

# 根鉋地域の飼料用トウモロコシに対する アーバスキュラー菌根菌の効果を考慮したリン酸施肥基準

八木哲生<sup>1</sup>・松本武彦<sup>1</sup>・大友 量<sup>2</sup>・小林創平<sup>2,†</sup>  
三枝俊哉<sup>1,‡</sup>・岡 紀邦<sup>2</sup>

キーワード アーバスキュラー菌根菌, 飼料用トウモロコシ, リン酸, 連作

## 1. はじめに

北海道東部に位置する根鉋地域は、夏季は冷涼湿潤、冬季は寒冷少雪で土壌凍結が発達する。北海道の一般的な農耕期間である5月から9月の積算気温が2,200°Cに満たない当地域は、飼料用トウモロコシ (*Zea mays* L.; 以下、トウモロコシ) の栽培限界地帯であり、その生産力は北海道の中でも特に低い(窪田・植田, 1981)。このため、安定した収量を確保しやすい牧草を飼料基盤とする大規模な草地型酪農が展開されてきた。しかし、近年は寒地向きの品種育成や、栽培技術の開発により(濃沼, 2013)、牧草より単位面積当たりエネルギー生産量の高いトウモロコシの栽培面積が拡大している。当地域のトウモロコシに対する標準的な施肥量は、窒素(N)、リン酸(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)、カリ(K<sub>2</sub>O)の順に各々130, 200, 140 kg ha<sup>-1</sup>であり(北海道農政部, 2010)、コスト面でもリン酸の占める割合が最も高いため、生産性を損なうことなくリン酸を減肥することが資材価格高騰への対応策として重要である。

作物に効率的にリンを吸収させる手段の一つとして、リン吸収を促進するアーバスキュラー菌根菌(以下、AM菌)の活用が考えられてきた(松崎, 2009; Miller, 2000)。AM菌の宿主であるトウモロコシやダイズ(*Glycine max* Merr.)を栽培する際、前作にAM菌の宿主作物を栽培することで土着のAM菌を増殖させ、後作のトウモロコシやダイズに対するAM菌の感染を促進し、リン吸収や生育を有利に進めることができる(Arihara and Karasawa, 2000; 唐澤ら, 2001; Oka *et al.*, 2010)。

八木ら(2014)は、根鉋地域の黒ボク土において、前作物の異なる圃場でトウモロコシに対するリン酸用量試験を行い、AM菌の宿主作物であるトウモロコシ跡地では、非

宿主作物であるテンサイ(*Beta vulgaris* L.)およびシロガラシ(*Sinapis alba* L.)の跡地より、AM菌感染率および初期生育が有意に高いことを認めた。さらに、リン酸施肥量の低下にともなう生育量の減少度合は、トウモロコシ跡地で非宿主作物跡地より小さかったことから、トウモロコシ連作条件におけるAM菌を活用した効率的なリン酸施肥の可能性を示唆した。

AM菌によるリン吸収促進効果を生産現場で活用し、これをリン酸減肥技術として確立するためには、減肥を可能とする条件とその量を具体的に提示する必要があるが、現在、AM菌の効果によるリン酸減肥可能量を提示して施肥設計に反映できている例は、ダイズを対象とした大友ら(2015)の報告のみである。北海道では、トウモロコシ畑において土壌診断に基づくリン酸施肥をするうえで、有効態リン酸含量の水準を5つに区分し、これに対応したリン酸施肥量を定めている(北海道農政部, 2010)。したがって、AM菌の効果によるリン酸減肥可能量をこれと関連づけて示すことができれば、本効果を生産現場で活用しやすいと考えられる。

そこで、本報告では、土壌型、播種床造成法およびリン酸肥沃度の異なる多様な条件のトウモロコシ連作畑においてリン酸用量試験を行った。その結果から、現行基準によるリン酸施肥条件における収穫期の収量水準と比べて、減肥を招かない範囲での安定生産を目指した減肥可能量を検討した。

## 2. 試験方法

### 1) 供試圃場

試験は2012年(圃場A, BおよびC)および2013年(圃場D, E, F, G, H, IおよびJ)に行い、試験年におけるトウモロコシ連作年数は2~9年目である(表1)。

試験場所は、北海道標津郡中標津町(圃場AおよびF)、厚岸郡厚岸町(圃場B, C, G, H, IおよびJ)、野付郡別海町(圃場DおよびE)の生産者圃場である(表1)。供試圃場の土壌型は、圃場A, D, EおよびFは火山放出物未熟土、他6圃場は黒ボク土である(農耕地土壌分類委員会, 1995)。供試圃場の播種床は、プラウ耕または表層攪拌により耕起した後、碎土および整地を行って造成した。したがって、耕起深は圃場によって異なる。

供試圃場の有効態リン酸含量(mg-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> kg<sup>-1</sup>)は、圃

<sup>1</sup>北海道立総合研究機構根鉋農業試験場(086-1135 北海道標津郡中標津町旭ヶ丘7番地)

<sup>2</sup>農研機構北海道農業研究センター(062-8555 北海道札幌市豊平区羊ヶ丘1)

<sup>†</sup>現在、農研機構本部(305-8517 茨城県つくば市観音台3-1-1)

<sup>‡</sup>現在、酪農学園大学(069-8501 北海道江別市文京台緑町582番地)

Corresponding Author: 八木哲生

2016年5月13日受付・2016年9月30日受理

日本土壌肥科学雑誌 第88巻 第1号 p. 12~19 (2017)

表1 供試圃場のトウモロコシ連作年数，土壌型，播種床造成法，土壌化学性および対照区のリン酸施肥量

試験年	圃場	トウモロコシ 連作年数 (年)	土壌型	播種床造成法 <sup>1)</sup>		pH (H <sub>2</sub> O)	有効態 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> <sup>2)</sup>	交換性塩基			リン酸吸収 係数 (mg・P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 100g <sup>-1</sup> )	対照区のリン酸 施肥量 <sup>3)</sup> (kg・P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup> )
				プラウ耕 (P)	表層攪拌			K <sub>2</sub> O	MgO	CaO		
2012 年	A	3	火山放出物未熟土	+	PH, RH	6.2	131	139	125	1,036	910	200
	B	6	黒ボク土	+	PH, RH	6.4	168	560	536	3,399	2,010	200
	C	9	黒ボク土	+	PH, RH	6.2	151	348	329	2,458	1,950	200
2013 年	D	5	火山放出物未熟土	+	DH, RH	5.7	153	197	97	895	1,160	200
	E	5	火山放出物未熟土	－	DH, RH	5.7	149	194	99	939	1,190	200
	F	4	火山放出物未熟土	+	PH, RH	5.7	139	234	187	1,165	1,050	200
	G	2	黒ボク土	+	RH	5.8	102	256	247	1,525	1,830	200
	H	2	黒ボク土	－	RH	5.9	101	279	235	1,506	1,820	200
	I	9	黒ボク土	+	RH	6.1	142	334	337	2,315	1,920	200
	J	4	黒ボク土	+	RH	6.8	426	667	866	4,767	1,710	160

<sup>1)</sup> 播種床造成法は，試験前年の収穫後から試験当年播種までの播種床造成工程。P, ブラウ；PH, パワーハロ；RH, ロータリハロ；DH, ディスクハロ。

<sup>2)</sup> 有効態 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> はトルオグ法による。土壌化学性の分析値は，各試験区の平均値。

<sup>3)</sup> 土壌診断に基づく施肥対応を行った場合のリン酸施肥量（北海道農政部，2010）。

場 J (426) では「北海道施肥ガイド2010」（北海道農政部，2010）における土壌診断基準値（100～300）より高かったが，他9圃場（101～168）では同基準値の範囲内であった（表1）。土壌のリン酸吸収係数（mg-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 100g<sup>-1</sup>）は，火山放出物未熟土で910～1,190，黒ボク土で1,710～2,010であった。また，土壌の pH および交換性塩基含量については，同基準値（pH, 5.5～6.5；交換性カリ，150～300mg-K<sub>2</sub>Okg<sup>-1</sup>；交換性苦土，250～450mg-MgOkg<sup>-1</sup>；交換性石灰，粒径により異なるが1,000～3,500mg-CaOkg<sup>-1</sup>）の範囲をわずかに外れる圃場もあったが，これらの土壌化学性が生育の制限因子になる可能性は低いと考えられた。

土壌診断に基づく施肥対応（北海道農政部，2010）を行った場合のリン酸施肥量（kg-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>ha<sup>-1</sup>）は，有効態リン酸含量が土壌診断基準値より高い圃場 J では160，有効態リン酸含量が同基準値の範囲内である他9圃場では200であり，これらのリン酸施肥区を各圃場の対照区とした（表1）。

## 2) 栽培概要および施肥処理

試験に供したトウモロコシ品種は，試験当時に当地域で奨励されていた早生品種である「たちぴりか」（2012年）および「ソリード」（2013年）とした（北海道農政部，2014）。設定播種密度は約82,000～83,000本ha<sup>-1</sup>（畦間×株間は75×16cm（2012年），72×17cm（2013年））とした。作付期間は試験年や供試圃場により異なるが，5月下旬から6月上旬に播種し，9月下旬から10月上旬に収穫した。

試験年の栽培期間（6月から9月）における中標津の積算日平均気温および降水量は，2012年は2,026℃および363mm，2013年は1,973℃および518mmであり，平年

値（1,873℃および561mm）よりも，日平均気温は高く，降水量は少なかった。この傾向は，他の試験地においても同様であった。

リン酸施肥量は，側条および全面全層施肥の合計量として過リン酸石灰を用いて0～300kg-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>ha<sup>-1</sup>の範囲で4～6水準を設けた。各々の施肥配分は表2に示した。リン酸以外の肥料成分は，「北海道施肥ガイド2010」（北海道農政部，2010）における施肥標準量に準じ，基肥は硫酸アンモニウム，硫酸カリウム，硫酸マグネシウムを用いて，側条で窒素(N)，カリ(K<sub>2</sub>O)，苦土(MgO)として，各々80, 140, 40kgha<sup>-1</sup>を施用した。なお，分施を基本とする窒素は，4葉期に尿素を用いて50kg-Nha<sup>-1</sup>を全面に表面施用した。

試験区の1区面積は，75m<sup>2</sup>（2012年）または46m<sup>2</sup>（2013年）とし，各処理区3反復を設けた。

## 3) トウモロコシ作物体および土壌の調査方法

生育初期（7月中旬，播種後38～48日目，6～9葉期）のトウモロコシは，各試験区から生育中庸な8個体（2個体×4畦）について，地上部と根部を分けて採取した。地上部は70℃で3日間通風乾燥後，重量を測定し，その粉碎物について，後述の方法でリン含有率を分析した。根部は水洗後，AM菌感染率を測定するための試料とした。

地上部全体を飼料として利用するホールクロップサイレージでは，トウモロコシの総体乾物率30％程度（黄熟期）で刈り取ることが望ましい（名久井ら，1981）。しかし，トウモロコシの栽培限界地帯で実施した本試験では，総体乾物率20～30％（糊熟期から黄熟期）の登熟程度を目安とし，次に示す方法により収穫期調査を行った。各試験区から生育中庸なトウモロコシ地上部（6個体×4畦の24個体（2012年），4個体×3畦の12個体（2013年））に

表2 リン酸用量試験における生育初期の AM 菌感染率, 地上部乾物重, P 含有率, P 吸収量および収穫期乾物収量

試験年	圃場	土壌型	リン酸施肥量 (kg-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup> )			AM 菌 感染率 (%)	生育初期					収穫期	
			側条	全面 全層	合計		地上部乾物重		地上部リン 含有率(%)	地上部リン吸収量		乾物収量	
							(g 本 <sup>-1</sup> )	初期生育 指数 <sup>1)</sup>		(mg-P 本 <sup>-1</sup> )	リン吸収 指数 <sup>1)</sup>	(Mg ha <sup>-1</sup> )	乾物収量 指数 <sup>1)</sup>
2012 年	A	火山放出物 未熟土	0	0	0	15	0.5 c	46	0.19 b	1.0 b	26	6.7 b	62
			80	0	80	12	0.8 bc	71	0.33 a	2.7 a	70	10.3 a	96
			80	80	160	20	0.9 ab	80	0.34 a	3.2 a	80	10.4 a	97
			80	120	200	14	1.2 a	100	0.34 a	3.9 a	100	10.7 a	100
			80	160	240	12	0.9 ab	78	0.32 a	2.9 a	74	10.2 a	95
			80	220	300	9	1.1 ab	95	0.37 a	4.1 a	103	10.9 a	102
	B	黒ボク土	0	0	0	26	1.2 b	80	0.35	4.2 b	62	14.8	91
			80	0	80	26	1.4 ab	98	0.43	6.3 ab	94	16.1	99
			80	80	160	25	1.4 ab	97	0.43	6.3 ab	93	16.2	100
			80	120	200	32	1.5 ab	100	0.46	6.7 ab	100	16.2	100
			80	160	240	24	1.6 ab	106	0.45	7.1 ab	105	16.3	100
			80	220	300	25	1.7 a	114	0.45	7.6 a	113	16.1	99
	C	黒ボク土	0	0	0	19	0.7	73	0.29 b	1.9	60	14.1	95
			80	0	80	20	1.0	110	0.35 ab	3.4	109	15.4	104
			80	40	120	19	0.9	105	0.36 ab	3.4	109	14.7	99
			80	80	160	15	1.1	119	0.38 a	4.0	128	14.1	95
			80	120	200	18	0.9	100	0.35 ab	3.1	100	14.8	100
2013 年	D	火山放出物 未熟土	0	0	0	36	4.0 b	29	0.24	9.7 b	26	8.6 b	75
			50	0	50	34	9.6 ab	71	0.28	26.9 ab	72	11.0 a	95
			50	50	100	34	12.1 a	89	0.28	34.4 a	92	10.6 ab	91
			50	100	150	32	12.2 a	90	0.27	32.7 a	87	10.9 a	94
			50	150	200	38	13.6 a	100	0.27	37.5 a	100	11.6 a	100
	E	火山放出物 未熟土	0	0	0	43	9.3 b	55	0.27 b	25.3 b	50	9.5 b	79
			50	0	50	46	13.4 ab	80	0.29 ab	39.5 ab	79	11.9 a	99
			50	50	100	49	16.3 a	97	0.31 a	49.8 a	99	11.9 a	100
			50	100	150	47	14.6 ab	87	0.29 ab	41.8 ab	83	11.6 a	96
			50	150	200	33	16.8 a	100	0.30 ab	50.1 a	100	12.0 a	100
	F	火山放出物 未熟土	0	0	0	34	3.5 c	24	0.24 b	8.3 c	21	7.1 b	70
			80	20	100	45	10.4 b	71	0.29 a	30.2 b	75	9.6 a	95
			80	80	160	31	13.1 a	89	0.28 a	36.9 ab	91	9.0 a	90
			80	120	200	37	14.7 a	100	0.28 ab	40.5 a	100	10.1 a	100
	G	黒ボク土	0	0	0	38	3.8 b	38	0.25 b	9.4 b	33	10.3 b	77
			50	0	50	33	8.4 a	86	0.30 a	24.9 a	88	12.5 a	93
			50	50	100	35	9.8 a	100	0.30 a	28.9 a	103	12.6 a	95
			50	100	150	34	9.1 a	93	0.29 a	26.7 a	95	12.3 a	92
			50	150	200	38	9.8 a	100	0.29 a	28.2 a	100	13.4 a	100
	H	黒ボク土	0	0	0	60	4.5 b	48	0.29	13.3 b	49	10.2 b	82
			50	0	50	45	7.5 ab	81	0.30	22.4 a	83	11.4 ab	92
			50	50	100	43	9.2 a	99	0.30	27.3 a	100	12.5 a	100
			50	100	150	35	9.4 a	100	0.30	28.1 a	103	12.3 ab	99
			50	150	200	40	9.3 a	100	0.29	27.1 a	100	12.4 a	100
	I	黒ボク土	0	0	0	57	7.8	74	0.31	24.3	79	10.6	79
			80	20	100	42	10.8	101	0.30	32.6	106	12.3	93
			80	80	160	37	11.8	111	0.31	36.5	118	12.4	93
			80	120	200	35	10.6	100	0.29	30.9	100	13.3	100
	J	黒ボク土	0	0	0	31	25.5 b	86	0.34	86.9	89	11.3 b	90
			80	0	80	27	30.1 ab	102	0.35	105.2	107	12.8 a	102
			80	40	120	21	32.2 a	109	0.33	107.8	110	11.9 ab	95
			80	80	160	26	29.5 ab	100	0.33	97.9	100	12.5 ab	100

各調査項目の数値に付した異なるアルファベットは, 各圃場内でリン酸施肥の処理間で有意差があることを示す (Tukey-Kramer,  $p < 0.05$ ).

<sup>1)</sup> 各圃場における対照区 (圃場 J, 160 kg-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>; その他 9 圃場, 200 kg-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>) の平均値を 100 とした相対値. 対照区は太字で示した.



ついて、地表から約15cmの高さで刈取り、茎葉部と雌穂部の生重量を部位別に測定した。その後、70°Cで3日間（農用細断機（IHIスター、SCH2110）で細断した茎葉の一部）または5日間（各試験区で代表的な4〜5本の雌穂部）、通風乾燥して求めた部位別の乾物率を、前述の生重量に乗じて乾物収量を求めた。また、部位別の乾燥試料を粉碎してリン含有率の分析に供した。

土壌は、試験年春の施肥前に、各試験区より3地点ずつ（深さ0〜20cm）採取し、2mm篩を通した風乾細土を化学性の分析に供した。

#### 4) 作物体および土壌の分析方法

生育初期および収穫期におけるトウモロコシ地上部試料は、水野・南（1980）の方法に基づき硫酸と過酸化水素で湿式分解した後、分解液中のリン含有率をバナドモリブデン酸による比色法（Murphy and Riley, 1962）にて測定した。また、地上部乾物重にリン含有率を乗じるにより、地上部リン吸収量を求めた。地上部乾物重、リン吸収量および収穫期乾物収量については、各圃場における調査時の生育ステージや品種の影響を標準化するため、各圃場の対照区における値（3反復の平均値）を100とした相対値を算出し、各々初期生育指数、リン吸収指数および乾物収量指数と表記した。

生育初期におけるトウモロコシ根部について、大場ら（2006）の方法に準じてAM菌感染率を測定した。すなわち、水洗し5mm程度に刻んだ根部を、10%水酸化カリウム溶液中で加熱（60°C、約12時間）することにより脱色し、2%塩酸で酸性化、0.05%トリパングルー溶液で染色後、ラクトグリセロール溶液に保存した。このように染色したサンプルをスライドガラスに並べ、AM菌の各構造物（内生菌糸、樹枝状体、嚢状体）を顕微鏡で観察した。なお、AM菌感染率は、観察した視野の中心と根の総交点数（100〜150）に対して、内生菌糸、樹枝状体、嚢状体のいずれかの構造物と視野中心との交点数の割合を計算することにより評価した。

土壌のpH（H<sub>2</sub>O）はガラス電極法（土壌：水=1:2.5）、有効態リン酸はトルオーグ法、交換性塩基は1molL<sup>-1</sup>酢酸アンモニウム液による抽出法、リン酸吸収係数は2.5%リン酸アンモニウム液法により測定した（土壌環境分析法編集委員会, 1997）。

#### 5) 統計処理

各調査項目に対するリン酸施肥処理間の比較は、Tukey-Kramerの多重比較により、初期生育指数と収穫期乾物収量指数の関係については、初期生育指数「100〜」の階級を対照群とするDunnettの多重比較により行った。これらは、危険率5%未満のときに統計的に有意差が認められるとした。また、リン酸施肥と生育の関係について、非線形最小二乗法による平方根モデル（Nelson *et al.*, 1985; 荒川, 2012）を適用し解析を行った。これらの統計処理には、統計ソフトJMP12（SAS Institute Japan）を用いた。

### 3. 結 果

#### 1) 生育初期のAM菌感染率と地上部乾物重

生育初期のAM菌感染率は、2012年は9〜32%、2013年は21〜60%であり、いずれの圃場においてもリン酸施肥処理による有意な差は認められなかった（表2）。

生育初期の地上部乾物重は、播種後日数が少ない2012年（播種後38〜39日、0.5〜1.7g本<sup>-1</sup>）で2013年（同46〜48日、3.5〜32.2g本<sup>-1</sup>）より少なかった（表2）。リン酸施肥区の地上部乾物重は、圃場CおよびIを除く8圃場においてリン酸無施肥区よりも有意に高まった。しかし、リン酸施肥区の中では、地上部乾物重に有意な差が認められない圃場が大部分であった。リン酸無施肥区の初期生育指数は24〜86を示し、圃場間差が大きかった（表2）。また、黒ボク土の初期生育指数（38〜86、平均は67）は、火山放出物未熟土（24〜55、同39）より大きい傾向を示した。

#### 2) 生育初期の地上部リン含有率とリン吸収量

生育初期の地上部リン含有率は概ね0.2〜0.5%であり、試験年および圃場による差は小さかった（表2）。リン酸施肥区のリン含有率は、火山放出物未熟土の圃場A、EおよびF、黒ボク土の圃場CおよびGにおいて、リン酸無施肥区よりも有意に高まった。しかし、リン酸施肥区の中では、リン含有率に有意な差が認められなかった。

リン酸施肥区の地上部リン吸収量は、黒ボク土の圃場C、IおよびJを除く7圃場において、リン酸無施肥区よりも有意に高まった。しかし、リン酸施肥区の中では、リン吸収量に有意な差が認められない場合が多かった。また、リン酸無施肥区のリン吸収指数は、前述の初期生育指数と同様に、黒ボク土（33〜79、平均57）で火山放出物未熟土（21〜50、同38）より大きかった。

#### 3) 収穫期の乾物収量

各圃場の対照区における収穫期乾物収量は、10.1〜16.2Mg<sup>ha</sup><sup>-1</sup>の範囲（10圃場の平均は12.7Mg<sup>ha</sup><sup>-1</sup>）であり、当地域の基準収量（総体乾物率30%を前提とした生収量で45〜50Mg<sup>ha</sup><sup>-1</sup>、乾物収量で13.5〜15.0Mg<sup>ha</sup><sup>-1</sup>）よりやや低かった。リン酸施肥区の収穫期乾物収量は、黒ボク土の圃場B、CおよびIを除く7圃場において、リン酸無施肥区よりも有意に高まった。しかし、リン酸施肥区の中では、乾物収量に有意な処理間差が認められなかった。また、乾物収量指数は、リン酸無施肥区で62〜95、リン酸施肥区では91〜104であり、生育初期に見られたリン酸施肥の処理間差（初期生育指数は、リン酸無施肥区で24〜86、リン酸施肥区で71〜119）より縮小する傾向にあった（表2）。

### 4. 考 察

AM菌の宿主作物跡地では、後作トウモロコシのAM菌感染率が高まりリン吸収が促進され、トウモロコシの生育が向上することが知られている（Arihara and Karasawa, 2000; 唐澤, 2004; 白木ら, 2007）。本試験の供試

圃場は土壌型、播種床造成法（プラウ耕、表層攪拌）、リン酸肥沃度（有効態リン酸含量 $102\sim 426\text{ mg-P}_2\text{O}_5\text{ kg}^{-1}$ ）が様々なトウモロコシ連作畑であったが、すべての圃場において、リン酸施肥区（現行基準のリン酸施肥量の25～150%）の乾物収量指数は90以上であり、リン酸施肥がトウモロコシの収穫期乾物収量に及ぼす影響は小さかった。本試験で得られた乾物収量は基準収量に満たない圃場が多かったが、これは供試圃場が生産者圃場であるため、収穫期の調査は生産者の収穫作業前に行わざるを得ないことから、収穫適期よりやや早かったことが一因として考えられる。しかしながら、リン酸施肥の処理効果を相対的に比較することは可能と考え、本試験のデータを用いて、トウモロコシ連作畑におけるリン酸減肥可能性を考察することとした。

はじめに、収量水準を低下させない範囲でのリン酸施肥量を求めるための判断指標について検討した。本試験において、各圃場のリン酸施肥区の収穫期乾物収量は概ね同等（乾物収量指数は92～104）であり、リン酸施肥の処理間に有意な差が認められなかった。したがって、収穫期乾物収量や乾物収量指数に基づいて判断する場合には、大幅なリン酸減肥が可能と考えられる。これに対し、生育初期の地上部乾物重は、収穫期乾物収量よりリン酸施肥の処理間差が大きかった（リン酸施肥区の初期生育指数は71～119）。吉良（1985）は、生育可能期間が短い寒冷地におけるトウモロコシの生産性について、その収量や品質は、生育期間の積算気温と密接な関係が認められることから、登熟期間を十分確保するため初期生育を向上させることが重要であると述べている。また、播種から6葉期までの生育初期におけるリン供給が収穫期収量に影響を及ぼすことが認められている（Barry and Miller, 1989）。これらのことから、寒冷地でのトウモロコシ栽培において、収穫期の収量水準を可能な限り低下させないためには、生育初期に一定水準以上の生育量を確保することやリン供給を十分に行うことが重要と考えられた。トウモロコシに対するリン酸肥効は低温年でより大きいことから（田中ら, 1971）、本試験において収穫期乾物収量の処理間差が小さかった理由は、2012年および2013年における6月から9月の積算日平均気温が平年値よりも高かったことが一因と考えられた。したがって、本試験における収穫期乾物収量の統計的な有意差のみを根拠として、大幅な減肥を可能と結論した場合、寒冷年における収量低下リスクが高まることが懸念される。一方、リン酸施肥量に水準を設けた本試験の結果において、初期生育指数と乾物収量指数の関係をみると（図1）、乾物収量指数は初期生育指数の減少とともに低下し、初期生育指数90未満のときに、同指数100以上の階級と比較して有意な低下が認められた。このことは、リン栄養状態により初期生育が影響を受ける条件では、一定水準以上の初期生育を確保できなければ、生育が回復しづらいことを示唆している。以上のことから、本報告では、リン酸減肥の可否を判断する指標として、収穫

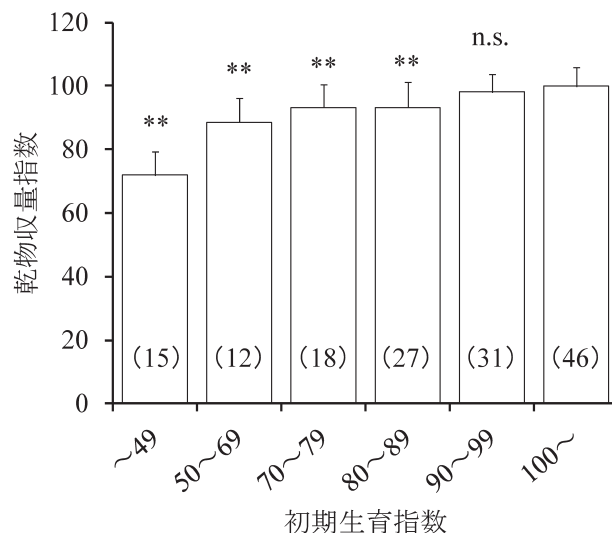


図1 トウモロコシの初期生育指数と乾物収量指数の関係  
各指数は、各圃場の対照区（現行基準のリン酸施肥量を施用した処理区）における生育量の平均値を100とした相対値。エラーバーは標準偏差を示す。（）の数値は、初期生育指数の各階級におけるサンプル数。\*\*は、初期生育指数の各階級における乾物収量指数が、「100～」と比較して有意差があることを示す（Dunnett,  $p<0.01$ , n.s. は  $p>0.05$ ）。

期乾物収量指数よりもリン酸施肥の処理間差が明瞭な初期生育指数を用い、この値が90以上のとき収穫期収量の低下リスクが小さいと判断した。

次に、各処理区のリン酸施肥量と初期生育指数との関係について、現行基準のリン酸施肥量との関連から解析するため、前報（八木ら, 2014）と同様に「リン酸施肥充足率」の概念を取り入れた。すなわち、圃場の有効態リン酸含量の多寡に応じて設定されている現行のリン酸施肥量（北海道農政部, 2010）に対する、各試験区のリン酸施肥量の割合を「リン酸施肥充足率」と定義し（八木ら, 2014）、これと初期生育指数の関係を解析した。

図2に、火山放出物未熟土4圃場と黒ボク土6圃場のデータについて、リン酸施肥充足率と初期生育指数（3反復の平均値）の関係を示した。黒ボク土および火山放出物未熟土のいずれについても、初期生育指数はリン酸施肥充足率の増大とともに増加するが、その増加度合は次第に小さくなる傾向にあった。また、土壌型別にみると、黒ボク土のプロットは火山放出物未熟土のそれよりも初期生育指数が高い位置に存在する傾向にあった。そこで、施肥と作物生育の関係について、非線形最小二乗法による平方根モデルを土壌型別に当てはめ、以下の回帰式（(1)火山放出物未熟土、(2)黒ボク土）を得た。

$$Y = 38.38 + 8.89 X^{1/2} - 0.35 X \quad (R^2 = 0.82) \quad (1)$$

$$Y = 66.32 + 6.45 X^{1/2} - 0.26 X \quad (R^2 = 0.68) \quad (2)$$

ここで、Yはトウモロコシの初期生育指数、Xはリン酸施肥充足率である。

これらの回帰式から、リン酸減肥を可能とする基準値

(初期生育指数90)を満たすリン酸施肥充足率は、火山放出物未熟土で80.0、黒ボク土で20.2と見込まれた。すなわち、収穫期乾物収量を低下させない範囲でのリン酸減肥可能割合は、火山放出物未熟土では現行基準の20%、黒ボク土では同約80%と考えられた。

Treseder (2013) は、AM 菌効果に関する多くの研究についてメタ解析を行い、AM 菌感染率が高いほど作物生育に対する AM 菌効果が高いことを報告している。本試験の2カ年の結果については、各土壌型における AM 菌感染率の平均値は、火山放出物未熟土(4圃場)で32%、黒ボク土(6圃場)で33%とほぼ等しかったことから、AM 菌感染率の差異そのものがリン酸施肥反応に影響している可能性は小さいと考えられた。AM 菌は菌糸を伸長させることにより、土壌中のリンとの接触機会を増やし、植物も吸収可能な形態のリンを吸収すると考えられている(Yao *et al.*, 2001)。また、AM 菌のリン吸収能力は、土壌にお

ける菌糸の広がり方の影響を受けることが知られている(Jakobsen *et al.*, 1992)。今後、土壌型によるリン酸施肥反応の違いを検討するためには、AM 菌菌糸の長さや広がりにも着目する必要がある。

一方、前報(八木ら, 2014)において、非宿主作物跡地で栽培されたトウモロコシの生育初期における AM 菌感染率(15~70%)は、本報の値と同等か高いにも関わらず、リン酸施肥充足率の減少にともなう初期生育指数の低下が認められた。すなわち、感染率のみでは AM 菌による生育促進効果を判断することは困難と考えられた。そこで、本報および前報(八木ら, 2014)の2010年および2011年におけるトウモロコシ連作畑のデータのみを用いて、次の方法により初期生育に寄与する要因について解析を試みた。すなわち、リン吸収量がトウモロコシの生育制限因子となりやすいリン酸無施肥条件において、初期生育指数を目的変数、土壌の有効態リン酸含量および AM 菌感染率を説明変数として重回帰分析を行い、以下の重回帰式(3)を得た(図3)。

$$Y=15.19+0.14 X_1+0.59 X_2 \quad (3)$$

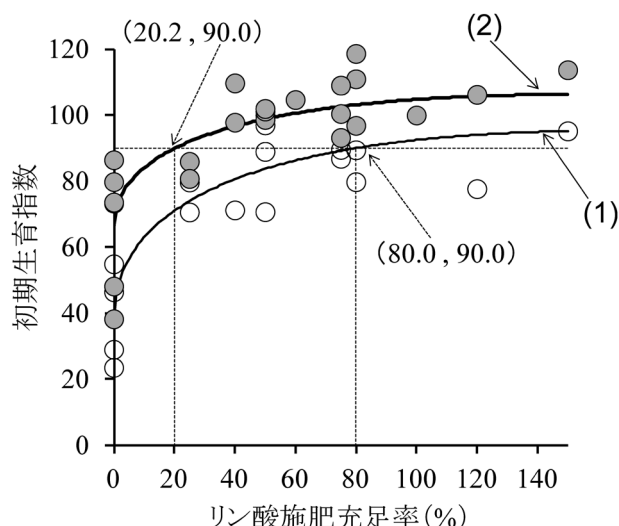


図2 リン酸施肥充足率と初期生育指数の関係

初期生育指数は、各圃場の対照区(現行基準のリン酸施肥量を施用した処理区)における地上部乾物重の平均値を100とした相対値。リン酸施肥充足率は、圃場の有効態リン酸含量の多寡に応じて設定されている現行のリン酸施肥量(北海道農政部, 2010)に対する、各試験区のリン酸施肥量の割合。プロット(○, 火山放出物未熟土; ●, 黒ボク土)は、各圃場における処理区ごとの平均値(n=3)。回帰曲線は、(1) $Y=38.38+8.89 X^{1/2}-0.35 X$  ( $R^2=0.82$ , 火山放出物未熟土4圃場,  $n=20$ ), (2) $Y=66.32+6.45 X^{1/2}-0.26 X$  ( $R^2=0.68$ , 黒ボク土6圃場,  $n=29$ )。

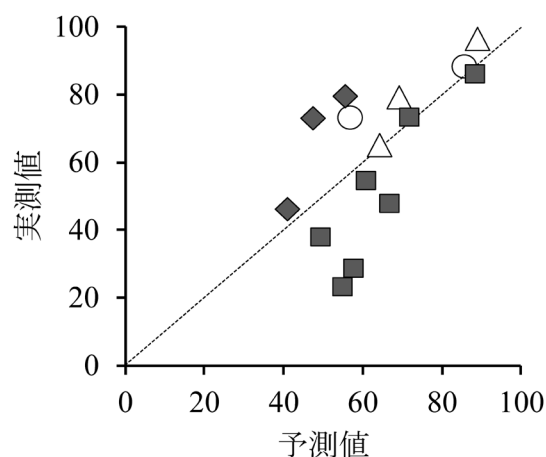


図3 リン酸無施肥区における初期生育指数の予測値と実測値の関係

初期生育指数は、各圃場の対照区(現行基準のリン酸施肥量を施用した処理区)における地上部乾物重の平均値を100とした相対値。図中の点線は、1:1の関係を示す。予測値は以下の式により算出した。 $Y=15.19+0.14 X_1+0.59 X_2$  (修正済み  $R^2=0.35$ ,  $p<0.05$ ,  $RMSE=18.22$ )。ここで、 $X_1$ は有効態リン酸含量、 $X_2$ はAM菌感染率を表す。○, 2010年; △, 2011年(以上、八木ら(2014)より); ◆, 2012年; ■, 2013年。

表3 根釧地域の飼料用トウモロコシに対するアーバスキュラー菌根菌の機能を考慮したリン酸施肥基準

有効態リン酸 <sup>1)</sup> (mg-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> kg <sup>-1</sup> )		基準値未満		基準値	基準値以上	
		~50	50~100	100~300	300~600	600~
リン酸施肥量 (kg-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup> )	新規作付 <sup>2)</sup>	300	240	200	160	100
	連作2年目~ <sup>2)</sup>	240	200	160	120	80

<sup>1)</sup> 有効態リン酸はトルオーグ法。 <sup>2)</sup> 新規作付は現行基準のリン酸施肥量と同じ。連作2年目以降、現行基準のリン酸施肥量から一律20%を減じる。



ここで、Yはトウモロコシの初期生育指数、 $X_1$ は有効態リン酸含量 ( $\text{mg-P}_2\text{O}_5\text{kg}^{-1}$ )、 $X_2$ はAM菌感染率(%)である。

式(3)の自由度修正済み $R^2$ は0.35(平均二乗誤差(RMSE)は18.22)であり、さらに他の要因の寄与が示唆されるものの、有効態リン酸含量およびAM菌感染率はいずれも有意な説明変数( $p<0.05$ )として選択されたことから、初期生育の良否には有効態リン酸含量とAM菌感染率の影響を無視できない(標準偏回帰係数は各々0.51および0.58)。言い換えると、有効態リン酸含量やAM菌感染率が高い条件は、大幅なリン酸減肥を可能とする必要条件である。もちろん、これらの要因の寄与率は高くないため、初期生育に影響を与える他の要因についても今後、整理する必要がある。

以上より、トウモロコシ連作畑において、収穫期の収量水準を低下させないリン酸施肥量は、土壌型、有効態リン酸含量およびAM菌感染率などにより異なるが、本報では、火山放出物未熟土で現行比20%、黒ボク土で同80%削減可能と推定できた。前者の減肥割合は、北海道におけるAM菌の宿主作物跡地で栽培したダイズに対する値(大友ら, 2015)と概ね同等であり、生産現場に普及しやすい。一方、後者の減肥割合はコスト低減に大きく貢献する反面、式(3)の寄与率が低い現時点では生産性に対するリスクも懸念される。そこで、現実的な対応として、トウモロコシ連作条件のリン酸施肥量を両土壌ともに一律で現行比20%削減する基準を設定した(表3)。なお、今後の研究発展により、AM菌効果の評価手法について精度向上を図ることができれば、さらなる減肥の可能性も考えられる。

今後は、栽培条件ごとに、トウモロコシ生育に対するAM菌感染率、リン酸施肥量、その他の要因の影響度合をさらに解析し、これらを定量化する必要がある。また、AM菌の効果などを考慮した効率的なリン酸施肥技術を広く普及するためには、土着AM菌が作付予定の作物に感染する能力やリン吸収促進効果について、施肥設計前に診断できる技術の開発が望まれる。

## 5. 要 約

アーバスキュラー菌根菌(AM菌)の宿主作物を前作物とすることで、宿主の後作物のリン吸収が促進されることは広く知られている。本報告では、北海道根釧地域において、AM菌の宿主作物である飼料用トウモロコシの連作条件に対し、AM菌の効果を検討したリン酸減肥可能量を検討し、以下の結果を得た。

1) リン酸減肥の可否を判断する指標として、初期生育指数を用いることとした。

2) 収穫期収量を低下させないリン酸施肥量は、土壌型、有効態リン酸含量およびAM菌感染率などにより異なると考えられた。

3) 多様な条件のトウモロコシ連作畑において、現行基

準から一律20%減肥する基準を設定した。

謝 辞：本稿を取りまとめるにあたり、道総研中央農業試験場農業環境部長長尾明宣氏にご校閲いただいた。ここに、深く感謝の意を表する。

付 記：本研究は農林水産省委託プロジェクト研究「気候変動に対応した循環型食料生産等の確立のための技術開発」の成果の一部である。また、本報告の一部は、2013年度日本土壌肥科学会北海道支部秋季大会において発表した。

## 文 献

- 荒川祐介 2012. 堆肥のペレット成型がそのリン酸肥効に及ぼす影響. 土肥誌, **83**, 249–255.
- Arihara, J., and Karasawa, T. 2000. Effect of previous crops on arbuscular mycorrhizal formation and growth of succeeding maize. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **46**, 43–51.
- Barry, D.A.J., and Miller, M.H. 1989. Phosphorus nutritional requirement of maize seedlings for maximum yield. *Agron. J.*, **81**, 95–99.
- 土壌環境分析法編集委員会 1997. 土壌環境分析法, p. 195–385.
- 北海道農政部 2010. 北海道施肥ガイド2010, p. 1–235. 札幌.
- 北海道農政部 2014. 北海道牧草・飼料作物優良品種一覧, p. 1–38. 札幌.
- Jakobsen, I., Abbott, L.K., and Robson, A.D. 1992. External hyphae of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi associated with *Trifolium subterraneum* L. 1. Spread of hyphae and phosphorus inflow into roots. *New Phytol.*, **120**, 371–380.
- 唐澤敏彦・笠原賢明・建部雅子 2001. 緑肥作物の導入によるアーバスキュラー菌根菌の増殖とトウモロコシ栽培への利用. 土肥誌, **72**, 357–364.
- 唐澤敏彦 2004. 輪作におけるアーバスキュラー菌根菌の動態と作物の生育に関する研究. 北海道農業研究センター研究報告, **179**, 1–71.
- 吉良賢二 1985. 北限地帯におけるサイレージ用トウモロコシの生育および生産性に関する研究 第3報 初期生育が収量に及ぼす影響. 日作記, **54**, 47–53.
- 濃沼圭一 2013. 北海道における飼料用トウモロコシの栽培技術および育種の動向. 北畜草会報, **1**, 23–27.
- 窪田文武・植田精一 1981. 飼料用トウモロコシの栽培環境と生産性 I トウモロコシの気象生産力の地域間差. 日草誌, **27**, 167–173.
- 松崎克彦 2009. アーバスキュラー菌根菌とその利用. 農業および園芸, **84**, 170–175.
- Miller, M.H. 2000. Arbuscular mycorrhizae and the phosphorus nutrition of maize: A review of Guelph studies. *Can. J. Plant Sci.*, **80**, 47–52.
- 水野直治・南 松雄 1980. 硫酸-過酸化水素による農作物中N, K, Mg, Ca, Fe, Mn定量のための迅速処理法. 土肥誌, **51**, 418–420.
- Murphy, J., and Riley, J.P. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chim. Acta*, **27**, 31–36.
- 名久井 忠・岩崎 薫・早川政市 1981. ホールクロップサイレージ用トウモロコシの収穫適期の検討. 日草誌, **26**, 412–417.
- Nelson, L.A., Voss, R.D., and Pesek, J.T. 1985. Agronomic and statistical evaluation of fertilizer response. In O.P. Engels-tad (ed.) *Fertilizer Technology and Use* (third ed.), p. 53–90, ASA, Madison, WI.
- 農耕地土壌分類委員会 1995. 農耕地土壌分類第3次改訂版. 農業

- 環境技術研究所資料, **17**, 1–79.
- Oka, N., Karasawa, T., Okazaki, K., and Takebe, M. 2010. Maintenance of soybean yield with reduced phosphorus application by previous cropping with mycorrhizal plants. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **56**, 824–830.
- 大場広輔・斎藤勝晴・藤吉正明 2006. アーバスキュラー菌根菌実験法(2) アーバスキュラー菌根の観察. *土と微生物*, **60**, 57–61.
- 大友 量・酒井 治・塚本康貴・杉戸智子・谷藤 健・岡 紀邦 2015. 北海道のダイズ作における輪作順序を考慮したリン酸減肥法. *土肥誌*, **86**, 549–552.
- 田中 明・山口淳一・原 徹夫 1971. トウモロコシの栄養生理学的研究(第11報) 異なった栽植密度下における窒素およびリンの肥効の年次変異. *土肥誌*, **12**, 465–470.
- Treseder, K.K. 2013. The extent of mycorrhizal colonization of roots and its influence on plant growth and phosphorus content. *Plant Soil*, **371**, 1–13.
- 臼木一英・山本泰由・田澤淳子 2007. 温暖地における前作と耕起法の組み合わせがトウモロコシの生育とアーバスキュラー菌根菌との共生関係に及ぼす影響. *日作記*, **76**, 394–400.
- 八木哲生・松本武彦・大友 量・小林創平・三枝俊哉・岡 紀邦 2014. 根釧地域における飼料用トウモロコシのアーバスキュラー菌根菌感染率とリン酸施肥反応に及ぼす前作物の影響. *土肥誌*, **85**, 501–508.
- Yao, Q., Li, X., Feng, G., and Christie, P. 2001. Mobilization of sparingly soluble inorganic phosphates by the external mycelium of an arbuscular mycorrhizal fungus. *Plant Soil*, **230**, 279–285.

### Phosphorus fertilizer recommendations for continuously cultivated maize in consideration with the effect of arbuscular mycorrhizal fungi in Konsen, Japan

Tetsuo YAGI<sup>1</sup>, Takehiko MATSUMOTO<sup>1</sup>, Ryo OHTOMO<sup>2</sup>, Sohei KOBAYASHI<sup>2, †</sup>,

Toshiya SAIGUSA<sup>1, ‡</sup> and Norikuni OKA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>HRO Konsen Agricultural Experiment Station Hokkaido,

<sup>2</sup>NARO Hokkaido Agricultural Research Center,

<sup>†</sup>Present address: NARO Headquarters,

<sup>‡</sup>Present address: Univ. Rakuno Gakuen

Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) are known to colonize plant roots and improve the phosphorus (P) uptake by their host plants, including maize (*Zea mays* L.). However, few studies have addressed the extent to which the application of P fertilizer can be reduced in the presence of AMF. Thus, the present study aimed to determine which P fertilizer application rates could be used without reducing the yield of continuously cultivated maize in Konsen, Japan.

The results of our field experiments demonstrated that maize yield was not significantly affected by reducing the application rate of P fertilizer, except when no P fertilizer was applied. Relative early growth rate was a useful measure for evaluating the effect of reduced P fertilizer application on maize yield. P fertilizer application rates that did not result in reduced yield were different depending on factors such as soil type, available phosphorus content, and AMF colonization. Based on relative early growth rate, we tentatively determined that P fertilizer application rates could be reduced by 20 % of the present standard in fields where maize is continuously cultivated.

The application of P fertilizer to maize could be further reduced if the effects of AMF on the P uptake of host plants are quantified more precisely under various cropping conditions.

**Key words:** arbuscular mycorrhizal fungi, continuous cultivation, maize (*Zea mays* L.), phosphorous fertilizer

(Jpn. Soil Sci. Sci. Plant Nutr., **88**, 12–19, 2017)