

## 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

神田英司\*・鳥越洋一・小林隆

(東北農業研究センター)

**要旨:** 水稻冷害早期警戒システムにおいて東北全域の水稻の生育監視に適用する幼穂および玄米の主な発育ステージを予測するモデルを作成した。これらのモデルは日平均気温 10℃ 以上の有効積算気温を用いて気象被害予測、栽培管理の支援に必要な発育ステージを推定するものである。幼穂の発育モデルは、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、出穂期を推定するものであり、日平均気温 18~26℃ の温度勾配温室でポット栽培した主稈を対象とした有効積算気温に、圃場の群落を構成する株内の主稈と他の茎の出穂変異を加味して作成した。玄米の発育モデルは出穂期から乳熟期、糊熟期、黄熟期、成熟期を推定するものであり、1998 年と 1999 年の盛岡における東北の基幹 12 品種の各発育ステージの到達日から有効積算気温を決定した。本モデルを用いて 2000 年の盛岡で栽培した 12 品種の出穂期および成熟期の予測精度を検証したところ、推定誤差はそれぞれ 1.2 日、2.1 日であった。また、宮城県、山形県の農家圃場における出穂期と成熟過程の予測精度は比較的高かった。さらに既報の主稈葉齢進度モデルに幼穂と玄米の発育モデルを組み合わせて幼穂形成期、出穂期で切り替えて利用することにより、活着後から成熟期までの発育ステージを予測することも可能であった。

**キーワード:** 玄米、水稻、早期警戒システム、発育モデル、有効積算気温、幼穂、冷害。

東北地域は 2000 年現在の水稻の 10 a あたり収量が 570 kg、水稻作付面積が全国の 25.8%、玄米収穫量 27.4% を占める一大生産地である（注：農林水産省統計情報部、農林水産統計速報、2000）。また、食味ランク「特 A」も全国 11 銘柄中の 7 銘柄を占める高品質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、2000）。しかし、1993 年には大冷害となり作況指数が東北全体で 56 になるなど、過去にはほぼ 4 年に 1 回の頻度で冷害に遭遇してきた。また、1999 年には猛暑による高温障害およびカメムシ発生による品質低下を招いた。さらに、1994 年、2000 年にも猛暑に見舞われたように、極端な気象の年が多くなっている。このような気象の変動下では、気象と生育に対応した的確な栽培管理を行うことが水稻の安定生産にとって重要となる。

そこで、著者らはインターネット上で気象、水稻の生育状況、いもち病の発生予測に関する情報をリアルタイムに提供する水稻冷害早期警戒システムを作成し、2000 年からは高温障害も監視対象として加え、安定生産のための総合的なシステム開発を目指している。本システムでは、気象データとしてアメダスを用い、東北 6 県のアメダス地点から稲作立地に基づき 71 地点を選択して、気象と水稻の生育の監視を行っている（鳥越 1998）。このために広域かつ多数品種に利用できる主稈葉齢進度モデルを作成した（神田ら 2000）。このモデルは対象品種の既知の主稈総葉数を設定しておき、活着時の葉齢を初期値として日平均気温を用いて葉齢進度を追跡し、葉齢指数に基づいて穂首分化期、幼穂形成期、減数分裂期、止葉完全展開期を予測するものである。このモデルの特性上、止葉が完全展開する減数分裂盛期までしか発育を追跡できない。また、主稈総葉数の増減により、葉齢指数による予測誤差が発生すると

いう問題も残されている。

水稻の冷害は、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、両者が併発した場合が混合型である。障害型冷害は幼穂形成期、減数分裂期、開花期の冷温により不稔粒が多発して減収するものをいう（柿崎・木戸 1938、福家・近藤 1939、寺尾 1940a、寺尾 1940b、木戸 1941、田中 1962、Hayase ら 1969）。さらに、幼穂形成期、減数分裂期の冷温は穎花の退化や奇形により一穂穎花数を減少させることも知られている（福家・近藤 1939、寺尾 1940a、木戸 1941、田中 1962）。遅延型冷害は活着から成熟にいたるまでの各発育ステージの冷温により生育、出穂および登熟遅延が蓄積し、成熟前に登熟限界以下の気温になるために未熟粒が多発するものをいう（佐竹 1980）。一方、乳白粒、心白粒、腹白粒などの多発による玄米品質の低下は乳熟期から糊熟期の高温が原因とされている（長戸・江幡 1960、長戸・江幡 1965、Tashiro and Wardlaw 1991）。このように冷害ならびに高温障害を監視の対象とすると、移植から成熟までの発育ステージを監視できるモデルが必要となる。

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、本報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、多数品種および広域で簡便に利用できることが判明したので報告する。

## 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。

水稻の発育過程のうち、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℃と設定している。さらに、イネの登熟限界気温は一般に最低気温 10℃とされてる。

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℃と設定している。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  $\Sigma T_{10}$ ：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

東北地域における幼穂形成期から出穂期までの  $\Sigma T_{10}$ 、および  $\Sigma T_{10}$  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  $\Sigma T_{10}$  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な日変化となる。

水稻品種「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 1/5000 a 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、0.60 g を化成肥料で与えた。幼穂形成期（幼穂長 2 mm）直前にポットを搬入し、1997 年は温度勾配温室で 5 段階（T1～T5）の温度処理をおこなった。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（第 1 表）。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、 $\Sigma T_{10}$  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。

### 3. 東北農業研究センターにおける圃場試験

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  $\Sigma T_{10}$  を明らかにするために、東北農業研究センター（岩手県盛岡市下厨川）内の 60 a 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 5.1 m×9.4 m で、条間 30 cm、株間 20 cm 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 g m<sup>-2</sup> とし、追肥は活着後に N、 $P_2O_5$ 、 $K_2O$  を 2.1、0.6、2.1 g m<sup>-2</sup>、「あきたこまち」の分げつ盛期に N、 $P_2O_5$ 、 $K_2O$  を 3.08、0.88、3.08 g m<sup>-2</sup>、「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 g m<sup>-2</sup> 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 2 mm 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穂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穂を押して、乳液が出る時期、糊熟期は穂の中央部のいくつかの穂を押すと胚乳が糊状を示す時期とした。黄熟期は黄化割合が 50%、成熟期は 80%に達した日とした。1999

第1表 幼穂形成期から出穂期までの日平均気温と有効積算気温 ( $\Sigma T_{10}$ ).

	処理区	幼穂形成期	出穂期	日射量 ( $Wm^{-2}$ )	平均気温 ( $^{\circ}C$ )	$\Sigma T_{10}$ ( $^{\circ}C$ 日)
1997年	T1	7月18日	8月17日	13.4	18.5	257.6 (n=2)
	T2	7月19日	8月15日	13.4	20.2	269.2 (n=3)
	T3	7月20日	8月11日	14.0	22.8	283.4 (n=3)
	T4	7月20日	8月10日	14.5	24.9	315.6 (n=3)
	T5	7月20日	8月 7日	15.0	26.1	296.8 (n=4)
	平均	7月20日	8月12日	14.2	23.0	287.1 (n=15)
1999年	t1	7月18日	8月15日	15.8	19.7	271.4 (n=4)
	t2	7月19日	8月13日	16.0	20.9	271.7 (n=4)
	t3	7月17日	8月 9日	15.5	23.0	298.7 (n=5)
	t4	7月18日	8月 8日	15.4	25.0	305.6 (n=4)
	平均	7月18日	8月11日	15.6	22.2	287.5 (n=17)

n は個体数, 各処理区 5 個体より主稈総葉数 15 葉のものを対象とした.

年には「あきたこまち」, 「ひとめぼれ」について別に調査区各 10 株を設け, 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, 一般農家圃場での実証試験を行った. 2000 年に宮城県亘理町の 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 か所設置した. 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. 気象データは亘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.

### 結 果

#### 1. 幼穂の発育モデルの作成

##### 1) 主稈における出穂期までの $\Sigma T_{10}$ 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) の平均気温は 1997 年では T1~T5 で 18.5~26.1  $^{\circ}C$  と温度勾配は 7.6  $^{\circ}C$  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  $^{\circ}C$  と 1  $^{\circ}C$  高く, t4 は T4 とほぼ同じ 25.0  $^{\circ}C$  であったので, 温度勾配は 5.3  $^{\circ}C$  と小さかった (第 1 表). 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準平年値は, これより低い青森県小田野沢, 六ヶ所の 2

地点を除くと 18~26  $^{\circ}C$  の範囲にあり, この試験の気温設定で東北地域の気象を再現できた. 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.  $\Sigma T_{10}$  の値は平均気温が高くなると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  $^{\circ}C$ , 1999 年では 22.2  $^{\circ}C$ , 幼穂形成期間は同様に 23 日, 24 日とほぼ同じであり,  $\Sigma T_{10}$  は 1997 年では 287.1  $^{\circ}C$  日, 1999 年では 287.5  $^{\circ}C$  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  $\Sigma T_{10}$  は平均値に基づき 290  $^{\circ}C$  日と設定した.

##### 2) 幼穂形成期間における各発育ステージの $\Sigma T_{10}$ 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,  $\Sigma T_{10}$  と幼穂長の関係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:  $\Sigma T_{10}$ .

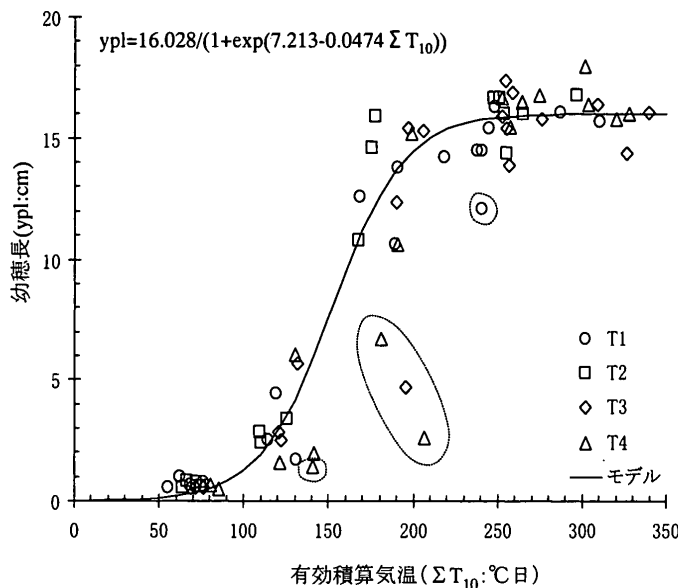
であらわすこととした (第 1 図). 外れ値を除いて, 主稈総葉数 14 葉と 15 葉は同じ方程式となる帰無仮説を立て検定すると, その確率は 0% であり, 主稈総葉数 14 葉と 15 葉は異なるロジスティック方程式となる. 両方程式を比較すると, パラメータ a は 14 葉が小さく, r, K は大きかった. 次に, 主稈総葉数 15 葉について, 全ての温度処理区は同じ方程式となる帰無仮説を立て検定すると, その確率は 14% となり, 帰無仮説が誤りとはいえなかった. そこで, 外れ値を除く全ての温度処理区の主稈総葉数 15 葉の値をまとめて非線形最小二乗法で近似すると, 次式が得られた.

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

第2表 各発育モデルの基準温度、上限温度、積算開始日および有効積算気温。

	葉齢進捗モデル <sup>1)</sup>	幼穂の発育モデル				玄米の発育モデル			
基準温度	10℃	10℃				10℃			
上限温度	24℃	なし				なし			
積算開始日	葉齢調査時	幼穂形成期				出穂期			
各発育ステージ		花粉母細胞分化期	減数分裂期	花粉内容充実期	出穂期	乳熟期	糊熟期	黄熟期	成熟期
までの有効積算気温(℃日)	出葉間隔を予測	100	160	260	310	160	280	400	530

1) 神田ら(2000)を参照。



第1図 有効積算気温と幼穂長の関係(1999年)。

品種:「あきたこまち」。主穂総葉数:15葉。点線内は外れ値。

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 $\Sigma T_{10}$ の関係をまとめると、主穂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。

### 3) 圃場における株内の出穂変異を考慮した $\Sigma T_{10}$ 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 $\Sigma T_{10}$ は1998年と1999年の変動が大きく、12品種の平均は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℃日、1999年では33.6℃日であり、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、葉齢進捗モデルによる推定幼穂形成期から出穂期までの $\Sigma T_{10}$ は葉齢進捗モデルに適合性の悪い「おきにいり」で大きい、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、出穂の早晚と $\Sigma T_{10}$ とに一定の関係はなく、圃場では幼穂形成期間の

$\Sigma T_{10}$ は310℃日であると考えられた。

ここで、ポット試験の主穂と圃場群落の幼穂形成期間の $\Sigma T_{10}$ 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穂の出穂日と主穂及び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穂の出穂日と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、主穂の幼穂形成期間の $\Sigma T_{10}$ 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℃日を加算した(第2表)。

### 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 $\Sigma T_{10}$ を算出した(第3表)。これらの $\Sigma T_{10}$ 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 $\Sigma T_{10}$ は出穂の早晚との関係からみると、出穂が早い品種ほど $\Sigma T_{10}$ 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℃日と大きく、「ひとめぼれ」「ササニシキ」の値が114.9、125.8℃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 $\Sigma T_{10}$ は156.7、156.5℃日と、160℃日程度となっていたが、「ササニシキ」では138.8℃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 $\Sigma T_{10}$ 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 $\Sigma T_{10}$ の品種間変異は変動の大きい1998年の乳熟期では89.9℃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℃なので6.4日の幅であった。1999年は48.2℃日で3.4日であった。他の発育ステージの変異幅は39.3～67.2℃と乳熟期より小さいが、成熟期は日平均気温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 $\Sigma T_{10}$ 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 $\Sigma T_{10}$

第3表 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 ( $\Sigma T_{10}$ ).

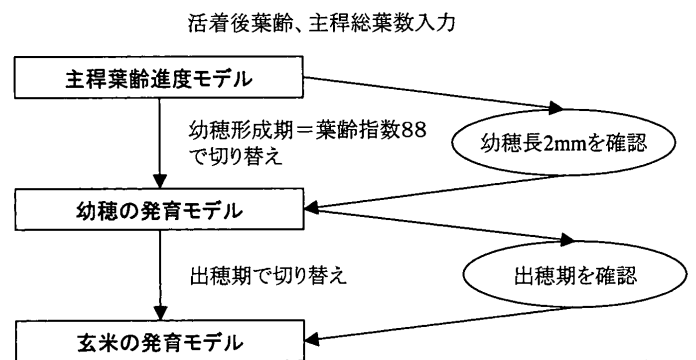
品種	出穂期		乳熟期		糊熟期		黄熟期		成熟期	
	1998	1999	1998	1999	1998	1999	1998	1999	1998	1999
かけはし	7月28日	7月25日	156.9	168.2	275.6	274.5	391.6	408.0	535.6	508.0
むつほまれ	8月2日	7月30日	168.4	156.2	283.2	262.6	419.6	395.5	544.8	523.0
つがるロマン	8月3日	7月31日	204.8	156.7	296.6	260.1	407.1	378.4	550.0	505.9
あきたこまち	8月5日	8月2日	173.3	158.5	289.3	257.0	408.5	384.8	544.3	507.5
じょうでき	8月7日	8月2日	160.6	158.5	282.7	274.3	393.6	395.9	530.6	531.1
ゆめさんさ	8月7日	8月3日	160.6	141.4	282.7	257.2	393.6	367.7	530.6	490.4
どまんなか	8月8日	8月3日	162.9	178.3	282.6	293.2	395.9	390.7	520.5	526.5
おきにいり	8月10日	8月5日	156.6	174.0	276.4	292.3	402.8	419.8	517.1	557.6
ひとめぼれ	8月13日	8月6日	114.9	156.5	268.4	290.0	383.5	413.4	505.7	540.1
ササニシキ	8月13日	8月7日	125.8	138.8	290.2	272.3	393.4	406.7	514.6	535.7
はえぬき	8月12日	8月6日	150.7	187.0	257.3	304.3	383.7	413.4	551.7	540.1
コシヒカリ	8月21日	8月13日	132.1	149.4	269.5	288.0	370.0	414.7	495.9	538.4
12品種	平均		155.6	160.3	279.5	277.2	395.3	399.1	528.5	525.4
	変動係数(%)		15.1	9.0	3.9	5.8	3.3	4.1	3.4	3.6
2年	平均		158.0		278.3		397.2		526.9	
	変動係数(%)		12.2		4.8		3.7		3.5	

を2か年で平均すると、乳熟期 158.0℃日、糊熟期 278.3℃日、黄熟期 397.2℃日、成熟期 526.9℃日であった(第3表)。これらの平均値に基づいて、出穂期から乳熟期の $\Sigma T_{10}$ を160℃日、糊熟期を280℃日、黄熟期を400℃日、成熟期を530℃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主稈葉齢進度モデル、幼穂の発育モデルならびに玄米の発育モデルを用い(第2表)、幼穂形成期と出穂期で順次、次のモデルに切り替えて使用することとした(第2図)。2000年の圃場における実測と本モデルによる推定の差を第4表にまとめた。

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。また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 $\Sigma T_{10}$ が小さいことを意味し、とくに「ササニシキ」は過去の $\Sigma T_{10}$ からも出穂期から乳熟期への到達日数が短いといえる(第3表)。



第2図 幼穂と玄米の発育モデルの利用法。

また、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。次に、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、乳熟期から成熟期までの誤差平均は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。

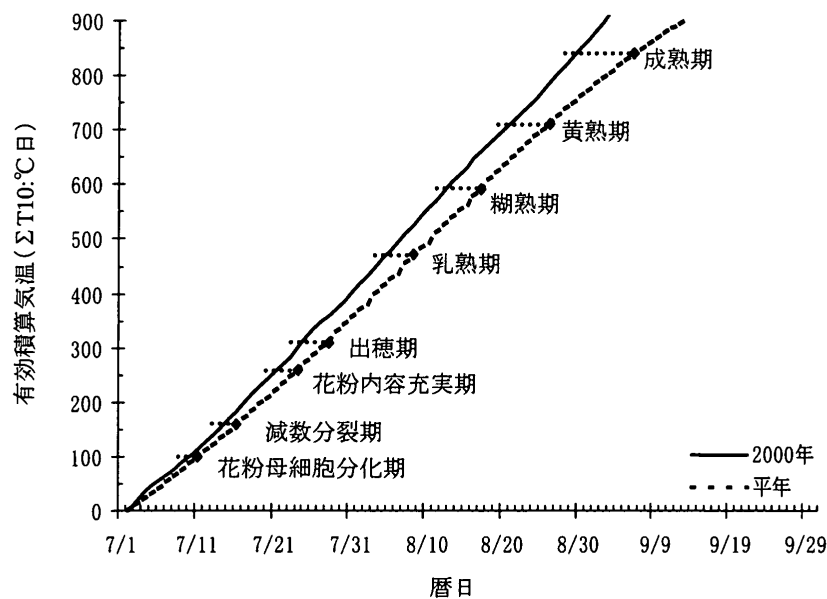
亘理町の農家圃場では、葉齢進度モデルにより予測した幼穂形成期の誤差は-1日であった。確認した幼穂形成期から出穂期を予測すると、誤差は3日であった。予測出穂期から乳熟期を予測すると誤差は1日、糊熟期は1日、黄熟期は0日、成熟期は0日で、乳熟期から成熟期の誤差平均は0.7日であった(第3図、第5表)。亘理町の農家圃

第4表 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<sup>1)</sup> (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 均 <sup>3)</sup>	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 <sup>2)</sup>	2.2	1.2	1.2	1.8	3.0	2.1	2.1	1.2	1.1	2.2	1.7	1.6	2.5	2.5	2.6	2.7	2.6
11品種 <sup>4)</sup>	2.0	1.1	1.2	1.9	3.1	2.1	2.2	0.9	1.1	2.3	1.7	1.6	1.9	2.2	2.4	2.1	2.2

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。4) 11品種は「おきにいり」を除く。



第3図 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).

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

場を含む5品種9圃場の主稈葉齢進捗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(データ省略)。

## 考 察

### 1. 発育モデルにおける基準温度 10°C の妥当性

水稻冷害早期警戒システムにおいては、東北全域の水稻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、既報の葉齢進捗モデル(神田ら 2000)と組合わ

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テージを予測するものである。試験圃場の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、試験圃場と農家圃場では花粉母細胞分化期、減数分裂期、花粉内

第5表 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
2000年	7月23日	8月3日	8月11日	8月20日	8月28日
観察	7月26日	8月4日	8月12日	8月20日	8月28日

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

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する。

玄米の発育モデルは農林水産省統計情報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、試験圃場における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℃以下の冷温を受けると、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、穎花も生長する時期であって、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), 穎穀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のも高いのは減数分裂期 (柿崎・木戸 1938, 福家・近藤 1939, 寺尾 1940a, 田中 1962, Hayaseら 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ら 1988)。

以上のように、冷温により1穂穎花数の減少、穎穀サイズの減少、不稔の発生が起きる。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の発生の監視が重要なものとなる。この不稔の発生は、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2mm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、穎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、登熟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穎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、decimal code 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ら 1974, Lancashireら 1991, Chinら 1991)。Chinら (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、圃場では達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



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 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障害回避、落水時期、適期刈り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、アメダス監視地点としている（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、主稈葉齢進捗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（第 2 図）。このときの予測精度を、主稈葉齢進捗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、宮城県亘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、補正の必要はないともいえるが、基本的には幼穂形成期と出穂期で補正して利用することが望ましい。

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、葉齢進捗モデルを組み合わせることで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。

最後に、冷害回避の基本技術として、八柳（1960）は安

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ている。この考えは後に内島（1983）によって体系化され安全作期として提唱されている。早期警戒システムではこれに加えて、本モデルで予測した発育ステージに基づき、障害型不稔に対する深水管理、玄米の高温障害に対する灌漑水の掛け流し管理、いもち病の発生予測に応じた適期防除など、きめ細やかな対策技術を提示することにより、安全多収から安定高品質へ、安全作期から一步すすめた安定作期を提案していく計画である。

謝辞：実験遂行に協力を頂いた当時業務 3 科の大森保夫氏、工藤一博氏、藤村豪氏、圃場の提供および調査に協力頂いたモニター農家の宮城県亘理町小野文衛氏、松山町小原勉氏、只埜和臣氏、松川薫氏、岩出山町小松庸一氏、山形県鶴岡市木村日出夫氏、最上町山口仁氏に厚く御礼申し上げます。

#### 引用文献

- 荒川市郎・本馬昌直・岡部清信 1994. 積算気温による水稻の幼穂発育モデル. 東北の農業気象 39: 28—32.
- Chin, M., A. Leohken, D. Sozzi and J. Williams 1991. A modified Zadok's decimal code for the growth stages of rice. Trop. Pest Manage. 37: 277—280.
- 長南信雄 1966. 気温が水稻の葉原基発生と出葉に及ぼす影響. 日作東北支部報 8: 13—14.
- 福家豊・近藤頼巳 1939. 水稻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, 特に稔實粒数の減少機構に就いて. 農及園 14: 2049—2060, 2261—2269.
- 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 水稻の出穂期と気温との関係. 農業気象 18: 109—117.
- Hayase, H., T. Satake, I. Nishiyama and N. Ito 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 柿崎洋一・木戸三夫 1938. 水稻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.
- 神田英司・鳥越洋一・小林隆 2000. 水稻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.
- 木戸三夫 1941. 水稻の幼穂の發育並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.
- 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稻適地区分. 第 2 報 障害型冷害危険度の推定. 山形農試研報 27: 23—30.



- Lancashire, P.D., H. Bleiholder, T. Van Den Boom, P. Langeluddeke, R. Stauss, E. Weber and A. Witzemberger 1991. A uniform decimal code for growth stages of crop and weeds. *Ann. Appl. Biol.* 119: 561–601.
- 松島省三・真中多喜夫 1956. 水稻幼穂の發育經過とその診断—全茎を対象とした幼穂の發育經過とその基準及び各發育段階の特徴—. 農業技術協会, 東京. 1–57.
- 松島省三・角田公正・真中多喜夫 1958. 水稻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.
- 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: 156–169.
- 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.
- 長戸一雄・江幡守衛 1965. 登熟期の高温が穎花の發育ならびに米質に及ぼす影響. *日作紀* 34: 59–66.
- 中川博視・堀江武 1995. イネの發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.
- 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.
- Satake, T. and H. Hayase 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.
- 佐竹徹夫 1980. イネ冷害の機構と栽培的対策. *農業気象* 35: 251–261.
- Satake, T. and S. Koike 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.
- Satake, T., S. Y. Lee, S. Koike and K. Kariya 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. J. Crop Sci.* 57: 234–241.
- 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.
- Suge, H. and A. Osada 1967. Physiology of flowering in rice plants. 1. Synthesis and translocation of floral stimulus. *Proc. Crop. Soc. Japan* 36: 32–36.
- 田村繁司 1956. 水稻の登熟障害に関する一考察. *青森農試研報* 3: 21–26.
- 田中稔 1962. 水稻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.
- Tashiro, T. and I.F. Wardlaw 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.
- 寺尾博・大谷義雄・白木實・山崎正枝 1940a. 水稻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.
- 寺尾博・近藤頼己・土井彌太郎・泉清一 1940b. 水稻冷害の生理學的研究 (豫報). [IV] 開穎及び授精作用に関する低温障害の品種間差異. *日作紀* 12: 203–208.
- 鳥越洋一 1998. 東北地域における水稻冷害早期警戒システム. *システム農学* 14: 142–149.
- 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.
- 内島立郎 1983. 北海道, 東北地方における水稻の安全作季に関する農業気象學的研究. *農技研報* A31: 23–113.
- 内嶋善兵衛 1976. 有効積算気温の永年変化と変動特性. *農業気象* 31: 185–194.
- 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). *農及園* 35: 931–934, 1095–1098, 1248–1252, 1425–1428, 1565–1569, 1717–1722.
- 吉田昌一 1986. 稲作科学の基礎. 博友社, 東京. 52–55.
- Zadoks, J.C., T.T. Chang and C.F. Konzak 1974. A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Res.* 14: 415–421.

**A Simple Model to Predict the Developmental Stages of Rice Panicles Using the Effective Accumulative Temperature**: Eiji KANDA\*, Yoichi TORIGOE and Takashi KOBAYASHI (*Nat. Agr. Res. Cent. for Tohoku Region, Morioka 020-0198, Japan*)

**Abstract**: An early warning system for preventing the decrease in rice yield by cool summer damage in the whole Tohoku area is constructed. This needs to predict the developmental stages of rice plants from the effective accumulative air temperature above 10°C. The panicle development model, which predicts the time of pollen mother cell differentiation, meiosis, pollen ripening and heading was constructed using the effective accumulative temperature. The model was made by grown in a Gradiatoron with a daily mean temperature gradient from 18 to 26°C, and modified considering the difference in heading date between the main stem and the whole tillers in the field. The kernel developmental model, which predicts the time of milk ripe, dough ripe, yellow ripe and full-ripe stages from heading stage. The values of effective accumulative air temperature were decided in the field at Morioka in 1998 and 1999 for 12 leading cultivars of Tohoku District. The mean error of heading date and full-ripening date predicted by the model in the 12 varieties at Morioka in 2000 was 1.2 and 2.1 days, respectively. The usefulness of these models was practically validated in the rice growers' fields in Miyagi and Yamagata Pref. Furthermore, the usages combining these two models with the leaf age predicting model reported previously make it possible to predict the dates of each developmental stage from rooting to full-ripe stage.

**Key words**: Cool summer damage, Developmental model, Early warning system, Effective accumulated air temperature, Kernel, Paddy rice, Young panicle.