わせて経年変動が顕著で、卓越したヤマセは、夏季の異常気象（冷夏）と言われてきました。一方で、ヤマセの持続期間や低温の程度に経年変動があるとはいえ、毎年繰り返し発生しているという事実も重要です（例えば、2013 年は、7 月 17-23 日にかけて東北地方の太平洋側で、顕著な低温低日射の状態が続きました）。ヤマセのこのような特徴は、地域気象・気候、そして社会活動（農業、海洋安全、航空安全等）に影響します。例えば、農業にとっては、毎年発生する数日程度のヤマセによる低温寡照期が、農作物の重要な成長期に当たるかどうか大きなリスクとなっています[2]。このように、ヤマセの理解は、特に東北地方の冷害の歴史[3]を背景に、社会的に重要な課題でありつづけています。

では、地球温暖化が進んだ将来、ヤマセの発生はどのように変化するのでしょうか。将来気候においても、ヤマセは発生することがこれまでの研究で示されています。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ます。現在気候について、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ります（図 2 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、下層の冷たい空気が山地にせき止められることを示しています。将来気候においても、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ます（図 2 中）。この気温分布は、将来気候の夏季平均からの差であることに注意してください。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 高くなっています (図 2 右)。ただし、現在気候と同じ条件の事例発生数は、将来気候では若干 (約 2%) 減少しています。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ます。

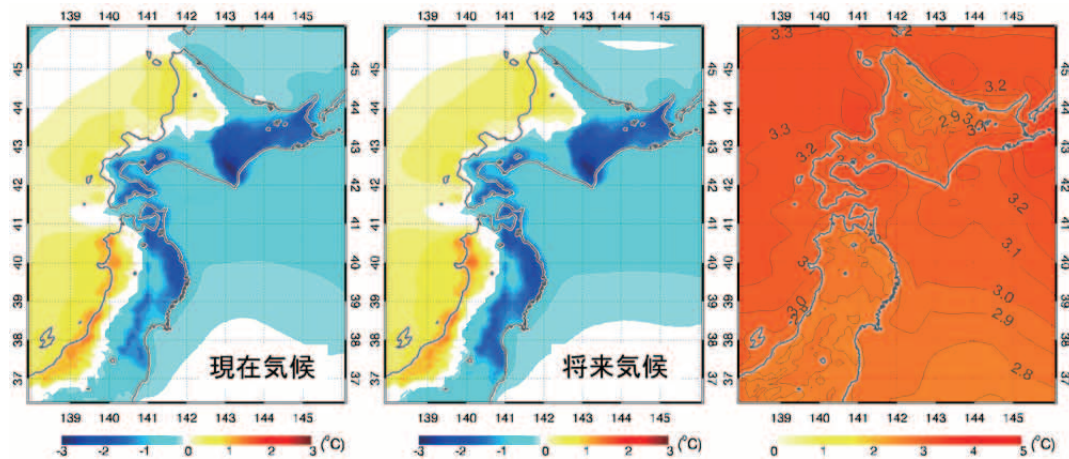


図 2 (左) 現在気候と (中) 将来気候の 6-8 月のヤマセ卓越時について、気温の平年値からの差。現在気候と将来気候の平年値は、現在気候と将来気候それぞれの夏季平均である。(右) ヤマセ卓越時の気温の将来気候と現在気候の差。

2.1.3 異常高温は東北地方全体で顕著になる

地球温暖化による平均的な気温上昇とともに、猛暑が増加しています (2010 年は、日本各地で記録的な高温が観測されました)。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ます。また、農作物の高温障害が発生します [7]。「地球温暖化予測情報第 8 巻」[1]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ます。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 $2\sim 3^{\circ}\text{C}$ 程度の上昇が予測されています。

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詳細に見てみます。「地球温暖化予測情報第 8 巻」[1]と同じく、日最高気温の 95 パーセンタイル値を指標とします。95 パーセンタイル値とは、標本の各データを値の小さい順に並べた時、値の小さい方から数えてデータ数の 95 パーセントに当たる値のことです。つまり、日最高気温の 95 パーセンタイル値は、日最高気温の低い方から 95% の値、逆に言うと日最高気温のデータ中で上位 5% に位置する値となります。このため、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ります。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 です (図 3 左)。7-8 月について、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℃の上昇が見られる一方、日本海側では約 2℃です。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のですが、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になります。

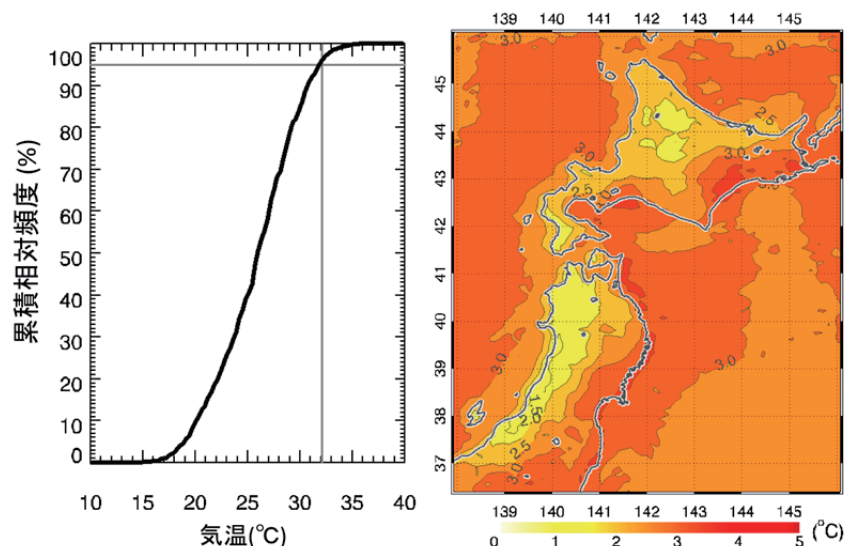


図3 (左) 仙台における日最高気温の累積頻度分布。灰色の線の交点が 95 パーセンタイル値を表す。(右) 日最高気温の 95 パーセンタイル値の将来変化。

2.1.4. 短時間強雨の少なかった東北地方でも将来は増加

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ます。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ました。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ます[5]。その一方で、降水日数は減少する傾向にあります[5]。これらの傾向は、「地球温暖化予測情報第 8 巻」[1]で示された将来変化と一致しています。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ます。また、年降水量は、全国的に増加することが示されています。

現在気候の東北地方について、我々のデータを用いて詳しく見てみます。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ます。将来気候では、夏季降水量は、平均して約 12%増加すると予測されています。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す[1]。しかし、東北地方においても短時間強雨が将来増加する傾向が現れており（図 4 右）、全国的な特徴[1]と一致しています。今後、大雨や短時間

強雨の頻度が増加するにつれて、水害や土砂災害に対する東北地方の脆弱性が明らかになる可能性があります。将来の大雨や短時間強雨の増加を想定して、防災情報等に関わる降水量の指標を見直すとともに、新たな防災減災対策が必要になってくると考えられます。なお、無降水日は東北地方の夏季に限っては、やや減少傾向になっています。

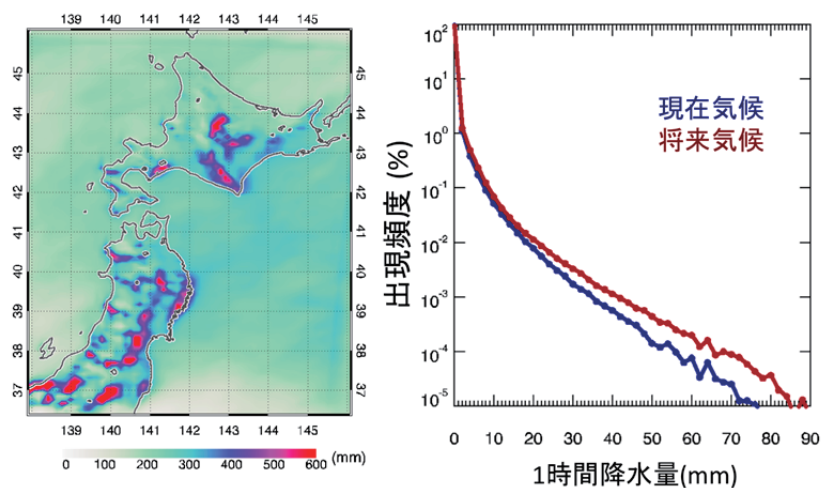


図4 (左) 現在気候における6-8月の降水量。(右) 現在気候と将来気候の1時間降水量の発生頻度分布。

2.1.5. まとめ

気候変動の影響が顕在化する中、温暖化に対する緩和策とともに、適応策や気候変動に起因する様々なリスク管理を推進して行く必要があります。これを地域の実情とニーズに合わせて行っていくためには、全球の気候予測が地域スケールでどのように現れるのかを明らかにしなければなりません。東北大学や東北農業研究センターでは、ダウンスケーリングという手法を用いて、東北地方に特化した将来気候と温暖化の影響評価の研究を進めています。

2.2. 東北農業の将来

2.2.1. はじめに：現在の品種で安定したコメ生産は可能か？

温暖化が水稻生育に与える影響は、現在各地がおかれる状況によって様々です。九州や四国といった温暖な環境では、近年の昇温によってコメの品質や収量の低下が起こっています[6]。一方で、もともと冷涼な環境の東北では増収傾向であると報告されています。そのため、温暖化の進行に伴って、東北地方はコメ生産のより重要な地域となっていくと考えられます[7]。我々のグループは（独）農業環境技術研究所と共同で、東日本における温暖化の水稻生育に与える影響を調べました。

2.2.2. 現行品種を維持した場合、増収が見込まれるが高温障害リスクも増加する

気温や日射量といった気象条件から日々の生長量を計算する水稻生育モデル Hasegawa/Horie を用いて、水稻生長のシミュレーションを行いました。気象条件には前節の温暖化シナリオを用いて、温暖化が水稻に与える影響を算出しました。

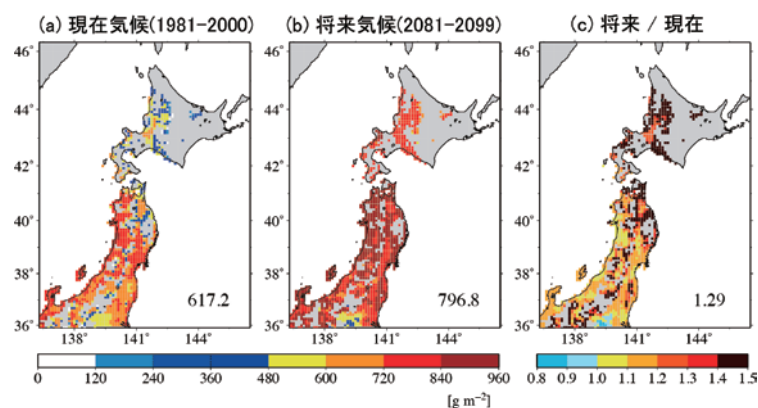


図5 各県で最大の作付面積を持つ品種を将来も維持した場合の収量変化。(a) 現在気候、(b) 将来気候、(c) 将来気候値の現在気候値に対する比。各図右下の値は領域平均値で、灰色の部分は10km メッシュ内の水田面積率が1%未満の地点を表す。

図5は、各県で栽培されている主要な品種（現行品種と定義します）を将来もそのまま維持した場合の収量分布です。現在気候では720-840 (t m^{-2})は高収量といえますが、平均気温の上昇と CO_2 の施肥効果によって、将来気候ではそういった値やそれ以上の値が本州の多くの地域で見られるようになりました。また、増収率は本州の山岳部や北海道で高く、現在は十分にとれなかった地域での増加が顕著でした。現在報告されている増収傾向は今後も続く見込まれます。

つづいて、水稻生育における高温・低温による不稔率（＝実がつかない割合）を推定しました（図6）。現在の東北地方では、ヤマセによる冷害が水稻生育に深刻な問題です（高温の不稔率を1としたとき、低温の不稔率は72.3倍）。温暖化に伴って、現在冷涼な東北地方においても高温による不稔率の増加が予測されますが、依然として低温による不稔率の方が高いと推定されまし

た（同 3.3 倍）。将来気候においては、高温による不稔率は低温による不稔率の約 30%まで増加するため、将来は冷害への継続した警戒と顕在化する高温障害への対応の両面が必要になると言えます。

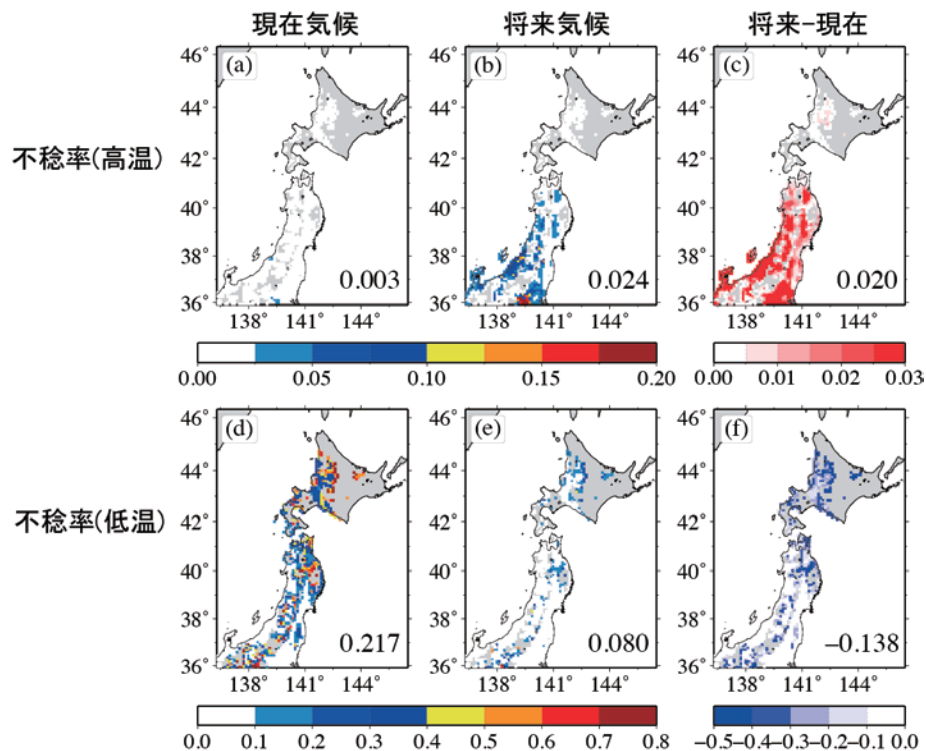


図 6 図 5 と同様。ただし、(a-c)は高温による不稔率、(d-f)は低温による不稔率。

コメ生産では、品質も重要な要素です。出穂したあとの生殖生長期に高温になると、十分に登熟できず、白く濁った粒が増えます（白未熟粒（しろみじゅくりゅう）と呼ばれます）。白未熟粒の増加により、一等米の比率が下がります。登熟期の日平均気温が 26°C を越えた分を足し合わせた積算気温が、品質のよい指標として用いられるため、先の水稲生育モデルで算出しました（図 7）。

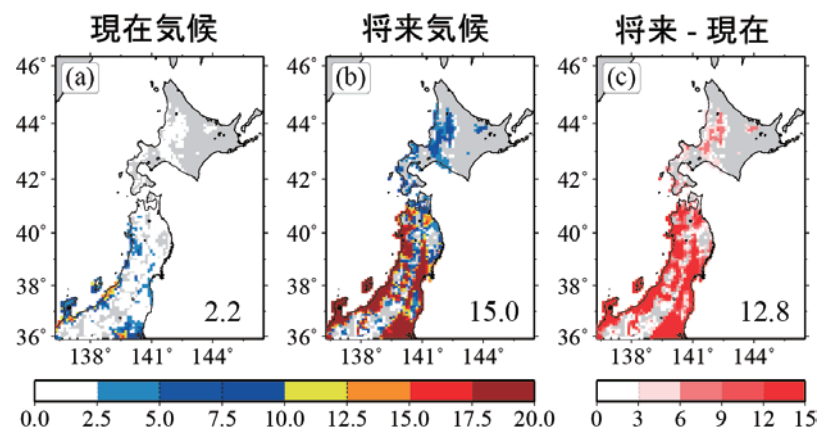


図 7 登熟期の日平均気温が 26°C を越えた分を積算した気温($^{\circ}\text{C}$)。

収量の場合と同様に、品質についても登熟期の高温は現在ほぼ見られませんが、将来気候では東北の平野部で多く見られるようになりました。ごくわずかではありますが、北海道でも登熟期の高温が推定されています。東日本全体では、登熟期の”積算”気温は将来気候で 10℃以上増加すると推定されるため、品質の面からも高温障害への警戒が必要になっていくといえます。

2.2.3. 安定したコメ生産には耐高温品種の導入と現行品種の維持が大きな柱

再び収量の話にもどります。冷害と高温障害の影響を考慮して、現行品種よりも高収量・不稔率低下を実現できる品種を検討しました。検証に使用した品種は、現在日本で主に栽培されている 10 種です（表 1）。現行品種よりも収量あるいは不稔率のいずれかの点で優れる品種は多くありましたが、複合条件では低温による不稔率低下の実現が厳しいために品種の選択肢が狭まり、中京以南で栽培されている数種類に限られました（図 8）。一方で、半分ほどの地点では現行品種が最適と選定され、安定した食糧供給のためには、耐高温品種の導入と現行品種の維持が大きな柱といえそうです。

表 1 水稻生育モデル Hasegawa/Horie で使用した品種リスト。

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

2.2.4. 最後に：結果の解釈について

本課題によって得られた結果は 1 モデル・1 シナリオに限られており、将来気候において必ずこのようになるというものではないことに注意が必要です。さらに、コメ生産での適応策として栽培品種の変更に着目していますが、品種改良や水田への移植日変更といった他の様々な方策も考えられます。そのため、得られた結果は数ある可能性のうちの 1 つとして捉えるとともに、他の全球気候モデルや排出シナリオによるデータも利用した、大気側・水稻側のそれぞれ多様な方策を考慮した、より包括的な解析が今後必要です。

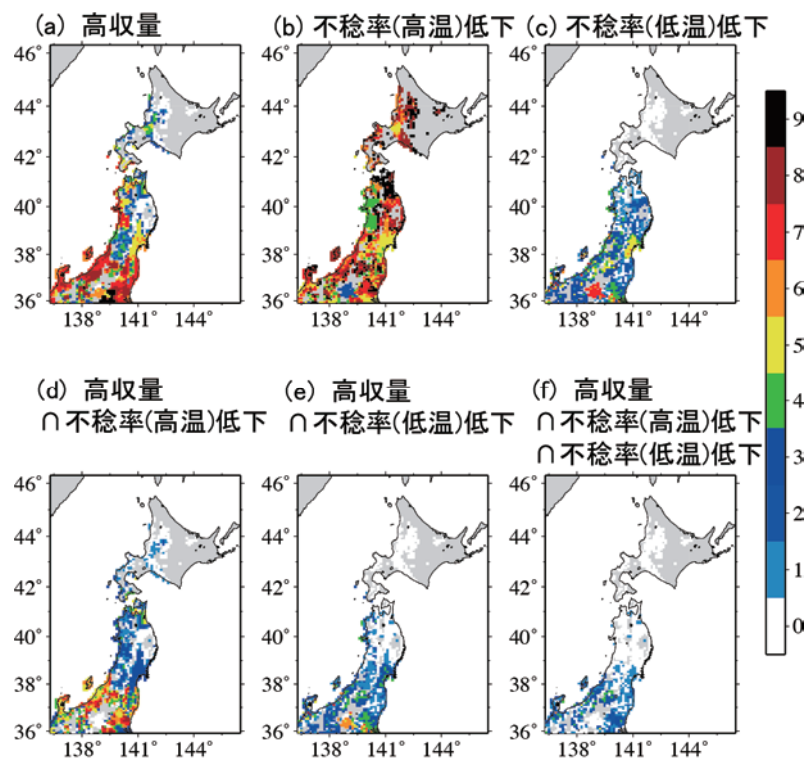


図8 将来気候において、現行品種よりも好ましい条件となる品種数の空間分布。(a)高収量、(b)不稔率(高温)低下、(c)不稔率(低温)低下、(d)高収量 $\cap$ (かつ)不稔率(高温)低下、(e)高収量 $\cap$ 不稔率(低温)低下、(f)高収量 $\cap$ 不稔率(高温)低下 $\cap$ 不稔率(低温)低下。

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

3.1.1. はじめに

100年後の地域の気温は、地球温暖化により、およそ 3°C 上昇することが予測されています。他方、年ごとの気温の変動（自然変動）の大きさについて、例えば、ヤマセの顕著な八戸の7月の場合で、月平均気温の標準偏差は 1.89°C です。暑夏と冷夏では、 3°C 以上（ 1.89°C の2倍）の気温差があることになり、今後100年間の地球温暖化による上昇に、およそ匹敵します。地球温暖化の長期的な適応策が機能するためには、暑夏年や冷夏年などの自然変動（年々変動）に対しても適応できなければなりません。

年々の変動に対処する一つの方法は、今後さらに精度向上が期待できる気象予測を高度利用することです。気象予測の農業利用では、地上気象要素（気温、湿度、風、日照）を1 km程度の高解像度で、かつできるだけ先まで予測することが望まれます。アンサンブルダウンスケール（図9）という手法を用いれば、5日程度先まで、有効な高解像度予測情報を作成できます。

3.1.2. アンサンブル予報

今日の天気予報は、数値気象予報モデルの予測に基づいて作成されています。数値気象予報モデルは、現在の大気の状態（実況値）を初期条件とし、物理法則に基づいて時間積分することで、将来の大気の状態を予測します。しかしながら、大気の状態は、常に完全に把握されている訳ではありません。観測を実施している場所は相当に限られます。例えば、現状の観測システムでは、大気の鉛直構造を知るためのラジオゾンデ観測は、およそ300 km間隔で実施されており、大気状態を観測だけで実況値を細かく解析することはできません。また、観測誤差をなくすことも不可能です。このため、初期条件（実況値）には必ず誤差が含まれます。誤差は予測時間とともに成長し、やがて、予測は誤差に凌駕されて利用できなくなります。

気象庁の発表する週間予報とそれより長い予報では、不確実性の影響を抑え、信頼性の高い予測情報を作成するために、アンサンブル予報という手法が採用されています。アンサンブル予報では、観測誤差に見合うだけ少しずつ異なるたくさんの初期条件を準備し、それぞれの初期条件から予測（メンバー予報）を実行し、その結果を統計処理して予測情報を作成します。

図10は、およそ1500m上空の仙台付近の気温に対する全球アンサンブル予報の1例です。細かい実線は各メンバーの予報を表し、太い実線はすべてのメンバー予報の平均値を表します。各メンバーの予報は成績の良いものも悪いものもあります。太い実線の予報の平均値は大きく外すことは少なくなります。予報メンバー間の相違（バラツキ）は、予報の不確実性を表しており、その標準偏差はスプレッドと呼ばれ、予報の信頼性の指標とされます。このケースでは、10日予報でもスプレッドは比較的小さいままですが、通常は、スプレッドは予測時間とともに大きくなり、予報精度が低下することを示唆します。また、指定した気温の範囲に入る予報の数と全体の予報

の数の比をとれば、予報を確率で表すことも可能です。例えば、図 10 で 5 日後に気温が $12.5 \pm 1^\circ\text{C}$ の範囲に入る予報は 5 本で、その確率はおよそ 60% となります。このように、アンサンブル平均をとることによって、誤差が極端に大きくなることを防ぎ、予測の確からしさを知り、確率予報を行うことができます。

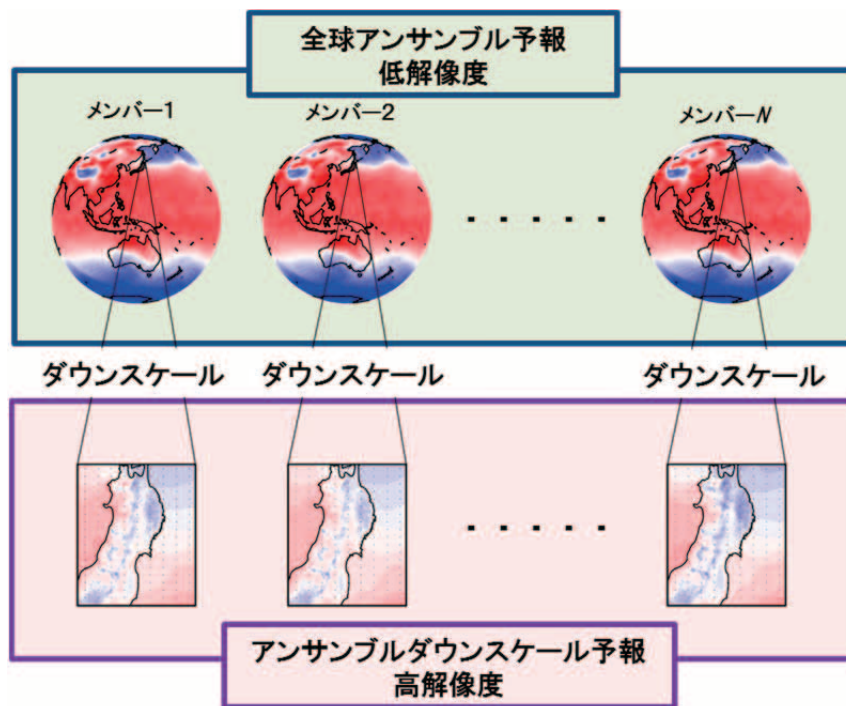


図 9 アンサンブルダウンスケール予報の模式図。

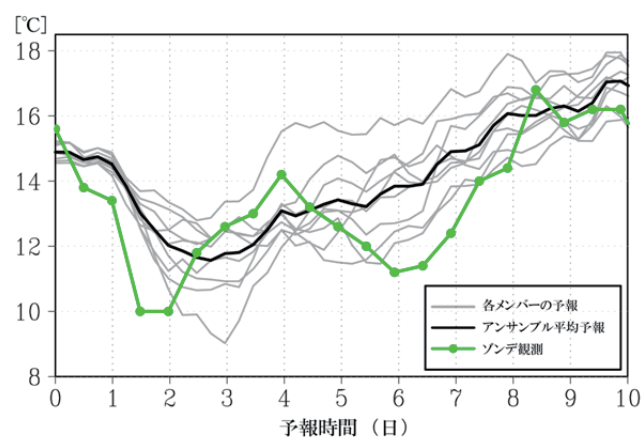


図 10 全球モデルによるアンサンブル予報の1例。仙台上空の 850hPa（およそ 1500m）の気温の 10 日予報。細線は 9 メンバーのそれぞれの予報結果で、太い実線はアンサンブル平均値、緑は観測値。

3.1.3. アンサンブルダウンスケール予報の予測可能性

農業などでは、地上気象要素に関する面的な高解像度の情報を必要としています。しかし、全球大気を数kmの格子間隔で予報するには大変な計算コストがかかります。実際に、気象庁で週間アンサンブル予報に用いられている全球数値気象予報モデルの格子間隔はおよそ 40 kmで、個々の水田・畑は解像できません。そこで利用するのが 2.1 節で説明したダウンスケールという技術です。

特に、東北地方で問題となるヤマセにおいては、冷気は谷間に向かって侵入するので、細かな地形の効果が大きな影響を与えます。このような現象の予測には、高解像度の数値予報モデルの利用が必要です。ダウンスケール予報では、比較的広い領域の予報を低解像度モデル用いて計算し、高解像度モデルのための時間的に変化する側面境界条件を作成します。この側面境界条件を利用し、高解像度モデルにより、狭い領域を高解像度で計算します。

図 11 はそのようなアンサンブルダウンスケール予報の例です。このダウンスケール予報実験では、全球数値予報モデル(格子間隔 125km)による週間アンサンブル予報の結果と、日本全体 (25 km格子)、東北地方 (5 km格子) の2つの解像度の異なる領域数値予報モデルを利用します。まず、全球モデルによる週間アンサンブル予報の各メンバーの予報を、それぞれ初期条件および側面境界条件として、25 km格子の領域数値予報モデルによるアンサンブルダウンスケール予報を行います。次に、25 km格子の領域数値予報モデルの予報結果を初期値・境界値として 5 km格子の数値気象予報モデルによりアンサンブルダウンスケール予報を行います。図 11 にはそれぞれの数値気象モデルによる 66 時間予報のアンサンブル平均を表しています。全球予報の結果では、ヤマセの事例であるにもかかわらず、太平洋側の気温が低くならず、東北がほぼ一様な気温となっています。これがダウンスケール予報では、太平洋沿岸地域と仙台平野の低温が明瞭に示され、地域の特徴が良く表現されています。

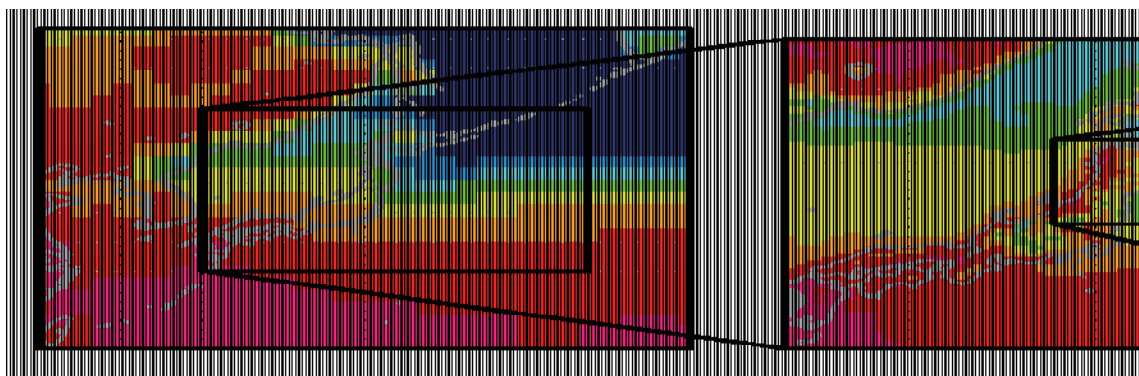


図 11 実験システムで用いたアンサンブルダウンスケール予報の計算領域と気温の予報例。 左より全球予報 (125 km格子で表現)、25 km格子、5 km格子モデルの 66 時間予報の結果 (9 メンバーの平均値) で、枠線はそれぞれ 25 km、5 kmの計算領域を表す。

アンサンブルダウンスケール予報の場合、局地循環が良く表現される反面、その誤差は大きく

なります。低解像度モデルの誤差に、高解像度モデルの誤差（局地循環の誤差）が加わるためです。各メンバー単独の予報を利用した場合は、低解像度モデルの誤差が高解像度モデルで増幅され、利用者には使いにくい情報となってしまいます。これに対して、アンサンブル平均をとるとノイズが相殺されて消え、シグナルが残り、実効的な予測可能時間を延ばすことができます。

図 12 は、ヤマセ型の気温分布パターンの時間的な変動について、40 事例のアンサンブル平均予報の成績を、観測値に対する相関係数と回帰係数で表したものです。大まかには、相関係数は時間的な変動パターンの類似性を表し、回帰係数はその変動の大きさの再現性を表します。ヤマセ型の気温分布パターンの変動の類似性（相関係数）は、アンサンブルダウンスケールを行ったかどうかにより依存せず、5 日程度予測可能であることを示しています（注：相関係数が 0.5 を切るまでの時間で判定）。他方、変動の大きさ（回帰係数）は、アンサンブルダウンスケールを行っていない全球アンサンブル予報では実際の 2 割以下ですが、25 km 格子にアンサンブルダウンスケールした場合ではおよそ 7 割、5 km 格子にアンサンブルダウンスケールした場合では 8 割以上再現されています。すなわち、アンサンブルダウンスケールにより解像度を高くすることで、小さなスケールの現象の予測が有効となることがわかります。ただし、解像度を高くすると計算量が著しく増えるので、費用対効果をよく考えて解像度を選ぶ必要があります。将来的に全球数値予報の改善や、メンバー数の増加によって、アンサンブルダウンスケール予報の精度向上を図ることができます。

最後にアンサンブルダウンスケール予報の農業利用について整理します。アンサンブルダウンスケール予報の各予報（メンバー）によって、起こりうる気象状態を確率的に予報することができます。各予報の結果を、数値農業モデルに入力し、得られた結果を統計処理して不確実性を考慮した農業気象情報を作成することが可能です。例えば、いもち病の予察の場合は、いもち病発生ケースと発生しないケースを分けて、加算し、確率情報として利用者に提供することが可能です。詳しい説明は次節で行います。

3.1.4. まとめ

温暖化後も予想される間欠的なヤマセによる冷夏などの自然変動に対応するためには、日々の気象予測の高度利用が重要です。アンサンブルダウンスケール予報は、より小さなスケールの現象を考慮しながら、ヤマセ型の気温分布を 5 日程度先まで予測することが可能です。アンサンブルダウンスケール予報を、農業の数値モデルと組み合わせれば、確率的な農業気象情報を作成することができます。

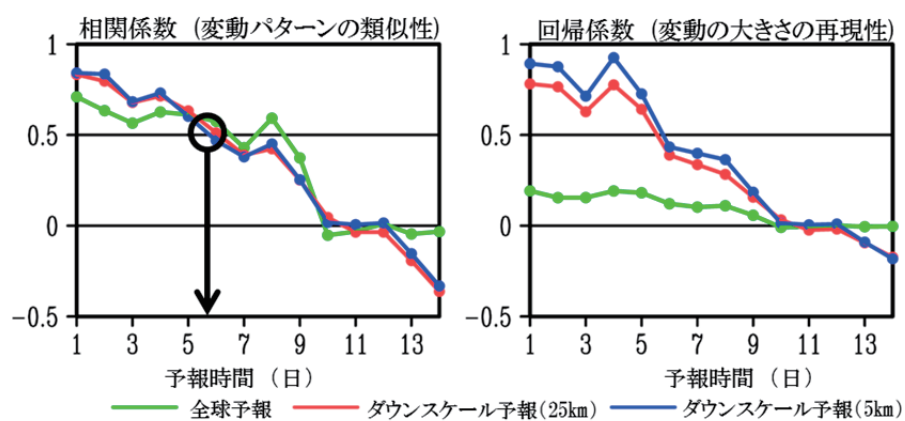


図 12 アンサンブルダウンスケール予報実験におけるアンサンブル平均値予報の、ヤマセ型の気温パターンに対する相関係数と回帰係数。40 事例の平均。

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

ー葉いもち予察モデルを例として

3.2.1. はじめに

アンサンブル予測や気象データのダウンスケールを用いることで、高解像度の気象予測情報を作成することができます。これをうまく利用することで、農業へ役立てられる可能性があります。ここでは、葉いもちの予察を例に、気象データの農業への利用について紹介します。

3.2.2 イネいもち病について

いもち病は、イネがいもち病菌に感染して起きる病気で、蔓延すると大幅な減収を招くため、昔から恐れられてきました。特に冷夏で低温や低日照が続く場合は、稲の抵抗力も弱まり、低温による冷害とあわせて病害も発生し被害の拡大をもたらします。いもち病を防ぐには、予防的な農薬とともに、発生が予測された際の殺菌剤の使用が効果的です。そこで、東北農業試験場（現農研機構東北農業研究センター）では、アメダス気象観測所の気象データを用いて、いもち病のうち、葉いもちの発生予察を行うコンピュータープログラム「BLASTAM」を1988年に開発しました[8、9]。これは、アメダスで観測される気象4要素（気温、雨量、風、日照時間）を用いて、イネの葉の濡れ時間を推定し、連続濡れ時間がしきい値を超えると「感染可能性あり」の数字（1,2,3,4,10）で示すものです。

3.2.3 アンサンブルダウンスケール予報の農業モデルへの適用

アンサンブルダウンスケール予報（3.1節）とは、アンサンブル気象予測という手法の予測結果を、細かい空間解像度に展開（ダウンスケール）したものです。本節では、アンサンブルダウンスケールデータを農業気象情報として利用する場合の利用可能性について、葉いもち予察を例に紹介します（図13）。

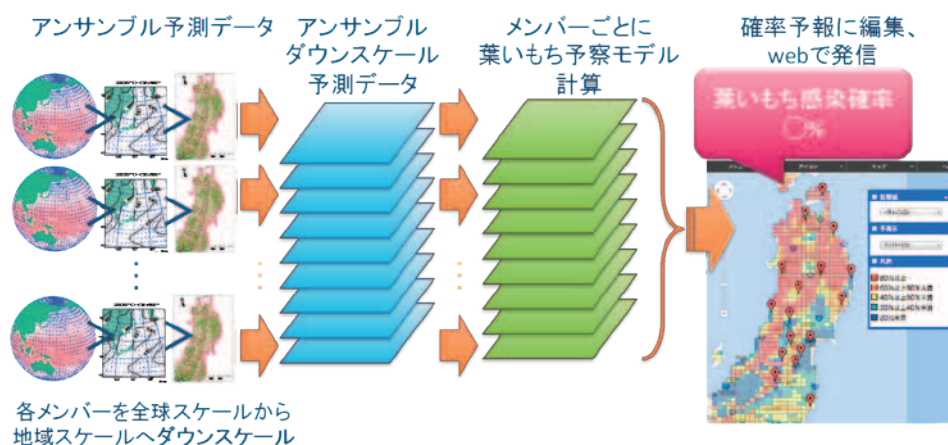


図13 アンサンブル予測結果による葉いもち病発生確率予測の概念図。

1つの気象予測計算（アンサンブルメンバー）毎にダウンスケール計算、農業モデル計算を行う。

ここでは、近年の東北地方での代表的な冷夏年である 2003 年夏季を対象としたアンサンブル予測データを使用して、BLASTAM の計算を行いました。実験対象期間は 2003 年夏季の、それぞれ 6 月 20 日、6 月 30 日、7 月 10 日、7 月 20 日を初期値とする 4 期間×各 2 週間としました。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° （約 110km）間隔から 5km 間隔にしたデータを用いて、BLASTAM で葉いもち病の感染好適条件を求めました。9 つの予測結果それぞれを用いて BLASTAM を計算し、メッシュ毎に「感染可能性あり」の出現割合を求め、葉いもち発生確率としました（図 13）。なお、ここでは BLASTAM の結果が 1, 2, 3, 4, 10 のいずれかであれば「感染可能性あり」としました。

対照的な事例となった 6 月 20 日と 6 月 30 日を初期値とする期間を例に結果を示します。2003 年 6 月 20 日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ました（例として、図 14a）。それに対して、2003 年 6 月 30 日を初期値とした期間は、特に期間の後半で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で大きく異なる日が多くなりました（例として、図 14b）。

(a) 2003 年 6 月 20 日初期値、5 日目の例 (b) 2003 年 6 月 30 日初期値、7 日目の例

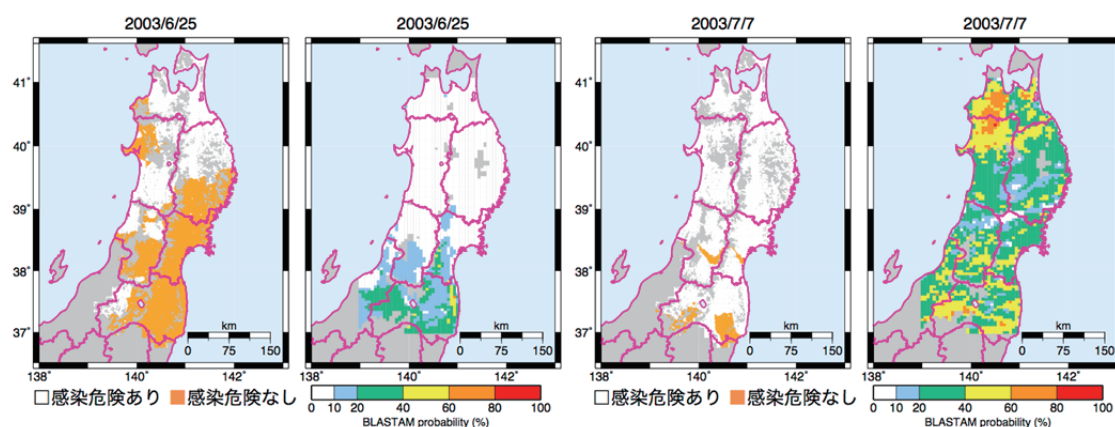


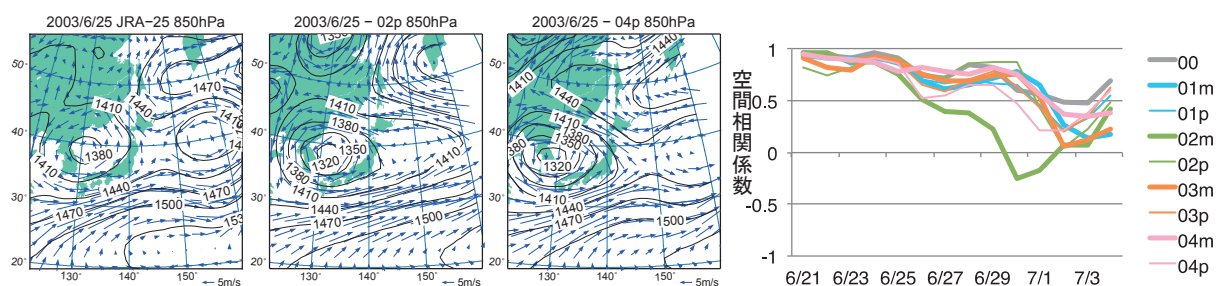
図 14 アメダス観測値により求めた感染好適条件 (a) とアンサンブル予測データによる葉いもち感染確率の分布 (b)

これらの原因は、気圧配置の予測精度と関係しています。5km 間隔にダウンスケールを実施する前の予測データの気圧配置を、再解析データによる実際の気圧配置と比較しました。比較にはアノマリ相関による空間相関係数（実際の気圧配置と予測された気圧配置とを比較するために、その時期の平均的な気圧配置からの両者の差で求めた相関係数）を用いて、気圧配置の類似度としました。実際と予測の気圧配置の例と、両者の空間相関係数の推移を図 15 に示します。

2003 年 6 月 20 日初期値による気圧配置の例（図 15a）では、再解析データとアンサンブル予測データとでよく似た気圧配置を示しています。両者の気圧配置の類似度を示す空間相関係数も、

ほとん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の予測精度が比較的よかったことを示していました。その一方で、2003 年 6 月 30 日初期値の例（図 15b）では、多くのメンバーで 5 日目以降に空間相関係数が大きく下がり、気圧配置が再現されていないことを示していました。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下がっていました。これらのことから、予測の精度が高く、気圧配置型の再現性が高い時期には、BLASTAM の結果もアメダス観測値と近い空間分布になることがわかりました。

（a）2003 年 6 月 20 日初期値、気圧配置は 5 日目の例



（b）2003 年 6 月 30 日初期値、気圧配置は 7 日目の例

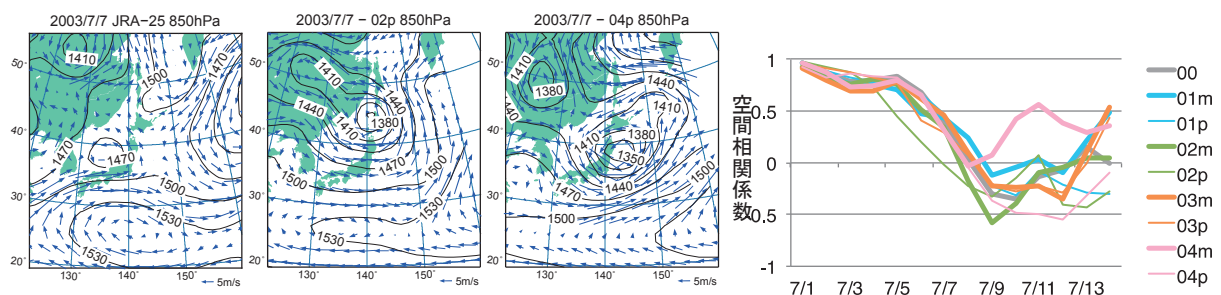


図 15 再解析データとアンサンブル予測実験による気圧配置の比較。

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。グラフは再解析データとアンサンブル予測 9 メンバーのアノマリ相関による空間相関係数の推移を示す。

3.2.4 おわりに

ここで示したアンサンブルダウンスケールデータによる「葉いもち感染確率」の予測は、実験段階にあるものです。今後、アンサンブルダウンスケールデータの実利用が始まると、どのくらいの確かさであるかを示した新たな形での情報提供（例として、図 16）が、BLASTAM をはじめとする農業気象分野へも活用されることが期待されます。

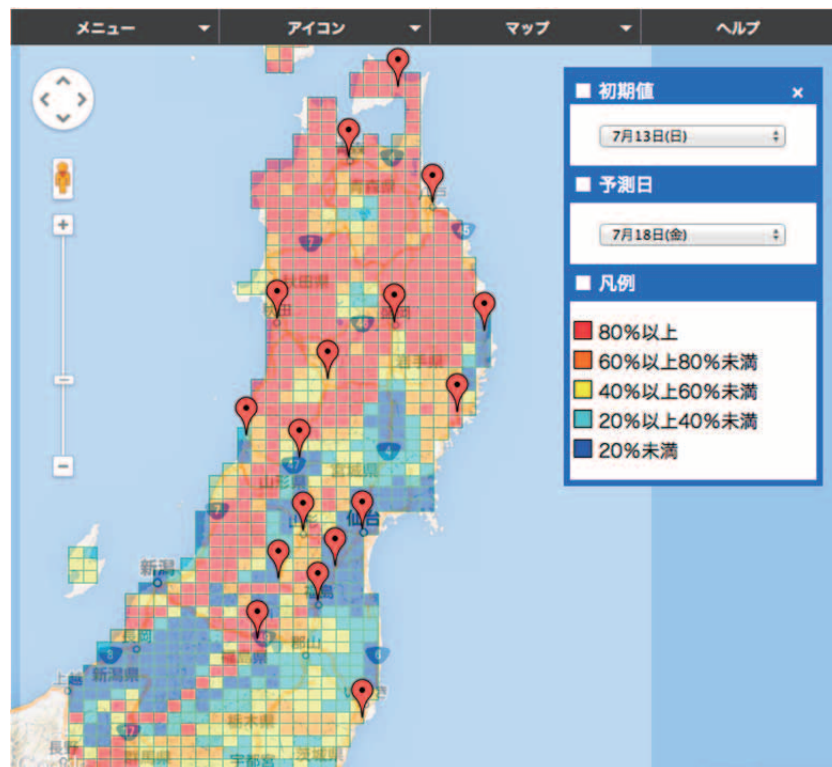


図 16 葉いもち感染危険度予測マップの web 上での表示例。

アンサンブルダウンスケール気象予測データ (27 メンバー、10km 間隔) を BLASTAM に適用し、感染危険ありを示したメンバーの割合をメッシュごとに示している。

3.3. 農業支援システム

3.3.1. はじめに：2週間先の低温・高温リスクの高まりを把握する技術とは？

これまでに東北農業研究センターと岩手県立大学で共同研究を行い、東北地方の農業従事者を対象に、ウェブサイトを通じて1週間先までの気温の予測等を用いた「水稻栽培管理警戒情報」を提供してきました（2010年より農業試験システムを一般公開しております。ウェブサイト <http://map2.wat.soft.iwate-pu.ac.jp/>）。

深水管理による冷害対策などには一定の準備期間を要することから、さらに早い時期から低温・高温のリスクの高まりを把握できるように、2011年より気象庁の協力のもと、2週間先までの予測情報による警戒情報を試行提供しています。2週間先までの予測情報は、アンサンブルダウンスケール予報（確率予報）であり、一般にあまり馴染みのないものであるため、警戒情報を分かりやすい言葉で表現し提供しています（警戒情報はメール配信もしています）。

3.3.2. 2週間先までの気温の予測情報を提供しています

2週間先までの予測情報には、東北地方全体を1kmメッシュに区切って示した気温予測（7日平均気温）と確率情報（低温、高温確率）があります（東北農業研究センターと気象庁の共同研究により作成しています）。

(1) 気温予測

気温予測（7日平均気温）は、東北農業研究センターが作成した1kmメッシュ気温平年値・標準偏差（対象期間は1981～2010年の30年）と気象庁の「異常天候早期警戒情報（以下、早警）」のガイダンス（アンサンブル予報から地域毎の気温平年差や降水量平年比を予測したデータ）を用いて作成しています（図17）。

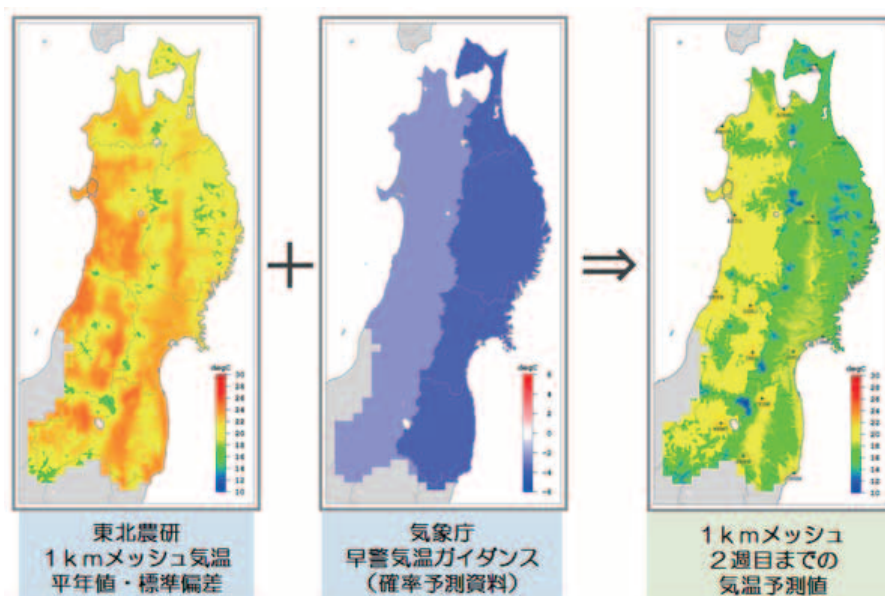


図17 東北地方1kmメッシュ気温予測値の作成方法。

2週間先の予測では、明日、明後日の天気予報のような精度のよい予測は困難ですが、気温の大まかな傾向などを把握することは可能です。図18は、低温が顕著であった、1993年の7月末を対象として、モデルによる予測実験を行った結果です。右の予測結果をみると、2週間前の時点で、左の解析値ほどではありませんが、北日本を中心とした低温が予測されています。このような情報により、いち早く低温などの兆候が分かれば、冷害対策に生かすことが期待できます。

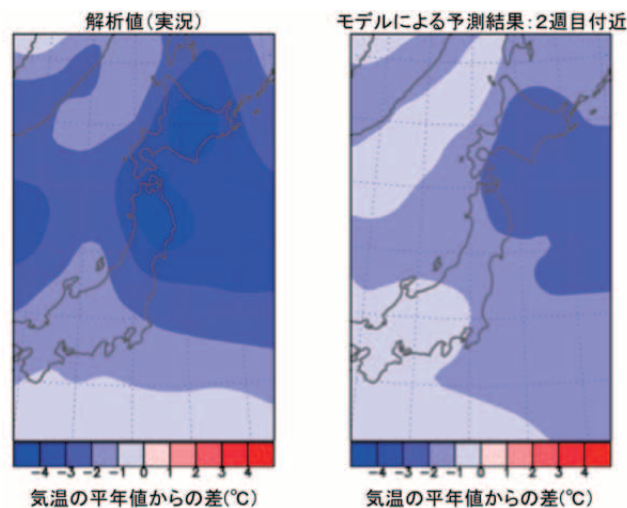


図18 1993年7月末のヤマセ時を対象とした、2週間先の予測実験結果（7日平均気温）。

(2) 確率情報

確率情報（低温、高温確率）は、各メッシュについて、水稻の低温・高温への影響が懸念される気温の確率です。表2に示すように、低温の基準は20℃以下としています。7月中旬から8月上旬にかけて気温が20℃より下がると、花粉の発育障害が起こり、受粉・受精が正常に行われななどの理由から、収量が著しく下がる危険性が高まります。また、高温の基準は27℃以上としています。8月上旬から8月下旬にかけて気温が27℃以上になる場合、高温登熟障害により品質が低下する危険性が高まります。

表2 水稻の警戒気温。

時期	警戒気温 (7日間平均)	懸念される症状	対策
7月中旬から8月上旬 (幼穂形成期～出穂期前)	20℃以下	障害不稔発生	深水管理など
8月上旬 (出穂期)	20℃以下	障害不稔発生	深水管理など
8月上旬から8月下旬 (出穂期～登熟初期)	27℃以上	高温登熟障害	掛け流し灌漑など

図 19 は、ヤマセによる低温が顕著であった、2003 年の 7 月末を対象として予測実験を行った結果です。左の平年値と比較すると、低温確率が大きく、低温のリスクが平年より高まっていることがわかります。右の実況値はこの時期に対応した実際の気温の分布です。水稻の低温障害が懸念される 20°C 以下の所を、青系の色で示しています。この事例では、中央の確率メッシュの 20% 以上に着目すると、実況で 20°C 以下の地域がかなり捉えられ、10% 以上に着目すればほぼ網羅されます。このように平年の確率と比べて低温（高温）確率が大きい場合には、10% や 20% のような小さい確率でも注意が必要な場合がありますので、この先の状況に注目しつつ、いざという時に深水管理などの対策ができるように準備するのがよいと考えられます。

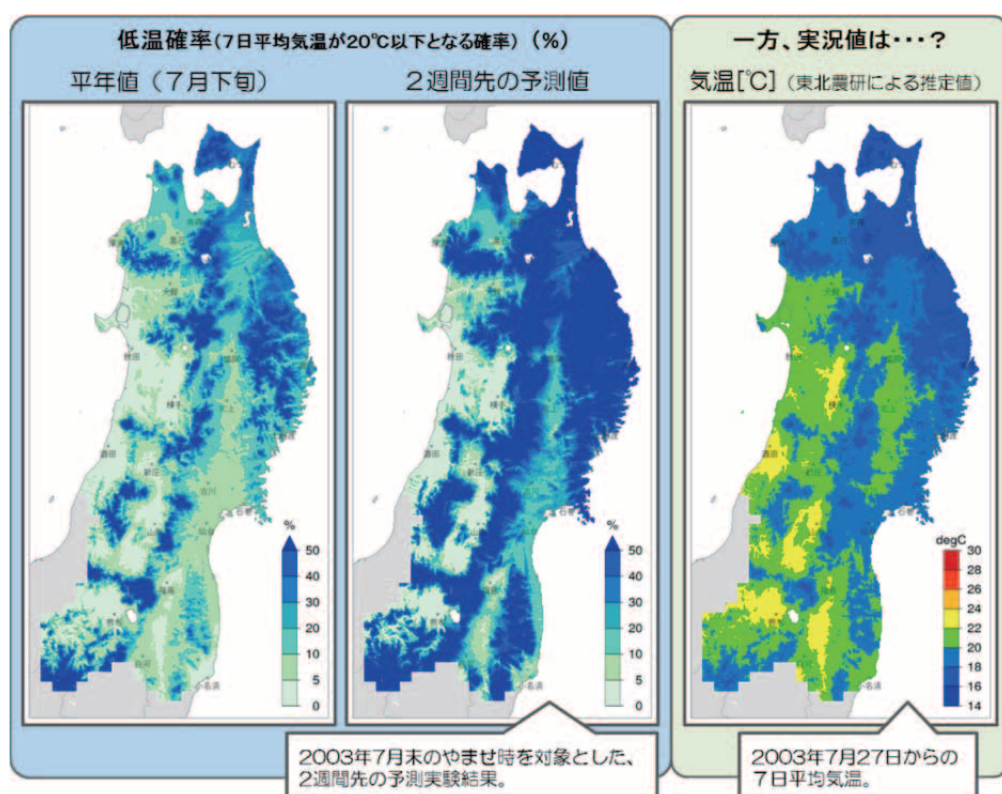


図 19 1993 年 7 月末のヤマセ時を対象とした、2 週間先の予測実験結果（警戒確率）。

3.3.3. 低温リスクと高温リスクの警戒情報を配信しています

2 週間先までの予測情報による警戒情報は、2 週間先までの予測情報の特性を考慮して、1 週間先までの警戒情報（栽培管理）の補助的な情報と 2 週間先までの警戒情報（低温、高温確率）のみの単独の情報の 2 つを提供しています。

(1) 1 週間先までの警戒情報（栽培管理）の補助的な情報

1 週間先までの予測情報を用いた栽培管理の警戒情報では、生育モデルからユーザの圃場での生育段階を予測し、各生育段階での警戒温度をもとに低温、高温のリスクがある場合に警戒情報を提供しています。1 週間先までに低温、高温のリスクがある場合には、さらに 2 週間先までの

予測情報から低温、高温のリスクがあるかを警戒情報として提供します。すなわち、低温、高温のリスクが2週間先まで継続する場合に注意を促し、早目の対策を立てる判断材料として活用できるようにしています。

図20に示すように、低温（20℃以下）、高温（27℃以上）の警戒情報は、低温、高温確率が30%以上の場合に提供します（確率と実況出現頻度から基準を定めています）。ただし、高温の警戒情報においては、8月下旬から9月には27℃以上の確率が30%となることがほとんどないため、刈り取り適期等に活用することを考え、アンサンブル平均の平年差が+1.5℃以上となる場合に警戒情報を提供しています（気象庁から高温の異常天候早期警戒情報が発表されるレベルに近い条件で警戒情報を提供しています）。

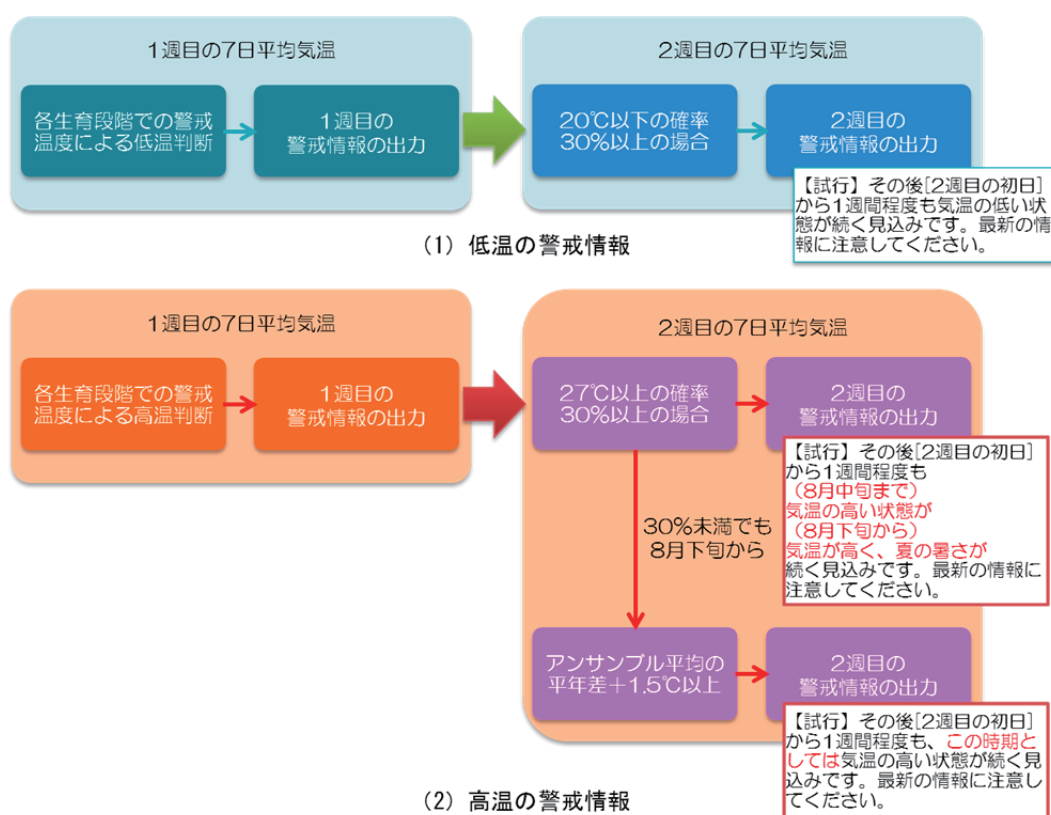


図20 1週間先までの警戒情報（栽培管理）の補助的な情報。

(2) 2週間先までの警戒情報（低温、高温確率）のみの単独の情報

2週間先までの警戒情報のみの単独の情報では、低温、高温確率を分かりやすい言葉で表現し提供します（表1の低温、高温障害の危険期に警戒情報をメールで配信しています）。

図21に示すように、低温（20℃以下）、高温（27℃以上）の警戒情報は、低温、高温確率が20%以上の場合で、なおかつ、低温、高温確率が平年の出現確率より大きい場合に提供します（確率と実況出現頻度から基準を定めています）。20%の小さい確率でも平年の確率と比べて低温、高温確率が大きい場合に注意を促し、早目の対策の判断材料として活用できるようにしています。

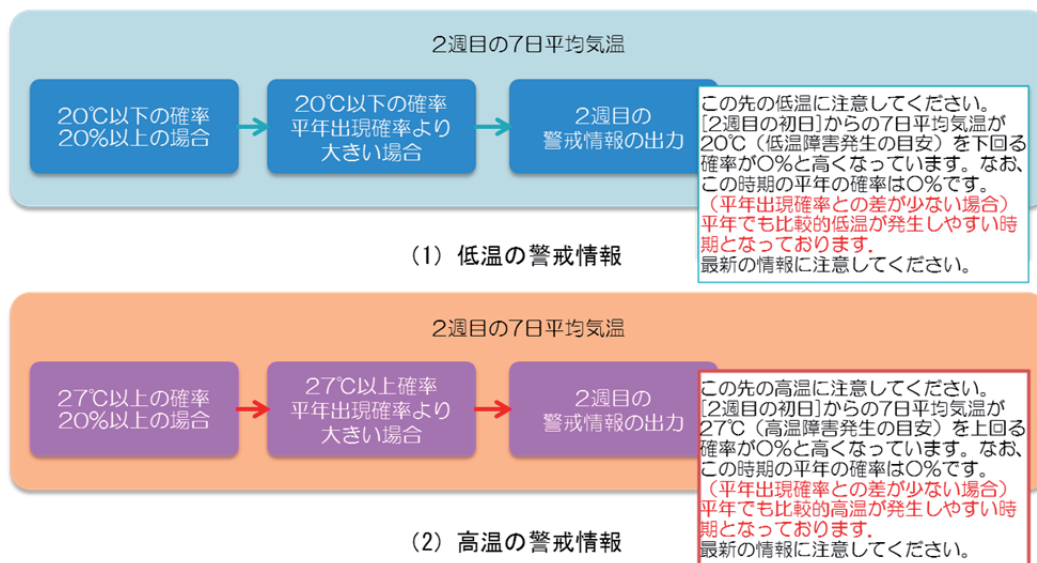


図 21 2週間先までの警戒情報（低温、高温確率）のみの単独の情報。

3.3.4. まとめ

本節で紹介しました農業支援システム（図 22）は、ユーザ登録をすれば、どなたでも無料で利用できます（ウェブサイト <http://map2.wat.soft.iwate-pu.ac.jp/> からユーザ登録ができます）。早い時期から低温・高温のリスクの高まりを把握できるように、ウェブサイトおよびメールにより情報提供を行っていますので、深水管理などの対策を実施する際の判断材料の 1 つとしてご利用して頂ければと思います。

図 22 農業支援システム（ウェブサイト <http://map2.wat.soft.iwate-pu.ac.jp/>）。

4. 終わりに

本稿は、大学、農業研究機関、気象機関が協力し、東北の農業（稲作）の地球温暖化適応策を取りまとめたものです。地球温暖化予測実験結果をダウンスケールし、地域の温暖化予測データを作成し、適応策を検討しました。内容は、気候の平均的状态の変化への対応と、気候変動に対処するための農業気象情報の高度利用の2点です。

1 節でも書いた通り、地球温暖化予測には、様々な不確実性が残されています。また、温暖化による影響は地域によって異なり、地域の温暖化予測は一層難しく不確実性も大きい、と考えなければなりません。温暖化予測の精密化をはかり、適応策も随時修正していく必要があります。

地球温暖化が地域社会に与える影響はたいへん複雑です。このため、温暖化適応策も多岐にわたります。地域の問題は地域で考えていくことが大切で、そのためには、地域における横の連携が大事です。有効な適応策を提案するためには、産官学や学際、異業種間での議論を一層深める必要があります。

地球温暖化予測情報を地域の発展に役立てるためには、そもそも、日々の気象予測を有効活用できる基盤が必要です。気象予測技術の発展は顕著であり、予報を活用できる範囲は確実に広がります。確率表現が可能となるアンサンブル予報も徐々に公開が始まりつつあります。気象データはビッグデータの時代を迎えます。膨大な気象予測データから地域に役立つ情報を引き出すための高度利用技術がますます重要になります。

謝辞

本稿は、気候変動適応研究推進プログラム「ヤマセと冬季モンスーンに関する先進的ダウンスケール研究」の研究成果と様々な議論に基づいています。また、全球気候モデルによる温暖化データのダウンスケールには、東北大学サイバーサイエンスセンターのスーパーコンピュータを利用しました。同センター関係各位の有益なご指導とご協力に感謝いたします。本研究で使用した気象庁データ「週間予報データ」は気象庁と（社）日本気象学会の研究協力の枠組みである「気象研究コンソーシアム」を通じて提供されました。

用語解説

- 全球気候モデル

全球気候モデルは、大気・海洋・陸面・雪氷などの変化を、流体力学・力学・化学・物理学・生物学などの方程式を用いて表現し、地球規模での気候をシミュレーションする数値モデルの総称。地球温暖化の予測や原因の推定などに用いられ、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の報告書の根拠となる研究成果にも数多く利用されています。

- 領域気象モデル

領域気象モデルは、大気・海洋・陸面・雪氷などの変化を、流体力学・力学・化学・物理学・生物学などの方程式を用いて表現し、着目する領域内の気象を詳細にシミュレーションする数値モデルの総称。防災気象情報等を提供するために用いられています。

- シナリオ

将来の気候を予測するために用いるための社会の変化の想定のこと。特に、温室効果ガスの排出量についてのシナリオを、排出シナリオと言います。排出シナリオの中で、特に IPCC の「排出シナリオに関する特別報告 (Special Report on Emission Scenarios)」が提案したものを SRES シナリオと言います。気象庁の「地球温暖化予測情報第 8 巻」に用いられている SRES シナリオは、その中の一つ SRES A1B シナリオです。このシナリオは、高度経済成長が続き、地域間格差が縮小し、新しい技術が急速に導入される未来社会で、全てのエネルギー源のバランスを重視するという、社会変化を想定したものです。このシナリオの他に、二酸化炭素の排出を減少させていく社会を想定したシナリオ、あるいは、二酸化炭素排出量が増えていく社会を想定したシナリオも存在します。

- 力学的ダウンスケーリング

数値気象モデルを用いた再計算によるデータの詳細化のこと。低解像度の全球気候モデルによる大規模場の計算結果をもとに、ある領域について、高解像度の地形等を入力して再計算することを言います。これにより、指定した領域について、下部境界の状態に大きく依存した小さな現象を解像することができます。温暖化予測については、全球で計算された気候の変化が、着目する地域ではどのように現れるかがわかるようになります。本研究では、東北大学サイバーサイエンスセンターのスーパーコンピュータを利用して、計算を実施した。

参考文献

- [1] 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>
- [2] 下野裕之, 2012: 地球温暖化でも冷害はなくなる—そのメカニズムと対策, 農山漁村文化協会.
- [3] ト蔵建治, 2001: ヤマセと冷害: 東北稲作のあゆみ, 成山堂書店.
- [4] 松村伸二, 2011: 2010年夏季の異常高温と農業被害 -水稲を中心として-, 自然災害科学, 30(2), 169-192.
- [5] 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>
- [6] 林陽生, 2009: 地球温暖化で日本農業はどう変わる, 家の光協会.
- [7] 渡邊紹裕, 2008: 地球温暖化と農業-地域の食料生産はどうなるのか?, 昭和堂.
- [8] 越水幸男, 1988: アメダス資料による葉いもち発生予察法. 東北農業試験場研究報告, (78), 67-121.
- [9] 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. 東北農業試験場研究報告, (78), 123-138.