

東北地方における水稲冷害の早期警戒システムの開発に関する研究

神 田 英 司*¹⁾

抄 録：東北地方では水稲の冷害がたびたび発生し、わが国全体の食糧生産に影響を与えてきた。耐冷品種の開発や冷害対策技術により、冷害はかなり軽減されてきているものの、依然として東北地方の稲作の最大の不安定要因となっている。本研究では、冷害軽減を支援するために、東北地方に適用できる水稲の発育予測モデルと被害診断技術の作成、ならびに早期警戒システムの開発を行った。発育予測モデルは、イネの移植期から成熟期までを、葉、幼穂および玄米の発育過程別の3つのサブモデルより構成される。この発育予測モデルをイネの形態形成の規則性で拡張し、圃場内の発育ステージの変異を推定した。これに地域内の移植日の幅と苗質を組み合わせ、地域内の発育ステージの変異を推定した。推定される発育ステージと冷却量に基づく障害不稔歩合推定モデルと成熟期到達割合に基づく遅延型冷害の被害推定モデルを作成した。以上の発育予測モデルおよび情報を統合して作成した早期警戒システムは東北地方の冷害被害実態の正確な把握に役立つのみならず、生産現場における栽培管理の実施時期の判断、深水灌漑などの冷害回避技術の要否や刈取り時期の判定などに利用されている。

キーワード：水稲、早期警戒システム、発育予測モデル、冷害

Studies on the Development of an Early-warning System to Protect Rice Against Cool Weather Damage in the Tohoku Area : Eiji KANDA*¹⁾

Abstract : Rice production in the Tohoku region, in the northern part of Japan, has been frequently and severely limited by unusually cool weather. Although studies have aimed to develop breeding programs to improve rice's cold tolerance and to improve cultivation technique, it is difficult to fully mitigate damage from cool weather. To help local farmers make effective decisions regarding cultivation techniques during cool weather, a system called the "Early-warning system for cool weather damage" was developed that serves to distribute risk information concerning cool weather damage based on predictions made by a simulation model through the Internet. A simulation model of the system is composed of three submodels. First, the developmental stages from transplanting to maturity are estimated based on three phases: the leaf appearance phase, the panicle developmental phase, and the grain filling phase. Second, the percentage of sterile spikelets is estimated based on the amount of cool degree days with accounting for the developmental stages of young panicles. Third, the percentage of full ripening grain is estimated based on the developmental stage of grain filling when it is completed by low temperature. These submodels are integrated into the "Early-warning system for cool weather damage" which has provided daily information regarding the risk of cool weather damage to local farmers in the Tohoku region via the Internet since 1996. Farmers have widely utilized this system to judge the timing of cultivation management, including deep water management to protect against cool weather.

Key Words : Cool weather damage, Developmental model, Early warning system, Rice

目 次	II 水稲の発育ステージの簡易予測法の作成 ……………75
	1. 緒 言 ……………75
I 緒 論 ……………72	2. 出葉過程に基づく主稈葉齢予測と幼穂形成期の推定 ……75

* 1) 東北農業研究センター (National Agricultural Research Center for Tohoku Region, Morioka, Iwate 020-0198, Japan)

2006年12月28日受付、2007年2月28日受理

3. 有効積算気温を用いた穂の発育ステージの簡易予測モデル	81	2. ノンパラメトリック回帰モデルによる不稔歩合の推定	101
Ⅲ 圃場内、地域内の発育ステージの変異の推定	88	3. 登熟停止による減収率の推定	106
1. 緒言	88	V 発育予測モデルに基づく水稲冷害の早期警戒システムの開発	108
2. 器官形成の規則性に基づく発育ステージの圃場内変異の推定	88	1. 早期警戒システムの構成	108
3. アメダス指標地点の周辺地域における発育ステージの変異の推定	96	2. 早期警戒システムの機能と運営	109
Ⅳ 気象情報と発育予測モデルに基づく水稲冷害被害の予測	101	Ⅵ 総合考察—東北地方の水稲安定生産に向けての課題—	111
1. 緒言	101	Ⅶ 摘要	112

I 緒 論

東北地方は本州の東北部に位置し、冬季の積雪による雪解け水に恵まれ、平野部を中心に稲作が営まれている。しかし、冷夏により冷害が発生する。冷害とは「夏期冷温少照のために農作物の生育が害され、収量を損なう害」をいう(坪井 1976)。東北地方が冷夏となるときは、オホーツク海高気圧の持続的な発生が原因になることが最近では多い。オホーツク海高気圧は梅雨期に最も現われやすいが、冷夏の場合には7月後半から8月にも出現することがある。北日本の太平洋側はこのオホーツク海高気圧から吹き出す冷湿な海風の影響を受ける。この風は海上で冷やされる過程で水蒸気飽和し霧をとめない、東北地方太平洋側に到達した時には、低温・寡照をもたらす偏東風となり、これを「やませ」という。偏東風は成層状態が安定しているため、上陸すると標高の低い平野や谷を這うように進み、気温は4~5℃またはそれ以下となり、東北地方の暖候期に寒冷気象をもたらしている最大の原因である。偏東風は、特に冷害年でも、梅雨期を中心に毎年10数日程度は吹走する。とくに、偏東風の吹走頻度は年による差が大きい。オホーツク海高気圧が停滞し、偏東風の吹走が長引くと稲作に大きな被害が生じる。これが第1種冷夏による冷害である。このため、第1種冷夏の場合は太平洋側を中心に冷害となる。これに対しオホーツク海高気圧と関係なく、上空に北極から寒気の流出が西に偏り、日本海側から冷たい偏西風がたびたび流入する北冷西暑型(第2種)冷夏もある。この場合はオホーツク海高気圧による偏東風とは異なり日照はあるが、北部ほど冷

温となる。このため、日本海側でも冷害となることがある(坪井 1976、卜藏 2001)。

水稲の冷害は、その被害の発生タイプにより一般的に障害型と遅延型の2つに大別される。障害型冷害は幼穂形成期から開花期までの冷温による花粉形成阻害や受精障害による不稔になるものである(柿崎・木戸 1938、福家・近藤 1939、寺尾ら 1940a、寺尾ら 1940b、Hayase *et al.* 1969)。遅延型冷害は出穂までの生育各期の低温による出穂遅延に加えて登熟後期に秋冷にあつて、未熟米を多発するか、出穂が遅延しなくとも登熟期の冷温をうけて登熟が遅延し未熟米が発生するものである(酒井 1944)。両者が併発した場合は混合型冷害と呼称される。

東北地方では1881年~1994年の114年間で26回と、過去4、5年に1回の頻度で冷害に遭遇してきた(西山 1996)。このため、地域農業の基幹である稲作の生産性を高め、冷害を克服して地域農業全体の安定性を高めることが、明治以来の悲願であった。度重なる冷害に苦しむ東北農民に対し、国が総力を挙げて冷害対策に取り組んだのは明治後期から昭和初期であった。とくに1902年、1905年、1913年の大冷害が気象学者や農学者に冷害研究を促す契機となった。気象学者岡田武松は、1910年に梅雨期北日本にみられる低温は北海道から三陸東方に張り出すオホーツク海高気圧の影響とする説を発表した(奥田 1957)。農学者安藤広太郎は1915年に親潮の海面水温が7、8月の冷夏と関係することを発表した(奥田 1957)。その後1934年の大凶作が近代科学による冷害克服への胎動となる。明けて1935年、冷害防止に関する試験研究事業が農林省と東北6県の農事試験場を中心にして創設組織され、農林省農事試験

場においては、とくに冷害実験室を設立して、基礎的な冷害生理の研究が開始され、中央気象台には東北凶作の調査をする一係が設けられた。これらの諸施策は寺尾博らの冷害生理の研究にはじまる一連の成果となって現れ、それはやがて、総合的な冷害対策の基礎となった。これらの施策による画期的な成果としては次のものが挙げられる。

保温折衷苗代の開発：長野県軽井沢の篤農家荻原豊次によって考案され、県農事試験場岡村政勝の協力で1942年に原型が完成した「油紙保温折衷苗代」は、ビニールやポリエチレンの開発に伴って技術化が一層加速化され、普及に移されたのは1959年であった（川田 1976）。この技術により1か月も早く播種、田植えができるようになり、明治時代からの一つの目標であった早植栽培を可能とした。これにより遅延型冷害の被害はかなり軽減されるようになった。

耐冷性検定装置の開発：障害型冷害の解決には耐冷性育種が大きく貢献した。宮城県古川農業試験場で開発された耐冷性検定法「恒温深水法」は、処理用水の水温を19℃に制御し、20cm以上の水深を保ち、強制循環させて水温のムラをなくして検定する方法である。それにより、障害不稔発生の再現性が高く、小面積で多数の育種素材を精度高く検定できるようになった（佐々木 1996）。それまで耐冷性が強く、かつ良食味で多収の品種は育成が困難といわれていたが、1980年冷害で「コシヒカリ」やその近縁品種の被害が軽微であったことが契機となって、1991年に宮城県古川農業試験場で「コシヒカリ」の血を継ぐ「ひとめぼれ」が育成された。同品種は普及直後の1993年大冷害時に、壊滅的な被害を受けた「ササニシキ」に比べて被害程度は半減され、その後普及面積が急増した。

安全作期策定手法の考案：戦後、早生で多収の耐冷性品種（「藤坂5号」など）が育成され、さらに育苗法もビニール畑苗代などの保護苗代が開発され、早い時期に発根力の強い健苗ができるようになった。しかし極端な早植では、減数分裂期が梅雨期の低温に遭遇して不稔を発生すること、秋冷による登熟障害と梅雨末期の不稔障害という二つの障害が問題となった。八柳（1960）は「東北地方における稲作の計画栽培について」を発表し、安全出穂期・好適出穂期を中心とする計画栽培の基本的な考えを提案した。この考えは後に内島（1983）によ

て安全作期の策定手法として体系化され、東北稲作の安定多収に貢献し、同時に冷害による被害をも軽減してきた。

前歴期・危険期深水管理法の開発：水稲では出穂前は水温と地温の効果が気温よりも大きい。したがって、水管理は昔から稲作りの基本的な技術として重要視されてきた。昼間止水・夜間灌漑は水温上昇のための基本技術として、また減数分裂期を中心とする感受性Ⅱ期（いわゆる危険期）の深水管理は障害型不稔防止の応急技術として冷害軽減に役立ってきた。最近では、幼穂形成期を中心とする感受性Ⅰ期（いわゆる前歴期）の水温の効果、すなわち幼穂形成期から減数分裂期直前までの深水管理による不稔防止効果が顕著であることが示された（Satake *et al.* 1988）。感受性Ⅰ期と感受性Ⅱ期の深水管理を組み合わせることで、障害不稔発生を大きく軽減できるため、冷害危険度の高い地域や耐冷性の弱い品種については、深水管理が基本技術として位置づけられてきた。

これらの技術開発により、東北地方の水稲の10a当たり収量は1950年代以降飛躍的に向上し、2004年現在の水稲の10a当たり収量が平均546kg、水稲作付面積が全国の25.9%、玄米収穫量27.5%を占める一大生産地となった（注：農林水産省統計情報部。農林水産統計速報。2004）。また、食味ランク「特A」も全国17銘柄中の11銘柄を占める高品質良食味米の生産地域でもある（注：日本穀物検定協会。食味ランキング。2004）。このように東北地方の水稲作柄は、おいしい米を求める流通関係者や消費者にとって最大関心事となっている。

しかし、さまざまな技術改良により収量が増加し、全国的な米あまりとなり生産調整が始まった1970年から2004年の35年間においても冷害は2003年を含め8回発生し、その発生頻度は変わらない。なかでも、1993年には全国的に異常気象が頻発し、東北は大冷害となり、作況指数が東北全体で56、青森県28、岩手県30、宮城県37、秋田県83、山形県79、福島県61、被害総額は4,690億円となった。また、2003年にも冷害となり、作況指数が東北全体で80、被害総額は1,425億円となった。このことは、その被害程度は軽減されてきたものの、現在でも冷害が起りうることを示している。

東北農業研究センター（以下、「東北農研」とする）は1993年の冷害を受けて、東北農政局、仙台管

区气象台、東北6県と共同して、1994年に東北地域水稲安定生産推進連絡協議会を発足させ、水稲冷害の早期警戒システムの構築を開始した(鳥越 1998)。早期警戒システムの開発コンセプトは、①気象変動下での水稲安定生産のための情報提供システムを構築し、冷害回避のために、気象、水稲の生育、対策技術に関する情報をリアルタイムで生産関係者に提供し、組織的な対応で被害を最小限に止めること、②発育ステージ情報による栽培管理、葉いもち病予防による防除の要否判定など生産者の意思決定を支援することである。本システムでは東北6県を対象に気象と水稲生育の監視を行うため、全アメダス地点から冷害危険度(神田・鳥越 1995)と稲作重要度、冷害気象の把握を基準に71地点を選定した。これらの地点における気象情報を基に冷害発生を予測し、冷害対策技術の活用および冷害時の迅速な被害診断技術を開発するためには、全発育ステージを追跡的に把握する精度の高い、全指標地点および東北の主要な品種に適用できる発育モデルの開発が急務であった。

発育ステージの予測には播種または移植から出穂・開花期、登熟期までの積算気温あるいは有効積算気温が使われてきた。八柳(1960)、伊達(1963)、内島(1983)は安全作期を策定するために積算気温を利用し、羽生・内島(1962)、森田・村上(1981)は温度効果の非線形性を考慮し、3℃きざみの有効気温係数を使った有効積算気温で発育ステージを示した。連続的な発育ステージの推定法として、堀江・中川(1990)は発育ステージを例えば出芽期に0、出穂期に1、そして成熟期に2の値をとるような連続的に変化する値、すなわち発育指数(DVI)であらわす方法が有効であることを提案している。

一方、生産現場では、出穂までの水稲の発育ステージの指標として葉齢、葉齢指数を利用している。これは、片山(1951)の同伸葉・同分けつ理論による分けつ出現の規則性、藤井(1961)の葉と節根の出現の規則性、松島・真中(1956)の葉齢指数による幼穂の発育経過の診断などに示されるように、葉齢や葉齢指数が器官形成と密接な関係にあるためである。したがって、葉齢が予測できれば、各県の生育診断圃場で実施されている慣行の生育調査データも活用した生育の監視が可能となる。イネでは中川・堀江(1991)が気温とDVIから葉齢増加をモデル化し、コムギではMiglietta(1991)が圃場における

主稈葉齢予測モデルを作成している。

出穂期以降は乳熟期、糊熟期、黄熟期、成熟期という外観による登熟過程を指標として、低温時の深水管理、高温時の掛け流し灌漑、いもち病やカメムシの防除、落水時期や刈取期の決定を行っている。また、作況調査、農作物被害調査などでもこれらの発育ステージを基準にしている。しかし、玄米の登熟過程の発育ステージを予測するモデルは提唱されていない。

水稲の収量は次式から成り立ち、右辺を収量構成要素という。

$$\begin{aligned} \text{収量} &= \text{穂数} \times 1 \text{ 穂粒数} \\ &\quad \times \text{登熟歩合} \times 1 \text{ 粒重} \end{aligned}$$

水稲は収量成立過程において冷温に遭遇すると、収量構成が直接あるいは間接的に影響を受ける。直接的なものは次の2つに整理できる。遅延型冷害の場合、被害は登熟歩合や1粒重に現れる。障害型冷害の場合、被害は1穂粒数や登熟歩合に現れる。現在、生育ステージ、乾物生産量や不稔発生などを予測する各種モデル(矢島 1994)が開発されているが、実用レベルでかつリアルタイムな情報として提供されている事例はほとんどない。

近年、情報技術が急速に進展しインターネットが普及した結果、生産者は県の普及指導員やJAの営農指導員からの情報に加えて、インターネットを通じた栽培技術や気象情報などの入手が容易になり、気象会社のWebサービスによる準リアルタイムな気象情報、海外の気象サイトによる気象予測など様々な情報を活用した栽培が可能となった。しかし、インターネット上にある情報はその質や難易度、対象者が様々であり、一般農家が大量にある情報の中から有用な情報を選択して使いこなすのは困難である。そこで、東北地域水稲安定生産推進連絡協議会における早期警戒システム活動で交換される情報を一般の農業関係者、消費者、流通関係者とリアルタイムで共有するWebサイト版早期警戒システムを1996年に開設した。その目的は、①東北の稲作の実態について社会の理解を深めること、②地域社会へ冷害情報をリアルタイムで発信することによる冷害軽減を目指すことである。このサイトの閲覧者の有志からモニター農家ネットワークが形成され、生産者と双方向の情報交換が可能となった。

このように、東北地方では未だ冷害の危険性があり、早期警戒システムで提供する発育情報、警戒情

報は東北地方の水稲安定生産にとって重要である。そこで、本研究は、東北地方に適用できる水稲の発育予測モデルの作成とそれを活用した冷害軽減のための早期警戒システムの開発を目的に行われた。

最後に、本報告の取りまとめに際し、前京都大学大学院農学研究科教授堀江武博士には懇切丁寧な御指導と御校閲をいただいた。

また、本研究は農林水産技術会議の地域先導総合研究として2000年より5か年にわたり実施された「早期警戒システムを基幹とする冷害克服型営農技術の確立」の一環として行われたものである。その推進リーダーであった農林水産省東北農業試験場地域基盤研究部（現独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構東北農業研究センター）河部暹・中山正義部長、総合研究部諸岡慶昇部長、チーム長鳥越洋一博士には懇切丁寧な御指導をいただいた。鳥越洋一博士にはこの研究の開始から終了まで、さらに論文の作成まで懇切なご教示と励ましをいただいた。また、東北地域水稲安定生産推進連絡協議会を通じて、東北6県試験場から貴重な種子を分譲して頂いた。同僚の小林隆、伊藤一幸、菅野洋光各位には研究遂行に多大な協力をいただいた。さらに業務3科担当職員の方々には試験材料の栽培管理や調査に多大なご協力をいただき、ご苦勞をおかけした。また、早期警戒モニター農家各位には、水稲圃場の提供および調査にご協力いただいた。

本研究はこれらの方々を含む諸氏のご指導、ご援助の賜である。ここに記して謝意を表する。

II 水稲の発育ステージの簡易予測法の作成

1. 緒言

障害型冷害は幼穂形成期から開花期までの冷温に起因する花粉形成阻害や受精障害によって、不稔歩合が増加するものである。遅延型冷害は、移植から出穂までの生育各期の低温による出穂遅延により登熟後期に秋冷に遭遇するか、出穂後から成熟期までに冷温をうけて登熟が遅延または停止し、未熟米が多発するものである。

そこで、移植から成熟期までをイネの発育過程に従い、葉の生育、幼穂の発育、玄米の発育の3つにわけて以下のようにモデル化する。

① 主稈葉齢進度モデル：追跡する生育ステージは移植期を起点として止葉までの葉齢および葉齢指数。葉齢指数から穂首分化期、枝梗分化期、幼穂

形成期、花粉母細胞分化期、減数分裂期と止葉完全展開期を推定する。

② 幼穂の発育モデル：追跡する生育ステージは幼穂形成期を起点として、花粉母細胞分化期、減数分裂期、花粉内容充実期と出穂期。

③ 玄米の発育モデル：追跡する生育ステージは出穂期を起点として、乳熟期、糊熟期、黄熟期と成熟期。

まず、主稈葉齢進度モデルで幼穂形成期を予測し、幼穂の発育モデルにより障害型冷害の監視に重要な主要なステージを追跡することが可能となる。さらに、幼穂の発育モデルにより出穂遅延が、また玄米の発育モデルによって、玄米の主要な成熟過程の遅速を把握することが可能となる。

この章では、この目的を満たすために作成した上記3つの発育モデルについて記述する。

2. 出葉過程に基づく主稈葉齢予測と幼穂形成期の推定

発育ステージの予測には播種または移植から出穂・開花期、成熟期までの積算気温あるいは有効積算気温が使われてきた。八柳（1960）、伊達（1963）、内島（1983）は安全作期を策定するために積算気温を利用し、羽生・内島（1962）、森田・村上（1981）は温度効果の非線形性を考慮し、3℃きざみの有効気温係数を使った有効積算気温で発育ステージを示した。その後、連続的な発育ステージの推定法として、堀江・中川（1990）は発育ステージを例えば出芽期に0、出穂期に1、そして成熟期に2の値をとるような連続的に変化する値、すなわち発育指数（DVI）であらわす方法が有効であることを提案している。このDVIは毎日の発育速度（DVR）の積算値であり、温度や日長の関数で表され、品種に固有のパラメータをもつ。

一方、生産現場では、葉齢、葉齢指数を出穂までの水稲の発育ステージの指標として利用している。これは、片山（1951）の同伸葉・同分げつ理論による分げつ出現の規則性、藤井（1961）の葉と節根の出現の規則性、松島・真中（1956）の葉齢指数による幼穂の発育経過の診断などに示されるように、葉齢や葉齢指数が器官形成と密接な関係にあるためである。したがって、葉齢が予測できれば、各県の生育診断圃場で実施されている慣行の生育調査データも活用した生育の監視が可能となる。

ここでは有効積算気温を使った出葉間隔に基づく

簡便な主稈葉齢進度モデルの作成を試みたところ、出葉経過を比較的良好に表すことができた。

1) 材料と方法

(1) 東北農研における作柄診断試験

実験には東北農研（岩手県盛岡市下厨川）内の60aの圃場を用いた。圃場内の水温むらや地力むらなどの縦横方向の系統誤差の影響を避けるため、12品種を早中晩の3つのグループに分け、4×4のラテン方格法により配置して、1品種4反復計48区とした。1つの調査区の面積は52m²、供試品種は基幹品種を中心に各県のバランスも考慮して12品種を選択した。1997年度は「つがるおとめ」、「つがるロマン」、「かけはし」、「ゆめさんさ」、「あきたこまち」、「おきにいり」、「ひとめぼれ」、「ササニシキ」、「こころまち」、「どまんなか」、「はえぬき」、「コシヒカリ」の12品種、1998年度からはこれらの12品種のうち「つがるおとめ」を「むつほまれ」に、「こころまち」を東北でもっとも耐冷性の強い「じょうでき」に変更した。移植は1997年と1999年は5月19日に行ったが、1998年は育苗期間が平年より高温に推移したため、苗の生育が早まり、1週間早い5月12日になった。移植は1株3本を手植し、その後は通常の栽培管理を行なった。生育調査は各区の連続10株について約10日ごとに、茎数、草丈、SPAD値、および各株を構成する1個体の主稈を対象に不完全葉を含む葉齢を測定した。1999年は出葉転換点付近の生育調査を1週間ごとに行った。

気象データは盛岡アメダスのデータを用いた。温度効果は非線形とされているが、ここではモデルの簡略化のため、上限温度と下限温度を設定し、この間の温度効果は線形であると仮定した。この下限は内嶋（1976）より10℃、上限は吉田（1986）より24℃とし、この間の日平均気温を有効積算気温（以下、「 $\Sigma T_{10,24}$ 」）として計算した。具体的には日平均気温（T）が10～24℃の時は（T-10）、24℃以上の時は（24-10）を積算した。

1997年は移植後6月上旬まで平年より低温が続く、その後平年より高温に推移した。このため、他の2年よりも分けつ開始期、有効分けつ終止期が遅れた。1998年は6月上中旬、7月中下旬に平年より低温だったが、移植が早く活着が良好であったため、分けつ開始期、有効分けつ終止期、最高分けつ期はこの3年で最も早かった。1999年は一時的に平年より低温になったが、終始平年より高温で推移した結

果、幼穂形成期、出穂期が促進された。

1997年、1998年に共通の10品種のうち「かけはし」、「コシヒカリ」を除く8品種の調査葉齢から主稈葉齢進度モデルを作成し、1999年にモデルによる葉齢の予測精度を検証した。

(2) 宮城県および山形県のモニター農家圃場

1999年には宮城県松山町のモニター農家T氏圃場とその隣接する圃場で試験を行った。機械移植直後、5月7日に植え込み本数を調査し、連続10株を1株4本に調整した調査区を1圃場に3ヶ所設けた。各株を構成する1個体の主稈を対象に不完全葉を含む葉齢と茎数を約10日ごとに測定した。T氏圃場は生育にあわせた段階的な深水管理を行い、その隣接圃場は慣行の浅水管理であった。気象データは鹿島台アメダスを用い、品種は「ひとめぼれ」であった。

山形県最上町および鶴岡市の農家圃場でも、予備的に連続10株について1株あたりの本数を平均的な植付け本数に調整した調査区を1圃場に1ヶ所設置して葉齢と茎数の調査を行った。最上町の植付け本数は4本、品種は「あきたこまち」と「はえぬき」、気象データは向町アメダスを用いた。鶴岡市の植付け本数は6本、品種は「ひとめぼれ」と「はえぬき」、気象データは鶴岡アメダスを用いた。

2) 結果

(1) モデルの作成

ある日の葉齢は前日の葉齢に $\Sigma T_{10,24}$ による伸長分が加算されたものと考え、調査日間の葉齢の展開分をこの期間の $\Sigma T_{10,24}$ で除して主稈葉齢が1進むのに必要な $\Sigma T_{10,24}$ を求め、ここではこれを出葉間隔と定義した。主稈葉齢が0.1葉進むごとの出葉間隔の変化を6品種を例に図1に示した。品種により13～15葉と主稈総葉数は異なったが、生育にともなう出葉

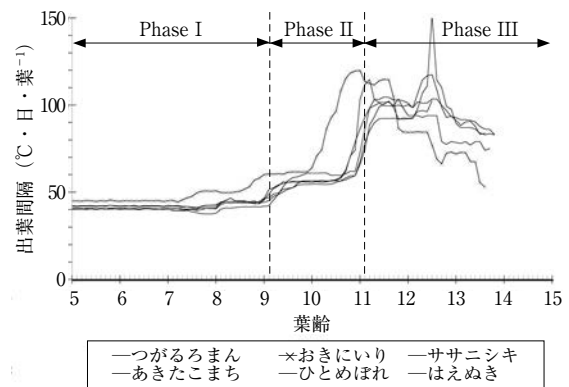


図1 主稈葉齢が1進むのに必要な有効積算気温の推移

間隔の推移は「おきにいり」を除けばほぼ同様であった。「おきにいり」は11.1葉期までは他品種よりも出葉間隔が相対的に広く、出葉間隔の転換が他の品種よりも早かった。このため、モデルの作成から「おきにいり」を外し、以降の検討は残りの7品種について行った。出葉間隔の推移の特徴から葉齢が移植後9.1葉までのPhase I、9.1~11.1葉のPhase II、11.1葉以降のPhase IIIの3時期にわけた。Phase Iは品種、年度によらず出葉間隔は一定の値を示す。Phase IIは出葉間隔が転換する時期である。Phase IIIはほぼ一定の出葉間隔になるが、変動が大きい時期である。出葉の転換するPhase IIは分げつが急速に増加する時期に相当し、主稈総葉数15の品種では松島・真中（1956）の葉齢指数で64.6~76.6と終了時に穂首分化期（76~78）となる。

この出葉間隔の推移をもとに出葉転換に関する取り扱いが異なる2つのモデルを設定した。一つはPhase IIの期間に一定の割合で出葉間隔が広がるとするモデル1である。もう一つはさらに単純化し、Phase IIの中間点の10.1葉を出葉転換点に出葉間隔が広がるモデル2である。これはモデル1と比較すると出葉間隔は前半では広く、後半では狭くなる。モデル2の出葉経過は出葉転換点を境とした2直線で示され、片山（1951）、後藤・星川（1988）の報告と類似する。モデル1の出葉過程はPhase IIで曲線的に増加し、出葉後期の出葉速度は一定でないとする田中（1958）、永井（1968）に準じる。これらのモデルでは葉齢が1葉進むのに必要な有効積算気温を示し、開始日の葉齢とその後の日平均気温から

現在の葉齢が推定できる。

1997、1998年のデータより、モデル1はPhase I、IIIの出葉間隔とPhase IIの出葉間隔の増分（主稈葉齢が1進む間の $\Sigma T_{10.24}$ の変化率）、モデル2は出葉転換点前後の出葉間隔を計算した（表1）。モデル1についてみると、Phase Iの両年の出葉間隔は39.9~43.6℃・日・葉⁻¹の範囲にあり、7品種平均は1997年では41.8℃・日・葉⁻¹、1998年では40.9℃・日・葉⁻¹で、両年平均は41.4℃・日・葉⁻¹であった。Phase IIの両年の出葉間隔の増分は25.6~33.5℃・日・葉⁻¹の範囲にあり、7品種平均は1997年では28.6℃・日・葉⁻¹、1998年では27.8℃・日・葉⁻¹で、両年平均は28.2℃・日・葉⁻²であった。Phase IIIの両年の出葉間隔は92.6~107.3℃・日・葉⁻¹の範囲にあり、7品種平均は1997年では99.0℃・日・葉⁻¹、1998年では96.6℃・日・葉⁻¹で、両年平均は97.8℃・日・葉⁻¹であった。モデル2の出葉転換点前の両年の出葉間隔は42.1~47.5℃・日・葉⁻¹の範囲にあり、7品種平均は1997年では45.1℃・日・葉⁻¹、1998年では42.9℃・日・葉⁻¹で、両年平均は44.1℃・日・葉⁻¹であった。出葉転換後の両年の出葉間隔は75.4~95.9℃・日・葉⁻¹の範囲にあり、7品種平均は1997年では89.8℃・日・葉⁻¹、1998年では85.2℃・日・葉⁻¹と出葉転換点を境にほぼ2倍になった。とくに、モデル1のPhase Iおよびモデル2の出葉転換前は両年平均の変動係数は8.3%および7.2%と小さく安定していた。モデルで使用するパラメータはこの7品種の両年平均を用いることとした。

表1 最終葉15葉の個体における出葉間隔(℃・日・葉⁻¹)と出葉間隔の変化率(℃・日・葉⁻²)

品種名	モデル1						モデル2			
	Phase I		Phase II		Phase III		10.1葉まで		10.1葉から	
	出葉間隔		出葉間隔	変化率	出葉間隔		出葉間隔		出葉間隔	
	1997	1998	1997	1998	1997	1998	1997	1998	1997	1998
つがるロマン	40.5	41.1	27.5	27.0	95.5	95.1	43.6	42.7	84.0	75.4
あきたこまち	41.1	41.5	27.2	29.4	95.4	100.3	44.3	43.4	87.9	77.7
ゆめさんさ	40.5	40.4	30.5	28.8	101.6	98.1	44.4	43.0	92.4	80.1
どまんなか	41.7	40.8	25.6	25.9	92.9	92.6	45.0	42.7	85.6	83.5
ひとめぼれ	40.4	39.9	33.5	29.5	107.3	98.9	43.7	42.1	95.9	85.3
ササニシキ	43.0	41.2	26.9	26.4	96.7	94.0	45.8	43.1	88.4	80.3
はえぬき	43.6	42.1	29.3	28.2	102.2	98.6	47.5	44.1	92.5	86.3
7品種平均	41.8	40.9	28.6	27.8	99.0	96.6	45.1	42.9	89.8	80.4
両年平均	41.4(8.3)		28.2(21.5)		97.8(11.7)		44.1(7.2)		85.2(10.6)	

注. ()の数字は変動係数(%)。

(2) モデルの検証

a. 東北農研における作柄診断試験

1999年の全供試品種について5月21日の活着後第1回目の調査葉齢を起点としてモデル1とモデル2による出葉経過を推定した。これに基づいて調査時葉齢の実測値と推定値を比較した(表2)。出葉間隔の推移の異なる「おきにいり」ではモデル1による推定葉齢は最大0.96葉、モデル2では1.22葉進み、誤差平均は0.77葉、0.85葉と他の11品種の誤差平均0.13~0.43葉に比較して大きかった。「おきにいり」を除いた11品種全体の誤差平均はモデル1では0.25葉で、日数に換算して1.7日であり、モデル2では0.28葉で、日数に換算して1.8日であった。両モデルとも出葉転換点付近の6月25日と7月6日で、誤差は0.23~0.40葉と若干大きかった。出葉転換点前の6月3日と14日の誤差はモデル1では0.13、0.16葉、モデル2では0.15、0.22葉と小さかった。出葉転換点後の7月16日と26日の誤差はモデル1では0.21、0.25葉であった。モデル2は設定上、モデル1と比較して出葉転換前に遅れ、出葉転換後に進むため0.26、0.45葉と誤差平均が大きかった。パラメータを作成した7品種に含まれていない「かけはし」、「むつほまれ」、「じょうでき」、「コシヒカリ」についてもモデル1の誤差平均は0.13~0.33葉とよく一

致したが、モデル2の誤差平均は0.22~0.43葉であった。「あきたこまち」、「ひとめぼれ」、「コシヒカリ」の出葉経過はモデル1では出葉転換点付近で若干ずれがあるが予測値は実測値とよく一致した。モデル2については設定上出葉転換点前はモデル1よりも小さく、出葉転換点後は大きくなるので止葉展開期にも実測値との差が存在した。「おきにいり」の予測値は出葉転換点前は実測値と一致しているが、出葉転換点頃の6月21日からずれ始め、その後ほぼ平行に推移した。他の8品種については上記3品種と同様の傾向であった。このように「おきにいり」を除いた11品種ではモデル1による予測値と実測値はおおむねよく一致した。

b. 宮城県および山形県の農家圃場

宮城県農家圃場において5月14日の活着後第1回目の調査葉齢を起点として、モデル1を用い出葉経過を追跡的に推定した(図2)。T氏圃場では生育にともなう段階的な深水管理のため分けつが発生が抑制され、7月19日に最高分けつ期となった。その隣接圃場は慣行的な浅水管理が行われ、生育初期から多分けつとなり最高分けつ期は6月18日であった。T氏圃場ではモデルによる予測値と生育調査による実測値の誤差平均は0.21葉であり、日数に換算して1.5日であった。一方、隣接水田では6月18日(葉

表2 盛岡における調査時葉齢の実測値と推定値の比較

品種名	モデル1							誤差平均	モデル2							誤差平均
	6/3	6/14	6/25	7/6	7/16	7/26	6/3		6/14	6/25	7/6	7/16	7/26			
かけはし	-0.12	-0.16	-0.52	-0.3	0.08	-*	0.28	0.01	0.11	-0.45	-0.3	-0.09	-	0.25		
むつほまれ	0.1	-0.05	-0.49	-0.23	0.03	-	0.25	0.23	0.22	-0.44	-0.21	-0.12	-	0.26		
つがるロマン	0.03	0.07	-0.21	0.18	0.46	0.54	0.31	0.16	0.34	-0.15	0.2	0.32	0.19	0.24		
あきたこまち	0.01	0.06	-0.22	-0.01	0.16	0.15	0.13	0.14	0.33	-0.16	-0.01	0	-0.21	0.18		
じょうでき	-0.01	-0.06	-0.51	-0.43	-0.32	-0.33	0.33	0.12	0.21	-0.45	-0.41	-0.47	-0.68	0.43		
ゆめさんさ	-0.34	-0.38	-0.5	-0.29	-0.19	-0.18	0.33	-0.21	-0.11	-0.43	-0.32	-0.39	-0.58	0.37		
どまんなか	0.07	-0.07	-0.37	-0.14	0.06	0.11	0.17	0.2	0.2	-0.31	-0.13	-0.09	-0.25	0.21		
おきにいり	-0.22	-0.51	-0.96	-0.88	-0.92	-0.86	0.77	-0.09	-0.24	-0.89	-0.88	-1.08	-1.22	0.85		
ひとめぼれ	-0.1	-0.11	-0.36	-0.23	-0.18	-0.28	0.23	0.03	0.16	-0.3	-0.23	-0.34	-0.65	0.34		
ササニシキ	-0.14	-0.24	-0.48	-0.14	0	0	0.23	-0.01	0.03	-0.42	-0.13	-0.16	-0.36	0.24		
はえぬき	-0.06	-0.15	-0.35	-0.19	-0.09	0.04	0.18	0.07	0.12	-0.29	-0.2	-0.26	-0.42	0.25		
コシヒカリ	0.03	0.09	-0.16	0.14	0.23	0.03	0.13	0.16	0.36	-0.11	0.16	0.08	-0.33	0.22		
誤差平均	12品種	0.14	0.21	0.47	0.34	0.33	0.33	0.14	0.23	0.42	0.34	0.4	0.57	0.37		
	11品種**	0.13	0.16	0.4	0.23	0.21	0.25	0.15	0.22	0.34	0.23	0.26	0.45	0.28		

注. 数字は葉齢の実測値とモデルによる推定値の差を示す。-はモデルによる推定が進んでいることを示す。

*) この時期には止葉が完全展開済み。

**) 「おきにいり」を除いた11品種。

誤差平均 = $\sqrt{\frac{\sum (\text{実測値} - \text{予測値})^2}{n}}$ (nは対象品種数または調査回数)。

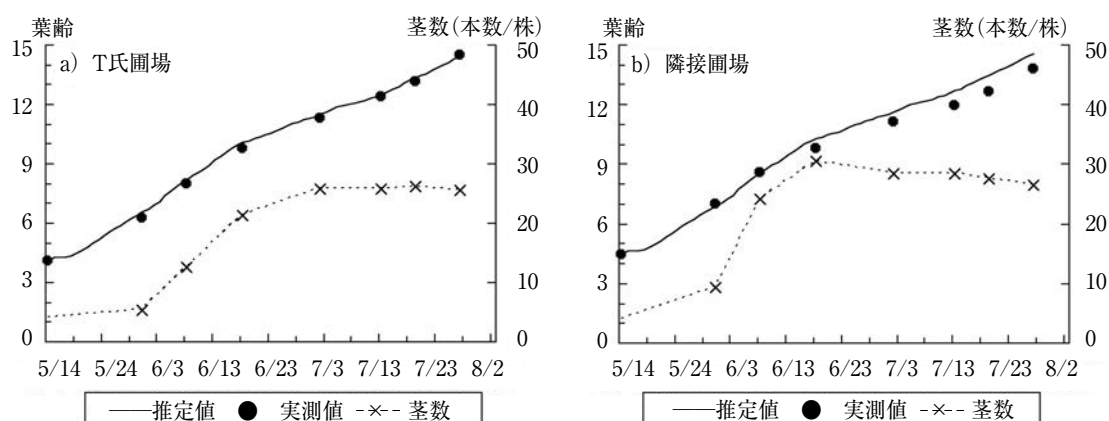


図2 宮城県松山町の生育型を異にする調査圃場における葉齢の推定値と実測値の推移

齢9.8葉)に実測がモデルよりも0.50葉の遅れとなり、7月19日(葉齢12.7葉)には最大の0.82葉の遅れとなり、誤差平均は0.58葉で日数に換算して5.2日となった。

山形県最上町の農家圃場では生育期間を通じた誤差平均が「あきたこまち」で0.26葉、「はえぬき」で0.28葉と実測値と予測値はおおむねよく一致していた。しかし、鶴岡市の農家圃場は生育初期(葉齢9.4葉頃)から出葉が遅延し、誤差平均が「ひとめぼれ」で1.21葉、「はえぬき」で1.16葉、それぞれ日数に換算して9.3、8.9日と誤差が大きかった。

3) 考察

(1) 主稈葉齢進度モデルと葉の形態形成との関係

出葉とは葉身が下位葉の葉鞘から抽出する現象であるから、出葉には葉の分化と伸長の両者が関与し、厳密には葉原基の分化も考慮されねばならない。葉の抽出開始とその4葉上位の葉原基の分化は常に同調しており、葉の抽出開始時には2つの葉原基と2つの幼葉が内在する。この葉原基の分化から幼葉、抽出、成熟葉へという葉の段階的生長は環境、葉位によって変わらない(山崎 1960、1963a、1963b、1963c)。これを基に主稈総葉数が15葉の個体で葉齢進度モデルを整理してみると、Phase Iで出現する5~9葉は苗(葉齢4.1)の段階ですでに分化済みであり、伸長のみが行われている。また、10~14葉の葉原基までが $\Sigma T_{10.24}$ で一定の間隔で分化すると推察される。Phase IIは15葉の葉原基と幼穂が分化する時期に相当する。この時伸長する葉はすでにPhase Iで分化しているが、出葉間隔は広くなる。

Phase IIの開始時である9.1葉は4号分けつの第1葉からの2次分けつが出現を開始する時期であり(片山 1951)、分けつの急激な増加が始まる。Phase IIIは幼穂発育と節間伸長が行われる。このモデルはこのような個体形成過程の特徴を反映するものと考えられる。

(2) 出葉間隔と環境条件

出葉速度は温度条件により遅速が生じ(朝隈 1958、角田 1964)、日長からは影響を受けない(栗山 1965、永井 1968)が、光強度には大きく影響され、強光下ほど早くなる(玉置・山本 1997、本田 1977)など気象条件に影響される。また、施用窒素量が多いほど出葉速度は早くなる(玉置・山本 1997、永井 1968)など気象以外の栽培的要因の影響もある。このモデルを適用する各指標地点では気温、品種、栽培様式が異なるので、これらの影響が問題となる。気温の影響は出葉周期ではなく $\Sigma T_{10.24}$ に基づく出葉間隔にすることで考慮している。品種による出葉間隔の差異については、薦田(1957)は1葉増加するのに必要な積算気温は品種間差異が比較的少なく、幼穂分化後には品種間差異が比較的大きくするとした。朝隈(1958)も温度が高くなることによって出葉速度が早くなる品種間差異は小さいとしている。このため、出葉間隔を使うこのモデルは多くの品種に適用できると考えられる。本実験においても、「おきにいり」を除く供試品種では過去3年ともモデルと実測との差は生育期間平均で2日以内と精度よく推定できた。

長谷川(1959)は節間伸長以前は出葉速度に対して気温、水温よりも地温つまり生長点付近の温度の

影響が大きいことを示唆した。しかし、中堀ら (1974) は水温17℃では葉齢の増加は気温の影響も受けるとしている。これは山崎 (1963c, 1964) が成熟葉の外部形態は生長点のみによって規定されないとしているように、介在分裂組織の働きを通じて葉の伸長に気温が影響していると考えられる。葉原基発生の周期よりも出葉周期の方が温度に関らず長く (長南 1966)、葉の分化よりも伸長と温度の関係が重要であると考えられる。さらに、気温が高い場合には水温、地温が上昇すると考えられ、間接的には気温が出葉周期に影響することは疑いなく、出葉間隔を算出するために気温を使うことは合理的である。

出葉間隔の下限温度を10℃に設定することは、羽生・内島 (1962) の3℃きざみの有効温度係数 (その温度帯の有効性を0~1の数字であらわす) が10℃以下で0、つまり無効となること、出葉周期の最低温度は9~10℃よりやや高い (長南 1966) ことから妥当と考える。上限温度の24℃は、出葉速度が平均水温30~35℃で最も早く (角田 1964)、土壌温度30~33℃で最も早い (長谷川 1959) ことから上限温度としては低い。しかし、実際には1999年の圃場において計測した日平均水温は日平均気温よりも最大5.5℃、生育期間の平均で2.6℃高く、日平均気温が24℃でも水温は30℃近くになることもあり、大きな隔たりはないと考えられる。また、羽生・内島 (1962) は日平均気温25℃または24℃以上になると出穂までの日々の生長速度は増加しないことを指摘している。長南 (1966) のデータでは日平均気温21℃以上になると気温の上昇により葉原基発生周期、出葉周期が短くなる程度は小さい。高温年の1999年は盛岡でも梅雨明け後に日平均気温で24℃を超えたが、そのころ出葉を続けている「コシヒカリ」など晩生の品種の出葉経過をみると24℃の上限を設けたほうが推定精度が良かった。これらのことから、出葉間隔に上限温度24℃を設定することは妥当である。このように $\sum T_{10,24}$ に基づく出葉間隔を用いれば気温、品種、日長に関係なく葉齢予測が可能であると考えられる。

(3) 生育に伴う出葉間隔の推移

出葉経過は出葉転換点を境にして2直線で示せるという指摘は多い (片山 1951、後藤・星川 1988、玉置・山本 1997)。これに対し、田中 (1958)、永井 (1968) は生育前期は出葉速度がほぼ一定である

が、上位葉になるにつれて出葉速度が遅くなるとしている。本実験では双方の考えに基づくモデルを作成したが、モデル2は設定上、止葉完全展開期近くでは葉齢を大きめに予測する傾向にあり、減数分裂期の予測精度がモデル1に比べ劣る。後藤・星川 (1988) は曲線で近似すると次数が高い関数になると考えられ、このような近似は解析に当たって合理的ではないと指摘しているが、モデル1は出葉経過は曲線となるが、出葉間隔の推移は1次直線であり問題はない。また、1999年の葉齢推移から算出した出葉間隔の推移もモデル1に近いので、モデル1を採用するのが妥当である。

片山 (1951) は出葉転換点の有効分げつ終止期と一致すること、永井 (1968) は1次分げつ出現停止期、後藤・星川 (1988) は出葉転換点は2次分げつが出現してまもなく、3次分げつ出現の直前で、茎数が急激に増加する時期にあたることを報告している。いずれも出葉転換点は分げつ発生と密接にかかわっていることを示唆している。また、栗山 (1965) は出葉転換は種々の品種で一定であり、日長とも関係がないことから幼穂分化は出葉転換と無関係であると結論づけている。これは葉齢の増加と幼穂の分化にむけての発育は独立に生じるという考え (中川・堀江 1991) と一致する。1999年の生育では、Phase IIに入る9.1葉期は2次分げつが出現しはじめた時期であり、Phase IIの終了する11.1葉は最高分げつ期の少し前であった。また、調査品種の「かけはし」の12葉タイプからコシヒカリの16葉タイプまでは同じPhase IIで主稈葉齢の予測が可能であった。これにより、Phase IIの出葉間隔の転換は茎数の急激な増加が関係するものと推察でき、Phase IIの時期は主稈総葉数に関係なく一定と考えられる。

出葉間隔の大小も分げつ数と関係し、分げつ数が多いと生育後期の出葉周期が広がる (片山 1951)。宮城県松山町のT氏圃場でモデルが適合するにもかかわらず、その隣接圃場において6月18日からモデルより遅れはじめたのは、隣接圃場ではこの時期に最高分げつ期となる初期に分げつの発生が旺盛な生育であったため、分げつの増加が出葉間隔を拡大し、モデルおよびT氏圃場より遅れたものと考えられる。また、最上町と鶴岡市のモニター農家の情報提供による生育データをみると、鶴岡市の農家圃場においては初期から株あたりの茎数が多く、葉齢の推移は予測より遅れていたが、最上町の圃場で

は適合していた。さらに出葉間隔は分けつ他に栽植密度、施用窒素量により影響される(永井 1968)ので、栽培管理によってはPhase IIで予測精度が落ちるが、Phase II終期に補正してPhase IIIの予測が可能である。

このモデルから幼穂の発育ステージを予測するためには、葉齢指数に変換するための主稈総葉数が必要となるが、主稈総葉数はこの3年間で1葉近く変動した品種もあった。このように、主稈総葉数は低温によって変動し(細井 1976)、窒素が少ないほど、密植なほど主稈葉数が1枚少ない減葉タイプが多くなる(山口ら 1988)。このため、遅延型冷害のような極端な気象状況の際には葉齢は予測できても、葉齢指数による幼穂の発育ステージの予測精度がさがること考えられる。中川・堀江(1991)はDVIと気温による葉齢増加速度とDVIから主稈総葉数を決定している。しかし、今回は圃場における東北全域、多品種の予測を目的とした簡便なモデルであるので、設定した主稈総葉数とのずれが生じた場合には、止葉が確認された後、修正して葉齢指数を再計算し、幼穂の発育ステージの推定をより正確におこなうことにしている。また、このモデルで予測できる発育ステージは止葉展開期までなので、減数分裂期以後については適用できない。これについては次節で記述する幼穂の発育モデルを併用することにより、障害型冷害の危険期の推定精度を高めた。

3. 有効積算気温を用いた穂の発育ステージの簡易予測モデル

過去に開発されたモデルを精査したところ、八柳(1960)は積算気温を用い、羽生・内島(1962)は有効気温係数による有効積算気温を用いて出穂・開花期を予測する手法を提案しているが、途中の発育ステージには着目していない。荒川ら(1994)、中園・井上(2001)は積算気温を用いて幼穂長を推定して冷害危険期を把握する手法、木村ら(1993)は減数分裂期、出穂期を発育指数(DVI)で予測する手法、中川・堀江(1995)はDVIとフロラル・ステージ(Suge and Osada 1967)の対照表を作成して幼穂の発育ステージをDVIで予測する手法を提案している。しかし、幼穂と玄米の発育過程を統一的に予測する手法はほとんどない。

そこで、ここでは気象データにアメダスデータを利用し、有効積算気温を用いて幼穂形成期から出穂期までの幼穂の発育ステージと出穂期から成熟期ま

での玄米の発育ステージを予測する手法を作成し、予測精度を検証したところ、多数の品種および広域で簡便に利用できることが判明した。

1) 材料と方法

(1) 有効積算気温の基準温度の設定

主稈葉齢進度モデル(神田ら 2000)では葉の生長に基づき、下限を10℃、上限を24℃、その間を線形としたが、本報では穂の発育を予測することを目的としており、主稈葉齢進度モデルとは別の視点で基準温度を検討した。水稲の発育過程のうち、出芽期～出穂期までの期間と平均気温との関係は非線形である(吉田 1986、堀江・中川 1990)。出芽以後の生育を幼穂分化期以前と、幼穂分化期以後に分けてみると、一般に前者は日長や温度に大きく影響されるが、後者は温度のみに影響されることが知られている。そこで、幼穂と玄米の発育過程の温度効果は簡易なモデルを作成する上から線形であると仮定した。発育過程に関する気温指標について過去の知見を精査すると、内嶋(1976)は夏作物の生育可能気温として、日平均気温10℃をあげている。また、葉の分化、生長の限界温度は日平均気温10℃であり(長南 1966)、主稈葉齢進度モデルでは基準温度を10℃と設定した。さらに、イネの登熟限界気温は経験的に最低気温10℃とされている。一方、上限温度については葉齢進度モデルでは葉の分化、生長の温度反応より(長南 1966)、日平均気温24℃と設定した。穂の発育過程の温度反応については、角田(1964)が穂首分化期から穎花分化後期までは日平均水温37.5℃以上で出穂期が遅延し、減数分裂期は水温の影響が小さいことを示している他に、上限温度に関する報告はほとんどない。

そこで、有効積算気温の下限を日平均気温10℃、東北では日平均気温が30℃となることはないので上限は設定しないこととし、この有効積算気温(以下 ΣT_{10} :日平均気温(T)が10℃以上のときに $(T-10)$ を積算する)を用いてモデルを作成し、予測精度を検証した。

(2) 温度勾配温室におけるポット試験

東北地方における幼穂形成期から出穂期までの ΣT_{10} 、および ΣT_{10} と幼穂長の関係を明らかにし、花粉母細胞分化期、減数分裂期、花粉内容充実期の各発育ステージの ΣT_{10} を設定するために、温度勾配温室(GRADIOTRON)でポット試験を行った。温度勾配温室は、入口で外気を冷却し、温室内の空

気を日射熱または温風暖房機で徐々に温めることにより、出口ほど温度が上昇し、出入り口の温度差が5～8℃になるように調節できる施設である。また、温室内の温度は外気温に追従した自然に近い日変化となる (Okada *et al.* 2000)。

水稲品種「あきたこまち」を供試し、1997年5月23日および1999年5月20日に1/5000aのワグネルポットに1本植えし、その後網室で栽培した。基肥は1ポットあたり窒素 (N)、リン酸 (P_2O_5)、カリ (K_2O) で0.60、0.84、0.60gを化成肥料で与えた。幼穂形成期 (幼穂長2mm) 直前にポットを温度勾配温室に移動し、1997年は5段階 (T1～T5) の温度処理をおこなった。しかし、出口に近いT4、T5の温度勾配が小さかったので、1999年では温度処理を4段階 (T1～T4) とした。各処理区5ポット用意し、1997年は全茎、1999年は主稈の出穂日を調査した。また、1999年には各処理区20ポットを別に用意し、 ΣT_{10} で60℃・日ごとに5ポットをサンプリングして、主稈の穂長を測定した。日平均気温はポット配置場所で計測している30分間隔のデータより算出した。日射量については、温度勾配温室の屋外で計測している光電式全天日射計のデータより算出した。

(3) 東北農研における作柄診断試験

圃場における幼穂形成期から出穂期まで、および出穂期から成熟期までの ΣT_{10} を明らかにするために、60aの多湿黒ボク土圃場で1998年～2000年の3年間にわたって試験を行った。供試品種は東北6県の奨励品種を各県のバランスも考慮して、「むつほまれ」、「つがるロマン」、「かけはし」、「ゆめさんさ」、「あきたこまち」、「おきにいり」、「ひとめぼれ」、「ササニシキ」、「じょうでき」、「どまんなか」、「はえぬき」、「コシヒカリ」の12品種を選択した。水温むらや地力むらなどの縦横方向の系統誤差の影響を評価するため、12品種を早中晩の3つのグループに分け、4×4のラテン方格法により配置し、1品種4反復計48区とした。1区は5.1m×9.4mで、条間30cm、株間20cmとした。基肥は窒素 (N)、リン酸 (P_2O_5)、カリ (K_2O) それぞれ成分で7、17.5、7 gm^{-2} とし、追肥は活着後にN、 P_2O_5 、 K_2O を2.1、0.6、2.1 gm^{-2} 、「あきたこまち」の分けつ盛期にN、 P_2O_5 、 K_2O を3.08、0.88、3.08 gm^{-2} 、「あきたこまち」の幼穂形成期にN、 P_2O_5 、 K_2O を2.1、0.6、2.1 gm^{-2} を与えた。移植は1998年5月12日、1999年5月19日、2000年5月17日に1株3本を手植し、その後は通常

の栽培管理を行なった。

各区に連続10株からなる葉齢調査区を設定し、葉齢進度を約10日ごとに追跡した。さらに、幼穂形成期、出穂期、乳熟期、糊熟期、黄熟期、成熟期の到達日を調査した。葉齢進度モデルを用いた幼穂形成期の直前より、葉齢調査区周辺の3株の強勢な茎10本の解剖調査を隔日で行い、半数が幼穂長2mmとなる日を幼穂形成期とした。出穂期は区全体を達観して先端初が止葉葉鞘から出た茎が50%になる日とした。乳熟期は穂の中央部のいくつかの初を押して、乳液が出る時期、糊熟期は穂の中央部のいくつかの初を押すと胚乳が糊状を示す時期とした。黄熟期は黄化初割合が50%、成熟期は80%に達した日とした。1999年には「あきたこまち」、「ひとめぼれ」について、葉齢調査区とは別に連続10株からなる調査区を設け、全茎の出穂日を調査した。気象データは盛岡アメダスのデータを用いた。

(4) モニター農家圃場における実証

モデル作成地以外でのモデルの予測精度を検証するために、モニター農家圃場での実証試験を行った。2000年に宮城県亶理町のO氏圃場で5月5日に「まなむすめ」を機械移植直後に植え込み本数を調査し、連続10株の植え込み本数を1株3本に調整した調査区を3カ所設置した。その後、葉齢進度および幼穂形成期、出穂期、乳熟期、糊熟期、黄熟期、成熟期の到達日を調査した。気象データは亶理アメダスを用いた。さらに、宮城県松山町の「ひとめぼれ」栽培の4圃場、岩出山町「ササニシキ」栽培圃場、山形県鶴岡市「はえぬき」栽培圃場、最上町「あきたこまち」、「はえぬき」栽培圃場の合計4品種8圃場の幼穂形成期と出穂期の観察を依頼した。気象データとして松山町は鹿島台、岩出山町は古川、鶴岡市は鶴岡、最上町は向町アメダスをそれぞれ用いた。

2) 結果

(1) 幼穂の発育モデルの作成

a. 主稈における幼穂形成期から出穂期までの ΣT_{10} の設定

ポット試験における「あきたこまち」の主稈総葉数は14葉と15葉であり、同じ葉齢でも幼穂形成期が異なるので、個体数が多い主稈総葉数が15葉について解析した結果を示す。各処理区の幼穂形成期から出穂期までの期間 (以下、「幼穂形成期間」と呼称する) の温度勾配温室の平均気温は1997年ではT1～T5で18.5～26.1℃と温度勾配は7.6℃であった。高

温年であった1999年では1997年に比して入口気温が19.7℃と1℃高く、T4は25.0℃であったので、温度勾配は5.3℃と小さかった。東北6県のアメダス地点における幼穂形成期間の日平均気温の平年値は、青森県小田野沢、六ヶ所の2地点を除くと18~26℃の範囲にあり、この試験の気温設定で東北地方の穂の発育がシミュレーションできる。幼穂形成期間は1997年ではT1が30日、T5が18日と、期間中の平均気温が高い区ほど短くなった。期間中の1日あたり日射量は、1997年には8月10日前後が低日照であったため、T1、T2では他区に比べて少なかったが、区間の差は小さく、処理期間中の日射の影響はないものと考えられる。平均気温が高い処理区の ΣT_{10} の値が大きくなる傾向があった。また、全体を平均すると、平均気温は1997年では23.0℃、1999年では22.2℃、幼穂形成期間は同様に23日、24日とほぼ同じであり、 ΣT_{10} は1997年では287.1℃・日、1999年では287.5℃・日であった。これは一般に幼穂形成期間とされる24日にも近似し、幼穂形成期間の ΣT_{10} は平均値に基づき290℃・日と設定した。

b. 幼穂形成期間における各発育ステージの ΣT_{10} の設定

幼穂形成期間の幼穂長と積算気温の関係はロジスティック方程式で示すことができる(荒川ら1994、中園・井上2001)。そこで、 ΣT_{10} と幼穂長の間をロジスティック方程式

$$ypl = K / (1 + \exp(a - rt))$$

ypl: 幼穂長、K: 最終穂長、a: 初期幼穂長、r: 穂長伸長速度、t: ΣT_{10}

で表すこととした(図3)。外れ値を除いて、主稈

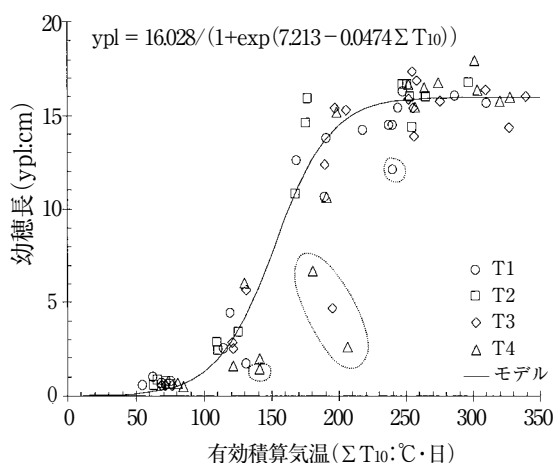


図3 有効積算気温と幼穂長の関係(1999年)
品種:あきたこまち、主稈総葉数:15葉、点線内は外れ値。

総葉数14葉と15葉は同じ方程式となる帰無仮説を立て検定すると、その確率は0%であり、主稈総葉数14葉と15葉は異なるロジスティック方程式となる。両方程式を比較すると、パラメータaは14葉が小さく、r、Kは大きかった。以後、個体数が多い主稈総葉数が15葉について解析した結果を示す。次に、全ての温度処理区は同じ方程式となる帰無仮説を立て検定すると、その確率は14%となり、帰無仮説が誤りとはいえなかった。そこで、外れ値を除く全ての温度処理区の主稈総葉数15葉の値をまとめて非線形最小二乗法で近似すると、次式が得られた。

$$ypl = 16.028 / (1 + \exp(7.213 - 0.0474 \Sigma T_{10}))$$

幼穂長の推定結果及び松島・真中(1956)から穂の発育ステージと ΣT_{10} の関係をまとめると、主稈単位では幼穂形成期を起点として、花粉母細胞分化期は幼穂長1.5cmで80℃・日、減数分裂期は5cmで140℃・日、花粉内容充実期は最終穂長の94%で240℃・日、出穂期は290℃・日と設定できた。

c. 圃場における株内の出穂変異を考慮した ΣT_{10} の再設定

圃場における12品種の観察に基づく幼穂形成期間の ΣT_{10} は1998年と1999年の変動が大きく、12品種の平均値は1998年では288.3℃・日、1999年では311.3℃・日、変動係数はそれぞれ9.2%、3.4%であった。変動幅は1998年では103.6℃、1999年では33.6℃であり、これを盛岡アメダスの8月上旬の平均気温の準平年値から日数に換算すると7日となる。一方、主稈葉齢進度モデルによる推定幼穂形成期から出穂期までの ΣT_{10} は適合性の悪い「おきにいり」で大きいのが、12品種平均は1998年311.6℃・日、1999年313.9℃・日、変動係数はそれぞれ11.1%、10.6%であった。この結果、出穂の早晩と ΣT_{10} とに一定の関係はなく、圃場では幼穂形成期間の ΣT_{10} は310℃・日であると考えられた。

ここで、ポット試験の主稈と圃場群落の幼穂形成期間の ΣT_{10} には20℃・日の差が認められた。このことは、ポット試験における主稈の出穂日と主稈及び1次分げつの出穂期の差が20.2℃・日、また圃場試験における主稈の出穂日と1株の出穂期の差が「あきたこまち」で11.9℃・日、「ひとめぼれ」で16.0℃・日であったことを考慮すると、この差は株内の出穂日の変異が主な原因であると考えられる。そこで、主稈の幼穂形成期間の ΣT_{10} は290℃・日であるが、圃場では20℃・日を加算した310℃・日と

した。また、各発育ステージについてもそれぞれ $20^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ を加算した。

(2) 玄米の発育モデルの作成

圃場における出穂期、乳熟期、糊熟期、黄熟期および成熟期の到達日について出穂期から乳熟期以降の各発育ステージまでの ΣT_{10} を算出した (表3)。これらの ΣT_{10} は1元配置分散分析の結果、品種、年度間による有意差は存在しなかった。乳熟期の ΣT_{10} は出穂の早晚との関係からみると、出穂が早い品種ほど ΣT_{10} が大きい傾向にあったが、これは1998年の「つがるロマン」が $204.8^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ と大きく、「ひとめぼれ」、「ササニシキ」の値が114.9、125.8 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ と小さいためであった。1999年には「つがるロマン」、「ひとめぼれ」では乳熟期までの ΣT_{10} は156.7、156.5 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ と、 $160^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ 程度となっていたが、「ササニシキ」では138.8 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ と小さかった。また、乳熟期の値の変動係数は他の発育ステージよりも大きく、とくに1998年は15.1%と他のステージの4倍であったこともあり、出穂の早晚と乳熟期までの ΣT_{10} の間に特定の関係はないものと考えられた。

各発育ステージの ΣT_{10} の品種間の変異幅は1998年の乳熟期では $89.9^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ であり、出穂期～乳熟期頃の盛岡アメダスの気温の準平年値は 24°C であるので6.4日の幅であった。1999年は $48.2^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ で3.4日であった。他の発育ステージの変異幅は $39.3\sim 67.2^{\circ}\text{C}$ と乳熟期より小さいが、成熟期は日平均気温

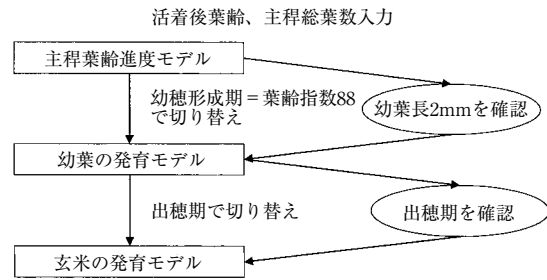


図4 幼葉と玄米の発育モデルの利用法

が低いので日数に換算すると、1998年では8.0日、1999年では9.6日と大きくなった。

以上のように、各発育ステージの ΣT_{10} には品種間差および年次間差はあるが、12品種の各発育ステージの ΣT_{10} を2か年で平均すると、乳熟期 $158.0^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ 、糊熟期 $278.3^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ 、黄熟期 $397.2^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ 、成熟期 $526.9^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ であった。これらの平均値に基づいて、出穂期から乳熟期の ΣT_{10} を $160^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ 、糊熟期を $280^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ 、黄熟期を $400^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ 、成熟期を $530^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ と設定した。

(3) モデルの検証

活着期から成熟期までの各発育ステージの予測には、活着期から幼穂形成期までは主稈葉齢進捗モデル、幼穂形成期から出穂期までは幼穂の発育モデル、出穂期から成熟期までは玄米の発育モデルを用いた (図4)。2000年の作柄診断試験における実測と本モデルによる推定の差を表4にまとめた。

表3 東北農業研究センター圃場における出穂期および出穂期から各発育ステージまでの有効積算気温 (ΣT_{10})

品 種	出穂期		乳熟期 ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$)		糊熟期 ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$)		黄熟期 ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$)		成熟期 ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$)	
	1998	1999	1998	1999	1998	1999	1998	1999	1998	1999
かけはし	323.5	303.9	156.9	168.2	275.6	274.5	391.6	408.0	535.6	508.0
むつほまれ	267.5	269.7	168.4	156.2	283.2	262.6	419.6	395.5	544.8	523.0
つがるロマン	282.1	286.3	204.8	156.7	296.6	260.1	407.1	378.4	550.0	505.9
あきたこまち	312.5	326.1	173.3	158.5	289.3	257.0	408.5	384.8	544.3	507.5
じょうでき	341.0	323.3	160.6	158.5	282.7	274.3	393.6	395.9	530.6	531.1
ゆめさんさ	346.9	361.0	160.6	141.4	282.7	257.2	393.6	367.7	530.6	490.4
どまんなか	355.4	340.4	162.9	178.3	282.6	293.2	395.9	390.7	520.5	526.5
おきにいり	368.5	380.3	156.6	174.0	276.4	292.3	402.8	419.8	517.1	557.6
ひとめぼれ	289.8	290.6	114.9	156.5	268.4	290.0	383.5	413.4	505.7	540.1
ササニシキ	292.4	303.3	125.8	138.8	290.2	272.3	393.4	406.7	514.6	535.7
はえぬき	279.0	291.0	150.7	187.0	257.3	304.3	383.7	413.4	551.7	540.1
コシヒカリ	281.1	290.6	132.1	149.4	269.5	288.0	370.0	414.7	495.9	538.4
12品種 平均	311.6	313.9	155.6	160.3	279.5	277.2	395.3	399.1	528.5	525.4
変動係数 (%)	11.1	10.6	15.1	9.0	3.9	5.8	3.3	4.1	3.4	3.6
2年 平均	312.8		158.0		278.3		397.2		526.9	
変動係数 (%)	10.0		12.2		4.8		3.7		3.5	

まず、活着期の調査から葉齢進度モデルで幼穂形成期を推定すると、予測誤差は-2~4日であり、12品種の誤差平均は2.2日であった。葉齢進度モデルに適合性の悪い「おきにいり」を除く11品種の誤差平均は2.0日であった。次に、観察した幼穂形成期より幼穂の発育モデルで出穂期を予測すると、誤差は-1~2日であり、12品種の誤差平均は1.2日であった。さらに、観察した出穂期より玄米の発育モデルで乳熟期、糊熟期、黄熟期、成熟期を予測すると、誤差はそれぞれ-2~2日、-3~1日、-4~0日、-4~0日と全て4日の幅であった。12品種の誤差平均はそれぞれ1.2、1.8、3.0、2.1日であり、さらに乳熟期から成熟期までの誤差平均は2.1日であった。このとき、乳熟期の誤差は出穂の早い品種でプラスに、遅い品種でマイナスになる傾向があった。これは出穂が遅い品種ほど乳熟期までのΣT₁₀が小さいことを示し、とくに「ササニシキ」は過去のΣT₁₀からも出穂期から乳熟期への到達日数が短いといえる(表3)。

次に、出穂期の確認ができないことを想定して、観察に基づく幼穂形成期から幼穂の発育モデルによる予測出穂期を起点として、玄米の発育モデルを用いると、乳熟期、糊熟期、黄熟期、成熟期の誤差平均はそれぞれ1.2、1.1、2.2、1.7日であり、乳熟期から成熟期までの誤差平均は1.6日であった。また、幼穂形成期の確認ができないことも想定し、主稈葉齢進度モデルで予測した幼穂形成期から幼穂の発育

モデルで出穂期を予測して、玄米の発育モデルに切り替えて乳熟期、糊熟期、黄熟期、成熟期の到達日を予測すると、誤差平均はそれぞれ2.5、2.5、2.6、2.7日であり、乳熟期から成熟までの誤差平均は2.6日であった。なお、このときの出穂期の誤差平均は2.5日であった。

亘理町の農家圃場では、主稈葉齢進度モデルにより予測した幼穂形成期の誤差は-1日であった。確認した幼穂形成期から出穂期を予測すると、誤差は3日であった。予測出穂期から乳熟期を予測すると誤差は1日、糊熟期は1日、黄熟期は0日、成熟期は0日で、乳熟期から成熟期の誤差平均は0.7日であった(図5、表5)。亘理町の農家圃場を含む5品種9圃場の主稈葉齢進度モデルによる幼穂形成期の予測誤差は-2~4日で、誤差平均は2.6日であった。また、幼穂形成期を確認して出穂期を予測した誤差は1~5日で、誤差平均は2.9日であった。

3) 考察

(1) 発育モデルにおける基準温度10℃の妥当性

水稲冷害早期警戒システムにおいては、東北全域の水稲の発育を推定することが重要となる。幼穂と玄米の発育モデルは、前節の主稈葉齢進度モデル(神田ら 2000)と組み合わせて、活着期から成熟期までを通して利用できることからその有用性が期待される。

幼穂の発育モデルは幼穂形成期間の主な発育ス

表4 東北農業研究センター圃場における各発育ステージの予測誤差¹⁾(2000年)

品 種	幼穂形成期、出穂期の観察に基づくもの						出穂期の観察による 補正なし					幼穂形成期、出穂期の観察 による補正なし					
	幼 形 期	出 穂 期	乳 熟 期	糊 熟 期	黄 熟 期	成 熟 期	平 ³⁾ 均	乳 熟 期	糊 熟 期	黄 熟 期	成 熟 期	平 均	乳 熟 期	糊 熟 期	黄 熟 期	成 熟 期	平 均
かけはし	1	-1	2	1	0	-2	1.5	1	0	-1	-3	1.7	2	1	0	-2	1.5
むつほまれ	-1	0	0	-2	-3	-3	2.3	0	-2	-3	-3	2.3	-1	-3	-4	-4	3.2
つがるロマン	0	0	1	-1	-3	-1	1.7	1	-1	-3	-1	1.7	1	-1	-3	-1	1.7
あきたこまち	2	0	0	-1	-3	0	1.6	1	-1	-2	1	1.3	2	1	-1	2	1.6
じょうでき	2	1	-1	-3	-4	-2	2.7	1	-1	-2	1	1.3	2	1	-1	2	1.6
ゆめさんさ	4	1	-1	-2	-4	-3	2.7	0	-1	-3	-2	1.9	3	3	0	2	2.3
どまんなか	3	1	0	-1	-3	-1	1.7	1	0	-2	1	1.2	3	3	0	3	2.6
おきにいり	4	2	1	-1	-2	-2	1.6	3	1	1	1	1.7	6	5	4	5	5.0
ひとめぼれ	-2	2	-2	-3	-3	-4	3.1	0	-1	-1	-1	0.9	-1	-2	-2	-3	2.1
ササニシキ	-1	1	-2	-2	-3	0	2.1	-1	-2	-2	1	1.6	-2	-3	-3	0	2.3
はえぬき	-1	1	0	-1	-4	-2	2.3	1	-1	-3	-1	1.7	0	-2	-4	-2	2.4
コシヒカリ	1	2	-1	-2	-1	-1	1.3	1	0	2	2	1.5	2	0	3	3	2.3
誤差平均 ²⁾	2.2	1.2	1.2	1.8	3	2.1	2.1	1.2	1.1	2.2	1.7	1.6	2.5	2.5	2.6	2.7	2.6

注. 1) 予測誤差は(観察-予測)。
 2) 誤差平均は $\sqrt{(\text{観察}-\text{予測})^2/n}$ 。
 3) 平均は乳熟期から成熟期までの誤差平均。

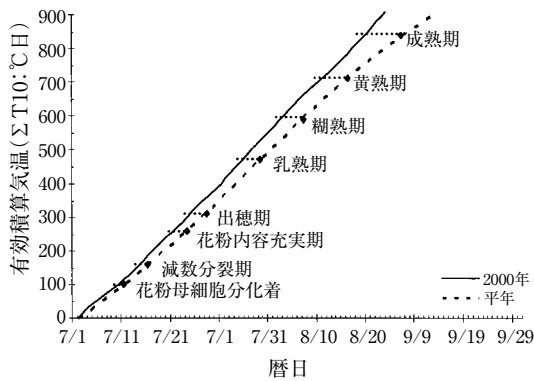


図5 幼穂形成期を起点とした穂の発育過程の監視例
(2000年:宮城県亘理町)
平年はアメダス地点の日平均気温の準平年値を使用。

表5 幼穂形成期を起点とした穂の発育過程
(2000年:宮城県亘理町)

生育段階	出穂期	乳熟期	糊熟期	黄熟期	成熟期
平年	7月30日	8月10日	8月19日	8月28日	9月9日
推定	7月23日	8月3日	8月11日	8月20日	8月28日
実測	7月26日	8月4日	8月12日	8月20日	8月28日

注. 平年はアメダス地点の日平均気温の準平年値、推定は2000年の実況値を使用して推定。品種は「まなむすめ」。

テージを予測するものである。作柄診断試験の12品種の出穂期の誤差平均は1.2日であり、宮城県、山形県の農家圃場でも2.9日と、生産現場で利用する上では十分な精度であった。このことは、穎花分化始期から出穂期までの期間は30日程度で主に温度に左右され、品種や栽培条件に左右されにくい(松島・真中 1956) ことにも一致する。また、作柄診断試験と農家圃場では花粉母細胞分化期、減数分裂期、花粉内容充実期の観察によるステージ確認を行っていないが、幼穂長は積算気温によるロジスティック方程式で示されること(荒川ら 1994、中園・井上 2001)、幼穂長と穂の発育には規則性があること(松島・真中 1956) から、途中の発育ステージ予測も出穂期の予測精度から判断して適合するものと考えられる。

玄米の発育モデルは農林水産省大臣官房統計部などが作況調査に利用する登熟過程の主な発育ステージを推定するものである。登熟への日照の影響は、乳熟期の遮光処理が登熟歩合を低下させ、25℃でも高温登熟障害を生じさせる(松島ら 1958) ように、登熟速度ではなく、主に登熟歩合に影響するため、登熟の進行は日照よりも温度に強く影響される。各

発育ステージは達観の調査に基づくものであるが、作柄診断試験における12品種の誤差平均は乳熟期は1.2日、糊熟期は1.8日、黄熟期は3.0日、成熟期で2.1日であった。また、農家圃場での誤差はそれぞれ1、1、0、0日であり。比較的精度が高いといえる。

以上のように、いずれのモデルも既往の知見(内嶋 1976、長南 1966)に基づいて基準温度10℃を設定して精度を検証したところ、東北の基幹品種や異なる地域にも適用できることから、早期警戒システムの生育監視活動に利用できるものと判断される。

(2) 障害型冷害監視における幼穂の発育モデルの利用法

松島・真中(1956)は幼穂の発育段階を止葉始原体分化期から花粉完成期までの21期に細分類したが、栽培管理上は穂首分化期、枝梗分化期、穎花分化期、生殖細胞形成期、減数分裂期、花粉外殻形成期および花粉完成期の7段階で十分としている。この7分類に基づき、幼穂の発育過程における冷温の影響は次のように整理できる。

まず、1穂穎花数に対する影響をみると、穂首分化期から穎花分化期に17℃以下の冷温を受けて、枝梗ならびに穎花の分化数が減少し、その結果として1穂穎花数が減少する(寺尾 1940a、木戸 1941、田中 1962)。また、花粉母細胞分化期から減数分裂期は幼穂が急速に伸長し、穎花も発達する時期であって、この時期の冷温は枝梗及び穎花の退化を招き、1穂穎花数を減少させ(寺尾 1940a、木戸 1941、田中 1962)、籾殻サイズも減少させる(松島・真中 1956)。次に、冷温が誘発する不稔についてみると、幼穂形成期は雄蕊、雌蕊の始原体の分化する時期であり、17℃以下の冷温によって不稔が生じる(寺尾 1940a、木戸 1941、田中 1962)が、不受精に対する感受性が高いたるは減数分裂期(柿崎・木戸 1938、福家・近藤 1939、寺尾 1940a、田中 1962、Hayase *et al.* 1969)であり、より厳密には小孢子初期(Satake and Hayase 1970)である。また、穎花分化期から減数分裂期前までの前歴期間において、受精障害を誘引しない程度の冷温は減数分裂期の不稔を増長する(Ito 1976)。このため、障害不稔回避を目的とする深水管理は前歴期間と危険期の深水管理を組み合わせると効果的である(Satake *et al.* 1988)。

以上のように、冷温により1穂穎花数の減少、籾殻サイズの減少、不稔籾の発生が起きる。このうち

冷害の早期警戒においては障害型冷害による不稔籾の発生の監視が重要なものとなる。この不稔籾の発生は、幼穂形成期を中心とする時期の平均気温20℃以下の積算である冷却量、減数分裂期を中心とする時期の冷却量、および品種の耐冷性の強弱を組合わせておおまかに診断できると考えられる。

ここで提示した幼穂の発育モデルは、生産現場で幼穂長2 mmで確認される幼穂形成期（松島・真中（1956）の穎花分化期に相当）、花粉母細胞分化期（同生殖細胞形成期）、減数分裂期、花粉内容充実期（同花粉外殻形成期）および出穂期を予測するものであり、生産現場で利用するには十分な精度であることが示された。したがって、本モデルは、早期警戒システムにおける障害型冷害の監視や不稔籾の発生診断に利用できると考えられる。また、深水などの栽培管理の実施時期などの障害型冷害の回避技術の策定も容易となる。

（3）遅延型冷害、高温登熟障害の監視における玄米の発育モデルの利用法

登熟過程はこれまで出穂後日数、乾物重、籾水分で示されてきた（星川 1972、田村 1956、長戸 1941）。しかし、現場では作況調査、農作物被害調査などで外観による登熟過程の診断が行われ、発育ステージとして出穂期、乳熟期、糊熟期、黄熟期および成熟期が用いられている（注：農林水産省統計情報部。夏作減収推定尺度。1994）。この登熟ステージの進展は籾重増加からみた成熟の進行とも一致する（長戸 1941）。さらに、海外では、圃場における穀物の発育ステージを外観から診断するために、decimalcodeという出芽から成熟までの主な発育ステージに基づき10進数のコードをつける方法が広く利用されている（Zadoks *et al.* 1974、Lancashire *et al.* 1991、Chin *et al.* 1991）。Chin *et al.* (1991)はこのdecimal codeをイネに応用し、病害の感染、伝搬、被害に特有な発育ステージを的確に診断し、いもち病、紋枯病の薬剤散布の時期の判定に有効であるとしている。このように、圃場では遠観で判断できる指標で発育ステージを把握し、それに応じた栽培管理をすることが重要である。

登熟および玄米品質に及ぼす気温の影響は玄米の発育ステージにしたがって、次のように整理できる。出穂開花時における17℃以下の冷温や30℃以上の高温は授精障害を引き起こし、不稔や単為結果を生じる（寺尾 1940b、田中 1962、Satake and Koike

1983、松島ら 1958、佐藤ら 1973、Tashiro and Warldlaw 1991）。開花期から乳熟期の冷温や高温では、発育不全による死米、しいな、胴切れ米が生じる（Tashiro and Warldlaw 1991）。乳熟期以降の障害は、デンプン粒の発育不良により生じる。すなわち、乳熟期から糊熟期は乳白米を生じ、糊熟期頃は背白米、腹白米、基白米が生じる（長戸・江幡 1960、長戸・江幡 1965、Tashiro and Warldlaw 1991）。また、10℃以下の冷温により登熟は停止するが、10℃以上に回復すると登熟はふたたび進行し、不可逆的に停止するのは強霜に遭遇したときである（松島ら 1958）。

玄米の発育モデルは出穂期を起点とし、生産現場で用いられる乳熟期、糊熟期、黄熟期および成熟期を予測するものである。本モデルを用いてこれらの発育ステージと気象の経過を追跡的に監視することによって、遅延型冷害および高温登熟障害の有無の判定に利用できることが期待される。また、いもち病の追加防除、掛け流し灌漑による高温登熟障害回避、落水時期、適期刈取りなどの栽培管理の意思決定にも利用できる。

（4）モデルの組み合わせとその効果

早期警戒システムでは稲作立地に基づき東北6県のアメダス地点から71地点を選択し、アメダス指標地点としている（鳥越 1998）。このように遠隔多数地点の発育ステージを予測する際には幼穂形成期、出穂期をすべて観察して、各モデルを切り替えることは現実的ではない。そこで、観察で確認した時期ではなく、主稈葉齢進度モデルで予測した幼穂形成期から幼穂の発育モデルに、幼穂の発育モデルで予測した出穂期から玄米の発育モデルに切り替えて利用することもできる（図4）。このときの予測精度を、主稈葉齢進度モデルへの適合度が低い「おきにいり」を外した11品種の乳熟期から成熟期の誤差平均でみると、補正なしでは2.2日、幼穂形成期の補正のみでは1.6日、出穂期で補正した場合で2.2日と誤差に大きな違いはなかった。同様に、宮城県亶理町の農家圃場では観察による補正なしで1.0日、幼穂形成期の補正のみで1.5日、幼穂形成期および出穂期で補正した場合で2.5日であった。このように、幼穂形成期や出穂期の予測誤差が2、3日程度なら、観測誤差の影響があるため補正の必要はないが、誤差が大きい場合には幼穂形成期と出穂期に補正して利用する必要がある。

幼穂および玄米の発育モデルは単独でも、障害型冷害および登熟障害の予測とそれに伴う栽培管理の意思決定支援に利用できるが、葉齢進度モデルを組み合わせて移植後から成熟期までの統合モデルとすることにより、遅延型冷害の診断に利用できる。

Ⅲ 圃場内、地域内の発育ステージの変異の推定

1. 緒言

ここではⅠで作成した発育モデルを用いて推定した発育ステージを基に冷温による障害型冷害、遅延型冷害など各種被害の診断手法を確立するために必要な発育モデルの拡張を行う。

障害型冷害、遅延型冷害など各種被害の診断には、冷温の強さ、期間、そしてそのときのイネの発育ステージが重要となる。しかし、ひとつの圃場の発育経過についても、種籾の大小や発芽の遅速、育苗管理に基づく発育の良否などにより、すでに移植時の個体の葉齢に変異が存在し、さらに個体内の穂や穂内の穎花に発育の変異が存在している。また、市町村、各県の作柄表示地帯においては、農家による移植期や苗質の差、品種の早晩性に起因して圃場ごとに発育の変異が存在する。

イネの発育における器官形成の規則性に基づく変異に着目すると、圃場内における特定の発育ステージ割合を、次に圃場の移植期と苗質の変異に着目すると、地域内の特定の発育ステージ割合を把握することが可能となる。

ここでは、発育ステージの変異を把握する目的で作成した以上2つの手法について記述する。

2. 器官形成の規則性に基づく発育ステージの圃場内変異の推定

Ⅱにおいて作成した主稈葉齢進度モデル、幼穂および玄米の発育モデルの3つのモデルにより、各アメダス指標地点の代表的な品種の発育ステージの進行をリアルタイムで追跡することが可能となった。

次に推定した発育ステージを基に冷温による障害型冷害、遅延型冷害など各種被害の診断手法を確立することが要請されている。そこで、各県が運営する生育診断圃場における障害型冷害と遅延型冷害の危険度を推定する手法の確立が急務となる。

しかし、ひとつの圃場の発育経過についても、種籾の大小や発芽の遅速、育苗管理に基づく発育の良否などにより、移植時の個体の葉齢には変異が存在する。さらに、ひとつの個体の主な分けつでは主稈

とはほぼ同時に幼穂形成期に入るが、分けつ次位や他の分けつとの相対葉齢差によりその時期に差異が生じ(後藤・星川 1991)、その後の穂の発育の変異に結びつく。また、ひとつの穂についてみると、穎花分化の序列に従って穎花に発育の差異が生じ、開花まで逆転することはない(松島・真中 1956)、1穂内の穎花間にも開花日とその後の玄米の発育に変異が存在する。このように、圃場においてある時点で発育ステージが混在することは、冷温の被害程度を推定する上で問題となる。このため、イネの発育における器官形成の規則性に基づく変異に着目して、穎花単位で発育ステージの違いを推定する手法を開発することが必要となる。

そこで、ここでは、Ⅱで作成した3つの発育モデルを拡張し、圃場内における穎花が減数分裂期などの特定の発育ステージにある割合を推定する手法を作成した。この手法の有効性を生育診断圃場で検証したところ、圃場内の発育変異の特徴をよく現すことが判明した。

1) 材料と方法

(1) イネの発育に内在する変異の定式化

生育診断圃場では、植付け本数が3または4本で統一され、そのうち1個体について葉齢進度が追跡されている。その個体を株の代表個体とし、株を構成する他の個体の葉齢進度は代表個体に準ずるとする。株を構成する全ての分けつが穂を形成しないので、穂を形成する分けつを有効穂と表現した。

圃場内におけるイネの発育に内在する変異の要因を次の3点とし定式化を試みた。すなわち、①移植時個体葉齢変異、②有効穂の幼穂形成期および出穂期の到達日変異、③穎花の開花日変異である。

a. 移植時個体葉齢変異

株の発育の変異は株を構成する個体の初期値(葉齢)の変異に基づくとし、それぞれの株の代表個体の葉齢を設定し、その後の発育を主稈葉齢進度モデルで推定して、株の葉齢、幼穂形成期を決定した。なお、初期値(葉齢)の変異は正規分布と仮定した。

b. 有効穂の幼穂形成期と出穂期の到達日変異

株内における幼穂形成期の変異は株の幼穂形成期を平均とする正規分布で表し、主稈葉齢進度モデルで推定した株の代表個体の幼穂形成期に、分けつの次位や株内の個体間の葉齢差により生じる株内の有効穂の幼穂形成期の到達日の差を考慮することとした。ここでは、主稈と株の出穂期に幼穂形成期から

の有効積算気温(日平均気温をTとすると $\Sigma(T-10)$ if $(T>10)$ 、以下 ΣT_{10})で $20^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ に差が存在することに基つき(神田ら 2002)、主稈葉齢進度モデルで推定した代表個体の主稈の幼穂形成期に $20^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ 加算した日を株の推定幼穂形成期とした。これにより株の主な分けつの幼穂形成期の初期値(暦日)を決定し、幼穂の発育モデルで出穂期などその後の発育を推定した。圃場内の有効穂の出穂期は株の発育変異にこの変異が加わったものとなる。

c. 穎花の開花日変異

1穂の穎花の発育順序は分化より開花まで逆転しない(松島・真中 1956)ことより、開花順序を基に穎花分化の違いを推定した。開花順序の推定には、水稲品種「陸羽132号」(寺尾 1940a)、同「農林25号」(松島・真中 1956)、同「はやゆき」(Satake and Koike 1983)、同「コシヒカリ」(菊屋ら 2001)のデータを使用した。これらの4品種では1穂の開花日数は5~8日と異なっていたため、同一指標で相対的に比較する目的で、発育モデルに使用してい

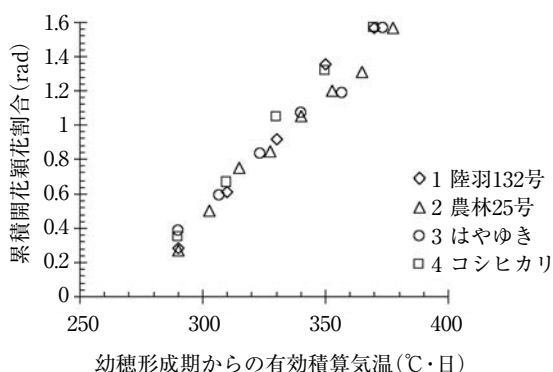


図6 有効積算気温による開花反応のモデル化
注. 累積開花穎花割合(%)を逆正弦変換した。
単位はラジアン(rad)。

る ΣT_{10} を用いた。ひとつの穂の開花に要する ΣT_{10} を決めるためには、穎花の発育の違いを特定のステージを基に推定する必要がある。ここでは、減数分裂期を基準とする。松島・真中(1956)によると、先端穎花の減数分裂期は幼穂長約5cm時、下位穎花の減数分裂期には幼穂はほぼ最終的な長さとなる。これに ΣT_{10} と幼穂長の関係(神田ら 2002)を当てはめると、減数分裂期の先端穎花と下位穎花の発育のずれは ΣT_{10} でおおよそ $100^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ と推定された。したがって、開花開始から開花終了までの ΣT_{10} を $100^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ とし、これを開花日数で均等割し、開花穎花割合の推移を算出した。 ΣT_{10} と累積開花穎花割合の関係は、累積開花穎花割合を逆正弦変換すると、育成時期の異なる新旧4品種とも開花から開花終了までほぼ直線になり、品種による差異はみられなかった(図6)。

この開花順序に従い、玄米の発育モデルの初期値を与え、開花から成熟期までの発育経過の変異を推定する。つまり、圃場内の穎花の発育変異は有効穂の出穂期変異に穎花の開花日の変異が加わったものとなる。

(2) 障害型と遅延型冷害の危険度推定手法

a. 危険期穎花割合の推定

穎花の障害不稔の発生危険期を、①一般的に危険期とされる花粉母細胞減数分裂初期~花粉4分子期(設定1)、②もっとも障害型冷害にとって重要とされる花粉母細胞4分子期(設定2)、③花粉の発育に関する時期全体にあたる花粉母細胞分化期から花粉内容充実期(設定3)の3つ設定した。

この危険期は松島・真中(1956)の幼穂長と穂の発育ステージの関係を基に、幼穂長と幼穂形成期を起点とする ΣT_{10} の関係を併せて整理すると表6ようになる。さらに穎花の開花順序に従い危険期に

表6 1穎花の危険期設定から決定される危険期間

穎花の危険期設定	穎花の危険期の幅	上位穎花 (早期に開花する穎花)		中位穎花 (中期に開花する穎花)		下位穎花 (晩期に開花する穎花)	
		幼穂長	ΣT_{10}^*	幼穂長	ΣT_{10}^*	幼穂長	ΣT_{10}^*
設定1 花粉母細胞減数分裂初期~ 花粉母細胞減数分裂4分子期	$20^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$	4~8cm	120~140 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$	12~18cm	160~190 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$	ほぼ全長	200 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ ~
設定2 花粉母細胞4分子期	$10^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$	7~8cm	130~140 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$	15~18cm	170~190 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$	ほぼ全長	200 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ ~
設定3 花粉母細胞分化期~ 花粉内容充実期	$60^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$	1.5~15cm	100~170 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$	8~20cm	140~230 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$	ほぼ全長	200 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ ~

注. 危険期と幼穂長の関係は松島・真中(1956)より、日平均気温 10°C 以上の有効積算気温(ΣT_{10})と幼穂長の関係は神田ら(2002)より。

*) 幼穂形成期を起点とする ΣT_{10}

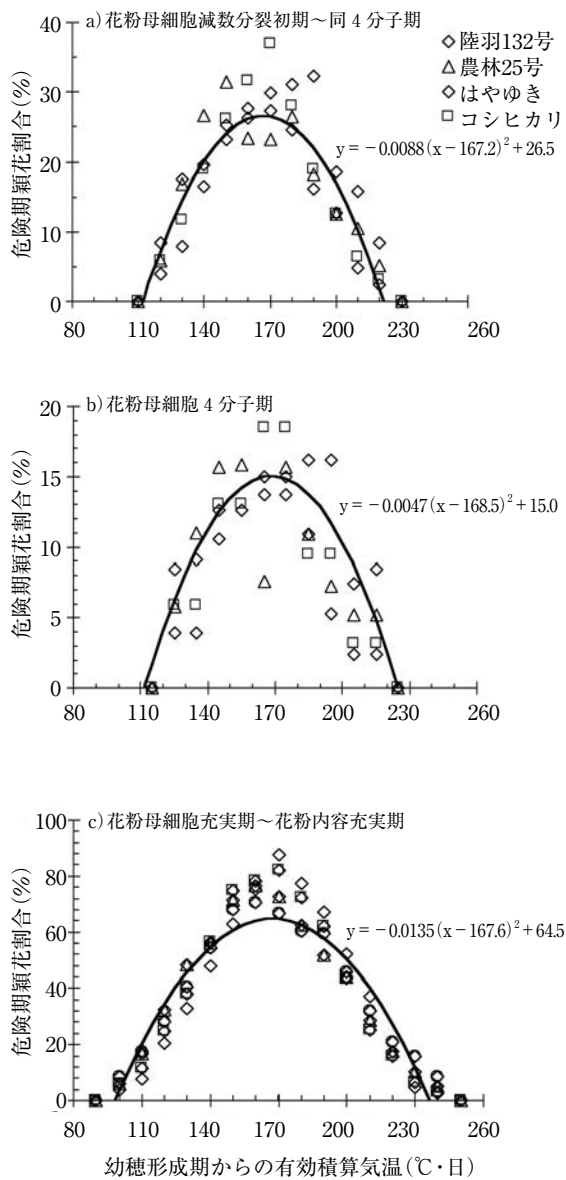


図7 3設定条件における危険期穎花割合の推移

ある穎花割合を求め、 ΣT_{10} との関係を示すと図7になる。この関係を2次式で近似し、幼穂形成期からの ΣT_{10} で危険期穎花割合を推定した。

b. 成熟期に達した穎花割合の推定

穎花の開花日からは玄米の発育モデルを用いて各穎花の発育ステージの進行を追跡できる。ただし、玄米の発育モデルは登熟における主な発育ステージを出穂期からの ΣT_{10} でモデル化しているため、各穎花の開花日を起点とし、各穎花ごとの登熟進度に応用する場合はそのままでは使用できない。穂における出穂期の判定は先端穎が止葉葉鞘から出た時、乳熟期、糊熟期を判定する際は穂中央部の穂の胚乳の状態、黄熟期と成熟期は黄化率割合で到達日の判

定を行う(神田ら 2002)。ここでは乳熟期または糊熟期の発育ステージの判定が出穂時と同じ先端穎花ではなく、中央部の穎花であることから、先端穎花と50% (0.49ラジアン) の穎花が開花する ΣT_{10} の差 $30^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ (図6)を出穂を起点とする玄米の各発育ステージまでの ΣT_{10} から減算して到達日を算出した。

(3) 特徴的な気象条件下における推定精度の検証

この手法による推定精度を検証するため高温年である1999年、開花期前後が冷温となった2001年、冷害年である2003年について、東北農研の生育診断圃場と青森県の3箇所の生育観測圃における幼穂形成期から成熟期までの発育ステージの変異を計算した。

計算に使用した各年次の気象を概括すると、1999年の夏の天候はオホーツク海高気圧の発生は一時的で東北地方は晴れて気温の高い日が多かった。2001年は、7月中旬から8月にかけてオホーツク海高気圧が発達し、東北地方は太平洋側を中心に7月中旬から8月中旬に冷温・寡照、8月下旬の冷温、また9月22、23日に極端な冷温となった。2003年は6月下旬から7月はオホーツク海高気圧が優勢となり、顕著な冷温・寡照となった。8月も断続的に冷温・寡照の状態が続いた。

a. 東北農研作柄診断圃場

モデルによる発育の推定精度を検証するため、作柄診断圃場で栽培した12品種のうち、1999年の「あきたこまち」「ひとめぼれ」の東北農研圃場の調査データ、および継続して試験を行った2001年、2003年のデータを用いた。主稈葉齢進度モデルの初期値は、連続10株4箇所の調査区の平均値とこの標準偏差より $\sigma=0.3$ からなる正規分布とした。有効穂の幼穂形成期の変異幅は出穂日と同じとし、連続10株の調査区2箇所で行った有効穂の出穂日調査の結果より15日とした。この設定に基づき、各年次の圃場、株、穂、穎花の各レベルの主な発育ステージとその変異を推定した。圃場、株、穂の各レベルについては、推定した幼穂形成期、花粉母細胞分化期、花粉内容充実期に基づき感受性Ⅰ期(幼穂形成期～花粉母細胞分化期)、感受性Ⅱ期(花粉母細胞分化期～花粉内容充実期)の日平均気温 20°C 以下の冷却量(内島 1976)を算出した。

各年次とも調査区とは別に4箇所で60株採取し、そのうち平均的な5株より20穂を採取し不稔歩合を

調査した。60株を精米し青米歩合を調査した。

b. 青森県生育観測圃

作成したモデルを青森県の生育観測圃のうち、十和田、八戸、青森に適用した。品種は「むつほまれ」。初期葉齢の正規分布は、平均値をその圃場の苗の調査葉齢、葉齢変異は東北農研圃場と同じ $\sigma=0.3$ 、有効穂の幼穂形成期の変異の幅は15日とした。この設定に従い、1999年、2001年、2003年の圃場、株、穂、穎花の各レベルの主な発育ステージとその変異を推定した。推定した幼穂形成期、花粉母細胞分化期、花粉内容充実期に基づき、圃場、株、穂の各レベルの感受性Ⅰ期、感受性Ⅱ期の日平均気温20℃以下の冷却量を算出した。なお、気温データは青森、十和田、八戸のアメダス地点のデータを用いた。

1999年、2001年には青森県の十和田、八戸、青森のアメダス近傍の生育観測圃より、100穂採取し、そのうち20穂の不稔歩合を調査した。残り80穂を精米し青米歩合を調査した。2003年の出穂日、不稔歩合については、東北地域水稲安定生産推進連絡協議会が2003年の東北6県の生育調査圃場のデータをとりとまとめた「2003年東北地域水稲生育調査圃データ集」を参考にした。

2) 結果

(1) 冷害障害の主な発育ステージの推定

a. 花粉母細胞減数分裂期

有効積算気温と穎花の危険期割合の関係は、穎花の危険期間の設定の違いにかかわらず、ピークは1

穂の減数分裂期である140℃・日よりも後の約170℃・日となった。また、穎花の危険期間を長く設定しているものほど危険期間が長くなる他に、穎花同士で危険期が重なりあうため、危険期にある穎花割合のピークは高くなった(図7)。

設定1に基づく穎花の障害型冷害危険期の推定結果および圃場、株、有効穂の各レベルの花粉母細胞減数分裂期の到達日を表7に示した。圃場レベルとは代表個体のモデル、株レベルとは株の発育変異、有効穂レベルとは株と有効穂の発育変異、穎花の障害型冷害危険期は株と有効穂、さらに穎花の発育変異を取り込んだものをそれぞれ示す。また穎花の発育ステージの変異は極値を避けるため1%以上範囲を設定した。

圃場、株、有効穂の各レベルの花粉母細胞減数分裂期の分布を比較すると、最頻値はほぼ同じであったが、株レベル、有効穂レベルの順で花粉母細胞減数分裂期にある期間が長くなった。穎花の障害型冷害危険期についてみると、株や有効穂レベルの減数分裂期の期間よりも長かったが、極端に発育の早い穎花や遅い穎花を除く、危険期にある穎花の存在割合が1日に1%以上の期間についてみると、有効穂レベルの分布に近かったが、穎花の障害型冷害危険期の最頻値は株や有効穂レベルの最頻値よりも2~3日遅かった。

さらに穎花の障害型冷害危険期の年次変動についてみると、7月に気温が平年より高かった2001年で

表7 穎花の障害型冷害危険期(設定1)と花粉母細胞減数分裂期の到達日の推定

場所	品種	年次	花粉母細胞減数分裂期の到達日					穎花の障害型冷害危険期		
			圃場レベル	株レベル		有効穂レベル		推定範囲	1%以上範囲*	最頻値
			推定範囲	最頻値	推定範囲	最頻値	推定範囲	1%以上範囲*	最頻値	
盛岡	あきたこまち	1999	7.23	7.21~7.25	7.23	7.16~7.30	7.22	7.15~8.4	7.19~7.30	7.25
		2001	7.21	7.19~7.23	7.21	7.13~7.30	7.21	7.11~8.6	7.17~7.30	7.23
		2003	7.27	7.23~7.30	7.27	7.17~8.4	7.25	7.14~8.9	7.21~8.5	7.30
	ひとめぼれ	1999	7.29	7.28~7.31	7.29	7.22~8.7	7.28	7.20~8.11	7.26~8.5	7.31
		2001	7.29	7.26~8.1	7.29	7.20~8.11	7.29	7.18~8.16	7.24~8.10	8.1
		2003	8.5	8.3~8.7	8.5	7.28~8.13	8.5	7.25~8.21	8.2~8.13	8.7
十和田	むつほまれ	1999	7.26	7.24~7.28	7.26	7.22~8.2	7.26	7.20~8.6	7.23~8.1	7.28
		2001	7.29	7.26~7.31	7.29	7.20~8.8	7.29	7.17~8.16	7.24~8.9	7.31
		2003	8.11	8.8~8.13	8.11	8.5~8.23	8.11	8.3~8.30	8.7~8.22	8.13
八戸	むつほまれ	1999	7.27	7.25~7.28	7.27	7.23~8.3	7.27	7.21~8.7	7.24~8.1	7.28
		2001	7.3	7.27~8.1	7.30	7.21~8.10	7.30	7.18~8.17	7.25~8.9	8.1
		2003	8.14	8.11~8.17	8.14	8.8~8.25	8.14	8.6~9.2	8.10~8.25	8.17
青森	むつほまれ	1999	7.24	7.22~7.26	7.24	7.18~7.30	7.24	7.16~8.3	7.21~7.30	7.26
		2001	7.24	7.22~7.26	7.24	7.15~8.2	7.24	7.13~8.9	7.19~8.2	7.26
		2003	8.4	8.2~8.7	8.4	7.25~8.11	8.4	7.22~8.19	7.31~8.13	8.6

注. *) 極値を避けるため存在割合が1%以上となる日を設定した。

最も早く、7月冷温であった2003年は穎花の障害型冷害危険期のピークも1999年、2001年よりも遅く、ピークに達するまでの期間も長かった(図8)。

危険期設定の違いによる穎花の障害型冷害危険期を比較すると、全ての設定で最頻値となる歴日はほぼ同じであったが、この日に危険期にある穎花割合は穎花の危険期間を長く設定している設定3で51.5~59.2%と大きく、短い設定2では10.9~13.2%と小さかった。しかし、穎花個々の危険期間は設定を反映して変動したが、最も危険期が長い設定3でも最も危険期の短い設定2と比較して圃場全体の危険期間は1~2日長くなる程度であった。

b. 出穂期と開花期間

1999年の東北農研作柄診断圃場における有効穂の出穂分布を推定したところ、調査した有効穂の出穂日分布の結果とほぼ一致した(図9)。

青森県の生育観測圃について出穂日を推定すると圃場の出穂期、株の出穂期の最頻値、穂の出穂期(有効穂の50%以上が出穂)はほぼ同じであった(表8)。穎花の開花の最頻値はそれよりも2~3日遅くなった。推定された出穂期は生育観測圃で観測された出穂期と概ね同じであったが、2003年は観測出穂期よりも推定出穂期が5~14日遅れた。推定出穂期が観測出穂期とほぼ同じ場合は、観測による出穂始期~終期と株の出穂期、有効穂の出穂始期(5%)から終期(95%)もほぼ同じであった。

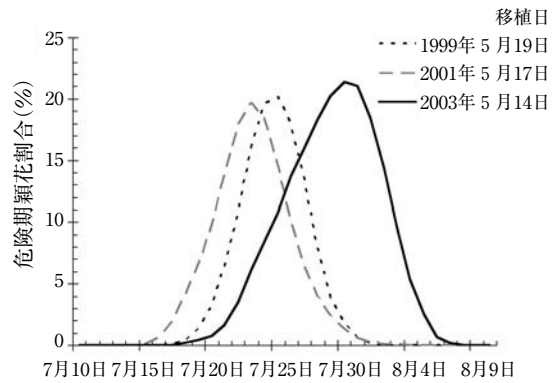


図8 危険期穎花割合の推移の年次間変異
東北農業研究センター・品種：あきたこまち。

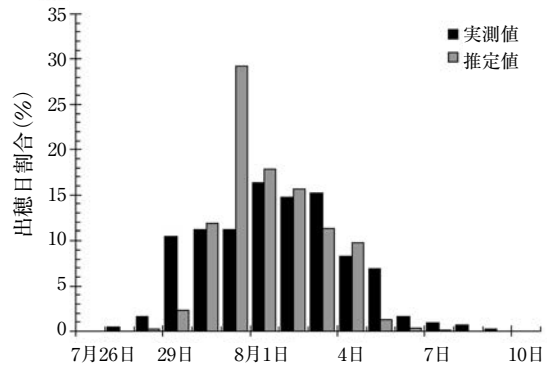


図9 出穂日の推定値と実測値の比較(1999年)
東北農業研究センター・品種：あきたこまち。

表8 出穂期と穎花の開花期間の推定

場所	品種	年次	観察出穂期			圃場 レベル	株レベル		有効穂レベル			穎花の開花期間		
			始*	期	終*		推定範囲	最頻値	5%	50%	95%	推定範囲	1%以上範囲**	最頻値
盛岡	あきたこまち	1999	8.2		8.1	7.30~8.3	8.1	7.30	8.1	8.4	7.26~8.13	7.30~8.8	8.3	
		2001	8.4		8.2	7.30~8.4	8.2	7.28	8.1	8.6	7.23~8.20	7.29~8.12	8.5	
		2003	8.10		8.8	8.6~8.10	8.8	8.6	8.8	8.11	8.1~8.24	8.6~8.18	8.11	
	ひとめぼれ	1999	8.6		8.7	8.5~8.9	8.7	8.4	8.7	8.10	7.30~8.21	8.4~8.14	8.9	
		2001	8.11		8.12	8.9~8.14	8.12	8.6	8.12	8.16	7.29~8.29	8.8~8.21	8.15	
		2003	8.14		8.18	8.15~8.21	8.18	8.15	8.18	8.21	8.8~9.4	8.15~8.27	8.23	
十和田	むつほまれ	1999	8.1	8.2	8.4	8.4	8.2~8.6	8.4	8.2	8.4	8.6	7.30~8.17	8.2~8.10	8.6
		2001	8.5	8.8	8.10	8.13	8.10~8.16	8.14	8.10	8.13	8.16	7.31~9.1	8.9~8.24	8.16
		2003	8.10	8.12	8.13	8.26	8.23~8.29	8.26	8.23	8.25	8.29	8.17~9.16	8.23~9.5	8.30
八戸	むつほまれ	1999	8.3	8.4	8.6	8.4	8.2~8.6	8.4	8.2	8.4	8.6	7.30~8.17	8.2~8.10	8.6
		2001	8.13	8.16	8.18	8.14	8.11~8.17	8.15	8.10	8.15	8.17	8.1~9.1	8.10~8.24	8.16
		2003	8.22	8.24	8.26	8.29	8.26~9.1	8.29	8.26	8.29	9.2	8.21~9.19	8.25~9.10	8.30
青森	むつほまれ	1999	7.31	8.1	8.2	8.2	7.31~8.3	8.2	7.30	8.1	8.4	7.27~8.13	7.31~8.8	8.3
		2001	8.3	8.5	8.8	8.5	8.3~8.8	8.5	8.2	8.6	8.10	7.25~8.23	8.2~8.16	8.9
		2003	8.7	8.10	8.12	8.17	8.14~8.20	8.17	8.14	8.17	8.20	8.8~9.2	8.14~8.26	8.22

注. *) 盛岡では出穂始期、出穂終期の調査はしていない。
**) 極値を避けるため存在割合が1%以上となる日を設定した。

表9 成熟期の到達日の推定

場所	品種	年次	観察 成熟 期	青米 歩合* (%)	圃場 レベル	有効穂レベル				穎花レベル			
						推定範囲	最頻値	80% 到達日	到達率 (%)	推定範囲	最頻値	80% 到達日	到達率 (%)
盛岡	あきたこまち	1999	9.5		9.5	8.28~9.15	9.6	9.8	100.0	8.25~9.23	9.6	9.9	100.0
		2001	9.12	0.1	9.16	9.6~10.8	9.16	9.18	100.0	9.2~10.25	9.17	9.20	100.0
		2003	10.13	2.3	10.3	9.18~10.25	10.10	10.13	95.9	9.14~10.29	10.11	10.21	88.0
	ひとめぼれ	1999	9.13		9.14	9.4~10.1	9.13	9.16	100.0	8.31~10.13	9.14	9.18	100.0
		2001	9.25	1.3	10.7	9.15~10.25	10.6	10.12	96.8	9.10~10.25	10.8	10.16	91.1
		2003	10.11	8.4	**	10.11~10.29	-	-	0.2	9.27~10.29	-	-	1.2
十和田	むつほまれ	1999	9.13	9.8	9.12	9.6~9.25	9.12	9.14	100.0	9.2~10.3	9.12	9.16	100.0
		2001	9.28	17.0	-	10.3~10.22	-	-	12.9	9.21~10.25	-	-	19.9
		2003	10.3		-	-	-	-	0.0	-	-	-	0.0
八戸	むつほまれ	1999	9.16	12.4	9.11	9.5~9.24	9.11	9.12	100.0	9.1~9.27	9.11	9.14	100.0
		2001	10.5	46.8	10.26	10.1~10.23	-	-	47.7	9.21~10.27	10.23	-	52.6
		2003	10.7		-	-	-	-	-	-	-	-	0.0
青森	むつほまれ	1999	9.12	4.7	9.5	8.29~9.13	9.6	9.6	100.0	8.26~9.20	9.6	9.8	100.0
		2001	9.23	12.4	9.26	9.12~10.14	9.26	9.28	100.0	9.7~10.27	9.26	10.2	100.0
		2003	9.21		-	10.8~10.31	-	-	4.1	9.28~10.29	-	-	8.6

注. *) 東北農業研究センターの1999年の青米歩合、青森県の生育観測圃の2003年の青米歩合は欠測。

***) -は成熟期に到達しなかったとみられる。

表10 感受性I期および感受性II期の冷却量の推定

場所	品種	年次	不稔 歩合* (%)	圃場レベル		株レベル				有効穂レベル			
				感受性I期 の冷却量 (℃・日)	感受性II期 の冷却量 (℃・日)	感受性I期の 冷却量(℃・日) 推定範囲	感受性II期の 冷却量(℃・日) 平均	感受性I期の 冷却量(℃・日) 推定範囲	感受性II期の 冷却量(℃・日) 平均	感受性I期の 冷却量(℃・日) 推定範囲	感受性II期の 冷却量(℃・日) 平均		
盛岡	あきたこまち	1999	3.7	0.0	0.0	0.0~4.1	0.5	0.0~0.0	0.0	0.0~7.4	1.1	0.0~0.0	0.0
		2001	9.9	0.0	0.0	0.0~0.0	0.0	0.0~0.3	0.1	0.0~1.5	0.0	0.0~3.2	0.2
		2003	35.3	10.0	21.3	9.4~13.1	10.8	15.4~24.0	20.5	9.4~23.6	11.8	0.0~25.8	19.4
	ひとめぼれ	1999	2.8	0.0	0.0	0.0~0.0	0.0	0.0~0.0	0.0	0.0~7.4	1.1	0.0~0.0	0.0
		2001	7.4	0.0	2.2	0.0~0.0	0.0	1.4~4.9	2.5	0.0~1.5	0.0	0.0~3.2	0.2
		2003	8.4	16.9	0.0	10.7~23.5	17.9	0.0~1.4	0.0	0.0~23.5	17.8	0.0~16.9	0.3
十和田	むつほまれ	1999	1.1	3.5	0.0	3.5~13.6	4.4	0.0~0.0	0.0	0.0~34.8	5.9	0.0~3.5	0.1
		2001	6.1	9.3	14.3	9.3~9.3	9.3	8.8~16.1	13.7	2.6~9.3	8.9	8.8~16.1	13.5
		2003	62.8	29.3	13.9	5.1~51.3	29.2	9.7~13.9	13.7	0.2~71.1	28.6	1.8~17.6	13.4
八戸	むつほまれ	1999	2.1	3.7	0.0	3.7~10.1	4.1	0.0~0.0	0.0	0.0~33.3	5.6	0.0~3.7	0.0
		2001	12.8	10.0	14.7	9.8~10.6	10.0	9.3~15.7	14.2	2.3~10.6	10.0	7.9~15.7	13.5
		2003	12.7	9.3	13.3	1.5~32.8	11.0	13.3~13.9	13.4	0.0~58.9	11.7	6.2~17.0	13.7
青森	むつほまれ	1999	4.0	0.3	0.0	0.0~6.7	0.9	0.0~0.0	0.0	0.0~22.1	1.8	0.0~0.0	0.0
		2001	7.7	0.3	0.4	0.0~0.9	0.4	0.1~0.4	0.4	0.0~1.1	0.6	0.0~1.1	0.2
		2003	57.1	25.7	6.1	21.8~25.9	24.9	1.6~14.4	6.6	11.2~25.9	24.1	0.6~29.8	7.1

注. *) 青森県の生育観測圃の不稔歩合は1999、2001年は調査データ、2003年は「平成15年東北地域生育調査圃データ集」。

c. 成熟期

東北農研作柄診断圃場と青森県の生育観測圃の圃場、株、有効穂、穎花レベルの成熟期の到達日の推定結果を表9に示す。1999年は東北農研の作柄診断圃場および青森県のいずれの生育観測圃でも圃場内の全ての有効穂、穎花も9月中にほぼ成熟した。ま

た、1999年は穎花の成熟盛期と観察成熟期はほぼ一致した。2001年は盛岡、青森では成熟したが、十和田、八戸では大部分が成熟に達しなかったと推定された。八戸では青米歩合が46.8%と多かった。2003年は出穂が遅れたため、盛岡の「あきたこまち」を除き、いずれの地点でも圃場レベルでは成熟期に到

達しなかったと推定されたが、穂レベル、穎花レベルでみると盛岡の「ひとめぼれ」と青森では一部で成熟に達していたものと推定された。

(2) 冷却量の推定と障害不稔発生の関係

圃場、株、有効穂の各レベルで幼穂形成期、花粉母細胞分化期、花粉内容充実期を推定して算出した感受性Ⅰ期、感受性Ⅱ期の冷却量を表10に示した。これら各レベルの冷却量はそれぞれ分布範囲が異なるが、平均すると株や有効穂の冷却量も圃場レベルの冷却量とほぼ同じであった。

冷害年である2003年の東北農研圃場の冷却量と不稔歩合の関係は、穎花の障害型冷害危険期が7月下旬の冷温時期と重なった「あきたこまち」は圃場の感受性Ⅱ期の冷却量が $21.3^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ となり、不稔歩合は35.3%であった。これに対し「ひとめぼれ」は感受性Ⅰ期の冷却量は $16.9^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ であったが感受性Ⅱ期は $0.0^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ であり、不稔歩合は平年よりやや多い8.4%であった。

青森県の生育観測圃場について冷却量をみると、八戸では2001年と2003年は感受性Ⅰ期と感受性Ⅱ期の冷却量とも同程度であり、不稔歩合も両年で同程度であった。しかし、十和田は圃場レベルの感受性Ⅱ期の冷却量が $13.9^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ と2001年とほぼ同じであるが、不稔歩合は2001年の6.1%に対し、2003年は62.8%であった。株レベルについては2001年と2003年では感受性Ⅰ期の冷却量が2001年の $9.3^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ に対し $29.3^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ と大きくなっていった点と圃場の推定出穂期と観察出穂期の差が2001年では5日に対し、2003年では14日遅れていた点が異なる。2003年に冷温であった時期を考えるとこの推定の遅れは感受性Ⅰ期の冷却量を実際より大きく、感受性Ⅱ期の冷却量を小さく推定していると考えられる。

3) 考察

(1) 発育に内在する変異の定式化

圃場内における発育ステージの変異の定式化は、器官形成の規則性に基づく変異を基本とした。その一つは、種籾の充実度と発芽から育苗段階に生じる発育ステージの差異が個体の葉齢の違いとなり、それが主稈葉齢進度モデルの初期値の違いとし、株の発育ステージを推定する。その二つは、株内においては、主稈が幼穂形成期に入ると分けつもほぼ同時に幼穂形成期に入るが、分けつの次位や葉齢により発育ステージに差異が生じ(後藤・星川 1991)、有効穂間の幼穂形成期を幼穂の発育モデルの初期値

とし、有効穂の発育ステージを推定する。その三は、1穂内でも穎花の分化順序に平行して発育の早晚が生じ(松島・真中 1956)、1穂の穎花の開花日の違いを玄米の発育モデルの初期値とし、穎花の発育ステージを推定する。これにより、圃場内の発育変異を株レベル、有効穂レベル、穎花レベルで推定するモデルとなる。さらに、株内の有効穂の発育変異を加算しなければ圃場内の株の変異を、穂内の穎花の発育変異を加算しなければ圃場内の有効穂の変異を推定することもできる。目的に応じて圃場、株、有効穂、穎花のレベルで発育ステージを推定し、生育監視や被害診断に利用できるものと考えられる。

器官形成以外に考えられる圃場内の変異を拡大する要因としては、1株の植付け本数の違いや圃場における水温や地力の水平分布などがある。1株の植付け本数が増えると1株茎数が初期から増加するため最高分けつ期は早くなり(立野・伊藤 1971)、葉齢進度も遅くなる(山本ら 1994)。また、幼穂形成期、出穂期は早くなる(立野・伊藤 1971)。一方、水田には地力窒素に不均一性があり、その変動性と水稻の窒素吸収量との間には高い相関性がある(樋口ら 1983)ため、葉齢進度、幼穂形成期、出穂期、分けつ出現率に影響する。また、冷水を灌漑すると水温は水口からの距離による同心円を描いて分布する(坪井・本田 1953)ため、水温の影響で生育の差異が拡大する。また、直播においては、田面の高低によっても、草丈や分けつの出現率に影響がある(佐々木ら 2002)。

しかし、植付け本数の違いで生育に大きな差がみられるのは1本植、2本植であり、3本~8本では差が小さい。また、水田の地力窒素の変動係数も10%以下であり(樋口ら 1983)、地力窒素の発現にあわせた施肥により差異は縮小できる。冷水灌漑の影響は灌水チューブの使用など栽培管理をすれば小さくできる。したがって、都道府県の稲作指導指針に則って管理された圃場であれば、圃場内の発育ステージの変異は今回取り扱った器官形成に基づく変異が主なものと考えられる。

(2) 被害診断への利用法

a. 穎花の危険期設定と障害型冷害

穎花の障害型冷害の危険期は、被害診断の対象とその対象が必要とする推定精度のバランスを考慮して危険期の幅の異なる設定を3つ作成した(表6)。危険期が最も厳密で短い設定2は誤差1日程度で個

体レベルを対象とすることを想定し、設定1は誤差2～3日程度で圃場レベル、設定3は誤差3日以上で地域レベルの危険期推定に用いることを考えた。したがって、生育診断圃場における推定には設定1を用いた。しかし、1穎花の危険期間は設定を反映して長くなったが、圃場全体の危険期間は設定3で設定2より1～2日長くなる程度であり、危険期の推定範囲の長さには穎花の危険期間設定よりも圃場内の穎花の発育ステージの変異が大きく影響した。

この手法による障害型冷害の被害診断の可能性を2003年冷害で検討する。東北農研圃場では感受性Ⅱ期の冷却量が $21.3^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ と大きい「あきたこまち」で不稔歩合が35.3%と大きく、感受性Ⅱ期の冷却量が0.0であった「ひとめぼれ」は、不稔歩合は平年よりやや多い8.4%であった(表10)。また、青森県八戸の生育観測圃では、2001年と2003年で同程度の冷却量で同程度の不稔歩合であった。感受性Ⅱ期の冷却量が大きいほど不稔歩合が増加する(内島1976)ため、この不稔発生は感受性Ⅱ期の冷却量の大きさに影響されているとみられ、感受性Ⅱ期の冷却量を用いて不稔歩合を推定でき、障害型冷害の被害程度が推定できることを示唆する。しかし、2003年の青森、十和田では冷却量の大きさと比較して不稔歩合が大きく、感受性Ⅱ期の冷却量のみで説明するのは困難である。これは出穂期の推定誤差のため、感受性Ⅱ期の冷却量が小さく算出された影響もあるが、それに加え感受性Ⅰ期の冷温の影響が考えられ(Satake *et al.* 1989)、感受性Ⅰ期の影響を含め冷却量と不稔発生の関係をモデル化する必要がある。また、圃場内の発育変異に従い、それぞれ冷却量を計算することにより、圃場内の不稔歩合の変異も推定可能となる。2003年の東北農研の「あきたこまち」は圃場レベルでは感受性Ⅰ期の冷却量 $10^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ 以上かつ感受性Ⅱ期の冷却量 $20^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ 以上であったが、同じ冷却量となるのは株レベルでは全体の56.6%、有効穂レベルでは53.2%のみであった。また、八戸の生育観測圃では、2001年と2003年では観察された不稔歩合が同じ程度であるが、観察出穂期から計算した冷却量の変異幅は2001年よりも2003年で大きく、圃場内における不稔発生も2003年でばらつきが大きかったと推察される。

2003年の青森県生育観測圃においては出穂期の推定に大きな誤差が生じたが、東北農研では2003年も推定誤差は-2～4日であった。これは冷害の影響

評価を目的とした東北農研では通常の浅水管理を行ったのに対し、青森県の生育観測圃では冷害対策として深水管理を徹底したため、水温が保持されアメダス気温で追跡した生育と差が開いたためと考えられる。

水稲の生長点は節間伸長の後半までは水面下にあり、気温よりも水温が水稲の発育に影響することは広く知られている(松島ら 1964)が、広域の水温データをリアルタイムで継続的に入手することは困難であり、アメダス地域気象データの平均気温をモデルの入力値として採用して発育予測を行っている。日平均気温と水温には相関関係があるため、気温を用いるモデルでも、間接的に水温を評価して発育予測を行っていることになる。しかし、冷害年には寡照や深水管理によって、平年(通常年)の日平均気温と水温とは異なる関係になるため、水温の評価誤差が発育予測に影響を与えると考えられる。このため発育予測モデルを冷害年に適用するには発育予測誤差の補正法を検討する必要がある。

(2) 遅延型冷害

この手法による成熟期推定を評価すると、1999年の東北農研の「あきたこまち」「ひとめぼれ」、1999年の青森県の3か所で有効穂または穎花の成熟盛期と圃場の観察成熟期はほぼ適合し(表9)、この手法による成熟期推定が可能と考えられる。

そこで、この手法の遅延型冷害による被害推定への適用可能性を出穂期以降に冷温に遭遇した2001年の青森県の生育観測圃で検討すると、青森でも青米がやや増加したが、成熟期に達しない割合が多いと推定される八戸、十和田で、青米が多くなる傾向にあった(表9)。これは、成熟期に達した穎花割合を推定することにより、遅延型冷害による被害推定が可能であることを示す。しかし、未達の割合が八戸より多い十和田で八戸より青米歩合が少ないことは、青米歩合に単位面積当たり稔数など他の要因も影響しているためと考えられる。このため、玄米の発育ステージ別に発育停止した場合の減収程度、収量構成要素の特徴を明らかにしていくなど、この手法で被害推定を行うためにはさらなる検討が必要である。

また、今回のモデルでは成熟期に到達した割合の推定結果は2001年や2003年のように生育が遅延した年には、圃場、株、有効穂、穎花の各レベルで異なってくる。2003年の青森の生育観測圃では、圃場レ

ベルで推定した場合は成熟に達しないと推定されるが、有効穂レベルでは早く出穂した穂、穎花レベルでは早く咲いた穎花は成熟すると推定される。このため、遅延型冷害の被害を推定するには有効穂または穎花レベルのモデルが適していると考えられる。

3. アメダス指標地点の周辺地域における発育ステージの変異の推定

IIにおいて作成したモデルにより、各アメダス指標地点の代表的な品種の発育ステージの進行をリアルタイムで追跡することが可能となった。しかし、アメダス指標地点周辺の市町村や各県の作柄表示地帯においては、農家による移植期や苗質の差、品種の早晚性に基づいて圃場間にも発育ステージの変異が生じている。

従来、地域の発育変異を把握するには開発したモデルを気象メッシュで図化して地域の現状を把握するのが主流である(梅津ら 1993、矢島1994)。多くの場合は図中の全メッシュを同じ初期値とし、複数設定して複数の図を作成するか、各メッシュに初期値を設定することにより地域内の変異を取り入れて図化する必要がある。複数のメッシュ図を基に地域の状況を的確に把握することは判断する人の技能に大きく依存する。一方、各メッシュに適切な初期値を設定するのは、その地域に初期値情報を提供可能な地理情報システム(GIS)が整備されていないと困難である。また、通常使用される気象メッシュは1 kmメッシュであり、圃場の発育変異を考慮するメッシュサイズとしては大きすぎる。

そこで、ここでは障害型冷害や遅延型冷害に対する指標地点近傍の危険度や被害推定に焦点を絞り、各県の農業改良普及センターが調査する市町村および農政局の作柄表示地帯の移植期調査データに基づき、市町村および作柄表示地帯の移植日の頻度分布を設定し、ある移植日となる圃場の存在割合を決定した。これに前節で作成した圃場内変異の推定法(神田ら 2005)と組み合わせて市町村および作柄表示地帯の発育ステージの変異の推定法(以下、地域モデルと称す)を作成した。この推定法の精度を特徴的な気象年次間で比較検討したところ、出穂期と成熟期にみられる変異の特徴を再現できた。

1) 材料と方法

(1) 地域内の移植日分布変異の設定

推定する地域は、各農業改良普及センターが調査する市町村および東北農政局で調査する作柄表示地

帯の2つとし、その地域内の発育ステージの変異の主な発生要因を移植日と苗の葉齢の違いとして前節のイネの発育における器官形成の規則性に基づく圃場内の変異と合成し、移植日から成熟期までの発育の変異を推定することとした。

市町村および作柄表示地帯については、域内にある各アメダス指標地点における発育の変異を推定した。推定対象は冷害に対する危険度の高い太平洋側と低い日本海側を併せもつ青森県とし、作柄表示地帯の青森地帯から青森と蟹田、津軽地帯から五所川原、弘前、黒石、南部・北北地帯より八戸、十和田、三沢を選択した。同じ作柄表示地帯のアメダス指標地点は全て作柄表示地帯の移植日の始期、盛期、終期を用いた。また、作柄表示地帯で使用したアメダス指標地点(青森、蟹田、五所川原、弘前、黒石、八戸、十和田、三沢)については、市町村別の移植日の始期、盛期、終期を用いた。

移植日の頻度分布を移植日の始期、盛期、終期の3つの時期に基づいて、次のように設定した。平均を移植盛期とし、始期から盛期までの期間と盛期から終期までの期間でそれぞれ異なる標準偏差($\sigma_{\text{始期} \sim \text{盛期}}$ 、 $\sigma_{\text{盛期} \sim \text{終期}}$)を定めた。データの95%が含まれる範囲を期間の長さ(暦日)とし、始期を盛期 $-2\sigma_{\text{始期} \sim \text{盛期}}$ 、終期を盛期 $+2\sigma_{\text{盛期} \sim \text{終期}}$ と設定した。例として青森県のアメダス指標地点近傍の移植の進捗状況に基づき作成した十和田の移植日の頻度分布を図10に示す。

苗質は星川(1975)を参考に稚苗3.5葉、中苗4.5葉、成苗5.5葉と区別した。しかし、実際に農家が移植する苗の葉齢は一定でなく、これを中心として変動する。ここでは、各圃場に移植する苗葉齢の分布が正規分布であるとし、また青森県に関しては苗

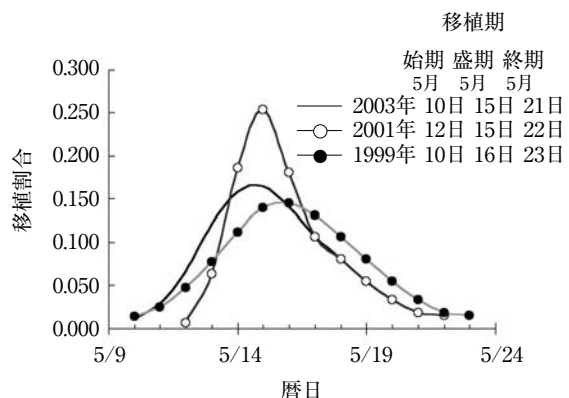


図10 移植期調査より設定した移植日の頻度分布(青森県十和田市)

の葉齢は中苗で4.5葉であるため、各圃場に移植する苗葉齢の分布を4.0～5.0葉と仮定した。

(2) 地域モデルによる発育変異の推定手順

移植日と苗葉齢に圃場内のイネの器官形成の規則性に基づく変異を組み合わせて、地域内の発育変異を有効穂の出穂期と障害型冷害の危険期にある穎花割合や成熟期に達した籾割合を推定するモデルを作成した。圃場内におけるイネの発育に内在する変異は、①移植時個体葉齢変異、②有効穂の幼穂形成期および出穂期の到達日変異、③穎花の開花日変異の3点を取り扱う。また、圃場内の苗葉齢分布と幼穂形成期の分布は正規分布とし、東北農研で行った試験結果を基に苗葉齢は $\sigma=0.3$ の正規分布、幼穂形成期は $\sigma=2$ の正規分布とした。なお、主稈葉齢進捗モデルの主稈総葉数は「むつほまれ」と「つがるロマン」とも基本的には14葉と設定した。また、主稈総葉数は年次間で変動することがあるので、それによる予測精度への影響をみるため、主稈総葉数を13葉、13.2葉、13.5葉、13.8葉についても計算を行った。

推定手順は次のとおりである。すなわち、

- ① 移植日分布と葉齢分布からある移植日にある葉齢の苗を移植する圃場割合を推定する。
- ② 移植日と葉齢の異なる圃場全てについて、圃場内の発育変異モデルを用いて、特定の発育ステージにある割合を推定する。
- ③ 圃場全てについて圃場割合と圃場内の特定の発育ステージの存在割合を合成し、地域内の特定の発育ステージにある割合を推定する。

このモデルを用いて各年次の有効穂、穎花単位の主な発育ステージとその変異を推定した。穎花については前節の設定に基づき、穎花の発育ステージが一般に障害不稔の発生危険期とされる花粉母細胞分裂初期～花粉母細胞4分子期と推定される期間を穎花の危険期とした。有効穂については推定した幼穂形成期、花粉母細胞分化期、花粉内容充実期に基づき感受性Ⅰ期と感受性Ⅱ期の日平均気温20℃以下の冷却量をそれぞれ算出した。

なお、出穂日の始期、盛期、終期は実際の判定にあわせ、出穂期と推定される圃場の存在割合が5%、50%、95%を超えた日とした。開花期、成熟期などその他の発育ステージについても同様とした。

(3) 特徴的な気象年次における推定精度の検証
高温年であった1999年、開花期前後が冷温となった2001年、冷害年であった2003年のデータで地域モ

デルによる推定精度を検証する。検証データには農林水産統計(1999、2001、2003)から県別、作柄表示地帯別の「移植日」、「出穂日」、「刈取日」を用い、さらに青森県提供の市町村別「移植日」、「出穂日」、「刈取日」を用いた。なお、この節での成熟期はモデルで籾の成熟割合が80%に達した日と定義した。これに対し、刈取日は成熟期後に天候なども含む総合的な農家の経営的判断で決定される期日であり、成熟期とは意味を異にする。

検証に使用した各年次の気象を概括すると、1999年の夏の天候はオホーツク海高気圧の発生は一時的で東北地方は晴れて気温の高い日が多かった。2001年は、7月中旬から8月にかけてオホーツク海高気圧が発達し、東北地方は太平洋側を中心に7月中旬から8月中旬に冷温・寡照、8月下旬の冷温、また9月22、23日に極端な冷温となった。2003年は6月下旬から7月はオホーツク海高気圧が優勢となり、顕著な冷温・寡照となった。8月も断続的に冷温・寡照の状態が続いた。

2) 結果

(1) 出穂期および成熟期の推定

アメダス指標地点および作柄表示地帯の出穂期と穎花の開花期間を推定した。推定出穂期とアメダス指標地点別の出穂期との誤差平均は、1999年は、青森、八戸、三沢、十和田で2日以内、津軽の五所川原、弘前、黒石の誤差平均は3.1～3.7日であった。2001年は誤差がやや大きくなり、青森、八戸、三沢、十和田では1.6～4.8日、津軽の五所川原、弘前、黒石では3.3～5.7日であった。2003年の各地点の誤差平均は青森では2.9日だが、八戸、三沢、十和田は9.9～12.6日と大きくなったが、津軽の五所川原、弘前、黒石では0.6～4.1日であった。全地点の誤差平均についてみると1999年は2.4日、2001年は4.1日、2003年は7.8日であった。

作柄表示地帯別の出穂期の推定結果を表11に示す。市町村別に比較して、出穂期間は長くなるが、各年次の出穂時期の変動傾向はアメダス指標地点別の結果と同じ傾向であった。推定出穂期を作柄表示地帯別の出穂期と比較すると、1999年は南部・下北地帯の誤差は0～3日、誤差平均で1.8日、津軽地帯の誤差平均は4.0日であった。2001年は南部・下北地帯で1.7日、津軽地帯で5.1日であった。2003年は南部・下北地帯で10.9日、津軽地帯で1.3日であった。1999年は誤差が小さく、誤差平均は2.8日あり、

表11 地帯別の有効穂の出穂期の推定結果

年次	作柄表示地帯	推定値			誤差				
		有効穂の出穂期			出穂期			出穂期 平均	
		始期(5%)	盛期(50%)	終期(95%)	始期	盛期	終期		
1999年	青森県	7月29日	8月 2日	8月 6日	3	3	2	2.7	
	青森地帯	7月31日	8月 2日	8月 9日	2	3	-1	2.2	
	津軽地帯	7月28日	7月31日	8月 3日	4	4	4	4.0	
	南部・下北地帯	8月 2日	8月 4日	8月 6日	-1	0	3	1.8	
2001年	青森県	7月30日	8月 7日	8月17日	5	2	-2	3.3	
	青森地帯	8月 4日	8月 8日	8月19日	3	4	-4	3.7	
	津軽地帯	7月28日	8月 3日	8月 8日	6	4	5	5.1	
	南部・下北地帯	8月 8日	8月15日	8月19日	-2	-2	-1	1.7	
2003年	青森県	8月 8日	8月17日	8月31日	-2	-4	-8	5.3	
	青森地帯	8月15日	8月19日	9月 2日	-3	-1	-7	4.4	
	津軽地帯	8月 8日	8月12日	8月16日	-2	-1	0	1.3	
	南部・下北地帯	8月24日	8月27日	9月 2日	-13	-11	-8	10.9	
				1999年	2.7	2.9	2.7	2.8	
				誤差平均	2001年	4.3	3.2	3.4	3.7
					2003年	6.8	5.9	6.7	6.5
				3年	4.9	4.2	4.6	4.6	

注. 誤差は (実測値 - 予測値)。

誤差平均 = $\sqrt{\sum (\text{実測値} - \text{予測値})^2 / n}$ (n は地帯数)。

表12 地帯別の穎花の危険期と有効穂の推定冷却量

年次	作柄表示地帯	推定値			冷却量			
		穎花の危険期			前歴期間		危険期間	
		始期(5%)	盛期(50%)	終期(95%)	平均		平均	
1999年	青森県	7月20日	7月26日	7月31日	0.0~62.7	13.6	0.0~12.7	0.1
	青森地帯	7月23日	7月27日	8月 1日	0.0~30.8	4.4	0.0~3.5	0.0
	津軽地帯	7月19日	7月23日	7月27日	0.0~27.0	11.2	0.0~12.7	0.2
	南部・下北地帯	7月25日	7月28日	8月 1日	0.0~62.7	19.0	0.0~8.0	0.2
2001年	青森県	7月20日	7月29日	8月 7日	0.0~27.0	5.5	0.0~18.7	6.3
	青森地帯	7月24日	7月29日	8月 8日	0.0~14.3	1.5	0.0~10.6	0.8
	津軽地帯	7月18日	7月24日	7月30日	0.0~17.2	1.6	0.0~2.3	0.5
	南部・下北地帯	7月26日	8月 1日	8月 8日	2.3~27.0	11.1	6.5~18.7	13.7
2003年	青森県	7月28日	8月10日	8月21日	0.0~94.5	36.0	0.0~46.9	11.8
	青森地帯	8月 3日	8月 8日	8月21日	1.0~69.5	29.4	0.0~35.1	5.8
	津軽地帯	7月26日	8月 2日	8月 7日	8.6~55.0	23.9	0.0~36.9	12.3
	南部・下北地帯	8月10日	8月15日	8月22日	0.0~94.5	49.8	0.2~46.9	13.4

2001年は誤差がやや大きく、平均で3.7日となった。
2003年は6.5日遅くなった。

アメダス指標地点および作柄表示地帯の有効穂の成熟期および成熟期に達した割合を推定した。1999年の成熟期に達した割合の分布は、成熟始期~終期は八戸では9月7日~15日、三沢では9月8日~19日、十和田では9月8日~18日であった。五所川原および弘前では8月29日~9月7日、黒石では9月1日~10日であった。2001年は三沢では成熟

始期に到達せず、八戸では10月14日、十和田で10月11日に成熟始期に到達したが、盛期、終期には到達しなかった。五所川原では成熟始期~終期は9月12日~10月2日、弘前では9月11日~28日、黒石では9月16日~10月10日であった。2003年は八戸、三沢、十和田で成熟始期に達しなかった。五所川原では10月11日、弘前では9月30日、黒石では10月23日であったが、いずれの地点でも成熟終期には到達しなかった。

(2) 冷温障害の危険期と冷却量の推定

アメダス指標地点と作柄地帯別の穎花の危険期と有効穂の推定冷却量を推定した。穎花の危険期は障害不稔の発生危険期にある穎花が地域内に存在する期間を示し、有効穂の推定冷却量は暦日別の地域内の有効穂の発育ステージの存在割合を基に、有効穂の感受性Ⅰ期、感受性Ⅱ期の冷却量を推定したものを示す。

穎花の危険期について、作柄表示地帯およびアメダス指標地点の年次の特徴を概観すると、1999年は南部・下北地帯では7月25日～8月1日、津軽地帯では7月19日～27日であった(表12)。2001年は南部・下北地帯、八戸、三沢、十和田では1999年に比べてやや遅く、津軽地帯、五所川原、弘前、黒石ではほぼ同じであった。2003年はいずれの地帯、地点ともこの3年で最も遅かった。これは有効穂の発育ステージが感受性Ⅱ期にある期間よりやや変異幅が小さいが時期はほぼ同じであった。

有効穂の冷却量の変異の幅について同様にみると、感受性Ⅱ期の冷却量は、1999年は各地帯、地点ともほぼゼロであった(表12)。2001年は南部・下北地帯と八戸、三沢、十和田では10℃・日以上であったが、津軽地帯、五所川原、弘前、黒石ではほぼゼロであった。2003年は南部・下北地帯、津軽地帯およびそこに属する地点で10℃・日以上となった。次に感受性Ⅰ期の冷却量については、1999年は南部・下北地帯では19.0℃・日、十和田で20.3℃・日と大きく、青森地帯および青森、蟹田では小さかったが、その他の地帯、地点は10℃・日前後であった。2001年は南部・下北地帯および八戸、三沢、十和田で10℃・日前後であったが、津軽地帯および五所川原、弘前、黒石で0.3～2.1℃・日と小さかった。2003年は全般に大きく南部・下北地帯で49.8℃・日、十和田で53.8℃・日、津軽地帯でも23.9℃・日、黒石で28.0℃・日であった。

3) 考察

地域の発育の変異は、移植期の調査データに基づく地域の移植日の幅と、移植する苗の葉齢変異を基本とした。この移植時に決定される地域内の圃場割合に、前節で作成した圃場内におけるイネの器官形成の規則性に基づく発育ステージの変異を組み合わせ、有効穂および穎花単位で障害型冷害の危険期を推定し、有効穂の成熟期および成熟期に達した割合で遅延型冷害を判定している。

推定出穂期についてみると、アメダス指標地点では1999年、2001年は青森県提供の市町村別出穂データ並びに作柄表示地帯は農政局発表の出穂期とほぼ同じであったが、2003年では津軽地帯は誤差が1.3日に対し、南部・下北地帯では10.9日、八戸で12.6日、三沢で9.9日、十和田で10.0日遅くなった。これは、前節でも論じたように冷害回避のため深水管理で水温を高く保ったため、気温での推定よりも幼穂の発育が早まり、出穂期が早くなったものと推察される。

出穂誤差については、主稈総葉数の年次変化も考慮する必要がある。ここでは主稈総葉数を14葉としているが、例えば十和田の2003年の主稈総葉数を13葉まで段階的に減少させると、14葉の10.0日から徐々に減少し、13葉で出穂期間の誤差平均は1.4日となった(図11、表13)。つまり、2003年のような冷害年にはこれらの地域では総葉数が減少することもあると考えれば、精度は向上する。しかし、青森県十和田の生育観測圃の「むつほまれ」の主稈総葉数は1999年が13.0葉、2001年は12.9葉、2003年は13.2葉と、生育観測圃では実際には総葉数の減少はみられなかった。なお、青森など青森県の他の生育観測圃の「むつほまれ」の主稈総葉数の実測値も13

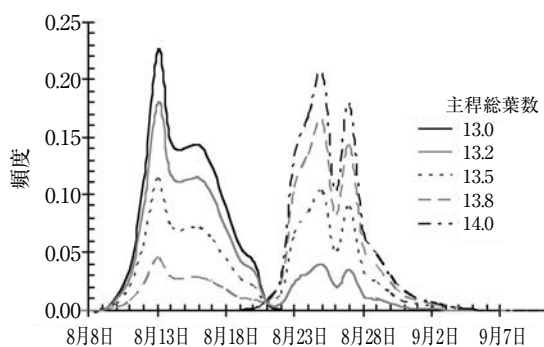


図11 主稈総葉数の違いによる推定出穂分布 (青森県十和田市：2003年)

表13 主稈総葉数の違いによる推定出穂分布 (青森県十和田市：2003年)

主稈総葉数	出穂始期	出穂盛期	出穂終期	誤差
13.0	8月11日	8月14日	8月19日	1.4
13.2	8月12日	8月16日	8月27日	3.5
13.5	8月12日	8月21日	8月29日	5.8
13.8	8月13日	8月25日	8月30日	7.8
14.0	8月23日	8月25日	8月30日	10.0
実測値	8月12日	8月15日	8月21日	

葉に近いが、ここでは、主稈葉齢進度モデルのパラメータを決定した東北農研の実測値から14葉を使用している。主稈総葉数の冷温による増減については、減少とする寺尾ら(1942)、薦田(1949)と、増加とする近藤(1952)の両方の報告がある。細井(1976)は、早生種は低温で増加し、晩生種は減少するとしている。Sato and Takahashi(1983)は、冷気温は葉数を増加させ、冷水温は減少させること、そして品種によりその反応性が異なることを報告している。このように、冷害年の主稈総葉数の増減については品種の早晩性などの特性が関与しているため、一定の傾向はみられないものと考えられる。

また、障害型冷害についてみると、1999年は作柄地帯別の感受性Ⅱ期の冷却量は $0.0\sim 0.2^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ であり、東北農政局発表の作況指数は100~105と不稔発生は平年並みとみられた。2001年は津軽地帯では危険の冷却量が $1.6^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ だが、南部・下北地帯で $13.7^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ と大きく、作況指数も津軽地帯は103、南部・下北地帯は92であった。これは青森県生育観測圃の不稔歩合が八戸で12.6%、十和田で6.1%、三沢で5.1%であることからみて八戸を中心に不稔が発生したことが減収の一因と考えられる。2003年は出穂が遅れたため、感受性Ⅱ期の冷却量は南部・下北地帯で $13.4^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ 、津軽地帯で $12.3^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ 、青森地帯で $5.8^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ であったが、感受性Ⅰ期の冷却量が $49.8^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ であった南部・下北地帯で東北農政局発表の不稔歩合は49%、 $29.4^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ の青森地帯で26%、 $23.9^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ の津軽地帯で16%であり、推定された冷却量の大きさと不稔発生には一定の関係がみられた。

成熟期に達した割合の推定結果についてみると、1999年は全アメダス指標地点、全作柄表示地帯で9月中旬に成熟終期に到達したが、2001年は津軽地帯では10月上旬までに成熟終期に到達したが、南部・下北地帯では成熟終期まで到達しなかった。このときの南部・下北地帯の作況指数は92であり、不稔発生とともに登熟不良が減収の一因と思われる。2003年には津軽地帯、南部・下北地帯とも到達しなかった。このときの津軽地帯の作況指数は71であり、不稔歩合が16%にとどまったことから、登熟不良も大きな減収要因と考えられる。2003年の青森県では、8月中・下旬の最低気温が 15°C 以下の強い低温に加え、9月下旬の最低気温 10°C となる日の出現など、登熟期間全般の気温は平年より1日当たり 2°C 程度下回ったことなどにより登熟が不良となったと

されている(農林水産統計 2003)。さらに、津軽地帯では 2.1mm 以上の玄米の重量比が直近の3年平均より18.7%減少し、 $1.9\text{mm}\sim 2.0\text{mm}$ の玄米が15.3%増加するという玄米の充実低下も報告している。このように地域の発育変異の推定を基に、有効穂の冷却量や成熟期到達割合を推定することにより、被害診断を行うことが可能となる。

アメダス指標地点および作柄表示地帯の発育変異を推定するときに、圃場内の発育変異を計算する方法と計算しない方法でも出穂期や成熟期などの発育ステージ盛期はほぼ同じとなった。しかし、アメダス指標地点の発育変異の推定においては、圃場内の発育変異も計算した推定が圃場内の変異を計算しない推定結果よりも発育ステージの変異の幅が大きくなった。このため、圃場内の発育変異を含めた本手法による冷却量、成熟期に達した割合の推定結果が2003年のような冷害年の被害評価に適用できると考えられる。しかし、アメダス指標地点の発育変異を作柄表示地帯別にまとめると、圃場内の株、有効穂、穎花の発育変異まで計算した結果も圃場内の変異を計算しない推定結果に近かった。これは、作柄表示地帯別の発育変異には地域間の気象、移植期の差が発育変異に与える影響が大きいためと考えられ、作柄表示地帯別のように大きな単位で発育や被害推定を行う際は圃場内の発育変異を考慮する必要は少ないといえる。

地域内で移植時変異に比べて、感受性Ⅱ期や出穂期の変異がやや小さいが、これは移植期の日平均気温は感受性Ⅱ期や出穂期のものと比較して低く、1日あたりの発育進度が小さいためである。実際には、地域内に早晩性の異なる品種が存在し、推定よりも変異が大きくなる。これについては品種の栽培面積割合を初期値に設定して計算することは可能であり、今後改善の余地がある。

早期警戒システムの目的は地域の冷害被害をリアルタイムに評価することであるため、地域内の発育ステージ割合を推定する本手法が有効である。水稲冷害早期警戒システムは農政局・県との連携で運営されているため、2003年冷害時のようにこの手法による地域の発育変異の予測が大きく外れた時は、農政局・県からの情報に基づき、幼穂形成期、出穂期などモデルを展開する各段階で修正を加えれば、より適正な評価が可能となる。

Ⅳ 気象情報と発育予測モデルに基づく水稲冷温被害の予測

1. 緒言

水稲の冷温被害はその発育ステージ別に被害の発生機作が異なる。そのため、気象経過と水稲の生育を監視し、幼穂形成期、減数分裂期、出穂・開花期、そして登熟過程の生育時期別の被害程度を診断することが求められている。なかでも、障害型冷害における不稔籾の発生と遅延型冷害における未成熟籾の発生の診断はとくに重要である。

障害型冷害の被害推定は、不稔歩合の推定がポイントとなる。減数分裂期の冷温による不稔発生が大きな要因となるが、開花期や幼穂形成期の冷温でも不稔が発生する(野口 1931、寺尾ら 1940a)。単独では不稔を引き起こさない程度の幼穂形成期の冷温と減数分裂期の冷温による不稔発生の相乗効果(Satake *et al.* 1989)、穂ばらみ期と開花期の冷温の相乗効果(浪岡 1993)があるとされている。このため、幼穂形成期、減数分裂期と出穂・開花期の冷温を被害診断でどのように評価するかが重要となる。

遅延型冷害の被害推定は、基本的な考えとしては、穎花一つ一つが独立に成熟に向かうと仮定すると、成熟に到達する前に冷温で玄米の発育が停止した穎花の玄米重量も含めた個々の玄米の総重量を積算し、減収率を評価することになる。しかし、このためには、単位面積当たりの籾数などの気温以外の要因で影響を受ける要素も考慮しなければならない。また、開花の早い上位枝梗の先端穎花から登熟を開始し、下部枝梗の二次枝梗穎花との成熟期の差は約20日程度といわれている(長戸 1941)。このため、現場圃場での遅延型冷害の被害推定を目的とすると、秋冷による発育停止または収穫までに各穎花の発育ステージがどこまで進んだかを基に減収率を推定する必要がある。

この章では、Ⅱ、Ⅲで開発した発育予測モデルを用いて作成した現場に適用できる障害型冷害および遅延型冷害の被害推定モデルについて記述する。

2. ノンパラメトリック回帰モデルによる不稔歩合の推定

障害型冷害の不稔歩合については、出穂前後日数で設定した時期の気温または水温と不稔歩合の関係を求める重回帰モデルが作成されてきた(田中ら 1987)。また、内島(1976)は減数分裂期に日平均

気温が20℃以下になった偏差を積算した冷却量を導入して不稔歩合を推定している。被害解析には出穂前日数で減数分裂期前後の冷却量と不稔歩合との回帰式が作成されてきた(高橋 2004)。これらは、障害型冷害の危険期である減数分裂期を評価しているが、気象条件により変化する出穂前日数で危険期が設定されており、また幼穂形成期や出穂・開花期については考慮されていない。これに対し危険期に穂の発育ステージを用いた手法は、1988年冷害における宮城県の「ササニシキ」と不稔歩合と近傍アメダス気温から、DVIごとの冷温感受性の関数をシンプレックス法で導き、あるDVIの冷却量と冷温感受性を積算の和から不稔歩合を推定する手法を作成した報告しかない(矢島 1994)。しかし、出芽期を0、出穂期を1とするDVIで、幼穂形成期をおよそ0.72、減数分裂期を0.88、開花期を1.07とする発育速度(DVI)に依存する低温感受性は、ササニシキよりも早生や晩生の品種では発育ステージと低温感受性の関係にずれが生じること、ササニシキと異なる耐冷性の品種を考慮していないことが問題として残る。

DVIによる冷温感受性以外の手法で幼穂の発育ステージによる冷温感受性の違いを扱うには、幼穂の発育期間を短く分割し、その期間の冷却量を説明変数として不稔発生との関係をモデル化する必要がある。発育期間を短く分割することで説明変数の数が多くなるが、各発育ステージの冷却量に順序関係が存在し、説明変数の間には強い多重共線性が存在する。多重共線性の問題を解決した上で、順序関係も考慮する方法としてノンパラメトリック回帰による解析法がある。ノンパラメトリック回帰手法は時系列や空間系列データの平滑化に使用され、時間軸や空間軸に対して滑らかな変動を表現できる。この節では、発育ステージによる冷温感受性の違いをあらかじめ設定せずに、短期間の発育ステージの冷却量を説明変数とし、ノンパラメトリック回帰により発育に伴う連続した冷温感受性の変化を求め、それを組み入れた障害不稔歩合推定モデルを作成する。

1) 材料と方法

(1) 使用するデータセット

a. 恒温深水処理試験

供試品種として「あきたこまち」(耐冷性：中)、「ササニシキ」(耐冷性：やや弱)、「ひとめぼれ」(耐冷性：極強)を用い、1999年から2003年に1/5000aのワグネルポットに1本植し、網室で栽培

した。恒温深水処理として、ハウス内の水槽(1.0×1.0×0.6m)にはほぼ一定の水温(19℃、21℃、23.5℃)となるように調整し、ポット土壌面から25cm以上になるように水深を調節した。水槽は各水温区3つ設置した。2003年のみは水温18~22℃、1℃刻みで5段階の処理を行い、18~21℃の水槽は各2、22℃の水槽を1つ設置した。処理期間は1999年、2000年は幼穂形成期(幼穂長2mm)から減数分裂期、減数分裂期から出穂始めならびに幼穂形成期から出穂始めまでの3期間、2001年から2003年は穂首分化期から減数分裂期、減数分裂期から出穂始めならびに穂首分化期から出穂始めまでの3期間とした。各処理区につき、水槽に3ポット入れ、ポットごと水稻を冷却し不稔を発生させ、各ポット5本の穂の出穂日と不稔歩合を調査した。

b. 東北農研生育作柄診断圃場

第2章の方法で栽培している東北農研の生育作柄診断圃場のデータを用いた。2003年度は「かけはし」、「ゆめあかり」、「むつほまれ」、「つがるロマン」、「あきたこまち」、「めんこいな」、「まなむすめ」、「ひとめぼれ」、「ササニシキ」、「はえぬき」、「こいむすび」、「コシヒカリ」の12品種を供試した。移植は5月14日に行い、幼穂形成期と出穂期の暦日を調査した。不稔歩合の調査は、60株から平均的な茎数の5株を刈取り全ての穂について行った。また、圃場に温度計を設置し30分ごとに水温を計測した。

また、成熟期に青森県、岩手県、宮城県、山形県のモニター農家29圃場で、各圃場から3カ所、1カ所あたり連続する10株を採取した。10株からそれぞれ平均的な穂長の穂を20本選択し、不稔歩合を調査した。

c. 東北地域水稻安定生産推進連絡協議会データ集

東北地域水稻安定生産推進連絡協議会が2003年の東北6県の生育調査圃場のデータを取りまとめた「2003年東北地域水稻生育調査圃データ集」より、「つがるロマン」、「ゆめあかり」、「むつほまれ」、「あきたこまち」、「ひとめぼれ」、「ササニシキ」栽培圃場のデータ(緯度・経度、出穂日、不稔歩合)を抽出した。各品種のデータ数は、「つがるロマン」青森県14圃場、「ゆめあかり」青森県26圃場、「むつほまれ」青森県24圃場、「あきたこまち」は岩手県16圃場、秋田県58圃場、山形県6圃場、「ひとめぼれ」は岩手県12圃場、秋田県5圃場、宮城県18圃場、山形県1圃場、「ササニシキ」は岩手県2圃場、秋

田県2圃場、宮城県12圃場、山形県1圃場となった。日別平均気温は早期警戒システムで運用しているメッシュ気温データから圃場の緯度・経度で検索した。

(2) 使用したモデル

不稔歩合の推定には、隣り合う偏回帰係数 β の値は大きく異ならないという制限付きのノンパラメトリック回帰モデル(式1、式2)を用いた(三輪ら1998)。冷温感受性を求める発育ステージは幼穂の発育モデルによる幼穂形成期から出穂期とするが、幼穂形成期および出穂期前後の冷温感受性も推定するために、幼穂形成期前および出穂期後の40℃・日についても対象に含めた。幼穂形成期の40℃・日前はほぼ幼穂長1mm程度の時期に相当する。冷却量(Q)を求める ΣT_{10} の刻み幅については、冷温感受性を滑らかに求めるために予備解析の結果を基に5℃・日とした。この期間のQを日平均温度(深水処理中は水温、処理前後については気温)と冷却量算出の基準温度(T_0)を用いて算出した。

$$\hat{y} = \beta_0 + \sum_{j=1}^j \beta_j t_j \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 + \lambda \sum_{j=1}^{j-1} (\beta_{j+1} - \beta_j)^2 \rightarrow \text{最小化} \quad (2)$$

目的変数は不稔歩合、説明変数は幼穂形成期の40℃・日前から出穂期の40℃・日後までの発育相を ΣT_{10} 刻みに分割したときの各発育ステージ、すなわち(j-1)×5℃・日後からj×5℃・日後までの期間のQ値、 β_j は同様に各発育ステージのQの相対的効果をあらわす(式1)。重回帰モデルは実測値 y_i と推定値 \hat{y}_i との差が最小になるように β を決めるが、ノンパラメトリック回帰モデルでは隣り合う β の変化が滑らかであるという制限を設ける(式2)。 λ は平滑化に関する係数で β の連続性の程度を制御する。 λ と T_0 はクロスバリデーション(データを1つずつ除外し作成した回帰式で除外したデータを予測し、その予測誤差の平方和を求める検証法)で決定する。なお、 β はこれらの式を解くことで求められ、逆行列、転置行列が計算可能なソフトウェアで容易に計算できる。

恒温深水処理試験のデータを用いて、水温に対する冷温感受性をあらわすパラメータ(以下、水温感受性パラメータと称す)を、また東北地域水稻安定生産推進連絡協議会データを用いて気温に対する冷温感受性をあらわすパラメータ(以下、気温感受性パラメータと称す)を決定した。

2) 結果

(1) 水温感受性パラメータによる不稔歩合の推定

1999年から2003年までの恒温深水処理の「あきたこまち」の調査穂の穂単位の不稔歩合を目的変数に、幼穂の発育ステージに対する冷却量を説明変数とするノンパラメトリック回帰モデルのパラメータを求めた(図12)。2001年から2003年は年によってやや異なるが、「あきたこまち」のパラメータは幼穂形成期と減数分裂期にピークを示した。2003年は冷害年で水槽での恒温深水処理に加え、気温による冷温が影響し、パラメータの値が全体に小さくなった。1999年は処理開始が遅かったため、減数分裂期のみピークを持ち、2000年は高温多照であったため、はっきりとしたピークを示さなかった。そこで、2002年が「あきたこまち」の冷温感受性を最も良く表現しているものと判断した。

「ササニシキ」、「ひとめぼれ」についてもそれぞれパラメータを求めたところ、「あきたこまち」のパラメータとは形やピークの位置が異なる部分もあったが、発育ステージ別の感受性および年次についてほぼ同様の傾向であった。そこで、2002年の「あきたこまち」の恒温深水処理により作成した発育ステージ別の冷温感受性(水温感受性パラメータ)はイネの基本的特性と考え、他の年次や他の品種にも適用することとした。なお、算出された冷却量の基準温度は、「あきたこまち」は20.5℃、「ササニシキ」は21℃、「ひとめぼれ」は19.5℃となり、耐冷性の程度で異なった。

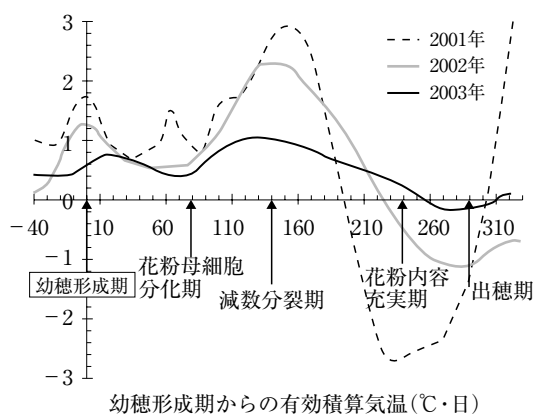


図12 ノンパラメトリック回帰の水温パラメータ
幼穂の発育ステージは茎単位の場合。
(品種:あきたこまち)

この水温感受性パラメータで2002年の「あきたこまち」のポット単位の平均不稔歩合を推定すると、寄与率は96.6%であった。次に、このパラメータを用いて他年度も含めた「あきたこまち」の水槽単位の平均不稔歩合を推定した(図13(a))。高温多照年であった2000年の冷温処理区では不稔歩合の変動よりも推定誤差の変動が大きく、意味のある推定とはならなかった。そこで、2000年を除く4年間の重相関係数Rを求めると0.878で、寄与率77.2%と外気温や日射量の異なる条件を考慮すると比較的高い精度であった。このパラメータを「ササニシキ」「ひとめぼれ」にも適用して、水槽単位の不稔歩合を推

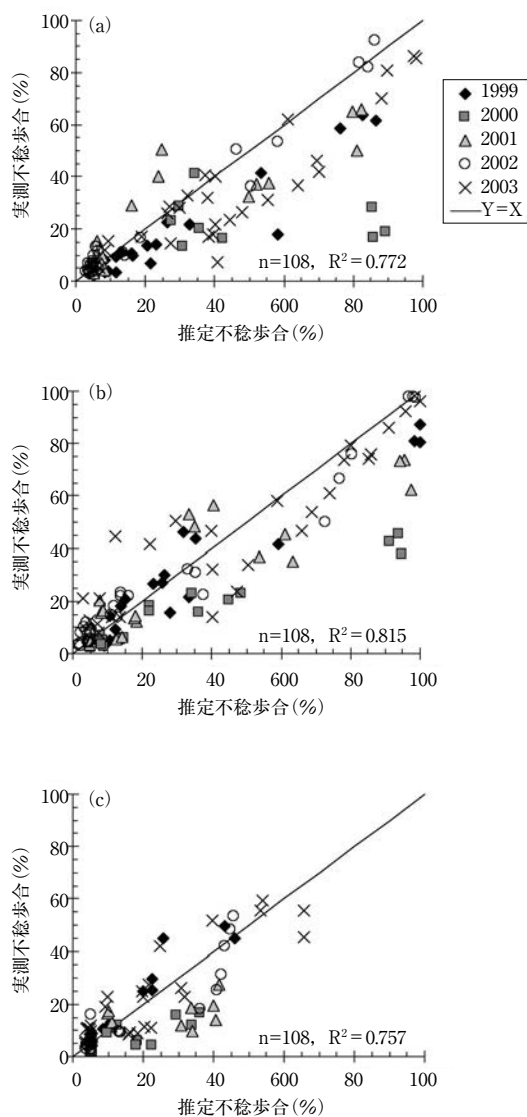


図13 ポットパラメータによる推定不稔歩合と実測値の散布図
(a)あきたこまち、(b)ササニシキ、(c)ひとめぼれ
寄与率の計算には2000年のデータを除く。

定すると、「ササニシキ」は $R^2=0.815$ 、「ひとめぼれ」は $R^2=0.757$ であった (図13 (b) (c))。

水温感受性パラメータを水深 5 cm程度で慣行栽培された東北農研生育作柄診断圃で2003年に発生した障害不稔に対して適用した。12品種の冷却量の基準温度は、「あきたこまち (耐冷性：中)」20.5℃、「ササニシキ (耐冷性：やや弱)」21℃、「ひとめぼれ (耐冷性：極強)」19.5℃に基づき、耐冷性極強の「まなむすめ」、「ひとめぼれ」、「はえぬき」、「こいむすび」、「コシヒカリ」で19.5℃、耐冷性強とやや強の「かけはし」、「ゆめあかり」、「つがるロマン」で20℃、耐冷性中の「むつほまれ」、「あきたこまち」、「めんこいな」で20.5℃、耐冷性やや弱「ササニシキ」で21℃にそれぞれ設定し、幼穂が水中にある幼穂形成期前後 (幼穂形成期からの有効積算気温で35℃・日までで、ほぼ穎花始原体分化後期に相当) は測定水温を用い、その後気温を用いて冷却量を算出した。この冷却量と水温感受性パラメータから生育作柄診断圃場での不稔歩合を推定すると、耐冷性の異なる品種の不稔歩合が比較的精度高く推定でき、 $R^2=0.827$ であった (図14)。また、同じ耐冷性が中の「むつほまれ」、「あきたこまち」、「めんこいな」は、出穂日が8月5日、10日、12日と異なり冷温への遭遇の仕方がそれぞれ異なったが、不稔歩合を適正に推定できた。

(2) 気温感受性パラメータによる不稔歩合の推定

次に、東北 6 県の生育調査圃場で2003年に発生した障害不稔に対して、ノンパラメトリック回帰を適用した。東北農研生育作柄診断圃場と同様に品種の

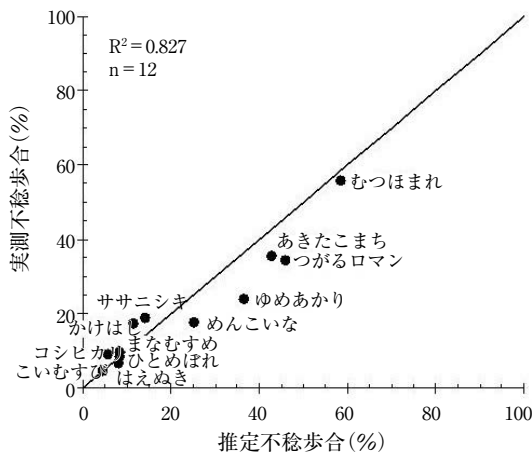


図14 生育作柄診断圃場の推定結果 (2003年) 水温感受性パラメータを使用。

耐冷性に応じて冷却度の基準温度を設定した。水温データが使用できないため、圃場の気温データを基にこれら品種について10℃以上の有効積算気温で出穂期前350℃・日～出穂期後40℃・日の期間の5℃・日刻みの冷却量を算出し、不稔歩合との関係より全品種で一つのノンパラメトリック回帰による障害不稔歩合推定モデルのパラメータ (気温感受性パラメータ) を算出した。

2003年冷害における現場データによるノンパラメトリック回帰による障害不稔歩合推定モデルの気温感受性パラメータを図15に示す。幼穂形成期および減数分裂期に特徴的な不稔発生への影響のピークが存在した。また、出穂期の直前であるものの出穂・

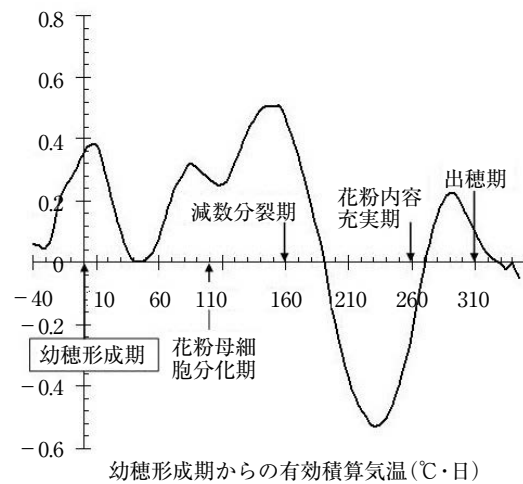


図15 ノンパラメトリック回帰による気温感受性パラメータ 幼穂の発育ステージは圃場単位の場合。

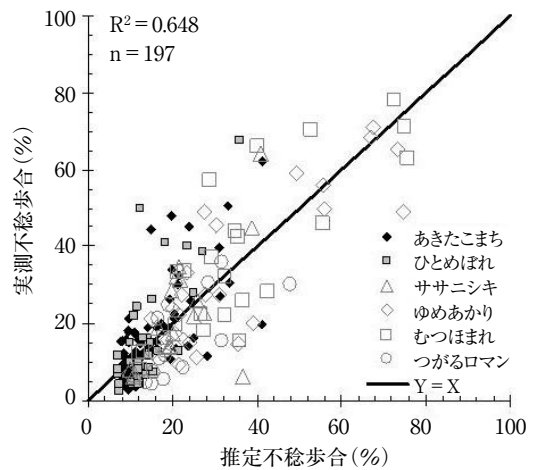


図16 気温感受性パラメータによる推定不稔歩合と実測値の関係

開花期にもピークが認められた。これは水温感受性パラメータでは実験の性格上みられなかった出穂・開花期の不稔発生への影響を示すものと考えられた。このように気温感受性パラメータの特徴は既存の障害不稔発生現象に関する知見と一致した。気温感受性パラメータを用いた推定不稔歩合と実測不稔歩合を図16に示す。気温感受性パラメータを算出した現地圃場データに適用しても精度は悪く、 $R^2=0.648$ であった。この気温感受性パラメータをモニター農家圃場の不稔発生に適用すると $R^2=0.730$ と精度はやや高かった。

3) 考察

(1) ノンパラメトリック回帰モデル

ノンパラメトリック回帰を冷温により発生した障害不稔歩合へ適用すると、求めた回帰係数 β はイネの発育ステージ別の冷温感受性を滑らかに表現できる。水温感受性パラメータは幼穂形成期と減数分裂期にピークをもち(図12)、気温感受性パラメータはさらに出穂期の冷温感受性も示した(図15)。これらは障害型冷害に感受性のある発育ステージと一致する(柿崎・木戸 1938、福家・近藤 1939、寺尾ら 1940a、寺尾ら 1940b、Hayase *et al.* 1969)。このため、水温感受性パラメータおよび気温感受性パラメータは他年度および他品種または他圃場への適用が可能であった。

しかし、ノンパラメトリック回帰は発育ステージ別の冷温の不稔発生に対する効果を重み付けし相加するものであり、前歴期間の冷温による減数分裂期の不稔発生への相乗効果(Satake *et al.* 1989)、穂ばらみ期と開花期の冷温の相乗効果(浪岡 1993)は十分評価できない。障害不稔歩合の推定モデルにおける相乗効果の扱いについては、今後の課題である。

冷温遭遇時には発育が緩慢となり、圃場内の発育変異が拡大し、幼穂形成期や出穂期の判定に誤差が生じやすくなるため、ノンパラメトリック回帰では発育ステージの判定誤差による影響が大きくなることも考えられた。しかし、2003年冷害では、東北6県生育観測圃、モニター農家圃場ともノンパラメトリック回帰の推定精度は高かった。このように現地圃場においても、冷温被害の推定にはノンパラメトリック回帰が有用である。

(2) 水温感受性パラメータと気温感受性パラメータの利用法

水温感受性パラメータは2002年の「あきたこまち」

の恒温深水処理による不稔歩合と水温により決定したもので、幼穂形成期と減数分裂期にピークをもち、そのまま他年度および他品種やさらに生育作柄診断圃場への適用が可能であった(図13)。とくに生育作柄診断圃場において、幼穂の位置と水深を考慮することで水温感受性パラメータを適用できたことは、茎単位の温度と不稔歩合の関係が茎、個体、株の発育変異が存在する圃場レベルでも使えること、水温でも気温でも幼穂の位置の温度の効果は同じであることを示すと考えられる。逆に幼穂の位置を考慮して水温、気温を使い分けることで、圃場の水管理の違いにかかわらず水温感受性パラメータを適用できることを示す。

また、幼穂の位置が灌漑水の水面下では水温、水面上では気温の影響を受けることも示す。恒温深水処理試験においても、幼穂の発育ステージの後半には幼穂は水上に抽出し、高温多照であった2000年には気温の影響で、水温によるQで推定されるよりもとくに不稔歩合が少なかったと推察される。このことは、幼穂が水面下であれば、気温ではなく水温の影響が大きく、深水灌漑のような水管理によって水温を気温より高く管理すれば、障害型冷害の被害を小さくできることを意味する(Satake *et al.* 1988)。

恒温深水処理実験では水のあるポット土壌面の 25cm までしか冷却できないため、水温感受性パラメータは節間伸長により穂が水面より抽出した後の出穂・開花時の冷温による不稔発生は評価できない。これに対し、気温感受性パラメータは幼穂形成期、減数分裂期に加え、出穂の早い茎を中心に出穂期の感受性を示すとみられるピークが存在した(図15)。このピークの位置は出穂期よりやや早いのが、2003年の冷温の特徴から出穂の早い茎を中心とした出穂期の感受性がおもに反映されたためと推察される。しかし、気温感受性パラメータと水温感受性パラメータとを比較すると、減数分裂期のピークは気温感受性パラメータで0.507、水温感受性パラメータで2.284であった。モデルで対象とする全期間のQを1として不稔歩合を計算すると気温感受性パラメータでは14.6%、水温感受性パラメータでは66.5%と、同じQに対する反応は気温感受性パラメータで小さい。これは処理水温が直接影響するポット実験とは異なり、幼穂が水中にある期間は気温が水田水温を介して影響しているためと考えられる。また、水温には日射量も影響する。このため、年次による日照の多

少などにより、気温と水温の関係が変わると気温感受性パラメータでの推定精度が低くなるとみられる。

気温感受性パラメータによる現地圃場の R^2 は水温感受性パラメータによる生育作柄診断圃場の R^2 よりも低かった。これは、東北6県の生育観測圃場、モニター農家圃場では、圃場ごとの水管理、栽培管理の違いなど、温度環境以外に不稔発生に寄与する要因があるためと推察される。しかし、現地圃場での不稔発生と気温においてもノンパラメトリック回帰の使用は有用であり、その年の気象や現地圃場の栽培管理により気温感受性パラメータの推定精度は影響を受けるものの、被害の事前診断には十分利用できるものと考えられる。

(3) 品種の耐冷性と冷却量の基準温度 T_0

本障害不稔歩合推定モデルの特徴は T_0 を耐冷性に基づき、耐冷性極強の品種では 19.5°C 、耐冷性強とやや強の品種で 20°C 、耐冷性中の品種で 20.5°C 、耐冷性やや弱の品種で 21°C に設定されたことである。耐冷性の違いを T_0 の違いとしてモデルに組み入れることで品種ごとの回帰係数を必要としない多数品種に対応した実用的なモデルとなった。クロスバリデーションを用いて T_0 を決定することは、従来の重回帰などでも可能であるが、的確に決定するためには発育ステージとの温度の関係を詳細に導く必要があり、幼穂の発育モデルとノンパラメトリック回帰の組み合わせが有用である。

一般に耐冷性の違いによる平均水温と不稔歩合の関係は耐冷性の弱い品種ほど同じ水温でも不稔歩合が大きい。しかし、品種の耐冷性は障害型冷害の危険の低温処理による発生した不稔歩合を基準品種と比較し、不稔歩合がより近い基準品種と同じ耐冷性に決定されるため(松永・佐々木 1985)、同じ耐冷性に分級される品種でも T_0 に幅があると考えられる。これに対し、恒温深水処理による不稔歩合からノンパラメトリック回帰により各品種の T_0 を決定することで、同じ耐冷性に分級される品種の耐冷性の差を T_0 で示せ、さらに、現在、弱～極強の品種の耐冷性を T_0 という数値で連続的に示すことができる利点もある。

以上のことから、ノンパラメトリック回帰は生産現場での障害不稔歩合の推定に有用である。早期警戒システムでは、アメダス指標地点の代表品種の幼穂の発育経過を「で」で作成した発育予測モデルで推定し、代表品種の耐冷性に基づく T_0 と水温感受性パ

ラメータおよび気温感受性パラメータで不稔歩合を推定し、早期警戒情報での対応技術の選択の参考とする。また、冷害が懸念される年には、このモデルによる推定結果は出穂・開花期に花粉の成熟程度や乳熟期に玄米の成長程度から不稔発生を事前に調査する警戒地域を特定する際に役立つものと期待される。

3. 登熟停止による減収率の推定

遅延型冷害の被害推定については、収量と気温の関係について、登熟期間として出穂後40日間の積算気温または平均気温をもとに減収率を設定して求められてきた(坪井 1964、阿部ら 1964)。この手法は登熟期間を出穂後40日間として気温による登熟期間の変化を考慮していないこと、この期間の平均気温での推定であり、発育ステージ別の気温の関係については考慮されていない。

ここでは、秋冷による発育停止または刈取りまでに玄米の発育モデルで推定される発育ステージ(ΣT_{10})がどこまで進んだかを基に減収率を推定する遅延型冷害の被害推定モデルを作成する。

1) 材料と方法

(1) 供試材料

Ⅱの要領で栽培している東北農研の作柄診断試験のデータを用いた。2004年度は「かけはし」、「ゆめあかり」、「むつほまれ」、「つがるロマン」、「いわてっこ」、「あきたこまち」、「めんこいな」、「まなむすめ」、「ひとめぼれ」、「ササニシキ」、「はえぬき」、「コシヒカリ」の12品種。移植は5月14日に行い、出穂期の暦日を調査した。このうち盛岡近辺で通常栽培される「あきたこまち」、「ひとめぼれ」について、糊熟期、黄熟期、成熟期、および各発育ステージの中間の5回、水口、水尻の区を除く2区で、1区から3カ所、計6カ所で各5株を刈取り、不稔粒数、比重1.06以上の粉(成熟粉)数、1.9mm以上の玄米(精玄米)の数と水分15%に換算した精玄米重を調査した。

作柄診断試験で12品種の中で最も晩生の「コシヒカリ」は年次によっては成熟期前に登熟停止した。このため「コシヒカリ」の1997年～2004年の収量データを遅延型冷害での登熟停止による減収率の検証データに用いた。また、1997年～2004年の出穂期、刈取り日、千粒重のデータを成熟期に達した穎花割合の推定および検証に用いた。

(2) 登熟停止による減収率の設定法

成熟期の精玄米重を基準とし、調査時の精玄米重

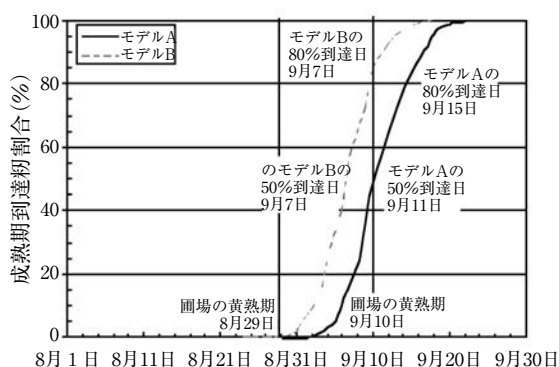


図17 設定による成熟期到達割合の違い
(2004年、品種:あきたこまち)

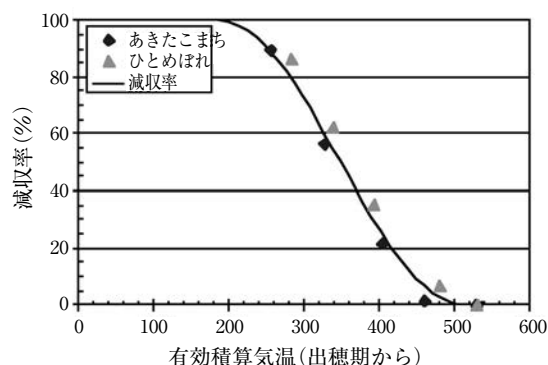


図18 玄米の発育ステージと減収率

減収率は、データを逆正弦変換して求めた回帰直線を逆変換して示した。

との収量比 (%) を求め、100との差を減収率 (%) とした。この減収率を逆正弦変換した後、玄米の発育ステージ (ΣT_{10}) を説明変数とした直線回帰のパラメータを求めた。

(3) 圃場内の成熟割合の推定法

Ⅲ-2 で作成した圃場内の発育変異モデルにより推定される成熟期に達した穎花割合を基本 (モデルA) とする (図17)。ただし、モデルAは穎花の成熟盛期 (50%) と圃場の成熟期 (80%) が同じとなるように設定してあるため、成熟期に達した穎花割合を遅延型冷害の指標とするためには、80%の穂が成熟期に到達したときと圃場の成熟期が一致するように、有効積算気温 (ΣT_{10}) をAのモデルよりも $40^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ 短く設定 (モデルB) した。刈取日の圃場内の穎花の玄米の発育ステージ分布を基に、これらの有効積算気温に到達した穎花の割合を成熟割合として算出した。

2) 結果

玄米の発育ステージの進行と収量増加の関係を成熟期収量に対する比率で示すと、収量の増加曲線の傾きは、登熟歩合、精玄米千粒重の増加曲線と類似であり、成熟期直前には増加曲線の傾きは小さかった。

ある玄米の発育ステージ (ΣT_{10}) での収量が成熟期の収量に不足する割合を減収率として計算した。減収率を逆正弦変換した後、玄米の発育ステージとの関係を見ると直線関係であった。そこで、減収率について直線回帰を適用したところ、「あきたこまち」、「ひとめぼれ」とも同じ回帰式 ($-0.272 \cdot \Sigma T_{10} + 140$) が設定でき、その寄与率は「あきたこまち」で97.3%、ひとめぼれ96.4%であった。この回帰式を遅延型冷害によりある玄米の発育ス

テージで登熟停止した際の減収率とした (図18)。

生育作柄診断圃場でもっとも晩生であり、年次によっては遅延型冷害の症状を示す「コシヒカリ」の減収率と収量の間についてみると、減収率が10%未満となる1998年、1999年、2000年、2002年、2004年の平均収量は527kg、減収率が10%以上となる1997年、2001年、2003年の平均収量は422kgであった。減収率が32.8%と大きい1997年で405kgと収量が少なかったが、2003年は54.8%で減収率が1997年よりも大きい収量は436kgと1997年よりも多かった。また、2002年は減収率7.9%で597kgと減収率が0%の1999年、2000年に比べ収量が多かった。このように収量は様々な要因が関与するため、減収率と収量の間には明確な関係式は導けなかったが、おおむね減収率が10%以上の年は減収率が10%未満の年よりも収量が約100kg少なかった。

また、圃場内の成熟割合と収量の間についてみると、はっきりした関係はみられなかった。しかし、成熟割合と千粒重の間についてみると、成熟割合が0.0%の2003年では千粒重は19.3gであったが、圃場の成熟期の目安となる80%を超える1999年と2000年の千粒重は23.5gと23.4gであり、成熟割合が多い年次ほど、千粒重が大きかった。このように成熟割合と千粒重との間に $r = 0.893$ の相関関係が認められた。

3) 考察

成熟途中での登熟停止の収量への影響は登熟歩合と収量比の増加パターンからみると、黄熟期までは登熟割合の不足により、黄熟期以降は登熟割合の減少よりも精玄米の粒重増加停止の影響が大きい。このため、Ⅲ-2 で作成した圃場内の発育変異

モデルを用い、成熟割合を算出すると千粒重と相関があるが、収量とは関係が無く成熟割合で遅延型冷害による減収程度を推定するのは困難と判断された。そこで、遅延型冷害による被害推定には、収量増加過程から導いた玄米の発育ステージ (ΣT_{10}) に対する減収率を利用する。

坪井 (1964) は遅延型冷害の減収量を推定するため、登熟期間 (出穂後40日間) の平均気温と減収率を各県で求めるように提案している。坪井の減収率とこの減収率の関係をみると、2002年と2003年を除いてよく合致した (図19)。減収率は坪井の減収率と異なり、出穂後40日間ではなく出穂期から刈取期までの平均気温を用いているため、刈取を遅らせた兩年の平均気温が低下し低い側に外れたものと推察される。このように玄米の発育ステージに対応した減収率は、青森県藤坂試験地における出穂遅延および晩生品種の登熟気温から決定した減収率とも同じ傾向を示すことから、遅延型冷害における登熟停止の際の被害評価に用いることができるものと判断される。また、玄米の発育ステージに応じた減収率は登熟期間が40日間でない年次や、発育を追跡しながら被害評価を行う早期警戒システムでの使用に適する。

しかし、収量は生育作柄診断圃場での「コシヒカリ」のように、減収率が大きい年次には収量が小さいという傾向はあったものの、その年の収量が平年収量に減収率を掛けることで決定されるものではなかった。これは収量には m^2 あたり籾数、籾殻サイズなど多くの要素が関与し、その年次変動があるため、登熟停止による減収率のみで減収量を評価するには限界があることを示す。

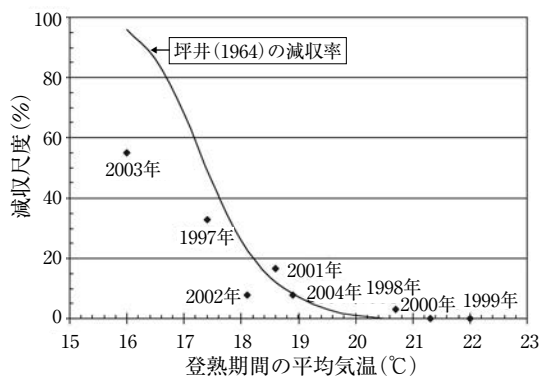


図19 坪井(1964)の減収率と減収尺度の関係
(東北農業研究センター、品種:コシヒカリ)

この減収率に指標地点の過去の気温データを用いると、出穂期および登熟期の各発育ステージの到達日に成熟期に達する可能性の判定および減収率の推定を行うことが可能である。例えば、盛岡周辺で主に栽培される「あきたこまち」が作柄診断圃場での平年 (1999~2004年の平均) の出穂期である8月10日に収穫した場合でも、1976~2004年の29年中4年で成熟期には到達しないが、最も登熟条件の悪い1976年の気象でも、減収率は1.5%であると推定できる。しかし、一般に盛岡の出穂晩限とされる8月20日に収穫した場合では、最も登熟条件の悪い1981年の気象では減収率が33.5%となる。同様に、乳熟期、糊熟期、黄熟期段階でも到達日から成熟期に達する可能性および減収率が推定でき、早期警戒システムにおける遅延型冷害の監視の基礎資料となる。

このように、この節で作成した登熟停止による減収率は早期警戒システムにおける遅延型冷害の監視および被害推定に用いることができるものと考えられる。

V 発育予測モデルに基づく水稲冷害の早期警戒システムの開発

1. 早期警戒システムの構成

早期警戒システムは、東北地域水稲安定生産推進連絡協議会を構成する仙台管区气象台、東北農政局、東北6県、東北農研の緊密な連携のもとに運営されている (図20)。本協議会では、仙台管区气象台が長

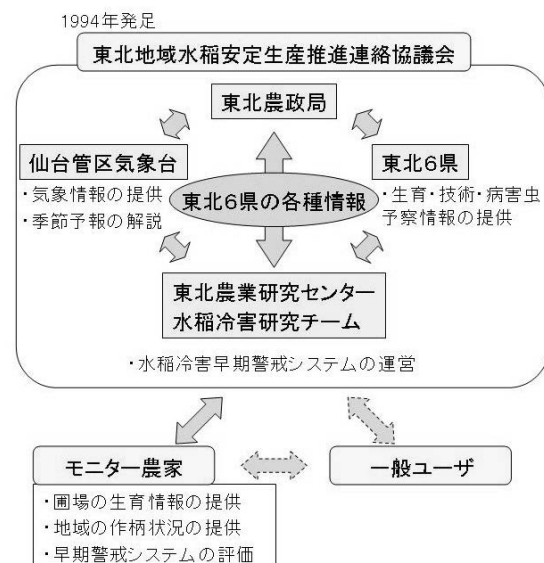


図20 早期警戒システムの運営体制

期予報の解説や気象情報の提供など今後の天候推移に関する情報を、東北6県が水稲の生育状況、技術情報、病虫害の発生予察情報を定期的に提供するなど、水稲の安定生産のための基礎となる情報を交換する。早期警戒システムは東北農研水稲冷害研究チームが中核となり、気象、水稲の生育、対策技術に関する情報等を迅速に生産関係者に提供し、組織的な対応により冷温被害を最小限に止めることを目的に1994年から運営されている。1996年には本協議会向けに早期警戒システムで作成される情報の一部を一般の農業関係者、消費者、流通関係者とリアルタイムで共有するためにWebサイト版早期警戒システム (<http://www.reigai.affrc.go.jp/cgi-bin/reigai.cgi>) が開設された。

早期警戒システムを実用的なものにするため、モニター農家が設置されている。モニター農家は依頼した方と自ら参加を希望された方、計16名が東北地方に散在する。モニター農家は自己の圃場の生育情報、地域の作柄状況の情報提供と早期警戒システムで提供されている情報の評価を担っている。

早期警戒システムにおける主な情報の流れを図21に示す。図中、○は情報の合流点、●は情報の引き出し点を示す。気象データは、アメダスデータを専用システムで受信し、71アメダス指標地点別や1km気象メッシュに加工され、早期警戒システム内のデータベースに蓄積され、気象の実況を示す各種情報に加工される他、発育予測モデル、被害推定モデルなどで使用される。長期予報（1か月予報、3か月予報、暖候期予報）は仙台管区気象台から配信され、予報官と今後の天候の推移に関する情報交換

も行われている。現地圃場の水稲の移植時または初回生育調査時の葉齢と暦日は、東北6県の生育観測圃については東北農政局にデータが集められ、モニター農家圃場については農家から直接東北農研に送信される。東北農政局統計部からは参考情報として「農林水産統計（水稲の作柄概況）」が配信される。東北6県が一般生産者に公表する稲作に関する技術情報、病虫害発生予察情報は県の担当者から東北農研にも配信される。

アメダスデータと1km気象メッシュは東北地方のアメダス実況を示す時別、日別分布図などの各種気象情報に加工される他、発育予測モデル、被害推定モデル、越水のBLASTAM、警戒メッシュなどに使用される。現地圃場の最寄りのアメダス地点の気温データと葉齢と暦日より、発育予測モデルを用い発育ステージを推定し、さらに圃場内、地域内の発育変異の推定も行われる。推定された発育ステージは発育予測情報として公開される他、気温経過に応じて被害予測モデルにより冷温被害を推定する。現段階では冷温被害予測結果は公開されていないが、早期警戒情報を作成する際の参考情報とされている。1km気象メッシュデータは、越水のBLASTAMによる葉いもちの感染好適条件の分布図および発育ステージ別に警戒地帯を画定したメッシュ図の作成に使用されている。

早期警戒情報は、1か月予報、前7日の気象経過、東北地方の水稲の発育ステージ、警戒メッシュ、葉いもち予察情報を基に毎週土曜日に作成する。その際には、東北農政局の「農林水産統計」、東北6県の技術情報、病虫害発生予察情報、また新聞報道などマスコミ情報が参考にされる場合もある。

モニター農家圃場、東北6県の生育観測圃の生育調査結果が定期的に入り、発育ステージ予測が検証され、大きくずれている場合は修正される。冷害発生が懸念される時には、現地調査による被害発生状況を基に被害診断結果が検証される。

このように早期警戒システムは、仙台管区気象台、東北農政局、東北6県、東北農研、モニター農家等からの様々な情報を収集・分析して、より正確な事実情報に処理し、一般の方にも提供することで成り立っている。

2. 早期警戒システムの機能と運営

早期警戒システムでは、気象に関する情報がリアルタイムに提供されるとともに、前章までに作成し

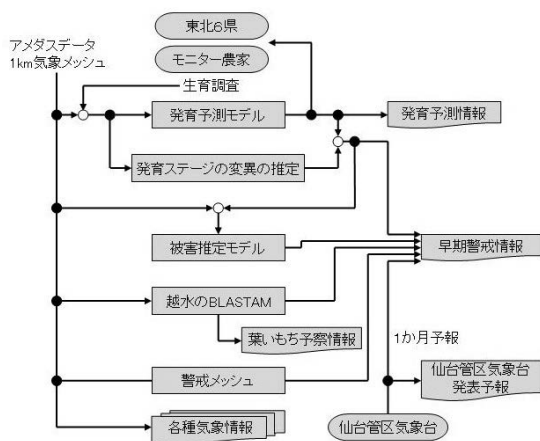


図21 早期警戒システムにおける主な情報の流れ

た地帯区分、発育予測モデルによる生育情報など水稲の安定生産を支援するための各種情報が提供されている(鳥越 2001)。代表的な情報提供内容を以下に示す。

- ① 早期警戒情報：本システムの機能はこの早期警戒情報に集約されている。毎週金曜日に発表される1か月予報を受けて土曜日早朝に作成され、これから先2週間の天候推移の見込み、これまでの気象経過、発育予測モデルで推定される現在の発育ステージなどを概説し、今後の技術的な対策のポイントが示される情報である。このページにある「気象被害監視のポイント」に基づき作成される警戒メッシュで警戒すべき地帯が図示され、現在の発育ステージに関連する冷害回避の基本技術と応急技術および各県の病害虫発生予察などの情報も示される。「気象被害監視のポイント」および冷害回避の基本技術と応急技術は東北地方以外でも汎用的に利用できるものとなっている。編集者の7段階の警戒レベルを閲覧者が直観できるように顔アイコンも使用されている。
- ② 各種気象情報：71指標地点におけるリアルタイムな毎正時、日別のアメダス情報、気温、日照時間、降水量を4月から10月までの期間、平年と比較した経過図が提供されている。
- ③ 安全作期と水稲発育情報：冷害回避の基本技術として発育予測モデルとアメダス指標地点の準平年値を基に、冷害の危険性をもっとも少なくする発育ステージ経過を推定した情報が安全作期として提供されている。水稲の生育期間には主稈葉齢進捗モデル、幼穂および玄米の発育予測モデルで推定した発育情報も提供されている。
- ④ 葉いもち予察情報：越水(1988)による葉いもち発生予察法(BLASTAM)を用い、指標地点および1キロメッシュで感染好適条件の検出図が作成され、葉いもちの広域的発生時期、流行開始期および発病増加開始期が予測され、防除の要否の判定を支援する情報が提供されている。
- ⑤ 技術情報:「図説：東北の稲作と冷害」では、技術情報として東北の稲作、過去の冷害の実態、冷害回避技術に関する知見を整理して分かりやすい図を用いて解説した情報が提供されている。
- ⑥ 編集長日誌:監視の記録やモニター農家や一般閲覧者との意見交換、研究の様子などが公開されている。早期警戒活動および閲覧者の生の声が提

供されている。

モニター農家と広範な一般ユーザーとともに双方向性と対等性をベースに構築されているモニター農家情報ネットワークは、三者間の情報収集に役立つ。その波及効果を総括すると、①情報の発生・利用における相乗効果、②行動様式における学習効果、③「信頼」という財の創出効果にある(宮沢 1988)といえる。生産者はこれらの情報ネットワークの中で、気象経過と水稲生育の変化に応じて、技術体系を補正し、的確で無駄のない追肥・防除などの管理が実施でき、また技術情報や他の農家の情報から技術的な研鑽の糸口が得られる。さらには、品種・作付計画などの経営設計や冷害にも高温登熟障害にも強い理想生育型の実現に活かされ、収量と品質の向上により経営改善につながる日々の情報源と位置付けられている。

早期警戒システムで提供する主な情報は日々更新されている。生育予測情報、早期警戒情報など稲作関連の情報は稲作期間のみの更新となるが、気象情報や季節予報については年間を通じて情報提供されている。各種気象情報は、発育ステージや季節の変化によって設定変更が必要であるが、自動更新となっている。生育予測情報も自動更新が可能であるが、早期警戒情報、仙台管区気象台発表予報などその他の情報に関しては全て手動で更新されている。

2003年は早期警戒システムの運営を1996年に開始して初めての大きな冷害となった。6月22日に北半球500hPa高度場の予測情報でオホーツク海上に典型的なブロッキング高気圧の発達が予想され始め、6月25日に実況地上天気図にもオホーツク海上にほとんど停滞する高気圧があらわれて以来、早期警戒情報で深水管理やいもち病防除などを呼びかけた(神田 2004)。また、現地調査により出穂前後に花粉の充実度、乳熟期に稔実の有無を調査し冷害被害実態の早期把握に努めた。

2003年冷害の際に行ったモニター農家経営調査によると(長谷川 2004)、モニター農家がよく利用する情報は、早期警戒情報、いもち病発生予察情報、他のモニターや一般の方の状況が示される編集長日誌などである。これらの情報の評価は「リアルタイムで情報が得られる」、「どこが冷害の危険期で、どこでいもち病が発生したかという情報が役立つ」など、情報が即時、正確、綿密であることを評価する農家が多い。また、深水管理やいもち病防除の判断

基準に利用されるだけでなく、「農協にいち防除を働きかけた」というように地域全体の冷害対応につなげた農家もいた。さらに、「イネの栽培生理について知識が広がる」、「情報が豊富で、冷害に限らず技術情報の解説を探すと出てくる」というように自ら栽培理論を学ぶという姿勢から技術情報を持つ稲作に関する総合ページであることを評価する農家もいた。このように、早期警戒システムは最新の情報を提供し続けることにより生産者の信頼を獲得し、今後とも発展が期待されている。

以上のように、水稲の発育予測モデルおよび被害診断手法を作成し、それらを活用して冷害軽減のための水稲冷害早期警戒システムを開発・運営したことは、開発した技術とその普及方法の新たな展開を示すものといえる。

Ⅵ 総合考察

東北地方の水稲安定生産に向けての課題 -

1993年の冷害を受けて、東北農研は東北地域水稲安定生産推進連絡協議会の枠組みの中で、水稲冷害の早期警戒システムの構築を開始した。早期警戒システムでは東北6県を対象に冷温と水稲生育の監視を行うため、発育ステージを追跡できる精度の高い予測手法とそれに基づく被害診断技術を必要とした。そこで、東北地方に適用できる水稲の発育予測モデルとそれに基づく被害診断技術の作成、ならびにそれらを活用した冷害軽減のための情報提供システムを開発した。

しかし、システムにより提供されるアメダス指標地点の水稲生育と作柄に関する情報は、その近傍の代表地点の典型的な栽培のものであり、監視にはⅢ-3で作成した地域モデルが利用できるものの、自らの圃場の発育と異なる利用者が存在するのが実態である。そこで、一般生産者が自らの圃場における水稲の発育の監視に利用できる表計算ソフト(Microsoft Excel)版の発育予測モデルを早期警戒システムのWebサイトで公開している。このモデルは特別な知識がなくても簡単に使用でき、日平均気温データもWebサイトに日々更新されるのでダウンロードするだけでよい。これにより生産者は自らの圃場の発育予測と早期警戒システムによって提供される情報に基づき、その年の気象変動に対応した様々な栽培管理の意思決定を行うことができる。

現在、気象情報と発育予測モデルに基づく水稲冷温被害の推定法の検証について、2003年の冷害を中心にを行っているが、今後の冷温遭遇年におけるさらなる現地実証が推定精度の向上のために必要である。また、現在では被害推定結果は協議会関係者の参考情報にとどめ、一般生産者には非公開としているが、今後は産地イメージの低下や社会的な混乱が発生しない提供方法とその利用法を検討した上で、提供していく必要があるだろう。

現段階では、冷温や被害が予測される時に対応できる対策技術には限界がある。このため、気象変動に強い安全作期を栽培の基本とし、早期警戒システムの利用を前提とした安定生産のための栽培管理により、冷温被害を軽減する体系を開発する必要がある。また、指標地点の過去の年次の気象変動や、それに基づく水稲の発育ステージの変動についても、生産者の意思決定を支援する知識ベース部分として組み入れていく必要がある。

また、モニター農家から寄せられる情報の活用、モニター農家および一般閲覧者で構成されるモニター農家情報ネットワーク参加者の拡充も今後の課題である。また、各県が生育情報、技術指導情報、病虫害発生情報を提供しているシステムと連携した独自の情報内容と提供方法についても検討が必要である。

さらに、早期警戒システムの持続的な運営にも課題が多い。冷害年には改めて必要性が認識されるが、冷害が発生しない年が続いた時にも、東北農研や関係機関からの支援が継続するかは不明である。また、水稲冷害研究チームのスタッフによる情報の手動更新も担当者の負担は大きく、後任に円滑に引き継げるか不明である。今後も早期警戒システムを継続的に運用していくには、農業気象災害に対する不断の危機管理意識と体制の構築が国レベルで必要である。

本システムは東北地域で最も影響の大きい農業気象災害である冷害の軽減を目的に構築されたが、夏(6~8月)の気温は1970年の後半から変動が大きく、2000年代に入っても、2000年は暑夏、03年は記録的な冷夏、04年、05年は暑夏と極端な天候が現れている。このため、早期警戒システムは、東北地方の水稲の高品質安定生産に向け、高温登熟障害についても監視を始めているが、被害程度を推定する基準温度や対策技術はまだ確立されていないため、現

地実証を含めた試験を行う必要がある。また、2004年の台風15号による秋田県、山形県沿岸部の潮風害のように思わぬ災害に見舞われることもあり、水稻安定生産のためには農業気象災害に対する総合的で汎用性の高い警戒システムの構築が望まれる。

このような気象変動下での水稻栽培の基本は安定作期である。安全作期は障害型冷害と遅延型冷害の回避を目的とし、安定作期は高品質安定生産を目標に、登熟条件まで考慮するものである。この安全作期と安定作期を参考に経営戦略と販売戦略に基づいた品種、作期、有機栽培や特別栽培など栽培法の選択を行い、単に収量を確保するだけでなく、高品質安定生産を実践できる。また、その年の生育経過と安全作期、安定作期とのずれを確認することによって、被害をあらかじめ察知して、適切な対策をとることも可能となる。早期警戒システムで71アメダス指標地点の安全作期は公開中であるが、安定作期の公開はこれからの課題である。

また、早期警戒システムに求められるのは対象作物の拡大である。すぐに果樹や野菜に拡大することは無理にしても、水田で転作される麦、大豆の安定生産を支援するシステムは稲作農家の経営安定の観点からも望ましい。麦類の収穫期は梅雨期と重なるため穂発芽、赤かび病などの発生予測が必要とされる。大豆でも、2002年には収穫前の積雪による品質低下や刈取りの断念、2003年は冷害及び湿害、2004年の潮風害と3年続けて収量および品質が低下しており、畑作物をも含めた気象災害に対する総合的かつ汎用的な警戒システムの構築が望まれている。

以上のように、東北地方の水稻安定生産に向けて早期警戒システムが取り組むべき課題は多いが、運営を継続しながら1つずつ解決に向かって努力していきたい。

Ⅶ 摘 要

東北地方はわが国の米生産の30%弱を占める稲作の中心地である。しかし、同地域では冷害がたびたび発生し、この地域にとどまらず、わが国全体の食糧生産に影響を与えてきた。耐冷性、早熟性品種の開発および保温折衷苗代、早植えなどの冷害対策技術によって冷害はかなり軽減されているものの、1993年の大冷害にみられるように依然として同地方の稲作の最大の不安定要因となっている。本研究は、東北地方の水稻のさらなる軽減を可能とする技術と

して各地域の気候からみた安定作期、毎年の気象と水稻の生育状況のモニター・予測、およびそれに基づく地域別の冷害情報と対策技術情報を東北全域に発信するシステムを開発しようとして行ったものである。

東北地方に広く適用できる水稻の発育予測モデルとして、イネの移植期から成熟期までを、葉、幼穂および玄米の発育過程の3つにわけて次のようにモデル化した。

① 主稈葉齢進度モデル：移植期を起点として止葉展開期までの葉齢を日々の気温から推定した。主稈葉齢は最低気温10℃、そして上限温度24℃とする有効温度の日々の積算値がある一定値に達したとき、1齢進むようにモデル化した。葉齢が1齢進むのに必要な有効積算温度は出葉転換点を考慮して、葉齢9.1までは一定 (Phase I)、その後11.1葉までは葉齢とともに直線的に増加し (Phase II)、以後一定値に達する (Phase III) 関数で与えた。このことから出葉転換は幼穂分化とは無関係に群落の繁茂度ないしはそれに影響される植物体の栄養条件を反映してあらわれると推察された。本モデルによる推定葉齢と実測葉齢を1999年の盛岡について比較すると、熟期の異なる11品種で誤差平均が0.25葉、日数に換算すると1.7日であった。

② 幼穂の発育モデル：幼穂形成期を起点とし、日平均気温10℃以上の有効積算気温を用い花粉母細胞分化期、減数分裂期、花粉内容充実期と出穂期を推定した。各発育ステージに達する有効積算気温は、18～26℃の温度勾配温室でポット栽培した主稈の幼穂長に基づいて設定した。この設定値を圃場に適用するにあたり、圃場の群落を構成する株内の主稈と株全体の出穂の差異に相当する有効積算気温を考慮して作成した。2000年に東北農研生育作柄診断圃場で栽培した東北の基幹12品種の出穂期の推定誤差は1.2日であった。

③ 玄米の発育モデル：出穂期を起点とし、日平均気温10℃以上の有効積算気温を用い乳熟期、糊熟期、黄熟期と成熟期を推定した。各発育ステージの有効積算気温の基準値は東北農研生育作柄診断圃場の12品種の各発育ステージの到達日のデータを用いて決定した。2000年の生育作柄診断圃場の12品種の出穂期の推定誤差は2.1日であった。

これらの発育予測モデルを用い、71アメダス指標

地点の基幹品種、モニター農家の栽培品種と東北農研生育作柄診断圃場の12品種の発育予測をリアルタイムで行うことにより、東北全域の基幹品種の生育状況、障害型冷害の危険期ならびに遅延型冷害の発止有無が推定できるようになった。

圃場内、地域内に異なる発育ステージが混在することは冷温、とくに短期間の冷温による被害程度を推定する上で問題となる。そこで、これらの発育予測モデルを拡張し、イネの形態形成の規則性に基づいて圃場内の発育ステージの変異を推定する手法とその手法に地域内の移植に関する情報を組み合わせることで、特定の発育ステージにある有効穂や穎花の存在割合を評価する手法を次のように作成した。

発育予測モデルを適用する上で、圃場内の発育ステージの変異に関わる次の3要因に着目して、その分布を推定した。すなわち、①移植時個体葉齢変異、②有効穂の幼穂形成期および出穂期の到達日変異、③穎花の開花日変異である。この手法を1999年、2001年、2003年の東北農研と青森県十和田、八戸、青森の生育診断圃場に適用し、実用性を検討した。冷害年である2003年は冷温で発育が緩慢となり、減数分裂期の有効穂、危険期の穎花ともに圃場に存在している期間が長くなった。出穂および開花期に冷温となった2001年は出穂する穂および開花する穎花が圃場に存在する期間が冷害年の2003年よりも長くなった。この手法で成熟期を推定すると、2001年や2003年のように冷温で登熟が遅延したときに、圃場レベルで成熟期に未達でも有効穂や穎花レベルでは一部で成熟しているとみられた。障害型冷害の危険期冷却量を求めたところ、1999年は不稔発生が少ないが、2001年、2003年は冷却量が大きいと不稔歩合が大きかった。この手法でその年度の圃場内の発育ステージの変異の特徴を推定することができた。

地域内における発育ステージの変異は、地域内の個々の圃場における移植日の幅と、移植する苗の葉齢変異の情報と圃場内の発育ステージ変異を組み合わせることで、地域内の特定の発育ステージにある有効穂や穎花の存在割合として推定した。この手法を1999年、2001年、2003年の青森県のアメダス指標地点のうち、青森、蟹田、五所川原、弘前、黒石、八戸、十和田、三沢、作柄表示地帯の青森地帯、津軽地帯、南部・下北地帯に適用し、実用性を検討した。出穂期の始期、盛期、終期の推定誤差は、1999年はアメダス指標地点の平均で2.4日、作柄表示地

帯別で2.8日であったが、冷害年である2003年はアメダス指標地点の平均で7.8日、作柄表示地帯別で6.5日とくに太平洋側の地点、地帯で誤差が大きかった。危険期の冷却量を推定すると不稔歩合と一定の関係がみられた。この手法でその年度の地域内の発育ステージの変異の特徴を推定することができた。

冷害気象時に被害を可能な限り早い時点で推定するため、冷却量を用いた障害不稔歩合推定モデルと登熟停止による被害推定モデルを作成した。障害型冷害における不稔歩合の推定には、2002年にポット栽培の「あきたこまち」を恒温深水処理して得た水温と不稔歩合の関係、および2003年冷害における東北6県の生育観測圃の気温と不稔歩合の関係についてのデータを用いた。これらのデータをもとに隣り合う偏回帰係数の値は大きく異ならぬとするノンパラメトリック回帰を行い、不稔歩合と水温あるいは気温の関係を求めた。この場合、品種の耐冷性の違いを冷却量算出の基準温度の差異であらわすことにより、複数品種を同時に扱うことができた。このモデルは、現場圃場では推定精度が落ちるものの被害予測には有効に機能した。

遅延型冷害の被害推定は、登熟停止時点の玄米の発育ステージを推定し、それと成熟期の収量から減収率を直線回帰により決定した。発育ステージと減収率の関係は、登熟期間の気温経過の異なる「あきたこまち」と「ひとめぼれ」で同じ回帰直線で示すことができた。また、圃場内の穎花の発育ステージ変異から推定される成熟期に達した籾割合と千粒重には一定の関係が認められた。このようにして求めた減収率と成熟籾割合は遅延型冷害による被害推定に有用であった。

これらのモデルをリアルタイムで実行することにより、被害の発生が予想される地点や地域の特性が容易になり、現地調査を効率的に行うことができ、被害実態の正確な把握に役立つ。

1972年から1994年までの23年間の水稲収量データに基づき全市町村を8つの冷害危険度地帯に区分した。この地帯区分をもとに東北地方の冷害発生の特徴を監視する71アメダス指標地点を設定した。これら71指標地点を対象に、冷害回避の基本として、平年気候と発育予測モデルより冷害危険期を推定し、内島の気温指標を参考に安全作期を策定した。さらに、各指標地点における気温の年次変動と、登熟条件、高温登熟障害の気温指標、いもち病に関する情

報を加え、高品質安定生産を行うための安定作期を策定した。

以上に開発したモデルを基に、設定した71指標地点を対象に冷害回避の基本としての安全作期、安定作期、および日々の気象経過に基づく水稲発育進度、冷害危険期、冷害の予測と対応技術についてのリアルタイム情報を発信する早期警戒システムを構築した。本システムは、これらの情報を仙台管区気象台、東北農政局、東北6県、東北農研およびモニター農家の連携の下、①早期警戒情報、②各種気象情報、③安全作期と水稲発育情報、④葉いもち予察情報、⑤技術情報、⑥編集長日誌などで提供している。このシステムは各地域のモニターによって発信情報の有効性が検証され、その結果がシステムにフィードバックされシステムの改善に活かされるようになっている。このようにして開発されたシステムは生産現場における栽培管理の実施時期の判断、深水灌漑などの冷害回避技術の要否や刈取り時期の判定などに利用されている。本システムは、生産現場でのさらなる検証を積み重ねることにより東北地域の冷害軽減に大きく貢献することが期待される。今後は、東北地方の水稲の高品質安定生産に向け、対象とする農業気象災害を拡大し、また対象作物を麦、大豆に拡大し、畑作物をも含めた農業気象災害に対する総合的かつ汎用的なシステムを構築することを目指している。

引用文献

- 1) 阿部亥三, 鳥山国土, 東山春紀, 小野清治. 1964. 青森県における冷害危険度の推定に関する研究. 農業気象 19: 133-139.
- 2) 荒川市郎, 本馬昌直, 岡部清信. 1994. 積算気温による水稲の幼穂発育モデル. 東北の農業気象 39: 28-32.
- 3) 朝隈純隆. 1958. 生態的特性からみた水稲早晩期用品種(1), (2). 農業技術 13: 152-154, 204-206.
- 4) 卜藏建治. 2001. ヤマセと冷害—東北稲作のあゆみ. 東京. 成山堂. p.78-96.
- 5) Chin, M.; Leohken, A.; Sozzi D.; Williams, J. 1991. A modified Zadokos decimal code for the growth stages of rice. Tropical Pest Management 37: 277-280.
- 6) 長南信雄. 1966. 気温が水稲の葉原基発生と出葉に及ぼす影響. 日作学会東北支報 8: 13-14.
- 7) 大後美保. 1945. 日本作物気象の研究. 東京. 朝倉書店. p.51-100.
- 8) 伊達了. 1963. 東北地方の水稲栽培期間の決定方法に関する農業気象学的研究. 東北農試研報 28: 1-41.
- 9) 藤井義典. 1961. 稲麦における根の生育の規則性に関する研究. 佐賀大農彙 12: 1-117.
- 10) 福家豊, 近藤頼巳. 1939. 水稲の冷害現象に関する実験的研究. 第1報 寡照低温による生育障礙, 特に稔實初敷の減少機構に就いて. 農及園 14: 2049-60, 2261-2269.
- 11) 後藤雄佐, 星川清親. 1988. 水稲の分けつ性に関する研究. 第1報 主茎と分けつの生長の相互関係. 日作紀 57: 496-504.
- 12) 後藤雄佐, 星川清親. 1991. 水稲の分けつ性に関する研究. 第8報 個体内各茎の分けつ位と葉数の関係. 日作紀 60: 392-399.
- 13) 羽生寿郎, 内島立郎. 1962. 作物の生育と気象との関連に関する研究. 第1報 水稲の出穂期と気温との関係. 農業気象 18: 109-117.
- 14) 長谷川浩. 1959. 水稲の出葉速度と土壤温度. 農および園 34: 1795-1798.
- 15) 長谷川啓哉. 2004. モニター農家からみた水稲冷害早期警戒システムの評価. 農業技術 59: 362-365.
- 16) Hayase, H.; Satake, T.; Nishiyama I.; Ito, N. 1969. Male Sterility Caused by Cooling Treatment at the Meiotic Stage in Rice Plants. II. The most sensitive stage to cooling and the fertilizing ability of pistils. Proc. Crop Sci. Soc. Japan 38: 706-711.
- 17) 樋口太重, 小野信一, 内田好哉, 古賀汎. 1983. 水田の地力窒素の不均一性および緩衝液抽出法による評価. 土肥誌 54: 377-382.
- 18) 本田強. 1977. 水稲の分けつに関する研究. とくに物質生産と生長および配分の関係. 東北大農研所報 28: 171-312.
- 19) 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. 第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. 日作紀 59: 687-695.
- 20) 星川清親. 1972. 米の胚乳組織の構造とその発達.

- 生物科学 23：66-76.
- 21) 星川清親. 1975. イネの生長. 農文協 p.81-91.
 - 22) 堀口郁夫. 1980. 冷害時における水稲・大豆の収量予想と気温の関係について. 北海道大学農学部邦文紀要 12：222-229.
 - 23) 細井徳夫. 1976. 気象要因による水稲生育の変動性に関する研究. I. 生育温度の差異による水稲の出穂変動性の品種間差異. 育雑 26：328-338.
 - 24) Ito, N. 1976. Male sterility caused by cooling treatment at the young microspore stage in rice plants. XV. Effect of moderate cooling before or after the critical stage on sterility induced by cooling at the critical stage. Proc. Crop Sci. Soc. Japan 45：558-562.
 - 25) 柿崎洋一, 木戸三夫. 1938. 水稲の穂の生育過程上低温に依る稔實障礙を来し易き時期. 農及園 13：59-62.
 - 26) 神田英司, 鳥越洋一. 1995. 東北地域における水稲収量とその変動からみた冷害危険度区分. 日作紀 64(別2)：45-46.
 - 27) 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. 日作紀 69：540-546.
 - 28) 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予測への適用. 日作紀 71：394-402.
 - 29) 神田英司. 2004. 2003年における「水稲冷害早期警戒システム」の活動状況. 農業技術 59：346-350.
 - 30) 神田英司, 鳥越洋一, 小林隆. 2005. イネの形態形成の規則性に起因する発育ステージの変異を推定する方法. 日作紀 74：276-284.
 - 31) 片山佃. 1951. 稲・麦の分けつ研究—稲・麦の分けつ秩序に関する研究—. 東京. 養賢堂. 117p.
 - 32) 川田信一郎. 1976. 日本作物栽培論. 東京. 養賢堂. p.52-54.
 - 33) 木戸三夫. 1941. 水稲の幼穂の發育竝に節間伸長と冷水掛流に依る稔實障害及び出穂遅延. 農及園 16：1463-66, 1605-1608.
 - 34) 菊屋良幸, 加藤盛夫, 横尾政雄. 2001. イネの穂における穎花の開花規則性の検証. 日作紀 70(別2)：45-46.
 - 35) 木村和則, 大江栄悦, 荒垣憲一, 梅津敏彦, 中野憲司, 佐藤昌宏. 1993. メッシュ気候値を活用した水稲適地区分. 第2報 障害型冷害危険度の推定. 山形農試研報 27：23-30.
 - 36) 薦田快夫. 1957. 水稲の早期栽培と晩期栽培. 東京. 養賢堂. p.3-46.
 - 37) 越水幸男. 1988. アメダス資料による葉いもち発生予察法. 東北農試研報 78：67-121.
 - 38) 栗山英雄. 1965. 稲の出穂性に関する研究. 農技研報 D13：275-353.
 - 39) Lancashire, P. D.; Bleiholder, H.; Van Den Boom, T.; Langeluddeke, P.; Stauss, R.; Weber E.; Witzemberger, A. 1991. A uniform decimal code for growth stages of crop and weeds. Ann. Appl. Biol. 119：561-601.
 - 40) 松永和久, 佐々木武彦. 1985. 東北地方におけるイネの穂ばらみ耐冷性基準品種案. 東北農業研究 37：7-8.
 - 41) 松島省三, 真中多喜夫. 1956. 水稲幼穂の發育経過とその診断—全茎を対象とした幼穂の發育経過とその基準及び各發育段階の特徴—. 東京. 農業技術協会. 57p.
 - 42) 松島省三, 角田公正, 真中多喜夫. 1958. 水稲の登熟に及ぼす生育各期の気温・日射及び気温較差の影響. 農及園 33：877-883.
 - 43) 松島省三, 田中孝幸, 星野孝文. 1964. 水稲収量の成立原理とその応用に関する作物学的研究. 第71報 生育各期の気温・水温の各種の組み合わせが水稲の生育およびその他諸形質に及ぼす影響. 日作紀 33：135-140.
 - 44) Miglietta, F. 1991. Simulation of wheat ontogenesis. I. Appearance of main stem leaves in the field. Clim. Res. 1：145-150.
 - 45) 三輪哲久, 高橋渉, 二宮正士, Vu Ngyuyen-Cong, 川口裕男, 南山恵. 1998. スペクトルデータ解析におけるPLS回帰とノンパラメトリック回帰. SUGI-J '98論文集 137-148.
 - 46) 宮沢健一. 1988. 業際化と情報化. 産業社会へのインパクト. 東京. 有斐閣. p.50-70.
 - 47) 森田弘彦, 村上利男. 1981. 寒地水稲の作期の計画化について. 第1報 有効積算気温と出穂期の関係. 日作紀 50：338-343.
 - 48) 村上利男, 森田弘彦, 土井康生, 今野一男. 1982. 寒地水稲の計画栽培に関する解析的研究. 北海道農試研報 133：61-100.
 - 49) 永井衛. 1968. 水稲における出葉および分けつの

- 出現様相に関する研究. 静岡大農研報 18:1-74.
- 50) 長戸一雄. 1941. 穂上位置に依る米粒成熟の差異に就いて. 日作紀 13:156-223.
- 51) 長戸一雄, 江幡守衛. 1960. 登熟期の気温が水稻の稔実に及ぼす影響. 日作紀 28:275-278.
- 52) 長戸一雄, 江幡守衛. 1965. 登熟期の高温が穎花の発育ならびに米質に及ぼす影響. 日作紀 34:59-66.
- 53) 中掘登志光, 三本弘乗, 本田勝雄, 松田幹男, 佐藤尚雄. 1974. 水稻の機械化移植栽培に関する生態的研究. 第3報 移植期における温度条件について(2). 日作学会東北支報 16:15-16.
- 54) 中川博視, 堀江武. 1991. イネの発育過程のモデル化と予測に関する研究. (10)葉齢増加と主稈総葉数の気象的予測モデル. 日作紀 60(別1):272-273.
- 55) 中川博視, 堀江武. 1995. イネの発育過程のモデル化と予測に関する研究. 第2報 幼穂の分化・発達過程の気象的予測モデル. 日作紀 64:33-42.
- 56) 中園江, 井上君夫. 2001. 積算気温を用いた水稻の幼穂長および冷害危険期の推定. 日作紀 70:247-254.
- 57) 浪岡実. 1993. 前歴を含めた複合型不受精の発生と予測上の問題点. (東北農業試験場, 東北地域における平成3年気象災害の記録). 盛岡. p.77-83.
- 58) 西山岩男. 1996. 冷害の歴史. (鳥山国土, 熊野誠一, 浅賀宏一監修, 東北の稲研究). 大曲. 東北農業試験場稲作研究100年記念事業会. p.19-26.
- 59) 野口彌吉. 1931. イネの開花に對する外界の影響に就て. 特に花粉の発芽及び花粉管の延長に就て. 日作紀 3:22-23.
- 60) 農林水産省東北農政局. 1999. 農林水産統計 平成11年産水陸稲収穫量(東北). 7p.
- 61) 農林水産省東北農政局. 2001. 農林水産統計 平成13年産水陸稲の収穫量(東北). 東北農政局 8p.
- 62) 農林水産省東北農政局. 2003. 農林水産統計 平成15年産水陸稲の収穫量(東北). 東北農政局 8p.
- 63) Okada, M.; Hamasaki, T.; Sameshima, R. 2000. Pre-air-conditioned temperature gradient chambers for research on temperature stress in plants. Biotronics 29:43-55.
- 64) 奥田穰. 1957. 日本の冷害. 東京. 東洋経済新報社. p.58-78.
- 65) 酒井寛一. 1944. 北海道庁食糧増産指導資料 15:1-13.
- 66) 佐々木良治, 柴田洋一, 鳥山和伸. 2002. 大区画水田における田面の高低が直播水稻の初期生育と分けつに及ぼす影響. 日作紀 71:308-316.
- 67) 佐々木武彦. 1996. 近年の耐冷性育種. (鳥山国土, 熊野誠一, 浅賀宏一監修, 東北の稲研究). 大曲. 東北農業試験場稲作研究100年記念事業会. p.36-41.
- 68) Satake, T.; Hayase, H. 1970. Male sterility caused by cooling treatment at the young microspore stage in rice plants. V. Estimations of pollen developmental stage and the most sensitive stage to coolness. Proc. Crop Sci. Soc. Japan 39:468-473.
- 69) Satake, T.; Koike S. 1983. Sterility caused by cooling treatment at the flowering stage in rice plants. I. The stage and organ susceptible to cool temperature. Jpn. J. Crop Sci. 52:207-214.
- 70) Satake, T.; Lee, S. Y.; Koike, S.; Kariya, K. 1988. Male Sterility Caused by Cooling Treatment at the Young Microspore Stage in Rice Plants. XXVIII. Prevention of cool injury with the newly devised water management practice - effects of the temperature and depth of water before the critical stage. Jpn. Jour. Crop Sci. 57:234-241.
- 71) Satake, T. 1989. Male Sterility Caused by Cooling Treatment at the Young Microspore Stage in Rice Plants. XXIX. The mechanism of enhancement in cool tolerance by raising water temperature before the critical stage. Jpn. Jour. Crop Sci. 58:240-245.
- 72) 佐藤庚, 稲葉健五, 戸沢正隆. 1973. 高温による水稻の稔実障害に関する研究. 第1報 幼穂形成期以降の生育時期別高温処理が稔実に及ぼす影響. 日作紀 42:207-213.
- 73) Suge, H.; Osada, A. 1967. Physiology of flowering in rice plants. 1. Synthesis and translocation of floral stimulus. Proc. Crop. Soc. Japan 36:32-36.
- 74) 高橋政夫. 2004. 2003年岩手県における水稻冷害の解析と課題. 日作東北支部報 47:105-108.
- 75) 玉置雅彦, 山本由徳. 1997. 遮光および施用窒素

- 量が水稲の出葉速度と分けつ発生に及ぼす影響—とくに出葉転換点に着目して—, 日作紀 66: 29-34.
- 76) 田村繁司, 1956. 水稲の登熟障害に関する一考察, 青森農試研報 3: 21-26.
- 77) 田中明, 1958. 水稲の出穂期に関する栄養生理—主稈葉数と出葉間隔の問題—, 農業技術 13: 356-393.
- 78) 田中稔, 1962. 水稲の冷水並びに出穂遅延障害に関する研究, 青森県農業試験場研究報告 7: 1-107.
- 79) 田中良, 1987. 重回帰分析による水稲の障害型不稔の発生程度と出穂前後の気温との関係, 東北農業研究 40: 57-58.
- 80) Tashiro, T.; Wardlaw, I. F. 1991. The effect of high temperature on kernel dimensions and the type and occurrence of kernel damage in rice. *Aust. J. Agric. Res.* 42: 485-496.
- 81) 立野喜代太, 伊藤健次, 1971. 西南暖地における稚苗稲作技術に関する研究, 第1報 1株植付苗数の多少が稚苗移植水稲の生育, ならびに収量に及ぼす影響, 日作九州支報 35: 1-11.
- 82) 寺尾博, 大谷義雄, 白木實, 山崎正枝, 1940a. 水稲冷害の生理學的研究(豫報), [II]幼穂發育上の各期に於ける低温障害, 日作紀 12: 177-195.
- 83) 寺尾博, 近藤頼己, 土井彌太郎, 泉清一, 1940b. 水稲冷害の生理學的研究(豫報), [IV]開穎及び授精作用に關する低温障害の品種間差異, 日作紀 12: 203-208.
- 84) 鳥越洋一, 1998. 東北地域における水稲冷害早期警戒システム, システム農学 14: 142-149.
- 85) 鳥越洋一, 2001. 東北地域を対象とした水稲冷害早期警戒システム, 農業技術 56: 193-196.
- 86) 坪井八十二, 本田勳夫, 1953. 冷水掛流水田における温度分布の特性, 農業氣象 8: 7-11.
- 87) 坪井八十二, 1964. 水稲の冷害による被害量の推定法について, 農業氣象 19: 129-132.
- 88) 坪井八十二, 1976. 冷害と氣象, (坪井八十二, 根本順吉編, 異常氣象と農業), 東京, 朝倉書店, p.71-75.
- 89) 角田公正, 1964. 水温と稲の生育・収量との関係に関する実験的研究, 農技研報 A11: 75-174.
- 90) 内島立郎, 1976. 冷温条件と水稲の不稔発生との関係についての一考察, 農業氣象 31: 199-202.
- 91) 内島立郎, 1983. 北海道, 東北地方における水稲の安全作季に関する農業氣象学的研究, 農技研報 A31: 23-113.
- 92) 内嶋善兵衛, 1976. 有効積算気温の永年変化と変動特性, 農業氣象 31: 185-194.
- 93) 梅津俊彦, 木村和則, 中野憲司, 長谷川愿, 松田裕之, 太田秀樹, 芳賀静雄, 武田政宏, 矢島正晴, 1993. メッシュ気候値を活用した水稲適地区分, 第1報 好適作期の策定と適地判定, 山形農試研報 27: 1-21.
- 94) 矢島正晴, 1994. 水稲の生長・収量の農業氣象的予測, (日本農業氣象学会編, 平成の大凶作), 東京, 農林統計協会, p.67-81.
- 95) 山口正篤, 青木岳央, 前波健二郎, 福田正治, 1988. 水稲の主稈総葉数の違いによる形態的, 生態的な差異及び出現要因, 栃木農試研報 35: 1-8.
- 96) 山本良孝, 川口祐男, 高橋渉, 1994. 水稲發育段階予測法の植付本数の異なる条件への適用, 日作紀 63: 208-214.
- 97) 山崎耕宇, 1960. 生育条件を異にした場合の作物の形態発生に関する基礎的研究, II. 水稲・小麦における分けつ芽の発生について, 日作紀 28: 262-265.
- 98) 山崎耕宇, 1963a. 水稲の葉の形態形成に関する研究, I. 葉の發育経過に関する一般的觀察, 日作紀 31: 371-378.
- 99) 山崎耕宇, 1963b. 水稲の葉の形態形成に関する研究, II. 葉位を異にした場合の葉の發育の相違について, 日作紀 32: 81-88.
- 100) 山崎耕宇, 1963c. 水稲の葉の形態形成に関する研究, III. 一, 二の環境条件が葉の形態形成におよぼす影響, 日作紀 32: 145-151.
- 101) 山崎耕宇, 1964. 水稲の葉の形態形成に関する研究, IV. 葉の形態形成を解明する二, 三の実験, 日作紀 32: 237-242.
- 102) 八柳三郎, 1960. 東北地方における稲作の計画栽培について(1), (2), (3), (4), (5), (6), 農および園 35: 931-934, 1095-1098, 1248-1252, 1425-1428, 1565-1569, 1717-1722.
- 103) 吉田昌一, 1986. 稲作科学の基礎, 東京, 博友社, p.52-55.
- 104) Zadoks, J. C.; Chang, T. T.; Konzak, C. F. 1974. A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Research* 14: 415-421.