

# 3,4-dimethylpyrazole phosphate(DMPP)の硝酸化成抑制効果と水稻基肥への活用

誌名	日本土壌肥料学雑誌 = Journal of the science of soil and manure, Japan
ISSN	00290610
著者名	田淵,浩平 小林,新
発行元	日本土壌肥料学会
巻/号	90巻2号
掲載ページ	p. 147-152
発行年月	2019年4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



ノ ー ト

### 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP) の 硝酸化成抑制効果と水稻基肥への活用

田淵浩平・小林 新<sup>†</sup>

キーワード Dd, DMPP, 硝酸化成抑制材, 水稻

#### 1. はじめに

硝酸化成抑制材は、土壤中でアンモニウム態窒素の硝酸態窒素への変化に関わる菌の増殖や活性を抑制するために使われる(尾和ら, 2007)。硝酸化成を抑えることにより、アンモニウム態窒素が土壤中に長く保持され、窒素の流出が抑制されて、窒素質肥料の効果が持続し、作物への窒素肥効の向上が期待できる(三幣, 1972)。

硝酸化成抑制材は、アメリカのDow Chemical社によって、1962年に開発されたNitrapyrin (2-Chloro-6-(trichloromethyl)pyridine)が最初である(Goring, 1962)。その後、日本でも活発な開発がなされたが、1986年における硝酸化成抑制材入り肥料の生産量は、約4万トン(当時の全化成肥料生産量の約1%)と僅かであり(栗原・越野, 1986)、近年におけるその生産量は、1986年当時と同等かもしくは低減していると考えられる。海外では、硝酸化成抑制材入り肥料は被覆肥料に比べて安価であり(MARKETS AND MARKETS, 2015a)、温室効果ガスである亜酸化窒素の放出量低減効果があることから(Linzmeier *et al.*, 2001; 森本ら, 2008; 農業環境技術研究所, 2009; Weiske *et al.*, 2001)、その活用が見直されつつある。世界全体の硝酸化成抑制材入り肥料の生産量は、2014年で約37.8千トンに対して、2020年で49.0千トンにまで増加すると推定されている(MARKETS AND MARKETS, 2015b)。

近年、日本でもドイツのBASF社が販売する新規の硝酸化成抑制材3,4-dimethylpyrazole phosphate (以下、

DMPP)を添加した肥料が使用され始めた。DMPPの特徴はZerulla *et al.* (2001)により報告されており、その基本的な性質を表1に示した。DMPPは、海外・日本国内ともに普及が進んでいるDicyandiamide (以下、Dd)より、少量で高い硝酸化成抑制効果がみられたことが報告されている(Zerulla *et al.*, 2001)。また、Pasda *et al.* (2001)は、1997~1999年に西南ヨーロッパ各地の136圃場で、DMPP入り肥料を供試した栽培試験を複数の作物で実施し、作物の収量が増加する傾向があることを報告している。

松森・開田(2016)は熊本県において、水稻の作付面積が大きい大規模農家や休日しか農作業ができない兼業農家では、基肥施肥、代掻き等の春作業の労力分散を図るために、基肥施肥時期を早めている状況を報告している。さらに、基肥施肥から代掻きまでの期間が長くなる場合、乾田状態で施肥されたアンモニウム態窒素が、硝酸化成により硝酸態窒素となり、降雨により溶脱されること、加えて、入水後の土壤は還元状態になるため、硝酸態窒素が脱窒により失われ、窒素の肥効が低下することが報告されている(松森・開田, 2016)。

本試験では、DMPP入り肥料の日本での普及を想定し、国内土壤におけるDMPPの硝酸化成抑制効果を検証するため、試験Iとして、畑条件での瓶培養試験を実施した。さらに、基肥施肥時期を早めた場合でも、DMPP入り肥料を用いて硝酸態窒素への変化を抑制することで、水稻への肥効の低下を抑えられるか検証するため、試験IIとして、水稻ポット栽培試験を行ったので報告する。

#### 2. 材料と方法

##### 1) 試験I: 異なる土壤におけるDMPPの硝酸化成抑制効果

国内土壤におけるDMPPの硝酸化成抑制効果を明らかにするため、畑土壤2種類(褐色低地土、黒ボク土)を用いた培養試験を実施した。表2に供試土壤の理化学性を示した。肥料は、尿素(和光純薬工業、特級)と、尿素と各硝酸化成抑制材を混合したDMPP系列およびDd系列の3種類を供試した。DMPP系列では、DMPP (TORONTO RESEARCH CHEMICALS INC, D478960, Purity $\geq$ 98%)

Kouhei TABUCHI and Arata KOBAYASHI: The effect of 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP) on nitrification inhibition and its use for basal nitrogen application to paddy rice

JA 全農 九州営農資材事業所 (810-0001 福岡市中央区天神 4-5-23)

<sup>†</sup>現在, JA 全農 本所 耕種資材部; 100-6832 東京都千代田区大手町1-3-1

Corresponding Author: 田淵浩平 tabuchi-kouhei@zennoh.or.jp

2018年3月19日受付・2018年11月25日受理

日本土壤肥料学雑誌 第90巻 第2号 p. 147~152 (2019)

表1 DMPPの理化学的特性 (Zerulla *et al.*, 2001)

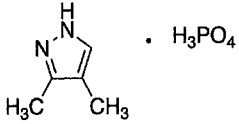
構造式	
分子式・分子量	C <sub>5</sub> H <sub>11</sub> N <sub>2</sub> O <sub>4</sub> P (194.2)
融点	165°C
結晶	灰色・白色粉末
水溶解度	46 g L <sup>-1</sup> (pH7, 20°C)
pH	2.5~3.0(132 g L <sup>-1</sup> 25°C)

表2 供試土壌の理化学性 (試験 I: 瓶培養試験, 試験 II: ポット栽培試験)

試験区分	土壌群	土壌採取地	pH (H <sub>2</sub> O)	EC (dS m <sup>-1</sup> )	NH <sub>4</sub> -N NO <sub>3</sub> -N		CEC (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	TC (g kg <sup>-1</sup> )	TN	C/N
					(mg kg <sup>-1</sup> )					
試験 I	褐色低地土	神奈川県平塚市	7.5	0.03	2.6	5.3	23.9	5.3	0.5	10.6
	黒ボク土	神奈川県藤沢市	6.2	0.15	2.0	18.3	41.1	82.5	4.9	16.8
試験 II	灰色低地土	神奈川県平塚市	7.5	0.05	14.7	11.4	36.2	28.7	2.8	10.2

分析値は乾土当たり。

表3 供試肥料の構成

No	供試肥料	内訳 (重量%)		
		尿素	DMPP	Dd
1	尿素	100.0	—	—
2	尿素+DMPP 0.2%	99.9	0.1	—
3	尿素+DMPP 0.6%	99.7	0.3	—
4	尿素+DMPP 1.0%	99.6	0.4	—
5	尿素+Dd 5.0%	96.6	—	3.4
6	尿素+Dd 10.0%	93.0	—	7.0
7	尿素+Dd 15.0%	89.4	—	10.6

DMPP 系列では, DMPP を尿素的窒素成分当たり資材重量で, 0.2, 0.6, 1.0% となるように添加混合した。

Dd 系列では, Dd を供試肥料全体に含まれる窒素成分に対して, Dd 由来の窒素を 5, 10, 15% 含有するように Dd を添加混合した。

を尿素的窒素成分当たり資材重量で, 0.2, 0.6, 1.0% の 3 水準となるように添加混合したものとした。Dd 系列では, Dd (和光純薬工業, 化学用) を供試肥料全体に含まれる窒素成分に対して, Dd 由来の窒素を 5, 10, 15% 含有する 3 水準となるように Dd を添加混合したものとした。DMPP および Dd の添加量の設計は慣例として, 尿素的窒素成分に対する資材重量, あるいは供試肥料全体の窒素成分に対する資材由来の窒素成分として, 異なる添加設計で示した。表3では, 添加量 (%) の比較のため, それぞれの添加設計を重量割合に換算したものを示した。

培養試験は 100 mL の UM ガラス瓶 (アズワン, 100 mL 容, 品番 5-128-22) に 2 mm の篩を通過させた未風乾土 (乾土 20 g 相当) を入れ, 供試肥料をあらかじめイオン交換水に溶解させたものを, 窒素として 0.5 g kg<sup>-1</sup> 乾土となるよう添加し, ガラス棒でよく混合した。次にイオン交換水を最大容水量の 50% になるように加え, 25°C に設定した恒温器で培養した。合わせて, 土壌のみの培養 (以下, 無窒素区) も行った。なお, 培養期間中に適時上部のガス抜きと水分調整を行った。培養開始後 7, 14, 28, 49 日目に, 恒温器から UM ガラス瓶を取り出し, 2 mol L<sup>-1</sup> の塩化カリウム溶液を 0.08 L 添加して 1 時間往復振とう後, ろ過し, ろ液のアンモニウム態窒素および硝酸態窒素をオートアナライザー (ブランルーベ, Tracss 800) で定量した。硝酸化成割合 (%) を以下の計算式により算出した。

硝酸化成割合 (%) = (処理区の硝酸態窒素含量 - 無窒素

区の硝酸態窒素含量) / (処理区の無機態窒素含量 - 無窒素区の無機態窒素含量) × 100。試験は 2 連で行った。

## 2) 試験 II: 水稻ポット栽培による硝酸化成抑制材 (DMPP) 入り肥料の基肥早期施肥試験

供試した水田土壌 (灰色低地土) の理化学性を表2に示した。試験は 2014 年に温度制御をしていないガラス温室 (神奈川県平塚市 JA 全農営業・技術センター) で行った。4 mm の篩を通過させた未風乾の灰色低地土を, ワグネルポット (0.02 m<sup>2</sup>) 当たり乾土で 3.5 kg となるように充填した。基肥として各窒素質肥料 (尿素 (全農), DMPP 入り尿素 (COMPO 社, DMPP 添加量は表3の No 3 に相当)) でポット当たり窒素 0.6 g, 過リン酸石灰でリン酸 (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) 0.6 g, 塩化加里でカリ (K<sub>2</sub>O) 0.6 g をポット内土壌全体に混和した。基肥施肥時期は移植日から起算して 28, 21, 14, 7 日前の 4 水準とし, 移植日まで最大容水量の 50% になるように毎日 1 回, 水分調整を行った。合わせて, 移植 28 日前にリン酸とカリのみを施肥する無窒素区を設けた。2014 年 6 月 25 日に播種した水稻 (キヌヒカリ) の苗を, 7 月 11 日に 1 株当たり 3 本に揃えて移植した。代掻きは, 移植直前 (7 月 11 日) に加水して行った。ポットはガラス温室内のコンクリートの上にスノコを敷き, その上に設置した。各処理区ともに 3 連とした。移植当日に約 50 g の土壌をポットから取り出して無機態窒素含量を測定した。生育調査は 8 月 5 日と 8 月 14 日, 植物試料の採取を 8 月 25 日に実施した。

採取した植物試料から根を切除し, 地上部は 70°C の乾燥機内で乾燥して, 乾物重を測定した後に粉碎し, NC アナライザー (住化分析センター, SUMIGRAPH NC-TR22) により地上部窒素含有率を測定した。地上部窒素吸収量は, 地上部窒素含有率に地上部乾物重を乗じて求めた。肥料由来の地上部窒素吸収量は, 各肥料の施肥区における地上部窒素吸収量から無窒素区の地上部窒素吸収量を引いて求めた。

水稻ポット栽培試験における土壌無機態窒素含量, 茎数, 地上部乾物重, 地上部窒素含有率および地上部窒素吸収量に対して, 同一の供試肥料における異なる施肥期間の比較を Tukey の多重検定により, 同一施肥期間における異なる供試肥料間の比較を t 検定により, 統計ソフト「JMP 5.0」(SAS Institute Japan) を用いて解析した。

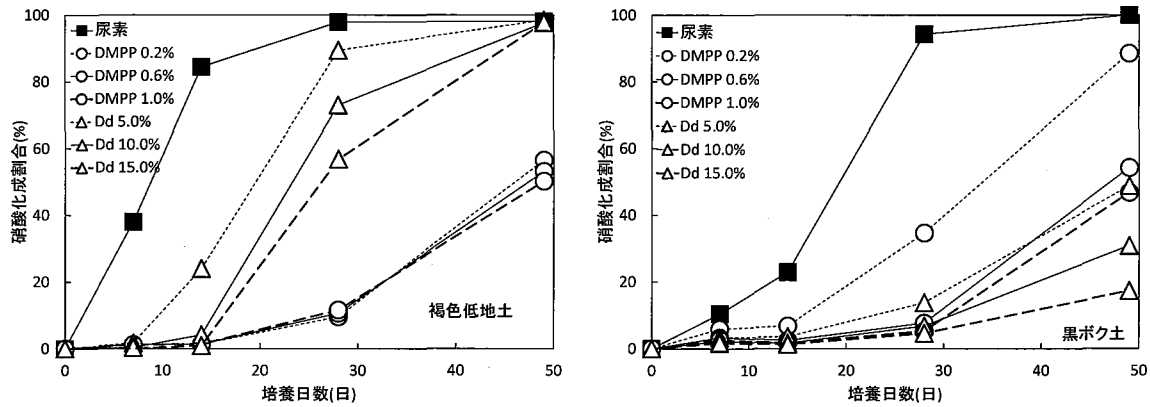


図1 各土壌における供試肥料の硝酸化成割合の推移 (左図：褐色低地土, 右図：黒ボク土)

### 3. 結果および考察

#### 1) 試験 I：異なる土壌における DMPP の硝酸化成抑制効果

褐色低地土と黒ボク土における、それぞれに供試した肥料の硝酸化成割合を図1に示した。硝酸化成抑制材を添加しない場合、培養後14日目における尿素の硝酸化成割合は、褐色低地土では84%であり、黒ボク土の23%より高かった。これまでに硝酸化成能の耕地土壌における土壌間差については、黒ボク土は非黒ボク土より有機物含量が多く、微生物に対してより大きな生息空間を提供するため(笛木, 2008)、硝酸化成能が高いことが報告されている(土壌微生物研究会, 1966; 三幣, 1972)。しかし、本試験の結果はこれと異なるものであった。一方で、土壌 pH が高まると、硝酸化成の活性に寄与するアンモニウム酸化細菌の活性が高まるため(Nicol *et al.*, 2008)、硝酸化成は顕著に促進されることが明らかになっている(原田ら, 1960; 浪岡ら, 1975; 佐藤・岡部, 1965)。本試験に供試した褐色低地土の pH が7.5 と高いことが、褐色低地土が黒ボク土より硝酸化成能が高かった一因として考えられた。

両土壌とも硝酸化成割合は、硝酸化成抑制材を尿素に添加することで、硝酸化成抑制材無添加の尿素より低く推移した。褐色低地土では、DMPP 系列の培養後28日目の硝酸化成割合は10~12%であり、Dd 系列の57~89%より低かった。黒ボク土では、DMPP 系列の培養後28日目の硝酸化成割合は0.2%添加(硝酸化成割合: 35%)を除くと5~13%であり、Dd 系列の5~14%と同等であった。しかし、DMPP 系列の培養後49日目における硝酸化成割合は47~89%であり、Dd 系列の17~49%より高かった。

Zerulla *et al.* (2001) は非黒ボク土で試験し、DMPP の硝酸化成抑制効果は Dd より高かったことを報告し、本試験の褐色低地土での結果と一致した。一方、本試験で黒ボク土では、DMPP の硝酸化成抑制効果が Dd より低かったことから、土壌の種類によって硝酸化成抑制材の効果発現に差異がみられた。DMPP は土壌に吸着されると、硝酸化成抑制効果が低下することが報告されている(Barth

*et al.*, 2001)。土壌別の硝酸化成抑制材の吸着に関しては、浪岡・大塩(1976)はアロフェン系火山灰土が硝酸化成抑制材を吸着し、その効果を低下させる可能性があることを報告した。硝酸化成抑制材別の土壌への吸着に関しては、三幣(1973)は Dd を含む計11種類の硝酸化成抑制材の土壌中での移動性を比較し、Dd の移動性が最も高く、Dd は土壌に吸着されにくいことを報告した。また、Fettweis *et al.* (2001) はライシメータを用いた試験で、DMPP と Dd の下層への溶脱を比較し、DMPP の溶脱は Dd より少なかったことを報告した。さらに、Barth *et al.* (2001) や Azam *et al.* (2001) も、DMPP は Dd と比較して、土壌から溶脱されにくいことを推察している。以上から、本試験において、DMPP の黒ボク土における硝酸化成抑制効果が Dd より低かった理由として、黒ボク土は褐色低地土と比較して、アロフェン質粘土や腐植含量が多く、これらが吸着基となり、DMPP がより多く吸着され、硝酸化成抑制効果が低下したと推察された。

#### 2) 試験 II：水稻ポット栽培による硝酸化成抑制材(DMPP)入り肥料の基肥早期施肥試験

移植当日の乾土当たりの土壌無機態窒素含量を図2に示した。無窒素区ではアンモニウム態窒素含量が $4\text{mgkg}^{-1}$ で、硝酸態窒素含量が $19\text{mgkg}^{-1}$ であった。DMPP 入り尿素区および尿素区では、基肥施肥時期を早めるほど、無機態窒素含量に占めるアンモニウム態窒素含量の割合が低下し、硝酸態窒素含量の割合が増加し、硝酸化成が認められた。特に移植28日前に施肥した場合、尿素区における無機態窒素含量に占めるアンモニウム態窒素含量の割合は約10%であり、アンモニウム態窒素含量も無窒素区と同等の $22\text{mgkg}^{-1}$ まで低下した。一方、DMPP 入り尿素を移植28日前に施肥した場合、無機態窒素含量に占めるアンモニウム態窒素含量の割合は約60%であり、アンモニウム態窒素含量も $138\text{mgkg}^{-1}$ と尿素区( $22\text{mgkg}^{-1}$ )よりも顕著に多く( $P<0.05$ )、DMPP による硝酸化成抑制効果が認められた。さらに、同じ基肥施肥時期における供試肥料間のアンモニウム態窒素含量と硝酸態窒素含量の各々を比較すると、移植7日前を除く各施肥時期で、

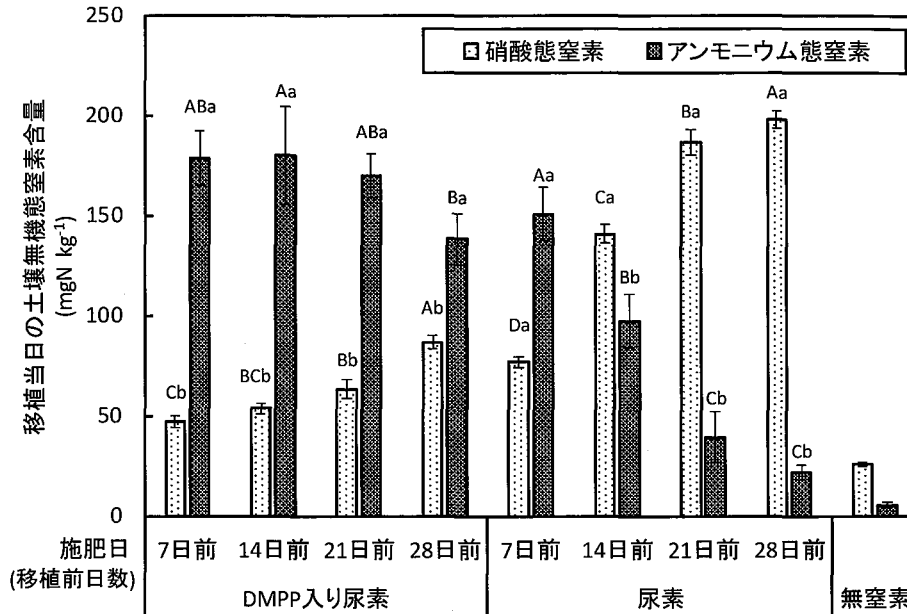


図2 基肥早期施肥における移植当日の土壤無機態窒素含量

DMPP入り尿素は市販品 (COMPO社). 7 (14, 21, 28) 日前は, 移植日から起算した施肥日を示す. 大文字のアルファベットは, 同一の供試肥料において異なる施肥時期間で有意差検定を行い, 同一のアルファベットを有する施肥時期間で有意差はないことを示す (Tukey 検定,  $P < 0.05$ ). 小文字のアルファベットは, 同一施肥時期において異なる供試肥料間で有意差検定を行い, 同一のアルファベットを有する供試肥料間で有意差はないことを示す (t 検定,  $P < 0.05$ ).

表4 水稲ポットの生育調査結果

処理区	施肥日	茎数 (本 株 <sup>-1</sup> )			地上部乾物重 g 株 <sup>-1</sup>	地上部窒素含有率 g kg <sup>-1</sup>	地上部窒素吸収量 mg 株 <sup>-1</sup>
		8月5日	8月14日	8月26日			
無窒素	28 日前	10±1	9±1	9±1	5±0	10.5±0.2	53±4
DMPP 入り尿素	7 日前	29±4 Aa	34±3 Aa	31±1 Aa	38±3 Aa	13.5±0.9 Aa	509±16 Aa
	14 日前	30±6 Aa	33±3 Aa	31±4 Aa	37±2 Aa	13.2±0.8 Aa	486±15 ABa
	21 日前	27±5 Aa	31±8 Aa	29±6 Aa	33±5 Aa	13.8±1.3 Aa	449±26 Ba
	28 日前	28±3 Aa	29±5 Aa	28±4 Aa	31±3 Aa	13.0±1.1 Ab	403±8 Ca
尿素	7 日前	24±2 Aa	27±3 Ab	26±2 Ab	35±3 Aa	12.2±1.7 Ba	419±20 Ab
	14 日前	26±3 Aa	28±2 Aa	27±1 Aa	31±0 Ab	12.2±0.8 Ba	375±25 ABb
	21 日前	23±5 Aa	25±4 Aa	23±2 Aa	27±4 Aa	12.7±1.7 Ba	336±29 Bb
	28 日前	11±2 Bb	14±1 Bb	13±1 Bb	11±3 Bb	23.2±3.7 Aa	253±30 Cb

7 (14, 21, 28) 日前は, 移植日から起算した施肥日を示す.

大文字のアルファベットは, 同一の供試肥料において異なる施肥時期間で有意差検定を行い, 同一のアルファベットを有する施肥時期間で有意差はないことを示す (Tukey 検定,  $P < 0.05$ ).

小文字のアルファベットは, 同一施肥時期において異なる供試肥料間で有意差検定を行い, 同一のアルファベットを有する供試肥料間で有意差はないことを示す (t 検定,  $P < 0.05$ ).

地上部乾物重, 地上部窒素含有率, 地上部窒素吸収量は2014年8月25日にサンプリングしたもの.

DMPP入り尿素区のアンモニウム態窒素含量は尿素区より多く ( $P < 0.05$ ), 硝酸態窒素含量は尿素区より少なかった ( $P < 0.05$ ).

水稲の生育調査結果を表4に示した. 同じ基肥施肥時期における供試肥料間の地上部窒素吸収量を比較すると, 全ての施肥時期で, DMPP入り尿素区の地上部窒素吸収量は尿素区より多かった ( $P < 0.05$ ). 特に移植28日前施肥では, DMPP入り尿素区の茎数は尿素区の約2倍で推

移し ( $P < 0.05$ ), 地上部窒素吸収量は尿素区の約1.6倍であった ( $P < 0.05$ ). 同じ供試肥料における施肥時期間の地上部窒素吸収量を比較すると, いずれの供試肥料でも基肥施肥時期を早めるほど地上部窒素吸収量は低下した. さらに, 移植7日前施肥と28日前施肥の地上部窒素吸収量の差をみると, 尿素区は166mg 株<sup>-1</sup> (移植7日前施肥: 419mg 株<sup>-1</sup>, および移植28日前施肥: 253mg 株<sup>-1</sup>) であったのに対して, DMPP入り尿素区は106mg 株<sup>-1</sup> (移

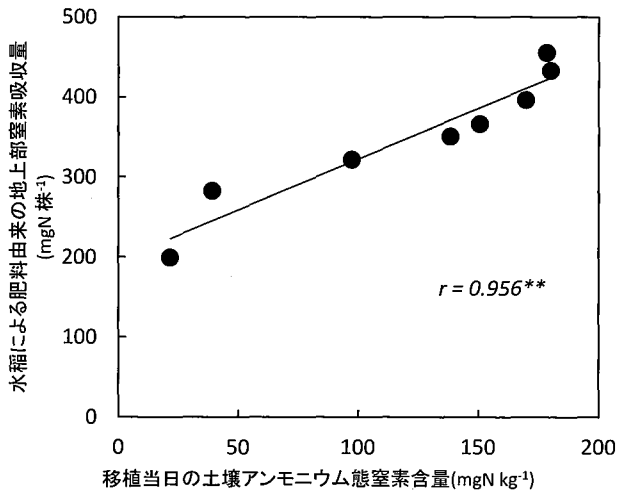


図3 移植当日の土壤アンモニウム態窒素含量と水稻による肥料由来の地上部窒素吸収量との関係

水稻による肥料由来の地上部窒素吸収量は、各供試肥料の施肥区における地上部窒素吸収量から無窒素区の地上部窒素吸収量を引いて求めた。\*: 1%水準で有意な相関あり。

植7日前施肥:  $509 \text{ mg 株}^{-1}$ 、および移植28日前施肥:  $403 \text{ mg 株}^{-1}$ であり、基肥施肥時期を早めることによる地上部窒素吸収量の低下への影響は、DMPP入り尿素区のほうが尿素区より小さかった。移植当日の土壤アンモニウム態窒素含量と、水稻の地上部窒素吸収量の間には高い正の相関 ( $r=0.956$ ,  $P<0.01$ ) がみられた(図3)。したがって、硝酸化成抑制材(DMPP)入り尿素を用いることで、基肥を早期に施肥しても、土壤中にアンモニウム態窒素を長く留まらせ、水稻の地上部窒素吸収量を高く維持できたと考えられた。

#### 4. 要約

3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP) には Dicyandiamide (Dd) と同様に硝酸化成抑制効果が認められた。褐色低地土における DMPP の硝酸化成抑制効果は Dd より高かったが、黒ボク土においては Dd より低く、土壌の種類によって硝酸化成抑制材の効果発現に差異がみられた。水稻ポット栽培試験において、代掻き前の基肥施肥時期を早めるほど硝酸化成が起り、土壌のアンモニウム態窒素含量が低下し、水稻の地上部窒素吸収量が低下した。DMPP入り尿素区では、DMPPの硝酸化成抑制効果により、基肥施肥時期を早めても、施肥窒素がアンモニウム態窒素の形態で維持されるため、地上部窒素吸収量は尿素区より多かった。以上から、硝酸化成抑制材入り肥料は、特に基肥施肥から代掻きまでの日数が長期化した場合において、水稻の安定生産に寄与すると考えられた。

謝辞: 本研究を実施するにあたり、栽培および分析にご協力いただきました(株)全農ビジネスサポート平塚支店肥料グループの皆様へ深く感謝いたします。また、元JA全農技術主管 在原克之博士、元JA全農技術主管 山田一郎博士、JA全農技術主管 岡本保博士にご校閲を賜り

ました。深く謝意を表します。

付記: 本報告の一部は2017年11月日本土壌肥料学会関東支部会(神奈川)において発表した。

#### 文 献

- Azam, F., Bebeckiser, G., Müller, C., and Ottow, J.C.G. 2001. Release, movement and recovery of 3,4-dimethylpyrazole-phosphate (DMPP), ammonium, and nitrate from stabilized nitrogen fertilizer granules in a silty clay soil under laboratory conditions. *Biol. Fertil. Soils*, **34**, 118–125.
- Barth, G., Tucher, S., and Von, 2001. Influence of soil parameters on the effect of 3, 4-dimethylpyrazole-phosphate as a nitrification inhibitor. *Biol. Fertil. Soils*, **34**, 98–102.
- 土壌微生物研究会編 1966. 土と微生物, p. 73–110. 岩波書店, 東京.
- Fettweis, U., Mittelstaedt, W., Schimansky, C., and Führ, F. 2001. Lysimeter experiments on the translocation of carbon-14-labelled nitrification inhibitor 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP) in a gleyic cambisol. *Biol. Fertil. Soils*, **34**, 126–130.
- 笛木伸彦 2008. テンサイの安定生産に向けた肥培管理法に関する研究. 北海道立農業試験場報告, **120**, 33–40.
- Goring, C.A.I. 1962. Control of nitrification of ammonium fertilizers and urea by 2-chloro-6-(trichloromethyl)pyridine. *Soil Sci.*, **93**, 431–439.
- 原田登五郎・西原典則・甲斐秀昭・赤松和夫 1960. 土壌中における硝化条件に関する研究(第1報) —土壌の種類と硝化条件—. 土肥要旨集, **6**, 362.
- 栗原 淳・越野正義 1986. 肥料製造学, p. 205–208. 養賢堂, 東京.
- Linzmeier, W., Gutser, R., and Schmidhalter, U. 2001. Nitrous oxide emission from soil and from a nitrogen-15-labelled fertilizer with the new nitrification inhibitor 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP). *Biol. Fertil. Soils*, **34**, 103–108.
- MARKETS AND MARKETS 2015a. Controlled-release Fertilizers Market-Global Trends and Forecast to 2020, p. 58. MarketsandMarkets Research Private Ltd., Hadapsar.
- MARKETS AND MARKETS 2015b. Controlled-release Fertilizers Market-Global Trends and Forecast to 2020, p. 67–80. MarketsandMarkets Research Private Ltd., Hadapsar.
- 松森 信・開田和歌子 2016. 全量基肥施肥法における施肥日の違いが窒素肥効や水稻の生育に及ぼす影響. 土肥誌, **87**, 136–139.
- 森本昌子・黒田康文・横田 香 2008. 硝酸化成抑制剤入り被覆窒素肥料による窒素負荷低減対策. 徳島県立農林水産総合技術支援センター農業研究所研究報告, **5**, 25–34.
- 浪岡日左雄・大塩裕陸 1976. 硝酸化成抑制剤(DCS)の土壌中での行動ならびに効果発現機構. 土肥誌, **47**, 114–121.
- 浪岡日左雄・上田 実・小牧倫男 1975. N-(2,5-dichlorophenyl) Succinamic Acid (DCS)の硝酸化成抑制効果. 土肥誌, **46**, 69–75.
- Nicol, G.W., Leininger, S., Schleper, C., and Prosser, J.I. 2008. The influence of soil pH on the diversity, abundance and transcriptional activity of ammonia oxidizing archaea and bacteria. *Environ. Microbiol.*, **10**, 2966–2978.
- 農業環境技術研究所 2009. 農耕地から発生する亜酸化窒素の削減効果を定量的に評価. [http://www.naro.affrc.go.jp/archive/niaes/sinfo/result/result26/result26\\_46.html](http://www.naro.affrc.go.jp/archive/niaes/sinfo/result/result26/result26_46.html)
- 尾和尚人・樋口太重 2007. 肥料土づくり資材大辞典, p. 177–182. 農山漁村文化協会, 東京.
- Pasda, G., Hähndel, R., and Zerulla, W. 2001. Effect of fertiliz-

- ers with the new nitrification inhibitor DMPP (3,4-dimethylpyrazole phosphate) on yield and quality of agricultural and horticultural crops. *Biol. Fertil. Soils*, **34**, 85–97.
- 三幣正巳 1972. 硝酸化抑制に関する研究(1). 農業技術研究所報告, B, 土壤肥料, **23**, 79–145.
- 三幣正巳 1973. 硝酸化抑制に関する研究(2). 農業技術研究所報告, B, 土壤肥料, **24**, 53–100.
- 佐藤吉之助・岡部達雄 1965. 土壤の硝酸化成力と窒素質肥料の肥効に関する研究. 千葉県農業試験場研究報告, **6**, 90–96.
- Weiske, A., Benckiser, G., Herbert, T., and Ottow, J.C.G. 2001. Influence of the nitrification inhibitor 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP) in comparison to dicyandiamide (DCD) on nitrous oxide emissions, carbon dioxide fluxes and methane oxidation during 3 years of repeated application in field experiments. *Biol. Fertil. Soils*, **34**, 109–117.
- Zerulla, W., Barth, T., Dressel, J., Erhardt, K., von Locquenghien, K.H., Pasda, G., Rädle, M., and Wissemeier, A.H. 2001. 3-4-Dimethylprazole phosphate (DMPP)—a new nitrification inhibitor for agriculture and horticulture. *Biol. Fertil. Soils*, **34**, 79–84.
-