

# 気象庁全球週間アンサンブル予報のダウンスケールデータを用いた相対湿度および葉面濡れの確率予報実験と検証

池 田 翔<sup>\*1</sup>・山 崎 剛<sup>\*2</sup>・岩 崎 俊 樹<sup>\*2</sup>  
福 井 真<sup>\*2</sup>・菅 野 洋 光<sup>\*3</sup>・大久保 さゆり<sup>\*4</sup>

## 要 旨

イネ葉いもち病等の誘因となる葉面の濡れについて、降水による濡れだけではなく結露による濡れにも対応できる葉面濡れ確率予報システムを開発し、圃場の観測値を用いて検証を行った。まず、全球週間アンサンブル予報を気象庁非静力学モデルにより力学的にダウンスケールした結果、濡れと関係の深い相対湿度89%以上となる予報確率は、予測対象日が降水日の場合は4日前から、非降水日の場合は1週間前から、気候学的な出現確率よりも精度が高かった。次に、高解像度化したアンサンブル予報データを利用し、濡れを相対湿度の閾値で判定する湿度法と陸面過程モデルで推定する手法の性能を比較した。結露とその蒸発を陽に計算できる陸面過程モデルを用いることで、既存の湿度法に対して、地理的な汎用性と葉面濡れ継続時間の予測精度が向上することを確認した。本研究で提案する葉面濡れ確率予報は、決定論的手法に対して信頼度情報を付加できるという長所を持つ。

## 1. はじめに

農作物の「葉面濡れ」は、病原菌による葉面病害の発生に関わる重要な指標である。葉面濡れ継続時間が病害発生に必要な時間を超え、かつ病害発生に適する温度条件が満たされると病害が発生する。イネ葉いもちは、いもち病菌の胞子が葉に付着して侵入菌糸が発生し、イネ体内に侵入するまでに、15~25°Cの気温下での葉面濡れ時間が10時間以上必要である(吉野1973; 山口1984; Kim and Mogi 1986)。

気象が規定する葉面濡れには、降水や水蒸気の結露による濡れがあり(Wichink Kruit *et al.* 2008; 北海道中央農試 2011; 菅野ほか 2018)、いもち病の発生に好

適な気象条件として以下の3点が挙げられる。①弱くて持続的な降雨(大雨だと菌が流れてしまう)、②葉面の水分が乾かない程の弱い風、③低日照。すなわち、梅雨期頃にヤマセが持続的に吹走している時に感染しやすいとされている(菅野・小林 2008)。

従来、イネ葉いもち病の予察には、BLASTAM(越水1988; 林・越水1988)が広く使われてきた。BLASTAMは、葉面濡れ時間と感染に必要な適温をアメダス観測値(降水量、日照、風速、気温)から経験的に推定し、葉いもち発生危険度を判定する。ただし、早朝の「結露」等、降水によらない湿潤状態の発生が多い盆地や山間地の水田において、BLASTAMではいもち病を予察しきれないことが指摘されている。これは、BLASTAMは相対湿度を利用しないため、結露を考慮できないことが要因と考えられている(大久保ほか2015)。

葉の濡れの推定手法には、相対湿度の閾値で判定する湿度法のような経験的手法と、陸面過程モデルを用いて水・熱収支に基づき推定する物理的手法がある。湿度法のような経験モデル(Gleason *et al.* 1994; Sentelhas *et al.* 2008)の長所は、放射量のような入手しづ

\*1 (連絡責任著者) 東北大学大学院理学研究科(現: 仙台管区気象台)。

E-mail: sho.iked@met.kishou.go.jp

\*2 東北大学大学院理学研究科。

\*3 農研機構農業環境研究部門。

\*4 農研機構東北農業研究センター。

—2019年5月30日受領—

—2021年10月22日受理—

らい予報データが無くても、圃場ごとに相対湿度の閾値を適切に設定できれば、物理モデル並みの濡れ再現性が得られる点である (Wichink Kruit *et al.* 2008). ただし、観測と濡れ予測式を圃場ごとに作成するコストがかかる点と現在気候からの変動が想定される将来気候のもとで不向きな点は短所である。

一方で、Yamazaki *et al.* (2004) 等の陸面過程モデルの長所は、天気予報や気候予測で使われる数値モデルの気象データを用いて、物理的關係 (葉面水・熱収支) から結露や雨滴による濡れを陽に計算することができ、いずれの圃場にも同等の条件で濡れを推定することができる点にある。

近年、社会の自然志向の高まりと農作業に係る費用・手間の削減のため、限定的、効率的な薬剤散布が求められている。しかしながら、決定論的予報を用いた病害予察結果は、「感染あり」か「感染なし」で表されるため、薬剤散布等に多くの費用を要する農業現場にとって、当たり外れの影響が大きいが想定される。そこで、アンサンブル予報から得られる信頼度情報を付加できれば、予察の利用価値が高まるであろう。このような考えのもと、既に、9メンバーによるアンサンブルハインドキャスト実験結果 (Fukui *et al.* 2014) を BLASTAM に適用した、イネ葉いもち感染確率予報の精度検証が行われているが (紺野ほか 2015)、結露による濡れに対応できないことが課題として残っている。また、適切な確率値を算出するために、メンバー数を更に増やすことが望ましいとされている。

そこで本研究では、葉面濡れを物理的に推定できる陸面過程モデル2LM (Two Layers Model) を用いて、結露にも精度良く対応できる葉面濡れ確率予報システムを提案することを目的とする。そのために、確率表現を更に良くする理由で、紺野ほか (2015) が用いたメンバー数の3倍となる、週間アンサンブル予報の27メンバーすべてを使うこととした。

## 2. 方法

まず、濡れに重要な相対湿度の再現性を確かめるため、気象庁非静力学モデル (Saito *et al.* 2007) の中の2つの陸面過程の比較を行った (STEP0)。気象庁全球解析値を初期値・境界値に用いて、1日ごとに初期化して短期積分 (24時間予報) を繰り返し、水平解像度5 km にダウンスケールを行い、相対湿度の再現性を検証した。次に、第1図のように、気象庁全球週間アンサンブル予報をメンバーごとに気象庁非静力学モ

デルを用いて力学的にダウンスケールした (STEP1)。さらに、力学的ダウンスケールにより高解像度化したアンサンブル予報データを用いて、湿度法 (菅野ほか 2018) または陸面過程モデル2LM (Yamazaki *et al.* 1992, 2004; Yamazaki 2001) によりイネ葉面濡れの有無を計算し、それぞれの濡れ推定手法の濡れ確率として出力した (STEP2)。なお、本論文において、湿度法での相対湿度の閾値は、菅野ほか (2018) が宮城県名取市の試験水田において最適化したイネ葉面濡れ指標である89%を用いた。一方、陸面過程モデル2LMは、葉面保水率 (葉面の最大保水量に対する計算した保水量の割合) が0より大きければ、葉面濡れありと定義した。また、一般にアンサンブルメンバー数を増やせば、確率予報の精度は向上することが期待されるため、親モデルの週間アンサンブル予報の27メンバーすべてを用いた。

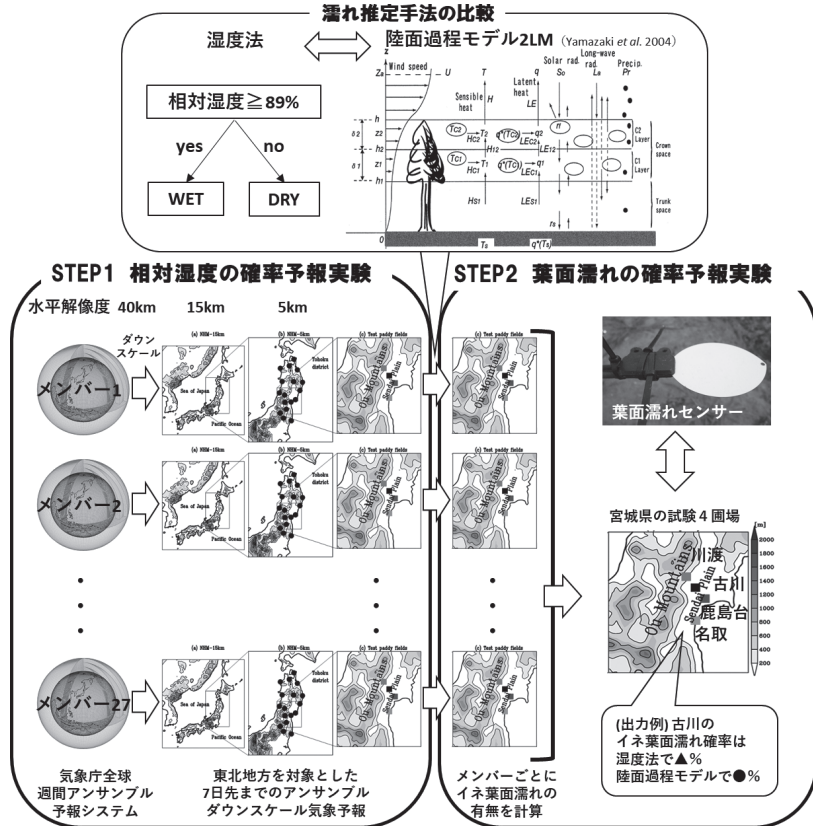
葉面濡れ確率予報システムを提案するために、以下の2.2~2.6節に記す検証を行った。これらの検証の1つ目の目的は、濡れと関係の深い「事象①: 相対湿度89%以上」の予測可能性を確かめることである。2つ目の目的は、「事象②: イネ葉面濡れあり」について、2つの濡れ推定手法 (湿度法と陸面過程モデル2LM) の比較を行い、その予測精度を確かめることである。

次節以降、圃場の観測データと各検証目的・指標について記す。検証に用いた予報モデルと観測データは第1表、検証指標の簡単な説明は第2表に整理した。

### 2.1 圃場 (水田) における観測

圃場における観測は、2015年6~8月にかけて、第1図に示す宮城県内の名取、鹿島台、古川、川渡で実施した。各圃場の気候学的特徴は、圃場に隣接するアメダスの平年値を用いて、第3表にまとめた。第2図に示すように、イネの植生上方の気象要素 (気温、風速、相対湿度、日射量、下向き長波放射量、降水量) と、葉面濡れセンサーによるイネの葉面濡れ状態についてのデータを取得した。測定高度について、気温、風速、相対湿度は地上約2 m、日射量、下向き長波放射量は地上約1 m、降水量は地上付近である。葉面濡れセンサーは地上約50 cm のイネの植生の中に設置した。また、観測に使用した測器を第4表に示す。

測定水田の周辺環境について、名取は0°~180°方向 (東側) に広がる水田から100 m 程度は離れるが、観測した風向は北~北東と東~南が上位70%程度を占めており、概ね水田上を吹走した気流を観測したと考える。一方で、鹿島台、古川、川渡は水田に囲まれていた。



第1図 結露対応版の週間メソアンサンブル葉面濡れ予報システムの概要。検証を行う東北地方における気象庁の17地上気象観測点は黒丸で、宮城県内の試験4圃場は四角で地点名とともに示した。地形図の等高線は、200m、400m、800mを示す。予報実験では、週間アンサンブル予報の27メンバーすべてを用いて、水平解像度5kmについて、初期時刻15UTCで7日先までダウンスケールを行った。また、葉面濡れの推定には、図の上方に示す湿度法と陸面過程モデル2LMを用いた。

第1表 検証に用いた予報モデルと観測データ。MRI/JMA-SiBおよびSLABは、気象庁非静力学モデルの中の陸面過程モデルである。MRI/JMA-SiBはキャノピー（植生）の効果があるが、SLABはキャノピー（植生）の効果がない陸面過程モデルである。一方、2LM (Yamazaki *et al.* 2004) は、気象庁非静力学モデルとは独立なキャノピー（植生）を持つ陸面過程モデルである。また、相対湿度のバイアス補正は、付録Dの(D1)式の線形重回帰式による。

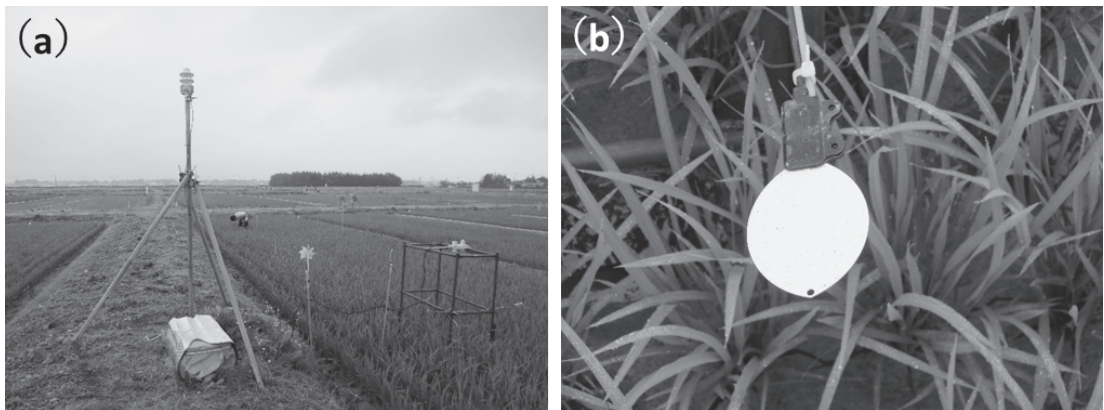
STEP	検証名	入力データ (親モデル)	気象庁非静力学モデルの中の陸面過程	濡れ推定 モデル	相対湿度のバイアス補正の有無	観測データ
STEP0	検証A	全球解析値	MRI/JMA-SiB および SLAB	—	無：圃場	圃場の相対湿度
STEP1 (相対湿度)	検証B	全球週間アンサンブル予報値	SLAB	—	無：圃場, 有：東北地方	圃場および東北地方 17地点の相対湿度
	検証C	全球週間アンサンブル予報値	SLAB	—	有：東北地方	東北地方17地点の相 対湿度
STEP2 (濡れ)	検証D	全球週間アンサンブル予報値	SLAB	湿度法	有：圃場	圃場の相対湿度およ び濡れセンサー
	検証E	全球解析値	SLAB	湿度法および 2LM	無：圃場 (相対湿度 以外も無)	圃場の濡れセンサー
	検証F	全球週間アンサンブル予報値	SLAB	湿度法および 2LM	無：圃場 (相対湿度 以外も無)	圃場の濡れセンサー

第2表 各検証指標の説明.

検証指標	STEP	検証名	式番号	説明	使用図
バイアス	STEP0	検証 A	—	予報値が持つ観測値との系統的な誤差 (最適値は 0)	第 3 図
アンサンブルスプレッド	STEP1	検証 B	(A1) 式	アンサンブルメンバーの分散 (バラツキ)	第 4 図
$RMSE_{EM}$		検証 B	(A2) 式	アンサンブル平均予報値の予報誤差	第 4 図
Spread-Skill の関係 $R$		検証 B	(A3) 式	比が 1 で分散 (バラツキ) が最適な アンサンブル予報	第 5 図
確率のバイアス	STEP 1, 2	検証 C, D	(B2) 式	確率の平均値が持つ観測頻度との系統的な誤差 (最適値は 0)	第 7 表
ブライアスコア (BS)	STEP1	検証 C	(B3) 式	確率予報の予報誤差 (最適値は 0 で大きいほど悪い)	—
ブライアスキルスコア (BSS)		検証 C	(C1) 式	気候学的な出現確率を基準とした 確率予報の善し悪し (最適値は 1.0 で正の時に確率予報が有効)	第 6 図
信頼度曲線	STEP2	検証 D	—	確率〇%という予報が実際にその通りかどうか (対角線で最適)	第 7 図
スレットスコア		検証 E	—	葉面濡れの適中率 (最適値は 1)	第 8 図
頻度バイアス		検証 E	—	濡れ観測回数に対する濡れ予報回数の比 (最適値は 1)	第 8 図
ROC 面積		検証 F	—	ROC 曲線より下側の面積で大きいほど 予報確率による検出力が高い	第 9 図

第3表 試験4圃場の気候学的特徴について. 気象データは各試験圃場に隣接するアメダスの平年値 (1981~2010年の6~8月) より算出した. なお, 気温の日較差は, 日最高気温と日最低気温の差である.

圃場名	施設名	緯度 (北緯)	経度 (東経)	標高 [m]	降水量 [mm/month]	気温の日較差 [°C]	平均風速 [m/s]
名取	耕耘アグリサービス	38度8.3分	140度55.0分	2	141.5	6.1	2.9
鹿島台	東北大学大学院生命科学研究所附属 湛水生態系野外実験施設	38度27.6分	141度5.5分	3	138.6	7.5	2.2
古川	宮城県古川農業試験場	38度35.9分	140度54.7分	28	146.8	8.0	1.9
川渡	東北大学大学院農学研究所附属 複合生態フィールド教育研究センター	38度44.6分	140度45.6分	170	195.8	8.5	1.2



第2図 宮城県古川農業試験場の水田における観測 (著者が2013年7月に撮影). (a) 観測した気象データは気温, 風速, 相対湿度, 日射量, 下向き長波放射量, 降水量. (b) 葉面濡れセンサーをイネの植生の中に設置.

2.2 【検証 A】アンサンブル予報実験に向けた相対湿度の再現性

濡れに重要な相対湿度の再現性を確かめるために、気象庁非静力学モデルの中の2つの陸面過程の比較を行った。1つは、MRI/JMA-SiB (Simple Biosphere) モデル (Sellers *et al.* 1986 ; 大泉・三浦 2008) で、地表面の水・熱収支と大気下層の作用が精緻な、キャノピー (植生) を含む陸面過程モデルである。もう1つは、SLAB モデル (原 2008) で、キャノピー (植生) はないが地表面の水・熱収支の計算は行われている陸面過程モデルである。比較を行う理由は、MRI/JMA-SiB の植生濡れを利用できれば、大気-植生間で物理的に一貫した葉面濡れ予報を期待できるからである。ダウンスケールの初期値・境界値に用いたデータは、気象庁全球解析値と海面水温解析値 (NOAA Daily OISST ; Reynolds *et al.* 2007) である。気象の再現データの作成手法は、気象庁 DSJRA-55 (Kayaba *et al.* 2016) を参考にした。すなわち、1日ごとに初期化して短期積分 (06UTC 初期値の24時間予報) を繰り返すことで総観場の予報誤差は小さくし、1日を通しては物理的連続性のある水平解像度 5 km の時系列気象データを作成した。陸面過程以外の物理過程は、次節以降で説明するアンサンブル予報実験も含めすべて同じ設定とした。なお、結果に記すが、以降のアンサンブル予報実験では、濡れに重要な相対湿度の再現性が良い SLAB モデルを選択した。

【検証 A】では、圃場における相対湿度の時別値について、2015年6~8月の期間の統計的なバイアス (系統誤差) の検証を行った。

2.3 【検証 B, C】相対湿度のアンサンブルスプレッドと予測可能性  
アンサンブルダウンスケー

ル予報実験の設定を第5表に示す。TIGGE (THORPEX Interactive Grand Global Ensemble ; Swinbank *et al.* 2016) アーカイブの気象庁全球週間アンサンブル予報システム (JMA-WEPS) から得た鉛直層の粗い摂動成分を内・外挿して (Saito *et al.* 2010), 決定論的な気象庁全球数値予報モデル (JMA-GSM) に線形結合し、全球アンサンブル27メンバーを作成した。予報事例数は2015年6月1日~8月31日の92初期値とし、水平解像度 5 km で7日予報 (165時間予報) を行った。なお、実験名 NHM-15km/NHM-5 km の初期時刻は12UTC/15UTC である。

【検証 B】では、相対湿度のアンサンブルスプレッドについて、Spread-Skill の関係 (付録 A 参照) を用いて検証を行う。また、【検証 C】では、濡れに重要な指標となる「事象①：相対湿度89%以上」の予測可能性を確かめるために、ブライアスコア (付録 B 参照) よ

第4表 試験4圃場における農業気象観測システム。葉面濡れセンサーはすべての圃場で、LWS-L Dielectric, Campbell Scientific を用いた。

	名取	鹿島台	古川	川渡
気温	HMP155, Vaisala	HMP155, Vaisala	WXT520, Vaisala	WXT520, Vaisala
風速	CYG-5108, Young	CYG-5103, Young	WXT520, Vaisala	WXT520, Vaisala
相対湿度	HMP155, Vaisala	HMP155, Vaisala	WXT520, Vaisala	WXT520, Vaisala
日射量	CHF-LP02, Hukseflux	CHF-LP02, Hukseflux	CHF-SR01, Hukseflux	MR-22, Eko
下向き長波放射量	CHF-IR02, Hukseflux	CHF-IR02, Hukseflux	CHF-IR01, Hukseflux	CHF-IR02, Hukseflux
降水量	CTKF-1, climatec	CTK-15PC, climatec	AMeDAS, JMA	AMeDAS, JMA

第5表 週間アンサンブルダウンスケール予報実験の設定。

実験名	NHM-15km	NHM-5 km
水平解像度	15km	5 km
格子数	130×140×36	130×160×36
予報時間	168時間	165時間
タイムステップ	60秒	20秒
初期値・境界値	JMA-WEPS	15km の出力値
雲物理過程	氷相を含むバルクモデル	
対流パラメタリゼーション	Kain-Fritsch スキーム (Kain and Fritsch 1990)	
乱流クロージャー	Improved Mellor-Yamada level 3 スキーム (Nakanishi and Niino 2009)	
陸面過程	SLAB モデル (原 2008)	
海面水温	NOAA Daily OISST (Reynolds <i>et al.</i> 2007) メンバー共通の偏差固定予報 SST (持続予報)	

り算出するブライアスキルスコア（付録C参照）を用いて検証を行う。ここで、観測データに気象庁の相対湿度の特別値も用いたのは、圃場だけでは空間代表性に問題があることと、気候学的な出現確率を得るために長期間の観測データが必要となるからである。気候学的な出現確率の算出には、1990～2014年の観測データを用いた。なお、各スコアの特別値を7日先までの予報日ごとに日平均化し、2015年6～8月の期間について統計的な検証を行った。

2.4 【検証D】湿度法に基づく濡れ確率予報の信頼度

まずは、「事象②：イネ葉面濡れあり」について、簡便な湿度法の予報信頼度を検証した。沿岸の名取で最適化された相対湿度の閾値（89%以上）が、他の地点でも適用できるかどうか確かめることを目的とする。ここで、各アンサンブルメンバーの相対湿度の予報値は、線形重回帰式（付録Dの(D1)式参照）により、予報地点と予報時間ごとにバイアス（付録Bの(B2)式参照）を除去した。予報信頼度の検証には、信頼度曲線（横軸に事象の予報確率をとり、検証期間中、その予報確率が出たときに実際にその事象が観測された頻度を縦軸に表す図）を用いる。なお、この信頼度曲線は、傾き1の対角線であることが望ましく、濡れと相対湿度の特別値を用いて7日先までの予報日ごとに集計した。確率のバイアスの算出では、濡れと相対湿度のバイアスの特別値を予報日ごとに日平均化した。これらについて、2015年6～8月の期間の統計的な検証を行った。

2.5 【検証E】湿度法と陸面過程モデル2LMによる濡れ再現性の比較

陸面過程モデル2LM（Yamazaki *et al.* 2004）のメリットを湿度法と比較しながら確かめることが目的である。気象データは、初期値・境界値に全球解析値を用いて水平解像度5kmに高解像度化した、【検証A】のデータ（06UTC初期値の24時間予報の特別値）を利用する。気象庁非静力学モデルの中の陸面過程は、相対湿度の再現性が良いSLABモデルである。ここで、

気象データのバイアス補正は、バイアスを低減させる効果よりも、陸面過程モデル2LMの入力値として、6気象要素（気温、風速、相対湿度、日射量、下向き長波放射量、降水量）間の物理的不整合をもたらす可能性がある（Yoshida *et al.* 2015）。したがって、この6つの気象要素についてバイアス補正はしない。なお、陸面過程モデル2LMについては付録Eに示した。2手法により推定した葉面濡れの特別のスコアについて、2015年6～8月の期間の統計的な検証を行った。

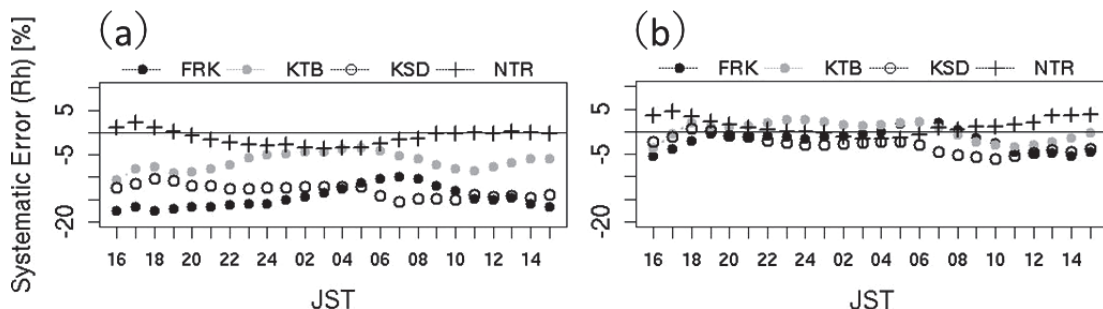
濡れのカテゴリー検証では、濡れの有無を予報と実況それぞれについて判定し、標本を第6表のように4つのカテゴリー（FO, FX, XO, XX）に分類する。検証指標には、濡れの適中率であるスレツスコア（Threat Score； $TS=FO/(FO+FX+XO)$ ）と頻度バイアス（Frequency Bias； $FB=(FO+FX)/(FO+XO)$ ）を用いた。スレツスコアは、予報または実況で「濡れあり」の場合の予報適中に着目して評価する。また、頻度バイアスは、実況で「濡れあり」に対する予報で「濡れあり」の事例数の比で、1.0より大きい（小さい）と予測頻度が過多（過少）であることを示す。両スコアの最適値は1.0である。

2.6 【検証F】湿度法と陸面過程モデル2LMによる週間濡れ確率予報の比較

【検証E】との違いは、週間予報における濡れ予報確率（7日先までの165時間予報）を用いて、2手法の濡れ検出力の比較を行うことを目的とした点である。2.3節に記述したように、本研究の週間メソアンサンブル濡れ予報の初期時刻は15UTCである。ここで、検証に用いるROC（Relative Operational Characteristics）曲線は、様々な確率を閾値として、それ以上（未満）ならば濡れあり（なし）の予報として分割表を作り、確率の閾値ごとに捕捉率（Hit Rate； $Hr=FO/(FO+XO)$ ）と誤検出率（False Alarm Rate； $Fr=FX/(FX+XX)$ ）を計算して、 $Fr-Hr$ 平面上に点をプロットしてつないだ曲線である。この確率予報に全く情報がなければ、 $Hr=Fr$ となり傾き1の対角線となる。ROC曲線は、この対角線より左上に膨らむほど良い確率予報であることを示すから、ROC曲線から下の面積であるROC面積は、確率予報の1つの評価指標となる（高野 2002）。【検証F】では、濡れ確率0～100%の間で10%ごとに増加させて、複数の濡れ確率を閾値とした。なお、ROC面積は、濡れ確率の特別値を用いて7日先までの予報日ごとに集計し、2015年6～8月の期間について統計的な検証を行った。

第6表 葉面濡れのカテゴリー検証に用いた2×2分割表。

		濡れセンサー検出	
		あり	なし
濡れ予報 (モデル)	あり	FO	FX
	なし	XO	XX



第3図 【検証A】試験4圃場における相対湿度のバイアス。気象庁非静力学モデルの中の陸面過程の比較で、(a)はMRI/JMA-SiBモデル、(b)はSLABモデル、黒色丸(FRK)は古川、灰色丸(KTB)は川渡、白色丸(KSD)は鹿島台、十字(NTR)は名取を示す。2015年6～8月の期間の統計的な結果を示し、バイアスなしで最適値の0(実線)となる。

### 3. 結果；相対湿度 (STEP0/1)

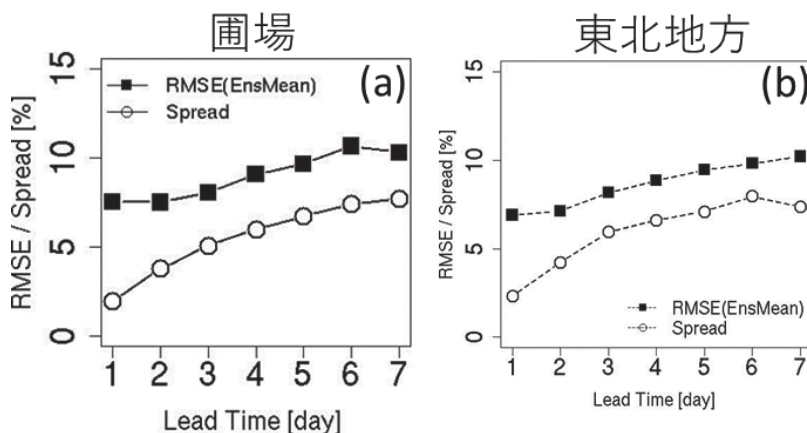
#### 3.1 【検証A】相対湿度の再現性

第3図は、気象庁非静力学モデルの中の陸面過程による相対湿度のバイアスの比較である。第3図aはMRI/JMA-SiBモデル、第3図bはSLABモデルを示す。MRI/JMA-SiBは、内陸・山地(古川、川渡、鹿島台)において負(乾燥)バイアスが大きかった。特に、非降水日は相対湿度の負(乾燥)バイアスや気温の正(高温)バイアス、比湿の負バイアスが顕著だった(図略)。

一般に、数値予報モデルに大きなバイアスがある場合、アンサンブル予報もそのバイアスを含んでしまい、アンサンブル予報の利用価値は低下する(経田2006)。したがって、以降のアンサンブル予報実験では、濡れに重要な相対湿度の再現性を優先し、気象庁非静力学モデルの中の陸面過程はSLABモデルを用いる。

#### 3.2 【検証B】相対湿度のアンサンブルスプレッド

第4図に、相対湿度の予報誤差とアンサンブルスプレッドの関係を示す。なお、東北地方における気象庁の観測地点については、【検証C】で予測可能性を検証するため、各アンサンブルメンバーの相対湿度の予報値に対して、付録Dの(D1)式によりバイアス補正を



第4図 【検証B】相対湿度の予報誤差とアンサンブルスプレッド。黒色四角はアンサンブル27メンバー平均値の2乗平均平方根誤差、白色丸は全27メンバーのアンサンブルスプレッドを示す。ただし、(a)は試験4圃場の平均、(b)は気象庁観測の東北地方17地点の平均である。2015年6～8月の92初期値による統計的な結果を示す。

した。第4図により、予報誤差に対してアンサンブルスプレッドは不足しており、特に予報初期において顕著である。すなわち、第5図に示すように、Spread-Skillの関係は1.0より小さい。アンサンブルスプレッドが予報誤差と同程度(Spread-Skillの関係が1.0)であれば、アンサンブルメンバーのより適切な分散(バラツキ)を利用し、現状よりも精度の高い確率予報が展開できる。

#### 3.3 【検証C】高湿度の予測可能性

ある予報対象時刻における観測値の確率分布に対して、アンサンブル予報値の確率分布の広がり方は、予報初期と後期では異なる。例えば、予報対象時刻16UTCに対して、初期時刻が15UTCの1時間予報

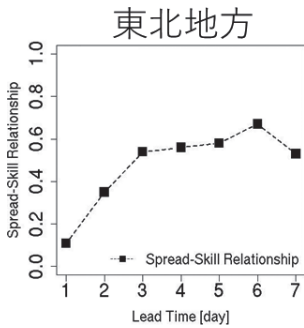
( $FT=1$ ) と145時間予報 ( $FT=145$ ) では、アンサンブルスプレッド (分散) は異なる。したがって、付録Bの(B2)式に示すように、予報時刻によって予報確率のバイアス  $b(FT)$  は異なる。そこで、アンサンブルスプレッドを補正する意義は、アンサンブル予報の確率分布を観測の確率分布に近づけ、確率のバイアスを小さくすることであると考えられる。

しかしながら、本研究では、各アンサンブルメンバーの予報値に対してバイアス補正をしたが、アンサンブルスプレッド (分散) の補正は行っていない。したがって、まずは、確率のバイアスの大きさを確認する。事象①(相対湿度89%以上)の予報確率のバイアス

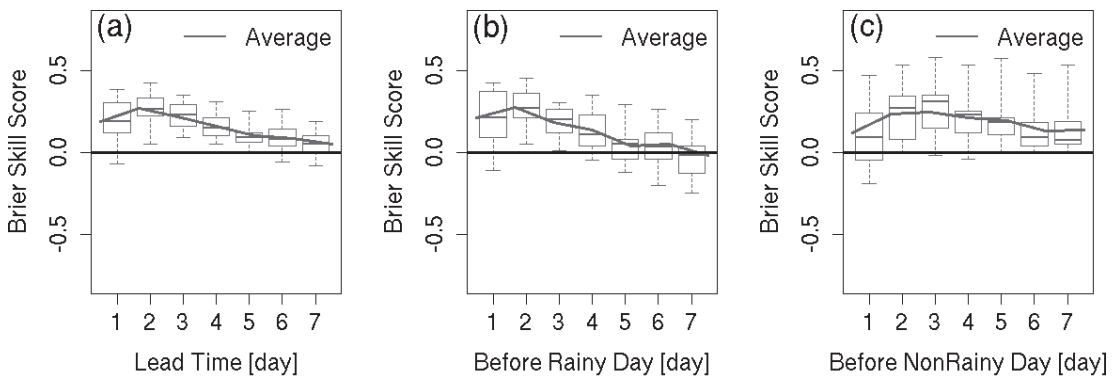
$b(FT)$  は、予報期間を通して東北地方17地点の平均で最大 $-0.1$  ( $-10\%$ )程度だった。付録Bの(B4)式第2項のバイアス項  $b(FT)^2$ は $0.01$ から $0.02$ 程度、ブライアスコア  $BS(FT)$ は $0.13$ から $0.17$ 程度であり、(B4)式における  $b(FT)^2$ の項の  $BS(FT)$  への寄与はごく小さいため、算出した  $BS(FT)$  をバイアスのない確率によるブライアスコア  $BS'(FT)$  と考えて以下議論を行う。

第6図aに示すように、ブライアスキルスコアの東北地方17地点の平均値は、7日先にかけて正である。よって、相対湿度が89%以上となる予報確率は、事象の気候学的な出現確率による予報に対して、1週間程度は精度が高い。次に、第6図bは予測対象日が降水日、第6図cは予測対象日が非降水日に、相対湿度が89%以上となる予報確率のブライアスキルスコアとリードタイムの関係を示す。予測対象日が降水日に対するブライアスキルスコアの算出では、例えば、ある観測地点における降水観測日(8月8日)に対して、8月7日初期値の1日予報、8月6日初期値の2日予報、…、8月1日初期値の7日予報を用いた。非降水日に対しても同様に統計処理した。ブライアスキルスコアの17地点平均値が正となる期間に注目すると、相対湿度が89%以上となる予報確率は、予測対象日が降水日の場合は4日前から、非降水日の場合は1週間前から、気候学的な出現確率よりも精度が高い。

Fukui *et al.*(2014) は、日平均気温のアンサンブル

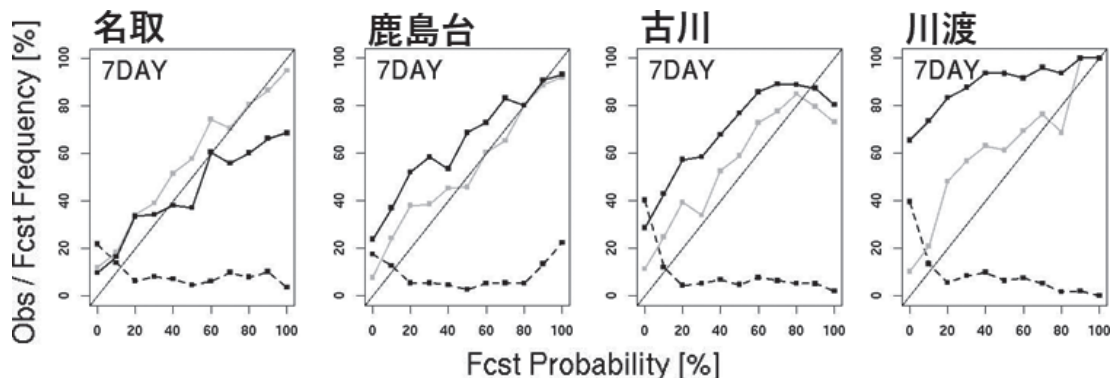


第5図 【検証B】相対湿度の Spread-Skill の関係。第4図bより算出した Spread-Skill の関係で、最適値は1.0である。2015年6～8月の92初期値による統計的な結果を示す。



第6図 【検証C】事象①(相対湿度89%以上)の予報確率に対するブライアスキルスコア。気象庁の東北地方17地点における相対湿度の観測値とアンサンブル予報27メンバーを用い、(a)は全事例(2015年6～8月の92初期値)、(b)は降水日、(c)は非降水日を対象として算出した統計的な結果を示す。降水日に対するブライアスキルスコアの算出では、例えば、ある観測地点における降水観測日(8月8日)に対して、8月7日初期値の1日予報、8月6日初期値の2日予報、…、8月1日初期値の7日予報を用いた。非降水日に対しても同様に統計処理した。箱ひげ値は下から、地点スコアの最小値、第1四分位、中央値、第3四分位、最大値、折線は地点スコアの平均値を示す。最適値は1.0で、正の時に確率予報が有効である。





第7図 【検証 D】 試験4 圃場における湿度法に基づく確率濡れ予報の信頼度曲線。横軸は相対湿度89%以上を予報する確率 [%]、縦軸は相対湿度89%以上の観測/予報頻度 [%] と葉面濡れありの観測頻度 [%] を示す。灰色の実線は事象①(相対湿度89%以上) の観測頻度 [%]、黒色の実線は事象②(葉面濡れあり) の観測頻度 [%]、黒色の破線は事象①(相対湿度89%以上) を予報する頻度 [%] を示す。2015年6～8月の期間の統計的な結果を示し、信頼度曲線(灰色/黒色の実線)のリードタイムによる違いは小さいため、7日予報のみを示す。

平均値予報と東北地方におけるアメダス観測値との相関をEOFにより解析し、梅雨前線モードで2日、ヤマセモードで5日、高気圧モードで8日の予測可能性があることを示した。直接比較はできないが、本結果においても、予測可能性期間が低気圧系(降水日)は短く、高気圧系(非降水日)は長いという、同様の傾向が見られた。

降水日は主に低気圧等に伴う雨滴による濡れ、非降水日は主に高気圧に覆われて放射冷却で葉面温度が低下することに伴う結露による濡れに関連すると考えられる。したがって、結露による濡れを予報する方がリードタイムは長いと推察される。

#### 4. 結果；葉面濡れ (STEP2)

##### 4.1 【検証 D】 湿度法に基づく濡れ確率予報の信頼度

予報信頼度曲線はリードタイムによる違いが小さいため、第7図に7日予報のみを示す。沿岸の名取における濡れの信頼度曲線は概ね対角線に近い。しかしながら、精緻にパラメーター(相対湿度の閾値)が調整された沿岸の名取を起点に、内陸から山地に遠ざかるにつれて、鹿島台、古川、川渡と順を追って、対角線か

第7表 【検証 D】 試験4 圃場における予報確率のバイアス。白色および灰色セル内の数字は、付録Bの(B2)式により算出した、事象①(相対湿度89%以上)および事象②(葉面濡れあり)に対する予報確率のバイアス [%] を示す。スコアの最適値は0で、2015年6～8月の期間の統計的な結果を示す。

圃場名	1日予報		3日予報		5日予報		7日予報	
	事象①	事象②	事象①	事象②	事象①	事象②	事象①	事象②
名取	-4	+4	-6	+4	-7	+3	-7	+3
鹿島台	0	-8	-2	-10	-1	-10	-3	-12
古川	-4	-18	-6	-20	-9	-23	-9	-25
川渡	-10	-49	-11	-49	-14	-54	-13	-55

らのずれが大きくなっていく傾向が見える。また、確率のバイアスを示す第7表により、濡れ確率のバイアスは、どの予報日も名取では小さいが、鹿島台、古川、川渡の順に濡れ確率の負バイアスが大きくなる。これらの結果により、名取以外の圃場では、相対湿度の閾値が不適切であることが推測される。したがって、名取のように適切な相対湿度の閾値を決めることができる場合、相対湿度のみを用いる湿度法は、農業利用上簡便である。

##### 4.2 【検証 E】 湿度法と陸面過程モデル2LMによる濡れ再現性の比較

本節以降、濡れ推定手法の高度化として陸面過程モデル2LMを導入し、湿度法と比較を行った結果を示す。ここで、いもち病の誘因の1つとなる早朝の露は、夜間に結露し気温が上昇する朝以降、昼頃にかけて蒸発して消失することが多い。したがって、夜から翌日

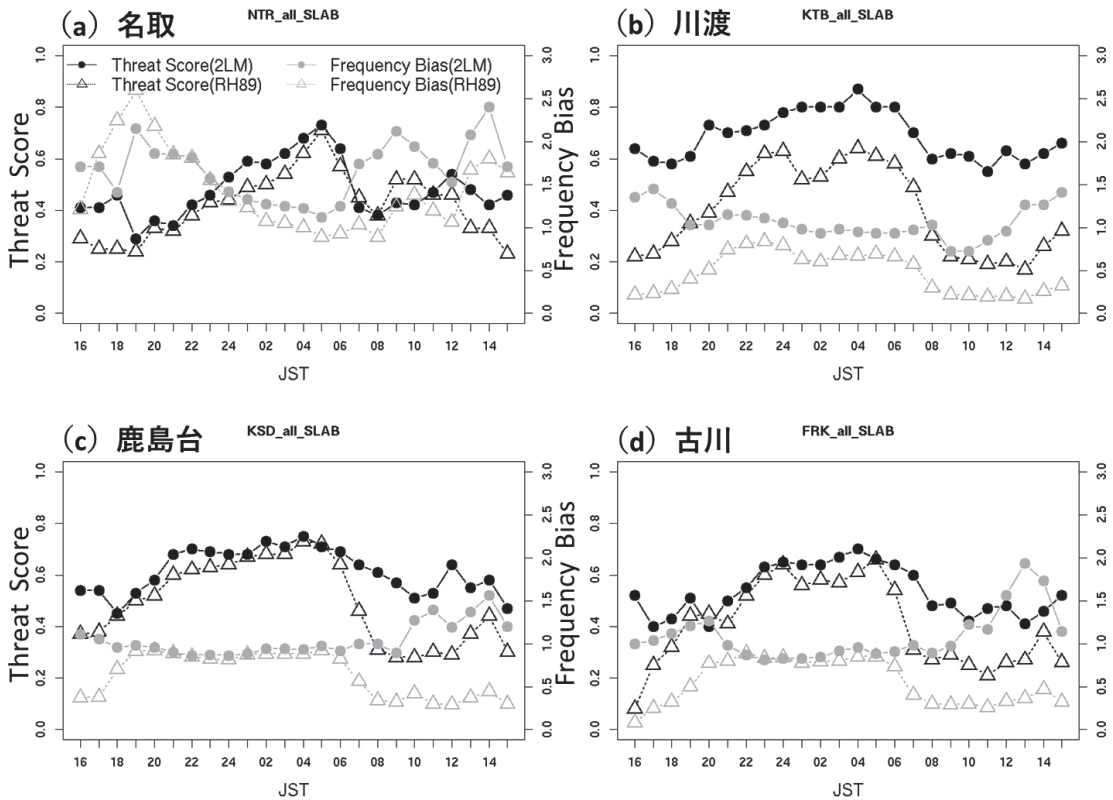
午前にかけての時間帯に着目することは、評価の1つのポイントになると考えられる。

第8図に、濡れ適中率の2手法による比較を示す。名取では湿度法の適中率は、夜から翌日午前にかけて、陸面過程モデル2LMと同程度である。しかし、鹿島台と古川では朝7時以降の午前にかけて、川渡では夜から翌日午前にかけて、湿度法の適中率が陸面過程モデル2LMよりも低い。一方、名取では湿度法の頻度バイアスは、夜から翌日午前にかけて、陸面過程モデル2LMよりも1.0に近く良好である。しかし、鹿島台と古川では朝7時以降の午前にかけて、川渡では夜間も含め、湿度法の頻度バイアスが陸面過程モデル2LMよりも過少である。したがって、名取以外の圃場において、湿度法の適中率が陸面過程モデル2LMよりも低い主な要因は、湿度法の頻度バイアスが低下し、予測が不足することが考えられる。なお、実際の圃場の気

象データを用いた時系列のスコアでも上述の特徴が見られた(図略)。

#### 4.3 【検証 F】湿度法と陸面過程モデル2LMによる週間濡れ確率予報の比較

週間予報において、いずれの圃場と予報日についても、陸面過程モデル2LMは湿度法よりもROC曲線が対角線から左上に向かって膨らんでおり(図略)、濡れ検出力の高い確率予報であることを示す。次に、これを数値化したROC面積を第9図に示す。陸面過程モデル2LMを用いる手法は、湿度法よりも予報期間を通してROC面積が大きく、濡れ確率予報としての情報価値が高い。



第8図 【検証 E】試験4圃場における湿度法と陸面過程モデル2LMを用いた葉面濡れ再現実験の比較。横軸は予報時刻 (JST)、左縦軸は適中率 (黒色)、右縦軸は頻度バイアス (灰色)を示し、最適値は両スコアともに1.0である。頻度バイアスは1.0より大きい (小さい) と予測頻度が過多 (過少) であることを示す。また、三角印 (RH89) は湿度法、丸印 (2LM) は陸面過程モデル2LMで、2015年6～8月の期間の統計的な結果を示す。

## 5. 考察

### 5.1 陸面過程モデル2LMの導入による確率濡れ予報の他地点への拡張性

濡れの再現実験（第8図）と週間濡れ確率予報（第9図）において、2手法の濡れ検出力の違いを理解するための例として、晴天時早朝の「結露」の予報事例を説明する。日本の東から張り出す高気圧に覆われたため、2015年8月2日から3日にかけて、宮城県内は概ね晴れた。第10図に、古川における確率濡れ予報の時系列を濡れセンサーの検出とともに示す。センサーによる濡れは、8月2日夜から3日朝頃（ $FT=33$ 頃）にかけて検出された。降水は観測されなかったため、結露で葉が濡れていたと考える。陸面過程モデル2LMは、21～29時間予報で結露を予報し、29時間予報以降は結露の蒸発を予報した（第10図a）。観測された21～33時間予報の時刻での濡れに対し、決定論的予報（摂動を与えていない予報）では21～34時間予報で濡れが判定され、確率的予報では21～33時間予報は高確率で、34時間予報以降は確率が低下するという信頼度情報が付加されている（第10図b）。湿度法は、3日朝7時以降の昇温に伴う相対湿度の低下により、濡れ継続

時間が中断した予報となった（第10図c）。

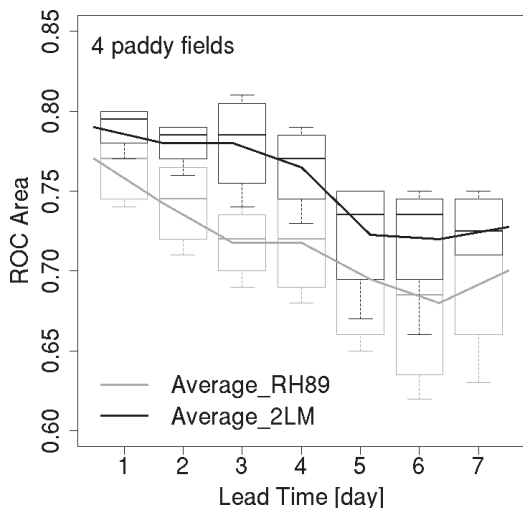
沿岸の名取で最適な湿度法の閾値（89%以上）は、内陸の古川では不適切であると推測されることを再確認した。これまでの検証結果により、陸面過程モデル2LMを用いることで、広く他の地域においても、朝の濡れ継続時間の予報に有利と考えられる。特に、葉上水滴は存在時間の長いことに加え、消失時刻の遅いことが発病の重要な要因となり、午前消失の遅れる山間部ほど発病が多いといった指摘もある（鈴木 1969）。したがって、Yamazaki *et al.* (2004) 等の陸面過程モデルを用いて物理的に葉面の結露や蒸発を計算することで、大久保ほか（2015）がBLASTAMの問題にあげていた、内陸盆地・山間部における結露（降水によらない湿潤状態）を含む濡れの予測精度の向上が期待できる。

### 5.2 今後の課題

夏季天候の温暖化予測では、21世紀末にかけても引き続きヤマセは出現し（Kanno *et al.* 2013）、ヤマセと梅雨期の遅延が予測されている（Kitoh and Uchiyama 2006；遠藤 2008；Endo 2012）。したがって、これまでとは異なる時期に発病する可能性のある作物病害にも対応できるような濡れ予報が今後は求められる。数値予報モデルを用いた作物体の濡れ情報は、異常天候による病害リスク管理において、地球温暖化の適応策の実施にも活用できる。本研究の課題について、以下に3点記述する。

まず、アンサンブル予報データの高度利用に向けた課題を記述する。相対湿度の予報実験（STEP1）において、水平解像度5 kmのアンサンブルスプレッドは、予報誤差に対して不足していた。初期値の分散（バラツキ）を大きくする改善が必要である。これによって、不確実性の表現が改善された確率情報により、葉面濡れの予報ができる。

次に、予報データを陸面付近の事象（農業気象）に応用する場合の課題を記述する。まず、結露濡れへのインパクトを見るために、気象庁非静力学モデルの中の陸面過程をMRI/JMA-SiBに設定した非降水日の結露に対する予備実験では、乾燥傾向がみられた（図略）。また、【検証A】の再現実験では、MRI/JMA-SiBの相対湿度は負（乾燥）バイアスだった。これらのことから、アンサンブル予報実験（STEP1/2）では、気象庁非静力学モデルの中の陸面過程にMRI/JMA-SiBを利用しなかった。この負（乾燥）バイアスは、MRI/JMA-SiBにおける土壌水分初期値を各予報サイクル

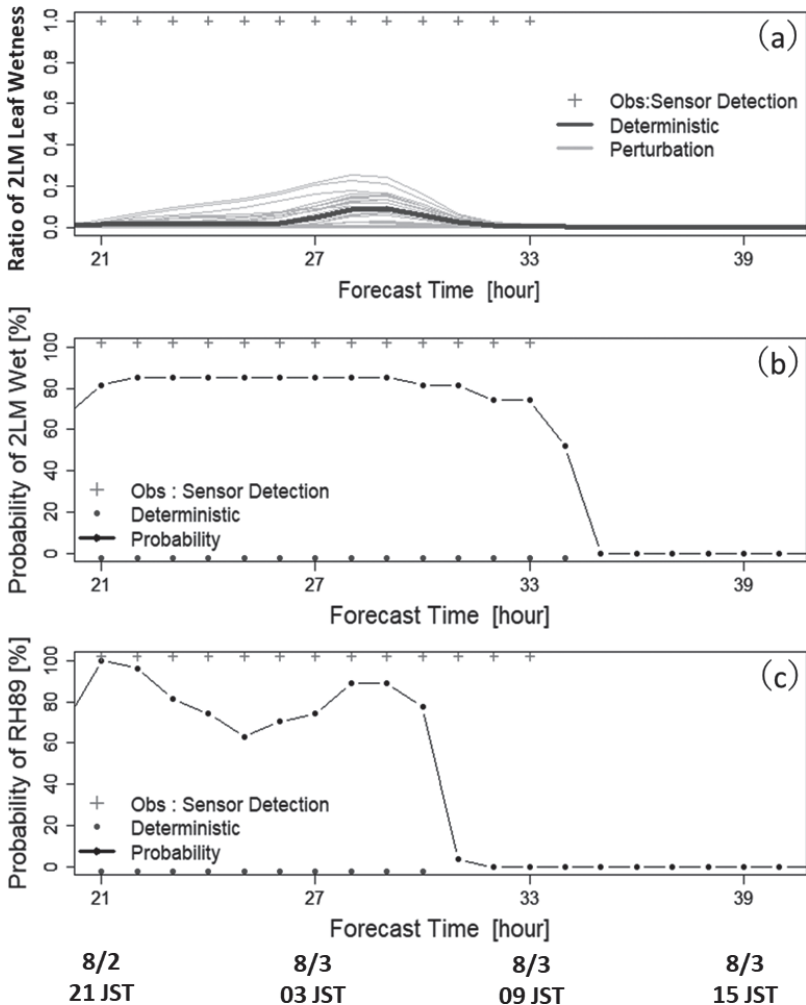


第9図 【検証F】試験4圃場における湿度法と陸面過程モデル2LMを用いた週間濡れ予報確率の検出力の比較。灰色（RH89）は湿度法、黒色（2LM）は陸面過程モデル2LMで、2015年6～8月の期間の統計的な結果を示す。箱ひげ値は下から、地点スコアの最小値、第1四分位、中央値、第3四分位、最大値を示す。折線は試験4圃場のROC面積の平均値であり、値が大きいほど濡れ検出力が高いことを示す。

間で繋いでいくことにより大きく改善される可能性はある。予測精度を重視する気象庁の現業メソ/局地気象モデルでの陸面モデルの動向も注視しつつ、今後改善すべき課題としたい。

最後に、いもち病予報における課題を記述する。湿度法は、相対湿度の閾値が合う場合に農業利用上簡便である。もし、アメダスの観測項目に相対湿度を加えることができれば、ポスト BLASTAM (葉いもち病発生予察法) としての「結露対応版 BLASTAM2 (仮称)」

は、大変に利用価値が高い。物理的に濡れを推定できれば勿論それに越したことはないが、仮に、葉面濡れも観測できる場合には相対湿度の閾値を決めることができ、湿度法を用いて濡れ推定ができる。そのあとで、病原菌の活動に好適な温度帯を加味した病害の検証が期待される。加えて、農業気象分野におけるアンサンブル予報による情報提供のあり方として、当たり外れの大きい決定論的な情報に対する、確率的な病害情報の利用方法についての議論も望まれる。



第10図 古川の圃場における濡れ確率予報の事例 (2015年8月1日24JST 初期値)。(a)は陸面過程モデル2LMの規格化した葉面保水率(最大保水量に対する計算した保水量の割合)で、上方の十字は濡れセンサー検出あり、黒色太線は決定論的予報(摂動を与えていない予報)、灰色線群は摂動ラン(ほかの異なる26パターンの予報)を示す。(b)と(c)において、黒色折線はそれぞれ陸面過程モデル2LMと湿度法に基づく濡れ確率、点列はそれぞれの手法による決定論的予報で濡れあり、上方の十字は濡れセンサー検出ありを示す。予報時間  $FT$  (Forecast Time) は、 $FT=21$  (8月2日21JST)、 $FT=27$  (8月3日03JST)、 $FT=33$  (8月3日09JST)、 $FT=39$  (8月3日15JST)を图中に記した。

## 6. まとめ

本研究では、第1図に示すように、気象庁全球週間アンサンブル予報システムのダウンスケールデータを用いた、葉面濡れ確率予報システムを提案した。まず、現状のいもち病発生予察法 (BLASTAM) が予測できない結露による濡れは、相対湿度の閾値が適切な場合、湿度法で対応可能と考えられる。そこで、結露とその蒸発を陽に計算できる陸面過程モデル2LMを導入することにより、湿度法における相対湿度の閾値が決められない他地点への濡れ予報の「拡張性」が示された。さらに、アンサンブル予報データの活用によって、確率的に濡れ予報ができるようになった。なお、予報実験では、親モデルの週間アンサンブル予報の27メンバーすべてを用いた。これによって、少数のメンバーから算出するよりも適切な確率表現が可能になると考えられる。

葉面濡れと関係の深い事象①(相対湿度89%以上)の予報確率は、予測対象日が降水日の場合は4日前から、非降水日の場合は1週間前から、気候学的な出現確率よりも精度が高かった。次に、事象②(葉面濡れあり)の確率予報について、湿度法は濡れの目安となる相対湿度の閾値が適切な場合、濡れ予報確率のバイアスは小さく予報信頼度は良好だった。しかしながら、閾値が不適切と推測される圃場においては、最大で50%程度もの濡れ確率の負バイアスがみられた。そこで、陸面過程モデル2LMを導入することにより、湿度法よりも濡れ確率の検出力が高くなり、地理的な汎用性と濡れ継続時間における予測精度が向上することを確認した。

## 謝辞

本研究の一部は、内閣府戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 「次世代農林水産業創造技術」(管理法人: 生研支援センター) によって実施されました。アンサンブル予報実験には、TIGGEで公開されている気象庁全球週間アンサンブル予報データを使用しました。気象庁全球数値予報モデル (JMA-GSM) のデータは、京都大学生存圏研究所が運営する生存圏データベースによって収集・配布されたものです。編集委員と査読各氏には、懇切丁寧なアドバイスをいただきました。また、ヤマセ研究会 (東北地域における気象・気候情報の精度向上と高度利用に関する研究会; <http://wind.gp.tohoku.ac.jp/yamase/>) においてもコメント等をいただきました。皆さんありがとうございました。

ました。

## 参考文献

- Brier, G. W., 1950: Verification of forecasts expressed in terms of probability. *Mon. Wea. Rev.*, **78**, 1-3.
- 遠藤洋和, 2008: 地球温暖化による東北地方の気候変化に関する研究 (4.1ヤマセ). 気象研究所技術報告, (52), 27-48.
- 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.
- Fukui, S., T. Iwasaki and W. Sha, 2014: An ensemble downscaling prediction experiment for medium-range forecast of the daily mean surface temperature distribution over northeastern Japan during summer. *J. Meteor. Soc. Japan*, **92**, 505-517.
- Gleason, M. L., S. E. Taylor, T. M. Loughin and K. J. Koehler, 1994: Development and validation of an empirical model to estimate the duration of dew periods. *Plant Disease*, **78**, 1011-1016.
- 原 旅人, 2008: 地表面過程. 数値予報課報告別冊, (54), 166-186.
- 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.
- 北海道中央農試 (北海道立総合研究機構農業研究本部中央農業試験場), 2011: 戦略研究「地球温暖化と生産構造の変化に対応できる北海道農林業の構築—気象変動が道内主要作物に及ぼす影響の予測—」成果集. 北海道立総合研究機構農業試験場資料, (39), 7-22.
- Kain, J. S. and J. M. Fritsch, 1990: A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization. *J. Atmos. Sci.*, **47**, 2784-2802.
- 菅野洋光, 小林 隆, 2008: 農業への利用—イネいもち病発生予察への適用. *天気*, **57**, 32-36.
- Kanno, H., M. Watanabe and E. Kanda, 2013: MIROC5 predictions of Yamase (cold northeasterly winds causing cool summers in northern Japan). *J. Agric. Meteorol.*, **69**, 117-125.
- 菅野洋光, 山崎 剛, 大久保さゆり, 岩崎俊樹, 神田英司, 小林 隆, 2018: 相対湿度を用いた1 km メッシュのイネ葉面濡れ時間予測マップ. 日本地理学会発表要旨集, [https://doi.org/10.14866/ajg.2018s.0\\_000066](https://doi.org/10.14866/ajg.2018s.0_000066).
- Kayaba, N., T. Yamada, S. Hayashi, K. Onogi, S. Kobayashi, K. Yoshimoto, K. Kamiguchi and K. Yamashita, 2016: Dynamical regional downscaling using

- the JRA-55 reanalysis (DSJRA-55). SOLA, 12, 1-5.
- Kim, C. K. and S. Mogi, 1986: Effect of temperature treatments on the penetration and disease development in the leaf epidermis by the rice blast fungus, *Pyricularia oryzae* CAVARA 1. Effect of pre- and postdisposing temperature on the disease development of rice blast. Ann. Phytopath. Soc. Japan, 52, 184-192.
- Kitoh, A. and T. Uchiyama, 2006: Changes in onset and withdrawal of the east Asian summer rainy season by multi-model global warming experiments. J. Meteor. Soc. Japan, 84, 247-258.
- 紺野祥平, 大久保さゆり, 菅野洋光, 福井 真, 吉田龍平, 岩崎俊樹, 小林 隆, 2015: アンサンブルハインドキャスト実験結果を用いたイネ葉いもち感染確率予報の精度検証. 天気, 62, 13-18.
- 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.
- 経田正幸, 2006: 週間アンサンブル予報システム. 数値予報課報告別冊, (52), 23-33.
- Nakanishi, M. and H. Niino, 2009: Development of an improved turbulence closure model for the atmospheric boundary layer. J. Meteor. Soc. Japan, 87, 895-912.
- 大泉三津夫, 三浦大輔, 2008: JMA-NHM に組み込んだ新陸面モデル. 数値予報課報告別冊, (54), 187-192.
- 大久保さゆり, 菅野洋光, 小林 隆, 2015: 高解像度気象データを用いた東北地方におけるイネ葉いもち発生予察モデル (BLASTAM) の検証. 天気, 62, 5-15.
- 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.
- 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.
- Saito, K., T. Kuroda, M. Kunii and N. Kohno, 2010: Numerical simulation of Myanmar cyclone Nargis and the associated storm surge part II: Ensemble prediction. J. Meteor. Soc. Japan, 88, 547-570.
- Sellers, P. J., Y. Mintz, Y. C. Sud and A. Dalcher, 1986: A Simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models. J. Atmos. Sci., 43, 505-531.
- Sentelhas, P. C., A. Dalla Marta, S. Orlandini, E. A. Santos, T. J. Gillespie and M. L. Gleason, 2008: Suitability of relative humidity as an estimator of leaf wetness duration. Agric. For. Meteorol., 148, 392-400.
- 鈴木穂積, 1969: いもち病と気象. 農業気象, 24, 211-218.
- Swinbank, R., M. Kyouda, P. Buchanan, L. Froude, T. M. Hamill, T. D. Hewson, J. H. Keller, M. Matsueda, J. Methven, F. Pappenberger, M. Scheuerer, H. A. Titley, L. Wilson and M. Yamaguchi, 2016: The TIGGE project and its achievements. Bull. Amer. Meteor. Soc., 97, 49-67.
- 高野清治, 2002: アンサンブル予報の利用技術. 気象研究ノート, (201), 73-103.
- Wichink Kruit, R. J., A. F. G. Jacobs and A. A. M. Holtslag, 2008: Measurements and estimates of leaf wetness over agricultural grassland for dry deposition modeling of trace gases. Atmos. Environ., 42, 5304-5316.
- Wilks, D. S., 2011: Statistical Methods in the Atmospheric Sciences (3rd ed.). Academic Press, 676pp.
- 山口富夫, 1984: 稲いもち病・紋枯病の発生生態に関する研究. 日本植物病理学会報, 50, 304-306.
- Yamazaki, T., 2001: A one-dimensional land surface model adaptable to intensely cold regions and its applications in eastern Siberia. J. Meteor. Soc. Japan, 79, 1107-1118.
- Yamazaki, T., J. Kondo, T. Watanabe and T. Sato, 1992: A heat-balance model with a canopy of one or two layers and its application to field experiments. J. Appl. Meteor., 31, 86-103.
- Yamazaki, T., H. Yabuki, Y. Ishii, T. Ohta and T. Ohata, 2004: Water and energy exchanges at forests and a grassland in eastern Siberia evaluated using a one-dimensional land surface model. J. Hydrometeor., 5, 504-515.
- Yoshida, R., Y. Onodera, T. Tojo, T. Yamazaki, H. Kanno, I. Takayabu and A. Suzuki-Parker, 2015: An application of a physical vegetation model to estimate climate change impacts on rice leaf wetness. J. Appl. Meteorol. Clim., 54, 1482-1495.
- 吉野嶺一, 1973: イネいもち病菌の侵入に関する予察的研究 II 接種温度と侵入率の経時変化. 日本植物病理学会報, 39, 186.

#### 付録 A : Spread-Skill の関係

確率予報が上手くいくためには, (A1) 式のアンサンブルスプレッドが, (A2) 式のアンサンブル平均予報値の予報誤差と同程度であることが望ましい. すなわち, (A3) 式で定義される Spread-Skill の関係は, 1.0になることを期待する. この指標は, 1.0より小さい(大きい)とアンサンブルスプレッドが小さい(大きい)ことを示す(高野 2002).

$$Spread(FT) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M [f_{m,i}(FT) - \bar{f}_i(FT)]^2} \quad (A1)$$

$$RMSE_{EM}(FT) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [f_i(FT) - o(T_i + FT)]^2} \quad (A2)$$

$$R(FT) = \frac{M-1}{M+1} \times \frac{Spread(FT)^2}{RMSE_{EM}(FT)^2} \quad (A3)$$

記号はそれぞれ,  $FT$ : 予報時間,  $T_i$ : 初期時刻,  $Spread(FT)$ : アンサンブルスプレッド,  $RMSE_{EM}(FT)$ : アンサンブル平均予報値の2乗平均平方根誤差,  $R(FT)$ : Spread-Skill の関係,  $i$ : 事例 (イニシャル),  $N$ : 事例数,  $M$ : アンサンブルサイズ,  $f_{m,i}(FT)$ :  $m$  番目のメンバーの予報値,  $f_i(FT)$ : アンサンブル平均予報値,  $o(T_i + FT)$ : 観測値である.

### 付録 B: ブライアスコア (Brier Score)

ブライアスコアは, 確率予報の精度を検証するための指標である (Brier 1950). 特に本付録では, ブライアスコアが含む確率のバイアス項を示す. まず, (B1) 式に示すように, 予報確率は予報時間に依存する確率のバイアスを持つ.

$$p_i(FT) = p_i'(FT) + b(FT) \quad (B1)$$

記号はそれぞれ,  $FT$ : 予報時間,  $p_i(FT)$ : 予報確率,  $p_i'(FT)$ : 確率のバイアスを除去した確率,  $b(FT)$ : 確率のバイアスである.

ここで, 確率のバイアスは, (B2) 式に示すように, 確率をたくさん集めた時の平均値と事象の出現頻度が一致しないことによるバイアス (系統誤差) で定義する.

$$b(FT) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [p_i(FT) - a(T_i + FT)] \quad (B2)$$

記号はそれぞれ,  $FT$ : 予報時間,  $T_i$ : 初期時刻,  $N$ : 事例数,  $i$ : 事例 (イニシャル),  $p_i(FT)$ : 予報確率,  $a(T_i + FT)$ : 事象の有無である.

次に, ブライアスコアは (B3) 式で定義される. (B4) 式第1項は, 確率のバイアスを除去した確率によるブライアスコア, (B4) 式第2項は, 確率のバイアス項である. ブライアスコアは, 完全に適中する確率予報で最適値の 0.0 となる.

$$BS(FT) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [p_i(FT) - a(T_i + FT)]^2 \quad (B3)$$

$$= BS'(FT) + b(FT)^2 \quad (B4)$$

### 付録 C: ブライアスキルスコア (Brier Skill Score)

ブライアスキルスコアは, (C1) 式に示すように, 事象の気候学的な出現確率に対する, 確率予報の有効性を示す

指標である. すなわち, ブライアスキルスコアは, 完全予報できれば 1.0, 気候学的な出現確率よりも予報誤差が大きいと負となるため, 正の時に有効な確率予報であることを示す.

$$BSS(FT) = 1.0 - \frac{BS_{fcst}(FT)}{BS_{clim}(FT)} \quad (C1)$$

$$BS_{fcst}(FT) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [p_i(FT) - a(T_i + FT)]^2 \quad (C2)$$

$$BS_{clim}(FT) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [p_{clim}(T_i + FT) - a(T_i + FT)]^2 \quad (C3)$$

記号はそれぞれ,  $FT$ : 予報時間,  $T_i$ : 初期時刻,  $BSS(FT)$ : ブライアスキルスコア,  $BS_{fcst}(FT)$ : 予報確率によるブライアスコア,  $BS_{clim}(FT)$ : 事象の気候学的な出現確率によるブライアスコア,  $N$ : 事例数,  $i$ : 事例 (イニシャル),  $p_i(FT)$ : 予報確率,  $p_{clim}(T_i + FT)$ : 事象の気候学的な出現確率,  $a(T_i + FT)$ : 事象の有無である.

### 付録 D: バイアス補正

各アンサンブルメンバーの気象データを陸面過程モデル 2LM に入力し, 濡れを計算することを想定したため, (D1) 式に示す線形重回帰式により, 相対湿度のバイアスを除去した.

$$y_{s,m}(FT) = \beta_{0,s}(FT) + \sum_{e=1}^E \beta_{e,s}(FT) x_{e,s,m}(FT) \quad (D1)$$

記号はそれぞれ,  $y$ : 目的変数,  $x$ : 説明変数,  $\beta$ : 重回帰式の係数,  $FT$ : 予報時間,  $s$ : 水田または気象庁の観測地点,  $m$ : アンサンブルメンバー,  $E$ : 説明変数の総数,  $e$ : 説明変数の要素である. 気象庁現業の時系列湿度ガイドンスを参考にし, 地上相対湿度, 地上風の東西・南北成分, 地上風速, 下・中層雲量, 前1時間降水量, 海面更正気圧を説明変数に用いた. 各アンサンブルメンバーについて, 各予報地点と1時間ごとの予報時刻に対してバイアス補正をした. なお, 目的変数に水田または気象庁の観測地点で観測した相対湿度, 説明変数にアンサンブル平均のモデル予報値を用いて, 予報地点と予報時刻ごとに層別化して係数  $\beta$  を作成した.

### 付録 E: 陸面過程モデル 2LM (Two Layers Model)

2LM (Yamazaki *et al.* 1992, 2004; Yamazaki 2001) は, キャノピー (植生) 2層構造を持つ陸面過程モデルである. キャノピー上の気象要素 (気温, 風速, 相対湿度, 日射量, 下向き長波放射量, 降水量) を入力し, 地表面における 1次元の水・熱収支の計算を行う. 葉の保水量にあたる, 第  $k$  層のキャノピー水分量方程式は, 以下の (E1) 式に示す.

$$\frac{dM_k}{dt} = P_k - D_k - \frac{E_k}{\rho} \quad (0 \leq M_k \leq Mx_k; k=1,2) \quad (E1)$$

記号はそれぞれ,  $M_k$ : キヤノピー水分量,  $Mx_k$ : キヤノピー最大水分量,  $P_k$ : 遮断降水,  $D_k$ : 水捌け (キヤノピー超過水分量),  $E_k$ : 遮断蒸発,  $\rho$ : 水の密度である. (E1) 式右辺の3項は, 以下の (E2)~(E4) 式で表され, (E4) 式の  $E_k$  は正で蒸発, 負で結露を示す.

$$P_k = \left[ 1.0 - \exp \left\{ -0.5 PAI \left( 1.0 - \frac{M_k}{Mx_k} \right) \right\} \right] \times Pr_k \quad (E2)$$

$$D_k = \begin{cases} \frac{M_k - Mx_k}{\Delta t}, & (M_k > Mx_k) \\ 0, & (M_k \leq Mx_k) \end{cases} \quad (E3)$$

$$E_k = \rho_a \frac{M_k}{Mx_k} a c_h \delta_k U_k [q_{\text{sat}}(Tc_k) - q_k] \begin{cases} q_{\text{sat}}(Tc_k) > q_k \text{ のとき} & 0 \leq \frac{M_k}{Mx_k} \leq 1, \\ q_{\text{sat}}(Tc_k) < q_k \text{ のとき} & \frac{M_k}{Mx_k} = 1 \end{cases} \quad (E4)$$

記号はそれぞれ,  $PAI$ : 植物面積指数,  $Pr_k$ : 第  $k$  層上端に達した降水量,  $\Delta t$ : タイムステップ,  $\rho_a$ : 空気密度,  $a$ : 植物面積密度 (=  $PAI/\delta$ ,  $\delta$ : crown space の厚さ),  $c_h$ : 顕熱輸送係数,  $\delta_k$ : キヤノピー厚さ,  $U_k$ : 風速,  $Tc_k$ : キヤノピー温度,  $q_{\text{sat}}(Tc_k)$ : 飽和比湿,  $q_k$ : 比湿である.

イネのパラメーターは, 水田における観測 (Yamazaki *et al.* 1992) に基づき, 6月1日から8月31日にかけて変化させた. すなわち,  $PAI$  は 0.6~5.0, キヤノピー高さ  $h$  は 0.05~0.90m, 幹部 (trunk space) は キヤノピー高さ  $h$  の 0.1倍とした. また, タイムステップ  $\Delta t$  は 150秒とし, 葉面保水量等の陸面予報変数を 1時間ごとに出力した.

---

## A Probabilistic Forecast Experiment and Its Verification for Relative Humidity and Leaf Wetness with Downscaling Data of One-Week Ensemble Prediction System of the Japan Meteorological Agency

Sho IKEDA<sup>\*1</sup>, Takeshi YAMAZAKI<sup>\*2</sup>,  
Toshiki IWASAKI<sup>\*2</sup>, Shin FUKUI<sup>\*2</sup>,  
Hiromitsu KANNO<sup>\*3</sup> and Sayuri OKUBO<sup>\*4</sup>

<sup>\*1</sup> (Corresponding author) Graduate School of Science, Tohoku University (Present affiliation: Sendai Regional Headquarters of the Japan Meteorological Agency, 1-3-15, Gorin, Miyagino-ku, Sendai-shi, Miyagi 983-0842, Japan).

E-mail: sho.iked@met.kishou.go.jp

<sup>\*2</sup> Graduate School of Science, Tohoku University.

<sup>\*3</sup> NARO Institute for Agro-Environmental Sciences.

<sup>\*4</sup> NARO Tohoku Agricultural Research Center.

(Received 30 May 2019; Accepted 22 October 2021)

---