

## 養分収支モデルの改良による愛知県の田畑輪換を含めた 水田土壌における可給態リン酸含量の将来予測

中村嘉孝<sup>1)</sup>・日置雅之<sup>2)</sup>・尾賀俊哉<sup>3)</sup>・久野智香子<sup>4)</sup>・大橋祥範<sup>5)</sup>・安藤 薫<sup>6)</sup>・大竹敏也<sup>7)</sup>

**摘要:** 愛知県の田畑輪換を含めた水田土壌における可給態リン酸含量の将来予測技術の確立に向けて、養分収支に基づいたモデルを改良した。可給態リン酸として残存する割合を表す消長係数を土壌では0.99とし、各投入成分ではリン酸吸収係数に応じて変化させるとともに、予測値の下限値の条件式を追加した。田畑輪換を行った水田では、夏作が水稻の場合は水田用の消長係数を、畑作物の場合は畑用の消長係数を用いた。土壌の種類やリン酸吸収係数、田畑輪換の履歴、有機質資材の施用歴が異なる水田土壌において、改良したモデルの有用性を検証したところ、新モデルの予測値と実測値の二乗平均平方根誤差は旧モデルよりも小さくなる傾向を示し、予測精度は向上した。

**キーワード:** 水田土壌、可給態リン酸、リン酸吸収係数、養分収支モデル、将来予測

## Prediction of Available Phosphate in Paddy and Paddy-Upland Rotation Soils Using an Improved Nutrient Balance Model

NAKAMURA Yoshitaka, HIOKI Masayuki, OGA Toshiya, KUNO Chikako,  
OHASHI Yoshinori, ANDO Kaori and OTAKE Toshiya

**Abstract:** We improved a nutrient balance model to establish a technique for predicting the available phosphate content in paddy and paddy-upland rotation soils in Aichi Prefecture. The coefficient reflecting the proportion of available phosphate in the soil was set at 0.99, and the residual coefficient of each input component was adjusted using the phosphate absorption coefficient. Furthermore, a conditional expression with a lower limit value was included. In paddy-upland rotation fields, the coefficient for paddy fields was applied if the summer crop was paddy rice, and the coefficient for upland field crops was applied for upland field crops. For paddy fields with varying soil types, phosphate absorption coefficients, field rotation histories, and organic material application histories, the improved nutrient balance model predicted values that were close to the actual values. These results demonstrate the improvement in the prediction method.

**Key Words:** Paddy soils, Available phosphate, Phosphate absorption coefficient, Nutrient balance model, Prediction

<sup>1)</sup>環境基盤研究部(現普及戦略部) <sup>2)</sup>作物研究部(現環境基盤研究部) <sup>3)</sup>作物研究部(現西三河農林水産事務所) <sup>4)</sup>環境基盤研究部(現作物研究部) <sup>5)</sup>環境基盤研究部(現研究戦略部) <sup>6)</sup>環境基盤研究部 <sup>7)</sup>環境基盤研究部(退職)

## 緒言

リン酸は植物の必須元素であり、肥料として施用される。しかし、リン酸の化学肥料原料は世界的に偏在しており、その経済可採埋蔵量は有限である<sup>1)</sup>。日本はリン酸の肥料原料のほとんどを輸入しているが、肥料原料の輸入価格は2021年以降上昇傾向<sup>2,3)</sup>で生産者の経営を圧迫している<sup>3)</sup>。このため、土壌の可給態画分の含量を考慮して施肥量を加減し、肥料成分が土壌へ過剰に蓄積することを防ぎ、その有効活用を図る必要がある。また、リン酸は水系の富栄養化の要因の1つであり、近隣の水系へ流出した場合、環境負荷につながる懸念される。これらのことから、リン酸の適切な施肥管理は、持続的な農業生産の実現において重要である。

愛知県で普及している水稲の不耕起V溝直播栽培<sup>4)</sup>では、播種と同時に窒素単肥の肥効調節型肥料を全量基肥として施用される。このため、収取率分のリン酸を荒おこし時や冬季代かき時等に全層施用することとしている<sup>5)</sup>。しかし、このような対策は経営規模の拡大に伴う労力負担の増加により困難となっている。加えて、水稲-コムギ-ダイズの2年3作体系の普及<sup>4)</sup>によりコムギやダイズの栽培時の施用が必要となるが、省略されることも多い。その場合、作物収穫に伴う収取率により、土壌のリン酸含量は減少し、作物生産性は低下することが懸念される。愛知県内の水田土壌の大半の可給態リン酸含量は土壌診断基準の適正範囲内にある<sup>6)</sup>ものの、中長期的な土壌の可給態リン酸含量の変化を踏まえた土壌管理が必要である。

農耕地土壌における1作ごとの可給態リン酸含量の予測については、養分収支に基づいた簡易なモデル(以下、「旧モデル」)が提案されている<sup>6,7)</sup>。旧モデル<sup>6,7)</sup>は、施肥量や作物のリン酸吸収量などの得られやすい、または推定しやすい入力値で対応できることから、普及性が高いと考えられる。畑土壌ではこの旧モデルにおける消長係数(流亡や固定化され不可給化する割合を差し引いた値)をリン酸吸収係数に応

じて変化させることで適合性が高まることが報告<sup>8)</sup>されている。水田土壌においても、同様に改良することでモデルの適合性は高まると考えられる。モデルの精度向上は、化学肥料の低減量や期間をより正確に提案できるため、施肥の効率化や家畜ふん堆肥の活用推進につながると期待される。

そこで、本研究では愛知県の水田土壌における可給態リン酸含量の予測に基づいた土壌管理技術の確立に向けて、旧モデルを改良するとともに、その精度を検証した。

## 材料及び方法

### 1 水稲単作水田における養分収支モデルの改良

#### (1) 供試データ(試験1~3)

供試データは、愛知県の安城市(愛知県農業総合試験場水田利用研究室)及び日進市(生産者のほ場)で実施された試験1~3のデータ<sup>9-11)</sup>を用いた(表1~2)。

#### (2) 旧モデルによる予測

旧モデル<sup>6,7)</sup>を用いて作土の可給態リン酸含量を予測した。すなわち、可給態リン酸含量に関する消長係数は黒ボク土以外の水田土壌に適用される値(表3)を用いた。試験2の稲わら還元CL区及び試験3の稲わら還元SL区の稲わらは作物残渣による還元とした。作物による成分の吸収量は、作物による吸収量から稲わらの還元量を差し引いた値とした。

#### (3) 養分収支モデルの改良

水稲単作水田における旧モデル<sup>6,7)</sup>の改良は、畑土壌における養分収支モデルの改良<sup>8)</sup>に準じて、下記の変更を行った(式①、式②及び式③)を組み合わせさせたモデル。以下、「新モデル」。すなわち、式①における化学肥料の成分、有機質資材の成分、かんがい水及び降雨の成分の消長係数をリン酸吸収係数に基づいた式②により変化させた。あわせて、可給態リン酸含量の下限値を補正する条件式(式③)を式①に追加した。補正する下限値は、可給態リン酸含量が最小であった試験1のリン酸無施用区の0.01 g kg<sup>-1</sup>とした。

表1 養分収支モデルの改良に用いた試験データの概要

試験番号 (試験市)	土壌 (PAC) <sup>1)</sup>	栽培概要 (作物残渣の扱い) 【解析年】	処理区	各処理区の土壌管理の概要
試験1 (安城)	黄色土 (411)	水稲単作 (稲わらは持ち出し) 【1976-2017】	稲わら堆肥 7.5t 区	化学肥料と稲わら堆肥 7.5 t ha <sup>-1</sup> 連用
			稲わら堆肥 22.5t 区	化学肥料と稲わら堆肥 22.5 t ha <sup>-1</sup> 連用
			稲わら堆肥無施用区	化学肥料のみ連用
			無肥料区	化学肥料と有機質資材無施用継続
リン酸無施用区	リン酸のみ無施用継続			
試験2 (日進)	灰色低地土 (450)	水稲単作 (稲わらは持ち出し) 【1977-1982】	稲わら還元 CL 区	稲わら 5 t ha <sup>-1</sup> 連用
			豚ふん堆肥 CL 区	おがくず入り豚ふん堆肥 10 t ha <sup>-1</sup> 連用
			化学肥料 CL 区	化学肥料のみ連用
試験3 (日進)	灰色低地土 (252)	水稲単作 (稲わらは持ち出し) 【1984-1997】	稲わら還元 SL 区	稲わら 5 t ha <sup>-1</sup> 連用
			豚ふん堆肥 SL 区	おがくず入り豚ふん堆肥 10 t ha <sup>-1</sup> 連用
			化学肥料 SL 区	化学肥料のみ連用
試験4 (長久手)	灰色台地土 (597)	2年で水稲-コムギ-ダイズを栽培 (収穫部以外はすきこみ) 【2015-2020】	牛ふん堆肥 20t 区	水稲栽培時に牛ふん堆肥 20 t ha <sup>-1</sup> 施用
			牛ふん堆肥 30t 区	水稲栽培時に牛ふん堆肥 30 t ha <sup>-1</sup> 施用
			牛ふん堆肥 40t 区	水稲栽培時に牛ふん堆肥 40 t ha <sup>-1</sup> 施用

1) 消長係数の算出に用いたリン酸吸収係数(mg 100 g<sup>-1</sup>)

式①:  $Y = SB \cdot Sk + (FB \cdot Fk + OB \cdot Ok + WB \cdot Wk + RB \cdot Rk - PU) / (\rho \cdot D \cdot 1000)$

Y:1年後の土壌の可給態リン酸含量(g-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> kg<sup>-1</sup>)

SB:予測開始時の土壌の可給態リン酸含量(g-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> kg<sup>-1</sup>)

Sk:土壌の可給態リン酸の消長係数

FB:化学肥料の成分量(g m<sup>-2</sup>)

Fk:化学肥料の成分の消長係数(=式②)

OB:有機質資材の成分量(g m<sup>-2</sup>)

Ok:有機質資材の成分の消長係数(=式②)

WB:かんがい水の成分量(g m<sup>-2</sup>)

Wk:かんがい水の成分の消長係数(=式②)

RB:降雨の成分量(g m<sup>-2</sup>)

Rk:降雨の成分の消長係数(=式②)

PU:作物による成分の吸収量(g m<sup>-2</sup>)

ρ:乾燥密度(g cm<sup>-3</sup>)

D:作土深(m)

式②:  $A = (-0.00032 \cdot x + 0.724) \cdot Sk$

A:消長係数

x:リン酸吸収係数(mg 100g<sup>-1</sup>)

Sk:土壌の可給態リン酸の消長係数

式③:式①の予測値 ≥ 0.01 g kg<sup>-1</sup> → 式①の予測値

式①の予測値 < 0.01 g kg<sup>-1</sup> → 下限値(0.01 g kg<sup>-1</sup>)

夏作が水稻の場合の土壌の可給態画分の消長係数は以下のとおり求めた。まず、試験1~3における式①と②のSkを1.00から0.01単位ごとに減少させ、作土の可給態リン酸含量の予測値を算出した。次に、これらの予測値と実測値との残差平方和を算出し、最小となる値を採用した

かんがい水及び降雨の成分については、既報<sup>9)</sup>の調査値を用いた。試験2の稲わら還元CL区及び試験3の稲わら還元SL区の稲わらは、旧モデルと同様に、作物残渣による還元とみなし、作物による吸収量から稲わらの還元量を差し引いた値を作物による成分の吸収量とした。

## 2 田畑輪換水田における新旧モデルの適合性の比較

供試データは、愛知県の長久手市(愛知県農業総合試験場作物研究室)で実施された試験4のデータ<sup>12)</sup>を用いた(表1~2)。新旧モデルともに、夏作が水稻の場合は水稻の消長係数を(表3)、夏作が畑作物の場合は新旧それぞれの畑土壌における消長係数<sup>6-8)</sup>を用いて、作土の可給態リン酸含量の予測値と実測値の適合性を比較した。

表2 各処理区の解析開始時の可給態リン酸含量とリン酸の収支

試験番号	処理区	解析開始時の可給態リン酸含量 (g-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> kg <sup>-1</sup> )	年間平均投入量 (g-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> m <sup>-2</sup> y <sup>-1</sup> )		年間平均持ち出し量 (g-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> m <sup>-2</sup> y <sup>-1</sup> )	年間平均余剰量 <sup>1)</sup> (g-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> m <sup>-2</sup> y <sup>-1</sup> )
			化学肥料	有機質資材		
試験1	稲わら堆肥 7.5t 区	0.34	8.7	1.0	5.8	4.5
	稲わら堆肥 22.5t 区	0.38	8.7	2.9	6.6	5.7
	稲わら堆肥無施用区	0.31	8.7	0.0	5.0	4.4
	無肥料区	0.08	0.0	0.0	0.9	-0.3
	リン酸無施用区	0.08	0.0	0.0	0.8	-0.1
試験2	稲わら還元 CL 区	0.05	7.3	0.0	4.8	4.8
	豚ふん堆肥 CL 区	0.10	7.3	9.2	4.9	12.3
	化学肥料 CL 区	0.07	7.3	0.0	5.0	3.0
試験3	稲わら還元 SL 区	0.15	9.5	0.0	5.3	6.8
	豚ふん堆肥 SL 区	0.15	9.5	3.9	5.9	8.2
	化学肥料 SL 区	0.16	9.5	0.0	5.2	4.9
試験4	牛ふん堆肥 20t 区	0.12	0(8.6) <sup>2)</sup>	54(0)	1.3(6.0)	53(3.1)
	牛ふん堆肥 30t 区	0.13	0(8.6)	80(0)	1.3(6.2)	71(2.8)
	牛ふん堆肥 40t 区	0.12	0(8.6)	107(0)	1.2(6.3)	106(2.7)

1) 余剰量=化学肥料+有機質資材+かんがい水+降雨-持ち出し量

2) 括弧外は水稻作の値、括弧内はコムギ-ダイズ作の値

表3 新旧の養分収支モデルで用いた消長係数

消長係数	消長係数						
	旧モデル <sup>1)</sup>		新モデル <sup>2)</sup>				
	(水稻)	(畑作物)	試験1 (水稻)	試験2 (水稻)	試験3 (水稻)	試験4 (水稻) (畑作物) <sup>3)</sup>	
Sk	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99	0.99	0.90
Fk	0.60	0.60	0.58	0.57	0.63	0.53	0.48
Ok	0.10	0.60	0.58	0.57	0.63	0.53	0.48
Wk	1.00	1.00	0.58	0.57	0.63	0.53	0.48
Rk	0.00 <sup>4)</sup>	0.00	0.58	0.57	0.63	0.53	0.48

Sk:土壌の可給態リン酸の消長係数 Fk:化学肥料の成分の消長係数 Ok:有機質資材の成分の消長係数

Wk:かんがい水の成分の消長係数 Rk:降雨の成分の消長係数

1) 北村<sup>6,7)</sup>から作成 2) Fk, Ok, Wk, Rkの各投入成分の消長係数はリン酸吸収係数に応じた式②から算出した

3) 中村ら<sup>8)</sup>から作成 4) 北村<sup>6,7)</sup>における設定がないため「0」とした

### 3 現地調査した水田における新モデルの適合性の検証

新モデルの検証には、愛知県内で生産者が管理する同一ほ場で継続的な調査(土壌環境基礎調査(1979~1997年)、土壌機能モニタリング調査(1999~2007年)、農地管理実態調査(2009~2017年)及び農地土壌炭素貯留等基礎調査(2018~2019年))が実施された、水稲連作水田と田畑輪換水田の計26ほ場の調査データを用いた(表4)。適合性の検証における消長係数は2と同様に夏作に応じた値とした。

### 4 土壌化学性の分析方法

可給態リン酸含量はトルオーグ法<sup>13)</sup>で測定された調査値をリン酸( $P_2O_5$ )量に換算して用いた。リン酸吸収係数は25 g L<sup>-1</sup>リン酸アンモニウム液を添加して24時間後に減少したリン酸( $P_2O_5$ )量を、慣用に従って土壌100 g当たりのmgで表した値を用いた<sup>13)</sup>。

## 結果及び考察

### 1 水稲単作水田における養分収支モデルの改良(試験1~3)

#### (1) 土壌の可給態リン酸の消長係数

試験1~3における新モデルの実測値と予測値の残差平方和が最小となった土壌の可給態リン酸の消長係数は、0.99であった(データ略)。このことから、新モデルにおいて、夏作が水稲である場合の土壌の可給態リン酸の消長係数は「0.99」を採用した(表3)。

#### (2) 有機質資材以外の消長係数

試験1~3の実測値と新旧モデルの各予測値の経時変化を図1~3に示した。

このうち、有機質資材を施用せず、リン酸を含む肥料は施用した各処理区の結果から、有機質資材以外の各投入成分の消長係数について検証した。試験1の稲わら堆肥無施用区、試験2の稲わら還元CL区と化学肥料CL区及び試験3の稲わら還元SL区と化学肥料SL区における新旧の2モデルによる可給態リン酸含量の予測値は実測値と同様に推移し、これらの予測値と実測値のRMSEは最大で0.06であり、新旧の2モデルのRMSEの差は最大で0.01と小さかったことから、新旧モデルの予測精度は同程度であった(図1~3)。これは、試験1~3におけるリン酸吸収係数の252~450 mg 100 g<sup>-1</sup>から算出された新モデルの各投入成分の消長係数と旧モデルの消長係数が同程度であったため(表3)と考えられる。

表4 現地調査した水田の概要

ほ場 番号	所在 市町	土壌の 種類	解析 期間 (年)	作土深 (cm)	乾燥 密度 (g cm <sup>-3</sup> )	PAC <sup>1)</sup>	畑転換時の 作目	Av-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> <sup>2)</sup> (g-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> kg <sup>-1</sup> )	年間投入量 <sup>3)</sup> (g m <sup>-2</sup> )		年間 持出し量 <sup>4)</sup> (g m <sup>-2</sup> )
									化学肥料	有機質資材	
1	小牧市	褐色低地土	1979-2014	13.5	1.1	713	-	0.50	0.0-30.4	0	3.8
2	犬山市	低地水田土	1979-2014	13.4	1.0	1053	-	0.43	3.6-30.0	0	3.7
3	犬山市	灰色台地土	1984-2014	13.8	1.2	573	-	0.32	3.4-10.0	0	3.6
4	半田市	グライ低地土	1984-2014	14.1	1.2	380	-	0.13	2.7-26.4	0	3.6
5	美浜町	未熟低地土	1979-2014	15.4	1.1	473	-	0.16	1.8-24.4	0	3.2
6	豊田市	灰色低地土	1980-2016	15.1	1.1	484	-	0.10	0.0-18.0	0	3.9
7	豊田市	黄色土	1980-2016	14.4	1.2	631	-	0.31	4.0-4.5	0	3.7
8	豊田市	黄色土	1980-2016	13.5	1.3	563	コムギ、ダイズ	0.10	2.0-10.4	0-19	2.7-5.4
9	安城市	黄色土	1980-2016	15.5	1.3	503	-	0.22	2.0-45.2	0-13	3.8
10	安城市	黄色土	1980-2016	13.5	1.3	545	コムギ	0.25	2.5-25.9	0	3.5-3.7
11	安城市	灰色台地土	1980-2016	15.5	1.3	272	コムギ	0.24	5.2-6.5	0	3.1-3.7
12	西尾市	グライ低地土	1980-2015	14.0	1.0	595	コムギ、ダイズ	0.22	3.2-26.0	0	3.1-5.2
13	豊田市	灰色低地土	1980-2016	15.0	1.0	400	コムギ	0.11	2.7-26.4	0	1.6-3.4
14	安城市	灰色低地土	1980-2016	17.0	1.2	335	コムギ、ダイズ	0.11	1.8-28.8	0-26	3.3-4.6
15	西尾市	グライ低地土	1980-2015	14.8	1.0	410	コムギ、ダイズ	0.23	2.7-6.4	0	3.5-6.8
16	豊川市	褐色森林土	1981-2014	16.4	0.7	838	コムギ、ダイズ	0.50	3.6-13.8	0-6	3.2-8.2
17	豊橋市	低地水田土	1981-2014	13.9	1.1	493	-	0.37	2.7-6.0	0	3.9
18	豊橋市	低地水田土	1981-2014	14.3	1.2	318	-	0.18	0.0-16.8	0	3.2-6.1
19	田原市	低地水田土	1986-2014	15.0	1.2	518	キャベツ	0.20	0.0-14.0	0-39	3.7-7.1
20	あま市	灰色低地土	1982-2019	14.1	1.1	527	-	0.24	0.0-8.5	0-26	3.5
21	稲沢市	灰色低地土	1982-2019	13.9	0.9	585	-	0.19	0.0-13.6	0	3.8
22	愛西市	灰色低地土	1982-2019	15.8	0.9	502	-	0.32	3.2-6.8	0	4.1
23	愛西市	グライ低地土	1982-2019	16.1	0.9	706	-	0.11	5.4-14.0	0	4.0-7.8
24	愛西市	グライ低地土	1982-2019	14.3	1.2	437	-	0.12	0.0-8.8	0	3.8-7.3
25	愛西市	グライ低地土	1982-2019	16.5	1.0	438	-	0.19	3.2-19.1	0-13	3.4-6.5
26	弥富市	グライ低地土	1982-2019	15.9	0.9	407	-	0.23	2.4-10.2	0	3.8-7.4

1) リン酸吸収係数(mg-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 100 g<sup>-1</sup>) 2) 解析開始時の可給態リン酸含量

3) データを基に解析に用いた1年間の各投入量 4) データを基に解析用いた作物収穫に伴う1年間の持ち出し量

(3) 有機質資材の消長係数

有機質資材は多種多様であるが、本研究では稲わら堆肥と豚ふん堆肥について検証した。稲わら堆肥を施用した試験1の稲わら堆肥7.5 t区における新旧の2モデルの予測値は同様に推移し、実測値と同程度で推移した(図1)。しかし、稲わら堆肥22.5 t区における新モデルの予測値は実測値と同程度で推移したのに対して、旧モデルの予測値は減少傾向を示し、実測値との差は経時的に大きくなった。稲わら堆肥22.5 t区における稲わら堆肥からのリン酸の投入量は多く、その稲わら堆肥の消長係数は旧モデル<sup>6)</sup>が0.10であったのに対して新モデルは0.58と大きかったことが各予測値に影響したと考えられる。また、豚ふん堆肥を施用した試験2の豚ふん堆肥CL区と試験3の豚ふん堆肥SL区における新モデルの予測値と実測値のRMSEは、旧モデルのRMSEよりも小さかった(図2~3)。これら2種類以外の有機質資材については検

討が必要であるものの、有機質資材の消長係数は新モデルの方が旧モデルよりも適合性は高いと考えられる。

(4) 下限値を補正する条件式

リン酸を無施用とした試験1の無肥料区とリン酸無施用区における旧モデルの予測値は、余剰量が負であったことを反映して1990年以降は負の値を示した(図1)。しかし、同区の実測値は減少傾向を示したものの、正の値を維持した。可給態リン酸の評価方法として用いたトルオーグ法によって評価される可給態リン酸は、主にカルシウムと結合しているとされる<sup>14)</sup>。水田では湛水に伴う土壌の還元化により鉄と結合したリン酸が可給化することが報告されている<sup>15)</sup>。水稻はトルオーグ法抽出の可給態リン酸以外の画分のリン酸も利用可能であることから、リン酸の余剰量が継続して負の値を示しても、可給態リン酸は0.01 g kg<sup>-1</sup>を下回らなかったと考えられる。このため、旧モデルは余剰量が負の値となる条件が継続する

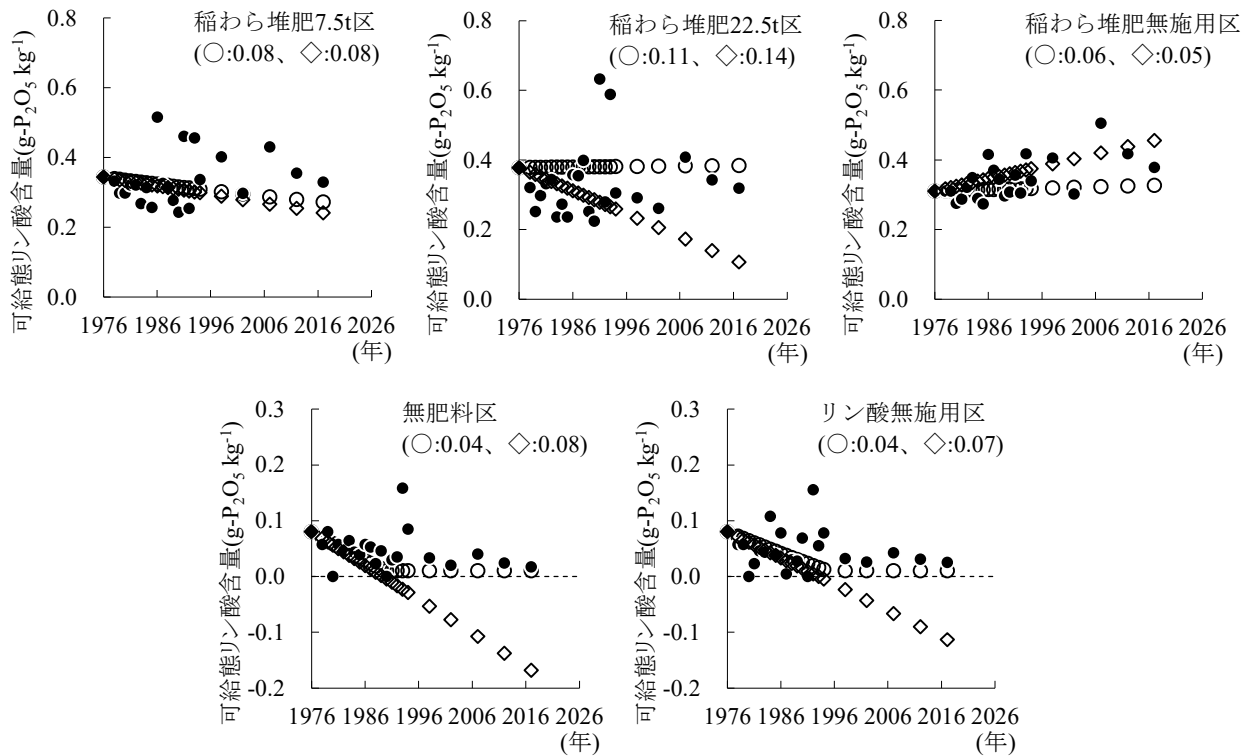


図1 試験1における可給態リン酸含量の実測値(●)、新モデル(○)と旧モデル(◇)の予測値の経時変化  
括弧内は各モデルの予測値と実測値のRMSEを示す

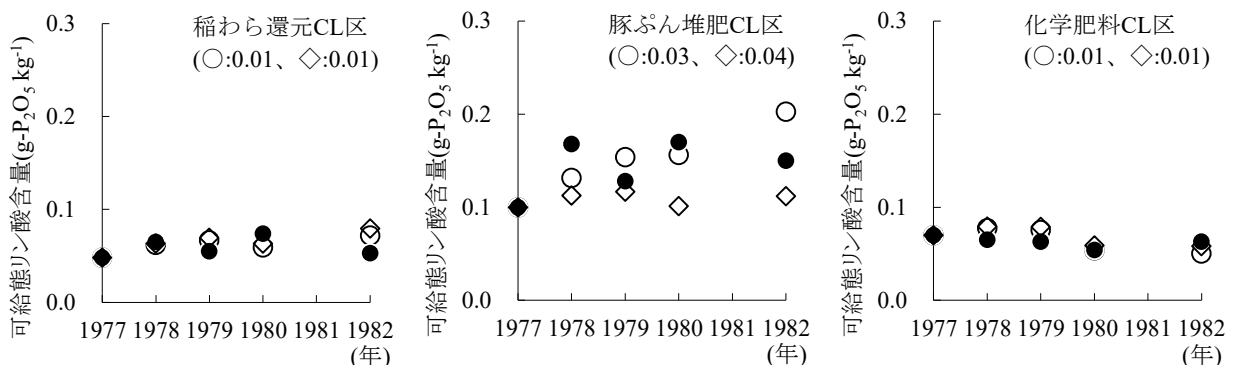


図2 試験2における可給態リン酸含量の実測値(●)、新モデル(○)と旧モデル(◇)の予測値の経時変化  
括弧内は各モデルの予測値と実測値のRMSEを示す

と予測値は負の値となることから、下限値を補正する条件式を組み込むことはモデルの適合性を高めると考えられる。本研究では補正する下限値は、供試データで最も低かった試験1のリン酸無施用区における可給態リン酸含量としたことから他の異なる処理条件下における検証が必要である。しかし、試験1の無肥料区も余剰量は負で1990年以降の旧モデルは負の値を示したのに対し、新モデルの予測値は式③による下限値の補正によって実測値と同程度で推移した。このことから、本研究で用いた下限値(可給態リン酸含量で $0.01 \text{ g kg}^{-1}$ )が他の土壌管理条件にも適応できると考えられる。

これらのことから、水稻単作水田の可給態リン酸含量の予測において、各投入成分の消長係数をリン酸吸収係数に応じて変化させ、下限値の補正式を組み込んだ新モデルの適合性は旧モデルより高いと考えられる。

## 2 田畑輪換水田における新旧モデルの適合性の比較(試験4)

田畑輪換を行った試験4の各処理区における実測値と新旧モデルの予測値を図4に示した。新モデルによる予測値は実測値と同様に増加したのに対し、旧モデルによる予測値の増加量はわずかで実測値との差が経時的に大きくなった(図4)。解析に用いた試験4のリン酸投入量の多くは、水稻栽培時に施用された牛ふん堆肥からで(表2)、その消長係数は旧モデル<sup>7)</sup>が0.10であったのに対し、新モデルは0.53と大きかった(表3)。新モデルにおける予測値は実測値と同程度の増加を示したことから、有機質資材の消長係数は新モデルの方が旧モデルよりも適合性は高いと考えられる。

これらのことから、田畑輪換水田における可給態リン酸の予測は、夏作に応じて、本研究の1で得られた水稻単作水田と、中村ら<sup>8)</sup>の畑土壌における消長係数を用いることで予測できると考えられる。

## 3 現地調査した水田における新モデルの適合性の検証

### (1) リン酸吸収係数が高いほ場(ほ場番号:2)

ほ場番号2のリン酸吸収係数は1053で、現地調査した水田土壌の中で最も高かった(表4)。このほ場における新モデルによる可給態リン酸含量の予測値は実測値と同程度であったが、旧モデルの予測値は増加し、実測値との差は経時的に大きくなった(図5)。新モデルでは、リン酸吸収係数に応じて各投入成分の消長係数を変化させており、本ほ場における投入リン酸の消長係数は0.37で、旧モデルの消長係数よりも小さかった。したがって、余剰のリン酸が可給態リン酸として土壌に残存した割合は旧モデルよりも低く、実測値に近い値で推移したと考えられる。このため、投入されたリン酸の各成分の消長係数を土壌のリン酸吸収係数に応じて変えることは、モデルの適合性を高めるために有効と考えられる。

### (2) 有機質資材の施用歴があるほ場(ほ場番号:20)

ほ場番号20は水稻単作で解析期間後半の牛ふん堆肥の施用によって2019年の可給態リン酸含量の実測値は増加した(図6)。新モデルの予測値も実測値と同様に増加したが、旧モデルの予測値は2011年と同程度であった。本ほ場における有機質資材の消長係数は0.55で、旧モデルの家畜ふん堆肥の消長係数<sup>7)</sup>の0.10よりも大きいため、新モデルにおける有機質資材の消長係数の方が適していると考えられる。

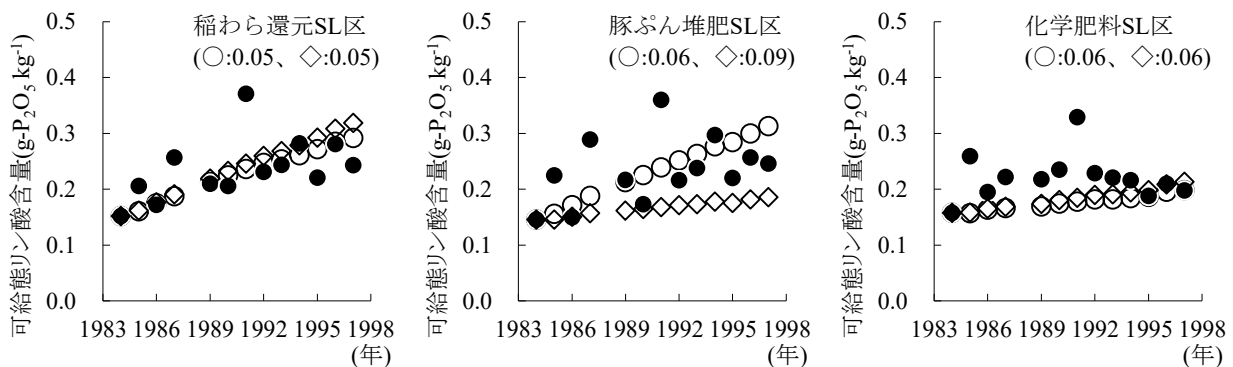


図3 試験3における可給態リン酸含量の実測値(●)、新モデル(○)と旧モデル(◇)の予測値の経時変化  
括弧内は各モデルの予測値と実測値のRMSEを示す

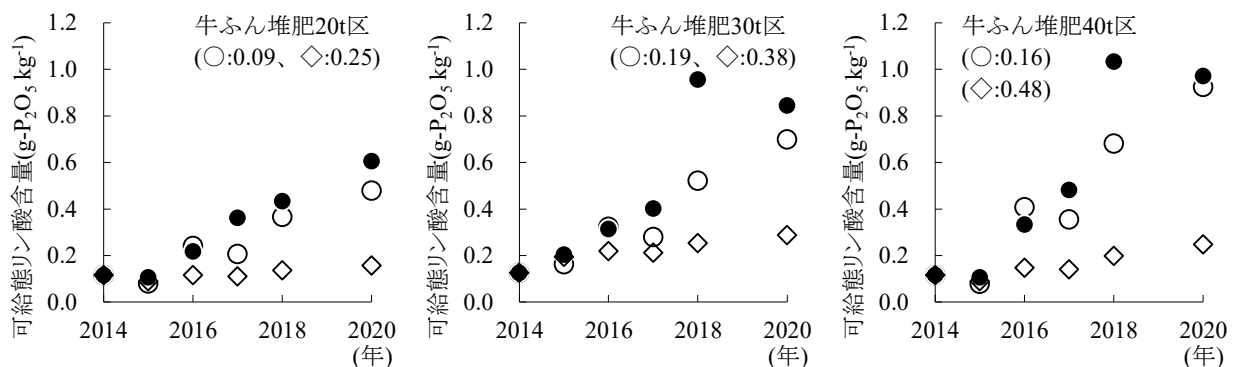


図4 試験4における可給態リン酸含量の実測値(●)、新モデル(○)と旧モデル(◇)の予測値の経時変化  
括弧内は各モデルの予測値と実測値のRMSEを示す

このため、現地調査した水田においても有機質資材の消長係数は、他の投入成分と同様に、リン酸吸収係数に応じた新モデルの値とする方がモデルの適合性は高くなると考えられる。

(3) 田畑輪換履歴があるほ場(ほ場番号:12)

ほ場番号12において、田畑輪換を開始した2000年から旧モデルの予測値は実測値よりも高く推移していたのに対し、新モデルの予測値は旧モデルの予測値より低く推移し、実測値に近かった(図7)。本ほ場における夏作が畑作の場合、リン酸が26 g m<sup>2</sup>施用されたが(表2)、実測値は増加傾向を示さなかった。新モデルの水稲や畑作物<sup>8)</sup>の消長係数は旧モデル<sup>7)</sup>の消長係数よりも小さいため、その予測値は旧モデルよりも低く、実測値と同様に推移したと考えられる。これらのことから、田畑輪換水田においても夏作に応じて消長係数を使い分けた新モデルの適合性は高いと考えられる。

(4) 現地調査した水田における新モデルの適合性(全体)

現地ほ場における土壌の種類やリン酸吸収係数、田畑輪換の履歴、有機質資材の施用歴が異なる土壌においても、

新モデルのRMSEは、旧モデルのRMSEと同程度か小さい値を示した(表5)。また、新モデルのRMSEの平均値は旧モデルよりも0.07小さかった。このことから、新モデルの方が旧モデルに比べて現地調査した水田土壌における適合性は高いことが示された。

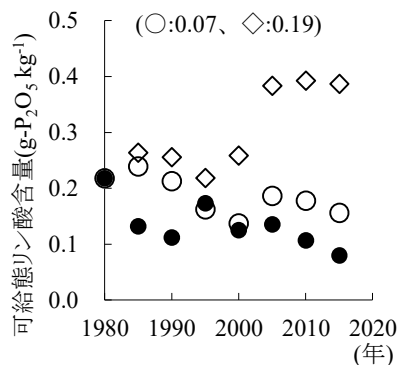


図7 田畑輪換履歴がある水田(ほ場番号 12)における可給態リン酸含量の実測値(●)、新モデル(○)と旧モデル(◇)の予測値の経時変化  
括弧内は各モデルの予測値と実測値の RMSE を示す

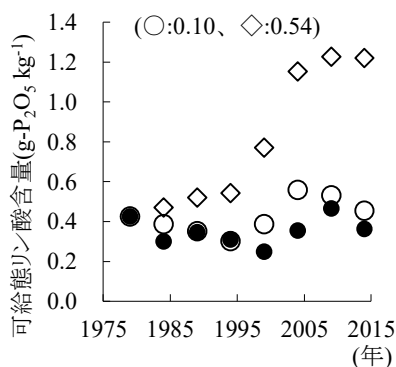


図5 リン酸吸収係数が高い水田(ほ場番号 2)における可給態リン酸含量の実測値(●)、新モデル(○)と旧モデル(◇)の予測値の経時変化  
括弧内は各モデルの予測値と実測値の RMSE を示す

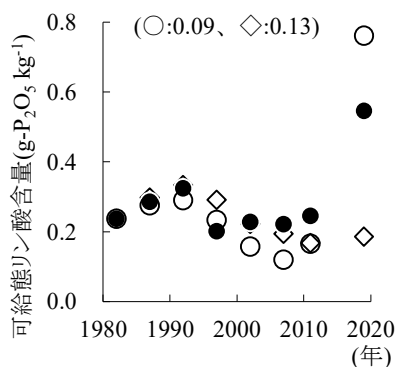


図6 有機質資材の施用歴がある水田(ほ場番号 20)における可給態リン酸含量の実測値(●)、新モデル(○)と旧モデル(◇)の予測値の経時変化  
括弧内は各モデルの予測値と実測値の RMSE を示す

表5 現地調査した水田の新旧モデルの RMSE

ほ場番号	RMSE <sup>1)</sup>	
	新モデル	旧モデル
1	0.36	0.70
2	0.10	0.54
3	0.08	0.17
4	0.25	0.30
5	0.33	0.43
6	0.05	0.08
7	0.16	0.11
8	0.07	0.17
9	0.24	0.26
10	0.08	0.25
11	0.13	0.11
12	0.07	0.19
13	0.21	0.28
14	0.09	0.11
15	0.13	0.16
16	0.14	0.27
17	0.12	0.17
18	0.21	0.24
19	0.33	0.19
20	0.09	0.13
21	0.12	0.23
22	0.08	0.11
23	0.07	0.14
24	0.10	0.09
25	0.17	0.22
26	0.08	0.11
平均値	0.15	0.22
最小値	0.05	0.08
最大値	0.36	0.70

1) 実測値と各モデルの予測値の二乗平均平方根誤差

愛知県の施肥基準<sup>5)</sup>では、水稻栽培における可給態リン酸含量に基づくリン酸施肥量の目安として、0.10 g kg<sup>-1</sup>未満は施肥基準量に増肥、0.10~0.15 g kg<sup>-1</sup>は施肥基準量、0.15~0.40 g kg<sup>-1</sup>は施肥基準量の半量、0.40 g kg<sup>-1</sup>以上は、無施肥、としている。施肥基準量の施用量とされる可給態リン酸含量の水準(0.10~0.15 g kg<sup>-1</sup>)を診断するためには、予測誤差として0.05 g kg<sup>-1</sup>以下の精度が望まれる。新モデルのRMSEの平均値は0.15であったことから、将来予測した際に施肥基準の半量とする水準(0.15~0.40 g kg<sup>-1</sup>)であるかを評価できる可能性はあるものの、さらなる予測精度の向上が必要である。

また、いずれの現地調査した水田においても下限値の補正式(式③)が適用されたほ場はなかった。下限値の設定根拠とした試験1のリン酸無施用区における水稻の収量は、リン酸を施用した処理区よりも低く推移していた<sup>9)</sup>ため、リン酸欠乏を生ずる値であった。本研究で供試した現地ほ場ではリン酸欠乏が生ずる前にリン酸が施用されたため、下限値の補正が適用されなかったと考えられる。

#### 4 可給態リン酸含量の予測に向けた新モデルの活用

新モデルによって、田畑輪換も含めた水田土壌の可給態リン酸含量の変化を旧モデルよりも高い精度で予測できることが明らかとなった。本予測手法は、リン酸の収支に基づいた予測であることから、栽培品目や各成分からの投入量の変更に伴う変化を反映しやすい。さらに、予測対象である可給態リン酸含量は、土壌診断の測定項目に採用されている。本予測手法で得られた予測値から、施肥診断ができる予測精度はないものの、将来の土壌の可給態リン酸含量の増減傾向と土壌診断基準<sup>5)</sup>と比較することができ、すぐに現場で活用できることは利点と考えられる。

これらのことから、本予測手法は将来の土壌の可給態リン酸含量の変化を踏まえた土壌管理を実現でき、余剰のリン酸の土壌への過剰な蓄積を抑制するとともに、有限なリン酸資源の効率的かつ適切な施用に寄与すると考えられる。

### 引用文献

1. 安藤淳平. リン資源の将来とわが国の進むべき方向. 土肥誌. 54(2), 164-169(1983)
2. John, B., and Chian, K. 2021. Soaring fertilizer prices

add to inflationary pressures and food security concerns. <https://blogs.worldbank.org/opendata/soaring-fertilizer-prices-addinflationary-pressures-and-food-security-concerns> (2024.7.2参照)

3. 農林水産省農産局技術普及課. 肥料をめぐる情勢(令和4年4月). [https://www.maff.go.jp/j/seisan/sien/sizai/s\\_hiryo/attach/pdf/index-7.pdf](https://www.maff.go.jp/j/seisan/sien/sizai/s_hiryo/attach/pdf/index-7.pdf). (2022.8.3参照)
4. 愛知県農業総合試験場. 不耕起V溝直播栽培の手引き(改訂第4版). 愛知県農業総合試験場. p.1-52(2007)
5. 愛知県農業水産局農政部農業経営課. 農作物の施肥基準. 愛知県. (2021) <https://www.pref.aichi.jp/soshiki/nogyo-keiei/sehikijun.html>. (2022.8.6参照)
6. 北村秀教. 土壌塩基類消長の簡易予測方法. 愛知農総試研報. 33, 229-236(2001)
7. 北村秀教. 土壌化学性の簡易な未来予測. 土肥誌. 74(5), 679-683(2003)
8. 中村嘉孝, 山本拓, 久野智香子, 大橋祥範, 安藤薫, 大竹敏也. 養分収支モデルの改良による愛知県の畑土壌における可給態リン酸含量と交換性カリウム含量の予測. 愛知農総試研報. 55, 8-20(2023)
9. 糟谷真宏, 安藤薫, 尾賀俊哉, 大橋祥範, 久野智香子. 愛知県での95年間の長期連用試験における水稻の収量と土壌化学性の変化および土壌カリウム供給機構について. 土肥誌. 93(1), 1-11(2022)
10. 愛知県農業総合試験場. 昭和50~57年度土壌環境基礎調査(基準点調査)成績書. p.113-157(1983)
11. 愛知県農業総合試験場. 昭和59年度~平成9年度土壌保全関係試験成績概要集. p.35-61(1998)
12. 久野智香子, 浅野智也, 小田紫帆里, 森崎耕平, 武井真理, 瀧勝俊, 大竹敏也. 2年3作輪作体系のダイズ作を対象とした地力改善指標の確立. 愛知農総試研報. 53, 17-24(2021)
13. 農林水産省農蚕園芸局農産課. 土壌環境基礎調査における土壌, 水質及び作物体分析法. 土壌保全調査事業全国協議会. 1-202(1979)
14. 安藤薫, 中村嘉孝, 山口紀子, 糟谷真宏, 瀧勝俊. 愛知県露地畑土壌におけるリンの蓄積形態とその可能性. 土肥誌. 93(4), 197-200(2022)
15. 飯村康二. 湛水下の水田土壌におけるリン酸の溶解度の上昇原因について. 土肥誌. 76(2), 199-200(2005)