

研究情報

北陸地域における水稻の生育診断・予測技術開発研究の現状

寺 田 優
(石川県農業総合試験場)

I. はじめに

北陸地域の農業は水田作を中心とした農業で、水稻・大麦・大豆が基幹作物である。この中でも水稻は最も重要な作物で、良質米の生産が奨励されている。しかし、食生活の多様化による米の消費減退や良食味米志向、また米の輸入自由化や生産コストの大幅な低減の問題等、米生産を取り巻く環境は極めて厳しい状況にある。

このような状況の中、北陸地域では、高品質・良食味米の低コスト生産技術の開発が最優先の課題となっている。米の生産コスト低減には収量の高位安定化と生産資材の省資材化及び作業の省力・合理化により達成される。このためには、水稻の生育に関する高精度なリアルタイム情報と情報に基づくタイムリーな管理作業が必要である。そこで新潟・富山・石川及び福井の北陸4県の農業試験場では、農林水産省の地域重要新技術開発事業費の補助を受け、北陸4県の共同研究として、“水稻の生育診断・予測技術開発”を課題化し、3年間研究を実施してきた。

本研究情報は“水稻の生育診断・予測技術開発”研究の主要な成果について主査の石川県がとりまとめたものである。

II. 生育診断

水稻の生育状態を診断・予測するに当たり、予備

的に北陸各県の奨励品種を供試して気温や栄養条件と生育の関係が検討された。

1. 温度と生育反応

温度と水稻の生育については既に多くの知見がある。しかし、北陸地域では栽培管理に大切な生育ステージ、すなわち、幼穂形成期や出穂期及び成熟期と温度の関係についてはほとんど明らかにされていない。そこで無効温度¹⁾を仮定して、生育時期と有効積算温度の関係が検討された。その一例を第1表に示す。コシヒカリにおける移植から幼穂形成期、移植から出穂期までの有効積算温度($\sum_{i=1}^n T_i - T_0$)は移植時期に関係なく、それぞれ平均値で577.4°Cと924.5°Cとなることが明らかにされた。但し、 T_i は移植から幼穂形成期及び出穂期までの日平均気温(°C)、 T_0 は経験から仮定した無効温度(°C)である。

有効積算温度の値は無効温度の設定値により変わる。そこで無効温度の値について検討がなされた。その結果は第2表のようになった。すなわち、無効温度を10°Cから16°Cに設定して有効積算温度とその変動係数を求め、変動係数が最小となる温度を無効温度とした。その結果、無効温度は10°Cから11°Cで江幡ら²⁾と同様の値になり、第1表で仮定した無効温度の妥当性が証明された。

2. 栄養条件と生育反応

水稻の生育調査では草丈・葉齢・茎数及び乾物重等が測定されている。このうち茎数は気温の他、稲

第1表 北陸地域におけるコシヒカリ栽培の無効温度と有効積算温度。

移植日 (月/日)	無効温度(°C)		有効積算温度(°C)	
	移 植	移 植	移 植	移 植
	{		{	
	幼形期	幼形期	幼形期	幼形期
4/9			572.5	931.4
4/23			582.0	918.3
5/6	11.0	10.5	577.6	917.1
5/21			577.3	931.0
平 均			577.4	924.5

第2表 コシヒカリにおける出穂期までの無効温度別有効積算温度の変動。

無効 温度 (°C)	有効積算 温度 平均(°C)	標準 偏差 (°C)	変動 係数 (%)
10	1,026.7	47.5	4.63
11	933.7	45.3	4.86
12	840.8	43.6	5.19
13	749.1	42.6	5.63
14	659.3	41.9	6.36
15	572.4	42.0	7.34
16	480.0	43.1	8.99

体の窒素吸収量等の栄養条件に大きく影響される。

そこで窒素の施用量を変えて葉身の窒素含有量と茎数の関係が検討された。両者の単相関係数を示すと第3表になった。すなわち、コシヒカリの栽培では、6月10日の葉身窒素含有量は幼穂形成期まで、また6月20日から30日までのそれは出穂期以降の穂数と極めて高い相関係数があることが明らかにされた。したがって、後で述べる生育量の予測、特に茎数の予測モデルでは土壌中の窒素含有量や水稻の窒素吸収量が重要な説明変数になることが示された。

3. 生育診断指標の策定

生育診断を行うには基準となる尺度が必要である。気象変動の大きかった1984年から1988年の5

カ年間におけるコシヒカリの生育データを使用し、出穂期のLAIを基準として第4表のように生育相が分類された。これによると多収年(664 Kg/10 a)の生育経過を望ましい生育と考え、出穂期のLAIが5程度の中間型が北陸地域の良好型生育相とされた。

良好型生育相から第5表に示す診断基準値が明示された。水稻の生育は気象条件により年次変動が発生するが、この診断基準値を目標に肥培管理を行う必要がある。なお、この良好型生育相における収量と収量構成要素についても第4表のような具体的目標値が明確にされた。

第3表 葉身の窒素含有量と茎数の相関関係(コシヒカリ)。

月日 窒素量 の測定日	暦 日 ご と の 茎 数								
	6/10	6/20	6/25	6/30	7/10	7/18	7/30	8/8	8/20
5/30	0.85	0.87	0.82	0.80	0.86	0.66	0.84	0.80	0.81
6/10	0.95**	0.92**	0.93**	0.89**	0.90**	0.70	0.70	0.82	0.85
6/20		0.90**	0.92**	0.91**	0.91**	0.93**	0.89**	0.90**	0.93**
6/25			0.95**	0.94**	0.94**	0.93**	0.93**	0.94**	0.98**
6/30				0.95**	0.94**	0.90**	0.91**	0.94**	0.97**
7/10					0.85	0.81	0.85	0.83	0.91**
7/18						0.73	0.73	0.83	0.89**
7/30							0.86	0.73	0.76
8/8								0.86	0.86

第4表 コシヒカリの生育相の分類と良好型生育相。

生 育 型	出穂期		幼穂形成～ 出穂期 CGR (g/m ² /MJ)	茎数 (本/m ²)	登熟度	収量 (kg/10a)	年次
	LAI (-)	全乾物重 (g/m ²)					
不足型	4.3	806	1.10	364	1962	560	1988
中間～ 不足型	4.05	928	1.23	384	2094	610	{ 1984 1985
中間型 (良好型)	4.9	1.007	1.50	393	2024	664	1986
過繁茂型	5.9	1.047	1.20	484	1846	580	1987

第5表 良好型生育相から求めた茎数・LAI・乾物重の概略値(コシヒカリ)。

項 目	暦日 (月日)											
	5/25	6/1	6/8	6/15	6/22	6/29	7/6	7/13	7/20	7/27	8/4	8/4 以降
茎数(本/m ²)	100	200	360	510	660	655	635	585	540	440	415	415
生育ステージ		分けつ期			最高分けつ期			幼穂形成期			出穂期	
LAI(-)		0.34			2.1			2.8			4.9	3.31 1.3
乾物重(g/m ²)		0.08			0.27			0.40			1.05	1.40 4.53

第6表 DVS 値による幼穂形成期、出穂期の予測と精度 (コシヒカリ)。

年次 (年)		1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986
幼 穂 形成期	実測値 A (月日)	7.12	7.14	7.12	7.12	7.10	7.11	7.16	7.10	7.14	7.9	7.9	7.17
	推定値 B (月日)	7.13	7.13	7.13	7.9	7.10	7.9	7.15	7.11	7.13	7.11	7.11	7.17
	誤差 (A-B, 日)	-1	+1	-1	+3	0	+2	+1	-1	+1	-2	-2	0
出穂期	実測値 A (月日)	8.4	8.9	8.5	8.5	8.6	8.10	8.9	8.5	8.6	8.2	8.2	8.11
	推定値 B (月日)	8.6	8.8	8.7	8.2	8.6	8.9	8.10	8.7	8.8	8.5	8.4	8.13
	誤差 (A-B, 日)	-2	+1	-2	+3	0	+1	-1	-2	-2	-3	-2	-2

III. 生育予測

水稻の生育予測には①生育時期 (ステージ) を予測するもの¹¹⁾, ②草丈・茎数等の生育量⁸⁾, ③倒伏程度・収量構成要素及び収量等を予測するもの¹⁹⁾ 等がある。

“水稻の生育診断・予測技術の開発” 研究で策定・検証されたモデル (予測式) の概要について述べる。

1. 生育時期の予測

水稻の栽培管理において生育時期を正確に予測することは極めて重要である。重要な生育時期としては幼穂形成期と出穂期及び成熟期があり、それぞれ次の式が策定された。すなわち, DVR_i を日々の生育速度, DVS を生育時期, および DVR_j を幼穂形成期以降の生育速度とした時,

幼穂形成期は,

$$DVS = \sum_{i=1}^n DVR_i \dots \dots \dots (1)$$

但し,

$$DVR_i = 1/G \{1 - \exp\{1 - KD(T_i - T_{cd})\}\} \dots \dots \dots (2)$$

出穂期は,

$$DVS = \sum_{j=1}^n DVR_j \dots \dots \dots (2)$$

但し, $20^\circ\text{C} \leq T_i \leq 27^\circ\text{C}$ の場合

$$DVR_j = 0.3 / (0.266 T_i^2 - 14.708 T_i + 226.435)$$

$T_i > 27^\circ\text{C}$ の場合

$$DVR_j = 0.013$$

ここに, T_i : 日平均気温 ($^\circ\text{C}$)

T_{cd} : 発育の最低温度 ($^\circ\text{C}$)

G, KD : パラメター

(1) 式は堀江の式で $DVS=1.0$ が出穂期, 2.0 が成熟期とされているが幼穂形成期については言及されていない。そこで幼穂形成期は $DVS=0.7$ であるこ

と, また, 出穂期は $DVS=2.0$ より (2) 式で予測した方が精度が高いことが明らかにされた。両式による幼穂形成期と出穂期の予測精度は第6表のようになった。さらに, 生育時期の予測にはノンパラメトリック法の適用も試みられた。この方法は得られたデータそのものを平滑化して解析する方法である。すなわち, $DVR_i = f(T_i)$ をノンパラメトリック法で推定し, 幼穂形成期・出穂期及び成熟期が予測された。予測結果を第7表に示す。以上, 3つのモデルは最大4日以内の誤差で各生育時期を予測できた。しかし, 幼穂形成期の予測誤差が ± 2 日以上になると収量の減少や倒伏が発生して減収となる。したがって, 実用化に向けて一層のモデルの精度向上が必要である。

2. 生育量の予測

水稻の草丈・葉齢・茎数等を経時的に予測するモデルは生育量の逐次予測モデルといわれ, 谷藤等⁹⁾ が実用化した。このモデルは草丈・葉齢・茎数ごとに, また, 予測時期ごとに重回帰式を作成して予測するものである。北陸地域のコシヒカリを対象として作られたモデルとその予測精度の一例を第8表に示す。

この表より, 草丈と葉齢の予測精度は90%以上で, 概ね実用に供しうることが明らかにされた。しかし, 茎数の予測精度は低く実用的でないことが示された。

第8表に示すように茎数の予測式には土壌中の窒素量と稲体窒素含有量 (表中の説明変数 N_s と N_t) を導入しても予測精度の向上ができない時期もあった。すなわち, 茎数の予測は, ノイズを含む時系列データを多くのパラメターを含む多項式で平滑化しても実用に供しうる精度の予測はできないことが明らかにされた。

3. 生育時期と生育量の関係

生育時期の予測に使用した DVS と生育量の予測

第7表 ノンパラメトリック法によるコシヒカリの各生育時期の予測精度。

コシヒカリ幼穂				推 定 の 差 (日)			
移植期 月/日	形成期 月/日	出穂期 月/日	成熟期 月/日	移植 ～幼形	移植 ～出穂	幼形 ～出穂	出穂 ～成熟
5/2	7/9	7/29	9/8	0.3	0.5	1.6	-0.9
5/2	7/13	8/6	9/15	-1.2	-1.9	-0.2	1.3
5/2	7/12	8/8	9/19	-3.2	-6.1	0.1	-0.4
5/4	7/15	8/9	9/20	-1.4	-2.4	-1.5	-0.2
5/2	7/10	8/4	9/15	2.8	4.0	2.5	-0.8
5/2	7/12	8/6	9/16	0.3	0.8	0.0	-0.9
5/2	7/10	8/1	9/11	2.7	3.9	2.0	-0.9
5/2	7/11	8/3	9/11	-0.2	0.7	0.3	1.5
5/2	7/15	8/11	9/20	-1.2	-1.1	-2.2	1.3

第8表 重回帰を用いたコシヒカリの生育予測モデルと精度。

期 間	目的変数	重 回 帰 式	予測精度	
			S 62	S 63
5月1日	草丈 (5/10)	$Y=0.51 X 3-0.35 L 50+10.91$	71	83
～10日	葉数 //	$Y=0.26 X 1+0.36 S 50-1.65$	86	100
5月11日	草丈 (5/29)	$Y=1.51 X 3+0.54 L 51-5.95$	99	60
	葉数 //	$Y=0.14 X +0.90 S 51+0.92$	96	97
～20日	茎数 //	$Y=0.41 N 5+3.03 S 51-5.93$	61	73
5月21日	草丈 (5/30)	$Y=0.47 X 2+0.46 L 52+5.42$	99	99
	葉数 //	$Y=0.11 X 2+0.81 S 52+0.29$	95	90
～31日	茎数 //	$Y=1.35 X 3+1.18 K 52-12.98$	90	—
6月1日	草丈 (6/10)	$Y=1.16 X 3+1.55 L 53-22.99$	99	94
	葉数 //	$Y=0.091 X 2+0.81 S 53+0.89$	98	97
～10日	茎数 //	$Y=2.12 N 5+1.77 K 53-5.62$	96	95
6月11日	草丈 (6/20)	$Y=3.01 X 3+1.18 L 61-43.68$	94	84
	葉数 //	$Y=0.16 X 3+0.77 S 61+0.64$	96	100
～20日	茎数 //	$Y=-0.24 X 3+1.47 N 5+0.84 K 61+1.08$	81	65
6月21日	草丈 (6/30)	$Y=3.30 X 3+0.61 L 62-29.33$	90	96
	葉数 //	$Y=0.09 X 1+0.69 S 62+2.11$	99	96
～30日	茎数 //	$Y=4.85 N 1-0.99 N 5+1.15 K 62-21.86$	83	57
7月1日	草丈 (7/10)	$Y=2.01 X 3+3.98 N 3+0.45 L 63-10.55$	92	88
	葉数 //	$Y=0.03 X 3+0.49 S 63+5.85$	97	98
～10日	茎数 //	$Y=-1.36 X 3+0.67 K 63+33.37$	98	98
7月11日	草丈 (7/20)	$Y=-0.64 X 4+0.99 L 71+11.23$	90	91
～20日	茎数 //	$Y=0.94 X 4+0.41 K 71+6.96$	84	89

で求めた草丈・葉齢・茎数の関係についての報告はほとんどない。“水稻の生育診断・予測技術の開発”研究では両者の関係が検討された。その結果、第1図の関係が明らかにされたが草丈・茎数・乾物重とDVSの関係は明確にできなかった。今後さらに検討する必要がある。

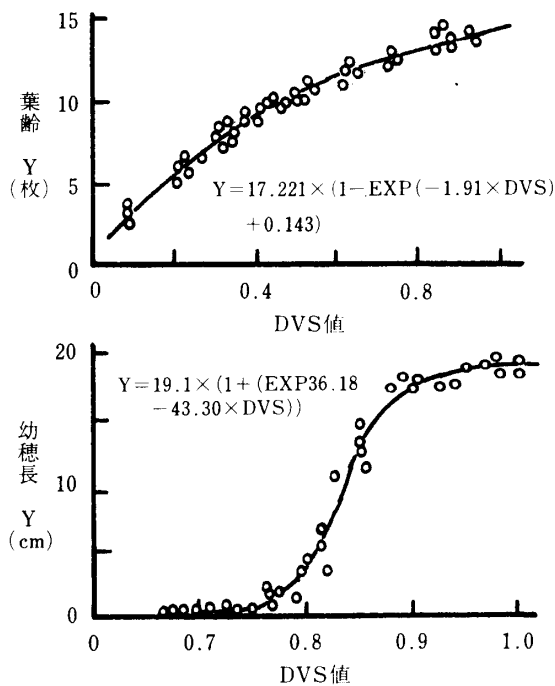
4. その他の予測

生育時期の予測で使用したDVS値を説明変数として稲体の窒素吸収量や稈長等を予測する試みがなされたが定式化することはできなかった。また、有

効茎歩合・ m^2 当たり粒数・登熟歩合・倒伏程度及び収量等についても重回帰式による予測が検討されたが、高精度の予測式は策定できなかった。

IV. 土壌窒素の無機化過程と窒素施肥

水稻の良好型生育相に対応して栄養条件の面から、土壌窒素の発現量と追肥量および利用率を考慮した望ましい窒素吸収パターンを設定する必要がある。



第1図 DVS値と葉齢及び幼穂長の関係。

1. 土壌型別土壌窒素の無機化パターン

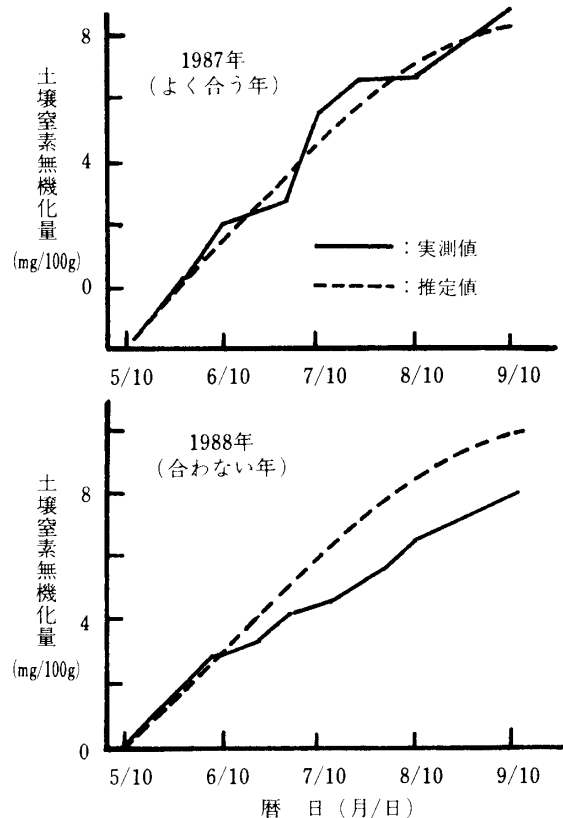
土壌型別の土壌窒素無機化の推定には速度反応論的方法^{5),7)}と有効積算温度法¹²⁾が検討された。前者による予測では土壌型別に単純型、単純並行型モデルの妥当性が調べられた。その結果、AIC法の値を用いてモデルを選択すると土壌により適するモデルが異なること、また、単純並行型モデルは土壌によりパラメータ値が負になり、土壌窒素の無機化量が推定できないことが明らかにされた。

単純型モデルによる土壌窒素無機化量の一例を第2図に示した。土壌窒素の累積発現量、つまり発現パターンは暦日に対して右上がりの曲線となる。単純型モデルによる推定値と実測値の適合度には年次間変動があり、この原因として栽培前の土壌管理や乾燥状態、耕起時期や碎土率等¹³⁾があり指摘された。

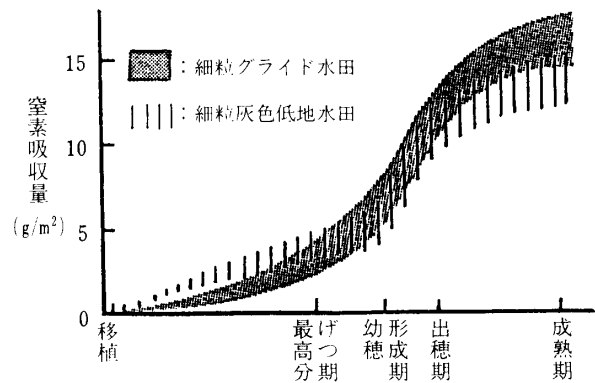
有効積算温度法では1次関数、対数関数、指数関数の各モデルが検討された。これら回帰式モデルの寄与率は、指数関数モデルを除いて、80%以上になり、概ね実用化できることが示された。

2. 良好な窒素吸収パターン

多収年における生育経過から良好型生育相を策定したのと同様に考え、多収年を目標とした望ましい窒素吸収パターンが検討された。水稻の生育に対応した望ましい窒素吸収パターンは一般的に、第3図のようなシグモイド曲線になることが明らかにされた。また、曲線の形は土壌型別に若干異なるが、実



第2図 土壌窒素無機化のパターン。



第3図 望ましい窒素吸収パターン。

測値と推定値もよく合うことも検証された。

3. 追肥窒素の利用効率とシステム施肥法

水稻栽培における施肥窒素の施用量は水稻が必要とする量を利用効率で除したものである。そこで施肥の合理化を図るために施肥窒素の利用効率が検討された。その一例を第9表に示したが、施肥窒素の利用効率は土壌型別に、また、施肥時期ごとに異なり千差万別である。したがって、“水稻の生育診断・予測技術の開発”研究では、各県の代表的土壌についてのみ施肥時期別の利用効率が明らかにされた。

目標とする水稻の窒素吸収量³⁾と土壌窒素吸収量

第9表 コシヒカリにおける施肥窒素の吸収利用率(%)。

施肥名	黄色土	黒ボク土	灰色低地土
基肥	33.5	32.3	22.9
早期追肥	6.9	18.5	8.5
穂肥	51.0	51.9	38.8
実肥	58.0	37.1	61.0

の差を生育時期別に施肥窒素で細くする施肥法をシステム施肥法⁴⁾と呼んでいる。このシステム施肥法では土壌窒素と施肥窒素の利用率を使用して、適正な追肥窒素の施用量が次の(3)式で求められる。

$$\text{追肥窒素量} = \frac{(B-A) - (C \times D \div 100)}{E \div 100} (\text{kg/10 a}) \quad \dots\dots\dots (3)$$

但し、A; 栄養診断日の水稻の窒素保有量(kg/10 a)

B; 目標日の理想的な窒素保有量(kg/10 a)

C; A~B間の土壌窒素無機化量(kg/10 a)

D; 無機化した土壌窒素の利用率(%)

E; 施肥窒素の利用率(%)

システム施肥法を使用すると水稻の生育時期毎に窒素吸収量が計算できる。この計算値と実測値を比較すると両者は土壌の種類と施肥時期に関係なくほぼ一致することが検証された。このことよりシステム施肥法は合理的な肥培管理技術として実用化できることが明らかにされた。

V. おわりに

北陸地域ではこれまで水稻栽培に関する膨大なデータが蓄積されてきたが、生育の予測・診断といったシステムティックなデータの加工や解析をした研究は殆ど無かった。“水稻の生育診断・予測技術の開発”研究を実施し、①水稻の良好型生育相と診断基準値の設定、②堀江や谷藤等の生育モデルの改良とノンパラメトリック法などの新しいモデルの策定、

さらに、③望ましい窒素吸収経過と量およびシステム施肥法という新しい追肥法の開発等々の成果がもたらされた。これらの主要成果の中には実用化に到らない技術もあり、今後更に実用化に向けて研究を継続する必要がある。

以上、“水稻の生育診断・予測技術”研究の概要を報告した。未解決の問題も多くあるが、他地域における研究の一助になれば幸甚である。

引用文献

1. 朝限隆純 1958. 生態的特性からみた水稻早晩期用品種. 農業技術 13-5: 204-209.
2. 江幡守衛 1990. 有効積算温度とイネの成長. 第2報 イネの出穂・開花および登熟における有効積算温度. 日作紀 59: 233-238.
3. 北田敬字 1990. コシヒカリの多収水準における窒素吸収パターン. 土肥誌 61: 187-189.
4. 北田敬字ら 1991. 水稻の理想的な窒素吸収パターンと土壌窒素無機化予測によるシステム施肥法. 土肥誌 62: 585-592.
5. 金野隆光 1980. 土壌中の生物活性と温度. 土壌の物理 41: 7-16.
6. 神保恵志郎ら 1982. 水稻生育中期における栄養診断と生育診断, 予測に関する研究. 山形農試研報 16: 86-89.
7. 杉原 進・金野隆光 1986. 土壌中における有機物の反応速度論的解析法. 農環研報 1: 127-166.
8. 谷藤雄二・東海林寛 1985. 水稻生育の逐次予測モデルの構築とその適用. 山形農試研報 19: 1-12.
9. 谷藤雄二 1989. 水稻生育の逐次予測法の開発と情報化に関する実証的研究. 山形農試特別研報 15: 34-66.
10. 津野幸人 1958. 収量予測のむつかしさ (1). 農業技術 13-9: 394-396.
11. 堀江 武 1985. 北陸の気象と水稻生産. 日本農業気象学会北陸支部報 10: 84-92.
12. 吉野 喬・出井嘉光 1978. 土壌窒素供給力の有効積算温度による推定法について. 農事試研報 25: 18-34.
13. 吉野 喬・出井嘉光 1977. 土壌窒素供給力の有効積算温度による推定法について. 農事試研報 25: 13-16.