

2011年4月28日

水稻の移植栽培における晩限日の推定について

中川博視¹・神田英司¹・大野宏之¹・吉田ひろえ¹・菅野洋光¹・鮫島良次¹・濱寄孝弘¹・
根本学¹・中園江¹・大原源二¹・近藤始彦¹・石黒潔¹・渡邊好昭¹・長谷川利拡²

(1 (独) 農業・食品産業技術総合研究機構、2 (独) 農業環境技術研究所)

1. 目的

2011年3月11日の東日本大震災により、被災地および被災地周辺の農耕地において、冠水、液状化、パイプライン等の灌漑設備の損傷が生じている。それら農業インフラの損傷および諸般の事情により、水稻作付が可能であっても移植期の遅れが生じる地域が相当面積に及ぶことが懸念されている。そこで、東北、関東甲信および北陸地域を対象として、水稻移植期の晩限と移植期の遅れに伴う減収率を推定した。

2. 方法

(1) 安全成熟期晩限日に基づく移植期の晩限

1) 対象地域と品種

東北については主要品種、関東・北陸以南についてはコシヒカリについて算出した。

2) 気象データ

1981年～2010年の30年間の日平均気温平年値を使用した（気象データについては、留意事項6）を参照のこと）。

3) 計算法

内島（1983）の方法に基づき、気温平年値が15℃以下となる初日を安全成熟期晩限日（ M_L ）とした。次いで、安全成熟期晩限日から遡って日平均気温を積算し、品種固有の登熟に必要な積算温度に達する日を出穂期晩限日（ H_L ）とした。さらに、出穂期晩限日から出穂期予測モデルを使用して遡及的に移植期晩限日（ TP_L ）を算出した。

4) 登熟に要する積算温度

東北地域：

早生（まっしぐら、つがるロマン、いわてっこ）：950℃日

中生（あきたこまち、ひとめぼれ、はえぬき）：1000℃日

晩生（コシヒカリ）：1050℃日、（福島県浜通り 1100℃）

関東・北陸以南の地域：

コシヒカリ：1050℃日

※内島（1983）の方法では、安全出穂期晩限日を計算するための登熟相積算温度を一律に800℃日（東北地方）としたが、ここでは、より安全に晩限日を設定するために、対象地域、

品種別に積算温度を設定した。

5) 出穂期予測モデル

東北地域：

神田ら(2000, 2002)の主稈葉齢進度モデル、幼穂の発育モデルを使用した。モデルのパラメータは盛岡の栽培データを用いて決定し、品種の早晩により主稈総葉数を調整した。ただし、稚苗移植を対象としてパラメータを決定した。

関東・北陸以南の地域

堀江・中川(1990)の出穂期予測モデルのパラメータをつくばと京都のコシヒカリ栽培データを用いて決定した。ただし、移植日の発育指数を、コシヒカリ主要栽培地点の作況基準筆データ(水稻作況調査のために各作柄表示地帯で選定された農家圃場における観測データ)に合うようにチューニングした。パラメータのチューニングに使用したデータの大半は稚苗移植であった。

(2) 移植期の遅れに伴う冷温による登熟不全発生リスク分析

1) 対象地域と品種

東北については主要品種、関東・北陸以南についてはコシヒカリについて算出した。

2) 気象データ：1991～2010年の20年間の年々の気象データを使用した。

3) 計算法

水稻生育・収量シミュレーションモデルSIMRIW(Horie et al. 1995)に従って、日平均気温が連続する3日間で12℃未満になると登熟が停止すると仮定し、そのような条件を満たす最初の日を成熟晩限日とする。その日から遡って積算温度を計算し、各品種固有の登熟に要する積算温度に達する日を出穂期とする。ただし、登熟相に要する積算温度は、方法(1)と同様とした。さらに、出穂日から(1)と同様に出穂期予測モデルで遡及的に移植日を算出した。その翌日以降の移植日では、登熟相後半の冷温により成熟期に至らず、登熟不全になると仮定できる。以下、生育の種々の時期の温度条件によって生育が遅れ、登熟相後半に冷温に遭遇し、登熟不全となることを単に登熟不全と呼ぶことにする。以上の計算を20年間の毎年について行い、様々な移植日に対する登熟不全発生リスクを算出した。また、計算結果をもとに、登熟不全発生リスク0、10、20、30%を与える移植日(それぞれ、 $TP_{0\%}$ 、 $TP_{10\%}$ 、 $TP_{20\%}$ 、 $TP_{30\%}$)を推定した。

(3) 移植期の遅れに伴う粗玄米収量減収率の推定

1) 対象地域と品種

(1)、(2)で計算対象とした地点のうち、各県につき1地点を選んだ。全県についてコシヒカリを対象品種とした。東北については、コシヒカリに加えて、ひとめぼれ、あきたこまちを対象品種とした。

2) 気象データ：1991～2010年の20年間の年々の気象データ（日最高気温、日最低気温、全天日射量）を使用した。ただし、全天日射量の観測値がない気象観測所については、近隣の気象観測所のデータで代用した。

3) 計算法

水稻生育・収量シミュレーションモデルSIMRIW (Horie et al. 1995) を用いて、各地の年々の気象条件のもとで、4月1日から8月31日までの各日に移植したと仮定して、粗玄米収量を推定した。20年間のシミュレーション結果から、各移植日における粗玄米収量の平均値、最小値、最大値を計算した。結果と考察においての粗玄米収量は、各作柄表示地帯または各県における移植期最盛期（表1）に移植した場合の推定収量平均値を100とした時の相対値で表した。

モデルの品種パラメータは、出穂期予測サブモデルのパラメータのみ品種固有の値を使用し、それ以外のパラメータは全品種共通とした。コシヒカリについては、堀江・中川(1990)の出穂期予測モデルのパラメータを作況基準筆の出穂期データを用いてチューニングした。あきたこまち、ひとめぼれについては、Nakagawa et al. (2005)の出穂期予測モデルのパラメータを東北地域の栽培試験データを用いて決定したもの（神田ら2011）を用いた。

3. 結果と考察

(1) 移植期晩限日と登熟不全発生リスク

各県の代表的気象観測所の気象条件を用いて算出した方法(1)による移植期晩限日(TP_L)、出穂期晩限日(H_L)、安全成熟期晩限日(M_L)と、 TP_L に移植した場合の登熟不全発生リスクおよび粗玄米収量相対値(移植盛期に移植した場合の収量を100%とする)を表1に示した。また、登熟不全発生リスクが0、10、20、30%を与える移植日($TP_{0\%}$ 、 $TP_{10\%}$ 、 $TP_{20\%}$ 、 $TP_{30\%}$)を表2に示した。東北については、 TP_L 、 H_L 、 M_L (図1)および $TP_{10\%}$ 、 $TP_{20\%}$ 、 $TP_{30\%}$ (図2)について、稲作地帯区別の代表品種を用いた計算結果をメッシュ図で示した。関東・北陸地域以南については、コシヒカリについて算出した、 TP_L 、 H_L 、 M_L のメッシュ図を示した(図3)。

TP_L は、気象平年値に基づいて算出した移植晩限日であるため、1993年のような冷害年には登熟不全が発生する危険性が残されているが、移植晩限日として TP_L を採用した場合、過去の20年の気象条件では、多くの地点で登熟不全発生リスクは10%以下の低い確率であった。ただし、長野では登熟不全発生リスクが10%以上であり、 TP_L を採用した場合のリスクが若干高くなる。そのような地点では、 TP_L を採用した場合の登熟不全発生リスクが高いと判断される場合には、 $TP_{10\%}$ (表2)を移植晩限日としたほうがより安全であるが、 TP_L を採用した場合でもリスクが20%を超えることはなかった。過去20年間の気象条件で登熟不全を発生しないと推定された移植日が $TP_{0\%}$ であるが、東北では、そのような日が存在しない、すなわち登熟不全発生リスクを0にできない地点が存在する(データ省略)。また、メッシュ図(図2)でリスク10%以下にできない地点も多数存在する。したがって、実際的な移植

表 1. 各県の気象条件から計算した水稻の移植期晩限日 (TP_L)、出穂期晩限日 (H_L)、安全成熟期晩限日 (M_L)、移植始期・最盛期・終期の統計値、および TP_L に移植した場合の登熟不全生リスクと粗玄米収量相対値 (移植最盛期=100%)。

県	気象観測所名	気象観測所の位置		計算に 用いた品種	移植期 晩限日 (TP _L)	出穂期 晩限日 (H _L)	安全成熟期 晩限日 (M _L)	移植期 (2010年統計)			TP _L にお ける登熟 不全発 生リスク (%) ¹⁾	TP _L に移 植した場 合の粗玄 米収量相 対値(%) ¹⁾	
		緯度(°)	経度(°)					標高(m)	作柄表示地帯	始期			最盛期
宮城県	仙台	38.3	140.9	39	6/17	8/27	10/17	中部	5/4	5/8	5/18	5.6	95.9
福島県	福島	37.8	140.5	67	6/12	8/25	10/17	中通り	5/6	5/16	5/22	5.0	92.6
	若松	37.5	139.9	212	6/6	8/24	10/15		会津	5/14	5/20	5/24	7.5
茨城県	水戸	36.4	140.5	29	6/28	8/21	10/11	全県	4/28	5/6	5/21	2.1	83.3
	つくば	36.1	140.1	25	6/28	8/29	10/20			5/7	6/14	6/14	4.3
栃木県	宇都宮	36.6	139.9	119	6/30	8/29	10/21	全県	5/1	5/7	6/14	3.6	90.8
群馬県	前橋	36.4	139.1	112	7/4	8/31	10/23	全県	5/23	6/15	6/27	3.7	66.9
千葉県	千葉	35.6	140.1	4	7/23	9/12	11/6	全県	4/19	4/27	5/7	5.0	73.5
神奈川県	横浜	35.4	139.7	39	7/21	9/11	11/5	全県	5/23	6/1	6/14	3.3	97.2
新潟県	津南	37.0	138.7	304	5/30	8/17	10/9	魚沼		5/22			97.1
	関山	36.9	138.2	350	5/26	8/17	10/9	上越		5/16			91.5
長野県	長野	36.7	138.2	418	6/14	8/21	10/12	全県	5/12	5/21	5/30	11.7	

1) 水稻生育・収量予測モデルSIMRIWを用いて推定した。移植盛期に移植した場合の粗玄米収量モデル推定値に対する、移植期晩限日に移植した場合の粗玄米収量モデル推定値の相対値(移植盛期=100%)。粗玄米収量のモデル推定値は、各地域の気象条件から見た潜在生産力を表しており、精玄米収量は、晩植によって登熟歩合が悪化するなど、粗玄米収量より大きく減収する場合がある。

2) 空欄は、未計算またはデータなし。

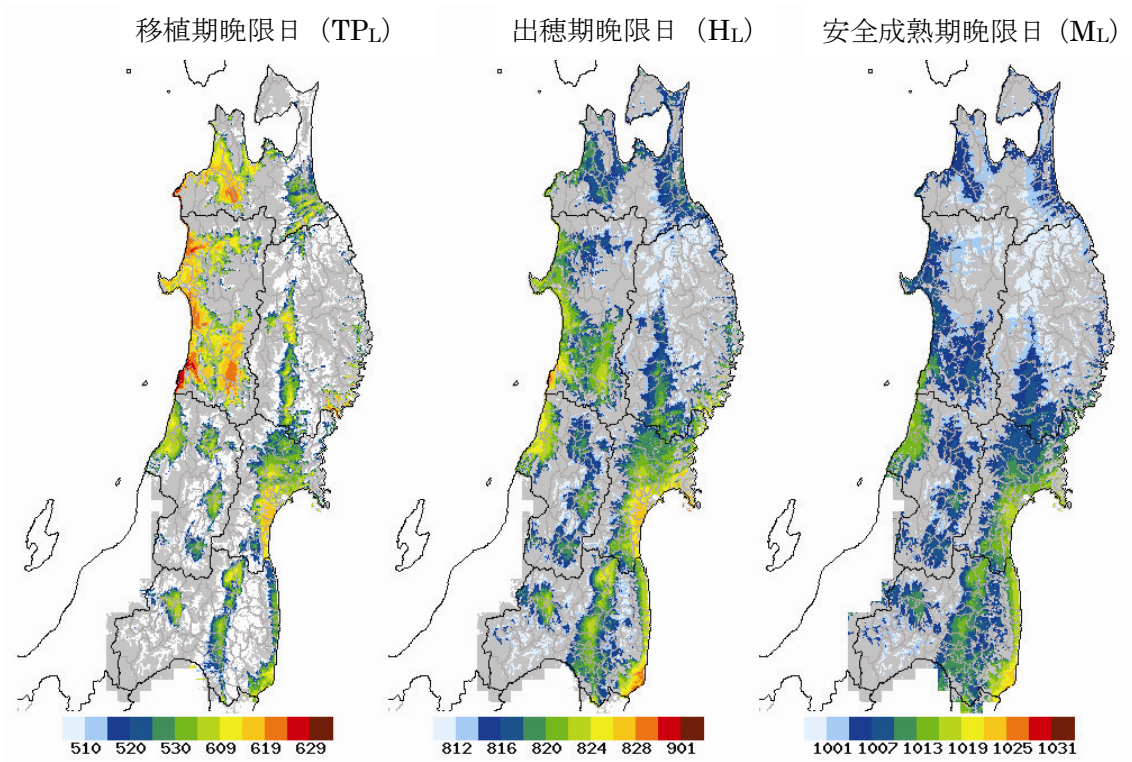
晩限日としては TP_L が現実的である。

つくばにおいて、コシヒカリを種々の時期に移植した場合の登熟不全発生に関するリスク分析結果を図4に示した。1993年の冷害年に算出された移植晩限日は、6月16日 ($TP_{0\%}$) であり、 TP_L より早い時期に位置した。 $TP_{0\%}$ から $TP_{10\%}$ への勾配は緩く、その間の移植日の変更は登熟不全発生リスクを大きく増加させることはなかった。したがって、1993年のような冷害年を除けば、つくばにおいては、 $TP_{10\%}$ までの移植日は、比較的安全性が高い。しかし、 $TP_{10\%}$ と $TP_{30\%}$ の差は、わずか2日と小さく、急勾配で変化した（急勾配故に、日単位に丸めて表記した表1のつくばの $TP_{20\%}$ と $TP_{30\%}$ は同一日となった）。これは、 $TP_{10\%}$ を超えると急激に危険性が上昇することを意味しており、安全な移植晩限日は、このような曲線勾配が急激に変化する期日以前に定めるべきである。そのような意味でも、多くの地点で TP_L は妥当な移植晩限日を与えていると考えられる。

以上の解析より、 TP_L を登熟不全を回避するための移植晩限日として採用することとした。

表2. 移植期晩限日 (TP_L)、および1991～2010年の気象条件のもとで、登熟不全発生リスクが、それぞれ0、10、20、30%となる移植日（それぞれ、 $TP_{0\%}$ 、 $TP_{10\%}$ 、 $TP_{20\%}$ 、 $TP_{30\%}$ ）

県	気象観測所名	計算に 用いた品種	移植期 晩限日 (TP_L)	登熟不全発生リスクに対応する 移植日			
				リスク0% ($TP_{0\%}$)	リスク10% ($TP_{10\%}$)	リスク20% ($TP_{20\%}$)	リスク30% ($TP_{30\%}$)
宮城県	仙台	ひとめぼれ	6/17	5/29	6/25	6/26	6/27
		コシヒカリ	5/31	4/24	6/7	6/10	6/13
福島県	福島	コシヒカリ	6/12	5/28	6/13	6/17	6/18
	若松	コシヒカリ	6/6	5/25	6/6	6/9	6/14
茨城県	水戸	コシヒカリ	6/28	6/25	7/3	7/6	7/7
	つくば	コシヒカリ	6/28	6/16	7/8	7/9	7/9
栃木県	宇都宮	コシヒカリ	6/30	6/15	7/7	7/9	7/10
群馬県	前橋	コシヒカリ	7/4	6/23	7/9	7/12	7/13
千葉県	千葉	コシヒカリ	7/23	7/18	7/24	7/27	7/30
神奈川県	横浜	コシヒカリ	7/21	7/19	7/23	7/29	7/30
長野県	長野	コシヒカリ	6/14	5/24	6/12	6/18	6/23



県名	稲作地帯区分	代表品種
青森県	青森	つがるロマン
青森県	津軽	つがるロマン
青森県	南部・下北	まっしぐら
岩手県	北上川上流	あきたこまち
岩手県	北上川下流	ひとめぼれ
岩手県	東部	あきたこまち
岩手県	北部	いわてっこ
宮城県	南部	コシヒカリ
宮城県	中部	ひとめぼれ
宮城県	北部	ひとめぼれ
宮城県	東部	ひとめぼれ
秋田県	県北	あきたこまち
秋田県	県中央	あきたこまち
秋田県	県南	あきたこまち
山形県	村山	コシヒカリ
山形県	最上	はえぬき
山形県	置賜	コシヒカリ
山形県	庄内	コシヒカリ
福島県	中通り	コシヒカリ
福島県	浜通り	コシヒカリ
福島県	会津	コシヒカリ

図1. 方法(1)で算出した東北地方の移植期晩限日(TPL)、出穂期晩限日(HL)、安全成熟期晩限日(ML)のメッシュ図。白は低温により移植期晩限が設定できないメッシュ、灰色は水稻栽培が行われていないメッシュを示している。表は各作柄地帯の代表品種を示し、これらの品種の出穂期予測モデルと登熟に要する積算気温を用いて、TPL、HLを決定した。ただし、TPLの計算には稚苗移植を仮定した。

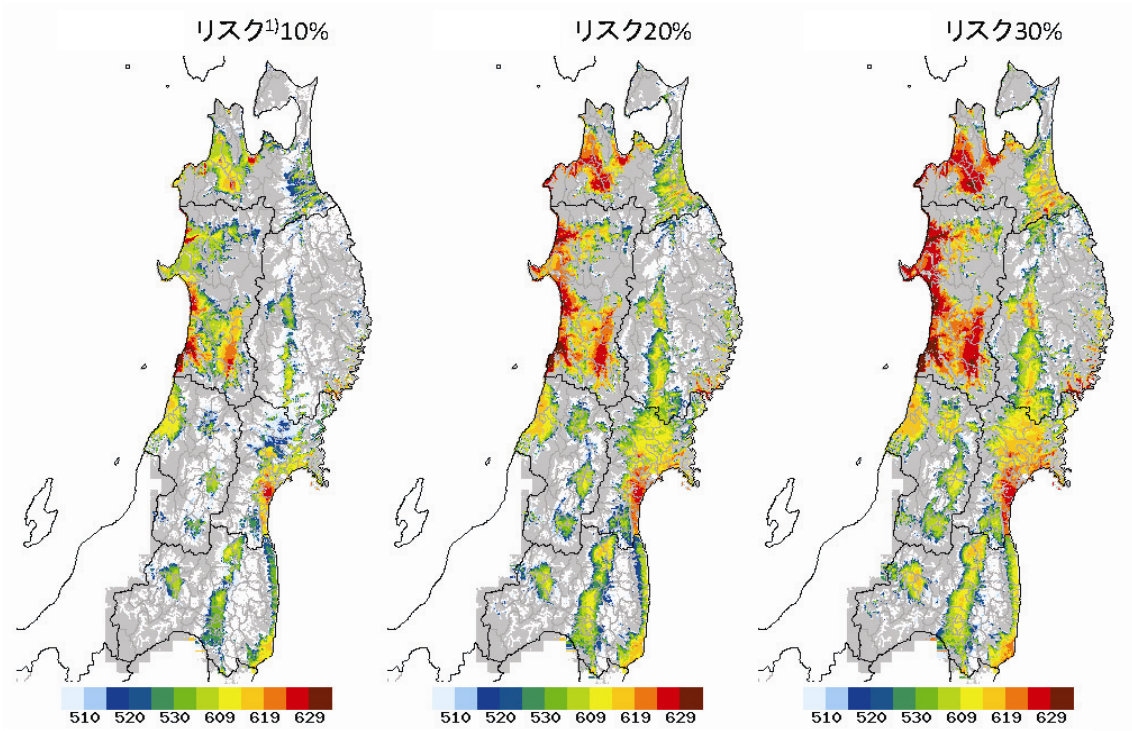
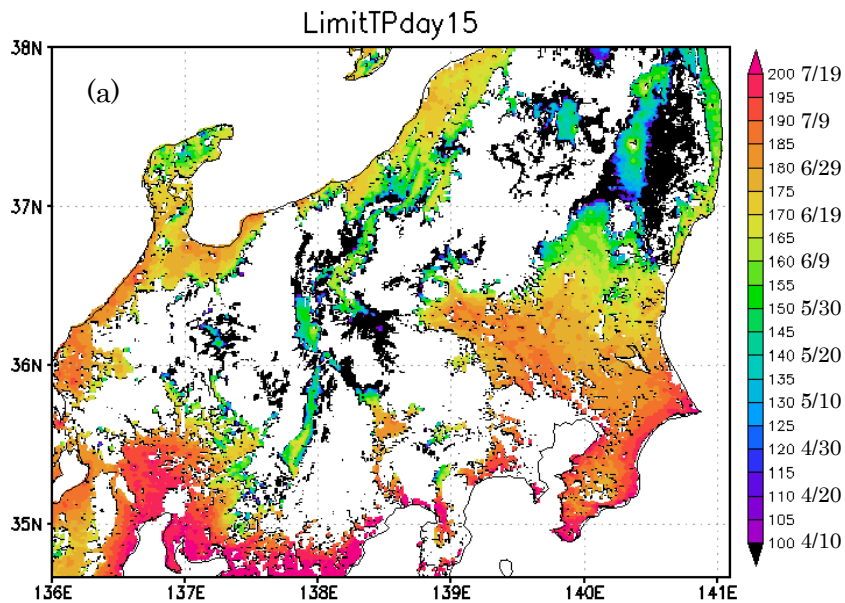


図2. 方法(2)で算出した東北地方の登熟不全発生リスク 10、20、30%を与える移植日(それぞれ、 $TP_{10\%}$ 、 $TP_{20\%}$ 、 $TP_{30\%}$)。白は低温により該当日が存在しないメッシュ、灰色は水稻栽培が行われていないメッシュを示している。計算に用いた品種パラメータと作柄表示地帯との対応は、図1に等しい。1)リスク 10%の移植日では、10年に1回の確率で成熟期に到達しない可能性がある。



GrADS: COLA/IGES

2011-03-29-12:58

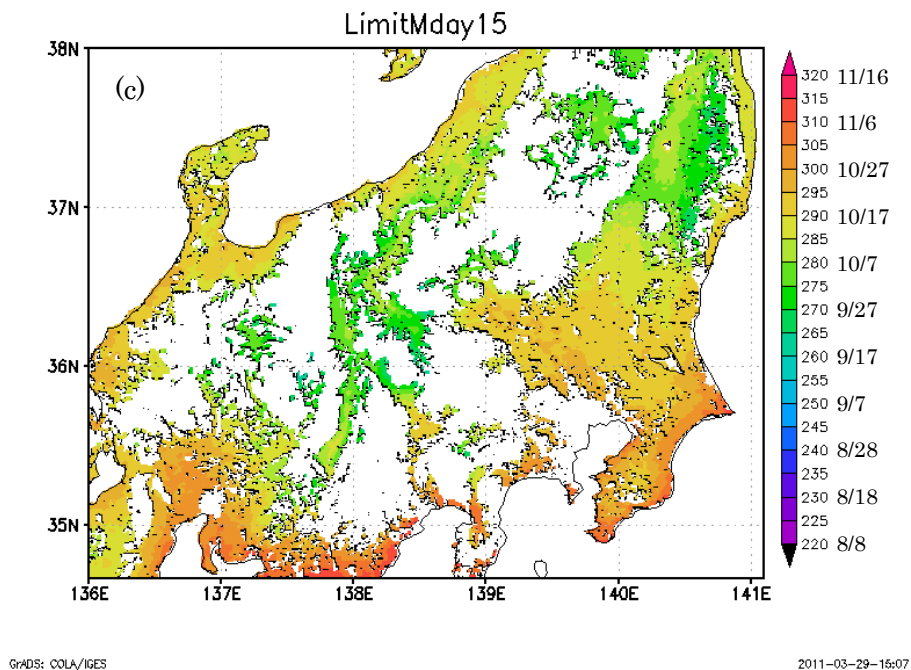
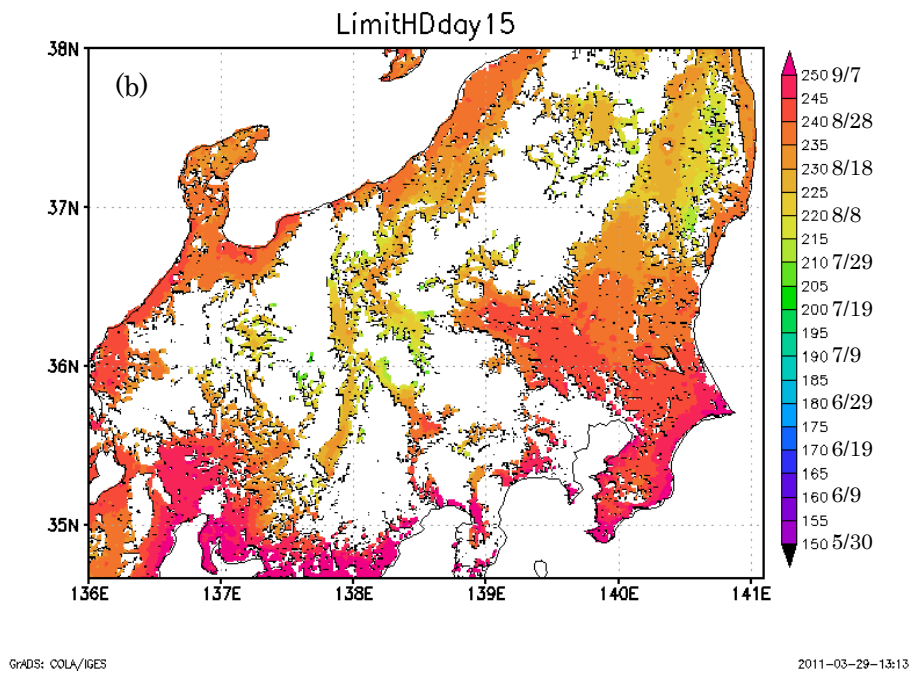


図3. 方法(1)で算出したコシヒカリについての関東・甲信・北陸地方の移植期晩限日((a): TP_L)、出穂期晩限日((b): H_L)、安全成熟期晩限日((c): M_L)のメッシュ図。黒は低温により移植期晩限日が設定できないメッシュ、白色は水稻栽培が行われていないメッシュを示している。カラーバー右の数字は1月1日を1とする通日および月日を示す。

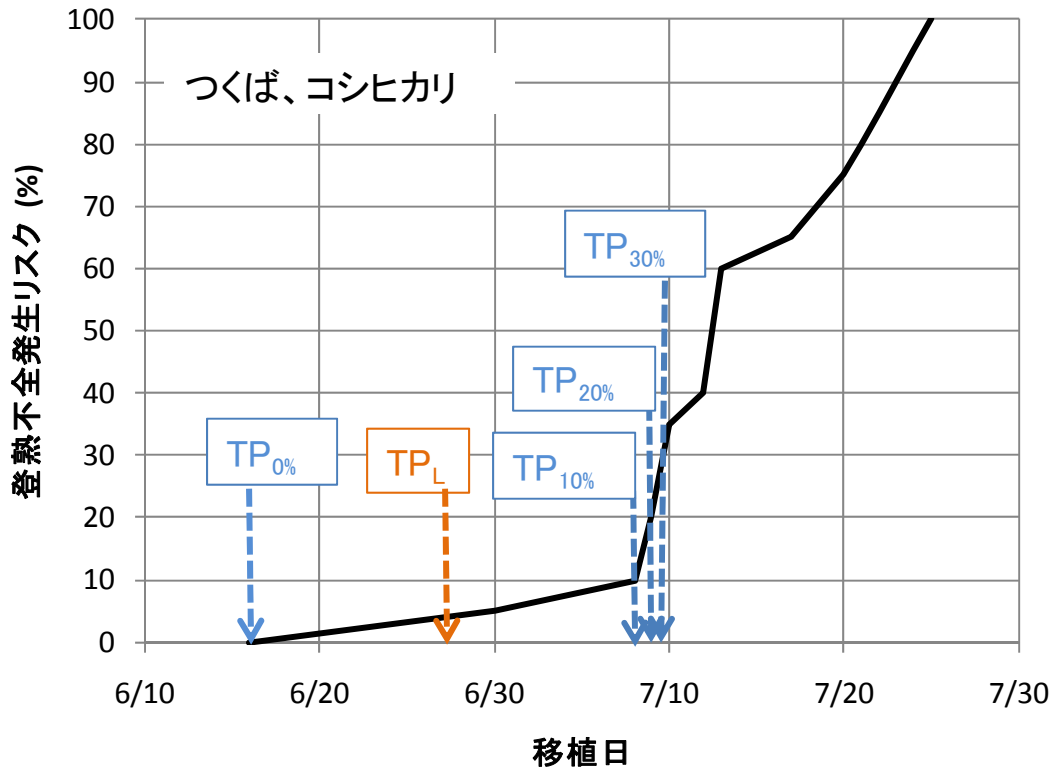


図4. つくばの最近の20年の気象条件を用いて、リスク分析による方法(2)で算出したコシヒカリの移植日と登熟不全発生リスクとの関係。TP_{0%}、TP_{10%}、TP_{20%}、TP_{30%}は、それぞれ、登熟不全発生リスクが0、10、20、30%となる移植日であり、TP_Lは気象平年値を用いて計算した移植晩限日である。

(2) 晩植化に伴う減収率の推定

水稲生育・収量予測モデルSIMRIWによるシミュレーション結果から、各地点において粗玄米収量を最大にする移植日が存在することが示唆された(図5、7、8、9)。極端な早植えでは、移植直後の低温による枯死、あるいは障害型冷害によって減収することがモデルシミュレーションによって再現されている。ほとんどの地点で、気象からみた粗玄米ベースの可能最大収量は、初期の低温障害もしくは障害型冷害を引き起こさない移植日の早限でもたらされた。そのような最適移植日を過ぎると粗玄米収量はなだらかに減収し始め、ある移植日を過ぎると急激に減収することが推定された。なだらかな減収は、主として生育期間の短縮に伴う生育量不足による減収を反映しており、極端な晩植による急激な減収は、登熟相に低温に遭遇し、登熟が停止することによっている。現行の移植期は、収量推定値の最大～最大-5%を与える移植日の範囲にある場合が多かった。

本報告で算出した移植期晩限日TP_Lは、登熟相の低温による登熟不全を避けるための晩限

日であり、収量性のことを考慮した基準ではない。そこで、移植最盛期に移植したときの粗玄米収量に対する TP_L 移植の粗玄米収量相対値を算出したところ、地域・品種によって 67～97%の範囲で様々な値をとった（表 1）。概して言えば、 TP_L が比較的早い時期となる東北地域および長野、新潟県の高冷地では、 TP_L 移植における粗玄米収量相対値が高く、関東地域では低い地点が多かった。また、関東地域の中では、もともと移植期最盛期が遅い群馬県で、 TP_L 移植に対する粗玄米収量相対値が比較的高かった。

次に金沢と福島のコシヒカリに関する、 TP_L および登熟不全発生リスク分析結果と SIMRIW による減収程度の推定結果を比較した（図 5）。まず、既述のように、両地点で、 TP_L は登熟不全発生リスクの低い移植日の範囲にあり、登熟不全の回避という意味では、妥当な移植晩限日を与えていることがわかる。しかし、福島では TP_L に移植した場合の粗玄米収量相対値が 91%であるのに対し、金沢では同 77.5%となり、より大きな減収が予測された。これは、移植日に対する粗玄米収量の減少勾配が両地点で比較的近いのに対し、 TP_L は福島のほうが 1 ヶ月弱早いためであった。いいかえれば、東北地域では、収量が大きく減少する前に TP_L を迎えるが、より南の地域では、かなり遅くまで移植が可能ではあるが、 TP_L における減収程度は大きくなる可能性がある。

水稲生育・収量予測モデル SIMRIW で推定される収量は、粗玄米重データに基づいており、気象条件からみた各地点の可能最大収量を与える。しかし、精玄米収量の減収程度を考えるには、晩植による登熟歩合の低下（丸山・田中 1985、松本・中谷 1988）を考慮する必要がある。登熟歩合は、穎花数と出穂前蓄積非構造化炭水化物および出穂後の乾物生産との相対的關係に影響を受け、穎花数がほぼ等しい場合は、出穂前 15 日から出穂後 35 日の平均日射量の減少とともに登熟歩合が低下する（丸山・田中 1985）。晩植化に伴う穎花数減少の程度は比較的小さい（丸山・田中 1985、松本・中谷 1988）ため、生殖成長相後期から登熟相の日射環境の悪化が登熟歩合の悪化をもたらすと考えられている（丸山・中谷 1985）。通常、晩植化に伴って出穂期が遅れ、生殖成長相後期～登熟相の日射環境は悪化するため、晩植化に伴う精玄米収量の減収程度は、SIMRIW で推定された粗玄米収量の減収程度以上になる可能性が高いと考えられる。

そこで、石川県農業総合試験場（現石川県農業総合研究センター）におけるコシヒカリの作期移動試験（松本・中谷 1988）のデータを再解析して、精玄米収量の減収程度の推定を試みた。松本・中谷（1988）は、コシヒカリを 5 月 5 日、5 月 15 日、5 月 25 日、6 月 5 日、6 月 15 日、6 月 25 日の 6 回移植し、各作期の収量および収量構成要素を調査した。彼らのデータをもとに、5 月 5 日移植の粗玄米収量および精玄米収量をそれぞれ 100 とした時の相対値に変換し、両者の関係を調べたところ、粗玄米収量相対値と精玄米収量相対値の間には密接な関係が認められ、粗玄米収量より精玄米収量の低下程度が大きかった（図 6(a)）。この粗玄米収量と精玄米収量の関係を用いて、粗玄米収量の相対値を精玄米収量の相対値に換算したものが図 5（金沢）の精玄米①の線である。一方、図 6(b)は、粗玄米収量の実測値（松本・中谷 1988）と SIMRIW による推定値の関係である。松本・中谷（1988）

の実験では、倒伏を危惧して6月15日、6月25日移植の場合、窒素元肥量を他作期の5kg/10aから4kg/10aに減らしている。SIMRIWでは最適な栽培条件における可能最大収量を与えるために、実験において施肥条件が一定していないことがモデルの過大評価の一因と考えられる。また、SIMRIWでは温度ストレスを受けない場合は一定の収穫指数を仮定しているが、実験値では6月25日移植で収穫指数が低下していたので、これも極端な晩期移植時にSIMRIWが粗玄米収量を過大評価した理由と思われる。そこで、SIMRIWによる粗玄米収量の過大評価を図6(b)の関係をを用いて修正し、さらに図6(a)の関係をを用いて精玄米収量相対値に換算したものが図5(金沢)の精玄米②の線である。したがって、精玄米②の線は、ほぼ松本・中谷(1988)の元データが与える関係に近い。ただし、精玄米②の線には、晩期移植時に減肥した効果が入っているので、栽培条件一定と仮定すると、精玄米①と精玄米②の2本の曲線に囲まれた、網掛けした範囲に精玄米収量が入ると推定される。範囲の中央をとれば、金沢の場合、粗玄米収量90%に対して精玄米収量80%程度、同様に80%に対して60%程度と見積もることができる。もしくは、気象的な潜在生産力が活かせるような栽培法をとると仮定して精玄米①の関係を採用すると、粗玄米90%に対して精玄米85%、同様に80%に対して70%程度となる。このような粗玄米収量と精玄米収量の関係は、地域、気象条件、品種、栽培法によって変わるので、一般化することは難しいが、本報告の結果を使用する際に、粗玄米収量より精玄米収量の減収程度が大きい可能性が高いとの注意を促す意味で例示した。

図7、8、9にSIMRIWによって推定された、各地点・品種における移植日の変化に伴う粗玄米収量相対値の変化について図示した。東北地域では各地点で、あきたこまち、ひとめぼれ、コシヒカリについてのシミュレーション結果を比較した(図7)。コシヒカリにくらべて、ひとめぼれ、あきたこまちのような早生品種を使用すると晩植化に伴う粗玄米収量の減少程度が緩和されており、シミュレーションによって品種間の常識的な関係が再現されていることが確認された。また、 TP_L に移植した場合の粗玄米収量減収程度が関東・北陸地域に比べて小さかった(表1、図5)のは、東北地域全般に TP_L が早い時期に位置しているという既述の理由に加えて、早生品種を用いるためであることが示唆された。図8は、東北の各地点で代表的な早晩性の品種を用いたシミュレーション結果である。最近20年間の気象条件下で計算した結果の平均値のみならず、最小値、最大値を付加した。最小値は、主として冷害年のシミュレーション値であるが、安全性を重視するなら、この曲線が急激に落ち始める日以前に移植することが望ましい。同様に、図9では、関東および甲信地方の各地点におけるシミュレーション結果を示した。

収量性に関する移植期の晩限設定は、この報告のシミュレーションでは精玄米収量を考慮していないために困難である。また、実際的な晩限設定には、外観品質、食味や倒伏の問題を考慮する必要がある。そのような限界を認めた上で、モデルによる粗玄米収量推定値から収量性を勘案した晩限設定を試みる。金沢では粗玄米収量90%を与える移植日は、石川県における常識的な移植晩限の5月末日より11日遅い、6月11日である(図5)。また、

粗玄米収量 85%を与える移植日は 6 月 23 日である。それに対して、 TP_L は 7 月 9 日であり、 TP_L に移植した場合は、シミュレーションにおいても、松本・中谷 (1988) の栽培試験結果から判断しても、かなりの減収が予想される。したがって、 TP_L は、登熟不全を避けるための移植限界としては適当であるが、収量性を考慮した移植限界としては遅すぎるだろう。また、推定粗玄米収量 80%を与える移植日は、金沢では精玄米収量が半減する危険性があり (図 5 上図、精玄米②)、収量性を加味した晩限基準としては現実的ではない。さらに、粗玄米収量 80%を与える移植日は、関東・北陸地域では TP_L 以後の期日に位置する場合が半数程度あったので、その意味でも晩限期として遅すぎる。そこで、SIMRIW による推定で粗玄米収量相対値 90%を与える移植日を、緊急時に移植晩限を緩和する際の一基準として使用することを提案する。金沢における栽培試験結果 (松本・田中 1988) では、6 月 15 日移植で 453kg/10a の精玄米収量が得られているので、外観品質、食味、倒伏等の問題を考えなければ、少なくとも金沢については、そのようにして推定された 6 月 11 日は、妥当な基準と考えられる。あるいは、稚苗から中苗への切り替え、密植などによって晩植への適応策を取り、精玄米①の関係が期待できるなら、20~30%の精玄米収量減収の危険性を認めた上で、推定粗玄米収量 85%の移植日 (金沢では 6 月 23 日) まで晩限基準を緩めることも可能と思われる。関東、北陸地域では、もともと移植盛期が遅い群馬県を除けば、移植晩限日として TP_L を採用した場合の粗玄米収量相対値が 90%以下であるので、収量性を考慮した晩限日は、少なくとも TP_L より前に設定すべきだろう。したがって、関東・北陸地域では、金沢で得られた関係が適用できると仮定すると、 TP_L ではなく、粗玄米収量相対値 90%を与える日を移植晩限として採用することが望ましい。旧北陸農試 (上越市) でトドロキワセを用いた作期移動試験の結果では、4 月 30 日移植の精玄米収量を 100%としたとき、6 月 11 日および 6 月 25 日の精玄米収量はそれぞれ 86%、76%であった (丸山・田中 1985)。コシヒカリを用いた新潟市のシミュレーション結果では、粗玄米収量 90%を与える移植日は 6 月 9 日であった。トドロキワセがコシヒカリより早生であること、計算地点と栽培地点が異なっていることを考えても、丸山・田中 (1985) の結果から、6 月 9 日移植で、精玄米収量 80%程度は確保できそうである。一方、新潟市のシミュレーション結果で粗玄米収量 85%を与える日は 6 月 21 日であった。この日を精玄米収量 20~30%減を許容する場合の晩限基準とすれば、トドロキワセがコシヒカリより数日早く出穂することを考慮すると、丸山・田中 (1985) の 6 月 25 日移植の結果に極めて近い。以上より、関東・北陸地域においては、移植晩限日として TP_L を採用するより、SIMRIW による粗玄米収量相対値 90%を与える移植日を晩限日として用いる方が収量性・安全性の観点から適当である。ただし、関東地域では、粗玄米収量相対値 85%を与える移植日は、群馬県を除いて、すべて TP_L 以前であったので、晩植の限界をできるだけ拡大したい場合は、適切な栽培的対応を取った上で、粗玄米収量相対値 85%を与える移植日を晩限日として採用することも可能と考えられた。

東北地域において多作期を設けた栽培試験結果では、盛岡で 30 日苗を用いた場合に、6 月 5 日移植に対する 6 月 25 日移植の精玄米収量相対値が 90% (関山 2 号) ~93% (奥羽 195

号) (平野ら 1959)、山形で同様に 6 月 5 日移植に対する 6 月 25 日移植の精玄米収量相対値が 84% (キヨニシキ) (下田ら 1981) の例がある。下田ら(1981)では、作期移動試験の結果に基づいて薄播きによる育苗と密植等によって、6 月 20 日前後まで晩植限界を拡大できると判断している。山形におけるひとめぼれのシミュレーション結果 (図 8) では、粗玄米収量推定値が 90%となる移植日は 6 月 30 日である。仮に金沢における粗玄米収量と精玄米収量の関係 (図 5、6) が成り立つとすれば、精玄米収量相対値は 6 月 30 日時点で 80%程度であり、上述の下田ら(1981)の結果に近い。山形では、はえぬきについて算出した TP_L は 6 月 18 日であり、粗玄米収量相対値 90%を与える移植日より早い時期に位置する。はえぬきの早晚性はひとめぼれのそれに比較的近いので、以上の結果から、山形において TP_L は、収量性を考慮した上での晩限日としても妥当と考えられた。東北地域の他地点および長野、津南、関山についても、既述のように TP_L に移植した場合の粗玄米収量相対値が 90%を超えていた (表 1) ので、同様に、移植晩限日として TP_L を採用することは収量性の面でも妥当と思われる。ただし、図 8 の収量最小値は、最も厳しい冷害年には、収量が急激に減少する限界の移植日が平年より早いことを示している。例えば、山形では、収量最小値の曲線において移植日が 6 月 10 日を超えると推定収量が急激に減少していることから、冷害年の場合は 6 月 10 日までに移植することが望まれる。同様に、他の東北地域においても、冷害年への対処を優先する場合は、収量最小値が急激に減少する移植日前に晩限日を設定すべきであろう。

以上をまとめると、登熟不全発生リスクと収量性の両者を考慮した移植晩限日として、東北地域、長野県、新潟県の山間部および群馬県では TP_L (ただし、 TP_L が $TP_{10\%}$ を超える場合は、 $TP_{10\%}$ がより望ましい)、群馬県を除く関東地域では、SIMRIW による粗玄米収量推定値が 90%となる日を採用するのが妥当と考えられた。したがって、 TP_L 、 $TP_{10\%}$ 、粗玄米収量推定値が 90%となる日のうち、最も早い日を移植晩限とすれば、全ての地点で、登熟不全回避と収量性の両面で安全な晩限設定が可能となる。また、関東地域で、晩植限界を拡大したい場合は、薄播による健苗育成、密植などによる適切な対応を取った上で、粗玄米収量推定値が 85%となる日が TP_L を超えなければ、それを晩限日とすることも可能と考えられた。

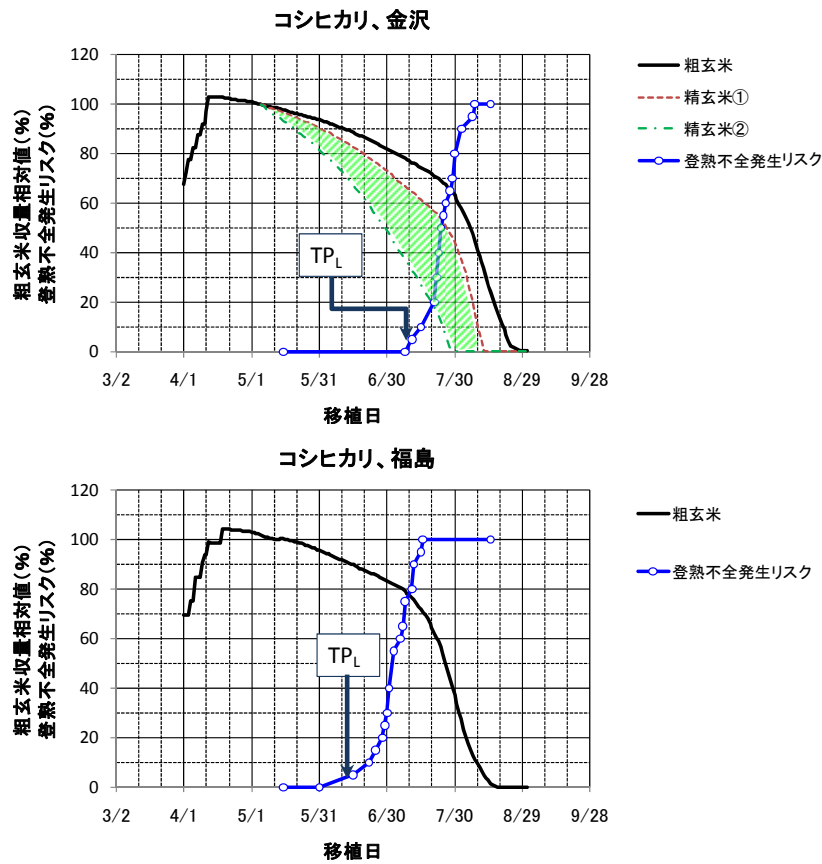


図 5. 金沢と福島的气象条件（1991～2010 年）下で、水稻生育・収量シミュレーションモデル SIMRIW によって推定された粗玄米収量の移植日による変化と各移植日における登熟不全発生リスク。ただし、粗玄米収量は各地点の移植盛期における推定値を 100%としたときの相対値として図示した。図中の TP_L は移植期晩限日を示す。精玄米①は、図 6(a)の関係を使用して、粗玄米収量推定値から精玄米収量推定値に換算したものであり、精玄米②は、図 6(b)の関係をもとに粗玄米収量を補正した上で図 6(a)の関係を適用した換算値である。

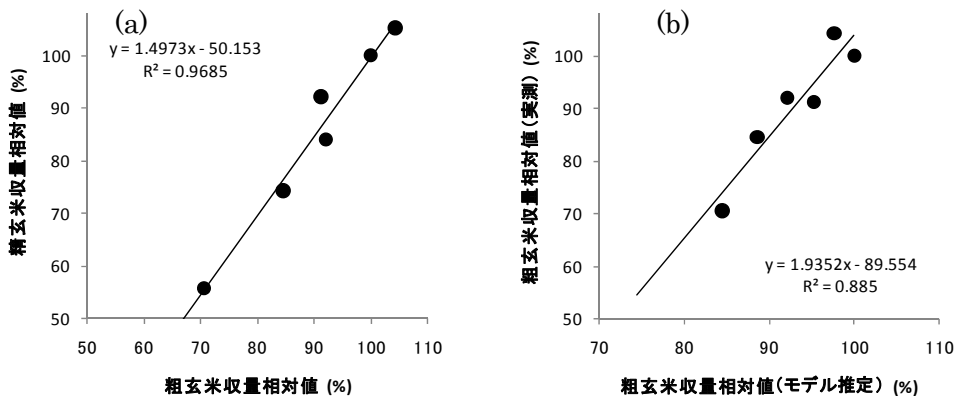


図 6. 石川県農業総合試験場で、6 回の移植期（5 月 5 日～6 月 25 日、10 日毎）を設けて栽培されたコシヒカリの粗玄米収量相対値と精玄米収量相対値との関係（松本・中谷（1988）のデータを再解析した）(a)、および、松本・中谷（1988）の粗玄米収量実測値と金沢の気象条件を用いた SIMRIW による粗玄米収量推定値(b)。ただし、すべて 5 月 5 日移植の収量を 100%としたときの推定値として図示した。

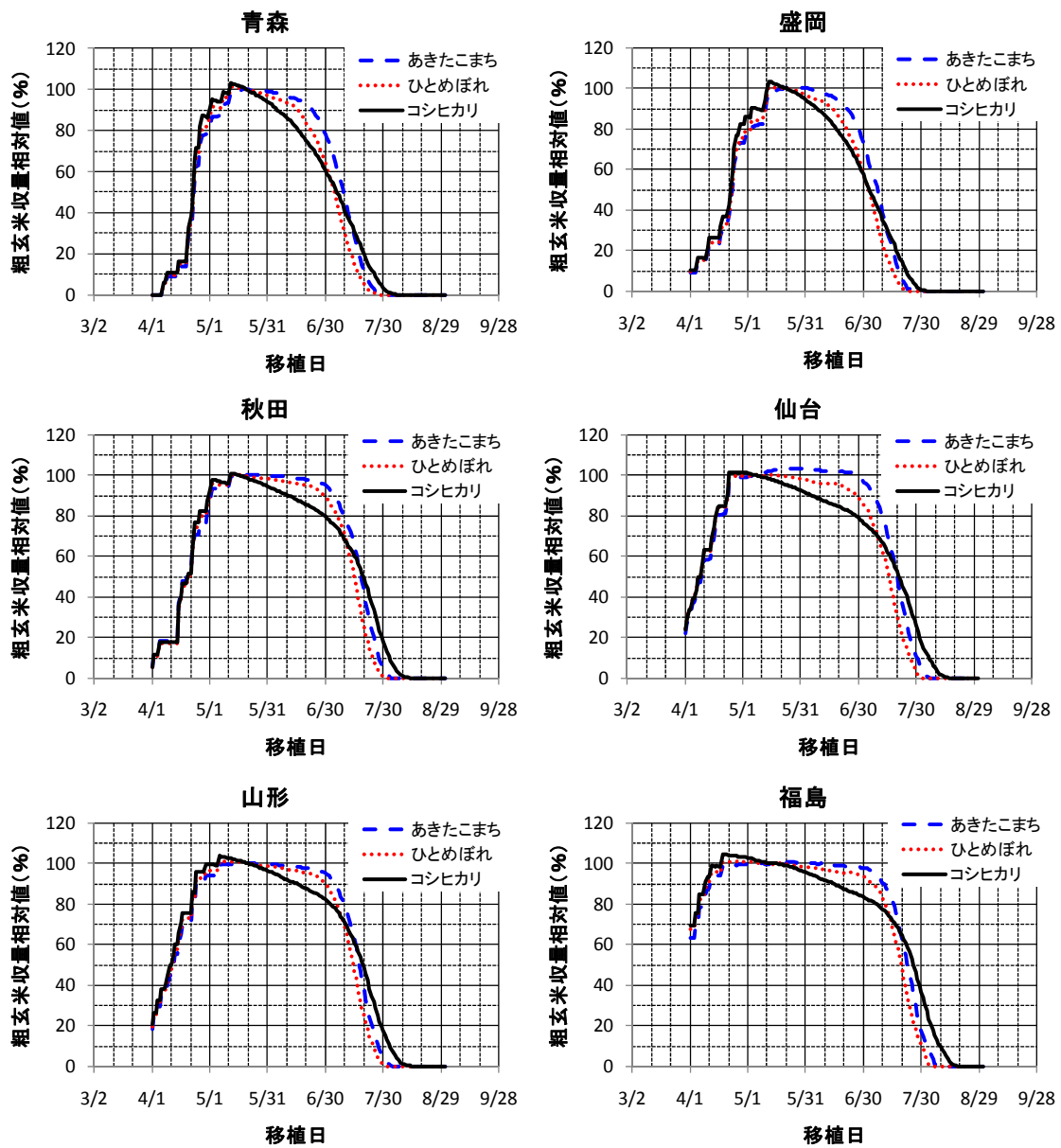


図 7. 東北地方の 6 地点の気象条件下で水稻生育・収量予測モデル SIMRIW を用いて推定された、あきたこまち、ひとめぼれ、コシヒカリの粗玄米収量の移植日による変化。ただし、1991～2010 年の年々の気象条件を用いてシミュレーションを行い、各移植日について、20 年間の収量を平均した。また、粗玄米収量は各地点の移植盛期における推定値を 100%としたときの相対値として図示した。

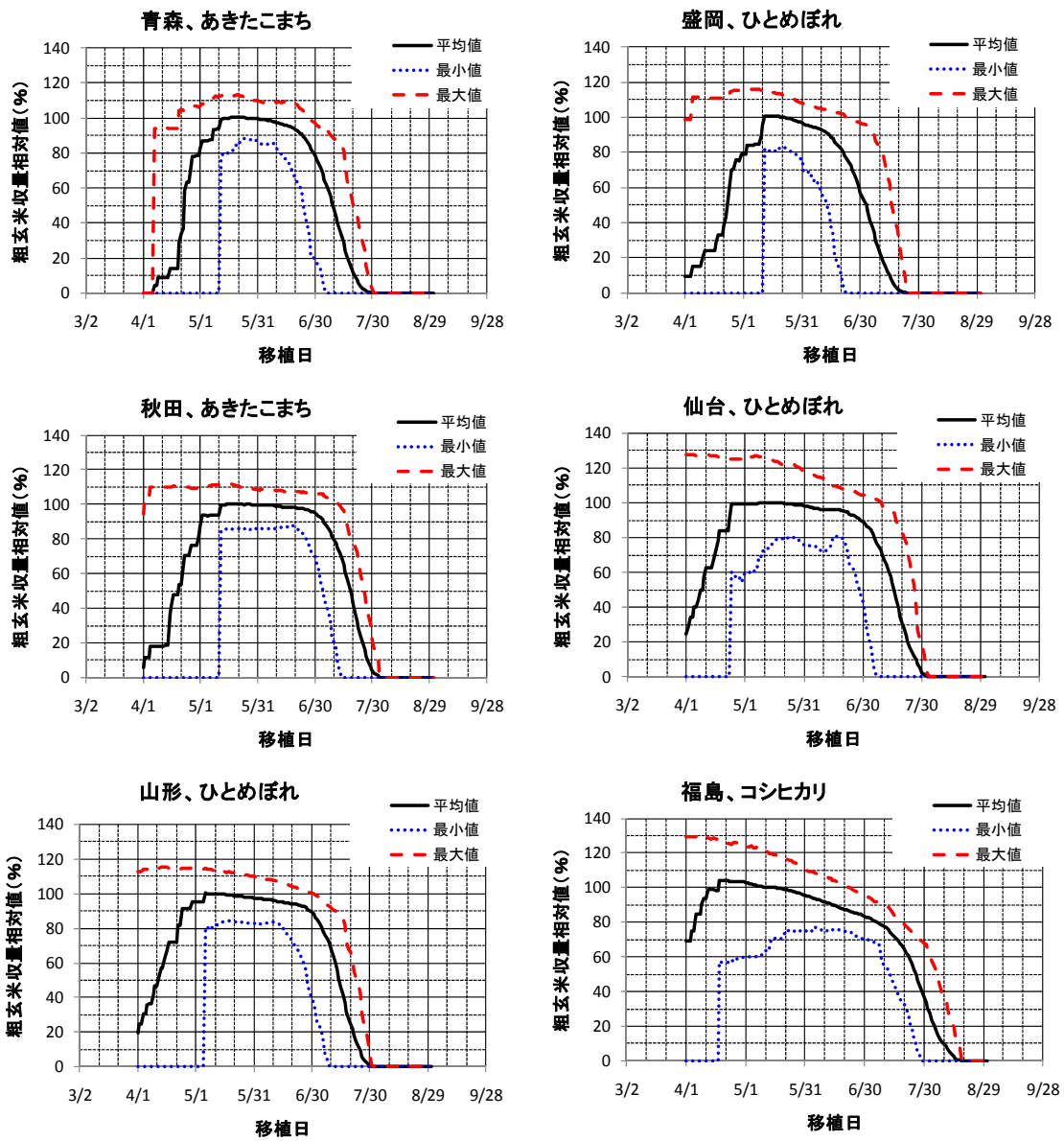
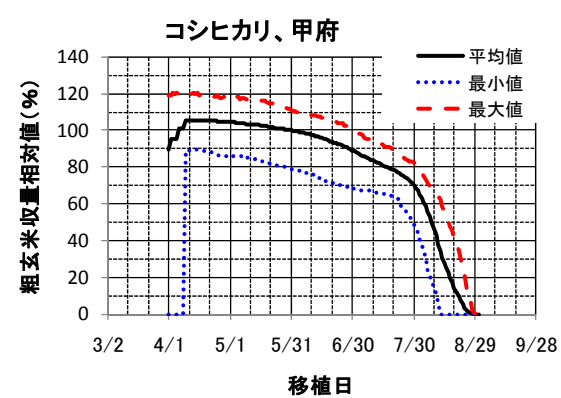
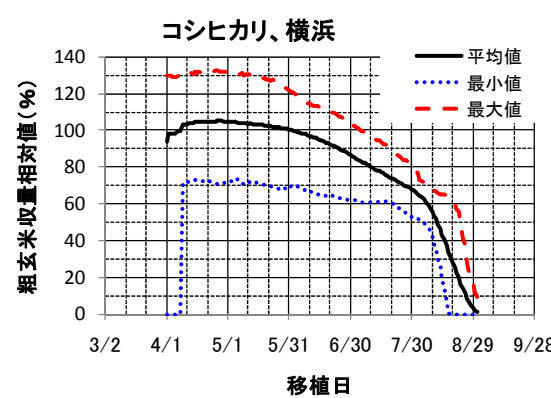
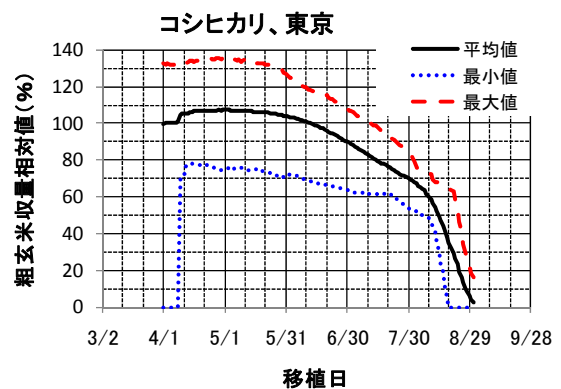
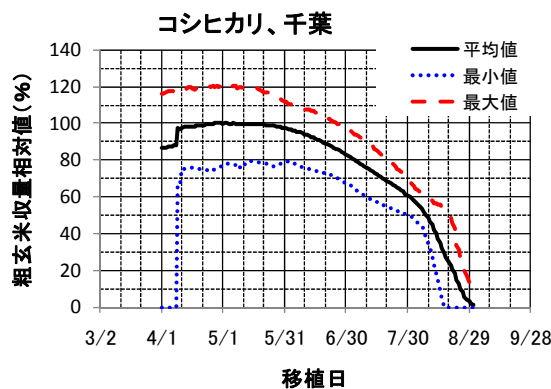
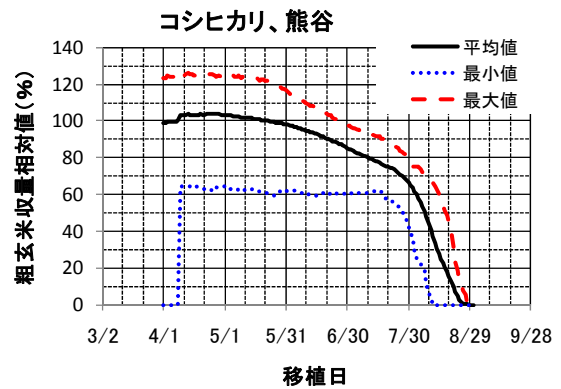
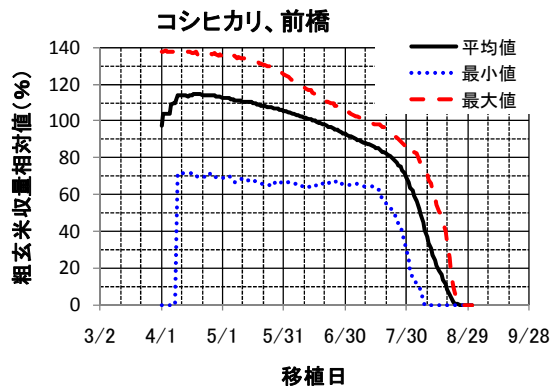
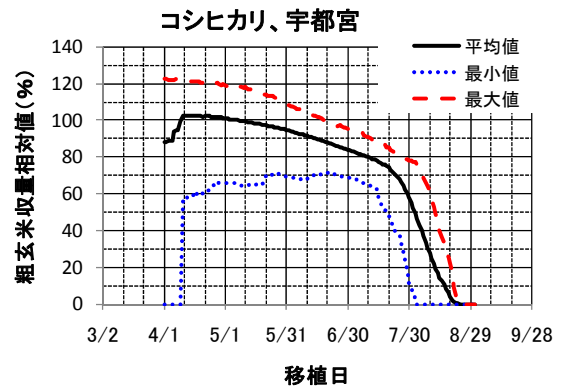
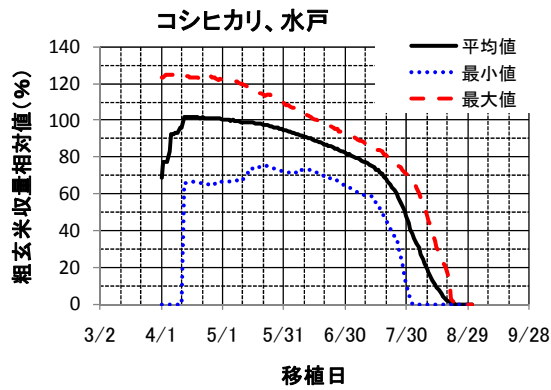


図 8. 東北地方の 6 地点の気象条件下で水稻生育・収量予測モデル SIMRIW を用いて推定された、1991 年～2010 年間の各地点の代表的品種の粗玄米収量平均値、最小値、最大値の移植日による変化。ただし、粗玄米収量は各地点の移植盛期における推定値の平均値を 100%としたときの相対値として図示した。各地の代表的品種は、必ずしも作付け第 1 位の品種という意味ではなく、発育予測モデルのパラメータが使用できる品種の中から、各地点に適する早晩性の品種を選んだ。



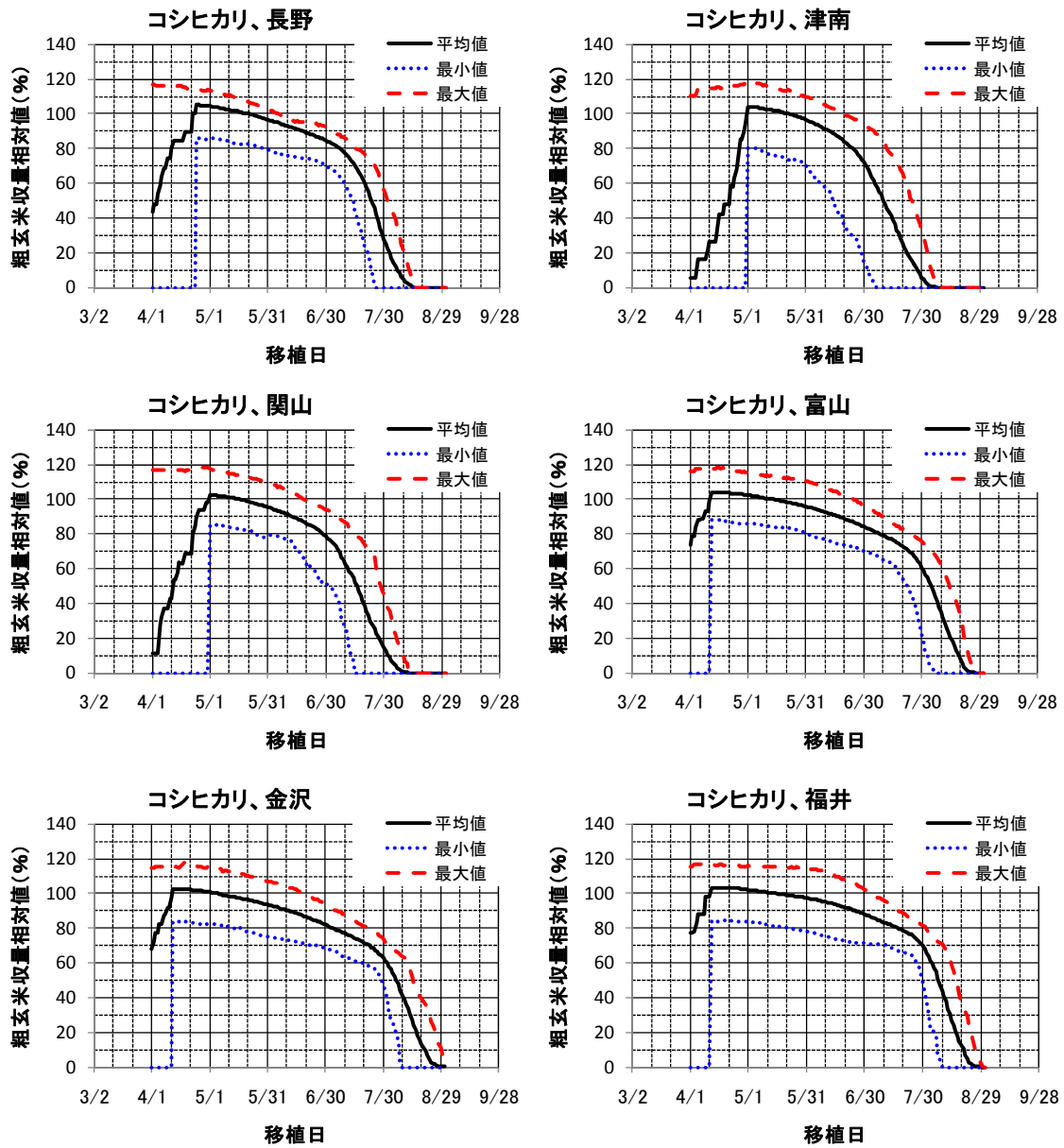


図 9. 関東・甲信・北陸地方の 14 地点の気象条件下で水稻生育・収量予測モデル SIMRIW を用いて推定された、1991 年～2010 年間のコシヒカリの粗玄米収量平均値、最小値、最大値の移植日による変化。ただし、粗玄米収量は各地点の移植盛期における推定値の平均値を 100%としたときの相対値として図示した。

表3. 水稻生育・収量予測モデル SIMRIW で推定された粗玄米収量相対値（各地点の移植最盛期に移植した場合の推定値を100%とする）が、それぞれ、95、90、85、80%となる移植日。

県	気象観測所名	計算に 用いた品種	粗玄米収量 相対値95%	粗玄米収量 相対値90%	粗玄米収量 相対値85%	粗玄米収量 相対値80%
宮城県	仙台	ひとめぼれ	6/21	6/28	7/3	7/6
		コシヒカリ	5/24	6/5	6/18	6/28
福島県	福島	コシヒカリ	6/1	6/14	6/26	7/6
茨城県	水戸	コシヒカリ	5/30	6/13	6/24	7/4
栃木県	宇都宮	コシヒカリ	5/30	6/14	6/27	7/10
群馬県	前橋	コシヒカリ	6/26	7/5	7/16	7/22
千葉県	千葉	コシヒカリ	6/7	6/18	6/27	7/4
神奈川県	横浜	コシヒカリ	6/15	6/24	7/2	7/10
新潟県	津南	コシヒカリ	6/3	6/12	6/18	6/24
	関山	コシヒカリ	6/1	6/12	6/22	6/28
長野県	長野	コシヒカリ	6/4	6/17	6/29	7/7

4. 結論

異なる地域および品種に対応した移植期の晩限を提示するために、生育後期の低温限界を想定した安全成熟期晩限（内島、1983）に基づく移植期晩限日（ TP_L ）と、生育・収量シミュレーションモデル SIMRIW (Horie et al 1995) に基づく晩植による粗玄米収量の減収率（移植盛期の平年収量を基準とする）を東北、関東甲信、北陸地域を対象として算出した。その結果、東北地域、新潟県の高冷地、長野県および群馬県では、 TP_L に移植した場合、SIMRIW による減収予測は10%以下と軽微であったが、それ以外の地域では TP_L に移植すると減収率は10%以上になるものと推定された。すなわち、後者の地域では減収率が10%となる移植日（ $YL_{10\%}$ ）以前に移植すれば、生育後期の冷温遭遇による登熟不全発生リスクは極めて小さい。このような地域的な特徴を考慮して、 TP_L と $YL_{10\%}$ のうち、早い方を安全な移植晩限日として提案する。これによって、対象にした全地域で、登熟不全回避と収量性の両面で安全な移植晩限日の設定が可能になる。

5. 留意事項

1) 本報告で安全成熟期晩限日（ M_L ）より求めた出穂期晩限日（ H_L ）は、坪井（1983）の好

適出穂期晩限日（出穂後 40 日間の平均気温 22℃を確保できる出穂期晩限）より遅く、安全出穂期晩限日（出穂後 40 日間の平均気温 20℃を確保できる出穂期晩限）より早い場合が多かった。したがって、本報告の出穂期晩限日（ H_L ）は、比較的厳しい基準による安全出穂期晩限を与えていると考えられる。

2) 従来法（内島 1983）による移植期晩限日（ TP_L ）は、登熟後期の冷害を回避するための移植晩限であり、晩植した場合は、秋季の低温ストレスに遭遇する危険性が高まるだけでなく、収量水準は低下する可能性がある。したがって、本報告では、収量シミュレーションを併用した、新たな移植晩限設定法を提案した。

3) 登熟不全発生リスク 10%を与える移植日とは、その日に移植した場合、過去 20 年の気象条件下で、2 年は登熟相の後半に低温障害に遭遇する危険性があるということ（ $2/20 \times 100 = 10\%$ ）、減収率を示す値ではない。他のリスク%についても同様である。ただし、リスク 0%とは、必ず低温障害を避けることができるという意味ではなく、過去 20 年の気象条件の範囲で低温障害を避けることのできる晩限日である。

4) 本報告の収量シミュレーションは粗玄米重をベースにした生育・収量予測モデルによって行われているので、晩植による精玄米収量の減収程度は、登熟歩合の悪化等により、シミュレーション結果より厳しくなる可能性がある。逆に稚苗から中苗への変更、薄播による健苗育成、密植などによって、収量性を考慮した晩限日を拡大できる可能性がある。各県の実情に合わせた解釈が必要である。また、生育・収量予測モデル SIMRIW のパラメータは、出穂期予測サブモデル以外は代表的品種の実験データに基づいているので、各品種の生育に関する特徴を必ずしも反映していない場合がある。

5) 取水可能期間や調製・出荷上の問題は考慮していない。そのため、本報告で提示した移植晩限日は生理的な意味での晩限であり、実際の作期設定には、各地域の実情を考慮する必要がある。

6) 気象平年値は、日々の気象を評価するために気象庁が作成する過去 30 年間の観測値に基づく気候値で、現在の平年値は 1971 年から 2000 年の統計期間に基づく。気象庁は、平年値を 10 年ごとに更新しており、今年（2020 年）は更新の年に当たる。公式には平成 23 年 5 月 18 日より、1981 年～2010 年に基づく新平年値が使用されるが、気象庁では計算方法を公表している（気象庁、2005）ので、これに準拠して新しい統計期間に基づく平年値を独自に計算して使用した。新时期の平年値は、現平年値と比較し、気温は全国的に高くなっている。さらに、近年の 20 年間は温暖化傾向が続いているので、30 年間の平年値を用いた解析は、やや厳しい移植期晩限日を与える可能性が考えられた。そこで、近年の温暖化傾向を考慮するために、直近の 20 年間（1991～2010 年）の気象データを用いてリスク分析を行い、平年値から算出した移植期晩限日（ TP_L ）を評価した。結果と考察に述べたように、 TP_L はやや厳しくはあるが、安全性を考えると妥当な数値と判断した。

計算に用いる日別最高、最低、平均気温データには、関東地方については（独）農業環境技術研究所が作成したアメダスメッシュ化データ（清野、1993）を用いた。このデータは、

標高を考慮した距離重み付き補間により気象庁の観測値を空間補間するもので、気象観測点が含まれるメッシュにおける値はそこでの観測値と一致する。東北地方については、菅野（1997）で示された手法を用いた。具体的には、東北6県のアメダスおよび空港気象観測点約150地点分の日平均・最高・最低気温データを目的変数、アメダス観測点の存在する1kmメッシュの地形因子を従属変数として重回帰分析（ステップワイズ法）を行い、地形因子を用いた気温推定式を求め、東北地方の7万数千点のメッシュについて地形因子から気温を推定し、実測値からの残差補正等を行って求められている。特にやませの吹走時に高精度に気温を推定するよう、地形因子が選択されている点の特徴である。平年値については、1981年～2010年の30年平均値を用い、気象庁の平年値作成法と同様に日々の平均値に9日移動平均を3回かけて求めている。データは以下のURLからダウンロード出来る。<http://tohoku.dc.affrc.go.jp/trmain.html>

引用文献

平野哲也・島田裕之・竹村武雄（1959）寒冷地における水稻の晩播晩植栽培に関する研究. 東北農試研報 15 : 1-15.

下田英雄・吉田浩・山崎栄蔵・神保恵志郎・田中順一・菅原道夫（1981）水田高度利用のための水稻機械化晩植栽培技術の確立に関する研究. 山形県立農業試験場報告 15 : 109-131.

内島立郎（1983）北海道、東北地方における水稻の安全作季に関する農業気象学的研究. 農技研報告 A31. pp. 113.

丸山幸夫・田中孝幸（1985）水稻の作期が生育収量に及ぼす影響. 北陸農試報 27 : 80-99.

坪井八十二（1986）水稻の計画栽培法. 気象と農業生産. 養賢堂. p. 46-54.

松本範裕・中谷治夫（1988）低コスト稲作のための品種構成と収量限界. 北陸作物学会報 23 : 39-41.

堀江武・中川博視（1990）イネの発育過程のモデル化と予測に関する研究. 1報 モデルの基本構造とパラメータの推定法および出穂予測への適用. 日本作物学会紀事 59 : 687-695.

清野 豁(1993) アメダスデータのメッシュ化について. 農業気象 48(4) : 379-383.

Horie, T., H. Nakagawa, H. G. S. Centeno and M. J. Kropff et al. (1995) The rice crop simulation model SIMRIW and its testing. In (Matthews et al. eds.) Modelling the Impact of Climate Change on Rice Production. CAB INTERNATIONAL, p. 51-66.

菅野洋光(1997) ヤマセ吹走時におけるメッシュ日平均気温の推定. 農業気象 53(1): 11-19.

神田英司・鳥越洋一・小林隆(2000) 水稲における葉の形成過程を考慮した主稈葉齢予測モデル. 日本作物学会紀事. 69: 540-546.

神田英司・鳥越洋一・小林隆(2002) 有効積算気温を用いた簡易モデルの穂の発育ステージへの適用. 日本作物学会紀事. 71: 394-402.

気象庁(2005) 気象観測統計の解説. p. 103-105.

Nakagawa, H., J. Yamagishi, N. Miyamoto, M. Motoyama, M. Yano, K. Nemoto (2005) Flowering response of rice to photoperiod and temperature: a QTL analysis using a phenological model. Theoretical and Applied Genetics 110:778-786.

神田英司・下野裕之・岡田益己 (2011) 温暖化時の水稲冷害発生リスク評価. 農林水産省プロジェクト研究 農林水産分野における地球温暖化対策のための緩和及び適応技術の開発 4. 農業分野に与える影響評価と適応技術の開発. 平成 22 年度研究成果報告. p. 21-27.