

A-5 紫外線増加が生物に与える影響の評価

(1) 紫外線増加が陸上植物に及ぼす影響の生化学的研究

② 紫外線増加が野菜類の生育・収量及び品質に及ぼす影響の評価に関する研究

農業技術研究機構近畿中国四国農業研究センター 地域基盤研究部 気象資源研究室

米村 健

(研究協力機関)島根大学生物資源科学部生命工学科 柴田 均・田中智之

平成 11～13 年度合計予算額 12,478 千円

(うち、平成 13 年度予算額 2,999 千円)

[要旨] オゾン層破壊に伴う B 領域紫外線(UV-B)の増加がカリフラワー及びホウレンソウの収量に及ぼす影響を評価するために、圃場に自動調光型 UV-B 照射装置を設置して、植物の成長に必要な光を確保した条件で、UV-B 照射実験を 3 年間にわたってくり返し行った。その結果、これらの野菜の収量に対する影響はほとんどないことがわかった。また、カリフラワー、ブロッコリ及びホウレンソウの 4～10 品種をくり返し供試し、UV-B_{BE}と日射量の比を、自然光の 1 倍、2 倍、3 倍、4 倍に制御する 4 水準の処理で、UV-B 増加に対する感受性の品種間差を調べた。その結果、カリフラワーでは、UV-B 増加が試験期間中の乾物増加量に及ぼす影響について、供試した 4 品種に品種間差がみられ、この品種間差は、UV-B 増加による紫外線吸光物質含量や抗酸化能の増加割合の違いにより生じることが示唆された。ブロッコリ及びホウレンソウでは、予想されるオゾン層破壊による UV-B 増加以上の処理を行った 4 倍区でも、乾物増加量に品種間差は生じなかった。UV-B による抗酸化能の増加については、UV-B に暴露した部分に局所的に生じ、他の部分への抗酸化物質の移送はほとんどないことを明らかにした。

[キーワード] UV-B、カリフラワー、ホウレンソウ、収量、抗酸化能

1. はじめに

オゾン層破壊による B 領域紫外線増加が作物生産に悪影響を及ぼすことが懸念されて久しいが、従来の知見の蓄積はほとんどが室内試験の結果によるものであった。近年では、PAR に代表される植物の生育に必要な光環境の違いが、UV-B 増加の植物の生育に及ぼす影響を大きく変化させることが明らかとなり、UV-B 増加の影響を圃場試験により評価する研究の重要性が強調されている¹⁾。しかし、野菜類の収量への影響を評価した圃場試験の報告例は少ない。また、UV-B に対する感受性は同じ作物でも品種によって異なることが知られている²⁾。野菜類には多数の品種が育成されているにもかかわらず、UV-B 増加に対する感受性の品種間差についての研究はほとんど行われていない。

2. 研究目的

UV-B 増加の影響は UV-B 以外の環境要因によって変化することが知られている。屋外では季節や年次により栽培期間の微気象が異なることにより、UV-B 増加の作物への影響が一様でない。このため、作物の UV-B 増加に対する感受性の評価は数年にわたる圃場試験によるのが望ましいとの指摘がある³⁾。しかし、UV-B 増加が野菜類の収量に及ぼす影響を圃場の繰り返し試験によって評価した研究はほとんどない。そこで、カリフラワー及びホウレンソウを供試し、圃場での繰り返し試験により収量への影響を評価することを本研究の目的のひとつとした。

また、UV-B 増加に対する感受性の品種間差の評価を本研究のもうひとつの目的とした。平成 8 年度から 10 年度にかけて、アブラナ科野菜 8 種 230 品種を供試し UV-B 増加が処理期間の乾物増加への影響を調査した圃場試験の結果、40 % のオゾン層破壊に相当する UV-B 環境下⁴⁾での栽培では品種間差の有無が明らかにならなかった。そこで、今回は、前回の試験で比較的影響が大きかったカリフラワー及びブロッコリ、またアブラナ科以外の露地野菜の中で代表的なホウレンソウを各 4~10 品種供試し、処理水準を増やして UV-B 増加の割合と乾物増加量に及ぼす影響との相関を調べることで、UV-B 増加に対する感受性の品種間差を評価することとした。また、同様な方法で UV-B 増加が葉内の紫外線吸光物質含量や抗酸化能に及ぼす影響からも UV-B 増加に対する感受性の品種間差を評価することとした。

3. 研究方法

(1) 紫外線照射方法

野内らの調光ランプシステム⁵⁾を基本とした照射装置を圃場に設置し UV-B を照射した。この装置の目的は、太陽からの入射量に比例して強めた UV-B を供試植物に照射することにある。装置にとりつける紫外線ランプは UVB-313(The Q-Panel Co.)を用いた。ランプ下面と供試作物との距離はどの試験でも 60 cm とした。UV-B の測定には MS-210D(英弘精機株)を用い、野内らの方法⁵⁾で UV-B 生物学的影響量⁶⁾(UV-B_{BE})へ換算し、各処理区の紫外線量を評価した。UV-B 照射量は MS-210D の測定値を MS-210W(英弘精機株)の値に換算して示した。日射量の測定には MS-42(英弘精機株)を用いた。また、MSR-7000(オプトリサーチ株)を用いて MS-42 を校正し、MS-42 の測定値を PAR に換算して示した。

苗を圃場に定植し慣行法に準じた栽培を行って収穫するまで、1 ヶ月以上の期間にわたって処理を行う試験(以下、収穫試験)では、野内らの装置をそのまま用いた。収穫試験では UV-B 処理は対照区と処理区の 2 水準とした。処理区の紫外線ランプはセルロースダイアセテートフィルム(CA フィルム)で覆い、対照区の紫外線ランプはルミラーフィルム(L フィルム)で覆った。CA フィルムは 290 nm 以下の波長を、L フィルムは 320 nm 以下の波長を透過しないので、供試植物にはそれぞれ UV-A と UV-B、または UV-A のみが照射される。処理区の照射強度は、UV-B_{BE} と日射量の比を

対照区の2倍とすることを目標に制御した。

苗を供試して2~4週間の処理を行う試験(以下、苗試験)では、UV-B処理の水準を増やして行った。1999~2000年度では、ランプ枠に取付ける40W紫外線ランプを8本から24本にして装置のUV-B照射能力を高め、UV-B照射量と生長量および紫外線吸光物質含量に対する影響との関係を調査した。UV-B処理は、ランプを消灯した状態のランプ枠下のUV-B_{BE}と日射量の比を1として1倍区、2倍区、3倍区、4倍区の4水準とした。それぞれの区で点灯するランプ数をそれぞれ0、8、16、24本とし、点灯するランプはCAフィルムで、点灯しないランプはLフィルムで覆った。2001年度はランプ枠による遮光の割合を少なくする目的で、ランプ枠に取付けるランプ数を24本から16本に減らし、UV-B処理を1倍区、2倍区、3倍区の3水準として、葉身の抗酸化能に対する影響を調査した。1倍区は16本すべてのランプをLフィルムで覆い、2倍区はCAフィルムとLフィルムでそれぞれ8本ずつを覆い、3倍区は16本すべてのランプをCAフィルムで覆い、どの区もすべてのランプを点灯させて紫外線照射を行った。

(2) カリフラワーの収量および抗酸化能に対するUV-B増加の影響(1999~2001年)

カリフラワー極早生品種“しらたま”を供試して3年間で6回の繰り返し試験を行った。供試材料は、128穴のセル育苗箱に播種しガラス室で3~4週間育苗した後、120cm幅で畦立てした圃場に株間30cm 畝間60cmの2条植えで定植し慣行法で収穫期まで栽培した。基肥は化成肥料(N:P₂O₅:K₂O=3.2:3.2:3.2)を用い、窒素成分で10kg/10aとし、極早稲品種で栽培期間が短いことから追肥は行わなかった。

UV-B処理は定植から収穫までの1~1.5ヶ月の期間行った。1区につき18株、2反復とした。処理後、18株から生長の中庸な10株を選び、花蕾を収穫して生体重を調査し収量とした。

また、2001年については調査した各株の花蕾2gFwおよび葉身25gFwをそれぞれ18ml及び225mlの99%メタノール中でホモジナイズし、抽出液の1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl消去能(以下、DPPH消去能)を測定することで、抗酸化能の評価を行った¹⁸⁾。

(3) ホウレンソウの収量および抗酸化能に対するUV-B増加の影響(1999~2001年)

ホウレンソウの収量に対する影響は、4品種(日本、キングオブデンマーク、晩抽パルク、ミンスターランド)を供試した収穫試験と10品種(上記4品種の他に、ピロフレイ、パレード、メガトン、兎城、次郎丸、豊葉)を供試して行った苗試験によって評価した。これらの品種は、代表的な育種親から選んだ。

収穫試験は、2001年に2回行った。供試材料は128穴のセル育苗箱に播種しガラス室で3~4週間育苗した後、120cm幅で畦立てした圃場に株間5cm 畝間30cmの3条植えで定植し慣行法で収穫期まで栽培した。基肥は化成肥料(N:P₂O₅:K₂O=3.2:3.2:3.2)を用い、窒素成分で15kg/10aとし追肥は行わなかった。UV-B

処理は定植から収穫までの約1ヶ月間行った。1区につき15株、6反復とした。処理後、収穫して15株から生長の中庸な8株を選び、生体重を調査した。また、調査した各株の全葉を切り刻み、刻んだ葉身25gFwを225mlの99%メタノール中でホモジナイズし、抽出液のDPPH消去能を測定することで、抗酸化能の評価を行った。

苗試験は1999~2000年に10品種をのべ36回供試して行なった。供試材料は128穴のセル育苗箱に播種しガラス室で3~4週間育苗した後、直径10.5cmのビニルポットへの鉢上げ後、処理を開始した。養土には育苗培土(タキイ種苗㈱)を用いた。栽培は慣行法に準じた。各区の株数は12株、栽植密度は50株/m²であった。2~4週間のUV-B処理を4水準3反復で行った後、地際から地上部を切り離し、12株から生育の中庸な8株を選び、生体重を測定した。

(4) カリフラワー、ブロッコリおよびホウレンソウの苗の乾物重に対するUV-B増加の影響(1999~2000年)

カリフラワー4品種(しらたま、オレンジブーケ、バイオレットクイン、ブライダル)、ブロッコリ4品種(まさ緑67号、りく緑15号、ひの緑26号、ハイツ)およびホウレンソウ10品種(日本、キングオブデンマーク、晩抽パルク、ピロフレイ、ミンスターランド、パレード、メガトン、兎城、次郎丸、豊葉)を供試し、苗試験を行って影響を調査した。

苗試験の栽培およびUV-B照射処理は前節(3)と同様に行なった。処理後、地際から地上部を切り離し、12株から生体重の中庸な8株を選び、70℃で3日間通風乾燥し、風乾重を測定して乾物重とした。

(5) カリフラワーおよびホウレンソウ葉身の紫外線吸光物質および比葉重に対するUV-B増加の影響(1999~2000年)

UV-B増加による葉身表皮細胞内の紫外線吸光物質含量が増加および比葉重で示される葉の厚さの増加が様々な植物で観察されている^{7,8)}。これらの反応はUV-Bが内部組織に浸透するのを防ぐ防御反応と考えられている^{9,10)}。これらの反応はUV-B感受性の指標と考えられるので、苗試験で供試した3種の野菜について、UV-B増加がこれらの反応の発現程度に及ぼす影響を調べた。

苗試験の供試品種、栽培およびUV-B照射処理は前節(3)と同様に行なった。処理後、地際から地上部を切り離し、12株から生育の中庸な6株を選び、最大葉および隣接する上位葉及び下位葉を各1枚ずつ、計3枚の個葉の葉縁からパンチで直径6mmのリーフディスクを4枚ずつ計12枚打ち抜いたものを10mlの80%メタノール溶媒に浸潤し1日~5日間冷暗所に安置した。安置後、浸潤液の330nm吸光度を測定し、1倍区の吸光度を1とした相対値であらわした。また、吸光度測定に用いた個体は、上記の操作を行った後、株ごとに葉面積および乾物重を測定し、乾物重を葉面積で割った値を比葉重とした。

(6) カリフラワーおよびホウレンソウ葉身の抗酸化能に対する UV-B 増加の影響(2001年)

葉内組織に浸透した UV-B は脂質の活性酸素を増加させることが知られている^{11,12)}。活性酸素の過度の増加は植物組織を破壊するため、過度の活性酸素を消去する抗酸化能が増加する防御反応が知られている。したがって、抗酸化能増加の割合は UV-B 感受性を表すと考えられるので、葉身抽出液の抗酸化能を測定した。

カリフラワー4品種(しらたま、オレンジブーケ、バイオレットクイン、ブライダル)を苗試験 RS-C1 及び RS-C2 に、ホウレンソウ4品種(日本、キングオブデンマーク、晩抽パルク、ミンスターランド)を苗試験 RS-S1 及び RS-S2 に供試した。

栽培は前節(3)と同様に行なった。3水準4反復で2~4週間の UV-B 処理を行った後、12株から生育の中庸な6株を選び、最大葉および隣接する上位葉及び下位葉を各1枚ずつ、計3枚の個葉の葉縁からパンチで直径6mmのリーフディスクを8枚ずつ計24枚打ち抜いたものを20mlの80%メタノール中でホモジナイズし、抽出液の DPPH 消去能を測定することで、抗酸化能の評価を行った。また、植物体内の抗酸化物質として代表的なものであるポリフェノール及びアスコルビン酸の UV-B による含量の変化も合わせて測定した。ポリフェノール含量は抗酸化能の測定に用いた抽出液をフォリン=シオカルト法¹⁹⁾で測定し求めた。スコルビン酸含量は、抗酸化能の測定に用いた各株の3個葉の2g Fwを5%メタリン酸20mlでホモジナイズした後、ヒドラジン法で測定した。

(7) UV-B 増加による DPPH 消去能増加の原因物質の同定

苗試験 RS-C2 に供試したカリフラワー“しらたま”と“バイオレットクイン”、及び苗試験 RS-S1 に供試したホウレンソウ“晩抽パルク”と“ミンスターランド”を分析に用いた。前節(6)の抗酸化能等の測定に用いなかった苗6株から中庸な2~3株を選び、葉身を液体窒素で凍結保存した。この凍結サンプル2gを4mlの10mM KP buffer (pH 7.0) にて磨砕した後、40000 rpm で30分間遠心分離した上清を、内径2.5cm管長20cmのガラス管に充填した Sephadex G-75 にアプライして蒸留水で溶出し、250~600 nm の吸光度をもつ黄色のフラクションの部分を回収し15000 rpm で30分間遠心分離した上清を凍結乾燥後、2mlの蒸留水に溶解した。2mlのメタノールおよび2mlの10mM KP buffer(pH 7.0)でコンディショニングした C18 Sep-Pak 500 mg cartridge にこの水溶液2mlをアプライし、16%アセトニトリル(pH 1.5)で抽出した画分を抗酸化物質の同定および定量に用いた。

抗酸化物質の同定および定量は、前述の16%アセトニトリル画分を BONDASHERE 5 \square C18 カラムを用いた HPLC 分析にて行った。測定条件は以下のとおりであった。

移動層 : 0-10 min linier gradient of 0-100 % axetonitrile (16 %, pH 1.5)

Flow rate : 0.8 ml/min

(8) UV-B 暴露による抗酸化能増加の局所性についての試験

ホウレンソウ品種“キングオブデンマーク”及び“ミンスターランド”の苗を供試した。供試材料は128穴のセル育苗箱に播種しガラス室で3~4週間育苗した後、直径10.5 cmのビニルポットへの鉢上げした。“キングオブデンマーク”は第5葉が展開中のときに供試し、第4葉及び第5葉の2葉を残して他の葉を切除した。葉を切除した苗の1/3は、UV-Bが一方の個葉の表面にあたらないようにする目的で、第4葉の表側をLフィルムで覆って水平を保ち、他方の個葉には覆いをせずに栽培した。別の1/3の苗は同様の目的で第5葉の表側をLフィルムで覆い、他方の個葉には覆いをせずに栽培した。残りの1/3の苗は両個葉とも覆いをしなかった。これらの苗をUV-Bを照射しながらあるいは照射なしで3反復で5日間、圃場で栽培した。照射区のUV-BBEと日射量の比は、照射をしなかった区の3倍とした。栽植密度は50株/m²であった。処理後、各個葉の葉縁からパンチで直径6 mmのリーフディスクを12枚ずつ打ち抜いたものを20 mlの80%メタノール中でホモジナイズし、抽出液のDPPH消去能を測定することで、抗酸化能の評価を行った。“ミンスターランド”は第6葉が展開中のときに供試し、同様の処理を行なった。

4. 結果・考察

(1) 実験期間中のUV-B照射量

収量試験および苗試験中の自然光のUV-BとUV-B照射量を表1及び表2に示す。

収穫試験では、どの試験においても処理区のUV-B_{BE}は対照区の1.7~1.8倍であった(表1)。ランプ枠により自然光が遮られるため、ランプ枠下への日射の透過率は80%程度であった。

苗試験では1999~2000年の4水準の処理および2001年の3水準の処理とも、3倍区、4倍区でUV-B照射量が目標値に達しない試験があったが、どの試験においてもUV-B_{BE}と日射量の比が4水準あるいは3水準となるようにUV-B照射量を制御することはできた(表2)。苗試験で用いたランプ枠は収穫試験のものよりランプ数が多いので自然光の遮光率が高く、ランプ枠下への日射の透過率は65%程度であった。

(2) カリフラワーの収量および抗酸化能に対するUV-B増加の影響

カリフラワー極早生品種“しらたま”を供試して3年間で6回の収穫試験YI-(1)~(6)を行った。どの試験においてもUV-B増加は収量に影響を及ぼさなかった(図1)。2001年には、収穫部位である花蕾および葉身の抗酸化能を調査した。UV-B照射により花蕾では抗酸化能が増加したが、葉身では増加しなかった(図2)。

(3) ホウレンソウの収量および抗酸化能に対するUV-B増加の影響

2001年に行った2回の収穫試験YII-(1)及びYII-(2)の結果では、ホウレンソウの収量はUV-B増加の影響を受けなかった(図3)。また、葉身の抗酸化能も試験YII-(2)における“日本”を除き、UV-B増加の影響を受けなかった(図4)。

(4) カリフラワー、ブロッコリおよびハウレンソウの苗の乾物増加量に対する UV-B 増加の影響

同一品種を繰り返し供試した苗試験では、試験時期が異なる圃場試験であることから、各試験における1倍区の平均日積算 UV-B_{BE}が同一でない(表2)。また、試験期間の乾物増加量も試験ごとに異なる。そのため、時期の異なる試験の結果を絶対量で比較するのは難しい。そこで、試験期間中の平均日積算 UV-B_{BE}を平均日積算日射量で除した値を縦軸に、乾物増加量については、各試験の各品種ごとに1倍区の値を1としたときの各区の相対値を試験ごとに計算した値を縦軸にとり、複数の試験結果をひとつのグラフ上に表わすこととした。横軸を上記のように表したのは、UV-B 増加が植物に及ぼす影響を評価する場合、UV-B と日射量の比が重要だからである¹⁾。苗試験の結果は、抗酸化能を除いた他のすべての測定項目についても、この方法で表した。

カリフラワー4品種を供試したのべ19回の苗試験 S I -(1)~(7)では、4品種とも、UV-B 増加により栽培期間中の乾物増加量が減少する傾向がみられた(図5-1)。日射量に対する UV-B_{BE}の割合が増加した時に乾物増加量が減少する割合を大きい順に並べると、“しらたま”、“ブライダル”、“オレンジブーケ”、“バイオレットクイン”の順であった。UV-B 増加により乾物増加量に有意な減少が生じた割合も“しらたま”及び“ブライダル”が高く、“しらたま”では3倍区で7回中2回、4倍区で7回中4回の減少、“ブライダル”では、3倍区で5回中1回、4倍区で5回中3回の減少があった。“オレンジブーケ”及び“バイオレットクイン”では、ともに3倍区で4回中1回、4倍区で4回中2回乾物増加量が有意に減少した。カリフラワーの苗試験では、UV-B 増加により乾物増加量が増加した品種はなかった(表3-1)。

ブロッコリ4品種を供試したのべ10回の苗試験 S II -(1)~(3)では、UV-B 増加は栽培期間中の乾物増加量にほとんど影響を与えなかった(図5-2)。有意な減少が生じたのは、“ハイツ”の4倍区で1回だけであった(表3-2)。

ハウレンソウ10品種を供試したのべ36回の苗試験 S III -(1)~(6)でも、UV-B 増加は栽培期間中の乾物増加量にほとんど影響を与えなかった(図5-3)。有意な減少は、“日本”の4倍区で6回中1回、“晩抽パルク”の3倍区及び4倍区で7回のうち1回ずつ、“ピロフレイ”の3倍区および4倍区で4回中1回ずつだけであった。逆に“晩抽パルク”及び“キングオブデンマーク”の4倍区で生体重が1回ずつ有意に増加した(表3-3)。

(5) カリフラワー、ブロッコリーおよびハウレンソウ葉身の紫外線吸光物質および比葉重に対する UV-B 増加の影響

紫外線吸光物質含量については、カリフラワー4品種を供試したのべ20回の苗試験 S I -(1)~(7)で、品種を問わずほとんどの試験でUV-B 増加により有意に増加した(図6-1)。UV-B 増加により紫外線吸光物質が1倍区に対し有意に増加した回数は、2倍

区で20回中のべ14回、3倍区でのべ18回、4倍区でのべ17回であった(表3-1)。ブロッコリ4品種を供試したのべ10回の苗試験SⅡ-(1)~(3)でも、カリフラワーと同様に、品種を問わずほとんどの試験でUV-B増加により紫外線吸光物質含量が増加した(図6-2)。UV-B増加により紫外線吸光物質が1倍区に対し有意に増加した回数は、2倍区で10回中のべ4回、3倍区でのべ5回、4倍区でのべ7回であった(表3-2)。ホウレンソウ10品種を供試したのべ36回の苗試験SⅢ-(1)~(6)でも、品種を問わずほとんどの試験でUV-B増加により紫外線吸光物質含量が増加した(図6-3)。UV-B増加により紫外線吸光物質が1倍区に対し有意に増加した回数は、2倍区で36回中のべ15回、3倍区でのべ28回、4倍区でのべ23回であった(表3-3)。

比葉重については、カリフラワー4品種を供試した苗試験SⅠ-(1)~(7)ではUV-B増加による影響はほとんどなかった(図7-1)。ブロッコリ4品種を供試した苗試験SⅡ-(1)~(3)では、UV-B増加により比葉重が減少する傾向があった(図7-2)。これらの野菜では比葉重の増加はみられず、UV-B増加による比葉重の減少が、カリフラワーで4倍区で20回中2回、ブロッコリで10回中3回みられた(表3-1及び表3-2)。ホウレンソウ10品種を供試したのべ36回の苗試験SⅢ-(1)~(6)では、“日本”、“晩抽パルク”、“ミンスターランド”、“豊葉”に、UV-B増加による比葉重増加の傾向がみられた(図7-3)。UV-B増加により比葉重が1倍区に対し有意に増加した回数は、2倍区で36回中1回、3倍区で4回、4倍区で13回あった(表3-3)。

(6) カリフラワーおよびホウレンソウ葉身の抗酸化能に対するUV-B増加の影響

カリフラワー3品種を供試した苗試験を2回繰り返した結果、“オレンジブーケ”及び“バイオレットクイン”では両試験ともUV-B増加に伴い葉内の抗酸化能が有意に増加した(図8)。“しらたま”は両試験での影響が異なった。両試験における各区のUV-B_{BE}はほとんど同じであったにもかかわらず、苗試験RS-C1ではUV-B_{BE}が約4 kJ/m²/dayの2倍区では抗酸化能はUV-B増加の影響を受けず、約4.5 kJ/m²/dayの3倍区で抗酸化能が有意に増加したのに対し、苗試験RS-C2では2倍区で抗酸化能も有意に増加し、3倍区では逆に抗酸化能が有意に減少した。

ホウレンソウ4品種を供試した苗試験を2回繰り返したRS-S1及びRS-S2結果でも、どの品種でもUV-B増加に伴い抗酸化能の増加する傾向がみられ、“日本”を除く4品種中3品種において抗酸化能の有意な増加がみられた(図8)。

UV-B増加による葉内ポリフェノール含量増加の割合は、カリフラワー3品種およびホウレンソウ4品種を供試したこれらのべ14回の苗試験において、葉内の抗酸化能増加の割合に比べて小さかったが、抗酸化能の増加にはポリフェノール含量増加が伴う傾向がみられた(図9)。UV-B増加による葉内ポリフェノール含量増加の割合が葉内の抗酸化能増加の割合に比べて小さかったのは、UV-Bにより誘導されるポリフェノール種が限られているためと考えられる^{11,12)}。

葉身のアスコルビン酸含量は、カリフラワー、ホウレンソウともUV-B増加による有意な影響や一定の傾向は見られなかった(図10-1及び10-2)。

(7) UV-B 増加により DPPH 消去能が増加する原因物質の同定

苗試験 RS-C2 では、“しらたま” および“バイオレットクイン”の葉身のクロロゲン酸含量が UV-B 増加により増加した(図 11)。クロロゲン酸の DPPH 消去能を図 12 に示す。一方、ハウレンソウを供試した苗試験 RS-S1 では、“晩抽パルク” および“ミンスターランド”の葉身のクロロゲン酸含量には UV-B 増加の影響はなかった(図 11)。カリフラワーではクロロゲン酸含量に増加がみられたのにハウレンソウでは変化がなかった。このことから、作物の種類により UV-B により誘導されるポリフェノール種が異なることが示された。

(8) UV-B 暴露による抗酸化能増加の局所性についての試験

ハウレンソウ 4 品種を供試した苗試験 RS-C1 及び RS-C2 では試験の時期の違いにかかわらず、どちらの試験でもほとんどの品種で UV-B 増加により葉身の抗酸化能が増加したが、同じ品種を供試した収穫試験 YII-1 及び YII-2 では UV-B が増加しても葉身の抗酸化能は増加しなかった。この違いは、苗試験と収穫試験の栽植密度の違いが原因と考えられた。苗試験では各個葉はほとんど相互被陰をせずに UV-B に暴露されたが、収穫試験では収穫時期には全ての個葉はお互いに重なり合い、草冠だけが UV-B に暴露された。収穫試験のハウレンソウの葉身で UV-B による抗酸化能の増加が起こらないことは、UV-B に暴露された部分で増加した抗酸化物質が他の部分に移送されないことを示唆した。この抗酸化物質増加の局所性を確かめるため、2 枚の個葉のみを残して他の個葉を切除したハウレンソウの苗を供試し、一方の個葉だけを UV-B に暴露し、他方の個葉は L フィルムで覆い UV-B に暴露せずに栽培し、UV-B が各個葉の抗酸化能に及ぼす影響を調べた。可視光は自然光とし、一方の個葉に暴露させる UV-B は、自然光の UV-B 及び自然光の 3 倍の UV-B の 2 水準とし、3 反復で試験を行った。

試験期間の光環境を表 4 に示す。

“キングオブデンマーク”を 5 日間供試した試験で、UV-B を暴露しなかった個葉の抗酸化能は、他方の葉に暴露した UV-B の違いによらず、平均で $260 \mu\text{mol Trolox eq./100 gFw}$ であった。自然光の UV-B および自然光の 3 倍の UV-B を暴露した個葉の抗酸化能は、平均でそれぞれ 430 および $560 \mu\text{mol Trolox eq./100 gFw}$ であった。この結果に葉位の違いの影響はなかった(表 5-1)。“ミンスターランド”を供試した試験でも同様の結果が得られた(表 5-2)。これら 2 品種を供試した試験の結果、UV-B を暴露しなかった個葉の抗酸化能が他方の個葉の抗酸化能の違いによらず一定であったことは、UV-B に暴露した個葉から暴露しなかった個葉への抗酸化物質の移送がほとんどないことを示し、抗酸化能増加は UV-B に暴露した部分に局所的に生じることが明らかとなった。

(9) 総合考察

① カリフラワー及びホウレンソウの収量に対する影響

カリフラワーの収穫試験に供試した“しらたま”は、苗試験に供試したカリフラワー4品種中、栽培期間の乾物増加量が4倍区で減少する回数が7回中4回と最も頻度が高かった(表3-1)ことなどから、UV-B増加に対する耐性が最も弱い品種と考えられた。予想されるUV-B増加を想定した処理がどの試験においてもUV-B耐性の弱い“しらたま”の収量に有意な影響を与えなかった(図1)ことは、他のカリフラワー供試品種についてもUV-B増加による収量に対する影響もほとんどないことを示唆した。

UV-B増加により花蕾の抗酸化能が増加した(図2)ことがカリフラワーの食品としての機能性を高める可能性の検討については、増加した抗酸化物質の人間体内への吸収程度や収穫後の保存方法が増加した抗酸化能に及ぼす影響についての更なる調査が必要である。

ホウレンソウの収量に関しては、4品種を供試して圃場で慣行法に準じた栽培を行い影響を調べる収穫試験を2001年に2回行った。両試験とも、予想されるUV-B増加を想定した処理は収量に有意な影響を与えなかった(図3)。1999年から2000年にのべ36品種を供試した苗試験において生体重にほとんど影響がなかった(図省略)。ホウレンソウを供試した試験では、収穫試験と苗試験で調査部位が共通であったこと、また、苗試験の調査時の1株生体重が20~40g程度と収穫試験とほぼ同等であったことから、苗試験の結果もUV-B増加が収量へ及ぼす影響はほとんどないことを支持したと考えられた。

② カリフラワー、ブロッコリ及びホウレンソウのUV-B増加に対する感受性の品種間差

1989年のKrupaらの総説¹³⁾では、UV-B増加に対し、カリフラワーでは室内試験で全乾物重が減少した報告が1報、ブロッコリでは、室内試験で全乾物重が減少した報告が1報、圃場試験で全乾物重あるいは収量が減少した報告がそれぞれ1報ずつ、ホウレンソウでは室内試験で全乾物重が減少した報告が2報および一株生重が減少した報告が1報紹介されており、これら3種の野菜に関するUV-B増加による生育促進の報告は紹介されていない。しかし、これらの研究は1~2品種を供試したもので品種間差の考察をしていない。そこで、本研究ではこの3種の野菜について4~10品種を供試して品種間差を調べた。

カリフラワーでは、本研究に供試した4品種ともUV-B増加による乾物増加量減少の傾向がみられた。供試した4品種は、収穫部位である花蕾の色の違いにより、乾物増加量への影響が異なった。花蕾が白色である“しらたま”及び“ブライダル”は、花蕾が橙色の“オレンジブーケ”や紫色の“バイオレットクイン”に比べ、乾物増加量の減少の割合や有意な減少の生じる頻度が高かった(図5-1及び表3-1)。

紫外線吸光物質含量に対する影響については、有色花蕾の“オレンジブーケ”及び“バイオレットクイン”における増加の割合が、白色花蕾の“しらたま”及び“ブ

ライダル”より大きかった(図 6-1 及び表 3-1)。Caldwell ら¹⁴⁾は、ダイズを供試した圃場試験で UV-B 増加による紫外線吸光物質の増加が個葉を貫通する UV-B 量を減少させることを明らかにしている。4 品種中で UV-B による紫外線吸光物質含量の増加割合の比較的小さい“しらたま”及び“ブライダル”では、他の 2 品種より葉肉細胞に浸透する UV-B 量が多いと考えられる。Reuber ら¹⁵⁾は、UV-B による紫外線吸光物質含量の増加は表皮細胞で顕著で葉肉細胞ではほとんど生じないとことを報告している。本研究では両者を区別せずに色素を抽出した。表皮細胞からのみ色素を抽出すれば、UV-B による紫外線吸光物質含量増加の品種間差をより明確にできる可能性がある。

葉身内の抗酸化能については、“オレンジブーケ”及び“バイオレットクイン”では苗試験 RS-C1 および RS-C2 のどちらの試験においても、UV-B が増加するにしたがって増加した(図 8)。しかし“しらたま”では UV-B_{BE} が約 4 kJ/m²/day までは抗酸化能はほとんど影響はなかった。両試験において、“しらたま”の紫外線吸光物質含量は UV-B 増加によってほとんど影響を受けなかった(図省略)ので、UV-B 増加により葉肉細胞に浸透する UV-B 量は増加したと考えられた。本研究で測定した抗酸化能は、葉内で発生した活性酸素を抗酸化物質が消去した後に残っている抗酸化能と考えられる。したがって、本試験の“しらたま”において UV-B_{BE} が約 4 kJ/m²/day まで葉内の抗酸化能がほとんど変化しなかったことは葉肉細胞に浸透した UV-B 増加による活性酸素発生の促進と抗酸化物質生産の促進とがほぼ均衡を保っていたことを示唆した。UV-B_{BE} が約 4 kJ/m²/day から約 5 kJ/m²/day に増加すると抗酸化能は試験 RS-C1 では有意に増加し、試験 RS-C2 では有意に減少した(図 8)。このことは、試験 RS-C1 では抗酸化物質生産量が活性酸素の発生量を上回り、試験 RS-C2 では逆に活性酸素発生量が抗酸化物質生産量を上回ったことを示唆した。試験期間中の光環境がほとんど同じ両試験で抗酸化能に対する影響に違いがみられたことは、UV-B 増加の影響が他の環境要因により変化することを示した。Takeuchi らは、300-320 nm の UV-B 感受性が、キュウリの子葉では温度により変化することを報告している¹⁶⁾。両試験期間中の平均気温が、苗試験 RS-C1 が 16.7 °C、RS-C2 が 22.0 °C と異なったことが影響を与えているかもしれない。

以上のことから、供試した 4 種類のカリフラワー品種の中では“しらたま”が UV-B 耐性が弱い品種と考えられた。抗酸化能の測定を行なわなかった“ブライダル”についても、有色花蕾の 2 品種より紫外線吸光物質含量増加の割合が小さく葉肉細胞への UV-B の浸透割合が多いため UV-B 耐性が有色花蕾品種より弱く、乾物増加量に影響する頻度が高かったと考えられる。有色花蕾の 2 品種“オレンジブーケ”及び“バイオレットクイン”は、UV-B 増加による紫外線吸光物質増加の割合が大きい(図 6-1)ことが UV-B の葉肉細胞への浸透を防ぎ、UV-B 増加による抗酸化能の増加の割合が大きいこと(図 8)が葉肉細胞へ浸透した UV-B の悪影響を軽減する度合いが大きいいため、UV-B 耐性が白色花蕾の 2 品種より強いと考えられた。

ブロッコリ及びホウレンソウについては、本研究の苗試験の結果では、供試した

どの品種も UV-B 増加が乾物増加量に及ぼす影響はほとんどなかった(表 3-2 及び 3-3) ため、品種間差についての考察は難しい。本研究の 4 水準の苗試験での 4 倍区の UV-B 量は、ランプ枠による遮光のため UV-BBE が自然光の 4 倍にはならないが最高で 2.77 倍であった。一方、50 %のオゾン層破壊による UV-BBE 増加量が 1.5 倍程度である。このことから、本試験の UV-B 増加処理で乾物増加量に影響がないことは、ブロッコリ及びハウレンソウで苗試験に供試したすべての品種は、予想されるオゾン層破壊に伴う UV-B 増加に対して耐性があると考えられた。UV-B 照射強度を更に強めればこれらの品種間差が明確になるかもしれない。しかし、この照射装置を用いて更に照射強度を強くするためにはランプ枠のランプ数を更に増やさなくてはならない。そのことはランプ枠下への日射の透過率を 65 %から更に減少させることになり、植物の生育に必要な光が十分確保するという圃場試験の目的を損なう可能性があるため、これ以上の UV-B 照射処理は本研究では行わなかった。

UV-B 耐性の弱い品種ほど UV-B 感受性が高いと定義すれば、供試した 4 種類のカリフラワー品種の中では“しらたま”や“ブライダル”が感受性の高い品種となる。しかし、紫外線吸光物質の増加程度や抗酸化物質含量の変化は“オレンジブーケ”や“バイオレットクイン”のほうが他の 2 品種よりも大きく、これらを指標とすれば UV-B 感受性の高さは UV-B 耐性の強さとなる。植物の生育に必要な光が十分ある環境では、UV-B 増加による生育量の抑制はほとんどなかったという本研究の結果や他の圃場試験による報告¹⁷⁾から、UV-B 耐性の強さの原因となる紫外線吸光物質の増加程度や抗酸化物質含量の変化程度などにより UV-B 感受性を評価し、それらの含量の変化が食味や食品機能性に及ぼす影響を検討する必要があると考えられる。

5. 本研究により得られた成果

圃場におけるくり返し試験により、カリフラワー及びハウレンソウの収量にはオゾン層破壊に伴う UV-B 増加はほとんど影響しないことを明らかにした。UV-B によりカリフラワー花蕾で抗酸化能が増加したが、この現象が食品機能性を高めるかについては更に研究が必要である。アスコルビン酸(ビタミン C)含量については、UV-B 増加はカリフラワーでもハウレンソウでも影響を与えなかった。

UV-B 増加に対する野菜類の感受性の品種間差を評価する場合、圃場条件で UV-B 増加が生体重や乾物重へ及ぼす影響が小さいときにも、紫外線吸光物質含量や葉内抗酸化能の増加程度から評価するのが有効であることを示した。

UV-B 暴露により生じる抗酸化能の増加もに関して、UV-B による抗酸化能の増加は局所的な現象であり、UV-B により葉身で増加した抗酸化物質が他の個葉に移送されることはほとんどないことを明らかにした。

6. 引用文献

- 1) Mirecki, R.M. and Teramura, A.H. (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 Physiology* 74: 475-480.
- 2) Teramura A.H., Sullivan J.H. & Lydon J. (1990) Effects of UV-B radiation on soybean yield and seed quality: a 6-year field study. *Physiologia plantarum* 80: 5-11.
 - 3) Teramura, A.H., Ziska, L.H. & Sztein, E. (1991) Changes in growth and photosynthetic capacity of rice with increased UV-B radiation. *Physiologia Plantarum* 83* 373-380.
 - 4) Green, A.E.S., Cross, K.R. & Amith, L.A. (1980) Improved analytical characterization of ultraviolet skylight. *Photochemistry and Photobiology* 31: 59-65.
 - 5) Nouch, I. and Kobayashi, K. (1995) Effects of Enhanced Ultraviolet-B Radiation with a Modulated Lamp Control System on Growth of 17 Rice Cultivars in the Field. *J. Agricultural Meteorology* 51(1):11-20
 - 6) Caldwell M.M. (1971) Solar UV irradiation and the growth and development of higher plants. In *Photophysiology*. Edited by Giese, A.C. p.131-177. Academic Press, New York.
 - 7) Liu, L., Gitz III, D.C. & McClure, J.W. (1995) Effects of UV-B on flavonoids, ferulic acid, growth and photosynthesis in barley primary leaves. *Physiologia Plantarum* 93: 725-33
 - 8) Day T.A.(1993) Relating UV-B radiation screening effectiveness of foliage to absorbing-compound concentration and anatomical characteristics in diverse group of plants. *Oecologia* 95: 542-550.
 - 9) Caldwell M.M., Robberecht R.& Flint S.D. (1983) Internal Filters: prospects for UV-acclimation in higher plants. *Physiologia plantarum* 58: 445-450.
 - 10) Tevini M., Braun J. & Fieser G. (1991) The protective function of the epidermal layer of rye seedlings against ultraviolet-B radiation. *Photochemistry and Photobiology* 53: 329-333.
 - 11) Kramer G.F., Norman H.A., Krizek D.T & Mirecki R.M.(1991) Influence of UV-B radiation on polyamines, lipid reoxidation and membrane lipids in cucumber. *Phytochemistry* 30: 2101-2108.
 - 12) Panagopoulos I., Bornman J.F. & Björn L.O.(1990) Effects of UV radiation and visible light on growth fluorescence induction ultraweak luminescence and peroxidase activity in

sugar beet plants. J. Photochem photobiol. B-Biology 8: 73-87

- 13) Krupa S.V. & Kichkert R.N. (1989) The greenhouse effect : Impactsof Ultraviolet-B(UV-B) radiation, carbon dioxide (CO₂) and Ozone (O₃) on Vegetation. Environmental Pollution 31: 263-393.
- 14) Caldwell, M. M., Flint, S. D. & Serles, P. S. (1994) Spectral balance and UV-B sensitivity of soybean : a Field experiment. Plant, Cell and Environment 17: 267-276.
- 15) Reuber, S. , Bornman, J.. & Weissenböck, G. (1996) Phenylpropanoid compounds in primary leaves of rye (*Secale cereale*) – light regulation of their biosynthesis and the possible role in UV-B protection. Physiologia Plantrum 97: 160-8.
- 16) Takeuchi, Y., Ikeda S. & Kasahara, H. (1993) Dependence on wavelength and temperature of growth inhibition induced by UV-B irradiation. Plant Cell Physiology 34: 913-917.
- 17) Fiscus, E.L. & Booker, F.L. (1995) Is increased UV-B a threat to crop photosynthesis and productivity? Photosynthesis Research 43: 81-92.
- 18) 須田郁夫(2000)3-3-9 抗酸化機能①分光的抗酸化機能評価 in 食品機能研究法 Editedby Shinohara, K., Suzuki T. & Uenogawa S. pp.218-220. 光琳
- 19) 津志田藤二郎(2000)4-1 ポリフェノールの分析法 in 食品機能研究法 Editedby Shinohara, K., Suzuki T. & Uenogawa S. pp.318-322. 光琳

[国際共同研究等の状況]

なし

[研究成果の発表状況]

(1) 誌上発表(学術誌・書籍)

なし

(2) 口頭発表

- ① 米村 健：平成 11 年度日本農業気象学会中国四国支部会(1999)「4 つの異なる紫外線環境下における圃場での野菜類の苗の生長」
- ② 米村 健：第 41 回日本作物学会中国支部会(2000)「UV-B 増加による葉内紫外線吸収物質含量増加におけるハウレンソウとブロッコリ等との違い」
- ③ 米村 健：第 212 回日本作物学会(2001)「UV-B 増加が、ハウレンソウおよびカ

リフラワーの葉身抽出液の吸光度および抗酸化能に及ぼす影響」

- ④ 田中智之、米村 健、長嶺考行、石川孝博、澤 嘉弘、柴田 均：日本植物生理学会 2002 年度年会及び第 42 回シンポジウム(2002)「高等植物における UV-B 照射量の増加にともなう遮蔽化合物の蓄積」
 - ⑤ T. Yonemura : 1st Asian Conference on Photobiology, Hyogo , Japan, 2002. “Scarcely import of antioxidants produced in a leaf of spinach into another leaf.” (アブストラクト提出済み)
- (3) 出願特許
なし
- (4) 受賞等
なし
- (5) 一般への公表・報道等
- ① FMふくやま(2002年3月13日&3月27日、オゾン層破壊による UV-B 増加がカリフラワー及びホウレンソウの生産にはあまり影響がないことについて5分ほど紹介)
- (6) その他成果の普及、政策的な寄与・貢献について
なし

表 1. 各収穫試験の供試材料、期間、日射量およびUV-B照射量

| 試験番号 | 供試作物 | 品種名 反復数 | 処理期間 | | 平均日積算 日射量 (MJ/m ² /day) | 平均日積算 PAR (MJ/m ² /day) ^{注2)} | | 平均日積算 UV-B _{ae} (KJ/m ² /day) ^{注1)} | 平均日積算 照射UV-B量 ^{注3)} (KJ/m ² /day) |
|-----------|--------|-------------|---------------------|--------------------|--|---|-----|--|---|
| Y I -(1) | カリフラワー | しらたま 2反復 | 1999年 4/28~6/3 | 全天 ^{注4)} | 21.8 | 9.2 | | 3.36 | |
| | | | | 試験区 ^{注4)} | 17.4 | 7.3 | 対照区 | 2.78 (1.0) | ---- |
| | | | | | | | 処理区 | 4.79 (1.7) | 6.6 |
| Y I -(2) | カリフラワー | しらたま 2反復 | 2000年 9/20~10/29 | 全天 | 14.7 | 6.2 | | 2.31 | |
| | | | | 試験区 | 11.4 | 4.8 | 対照区 | 1.85 (1.0) | ---- |
| | | | | | | | 処理区 | 3.18 (1.7) | 5.2 |
| Y I -(3) | カリフラワー | しらたま 2反復 | 2000年 5/18~6/21 | 全天 | 16.3 | 6.8 | | 3.47 | |
| | | | | 試験区 | 13.8 | 5.8 | 対照区 | 2.85 (1.0) | ---- |
| | | | | | | | 処理区 | 4.82 (1.7) | 6.7 |
| Y I -(4) | カリフラワー | しらたま 4反復 | 2000年 9/29~11/2 | 全天 | 9.3 | 3.9 | | 1.65 | |
| | | | | 試験区 | 6.9 | 2.9 | 対照区 | 1.23 (1.0) | ---- |
| | | | | | | | 処理区 | 2.24 (1.8) | 3.7 |
| Y I -(5) | カリフラワー | しらたま 2反復 | 2001年 4/25~5/26 | 全天 | 17.4 | 7.3 | | 2.85 | |
| | | | | 試験区 | 13.9 | 5.8 | 対照区 | 2.27 (1.0) | ---- |
| | | | | | | | 処理区 | 4.17 (1.8) | 6.2 |
| Y I -(6) | カリフラワー | しらたま 2反復 | 2001年 7/16~8/30 | 全天 | 19.8 | 8.3 | | 3.24 | |
| | | | | 試験区 | 16.8 | 7.1 | 対照区 | 2.51 (1.0) | ---- |
| | | | | | | | 処理区 | 4.52 (1.8) | 6.5 |
| Y II -(1) | ホウレンソウ | 4品種 6反復 | 2001年 3/17~4/27 | 全天 | 17.4 | 7.3 | | 3.74 | |
| | | | | 試験区 | 14.0 | 5.9 | 対照区 | 3.03 (1.0) | ---- |
| | | | | | | | 処理区 | 5.27 (1.7) | 6.7 |
| Y II -(2) | ホウレンソウ | 4品種 6反復 | 2001年 9/16~10/14 | 全天 | 15.2 | 6.4 | | 2.52 | |
| | | | | 試験区 | 11.5 | 4.8 | 対照区 | 2.12 (1.0) | ---- |
| | | | | | | | 処理区 | 3.73 (1.8) | 5.8 |

注) 1 : 1倍区の値を1とした相対値を () 内に付加して示す。

2 : 日積算PAR : MSR-7000 (オプトリサーチ株) を用いて英弘精機(株)MS-42を校正し、MS-42の測定値をPARに換算した値で示す。

3 : 照射UV-B量 : 英弘精機(株)MS-210Dでの測定値を英弘精機(株)MS-210Wの測定値に換算した値で示す。

4 : 全天は周囲に障害物のない場所での測定値、処理区は照射装置下での測定値を表す。

表2. 各苗試験の供試材料、期間、日射量およびUV-B制御結果

| 試験番号 | 供試作物 | 品種数 | 処理期間 (日数) | | 平均日積算 日射量 (MJ/m ² /day) | 平均日積算 PAR (MJ/m ² /day) ^(注2) | | 平均日積算 UV-B ₀₂ (KJ/m ² /day) ^(注1) | 平均日積算 照射UV-B量 ^(注3) (KJ/m ² /day) |
|--------|------|---------|---------------------|---------------------|--|--|------------|---|--|
| SI-(1) | カ | 2 品種 | 1999年 5/26~6/17 | 全天 ^(注4) | 19.2 | 8.0 | 全天 | 3.60 | |
| | | | | 処理区 ^(注4) | 12.2 | 5.1 | 1倍区 | 2.31 (1.0) | --- |
| | | | | | | | 2倍区 | 3.88 (1.7) | 6.5 |
| | | | | | | | 3倍区 | 5.53 (2.4) | 12.6 |
| | | | | | | 4倍区 | 6.62 (2.9) | 19.8 | |
| SI-(2) | リ | 1 品種 | 1999年 9/16~10/14 | 全天 | 12.8 | 5.4 | 全天 | 2.53 | |
| | | | | 処理区 | 5.9 | 2.5 | 1倍区 | 1.65 (1.0) | --- |
| | | | | | | | 2倍区 | 3.39 (2.1) | 4.7 |
| | | | | | | | 3倍区 | 4.56 (2.8) | 8.8 |
| | | | | | | 4倍区 | 5.38 (3.3) | 13.2 | |
| SI-(3) | フ | 1 品種 | 2000年 4/10~4/28 | 全天 | 15.1 | 6.4 | 全天 | 2.20 | |
| | | | | 処理区 | 9.4 | 3.9 | 1倍区 | 1.46 (1.0) | --- |
| | | | | | | | 2倍区 | 3.74 (2.6) | 5.9 |
| | | | | | | | 3倍区 | 4.97 (3.4) | 11.1 |
| | | | | | | 4倍区 | 5.97 (4.1) | 15.6 | |
| SI-(4) | ラ | 4 品種 | 2000年 5/11~5/29 | 全天 | 18.1 | 7.6 | 全天 | 3.51 | |
| | | | | 処理区 | 11.5 | 4.8 | 1倍区 | 2.28 (1.0) | --- |
| | | | | | | | 2倍区 | 3.60 (1.6) | 6.2 |
| | | | | | | | 3倍区 | 5.28 (2.3) | 12.2 |
| | | | | | | 4倍区 | 6.55 (2.9) | 19.2 | |
| SI-(5) | ワ | 4 品種 | 2000年 6/7~7/10 | 全天 | 16.9 | 7.1 | 全天 | 3.63 | |
| | | | | 処理区 | 10.5 | 4.4 | 1倍区 | 2.34 (1.0) | --- |
| | | | | | | | 2倍区 | 4.70 (2.1) | 11.0 |
| | | | | | | | 3倍区 | 7.52 (3.3) | 20.6 |
| | | | | | | 4倍区 | 9.22 (4.0) | 27.2 | |
| SI-(6) | I | 4 品種 | 2000年 9/27~10/16 | 全天 | 12.2 | 5.1 | 全天 | 2.09 | |
| | | | | 処理区 | 8.4 | 3.5 | 1倍区 | 1.46 (1.0) | --- |
| | | | | | | | 2倍区 | 3.02 (2.1) | 4.8 |
| | | | | | | | 3倍区 | 4.67 (3.2) | 9.0 |
| | | | | | | 4倍区 | 5.78 (4.0) | 13.7 | |
| SI-(7) | | 4 品種 | 2000年 10/21~11/9 | 全天 | 8.1 | 3.4 | 全天 | 1.35 | |
| | | | | 処理区 | 5.1 | 2.2 | 1倍区 | 0.88 (1.0) | --- |
| | | | | | | | 2倍区 | 1.93 (2.2) | 2.1 |
| | | | | | | | 3倍区 | 2.60 (3.0) | 4.4 |
| | | | | | | 4倍区 | 3.34 (3.8) | 6.6 | |
| RS-C1 | | 3 品種 | 2001年 4/23~5/16 | 全天 | 15.9 | 6.7 | 全天 | 2.90 | |
| | | | | 処理区 | 11.9 | 5.0 | 1倍区 | 2.04 (1.0) | --- |
| | | | | | | | 2倍区 | 4.19 (2.1) | 12.7 |
| | | | | | | 3倍区 | 4.67 (2.3) | 15.2 | |
| RS-C2 | | 4 品種 | 2001年 6/1~6/14 | 全天 | 16.0 | 6.7 | 全天 | 2.96 | |
| | | | | 処理区 | 12.7 | 5.3 | 1倍区 | 2.10 (1.0) | --- |
| | | | | | | | 2倍区 | 3.88 (1.8) | 10.1 |
| | | | | | | 3倍区 | 4.85 (2.3) | 14.8 | |

| | | | | | | | | | |
|-----------|--------|-------------|----------------------|-----|------|-----|-----|------------|------|
| S II-(1) | ブ ロ | 2 品 種 | 1999年 5/26~6/17 | 全天 | 19.2 | 8.0 | 全天 | 3.60 | |
| | | | | 処理区 | 12.2 | 5.1 | 1倍区 | 2.31 (1.0) | --- |
| S II-(2) | ツ コ | 4 品 種 | 1999年 6/24~7/16 | 全天 | 15 | 6.3 | 全天 | 3.19 | |
| | | | | 処理区 | 8.8 | 3.7 | 1倍区 | 2.07 (1.0) | --- |
| S II-(3) | リ | 4 品 種 | 1999年 9/16~10/14 | 全天 | 12.8 | 5.4 | 全天 | 2.53 | |
| | | | | 処理区 | 5.9 | 2.5 | 1倍区 | 1.65 (1.0) | --- |
| S III-(1) | ホ | 4 品 種 | 1999年 4/22~5/14 | 全天 | 21.6 | 9.1 | 全天 | 3.60 | |
| | | | | 処理区 | 13.5 | 5.7 | 1倍区 | 2.31 (1.0) | --- |
| S III-(2) | ウ | 8 品 種 | 1999年 10/18~11/12 | 全天 | 12 | 5.0 | 全天 | 1.65 | |
| | | | | 処理区 | 6.7 | 2.8 | 1倍区 | 1.07 (1.0) | --- |
| S III-(3) | レ | 9 品 種 | 1999年 11/20~12/15 | 全天 | 7.7 | 3.2 | 全天 | 1.07 | |
| | | | | 処理区 | 4.8 | 2.0 | 1倍区 | 0.69 (1.0) | --- |
| S III-(4) | ン | 4 品 種 | 2000年 4/10~4/28 | 全天 | 15.1 | 6.4 | 全天 | 2.20 | |
| | | | | 処理区 | 9.4 | 3.9 | 1倍区 | 1.46 (1.0) | --- |
| S III-(5) | ソ | 4 品 種 | 2000年 9/29~10/17 | 全天 | 11.1 | 4.7 | 全天 | 1.92 | |
| | | | | 処理区 | 6.9 | 2.9 | 1倍区 | 1.19 (1.0) | --- |
| S III-(6) | ウ | 4 品 種 | 2000年 10/22~11/14 | 全天 | 7.7 | 3.2 | 全天 | 1.16 | |
| | | | | 処理区 | 4.8 | 2.0 | 1倍区 | 0.75 (1.0) | --- |
| RS-S1 | | 4 品 種 | 2001年 3/14~4/16 | 全天 | 14.2 | 6.0 | 全天 | 1.80 | |
| | | | | 処理区 | 11.4 | 4.8 | 1倍区 | 1.50 (1.0) | --- |
| RS-S2 | | 4 品 種 | 2001年 9/13~10/4 | 全天 | 14.5 | 6.1 | 全天 | 2.46 | |
| | | | | 処理区 | 11.6 | 4.9 | 1倍区 | 2.04 (1.0) | --- |
| | | | | | | | 2倍区 | 2.92 (1.9) | 6.8 |
| | | | | | | | 3倍区 | 4.39 (2.9) | 10.8 |
| | | | | | | | 2倍区 | 3.52 (1.7) | 7.7 |
| | | | | | | | 3倍区 | 4.51 (2.2) | 11.9 |

注) 1: 1倍区の値を1とした相対値を()内に付加して示す。

2: 日積算PAR: MSR-7000 (オプトリサーチ株) を用いて英弘精機(株)MS-42を校正し、MS-42の測定値をPARに換算した値で示す。

3: 照射UV-B量: 英弘精機(株)MS-210Dでの測定値を英弘精機(株)MS-210Wの測定値に換算した値で示す。

4: 全天は周囲に障害物のない場所での測定値、処理区は照射装置下での測定値を表す。

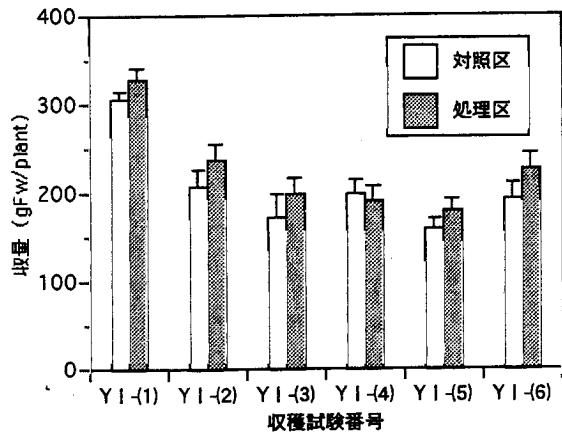


図1. UV-B増加がカリフラワー“しらたま”の収量に及ぼす影響

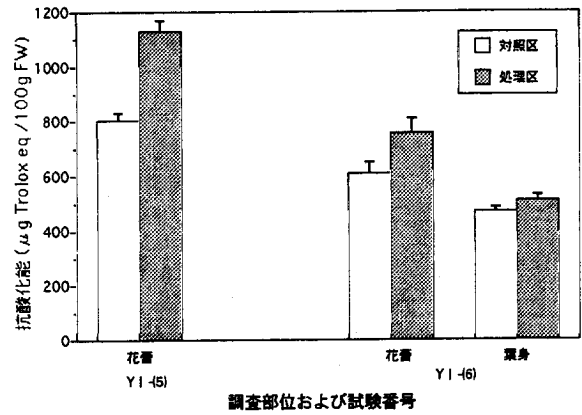


図2. UV-B増加がカリフラワー“しらたま”収穫時の花蕾および葉身の抗酸化能に及ぼす影響

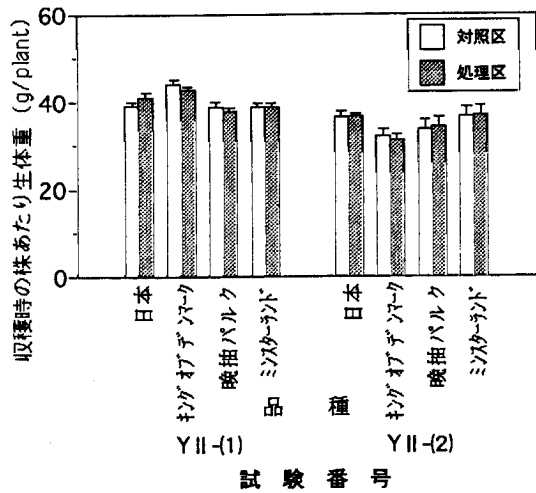


図3. UV-B増加がホウレンソウ収穫時の一株あたり生体重に及ぼす影響

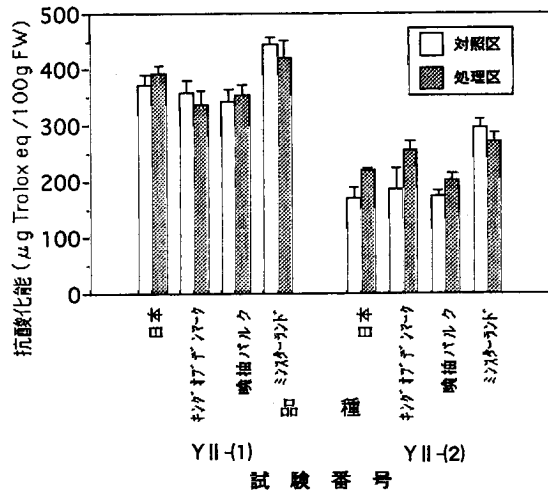


図4. UV-B増加が収穫時のホウレンソウ葉身の抗酸化能に及ぼす影響

表3-1. カリフラワーを供試した苗試験の各測定項目において有意な影響の生じた回数

| 品種名 | 繰り 返し 回数 | 乾物増加量 | | | 紫外線吸光物質含量 | | | 比葉重 | | |
|-----------|----------------|-----------------|----------|----------------|-----------|----------|----------|-----------------|----------|----------------|
| | | 減 少 3倍区 で | 4倍区 で | 増加 4倍区 で | 2倍区 で | 3倍区 で | 4倍区 で | 増 加 3倍区 で | 4倍区 で | 減少 4倍区 で |
| しらたま | 7 | 2 | 4 | 0 | 4 | 6 | 5 | 0 | 0 | 1 |
| ブライダル | 5 | 1 | 3 | 0 | 4 | 4 | 4 | 0 | 0 | 1 |
| オレンジブーケ | 4 | 1 | 2 | 0 | 2 | 4 | 4 | 0 | 0 | 0 |
| バイオレットクイン | 4 | 1 | 2 | 0 | 4 | 4 | 4 | 0 | 0 | 0 |
| カリフラワー小計 | 20 | 5 | 11 | 0 | 14 | 18 | 17 | 0 | 0 | 2 |

表3-2. ブロccoliを供試した苗試験の各測定項目において有意な影響の生じた回数

| 品種名 | 繰り 返し 回数 | 乾物増加量 | | | 紫外線吸光物質含量 | | | 比葉重 | | |
|---------|----------------|-----------------|----------|----------------|-----------|----------|----------|-----------------|----------|----------------|
| | | 減 少 3倍区 で | 4倍区 で | 増加 4倍区 で | 2倍区 で | 3倍区 で | 4倍区 で | 増 加 3倍区 で | 4倍区 で | 減少 4倍区 で |
| ひの緑26号 | 2 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| まさ緑67号 | 3 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| りく緑15号 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 2 | 0 | 0 | 1 |
| ハイツ | 3 | 0 | 1 | 0 | 2 | 1 | 2 | 0 | 0 | 1 |
| ブロッコリ小計 | 10 | 0 | 1 | 0 | 4 | 5 | 7 | 0 | 0 | 3 |

表3-3. ホウレンソウを供試した苗試験の各測定項目において有意な影響の生じた回数

| 品種名 | 繰り 返し 回数 | 乾物増加量 | | | 紫外線吸光物質含量 | | | 比葉重 | | |
|------------|----------------|-----------------|----------|----------------|-----------|----------|----------|-----------------|----------|----------------|
| | | 減 少 3倍区 で | 4倍区 で | 増加 4倍区 で | 2倍区 で | 3倍区 で | 4倍区 で | 増 加 3倍区 で | 4倍区 で | 減少 4倍区 で |
| 日本 | 6 | 0 | 1 | 0 | 1 | 4 | 3 | 0 | 1 | 0 |
| 晩抽バルク | 7 | 1 | 1 | 1 | 2 | 6 | 5 | 1 | 1 | 1 |
| キングオブデンマーク | 6 | 0 | 0 | 1 | 3 | 6 | 6 | 0 | 0 | 1 |
| ピロフレイ | 4 | 1 | 1 | 0 | 4 | 4 | 4 | 1 | 1 | 0 |
| ミンスターランド | 2 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| パレード | 3 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| メガトン | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 兎城 | 2 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 次郎丸 | 2 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 豊葉 | 2 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| ホウレンソウ小計 | 36 | 2 | 3 | 2 | 15 | 28 | 23 | 2 | 3 | 2 |

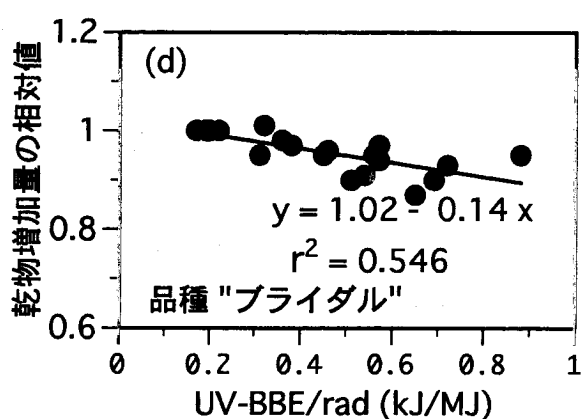
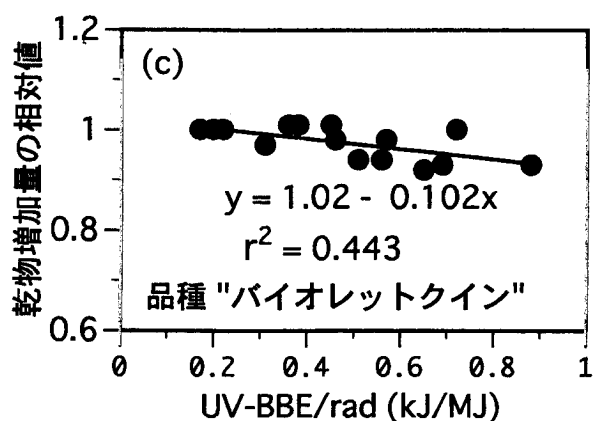
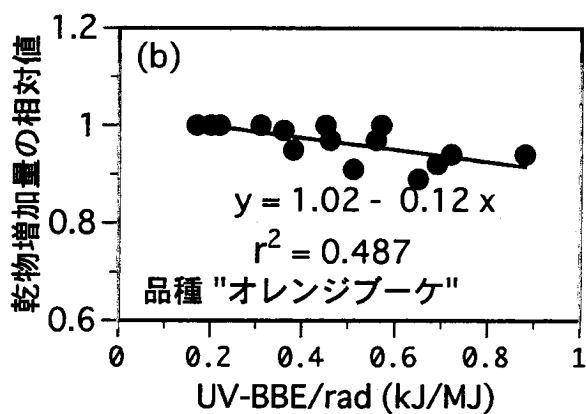
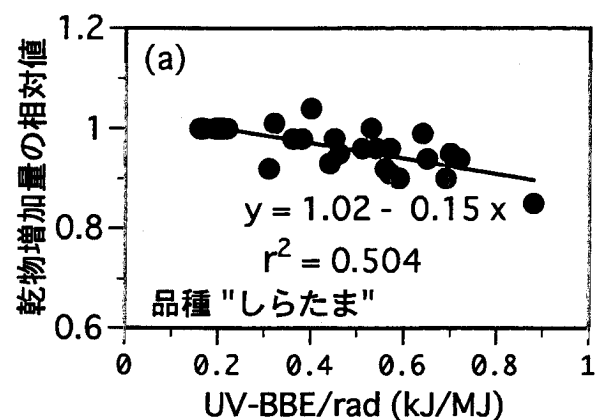


図5-1. UV-B増加がカリフラワーの乾物増加量に及ぼす影響

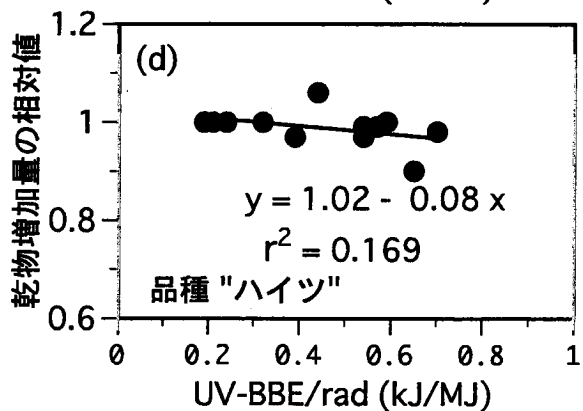
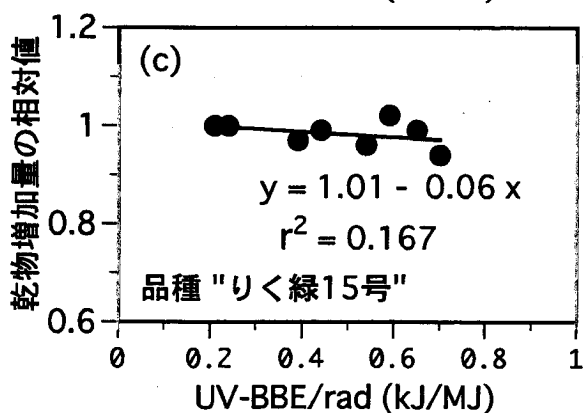
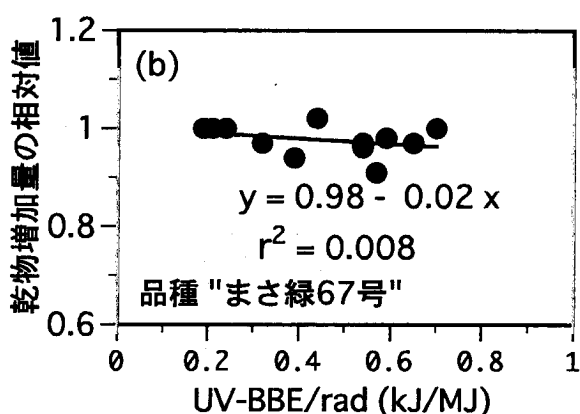
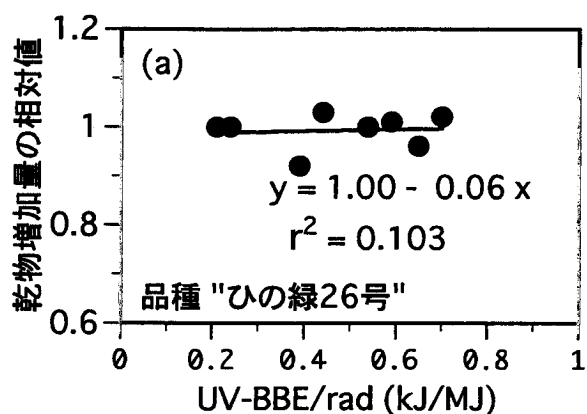


図5-2. UV-B増加がブロッコリの乾物増加量に及ぼす影響

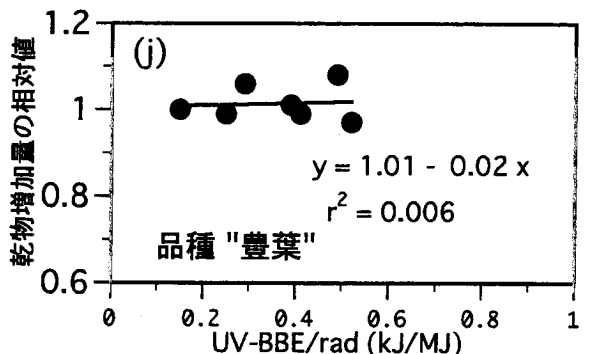
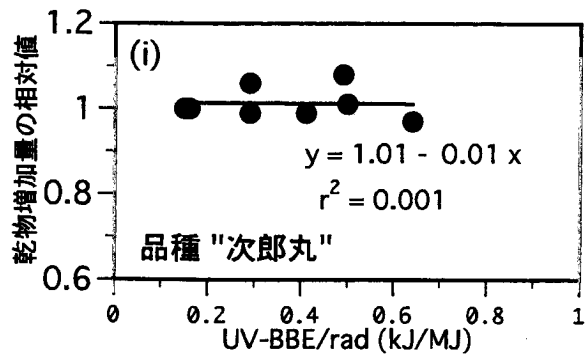
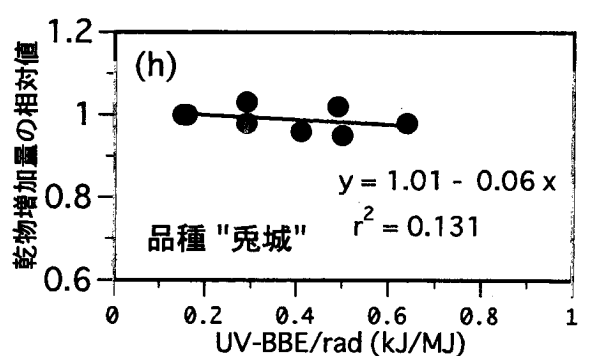
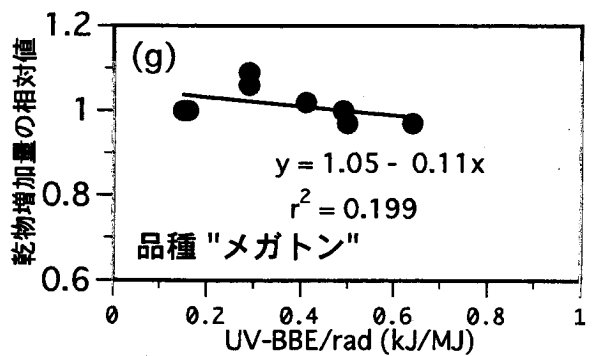
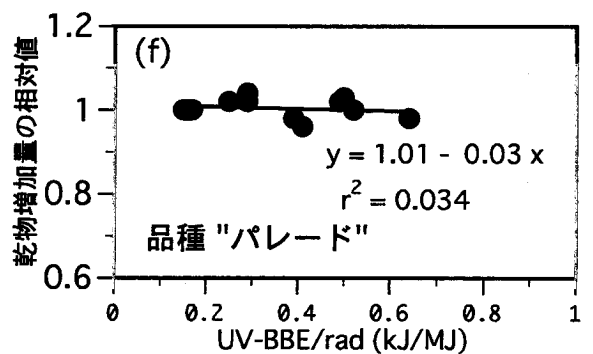
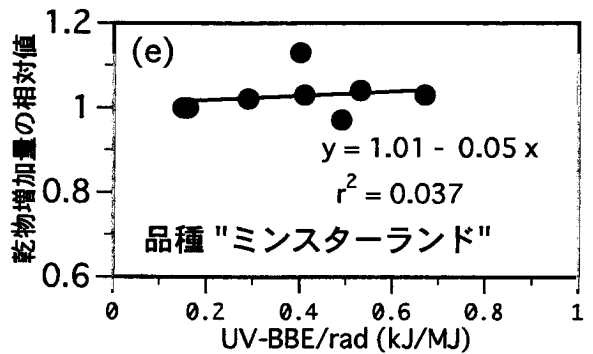
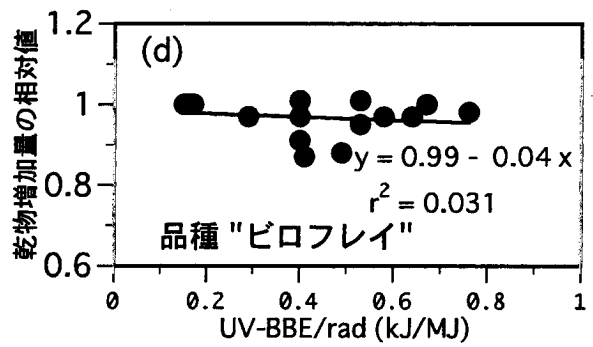
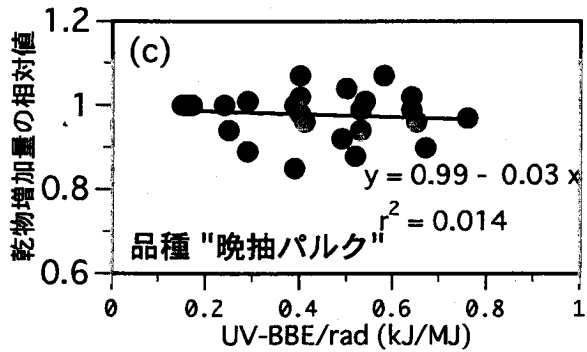
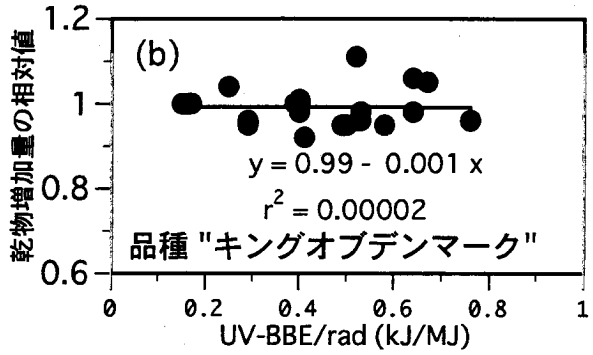
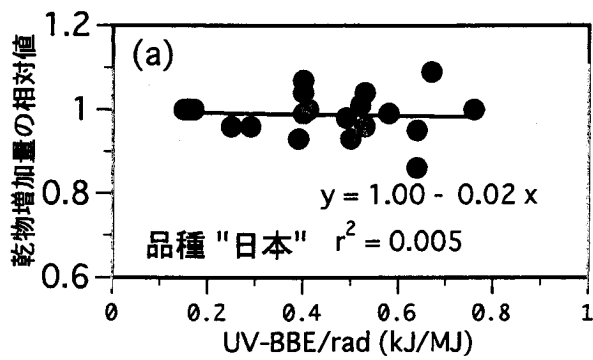


図5-3. UV-B増加がホウレンソウの乾物増加量に及ぼす影響

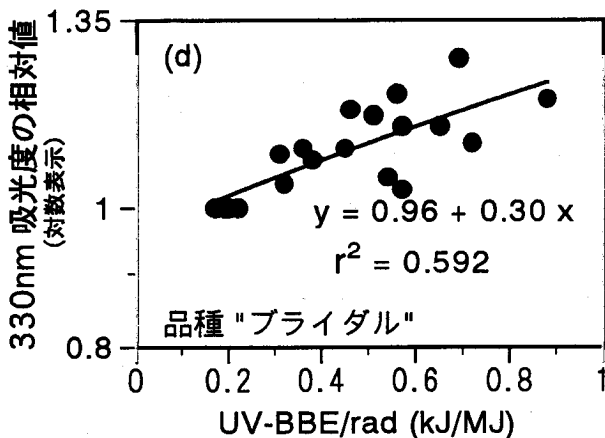
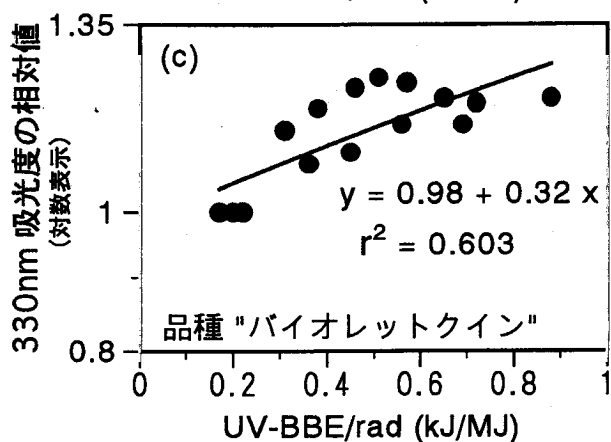
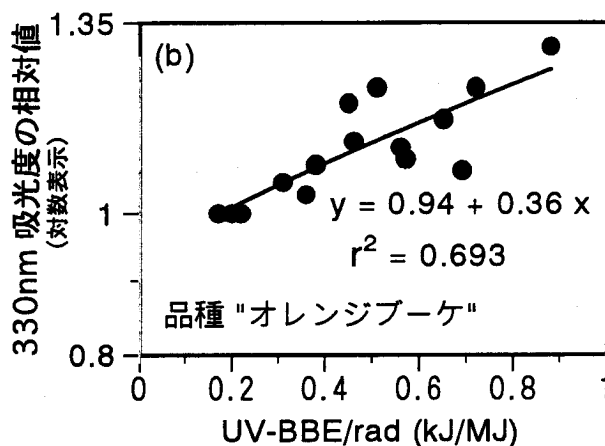
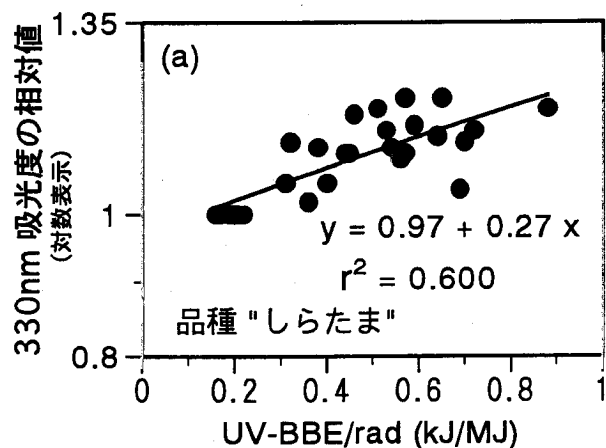


図6-1. UV-B増加がカリフラワー葉身の紫外線吸光物質含量に及ぼす影響

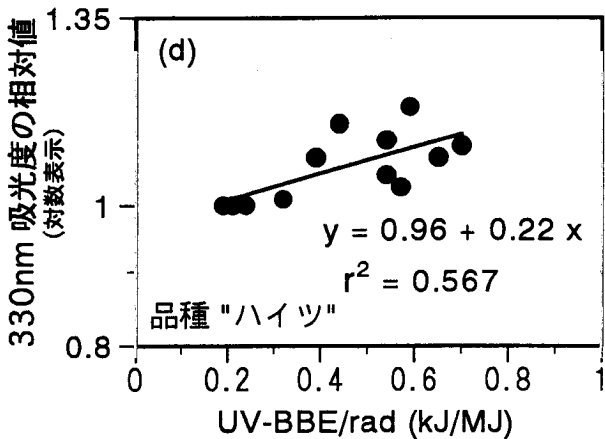
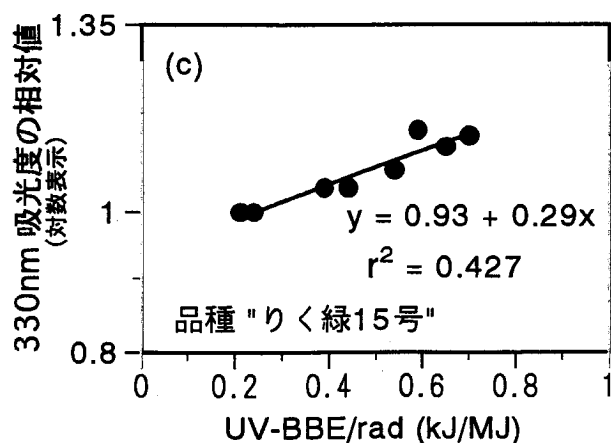
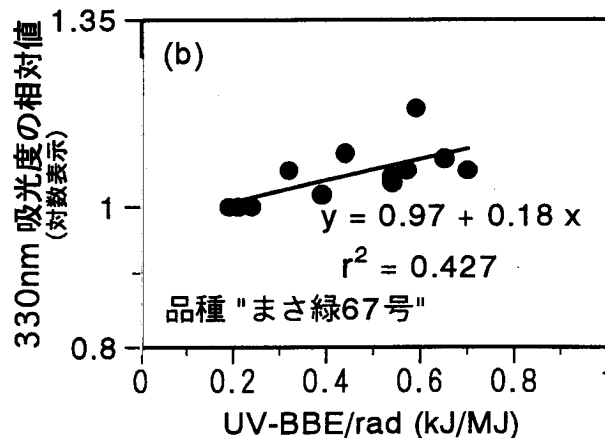
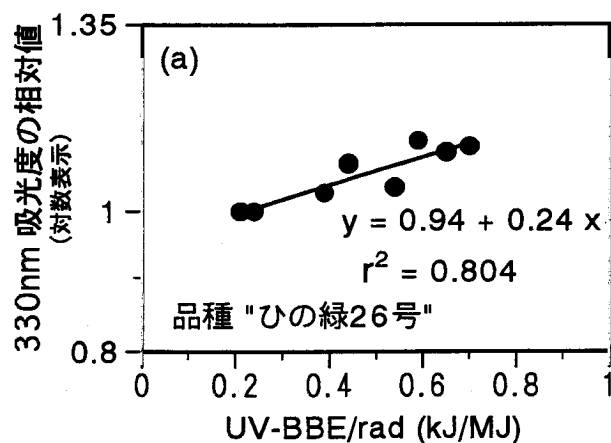


図6-2. UV-B増加がブロッコリ葉身の紫外線吸光物質含量に及ぼす影響

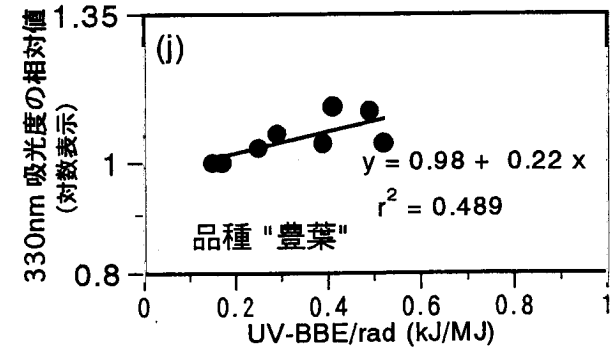
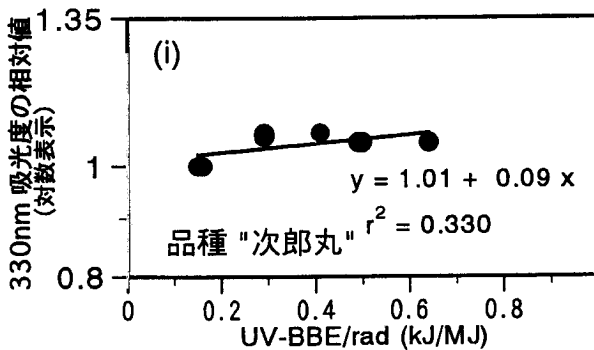
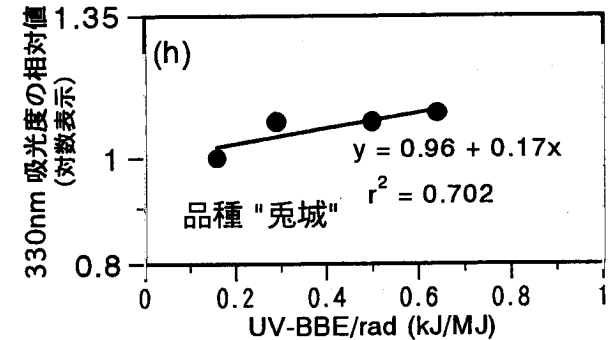
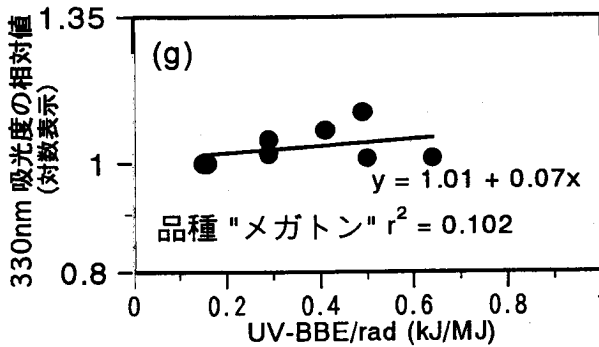
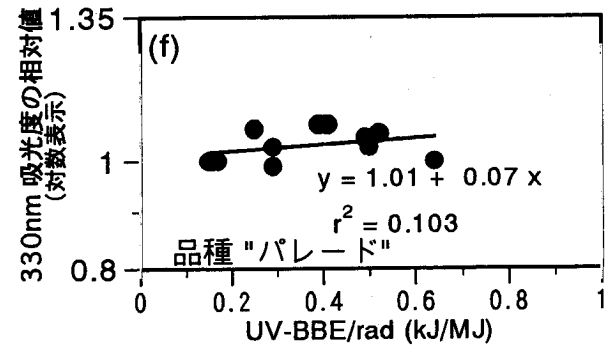
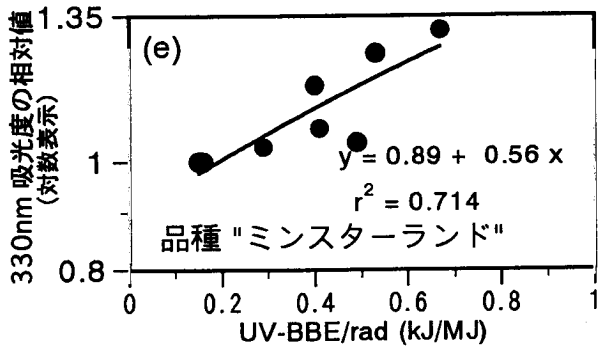
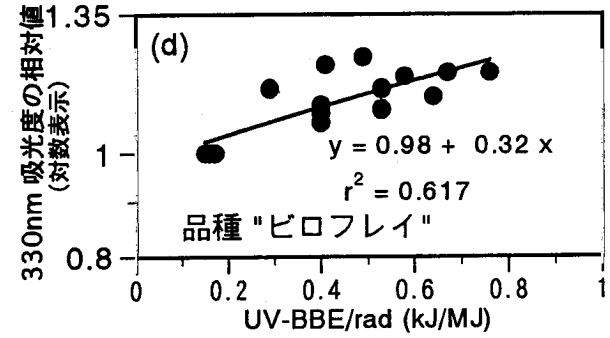
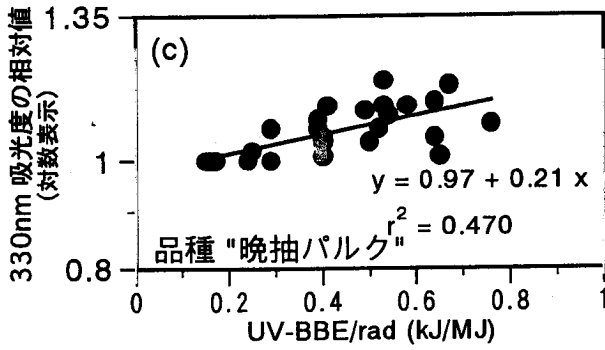
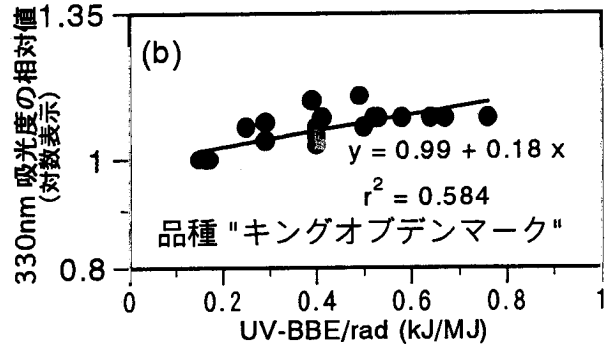
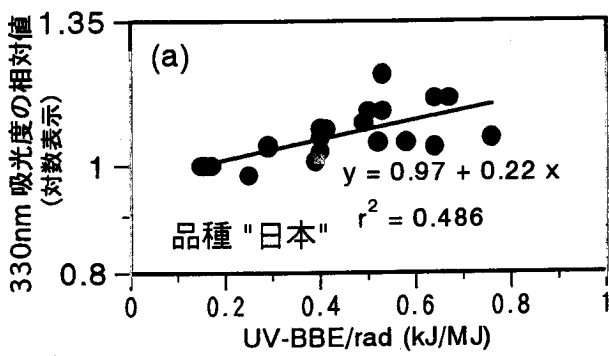


図6-3. UV-B増加がホウレンソウ葉身の紫外線吸光物質含量に及ぼす影響

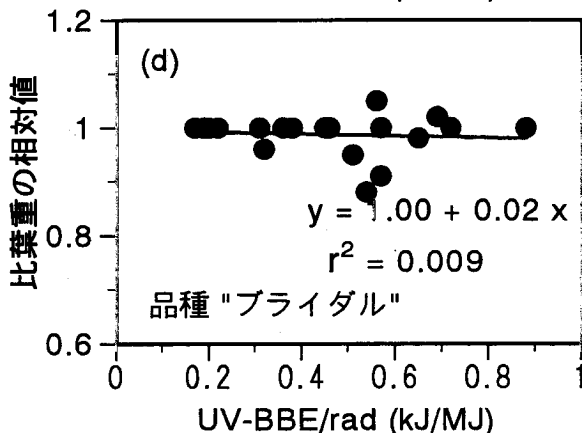
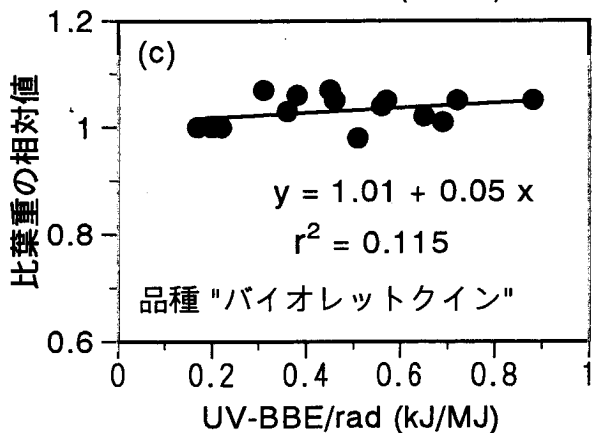
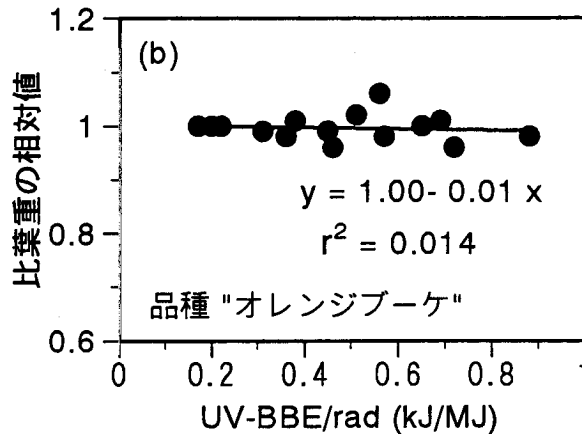
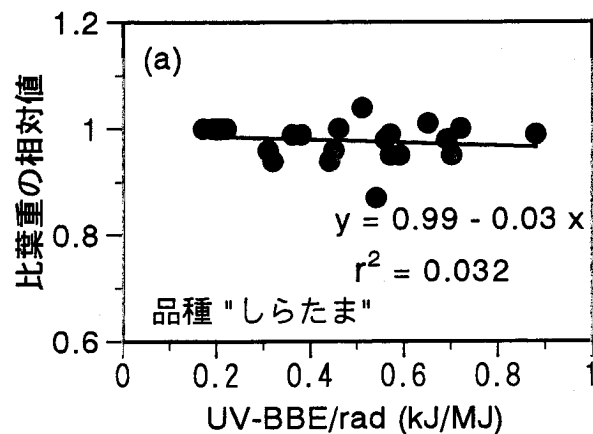


図7-1. UV-B増加がカリフラワーの比葉重に及ぼす影響

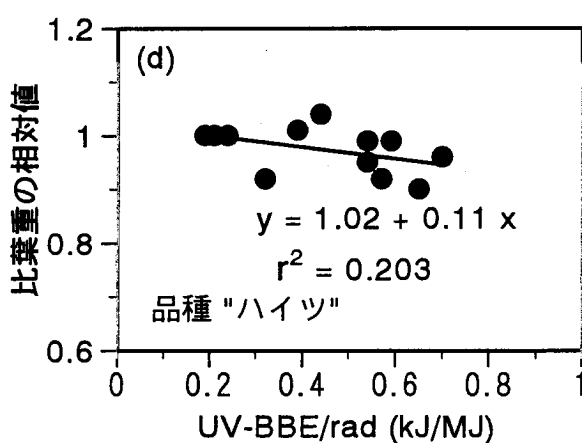
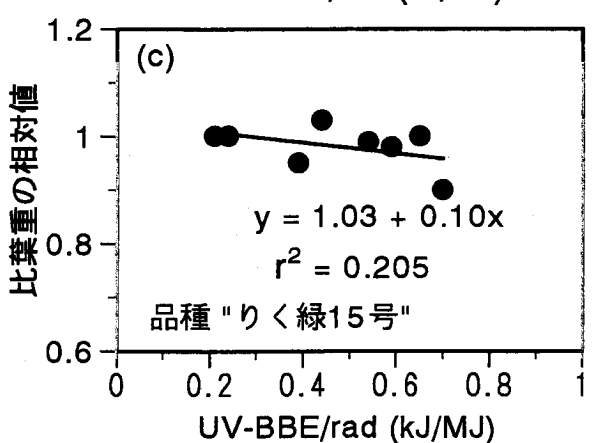
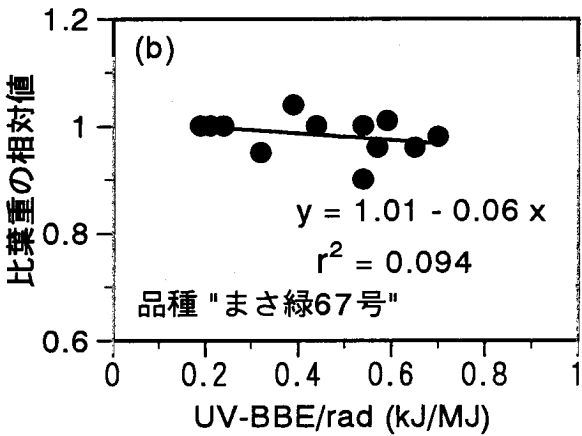
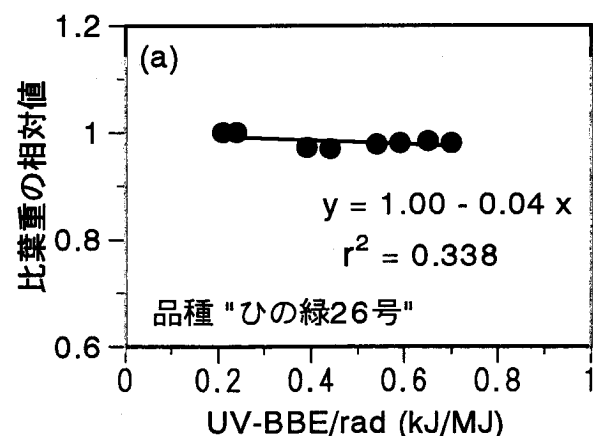


図7-2. UV-B増加がブロッコリの比葉重に及ぼす影響

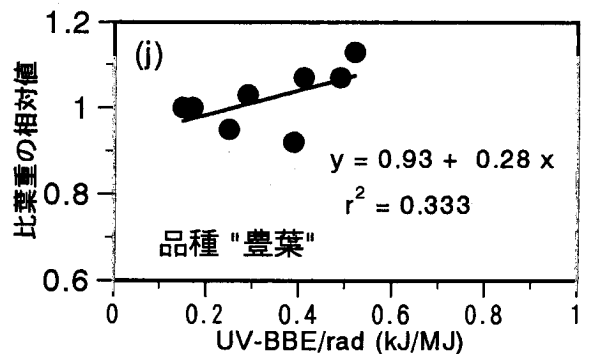
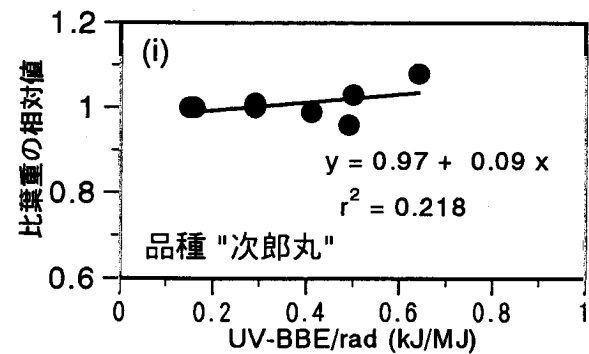
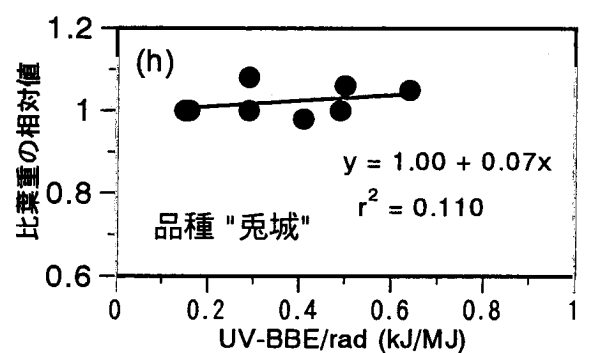
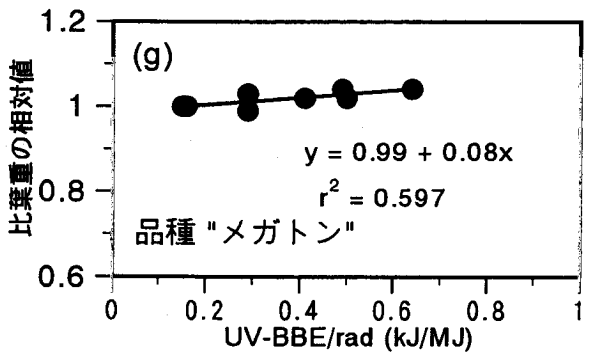
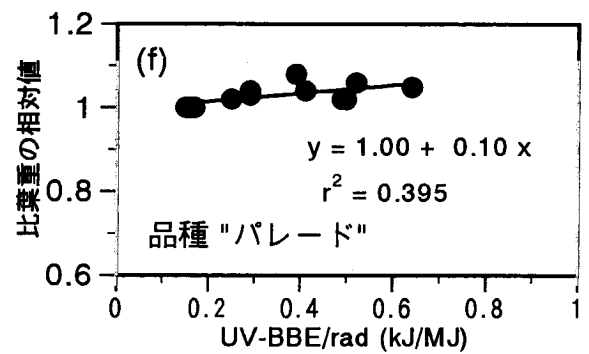
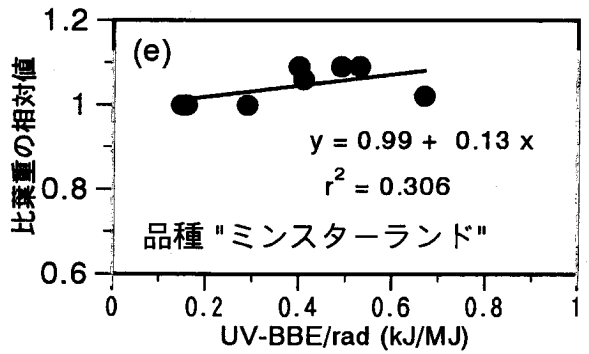
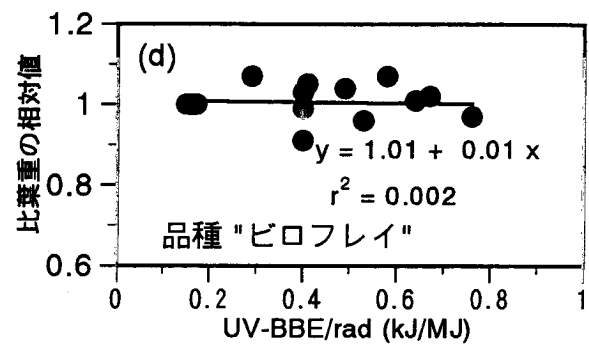
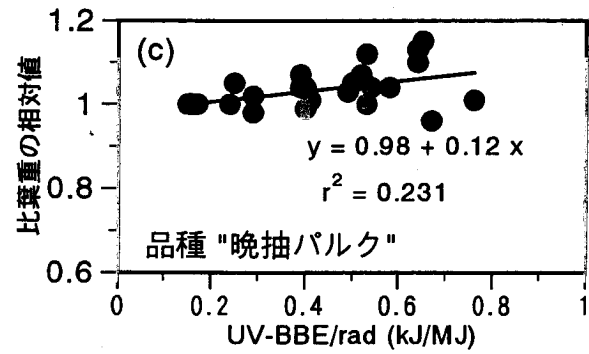
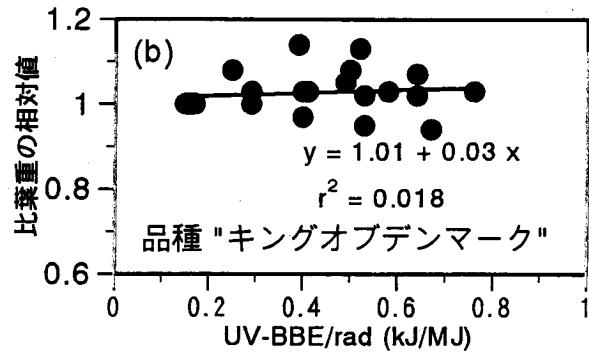
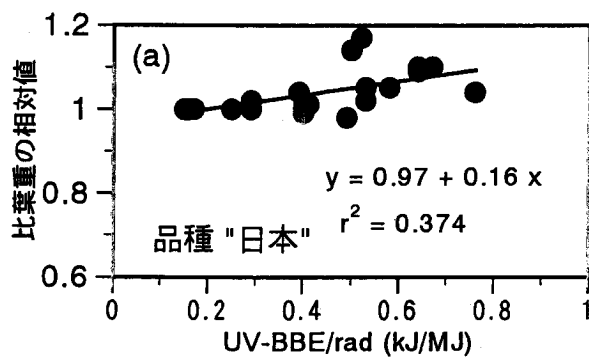


図7-3. UV-B増加がホウレンソウの比葉重に及ぼす影響

表4. ホウレンソウ2葉苗試験の供試材料、期間、日射量およびUV-B制御結果

| 試験番号 | 品種名 | 処理期間 | | 平均日積算日射量 (MJ/m ² /day) | 平均日積算PAR 注2) (MJ/m ² /day) | | 平均日積算UV-BBE 注1) (KJ/m ² /day) | 平均日積算照射UV-B量 注3) (KJ/m ² /day) |
|---------|-------------------|------------------------|---------|-----------------------------------|---------------------------------------|------|--|---|
| SIV-(1) | キングオブデンマーク 3反復 | 2002年 3/12~ 3/16 | 全天 注4) | 15.9 | 6.7 | | 2.1 | |
| | | | 試験区 注4) | 10.3 | 4.3 | 自然光区 | 1.47 (1.0) | --- |
| | | | | | | 照射区 | 4.95 (3.4) | 9.2 |
| SIV-(2) | ミンスターランド 3反復 | 2002年 3/17~ 3/25 | 全天 | 14.6 | 6.1 | | 1.98 | |
| | | | 試験区 | 9.4 | 4.0 | 自然光区 | 1.39 (1.0) | --- |
| | | | | | | 照射区 | 3.77 (2.7) | 6.6 |

注) 1: 1倍区の値を1とした相対値を () 内に付加して示す。

2: 日積算PAR: MSR-7000 (オプトリサーチ機) を用いて英弘精機(株)MS-42を校正し、

MS-42の測定値をPARに換算した値で示す。

3: 照射UV-B量: 英弘精機(株)MS-210Dでの測定値を英弘精機(株)MS-210Wの測定値に換算した値で示す。

4: 全天は周囲に障害物のない場所での測定値、処理区は照射装置下での測定値を表す。

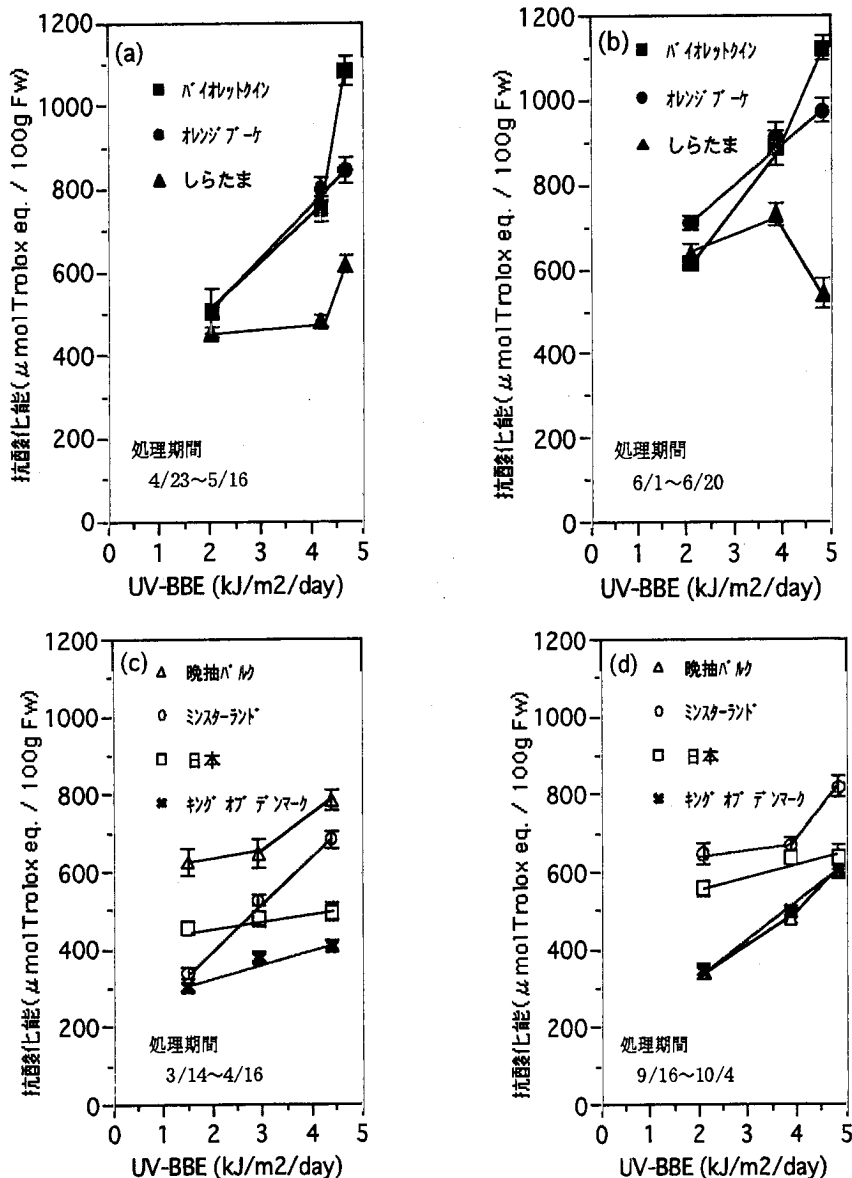


図8. UV-B増加が葉内の抗酸化能に及ぼす影響

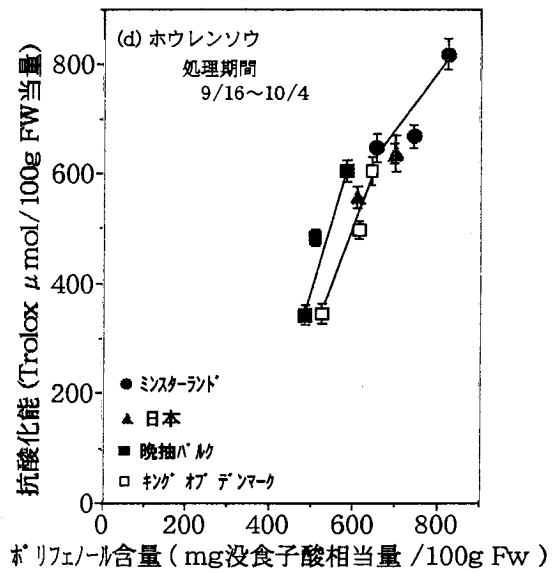
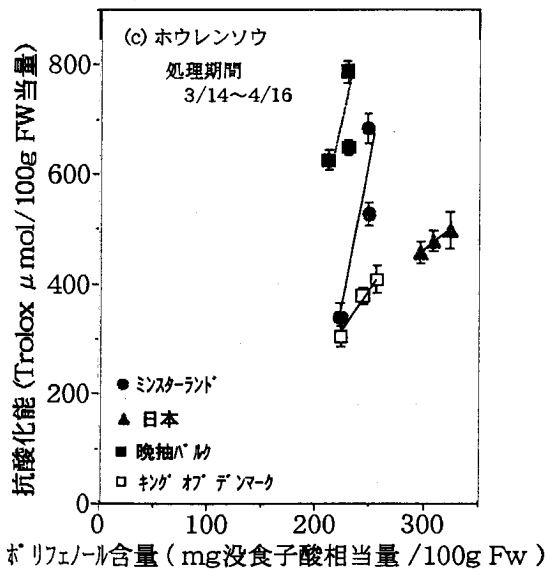
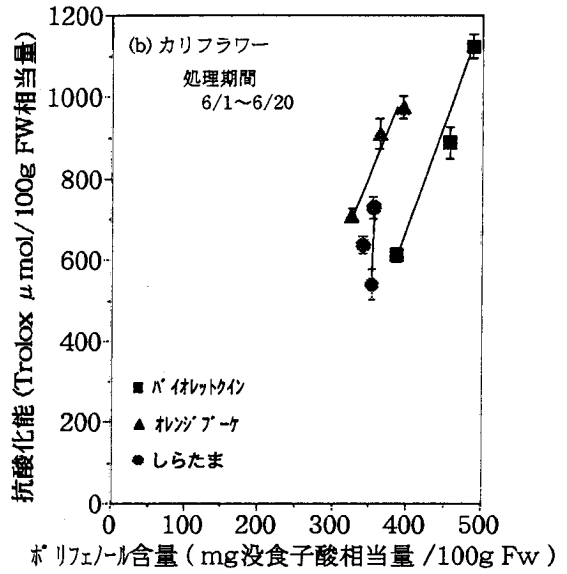
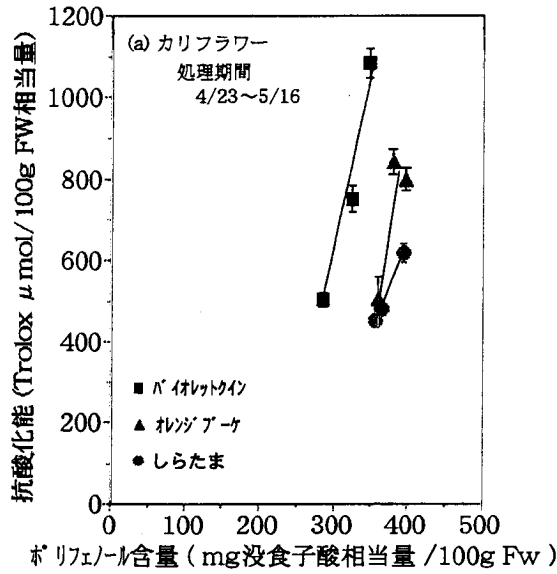


図9 UV-B増加による葉内ポリフェノール含量増加と抗酸化能増加の関係

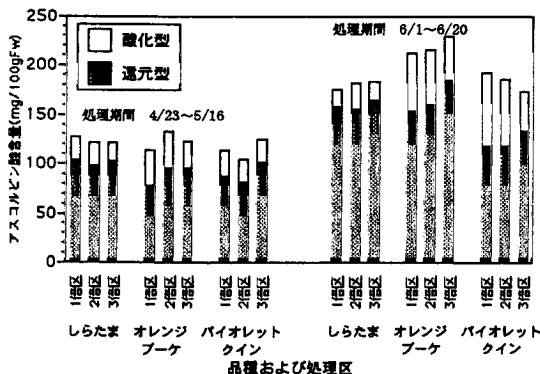


図10-1 UV-B増加がカリフラワー葉身のアスコルビン酸含量に及ぼす影響

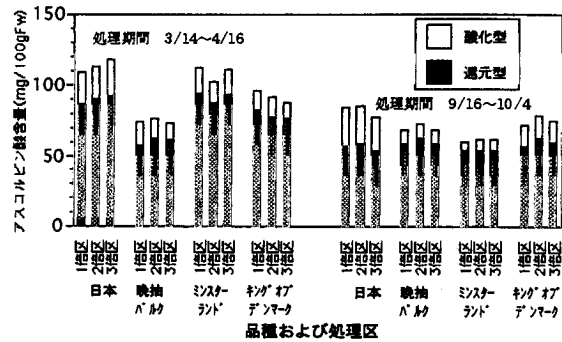


図10-2 UV-B増加がホウレンソウ葉身のアスコルビン酸含量に及ぼす影響

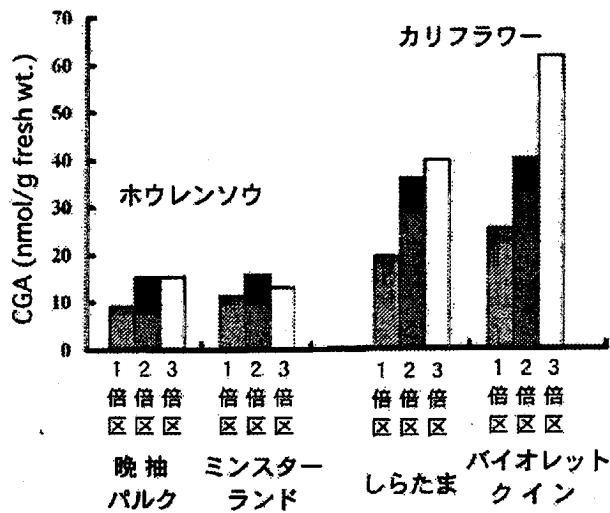


図 11. UV-B 増加が葉内クロロゲン酸含量に及ぼす影響

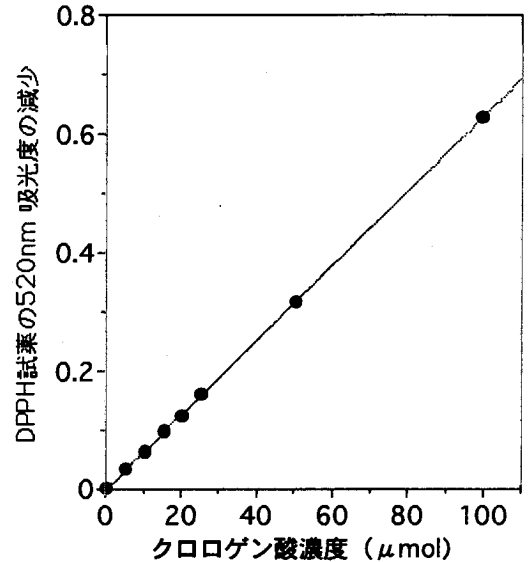


図 12. クロロゲン酸含量と DPPH 消去能との関係

表5-1 ホウレンソウの異なる葉身間での抗酸化物質の移送

| 品種：キングオブデンマーク | 処理期間：5日間 | |
|------------------------|--|--------------|
| | 自然光区 | 照射区* |
| 処理及びサンプリングした個葉の葉位 | 生体重あたりTrolox相当 ($\mu\text{mol}/100\text{gFw}$) | |
| 両葉ともUV-Bに暴露した個体 | | |
| 4葉 (UV-Bに暴露) | 460 \pm 20 | 580 \pm 20 |
| 5葉 (UV-Bに暴露) | 480 \pm 20 | 590 \pm 20 |
| 第4葉をLフィルムで覆った個体 | | |
| 4葉 (UV-Bに非暴露) | 270 \pm 20 | 280 \pm 20 |
| 5葉 (UV-Bに暴露) | 400 \pm 20 | 510 \pm 20 |
| 第5葉をLフィルムで覆った個体 | | |
| 4葉 (UV-Bに暴露) | 380 \pm 20 | 550 \pm 20 |
| 5葉 (UV-Bに非暴露) | 220 \pm 20 | 280 \pm 10 |

注) 照射区のUV-BBEは自然光区の3.4倍

表5-2 ホウレンソウの異なる葉身間での抗酸化物質の移送

| 品種：ミンスターランド | 処理期間：9日間 | |
|------------------------|--|--------------|
| | 自然光区 | 照射区* |
| 処理及びサンプリングした個葉の葉位 | 生体重あたりTrolox相当 ($\mu\text{mol}/100\text{gFw}$) | |
| 両葉ともUV-Bに暴露した個体 | | |
| 5葉 (UV-Bに暴露) | 410 \pm 20 | 520 \pm 20 |
| 6葉 (UV-Bに暴露) | 380 \pm 30 | 490 \pm 20 |
| 第5葉をLフィルムで覆った個体 | | |
| 5葉 (UV-Bに非暴露) | 260 \pm 30 | 250 \pm 30 |
| 6葉 (UV-Bに暴露) | 410 \pm 20 | 460 \pm 20 |
| 第6葉をLフィルムで覆った個体 | | |
| 5葉 (UV-Bに暴露) | 380 \pm 20 | 540 \pm 20 |
| 6葉 (UV-Bに非暴露) | 240 \pm 20 | 280 \pm 20 |

注) 照射区のUV-BBEは自然光区の2.7