

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

神田英司*・鳥越洋一・小林隆

(東北農業試験場)

要旨: 水稻冷害の早期警戒システムにおいて東北全域の生育監視に適用する止葉展開期までの発育ステージを葉齢で予測するモデルを作成した。本モデルでは、主稈葉齢が1進むのに必要な10~24°Cの有効積算気温を出葉間隔とした。葉齢増加による出葉間隔の転換点を主稈葉齢9.1と11.1とし、3時期に分割した。出葉間隔はPhase Iは一定、Phase IIでは一定の割合で拡大し、Phase IIIで再び一定とする。葉齢は出葉間隔に基づいて、日々の葉齢進度を積算して推定する。東北の基幹12品種のうち、1997年と1998年の7品種の盛岡における出葉経過からモデルのパラメータを決定した。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、「おきにいり」を除いた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。作成したモデルを宮城県松山町と山形県最上町の農家圃場で検証したところ、予測精度は比較的高かった。ただし、出葉間隔は分けつの影響も受けるため、初期に分けつ形成が旺盛な生育型では予測精度が低くなった。

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

東北地域は1999年現在の水稻栽培面積が全国の25.7%, 生産量28.1%を占める一大生産地域であり, 10a当たり収量も564 kgとトップクラスである(注: 農林水産省統計情報部, 農林水産統計速報, 1999)。しかし, 過去28年間に7回とほぼ4年に1回の頻度で冷害に遭遇してきた。被害の最も大きかった1993年の作況指数は東北全体で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であった。東北農政局, 仙台管区気象台, 東北6県, 東北農業試験場は, この冷害を契機に1994年に東北地域水稻安定生産推進連絡協議会を発足させ, 水稻冷害の早期警戒システムの構築を開始した(鳥越1998)。このシステムでは東北全域を対象に冷害気象と水稻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, やませ気象の把握を基準に71ヶ所を選定した。気象情報を基に冷害対策技術の活用および冷害時の迅速な被害診断を行うためには, 全発育ステージを追跡的に把握することが不可欠である。そこで, 全監視地点に適用できる発育ステージの予測モデルが必要となる。

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°C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。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あらわし, 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稻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・同伸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(1957)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。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予測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ので, ここに報告する。

材料と方法

1. 東北農業試験場における作柄診断試験

実験には東北農業試験場(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作柄診断試験を行った。1区面積52 m², 供試品種は監視地点で栽培されている品種を中心に各県のバランスも考慮して12品種を選出した。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。生育調査を各区に 1 ヶ所連続 10 株で約 10 日ごとに、茎数、草丈、SPAD 値、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 °C、上限は吉田 (1986) より 24 °C 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 °C の時は (T-10)、24 °C 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き、その後平年より高温に推移した。このため、他の 2 年よりも分げつ開始期、有効分げつ終止期が遅れた。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、分げつ開始期、有効分げつ終止期、最高分げつ期はこの 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予測モデルを作成し、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農家圃場

1999 年には宮城県松山町の一般農家 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。茎数と株を構成する 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 株を 1 株あたりの本数を同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。最上町の植えつけ本数は 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。鶴岡市の植えつけ本数は 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。

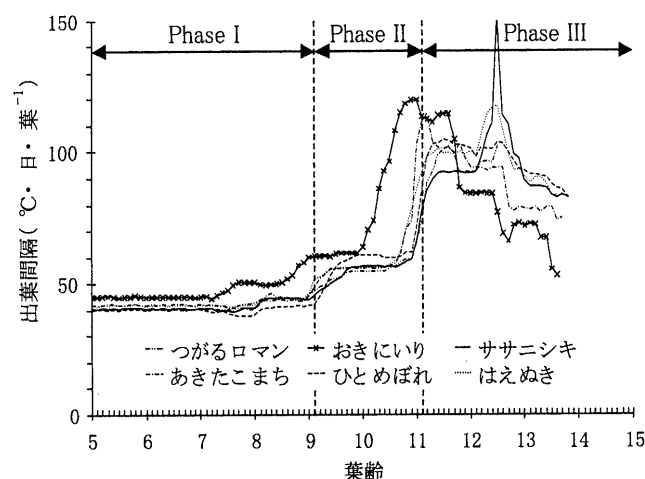
結 果

1. モデルの作成

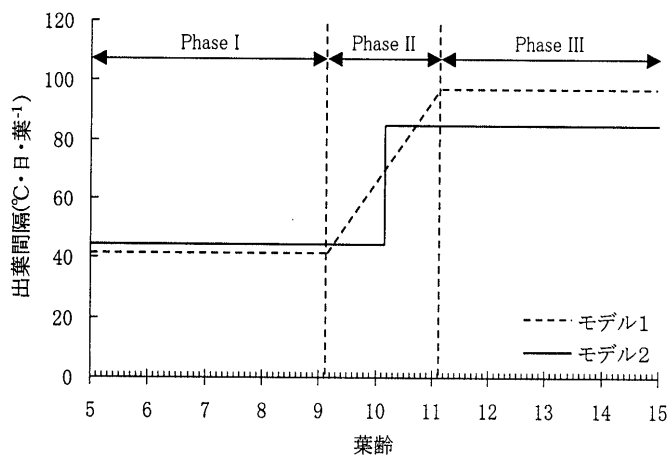
ある日の葉齢は前日の葉齢に $\Sigma T_{10,24}$ による伸展分が加

算されたものと考え、調査日間の $\Sigma T_{10,24}$ をこの期間の葉齢の展開分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 品種を例に第 1 図に示した。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 (1957) 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 (第 2 図)。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。他はさらに単純化し 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第 2 図における面積がある葉齢から次の葉齢になる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



第 1 図 主稈葉齢が 1 進むのに必要な有効積算気温の推移。



第2図 葉齢予測モデルの概念図。

$\Sigma T_{10,24}$ 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(第1表)。モデル1についてみると, Phase Iの出葉間隔は $39.9 \sim 43.6^{\circ}\text{C 日葉}^{-1}$, 7品種平均は1997年 $41.8^{\circ}\text{C 日葉}^{-1}$, 1998年 $40.9^{\circ}\text{C 日葉}^{-1}$ で両年平均は $41.4^{\circ}\text{C 日葉}^{-1}$ であった。Phase IIに出葉間隔の増分は $28.2^{\circ}\text{C 日葉}^{-2}$ となり, Phase IIIの出葉間隔は $97.8^{\circ}\text{C 日葉}^{-1}$ であった。モデル2の出葉転換点前出葉間隔は7品種平均で1997年は $45.1^{\circ}\text{C 日葉}^{-1}$, 1998年で $42.9^{\circ}\text{C 日葉}^{-1}$ で両年平均は $44.1^{\circ}\text{C 日葉}^{-1}$ であった。出葉転換後の両年平均は $85.2^{\circ}\text{C 日葉}^{-1}$ 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。

2. モデルの検証

(1) 東北農業試験場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(第2表)。出葉間隔の推移の異なる「おきにいり」ではモデル1による予測葉齢は最大0.96葉, モデル2では1.22葉進み, 誤差平均でも0.77葉, 0.85葉と他の11品種の誤差平均 $0.13 \sim 0.43$ 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0.25葉であり, 日数に換算して1.7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 $0.23 \sim 0.40$ 葉と若干大きかった。出葉転換点前の6月3日と14日はモデル1は0.13, 0.16葉, モデル2で0.15, 0.22葉と小さかった。出葉転換点後の7月16日と26日はモデル1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 $0.13 \sim 0.33$ 葉とよく一致した。そこで, 広域適応性品種である「あきたこまち」, 「ひとめぼれ」, およびパラメータを作成した7品種に含まれない「コシヒカリ」と「おきにいり」の出葉経過を追跡的に予測した結果を第3図に例示した。「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実測値は予測線上にほぼ存在した。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」は出葉転換点前は予測線と一致しているが, 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3品種と同様に実測値は予測線上にほぼ存在した。「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。

(2) 宮城県および山形県の農家圃場

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(第4図)。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げつ

第1表 最終葉15葉の個体における出葉間隔($^{\circ}\text{C 日 葉}^{-1}$)と出葉間隔の変化率($^{\circ}\text{C 日 葉}^{-2}$)。

品種名	モデル1						モデル2			
	Phase I 出葉間隔		Phase II 出葉間隔の変化率		Phase III 出葉間隔		10.1葉まで 出葉間隔		10.1葉から 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)	

() の数字は変動係数(%)。

第2表 盛岡における調査時葉齢の実測値と推定値の比較。

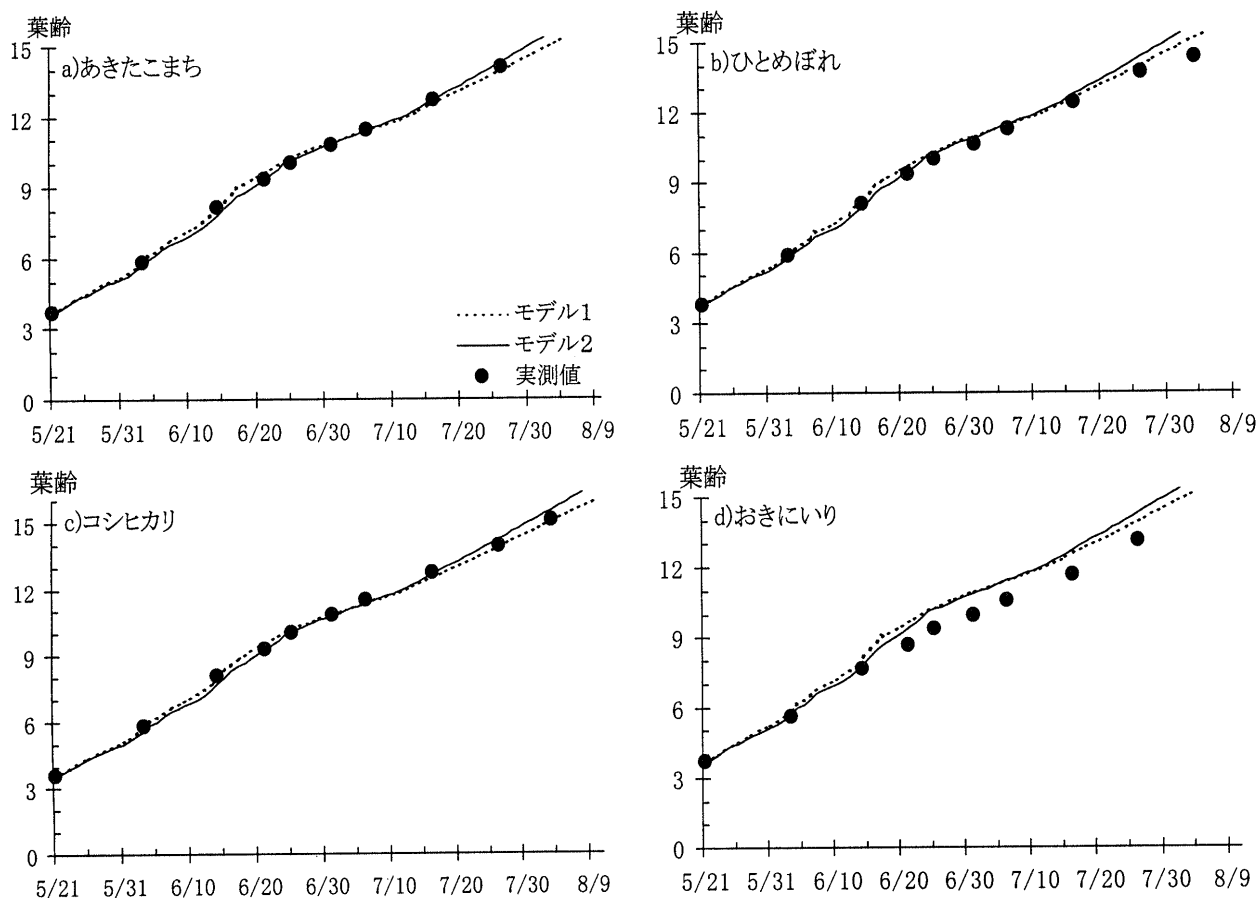
品種名	モデル1							モデル2						
	6/3	6/14	6/25	7/6	7/16	7/26	誤差 平均	6/3	6/14	6/25	7/6	7/16	7/26	誤差 平均
かけはし	-0.12	-0.16	-0.52	-0.30	0.08	—*	0.28	0.01	0.11	-0.45	-0.30	-0.09	—	0.25
むつほまれ	0.10	-0.05	-0.49	-0.23	0.03	—	0.25	0.23	0.22	-0.44	-0.21	-0.12	—	0.26
つがるロマン	0.03	0.07	-0.21	0.18	0.46	0.54	0.31	0.16	0.34	-0.15	0.20	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	0.00	-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	-0.50	-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	0.20	0.20	-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	-0.10	-0.11	-0.36	-0.23	-0.18	-0.28	0.23	0.03	0.16	-0.30	-0.23	-0.34	-0.65	0.34
ササニシキ	-0.14	-0.24	-0.48	-0.14	0.00	0.00	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	-0.20	-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	0.36	0.33	0.14	0.23	0.42	0.34	0.40	0.57	0.37
11品種**	0.13	0.16	0.40	0.23	0.21	0.25	0.25	0.15	0.22	0.34	0.23	0.26	0.45	0.28

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。

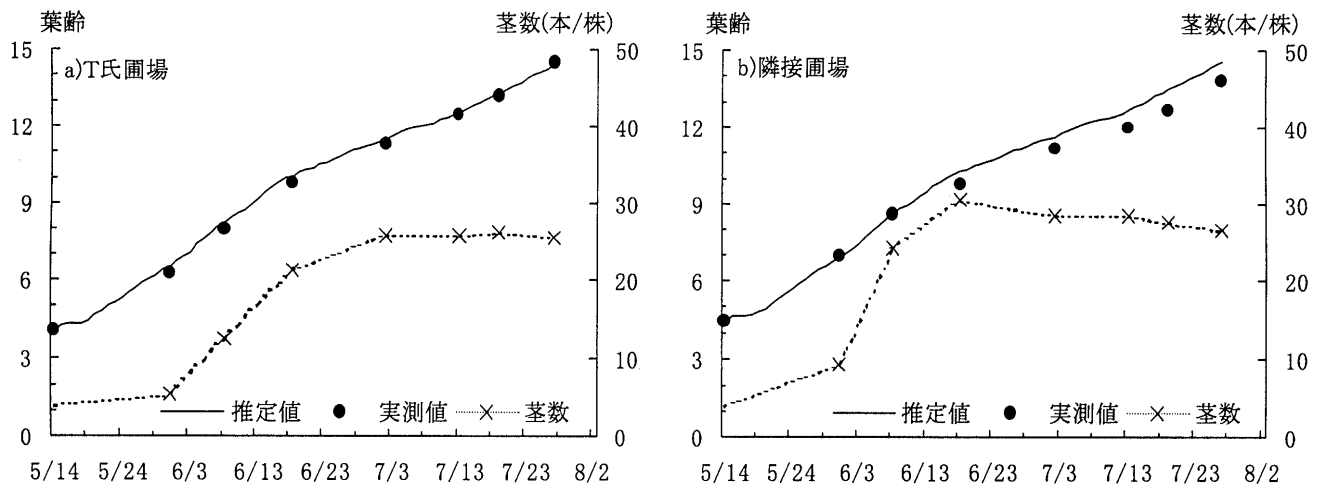
誤差平均 = $\sqrt{(\text{実測値} - \text{予測値})^2 / n}$ (n は対象品種数または調査回数)。



第3図 1999年厨川における葉齢進度の推定と実測葉齢。

の発生が抑制され、7月19日に最高分げつ期となった。その隣接圃場は慣行的な浅水管理が行われ、生育初期から多けつとなり最高分げつ期は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日であったが、隣接水田では6月18日に実測がモデルよりも0.50葉遅れと差が大きくなりはじめ、7月19日には最大の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



第4図 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。

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。

考 察

1. 葉齢予測モデルと葉の形態形成との関係

出葉とは葉身がすぐ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個の葉原基と2個の幼葉が存在する。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 1959, 1962, 1963 a, 1963 b)。これを基に主稈総葉数が15葉の個体で葉齢予測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号分げつの第1葉からの2次分げつが出現を開始する時期であり(片山 1951)、分げ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)、日長には影響を受けない(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監視地点では気温、品種、日長、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となるとした。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程度の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(1963 b, 1963 c)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

とからは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°C、生育期間の平均で2.6°C高く、日平均気温が24°Cでも水温は30°C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°Cまたは24°C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°C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。高温年の今年は盛岡でも梅雨明け後に日平均気温で24°C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°Cの上限を設けたほうが推定精度が良かった。これらから出葉間隔に上限温度24°Cを設定したほうがよい。このように $\Sigma T_{10,24}$ に基づく出葉間隔を用いれば気温、品種、日長に関係なく葉齡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齡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年の葉齡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)は出葉転換点は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、日長とも関係が無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。これは葉齡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)とも一致する。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で主稈葉齡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定でき、

Phase IIの時期は主稈葉齡数に関係なく一定と考えてよい。

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長くなる(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、葉齡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げつの他に栽植密度、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に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、葉齡指数に変換するための主稈葉齡数が必要となるが、主稈葉齡数はこの3年間で1葉近く変動した品種もあった。主稈葉齡数は低温によって変動し(細井 1976)、窒素が少ないほど、密植なほど主稈葉齡数が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齡は予測できても、葉齡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と考えられる。中川・堀江(1991)はDVIと気温による葉齡増加速度とDVIから主稈葉齡数を決定している。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、設定した主稈葉齡数とのずれが生じた場合には、止葉が確認された後、修正して葉齡指数を再計算し、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。これについては現在、幼穂分化後に特化したモデルを開発している。今後は主稈葉齡予測モデルで幼穂形成期に到達した時点、または観察により幼穂形成期に達した時点からこの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い。

謝辞: 実験遂行にご協力を頂きました当場業務3科の大森保夫氏、工藤一博氏、藤村豪氏および木村力也氏、水稻圃場の提供および調査にご協力頂きましたモニター農家の松山町・只埜和臣氏および小原勉氏、最上町・山口仁氏、鶴岡市・木村日出夫氏に厚く御礼申し上げます。

引用文献

- 朝隈純隆 1958. 生態的特性からみた水稻早晩期用品種(1),(2). 農業技術 13: 152-154, 204-206.
- 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. 日作学会東北支報 8: 13-14.

- 伊達達 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.
- 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. 佐賀大農學 12:1—117.
- 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.
- 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.
- 長谷川浩 1959. 水稲の出穂速度と土壌温度. 農及園 34:1795—1798.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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—, 養賢堂, 東京. 1—117.
- 薦田快夫 1957. 水稲の早期栽培と晩期栽培. 養賢堂, 東京. 3—46.
- 栗山英雄 1965. 稲の出穂性に関する研究. 農技研報 D13:275—353.
- 松島省三 1957. 水稲収量の成立と予察に関する作物学的研究. 農技研報 A5:1—271.
- Miglietta, F. 1991. Simulation of wheat ontogenesis. I. Appearance of main stem leaves in the field. Clim. Res. 1:145—150.
- 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.
- 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.
- 中掘登志光・三本弘乗・本田勝雄・松田幹男・佐藤尚雄 1974. 水稲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). 日作東北支報 16:15—16.
- 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.
- 玉置雅彦・山本由徳 1997. 遮光および施用窒素量が水稲の出穂速度と分けつ発生に及ぼす影響—とくに出穂転換点に着目して—. 日作紀 66:29—34.
- 田中明 1958. 水稲の出穂期に関する栄養生理—主稈葉数と出穂間隔の問題—. 農業技術 13:356—393.
- 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.
- 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 A 11:75—174.
- 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気象学的研究. 農技研報 A 31:23—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.
- 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.
- 山崎耕宇 1959. 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.
- 山崎耕宇 1962. 水稲の葉の形態形成に関する研究. I. 葉の発育経過に関する一般的観察. 日作紀 31:371—378.
- 山崎耕宇 1963a. 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発育の相違について. 日作紀 32:81—88.
- 山崎耕宇 1963b. 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.
- 山崎耕宇 1963c. 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.
- 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.

A Model to Estimate the Increase of Leaf Number on the Main Culm of the Rice Plant: Eiji KANDA*, Yoichi TORIGOE and Takashi KOBAYASHI(**Tohoku Nat. Agr. Exp. Stn., Morioka 020-0198, Japan*)

Abstract: We are building an early warning system for preventing the decrease in rice-yield by cool summer damage. To monitor the developmental stage of rice plants in the whole Tohoku area, we constructed a model for estimating the plant age in leaf number. In the model, the sum of effective cumulative air temperature for 10—24°C necessary to advance the leaf number on the main culm by one was defined as the leaf emergence interval. The model predicts the plant age from effective cumulative air temperature. The leaf emergence interval was assumed to be constant in Phase I (before the leaf age 9.1), increase at a fixed rate in Phase II (between leaf age 9.1 and 11.1), and to be constant in Phase III (after leaf age 11.1). The parameters of the model were decided from the leaf-emergence interval of seven varieties among twelve leading varieties of Tohoku District in 1997 and 1998 in Morioka. The model estimated the leaf age of the 11 varieties excluding “Okiniiri” in Morioka in 1999 with the mean error of 0.25 leaf, which corresponds to 1.7 days. From the application of this model to the rice-growers’ fields in Miyagi and Yamagata Pref., the adaptability of this model was validated. However, in the growth types with vigorous tillering, the prediction accuracy was low because the leaf emergence interval was influenced by the number of tillers.

Key word: Cool summer damage, Developmental model, Early warning system, Effective accumulated air temperature, Paddy rice, Plant age in leaf number.