

B - 1 2 地球の温暖化が植物に及ぼす影響の解明に関する研究

(3) 植物に及ぼす複合影響に関する実験的研究

研究代表者 環境庁国立環境研究所 清水 英幸

環境庁国立環境研究所

生物圏環境部	環境植物研究室	清水英幸・戸部和夫・大政謙次
地球環境研究センター		藤沼康実
客員研究員	京都大学農学部	堀江 武・松井 勤

平成5～7年度合計予算額	8,441,000円
(平成7年度予算額)	2,936,000円)

[要旨]

二酸化炭素(CO₂)など地球温暖化ガスの濃度増加は、また、気温上昇、乾燥化、大気汚染ガス濃度の増加などの環境変動を引き起こす。本研究では、地球温暖化の植物影響を解析するために、農作物(ナス、ピーマン、トマト、ダイズ、ハクサイ、ハツカダイコン、トウモロコシ、ソルガム)を材料として、その生長に及ぼすCO₂濃度と乾燥化、及び、温度上昇と乾燥化の単独及び複合影響について実験的検討を行った。CO₂濃度(500または1000ppm)×相対湿度(37%または79%)の4条件区、また、温度(28℃または31℃)×相対湿度(37%または79%)の4条件区を設定し、人工光型の環境制御室の液耕培養システムで、5～10日間、生長実験を行った。ほとんどの農作物種の乾重生長、及び、葉面積生長は、CO₂濃度増加によって促進され、一方、温度上昇や乾燥化によって抑制されたが、植物種によってその影響程度は異なった。生長パラメータを調べると、CO₂濃度増加によって、相対生長率(RGR)や純同化率(NAR)は増加し、葉面積比(LAR)や比葉面積(SLA)は減少していた。温度上昇や乾燥化によって、RGRは減少したが、NARやLARへの影響は種によって異なった。CO₂濃度増加によるC₃植物の蒸散量への影響は明確ではなかったが、C₄植物のトウモロコシの蒸散量は顕著に減少し、水利用効率は向上した。温度上昇は若干、乾燥化は顕著に植物の蒸散量を増加させ、特に乾燥化は水利用効率を低下させた。CO₂濃度増加、気温上昇、乾燥化は相加的に影響している場合が多かったが、複合影響が存在することも示唆された。また、生殖生長に及ぼす気温上昇の影響検討では、開花期の高温処理によって穎花の受精率が低下し、品種によってその影響程度は異なることが判明した。この結果をイネの生育収量に関するシミュレーションモデル(SIMRIW)に当てはめ、3種の大循環モデル(GCM)の気候変動シナリオのもとで、2倍のCO₂濃度時の日本におけるイネの収量に関する予測を行った。

[キーワード] 温度上昇、乾燥化、生長、地球温暖化、二酸化炭素

1. 序

産業革命以後の急激な工業の発達・人間活動の拡大は、地域的な汚染ばかりでなく、今や地球環境変動として懸念されるに至っている。植物は動物と異なり、自らの生育場所から移動できな

いため、急激な環境変動に対して影響を受け易いと考えられており、「地球温暖化」などの植物・植生に及ぼす影響の予測的研究²⁴⁾が試みられている。二酸化炭素(CO₂)など地球温暖化ガスの濃度増加は、それ自体が植物の生育に多大な影響を及ぼすが、また、植物の生育にとって重要な環境である気温の上昇や降水量の変化を引き起こし、地域によっては乾燥化の促進も予想されている。さらに都市域における対流圏オゾン(O₃)などの大気汚染ガス濃度の増加²²⁾も懸念されている。「地球温暖化」の植物・植生影響の定量的予測には、これら複数の環境要因の単独及び複合影響を解析、評価することが不可欠であり、実験的な基礎データの集積が必要とされている。

植物は環境要因に対して、種によって異なる反応を示すことが知られており、これまで、個々の環境要因に対する種々の植物の反応とそのメカニズムについて、多くの研究^{2, 12, 14)}がなされている。最近では、地球環境問題への関心の高まりから、温暖化に関連する環境変動の植物の生育等に及ぼす影響に関する報告^{7, 16, 17, 21, 23)}も集積されてきており、環境要因の複合影響を含めた研究^{1, 3, 6, 25)}の推進が求められている。

2. 研究目的

本研究では、「地球温暖化」の植物・植生影響の定量的な予測モデル構築に資する、基礎的な実験データを集積することを目的として、主要な温暖化ガスであり、光合成の基質でもあるCO₂ガスの濃度増加や温度上昇と乾燥化が、単独及び複合で、種々の陸上植物の生長や水利用効率にどのような影響を及ぼすのか、植物による種間差はどの程度あるのかについて、植物実験用環境調節装置を用いて実験的に解析し、評価することを試みた。また、複数の環境要因が組み合わさったときに単独の場合と異なる複合影響が認められるかについても検討した。さらに、植物の生殖生長に及ぼす地球温暖化の影響を明らかにするために、品種の異なるイネの受精率の高温感受性について検討し、将来予想される気候変動のもとでの収量予測を試みた。

3. 研究方法

実験材料として、ナス、ピーマン、トマト、ダイズ、ハクサイ、ハツカダイコン、トウモロコシ、ソルガムなどの農作物苗を用いた。気温：25℃、相対湿度：70%に制御された自然光型環境制御温室で、これらの種子を園芸用培土(クレハ園芸培土；呉羽化学)に播種した。発芽後4～12日目、適当な大きさに生育した幼苗を、人工礫(hidroボール中粒4～8mm；オランダ製)を詰めた通気型ポットに移植し、ホーグランドのNo.2微量元素と142 μMのFe(III)EDTAを含んだ、ハイポネックス1000培液を満たしたプラスチック製液耕培養容器で、通気しながら同温室で栽培した。

第1本葉展開期の植物(発芽後7～16日目)を、4台の人工光型環境制御室(KG-50HLA-D；小糸工業)に移し、生長実験を行った(図1)。上述と同様な成分を含む培養液を用いた液耕培養システムを環境制御室内に設置し、ポットごと植物を移した。

光照射は、各室14本の96W昼白色蛍光灯(ツイン1FPR96EX-N/A；松下)と、4個の100W白熱球(ソフトシリカ；日立)を用いて行い、大型ジャッキに乗せた液耕装置を上下させることにより、植物上の照度を調節した。実験の最初と最後に、光量子センサーの付いた測光メータ(LI-189；ライカー)を用いて照度測定を行った。温湿度計測は、乾湿球式温湿度検出器(E-765；横川ウェザック)を用い、PID制御のデジタルプログラム調節計(DCP216；山武ハネウエル)を用いたシステム

で制御した。CO₂濃度は、非分散型赤外線ガス分析計(ZRH1DZY1-0AZY; 富士電気)を用いて計測し、CO₂ガスコンテナからのガスの供給をマスフローコントローラで制御する自動制御システムにより、一定濃度に制御した。

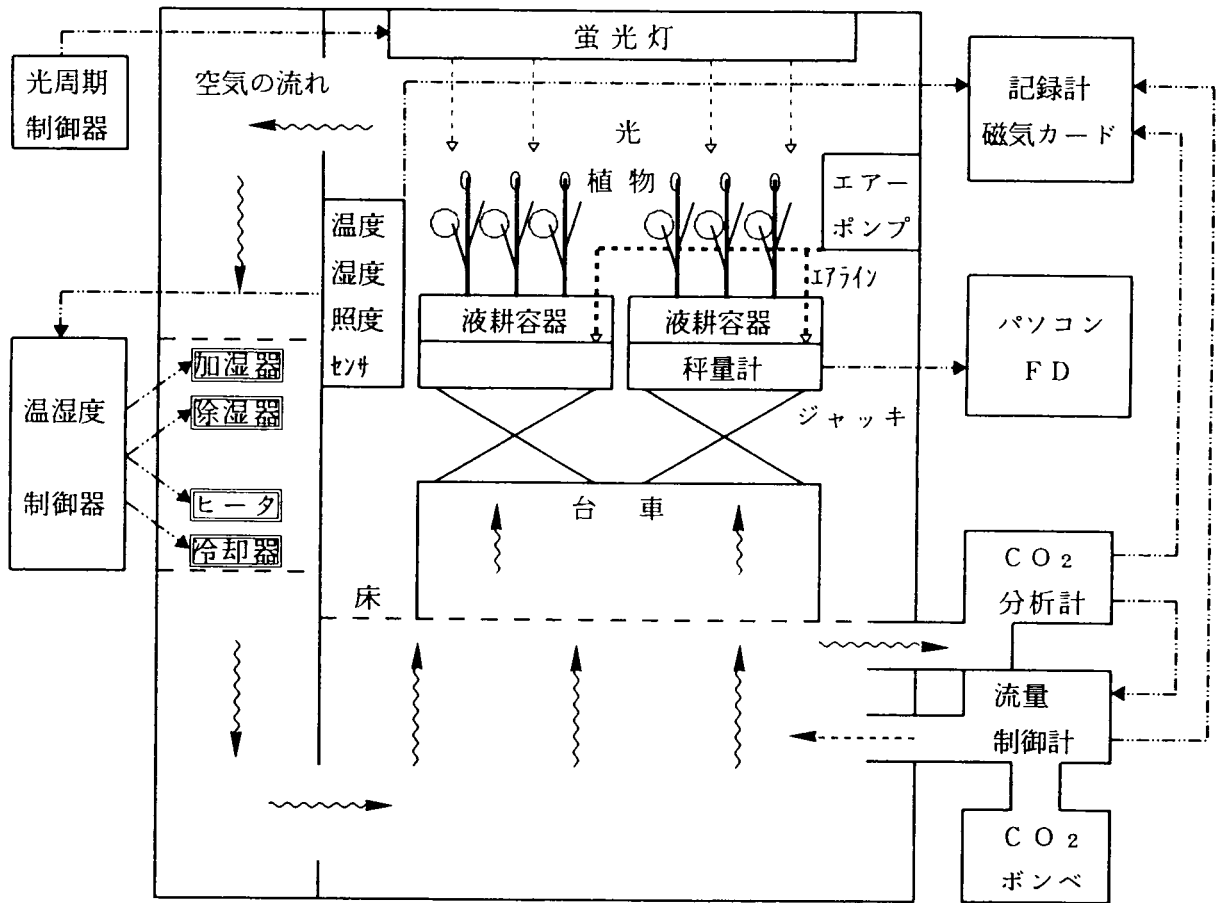


図 1 本研究で用いた液耕培養システムと環境制御室の概要。

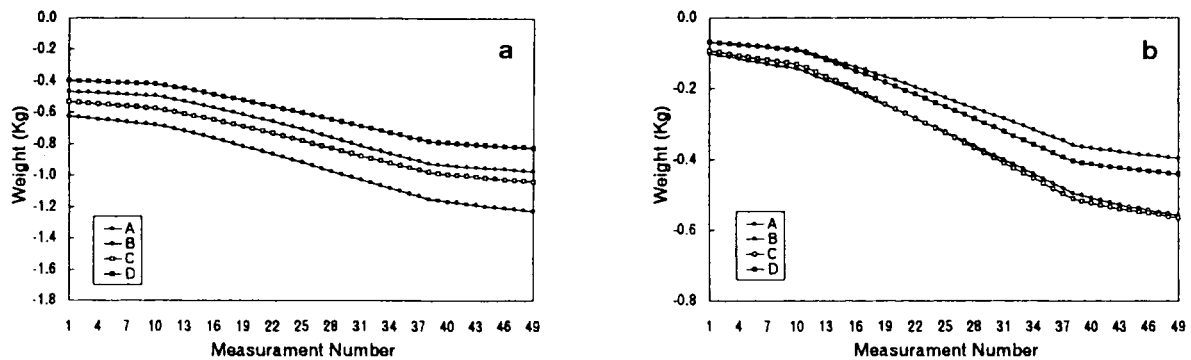


図 2 蒸散量(重量法)の連続計測の出力例。1日の液耕培養装置の重量減少を表示。a: ナス, b: トウモロコシ。A: 1000ppmCO₂・37%RH処理区, B: 1000ppmCO₂・79%RH処理区, C: 500ppmCO₂・37%RH処理区, D: 500ppmCO₂・79%RH処理区。縦軸: 重量(設定時: 0kg), 横軸: 時刻(数値1: 午前0時, 以下30分毎, 数値49: 次の日の午前0時)。

表 1 生長解析法で用いる生長パラメータ

パラメータ	記号	定義 ^{a)}	計算式 ^{b)}	単位
相対生長率	RGR	$\frac{1}{W} \cdot \frac{dW}{dt}$	$\frac{\ln W_2 - \ln W_1}{t_2 - t_1}$	day ⁻¹
純同化率	NAR	$\frac{1}{F} \cdot \frac{dW}{dt}$	$\frac{(W_2 - W_1)(\ln F_2 - \ln F_1)}{(t_2 - t_1)(F_2 - F_1)}$	g·m ⁻² ·day ⁻¹
葉面積比	LAR	$\frac{F}{W}$	$\frac{(F_2 - F_1)(\ln W_2 - \ln W_1)}{(\ln F_2 - \ln F_1)(W_2 - W_1)}$	m ² ·g ⁻¹
葉重比	LWR	$\frac{L}{W}$	$\frac{(L_2 - L_1)(\ln W_2 - \ln W_1)}{(\ln L_2 - \ln L_1)(W_2 - W_1)}$	—
比葉面積	SLA	$\frac{F}{L}$	$\frac{(F_2 - F_1)(\ln L_2 - \ln L_1)}{(\ln F_2 - \ln F_1)(L_2 - L_1)}$	m ² ·g ⁻¹

^{a)} W: 個体乾重, F: 葉面積, L: 葉乾重, t: 時間.

^{b)} 添字の₁と₂は収穫の順番を示す.

蒸散量は、液耕培養容器の下に、電子式上皿天秤(KAI5; メトラー)を設置し、重量を定期的に自動計測した。パソコン(PC9801Vm; NEC)のフロッピーディスクにデータを自動記録し、重量減少から植物個体群の蒸散量を算出した(図2)。無植物時の重量変化を差し引き、単位葉面積当たりの蒸散速度を算出し、生長影響と比較しながら、植物の水収支について検討した。

実験終了後、植物を葉、莖、根の各器官に分け、葉面積を自動面積計(AAM-7; 林電工)で測定し、各器官を80℃で3日以上乾燥した後、乾重を測定した。これらのデータから、生長解析法^{1,8)}により、以下の式(表1)を用い、相対生長率(RGR)、純同化率(NAR)、葉面積比(LAR)、葉重比(LWR)、比葉面積(SLA)などの生長パラメータを算出し、それらに対する影響を比較した。

(1) CO₂濃度増加と乾燥化の複合影響

植物材料として、ナス、ピーマン、トマト、ハクサイ、ハツカダイコン、トウモロコシの6種を用いた。4台の環境制御室の環境条件としては、気温: 25℃一定、明期/暗期: 14時間/10時間、照度: 500 μEs·m⁻²·sec⁻¹に制御した。本実験では、CO₂濃度: 500または1000ppm、相対湿度(RH): 37%(飽差: 15 mmHg)または79%(飽差: 5mmHg)に制御して、CO₂濃度と湿度の組み合わせで、4条件区を設定し、5、7あるいは10日間、生長実験を行った。

(2) 温度上昇と乾燥化の複合影響

植物材料として、ナス、ピーマン、ダイズ、ハクサイ、ハツカダイコン、トウモロコシ、ソルガムの7種を用いた。4台の環境制御室の環境条件としては、CO₂濃度: 500ppm一定、明期/暗期: 14時間/10時間、照度: 500 μEs·m⁻²·sec⁻¹に制御した。本実験では、気温: 28℃または31℃、相対湿度(RH): 37%または79%に制御して、温度と湿度の組み合わせで、4条件区を設定し、7日間、生長実験を行った。本実験においては、実験終了日に、スーパーポロメータ(LI-1600; ライカー)を用いて、各個体の成熟葉数枚を選び、葉の中央部の蒸散速度、拡散抵抗、葉面温度などを計測し、重量法で計測した蒸散速度⁵⁾と比較した。

(3) イネの受精に及ぼす温度上昇の影響と収量予測

2品種のイネ(日本型水稻:アキヒカリ及びコシヒカリ)を実験材料として用いた。苗をワグネル

ポット(1/5000 a)に移植し、元肥として、窒素:0.2g、リン:0.5g、カリウム:0.5gを、また穂肥として、窒素:0.4gを各ポットに施用した。湛水条件で開花期まで生育させた植物を、気温:26°C、相対湿度:70%の自然光型環境制御室に搬入し、1日に6時間(10:00-16:00)の高温処理(36.5°C、38.0°C、39.5°C)を8日間行った。処理開始日~開始後2日目に穂した穎花の受精率を調査し、また柱頭に付着した花粉数やその発芽率を調査した。この結果をイネの生育収量に関するシミュレーションモデル(SIMRIW)に当てはめ、GFDL、GISS、UKMOの3種類の大循環モデル(GCM)の気候変動シナリオを用いて、2倍のCO₂濃度時の日本におけるイネの収量予測⁶⁾を行った。

4. 実験結果と考察

(1) CO₂濃度増加と乾燥化の複合影響

実験に用いた植物6種の個体乾重量の初期値及び処理後の値を図3に示す。500ppmCO₂処理と比較し、1000ppmCO₂処理で、今回実験に供した全植物種の生長は促進された。一方、79%RH処理

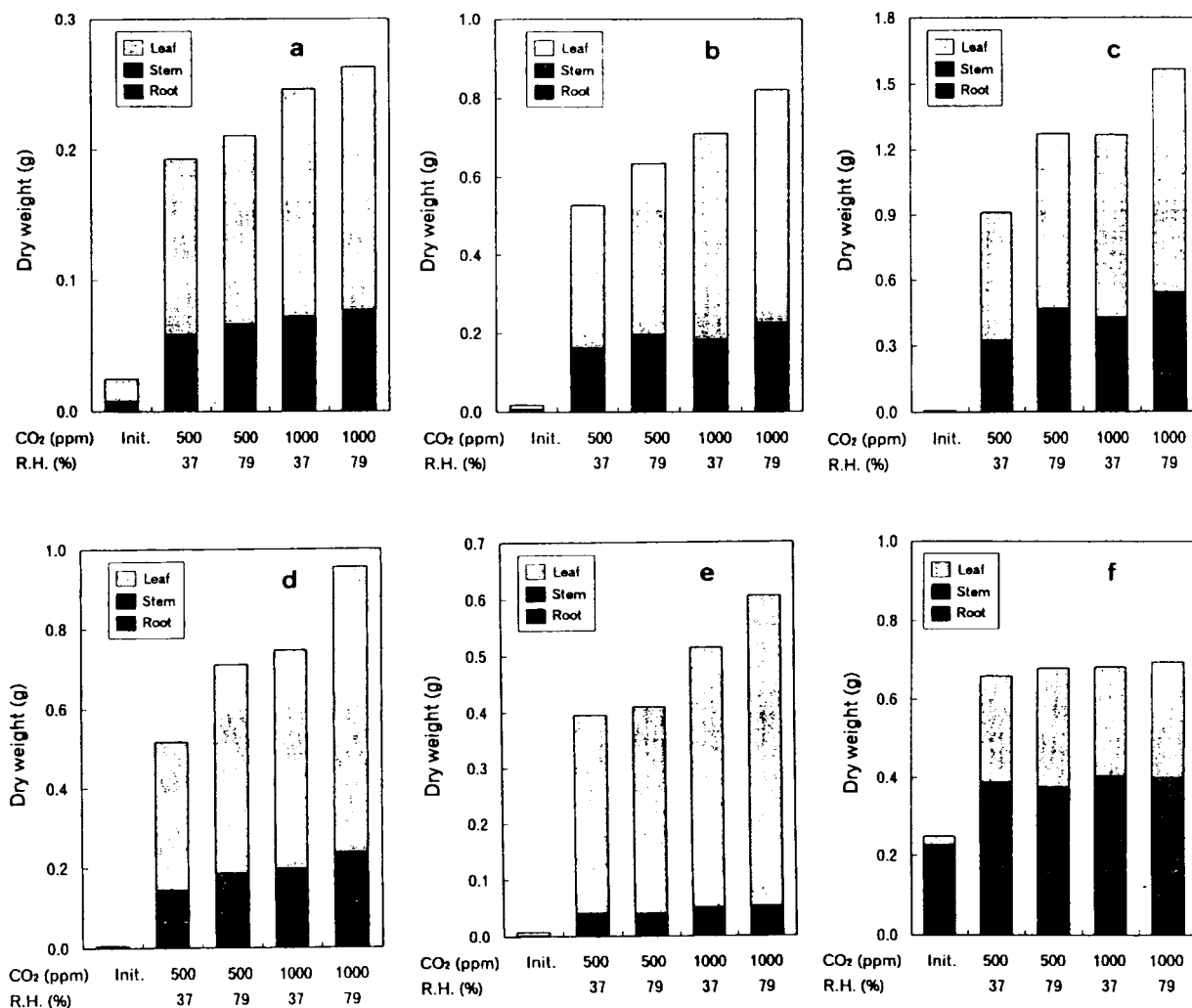


図3 CO₂濃度増加と乾燥化が植物の個体乾重生長に及ぼす影響. a: ハツカダイコン(5日間処理), b: ピーマン(10日間処理), c: トマト(10日間処理), d: ナス(10日間処理), e: ハクサイ(7日間処理), f: トウモロコシ(5日間処理).

と比較し、37%RH処理では全植物種の生長は抑制されたが、CO₂濃度と相対湿度の影響の程度は植物種によって異なっていた。CO₂濃度増加による個体乾重生長の促進は、C₃植物のピーマン、ハクサイ、ナス、トマト、ハツカダイコンでは顕著に認められたが、C₄植物のトウモロコシではごく僅かであった。乾燥化（相対湿度低下）による栄養生長の抑制は、ナス、トマト、ハツカダイコンでは顕著であったが、ピーマン、ハクサイ、トウモロコシでは軽微であった。多くの植物では、CO₂濃度と相対湿度の影響は相加的であった。但し、ハクサイでは、500ppmCO₂処理時の乾燥化による生長抑制と比較し、1000ppmCO₂処理時の乾燥化による生長抑制はより著しかった。植物種によっては、複合的な影響の可能性が示唆された。10日間処理のナス場合、500ppmCO₂・79%RH区の植物を対照とすると、個体乾重は、1000ppmCO₂処理で34%増加し、37%RH処理では27%減少した。1000ppmCO₂・37%RH区の植物の生長は、対照とほとんど変わらなかった。一方、5日間処理のトウモロコシの個体乾重は、対照と比較して、1000ppmCO₂処理で2%増加し、37%RH処理で3%減少した。トウモロコシでも、1000ppmCO₂・37%RH区の植物の生長は、対照と変わらなかった。

多くの植物では、葉面積生長も、CO₂濃度増加によって促進され、乾燥化によって抑制された(図4)。500ppmCO₂・79%RH区の植物を対照とすると、CO₂濃度増加による葉面積生長の促進は、ナスでは11%であり、トマト、ハクサイでも比較的明確だったが、トウモロコシでは認められなかった。一方、乾燥化による葉面積生長の抑制は、トウモロコシを含め、どの種でも明確に認められた。ナスの場合、29%減少し、トウモロコシでも9%減少した。CO₂濃度と相対湿度の影響はやはり多くの種で相加的であったが、ハクサイでは、500ppmCO₂処理時の影響に比べ、1000ppmCO₂処理時では、乾燥化による葉面積生長の抑制は著しかった。

生長解析法(表1)によって、生長パラメータを算出して比較した(図5)。CO₂濃度増加によって、全ての植物のRGRが増加した。また、NARはRGR以上に顕著に増加していたが、一方、LARは明確に減少しており、それはSLAの減少に因っていた。長期間のCO₂濃度増加によるSLAの減少は、他の植物でも報告⁴⁾されている。LWRはCO₂処理によって増加する傾向にあったが、明確ではなかった。乾燥化によって、全ての植物のRGRは減少した。しかし、ナスやトマトではNARの減少

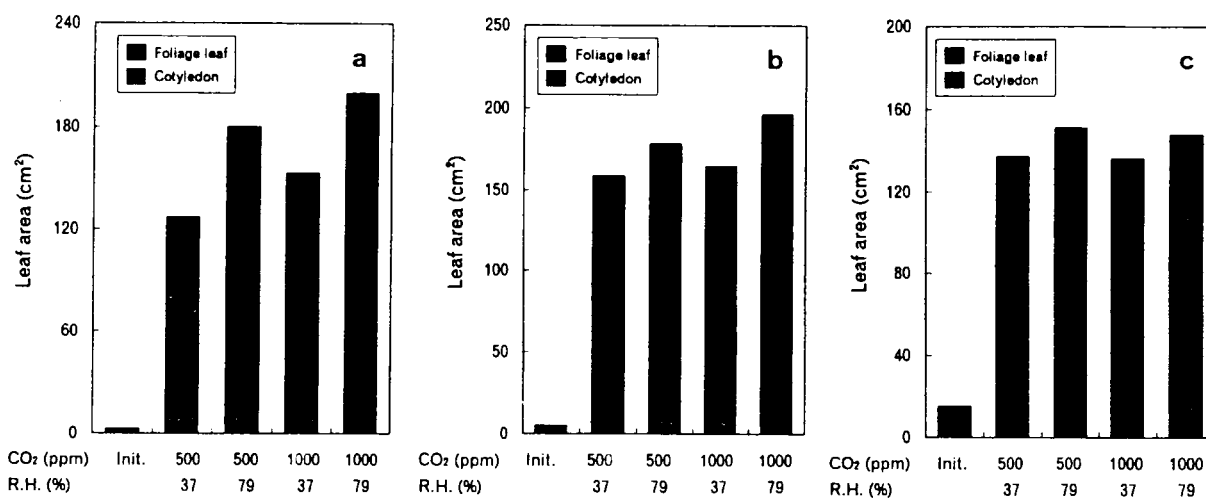


図4 CO₂濃度増加と乾燥化が植物の葉面積生長に及ぼす影響。a: ナス(10日間処理), b: ハクサイ(7日間処理), c: トウモロコシ(5日間処理)。

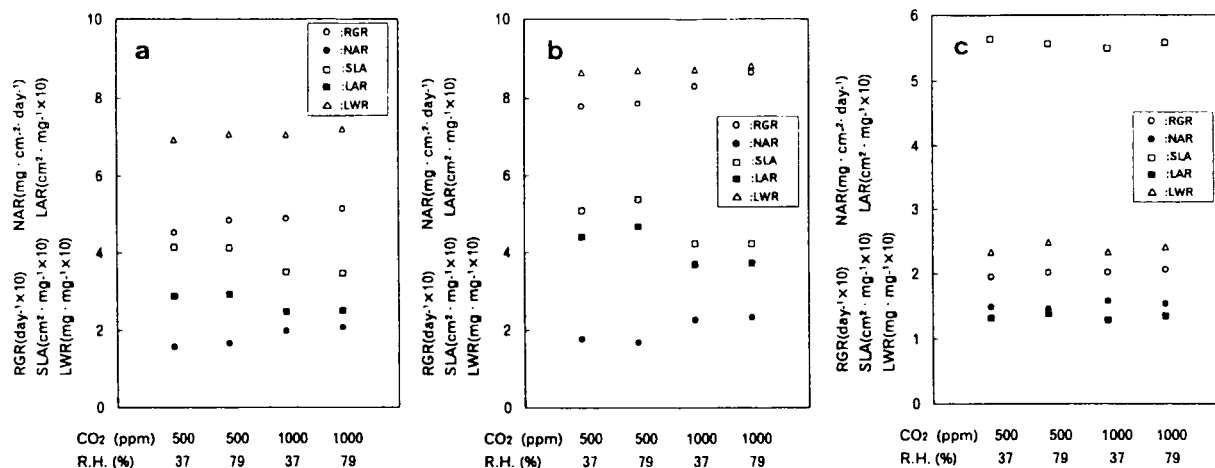


図 5 CO₂濃度増加と乾燥化が植物の生長パラメータに及ぼす影響. a: ナス(10日間処理), b: ハクサイ(7日間処理), c: トウモロコシ(5日間処理).

が認められたが、他の植物では明確な影響は認められなかった。LARやSLAはハクサイやハツカダイコンでは多少減少していたが、他の植物では明確ではなかった。LWRには明確な変化は認められなかった。500ppmCO₂・79%RH区の植物を対照とすると、例えば、ナスのRGR及びNARは、1000ppmCO₂処理で各々6%、24%の増加、37%RH処理で各々7%、5%の減少を示した。一方、LARは、1000ppmCO₂処理で15%減少し、一方、37%RH処理では変化しなかった。また、トウモロコシのRGRは、1000ppmCO₂処理でも2%しか増加せず、37%RH処理では3%減少しただけであった。NARも、1000ppmCO₂処理で5%、37%RH処理でも2%増加しただけであり、LARは、1000ppmCO₂処理で5%、37%RH処理で3%減少したにすぎなかった。

CO₂濃度の生長促進効果も乾燥化の生長抑制効果も、C₃植物では顕著であったが、C₄植物のトウモロコシではあまり明確でなかった。その他のC₄植物でも同様であるかについては、さらに知見を充実させる⁷⁾必要がある。なお、本実験の範囲においては、植物の生長に及ぼすCO₂濃度と相対湿度の影響は、若干の例外を除き、ほとんど相加的であった。

重量減少から求めた植物葉面積当たりの蒸散量を比較すると、CO₂濃度増加の影響は、種によって異なった(図6)。ハクサイとハツカダイコンでは、CO₂濃度増加によって蒸散量は若干増加したが、他の植物では、変わらないか、むしろ減少した。特に、トウモロコシとピーマンでは顕著な減少が認められた。一方、乾燥化は全ての植物種に対してその蒸散を促進した。CO₂濃度と相対湿度は相加的な影響を示した。500ppmCO₂・79%RH区の植物を対照とすると、10日間処理のナス場合、蒸散量は、1000ppmCO₂処理で変化はなかったが、37%RH処理では28%増加した。一方、5日間処理のトウモロコシの蒸散量は、対照と比較して、1000ppmCO₂処理で34%減少し、37%RH処理で13%増加した。個体乾重量、葉面積、蒸散量などから植物の水利用効率について計算すると、CO₂濃度増加によって、ほとんどの植物の水利用効率は向上しており、特にC₄植物であるトウモロコシでは顕著⁹⁾であった。一方、乾燥化によって、植物の水利用効率は低下したが、C₄植物のトウモロコシと比較すると、C₃植物の方が影響は顕著に認められた。

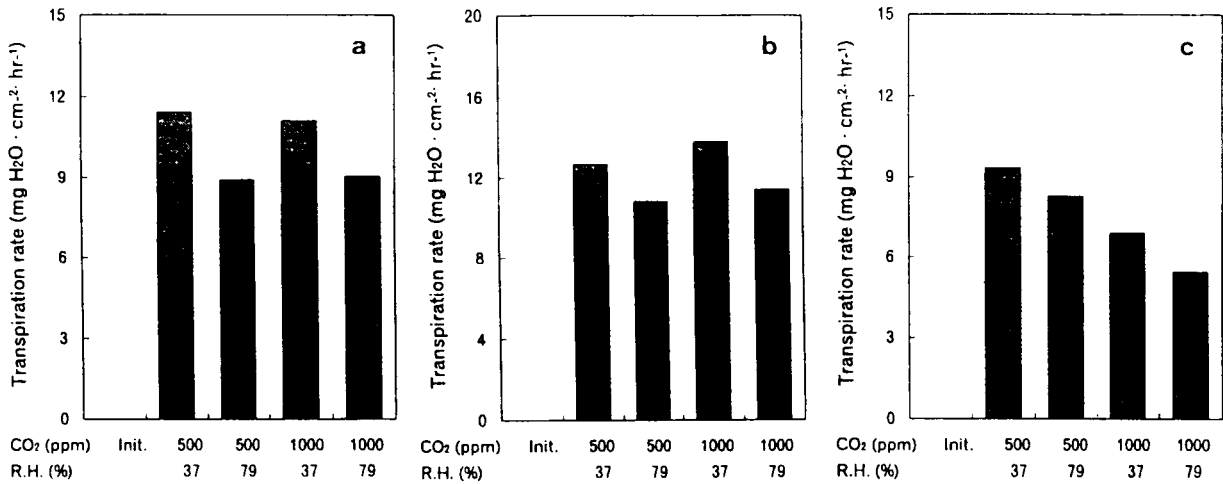


図 6 CO₂濃度増加と乾燥化が植物の蒸散量に及ぼす影響. 重量法にて測定(図2 参照). a: ナス(10日間処理), b: ハクサイ(7日間処理), c: トウモロコシ(5日間処理).

(2) 温度上昇と乾燥化の複合影響

本実験に用いた植物7種の個体乾重量の初期値及び処理後の値を図7に示す。多くの植物で、28℃処理と比較し、31℃では生長抑制が起こっていた。一方、本実験の温度範囲では、79%RH処理と比較し、37%RH処理で、生長が抑制された種もあったが、明確な影響が認められない種もあり、また、温度と相対湿度の影響の程度は植物種によって異なっていた。温度上昇による個体乾重生長の抑制は、ピーマン、ハクサイ、ハツカダイコン、ナス、ソルガムでは顕著に認められたが、ダイズやトウモロコシでは認められなかった。乾燥化(相対湿度低下)による乾重生長の抑制は、ナス、ハツカダイコン、トウモロコシでは顕著であったが、その他の植物では影響が明確でなかった。多くの植物では、温度と相対湿度の影響は相加的な範囲であったが、ハクサイやソルガムでは、多少複合的な影響が認められ、植物種によっては、複合影響を考慮する必要があることが示唆された。7日間処理のソルガムの場合、28℃・79%RH区の植物を対照とすると、個体乾重は、31℃処理で25%減少したが、37%RH処理では影響が認められなかった。31℃・37%RH区の植物の生長は、対照と比べ、14%の減少にとどまった。一方、トウモロコシの個体乾重は、対照と比べ、31℃処理で3%減少しただけであったが、37%RH処理では16%減少した。また、31℃・37%RH区では、対照より13%減少していた。

多くの植物では、葉面積生長が、温度上昇、及び、乾燥化によって抑制された(図8)。28℃・79%RH区の植物を対照とすると、温度上昇による葉面積生長の抑制は、ハツカダイコンで48%もあり、ハクサイ、ピーマン、ナス、ソルガムでも顕著であった。しかし、トウモロコシでは影響は認められず、ダイズでは逆に温度上昇によって、葉面積は13%増加した。一方、乾燥化によって、葉面積生長は、ナスで26%抑制されており、ソルガムやピーマンでも顕著に抑制されていたが、ハクサイ、ハツカダイコン、トウモロコシでは抑制されていなかった。温度と相対湿度の影響はナスやソルガム以外のほとんどの種で相加的であったが、25℃での実験(前述)と比べると、乾燥化の影響は明確ではない。温度と相対湿度の影響⁸⁾はさらに検討する必要があるだろう。なお、ソルガムでは、28℃処理時に比べ、31℃処理時では、乾燥化によって、むしろ葉面積生長は促進

されており、相殺的な複合影響が認められた。

生長解析法(表1)によって、生長パラメータを比較した(図9)。温度上昇によって、多くの植物のRGRが減少した。しかし、NARへの影響は明確ではなく、温度上昇によってソルガムのNARは

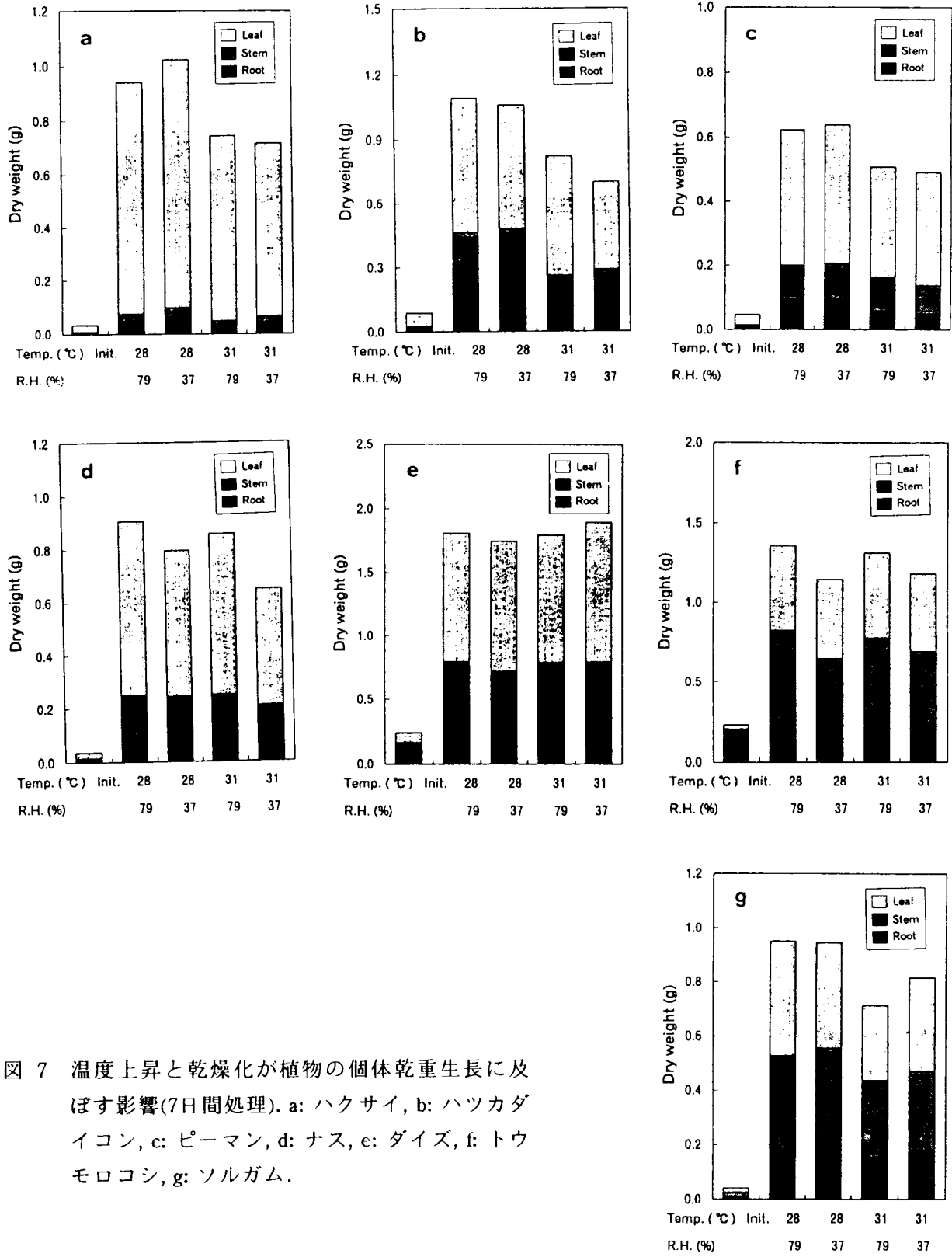


図 7 温度上昇と乾燥化が植物の個体乾重生長に及ぼす影響(7日間処理). a: ハクサイ, b: ハツカダイコン, c: ピーマン, d: ナス, e: ダイズ, f: トウモロコシ, g: ソルガム.

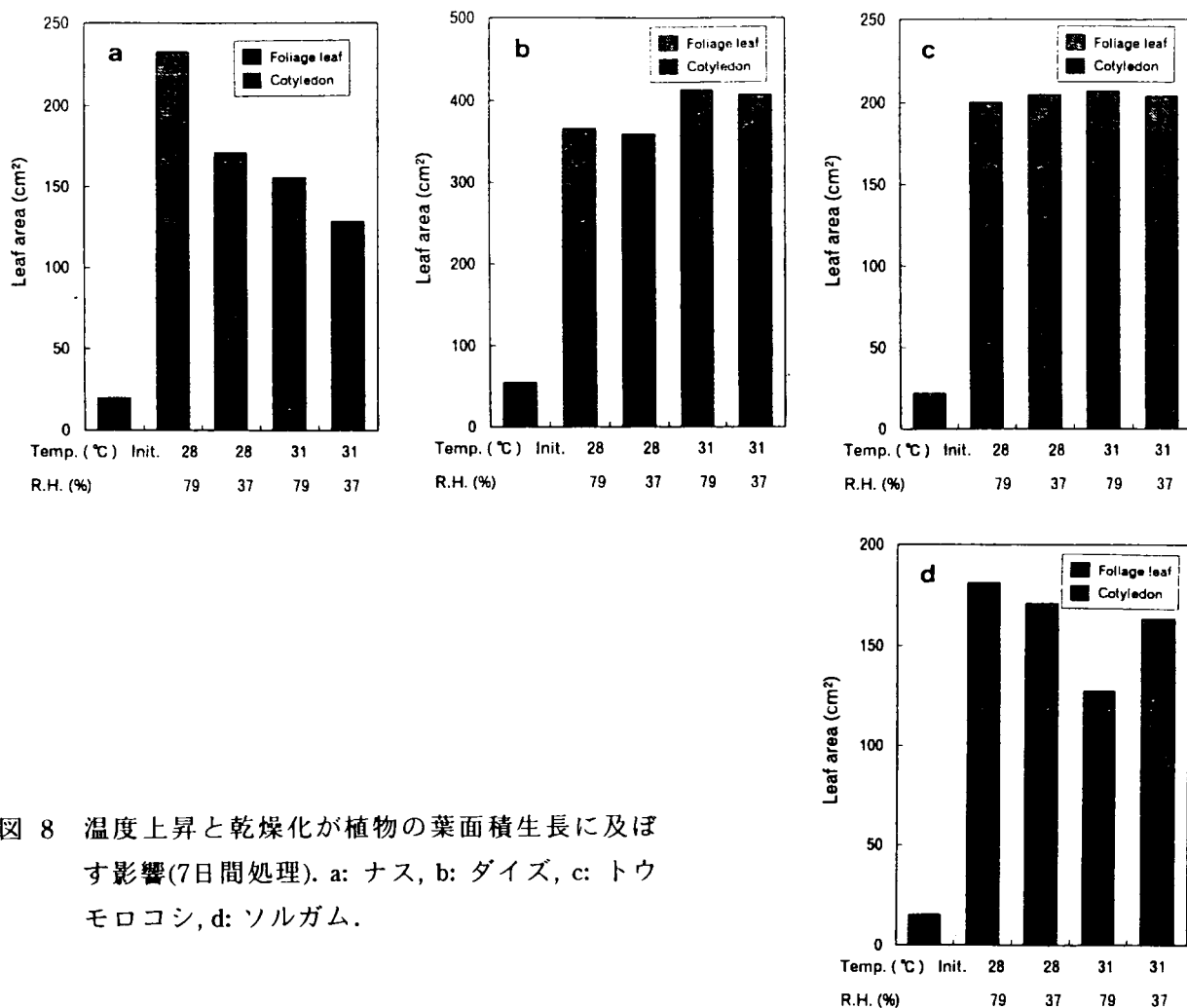


図 8 温度上昇と乾燥化が植物の葉面積生長に及ぼす影響(7日間処理). a: ナス, b: ダイズ, c: トウモロコシ, d: ソルガム.

減少していたが、ナス、ハクサイ、ハツカダイコンではむしろ増加していた。ナス、ハクサイ、ハツカダイコンをはじめ、ほとんどの植物のLARは温度上昇によって減少しており、それはSLAの減少に因っていた。しかし、ダイズのSLAは温度上昇によってむしろ増加していた。温度上昇によって、LWRは顕著には変化しなかったが、葉面積生長が抑制されていたハツカダイコンのLWRは増加していた。本実験の温度範囲においては、乾燥化の影響は明確には認められなかった。乾燥化によって、RGRの顕著な減少が認められたのはナスとトウモロコシであった。ナスでは主としてLARが減少していたが、トウモロコシではNARが減少しており、LARは増加傾向にあった。LARの変化はSLAの変化に因っていた。乾燥化によって、LWRには明確な影響は認められなかったが、ハツカダイコンでは若干減少していた。28°C・79%RH区の植物を対照とすると、ナスのRGR、NAR、LARは、31°C処理で各々2%減少、24%増加、21%減少を示した。一方、37%RH処理では4%減少、7%増加、11%減少を示した。31°C・37%RH処理では、10%減少、5%増加、14%減少であり、NARやLARに相殺的な影響が認められた。ソルガムの場合、RGR及びNAR、LARは、31°C処理で9%減少、6%減少、3%減少を示した。一方、37%RH処理では0%減少、3%増加、3%減少とほとんど変化しなかった。31°C・37%RH処理では、各々5%減少、9%減少、4%増加であり、温度と相対湿度の複合的な影響が認められた。

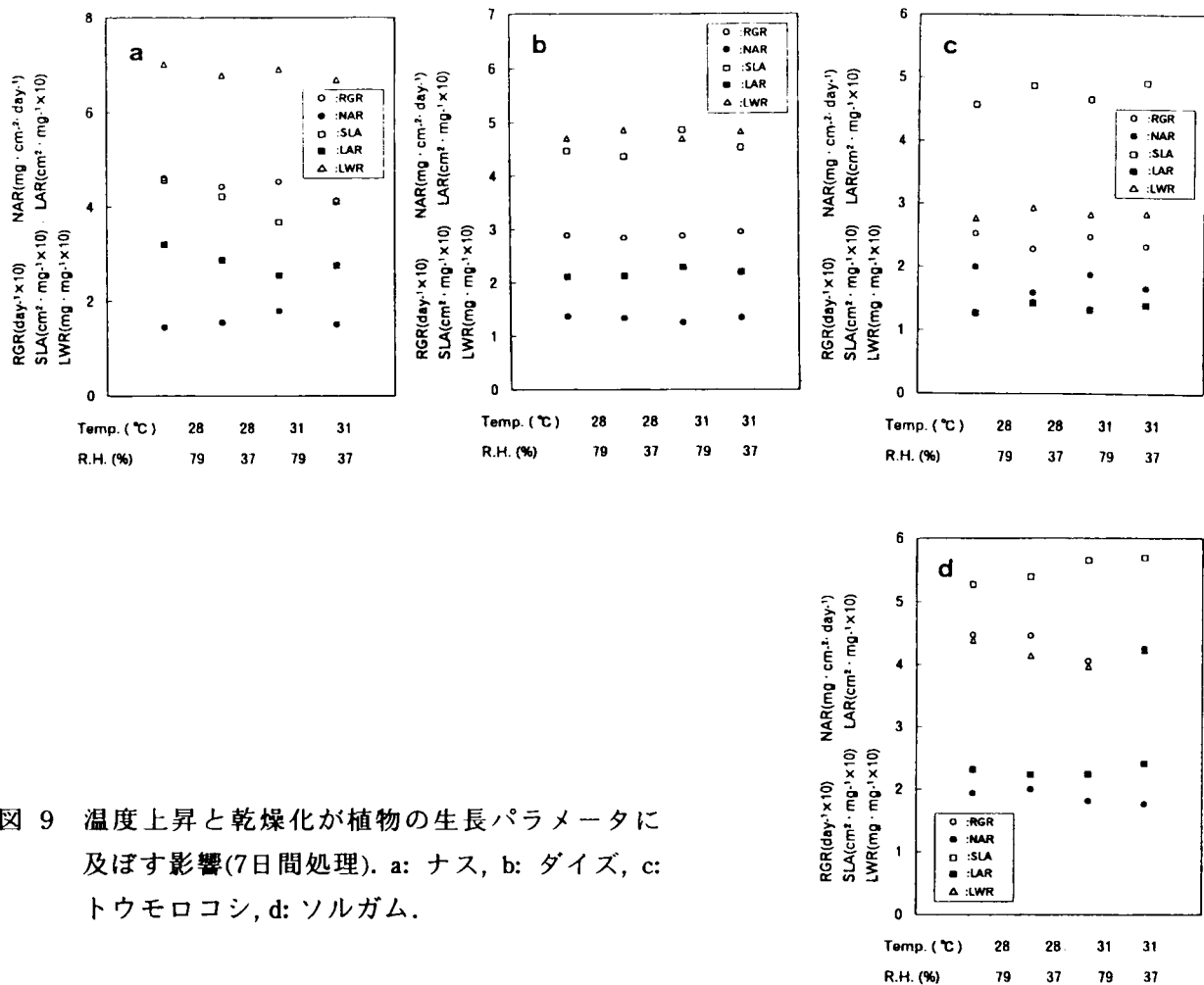


図 9 温度上昇と乾燥化が植物の生長パラメータに及ぼす影響(7日間処理)。a: ナス, b: ダイズ, c: トウモロコシ, d: ソルガム。

重量減少から求めた植物葉面積当たりの蒸散量を比較すると、温度上昇の影響は、種によって異なった(図10)。ハクサイ、ハツカダイコン、トウモロコシでは、温度上昇によって蒸散量は増加したが、他の植物では、明確な影響は認められなかった。一方、乾燥化は全植物種の蒸散を促進した。また、温度と相対湿度はほとんど相加的な影響を示した。28°C・79%RH区の植物を対照とすると、ナスの場合、蒸散量は、31°C処理で24%増加し、37%RH処理では63%増加した。ソルガムの蒸散量は、対照と比較して、31°C処理では8%増加しただけだったが、37%RH処理では54%増加していた。個体乾重量、葉面積、蒸散量から植物の水利用効率について考察すると、水利用効率は温度上昇によってそれほど変化しなかったが、一方、乾燥化によっては顕著に低下していた。

実験終了時にポロメータを用いて、蒸散速度、葉-気温差、拡散コンダクタンスを算出した(図11)。重量法で測定した値と比較すると、単位面積当たりで、数倍の値を示している。ポロメータでは、各個体の成熟葉の中央部という活性の高い部分の蒸散量を測定しているためであると思われる。しかし、ポロメータで得た蒸散速度の変化は、重量法で得た蒸散量の変化とはほぼ同様であった。ほとんどの植物の蒸散速度は、温度上昇によって若干増加し、また、乾燥化によって、顕著に増加した。ソルガムやハクサイでは、温度上昇と乾燥化で相乗的な増加を示しており、重

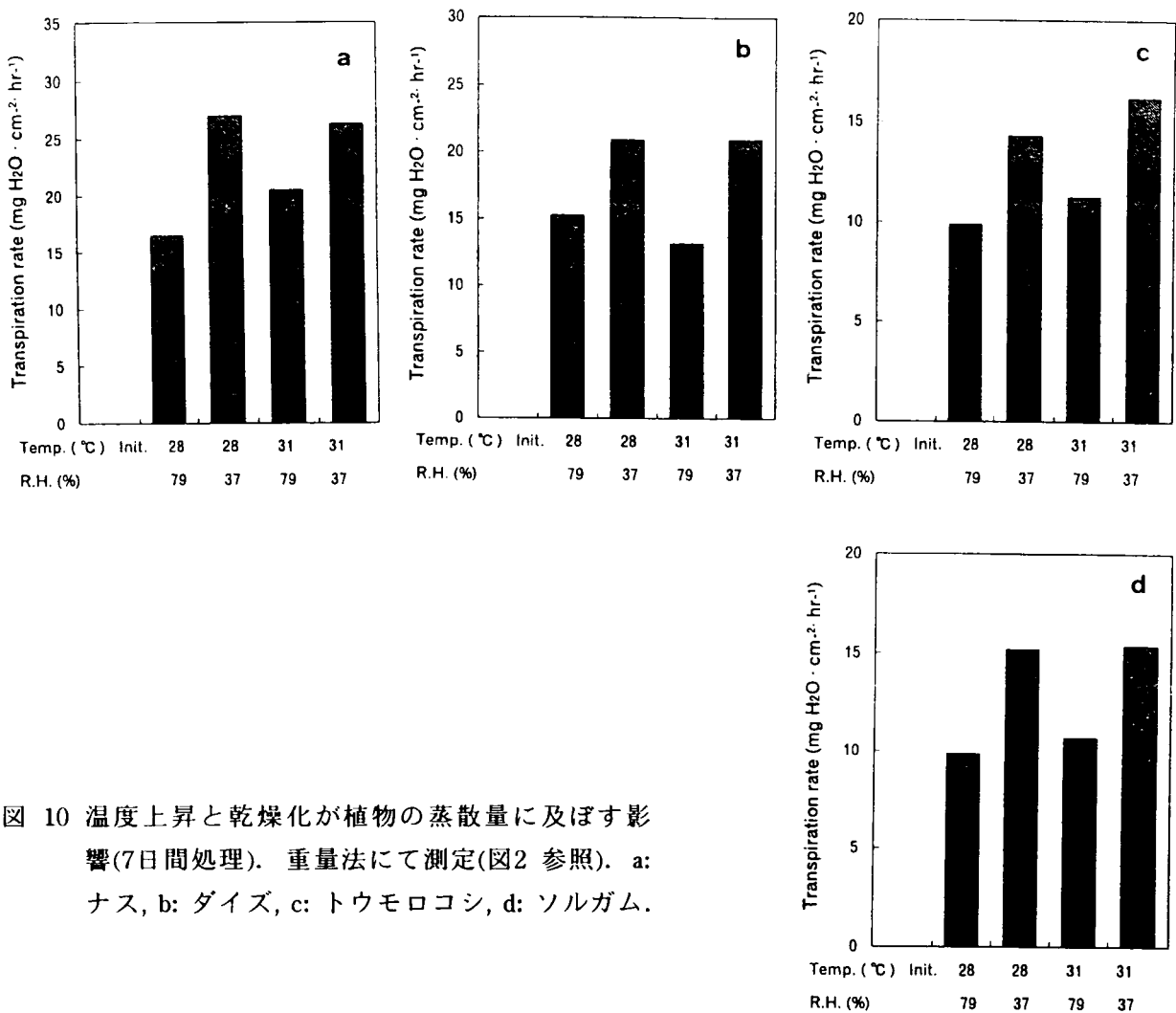


図 10 温度上昇と乾燥化が植物の蒸散量に及ぼす影響(7日間処理). 重量法にて測定(図2 参照). a: ナス, b: ダイズ, c: トウモロコシ, d: ソルガム.

量法で得た結果と多少異なる。これもポロメータ法では、蒸散活性の高い葉部のみを測定していることが関係していると思われる。拡散コンダクタンスに対する温度上昇の影響は種によって異なり、ダイズ、トウモロコシなどでは増加したが、ハツカダイコン、ピーマンなどでは減少していた。一方、乾燥化によってほとんどの植物の拡散コンダクタンスは減少した。ほとんどのC₃植物の葉温は、温度上昇によって若干、乾燥化によって顕著に低下した。一方、C₄植物であるトウモロコシとソルガムの葉温は、乾燥化よりも温度上昇に対して顕著に低下した。また、C₃植物では、蒸散により、葉-気温差は負の値を示すのに対し、C₄植物では、蒸散量が基本的に少ないため、葉温は気温より高くなっている。28°C処理と比較して、31°C処理のトウモロコシでは、どちらのRH処理でも葉温は低下しているが、ソルガムでは、79%RH処理の場合、37%RH処理ほど葉温は低下していない。31°C・79%RH処理におけるソルガムの顕著な生長抑制は、気温よりかなり高い葉温が示すように、熱ストレス²⁾の可能性が考えられる。

(3) イネの受精に及ぼす温度上昇の影響と収量予測

開花期の高温処理(36.5、38.0、39.5°C)は、アキヒカリ、コシヒカリ両品種のイネの穎花の受精率を低下させた。処理温度と受精率との関係を図12に示す。両品種共、処理温度の上昇に伴い、

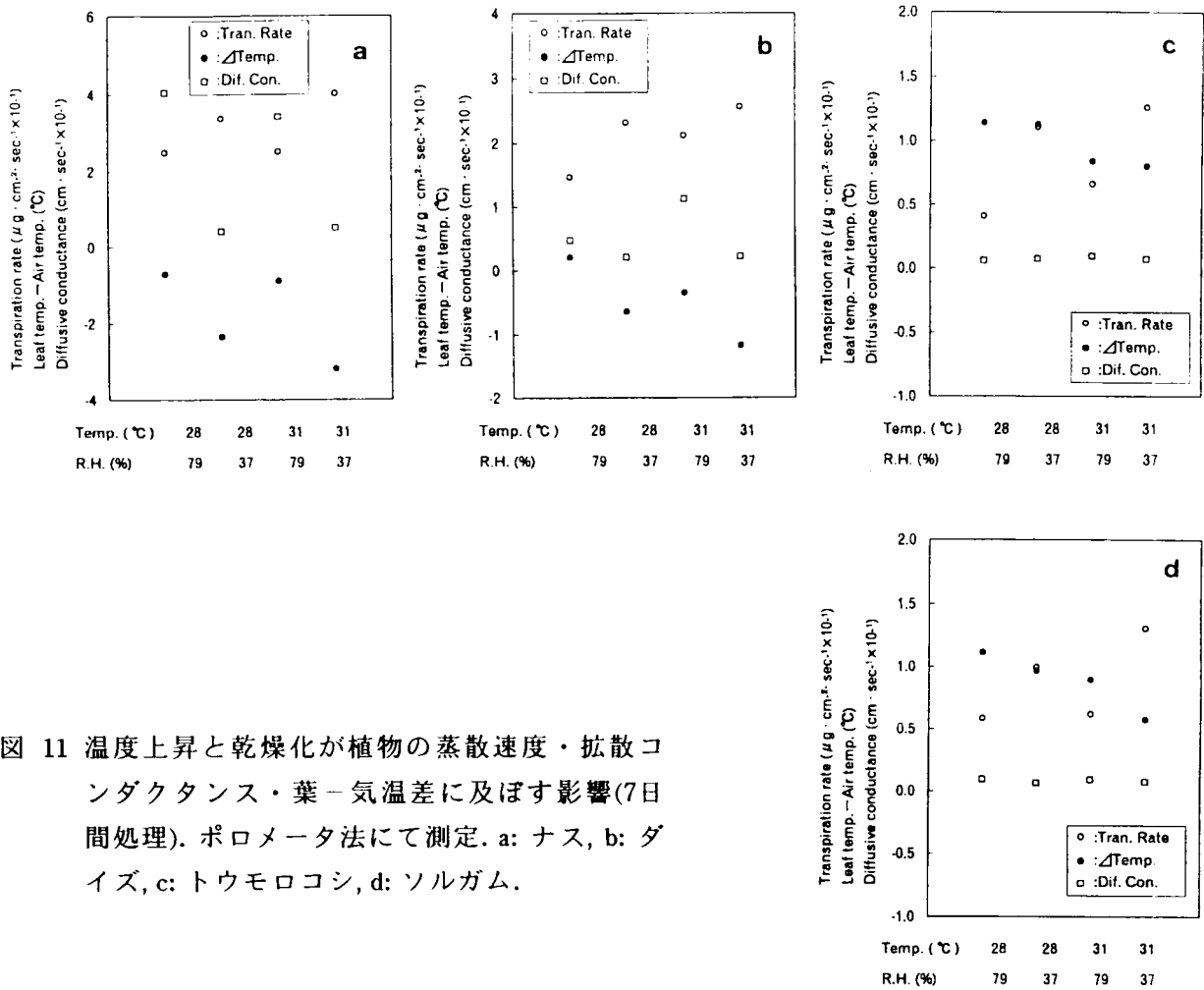


図 11 温度上昇と乾燥化が植物の蒸散速度・拡散コンダクタンス・葉-気温差に及ぼす影響(7日間処理). ポロメータ法にて測定. a: ナス, b: ダイズ, c: トウモロコシ, d: ソルガム.

受精率は低下したが、高温影響に対する感受性は品種間で大きく異なった。50%不稔が生じる気温：CT(50)を比較すると、アキヒカリ(高温感受性品種)は高温影響を受け易く、コシヒカリ(高温抵抗性品種)より2°Cほど低かった。39.5°C処理によって、アキヒカリの受精率は20%以下に抑制されていた。

高温処理(38.0、39.5°C)の開始日及び3日目に開花した穎花の柱頭に付着した花粉数及びその発芽率を調査した。処理開始3日目の穎花柱頭の付着花粉数と花粉発芽率を図13に示す。アキヒカリでは付着花粉数は少なく、コシヒカリの15~50%ほどの値を示した。柱頭上の花粉発芽率については、39.5°C処理の3日目で、コシヒカリと比較してアキヒカリでは低下していたが、明確な差異は認められなかった。いずれにせよ、穎花の受精率と柱頭上での花粉の発芽数(付着花粉数×花粉発芽率)には密接な関係が認められ、穎花の不受精の発生原因として、柱頭上での花粉発芽数の減少が考えられた。両品種の高温感受性の差異もこのことに起因すると推察された。

高温処理による受精率の低下は、最終的な収量に大きく影響する可能性があり、品種によっては地球温暖化の進行によって顕著な生産影響を被ることが予想される。そこで、上記結果をイネの生育収量に関するシミュレーションモデル(SIMRIW)に当てはめ、日本におけるイネの収量予測を高温感受性品種と高温抵抗性品種を用いた場合とで比較した。2倍のCO₂濃度(640ppm)時の、GFDL、GISS、UKMOの3種の大循環モデル(GCM)の気候変動シナリオを用いた場合の収量予測を

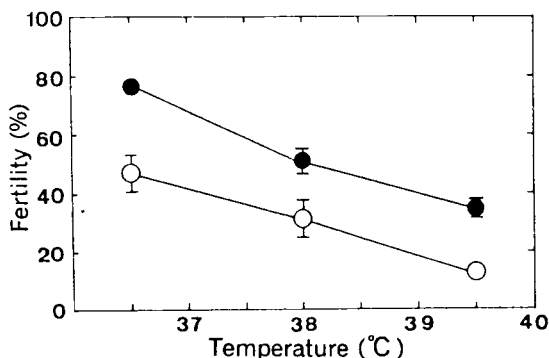


図 12 イネ穎花の受精率に及ぼす高温影響。
○: アキヒカリ, ●: コシヒカリ。

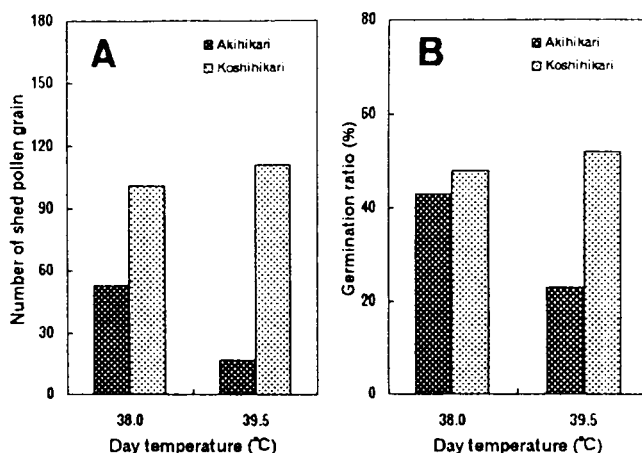


図 13 イネ穎花柱頭の付着花粉数とその発芽率に及ぼす高温影響。処理3日目に開花した穎花の調査。A: 付着花粉数, B: 花粉発芽率。

図14に示す。南日本のイネでは、高温感受性品種を用いた場合、GFDL、GISS、UKMOのシナリオで、現在と比較して、各々およそ10%、20%、40%の収量減少が予測された。一方、高温抵抗性品種を用いた場合は、どのシナリオでも収量減少は10%以下であった。これに対し、北日本では、イネ品種の高温感受性の差に係わらず、10%(GFDL)~25%(GISS及びUKMO)の収量増加が予測⁶⁾された。

5. まとめ

CO₂濃度増加、気温上昇、乾燥化といった温暖化に関連する環境要因の影響は、植物種によって異なること、それらは植物の光合成を基礎とする純同化率の変化ばかりでなく、分配率や比葉面積に影響を与えていることなどが判明した。また、これらの環境要因は、気孔を通じた蒸散量に影響し、水利用効率や葉面温度にも影響を及ぼしていた。本実験で調べた限りにおいては、各々の環境要因は植物の個々の生理パラメータに対し、相加的に影響している場合が多かった。このことは、ある種の植物に対して、地球温暖化に関連する環境変動の多くが負の方向に働いた場合、かなり大きな影響を及ぼすことを示唆している。また、ソルガムの生長に及ぼす気温上昇と乾燥化の影響に見られたような複合効果が存在することは、今後、地球温暖化の植物・植生に及ぼす影響の定量的予測・評価を行う場合、単に一要因だけに注目するばかりでなく、重要な要因の複合影響を考慮する必要があることを示唆している。植物の気孔は、CO₂吸収調節、蒸散調節、さらに、葉温調節などを行っており、また同時にCO₂濃度、気温、相対湿度(飽差)など多くの環境要因によって影響を受ける。これらの環境変動は植物に直接的に影響するばかりでなく、気孔を介した間接影響を含めて、複合的な影響を及ぼすと考えられるので、さらに多くの実験的な検討、知識の集積が必要であろう。

イネの生殖生長は気温上昇によって影響されたが、コシヒカリと比べアキヒカリの方が、開花期の高温処理で穎花の受精率は顕著に抑制された。穎花の受精率と柱頭上での花粉の発芽数(付

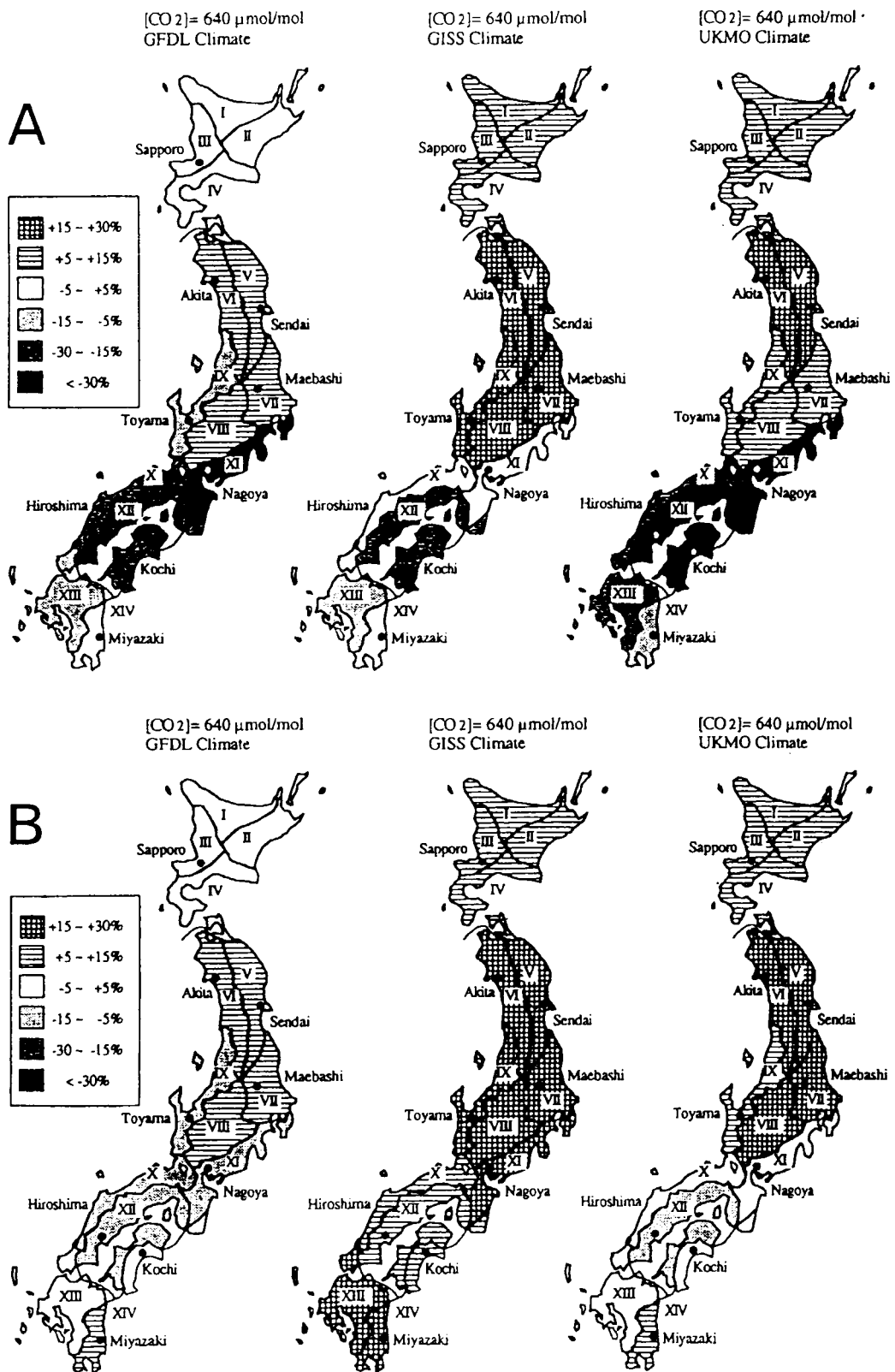


図 14 2倍のCO₂濃度(640ppm)時の日本におけるイネの収量予測. イネの生育収量に関するシミュレーションモデル(SIMRIW)に当てはめた. GFDL, GISS, UKMOの3種の大循環モデル(GCM)の気候変動シナリオを用いた. A(上段): 高温感受性品種, B(下段): 高温抵抗性品種.

着花粉数×花粉発芽率)には密接な関係が認められ、両品種の高温感受性の差異は柱頭上での花粉発芽数の差に起因すると推察された。将来の日本のイネの収量予測に関して、イネの生育収量に関するシミュレーションモデル(SIMRIW)を用い、2倍のCO₂濃度(640ppm)時のGFDL、GISS、UKMOの大循環モデル(GCM)の気候変動シナリオを当てはめた場合、南日本では、高温感受性品種で10%~40%、高温抵抗性品種で10%以下の収量減少が予測された。一方、北日本では、イネ品種の高温感受性の差に係わらず、10%~25%の収量増加が予測された。今後、他の多くの品種でのデータを集積すると共に、複合環境での影響解析を進める必要がある。

温暖化によって引き起こされる現象としては、この他にも、オゾン(O₃)濃度の増加など、植物の生育を抑制する²⁰⁾環境要因も含まれている。また、酸性雨や有害紫外線の増加など、他の地球環境変動の影響が憂慮されている地域もある。これらの地球環境変動が個々の植物種に及ぼす複合的影響に関する研究¹⁹⁾は、まだ緒に付いたばかりであり、今後、局地における環境及び植生の現状を考慮した複合環境影響の研究を推進する必要がある。

食料として重要な農作物、あるいは自然林の更新などに関しては、栄養生長ばかりでなく、生殖生長への影響⁶⁾も重要である。また、長期間処理による環境適応性や、共存する雑草などとの競争も考慮した影響研究¹⁵⁾も必要であろう。さらに自然生態系を考えた場合、地球環境変動の影響は、多くの種の環境適応性や種間競争、さらには生態系そのものも考慮しながら研究を進めていかなくてはならないと思われる。我々は早急にこれらの多様で複雑な問題に、精力的に取り組む必要に迫られている。このためには、対象とする地域での気象等の環境要因の長期的な計測や、対象植物・植生の生理生態特性を、現地野外において、また、環境制御室などを用いて検討し、明らかにしていくべきである。最近では、複数種の動植物を入れた大型の環境制御室を用いた、地球環境変動の生態系影響研究^{11, 13)}や、野外でCO₂濃度も制御した実験系を構築し、それを用いた研究¹⁰⁾も行われつつある。地球温暖化の影響予測を行うためにも、今後の農業生産の拡大や自然環境の保全に資するためにも、このような様々なレベルでの研究をさらに推進し、またそれらの成果を総合的に解析・評価する必要がある。

6. 本研究により得られた成果

CO₂濃度増加、気温上昇、乾燥化といった温暖化に関連する環境要因の影響は、植物種によって異なること、それらは植物の光合成を基礎とする純同化率ばかりでなく、分配率や比葉面積に影響を与えていることなどが判明した。また、これらの環境要因は、気孔を通じた蒸散量に影響し、水利用効率や葉面温度にも影響を及ぼしていた。各々の環境要因は植物の個々の生理パラメータに対し、相加的に影響している場合が多かったが、複合効果も認められた。今後、地球温暖化の植物・植生に及ぼす影響の定量的予測・評価を行う場合、単に一要因だけに注目するばかりでなく、重要な要因の複合影響を考慮する必要があることが示唆された。

イネの生殖生長は、開花期の気温上昇によって影響されたが、品種によって受精率の抑制程度は異なった。2倍のCO₂濃度(640ppm)時の3種のGCMの気候変動シナリオを用いて、イネの生育収量に関するシミュレーションを行った結果、南日本では、高温感受性品種で10%~40%、高温抵抗性品種で10%以下の収量減少が、北日本では、品種に係わらず、10%~25%の収量増加が予測された。

7. 参考文献

- ¹⁾ Baker, J. T. and Allen, L. H. Jr. (1993): Effects of CO₂ and temperature on rice: A summary of five growing seasons. *J. Agr. Met.* 48, 575–582.
- ²⁾ Berry, J. A. and Raison, J. K. (1981): Responses of macrophytes to temperature. In: *Encyclopedia of plant physiology 12A*. (eds.) Pirson, A. and Zimmermann, M. H., 277–338, Springer–Verlag.
- ³⁾ Eamus, D. (1991): The interaction of rising CO₂ and temperatures with water use efficiency. *Plant Cell Environ.*, 14, 843–852.
- ⁴⁾ Eamus, D., Duff, G. A. and Berryman, C. A. (1995): Photosynthetic responses to temperature, light flux–density, CO₂ concentration and vapour pressure deficit in *Eucalyptus tetrodonta* grown under CO₂ enrichment. *Environ. Pollut.*, 90, 41–49.
- ⁵⁾ 藤沼康実・古川昭雄 (1988): 気孔開度の測定法. 大政謙次・近藤矩朗・井上頼直編, 植物の計測と診断, 朝倉書店, 107–111.
- ⁶⁾ Horie, T., Matsui, T., Nakagawa, H. and Omasa, K. (1996): Effects of elevated CO₂ and global climate change on rice yield in Japan. In: *Climate change and plants in East Asia*. (eds.) Omasa, K., Kai, K., Taoda, H., Uchijima, Z. and Yoshino, M., 39–56, Springer–Verlag.
- ⁷⁾ 今井勝 (1988): 二酸化炭素と作物生産. 日本作物学会記事, 57, 380–391.
- ⁸⁾ Imai, K. and Kanda, A. (1995): CO₂ dependence of gas exchanges in rice leaves as affected by temperature, light and vapor saturation deficit. *Environ. Control Biol.*, 33, 285–291.
- ⁹⁾ Imai, K. and Okamoto–Sato, M. (1991): Effects of temperature on CO₂ dependence of gas exchanges in C₃ and C₄ crop plants. *Jpn. J. Crop Sci.*, 60, 139–145.
- ¹⁰⁾ Kimball, B. A., Pinter, P. J. Jr., Garcia, R. L., LaMorte, R. L., Wall, G. W., Hunsaker, D. J., Wechsung, G., Wechsung, F. and Kartschall, T. (1995): Productivity and water use of wheat under free–air CO₂ enrichment. *Global Change Biology*, 1, 429–442.
- ¹¹⁾ Korner, C. & Arnone, J. A. III (1992): Responses to elevated carbon dioxide in artificial tropical ecosystems. *Science*, 257, 1672–1675.
- ¹²⁾ Kramer, P. J. (1983): *Water relations of plants*. Academic Press.
- ¹³⁾ Lawton, J. H. (1995): Ecological experiments with model systems. *Science*, 269, 328–331.
- ¹⁴⁾ Lemon, E. R. (1983): *CO₂ and plants*. Westview Press.
- ¹⁵⁾ Patterson, D. T. and Flint, E. P. (1980): Potential effects of global atmospheric CO₂ enrichment on the growth and competitiveness of C₃ and C₄ weed and crop plants. *Weed Sci.*, 28, 71–75.
- ¹⁶⁾ Rosenzweig, C. (1985): Potential CO₂–induced climate effects on North American wheat–producing regions. *Climate Change*, 7, 367–389.
- ¹⁷⁾ 清野豁 (1995): 気候温暖化が我が国の穀物生産に及ぼす影響. *農業気象*, 51, 131–138.
- ¹⁸⁾ 清水英幸 (1988): 生長速度の計測. 大政謙次・近藤矩朗・井上頼直編, 植物の計測と診断, 朝倉書店, 124–130.
- ¹⁹⁾ Shimizu, H. Kai, K. and Omasa, K. (1996) Effects of elevated CO₂ and O₃ singly or in mixture on the growth of several herbaceous plants. *J. Agr. Met.* (in preparation).
- ²⁰⁾ Shimizu, H., Fujinuma, Y., Kubota, K., Totsuka, T. and Omasa, K. (1993) Effects of low concentrations of O₃ on the growth of several woody plants. *J. Agr. Met.*, 48, 723–726.

- ²¹⁾ Smit, B., Ludlow, L. and Brklacich, M. (1988): Implication of a global climatic warming for agriculture: A review and appraisal. *J. Environ. Quart.*, 17., 519–527.
- ²²⁾ Smith, J. B. and Tirpak, D. (1989): The potential effects of global climate change on the United States. 409p. United States Environmental Protection Agency.
- ²³⁾ 内嶋善兵衛 (1990): 地球温暖化の影響評価. *地学雑誌*, 99, 186–193.
- ²⁴⁾ WMO/UNEP: IPCC (1990): Climate change –The IPCC impacts assessment. Australian government publishing service.
- ²⁵⁾ Wong, S. C. (1993): Interaction between elevated atmospheric concentration of CO₂ and humidity on plant growth: Comparison between cotton and radish. *Vegetatio*, 104/105, 211–221.

国際共同研究等の状況

Dr. T. W. Ashenden (Institute of Terrestrial Ecology, British Council, U.K.), Dr. J. F. Reynolds (Phytotron, Duke University, NSF Ecosystem, USA), 張新時所長(植物研究所, 中国), 劉照光所長(成都生物研究所), 陶戰副所長(農業部環境保護科研監測所, 中国), 李小明研究員(新疆生物土壤沙漠研究所, 中国)らと、地球温暖化の植物・植生影響の研究に関する情報交換を継続的に推進すると共に、一部上記研究所の研究員らと共同研究等を行った。

研究発表の状況

(1)論文等

- Shimizu, H. (1995): Monitoring of atmospheric environment by plant indicators using bryophytes and lichens. The international seminar on the simple measuring and evaluation method on air pollution (118pp.), 27–42. JSAP & ERTC, Thailand
- 清水英幸 (1995): 日本的自然環境保護和植物、植被研究. 中日技術合作自然生態環境調査及評価 学術研究会論文集(298pp.). 23–34. 中日友好環境保護中心.
- Horie, T., Matsui, T., Nakagawa, H. and Omasa, K. (1996): Effects of elevated CO₂ and global climate change on rice yield in Japan. In: *Climate change and plants in East Asia*. (eds.) Omasa, K., Kai, K., Taoda, H., Uchijima, Z. and Yoshino, M. (215pp.), 39–56, Springer–Verlag.
- 清水英幸 (1996): 日本における自然環境保全研究 – 実験研究と野外調査 –. 中国長江三峡ダム建設事業支援のための水源涵養林造成と環境保全に関する研究(I)研究成果報告書 (110pp.). 21–36. 国際善隣協会.
- 清水英幸, 喬永康 (1996): 中国産数種樹木の種子発芽特性に関する研究. 中国長江三峡ダム建設事業支援のための水源涵養林造成と環境保全に関する研究(I)研究成果報告書 (110pp.). 83–87. 国際善隣協会.
- Shimizu, H. Kai, K. and Omasa, K. (1996): Effects of elevated CO₂ and O₃ singly or in mixture on the growth of several herbaceous plants. *J. Agr. Met.* (in preparation).
- Shimizu, H. Fujinuma, Y. and Omasa, K. (1996): Effects of carbon dioxides and/or relative humidity on the growth and transpiration of several plants. *Acta Horticulturae*. (in preparation).

(2)学会等

藤沼康実, 大政謙次 (1994): 気候反応の異なるポプラ系統の水収支特性. 日本農業気象学会1994年度全国大会. 熊本.

藤沼康実 (1994): 指標植物を用いたグロースキャビネットの安全性の評価. 日本生物環境調節学会第32回集会. 熊本.

清水英幸 (1995): 蘚苔類(*Plagiomnium*属)の生長と環境 - 連続培養法の検討 -. 日本蘚苔類学会第24回大会. 沖縄県宜野湾市.

清水英幸, 藤沼康実, 大政謙次 (1995): 二酸化炭素濃度増加と乾燥化が植物の栄養生長に及ぼす、単独及び複合影響. 第36回大気環境学会年回. 東京.

清水英幸, 菅邦子, 大橋毅 (1995): 指標植物評価和監測大気質量. 大気汚染監測與評価方法研修班演講. 中国重慶.

野村幹雄, 今井勝, 大政謙次 (1996): 水稲の生長と光合成に及ぼす空气中CO₂濃度およびリン栄養の影響. 日本作物学会第201回講演会. 宇都宮.