

水稲における窒素利用効率の品種間差異

齊藤 邦行^{a)}・岩目 好史^{b)}・前川 雅彦^{c)}・武田 和義^{c)}
(応用植物科学コース)

Cultivar differences in nitrogen use efficiency of rice

Kuniyuki Saitoh^{a)}, Yoshifumi Iwame^{b)}, Masahiko Maekawa^{c)}, and Kazuyoshi Takeda^{c)}
(Course of Applied Plant Science)

We investigated the effects of fertilizer-free and fertilizer-applied cultivation on growth, yield and nitrogen (N) utilization of rice cultivars in our Kurashiki paddy fields (Institute of Plant Science and Resources, Okayama Univ.), which have been cultivated without fertilizer since 1970, and also in our Okayama paddy fields, which are conventionally cultivated. In 2001, the cultivars Nipponbare (NIP) and Nourin 18 (N18) were cultivated in the Kurashiki fields, with a “0 N plot” (no fertilizer application), a “1 N plot” (standard fertilizer application), and a “2 N plot” (double fertilizer application). In 2002, five cultivars were grown without fertilizer in the Kurashiki fields, and 51 cultivars were tested in 0 N and 1 N plots in the Okayama fields. Yield (2001) in the Kurashiki fields was higher in the 0 N plot for N18 (379 g m⁻²), which had a higher number of spikelets per m², than NIP (300 g m⁻²), while in the 1 N and 2 N plots it was higher for NIP, which had a higher percentage of ripening, and N18 had high yield potential even without fertilizer application, but low fertilizer tolerance. The differences in yield were related to N-uptake (NU), and the differences in N use efficiency (NUE, yield/NU) between cultivars were small. The pot experiment showed that the yield of 0 N plot was higher for N18 than NIP grown in Kurashiki soil because of the higher number of spikelets per hill, and the yield in the Okayama soil was higher than that in the Kurashiki soil. Long-term non-fertilized soils are of poor soil fertility, which also decreases the NUE, and the NUE of N18 is higher than that of NIP under isolated conditions. The difference in yields is closely related to sink capacity (SC). In 2002, yields in the Kurashiki fields were highest in Takanari (TAK, 494 g m⁻²) and lowest in NIP (350 g m⁻²), and differences in yields were closely related to SC. NUE was highest in TAK (68.6) and lowest in Akebono (48.1). TAK had high NUE and high sink production efficiency (SPE, SC/NU), while N18 had low NUE but high SC due to higher NU, ensuring high yield even under unfertilized cultivation. Yields in the 0 N and 1 N plots cultivated in 2002 varied between 244–631 g m⁻² and 199–769 g m⁻², respectively. A close positive correlation was observed between yield and SC, and between NU and SC, suggesting that the SC through NU is involved in determining yield. A positive correlation was also observed between NUE and yield. It was found that yield increased with an increase in NUE, and that NUE decreased although yield increased with fertilizer application. Through selection of cultivars with high SPE, it is expected that it will be possible to breed low-input, high-yielding cultivars with high NUE in the future.

Key words : High-yielding rice cultivar, Nitrogen use efficiency, Nitrogen uptake, Sink capacity, Sink production efficiency, Unfertilized paddy field

はじめに

今日の水稲栽培は、多肥により生産性を著しく向上させてきたが、持続的農業の観点から化学肥料の低減化が求められている⁴⁾。現在の栽培品種は多肥で多収を示すものが多く³⁾、少肥でも多収を示す品種特性を明らかにする必要がある^{1,8)}。Okumura⁵⁾は、長期無施肥無農薬農法において、ベニアサヒを用いて10 a 当たり400 kg 前後の収量を示す事例があることを報告している。細谷・杉山²⁾

Received October 6, 2023

- a) 岡山大学大学院環境生命自然科学研究科
(The Graduate School of Environmental, Life, Natural Science and Technology, Okayama University)
- b) 岡山大学大学院自然科学研究科
(The Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University)
- c) 岡山大学資源植物科学研究所
(Institute of Plant Science and Resources (IPSR), Okayama University)

も北日本の無施肥栽培水田を調査し、420~480 kg/10 aの収量を記録している。これらは長期の無施肥水田としては一般に予想し難い高い収量レベルである。また、本学資源植物科学研究所には1970年より無肥料で栽培を継続している圃場があり、無施肥条件下においても収量性の高い品種の選抜が行われている。その結果、農林18号を用いて400 kg/10 a前後の収量をj得ている。このように、無肥料でも高い収量性を示す品種の生産特性を解明することは、化学肥料・農薬の低減化に重要である。

そこで、同水田において、無施肥条件に高い適応性を示す農林18号の性質を明らかにするため、特性の異なるタカナリ・アケボノ及び日本晴とともに栽培試験を行った。また、土壌による影響を比較するため、長期無施肥水田と慣行水田の土壌を用いてポット試験を行い、土壌、施肥条件の違いが水稻の生育収量に及ぼす影響を検討した。さらに、生育期間や草型の異なる51品種を用い、窒素利用効率の品種間差異を明らかにすることを目的とした。

材料と方法

1. 施肥レベルが窒素利用効率に及ぼす影響 (試験I)

2001年に水稻品種日本晴と農林18号を供試して、岡山大学資源植物科学研究所附属農場の長期無施肥水田(倉敷水田)において栽培試験を行った。5月14日に播種し、慣行に従ってポット育苗した苗を、6月20日に栽植密度22.2株 m^{-2} (30×15cm, 3本植)で手植え移植した。試験区は、施肥を行わない「0N区」、標準量を施肥する「1N区」、標準量の2倍を施肥する「2N区」の3水準を設けた。施肥はすべて基肥のみとし、緩効性肥料LP複合140E-80(N:P₂O₅:K₂O=14:14:14)を用いて、窒素成分で10a当たり1N区は6kg, 2N区は12kgを施肥した。

収穫期に120株(20株, 6反復)を刈り取り、収量と収量構成要素を調査した。また、各試験区につき8株を抜き取り、根を切除し、地上部を穂と茎葉部(穂以外)に解体し、80℃, 48時間通風乾燥後、乾物重を測定した。この乾物の窒素含有率をCNコーダ(MT-700, ヤナコ分析工業製)で測定し、窒素吸収量を算出した。さらに、シンク生産効率を吸収窒素当たりのシンク容量、窒素利用効率を吸収窒素当たりの精玄米収量として算出した。

2. ポット栽培における施肥レベルが窒素利用効率に及ぼす影響 (試験II)

土壌による影響を比較するため、2001年に倉敷水田および本学農学部附属山陽圏フィールド科学センターの水田(岡山水田)の土壌を用い、同センター内の雨除けビニールハウスで、日本晴と農林18号を供試して、ポット栽培(1/5,000aワグナー)を行った。試験区は、施肥を行わない「0N区」、標準量を施肥する「1N区」(0.2gN/pot, 10kgN/10a)、標準量の2倍を施肥する「2N区」(0.4gN/pot, 20kgN/10a)の3水準設け、施

肥には硫安、熔リン、塩加を用いた。試験Iと同様の苗を6月11日に1株3本植えて移植した。各区4個体につき、試験Iと同様に収量と収量構成要素、乾物重、窒素吸収量を測定し、シンク生産効率・窒素利用効率を算出した。

3. 長期無施肥水田における窒素利用効率の品種間差異 (試験III)

2002年には特性の異なる品種としてタカナリ・アケボノを加えた4品種を用いて、倉敷水田において無施肥で栽培を行った。5月13日に播種し、慣行に従ってポット育苗した苗を、6月10日に栽植密度22.2株 m^{-2} (30×15cm, 3本植)で手植え移植した。収穫期に60株(20株, 3反復)を刈り取り、収量と収量構成要素を調査した。また、試験Iと同様に乾物重、窒素吸収量を測定し、シンク生産効率・窒素利用効率を算出した。

4. 慣行栽培水田における窒素利用効率の品種間差異 (試験IV)

2002年に、岡山大学農学部附属山陽圏フィールド科学センターの水田(岡山水田)にて、特性の異なる51品種(Table 4)を用いて栽培試験を行った。試験区は無施肥条件の「0N区」、LP複合140E-80を用いて、窒素成分で8kg/10aする「1N区」を設けた。5月13日に播種し、慣行に従ってポット育苗した苗を、6月10日に栽植密度22.2株 m^{-2} (30×15cm, 3本植)で手植え移植した。各品種0N区, 1N区ともに試験区面積は2.25 m^2 (1.5×1.5m)無反復とした。

収穫はそれぞれの品種において出穂後45日を目安に行い、各試験区につき6株を地際から刈り取り、収量と収量構成要素を調査した。各試験区につき6株を対象に乾物重、窒素吸収量を測定し、シンク生産効率・窒素利用効率を算出した。

結 果

1. 施肥レベルが窒素利用効率に及ぼす影響 (試験I)

穂数は両品種ともに施肥量が多いほど増加する傾向にあったが、1N区と2N区の差は小さかった。いずれの試験区においても日本晴に比べ農林18号が少なくなった(Table 1)。一穂粒数は両品種ともに施肥量が多くなるほど多くなる傾向があり、農林18号の2N区(93.1)で最も多く、日本晴の0N区(63.0)で最も少なくなった。農林18号は全ての試験区で日本晴の2N区(81.6)より多くなった。総粒数は施肥量の増加とともに多くなったが、1N区と2N区の差は小さかった。いずれの試験区においても日本晴に比べ農林18号が多く、特に0N区で品種間差が大きかった。登熟歩合は両品種ともに0N区で高く、施肥量が多くなるほど低下がみられた。1N区, 2N区の登熟歩合は日本晴に比べ農林18号で低くなった。精玄米千粒重は品種間、試験区間の相違は小さかった。形成された総粒の容量をシンク容量(=総粒数×

精玄米一粒重)で比較してみると、総粒数と同様の傾向を示し、2N区 > 1N区 > 0N区の順に大きく、日本晴に比べ農林18号が大きかった。精玄米収量は0N区では総粒数の多い農林18号 (379 g m⁻²) が日本晴 (300 g m⁻²) に比べ高かったが、1N区、2N区では登熟歩合の低かった農林18号が日本晴に比べ低くなった。

2. ポット栽培における施肥レベルが窒素利用効率に及ぼす影響 (試験II)

穂数はいずれの品種・土壌においても2N区 > 1N区 > 0N区の順に高くなった (Table 2)。総粒数・シンク容量は施肥量に伴って増加したが、これは穂数の増

加に起因していた。登熟歩合の施肥レベル間の相違は小さく、ポット試験は孤立条件で受光条件が良いためと考えられた。いずれの施肥レベル・土壌においても農林18号の総粒数は日本晴に比べ多く、登熟歩合も高く維持しており、収量は高くなった。土壌間で比較すると、収量はいずれの品種・施肥レベルにおいても岡山土壌で高くなった。これも総粒数・登熟歩合が高いことに起因していた。また、土壌間では施肥量の増加に伴う増収程度が異なり、両品種ともに倉敷土壌に比べ岡山土壌でその程度が大きかった。この結果、長期無施肥土壌である倉敷土壌は、岡大土壌に比べ地力が乏しいことが推察された。

Table 1 Yield and yield components of rice plants grown under different levels of nitrogen fertilizer (Exp. I, 2001)

Cultivar	Plots	Panicle no. (m ⁻²)	Spikelets no. (panicle ⁻¹)	Spikelets no. (× 10 ³ m ⁻²)	Filled spikelets (%)	1000-grains weight (g)	Sink capacity (g m ⁻²)	Filled brown rice yield (g m ⁻²)	Nitrogen uptake (g m ⁻²)	Sink prod. efficiency (g gN ⁻¹)	N-use efficiency (g gN ⁻¹)
Nipponbare	0 N	235	63.0	14.8	88.3	22.8	338	300	3.07	46.4	41.1
	1 N	363	78.3	28.5	86.3	23.2	660	567	9.6	42.0	36.0
	2 N	385	81.6	31.4	81.0	22.8	717	580	12.7	43.1	34.8
Nourin 18	0 N	216	86.2	18.6	87.9	23.1	431	379	6.03	48.5	42.6
	1 N	347	85.9	29.8	75.7	22.6	674	510	12.5	46.8	35.4
	2 N	357	93.1	33.2	70.1	22.8	756	530	14.0	52.1	36.5
ANOVA	Cultivar (A)	**	**	ns	**	ns	ns	*	-	-	-
	Plot (B)	**	**	**	**	ns	**	**	-	-	-
	(A × B)	ns	**	*	**	*	*	**	-	-	-

* and **, significant at 0.05 and 0.01 level ; ns, not significant by ANOVA.

Sink capacity = Spikelet no. m⁻² × One grain weight. Sink production efficiency = Sink capacity / Nitrogen uptake.

Nitrogen use efficiency = Filled brown rice yield / Nitrogen uptake.

Table 2 Yield and yield components of rice plants grown in pots under different levels of nitrogen (Exp. II, 2001)

Cultivar	Soil	N level	Panicle no. (hill ⁻¹)	Spiklets no. (panicle ⁻¹)	Spiklets no. (hill ⁻¹)	Filled spikelets (%)	1000-grains weight (g)	Sink capacity (g hill ⁻¹)	Filled brown rice yield (g hill ⁻¹)	Nitrogen uptake (g hill ⁻¹)	Sink prod. efficiency (g gN ⁻¹)	N-use efficiency (g gN ⁻¹)
Nipponbare	Okayama soil	0 N	10.5	64.7	674	79.7	23.1	15.6	12.4	0.32	48.1	38.3
		1 N	14.5	66.0	953	81.6	23.2	22.1	19.3	0.52	42.1	36.8
		2 N	21.5	65.2	1,391	80.8	22.6	31.4	25.4	0.71	44.0	35.6
	Kurashiki soil	0 N	9.3	54.3	493	69.6	22.0	10.8	7.5	0.28	39.2	27.2
		1 N	13.0	57.0	737	68.3	22.8	16.8	11.5	0.39	42.7	29.2
		2 N	22.3	47.9	1,053	70.9	21.6	22.7	16.1	0.53	43.1	30.5
Nourin 18	Okayama soil	0 N	9.3	90.0	832	88.0	22.4	18.6	16.4	0.37	50.3	44.3
		1 N	13.0	82.4	1,063	92.1	22.2	23.6	21.8	0.56	42.3	39.0
		2 N	19.0	74.2	1,406	93.1	22.2	31.2	29.1	0.80	39.1	36.4
	Kurashiki soil	0 N	7.8	67.8	522	85.6	22.1	11.5	9.8	0.27	43.3	36.9
		1 N	11.3	60.2	682	83.1	21.7	14.8	12.3	0.39	37.7	32.0
		2 N	14.8	64.9	953	78.7	22.0	21.0	16.5	0.52	40.6	34.2
ANOVA	Cultivar (A)	Soil (B)	**	**	**	**	**	**	**	-	-	-
		N level (C)	**	*	**	ns	*	**	**	-	-	-
		A × B	ns	ns	**	ns	*	**	ns	-	-	-
		A × C	**	ns	*	ns	*	*	ns	-	-	-
		B × C	ns	ns	**	ns	ns	**	**	-	-	-
		A × B × C	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	-	-	-

* and **, significant at 0.05 and 0.01 level ; ns, not significant by ANOVA. Sink capacity = Spikelet no. m⁻² × One grain weight.

Sink production efficiency = Sink capacity / Nitrogen uptake. Nitrogen use efficiency = Filled brown rice yield / Nitrogen uptake.

3. 長期無施肥水田における窒素利用効率の品種間差異 (試験Ⅲ)

収量はタカナリ (494 g m⁻²) > 農林18号 (397 g m⁻²) > アケボノ (389 g m⁻²) > 日本晴 (351 g m⁻²) の順に高くなった (Table 3). 収量構成要素を比較すると、穂数は日本晴 (242 本 m⁻²) が最も高く、農林18号 (211 本 m⁻²) が最も低い値を示したが、一穂粒数はタカナリ (143粒)、農林18号 (88粒) が多かった。その結果、総粒数はタカナリが他の3品種に比べ有意に多く、農林18号 > アケボノ > 日本晴の順となった。登熟歩合はいずれの品種間においても有意差が認められ、アケボノ > 農林18号 > 日本晴 > タカナリの順に高くなった。シンク容量は、タカナリの総粒数が多いことにより有意に高い値を示した。農林18号のシンク容量はタカナリに次いで大きく、有意差は認められなかったものの日本晴・アケボノを上回っていた。以上のことから、タカナリは登熟歩合が低かったものの、シンク容量が大きいことにより高い収量を達成したと考えられる。また、農林18号は日本晴に比べ収量が有意に高く、これにはシンク容量と登熟歩合ともに高いことが関係することがわかった。

4. 慣行栽培水田における窒素利用効率の品種間差異 (試験Ⅳ)

0 N 区の収量と収量構成要素、及び窒素利用効率を Table 4 に示した。

精玄米収量は 0 N 区で 208~632 g m⁻²、1 N 区で 186~769 g m⁻² の変異が認められ、両試験区の収量の間には密接な正の相関がみられた (Fig. 1)。すなわち、0 N 区の収量が高い品種は 1 N 区においても収量が高いことが示された。また、回帰直線の傾きは 1 を越えていることから、0 N 区の収量が高い品種ほど施肥による増収程度が大きいことがわかった。

収量構成要素についてみると、収量とシンク容量の間には正の相関関係 ($r = 0.862^{**}$) が認められた (Fig. 2)。シンク容量は 0 N 区で 298~771 g m⁻²、1 N 区で 342~864 g m⁻² の変異が認められた。総粒数は、0 N 区で 12,100~38,900 粒 m⁻²、1 N 区で 13,300~44,800 粒 m⁻² の変異が認められ、総粒数を多く確保できた品種は一穂粒数が多い品種であった。登熟歩合は精玄米千粒重と負の相関を示

し、大粒品種では登熟が劣る傾向にあった。精玄米千粒重には 16~38 g の変異が認められ、品種により異なった。

以上より、施肥条件に関わらず、一穂粒数が多いことにより総粒数を確保し、登熟歩合を維持できるような品種が高い収量を示すことがわかった。これらの特性は多肥条件で多収性を示すとされる品種の特性と一致しており、南京11号・桂朝2号・タカナリなどの多肥多収性品種においては、無施肥条件においても高い収量を示すことがわかった。

総窒素吸収量は 0 N 区で 5.56~11.62 g m⁻²、1 N 区で 9.25~17.81 g m⁻² の変異が認められ、1 N 区で高い値を示した (Fig. 3)。シンク容量と総窒素吸収量の間には正の相関 ($r = 0.660^{**}$) がみられ、窒素吸収量を介したシンク容量の大小が収量の決定に関与すると推察された。

シンク生産効率は (Fig. 4)、0 N 区で 39.1~84.2 g g⁻¹、1 N 区で 34.1~75.9 g g⁻¹ の変異が認められ、ほとんどの品種で 0 N 区に比べ 1 N 区で小さく、施肥により低下がみられた。シンク生産効率は収量と正の相関 (0 N 区: $r = 0.639^{**}$ 、1 N 区: $r = 0.545^{**}$) を示したが (Fig. 4)、その回帰直線の傾きは 0 N 区に比べ 1 N 区で大きかった。シンク生産効率が等しくても 0 N 区に比べ 1 N 区の収量は高く、これには、0 N 区に比べ 1 N 区の窒素吸収量が多く、シンク容量の増大とともに収量の増加割合が高くなることが関係すると推察された。

窒素利用効率は、0 N 区で 28.8~74.9 g g⁻¹、1 N 区で 17.4~56.5 g g⁻¹ の変異が認められ、シンク生産効率と同様に 0 N 区に比べ 1 N 区で小さく、施肥により低下がみられた (Fig. 5)。窒素利用効率においても収量と正の相関 (0 N 区: $r = 0.841^{**}$ 、1 N 区: $r = 0.836^{**}$) を示したが、その傾きは 0 N 区と 1 N 区で異なった。窒素利用効率が等しくても 0 N 区に比べ 1 N 区の収量が高いことには、窒素吸収量の増加とともに 1 N 区の収量が高くなることが関係すると推察された。

さらに、シンク生産効率と窒素利用効率の間には施肥レベルによらず、密接な直線関係が認められ (Fig. 6)、シンク形成能の高い品種では窒素利用効率も高いことが明らかとなった。また、Fig. 6 において 0 N 区が 1 N 区に比べ右上に多く分布しており、施肥に伴いシンク生産

Table 3 Yield and yield component of rice plants in unfertilized paddy field (Exp. III, 2002)

Cultivar	Panicle no. (m ⁻²)	Spikelets no. (panicle ⁻¹)	Spikelets no. (×10 ³ m ⁻²)	Filled spikelets (%)	1000-grains weight (g)	Sink capacity (g m ⁻²)	Filled brown rice yield (g m ⁻²)	Nitrogen uptake (g m ⁻²)	Sink prod. efficiency (g gN ⁻¹)	N-use efficiency (g gN ⁻¹)
Nipponbare	242 a	71.2 c	17.3 b	88.7 c	22.9 c	395 b	350 c	5.54	71.4	63.3
Takanari	235 ab	142.6 a	33.5 a	77.6 d	19.0 d	637 a	494 a	7.21	88.4	68.6
Nourin 18	211 b	88.1 b	18.5 b	91.4 b	23.4 b	434 b	397 b	6.40	67.8	62.0
Akebono	232 ab	74.8 c	17.4 b	93.3 a	24.0 a	417 b	389 bc	8.10	51.5	48.1
ANOVA	*	**	**	*	**	**	*	-	-	-

* and **, significant at 0.05 and 0.01 level; ns, not significant by ANOVA. Values followed by same letter are not significantly different at the 0.05 probability level by Tukey's test. Sink capacity = Spikelet no. m⁻² × One grain weight.

Sink production efficiency = Sink capacity / Nitrogen uptake. Nitrogen use efficiency = brown rice yield / Nitrogen uptake.

Table 4 Yield, yield components and N-use efficiency of rice cultivars without fertilization (Exp. IV, 2002)

No.	Cultivars	Panicle no. (m ⁻²)	Spikelets no. (panicle ⁻¹)	Spikelets no. (×10 ³ m ⁻²)	Filled spikelets (%)	1000-grains weight (g)	Sink capacity (g m ⁻²)	Filled brown rice yield (g m ⁻²)	Nitrogen uptake (g m ⁻²)	Sionk prod. efficiency (g gN ⁻¹)	N-use efficiency (g gN ⁻¹)
1	Kitahikari	396	30.5	12.1	82.1	24.7	298	245	7.18	41.5	34.1
2	Akage	259	70.6	18.3	70.7	18.9	346	245	7.91	43.7	30.9
3	Toyohatamochi	207	88.1	18.2	74.6	22.7	413	308	7.28	56.8	42.3
4	Nourin 1	322	77.0	24.8	86.6	18.6	461	399	8.43	54.7	47.4
5	Akihikari	215	88.2	18.9	93.6	21.5	406	380	7.68	52.9	49.5
6	Hananomai	239	88.2	21.0	89.8	21.4	450	404	7.53	59.7	53.6
7	Akitakomachi	235	88.3	20.7	91.4	21.8	451	413	7.88	57.3	52.4
8	Ginbouzu	252	103.5	26.0	83.1	21.8	568	472	7.43	76.4	63.5
9	Dular	241	96.2	23.1	96.6	20.4	472	456	7.67	61.5	59.4
10	Sasanishiki	287	91.2	26.2	92.2	20.5	537	495	9.49	56.6	52.1
11	Romeo	135	95.8	12.9	82.8	31.4	405	336	7.74	52.4	43.4
12	Hitomebore	259	72.5	18.8	86.6	21.5	404	350	8.33	48.5	42.0
13	Kinuhikari	233	87.5	20.4	91.1	21.6	440	401	8.83	49.8	45.4
14	Labelle	196	132.5	26.0	92.1	16.1	420	386	7.54	55.6	51.2
15	Koshihikari	274	91.8	25.1	90.7	20.4	513	466	9.90	51.8	47.0
16	Kochihibiki	283	66.7	18.9	92.5	23.1	437	404	9.04	48.3	44.7
17	Nanjing 11	248	127.1	31.5	90.9	21.1	666	606	9.95	67.0	60.9
18	North Rose	200	107.5	21.5	85.7	21.1	453	388	8.94	50.6	43.4
19	Hokuriku 130	209	67.7	14.2	46.6	36.7	520	242	8.41	61.8	28.8
20	Habataki	222	157.8	35.0	78.7	18.0	630	496	9.87	63.8	50.2
21	Hourei	285	68.9	19.6	77.4	20.4	400	309	9.70	41.2	31.9
22	Musashikogane	250	73.6	18.4	93.4	21.2	390	364	9.90	39.4	36.8
23	Milyang 23	207	129.1	26.7	81.9	21.2	567	464	10.24	55.4	45.3
24	Jaguary	159	76.9	12.2	56.0	30.3	371	208	5.56	66.7	37.4
25	Kahei	185	100.6	18.6	86.2	26.1	485	418	6.89	70.4	60.7
26	Akinishiki	268	74.7	20.0	92.2	21.4	428	394	8.78	48.7	44.9
27	Takanari	224	156.8	35.1	89.9	18.8	660	593	9.79	67.4	60.6
28	Nipponbare	239	96.5	23.0	90.8	22.6	521	473	8.67	60.1	54.6
29	Nourin 8	253	83.7	21.2	88.0	19.6	416	366	9.91	42.0	36.9
30	IR58	200	97.0	19.4	89.6	22.2	429	385	8.05	53.3	47.8
31	Asominori	320	62.5	20.0	91.9	25.2	504	464	8.20	61.5	56.5
32	Guizhao 2	224	154.4	34.6	83.2	22.0	759	631	9.22	82.3	68.5
33	Suweon 258	231	128.4	29.7	76.0	20.4	607	461	7.42	81.7	62.1
34	Tadukan	407	95.6	38.9	64.9	17.0	662	430	9.99	66.2	43.0
35	Taichungnative 1	302	101.4	30.6	84.7	20.1	616	522	9.59	64.2	54.4
36	Nourin 22	242	82.4	20.0	91.4	21.4	428	391	7.41	57.7	52.7
37	Kinmaze	298	85.1	25.3	91.4	22.4	568	519	8.78	64.7	59.1
38	Nakateshinsenbon	274	73.8	20.2	92.1	22.5	454	418	8.12	55.9	51.5
39	Akenohoshi	198	147.0	29.1	88.9	21.1	614	545	7.29	84.2	74.9
40	Koganemasari	242	86.3	20.9	91.2	22.0	459	419	8.18	56.2	51.3
41	NPT	179	131.5	23.6	82.6	24.2	570	471	8.44	67.6	55.8
42	IR24	242	156.3	37.9	58.2	20.4	771	449	11.62	66.4	38.6
43	Hinohikari	266	79.5	21.2	85.0	21.3	451	383	8.21	54.9	46.7
44	Kameji	178	121.6	21.6	88.4	21.5	465	411	8.84	52.6	46.5
45	Shinrei	257	73.9	19.0	84.9	17.5	332	282	8.50	39.1	33.2
46	Reihou	257	74.2	19.1	87.1	19.9	380	331	8.20	46.3	40.4
47	Asahi (new)	235	95.7	22.5	88.4	22.2	498	440	8.54	58.3	51.5
48	Asahi (old)	215	94.2	20.2	92.1	24.3	491	452	8.79	55.8	51.4
49	Akebono	255	92.4	23.6	91.2	22.9	539	492	8.63	62.5	57.0
50	Nourin 18	252	109.8	27.6	90.2	23.0	636	574	9.49	67.0	60.4
51	Kougyoku	294	84.4	24.8	94.5	22.4	556	525	8.67	64.1	60.6

Sink capacity = Spikelet no. m⁻² × One grain weight. Sink production efficiency = Sink capacity / Nitrogen uptake.
 Nitrogen use efficiency = Filled brown rice yield / Nitrogen uptake.

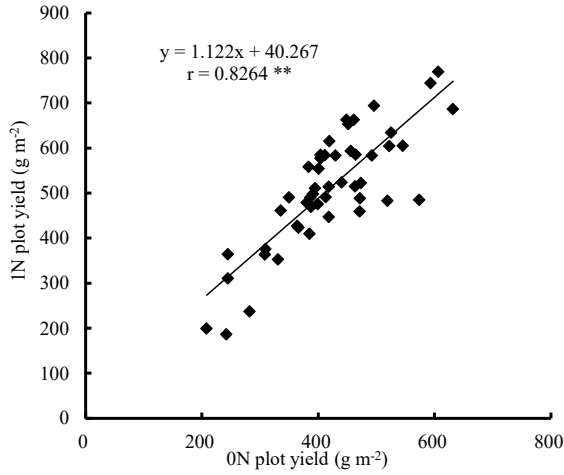


Fig. 1 Relation between yield in 0 N plot and that in 1 N plot (Exp.IV).

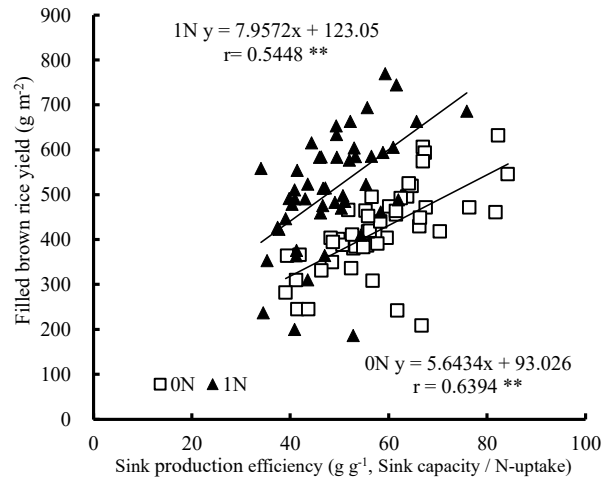


Fig. 4 Relation between sink production efficiency and yield in unfertilized (0 N) and standard fertilized (1 N) plots.

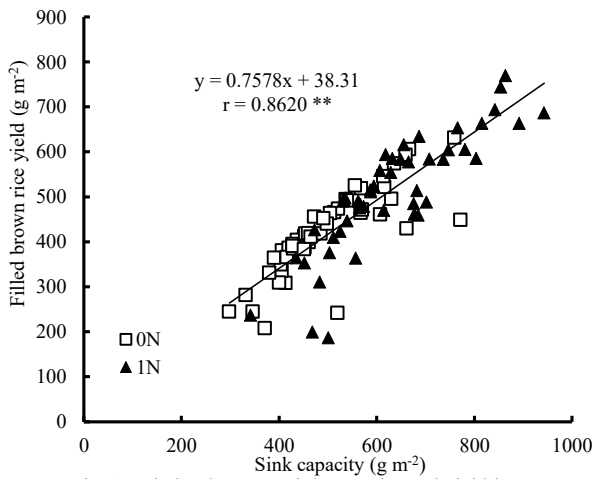


Fig. 2 Relation between sink capacity and yield in unfertilized (0 N) and standard fertilized (1 N) plots.

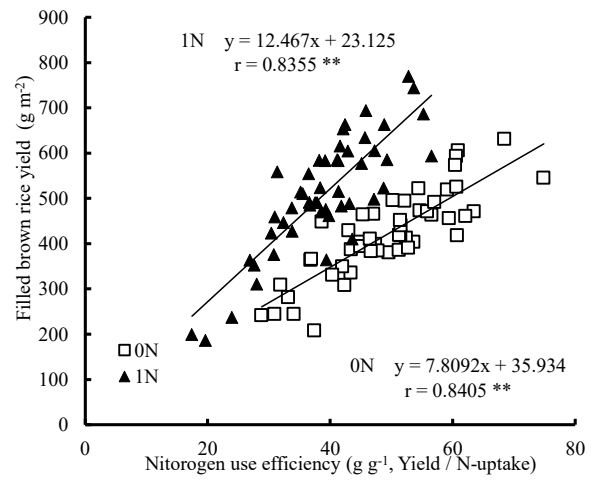


Fig. 5 Relation between N-use efficiency and yield in unfertilized (0 N) and standard fertilized (1 N) plots.

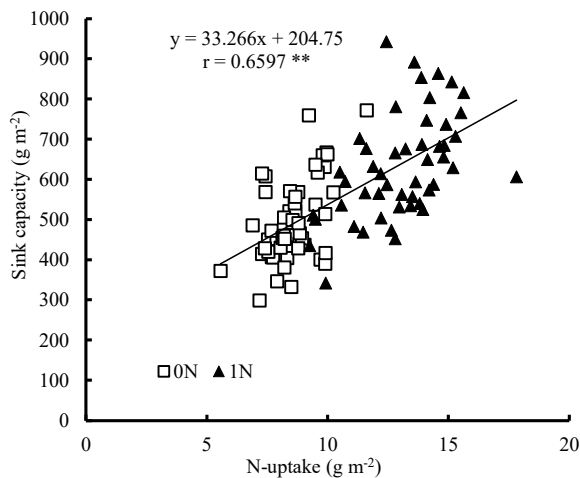


Fig. 3 Relation between N-uptake and sink capacity in unfertilized (0 N) and standard fertilized (1 N) plots.

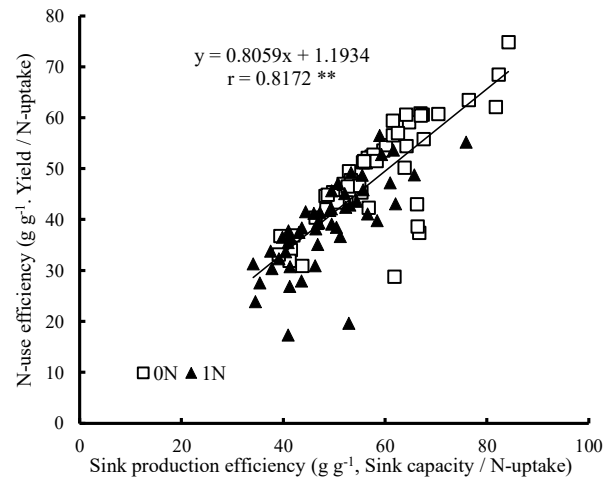


Fig. 6 Relation between sink production efficiency and N-use efficiency in unfertilized (0 N) and standard fertilized (1 N) plots.

効率・窒素利用効率は低下する傾向にあった。

以上のことから、シンク生産効率の上昇に伴って窒素利用効率・収量ともに増加すること、施肥に伴い収量は増加するもののシンク生産効率・窒素利用効率は低下することがわかった。

考 察

長期無施肥水田において栽培を行った水稻品種、農林18号は日本晴に比べ、生育期間が長く、草丈が大きかったが、有効茎歩合は低かった。収量と収量構成要素についてみると、農林18号は穂数が少ないものの一穂粒数が多く、穂重型の特性を備えており、総粒数が多くシンク容量が大きかった。無施肥条件での収量は、農林18号は日本晴に比べ高かったが、圃場条件下においては施肥量の増加に伴う増収程度は小さく、1N区・2N区では、日本晴に比べ収量は低かった (Table 1)。総窒素吸収量は、出穂期にはいずれの試験区においても農林18号が多く、特に0N区では日本晴の約2倍となった。これは、栄養成長期間が日本晴に比べ農林18号が15日間長く、1日あたりの総窒素吸収量も多かったことが関係していた。収穫期においては、品種間の差は小さくなり、1N区・2N区では日本晴が農林18号を上回った。収量を左右するシンク容量は、幼穂形成期までの総窒素吸収量⁷⁾、出穂2週間前までの窒素吸収量と出穂前2週間のCGR⁹⁾、穂揃い期の総窒素吸収量当たりのシンク容量で表されるシンク生産効率¹⁰⁾などによって大小が決定するとされている。収量はシンク容量と密接な正の相関関係にあり⁵⁾ (Fig. は省略)、また、日本晴・農林18号においてはシンク容量と総窒素吸収量の間に有意な正の相関関係が認められた (Fig. は省略)。すなわち、総窒素吸収量が多いほどシンク容量が増大し、収量の増加につながった (Table 1)。以上のことから、圃場条件下の0N区において日本晴に比べ、農林18号の収量が高かったことには、出穂期までの窒素吸収量が多く、シンク容量を確保できたことが関係していた。

ポット試験により土壌の影響を比較したところ、概ね慣行圃場の岡大土壌での生育が活発で、収量も高かった (Table 2)。ポット条件下での収量は、圃場条件とは異なった傾向を示し、施肥量の増加に伴い、両品種ともにほぼ同等の増収がみられ、いずれの施肥レベル、土壌においても日本晴に比べ農林18号が高くなった。すなわち、農林18号は日本晴に比べ、孤立条件下での収量性は高いが、群落条件下においては、登熟期の受光態勢が悪化することにより登熟歩合の低下が推察され、施肥量に伴う増収程度は小さくなった。総窒素吸収量を比較すると、品種間では、圃場条件と同様に日本晴に比べ農林18号が多く、土壌間では、倉敷土壌に比べ岡大土壌が多く、長期無施肥土壌は地力に乏しいと推察された。窒素利用効率を比較したところ、圃場条件下では大きな相違はみら

れなかったが、ポット条件下では日本晴に比べ農林18号が高い傾向を示した (Table 2)。したがって、孤立条件下で農林18号は日本晴に比べ窒素吸収量が多く、窒素利用効率も高いことにより収量は高くなった。また、窒素利用効率を土壌間で比較すると、倉敷土壌に比べ岡大土壌で高く、長期無施肥土壌は窒素利用効率も低下させることがわかった。

さらに、2002年倉敷水田において、特性の異なる品種タカナリ・アケボノを加えて無施肥栽培試験を行った結果、収量と収量構成要素についてみると、シンク容量はタカナリ・農林18号で高い値を示し、それに伴い収量は高くなった (Table 3)。総窒素吸収量と収量の間には有意な相関は認められなかった。タカナリが他の品種より収量が高かったのには、総窒素吸収量が多く、シンク生産効率が高いことによりシンク容量を確保できたことに起因していた。

窒素利用効率・シンク生産効率は品種間で相違がみられたことから、特性の異なる51品種を用い、窒素利用効率・シンク生産効率に及ぼす影響について検討した。収量と収量構成要素についてみると、精玄米収量は0N区で208~632 g m⁻²、1N区で186~769 g m⁻²の変異が認められ、両試験区の収量の間には密接な正の相関がみられた (Fig. 1)。すなわち、0N区の収量が高い品種は1N区においても収量が高いことが示された。また、0N区の収量が高い品種ほど施肥による増収程度が大きいことがわかった。収量構成要素についてみると、収量と最も密接な関係にあったのはシンク容量で、両区を込みに考えた場合にも、収量とシンク容量の間には密接な正の相関関係が認められた⁵⁾ (Fig. 2)。この関係は、いずれの試験においても成立していた。Yoshinaga et al.¹⁰⁾も収量はシンク容量と密接に関係し、シンク容量が大きく、さらにシンク充填率の高い特性または施肥量が多収の条件であると述べている。総粒数は、穂数よりも一穂粒数とより密接な正の相関を示しており、総粒数を多く確保できたのは一穂粒数が多い品種であったことが示された。登熟歩合は精玄米千粒重と負の相関を示し、大粒な品種ほど登熟が悪い傾向にあった。このことから、施肥条件に関わらず、一穂粒数が多いことにより総粒数を確保し、登熟歩合を維持できる品種が高収量を示した。これは多肥多収性品種の特性と一致し⁶⁾、無施肥条件においても多肥多収性品種の収量は高かった。収量とシンク容量の間には密接な正の相関が示され (Fig. 2)、シンク容量と総窒素吸収量の間にも、両試験区を込みにして正の相関がみられ (Fig. 3)、窒素吸収量を介したシンク容量の大小が収量の決定に関与すると推察された。さらに、シンク生産効率と窒素利用効率の間には両試験区を込みにして正の相関がみられ (Fig. 6)、シンク生産効率の高い品種で窒素利用効率も高い傾向にあった。また、Fig. 6において0N区のプロットが1N区のプロットに比べ、シ

ンク生産効率・窒素利用効率ともに回帰直線の上方に多く分布しており、施肥に伴いシンク生産効率・窒素利用効率が低下することが認められた。したがって、シンク生産効率の上昇に伴って窒素利用効率・収量ともに増加すること、施肥に伴い収量は増加するもののシンク生産効率・窒素利用効率は低下することがわかった。

以上のことから、施肥は窒素利用効率を低下させること、無施肥条件における水稻品種の収量性には大きな品種間差がみられ、それには品種の早晚性や窒素吸収能力による総窒素吸収量と、シンク生産効率の違いが関係していることが明らかになった。今後、シンク生産効率の高い品種の選抜により、窒素利用効率の高い低投入多収性品種の育成が可能になると推察された。

引用文献

- 1) Hasegawa, H. : High-yielding rice cultivars perform best even at reduced nitrogen fertilizer rate, *Crop Science*, **43**, 921-926 (2003)
- 2) 細谷啓太・杉山修一：北日本の無施肥栽培における水稻収量の地域間変異とその寄与要因. *日本作物学会紀事*, **85**, 266-273 (2016)
- 3) 村山 登：収獲漸減法則の克服. pp.1-232, 養賢堂, 東京(1982)
- 4) 農林水産省：みどりの食料システム戦略.
<https://www.maff.go.jp/j/kanbo/kankyo/seisaku/midori/> (2021)
- 5) Okamura, M., J. Hosoi, K. Nagata, K. Koba, D. Sugiura, Y. Arai-Sanoh, N. Kobayashi and M. Kondo : Cross-locational experiments to reveal yield potential and yield-determining factors of the rice cultivar 'Hokuriku 193' and climatic factors to achieve high brown rice yield over 1.2 kg m⁻² at Nagano in central inland of Japan. *Plant Production Science*, **25**, 131-147 (2022)
- 6) 斎藤邦行・下田博之・石原 邦：水稻多収性品種の乾物生産特性の解析 第6報 新・旧品種の比較を通じて. *日本作物学会紀事*, **62**, 509-517 (1993)
- 7) Wada, G. and P. C. Sta. Cruz : Varietal difference in nitrogen response of rice plants with special reference to growth duration. *Japanese Journal of Crop Science*, **58**, 732-739 (1989)
- 8) 横上晴郁・東 正昭：水稻の少肥栽培適性の品種間差異. *東北農業研究*, **52**, 17-18 (1999)
- 9) Yoshida, H., T. Horie and T. Shiraiwa : A model explaining genotypic and environmental variation in leaf area development of rice based on biomass growth and leaf N accumulation. *Field Crops Research*, **113**, 227-237 (2009)
- 10) Yoshinaga, S., T. Takai, Y. Arai-Sanoh, T. Ishimaru and M. Kondo : Varietal differences in sink production and grain-filling ability in recently developed high-yielding rice (*Oryza sativa* L.) varieties in Japan. *Field Crops Research*, **150**, 74-82 (2013)