

収量予測・情報処理・環境

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

中園江*・井上君夫

(農業技術研究機構)

要旨：低温によって発生する水稻の不稔の防止および被害解析に必要な幼穂の発育段階を気象要素より推定する方法について検討した。発育段階の指標に幼穂長を用い、あきたこまち、コシヒカリ、日本晴を供試し、幼穂形成期からの日平均積算気温に対する幼穂の伸長過程を調査した結果、伸長過程はロジスティック式でよく表され、式中のパラメータを比較することにより晩生の品種ほど曲線の立ち上がりが遅い傾向にあることが明らかとなった。つくばで得られたコシヒカリのパラメータを用いて郡山で栽培された同一品種の幼穂長を推定した結果、年次によっては差が大きくなったが、その原因として 20℃ 以下の低温による幼穂発育の遅延が考えられた。低温感受性の高い小孢子初期の花粉を持つ危険期類花は、幼穂長が全長の約 30% に達するころ現れ、約 70% で割合が最大になり、出穂期に近づくにつれて減少する。この関係は日本の主要な栽培品種に共通していると推察された。幼穂形成期間中の圃場内における発育段階のばらつきは伸長中期で特に大きくなるが、各茎の幼穂長の実測値に先に求めた積算気温と幼穂長の関係式および幼穂長と危険期類花率の関係式を適用することにより、圃場内における発育段階のばらつきを考慮した冷害危険度の式を得た。この式から求められる冷害危険度に冷却量を乗じた重点化冷却量の積算値は、冷却量のみを用いるよりも正確に不稔歩合の推定ができることを示した。

キーワード：イネ、積算気温、発育段階、幼穂長、予測、冷害。

水稻の幼穂形成始期から出穂期にかけては、幼穂の分化、花粉の形成と穂の発達など、短期間のうちに急激な発育段階の変化が見られる。この間の発育段階の推移と形態の変化については、以前より詳細な研究が行われてきた(松島 1957)。この時期は環境の影響を受けやすく、特に低温によって発生する不稔は収量を大幅に低下させる。不稔の発生程度は低温来襲時の幼穂の発育段階により変動するため、それを正確に推定することが水管理に代表される防止対策や(西山ら 1969, 小林・佐竹 1979)、品種・地域間差や栽培管理の評価等の被害解析を行うために必要である。発育段階の指標としては幼穂長を用いることが多いが、幼穂の形成は葉鞘内で進むため外観から幼穂長を推定することは難しい。また幼穂の発育段階を葉齢指数、葉耳間長等の外部から見て判別できる指標で表す方法(松島 1957)もあり、特に葉耳間長は冷害危険期の形態的な指標として一般的に用いられている。しかし、これらの方法は圃場での葉齢のマーキングや観察が必要であり、時間を要すると共に危険期を精度よく事前に予測したり事後に推定することが難しい。この他に発育段階を出穂前日数などの暦日で表す方法もあるが、これには出穂日が明らかになっている必要があり、かつ出穂日は気象条件により年々変動するため必ずしも正確な指標とはならない。

近年、異常気象の頻発等を背景に気象要素より発育段階を精度よく推定する手法が求められており、特に水稻では堀江・中川(1990)の提唱した発育指数(DVI)による推定法が広く普及し、幼穂形成期および出穂期が1～2日の

精度で推定できるようになってきている。中川・堀江(1995)はさらにDVIの値をフロラル・ステージと対応させて幼穂の発育段階を気象の経過より推定・予測できることを報告している。また荒川ら(1994)は幼穂の発達過程を簡便に推定する重要性を指摘し、積算気温を用いた幼穂伸長モデルによる減数分裂期の推定が発育指数を用いたモデルと同等の精度が得られることを示している。このように栽培の現場で利用しやすい推定法とするためには、幼穂の発育段階を形態情報と具体的に対応させて予測する研究が必要であると思われる。

本報では、数種的水稻品種の幼穂長と積算気温の関係を定式化し、幼穂長と低温感受性の高い時期の関係および株内での発育差を考慮することによって、圃場内の冷害危険期を気象要素から推定する手法を検討した。

材料と方法

1. ポット試験

本試験は農業研究センター観音台地区において実施した。1996年は水稻品種コシヒカリ、1999年はあきたこまち、コシヒカリ、日本晴を供試した。1996年は5月1日、1999年は5月7日に化成肥料(14:14:14)5gを混合した水田土壌を1/5000a深型ワグネルポットに充填し、そこに催芽種子を播種した。1996年は1本植で2株、1999年は円形に20粒播きとし、分げつを順次切除して主稈のみとした。栽培は戸外で行い、幼穂形成期(10本の主稈の幼穂長の平均値が1mmを越えた日)から出穂期

(調査対象全体の主稈の50%が出穂した日)の間に自然光のグロースチャンパー(コイトトロン3S-135A型)にポットを搬入し、25, 22, 20°C(昼夜一定)の温度制御環境下で栽培した。幼穂長は幼穂形成期から数日毎に主稈をサンプリングして調査した。

2. 圃場試験

1998年と1999年はあきたこまち、コシヒカリ、日本晴を農業研究センター谷和原水田圃場で栽培した。1998年は5月19日、5月29日、6月15日に中苗を1株1本で30×15cmの密度で手植えし、1999年は5月17日、6月14日に1株1本および4本の2通りに同様の密度で手植えた。肥料は窒素、リン酸、カリを10aあたり成分量で8kg施用し、窒素は基肥として5kg、幼穂形成期前に緩効性肥料で3kgの割合で分施した。その他の栽培管理は茨城県の慣行法に準じて行った。両年ともに幼穂形成期間中に数回主稈をサンプリングし、幼穂長を調査した。1998年には上記3品種の他にむつほまれ、初星、ササニシキ、ひとめぼれ、月の光、ヒノヒカリ、コチヒビキを1本植で栽培し、幼穂形成期間中に数回主稈をサンプリングし、幼穂をホルマリン・酢酸・エタノールを混合した固定液(FAA)中で固定した後に薬を酢酸カーミンで染色し、光学顕微鏡で各穎花の花粉の発育ステージを観察した。本報ではSatake and Hayase (1970)と同様に4分子期から小孢子前期の花粉を含む穎花を低温感受性の最も高い冷害危険期穎花として、1穂中に含まれる割合を算出した。また1999年は4本植の各区より幼穂形成期間中に3回生育中庸な株を各回20株採取し、全茎の幼穂長および下位伸長節間径を調査した。また1本植のコシヒカリについて、葉耳間長を指標として生育のほぼ揃った個体を採取し、主稈と分けつに分けて同様の調査を行った。以上の試験は1998年は反復なし、1999年は2反復で行った。

また、幼穂長の推定式を他地域に適用可能かどうかを検討するため、福島県農業試験場における幼穂長の実測データを含む作況データおよびAMeDASデータを解析に用いた。

本研究の解析に用いた気温データは、観音台は農業環境技術研究所で測定されたもの、谷和原是水田圃場近傍の農業研究センター気象観測露場で測定されたものをを用いた。

1998年は7月上旬に高温が続いたが、中旬には平均気温20°C以下の日が6日間続き、全体的にやや低温傾向であった。1999年は7、8月共に平年よりも高温に推移した。

結 果

1. 積算気温と幼穂長、冷害危険期の関係

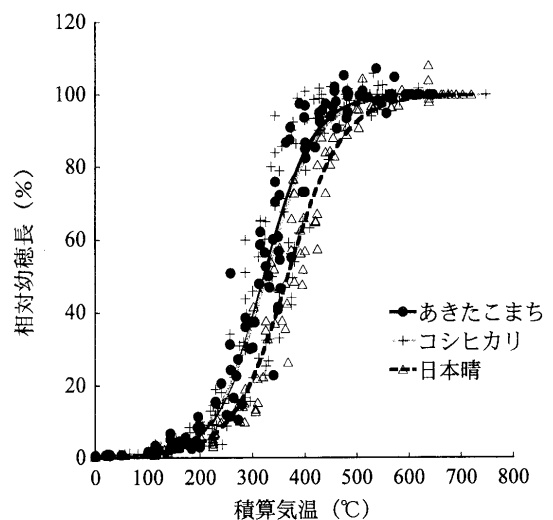
早晩生の異なるあきたこまち、コシヒカリ、および日本晴を供試した1996, 1998, 1999年の試験データから、日平均気温の積算値に対する幼穂長の推移は何れもS字曲線を描いた(第1図)。品種間や栽培条件によって最終穂長は異なるが、ここでは温度反応のみを明らかにするため、出穂日の穂長を100とし、これに対する割合を相対幼穂長とした。この関係を以下に示すロジスティック式にあてはめ、品種ごとのパラメータを最小二乗法で求めた(第1表)。

$$y = a / \{1 + \exp^{-b(x-c)}\} \quad (1)$$

y: 相対幼穂長, x: 幼穂形成始期からの積算気温(°C),

a, b, c: パラメータ

パラメータaは基準化した最終の穂長(=100), bはx=cでの曲線の傾き, cは幼穂長が最終長の半分に達した時の積算気温をそれぞれ表している。このロジスティック式は積算気温に対する幼穂の伸長過程をよく表現している。



第1図 幼穂形成始期からの積算気温に対する相対幼穂長の推移。

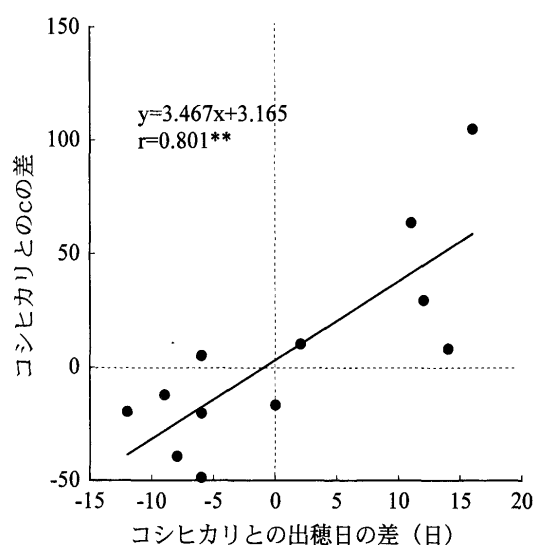
ただし相対幼穂長=(幼穂長/出穂日の穂長)*100
対象データは第1表に示す。

第1表 供試3品種の栽培法とロジスティック式のパラメータ。

品種	対象データ	a	b	c
あきたこまち	1998, 1999のポットおよび圃場データ(14組)	100	0.0213	323.1
コシヒカリ	1996, 1998, 1999年のポットおよび圃場データ(17組)	100	0.0203	325.5
日本晴	1998, 1999のポットおよび圃場データ(13組)	100	0.0189	366.9

第2表 つくば、郡山における栽培データおよびロジスティック式のパラメータ。

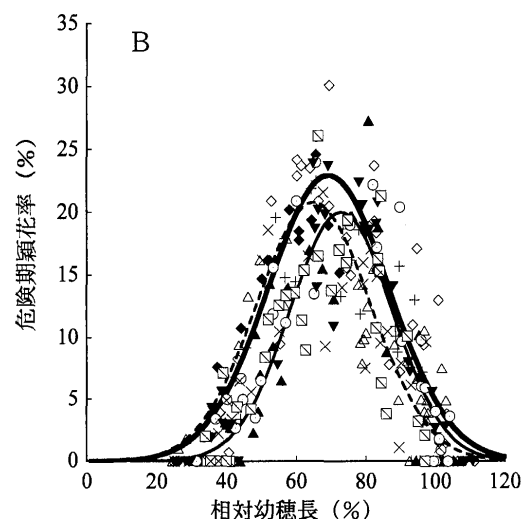
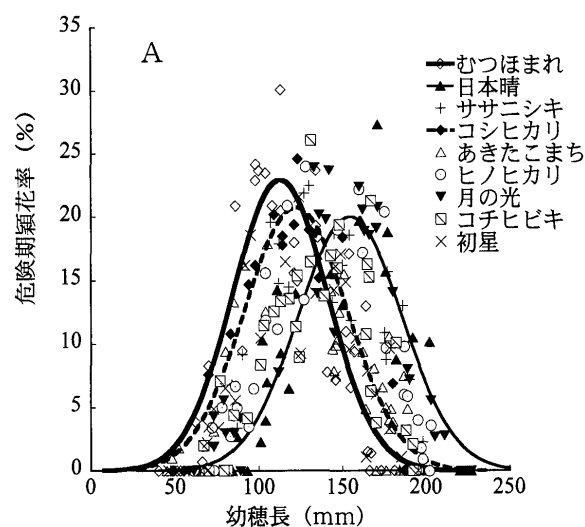
地域	年次	品種	栽培様式	移植日	幼穂形成期	出穂期	穂長 (mm)	a	b	c	伸長期間 (10 ~90%) の積 算気温 (°C)	幼穂期~出 穂期の積算 気温 (°C)
つくば	1999	コシヒカリ	4本植	5月17日	7月9日	8月2日	197	100	0.0216	365.2	203.6	659.4
		あきたこまち	4本植	5月17日	7月3日	7月27日	184	100	0.0227	316.6	193.2	618.9
		日本晴	4本植	5月17日	7月21日	8月14日	216	100	0.0202	394.8	217.3	702.6
		コシヒカリ	1本植	5月17日	7月11日	8月4日	207	100	0.0247	292.2	178.1	675.8
		あきたこまち	1本植	5月17日	7月5日	7月29日	194	100	0.0249	297.4	176.8	626.3
		日本晴	1本植	5月17日	7月23日	8月15日	228	100	0.0169	355.7	259.6	677.3
		コシヒカリ	4本植	6月14日	7月25日	8月14日	176	100	0.0227	358.2	193.3	593.7
		あきたこまち	4本植	6月14日	7月25日	8月14日	180	100	0.0213	341.6	206.6	593.7
		日本晴	4本植	6月14日	8月3日	8月28日	196	100	0.0190	366.3	230.7	719.9
		コシヒカリ	1本植	6月14日	7月25日	8月13日	194	100	0.0301	281.0	146.2	567.9
		あきたこまち	1本植	6月14日	7月26日	8月15日	198	100	0.0206	291.4	213.5	593.4
		日本晴	1本植	6月14日	8月4日	8月29日	212	100	0.0212	385.8	207.1	718.8
郡山	1987-98	コシヒカリ	作況試験	5月15日	7月24日	8月18日	174	100	0.0204	322.1	215.6	615.0
	1990-98	初星	作況試験	5月15日	7月13日	8月6日	173	100	0.0201	302.6	218.6	586.0
	1987-96	ササニシキ	作況試験	5月15日	7月16日	8月10日	173	100	0.0194	282.9	226.1	579.2
	1991-98	ひとめぼれ	作況試験	5月15日	7月14日	8月9日	180	100	0.0182	310.1	241.6	614.7

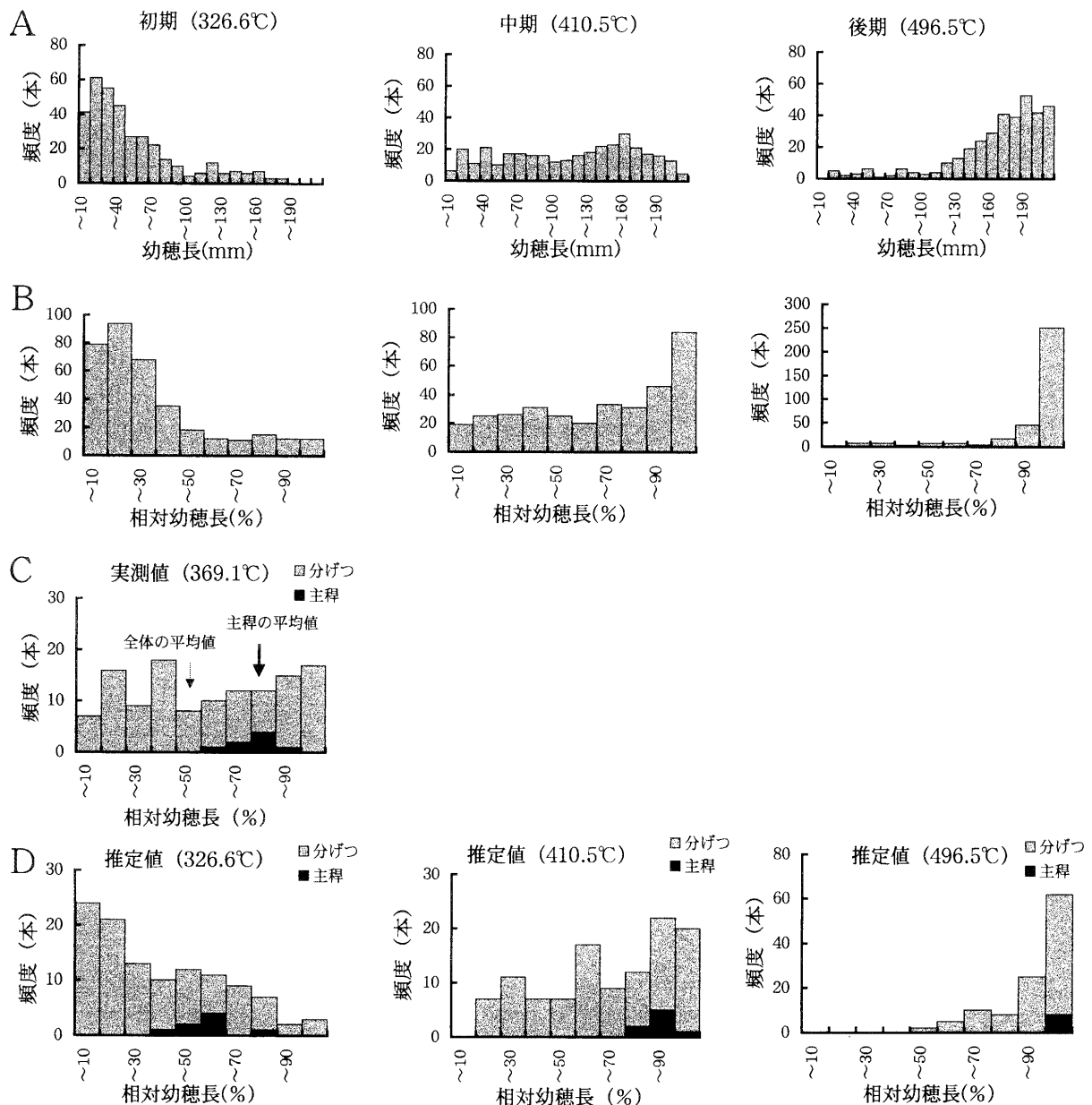


第2図 品種の早晩生とパラメータcとの関係。

** : 1%水準で有意。

日本晴は他の2品種と比較して曲線の立ち上がりがやや遅れ、それがcの値に現れている。そこで品種間差異を検討するために、つくばの1999年のデータに加えて郡山の幼穂長データも用いて、同一作期で数品種を栽培した場合のパラメータおよび幼穂長の伸長期間（相対幼穂長が10から90%の範囲に対応する積算気温の幅）を算出して比較した（第2表）。2地域のデータを同時に比較するために、両地域のコシヒカリを基準とし、他の品種との出穂期の差を横軸、cの差を縦軸にプロットしたところ、出穂期が遅い品種ほどcが大きくなることが示された（第2図）。一方、パラメータbおよび幼穂長の伸長期間と早晩生の間に相関は見られなかった。

第3図 幼穂長 (A) と相対幼穂長 (B) に対する危険期
類花率の関係。



第4図 圃場における幼穂形成期間中の幼穂長の頻度分布.

- A 幼穂長の頻度分布 (品種: コシヒカリ, 4本植).
 B Aを相対幼穂長に換算した場合の頻度分布.
 C 主稈・分げつ別の相対幼穂長の頻度分布 (品種: コシヒカリ, 1本植, [N-1]型).
 D Cから推定した積算気温 326.6℃, 410.5℃, 496.5℃での相対幼穂長の頻度分布.

つぎに、幼穂長を冷害危険期の指標とするために、幼穂長と低温感受性の変化を定量的に関連づけることを試みた。小孢子初期の花粉をもつ穎花を“危険期穎花”として、1本の穂の中に含まれる百分率（以下危険期穎花率とする）を幼穂長に対してプロットしたところ、第3図Aに示すような関係が得られた。危険期の穎花は幼穂長50～70 mmから190～240 mmの範囲に存在し、最大値で約20%となり、その後幼穂の伸長に従って減少するという凸型の曲線を描いた。しかし、危険期穎花の現れる幼穂長の範囲は品種によって異なり、例えば危険期穎花率が最大となる時の幼穂長は、最短のむつほまれで約114 mm、最長の日本晴で157 mmと幅が見られ、晩生の品種ほど

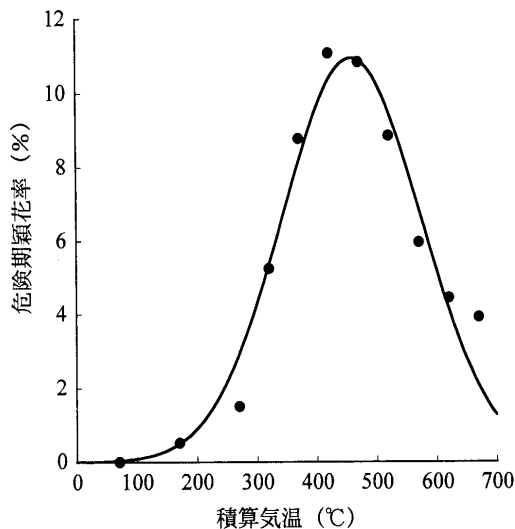
長くなる傾向が見られた。ただし、本実験における調査対象の9品種では早晩生と最終穂長に正の相関がみられたので、ここでも出穂日の穂長を100として相対幼穂長で表したところ、品種間差は小さくなった(第3図B)。全品種のデータを対象としてこの関係を以下の式で表した。

$$z = d * \exp\{- (y - e)^2 / f^2\} \quad (2)$$

z: 危険期穎花率 (%), d=19.547, e=69.4, f=22.9

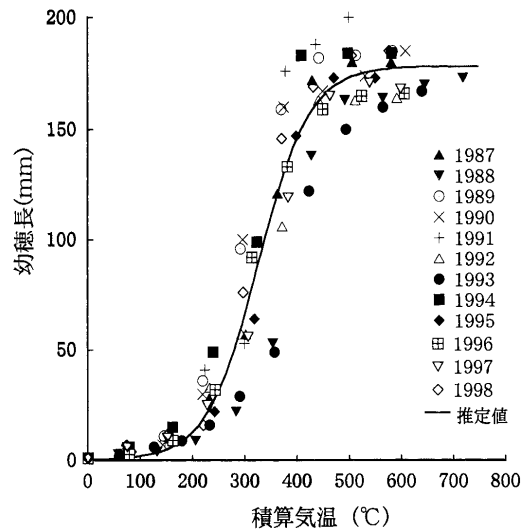
危険期穎花は幼穂長が全長の約30%に達するころに現れ、割合が約70%で最大になり、出穂期に近づくにつれて減少していく関係が共通した品種特性として得られた。

以上は、主稈を対象に調査した結果であるが、水稻の株は主稈と多くの分げつより構成されているため、株単位も



第5図 圃場内のばらつきを考慮した積算気温に対する危険期穎花率の推移。

しくは圃場単位での危険期の検討が必要になる。そこで、各茎の発育の差について検討するため、試験圃場で栽培したコシヒカリについて発育の初期・中期・後期の全茎の幼穂長の変異を調査したところ、第4図Aのように伸長初期は幼穂長の短い側にピークのある分布を示し、中期ではピークの不明瞭な分布を示し、後期になると発育が揃って出穂に至るという経過を示した。各茎の最終穂長が異なるため、下位の伸長節間径と穂長の関係（一次式）から各茎の最終穂長を推定し、調査対象の各茎の幼穂長の実測値を相対幼穂長に変換したところ、分布は第4図Bのようになった。1本植したコシヒカリについて、松葉（1987）の生育型（主稈の最終葉数）別に各茎の幼穂長を同様に調べたところ、最終葉数が1枚少ない[N-1]型の主稈と分げつの相対幼穂長の分布は第4図Cのようになり、4本植の結果と同様にピークの明確でない分布を示し、また主稈の相対幼穂長は全体の平均よりも長い範囲に位置していた。つぎにこの[N-1]型の主稈と分げつの相対幼穂長の分布を用いて、4本植の調査時期と同時期（積算気温：326.6°C, 410.5°C, 496.5°C）の相対幼穂長の分布を推定した。この調査時期の積算気温は主稈を対象としているため、まず第4図Cの主稈の平均相対幼穂長の値から（1）式により調査時の積算気温を求めると、369.1°Cとなった。分げつについても相対幼穂長より同様に積算気温を求め、（1）式より積算気温が369.1°Cから326.6°C, 410.5°C, 496.5°Cにそれぞれ変化した場合の相対幼穂長の分布を推定したところ、4本植の分布と類似するパターンを示した（第4図D）。さらに各茎の相対幼穂長より危険期穎花率を（2）式より算出し、様々な積算気温に対する全体の危険期穎花率の推移を第5図に示した。実際の栽培下では[N-1]型とN型が混在し、その出現比率は年によって変化するといわれているが、本実験の4本植の一部の主稈を対象として伸長節間の数と長さ、および止葉の葉身長から判断



第6図 郡山における幼穂長実測値とモデルによる推定値。
1987年から1998年のコシヒカリの幼穂長実測値を対象とした。実線はつくばで得られたパラメータによる推定値。

して生育型別に分類したところ、[N-1]型が全体の約8割を占めていたことから、[N-1]型での主稈と分げつ間の発育差を用いて圃場内の発育差を推定した（松葉 1984, 1990, 1994）。また1本植と4本植では主稈に対する分げつ数が異なり、発育の相対関係も異なることが考えられるが、全体の頻度分布が1本植と4本植でほぼ同じであることと、株間の差の推定が事実上困難であることから、ここでは差がほとんどない状態を基準とし、1本植の頻度分布を用いることにした。なお、この計算に用いた各茎の穎花数は、穂長と穎数の関係が一次式で表せることから推定した。そこで、これらのデータを（2）式に当てはめたところ、（3）式が得られた。

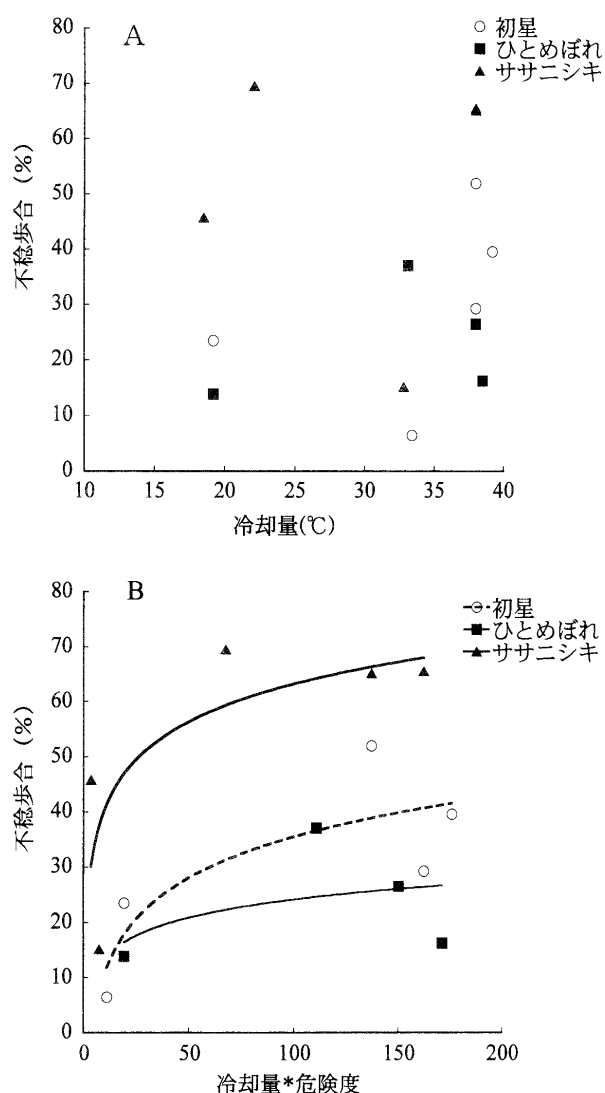
$$z = 9.839 * \exp\{-(y-455.8)^2/161.9^2\} \quad (3)$$

この式は圃場全体の危険期穎花率の推移を表している。

2. 他地域への適用および不稔歩合推定法の検討

他地域で得られたデータに本手法が適用できるかどうか、および不稔歩合の推定に使えるかどうかを検討した。検証するデータは郡山で得られた1987年から1998年のコシヒカリの幼穂長の実測データを含む作況データおよびAMeDASデータの平均気温である。各年の幼穂形成始期からの日平均気温の積算値に対する幼穂長の実測値と、第1表に示すつくばで得られたコシヒカリのパラメータを（1）式に適用した推定値とを第6図に比較した。なお（1）式は相対幼穂長で表されるので、郡山におけるコシヒカリの穂長の平年値を用いて相対幼穂長を長さに変換した。第6図はつくばのコシヒカリで得られた推定式が郡山で栽培されたコシヒカリに大体適用できることを示しているが、年次によっては差が大きくなった。

つぎに、圃場全体の危険期穎花率の推移を表す式（3）を不稔歩合の推定に利用することについて検討した。危険期穎花率は低温感受性の程度を表すとみなせることから、



第7図 幼穂形成期から出穂期までの冷却量 (A) および冷却量 * 冷害危険度 (B) と不稔歩合の関係。
1988年, 1993年の郡山における作況データを対象とした。不稔歩合は東北農試・農研センター(1990), および東北農試(1995)刊行の「冷害の記録」より抜粋。

(3) 式より, 幼穂形成期以降の毎日の積算気温に対応した冷害危険度が算出できる。この危険度に毎日の冷却量 (20°C - 平均気温, ただし, 平均気温 $> 20^{\circ}\text{C}$ のとき冷却量 = 0) を乗じ (内島 1976), つぎに幼穂形成始期から出穂期までの冷却量および冷却量に冷害危険度を乗じた値をそれぞれ積算し, これらと不稔歩合との関係を検討した。対象としたデータは, 冷害年の 1998, 1993 年の初星, ひとめぼれ, ササニシキの 3 品種の不稔歩合である。第 7 図 A に示したように, 幼穂形成始期から出穂期までの冷却量を積算したもので, 不稔歩合との間に一定の相関はみられないが, 冷却量に冷害危険度を乗じた値 (重点化冷却量とする) を用いると, 不稔歩合と重点化冷却量との相関が高くなった (第 7 図 B)。また, この 3 品種については重点化冷却量を用いることにより, 穂ばらみ期耐冷性 (不稔歩合) の品種間差がより明確となった。

考 察

植物の生長曲線にはここで用いたロジスティック式の他にリチャーズの式等が適用できる。リチャーズの式は変曲点を中心に左右対称でない曲線を表せるという利点があるが, 本研究ではパラメータ数の少ないロジスティック式を用いた。川原ら (1968) が水稻各器官の伸長過程を調査した結果と同様に, 幼穂の伸長過程は第 1 図のように S 字型の曲線を示し, 変曲点 ($x=c$) までは加速的に生長し, 変曲点をこえると生長はゆるやかになっていき, 最終長に近づいていく。この過程はロジスティック式でよく表現され, 式中のパラメータを比較することにより積算気温に対する幼穂伸長過程の品種間差を検討することができる。今回の結果および郡山のデータより, 同一作期で栽培した場合に晩生の品種ほどパラメータ c の値が大きくなり, 伸長曲線の立ち上がりが遅れる傾向にあることが示された。松島・真中 (1959) は幼穂形成始期から出穂期までの日数を様々な品種・栽培条件下で調査し, 晩生の品種ほど日数が増すことを報告している。本実験においても, 同一作期で栽培した場合に晩生品種ほど幼穂形成期から出穂日までの積算気温が大きくなることを確認した。パラメータ b で表される曲線の最大の傾きおよび幼穂長の伸長期間と早晩生の間に相関は見られなかったことから, 晩生品種の幼穂形成期間の延長は, 主に幼穂伸長曲線の立ち上がりの遅れに起因するものであることが推察される。

従来の冷害の最危険期とされていた減数分裂期と幼穂長の関係についてはいくつかの報告があるが, 研究者により両者の関係に大きなばらつきが見られる。松島 (1957) は詳細な調査により幼穂長 4~20 cm を減数分裂期とし, 減数分裂期の開始は幼穂長 4~6 cm の時期であるとしている。本報では減数分裂期ではなくその直後の小孢子初期を最危険期と仮定して調査し, 危険期穎花は相対幼穂長で 30~100% の間に存在するという結果を得た。仮に穂長を 180 mm とすると, 危険期は 54 mm から 180 mm と推察されるが, この数値は松島の報告とほぼ同じ結果であると考えられる。危険期穎花の出現範囲の品種間差は, 幼穂長を相対幼穂長に換算した場合においても認められたが, 極端な短穂・長穂あるいは着粒密度の異なる品種を除けば, (2) 式で示した相対幼穂長と危険期穎花率の関係式は日本の主要な栽培品種に適用できるものと考えられる。また, 冷害危険期の形態的な指標として幼穂長の他に葉耳間長を表す方法があり, その基準としては葉耳間長 0 cm が最危険期とされている (松島 1957)。本試験においても葉耳間長を調査したところ, 最危険期の葉耳間長は最短のむつほまれで -3.4 cm, 最長の日本晴で 4.6 cm となっており, 明らかに品種間差があることから, これを指標として危険期の低温処理を行ったり, 冷害危険期を判定する場合には留意することが必要である。

冷害危険期に近い幼穂の発育中期では, 株内の分けつ間

の発育差が大きく現れることが明らかになった(第4図)。そこで各分げつの幼穂長の実測値にロジスティック式を適用することにより、幼穂発育期間の圃場内における発育分布の推移が定量的に評価できるようになった。圃場内の発育差は、株内の分げつ間の幼穂分化時期の差に起因する生長の差(松崎ら 1994)、また水温、地温、肥料むら等の圃場内の微少な環境の違いによる株間の発育差に加えて、主稈の生育型の違い(松葉 1987)にも起因するが、幼穂発育の初期、後期に比べて幼穂の伸長速度の大きい中期では、これらの要因による差が拡大し、ばらつきが大きくなるものと考えられる。角田ら(1965)は障害型不稔の発生した圃場における調査より、不稔の発生程度の株内変異係数が20~50%で株間の変動よりも大きいことを報告している。これは株内の幼穂の発育のばらつきに起因しているものと推察される。株内変異が株間変異を上回ることを考えれば、今後発育の株内変異を把握する必要がある。

つくばのコシヒカリで得られたパラメータを郡山の同一品種の幼穂長の実測値に用いて積算気温から幼穂長を推定した結果、平均的には一つのロジスティック式で近似できるが、年次によっては差が大きくなった(第6図)。近似曲線から大きく離れる1993年はコシヒカリの幼穂形成期から出穂期に平均気温が20℃以下の日が10日以上もある低温年であった。八柳・竹内(1959)は幼穂分化以降の正常な発育には20℃以上の気温が必要であるとしており、遅延は低温による幼穂発育の障害に起因したものと考えられる。つくばのパラメータ算出の際に用いた積算気温と幼穂長のデータは、主として1998年と1999年の圃場試験において得られたもので、1998年は7月中旬に低温となったものの上・下旬および8月は平均気温が24℃以上であり、1999年は7月上旬を除いて平年値を上回る高温年であった。またポット試験の場合はグロースチャンパーの最低気温は20℃に設定した。本報で用いた積算温度法は、温度と発育速度との間に直線関係が存在することを前提とした方法である。石橋ら(1990)は幼穂形成期から出穂期の発育速度と温度の関係が直線的で、気温が高いほど発育が促進されることを示しているが、20℃以下の気温についてはあまり検討されていない。一方中川・堀江(1995)は20℃から32℃の範囲では幼穂形成期から出穂期の発育の温度反応が非線形であることを示しており、この期間の日本型品種の発育下限温度を12℃と推定している。温度と発育速度が非線形な関係にある場合、単純な積算気温による予測方法では極端な低温・高温年では誤差が大きくなることが考えられる。村上ら(1982)は気温を2℃毎の気温階層に分類し、各気温階層の生育への寄与度とその出現期間との積和を有効積算気温とすることにより、北海道における幅広い温度条件下での出穂期の予測に有効であることを示した。本研究では一般的に得られる気象データを用いて簡便に推定するために、日平均気温の単純な積算値を用いたが、推定精度を向上するためには気温の積算方法の

見直しなどの検討が必要であると考えられる。

本報では幼穂長という形態情報を積算気温で表し、さらに危険期穎花率を用いて冷害危険度と関連づけることによって、幼穂長の推定だけでなく従来の“減数分裂期”あるいは“穂ばらみ期”という漠然とした冷害危険期を、定量的に表すことが可能であることを示した。矢島(1994)は水稻の発育指数を用いたモデルにおいて、障害型不稔に対する感受性の発育に伴う変化を考慮に入れて不稔歩合の推定を行っている。本報においても幼穂形成始期から出穂期までの冷却量よりも、冷却量に冷害危険度を乗じた値の方が不稔歩合との関係がより明確になった(第7図B)。すなわち、低温に冷害危険度で重み付けをすれば、より正確に被害程度の推定ができる可能性が示唆された。冷却量は冷害発生時の被害解析の際に、低温の程度を示す指標としてよく使われているが、冷却量を計算する期間をいつ、どれぐらいの長さにとるのがしばしば問題となる。一方で、幼穂形成期と出穂期は基本的なデータとして調査されていることが多いが、本報で示したように幼穂形成始期より出穂期までの全期間について冷害危険度の推移を定量的に表すことができれば、被害程度の地域・品種間差等の客観的な評価および予測が可能になるものと考えられる。今後、各ステージでの温度変化と発生する不稔歩合に関する多くのデータに基づいた解析を行い、具体的な推定式を示すことによって幼穂長モデルを用いた不稔歩合の推定法を確立したい。その際には、幼穂長モデルのパラメータの検討、前歴期間における低温の影響評価等様々な課題が挙げられるが、これらについては次報以降で検討していく予定である。

謝辞：福島県農林水産部の荒川市郎氏、佐藤博志氏、福島県農業試験場の荒井義光氏には郡山の気象および作況データをご提供いただき、またデータの解析法について有益なご助言をいただきました。記して感謝の意を表します。

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.
- 八柳三郎・竹内徳猪 1959. 水稻品種の生態に関する研究. III 生殖生長期における気温とその効率の関係. 日作紀 28: 164-168.
- 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 モデルの基本的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.
- 石橋英二・桐山隆・田村良文・金野隆光・小野祐幸 1990. ノンパラメトリック回帰を用いた温度影響評価による水稻の生育期予測. 日作紀 59: 443-449.
- 川原治之助・長南信雄・和田清 1968. 稲の形態形成に関する研究. 第3報 葉, 穂, 稈の伸長の相互関係および稈の分裂組織について. 日作紀 37: 372-383.
- 小林正男・佐竹徹夫 1979. イネの穂はらみ期低温による不稔を防止するために有効なかんがい水の深さ. 日作紀 48: 243-248.
- 松葉捷也 1984. イネの稈長及び節間長の調査基準について. 北陸作

- 物学会報 19: 1-6.
- 松葉捷也 1987. イネの茎葉生育の規則性に関する発育形態学的研究. 第1報 同一栽培条件下で総葉数を異にした主稈の生育型について. 日作紀 56: 313-321.
- 松葉捷也 1990. 稲の生長解析—平均値とパターン. 植調 24: 11-16.
- 松葉捷也 1994. イネの茎葉生育の規則性に関する発育形態学的研究. 第4報 分げつ体系における母茎・分げつの各生育型の構造的規則性. 日作紀 63: 230-239.
- 松島省三 1957. 水稻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.
- 松島省三・真中多喜夫 1959. 水稻収量の成立原理とその応用に関する作物学的研究. LIII. 品種の早晚と栽培時期の差による幼穂発育経過の差異と発育段階の認定法 (2). 日作紀 28: 201-204.
- 松崎昭夫・尤宗・町田寛康 1994. イネ分げつの出穂特性に関する研究. 第1報 一, 二次分げつの出穂特性に及ぼす剪葉の影響. 日作紀 63: 589-593.
- 村上利男・森田弘彦・土井康生・今野一男 1982. 寒地水稻の計画栽培に関する解析的研究. 北海道農試研報 133: 61-100.
- 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.
- 西山岩男・伊藤延男・早瀬広司・佐竹徹夫 1969. 水稻の障害型冷害防止にたいする水温及び水深の効果. 日作紀 38: 554-555.
- Satake, T. and H. Hayase 1970. Male sterility caused by cooling treatment at the young microspore stage in rice plants. V. Estimation of pollen developmental stage and the most sensitive stage to coolness. Proc. Crop Sci. Soc. Japan 39: 468-473.
- 東北農試・農研センター 1990. 東北・関東東山地域における昭和63年の冷害の記録. 89-103.
- 東北農試 1995. 東北地域における平成5年冷害の記録.—平成5年異常気象による被害の実態と解析—. 124-141.
- 角田公正・和田純二・佐藤亮一 1965. 水稻冷害の実際的研究. 第20報 障害型不稔発生程度の株間および穂間変異について. 日作紀 34: 40-43.
- 内島一郎 1976. 冷温条件と水稻の不稔発生との関係についての一考察. 農業気象 31: 199-202.
- 矢島正晴 1994. 平成の大凶作. 日本農業気象学会編. 農林統計協会, 東京. 67-81.

Estimation of Young Panicle Length and Cool Injury of Rice Using Cumulative Temperature: Kou NAKAZONO* and Kimio INOUE (*Natl. Agr. Res. Cent., Tsukuba 305-8666, Japan*)

Abstract: The method of estimating the developmental stage necessary to prevent and analyze the cool damage in rice plants using meteorological elements was examined. We investigated the relationship between the elongation rate of the young panicles and the cumulative temperature from the panicle initiation using three Japonica cultivars, Akitakomachi, Koshihikari and Nipponbare. A logistic function was fitted to the relationship between the length of young panicle and the cumulative daily mean temperature. It was shown that the later the heading date, the higher the cumulative temperature until the panicle reached 50% of the final length. Although the young panicle length of Koshihikari in another area (Koriyama) could be roughly estimated by the logistic function fitted to the data obtained in Tsukuba, there was a difference between the estimated and measured length in some years. This was suggested to be due to the delay of panicle elongation by the temperature below about 20°C. The morphological observation of the pollen revealed that the sensitivity to a low temperature varied with the panicle length, and reached the maximum when the panicle became 70% of the final length. The developmental stage of the panicle varied with the tiller, but we obtained a formula showing the change in the low-temperature sensitivity considering the variation, based on the correlation between the cumulative temperature and young panicle length and that between the young panicle length and the sensitivity to cool temperature. From these results it is shown that the cumulative value, which is calculated from the degree of sensitivity and the degree of cooling (mean air temperature below 20°C) during panicle development, is useful for the estimation of the percentage of sterility caused by a low temperature.

Key words: Accumulated temperature, Cool injury, Developmental stage, Prediction, Rice, Young panicle length.