

収量予測・情報処理・環境

水稻の光合成速度に及ぼす二酸化硫黄の影響の品種間差異

長屋祐一^{*1)}・梅崎輝尚¹⁾・松井昭博¹⁾・谷山鉄郎²⁾

(¹⁾三重大学・²⁾中部大学)

要旨 : 水稻 14 品種を供試し、止葉の光合成速度に及ぼす二酸化硫黄濃度 $1.0 \mu\text{L L}^{-1}$ 、15 分間処理の影響について品種比較を行なった。各品種の二酸化硫黄による光合成速度の低下程度を光合成阻害率として表すと、1998 年は 30.1 % から 65.2%、1999 年は 42.8% から 65.9% の範囲に分散しており品種間差異がみられた。供試品種の育成年度から、1909 年以前の 4 品種 (愛国、亀ノ尾、京都旭、竹成) を旧品種群、1945 年以降の 10 品種 (あきたこまち、秋晴、アキヒカリ、コシヒカリ、ササニシキ、初星、晴々、日本晴、農林 29 号、ヤマヒカリ) を新品種と区別して両者を比較すると、葉色 (SPAD 値) には有意差がみられなかったが、旧品種群の光合成阻害率は新品種群より有意に高かった。

キーワード : 光合成阻害率、光合成速度、水稻、二酸化硫黄。

水稻の収量に及ぼす二酸化硫黄や硫黄酸化物の影響は、可視被害と不可視障害として存在する。日本では大気中の二酸化硫黄濃度の年平均値は 1967 年を最高として、その後年々低下した (環境庁 1985)。現在では、二酸化硫黄による水稻の可視被害はほとんど報告されていない。しかし、不可視障害による水稻の乾物生産力および子実生産の減退機構が明らかにされており (谷山 1972)、大気中の硫黄酸化物濃度が高いほど水稻の収量が減少する (谷山・沢中 1975, Taniyama 1985)。このことから現在でも不可視障害により水稻収量が低下していることが示唆される。

硫黄酸化物の主要な成分である二酸化硫黄は、世界的な規模で今後も年間 4% の割合で増加傾向にある (Yunus ら 1996) ことから、不可視障害による減収程度の少ない水稻品種を選抜することは、安定多収の実現のために重要である。本報告では、作物の収量生産決定に関わる諸要因 (窪田 1990) のなかから、個葉光合成速度に着目して、長屋ら (2003) の方法によって、水稻の光合成速度に及ぼす二酸化硫黄の影響の品種間差異について検討した。

材料と方法

1. 供試材料

(1) 供試品種

第 1 表に示す水稻品種 14 品種を供試して、1998 年と 1999 年の 2 年間にわたり、三重大学生物資源学部実験圃場で栽培した。石井ら (1988) は水稻品種の品種間差とその成立要因を検討した報告の中で、育成年度により品種を区別をした。すなわち、1920 年以前の主に選抜育種によって育成された品種を旧品種、1920 年から 1945 年の品種で旧品種を交配親として育成された品種を中間品種、1945 年以後の品種で主に中間品種を交配親として育成された品種を新品種とした。本研究では、供試品種の中で中間品種は 1945 年に育成された「農林 29 号」のみであるので、これ

を新品種に含めることとし、「愛国」「亀ノ尾」「京都旭」と「竹成」を旧品種、その他の品種を新品種とした。

(2) 供試品種の育成方法

両年とも、比重 1.13 で塩水選した種子を催芽し、4 月 11 日に播種した。無加温のガラス室で育苗後、5 月 5 日に化成肥料 7 g (1998 年, N:P₂O₅:K₂O=10:6:8) あるいは 8 g (1999 年, N:P₂O₅:K₂O=12:18:14) を水田土壌に全層混和、充填した 5000 分の 1 アールワグネルポットに、1 株 1 本植え (1998 年) あるいは 1 株 2 本植え (1999 年) で移植した。移植後、屋外で栽培した。追肥 (N:P₂O₅:K₂O=14:0:14) 1 g は、止葉展開完了後にを行い、葉色が低下しないよう努めた。

2. 二酸化硫黄処理

出穂期後約 10 日目の止葉の葉身を用いて、光量子束密度 $2000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、葉温 30°C 、相対湿度約 70% の条件下で、二酸化硫黄処理を行った (長屋ら 2003)。二酸化硫黄処理は光合成速度が安定した後、同化箱内の二酸化硫黄濃度 $2.6 \text{ mg SO}_2 \text{ m}^{-3}$ ($1.0 \pm 0.1 \mu\text{L L}^{-1}$) で 15 分間処理を行い、直に二酸化硫黄の供給を停止した。その後、60 分間清浄な空気で置換した。この処理開始前から終了まで光合成速度を連続測定した。二酸化硫黄処理が光合成速度に及ぼす影響の指標として、光合成速度の阻害率 (以後、光合成阻害率と示す) と光合成速度の回復率 (以後、光合成回復率と示す) を算出した (長屋ら 1998)。処理直前の処理開始時光合成速度を A、二酸化硫黄処理により最も低下した時点の光合成速度を B、二酸化硫黄処理後に最も回復した時点の光合成速度を C として、光合成阻害率は $(A - B)/A \times 100$ (%)、光合成回復率は $C/A \times 100$ (%) で算出した。

各品種 8 反復とした。統計処理は NCSS 2000 (NCSS Statistical Software) を用いて、分散分析および Scheffe の

検定を行なった。

結果と考察

1. 品種間差異について

1998年に行った実験では、品種別に光合成阻害率を比較すると、「京都旭」が65.2%と最も高く、「初星」が30.1%と最も低く、品種間差異がみられた。品種別に光合成回復率を比較すると、77.1%から89.0%の間であって、品種間差異がみられなかった。品種別に処理開始時光合成速度を比較すると、「コシヒカリ」が $32.0 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ と最も高く、「京都旭」が $17.9 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ と最も低く、品種間差異がみられた。品種別に葉色を比較すると「初星」が44.9と最も高く、「京都旭」が34.3と最も低く、品種間差異がみられた。

1999年の実験についても1998年と同様に、光合成阻害率、処理開始時光合成速度と葉色では、品種間差異がみられたが、光合成回復率では品種間差異がみられなかった。よって、兩年の結果を品種毎に平均して、品種育成年度順に示した(第1表)。

2. 光合成阻害率について

光合成阻害率について、1998年は30.1%から65.2%、1999年は42.8%から65.9%の範囲に分散しており、品種間差異がみられた。「愛国」と「あきたこまち」の光合成阻害率の間に、兩年とも有意差がみられた。その他の品種については、年次ごとの明瞭な順位関係はみられなかった。

第1表 光合成阻害率、光合成回復率、処理開始時光合成速度と品種育成年度。

品種名	品種育成年度	光合成阻害率 %	光合成回復率 %	処理開始時光合成速度 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	葉色
竹成	1874	57.4	87.8	15.3	33.2
愛国	1882	64.6	90.7	22.5	42.6
亀ノ尾	1893	58.7	91.9	22.3	35.0
京都旭	1909	62.8	89.3	17.0	40.1
農林29号	1945	49.0	87.7	23.3	36.6
コシヒカリ	1956	46.8	83.0	28.0	38.2
秋晴	1962	54.0	90.3	22.2	38.0
ササニシキ	1963	42.0	86.9	24.6	32.4
日本晴	1963	54.9	89.7	20.4	30.4
晴々	1968	57.9	91.3	20.1	45.1
アキヒカリ	1976	48.7	88.0	23.9	39.2
初星	1977	39.9	88.9	28.0	35.2
ヤマヒカリ	1977	61.2	89.3	20.3	38.6
あきたこまち	1984	38.7	91.6	26.7	39.6
平均		52.7	89.0	22.5	37.4

値は1998年、1999年の品種毎の平均値を示す。葉色はSPAD値で示す。

兩年の結果を品種ごとに平均した(第1表)ところ、旧品種の光合成阻害率は全品種の平均値52.7%よりすべての

品種で高かった。また、全品種込みの光合成阻害率の平均値は1998年が50.3%、1999年が54.9%であり、この差は4.6%であった。そこで1998年と1999年の差を年次差として、各品種ごとに検討した(第2表)ところ、兩年で光合成阻害率が10%以上異なったのは、「秋晴」「アキヒカリ」「ササニシキ」「初星」の4品種であった。とくに「アキヒカリ」は23.8%の年次差がみられた。これは、光合成速度に及ぼす二酸化硫黄の影響について年次により影響の程度が異なる品種があることを示唆している。

3. 年次間変動

光合成阻害率について年次間変動を兩年の差として示し

第2表 光合成阻害率、処理開始時光合成速度、葉色の年次差。

品種名	光合成阻害率 %	処理開始時光合成速度 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	葉色
竹成	6.3	5.6	8.2
愛国	-2.6	3.5	5.8
亀ノ尾	3.6	6.1	6.6
京都旭	4.8	1.7	3.9
農林29号	7.3	2.6	3.8
コシヒカリ	-5.5	8.0	3.7
秋晴	-13.9	2.8	2.4
ササニシキ	-16.3	1.5	3.1
日本晴	-3.4	9.9	9.3
晴々	3.3	4.9	5.7
アキヒカリ	-23.8	4.2	3.9
初星	-19.7	-5.5	-0.4
ヤマヒカリ	4.7	5.1	8.6
あきたこまち	-8.2	-2.5	1.3
旧品種群			
平均	3.0	4.2	6.1
標準偏差	3.9	2.0	1.8
新品種群			
平均	-7.6	3.1	4.1
標準偏差	10.7	4.6	3.0

年次差は品種ごとに(1998年の値)-(1999年の値)として算出した。葉色はSPAD値で示す。

た(第2表)ところ、旧品種群は平均が3.0%、標準偏差が3.9であったが、新品種群は平均が-7.6%、標準偏差が10.7であり、新品種群の年次間変動は旧品種群より大きかった。

新・旧品種群の変動について、処理開始時光合成速度とSPAD値について検討したところ、これらの指標も光合成阻害率と同様に、新品種群の年次間変動は旧品種群より大きかった。変動の大きさについて標準偏差から検討すると、新・旧どちらの品種についても光合成阻害率のばらつき程度が、処理前光合成速度とSPAD値の変動に比べて高かった。

4. 新・旧品種群の比較

新旧の品種群について、光合成阻害率、処理開始時光合成速度と SPAD 値について、分散分析を行なった（第 3 表）。光合成阻害率と処理開始時光合成速度には、新旧の品種間に 5%水準で有意差がみられたが、SPAD 値には有意差がみられなかった。

多収品種の育成について、群落構造、収量成立過程、乾物生産過程や個葉光合成速度などから検討されている（窪田 1990）。個葉光合成速度からみた新旧品種の比較では、出穂期から出穂後 10 日目頃の個葉光合成速度には有意差はみられないが、登熟期では新品種が旧品種より高いことが報告されている（斎藤ら 1993）。本報告の光合成速度は出穂後 10 日目に測定したが、斎藤ら（1993）の報告とは異なり、新旧の品種間に有意差がみられ、新品種群が高かった。一方、二酸化硫黄存在下で光合成速度が低下する程度を示した光合成阻害率は、新品種群が旧品種群よりも有意に低かった（第 3 表）。

第 3 表 旧品種¹⁾と新品種²⁾の光合成阻害率、処理開始時光合成速度および葉色 (SPAD 値) についての分散分析結果。

	光合成 阻害率 %	処理開始時 光合成速度 $\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$	葉色
旧品種	60.8	19.3	36.5
新品種	49.3	23.7	37.8
有意差	*	*	

- 1) は愛国、亀ノ尾、京都旭、竹成を示す。
2) はその他の品種を示す。分散分析の結果、*は 5%水準で有意差があることを示す。葉色は SPAD 値を示す。

本研究の栽培地は三重県津市であり、供試した品種の適地ではない品種が存在した。しかし、長屋ら（2003）によれば、様々な時期に栽培した「コシヒカリ」を供試して、二酸化硫黄処理が最も安定した時期は「出穂期後 10 日目」で、処理対象は止葉であった。それにもかかわらず、新品種群では年次により光合成阻害率のふれが生じる品種も存在した。年次間変動が生じる要因は、気象条件、早晚性、地域性などの違いによる可能性もあるが、理由については不明であった。

本研究で用いた品種のうち、育成年度により新旧品種群に区別すると、新品種群の止葉光合成速度は旧品種群よりも有意に高く、また、二酸化硫黄存在下で、光合成速度が低下する程度が有意に少なかった。開花期後の止葉の光合成は、子実収量の約 48%を占めるほどで、大変重要である

(折谷 1984)。近代的な品種改良により育成された新しい品種は光合成能力、とくに個葉光合成速度の高い持続能力（斎藤ら 1993）とともに、二酸化硫黄存在下での光合成速度を高く維持する特性を併せもつ可能性が示唆された。このような二酸化硫黄処理中の光合成速度の変化は、気孔の可逆的な開閉（谷山 1972、古川・戸塚 1978）や硫酸イオンの代謝活性（Sekiya ら 1982、Tanaka ら 1982）等の関与が推察される。今後は二酸化硫黄に対する反応性を明らかにするために、各品種の気孔開度や硫酸代謝活性について詳細に検討する必要があると思われる。

引用文献

- 古川昭雄・戸塚績 1978. ヒマワリ葉の光合成. 気孔開度におよぼす二酸化イオウの影響. 国立公害研究所 2: 57—65.
- 石井龍一・松崎昭夫・刈屋国男・季万九・中元朋実・町田寛康・角田公正・玖村敦彦 1988. 水稲品種の品種間差とその成立原因. 作物の収量機構の解析と到達可能水準の探求. 後藤寛治 研究代表. 昭和 60—62 年度科学研究費補助金 (総合研究 A) 研究成果報告書. 6—18.
- 環境庁 1985. 環境白書 昭和 60 年版. (1) 二酸化硫黄. 第 1 節 大気汚染の現状. 第 2 章 大気汚染の現状と対策. 大蔵省印刷局, 東京. 199—201.
- 窪田文武 1990. 品種改良の目標と生理生態的形質. 作物学総論. 堀江武編. 朝倉書店, 東京. 141—161.
- 長屋祐一・安尾正和・谷山鉄郎 1998. ムギ類の光合成速度におよぼす二酸化硫黄の影響. 日作紀 67: 373—378.
- 長屋祐一・梅崎輝尚・松井昭博・谷山鉄郎 2003. 水稲の光合成速度に及ぼす二酸化硫黄の影響の適切な測定方法. 日作紀 72: 443—449.
- 折谷隆志 1984. 作物の窒素代謝に関する研究. 第 19 報 水稲の Source から Sink への N の転流と蓄積機構について. 日作紀 53: 268—275.
- 斎藤邦行・下田博之・石原邦 1993. 水稲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. 日作紀 62: 509—517.
- Sekiya J., L. G. Wilson, and P. Pilner 1982. Resistance to injury by sulfur dioxide. *Plant Physiol.* 70: 437—441.
- Tanaka K., T. Otsubo and N. Kondo 1982. Participation of hydrogen peroxide in the inactivation of calvin-cycle SH enzyme in SO₂-fumigated spinach leaves. *Plant & Cell Physiol.* 23: 1009—1018.
- 谷山鉄郎 1972. 作物の亜硫酸ガス障害の実態とその機構に関する研究. 三重大農報 44: 11—130.
- 谷山鉄郎・沢中和雄 1975. 作物のガス障害に関する研究. 第 12 報 大気汚染地域 (四日市市) における水稲の生育・収量の特徴と大気汚染に対する指標植物としての意義について. 日作紀 44: 74—85.
- Taniyama, T. 1985. Studies on injurious effects of air pollutants on crop plant 22. Relationship between regulation of total emission in sulfur oxides and yield in rice plants. *Rept. Environ. Sci. Mie University*, 10: 165—170.
- Yunus, M., N. Singh and M. Iqbal 1996. Global Status of Air Pollution: An Overview. In *Plant Response to Air pollution*, M. Yunus and M. Iqbal eds. John Wiley and Sons, New York. 1—35.

Abstract : The effects of sulfur dioxide on photosynthetic rate at the flag leaf of rice plants at 10 days after the heading stage were studied with various cultivar. Sulfur dioxide was supplied at the rate of $2.6 \text{ mg SO}_2 \text{ m}^{-3}$ (about $1.0 \mu\text{L L}^{-1}$) for 15 min and then was displaced with clean air for 1 hr. The inhibitory rate of photosynthesis widely ranged from 30.1 % to 65.3 % in 1998 and from 42.8 % to 65.9 % in 1999, showing a significant cultivar difference. The photosynthesis-inhibiting effects of SO_2 in old four varieties (cv. Aikoku, Kamenoo, Kyotoasahi and Takenari) was significantly higher than that in new 10 varieties (cv. Akitakomati, Akibare, Akihikari, Koshihikari, Sasanishiki, Hataboshi, Nipponbare, Nourin 29 and Yamahikari). However, the effects of SO_2 on the green index in leaf (SPAD value) was not significantly different between old and new cultivars.

Key words : Inhibitory rate, Photosynthesis, Rice, Sulfer dioxide.
