

## 水稻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

長屋祐一\*<sup>1)</sup>・梅崎輝尚<sup>1)</sup>・松井昭博<sup>1)</sup>・谷山鉄郎<sup>2)</sup>

(<sup>1)</sup>三重大学・<sup>2)</sup>中部大学)

**要旨:** 水稻の光合成速度に及ぼす二酸化硫黄の影響を調査する場合の設定条件について詳細な検討を行った。二酸化硫黄処理時の環境条件や水稻の葉位、部位、生育時期の違いにより二酸化硫黄処理の影響が異なるか否かを、処理開始時光合成速度と光合成阻害率および光合成回復率から検討した。処理対象を個体とした場合、8時から14時の間に行った二酸化硫黄処理では、光量子束密度や同化箱内の二酸化炭素濃度が異なった条件下であっても、光合成阻害率および光合成回復率はほぼ一定であった。次に、処理対象部位を個葉とした場合、二酸化硫黄に対する反応を光合成阻害率で比較すると、最上位展開葉が高かった。そこで、止葉を用いて生育時期別に二酸化硫黄処理を行ったところ、出穂期後10日目と20日目に比べ、出穂始と出穂期の光合成阻害率が高かった。また、播種時期や栽培方法が異なった供試材料を用いても、出穂期後10日目の止葉に二酸化硫黄処理を行うと、光合成阻害率が安定することから、二酸化硫黄処理は出穂期後10日目頃に止葉を対象とするのが最適であると考えられた。

**キーワード:** 光合成回復率、光合成阻害率、光合成速度、水稻、二酸化硫黄。

水稻に及ぼす二酸化硫黄の影響には、可視被害と不可視障害が存在することが報告されている(谷山 1972)。可視被害とは、葉身や葉鞘、穂などに二酸化硫黄特有の症状がみられることであり、不可視障害とは、外見的にはなんら正常な個体であるが乾物生産量や収量が低下することである(谷山 1978)。二酸化硫黄の影響を考える上で、二酸化硫黄濃度とその接触の時間並びに水稻の生育時期が重要な要因ではある(谷山 1972, 1978)が、現在のわが国における大気中の二酸化硫黄濃度では、可視被害が生じる可能性よりも、不可視障害として作物の生産力を低下させる可能性が高いと考えられる(谷山 1978)。このような現象は伊勢湾周辺に配置したポット栽培の水稻収量とその付近での二酸化硫黄を主成分とする硫黄酸化物濃度との間に負の相関がみられること(谷山・沢中 1975)。また、三重県四日市市付近の農家が栽培した水稻の収量と硫黄酸化物濃度と間にも同様に負の相関があること(Taniyama 1985)から実証された。この機作について、谷山ら(1971)、および谷山(1978)は光合成作用が阻害され呼吸が昂進するとともに、葉面積の減少により純同化率が低下して、全乾物重が減少すること、また、受精の阻害等により稔実歩合の低下が生じるため、総じて子実生産量の低下が生じると述べている。

乾物生産に関わる諸要因のうち、光合成速度が乾物生産量や子実生産量と密接に関連している(窪田 1990)ので、二酸化硫黄が水稻の光合成速度に及ぼす影響について正しく評価することが重要である。不可視障害のうち、光合成速度から検討したこれまでの研究(谷山 1978)では、二酸化硫黄濃度  $1 \mu\text{L L}^{-1}$  以下の接触では水稻に可視被害がみられない。また、二酸化硫黄に接触中は光合成速度が低下し、二酸化硫黄が取り除かれると元の光合成速度まで回復する(谷山 1972)ことが知られている。以上のことか

ら、本研究では二酸化硫黄濃度  $1 \mu\text{L L}^{-1}$  の15分間処理を用いて、水稻の光合成速度に及ぼす二酸化硫黄の影響を示す指標を2つ設定した。一方は二酸化硫黄による光合成速度が低下する程度を光合成阻害率とし、他方は二酸化硫黄が除去された後に光合成速度が回復する程度を光合成回復率とした。これらの指標を用いて、それぞれの平均値やばらつき程度を調査することにより、二酸化硫黄の処理対象や処理方法を適切に評価する条件を導き、光合成速度に及ぼす二酸化硫黄の影響を安定して計測できる測定条件を明らかにすることを目的とした。

### 材料と方法

#### 1. 供試材料

実験は1998年と1999年の2カ年行った。供試品種はコシヒカリ (*Oryza sativa* L. cv. Koshihikari) を用いた。播種は催芽籾を用いて、1998年には4月17日、6月29日、9月6日、1999年には4月10日、5月8日、7月3日に育苗箱に点播した。播種後21日目に、三重大学生物資源学部内水田の土壤に基肥として化成肥料を全層混和、充填した5000分の1アールワグネルポットに移植した。1998年はポットあたり基肥 (N:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:K<sub>2</sub>O=10:6:8) 7gで1株1本植え、1999年は基肥 (N:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:K<sub>2</sub>O=12:18:14) 8gで1株2本植えとした。移植時の葉齢は4.1から4.5であった。また両年とも必要に応じて追肥 (N:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:K<sub>2</sub>O=14:0:14) 1gを止葉展開完了後に行った。供試材料は屋外で生育させ、二酸化硫黄処理の開始2時間ほど前に室内に移動させて、人工照明下で馴化を行った。

#### 2. 実験装置と二酸化硫黄処理方法

水稻の個体ならびに個葉を人工照明下で開放系同化箱に

挿入して、同化箱の中の二酸化硫黄濃度と同化箱の入口-出口の二酸化炭素濃度を測定した。この装置によって、同化箱の中で、二酸化硫黄処理と光合成速度の測定を同時に行った(長屋ら 1998)。同化箱は処理対象によって個体用(容積 180 L, 幅 50 cm×奥行き 50 cm×高さ 72 cm)と個葉用(容積 7.5 L, 幅 25 cm×奥行き 20 cm×高さ 15 cm)を使用した。

基本条件として同化箱内の相対湿度は約 70%, 葉温は約 30 °C, 人工灯(東芝製, M1000B-J/BU)を光源として光量子束密度は  $2000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , 同化箱入口の二酸化炭素濃度は約  $350 \mu\text{L L}^{-1}$  とした。本報告では、二酸化硫黄処理時の処理時間帯, 同化箱入口流量, 光量子束密度, 供試材料の処理対象や生育時期を変えて, 光合成速度に及ぼす二酸化硫黄の影響を検討した。

二酸化硫黄処理は次のように行った。まず, 供試材料の光合成速度が安定した後, 同化箱内の二酸化硫黄濃度を  $2.6 \text{ mg SO}_2 \text{ m}^{-3}$  ( $1.0 \pm 0.1 \mu\text{L L}^{-1}$ ) として 15 分間処理を行い, 処理終了後, 直ちに二酸化硫黄の供給を停止し, 60 分間清浄な空気を供給することで, 同化箱内の二酸化硫黄を空気に置換した。この処理開始前から終了までの一連の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。

葉身の SPAD 値は, 二酸化硫黄処理後に, 葉身中央部の長さ約 7 cm 範囲を, 中肋をはさんで, 左右 3 箇所ずつ測定し, その平均値とした。二酸化硫黄処理が個体の場合, SPAD 値は主稈の上位 3 葉を測定し, その平均値とした。二酸化硫黄処理が個葉の場合, SPAD 値は処理に使用した全ての葉身を測定し, その平均値とした。

### 3. 測定条件の検討項目

(1) 二酸化硫黄処理時間帯が水稻の光合成速度に及ぼす影響

葉齢 11.6 の個体を供試して, 二酸化硫黄処理をする時間帯を 8 時~10 時, 12 時~14 時と 16 時~18 時の 3 水準として, 個体の光合成速度に及ぼす処理時間帯の影響を検討した。

(2) 二酸化硫黄処理時の光量子束密度が水稻の個体光合成速度に及ぼす影響

葉齢 11.4 の個体を供試して, 光量子束密度を 2000, 1500 と  $500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  の 3 水準として, 個体の光合成速度に及ぼす二酸化硫黄の影響を検討した。

(3) 二酸化硫黄処理時の同化箱への入口流量が水稻の光

合成速度に及ぼす影響

葉齢 13.6 の個体を供試して, 同化箱入口流量を毎分 70 L と毎分 35 L の 2 水準として, 光合成速度に及ぼす二酸化硫黄の影響について検討した。

(4) 二酸化硫黄処理部位が水稻の光合成速度に及ぼす影響

生育時期の揃った水稻を供試して, 処理部位の違いが光合成速度に及ぼす影響について検討した。葉齢 10.4 の供試材料を用いて, 処理対象として個体あるいは最上位完全展開葉(第 10 葉)と上位第 2 位完全展開葉(第 9 葉)の 3 処理を設けて, 光合成速度に及ぼす二酸化硫黄の影響を検討した。また, 葉齢 13.8 の供試材料を用いて, 処理対象部位を個体と上位第 2 位完全展開葉(第 12 葉)の 2 処理を設定して, 同様に検討した。

(5) 主稈と分けつ茎の違いが二酸化硫黄処理時の水稻の止葉光合成速度に及ぼす影響

主稈葉数 13 の水稻の止葉を供試して, 出穂期後 10 日目に, 主稈の止葉と低次分けつ茎の止葉を処理対象として, 二酸化硫黄処理を行い, 両者の反応を比較検討した。なお, 出穂期は有効分けつ数の 50% が出穂した日とした。

(6) 二酸化硫黄処理時の光量子束密度が水稻の止葉光合成速度に及ぼす影響

主稈葉数 13 の水稻の止葉を用いて, 出穂期後 15 日目に, 光量子束密度を  $2000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  と  $500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  の 2 水準として, 個葉の光合成速度に及ぼす二酸化硫黄の影響を検討した。

(7) 二酸化硫黄処理時期が水稻の止葉光合成速度に及ぼす影響

水稻の止葉を供試して, 穂ばらみ期から出穂期後 28 日目の間に二酸化硫黄処理を行った。実験には播種時期を異に栽培した水稻を用いた。主稈葉数 13 の水稻を供試して穂ばらみ期, 出穂始め, 出穂期, 出穂期後 10 日目, 20 日目, 主稈葉数 16 の水稻を供試して穂ばらみ期, 出穂期, 出穂期後 10 日目, 20 日目, 主稈葉数 16 の水稻を供試して出穂期後 8 日目, 10 日目, 15 日目, 28 日目に, それぞれ二酸化硫黄処理を行い, 処理時期が光合成速度に及ぼす影響を検討した。

なお, 有効分けつが 1 本でも出穂した日を出穂始め, 有効分けつ数の 50% が出穂した日を出穂期とした。

### 4. 統計処理

各実験の反復数は 4~8 であった。統計処理は NCSS 2000 (NCSS Statistical Software) を用いて, 分散分析および Scheffe の検定を行った。

## 結 果

### 1. 二酸化硫黄処理時間帯が水稻の光合成速度に及ぼす影響

個体を処理対象として, 時間帯別に二酸化硫黄処理を行

第1表 水稻の個体光合成速度に及ぼす二酸化硫黄処理時間帯の影響。

処理時間帯	光合成阻害率 %	光合成回復率 %	処理開始時 光合成速度 $\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$	葉色
8時から10時	32.4 (8.0) b	96.4 (4.3) a	12.1 (7.2) a	46.9 (2.8) a
12時から14時	35.9 (4.4) b	97.0 (5.2) a	10.8 (5.9) a	47.9 (1.4) a
16時から18時	52.4 (19.9) a	87.0 (8.0) a	11.0 (12.3) a	47.9 (1.5) a

同一英字の付いた数値には5%水準で有意差がないことを示す。葉色はSPAD値を示す。( )内の数値は変動係数(%)を示す。供試材料の葉齢は11.6であった。

第3表 水稻の個体光合成速度に及ぼす同化箱への入口流量の影響。

入口流量 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$	光合成阻害率 %	光合成回復率 %	処理開始時 光合成速度 $\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$	葉色
35	45.8 (11.6) a	93.9 (1.8) a	8.6 (14.3) a	45.3 (2.8) a
70	50.0 (21.4) a	96.3 (9.2) a	8.5 (11.5) a	46.9 (0.4) a

同一英字の付いた数値には5%水準で有意差がないことを示す。葉色はSPAD値を示す。( )内の数値は変動係数(%)を示す。供試材料の葉齢は13.6であった。

った(第1表)。処理開始時光合成速度について、それぞれの時間帯に有意差はみられなかった。16時から18時に処理した光合成阻害率は他の時間帯に比較して有意に高く、16時から18時は二酸化硫黄の影響を受けやすいと考えられた。光合成回復率については時間帯の間に有意差はみられなかった。二酸化硫黄処理に対する反応のばらつきについて変動係数から時間帯を比較すると、光合成阻害率、光合成回復率および処理開始時光合成速度は、すべて16時から18時の時間帯で変動が大きかった。

## 2. 二酸化硫黄処理時の光量子束密度が水稻の光合成速度に及ぼす影響

光合成速度は光量子束密度の影響を強く受けるので、二酸化硫黄処理に及ぼす光量子束密度の影響について検討した。二酸化硫黄処理を個体に行った場合、光量子束密度が増加するにつれて、処理開始時光合成速度は有意に増加した。一方、光合成阻害率と光合成回復率は、異なる光量条件下においても有意差はみられなかった(第2表)。

## 3. 二酸化硫黄処理時の同化箱への入口流量が水稻の光合成速度に及ぼす影響

同化箱内の二酸化炭素濃度は、同化箱入口の二酸化炭素濃度や流量、光合成作用による二酸化炭素の吸収によって変化する。本実験では、入口流量を変化させて、同化箱内の二酸化炭素濃度が異なるように条件を設定した。入口-出口の二酸化炭素濃度差は入口流量が毎分35Lの場合約 $50\mu\text{L}\text{L}^{-1}$ 、入口流量が毎分70Lの場合約 $100\mu\text{L}\text{L}^{-1}$ であった。処理開始時光合成速度、光合成阻害率と光合成回復率のそれぞれに有意差はみられなかった(第3表)。

第2表 水稻の個体光合成速度に光量子束密度の及ぼす影響。

光量子束密度 $\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$	光合成阻害率 %	光合成回復率 %	処理開始時 光合成速度 $\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$	葉色
2000	34.2 (22.3) a	97.3 (4.2) a	15.1 (8.0) a	47.5 (1.9) a
1500	37.6 (30.7) a	97.3 (4.3) a	11.9 (11.9) b	47.7 (1.3) a
500	34.8 (30.7) a	100.3 (5.6) a	2.8 (38.5) c	47.8 (0.8) a

同一英字の付いた数値には5%水準で有意差がないことを示す。葉色はSPAD値を示す。( )内の数値は変動係数(%)を示す。供試材料の葉齢は11.4であった。

第4表 水稻の個体あるいは個葉光合成速度に及ぼす二酸化硫黄処理の影響。

葉齢	処理部位	光合成阻害率 %	光合成回復率 %	処理開始時 光合成速度 $\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$	葉色
10.4	個体	36.0 (23.5) b	96.7 (2.4) a	9.8 (13.9)	49.4 (1.7) a
	個葉(10葉) (最上位完全展開葉)	52.1 (26.7) a	77.1 (7.1) b	33.8 (12.9)	48.2 (1.6) b
	個葉(9葉) (上位第2位完全展開葉)	32.0 (29.8) b	89.7 (9.0) a	29.5 (5.6)	48.6 (3.0) ab
13.8	個体	50.8 (13.3) a	97.4 (8.2) a	6.8 (7.4)	42.6 (3.7) a
	個葉(12葉) (上位第2位完全展開葉)	55.8 (19.7) a	73.4 (3.7) b	27.6 (14.2)	41.4 (1.9) a

同一英字の付いた数値には5%水準で有意差がないことを示す。処理開始時光合成速度の比較は行っていない。葉色はSPAD値を示す。( )内の数値は変動係数(%)を示す。

## 4. 二酸化硫黄処理部位が水稻の光合成速度に及ぼす影響

処理対象を個体と個葉に区分して、個葉はさらに最上位完全展開葉と上位第2位完全展開葉に分けて、それぞれ二酸化硫黄処理を行った(第4表)。処理開始時光合成速度は、個体より個葉が高かった。個葉で比較すると、最上位完全展開葉が上位第2位完全展開葉より有意に高かった。二酸化硫黄処理を行った処理対象部位間について光合成阻害率を比較すると、個体と上位第2位完全展開葉の光合成阻害率の間に有意差はみられなかったが、最上位完全展開葉の光合成阻害率は有意に高かった。また光合成回復率では、個体と上位第2位完全展開葉の光合成回復率の間に有意差はみられなかったが、最上位完全展開葉の光合成回復率は有意に低かった。以上のように、光合成阻害率が高く光合成回復率が低い処理対象部位は最上位完全展開葉であったことから、この部位が二酸化硫黄処理に最も敏感であると考えた。

次に、葉齢の進んだ供試材料を用いて、処理対象を個体と上位第2位完全展開葉として二酸化硫黄処理を行った。両者の光合成阻害率に有意差はなかったが、光合成回復率については、上位第2位完全展開葉が個体より有意に低かった(第4表)。

第5表 水稻の主稈あるいは分けつ止葉の光合成速度に及ぼす二酸化硫黄の影響。

処理部位	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
主稈から発生した止葉	46.3 (14.9) a	100.1 (5.9) a	27.0 (13.5) a	45.0 (2.0) a
分けつ茎から発生した止葉	49.5 (26.0) a	93.8 (6.3) a	27.8 (5.3) a	44.2 (4.9) a

同一英字の付いた数値には5%水準で有意差がないことを示す。葉色はSPAD値を示す。( )内の数値は変動係数(%)を示す。供試材料の主稈葉数は13で、出穂後10日目に二酸化硫黄処理を行った。

第7表 水稻の止葉の光合成速度に及ぼす二酸化硫黄処理時期の影響。

主稈止葉葉位	処理時期	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
13	穂ばらみ期	55.7 (14.7) a	82.2 (4.4) a	24.2 (4.1) a	39.0 (2.2) c
	出穂始め	62.6 (9.1) a	82.5 (5.8) a	24.4 (10.1) a	41.5 (1.1) b
	出穂期	61.2 (36.9) a	77.4 (22.4) a	17.3 (5.1) b	42.2 (1.2) ab
	出穂期後10日目	50.0 (9.6) a	90.0 (5.4) a	24.3 (10.0) a	43.6 (2.9) a
	出穂期後20日目	42.9 (18.2) a	89.0 (7.1) a	17.7 (14.5) b	42.5 (5.0) ab
16A	穂ばらみ期	77.0 (6.1) a	85.1 (4.3) b	20.9 (12.6) a	31.1 (5.1) a
	出穂期	72.2 (5.4) a	81.5 (0.6) b	21.5 (7.8) a	31.7 (2.7) a
	出穂期後10日目	53.5 (2.5) c	94.1 (3.4) a	20.3 (4.2) a	32.2 (3.9) a
	出穂期後20日目	64.2 (1.0) b	90.0 (1.6) a	14.7 (6.3) b	27.2 (4.3) b
	出穂期後8日目	54.0 (17.9) a	84.9 (6.6) a	25.2 (10.4) a	39.9 (2.5) a
16B	出穂期後10日目	47.0 (6.4) a	88.0 (4.2) a	27.3 (9.1) a	41.0 (0.8) a
	出穂期後15日目	47.4 (10.2) a	92.0 (5.5) a	24.5 (7.6) a	40.5 (1.4) a
	出穂期後28日目	56.3 (7.4) a	85.3 (5.8) a	13.3 (22.3) b	29.9 (6.6) b

同じ主稈葉数内において同一記号の付いた英小文字には、5%水準で有意差がないことを示す。葉色はSPAD値を示す。( )内の数値は変動係数(%)を示す。主稈止葉葉位の添え字は、播種時期が異なる材料を示す(A, 5月8日播種; B, 4月17日播種)。

### 5. 主稈と分けつ茎の違いが二酸化硫黄処理時の水稻の止葉光合成速度に及ぼす影響

出穂期後10日目に主稈の止葉と低次分けつ茎の止葉に、それぞれ二酸化硫黄処理を行った。処理開始時光合成速度、光合成阻害率および光合成回復率について、両者に有意差は認められなかった(第5表)。

### 6. 二酸化硫黄処理時の光量子束密度が水稻の止葉光合成速度に及ぼす影響

二酸化硫黄処理を個葉に行った場合、出穂期後15日目の止葉を用いて、光量子束密度が $2000 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ と $500 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ の条件下で二酸化硫黄処理の影響について検討した。止葉の処理前光合成速度は光量子束密度が高いほど有意に高かったが、光合成阻害率と光合成回復率では光量子束密度が異なっても有意差がみられなかった(第6表)。

### 7. 二酸化硫黄処理時期が水稻の止葉光合成速度に及ぼす影響

主稈葉数13の水稻を供試して、穂ばらみ期、出穂始、

第6表 水稻の止葉の光合成速度に及ぼす光量子束密度の影響。

光量子束密度 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$	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
2000	31.7 (22.3) a	93.5 (6.3) a	22.3 (16.7) a	43.3 (5.1) a
500	31.6 (22.8) a	95.1 (3.6) a	13.6 (7.5) b	42.3 (2.9) a

同一英字の付いた数値には5%水準で有意差がないことを示す。葉色はSPAD値を示す。( )内の数値は変動係数(%)を示す。供試材料の主稈葉数は13で、出穂後10日目に二酸化硫黄処理を行った。

出穂期、出穂期後10日目、出穂期後20日目のそれぞれに、止葉を処理対象として二酸化硫黄処理を行った(第7表)。止葉の葉色を示すSPAD値は処理時期により有意差がみられたが、39.0から43.6の間であり、いずれも健全な緑色を呈していた。出穂期と出穂期後20日目の処理開始時光合成速度は、他の時期と比較して有意に低かった。光合成阻害率は、出穂期後20日目に最も低く、出穂始に最も高かったが有意な差ではなかった。光合成回復率には有意差はみられなかった。

主稈葉数16の水稻を供試して、穂ばらみ期、出穂期、出穂期後10日目、出穂期後20日目のそれぞれに止葉を処理対象として二酸化硫黄処理を行った(第7表の主稈葉数16A)。止葉の葉色を示すSPAD値は出穂期後20日目で有意に低かったが、各時期のSPAD値は27.2から32.2の間であり、いずれもやや淡い緑色を呈していた。出穂期後20日目の処理開始時光合成速度は有意に低かった。光合成阻害率は出穂期後10日目に最も低く、次いで出穂期後20日目に低かった。光合成回復率は、出穂期が最も低く、出穂期後10日目が最も高かった。

主稈葉数16の水稻を供試して、出穂期後8日目、10日目、15日目、28日目のそれぞれに止葉を処理対象として二酸化硫黄処理を行った(第7表の主稈葉数16B)。出穂期後8日目から15日目の止葉の葉色を示すSPAD値は39.9から41.0であり、出穂期後28日目のそれと比較して有意に高かった。出穂期後8日目から15日目の処理開始時光合成速度は、出穂期後28日目と比較して有意に高く、SPAD値と同様な傾向がみられた。光合成阻害率には有意差はみられなかったが、出穂期後10日目に最も低く、出穂期後28日目に最も高かった。光合成回復率はいずれの処理時期に有意差がみられなかったが、出穂期後8日目に最も低く、出穂期後15日目に最も高かった。

## 考 察

水稻の光合成速度に及ぼす二酸化硫黄の影響について、谷山らの研究グループ(谷山・有門 1969, 谷山ら 1971, 谷山 1972)は二酸化硫黄濃度や生育時期について検討しているが、供試材料の栽培時期や二酸化硫黄処理対象部位や処理時間帯、同化箱内の二酸化炭素濃度、光量等詳細な条件については不明瞭であった。光合成速度は環境条件

(気温, 光量, 大気湿度, 土壌の水分状態) や栽培条件, 植物の葉位, 部位, 生育段階等で大きく変化することが知られている (高・玖村 1973, 玖村 1973, 石原・黒田 1986, 石原・斉藤 1987, 平沢ら 1988)。また, 生産力に関与する基本的要因の1つに光合成能力があり, これは個体, 個葉レベルで評価される (黒田・玖村 1989a, b, 黒田 1994)。そこで, 光合成速度の測定部位を個体と個葉とに分けて, 二酸化硫黄処理がこれらの部位に及ぼす影響について検討した。

1. 個体を対象に二酸化硫黄処理を行った場合

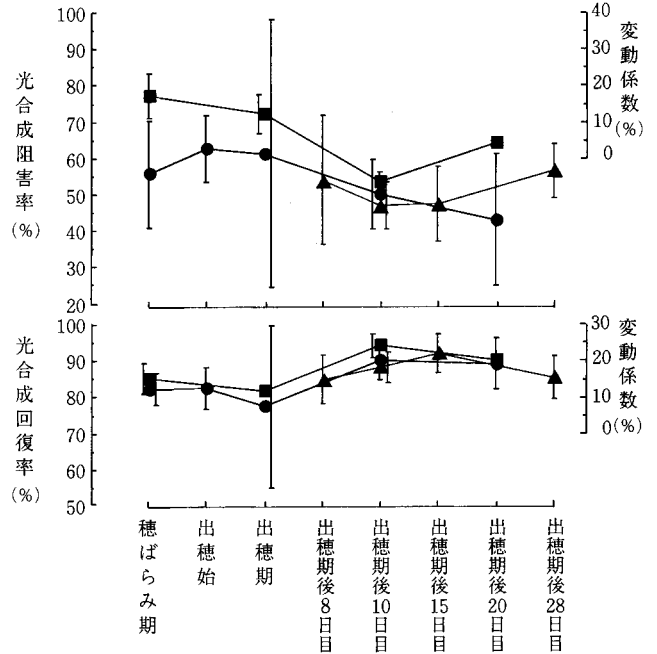
個体光合成速度の測定結果から, 処理開始時光合成速度の日変化は8時から18時の間ではほぼ一定で日変化は小さかった。一方, 光合成阻害率は16時から18時の時間帯が他の時間帯に比べて有意に高かった。しかし, 処理前光合成速度や光合成阻害率と光合成回復率の変動を比較すると, 16時から18時の時間帯では他の時間帯に比べて大きかったことから, 二酸化硫黄処理は8時から14時までに行えば, 処理時間による変動が小さいことが明らかとなった (第1表)。

次に処理開始時光合成速度は光量子束密度に比例して増加したが, 二酸化硫黄処理の影響を示す光合成阻害率と光合成回復率は, 光量子束密度にかかわらず同程度であった (第2表)。

一般に開放型同化箱測定法では, 単位葉面積に対してできるかぎり入口と出口の二酸化炭素濃度差を少なくするような通気量の設定がなされる (村上・武田 1973)。本実験では同化箱へ導入する入口流量を変化させ, 入口と出口の二酸化炭素濃度差を2水準とした。同化箱内にファンを設置し, 空気を常に攪拌することで同化箱内の二酸化炭素濃度は出口のそれと同等となる。葉面付近の二酸化炭素濃度が異なる条件下で, 処理前光合成速度, 光合成阻害率と光合成回復率に及ぼす影響を比較したところ, 本実験の範囲ではいずれも影響を受けなかった (第3表)。

次に, 供試材料の葉齢ごとに光合成阻害率と光合成回復率を整理すると, 第1, 2, 4表から, 処理時期の葉齢が10.4から11.6では光合成阻害率の平均は約35%, 光合成回復率の平均は約98%であった。また, 第3, 5表から処理時期の葉齢が13.6から13.8では光合成阻害率の平均は約49%, 光合成回復率の平均は約96%であり, 葉齢が進むほど光合成阻害率は高くなり, 二酸化硫黄の影響は大きくなった。葉齢10.4から11.6は栄養成長期であり, また葉齢13.6から13.8は花芽形成後の生殖成長期であったため, 生育相の違いによって二酸化硫黄の感受性が異なることが示唆された。

以上から8時から14時の間に二酸化硫黄処理を行う場合, 二酸化硫黄処理による個体光合成速度の反応性は, 光量や同化箱内の二酸化炭素濃度による影響が小さいことが示された。しかし供試材料の葉齢によって影響が異なっ



第1図 二酸化硫黄処理時期別の光合成阻害率と光合成回復率の推移。

●は止葉葉位が13, ■は同16A(5月8日播種), ▲は同16B(4月17日播種)を示す。縦棒は変動係数(%)を示す。

た。

2. 個葉を対象に二酸化硫黄処理を行った場合

二酸化硫黄処理対象が個体の場合, 同化器官である葉身と非同化器官である葉鞘とが混在している。葉身と葉鞘の関与を区別するため, 個体と個葉を対象に検討した。二酸化硫黄に対する光合成能力の反応性について, 部位別の反応性を光合成阻害率で比較すると, 上位第2位完全展開葉は葉齢に関わらず個体と類似 (第4表) していたが, 光合成回復率では葉齢10.4の個葉より葉齢13.8の個葉が低くなった。この光合成回復率が異なった理由はそれぞれ葉齢において, 前者は栄養生長期, 後者は生殖生長期に二酸化硫黄処理を受けていたものと考えられ, これらの生育相が異なることによると考えられた。また, 個葉として, 最上位完全展開葉と上位第2位完全展開葉とを比較すると, 最上位完全展開葉は光合成阻害率が高く, かつ, 光合成回復率が低く (第4表) になったことから, 二酸化硫黄に対して感受性が高く, 反応が敏感であることが示唆された。よって, 二酸化硫黄の影響を測定するには, 最上位完全展開葉が適していると判断された。

3. 止葉を処理対象に二酸化硫黄処理を行った場合

同一品種であっても栽培時期によって主稈葉数が変化し, また, 品種により主稈葉数が異なることから, 葉齢による生育相の判断は困難である。そのため, 生育相を統一するには, 最終主稈葉である止葉が適切である。また, 開花期以降の止葉は, 収量の約48%に寄与する光合成産物

を生産する(折谷 1984)ため、止葉は水稻の収量に貢献が大きいことから、水稻の止葉に及ぼす二酸化硫黄の影響を検討することは、安定多収の点からも重要である。

主稈と分けつから発生する止葉について比較したところ、両者の二酸化硫黄に対する光合成速度の反応性に差が認められない(第6表)ことから、止葉を処理対象とする場合には、主稈と分けつを区別せず二酸化硫黄処理に用いることができると判断した。

谷山(1972)は二酸化硫黄が水稻の個体光合成速度に及ぼす影響について生育ステージごとに比較したところ出穂開花期が最も大きく、乳熟期、分けつ期、最高分けつ期の順に小さくなったことを報告している。本実験では、止葉つまり個葉光合成速度に着目して、止葉展開完了後の日数により二酸化硫黄処理の処理時期別反応性について検討した結果(第7表)から、光合成阻害率と光合成回復率について時系列の図を作成した(第1図)。反応性について変動係数から考えると、光合成阻害率では出穂期後10日目の変動係数が小さく反応が安定していた。光合成回復率では、出穂期を除き、いずれの時期でも変動係数が同程度であり安定していた。光合成阻害率から生育時期による反応性を比較すると、出穂始と出穂期を出穂開花期、出穂期後10日目と出穂期後20日目を乳熟期とすれば、光合成阻害率は後者より前者が高く(第7表、第1図)、谷山(1972)が個体を対象として検討した結果と同様な傾向が認められた。

次に、播種時期が異なる4組の供試材料(第5表、第7表)を用いて出穂期後10日目に二酸化硫黄処理したところ、いずれの播種時期の供試材料についても、光合成阻害率と光合成回復率は同程度で、播種時期の間に有意差はみられなかった。出穂期後10日目以外の時期に行なった二酸化硫黄処理では、播種期が異なる供試材料では有意差が生じた処理時期がみられた。また、出穂期後10日目の二酸化硫黄処理で変動係数は低い傾向があった(第7表)ことも考慮して、播種時期が異なる供試材料であっても、出穂期後10日目に二酸化硫黄処理を行うことが適当であると考えられた。

以上より、二酸化硫黄処理の対象を個体と個葉とに分けた場合、個体の状況を個葉で代表させるならば上位第2位完全展開葉が適切であった(第4表)。また、個葉では最上位完全展開葉は上位第2位完全展開葉よりも二酸化硫黄に対して敏感であった(第4表)。品種や栽培条件が異なる場合、葉齢を基準として供試材料の生育相を揃えることが困難なことから、主稈の最終葉として止葉を用いることが最も実用的であると考えられた。止葉の二酸化硫黄処理時期については、検討した期間内では出穂期後10日目に

処理を行うことが最も適していた。

## 引用文献

- 平沢正・飯田幸彦・石原邦 1988. 水稻葉身の拡散伝導度, 光合成速度に及ぼす葉の水ポテンシャルと空気湿度の影響の相互関係. 日作紀 57:112-118.
- 石原邦・黒田栄喜 1986. 水稻葉身の光合成速度に対する空気湿度の影響. 日作紀 55:458-464.
- 石原邦・斉藤邦行 1987. 湛水状態の水田に生育する水稻の個体光合成速度の日変化に影響する要因について. 日作紀 56:8-17.
- 高清吉・玖村敦彦 1973. コムギの光合成速度と物質生産に関する研究. 第1報 生育各期における個体群のCO<sub>2</sub>変換の日変化の特徴. 日作紀 42:227-235.
- 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.
- 玖村敦彦 1973. 3. 作物個体群の生産システム. IV. 生産過程. 作物学. 朝倉書店, 東京, 97-123.
- 黒田栄喜・玖村敦彦 1989a. 圃場条件下における水稻個葉の光合成の実態とその解析. 第2報 光合成速度の個葉間変異とその基礎. 日作紀 58:347-356.
- 黒田栄喜・玖村敦彦 1989b. 圃場条件下における水稻個葉の光合成の実態とその解析. 第3報 光合成速度の時刻による変動とその生理的基礎. 日作紀 58:617-622.
- 黒田栄喜 1994. 1.1 作物の生産力とその構成要因. 1. 作物生産と光合成. 石井龍一編, 植物生産生理学. 朝倉書店, 東京, 6-10.
- 村上毅・武田友二郎 1973. 通気法による個葉の光合成速度測定法に関する研究. 第1報 桑葉の光合成速度と通気量, 炭酸ガス濃度差および攪拌との関係について. 日作紀 42:170-177.
- 長屋祐一・谷山鉄郎・安尾正和 1998. ムギ類の光合成速度に及ぼす二酸化硫黄の影響. 日作紀 67:373-378.
- 折谷隆志 1984. 作物の窒素代謝に関する研究. 第19報 水稻の 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.
- 谷山鉄郎・有門博樹 1969. 作物のガス障害に関する研究. 第5報 水稻の炭酸同化作用に及ぼすSO<sub>2</sub>ガスの影響. 日作紀 38:598-602.
- 谷山鉄郎・有門博樹・岩田幸弘 1971. 作物のガス障害に関する研究. 第9報 亜硫酸ガス(SO<sub>2</sub>)の長期間接触が水稻の乾物生産におよぼす影響. 日作紀 40:455-461.
- 谷山鉄郎 1972. 作物の亜硫酸ガス障害の実態とその機作に関する研究. 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)における水稻の生育・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.
- 谷山鉄郎 1978. 硫酸化物大気汚染と作物生産. 科学 48:169-175.
- Taniyama, T. 1985. Studies on injurious effects of air pollutants crop plants. XXII Relationship between regulation of total emission in sulfur dioxides and yield in rice Plants. Rep. of the Environ. Sci., Mie Univ. No. 10:165-170.

**A Method for Examining for Effect of Sulfur Dioxide on Photosynthesis in Rice:** Yuichi NAGAYA\*<sup>1)</sup>, Teruhisa UMEZAKI<sup>1)</sup>, Akihiro MATSUI<sup>1)</sup> and Tetsuro TANIYAMA<sup>2)</sup> (<sup>1)</sup>*Fac. of Bioresources, Mie Univ., Tsu 514-8507*, <sup>2)</sup>*Coll. of Bioscience and Biotechnology, Chubu Univ.*)

**Abstract:** In order to establish an adequate method of examining the inhibitory effect of SO<sub>2</sub> on photosynthesis in rice, we examined the effect of SO<sub>2</sub> under various conditions differing in growth stage, CO<sub>2</sub> concentration, light intensity, leaf position, leaf age and others. The rate of recovery from the inhibition was also examined. When whole (individual) plants were exposed SO<sub>2</sub> between 8:00 and 14:00, light intensity and CO<sub>2</sub> concentration scarcely influenced the inhibitory effect of SO<sub>2</sub> on photosynthesis and recovery rate from the inhibition. When only a leaf blade was exposed to SO<sub>2</sub>, the inhibitory effect was the highest in the latest expanded leaf blade. The photosynthesis-inhibiting effect of SO<sub>2</sub> in the flag leaf was higher at the heading stage than at 10 or 20 days after heading. However, the most stable results were obtained when the flag leaf was exposed to SO<sub>2</sub> 10 days after heading irrespective of the cultivation method.

**Key words:** Inhibitory rate, Photosynthesis, Recovery rate, Rice, Sulfur dioxide.

---