

イネ登熟前期の再転流速度に及ぼす気温の影響のモデル化

楊重法^{* 1)}・井上直人²⁾・藤田かおり¹⁾・加藤昌和²⁾・萩原素之²⁾

(¹⁾ 岐阜大学連合農学研究科・²⁾ 信州大学農学部)

要旨：イネの登熟前期（穂揃期から穂揃期後2週間までの期間）における茎葉部に貯蔵された物質の再転流速度と気温との関係を表す簡易なモデルを構築するために、タカナリ、IR72、三桂草、Ch86、IR65564-44-2-2、日本晴、竹成、Banten、WAB450-1-B-P-38-HBの9品種を北上、伊那、松江、京都、中国の南京と雲南省永勝県濤源郷濤源村（2002年のみ）、タイのチェンマイとウボンで2001年と2002年に栽培した。茎葉部に貯蔵された生理的に転流可能な物質の登熟前期における再転流速度を酵素分析法で測定し、その期間における気象要因との関係を解析し、特に密接な関係が認められた気温および気温日較差との関係を検討した。(1) 最低気温、最高気温および平均気温を比較すると、最高気温と再転流速度との関係が最も深く、再転流速度が最も高くなる日最高気温（最適気温）は31℃付近にあることが明らかになった。(2) 気温日較差と再転流速度との間には有意な正の相関関係があった。(3) 再転流速度と日最高気温との関係は2つの指数関数を組み合わせた簡易な非線形モデルによって表現できた。

キーワード：イネ、気温、気温日較差、再転流速度、貯蔵物質、モデル。

出穂期までにイネの茎葉部に貯蔵された物質は受精後に穂に転流（以下再転流と称す）して胚、胚乳および穎を充実させる。その再転流速度と気温との関係については古くから多くの研究がされており、再転流に最適な気温は25℃付近にあると報告されている（相見ら1958、松島・和田1958、松島・和田1959）。これらの研究は人工気象条件下で得られたものであるために厳密であるが、実際の自然状態における再転流速度を気象環境から予測するには、複数の気象要因と作物の個々の品種の反応の関係を的確に示す気象—作物モデルが必要である。遺伝子型と環境の交互作用が大きい収量関連形質では、そうしたモデルが特に重要と考えられる。

これまで、日射や気温などの環境要因と生育、個体群成長速度（CGR）、葉面積指数（LAI）の関係について多くの研究が行われ、気象的予測モデルが発展してきた（堀江・中川1990、齊藤ら1992、Yinら1997a, b）。また、登熟プロセスについても同様に研究が進展しつつあるが（堀江1986、大西ら2001）、広範な環境条件下でかつ多様な遺伝子型にも適用できる気象—作物モデルを開発するには、アジアの主要な稲作地帯をカバーできる環境と遺伝子型の変動の大きなデータをもとに検討することが有効と考えられる。しかしながら、登熟の重要な支配因子である登熟期のCGRと茎葉部から籾への再転流速度に関する気象—作物モデルについてそのような広範の環境条件下で検討した研究はまだ見当たらない。

特に穂揃期から穂揃期後2週間まで（以下登熟前期と称す）の籾への乾物の転流量と再転流速度は全生育期間を通じて最も大きく（井上ら2000）、また登熟前期の籾への再転流速度は登熟歩合と極めて密接な正の相関関係があるこ

とが示されていることから（Inoue and Hagiwara 2003）、この期間に特に注目してモデルを検討することは意義があると考えた。

さらにInoue and Hagiwara (2003)、楊ら (2004a, b) は、登熟前期の再転流速度と気温との関について多地点、多品種試験であるARICE-Netグループ[#]によるアジア稲作連絡試験（Asian Rice Network: ARICE-NET）の結果を整理して、登熟前期における再転流速度と出穂期の貯蔵物質質量、籾数、日射、CGR、気温との関係を検討したところ、出穂期の貯蔵物質質量、籾数との間には弱い正の相関関係が認められ、日射、CGRとは有意な相関関係がみられなかったが、ほとんどすべての品種で登熟期の気温とは明らかに非線形の山なりの関係が存在することが示された。またそのパターン自体はどの品種も同じであるが、山なりの反応曲線の山の高さや裾野の広がり程度は品種によって異なることが示唆された。このことは、反応パターン自体を示すモデルを構築することについては問題なく、品種の特徴はモデルに含まれるパラメーターを推定することで表現することができることを示している。

そこで本論文では、再転流速度と気温との関係についての簡易なモデルが構築できるかどうかについて検討したので報告する。すなわちこの論文では、モデルを構築する最初の手順としていずれの品種にもあてはまるような環境応答パターンを表現する基本となるモデルをできるだけ多くのデータを用いて求めることをめざす。なお、最終的な目的である品種に固有な反応を示すモデルのパラメーターを推定することは、本報告で基本モデルが策定できた後に続報において行う。

2004年11月8日受理。*連絡責任者（〒399-4598 南箕輪村 信州大学農学部、yangzhongfa@hotmail.com）。

[#] 堀江武・白岩立彦・松井勤（京大）、小葉田亨・大西政夫・小林和広（島根大）、中川博視（石川県農短）・黒田栄喜（岩手大）、W. Cao（南京農大）、S. Nopporn（Ubon RRC）、J. Sakuda（チェンマイ大）、佐々木忠勝・阿部陽（岩手農試）、井上直人・萩原素之（信州大）。

第1表 供試品種の特性と栽培管理.

品 種 (記号)	タイプ	施 肥 グループ	発芽～出穂期 (日数)	生育期間 (日数)
タカナリ (TA)	<i>Indica</i> × <i>Japonica</i>	II	104.0 ± 10.8	149.6 ± 15.6
IR72 (IR)	<i>Indica</i>	II	111.1 ± 13.1	152.9 ± 18.3
三桂草 (SK)	<i>Indica</i>	II	105.6 ± 13.6	143.8 ± 19.5
Ch86 (CH)	<i>Indica</i>	I	104.8 ± 12.1	142.5 ± 18.3
IR65564 - 44 - 2 - 2 (NP)	<i>Indica</i> × <i>Javanica</i>	II	114.0 ± 12.7	155.1 ± 19.1
日本晴 (NI)	<i>Japonica</i>	II	99.6 ± 22.5	139.5 ± 25.6
竹成 (TE)	<i>Japonica</i>	II	108.0 ± 20.4	150.9 ± 23.2
Banten (BA)	<i>Javanica</i>	I	118.3 ± 15.8	154.6 ± 20.9
WAB450 - 1 - B - P - 38 - HB (WA)	<i>glaberrima</i> × <i>sativa</i>	II	105.1 ± 11.1	144.7 ± 15.5
品種			***	***
試験地			***	***
年度			ns	ns
品種 × 試験地			*	ns

数値は各品種とも全地点、2年(濤源村は2002年のみ)の値から算出し、平均値±標準偏差である。*, **, ***, nsはそれぞれ5%, 1%, 0.1%水準で有意, 5%水準で有意でないことを示す。n=135。施肥グループのIは窒素量にして元肥1g/m², 追肥1回当たり1g/m², IIは元肥4g/m², 追肥1回当たり2g/m²相当量を各々施用した。

材料及び方法

1. 供試品種, 試験場所及び栽培概要.

供試品種はタカナリ (TA), IR72 (IR), 三桂草 (SK), Ch86 (CH), IR65564-44-2-2 (NP), 日本晴 (NI), 竹成 (TE), Banten (BA), WAB450-1-B-P-38-HB (WA) の9品種である(第1表)。

試験は北上, 伊那, 松江, 京都, 中国の南京と雲南省永勝県濤源郷濤源村 (2002年のみ), タイのチェンマイとウボンで2001年と2002年に実施した。

各年の試験配置は3反復の乱塊法であり, 1区あたりの面積は20 m²以上とした。ペーパーポットで1穴2粒を播き, 移植時の葉齢は4~5程度であった。移植密度は畝間30 cm × 株間15 cm の22.2株/m²で, 2001年には1本植, 2002年には2本植で移植した。播種日と移植日は各試験地における慣行に従った。

窒素施肥は2グループに分けて行った(第1表)。グループIは窒素量にして元肥1 g/m², 追肥1回当たり1 g/m², グループIIは元肥4 g/m², 追肥1回当たり2 g/m²相当量を各々施用した。窒素追肥は移植後20日毎に施用し, 最終追肥は出穂10日後までとした。合計施用の窒素量はグループI 4~7 g/m², グループII 8~16 g/m²であった。リン酸とカリウム施肥は全量元肥として, 全区共通に各々12 g/m²を施用した。

2. 調査方法.

穂揃期と穂揃期後2週間目に反復ごとに8株を抜き取り, 根を除去して全乾物重などの形質を調査した。その後, サンプルを穂と茎葉に分けて乾燥し, それぞれの乾物重を測定した。

乾物重を測定したサンプルはカッティングミルで荒粉砕

した後に超遠心ミル P-14 (FRITSCH JAPAN Co. Ltd.) で微粉砕し, 内径0.5 mmの篩を通過させた。試料はpH 5.8の混合酵素法(阿部1980, 古賀・阿部1994)により, 潜在的に再転流が可能な物質である細胞内容物質(非繊維分画)を溶解させ, その含量を定量した。

収量調査は各反復について1 m²の面積の全株を刈り取り, 穂数, 粒数と粗粒乾物重を測定した後, ジャポニカ品種は比重1.06, 他の品種は1.03の塩水選を行い, 精粒乾物重と登熟歩合を求めた。なお塩水選の濃度は日本, 中国, タイの各試験地におけるこれまでの収量調査の経験から求めたものである。

登熟前期における最低気温, 最高気温, 平均気温および気温日較差は穂揃期から穂揃期後2週間までの毎日のデータを平均して求めた。登熟前期における茎葉部の再転流可能物質, すなわち酵素試薬で分解された細胞内容物質(非繊維分画)の減少分を茎葉部から穂への再転流量とし, それをその期間の日数で割った値を再転流速度とした。

次に最低気温, 最高気温, 平均気温および気温日較差を1℃おきに分級し, 分級区間ごとのそれぞれの値とそれに対応する再転流速度の平均値を求めた。この数的処理は時系列解析における移動平均(嶋崎1984)による平滑化(スムージング)と同様の目的から行ったものである。時系列解析においては時間にともなう大きな傾向(トレンド)を明らかにすることや, それを差し引いた細かい変動に分離して解析する。野外におけるイネの登熟速度の観測値はさまざまな要因によって幅広い変動を示すのが普通であるが, 温度要因の変化に対するトレンドを抽出するためには, 時系列解析におけるスムージングと同様に平均をとるのが合理的な数的処理と考えたからである。なお, 温度は時間サンプリングのように等間隔ではないために温度で分級して計算したが, 数値は移動平均した場合と大きな違いは無

い、

結 果

2年間の全試験地を込みにした品種別の生育期間長を平均値でみると、発芽から出穂期までの日数は99.6~118.3の範囲であり、品種間差異と試験地間差異および品種×試験地に交互作用が認められた。生育期間は139.5~155.1であり、品種間差異と試験地間差異が認められた(第1表)。

1. 再転流に関わる主な形質.

収量と再転流に関わる形質などは品種や試験地によって大きく変動した。これらの分散分析の結果および平均値と標準偏差を第2表と第3表に示した。

第2表にみられるように、収量と収量構成要素は品種や

試験地によって大きく変動した。収量は品種間に有意差があり、BAにおける306 g/m²が最も低く、TAでの624 g/m²が最も高かった。また有意な試験地間差異と品種×試験地に交互作用が認められた。籾数には交互作用が無かったものの、登熟歩合と千粒重には交互作用が認められた。

再転流に関わる主な形質は第3表に示した。穂揃期における全乾物重(W)は品種や試験地によって幅広く変動し、品種別にはNIが最も小さく、IRが最も大きかった。茎葉部乾物重(Ws)と茎葉部の再転流可能物質重(Wcs)はWと同じ傾向であった。W、WsおよびWcsの間にそれぞれ有意な正の相関が認められた($r = 0.873 \sim 0.967$, いずれも $P < 0.001$)。再転流速度($-dWcs/dt$)は幅広く変動し、WAが最も小さく、IRが最も大きかった。品種×試験地に交互作用が認められた($P < 0.01$)。

第2表 収量および収量構成要素.

品種	穂数 (m ⁻²)	全籾数 (m ⁻²)	登熟歩合 (%)	精籾千粒重 (g)	精籾収量 (g m ⁻²)
TA	236 ± 51	38064 ± 13621	66.0 ± 24.2	22.8 ± 1.5	624.5 ± 286.6
IR	376 ± 85	38241 ± 10364	57.4 ± 27.0	21.9 ± 1.3	514.5 ± 247.2
SK	321 ± 65	46472 ± 15433	70.9 ± 25.0	17.0 ± 0.8	617.8 ± 254.5
CH	267 ± 42	22906 ± 6063	72.6 ± 23.5	22.4 ± 1.8	408.2 ± 128.1
NP	184 ± 59	29114 ± 9031	54.0 ± 26.6	24.1 ± 2.0	407.3 ± 233.8
NI	446 ± 106	28344 ± 10347	69.2 ± 25.2	23.4 ± 1.7	507.6 ± 277.7
TE	375 ± 86	34383 ± 13334	63.1 ± 26.4	22.1 ± 5.6	540.4 ± 259.9
BA	186 ± 51	20142 ± 6446	59.4 ± 34.6	23.2 ± 1.8	305.6 ± 200.9
WA	183 ± 48	22956 ± 8747	61.7 ± 25.1	24.1 ± 1.4	373.5 ± 174.9
品種	***	***	*	***	***
試験地	***	***	***	**	***
年度	ns	***	*	ns	***
品種×試験地	***	ns	*	***	*

品種については第1表を参考。数値は各品種とも全地点、2年(澁源村は2002年のみ)の値から算出し、平均値±標準偏差である。*, **, ***, nsはそれぞれ5%, 1%, 0.1%水準で有意, 5%水準で有意でないことを示す。n=135。精籾千粒重と精籾収量は乾物重である。

第3表 穂揃期の乾物重および登熟前期の再転流速度と気温.

品種	W (g m ⁻²)	Ws (g m ⁻²)	Wcs (g m ⁻²)	$-dWcs/dt$ (g m ⁻² d ⁻¹)	最低気温 (°C)	最高気温 (°C)	平均気温 (°C)	気温日較差 (°C)
TA	1043.7 ± 219.0	841.7 ± 217.7	276.3 ± 74.7	6.3 ± 4.3	21.1 ± 2.8	30.0 ± 2.6	25.0 ± 2.7	9.0 ± 2.0
IR	1119.2 ± 278.1	928.1 ± 264.5	297.5 ± 101.3	6.9 ± 5.0	20.2 ± 3.2	29.5 ± 2.6	24.3 ± 2.9	9.3 ± 1.8
SK	1028.3 ± 230.3	844.0 ± 240.9	275.8 ± 86.4	6.3 ± 2.9	20.8 ± 3.0	30.3 ± 2.4	24.9 ± 2.6	9.5 ± 3.4
CH	921.3 ± 283.9	796.7 ± 302.6	255.5 ± 96.5	3.7 ± 4.1	20.8 ± 3.0	29.9 ± 2.3	24.7 ± 2.7	9.1 ± 2.6
NP	1003.8 ± 235.4	850.2 ± 238.3	298.5 ± 82.0	3.8 ± 5.1	20.0 ± 3.1	28.9 ± 2.5	23.9 ± 2.8	8.9 ± 1.9
NI	855.8 ± 400.3	760.6 ± 383.5	225.9 ± 108.8	3.5 ± 3.5	20.9 ± 2.7	29.6 ± 3.1	24.7 ± 2.7	8.7 ± 2.2
TE	1015.5 ± 463.8	877.3 ± 433.4	262.4 ± 113.4	4.1 ± 4.3	20.3 ± 3.2	29.5 ± 3.0	24.4 ± 3.0	9.2 ± 1.6
BA	992.5 ± 200.1	877.4 ± 201.0	275.5 ± 68.1	4.1 ± 6.4	18.5 ± 4.9	28.3 ± 3.6	22.8 ± 4.2	9.7 ± 2.5
WA	867.9 ± 246.4	730.8 ± 383.5	237.8 ± 78.1	3.3 ± 3.4	20.9 ± 3.2	29.9 ± 2.4	25.0 ± 2.8	9.0 ± 2.1
品種	***	**	***	***	*	ns	ns	ns
試験地	***	***	***	***	***	***	***	***
年度	ns	ns	**	***	***	**	***	***
品種×試験地	***	*	*	**	ns	ns	ns	ns

品種については第1表を参考。数値は各品種とも全地点、2年(澁源村は2002年のみ)の値から算出し、平均値±標準偏差である。*, **, ***, nsはそれぞれ5%, 1%, 0.1%水準で有意, 5%水準で有意でないことを示す。n=135。W, Ws, Wcsはそれぞれ穂揃期における全乾物重, 茎葉部乾物重, 茎葉部再転流可能物質重, $-dWcs/dt$ は登熟前期における再転流速度である。最低気温, 最高気温, 平均気温と気温日較差は登熟前期における日当りの平均値である。

登熟前期の最低気温、最高気温、日平均気温および気温日較差も大きな変動を示し、試験地の間に有意差があった ($P < 0.001$) (第3表)。品種間では最低気温には有意差が認められたが ($P < 0.05$)、最高気温、日平均気温および気温日較差には有意差がなかった。

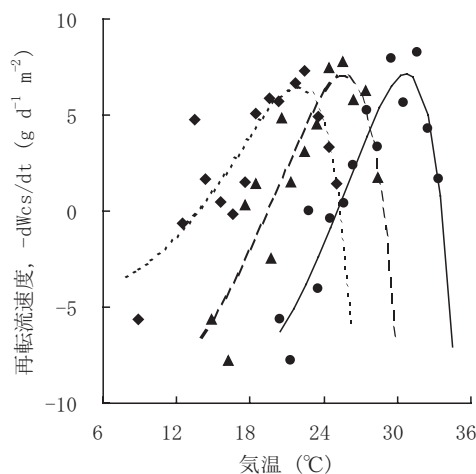
2. 最低気温、最高気温および日平均気温が再転流速度に影響する程度.

登熟前期における最低気温、最高気温と日平均気温を 1°C おきに分級した平均値とそれらに対応する再転流速度の平均値との関係を表すため、3次式と指数関数式を当てはめて比較検討した。3次式も指数関数式も同程度のあてはまり具合を示したが、3次式の各パラメーターの表す生物学的な意味が不明瞭であるため、指数関数を選択した。温度と再転流速度の関係が左右非対称の山なりの曲線であることから、ある気温以上になるとマイナスに働く要因があると判断できるため、そのマイナスに転じる気温を示すパラメーターを導入して、次の式を用いることとした。

$$R = \exp(k_1 \cdot T) - \exp[k_2 \cdot (T - k_3)] - k_4 \quad (1)$$

ここで R は再転流速度、 T は気温要素、 k_1 、 k_2 、 k_3 と k_4 は再転流速度と気温との関係を示すパラメーターである。 k_1 は再転流速度の増加程度を、 k_2 はその低下程度を示している。また、 k_3 は再転流に対してマイナスに作用し始める気温を示すものであり、 k_4 は温度応答曲線全体を上下に平行移動させる係数である。

(1) 式により推定された再転流速度と気温との関係を第1図に示した。再転流速度と最低気温、平均気温および最高気温の間にはいずれも有意な関係があり、決定係数 (R^2) はそれぞれ 0.722, 0.808, 0.889 で、平均平方誤差 (RMSE) はそれぞれ 2.351, 2.069, 1.834 であった。最高気温において R^2 が最も大きく、RMSE は最も小さく、



第1図 登熟前期における再転流速度と気温の関係.

◆ : 最低気温, RMSE=2.351, $R^2=0.722$, $P=6.1\text{E-}05$.
 ▲ : 平均気温, RMSE=2.069, $R^2=0.808$, $P=1.2\text{E-}05$.
 ● : 最高気温, RMSE=1.834, $R^2=0.889$, $P=4.4\text{E-}07$.
 RMSE : 平均平方誤差.

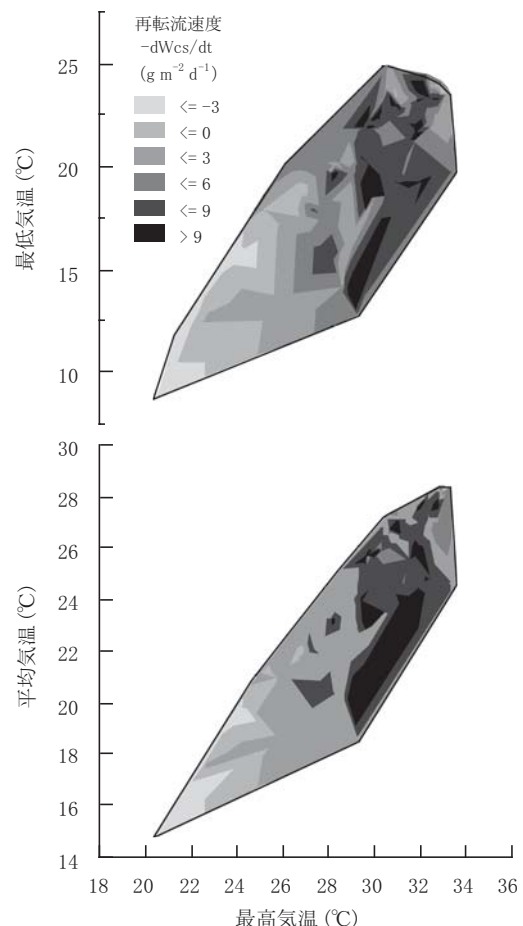
最高気温が再転流速度と最も密接な関係があることが示された。

そこで、さらに最低気温、最高気温および平均気温が再転流速度に影響する程度を詳細に検討するために、再転流速度に対する最高気温と最低気温、最高気温と平均気温の関係を等高線によって表現した (第2図)。最高気温を一定にしたときは平均気温、最低気温が変動しても再転流速度は大きく変動しないが、最高気温が変動すると平均気温、最低気温に関係なく再転流速度が大きく変動する傾向がみられた。第1図の R^2 、RMSE および第2図から再転流速度は最高気温と最も密接な関係があることが示された。

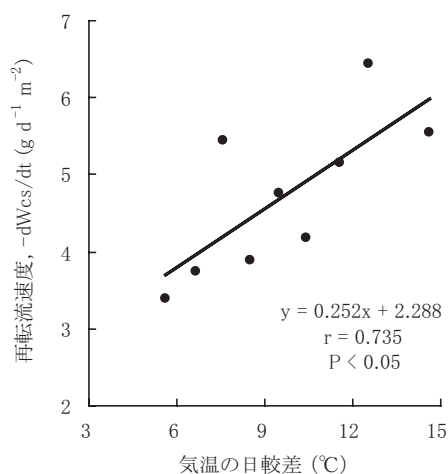
(1) 式における再転流速度と最高気温との関係を示すパラメーター k_1 、 k_2 、 k_3 および k_4 の値はそれぞれ 0.1150, 0.3772, 24.514, 16.621 であった。したがって最高気温が k_3 (24.5°C) より大きくなると再転流に対してマイナスに作用することになる。また、(1) 式によって求めた最大再転流速度を示す最高気温 (以下最適気温と称す) は 30.7°C であった。すなわち、最高気温が 30.7°C よりも低く、あるいは高くなればなるほど再転流速度は低下した。

3. 気温日較差が再転流速度に及ぼす影響.

登熟前期における全品種全地点2年 (源郷溝源村は2002



第2図 登熟前期における再転流速度と気温の関係.



第3図 登熟前期における再転流速度と気温日較差の関係。

年のみ)の気温日較差は5~15°Cの範囲に分布した。再転流速度と気温日較差との関係を見出すために、すべての気温日較差のデータを1°Cおきに分級し、分級区間ごとに算出した平均値とそれに対応する再転流速度の平均値との関係を求めたところ、両者の間に5%の水準で有意な正の相関関係が示された(第3図)。

考 察

登熟前期における再転流速度は出穂期の貯蔵物質質量、籾数、日射、CGR、気温などと関係が深いと考えられるので、あらかじめその点を検討した(Inoue and Hagiwara 2003, 楊ら 2004a, b)。その結果、登熟前期における再転流速度は出穂期の貯蔵物質質量、籾数との間には弱い正の相関関係が認められ、日射、CGRとは有意な相関関係がみられず、登熟前期の再転流速度は気温と明らかに非線形の山なりの関係があることが示された。したがってこの論文では気温に対する再転流速度の変化に焦点を絞って考察することにした。

1. 再転流速度と最高気温の関係を示す基本モデルの妥当性について。

イネの登熟期における茎葉部の貯蔵物質の穂への再転流と気温との関係については古くから研究されており、25°C付近に再転流の適温があると見られているが(相見ら 1958, 松島・和田 1958, 松島・和田 1959)、それらの多くは人工気象室において恒温状態で求めた結果である。本実験は実際の圃場の自然状態で行ったものであるが、解析の結果から最高気温は再転流速度と関係が深く、その最適気温は30.7°Cであることが示された(第1図, 第2図)。ここではこの現象がみられた理由について考察し、またそれを表すモデルとしてこの指数関数が適当かどうか考察する。

茎葉部に貯蔵された物質の多くは高分子の非水溶性物質

であり、そのままでは移動できないので、酵素によって低分子の糖類やアミノ酸に分解されてから穂に転流する(松島ら 1957, 松島・和田 1958, 村山ら 1961, 大島 1966)。転流速度はソースとシンクの間のその濃度差に比例するとみられている(松島ら 1957, 松島・和田 1958, 棟方 1990)。酵素活性は分解速度を支配して再転流物質の濃度差および転流速度に影響を及ぼす(Hirano ら 1996, Majorowski and Ohsugi 1996)。一般に多くの酵素活性は30°C~40°Cの間で最高となり、低温になるにつれて低下する傾向がある。このため、最高気温が高いほど昼温が高くなり、酵素の活性が高まることによって、再転流速度が大きくなると推察される。一方、炭水化物の供給量が多いほど転流の適温は高くなると見られるが(松島・和田 1959)、高温は籾の受け入れ能力を早く低下させることもわかっている(長戸・江幡 1959, 佐藤ら 1973a, 佐藤・稲葉 1973b)。したがって、圃場の自然条件下においては、最高気温は分解に関わる酵素活性と籾の受け入れ能力の2つの生理的に異なる要因に働いて、その結果として再転流の最適気温が決定されると考えられる。

これらの研究成果をふまえて適当な気象—作物モデルを選択する必要がある。本研究では、気温が高まるほど酵素活性によって再転流速度が増すことを示す部分と気温が高まるにつれて転流物質の受け入れ能力が低下することを示す部分を指数関数にあてはめ、それらを組み合わせて(1)式を求めた。その結果高い適合性が認められ、再転流速度の増加程度を示すパラメーター k_1 、その低下程度を示すパラメーター k_2 、再転流に対してマイナスに作用し始める気温を示すパラメーター k_3 によって基本的な温度応答パターンを表現することができた。なお k_4 は温度応答曲線全体が上下に平行移動することに係わる係数である。こうしたモデルの適否はパラメーターに生物学的な意味があり、かつ必要最小限であることと、データへのあてはまりが良好なことの2点で評価される。ここで検討した指数関数を用いた(1)式は、あてはまりが良かったことに加え、生理的に異なる反応を少数のパラメーターで表現しているという点でも問題の少ない気象—作物モデルであると判断された。

2. 気温日較差と再転流速度の関係。

圃場においては再転流には気温のみではなく、気温日較差も影響すると考えられる。しかしながら、再転流速度と気温日較差との関係に関する報告はこれまで見当たらない。気温日較差が大きいほど相対的に昼温が高く夜温が低くなり、逆に気温日較差が小さいほど昼温が低く夜温が高くなる。最高気温を一定とすれば、気温日較差が小さいほど夜温が高くなり、高分子の再転流可能物質の分解、転流および呼吸による物質の消耗が増加することによって、見かけの再転流速度、つまり茎葉部の再転流可能な物質の減少速度は大きくなると推察される。本実験においては、登

熟前期における各品種の全地点2年(源郷瀬源村は2002年のみ)の最高気温と気温日較差はそれぞれ21~33℃と5~15℃の範囲に分布しており、再転流速度と気温日較差との間に有意な正の相関関係が認められた(第3図)。本論文では最後にこのことについて考察し、また(1)式のモデルとの関係について考察することにした。

植物体に夜間の高温処理をすることによって茎葉部における炭水化物の含有率の増加がみられることや、穂の部分に昼夜あるいは夜間のみ高温処理した場合に、稔実が早期に停止して千粒重が低下することで、炭水化物の蓄積量が相対的に穂に少なく茎葉部に多く残留することなどが報告されている(長戸・江幡1959, 佐藤ら1973a, 佐藤・稲葉1973b, 津野ら1990, 森田ら2004)。これらの情報を要約すると、高温、特に夜間の高温は籾の発育を阻害し、穂への転流速度を低下させる。これらのことから、気温日較差は主に夜温を通じて、穂の炭水化物の受け入れ能力に影響し、それによって再転流速度を支配すると考えられる。

(1)式の中ではパラメーター k_4 が全体の再転流速度を上下に平行移動する働きを持っている。気温日較差と再転流速度の関係が単純な線形で表せたことから、このパラメーター k_4 を目的変量とし、気温日較差を説明変量とした補正をほどこせば、さらに現実の各地点のデータによく適合すると考えられた。

3. モデルを用いた解析の方向性

これまでの解析により、広範な気象環境の下で再転流速度を予測できるモデルは最高気温と気温日較差を説明変量とすることで構築できると考えられた。しかしながら、この報告では全品種を用いたモデル構築の試みであるために最高気温との関係がたまたま高くなったのであって、品種によっては最低気温との関係の方が深い場合もあるかもしれない。この点は全く不明であるので、今後は品種ごとにこのモデルを適用して同様の検討をする必要がある。本研究では多様な品種全体を通じて見られる傾向を明らかにしてモデルの基本構造を定めることが目的であり、登熟における環境×遺伝子型交互作用についてモデルを用いて解析するための第一ステップであると位置づけている。このモデルを用いて品種ごとにパラメーター推定を行うことが次のステップであり、これによって収量予測や育種に役立つと考えられる。今後は再転流の温度反応について亜種間差異や品種間差異を詳細に検討する予定であり、求められたパラメーターの結果を解析することによって関連する酵素群の違いなどを追求することができると考えている。

また、登熟のもう一つの大きな支配要因であり、主に日射環境によって支配されるCGRの気象的モデルと本モデルを組み合わせることによって、登熟速度自体を予測できるモデルも確立できると考えられる。このため、そのようなサブモデルの統合も今後の課題と考えている。

引用文献

- 阿部亮 1980. 炭水化物成分を中心とした飼料分析法とその飼料栄養価評価法への応用. 畜試研資 2: 20-61.
- 相見霊三・沢村浩・昆野昭晨 1958. 作物登熟機構に関する研究. 一 登熟期の炭水化物及びそれに関与する数種酵素活性に及ぼす気温の影響. 日作紀 27: 405-407.
- 古賀照章・阿部亮 1994. アミラーゼ・プロテアーゼ混合酵素による細胞壁物質の定量及び牧草・牧草サイレージのTDN含量推定法の検討. 日草誌 40: 8-15.
- Hirano, T., N. Uchida, T. Azuma and T. Yasuda 1996. Effect of submergence on distribution of photoassimilates and activities of sucrose metabolizing enzymes in sink organs of floating rice. 日作紀 65: 540-548.
- 堀江武 1986. イネの生育・収量の動的評価・予測法に関する研究. 1. 生育・収量の気象的予測モデル. 日作紀 55 (別2): 214-215.
- 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ーの推定法および出穂予測への適用. 日作紀 59: 687-695.
- 井上直人・谷一造・楊重法・小松有紀 2000. イネの再転流可能物質の動態. 日作紀 69 (別2): 138-140.
- Inoue, N. and M. Hagiwara 2003. Grain filling rate during the early period after heading in rice. Tentative Program of the ARICE-NET Meeting December 2003., pp. 37-62.
- Majorowski, M. and R. Ohsugi 1996. Diurnal changes of sucrose content and enzyme activities involved in sucrose metabolism in leaf blade and sheath of rice before heading. 日作紀 65 (別1): 106-107.
- 松島省三・岡部俊・和田源七 1957. 水稻収量の成立と予察に関する作物学的研究. XL I. 水稻の登熟機構の研究. (7) 炭素同化量並びに穂体各部の炭水化物含量の日変化と籾への転流の日変化との関係(転流機構に関する一知見). 日作紀 26: 17-18.
- 松島省三・和田源七 1958. 水稻収量成立原理とその応用に関する作物学的研究. XL VII. 水稻登熟機構の研究. (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方法について. 日作紀 27: 6-8.
- 松島省三・和田源七 1959. 水稻収量成立原理とその応用に関する作物学的研究. L II. 水稻登熟機構の研究. (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: 44-45.
- 森田敏・白土宏之・高梨純一・藤田耕之輔 2004. 高温が水稻の登熟に及ぼす影響. 一穂・茎葉別高夜温・高昼温処理による解析. 日作紀 73: 77-83.
- 棟方研 1990. 水稻の生長モデル. 松尾孝嶺他編, 稲学大成. 第2巻 生理編. 農文協, 東京. 533-539.
- 村山登・大島正男・塚原貞雄 1961. 水稻の登熟過程における物質の動態に関する研究. (第6報) ^{14}C による茎部貯蔵炭水化物の標識とその移行ならびに分布. 土肥誌 32: 261-265.
- 長戸一雄・江幡守衛 1959. 登熟気温が水稻の稔実に及ぼす影響. 日作紀 28: 275-278.
- 大西政夫・塚田明広・堀江武・佐伯友和・J.F. Angus・萩原素之 2001. 品種・地域比較実験に基づく水稻の生育特性の解析と多収機構. 2. コシヒカリの穎花生産に及ぼす窒素および気温の影響のモデル化. 日作紀 70 (別1): 60-61.
- 大島正男 1966. 水稻の生育各期に同化された ^{14}C の種実への移行に

- ついて. 土肥誌 37: 589–593.
- 斉藤邦行・下田博之・石原邦 1992. 水稻多収性品種の乾物生産特性の解析. 第5報 個体群光合成速度のシミュレーションによる比較. 日作紀 61: 62–73.
- 佐藤庚・稲葉健五・戸沢正隆 1973a. 高温による水稻の稔実に関する研究. 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.
- 佐藤庚・稲葉健五 1973b. 高温による水稻の稔実に関する研究. 第2報 穂と茎葉を別々の温度環境下においた場合の稔実. 日作紀 42: 214–219.
- 嶋崎昭典 1984. 時系列解析の手法. 奥野忠一他編, 応用統計ハンドブック. 養賢堂, 東京. 432–456.
- 津野幸人・山口武視・牛見哲也 1990. 登熟抑制処理の水稻にみられる粒重と玄米中のアンモニア濃度との関係. 日作紀 59: 481–493.
- 楊重法・井上直人・F. リン・加藤昌和・藤田かおり・萩原素之・ARICE-Net グループ 2004a. 水稻の登熟期の転流・分配に関する研究. 2. 登熟前半の再転流速度に及ぼす気象的要因の影響. 日作紀 73 (別1): 166–167.
- 楊重法・井上直人・藤田かおり・加藤昌和・萩原素之・ARICE-Net グループ 2004b. 水稻の登熟期の転流・分配に関する研究. 3. 登熟前半の再転流速度に及ぼす要因の解析. 日作紀 73 (別2): 122–123.
- Yin X., M. J. Kropff, T. Horie, H. Nakagawa, H. G. S. Centeno, D. Zhu and J. Goudriaan 1997a. A model for photothermal responses of flowering in rice. I. Model description and parameterization. *Field Crops Res.* 51: 189–200.
- Yin X., M. J. Kropff, H. Nakagawa, T. Horie and J. Goudriaan 1997b. A model for photothermal responses of flowering in rice. II. Model evaluation. *Field Crops Res.* 51: 201–211.

Modeling of Translocation Rate of Dry Matter from Vegetative Organs to Panicle as Influenced by Air Temperature in Rice: Zhongfa YANG^{*1)}, Naoto INOUE²⁾, Kaori FUJITA¹⁾, Masakazu KATO¹⁾ and Motoyuki HAKIWARA²⁾ (¹⁾Unit. Grad. Sch. of Agr. Sci., Gifu Univ., Gifu 501-1193, Japan; ²⁾Fac. of Agr., Shinshu Univ., Nagano 399-4598, Japan)

Abstract : Field experiments were carried out at 8 sites: Chiang Mai and Ubon in Thailand, Taoyuan of Yunnan and Nanjing in China and Kitakami, Ina, Kyoto and Matsue in Japan, to clarify the relationship between the translocation rate of dry matter from vegetative organs to panicle and air temperature in 2001 and 2002. The potentially degradable dry matter in leaves and stems under the field condition was determined by an enzymatic degradation method using protease and α -amylase. The dry matter was determined at the full heading stage and 2 weeks later in 9 varieties: Takanari, IR72, Shanguichao, CH86, IR65564-44-2-2, Nipponbare, Takenari, Banten and WAB450-1-B-P-38-HB. The maximum daily air temperature during the 2 weeks after full heading correlated with the translocation rate of dry matter from vegetative organs to panicles more closely than the mean and minimum daily air temperature. The highest translocation rate was recorded when the average of maximum daily air temperature was around 30°C. There was a significantly positive correlation between the translocation rate and the average of daily air temperature difference (maximum-minimum temperature). The relationship between the translocation rate and air temperature was expressed by a simplified non-linear model that has 2 exponential equations with 4 parameters.

Key words : Air temperature, Air temperature difference, Model, Rice, Storage matter, Translocation rate.