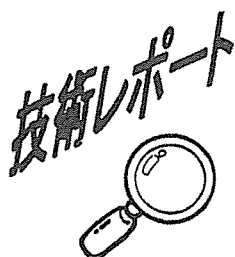


水稻の感温特性を考慮したシグモイド溶出型被覆尿素の選 定法

誌名	日本土壌肥料学雑誌 = Journal of the science of soil and manure, Japan
ISSN	00290610
著者	森次, 真一 石橋, 英二 大家, 理哉
巻/号	80巻1号
掲載ページ	p. 49-53
発行年月	2009年2月



水稲の感温特性を考慮したシグモイド溶出型被覆尿素の選定法

森次真一・石橋英二・大家理哉

キーワード 感温特性, 被覆尿素, 反応速度論, 温度変換日数法, GIS

1. はじめに

肥効調節型肥料を用いた施肥管理は、省力で環境保全的な施肥技術として多くの作物においてその有効性が認められ、生産現場への普及が図られている。なかでも、水稲栽培では被覆肥料による全量基肥施肥技術が全国的に普及している。今後も省力施肥技術の必要性から高齢化した稲作農家や集落営農組織等の大規模稲作経営体ではますます重要な施肥技術として活用されるものと予想される。

被覆肥料の最大の特性は、肥料成分の溶出パターンが主に温度条件に依存し変化することである(石橋ら, 1992)。したがって、対象とする作物の栽培期間の温度条件(地温)や溶出タイプを考慮することによって、作物の養分要求パターンに合った施肥管理が可能になる。水稲栽培では、被覆尿素的窒素溶出速度が温度のみの影響を受けて変動するため、栽培期間の気象経過が平年と異なる場合、窒素溶出パターンと水稲生育とのずれが懸念される。一方で、水稲の生育ステージも気象変動によって前後するため、両者の関係を明らかにすることが重要と考えられる。

近年、各肥料メーカーから様々な溶出日数を示すシグモイド溶出型被覆尿素が開発されたことから、全量基肥施肥栽培では、分施肥系の穂肥代替として幼穂形成期頃から窒素溶出が始まるタイプの被覆尿素を配合した被覆肥料が用いられることが多い。安定生産の観点からは窒素溶出開始時期が幼穂形成期に近く、気象条件が変動した場合でも窒素溶出開始時期と水稲の幼穂形成期の関係が大きく変わらない被覆肥料の選択が望ましいと考えられる。

そこで、被覆肥料の窒素溶出及び幼穂形成期の早晚が温度に強く依存することを利用して、反応速度論的解析よ

て得られる両者の感温特性値を比較し、さらに、地理情報システム(GIS)を活用して、対象とする栽培地域における気象変動時の両者の関係及び窒素溶出パターンの面的解析によって、栽培地域の気象条件に適した被覆肥料を選定する手法を検討したので報告する。

2. 方法

1) 水稲の幼穂形成期の感温特性

コシヒカリを対象に幼穂形成期の感温特性値を求めた。つまり、作期を変えてコシヒカリを栽培し、移植期～幼穂形成期までの日数と地温を測定し、得られた結果を反応速度論的手法である温度変換日数法(金野・杉原, 1986)により解析し、標準温度 25℃における移植期～幼穂形成期までの日数及び見かけの活性化エネルギー(以下, E_a)を求めた。 E_a は生育ステージの進み方に対する温度の影響の大きさを数値化した値であり、本報告では幼穂形成期の感温特性値として用いた。

計算手順は以下のとおりである。まず、任意の E_a を用いて式 1 により各作期の移植～幼穂形成期の温度変換日数(DTS)を計算し、その平均値を求める。次に、この平均DTSを基に各作期の移植～幼穂形成期の所要日数を推定し、観測値との残差平方和を計算し、 E_a の値を変えて繰り返し計算し、残差平方和が最小になるときの E_a を求めた。なお、残差平方和を最小にする最適 E_a は、Excel のソルバー機能を用いて求めた。

$$DTS = \exp[E_a(T - T_s)/R \times T \times T_s]$$

DTS: 温度変換日数(日), T: 地温(絶対温度K),

T_s : 標準温度(絶対温度K), R: 気体定数,

E_a : 見かけの活性化エネルギー($J \cdot mol^{-1}$)

式 1 DTS (温度変換日数) 計算式

解析には作期移動試験等で 2000～2005 年に得られたコシヒカリの観測データを用いた。幼穂形成期は幼穂長が 1～2 mm の時期とした。また、地温は水稲立毛中の地表下 5 cm に温度センサーを埋設して観測し、1 時間毎の観測値から日平均値を算出し解析に用いた。

2) 被覆尿素的感温特性(窒素溶出特性)

シグモイド溶出型被覆尿素(熱可塑性ポリオレフィン系)の 60, 80, 100 日溶出タイプを供試し、温度別培養試験を行った。培養方法は石橋ら(1992)の方法に従い、培

Shinichi MORITSUGI, Eiji ISHIBASHI and Masaya OOYA: A method of selecting sigmoid releasing-types of coated urea fertilizer that considers the sensitivity to temperature of rice plant

岡山県農業総合センター農業試験場 (709-0801 岡山県赤磐市神田沖 1174-1)

2008年5月9日受付・2008年8月12日受理

日本土壌肥科学雑誌 第80巻 第1号 p.49～53 (2009)

$$N=A\{1-\exp[-k(t-TAU)]\}$$

$$\text{ただし、} t = \sum \exp[Ea1(T-Ts)/R \times T \times Ts],$$

$$TAU = \sum \exp[Ea2(T-Ts)/R \times T \times Ts]$$

N: 窒素溶出率(%), A: 最大溶出率(%), k: 溶出速度定数,
t: 温度変換日数(日), TAU: 溶出開始までの日数(日),
R: 気体定数, T: 地温(絶対温度K), Ts: 標準温度(絶対温度K),
Ea1: kに対する見かけの活性化エネルギー(J・mol⁻¹),
Ea2: TAUに対する見かけの活性化エネルギー(J・mol⁻¹)

式2 被覆尿素的窒素溶出予測式

養温度は15, 25, 35℃の3段階とした。窒素溶出特性値は、温度別の窒素溶出データを基に反応速度論的手法の1次反応式(式2)で解析し、標準温度25℃における窒素溶出特性値を求めた。

被覆肥料の溶出予測では、5つの溶出特性値が用いられる。本報告では、水稻の幼穂形成期と溶出開始期の年次変動が問題であるとの認識にたつて、溶出開始までの日数(以下、TAU)に対する見かけの活性化エネルギーEaを被覆尿素的感温特性値として求め、水稻の幼穂形成期と被覆尿素からの窒素溶出開始期との関係を検討した。

3) GISによる面的解析

GISによる解析対象地域は岡山県下でコシヒカリの栽培が多い県中北部地域(年平均気温14.5℃以下)とし、本試験で求めた被覆尿素及びコシヒカリの感温特性値を基にして1×1kmメッシュ単位で窒素溶出開始期と幼穂形成期の関係を解析した。また、幼穂形成期以降の窒素溶出パターンも把握する必要があると考えられ、出穂期及び成熟期の各被覆尿素的窒素溶出率についてそれぞれ1kmメッシュ単位で予測した。

解析に当たり、アメダス1kmメッシュ気象データ(清野, 1993)の平年値(1971~2000年, 日平均気温及び日別日射量)を基に1kmメッシュ単位で地温を推定し(森次ら, 2003), 被覆尿素的窒素溶出開始期及びコシヒカリの幼穂形成期を予測した。両者の計算開始日は、対象地域の標準的な田植え時期である5月15日とし、被覆尿素的窒素溶出開始期については積算溶出率が5%を超えた日とした。また、コシヒカリの出穂期は平均気温、日照時間を用いた2次元ノンパラメトリック法によって推定し、成熟期は出穂期以降の積算気温が950℃に達した日とし、それぞれの生育ステージにおける窒素溶出率を予測した。また、気象変動の影響を明らかにするために、低温年(1993年)及び高温年(1994年)の1kmメッシュ気象データを用いて被覆尿素的窒素溶出開始期及びコシヒカリの幼穂形成期を求めた。そして気象条件の違いが両者の関係や窒素溶出パターンへ及ぼす影響を解析した。

3. 結果及び考察

1) 水稻の幼穂形成期の感温特性

生育観測を行った13作期における移植~幼穂形成期の地温は約15~30℃の範囲で推移しており、岡山県内の水田地温の変動域(森次ら, 2006)とほぼ同等であることか

ら、本解析によって得られる温度特性値は県内全域の気象条件にほぼ適用できると考えられた。また、移植~幼穂形成期までの所要日数は、最短で27日、最長で64日であった。

地温を用いたDTS法によって求められたコシヒカリの幼穂形成期の感温特性値Eaは約88,900 J・mol⁻¹であった。この時の幼穂形成期の推定精度をみたところ推定誤差RMSEは2日であり(図1), 移植~幼穂形成期の所要日数は本試験で求めたEaを基にして予測可能と考えられた。また、この時の標準温度25℃における移植~幼穂形成期の所要日数は46日であった(表1)。

反応速度論的手法を用いる温度変換日数法は、アレニウスの法則に基づいて生物活性と温度の関係を解析する手法であり(金野・杉原, 1986), ナシ・ミカン等では、解析によって求められる見かけの活性化エネルギーEaを用いて生育予測が可能であることを報告している(例えば、小野ら, 1988)。一方、水稻の生育予測では発育速度の概念に基づく手法(堀江・中川, 1990)が主に利用されており、今回用いたDTS法は、窒素吸収量推定法への適用例(上原ら, 1999; 荒木ら, 2006)の他にほとんどみられない。本試験ではコシヒカリの幼穂形成期におけるDTS法の適用を試みたところ、得られたEaと地温とによって幼穂形成期が精度よく予測できることから、Eaはコシヒカリの移植~幼穂形成期の所要日数に対する地温の影響度合いを示す指標と考えられる。このことは、同様に反応速度論的手法によって求められる被覆尿素的溶出開始期の温度反応性を示す溶出特性値TAUに対する見かけの活性化エネルギーEaとの比較が可能であることを示している。さらに解析に用いた温度条件が両者とも地温であることから、両者のEa

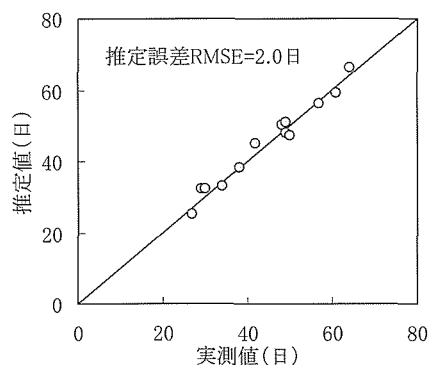


図1 温度変換日数法によるコシヒカリの幼穂形成期の推定精度

表1 コシヒカリの移植~幼穂形成期及びシグモイド型被覆尿素的施肥~窒素溶出開始期の感温特性値

	Ea (J・mol ⁻¹)	標準温度変換日数 ² (日)
コシヒカリ	88,903	46
被覆尿素		
60日型	70,288	35
80日型	76,986	47
100日型	77,153	53

² 地温25℃の温度変換日数

の比較は意味を持つと考えられた。

2) 被覆尿素的感温特性（窒素溶出特性）

供試した3種類のシグモイド溶出型被覆尿素的温度別窒素溶出データはいずれも1次反応式（単純型）に従った。反応速度論的手法によって求められた各被覆尿素的のTAU及びTAUに対するEaを表1に示した。求められたEaは、60日溶出タイプが約70,300 J・mol⁻¹、80日溶出タイプが約77,000 J・mol⁻¹、100日溶出タイプが約77,200 J・mol⁻¹であった。また、標準温度25℃におけるTAUは、それぞれ35,47,53日であった。さらに、窒素溶出速度は、60日型、80日型、100日型の順に低い値を示した（データ省略）。

供試した被覆尿素的のTAUに対するEaは約70,000～77,000 J・mol⁻¹であったのに対し、コシヒカリの幼穂形成期に対するEaは約89,000 J・mol⁻¹であった。先述した様に両者のEaはともに地温に対する温度反応性を示しているため、比較が可能であり、コシヒカリの幼穂形成期は、温度変化に対して被覆尿素的の窒素溶出開始期よりもやや敏感に反応するものと推察される。この点については、実際の温度条件によって両者の反応度合いがどの程度異なるか

を比較し、評価することが重要であると考えられ、次節で検討した。また、標準温度25℃におけるDTSは、80日溶出タイプの窒素溶出開始期がコシヒカリの幼穂形成期と同等の値を示した。

3) GISによる面的解析

岡山県中北部地域を対象に、コシヒカリの幼穂形成期と各被覆尿素的の窒素溶出開始期の関係を1kmメッシュ単位で予測し、両者の差の分布状況を図2に、全メッシュに対するその分布割合を表2に示した。両者の差は80日溶出タイプが最も小さく、平年、低温年、高温年ともほとんどの地域で±5日以内であった。これに対して、60日溶出タイプは幼穂形成期よりも約2週間前、100日溶出タイプは約1週間後から溶出が始まる地域が多く分布した。特に60日溶出タイプでは低温年において両者のずれが大きく、幼穂形成期の20日以上前から溶出が始まる地域が中国山地沿いの気温が低い地域を中心に全体の約3割程度に分布した。これは、コシヒカリの移植～幼穂形成期の標準温度変換日数と被覆尿素的の施肥～窒素溶出開始期の標準温度変換日数の差が11日あることに加えて、両者のEaの差が

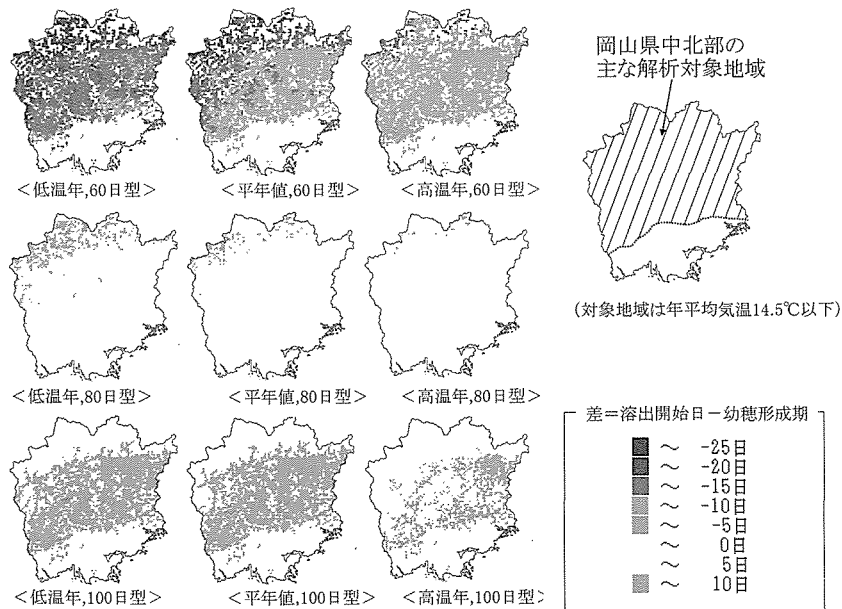


図2 シグモイド溶出型被覆尿素的の窒素溶出開始日とコシヒカリの幼穂形成期の差

表2 窒素溶出開始期と幼穂形成期の差の分布割合[※]

溶出タイプ	気象	溶出開始期と幼穂形成期の差 [†]								
		～-30日	～-25日	～-20日	～-15日	～-10日	～-5日	～0日	～5日	～10日
60日型	低温年	0.3	6.0	23.8	67.6	2.3				
	平年		0.7	11.7	39.0	48.6				
	高温年			0.2	9.8	90.0	0.0			
80日型	低温年					0.5	19.2	79.1	1.2	
	平年						8.1	80.6	11.3	
	高温年						1.6	85.6	12.8	
100日型	低温年							0.7	22.7	76.6
	平年							0.2	21.5	78.3
	高温年							0.1	69.4	30.5

[※]対象地域における全水田メッシュ数に対する該当メッシュ数の割合（％）

[†]差 = 溶出開始日 - 幼穂形成期

表3 出穂期における被覆尿素的窒素溶出率の分布割合²

溶出タイプ	気象	窒素溶出率 (%)							
		~30%	~40%	~50%	~60%	~70%	~80%	~90%	~100%
60日型	低温年						87.7	12.3	
	平年						98.3	1.7	
	高温年						99.5	0.5	
80日型	低温年			0.4	97.7	1.9			
	平年			7.8	92.1	0.1			
	高温年				98.4	1.6			
100日型	低温年	0.0	98.5	1.5					
	平年	0.2	99.5	0.3					
	高温年		18.7	81.3					

²対象地域における全水田メッシュ数に対する該当メッシュ数の割合 (%)

表4 成熟期における被覆尿素的窒素溶出率の分布割合²

溶出タイプ	気象	窒素溶出率 (%)							
		~30%	~40%	~50%	~60%	~70%	~80%	~90%	~100%
60日型	低温年								100.0
	平年								100.0
	高温年								100.0
80日型	低温年							100.0	
	平年							100.0	
	高温年							99.9	0.1
100日型	低温年				43.4	56.6			
	平年				2.9	97.1			
	高温年						94.8	5.2	

²対象地域における全水田メッシュ数に対する該当メッシュ数の割合 (%)

約 19,000 J · mol⁻¹ と大きいことによるものと考えられた。また、窒素溶出開始後の溶出パターンを知るために、出穂期及び成熟期の窒素溶出率を予測し、それぞれの生育ステージにおける窒素溶出率の分布割合を表3、表4に示した。60日溶出タイプは、ほとんどの地域において出穂期までに70~80%、成熟期には90%以上の溶出率を示した。次に、80日溶出タイプは、ほぼ全域において出穂期までに50~60%、成熟期に80~90%の溶出率を示し、気象変動の影響はほとんどの地域で認められなかった。さらに、100日溶出タイプでは、出穂期までに30~50%、成熟期に60~80%の溶出率を示し、特に低温年では成熟期の溶出率が約60~70%にとどまる地域が全体の約4割に分布すると予測された。

まず、被覆尿素的窒素溶出開始時期については、コシヒカリを倒伏させないことを念頭に検討を行う必要がある。福井県におけるコシヒカリ栽培では、幼穂形成期より早く溶出開始した場合は倒伏等による減収がみられたが(伊森・友広, 1991)、幼穂形成期以後に溶出が増加するタイプの被覆肥料では倒伏に対する影響は出穂18日前以降に穂肥を施用した慣行施肥と同等であったと報告している(伊森ら, 1994)。また、愛知県では、コシヒカリ以外の品種では出穂前40日頃の下位節間伸長期に溶出が始まる肥料でも溶出は徐々に行われるため倒伏の心配はないが、コシヒカリでは倒伏が心配されるため、溶出開始期がより遅い出穂前30日頃の肥料を選定し、慣行栽培と同等の収量を得ている(北村・今井, 1995)。これらのことから、今回供試した中では、60日溶出タイプは溶出開始時期が早く、

溶出開始期が下位節間伸長期にあたり、倒伏の危険性が高いと考えられた。一方、80日溶出タイプでは幼穂形成期前後から溶出が始まり、100日溶出タイプでは幼穂形成期をやや過ぎた頃から溶出が始まることから、コシヒカリを対象とした場合は80日及び100日溶出タイプの窒素溶出開始時期が適当であると判断された。

次に、80日及び100日溶出タイプの幼穂形成期以降の窒素溶出パターンについて検討した。80日溶出タイプでは、気象条件に関わらず、成熟期では90%近く溶出するのに対して、100日溶出タイプでは年によって溶出率が異なり、特に低温年では40%近くの窒素が溶出せず残存すると考えられた。これらから、溶出の安定性を考えると、今回供試した被覆尿素の中では80日溶出タイプが岡山県中北部地域のコシヒカリ栽培に適していると考えられた。

以上のように、岡山県中北部地域を対象にして反応速度論的手法を用いてコシヒカリに適するシグモイド溶出型被覆尿素的窒素の選定を試みた。その結果、標準温度における被覆尿素的窒素溶出開始期とコシヒカリの幼穂形成期のDTSはほぼ同等であることが望ましく、逆に両者のDTSが10日以上異なる場合や両者のEaの差が大きい場合には生育ステージとのずれが大きくなり、特に気象条件によっては施用効果が安定しないことが懸念された。

4. おわりに

現在、岡山県中北部地域のコシヒカリ栽培においては、全量基肥施用用の被覆肥料として既存のシグモイド100日溶出タイプから新たにシグモイド80~90日溶出タイプを配合した被覆肥料が用いられ、従来よりもより安定した肥

効が期待できるものと考えられる。

反応速度論的手法を用いる温度変換日数法によって水稲の生育速度に対する温度の影響を評価し感温特性値を求めることは、同様に反応速度論的解析によって求められる被覆尿素の感温特性との比較が可能になるという点で意味があると考えられる。今後、コシヒカリ以外の品種でも同様に感温特性を明らかにすることによって、より適正な被覆肥料の選定が行えるものと考えられる。また、コンピューターの性能が飛躍的に向上し、これまで一般のパソコンでは行えなかった膨大な計算処理やその計算結果を基にした解析が可能となっている。今回示したようにGISを活用することによってこれまで得られなかったマクロな情報も作成可能であり、被覆肥料の特性を最大限に活かした全量基肥施肥技術がさらに展開されることを期待したい。

謝辞：コシヒカリの作期移動試験データについては、岡山県農業総合センター農業試験場作物研究室長杉本真一氏からご提供頂いた。深く感謝の意を表します。

文 献

- 荒木雅登・山本富三・満田幸恵 2006. 標準温度変換日数と生育診断による暖地水稲の窒素吸収量推定法. 土肥誌, 77, 191-94
- 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
- 伊森博志・友広啓二郎 1991. 側条施肥田植機による水稲の施肥技術(第3報) 2段施肥の肥効. 土肥要旨集, 37, 314
- 伊森博志・坂東義仁・友廣啓二郎 1994. 遅効性肥料を利用した施肥田植機によるコシヒカリの全量基肥施肥法. 福井県農試研報, 31, 53-63
- 石橋英二・金野隆光・木本英照 1992. 反応速度論的方法によるコーティング窒素肥料の溶出評価. 土肥誌, 63, 664-668
- 北村秀教・今井克彦 1995. 肥効調節型肥料による施肥技術の展開1, 水稲の全量基肥施肥技術. 同上, 66, 71-79
- 金野隆光・杉原 進 1986. 土壌生物活性への温度影響の指標化と土壌有機物分解への応用. 農環研報, 1, 51-68
- 森次真一・石橋英二・沖 和生・山本章吾 2003. アメダスメッシュデータによる被覆尿素からの窒素溶出予測. 農業環境工学関連5学会講要, 306
- 森次真一・石橋英二・沖 和生 2006. 岡山県下における水稲栽培期間中の水田地温の変化. 岡山県農総セ農試研報, 24, 1-6
- 小野祐幸・金野隆光・奥野 隆・浅野聖子 1988. 日本ナシの催芽・開花まで日数への温度の影響. 農業気象, 44, 203-208
- 清野 裕 1993. アメダスデータのメッシュ化について. 農業気象, 48 (4), 379-383
- 上原敬義・小松正孝・佐藤 強・豊川 泰 1999. 稲体の充実度を考慮した栄養診断法. 土肥要旨集, 45, 213