

水稻の根系発達におよぼすアンモニア態窒素と硝酸態窒素の影響

野間貴文¹⁾・廣瀬大介²⁾

(¹⁾ 鹿児島大学大学院連合農学研究科, ²⁾ 南九州大学環境造園学部)

要旨: 水稻 (コシヒカリと稀珍黒米) に硝酸態窒素もしくはアンモニア態窒素を施用し, それぞれの根系発達を比較した. 両品種とも乾物重, 根長及び節根数は, 硝酸態窒素施用に比べ, アンモニア態窒素施用の方が有意に高い値を示した. しかし, 比根長については, 両品種とも硝酸態窒素施用の方が有意に高い値を示した. また, アンモニア態窒素施用と硝酸態窒素施用の根の生理活性については一定の傾向は見られなかった. これらのことから, 水稻においてはアンモニア態窒素施用の方が硝酸態窒素施用に比べ, 根系の長さが優れることが示された. また, 根系の長さの差は, 根の分枝発達程度の差ではなく, 節根数の差が一因と考えられた. さらに, 根系の発達様相には品種間差があることが示唆された.

キーワード: アンモニア態窒素, 根系, 硝酸態窒素, 水稻, 窒素肥料, 根の活性.

植物体が主に吸収利用できる窒素形態にはアンモニア態と硝酸態があり, 植物種によって生育に適する窒素形態が異なることは, 良く知られている (春日井 1939, 奥田・下瀬 1951, 岩田・谷内 1953, Greidanus ら 1972). 水稻では, アンモニア態窒素施用の方が硝酸態窒素施用に比べ, 生育が優れることが報告されている (春日井 1939, Smirnov and Stewart 1985). その原因には窒素の吸収量とタンパク質合成能の違い (Smirnov and Stewart 1985) や各器官の生育差が指摘されている (三井・熊沢 1964, 林・熊沢 1985). 特に根は植物体を支え, 養水分吸収を担っているだけではなく窒素の同化や貯蔵器官, あるいは生長調節物質の合成器官としても重要な役割をはたしている (田中 1974, 河野 1987). このため, 硝酸態窒素とアンモニア態窒素をそれぞれ施用した水稻の生育の違いをより詳しく明らかにするには根系発達についても検討を加える必要があると考えられる.

これまでに, 水稻の根系発達に対するアンモニア態窒素と硝酸態窒素の影響については, 乾物重 (Bloom 1997, Lu ら 2000, Briones ら 2003) や窒素の吸収量 (Kronzucker ら 2000, Kirk 2001) などから検討された多くの報告がある. しかし, 根系発達をより詳細に示す指標である根長 (山内 1998) の差異から検討したものは少ない (三井・熊沢 1964, 林・熊沢 1985, Liu ら 2000). これら根長を比較した研究から水稻への硝酸態窒素施用はアンモニア態窒素施用に比べ, 根系が長くなることが示されている. しかし, 三井・熊沢 (1964) と林・熊沢 (1985) 報告は, 発芽間もない種子根やごく初期の冠根のみを調査しているだけで生育がより進んだ段階での両窒素の根系への影響は明らかでない. 一方, Liu らの報告 (2000) は, 水稻生長に対するサイトカイニンの影響を明らかにすることが目的であったため, 根長に関しては, 最長根長を移植後 25 日目から 60 日目まで測定し, 総根長は, 移植後 60 日目の不定根しか測定していない. このため生育に伴う詳細な根長の

差異は明らかでない. また, 水稻の根系形態は品種によって異なることが報告されている (川島 1988, 新田ら 1998, 森田ら 1995). さらに, アンモニア態窒素と硝酸態窒素に対する水稻の生育は, 品種により大きく異なることが報告されている (Chanh ら 1981). このため, アンモニア態窒素と硝酸態窒素に対する根系発達様相は品種によって異なることも考えられる. そこで本実験では, 水稻に硝酸態窒素もしくはアンモニア態窒素を施用し, それぞれの根系発達を調査し, 施肥窒素の化合形態の違いが根系発達に及ぼす影響を明らかにすると共に品種間差異についても検討を加えた.

材料と方法

本研究は, 南九州大学付属農場のガラス温室内で行った. 供試品種には, 宮崎県で早期水稻用として最も多く栽培されているコシヒカリと宮崎県西都市で祭事用として最も多く栽培されている稀珍黒米 (もち米, インド型紫黒米) を用いた. 2002 年 4 月 9 日に種籾を 30℃ にセットした恒温器に入れ, 3 日間催芽処理を行った (0.1% ベンレート溶液による種子消毒処理の 1 日間を含む). このように準備した催芽種子をパーミキュライトを入れた容器 (27 × 34 × 10 cm) に播種した. 播種後 10 日目に, コンテナ (54 × 36 × 25 cm) 上部に直径 2 cm の穴を 35 個開けた 1 cm 厚の発泡スチロール板をはめ込み, 各穴に茎基部をウレタンで巻いた苗 (第 2 葉期) を移植し, 水耕栽培を開始した. また, 移植個体は, 1 コンテナあたり 35 個体とし, 水耕液量は 40L とした. 水耕液の組成は廣瀬 (2000) を参考に第 1 表のようにした. 窒素の濃度は, アンモニア態窒素施用, 硝酸態窒素施用のいずれにおいても水稻の生育に対して同等に優れた窒素源となる濃度として報告されている 20 ppm とした (Tanaka ら 1959). また, 水耕液の pH は毎日午前と午後の 2 回, 5.5 に調整し, 5 日おきに更新した. 試験区は, 品種ごとに窒素肥料として硫酸を施用したアン

第1表 水耕液の組成.

各要素の形態	mg/L
KH ₂ PO ₄	43.9
K ₂ SO ₄	67.0
CaCl ₂ ·2H ₂ O	368.0
MgSO ₄ ·7H ₂ O	102.0
Na·EDTA-Fe	13.1
MnSO ₄ ·5H ₂ O	1.3
ZnSO ₄ ·7H ₂ O	2.2
H ₃ BO ₄	2.8
(NH ₄) ₂ SO ₄	100.0
or	
NaNO ₃	125.0

窒素としてアンモニア区には(NH₄)₂SO₄を、
硝酸区にはNaNO₃をそれぞれ用いた.

モニア区と硝酸ナトリウムを施用した硝酸区の2試験区を設けた. また, 1試験区あたり2個のコンテナを用意した. 栽培中, 通気は行わなかった.

材料の採取は, 移植直前の播種後10日目から60日目まで10日おきに行った. 採取個体は各区, 6個体とした. 採取した個体のうち3個体は節根数と根長の測定に, 残りの3個体は根の生理活性測定にそれぞれ用いた. 節根数と根長測定用の3個体は, 採取後, 直ちに葉身, 葉鞘, 稈および根の各器官に分けた. 葉身, 葉鞘および稈は, 80℃で2日間通風乾燥した. 根は, 一旦, FAA液(メタノール:水:酢酸:ホルマリン=9:9:1:1)に保存し, 適宜取り出して, 節根数と根長を測定した後, 地上部と同様に乾燥した. 乾燥後, 各器官とも乾物重を測定した. なお, 節根数は直接数え, 根長の測定は, ルートスキャナー(Commonwealth aircraft社)を用いて測定した. また, 根の生理活性はα-

ナフチルアミン法(二見1990)にて測定し, 各試料3反復した.

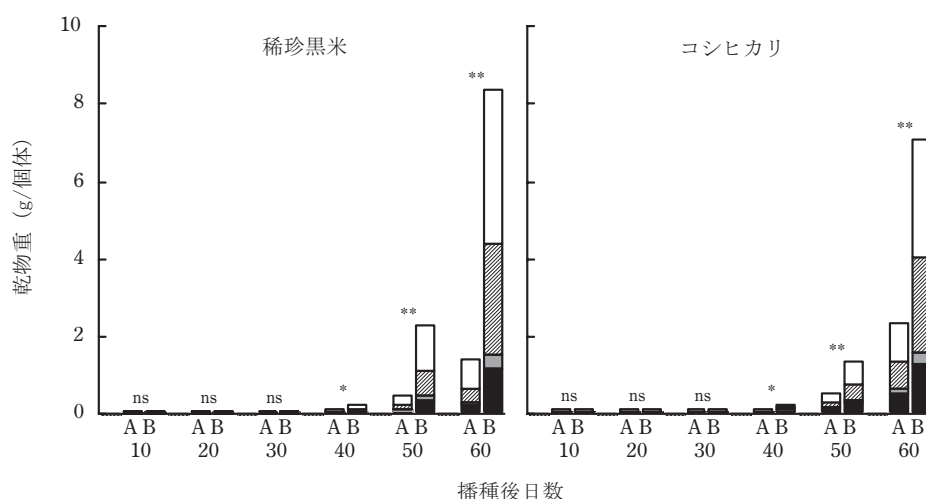
結 果

器官別乾物重の推移を第1図に示した. 乾物重は, 両品種とも硝酸区に比べ, アンモニア区の増加が著しかった. 播種後60日目では, アンモニア区は硝酸区に比べ稀珍黒米で約6.2倍, コシヒカリで約3.0倍高い値を示した. 60日目の器官別では, 両品種のいずれの試験区も葉鞘の値が最も高かった. また, 60日目の稀珍黒米とコシヒカリを一元配置の分散分析により比較してみると, いずれの試験区も稀珍黒米の方が5%水準で有意に高い値を示した.

根長も両品種とも硝酸区に比べ, アンモニア区の伸長が著しかった(第2図). 播種後60日目では, アンモニア区は硝酸区に比べ稀珍黒米で約2.8倍, コシヒカリで約1.7倍長くなった.

地上部/地下部比の推移を第2表に示した. 稀珍黒米では播種後50日目まではアンモニア区と硝酸区の間には, 有意な差は見られなかったが, 60日目ではアンモニア区の方が有意に高い値となった. 一方, コシヒカリでは播種後30日目と60日目ではアンモニア区の方が有意に高い値を示したが, それ以外はアンモニア区と硝酸区の間には, 差は見られなかった.

比根長(根長/根重比)の推移を第3表に示した. 稀珍黒米の硝酸区は, 播種後30日目で最も高い値を示したが, アンモニア区は, 播種後20日目で最も高い値を示し, その後は両試験区とも減少した. 一方, コシヒカリのアンモニア区と硝酸区では, 播種後30日目で最も高い値を示し, その後, 減少した.

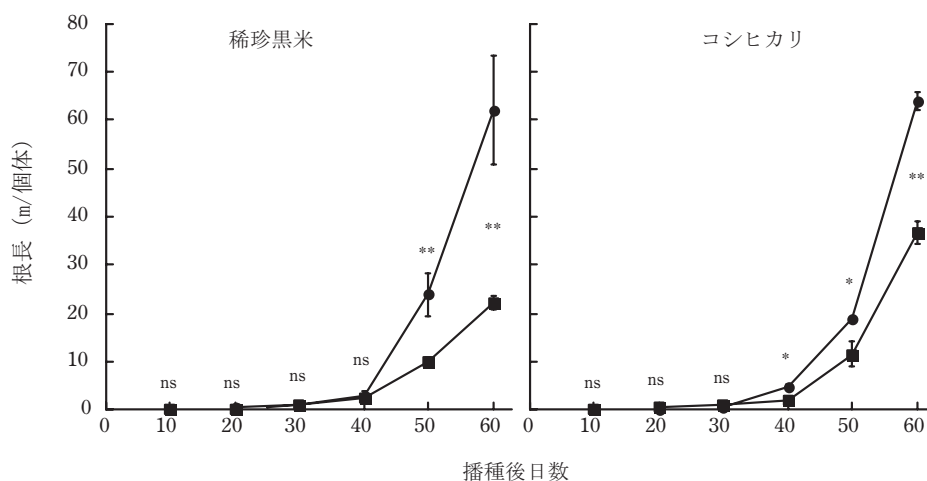


第1図 器官別乾物重の推移.

■: 根, □: 節, ▨: 葉鞘, □: 葉身.

A: 硝酸区, B: アンモニア区.

図中のns, *および**は, 一元配置の分散分析より, それぞれの品種内で同一播種後日数の試験区間で, それぞれ有意差なし, 5%および1%水準で有意差があることを示す.



第2図 根長の推移.

—●— : アンモニア区, —■— : 硝酸区.

図中の棒線は、標準誤差を、ns、*および**は、一元配置の分散分析より、それぞれの品種内で同一播種後日数の試験区間で、それぞれ有意差なし、5%および1%水準で有意差があることを示す。

第2表 地上部/地下部比 (T/R比) の推移.

播種後日数	稀珍黒米			コシヒカリ		
	アンモニア区	硝酸区		アンモニア区	硝酸区	
10	3.3	3.3	NS	1.3	1.3	NS
20	2.6	2.3	NS	2.2	1.6	NS
30	4.1	3.3	NS	6.2	3.7	*
40	5.0	3.7	NS	3.0	3.8	NS
50	5.2	4.2	NS	3.9	3.3	NS
60	6.3	4.9	*	4.7	3.6	*

NS, *は、一元配置の分散分析により、それぞれの品種内で同一播種後日数の試験区間で、それぞれ有意差なし、5%水準で有意差があることを示す。

第3表 比根長 (根長/根重比) の推移.

播種後日数	比根長 (m/g)					
	稀珍黒米			コシヒカリ		
	アンモニア区	硝酸区		アンモニア区	硝酸区	
10	100	100	NS	50	50	NS
20	117	100	NS	92	111	NS
30	89	138	*	133	185	*
40	94	125	NS	86	143	*
50	66	110	*	69	102	*
60	54	97	*	51	73	*

NS, *は、一元配置の分散分析により、それぞれの品種内で同一播種後日数の試験区間で、それぞれ有意差なし、5%水準で有意差があることを示す。

節根数の推移を第4表に示した。稀珍黒米では播種後50日目以降、コシヒカリでは40日目以降、いずれもアンモニア区の方が硝酸区に比べ、有意に多くなり、播種後60日目では稀珍黒米で約4.0倍、コシヒカリでは約2.0倍多い値となった。

根の α -ナフチルアミン酸化量の推移を第5表に示し

た。稀珍黒米では、播種後20日目と50日目ではアンモニア区が硝酸区に比べ、有意に高い値を示したが、それ以外では差は見られなかった。一方、コシヒカリでは、播種後30日目、40日目及び60日目ではアンモニア区の方が有意に高い値を示したが、それ以外では差は見られなかった。

第4表 節根数の推移.

播種後日数	節根数 (本/個体)					
	稀珍黒米			コシヒカリ		
	アンモニア区	硝酸区		アンモニア区	硝酸区	
10	3	3	NS	4	4	NS
20	5	5	NS	6	6	NS
30	15	11	*	10	10	NS
40	22	14	NS	29	22	*
50	76	33	*	59	38	*
60	202	52	*	199	102	*

NS, *は、一元配置の分散分析により、それぞれの品種内で同一播種後日数の試験区間で、それぞれ有意差なし、5%水準で有意差があることを示す。

第5表 α -ナフチルアミン酸化量の推移.

播種後日数	α -ナフチルアミン酸化量 ($\mu\text{g}/\text{根の生重g}/\text{hr}$)					
	稀珍黒米			コシヒカリ		
	アンモニア区	硝酸区		アンモニア区	硝酸区	
10	625	625	NS	625	625	NS
20	1499	625	*	1499	1249	NS
30	1499	1124	NS	1811	1124	*
40	858	791	NS	786	397	*
50	749	571	*	557	409	NS
60	628	607	NS	583	488	*

NS, *は、一元配置の分散分析により、それぞれの品種内で同一播種後日数の試験区間で、それぞれ有意差なし、5%水準で有意差があることを示す。

考 察

水稻の生育はこれまでの報告 (春日井 1939, Smirnoff and Stewart 1985) と同様に両品種とも硝酸態窒素施用に比べ、アンモニア態窒素施用の方が有意に優れた (第1図). また、根長は両品種ともアンモニア態窒素施用の方が硝酸態窒素施用に比べ、有意に長くなることが示された (第2図). 播種後10日目から60日目の比根長の平均の値を計算してみると稀珍黒米のアンモニア区で87 m/g, 硝酸区で112 m/g, コシヒカリのアンモニア区で80 m/g, 硝酸区111 m/gとなり、両品種とも硝酸態窒素施用の方がアンモニア態窒素施用に比べ高い値を示した (第3表). 比根長は、根系を構成する根の平均的な直径の指標、あるいは分枝程度の指標で、この値が大きいほど細い根が多い、あるいは分枝が発達していると言われている (小柳 1998). このことから、いずれの品種も硝酸態窒素施用の方がアンモニア態窒素施用に比べ、分枝程度が優れ、細い根が多いことが示唆された. また、節根数は、両品種ともアンモニア態窒素施用の方が硝酸態窒素施用に比べ多い値を示した (第4表). このため、硝酸態窒素施用に比べ、アンモニア態窒素施用の方が生育が優れたのは、節根数の増加に伴って根系が長くなったことが一因と考えられる.

根系の長さはこれまでの報告 (三井・熊沢 1964, 林・熊沢 1985, Liu ら 2000) と異なりアンモニア態窒素施用の方

が長くなった. 本実験は、播種後10日目から60日目までの根系の長さを測定したが、三井・熊沢 (1964) と林・熊沢 (1985) の報告は、発芽後間もない幼植物の根の長さを測定したものであった. また、供試品種は、本実験ではコシヒカリと稀珍黒米であったが、Liu ら (2000) の実験では、North Rose であった. よって、異なった結果を生じた一因に実験期間と品種の違いが考えられた.

根の α -ナフチルアミン酸化量は、両品種ともアンモニア態窒素施用と硝酸態窒素施用の間に一定の傾向を見出せなかった (第5表). α -ナフチルアミン酸化力は、根の生理作用や代謝機能と正の比例関係があり、特に窒素の吸収量との間に高い正の相関関係を示すと言われている (鯨 1998). このため、アンモニア態窒素施用の方が、硝酸態窒素施用に比べ根系の長さが優れたのが根の生理作用や代謝機能、さらには窒素の吸収量の差によって生じたかどうかは明らかでない.

品種ごとに施肥窒素の化合形態の違いが生育や根系の長さにおよぼす影響を見てみるとコシヒカリに比べ、稀珍黒米の方がアンモニア区と硝酸区の差が大きかった (第1図と第2図). また、品種間においてアンモニア区と硝酸区の比根長には差が見られなかったが (第3表), 硝酸区の節根数は、コシヒカリが稀珍黒米に比べ、約2倍多い値を示した (第4表). このことから、品種によって施肥窒素の化合形態の違いによる根系の長さへの影響は異なり、この

違いは、節根数の差によりもたらされたことが示唆された。

また、水耕液は各区とも pH は 1 日 2 回調整したので水耕液中の pH の変動が両品種の生育や根系発達に及ぼした影響は少ないものと考えられる。また、各区には随伴イオンの SO_4 イオンや Na イオンを含んでいるが、これらによる生育障害は見られなかった。このことからこれらイオンが生育や根系発達に及ぼした影響も少ないものと思われる。

一般にアンモニア態窒素は、主に根で同化される (王子 1989)。一方、硝酸態窒素は、根から吸収された後、速やかに地上部に運ばれ、主に葉で同化される (Weissman 1964, Smirnoff and Stewart 1985)。このようなアンモニア態窒素と硝酸態窒素の主同化器官の違いが両窒素に対する根系発達の違いを生じさせた可能性も考えられた。

以上見たように、播種後 10 日目から 60 日目までの水稲ではアンモニア態窒素施用の方が、硝酸態窒素施用に比べ根系が長くなることが示された。根系の長さの差は根の分枝発達程度の差ではなく、節根数の差から生じていることが示唆された。さらに、品種により根系発達に及ぼす施肥窒素の化合形態の影響度合いが異なることが示された。三井・熊沢 (1964) の実験によると、硝酸態窒素を施用した発芽後間もない水稲根の生長は培地の窒素濃度 2 ppm から 20 ppm までは促進されるが、100 ppm では 20 ppm 施用に比べ、劣ることが報告されている。一方、アンモニア態窒素施用の場合は濃度が高まるにつれて根の生長は抑制されることが報告されている。さらに、窒素施用量が水稲の根系発達に及ぼす影響を調査した報告によると調査時期により増肥によって根系の長さが短くなる品種、長くなる品種、あるいは変わらない品種があることが示されている (Tanaka ら 1993)。よって、培地の窒素濃度や調査時期、さらには他品種を用いた場合には本実験とは異なる結果が生じることも考えられる。また、水稲では、アンモニア態窒素と硝酸態窒素をそれぞれ単独で施用するより混合施用の方が生育が優れることが報告されている (Karim and Vlamis 1962, Malavolta 1976)。このため、両窒素単独施用より混合施用の方が根系の長さが優れることも考えられる。施肥窒素の化合形態の違いが水稲の根系発達に及ぼす影響をより詳細に明らかにするためには、今後、これらについて検討を加えていく必要があるものと考ええる。

引用文献

- Bloom, A. 1997. Interactions between inorganic nitrogen nutrition and root development. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 160 : 253–259.
- Briones Jr, A.M., S. Okabe, Y. Umekiya, N. Ramsing, W. Reichardt and H. Okuyama 2003. Ammonia-oxidizing bacteria on root biofilms and their possible contribution to N use efficiency of different rice cultivars. *Plant and Soil* 250 : 335–348.
- Chanh, T., M. Tsutsumi and K. Kurihara 1981. Comparative study on the response of indica and japonica rice plants to ammonium and nitrate nitrogen. *Soil Sci. Plant Nutr.* 27 : 83–92.
- 二見敬三 1990. 3. 根活性診断法. 植物栄養実験法編集委員会編. 植物栄養実験法. 博友社, 東京. 49–54.
- Greidanus, T., L.A. Peterson, L.E. Schrader, and M.N. Dana 1972. Essentiality of ammonium for cranberry nutrition. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 97 : 272–277.
- 林茂一・熊沢喜久雄 1985. 水稲並びに小麦幼植物の生長に及ぼす有機酸の影響, とくにアンモニア態あるいは硝酸態窒素を与えた場合. *日作紀* 54 : 134–140.
- 廣瀬大介 2000. アルファルファの初期生育と窒素吸収におよぼすアンモニア態窒素と硝酸態窒素の影響. *日草誌* 45 : 404–410.
- 岩田正利・谷内武信 1953. 窒素の差異と蔬菜の生育. *園学雑* 22 : 183–192.
- Karim, A.Q.M.B. and J. Vlamis 1962. Comparative study of the effect of ammonium and nitrate nitrogen in the nutrition of rice. *Plant Soil* 16 : 32–41.
- 春日井新一郎 1939. 水耕法に関する研究. *土肥誌* 13 : 669–828.
- 川島長治 1988. 水稲の根系形成に関する研究. 第 4 報 主根葉数の異なる品種間の差異について. *日作紀* 57 : 37–47.
- Kirk, G.J.D. 2001. Plant-mediated processes to acquire nutrients: nitrogen uptake by rice plants. *Plant and Soil* 232 : 129–134.
- 河野恭広 1987. 根の形態と機能. 農業技術大系 土壌施肥編. 1. 土壌の働きと根圏環境. 農村漁村文化協会, 東京. 1–43.
- 小柳敦史 1998. C. 根系の形態的な測定指標. 根の事典編集委員会編. 根の事典. 朝倉書店, 東京. 375–376.
- Kronzucker, H.J., A.D.M. Glass, M.Y. Siddiqi and G.J.D. Kirk 2000. Comparative kinetic analysis of ammonium and nitrate acquisition by tropical lowland rice : implications for rice cultivation and yield potential. *New Phytol.* 145 : 471–476.
- 鯨幸夫 1998. C. α -ナフチルアミン酸化力を用いた根の生長解析. 根の事典編集委員会編. 根の事典. 朝倉書店, 東京. 112–114.
- Liu, Z., Y. Goto and I. Nishiyama 2000. Effects of benzylaminopurine on shoot and root development and growth of rice (cv. north rose) grown hydroponically with different nitrogen forms. *Plant Prod. Sci.* 3 : 349–353.
- Lu, Y., R. Wassmann, H. Neue and C. Huang 2000. Dissolved organic carbon and methane emissions from a rice paddy fertilized with ammonium and nitrate. *J. Environ. Qual.* 29 : 1733–1740.
- Malavolta, E. 1954. Studies on the nitrogenous nutrition of rice. *Plant Physiol.* 29 : 98–99.
- 三井進午・熊沢喜久雄 1964. 水稲根の生長に及ぼす各種窒素化合物, 特に硝酸態及びアンモニア態窒素の影響について. 作物の養分吸収に関する動的研究 (第 42 報). *土肥誌* 35 : 119–122.
- 森田茂紀・山田章平・阿部淳 1995. イネの根系形態の解析—成熟期における品種間比較—. *日作紀* 64 : 58–65.
- 新田洋司・山本由徳・永見隆司 1998. 水稲の主茎および分げつの不伸長茎部における冠根原基の形成. *日作紀* 67 : 543–548.
- 王子善清 1989. 植物の好アンモニア性と好硝酸性. *農化誌* 63 : 1382–1385.
- 奥田東・下瀬昇 1951. 作物の窒素代謝に関する研究. *土肥誌* 22 : 88–90.
- Smirnoff, N. and G.R. Stewart 1985. Nitrate assimilation and translocation by higher plant : Comparative physiology and ecological consequence. *Physiol. Plant.* 64 : 133–140.

- Tanaka, A., S. Patnaik and C.T. Abichandani 1959. Studies on the nutrition of rice plant. *Poc. Ind. Acad. Sci.* B49 : 389–396.
- 田中典幸 1974. 作物の根に関する研究. *日作紀* 43 : 291–316.
- Tanaka, S., A. Yamauchi and Y. Kono 1993. Cultivar difference in the response of root system to nitrogen application in rice plant. *Jpn. J. Crop Sci.* 62 : 447–455.
- Weissman, G.S. 1964. Effects of ammonium and nitrate nutrition on protein level and exudate composition. *Plant Physiol.* 39 : 947–952.
- 山内 章 1998. 根の測定形質と形態指標. 根の事典. 朝倉書店, 東京. 374–375.

Effects of Ammonium and Nitrate Nitrogen on the Development of the Rice Root System : Takafumi NOMA¹⁾ and Daisuke HIROSE²⁾ (¹⁾*Unit. Grad. Sch. of Agr. Sci., Kagoshima Univ.*, ²⁾*Fac. of Environmental Landscape architecture, Minamikyushu Univ., Takanabe 884-0003, Japan*)

Abstract : The root-system development of two rice varieties, Koshihikari and Kichinkurogome, fertilized with ammonium nitrogen was compared with that of these varieties fertilized with nitrate nitrogen. In both varieties, dry weight, root length and the number of nodal roots were significantly greater in the plants fertilized with ammonium nitrogen than in those fertilized with nitrate nitrogen. However, specific root length was significantly longer in the plants fertilized with nitrate nitrogen in both varieties. The above effects of the chemical form of fertilizer nitrogen on the root system were greater in Kichinkurogome than in Koshihikari. These findings suggest that the growth of rice fertilized with ammonium nitrogen is superior to that fertilized with nitrate nitrogen in increasing root-system length. The difference in the root-system length may depend on the difference in the number of nodal roots rather than the degree of root branching. The effect of the chemical form of fertilizer nitrogen on root system development was suggested to vary with the rice cultivar.

Key words : Ammonium nitrogen, Nitrate nitrogen, Nitrogen fertilizer, Rice plant, Root activity, Root system.
