

中国産多収性水稻品種の窒素吸収と施肥窒素吸収率に及ぼす 緩効性肥料の施用効果

小久保敏明¹⁾・宮崎彰²⁾・吉田徹志²⁾・山本由徳²⁾・井上洋子²⁾・岡崎秀昭²⁾・岩永泰大²⁾・
黒田翔平²⁾・居静³⁾・王余龍³⁾

(¹⁾ 愛媛大学大学院連合農学研究科, (²⁾ 高知大学農学部, (³⁾ 揚州大学)

要旨：中国における水稻の多収獲多施肥栽培において施肥窒素 (N) 吸収率の向上を目的とし、多収性水稻品種の N 吸収に及ぼす緩効性肥料の施用効果を調査した。緩効性肥料の施用は、中国産多収性品種の揚稲 4 号 (YD) および武育梗 3 号 (WY) において幼穂形成期までの肥料由来 N 吸収量を有意に増加させた。この結果、施肥 N 吸収率が有意に増加し、YD では成熟期 N 含有量の有意な増加も認められた。YD は幼穂形成期から出穂期にかけての N 吸収量が高かったが、WY はより早い時期の N 吸収量が高く、YD に対しては WY より肥効の長い緩効性肥料の施用が有効であると推察される。YD の施肥 N 吸収率は、シグモイド型緩効性肥料 (S 区) > リニア型緩効性肥料 (L 区) > 塩安の分施 (C 区) の傾向があり、施肥 N 量の増加に伴い C 区では有意に増加したが、S 区および L 区では有意な変化は認められなかった。以上のことから、YD への緩効性肥料、特にシグモイド型肥料の施用は施肥 N 吸収率が高いこと、それにより施用量の削減が可能であることから、環境負荷の軽減に有効であると考えられた。

キーワード：緩効性肥料、水稻、施肥吸収率、窒素施肥、中国産多収性品種。

中国最大級の稲作地帯である江蘇省では、多収性水稻品種による多収獲栽培が盛んであり、最大収量は籾重で 1000 g m⁻² を超えることが報告されている (王ら 1997, Yao ら 2000a)。中国産多収性品種は、大穂あるいは密穂で、粒重が重く、一穂籾数が多いことがシンクサイズ (面積あたり籾数 × 1 粒重) の増加を通して収量増加に大きく貢献していることが報告されている (天野ら 1996a, 1996b, 王ら 1995, 1997)。同省では多収性品種の収量確保のため、30 g m⁻² を超える窒素 (N) を施用する多施肥栽培が行われており (Peng ら 2006)、余剰成分の流出による環境負荷が問題視されている (Zhu and Chen 2002)。また、施肥 N 量が過多であるために施肥 N 量当たりの収量が低く、施肥 N 量当たりの肥料由来 N 吸収量 (施肥 N 吸収率) の向上による施肥 N 量の削減が重要な課題の一つとされており、近年の中国では施肥法が見直されつつある (Yao ら 2000b)。施肥 N 吸収率の改善のための施肥法として、施肥量および施肥時期の調整 (Peng ら 1996, 2006, Pan ら 2009)、鶏糞の全量基肥施用と土中への混ぜ込み (Liu ら 2008)、硝化抑制剤の使用 (Huang ら 1996) などが既に報告されているが、更に効果的な方法の検討が必要である。

施肥 N 吸収率を高める方法の一つとして緩効性肥料が挙げられ、日本の水稻栽培で近年広く利用されている。緩効性肥料は長期間に渡り成分を溶出するため、植物の成分吸収効率の向上による環境負荷の軽減と施肥量の低減が可能である (田中 1988, 亀川 1990, 中西ら 1990, 上野ら 1991, 酒田ら 1995, Acquaye and Inubushi 2004)。実際に、緩効性肥料の施用は田面水への N 成分漏出を大きく軽減させることが中国においても報告されている (Wang ら 2004,

2007)。また、全量基肥施用により追肥が不要となることから、高齢化、過疎化が急速に進行する中国においても将来的な普及が予想される。緩効性肥料には溶出パターンや溶出日数の異なる多くのタイプが開発されているため、水稻の生育中期に成分溶出が多いものを用いることで、幼穂の発育を促進し、一穂籾数の増加による収量の増加が期待できる (和田 1969, Yao ら 2000b)。

著者らはこれまで、緩効性肥料の施用は中国産多収性水稻品種のシンクサイズを有意に増加させること、その施用効果には中国産多収性水稻品種においても品種間差が認められることを報告した (Kokubo ら 2011)。一方で、多収性水稻品種は日本の一般品種に比べ N 吸収量が高いことが報告されているが (樋口・吉野 1986)、中国産多収性品種の N 吸収および施肥 N 吸収率の向上に緩効性肥料が有効であるか否かは明らかでない。本研究では、前報 (Kokubo ら 2011) と同じ材料を用いて、異なる溶出パターンを示す緩効性肥料の施用が中国産多収性品種の N 吸収パターン、施肥 N 吸収率に及ぼす影響を解析した。

材料と方法

1. 供試品種および栽培概要

高知大学農学部附属暖地フィールドサイエンス教育研究センター (FSC) 水田において、2006～2009 年 (試験 1) および 2010 年 (試験 2) に栽培試験を行った。供試品種として、試験 1 では揚稲 4 号 (YD)、武育梗 3 号 (WY) およびヒノヒカリ (HH) の 3 品種を、試験 2 では YD と HH の 2 品種を用いた。YD は中国産多収性インド型水稻品種で、茎数は HH に比べ少ないものの、一穂籾数は多く、

第1表 N 施肥量 (g m^{-2} , 試験1, 2006~2009年).

処理区	基肥			分けつ期	幼穂形成期		出穂期	合計
	塩安	リニア	シグモイド	塩安	塩安	塩安	塩安	
C	4			2	2	2	2	12
L		12						12
S (2006, 2007年)	4		6	2				12
S (2008, 2009年)			12					12

L: リニア, くみあい42被覆尿素LPコート100.

S: シグモイド, くみあい40被覆尿素LPコートSS100.

分けつ期は移植から10日後.

幼穂形成期前期は出穂約20日前, 同中期は前期から10日後.

第2表 N 施肥量 (g m^{-2} , 試験2, 2010年).

処理区	基肥			分けつ期	幼穂形成期		出穂期	合計
	塩安	リニア	シグモイド	塩安	塩安	塩安	塩安	
C12	4			2	2	2	2	12
L12		12						12
S12			12					12
C21	7			3.5	3.5	3.5	3.5	21
L21		21						21
S21			21					21
C30	10			5	5	5	5	30
L30		30						30
S30			30					30

肥料の種類, 施用時期の詳細は第1表を参照.

粒重は重い典型的な穂重型である. 江蘇省で育成され, 1990年に普及を開始し, 1995年には栽培面積が17.9万haを記録した(居ら2006). 中国における収量は粒重で 1000 g m^{-2} 以上とされており(Yaoら2000b), 現在も近縁系統の品種が栽培されている. WYは中国産多収性日本型水稻品種で, 茎数はHHと同等かやや劣る程度で, 一穂粒数はHHよりやや多く, 粒重はYDとHHの中間程度の密穂型品種である. HHはYDおよびWYと出穂期がほぼ等しい日本型品種である. 育苗をFSCの慣行法に従い各年とも5月中旬より開始した. 但し, 播種量はHHにおいて乾粒重で 100 g/箱 とし, YDおよびWYはHHと同粒数となるように播種量を調整した. 各年とも5月末から6月上旬に, 中苗を栽植密度 22.2 株 m^{-2} (条間 $30 \text{ cm} \times$ 株間 15 cm), 1株2本植えて手植え移植した.

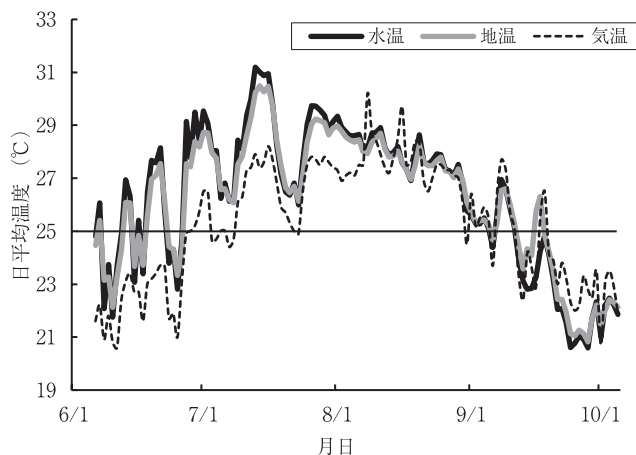
2. 処理区設計

N肥料の種類により対照区(C区), リニア型緩効性肥料区(L区), シグモイド型緩効性肥料区(S区)の3処理区を設けた(第1表, 第2表). C区では, 塩安を基肥: 分けつ肥(移植後20日後): 幼穂形成期前期(出穂約20日前): 同中期(前期より10日後): 出穂期 = 2:1:1:1:

1の割合で分施した. L区ではリニア型緩効性肥料(くみあい42被覆尿素LPコート100, 100日タイプ, 25°C で成分の80%を100日間で溶出)を全量基肥で施用した. S区ではシグモイド型緩効性肥料(くみあい40被覆尿素LPコートSS100, 同100日タイプ)を全量基肥で施用した. 但し, 2006年と2007年のS区では, 初期生育を促すために, シグモイド型緩効性肥料を50%に減量し, 減量分を塩安で基肥と分けつ肥に追加混合した(第1表). 試験1では各処理区ともN施肥量の合計を 12 g m^{-2} とした. 試験2では各タイプ肥料のN施肥量を12, 21, 30 g m^{-2} の3段階に設定した(第2表). 試験1, 2とも各処理区の施肥N合計量と同量のリン酸およびカリを施用した. リン酸は過リン酸石灰により基肥で全量を施用し, カリは塩化カリにより基肥, 幼穂形成期前期, 同中期にそれぞれ4:1:1の割合で施用した. 各年次とも, 処理区内にあぜなみにより小区画を設けた. 小区画は2006年のみ2株の周囲 $60 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$ を, その他の年次は1株の周囲 $30 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$ をあぜなみで区分した. 小区画内の株に対し, 各施用時期に通常の肥料に代わり標識重窒素(^{15}N , 3 atom %)を含む当該肥料を与えた. 各処理区はいずれの年次とも乱塊法2反復とした. 病害虫の駆除のため, 農薬の散布を適宜行った.

3. サンプルングおよび調査, 分析

各年次とも, 各処理区の ^{15}N 施用株から2株を採取した. 採取時期は試験1では幼穂形成期 (出穂約20日前), 出穂期および成熟期の3時期, 試験2では成熟期のみとした. 採取個体の地上部を部位別に分け, 通風乾燥機により 95°C で2時間, 65°C で2日以上乾燥し, 乾物重を測定した. 乾燥試料を粉碎し, ^{15}N トレーサー分析装置 (炭素窒素安定同位体比質量分析機, INTECRA-CN, Sercon Ltd.) により植物体内の N 含有率および ^{15}N 含有率 (atom %) を分析し,



第1図 日平均水温, 地温および気温の推移 (2006年).

図中の線は 25°C (緩効性肥料の溶出基準温度) を示す.

気温は高知県南門市日章地区における気象庁統計データによる.

Kamekawa ら (1990) の方法に従い以下の式より土壌由来, 肥料由来の N 吸収量を算出した.

肥料由来 N 吸収量 (mg 株^{-1}) = 植物体中の N 含有量 (mg 株^{-1}) \times (植物体の ^{15}N 含有率 atom % - 0.365^*) / (施肥 N 肥料の ^{15}N 含有率 atom % - 0.365^*)

^{15}N の自然存在比を 0.365 atom % とした.

土壌由来 N 吸収量 (mg 株^{-1}) = 植物体中の N 含有量 (mg 株^{-1}) - 肥料由来 N 吸収量 (mg 株^{-1})

また, 成熟期までの肥料由来 N 吸収量から下記の式により施肥 N 吸収率を算出した.

施肥 N 吸収率 (%) = 成熟期肥料由来 N 吸収量 (g m^{-2}) / 施肥 N 合計成分量 (g m^{-2})

2006 年の水稻生育期間中には, 水田圃場の水温および地温をデータロガー (おんどとり, 株式会社ティアンドデイ) により継続的に記録した.

結 果

試験1, 2とも, 出穂期は YD, WY および HH でそれぞれ8月16日~25日, 8月20日~25日および8月16日~25日であった. 成熟期はそれぞれ9月21日~10月9日, 9月26日~10月12日および9月26日~10月9日であった. 出穂期および成熟期は緩効性肥料の施用および施肥量の増加により約2~5日遅くなり, 出穂までの日数は S 区 > L 区 > C 区の順で有意な差が認められた.

第1図に, 2006 年の日平均水温, 地温と気温の推移を示す. 水温および地温は8月下旬まで気温より約 $2\sim4^{\circ}\text{C}$ 高

第3表 時期別および期間別 N 吸収量 (g m^{-2} , 試験1, 2008 と 2009 年の平均).

品種	処理区	幼穂形成期 N 含有量			出穂期 N 含有量			成熟期 N 含有量			幼穂形成期~出穂期 N 吸収量			出穂期~成熟期 N 吸収量		
揚稲4号 (YD)	C	6.7	100	b	13.5	100	b	16.8	100	b	6.9	100	a	3.3	100	a
	L	11.6	174	a B	16.5	122	ab A	19.6	117	a A	4.8	71	a A	3.1	96	a A
	S	10.2	153	a	17.5	129	a	21.0	125	a	7.3	106	a	3.5	107	a
武育梗3号 (WY)	C	8.4	100	b	13.7	100	a	17.1	100	a	5.3	100	a	3.4	100	a
	L	12.3	147	a A	16.6	121	a A	20.4	119	a A	4.3	81	a B	3.8	112	a A
	S	12.3	147	a	16.0	117	a	19.4	114	a	3.6	68	a	3.4	101	a
ヒノヒカリ (HH)	C	6.7	100	b	12.5	100	b	14.1	100	b	5.9	100	a	1.6	100	a
	L	10.8	162	a B	17.1	136	a A	18.4	130	ab A	6.3	108	a AB	1.3	81	a A
	S	11.1	166	a	16.4	131	a	20.2	143	a	5.3	91	a	3.8	239	a
肥料		***			***			***			n.s.			n.s.		
品種		*			n.s.			n.s.			*			n.s.		
年次		***			***			***			**			n.s.		
ANOVA	肥 \times 品	n.s.			n.s.			n.s.			n.s.			n.s.		
	肥 \times 年	n.s.			*			n.s.			*			n.s.		
	品 \times 年	n.s.			n.s.			n.s.			**			n.s.		
	肥 \times 品 \times 年	n.s.			n.s.			n.s.			n.s.			n.s.		

斜体の数字は C 区を 100 とした場合の割合.

同じ小文字アルファベットの間には, Tukey 法により年次を含めた肥料の種類の間には 5% 水準で有意差がないことを示す.

同じ大文字アルファベットの間には, Tukey 法により年次, 処理を含めた品種の間には 5% 水準で有意差がないことを示す.

*, **, ***; それぞれ 5%, 1%, 0.1% 水準で有意であることを示す. n.s.; 有意でないことを示す.

第4表 由来別および時期別 N 吸収量 (g m^{-2} , 試験 1, 2008 年と 2009 年の平均).

品種	処理区	肥料由来 N 吸収量						土壌由来 N 吸収量					
		移植～幼穂形成期		幼穂形成期～出穂期		出穂期～成熟期		移植～幼穂形成期		幼穂形成期～出穂期		出穂期～成熟期	
YD	C	0.8	100	c	2.0	100	ab	0.8	100	a	5.9	100	a
	L	4.8	629	a	1.3	65	b	0.1	12	a	6.8	115	a
	S	4.0	522	b	2.6	135	a	1.1	138	a	6.2	105	a
WY	C	0.9	100	b	1.9	100	a	0.7	100	a	7.5	100	a
	L	5.6	642	a	0.5	28	b	0.4	57	a	6.7	89	a
	S	5.8	663	a	1.5	79	ab	0.1	7	a	6.5	87	a
HH	C	1.0	100	b	2.0	100	a	0.4	100	a	5.6	100	a
	L	5.5	543	a	1.9	97	a	-1.2	-321	a	5.2	93	a
	S	5.1	502	a	2.6	134	a	0.4	105	a	6.0	106	a
ANOVA	肥料	***		**		*		n.s.		n.s.		n.s.	
	品種	***		*		n.s.		*		*		n.s.	
	年次	***		*		n.s.		**		***		n.s.	
	肥 × 品	*		n.s.		n.s.		n.s.		n.s.		n.s.	
	肥 × 年	***		**		n.s.		n.s.		***		n.s.	
	品 × 年	n.s.		n.s.		n.s.		n.s.		n.s.		n.s.	
	肥 × 品 × 年	n.s.		n.s.		n.s.		n.s.		n.s.		n.s.	

斜体の数字, 小文字および大文字のアルファベット, 記号は第3表を参照.

く推移し, 移植後 30 日目頃より 9 月上旬まで緩効性肥料の溶出基準温度の 25°C を常に上回った. 栽培期間中の気温は 2010 年の生育後期に高温で経過したが, 2006～2009 年は平年並みであった.

試験 1 において, 緩効性肥料が N 吸収に及ぼす影響および品種間差異は, 2006 年および 2007 年, すなわち S 区においてシグモイド型緩効性肥料を減量し塩安を混合施用した場合に比べ, 2008 年および 2009 年のシグモイド型緩効性肥料を単独施用した場合で明瞭であったので, ここでは第3表に 2008 年および 2009 年における時期別 N 含有量および期間別 N 吸収量を示す. 幼穂形成期 N 含有量はいずれの品種においても緩効性肥料の施用 (L 区および S 区) により C 区に比べ有意に増加したが (C 区の 147～174%), L 区と S 区の間に有意な差は認められなかった. 同様の傾向は出穂期および成熟期 N 含有量においても認められ, 分散分析において緩効性肥料の効果は有意であったが, その増加割合は幼穂形成期に比べ小さく, YD と HH では同一品種内での多重検定において S 区で C 区より有意に高かったが, L 区と C 区の間では必ずしも有意差が認められず, WY ではいずれの処理区間にも有意な差は認められなかった. これは, 幼穂形成期から出穂期および出穂期から成熟期の N 吸収量に緩効性肥料による有意な増加効果が認められなかったことによるものであった. 品種間では, WY は YD および HH に比べ, 幼穂形成期に有意に高かったが, 幼穂形成期から出穂期にかけて低く, その結果, 出穂期および成熟期には品種間に有意な差は認められなかった.

第4表に, 肥料由来 N と土壌由来 N に分けて 2008 年および 2009 年の期間別 N 吸収量を示す. 肥料由来 N 吸収量

において, 緩効性肥料による有意な増加は幼穂形成期までの期間で明瞭に認められたが (C 区の 502～663%), それ以降の期間 (幼穂形成期から出穂期, 出穂期から成熟期) では認められなかった. 土壌由来 N 吸収量には, いずれの品種, 生育時期においても緩効性肥料の施用による有意な増加は認められなかった.

第5表に 2006 年から 2009 年の各年における施肥 N 吸収率の結果を示す. 分散分析の結果から, 施肥 N 吸収率は緩効性肥料区で年次および品種に関わらず C 区より有意に高かった. しかし, 同一品種内の多重検定によると, 2006 年の YD および 2007 年の WY では緩効性肥料の施用による有意な増加は認められなかった. シグモイド型緩効性肥料と塩安を混合施用した 2006 年と 2007 年ではいずれの品種とも L 区で S 区より高い傾向にあったが, シグモイド型緩効性肥料を単独施用した 2008 年と 2009 年では S 区で L 区より高い傾向にあった.

第6表に試験 2 の異なる施肥 N 量における緩効性肥料の施用効果を示す. 分散分析の結果, 成熟期 N 含有量は緩効性肥料の施用および施肥量の増加により有意に増加し, YD で HH より有意に高かった. 分散分析では肥料の種類, 施肥量および品種の間に交互作用はみられなかったが, 同一品種の同一施肥量水準内における多重検定によると, 緩効性肥料の効果は施肥量水準および品種で異なった. すなわち, C 区に比べ, YD では 12 g m^{-2} の L 区および S 区で, また 21 g m^{-2} の S 区で有意に高かったが, 30 g m^{-2} では有意な差異は認められなかった. また, 緩効性肥料の効果は HH において有意でなかった.

肥料由来 N 吸収量は, 分散分析の結果, 緩効性肥料の施

第5表 施肥N吸収率(%, 試験1).

品種	処理区	2006 年				2007 年				2008 年				2009 年			
YD	C	25.6	100	<i>a</i>		32.5	100	<i>b</i>		29.6	100	<i>b</i>		29.5	100	<i>c</i>	
	L	46.4	181	<i>a</i>	<i>A</i>	50.5	155	<i>a</i>	<i>A</i>	49.8	169	<i>a</i>	<i>A</i>	53.6	182	<i>b</i>	<i>A</i>
	S	42.8	167	<i>a</i>		42.7	131	<i>a</i>		59.7	202	<i>a</i>		69.9	237	<i>a</i>	
WY	C	24.8	100	<i>b</i>		34.0	100	<i>a</i>		28.1	100	<i>b</i>		29.9	100	<i>b</i>	
	L	49.5	199	<i>a</i>	<i>A</i>	45.6	134	<i>a</i>	<i>A</i>	53.6	191	<i>a</i>	<i>A</i>	55.4	186	<i>a</i>	<i>A</i>
	S	36.6	148	<i>ab</i>		41.5	122	<i>a</i>		65.5	233	<i>a</i>		56.6	190	<i>a</i>	
HH	C	23.7	100	<i>b</i>		28.6	100	<i>b</i>		28.2	100	<i>c</i>		27.8	100	<i>b</i>	
	L	49.9	210	<i>a</i>	<i>A</i>	43.8	153	<i>a</i>	<i>A</i>	54.8	194	<i>b</i>	<i>A</i>	48.5	175	<i>ab</i>	<i>A</i>
	S	45.4	192	<i>a</i>		42.6	149	<i>a</i>		68.9	245	<i>a</i>		66.3	239	<i>a</i>	
ANOVA	肥料	***				***				***				***			
	品種	n.s.				n.s.				n.s.				n.s.			
	肥×品	n.s.				n.s.				n.s.				n.s.			

同じ小文字アルファベットの間には, Tukey 法により肥料の種類の間には5%水準で有意差がないことを示す.

同じ大文字アルファベットの間には, Tukey 法により処理を含めた品種の間には5%水準で有意差がないことを示す.

斜体の数字, 記号は第3表を参照.

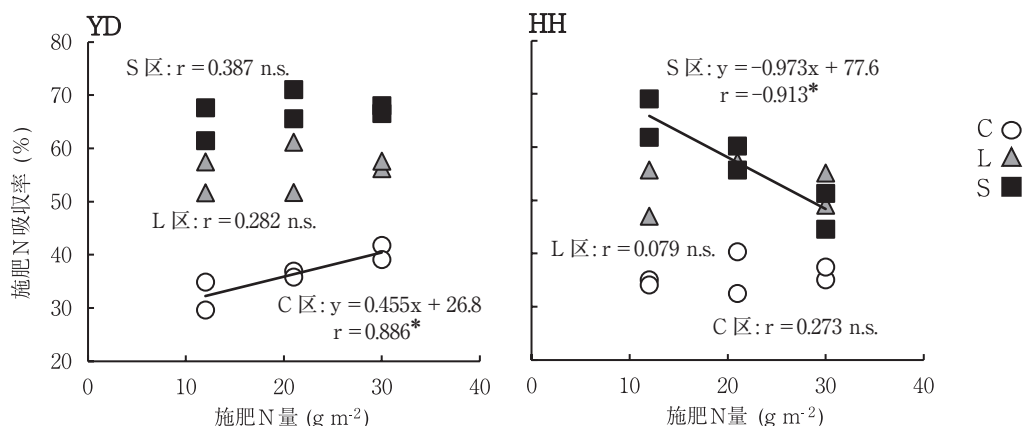
第6表 成熟期N含有量, 由来別N吸収量および施肥N吸収率(試験2).

品種	処理	成熟期 N 含有量 (g m ⁻²)				肥料由来 N 吸収量 (g m ⁻²)				土壌由来 N 吸収量 (g m ⁻²)				施肥 N 吸収率 (%)			
YD	C12	14.2	100	<i>b</i>		3.9	100	<i>b</i>		10.3	100	<i>a</i>		32.2	100	<i>b</i>	
	L12	19.3	136	<i>a</i>		6.6	169	<i>a</i>		12.8	124	<i>a</i>		54.6	169	<i>a</i>	
	S12	18.8	133	<i>a</i>		7.8	200	<i>a</i>		11.1	107	<i>a</i>		64.5	200	<i>a</i>	
	C21	20.8	100	<i>b</i>		7.6	100	<i>b</i>		13.1	100	<i>a</i>		36.4	100	<i>b</i>	
	L21	24.6	118	<i>ab</i>	<i>A</i>	11.9	155	<i>a</i>	<i>A</i>	12.7	97	<i>a</i>	<i>A</i>	56.4	155	<i>a</i>	<i>A</i>
	S21	27.2	131	<i>a</i>		14.3	188	<i>a</i>		12.8	97	<i>a</i>		68.3	188	<i>a</i>	
	C30	29.4	100	<i>a</i>		12.1	100	<i>c</i>		17.3	100	<i>a</i>		40.4	100	<i>c</i>	
	L30	30.5	104	<i>a</i>		17.1	141	<i>b</i>		13.5	78	<i>a</i>		56.9	141	<i>b</i>	
	S30	33.2	113	<i>a</i>		20.2	166	<i>a</i>		13.0	75	<i>a</i>		67.3	166	<i>a</i>	
HH	C12	15.9	100	<i>a</i>		4.2	100	<i>b</i>		11.7	100	<i>a</i>		34.6	100	<i>b</i>	
	L12	14.5	91	<i>a</i>		6.2	149	<i>ab</i>		8.3	71	<i>a</i>		51.4	149	<i>ab</i>	
	S12	17.3	109	<i>a</i>		7.9	189	<i>a</i>		9.5	81	<i>a</i>		65.5	189	<i>a</i>	
	C21	19.6	100	<i>a</i>		7.6	100	<i>b</i>		11.9	100	<i>a</i>		36.4	100	<i>b</i>	
	L21	22.5	115	<i>a</i>	<i>B</i>	11.9	155	<i>a</i>	<i>B</i>	10.6	89	<i>ab</i>	<i>B</i>	56.6	155	<i>a</i>	<i>B</i>
	S21	19.7	101	<i>a</i>		12.2	159	<i>a</i>		7.6	63	<i>b</i>		58.0	159	<i>a</i>	
	C30	25.5	100	<i>a</i>		10.9	100	<i>a</i>		14.6	100	<i>a</i>		36.3	100	<i>a</i>	
	L30	27.6	108	<i>a</i>		15.6	144	<i>a</i>		11.9	82	<i>a</i>		52.1	144	<i>a</i>	
	S30	28.0	110	<i>a</i>		14.4	132	<i>a</i>		13.6	93	<i>a</i>		47.9	132	<i>a</i>	
ANOVA	肥料	**				***				n.s.				***			
	施肥量	***				***				***				n.s.			
	品種	***				***				**				*			
	肥×量	n.s.				*				n.s.				n.s.			
	肥×品	n.s.				**				n.s.				*			
	量×品	n.s.				***				n.s.				*			
	肥×量×品	n.s.				*				n.s.				n.s.			

同じ小文字アルファベットの間には, Tukey 法により同一施肥量における肥料の種類の間には5%水準で有意差がないことを示す.

同じ大文字アルファベットの間には, t 検定により肥料の種類, 施肥量を含めた品種の間には5%水準で有意差がないことを示す.

斜体の数字, 記号は第3表を参照.



第2図 施肥N量と施肥N吸収率の関係(試験2)。

* : 5%水準で有意であることを示す. n.s. : 有意でないことを示す。

用および施肥量の増加により有意に増加し、YDでHHより有意に高かった。肥料の種類と施肥量の間には交互作用が認められ、緩効性肥料の効果は低N条件下で高N条件下より大きかった。肥料の種類と品種の間にも交互作用が認められ、緩効性肥料の効果はYDでHHより大きいことが示された。また、施肥量と品種の間にも有意な交互作用が認められ、YDではHHより高N条件下でのN吸収量が有意に高かった。また、肥料の種類、施肥量および品種による交互作用が認められ、YDの30 g m⁻²ではS区>L区>C区の順で有意な差が認められたが、このような傾向はHHでは認められなかった。

土壌由来Nは施肥量の増加により有意に増加し、YDでHHより有意に高かったが、肥料の種類による有意な差異は認められず、緩効性肥料の施用によってむしろ低下する傾向が認められた。

施肥N吸収率は緩効性肥料区でC区より有意に高く、施肥量による有意な差異は認められなかったが、品種間ではYDでHHより有意に高かった。また、肥料の種類と品種の間に交互作用が認められたことから、緩効性肥料の効果はYDでHHより大きいことが示された。さらに、施肥量と品種の間に交互作用が認められたことから、YDでは高N条件下においても低下せず、HHでは顕著に低下したことが示された。肥料の種類、施肥量および品種による交互作用は認められなかったが、YDの30 g m⁻²ではS区>L区>C区の順で有意な差が認められ、このような傾向はHHで認められなかった。

第2図に施肥N量と施肥N吸収率の関係を示す。YDの施肥N吸収率は施肥量に関わらずS区>L区>C区の傾向が認められた。施肥N吸収率はC区において施肥N量と有意な正の相関関係を示し、30 g m⁻²で最大であったが、L区およびS区の施肥N吸収率は施肥N量との間に有意な関係が認められず、いずれの施肥水準でも同程度であった。一方、HHの施肥N吸収率は、施肥N量の増加とともにS区で有意に低下した。また、YDと異なりC区の施肥

N吸収率は施肥N量と有意な関係を示さなかった。

考 察

多収性品種のN吸収は一般品種に比べ長く持続し、生育後期まで盛んであることが報告されており(樋口・吉野1986)、穂重型多収性品種では幼穂形成期におけるN要求量が多いことが指摘されている(王ら1997)。中国産多収性品種YDにおいても、幼穂形成期から出穂期までのN吸収量は他の品種より高い傾向にあった(第3表)。しかしながら、緩効性肥料の施用はこの期間のN吸収量を増加させず、幼穂形成期以前のN吸収量を有意に増加させた(第3表)。幼穂形成期までの地温は緩効性肥料の溶出基準温度の25℃を大きく上回っており(第1図)、溶出期間の100日(80%溶出)より早く溶出が進行したものと推察される。したがって、本実験では幼穂形成期以降のYDにおける高いN要求を満たしていないものと考えられ、より肥効の長いタイプの緩効性肥料を用いることでN吸収量の増加が期待される。一方、WYのN吸収パターンはYDに比べ幼穂形成期までに高く、幼穂形成期から出穂期にかけて低いことから(第3表)、YDの場合より早期に溶出する緩効性肥料の施用が有効であると考えられる。

幼穂形成期間中のN吸収量は籾数と有意な正の相関関係を示し(Yaoら2000b, Mae2011)、多収性穂重型品種では一穂籾数増加のため多量のNが幼穂形成期間中に要求される(王ら1997, 居ら2006)。シンクサイズ(面積当たり籾数×一粒重, 斎藤ら1991)およびm²当たり籾数は緩効性肥料の施用により有意に増加することを著者らは前報(Kokuboら2011)で報告した。緩効性肥料によるm²当たり籾数の増加は、日本型水稻品種では穂数の増加によることが報告されているが(Kaneta1995)、YDでは穂数の有意な増加は認められず、一穂籾数が有意に増加することが確認された(Kokuboら2011)。このように緩効性肥料の影響は肥効期間と品種の組み合わせにより異なるものと考えられる。m²当たり籾数の増加は登熟歩合の低下を引き起こ

すことがこれまで報告されており (徐・茶村 1979, 丸山ら 1988, 平岡ら 1992), このような傾向は前報 (Kokubo ら 2011) において WY および HH で認められたが, YD では m^2 当たり粒数およびシンクサイズの増加に対して登熟歩合の低下が小さく, シンクサイズの収量に及ぼす影響が大きいことが示された。

緩効性肥料による幼穂形成期までの肥料由来 N 吸収量の有意な増加によって, 成熟期における施肥 N 吸収率は有意に向上した (第 5 表)。YD の施肥 N 吸収率は, S 区 > L 区 > C 区の傾向が認められ, 緩効性肥料区では施肥量水準の増加に伴う有意な低下がみられなかった (第 6 表, 第 2 図)。緩効性肥料区では収量にも施肥量の増加に伴う有意な増加が認められなかったことから (Kokubo ら 2011), 低 N 施肥量条件下 (12 g m^{-2}) でも最適な収量生産と施肥 N 吸収率が得られることが示された。これに対し, C 区すなわち, 塩安を分施した場合の施肥 N 吸収率は施肥量の増加に伴い有意に増加し, 30 g m^{-2} で最大となった (第 2 図, 第 6 表)。また, 収量も施肥量の増加に伴い増加する傾向にあった (Kokubo ら 2011) ことから, 多施肥栽培が有効であると考えられた。しかし, C 区の施肥 N 吸収率は最大でも 40.4% であり緩効性肥料区に比べ有意に低く, 施肥 N 量の増加は収量への寄与率が低いだけでなく, N 成分の環境への流出負荷を増加させるものと考えられる。これらのことから, YD では緩効性肥料の施用により収量性と高い施肥 N 吸収率を維持しながら, 施肥量の削減が可能となる。一方, HH の施肥 N 吸収率は緩効性肥料の施用によって増加したが (第 5 表), S 区では施肥量の増加に伴い有意に低下し, C 区においても施肥 N 量の増加に伴う変化はみられなかったことから (第 2 図), いずれの肥料でも低 N 施肥量での栽培が有効である。

試験 2 (2010 年) と同様の結果が著者らのこれまでの試験から確認されており (Ju 2006, 居ら 2006), リニア型の緩効性肥料 (N, P, K 複合, 140 日タイプ) を異なる水準 (N 成分量で 6, 12, 18 g m^{-2}) で施用した結果, YD の施肥 N 吸収率は施肥 N 量の増加に伴い緩効性肥料区で低下せず (6, 12, 18 g m^{-2} でそれぞれ 80.6%, 91.7%, 91.0%, 但し, 無施肥区差し引き法による), 高 N 施用量で C 区より高かったこと, HH の緩効性肥料区では施肥 N 量の増加に伴い低下する傾向があった (同 93.3%, 80.0%, 73.1%) ことが示された。

以上より, 緩効性肥料による N 吸収促進効果は中国産多収性品種においても認められ, 施肥 N 吸収率は有意に増加した。多収性穂重型品種の YD と多収性穂数型品種の WY では N の吸収パターンが異なり, YD では WY と比べ幼穂形成期から出穂期にかけての N 要求量が高いことから, 肥効の長い緩効性肥料の施用が有効であると推察される。YD における緩効性肥料の施用は, いずれの施肥量条件下でも施肥 N 吸収率を増加させ, その増加による施用 N 量当たりの収量の向上と, それに伴う施用量の削減による環

境負荷の軽減に有効であると考えられる。今後はさらに吸収 N 量当たりの収量生産効率について, 緩効性肥料の効果と品種間差異を検討する必要がある。

謝辞: 重窒素トレーサー分析の実施にあたり, 愛媛大学農学部の上野秀人准教授および浅木直美氏に多大なる御協力を頂いた。ここに記して謝意を表する。

引用文献

- Acquaye, S. and K. Inubushi 2004. Comparative effects of application of coated and non-coated urea in clayey and sandy paddy soil microcosms examined by the ^{15}N tracer technique: I. Effects on growth, N uptake, and yield of rice crop. *Soil Sci. Plant Nutr.* 50: 205–213.
- 天野高久・帥常俊・秦徳林・津田誠・松本保博 1996a. 中国雲南省における水稻多収穫の実証的研究: 第 1 報 ジャボニカハイブリッドライス雑種 29 号の多収性. *日作紀* 65: 16–21.
- 天野高久・帥常俊・秦徳林・津田誠・松本保博 1996b. 中国雲南省における水稻多収穫の実証的研究: 第 2 報 ジャボニカハイブリッドライス雑種 29 号の粒数生産. *日作紀* 65: 22–28.
- 樋口太重・吉野喬 1986. 高収性水稻の窒素吸収特性について. *土肥誌* 57: 134–141.
- 平岡潔志・建部雅子・米山忠克 1992. 養分吸収・分配, シンク (穂) の特性からみた関東 146 号 (タカナリ) の多収性. *土肥誌* 63: 517–523.
- Huang, WY., D. Shank and T. I. Hewitt 1996. On-farm costs of reducing residual nitrogen on cropland vulnerable to nitrate leaching. *Rev. Agric. Econ.* 18: 325–339.
- 居静・山本由徳・宮崎彰・吉田徹志・王余龍 2006. 中国産多収性水稻品種揚稲 4 号の出液速度と窒素吸収量に及ぼす肥料の種類と施肥量の影響. *日作紀* 75: 249–256.
- Ju, J. 2006. Studies on nitrogen use efficiency and its improvement in Chinese high-yielding rice cultivars. Ph.D. diss. Unit. Grad. Sch. Agr. Sci., Ehime Univ., National Diet Library, UT51-2007-T737.
- 亀川健一 1990. LP 肥料—肥効特性と利用—, 農業技術体系 作物編 2-2 農文協, 東京. 技 522: 38–43.
- Kamekawa, K., T. Nagai, S. Sekiya and T. Yoneyama 1990. Nitrogen uptake by paddy rice (*Oryza sativa* L.) from ^{15}N labeled coated urea and ammonium sulfate. *Soil Sci. Plant Nutr.* 36: 333–336.
- Kaneta, Y. 1995. Single application of controlled availability fertilizer to nursery boxes in non-tillage rice culture. *JARQ* 29: 111–116.
- Kokubo, T., A. Miyazaki, T. Yoshida, Y. Yamamoto, J. Ju and Y. Wang 2011. Effect of slow release fertilizer on yield and yield components in Chinese high-yielding rice cultivars. *Proceedings of the 7th Asian Crop Science Association Conference* (In press).
- Liu, J., Q. Xie, Q. Shi and M. Li 2008. Rice uptake and recovery of nitrogen with different methods of applying ^{15}N -labeled chicken manure and ammonium sulfate. *Plant Prod. Sci.* 11: 271–277.
- Mae, T. 2011. Nitrogen acquisition and its relation to growth and yield in recent high-yielding cultivars of rice (*Oryza sativa* L.) in Japan. *Soil Sci. Plant Nutr.* 57: 625–635.
- 丸山幸夫・椛木信幸・田嶋公一 1988. 日本稲およびインド稲の窒素に対する生育反応: 第 1 報 窒素施肥によるわら重と穎花数増加の品種間差異. *日作紀* 57: 470–475.
- 中西政則・田中伸幸・安藤豊 1990. 水稻の穂首分化期における被服

- 尿素追肥が生育・収量に及ぼす影響. 日作紀 59 : 265–269.
- Pan, S., C. Cao, M. Cai, J. Zhai, R. Wang, S. Huang and G. Gao 2009. Effect of nitrogen management on rice nitrogen uptake and nitrogen concentrations in the leachate from rice field. *J. Agro-Environ. Sci.* 28 : 2145–2150.
- Peng, S., F. V. Garcia, R. C. Laza, R. M. Sanico, R. M. Visperas and K. G. Cassman 1996. Increased N-use efficiency using a chlorophyll meter on high-yielding irrigated rice. *Field Crops Res.* 47 : 243–252.
- Peng, S., R. J. Buresh, J. Huang, J. Yang, Y. Zou, X. Zhong, G. Wang and F. Zhang 2006. Strategies for overcoming low agronomic nitrogen use efficiency in irrigated rice systems in China. *Field Crops Res.* 96 : 37–47.
- 斎藤邦行・柏木伸哉・木下孝宏・石原邦 1991. 水稻多収性品種の乾物生産特性の解析: 第4報 穂への同化産物の分配. 日作紀 60 : 255–263.
- 酒田直克・山本一夫・中原秀雄・丸本卓哉 1995. 被覆肥料窒素の土壌中での挙動. 土肥誌 66 : 253–258.
- 徐錫元・茶村修吾 1979. 短稈多収性の改良インド型水稻品種の特性に関する研究: 第1報 シンク, ソース, 貯蔵炭水化物からみた登熟特性. 日作紀 48 : 365–370.
- 田中伸幸 1988. 被覆尿素を利用した水稻の省力的な施肥法. 土肥誌 59 : 500–503.
- 上野正夫・熊谷勝巳・富樫政博・田中伸幸 1991. 土壌窒素と緩効性被覆肥料を利用した全量基肥施肥技術. 土肥誌 62 : 647–653.
- 和田源七 1969. 水稻収量成立におよぼす窒素栄養の影響—特に出穂期以後の窒素の重要性について—. 農技研報 A16 : 1–167.
- Wang, X., J. Zhu, Y. Hosen and K. Feng 2004. Dynamic changes and modeling of nitrogen in paddy field surface water after application with different doses of urea. *J. Agro-Environ. Sci.* 23 : 852–856.
- Wang, X., J. Zhu, R. Gao, Y. Hosen and K. Feng 2007. Nitrogen cycling and losses under rice-wheat rotation with coated urea and urea in the Taihu Lake region. *Pedosphere* 17 : 62–69.
- 王余龍・山本由徳・新田洋司 1995. 中国産日本型水稻 9004 系統の多収要因の解析: 第1報 面積当たりの粗数水準同一での日本稲品種との収量性の比較. 日作紀 64 : 545–555.
- 王余龍・山本由徳・蔣軍民・姚友礼・蔡建中・新田洋司 1997. 中国産日本型水稻 9004 系統の多収要因の解析: 第3報 窒素施用時期並びに施用量が収量成立に及ぼす影響. 日作紀 66 : 1–10.
- Yao, Y., Y. Yamamoto, Y. Wang, T. Yoshida, A. Miyazaki, Y. Nitta and J. Cai 2000a. Macro-element absorption at maturity in relation to grain yield in high-yielding rice cultivars. *Soil Sci. Plant Nutr.* 46 : 815–824.
- Yao, Y., Y. Yamamoto, Y. Wang, T. Yoshida, A. Miyazaki, Y. Nitta and J. Cai 2000b. Role of nitrogen regulation in sink and source formation of high-yielding rice cultivars. *Soil Sci. Plant Nutr.* 46 : 825–834.
- Zhu, L.Z. and D.L. Chen 2002. Nitrogen fertilizer use in China—Contributions to food production, impacts on the environment and best management strategies. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 63 : 117–127.

Effect of Slow Release Fertilizer on Nitrogen Absorption and Fertilizer Nitrogen Recovery Rate in Chinese High-Yielding Rice Cultivars : Toshiaki KOKUBO¹⁾, Akira MIYAZAKI²⁾, Tetsushi YOSHIDA²⁾, Yoshinori YAMAMOTO²⁾, Yoko INOUE²⁾, Hideaki OKAZAKI²⁾, Yasuhiro IWANAGA²⁾, Syouhei KURODA²⁾, Jing JU³⁾ and Yulong WANG³⁾ (¹⁾United Graduate School of Agricultural Sciences, Ehime University; ²⁾Faculty of Agriculture, Kochi University, Kochi 783-8502, Japan; ³⁾Yangzhou University, China)

Abstract : The amount of nitrogen (N) absorbed from fertilizer before the young panicle formation stage in Chinese high-yielding cultivars, Yangdao 4 (YD) and Wuyugen 3 (WY) was increased significantly by applying a slow-release fertilizer. This resulted in a significant increase in fertilizer N recovery rate, and significantly increased the N content at the maturity stage in YD. The amount of N absorption from the young panicle formation stage to heading stage was significantly higher in YD than in WY, while WY absorbed a significantly larger amount of N than YD before the young panicle formation stage. This suggests that in YD, nitrogen is absorbed for a longer period from the slow-release fertilizer than in WY. The fertilizer N recovery rate in YD was higher in the sigmoid-type fertilizer than in the linear-type fertilizer, followed by the split application of ammonium chloride (C). It significantly increased with increasing amount of N fertilizer applied in C treatment, but not with linear or sigmoid-type fertilizers. These results show that the application of sigmoid-type slow-release fertilizer improves the fertilizer N recovery rate in these cultivars and the amount of N fertilizer to be applied can be decreased, thereby reducing the burden to the environment.

Key words : Chinese high-yielding cultivar, Fertilizer recovery rate, Nitrogen fertilizer application, Rice, Slow release fertilizer.