

BULLETIN
OF THE
HIROSHIMA PREFECTURAL
AGRICULTURE RESEARCH CENTER

JULY 2003

広島県立農業技術センター研究報告

ニホンナシ‘幸水’の樹体および果実形質に対する
環境要因の植物生体情報に基づく栄養生理学的解析

第 74 号
平成15年 7 月

広島県立農業技術センター
(広島県東広島市八本松町原)

ニホンナシ ‘幸水’ の樹体および果実形質に対する 環境要因の植物生体情報に基づく栄養生理学的解析

キーワード：ニホンナシ ‘幸水’，歪みゲージ式変位計，環境要因，補光，土壤水分，
気温，二酸化炭素富化，ジベレリン，樹体生育，果実形質

伊 藤 純 樹

— 2003 年 —

目 次

| | |
|--|----|
| 緒 論 | 1 |
| I. 歪みゲージ式変位計による茎径の微細計測法の原理と実測 | 3 |
| 緒 言 | 3 |
| 測定原理および方法 | 3 |
| 結果および考察 | 6 |
| II. ニホンナシ ‘幸水’ の樹体および果実形質に対する環境要因の影響 | 10 |
| 1. 補 光 | 10 |
| 緒 言 | 10 |
| 材料および方法 | 11 |
| 結 果 | 12 |
| 考 察 | 17 |
| 2. 土壌水分 | 20 |
| 緒 言 | 20 |
| 材料および方法 | 21 |
| 結 果 | 23 |
| 考 察 | 29 |
| 3. 気 温 | 32 |
| 緒 言 | 32 |
| 材料および方法 | 32 |
| 結 果 | 34 |
| 考 察 | 37 |
| 4. 二酸化炭素富化が果実肥大および樹体に与える影響および その支配要因の解析 | 39 |
| 1) 長期処理 | 39 |
| 緒 言 | 39 |
| 材料および方法 | 40 |
| 結 果 | 41 |
| 考 察 | 44 |

| | |
|--------------------------------|----|
| 2) 短期処理..... | 47 |
| 緒 言..... | 47 |
| 材料および方法..... | 47 |
| 結 果..... | 49 |
| 考 察..... | 53 |
| | |
| Ⅲ. ジベレリン処理がニホンナシ ‘幸水’ の果実肥大および | |
| 樹体生育に与える影響 | 55 |
| 緒 言..... | 55 |
| 材料および方法..... | 55 |
| 結 果..... | 56 |
| 考 察..... | 61 |
| | |
| Ⅳ. 総合考察 | 63 |
| | |
| Ⅴ. 摘 要 | 67 |
| | |
| 引用文献 | 71 |
| | |
| Summary | 77 |
| | |
| 謝 辞 | 81 |

緒 論

我が国では、ニホンナシ (*Pyrus pyrifolia* Nakai) は、明治以来100年にわたって、青ナシを代表する‘二十世紀’と赤ナシの‘長十郎’を主体に栽培されてきた。1959年にニホンナシ‘幸水’が育成されると、‘新水’、‘幸水’および‘豊水’のいわゆる三水と呼ぶナシの栽培面積が増加した。その後、1978年の干ばつによる‘長十郎’の品質低下を契機にして、‘長十郎’から‘幸水’および‘豊水’の品種更新が進むと同時に経営規模の拡大や新興産地の育成によって‘幸水’および‘豊水’の栽培は急速に増加した。長年にわたってニホンナシは秋の果物に位置づけられてきたが8月に成熟期を迎える‘幸水’の出現は、ナシの前進出荷の道を開き、盛夏の果実としてニホンナシの消費を飛躍的に拡大してきた。この結果、ニホンナシ‘幸水’は‘長十郎’に取って代わり、1989年には‘二十世紀’の栽培面積を抜き去り、現在日本国内において最も生産量の多いニホンナシ品種へと躍進した。ニホンナシ‘幸水’は8月に収穫できる早生種で、糖度が高く、歯触りが良くかつ多汁で芳醇さを持ち、発表の当初から果実品質に関する諸特性は高く評価されてきた。しかし、栽培面では、花芽着生不良、短果枝の使用年限が短くその維持が困難、平均1果重が小さいなどの問題点が指摘された。これらの問題点を国内外の研究成果や多くの栽培事例などから解析し、これらの問題を解明し、ニホンナシ‘幸水’の安定生産技術の体系化が精力的に行われてきた。その結果、ニホンナシ経営に‘幸水’が導入され、広く普及してきたといえる。

ニホンナシ‘幸水’の果実形質が著しく高く、栽培法も確立し収量も安定したことから、さらに、経営面や、消費者のニーズに応じて、8月の盆前の出荷、あるいは7月の中元に対応する出荷を目指した成熟期の促進技術が期待されてきた。

ニホンナシの成熟期の促進技術には、ジベレリンペーストの果梗塗布や、エスレル散布によって果実肥大促進に加え成熟期を短縮する方法(広田, 1971; 渋谷, 1982)と、施設(被覆)栽培によって生育ステージを前進させる方法がある(広田ら, 1983)。前者では大きな前進出荷は期待しえず、果実品質面でも問題が残されている。一方、後者の方法としては、棚上簡易被覆、無加温、加温ハウスなどの作型が開発されてきた。

施設栽培の中では、盆前出荷を狙った棚上簡易被覆栽培が最も頻繁に行われている。しかし、‘幸水’の施設栽培の歴史は浅く、栽培管理技術の体系化は目下のところ確立されるに至っていない。そのため、果実の低収性、低糖度、樹勢の衰弱および花芽着生の悪化等の問題点は指摘されているにもかかわらず、その対応策に関する研究は数例にとどまっている(広田ら, 1983; 内野ら, 1989; 内野・弦間, 1990; 伊藤ら, 1992)。

近年、植物生体情報の活用に着目して、環境の変化に対する植物の微小な形態的变化を連続計測する技術が進み、高形質果実を生産する条件を精度よく把握できるようになった。つまり、作物の環境ストレスに対する反応を気孔開度、光合成速度(Po)、水ポテンシャルなどの植物の諸機能を指標として、これらを画像解析、光、超音波などで高精度で連続計測し、演算処理するシステムが開発されており、微細な形態的变化を連続測定する歪みゲージ式変位計もその一つである。

歪みゲージ式変位計は植物の環境応答の計測に応用され、植物の茎、果実などの形態的变化を高精度で計測することが可能である(河井ら, 2003)。この計測結果によると、茎径は、気温、光強度、湿度、水分等の環境条件の影響を受け変動する(Klepperら, 1971;

Sheriff, 1976 ; Nagano and Shimaji, 1976 ; Nagano and Shimaji, 1978 ; Beedlow ら, 1986 ; Garnier and Berger, 1986 ; Katerji ら, 1994 ; Link ら, 1995 ; Thiede ら, 1995 ; Link ら, 1998)。また、茎径は日中に収縮し夜間に膨潤する日変化を示し、この変動をもたらす主要因の一つとして植物の吸水や体内での水の動態が挙げられている (Klepper, 1971 ; Hinckley and Bruckerhoff, 1975 ; Lassoie, 1979 ; Link ら, 1995)。これと類似の日変化のパターンは、モモ (*Prunus persica*) (Berger and Selles, 1993), リンゴ (*Pyrus malus* L.) (Link ら, 1998) およびニホンナシ (Imai ら, 1994) で得られている。

ニホンナシは開花後栄養生長と生殖生長が重複して行われる。すなわち、葉芽が出芽後、新梢は葉を展開しつつ、伸長を続け20~30葉が展開した満開後約75日目に新梢伸長が停止する。新梢伸長が停止し、受光体勢が完了すると、肥大速度が著しく高まる。一方、果実は、満開から収穫までを果実の生育相に基づき5つの生育期に分離しうることが提案されている (Imai ら, 1994)。すなわち、その生育期は果実の細胞分裂が旺盛な細胞分裂期に始まり、肥大速度が高まる初期肥大期、肥大速度が一時的に低下する発育停滞期、最も肥大速度の高い後期肥大期、糖が集積し肥大が緩慢な成熟期から構成されている。

そこで、ニホンナシ‘幸水’の大果・高糖度果実の生産を目指して、人為的に制御可能な光 (伊藤ら, 2003b), 土壌水分 (伊藤ら, 2003a), 気温 (Ito ら, 1999b), および大気中の炭酸ガス濃度 (Ito ら, 1999a ; Ito ら, 2002) などが、上記の果実発育からみた生育時期別の果実横径および側枝径の日変化および変化パターンに与える影響を詳細に調査すると共に、樹体生育および果実生産に与える影響について検討した。さらに、これらの研究成果をとりまとめて、加温ハウス栽培における大果で高糖度果実生産のための管理基準を提案した。

I. 歪みゲージ式変位計による莖径の微細計測法の原理と実測

緒言

作物生産の向上や、生産物の品質の向上を図るためには、与えられた栽培環境下における作物のストレスを早期に感知し、診断し、適切な処置を行うことが求められている。このような診断技術は、環境因子の制御が可能で、年間を通して高品質な作物生産を行う施設栽培で強く望まれている。

近年、環境ストレスに対する作物の反応を評価するために葉温、気孔開度、光合成速度、成長速度などの生体情報を連続計測する多様なシステムが開発されており、歪みゲージ式変位計を用いた莖径や果実径の計測システムもその一つである。

歪みゲージ式変位計は、従来、航空機や船、車両などの機械類の強度などを評価するため、これらを構成する各部材の応力や変形の状態の計測に用いられてきた。すなわち、この方法は、金属体自体をセンサーとして、その金属体に機械的な歪みが加えられたときに生じる電気抵抗の変化より高精度でその歪みを感知する方法である。

接着型の歪みゲージ式変位計を利用した莖および果実の径の測定法や測定器機の開発について報告されている(Nagano and Shimaji, 1976; Nagano and Shimaji, 1978; Linkら, 1998)。これらの計測法は、測定範囲が大きい、あるいは成長速度の高い対象植物に適応が容易である。しかし、温度の影響が大きく、また反力(対象を挟む力)が大きいため柔らかい莖や果実では測定精度に問題があると考えられる。

そこで、本報告では、反力が小さい非触着型の歪みゲージ式変位計を用いて、この計測システムの精度並びにこの測定に最も影響を与える要因の一つである温度の影響について詳細に検討し、さらに、変位計を用いたトマトの莖径の日変化を実測した結果を述べる。

測定原理および方法

測定原理

大西洋の海底電線敷設の際に、水圧による金属の電気抵抗の変化を計測して海の深さを求めており、これが歪みゲージ利用の始まりといわれている(Watanabe, 1931)。この効果を利用して、非接着型としてカールソン型歪み計(1930)が作成された。その後この利用頻度は低下したが、現在でもダム建設や土木工事などの分野の計測で使用されている。また、非接着型として、ステーサム型歪み計があり、これは今日でも主に変換器として利用されている。

一方、抵抗体を測定物の表面に直接貼り付けその歪みを測定する、いわゆる接着型の歪みゲージは、変位計、荷重計、圧力計および加速度計などの変換器に使用されている(Watanabe, 1931)。

次に、電気抵抗を持つ金属の導体に変形したときの抵抗値の変化と歪みの関係について述べる。導体の全抵抗値を R 、比抵抗を ρ 、断面積を A 、長さを l とすると、 $R = \rho \cdot l/A$ が成立する。この関係式より、抵抗変化率は $\Delta R/R = K \cdot \epsilon$ (K :抵抗線の歪み感度、 ϵ :ひずみ)として求められる。すなわち、導体の抵抗変化率はその歪みに比例する。歪みを測定するための電気回路として、一般にブリッジ回路が利用されている(図1)。

4 辺が抵抗 R のブリッジで、今 a—b 間のみ抵抗 R のゲージを使用したとき、ゲージに歪みが加わって、抵抗値が ΔR だけ変化したとする。このとき、このブリッジの出力 e は、 E_b と E_d の電位の差となり、 $e = E_b - E_d = R / (2R + \Delta R) \cdot E - R / 2R \cdot E = \Delta R / 2 (2R + \Delta R) \cdot E$ で表される。また、 ΔR は、 R に比較して十分に小さいため、 $e = 1/4 \cdot \Delta R / R \cdot E$ となる。さらに、先ほどの、抵抗変化率と歪みの式より、ブリッジの出力電圧と歪みの関係式 $e = 1/4 \cdot K \cdot \epsilon \cdot E$ が得られる。また、ブリッジの4辺に歪みゲージを組み込んだときには、出力が4倍となる ($e = K \cdot \epsilon \cdot E$)。ここで、 K は抵抗線の歪み感度で、通常は2である。またブリッジに加えられる電圧 E は一定である。したがって、 K と E は、既知の定数であるので、出力電圧 (e) の測定により、歪み (ϵ) を測定しうる。

次に、変位計の構造と原理について示した(図1)。変位を検知するレバーは、板バネで固定枠に固定されている。レバー側と固定枠側に絶縁ピンが固定されており、この間に抵抗線が張られている。抵抗線は、直径 $25\mu\text{m}$ の銅ニッケル合金が使われている。抵抗線は、合計4本であり、これで測定ブリッジを構成している(図1A)。今、レバーが水平方向に ΔL 変位すると、レバーは、角度 θ 回転する(図1B)。このとき、レバーに固定された絶縁ピンも同じように角度 θ 回転して、絶縁ピンの頭部で Δl の変位が生じる。この Δl により、抵抗線に歪みが発生する。この歪みにより、抵抗線に ΔR の抵抗変化が生じる(図1C)。片側の抵抗線には、プラスの抵抗変化、反対側には、マイナスの抵抗変化が生じる。これらを組み合わせて、ブリッジが構成されている。ブリッジの出力電圧は、抵抗の変化に比例する。したがって、それぞれの変数の間には、比例関係があり ($\Delta L \propto \theta \propto \Delta l \propto \epsilon \propto \Delta R \propto e$)、出力電圧を測れば、変位を知ることができる。

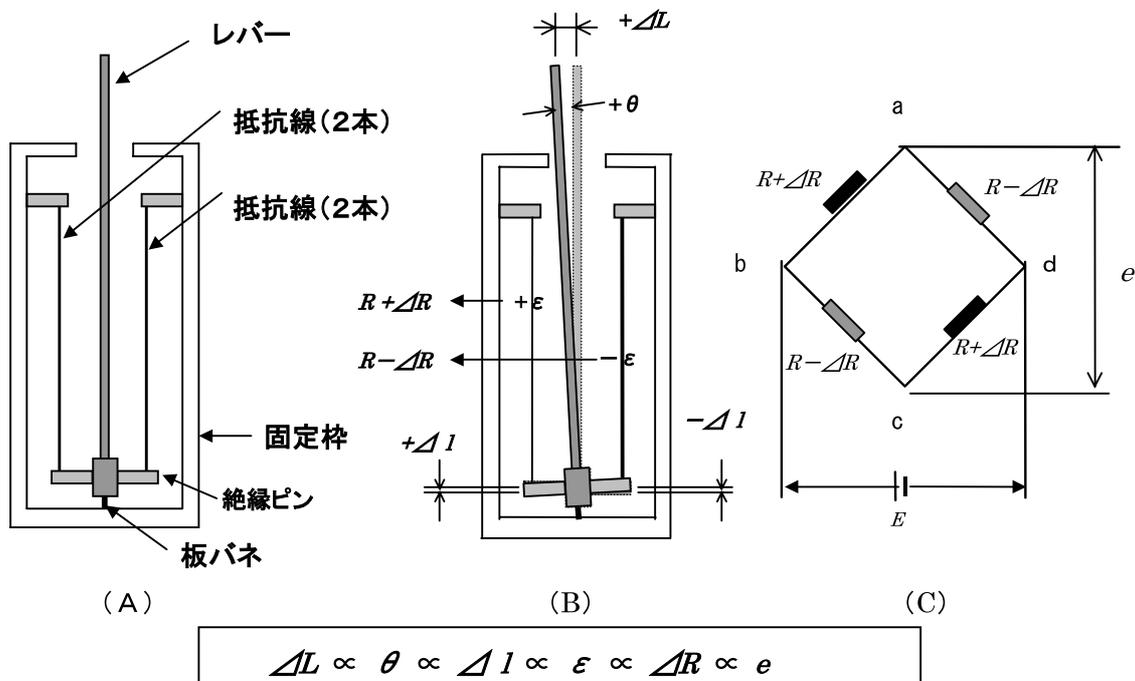


図1 非接着型ゲージを用いた変位計の構造と原理

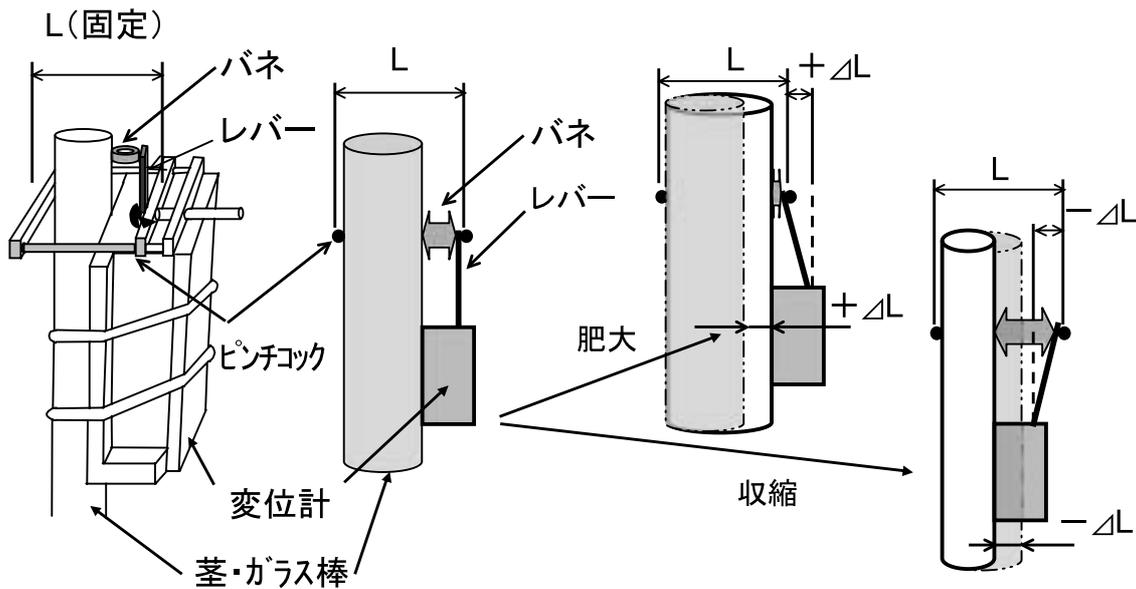


図2 歪みゲージ式変位計による茎径の測定方法

歪みゲージ式測定システムは、変位計のセンサーをデータロガーに接続し、得られたデータをパソコンで自動収録するものである。変位計は、茎や葉柄に固定し測定する。すなわち、変位計の取り付け方法は(図2)、まず、変位計をゴム紐で茎に取り付け、次に、茎と変位計のレバーの間にシリコンゴムのチューブをバネとして入れ、最後にピンチコックを取り付け、レバーの位置を調整する(Iwao and Takano,1888)。ピンチコックの内径Lは、一定値に固定され、レバーはバネによりピンチコック側に押しつけられている。ここで茎が ΔL 太ると、変位計の本体は、茎の表面とともに押し出される。レバーは、ピンチコックで動きが拘束されているので、結局、変位計としては、 ΔL の測定値が得られる。逆に、茎が収縮する場合は、収縮と共に変位計も移動し $-\Delta L$ の測定値が得られる。したがって、この方法で茎径の変化量を測ることが可能となる。

変位計の特性

本試験で用いた歪みゲージ式変位計(UL-10, ミネベア社製)は、縦、横および高さがそれぞれ56, 42および20mmで重さが98gである。また、測定範囲は $\pm 0.4\text{mm}$ 、定格出力は $\pm 1.75\text{mV/V}$ 、非直線性は0.3%R. O. , ヒステリシスは0.3%R. O. (rated output), 零点の温度のドリフトは0.5%R. O. / 10°C 、出力の温度の影響は0.5%R. O. / 10°C の特性を有し、変位の電圧への変換については優れた直線性を持つ。しかしながら、マイクロメーター単位の計測を行うに当たっては、温度変化に対しては許容できない誤差を生ずる可能性がある。そこで、温度変化による零点移動の実験(図3A)と定格出力の変化の実験(図3B)を実施した。また、ガラス温室内でガラス棒を対照に、この計測システムを用い、トマトの茎径の変化を調査した。

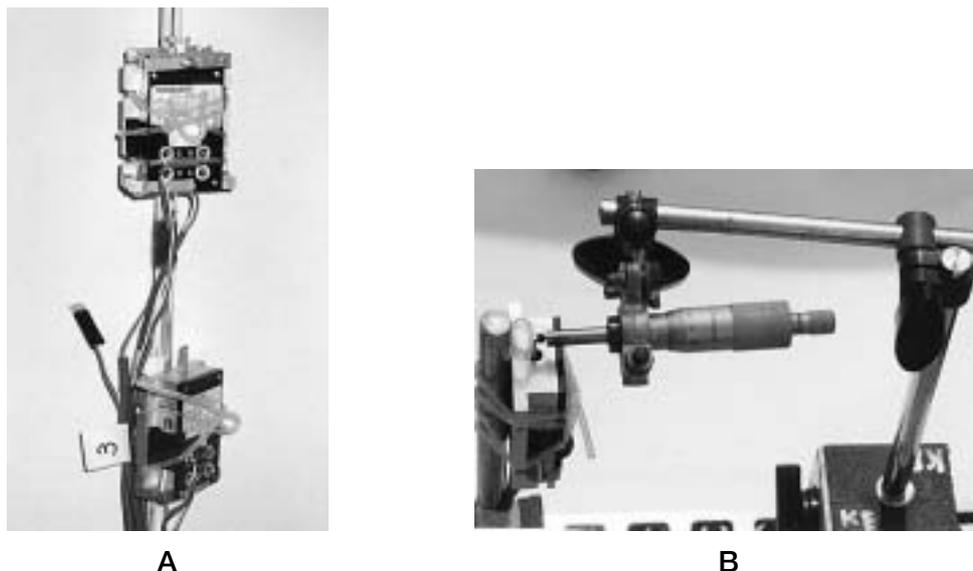


図3 温度が非接触型変位計の0点移動 (A) および定格出力 (B) に及ぼす影響

実験1. 零点移動に対する付属金属の影響

零点移動の実験は、広島県立農業技術センターの恒温器（広島設備開発株式会社製）を用い、直径10mmのガラス棒に変位計を取り付けを行った。すなわち、ピンチコックで変位計を固定した場合（ピンチコック区）および、変位計単体を直接取り付けた場合（単体区）を設定した（図3A）。両者とも、変位計の側面に熱電対を取り付け、その温度を測定した。定格出力の変化の実験は、マイクロメーターで基準の変位を与えて行った（図3B）。

実験2. 零点移動に対する気温の影響

実験1と同様の実験を広島県立農業技術センターのファイトトロン内で実施した。すなわち、変位計をファイトトロン内に静置し、気温を8.8～36.8℃の範囲で変動させ、変位計の出力に与える影響を調査した。

実験3. 歪みゲージ式変位計によるトマトの莖径変化の計測

第1花房開花期まで土耕で栽培したトマト (*Lycopersicon esculentum* L., 品種：桃太郎8) を広島大学ガラス温室の水耕培地（ホーランド養液）に移植し、実験に供試した。病虫害の防除などは慣行法に準じて行った。莖径の計測は、第2花房が開花期で、第1花房が果実肥大期のトマト個体を用い、主莖の径変化を5分間隔で72時間連続して測定した。すなわち、測定は、実験1のピンチコック区と同様にして、莖に歪みゲージ式変位計を取り付けて行った。

結果および考察

零点移動に対する付属金属および気温の影響

定格出力についての結果（図4）をみると、10℃当たり最大で±3 μmの差があった。零

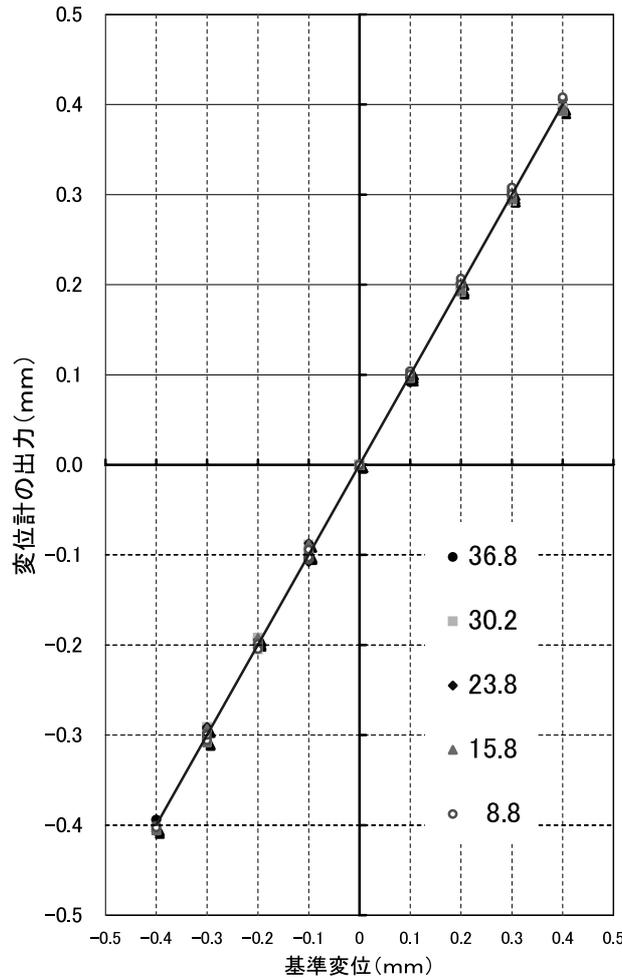


図4 温度が歪みゲージ式変位計の定格出力に及ぼす影響

点移動は、変位計単体区では、10℃当たり 1 μm だったのに対して、ピンチコック区では10℃当たり 4 μm であった(図5)。すなわち、零点移動の区間差異はピンチコックが温度に反応し、伸縮したためと推測される。

変位計の零点は、気温と連動して変動し、気温の上昇に伴い変動幅が増大した(図6)。この増大は変位計単体よりもピンチコック区の方が著しく大きかった。約40℃の温度変動幅に対して、変位計の測定結果は約16 μm 変動した。変動幅は平均で10℃当たり 4 μm であり、実験1の零点移動幅と一致した。すなわち、変位計システム(変位計、ピンチコックなどを含む計測システム)による測定の際、10℃当たり 4 μm の誤差で径変化の測定が可能であると推定される。

歪みゲージ式変位計によるトマトの茎の径変化

歪みゲージ式変位計によるトマトの茎の径変化の実測例を図7に示した。

トマトの茎径の径変化を3日間測定した所、日変化は210~430 μm の範囲で変動したのに対し、変位計の温度の日変化は18.2~22.0℃で変位計システムに由来する日変化、すなわち測定誤差は7.3~8.8 μm であった。これら測定値から、茎の日変化は歪みゲージ式変位計によ

って2.1~3.5%の誤差で計測されたことになり、この誤差による実用上の問題は少ないと考えられる。

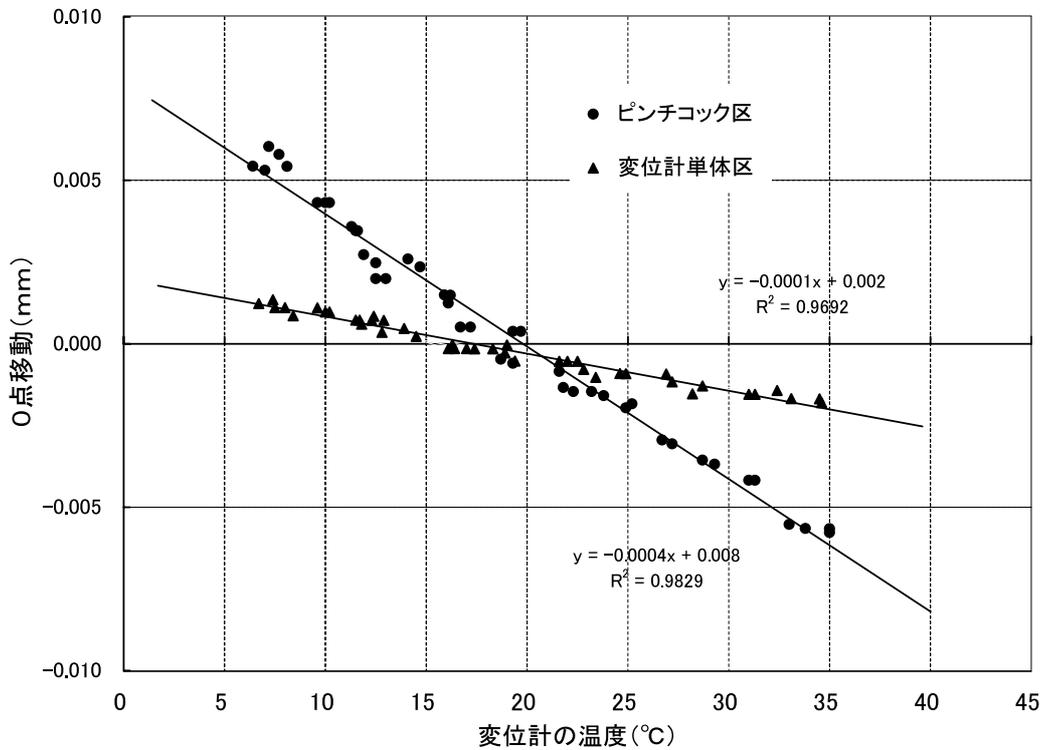


図5 温度が歪みゲージ式変位計の0点移動に及ぼす影響

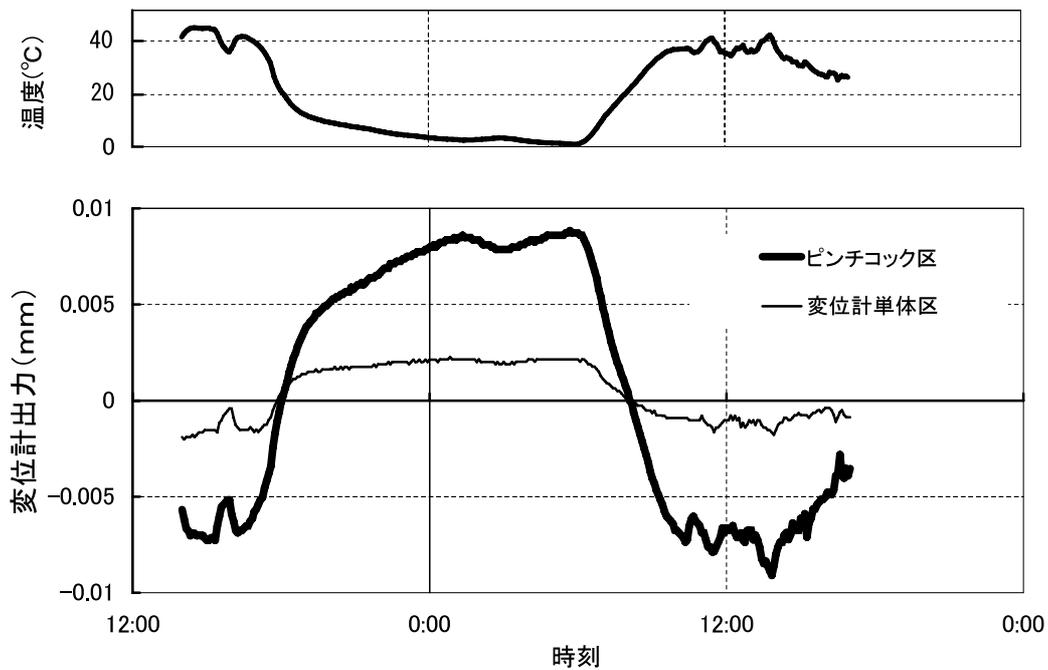


図6 温度の変動が歪みゲージ式変位計の0点移動に及ぼす影響

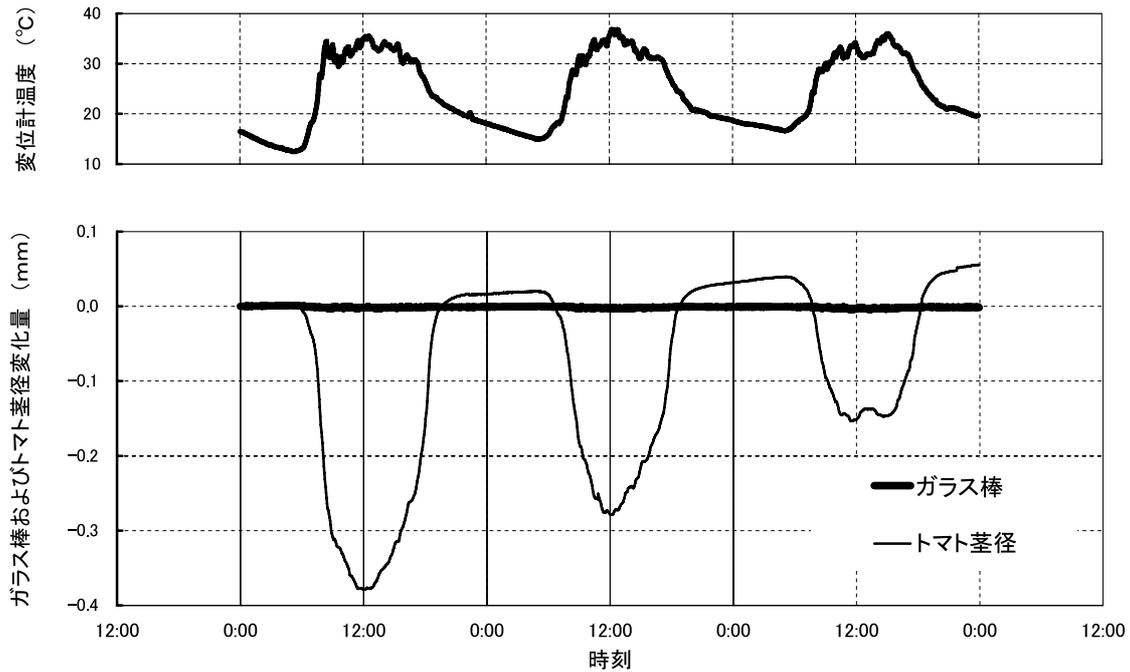


図7 トマトの茎径測定と歪みゲージ式変位計の温度特性

このように、真ちゅう製ピンチコックを用いた場合、測定誤差が最高で約3.5%となる。このため、ピンチコックの構造を改善し、その素材を温度感受性の低いものへ変換すれば精度はさらに向上すると推定される。

トマトの茎径は、夜明けと共に光照射が始まると収縮を開始し、2～3時間内に最低値に達し数時間一定に維持された後、再び膨張を始め、日没によって光照度が低下すると、夜明け前の茎径にほぼ匹敵する値まで回復した。茎径はこのような日変化を繰り返したが、日数の経過に伴い昼間の最低値が上昇し、夜間の最高値も上昇する傾向を示した。これらの結果は、これまでに報告された各種作物および果樹類の測定例と概ね一致している (Klepperら, 1971 ; Hinckley and Bruckerhoff, 1975 ; Lassoie, 1979 ; Linkら, 1995)。

以上の結果から、歪みゲージ式変位計によって作物の茎などの微小な形態的变化を高精度で計測することが可能である。しかも、これらの結果は作物が光に対して短時間で鋭敏に反応し、形態的变化を引き起こしていることを示している。しかしながら、この形態的变化をもたらす生理的な要因については目下の所、十分に明らかにされるに至っていない。それ故、環境因子がもたらす作物の成長速度の変化と作物体内の生理的反應との関係が解明されると、歪みゲージ式変位計は作物の環境ストレスを鋭敏かつ迅速に捉えうるセンサーとして利用しうる可能性が高い。

Ⅱ. ニホンナシ ‘幸水’ の樹体および果実形質に対する環境要因の影響

1. 補光

緒言

ニホンナシ ‘幸水’ では、開花から成熟までの日数は約120日であり、広島県など瀬戸内沿岸地域では8月中旬から9月上旬に成熟期を迎える。したがって、果実肥大の最盛期は梅雨（6月中旬から約1か月）に当たり、日射量の不足のため果実肥大や品質が低下すると予測される。しかしながら、この時期の日射量が果実肥大・品質および熟期などに与える影響は解明されるに至っていない。

日射量は葉の気孔の開閉を通じて植物の水分状態に影響を与えることが指摘されている。日の出に伴い茎径が急速に収縮し、日没と共に膨潤する (Imai ら, 1990 ; Ito ら, 1999b)。すなわち、日射によって気孔が開き、蒸散が盛んになると根からの水供給が追いつかないため茎が収縮すると考えられている。一方、大気中の二酸化炭素濃度の上昇に伴い光合成は上昇する。しかし、高二酸化炭素濃度では気孔開度が全開時の30~60%に低下するため蒸散速度が低下し、この結果、植物の水分保持量の減少が抑制され、茎径の収縮量が減少すると考えられる。また、茎の径変化は植物組織の水分状態と密接に関連している。Imai ら (1990) はブドウで、Simonneau ら (1993) はモモで、歪みゲージ式変位計による茎径の変化が葉の水分状態と密接に関連すると報告している。このように、植物の水分状態と茎径の変動が密接に関連することは報告されているが、日射量の上昇が茎径の変動に与える影響は報告されていない。

光、二酸化炭素濃度などの環境要因が光合成に影響を与え、その結果、果実の生産や品質にも影響を与える。例えば、 P_0 は弱光下では低く、日射量の上昇に伴い上昇する。二酸化炭素富化によってリブローズ-1, 5-ビスフォスフェートカルボキシラーゼ/オキシゲナーゼの二酸化炭素固定能が高まるため、 P_0 が上昇し (Makino, 1994), その結果作物生産が向上する (Hardy and Havelka, 1975 ; Kimball, 1983)。

一方、光はシンクの代謝に対しても影響を与える。Evans ら (1972) によると、コムギの穂の遮光によって着粒が著しく減少するという。コムギの着粒はジクロロフェニルジメチル尿素で光合成を完全に阻止した場合でも影響を受けなかった。これらの結果から、着粒は光合成を介在せずに光自体の影響を受けて行われることが示唆される。ダイズの花や莢を遮光すると落花、落莢が増加し、茎葉における光合成産物の集積が促進される (Heindle and Brun, 1983)。Guan and Janes (1991) はトマトで、光による果実生長の促進は光合成以外のメカニズムによると報告している。

そこで、本研究は、圃場条件下において果実肥大期を通じて補光処理を行い、日射量がニホンナシ ‘幸水’ の P_0 、茎の径変化、水分状態および果実生長に対する影響を詳細に検討し、ナシの果実肥大や品質に対して補光が有効か否かについて解析した。

材料および方法

本研究は広島県立農業技術センター果樹研究所で実施した。すべての実験でニホンナシ‘幸水’ (*Pyrus pyrifolia* Nakai) を供試した。

実験1. 日射量がニホンナシ葉の P_0 に与える影響

P_0 と光量子量との関係

未耕土のマサ土（花崗岩風化土壌）とバーク堆肥を7：3の比で混合しコンテナ（培土60L）に充填した培地に1年生ニホンナシ‘幸水’を移植し、生育に応じて施肥、防除を行い4年生に育成した。実験開始前年の秋季に基肥として窒素、リン (P_2O_5)、カリ (K_2O) をそれぞれ、培土10L当たり10, 5, 10g ずつを基肥として与えた。

P_0 の測定は、1993年6月に人工気象室（広島設備株式会社製，広島市）に4年生ニホンナシ‘幸水’を搬入し、2日間環境に適応させた後実験に供試した。満開後60日目のニホンナシ‘幸水’3個体の発育枝の基部から第5, 6, 7葉および短果枝の第3, 4, 5葉について、光量子を3段階（300, 800および1200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ）とし携帯型光合成測定器（LI-6200型，ライカ社製）で測定した。なお，気温を25℃，相対湿度を70%に保った。

早朝と夕方の補光と P_0 との関係

早朝と夕方の補光処理は P_0 と光量子の関係と同様に育成した3年生ニホンナシ‘幸水’を1989年に自然光ファイトトロンに搬入し、2日間環境に適応させた後行った。補光処理は、着果した3年生樹4個体（培土25L）を用い、満開後61日目（晴天日）に、メタルハライドランプで、200 $\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の日射量を早朝（午前4時30分～8時）および夕方（16時～19時）のそれぞれ3.5および3時間にわたって行った。 P_0 の測定は、同日午前4時30分から30分あるいは1時間間隔で19時30分まで日射量の変動試験と同様に3側枝の発育枝の5, 6葉位葉を用いて行った。

曇雨天日の補光と P_0 との関係

曇雨天日の処理はほ場で平棚栽培した9年生ニホンナシ‘幸水’を2個体用い、日射量が午前8時の時点で280 $\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 以下の日（満開後37日目；1992年5月29日）を選び、午前8時から4時間（午前中だけ）の補光を行った。 P_0 は、日射量の変動試験と同様に、3側枝の発育枝の5, 6葉位葉を8時30分から1時間間隔で18時30分まで測定した。

実験2 補光が栄養生長，果実の生産および品質に与える影響

個体全体の補光処理

二本主枝整枝法によって圃場（細粒黄色土造成相；凝灰岩質流紋岩土壌，埴壤土）で平棚栽培した8年生樹（栽植密度；3.0m×6.0m）2個体を用いた。すなわち，施肥として1年間で200 kg N ha^{-1} ，100 kg P ha^{-1} および200 kg K ha^{-1} を与え，病虫害の防除を適宜行い栽培した。補光処理は，個体の片方（半分）の主枝にメタルハライドランプ（400 J s^{-1} ）8灯を地上180cmに設置した平棚の約60cm上部に設置し，個体の光照射は側枝にほぼ均等に行った。もう一方の無補光の主枝を対照区とした。新梢葉の70%が成葉化した満開後25日目（1991年5月18日）から曇雨天日に補光を開始した。なお，補光処理は7時45分および8時に日射量が280 $\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 以下の場合に，午前8時から4時間（午前中）に，すべての果実の収穫を終了した満開

後136日目までの間に77日行った。なお、棚面の補光の日射量は約 $210 \text{ J m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ とした。

側枝の補光処理

個体処理と同様に二本主枝整枝法によって圃場平棚栽培した9年生樹(3.0×6.0m)2個体を用いた。各個体から2側枝づつを選び、メタルハイドランプ(400 J s^{-1})2灯を側枝の約60cm上部に設置し、側枝にほぼ均等に光の当たる位置に設置した。補光処理は、発育枝の基部から第5葉までがほぼ成葉化した満開後25日目(1992年5月18日)から開始し曇雨天日の午前中にのみ実施した。なお、補光は棚面の日射量を $280 \text{ J m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ とした以外は、個体の補光処理と同様の条件で満開後127日までに60日行った。

調査方法

樹体生長と果実肥大

新梢長、展開葉数、側枝径および果実横径は、満開20日後から約1週間毎に測定した。いずれのパラメーターの測定も10反復で行った。

果実形質

ニホンナシ‘幸水’の地色がカラーチャート(農林水産省果樹試験場監修)の指示値で3.5以上となり収穫適期と判定した成熟果実を満開後114日目から137日まで24日間にわたって2~3日間隔で採取し、収穫日に1果重、糖度、酸度および硬度を測定した。個体処理では対照区で173果、補光区で164果、側枝処理では対照区、補光区でそれぞれ35、30果について調査した。なお、糖度は果実の1/8の大きさの縦断果肉片を4片選び、果皮、果心を除き、搾汁器で磨砕し、搾汁液をガーゼでろ過した果汁の屈折計示度を測定した。果肉硬度は果実縦断面、赤道部をマグネステラー(10 lbs, プランジャー5/16インチ)で1果の4カ所を測定した。酸度は糖度測定と同じ果汁をpHメーターで測定した。

側枝径、蒸散流量の測定

側枝径は岩尾ら(1988)の方法に準じて測定した。すなわち、満開から116日後の個体について、それぞれの処理個体の1側枝に歪みゲージ式変位計を取り付け、48時間にわたって10分ごとの測定値をデータロガー(DE-1000型, NEC三栄社製)に測定し収録した。

蒸散流量は、側枝径の計測と同一個体の同一側枝を用い、48時間にわたって熱収支法を用いて計測した10分ごとの測定値をデータロガー(21X型, Dynamax社製)に収録した。なお、熱収支センサーにはダイナゲージ(SGA10-WS型, Dynamax社製)を用いた。

結 果

実験1. 日射量が P_0 に与える影響

P_0 は発育枝葉、短果枝葉とも大気と同じ二酸化炭素濃度では、光量子量の増加に伴い上昇し、 $1200 \mu \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ で最高値に達した(図8)。 P_0 は発育枝葉で短果枝葉よりも常に高く、測定光量子下の最高値は発育枝葉、短果枝葉でそれぞれ17、 $15 \mu \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ であった。

発育枝の P_0 は、対照区では晴天下で早朝に光量子量の増大に伴い上昇し、日中は光量子量の変化によって変動しながらほぼ一定値を示した(図9)。一方、補光区は光量子量の小さい早朝と夕方には3時間の補光によって P_0 が対照区に比べて上昇し、この上昇は早朝でより著しかった。1日当たりの光合成量をみると、補光による光合成の促進効果は約5%にとどま

った。一方、曇雨天日における午前8時から4時間の補光によって、午前中の補光処理中の P_0 は1.2倍に上昇したが、補光処理終了後の午後には補光の有無によって P_0 値に変化はなかった(図10)。1日当たりの増加量を面積で推定すると約8%の増大を示した。

以上の結果から、補光は曇雨天日などの低日射下での光合成量の増加に有効であると推定される。

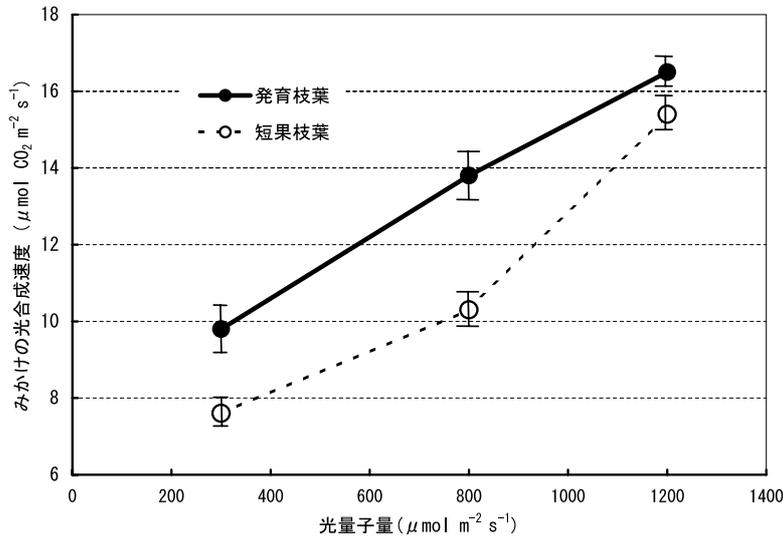


図8 ニホンナシ‘幸水’のみかけの光合成速度と光量子量との関係(実験1)

標準誤差(n=3)を垂直線で示した。

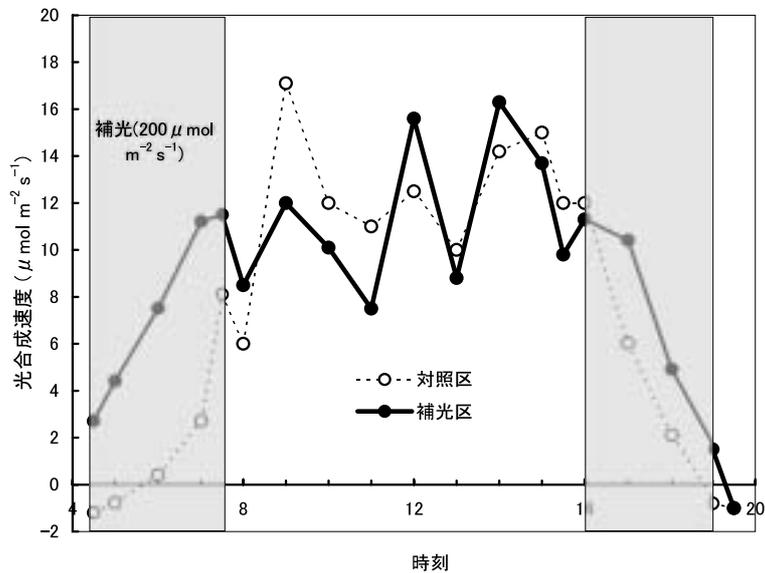


図9 早朝と夕方の補光がニホンナシ‘幸水’の満開61日後における発育枝の葉のみかけの光合成速度に及ぼす影響(実験1)

1989年6月21日に調査した。

各光合成測定の前平均値の標準誤差(n=6;側枝)は対照区および補光区でそれぞれ0.27~0.53および0.29~0.57 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の範囲にあった。

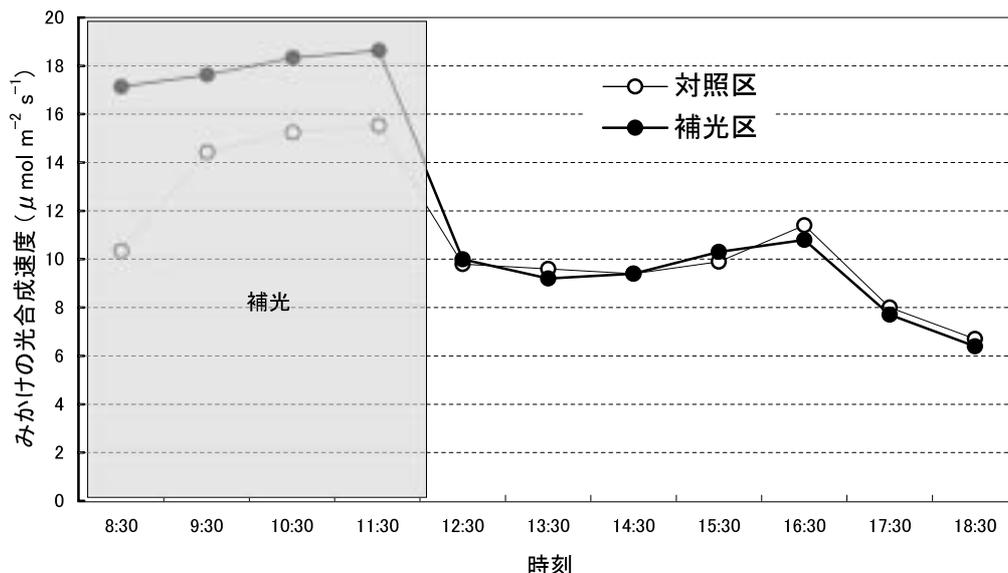


図10 曇天日の午前中の補光がニホンナシ‘幸水’の満開37日目の発育枝葉の光合成速度に及ぼす影響

1992年5月29日に調査した。

各光合成測定時の平均値の標準誤差 (n = 6 ; 側枝) は対照区および補光区でそれぞれ0.25~0.47および0.28~0.49 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の範囲にあった。

実験2. 補光が栄養生長、果実生産および果実品質に与える影響

個体全体の補光処理の影響

栄養生長

新梢伸長、葉の展開速度および新梢伸長停止期は補光による影響がみられなかった(図11)。一方、側枝径は補光処理開始20日後の満開後45日目から徐々に増大し、満開75日目に2%差となり、この差は収穫終了まで継続した。

果実生長および品質

補光区の1日当たりの果実横径増加量は補光処理開始20日後の満開後100日目から対照区より徐々に大きくなり、果実の収穫時に果実横径は対照区より約2mm増加した(図12)。平均1果重は対照区に比べ補光区で約23g(対照区の7%に相当)大きかった(表1)。果実のサイズについて見ると、対照区に比べて補光区では3L(1果重が350~400g)以上の大果の割合が多く、特に5L(1果重が450g以上)の果実の割合で著しかった(図13)。酸度は補光の影響を受けなかったが、糖度および果実硬度は補光によって上昇した。

果実の成熟は補光によって促進され、また収穫開始初期の成熟果実数が多かった。成熟果実数は、補光区で満開後118日目(8月19日)および125日目(8月26日)の2時期に全調査果実の20%を越えるピークがみられたのに対して、対照区では満開後125日目のみのピークを示すにとどまった(図14)。成熟果実の累積収穫率が60%に到達した時期を比べると、対照区よりも補光区で3日早かった。

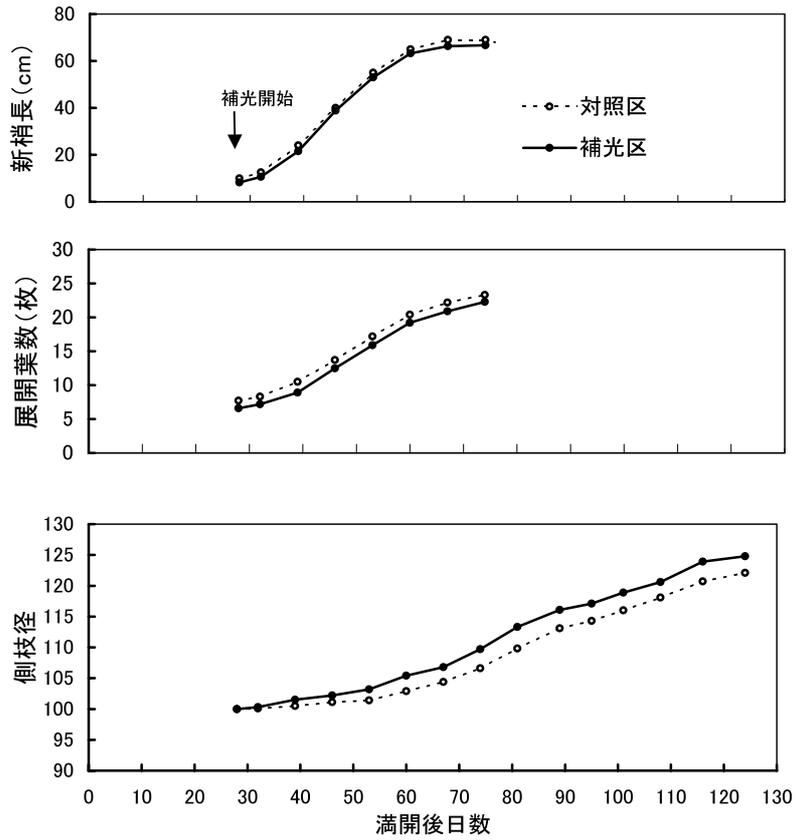


図11 個体全体の補光がニホンナシ ‘幸水’ の新梢伸長，葉の展開および側枝肥大に及ぼす影響（実験 2）

側枝径は満開28日後の直径を100とした相対値を示した。

2 個体の最大値と最小値を垂直線で示した。

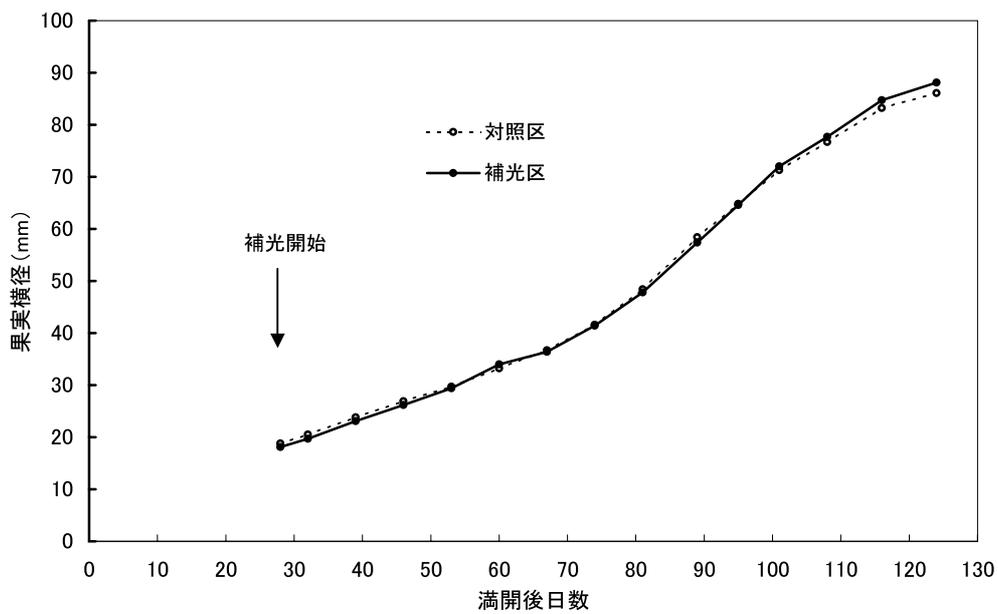


図12 個体全体の補光がニホンナシ ‘幸水’ の果実肥大に及ぼす影響（実験 2）

2 個体の最大値と最小値を垂直線で示した。

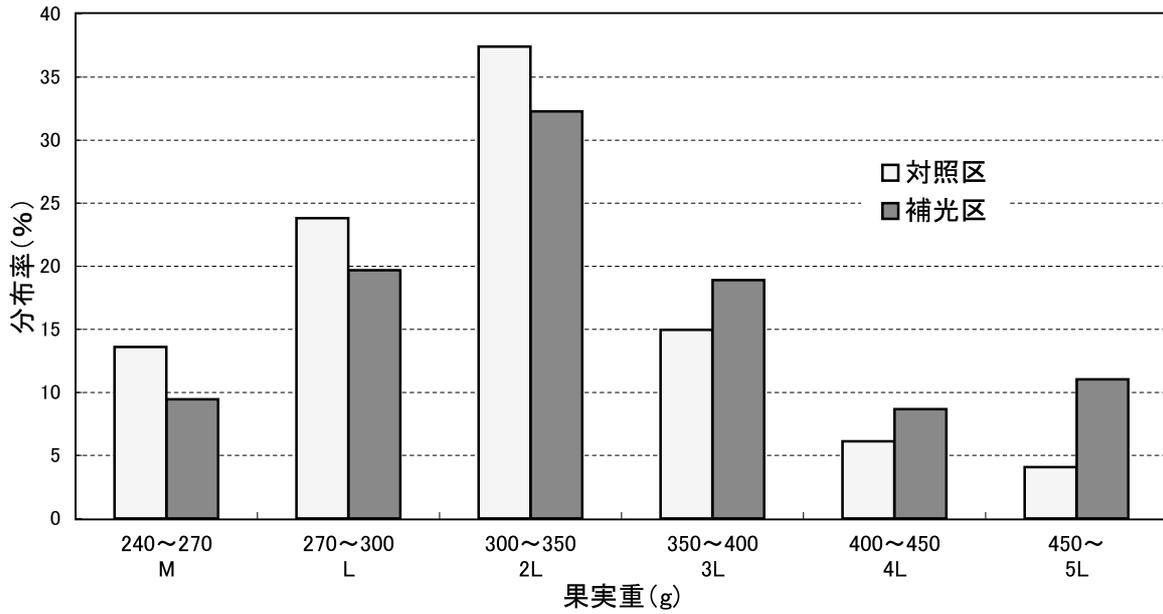


図13 個体全体の補光がニホンナシ‘幸水’果実の階級分布に及ぼす影響（実験2）

1991年に満開後114~137日までの全成熟果を調査した。
n=2の平均値を示した。

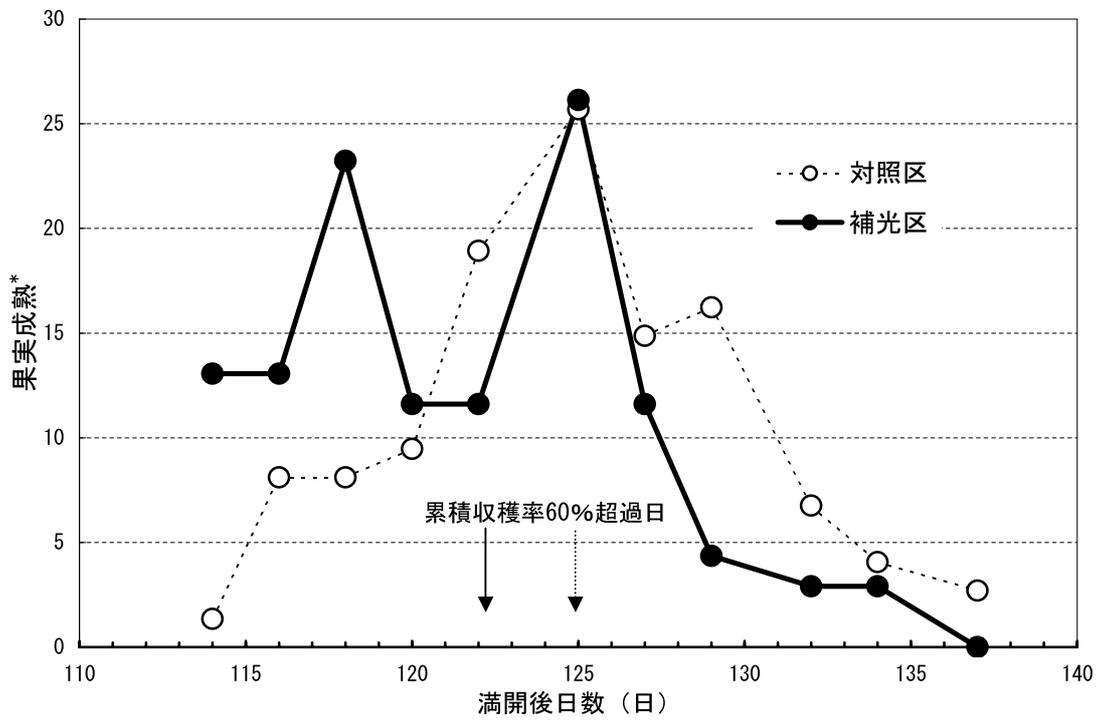


図14 個体全体の補光がナシ‘幸水’の果実の成熟に及ぼす影響（実験2）

*全調査果実を100としたときの相対値で示した。
果実の地色が3.5に達した成熟果を採取した。
n=2の平均値を示した。

表1 補光がニホンナシ‘幸水’の果実形質に及ぼす影響

| | 平均1果重 (g) | 糖度 (%) | 酸度 (pH) | 硬度 (lbs) |
|-----|--------------|-----------|------------|-------------|
| | | 個体処理 | | |
| 対照区 | 327±5.6 | 12.6±0.06 | 5.24±0.03 | 4.7±0.12 |
| 補光区 | 350±9.0 | 12.8±0.07 | 5.27±0.02 | 4.9±0.08 |
| | | 側枝処理 | | |
| 対照区 | 320±10.6 | 12.5±0.12 | 5.20±0.05 | 5.0±0.18 |
| 補光区 | 347±13.4 | 13.0±0.10 | 5.20±0.07 | 5.2±0.20 |

数値は2樹の平均値±差を示した。

側枝の補光処理の影響

栄養生長

新梢の伸長および葉の展開速度は補光処理の影響を受けなかったが、側枝径の肥大は補光によって上昇し、この傾向は個体全体の補光処理の影響と類似していた（データ省略）。

果実生長および品質

果実横径は個体処理と同様に補光区が対照区を上回る推移を示した（データ省略）。

平均1果重は対照区に比べ補光区で約27g（対照区の果実重の8%に相当）大きかった（表1）。糖度は補光区で対照区に比べて0.5%高かったが、酸度および硬度に有意差はみられなかった。

側枝径と蒸散量

曇天日の補光時に側枝径は減少し、蒸散量は増大した。しかし、補光処理の翌日には蒸散量は対照区と差が小さくなり、その結果、側枝径の変化量の差が小さくなり、補光の影響はほとんど残らなかった（図15）。

考 察

日射量の増大（光量子量が $1200 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ まで）に伴い、ニホンナシ葉の P_0 は上昇した（図8）。晴天日においても、朝夕ではこの光量子量に到達せず、曇雨天時では終日この光量子量以下で推移する。それ故、これらの時間帯の補光が P_0 を上昇させることは当然のことである。しかしながら、補光が特定の生育時期の光合成や生長に与える影響を定量的に評価し、補光が作物生産に与える意義は必ずしも十分に評価されていない。

本研究においても、低日射下の補光によって P_0 が上昇することは確認されている（図9）。しかしながら、晴天日には夕方に比較して早朝の補光による P_0 上昇効果が高く、この現象の生理的機構は必ずしも明らかではない。

P_0 から1日の光合成量を積算すると、朝夕の3時間ずつの補光による1日の光合成量は約5%増大したと推定される（図9）。一方、曇雨天時でも午前中の補光によって P_0 が1.2倍に上昇し、1日当たりで約8%の光合成量の増大が推定される（図10）。

これらの結果から曇雨天日に補光処理を行うことが有効と考えられる。そこで、新梢葉の70%が成葉化（満開25日）した後、果実成熟期まで長期間にわたって曇雨天日のみに補光処理を行い、樹体生長と果実生産、品質に与える影響を調査した（実験2）。

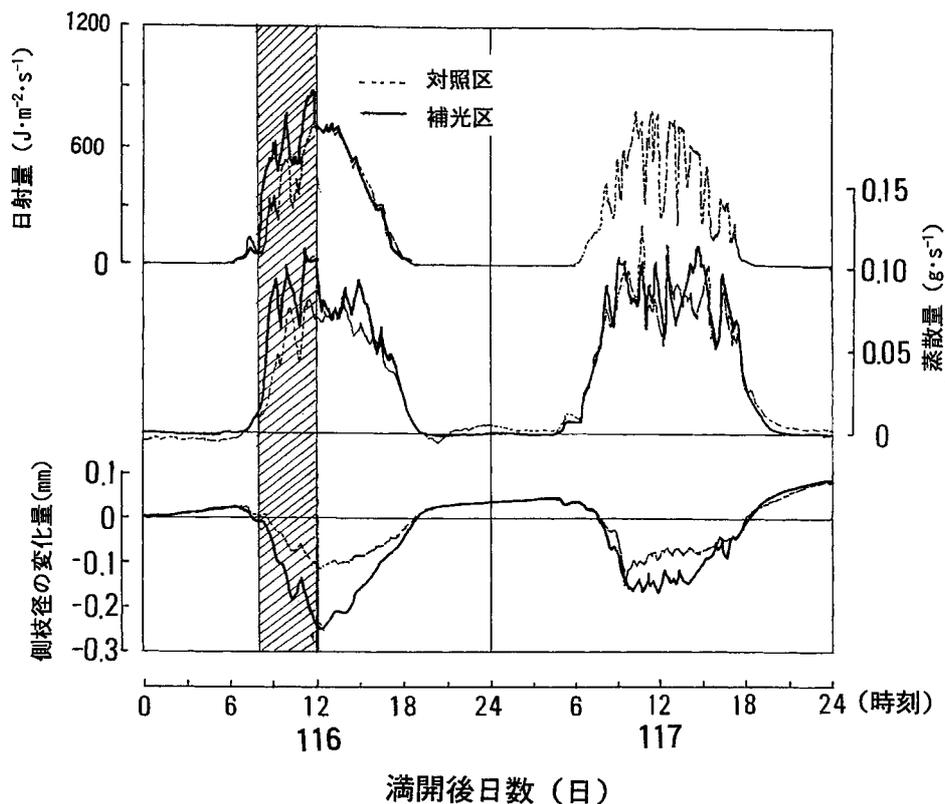


図15 側枝の補光がニホンナシ‘幸水’の蒸散と側枝径の変化に及ぼす影響（実験3）

1992年8月16, 17日に調査した。

斜線は補光時間帯を示した。

補光によって、側枝の茎径の肥大は促進された(図11)。一方、新梢伸長や葉の展開に対する影響は殆ど観察されなかった。すなわち、補光は栄養生長を促進させる上で有効であるが、新たに生長する器官の形成に対する影響は小さいと考えられる。

個体全体もしくは特定の側枝などの部分的な補光に関わらず、補光によって果実肥大は促進され、平均1果重が約7～8%増大し、その結果として5L級以上の大玉果率が向上した。(図13)。個体全体の補光処理の場合、個体当たり着果数は164～173果に調節してあり、単位面積当たりの収量に換算すると補光区の果実収量は約32 t ha⁻¹で、対照区の果実収量を1 t ha⁻¹上回ると推定される。すなわち、補光によってP₀を上昇させ、ソース能を強化すると、果実肥大が促進され果実サイズが増大すると考えられる。同様に葉果比を変えソース能を強化すると果実の肥大が促進される現象はトマトでも観察され、1個体当たり1果だけを着生させると果実重は通常の栽培条件の1.5倍に増大する(藤田ら, 1974)。この考え方に基づくと、通常の栽培条件下では梅雨時期には日射量が不足するため、ソース能が低下し、その結果、果実肥大が阻害され大玉果の割合が低下すると推察される。本研究において果実品質も日射量と密接に関係した。すなわち、果実糖度は補光処理によって、対照区に比べて最大0.5%まで上昇した(表1)。ニホンナシ果実は成熟期までは転流したソルビトールをスクロースなどの糖類へ変換しさらにデンプンとして集積し、成熟期にはデンプンに変換することなく糖類

として集積する(Yamakiら, 1979)。以上の結果から、補光を行い、日射量を増大させ P_0 を高めることによって、果実肥大の促進だけでなく糖度を上昇させ、果実品質の向上を図ることが可能である。

一方、二酸化炭素の富化がニホンナシ果実に与える影響は時期によって異なり、果実後期肥大期には果実重の増大に、成熟期では果実糖度の上昇に有効であると報告している。本試験の補光処理は果実前期肥大期から収穫期まで実施しており、時期は特定できないが果実重および果実糖度の両者に二酸化炭素富化と同様の効果を与えたと考えられる。

個体全体の補光処理は果実の成熟期を3日間促進した(図14)。Guan and Jones (1991)によると、日射量の上昇によって P_0 やトマト果実の光合成産物の分配は促進されず、トマト果実自身のヘキソースおよびデンプン代謝が直接促進されるという。さらに、光によって果実の着色やタンパク質の合成に影響を与えることも報告されている(Raymundoら, 1976)。この現象はどのような生理的要因によるものであろうか。果実の成熟を促進する要因として積算温度や樹体の窒素などの栄養状態が関与するといわれている。早期出荷をねらった加温栽培では成熟までの期間が短縮されて平均1果重は小さくなる(佐藤ら, 1978)。これらの報告は、果実の生育期間と平均1果重は密接に関連し、その期間の短縮に伴い、平均1果重が減少することを示している。この結果は果実の生育期間が短縮し果実サイズが増大する本研究の補光効果と一致しない。また、通常露地栽培では冷夏長雨年などのため満開から成熟までの期間が長いほど平均1果重は大きくなるが、糖度は低下することが観察されている(佐藤ら, 1978)。これらの既往の研究結果から、補光によって果実の成熟期が促進された要因は不明である。しかし、いずれにしても、補光によって平均1果重の増大、糖度の向上などを図れる点で有効である。近年、選果場に非破壊型の近赤外センサーなどが導入され、果実糖度による品質の差別化がなされている。冷夏長雨年などによる日照不足のため、相対取引の契約糖度に到達しない果実割合が増大する場合も想定され、補光処理は果実品質を安定的に高く維持し高級品をねらった果実栽培技術として利用される可能性もある。

補光によって日中の側枝径の収縮量が増大し、水移動速度は上昇することが示された(図15)。この現象はニホンナシで観察された二酸化炭素富化によって莖径の収縮が低下する現象(Itoら, 2002)と異なった。本実験結果と既往の知見を総合すると、補光によって蒸散が促進され、これを根からの水輸送によって補償できず一時的に側枝内の水分が減少し、収縮したと考えられる。以上のような本研究結果から、ニホンナシにおいて、土壤水分状態が同一の場合に日射量の変化に対する応答を歪みゲージ式変位計による莖径の変動から感知し、栽培技術に応用できる可能性が示唆された。

2. 土壌水分

緒言

果樹生産は気温、二酸化炭素濃度、水分・養分供給などの様々な環境因子によって影響を受けつつ行われる。これらの諸要因が果樹類の生育および生理機能に与える影響を明確にすることは、施設栽培における栽培技術の確立において極めて重要である。本章では土壌水分状態がニホンナシの果実生産に与える影響について検討した。水ストレスによって作物生産が阻害を受けることは多くの植物種で報告されている。例えば、果樹類の水要求量は1日の時間帯や生育時期、気象条件、植物の生理状態などの様々な要因によって刻々と変動する。したがって、ニホンナシの果実生産や品質の向上を図るためには、植物の水分状態に対する応答をリアルタイムで感知し、植物の生理状態を診断し、灌水の時期や量を判断することが望まれる。すなわち、植物の生体情報に直接基づく灌水システムの確立が高収性および高品質の果実生産を目指した果樹栽培技術の確立に不可欠である。

茎や果実の直径の計測は古くから行われてきた(Klepperら, 1971; Linkら, 1998)。Huguet(1985)は、茎径などの形態変化の高精度計測法を開発し、この方法による茎径変化の連続測定は、モモ樹園地の灌水管理に有効であることを示した。この方法によって、植物の生長に影響を与えずに非破壊で連続的に茎などの栄養器官および果実などの生長速度の測定が可能である。その後、同様の方法を用いた植物の水分状態の測定例が報告されている(Iwaoら, 1988; Campbell and Turner, 1991; Simonneauら, 1993; Moghaiebら, 2001)。Simonneauら(1993)は、差動トランスで測定した茎径の変動は水分含有量と密接に関係することを示した。また、この現象は気孔の開閉によると推定されている(Imaiら, 1990; Jhonsonら, 1992; Pearceら, 1993)。歪みゲージ式変位計で測定したニホンナシ側枝の径変化が日射量によって変動(伊藤ら, 2003b)し、これは主に葉の気孔開度や蒸散速度に伴う植物の水分状態によると報告している。Moghaiebら(2001)はトマトを用い、茎径の変化は蒸散速度に加えて根からの水供給速度に関連し、これらのパラメーターが塩ストレス耐性を評価するための重要な指標となりうることを指摘している。さらに、Genardら(2001)は、桃の幹およびスモモの根を用い、モデル解析によって木部の水ポテンシャルと根の直径の変化が密接に関連することを証明している。

Imaiら(1994)は、ニホンナシ‘幸水’の果実生長パターンから、果実の生育ステージを細胞分裂期、初期肥大期、発育停滞期、後期肥大期および成熟期に分けることを提案している。また、各生育ステージにおける植物体内の水分状態と果実横径および側枝径との関係から、ニホンナシ‘幸水’の樹体に水ストレスを与えない土壌水分ポテンシャルは-16~-31 kPaの範囲にあり、生育ステージにより変動すると結論している。しかし、目下の所、ニホンナシの栄養生長および果実生産に対する水ストレスの影響は充分解明されておらず、その影響を回避するための診断法は確立されていない。

以上のことを背景として、本研究はニホンナシを用い、水ストレスが茎や果実の径変化に与える影響を歪みゲージ式変位計を用い高精度で連続測定し、ニホンナシの果実の生育ステージ別の最適土壌水分状態を知るために水ストレスの生体情報に基づくリアルタイム診断法の確立に資すると共に、土壌水分状態に起因する水ストレスが果実肥大や品質に与える影響

を調査した。

材料および方法

本研究は広島県立農業技術センター果樹研究所で実施した。すべての実験で主幹形整枝仕立てのニホンナシ (*Pyrus pyrifolia* Nakai, 品種 ‘幸水’) を供試した。なお、果実は、長果枝には長さに応じて2～3果、ほぼすべての短果枝に1果着生させ、樹勢に応じて1側枝当たり3～7果着生させた。

実験1 果実生育全期間の土壤水分が樹体生育と果実肥大に与える影響

コンテナ (80L) に未耕土のマサ土 (花崗岩風化土壌) とバーク堆肥を7:3に混合し、1987年に1年生ニホンナシ ‘幸水’ を植え付けた (栽植密度; 1.35m×1.50m)。ガラス温室内で生育に応じて施肥および防除を行い4年生まで育成した。1991年秋季に基肥として窒素、リン (P_2O_5)、カリ (K_2O) をそれぞれ、培土10L当たり10, 5, 10gずつ施用した。実験は、側枝数を8～10本に調整した5年生ニホンナシ ‘幸水’ を供試し、3樹3反復で同一のガラス温室内で1992年に実施した。土壤水分処理は、ニホンナシ ‘幸水’ の満開時の4月12日から果実の収穫終了時の8月15日まで125日間実施した。土壤水分状態を変え、高水分区 (土壤水分ポテンシャル $-4 \sim -1$ kPa) および低水分区 (土壤水分ポテンシャル $-25 \sim -10$ kPa) の2区を設けた。低水分区は -25 kPaで灌水し -25 kPaから -10 kPaに保ったのに対して、高水分区では -4 kPaで灌水を開始し、 -4 kPaから -1 kPaに保った。この灌水処理はコンテナ (深さ30cm) の深さ15cmの部位に土壤水分測定センサー (DM-8P型, 竹村電機製作所製) を設置し、各処理区の下限土壤水分ポテンシャルに到達したとき、自動かん水指令装置 (DM-104型, 竹村電機製作所製) を用いて1樹1回当たり5L (20mm相当量) 行った。土壤水分ポテンシャルは灌水指令センサーと同じ位置に土壤水分測定センサーを埋設し、自記テンシオメーター (DIK-3202型, 大起理科工業社製) で連続して測定した。

新梢長および展開葉数は満開後15日目から約1週間間隔で連続測定した。

果実横径および側枝径は、発育停滞期 (満開後58および59日目)、後期肥大期 (88および89日目) および成熟期 (111および112日目) の3時期に測定した。側枝径および果実横径はIwaoら (1988) の方法に準じて測定した。すなわち、各処理区の個体の1側枝とその側枝から各1果実を選定して歪みゲージ式変位計を取り付け、48時間にわたって10分ごとの測定値をデータロガー (DE-1000型, NEC三栄社製) に収録した。なお、これらの測定は晴天日に実施した。

実験2 果実後期生育期の土壤水分が果実生育に与える影響

実験1と同様にガラス温室内で栽培した6年生ニホンナシ ‘幸水’ の側枝数を10～12本に調整して供試した。1993年に満開から収穫終了まで低水分で管理する区 (低水分区)、および果実の後期肥大期だけ高水分で管理しその他の時期は低水分で管理する区 (高水分変換区) を設けた。すなわち、両区とも -25 kPaで灌水する同一の管理を行った後、果実後期肥大期 (満開79日から25日間) のみに土壤水分ポテンシャルを $-4 \sim -1$ kPaにした高水分変換区および低水分区 (-25 kPaから -10 kPaに継続して保った) を設けた。灌水は実験1と同様に自動か

ん水指令装置を用い、それぞれの処理の下限の土壤水分ポテンシャルに到達したとき、1樹1回当たり5L(20mm相当量)行った。なお、栽培管理は満開37日前から加温(5℃以上)を開始し、約10日間隔で5℃ずつ気温を上昇させ、満開1日前から夜間気温(18時~6時)を18℃以上に保った。

果実横径は、満開20日後から果実成熟期まで約1週間毎にノギスで測定した。果実横径(同一箇所)の測定は、1樹から4果を選定し合計12果について、3反復で行った。また、歪みゲージ式変位計によって側枝径および果実横径を水分処理期間および処理終了後の果実の成熟期における2時期(満開87~89および110~112日目)に3日間に涉って実験1に準じて測定した。あわせて、この後期肥大期の土壤水分処理が成熟果実の品質に与える影響も調査した。

ニホンナシ‘幸水’の果実ていあ部の地色がカラーチャート(農林水産省果樹試験場監修)で3.5以上となり収穫適期と判定した成熟果実を採取し、落葉果樹育成系統適応性検定試験調査方法に準じて1果重、糖度、酸度および硬度を調査した。

実験3 果実成熟期の土壤水分が果実生育および品質に与える影響

未耕土のマサ土(花崗岩風化土壤)とバーク堆肥を7:3に混合した培地を充填したコンテナ(容量60L)で1年生苗木を植え付け(1991年)、無加温ハウス内で生育に応じて施肥等の管理を行った3年生ニホンナシ‘幸水’の側枝数を3~4本に調整して1993年秋季に基肥として窒素、リン(P_2O_5)、カリ(K_2O)をそれぞれ、培土10L当たり10, 5, 10gずつ施用し、1994年に実験を実施した。満開から果実の成熟開始期まで同一の土壤水分(-10~-25 kPa)で管理したニホンナシ‘幸水’を用い、果実の成熟開始期(満開後104日目)から収穫までの15日間に涉って3樹3反復で水分処理を行い、水ストレス区(土壤水分ポテンシャルを-63 kPaから-32 kPaに保った)および低水分区(土壤水分ポテンシャルを-10 kPaから-25 kPaに保った)を設けた。なお、果実収穫後から落葉期までは、両区とも土壤水分状態を-10 kPaから-25 kPaに保った。側枝径および果実横径は満開後114日から3日間に涉って実験1に準じて測定し、成熟果実の糖度および糖組成を分析し、さらに落葉後(満開後204日後)に発育枝の無機元素含有率を測定した。

果実の糖組成分析

ニホンナシ‘幸水’の果肉(約20g)をポリトロンホモジナイザーで約5分間粉碎し、No. 5 Cの濾紙でろ過し、濾液を0.45 μ mのフィルターでろ過後、この溶液を糖分析カラム(SH-1011型、昭和電工社製)と示差屈折検出器を備えたHPLC(ガリバーシリーズ、日本分光社製)でYakushijiら(1996)の方法に準じて測定した。溶離液として1.0 mL min⁻¹の流量で水を用い、採取液の糖をスクロース、グルコース、フルクトースおよびソルビトールに70℃のカラムで分離して標準試薬と比較し定量した。

発育枝の無機元素含有率

無機元素含有率は落葉後に剪定した発育枝を用い測定した。90℃で24時間、60℃で48時間通風乾燥後に秤量、粉碎した植物体試料を用い、N(ケルダール法)、硝酸一過塩素酸一硫酸法で分解後、P(バナドモリブデン酸法による比色法)、K、CaおよびMg(原子吸光光度法)を定量した。

結 果

実験1 果実生育全期間の土壤水分が樹体生育と果実肥大に与える影響

果実生育の全期間を通して低土壤水分処理区(-25~-10 kPa)では、高水分区(-4~-1 kPa)に比べてニホンナシ‘幸水’の新梢伸長は抑制された(図16)が、果実肥大が促進され、成熟果実の平均1果重は254 gと20 g増大した(データ省略)。しかし、両処理区の展開葉数に差はみられなかった。

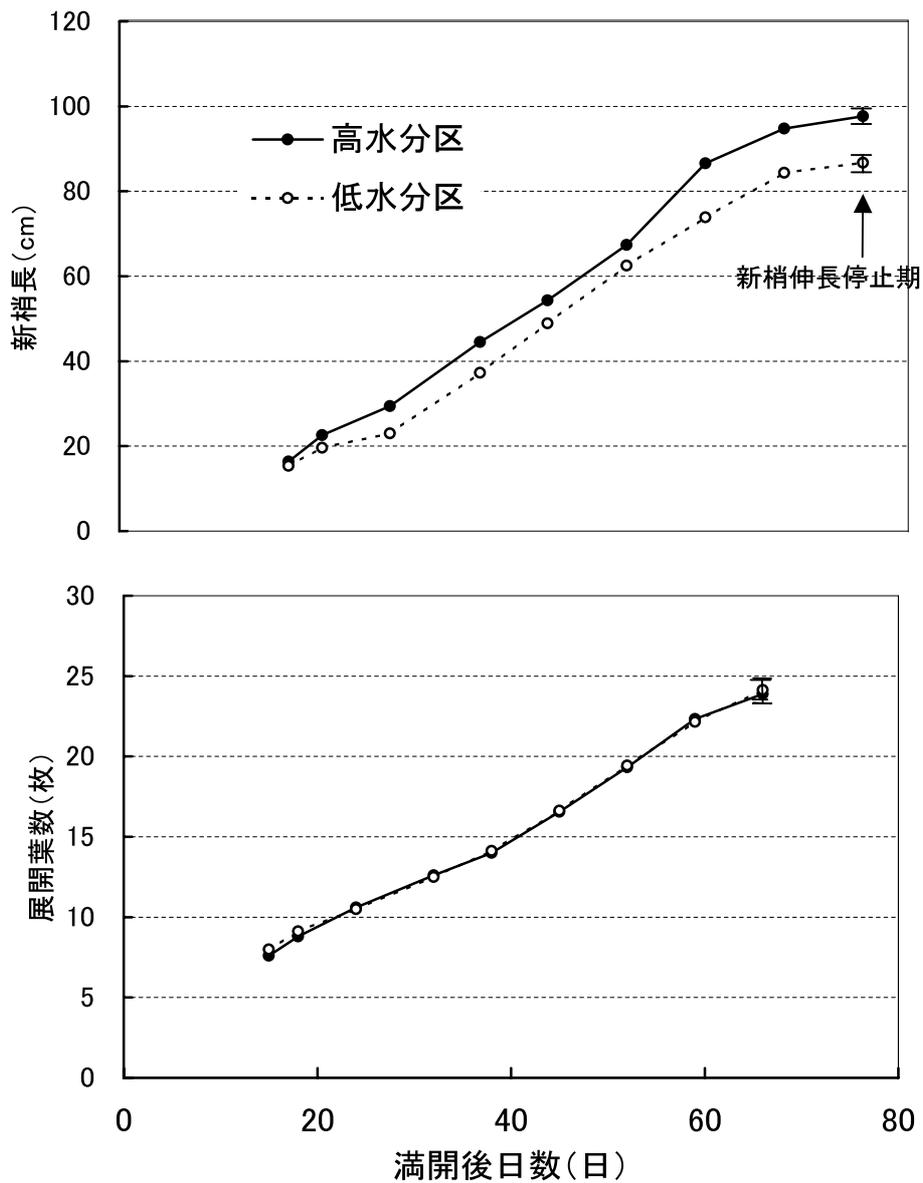


図16 果実生育全期間の土壤水分処理がニホンナシ‘幸水’の新梢伸長および展開葉数に及ぼす影響(実験1)

垂直線は標準誤差(n=3)を示した。

土壌の水分供給状態に対するニホンナシ‘幸水’の応答は生育期によって変動した。発育停滞期では、水分供給に対する応答は側枝径と果実横径間で異なっていた(図17)。側枝径では昼間の収縮は高水分区の方が小さかったが、1日当たりの肥大速度に差異はなかった。一方、果実横径では低水分区の方で肥大速度が高かった。後期肥大期では、側枝径は発育停滞期と類似の傾向を示したが、1日当たりの果実横径の増加量は高水分区で低水分区より約0.15mm大きかった(図18)。また、成熟期では後期肥大期とは逆に、果実横径は低水分区でより高く推移した(図19)。また、側枝径の増加量は高水分区で大きかった。

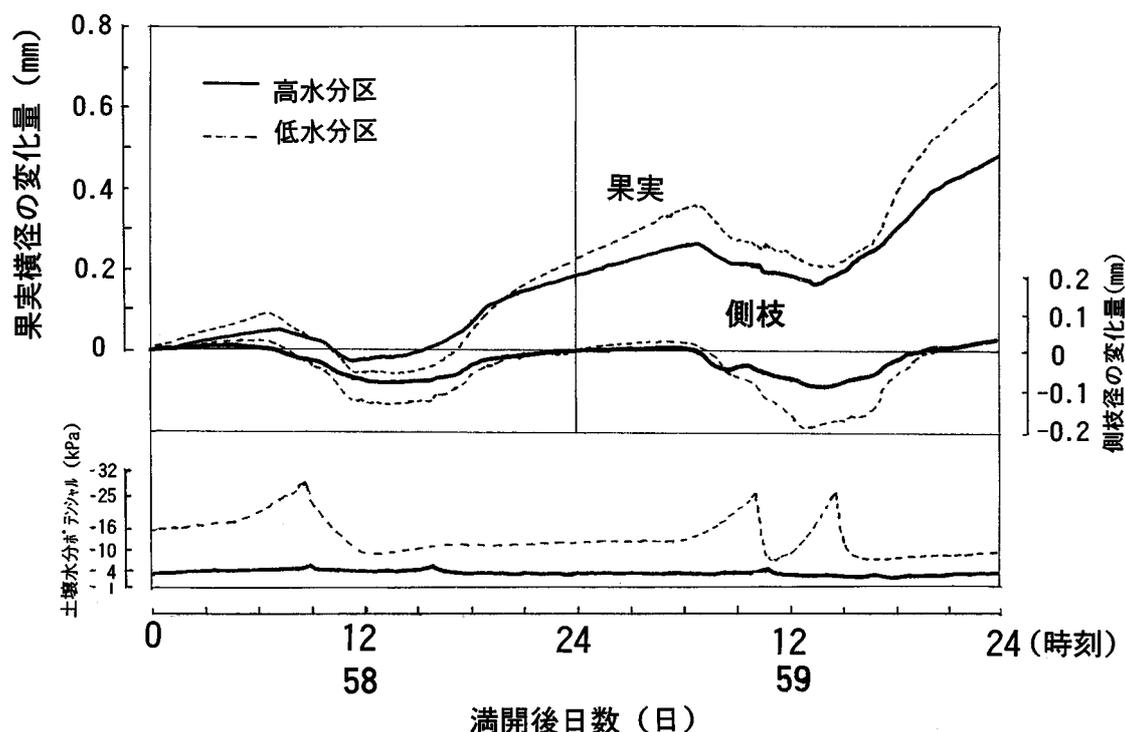


図17 果実生育全期間の土壌水分処理がニホンナシ‘幸水’の発育停滞期の果実横径・側枝径の日変化および土壌水分ポテンシャルに及ぼす影響(実験1)

10分間隔で測定した平均値の最大標準誤差($n=3$)は高水分区および低水分区で果実ではそれぞれ0.017および0.014mmであり、側枝では0.0045および0.0042mmであった。

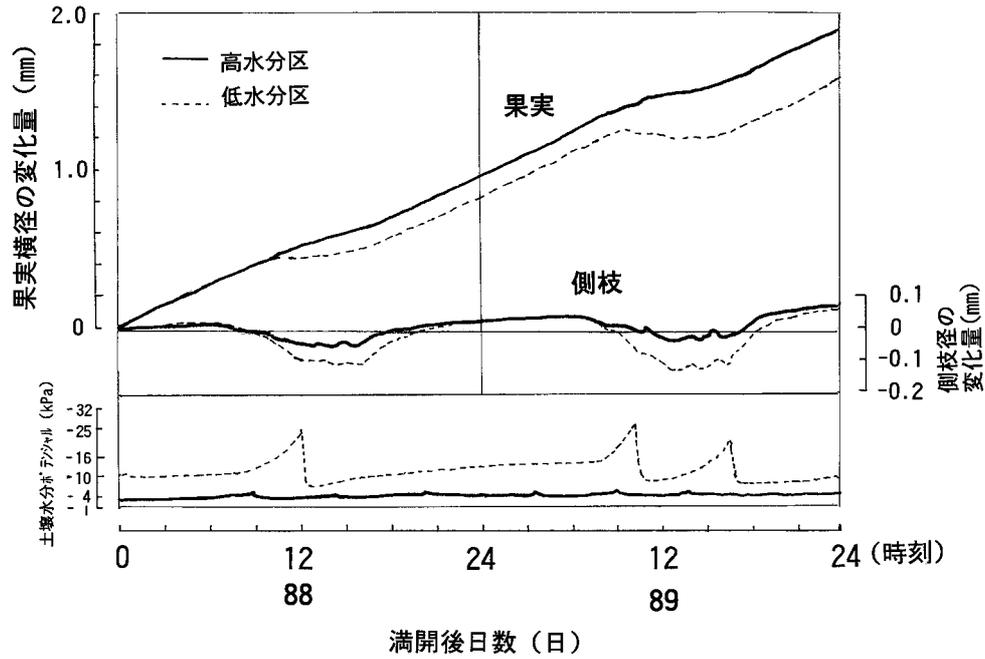


図18 果実生育全期間の土壤水分処理がニホンナシ ‘幸水’ の後期肥大期の果実横径・側枝径の日変化および土壤水分ポテンシャルに及ぼす影響（実験1）

10分間隔で測定した平均値の最大標準誤差（n=3）は高水分区および低水分区で果実ではそれぞれ0.022および0.019mmであり、側枝では0.0042および0.0041mmであった。

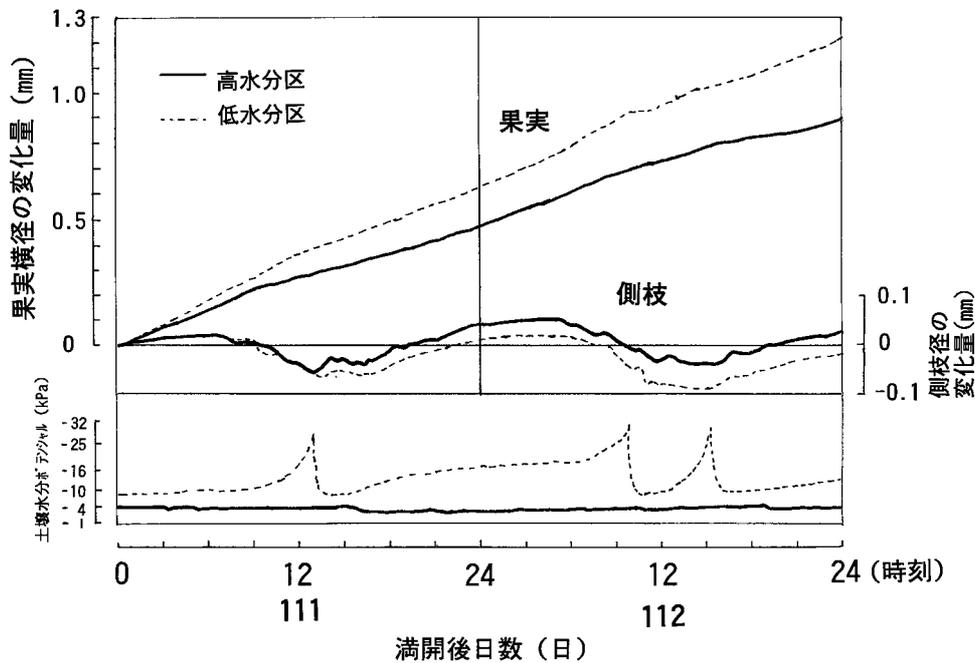


図19 果実生育全期間の土壤水分処理がニホンナシ ‘幸水’ の成熟期の果実横径・側枝径の日変化および土壤水分ポテンシャルに及ぼす影響（実験1）

10分間隔で測定した平均値の最大標準誤差（n=3）は高水分区および低水分区で果実ではそれぞれ0.020および0.016mmであり、側枝では0.0040および0.0041mmであった。

実験2 後期肥大期の土壤水分が果実生育と果実品質に与える影響

後期肥大期に土壤水分を高水分状態（ $-25 \sim -10$ kPa）から低水分状態（ $-4 \sim -1$ kPa）に切り換えると、処理開始後から低水分区より果実肥大速度が上昇し始め、果実横径は処理終了時には低水分区よりも約4 mm 肥大した（図20）。この肥大効果は処理終了後の成熟期でも持続し、収穫時の果実横径は低水分区に比べて高水分変換区で約8 mm 大きかった。

後期肥大期における果実横径の日変化をみると、昼間にわずかな収縮がみられたが、昼間、夜間ともほぼ直線的に増大した（図20）。果実の肥大は高水分変換区で低水分区より1日当たり約0.2mm 大きかった（図21）。側枝径は、高水分変換区で低水分区に比べて昼間の収縮がやや大きかったが、夜間の肥大速度が高かったため1日当たり0.03mm 上回った（図21）。成熟期でも果実横径は低水分区と同じ土壤水分状態に戻した高水分変換区の方が大きく推移し、側枝径では高水分変換と低水分区で1日当たりの肥大量に差はなかった。（図22）。成熟果実の平均1果重は高水分変換区で低水分区より約22%増大し、糖度も高水分変換区の方が大きかった（表2）。

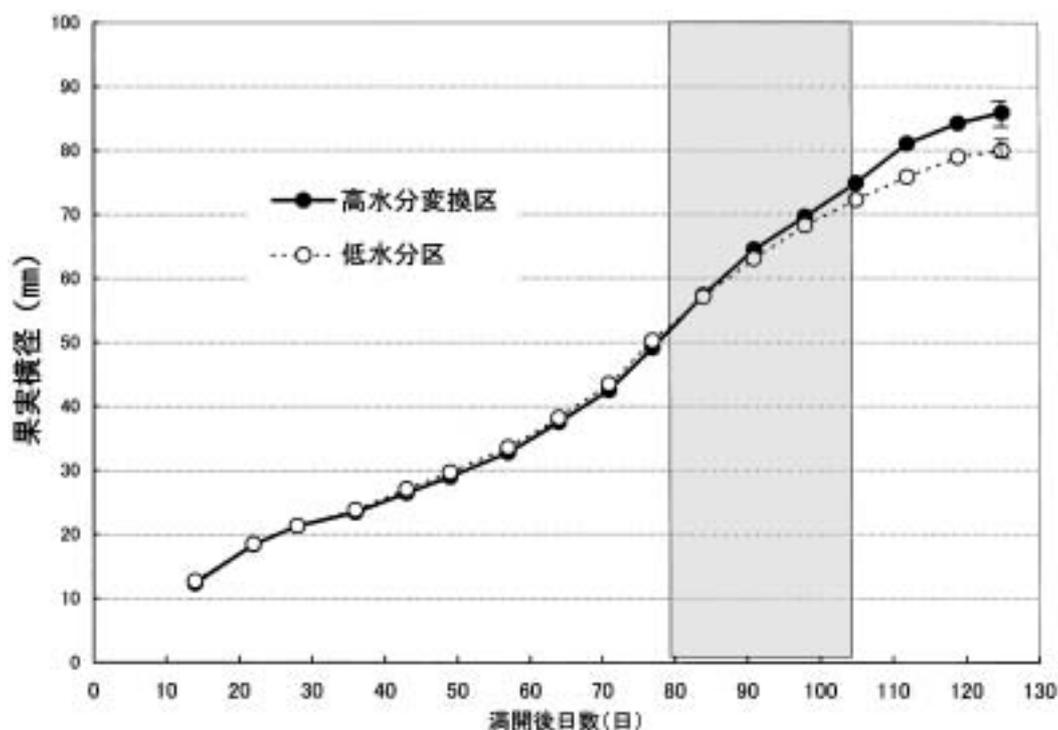


図20 後期肥大期の土壤水分処理がニホンナシ‘幸水’の果実肥大に及ぼす影響（実験2）

標準誤差（ $n=3$ ）を垂直線で示した。

網掛けは低水分から高水分に切り換えた期間を示した。

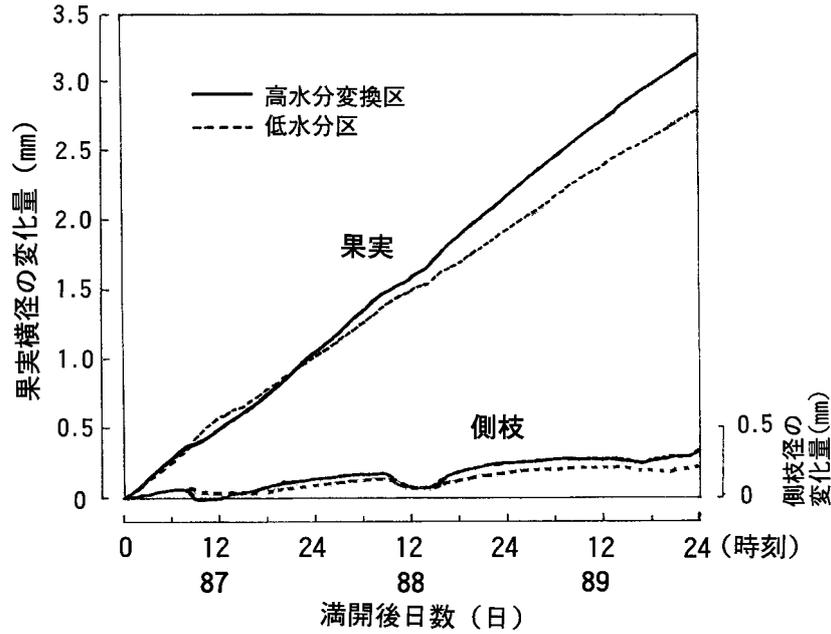


図21 後期肥大期の土壤水分処理がニホンナシ‘幸水’の同時期の果実横径および側枝径の日変化に及ぼす影響（実験2）

10分間隔で測定した平均値の最大標準誤差（ $n=3$ ）は高水分変換区および低水分区で果実ではそれぞれ0.023および0.019mmであり、側枝では0.0038および0.0038mmであった。

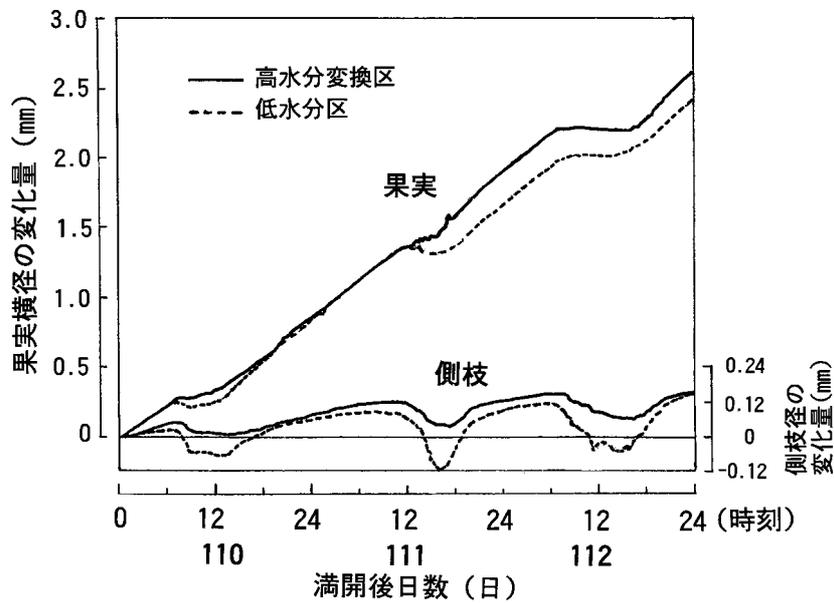


図22 後期肥大期の土壤水分処理がニホンナシ‘幸水’の成熟期の果実横径および側枝径の日変化に及ぼす影響（実験2）

10分間隔で測定した平均値の最大標準誤差（ $n=3$ ）は高水分変換区および低水分区で果実ではそれぞれ0.020および0.016mmであり、側枝では0.0039および0.0037mmであった。

表2 後期肥大期の土壤水分処理がニホンナシ‘幸水’の果実形質*に及ぼす影響(実験2)

| | 1果重 (g) | 糖度 (%) | 酸度 (pH) | 硬度 (lbs) |
|--------|------------|-----------|------------|-------------|
| 高水分変換区 | 300±10.0 | 12.1±0.16 | 5.3±0.08 | 4.4±0.13 |
| 低水分区 | 245±7.5 | 11.5±0.17 | 5.4±0.06 | 4.2±0.15 |

*果実地色3.5で成熟果実を採取した。
数値は平均値±標準誤差(n=3)を示した。

実験3 果実成熟期の土壤水分が果実生育、果実糖度および発育枝の無機元素含有率に与える影響

側枝径は水分状態にかかわらず昼間に減少し、夜間に肥大し、回復する日変化を示した(図23)。側枝径は低水分では昼の収縮および夜間の回復程度とも測定期間中でほぼ一定の値で推移したのに対して、水ストレス区では処理開始日から昼間の収縮が著しく促進され、夜間の増大はわずかであった。果実横径は低水分区では昼間は一定もしくはやや増大したにとどまり夜間に増大した。一方、水ストレス区では昼間に減少し、夕方やや回復したが、夜間の増大はわずかであった。果実横径の1日当たりの肥大量は水ストレス区で低水分区に比べて約0.2mm減少した。

果実の全糖度は低水分区では処理後11~14日目に処理開始時に比べて約2.6%、水ストレス区では約4.2%それぞれ上昇した(表3)。糖組成をみると、処理開始時にはソルビトールの占める比率が約43%と最も高く、ついでフルクトース、スクロースの順に高く、グルコース

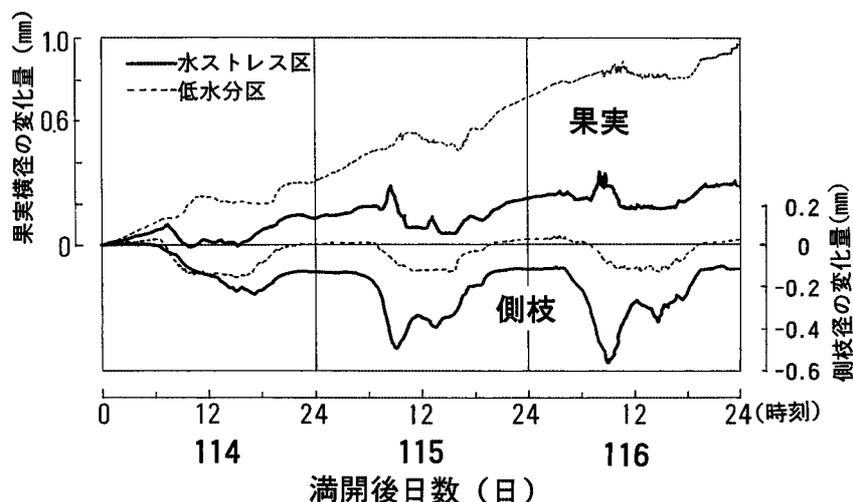


図23 成熟期の土壤水分処理がニホンナシ‘幸水’の同時期の果実横径および側枝径の日変化に及ぼす影響(実験3)

10分間隔で測定した平均値の最大標準誤差(n=3)は水ストレス区および低水分区で果実ではそれぞれ0.018および0.08mmであり、側枝では0.0089および0.0039mmであった。

で約12%と最も低かった。処理2週間後には、この比率はソルビトールで低下し、スクロースで著しく上昇した。低水分区に比べて水ストレス区で、ソルビトールの比率が高くスクロースの比率が低かった。

発育枝の無機元素含有率は、水ストレス区で低水分区に比べて各元素とも一斉に低下した(表4)。この低下割合は、とくに、窒素で著しく、ついでカリウムで大きく、カルシウムで最も小さかった。

考 察

側枝、果実の径変化に対する水ストレスの影響

実験1の結果から、果実の肥大に対する土壌水分の影響は果実の発育ステージによって異なり、果実の肥大が最も盛んな果実後期肥大期では高水分(-4~-1 kPa)で果実の日肥大量が増加した一方、その他の生育ステージでは高水分区に比べて低水分(-25~-10 kPa)区で日肥大量は減少した。そこで、果実後期肥大期だけを25日間にわたって土壌の水分を低水分状態から高水分状態に切り換え、水分供給状態を改善すると、果実横径は肥大し(図20, 21)、平均1果重も増大した(表2)。

植物器官のサイズの変動は水分状態、気温、生長などによって支配されており、特に水分状態による影響が強い(Kozlowsky ら, 1991)。例えば、茎の径変化は膨圧や浸透ポテンシャルよりも水ポテンシャルの変動によってより強く支配されることがモモやスモモで報告されている(Klepper ら, 1971; Garnier and Berger, 1986; Genard ら, 2001)。同様の関係はブドウで観察されている(Imai ら, 1990)。このように、ある器官のサイズの変動はその水分状態を反映している。しかしながら、ある器官の水分状態はそれ自体のみでなく、個体全体の水分

表3 成熟期の土壌水分処理がニホンナシ‘幸水’の果実糖度に及ぼす影響(実験3)

| | 全糖度 (%) | 糖組成 (%) | | | |
|----------|-----------|----------|----------|----------|----------|
| | | ソルビトール | グルコース | フルクトース | スクロース |
| 低水分区* | 10.1±0.09 | 42.6±1.8 | 11.8±1.2 | 30.8±1.6 | 14.8±0.9 |
| 水ストレス区** | 14.3±0.10 | 35.9±1.9 | 11.4±1.1 | 20.5±1.3 | 32.2±1.6 |
| 低水分区** | 12.7±0.09 | 29.0±1.7 | 9.0±0.7 | 22.1±1.3 | 39.9±1.8 |

* 処理開始時

**処理開始11~14日後に果実地色3.5で採取した。

数値は平均値±標準誤差 (n=3) を示した。

表4 成熟期の土壌水分処理がニホンナシ‘幸水’の発育枝*の無機元素含有率に及ぼす影響(実験3) (%)

| | N | P | K | Ca | Mg |
|--------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 水ストレス区 | 0.65±0.04 | 0.16±0.02 | 0.50±0.02 | 0.74±0.03 | 0.18±0.01 |
| 低水分区 | 1.32±0.05 | 0.23±0.02 | 0.85±0.02 | 0.95±0.04 | 0.24±0.02 |

*剪定時(満開後204日目)に採取した。

数値は平均値±標準誤差 (n=3) を示した。

状態の影響も受ける。例えば、トマトでは果実の径変化は果実と茎間の水ポテンシャルの落差と高い相関関係にあるという (Pearce ら, 1993)。また、モモ樹の幹径の急速な変化は植物個体の水分状態の変化と密接に関連するという (Simonneau ら, 1993)。

果実横径の変動から果実肥大に対する水ストレスの影響を検討した。果実肥大速度は発育停滞期では高土壌水分より低土壌水分、後期肥大期では逆に高土壌水分の方が、また成熟期では発育停滞期と同様に低土壌水分の方がそれぞれより高い値を示した(図17~19)。一方、茎径の変動を見ると、生育時期に関わらず、常に高土壌水分の方が昼間の収縮程度が小さく、1日当たりの肥大速度が高かった。同様の現象は、新梢の伸長でも観察され、高土壌水分でより旺盛な伸長を示した(図16)。これらの実験結果は、新梢および茎、幹などの栄養生長と果実間で最適な土壌水分供給状態が異なり、例えば、後者よりも前者の生長により多量の水分供給を必要とすると推定される。一方、果実では最適水分状態が果実自体の生育段階や植物個体の生育段階との関係によって異なり、新梢の伸長が停止し果実肥大が旺盛な果実肥大後期には $-4 \sim -1$ kPa と高土壌水分が、果実肥大が減少する成熟期には $-25 \sim -10$ kPa とやや低土壌水分がそれぞれ果実肥大に対して最適土壌水分状態となる。さらに、これらよりも早い生育段階の発育停滞期では低土壌水分で果実肥大が旺盛であるが、この主要原因は低土壌水分条件下でこの時期に旺盛な栄養生長が抑制され、果実肥大が確保されたためと推定される。

つぎに、果実の成熟期に強度の水ストレス (-63 kPa) を与えた時の果実および側枝径に対する影響について検討した。水ストレス下では側枝で調査開始12時間後の日中の収縮が著しく、夜間の回復程度も小さかった(図23)。一方、果実の肥大速度の低下も著しく調査後6時間目より減少し、日中には収縮し、夜間にやや回復するが肥大はわずかであった。すなわち、水ストレス下では昼間には果実の肥大が停止し、収縮も生じている。これらの結果から、根からの水供給量が蒸散を下回り、果実の水分が奪い取られたためと推察された。この果実の収縮現象は果実からの蒸散もしくは果実から他器官への水の移動のどちらによるかは今後の課題である。

果実糖度に対する水ストレスの影響

成熟果実の全糖度は成熟期の水ストレスによって上昇した。果実の後期肥大期に土壌水分ポテンシャルを $-25 \sim -10$ kPa から $-4 \sim -1$ kPa に切り換え軽度の水ストレスを解除すると、果実肥大速度は著しく上昇し(図21)、糖度も増加した(表2)。一方、逆に土壌水分ポテンシャルを $-25 \sim -10$ kPa に維持すると果実の糖度はむしろやや低下した。これらの実験結果はニホンナシに対して果実の後期肥大期に軽度の水ストレスを解除する方が果実肥大および糖度の両者を増大させることを示している。一方、成熟期の強度の水ストレス (-63 kPa) 下では、果実肥大が著しく抑制された(図23)が、果実糖度が上昇した(表3)。つまり、成熟期の強度の水ストレスは果実後期肥大期の軽度の水ストレスと果実肥大と糖集積間の関係が異なり、強度の水ストレスによって果実肥大が著しく抑制され、果実への糖の転流量の抑制を上回ったためと推察された。二酸化炭素富化処理に対するニホンナシ果実の応答にも類似の現象が観察される (Ito ら, 1999a)。すなわち、果実発育停滞期以降に二酸化炭素富化処理を与えると、果実サイズは増大するが糖度の上昇は小さい。一方、果実サイズの増大が小さい成熟期に同処理を与えると果実の糖度が上昇する。

これらの本研究結果と既往の結果とを総合すると、水ストレスに対する応答は果実肥大の旺盛な生育時期（後期肥大期）と糖集積の主体となる生育時期（成熟期）が異なり、しかも両者間で至適水供給状態も異なっている。それ故、果実の糖度は歪みゲージ式変位計による形態変化のモニタリングでは判定できないため、成熟果実の大きさと糖度の関係を調査し、果実の糖度を考慮した果実の生育ステージ別の肥大速度の目標値の設定が今後の課題である。

栄養生長、無機元素吸収に対する水ストレスの影響

果実の成熟期における水ストレス処理によって、発育枝の無機元素含有率、特に窒素およびカリウム含有率が著しく低下した(表4)。つまり、水ストレス下では窒素およびカリウムなどの無機元素の吸収がとくに著しく抑制され栄養器官への供給が抑制されることを示している。イネ科1年生作物では、水ストレス下においてリンの吸収がとくに強く抑制されることが報告されている(実岡ら, 1989)。すなわち、成熟期の水ストレス処理によって栄養生長が抑制され、次年度以降の樹体や果実生産へ悪影響を与える可能性が予測される。

以上の結果を総合すると、ハウス栽培下のニホンナシの水管理は果実サイズと果実品質の確保のため、次の水管理を指標にしよう。つまり、 $-25\sim-10$ kPa で果実の細胞分裂期、初期肥大期、発育停滞期および成熟期を管理し、後期肥大期には -4 kPa 以上の高土壌水分条件で管理することが望まれる。また、果実の糖度の上昇を目的とした果実の成熟期に行われる‘水切り’と呼ぶ栽培法の導入に当たっては、果実糖度の向上のみでなく、早期落葉が観察されることや無機元素の吸収低下に起因する樹勢の低下が推察され、翌年の果実生産確保のための樹体維持なども考慮することが不可欠である。

水ストレス処理による側枝の収縮や果実肥大の著しい抑制は変位計による調査開始後2～6時間以内に歪みゲージ式変位計によって検出された(図17, 18, 19および23)。これらの結果は、歪みゲージ式変位計によって水ストレスに対するニホンナシの応答を極めて短時間で検出しうることを示している。これと類似の現象は他果樹種でも観察され、例えば、モモ樹の幹径の変化は差動トランスによるモニタリングで、水ストレス処理後20秒と極短時間でその影響を検出しうると報告されている(Simonneauら, 1993)。このように、歪みゲージ式変位計による茎・果実などのモニタリングの活用によって水ストレスのリアルタイム診断法を開発しうる可能性が高い。それ故、ニホンナシ‘幸水’の水管理に当たっては果実や側枝径の歪みゲージ式変位計による連続モニタリングをベースとした栽培管理技術の導入が重要であると考えられる。

3. 気温

緒言

果実生産は、気温、二酸化炭素濃度、土壌水分および施肥などの影響を受ける。実際に、篤農家では簡易被覆やハウス栽培で加温および二酸化炭素富化による果実形質の向上や成熟期の促進が実施されている(伊藤ら, 1992)。つまり、ハウス栽培下で人為的に制御できる環境因子は気温、二酸化炭素濃度、土壌水分である。その中でも気温は最も制御可能な環境要因である。

トマト果実の生長速度に直接温度が影響を与える(Pearceら, 1993)。Pearceら(1993)は、トマトの果実の生長は、主として温度に支配され、10℃から35℃まで直線的に増加し、それは炭素要求と転流に与える温度の影響に支配されていると報告している。トマト(Pearceら, 1993)で認められた光と温度の効果は、エンドウマメの子実肥大(Hole and Scott, 1984)およびコムギ葉の伸長(Christ, 1978)にも同様に認められている。水を介在した炭素の転流の増加によって果実は肥大する。水ストレス下のような植物体内の水分が少ない状態では果実への篩管液の流入が抑制され、生長速度に与える温度の影響は小さくなり、その結果果実の肥大速度が低下した(Pearceら, 1993)。トマト果実の肥大速度の変動は、果実への水の集積によるとHoら(1987)も報告している。

植物の水分状態を把握することによって土壌水分含量あるいは気候条件の変動に依存するよりも効率よく計画的な灌水が可能である(Li and Huguet, 1990; Cambell and Turner, 1991)。植物の水分状態の日変化は、茎径の変動を微細茎径計測法によって推定できる(Simonneauら, 1993)。Pearceら(1993)は、作動トランスによってトマト幼果の肥大を精密に測定し、果実の肥大速度は温度と最も密接な関係にあり、また真の光合成よりも水分状態の影響をより大きく受けると報告している。水分状態は果実の生長に最も大きな影響を及ぼし、とくに高日射量で著しく果実は収縮する(Endo, 1973a, b)。

本研究は、ニホンナシ‘幸水’の果実収量や品質向上に対する気温の影響を明確にするため、気温がニホンナシの果実肥大および側枝径に与える影響を歪みゲージ式変位計を用い、精密に調査すると共に、細胞分裂期の夜間気温の相違が樹体生長、平均1果重、果実品質および無機元素含有率に与える影響を検討した。

材料および方法

実験1 気温が環境制御下での側枝径および果実径に与える影響

本研究は広島県立農業技術センター果樹研究所で実施した。ニホンヤマナシ(*Pyrus aromatica*)に接ぎ木した5および7年生のニホンナシ(*Pyrus pyrifolia* Nakai, 品種‘幸水’)を供試した。コンテナ(25および60 L)に未耕土のマサ土(花崗岩風化土壌)とバーク堆肥を7:3に混合し、ついで、窒素, リン(P_2O_5), カリ(K_2O)をそれぞれ、培土10 L当たり10, 5, 10 gずつを基肥として与えた。

果実細胞分裂期のニホンナシ果実を用い、夜温を2水準に制御した人工気象室内で2日間実験を実施した。対照区、変温区とも明期開始後2時間は22℃、その後明期終了時まで25℃

に維持した。明期終了の18時から1時間は両区とも22℃にその後2時間は18℃に保った。対照区はその後明朝の6時まで18℃に維持したが、変温区は21時～23時まで15℃に、23時～明朝2時まで10℃に、2時～4時まで15℃に、4時から6時は対照区と同様に18℃に変温した。この処理を2日間繰り返した。

果実後期肥大期のニホンナシを用い、気温を3水準（16、23および30℃）に制御した人工気象室内で2日間実験を実施した。

両実験とも1日の内12時間ずつ明期（6～18時）と暗期（18～6時）を与え、明期の光量子量はメタルハライドランプを用い、ナシ樹の高さの中央部で $800 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ に設定した。相対湿度は70%に設定し、適宜灌水して土壤水分ポテンシャルを -25 kPa 以上に維持した。

側枝径と果実横径の精密測定

Iwaoら（1988）の方法に準じて2日間実施した。すなわち、各処理区の個体の3側枝から各1果実を選定して歪みゲージ式変位計を取り付け、48時間にわたって10分ごとの測定値をデータロガー（DE-1000型、NEC三栄社製）に収録した。

P_0 の測定（果実後期肥大期のみ）

P_0 は、ニホンナシ‘幸水’の個体当り3発育枝の基部から第6、7葉について、各処理区合計12葉について光量子を $1000 \mu \text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ とし、携帯型光合成測定器（LI-6200型、ライカ社製）で測定した。

実験2 細胞分裂期の気温が果実生長に与える影響

コンテナ（80L）に未耕土のマサ土（花崗岩風化土壌）とバーク堆肥を7：3に混合し、1年生ニホンナシを植え付け（栽植密度； $1.35\text{m} \times 1.50\text{m}$ ）た。ガラス温室内で生育に応じて施肥および防除を行い育成した5年生ニホンナシ‘幸水’の側枝数を8～10に調整して1991年秋季に基肥として窒素、リン（ P_2O_5 ）、カリ（ K_2O ）をそれぞれ、培土10L当たり10、5、10gずつ施用し、3樹3反復でガラス温室で栽培し、実験に供試した。2月23日から夜間の加温を開始し、露地での平均的な満開日より22日早めた。

夜間（19～7時）に気温を11℃および18℃に維持する2区を設けた。温度処理は満開1日前の4月1日から35日間（果実の細胞分裂終了時まで）連続して行った。なおその後の夜間の温度管理は両区とも18℃とし、満開50日目以降は最低気温が18℃以上となったため加温を中止した。土壤水分は水分ポテンシャルを -25 kPa 以上に維持した。この灌水処理はコンテナ（深さ30cm）の深さ15cmの部位に土壤水分測定センサー（DM-8P型、竹村電機製作所製）を設置し、各処理区の水分ポテンシャルが -25 kPa に到達したとき、自動かん水指令装置（DM-104型、竹村電機製作所製）を用いて1樹1回当たり5L（20mm相当量）行った。

側枝径と果実横径の精密測定

測定は実験1と同様に行った。側枝径と果実横径の測定は、果実の生育ステージ別に、すなわち細胞分裂期（満開後13～15日）、初期肥大期（満開後38～40日）、発育停滞期（満開後59～61日）、後期肥大期（満開後87～89日）および成熟期（満開後114～116日）のそれぞれ3日間を実施した。側枝径、果実とも実験開始から終了まで標準的な3個体について測定した。

果実肥大および果実形質

果実横径は、各処理区から標識した15果実を選び、ノギスで約1週間ごとに測定した。カラーチャートの指示値で3.5以上の成熟果を1日ごとに採取し、収穫日に1果重、糖度、酸度

および硬度を全収穫果実について測定した。なお、これらの調査は、系統適応性特性検定試験調査要領に基づいて行った。

結 果

実験1 気温が環境制御下での側枝径および果実径ならびに光合成に与える影響

側枝径および果実径の変化

果実の細胞分裂期における気温が果実および側枝径に与える影響を調査した。対照区では、果実は、明期開始直後から1.5時間収縮した。その後果実は明期では緩やかに暗期直後から約3時間急速に回復肥大し、その後直線的に肥大した(図24)。変温区では夜間の肥大速度が対照区に比べ大きかったが、昼間の肥大速度は逆に変温区で大きく、1日当たりの肥大量にほとんど差がなかった。側枝径は明期開始直後から2、3時間は急速に、その後緩やかにそれぞれ収縮をつづけた(図24)。対照区では、側枝径は暗期開始後急速に回復し、24時間前より大きい値を示した。変温下のそれはほぼ同様の变化パターンを示したが、1日当たりの肥大量は対照区に比べて大差はなかった。

果実の後期肥大期に気温が果実および側枝径に与える影響を調査した。低温下(16℃区)では、果実は、明期開始直後から1.5時間収縮し、その後明期および暗期とも直線的に肥大した(図25)。しかし、肥大速度は暗期で明期より大きかった。1日当たりの肥大量が低温区で小さかったのは、明期開始直後の収縮量が大きいためであった。30℃区では23℃区に比べて24時間後に肥大量の低下が感知できた。23℃区および30℃区では明期開始直後の収縮が抑制された。

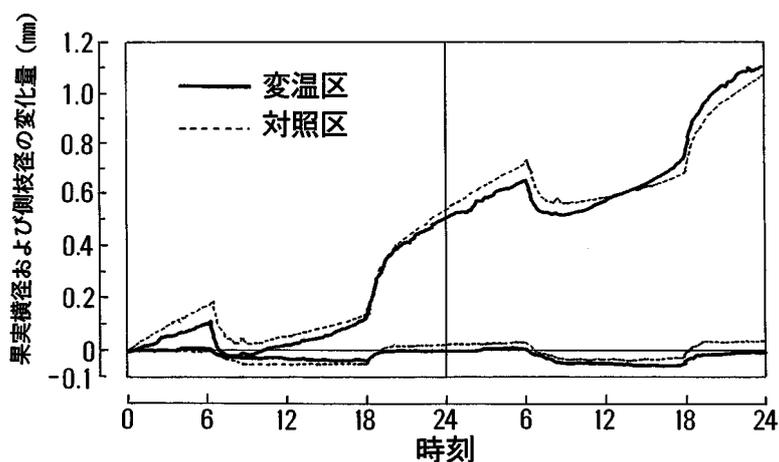


図24 細胞分裂期の夜間の変温がニホンナシ‘幸水’果実横径および側枝径の変化量に及ぼす影響(実験1)

測定開始時の果実横径および側枝径は、それぞれ $18.6 \pm 1.5\text{mm}$ および $14.7 \pm 0.6\text{mm}$ であった。10分間隔で測定した平均値の最大標準誤差($n=3$)は変温および対照区で果実横径ではそれぞれ0.02, および0.014mmであり、側枝径ではそれぞれ0.0027および0.0028mmであった。

つまり、23℃区に比べ16℃区および30℃区でそれぞれ3および24時間で果実肥大が低下した。果実横径の平均肥大速度は、16℃区、23℃区および30℃区では明期でそれぞれ13, 17, 15 μmh^{-1} であり、暗期でそれぞれ38, 44, 39 μmh^{-1} であった。側枝径は明期開始直後から2, 3時間急速に収縮し、その後緩やかに収縮をつづけた(図25)。この値は、暗期開始後急速に回復し、24時間前よりわずかに大きい値を示した。低温下(16℃区)では収縮量が著しく低下した。

P₀

果実の後期肥大期の P₀は23℃区で最も高く、16℃区および30℃区で低かった(表5)。

実験2 細胞分裂期の気温が果実生長に与える影響

果実の生育初期の細胞分裂期に35日間にわたって夜温(18℃)が高まると、主として夜間の肥大速度が上昇し、果実横径は増大した(図26A)。この高温処理の影響はこの後の果実の生育ステージにも残存し、果実の初期肥大期までは肥大速度は上昇した後、この効果は減少した。ただし、果実の肥大が最も旺盛な後期肥大期には高温区で果実肥大速度が大きかった(図26B-E)。この結果、収穫までの果実横径は夜間高温処理区が常に低温区を上回った(図27)。

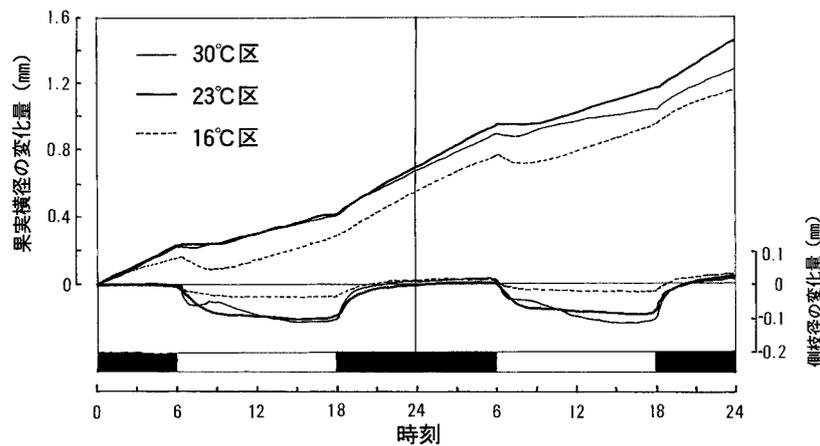


図25 後期肥大期の気温がニホンナシ‘幸水’の果実および側枝径の変化量に及ぼす影響(実験1)

測定開始時の果実横径および側枝径は、それぞれ $62.6 \pm 1.5\text{mm}$ および $14.3 \pm 0.6\text{mm}$ であった。10分間隔で測定した平均値の最大標準誤差 (n=3) は30, 23および16℃区で果実横径ではそれぞれ0.020, 0.022および0.014mmであり、側枝径ではそれぞれ0.0038, 0.0042および0.0028mmであった。

表5 後期肥大期の気温がニホンナシ‘幸水’の P₀に及ぼす影響(実験1)

| | 測定時刻 (時) | |
|------|-----------|-----------|
| | 9 | 12 |
| 30℃区 | 13.8±0.44 | 14.5±0.48 |
| 23℃区 | 17.0±0.54 | 17.5±0.52 |
| 16℃区 | 14.5±0.41 | 13.1±0.44 |

数値は平均値±標準誤差 (n=3) を示した。

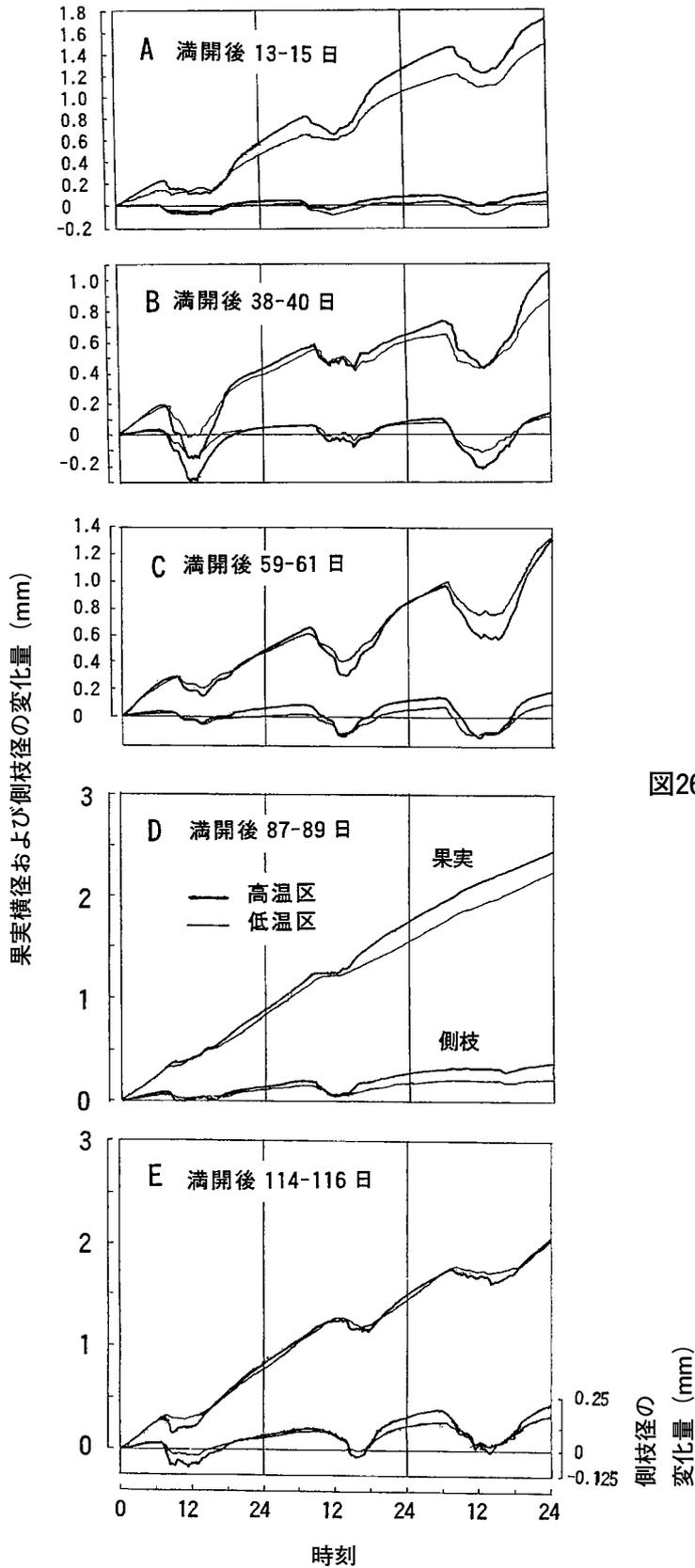


図26 細胞分裂期の夜間の高温がニホンナシ‘幸水’の果実横径および側枝径の変化量に及ぼす影響 (実験2)

測定開始時の高温区、低温区で果実横径および側枝径は、それぞれ
 (A) $14.2 \pm 1.0, 13.2 \pm 0.9\text{mm}$ および $24.1 \pm 0.4, 25.5 \pm 0.4\text{mm}$,
 (B) $27.6 \pm 1.0, 26.6 \pm 1.0\text{mm}$ および $24.9 \pm 0.6, 26.3 \pm 0.6\text{mm}$
 (C) $36.4 \pm 1.1, 34.5 \pm 1.0\text{mm}$ および $27.1 \pm 0.6, 28.5 \pm 0.6\text{mm}$
 (D) $62.2 \pm 1.1, 59.6 \pm 1.0\text{mm}$ および $28.1 \pm 0.6, 29.5 \pm 0.6\text{mm}$
 (E) $80.5 \pm 1.1, 73.3 \pm 1.1\text{mm}$ および $29.0 \pm 0.6, 30.5 \pm 0.6\text{mm}$ であった。

夜温（18℃）が高いと、成熟果実の平均1果重は著しく増大し、果実硬度が低下したが、糖度および酸度に影響を与えなかった(表6)。同処理によって果実サイズが著しく増大したにもかかわらず、糖度に大差がなかった点は特筆される。

考 察

本研究において、ニホンナシ果実に対する気温の影響を短時間で調査した。果実後期肥大期のニホンナシの生育適温は23℃付近と推定される。この気温を下回ると、1日当たりの果実肥大量は低下する。この肥大の低下は、暗期から明期への変換時の果実の一時的な収縮のためである。一方、23℃を超えると、肥大量の低下は昼夜間を通じた果実肥大速度の低下による。果実の一時的な収縮の原因は未だに解明されていない。本実験において、早朝の光照射開始直後に低温条件では果実は収縮を開始するが、この収縮は23℃以上の比較的高温域では観察されなかった(図25)。Pearceら(1993)は低温(16℃)処理開始後3時間で果実肥大

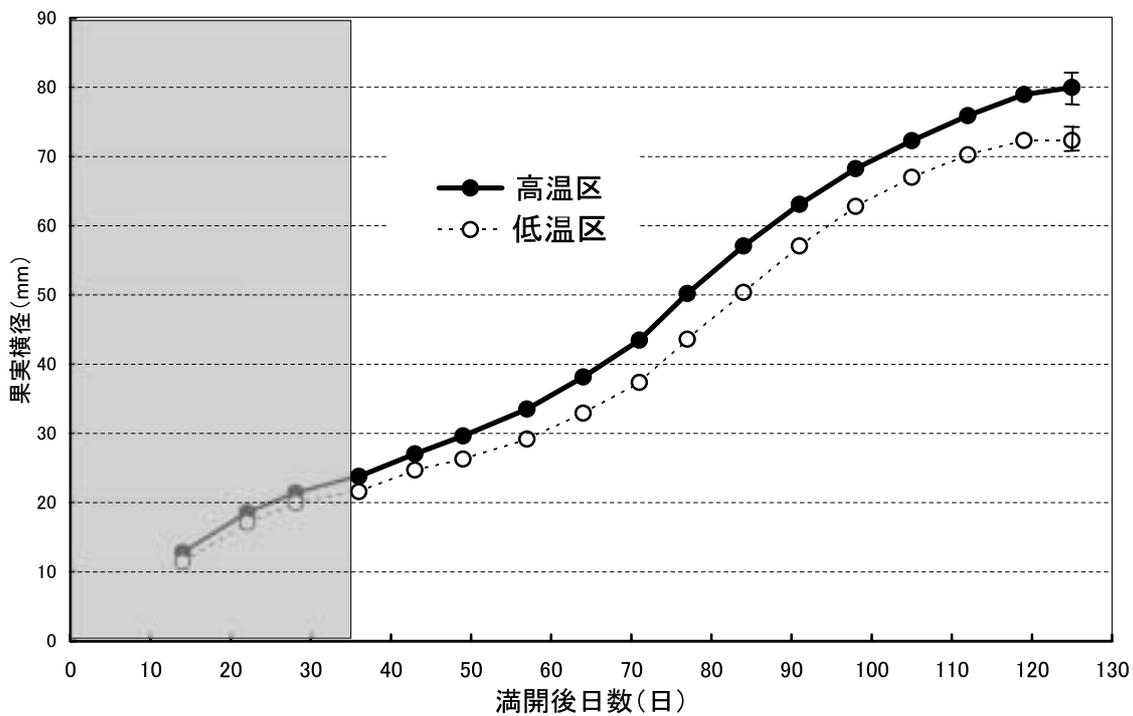


図27 細胞分裂期の夜間の高温処理がニホンナシ‘幸水’の果実肥大に及ぼす影響(実験2)

標準誤差(n=3)を垂直線で示した。

網掛けは処理期間を示した。

表6 細胞分裂期の夜間高温処理がニホンナシ‘幸水’の果実形質に及ぼす影響(実験2)

| | 平均1果重 (g) | Brix (%) | 酸度 (pH) | 硬度 (lbs) |
|-----------|--------------|-------------|------------|-------------|
| 高温区 | 300 | 12.1 | 5.3 | 4.4 |
| 低温区 | 201 | 12.0 | 5.3 | 4.7 |
| 有意差(0.05) | * | n.s. | n.s. | * |

が減少することを見いだしている。また、トマト果実の一時的な収縮は、暗期から明期への変換時の飽差の低下に起因すると報告している。この他にも、光が照射されると一時的に果実の肥大速度が低下することが数例 (Christ, 1978; Hole and Scott, 1984) 報告されており、この減少は気孔の開度の上昇と葉からの蒸散の促進によると考えられている。しかしながら、本研究では温度と飽差が安定した条件で、果実が一時的に収縮したことから、飽差は主要要因ではないと推察される。日射量の変動に伴い莖径が変動する現象は、多くの植物で報告されており、主として蒸散量の変動によると考えられている (Kimball, 1983; Imai ら, 1990; Li and Huguet, 1990; Simonneau ら, 1993)。また、ニホンナシにおいて、二酸化炭素富化によって、気孔伝導度および蒸散量が低下し、側枝径の収縮が抑制される現象が観察されている (Ito ら, 2002)。

果実の生育初期の細胞分裂期に35日間夜温 (18℃) を高めると、主として夜間の果実の肥大速度が上昇し、1日当たりの果実肥大量が増加した (図26A)。この後の果実の生育ステージにおいても、この高温処理の影響は残存し、果実の初期肥大期までは肥大速度は上昇を続けたがその後この効果は減少した (図26A, B, C, D, E)。ただし、果実の肥大が最も旺盛な後期肥大期には高温処理区で1日当たりの果実肥大量は大きかった。この結果、収穫時の果実横径は果実細胞分裂期の高温処理によって増大し、平均1果重も増大した (図27, 表6)。伊藤ら (1992) は、細胞分裂期の高夜温はこの時期の細胞数の増大の促進と細胞の肥大を促進することを報告しており、本実験においても同様の現象によって、果実肥大が促進されたと考えられる。また、初期肥大期と果実後期肥大期により肥大速度が上昇した要因として、果実のシンク能が細胞分裂期の高夜温によって上昇したためと考えられる。しかし、この時期に夜温を10℃まで段階的に低下させても対照区に比べて果実の1日当たりの肥大量に大きな影響はみられない (図24) ことから、夜間の変温管理の重要性が指摘され、加温費を節減できる可能性がある。

4. 二酸化炭素富化が果実肥大および樹体に与える影響およびその支配要因の解析

1) 長期処理

緒言

一部の篤農家は、施設栽培で果実生産および果実品質向上のために、ブドウ (*Vitis vinifera*), カキ (*Diospyrus kaki* Thunb.) およびニホンナシ (*Pyrus sp.*) に対して二酸化炭素の富化処理を行っている。しかしながら果実生産向上のための最適な二酸化炭素の施用時期や濃度についてはよく知られていない。また、二酸化炭素富化が果樹生産に与える影響については数例の研究があるにすぎない (黒岡ら, 1990; 猪俣ら, 1993; 猪俣ら, 1996)。

多くの C_3 植物で二酸化炭素富化によって処理開始時は P_0 が向上するが、処理終了時には著しく低下する (Peet, 1984; Masuda ら, 1989; Idso and Kimball, 1991; Bowes, 1993; Makino, 1994)。その一つの理由は光合成産物のソースからシンクへの転流速度が P_0 ほど増加しないためである。しかしながら果樹ではそのような現象はみられていない (Idso ら, 1991; Idso and Kimball, 1992; 猪俣ら, 1993; 黒岡ら, 1990)。その理由は、長期間の二酸化炭素富化が光合成、無機元素の供給およびシンクの活性に与える影響は、植物種で異なるためと考えられる (Arp ら, 1991; Idso ら, 1991; Sage, 1994; Fisher ら, 1997)。しかし、ニホンナシではこの種の報告はなされていない。

ニホンナシでは開花後栄養生長と生殖生長は同時に進行する。ニホンナシの果実生長パターンから、果実の生育ステージを細胞分裂期、初期肥大期、発育停滞期、後期肥大期および成熟期に分けることができる (Imai ら, 1994)。これらの果実生育ステージに応じて、新梢伸長の停止期までは、果実と枝葉、これ以降の時期は果実と再生産部位である葉芽および花芽と光合成産物の競合を起こす可能性もある。

ソルビトールはニホンナシを含むバラ科の植物の主たる光合成産物の転流形態である (Webb and Burley, 1962)。果実中で NAD^+ 依存のソルビトール脱水および酸化酵素によってソルビトールはフルクトースおよびグルコースにそれぞれ変換される (Yamaki and Moriguchi, 1989)。これら糖類は、スクロース合成酵素 (SS) およびスクロースリン酸合成酵素 (SPS) によってスクロースに変換される (Moriguchi ら, 1990)。成熟果実に転流した光合成産物は主として、スクロース、グルコース、フルクトースおよびソルビトールとして貯蔵される (Yamaki and Moriguchi, 1989)。Moriguchi ら (1990) は、ニホンナシの糖組成に著しい品種間差を観察している。しかしながら、二酸化炭素富化が果実品質とくに糖濃度に与える影響は報告されていない。

本研究は、ニホンナシ‘幸水’の果実収量や品質向上に対する二酸化炭素富化の期間を明確にするため、果実の幼果期から成熟期までの長期および成熟期の短期の二酸化炭素富化がニホンナシの樹体生長、1果重、果実品質および無機元素含有率に与える影響を検討した。

材料および方法

実験1 果実発育停滞期以降の二酸化炭素富化（満開後52日から収穫完了まで）が果実形質に与える影響

コンテナ (80L) に未耕土のマサ土 (花崗岩風化土壌) とバーク堆肥を 7 : 3 に混合し, 1987 年に 1 年生ニホンナシ ‘幸水’ を植え付けた (栽植密度; 1.35m×1.50m)。ガラス温室内で 5 年生まで生育に応じて施肥および防除を行い育成した。側枝数を個体当たり 8 ~ 10 本に調整した ‘幸水’ を用い, 1993 年秋季に基肥として窒素, リン (P_2O_5), カリ (K_2O) をそれぞれ, 培土 10L 当たり 10, 5, 10g ずつ施用し, 1994 年に 3 樹 3 反復で同一のガラス温室内で二酸化炭素富化実験に供試した。

ガラス温室大気中の二酸化炭素濃度を上昇させた二酸化炭素富化区 ($1400 \pm 200 \mu L L^{-1} CO_2$) と大気中の二酸化炭素濃度の対照区 ($350 \pm 50 \mu L L^{-1} CO_2$) を設けた。

二酸化炭素富化は満開後 52 日目の 5 月 18 日に開始し全果実を採取した 8 月 4 日まで 79 日間連続して実施した。ただし, 午前 5 時 30 分から午後 7 時までを施用時間帯としかつ温室内の気温が $25^\circ C$ 以下でガラス温室が閉鎖できる条件で実施した。二酸化炭素濃度の制御は, 二酸化炭素制御器 (GH-250E 型, コス株式会社製) を用い, 液体二酸化炭素を気化して発生させ $1400 \pm 200 \mu L L^{-1} CO_2$ の範囲に制御した。土壌水分は後期肥大期の 25 日間を土壌水分ポテンシャル $-4 kPa$ 以上とし, その他の生育ステージは $-25 kPa$ 以上に自動制御した。対照区は二酸化炭素濃度以外の環境要因を同一条件にして実施した。同様の二酸化炭素富化処理試験を翌年も実施した。

果実肥大および側枝の測定

果実横径および側枝径は満開後 11 日目から約 1 週間間隔でノギスを用いて測定した。果実横径および側枝径 (同一箇所) の測定は, 1 樹から 10 果を選定し合計 30 果について行った。

果実の無機元素含有率の測定

各樹から満開後 47, 78, 99, 113 日目に, 2 果ずつ採取し, $90^\circ C$ で 24 時間, $60^\circ C$ で 48 時間通風乾燥後に秤量, 粉碎した植物体試料を用い, N (ケルダール法), 硝酸-過塩素酸-硫酸法で分解後, P (バナドモリブデン酸法による比色法), K, Ca および Mg (原子吸光光度法) を定量した。

花芽着生率と花芽の無機元素含有率の測定

二酸化炭素富化処理終了後, 約 4 カ月目に発育枝および予備枝の花芽着生率と短果枝および発育枝の花芽の無機元素含有率を調査した。無機元素含有率は, 果実と同様に測定した。

果実品質

カラーチャートで 3.5 以上の成熟果実を採取し, 系統適応性特性検定試験調査要領に準じて 1 果重, 糖度, 酸度および硬度を調査した。

実験2 果実の後期肥大期以降の二酸化炭素富化（満開後88日目から収穫完了）が果実形質に与える影響

コンテナ (80L) に未耕土のマサ土 (花崗岩風化土壌) とバーク堆肥を 7 : 3 に混合し, 7 年生のニホンナシ ‘幸水’ をコンテナ当たり 1 樹とし, 自然光ファイトトロンに搬入し, 2 日間その新環境に順応させた後, 2 樹 2 反復で実験に供試した。

ファイトロン大気中の二酸化炭素濃度を上昇させた二酸化炭素富化区 ($1400 \pm 200 \mu\text{L L}^{-1} \text{CO}_2$) と大気中の二酸化炭素濃度の対照区 ($350 \pm 50 \mu\text{L L}^{-1} \text{CO}_2$) を設けた。二酸化炭素富化は満開後88日目の7月20日に開始し、全果実を採取した8月24日まで35日間連続して施用した。二酸化炭素濃度制御およびその他の環境要因の制御 (気温, 土壌水分) は実験1に準じて実施した。

果実の糖組成分析

各樹から満開後88, 101, 108, 123日目に、2果ずつ採取し、果肉 (約20g) をポリトンホモジナイザー (ブリンクマン社製) で約5分間粉碎し、No. 5Cの濾紙でろ過し、濾液は0.45 μm のフィルターでろ過後、この溶液を糖分析カラム (SH-1011型, 昭和電工社製) と示差屈折検出器を備えたHPLC (ガリバーシリーズ, 日本分光社製) でYakushijiら (1996) の方法に準じて測定した。溶離液として1.0 mL min^{-1} の流量で水を用い、採取液の糖をスクロース, グルコース, フルクトースおよびソルビトールに70°Cのカラムで分離して標準試薬と比較し定量した。

果実形質調査は実験1と同様に行った。

結 果

実験1 新梢伸長停止期以降の二酸化炭素富化 (満開後52日から収穫完了まで) が果実形質に与える影響

果実横径は二酸化炭素富化処理開始10日後から増大し、この増加程度は生育ステージの進展に伴い拡大したが、果実成熟期の満開100日目以降はこの果実肥大速度に差異はなかった。(図28)。この結果、平均1果重は対照区に比べ二酸化炭素富化区で約45g (対照区の17%に相当) 大きかったが、糖度に有意差はなかった (表7)。側枝径は、二酸化炭素富化処理開始20日後 (満開72日目) から増大し、この増加程度は生育ステージの進展に伴い拡大した。

果実中の無機元素含有率は果実生育ステージが若いほど高く、生育ステージの進展に伴い減少した (図29)。二酸化炭素富化処理によって満開後78日目までは無機元素含有率に有意差は見られなかったが、その後対照区に比べて窒素およびカリウムの含有率が上昇し、とくにカリウムで著しかった (表8)。

表7 二酸化炭素富化がニホンナシ ‘幸水’ の果実形質に及ぼす影響

| | 平均1果重 (g) | Brix (%) | 酸度 (pH) | 硬度 (lbs) |
|------------|--------------|-------------|------------|-------------|
| 実験1 長期処理 | | | | |
| 二酸化炭素富化区 | 314 | 11.6 | 5.4 | 4.9 |
| 対照区 | 269 | 12.0 | 5.4 | 4.9 |
| 有意差 (0.05) | * | n.s. | n.s. | n.s. |
| 実験2 短期処理 | | | | |
| 二酸化炭素富化区 | 339 | 15.6 | 5.3 | 6.9 |
| 対照区 | 340 | 14.5 | 5.2 | 7.6 |
| 有意差 (0.05) | n.s. | * | n.s. | * |

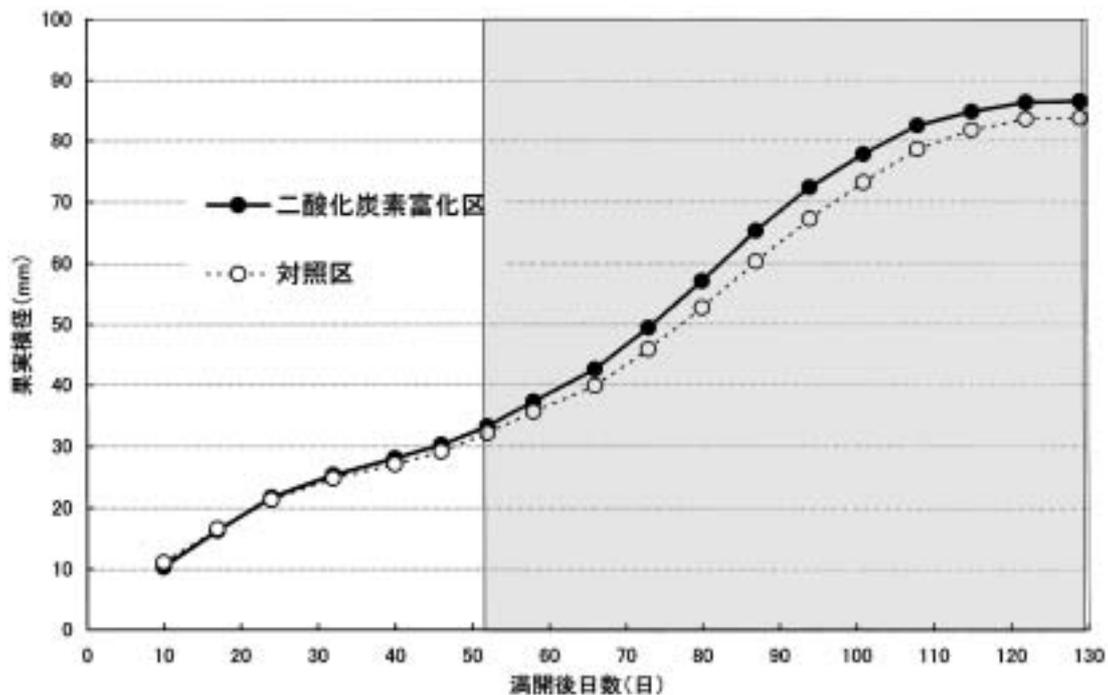


図28 長期の二酸化炭素富化がニホンナシ ‘幸水’ の果実肥大に及ぼす影響 (実験1)
網掛けは二酸化炭素の富化期間を示した。

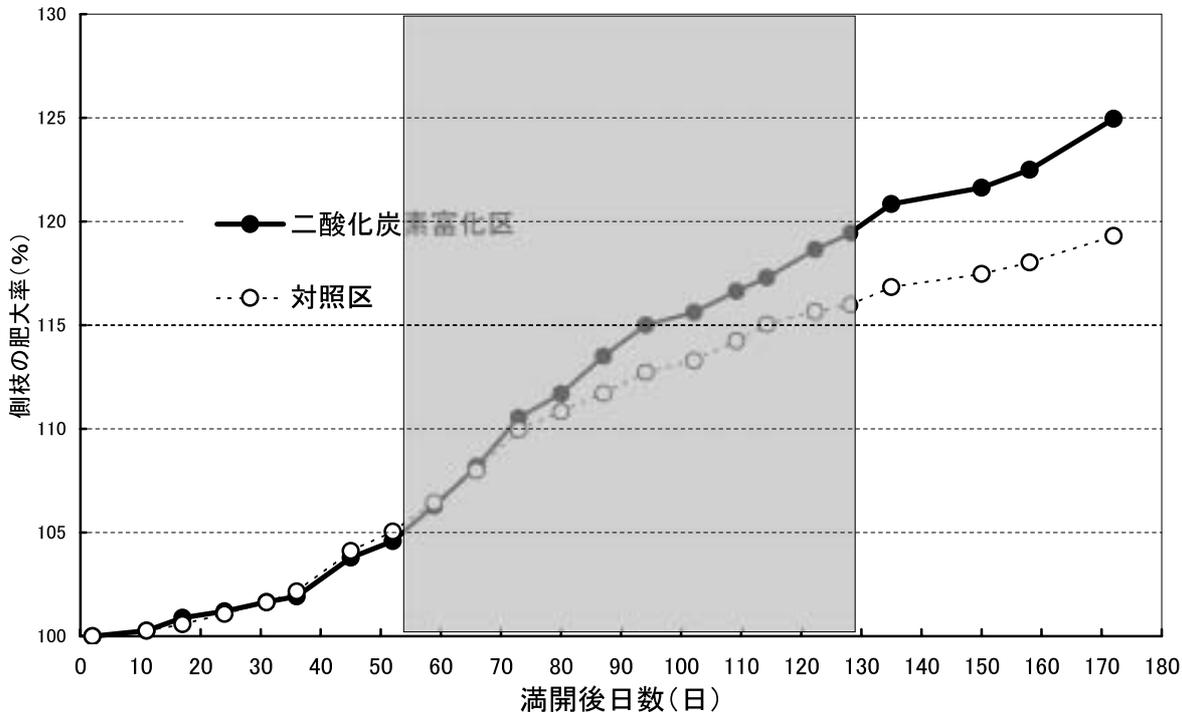


図29 長期の二酸化炭素富化がニホンナシ ‘幸水’ の側枝肥大に及ぼす影響 (実験1)
満開後2日目の側枝径を100とした相対値で示した。
網掛けは二酸化炭素の富化期間を示した。

果実収穫完了4カ月後の冬季の調査結果では、二酸化炭素富化処理によって総芽数（葉芽および花芽）は影響を受けなかったが、発育枝、予備枝とも花芽数が増加し、花芽着生率も上昇し、かつ平均花芽重も増加した（データ省略）。また、無機元素含有率は、二酸化炭素富化処理によって窒素、リン、カルシウム、マグネシウムに影響を及ぼさなかったが、二酸化炭素富化処理によってカリウム含有率は上昇した（表9）。果実形質をみると、平均1果重は対照区に比べ二酸化炭素富化区で約45g（対照区の17%に相当）大きかったが、糖度、酸度および硬度に有意な差はなかった（表7）。また、収穫中央日は二酸化炭素富化処理によって5日遅れた（データ省略）。

実験2 果実の後期肥大期以降の連続二酸化炭素富化（満開後88日目から収穫完了）が果実形質に与える影響

全糖含有率は満開後88日目には8%であったが、成熟果では14.6%まで上昇した（図30）。二酸化炭素富化処理前には全糖含有率に差異はなかったが、二酸化炭素短期富化処理によって処理13日目には対照区に比べて2%上昇し、この差は成熟時まで維持された。

果実中の全糖に占めるソルビトールの割合は、対照区では満開後88日目でグルコース、フルクトースおよびスクロースに比べて最も高く、満開後108日目までスクロースは検出されなかった（表10）。その後ソルビトールの割合は低下し、それとは逆にスクロースの割合が上昇したが、グルコースおよびフルクトースの割合はほぼ一定であった。二酸化炭素短期富化処理によってスクロースの検出時期が満開後101日目と約1週間早まった。二酸化炭素短期富化処理にかかわらず、成熟果の糖組成はフルクトース>スクロース>ソルビトール>グルコースの順に高かった。

二酸化炭素の短期富化処理によって成熟果の平均1果重は変動しなかったが、糖度（Brix）が上昇した（表7）。また、二酸化炭素富化処理によって硬度は減少したが、酸度に差異はなかった。

表8 長期の二酸化炭素富化がニホンナシ‘幸水’果実の無機元素含有率に及ぼす影響（実験1） (%)

| 満開後日数 (日) | 二酸化炭素富化区 | | | | | 対照区 | | | | |
|--------------|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | N | P | K | Ca | Mg | N | P | K | Ca | Mg |
| 47 | 1.26 | 0.23 | 1.38 | 0.26 | 0.17 | 1.21 | 0.23 | 1.38 | 0.21 | 0.16 |
| 78 | 0.49 | 0.12 | 1.06 | 0.16 | 0.08 | 0.49 | 0.12 | 0.90 | 0.16 | 0.06 |
| 99 | 0.40 | 0.09 | 1.01 | 0.16 | 0.06 | 0.36 | 0.10 | 0.74 | 0.11 | 0.06 |
| 113 | 0.29 | 0.11 | 0.95 | 0.11 | 0.05 | 0.23 | 0.07 | 0.53 | 0.16 | 0.05 |

表9 長期の二酸化炭素富化がニホンナシ‘幸水’の花芽の重量および無機元素含有率に及ぼす影響（実験1）

| | 短果枝 | | | | | 発育枝 | | | | | | |
|----------|-----------------|------|------|------|------|------|-----------------|------|------|------|------|------|
| | 1芽重 (D.W.mg) | N | P | K | Ca | Mg | 1芽重 (D.W.mg) | N | P | K | Ca | Mg |
| 二酸化炭素富化区 | 47.6 | 1.11 | 0.26 | 1.00 | 1.22 | 0.38 | 44.4 | 1.19 | 0.26 | 1.00 | 1.06 | 0.31 |
| 対照区 | 44.7 | 1.11 | 0.26 | 0.64 | 1.22 | 0.33 | 40.5 | 1.21 | 0.27 | 0.80 | 1.11 | 0.27 |

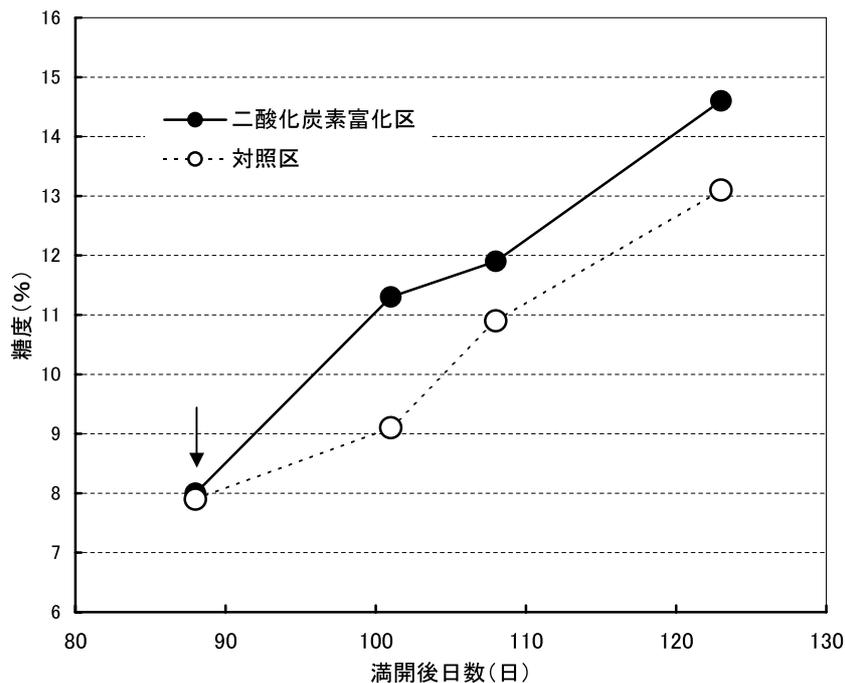


図30 短期の二酸化炭素富化がニホンナシ‘幸水’の果実の全糖含有率に及ぼす影響(実験2)

表10 短期の二酸化炭素富化がニホンナシ‘幸水’の糖組成に及ぼす影響(実験2)

(%)

| 満開後日数 (日) | 二酸化炭素富化区 | | | | 対照区 | | | |
|--------------|----------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|
| | ソルビトール | グルコース | フルクトース | スクロース | ソルビトール | グルコース | フルクトース | スクロース |
| 88 | 46.9 | 16.6 | 36.5 | 0 | 47.6 | 14.4 | 38.0 | 0 |
| 101 | 35.2 | 15.5 | 41.0 | 8.3 | 47.4 | 16.2 | 36.4 | 0 |
| 108 | 36.1 | 15.8 | 39.6 | 8.5 | 34.7 | 15.1 | 42.9 | 7.3 |
| 123 | 22.0 | 14.9 | 35.8 | 27.3 | 21.0 | 14.4 | 38.9 | 25.7 |

考 察

栄養生長および果実生長と二酸化炭素富化

多くのC₃植物で二酸化炭素富化によって処理開始初期はP₀が向上するが、処理終了時には著しく低下するいわゆるダウンレギュレーションが観察されている (Peet, 1984; Masudaら, 1989; Idso and Kimball, 1991; Bowes, 1993; Makino, 1994)。その原因の一つはソースからシンクへの光合成産物の転流速度がP₀ほど増加しないためとされている。しかし、本実験結果によると、ニホンナシの発育枝葉のP₀は同一日射量下で処理開始4～5日目では対照区の1.8～2.6倍、処理終了時の5日前でも2倍以上のP₀を維持した(データ省略)。同様の現象がブドウで報告されている(松井ら, 1985)。このように比較的長期の二酸化炭素富化条件下でも果樹においてP₀が低下しない要因を考察してみる。本実験の二酸化炭素富化によって、果実の肥大が著しく促進され、かつ側枝径も肥大した。一方、二酸化炭素富化処理によ

って総芽数（葉芽および花芽）は影響を受けなかったが、発育枝、予備枝とも花芽数が増加し、花芽着生率も上昇し、かつ平均花芽重も増加した。ブドウの果粒初期肥大期から成熟期までの二酸化炭素富化によって果実生育および樹体生長の両者を促進した(黒岡ら, 1990)。また、果実の後期肥大期の¹³Cトレーサー実験によると、側枝先端の発育枝から果実への光合成産物の分配が60%と高いことから、この時期のニホンナシ果実のシンク活性は著しく高いと推察される(Itoら, 2002)。また、松井ら(1985)も、光合成産物の各器官に対する分配は、生育時期によって異なり、それは各器官の生育相と密接に関連していると報告している。しかし、これらの事実は、各器官への光合成産物の分配が変動するにもかかわらず、シンクが強く維持される永年作物である果樹ではP₀の低下は小さいと推察され、葉におけるソースつまり光合成産物生産量が不足していることを示唆している。なお、内野ら(1990)は、ニホンナシ‘幸水’ではハウス栽培下ですべての器官の炭水化物含有率が低下すると報告している。これらの結果から、ハウス栽培ではさらにP₀の強化が必要と推察され、二酸化炭素富化処理は果実生産のみならず、翌年以降の樹体生育を維持する上で有効であると結論できる。

糖代謝と二酸化炭素富化

新梢伸長停止期以降の長期二酸化炭素富化によって、平均1果重が増大したが、果実品質つまり糖度、酸度および硬度には明らかな影響を及ぼさなかった。猪俣ら(1993)もニホンナシ‘幸水’を用い、二酸化炭素富化の期間を変えると、満開から成熟までの二酸化炭素富化処理は、時期的に期間がより収穫期に近くしかも短期の処理と比べてみると、平均1果重は増大するが、糖度は変動しないことを報告している。一方、後期肥大期以降の二酸化炭素富化は、果実サイズよりも果実糖度の上昇に影響を及ぼしている。つまり、二酸化炭素富化時期によって果実に与える影響が異なると考えられる。二酸化炭素富化の影響は植物の生育ステージによるという報告もある(Neales and Nicholls, 1978; Ingvarsdén and Veierskov, 1994)。しかし、二酸化炭素富化の時期の違いが果実糖度を上昇させた理由については明らかにできなかった。

ニホンナシ果実は成熟期までは転流したソルビトールをスクロースなどの糖類へ転換し、さらにデンプンとして集積し、成熟期にはデンプンに転換することなく糖類として集積する(Yamaki and Moriguchi, 1989)。ソルビトールは、果実中でNAD⁺依存のソルビトール脱水および酸化酵素によってフルクトースおよびグルコースにそれぞれ転換される(Yamaki and Ishikawa, 1986)。その後、SSおよびSPSによってスクロースに転換される(Moriguchiら, 1992)。ソルビトールの減少に伴いフルクトースおよびグルコースが増加し、この増加はニホンナシ‘幸水’では二酸化炭素富化によってより早期に起こると共に著しく促進された。二酸化炭素富化はソルビトールの他の糖への転換やSSおよびSPSなどの糖代謝をより早期から向上させると考えられる。この結果は、糖の果実への集積期間が遅延し、長期に渉ることを示唆している。二酸化炭素富化によって、光合成速度および光合成産物の転流は促進される。加えて、篩部出液中のソルビトール濃度が上昇した(Itoら, 2002)。これらの結果から、果実への糖供給はソルビトールの濃度の上昇を通して促進され、ソルビトールの転換とSS活性の向上にも関与したと推察される。Moriguchiら(1992)は、ニホンナシ果実でSSやSPSなどの糖合成に関与する酵素活性とスクロース含有率に密接な関係があると報告している。この結果から、二酸化炭素富化による糖代謝の促進によって果実への光合成産物の供給が増

大したと考えられる。

果実の成熟期における二酸化炭素富化による果実糖度の変動は果実に含まれる水による希釈のためと推定される。例えば、果実の成熟期の二酸化炭素富化は果実のサイズに影響を及ぼさないため糖度が上昇した。一方、長期の二酸化炭素富化によって果実のサイズが増大し、果実の糖度は対照区に匹敵する値を示した。つまり、ニホンナシは果実で肥大と平行して糖集積が生じるため、転流したソルビトールが果実後期肥大期にはヘミセルロースやセルロースのような細胞壁の合成による肥大に優先的に消費されたことも一因と推察される。

無機元素と二酸化炭素富化

二酸化炭素富化処理によって満開後78日目までは果実の無機元素含有率に有意差は見られなかったが、その後対照区に比べて窒素およびカリウム含有率が上昇し、とくにこの上昇はカリウムで著しかった(表8)。同様にカリウム含有率の上昇が花芽でもみられた。これらの結果から、二酸化炭素富化によってニホンナシの果実や再生長部位へカリウムが供給され保持されることが考えられる。これらの知見は、二酸化炭素富化によって *Poa alpina* の花で無機元素の増加はみられず、牧草 (*Festuca vivipara* L.) 葉で窒素、リン酸およびカリウム含有率が上昇した結果とはかならずしも一致しない(Baxterら, 1994)。カリウムは糖の転流に重要な役割を果たし、サツマイモ塊根のシンク活性を促進する (Tsunno and Fujise, 1965) という知見と本実験結果から、二酸化炭素富化によるニホンナシ果実および花芽のカリウム含有率の上昇は、光合成産物の転流と果実の糖代謝の促進に寄与すると考えられる。

2) 短期処理

緒言

果実生長に対する二酸化炭素富化は果実の生長時期によって異なり、新梢伸長停止期以降の果実発育停滞期からの二酸化炭素富化は果実サイズを増大させ、一方、果実生長速度が低下する果実成熟期の二酸化炭素富化は果実肥大に影響を及ぼさずに果実糖度を上昇させる (Ito ら, 1999a)。果実の生長初期には細胞数とサイズが急速に増大するが果実の成熟期には細胞の肥大は鈍化し、細胞に糖が集積する。しかし、果実の生長を促進する要因は果実細胞の肥大 (expansion) もしくは果実細胞への糖集積のどちらに起因するかについては明らかにできなかった。

大気中の二酸化炭素濃度が高いと、気孔伝導度や蒸散量が減少する。しかし、植物の二酸化炭素の拡散および P_0 が増加する (Bowes, 1993)。これらの応答の結果、植物の水分状態が向上し、細胞の水の移動によって生産効率は上昇する (Jones ら, 1985; Morison, 1985; Stronach ら, 1994)。二酸化炭素富化によって多くの植物で生産量が増大する (Hardy and Havelka, 1975; Kimball, 1983)。その理由は二酸化炭素の純同化量の増加によると考えられる (Valle ら, 1985; Makino, 1994) が、いくつかの例外もある。多くの C_3 植物で二酸化炭素富化によって処理開始初期は P_0 が向上するが、処理終了時には著しく低下する (Peet, 1984; Masuda ら, 1989; Idso and Kimball, 1991; Bowes, 1993; Makino, 1994)。その一つの理由は光合成産物のソースからシンクへの転流速度が P_0 ほど増加しないためである。

植物の水分状態に対応して植物の側枝径は変動する (Klepper ら, 1971; So ら, 1979; Imai ら, 1990; Campbell and Turner, 1991; Simonneau ら, 1993)。Huguet (1985) の開発した植物の微細計測法、すなわち側枝径のモニタリングによって植物の水分状態が評価できる (Simonneau ら, 1993)。それ故に、この手法を用いれば二酸化炭素富化による水利用効率の増進や果実肥大に与える影響について調査できる。二酸化炭素富化による水利用効率の増進は、二酸化炭素吸収量の増加 (Bowes, 1993) あるいは蒸散による水分の損失の低下 (Drake ら, 1997) によって引き起こされる。果実の生長に与える二酸化炭素富化の影響は前述の要因の一方あるいは両方によると考えられるが明瞭ではない。本研究は、二酸化炭素富化による果実の生長はその水分状態あるいは光合成産物の供給によるか否かを検討した。

材料および方法

本研究は広島県立農業技術センター、果樹研究所で実施した。すべての実験でコンテナ (60 L) に未耕土のマサ土 (花崗岩風化土壌) とバーク堆肥を 7 : 3 に混合しコンテナ当たり 1 樹として主幹形整枝仕立てのニホンナシ (*Pyrus pyrifolia* Nakai, 品種 '幸水') を育成した。屋外で育成した 4 年生のニホンナシ '幸水' を果実の後期肥大期に人工気象室に搬入し、2 日間 $350 \mu\text{L L}^{-1} \text{CO}_2$ で新環境に順応させた。二酸化炭素濃度を 350 ± 50 , 700 ± 100 および $1400 \pm 200 \mu\text{L L}^{-1} \text{CO}_2$ の 3 水準に 2 日間二酸化炭素制御器 (GH-250E 型, コス株式会社製) で制御し、二酸化炭素濃度を 10 分間隔で記録した。人工気象室 (広島設備株式会社製, 広島市) 内の環境は光量子が樹の上部で $1700 \mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 気温 25°C , 相対湿度 $70 \pm 5\%$ に維持し、

土壌水分は水分ポテンシャルを -25kPa 以上に適宜灌水し維持した。

実験1 P_0 および果実・側枝径に与える二酸化炭素富化の影響

P_0 および気孔伝導度 (g_s) の測定

二酸化炭素富化処理2日後の P_0 および g_s は携帯型光合成測定器(LI-6200型, ライカ社製)で発育枝の基部から第5, 6, 7葉および短果枝の第3, 4, 5葉について, 光量子 $800\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ で測定した。

果実および側枝径の測定

側枝径はIwaoら(1988)の方法に準じて測定した。すなわち, 満開から90日後の個体について, それぞれの処理の3側枝に歪みゲージ式変位計を取り付け, 48時間にわたって10分ごとの測定値をデータロガー(DE-1000型, NEC三栄社製)に収録し測定した。

側枝径および「髓と木部」径の測定

これらの測定は二酸化炭素濃度を 350 ± 50 および $1400\pm 200\mu\text{L L}^{-1}\text{CO}_2$ の条件下で実施した。「髓と木部」の変化の測定は側枝の樹皮(主に形成層と篩部)を幅約 10cm (側枝の約 $1/10$)カミソリで除去した後に行った。この径変化は二酸化炭素富化処理後2日目の24時間について10分ごとに測定記録した。

実験2 木部の水移動速度

これらの測定は二酸化炭素濃度を 350 ± 50 および $1400\pm 200\mu\text{L L}^{-1}\text{CO}_2$ の条件下で自然光ファイトトン内で実施した。日射量以外は, 実験1と同様の環境下で実施した。木部の水移動速度はダイナゲージSGAシリーズ(ダイナマックス社, 米国)で測定し, それぞれの樹の葉面積は葉面積計(AAM-5型, 林電工社製)で測定した。

実験3 $^{13}\text{CO}_2$ 同化実験および篩部出液の測定

実験は二酸化炭素濃度が 350 ± 50 および $1400\pm 200\mu\text{L L}^{-1}\text{CO}_2$ の2区について3日間実施した。 $^{13}\text{CO}_2$ の同化はSawadaら(1995)の方法に準じて実施した。二酸化炭素富化処理後2日目の12時に側枝先端の発育枝に $^{13}\text{CO}_2$ を同化した。つまり, 発育枝上の葉をビニール袋で覆い, 1kPa の $^{13}\text{CO}_2$ を含む空気バランスのガスを約 4L 注入した。約2時間にわたって $1000\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ の光量子下で同化させた。同化終了24時間後に $^{13}\text{CO}_2$ 施用同化葉と発育枝, すべての果実, その他の葉, 茎, 枝, 主稈および根に分けて採取した。これらの採取試料は3日間 70°C で通風乾燥後, 乾物重を測定した。試料は, 微粉碎した後, 分析に供試した。

^{13}C の分析

各部位の ^{13}C 量は全自動窒素炭素同位体測定器(ANCA-SL型, Europa Scientific社製)を用い定量した。 ^{13}C atom% excessは, 植物体と既知の濃度のグリシンとを比較し, 算出した。

篩部出液の糖濃度の測定

篩部出液は二酸化炭素濃度 350 および $1400\mu\text{L L}^{-1}\text{CO}_2$ の2区のそれぞれ3側枝からCostelloら(1982)の方法に準じて採取した。採取は, 二酸化炭素富化処理36時間後から4時間実施した。側枝から剥がし着生状態の樹皮片の切断面を 5mL の 10mM EDTA溶液を満たした試験管に浸けて篩部液を採取した。採取したサンプルは分析まで -80°C で保存した。採取液は $0.45\mu\text{m}$ のフィルターでろ過後, この溶液を糖分析カラム(SH-1011型, 昭和電工社製)

と示差屈折検出器を備えた HPLC (ガリバーシリーズ, 日本分光社製) で測定した。カラムの温度を70℃に保ち, 溶離液として1.0mLmin⁻¹の流量で水を流し, 採取液の糖をスクロース, グルコース, フルクトースおよびソルビトールに分離して標準試薬と比較し定量した。

結 果

P₀および g_s

P₀は側枝の短果枝葉よりも発育枝葉で高かった (図31)。P₀は二酸化炭素濃度が350から700 μL L⁻¹ CO₂に上昇するに伴い上昇した。しかし, この上昇の傾きは発育枝葉の方が高く, 1400 μL L⁻¹ CO₂まで二酸化炭素濃度の上昇に伴い直線的に上昇したが, 短果枝葉では700 μL L⁻¹ CO₂から低下した。P₀とは逆に g_s は発育枝葉よりも短果枝葉で高く, 二酸化炭素濃度の上昇に伴い直線的に低下した。葉面積は発育枝葉で短果枝葉の約15倍大きかった (データ省略)。

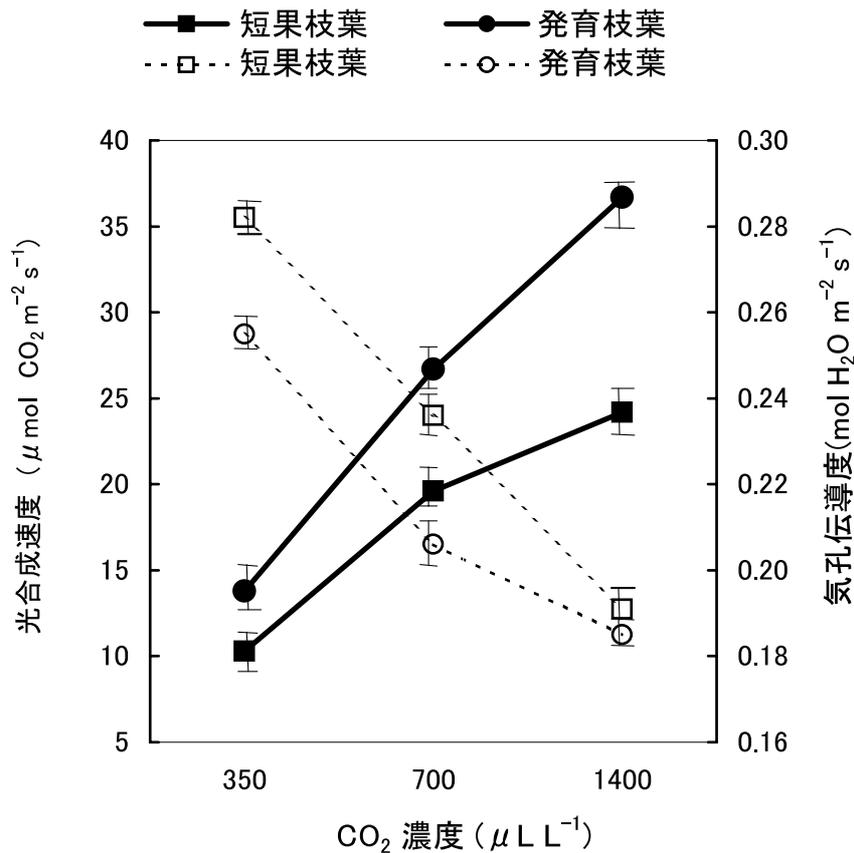


図31 二酸化炭素富化がニホンナシ ‘幸水’ 葉の光合成および気孔伝導度に及ぼす影響 (実験 1)

標準誤差 (n=3) を垂直線で示した。

果実および側枝径

果実および側枝径は測定期間に増加したが、その肥大の日変化は処理区間で明確に異なった(図32)。大気中の二酸化炭素濃度下では、茎は明期に収縮し、夜間に肥大する。果実の肥大速度は昼間で遅く、夜間で早かった。二酸化炭素濃度の上昇に伴い、光照射下において側枝径の収縮や果実肥大の低下が抑制された。二酸化炭素濃度が $1400 \mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ では果実の日変化は消滅して明期暗期とも同一の肥大速度を示し、明期の側枝径の収縮も最小であった。

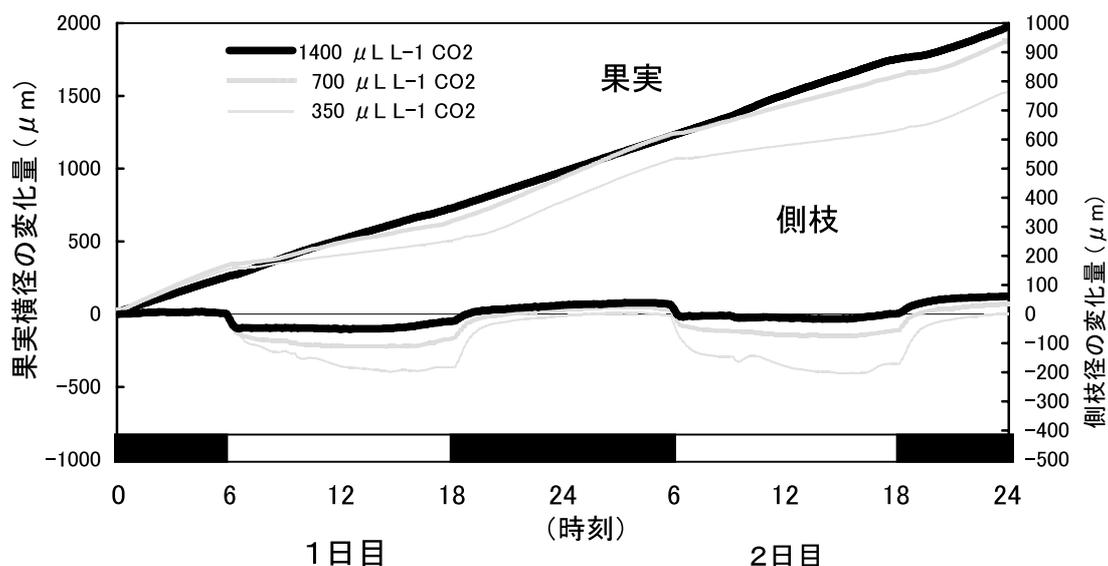


図32 二酸化炭素富化がニホンナシ‘幸水’の果実および側枝径の変化量に及ぼす影響 (実験1)

図の下方の黒線および白線は暗期および明期を示す。測定開始時の果実横径および側枝径は、それぞれ $54.5 \pm 2.5 \text{mm}$ および $18.2 \pm 0.5 \text{mm}$ であった。10分間隔で測定した平均値の最大標準誤差 ($n=3$) は 1400, 700 および $350 \mu\text{L L}^{-1}$ 区で果実横径ではそれぞれ 25.7, 39.3 および $10.1 \mu\text{m}$ であり、側枝径ではそれぞれ 5.7, 14.2 および $12.8 \mu\text{m}$ であった。

「髓と木部」径

側枝径と「髓と木部」径における明期の収縮および暗期の肥大について、大気 ($350 \mu\text{L L}^{-1} \text{CO}_2$) および二酸化炭素富化 ($1400 \mu\text{L L}^{-1} \text{CO}_2$) 条件下で測定した (図33)。側枝径の明期の収縮幅 (図33A に示した a と d の差) は大気時より二酸化炭素富化時の幅 (図33B に示した a' と d' の差) より大きかった。同様の傾向は、「髓と木部」径の変動で観察された。「髓と木部」径の明期における収縮幅は側枝径全体の収縮幅の主要部分を占めたが、この収縮幅は二酸化炭素富化によって減少した。すなわち、二酸化炭素富化による側枝径の明期の収縮 (図33B に示した a' と d' の差) は、b' と c' の距離が非常に小さいことから「髓と木部」以外 (主として形成層と篩部) の部位の収縮による。明期の終了時には、側枝径の収縮は回復し、肥大し始めていた。二酸化炭素富化時では「髓と木部」径は側枝径とほぼ同様の变化パターンを示した。処理24時間後には、「髓と木部」径は処理開始時と同一の値に回復したが、この回復や肥大は側枝では著しかったため、二酸化炭素富化による側枝径と「髓と木部」径の距離の差は昼間でも明らかで、その差異は暗期に拡大した。

木部の水移動速度

側枝の木部の水移動速度は二酸化炭素濃度にかかわらず、明期開始時から増加し始め、約12時に最大値を示し、その後減少して夜間にはゼロレベルに達した (図34)。この水移動速度は二酸化炭素富化によって大気二酸化炭素濃度より昼間に著しく減少した。この水移動速度の減少は午後より午前の方が著しかった。

光合成産物の転流

$^{13}\text{Catom}\% \text{excess}$ は、 ^{13}C 同化葉で最も高く、ついで ^{13}C 同化葉に近接した果実でその値が高かった (データ省略)。二酸化炭素富化によって ^{13}C 同化葉からの転流率は低下したが、果実への分配率には有意差はみられなかった (表11)。

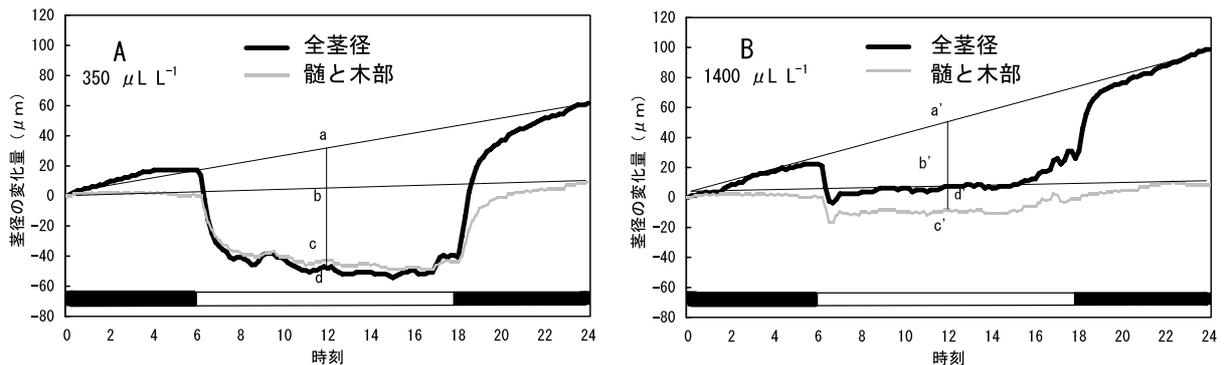


図33 二酸化炭素富化がニホンナシ ‘幸水’ の側枝の全茎径および「髓と木部」の変化量に及ぼす影響 (実験1)

図の下方の黒線および白線は暗期および明期を示す。測定開始時の側枝径および髓と木部径は、それぞれ $15.8 \pm 0.5 \text{mm}$ および $12.5 \pm 0.5 \text{mm}$ であった。10分間隔で測定した平均値の最大標準誤差 ($n=3$) は1400および $350 \mu\text{L L}^{-1}$ 区で側枝径ではそれぞれ 4.2 および $5.7 \mu\text{m}$ であり、髓と木部径ではそれぞれ 3.6 および $4.9 \mu\text{m}$ であった。

篩部出液の糖濃度

ソルビトールは満開93日目の側枝の篩部出液の主要な糖質であり、スクロース、グルコースおよびフルクトースは非常に少なかった(データ省略)。ソルビトールの篩部からの出液速度は二酸化炭素富化によって増加した(表12)。

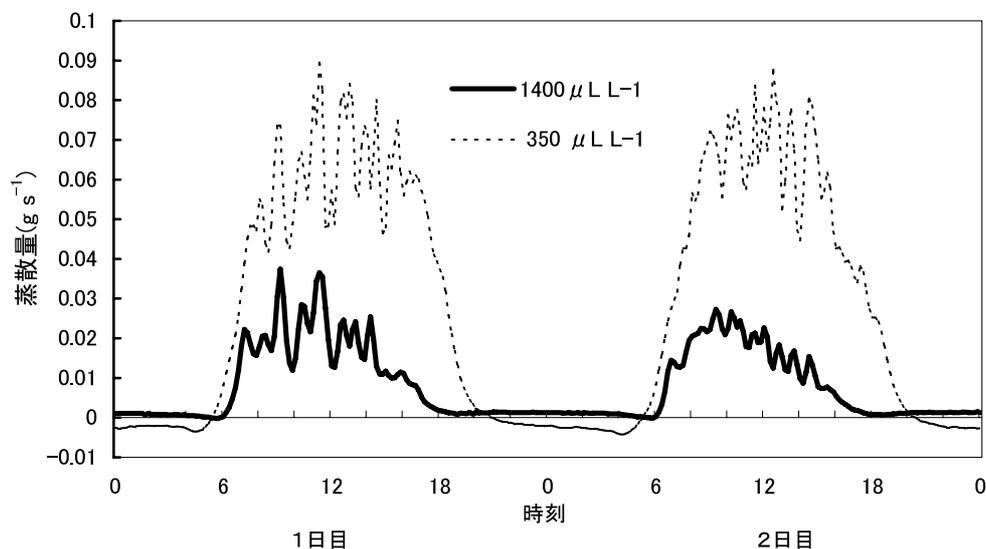


図34 二酸化炭素富化がニホンナシ‘幸水’の木部の水移動に及ぼす影響(実験2)

側枝の葉面積は、1400および350 $\mu\text{L L}^{-1}$ 区でそれぞれ 7.5 ± 0.5 および $7.6 \pm 0.5 \text{dm}^2$ であった。10分間隔で測定した平均値の最大標準誤差 ($n=3$) は二酸化炭素富化区および対照区でそれぞれ 0.015 および 0.010g s^{-1} であった。

表11 二酸化炭素富化がニホンナシ‘幸水’の果実および他の器官への転流と分配に及ぼす影響(満開後93日目に $^{13}\text{C}_2$ 施用; 実験3)

| | ^{13}C 量 ($\mu\text{g}/\text{個体}$) | | | 転流率 (%) |
|---------------------------------------|---|--------|--------|---------|
| | ^{13}C 施用枝 | 果実 | 他器官 | |
| $350 \mu\text{L L}^{-1} \text{CO}_2$ | 83 | 77(62) | 48(38) | 60 |
| $1400 \mu\text{L L}^{-1} \text{CO}_2$ | 115 | 93(66) | 49(34) | 55 |
| LSD(0.05) | 43 | n.s | n.s | 7 |

転流率 = [(植物全体の ^{13}C - 施用枝 ^{13}C) / (植物全体の ^{13}C)] $\times 100$ 。

カッコ内の値は ^{13}C の分配を示した。

分配率 = [各器官の ^{13}C / (植物体の ^{13}C - 施用枝の ^{13}C)] $\times 100$ 。

表12 二酸化炭素富化がニホンナシ‘幸水’の側枝の篩部からのソルビトール出液に及ぼす影響(実験3)

| ソルビトール出液率 | |
|---------------------------------------|------|
| $\mu\text{g min}^{-1}$ | |
| $350 \mu\text{L L}^{-1} \text{CO}_2$ | 27.8 |
| $1400 \mu\text{L L}^{-1} \text{CO}_2$ | 38.2 |
| LSD(0.05) | 9.46 |

考 察

二酸化炭素富化の植物に与える効果として、植物の光合成、光合成産物の転流および水利用効率の向上が報告されており (Bowes, 1993 ; Drake ら, 1997), ニホンナシにおいて二酸化炭素富化の影響の詳細な調査が実施され、果実後期肥大期における果実肥大と光合成産物の転流および水分状態との関連を明らかにした。Genard ら (2001) は、植物組織のサイズの変動は成熟した篩部周辺の伸縮細胞の収縮と肥大によって引き起こされ、これらの細胞の生長および収縮は膨圧と同化産物の濃度の変動によると報告している。本実験では、二酸化炭素富化によって、側枝径の日中の収縮が軽減されると同時に果実肥大速度の低下が抑制された。植物器官の肥大に対するこのような効果は主として「髓と木部」の周辺伸縮細胞の膨圧の増大によると考えられる。この要因は、二酸化炭素富化によって、気孔開度が低下し、水損失が減少するためであろう。二酸化炭素富化によって、 P_0 , ^{13}C の果実への分配および篩部出液のソルビトール濃度が増大した。これらの結果から、ニホンナシにおいて二酸化炭素富化による昼間の器官の収縮の低下は、光合成産物の転流量の増大が関与すると推定される。二酸化炭素富化によって夜間に主に篩部と形成層の肥大によって側枝径が増大する。以上の結果から、果実肥大に対する光合成産物の果たす役割は膨圧より小さいと考えられる。この結論は、光合成が停止し、果実への光合成産物の転流が最小になった時、つまり夜間に果実生長は盛んになるという報告 (Johnson ら, 1992) を支持している。

1日 (24時間) に明期および暗期に側枝が収縮と肥大を繰り返すこと (Kozlowski, 1972 ; Brough ら, 1986) から、器官の生長にはサーカディアンリズムが関与すると考えられる。植物のサーカディアンシステム (McClung, 2001) と同様に、肥大生長における日変化は植物の水分状態の変動に対応するために重要である。本実験では二酸化炭素富化によって植物の水分状態が改善され、その結果、側枝径の変動幅および程度が著しく減少した。波動の角度は鋭角ではなく、幅広くなったが、波動のリズムに対する時間的な影響はみられなかった。二酸化炭素富化によって振動測定に時間的な悪影響を与えず、植物の水分状態の改善によってその機能を隠蔽する効果を持つと推察される (Salisbury and Ross, 1992)。 *Pinus radiata* の茎長の増加に伴い茎径の日変化の幅が増大するという報告 (Wronski ら, 1985) は本実験結果と一致している。樹木において、水ポテンシャルは樹高の増加に伴い低下し (Salisbury and Ross, 1992), 水分状態が悪化すると茎径の収縮量が増大する。

二酸化炭素富化によって、気孔抵抗と蒸散量が減少するが、 P_0 と光利用効率は増加する (Bowes, 1993 ; Drake ら, 1997)。この結果とは逆に、長期の二酸化炭素富化を行うと、非構造炭水化物の集積に伴い炭素代謝系の主要酵素活性が低下することによって、 P_0 は低下する (Bowes, 1993 ; Cure and Acock, 1986 ; Drake ら, 1997 ; Gesch ら, 1998)。本実験においては短期の二酸化炭素富化であり、植物の反応はこれまでの他の報告 (Bowes, 1993 ; Drake ら, 1997) と同様であった。つまり、他の植物のような長期間の二酸化炭素富化による光合成の順化の影響はニホンナシ ‘幸水’ ではみられなかった。短期の二酸化炭素富化によってソルビトールの篩部からの出液速度は増加し、果実品質の向上に有効であろう。しかし、本実験において二酸化炭素富化時に葉からの ^{13}C 転流率は低下した (表11)。この転流率の低下は、シンク機能を制約したときの *Lolium perenne* の応答 (Fisher ら, 1997) と一致した。

本実験では、明期開始直後から数分で気孔は開放され側枝径が収縮した。二酸化炭素富化

によって、側枝径の減少は著しく抑制された。このように気孔伝導度に与える二酸化炭素富化の影響は直接的であって、水分バランスの変動による間接的な減少ではなかった。二酸化炭素富化による気孔の部分的な閉鎖によって蒸散および木部の水移動が抑制された。水損失が軽減されると、水ポテンシャルは木部で上昇し、同様の現象は師部と形成層のような伸縮性の高い組織でも観察された。伸縮可能な細胞は膨潤し、その結果樹木の側枝径は増加した。昼間の茎径の収縮と蒸散速度を互いに関連させた例は数多い (Imai ら, 1990 ; Li and Huguit, 1990 ; Simonneau ら, 1993 ; Makino, 1994)。樹木の茎には伸縮細胞が存在し、これらが水移動速度に関連して収縮および肥大することを Genard (2001) は報告している。

前節の1で長期間の二酸化炭素富化によって、ニホンナシの果実肥大が促進されるが、この増大のメカニズムについては明らかでなかった。二酸化炭素富化によって夜間ではなく日中の果実肥大が促進されることが明らかになった。大気中の二酸化炭素濃度下では気孔が開放されるため側枝の収縮と果実肥大が抑制される。一方、二酸化炭素富化によって気孔開度が減少し、伝導度が低下するため水損失が抑制され、その結果果実肥大の抑制が解除されると考えられた。

Ⅲ. ジベレリン処理がニホンナシ ‘幸水’ の果実肥大および樹体生育に与える影響

緒言

果樹生産は気温、二酸化炭素濃度、水分・養分供給などの様々な環境因子によって影響を受けつつ行われる。これらの諸要因が果樹類の生育および生理機能に与える影響を明確にすることは、施設栽培における栽培技術の確立において極めて重要である。著者らは、この目的の達成を目指してニホンナシを例に一連の研究を実施している。この研究の一環として、果実生産における重要な栽培技術の一つである植物ホルモン、ジベレリン (GA) 処理の影響について調査した。GA 施用が果実肥大や熟期の促進に有効であることはよく知られている。例えば、高瀬ら (1982) は GA 処理によって、ニホンナシ ‘幸水’ で 4～5 日の果実の成熟期および肥大が促進されることを報告しており、ニホンナシ ‘新水’ でも果実の成熟期の促進効果が観察されている (西本, 1983)。セイヨウナシ ‘ル レクチュ’ では果実肥大促進効果が報告されている (歌代ら, 1995)。また、ニホンナシ ‘幸水’ では GA 果梗塗布による裂果果実の増大 (高瀬ら, 1982)、セイヨウナシ ‘ル レクチュ’ では果肉硬度の減少 (歌代ら, 1995) 等の果実品質の劣化も報告されている。しかし、加温ハウス栽培下の GA 塗布がニホンナシに与える影響についての研究成果は限られており、その果実生産および樹体への影響についての報告はみあたらない。ニホンナシでは開花後、果実肥大と平行して、新梢の出芽・生長、側枝の肥大などの栄養生長が平行して行われ、これら器官間で葉における光合成産物や根から吸収された養水分に対して競合する可能性がある (伊藤, 未発表データ)。それ故、GA が栄養生長および生殖生長に与える影響を解明することによって、ニホンナシの果実生産における GA 処理の効果を明らかにしうると考えられる。

そこで、露地栽培と比較しつつ、加温ハウス栽培条件下におけるニホンナシ ‘幸水’ の樹体生育、果実生産に対する GA 処理の影響を検討した。

材料および方法

本研究は広島県立農業技術センター、果樹研究所で実施した。二本主枝整枝法によって圃場で平棚栽培したニホンナシ (*Pyrus pyrifolia* Nakai, 品種 ‘幸水’ 13年生, 3.0m×6.0m 植え) を供試した。前年までは慣行栽培に準じて育成し、施肥は基肥として1994年の11月に N, P₂O₅, K₂O および MgO をそれぞれ200, 100, 200および20 kg ha⁻¹施用した。

満開10日前 (4月1日) にビニールによる植物の被覆処理を行い、露地区 (被覆なし) とハウス (被覆した) 区の2区を設け、8月21日までの143日間被覆処理を行った。この間、昼間は25℃以下、最低気温は5℃以上とした。なお、4月5日からは夜間の最低気温を15℃以上に保った。灌水によって、ハウス区および露地区とも主幹から50cm, 土壌深20cm の位置の土壌水分ポテンシャルを-32 kPa 以上に保った。満開日は、ハウス栽培では4月10日、露地栽培では4月24日であった。

処理は、露地区およびハウス区からそれぞれ二樹を選び、満開後35日目に二本主枝の一方の主枝のすべての果実の果梗に GA ペースト (協和発酵社製, GA 濃度27 mg g⁻¹) を20～30 mg

塗布した。露地およびハウス区と GA 処理の有無を組み合わせ、露地区、露地 GA 区、ハウス区、ハウス GA 区の合計 4 処理を設けた。

調査は、果実横径、新梢長、展開葉数、および側枝径について、満開後30日目から果実収穫終了まで約1週間毎に10反復で行った。葉面積指数は、第1回目を露地区では満開後42日目、ハウス区では36日目に、第2回目を77および、71日目にそれぞれ実施した。満開後134日目（露地9月7日、ハウス8月22日）に3側枝を採取し、葉、発育枝、二年枝、三年枝、果実および芽の各器官に分けて、90℃で24時間、ついで60℃で48時間通風乾燥後に秤量、粉碎した。この植物体試料を用い、N(ケルダール法)、硝酸一過塩素酸一硫酸法で分解後、P(バナドモリブデン酸法による比色法)、K、CaおよびMg(原子吸光光度法)を定量した。花芽の着生状態は、各区標準的な発育枝を10枝選び、1996年1月16日に行った。果実はカラーチャートで3以上の成熟果実を採取し、第3章1節と同様の方法を用い、系統適応性特性検定試験調査要領に準じて平均1果重、糖度、酸度および硬度を全着果果実の約半数について調査した。

結 果

新梢伸長停止期の新梢長は、60~70cmでありハウスではGA処理区が大きく、露地では逆に無処理区が大きかった(図35)。展葉数は20~23枚で、処理による影響は小さかった。新梢伸長は、ハウスで速く満開後65日で停止したのに対し、露地では約10日遅れて停止した。なお、GA処理の有無による停止期の差はみられなかった。

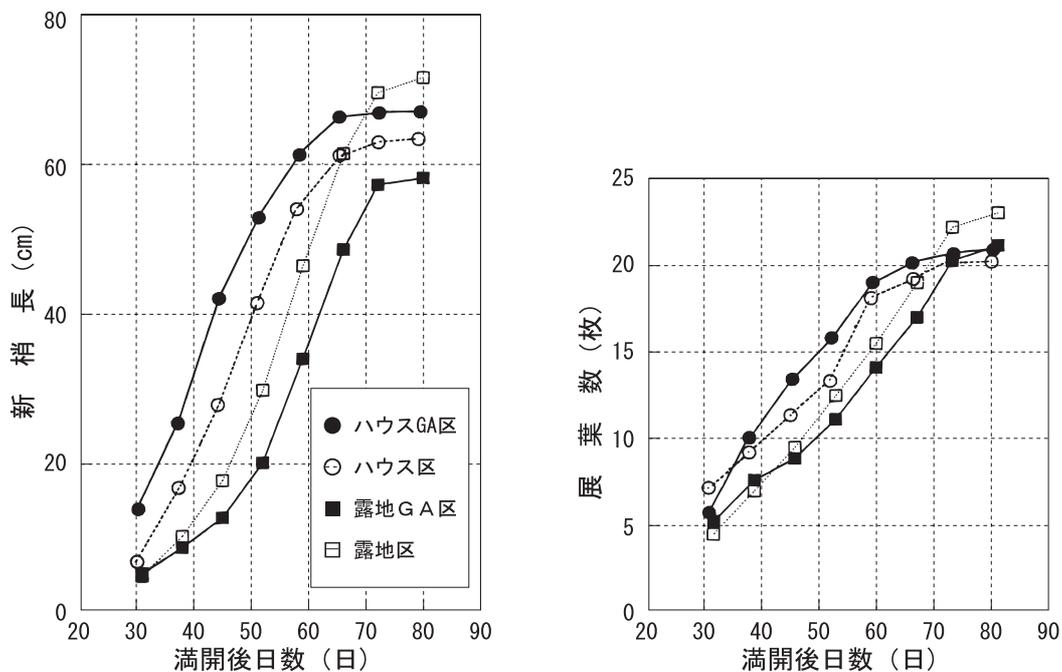


図35 GA処理がニホンナシ‘幸水’の新梢伸長および葉の展開に及ぼす影響

側枝肥大率は露地区に比べてハウス区で著しく低下し、また、GA 処理によって、露地区、ハウス区とも側枝の肥大率が低下した（図36）。

葉面積指数の GA 処理時から葉の展開終了後までの増加割合は、露地区に比べてハウス区でわずかに低かった（表13）。しかし、ハウス区、露地区とも GA 処理の影響はみられなかった。

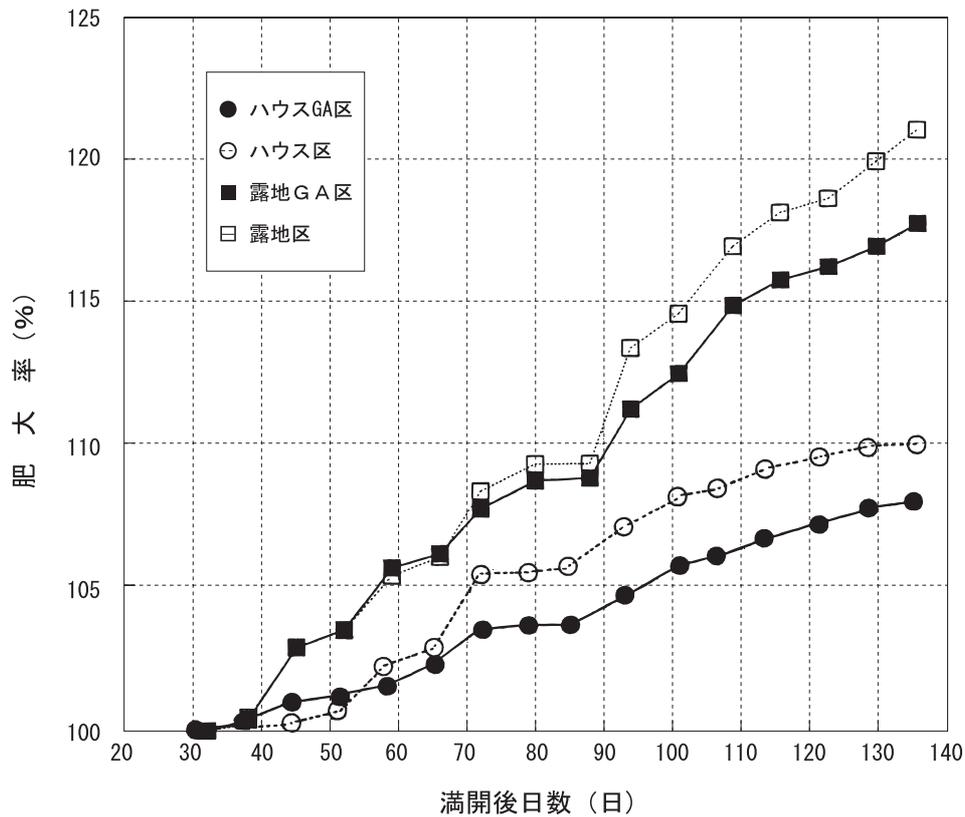


図36 GA 処理がニホンナシ ‘幸水’ の側枝の肥大に及ぼす影響

満開後30日目の側枝径を100とした相対値で示した。

表13 GA 処理がニホンナシ ‘幸水’ の葉面積指数に及ぼす影響

| | GA 処理時* | 新梢伸長停止期** |
|----------|-----------|-----------|
| ハウス GA 区 | 2.29(100) | 3.01(131) |
| ハウス区 | 2.75(100) | 3.50(127) |
| 露地 GA 区 | 2.23(100) | 3.02(135) |
| 露地区 | 2.75(100) | 3.84(140) |

* ハウスおよび露地はそれぞれ満開後36および42日目に調査した。

**ハウスおよび露地はそれぞれ満開後77および71日目に調査した。

新梢停止期のかっこ内の値は GA 処理時を100とした相対値で示した。

葉の無機元素含有率をみると、窒素含有率は露地区に比べてハウス区で低下した(表14)。一方、無機元素含有率は、果実では露地区に比べてハウス区ですべてで高かったが、その他の器官では大差なかった。一方、GA 処理の影響をみると、GA 処理により葉では露地区およびハウス区とも N, Ca 含有率が上昇した。発育枝の N, K, Mg 含有率では、露地、ハウス区間で大差なかったが K では GA 処理区で低かった。芽の無機元素含有率も露地区では、GA 処理で低下した。果実では、ハウス区のみで GA 処理によってすべての無機元素含有率が上昇した。

花芽率は、露地、ハウス区間で差はなく、GA 処理によってハウス区のみで約10%低下した(表15)。

表14 GA 処理がニホンナシ ‘幸水’ の各器官の無機元素含有率に及ぼす影響

| | N | P | K (%) | Ca | Mg |
|----------|-----|------|----------|-----|------|
| 葉 | | | | | |
| ハウス GA 区 | 2.0 | 0.13 | 1.3 | 1.3 | 0.34 |
| ハウス区 | 1.8 | 0.12 | 1.4 | 1.4 | 0.34 |
| 露地 GA 区 | 2.3 | 0.18 | 1.8 | 1.8 | 0.36 |
| 露地区 | 2.3 | 0.13 | 1.8 | 1.8 | 0.37 |
| 発育枝 | | | | | |
| ハウス GA 区 | 0.9 | 0.17 | 0.7 | 0.7 | 0.14 |
| ハウス区 | 1.3 | 0.17 | 0.9 | 0.9 | 0.14 |
| 露地 GA 区 | 1.1 | 0.17 | 0.6 | 0.6 | 0.16 |
| 露地区 | 1.1 | 0.17 | 0.7 | 0.7 | 0.17 |
| 芽 | | | | | |
| ハウス GA 区 | 0.8 | 0.11 | 0.5 | 0.5 | 0.22 |
| ハウス区 | — | — | — | — | — |
| 露地 GA 区 | 0.7 | 0.10 | 0.5 | 0.5 | 0.21 |
| 露地区 | 0.9 | 0.33 | 0.9 | 0.9 | 0.51 |
| 果実 | | | | | |
| ハウス GA 区 | 0.9 | 0.12 | 1.0 | 1.0 | 0.06 |
| ハウス区 | 0.7 | 0.09 | 0.8 | 0.8 | 0.05 |
| 露地 GA 区 | 0.6 | 0.07 | 0.6 | 0.6 | 0.01 |
| 露地区 | 0.6 | 0.06 | 0.7 | 0.7 | 0.03 |

調査は満開後134日目（ハウス1995年8月22日、露地9月7日）に行った。

表15 GA 処理がニホンナシ ‘幸水’ の花芽の着生に及ぼす影響

| | 総芽数 | 花芽数 | 花芽率 (%) |
|----------|------|-----|------------|
| ハウス GA 区 | 18.6 | 7.8 | 40 |
| ハウス区 | 18.4 | 9.0 | 52 |
| 露地 GA 区 | 18.3 | 9.6 | 52 |
| 露地区 | 17.9 | 9.0 | 51 |

調査は1996年1月16日に行った。

果実横径は満開30日後にはすでにハウス区では露地区より大きく、その後の果実肥大は果実の後期肥大期から成熟期でとくに著しかった(図37)。一方、GA処理によってハウス区ではGA処理後肥大速度が速まり、横径の差は成熟期まで持続した。露地区ではGA処理によりやや肥大速度が上昇するにとどまった。

果実の収穫は、露地区で満開後117日目ハウス区では119日目から約2日遅れて開始されたが、収穫期間は両区とも18日であった(図38)。一方、GA処理で露地、ハウス区とも初期の収穫果率が増加し、この傾向はハウス区で著しかった。

果実の累積収穫率が60%に達した時期は、露地、ハウス区間で差異はなく、一方、GA処理によって、露地区では約1日、ハウス区では約5日それぞれ早まった(図38)。

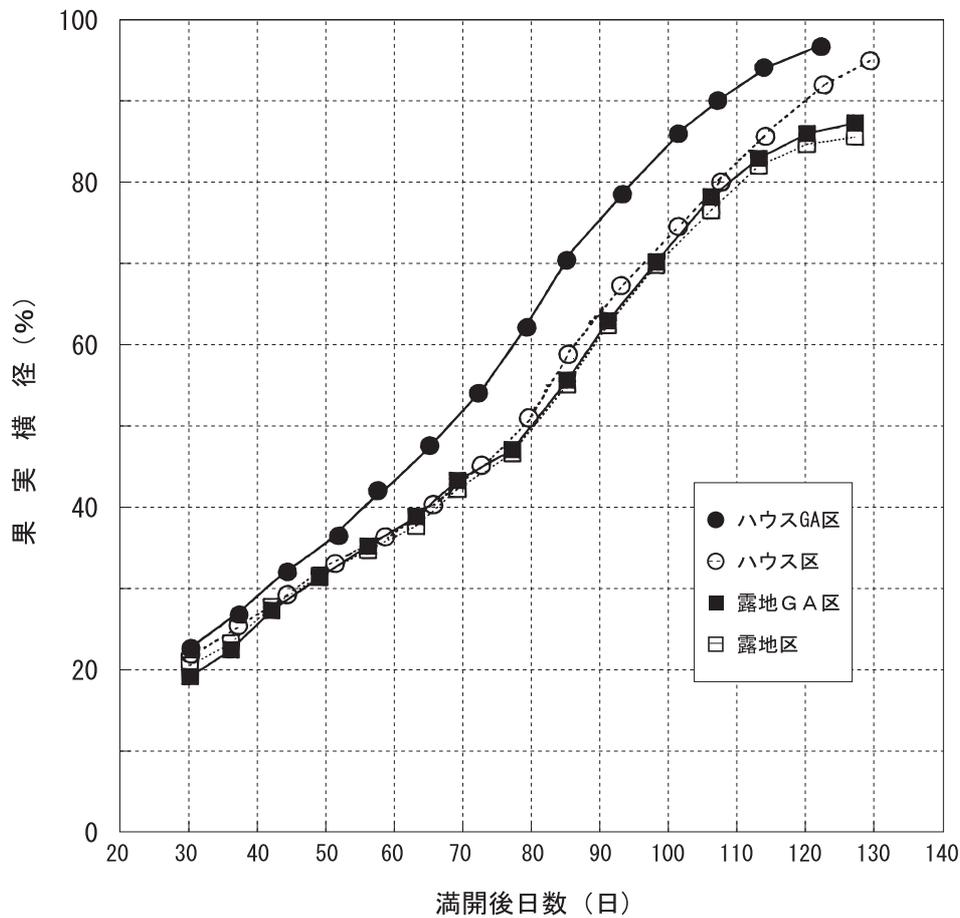


図37 GA処理がニホンナシ‘幸水’の果実肥大に及ぼす影響

平均1果重はハウス区で約404 gであり、露地区に比べて約90 g大きかったが、糖度が約1%，硬度が0.7 lbsそれぞれ低下し、酸度には大差なかった(表16)。一方、GA処理によって露地区では硬度がやや上昇した以外は差がなかったが、ハウス区では1果重が約40 g増大し、糖度が0.5%低下した。

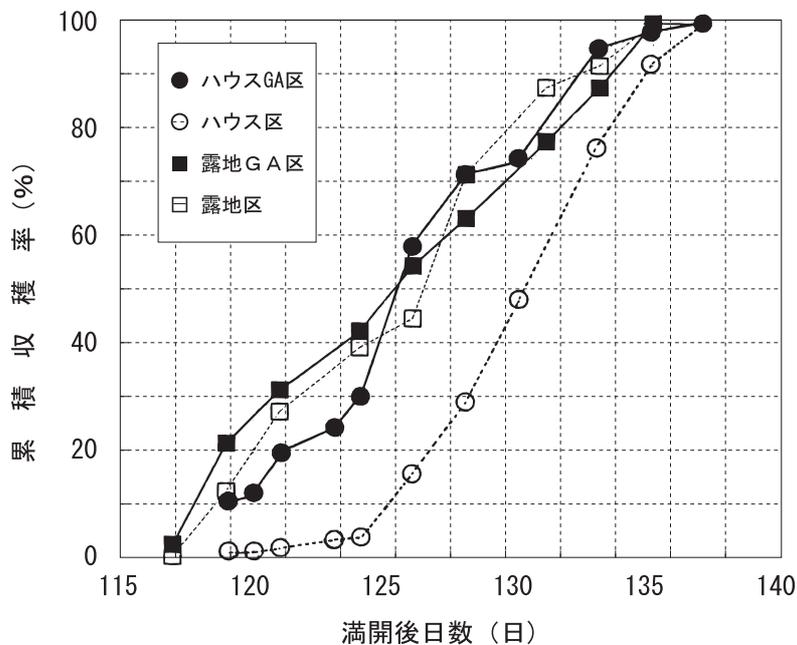


図38 GA処理がニホンナシ‘幸水’の果実の収穫時期に及ぼす影響

表16 GA処理がニホンナシ‘幸水’の果実品質に及ぼす影響

| | 平均1果重 (g) | 糖度 (%) | 酸度 (pH) | 硬度 (lbs) |
|--------|--------------|-----------|------------|-------------|
| ハウスGA区 | 445a* | 12.8c | 5.0c | 5.3a |
| ハウス区 | 404b | 13.3b | 4.9c | 5.4a |
| 露地GA区 | 334c | 14.6a | 6.0a | 5.4a |
| 露地区 | 313c | 14.5a | 5.6b | 5.4a |

*異なる英小文字間で有意差有り (ダンカンの多重検定, $P \geq 0.05$)。

考 察

ニホンナシでは、満開後、新たに葉が展開し、新梢が伸長し、側枝が肥大する一方、果実肥大が行われ、栄養生長と生殖生長とが平行して行われる。栄養生長はハウス条件下では生育の早い時期から促進されるのに対し、露地条件下では遅い時期まで継続する。しかし、側枝の成長はハウス条件下でむしろ小さい。これらの結果から、生育初期にハウス条件下では気温の上昇によって、葉の展開、新梢の伸長などが促進されるが、これと対応して P_0 が増大しないため、側枝の肥大速度はむしろ低下する。一方、果実肥大に対するハウス条件の影響をみると、果実肥大速度は、ハウス条件下で生育後期に促進されるが、果実の成熟は、露地よりもハウス条件で遅延した。以上の結果を総合すると、ハウス条件下では満開後の早い時期の気温が上昇するため栄養生長は旺盛になるが、果実の成熟は2日遅延する。すなわち、気温の上昇によって、栄養器官の成長が促進されるのに対し、果実成熟が逆に遅延すると推定される。

次に、新梢伸長や葉の展開は、GA 処理によって、ハウス条件では高まるのに対し、露地条件では逆に低下した。これらの結果は、GA の効果は気温によって変動し、この促進効果は高温下でのみ発現すると推定される。しかしながら、側枝の肥大は GA 施用によって抑制された(図36)。

一方、果実肥大に対する GA の影響をみると、ハウス条件下では生育早期(満開後35日以降)より果実肥大は促進されるが、このような効果は露地条件では認められなかった。井上ら(2001)もニホンナシ‘ゴールド二十世紀’において、ハウス内の夜温が露地と同等の10℃区は、夜温12℃区に対して GA の肥大促進効果が低下すると報告している。本実験とこの報告から、低夜温下では果実肥大効果が小さいと考えられる。また、果実成熟に対してはハウス条件下では累積収穫率の60%到達は5日早く、GA による果実の成熟促進効果は認められたが、露地ではこの効果は明瞭でなかった。果実幼果期の夜温の上昇によって果実サイズが増大することが観察(伊藤ら, 1992; Ito ら, 1999b) されているところから、GA 処理は高夜温と相加的に果実肥大を促進すると考えられる。その結果、平均1果重は、ハウスおよび露地条件に関わらず GA 処理によって増大したが、この効果はハウス栽培下で著しく促進される。

果実品質についてみると、本研究結果では露地栽培で GA 処理による糖度の低下は小さく、これまでの報告(高瀬ら, 1982; 西本, 1983; 井上ら, 2001)と一致している。しかし、ハウス栽培下では GA 処理によって果実糖度は低下した。すなわち、この要因は果実サイズの増大に対応して、糖の転流量が増大しないためと考えられる。しかしながら、果実硬度に対する GA 処理効果には一貫した見解が得られておらず、低下する(高瀬ら, 1982; 歌代ら, 1995)場合と、本試験と同様に影響がみられない場合もあった(西本, 1983; 井上ら, 2001)。

無機元素含有率をみると、果実では、露地で GA 処理による差がみられなかったが、ハウスではすべての無機元素含有率が上昇した(表14)。一方、芽の無機元素含有率は露地では、GA 処理によっていずれも低下した。この結果は、GA 処理によってハウス栽培下で当該年度の果実肥大が促進され、かつ無機元素の供給量が増大するために花芽への無機元素の供給量が低下すると推察される。このためニホンナシの花芽着生率が低下した(表15)と考えられる。

以上の結果より、GA 処理によって栄養生長は露地で抑制される一方、ハウス条件下では促進される。しかしながら、果実肥大は、ハウス、露地条件に関わらず、GA 処理によって促進

されるが、果実成熟はハウス条件下のみで促進される。すなわち、GA 処理による促進効果は、栄養生長に対して、ハウス条件下で気温が高い場合で明瞭であり、同様の促進効果は果実成熟などでも観察される。加温ハウス栽培下では、果実の肥大効果が著しく、花芽の無機元素含有率や花芽の着生率を低下させることもあり、翌年以降の果実生産の確保のために着果量を低減するなどの試みが必要と考えられる。

Ⅳ. 総 合 考 察

広島県の主要落葉果樹の一つであるニホンナシにおいて、加温ハウス栽培はここ10～20年の間に一般化してきた。しかしながら、このことは成熟期の促進による前進出荷を主なねらいとし、積極的な高収量あるいは高品質を目指すものではなかった。しかしながら、加温ハウス内では土壌水分、気温、光および二酸化炭素などの環境因子を人為的に操作し、高収量あるいは高品質を達成する栽培技術を確立しうる可能性がある。そこで、本研究ではニホンナシ‘幸水’を用い、歪みゲージ式変位計によって果実および側枝径を高精度で連続測定し、短時間で環境因子の影響を検知してその生理的意義を解明し、果実生産の至適環境を究明しようとして実施した。

本研究において最も重要なパラメーターである果実および側枝の径変化の測定に歪みゲージ式変位計を用いた。この変位計は高精度で径変化が測定可能で、トマトの側枝径の径変化は210～430 μm の範囲で変動し、この測定誤差は7.3～8.8 μm であり、2.1～3.5%の誤差で計測できることを示している。そこで、本研究において、この計測器を用いてニホンナシのハウス栽培における環境要因について解析を試みた。

ニホンナシは開花後栄養生長と生殖生長が平行して行われ、果実生産を営んでいる。すなわち、葉芽が出芽後、新梢は葉を展開しながら伸長を続け、20～30葉が展開した満開後約75日目に新梢伸長が停止する。新梢伸長が停止し、受光体勢が完了すると、果実の後期肥大が開始されて肥大速度が著しく高まる。果実の肥大期は生育相に基づき満開から成熟までを5つの生育期に分離されている。すなわち、果実の細胞分裂が旺盛な細胞分裂期、肥大速度が高まる初期肥大期、肥大速度が低下する発育停滞期、最も肥大速度の高い後期肥大期、糖が集積し肥大が緩慢な成熟期である。このように果実生産は栄養生長と生殖生長が相互に密接に関係しつつ行われる。それ故、果実生産を良好に行うため、両者のバランスを操作する必要があり、このため整枝・剪定、除芽、徒長枝の除去および摘果などが栽培技術として実施されている。これらの技術は葉のソース能の向上やソースとシンク（果実等）のバランスを保つことを目的としている。ニホンナシは補光や高二酸化炭素濃度下では P_0 が上昇し、果実肥大が促進される。同様の現象がトマトでも観察され、摘果によって1個体当たり1果だけを着生させると果実重は通常の栽培条件の1.5倍に増大するという。つまり、葉果比を変えシンク能に対するソース能を強化すると果実の肥大が促進される。一方、補光や二酸化炭素富化は果実肥大に加えて側枝の肥大を促進するのに対して、GA処理は果実肥大を特異的に旺盛にするが、この効果が著しく上昇すると、側枝径の肥大率の減少にみられるように栄養生長が抑制され、貯蔵養分の減少を招く。すなわち、ソース能をそのままの状態に維持して果実のシンク能だけを高めると当年の果実（主要なソース）生産を増大させるが、栄養器官の成長やその貯蔵養分の減少を招くため翌年の果実生産を減少させる可能性がある。

ニホンナシ生産において、ある側枝を1単位として捉え、側枝における果実および側枝径の微細変動に対する環境要因の影響を検討してみる。歪みゲージ式変位計による計測は果実、側枝にかかわらず、従来の測定法のノギスよりも高精度であるがため、植物の環境要因に対する応答を早期に捉えうる。例えば、つぎのような事実が観察された。果実と側枝径の応答には時間的な差異が見られ、側枝径では水分ストレス、高二酸化炭素濃度および気温の変動に対して1時間以内に応答するが、果実では数時間から1～2日遅れて応答する。しかし、

ノギスなどによる計測ではこれらの応答の検出さらに長時間を必要とする。

側枝径は補光によって昼間に著しく収縮する一方、二酸化炭素富化によって収縮が抑制される。このように側枝径の環境変化に対する応答が速い理由は、根の吸水と気孔での蒸散のバランスの変動による植物の水分状態を速やかに反映するためと考えられる。いずれにしても、これらの現象から環境要因に対する側枝や果実の応答が異なることが示されており、この現象を利用した栽培管理法確立の可能性が示唆された。目下の所、歪みゲージ式変位計による栽培管理への応用可能な技術として水管理が挙げられる。果実の生育期によって果実肥大のための最適水分要求量が異なっている。それ故、歪みゲージ式変位計を用いた果実および莖径のモニタリングによって果実や側枝の昼間の収縮程度を把握し、1日当たりの肥大量から植物の水分状態を判定することによって、ニホンナシの植物生体情報から直接灌水を指令する栽培管理システムの樹立が可能であろう。

補光について

本研究結果は、低日射下では補光は平均1果重の増大、糖度の向上、果実の成熟期の早期化などを図りうる点で有効であることを示している。この主な要因として梅雨時期の日照不足を補い、 P_0 を高く保つ点などが挙げられる。梅雨の期間や日射量の低下程度は年次間で著しく変動する。しかし、これに対応して人工的に補光する栽培技術が確立されていないことから、本研究成果は将来的には梅雨の日射量不足の影響を軽減するための栽培技術が展開される端緒となる可能性がある。また、補光は果実の生産量を増加させるだけでなく果実品質の向上に関しても重要である。例えば、梅雨期間が長引く冷夏長雨年などによる日照不足のため、相対取引の契約糖度に到達しない果実割合が増大する場合も想定され、補光処理は果実品質を安定的に高く維持し高級品をねらった果実栽培技術として利用される可能性もある。

土壌水分について

本研究結果は、歪みゲージ式変位計によって水ストレスに対するニホンナシの応答を極めて短時間で検出しうることを示し、モモ樹 (Simonneau ら, 1993) の結果と一致している。このように、歪みゲージ式変位計による莖・果実などのモニタリングの活用によって水ストレスのリアルタイム診断法を開発しうる可能性が高い。この歪みゲージ式変位計によるニホンナシ樹体からの直接的な情報などに基づいてハウス栽培下のニホンナシの果実サイズおよび果実品質を高く維持するため、次の水管理を提示した。-25~-10 kPa で果実の細胞分裂期、初期肥大期、発育停滞期および成熟期を管理し、後期肥大期には-4 kPa 以上の高土壌水分条件で管理する。

気温について

気温がニホンナシに与える影響を歪みゲージ式変位計によって短時間で検出しうる。気温が果実および側枝径に与える変動の主な要因は、光合成産物の増減よりも果実および側枝の水分状態の変動によると考えられる。水の移動は原形質膜に局在するアクアポリンによって支配される (Clarkson ら, 2000)。アクアポリンの活性は昼間よりも夜間の方が高く、この事実は果実の肥大速度が昼間よりも夜間で高い要因の一つと推測される。本研究結果において、夜間のニホンナシ果実の肥大速度は、夜温が $23^{\circ}\text{C} \geq 30^{\circ}\text{C} > 16^{\circ}\text{C}$ の順に高い。アクアポリン活

性は温度によって異なり、この差異が夜間の果実肥大を支配している可能性もある。

二酸化炭素富化について

長期施用

高二酸化炭素濃度(1400 μ L L⁻¹CO₂)処理によって、ニホンナシの果実肥大が促進された。この現象は多数のC₃型植物の実験結果と一致する(Jones ら, 1985; Morison, 1985; Stronach ら, 1994; Hardy and Havelka, 1975; Kimball, 1983)。しかし、高二酸化炭素濃度の影響は果実の生育時期によって異なり、後期肥大期以前からの長期にわたる処理は果実肥大を著しく促進するのに対し、果実の肥大速度が低下した成熟期には1果重の増大は極めて緩慢となる。果実肥大の一つの要因である果実の糖集積はソルビトールの転流量の増大によっており、この増大は光合成産物の分配よりもP₀の上昇に強く依存している。ニホンナシ葉からの光合成産物の転流率は約60%であり、この値は、トマトおよびダイズに匹敵するが、トウモロコシ(約90%)よりは低い。高二酸化炭素濃度下ではニホンナシ果実のサイズが増大しても糖濃度は低下しない。ハウス栽培条件下でニホンナシ‘幸水’のすべての器官で炭水化物含有率が低下する(内野ら, 1990)。この主因は、被覆による日射量の低下によると考えられる。それ故に、二酸化炭素富化はP₀を上昇させ、ソース能が高まるため大果であるにもかかわらず糖度を高く保ちうる重要な栽培技術の一つと考える。

短期施用

二酸化炭素富化が果実肥大に与える影響を光合成産物の転流および水分状態との関連から解析した。Genard ら(2001)は、植物組織のサイズの変動は成熟した篩部周辺の伸縮細胞によって引き起こされ、これらの細胞の生長および収縮は膨圧と同化産物の濃度の変動によると報告している。一方、本実験結果によると、二酸化炭素富化によって、側枝径の収縮は軽減され、果実肥大速度は上昇しており、植物器官の肥大は主として木部の水ポテンシャルの増加に伴う相対的な伸縮細胞の膨圧の増大によると考えられる。この膨圧の増大は二酸化炭素富化によって気孔が部分的に閉鎖し、水損失が低下するためと推察される。本実験では二酸化炭素富化によって植物の水分状態が改善され、その結果、側枝径の変動の幅および程度が著しく減少した。例えば側枝径の日変動を波動として読みとると、二酸化炭素富化によって波動の角度は鋭角ではなくかつ幅広くなったが、波動のリズムの時間に影響はみられない。

GA 処理について

本研究結果から、GAの果実肥大に与える影響は気温によって変動し、ハウスの高温条件下では果実肥大が促進されるが、この現象は露地の低温条件下では認められない。昼温よりも夜温の影響がみられ、夜温を露地に匹敵する10℃から12℃に上昇するとGAの果実肥大が促進される(井上ら, 2001)。

果実品質についてみると、露地栽培ではGA処理による糖度の低下は小さく、これまでの報告(高瀬ら, 1982; 西本, 1983; 井上ら, 2001)と一致している。しかし、ハウス栽培下ではGA処理によって果実の糖度は低下しており、このことは果実サイズの増大に対応して、糖の転流量が増大しないためと考えられる。しかしながら、果実硬度に対するGA処理効果は一貫しておらず、低下する場合(高瀬ら, 1982; 歌代ら, 1995)と、影響がみられない場合(西本, 1983; 井上ら, 2001)があった。

加温ハウス栽培下では、果実の肥大効果が著しく、花芽の無機元素含有率や花芽の着生率を低下させる場合すらあり、果実の肥大と同時並行して花芽が形成されるニホンナシにおいては着果量の低減などの栽培時術の確立が重要である。

補光，二酸化炭素富化および GA 処理がニホンナシ‘幸水’の果実横径・側枝径に与える変化パターンの影響

補光および二酸化炭素富化の両処理は、ニホンナシ‘幸水’の光合成を増大させ、果実の肥大や糖度の上昇に効果的であったが、側枝径および果実径に与える影響は処理間で異なっている。例えば、ニホンナシ‘幸水’では二酸化炭素富化は側枝径の昼間の収縮を抑制するのに対し、補光は逆に側枝径の昼間の収縮を促進し、両者とも果実肥大を促進した。つまり、二酸化炭素富化は蒸散量を抑制するが、補光はこれを促進する。この結果は Bowes (1993) の報告と一致しており、気孔の開閉に与える影響が光と二酸化炭素濃度で異なるためと考えられる。果実や側枝の肥大率は、二酸化炭素富化の方が補光よりも高く、当年の果実生産のみならず翌年以降の果実生産を確保する上で二酸化炭素富化の方が有利であると結論できる。

GA の果梗塗布によって、ニホンナシ‘幸水’の平均 1 果重、果実糖度および無機元素含有率などを増大させ、この効果は、とくにハウス栽培条件下で著しかった。これらのことから、GA 処理はニホンナシ果実のシンク能を増大させる。一方、側枝の肥大や花芽の着生を低下させ、栄養器官のシンク能を低下させている。一方、二酸化炭素富化や補光は、果実肥大の促進のみならず、側枝径の肥大率、花芽着生率および無機元素含有率の上昇にみられるように、生殖生長に加えて栄養生長も確保し、翌年以降の果実生産を持続的に高く保つ上で有利であると結論できる。

以上のような研究結果や考察を通じて、次のような栽培管理を提案する（表17）。

表17 ニホンナシ‘幸水’の新加温ハウス栽培管理体系

| 月 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|-----------------------|---|-------------------|---------------|---------|-------------------------------------|----------------------------|-------------------|--------------|
| 生育段階 (栄養器官) | 自発休眠 | | 萌芽期 開花期 新梢伸長期 | | | 花芽分化期 | | 収穫期 |
| (果実) | | | 細胞分裂 | | 初期肥大 | 发育停滞 | 後期肥大 | 成熟 |
| 温度管理 目標 | 被覆開始 (°C) | 加温開始 | | | 加温終了 | | 被覆終了 | |
| | 最高温度 | 22 22 | 23 23 | 23 ~ 25 | | 25 | 28 | |
| | 最低温度 | 5 | 10 15 | 18 | | 20 | 23 | |
| 土壌水分 | 灌水点 pF2.4 (-25kpa) | pF2.4 (-25kpa) | | | pF1.6 (-4kpa) | | pF2.4 (-25kpa) | |
| CO ₂ 補光 | CO ₂ 施用(1400 μ L L ⁻¹), 補光 | | | | | | | |
| 主要な 管理作業 | 誘引・結束 | 被覆開始 | 加温開始 | 換気 | 摘人花芽摘 蕾工弁か果 ・受落き 摘粉と 花し | 徒発 長育 枝枝 除誘 去引 | 収穫開始 | 収穫終了 礼肥施用 |

V. 摘 要

ニホンナシ‘幸水’の施設栽培はここ20～30年の間に一般化してきた。しかしながら、成熟期の促進による前進出荷を主なねらいとし、積極的な高収量あるいは高品質を目指すものではなかった。加温ハウス内で人為的に制御可能な環境因子である土壤水分、気温、光および二酸化炭素富化についてニホンナシ‘幸水’の樹体および果実生長に与える影響を検討し、歪みゲージ式変位計を利用した果実横径や側枝径の日変化パターンの解析による短時間での環境水準判定に果実形質および収量性を加えてそれぞれの要因の至適環境を見いだすことを主なねらいとした。

そこで、本研究では、加温ハウス栽培における大果で高糖度果実生産のための管理基準の策定を目的に施設内の土壤水分、気温、光および大気中の炭酸ガス濃度を検討した。

1. 歪みゲージ式変位計による側枝径の微細計測法の原理と実測

本研究は、歪みゲージ式変位計に対する温度の影響について調査すると共に、この変位計を機軸とした計測システムによって環境ストレスの植物生育に与える影響を評価しうるか否かについて検討した。歪みゲージ式変位計が温度に反応するため、測定誤差は変位計単独では10℃当たり1 μm であったが、それにピンチコックが加わると10℃当たり4 μm と上昇した。すなわち、変位計よりもピンチコックが温度により強く反応するため測定精度が低下した。ピンチコックの材質の改良によって測定精度を向上させうると考えられる。トマトの茎径の径変化を3日間測定したところ、この日変化は210～430 μm 、変位計の温度の日変化は18.2～22.0℃で変位計システムに由来する日変化、すなわち測定誤差は7.3～8.8 μm であった。これらから、歪みゲージ式変位計によって2.1～3.5%の誤差で茎の日変化が測定される。これらの歪みゲージ式変位計システムを用いて環境ストレスが茎等の形態的な変化に与える影響を連続的にモニターし、この変化を引き起こす生理・生化学的な要因が解明されると作物における環境ストレスのリアルタイム診断が可能となると考える。

2. 補光がニホンナシ‘幸水’の果実生産および果実品質に与える影響

圃場(8～9年生, 3.0m×6.0m 植え)およびコンテナ栽培したニホンナシ‘幸水’(*Pyrus pyrifolia* Nakai)を供試し、補光が栄養生長および果実生産・品質に与える影響を、光合成、水分状態などの関連で解析した。

みかけの光合成速度(P_0)は光量子量の増大に伴い上昇する傾向を示し、1200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ で最も高い値(発育枝葉, 短果枝葉でそれぞれ約15, 17 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)を示した。 P_0 は、早朝、夕方および曇雨天日などの光量子量が小さい時に補光によって上昇した。補光によって、平均1果重が増大し、特に大果の割合が増大し、その結果、果実収量が103%に増大した。同処理によって、果実の糖度が0.2%上昇し、成熟期が3日早まった。

以上の結果から、日射量が低いため P_0 が低下する条件下では、補光は果実重の増大だけでなく成熟期の促進および果実糖度の向上に有効であると結論される。それ故、梅雨時期の低日射のため、果実の肥大や品質の低減、熟期の遅延などが起こることが明瞭に示された。日射量は果実の肥大や糖集積に対して光合成を通じて影響を与えると推定される。

3. 土壌水分がニホンナシ‘幸水’の果実・側枝の径変化および果実生長・形質に与える影響

ニホンナシ (*Pyrus pyrifolia* Nakai, 品種‘幸水’ 3～6年生) をコンテナ (容量60～80L) で土耕栽培し、異なる土壌水分が、果実肥大速度および茎径の変動に及ぼす影響を詳細に連続測定すると共に果実肥大や品質に及ぼす影響を調査した。

果実の肥大に対する土壌水分の影響は果実の発育ステージによって異なり、果実の日肥大量は果実の肥大が最も盛んな果実後期肥大期では高水分 (土壌水分ポテンシャル; $-4 \sim -1$ kPa) 下で増加したが、それ以外の生育ステージでは低水分 (土壌水分ポテンシャル; $-25 \sim -10$ kPa) 下の方が増加した。果実の全生育期間を低水分 ($-25 \sim -10$ kPa) に維持した区に比べて、果実後期肥大期のみを高水分 ($-4 \sim -1$ kPa) に切り換えることによって、果実後期肥大期以降の果実肥大速度が上昇した。その結果、平均1果重は約22%増大し、果実糖度も上昇した。果実の成熟期に水分ストレス ($-63 \sim -32$ kPa) を与えると、果実横径、側枝径の肥大が短時間 (歪みゲージ式変位計の利用) で著しく低下した一方、果実糖度は上昇した。また、水ストレス処理によって発育枝の無機元素含有率、特に窒素含有率は著しく低下した。

歪みゲージ式変位計によって、果実横径や側枝径に対する水分状態の影響をノギスよりも高精度で連続的にモニタリングが可能であり、ニホンナシの栄養生長および果実肥大に対する水分供給状態を早期に診断し、栽培管理に活用できる可能性が示された。

4. 気温がニホンナシ‘幸水’の果実・側枝の径変化および果実生長・形質に与える影響

1) コンテナ (容量60L) で土耕栽培したニホンヤマナシ (*Pyrus aromatica*) に接ぎ木した5年生のニホンナシ (*Pyrus pyrifolia* Nakai, 品種‘幸水’) を果実の細胞分裂期に人工気象室に搬入し、2日間順化した後、夜温2水準に制御した人工気象室内で2日間実験を実施した。実験は、夜間の変温 (10°C まで3時間低下させる) が果実肥大および側枝径に与える影響を歪みゲージ式変位計を用い、精密に調査した。また、果実の後期肥大期に24時間にわたって、 16°C 、 23°C および 30°C に気温を変えて同様の調査を実施した。

細胞分裂期には、対照区では、果実は、明期開始直後から1.5時間収縮し、その後明期では緩やかに暗期直後から3時間は急速に回復肥大しその後直線的に肥大した。変温区は、肥大速度が夜間で低下したが、昼間で大きく、1日当たりの肥大量に両区間に差異がなかった。

果実の後期肥大期でニホンナシの葉の P_0 は 23°C 区で最も高かった。低温下 (16°C 区) では、果実は、明期開始直後から1、2時間収縮し、その後は明・暗期とも直線的に肥大した。しかし、肥大速度は暗期で明期より大きかった。1日当たりの肥大量が低温区で小さかったのは、明期開始直後の収縮量が大きいためであった。肥大量は、 23°C に比べ 30°C では24時間後に 16°C 区では3時間後にそれぞれ低下した。より高温 (23°C および 30°C) 下ではこの明期開始直後の収縮が抑制された。

2) コンテナ (容量80L) でガラス温室内で土耕栽培した5年生のニホンナシ‘幸水’ を実験に供試し、果実の細胞分裂期の高夜温 (18°C) が、樹体生長、果実肥大および果実品質に与える影響を調査した。また、果実横径および側枝径の変動については果実生育ステージ別にそれぞれ3日間上記の方法を用い精密に調査した。

果実の生育初期の細胞分裂期に35日間夜温 (18°C) を上昇させると、主として夜間の肥大速度の上昇によって、果実横径は増大した。これ以降の果実の生育時期にも、この高温処理

の影響は残存し、初期肥大期までは肥大速度は上昇を続けるがその後この効果は低下した。ただし、果実肥大が最も旺盛な後期肥大期には高温処理区で大きかった。夜間気温（18℃）を上昇させると、成熟果実の平均1果重は著しく増大し、果実硬度が低下したが、糖度および酸度に影響を与えなかった。

5. 長期の二酸化炭素富化がニホンナシ‘幸水’の樹体生育、果実肥大および果実品質に与える影響

ニホンナシ (*Pyrus pyrifolia* Nakai, 品種‘幸水’; 7年生) をガラス温室あるいは自然光ファイトトロン内でコンテナ (容量60~80L) で土耕栽培し、異なる二酸化炭素富化 ($1400 \mu\text{L L}^{-1} \text{CO}_2$) 期間が果実肥大や品質に与える影響を調査した。すなわち、大気中の二酸化炭素濃度 ($350 \mu\text{L L}^{-1} \text{CO}_2$) を対照に二酸化炭素富化処理を満開後52日目から79日間 (長期二酸化炭素富化処理) および満開後88日目から35日間 (短期二酸化炭素富化処理) 実施し、樹体生長、平均1果重、果実品質および無機元素含有率に与える影響を調査した。

長期二酸化炭素富化処理によって、果実サイズは増加したが果実品質に明確な影響はなかった。また、側枝径、果実のカリウム含有率、花芽の着生率・重量が増加した。一方、短期二酸化炭素富化処理によって、平均1果重に影響を与えなかったが、果実の糖度が上昇し、硬度が低下した。果実のソルビトール濃度の低下に伴い、フルクトースおよびスクロースの濃度が上昇し、この現象は二酸化炭素富化によって促進された。これらの結果から、果実生長に対する二酸化炭素富化は果実の生長時期によって異なり、果実発育停滞期からの二酸化炭素富化によって果実サイズはを増大した一方、果実成熟期の二酸化炭素富化によって果実糖度が上昇する。

以上の結果を総合すると、二酸化炭素富化による光合成産物の供給増は栄養器官、果実、花芽等の器官の成長を促進すると考えられる。

6. 短期の二酸化炭素富化による果実肥大の要因解析

長期にわたる二酸化炭素富化によって、果実サイズが増大するが、二酸化炭素富化による果実肥大の促進機構は明らかではない。そこで、二酸化炭素富化による果実肥大の要因について水分および光合成産物の供給との関連で検討した。主幹形整枝仕立てのニホンナシ (*Pyrus pyrifolia* Nakai, 品種‘幸水’) を供試し、人工気象室で果実後期肥大期に二酸化炭素濃度を 350 ± 50 , 700 ± 100 および $1400 \pm 200 \mu\text{L L}^{-1} \text{CO}_2$ の3水準で2日間処理を実施し、光合成産物の転流、水分状態および果実生長 (果実横径) を測定した。発育枝および短果枝葉のみかけの P_0 は二酸化炭素濃度の上昇に伴い直線的に上昇した。二酸化炭素富化によって、篩部液のソルビトール濃度が増加し、葉からの光合成産物の転流速度が促進されることが明らかになった。また、この上昇は転流率ではなく P_0 による。果実の肥大は $350 \mu\text{L L}^{-1} \text{CO}_2$ では日変化を示し、明期の肥大速度の低下が特徴的であった。この効果は二酸化炭素富化によって抑制され、 $700 \sim 1400$ より $350 \sim 700 \mu\text{L L}^{-1} \text{CO}_2$ 下でより抑制効果が著しかった。二酸化炭素富化によって気孔伝導度、導管の水移動量および篩部および髓の収縮が減少した。気孔伝導度および側枝径の収縮の減少は $700 \sim 1400 \mu\text{L L}^{-1} \text{CO}_2$ より $350 \sim 700 \mu\text{L L}^{-1} \text{CO}_2$ で著しかった。これらの結果から、①高二酸化炭素濃度によって P_0 および光合成産物の果実への転流が増大し、② $700 \mu\text{L L}^{-1} \text{CO}_2$ より高濃度の二酸化炭素富化によって水利用率と水収支が向上する。

7. GA 処理がニホンナシ‘幸水’の樹体および果実形質に与える影響

ニホンナシ (*Pyrus pyrifolia* Nakai, 品種‘幸水’13年生, 3.0m×6.0m 植え) を二本主枝整枝法によって圃場で平棚栽培し, 加温ハウス栽培下および露地栽培下において満開35日目にニホンナシ‘幸水’の果梗に GA ペーストを塗布し, 果実肥大, 果実品質および樹体生育に与える影響を調査した。

ニホンナシ‘幸水’は, ハウス栽培下で露地栽培に比べて新梢伸長停止期が早まり, 平均1果重が404 g と約90 g 増大した。しかし, ハウス栽培下では果実の糖度および硬度や側枝の肥大率が低下し, 果実への無機元素の分配が増加した。今後, 樹体維持方法など長期にわたる経年的な検討が必要である。

ニホンナシ‘幸水’に対する GA 処理の効果は, 露地では明瞭ではなかったが, 平均1果重の増大や, 成熟期の促進の傾向が認められた。ハウス栽培下では, 平均1果重を445 g と約40 g 増大させ, また, 成熟期を5日早めた。しかし, この条件下では果実の糖度および硬度の低下や側枝の肥大率の減少がみられ, 無機元素の分配が果実で増加する反面, 栄養器官で減少した。今後, 果実形質や樹体生育に対する着果負担との相互関係について持続的安定生産の観点から検討する必要がある。

引用文献

- Arp, W. J. 1991. Effect of source-sink relations on photosynthetic acclimation to elevated CO₂. *Plant Cell Environ.* 14 : 869-875.
- Baxter, R., Gantley, M., Ashenden, T. W. and Farrar, J. F. 1994. Effect of elevated carbon dioxide on three grass species from Montana pasture II. Nutrient uptake, allocation and efficiency of use. *J. Exp. Bot.* 45 : 1267-1278.
- Beedlow, P. A., Dayly, D. S. and Thiede, M. E. 1986. A new device for measuring fluctuations in plant stem diameter : implications for monitoring plant responses. *Environmental Monitoring and Assessment* 6 : 277-282.
- Berger, A. and Selles, G. 1993. Diurnal fruit shrinkage : a model. In : Borghetti, M., Grace, J., Raschi, A., eds. *Water transport in plants under climatic stress*. Cambridge University Press. London. pp. 261-269.
- Bowes, G. 1993. Facing the inevitable : plants and increasing atmospheric CO₂. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 44 : 309-332.
- Brough, D. W., Jones, H. G., and Grace, J. 1986. Diurnal changes in water content of the stems of apple trees, as influenced by irrigation. *Plant Cell Environ.* 9 : 1-7.
- Campbell, G. S. and Turner, N. C. 1991. Plant-soil-water relationship. In Hoffmann G. J., Howell, T. A. and Solomon, T. A. eds. *Management of farm irrigation systems*. St Joseph, Michigan, American Society of Agricultural Engineers, pp. 13-29.
- Clarkson, D. T., Carvajal, M., Henzler, T., Waterhouse, R. N., Smyth, A. J., Cooke D. T., and Steudle, E. 2000. Root hydraulic conductance : diurnal aquaporin expression and the effects of nutrient stress. *J. Exp. Bot.* 51 : 61-70.
- Christ, R. A. 1978. The elongation rate of wheat leaves. II. Effect of sudden light change on the elongation rate. *J. Exp. Bot.* 29 : 611-618.
- Costello, L. R., Bassham, J. A. and Calvin, M. 1982. Enhancement of phloem exudation from *Fraxinus uhdei* Wenz. (Evergreen ash) using ethylenediaminetetraacetic acid. *Plant Physiol.* 69 : 77-82.
- Cure, J. D. and Acock, B. 1986. Crop response to carbon dioxide doubling a literature survey. *Agric. For. Meteorol.* 38 : 127-145.
- Drake, B. G., Gonzalez-Meler, M. A. and Long, S. P. 1997. More efficient plants : A consequence of rising atmospheric CO₂ ?. *Ann. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 48 : 609-639.
- Endo, M. 1973 a. Studies on the daily change in fruit size of the Japanese pear. II. Effect of night temperature on diurnal fluctuation of fruit during early stage of fruit development. *J. Jpn. Soc. Hort. Sci.* 42 : 188-200.
- Endo, M. 1973 b. Studies on the daily change in fruit size of the Japanese pear. III. Influence of night temperature on late stage of fruit development on diurnal fluctuation of fruit diameter. *J. Jpn. Soc. Hort. Sci.* 42 : 295-304.
- Evans, L. T., Bingham J. and Roskam M. A. 1972. The pattern of grain set within ears of wheat.

- Aust. J. Biol. Sci. 25 : 1-8.
- Fisher, B. U., Frehner, U. A., Hendrey, G. R., Blum, H. and Nosberger, J. 1997. Source-sink relations in *Lolium perenne* L. as reflected by carbohydrate concentrations in leaves and pseudo-stems during regrowth in a free air carbon dioxide enrichment (FACE) experiment. *Plant Cell Environ.* 20 : 945-952.
- 藤田耕之輔・田中明. 1974. トマトの果実生産における source と sink の相対的意義の解析 (第4報) 栽植密度および摘芯位が乾物および果実生産に及ぼす影響. *土肥誌*. 45 : 247-252.
- Garnier E. and Berger, A. 1986. Effect of water stress on stem diameter changes of peach trees growing in the field. *J. Applied Ecology*. 23 : 193-209.
- Genard, M., Fishma, S., Vercambre, G., Huguet J. -G., Bussi, C., Besset, J. and Habib, R. 2001. A biophysical analysis of stem and root diameter variations in woody plants. *Plant Physiol.* 126 : 188-202.
- Gesch, R. W., Boote, K. J., Vu, J. C. V., Allen Jr., I. H. and Bowes, G. 1998. Changes in growth CO₂ result in rapid adjustments of ribulose-1, 5-bisphosphate carboxylase / oxygenase small subunit gene expression in expanding and mature leaves of rice. *Plant Physiol.* 118 : 521-529.
- Guan H. P., and Janes H. W. 1991. Light regulation of sink metabolism in tomato fruit. *Plant Physiol.* 96 : 916-921.
- Hardy, R. W. F., and Havelka, U. D. 1975. Photosynthate as a major factor limiting nitrogen fixation by field grown legumes with emphasis on soybeans. E. P. S. Nutman, In *Symbiotic Nitrogen Fixation in Plants*. Cambridge Univ. Press. New York. pp. 421-429.
- Heindle, J. C., Brun, W. A. 1983. Light and shade effects on abscission and ¹⁴C-photoassimilate partitioning among reproductive structures in soybean. *Plant Physiol.* 73 : 434-439.
- Hinckley, T. M. and Bruckerhoff, D. F. 1975. The effect of drought on water relations and stem shrinkage of *Quercus alba*. *Can. J. Bot.* 53 : 62-72.
- 広田隆一郎. 1971. エスレルによるナシの熟期促進. *農及園*. 46 (7) : 1033-1038.
- 広田隆一郎・高田弘生・坂本英則. 1983. 日本ナシのビニールトンネル被覆栽培に関する研究 (第1報) ビニールトンネル栽培による二十世紀の熟期促進. *佐賀果試研報*. 8 : 43-63.
- Ho, L. C., Grange, R. I. and Picken, A. J. 1987. An analysis of the accumulation of water and dry matter in tomato fruit. *Plant Cell Environ.* 10 : 157-162.
- Hole, C. C. and Scott, P. A. 1984. Pea fruit extension rate. I. Effect of light, dark and temperature in controlled environment. *J. Exp. Bot.* 35 : 790-802.
- Huguet, J. G. 1985. Appreciation de letat kybrique d une plante a partir des variations micrometriques de la dimension des fruits ou des liges au cours de la journee. *Agronomie*. 5 : 733-741.
- Idso, S. B. and Kimball, B. A. 1991. Downward regulation of photosynthesis and growth at high CO₂ levels. No evidence for either phenomenon in three-year study of sour orange trees. *Plant Physiol.* 96 : 990-992.
- Idso, S. B. and Kimball, B. A. 1992. Effect of atmospheric CO₂ enrichment on photosynthesis,

- respiration, and growth of sour orange trees. *Plant Physiol.* 99 : 341-343.
- Idso, S. B., Kimball, B. A. and Allen, S. G. 1991. CO₂ enrichment of sour orange trees. *Plant Cell Environ.* 14 : 351-353.
- Imai, S., Iwao, K. and Fujiwara, T. 1990. Measurements of plant physiological information of vine tree and indexation of soil moisture control (1) Analysis of stem diameter variation affected by environmental factors *Environ. Control in Biol.* 28 : 103-108.
- Imai, S., Honda, T. and Fujiwara, T. 1994. Influence of soil moisture on daily variations of fruit and stem diameters of Japanese pear 'Kosui'. *Environ. Control in Biol.* 32 (3) : 155-162.
- 猪俣雄司・八重垣英明・倉橋孝夫・下山博之・本城均・鈴木邦彦. 1993. 炭酸ガス施用がニホンナシ '幸水' の果実品質および新梢伸長に及ぼす影響. *果樹試報.* 25 : 77-122.
- 猪俣雄司・八重垣英明・本城均・高辻豊二・鈴木邦彦. 1996. 炭酸ガス施用の時期および長さがニホンナシ '幸水' の若木の乾物生産に及ぼす影響. *果樹試報.* 29 : 41-50.
- Ingvarsdén, C. and Veierskov, b. 1994. Response of young barley plants to CO₂ enrichment. *J. Exp. Bot.* 45 : 1373-1378.
- 井上耕介・池田隆政・中島正人. 2001. ニホンナシ 'ゴールド二十世紀' における幼果期の低温が果実品質に及ぼす影響ならびにジベレリンペースト処理による果実肥大効果について. *鳥取園試報.* 5 : 1-10.
- Ito, J., Hasegawa, S., Fujita, K., Ogasawara, S. and Fujiwara T. 1999 a. Effect of CO₂ enrichment on fruit growth and quality in Japanese pear (*Pyrus serotina* Reheder cv. Kosui). *Soil Sci. Plant Nutr.* 45 : 385-394.
- Ito, J., Hasegawa, S., Fujita, K., Ogasawara, S. and Fujiwara, T. 1999 b. Real time diagnosis of environmental stress by micromorphometric method. 1. Effect of air temperature during fruitlet stage of fruit on stem and fruit diameters, and fruit growth in Japanese pear tree (*Pyrus serotina* Reheder cv. Kosui). *Soil Sci. Plant Nutr.* 45 : 395-402.
- Ito, J., Hasegawa, S., Fujita, K., Ogasawara, S. and Fujiwara, T. 2002. Changes in Water Relations Induced by CO₂ Enrichment Govern Diurnal Stem and Fruit Diameters of Japanese Pear. *Plant Sci.* 163 : 1169-1176.
- 伊藤純樹・藤田耕之輔・藤原多見夫. 2003a. 土壌水分がニホンナシ '幸水' の側枝・果実の径変化および果実生長・形質に及ぼす影響. *土肥誌.* 74 (3) : 301-308.
- 伊藤純樹・長谷義勝・本田敏夫・藤田耕之輔・今井俊治・藤原多見夫. 2003b. ニホンナシの果実生産および品質に及ぼす補光の影響. *土肥誌.* 74 (3) : 309-315.
- 伊藤純樹・三善正道・今井俊治・古井シゲ子・藤原多見夫. 1992. 加温ハウス栽培におけるナシ '幸水' の果実発育と樹体生育. *広島農技セ研報.* 55 : 53-64.
- Iwao, K. and Takano, T. 1988. Studies on measurements of plant physiological information and their agricultural applications (1) Development of non-invasive measurements of water content in plant. *Environ. Control in Biol.* 26 : 139-145.
- Johnson, R. W., Dixon, M. A. and Lee, D. R. 1992. Water relations of the tomato during fruit growth. *Plant, Cell and Environ.* 15 : 947-953.
- Jones, P., Jones, J. W. and Allen I. H. Jr. 1985. Seasonal carbon and water balances of soybean grown under stress treatments in sunlit chambers. *Transactions ASAF* 28 : 2021-2028.

- Katerji, N., Tardieu, F., Bethenod, O. and Quentin, P. 1994. Behavior of maize stem diameter during drying cycles : comparison of two methods for detecting water stress. *Crop Sci.* 34 : 165-169.
- 河井光治・伊藤純樹・李克己・藤田耕之輔. 2003. 歪みゲージ式変位計を利用した植物の茎径の計測システムに及ぼす温度の影響. *生物環境調節誌*. 41 : (印刷中)
- Kimball, B. A. 1983. Carbon dioxide and Agricultural yield : an assemblage and analysis of 320 prior observations. *Agron. J.*, 75 : 779-788.
- Klepper, B., Browning, V. D. and Taylor, H. M. 1971. Stem diameter in relation to plant water stress. *Plant Physiol.* 48 : 683-685.
- Kozlowsky, T. T., Kramer, P. J. and Pallardy, S. G. 1991. Water stress. In : *The physiological ecology of woody plants*. London : Academic Press. pp. 247-302.
- 黒岡浩・福長信吾・湯田英二・中川昌一・堀内昭作. 1990. CO₂施用がブドウ‘巨峰’の生育と果実品質に及ぼす影響. *園学雑*. 59 : 463-470.
- Lassoie, J. P. 1979. Stem dimensional fluctuations in Douglas-fir of different crown classes. *Forest Science* 25 : 132-144.
- Link, S. O., Thiede, M. E., Evans, R. D., Downs, J. L. and Gee, G. W. 1995. Responses big sagebrush and spiny hopsage to increasing seasonal drought. In : *Proceedings of the Conference of the Shrub Research Consortium*. Ogden, Utah : US Forest Service Intermountain Research Station General Technical Report INT-GTR-315 : 196-201.
- Link, S. O., Thiede, M. E. and van Bavel, M.G. 1998. An improved strain-gauge device for continuous field measurement of stem and fruit diameter. *J. Exp. Bot.* 49 : 1583-1587.
- Li, S. H., Huguet, J. G. 1990. Controlling water status of plants and scheduling irrigation by the micromorphometric method for fruit trees. *Acta Hort.* 278 : 333-342.
- Makino, A. 1994. Biochemistry of C₃-photosynthesis in high CO₂. *J. Plant Res.* 107 : 79-84.
- Masuda, T., Fujita, K. and Ogata, S. 1989. Effect of CO₂ enrichment and nitrate application on growth and dinitrogen fixation of wild and cultivated soybean plants during pod-filling stage. *Soil Sci. Plant Nutr.* 35 : 405-416.
- 松井弘之・湯田英二・中川昌一. 1985. ブドウ‘デラウエア’における光合成産物の転流と分配. *園学雑*. 54 : 184-191.
- McClung, C. R. 2001. Circadian rhythms in plants. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 52 : 139-162.
- Moghaieb, R. E. A., Saneoka, H., Ito, J. and Fujita, K. 2000. Characterization of salt tolerance in tomato plant in terms of photosynthesis and water relations. *Soil Sci. Plant Nutr.* 47(2) : 377-385.
- Morison, J. I. L. 1985. Sensitivity of stomata and water use efficiency to high CO₂. *Plant Cell and Environ.* 8 : 467-474.
- Moriguchi, T., Sanada, T. and Yamaki, S. 1990. Seasonal fluctuation of some enzymes relating to sucrose and sorbitol metabolism in peach fruit. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 115 : 278-281.
- Moriguchi, T., Abe, K., Sanada, T. and Yamaki, S. 1992. Levels and role of sucrose synthase, sucrose-phosphate synthase, and acid invertase in sucrose accumulation in fruit of Asian pear.

- J. Amer. Soc. Hort. Sci. 117 : 274-278.
- Nagano, T., Shimaji. H. 1976. Internal plant-water-status and its control. (1) Measurement of internal plant water status. J. Agr. Met. 32 : 67-71.
- Nagano, T., Shimaji. H. 1978. Internal plant-water-status and its control. (2) Measurement of internal plant-water-status and effect of water-stressed on transpiration rate, root respiration and ABA content in sunflower plants. Environ. Control in Biol. 16 : 93-100.
- Neales, T. F. and Nicholls, A. O. 1978. Growth responses of young wheat plants to arrange of ambient CO₂ level. Aust. J. Plant Physiol. 5 : 45-59.
- 西本直行. 1983. ニホンナシの熟期促進に関する研究 (第1報) 薪水に対するジベレリン・ペーストおよびエスレルによる成熟促進. 富山農試研報. 13 : 63-69.
- Pearce, B. D., Grange, R. I. and Hardwick, K. 1993. The growth of young tomato fruit 1. Effects of temperature and irradiance on fruit grown in controlled environments. J. Hort. Sci. 68 : 1-11.
- Peet, M. M. 1984. CO₂ enrichment of soybeans. Effects of leaf/pod ratio. Plant Physiol. 60 : 38-42.
- Raymundo, L. C., Chichester, C. O. and Simpson, K. L. 1976. Light dependent carotenoid synthesis in tomato fruit. J. Agric. Food Chem. 24 : 59-64.
- Sage, R. F. 1994. Acclimation of photosynthesis to increasing atmospheric CO₂.: The gas exchange perspective. Photosynth. Res. 39 : 351-368.
- Salisbury, F. B. and Ross, C. W. 1992. Plant Physiol., 4th Edition. Wadsworth Publishing Co. California. pp.1-682.
- 佐藤幸雄. 1978. 温度および日照が二十世紀ナシ樹の生育ならびに果実の肥大・品質に及ぼす影響. 鳥取果試研報. 6 : 1-19.
- 実岡寛文・尾形昭逸・藤田耕之輔. 1989. 暖地型イネ科飼料作物の耐干性に対するリン施与効果. 草地学雑. 35 : 116~126.
- Sawada, O., Ito, J. and Fujita, K. 1995. Characteristics of photosynthesis and translocation of ¹³C-labelled photosynthate in husk leaves of sweet corn. Crop Sci. 35 : 480-485.
- Sheriff, D. W. 1976. A new dendrometer for the measurement of small stems in the laboratory. J. Exp. Bot. 96 : 175-183.
- 渋谷久治・服部吉男. 1982. 薪水ナシの被覆栽培に関する研究 (第1報) 被覆開始時期と熟期促進剤の利用. 園学要旨. 昭57秋 : 62-63.
- Simonneau, T., Habib, R., Goutouly, J.-P., Huguet, J. G. 1993. Diurnal changes in stem diameter depend upon variations in water content : Direct evidence in peach trees. J. Exp. Bot. 44 : 615-621.
- Stronach, I. M., Clifford S. C. and Mohamed A. D., Singleton-Jones P. R., Azam-Ali S. N. and Crout N. M. J. 1994. The effects of elevated carbon dioxide, temperature and soil moisture on the water use of stands of groundnut (*Arachis hypogaea* L.). J. Exp. Bot. 45 : 1633-1638.
- So, H. B., Reicosky, D. C. and Taylor H. M. 1979. Utility of stem diameter changes as predictors of plant canopy water potential. Agron. J. 71 : 707-711.
- 杉浦俊彦・本條均. 1997. ニホンナシの自発休眠覚醒と温度の関係解明およびそのモデル化. 農業気象. 53 : 285-290.

- 杉浦俊彦・小野祐幸・鴨田福也・朝倉利員・奥野隆・浅野聖子. 1991. ニホンナシの自発休眠覚醒から開花期までの発育速度モデルについて. 農業気象. 46:197-203.
- 高瀬輔久・河瀬明夫・岡田詔男. 1982. ジベレリンペーストとエスレルによるナシ‘幸水’の熟期促進及び果実肥大効果. 愛知農総試研報. 14:205-210.
- Thiede, M. E., Link, S. O., Fellows, R. J. and Beedlow, P. A. 1995. Analysis of an acute dose of gamma radiation on stem diameter growth, carbon gain, and biomass partitioning in *Helianthus annuus*. J. Exp. Bot. 35: 33-41.
- Tsuno, Y. and Fujise, K. 1965. Crop scientific studies on dry matter production in sweet potato. Rep. Agri. Res. Inst. D 13 pp.351-368.
- 内野浩二・弦間洋・福島正幸・大垣智昭. 1989. ハウス栽培におけるニホンナシ‘幸水’の果実発育と樹体生理について. 園学雑. 58(3):499-506.
- 内野浩二・弦間洋. 1990. ハウス栽培におけるニホンナシ‘幸水’の器官別乾物重構成, 貯蔵養分および花芽着生の特徴. 園学雑. 59(3):503-508.
- 歌代景一・青木義弘・山田寿. 1995. セイヨウナシ果実の肥大および成熟に及ぼすジベレリンペースト処理の影響. 新潟大農学部研報. 47:11-19.
- Valle, R., Mishoe, J. W., Campbell, W. J., Jones, J. W. and Allen, Jr. L. H. 1985. Photosynthetic responses of ‘Bragg’ soybean leaves adapted to different CO₂ environments. Crop Sci. 25: 333-339.
- 渡辺理. 1931. ひずみゲージとその応用. 日刊工業新聞社. 東京. pp.2-3.
- Webb, K. L. and Burley, J. W. A. 1962. Sorbitol translocation in apple. Science 137: 766.
- Wronski, E. B., Holmes, J. W. and Turner N. C. 1985. Phase and amplitude relations between transpiration water potential and stem shrinkage. Plant Cell Environ. 8: 613-622.
- Yakushiji, H., Nonami, H. and Fukuyama, T. 1996. Sugar accumulation enhanced by osmoregulation in Satsuma mandarin fruit. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 121(3): 466-472.
- Yamaki S., Kajiura, I. and Kakiuchi, N. 1979. Changes in sugars and their related enzymes during development and ripening of Japanese pear fruit (*Pyrus serotina* Reheder var. *culta* Reheder), Bull. Fruit Tree Res. Stn. A 6: 15-26.
- Yamaki, S. and Ishikawa, K. 1986. Roles of four sorbitol related enzymes and invertase in the seasonal alteration of sugar metabolism in apple tissue. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 111: 134-137.
- Yamaki, S. and Moriguchi, T. 1989. Seasonal fluctuation of sorbitol related enzymes and invertase activities accompanying maturation of Japanese pear (*Pyrus serotina* Reheder var. *culta* Reheder) fruit. J. Jpn. Soc. Hort. Sci. 57: 602-607.

Summary

Physiological studies of influences in environmental factors on vegetative and fruit growth in Japanese pear

Junki Ito

Introduction

Fruit production is influenced by environmental conditions, such as temperature, CO₂ concentration of atmosphere, solar radiation and fertility and moisture content of soil. Farmers manipulate with temperature and CO₂ concentration to improve fruit maturity and quality of Japanese pear (*Pyrus pyrifolia* Nakai) under protected horticulture conditions during the cool season. However, the effects of environmental manipulations are not understood properly and lack of adequate information leads to failure of the desired objectives. In the present study, an attempt has been made to investigate the effects of supplemental lighting, soil water potential, air temperature and CO₂ concentration on vegetative and fruit growth in Japanese pear (*Pyrus pyrifolia* Nakai cv. Kosui) under glass house horticulture.

I. Measurement of changes in stem diameter at different temperatures by an unbounded type gauge device

The effect of high temperature stress on stem diameter was measured by using an unbounded type gauge device and the efficacy of the methodology was tested on a tomato plant. The strain gauges were fastened to the stem of tomato plant with rubber band and changes in diameters were continuously recorded during three day period under a temperature varying between 8.8 to 36.8°C. In the control, the stem was replaced with a glass rod of 10 mm diameter. The temperature on the surface of the plant was also measured in course of the experiment. The following results were obtained from the experiment.

1. The error margin of the strain gauge sensor increased by 1 μm for every 10°C increase of temperature. The error margin increased by three fold when the sensor was fixed with clamp screw. The sensitivity could be decreased and error margin reduced by improvement of material of the clamp screw.
2. The results also indicated that changes in stem diameter of a plant could be monitored continuously with high sensitivity (within the range of 2.1 to 3.5%) by a micro-displacement detector. The method is very good to diagnose the effect of environmental stress on plant growth.

II. Effects of environmental manipulations on fruit production and quality in Japanese pear

1. Effect of supplemental lighting on fruit production and quality in Japanese pear

Three to nine-year-old Japanese pear (*Pyrus pyrifolia* Nakai cv. Kosui) plants were grown in open field conditions and in pots filled with adequately fertilized granite regosol. Diurnal and

seasonal changes in photosynthetic and transpiration rates of leaves and quality and size of matured fruit were measured in order to find out the effect of supplemental lighting on the plant.

- 1) The photosynthetic rate tended to increase with increase of irradiance up to $1200 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. The highest photosynthesis of 15 and $17 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ were recorded for the spur and the lateral branch leaves, respectively. Photosynthetic rate of the lateral branch leaves increased by supplemental lighting under cloudy condition of the sky.
- 2) Supplemental lighting increased water transport rate during the day time. However, it depressed the diameter of the stem significantly. These observations indicated that changes in stem diameter of the plant was related to its water status.
- 3) Supplemental lighting promoted fruit maturation by a few days and increased weight and sugar concentration of the fruit significantly.

These results clearly demonstrated that fruit production and quality were limited under reduced solar radiation. The farmers can use supplemental lighting to improve fruit production.

2. Effect of soil moisture status on stem and fruit diameters and production and quality of fruit in Japanese pear.

Three to six-year-old Japanese pear (*Pyrus pyrifolia* Nakai cv. Kosui) grafted on *P. pyrifolia* Nihonyamanashi were exposed to different levels of soil moisture regimes during the fruit development period under controlled glass and green house conditions. The effect of soil moisture status on stem and fruit diameters was recorded by micromorphometric technique. The effects of the moisture regimes were measured on the fruit quantity and quality.

The effect of soil water potential was directly related to the developmental stage of the fruit. During the most active period of expansion, fruit growth was higher at high soil water potential (-4 to -1 kPa) than at low soil water potential (-25 to -10 kPa). The trend was the opposite at other growth stages of the fruit. Weight and sugar concentration of the fruits improved significantly when the plants were shifted from a soil water potential of -25 to -4 kPa during the most active expansion growth stage of fruit. A change over during other growth stages of the fruit development was not effective. Soil water potential ranging between -63 to -32 kPa reduced stem and fruit diameters, but improved sugar concentration of fruit significantly at fruit maturation stage. Water stress imposed at the time of fruit maturity also reduced the mineral contents of the newly growing vegetative branches at the pruning stage. The decrease was most remarkable for nitrogen.

3. Effect of air temperature during initial stage of fruit growth on fruit growth and quality of Japanese pear

- 1) The plants were exposed to two different air temperatures (normal and low temperatures) during the night period for two days during the initial stage of fruit growth under controlled environment conditions. In addition to this, some other plants were exposed to continuous day and night temperatures of 16, 23 and 30°C during the most active period of fruit expansion for 48 hours. Low mid-night temperature did not decrease fruit growth during the initial period of fruit growth. At the most active period of fruit expansion, fruit expansion growth was optimum at continuous

temperature of 23°C and minimum at 16°C. Compared to the treatment at 23°C, fruit expansion was slow for a few hours after beginning of the treatment period at 16 °C. At 30°C, fruit expansion slowed down after 24 hours of treatment. The stem diameter shrunk during day time and expanded in the night. Day time shrinkage was less pronounced at low temperature compared to high temperature treatment.

2) At the initial stage of fruit development, plants were exposed to night temperature regimes of 11 and 18°C and the treatments were continued for 35 consecutive days. The effects of the temperature were observed on stem and fruit diameters and quality and weight of the fruits. Diurnal changes of fruit diameter were of rhythmic pattern; it shrunk during day time and expanded at night. Low temperature reduced night expansion significantly. A residual effect of low temperature was observed on fruit expansion during the active period of fruit expansion, but it vanished at the stage of fruit maturation. Low night temperature also reduced weight of the matured fruit, but it did not influence fruit quality including sugar concentration, acidity and hardness.

4. Effect of CO₂ enrichment on fruit growth and quality of Japanese pear

1) Effect of CO₂ enrichment at different fruit growth stages on growth and quality

Six-year-old Japanese pear (*Pyrus pyrifolia* Nakai cv. Kosui) plants grafted on *P. pyrifolia* cv. Nihonyamanashi were exposed to CO₂ concentrations of 350 and 1400 $\mu\text{L L}^{-1}$ CO₂ during the period of fruit expansion and maturity under controlled environmental conditions. The first group of plants were exposed to CO₂ enrichment for 79 days from 52 days after full bloom to fruit maturity (long term CO₂ enrichment), while the second group of plants were exposed to the same treatments for 35 days from 88 days after full bloom to fruit maturity (short term CO₂ enrichment). The effects of CO₂ enrichments were observed on vegetative growth, average fruit and flower bud weights, fruit quality and mineral contents.

Long term CO₂ enrichment increased fruit size and fresh weight, but it had no effect on quality. The treatment increased diameter of the lateral branch and K content of fruit and flower bud. On the contrary, short term CO₂ enrichment did not have any influence on fruit size, but it increased the sugar concentration of the fruit. While sucrose and fructose concentrations of the fruit increased, the sorbitol concentration decreased. It was concluded that response of fruit growth to CO₂ enrichment was not similar at different stages of its growth; at the fruitlet stage CO₂ enrichment increased size of the fruit and it enhanced sugar accumulation during maturation stage.

2) Changes in water relations induced by CO₂ enrichment govern diurnal fluctuations of stem and fruit diameters of Japanese pear

In order to understand the mechanism of acceleration of fruit expansion under elevated CO₂, an experiment was undertaken to measure water and photoassimilate supply in four year Japanese pear (*Pyrus pyrifolia* Nakai cv. Kosui) grafted on Chinese white pear (*P. bretschneideri*). The plants were subjected to 350, 700 and 1400 $\mu\text{L L}^{-1}$ levels of CO₂ concentrations during the active period of fruit growth under controlled growth cabinets. The apparent photosynthesis rate of leaves on spurs and shoots increased linearly with the increase of CO₂ concentration. CO₂ enrichment

enhanced export of photoassimilates from the leaves as evidenced by sorbitol exudation rate in the phloem. The enhanced export correlated with the stimulation of photosynthesis under CO₂ enrichment. At 350 μL L⁻¹ CO₂ fruit diameter expansion exhibited a diurnal periodicity; expansion was slower during light phase in comparison to the dark phase. This effect was eliminated at higher levels of CO₂ concentrations. At ambient CO₂ concentration (350 μL L⁻¹), stomatal conductance, xylem water flow rate and decrease of xylem and pith diameter were high during the daytime. CO₂ enrichment reduced stomatal conductance, xylem water flow rate and alleviated shrinkage of xylem and pith diameter significantly. It was concluded that CO₂ enrichment improved photosynthesis and assimilate partitioning into the fruit. It reduced stomatal conductance and consequently improved conservation of water within the plant and fruit expansion.

III. Effects of gibberellin (GA) application on fruit growth and quality in Japanese pear

Thirteen-year-old Japanese pear (*Pyrus pyrifolia* Nakai cv. Kosui) trees possessing two primary scaffold branches were grown under field as well as green house conditions. GA paste (Kyowa co., 27 mg g⁻¹) was applied at 35 days after blooming to the peduncle of all fruits in one branch. The fruits of the other branch did not receive any GA and were treated as control. The effects of GA treatment were measured on vegetative growth, average fruit and flower bud weights, fruit quality and mineral contents.

Under the green house condition, the shoot elongation terminated 10 days earlier than that of field condition. The average weight of the fruit was higher under green house condition than that of field condition. However, sugar concentration and hardness of fruit decreased in green house condition. There were differences in partitioning of dry matter and mineral contents of the fruits between the two types of environments.

The effect of GA application on Japanese pear plant was not clear and conclusive under field condition, although it tended to accelerate maturity and fruit weight. However, GA application improved fruit growth significantly and fruit maturity was enhanced by 5 days under the green house condition. GA treatment reduced sugar concentration of fruit and diameter of lateral branches under green house condition. Changes in dry matter partitioning into fruit and mineral contents also occurred due to GA application.

Key words : Japanese pear (*Pyrus pyrifolia* Nakai cv. Kosui), an unbounded type gauge device, environmental manipulations, supplemental lighting, soil moisture status, air temperature, CO₂ enrichment, gibberellin (GA), fruit production and quality

謝 辞

本報告は、広島大学に提出した学位論文である。

本研究を行うに当たり、終始懇篤なご指導とご鞭撻をいただき、論文のとりまとめとご校閲の労を賜った広島大学教授、藤田耕之輔博士に対して衷心より深謝の意を表します。また、同大学教授安藤忠男博士、桜井直樹博士、河野憲治博士、江坂宗治博士、助教授実岡寛文博士並びに四日市大学教授大倉克己博士には有益なご助言および校閲の労を賜りました。心から、深謝申し上げます。

元広島県立農業技術センター果樹研究所所長（現 久米産業株式会社）藤原多見夫博士には、本研究の構想を与えてくださると同時にその研究過程においても終始懇切なご指導をいただき、また、本研究のとりまとめに際しても絶えず暖かいご激励とご便宜を賜りました。衷心から感謝申し上げます。また、広島県立農業技術センター果樹研究所・落葉果樹研究室、小笠原静彦元室長、古井シゲ子元主任研究員（現 東広島市園芸センター）、今井俊治博士（現 企画情報部）、新田浩通主任研究員、赤阪信二研究員（現 農業改良普及センター）並びに常緑果樹研究部、長谷川繁樹部長には多大なご助言、ご援助およびご協力をいただきました。また、故佐々木篤博士、元広島県立農業技術センター生物工学研究所西田和夫所長には、種々有益なご助言とご便宜を図っていただきました。さらに、当時の落葉果樹研究室主任技術員および技術員の唐田則彦、金好利美、脇靖寛、岡信秀樹、竹林亨、柏迫良章、要田宗毅および道法一志様並びに22条職員の方々には、実験の遂行のために調査や栽培管理、ほ場管理に尽力をいただきました。心から御礼申し上げます。

なお、元中国電力技術研究センター本田敏夫主査並びに長谷義勝副主査にはニホンナシに対する補光実験に当たり甚大なご協力をいただきました。元佐賀大学教授山室成一博士には、¹⁵N および ¹³C の施用法について懇篤なご指導と貴重なご教示をいただきました。また、ご助言やご指導をいただいたサンバルパー大学教授 P. K. Mohapatra 博士に深い感謝の意を表します。

この他にも広島県立農業技術センターならびに広島大学の多くの方々のご指導やご協力をいただきました。心から御礼申し上げます。

広島県立農業技術センター研究報告 第74号

平成15年7月25日 印刷
平成15年7月25日 発行

編集 広島県農業技術センター
発行
〒739-0151 広島県東広島市八本松町原

印刷所 (株) 中 本 本 店
〒730-0004 広島市中区東白島町13-15
☎ (082) 221-9181

BULLETIN
OF THE
HIROSHIMA PREFECTURAL
AGRICULTURE RESEARCH CENTER
NO.74

Hiroshima Prefectural Agriculture Research Center
(Higashihiroshima, Hiroshima Prefecture, 739-0151 Japan)

Junki ITO

Hiroshima Prefectural Agriculture Research Center
(Higashihiroshima, Hiroshima Prefecture, 739-0151 Japan)

July, 2003