

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

石橋 英二・桐山 隆*・田村 良文**

金野 隆光***・小野 祐幸***

(岡山県立農業試験場, *石川県農業総合試験場,

農業研究センター, *四国農業試験場)

平成元年 9 月 29 日受理

要 旨：岡山県南部の主要品種（日本晴，アケボノ）について，移植期～幼穂形成期と幼穂形成期～出穂期の温度影響評価と幼穂形成期および出穂期の予測を行った。その際，竹澤ら^{10,11)}が，堀江ら³⁾の概念に基づいて提案した方法，つまりノンパラメトリック回帰を用いて DVR を決定する方法（以下，ノンパラメトリック DVR 法と称する）を用いて解析した。また，予測精度を有効積算温度法と比較した。さらに岡山県と石川県で得た生育期毎の発育速度と温度の関係（DVR-T 曲線）を比較した。

1. DVR-T 曲線は，生育ステージによって特徴的な形状を示し，移植期から幼穂形成期では，湾曲していたが，幼穂形成期から出穂期では直線状となった。2. Cross-validation を併用したノンパラメトリック DVR 法で幼穂形成期あるいは出穂期を予測した結果，予測日と観測日の差は最大 2～3 日であった。3. ノンパラメトリック DVR 法と有効積算温度法を比較した結果，DVR-T 曲線が直線の場合には，ノンパラメトリック DVR 法と有効積算温度法の予測精度は同程度であったが，DVR-T 曲線が湾曲する場合には，ノンパラメトリック DVR 法の予測精度が勝っていた。4. 石川，岡山両県で得た DVR-T 曲線の比較から，移植期～幼穂形成期では，発育速度は 20℃ 以上で頭打ちになるが，幼穂形成期～出穂期では気温が高いほど，発育が早まり，温度反応が鋭敏であることがうかがえた。

キーワード：温度影響，出穂期，水稻，生育予測，ノンパラメトリック DVR 法，幼穂形成期。

Prediction of Growth Stage by Nonparametric Evaluation of Temperature Response in Rice Plant : Eiji ISHIBASHI, Takashi KIRIYAMA*, Yoshifumi TAMURA**, Takamitsu KONNO*** and Sukeyuki ONO** (*Okayama Agric. Exp. Stn. Sanyo, Okayama 709-08, Japan, *Ishikawa Agric. Res. Cent. Kanazawa, Ishikawa 920-01, Japan, **Natl. Agric. Res. Cent. Tsukuba, Ibaraki 305, Japan, ***Shikoku Natl. Agric. Exp. Stn, Zentsuji, Kagawa 765, Japan*)

Abstract : The temperature response in two growth phases of rice, namely, the transplanting time to the panicle formation stage and the panicle formation stage to the heading time, was estimated according to the concept of the Developmental Index, using the Nonparametric DVR method. Also, the prediction of the panicle formation stage and the heading time was attempted.

The accuracy of prediction by the Nonparametric DVR method was compared with the Accumulative temperature method. Also the relationship between developmental rate and air temperature (DVR-T curve) obtained in Okayama Prefecture was compared with that in Ishikawa Prefecture.

1) The DVR-T curve showed characteristic shapes in each growth phase. In the period between the transplanting and the panicle formation stage, the DVR-T curve was bent; whereas it was on a straight line thereafter.

2) The differences in the days between the observed and estimated panicle formation stage or heading time were less than 2~3 days, when the Nonparametric DVR method was used in combination with the Cross validation method.

3) When the DVR-T curve was on a straight line, the accuracy of the prediction did not differ from that obtained by the Accumulative temperature method. When the DVR-T curve was bent, the prediction by the Nonparametric DVR method was more accurate.

4) The DVR-T curves obtained in both prefectures gradually declined in increment as the temperature became higher than 20 C until the panicle formation stage, and thereafter the developmental rate became higher with the increment of air temperature.

Key words : Heading time, Nonparametric DVR method, Panicle formation stage, Prediction, Rice, Temperature affection.

近年の良質米志向を反映して，倒伏抵抗性あるいは病害抵抗性が比較的低い品種の作付が増加する傾

向にあり，作柄の安定を図るためには的確な肥培管理および適期防除が必要である。さらに，兼業農家が増え，収穫作業の受委託あるいはライスセンター並びに機械銀行の効率的運用のためにも生育期の的確な予測が求められている。

* 大要は，第 77 回関東支部講演会（1988 年 12 月）において発表。

+ 現 果樹試験場 安芸津支場。

水稻の生育期予測法として、堀江ら³⁾は发育速度の概念を提案した。つまり发育指数 (DVI)⁸⁾ を例えば出芽時に 0、出穂期に 1 とし、毎日の发育速度 (DVR) を気温及び日照時間の関数として、パラメトリックな関数モデルによって決定することにより、水稻の出穂期を動的に予測できるとした。

一方、竹澤ら^{10,11)}は、生育期の予測に堀江らと同様に发育速度の概念を用い、DVI と DVR の関係を日平均気温だけで表すことによって生育期の予測が可能であると考えた。そしてその解析法として、これまでのような予め定義した関数のパラメーターを最小二乗法で求める方法に対して、特別な関数の定義なしにより精度の高い推定を行うためにノンパラメトリックな手法を提案した。この方法はパラメトリックな関数を定義していないという意味でノンパラメトリック DVR 法と称されている。

田村らは春小麦の成熟期¹²⁾、トウモロコシの絹糸抽出期等の予測並びに发育指数の進行に対する温度影響評価¹³⁾を行い、ノンパラメトリック DVR 法の有効性を報告している。本報では水稻の出穂性が、限られた地域の同一播種期という条件下では、気温だけで説明が可能であるという観点から、生育期予測および发育進行に対する温度影響評価にノンパラメトリック DVR 法を適用した。そしてその結果求まる DVR-T 曲線は品種固有の形状を示すであろうと考えた。この際、従来の有効積算温度法との比較も行った。また、岡山県と石川県では稲作期間中の気象パターンが著しく異なり、岡山県では移植期から出穂期までの温度較差が小さく、かつ幼穂形成期頃の気温が最も高いのに対して、石川県では出穂期まで連続的に上昇し、温度較差も岡山県に比べて大きい。このような気温の推移と生育ステージの進行の相互関係がかなり異なる 2 地域における水稻の发育進行に対する温度影響を比較し、その違

いを気象との関係で論じた。

材料と方法

1 解析に用いたデータ

中国四国農政局統計情報部岡山作況試験室が、日本晴およびアケボノについて、前者では 1978～1987 年の 10 年間に、後者では 1969～1987 年の 19 年間に得た移植期、幼穂形成期および出穂期の暦日データと同期間の日最高および最低気温を今回の解析に用いた。

石川県の DVR-T 曲線は、北陸農政局統計情報部石川作況試験室が 1977～1986 年に加賀ひかりとコシヒカリで得た生育期調査データと日平均気温を、桐山ら²⁾がノンパラメトリック DVR 法によって解析して求めた。

栽培方法はアケボノが成苗手植えであったのを除いて、その他の品種では稚苗機械移植であった。耕種概要は両県とも慣行に準拠していた。

2 ノンパラメトリック DVR 法による解析

堀江ら³⁾の发育速度の概念に基づき、移植時の发育指数 (DVI) を 0 とし、幼穂形成期に 1 になるように毎日の发育速度 (DVR) を日平均気温だけで表すと次式のようなになる。

$$DVI = \sum_{i=1}^n DVR(T_i)$$

ただし、 T_i : 日平均気温 n : 幼穂形成期
 $i=n$ の時 $DVI=1$

これを満足する DVR と日平均気温の関係を求めれば幼穂形成期の予測が可能になる。同様に幼穂形成期の DVI を 0、出穂期を 1 として生育ステージ毎に DVR と日平均気温の関係を求めた。

なお、毎日の平均気温 (T_i) に対する DVR は次に示すように一定の温度範囲毎に DVR_i として与えられる。

第 1 表 日本晴、アケボノにおける各生育期間の所要日数の年次変動 (日)。

	日 本 晴		ア ケ ボ ノ	
	移 植 期～幼 穂～出 穂 期 形成期		移 植 期～幼 穂～出 穂 期 形成期	
平均所要 日 数	48.1	20.5	49.4	22.5
最 大	51	22	52	26
最 小	45	18	47	21
変 動 幅	6	4	5	5

日本晴は 1978—1987 年、アケボノは 1969—1987 年のデータを用いている。

$$\text{DVR}(T_i) = \text{DVR}_j$$

$$\text{for } T_0 + j\Delta T \leq T_i \leq T_0 + (j+1)\Delta T$$

ただし、 $0 \leq j \leq M-1$ (M は日平均気温の刻みの数)、 T_0 は T_i の最小値よりも小さな値、 $T_0 + M\Delta T$ (ΔT は日平均気温の刻み幅) は T_i の最大値よりも大きな値。

このようにして求められた各生育ステージ毎の DVR と T_i の関係に基づいて、その生育期を予測し、予測日と観測日の差が全ての調査データにおいて最小になるような、つまり DVR と T_i の関係が用いたデータの範囲内で最も普遍性があるような組み合わせを最適とした。

この DVR (T_i) の算出に当たっては、竹澤ら¹⁰⁾ の提唱した DVR_j が j について滑らかに変化するという仮定を設ける考え方に従い、計算は金野らが

開発したパソコン用ソフトによった。なお、計算に際して、気温の刻みは 1°C 、平滑化係数 $\lambda = 5000$ として Cross-validation 法を併用して実施した。

なお、Cross-validation 法とは、ある年の生育期を予測する場合に、その年を除外した年次の観測日と日平均気温から求めた発育速度と温度との関係を用いて、当該除外年次の生育期を予測する手法である。すなわち、予測に当該年のデータを用いないのでより厳密な予測が可能となる手法である。

3 有効積算温度法による解析

有効積算温度法による解析は、ノンパラメトリック DVR 法による解析と同一の生育期について、金野の開発したパソコン用ソフトによって実施した。その際、生育零点(D)を 10°C とし、Cross-validation 法を併用した。

第2表 ノンパラメトリック DVR 法によって求めた日本晴、アケボノにおける幼穂形成期、出穂期の予測結果。

年 次	日 本 晴				ア ケ ボ ノ			
	幼形期	出穂期	予測の差(日)		幼形期	出穂期	予測の差(日)	
	月／日	月／日	移～幼	幼～出	月／日	月／日	移～幼	幼～出
1969	—	—	—	—	8/13	9/04	－0.3	1.5
1970	—	—	—	—	8/14	9/05	－2.5	0.7
1971	—	—	—	—	8/13	9/08	－2.3	－0.5
1972	—	—	—	—	8/13	9/07	－1.6	－1.4
1973	—	—	—	—	8/11	9/02	－0.3	0.3
1974	—	—	—	—	8/12	9/01	－0.2	2.3
1975	—	—	—	—	8/11	9/04	0.2	－1.7
1976	—	—	—	—	8/11	9/04	1.0	－0.4
1977	—	—	—	—	8/11	9/04	0.1	－0.3
1978	8/1	8/19	2.3	2.5	8/10	9/02	0.8	－1.9
1979	8/4	8/23	－0.1	1.3	8/11	9/01	0.3	0.7
1980	8/7	8/29	－2.3	0.0	8/12	9/05	0.1	0.4
1981	8/4	8/25	－1.4	0.5	8/11	9/03	－0.1	－0.5
1982	8/5	8/27	1.6	－1.4	8/12	9/02	0.7	1.6
1983	8/2	8/23	2.8	－1.9	8/09	8/30	2.5	0.0
1984	8/3	8/23	0.3	－0.2	8/10	8/31	0.9	－0.1
1985	8/5	8/25	－1.5	－0.1	8/11	9/02	－0.1	－1.0
1986	8/6	8/26	－1.5	0.7	8/12	9/02	－0.3	0.7
1987	8/4	8/26	0.4	－1.4	8/10	9/01	1.5	0.1
ノンパラメトリック DVR 法による								
予測の差の標準誤差 (CR)			1.75	1.35				1.20 1.11
有効積算温度法による								
予測の差の標準誤差 (CR)			2.35	1.55				2.15 1.23

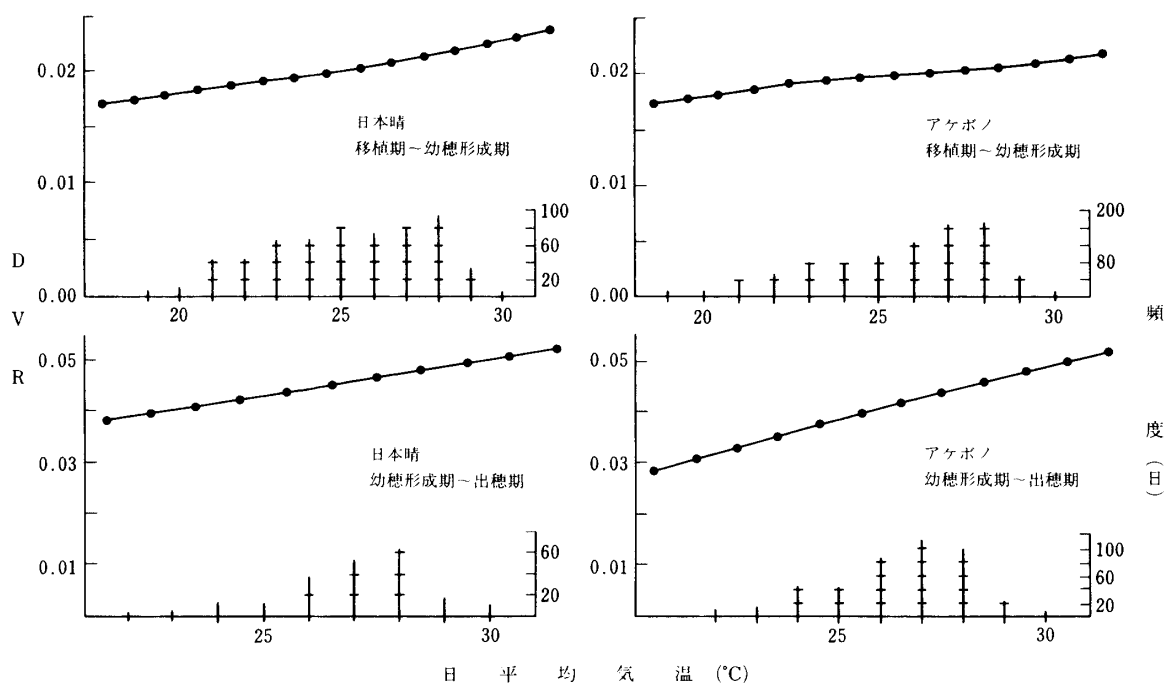
表中 * 予測の差 + は観測日より予測日が遅いことを、- は早いことをしめす。

* CR ; 当該年を除去して推定した DVR (T)、或は有効積算温度で予測。

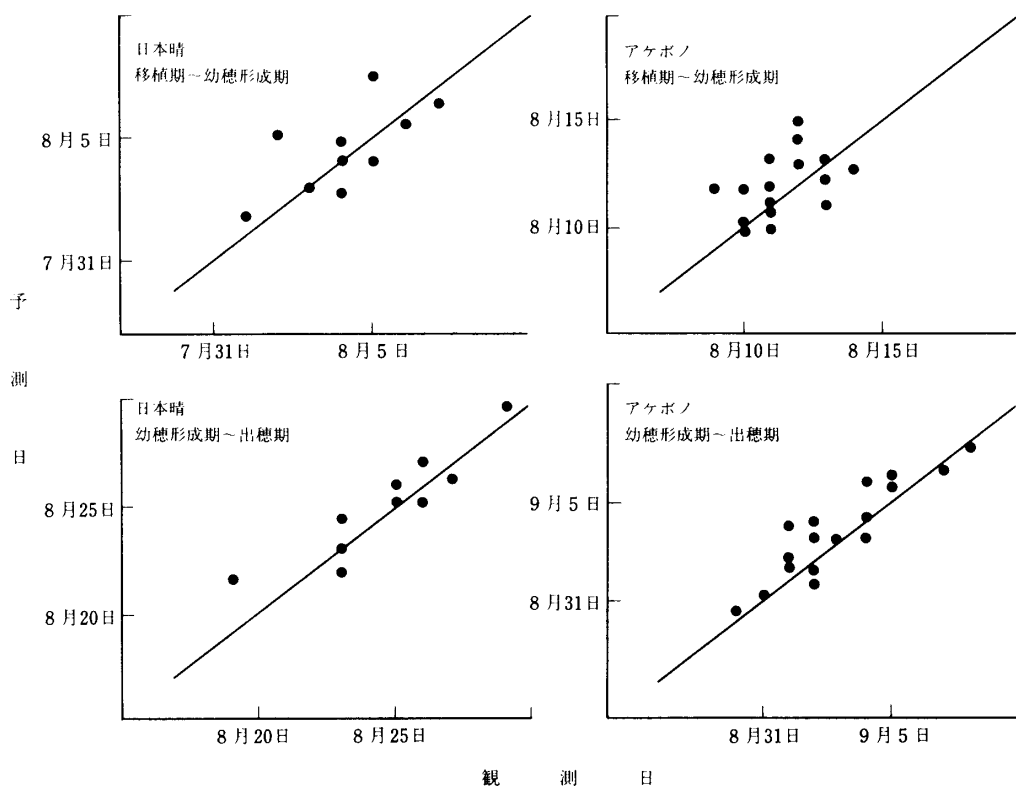
* 移は移植期、幼は幼穂形成期、出は出穂期を示す。

なお、移植期は日本晴 6月17日、アケボノ 6月23日。

* 有効積算温度法による予測においては、生育零点を 10°C として計算。



第1図 DVR と気温の関係 (DVR-T 曲線) ならびに生育期間中の日平均気温の頻度分布。



第2図 有効積算温度法による幼穂形成期または出穂期の予測日と観測日との関係。

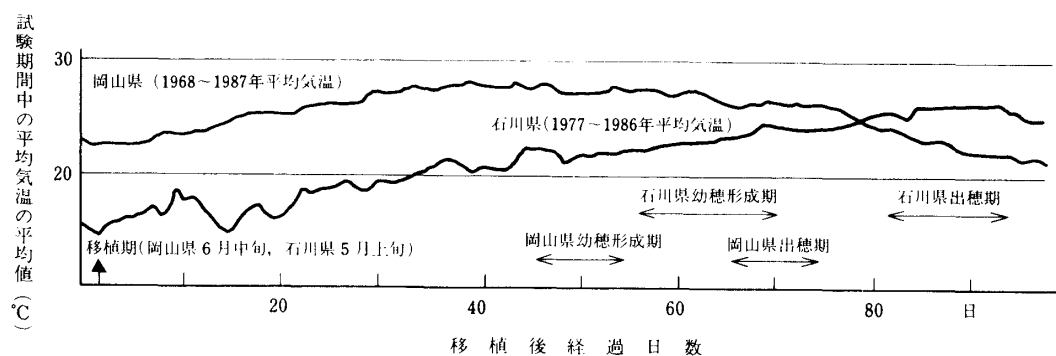
結果と考察

1 各生育期の予測結果

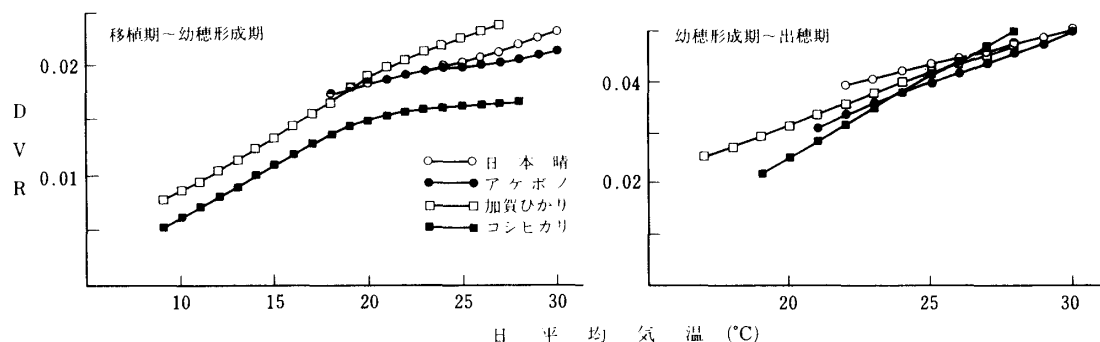
生育期の進行に要する日数は、毎年の気象あるいは栽培管理の影響を受けると考えられ、各生育期間

の所要日数には第1表に見られるように、日本晴、アケボノの各生育期間で4~6日程度の年次変動があった。

次に、各生育期のノンパラメトリック DVR 法による解析によって求めた予測日と実際の観測日と



第3図 岡山県と石川県における水稻の生育期と平均気温の推移。



第4図 生育期および栽培地域が発育速度と温度に及ぼす影響。

の差を第2表に示した。これによると、両品種共に幼穂形成期および出穂期それぞれの予測日と観測日との差は最大2.8日で、予測の差の標準誤差は1.1～1.8日であった。同期間で観測された所要日数の変動幅は4～6日であることから、予測の精度としては、予測日と観測日の差が1～2日以内であることが必要である。2日以内の条件を満たしている年次は、日本晴で8割、アケボノでは9割であった。特に、アケボノでは調査年次の7割において1日以内の精度で予測できた。一方、予測日と観測日の差が2日以上ある年次が、日本晴で2割、アケボノで1割を占めており、このような年次では予測精度が不十分であると思われる。

有効積算温度法とノンパラメトリック DVR 法による予測精度を比較するために、両者の予測の差の標準誤差を比べると、日本晴、アケボノのいずれの生育期においてもノンパラメトリック DVR 法の予測精度が勝っていた。しかし、予測時期によってその程度が異なり、幼穂形成期の予測では両者間の差が大きかったが、出穂期では小さかった。

2 温度影響の生育期による相違

ノンパラメトリック DVR 法による解析によって求めた DVR-T 曲線の形状は第1図に見られる

ように、生育ステージによって異なり、移植期～幼穂形成期では緩やかな右上がりのやや湾曲した形状であった。一方、幼穂形成期から出穂期にかけては傾きが大きい直線的関係が見られ、発育の温度反応が鋭敏な時期と考えられた。

第2図はノンパラメトリック DVR 法で解析したのと同じ時期について、有効積算温度法で解析した時に得られた予測日と観測日との関係を示したものである。これによると、両品種とも移植期～幼穂形成期では予測日と観測日の相関関係がはっきりしていないのに対して、幼穂形成期～出穂期では明確になってきている。これらのことは、水稻の発育進行に及ぼす温度上昇の影響が幼穂形成期までは明確でなく、それ以後、特に幼穂形成期～出穂期において強く現れることを示していると考えられた。

このように、ノンパラメトリック DVR 法でも有効積算温度法でも、ステージによる温度反応に違いがあるということが明らかになった。しかしながら、有効積算温度法では、温度と発育速度の関係が直線的であるということを前提にしているのに対して、ノンパラメトリック DVR 法ではそのような仮定を設けないため、温度と発育速度の関係が DVR-T 曲線として得られるという特徴がある。す

なわち、温度だけで生育期を予測しようとする場合、積算温度法では温度が発育進行に及ぼす重みづけが画一的であるために、移植期～幼穂形成期のように発育速度と温度の関係が直線的でなく湾曲している場合は予測精度が劣り、ノンパラメトリック DVR 法の有効性が認められる。

3 岡山県と石川県における DVR-T 曲線の比較

岡山、石川両県における移植から出穂にいたる期間の平均気温の温度変化の違いを示したのが第3図である。岡山県では幼穂形成期を境にして、気温変化のパターンが左右対称で、移植時にはすでに平均気温が 22～23℃ になっている。一方、石川県では出穂期まで連続的に気温が上昇しており、20℃ を越えるのは移植後 30 数日頃で、22～23℃ になるのは幼穂形成期になってからである。

次に、岡山県と石川県における移植期～幼穂形成期並びに幼穂形成期～出穂期における期間の DVR-T 曲線を第4図に示した。まず、移植期～幼穂形成期では、石川県のコシヒカリにおいては、20℃ 以上の温度で温度上昇による発育促進の程度が低く、DVR-T 曲線が頭打ちになっており、加賀ひかりにおいても同様の傾向が見受けられた。一方、岡山県の日本晴、アケボノではいずれも勾配が小さかった。このように、岡山県と石川県では DVR-T 曲線の形状に著しい違いがみられた。これは、すでに岡山県では移植時の平均気温が 22～23℃ になっており、石川県で得られた DVR-T 曲線の 20℃ 以上の部分に相当し、この時期は温度上昇による発育促進の程度が比較的小さい時期にあたるためと理解される。つまり、水稻の幼穂分化に対する温度影響は、基本的には温度上昇とともに促進されるが、その促進効果は 20℃ 以上で頭打ちになるものと考えられ、その傾向はアケボノおよびコシヒカリで強く、日本晴および加賀ひかりで弱かった。それに対して、幼穂形成期～出穂期では、発育速度と温度の関係は、岡山、石川両県の各品種共に直線的であり、傾きも大きく、気温が高いほど発育が促進されることを示していた。この期間の地域差は、同期間の温度範囲が大差ないことから、幼穂形成期までのような大きい差は認められなかった。一方、発育進行に対する温度影響の品種による違いは DVR-T 曲線の傾きの程度によって判定できると考えられ、温度反応が最も敏感なのはコシヒカリで、日本晴は4品種の中では最も鈍かった。その他の2品種はコシヒカリと日本晴の中間であった。

総合考察

水稻の生育期に関する研究の歴史は古く、和田¹⁴⁾が品種の基本栄養生長性、感温性、感光性程度と地理的分布との関係を明らかにし、栗山⁶⁾は感光性を適日長の限界時数と過剰日長による出穂遅延度の2つの要素に分けて論じた。また、感温性に関して朝隈¹⁾は生育の進行に及ぼす有効温度と無効温度の概念を提案した。

一般に、水稻の出穂性については基本栄養生長性、感光性、感温性を考慮しなければならないとされているが、細井⁴⁾は同一地域での出穂期の年次変動を問題にするときには、温度だけを変動要因としてとらえれば十分で、日長は年による変化がないので関係ないと考えられるとしている。また、鮫島⁹⁾も日長反応に敏感な大豆の生育期予測に際して、適用範囲(地域、作期)を限れば日長時間と日平均気温の間に高い相関関係があるため、発育速度が見かけ上気温のみに依存すると見なされる場合があると報告している。著者らも一定地域、同一品種の出穂の年次変動は温度だけで説明が可能と考え、ノンパラメトリック DVR 法の適用を試みた。

温度が幼穂分化あるいは出穂に及ぼす影響に関する報告は多く、幼穂形成期に関しては栗山⁶⁾は 21℃ 以下で遅延するとし、朝隈¹⁾は幼穂の分化は高温によって遅れるが、幼穂の発育速度が高温によって遅れることはないと報告している。さらに、小林⁹⁾はファイトトロンを用いた試験で、出穂の適温は 18.6～30℃ で、17.5℃ 以下の温度で出穂が遅れ、その主因は幼穂分化の遅れにあると報告している。また、松島ら⁷⁾が生育各期の気温あるいは水温が水稻の発育に及ぼす影響を検討した結果、穂首分化直前から出穂に至る期間では 31℃ で最も出穂が促進されるとしている。一方、本報で得られた移植期～幼穂形成期の DVR-T 曲線が 20℃ 以上で頭打ちになる傾向、あるいは幼穂形成期～出穂期では勾配のはっきりした右上がりの直線関係にある事実は、幼穂形成期までは 20℃ 以下の低温でステージの進み方が明らかに遅れ、それ以上の高温になっても促進効果が小さいことを示し、また、幼穂形成期～出穂期までは 30℃ 以下の温度範囲内、換言すれば北陸地方だけでなく瀬戸内地方においても高温ほど出穂が促進されるということを示している。

このようにノンパラメトリック DVR 法では、

生育ステージの進み方に対する温度の影響が DVR-T 曲線という形で示され、毎日の発育の遅れ、あるいは進行がその日の気温だけで量的に把握できる。そのため、日長条件を無視できるような条件において、生育期を温度だけで捉えようとする場合非常に有益な手法と考える。また、DVR-T 曲線はそれが得られた温度範囲において、品種固有の形状を示すことが示唆され、さらに解析点数を増やすことによってより精度の高い水稻の出穂性に対する温度影響評価と出穂期の予測が可能になると考えられる。

謝辞：本研究の推進にあたっては、農業環境技術研究所気象管理科気象生態研究室の各位に多大な御指導、御助言を賜った。また、本論文の作成においては当時化学部長木本英照氏並びにみのる産業(株)植物工学研究所西田正義博士に有益な御助言を頂いた。ここに厚く御礼申し上げる。

引用文献

1. 朝隈純隆 1970. 日本型水稻の出穂に関する生態学的研究. 鹿児島県農試報告 1: 49-70.
2. 桐山 隆・金野隆光・田村良文・小野祐幸 1988. ノンパラメトリック法を用いた水稻の温度影響評価と生育期予測 第1報 石川県の加賀ひかり、コシヒカリについて. 日本作物学会関東支部会講演要旨: 51-52.
3. 堀江 武・中川博視・吉良智彦 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. 細井徳夫 1976. 気象要因による水稻生育の変動性に関する研究 1. 生育温度の差異による水稻の出穂変動性の品種間差異. 育雑 26 (4): 328-338.
5. 小林 陽 1977. 水稻品種の感温性に関する研究 1. 出穂促進の適温域および適温の下限について. 育雑 27 (2): 149-156.
6. 栗山英雄 1965. 稲の出穂性に関する研究. 農技研報 D13: 275-353.
7. 松島省三・田中孝幸・星野孝文 1964. 水稻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・水温の各種組合せが水稻の生育およびその他の諸形質に及ぼす影響. 日作紀 33: 135-140.
8. 中川博視・堀江 武 1987. 稲の発育過程のモデル化と予測に関する研究 (2) 幼穂の分化・発育過程の気象的予測モデル. 日作紀 56 (別1): 208-209.
9. 鮫島良次・岩切 敏 1987. 気象と大豆の生育動態に関する研究. (1) 開花までの期間における発育速度と日長・気温の関係. 農業気象 42: 375-380.
10. 竹澤邦夫・田村良文 1988. 生育ステージのノンパラメトリック推定. 昭和63年度日本農業気象学会講演要旨: 150-151.
11. 竹澤邦夫・田村良文・小野祐幸 1989. 作物の生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, 投稿中
12. 田村良文・金野隆光・小野祐幸・清野 豁・竹澤邦夫 1988. 麦類の生育に対する温度影響のノンパラメトリック評価. 1. 春小麦の出穂・成熟における温度影響評価. 日作紀 57 (別2): 31-32.
13. 田村良文・竹澤邦夫・金野隆光・小野祐幸・清野 豁・門馬栄秀 1989. ノンパラメトリック法を用いた温度影響評価によるトウモロコシの絹糸抽出期予測. 日作紀 58: 48-54.
14. 和田栄太郎 1952. 稲の感温性及び感光性に関する研究 (第1報) 日本における水稻品種の感温性及び感光性とその地理的分布について. 育雑 2: 55-62.