

高温条件下における紫外線 (UV-B) の照射が 幼穂形成期以降の水稻の生育に及ぼす影響

稲葉健五

(茨城大学教育学部)

要旨：水稻品種コシヒカリを用い、幼穂形成期に当たる出穂2週間前以降に高温（昼一夜温：35-30℃）とUV-B（強UV-B；60.4 kJ/m²・day，弱UV-B；18.1 kJ/m²・day）を組合せた処理を5日間行い、開花・結実にどのような影響があるかを検討した。強UV-Bだけを処理した場合、不稔籾が対照区に比べて多少増加したが、その他には大きな影響を受けなかった。高温区と高温＋弱UV-B区の場合は、出穂2週間前と出穂日からの処理で不稔が増加し、出穂2週間後からの処理で多少籾重が減少した。高温＋強UV-B区の場合は、出穂2週間前からの処理で不稔が増加し、籾や葯の大きさが小さくなった。開花日からの処理で不稔が大きく増加し、葯長が短く、花粉の充実度が大きく低下した。また、出穂2週間後からの処理で籾重が減少した。更に止葉の光合成速度も一時的に低下した。以上のように高温と強UV-Bを同時処理すると、高温やUV-Bの単独処理ではなかったような生育に対する悪影響が現れたり、高温やUV-B単独の影響で現れた不稔や花粉の不良などの悪影響が増強されて発現した。

キーワード：UV-B，高温，人工気象室，水稻，生殖生長期，登熟。

炭酸ガスなど温室効果ガスの増加に伴い、地球の温暖化が懸念される事態になっている。気温の上昇は、各種作物の生育に大きな影響を与える。水稻については以前より多数の研究がなされ、出穂・開花期を中心とする処理で不稔の多発（松島・真中 1957, 佐藤ら 1973, Satake and Yoshida 1978, Matsui ら 2001）、登熟期の処理で籾重の減少（山本 1952, 松島・和田 1960, 佐藤・稲葉 1973, 森田 2000）や品質の低下（長戸・江幡 1965, 佐藤・稲葉 1973, 森田 2000）などが報告されている。

一方、南極におけるオゾンホール出現とその拡大に代表される様に、近年フロンガスなどによるオゾン層の破壊が進行し、地表面に達する紫外線による生物への影響が問題となっている。オゾン濃度の減少により地表面に到達する割合が増える紫外線の種類は、主に280 nm から320 nm のUV-Bと言われるものである。この波長の紫外線の植物への影響については、多くの種・品種で調べられ、約50%の植物で生育阻害などの悪影響を受けたと報告されている（Tevini 1994）。水稻についても人工気象装置を使った試験を中心に悪影響を受けたという報告がなされ、UV-Bに対して中程度の感受性を持った作物（Krupa and Kickert 1989）と判断されてきた。最近の研究によれば、品種間差があるという報告（Barnes ら 1993, Sato and Kumagai 1997, Hidema ら 2000）や、影響が比較的少ないという試験結果（Dai ら 1995b, Nouchi and Kobayashi 1995）が多い。また、温暖化とオゾン層の破壊には関係があり、温暖化の進行が極地方のオゾン層の破壊を促進する（Austine ら 1992）との報告がなされている。近い将来の気候の変化を考えた時、温暖化とUV-Bの増加が同時に進行し、それが植物の生育に影響する可能性もあると考えられる。しかし、現在まで水稻に対し高温とUV-Bを組合せて処理し、それが生育や

登熟にどのような様に影響するかを検討した報告は見当たらない。

そこで、本報告では、気温の上昇と同時にUV-B強度が増した場合の影響を調査する目的で、幼穂形成期以降に高温と同時にUV-Bを処理し、水稻の生殖生長にどのような影響があるのかを検討した。

材料と方法

2001年と2002年の4月上旬に水稻品種コシヒカリを播種した。4葉程度に育った苗を1/5000 a のワグネルポットに1株3本植えて2株づつ植付けし、茨城大学教育学部（茨城県水戸市）敷地内の戸外で土耕栽培した。肥料は硫酸・過リン酸石灰・塩化カリを用いて基肥として、ポット当たりそれぞれ2:2:1 g（成分量でN, P, Kそれぞれ0.4, 0.34, 0.6g）を、追肥として幼穂形成開始期に硫酸と塩化カリを1gづつ（成分量でそれぞれ0.2, 0.6gづつ）施した。出穂前2～3週間に達した水稻を数日おきに8ポットづつ人工気象装置内に搬入し、5日間の処理を行った。

温度処理条件は5日間の平均気温として、日本で観測された最高値である32.4～32.5℃（愛知県東海市；1994年8月2日から6日まで、大阪市；1994年8月4日から8日まで）にほぼ等しい昼・夜温が35-30℃の高温区と25-20℃の常温区の2種類とした。紫外線の照射条件は、水戸地区での戸外のUV-B量が7月中旬から8月上旬の快晴日で36.6～40.8 kJ/m²・dayであったことから、強UV-B区として戸外の1.5倍程度の60.4 kJ/m²・day，弱UV-B区として戸外のほぼ半分の18.1 kJ/m²・dayの2種類とした。処理区はこの2つの条件を組合わせて、高温＋強UV-B区、高温＋弱UV-B区、高温区（高温のみ処理）、強UV-B区（常温＋強UV-B処理）、そして対照区（常温のみ処理）の5

区とした。

UV-B は、装置の照明開始後 30 分から終了前 30 分まで 13 時間連続して照射した。照射には紫外線ランプ (Q-panel 社, 313UV-B ランプ) を用いた。このランプを UV-C 遮断フィルム (中川ケミカル, カッティングシート 000C) で覆って使用した (フィルムの劣化が急速に進行するため, 2 日おきにフィルムを張り替えた)。なお, このフィルムは 290nm より短波長の紫外線はカットするが, それより長波長の紫外線は透過するため, UV-B ランプから一部発生する UV-A も照射した事になる。UV-B 強度は Delta 社のデータロガー (DO9721) と光センサー (LP9021) を用いて測定した。人工気象装置内の共通の気象条件は, 日長が 14 時間, 穂と止葉付近での日射強度が 350~400 $\mu\text{mol}/\text{s} \cdot \text{m}^2$ (光源: ナショナル・ツイン蛍光灯 FPR96EX-N/A), 相対湿度が昼・夜それぞれ 60-70% である。

処理後, 水稻は直ちに戸外に搬出し, 登熟終了まで生育させた。調査は予め印を付けていた 1 次分げつ (予備試験の結果, 一定した大きさの穂が得やすい, 各個体の第 4, 5 節から発生した 1 次分げつ, ポット当たり 8~10 本) を対象とし, 穂単位に出穂日と処理日を調べ, 1 穂粒数, 不稔発生率, 籾の大きさ, 籾重を計測した。籾の大きさは収穫時において, その長さと同幅を Keyence 社の LASER SCAN DIAMETER を用いて計測した。一部材料については, 開花日と処理日の関係をより明確にするため, 開花日ごとにカラーエナメルで籾に印を付けた。また, 葯と花粉の調査は処理開始 1 日目から 5 日目までの午前 7 時から 8 時の間に, その日に開花すると考えられた穎花 (花糸が伸びて葯が穎花の上部に達したものを) を採取して行なった。一定期間 70% エタノールに保存した穎花中から葯を取り出し, まず, 葯長を計測した。その後, スライドグラス上においた葯を針で丁寧に裂き, 花粉をスライドグラス上に広げ, ヨウ素ヨウ化カリ液を数滴落とし, 光学顕微鏡で検鏡した。花粉の状態は佐藤ら (1973) の方法に順じて, 花粉のデンプン染色程度によって 4 段階 (I…完全に澱粉染色された花粉, II…一部澱粉染色されなかった花粉, III…半分以下しか染色されなかった花粉, IV…全く染色されなかった花粉) に分けて示した。

光合成の測定は処理を開始した時, ちょうど出穂中の茎の止葉 4 枚を選び, その葉の中央部を用いて行った。計測

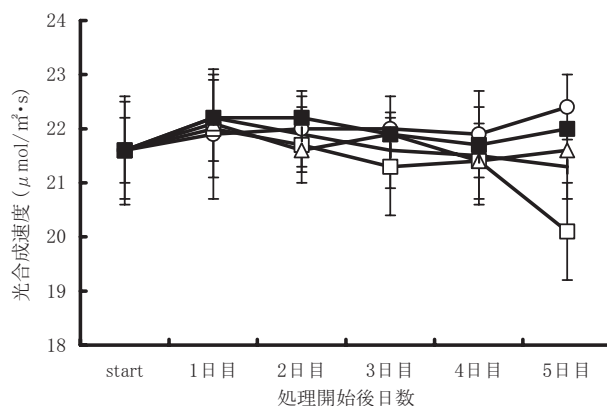
は携帯型光合成装置 (小糸工業, CIRAS) を用い, 測光強度 400 $\mu\text{mol}/\text{s} \cdot \text{m}^2$, 炭酸ガス濃度 350 ppm, 気温 25°C の条件で行った。また, 出穂 15 日後の段階においても, 同じ葉を用いて, 全く同じ条件で光合成速度を調査した。葉色は光合成と同じく, 同じ生育段階の止葉について葉緑素計 (MINORUTA, SPAD-502) を用いて計測した。

光合成と葉色そして籾の大きさの計測は, 2001 年に栽培した材料を用いて行ない, 他の調査は 2002 年度の材料について行った。

結 果

1. 光合成・葉色

出穂直後の茎の光合成速度 (第 1 図) は, 高温と強 UV-B を組合せて処理した区 (高温 + 強 UV-B 区) の処理開始 5 日目において, 対照区に比べて低下したが, 5 日間平均の処理期間中の区間差は殆どなかった。図に示していないが, 出穂 15 日後 (処理終了後 10 日目) では, 全ての区間に明らかな差は認められなかった (対照区 19.1 ± 1.8 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$, 高温 + 強 UV-B 区 18.5 ± 2.1 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ (平均値 \pm 標準誤差))。また, 止葉の葉色 (SPAD 値) は, 5 日間の処理期間中を通じて全ての区間に明確な差は見られなかった (第 1 表)。また, 出穂 15 日後でも差は認められなかった (対照区 36.5 ± 2.6 , 高温 + 強 UV-B 区 35.7 ± 3.2 (平均値 \pm 標準誤差))。



第 1 図 高温と紫外線 (UV-B) の組合せ処理が出穂直後の光合成速度に及ぼす影響。

○: 対照区, □: 高温+強 UV-B 区, △: 高温+弱 UV-B 区, ◇: 高温区, ■: 強 UV-B 区。

測定に用いた茎は処理開始時に出穂中であつた。測定数 4 点の平均, シンボル上の縦線は標準誤差を示す。

第 1 表 高温と紫外線 (UV-B) の組合せ処理が葉色 (SPAD 値) に及ぼす影響。

	処理開始後日数					
	0 日目	1 日目	2 日目	3 日目	4 日目	5 日目
対照区	42.2 \pm 0.4	43.1 \pm 0.3	42.9 \pm 0.5	43.2 \pm 0.4	43.3 \pm 0.5	42.7 \pm 0.5
高温+強 UV-B 区	43.1 \pm 1.0	42.4 \pm 1.3	42.2 \pm 1.1	42.1 \pm 1.0	41.8 \pm 1.2	41.6 \pm 1.8
高温+弱 UV-B 区	42.2 \pm 0.9	42.5 \pm 1.1	43.1 \pm 1.0	43.0 \pm 0.8	42.7 \pm 1.2	42.5 \pm 0.9
高温区	43.3 \pm 1.0	43.0 \pm 0.7	42.1 \pm 0.7	42.8 \pm 1.1	42.7 \pm 0.6	42.0 \pm 1.0
強 UV-B 区	43.1 \pm 0.9	42.2 \pm 1.1	43.1 \pm 1.2	42.6 \pm 0.9	42.5 \pm 1.2	42.1 \pm 0.9
LSD (0.05)	ns	ns	ns	ns	ns	ns

止葉 10 枚各 3 ヶ所, 計 30 点の平均値, 平均値 \pm 標準誤差。

第2表 高温と紫外線 (UV-B) の組合せ処理が1穂粒数・不稔率・1粒重に及ぼす影響。

	処理開始日				
	出穂2週間前	出穂1週間前	出穂日	出穂1週間後	出穂2週間後
1 穂粒数					
対 照 区	92.3±1.2	92.7±1.7	92.4±2.0	93.1±1.2	92.4±1.9
高温+強 UV-B 区	88.1±2.3*	90.3±2.5	92.1±2.3	93.8±2.5	91.6±2.9
高温+弱 UV-B 区	90.6±2.1	90.9±3.9	93.1±2.0	90.6±1.9	91.3±2.3
高 温 区	89.2±1.8	90.5±2.7	91.6±3.2	93.2±3.6	90.9±2.6
強 UV-B 区	89.9±2.0	92.1±1.9	92.1±2.5	92.2±2.4	90.7±1.8
LSD(0.05)	3.2	ns	ns	ns	ns
不稔率(%)					
対 照 区	3.3±0.6	4.1±0.5	2.9±0.3	3.4±0.3	3.5±0.4
高温+強 UV-B 区	15.7±2.9**	7.6±1.6	37.1±5.1**	7.3±2.3	3.9±0.7
高温+弱 UV-B 区	12.1±1.3**	6.0±1.8	18.4±2.3**	5.9±1.9	3.4±0.5
高 温 区	12.0±1.9**	7.4±1.2	18.2±3.1**	6.1±1.7	4.3±0.3
強 UV-B 区	7.4±1.2	5.7±1.1	8.6±1.7*	4.3±0.9	3.5±0.5
LSD(0.05)	4.4	3.5	5.5	ns	ns
LSD(0.01)	7.2	ns	9.4	ns	ns
1 粒重(mg)					
対 照 区	25.0±0.2	24.9±0.4	24.8±0.3	25.1±0.3	24.6±0.2
高温+強 UV-B 区	23.5±0.5*	24.1±0.6	25.0±0.7	24.0±0.4	23.4±0.5*
高温+弱 UV-B 区	24.4±0.3	24.5±0.3	25.3±0.6	24.8±0.4	23.9±0.5
高 温 区	23.9±0.3	23.9±0.4	25.6±0.4*	24.6±0.5	23.6±0.4*
強 UV-B 区	24.1±0.4	24.1±0.4	24.9±0.3	24.9±0.4	24.2±0.4
LSD(0.05)	1.1	ns	0.7	ns	0.9

40穂の平均値, 平均値±標準誤差. ***: 対照区に対してそれぞれ5%・1%水準で有意差があることを示す.

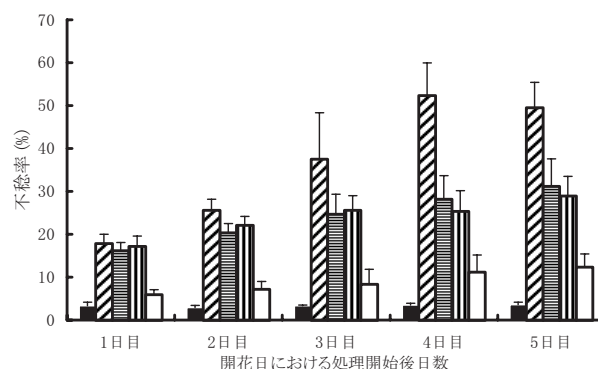
2. 1 穂粒数・粒重・不稔・粒の大きさについて

1 穂粒数は, 高温と強 UV-B を出穂2週間前から処理した場合に, 対照区に比べて5%ほど減少した以外に明らかな差は認められなかった (第2表).

不稔の発生は出穂開始当日に処理を開始した場合に最も多く, 高温+強 UV-B 区では37.1%に達した (第2表). 高温+弱 UV-B 区と高温区では, 不稔発生率が高温+強 UV-B 区のほぼ半分の18%程度であった. 強 UV-B 区は, 処理区中, 不稔発生率が最も少なかったが, 対照区の3倍程度の8.6%発生し, 有意差も認められた. 続いて出穂2週間前から処理を開始した茎において不稔が増加し, 高温+強 UV-B 区で15.7%, 高温+弱 UV-B 区と高温区で12%程度が不稔となった. 出穂期前後1週間からの処理では不稔の有意な増加はなかったが, いずれの処理区でも, 対照区の2倍程度の不稔が発生した. 出穂2週間後からの処理では影響がみられなかった.

1 粒重は, 高温+強 UV-B 区の出穂前2週間と出穂後2週間から, そして高温区の出穂後2週間からの処理で減少した (第2表). また, 出穂日からの高温処理で逆に粒重が増加した. しかし, 不稔の増加で見られたような高温と紫外線の組合せによる増加は見られなかった.

開花日における処理開始後日数と不稔発生の関係を第2図に示した. 高温+強 UV-B 区は処理開始1日目に開花した粒の不稔発生率が18%弱であったが, 開花日までの処理期間が長くなるほど不稔率が高まり, 4日目に開花した粒の50%以上が不稔となった. 続いて高温+弱 UV-B 区と高温区の不稔発生率が高く, 5日目で28~32%となったが, いずれの場合でも開花日までの処理期間の延長による



第2図 開花日における高温・紫外線 (UV-B) 処理開始後日数と不稔発生率との関係.

■: 対照区, ▨: 高温+強 UV-B 区, ▤: 高温+弱 UV-B 区, ▥: 高温区, □: 強 UV-B 区. 図中の縦線は標準誤差を示す.

不稔率の増加は比較的少なかった. 強 UV-B 区は処理区の中で最も不稔の発生が少なかったが, 開花日までの処理期間が4~5日間の処理で対照区の3倍程度の約10%が不稔となった.

収穫期の粒の長さや幅を第3表に示した. 粒の長さや幅は出穂2ないし1週間前から処理を行った場合, 対照区に比べていずれも小さくなる傾向が認められたが, 明らかに小さくなったのは, 高温+強 UV-B 区の出穂2週間前から処理を行った時の長さや幅であった.

3. 葯の長さ・花粉の充実度

処理区における不稔の原因を探るため, 葯の長さや花粉の充実度を調査した. 葯長は対照区に比べ処理区で短い傾

第 3 表 高温と紫外線 (UV-B) の組合せ処理が籾の長さ幅に及ぼす影響.

	処理開始日				
	出穂 2 週間前	出穂 1 週間前	出穂日	出穂 1 週間後	出穂 2 週間後
籾の長さ(mm)					
対 照 区	7.05±0.05	7.03±0.03	7.03±0.01	7.01±0.01	7.04±0.02
高温+強 UV-B 区	6.82±0.07*	6.94±0.05	6.95±0.03	6.99±0.03	7.01±0.01
高温+弱 UV-B 区	6.90±0.06	6.97±0.08	6.99±0.02	7.02±0.03	7.04±0.02
高 温 区	6.91±0.09	6.98±0.05	7.00±0.04	6.99±0.05	7.01±0.03
強 UV-B 区	6.92±0.06	6.94±0.04	7.01±0.03	7.02±0.04	7.02±0.02
LSD(0.05)	0.15	ns	ns	ns	ns
籾の幅(mm)					
対 照 区	3.46±0.02	3.45±0.02	3.44±0.01	3.45±0.03	3.44±0.02
高温+強 UV-B 区	3.36±0.04*	3.43±0.03	3.42±0.02	3.44±0.04	3.43±0.02
高温+弱 UV-B 区	3.40±0.04	3.40±0.02	3.39±0.04	3.43±0.03	3.44±0.01
高 温 区	3.41±0.04	3.41±0.03	3.43±0.03	3.44±0.03	3.42±0.03
強 UV-B 区	3.43±0.03	3.41±0.01	3.44±0.02	3.43±0.04	3.44±0.02
LSD(0.05)	0.07	ns	ns	ns	ns

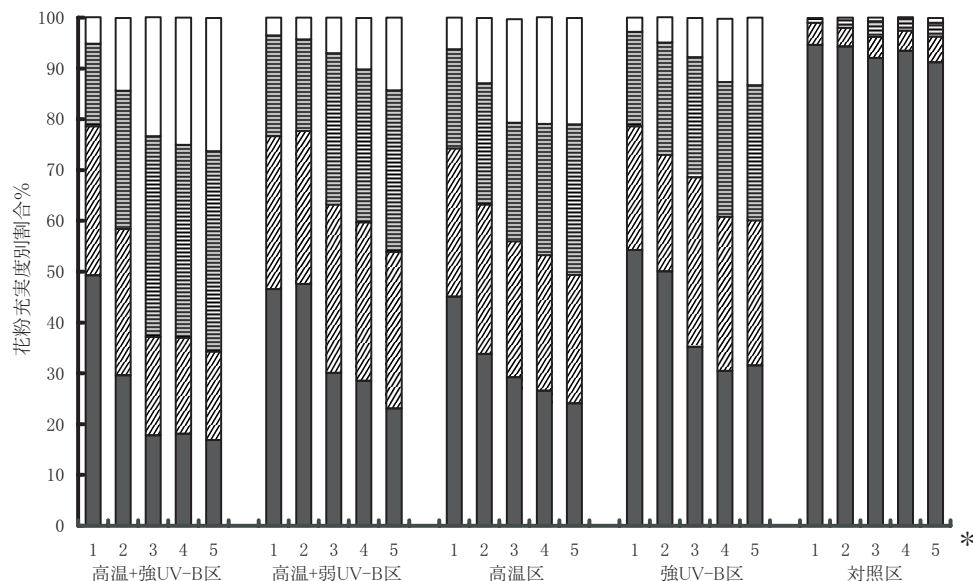
20穂・約600籾の平均値, 平均値±標準誤差. *: 対照区に対して5%水準で有意差があることを示す.

第 4 表 高温と紫外線 (UV-B) の組合せ処理が葯長に及ぼす影響.

	処 理 開 始 日		
	出穂前 2 週間	出穂前 1 週間	出穂日
mm			
対 照 区	1.83±0.03	1.81±0.04	1.84±0.04
高温+強 UV-B 区	1.70±0.04**	1.72±0.06*	1.74±0.05*
高温+弱 UV-B 区	1.79±0.03	1.78±0.04	1.77±0.03
高 温 区	1.74±0.03*	1.77±0.06	1.76±0.04
強 UV-B 区	1.82±0.05	1.76±0.04	1.78±0.06
LSD(0.05)	0.05	0.08	0.08
LSD(0.01)	0.09	ns	ns

穂の上部から1・2・3番目の枝梗の先端穎花30個の平均値. 平均値±標準誤差.

・・*: 対照区に対してそれぞれ5%・1%水準で有意差があることを示す.



第 3 図 高温と紫外線 (UV-B) の組合せ処理が花粉の充実程度に及ぼす影響.

■ : 完全染色花粉, ▨ : 一部染色されない花粉
 ▤ : 半分以下しか染色されない花粉, □ : 全く染色されない花粉.

*: 処理開始後日数.

向があったが、特に高温 + 強 UV-B 区の出穂 2 ないし 1 週間前と出穂日から、高温区の出穂 2 週間前からの処理において短くなった。一方、高温 + 弱 UV-B 区と強 UV-B 区では影響が明らかでなかった (第 4 表)。花粉の充実度を澱粉の蓄積程度によって 4 段階に分けて第 3 図に示した。対照区においては処理期間を通じて、花粉の 90% 以上が完全に澱粉染色される優良な花粉であったのに対し、4 つの処理区全てにおいて処理開始後急激に完全染色花粉が減少し、5 日目には 20~30% にまで減少した。不稔が最も多く発生した高温 + 強 UV-B 区は、澱粉が殆どない花粉や半分以下しか澱粉染色されない充実の悪い花粉の割合が最も多く、両者の合計値は処理開始 5 日目には 60% 以上に達した。続いて花粉の充実が悪かったのは高温区と高温 + 弱 UV-B 区であった。不稔の発生率が 5 日間処理で 10% 程度と他処理区に比べて低かった強 UV-B 区においては、他の 3 処理区より充実の良い花粉が多少多かったが、それでも完全染色花粉の割合は 30% 程度であった。

考 察

本試験の場合、今まで行われてこなかった高温と UV-B を組合せた処理が水稻の生殖生長への様に影響するかを高温単独処理や UV-B 単独処理と比較しながら調査する事を目的としている。以下、高温単独処理、UV-B 単独処理、高温 + UV-B 処理、不稔の原因の順に考察する。

本研究で設定した昼夜温 35-30°C の高温条件では、開花前 2 週間と開花期からの処理で不稔が多発し、開花前 2 週間からの処理で葯長が短くなり、開花 2 週間後からの処理で籾重が軽くなった。また、開花期の処理で花粉への澱粉蓄積度が悪くなった (第 2・3 図、第 2・4 表)。これらの結果は、従来の報告とほぼ一致する。水稻の登熟には夏 3 ヶ月の気温が大きく関係する。過去 40 年間における夏 3 ヶ月における高温月 (月平均気温 30°C 以上と 29.0~29.9°C) の出現回数を全国気象台設置場所 54 ヶ所で比較した場合、1964~1973 年がそれぞれ 0 回、18 回、1974~1983 年で 1 回、18 回、1984~1993 年で 3 回、44 回、1994~2003 年で 10 回、93 回と急速に増えている (注: 気象庁電子閲覧室 <http://www.data.kisyu.go.jp/> (2004 年 4 月現在))。つまり、高温が水稻の登熟に確実に影響する事態が進行しつつある。本試験の結果では新しく葯長の短縮という現象も見られており、今後更に詳細な検討が必要となろう。

UV-B 単独の影響に関しては、光合成の低下、主茎長・分枝長の抑制、葉面積・葉の厚さの減少、気孔数の増加、気孔開度の減少などの栄養生長への影響 (Teramura ら 1991, Kumagai and Sato 1992, Dai ら 1995a, Hidema ら 1996, Correia ら 1998, Jansen ら 1998, Nogues ら 1999, Kakani ら 2003)、不稔の増加、花粉数・葯長の減少、収量の低下などの生殖生長への影響 (Teramura 1983, Tevini and Teramura 1989, Jansen 1998, Santos ら 1998, Kakani ら 2003) など植物生長の多くの面に影響すると報告されてい

る。しかし、水稻に対する UV-B の影響に関しては、その生育阻害効果は可視光線が強く光合成が順調に行われる条件では、緩和される事が知られている (Mirecki and Teramura 1984, Tevini and Teramura 1989, Adamse and Britz 1992, Nouchi and Kobayashi 1995)。事実、最近の戸外での UV-B 処理試験では、その影響が少ないとの報告が多い (Dai ら 1995a, Nouchi and Kobayashi 1995, Kim ら 1996, 野内 1997)。中緯度地方の UV-B 量が近い将来大きく増加する可能性は低い (環境庁 1995, 野内 1997) との報告もあり、水稻に関しては感受性品種を除き、UV-B の影響が少ないとする意見が定着しつつある。人工気象室を用いた本試験の場合、開花期における 1.5 倍程度の UV-B 処理で、不稔率が対照区より 3 倍程度増加し、花粉の充実度が悪くなったが、高温単独区に比べてその影響はかなり少なかった (第 3 図、第 2 表)。野内 (1997) も指摘しているように、本試験で使用した品種「コシヒカリ」が UV-B 単独で深刻な被害を受ける可能性は少ないと考えられる。

高温 + 強 UV-B 区においては、出穂 2 週間前からの処理で、1 穂粒数・籾重・籾の大きさ・葯長が減少し、不稔率が増加し、開花期の処理で不稔が多発し、葯長が短くなり、花粉の充実が悪くなった。更に処理開始 5 日目の光合成速度も低下した (第 1・2・3 図、第 2・3・4 表)。高温単独や UV-B 単独処理の影響が一部籾長や葯長の減少を伴うものの基本的に不稔の増加に限られるのに比べて、高温と組合せて UV-B を処理すると不稔率や充実不良の花粉を単独処理に比べて増加させ、さらに、1 穂粒数・葯長・籾の大きさを減少させ、光合成速度を低下させるなどの悪影響を及ぼすことが明確になった。前述のように日本付近の UV-B 量は今後急激に増加することはないとも言われているが、UV-B 量に関係するオゾン全量については、現在まで低緯度地方を除いて減少傾向が続いており (環境省 2003)、今後の UV-B 増加の可能性を否定することはできないと考えられる。従って、高温条件下における UV-B の水稻に対する影響を一層詳細に検討する必要がある。高気温と UV-B を組合せて処理すると、悪影響が増大する理由は明確でない。しかし、前述の様に、光合成が充分に行える環境で UV-B の影響が少なくなることが知られている。一方、高温条件では呼吸の昂進のため炭水化物不足がおこることが指摘されている (山本 1954, 松島・和田 1960, 佐藤・稲葉 1973)。従って高温条件下では光合成と呼吸のバランスが崩れ、生長や登熟がスムーズに進まなくなったことが、UV-B の悪影響を大きくし、高温の直接の影響と相俟って本試験で見られたような相乗的悪影響が現われたのかもしれない。

出穂・開花期処理による不稔多発の原因を探るために葯や花粉を調査した結果、対照区に比べて全ての処理区において、花粉のデンプン蓄積程度が悪くなり (第 3 図)、高温 + 強 UV-B 区は出穂 2 ないし 1 週間前からと出穂期から処理で葯長が 5~7% ほど減少した (第 4 表)。鈴木 (1981)

は、低温の影響を調べた中で、葯の長さとし中の花粉の数には高い相関がある報告しており、刈屋 (1994) は葯長が葯中の花粉数の指標となることを指摘している。このため、恐らく本試験の場合も穎花当たりの花粉数が減少したものと考えられた。また、ヨウ素ヨウ化カリ液によるデンプン染色により澱粉の蓄積程度を定性的に調べ、本試験ではその蓄積度だけによって花粉の充実度を判断したが、高温 + 強 UV-B 区はデンプン蓄積が全くなかったり、殆ど蓄積していない花粉の割合が、処理開始 1 日から 5 日まで処理区中最も高くなった。花粉数と受精率 (Nishiyama 1983)、花粉の充実度と受精率 (Satake 1991) との間には、密接な関係があると報告されている。これらの事から判断すると、本研究の高温 + UV-B 処理においても充実不良の花粉の増加、葯長の減少に伴う花粉数の減少が、優良な花粉の減少を招き、不稔増加の一因になったものと考えられる。なお、強 UV-B 区においても花粉中の澱粉蓄積程度が大きく妨げられていることは、注目に値する。このことが直接不稔の増加に大きく関係する事はなかったが、高温という悪条件を与えられた時に累積的悪影響を発揮したのかも知れない。しかし、本試験において花粉の充実度・葯長の状態と不稔発生率の関連性は必ずしも明確でなく、花粉数や花粉の充実度以外にもその原因を求め、明らかにする必要がある。

以上のように、高温や UV-B 単独では影響を受けない場合でも高温と強 UV-B を同時に処理すると、本試験で調査した項目のうち葉色を除く、光合成速度、1 穂粒数、不稔率、1 粒重、粒の大きさに悪影響があった。また、不稔増加の一因に花粉の充実不良と葯長の短縮による充実の良い花粉の減少が考えられた。本試験は光強度が $350 \sim 400 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ とかなり強い条件であるが、人工気象装置を利用した試験である。前述の様に自然光条件の圃場栽培では紫外線の影響は少ないとされており、高温と紫外線の組合せ処理によって戸外条件下で本当に生育抑制効果が強まるのかを調べる必要がある。また、苗木の試験結果であるが、光を制限した条件で育て、UV-B を突然照射すると、光合成の低下に結びつくとの報告 (Krause ら 2003) もあり、UV-B 強度や照射方法を変えて厳密な検討をする必要もある。

引用文献

- Adamse, P. and S.J. Britz 1992. Amelioration of UV-B damage under high Irradiance. I Role of photosynthesis. *Photochem. Photobiol.* 56 : 645 - 650.
- Austine, J., N. Butchart and K. Shine 1992. Possibility of arctic ozone hole in a doubled- CO_2 climate. *Nature* 360 : 221 - 225.
- Barnes, P.W., S. Maggard, S.R. Holman and B.S. Vergara 1993. Intraspecific variation in sensitivity to UV-B radiation in rice. *Crop Sci.* 33 : 1041 - 1046.
- Correia, C.M., E.L.V. Areal, M.S. Torres-Pereira and J.M.G. Torres-Pereira 1998. Intraspecific variation in sensitivity to

- ultraviolet-B radiation in maize grown under field conditions. I. Growth and morphological aspects. *Field Crop Res.* 59 : 81 - 89.
- Dai, Q., S. Peng, A.Q. Chavez and B.S. Vergara 1995a. Effects of UVB radiation on stomatal density and opening in rice (*Oryza sativa* L.). *Ann. Bot.* 76 : 65 - 70.
- Dai, Q., S. Peng, A.Q. Chavez and B.S. Vergara 1995b. Effect of enhanced ultraviolet-B radiation on growth and production of rice under greenhouse and field condition. In *Climate Change and Rice* (ed. by Peng, S., K.T. Ingram, H.U. Neue and L.H. Ziska), pp. 189 - 198. Springer-Verlag, Berlin.
- Hidema, J., H.S. Kang and T. Kumagai 1996. Differences in the sensitivity to UVB-radiation of two cultivars of rice (*Oryza sativa* L.). *Plant Cell Physiol.* 37 : 742 - 747.
- Hidema, J., T. Kumagai and B.M. Sutherland 2000. UV-radiation-sensitive Norin-1 rice contain defective Cyclobutane pyrimidine dimer photolyase. *Plant Cell.* 12 : 1569 - 1578.
- Jansen, M., V. Gaba and B.M. Greenberg 1998. Higher plant and UV-B radiation balancing damage repair and acclimation. *Trends Plant Sci.* 3 : 131 - 135.
- Kakani, V.G., K.R. Reddy, D. ZHAO and A.R. Mohammed 2003. Effects of ultraviolet-B radiation on cotton (*Gossypium hirsutum* L.) morphology and anatomy. *Ann. Bot.* 91 : 817 - 826.
- 刈屋国男 1994. イネ花粉の耐冷性に関する諸問題. *農及園* 69 : 1099 - 1105.
- 環境庁 1995. オゾン層の破壊 紫外線による健康影響, 植物・生態系への影響: 植物・生態系への影響. 中央法規, 東京. 97 - 127.
- 環境省 2003. 平成 15 年度オゾン層等の監視結果に関する年次報告書について. 環境省, 東京. 15 - 36.
- Kim, H.Y., K. Kobayashi, I. Nouchi and T. Yoneyama 1996. Enhanced UV-B radiation has little effect on growth, $\delta^{13}\text{C}$ values and pigments of pot-grown rice (*Oryza sativa*) in the field. *Physiol. Plant.* 96 : 1 - 5.
- Krause, G.H., E. Grube, A. Virgo and K. Winter 2003. Sudden exposure to solar UV-B radiation reduced net CO_2 uptake and photosystem I efficiency in shade-acclimated tropical tree seedling. *Plant Physiol.* 131 : 745 - 752.
- Krupa, S.V. and R. N. Kickert 1989. The greenhouse effects: impacts of ultraviolet-B (UV-B), carbon dioxide (CO_2) and ozone (O_3) on vegetation. *Environ. Pollut.* 61 : 263 - 293.
- Kumagai, T. and T. Sato 1992. Inhibitory effects of increase in near-UV radiation on the growth of Japanese rice cultivars (*Oryza sativa* L.) in a phytotron and recovery by exposure to visible radiation. *Jpn. J. Breed.* 42 : 545 - 552.
- Matsui, T., K. Omasa and T. Horie 2001. The difference in sterility due to high temperatures in during the flowering period among japonica-rice varieties. *Plant Prod. Sci.* 4 : 90 - 93.
- 松島省三・真中多喜男 1957. 水稻収量の成立と予察に関する作物学的研究 XXXIX. 水稻の登熟機構の研究 (5). 生育各期の気温の高低・日射の強弱並びにその複合条件が水稻の登熟に及ぼす影響. *日作紀* 25 : 203 - 204.
- 松島省三・和田源七 1960. 水稻収量成立原理とその応用に関する作物学的研究. 第 52 報 水稻の登熟機構の研究 (10). 粒への炭水化物の転流適温, 登熟適温並びに粒の炭水化物受け入れ能力の低下について. *日作紀* 28 : 44 - 45.
- Mirecki, R.M. and A.H. Teramura 1984. Effects of ultraviolet-B

- irradiance on Soybean. V. The dependence of plant sensitivity on the photosynthetic photon flux density during and after leaf expansion. *Plant Physiol.* 74 : 475–480.
- 森田敏 2000. 高温が水稻の登熟に及ぼす影響—人工気象室における温度処理実験による解析— *日作紀* 69 : 391–399.
- 長戸一雄・江幡守衛 1965. 登熟期の高温が穎花の発達ならびに米質に及ぼす影響. *日作紀* 34 : 59–66.
- Nishiyama, I. 1983. Male sterility caused by cooling treatment at the young microspore stage in rice plants XXVI. The number of ripened pollen grains and the difference in sensitivity to coolness among spikelets on the panicle. *Jpn. J. Crop Sci.* 52 : 307–313.
- Nogues, S., D.J. Allen, J.I.L. Morison and N.R. Baker 1999. Characterization of stomatal closure caused by ultraviolet-B radiation. *Plant Physiol.* 121 : 489–496.
- Nouchi, I. and K. Kobayashi 1995. Effects of enhanced ultraviolet-B radiation with a modulated lamp control system on 17 rice cultivars in the field. *J. Agric. Meteorol.* 51 : 11–20.
- 野内勇 1997. 紫外線 (UV-B) 増加は農作物の生育・収量に影響を及ぼすか [3] *農及園* 72 : 754–760.
- Santos, A., J.M. Almeida, L. Santos and R. Salema 1998. Biochemical and ultrastructural changes in pollen of *zea mays* L. grown under enhanced UV-B radiation. *Ann. Bot.* 82 : 641–645.
- Satake, T. and S. Yoshida 1978. High temperature-induced sterility in indica rice at flowering. *Jpn. J. Crop Sci.* 47 : 6–17.
- Satake, T. 1991. Male sterility caused by cooling treatment at the young microspore stages in rice plants. XXX. Relation between fertilization and the number of engorged pollen grains among spikelets cooled at different pollen developmental stages. *Jpn. J. Crop Sci.* 60 : 523–528.
- 佐藤庚・稲葉健五・戸沢正隆 1973. 高温による水稻の稔実障害に関する研究. 第1報 幼穂形成期以降の生育時期別高温処理が稔実に及ぼす影響. *日作紀* 42 : 207–213.
- 佐藤庚・稲葉健五 1973. 高温による水稻の稔実障害に関する研究. 第2報 穂と茎を別々の温度条件下においた場合の稔実. *日作紀* 42 : 214–219.
- Sato, T. and T. Kumagai 1997. Role of UV-absorbing compounds in genetic differences in the resistance to UV-B radiation in rice plants. *Breeding Sci.* 47 : 21–26.
- 鈴木正一 1981. イネにおける障害型耐冷性と花器形質との関係. I. 葯長および柱頭長の品種間差異と栽植密度の影響. *育種* 31 : 57–64.
- Teramura, A.H. 1983. Effects of ultraviolet-B radiation on the growth and yield of crop plants. *Physio. Plant.* 58 : 525–530.
- Teramura, A.H., L.H. Ziska and A.E. Szein 1991. Changes in growth and photosynthetic capacity of rice with increased UV-B radiation. *Physio. Plant.* 83 : 373–380.
- Tevini, M. and A.H. Teramura 1989. UV-B effects on terrestrial plants. *Photochem. Photobiol.* 50 : 479–487.
- Tevini, M. 1994. Physiological changes in plants related to UV-B radiation. *Instratospheric ozone depletion / UV-B radiation in the biosphere* (ed. by R.H. Biggs and M.E.B. Joyner), pp37–56. Springer—Verlag, Berlin.
- 山本健吾 1952. 夜温の高低と水稻の登熟について. *東北大学農学研究所報* 4 : 181–188.
- 山本健吾 1954. 水稻の登熟現象に関する研究 (III). 夜温の高低と登熟期間における呼吸量及び炭水化合物の変化. *農及園* 29 : 1425–1427.

Ultraviolet-B Radiation (UV-B) under High-Temperature Conditions Affects Growth of Rice (cv.Koshihikari) after a Young Panicle Formation Stage : Kengo INABA (*Fac. of Education, Ibaraki Univ., Mito 310-8512, Japan*)

Abstract : A japonica rice (cv.Koshihikari) was used to test the effects on blooming and ripening of UV-B radiation treatment combined with high temperature treatments (day/night, 35 / 30°C). Strong UV-B radiation (60.4 kJ/m²·day) slightly increased sterility. High temperatures and weak UV-B radiation (18.1 kJ/m²·day) applied together from two weeks before heading and from the heading day increased sterility and those applied from two weeks after heading decreased sterility. High temperature combined with strong UV-B radiation applied from two weeks before heading increased sterility and decreased the size of unhulled grain and anther length. The same treatment given from the heading stage greatly increased sterility and decreased anther length and pollen production, and that given two weeks after heading decreased unhulled grain weight. It also decreased photosynthetic rate in flag leaves. A high temperature applied together with strong UV-B radiation had a synergistic effect causing poor growth; it increased the harmful effects of a high temperature and strong UV-B given separately, on the sterility and pollen formation.

Key word : Growth chamber, High temperature, Reproductive stage, Rice, Ripening stage, UV-B.