

生産現場で収集したデータを用いた精玄米収量予測モデル の作成と収量水準の決定因子の解析

誌名	システム農学
ISSN	09137548
著者名	平井,康丸 山川,武夫 井上,英二 岡安,崇史 光岡,宗司
発行元	システム農学会
巻/号	38巻1号
巻号補足	
掲載ページ	p. 1-14
発行年月	2022年3月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



研究論文

生産現場で収集したデータを用いた精玄米収量予測モデルの作成と
収量水準の決定因子の解析平井康丸¹⁾・山川武夫¹⁾²⁾・井上英二¹⁾・岡安崇史¹⁾・光岡宗司¹⁾³⁾

1)九州大学大学院農学研究院

2)摂南大学農学部

3)琉球大学農学部

(受付日 2021/04/19; 受理日 2022/02/09)

要旨

我が国のコメ生産は、不安定な気象条件や地力低下による収量・品質の低下が懸念されている。また、外国産や他食料品との競争力強化が課題となっている。このような状況下、ICTの発達により収集が容易になりつつある、農業データを有効活用するための解析手法の開発が求められている。本研究は、1)生産現場で収集したデータを用いて精玄米収量の低・中・高のクラスを予測するモデルを作成すること、2)収量予測モデルを用いて収量の制限因子を明らかにすること、3)収量の改善指針を検討することを目的とした。予測モデルの作成にはサポートベクターマシンを用いた。また、モデル作成には、2011～2016年に福岡県糸島市において実施した延べ90枚の水田調査(品種ヒノヒカリ)により収集したデータを用いた。作成モデルは、籾数、出穂後5日から登熟後期の期間の日平均日照時間、および幼穂形成始期から登熟後期までの無機態窒素の供給量の3つの説明変数を含み、正答率は77.8%であった。低収量クラスの水田では、特に幼穂分化期の茎数が少なく、籾数が収量の制限因子となった。また、中収量クラス、および高収量クラスの籾数が2.8万m⁻²以上の事例において、登熟期の無機態窒素の供給量不足が制限因子になった水田が確認された。収量改善の指針として、低収量クラスの水田において栄養生長期の茎数増加による籾数の確保が、登熟期の窒素供給不足が制限因子になった水田では、追肥を2回に分施し、地域の施肥基準の窒素量3.6kg/10a程度を施用することが挙げられる。この追肥の指針は、生産現場の調査事例に基づく解析が、地域の栽培試験や現場の試行錯誤により決定された基準を支持したことを意味する。

キーワード

コメ生産、サポートベクターマシン、日照時間、肥培管理、無機態窒素供給、籾数

1. はじめに

我が国のコメ生産は、不安定な気象条件や地力低下による収量・品質の低下が懸念されている(森田 2011, 松江 2012, 高橋ほか 2015)。また、外国産や他食料品との競争力強化も課題となっている。このような状況下、収量・品質の高位平準化や生産コスト削減の重要性が高まっている。近年、ICT機器を活用した肥培管理により

収量改善を図った実証試験結果が報告されるなど(宮地ほか 2014)、スマート農業に対する生産者の関心が高まっている。しかし現状では、多くの生産者が依然として経験的、試行錯誤的な生産管理をしている。その結果、地域や水田によって異なる気象や土壌条件等が管理に的確に反映されず、収量・品質の不安定化を招いている。このことは、スマート農業機器が普及していない問題もあるが、各種農業データに基づき収量・品質の改善指針を提示する方法が確立されていないことも理由である。したがって、土・気象等の生産環境、肥培・水管理等の作業、栽培対象の稲からなる複雑なコメ生産システムを対象に、複数の因子と収量あるいは品質の関係を記述す

1) 〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744

2) 〒573-0101 大阪府枚方市長尾峠町 45-1

3) 〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町千原 1

(Correspondence: hirai@bpes.kyushu-u.ac.jp)

る解析モデルの開発が必要である。

Yoshida *et al.* (2016)は、コメ生産に関わる気象と窒素供給の因子と収量の関係を機構的水稻生育モデルにより記述した。同モデルは、作物の窒素吸収と光合成過程をモデル化した茎葉重や籾収量を予測するモデルであり、肥培管理の検討に利用し得る。しかし、モデルパラメータを決めるために作期移動試験や葉身窒素濃度および葉面積指数等を計測する実験が必要である。このパラメータの決定は、機構的水稻生育モデルを生産現場で実用化する大きな障壁である。また、同モデルは、限られた実験条件下でパラメータを決定しているため、多様な水田環境・管理方法の条件では精度が低下すると予想される。

一方、農業 ICT の発達により、コメ生産現場において環境、管理、生育、収穫物等のデータ収集が容易になりつつあることから、収集データを用いて影響因子と収量あるいは品質との関係を記述するアプローチも考えられる。Roel *et al.* (2007)は、ウルグアイのコメ生産グループの圃場で収集したデータを用いて、回帰木と決定木による解析を行った。その結果、収量のばらつきが主に施肥量、灌漑方法および作期の違いによって生じたことを明らかにした。田中ほか(2014)は、福岡県において調査した農家水田の収量の決定要因が籾数であったことを回帰木を用いて示した。また、Saruta *et al.* (2013)も同様に福岡県の農家水田において収集したデータを用いてサポートベクターマシンによる解析を行った。低・中・高の3つの収量および玄米タンパク含量のクラスが、出穂期の稲体の窒素吸収量と出穂後5~30日の平均気温の2つの説明変数により分類できることを示した。

しかし、生産現場で収集した環境、管理および生育等のデータに基づき、肥培管理等の生産者が制御できる要因まで遡って、収量あるいは品質との関係を解析可能なモデルは十分に開発されていない。前述した Roel *et al.* (2007)は窒素、リン、カリウムの施肥量を考慮したのみであり、田中ほか(2014)および Saruta *et al.* (2013)は肥培管理を考慮していない。これに対し本研究は、生産現場の多様な地力と肥培管理を反映して、無機態窒素供給量を推定し、収量予測モデルを作成する。

予測モデルは、水稻の栄養生長に関わる収量低下要因を特定すること、肥培管理の改善等に利用することを目的に作成した。そこで、モデルの説明変数の候補を、栄養生長期の水稻の生育状態を包括的に反映する籾数、出穂後5日から登熟後期までの日平均気温および日照時間、幼穂形成始期から登熟後期までの無機態窒素の供給量に絞った。

以上から本研究の目的は、(1)生産現場で収集したデータを用いて精玄米収量予測モデルを作成すること、(2)収量予測モデルを用いて収量の制限因子を明らかにすること、さらに(3)収量の改善指針を検討することであった。

2. 材料および方法

2.1 解析データの収集

解析データは、2011~2016年に福岡県糸島市において実施した、21経営体が管理した延べ90枚の水田調査(品種ヒノヒカリ)により収集した。調査水田は、東西および南北方向ともに約10kmの範囲(130.144°E-130.252°E, 33.500°N-33.614°N)に分布した。また、調査水田は概ね標高10m以下の平野部および海岸沿いに位置したが、延べ16枚の水田は標高50m~70mの山沿いに位置した。調査水田の作付体系は、稲単作が3水田、稲・麦・大豆のローテーションが1水田、その他は稲・麦の2毛作であった。移植日および肥培管理のデータは、各農家への電話あるいは訪問調査により入手した。また、出穂日は現地調査により、稲株の概ね50%が出穂した日とした。表1に調査水田の位置、土壌、生育時期の概要を、表2に堆肥施用の概要、表3に肥培管理の概要を示す。

水稻生育期間中の日平均気温および日照時間は、メッシュ農業気象データを用いた(大野 2014)。同データでは、調査水田の緯度・経度に対応するメッシュ(約1km²)の気象データを得ることができる。

土壌からの無機化窒素量を推定するために、水田土壌の湛水培養試験を実施した。供試土壌は、2014年5月26日もしくは6月2日の冬作収穫前後の入水前の時期に採取した。各調査水田の対角線上の5箇所で採取した土壌を未風乾のまま2mmの篩を通して用いた。培養試験は3連制で行い、培養期間は0、1、2、3、4、5、6、8、10および12週、培養温度は25°Cとした。培養試験の方法は平井ほか(2017)に詳述した。

生育指標は、幼穂分化期頃の茎数と登熟中期(出穂後20日頃)のSPAD値を計測した。調査水田内の対角に位置する2区画において、それぞれ条方向に連続する10株(合計20株)を計測して平均値を求めた。SPAD値の計測は、中鉢ほか(1986)を参考にして、株中の草丈が最長となる茎の止葉の中央部において、中肋を挟む左右各2箇所(合計4箇所)を葉緑素計(SPAD-502, コニカミノルタ社)により計測した。2014年はSPAD値を計測しなかった。

表 1 調査水田の位置、土壌、生育時期の概要

水田 No.	調査年	緯度 (度)	経度 (度)	土壌群 [Ⓐ]	土性 [Ⓑ]	CEC (cmol kg ⁻¹)	移植日	出穂日	収穫日
1	2011-16	33.572	130.210	グライ土	LiC	18.5	6/22-24	8/26-9/2	10/2-9
2	2011-16	33.575	130.236	グライ土	CL	13.9	6/20-24	8/27-9/2	10/2-9
3	2011-16	33.547	130.199	グライ土	LiC	16.4	6/19-22	8/24-9/2	10/1-8
4	2011-12, 14-16	33.525	130.247	灰色低地土	CL	14.4	6/13-15	8/23-30	10/1-5
5	2011-16	33.552	130.174	グライ土	SL	7.2	6/24-25	8/27-9/5	10/2-12
6	2011-15	33.572	130.144	グライ土	CL	9.9	6/22-7/1	8/30-9/5	10/7-12
7	2012-16	33.500	130.196	灰色低地土	CL	15.6	6/22-28	8/25-9/3	10/1-11
8	2011-16	33.528	130.252	灰色低地土	CL	12.8	6/12-17	8/23-29	10/1-5
9	2012-16	33.513	130.180	グライ土	CL	13.0	6/15-23	8/25-9/5	10/1-10
10	2011, 13-16	33.576	130.236	グライ土	CL	12.8	6/20-23	8/27-9/2	10/2-9
11	2011-2016	33.562	130.222	グライ土	LiC	17.0	6/18-21	8/24-9/2	10/1-8
12	2012-14, 16	33.533	130.155	グライ土	SCL	11.4	6/24-26	8/25-9/1	10/1-8
13	2013-14	33.531	130.163	グライ土	LiC	12.4	6/20-25	8/27-9/2	10/4-8
14	2013-2016	33.614	130.167	グライ土	CL	12.8	6/13-23	8/24-9/4	10/2-10
15	2011-13, 16	33.570	130.142	グライ土	LiC	9.7	6/24-30	8/27-30	10/2-9
16	2012-13	33.567	130.206	灰色低地土	LiC	15.6	6/19	8/27-30	10/4-6
17	2013	33.578	130.219	グライ土	LiC	17.5	6/24	8/28	10/5
18	2012-14	33.544	130.240	灰色低地土	CL	15.0	6/19-20	8/27-9/2	10/3-8
19	2012-16	33.521	130.150	グライ土	L	10.6	6/20-24	8/25-31	10/1-6
20	2012-13	33.589	130.152	グライ土	SCL	10.4	6/19-23	8/29	10/3-5
21	2014-15	33.558	130.218	灰色低地土	LiC	13.4	6/23	9/1-2	10/8

[Ⓐ]土壌情報閲覧システム（現日本土壌インベントリー；農業環境技術研究所 2009）を参照。土壌群は農耕地土壌分類第 2 次案改訂版（農業技術研究所化学部土壌第 3 科 1983）による。[Ⓑ]SL は砂壤土、SCL は砂質埴壤土、L は埴土、CL は埴壤土、LiC は軽埴土。

表 2 堆肥施用の概要

水田 No.	資材 No. [Ⓐ]	施用日	乾物施用量 (kg/10a) [Ⓒ]
4	3	2011/6/11	200
6	4	2012/6/15	100
7	1, 2	6/5-6/17 [Ⓑ]	660-825
12	6, 7	6/10-22 [Ⓑ]	580-1173
15	3	6/13-15 [Ⓑ]	200
18	5	2013/6/12	1120

[Ⓐ]表 5 の資材 No.に対応。[Ⓑ]全調査年に施用。[Ⓒ]現物施用量にサンプリング測定した乾物率を乗じて算定した。乾物率を欠測した年は前年の値を代用した。

収量構成要素については、2011 年～2014 年は生育調査株 20 株の中から平均的な生育量の 10 株を手刈りして分析試料とした。試料は通風乾燥後、各株の穂数と 10 株の合計籾数を計測した。さらに、インペラ粳すり機 (FC2K, (株)大竹製作所)により粳すりした玄米を、1.85 mm の縦目篩にて選別し(食糧庁規格穀粒粒度選別機 (大型), (株)藤原製作所)、篩上の精玄米粒数を計測した。籾数と精玄米粒数の計測には、粒数検知器 (WAVER IC-0, アイデックス社)を用いた。続いて、精

玄米重を秤量し、試料の含水率を 135°C24 時間法(濱中 2020)により測定した。以上の測定結果から、籾数、登熟歩合および千粒重の収量構成要素を求めた。精玄米収量については、収量構成要素の値を用いて算定した。

2015 年と 2016 年は手刈りした合計 60 株の試料を用いて、楠田 (1995)が提案した方法により収量構成要素および精玄米収量を計測した。すなわち、精玄米収量は籾重換算で 1/2、籾数は 1/16 の縮分試料をそれぞれ用いて計測した。また、千粒重は約千粒の精玄米を計数・秤量し、千粒の重さに換算した。本計測は 2 回実施し、平均値を求めた。登熟歩合は、1/2 の縮分試料の精玄米重を千粒重で除して精玄米粒数を求めた後、籾数との比により求めた。

粳すり、篩選別、含水率の計測は他の調査年と同様の方法で行った。なお、楠田 (1995)の方法で得られる籾数、登熟歩合、千粒重の収量構成要素の積は、1/2 の縮分試料を用いて計測した精玄米収量と一致する。この一致が見られない場合は、収量構成要素と精玄米収量の変動は対応せず、収量構成要素の一つを収量予測モデルの説明変数にする場合に誤差が生じる。

表3 肥培管理の概要

水田 No.	基肥			追肥 1			追肥 2		
	施用日	窒素施用量 (kg/10a)	資材 No. ^[a]	施用日	窒素施用量 (kg/10a)	資材 No. ^[b]	施用日	窒素施用量 (kg/10a)	資材 No. ^[b]
1	6/6-15	4.5-5.4	2, 4	8/10-17	2-2.3, 4.5 ^[c] , ^[d]	3, 4, 8	8/18-22 ^[m]	1.8-2.4	2
2	6/9-14	4.8-6.4	6, 7	8/7-11	1.8-2.4, 4 ^[d]	1, 8	8/16-18 ^[n]	1.2-1.8	1, 4
3	6/19-22	7.2-8.8	3	—	—	—	—	—	—
4	6/7-12	1.2 ^[e] , 4.2-6.4	2, 6, 7	8/6-12	1.8-2, 4 ⁴⁾	1, 2, 8	8/12-14 ^[l]	1.2	1
5 ^[f]	6/8-14	6	9	8/10-16	2.2-2.4	1, 2	8/17-23	2.4	1, 2
6	6/16-7/1	2.4 ^[e] , 4-5	5, 11	8/9-20	1.5-2.4, 3.6 ^[c]	3, 5, 6	2012/8/18	1.8	6
7	—	—	—	2013/8/10	1.5	5	—	—	—
8	6/7-10	3.6, 4.2	2	8/4-10	1.8-2.4	1	8/11-17	1-1.8	1
9	6/15-23	6-9.2	8, 10, 12, 13	—	—	—	—	—	—
10	6/13-17	4.8-6	2	8/8-11	1.8	1	8/17-21	1.8	1
11	6/9-14	3.6, 6 ^[g]	4, 9	8/7-18	1.5-2.4	1, 2	8/16-26	1.2-1.8	1, 2
12	6/9-21	3-3.5	11	8/8-11 ^[j]	1.5-1.7	5	2012/8/17	0.7	5
13	6/20-25	4-4.5	11	8/12	1.5-2	5	8/19-20	1.5-1.7	5
14	6/9-13	6	2	7/30-8/12	1.8-2.4, 4 ^[d]	1, 8	8/10-19 ^[n]	1.8	1
15	—	—	—	8/6-8	1.2-1.8	2	8/11-13 ^[h]	1.2-1.8	2
16	6/7-11	10	13	8/6-9	1.5-1.8	1, 5	2013/8/14	1.8	1
17	6/17	4.5	11	8/10	2	5	—	—	—
18	6/12-20 ^[i]	6.4	7	8/6-9	1.8-2.4	1, 2	2013/8/15	1	1
19	6/13-17	4	11	8/7-17	1-1.5	5	8/10-13 ^[k]	0.5-1.2	5
20	6/19-23	4.8-5.6	7, 14	8/5-8	2.4	2	8/15-16	1.5-1.8	2
21	6/12-14	9.6	1, 3	—	—	—	—	—	—

^[a]表6の基肥用の資材No.に対応。^[b]表6の追肥用の資材No.に対応。^[c]右列の資材No.3の施用量。^[d]右列の資材No.8の施用量。^[e]堆肥を施用した年。^[f]7/4-7/5の期間に分げつ肥として追肥用の資材7を窒素換算で2.1 kg/10a施用。^[g]右列の資材No.9の施用量。^[h]2012年、^[i]2013年、^[j]2014年、^[k]2014年と2015年、^[l]2014年～2016年、^[m]2015年と2016年、^[n]2016年は施用無し。

2.2 無機態窒素の供給量の推定

無機態窒素の給源としては、土壌、堆肥、肥料を考慮した。土壌からの窒素の無機化量は、式(1)に示す反応速度論的方法(杉原ほか 1986)を用いて算定した。

$$N_t = N_0 \{1 - \exp(-k \cdot t)\} + B \quad (1)$$

ここで、 N_t : 任意の培養日数までの窒素無機化量 (mg/100g 乾土)、 N_0 : 反応前の可分解性有機態窒素量 (mg/100g 乾土)、 k : 無機化速度定数 (d^{-1})、 t : 基準温度変換日数 (d)、 B : 培養開始時の無機態窒素量 (mg/100g 乾土) である。 N_0 と k は、培養日数と無機化窒素量の関係に非線形最小二乗法を用いて(1)式をフィッティングすることにより推定した。また、(1)式中の基準温度変換日数は下式(2)により求めた(小林ほか 1997)。

$$t = \sum_{i=t_s}^{t_e} \exp \{E_a (T_i - T_s) / RT_i T_s\} \quad (2)$$

ここで、 i : 任意の日 (d)、 t_s と t_e は、それぞれ培養開始日 (d) および窒素無機化量の推定日 (d)、 E_a : 活性化エネルギー ($J \cdot mol^{-1}$)、 T_i : 絶対温度 (K)、 T_s : 基準絶対温度 (298 K)、 R : 気体定数 ($8.314 J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$) である。なお、 E_a は山本(1994)および東北地域土壌窒素無機化パタ

ーン研究グループ(1988)の報告を参考に、 $83,680 J \cdot mol^{-1}$ ($20,000 cal \cdot mol^{-1}$)を用いた(平井ほか 2017)。さらに、下式(3)を用いて土壌からの無機態窒素供給量 S_N (kg/10a)を推定した。

$$S_N = 10 S_b S_d N_t \quad (3)$$

ここで、 S_b は土壌の仮比重 ($1 kg \cdot L^{-1}$) (長谷川 1997)、 S_d は作土深 (0.1 m) である。作土深は、水稻のうわ根と玄米収量の相関が高いことと、土壌表面より深さ 0.1 m に分布する根群の割合が高いことから決定した(川田ほか 1978)。また、式(2)の t_e は移植日とした。

無機態窒素供給量の推定に際しては、精度を高めるために T_i に地温を用いるのが望ましい。一方、本研究で地温を実測したのは一部の調査水田だけである。そこで、2014 年および 2016 年の水稻生育期間において、それぞれ、3 水田および 12 水田の日平均地温とメッシュ農業気象データの日平均気温の差異を確認した。その結果、日レベルでは $-3.5 \sim 3.9 ^\circ C$ の差が見られたが、生育期間中の平均値の差は $-0.3 \sim 0.6 ^\circ C$ と比較的小さかった。このことから、本研究における全ての計算において、地温はメッシュ農業気象データの日平均気温を代用した。表

表 4 土壌からの無機態窒素供給量の推定に用いた

パラメータ			
水田 No.	N_0 (mg/100g 乾土)	k (d ⁻¹)	B (mg/100g 乾土)
1	5.28	0.0113	0.06
2	5.44	0.0118	0.06
3	9.50	0.0113	0.38
4	7.64	0.0111	0.07
5	1.91	0.0258	0.07
6	6.29	0.0093	0.09
7	4.90	0.0132	0.11
8	4.59	0.0103	0.10
9	3.63	0.0173	0.12
10	6.80	0.0082	0.13
11	4.83	0.0134	0.15
12	6.80	0.0094	0.11
13	4.30	0.0081	0.09
14	7.86	0.0058	0.08
15	9.50	0.0065	0.06
16	7.43	0.0132	0.10
17	10.17	0.0079	0.11
18	8.98	0.0095	0.18
19	2.37	0.0133	0.08
20	11.64	0.0080	0.11
21	9.83	0.0094	0.08

2014 年に採取した土壌の培養試験により推定。

4 に土壌からの無機態窒素供給量の推定に用いたパラメータを示した。同パラメータを全ての調査年における推定に用いた。

堆肥からの無機態窒素の供給量は、式(1)を用いて計算した。ただし、堆肥の場合は施用した堆肥の窒素量 100 mg 当たりの窒素無機化量を算定するため、 N_i 、 N_0 および B の単位が mg/100 mg 窒素となる。これを踏まえて、下式(4)により堆肥からの無機態窒素供給量 M_N (kg/10a) が算定される。

$$M_N = M_a R_N N_i \quad (4)$$

ここで、 M_a は堆肥の施用量 (kg/10a)、 R_N は堆肥乾物の

全窒素含量である。表 5 に堆肥からの無機態窒素供給量の推定に用いたパラメータを示す。全窒素含量は Khem *et al.* (2018) の手順により分析した。その他のパラメータについては有機質資材の有機態窒素の無機化特性値のデータ集の値を使用した(古江・上沢 2001)。

ただし、資材 No.6 と 7 の自給牛・鶏ふん混合堆肥については、主成分である牛ふん堆肥の値を使用した。また、式(2)の t_s は堆肥施用日とし、無機態窒素の供給量は施用当年に対してのみ考慮した。経年的な堆肥からの窒素無機化量は土壌からの無機化量に含まれると見なした。

肥料の窒素成分の溶出予測については、速効性、被覆および有機質部分に分けて計算した。表 6 に溶出予測に用いたパラメータを示す。速効性部分は肥料窒素溶出量の予測式を適用し(柴原ほか 2000)、下式(5)により求めた。

$$F_q = F_{aq} / \left\{ 1 + \exp \left(\lambda_q - k_q \sum_{i=t_a}^{t_s} T_i \right) \right\} \quad (5)$$

ここで、 F_q は速効性部分の窒素溶出量 (kg/10a)、 F_{aq} は速効性部分の窒素施用量 (kg/10a)、 λ_q (6.91) および k_q (0.173) は肥料溶出パターンの特徴を示すパラメータ、 t_a は肥料の施用日 (d)、 t_s は溶出量の推定日 (d) である。また、式(5)における T_i は日平均地温 (°C) であるが、本研究では日平均気温を代用した。さらに、式(5)の F_{aq} は下式(6)により算定した。

$$F_{aq} = F_a R_N R_q \quad (6)$$

ここで、 F_a は肥料の施用量 (kg/10a)、 R_N は肥料の全窒素含量、 R_q は全窒素に占める速効性部分の割合である。被覆部分はガウス補正法を含む反応速度論的解析(式(7))を用いた施肥改善支援システム「施肥名人 ver.3」により推定した(小林 2015)。

$$F_c = AF_{ac} \{ 1 - \exp(-k_c \cdot t_c) \} \quad (7)$$

表 5 堆肥からの無機態窒素供給量の推定に用いたパラメータ

資材 No.	名称	全窒素 $R_N^{[a]}$	$N_0^{[b]}$ (mg/100mg 窒素)	$k^{[b]}$ (d ⁻¹)	$E_a^{[b]}$ (J mol ⁻¹)	$B^{[b]}$ (mg/100mg 窒素)
1	自給鶏ふん堆肥 1	0.0275				
2	自給鶏ふん堆肥 2	0.0291	22.0	0.0203	84935	12.3
3	発酵鶏糞ハーベスト	0.0256				
4	有機発酵堆肥 エムソイル (豚ふん堆肥)	0.0377	11.9	0.0233	61086	2.7
5	自給牛ふん堆肥	0.0168				
6 ^[c]	自給牛・鶏ふん混合堆肥 1	0.0278	10.8	0.0065	108366	2.5
7 ^[c]	自給牛・鶏ふん混合堆肥 2	0.0250				

^[a]Khem *et al.* (2018) の手順により分析。^[b]古江・上沢 (2001) を参照。^[c]主成分である牛ふん堆肥の値を使用。

表 6 肥料の窒素成分の溶出予測に用いたパラメータ

資材 No.	名称	全窒素の割合 $R_N^{[a]}$	全窒素に占める割合 ^[a]			有機質の主原料 ^[a]
			速効性 R_q	被覆部 R_c	有機質 R_o	
基肥用						
1	一発 48(140 日タイプ)	0.16	0.5	0.5	—	—
2	糸島ハイライス 40	0.12	0.81	—	0.19	菜種油粕
3	糸島有機一発 120 タイプ	0.16	0.319	0.525	0.156	蒸製毛粉
4	塩加燐安 284	0.12	1	—	—	—
5	機械施肥専用 242	0.12	1	—	—	—
6	くみあい化成ベスト 444	0.14	1	—	—	—
7	くみあい尿素硫加燐安 48 号	0.16	1	—	—	—
8	水稻一発 200	0.20	0.49	0.51	—	—
9	石灰窒素	0.20	1	—	—	—
10	タキコート 2300-1	0.23	0.48	0.52	—	—
11	特栽専用(基肥)30	0.10	0.49	—	0.51	蒸製毛粉
12	被覆尿素入り 585 号	0.15	0.7	0.3	—	—
13	万年緩効性肥料 200 号	0.20	0.5	0.5	—	—
14	有機 10%入り AG 化成 1 号	0.14	0.96	—	0.039	菜種油粕
追肥用						
1	糸島ハイマート 50/追肥	0.12	0.733	—	0.267	菜種油粕
2	糸島ハイライス 50	0.12	0.748	—	0.252	菜種油粕
3	糸島有機穂肥一発 810	0.18	0.42	0.4	0.18	蒸製毛粉
4	NK-C3	0.18	1	—	—	—
5	特栽米用穂肥 糸島有機	0.1	0.49	—	0.51	蒸製毛粉
6	ビッグハーベイ MAM280 号	0.12	0.833	—	0.167	蒸製毛粉
7	硫安	0.21	1	—	—	—
8	ワンショット追肥エムコート 206	0.2	0.5	0.5	—	—

^[a]保証票より転記した。^[b]各割合は肥料メーカーに電話あるいは email により調査した(速効性のみの資材は除く)。ただし、基肥資材 No.1 は電話調査に基づき推定した値である。^[c]電話あるいは email により調査した。有機質由来の窒素の 50% 以上を占める原料である。

ここで、 F_c は被覆部分の窒素溶出量(kg/10a)、 F_{ac} は被覆部分の窒素施用量(kg/10a)、 A は F_{ac} の最大溶出率であり 1 を用いた。 k_c は溶出速度定数(d^{-1})、 t_c は基準温度変換日数であり、計算方法については小林ほか(1997)に詳しい。また、 F_{ac} は式(8)により計算される。

$$F_{ac} = F_a R_N R_c \quad (8)$$

ここで、 R_c は全窒素に占める被覆部分の割合である。表 7 に被覆部分を含む資材の溶出予測に用いた被覆肥料の特性を示す。

有機質部分からの無機態窒素の供給量は、堆肥の場合と同様に式(1)を用いて、下式(9)により計算した。ただし、 B の値は 0 とした。

$$F_o = F_a R_N R_o N_t \quad (9)$$

ここで、 F_o は有機質由来の無機態窒素供給量(kg/10a)、 R_o は全窒素に占める有機質部分の割合である。

表 8 に有機質部分からの無機態窒素供給量の推定に用いたパラメータを示す。今回使用した肥料(表 6)の有機質部分は、複数の材料が含まれていたが、窒素無機化量の推定においては 50%以上を占める主原料の値を使用した。

表 7 被覆肥料の特性

資材 No. ^[a]	シリーズ名	溶出タイプ	溶出 期間(日)	含有 割合 ^[b]
基肥 ^[c]				
1 ^[d]	LP コート S		60	0.2
	LP コート SS	シグモイド	100	0.2
	LP コート S		140	0.6
3	LP コート SS	シグモイド	100	0.5
	LP コート S		120	0.5
追肥				
3	セラコート R	シグモイド	30	1
8	エムコート L	リニア	30	1

^[a]表 6 の資材 No. に対応。^[b]全窒素換算の含有割合。^[c]基肥資材 No. 8, 10, 12, 13 の特性は入手できなかったため、資材 No. 3 の特性で代替した。^[d]聞き取り調査により推定した特性。

表 8 有機質部分からの無機態窒素供給量の推定に使用したパラメータ

材料	N_0 (mg/100mg 窒素)	k (d^{-1})	E_a (J mol ⁻¹)
菜種油粕 ^[a]	68.6	0.1435	56972
蒸製毛粉 ^[b]	72.9	0.14	62485

^[a]古江・上沢(2001)、^[b]大橋ほか(2017)

最終的に、幼穂形成始期から登熟終期の期間に土壌、堆肥、肥料から供給される無機態窒素を合計して、予測モデルの候補説明変数 N が下式(10)より算定される。

$$N = \Delta S_N + \Delta M_N + \Delta F_g + \Delta F_e + \Delta F_o \quad (10)$$

ここで、 Δ は登熟終期と幼穂形成始期までの無機態窒素の供給量の差分を示す。すなわち、式(2)、(5)の t_e を登熟終期あるいは幼穂形成始期として、同時期までの無機態窒素の供給量の差を求める。また、幼穂形成始期は出穂前 20 日、登熟後期は出穂後 30 日とした。以上の無機態窒素の供給量の計算は、被覆部分の窒素溶出量の計算を除き、VBA 言語により作成したオリジナルプログラムにより行った。

2.3 精玄米収量の予測モデル

説明変数の候補は、籾数/m²(以下、籾数)、出穂後 5 日から登熟後期までの日平均気温の平均値(以下、 T)および日平均日照時間(以下、 S)、幼穂形成始期から登熟後期までの無機態窒素の供給量(以下、 N)とした。

籾数は炭水化物の“いれ物”であり、収量の最大容量(収量キャパシティ)を定める(星川 1985)。また、栄養生長期の水稻の分けつ数や窒素吸収量の生育状態を包括的に反映する指標である。

T と S はデンプンの蓄積を通して登熟に影響を及ぼす因子であり、既報に倣い影響期間を決定した(田中ほか 2014)。 N は幼穂形成および登熟に必要な窒素栄養の供給量を反映する因子として考慮した。

収量予測モデルの作成には、学習型の 2 クラス判別器であり、多クラス判別に拡張できるサポートベクターマシンを用いた(Saruta *et al.* 2013)。モデル作成に先立ち、目的変数の精玄米収量を低、中、高の 3 クラスに分類した。各クラスの範囲は最小値から最大値の範囲を 3 等分して決定した。収量の予測に範囲を持たせることにより、各水田の代表点で収集したばらつきを伴うデータを用いても、説明変数とのロバストな関係を構築できると考えた。また、収量を 3 クラス、等間隔区間(元田ほか 2006)で分類した理由は、各クラスに少なすぎない事例数を確保し、作成モデルの予測精度の高めるためであった。表 9 に各収量クラスの範囲と各クラスに属する事例数を示した。全事例数は 90 であった。4 つの候補説明変数を全て組み合わせでモデルを作成し、正答率を 10 分割のクロスバリデーションにより評価した。さらに、最も正答率が高い予測モデルを用いて各収量クラスを達成する説明変数の条件を可視化した。予測モデルの作成と評価、予測モデルを用いた解析は、Visual Basic 言語により作成したオリジナルプログラムにより行った。

表 9 精玄米収量のクラスと値の範囲

クラス	値の範囲 (kg/10a)	事例数
低	265–359	15
中	359–453	41
高	453–547	34

3. 結果

3.1 解析に用いたデータの概要

表 10 に気象、生育、収量および収量構成要素の調査データを、表 11 に幼穂形成期から登熟後期までの無機態窒素供給量(N)およびその内訳をまとめた。収量予測モデルの作成に使用した候補説明変数の値の範囲は、籾数が 17772–33009 m²(平均:25175 m²)、 T が 21.2–24.9 °C(平均:23.6 °C)、 S が 3–8.1 h(平均:5.2 h)、 N が 1.4–8.3 kg/10a(平均:4.0 kg/10a)であった。また、目的変数である精玄米収量の範囲は、265–547 kg/10a(平均:423 kg/10a)であった。

収量構成要素の一つである籾数/m²は精玄米収量との相関で高かった($r=0.675$, $p<0.01$)。また、籾数/m²は穂数/m²と 1 穂数/m²の積であることから、それぞれとの相関は $r=0.596$ ($p<0.01$)、 $r=0.403$ ($p<0.01$)と有意であった。さらに、穂数/m²は幼穂分化期の茎数(本/m²)と相関が高かった($r=0.783$, $p<0.01$)。

T は各調査年の平均が 24 °C 前後の年が多かったが、2014 年が 22.7 °C、2015 年が 22.2 °C と低かった。 S は多照であった 2013 年の平均が 6.8 h、寡照の 2016 年の平均が 3.5 h と調査年による違いが大きかった。 N の範囲が大きかったのは肥料由来の無機態窒素供給量の違いによるものであり、No.7 および No.19 の水田は施肥量が少なく、 N の値が特に小さかった。

その他の調査データの特徴として、登熟中期の SPAD 値は 27.7–43.8 と範囲が広く、調査水田間の違いが大きかった。登熟歩合の範囲は 0.59–0.91 であった。各調査年の平均値は 0.8 前後であるが、2014 年が 0.73、2016 年が 0.71 と低かった。千粒重の範囲は、20.1–23.3 g であった。各調査年の平均値は 22 g 程度であったが、2011 年が 21.5 g、2016 年が 21.3 g と小さい傾向であった。

3.2 精玄米収量予測モデルの正答率

表 12 に精玄米収量予測モデルの正答率を示す。説明変数が籾数のみのモデル No.1 でも正答率が 64.4%と比較的高かった。また、説明変数として籾数に S あるいは N を追加した No.6 および No.7 の正答率 68.9%であ

表 10 気象、生育、収量および収量構成要素の調査データ

水田 No.	$T^{[a]}$ (°C)	$S^{[b]}$ (h)	茎数 ^[c] (m^{-2})	登熟中期 SPAD ^[d]	穂数 (m^{-2})	1 穂粒数 (粒)	粒数 (m^{-2})	登熟 歩合	千粒重 (g)	収量 ^[e] (kg/10a)
1	22.2–24.3	3.8–6.9	291–483	36.1–37.1	280–405	59–81	22537–28922	0.79–0.90	22.1–23	419–547
2	22.7–24.7	3.6–7.6	302–493	32.8–37.3	308–422	64–86	22160–30029	0.61–0.82	20.8–23.2	337–545
3	22.5–24.7	3.3–6.5	315–475	34.1–38.5	355–423	59–73	24139–28257	0.67–0.91	20.8–22.8	373–478
4	22–24.5	3–5.4	318–428	31.3–38.5	335–379	74–82	25394–28002	0.69–0.85	21.6–22.7	416–494
5	22.1–24.4	3.7–7.8	261–441	36.4–43.8	320–401	66–86	23083–29948	0.73–0.83	21.8–22.9	397–492
6	22.1–24.3	4.7–8.1	307–454	30.1–35.2	282–376	59–86	21058–30377	0.74–0.86	20.1–22.5	334–502
7	21.2–23.5	3.2–6.8	286–424	31.5–37.2	306–387	63–85	22788–25862	0.59–0.76	20.6–21.6	278–397
8	22.1–24.5	3.3–5.9	290–395	27.7–35.5	303–359	64–79	20116–25353	0.77–0.86	21.4–23.1	356–461
9	22–24.3	3.3–6	329–577	30.8–33.7	324–436	58–84	19827–30239	0.67–0.8	20.5–22.4	292–444
10	22.2–24.4	3.6–6.9	224–403	32.7–36.4	224–323	73–84	17772–27175	0.7–0.86	20.9–22.7	265–467
11	22.6–24.8	3.3–6.3	303–431	34.4–38.8	297–392	71–91	22488–28469	0.72–0.87	20.5–23	336–522
12	22.8–24.3	3.6–6.8	325–472	29.9–37.8	314–430	65–82	20600–28981	0.66–0.78	20.6–22.3	280–478
13	22.9–24.6	5.2–6.3	346–402	31.9	312–350	74–76	23672–26036	0.79–0.84	22.5–22.9	428–494
14	22.6–24.9	3.9–6.8	327–478	29.4–33	314–461	63–68	21204–31435	0.63–0.7	20.6–21.5	276–458
15	23.6–24.3	3.8–7.3	351–454	33.2–36.1	337–394	58–74	22698–28892	0.74–0.88	21.1–23.2	384–470
16	23.6–24.3	5–6.6	392–458	31.1–35.3	353–356	56–73	19784–25870	0.74–0.77	21–22.9	307–454
17	24.3	6.9	415	32.5	355	73	26004	0.83	22.7	492
18	22.7–24.4	4.7–6.3	353–432	31.2–34.7	314–406	69–77	24113–27989	0.66–0.81	21.2–22.9	392–447
19	22.5–24.6	3.6–6.5	273–359	35–39.7	278–345	65–87	20643–26705	0.64–0.82	21.3–23.3	298–438
20	24–24.4	5.2–7.7	396–418	31.2–32.7	375–376	72	27109–27166	0.68–0.82	21.5–22.5	395–500
21	22.1–22.7	4.3–5.3	383–437	37	367–369	68–89	25155–33009	0.65–0.73	21.7–22	401–466
全体	21.2–24.9	3–8.1	224–577	27.7–43.8	224–461	56–91	17772–33009	0.59–0.91	20.1–23.3	265–547
平均	23.6	5.2	377	34.6	348	73	25175	0.77	21.9	423

^[a] T は出穂後 5～30 日の日平均気温の平均値、^[b] S は出穂後 5～30 日の日平均日照時間。^[c]幼穂分化期に計測。^[d]2014 年は未計測。^[e]精玄米収量。

り、No.1 のモデルに比べて僅かに向上した。一方、粒数、 S 、 N を考慮した 3 説明変数のモデル No.13 の正答率は最大の 77.8%であり、No.1 に比べて約 13%向上した。また、同モデルにおいて、低収量を中収量、中収量を高収量、高収量を中収量のクラスに誤分類した割合が、それぞれ 7%、9%、7%であった。4 説明変数の No.15 のモデルの正答率は 76.7%であり No.13 より僅かに低かった。

3.3 各収量クラスを達成する説明変数条件の可視化

正答率が最大の予測モデル No.13 を用いて、低・中・高の各収量クラスを達成する説明変数の領域を可視化した(図 1)。横軸に粒数、縦軸に N 、奥行き方向の第 3 軸に S を取った。また、作図に際しては、第 3 軸の S の最小値(3 h)と最大値(8.1 h)の区間を 5 等分し、両端面を含めて 6 断面($S=3, 4.02, 5.04, 6.06, 7.08, 8.1$ h)の平面の可視化結果を示した。さらに、実測値を S の条件が最も近い断面にプロットした。

全体的に粒数の増加とともに収量のクラスが低から中、

高(グレーの色が薄い領域から濃い領域)へ移行した。また、 S が大きくなると、低と中のクラスの境界の粒数が少なくなる傾向であった。具体的には、 $S=3$ h(図 1(a))では粒数 2.4 万 m^{-2} 付近に低と中の境界があるが、 $S=4.02$ h(図 1(b))では 2.2 万 m^{-2} 、 $S=5.04$ h(図 1(c))で 2 万 m^{-2} 付近に減少した。窒素供給については、中と高のクラスの境界が粒数の増加とともに減少した(図 1(c)–(e))。例えば、 $S=5.04$ h(図 1(c))の 2.5 万 m^{-2} 付近では、 $N=5$ kg/10a 程度で境界が引かれたが、2.8 万 m^{-2} 付近では、 $N=3$ kg/10a 程度まで境界が下がった。

一方、 $S=4.02$ h(図 1(b))においては、3 変数により中と高のクラスの分離する境界が作成できず、高収量の 5 事例全てが中収量領域に確認され、誤答となった。さらに、 $S=3$ h(図 1(a))においては、高収量の事例は無いが、 $S=4.02$ h(図 1(b))の中および高収量事例により作成された境界が延長して、高収量の領域が形成された。 $S=8.1$ h(図 1(f))についても同様に、中収量の事例は無いが、 $S=7.08$ h(図 1(e))の事例により作成された境界が延長して中収量の領域が形成された。

表 11 幼穂形成始期から登熟後期までの無機態窒素供給量およびその内訳

水田 No.	$N^{[a]}$	$\Delta S_N^{[b]}$	$\Delta M_N^{[c]}$	$\Delta F_q^{[d]}$	$\Delta F_c^{[e]}$	$\Delta F_o^{[f]}$	堆肥と肥料由来 ^[g]
1	4.8-5.8	1.1-1.4	0	2.3-4.4	1.4 ^[i] , 2.1 ^[m]	0.1-0.2	4.8-5.8
2	3.1-5.3	1.2-1.3	0	1.6-3.3	1.9 ^[m]	0.1-0.4	1.9-3.9
3	4.6-5.6	2-2.5	0	0	2.6-3.3	0	2.6-3.3
4	2-5.8	1.6-1.9	0.2 ^[j]	0.3-2.6	1.9 ^[m]	0.1-0.4	0.4-3.9
5	4.5-4.8	0.2-0.4	0	3.8-4.1	0	0.3-0.4	4.2-4.4
6	2.6-5.3	1.3-1.5	0.1 ^[j]	0.9-3.6	1.2 ^[j]	0.1-0.4	1.3-3.9
7	1.8-2.9	1-1.3	0.6-1.2	0.8 ^[k]	0	0.3	0.6-1.8
8	2.4-4.8	0.9-1.1	0	1.1-3.3	0	0.3-0.4	1.4-3.6
9	2.1-4.1	0.7-0.8	0	0	1.3-3.3	0	1.3-3.3
10	3.4-4.9	1.3-1.6	0	1.8-2.9	0	0.3-0.4	2.1-3.3
11	3.6-4.9	1-1.2	0	2.1-3.5	0	0.3-0.4	2.5-3.9
12	1.7-4.3	1.4-1.8	0.3-0.7	0.9-1.2	0	0.4-0.7	0.3-2.7
13	3.3-4.2	0.8-1	0	1.8-2.4	0	0.7	2.5-3.2
14	3-5.6	1.3-1.6	0	1.5-2	1.9 ^[m]	0.2-0.3	1.7-3.9
15	2.3-5.1	1.9-2.1	0.2	0.1 ^[j] , 1-2.4	0	0.1-0.3	0.4-3.0
16	5.1-8.3	1.7	0	0.1 ^[j] , 2.9	3.2-3.3	0.2-0.4	3.5-6.6
17	4 ^[j]	2.3	0	1.4	0	0.4	1.7 ^[j]
18	2-4.8	1.8-2.1	0.4 ^[k]	0.2-2	0	0.1-0.3	0.3-2.7
19	1.4-2.9	0.5-0.6	0	0.1-1.6	0	0.4-0.6	0.8-2.3
20	4.1-6.1	2.6	0	1.3-3.2	0	0.3	1.6-3.5
21	4.4-5.2	2	0	0	2.4-3.2	0	2.4-3.2
全体	1.4-8.3	0.2-2.6	0.1-1.2	0.1-4.4	1.2-3.3	0.1-0.7	0.3-6.6
平均	4	1.3	0.5	2.2	2.5	0.3	2.7

^[a] N は幼穂形成始期から登熟後期までの無機態窒素供給量、^[b] Δ は登熟後期と幼穂形成始期までの無機態窒素の供給量の差分を意味する。^[c] S_N 、^[d] M_N は、それぞれ土壌および堆肥からの無機態窒素供給量。^[e] F_q 、^[f] F_c は、それぞれ肥料中の速効性および被覆部分の窒素溶出量。^[g] F_o は肥料中の有機質由来の無機態窒素供給量。^[h]堆肥と肥料由来は、土壌を考慮しない無機態窒素供給量であり、 ΔM_N 、 ΔF_q 、 ΔF_c 、 ΔF_o の総和。窒素量の単位は全て kg/10a である。^[i]各内訳を小数点第 1 位に丸めたため合計が一致していない。^[j]2011 年、^[k]2012 年、^[l]2013 年、^[m]2015 年、^[n]2016 年。

表 12 精玄米収量予測モデルの正答率

モデル No.	説明変数				正答率 (%)
	籾数	T	S	N	
1	○				64.4
2		○			47.8
3			○		46.7
4				○	46.7
5	○	○			55.6
6	○		○		68.9
7	○			○	68.9
8		○	○		50.0
9		○		○	52.2
10			○	○	54.4
11	○	○	○		67.8
12	○	○		○	65.5
13	○		○	○	77.8
14		○	○	○	51.1
15	○	○	○	○	76.7

○は予測モデルの説明変数として選択したことを意味する。 T および S は、それぞれ出穂後 5 日から登熟後期までの日平均気温の平均値および日平均日照時間、 N : 幼穂形成始期から登熟後期までの無機態窒素の供給量。

4. 考察

収量予測モデルにおいて正答率の向上に最も寄与した変数は籾数であり、モデル No.1 の正答率は 64.4%であった(表 12)。このことは、調査地域の収量クラスが主に収量キャパシティ(籾数/m²)の影響を受けていることを示す。籾数/m²は穂数/m²との相関が $r=0.596$ ($p<0.01$) と比較的高い。また、穂数/m²は幼穂分化期の茎数(本/m²)と相関が高く($r=0.783$, $p<0.01$)、低収量クラスの水田では幼穂分化期の茎数が特に少なかった。モデルにより正しく収量クラスが予測され、収量の制限因子が籾数と示唆された事例について幼穂分化期の茎数を調べたところ、低が 317 本/m² ($r=11$)、中が 374 本/m² ($r=33$)、高が 405 本/m² ($r=28$)であった。このことから、籾数が少なく低収量を招いた水田については、栄養生長期の茎数確保が収量改善策として挙げられる。茎数確保の対策については、個々の水田について、無機態窒素の供給量、水管理、気象条件、水温等の面から茎数抑制の理由を特定した上で、提案する必要がある。また、籾数と 1 穂籾数の相関が $r=0.403$ ($p<0.01$) と有意であることから、1 穂

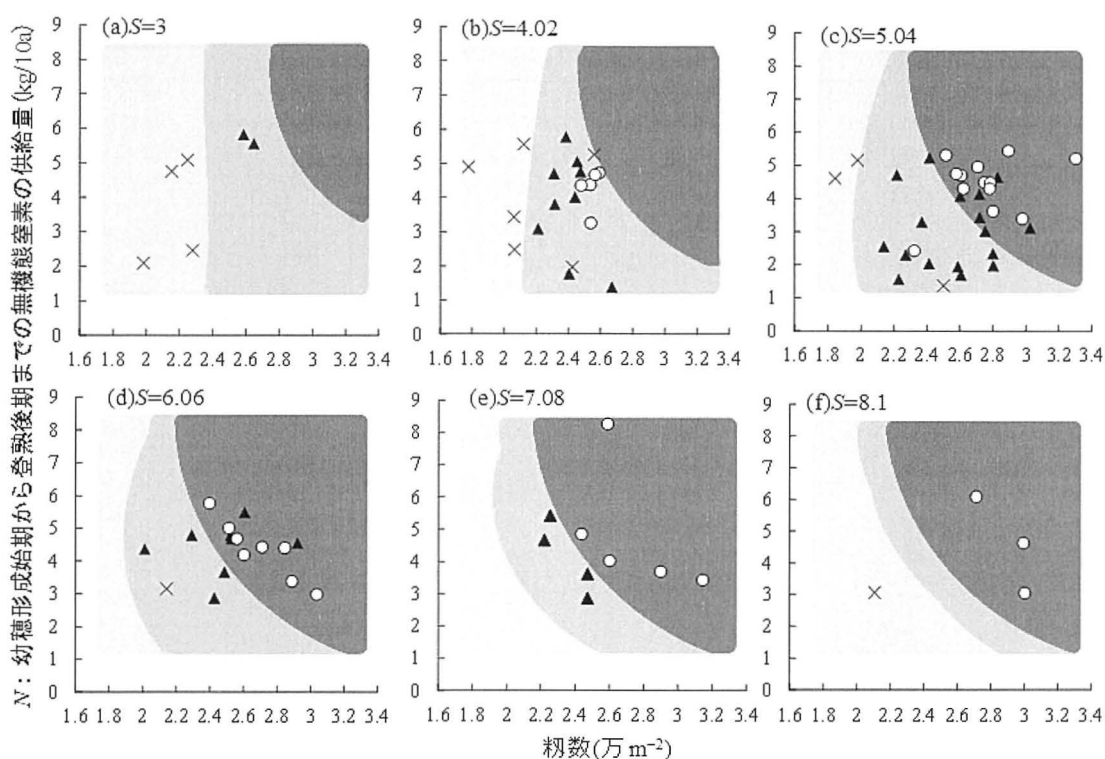


図1 予測モデルによる各収量クラスに対応する説明変数領域の可視化結果

S は出穂後5日から登熟後期までの日平均日照時間(h)。図中の、 $\square$ 、 $\blacksquare$ 、 $\blacksquare$ の領域は、それぞれ、予測モデルにより可視化した低、中、高収量クラスの領域。 $\times$ 、 $\blacktriangle$ 、 $\circ$ はそれぞれ、低、中、高収量クラスの実測値であり、 S の条件が最も近い断面にプロットした。

粒数の増加により粒数を確保することも考えられる。和田(1969)は、分化1穂穎花数は穎花分化終期の1穂当たりの窒素吸収量と高い正の相関($r=0.93$, $p<0.001$)があると報告している。したがって、1穂粒数の増加を図る場合には、穂数の水準に応じて供給する無機態窒素量を調整する必要がある。

S が大きくなると、低と中収量クラスの境界の粒数が少なくなった点については(図1(a)-(c))、日照時間の増加により登熟が良好になり、少ない粒数で中収量のクラスになったと解釈される。実際、2.2万 m^{-2} 付近において、 $S=3$ h(図1(a))では低収量の領域であるが、 $S=4.02$ h(図1(b))および $S=5.04$ h(図1(c))では登熟歩合および/または千粒重の増加により中収量の領域となっている。したがって、収量クラスが高いのに粒数が少ない場合には、千粒重と登熟歩合のいずれかが必ず大きくなることになる。具体的に2.2万 m^{-2} 付近の登熟歩合と千粒重の平均値は、それぞれ $S=3$ hが0.69、20.9 g(低収量クラス:3事例)、 $S=4.02$ hが0.8、22.4 g(中収量クラス:1事例)、 $S=5.04$ hが0.82、22.2 g(中収量クラス:4事例)であった。

さらに、 N を考慮したことにより類似の粒数レベルで中

と高収量クラスを分類することが可能になり、正答率が向上した。 $S=5.04$ h(図1(c))の粒数が約2.6万~2.8万 m^{-2} の範囲において $N=3\sim 4$ kg/10aを境界として中と高収量クラスの領域に分かれている。本結果は、無機態窒素の供給が不足すると、葉身窒素濃度の減少により光合成速度が低下し、登熟歩合あるいは千粒重が小さくなり収量クラスが高から中に下がったことを示唆する。葉身窒素濃度は光合成速度と高い正の相関がある(Yoshida and Coronel 1976)。また、葉身窒素濃度はSPAD値と高い正の相関がある(中鉢 1986, Peng *et al.* 1993)。そこで、中と高収量クラスの登熟中期(出穂後20日頃)のSPAD値を比較した。このとき、比較に使用した事例は予測モデルにより正答が得られたものである。さらに、粒数と日照時間の影響を低減するために、粒数と日照時間が類似の事例間でSPAD値を比較した(図2)。その結果、概ね高収量クラスのSPAD値が大きく、無機態窒素の供給量が登熟の良否に影響したことが示唆された。

一方、粒数が増加すると中と高収量クラスの N の境界が下がった点については(図1(c)-(e))、粒数が多い高収量クラスの事例に窒素供給量が少なかった事例が含ま

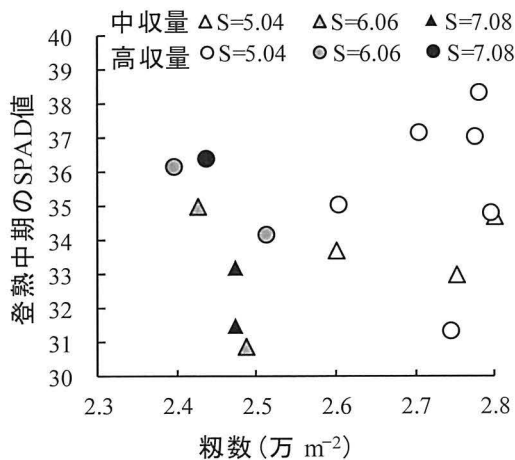


図2 中・高収量クラスの登熟中期のSPAD値の比較
図中のSは出穂後5日から登熟後期までの日平均日照時間(h)。グラフ作成に使用した事例は予測モデルにより正答が得られたものである。

れることを意味する。穂肥窒素は葉の光合成能力を維持し、収量の増加に効果がある(星川 1985)。このことから、収量の水準に対して窒素供給量が不足すると登熟不良を招き、収量低下につながると考えられる。収量が2.8万 m^2 以上の高収量クラスは正答が10事例見られたが、2事例が約545 kg/10aであり、残り8事例が458 kg/10a～502 kg/10aの範囲であった。この収量水準は、収量が3万～3.2万 m^2 におけるヒノヒカリの目標収量570～600 kg/10a(真鍋ほか 1990)、登熟期の高温化による外観品質の低下を抑える適正収量2.8万 m^2 前後における目標収量530～540 kg/10a(宮崎ほか 2012)に比べて小さく、窒素供給量不足と判断された。なお、収量水準の低かった8事例の土壌からの供給を除く、幼穂形成始期から登熟終期の期間の無機態窒素の供給量の平均は2.4 kg/10aであった。この供給量は、福岡県水稻・麦類施肥基準(水田ほか 2018)による穂肥の基準2～2.5 kg/10a(地力低～中庸、穂肥1回)と同等ではあったが、JA糸島および福岡普及指導センターによる調査地域の施肥基準の穂肥2回で窒素施用量3.6 kg/10aより少ない。福岡県の施肥基準は玄米タンパクに配慮しているため、収量を優先する場合は窒素供給量が不足することになる。

続いて、 $S=5.04$ h(図1(c))の収量が約2.6万～2.8万 m^2 の範囲において、中と高収量クラスを分けたNの値に影響する肥培管理について考察する。この条件に該当する高収量クラスの8つの正答事例の内、7事例が調査地域で推奨される2回の追肥が励行されており、残り

の1事例も追肥の一発タイプにより高収量クラスを満たすNが供給されていた。この時の土壌からの供給を除く、幼穂形成始期から登熟終期の期間の無機態窒素の供給量の平均は3.2 kg/10aであった。これは、真鍋ほか(1990)のヒノヒカリの栽培指針による穂肥3.5 kg/10a(1回目2 kg/10a, 2回目1.5 kg/10a)および調査地域の施肥基準の3.6 kg/10aに近い値である。ただし、真鍋ほか(1990)の収数の目標値は3万～3.2万 m^2 であることから、地域の施肥基準は地力、保肥力および収数水準等を考慮して調整された値と推察される。一方、中収量クラスの6事例においては、1事例のみが2回の追肥を実施し、2事例が1回の追肥、2事例が堆肥施用のみの追肥無し、1事例が基肥一発の追肥無しであり、土壌からの供給を除く無機態窒素の供給量の平均は1.2 kg/10aと少なかった。

以上より、調査地域において収量を改善するための指針としては、特に低収量クラスの水田において栄養生長期の茎数増加による収数の確保が挙げられる。また、登熟期の窒素供給不足が制限因子になっている水田では、追肥を2回に分施し、地域の施肥基準の窒素量3.6 kg/10a程度を施用することが挙げられる。分施については、真鍋ほか(1990)がヒノヒカリの収量の安定確保のために重要な点として挙げている。今回の調査では事例が少なく検証を要するが、追肥の一発を代用することも考えられる。さらに、収量が2.8万 m^2 以上の水田においては、窒素供給量不足が収量の制限因子になっていることから、2回分施の穂肥により窒素施用量を地域の施肥基準まで増加することが対策として挙げられる。

Roel *et al.* (2007)の生産現場のデータに基づく解析では、コメの収量に影響を与える因子として肥培管理を特定するに止まったが、本研究では定量的な指針を提示した。この指針は、地域の栽培試験や現場の試行錯誤により決定された施肥基準に沿うものであり新規性はないが、生産現場の調査事例に基づく解析が、同基準を支持した点に価値があると考えられる。

最後に、今回作成したモデルにより正答が得られなかった事例は、受光態勢、根の活性、病虫害などの因子が登熟に影響を与えた可能性がある(後藤ほか 2000)。これらの因子を考慮することにより、より詳細な収量決定因子の解析が可能になると考えられる。また、モデルにより作成された収量クラスに対応する説明変数の領域の中には調査事例を含まないものがあつた。これについては、事例の蓄積により、その妥当性を検証する必要がある。本研究では調査事例数に限りがあり、比較的範囲の広い3クラスの収量水準に対応する決定因子を解析した。

大量の事例が利用可能な状況であれば、多段階の収量クラスに対応する因子の条件が解析できると考える。さらに、本研究では収量クラスに対応する籾数および幼穂形成始期から登熟後期までの窒素供給の条件を明らかにしたが、今後の課題として栄養生長期の因子に注目した籾数制御に資する予測モデルを構築する必要がある。

5. まとめ

本研究の目的は、(1)生産現場で収集したデータを用いて精玄米収量予測モデルを作成すること、(2)収量予測モデルを用いて収量の制限因子を明らかにすること、さらに(3)収量の改善指針を検討することであった。得られた結果は以下の通りである。

- 1) 籾数、出穂後 5 日から登熟後期までの日平均日照時間、および幼穂形成始期から登熟後期までの無機態窒素の供給量を説明変数とする、低・中・高の収量クラス予測モデルを作成し、77.8%の正答率が得られた。
- 2) 低収量クラスの水田では、特に幼穂分化期の茎数が少なく、籾数が収量の制限因子となった。また、中収量クラス、および高収量クラスの籾数が 2.8 万 m^{-2} 以上の事例において、登熟期の無機態窒素の供給量不足が収量の制限因子になった水田が確認された。
- 3) 収量改善の指針として、低収量クラスの水田において栄養生長期の茎数増加による籾数の確保が、登熟期の窒素供給不足が制限因子になった中収量クラス、および高収量クラスの籾数が 2.8 万 m^{-2} 以上の水田では、追肥を 2 回に分散し、調査地域の施肥基準の窒素量 3.6 kg/10a 程度を施用することが挙げられる。この追肥の指針は、生産現場の調査事例に基づく解析が、地域の栽培試験や現場の試行錯誤により決定された基準を支持したことを意味する。

謝辞

本研究を遂行するに当たり、糸島稲作経営研究会の生産者、JA 糸島の職員各位に大変お世話になりました。ここに記して感謝の意を表します。本研究は JSPS 科研費 JP15K07678 の助成を受けたものである。

引用文献

中鉢富夫・浅野岩夫・及川勉, 1986, 葉緑素計による水稻(ササニシキ)の窒素栄養診断, 日本土壌肥科学雑誌, Vol. 57, pp. 190-193.

古江広治・上沢正志, 2001, 反応速度論的手法での土壌および有機質資材の有機態窒素の無機化特性値データ集 -アンケート調査とりまとめ-, 農業研究センター研究資料, Vol. 43, pp. 1-50.

後藤雄佐・新田洋司・中村聡, 2000, 7. 葉の受光体制, 7. 登熟期の管理, 後藤雄佐・新田洋司・中村聡:作物 I [稲作], 全国農業改良普及支援協会, 東京, pp. 8-9, 135.

濱中大介, 2020, 1.5.1 水分特性, 農業食料工学会編: 農業食料工学ハンドブック, コロナ社, 東京, pp. 283.

長谷川周一, 1997, 第 II 章 土壌物理 1. 三相分布, 土壌環境分析法編集委員会編:土壌環境分析法, 博友社, 東京, pp. 21-24.

平井康丸・岩坂宗一郎・山川武夫・森裕樹・和田信一郎・井上英二・岡安崇史・光岡宗司, 2017, 水田土壌の可分解性有機態窒素量および無機化速度定数と理化学性の相関関係, 九州大学大学院農学研究院学芸雑誌, Vol. 72, pp. 47-52.

星川清親, 1985, (5)収量の生産過程, 星川清親:新編食用作物, 養賢堂, 東京, pp. 91-95.

川田信一郎・副島増夫・山崎耕宇, 1978, 水稻における“うわ根”の形成量と玄米収量との関係, 日本作物学会紀事, Vol. 47, pp. 617-628.

Khem, B., Hirai, Y., Yamakawa, T., Mori, Y., Inoue, E., Okayasu, T., and Mitsuoka, M., 2018, Effects of different application methods of fertilizer and manure on soil chemical properties and yield in whole crop rice cultivation. *Soil Science and Plant Nutrition*, Vol. 64, pp. 406-414.

小林新・藤澤英司・久保省三・羽生友治, 1997, ガウス補正法による溶出モデル式の改良, 日本土壌肥科学雑誌, Vol. 68, pp. 487-492.

小林新, 2015, 樹脂系被覆肥料による革新的な施肥技術の開発と今後の展望:6. 樹脂系被覆肥料に期待される新たな機能と施肥技術への展望, 日本土壌肥科学雑誌, Vol. 86, pp. 563-572.

楠田宰, 1995, 水稻の収量及び収量構成要素の調査方法について, 植調, Vol. 29, No. 4, pp. 3-9.

真鍋尚義・田中浩平・福島裕助, 1990, 水稻品種ヒノカリの栽培法, 福岡県農業総合試験場研究報告, Vol. A-10, pp. 5-10.

松江勇次, 2012, 序, 松江勇次:作物生産からみた米の食味学, 養賢堂, 東京, 序 pp. 1.

宮地克嘉・長網宏尚・京田成博, 2014, 営農支援システム「クボタスマートアグリシステム(KSAS)」の開発, 農

- 業食料工学会誌, Vol. 76, pp. 284-288.
- 宮崎真行・荒木雅登・岩渕哲也・内川修・平田朋也, 2012, 温暖化に対応した「ヒノヒカリ」の高品質安定栽培技術 第 1 報 高温登熟条件下における外観品質からみた適正粒数の検討, 日本作物学会九州支部会報, Vol. 78, pp. 1-4.
- 水田一枝・内川修・石丸知道・荒木雅登・真鍋泰之・佐藤大和・満田幸恵・高原章二, 告舞, 2018, 3 本田施肥, 福岡県農林水産部経営支援技術課:福岡県水稻・麦類施肥基準, 福岡, p. 8.
- 森田敏, 2011, はじめに, 森田敏:イネの高温障害と対策—登熟不良の仕組みと防ぎ方—, 農山漁村文化協会, 東京, pp. 1-2.
- 元田浩・津本周作・山口高平・沼尾正行, 2006, 2. 各属性単独の離散化手法, 情報処理学会編:データマイニングの基礎, オーム社, 東京, pp. 125.
- 農業技術研究所化学部土壌第 3 科, 1983, 農耕地土壌の分類—土壌統の設定基準および土壌統一覧表—第 2 次案改訂版, 農業技術研究所, つくば.
- 農業環境技術研究所, 2009, 土壌情報閲覧システム. In <https://soil-inventory.rad.naro.go.jp/>, 農業環境技術研究所, つくば.
- 大橋祥範・日置雅之・糟谷真宏, 2017, 愛知県内で流通する 12 種の有機質肥料からの窒素無機化量の推定, 愛知県農業総合試験場研究報告, Vol. 49, pp. 1-8.
- 大野宏之, 2014, メッシュ農業気象データ利用マニュアル, 中央農業総合研究センター研究資料, Vol. 9, pp. 1-77.
- Peng, S., Garcia, F. V., Laza, R. C., and Cassman, K. G., 1993, Adjustment for specific leaf weight improves chlorophyll meter's estimate of rice leaf nitrogen concentration. *Agronomy Journal*, Vol. 85, pp. 987-990.
- Roel, A., Firpo, H., and Plant, R. E., 2007, Why do some farmers get higher yields? Multivariate analysis of a group of Uruguayan rice farmers. *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 58, pp. 78-92.
- Saruta, K., Hirai, Y., Tanaka, K., Inoue, E., Okayasu, T., and Mitsuoka, M., 2013, Predictive models for yield and protein content of brown rice using support vector machine. *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 99, pp. 93-100.
- 柴原藤善・武久邦彦・長谷川清善, 2000, 水稻窒素収量の簡易予測モデルと施肥診断システムの開発, 日本土壌肥科学雑誌, Vol. 71, pp. 898-902.
- 杉原進・金野隆光・石井和夫, 1986, 土壌中における有機態窒素無機化の反応速度論的解析法, 農業環境技術研究所報告, Vol. 1, pp. 127-166.
- 高橋彩子・佐藤久美・梅本英之・堂本晶子・松森信・金田吉弘・伊藤豊彰・藤井弘志, 2015, 水田土壌の地力低下の実態とその対策, 日本土壌肥科学雑誌, Vol. 86, pp. 332-338.
- 田中恒大・平井康丸・猿田恵輔・井上英二・岡安崇史・光岡宗司, 2014, 水稻の収量・品質決定要因解析としての回帰木の適用, 日本作物学会紀事, Vol. 83, pp. 143-154.
- 東北地域土壌窒素無機化パターン研究グループ, 1988, 東北地域における土壌窒素無機化パターンのモデル化とその活用技術の現状, 農業技術, Vol. 43, pp. 161-164.
- 和田源七, 1969, 水稻収量成立におよぼす窒素栄養の影響—とくに収穫期以後の窒素の重要性について—, 農業技術研究所報告, A16, pp. 27-167.
- 山本富三, 1994, 暖地水田土壌における地力窒素発現量の解析と水稻施肥技術への適用, 日本作物学会紀事, Vol. 63, pp. 549-553.
- Yoshida, S., and Coronel, V., 1976, Nitrogen nutrition, leaf resistance, and leaf photosynthetic rate of the rice plant. *Soil Science and Plant Nutrition*, Vol. 22, pp. 207-211.
- Yoshida, H., Takehisa, K., Kojima, T., Ohno, H., Sasaki, K., and Nakagawa, H., 2016, Modeling the effects of N application on growth, yield and plant properties associated with the occurrence of chalky grains of rice. *Plant Production Science*, Vol. 19, pp. 30-42.

Contributed paper

Building of the Predictive Model for Ripened Brown Rice Yield Using Data Collected in the Production Sites and Analysis of Determinants of Yield Classes

Yasumaru HIRAI¹⁾, Takeo YAMAKAWA¹⁾²⁾,
Eiji INOUE¹⁾, Takashi OKAYASU¹⁾ and Muneshi MITSUOKA¹⁾³⁾

1) Faculty of Agriculture, Kyushu University

2) Faculty of Agriculture, Setsunan University

3) Faculty of Agriculture, University of the Ryukyus

(Received 19 April 2021; in final form 09 February 2022)

Summary

Rice production in Japan faces concerns over yield reduction and poor grain quality owing to unstable weather conditions and the deterioration of soil fertility. In addition, it needs to increase competitiveness against foreign agricultural products and other food products. This situation requires to develop analytical methods to effectively use data regarding agriculture, which is becoming easily available with information and communication technologies. The objectives of this study were 1) to build the predictive model of three classes (low, middle, and high) of ripened brown rice yield using data collected in the production sites, 2) to clarify limiting factors of yield using the predictive model, and 3) to investigate measures to improve yield. We applied support vector machine to build the predictive model using data collected from 2011 to 2016 in a total of 90 paddy fields. The paddy fields where Hinohikari cultivar was cultivated were located in the city of Itoshima, Fukuoka Prefecture. The predictive model built included three explanatory variables: the number of rough rice, daily mean sunshine hours during the period from five days after heading to the late ripening period, and mineral nitrogen supply from the early panicle formation to the late ripening periods. The predictive model achieved the classification accuracy of 77.8%. Particularly, paddy fields categorized in the low yield class had small tiller number at the panicle initiation stage. As the result, small number of rough rice decreased yield. Some paddy fields, where their yield was categorized in the middle class and was categorized in the high class with the number of rough rice greater than 28 thousand m^{-2} , reduced yield because of shortage of mineral nitrogen supply during the ripening period. The measures to improve yield were as follows: for the paddy fields categorized in low yield class, to ensure appropriate number of rough rice by increasing tiller number during the vegetative growth stage, and for paddy fields where shortage of mineral nitrogen supply during the ripening period reduced yield, to apply topdressing two times to meet the standard nitrogen application rate in the surveyed region (3.6 kg/10a in total). This measure obtained for topdressing indicates that the analysis using survey data collected in rice production sites supported the standard that has been determined by local cultivation tests as well as trial and error in the production sites.

Key Words

Fertilizer management, Mineral nitrogen supply, Number of rough rice, Rice production, Sunshine hours, Support vector machine

1) 744 Motooka, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395, Japan

2) 45-1 Nagaotoge-cho, Hirakata City, Osaka 573-0101, Japan

3) 1 Sembaru, Nakagami-gun, Nishihara-cho, Okinawa 903-0213, Japan

(Correspondence: hirai@bpes.kyushu-u.ac.jp)