

立体栽培スイカの果実生産特性に関する研究[†]

渡辺 慎一*

(平成 24 年 9 月 24 日受理)

Fruit Productivity of Vertically Trained Watermelon [*Citrullus lanatus* (Thunb.) Matsum. et Nakai]

Shin-ichi Watanabe

目 次

I 緒 言	7	1 個体の生育, 果実肥大性, 受光態勢および圃場光合成速度の比較	38
1 スイカの植物学的, 栽培的特徴	7	2 単位面積当たりの果実生産性の比較	42
2 スイカ生産の現状と立体栽培の意義	8	3 作業姿勢の比較	48
3 スイカの果実肥大性・収量性研究の状況	9	4 本章の考察	51
4 スイカの光合成産物の転流・分配に関する研究の状況	10	V 総合考察	51
5 スイカにおける作業性研究の状況	10	1 立体栽培スイカの果実重を決定する要因	51
6 本研究の構成	11	2 果実生産特性の評価指標としての「個体当たり受光量」の有用性	51
7 本研究で用いる用語について	11	3 スイカ栽培における立体栽培化の有利性, 現状および今後の展望	52
II 立体栽培スイカの果実肥大に影響を及ぼす要因	11	VI 摘 要	53
1 着果節位の影響	12	引用文献	55
2 整枝法の影響	15	Summary	58
3 栽植密度の影響	20		
4 本章の考察	26		
III 立体栽培スイカの果実肥大期における光合成産物のソース・シンク関係	26	I 緒 言	
1 2本仕立て1果どり栽培におけるソース・シンク関係	26	1 スイカの植物学的, 栽培的特徴	
2 1本仕立て1果どり栽培におけるソース・シンク関係	31	スイカ [<i>Citrullus lanatus</i> (Thunb.) Matsum. et Nakai]	
3 本章の考察	36	はアフリカが起源と考えられているウリ科植物で, 同種の野生植物がアフリカの砂漠地帯に自生している (山川, 2003). 1節1花の植物で, 雌・雄花節が混在するが, 雌花は雄花の5分の1程度と少ない. エジプト, 地中海沿岸, 中央アジア, 近東, 中東など乾燥地帯を中心と	
IV スイカの果実生産性および軽労化に関する立体栽培と地ばい栽培の比較	38		

〒 470-2351 愛知県知多郡武豊町字南中根 40-1
野菜生産技術研究領域

*九州沖縄農業研究センター水田作・園芸研究領域

[†] 本論文は北海道大学学位審査論文 (平成 23 年 12 月, 第 6807 号) を基に編集・加筆したものである。本報告の一部は, 生環調, 39, 121-125(2001); 園学雑 70, 725-732(2001); *J. Japan. Soc. Hort. Sci.*, 70, 69-74(2001); 園学研 2, 35-38(2003); *J. Japan. Soc. Hort. Sci.*, 72, 497-503(2003) において発表した。

して栽培が発達し、飲料果汁用と糖度の高い果物用に分化した(山川, 2003). 中国などでは種子用(食用)の品種もある. 起源・発展地の気候を反映して, 生育, 特に開花・結実期には高温を要求する. 生育適温は昼温25~30℃(最高30~35℃), 夜温18~22℃(最低16~18℃)である. 多日照, 乾燥を好み, 土壌の過湿には弱い. 日本には16~17世紀に導入され, 短期間に広く普及した. 栽培は通常, 地ばい栽培で行われ, 1個体当たりの土地専有面積が比較的大きい. 海外では無整枝の放任栽培で行われる場合が多いが, 日本では伸長させる主枝や一次側枝数を制限する整枝栽培で, 1個体当たり着果数も1~2果に制限される場合が多い.

2 スイカ生産の現状と立体栽培の意義

スイカは, 平成21年現在で, 日本で生産されているウリ科野菜の中ではキュウリに次いで生産量が多く, 果菜類の中でもキュウリ, トマトに次いで生産量が多い果実的野菜である(農林水産省, 2010). スイカの作付面積および生産量は, 昭和43年の40,600haおよび120万tを最高に漸次減少し(甲田, 1986a), 昭和60年には26,400ha, および68万t, 平成21年には12,100haおよび39万tまで減少している(農林水産省, 2011b). スイカは一般に露地栽培で生産される印象が強いが, 施設栽培面積も熊本県等の半促成栽培を中心に平成21年現在で約2,900ha(スイカ全栽培面積の約24%)と多く, スイカ全体の栽培面積が減少している中で, 施設栽培での生産は7, 8年の間ほぼ一定で推移している(農林水産省, 2011a). その施設栽培面積はトマト, メロン類(一般メロンと温室メロンの合計), ホウレンソウ, イチゴ, キュウリに次いで多く(農林水産省, 2011a), スイカは施設園芸における主要な生産品目である. スイカの全栽培面積が減少する中で施設栽培面積が維持されているということは, 露地栽培で生産できない時期でのスイカの需要が堅調であることを示しているものと考えられる. よって, スイカ生産を維持するためには施設生産を維持, 発展させる必要があるが, 施設コストがかかることから施設内空間を有効利用した集約的生産技術の導入が必要である.

スイカ生産の減少の理由としては, 消費面, 生産面の双方から要因が考えられる. 消費面からの要因としては, 世界中から周年多くの果実類が供給されるようになったことや, アイスクリームなどの冷菓・飲料類がふんだんにいつでも手軽に入手できるようになったこと, 大玉スイカは大きすぎて冷やすにも食べるにも手間がかかりす

ぎること, 果皮がごみとして大量に出るため処理に困ること, 等が挙げられる(松田, 2002). 一方, 生産面からの要因としては, 農産物一般に共通な価格低迷による生産意欲の低下とともに, 生産者の高齢化が進む中で, スイカは通常地ばい栽培されるため, 主枝や側枝の整枝, 誘引などの管理作業を腰を曲げた姿勢で行うため足腰に大きな負担がかかること, 大玉果実の収穫に多くの労力を必要とすること等から, 重労働感が強い品目であることが挙げられる.

このような状況の中で, スイカ生産においても栽培管理作業の軽作業化が求められている. 他の果菜類の栽培管理の軽作業化については, 高設ベンチ等を利用したトマト低段密植栽培(渡辺, 2006), イチゴ高設栽培(伏原, 2004), 高軒高温室と作業台車を用いたトマトのハイワイヤー誘引システム栽培(鈴木, 2006)等が実用化されているとともに, 省力・軽作業的な整枝・誘引方法



図-1 スイカの立体栽培



図-2 スイカの立体栽培(左)と地ばい栽培(右)の栽培管理における作業姿勢

について検討および普及が進められており、スイカにおいてもこのような観点からの検討が必要である。スイカ施設栽培における作業姿勢の改善の方策としては、スイカの主枝あるいは側枝をメロンのように上方に誘引し、果実を空中に吊して栽培する立体栽培が選択肢の一つとして有望と考えられる(図-1)。立体栽培では、主枝あるいは側枝を上方に誘引することにより、畝幅を狭く設定しやすく、密植が可能である。また、不要なわき芽(側枝)の除去、受粉等の栽培管理の作業位置が高くなり、地ばい栽培のように腰をかがめたつらい姿勢での作業が少なくなる(図-2)。さらに、地ばい栽培と比べて葉裏への効果的な農薬散布が可能となり、殺虫剤等の減農薬効果も期待できる。そして、果実をひもやネットで空中に吊すことにより果実全面に光が当たるため、地ばい栽培で必要な玉直し作業がほとんど不要となり、果実の収穫姿勢も楽になる。メロンにおいては、果実のネット発生程度、糖度、肩落ち果率の点で立体栽培のほうが地ばい栽培よりも優れることが報告されている(難波・松本, 1975)。

スイカの立体栽培は、高知県を中心にハウス抑制～半促成作型で行われ、熊本県においてもここ10年ほどの間に導入が進んでいるが、スイカの全施設栽培面積から見るとその面積はごくわずかである。これまで、販売単価の高い時期に集約的に生産するという観点からの特殊な栽培法という位置づけであった立体栽培を、作業負荷の大きい慣行の地ばい栽培に替わるスイカの施設内における集約的生産技術として改めて評価し、普及を図るためには、立体栽培の果実生産特性とそのメリット(有利性)や軽労性についての客観的な根拠を提示することが必要である。ウリ科のトウガンでは、立体栽培は地ばい栽培と比較して増収となり、かつ作業負担が軽減されることが報告されている(大石ら, 2010)が、増収要因は解析されていない。一般に穀類では、稔実に対する植物体各部分の貢献の程度は、置かれた条件の下でどれだけの光合成産物を作り出すかということと、作り出した光合成産物のうちどれだけの部分を収穫対象部分に送るかという、2つの要因によって決まる(玖村, 1984)。よって、立体栽培スイカ個体の果実生産特性の解析においても、果実肥大期の個体の光合成生産に関する要因に加えて、光合成産物の転流・分配の様相を検討する必要がある。

3 スイカの果実肥大性・収量性研究の状況

スイカの果実肥大や収量については、地ばい栽培にお

いて葉面積の影響(萩原・余吾, 1942)、栽植密度の影響(NeSmith, 1993; Duthie et al., 1999a, 1999b; Motsenbocker and Arancibia, 2002)、栽植密度や整枝法の影響(松本ら, 2002; 貝塚・鈴木, 2004)、栽植密度や栽植様式、マルチの影響(Sanders et al., 1999)、栽植密度やマルチ、施肥量の影響(Brinen et al., 1979)、施肥、栽植密度、台木と穂木の組合せの影響(大場ら, 1980)、作型や整枝法の影響(五十嵐・平石, 1987)、台木品種や整枝方法、窒素施肥法の影響(塩澤ら, 2002)、マルチやトンネル被覆の影響(Ibarra-Jimenez et al., 2005)、トンネル栽培における換気法の影響(平井ら, 2005b)、施肥条件の影響(Locascio and Hochmuth, 2002)、トンネル隔離床栽培における培地の種類、容量、肥培管理法の影響(松本・橋本, 2005)、光や温度条件の影響(Nkansah et al., 1996)、直播と苗定植の間での比較(NeSmith, 1999)等が報告されている。これらのうち、萩原・余吾(1942)が葉面積が大きいほど果実重が大きくなること、平井ら(2005b)が個体の葉身重が重くなるほど果実重が増加する傾向があること、Ibarra-Jimenez et al.(2005)が放任栽培におけるマルチやトンネル処理による果実総収量の違いは、純光合成速度の違いでは説明できず、個体当たりの葉数や茎葉部の乾物重により、よく説明できること、Nkansah et al.(1996)が‘Baoguan’、‘Xinlan’の2品種の光合成特性を比較し、収量の高かった‘Baoguan’では光合成速度、蒸散速度および気孔伝導度が‘Xinlan’よりも高かったことを報告しているが、これら以外の上述の既報では、光合成生産に関連する要因を客観的に評価・検討したものは見当たらない。

一方、スイカ立体栽培では、整枝法(加藤ら, 1984a, 1984b, 1985b; 田尻ら, 2008)や、施肥・かん水(加藤ら, 1985a)等の栽培手法について調査されている。しかし、光合成生産に関連する要因を調査したものとしては、主枝1本仕立て1果どりにおいて、ハウス内積算日射量と果実重には密接な比例関係があることが報告されている(川信, 1997)のみで、植物体自体に着目した光合成生産に関連する要因の研究はない。さらに、立体栽培と地ばい栽培の比較については、これら両栽培法の間で光合成生産に関する要因と果実肥大性を比較した例はこれまで報告されていない。

同じウリ科野菜のうち、スイカと同様に個体当たりの着果数が比較的少なく、熟した果実を収穫するメロン、カボチャにおいても、光合成生産に関する要因と果実肥大性について検討されている。メロンでは、立体栽培

(佐藤, 1981; 吉岡・高橋, 1983; 萩生田, 1997), 地ばい栽培 (高木, 1939, 1940; 平井ら, 2005a) において基本的に果実重は個体当たり葉面積の増加に従って増加することが報告されているが, 葉面積がある一定以上を超えると果実重増加が停滞すること (高木, 1940; 萩生田, 1997), 着果節位以下の葉面積と果実重には相関関係がみられないこと (平井, 2005a) も報告されている。これらは, 果実肥大性を検討する際に受光量等, 葉面積以外の要因も加味して検討する必要があることを示唆しているものと考えられる。メロンの1本仕立て1果どりの立体栽培において, 交配から収穫までの光合成量子束密度 (Photosynthetic photon flux density, 以下PPFD) の日平均値と果実重の間には高い正の相関関係がみられること (佐藤ら, 1993), 栽植密度の違いによる果実重の差異は, 層別の葉面積に相対光透過率で重み付けして算出した個体葉面積との間に密接な関係があること (Cohen et al., 1999) も, 光の要因を加味した解析の重要性を示唆しているものと考えられる。カボチャにおいては, 葉数を15~25葉に制限した1本仕立て1~2果どりの地ばい栽培において, 着葉位置に関わらず葉面積と果実重の間に高い正の相関関係がみられることが報告されている (倉田・水野, 1982) が, 光合成生産に関する要因と果実肥大性を比較した例はほとんどない。立体栽培と地ばい栽培の比較については, カボチャにおいて直立仕立てS字誘引することにより地ばい仕立てと比較して収量が多く, 外観の優れた果実が得られることが報告されている (大木・崎山, 1995) 以外は, メロン, カボチャにおいても立体栽培, 地ばい栽培の間で光合成生産に関する要因と果実肥大性を比較した例はこれまで報告されていない。

以上のように, スイカの立体栽培の果実肥大性について光合成生産に関する要因と関連づけて検討した例はほとんどないことから, スイカ立体栽培の果実生産特性を解明するためには, 光合成そのものや, 光合成に関連する葉面積や光環境と果実生産性との関係を解明する必要がある。また, メロン, カボチャを含めても, 光合成生産に関する要因と関連づけた上での立体栽培と地ばい栽培における果実生産特性の比較に関する知見は皆無に等しく, スイカにおいてこれらの知見を得ることにより, スイカのみならず他のウリ科野菜の生産技術開発にも貢献できるものと考えられる。

4 スイカの光合成産物の転流・分配に関する研究の状況

光合成産物の分配に関しては, これまで果樹, 野菜, 花き, 食用作物, 工芸作物, 飼料作物等, 広範な農作物において数多く調べられており (Zamski and Schaffer, 1996), 炭素同位体を用いた解析も多数行われている。スイカでは, 地ばい栽培の2本仕立て1果どりにおいて, 果実肥大期の光合成産物の最も主要なシンクは果実であること (Lee et al., 2000, 2005, 2006), 根への炭素の主な供給源は無着果枝の着生葉であること (Lee et al., 2005), 無摘心の場合には, 果実より上位の葉の, 果実に次ぐ光合成産物のシンクはその着生枝の先端部であること (Lee et al., 2005), ハウス栽培個体と比べて露地栽培個体のほうが概して光合成産物の転流率が高いこと (Lee et al., 2005), トマトよりもスイカのほうが光合成産物の転流率が概して高いこと (Lee et al., 2006) が報告されている。これらは果実肥大期間中に1回のみ調査したものであり, 果実肥大期間を通して光合成産物の転流・分配を調査した例は見当たらない。また, スイカの立体栽培においては, 果実肥大期間の光合成産物の転流・分配について調査された例は見当たらない。

同じウリ科野菜のうち, スイカと同様に個体当たりの着果数が比較的少なく, 熟した果実を収穫するメロン, カボチャにおいても果実肥大期間の光合成産物の動態について調べられている。メロンでは, 果実肥大期における光合成産物の短時間での経時的な動態 (Hughes et al., 1983), 果実への光合成産物の転流・分配に及ぼす着果数や着果節位の影響 (吉岡・高橋, 1983), 葉位およびかん水量の影響 (宍戸ら, 1992) 等が調べられている。カボチャでは, 1本仕立て2果どりについてのソース・シンク関係 (Lee et al., 2009) が報告されている。スイカは着果枝と無着果枝が混在する整枝法で栽培される場合が多い (高橋, 2000) が, これらのメロン, カボチャにおける既報では2本仕立て1果どりについて検討したものは少ない (吉岡・高橋, 1983)。以上のように, スイカの立体栽培における果実肥大期の光合成産物の転流・分配の知見は見当たらないことから, スイカ立体栽培の果実生産特性を解明するためには, これらについての知見を得ることが重要である。

5 スイカにおける作業性研究の状況

スイカの立体栽培の評価には, 作業性や省力性も重要である。スイカでは, 地ばい栽培において, つるを株毎

に斜めに振り分けて誘引する「振り分け栽培法」により慣行栽培と比較して摘果作業時間が大幅に短縮して合計の作業時間の短縮が図られること(松本ら, 2002), 栽培ベッド位置をハウス内片寄せ・条植えにすると, ハウス内中央・条植えおよび千鳥植えと比較して整枝・誘引の作業時間の短縮が図れること(貝塚・鈴木, 2004)等が報告されている。立体栽培においては, 各種整枝法における誘引の作業時間の比較が報告されている(田尻ら, 2008)が, 地ばい栽培と立体栽培の作業性を比較した例は見当たらない。ウリ科野菜においては, キュウリでの栽植様式と作業時間, 労働時間当たり粗収益との関係(金井・阿部, 2003), カボチャでの短節間品種による作業時間の短縮(平井ら, 2004), メロンでの誘引作業および除芽作業における器具利用の効果の人間工学的評価(小堀ら, 1990), 短側枝性品種による地ばい栽培での整枝・摘果の作業時間の短縮, 作業姿勢の改善(金子ら, 2006)等が報告されているが, 立体栽培と地ばい栽培の間の比較については, トウガンにおける立体栽培化による作業姿勢の改善(大石ら, 2010)が報告されているのみであり, 他のウリ科野菜においてもほとんど例がない。本研究においては, 作業負荷の大きい慣行の地ばい栽培に替わるスイカの施設内における栽培技術として立体栽培を位置付けていることから, 作業性に関しては省力性の比較よりも軽労性に関する比較がより重要となる。軽作業化の解析法としては, 作業姿勢による評価が有用な方法である。果菜類の栽培における作業姿勢の検討例としては, OWAS法(Karhu et al., 1977)による評価(大石ら, 2010), つらさ指数(長町, 1986)による評価(羽石・石原, 2005; 金子ら, 2006), 作業姿勢モニタ(小林, 1994)による計測(前川ら, 2000; 石坂ら, 2003; 前川・谷川, 2004; 竹内ら, 2004; 羽石・石原, 2005)等があり, 本研究においても他で見知のあるこれらの手法による解析が必要である。

6 本研究の構成

以上のことを踏まえ, 本研究では, スイカ立体栽培と地ばい栽培について葉面積や受光態勢, 圃場光合成特性, 光合成産物の転流・分配と果実生産の関係, ならびに作業性の数値化を試み, それらをもとに, 地ばい栽培との比較において立体栽培の果実生産特性を明らかにしようとした。具体的には, まずⅡ章において, 立体栽培スイカの果実肥大性について, 着果節位, 整枝法, 栽植密度の影響を果実肥大期の葉面積や受光量, 光合成速度等, 光合成生産量に大きな影響を及ぼす光条件と関係する要

因と関連づけて検討した。次にⅢ章において, 立体栽培スイカの果実肥大期の光合成産物のソース・シンク関係を解析し, 着生位置の異なる葉の果実肥大への貢献度を明らかにした。そして, Ⅳ章において, スイカ立体栽培の果実生産特性について, 地ばい栽培との比較において収量性, 作業性の両面から評価を行い, その特徴を明らかにした。

7 本研究で用いる用語について

本研究では受粉から果実収穫までの期間を主な対象期間として検討を行った。この期間は厳密に表現すると前半が果実肥大期, 後半が果実成熟期ということになるが, 本研究においては受粉から収穫までの期間をまとめて「果実肥大期」と称することとした。また, 茎数の制限, 混み合った茎葉の切除等により植物体の形状を整えることを表す用語として「整枝」, 「仕立て」があるが, 本研究では主に残す主枝あるいは側枝の本数についてのみ「仕立て」を用い, その他は「整枝」という用語を用いた。そして, 植物体の受光態勢等を検討する際に, 地表面に対して様々な角度で配置されている葉に積算日射計測フィルムを設置して測定した値について, 通常は地面付近の水平な平面に入射する太陽エネルギーの単位面積当たりの量についての用語である「日射量」という用語を用いて, 「葉面積算日射量」という表現を用いた。

本論文をとりまとめるにあたり, ご助言とご校閲の労を賜った北海道大学北方生物圏フィールド科学センターの荒木肇教授ならびに山田敏彦教授, 同大学地球環境科学研究所の大原雅教授, 同大学大学院農学研究院の鈴木正彦教授, 農研機構北海道農業研究センターの杉山慶太博士に厚く御礼申し上げます。また, 本研究の遂行にあたり, 河野真人氏, 岩切博文氏, 羽山敏夫氏, 河野真寛氏他, 野菜茶業研究所研究支援センターの皆様には, 栽培管理およびデータ取得に多大なご支援をいただいた。ここに記して心よりの感謝を申し上げます。

Ⅱ 立体栽培スイカの果実肥大に影響を及ぼす要因

一般に, 個体の果実生産量は, 葉面積や受光態勢によって変動する光合成量の影響を受ける。近年, 積算日射量を簡易に計測することができる積算日射計測フィルム(吉村ら, 1989)や, 圃場条件下で葉温, 光条件等を制御して短時間で光合成速度を測定することができる携帯型光合成蒸散測定装置(村岡, 2003)が開発されている。これらにより, 個体の圃場条件下での受光態勢や光

合成生産量を簡便かつ詳細に調査することができ、果実生産特性を受光態勢や光合成との関連で解析することが可能になると考えられる。本章では、立体栽培スイカ個体の果実肥大特性を明らかにすることを目的として、果実肥大期の葉面積や受光態勢、圃場光合成特性と関連づけて着果節位、整枝法、栽植密度の影響を調査した。

1 着果節位の影響

ウリ科作物において、高節位に着生した果実の方が大きくなるのが、メロンで報告されている（吉岡・高橋, 1983; 平井ら, 2005a）。スイカにおいても、着果節位が果実重に影響するとされており、一般に低節位に着果させると果実の肥大が不良で変形果になりやすく、高節位に着生した果実は肥大が早く腰高の大果になるとされている（甲田, 1986b）が、具体的なデータが見当たらないことから、本節では、まず着果節位が果実肥大に及ぼす影響について検討した。

地ばい栽培のスイカ（萩原・余吾, 1942）、メロン（高木, 1939）、カボチャ（倉田・水野, 1982）において、着果節位が比較的揃っている条件下では、葉面積と果実重の間には正の相関関係が認められている。着果節位が異なると着果時点での葉数も異なることから、個体当たりの葉数や葉面積に差異が生じ、その結果、果実重に影響を及ぼすことが予想されるが、着果節位の違いによる果実重と個体の葉面積の関係を調べた例は見当たらない。よって本節では、スイカ立体栽培における着果節位が果実重に及ぼす影響について、果実肥大期の個体当たり葉面積と関連づけて明らかにすることを目的として調査を行った。

a 材料および方法

1) 供試品種および栽培法

ユウガオ‘かちどき2号’（萩原農場）に接ぎ木したスイカ‘縞王マックスRE’（大和農園）の購入苗（PeSP 苗）を、ガラス室内で土耕栽培した。本葉3～4枚の苗を、1999年4月22日に畝幅210cm、株間50cm、1条植え（栽植密度95.2個体・a⁻¹）で定植した。畝はポリフィルム（伊藤忠サンプラス、ムシコンワイド）でマルチした。施肥は畝面面積（全面積の約1/2）当たりでN、P₂O₅、K₂O各1.8kg・a⁻¹を畝部のみに行った。かん水はマルチ内に設置したかん水チューブ（三石アグリ、エバフローA型）で行った。本試験の整枝法の模式図を図-3に示した。定植後、本葉5～6枚残して主枝を摘心し、2本の一次側枝を伸長させた。一次側

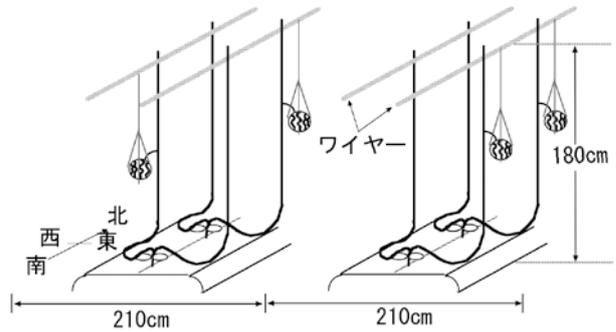


図-3 II章1節の整枝法の模式図
一次側枝2本仕立て1果どり



図-4 スイカ立体栽培における果実支持の様子

枝から発生した二次側枝はすべて除去した。伸長した側枝は、約180cmの高さに張ったワイヤーからつり下げたひもに固定して徐々に上方に誘引した。着果数は1個体当たり1果とし、着果節位は、いずれかの一次側枝の第3～5節、第8～11節、第14～16節および第18～22節の4種とした。なお、個体の配置は、各着果節位の個体がランダムに混在する配置とした。受粉は人手で行った。一次側枝はワイヤーの地上高さに相当する第22節で摘心した。摘心はすべての個体において5月26日～31日の間に行った。15cm角に切った白色寒冷

紗を底部に付けて十文字に結んだポリエチレン製のひもを用いて果実を支持し、一次側枝の誘引に用いたワイヤーからつり下げた(図-4)。

2) 調査項目

各着果節位から8個体を選び、受粉5日後、20日後に着生しているすべての葉の葉長と葉幅を計測した。そして、調査個体とは別の個体から葉を採取して、葉長および葉幅と葉面積との間で回帰式 $y = 0.447x$ ($n = 129, r^2 = 0.958, x$: 葉長×葉幅, y : 葉面積) を作成し、葉面積を推定した(図-5)。受粉40日後に果実を収穫し、各着果節位の果実12~13果について、重量、果形(果実縦断面の縦径/横径比)、皮の厚さ(表皮から白い果肉と赤い果肉の境界までの厚さ)を測定した。糖度は、果

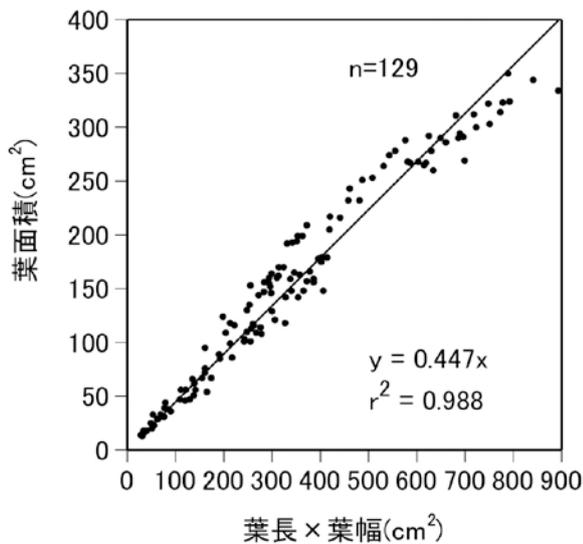


図-5 葉長と葉幅の積と葉面積の関係
 品種：縞王マックス RE
 図中の式は回帰式
 r^2 は決定係数

実の中心部から採取した果肉汁液を糖度計(アタゴ, P-1)で測定した。また、果実調査を行った個体について、葉面積を面積計(林電工, AC-440)で測定した。

b 結果

各着果節位での平均受粉日は着果節位が高まるほど遅れ、第3~5節着果で5月14日、第8~11節着果で5月19日、第14~16節着果で5月23日、第18~22節着果で5月26日であった。各着果節位での平均的な果実肥大期間(受粉~収穫)の温室内の積算気温の差は5%以内、温室内の積算日射量の差は10%以内であった(表-1)。

受粉5日後の個体当たり葉面積は、着果節位が高いほど大きかった(図-6)。これは受粉5日後において第3~5節着果の個体では第14~15葉まで、第8~11節着果の個体では第20~21葉までしか展開していなかったのに対して、第14~16節着果、第18~22節着果の個体では摘心節位の第22葉がすでに展開後であった(図-7)のように、着果節位が高いほど着果時点での本葉の展開が進んでいるためであった。受粉後日数が進むにつれて、各着果節位との個体当たり葉面積の差は小さくなる傾向があったが、収穫時の葉面積も着果節位が高いほど大きかった(図-6)。受粉5日後の第3~5節着果、第8~11節着果、第14~16節着果、第18~22節着果の個体当たり葉面積は、収穫時の葉面積のそれぞれ38%、62%、79%、92%であった。受粉20日後では、第3~5節着果の個体当たり葉面積は最終的な葉面積の88%であったが、その他の着果節位の個体では収穫時の葉面積にほぼ達していた。

収穫した果実の調査結果を表-2に示した。果実重は着果節位が高いほど大きかった。果形には着果節位による差はみられなかった。果皮は第3~5節着果の場合

表-1 各着果節位区の果実肥大期の温室内の積算気温および積算日射量

着果節位 (節)	平均 受粉日	平均 収穫日	積算気温 ^z (°C)	積算日射量 ^y (MJ・m ⁻²)
3~5	5月14日	6月23日	1002 (100)	501 (100)
8~11	5月19日	6月28日	1010 (101)	472 (94)
14~16	5月23日	7月 2日	1017 (102)	452 (90)
18~22	5月26日	7月 5日	1031 (103)	459 (92)

()内の数値は第3~5節区の数値を100とした場合の相対値

^z平均受粉日~平均収穫日の日平均気温の積算値

^y全天日射計(英弘精機, MS-42)で測定

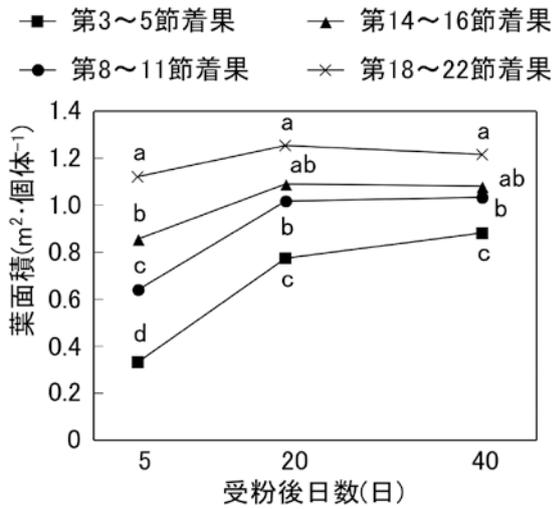


図-6 個体当たり葉面積の推移に及ぼす着果節位の影響

品種：縞王マックスRE

同じ受粉後日数の同一英文字間では Tukey-Kramer の多重検定 (危険率 5%) で有意差なし [n=8(受粉 5, 20 日後), n=12~13(受粉 40 日後)]

表-2 収穫時の果実の重量, 形, 皮の厚さおよび糖度に及ぼす着果節位の影響

着果節位 (節)	果実重 (kg)	果形 (縦径/横径)	皮の厚さ ^z (cm)	糖度 ^y (Brix%)
3~5	3.99 d ^x	1.03 a	1.3 a	11.9 a
8~11	4.66 c	1.01 a	1.0 b	9.9 b
14~16	5.62 b	1.02 a	0.9 b	9.2 c
18~22	6.59 a	1.01 a	1.0 b	9.2 c

品種：縞王マックスRE

^z表皮から白い果肉と赤い果肉の境界までの厚さ

^y果実中心部

^x同じ英文字間ではTukey-Kramerの多重検定(危険率5%)で有意差なし(n=12~13)

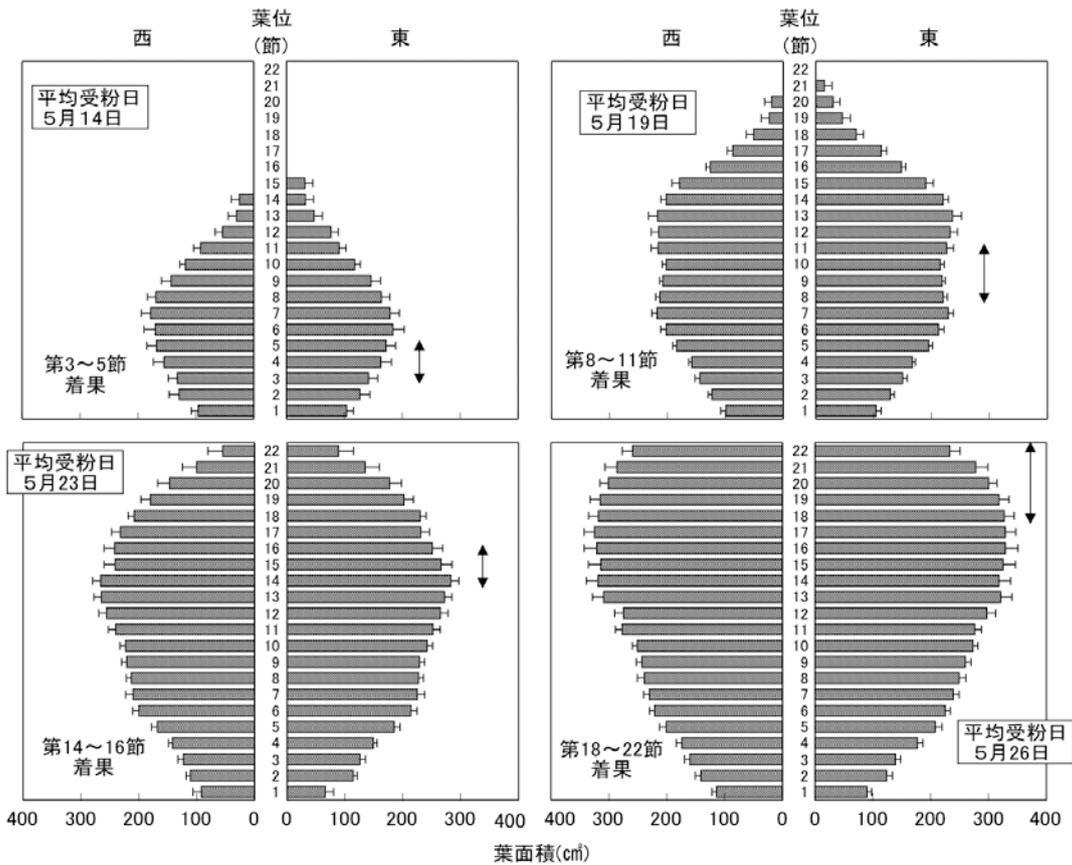


図-7 受粉5日後の葉位別葉面積に及ぼす着果節位の影響

品種：縞王マックスRE

矢印は各区の着果位置を示す

誤差線は SE(n=8)

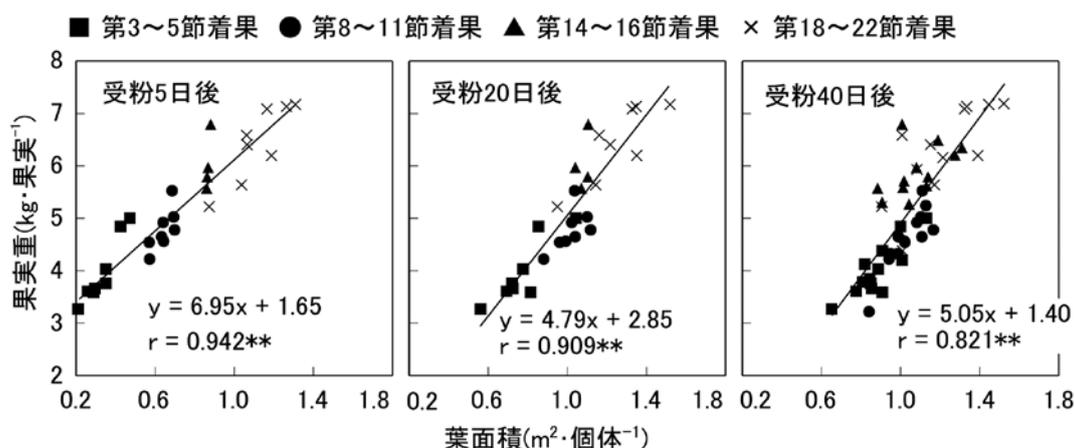


図-8 受粉5日、20日および40日後（収穫時）の個体当たり葉面積と収穫時の果実重との関係

品種：綺王マックスRE

図中の式は回帰式

rは相関係数

**は1%水準で有意

に他よりも厚かった。果実糖度は着果節位が低いほど高い傾向が認められた。なお、空洞果は低節位着果区においてもほとんど認められなかった（データ略）。

受粉5日後、20日後および40日後（収穫時）の個体当たり葉面積は、いずれも収穫時の果実重との間に高い正の相関関係（ $r = 0.821 \sim 0.942$ ）が認められた（図-8）。

c 考察

スイカ果実の発育は「開花までの栄養条件と受粉後の肥大環境、他の果実との競合などに影響される」とされている（倉田，1983）。本試験では、着果節位が高いほど果実肥大期を通して個体当たり葉面積が大きく、受粉5日後、20日後および40日後（収穫時）の葉面積と収穫時の果実重との間にはいずれも高い正の相関関係が認められた。従って、着果節位の違いによる果実肥大期の個体当たり葉面積の差異が果実重決定の主要な要因の一つであると考えられた。着果節位が低いほど果実肥大期の葉面積が小さくなる理由としては、着果（果実肥大開始）時の葉面積が小さい上に、展葉と果実肥大が同時進行するために果実と茎の間で競合が起こり、果実肥大期の葉面積の拡大が抑制されることが考えられる。換言すると、着果節位が低いほど、初期の果実への光合成産物の供給量が少ない上に、着果後の光合成生産量も少なくかつ葉面積拡大との間で光合成産物の分配の競合が起こるため、果実が小さくなるものと考えられる。なお、本試験では、各着果節位区の果実肥大期の積算気温およ

び積算日射量にはほとんど差がなかったことから、これらの気象要因が各着果節位の果実肥大に及ぼす影響は小さかったものと思われる。

雌花の子房は、節位の上昇に従って大きくなる傾向があり（末永ら，1989）、高節位の果実は低節位の果実と比べて細胞数が多い（Kano, 1993）。これらのことから、高節位の雌花の方が低節位の雌花よりもシンクとしての能力が大きい可能性があり、着果節位の違いによる果実肥大の差異を生じる要因の一つとなっていることも予想される。本試験では、子房の大きさについては調査を行わなかったため、着果節位の違いによる果実肥大の差異に子房（果実）のシンク能力がどの程度影響を及ぼしたかについては不明である。本試験の結果より、着果節位が異なると個体当たり葉面積の差異が生じ、果実肥大に影響があることが明らかとなったことから、以降の検討で果実肥大に及ぼす影響を検討する際には、着果節位の違いの影響を回避するため、ある程度着果節位を揃える必要があると考えられた。

2 整枝法の影響

整枝法の違いは、個体当たり葉面積等の差異を生じさせ、果実肥大にも影響を及ぼすものと考えられる。スイカの地ばい栽培では、収穫期の葉面積と果実の大きさとの間に正の相関関係があることが知られている（萩原・余吾，1942）。同様な関係は、メロン（高木，1939）、カボチャ（倉田・水野，1982）等でも報告されている。スイカの立体栽培において、果実重と整枝法の関係につい

て検討された例としては、1本仕立てにおける整枝法の影響(加藤ら, 1984a, 1984b), 2本仕立てにおける時期別摘心および摘葉の影響(加藤ら, 1985b)があるが、果実重と個体当たり葉面積との関係については検討されておらず、不明である。それ以外にも、果実肥大と積算日射量との関係(川信, 1997), 各作型に適した品種選定(田尻ら, 2008)について報告されているが、同様に果実重と個体当たり葉面積との関係については検討されていない。

本節では、スイカ立体栽培における整枝法が果実肥大に及ぼす影響について、個体当たり葉面積と果実重の關係に着目して検討した。なお、施設(大型トンネル栽培を含む)を用いたスイカ生産は通常、抑制および促成～早熟の作型で行われており、その際の整枝法は、立体栽培では1～2本仕立て1果どりが、地ばい栽培では2～3本仕立て1果どり、4～5本仕立て2果どりが行われることが多い(高橋, 2000)ことから、1～3本仕立て1果どりについて検討した。

a 材料および方法

1) 早熟栽培(6月どり)

(1) 供試品種および栽培法

ユウガオ‘FR ストッパー’(東海シード)に接ぎ木したスイカ品種‘ハニーシャルマン’(松井農園), ‘吉野’(神田育種農場), ‘早生天竜’(島崎種苗)を材料として用いた。1997年3月7日にユウガオ種子を、3月14日にスイカ種子をバーミキュライトを詰めた育苗箱に播種した。3月24日にさし接ぎした後、培養土を詰めた黒色ポリポット(直径7.5cm, 高さ7.0cm)に移植してガラス室内で育苗した。栽培は、ガラス室内で土耕で行った。4月18日に畝幅210cm(畝面幅約150cm), 株間50cm, 1条植え(95.2個体・a⁻¹)で定植した。畝はポリフィルム(伊藤忠サンプラス, ムシコンワイド)でマルチした。基肥は施用せず、マルチ下に設置したかん水チューブ(三石アグリ, エバフローA型)を用いて、水溶性園芸肥料(大塚化学, OKF-1, 成分: N 15%, P₂O₅ 8%, K₂O 17%, MgO 2%, CaO 6%)の1,000倍液を適宜かん水と同時に施肥した。肥料成分の総施用量は、個体当たりでおよそN 7.0g, P₂O₅ 3.7g, K₂O 7.9g, MgO 0.9g, CaO 2.8gであった。伸長させた主枝あるいは一次側枝を立体誘引する場合には、約180cmの高さに張った直径5mmの鋼鉄製のワイヤーからつり下げたひもに固定して徐々に上方に誘引した。受粉は人手で行い、果実は1個体当たり1果を主枝の第15～20節を

目標に着果させた。果実の直径が約10cmとなった時点で、十文字に結んだポリエチレン製のひもを用いて果実を支持し、主枝あるいは一次側枝を誘引したものと同じワイヤーからつり下げた。

(2) 整枝法

各整枝法の栽植密度、仕立て本数、摘心節位および総葉数を表-3に、模式図を図-9に示した。整枝法として、主枝1本を立体誘引(以下、1本仕立て)、主枝と主枝の基部の第5節前後から発生する一次側枝の2本仕立てとし両方とも立体誘引[以下、2本仕立て(立・立)], 同様に主枝と一次側枝の2本仕立てとし主枝を立体誘引し側枝は地ばい誘引[以下、2本仕立て(立・地)]の3種類を行った。その他の側枝は発生次第摘除した。摘心はワイヤーの高さを基準に行い、‘ハニーシャルマン’, ‘吉野’では、主枝を第25節、側枝を第22節, ‘早生天竜’では主枝を第27節、側枝を24節で摘心した。

(3) 調査項目

‘早生天竜’では受粉35日後に当たる6月16～22日に、‘ハニーシャルマン’と‘吉野’ではそれぞれ受粉40日後に当たる6月21～26日と20～28日にそれぞれ収穫し、果実重と糖度を測定した。糖度は、果実の頂部および基部付近の胎座部から採取した果肉汁液を糖度計(アタゴ, PR-1)で測定した。果実収穫後に、葉面積を面積計(林電工, AC-440)で測定した。各整枝法の個体の配置は、整枝法を主区、品種を副区とした10個体2反復の分割区法の配置としたが、果実および葉面積の調査は計20個体の中から図表中に示した数採取して行った。

表-3 II章2節の早熟栽培(6月どり)の整枝法

品種 整枝法	仕立て 本数 ^a	誘引法		栽植密度 (個体・a ⁻¹)	摘心節位(節)		総葉数 ^b
		主枝	一次側枝		主枝	一次側枝	
ハニーシャルマン, 吉野							
1本仕立て	1	立体	-	95.2	25	-	25
2本仕立て(立・立)	2	立体	立体	95.2	25	22	47
2本仕立て(立・地)	2	立体	地ばい	95.2	25	22	47
早生天竜							
1本仕立て	1	立体	-	95.2	27	-	27
2本仕立て(立・立)	2	立体	立体	95.2	27	24	51
2本仕立て(立・地)	2	立体	地ばい	95.2	27	24	51

^a個体当たり

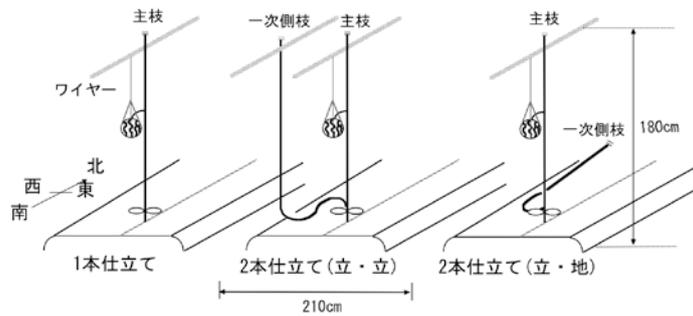


図-9 II章2節の早熟栽培(6月どり)の整枝法の模式図
各整枝法の摘心節位は表-3を参照

2) 抑制栽培(11月どり)

(1) 供試品種および栽培法

ユウガオ‘かちどき2号’(萩原農場)に接ぎ木したスイカ品種‘早生天竜’(嶋崎種苗)を材料として用いた。1997年8月8日にユウガオ種子を、8月11日にスイカ種子をバーミキュライトを詰めた育苗箱に播種した。8月19日にあわせ接ぎした後、培養土を詰めた黒色ポリポット(直径7.5cm,高さ7.0cm)に移植してガラス室内で育苗した。1)早熟栽培と同様に、ガラス室内で土耕栽培した。定植は9月8日に行った。畝はポリフィルム(伊藤忠サンプラス,ムシコンワイド)でマルチした。施肥量は畝面面積(全面積の約1/2)当たりで苦土石灰 $15\text{kg}\cdot\text{a}^{-1}$,CDU化成 $12.5\text{kg}\cdot\text{a}^{-1}$ (N, P_2O_5 , K_2O 各 $1.5\text{kg}\cdot\text{a}^{-1}$)とし、畝部のみに施用した。かん水はマルチ内に設置したかん水チューブ(三石アグリ,エバフローA型)で適宜行った。受粉は人手で行い、果実は1個体当たり1果を主枝の第25~30節着果を目標に着果させた。果実の支持は1)早熟栽培と同様とした。

(2) 栽植密度と整枝法

各整枝法の栽植密度,仕立て本数,摘心節位および総葉数を表-4に,模式図を図-10に示した。基本栽植様式は,畝幅210cm(畝面幅約100cm),条間70cm,2条千鳥植えとした。整枝法として,1)株間50cmで主枝1本のみを伸長させ第50節で摘心[以下,1本仕立て(長)],2)株間100cmとし,主枝1本と主枝の基部の第5節前後から発生した一次側枝1本を伸長させ,主枝第38節,側枝第26節で摘心[以下,2本仕立て(短)],3)2)と同様に仕立てて,主枝第50節,側枝第40節で摘心[以下,2本仕立て(長)],および4)株間100cmとし,主枝1本と主枝の基部から発生した一次側枝2本を伸長させ,主枝を第38節,2本の側枝をそれ

表-4 II章2節の抑制栽培(11月どり)の整枝法

整枝法	仕立て本数 ^a	誘引法	栽植密度 (個体 $\cdot\text{a}^{-1}$)	摘心節位(節)			総葉数 ^d
				主枝	一次側枝1	一次側枝2	
1本仕立て(長)	1	立体	190.5	50	-	-	50
2本仕立て(短)	2	立体	95.2	38	26	-	64
2本仕立て(長)	2	立体	95.2	50	40	-	90
3本仕立て	3	立体	95.2	38	26	24	88

^a個体当たり

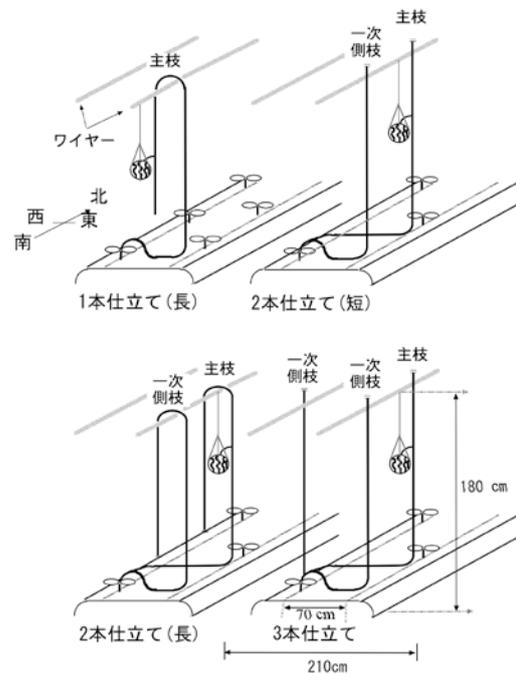


図-10 II章2節の抑制栽培(11月どり)の整枝法の模式図

各整枝法の栽植密度,摘心節位は表-4を参照

ぞれ第26節,第24節で摘心(以下,3本仕立て)の4種とした。なお,整枝法の間単位面積当たりの主枝,側枝数の差を小さくするため,1本仕立て(長)では栽

植密度を他の整枝法（栽植密度 $95.2 \text{ 個体} \cdot \text{a}^{-1}$ ）の2倍（栽植密度 $190.5 \text{ 個体} \cdot \text{a}^{-1}$ ）とした。いずれの整枝法も伸長させた側枝以外は発生次第摘除した。伸長させた主枝あるいは一次側枝は、定植した条部とは反対側の条部まで畝方向と垂直に畝表面を誘引した後、約180cmの高さに張った直径5mmの鋼鉄製のワイヤーからつり下げたひもに固定して徐々に上方に誘引した。ただし、3本仕立ての第24節で摘心した側枝は、定植部直上のワイヤーからつり下げられたひもへ誘引した。2本仕立て（短）、3本仕立ての主枝あるいは一次側枝の摘心位置はほぼワイヤーの高さであったが、1本仕立て（長）と2本仕立て（長）では、主枝あるいは一次側枝をワイヤー位置で折り返して下方に誘引した。

(3) 調査項目

果実の収穫を受粉44～45日後の11月10～24日に行い、1) 早熟栽培と同様に、果実重、果実糖度、葉面積を調査した。なお、各整枝法の個体の配置は10～20個体2反復の乱塊法に準じた配置としたが、果実および葉面積の調査は各区計20～30個体の中から図表中に示した数を採取して行った。

b 結果

1) 早熟栽培（6月どり）

個体当たり葉面積、葉面積指数（Laf area index, 以下LAI）、果実重および果実糖度を表-5に示した。いずれの品種においても1本仕立ての個体当たり葉面積および果実重は、2本仕立て（立・立）、2本仕立て（立

・地）と比べて明らかに小さかった。2本仕立て（立・立）と2本仕立て（立・地）の間では、個体当たり葉面積および果実重の間には有意差は認められなかった。LAIはいずれの整枝法においても1.0以下であった。果実糖度は9.5～11.0の範囲にあったが、いずれの品種においても1本仕立てでやや低くなる傾向がみられた。

図-11に、個体当たり葉面積と果実重の関係を、3種類の整枝法をまとめて品種別に示した。いずれの品種においても、個体当たり葉面積と果実重との間には、相関係数0.8以上の高い正の相関関係が認められた。

表-5 早熟栽培（6月どり）における整枝法が立体栽培スイカ個体の葉面積、果実重および果実糖度に及ぼす影響

品種 整枝法 ^z	葉面積 ^y ($\text{m}^2 \cdot \text{個体}^{-1}$)	LAI ^x ($\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$)	果実重 ($\text{kg} \cdot \text{果実}^{-1}$)	果実糖度 (Brix %)
ハニーシャルマン				
1本仕立て	0.522 b ^w	0.50	2.57 b	9.5 b
2本仕立て(立・立)	0.820 a	0.78	3.27 a	10.4 ab
2本仕立て(立・地)	0.841 a	0.80	3.08 a	10.8 a
吉野				
1本仕立て	0.361 b	0.34	1.90 b	9.8 ab
2本仕立て(立・立)	0.822 a	0.78	3.32 a	10.6 a
2本仕立て(立・地)	0.731 a	0.69	3.19 a	9.5 b
早生天竜				
1本仕立て	0.542 b	0.52	2.10 b	10.0 b
2本仕立て(立・立)	0.943 a	0.90	3.27 a	11.0 a
2本仕立て(立・地)	0.958 a	0.91	2.97 a	11.0 ab

^z表-3、図-9参照

^y果実調査終了後に調査

^x個体当たり葉面積/個体当たり土地面積

^w同一英文字間ではTukey-Kramerの多重検定(危険率5%)で有意差なし(n=9-13)

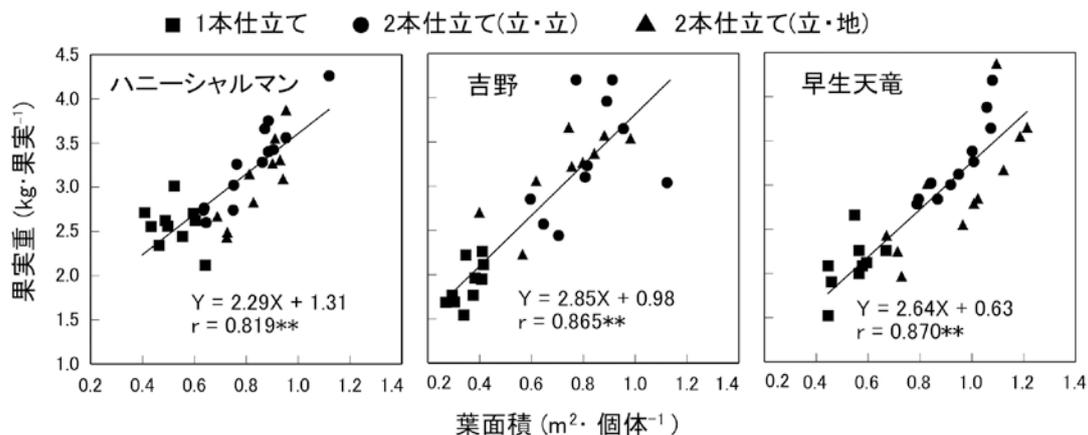


図-11 早熟栽培（6月どり）でのスイカ立体栽培における個体当たり総葉面積と果実重の関係

整枝法は表-3、図-9を参照

図中の式は回帰式

**は1%水準で有意

2) 抑制栽培 (11月どり)

各整枝法における個体当たり葉面積, LAI, 果実重および果実糖度を表-6に示した。個体当たり葉面積および果実重は, 1本仕立て(長)でその他の整枝法よりも明らかに小さかった。また, 2本仕立て(短)の個体当たり葉面積は2本仕立て(長)および3本仕立てよりも小さかったが, この3つの整枝法の間では果実重の差は認められなかった。LAIは1.69~2.13の範囲であった。果実糖度には整枝法の違いによる差はなかった。

1) 早熟栽培と同様に, 個体当たり葉面積と果実重の関係について, すべての整枝法をまとめて, 図-12に示した。個体当たり葉面積と果実重の間には高い正の相関関係が認められた。

早熟栽培と抑制栽培で供試した‘早生天竜’の栽培時

表-6 抑制栽培(11月どり)における整枝法が立体栽培スイカ個体の葉面積, 果実重および果実糖度に及ぼす影響

整枝法 ²	葉面積 ³ (m ² ・個体 ⁻¹)	LAI ⁴ (m ² ・m ⁻²)	果実重 (kg・果実 ⁻¹)	果実糖度 (Brix %)
1本仕立て(長)	1.046 c [*]	1.99	2.15 b	10.3 a
2本仕立て(短)	1.771 b	1.69	3.90 a	10.4 a
2本仕立て(長)	2.225 a	2.12	4.13 a	10.2 a
3本仕立て	2.246 a	2.13	4.37 a	10.4 a

品種: 早生天竜

²表-4, 図-10参照

³果実調査終了後に調査

⁴個体当たり葉面積/個体当たり土地面積

^{*}同一英文字間ではTukey-Kramerの多重検定(危険率5%)で有意差なし[n=10-13(葉面積), n=10-29(果実重), n=10-20(果実糖度)]

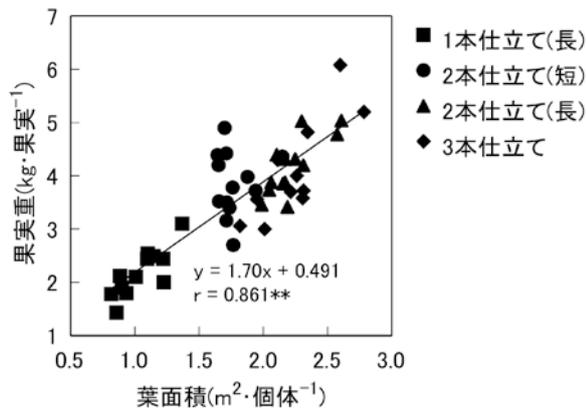


図-12 抑制栽培(11月どり)でのスイカ立体栽培における個体当たり葉面積と果実重の関係

品種: 早生天竜

整枝法は表-4, 図-10を参照

図中の式は回帰式

rは相関係数

**は1%水準で有意

期別の個体当たり葉面積と果実重の関係を図-13に示した。個体当たり葉面積と果実重の回帰直線には差がみられ, 単位葉面積当たりの果実生産効率は早熟栽培のほうが抑制栽培よりも高い傾向が認められた。果実肥大期の積算日射量は, 早熟栽培のほうが抑制栽培よりも多かった(表-7)。

c 考察

メロン, スイカ, カボチャ等のウリ科野菜においては, 個体当たり葉面積が大きいほど果実が大きくなることが報告されている(高木, 1939; 萩原・余吾, 1942; 倉田・水野, 1982)。これらはすべて地ばい栽培において

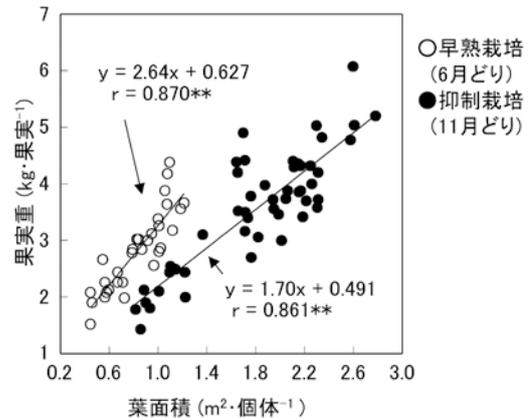


図-13 早熟栽培(6月どり)および抑制栽培(11月どり)でのスイカ立体栽培における個体当たり葉面積と果実重の関係

品種: 早生天竜

図中の式は回帰式

rは相関係数

**は1%水準で有意

表-7 早熟栽培(6月どり)と抑制栽培(11月どり)における‘早生天竜’の果実肥大期間の積算日射量

栽培時期	果実肥大期間 ²	果実肥大期間全体の積算日射量 ³ (MJ・m ⁻²)	日平均積算日射量 (MJ・m ⁻² ・day ⁻¹)
早熟栽培	5月19日 ~6月23日 (35日間)	635	17.6
抑制栽培	10月1日 ~11月15日 (45日間)	594	12.9

²受粉から収穫までの平均期間

³野菜・茶業試験場施設生産部の観測露場の全天日射計(弘引精機, MS-42)の計測値

得られた結果であるが、本試験の結果、主枝や側枝を上方に誘引する立体栽培においても同様であることが明らかとなった。本試験は、基肥無施用でかん水同時施肥を行った早熟栽培（6月どり）と、基肥施用の抑制栽培（11月どり）という異なる肥培管理や作期で行われ、また早熟栽培では3品種を用いて検討した。そのいずれにおいても、整枝法にかかわらず個体当たり葉面積と果実重の間には高い正の相関関係が認められた。早熟栽培では栽植密度 $95.2 \text{ 個体} \cdot \text{a}^{-1}$ 、枝数にして $95.2 \sim 190.5 \text{ 本} \cdot \text{a}^{-1}$ 、LAI 1.0 以下であり（表-3、表-5）、抑制栽培では栽植密度 $95.2 \sim 190.5 \text{ 個体} \cdot \text{a}^{-1}$ 、枝数にして $190.5 \sim 285.2 \text{ 本} \cdot \text{a}^{-1}$ 、LAI 1.7 ~ 2.1 程度であった（表-4、表-6）。従って、少なくともこれらの範囲においては、立体栽培においても個体当たり葉面積と果実重の間には密接な関係があるといえる。

しかしながら、本試験の結果において、個体当たり葉面積と果実重の関係に差異がみられる場合があった。すなわち、抑制栽培において2本仕立て（短）と2本仕立て（長）を比較すると、個体当たり葉面積は2本仕立て（長）で明らかに大きかったが、果実重には有意差が認められなかった（表-6）。また、早熟栽培と抑制栽培で共通して供試した‘早生天竜’で、個体当たり葉面積と果実重の関係を栽培時期別に比較したところ、その回帰直線に違いがみられ、早熟栽培が抑制栽培よりも単位葉面積当たりの果実生産効率が高い傾向がみられた（図-13）。これらの差異は、整枝法の違いによる受光態勢の違いに起因するものと考えられる。整枝法の違いによる受光態勢および光合成速度の差異については、リンゴ、ウンシュウミカン等の果樹で検討がなされている。倉橋・高橋（1994, 1995）は、リンゴ‘ふじ’のY字形棚整枝と主幹形整枝を比較し、Y字形棚整枝の方が収量が多いのは、樹冠専有面積率および最適葉面積指数が高く、受光環境が良好で1樹当たりの光合成速度が高いためであるとしている。また、小野ら（1980）は、ウンシュウミカンについて、果実生産性の高い棚仕立て樹を開心自然形樹と比較し、棚仕立て樹の方が光利用効率がよく、1樹当たりの光合成能が優れているとしている。今回の試験において、抑制栽培の2本仕立て（短）と（長）の間で、個体当たり葉面積は2本仕立て（長）で明らかに大きかったにもかかわらず果実重には有意差が認められなかった理由としては、2本仕立て（短）および（長）の葉面積指数がそれぞれ1.69および2.12であったことから、ワイヤーから下方へ折り返して誘引した2本仕立て（長）では、葉面積の増加の効果が葉の

相互遮へいによる個体当たり受光量の低下によって相殺されたことが考えられる。また、早熟栽培と抑制栽培で共通して供試した‘早生天竜’において早熟栽培が抑制栽培よりも単位葉面積当たりの果実生産効率が高い傾向がみられた理由としては、早熟栽培の方が果実肥大期の積算日射量が多く光条件が良好であったこと（表-7）、およびLAIが小さく（表-5、表-6）受光態勢が良好であったことが考えられる。川信（1997）もスイカの立体栽培において、果実肥大期の積算日射量が果実の大きさに影響することを示唆している。

本試験の結果から、整枝法の違いによる立体栽培スイカの果実重は基本的に個体当たり葉面積によって決定されるものと考えられるが、受光態勢も関与していることが示された。

3 栽植密度の影響

本章のこれまでの検討で、立体栽培スイカにおいては、着果節位が異なる場合も含めて、個体当たり葉面積と果実重の間に正の相関関係が認められることが明らかとなった。一方で、整枝法や栽培時期の違いにより個体当たり葉面積と果実重の関係（回帰直線）に違いがみられる場合があり、立体栽培における果実肥大特性をより詳細に解析するためには、受光態勢についても考慮する必要がある。

一般に、栽植密度と果実重（収量）の間には密接な関係があることが知られている（Willey and Heath, 1969）。スイカの地ばい栽培において、栽植密度の低下により単位面積当たりの果実収量は減少する一方で、個体当たり果実収量、平均果実重が増加する傾向があるが、個体当たり果実収量と比較して果実重の差異は小さい場合が多い（Brinen et al., 1979; NeSmith, 1993; Duthie et al., 1999a, 1999b; Motsenbocker and Arancibia, 2002）。これは、これらの試験が無摘果、無整枝の放任的な地ばい栽培で行われたもので、栽植密度の違いにより着果数が大きく変動する場合が多いことが一因であると思われる。スイカ立体栽培において栽植密度と果実収量の間を調査した例は見当たらないが、整枝・着果制限を前提とする立体栽培においては、栽植密度の違いにより果実重の変動がより大きいものと思われる。このような結果を生じる理由として、栽植密度が低い条件では個体当たり葉面積や受光量の増大により個体当たり光合成生産量が増加することが推察されるが、立体栽培において直接的に個体当たり受光量や光合成を測定して説明したものはない。本試験では、スイカ立体栽培の果実肥

大性と受光態勢との関連を明らかにするために、複数の栽植密度を設定することで個体当たり受光量や光合成生産量を変動させ、果実発育との関係を調査した。

a 材料および方法

1) 供試品種

ユウガオ‘かちどき2号’（萩原農場）に接ぎ木したスイカ‘縞王マックスRE’（大和農園）を材料として用いた。

2) 栽植密度および栽培法

1998年3月12日にユウガオおよびスイカ種子を、パーミキュライトを詰めた育苗箱に播種した。3月27日にあわせ接ぎした後、培養土を詰めた黒色ポリポット（直径7.5cm、高さ7.0cm）に移植してガラス室内で育苗した。栽培は、ガラス温室内で土耕で行った。4月21日に幅210cm（通路含む）の南北方向の畝に1条植えで定植した。栽植密度として52.9、68.0、95.2および158.7個体・a⁻¹（それぞれ株間90cm、70cm、50cmおよび30cm）の4段階を設けた。各栽植密度の個体の配置は15個体2反復の乱塊法の配置とし、調査は各区計30個体の中から所定の数採取して行った。畝はポリフィルム（伊藤忠サンプラス、ムシコンワイド）でマルチした。施肥量は畝面積（全面積の約1/2）当たりで苦土石灰15kg・a⁻¹、CDU化成12.5kg・a⁻¹（N、P₂O₅、K₂O各1.5kg・a⁻¹）とし、畝部のみに施用した。かん水はマルチ内に設置したかん水チューブ（三石アグリ、エバフローA型）で行った。本試験の整枝法は本章1節とほぼ同様とした（図-3）。すなわち、定植後、苗の主枝を本葉4～5枚残して摘心し、2本の一次側枝を伸長させて一次側枝2本仕立てとした。発生した他の側枝はすべて除去した。伸長させた側枝は、約180cmの高さに張った直径5mmの鋼鉄製のワイヤーからつり下げたポリエチレン製のひもで上方に誘引した。受粉は人手で行い、1個体当たり1果をどちらか一方の側枝の第15節を目標に着果させた。側枝はワイヤーの地上高さに相当する第22節で摘心した。15cm角に切った白色寒冷紗を底部に付けて十文字に結んだポリエチレン製のひもを用いて果実を支持し、側枝を誘引したものと同一ワイヤーからつり下げた。

3) 調査項目

(1) 個葉の葉面積算日射量の測定

果実肥大期の6月12日（受粉26～30日後に相当）

に、各栽植密度から着果枝が東側、無着果枝が西側に誘引された5個体を選び、計10本の一次側枝の第2葉以上のすべての葉の中央部に20mm×35mmの大きさの積算日射計測フィルム（大成イーアンドエル、オプトリーフR-2D）を貼付した。積算日射計測フィルムには、フィルムの積算日射量算出用の季節毎の簡易検量線が用意されているが、フィルムの退色は温度が高いほど早くなるため、実際の測定時に日射計との間で検量線を作成したほうが精度の高い測定が可能となる（渡邊ら、2001）。よって、フィルムの積算日射量算出のための回帰式を作成するため、ハウス内の遮へい物のない場所にフィルムと全天日射計（英弘精機、MS-42）を設置した。6月17日にフィルムを回収し、オプトリーフ測定器（大成イーアンドエル、T-METER）で470nmの吸光度を測定し、退色率を算出した。遮へい物のない場所に設置したフィルムの退色率と全天日射計の計測値から回帰式（ $y = -97.03x + 194.1$, x , フィルムの退色率; y , 積算日射量）を作成して測定期間中の各葉に設置したフィルムの積算日射量を算出し、葉面積算日射量とした。

(2) 個葉の光合成速度の測定

果実肥大期の晴天日を選び、携帯型光合成蒸散測定装置（Li-Cor, LI-6400）を用いて着果枝の第2葉以上のすべての葉の光合成速度を測定した。なお、本測定に先立って、1997年に測定時の葉の光条件が光合成速度に及ぼす影響について予備検討した。各栽植密度について、6月8日に各2個体、12日、15日、18日に各1個体の計5個体について個葉の光合成速度を測定した。原則として、光合成速度の測定部位は葉の先端部付近とし（図-14）、10:00～14:00の間に測定を行った。測



図-14 光合成速度の測定部位

定時の測定チャンバー内の葉温および空気の流速の設定はそれぞれ 30°C および $500\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$ とし、 CO_2 濃度、湿度は制御しなかった。光源は赤色 LED であった。

(3) 果実の調査

受粉 40 日後に果実を収穫し、果実の重量と糖度を測定した。糖度は、果実の中心部から採取した果肉汁液を糖度計（アタゴ、P-1）で測定した。

(4) 葉面積の測定

果実収穫後に各栽植密度から 15 個体を選び、葉面積を面積計（林電工、AC-440）で測定した。うち各 5～6 個体については、個体当たり受光量および光合成速度を算出するため個葉毎に葉面積を測定した。

(5) 個体当たり受光量および光合成生産量の算出

葉位別の葉面積算日射量 ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$) と収穫時に調査した葉位別の葉面積 ($\text{m}^2\cdot\text{葉}^{-1}$) から測定期間中の個葉当たり受光量 ($\text{MJ}\cdot\text{葉}^{-1}$) を算出し、この値を個体毎に積算することにより個体当たり受光量 ($\text{MJ}\cdot\text{個体}^{-1}$) を算出した。

同様に、葉位別の光合成速度 ($\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) と収穫時に調査した葉位別の葉面積 ($\text{m}^2\cdot\text{葉}^{-1}$) から個葉当たり光合成速度 ($\mu\text{molCO}_2\cdot\text{葉}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$) を算出し、着果枝毎に積算することにより着果枝当たり光合成速度 ($\mu\text{molCO}_2\cdot\text{着果枝}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$) を算出した。2 本仕立てであることから、この値を 2 倍して個体当たり光合成速度 ($\mu\text{molCO}_2\cdot\text{個体}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$) とし、個体当たり光合成生産量とみなした。

b 結果

1) 果実重、糖度および個体当たり葉面積

各栽植密度での個体当たり葉面積、LAI、果実重、果実収量および果実糖度を表-8 に示した。個体当たり葉面積は、栽植密度が高くなるに従って小さくなる傾向が認められた。LAI は栽植密度が高くなるに従って増加した。果実重は、栽植密度が $52.9\text{個体}\cdot\text{a}^{-1}$ 、 $68.0\text{個体}\cdot\text{a}^{-1}$ 、 $95.2\text{個体}\cdot\text{a}^{-1}$ 、 $158.7\text{個体}\cdot\text{a}^{-1}$ と高まるに従って 8.65kg、7.86kg、6.53kg、4.46kg と有意に減少し、その減少程度は個体当たり葉面積のそれと比べて大きかった。一方、果実収量は栽植密度が高くなるに従って高くなった。果実糖度は 10.8～11.2 の範囲であり、栽植密度による一定の傾向は認められなかった。

2) 葉位別の葉面積算日射量

測定期間中、ガラス室内の遮蔽物のない部分の全天日射量は $34.4\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ であった。各栽植密度の個体の葉位別の葉面積算日射量を図-15 に示した。いずれの栽植密度においても葉位の低下に従って葉面積算日射量が低下した。栽植密度による上位葉の葉面積算日射量の差は比較的小さかった。栽植密度が高くなるに従って、下位葉の葉面積算日射量の低下程度が大きくなる傾向が認められ、特に栽植密度が最も高かった $158.7\text{個体}\cdot\text{a}^{-1}$ で低下程度が大きい傾向が認められた。

3) 葉位別の光合成速度

まず、予備検討の結果について表-9 に示した。個葉の光合成速度は、測定葉の置かれていた光条件の影響を強く受けた。直射光を受けていた葉では葉面の

表-8 栽植密度が立体栽培スイカの葉面積、果実重、果実収量および果実糖度に及ぼす影響

栽植密度 (個体 $\cdot\text{a}^{-1}$)	葉面積 ^z ($\text{m}^2\cdot\text{個体}^{-1}$)	LAI ^y	果実重 ($\text{kg}\cdot\text{果実}^{-1}$)	果実収量 ^x ($\text{kg}\cdot\text{a}^{-1}$)	果実糖度 (Brix %)
52.9	1.88 a ^w	1.00	8.65 a	458	10.8 ab
68.0	1.78 ab	1.21	7.86 b	535	11.1 ab
95.2	1.77 ab	1.68	6.53 c	622	11.2 a
158.7	1.61 b	2.55	4.46 d	709	10.8 b

品種: 綺王マックスRE

^z果実調査終了後に調査

^y個体当たり葉面積/個体当たり土地面積

^x果実重 \times 栽植密度

^w同一英文字間ではTukey-Kramerの多重検定(危険率5%)で有意差なし
[n=15(葉面積), n=19~22(果実重), n=15~17(果実糖度)]

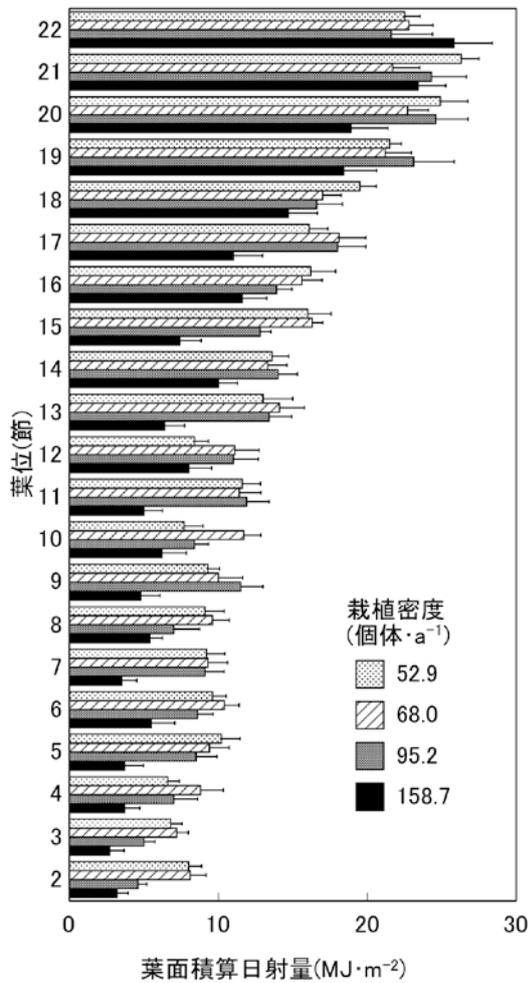


図-15 立体栽培スイカ個体の果実肥大期の葉位別の葉面積算日射量に及ぼす栽植密度の影響
 品種：縞王マックスRE
 積算日射量はオプトリーフ (R-2D) で測定
 誤差線はSE (n=10)

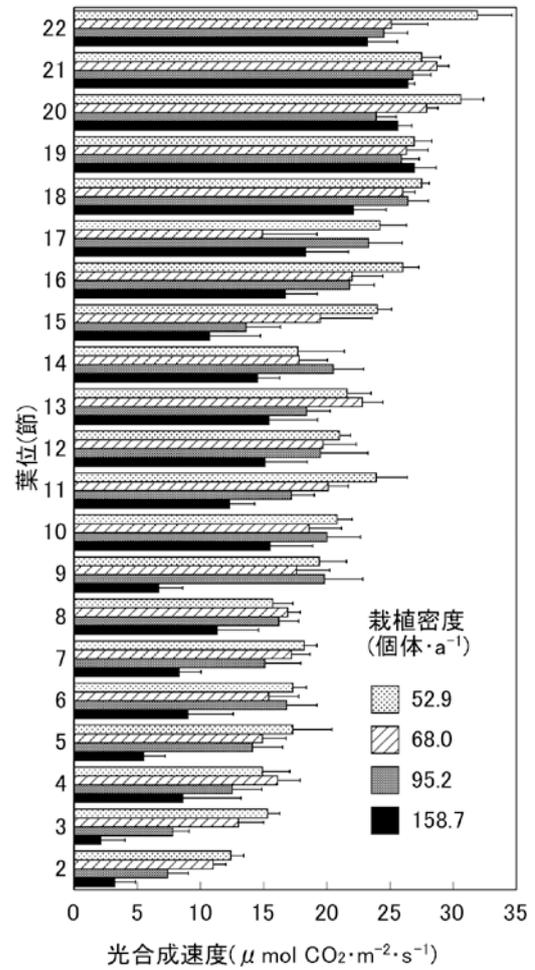


図-16 立体栽培スイカ個体の果実肥大期の葉位別光合成速度に及ぼす栽植密度の影響
 品種：縞王マックスRE
 携帯型光合成蒸散測定装置 (LI-6400) で測定
 測定チャンバーの葉温は28℃, PPFDは1200 μmol·m⁻²·s⁻¹とした
 誤差線はSE (n=5)

表-9 立体栽培スイカの個葉の光合成速度および気孔コンダクタンスに及ぼす測定葉の光前歴の影響

葉位	測定時の葉の光条件		光合成速度 ($\mu\text{mol}\cdot\text{CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	気孔コンダクタンス ($\text{mol}\text{H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
	状態	葉面でのPPFD ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)		
第15葉	直射光	1,100-1,200	24.9±1.4 ^z (100) ^y	0.470±0.034 ^z
	葉陰	30-120	6.0±1.7 (24.1)	0.045±0.013
第30葉	直射光	1,100-1,200	26.9±0.6 (100)	0.442±0.039
	葉陰	30-120	12.1±2.6 (45.0)	0.093±0.022

品種：早生天竜

測定チャンバー内の条件：PPFD 1200 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 空気の流速500 $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$, 葉温30℃

^z平均値±SD (n=5)

^y()内は直射光を受けていた葉の値を100とした場合の相対値

PPFDが1100~1200 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ であり、光合成速度が25~27 $\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ と高かったのに対し、日陰の葉では葉面のPPFDが30~120 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ であり、強光条件で測定しても光合成速度は直射光を受けていた葉の24~45%であった。気孔コンダクタンスも葉陰の葉で顕著に低かった。この結果と、暗条件に置かれた葉の光照射後の5分間の気孔の動きは緩慢であることが報告されている(難波ら, 2004)ことから、弱光条件下に置かれている葉について、携帯型光合成蒸散測定装置を用いた短時間での測定であれば、強光条件で測定しても直ちに気孔が開くことはなく光合成速度の過大評価は起こらず、実際の光合成速度をほぼ測定できるものと判断し、測定の効率化を優先して、測定時の光条件は1200 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ とした。

各栽植密度での葉別光合成速度を図-16に示した。個葉の葉面積算日射量と同様に、いずれの栽植密度にお

いても葉位の低下に従って個葉の光合成速度が低下した。栽植密度による上位葉の光合成速度の差は比較的小さかった。葉位の低下に伴って、栽植密度の間での光合成速度の差異が大きくなる傾向が認められた。また、栽植密度が高いほど、下位葉の光合成速度の低下程度が大きくなる傾向が認められた。

4) 葉位別の葉面積

各栽植密度区の葉別葉面積を図-17に示した。いずれの栽植密度においても、中位~上位葉では個葉面積の差異は概して小さかったが、下位葉では葉位の低下に伴って個葉面積が徐々に減少した。下位葉では栽植密度による個葉面積の差は小さかったが、中位~上位葉では栽植密度が高いほど、個葉面積が小さくなる傾向が認められた。

5) 個体当たり葉面積、受光量、光合成生産量と果実重の関係

個体当たり葉面積と果実重の関係を図-18に示した。各栽植密度においては、個体当たり葉面積と果実重の間には高い正の相関関係が認められた。栽植密度の違いにより、個体当たり葉面積と果実重の関係(回帰直線)には差異がみられ、栽植密度が低いほど、葉面積当たりの果実重は大きくなる傾向が認められた。

個体当たり受光量と果実重の関係を図-19に示した。個体当たり受光量は栽植密度が高くなるに従って小さく

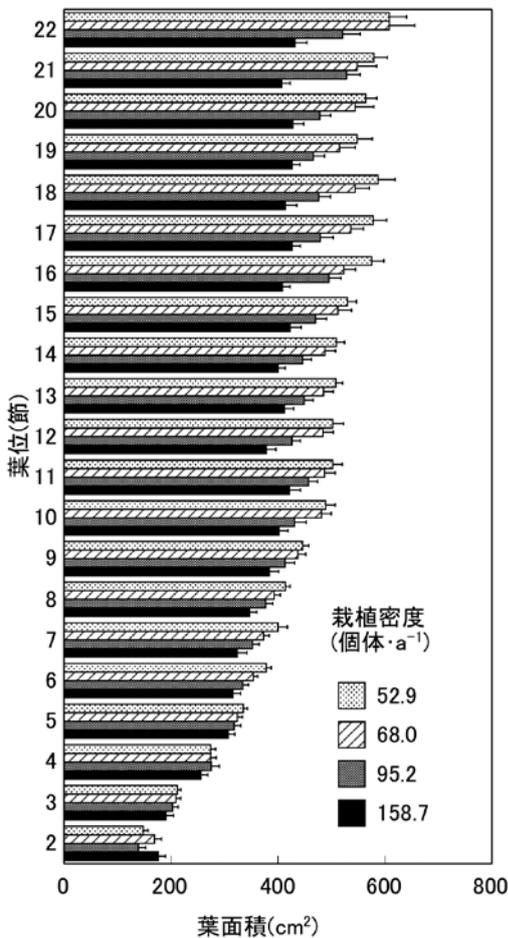


図-17 立体栽培スイカ個体の収穫期の葉位別葉面積に及ぼす栽植密度の影響
品種：縞王マックス RE
誤差線は SE (n=10-12)

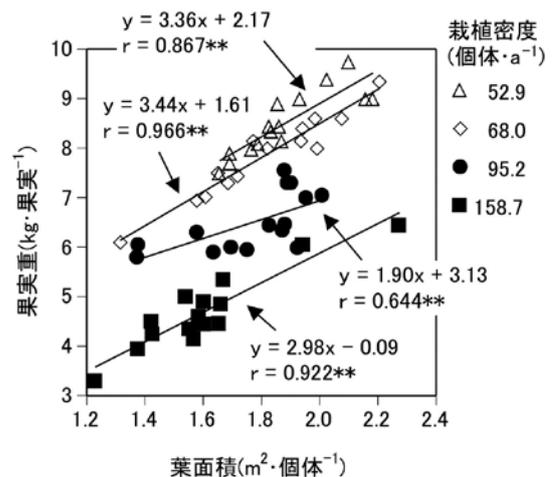
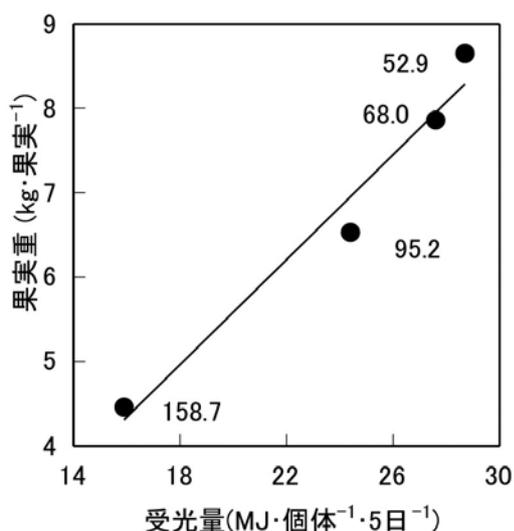
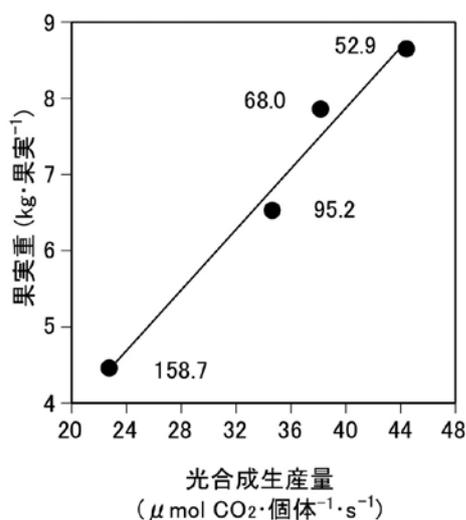


図-18 栽植密度の違いによる個体当たり葉面積と果実重の関係の差異
品種：縞王マックス RE
図中の式は回帰式
rは相関係数
**は1%水準で有意



図－19 個体当たり受光量と果実重の関係
品種：綺王マックスRE
図中の数値は栽培密度(個体・a⁻¹)を示す



図－20 個体当たり光合成生産量と果実重の関係
品種：綺王マックスRE
図中の数値は栽培密度(個体・a⁻¹)を示す

なった。個体当たり受光量と果実重の間には、明確な比例関係が認められた。すなわち、栽培密度を52.9個体・a⁻¹から158.7個体・a⁻¹へ高めることにより個体当たり受光量が28.7MJ・個体⁻¹・5日⁻¹から15.9MJ・個体⁻¹・5日⁻¹へとほぼ半減し、果実重も同様に8.65kgから4.46kgへとほぼ半減した(表－8)。

個体当たり光合成生産量と果実重の関係を図－20に示した。個体当たり受光量と同様に、個体当たり光合成生産量も栽培密度が高くなるに従って小さくなったが、個体当たり光合成生産量と果実重の間にも明確な比例関

係が認められた。すなわち、栽培密度を52.9個体・a⁻¹から158.7個体・a⁻¹へ高めることにより個体当たり光合成生産量が44.4μmolCO₂・個体⁻¹・s⁻¹から22.8μmolCO₂・個体⁻¹・s⁻¹へとほぼ半減し、果実重の減少程度とよく一致した。

c 考察

本試験の結果から、これまでスイカの地ばい栽培で報告されているように(大場ら, 1980; Brinen et al., 1979; NeSmith, 1993; Sanders et al., 1999), スイカの立体栽培においても果実肥大は栽培密度の影響を受け、栽培密度を高くすることにより果実重が小さくなることが明らかとなった。葉位別の葉面積算日射量および光合成速度は、いずれの栽培密度においても葉位の低下に従って低下したが、その低下程度は栽培密度が高いほど大きい傾向が認められた(図－15, 図－16)。このことは、栽培密度が高いほど中位～下位葉の葉面積算日射量が少なく、その結果これらの葉の光合成速度が低下したことを示している。また、上位～中位の個葉面積は栽培密度が高いほど小さく(図－17)、上述の個葉の葉面積算日射量および光合成速度を勘案すると、栽培密度が高いほど、上～中位葉の葉当たり光合成生産量が小さかったといえる。この結果、栽培密度が高くなるに従って、個体当たり光合成生産量が減少し、果実が小さくなったものと考えられる。

本試験の結果、栽培密度毎に果実肥大期間中に測定した葉位別の葉面積算日射量あるいは光合成速度と収穫時の葉位別の葉面積から算出した個葉当たり受光量あるいは光合成速度を積算し、個体当たり受光量あるいは光合成生産量を算出したところ、各栽培密度の果実重との間に密接な関係が認められた(図－19, 図－20)。本試験では、果実肥大期間中のある時期の受光量や光合成生産量あるいは葉面積しか調査していないので、厳密には果実肥大期全体の個体当たり受光量や光合成生産量を算出したわけではない。しかし、本試験と同様の整枝法・着果節位で果実肥大期間中の葉面積の推移を検討した本章1節の結果(第14～16節着果)によると、個体当たり葉面積は受粉5日の時点ですでに収穫時の葉面積の約80%、受粉20日後では収穫時の葉面積に達していたことから、果実肥大期の葉面積の推移は比較的小さいと思われる。よって、本試験で算出した個体当たり受光量の差異の傾向は、かなりの程度果実肥大期全期間の傾向を反映しているものと考えられる。

以上のことから、立体栽培における栽培密度の違いに

よる果実肥大の差異は、主として個体の受光量の差異がもたらす光合成生産力の差異によって生じるといえる。言い換えると、スイカの果実重は個体当たり受光量や光合成生産量によってほぼ決まるといえる。

また、本試験の結果において、各栽植密度内においては個体当たり葉面積と果実重の間には高い正の相関関係がみられたが、その関係（回帰直線）には栽植密度間で差異がみられ、栽植密度が低いほど、葉面積当たりの果実重は大きくなる傾向がみられた（図-18）。一方で、個体当たり受光量および光合成生産量と果実重との間には、明確な比例関係が認められ、栽植密度を52.9個体・a⁻¹から158.7個体・a⁻¹へ高めることにより個体当たり受光量および光合成生産量、果実重ともほぼ同様に半減し、減少程度がほぼ一致した（図-19、図-20）。このことから、栽植密度や栽植様式が大きく異なる個体の果実肥大特性を比較する場合には、個体の葉面積よりも受光量や光合成生産量を指標としたほうが、受光態勢等も包括した総合的な特性の比較が可能になるものと考えられた。

4 本章の考察

本章では、スイカ立体栽培個体の果実肥大に及ぼす着果節位、整枝法および栽植密度の影響について検討した。その結果、着果節位の影響については、着果節位が高いほど果実肥大期を通して個体当たり葉面積が大きく、受粉5日後、20日後および40日後（収穫時）の葉面積と収穫時の果実重との間にはいずれも高い正の相関関係が認められたことから、着果節位の違いによる果実肥大の違いは、主として果実肥大期の個体当たり葉面積の差異によって生じると考えられた。また、整枝法の影響については、整枝法にかかわらず個体当たり葉面積と果実重の間には高い正の相関関係が認められたことから、整枝法の違いによる果実重の違いは、着果節位と同様に、主として葉面積の違いによるものであると考えられた。しかし、栽培時期の違いや、LAIの大きな違いにより、個体当たり葉面積と果実重の関係（回帰直線）に差異がみられる場合があった。栽植密度の影響については、同じ栽植密度内では個体当たり葉面積と果実重の間には高い正の相関関係が認められたが、異なる栽植密度の間では、個体当たり葉面積と果実重の関係（回帰直線）に差異がみられる場合があった。そして、積算日射計測フィルムによる葉面積算日射量、携帯型光合成蒸散測定装置による個葉光合成速度および個葉面積から個体当たり受光量や光合成生産量を算出して果実重との関係をみたところ、

いずれも果実重と量的な比例関係が認められた。以上のことから、立体栽培スイカ個体の果実肥大性の違いは、栽培時期が同じでかつ栽植密度、栽植様式がある程度の範囲内である場合には主に個体当たり葉面積の違いによって説明可能であるが、栽培時期や栽植密度、栽植様式が大きく異なる個体の果実肥大特性を比較する場合には、個体の葉面積よりも受光量や光合成速度を指標としたほうが、汎用的な比較が可能になるものと考えられた。

III 立体栽培スイカの果実肥大期における光合成産物のソース・シンク関係

前章において、スイカ果実の大きさは、果実肥大期の光合成生産量の指標となる個体当たり葉面積と高い正の相関関係があり、個体当たり受光量や光合成生産量でほぼ決定されることが示された。緒言でも述べたとおり、一般に穀類では、稔実に対する植物体各部分の貢献の程度は、置かれた条件の下でどれだけの光合成産物を作り出すかということと、作り出した光合成産物のうちどれだけの部分を収穫対象部分に送るかという、2つの要因によって決まる（玖村，1984）。同様に、スイカの果実の大きさも、個体の光合成生産量と、光合成産物の果実への転流・分配量によって決定されるといえる。立体栽培スイカの果実生産特性を決定する要因をより明確にするためには、果実肥大期の光合成産物の転流・分配の様相、すなわち光合成産物の供給器官（ソース器官）と受容器官（シンク器官）の相互関係（ソース・シンク関係）について明らかにする必要がある。

果実肥大期のソース・シンク関係を明らかにするための光合成産物の転流・分配を解析する手段としては、炭素の放射性同位体（¹⁴C）や安定同位体（¹³C）を用いたトレーサー法が有効である。特に安定同位体である¹³Cは、¹⁴Cに比べて検出感度が劣る短所があるが、屋外での使用が可能であり、実際の栽培条件に近い状態での光合成産物の動態について比較的容易に調べることができる利点がある。

本章では、スイカ立体栽培における果実肥大期の異なる葉位の葉が果実肥大にどのように寄与しているのかを明らかにすることを目的として、¹³Cトレーサー法により果実肥大期の光合成産物の転流・分配を解析した。

1 2本仕立て1果どり栽培におけるソース・シンク関係

II章2節でも述べたとおり、地ばい栽培を含めたス

イカ生産は、立体栽培における1本仕立て1果どりを除いて、2～3本仕立て1果どりあるいは4～5本仕立て2果どり等、着果枝と無着果枝が混在する整枝法で行われる場合が多い（高橋，2000）。本節では、地ばい栽培に替わる栽培法としての立体栽培の評価という視点から、まず着果枝と無着果枝が混在する2本仕立て1果どりについて検討を行った。

a 材料および方法

1) 供試品種および栽培法

スイカ品種「縞王マックスRE」を材料として用いた。1999年3月19日にロックウール細粒綿を千鳥状に詰めた72穴セルトレイに播種し、ガラス室内で育苗した。数日間は水のみをかん水し、その後は $EC0.6dS \cdot m^{-1}$ の大塚A処方液を苗の生育に従って $0.6 \sim 1.2dS \cdot m^{-1}$ の濃度でかん水した。1999年4月17日に、ガラス室内の保水シート耕方式（図-21，岡野ら，1999）のコンテナ（長さ64cm×幅39cm×深さ13cm）に株間30cmで1コンテナ当たり2個体を定植し、養液栽培を行った。培養液は $EC 1.2 dS \cdot m^{-1}$ の大塚A処方液とし、余剰培養液をコンテナ側面に開けた穴から排出するかけ流し方式とした。整枝法は、主枝を本葉5～6葉で摘心した後、2本の一次側枝を伸長させ、一次側枝2本仕立てとした。伸長させた一次側枝は、約180cmの高さに設置した金属製のパイプからつり下げたひもに固定して徐々に上方に誘引した。受粉は人手で行い、1個体当たり1果をいずれかの側枝の第10～13節に着果させた。15cm角に切った白色寒冷紗を底部に付けて十字字に結んだポリエチレン製のひもを用いて果実を支持し、側枝を誘引

したものと同一パイプからつり下げた。伸長させた一次側枝は第23節で摘心し、その他の側枝は発生次第除去した。

2) $^{13}CO_2$ の処理法および分析法

果実肥大期間中の晴天日を選び、 $^{13}CO_2$ 処理を行った。受粉6～8日後（果実肥大初期）、21～22日後（果実肥大中期）および38～41日後（果実肥大終期）に相当する5月29日、6月10日および6月28日にそれぞれ4個体を選び、着果枝の第18～20葉（着果枝上位葉）および第3～5葉（着果枝下位葉）、無着果枝の第18～20葉（無着果枝上位葉）および第3～5葉（無着果枝下位葉）に $^{13}CO_2$ を処理した（図-22）。なお、用いた品種のこの栽培時期での収穫期は受粉後約40日である。 $^{13}CO_2$ 処理は各処理日とも8:30～16:00に行った。ゴム栓付きの500ml三角フラスコにHCl添加用1本、 $^{13}CO_2$ 導入用3本の計4本のガラス管を通し、それぞれにビニールチューブを接続した。各処理部位の3枚の処理葉は、個葉単位でポリエチレンバッグで覆い、 $^{13}CO_2$ 導入用のビニールチューブを各バッグに1本ずつ接続して密封した。フラスコ内に8gの ^{13}C 標識炭酸バリウム ($Ba^{13}CO_3$, 99atom% ^{13}C) を入れ、1N HClを30分間隔で1回当たり8mlずつプラスチックシリンジで加えて $^{13}CO_2$ を発生させた。処理葉を覆ったポリエチレンバッグにフラスコ内で発生した $^{13}CO_2$ を確実に導入するため、観賞魚用のエアポンプでフラスコ内に適宜送気した。 $^{13}CO_2$ 処理終了約48時間後に、処理個体を部位別にサンプリングした（図-22）。なお、サンプリングした葉部、茎部の節位の範囲については、着果位置や処理葉の位置によってずれが生じる（例えば、上位葉処理では第18～20葉に $^{13}CO_2$ を処理するので、第20葉は「処理葉」となり、部位「第20～23葉」は第20葉を除いた「第21～23葉」となる）が、平均的な節位の範囲をその部位の名称とした（図-22）。各部位のサンプルは、果実は2週間程度、その他の部位は数日間70～80℃で乾燥した。乾燥試料は振動粉砕器（平工製作所、TI-100）で微粉砕し、赤外分光法（JASCO EX-130 $^{13}CO_2$ アナライザー）で試料中の ^{13}C 存在比（atom% excess）を測定した（Okano et al., 1983）。なお ^{13}C 存在比は、各部位の ^{13}C 濃度が自然状態よりもどれだけ高くなっているか、すなわち $^{13}CO_2$ 処理によってどれだけ各部位の ^{13}C 濃度が高まったかを示している。各部位中の ^{13}C 存在量は、植物組織の全炭素含有率を40%と仮定して、次式のように計算した。

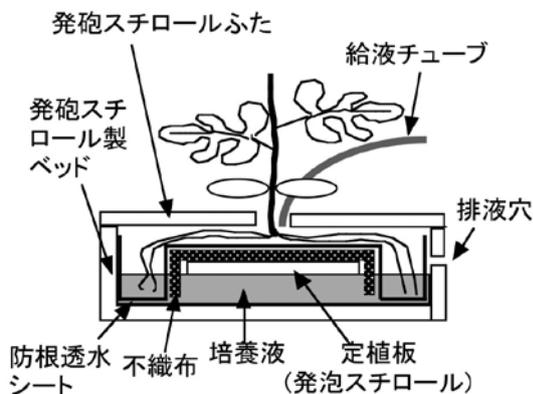


図-21 保水シート耕コンテナ内部の断面図

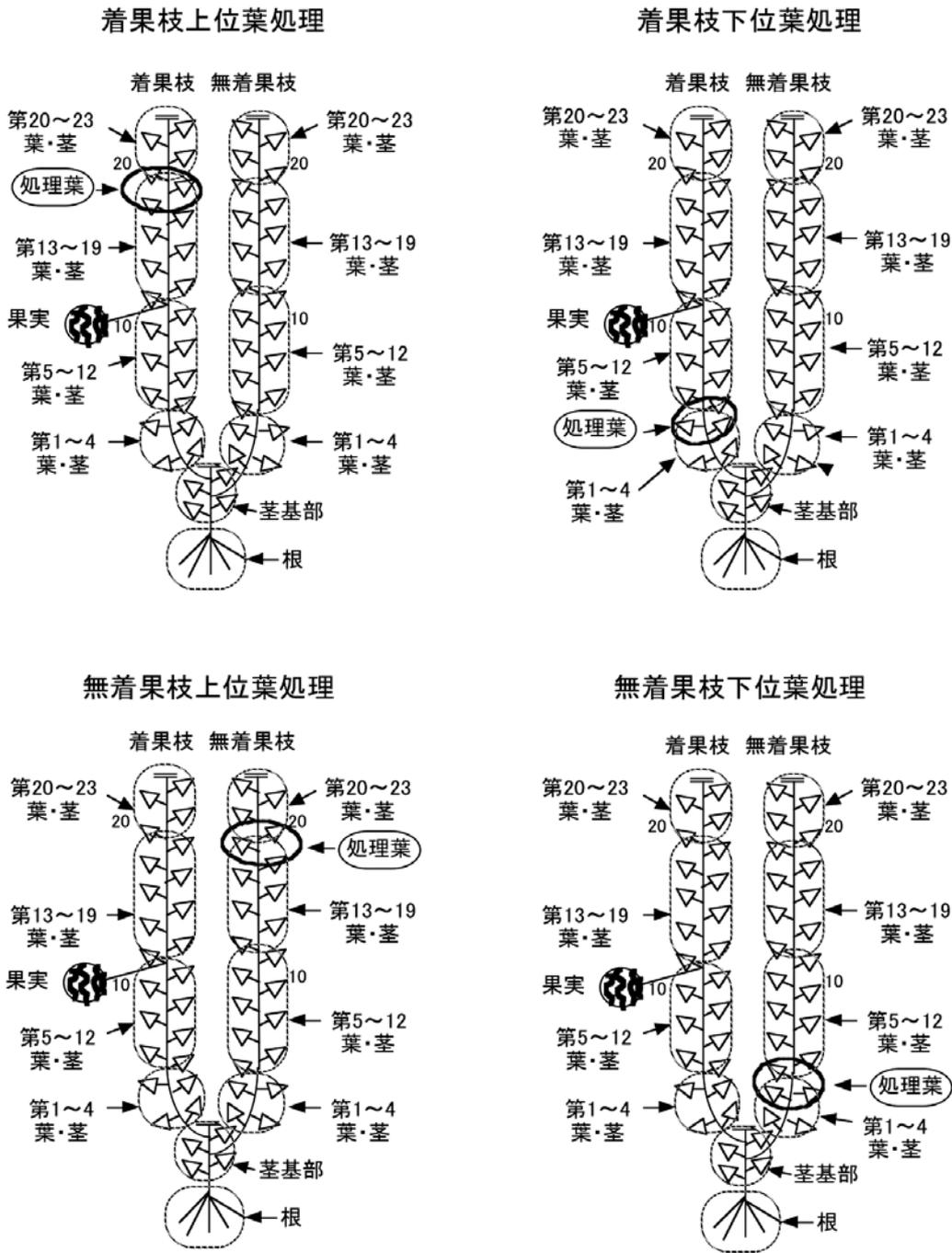


図-22 2本仕立て1果どり栽培での¹³CO₂処理部位およびサンプリング部位の位置関係
○は処理部位

^{13}C 存在量 = 乾物重 × 全炭素含有率 × ^{13}C 存在比
そして、以下の式により処理葉からの ^{13}C の転流率と各部位への ^{13}C 分配率を算出した。

$$^{13}\text{C} \text{ 転流率 (\%)} = (\text{処理葉を除く総 } ^{13}\text{C} \text{ 存在量} / \text{処理葉を含めた総 } ^{13}\text{C} \text{ 存在量}) \times 100$$

$$^{13}\text{C} \text{ 分配率 (\%)} = (\text{各部位の } ^{13}\text{C} \text{ 存在量} / \text{処理葉を除く}$$

$$\text{総 } ^{13}\text{C} \text{ 存在量}) \times 100.$$

なお、本実験では呼吸による ^{13}C 損失は考慮外とした。

b 結果

果実肥大期間中の植物体の乾物重の推移を図-23に示した。日数の経過に伴って植物体全体の乾物重は増加

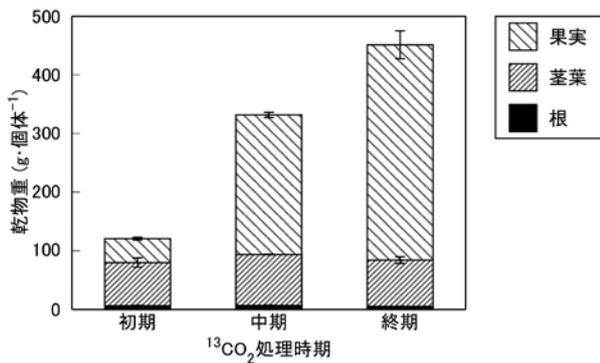


図-23 2本仕立て1果どり栽培における果実肥大各時期の立体栽培スイカの部位別乾物重
 品種：縞王マックスRE
 誤差線はSE(n=4)
 初期，受粉6～8日後；中期，受粉21～22日後；終期，受粉38～41日後

した。果実の乾物重も日数の経過に伴って増加した。茎葉および根の乾物重は果実肥大期間を通してほとんど変化しなかった。よって、果実肥大期間中の植物体全体の乾物重の増加は、果実乾物重の増加によるものであった。果実肥大終期の乾物重の割合は、果実が81%、根が1%、茎葉部が18%であった。なお、ほぼ果実収穫期に相当する果実肥大終期の果実の新鮮重の平均値は5.4kgであった。

果実肥大各時期の¹³C転流率を図-24に示す。着果枝上位葉処理では、処理葉からの¹³C転流率は、果実肥大期を通して66～91%、また無着果枝上位葉処理でも果実肥大期を通して70～90%であり、上位葉処理の場合は果実肥大期間を通して¹³C転流率が高かった。着果枝下位葉処理では、果実肥大初期および中期の¹³C転流率は83～87%と高かったが、果実肥大終期では46%に低下した。また、無着果枝下位葉処理でも、果実肥大初期および中期の¹³C転流率は75～84%と高かったが、果実肥大終期では51%に低下した。処理部位にかかわらず、果実肥大中期の¹³C転流率が最も高くなる傾向が認められた。

果実肥大各時期の¹³CO₂処理葉以外の各部位の¹³C存在比を表-10に示した。¹³CO₂の処理部位にかかわらず、果実肥大初期および中期では、¹³C存在比は果実で最も高かった。果実の¹³C存在比は、¹³CO₂の処理部位にかかわらず果実肥大初期で最も高く、果実肥大中期または終期で急激に低下した。根の¹³C存在比は、果実肥大期間を通して無着果枝上の葉に¹³CO₂処理を行った場合に0.1 atom% excess以上と高かった。無着果枝に¹³CO₂

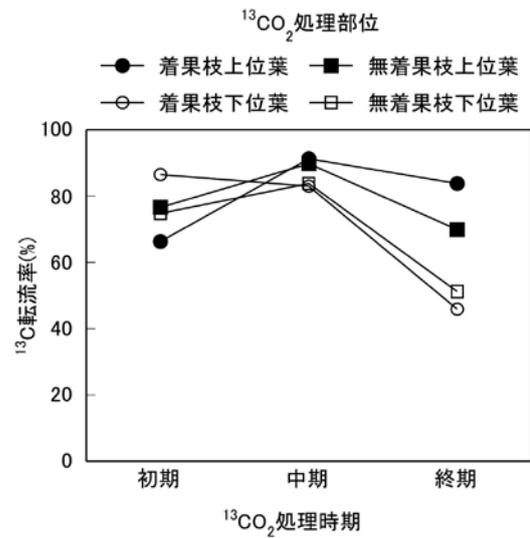


図-24 2本仕立て1果どり栽培における果実肥大各時期の立体栽培スイカの¹³C転流率
 品種：縞王マックスRE
 初期，受粉6～8日後；中期，受粉21～22日後；終期，受粉38～41日後

処理を行った場合、根の¹³C存在比は果実肥大初期で最も高く、果実肥大中期でほぼ半減し、果実肥大終期では変化しなかったか、やや上昇した。茎部の¹³C存在比は、¹³CO₂処理葉と果実の間に位置する茎部で比較的高い値を示した。葉部の¹³C存在比は、¹³CO₂処理時にまだ展開中であった果実肥大初期の第20～23葉部を除いて、¹³CO₂処理部位にかかわらず、ほぼゼロであった。

果実肥大各時期における各部位への¹³C分配率を表-11に示した。¹³CO₂処理部位にかかわらず、果実肥大期間を通して処理葉から他の部位に転流した¹³Cの90%以上は果実へ分配された。¹³CO₂処理部位にかかわらず、果実への¹³C分配率は、果実肥大中期で最も高くなる傾向が認められた。¹³Cの根への分配は、果実肥大期間を通して無着果枝上の葉から行われ、着果枝上の葉からはほとんど行われなかった。果実肥大初期では、摘心直後で着果枝および無着果枝の先端2、3枚の葉が展開中であったこともあり、着果枝、無着果枝とも、上位葉から上の先端部分(第20～23葉部および茎部)へ¹³Cが若干分配されていた。これらの葉が十分に展開した果実肥大中期および終期ではこれらの部位への¹³Cの分配はほとんどみられなかった。

c 考察

本試験で用いた¹³CO₂の処理手法は非常に簡便であり、

表-10 2本仕立て1果どりの立体栽培スイカにおける¹³CO₂処理2日後の各部位の¹³C存在比(atom% excess)

部位	¹³ CO ₂ 処理葉の位置 ¹⁾ および処理時期 ²⁾												
	着果枝						無着果枝						
	上位葉			下位葉			上位葉			下位葉			
		初期	中期	終期									
着果枝	第20-23 葉	0.29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
	第20-23 茎	1.09	0.07	0.09	0.03	0.00	0.02	0.00	0.02	0.03	0.00	0.00	0.05
	第13-19 葉	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	第13-19 茎	0.80	0.08	0.28	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.00	0.01
	第5-12 葉	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
	第5-12 茎	0.05	0.00	0.01	0.28	0.08	0.14	0.12	0.03	0.12	0.12	0.02	0.11
	第1-4 葉 第1-4 茎	0.01 0.00	0.00 0.01	0.02 0.00	0.00 0.36	0.00 0.00	0.03 0.29	0.00 0.19	0.00 0.00	0.00 0.15	0.00 0.07	0.00 0.04	0.00 0.07
無着果枝	第20-23 葉	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
	第20-23 茎	0.01	0.00	0.00	0.03	0.05	0.00	0.41	0.00	0.13	0.00	0.00	0.01
	第13-19 葉	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
	第13-19 茎	0.04	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.59	0.04	0.19	0.00	0.00	0.02
	第5-12 葉	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00
	第5-12 茎	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18	0.01	0.14	0.03	0.02	0.04
	第1-4 葉 第1-4 茎	0.02 0.03	0.01 0.01	0.01 0.00	0.01 0.01	0.00 0.00	0.00 0.00	0.00 0.14	0.00 0.00	0.01 0.12	0.01 0.30	0.01 0.17	0.00 0.17
果実	1.33	0.32	0.17	1.68	0.21	0.06	1.21	0.24	0.16	0.70	0.21	0.04	
茎基部	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.09	0.01	0.03	0.05	0.04	0.03	
根	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.30	0.13	0.29	0.38	0.18	0.17	

品種: 縞王マックスRE
¹⁾図-22を参照
²⁾初期, 受粉6-8日後; 中期, 受粉21-22日後; 終期, 受粉38-41日後

表-11 2本仕立て1果どりの立体栽培スイカにおける¹³CO₂処理2日後の各部位の¹³C分配率(%)²⁾

部位	¹³ CO ₂ 処理葉の位置 ¹⁾ および処理時期 ²⁾												
	着果枝上位葉			着果枝下位葉			無着果枝上位葉			無着果枝下位葉			
	初期	中期	終期	初期	中期	終期	初期	中期	終期	初期	中期	終期	
着果枝	第20-23 葉	1.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
	第20-23 茎	3.0	0.1	0.2	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.1
	第13-19 葉	0.2	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	第13-19 茎	3.7	0.3	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.2
	第5-12 葉	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0
	第5-12 茎	0.4	0.0	0.1	1.4	0.7	2.6	0.6	0.2	0.8	1.4	0.1	1.8
	第1-4 葉 第1-4 茎	0.1 0.0	0.0 0.0	0.1 0.0	0.0 0.6	0.0 0.0	0.2 1.5	0.0 0.3	0.0 0.0	0.0 0.2	0.0 0.2	0.0 0.1	0.0 0.4
無着果枝	第20-23 葉	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	第20-23 茎	0.1	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	1.1	0.0	0.2	0.0	0.0	0.1
	第13-19 葉	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
	第13-19 茎	0.3	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	2.6	0.2	0.7	0.0	0.0	0.3
	第5-12 葉	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0
	第5-12 茎	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	0.0	0.6	0.4	0.1	0.8
	第1-4 葉 第1-4 茎	0.2 0.1	0.0 0.0	0.1 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.2	0.0 0.0	0.0 0.2	0.0 1.0	0.0 0.3	0.0 0.9
果実	90.0	99.4	98.4	97.6	99.1	95.0	90.3	97.2	94.4	89.0	96.4	89.6	
茎基部	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.2	0.5	0.3	0.7	
根	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	3.2	1.5	2.5	7.2	2.6	4.9	

品種: 縞王マックスRE
²⁾¹³C分配率(%)=(各部位の¹³C存在量/処理葉を除く総¹³C存在量)×100
¹⁾図-22を参照
²⁾初期, 受粉6-8日後; 中期, 受粉21-22日後; 終期, 受粉38-41日後

ごく簡易な装置で実際の栽培環境下の植物葉に¹³Cで標識された二酸化炭素を取り込ませることができる(岡野ら, 2001)。反面, 処理バッグ内のCO₂濃度, 処理時の光強度や温度の厳密な制御はできない。その結果, たとえ処理葉の葉面積や光合成能力が同じだったとしても個体間で¹³C固定量にばらつきが出ることは否めない。本試験でも, 個体や処理時期によって¹³C固定量が140~377mg・個体⁻¹(データ略)とばらついたが, これが

¹³CO₂処理時の環境条件の違いによるものなのか, 処理葉の光合成能力の差異によるものなのかについては明らかでない。従って, 本試験で用いた処理手法は, 個体間での¹³C固定量や¹³C存在比の厳密な比較を行う必要がある試験には適さない。しかしながら, 植物体内における光合成産物の分配パターンは, 炭素固定量の影響を比較的受けにくいとされている(Okano et al., 1984)。また, 炭素固定量や光合成産物の各器官への分配量につい

て論じる場合は、厳密には呼吸による消費も考慮する必要がある。本法では光合成産物のうち呼吸によって消費された量については評価できない。しかしながら、トマトにおいては、全シンクに蓄積された光合成産物の量に対するシンク間の相対的な分配率は、呼吸量を加えた分配量と同様の傾向を示すことが報告されている(Shishido et al., 1989; 穴戸・熊倉, 1994)。そして、Shishido et al. (1989) は、光合成産物のソース・シンク関係の解析のための簡便法としては、シンクへの蓄積量のみからの分配率の算出も容認されたとしている。従って、上記で述べたような制約を理解した上で用いられれば、本試験で用いた簡便な $^{13}\text{CO}_2$ の処理法は、果菜類の整枝法の検討を行う上で、実際の栽培条件に近い形で光合成産物のソース・シンク関係を解析する方法として有用であるといえる。

本試験では、果実肥大期を通して $^{13}\text{CO}_2$ を処理した時期あるいは葉の位置にかかわらず、90%以上の光合成産物が果実に分配された。特に果実肥大中期には最も分配率の小さかった無着果枝下位葉処理の場合でも、処理葉から転流された光合成産物の96%が果実に分配されていた。Lee et al. (2005) は、2本仕立て1果どりの地ばい栽培において受粉約15日後に $^{14}\text{CO}_2$ 処理を行い、処理1日後に葉から転流された ^{14}C のうち、露地栽培された個体においては葉位にかかわらず91%以上が、また施設栽培された個体では葉位により45~96%が果実に分配されたと報告している。よって、少なくともスイカの2本仕立て1果どり栽培においては、果実は果実肥大期を通して着生するほとんどの葉の光合成産物の強力なシンクであることが強く示唆された。従って、前章で明らかにしたように立体栽培スイカで個体当たり葉面積や受光量で表される光合成生産力が果実肥大に直接的に反映されるのは、果実肥大期の光合成産物のほとんどが果実に分配されるからだといえる。

本試験では、2本仕立て1果どりにおける根への光合成産物の分配は、果実肥大期を通して無着果枝の上位葉および下位葉から行われ、着果枝の上位葉および下位葉からはほとんど行われていなかった。Lee et al. (2000, 2005) は、2本仕立て1果どりの地ばい栽培スイカにおいて、受粉約15日後の根への光合成産物の分配は着果枝の葉からもわずかに行われているものの無着果枝上の葉からが最も多く、無着果枝上の葉が健全な根系の発育、維持に不可欠であると報告している。よって、2本仕立て1果どりのスイカでの根の機能維持には、無着果枝上の葉が貢献しているものと考えられる。トマト(田

中・藤田, 1972b; 吉岡・高橋, 1984; 岡野ら, 2001) やメロン(吉岡・高橋, 1983; 穴戸ら, 1992) では、着果節より下位の葉が主として根への光合成産物のソースとなっており、本試験で得られたスイカでの根に関する光合成産物のソース・シンク関係は、これらとは様相が異なった。通常トマトやメロンは1本仕立てで栽培され、果実や根などの非光合成器官の生長や維持を同一の茎上の葉の光合成産物によって行わなければならないため、このような葉位による役割分担が行われているといえる。スイカでは本試験のみならず、着果枝と無着果枝が混在するような整枝法で栽培される場合がほとんどであり、根に関して特有のソース・シンク関係が形成されているものと考えられる。

以上のことから、2本仕立て1果どりの立体栽培における果実肥大期の光合成産物のソース・シンク関係については以下ようになる。果実は果実肥大期の圧倒的なシンクであり、果実肥大期を通して個体の全ての葉の光合成産物の大部分が果実に分配される。一方、果実肥大期の根への光合成産物の分配は、ほとんどすべてが無着果枝上の葉から行われる。従って、果実肥大期の果実および根に関するソース・シンク単位は、それぞれ個体上の全ての葉(ソース)・果実(シンク)、無着果枝上の葉(ソース)・根(シンク)であると結論づけられた。

2 1本仕立て1果どり栽培におけるソース・シンク関係

1節において、2本仕立て1果どり栽培における果実肥大期のソース・シンク関係について明らかにした。スイカの立体栽培を行っている生産現場では、特に抑制栽培や促成栽培では1本仕立て1果どりで栽培される場合が多い。他の果菜類での主枝1本仕立てで得られているソース・シンク関係の結果と比較して、1節で得られた2本仕立て1果どりのソース・シンク関係の様相が異なったことから、スイカにおいても1本仕立てと2本仕立てではソース・シンク関係が異なるものと考えられる。また、生産現場では、「遊びづる」と称して、一次側枝を短く残した栽培が行われる場合があるが、「遊びづる」が果実肥大等にどのように寄与しているかも不明である。よって本節では、1本仕立て1果どりにおける果実肥大期のソース・シンク関係について、一次側枝の寄与も含めて検討した。

a 材料および方法

1) 供試品種および栽培法

ユウガオ‘かちどき2号’に接ぎ木したスイカ品種‘縞王マックスRE’を材料として用いた。2002年3月14日にスイカ種子を、3月19日にユウガオ種子をパーミキュライトを詰めた育苗箱に播種した。3月29日に呼び接ぎ法で接ぎ木した後、培養土を詰めた黒色ポリポット（直径7.5cm、高さ7.0cm）に移植してガラス室内で育苗した。4月18日に、1節と同様にガラス室内の保水シート耕方式（図-21、岡野ら、1999）のコンテナ（長さ41cm×幅31cm×深さ10cm）に1コンテナ当たり1個体を定植し、養液栽培を行った。培養液はEC 1.2 dS・m⁻¹の大塚A処方液とし、余剰培養液をコンテナ側面に開けた穴から排出するかけ流し方式とした。整枝

法は、主枝1本仕立てとした。受粉は人手で行い、1個体当たり1果を第20～27節に着果させ、着果節以下の葉数を20枚となるよう摘葉し、着果節より上に10葉残して摘心した。主枝の誘引、果実の支持は、1節と同様とした。

2) ¹³CO₂ の処理法および分析法

¹³CO₂ 処理として、主枝着生葉への処理（以下、主枝葉処理）と一次側枝（いわゆる「遊びづる」）着生葉への処理（以下、一次側枝葉処理）を行った。果実肥大期間中の晴天日を選び、¹³CO₂ 処理を行った。果実肥大期中の中期（受粉19～21日後に相当）と後期（受粉33～

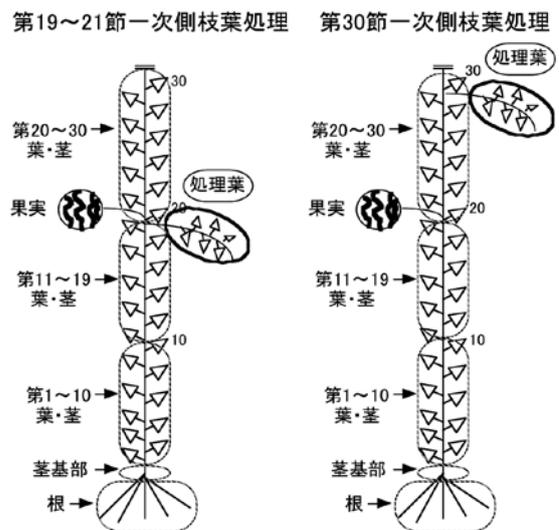
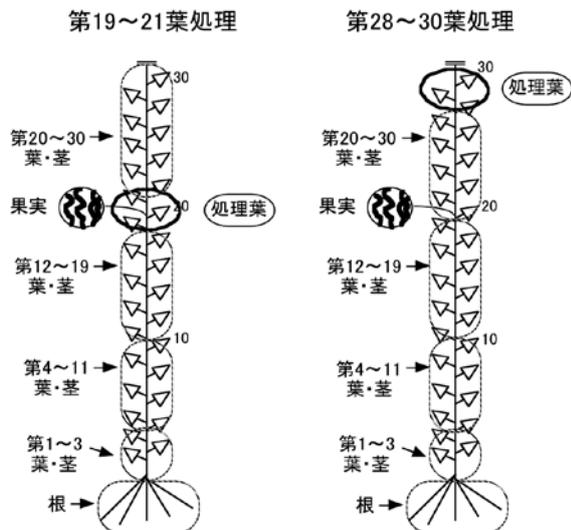
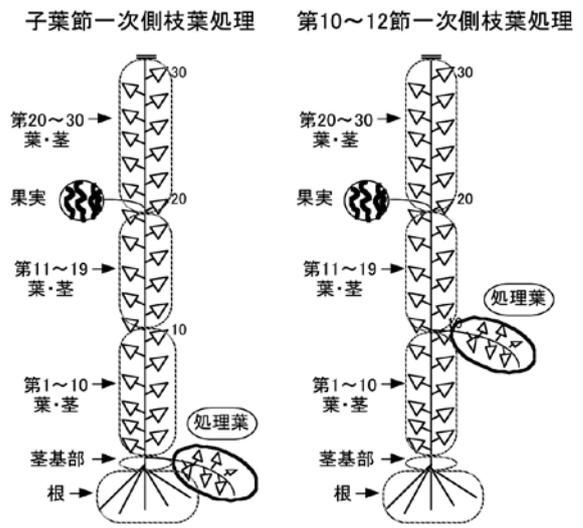
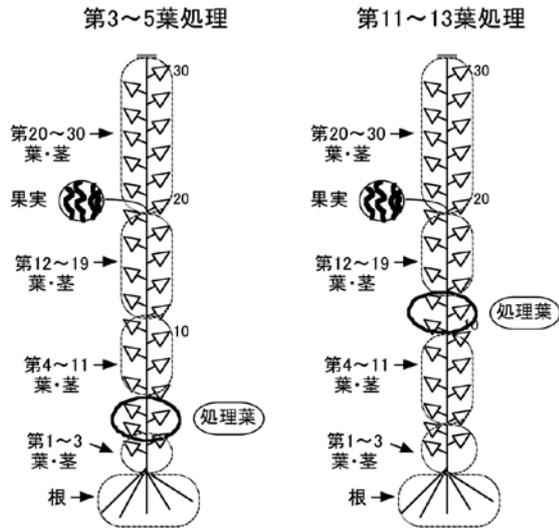


図-25 1本仕立て1果どり主枝葉処理試験での¹³CO₂ 処理部位およびサンプリング部位の位置関係
○は処理部位

図-26 1本仕立て1果どり一次側枝葉処理試験での¹³CO₂ 処理部位およびサンプリング部位の位置関係
○は処理部位

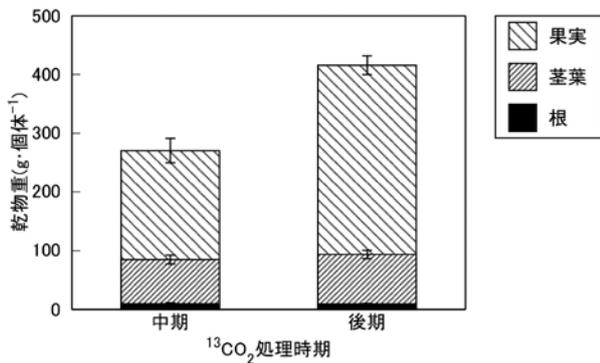


図-27 1本仕立て1果どり栽培における果実肥大各時期の立体栽培スイカの部位別乾物重
 品種：縞王マックスRE
 誤差線はSE(n=8)
 中期，受粉19～21日後；後期，受粉33～38日後。

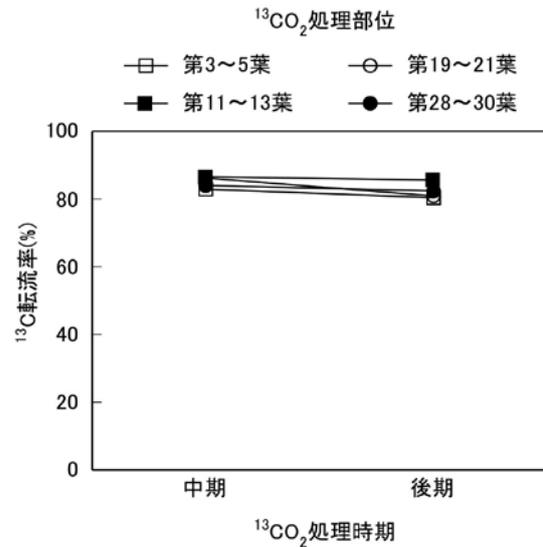


図-28 1本仕立て1果どり栽培の主枝葉¹³C処理試験における果実肥大各時期の¹³C転流率
 品種：縞王マックスRE
 中期，受粉19～21日後；後期，受粉33～38日後

38日後に相当)に、主枝葉処理では、一次側枝をすべて除去し、主枝の見かけ上の第3～5葉、第11～13葉、第19～21葉、第28～30葉に¹³CO₂を処理した(図-25)。一次側枝葉処理では、主枝の子葉部、見かけ上の第10～12節、第19～21節、第30節のいずれかから1本伸ばさせた一次側枝を6～7葉残して摘心した後、一次側枝全体に¹³CO₂を処理した(図-26)。処理は各部位とも2反復行った。なお、用いた品種のこの栽培時期での収穫期は受粉後約40日である。¹³CO₂処理は各処理日とも8:30～15:30に行った。フラスコ内に6gの¹³C標識炭酸バリウム(Ba¹³CO₃, 99atom%¹³C)を入れ、1N HClを30～60分間隔で1回当たり8mlずつプラスチックシリンジで加えて¹³CO₂を発生させ、主枝葉処理区では個葉単位で、一次側枝葉処理区では一次側枝全体を覆ったポリエチレンバッグ内にビニールチューブを用いて¹³CO₂を導入した。¹³CO₂を確実に導入するため、観賞魚用のエアポンプでフラスコ内に適宜送気した。その他の処理法は1節と同様とした。¹³CO₂処理終了約48時間後に、処理個体を部位別にサンプリングした(図-25、図-26)。サンプリングした葉部、茎部の節位の範囲については、1節と同様に着果位置や処理葉の位置によってずれが生じるが、平均的な節位の範囲で示した(図-25、図-26)。部位別サンプルは、1節と同様に乾燥、試料の微粉碎、¹³Cの分析を行った。なお、本試験では、¹³C存在量の計算に用いる全炭素含有率には各部位の全炭素含有率の測定値を用いた。

b 結果

1) 主枝葉処理

果実肥大期間中の植物体の乾物重の推移を図-27に示した。果実肥大中期から後期にかけて、植物体全体の乾物重は増加した。この期間の茎葉や根の乾物重の増加量は小さく、乾物重の増加は主に果実乾物重の増加によるものであった。果実肥大後期の乾物重の割合は、果実が77%、根部が2%、茎葉部が20%であった。なお、果実肥大後期の果実の新鮮重の平均値は4.7kgであった。

果実肥大各時期の¹³C転流率を図-28に示した。処理葉位、時期にかかわらず、処理葉からの¹³C転流率は80%以上であった。

果実肥大各時期の¹³CO₂処理葉以外の各部位の¹³C存在比を表-12に示した。第11～13葉、第19～21葉、第28～30葉に¹³CO₂処理した場合、果実肥大中期では果実の¹³C存在比が高かった。これらの葉への¹³CO₂処理では、果実肥大後期でも同様に果実の¹³C存在比は高かったものの、果実肥大中期と比べるとその値は低下し、第11～13葉および第28～30葉処理では処理葉と果実の間の茎部の¹³C存在比のほうが果実よりも高かった。第3～5葉に¹³CO₂処理した場合、¹³C存在比は処理葉と根の間の第1～3茎部で最も高く、次いで根で高かった。また、他の処理部位と比べて、全体的に茎部の存在比が高い傾向が認められた。

果実肥大中期および後期における各部位への¹³C分配率を表-13に示した。第11～13葉、第19～21葉、

表-12 1本仕立て1果どりの立体栽培スイカの主枝葉¹³CO₂処理における¹³CO₂処理2日後の各部位の¹³C存在比(atom% excess)

部位	¹³ CO ₂ 処理葉の位置 ^z および処理時期 ^y							
	第3-5葉		第11-13葉		第19-21葉		第28-30葉	
	中期	後期	中期	後期	中期	後期	中期	後期
第20-30 葉	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
第20-30 茎	0.02	0.03	0.00	0.00	0.01	0.00	0.09	0.17
第12-19 葉	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
第12-19 茎	0.06	0.32	0.05	0.19	0.02	0.03	0.01	0.00
第4-11 葉	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
第4-11 茎	0.17	0.13	0.04	0.09	0.00	0.00	0.01	0.00
第1-3 葉	0.01	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
第1-3 茎	0.35	0.83	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
果実	0.07	0.04	0.28	0.12	0.20	0.15	0.24	0.13
根	0.23	0.51	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

品種: 縞王マックスRE
^z図-25を参照
^y中期, 受粉19~21日後; 後期, 受粉33~38日後

表-13 1本仕立て1果どりの立体栽培スイカの主枝葉¹³CO₂処理における¹³CO₂処理2日後の各部位の¹³C分配率(%)^z

部位	¹³ CO ₂ 処理葉の位置 ^y および処理時期 ^x							
	第3-5葉		第11-13葉		第19-21葉		第28-30葉	
	中期	後期	中期	後期	中期	後期	中期	後期
第20-30 葉	1.3	2.2	0.0	0.0	0.2	0.0	0.2	0.0
第20-30 茎	0.5	0.7	0.0	0.0	0.2	0.1	1.0	2.1
第12-19 葉	0.5	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
第12-19 茎	1.5	5.0	0.4	2.1	0.2	0.3	0.1	0.0
第4-11 葉	0.1	0.2	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0
第4-11 茎	3.0	2.4	0.2	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0
第1-3 葉	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
第1-3 茎	2.5	5.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
果実	79.8	64.2	99.4	97.1	99.5	99.5	98.7	97.7
根	10.9	20.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1

品種: 縞王マックスRE
^z ^{13}C 分配率(%)=(各部位の ^{13}C 存在量/処理葉を除く総 ^{13}C 存在量)×100
^y図-25を参照
^x中期, 受粉19~21日後; 後期, 受粉33~38日後

第28~30葉処理の場合は、いずれの時期とも処理葉から他の部位に転流した¹³Cの97%以上は果実へ分配された。一方、第3~5葉処理の場合は、果実への¹³Cの分配率が79.8%~64.2%と他の同化部位に比べてやや低かった。¹³Cの根への分配は、果実肥大中期、後期とも第3~5葉から行われ、第11~13葉、第19~21葉、第28~30葉からはほとんど行われなかった。第3~5葉に処理した場合には、¹³Cの茎葉部への分配が、第11~13葉、第19~21葉、第28~30葉に処理した場合に比べて多い傾向が認められた。

2) 一次側枝葉処理

果実肥大期間中の植物体の乾物重の推移は主枝葉処理の場合とほぼ同様で、果実肥大中期から後期にかけての

乾物重の増加は主に果実乾物重の増加によるものであり、果実肥大後期の乾物重の割合も主枝葉処理の場合とほぼ同様で、果実が77%、根部が2%、茎葉部が21%であった(データ略)。なお、果実肥大後期の果実の新鮮重の平均値は4.3kgであった。

果実肥大各時期の¹³C転流率を図-29に示した。第10~12節、第19~21節、第30節の一次側枝処理葉からの¹³C転流率は、果実肥大中期、後期とも80%以上であった。子葉節の一次側枝処理葉からの¹³C転流率は、74~79%と他の一次側枝と比べて小さい傾向が認められた。

果実肥大各時期の¹³CO₂処理一次側枝以外の各部位の¹³C存在比を表-14に示した。子葉節の一次側枝葉を除いて、果実肥大中期、後期とも果実の¹³C存在比が最

も高かった。子葉節の一次側枝葉に $^{13}\text{CO}_2$ 処理した場合、 ^{13}C 存在比は果実肥大中期、後期とも根で最も高く、次いで子葉節の一次側枝と根の間の主枝の茎部である茎基部で高かった。果実の ^{13}C 存在比は、他の一次側枝 $^{13}\text{CO}_2$ 処理の場合と比べて低かった。いずれの一次側枝葉処理の場合でも、果実の ^{13}C 存在比は果実肥大中期のほうが果実肥大後期よりも高い傾向が認められた。

果実肥大中期および後期における各部位への ^{13}C 分配率を表-15に示す。第10～12節、第19～21節、第30節の一次側枝葉処理の場合は、いずれの時期とも処理葉から他の部位に転流した ^{13}C の97%以上は果実へ分配された。一方、子葉節の一次側枝葉処理の場合は、 ^{13}C の果実への分配率が71.5%～79.1%と他の処理部位に比べてやや低かった。 ^{13}C の根への分配は、果実肥大中期、後期とも子葉節の一次側枝葉から行われ、第10

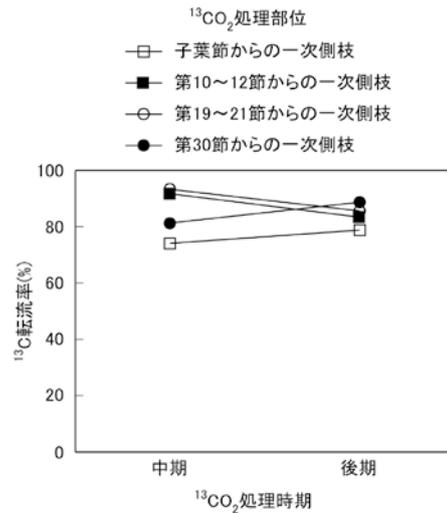


図-29 1本仕立て1果どり栽培の一次側枝葉 $^{13}\text{CO}_2$ 処理試験における果実肥大各時期の ^{13}C 転流率
品種：縞王マックスRE
中期，受粉19～21日後；後期，受粉33～38日後

表-14 1本仕立て1果どりの立体栽培スイカの一次側枝葉 $^{13}\text{CO}_2$ 処理における $^{13}\text{CO}_2$ 処理2日後の各部位の ^{13}C 存在比 (atom% excess)

部位	$^{13}\text{CO}_2$ 処理一次側枝の着生位置 ^z および処理時期 ^y							
	子葉節		第10～12節		第19～21節		第30節	
	中期	後期	中期	後期	中期	後期	中期	後期
第20～30 葉	0.04	0.02	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01
第20～30 茎	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.10
第11～19 葉	0.04	0.02	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00
第11～19 茎	0.05	0.09	0.03	0.13	0.00	0.01	0.00	0.01
第1～10 葉	0.02	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00
第1～10 茎	0.13	0.21	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00
茎基部	0.25	0.37	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01
果実	0.09	0.07	0.30	0.14	0.23	0.16	0.16	0.16
根	0.39	0.52	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00

品種：縞王マックスRE

^z図-26を参照

^y中期，受粉19～21日後；後期，受粉33～38日後

表-15 1本仕立て1果どりの立体栽培スイカの一次側枝葉 $^{13}\text{CO}_2$ 処理における $^{13}\text{CO}_2$ 処理2日後の各部位の ^{13}C 分配率 (%)^z

部位	$^{13}\text{CO}_2$ 処理一次側枝の着生位置 ^y および処理時期 ^x							
	子葉節		第10～12節		第19～21節		第30節	
	中期	後期	中期	後期	中期	後期	中期	後期
第20～30 葉	3.3	1.3	0.1	0.4	0.0	0.4	0.0	0.4
第20～30 茎	1.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.8
第11～19 葉	3.4	1.1	0.1	0.1	0.4	0.2	0.0	0.0
第11～19 茎	1.1	1.5	0.2	1.8	0.0	0.1	0.0	0.1
第1～10 葉	1.0	0.2	0.0	0.2	0.0	0.4	0.0	0.0
第1～10 茎	1.9	1.9	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0
茎基部	0.8	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
果実	71.5	79.1	99.6	97.3	99.6	98.6	99.6	98.7
根	16.0	14.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0

品種：縞王マックスRE

^z ^{13}C 分配率(%)=(各部位の ^{13}C 存在量/同化葉を除く総 ^{13}C 存在量)×100

^y図-26を参照

^x中期，受粉19～21日後；後期，受粉33～38日後

～12節，第19～21節，第30節の一次側枝葉からはほとんど行われなかった。子葉節の一次側枝葉処理では，第10～12節，第19～21節，第30節の一次側枝葉処理よりも多くの ^{13}C が莖葉部に分配されていた。

c 考察

本試験では，果実肥大中期，後期とも，第10節以上の主枝葉あるいは一次側枝葉での97%以上の光合成産物が果実に分配されたことから，2本仕立て1果どりと同様に，1本仕立て1果どり栽培においても，果実は果実肥大期を通して光合成産物の強力なシンクであることが明らかとなった。従って，前章で明らかにしたように立体栽培スイカで個体当たり葉面積や受光量で表される光合成生産力が果実肥大に直接的に反映されるのは，果実肥大期の光合成産物のほとんどが果実に分配されるからだといえる。

一方で，第3～5葉や，子葉節から発生した一次側枝の葉等，植物体の基部に近い葉の光合成産物は，2本仕立て1果どりの下位葉と比べて高い割合で根へ分配されていた。2本仕立て1果どりの無着果枝よりも葉数が制限されるので，相対的に根への分配割合が高くなったものと考えられた。1節に示したとおり，スイカのように個体当たり着果数が少なく，果実肥大期のソース・シンク関係が比較的単純な形で栽培されるメロンや一段栽培トマトにおける1本仕立てでの果実肥大期の根への光合成産物の分配は，根に近い葉からの割合が高いとされており（吉岡・高橋，1983；宍戸ら，1992；岡野ら，2001），基本的には1本仕立て1果どりスイカにおいても同様であることが明らかとなった。しかし，上述の既報では根から位置的に遠い葉からも根への光合成産物の分配が行われることが示されているのに対し，今回得られたスイカの結果では，下位の限られた主枝葉あるいは一次側枝葉のみからしか根への光合成産物の分配は行われていなかった。これは，スイカ果実のシンク能が非常に高いことと関連していると考えられる。1本仕立て1果どりにおいても，2本仕立て1果どりと同様，果実肥大期の植物体の乾物重の増加はほとんど果実の乾物重の増加によるものであり，果実の収穫期にほぼ相当する果実肥大後期の植物体の全乾物重のうち約8割（77%）が果実であり，仕立て本数が変わっても，スイカ果実のシンク能はほとんど変わらず，非常に高いことが示された。よって，1本仕立てにおいては，圧倒的な果実のシンク能のために根への光合成産物の供給は近傍のごく限られた葉からのみしか行われぬものと考えられた。

本試験では，主枝第3～5葉あるいは子葉節から発生した一次側枝の葉に処理し，転流した ^{13}C のうち，7～15%が莖葉部に分配されているという結果が得られた。トマトではすでに展開している葉への光合成産物の分配がみられる場合もあるが（田中・藤田，1972b），一般には成熟葉から成熟葉への光合成産物の分配は非常に少なく（米山・林，1991），同じウリ科であるメロンでは，光合成同化葉から他の展開を終えた葉への光合成産物の転流・分配は極めて少ない（吉岡・高橋，1983）とされている。これらの処理部位では，根への ^{13}C の分配率が他の部位と比べて高いことから，根によって生合成された何らかの物質として再転流されていることを示している興味深いデータである可能性もあるが，現時点では不明である。

以上のことから，1本仕立て1果どりの立体栽培における果実肥大期の光合成産物のソース・シンク関係については以下のようなになる。果実は果実肥大期の圧倒的なシンクであり，果実肥大期を通して個体の全ての葉の光合成産物の大部分が果実に分配される。一方，果実肥大期の根への光合成産物の分配は，ほとんどすべてが下位の限られた葉や一次側枝葉から行われる。従って，果実肥大期の果実および根に関するソース・シンク単位は，それぞれ個体上の全ての葉（ソース）・果実（シンク），下位の限られた葉（ソース）・根（シンク）であるといえる。

3 本章の考察

本章では，立体栽培スイカ個体の果実肥大期における光合成産物のソース・シンク関係について，2本仕立て1果どりおよび1本仕立て1果どりについて検討した。その結果，いずれにおいても，果実肥大期を通して光合成産物の大部分は果実に分配されることが明らかとなった。1本仕立て1果どりでの低節位のごく限られた主枝葉あるいは一次側枝以外では，光合成を行った葉から転流された光合成産物のうち90%以上という圧倒的な割合の光合成産物が果実肥大期を通して果実に分配された。Wilson (1972) は，シンク能 (Sink strength) は，シンクの大きさ (sink size) とシンク活性 (sink activity) の積であるとしている。吉岡・高橋 (1979a) は，シンクの大きさはシンクとなる器官の重量 (乾物重)，シンク活性はシンク器官の単位時間当たり，単位重量 (乾物) 当たりに転流された光合成産物の量に相当するとし， ^{14}C トレーサー法では，各器官のRSA (各器官の比放射能 / 植物全体の比放射能) または比放射能が

シンク活性に相当し、 ^{14}C 分配率または全放射能がシンク能に相当するものとしている。この考えに基づく、本試験で用いた ^{13}C トレーサー法では、 ^{13}C 存在比がシンク活性に相当すると考えられる。よって、スイカ果実は、果実肥大初期には高いシンク活性により、果実肥大後期には圧倒的なシンクの大きさによりシンク能を維持しているといえる。

スイカのように個体当たりの着果数が少なく、果実肥大期のソース・シンク関係が比較的単純な形で栽培されるメロンや一段栽培トマトについても、果実肥大期の異なる葉位の葉と果実の間のソース・シンク関係について調べられている。吉岡・高橋 (1983) は、1本仕立てにおける着果数および着果節位の異なるメロンのソース・シンク関係について検討し、異なる葉位の葉の光合成産物の分配パターンは、果実や根といったシンクとの相対的な位置関係によって異なることを明らかにしており、全ての葉の光合成産物のほとんどが果実に分配されるようなことは示されていない。また、穴戸ら (1992) の報告によると、受粉 43 日後の 1 本仕立て 1 果どりのメロンにおいて、着果側枝上の葉から転流された光合成産物の 90% 以上が果実に分配されたが、主枝上の着果節葉、着果節から 1 あるいは 10 節上位葉では 70 ~ 80%、着果節から 5 節下位葉では 65% 程度と果実への光合成産物の分配は低くなっていた。一段栽培トマトにおいては、果実肥大初期には葉位が低いほど光合成産物の根への分配率が高いこと、光合成産物の果実肥大盛期には葉位に関わらず果実への分配率が高まること、果実着色期には葉位に関わらず全体的に果実への分配率が低下することが報告されている (岡野ら, 2001)。これらの知見と比較してみると、葉位に関わらず転流された光合成産物のほとんどが果実に分配されるというのは、果菜類の中でもスイカの光合成産物の分配に特徴的なことであり、果実のシンク能 (Sink strength) が他の果菜類、少なくともトマトやメロンと比べて高いことが示唆された。

さらに、果実肥大期の植物体の乾物重の増加はほとんど果実の乾物重の増加によるものであり、果実の収穫期にはほぼ相当する果実肥大終期の植物体の全乾物重のうち約 8 割が果実であった。仮に果実全体を収穫利用部 (可食部は果肉のみであり、利用部位は実際にはもっと少なくなる) として考えると、収穫指数 (植物体全乾物重に対する収穫利用部の割合) は約 0.8 となる。収穫指数は作物間で大きな差異が認められ、イネ科穀類では 0.3 ~ 0.55 であるのに対し、イモ類では全般に高く、0.8 以上に及ぶこともある (長谷川, 2004) とされているが、

これらと比較しても、スイカ果実のシンク能は栽培作物の中でも非常に高いことが示唆された。

本章の試験の結果、光合成産物の葉からの転流率は、1 本仕立て 1 果どりでは葉位にかかわらず、2 本仕立て 1 果どりでは下位葉を除いて、果実肥大期を通して 70 ~ 80% 以上と非常に高かった。Lee et al. (2006) はスイカとトマトの $^{14}\text{CO}_2$ 処理 3 ~ 12 時間後の ^{14}C の転流率について、スイカのほうがトマトよりも概して高かったことを報告している。異なる葉位の光合成産物の転流率については、 $^{14}\text{CO}_2$ 処理約 2 日後において、トマトでは 51 ~ 62% (田中・藤田, 1972b)、メロンでは開花 10 ~ 12 日後の 1 果着果の場合で平均 57%、開花 15・9 日あるいは 9・8 日目の 2 果着果の場合で平均 71% (吉岡・高橋, 1983) との報告がある。また、穴戸ら (1992) は、メロンの $^{14}\text{CO}_2$ 処理 15 ~ 16 時間後において、受粉 43 日後の主茎上の各葉位の葉の転流率が 65 ~ 70%、果実着生側枝上の葉の転流率が 80% であり、主茎の着生節葉では、転流率は受粉 43 日後までは 65% 前後で推移し、受粉 50 日後で 84%、収穫時で 77% に高まったとしている。キュウリでは $^{14}\text{CO}_2$ 処理 24 時間後で転流率が 85% であったことが報告されている (Barrett and Amling, 1978)。さらに、今回の試験では呼吸による光合成産物の消耗は考慮外としているが、呼吸消耗を計算に入れない対回収光合成量をベースにした転流率は全光合成量をベースにした転流率よりも常に低い値を示すとされる (穴戸, 2009a, 2009b) ことから、呼吸の消耗を含めた実際の光合成産物の転流率は、今回得られた値よりもさらに高い可能性がある。これらの報告とあわせて考えると、スイカの光合成産物の転流効率は、果菜類の中ではかなり高いといえる。

以上をまとめると、スイカの果実肥大期では、大部分の葉において光合成産物の転流率が高く、しかも転流された光合成産物の大部分が果実へ分配されることから、果実肥大期の光合成産物の大部分は果実に分配されるといえる。そして、スイカは果菜類の中で、光合成生産量に対して非常に高い果実生産効率を有する作物であるといえる。II 章において明らかとなった、果実肥大期の個体の葉面積や受光量、光合成速度と果実重との間にみられた高い正の相関関係は、植物体で生成した光合成産物の大部分が果実肥大期を通して果実に集中するというスイカの物質生産特性によってほぼ説明できるものと結論づけられる。

IV スイカの果実生産性および軽労化に関する立体栽培と地ばい栽培の比較

II, III章において、立体栽培スイカの果実肥大特性を明らかにした。すなわち、立体栽培スイカでは果実肥大期の光合成産物のほとんどが果実に分配されることから、光合成生産力を表しているといえる個体当たり葉面積や受光量と果実重の間に、密接な関係があることを明らかにした。慣行の地ばい栽培と立体栽培では、つるの配置が大きく異なることから、作業性、群落としての果実生産性の特性も大きく異なるものと考えられ、実際の生産技術として評価するためには、作業性や単位面積当たりの収量特性等の評価も必要である。

これまで、ウリ科野菜において、立体栽培と地ばい栽培に関する比較検討がいくつか行われている。メロンでは、果実のネット発生程度、糖度、肩落ち果率の点で立体栽培のほうが地ばい栽培よりも優れることが報告されている（難波・松本, 1975）。カボチャでは、立体仕立てと地ばい仕立てにおけるつるの伸長や最大葉長等の生育差は小さいが、1果実重は立体仕立てよりも地ばい仕立てで大きいことが報告されている（大木・崎山, 1995）。トウガンでは、立体栽培化により収量増の傾向と作業姿勢の改善が報告されている（大石ら, 2010）。これらウリ科野菜に関する既報においては、いずれも立体栽培の栽植密度が地ばい栽培より高い、ある一水準の条件で検討されているのみで、両栽培法の間で複数の栽植密度を設定し果実生産性を比較・評価した例はない。また、立体栽培と地ばい栽培個体の間での受光態勢や圃場光合成特性を比較した例も見当たらない。果実の生産効率に関しては、トマトにおいて、支柱栽培（立体栽培に相当）に比べて無支柱栽培（地ばい栽培に相当）のほうが全植物重が小さく、果数も小さく、全果実収量も低くなったが、この理由としては葉の配列が悪いために光合成が阻害されたとともに、糖含有率の葉における上昇と茎における低下から光合成産物の移行の悪化が起こっていたことが推測されている（田中・藤田, 1972a）。このことは、立体栽培により葉面積や受光量当たりの果実生産効率が向上する可能性を示唆するものとも考えられるが、スイカのみならず、他の作物においても立体栽培と地ばい栽培の間でこのような観点から比較検討を行った例は見当たらない。

本章では、立体栽培と地ばい栽培の間での果実生産性および作業性の差異について、数値化して比較検討し、

立体栽培の特徴を明らかにすることを目的とした。

1 個体の生育、果実肥大性、受光態勢および圃場光合成速度の比較

立体栽培では、茎を上方に誘引するため、地表に平面的につるを誘引する地ばい栽培と比べて畝間が狭く密植できる有利性がある。これまで報告されているウリ科野菜における立体栽培と地ばい栽培の間での比較においては、立体栽培の栽植密度が高く設定された条件下で検討されている（難波・松本, 1975; 大木・崎山, 1995; 大石ら, 2010）。よって、本節では、まず立体栽培の栽植密度を高く設定した条件下で、地ばい栽培との比較において個体の生育、果実肥大性、受光態勢および葉位別光合成速度について検討した。

a 材料および方法

1) 供試品種および栽培法

ユウガオ‘かちどき2号’（萩原農場）に接ぎ木したスイカ品種‘早生天竜’（嶋崎種苗）を材料として用いた。1997年8月8日にユウガオ種子を、8月11日にスイカ種子をバーミキュライトを詰めた育苗箱に播種した。8月19日にあわせ接ぎ法で接ぎ木した後、培養土を詰めた黒色ポリポット（直径7.5cm、高さ7.0cm）に移植してガラス室内で育苗した。9月8日に土耕のガラス室内に定植した。畝はポリフィルム（伊藤忠サンプラス、ムシコンワイド）でマルチした。施肥量は畝面積（全面積の約1/2）当たりで苦土石灰 $15\text{kg}\cdot\text{a}^{-1}$ 、CDU化成 $12.5\text{kg}\cdot\text{a}^{-1}$ （N, P_2O_5 , K_2O 各 $1.5\text{kg}\cdot\text{a}^{-1}$ ）とし、畝部のみに施用した。かん水はマルチ内に設置したかん水チューブ（三石アグリ、エバフローA型）で適宜行った。立体栽培する場合には、約180cmの高さに張った直径5mmの鋼鉄製のワイヤーからつり下げたひもに主枝あるいは一次側枝を固定し、徐々に上方に誘引した。受粉は人手で行い、果実は1植物体当たり1果を主枝の第25~30節着果を目標に着果させた。立体栽培する場合には、十文字に結んだポリエチレン製のひもを用いて果実を支持し、主枝あるいは一次側枝を誘引したものと同一ワイヤーからつり下げた。

2) 栽植密度と整枝法

立体栽培および地ばい栽培の栽植密度、仕立て本数および摘心位置を表-16に、また整枝法の模式図を図-30に示す。立体栽培の整枝法は、畝幅210cm（畝面幅約100cm）、条間70cm、2条千鳥植えとし、1)株間

表-16 IV章1節の立体栽培および地ばい栽培の整枝法

整枝法	栽植密度 (個体・a ⁻¹)	摘心節位(節)		総葉数 ²
		主枝	一次側枝	
立体(短)	95.2	38	26	64
立体(長)		50	40	90
地ばい(短)	31.7	38	26	64
地ばい(長)		50	40	90

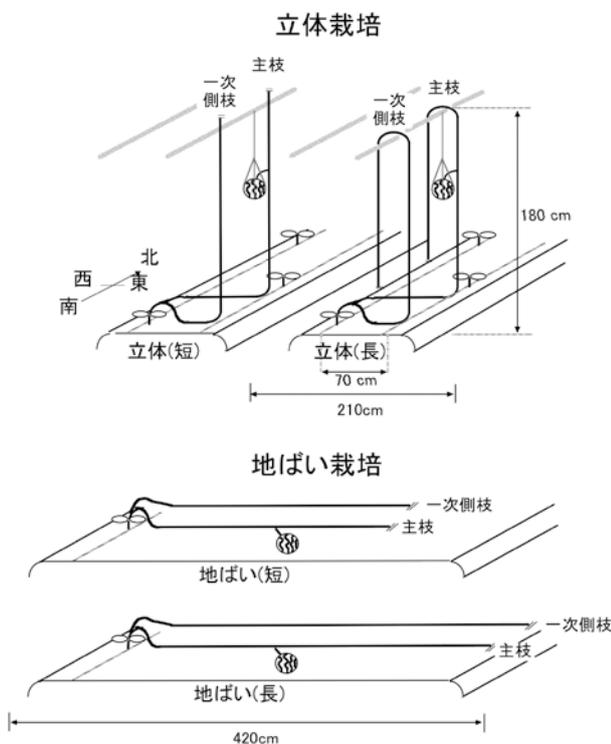
²個体当たり

図-30 IV章1節の立体栽培および地ばい栽培の整枝法の模式図

各整枝法の栽植密度, 摘心位置は表-16を参照

100cmとし, 主枝1本と主枝の基部の第5節前後から発生した一次側枝1本を伸長させ, 主枝第38節, 側枝第26節で摘心〔以下, 立体(短)], 2) 1)と同様に仕立てて, 主枝第50節, 側枝第40節で摘心〔以下, 立体(長)]とした。主枝および一次側枝は定植した条部とは反対側の条部まで畝方向と垂直に畝表面を誘引した後上方に誘引した。地ばい栽培は, 畝幅420cm(ただし定植部の畝面幅は立体栽培区と同様約100cm), 株間75cmの1条植えとした。そして, 立体栽培の立体

(短)および立体(長)と同じ摘心位置としたものを, それぞれ地ばい(短)および地ばい(長)とした。主枝および一次側枝は畝方向と垂直に誘引した。立体栽培, 地ばい栽培とも伸長させた側枝以外は発生次第除去した。

3) 調査項目

(1) 生育調査

立体(長)および地ばい(長)の個体について, 主枝長, 側枝長および展開葉数を6~8日ごとに調査した。また, 着果15日後から5日ごとに果実赤道面の周囲長を測定して果実横断面の直径を算出した。

(2) 個葉の葉面積算日射量の測定

果実肥大中期の10月21日~25日の間, 積算日射計測フィルム(大成イーアンドエル, オプトリーフR-2D)を用いて個葉の葉面積算日射量を測定した。立体(短), 地ばい(短)の個体に, 2葉おきに主枝葉の中央部に積算日射計測フィルムを貼付した。同時に, ガラス室内の遮蔽物のない場所にフィルムを設置し, ガラス室内の全天日射量を測定した。10月25日にフィルムを回収し, オプトリーフ測定器(大成イーアンドエル, T-METER)で470nmの吸光度を測定し, 退色率を算出した。そして, 積算日射量算出用の季節毎の簡易検量線によって積算日射量を算出した。簡易検量線での積算日射量の絶対値は測定時の温度条件で誤差が大きくなる場合があるので(渡邊ら, 2001), 誤差を少なくするために, 各葉に貼付したフィルムの積算日射量を, ガラス室内の遮蔽物のない場所に設置したフィルムで得られた全天日射量に対する相対値で示した。

(3) 個葉の光合成速度の測定

果実肥大期の個葉の光合成速度と気孔コンダクタンスを, 携帯型光合成蒸散測定装置(Li-Cor, LI-6400)で測定した。受粉約35日後に相当する11月6日と7日に立体(短), 地ばい(長)の各2個体を選び, 1~2葉おきに原則として葉の頂端部(図-14)の光合成速度と気孔コンダクタンスを測定した。測定は10:30~12:30の間に行った。測定時の測定チャンバー内の設定値について, 空気の流速は $500\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$, 葉温は 28°C とし, CO_2 濃度および湿度は制御しなかった。測定チャンバー内の光条件は, 実際の葉面の光条件を考慮して立体(短)では測定葉面のPPFDとし, 地ばい(長)では $\text{PPFD} = 1200\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ とした。光源は赤色LEDであった。

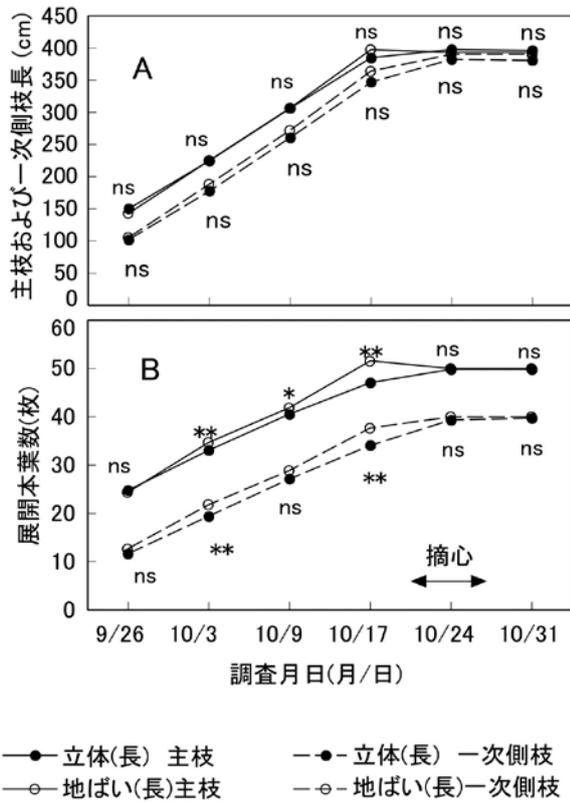


図-31 スイカの立体および地ばい栽培における主枝および一次側枝長 (A) および展開本葉数 (B) の経時的変化
 品種：早生天竜
 整枝法は表-16, 図-30を参照
 矢印は主枝および一次側枝の摘心期間を示す
 *, **は立体栽培と地ばい栽培の間でそれぞれ危険率5%, 1%のt検定で有意差があること, nsは有意差がないことを示す {n=14 [立体(長)], n=10 [地ばい(長)]}

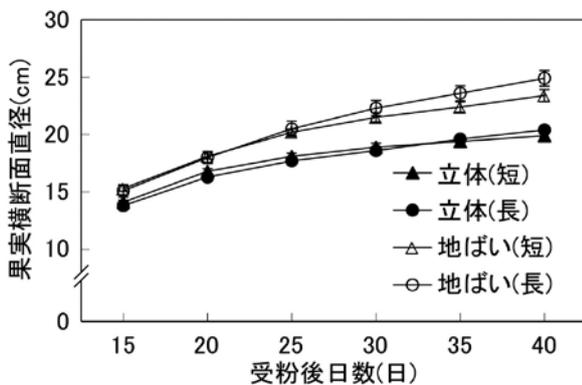


図-32 スイカの立体および地ばい栽培における果実肥大の経時的変化
 品種：早生天竜
 整枝法は表-16, 図-30を参照
 誤差線はSE (n=6~15)

(4) 収穫時調査

果実の収穫は受粉44~45日後に行い, 果実の重量と糖度を測定した. 糖度は, 果実の中心部から採取した果肉汁液を糖度計(アタゴ, P-1)で測定した. 果実収穫後に各整枝法の植物体の葉面積を面積計(林電工, AC-440)で測定した.

各整枝法の個体の配置は, 独立して存在する立体栽培, 地ばい栽培それぞれについて, 10~20個体2反復の乱塊法に準じた配置としたが, 各調査は各整枝法計20~30個体の中から図表中に示した数を採取して行った.

b 結果

1) 生育

立体(長)と地ばい(長)について, 主枝, 側枝の伸長および本葉の展開速度を図-31に示した. 主枝および側枝長は摘心するまではほぼ直線的に増加し, 立体栽培と地ばい栽培の間で有意差は認められなかった(図-31A). 本葉の枚数はいずれも摘心するまではほぼ直線的に増加したが, 展開速度は地ばい栽培で速い傾向がみられた(図-31B).

交配15日後からの果実横断面の直径の経時変化を図-32に示した. 立体(短)と立体(長), 地ばい(短)と地ばい(長)の間では果実肥大にほとんど差が認められなかった. 地ばい(短)および地ばい(長)の果実肥大は, 同じ葉数である立体(短)および立体(長)よりもそれぞれ良好であった.

2) 個葉の葉面積算日射量

立体(短)および地ばい(短)の個体の葉位別の葉面積算日射量を図-33に示した. 個葉の葉面積算日射量は, 立体栽培, 地ばい栽培とも最上位葉である第38葉で最も多く, ハウス内の全天日射量の約80%を受光していた. 第26葉より上位の葉では立体栽培, 地ばい栽培の間の葉面積算日射量に有意な差はみられなかった. 立体栽培では, 個葉の葉面積算日射量は葉位の低下に伴って徐々に減少し, 第26葉以下では全天日射量の約20%程度であり, これらの葉では地ばい栽培よりも有意に葉面積算日射量が少なかった. 地ばい栽培では, 上位葉から下位葉まで比較的まんべんなく受光していた.

3) 個葉の光合成速度

立体(短)および地ばい(長)の個体の葉位別光合成速度および気孔コンダクタンスを図-34に示した. 測定はそれぞれ2個体について行ったが, 傾向は同じで

あったので、ここでは各1個体の結果について示した。

立体栽培では、上位葉の光合成速度が大きく、葉位の低下に伴って徐々に減少した。気孔コンダクタンスの大小は光合成速度の高低と一致する傾向を示した。第17葉では葉位が低いにも関わらず光合成速度が高かったが、

葉面の条件にあわせたPPFDが $400\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ と高く、気孔コンダクタンスも大きかった。

地ばい栽培では、立体栽培と比べて葉位にかかわらずどの葉も比較的高い光合成速度を示した。気孔コンダクタンスの大小は、立体栽培と同様に光合成速度の高低と一致する傾向を示した。

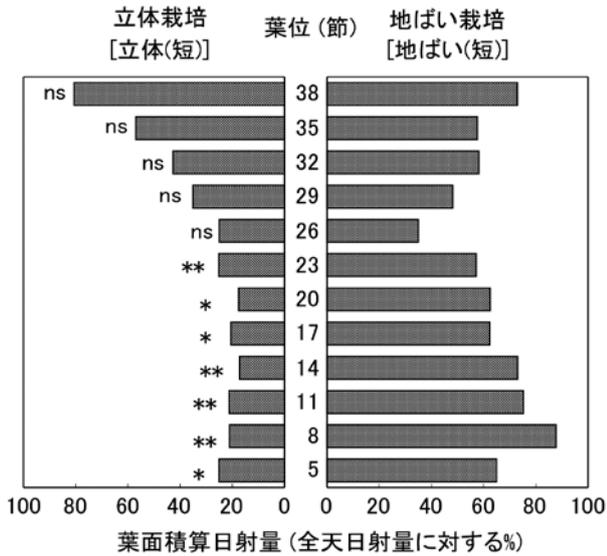


図-33 スイカの立体および地ばい栽培における果実肥大期の葉位別の葉面積算日射量
 品種：早生天竜
 整枝法は表-16, 図-30を参照
 *, ** は、立体栽培と地ばい栽培の間でそれぞれ危険率5%, 1%のt検定で有意差があること, nsは有意差がないことを示す [n=14~15 (立体栽培), n=5 (地ばい栽培)]

4) 収穫果実と葉面積

個体当たり葉面積, LAI, 果実重および果実糖度を表-17に示した。個体当たり葉面積は、立体栽培, 地ばい栽培とも(長)のほうが大きかった。LAIは立体栽培では1.7~2.1, 地ばい栽培では0.6~0.9であった。葉数が同じである立体(短)と地ばい(短)の間および立体(長)と地ばい(長)の間のいずれにおいても、明らかに地ばい栽培の方が果実が大きかった。特に地ばい(短)は立体(長)よりも個体当たり葉面積が小さいにもかかわらず、果実重は明らかに立体(長)より大きかった。果実糖度は立体(長)でやや低く、地ばい(短)でやや高かったものの、10.2~10.7の範囲にあり、整枝法の違いによる差は小さかった。

個体当たり葉面積と果実重の関係について、立体栽培, 地ばい栽培それぞれでまとめて図-35に示した。立体栽培および地ばい栽培とも、個体当たり葉面積と果実重の間には正の相関関係が認められた。一方、立体栽培と地ばい栽培を比較すると、個体当たり葉面積が同じ場合

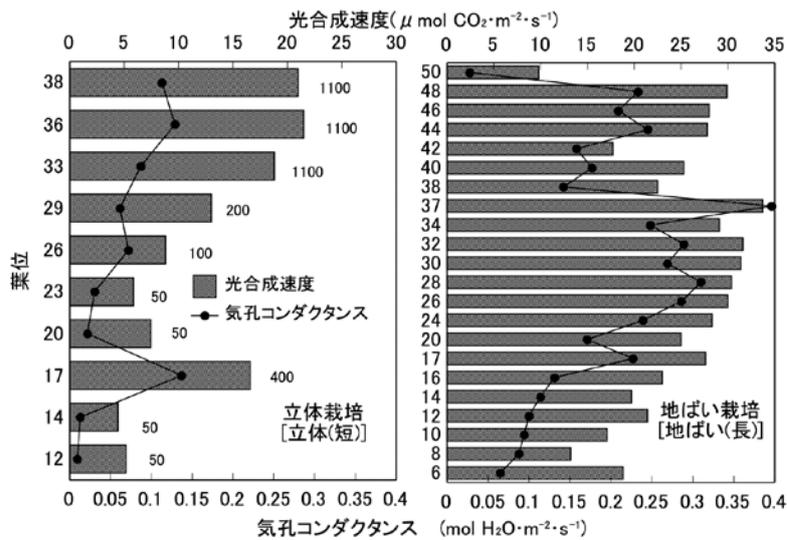


図-34 立体(左)および地ばい栽培(右)スイカ個体の葉位別光合成速度および気孔コンダクタンス
 品種：早生天竜
 整枝法は表-16, 図-30を参照
 立体栽培の図中の数値は測定時の設定PPFDを示す
 地ばい栽培の測定時の設定PPFDは $1200\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$

表-17 スイカの立体および地ばい栽培における整枝法が葉面積、果実重および果実糖度に及ぼす影響

整枝法 ^z	葉面積 ^y (m ² ・個体 ⁻¹)	LAI ^x	果実重 (kg・果実 ⁻¹)	果実糖度 (Brix %)
立体(短)	1.771 c ^w	1.69	3.90 c	10.4 ab
立体(長)	2.225 b	2.12	4.13 c	10.2 b
地ばい(短)	1.943 c	0.62	5.97 b	10.7 a
地ばい(長)	2.667 a	0.85	7.08 a	10.5 ab

品種:早生天竜

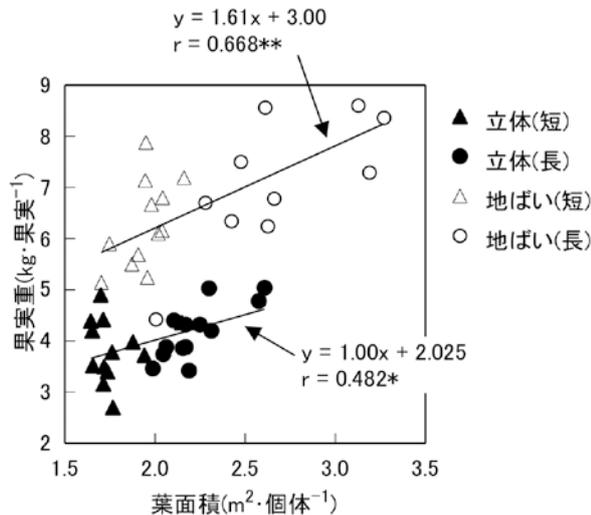
^z表-16, 図-30参照^y果実調査終了後に調査^x個体当たり葉面積/個体当たり土地面積^w同一英文字間ではTukey-Kramerの多重検定(危険率5%)で有意差なし[n=10~13(葉面積), n=10~29(果実重), n=10~20(果実糖度)]

図-35 スイカの立体および地ばい栽培における個体当たり葉面積と果実重の関係
 品種:早生天竜
 整枝法は表-16, 図-30を参照
 図中の式は回帰式
 rは相関係数
 *, **はそれぞれ5%, 1%水準で有意

でも、果実重は立体栽培で明らかに小さかった。

c 考察

本試験では、立体栽培の栽植密度が地ばい栽培よりも3倍高い条件下で生育、果実肥大性、受光態勢および葉位別の光合成速度を比較した。その結果、生育に関しては、本葉展開速度には立体栽培と地ばい栽培の間で若干の差がみられたものの、主枝および一次側枝の伸長速度には差がなかった。果実肥大では立体栽培と地ばい栽培の間で明らかな差がみられ、個体当たり葉面積が同じ場合でも、果実重は明らかに立体栽培で小さかった。大木・崎山(1995)も、抑制栽培カボチャにおいて地ば

い仕立てと立体仕立ての比較を行い、植物体の生育差は小さいが、果実重は地ばい仕立てよりも立体仕立てで小さいことを報告している。本試験の結果、立体栽培において中位~下位葉の葉面積算日射量が地ばい栽培よりも明らかに少なく、これらの葉の光合成速度も低い傾向があった。このことは、主枝あるいは一次側枝を空間に配置する立体栽培では、地ばい栽培よりもLAIが大きく、葉の立体配置による個体内あるいは個体間の相互遮蔽により、主枝や一次側枝、葉が地上面に平面的に配置される地ばい栽培よりも受光態勢が悪いことを示している。Misa et al. (1995)は草型の異なるラッカセイ品種を用いて、葉群構造と受光態勢の関係について検討し、高い受光効率、特に相互遮蔽の低減によって乾物生産が増加すると結論づけている。本試験では個体の個葉面積の分布については調査していないが、相互遮蔽による個体の受光量の低下が立体栽培個体の光合成産物の減少を生じさせ、果実重の減少を生じさせていると考えられる。

以上のように、積算日射計測フィルムと携帯型光合成蒸散測定装置を用いることにより、圃場条件下で立体栽培と地ばい栽培の間でのスイカ植物体の受光態勢や光合成の差異を数値化して比較することが可能であった。得られた結果から、密植されやすい立体栽培スイカ個体では、地ばい栽培よりも中位~下位葉の受光量が少なりやすいために、それらの葉の光合成速度が低く抑えられやすく、個体当たり光合成生産量が低下することによって、果実重が低下しやすいという特徴があると考えられた。

2 単位面積当たりの果実生産性の比較

立体栽培と地ばい栽培の個体では、主枝や側枝の配置が大きく異なり、それに伴って受光態勢も大きく異なることから、群落としての受光態勢も異なることが予想さ

れる。そして、栽植密度に対する収量の反応性や、単位面積当たり収量も異なるものと考えられるが、立体栽培と地ばい栽培の間で、これらについて検討された例は見当たらない。他のウリ科作物、キュウリ、カボチャ、メロン等でも、行われている割合には差があるものの、立体栽培（支柱栽培）と地ばい栽培がともに行われている。また、トマトでも、生食用の品種は主に支柱栽培が行われているが、加工用品種は一般に無支柱栽培（放任栽培）されている。しかし、これらスイカ以外の果菜類においても立体栽培（支柱栽培）と地ばい栽培（無支柱栽培）との間で複数の栽植密度条件を設定して果実生産性を検討した例は見当たらない。本節では、立体栽培と地ばい栽培での栽植密度に対する収量反応および受光量当たりの果実生産効率を比較し、立体栽培の単位面積当たりの果実生産性の特徴を地ばい栽培との比較において明らかにしようとした。

a 材料および方法

1) 供試品種および栽培法

試験は、抑制栽培（12月どり）と、早熟栽培（6～7月どり）で行った。ユウガオ‘かちどき2号’に接ぎ木したスイカ‘縞王マックスRE’を材料として用いた。抑制栽培では購入苗（PeSP 苗）を供試した。早熟栽培では、2000年3月16日にスイカ種子を、3月21日にユウガオ種子をパーミキュライトを詰めた育苗箱に播種し、3月28日に呼び接ぎした後、培養土を詰めた黒色ポリポット（直径7.5cm、高さ7.0cm）に移植してガラス室内で育苗した苗を供試した。

抑制栽培では1999年9月14日に本葉3～4枚の苗を、早熟栽培では2000年4月20日に本葉6～7枚の苗を、ガラス室内に定植し土耕栽培を行った。いずれの栽培時期も畝幅は立体栽培では210cm、地ばい栽培では420cmとした。抑制栽培では、株間を立体栽培で100cm、75cm、50cm、地ばい栽培で50cm、37.5cm、25cmとし、栽植密度はともに47.6個体・a⁻¹、63.5個体・a⁻¹、95.2個体・a⁻¹とした。早熟栽培では、株間を立体栽培、地ばい栽培とも50cm、37.5cm、25cmとし、栽植密度は立体栽培で95.2個体・a⁻¹、127.0個体・a⁻¹、190.5個体・a⁻¹、地ばい栽培で47.6個体・a⁻¹、63.5個体・a⁻¹、95.2個体・a⁻¹とした。畝はポリフィルム（伊藤忠サンプラス、ムシコンワイド）でマルチした。立体栽培では、基肥として畝面面積（全面積の約1/2）当たり、抑制栽培では苦土石灰15kg・a⁻¹、CDU化成15kg・a⁻¹（N、P₂O₅、K₂O各1.8kg・a⁻¹）を、早熟栽培では苦土石

灰12.5kg・a⁻¹、CDU化成40kg・a⁻¹（N、P₂O₅、K₂O各4.8kg・a⁻¹）を畝部だけに施用した。地ばい栽培では、立体栽培と根域を同じにするため、畦の約1/2に立体栽培と同量の施肥を行いマルチで覆った。かん水はマルチ内に設置したかん水チューブ（三石アグリ、エバフローA型）で適宜行った。定植後、苗の主枝を本葉5～6枚残して摘心し、2本の一次側枝を伸長させて一次側枝2本仕立てとした（図-36）。発生した他の側枝はすべて除去し、抑制栽培では第33節で、早熟栽培では第27節でそれぞれ摘心した。立体栽培では、伸長させた一次側枝は、約180cmの高さに張った直径5mmの鋼鉄製のワイヤーからつり下げたひもで上方に誘引した。受粉は人手で行い、果実は1個体あたり1果をいずれかの一次側枝に着果させた。着果節位は、抑制栽培では第22節前後、早熟栽培では第16節前後とした。立体栽培する場合には、15cm角に切った白色寒冷紗を底部に付けて十文字に結んだポリエチレン製のひもを用いて果実を支持し、一次側枝を誘引したものと同一ワイヤーからつり下げた。抑制栽培では、着果後、畦面当たりでN-P₂O₅-K₂O = 0.45-0.24-0.51kg・a⁻¹を液肥（OKF-1）で追肥した。

2) 調査項目

果実肥大期に立体栽培および地ばい栽培の各栽植密度から3～5個体選び、抑制栽培では受粉25～28日後に相当する1999年11月5日から7日間、早熟栽培では受粉26～29日後に相当する2000年6月13日から6

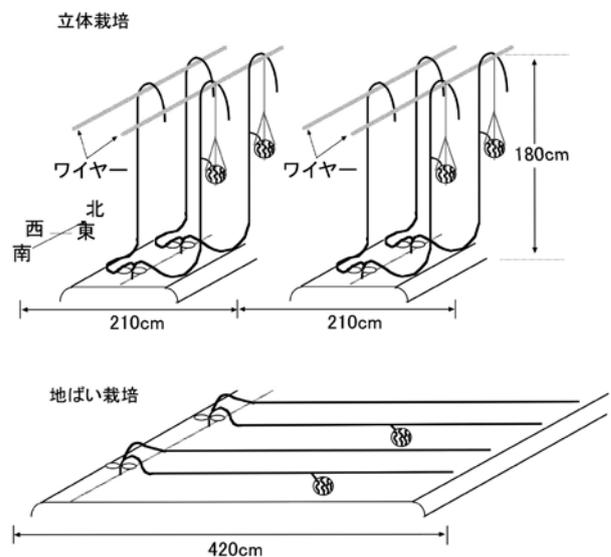


図-36 IV章2節の立体栽培および地ばい栽培の整枝法の模式図

日間、各個体の2本の一次側枝のうちの1本のすべての葉に積算日射計測フィルム(大成イーアンドエル, オプトリーフ R2-D)を貼付した。同時に積算日射量算出のための回帰式を作成するため、ガラス室内の遮へい物のない場所にフィルムと全天日射計(英弘精機, MS-42)を設置した。抑制栽培では7日後、早熟栽培では6日後にフィルムを回収し、オプトリーフ測定器(大成イーアンドエル, T-METER)で470nmの吸光度を測定して退色率を算出した。そして、遮へい物のない場所に設置したフィルムの退色率と全天日射計の計測値から回帰式(抑制栽培: $y = -102.5x + 208.7$, 早熟栽培: $y = -94.2x + 191.5$, x , フィルムの退色率; y , 積算日射量)を作成し、測定期間中の個葉の葉面積算日射量を算出した。

抑制栽培では受粉55日後に、早熟栽培では受粉42日後に果実を収穫し、果実の重量と糖度を測定した。糖度は、果実の中心部から採取した果肉汁液を糖度計(アタゴ, P-1)で測定した。

果実収穫後に、個葉の葉面積算日射量を測定した個体

の個葉の葉面積を面積計(林電工, AC-440)で測定した。そして、II章3節と同様に、葉位別の葉面積算日射量($MJ \cdot m^{-2}$)と収穫時に調査した葉位別の葉面積($m^2 \cdot 葉^{-1}$)から測定期間中の個葉当たり受光量($MJ \cdot 葉^{-1}$)を算出し、この値を個体毎に積算することにより測定した一次側枝当たり受光量($MJ \cdot 側枝^{-1}$)を算出した。この値を2倍して個体当たり受光量($MJ \cdot 個体^{-1}$)とした。

なお、各栽植密度の個体の配置は、独立して存在する立体栽培、地ばい栽培それぞれについて、2反復の乱塊法に準じた配置とした。抑制栽培では、立体栽培、地ばい栽培とも8個体2反復とし、果実の調査は各栽植密度計16個体の中から図表中に示した数を採用して行った。早熟栽培では、各栽植密度について立体栽培では16~20個体2反復、地ばい栽培では8~10個体2反復とし、果実の調査は立体栽培では各栽植密度計32~38個体、地ばい栽培では計18個体の中から図表中に示した数を採用して行った。

b 結果

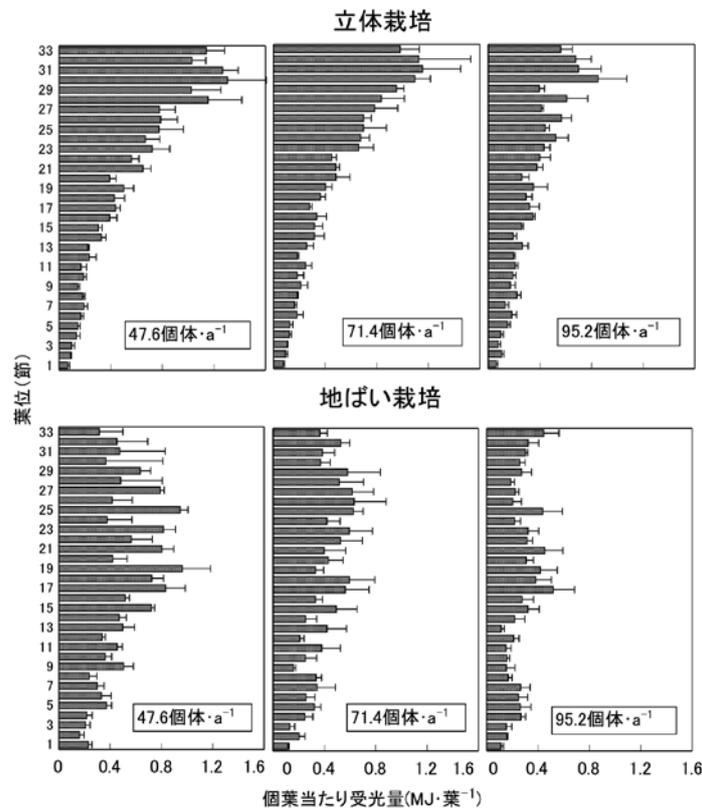


図-37 スイカの立体および地ばい栽培における葉位別の個葉当たり受光量に及ぼす栽植密度の影響(抑制栽培)
 品種: 縞王マックスRE
 個葉当たりの受光量は個葉の葉面積算日射量と葉面積から算出
 誤差線は SE(n=3~4)

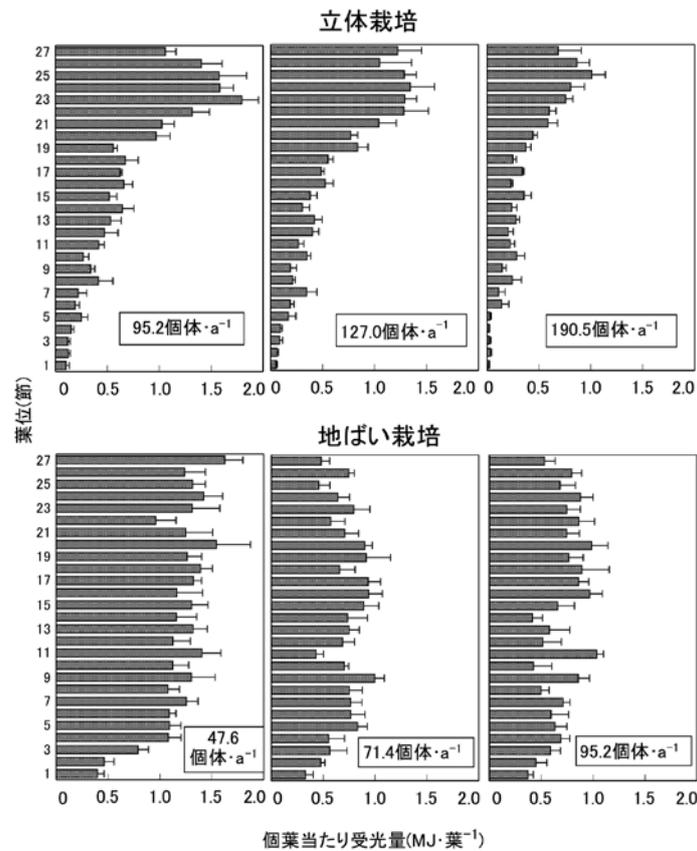


図-38 スイカの立体および地ばい栽培における葉位別の個葉当たり受光量に及ぼす栽植密度の影響（早熟栽培）
 品種：縞王マックスRE
 個葉当たりの受光量は個葉の葉面積算日射量と葉面積から算出
 誤差線は SE(n=5)

抑制栽培および早熟栽培における、積算日射計測フィルムで測定した各葉の葉面積算日射量と収穫時の葉面積から算出した、測定期間中の葉位別の個葉当たり受光量を図-37および図-38に示した。いずれの栽培時期においても、立体栽培では、個葉当たり受光量は栽植密度の上昇とともに特に上位葉で大きく減少した。一方、地ばい栽培では、個葉当たり受光量は栽植密度の上昇とともに全体的に減少する傾向が認められた。

測定期間中の個葉当たり受光量と果実重の関係を図-39に示した。いずれの栽培時期においても、測定期間中の個葉当たり受光量と果実重の間には高い正の相関関係が認められた。抑制栽培では、立体栽培と地ばい栽培の間で個葉当たり受光量と果実重の回帰直線にほとんど差はみられなかったが、早熟栽培では、立体栽培と地ばい栽培の間に差がみられ、立体栽培のほうが地ばい栽培よりも受光量当たりの果実重が大きい傾向が認められた。栽植密度と測定期間中の個葉当たり受光量との関係を

図-40に示した。抑制栽培における測定期間中の個葉当たり受光量は、立体栽培、地ばい栽培とも、栽植密度の上昇とともに減少したが、その減少程度は立体栽培の方が小さかった。早熟栽培においても、立体栽培、地ばい栽培とも個葉当たり受光量は、栽植密度の上昇とともに減少する傾向が認められた。

栽植密度と果実重および単位面積当たり収量の関係を図-41に示した。果実重は、いずれの栽培時期においても、立体栽培、地ばい栽培に関わらず栽植密度が高まるに従って小さくなった。抑制栽培では、栽植密度の上昇による果実重の低下程度が立体栽培で小さかった。よって、栽植密度が高くなるに従って立体栽培の方が単位面積当たりの果実収量が高くなった。早熟栽培では、今回設定した栽植密度の範囲では、立体栽培の単位面積当たり果実収量は 127 個体・a⁻¹ でピークとなり、190.5 個体・a⁻¹ でやや減少した。一方、地ばい栽培の単位面積当たり果実収量は栽植密度の上昇により漸増した。立

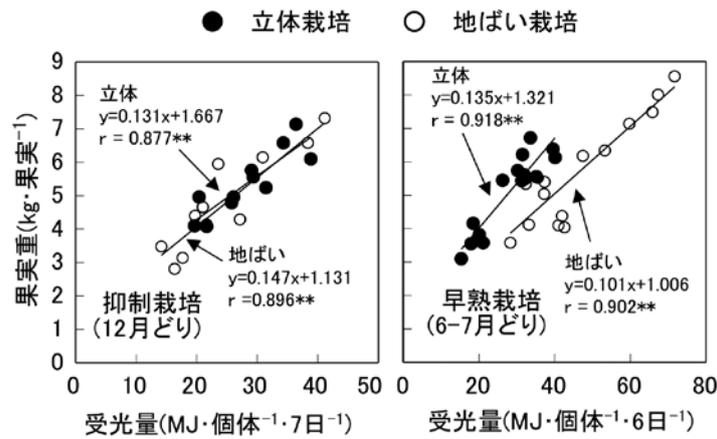


図-39 抑制栽培および早熟栽培でのスイカ立体および地ばい栽培における果実肥大期の個体当たり受光量と果実重の関係
 品種：縞王マックスRE
 図中の式は回帰式
 rは相関係数
 **は1%水準で有意

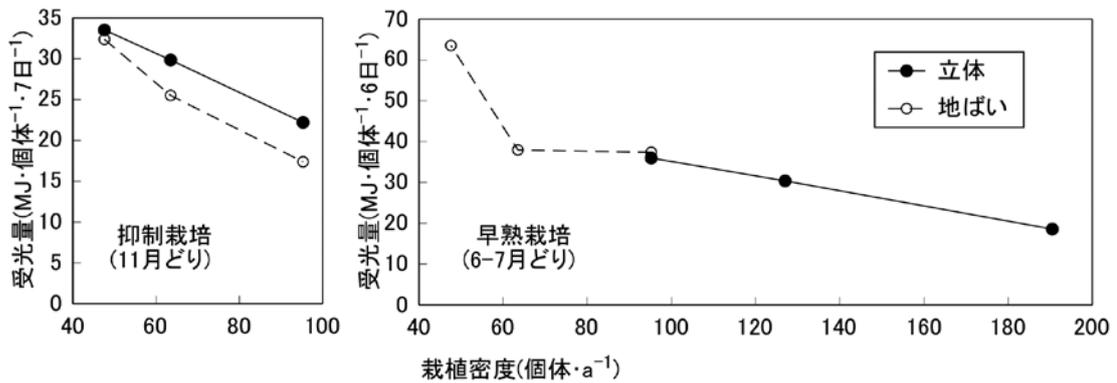


図-40 抑制栽培および早熟栽培でのスイカ立体および地ばい栽培における栽植密度と果実肥大期の個体当たり受光量との関係
 品種：縞王マックスRE

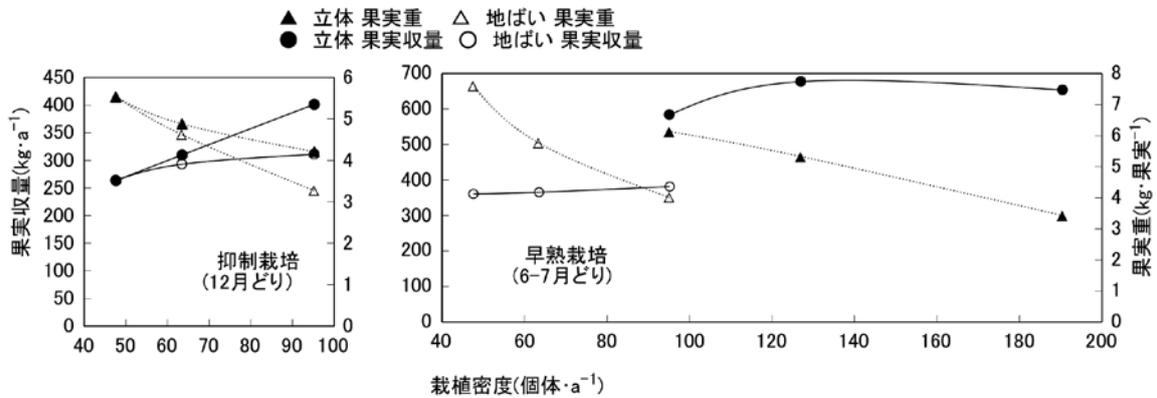


図-41 抑制栽培および早熟栽培でのスイカ立体および地ばい栽培における果実重および果実収量に及ぼす栽植密度の影響
 品種：縞王マックスRE

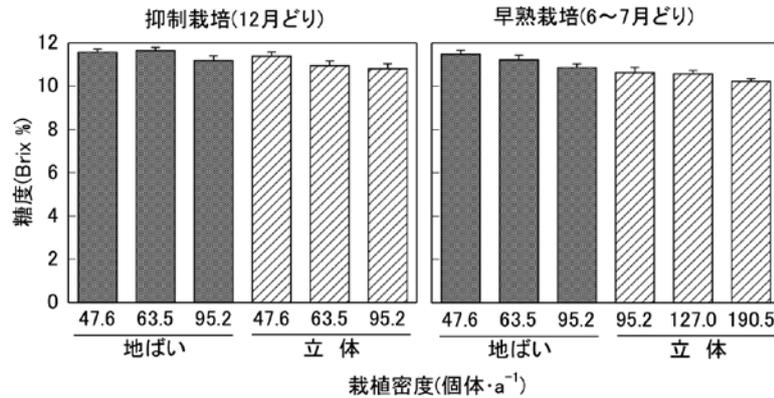


図-42 抑制栽培および早熟栽培でのスイカ立体および地ばい栽培における果実糖度に及ぼす栽植密度の影響
 品種：縞王マックスRE
 誤差線は SE(n=10~11)

体栽培，地ばい栽培の共通の栽植密度として設定した 95.2 個体・a⁻¹ では，地ばい栽培の中では最も果実収量が高く，立体栽培の中では最も果実収量が低かったが，地ばい栽培での果実収量は立体栽培の約 57% と低く，抑制栽培よりも差が大きかった。

収穫果実の糖度を図-42 に示した。果実糖度は，いずれの栽培時期においても，立体栽培，地ばい栽培に関わらず，栽植密度が低くなるに従って高くなる傾向が認められた。栽植密度が同じ場合，地ばい栽培の方が立体栽培よりも果実糖度がやや高い傾向が認められた。

c 考察

本試験では，抑制栽培においては立体栽培と地ばい栽培で栽植密度を揃える形で，早熟栽培においては株間を揃える形で検討を行った。その結果，栽植密度が高くなるに従って地ばい栽培，立体栽培とも果実重が低下するが，その低下程度は立体栽培の方が小さく，立体栽培のほうが密植条件下での単位面積当たりの果実収量が高くなることが明らかとなった。また，個体当たり受光量と果実重との関係において，抑制栽培では立体栽培と地ばい栽培の間で差異はみられず，早熟栽培では立体栽培のほうが地ばい栽培より個体の受光量当たりの果実重が大きくなる傾向がみられ，立体栽培における個体の受光量当たりの果実生産性は，地ばい栽培と同等以上であることが明らかとなった。抑制栽培に限ってみれば，栽植本数の増加に伴う個体当たり受光量の低下程度は立体栽培の方が小さく，葉が立体的に配置される立体栽培のほうが密植条件下ではより多くの光を捕捉でき，その結果，

果実重の低下程度も小さく面積当たり果実収量が増加するものと考えられた。植物体の誘引高さや収量との関係については，トマトにおいて，ハイワイヤー誘引のほうが慣行高さの誘引よりも受光態勢に優れており，空洞果の発生低減，糖度の向上等品質が向上すること（羽石・石原，2005），誘引高さが高いほうが収量が高いこと（細井，2003）が報告されており，葉群をより高い空間に配置した方が単位面積当たりの果実生産性が向上するものと考えられる。

なお，早熟栽培において，栽植密度 95.2 個体・a⁻¹ の立体および地ばい栽培の間で，果実重は立体栽培のほうが大きかったにもかかわらず個体当たり受光量にほとんど差がみられなかったという結果が得られた（図-40，図-41）。トマトでは，支柱栽培（立体栽培に相当）に比べて無支柱栽培（地ばい栽培に相当）のほうが葉における糖含有率が高く，茎における糖含有率が低かったことから，無支柱栽培個体では光合成産物の移行の悪化が起こっていたことが推測されている（田中・藤田，1972a）。早熟栽培の地ばい栽培スイカでも同様の光合成産物の移行の悪化が起こっていた可能性があるが，今回の結果からは不明なので，この理由については今後の検討が必要である。

本試験の結果から，立体栽培における個体の受光量当たりの果実生産性は，少なくとも地ばい栽培と同等以上であることが明らかとなった。一般に，立体栽培の方が地ばい栽培よりも果実が小さくなりやすいといわれているが，同様な株間で栽植した場合，つるを地面に平面的に誘引する地ばい栽培に比べて，つるを上方空間に誘引

する立体栽培では通常畝間を狭く設定することから、面積当たりの栽植本数が地ばい栽培よりも多くなり（本試験でも株間を揃えると栽植密度は立体栽培のほうが2倍になっている）、その結果、同じ株間では立体栽培のほうが個体当たり受光量が少なくなることが理由であると考えられる。栽植密度が高くなるほど果実重は低下するが、面積当たり果実収量は立体栽培の方が高くなる傾向が認められたことから、立体栽培は、密植条件下での小振りの果実の多収栽培に向いているといえる。

3 作業姿勢の比較

立体栽培では、主枝あるいは側枝を地面から上方に誘引することにより、交配、わき芽除去などの作業位置が高くなり、地ばい栽培のように腰をかがめた姿勢での作業が少なくなる。また、果実をひもやネットなどで吊せば、果実全面に光が当たるため、地ばい栽培で必要な玉直し作業がほとんど不要となるとともに、果実が空中にあることから収穫も立ち姿勢で行うことにより、作業が楽になる。このように、立体栽培化により、大幅な作業姿勢の改善が見込まれるが、これまでスイカ立体栽培において、その改善効果を数値化によって評価した例は見当たらない。作業姿勢の評価方法としては、「つらさ指数」による評価法（長町, 1986）、OWAS法（Karhu et al., 1977）、作業姿勢モニタによる解析（小林, 1994）等がある。本節では、立体栽培化することによってどのように軽作業化されたかを客観的に数値化して評価するため、果菜類に関して評価例のある作業姿勢モニタ（前川ら, 2000；石坂ら, 2003；前川・谷川, 2004；竹内ら, 2004；羽石・石原, 2005）およびつらさ指数（羽石・石原, 2005；金子ら, 2006）を用い、立体栽培と地ばい栽培でのわき芽除去および摘心作業を例にとって、数値化による立体栽培と地ばい栽培の間の作業姿勢の比較、およびそれら作業の作業効率についての比較を試みた。

a 材料および方法

ユウガオに接ぎ木したスイカ品種「縞王マックスRE」を1998年9月16日にガラス室内に定植し土耕栽培を行った。立体栽培では、畝幅210cm、株間50cm（栽植密度95.2株・a⁻¹）、1条植とし、つるは上方に誘引した。地ばい栽培では、畝幅420cm、株間50cm（栽植密度47.6株・a⁻¹）、1条植とした。ともに整枝法は一次側枝2本仕立て1果どりとした。立体および地ばい栽培における側枝除去作業および摘心作業（いずれもナイフを用

いて除去）について、農業研究センター〔現（独）農研機構 中央農業総合研究センター〕で開発された作業姿勢モニタ（小林, 1994）の試作機を用いて作業姿勢を1秒ごとに記録した。まず、得られたデータをもとに、解析プログラムを用いて作業姿勢のスティックピクチャー表示を行った。作業姿勢の解析には、作業姿勢モニタの大腿部及び体幹部用の角度センサーの値を用いた。なお、作業姿勢モニタの大腿部及び体幹部用の角度センサーにより、図-43のような角度方向でデータが記録される。体幹部および大腿部について得られた角度データについて、各々15°未満、15°以上30°未満、30°以上60°未満、60°以上90°未満、90°以上に分類し、作業中の出現割合を算出して作業姿勢の分布を評価した。また、これらの角度データを、「つらさ指数」の作業姿勢区分（長町, 1986, 図-44）に当てはめることによりつらさ指数に変換し（表-18）、作業中の平均的なつらさ指数

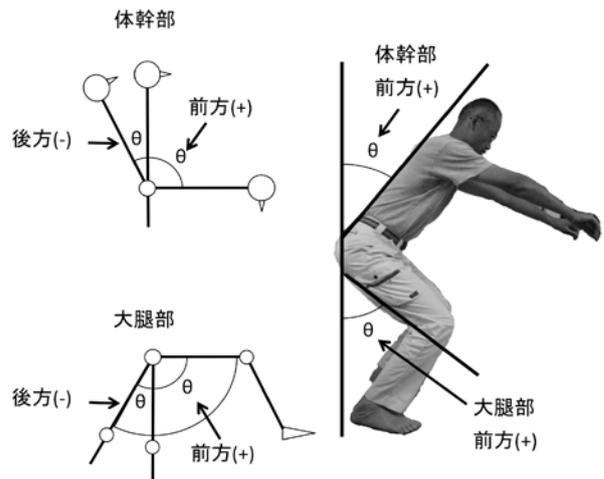


図-43 体幹部および大腿部の角度方向

つらさ指数	姿勢	動作内容	5	4	3	2	1
			しゃがんだ姿勢 (踵がついている)				
10		腰を深く曲げた中腰で上体を前屈					
6		膝を伸ばした中腰で上体を深く前屈					
6		腰を曲げた中腰で上体を前屈					
5		膝を伸ばした中腰で上体を前屈					

図-44 「つらさ指数」の作業姿勢区分（長町, 1986）

表－18 IV章3節での取得データのつらさ指数への変換基準

大腿部角度	体幹部角度	つらさ指数	相当する長町のつらさ指数
90≦	すべて	5	しゃがんだ姿勢
60≦X<90	すべて	10	腰を深く曲げた中腰で上体を前屈
30≦X<60	すべて	6	腰を曲げた中腰で上体を前屈
15≦X<30	90≦	6	膝を伸ばした中腰で上体を深く前屈
	30≦X<90	5	膝を伸ばした中腰で上体を前屈
	<30	4	膝を軽く曲げ上体を軽く前屈
<15	90≦	6	膝を伸ばした中腰で上体を深く前屈
	30≦X<90	5	膝を伸ばした中腰で上体を前屈
	15≦X<30	5	膝を伸ばし上体を軽く前屈
	<15	1	立ち姿勢

表－19 立体および地ばい栽培の側枝除去および摘心作業におけるつらさ指数および所要時間

調査日 (月・日)	被験者 ^z	作業	栽培 方式	つらさ 指数	所要 時間 ^y (秒)	除去 総数 ^y (本)	1本当たり 所要時間 (秒)	所要 時間比 ^x (%)
10.09	A	側枝除去	立体	4.9	450	83	5.4	73.1
			地ばい	6.3	935	126	7.4	
10.16	A	側枝除去	立体	3.6	587	128	4.6	87.8
			地ばい	5.8	1065	204	5.2	
10.16	A	摘心	立体	1.8	658	33	19.9	119.9
			地ばい	5.9	715	43	16.6	
10.23	B	側枝除去	地ばい	8.6	670	45	14.9	-

^zA, 身長183cm・男性; B, 身長155cm・女性

^y地ばい栽培, 立体栽培とも30個体(面積は地ばい63.0m², 立体 31.5m²)当たりの値

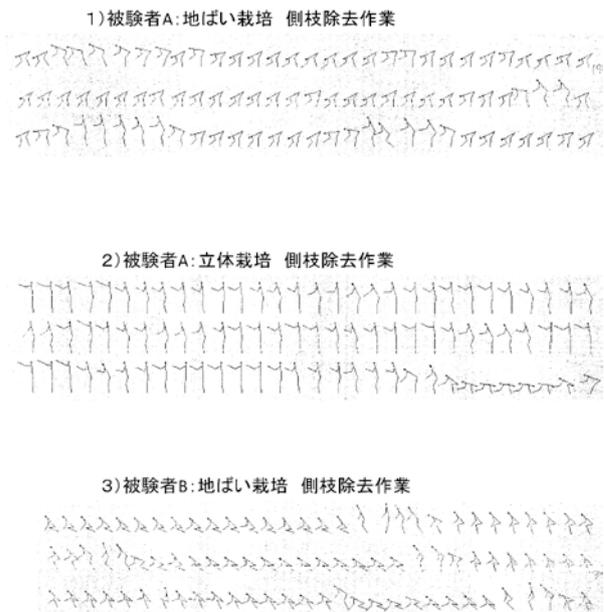
^x地ばい栽培に対する立体栽培の1本当たり所要時間の割合

を算出した。さらに、側枝や摘心部の除去本数と作業時間から、作業効率について評価を行った。

b 結果

立体および地ばい栽培における側枝除去作業の作業姿勢のスティックピクチャ表示の例を図－45に示した。この図でわかるように、側枝除去作業において、地ばい栽培では腰をかがめた姿勢が、立体栽培では立ち姿勢が多かった。

側枝除去および摘心作業における体幹部および大腿部の角度による作業姿勢の分布を図－46に示した。被験者Aの側枝除去および摘心作業において、地ばい栽培では体幹部を90度以上に深く前屈させた姿勢の割合が多かったが、立体栽培では地ばい栽培と比べて、体幹部、大腿部ともに角度が小さく立位に近い姿勢での作業の割合が多かった。同じ地ばい栽培の側枝除去作業でも、被験者Aは中腰の姿勢で行う割合が多かったのに対して、被験者Bはしゃがむ姿勢の割合が多かったこと(図－



図－45 立体および地ばい栽培における側枝除去作業の作業姿勢のスティックピクチャ表示の例
被験者A：身長183cm, 男性
被験者B：身長155cm, 女性

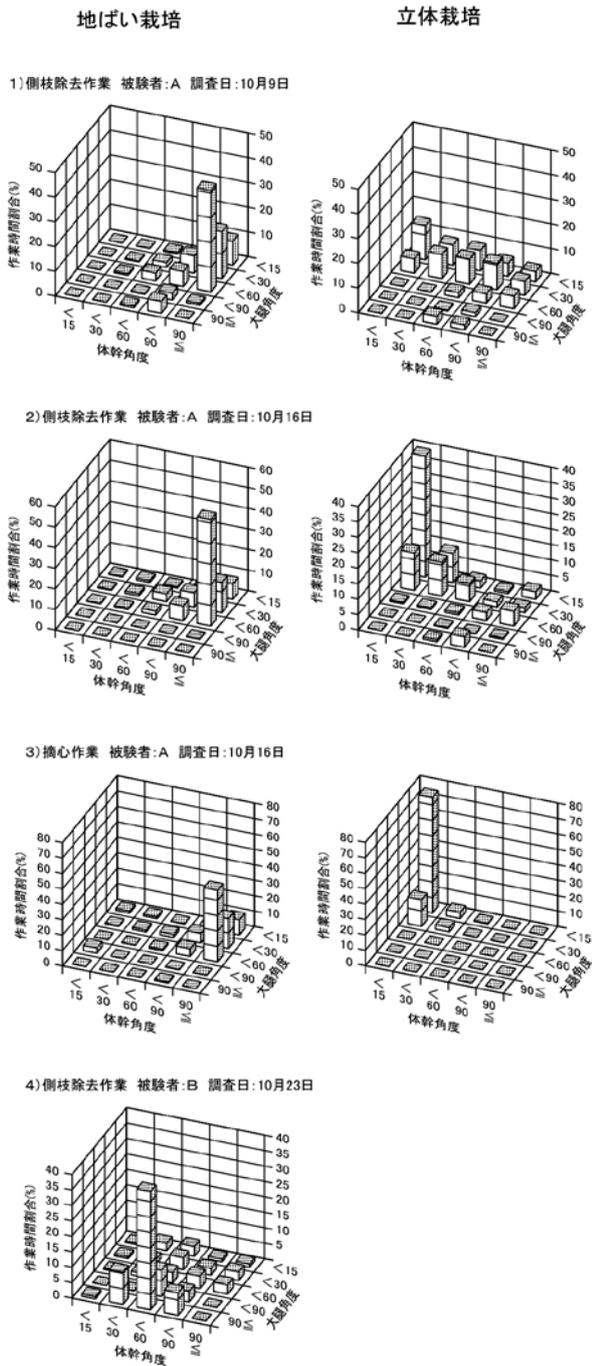


図-46 立体および地ばい栽培の側枝除去および摘心作業における作業姿勢分布
 被験者A:身長183cm, 男性
 被験者B:身長155cm, 女性

45) から、作業姿勢に違いがみられ、被験者A, Bの体幹部および大腿部の角度の分布は異なった。

側枝除去および摘心作業におけるつらさ指数、作業時間および作業効率を表-19に示した。被験者Aの側枝除去および摘心作業における平均的なつらさ指数はいず

れも立体栽培で小さかった。被験者Aの側枝除去作業において、10月9日より10月16日の立体栽培のつらさ指数が小さくなったが、側枝の発生位置がつの伸長とともに高くなり、立位に近い姿勢の割合がより多くなったためであった。被験者Aの側枝除去作業において、側枝1本当たりの除去に要する時間は立体栽培で12~27%短く、作業効率が改善された。一方、摘心作業では摘心1本当たりの除去に要する時間は立体栽培で約20%長く、作業効率の改善はみられなかった。地ばい栽培の側枝除去作業において、被験者Bのほうが、被験者Aよりも地ばい栽培の側枝除去作業のつらさ指数が大きく、側枝1本当たりの除去に要する時間が2~3倍要する等、被験者による差が大きかった。

c 考察

本節で得られた結果から、作業姿勢モニタを用いることにより、立体および地ばい栽培における作業姿勢を客観的に評価することができることが可能であり、立体栽培化により作業姿勢の改善が図られることを数値化して示すことが可能であった。今回、調査対象とした作業は側枝除去作業と摘心作業のみで、すべての作業について調査したわけではないが、徒手受粉や果実収穫の作業は、側枝除去作業や摘心作業と同じく、地ばい栽培では地表面で、立体栽培では空中で作業を行うことになるので、作業姿勢を示すつらさ指数は、他の作業においても立体栽培で減少するものと推察される。また、被験者Aの地ばい栽培での側枝除去作業や摘心作業のつらさ指数は、作業日の間での大きな差はみられず、同一人による同様の作業であれば、作業姿勢モニタを用いて再現性のある作業姿勢の数値化ができるものと考えられた。よって、今回の試験結果より、作業姿勢の点からの負担は立体栽培化により軽減されることは明らかであるといえる。ただし、今回の試験において、同じ側枝除去作業でも被験者AとBでは作業中の体幹部や大腿部の角度の頻度分布が異なることから、栽培法の違いによる作業姿勢の違いの評価には、被験者の身長、筋力等について留意する必要があると思われた。また、表-19より、同じ栽培法の側枝除去作業でも、単位面積当たりの除去本数が少なくなると、側枝を探す時間の増加や、1回の移動で除去できる本数の減少等により、1本当たりの除去に要する時間も長くなる傾向があった。よって、異なる整枝法について作業効率を評価する場合には、作業機会の頻度等に留意する必要があると思われ、立体栽培化による作業効率への影響の評価については、今後の検討課題である。

4 本章の考察

本章では、立体栽培と地ばい栽培の間での果実生産特性および作業性の差異について比較検討することを試みた。その結果、果実生産特性の点からは、スイカの立体栽培では、地ばい栽培と比べて、中～下位の葉の受光量、光合成速度が低下するものの、受光量当たりの果実生産効率は地ばい栽培と同等かそれ以上であること、密植条件下では面積当たり果実収量が地ばい栽培よりも高くなることを、作業性の点からは側枝除去や摘心作業の作業姿勢が大幅に改善されることによって身体負担も軽減されることを、具体的な数値化による比較を行って明らかにした。これまで、カボチャ（大木・崎山、1995）において、立体栽培の果実重は地ばい栽培よりも小さくなるのが報告されているが、これは立体栽培の栽植密度が高い条件下での結果である。今回の試験により、立体栽培スイカの受光量当たりの果実生産効率は少なくとも地ばい栽培スイカより悪いことはなく、個体当たり受光量が同じであれば、立体栽培の果実重は地ばい栽培と同等かそれ以上となることが明らかとなった。立体栽培のほう果実が小さくなりやすいという印象（誤解）を持たれやすいのは、主枝あるいは側枝を空中配置することにより、畝幅が狭く設定されやすいために密植になりやすく、結果として個体当たり受光量が低下して果実重が小さくなるためであると考えられる。むしろ立体栽培では畝幅を狭く設定することが可能で密植が可能となり、地ばい栽培よりも面積当たりの果実収量が増加することが特徴であるといえる。本章の結果から、立体栽培は、地ばい栽培と比較して小ぶりの果実の多収生産に適した軽労的な栽培法であると結論づけられる。

V 総合考察

本研究は、スイカ生産において、作業負荷の大きい慣行の地ばい栽培に替わる栽培技術の選択肢の一つとして立体栽培を位置付け、葉面積や受光態勢、圃場光合成特性、光合成産物のソース・シンク関係と果実生産との関係、ならびに作業性の数値化を試み、それらをもとに、地ばい栽培との比較において立体栽培の果実生産特性を明らかにしようとしたものである。

1 立体栽培スイカの果実重を決定する要因

II章では、スイカ個体の果実肥大特性を明らかにすることを目的として、立体栽培個体における着果節位、整

枝法および栽植密度と果実重との関係について、葉面積や受光態勢、圃場光合成特性と関連づけて検討した。その結果、立体栽培における着果節位による果実重の差異は果実肥大期の個体当たり葉面積の差異によって生じると考えられること、整枝法や栽植密度の違いによる果実肥大の差異も同様に果実肥大期の個体当たり葉面積の差異によるが、場合により葉面積と果実重の関係（回帰直線）に違いがみられること、栽植密度の違いによる果実重の差異は主として個体当たり受光量の差異がもたらす光合成生産力の違いによって生じることを明らかにした。

III章では、1本あるいは2本仕立て1果どりの立体栽培における果実肥大期の異なる着生位置の葉が果実肥大にどのように寄与しているのかを明らかにすることを目的として、¹³Cトレーサー法により果実肥大期の光合成産物の転流・分配を解析した。その結果、仕立て本数にかかわらず果実肥大期間中の光合成産物の大部分が果実に分配されること、根への光合成産物の供給は、2本仕立て1果どりの場合は無着果枝上の葉から、1本仕立て1果どりの場合は限られた下位葉あるいは下位節から発生した一次側枝の葉からのみ行われていることを明らかにした。

以上の結果より、スイカでは果実肥大期間中の光合成産物のほとんどが果実に分配されるため、仕立て本数にかかわらず、少なくとも1果着果の場合には、果実重は果実肥大期の個体の光合成生産量によってほぼ決定されるものと考えられ、そのため光合成生産量を規定する個体当たり受光量や（LAI等がある一定の範囲内であれば）葉面積と果実重との間に高い正の相関関係が認められるものと考えられた。今回の検討で明らかとなった、スイカの果実肥大期を通した光合成産物の高い転流率と果実への高い分配率により、果実肥大期間中のほとんどの光合成産物が果実に集中するという事実は、果実肥大期間の個体当たり光合成生産量に密接に関連した受光量、葉面積の把握や予測により果実重や面積当たり果実収量の精度の高い予測が可能であること、あるいは葉面積や栽植密度の調整等による個体当たり受光量の制御により精度の高い果実重の制御が可能であることを示唆している。スイカのみならず最近の消費者の需要は多様化が進んでおり、本研究により、スイカにおける果実重制御に発展可能な知見が得られた意義は大きいと考える。

2 果実生産特性の評価指標としての「個体当たり受光量」の有用性

II章およびIV章において、個体当たり受光量という評

価指標を設定し、果実重との関係解析を試みた。これまで、果菜類において、葉面積と果実重あるいは果実収量との関係を調べたものはあるが、受光量という葉面の光条件を直接的に測定し個体当たり受光量を算出して果実重や収量を評価・検討した例は著者の知る限り見当たらない。葉面積と果実重との関係の解析は、葉面積を測定することにより光合成生産能力を間接的に推定していることになるが、今回の検討で明らかになったように、栽植密度、栽植様式、受光態勢等が大きく異なる場合には、個体当たり葉面積と果実重との関係（回帰直線）に違いが生じる場合がある。個体当たり受光量も、個体の光合成生産能力を間接的に推定しているものであるが、葉面積という指標よりは、光の要因を加味している点で光合成生産能力により近い指標であるといえる。個体当たり受光量という指標を用いた結果、立体栽培と地ばい栽培との比較等、大きく栽植様式や受光態勢が異なる整枝法間での果実生産特性を、葉面積という指標よりも光合成生産能力により近い、より直接的な形で明確に示すことができたと考えられる。本来は、果実生産性について個体の光合成の実態を直接測定してその関係を解析することが理想的であるが、光合成測定装置は非常に高価であること、実際に圃場で生育している植物体の個体当たり光合成速度を評価することは、たとえ個葉光合成速度の積算によって評価するとしても、労力や時間の制約の関係で難しい。

スイカを含む果菜類の立体栽培においては、イネやムギ等のように多数の個体で面的に均一な群落を構成する作物と異なり、栽植部分であるうね部と非栽植部分である通路部分に分かれており土地当たりの葉の配置の粗密が大きいことから、群落の上下での光量の差から受光率を測定し植物体の受光量を推定する（白岩ら、2011）のではなく、今回行った個葉の受光量から植物体当たりの受光量を推定する手法がより妥当であると考えられる。また、ロング光量子センサーや管型日射計による光環境の瞬時値の測定では、測定時の条件によって生ずる変動や、群落内への光の透過程度の日変化が避けられないが、積算日射計測フィルムでの測定値は期間積算値の測定値ということができ、より信頼性の高い値を得ることができるとされている（白岩ら、2011）。よって、今回試みた、積算日射計測フィルムを用いて個葉の受光量を測定して個体当たり受光量を算出し、果実肥大との関係を解析する手法は、果菜類の整枝・仕立て法、特にLAIや葉の配置等、受光態勢が大きく異なる整枝・仕立て法について、実際の圃場レベルで生産性を検討する場合に、

汎用的かつより直接的な評価指標の一つとして有望であると考えられる。

3 スイカ栽培における立体栽培化の有利性、現状および今後の展望

IV章では、立体栽培と地ばい栽培の間での果実生産特性および作業性の差異について検討し、それらの特徴を数値化して明らかにすることを試みた。果実生産特性に関しては、立体栽培のほうが地ばい栽培よりも密植条件下での単位面積当たりの果実収量が高くなること、立体栽培における個体の受光量当たりの果実生産性は、地ばい栽培と比べて少なくとも低くはないことを明らかにした。作業性に関しては、作業姿勢モニタを用いることにより、地ばい栽培および立体栽培における作業姿勢を客観的に評価することができることが可能であり、立体栽培化により作業姿勢の改善が図られることを数値化して示すことができることを明らかにした。本研究で得られた結果から、立体栽培は、地ばい栽培と比較して作業姿勢が改善された、果実生産における光利用効率を低下させることなく密植・多収生産を可能とする栽培法であると結論づけられる。そして、作業姿勢が改善されることから整枝等の管理が行き届き、果実を空中につるすことから果実全面に光が当たり、地ばい栽培よりも品質の安定した果実の生産を行いやすいと考えられる。近年、世帯人数の減少、冷蔵庫への入れやすさ等により、消費者は大玉スイカを丸ごと1個買うよりも、カット販売されたスイカを買う傾向にある。また、同様な理由から、より小型果実の需要が高まっており、スイカでも「量より質」が求められているといえる。実際、スイカ全体の消費量が落ち込む中で小玉スイカの消費は維持されるとされる（杉山、2011）。そして、一時期よりは輸入量は低位安定となっているものの（財務省、2011）、アメリカ合衆国や韓国等の外国産スイカに対抗するためにも高品質な果実を生産する必要が生じている。緒言でも述べたとおり、スイカの立体栽培は高知県を中心にハウス抑制～半促成作型で行われ、熊本県においてもここ10年ほどの間に導入が進んでいる。スイカの全施設栽培面積からみるとその面積はごくわずかであるが、立体栽培で生産されたスイカは高品質果実として市場で認知されており、実際に高単価で販売されている。地ばい栽培よりも小型の果実の密植・多収生産に向き、高品質果実が生産しやすい立体栽培は、近年の高品質化の要望に応えられる栽培法の一つであるといえる。

最近、種苗会社によって、大玉品種並みの肉質（いわ

ゆる「しゃり」感)を持ち、裂果しにくい小玉品種(貝塚, 2002)や、立体栽培向けの中玉品種が育成されている。これらの品種と立体栽培を組み合わせることで密植栽培を行うことにより、高品質な中～小玉果実の多収生産が可能と考えられる。ただし、小玉品種は、本研究で検討した大玉品種と比較して葉面積当たりの果実生産効率が異なる可能性があるため、小玉品種の立体栽培における果実生産特性については改めて検討する必要がある。また、近年、部分不活化花粉を用いた新しい種なしスイカの生産技術が開発された(Sugiyama and Morishita, 2000)。この技術は、受粉した2倍体の品種の果実そのものを、果実品質をそのままに種子なしにする画期的な技術である。花粉の長期保存法の開発(Akutsu and Sugiyama, 2008)による部分不活化花粉作出の分業化、開花前日の蕾受粉法の開発(杉山・阿久津, 2010)による受粉関連作業の大幅な省力化が可能となったことから実用性が高まっているが、現状では人手による受粉が必要であり、この部分不活化花粉を利用した種なしスイカ生産において、立ち姿勢で受粉作業が可能な立体栽培がより有用な栽培方式であるといえる。

スイカの立体栽培は、誘引されたつるが強風を受けると揺れて痛む恐れがあるため、ハウス等施設内での栽培が前提であり、トンネルや露地が主体のスイカ生産の形態を大きく変えるものではないと思われる。しかし、緒言でも述べたとおり、スイカ栽培面積全体に対する比率は高くはないものの、秋～初夏に収穫する作型を中心にスイカの施設栽培面積自体はかなり大きい。施設栽培が行われる作型の一つである抑制栽培のスイカ(秋に食べるスイカ)については、消費者の要望として、夏に食べるスイカに比べて味がよいこと、小玉などで量は少なくてもよいことという回答が、価格が安いこととした回答を大幅に上回り、少量の食味のよいものを望んでいるというアンケート結果も得られており(町田, 2008)、夏場以外に生産される、換言すると施設で生産されるスイカについては良食味等の高品質化がより求められているといえる。今後、高品質化・差別化を重視し、かつ生産者の高齢化や新たな生産の担い手に対応したスイカ生産を考えた場合、立体栽培は、スイカの施設生産において地ばい栽培に替わる有力な生産技術の一つであると考えられると結論づけて本論文を締めくくりたい。

VI 摘 要

スイカは、果菜類の中でキュウリ、トマトに次いで生産量が多い果実的野菜であり、その施設栽培面積も野菜類の中ではトマト、メロン類、ホウレンソウ、イチゴ、キュウリに次いで多く、施設園芸における主要な生産品目であるが、その生産量は減少している。本研究は、スイカの施設生産において、作業負荷の大きい慣行の地ばい栽培に替わる技術として空間という環境を有効利用できる立体栽培に着目し、立体栽培における葉面積や受光態勢、圃場光合成特性、光合成産物のソース・シンク関係と果実生産との関係を数値化してその特性を明らかにすること、また、地ばい栽培との比較において、受光態勢、圃場光合成特性、栽植密度に対する果実収量特性および作業性の特徴を明らかにすることを目的として行った。

II章では、立体栽培スイカの果実肥大に影響を及ぼす要因について検討した。まず、2本仕立て1果どりにおける着果節位が果実肥大に及ぼす影響について検討したところ、果実重は着果節位が高いほど大きかった。着果節位が高いほど果実肥大期を通して個体当たり葉面積が大きく、果実肥大期を通して個体当たり葉面積と収穫時の果実重との間にはいずれも高い正の相関関係が認められた。従って、着果節位の違いによる果実肥大期の個体当たり葉面積の差異が果実重決定の主要な要因の一つであると考えられた。

次に、早熟栽培と抑制栽培において、立体栽培における1～3本仕立て1果どりの様々な整枝法が果実肥大に及ぼす影響について、個体当たり葉面積と果実重の関係に着目して検討したところ、それぞれの栽培時期においては、整枝法にかかわらず個体当たり葉面積と果実重の間には高い正の相関関係が認められた。しかし、栽培時期の違いにより個体当たり葉面積と果実重の関係(回帰直線)に差異がみられ、立体栽培における果実肥大特性をより詳細に解析するためには、受光態勢についても考慮する必要があると考えられた。

そこで、スイカの立体栽培の果実肥大に及ぼす栽植密度の影響について、個体当たり受光量や光合成量と関連づけて検討を行った。その結果、各栽植密度においては、個体当たり葉面積と果実重の間には正の相関関係がみられたが、栽植密度の違いにより個体の葉面積と果実重の関係(回帰直線)には差異がみられ、栽植密度が低いほど、葉面積当たりの果実重は大きくなる傾向がみられた。

個葉の葉面積算日射量と葉面積から算出した個体当たり受光量、および個葉の光合成速度と葉面積から算出した個体当たり光合成速度と果実重との間には、明確な比例関係が認められた。よって、立体栽培における栽植密度の違いによる果実肥大の差異は、主として個体の受光量の差異がもたらす光合成生産力の差異によって生じると考えられた。

II章の結果から、立体栽培スイカ個体の果実肥大性の違いは、栽培時期が同じでかつ栽植密度、栽植様式がある程度の範囲内である場合には、主に個体の葉面積の違いによって説明可能であるが、栽植密度や栽植様式が大きく異なる個体の果実肥大特性を比較する場合には、個体の葉面積よりも受光量や光合成速度を指標としたほうが、より適切であると考えられた。

続いてIII章で、立体栽培スイカの果実肥大を決定する要因をより明確にするために、1本あるいは2本仕立て1果どりの立体栽培における果実肥大期の光合成産物の転流・分配を調査した。光合成産物の葉からの転流率は、1本仕立て1果どりでは葉位にかかわらず、2本仕立て1果どりでは下位葉を除いて、果実肥大期を通して70～80%以上と高かった。1本仕立て、2本仕立てとも、果実肥大期を通して $^{13}\text{CO}_2$ 処理を行った全ての葉の光合成産物の大部分が果実に分配された。果実肥大期の果実および根に関するソース・シンク単位はそれぞれ、2本仕立て1果どりでは個体上の全ての葉・果実、無着果枝上の葉・根、1本仕立て1果どりでは個体上の全ての葉・果実、下位の限られた葉・根であると考えられた。大部分の葉において光合成産物の転流率が高く、しかも転流された光合成産物の大部分が果実へ分配されたことから、果実肥大期の光合成産物の大部分は果実に分配された。よって、果実肥大期の個体当たり葉面積や受光量、光合成速度と果実重との間にみられた高い正の相関関係は、植物体で生成した光合成産物の大部分が果実肥大期を通して果実に集中するというスイカの特性によってほぼ説明できるものと結論づけられた。

最後にIV章で、地ばい栽培に対する立体栽培の特徴を明らかにすることを目的として、立体栽培と地ばい栽培の間での果実生産特性ならびに作業性の差異について比較検討した。まず、2本仕立て1果どりにおいて、立体栽培の栽植密度を高く設定した条件下で、個体の生育、果実肥大性、受光態勢および葉位別光合成速度について比較した。その結果、密植されやすい立体栽培スイカ個体では、地ばい栽培よりも中位～下位葉の受光量が少なくなりやすいために、それらの葉の光合成速度が低く抑

えられやすく、個体当たり光合成生産量が低下することによって、果実重が低下しやすいという特徴があるものと考えられた。

次に、抑制栽培と早熟栽培での2本仕立て1果どりにおいて、立体栽培と地ばい栽培の間での栽植密度に対する収量反応、および受光量当たりの果実生産効率について比較した。その結果、立体栽培における個体の受光量当たりの果実生産性は、地ばい栽培と同等以上であることが明らかとなった。また、立体栽培のほうが密植条件下での単位面積当たりの果実収量が高くなることが明らかとなった。

さらに、立体栽培化による軽作業化程度を数値化して客観的に評価するため、作業姿勢モニタおよびつらさ指数を用い、立体栽培と地ばい栽培の間での側枝除去、摘心作業の作業姿勢および作業効率の比較を試みた。その結果、立体栽培化によって、体幹部および大腿部の曲げ角度が小さい姿勢が多くなりつらさ指数が低下すること、側枝除去作業においては1本当たりの除去時間が短縮して作業効率が図られることを数値化して示すことができた。

IV章の結果から、スイカ立体栽培は、地ばい栽培と比較して作業姿勢が改善され、果実生産における光利用効率を低下させることなく密植・多収生産を可能とする栽培法であると結論づけられた。

本研究で明らかとなった、スイカでは果実肥大期間中のほとんどの光合成産物が果実に集中するという知見は、果実肥大期間の個体当たり受光量、葉面積の把握や予測により果実重や面積当たり果実収量の精度の高い予測が可能であること、あるいは葉面積や栽植密度の調整等による個体当たり受光量制御により精度の高い果実重の制御が可能であることを示唆しており、スイカにおける果実重制御技術に発展可能な知見が得られたと考える。また、本研究で提示した個体当たり受光量という指標は、立体栽培と地ばい栽培との比較等、大きく栽植様式や受光態勢が異なる整枝法間での果実生産特性を比較する上で有用であることが明らかとなり、今後の果菜類の整枝法、特にLAIや葉の配置等、受光態勢が大きく異なる整枝法について、実際の圃場レベルで生産性を検討する際の指標として広く活用できるものとする。

さらに、本研究で明らかとなった、立体栽培における個体の受光量当たりの果実生産性は地ばい栽培と比べて同等以上であり、立体栽培のほうが地ばい栽培よりも密植条件下での単位面積当たりの果実収量が高くなるという知見は、スイカの立体栽培が、近年の高品質な中・小

玉果実への嗜好の変化に対応した生産技術であることを示している。よって、スイカの立体栽培は、今後のスイカ生産、中でも施設生産における有望な生産技術であると結論づけられる。

引用文献

- 1) Akutsu, M. and K. Sugiyama (2008): Establishment of a long-term storage method for soft X-ray irradiated pollen. *Euphytica*, **164**, 303-308.
- 2) Barrett, J. E. III and H. A. Amling (1978): Effects of developing fruits on production and translocation of ^{14}C -labeled assimilates in cucumber. *HortScience*, **13**, 545-547.
- 3) Brinen, G. H., S. J. Locascio and G. W. Elimstron (1979): Plant and row spacing, mulch, and fertilizer rate effects on watermelon production. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, **104**, 724-726.
- 4) Cohen, S., A. Schaffer, S. Shen, S. Cohen and M. Sagi (1999): Light distribution and canopy structure in greenhouse muskmelon. *Acta Hort.*, **507**, 17-24.
- 5) Duthie, J. A., J. W. Shreffler, B. W. Roberts and J.V. Edelson (1999a): Plant density-dependent variation in marketable yield, fruit biomass, and marketable fraction in watermelon. *Crop Sci.*, **39**, 406-412.
- 6) Duthie, J. A., B. W. Roberts, J. V. Edelson and J. W. Shreffler (1999b): Plant density-dependent variation in density, frequency, and size of watermelon fruits. *Crop Sci.*, **39**, 412-417.
- 7) 伏原肇 (2004): 第1章 高設栽培の特徴とねらい. イチゴの高設栽培, 9-20, 農山漁村文化協会, 東京.
- 8) 萩生田邦雄 (1997): ハウス栽培メロンにおける葉数および摘葉節位が果実の肥大, 品質におよぼす影響. 山形農学会報, **54**, 3-9.
- 9) 萩原十・余吾卓也 (1942): 西瓜の葉面積と果実との関係. 園学雑, **12**, 272-276.
- 10) 羽石重忠・石原良行 (2005): トマト促成栽培におけるハイワイヤー整枝法の特長. 栃木農試研報, **55**, 15-26.
- 11) 長谷川利弘 (2004): 乾物分配特性, 遺伝要因と収量, 24 収量と品質. 新編農学大事典, 839 養賢堂, 東京.
- 12) 平井剛・杉山裕・中野雅章 (2004): 短節間カボチャ「つるなしやっこ」の収量性および省力性. 園学研, **3**, 287-290.
- 13) 平井剛・後藤英次・中村隆一 (2005a): メロンのハウス抑制地ばい栽培における着果節位および整枝方法が果実糖度に及ぼす影響. 園学研, **4**, 55-58.
- 14) 平井剛・後藤英次・中村隆一・大橋優二・小宮山誠一 (2005b): スイカの裾換気型トンネル栽培における密閉および固定管理が生育, 収量および果実品質向上に及ぼす影響. 園学研, **4**, 319-322.
- 15) 細井徳夫 (2003): 葉面積を4水準に制御した樹高3mトマト個体群の収量解析. 野菜茶研研報, **2**, 245-265.
- 16) Hughes, D.L., J. Bosland and M. Yamaguchi (1983): Movement of photosynthates in muskmelon plants. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, **108**, 189-192.
- 17) Ibarra-Jimenez, L., J. Muguia-Lopez, A.J. Lozano-del Rio and A. Zermeno-Gonzalez (2005): Effect of plastic mulch and row covers on photosynthesis and yield of watermelon. *Aust. J. Exp. Agr.*, **45**, 1653-1657.
- 18) 五十嵐大造・平石雅之 (1987): スイカ「ラグビーボール」の作型と整枝法. 神奈川園試研報, **34**, 27-32.
- 19) 石坂晃・井上恵子・柴戸靖志 (2003): 促成ナス栽培における垂直仕立の主枝本数と整枝時の作業性および収量性. 福岡農総試研報, **22**, 80-84.
- 20) 貝塚隆史 (2002): 小玉スイカの品種と栽培技術. メロン スイカ 最新の栽培技術と経営, 153-159, 全国農業改良普及協会, 東京.
- 21) 貝塚隆史・鈴木雅人 (2004): 小玉スイカの整枝および誘引方法と生育および果実肥大との関係. 茨城農総セ園研研報, **12**, 1-7.
- 22) 金井幸男・阿部晴夫 (2003): 省力・高生産性のための施設キュウリ栽植様式. 群馬園試研報, **8**, 1-8.
- 23) 金子賢一・宮城慎・佐久間文雄 (2006): 短側枝性メロンの地這い栽培における整枝および摘果管理の省力効果. 茨城農総セ園研研報, **14**, 9-14.
- 24) Kano, Y. (1993): Relationship between the occurrence of hollowing in watermelon and the size and the number of fruit cells and intercellular air spaces. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.*, **62**, 103-112.
- 25) Karhu, O., P. Kansil and I. Kuorinka (1977): Correcting working postures in industry: A practical method for analysis. *Appl. Ergon.*, **8**, 199-201.
- 26) 加藤徹・福元康文・木下信三 (1984a): スイカ果実の肥大・品質に及ぼす整枝・摘心ならびに摘葉の影響について. 高知大学学術研究報告, **33** 農学, 83-90.
- 27) 加藤徹・福元康文・木下信三 (1984b): スイカ果実の肥大・品質に及ぼす側枝の取扱いの影響. 高知大学学術研究報告, **33** 農学, 91-99.
- 28) 加藤徹・福元康文・木下信三 (1985a): スイカ果実の肥大・品質に及ぼす着果後の時期別施肥・かん水の影響について. 高知大学学術研究報告, **34** 農学, 41-48.
- 29) 加藤徹・福元康文・木下信三 (1985b): 2本仕立のスイカ果実肥大・品質に及ぼす時期別摘心及び摘葉の影響について. 高知大学学術研究報告, **34** 農学, 71-78.
- 30) 川信修治 (1997): スイカ果実の生育・肥大に及ぼす積算温度と日射量の影響. 南九州大学園芸学部研究報告, **27A** 自然科学系, 1-8.
- 31) 小林恭 (1994): 作業姿勢のセンシングと計測技術. 農作業研究, **29**, 249-251.
- 32) 小堀乃・大塚寛治・伊東誠一 (1990): 作業姿勢改善のための器具利用の効果の人間工学的評価. 農作業研究, **25**, 260-266.
- 33) 甲田暢男 (1986a): 生理・生態と栽培技術, I 生産動向. スイカ 生理と栽培技術, 2-4, 誠文堂新光社, 東京.
- 34) 甲田暢男 (1986b): 生理生態と栽培技術, II 栽培法, 2 栽培技術, (8) 開花・交配. スイカ 生理と栽培技術, 27-30, 誠文堂新光社, 東京.
- 35) 玖村敦彦 (1984): IV 果実・種子の形成, 発育 2 果実・種子に蓄積される物質の供給源. 作物の生態生理, 276-286, 文永堂出版, 東京.
- 36) 倉橋孝夫・高橋国昭 (1994): リンゴ「ふじ」の棚仕立てY字形整枝法と主幹形整枝法における生産力と果実品質の比較. 園学雑, **63**, 305-311.
- 37) 倉橋孝夫・高橋国昭 (1995): 棚仕立てY字形整枝法と主幹形整枝法リンゴ樹「ふじ」の光環境と果実品質および光合成特性の比較. 園学雑, **64**, 499-508.
- 38) 倉田久男・水野正美 (1982): 洋種カボチャの果実の発育に及ぼす葉面積の影響. 香川大農学報, **33**, 103-108.
- 39) 倉田久男 (1983): スイカ基礎編, 果実発育の生理, 生態. 農業技術大系野菜編 4, 65-83, 農山漁村文化協会, 東京.
- 40) Lee, S. G., K. C. Seong, K. K. Kang, K. D. Ko and Y. B. Lee. (2000): Characteristics of translocation and distribution of photo-assimilates in leaves as different nodes in

- watermelon. *J. Kor. Soc. Hort. Sci.*, 41, 257-260.
- 41) Lee, S. G., K. D. Ko. and C.W. Lee (2005): Interaction of source-sink relationship for translocation and distribution ^{14}C carbohydrates in watermelon (*Citrullus vulgaris*). *J. Kor. Soc. Hort. Sci.*, 46, 300-304.
- 42) Lee, S. G., K. D. Ko and C.W. Lee (2006): Translocation and distribution of photosynthetic assimilates in watermelon and tomato. *Hort. Environ. Biotechnol.*, 47, 178-182.
- 43) Lee, S.E., S.G. Lee, C.W. Lee, Y. B. Lee and C. H. Pak (2009): Source-sink relationship for translocation and distribution of ^{14}C carbohydrates in pumpkin. *Kor. J. Hort. Sci. Technol.*, 27, 37-43.
- 44) Locascio, S. J. and G.J. Hochmuth (2002): Watermelon production as influenced by lime, gypsum, and potassium. *HortScience*, 37, 322-324.
- 45) 町田剛史 (2008): 千葉県におけるスイカ抑制栽培技術の開発への取り組み. 農耕と園芸, 966, 43-46.
- 46) 前川寛之・桐山晴美・黒住徹 (2000): 農作業の軽作業化に関する人間工学的研究 イチゴ栽培における栽培面の高さとして作業姿勢について. 奈良農試研報, 31, 1-8.
- 47) 前川寛之・谷川元一 (2004): 夏秋ナス栽培作業の軽作業化に関する研究—慣行整枝法および改善整枝法の作業労働面からの評価—. 農作業研究, 39, 17-22.
- 48) 松田照男 (2002): ウリ類の生産状況と展望. メロン スイカ最新の栽培技術と経営, 1-5, 全国農業改良普及協会, 東京.
- 49) 松本淳・橋本尚 (2005): スイカの露地トンネル隔離床栽培における培地の種類, 培地容量と肥培管理法の検討. 石川農総研研報, 26, 27-30.
- 50) 松本淳・斉田善一・橋本尚・福岡信之 (2002): スイカの株単位で果実管理が可能な振り分け栽培. 石川農総研研報, 24, 43-46.
- 51) Misa, A. L., A. Isoda and H. Nojima (1995): Plant type and dry matter production in peanut (*Arachis hypogaea* L.) cultivars II. Varietal differences in radiation interception. *Jpn. J. Crop Sci.*, 64, 73-77.
- 52) Motsenbocker C.E. and A. Arancibia (2002): In-row spacing influences triploid watermelon yield and crop value. *HortTechnology*, 12, 437-440.
- 53) 村岡裕由 (2003): III-2 光合成機能の評価, 1 CO_2 ガス交換, 光と水と植物のかたち 植物生理生態学入門, 229-243, 文一総合出版, 東京.
- 54) 長町三生 (1986): 6.4 作業の設計と改善. 現代の人間工学, 153-154, 朝倉書店, 東京.
- 55) 難波宏之・松本隆男 (1975): ハウスメロンの整枝法及び着果数が果実の品質, 収量に及ぼす影響. 近畿中国農業研究, 50, 48-50.
- 56) 難波和彦・近藤直・門田充司・笹尾彰 (2004): 植物気孔の光応答に基づく効率的光照射の検討. 植物工場学会誌, 16, 165-172.
- 57) NeSmith D. S. (1993): Plant spacing influences watermelon yield and yield components. *HortScience*, 28, 885-887.
- 58) NeSmith D. S. (1999): Root distribution and yield of direct seeded and transplanted watermelon. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, 124, 458-461.
- 59) Nkansah G. O., T. Maruo, Y. Shinohara and T. Ito (1996): Effects of light and temperature on photosynthetic parameters, yield and fruit quality of watermelons. *Jpn. J. Trop. Agr.*, 40, 118-122.
- 60) 大場貞信・長谷川一・鳴海有蔵・遊坐次夫 (1980): かぼちゃ 台つき木すいかの栽培法に関する研究 第2報 施肥, 栽植密度, 台木と穂木の組合せについて. 青森農試研報, 25, 43-49.
- 61) Okano K., O. Ito, N. Kokubun and T. Totsuka (1983): Determination of ^{13}C in plant materials by infrared absorption spectrometry using a simple calibration method. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 29, 369-374.
- 62) Okano K., O. Ito, G. Takeba, A. Shimizu and T. Totsuka (1984): Alteration of ^{13}C -assimilate partitioning in plants of *Phaseolus vulgaris* exposed to ozone. *New Phytol.*, 97, 155-163.
- 63) 岡野邦夫・坂本有加・渡邊慎一・中島武彦 (1999): 排液の再利用による一段トマトの閉鎖型養液栽培システムの確立. 生環境調, 37, 63-71.
- 64) 岡野邦夫・坂本有加・渡邊慎一 (2001): 一栽培トマトにおける ^{13}C -光合成産物の Source-Sink 関係. 野菜茶試研報, 16, 351-361.
- 65) 小野祐幸・工藤和典・大東宏 (1980): 温州みかんの光合成作用および生産構造に関する研究 第3報 樹形の違いが光合成速度に及ぼす影響. 四国農試報, 35, 41-54.
- 66) 大石毅・奥座一文・屋良利次・棚原尚哉・宮城聡子・伊志嶺弘勝・伊山和彦・小禄博昭 (2010): トウガン (*Benicasa hispida* (Thunb.) Cogn.) の立体栽培と地這い栽培における収量と作業姿勢の比較. 沖縄農研セ研報, 4, 32-35.
- 67) 大木浩・崎山一 (1995): 無加温施設による12月どり抑制カボチャの栽培法—品種, 播種期, 施肥量, 仕立て方が生育と収量に及ぼす影響—. 千葉農試研報, 36, 47-55.
- 68) Sanders D. C., J. D. Cure and J. R. Schultheis (1999): Yield response of watermelon to planting density, planting pattern, and polyethylene mulch. *HortScience*, 34, 1221-1223.
- 69) 佐藤紀男 (1981): ハウスメロンの2果どり栽培に関する試験. 神奈川園試研報, 28, 31-38.
- 70) 佐藤展之・石田伸治・柳原等 (1993): 冬期における補光が温室メロンの果実品質に及ぼす効果. 静岡農試研報, 37, 25-32.
- 71) 塩澤耕二・小野寺政行・福川英司・小田義信・中村隆一 (2002): ラグビーボール型小玉スイカのトンネル栽培法. 北海道立農業試験場集報, 83, 19-22.
- 72) 白岩立彦・川崎洋平・本間香貴 (2011): 作物群落の日射利用効率の推定. 日作紀, 80, 360-364.
- 73) Shishido Y., N. Seyama, S. Imada and Y. Hori (1989): Carbon budget in tomato plants as affected by night temperature evaluated by steady state feeding with $^{14}\text{CO}_2$. *Ann. Bot.*, 63, 357-367.
- 74) 穴戸良洋 (2009a): 野菜の収量に及ぼす光合成産物の転流・分配 [21]. 農及園, 84, 477-483.
- 75) 穴戸良洋 (2009b): 野菜の収量に及ぼす光合成産物の転流・分配 [23]. 農及園, 84, 652-658.
- 76) 穴戸良洋・湯橋勤・施山紀男 (1992): メロン果実への光合成産物の転流・分配に及ぼす葉位および灌水量の影響. 園学雑, 60, 897-903.
- 77) 穴戸良洋・熊倉博史 (1994): トマトにおける光合成・蒸散, 光合成産物の転流・分配および根の呼吸に及ぼす培地温の影響. 園学雑, 63, 81-89.
- 78) 末永善久・森田敏雅・田中正美 (1989): スイカの無加温促成栽培における着果安定と品質向上. 熊本農試研報, 15, 59-83.
- 79) 杉山慶太・阿久津雅子 (2010): 部分不活化花粉による二倍性種なしスイカ生産のための蕾受粉. 園学研, 9, 319-324.
- 80) Sugiyama K. and M. Morishita (2000): Production of seedless watermelon using soft-X-irradiation pollen. *Sci. Hort.*, 84, 255-264.
- 81) 杉山充啓 (2011): スイカの生理生態と栽培技術, (2) 品種開発と今後の育種方向. 農耕と園芸 1006, 41-45.
- 82) 鈴木克己 (2006): 高軒高施設を利用したトマト生産. 野菜茶試研報, 3, 73-77.

- 83) 田尻一裕・森田敏雅・石田豊明 (2008): スイカの立体栽培に適した品種選定と省力誘引法. 熊本県農研セ研報, 14, 30-41.
- 84) 高木輝治 (1939): メロンの葉面積が其の発育器官並に果実に及ぼす影響に就て (第1報). 園学雑, 10, 198-207.
- 85) 高木輝治 (1940): メロンの葉面積が其の発育器官並に果実に及ぼす影響に就て (第2報). 園学雑, 11, 436-449.
- 86) 高橋英生 (2000): スイカ基礎編, 圃場での管理と収穫・出荷, 仕立て方と栽植密度. 農業技術大系野菜編4, 189-191, 農山漁村文化協会, 東京.
- 87) 竹内隆・大宮琢磨・青島秀憲 (2004): イチゴの収穫作業労力軽減のための立性果房型系統の育成と栽培法. 静岡農試研究報, 49, 29-41.
- 88) 田中明・藤田耕之輔 (1972a): 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1報) 標準栽培条件下での生育経過および摘芽・摘芯の影響. 土肥誌, 43, 25-30.
- 89) 田中明・藤田耕之輔 (1972b): 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2報) 異なる葉位の葉からの ^{14}C の移行. 日本土壤土肥誌, 43: 77-80.
- 90) Wilson, J. W. (1972): Control of crop processes. Crop processes in controlled environments, 7-30, Academic Press, London.
- 91) 渡邊慎一・中野有加・岡野邦夫 (2001): 積算日射計測フィルムを用いた果菜類の個葉受光量の簡易測定. 生環調, 39, 121-125.
- 92) 渡邊慎一 (2006): 低段密植栽培による新たなトマト生産. 野菜茶研集報, 3, 91-98.
- 93) Willey, R.W. and S.B. Heath (1969): The quantitative relationships between plant population and crop yield. *Adv. Agron.*, 21, 281-321.
- 94) 山川邦夫 (2003): 4. スイカ. 野菜の生態と作型, 338-341, 農山漁村文化協会, 東京.
- 95) 米山忠克・林浩昭 (1991): 5. ソース・シンク, 5.1 転流. 現代植物生理学⑤物質の輸送と貯蔵, 128-145, 朝倉書店.
- 96) 吉村登雄・小宮山桂・石川敏雄 (1989): 簡易積算全天日射計. 太陽エネルギー, 15 (5), 47-53.
- 97) 吉岡宏・高橋和彦 (1979a): 果菜類における光合成産物の動態に関する研究 II トマトの生育に伴う ^{14}C 同化産物の転流・分配と摘心及びしゃ光の影響. 野菜試報, A6, 71-84.
- 98) 吉岡宏・高橋和彦 (1983): 果菜類における光合成産物の動態に関する研究 VI 着果数・着果節位を異にしたメロンにおける Source-Sink 関係. 野菜試報, A11, 33-43.
- 99) 吉岡宏・高橋和彦 (1984): 果菜類における光合成産物の動態に関する研究 VII トマトにおける Source-Sink 単位. 野菜試報, A12, 1-8.
- 100) Zamski, E. and A.A. Schaffer (1996): Photoassimilate Distribution in Plants and Crops Source-Sink Relationships. CRC Press, New York.
- 101) 農林水産省 (2010): 平成21年産秋冬野菜, 指定野菜に準ずる野菜等の作付面積, 収穫量及び出荷量. 併載: 平成21年産野菜 (39品目) の作付面積, 収穫量及び出荷量 (年間計). 農林水産省ウェブサイト http://www.maff.go.jp/j/tokei/sokuhou/yasai_syutou08/index.html (2011/8/1 閲覧).
- 102) 農林水産省 (2011a): 園芸用施設及び農業用廃プラスチックに関する調査 (平成20年~21年). 政府統計の情報窓口ウェブサイト <http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?lid=000001074417> (2011/8/1 閲覧).
- 103) 農林水産省 (2011b): 平成21年産野菜生産出荷統計. 政府統計の総合窓口ウェブサイト <http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?lid=000001074453> (2011/8/1 閲覧).
- 104) 財務省 (2011): 貿易統計. 統計情報サービスウェブサイト <http://toukei-is.com/h/?p=080711000&f=02> (2011/8/1 閲覧).

Fruit Productivity of Vertically Trained Watermelon [*Citrullus lanatus* (Thunb.) Matsum. et Nakai]

Shin-ichi Watanabe

Summary

Watermelon [*Citrullus lanatus* (Thunb.) Matsum. et Nakai] is a major, high-production fruit vegetable in Japan; its yearly production follows that of cucumbers and tomatoes. It is grown all over Japan, mainly in open fields. Production of watermelon is declining gradually, mainly because of the labor involved in managing conventional crops, whereby shoots are trained horizontally on the ground surface. Recently, vertical training has received attention as an alternative system because of the reduced crop management labor involved. We examined the fruit productivity of vertically trained watermelon plants, with a focus on leaf area, light reception, and field photosynthesis characteristics. We also examined the source–sink relationships of photosynthates during fruit development so as to characterize fruit productivity in vertical training. We compared the working posture required with vertical training systems with that with conventional, horizontal training systems.

Chapter II investigates the characteristics of fruit enlargement on vertically trained plants. Initially, we examined the effects of fruit set position on total leaf area per plant and final fruit weight in vertically trained plants. Two primary lateral shoots were allowed to grow on each plant, and one fruit was set per plant. As the fruit set position increased, the fruit weight increased. Total leaf area per plant during fruit development increased as fruit set position increased. Fruit weight at harvest was closely related to total leaf area per plant at 5, 20, and 40 days (harvest) after pollination. We concluded that decreased photosynthetic production due to small leaf area and competitive growth between the fruit and vegetative organs during fruit development caused smaller fruits to develop when fruiting occurred at a lower node position.

Next, we investigated the effect of the pattern of vertical training on fruit weight in relation to total leaf area per plant. In June-harvest and November-harvest crops, one to three shoots were allowed to grow and one fruit was set per plant. In both growing crops, fruit weight was closely related to total leaf area per plant, irrespective of the training pattern. However, the regression lines between fruit weight and total leaf area per plant differed between the growing seasons. There is therefore a need to further investigate light reception to analyze the characteristics of fruit enlargement in vertical training.

We investigated the effect of planting density on fruit weight of vertically trained plants in terms of light reception among expanded leaves and photosynthetic production. Two shoots per plant were allowed to grow and were trained vertically, and one fruit was set. Solar radiation on individual leaves was measured during fruit development with an integrated solarimeter film. The photosynthetic rates of these leaves were measured with a portable photosynthesis system. Fruit weight decreased significantly as planting density increased and was closely related to the total leaf area per plant at each planting density. However, the regression lines

between fruit weight and total leaf area per plant differed among planting densities. Fruit weight was obviously proportional to both total solar radiation received and photosynthetic production per plant. The change in fruit weight with planting density was attributed to changes in the photosynthetic productivity of the whole plant; this in turn was a main function of the total solar radiation.

The results in chapter II indicate that total leaf area per plant could determine differences in fruit weight in vertically trained plants within a certain range of planting densities or training patterns in the same growing season. However, over a wider range of planting densities or training patterns, or in a different growing season, the total solar radiation received and photosynthetic production per plant are likely to be more appropriate factors than the total leaf area per plant in investigations of the characteristics of fruit enlargement.

In chapter III, we use the ^{13}C -tracer method to investigate the translocation and distribution of photosynthates during fruit development in vertically trained plants with one or two shoots and one fruit. The percentage translocation of ^{13}C from $^{13}\text{CO}_2$ -fed leaves exceeded 70% during fruit development, irrespective of the position of the $^{13}\text{CO}_2$ -fed leaves (except for the lower leaves in the plants with two shoots and one fruit at the late stage of fruit development; the percentage was approximately 50%). Therefore, most of the photosynthates in the whole plant were transported to the fruit. In plants with two shoots and one fruit, all leaves on the plant were sources of photosynthates translocated to the fruit, whereas leaves on the non-fruiting shoots were also sources of photosynthates translocated to the roots. In plants with one shoot and one fruit, all leaves on the plant were sources of photosynthates translocated to the fruits, whereas a limited number of lower leaves on the main shoot or leaves on the extra lateral shoot (“asobi-zuru” in Japanese) growing from the cotyledonary node were sources of photosynthates to roots. We concluded that fruit weight could be determined by total leaf area, total solar radiation received, and photosynthetic production per plant, because most photosynthates of vertically trained watermelon plants during fruit development were concentrated in the fruit.

Chapter IV compares fruit productivity and labor load—especially working posture—between vertically and horizontally trained watermelon planting systems. Initially, we compared shoot growth, fruit enlargement, light-reception characteristics, and field photosynthetic rate between vertically and horizontally trained plants, each with two shoots and one fruit; a higher planting density was used for vertical training. The training method had little or no influence on shoot growth. Fruit weight was significantly lower in vertically trained plants than in horizontally trained ones, even when the total leaf area was similar. The amount of solar radiation received by, and the photosynthetic rates of, the middle and lower leaves of vertically trained plants decreased gradually with decreasing leaf position and were lower in vertically trained plants than in horizontally trained ones. We concluded that the main reason for the production of smaller fruits on vertically trained plants at the respective planting densities was the lower light reception by the middle and lower leaves on vertical plants than on horizontal ones.

We then compared fruit productivity in vertically and horizontally trained plants with two shoots and one fruit in July-harvest and November–December-harvest crops. Fruit weight per the amount of solar radiation received by a plant in vertically trained plants was equal to, or greater than, that in horizontally trained plants. As planting density increased, fruit yield per unit land area with vertical training increased and exceeded that with horizontal training.

We used a working posture analysis system to evaluate the labor load in disbudding and topping work with vertical and horizontal training systems. Vertical training improved the working posture by decreasing the bending angles of the trunk and thighs; this was accompanied by a decreased “pain index” (Nagamachi, 1986). The time needed for disbudding work was shorter in the vertical training system than in the horizontal one.

From the results in chapter IV, we concluded that vertical training of watermelon plants could improve working posture and increase fruit yield per unit land area under higher planting density than with horizontal

training, without loss of light-use efficiency.

The finding that most of the photosynthates were distributed to the fruits throughout fruit development suggested that fruit weight or fruit yield per unit land area, or both, could be predicted from estimated solar radiation. It also suggested that fruit weight could be controlled by adjusting planting density or leaf area per plant, or both. We also found that the amount of solar radiation received per plant was likely to be a more useful index than leaf area per plant for estimating fruit production with different training methods, especially when light-interception characteristics differed widely (e.g. between the vertical and horizontal training systems studied here). Use of solar radiation received per plant as an index should help in the development of productive training systems for fruit vegetables in the field.

In conclusion, vertical training of watermelon plants increased fruit yield per unit land area under higher planting density than with horizontal training, without loss of light-use efficiency. The vertical training method is favorable for meeting the recent marketing trend for small, high-quality fruit and has the potential to increase the areas under production in Japan, especially in protected cultivation.