

徳島県における水稲の生育診断予測技術

(第1報)

水稲奨励品種の出穂期および成熟期の推定

広田年信

Growth diagnosis and forecast technique of rice plants in Tokushima Prefecture I
Estimation of heading and maturing date of rice plants Toshinobu Hirota

要約

広田年信(1992): 徳島県における水稲の生育診断予測技術(第1報)水稲奨励品種の出穂期および成熟期の推定. 徳島農試研報, (28): 7~21

徳島県の水稲奨励品種の出穂期および成熟期の推定法を確立するため, 主要品種(コシヒカリ, 日本晴, コガネマサリ)を対象に直線回帰式, 積算温度法, 発育速度を利用する方法(関数式, ノンパラメトリック回帰)を用いて推定精度を比較検討した。

出穂期の推定には発育速度を利用する方法のうち気温と日長を関数式とする方法が推定精度は高く, 実用性は高かった。平均推定誤差はコシヒカリ1.8日, 日本晴1.4日, コガネマサリ1.3日程度で, 推定誤差(実測値-推定値)の範囲はそれぞれ -4~5日, -2~4日, -3~3日で, ±2日以内の推定誤差の割合はそれぞれ85%, 94%, 97%であった。また, 気温と日長を関数とする2次元ノンパラメトリック回帰も気温と日長の関数式と同程度の推定精度で実用性は高かった。

一方, 成熟期の推定には日最高気温と気温較差を関数とする2次元ノンパラメトリック回帰が平均推定誤差が小さかった。しかし, その平均推定誤差はコシヒカリ3.5日, 日本晴3.0日, コガネマサリ2.8日程度で, 推定誤差の範囲はそれぞれ -11~8日, -12~8日, -6~10日と大きく, 実用化にはさらに検討が必要であった。

また, その他の本県奨励品種について気温と日長の関数式を用いて出穂期の推定を行った結果, その平均推定誤差はハナエチゼン1.6日, 越路早生1.6日, オオセト1.3日, ミネニシキ1.2日, ミネユタカ1.4日, クレナイモチ1.5日程度であり, 推定精度は高かった。

キーワード: 水稲, 生育予測, 出穂期, 成熟期, 発育速度

はじめに

水稲の出穂期, 成熟期の正確な予測は農作業にとって重要であるとともに, 前後作や生育可能期間を考慮しながら決める作付計画にとっても重要である。例えば, 穂肥の施用時期や倒伏軽減剤の散布時期などは出穂期を基準として行われており, それらの効果を確実に得るためには出穂期の正確な予測が必要である。また, 成熟期の予測は収穫時における効率的な作業を実施するうえからも重要である。一般に同じ品種を同じ時期に栽培する場合は出穂期, 成熟期の変動はそれほど大きくないため, 経験によって把握できる。しかし, 気象変動が大きい場合, 新しく品種を導入する場合あるいは栽培時期が変わる場合などはそれらの正確な予測は容易でないため, 簡便かつ正確な予測法の確立が必要である。出穂期の推定は, 生育デ-タと気象変動等の因果関係を何らかの方法で見だし, その関係を利用して行われてきた。その関係を直線回帰式あるいは重回帰式に当てはめた方法^{13), 20)}積算温度あるいは有効積算温度を利用した方法^{1), 12)}等が検討されてきた。最近では発育指数の概念を取り入れた方法³⁾が検討されている。これは, 毎日の発育速度を求め, その積算がある一定の指数になったときに出穂期とする方法である。発育速度を求める方法の一つは, 出穂期が気温および日長に強い関係から, 気温あるいは気温と日長の関数式をあてはめる方法であり, りくつかの関数式が提案され, それらの間の予測精度の検討も行われている⁷⁾。また, もう一つの方法として, 特に関数関係を考慮せずに発育と環境との関係を考慮せずに発育と環境との関係を決定するノンパラメトリック回

帰によって求める方法^(18,19)が提案され、出穂期等の予測技術として利用されている^(5,20,21)。

一方、水稻の登熟に対する温度の影響についての研究^{(9)・(10)・(11)}や、刈り取り適期の判定法についての研究^{(6)・(8)・(17)}はあるが、成熟期の予測技術として確立されたものはない。これまでに成熟期の推定には重回帰式を用いた方法⁽³⁾、積算温度法⁽²⁰⁾、発育指数の概念を取り入れた方法(関数式、ノンパラメトリック回帰)^{(4)・(20)}などが検討されている。

そこで、本県奨励品種の出穂期および成熟期の推定法を確立するため、主要品種のコシヒカリ、日本晴、コガネマサリを対象にこれまでに蓄積されたデータをもとに移植期と出穂期および出穂期と成熟期との関係について検討し、出穂期、成熟期を推定する種々の方法を比較検討した。また、そのうち最も適応性のある推定法を用いて、本県の他の奨励品種について出穂期の推定精度を検討した。

試験方法

1 解析に使用した栽培データおよび気象データ

解析には1975～90年の水稻奨励品種決定試験および水稻豊凶試験、1978年および1988～90年の作期移動試験で得られたデータを使用した。栽培方法はすべて稚苗移植栽培であった。推定法の比較には本県主要品種であるコシヒカリ、日本晴、コガネマサリを使用した。それぞれの品種の試験年、データ数、移植期、出穂期、成熟期の概要は第1表に示したとおりである。

また、解析に利用した気象要因は気温および日長で、気温データは徳島地方気象台(農業試験場より東約12km)の観測値を、日長は農業試験場の緯度と暦日から算出した可照時間を用いた。

第1表 解析に使用した栽培データの概要

品種名	試験年	データ数	移植期(月・日)	出穂期(月・日)	成熟期(月・日)
コシヒカリ	1975～90	52	4.14～7.16	7.11～9.8	8.14～10.27
日本晴	1975～90	50	4.26～7.16	7.29～9.9	9.5～10.31
コガネマサリ	1983～90	37	4.26～7.16	8.2～9.12	9.11～11.4

2 解析に使用した方法

1) 直線回帰式($Y = a + bx$)による方法

(1) 出穂期の推定には説明変数として移植期、目的変数として出穂期を、成熟期の推定には説明変数として出穂期、目的変数として成熟期を用いた。以下この推定法を直線回帰(暦日)と呼ぶ。

(2) 出穂期の推定には説明変数として移植期、目的変数として移植期から出穂期までの日平均気温の積算気温(以下出穂期までの積算気温)を、成熟期の推定には説明変数として出穂期、目的変数として出穂期から成熟期までの日平均気温の積算気温(以下成熟期までの積算気温)を用いた。出穂期、成熟期の推定は日平均気温の積算が推定積算気温になった日をそれぞれ出穂期、成熟期とした。以下この推定法を直線回帰(積算気温)と呼ぶ。

なお、(1)、(2)とも移植期、出穂期、成熟期の起算日は4月1日とした。

2) 積算温度法

単純積算温度法および生育零点を10とする有効積算温度法を用いた。解析にはパソコン用ソフト<HEADAC-AC>(農研センター)を利用した。

3) 発育速度を利用する方法

堀江ら⁽³⁾の発育指数の概念に基づき、ここでは移植期の発育指数を0、出穂期を1(成熟期の推定の場合には出穂期を0、成熟期を1)とするモデルについて検討した。すなわち移植期(あるいは出穂期)から発育速度(DVR)を日々積算し、1に達した日を出穂期(あるいは成熟期)とするモデルである。

(1) 発育速度をノンパラメトリック回帰により求める方法

1次元および2次元ノンパラメトリック回帰を用いて検討したが、解析にはパソコン用ソフト<NONPARA>、<2DIMNON>(農研センター)を利用した。解析に使用した気象要因は出穂期の推定には日平均気温、日長を、成熟期の推定には日平均気温、日最高気温、日最低気温、日気温較差(日最高気温と日最低気温との差)を用いた。なお、それぞれの解析に使用した平滑化係数(スムージングパラメータ)は予測誤差およびDVR-気象要因曲線の形状等を総合的に検討して決定した。各品種の解析に

使用した平滑化係数は第2～

3表に示したとおりである。なお、計算に際しては気温の刻みは1 とし、日長の刻みは0.25時間とした。

第2表 ノンパラメトリック回帰の計算に使用した平滑化係数(出穂期)

次元	気象要因	コシヒカリ	日本晴	コガネマサリ
1次	平均気温	5,000	5,000	5,000
	日 長	50,000	5,000	5,000
2次	平均気温	10,000	5,000	5,000
	日 長	50,000	1,000	500

第3表 ノンパラメトリック回帰の計算に使用した平滑化係数(成熟期)

次元	気象要因	コシヒカリ	日本晴	コガネマサリ
1次	平均気温	5,000	5,000	10,000
	最高気温	5,000	5,000	5,000
	最低気温	5,000	5,000	10,000
	気温較差	100	500	500
2次	平均気温	5,000	5,000	10,000
	気温較差	500	100	5,000
	最高気温	5,000	5,000	5,000
	最低気温	10,000	50,000	5,000
	最高気温	5,000	5,000	5,000
	気温較差	500	100	1,000

(2) 発育速度を関数式より求める方法

日々の発育速度はその日の日平均気温(T)と日長(L)の関数と仮定し、出穂期の推定には(a)～(f)式を、成熟期の推定には(a)～(c)式を比較検討した。

$$DVR = a(T-b) \quad (a)$$

ただし $T < b$ の時 $DVR = 0$

$$DVR = 1/c((1-\exp(-a(T-b))) \quad (b)$$

ただし $T < b$ の時 $DVR = 0$

$$DVR = 1/c \cdot 1/((1+\exp(-a(T-b))) \quad (c)$$

$$DVR = aT + bL + c \quad (d)$$

$$DVR = a(T-b)(L-c) \quad (e)$$

ただし $T < b, L > c$ の時 $DVR = 0$

$$DVR = 1/e \cdot (1 - (\exp(a(L-b))) / (1 + \exp(-c(T-d))) \quad (f)$$

ただし $L > b$ の時 $DVR = 0$

$$DVR = a + \exp(b(T-c)) \quad (g)$$

(a), (b)式は気温のみの関数で、(a)式は有効積算温度(発育零点はb となる)を発育指数の形に当てはめたものである。(d), (e), (f)式は気温と日長の関数で、(f)式は堀江ら³⁾が提唱している。また、(c)式は(f)式で日長の影響を除いたもので、気温のみの関数である。(g)式は気温のみの関数で稲村⁴⁾が成熟期の推定の際に検討しているものである。各関数式のパラメータの決定にはシンプレックス法を用いた。

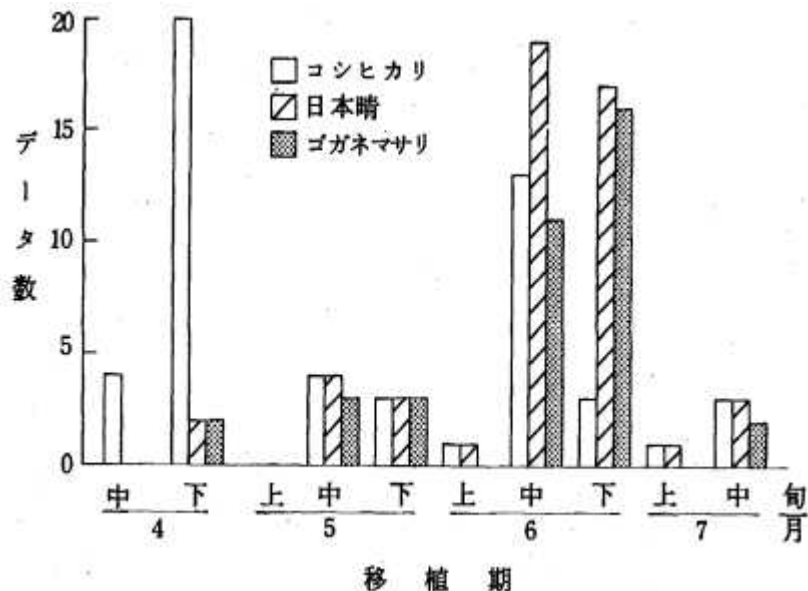
結果

1 出穂期の推定

1) 解析データの移植期と出穂期について

解析に使用したデータの移植期を旬別に見るとコシヒカリは4月下旬(早期栽培)と6月中旬(普通期栽培)が、日本晴およびコガネマサリは6月中旬と下旬が多かった(第1図)。移植期の幅はコシヒカリ93日、日本晴81日、コガネマサリ81日で、出穂期の幅はそれぞれ59日、42日、41日であった。移植期から出穂期までの日数(以下出穂期までの日数)はコシヒカリ55~95日、日本晴52~102日、コガネマサリ55~105日であった。

各品種の移植期と出穂期の関係を第2図に、移植期と出穂期までの積算気温との関係を第3図に示した。移植期と出穂期との間には高い正の相関(相関係数0.92~0.98)が、また移植期と出穂期までの積算気温との間には高い負の相関(相関係数-0.92~-0.96)が認められた。それぞれの関係を直線回帰に当てはめた場合の回帰係数は第4表に示したとおりで、直線回帰式による推定にはこの回帰係数を利用した。



第1図 移植期とデータ数

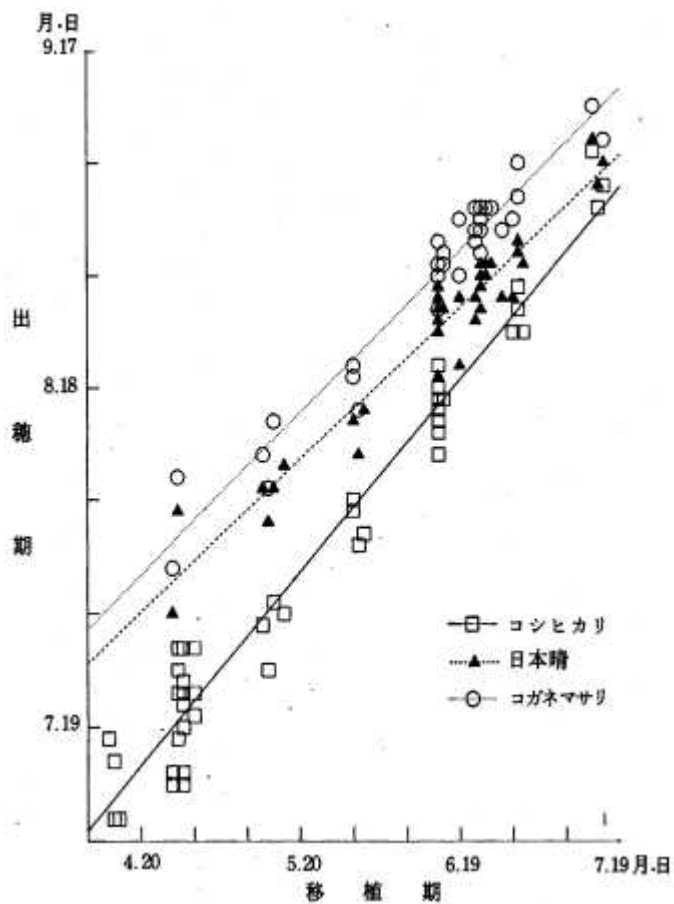
第4表 移植期と出穂期との関係

変数	品種名	相関係数	回帰係数	
			a	b
X: 移植期 Y: 出穂期	コシヒカリ	0.98	95.3	0.568
	日本晴	0.92	111.1	0.451
	コガネマサリ	0.97	113.8	0.479
X: 移植期 Y: 出穂期までの積算気温	コシヒカリ	-0.92	1939.7	-4.342
	日本晴	-0.96	2487.1	-8.980
	コガネマサリ	-0.96	2547.7	-8.006

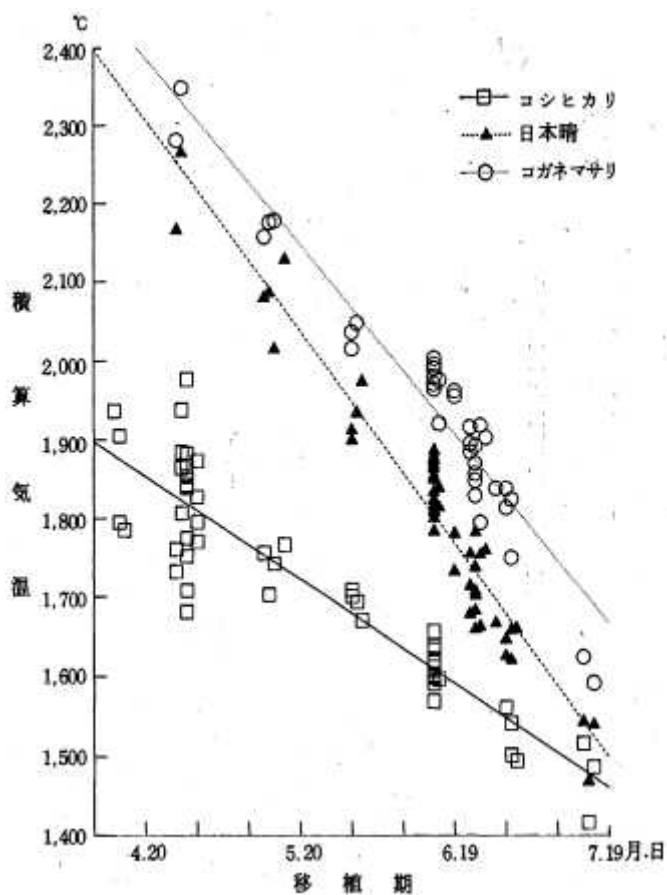
注) 直線回帰式は $Y = a + bX$ 移植期および出穂期の起算日は4月1日とした

第4図には各品種の移植期から出穂期までの日平均気温および日長の出現頻度を示した。日平均気温および日長の範囲はそれぞれコシヒカリ 11.3~30.8 , 2.6~14.4時間, 日本晴 12.8~31.7 , 12.6~14.4時間, コガネマサリ

12.8 ~ 31.7 , 12.5 ~ 14.4時間であった。



第2図 移植期と出穂期との関係
 注) 直線は各品種の回帰直線



第3図 移植期と移植期から出穂期までの積算気温との関係
 注) 直線は各品種の回帰直線

2) 各品種における推定法の比較

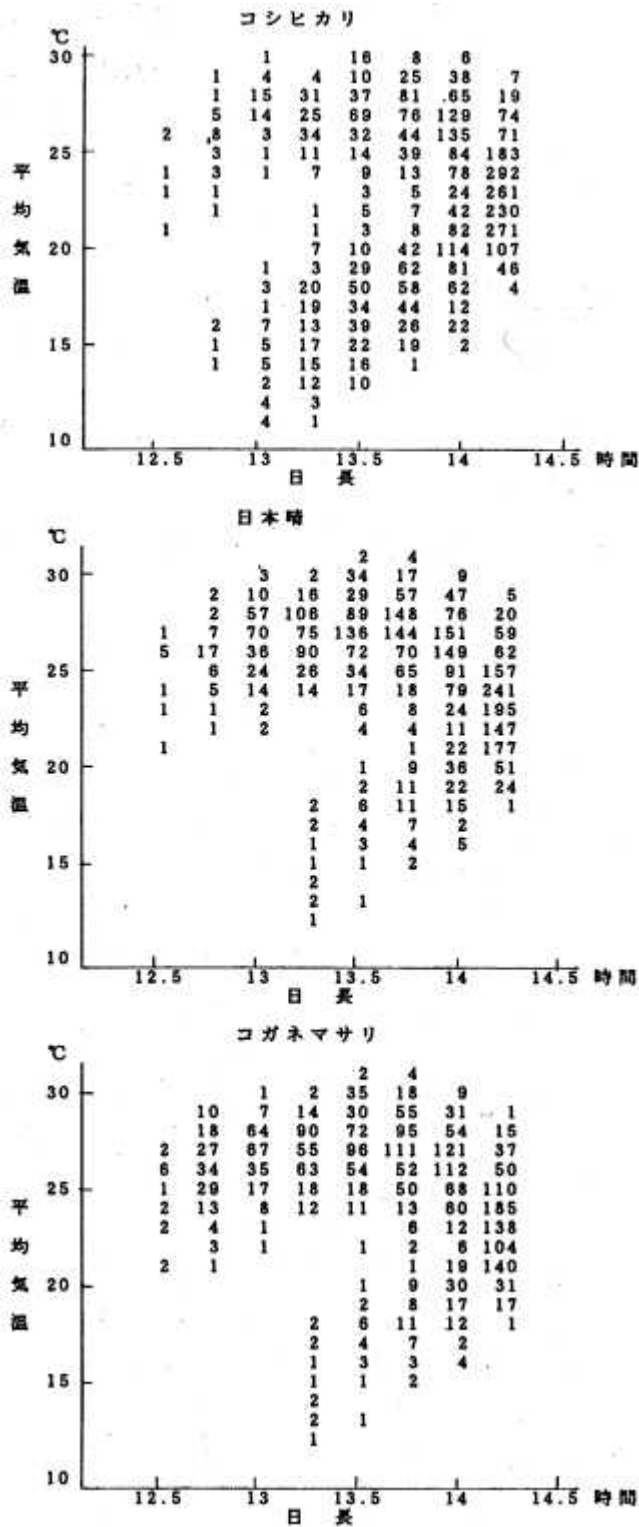
各推定法の推定精度を比較するために平均推定誤差(実測日数と推定日数の残差の2乗和をデータ数で除した平方根)を用いた。第5~7表にはコシヒカリ, 日本晴およびコガネマサリの各推定法の平均推定誤差, 推定誤差(実測値推定値)の範囲および推定誤差の割合を示した。

(1)コシヒカリ

直線回帰による推定では平均推定誤差は暦日で3.19日, 積算気温で2.14日と, 直線回帰(積算気温)が小さかった。また, 積算温度法では平均推定誤差は単純積算温度法で5.01日, 有効積算温度法で2.12日と, 有効積算温度法が小さく, 直線回帰(積算気温)と同程度であった。発育速度を利用する方法では日長を関数とするノンパラメトリック回帰の平均推定誤差は10.18日と大きかった。一方, 気温を関数とする関数式および1次元ノンパラメトリック回帰の平均推定誤差は1.98~2.09日と直線回帰(積算気温)よりも小さかった。また, 気温と日長を関数とする関数式および2次元ノンパラメトリック回帰では, (e)式の平均推定誤差は2.14日と気温を関数とする関数式等よりも大きかったが, (d), (f)式および2次元ノンパラメトリック回帰では平均推定誤差は1.68~1.78日と気温のみの関数式等よりも0.3日程度小さくなり, 直線回帰(積算気温)よりも0.4日程度小さくなった。

このように平均推定誤差は発育速度を利用する方法のうち気温と日長を関数とする(d), (f)式および2次元ノンパラメトリック回帰で

1.68~1.78日と小さく, これらの方法の推定精度は高かった。これらの方法の推定誤差の範囲は5~4日あるいは4~5日で, ±1日以内の誤差の割合は65~71%, ±2日以内の割合は85~87%, ±3日以内の割合は92~94%であった。



第4図 移植期から出穂期までの平均気温および日長の頻度分布

第5表 出穂期の予測法と平均推定誤差および誤差の割合(コシヒカリ)

予測法	平均推定誤差 (日)	推定誤差の範囲 (日)	誤差の割合(%)		
			±1日	±2日	±3日
暦日数	12.35	50~95			
直線回帰(暦日)	3.19	-6~7	37	60	71

直線回帰(積算気温)	2.14	-5 ~ 6	62	71	87
単純積算温度	5.01	-9 ~ 12	21	33	44
有効積算温度	2.12	-5 ~ 5	60	81	87
ノンパラ(気温)	2.09	-5 ~ 5	60	79	87
ノンパラ(日長)	10.18	-30 ~ 13	6	6	12
ノンパラ(気温 + 日長)	1.68	-4 ~ 5	71	87	94
a式	1.98	-6 ~ 4	58	79	94
b式	1.99	-5 ~ 4	58	81	90
c式	1.98	-6 ~ 4	60	81	92
d式	1.78	-5 ~ 4	65	85	94
e式	2.14	-6 ~ 5	58	81	90
f式	1.76	-4 ~ 5	69	85	92

注) 暦日数は移植期から出穂期までの日数の標準偏差(自由度はデータ数)および範囲

平均推定誤差は $\text{SQRT}((\text{実測値} - \text{推定値})^2 / \text{データ数})$

推定誤差は実測値 - 推定値

(2) 日本晴

直線回帰による推定では平均推定誤差は暦日で2.26日、積算気温で1.72日と、直線回帰(積算気温)が小さかった。積算温度法では平均推定誤差は単純積算温度法で5.90日、有効積算温度法で4.27日と、直線回帰よりも平均推定誤差は大きかった。発育速度を利用する方法では日長を関数とするノンパラメトリック回帰では平均推定誤差は4.35日と有効積算温度法と同程度であり、直線回帰よりも大きかった。また、気温を関数とする関数式および1次元ノンパラメトリック回帰の平均推定誤差は3.09 ~ 3.52日と、直線回帰よりも大きかった。一方、気温と日長を関数とする関数式および2次元ノンパラメトリック回帰では、(d)式の平均推定誤差は2.74日と気温を関数とする関数式等よりも小さかったが、直線回帰よりもやや大きかった。しかし、(e)、(f)式および2次元ノンパラメトリック回帰では平均推定誤差は1.42 ~ 1.56日と気温を関数とする関数式等よりも1.8日程度、直線回帰(積算気温)よりも0.2日程度小さかった。

このように平均推定誤差は発育速度を利用する方法のうち気温と日長を関数とする(e)、(f)式および2次元ノンパラメトリック回帰で1.42 ~ 1.56日と小さく、これらの方法の推定精度は高かった。これらの推定法の推定誤差の範囲は-2 ~ 4日あるいは-3 ~ 3日で、±1日以内の誤差の割合は62 ~ 68%、±2日以内の割合は88 ~ 94%、±3日以内の割合は98 ~ 100%であった。

第6表 出穂期の予測法と平均推定誤差および誤差の割合(日本晴)

予測法	平均推定 誤差 (日)	推定誤差 の範囲 (日)	誤差の割合(%)		
			±1日	±2日	±3日
暦日数	9.62	52 ~ 102			
直線回帰(暦日)	2.26	-5 ~ 6	58	74	90
直線回帰(積算気温)	1.72	-3 ~ 4	56	86	98
単純積算温度	5.90	-16 ~ 14	28	42	50
有効積算温度	4.27	-8 ~ 11	40	54	64
ノンパラ(気温)	3.22	-5 ~ 9	28	58	78
ノンパラ(日長)	4.35	-21 ~ 7	52	72	80
ノンパラ(気温 + 日長)	1.56	-2 ~ 4	68	88	98
a式	3.52	-7 ~ 7	36	52	70
b式	3.22	-5 ~ 8	40	56	72
c式	3.09	-5 ~ 8	36	58	74
d式	2.74	-5 ~ 6	36	62	78
e式	1.56	-3 ~ 3	62	90	100
f式	1.42	-3 ~ 3	66	94	100

(3) コガネマサリ

直線回帰による推定では平均推定誤差は暦日で2.26日、積算気温で1.70日と、直線回帰(積算気温)が小さかった。積算温度法では平均推定誤差は単純積算温度法で5.68日、有効積算温度法で4.08日と、直線回帰よりも大きかった。発育速度を利用する方法では日長を関数とするノンパラメトリック回帰では3.82日と直線回帰よりも大きかった。また、気温を関数とする関数式および1次元ノンパラメトリック回帰の平均推定誤差は3.21～3.62日と、直線回帰よりも大きかった。一方、気温と日長を関数とする関数式および2次元ノンパラメトリック回帰では、(d)式の平均推定誤差は2.83日、(e)式は2.05日と直線回帰(積算気温)よりも大きかったが、(f)式および2次元ノンパラメトリック回帰は1.19～1.27日と気温を関数とする関数式等よりも2.2日程度、直線回帰(積算気温)よりも0.5日程度小さかった。

このように平均推定誤差は発育速度を利用する方法のうち気温と日長を関数とする(f)式および2次元ノンパラメトリック回帰で1.19～1.27日と小さく、これらの方法の推定精度は高かった。これらの推定法の推定誤差の範囲は-2～3日あるいは-1～3日で、±1日以内の誤差の割合は73～81%、±2日以内の割合は97%、±3日以内の割合は100%であった。

第7表 出穂期の予測法と平均推定誤差および誤差の割合(コガネマサリ)

予測法	平均推定誤差 (日)	推定誤差の範囲 (日)	誤差の割合(%)		
			±1日	±2日	±3日
暦日数	9.71	55～105			
直線回帰(暦日)	2.26	-5～6	54	76	86
直線回帰(積算気温)	1.70	-3～4	68	89	92
単純積算温度	5.68	-14～14	27	46	57
有効積算温度	4.18	-5～12	57	68	68
ノンパラ(気温)	3.47	-4～11	51	78	86
ノンパラ(日長)	3.82	-16～7	51	68	81
ノンパラ(気温+日長)	1.19	-1～3	81	97	100
a式	3.62	-5～10	38	65	77
b式	3.37	-5～9	46	62	70
c式	3.21	-5～8	43	54	70
d式	2.83	-5～7	38	70	76
e式	2.05	-3～5	49	78	97
f式	1.27	-2～3	73	97	100

注)第5表と同じ

3) 出穂期の推定法

各品種における推定精度を比較するため出穂期までの日数の標準偏差(コシヒカリ12, 35日, 日本晴9.62日, コガネマサリ9.71日)に対する各推定法の平均推定誤差の割合(以下標準偏差比)を求め、第5図に示した。

早生で感温性の比較的高いコシヒカリでは有効積算温度, 直線回帰(積算気温), 気温あるいは気温と日長を関数とする関数式およびノンパラメトリック回帰が平均推定誤差は小さく(1.76~2.14日), 標準偏差比は14~17%であった。また, 日本晴では直線回帰(積算気温), 気温と日長を関数とする(e)式および2次元ノンパラメトリック回帰が平均推定誤差が小さく(1.42~1.72日), 標準偏差比は15~18%であった。一方, コガネマサリでは直線回帰(積算気温), 気温と日長を関数とする(f)式および2次元ノンパラメトリック回帰が平均推定誤差は小さく(1.19日~1.70日), 標準偏差比は12~13%であった。

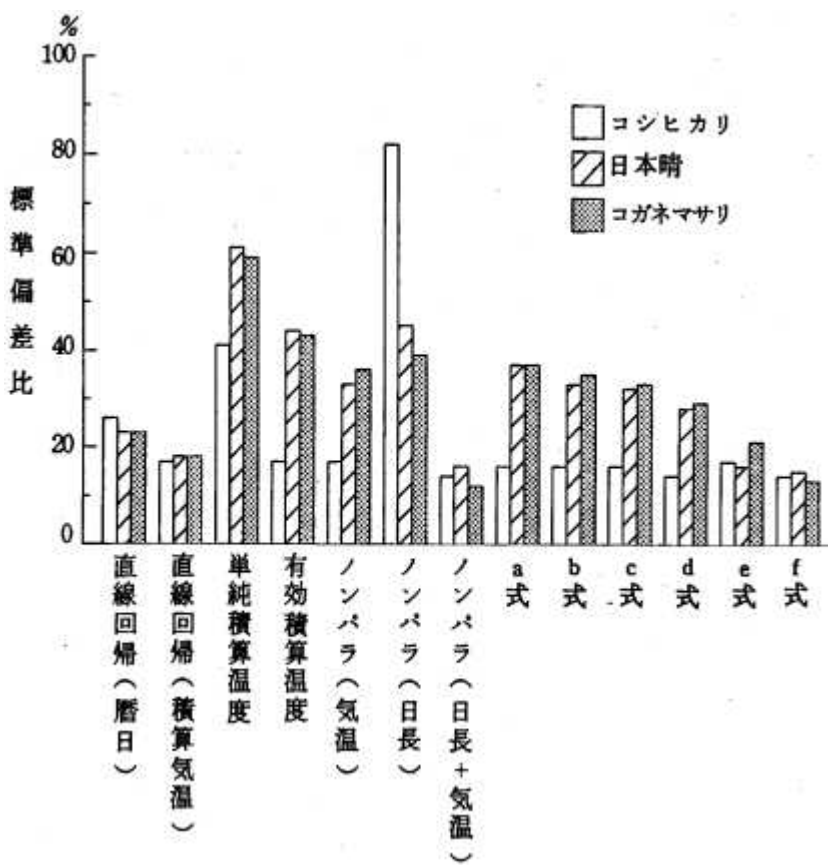
このようにコシヒカリ, 日本晴, コガネマサリとも直線回帰(積算気温), 気温と日長を関数とする(f)式および2次元ノンパラメトリック回帰で標準偏差比が小さく, それぞれ

17~18%, 13~15%, 12~16%であった。その中でも(f)式および2次元ノンパラメトリック回帰が平均推定誤差, 標準偏差比ともに小さく, 推定精度は高かった。

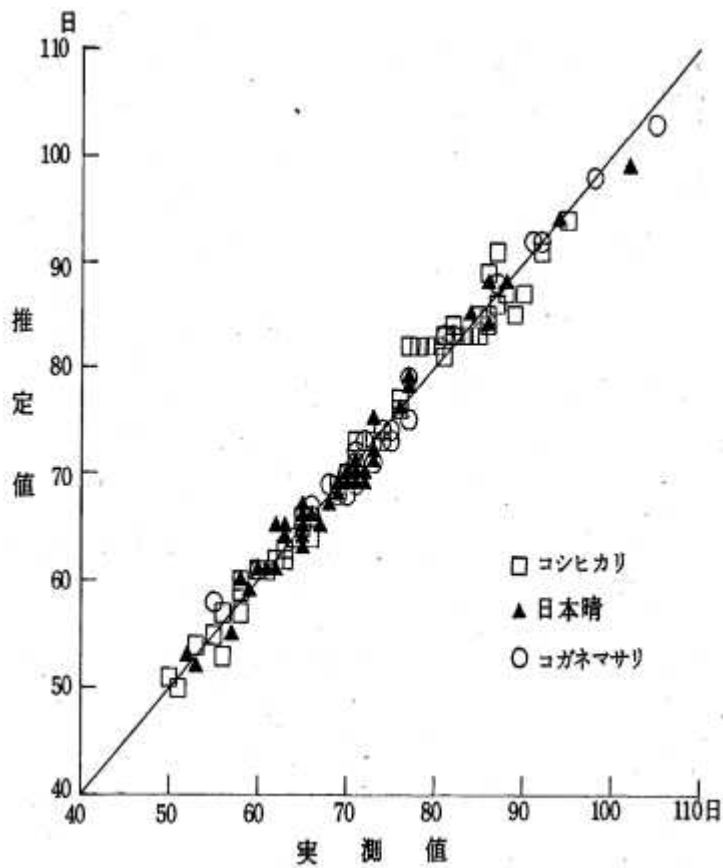
(f)式および2次元ノンパラメトリック回帰を経験的な方法である直線回帰(暦日)の平均推定誤差と比較すると, その割合はコシヒカリで54%, 日本晴で66%, コガネマサリで54%前後であり, 平均推定誤差は40%前後小さくなった。また, 推定誤差の範囲は直線回帰(暦日)ではコシヒカリ-6~7日, 日本晴-5~6日, コガネマサリ-5~6日であったが, これらの方法によって推定誤差の幅はそれぞれ4日, 5日, 6日程度狭まった。

また, (f)式と2次元ノンパラメトリック回帰を比較すると, コシヒカリ, コガネマサリでは2次元ノンパラメトリック回帰が, 日本晴では(f)式が平均推定誤差は小さかった。全データ(3品種)の平均推定誤差をそれぞれ求めると(f)式では1.52日, 2次元ノンパラメトリック回帰では1.53日と, わずかではあるが(f)式が小さかった。

そこで, ここでは(f)式を取り上げその推定誤差について検討した。まず, 出穂期までの日数の実測値と(f)式による推定値の関係を第6図に, 推定に利用した各品種のパラメータを第8表に示した。3品種全体では出穂期まで日数50~105日のデータが決定係数 $R^2 = 0.98$ の精度で説明できた。また, 第7図には各品種の移植期と(f)式による推定誤差との関係を示したが, コシヒカリでは4月中~下旬の移|直期で推定誤差の大きい場合が多く見られた。



第5図 出穂期の推定法の比較

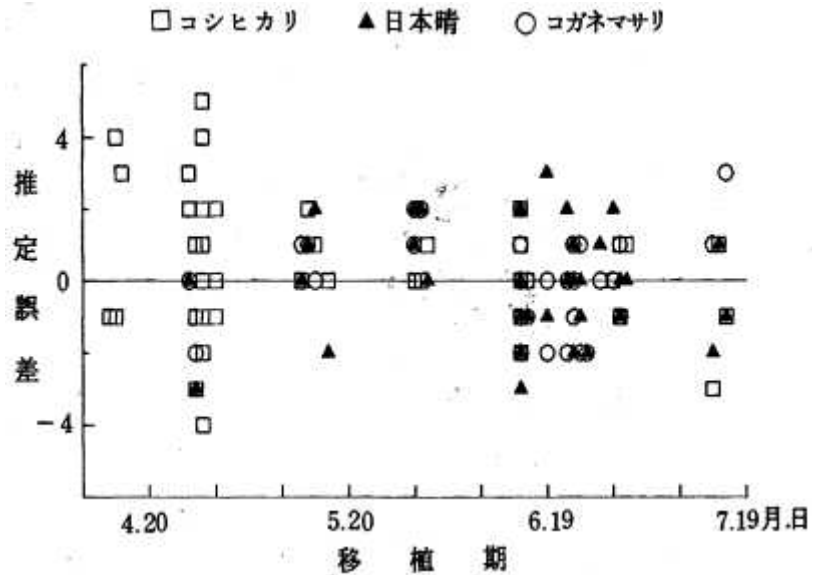


第6図 移植期から出穂期までの日数の実測値と(i)式による推定値との関係

第8表 DVRの決定に用いたf式のパラメータの値(出穂期の推定)

品種名	a	b	c	d	e
コシヒカリ	0.5374	160.69	0.2546	18.960	34.226
日本晴	0.8220	15.025	0.3064	18.727	34.579
コガネマサリ	0.9957	15.122	0.2590	18.024	42.624
ハナエチゼン	0.4049	17.142	0.3360	08.296	37.299
越路早生	0.8992	16.191	0.2358	18.124	34.880
オオセト	0.7998	15.027	0.2967	16.680	35.648
ミネニシキ	0.6303	15.145	0.4223	16.302	36.836
ミネユタカ	1.0059	14.992	0.2360	18.191	39.681
クレナイモチ	0.9650	15.015	0.3291	16.250	45.248

本県のその他の奨励品種(栽培データの概要は第9表)について(f)式による平均推定誤差を第10表に、移植期から出穂期までの日数の実測値と(f)式による推定値との関係を第8図に示した(推定に利用した各品種のパラメータは第8表)。平均推定誤差はハナエチゼン1.58日、越路早生1.63日、オオセト1.29日、ミネニシキ1.19日、ミネユタカ1.39日、クレナイモチ1.49日と小さく、推定精度は高かった。また、各品種の±2日以内の推定誤差の割合はハナエチゼン88%、越路早生76%、オオセト95%、ミネニシキ100%、ミネユタカ95%、クレナイモチは93%と、極早生品種のハナエチゼン、越路早生でやや低かった。6品種全体では出穂期までの日数52~91日のデータが決定係数R²=0.97の精度で説明できた。なお、ハナエチゼンは本年越路早生に替わって奨励品種に採用されたばかりで栽培データの数が少なく、さらに検討が必要である。



第7図移植期と出穂期の推定誤差(f式)

第9表 栽培データの概要

品種名	試験年	データ数	移植期(月. 日)	出穂期(月. 日)
ハナエチゼン	1988 ~ 90	8	4.26 ~ 7.16	7.11 ~ 9.6
越路早生	1975 ~ 90	34	4.15 ~ 7.15	7.7 ~ 9.3
オオセト	1975 ~ 90	20	5.13 ~ 6.30	8.7 ~ 8.31
ミネニシキ	1975 ~ 90	32	5.13 ~ 7.15	8.10 ~ 9.9
ミネユタカ	1975 ~ 90	43	5.13 ~ 7.15	8.11 ~ 9.6
クレナイモチ	1975 ~ 90	42	5.13 ~ 7.15	8.12 ~ 9.10

第10表 出穂期の予測法と平均推定誤差および誤差の割合

品種名	標準偏差(日)	平均推定誤差(日)	推定誤差の範囲(日)	推定誤差の割合(%)		
				±1日	±2日	±3日
ハナエチゼン	11.06	1.58	-2 ~ 3	63	88	100
越路早生	9.58	1.63	-3 ~ 4	62	76	97
オオセト	6.54	1.29	-3 ~ 2	75	95	100
ミネニシキ	6.76	1.17	-2 ~ 2	78	100	100
ミネユタカ	6.68	1.39	-3 ~ 4	74	95	98
クレナイモチ	5.96	1.49	-3 ~ 3	62	93	100

注) 標準偏差は移植期から出穂期までの日数の標準偏差(自由度はデータ数)
平均推定誤差は $\text{SQRT}(\text{実測値} - \text{推定値})^2 / \text{データ数}$

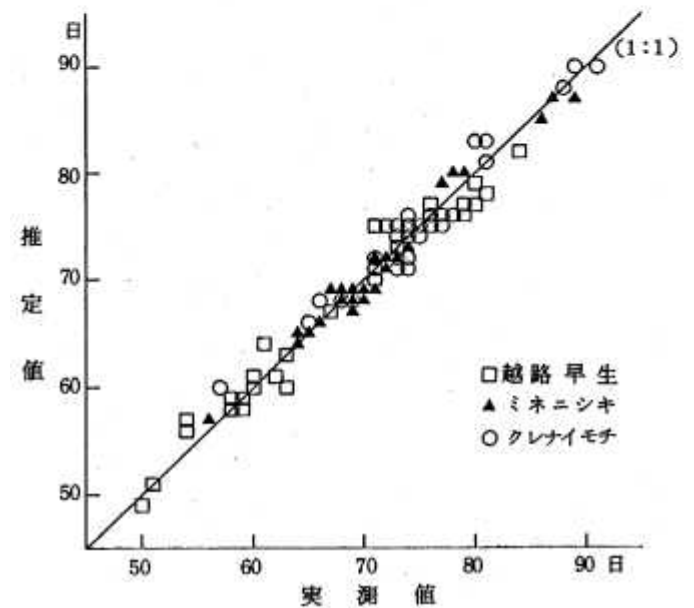
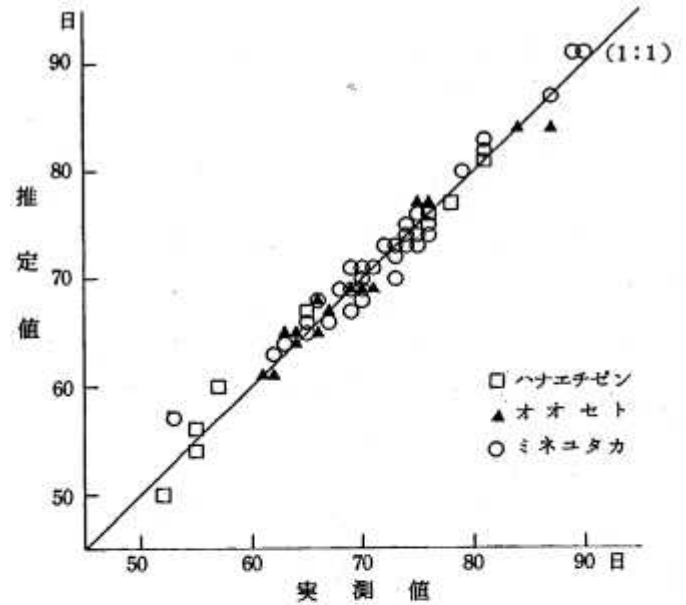
推定誤差は実測値-推定値

2 成熟期の推定

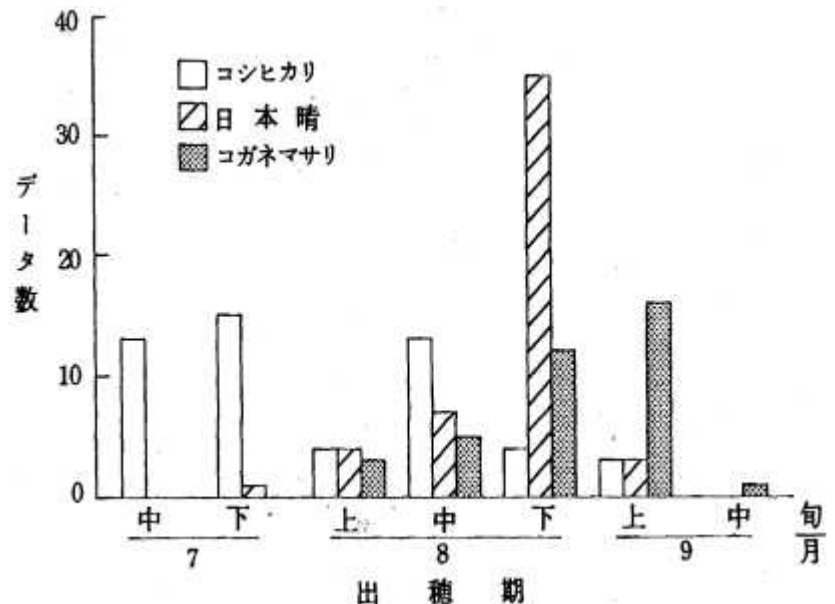
1) 解析データの出穂期と成熟期について

解析に使用したデータの出穂期を旬別にみるとコシヒカリは7月中旬、下旬と8月中旬が、日本晴は8月下旬が、コガネマサリは8月下旬と9月上旬が多く(第9図)、出穂期の幅はそれぞれ59日、42日、41日であった。また、成熟期の幅はコシヒカリ75日、日本晴56日、コガネマサリ54日と当穂期の幅より大きくなっていった。出穂期から成熟期までの日数(以下成熟期までの日数)はコシヒカリ30~52日、日本晴34~54日、コガネマサリ36~53日であった。

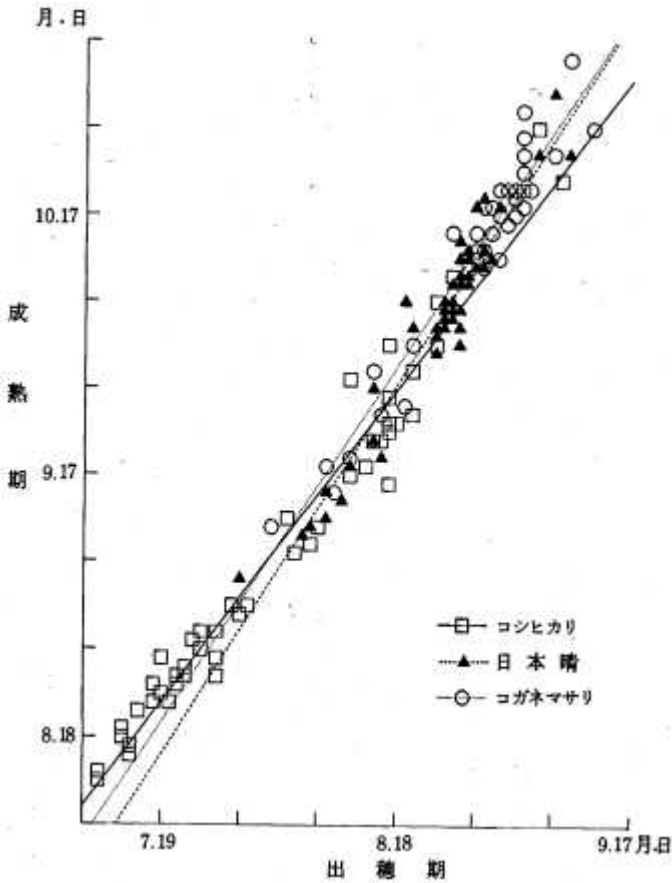
各品種の出穂期と成熟期との関係を第10図に、出穂期と成熟期までの積算気温との関係を第11図に示した。出穂期と成熟期の間には正の高い相関(相関係数0.93~0.96)が認められたが、出穂期と成熟期までの積算気温との間の相関は低く(相関係数-0.10~0.20)、明らかな関係は認められなかった。なお、成熟期までの積算気温はコシヒカリ802.6~1266.5(平均990.6)、日本晴909.7~1269.3(平均1046.1)、コガネマサリ939.4~1251.3(平均1083.8)であり、単純積算温度法ではこれらの平均値をもとに推定した。また、それぞれの関係を直線回帰に当てはめた場合の回帰係数は第11表のとおりで、直線回帰による推定にはこの回帰係数を利用した。



第8図 移植期から出穂期までの日数の実測値と(f)式による推定値との関係



第9図 出穂期とデータ数



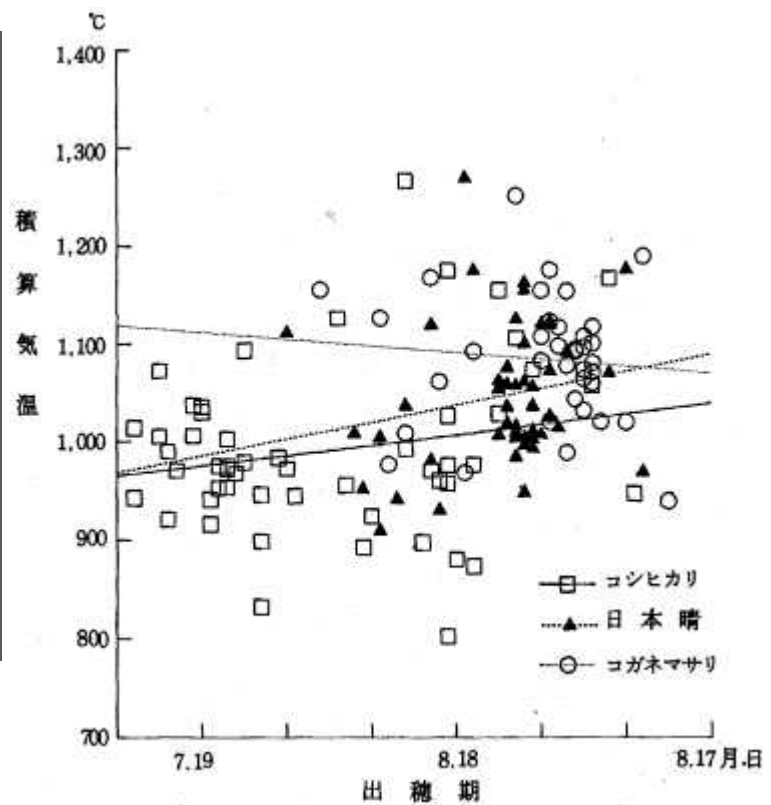
第10図 出穂期と成熟期との関係
注) 直線は各品種の回帰直線

第11表 出穂期と成熟期との関係

変数	品種名	相関係数	回帰係数	
			a	b
X: 出穂期 Y: 成熟期	コシヒカリ	0.93	12.7	1.193
	日本晴	0.96	-17.4	1.413
	コガネマサリ	0.97	-7.7	1.358
X: 出穂期 Y: 成熟期までの積算気温	コシヒカリ	0.20	8580.6	1.057
	日本晴	0.16	795.5	1.724
	コガネマサリ	-0.10	1187.1	-0.689

注) 直線回帰式は $Y = a + bX$
出穂期および成熟期の起算日は4月1日とした

2) 各品種における推定法の比較
第12~14表にはコシヒカリ, 日本晴およびコガネマサリの各推定法の平均



第11図 出穂期と出穂期から成熟期までの積算気温との関係
注) 直線は各品種の回帰直線

推定誤差，推定誤差の範囲および推定誤差の割合を示した。

(1) コシヒカリ

直線回帰による推定では平均推定誤差は暦日で3.54日，積算気温で3.83日と，直線回帰(暦日)がやや小さかった。また，積算温度法では平均推定誤差は単純積算温度で3.81日，有効積算温度で4.86日と，直線回帰(暦日)よりも大きかった。気温を関数とする関数式および1次元ノンパラメトリック回帰では平均推定誤差は3.73～3.93日で，気温較差を関数とするノンパラメトリック回帰が小さかったが，直線回帰(暦日)よりもやや大きかった。一方，2次元ノンパラメトリック回帰では平均推定誤差は3.50～3.62日で，最高気温と気温較差を関数とした場合が小さく，直線回帰(暦日)と同程度であった。

このように平均推定誤差は発育速度を利用する方法のうち最高気温と気温較差を関数とする2次元ノンパラメトリック回帰で3.50日と最も小さく，その推定誤差の範囲は-11～8日で，±3日の以内の推定誤差の割合は75%であった。

第12表 成熟期の予測法と平均推定誤差および誤差の割合(コシヒカリ)

予測法	平均推定誤差 (日)	推定誤差の範囲 (日)	誤差の割合(%)				
			±1日	±2日	±3日	±4日	±5日
暦日数	4.70	30～52					
直線回帰(暦日)	3.54	-8～10	38	54	65	83	88
直線回帰(積算気温)	3.83	-11～9	38	63	71	77	83
単純積算温度	3.81	-11～8	42	62	73	77	73
有効積算温度	4.86	-13～16	35	60	71	71	79
ノンパラ(平均気温)	3.82	-11～9	48	63	73	81	83
ノンパラ(最高気温)	3.75	-12～9	50	62	73	83	83
ノンパラ(最低気温)	3.93	-11～10	40	63	77	81	81
ノンパラ(気温較差)	3.73	-8～10	35	46	63	77	85
ノンパラ(平均+較差)	3.62	-11～9	46	65	75	81	85
ノンパラ(最高+最低)	3.57	-12～8	50	63	79	81	85
ノンパラ(最高+較差)	3.50	-11～8	50	63	75	81	85
a式	3.78	-11～8	42	63	71	81	83
b式	3.81	-11～7	40	63	71	81	81
c式	3.83	-11～7	46	67	71	79	87
g式	3.84	-11～8	42	63	71	81	85

注)暦日数は出穂期から成熟期までの日数の標準偏差(自由度はデータ数)および範囲
 平均推定誤差は $\text{SQRT}(\text{実測値}-\text{推定値})^2/\text{データ数}$
 推定誤差は実測値-推定値

(2) 日本晴

直線回帰による推定では平均推定誤差は暦日で3.21日，積算気温で3.39日と，直線回帰(暦日)が小さかった。積算温度法では平均推定誤差は単純積算温度で3.41日，有効積算温度で4.49日と，直線回帰よりもやや大きかった。気温を関数とする関数式および1次元ノンパラメトリック回帰では平均推定誤差は3.14～3.55日で，最高気温を関数とするノンパラメトリック回帰が小さく，直率回帰(暦日)と同程度であった。一方，2次元ノンパラメトリック回帰では平均推定誤差は2.87～3.09日で，最高気温と気温較差を関数とした場合が小さく，直線回帰(暦日)よりも0.3日程度小さかった。

このように平均推定誤差は発育速度を利用する方法のうち最高気温と気温較差を関数とする2次元ノンパラメトリック回帰で2.87日と最も小さく，その推定誤差の範囲は-7～6日で，±3日以内の推定誤差の割合は74%であった。

第13表 成熟期の予測法と平均推定誤差および誤差の割合(日本晴)

予測法	平均推定誤差 (日)	推定誤差の範囲 (日)	誤差の割合(%)				
			±1日	±2日	±3日	±4日	±5日
暦日数	4.58	34～54					
直線回帰(暦日)	3.21	-8～7	40	56	76	80	90
直線回帰(積算気温)	3.39	-10～7	30	46	74	82	92
単純積算温度	3.41	-10～6	26	52	76	80	90
有効積算温度	4.49	-12～14	20	46	64	68	78
ノンパラ(平均気温)	3.26	-10～6	34	54	74	84	92
ノンパラ(最高気温)	3.14	-9～6	34	56	72	84	96
ノンパラ(最低気温)	3.43	-9～6	34	48	68	80	90
ノンパラ(気温較差)	3.55	-8～7	32	46	64	78	88
ノンパラ(平均+較差)	2.93	-7～6	42	58	68	90	96
ノンパラ(最高+最低)	3.09	-9～6	36	58	72	86	96
ノンパラ(最高+較差)	2.87	-7～6	42	60	74	88	96
a式	3.32	-10～5	38	60	74	84	90
b式	3.46	-9～6	40	60	72	78	88
c式	3.45	-9～6	34	54	72	78	88
g式	3.40	-9～6	34	60	74	78	90

注) 第12表と同じ

(3) コガネマサリ

直線回帰による推定では平均推定誤差は暦日で3.31日、積算気温で3.37日と、直線回帰(暦日)がわずかに小さかった。積算温度法では平均推定誤差は単純積算温度で3.43日、有効積算温度で7.83日と、直線回帰よりも大きかった。一方、気温を関数とする関数式および1次元ノンパラメトリック回帰では平均推定誤差は3.03～3.87日で、最高気温を関数とするノンパラメトリック回帰が小さく、直線回帰より0.3日程度小さかった。また、2次元ノンパラメトリック回帰では平均推定誤差は2.71～3.13日で、最高気温と最低気温を関数とした場合が小さく、直線回帰よりも0.6日程度小さかった。

このように平均推定誤差は発育速度を利用する方法のうち最高気温と最低気温を関数とする2次元ノンパラメトリック回帰で2.71日と最も小さく、その推定誤差の範囲は-7～6日で、±3日以内の推定誤差の割合は81%であった。

第14表 成熟期の予測法と平均推定誤差および誤差の割合(コガネマサリ)

予測法	平均推定誤差 (日)	推定誤差の範囲 (日)	誤差の割合(%)				
			±1日	±2日	±3日	±4日	±5日
暦日数	4.61	36～56					
直線回帰(暦日)	3.31	-7～7	35	49	73	84	86
直線回帰(積算気温)	3.37	-8～8	46	59	70	84	86
単純積算温度	3.43	-8～9	43	47	70	84	86
有効積算温度	7.83	-11～24	24	27	43	54	68
ノンパラ	3.19	-8～8	46	57	78	84	89

ノンパラ	3.03	-7~8	46	62	73	89	92
ノンパラ	3.12	-8~8	43	65	78	84	92
ノンパラ	3.87	-7~8	24	35	62	76	84
ノンパラ	3.13	-7~9	46	62	76	84	92
ノンパラ	2.71	-7~6	49	65	81	89	95
ノンパラ	2.97	-6~10	51	59	78	92	95
a式	3.24	-8~7	46	59	73	84	89
b式	3.46	-8~9	46	54	70	81	89
c式	3.28	-8~7	49	57	70	84	89
g式	3.22	-8~6	43	57	73	84	89

注) 第12表と同じ

3)成熟期の推定法

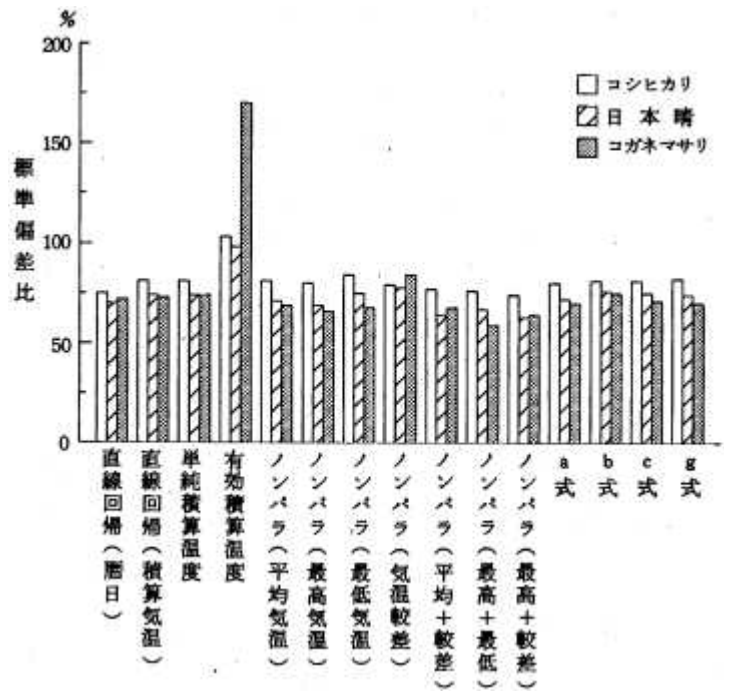
第12図にはコシヒカリ，日本晴およびコガネマサリの各推定法の成熟期までの日数の標準偏差(コシヒカリ4.70日，日本晴4.58日，コガネマサリ4.61日)に対する平均推定誤差の割合(標準偏差比)を示した。

各品種とも有効積算温度法の平均推定誤差は標準偏差よりも大きかった。その他の推定法の標準偏差比は大差なかったが，最高気温と最低気温，最高気温と気温較差を関数とする2次元ノンパラメトリック回帰が標準偏差比はやや小さく，コシヒカリ75%，日本晴65%，コガネマサリ62%前後であった。全データ(3品種)の平均推定誤差を最高気温と最低気温，最高気温と気温較差で求めると，それぞれ3.18日，3.14日とわずかではあるが，最高気温と気温較差を関数とする2次元ノンパラメトリック回帰が小さかった。

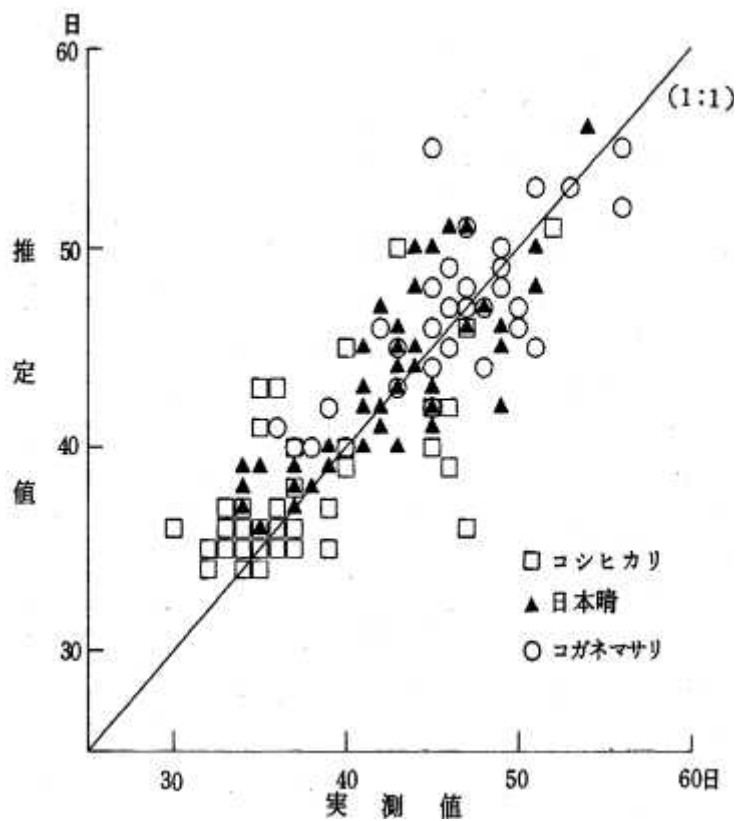
最高気温と気温較差を関数とする2次元ノンパラメトリック回帰の平均推定誤差はコシヒカリ3.50日，日本晴2.87日，コガネマサリ2.97日と出穂期の推定の場合(平均推定誤差1.19~1.78日)に比べ大きかった。第13図には成熟期までの日数の実測値と2次元ノンパラメトリック回帰(最高気温と気温較差)による推定値との関係を示した。また，第14図には出穂期と成熟期の推定誤差との関係を，第15図には収量と成熟期の推定誤差との関係を示した。

成熟期までの日数の実測値と推定値との間の決定係数 R^2 は0.74であり，推定誤差はコシヒカリ-11~8日，日本晴-7~6日，コガネマサリ-6~10日と大きく，実用化には誤差が大きいのと思われる。出穂期と成熟期の推定誤差との関係をみると，出穂期が遅くなると推定誤差の幅がやや大きくなる傾向が認められたが，コシヒカリでは7月に出穂したものは推定誤差の範囲が ± 3 日程度と小さかった。ま

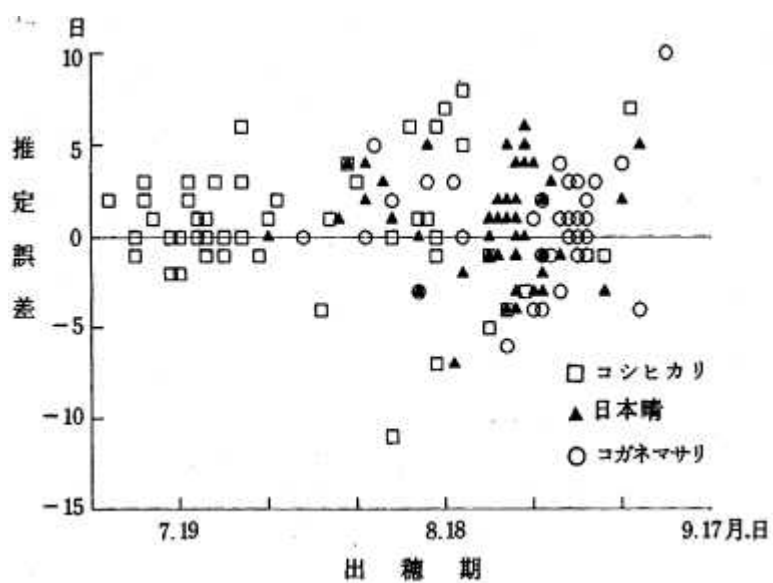
た、収量および倒伏程度と推定誤差の間には明らかな関係は認められなかった。



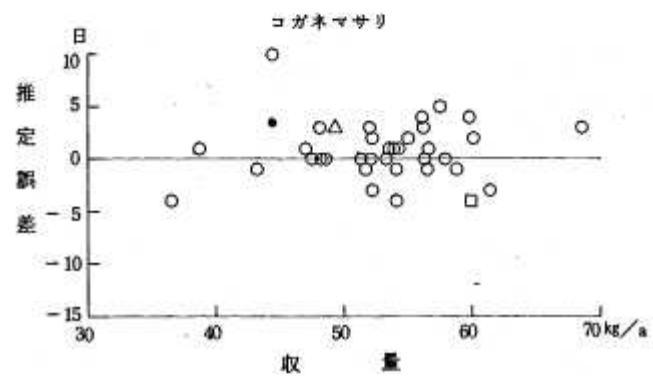
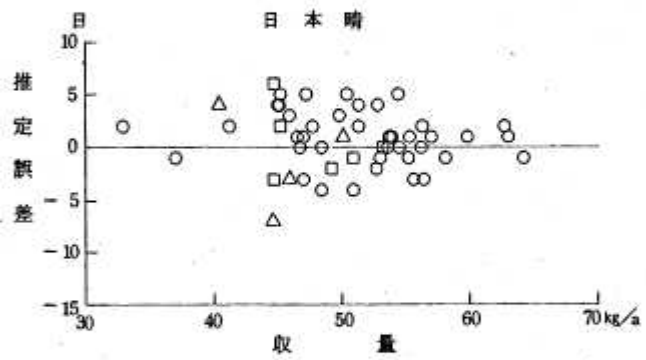
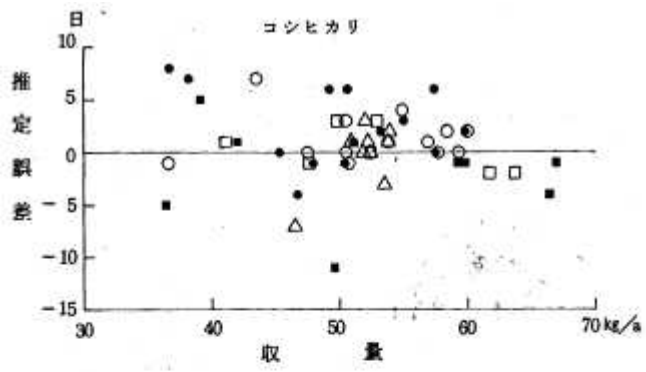
第12図 成熟期の推定法の比較



第13図 出穂期から成熟期までの日数の実測期と推定値との関係

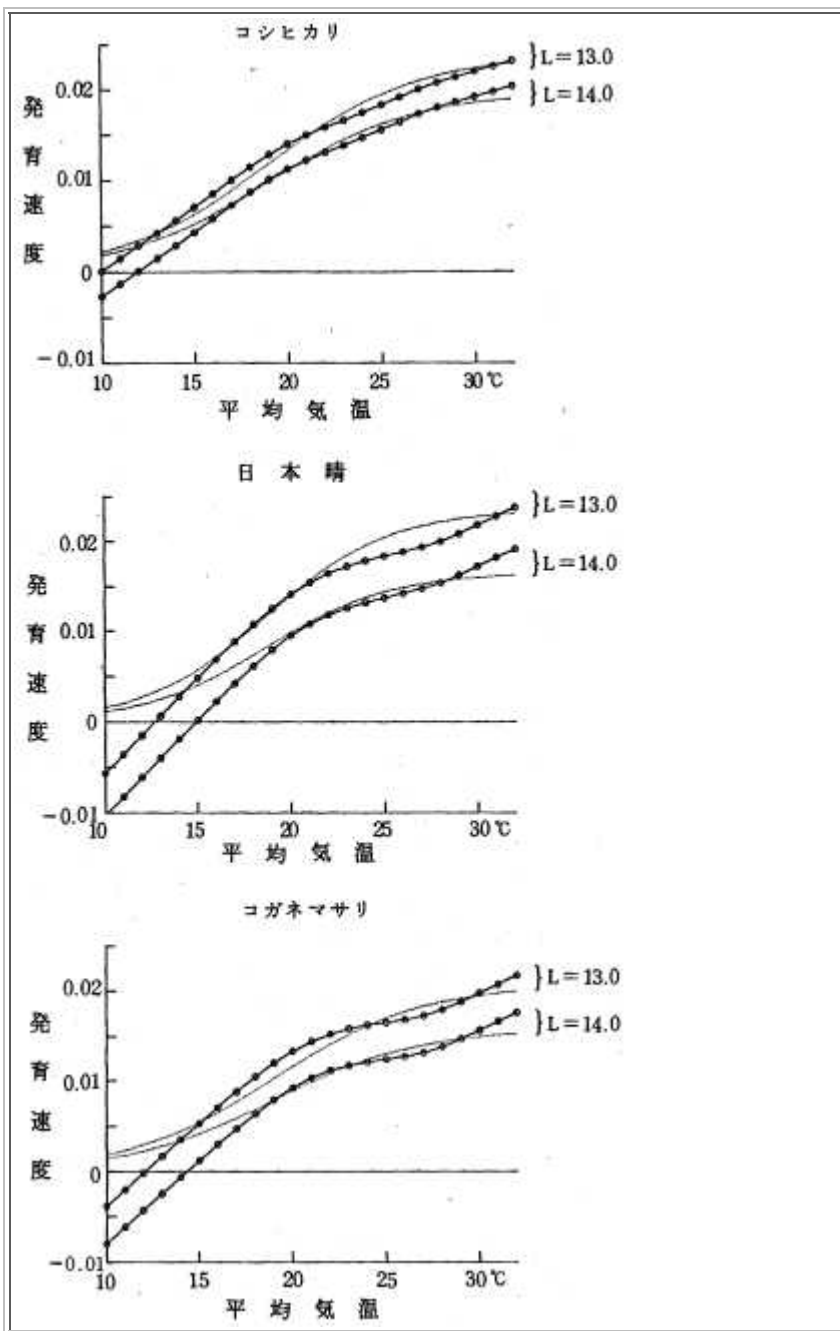


第14図 出穂期と成熟期の推定誤差との関係



第15図 収量と成熟期の推定誤差との関係

- 0 倒伏程度 1 1 < 倒伏程度 2
- 2 < 倒伏程度 3 3 < 倒伏程度 4
- 4 < 倒伏程度 5



第16図 発育速度の比較
 細実線は(f)式。丸の入った実線は2次元ノンパラメトリック回帰

考察

1 出穂期の推定

気温あるいは気温と日長の関数式の推定精度を比較したものとして川方・岡田⁷⁾、堀江・中川²⁾の報告がある。川方・岡田はアキヒカリ、ササニシキ、コシヒカリ、ミズホの幼穂形成始期および出穂期の予測に(a), (b), (d), (e), (f)式の比較を行い、気温のみの関数よりも気温と日長の関数式が推定精度が高く、その程度は感光性の高いミズホが他の品種より大きいこと、(d), (e), (f)式の差はほとんどなかったことを報告している。また堀江・中川は日本晴の出穂期の予測法を確立するなかで、(a), (c), (d), (f)式に相当する関数式を比較し

た結果(f)式が最も推定精度が高かったことを報告している。本解析でもコシヒカリ、日本晴、コガネマサリとも気温のみの関数式よりも気温と日長の関数式である(f)式の推定精度が高く、その程度は感光性の高い日本晴、コガネマサリで大きかった。

一方、ノンパラメトリック回帰を用いて解析する場合には平滑化係数の選択によりDVR-気象要因曲線の形状が変化し、どの曲線を採用するかによって平均推定誤差も変わる。今回の解析で使用した平滑化係数では、平均推定誤差は(f)式と大差がなく、2次元ノンパラメトリック回帰も(f)式と同様に出穂期

の推定には有効であると考えられた。

(f)式と2次元ノンパラメトリック回帰の発育速度(DVR)に及ぼす気温と日長の影響を比較するため、第16図に両推定法の発育速度を示した。コシヒカリの発育速度は栽培期間の気象範囲(日長13.0時間で平均気温11~30, 日長14.0時間で平均気温15~30)では両推定法の値には大差なかった。しかし日本晴およびコガネマサリの発育速度は栽培期間の気象範囲(日長13.0時間で平均気温22~30, 日長14時間で16~30)では(f)式による発育速度がやや大きく、その傾向は短日長で強かった。このように(f)式と2次元ノンパラメトリック回帰では日本晴およびコガネマサリでは発育速度にやや差が認められた。しかし、今回の解析の範囲では出穂期の平均推定誤差は両推定法に大差なく、今後新たな気象条件下のデータを当てはめ、推定精度を比較する必要がある。また、本県各地での適応性についても今後検討する必要がある。

第16図 発育速度の比較

注) Lは日長(可照時間)

細実線は(f)式, の付いた実線は2次元ノンパラメトリック回帰

ところで、前述の川方・岡田および堀江・中川の報告では出芽期を出発点とし、幼穂形成期あるいは出穂期を予測した。しかし、本報告では出芽期のデータおよび出芽期から移植期までの気温データがないため出発点を移植期とした。移植時における葉齢は調査した範囲で1.5葉程度の差が認められ、移植期の発育指数を一律に0とした点にも推定誤差が生じる要因があったと思われる。この点を補正する方法として中川・堀江¹⁶⁾、山本ら²²⁾が移植時の葉齢による移植時の発育指数を補正する方法を報告している。推定精度をさらに高めるためにも、また適用幅を拡大(乳苗, 中苗, 成苗移植に適用)するためにもこの点について検討する必要がある。

さらに、稲の生育ステージに対する環境の影響は幼穂形成期までは主に気温と日長が、それ以降出穂期までは気温が関与するとされている。しかし、中川・堀江¹⁵⁾は幼穂分化期から出穂期までの生殖生長期にも日長感応性が存在すること、しかも栄養生長期と比較すると日長感応性が小さいことを報告している。また、石橋ら⁵⁾は気温を関数とするノンパラメトリック回帰を用いて解析した結果、幼穂形成期の前後で温度に対するDVR-気温曲線が異なったことを、山本ら²⁴⁾も気温を関数とする関数式を用いて出穂期の推定を行い、幼穂形成期の前後で異なる関数式を用いることで推定精度が高まったことを報告している。しかし、本解析に使用したデータには幼穂形成期の調査がほとんどないため、移植期から出穂期までを一過程として解析をした。今後この点についても検討する必要がある。

また、本解析では気象要因(気温, 日長)について検討したが、地力, 窒素施肥量¹⁴⁾, 生育量等による出穂期の変動も考えられる。そのため、これらと出穂期(幼穂形成期)との関係を明らかにすることで、推定精度をより高めることができると思われる。

さて、出穂期の予測に発育指数の概念を取り入れることは、推定精度を高めるために有効であった。また、発育指数の概念を取り入れることは生育途中の発育段階を発育指数の形で表せるという利点がある。山本ら²³⁾は発育指数から葉齢, 葉齢指数, 幼穂長を推定する方法や分けつ初期および最高分けつ期などの各発育段階を発育指数で表すことを検討している。このように水稻の各生育段階を発育指数で表せることは、水稻の生育診断予測技術を確立する上でも大いに参考になり、今後検討する必要がある。このためにも、より推定精度の高い推定法が期待される。

2 成熟期の推定

本解析では、気象要因として気温を関数とする場合の推定法について検討したが、推定誤差が大きく実用化には問題があると思われる。成熟期に影響を与える要因として気温以外の気象要因(日射量等), 窒素施肥量¹⁴⁾, 稲の生育量, 倒伏程度等が考えられる。従って、成熟期の推定精度を高めるためにはそれらと成熟期との関係についても検討する必要がある。

また、成熟期とは「稔実初の大部分が完熟期に達した日」でその判定は主として、一穂内の穂の色を見て行われており、品種, 天候, 時刻や劣勢穎花の多少等により惑わされ、正確な判定は困難とされている。このため成熟期の判定は出穂期の判定に比べ、個人および諸条件によって変動し、そのため推定精度が悪くなった可能性もあり、より客観的な判定法が必要である。

謝辞: 本研究を進めるに当たり、京都大学農学部堀江武教授および中川博視助教授にはデータの解析のためのパソコン用ソフト<NIP88DVR>の提供と使用法の教示をいただいた。また、農業研究セン

タープロジェクト第5チーム主任研究官田村良文博士(現東北農業試験場)にはデータ解析のためのパソコン用ソフト<HEADAC-AC> , <NONPARA> , <2DIMNON> の提供と使用法の教示をいただいた。ここに記して感謝の意を表す。

摘 要

徳島県の水稲奨励品種の出穂期および成熟期の推定法を確立するため、主要品種(コシヒカリ, 日本晴, コガネマサリ)を対象に直線回帰式, 積算温度法, 発育速度を利用する方法(関数式, ノンパラメトリック回帰)を用いて推定精度を比較検討した。

1 出穂期は発育速度を利用する方法のうち気温と日長の関数式(f)式および2次元ノンパラメトリック回帰の推定精度が高く, 実用性は高かった。気温と日長を関数とする(f)式の平均推定誤差はコシヒカリ1.8日, 日本晴1.4日, コガネマサリ1.3日程度で, ± 2 日以内の推定誤差の割合はそれぞれ85%, 94%, 97%であった。

2 その他の本県奨励品種(ハナエチゼン, 越路早生, オオセト, ミネニシキ, ミネユタカ, クレナイモチ)について(f)式による推定精度を検討した結果, 平均推定誤差は1.2~1.6日と推定精度は高かった。

3 成熟期については2次元ノンパラメトリック回帰(日最高気温と気温較差, 日最高気温と日最低気温)で平均推定誤差が小さかった。しかし, その平均推定誤差はコシヒカリ3.5日, 日本晴3.0日, コガネマサリ2.8日程度であり, 推定誤差の範囲はそれぞれ-11~8日, -12~8日, -6~10日と大きく, 実用化にはさらに検討が必要であった。

引用文献

- 1) 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(1).農業気象, 18(3): 109~117.
- 2) 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(4):687~695.
- 3) 吉良知彦(1986): 稲の発育過程のモデル化と予測に関する研究(1)発育動態の気象的予測モデルについて.日作紀, 55(別 1):214~215.
- 4) 稲村達也(1989): 湛水土壤中直播栽培の出穂期, 成熟期および生産力の推定法.奈良農試研報, (20):1~11.
- 5) 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稲の生育期予測. 日作紀, 59(3):443~449.
- 6) 石倉教光・斉藤武雄・池永昇(1966): 水稲の収穫期と出穂後気温量の関係.農業技術, 21(9):426~429.
- 7) 川方俊和・岡田益己(1989): 発育指数を用いた水稲の幼穂形成始期と出穂期の推定.農業気象, 45(3):137~142.
- 8) 小林彌一(1983): 水稲の収穫適期の予測に関する研究(第1報)施肥法の差による籾の黄化, 積算気温と収穫適期との関係.福島農 試研報, (22):55~63.
- 9) 松島省三・真中多喜夫(1957): 水稲収量成立と予察に関する作物学的研究XXXIX水稲の登熟機構の研究(5)生育各期の気温の 高低・日射の強弱並びにその複合条件が水稲の登熟に及ぼす影響. 日作紀, 25(4):203~206.
- 10) (1958): XLVII水稲の登熟機構の研究(8)転流機構特に温度と転流速度との関係並びに登熟歩合向上法について.日作 紀, 27(1):6~8.
- 11) 和田源七(1959): LII. 水稲の登熟機構の研究(10)籾への炭水化物の転流適温, 登熟適温並びに籾の炭水化物受け入れ 能力の低下について.日作紀, 28(1):44~45.
- 12) 深山政治(1988): 千葉県における水稲の生育診断・予測について.米麦改良,(1):4~14.
- 13) 森康明・河野富香・房尾一宏・鳥生久嘉(1986): 広島県メッシュ気候図の利用に関する研究(第8報)水稲の出穂期及び成熟期の 推定とその利用.広島農試報告,(50):11~24.
- 14) 中川博視・堀江武(1989): イネの発育過程のモデル化と予測に関する研究(5)窒素施肥が発育に及ぼす影響の実験的解析.日作 紀,58(別1):18~19.
- 15) (1989): (6)栄養生長相と生殖生長相の日長感応性の品種間差異の実験的解析.日作 紀, 58(別1):20~21.

- 16 (1990): (8)本邦全域に適用可能な幼穂分化・出穂期の気象的予測モデルの開発:日作紀, 59(別2): 171 ~ 172.
- 17) 西郷昭三郎・鈴木金苗・塚本行雄・宮田喜次郎(1974): 水稻収穫時期の判定法に関する研究.静岡農試研報.(19): 1 ~ 10.
- 18) 竹澤邦夫・田村良文・小野祐幸(1989): 作物の発育ステージのノンパラメトリック推定の有効性.農業気象, 45(3): 151 ~ 154.
- 19) 田村良文・竹澤邦夫・土居健一(1990): 作物の新しい発育ステージ予測法 2)2次元ノンパラメトリック法の紹介.農及園, 65(2): 285 ~ 289.
- 20) 鳥生誠二(1989): 愛媛県における作物の生育ステージの予測に関する研究(第2報)水稻奨励品種の出穂期および成熟期の推. 愛媛農試研報, (29): 10 ~ 17.
- 21) (1990): (第4報)日平均気温と可照時間を関数とする2次元ノンパラメトリック回帰による水稻出穂期の予測.愛媛農試研報, (30): 1 ~ 8.
- 22) 山本良孝・川口祐男・浅生秀孝・高橋涉(1988): 気温による水稻の発育段階予測(第3報)葉齢の異なる苗への適用について.日作紀, 57(別2): 129 ~ 130.
- 23) 川上義昭・川口祐男(1987): 気温による水稻の発育段階予測について(第2報)DVS値と葉齢, 葉齢指数及び幼穂長との関係. 北陸作物学会報, (22): 17 ~ 18.
- 24) 田守健夫・川上義昭・川口祐男(1986): 気温による水稻の発育段階予測について.北陸作物学会報, (21): 47 ~ 48.