

## Development of soilless culture for increased yield and stable production of greenhouse crops on sloping land in Japan

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2019-03-22 キーワード (Ja): キーワード (En): hilly and mountainous area, greenhouse, tomato, irrigation, soilless culture, increase in yield, light extinction coefficient, solar radiation, fluctuation in yield, crop model 作成者: 東出, 忠桐 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="https://doi.org/10.24514/00001691">https://doi.org/10.24514/00001691</a>

# わが国の中山間傾斜地における 施設園芸作物の安定多収生産に向けての養液栽培技術の開発

東出忠桐<sup>1</sup>

**Key words** : hilly and mountainous area, greenhouse, tomato, irrigation, soilless culture, increase in yield, light extinction coefficient, solar radiation, fluctuation in yield, crop model

## 目 次

I 緒 言	38	V 中山間傾斜地における傾斜ハウスおよび傾斜地養液栽培システムの導入効果	61
II 傾斜地用低コスト・閉鎖系養液栽培システムの開発	40	1 夏秋トマト栽培に対する傾斜ハウスおよび傾斜地対応型養液供給システムの導入効果	61
1 傾斜圃場における高低差による給液量の違いと均一化	40	2 コンテナ養液栽培に適するブルーベリー品種	65
2 傾斜地養液栽培システムにおけるトマトの畝別収量の均一化	43	3 傾斜地養液栽培システムを利用したブルーベリーのコンテナ養液促成栽培	67
3 閉鎖系養液栽培システムの開発とトマト栽培への導入	45	4 総合考察	70
4 総合考察	47	5 摘 要	71
5 摘 要	49	VI 受光特性からみた傾斜地トマト個体群の高収量要因の解明	71
III 作物の吸水量に基づいた精密給液制御法の開発	50	1 傾斜地および平坦地におけるトマト個体群の受光特性の違い	73
1 微少な排液量の連続測定法	50	2 3次元モデル植物シミュレーションによる傾斜地個体群の受光特性の解明	75
2 微少排液の連続測定によって求めた作物の吸水量に基づいた給液制御法	51	3 総合考察	78
3 総合考察	55	4 摘 要	80
4 摘 要	56	VII 中山間傾斜地トマト栽培における安定出荷のための収量変動要因の解析および収量予測	80
IV 夏秋トマトの傾斜地養液栽培における培地および給液制御法	56	1 傾斜地養液栽培トマトの週間収量に及ぼす栽培時期の影響	81
1 夏秋トマトの傾斜地養液栽培に用いる培地	57	2 傾斜地トマトの週間収量変動に及ぼす開花前の日射の影響	83
2 夏秋トマトの傾斜地養液栽培における給液制御法	58	3 総合考察	86
3 総合考察	60		
4 摘 要	61		

(平成21年7月27日受付, 平成21年12月17日受理)

中山間傾斜地域施設園芸研究チーム

<sup>1</sup> 現 野菜茶業研究所 高収益施設野菜研究チーム

4 摘 要	87
VIII 総 括	88
謝 辞	90

引用文献	91
Summary	97

## I 緒 言

中山間地域は、わが国の国土の約70%の面積を占め、耕地面積では約40%を占める。中山間地域には平坦でない耕地が多く、傾斜地で作物生産を行う場合が多い。傾斜地農業に関する研究は古くから行われており、伊藤ら (1953)<sup>57)</sup> は斜面畑におけるアワ、コムギ、カンショ、トウモロコシおよび牧草などによる作付け体系を検討し、浸食や浸食による土壌流失への影響を報告した。一戸・工藤 (1956)<sup>53)</sup> は、コムギ、ダイズ、トウモロコシ、その他の作物の栽培と土壌浸食の防止について報告した。また、斜面における畑作の諸問題を解消するため、中村ら (1962)<sup>86)</sup> は、斜面をテラス状にする段畑への整備を検討した。従来の傾斜地農業研究ではコムギなどの畑作物を対象としたものが多かった。しかし、現在ではこれらの畑作物は営利目的ではほとんど生産されておらず、わずかに自家消費目的の生産が残っているのみである。

ところで、傾斜地には特有の気象条件があり、傾斜地農業の利点となっている。そのなかでも最も大きな利点は、標高の高いことにより夏季でも比較的涼しいことである。真木・玉置 (1986)<sup>75)</sup> および玉置ら (1987)<sup>121)</sup> は、四国地方の傾斜地における気象条件や降水条件および夏秋季の露地野菜に対する8月の限界最高気温を調査し、野菜栽培の導入地域を検討した。

夏季が冷涼なだけでなく、南斜面における豊富な日射も傾斜地の利点として知られており、圃場面積あたりの受光量は斜面方向によって平坦地よりも多くなると考えられる。静岡県温室メロン栽培では、スリークォーターハウスが用いられ、東西方向に設置された栽培ベッドは北側ほど高い。これは南斜面を設けたことと同等であり、その目的は作物の受光量を増やすことにある。宮本 (1968)<sup>77)</sup> は、冬季におけるメロンの株間の日射量は、東西棟を100%とすると南北棟では65%となることを報告している。

佐藤 (1967)<sup>103)</sup> は傾斜地域の日射の状態について、テラス圃場および斜面圃場における日変化、季節変化、緯度および傾斜度の影響を詳細に検討した。その結果、北斜面を除いた全方向においてテラス圃場よりも斜面圃場において日射量が多く、北斜面のみ、テラス圃場の方が斜面圃場より日射量が多いことを示した。これと同様に、東北地方の傾斜地域においても日射量における南斜面の優位性が報告された<sup>20)</sup>。黒瀬ら (1991)<sup>74)</sup> は国土地理院の数値情報から、圃場の日射を評価するモデルを作成し、南斜面の優位性を報告した。また、中山間地の農地の多くが、このモデルで算出した日射量の多い地域と一致することを示した。

四国地方は、全国平均に比べても傾斜地の割合が高く、傾斜地に居住して傾斜圃場で農業を営み生計を立てている割合も高い<sup>72)</sup>。現在、多くの傾斜地は、過疎化、高齢化および耕作放棄などの深刻な問題に直面している。その一方で施設園芸産地の形成や新市場の開拓などの新たな動きが報告されている。その中で特徴的な点は標高の高いことによる夏季の冷涼な気象条件を利用した野菜や花および地域特産果樹などの産地形成であり、地域農業の持続的発展には、地域特産物の市場開拓、価格安定方策、レンタルを基本とする施設導入、軽労化および環境保全的な基盤整備が重要であると指摘されている<sup>76)</sup>。これに関連するものとして、中山間傾斜地でのレタスやキャベツなどの葉菜類における省力的周年栽培技術が開発された<sup>69)</sup>。

西日本の多くの地域では高温のために夏季の施設トマト生産は困難である。また、生食用トマトの露地栽培は降雨による病気の発生が問題となるためにあまり行われない。そのため夏秋季の生食用トマトの生産は、夏季の気温の比較的低い中山間地で雨よけ施設を用いて行われる場合が多い。簡易雨よけ施設による夏秋トマト栽培は岐阜県の中山間地において始まった<sup>23)</sup>。それまでの露地栽培に比べると収穫期間が拡大したり、収量が増加したりするのが特徴で<sup>129)</sup>、全国各地の中山間地に広がった<sup>116, 124, 132)</sup>。

現在では雨よけ栽培にはパイプハウスが用いられることが多いが、傾斜が急な圃場ではパイプハウスは建設できない。このため現在でも傾斜圃場では畝ごとに被覆する簡易雨よけ施設を用いてトマト栽培を行っている。しかし、簡易雨よけ栽培では、台風などの強風によって作物および施設が損害を受けたり、害虫が侵入しやすい上に降雨によって薬剤散布の効果が低下したり、降雨による裂果の多発や果実の外観が損なわれたりするなど、問題点は多く、これらのために収量や品質は不安定なものとなっている。

そこで中山間傾斜地においても安定した施設生産を行うために、中山間傾斜地を対象とした施設が検討された。入口ら (1995)<sup>55)</sup> は、南斜面にあるテラス圃場を利用した多日射・耐風ハウスを開発した。このハウスでは冬期の日射が平地よりも1~2割多く、ガーベラの切り花生産が増加することが報告された。しかし、テラス状に土地を整備するためには多大なコストがかかることから、傾斜した圃場でも建設・使用できる施設が求められていた。これを受けて開発されたのが平張型傾斜ハウス（以下、傾斜ハウス）である<sup>81, 82, 84)</sup>。傾斜ハウスは、建設現場の足場用に用いられる安価な48.6mm径の鋼管（STK500, 外径48.6mm, 厚さ2.4mm）や直交クランプ、自在クランプなどのクランプ類を材料とし、ハウスの屋根は傾斜圃場とほぼ平行な面となる。傾斜地では不整形な圃場が多いが、圃場の形に合わせて建設できる点もこのハウスの特徴の一つである。また、側面を屋根近くまで開放でき、傾斜地特有の風である斜面風を利用し、換気性が良いことも特徴である<sup>107)</sup>。傾斜ハウスは、鋼材の強度が大きいためにハウス自体の強度も大きい<sup>52)</sup>、資材費は一般のパイプハウスとほぼ同等で10aあたり300万円程度である。

傾斜地では均一に灌水する技術が平坦地よりも重要となる。長谷部 (1971)<sup>27)</sup> は、傾斜地におけるスプリンクラーによる散水について検討し、スプリンクラーのライザを傾斜に対して直角に設置することで散水の均一性が向上することを報告した。傾斜地における点滴灌水については、多くの研究報告がある<sup>6, 7, 8, 71, 128)</sup>。これらの報告では、地形と標高に応じた配管方法が示され、水圧の重要性が指摘された。また、点滴灌水における主管や分管の分岐方法の設計手法も示された。森永ら (2004a)<sup>79)</sup> は、

中山間傾斜地カンキツ園を対象に周年マルチ点滴灌水同時施肥法を開発し、圧力と水量の関係やチューブの敷設方法などを明らかにした。この周年マルチ点滴灌水同時施肥法によってウンシュウミカンの果実糖度が向上し、高品質な果実生産と年間管理時間の17.5hr 10a<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>の省力化が達成された<sup>80)</sup>。果樹や他の作物に比べて、より集約的な生産が行われる野菜の場合には、さらに精密な灌水の均一性が求められる。Kawashima et al. (2000)<sup>68)</sup> は、傾斜地で点滴チューブを利用する場合の給液停止後の水だれについて、給液経路下部に電磁弁を設置して給液停止時に管内の残留水を抜くことで対処した。このとき抜かれた残留水はタンクに集められ、再度、ポンプアップして給液に利用された。

先に述べた傾斜ハウスによって傾斜地における施設栽培が可能となった。しかし、傾斜地における野菜栽培には、依然、深刻な2つの問題が残されていた。そのひとつが傾斜圃場内の土壌の落下とそれに対応した土揚げ作業である。傾斜圃場では、作業や人の移動によって少しずつ表面の土壌が下方方向に落ちていく。このため、土揚げが必要であるが、この作業は非常に労働強度が大きく、危険も伴うために高齢化の進む生産者に大きな負担を強いている<sup>15, 54)</sup>。もう一つの問題は土壌伝染性病害である。雨よけ栽培を行っている地域の多くでは、30年以上、トマト栽培が続けられており、萎凋病、青枯病などの被害は深刻で土壌殺菌だけでは対応できない場合が多い。

このような土揚げや土壌病害など傾斜地の野菜栽培の問題を解消するには、養液栽培の導入が適すると考えられるが、傾斜地用の養液栽培システムはこれまで開発されておらず、平地用のシステムをそのまま導入したのでは様々な問題が生じると考えられる。その問題点のひとつが給液の均一性である。前述の Kawashima et al. (2000)<sup>68)</sup> の方法を用いれば、傾斜地でも均一な点滴灌水は可能であるが、設備およびランニングコストが余計に必要となる。傾斜地に養液栽培を導入する際には、導入コストおよびランニングコストは重要な問題である。一般に養液栽培を導入する上で最も大きな問題はコストであるため、平坦地では簡易な養液栽培装置による低コスト化がいくつか検討されている<sup>13, 102)</sup>。本研究が対象

としている中山間傾斜地では、土地の制約上、規模拡大が難しく、スケールメリットを得ることも難しく、生産者の高齢化も進んでおり、施設や装置などに対する投資意欲は小さい。精密な栽培管理によって収量増、高品質化、省力化などをねらって多額の投資を行う一般の養液栽培とは対照的であるといえる。したがって、傾斜地を対象とした養液栽培システムでは導入コストおよびランニングコストを低く抑えることが平地よりも重要である。

そこで本研究では、まず、傾斜地の特性を活かし、低コスト・省エネルギーを重視した養液栽培システムを開発し、次にそれを利用するための給液管理技術を開発した。その次には、開発したシステムや傾斜ハウスを実際の中山間傾斜地のトマト生産現場に導入し、それらの導入効果を検討した。また、トマトの収量に関わる大きな要因のひとつである受光特性について、傾斜地および平地の個体群の受光量を比較、検討した。さらに、中山間傾斜地における夏秋トマトの安定生産において問題となる収量変動を回避するため、週間収量と生育ステージおよび環境要因との関係について解析し、これらの関係に基づいて週間収量の予測を試みた。

## II 傾斜地用低コスト・閉鎖系養液栽培システムの開発

傾斜地の多い四国の中山間地域では、夏季の冷涼な気候を利用して夏秋トマト栽培などが行われている。これらの地域では、通常のパイプハウスの導入は極めて困難であるため、畝毎にフィルムで被覆を行う簡易雨よけ施設でトマト栽培を行っている（第1図）。簡易雨よけ施設では、強風の被害を受けやすく、害虫の侵入が容易であり、農薬散布の効果が低くなったり、裂果などが生じたりする場合も多い。これらの問題点を解消し、傾斜地における施設生産を可能とする目的で傾斜ハウスが開発され、現地での導入が始まっている。傾斜ハウスは、足場パイプを材料とし、資材費が低価格であり、不整形な圃場にも建設可能である<sup>70, 81, 84)</sup>。また、斜面風によって換気性も高い<sup>107)</sup>。

傾斜圃場では、作業や人の移動、降雨などにより、圃場上部の土が下部に向かって落ちるため、作付け

の前の土揚げ作業が必須となっている。この作業は非常に労働強度が大きく、危険も伴うため、高齢化が進む生産者らに大きな負担を強いている<sup>15, 54)</sup>。また、夏秋トマトを30年以上連作している地域では、土壤伝染性病害が深刻となっている場合がある。これらの問題の解決には、養液栽培の導入が考えられるが、傾斜地用の養液栽培システムはこれまでに開発されておらず、平地用のシステムをそのまま利用した場合、様々な問題が生じると考えられる。そこで、ここでは、養液栽培を傾斜地で行う場合の問題点やその対策を検討し、傾斜地の条件を利用した低コストで環境保全的な傾斜地養液栽培システムを開発した。

### 1 傾斜圃場における高低差による給液量の違いと均一化

傾斜地では、同一の圃場内でも位置によって高さの差がある。このため、点滴灌水を行った場合に、給液のばらつきを生じるおそれがある。ここでは、傾斜圃場での位置による灌水資材からの吐出量の差異を明らかにし、ばらつきを解消するための方策を検討した。

#### 1) 材料および方法

##### (1) 傾斜地における点滴チューブからの吐出の測定

点滴チューブおよび配管方法について、山腹型傾斜畑地域（第2図）である徳島県東みよし町K地区（北緯34° 00′，東経133° 55′）のトマト生産者Aの傾斜ハウスにおいて検討した。この傾斜ハウスは、地面の傾斜角度が約20°の東南東斜面に建設されており、等高線方向の長さが約35m、等高線に垂直方向の長さが約13m、床面積は約440m<sup>2</sup>であった（第3図）。使用した点滴チューブは、A：ラム17（圧力補正機構付、流量 2.3L h<sup>-1</sup>、適用水圧 0.05～0.39MPa、ネタフイムジャパン、東京）およびB：ユニラム17（圧力補正機構付、流量2.3 L h<sup>-1</sup>、適用水圧 0.1～0.39MPa、停止圧 0.014MPa、同社）とした。なお、圧力補正機構とは、適用水圧の範囲では一定の吐出速度が維持される機構である。また、停止圧とは、吐出が停止する水圧のことであり、給液停止によりチューブ内の水圧が下がったとき、チュ

ープ内に液を有した状態で保持されることとなる。

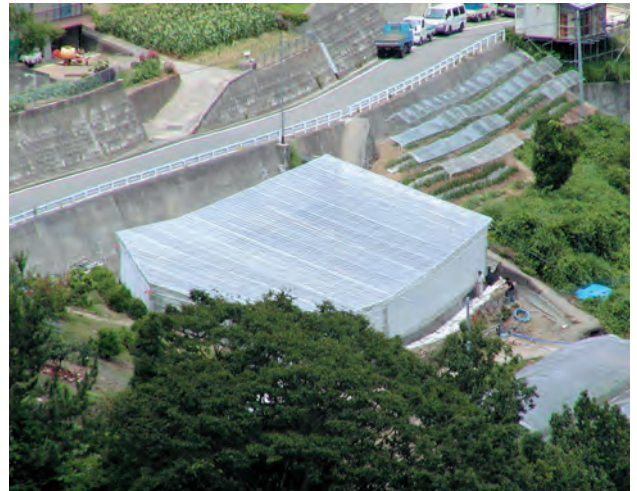
第4図のように等高線方向に約1m間隔で12本の点滴チューブを配置した。このとき、一番高い給液ラインと低い給液ラインの高低差は約4.5mであった。給液本管の圃場下部より給液を行い、まず、点滴チューブAを用いた場合の各チューブにおける給液中の吐出速度、給液停止後の吐出量および吐出終了までの時間を測定した。次に、点滴チューブをチューブBに交換して同様に測定した。また、チューブ末端を単に折り返すだけでなく、末端へエンドキャップを設置した場合の吐出を測定した。さらに、ライン同士の水圧差がチューブの停止圧以下となるように本管の途中への逆止弁を配置した場合の吐出を測定した。吐出量の測定は、それぞれ2～3回行った。

(2) 傾斜地養液栽培システムにおける吐出の測定

近畿中国四国農業研究センター(香川県善通寺市、北緯34°12'26"、東経133°47'、標高100m)傾斜ハウス内に傾斜地用の養液栽培システムを試作した。傾斜ハウスは、傾斜角度10°の北斜面に建設されており、等高線方向の長さが約10m、等高線に垂直方向の長さが約20m、床面積は約200㎡であった。傾斜ハウス内に等高線方向に約1.5m間隔で8列の栽培ベッドを設置した。位置的に高い列から第1列、第2列…第8列とすると、第1列と第8列の高低差は約2mであった。栽培ベッドの構造は、田中ら(1992)<sup>122)</sup>のロックウールシステムにしたがい、市販ロックウール栽培ベッド(ベッドボックス(誠和、東京)、ロックファイバーベッド75×300×910mm(ニッポー、東京))を各列8mの長さで設置し



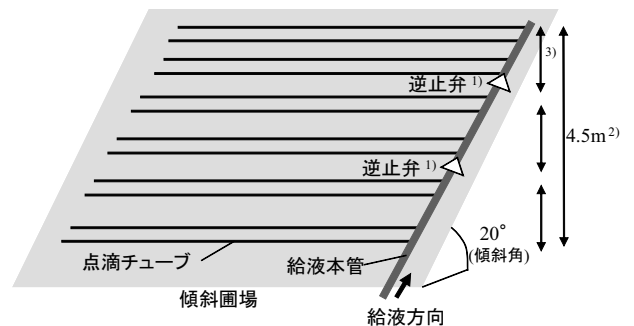
第1図 中山間傾斜地における簡易雨よけ施設による雨よけトマト栽培(徳島県東みよし町K地区)



第3図 平張型傾斜ハウス(徳島県東みよし町K地区)



第2図 山腹型傾斜畑地域(徳島県東みよし町K地区、標高300～600m、傾斜度4～25°)



第4図 傾斜圃場における点滴チューブの配管方法および逆止弁の挿入箇所

- 1) 点滴チューブB使用時の逆止弁挿入位置。
- 2) 最も高い点滴チューブと最も低いチューブとの高低差。
- 3) 逆止弁で分割された場合の給液ラインの高低差(約1.5m)。

た. 各列40cm間隔で19個の点滴ノズル, 圧力補正付・ウッドペッカー水だれ防止 CNL ドリッパー (流量  $3\text{L h}^{-1}$ , 適用水圧  $0.05\sim 0.39\text{MPa}$ , 停止圧  $0.04\text{MPa}$ , ネタフイムジャパン, 東京) を用いて給液を行った. 2003年2月26日, 原水圧を  $0.34\text{MPa}$  として, (1) と同様に各列における吐出の量および終了までの時間などを測定した.

## 2) 結果および考察

### (1) 傾斜地における点滴チューブからの吐出

点滴チューブAを用いた場合, 電磁弁を開放し, 給液ポンプ稼動状態の定常時には, 1穴あたりの吐出速度に大きな差はみられなかった. しかし, 電磁弁が閉鎖, ポンプ停止後には, 給液ラインの最も低い場所での吐出が長時間あり, 量も多かった (第1表). 次に, 点滴チューブBに交換した場合, 電磁弁閉鎖後, 給液ラインの最も低い位置における吐出は19分20秒続き, 吐出量は  $500\text{mL hole}^{-1}$  であった.

点滴チューブの末端からチューブ内に空気が入らないようにエンドキャップをつけた場合にも, 給液ライン最低位置における電磁弁閉鎖後の吐出は5分程度続き, その量は  $83\text{mL hole}^{-1}$  であった (第2表). さらに, 本管の途中に高低差を分割するように逆止弁および電磁弁を追加した結果が第3表である. これにより, 圃場内の最低位置においても, 給液停止後20秒で吐出が停止し, また, その量も少なく, 均一に灌水できることが示された.

### (2) 傾斜地養液栽培システムにおける吐出

研究センター内に試作した傾斜地養液栽培システムにおける各列の点滴ノズルからの吐出速度は,  $57\sim 65\text{mL hole}^{-1}\text{ min}^{-1}$  であり, 高低差の影響はみられなかった. 給液開始時の吐出および給液停止時の吐出停止は, ほとんど同時であり, 列による停止時間の差を計測することはできなかった (第4表).

第1表 点滴チューブAの1穴からの水の吐出にチューブ列の高低差が及ぼす影響

	チューブ列の高低差 <sup>1)</sup> (m)					
	4.0	3.0	2.5	2.0	1.0	0
定常時1穴あたり吐出速度 ( $\text{mL hole}^{-1}\text{ min}^{-1}$ )	42.0	42.0	41.3	39.7	39.3	38.7
吐出終了までの時間 <sup>2)</sup> (s)	0	60	60	60	60	720
8分給液時の総吐出量 ( $\text{mL hole}^{-1}$ )	305	330	328	340	330	520

1) 最も低いチューブ列 (給液ライン) からの高低差.

2) 給液停止後から.

第2表 点滴チューブBおよびエンドキャップを使用した場合の1穴からの水の吐出にチューブ列の高低差が及ぼす影響

	チューブ列の高低差 <sup>1)</sup> (m)					
	4.5	3.5	2.5	0.5	0.5	0
定常時1穴あたり吐出速度 ( $\text{mL hole}^{-1}\text{ min}^{-1}$ )	36.0	37.6	37.4	35.8	36.0	35.6
吐出終了までの時間 <sup>2)</sup> (s)	7	7	7	87	7	295
給液停止後の吐出量 ( $\text{mL hole}^{-1}$ )	0	0	0	41	0	83

1) 最も低いチューブ列 (給液ライン) からの高低差.

高低差が同一な列は異なる2地点の測定値.

2) 給液停止後から.

第3表 点滴チューブB, エンドキャップおよび逆止弁を使用した場合の1穴からの水の吐出にチューブ列の高低差が及ぼす影響

	チューブ列の高低差 <sup>1)</sup> (m)					
	4.5	3.5	2.5	0.5	0.5	0
定常時1穴あたり吐出速度 (mL hole <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup> )	38.4	39.0	39.4	36.4	36.4	38.2
吐出終了までの時間 <sup>2)</sup> (s)	7	7	7	7	7	20
給液停止後の吐出量 (mL hole <sup>-1</sup> )	0	0	0	3	0	7

- 1) 最も低いチューブ列(給液ライン)からの高低差。  
高低差が同一な列は異なる2地点の測定値。  
2) 給液停止後から。

第4表 傾斜地養液栽培システムにおける1つの点滴ドリッパーからの水の吐出にベッド列の高低差が及ぼす影響

	ベッド列の高低差 <sup>1)</sup> (m)							
	1.9	1.6	1.3	1.1	0.8	0.5	0.3	0
1穴あたり吐出速度 (mL hole <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup> )	63.0	63.0	59.5	62.0	56.5	61.0	65.0	60.0
吐出終了までの時間 <sup>2)</sup> (s)	0	0	0	0	0	0	0	0
給液停止後の吐出量 (mL hole <sup>-1</sup> )	0	0	0	0	0	0	0	0

- 1) 最も低いベッド列からの高低差。  
2) 給液停止後から。

以上の結果から、傾斜地における点滴灌水では給液停止後に管内の水が経路の低い部分から漏出することが明らかになった。また、これを解決するには、一定水压以下で吐出が停止する点滴資材を用い、点滴資材同士の水压差が停止圧内となるように逆止弁などで配管を分割すればよいことが明らかになった。

## 2 傾斜地養液栽培システムにおけるトマトの畝別収量の均一化

トマトの土耕栽培では、購入苗の利用が一般的であるが、養液栽培では接木を行わなくてもよいことから、自家育苗が一般的である。ここでは、まず、均一で大量の養液栽培用苗を簡易に低コストで育苗可能な装置を開発した。次に、研究センター内に試作した傾斜地用の養液栽培システムを用いてトマトの栽培実験を行い、傾斜地の養液栽培において重要となる条件や栽培システムの詳細を検討した。

### 1) 材料および方法

#### (1) 育苗装置

養液栽培用の苗を育成するために第5図のようなエプアンドフロー方式の育苗装置を作製した<sup>41)</sup>。この装置では、タンクの培養液は、給排水管を通してベッドに供給され、植物体の底面から吸水される。ポンプが停止すると培養液はサイフォンの原理により給排水管を逆流して速やかに回収される。栽培槽内の水位は調節せず、ポンプ稼働時にはタンク内の培養液のほぼ全量が栽培槽に貯留されるが、タンク内が空に近くなると、給排水管から一部が逃げ水としてタンク内に放出されるため、完全にタンクが空になることはない。栽培槽の大きさは90×360×12 cmとし、培養液タンクの容量は200 Lとした。また、低温時にはタンク内に水槽用投げ込みヒーター(セフティアップホットパック300, サーモスタット付, ヒーター容量300W, ジェックス, 大阪)を設置し、設定温度を16℃として培養液の加温を行った。ポン



プおよびヒーターは単極双投式（C接点方式）のタイムスイッチ（タイムスイッチ TB36109, National, 大阪）によって制御した。すなわち、A接点側にポンプを、B接点側にヒーターを接続し、タイマーによりA接点がONのとき以外は、B接点が通電しており、ヒーターはONとなる。培養液には園試処方50%濃度液<sup>50)</sup>を使用し、培養液が不足する場合に追加した。給液は、タイマーにより1日に6～8回行った。

## (2) トマト栽培実験1

トマト (*Solanum lycopersicum*, ‘桃太郎ファイト’, タキイ種苗, 京都) を、2002年11月29日に播種し、2003年1月1日に10×10×10cmのロックウールポットに鉢上げし、(1)に示した育苗装置および方法により育苗を行った。研究センター内に試作した1-1)-(2)の傾斜地養液栽培システムに、2003年1月27日、5.3葉期の苗を株間20cm、2条振り分けて、各列10～11個体8列の計82個体を定植した。培養液には園試処方50%濃度液を用い、タイマーにより1日8～14回の給液を行った。1回の給液時間は、天候に応じて手でサブタイマーを1～5分間に調節し、排液は循環させずかけ流し方式とした。第6花房上1葉を残し摘心を行い、1～6段の果実収量について調査した。なお、実験開始時の原水圧は0.09MPaであったが、周囲の水の使用状況により0.04MPa以下まで低下する場合がたびたびみられたので、同年2月26日に原水経路を変更し、原水圧を0.34MPaとした。ハウスは最低気温が15℃以下とならないように加温した。

## (3) トマト栽培実験2—原水圧が十分な条件および吸水シートの有無の影響—

(2)と同一な養液栽培システムにおいて、原水圧が十分に確保されている状態でトマト栽培実験を行った。原水圧は0.34MPaであり、給液時の経路内水圧は0.29MPaとした。また、このとき、ロックウールベッドの下に吸水性の不織布（ジャームガード、厚さ4mm、東洋紡、大阪）を用いた場合と用いない場合の、収量などへの影響を比較した。用いた品種は‘桃太郎ファイト’で、2003年1月17日に播種、同年2月10日に鉢上げし、(1)、(2)と同

様に育苗を行った。同年3月3日、6.0葉期の苗を株間20cmで、吸水性の不織布がある場合（シート区）とない場合（無シート区）につき、各列それぞれ5個体ずつ計80個体を定植した。給液および培養液管理は、(2)と同様とした。1週間毎に草丈および葉数を調査し、第6花房上1葉を残して摘心を行い、1～6段の果実収量を調査した。ハウスは最低気温が15℃以下とならないように加温した。

## 2) 結果および考察

### (1) 育苗装置

作製した育苗装置によって、健全で均一性の高い苗が育成できた。育苗中の管理作業としては培養液残量の確認と追加および苗のスペーシングのみで省力的であった。また、育苗中に装置に起因するトラブルはなかった。

### (2) トマト栽培実験1

植物体の生育は、高い位置の列よりも低い列において旺盛であり、茎の太さなども大きかった。果実収量について2列毎に比較すると、位置的に高い1-2列および3-4列に比べ、低い7-8列の方が収量は多かった（第5表）。5-6列と7-8列の収量には有意な差はみられなかった。一方、収穫果実数については、列間に有意な差はみられなかった。したがって、列間の収量の違いは1果重の違いによるものと考えられる。

### (3) トマト栽培実験2—原水圧が十分な条件および吸水シートの有無の影響—

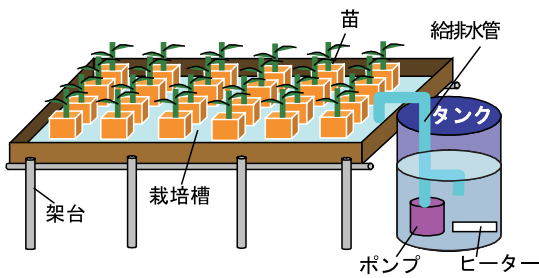
(2)と同様に2列毎に果実収量について比較すると、列間における有意な収量の差はみられなかった（第6表）。培地の下に吸水シートを用いた場合の方が、用いない場合よりも葉数および茎長は有意に大きかった。一方、収量については、シートの有無による有意な差はみられなかった（第7表）。

以上のように、自作が容易でトラブルの可能性の少ない育苗装置が開発された。また、試作した傾斜地養液栽培システムでトマトを栽培した場合、地面の高さによって収量の差がみられる場合があることが明らかになった。しかし、これは原水圧の低下に

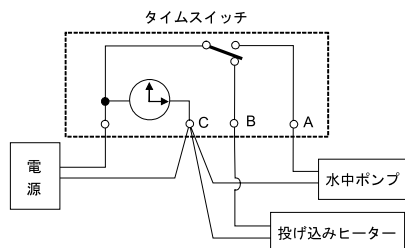
(a)



(b)



(c)



第5図 エプアンドフロー式の育苗装置 (a) の模式図 (b) および配線図 (c)

特許第3803711号

よる給液量の差に由来するものと考えられたため、同じシステムにおいて給液部分の水圧を適正な条件に保ち、再度、実験を行った。その結果、傾斜地養液栽培においても、位置による収量差はみられないことが明らかになった。

### 3 閉鎖系養液栽培システムの開発とトマト栽培への導入

ロックウールなどの固形培地耕では、培地内水分の均一化と養分組成の偏りを防ぐため、総給液量の20~30%が排液となるよう給液を行い、かけ流し方式を取る場合が多い。しかし、肥料の効率的利用や環境保全の面からは、系外への培養液の排出は極力避けるべきである。そこで、ここでは、傾斜地の養液栽培システムにおいても使用後の培養液を系外に

第5表 傾斜地養液栽培における位置の異なるベッド列が収量に及ぼす影響

ベッド列 <sup>1)</sup>	収量 <sup>2)</sup> (g plant <sup>-1</sup> )	果実数 <sup>2)</sup> (fruits plant <sup>-1</sup> )
1-2 列 (上側)	4,504 ± 646 a <sup>3)</sup>	26.9 ± 5.5 a
3-4 列	4,410 ± 791 a	26.6 ± 4.7 a
5-6 列	5,066 ± 664 ab	27.2 ± 5.0 a
7-8 列 (下側)	5,125 ± 665 b	26.7 ± 4.2 a

- 1) 1列が最も高く、8列が最も低い。
- 2) 平均±標準偏差 (n=19~22)。
- 3) 同列内で異なる文字は Tukey-Kramer Test, 5%水準で有意差あり。

第6表 原水圧が十分な場合の傾斜地養液栽培における位置の異なるベッド列のトマト収量

ベッド列 <sup>1)</sup>	収量 <sup>2)</sup> (g plant <sup>-1</sup> )	果実数 <sup>2)</sup> (fruits plant <sup>-1</sup> )
1-2 列 (上側)	5,217 ± 1,284 a <sup>3)</sup>	25.6 ± 4.6 a
3-4 列	4,768 ± 928 a	24.3 ± 4.0 a
5-6 列	5,359 ± 1,099 a	25.0 ± 4.7 a
7-8 列 (下側)	5,555 ± 1,095 a	25.9 ± 4.3 a

- 1) 1列が最も高く、8列が最も低い。
- 2) 平均±標準偏差 (n=16~20)。
- 3) 同列内で異なる文字は Tukey-Kramer Test, 5%水準で有意差あり。

第7表 吸水シートの有無がトマトの生育および収量に及ぼす影響

吸水シート	茎長 <sup>1)</sup> (cm plant <sup>-1</sup> )	葉数 <sup>1)</sup> (leaves plant <sup>-1</sup> )	収量 <sup>2)</sup> (g plant <sup>-1</sup> )
なし	147.6	21.7	5,263
あり	159.0	22.8	5,147
t検定 <sup>3)</sup>	*	**	ns

- 1) 定植後58日目。
- 2) 1段~6段。
- 3) \*および\*\*はそれぞれ5%および1%水準で有意差あり、ns:有意差なし。

排出しない閉鎖系システムを開発するとともに、中山間傾斜地の実際のトマト生産に導入して栽培実験を行った。

#### 1) 材料および方法

##### (1) 閉鎖系養液栽培システムの開発

傾斜地用閉鎖系養液栽培システムの開発および導入実験は、徳島県東みよし町K地区の生産者Bの傾斜ハウス (圃場傾斜角4°, 床面積約284m<sup>2</sup>, 等高線

方向の長さ27m, 等高線に垂直方向の長さ10.5m) において行った. 作製した傾斜地用閉鎖系養液栽培システムおよび栽培ベッド構造の概要を第6図に示す.

このシステムは, 点滴ドリッパー (圧力補正付・ウッドベッカー水だれ防止 CNL ドリッパー; 流量  $3\text{L h}^{-1}$ , 適用水圧  $0.05\sim 0.39\text{MPa}$ , 停止水圧  $0.04\text{MPa}$ , ネタフィルムジャパン), 配管, 原液タンク, ディスクフィルタ (アーカルフィルタ (120メッシュ, Arkal Filtration System 社製), ネタフィルムジャパン), 無動力式の液肥混入器 (ネタトロン (TEFEN 社製), モデル2502, 混入比率:  $0.2\sim 2\%$ , 水圧範囲:  $0.02\sim 0.59\text{MPa}$ , 流量範囲:  $20\sim 2500\text{L h}^{-1}$ , ネタフィルムジャパン), 排液タンク (容量:  $1\text{m}^3$ ), アスピレーター (水流ポンプ, 1-689-02, 金属製, アズワン, 大阪), 電磁弁, タイマーなどからなる. 培養液の供給には, ポンプを用いず, ハウスと取水口との高低差に由来する原水の水圧を利用した. 栽培ベッドは, 防根透水性シートおよび厚手の白黒フィルムにて培地スラブを包んだものとし, ベッド幅だけをテラス状に整地して設置した. その際, 白黒フィルムの斜面下側にたるみをもたせ, その部分に植物体に吸収されなかった培養液をいったん集めた. 栽培ベッドは, ほぼ等高線方向に設置したが, ベッドの排液が地面の傾斜を利用して排液タンクに回収されるよう留意して設置した. 回収された排液は金属製アスピレーター (水流ポンプ) を用い, 培養液供給時に混入して再度, 給液した<sup>66)</sup>. なお, アスピレーターによる排液の混入率は, 給液水圧が  $0.31\text{MPa}$  の場合,  $22\%$ 程度であった<sup>67)</sup>.

## (2) トマト栽培実験

栽培実験には, トマト品種 '桃太郎ファイト' を用い, 2003年3月26~28日に播種, 同年4月11日に鉢上げし, 2-1) - (1) と同様に育苗した. 培地にはロックウール (ロックファイバーベッド  $75\times 300\times 910\text{mm}$ , ニットーポー) を用い, 同年4月25日, 4葉期の苗を株間20cmで  $158\text{m}^2$  に330個体を定植した. 同年12月10日まで栽培を行い, 草丈, 葉数および果実収量について調査した. 培養液処方としては同年8月29日までは園試処方を用い, それ以降は大塚 SA 処方 (大塚化学, 大阪) を用いた. 培養液は, タイマーにより1日8~14回, 100倍原液を  $0.5\sim$

$1\%$ の割合で給液に混入して与えた. また, 1回の給液時間は, 天候に応じて手動で1~5分の間で調節した. 排液量は, 東出ら<sup>35, 37, 38)</sup>の方法で連続的に測定し, 給液量と排液量の差を吸水量とした. 排液タンク内の EC および pH は, EC センサ (CES-10, セムコーポレーション, 東京) および pH センサ (S5610, 同社) によって, 温室内の日射は放射熱センサ (LI-200SB, Li-Cor, USA) によって, 1分毎に測定した.

## 2) 結果および考察

本システムを用いて, 7か月間以上のトマト栽培を行うことができ,  $10\text{a}$ あたりの果実収量は  $12.8\text{t}$ であった. しかし, 2003年5月9日, 6月10日, 6月21日, 6月25日, 7月1日, 9月13日および9月29日に原水設備の問題やタイマーの入れ忘れなどによる断水があり, 植物体が萎凋するトラブルがあった. また, 8月初旬より葉先や葉縁が枯れるカリウム欠乏とみられる症状がみられた. 果房別の収量についてみると, 3-4段, 6-7段, 10-11段, 14段果房では, 収量の低下がみられた (第7図). これらの果房の開花期は, 先に述べた断水や養分欠乏などが発生した時期と一致した. 同年8月29日に培養液処方を園試処方から大塚 SA 処方に変更したところ, カリウム欠乏とおもわれる症状は改善した.

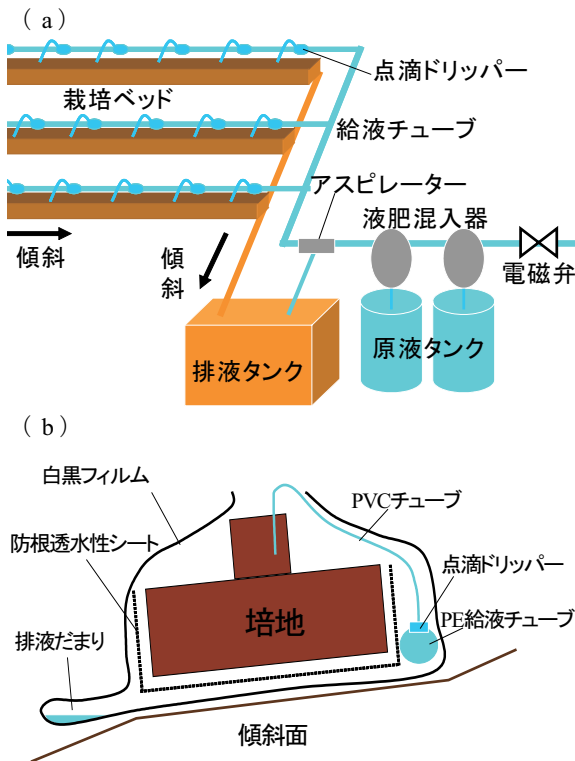
排液率は,  $0\sim 40\%$ 程度の間で変動していたが, 期間全体の平均は  $7.3\%$ と低いものであった (第8図). 排液タンク内の培養液の EC は, 大きく変動しながら徐々に高く, pH は徐々に低くなる傾向がみられた (第9図). 排液率が  $5\%$ 以上の日の吸水量と積算日射について, 収穫開始までと収穫開始後の期間に分けて調べたところ, 両者には正の相関があり ( $P<0.001$ ) 積算日射と吸水量との1次回帰式が得られた (第8表).

以上のように, 圃場の傾斜や高低差に由来する水圧を原動力として導入費およびランニングコストが安価な傾斜地用閉鎖系養液栽培システムが開発された. このシステムをトマト生産者に導入したところ, 7か月間以上の栽培を行うことができ,  $10\text{a}$ あたり  $12.8\text{t}$ の収量が得られることが明らかになった. また, 栽培実験から, 本システムによる夏秋トマト栽

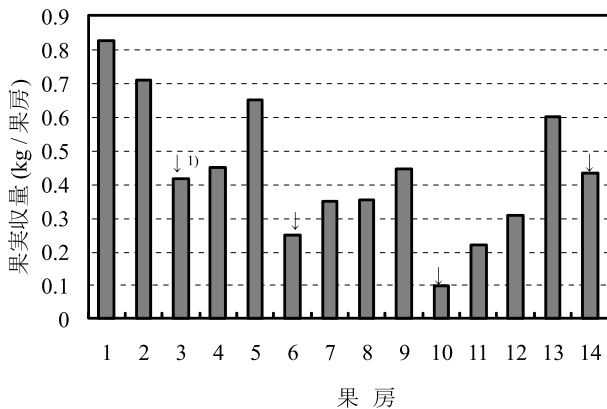
第 8 表 傾斜地養液栽培における吸水量と積算日射の相関関係

	期間	相関係数 (r)	1 次回帰式 <sup>1)</sup>
定植～収穫	4/25～6/30	0.77	$Wu = 0.078 Sr + 0.080$
収穫開始後	7/1～12/10	0.80	$Wu = 0.063 Sr + 0.254$

1) Wu: 吸水量 (L plant<sup>-1</sup>), Sr: 積算日射 (MJ m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>).

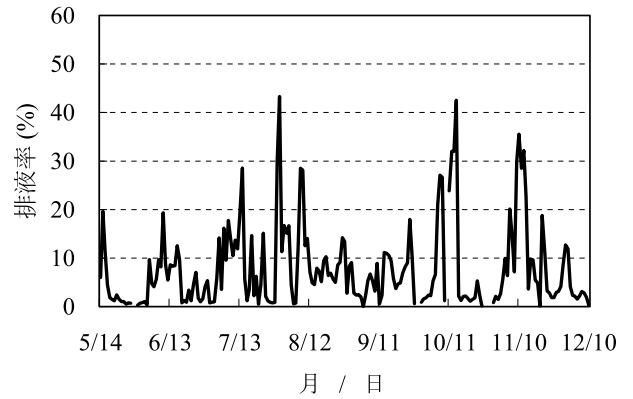


第 6 図 傾斜地用閉鎖系養液栽培システムの概要 (a) およびベッド断面図 (b)

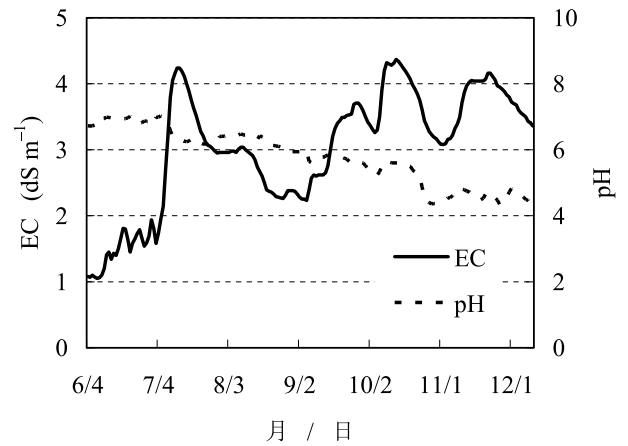


第 7 図 傾斜地用閉鎖系養液栽培システムにおけるトマトの果房別収量

1) ↓は、開花時期に断水もしくは養分欠乏などがあったことを示す。



第 8 図 傾斜地用閉鎖系養液栽培システムにおける排水率の推移



第 9 図 傾斜地用閉鎖系養液栽培システムの排水タンク内の EC および pH の推移

培における給液管理に対する基礎データが得られた。

#### 4 総合考察

傾斜地で点滴灌水を行う場合、圃場内の高低差に由来する水圧差によって給液の不均一が生じることが予測される。具体的な給液のばらつきの要因としては、吐出速度の違い、吐出の開始や終了の違いに由来する吐出時間の違い、給液停止後の吐出などが

考えられる。Ⅱ-1では、平地の養液土耕栽培などで一般的に用いられる圧力補正機構付の点滴器具を用いた場合、給液中の吐出速度は高低差に関係なく、ほぼ同等であったが、給液停止後にチューブ内の水が、給液ラインの低い部位で吐出した(第1表)。そこで、一定水压以下では吐出が停止する停止水压付の点滴器具を用い、さらに点滴チューブ同士の水压差がこの停止圧以内におさまるように逆止弁などで配管を分割した。その結果、給液停止後の吐出を抑え、均一な灌水を行うことができた(第2表、第3表)。

傾斜地において点滴灌水を行う場合、地形や水压によって配管方法を検討する必要がある<sup>6, 7, 8, 71)</sup>。現在の点滴器具の精度は高く、経路内に多少の水压差があっても、給液中の吐出速度の位置的な差異は少ない。しかし、給液停止後は、管内に残留する水が低い部分に集中して漏れる。給液(量)の不均一は配管の高低差に大きく影響され、管の総延長が大きくなったり、給液頻度が増えたりすると給液量の不均一はより顕著になる。傾斜地における給液停止後の水漏れについて、Kawashima et al. (2000)<sup>68)</sup>は、給液経路下部に電磁弁を設置して、給液終了時に管内の残留水をいったん抜くことで対処した。この場合、抜かれた残留水はタンクに集められ、再度、ポンプアップして給液に利用するため、設備およびランニングコストが余計に必要となる。Ⅱ-1で示したように水だれ防止機構付の点滴器具を用い、ライン同士の水压差が停止圧内におさまるように本管を逆止弁で分割する方法は、こういった設備が必要なく、コスト面で優れていると考えられる。

トマトを長期間栽培している地域では土壤病害に対応するため、接木苗を購入している場合が多く、全支出に対する苗コストの占める割合は大きい。養液栽培では、一般に土壤病害の問題は少ないため、接木は不要となり、自家育苗も容易となり、苗代についてのコストダウンが図られる。高品質な苗生産を行うため、育苗装置としてエプアンドフロー形式を用いる場合は多く、自作も容易である<sup>21)</sup>。しかし、自作の装置では、水があふれたり、漏れたりするなどの事故や故障が起こる場合が多い。Ⅱ-2において開発した育苗装置は、ベッド底部に排水口を設けないため、水漏れの危険は少ない。また、ポンプ稼

動によってタンク内の液はほとんど栽培槽に注入されるが、タンク内の液量のごく少量になるとポンプは稼動していても注入は停止し、給排水管から逃げ水としてタンク内に液が戻る。これにより、ポンプが空回しになることはなく、ポンプの焼き付きを防止できる。培養液の加温の際には、単極双投式のタイムスイッチの使用により、ポンプ稼動時にヒーターの電源は切断される。タンクが空の状態に加温した場合、空焚きによるタンクおよびヒーターの劣化や破損をまねく。ヒーターの劣化は、漏電や感電事故の危険性だけでなく、銅などの金属の溶出による植物体の障害に結びつく。2-1)-(1)で示した育苗装置は、自作が容易で事故のおそれが少ないものと考えられる。

2-2)-(2)では、栽培ベッドの高低差によって、収量に差異がみられた(第5表)。この原因は、原水压低下による給液量の差に由来するものと考えられる。実験開始時の原水压は0.09MPa、給液中の経路内水压は0.05~0.07MPaであり、使用した点滴ノズルの適応可能範囲内であった。しかし、給液時に周囲の圃場や温室において水が使用されると、原水压は0.04MPa以下まで低下し、点滴ノズルの適用範囲以下となることがたびたびあった。このため、点滴ノズルから均一に吐出できなかったものと考えられる。これを改善するため、2-2)-(3)では、原水経路を変更し、十分な原水压が得られるように設定したところ、高低差のある列間においても、収量には差はみられなかった(第6表)。また、第7表に示すように、培地の下に吸水シートを使った場合には、莖長は大きくなるが、収量に差はみられなかった。吸水シートは吸収されなかった培養液を毛管現象によって再度、供給する目的で用いたものである。傾斜圃場では、一般に単一斜面よりも複合斜面が多く、平地のように均一に平面化することは容易ではない。このように地面の凹凸がある圃場では、排液の滞留時間にも差異があると予測される。このため、吸水シートを用いた場合、位置的な水分状態のばらつきを生じ、生育の不均一をまねく可能性がある。したがって、傾斜地養液栽培では、シートは使用しない方が安全であると考えられる。

養液栽培は、コストがかかることが導入上の問題

であり、低コストで簡易な装置の研究が進められている<sup>13, 102)</sup>。3-1) - (1) で開発した養液栽培システムは、傾斜地用として初めてのシステムであるだけでなく、低コスト化が図られている。まず、給液には、原水圧を用い、無動力式液肥混入器にて給液時に培養液を調整するため、ポンプ、大容量タンクおよび EC センサなどが不要であり、タイマーおよび電磁弁以外には電力を用いない。また、培地を防根シートおよびフィルムで包むだけで、ベッドを支持する容器も用いていない。近年、普及が始まっているハイガターシステムでは、吸収されなかった培養液は、宙吊りされたガターによって、温室構造の勾配を利用して回収されるが、本システムでは圃場の勾配を利用して回収している。さらに排液はアスピレーターによって混入するため、その動力も不要である。このように初期設備だけでなく、傾斜地の特性を利用してランニングコストについても低コスト化を図っている。なお、3-1) - (1) の閉鎖系養液栽培システムの総資材費は10 a あたり116万円程度であった。

II-3 では、実際の生産者圃場において本システムによる7か月間以上の栽培を行った。このとき、果房別の収量をみると、特定の果房において収量の低下みられた(第7図)。これらの果房の開花時期は断水や養分欠乏の発生時期と一致することから、これらのトラブルが落花や不着果をまねき、収量低下の大きな要因となったと考えられる。また、断水などの影響は特定の果房だけでなく、しばらくの間、生育に影響を残したものと思われる。

本システムでは、給液する培養液に20%程度の排液を混入して植物体に与えることが可能である。したがって、給液中の80%程度は新鮮な(規定濃度の)培養液であるため、養分組成の乱れによる植物体への影響は、湛液耕などの EC 制御による循環型システムに比べて小さいと考えられる。3-2) では、排液タンク内の培養液の EC は、大きく変動しながら徐々に高くなっていった(第9図)。培養液濃度がある程度以上に高い場合、排液率が低いと、排液中の養分濃度が高くなる傾向がある<sup>34)</sup>。今回は、排液率がかなり低く推移していることから、これが EC の変動や上昇に大きく関与していることが推察される。今後の課題としては、排液率を制御した状態で

栽培を行い、養水分吸収を測定、解析し、培養液管理法を策定することが必要である。

本システムで培養液を完全に利用するためには、排液率を常に20%程度以下に抑える必要がある。ところで、排液量をモニタリングし、フィードバックすることで、天候や生育の変化に応じて適正な給液を行うことが可能である<sup>25, 34, 37)</sup>。しかし、これを行うにはコンピュータなどの設備が必要であり、中山間傾斜地を対象とする本システムに利用することは、普及性を考えると難しい。本システムの給液制御には、生産者がタイマーなどを設定するフィードフォワード制御方式が適していると考えられる。3-2) における排液率は、期間全体の平均で7.3%であり、5%以下の日も多く、給液が不足していたことがうかがえる(第8図)。排液率が5%以上の日について、積算日射と吸水量との1次回帰式を得たものが第8表である。1回の給液時間の上限を6分程度とし、最低給液間隔を30分として、第8表に基づいて時期別に給液法を検討すると、定植~6月30日では1日14回、1回につき0.8~6分間、7月1日~8月31日では1日14回、1回につき1.5~6分間、9月1日~10月31日では1日11回、1回につき1.5~5分間、11月1日~12月10日では1日9回、1回につき1.5~5分間が適当な範囲であると算出される。今後は、これを参考にして、天候に応じて1回あたりの給液時間を調節すれば、排液率の制御精度が向上するものと考えられる。

## 5 摘 要

傾斜地トマト栽培で問題となる土揚げ作業を省略し、土壤病害を避けるために傾斜地養液栽培システムを開発した。圧力補正機能付の点滴チューブを傾斜地において等高線方向に配置した場合、給液中の定常状態での吐出速度には位置的な差異はみられなかったが、給液停止後、チューブ内の水が低い位置から吐出した。一定水圧以下になると吐出が停止する点滴器具を用い、チューブ間の高低差に起因するチューブ内水圧の差が停止圧以内になるように配管を逆止弁で分割したところ、給液停止後の吐出はほとんどなくなった。傾斜地に等高線方向にロックウールベッドを配置し、原水圧で培養液を給液する傾斜地養液栽培システムを試作して、トマトを栽培し

たところ、位置的に高いベッドよりも低いベッドにおいて果実収量が多かった。これは水圧不足による給液量の差異によるものと考えられたため、同装置で原水圧を十分な高さに設定してトマトを栽培したところ、位置的な収量の差はみられなかった。この傾斜地養液栽培システムを改良し、圃場の傾斜によって排水を回収し、アスピレーターにより無動力で再混入させる閉鎖系システムを作製した。これを用いて、約7か月間トマトを栽培し、10 aあたり12.8 tの収量が得られた。

### Ⅲ 作物の吸水量に基づいた精密給液制御法の開発

Ⅱでは、傾斜地で養液栽培を行う場合の問題点やその対策を検討し、傾斜地の条件を利用した低コストで環境保全的な傾斜地養液栽培システムを開発した。しかし、新しい装置・システムを用いた養液栽培技術の確立には、ハード部分の開発以上に、いつ、どのくらいの量および濃度の培養液を、どのように給液するかといった給液管理手法の開発が必要である。そこで、ここでは、傾斜地養液栽培システムに相応しい給液制御手法を開発するため、精密かつ効率的な給液が可能と思われる水分吸収のリアルタイム監視に基づいた給液制御法を開発、検討した。

養液栽培では、給液不足を防ぐため、作物に対し、吸収量よりもやや多めに培養液を供給するのが一般的である。このとき、かけ流し方式の養液栽培では作物に吸収されなかった培養液は廃棄されるため、肥料の浪費だけでなく、環境汚染に結びつく可能性がある。この対策としては培養液をかけ流さずに循環すればよいが、この場合には病害の感染および拡大の危険が増加するとともに培養液組成の乱れが生じるおそれがある。したがって、循環式養液栽培を行う場合、病害感染や拡大を回避するために高価なフィルタや殺菌装置が必要となる。また、これらの設備の整った循環式システムにおいても定期的な培養液組成の修正は不可欠である。

作物に吸収されない培養液の量を最小限にすることは、培養液の利用効率を高めることになる。このためには作物の要求量にすばやく対応して給液を調節することが必要である。このため、Higashide et al. (1996)<sup>32)</sup> は培養液の養分組成を迅速にかつ精密

に調整できる噴霧耕システムを開発した。作物の培養液要求量は作物の種類や品種、生長速度や時期によって異なるが、養液栽培における培養液供給制御では、一般にタイマーや日射センサを用いたフィードフォワード型の制御方式が取られ、作物の要求量に基づいて供給を制御するフィードバック制御が取られることは少ない<sup>29)</sup>。作物による水分吸収は日射に密接に関係していることから、従来の制御方式では積算日射に基づいて給液量を調節するケースが多い。しかし、日射比例制御では作物の生長に伴って水分吸収が増加していくことは考慮されていない。このため、生産者が適宜、給液量を調節しなければならず、供給を完全に自動調節することは不可能である。このとき、生産者による調整には経験や技術が要求され、これが不適切な場合には作物の生育の減退、収量および品質の低下が生じることとなる。

これに対して、栽培中の作物の生体情報に基づいたフィードバック制御では、より精密にかつ自動的に給液量の調節が可能である。フィードバック制御において作物の水分状態を示す指標として用いられるものには、レーザーセンサやストレインゲージなどで計測した茎径変化や電子天秤によって連続測定された果実重変化などがあげられる<sup>11, 85, 91)</sup>。また、排水を一定速度に保つように培養液供給量および頻度を調節すると、作物の生長に応じて自動的に供給量が増加することが報告されている<sup>34)</sup>。

ここでは、刻々と変化する作物や環境条件の変化に対応できる精密で効率的な給液制御を検討した。この際、微少な排水を連続測定する方法について開発し、キュウリの噴霧耕において吸水量に基づいた給液制御と日射比例制御とを比較し、水分吸収のリアルタイム監視に基づいた給液制御の有効性を検討した。

#### 1 微少な排水量の連続測定法

養液栽培における排水は微少で断続的であるため、一般の流量計による測定は困難である。ここでは、電子天秤と簡単な排水測定補助具を用いて断続的で微少な排水を連続測定する方法を開発し、その精度について確認した。

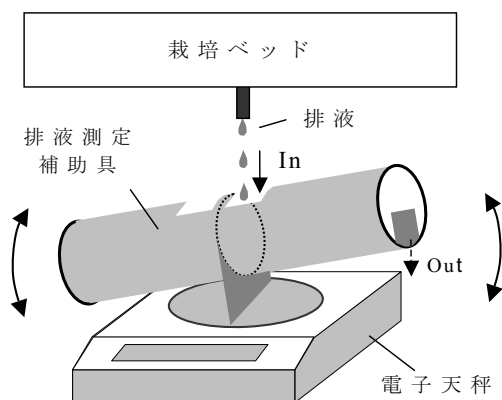
### 1) 材料および方法

第10図は、微量排液の測定装置を示している。この測定装置では、2つのシリンダーの底同士を連結しシーソー状にして、電子天秤（EB400H, Shimadzu, 京都）上に設置する。排液は、まず、片側のシリンダーに蓄積し、その重量は電子天秤によって計測され、RS232C ケーブル接続されたコンピュータに出力される。シリンダーに蓄積した液量がある一定の値に達するとバランスを失い、シーソーのように液の蓄積したシリンダーが下方に動き、液は排出される。その後、排液はもう一方のシリンダーに蓄積していき、同様に計測が行われる。以上のような一連の過程が繰り返されることによって、電子天秤の許容範囲を超えることなく排液が連続測定される<sup>35, 38)</sup>。

以下のように本装置および測定法の有効性および精度を確認した。実験室内において 1000mL の水を約  $1\text{L h}^{-1}$  の速度で本装置に滴下し、排液速度とその積算値である全排液重量を求めた。電子天秤による重量値は 1 秒毎に記録し、前回の重量値と現時点の重量値の差より排液速度を算出した。測定は、10 回行った。

### 2) 結果および考察

第11図は、開発した測定法によって測定した重量値の変化とそれから求めた排液速度を示している。本測定から得られた排液速度を積算することによって求めた排液重量の平均は、995.8 g、標準偏差は 0.0066であった。したがって、実際の水量 1000mL



第10図 微量な排液を自動的に連続測定するための装置  
特許第3660986号

(1000 g) と極めて近く、 $1\text{L h}^{-1}$  の断続的な排液を高い精度で測定できることが明らかになった。また、本方法によれば、 $0.3\sim 0.4\text{g s}^{-1}$  といった極めて微量な排液速度を測定できることが明らかになった。

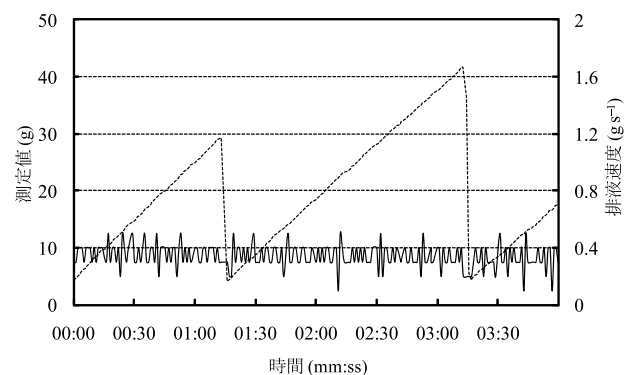
## 2 微量排液の連続測定によって求めた作物の吸水量に基づいた給液制御法

栽培中の作物の生体情報に基づくフィードバック制御では、より精密にかつ自動的に給液量の調節が可能である。排液を一定速度に保つように培養液供給量および頻度を調節すると、作物の生長に応じて自動的に供給量が増加することが報告されている<sup>34)</sup>。しかし、この方法においても天候が急変したときには、対応が遅れる可能性がある。Ⅲ-1において開発した微量排液の連続測定に基づけば、刻々と変化する作物の吸水量をリアルタイムで計測することが可能である。ここでは吸水量と日射に基づいて給液を制御する新しい制御方式を開発し、キュウリの噴霧耕において、この方式と従来の日射比例制御とを比較した。

### 1) 材料および方法

#### (1) 作物および栽培条件

栽培実験は野菜茶業研究所（愛知県武豊町）内アクリル複層板温室において行った。ロックウール等の培地の影響を避け、培養液を厳密に調節するため、噴霧耕システム<sup>32)</sup>によって実験を行った。第12図のようにこの噴霧耕システムでは栽培ベッド内に保持される培養液は培地耕や湛液耕に比べ、ごく少量



第11図 開発した測定法による排液重測定値の変化およびそれに基づいて算出された排液速度  
排液重量の測定値：破線、排液速度：実線



であり、一度に過剰な培養液を供給した場合、作物に吸収されない部分は排水として排出される。したがって、作物に水分ストレスを与えず、有効に培養液を使用するためには、少量の培養液を短い間隔で供給することが必要である。

2001年7月30日、キュウリ (*Cucumis sativus*, 品種‘シャープ1’, 埼玉原種育成会, 埼玉) をフェノール発泡樹脂に播種し、湛液方式にて育苗した。後述する2種類の給液制御方式を比較するため、それぞれの方式につき、深さ8cm, 幅60cm, 長さ345cmの噴霧耕ベッドを1基ずつ用いた。2001年8月11日、本葉第2葉展開期の植物体をそれぞれの制御方式の栽培ベッドに20個体ずつ定植した。培養液には、園試処方培養液100%濃度液<sup>50)</sup>: 8mM KNO<sub>3</sub>, 4mM Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, 2mM MgSO<sub>4</sub>, 1.3mM NH<sub>4</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, 3mg L<sup>-1</sup> Fe, 0.5mg L<sup>-1</sup> Mn, 0.5mg L<sup>-1</sup> B, 0.05mg L<sup>-1</sup> Zn, 0.02mg L<sup>-1</sup> Cu および 0.01mg L<sup>-1</sup> Mo を用いた。また、培養液の組成および濃度の変化による影響を防ぐため、非循環式とした。作物の側枝は、それぞれ第2節上で摘心し、主枝は2001年9月11日に第24節で摘心した。果実の収穫は2001年9月3日より同年11月9日まで行った。温室は最低気温が15℃以下とならないように加温した。

## (2) 培養液供給の制御方式

キュウリの噴霧耕において、第13図のように [1] 微量排水測定法によって求めた吸水量と日射の両方に基づいた給液制御方式 (吸水法) と [2] 日射に基づいた慣行の給液制御方式 (日射比例法) とを比較した。

[1] 吸水量に基づく新制御方式 (吸水法): 吸水法では、排水量を10秒間隔で測定し、給液量から排水量を差し引くことで作物の吸水量をリアルタイムで算出した。ただし、栽培ベッドに付着している培養液については、保持量は比較的少なく、その変化は小さいと考えられることから、考慮しなかった。以下のように吸水量と日射から直線回帰を行い、給液量を決定した。

$$U = aI + b \quad (1)$$

( $U$ : 吸水量;  $a, b$ : 直線回帰式の係数;  $I$ : 日射)

このとき、式 (1) の切片  $b$  は、日射が0のときの吸水量を示し、傾き  $a$  は日射に伴って変化する吸水量の割合を示す。30分毎の吸水量 ( $u_1, u_2, \dots, u_{48}$ ) および積算日射 ( $i_1, i_2, \dots, i_{48}$ ) を24時間計測し、毎日、24:00にこれらから直線回帰式を求めた。回帰式の算出は、直前24時間のデータのみ用い、それ以前のデータは回帰には用いなかった。求められた式 (1) の  $a, b$  および給液時点の日射に基づき、以下のように培養液の給液速度を算出し、この給液速度  $S$  をみたとすように給液間隔を決定した (第13図)。

$$S = (aI_m + b)(1 + L_d) \quad (2)$$

( $S$ : 給液供給速度;  $I_m$ : 5分間の平均日射;  $L_d$ : 設定排水率 = 30%)

1回の給液量は、式 (2) において日射を 571.4W m<sup>-2</sup> としたときの給液速度から算出した。なお、この日射の値は実験前にこの温室で測定された日射の最高値である。ただし、給液が不足することを避けるため、算出した式 (1) における  $a$  および  $b$  が前日より小さい場合には、前日のそれぞれの値を利用した。なお、一般のロックウール耕では、排水率を総給液量の20~30%とすることが多い。本実験で用いている噴霧耕はロックウール耕とは異なるが、排水率は30%に設定した。

[2] 日射に基づく慣行制御方式 (日射比例法): 日射比例法では、1日の排水率 (総給液量に対する排水量の割合) と日射に基づいて給液を制御した。慣行の日射比例制御と同様に積算日射が閾値に達した時点で給液を行った (第13図)。積算日射の閾値は 0.0926MJ m<sup>-2</sup> とし、これにより日射が 571.4W m<sup>-2</sup> の場合に吸水法と給液間隔が等しくなる。1回の給液量を算出するため、毎日、24:00に以下のように実際の排水率を算出した。

$$L_a = D_d / S_d \quad (3)$$

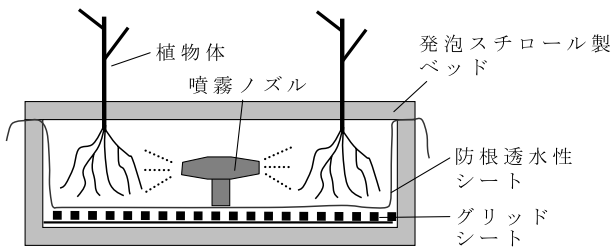
( $L_a$ : 排水率;  $D_d$ : 24時間の排水量;  $S_d$ : 24時間の総給液量)

1回の給液量は、この排水率  $L_a$  が30%となるように調節した。このとき、2001年8月11日から9月12日までは、前日の排水率  $L_a$  が10%以下の場合、当日の1回の給液量は20%増加させ、 $L_a$  が40%以上の場合には1回の給液量を20%減少させた。また、

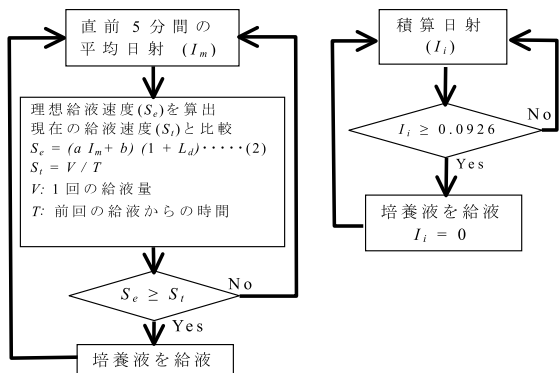
第9表 給液制御方式の違いがキュウリの生育および収量に及ぼす影響

制御方式	草丈 <sup>1)</sup> cm	葉数 <sup>1)</sup> 葉 個体 <sup>-1</sup>	収穫果実数 <sup>2)</sup> 果 個体 <sup>-1</sup>	果実収量 <sup>2)</sup> kg 個体 <sup>-1</sup>
吸水法	139.2	21.1	37.0	3.55
日射比例法	133.9	20.4	24.9	2.32
有意差 <sup>3)</sup>	ns	ns	**	**

- 1) 播種36日後（主枝は第24節で摘心）。  
 2) 播種より102日目まで。  
 3) ns：5%レベルで有意差なし，\*\*：1%レベルで有意差あり（t-test）。



第12図 使用した噴霧耕システムの栽培ベッド断面図  
 培養液はノズルより間欠的に作物の根に噴霧される。



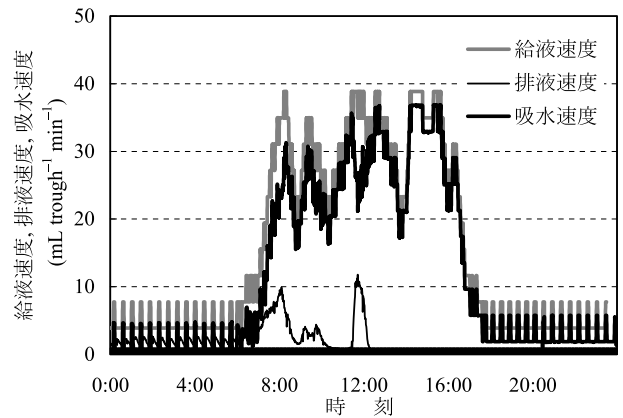
[1] 新方式（吸水法） [2] 日射に基づく慣行の制御法（日射比例法）

第13図 吸水法 [1] および日射比例法 [2] における給液判断のフローチャート

日射は10秒毎に計測，一連の給液判断は60秒毎。

同年9月13日以降は，給液量が激しく増減することを防ぐため， $L_d$  が70%以上の場合に1回の給液量を20%減少させた。

両制御法ともに給液間隔は最小3分，最大300分とした。また，給液間隔が180分を超えた場合には1回の給液量を最小値に変更した。日射は日射センサ（農試電試型日射計）によって10秒間隔で測定した。



第14図 播種後37日目<sup>1)</sup>における給液速度，排液速度および吸水速度の変化

1) 2001年9月5日（晴れ），ベッド（trough）あたり植物体数は20個体。

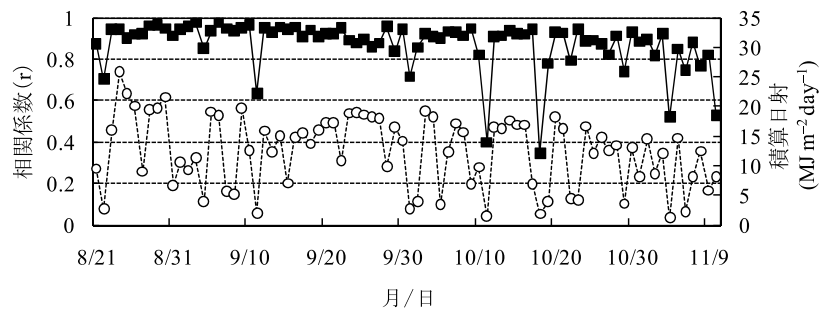
2) 結果および考察

(1) 微量排液測定に基づいた吸水量の連続測定

第14図は微量排液の測定に基づいて算出した作物の吸水量の1日の推移を示す。給液速度および吸水速度は，昼間に大きく，夜間に小さかった。また，この日の場合，排液は12:00までは観測されているが，12:00以降はみられなかった。このシステムでは，培養液供給はコンピュータによって制御されており，供給された培養液量は常に記録されている。このために培養液供給量から測定した排液量を差し引くことによって作物の吸水量を容易に求めることができる。

(2) 作物の吸水量に基づいた培養液供給の制御

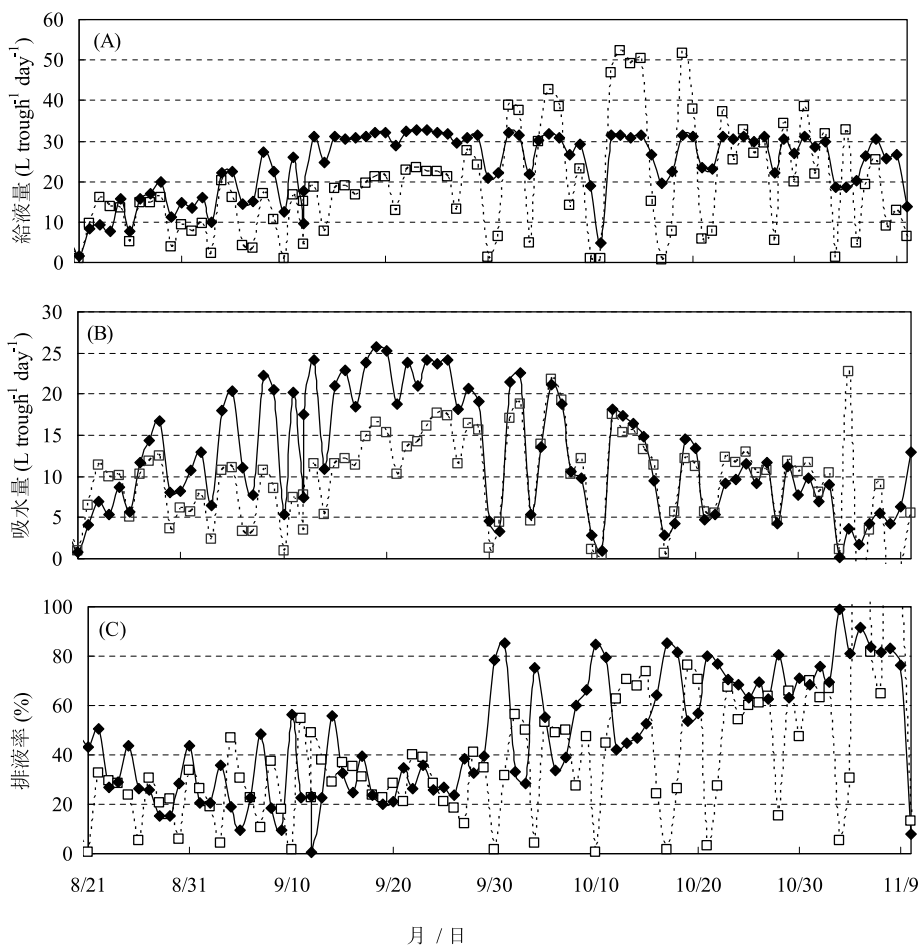
30分毎の吸水量と積算日射との相関関係を24時間毎に調べたところ，実験期間中，すべての日において吸水量と積算日射の間には有意な相関関係がみられた。相関係数は，晩秋に向かい日射が少なくなるとともに低下する傾向がみられた（第15図）。な



第15図 実験期間中の毎日の相関係数<sup>1)</sup> および積算日射の変化

相関係数 r : ■+実線, 日積算日射 : ○+破線.

1) 30分毎の吸水量と積算日射から24時間毎に求めたピアソンの積率相関係数.

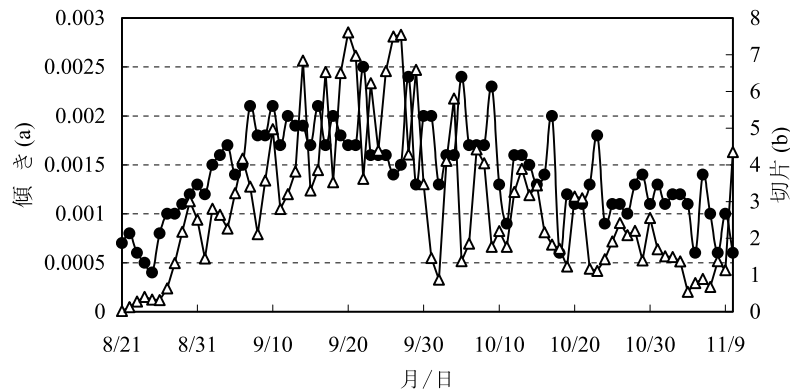


第16図 実験期間中の毎日の給液量 (A), 作物による吸水量 (B) および排水量 (C) の変化  
 吸水法 : ◆+実線, 日射比例法 : □+破線, ベッド (trough) あたり植物体数は20個体.

お, 実験期間全体の相関係数の平均は0.88であった。  
 播種後36日目における葉数および草丈についてみたところ, 日射比例法と吸水法との間では差はみられなかった。一方, 実験期間中の果実収量は日射比例法に比べて吸水法において有意に多かった。また,

この収量の差は収穫果実数の差によるものであった (第9表)。

第16図は実験期間中における毎日の培養液供給量, 作物による吸水量および排水率を示す。実験期間前半では, 給液量および吸水量は, 日射比例法よ



第17図 吸水量と日射の相関関係から求めた式(1)における傾き(a)および切片(b)の実験期間中の変化  
傾き(a):●, 切片(b):△.

りも吸水法において多かった(第16図AおよびB)。排液率については日々の増減があるものの、平均した場合、両制御法ともに約30%となっていた(第16図C)。したがって、吸水法では作物による吸水量は多いが、給液量に対する作物の吸水量の割合は両方式においてほぼ同等であったといえる。

実験期間後半には、吸水法における給液量は最大で  $30\text{L day}^{-1} \text{trough}^{-1}$  ( $1.5\text{L day}^{-1} \text{個体}^{-1}$ ) に達した。給液量の最大値は実験終了までこの値を超えることなく推移した。一方、日射比例法では、吸水法よりもさらに多量に給液される場合があり、日々の増減は著しく大きかった。実験期間後半における吸水量については両方式ともにほぼ同等であった(第16図B)。排液率は両方式において設定した30%よりも多く、特に日射比例において増減が激しかった。本噴霧耕システムでは過剰に給液した場合、作物が後で利用することができないように培養液は栽培ベッドに蓄積されることなく排出される。実験期間後半には両方式ともに過剰に給液していたものと考えられる。

第17図は吸水量と積算日射から求めた式(1)の傾きaおよび切片bについて示している。実験期間前半では傾きaおよび切片bともに増加傾向であった。日射あたりの吸水量は主に作物の生長によって変化すると考えられることから、作物の生長に伴って傾きaおよび切片bが増加していったものと考えられる。実験期間前半においては、吸水法による給液制御は排液率をフィードバックした日射比例法に比べて、より正確に作物の実際の要求量に応じた給

液を達成できたものと考えられる。一方、主枝を摘心した2001年9月11日以降、傾きaは減少し、10月初旬以降、切片bも減少した。今回、吸水法では、給液量が不足することを避けるために傾きおよび切片が前日より小さかった場合、給液量の算出には前日の値を利用した。このため、実験期間後半には、吸水法でも作物の要求量よりも過剰に給液され、このために排液率が増加したと考えられる。

### 3 総合考察

Ⅲ-1に示したように電子天秤と排液測定補助具を用いる排液測定法によって排液を正確に連続測定することが可能となった(第10および11図)。本方法では液の重量を直接、電子天秤によって計測していることから、キャリブレーションの必要がない。また、本方法により作物の吸水量をリアルタイムで計測することが可能となった(第14図)。作物の吸水量は葉面積と受光状態を統合したパラメータとみなすことができることから、本方法によって連続測定した吸水量をフィードバックして培養液供給を制御することが可能となった。

排液量に基づくフィードバック制御では、作物による吸水要求量と培養液供給量とを、ある程度、一致させることが可能である<sup>24, 25, 32)</sup>。Ⅲ-2では、給液制御について新しい方式をテストした。その方式では、毎日、吸水と日射との間の相関関係式を算出しておき、その関係式に対して、その時点の日射を代入して給液速度を決定する。この方式(吸水法)と日射比例法によりキュウリを栽培したところ、果

実収量は日射比例法に比べて吸水法において有意に多かった(第9表)。多くの作物と同様にキュウリの収量は、一般に水分供給の増加に伴い増加する<sup>130)</sup>。実験期間前半においては吸水法における吸水量は日射比例に比べて多かったことから、これが作物の生育を促進し、収量の増加に結びついたものと考えられる。循環式の養液栽培において排水率を低くした場合、キュウリの生育は抑制される<sup>46)</sup>。しかし、本実験では、培養液は循環させず、十分と思われる量の新鮮な培養液が給液されていた。このため、日射比例法において収量が少ない原因は、排水率が低いことではないと考えられる。作物の収量にはたくさんの要素が関係していることから、本実験でみられた収量の違いを明らかにするためにはさらに詳細な実験を行う必要がある。

実験期間後半においては、排水率は40-80%に達し、給液は適切に制御されたとはいえなかった(第16図C)。実験期間前半では、式(1)の傾き $a$ および切片 $b$ は作物の生育に伴って増加したが、主枝摘心後の実験期間後半では生育も実験期間前半のように旺盛ではないために傾き $a$ および切片 $b$ は減少傾向であった(第17図)。ところが、今回の実験では給液不足による生育の抑制を避けるために傾き $a$ および切片 $b$ が前日より小さかった場合、給液量の算出には前日の値を利用した。このルールは実験期間前半には妥当であったが、実験期間後半には不適切であったと考えられる。実験期間後半では日射の減少により給液量は減少するが、日射あたりの作物の吸水量はそれ以上に減少していたと考えられる。このため、作物の要求量よりも過剰に給液され、排水率が増加したといえる。傾き $a$ および切片 $b$ の適用ルールを修正すれば、吸水法によって栽培期間全体の給液を精密にかつ安定的に制御できると推定できる。

微量排水の連続測定によって作物による吸水量の連続算出も可能となった。第17図のように日射あたりの作物による吸水量は生育や季節によって異なった。吸水量に基づく制御では、このような変化に自動的に応じて給液を制御することが可能である。本実験で試みた吸水量による制御方式では、吸水量と日射量との関係から得た1次回帰直線を給液量の算出に使用した。回帰直線以外にも給液量の算出に吸

水量と日射との関係を多項式として用いたり、他の環境要因を考慮したりすれば、今回、試みた方式よりもさらに精密な給液制御ができる可能性がある。

以上のように、養液栽培において栽培中の作物の生体情報である吸水量と環境情報である日射とを組み合わせて給液制御を行った場合、従来の給液制御法に比べて精密な給液制御が可能となり、作物の生育や収量および培養液の利用効率が向上することが明らかになった。

#### 4 摘 要

中山間傾斜地域の養液栽培における給液制御法を開発するため、栽培中の作物の生体情報に基づいたフィードバック制御を検討した。まず、生体情報として水分吸収をリアルタイムに監視するため、微量な排水を連続的に測定する手法を開発した。転倒マス式の排水補助具を電子天秤の上に設置し、重量を連続測定することにより、微小な排水速度の連続測定が可能となった。これにより、実際の栽培状態にある作物の水分吸収について、連続的な算出が可能となった。そこで、キュウリの噴霧耕において、排水の連続測定に基づいた給液制御を検討した。新しい給液方式として、その時点の日射を、前日における日射と吸水量との1次回帰式に代入して給液制御を行う方法を検討し、従来の日射比例による方式と比較した。吸水量は、生育前半では日射比例方式よりも新方式の方が多かったが、生育後半では両方式で同程度であった。また、果実収量は、新方式の方が日射比例方式よりも有意に多かった。

#### Ⅳ 夏秋トマトの傾斜地養液栽培における培地および給液制御法

傾斜地のトマト栽培で生じる土壤病害や土揚げ作業などの問題を解決するため、Ⅱでは傾斜地用の養液栽培システムを開発した。また、Ⅲでは、養液栽培の培養液供給において生体情報に基づく精密で効率的な給液制御法を開発、検討した。ここでは、開発したこれらの技術を中山間傾斜地の夏秋トマト栽培に導入・普及させるため、実際の生産現場に適した培地および給液制御法を検討した。

ところで、養液栽培の培地として最も用いられ

ているロックウールは、使用後の廃棄が問題となることから多くの代替培地が検討されている<sup>13, 22, 51, 61, 62, 90, 93, 114, 123</sup>。中山間地には、豊富な森林資源から得られる樹皮が廃棄物としてたくさんある場合が多い。樹皮は有機性の資源であることから、ロックウールに比べて使用後の廃棄は容易であり、養液栽培の培地として利用できると考えられる。そこで、夏秋トマトの傾斜地養液栽培で用いる培地として、地域資源を有効利用できる樹皮を検討した。

ロックウールの代替培地として多くの培地があるが、培地の特性に適した給液管理を行わなければ、ロックウールと同程度の収量をあげるのは困難である。一般に養液栽培では、センサによる培養液のモニタリングや定期的に培養液の分析を行いながら栽培を行う場合が多い。また、Ⅲで開発した吸水量に基づいた給液制御法も精密で効果はあるが、高い導入コストの必要な技術である。しかし、中山間地の小規模農家にとっては、高価で精密な自動給液制御よりも、装置の導入・利用コストを抑え、操作が容易であることの方が重要である。傾斜地養液栽培システムは、培養液の希釈調製や給液には地域の高低差で生じる原水の水压を利用し、一般の養液栽培システムに必要なポンプ、大型タンク、培養液のモニタリングに用いる EC センサや pH センサ、制御用コントローラは利用せず、電磁弁やタイマー以外には電力も利用しないシステムである。すなわち、導入費用においても運用費用においても低コストかつ省エネルギーなシステムである。したがって、このシステムには安価であり、生産者にとって操作が容易な給液制御法が相応しいと考えられる。そこで、ここではロックウールの代替培地でも生産物の収量を十分に得ることができ、かつ、導入コストが安価であり、生産者にとって操作が容易な給液制御法を検討した。

### 1 夏秋トマトの傾斜地養液栽培に用いる培地

傾斜地養液栽培システムを用いる場合、多くの養液栽培と同様にロックウール培地が利用できるが、使用後の廃棄の問題や地域資源の有効利用の観点から、有機質培地の利用の検討が必要である。そこで、本システムによって夏秋トマト養液栽培を行う際の

培地として中山間地に豊富にある樹皮培地に着目した。ここでは、本システムの導入施設において樹皮培地を用いた栽培実験を行い、収量などについてロックウールを用いた場合と比較した。

#### 1) 材料および方法

樹皮培地として、多種の木材から得られた多種バーク（日生開発、香川）およびスギ・ヒノキ皮を素材としたもの（天領、ジャパングリーンシステム、大分）を用いた。まず、2種類の樹皮培地についての物理的特性を調べるために、体積含水率、飽和透水係数および N:P(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>):K の比率について測定した。

栽培実験は、徳島県東みよし町K地区の2戸のトマト生産者（生産者BおよびC）の傾斜ハウスにおいて行った。両生産者とも、傾斜地養液栽培システム<sup>39, 40</sup>を導入して夏秋トマト栽培を行っており、生産者Bの傾斜ハウスは、標高約330m、傾斜4°の北斜面に建設されており、床面積は284m<sup>2</sup>であった。また、生産者Cの傾斜ハウスは、標高約310m、傾斜6°の東斜面に建設されており、床面積は495m<sup>2</sup>であった。

傾斜地養液栽培システムで夏秋トマトを栽培する際に適した培地を検討するため、上記の2種類の樹皮培地およびロックウールスラブ（75×300×910mm、ニットーポー、東京）を用いてトマトを栽培し、それぞれの培地におけるトマトの生育および収量について調査した。実験は、生産者Bでは2004年および2005年に、生産者Cでは2005年に行った。生産者Bでは、2004年には‘桃太郎ファイト’を2004年4月19日および5月1日に栽植密度を2.2 個体 m<sup>-2</sup>として定植し、2005年には‘桃太郎8’（タキイ種苗、京都）を2005年5月4日および16日に栽植密度を2.6 個体 m<sup>-2</sup>として定植した。生産者Cでは、‘桃太郎8’を2005年5月4日、11日および21日に栽植密度を2.6 個体 m<sup>-2</sup>として定植した。2004年のみ、最低気温が10-13℃以下にならないように加温を行い、2005年は両生産者ともに無加温で栽培を行った。すべての実験において、6月下旬～7月上旬に収穫を開始して、2004年には11月下旬まで、2005年には12月上旬まで栽培を行った。大塚 SA 処方培養液を用い、給液はタイマーを用いて行い、頻度および1回

の給液量は生産者の判断によって適宜調節した。

栽培実験では、樹皮培地はポリエチレン製の袋 (30×90cm) につめて袋底部に水抜き穴を設け、ロックウールスラブと同様に栽培システムに置いて利用した。多種バークは実験地の近くで生産されるもので、袋と培地を合わせた価格は最も低価格であった (290円 バッグ<sup>-1</sup>)。これに対してスギ・ヒノキ皮培地は380円 バッグ<sup>-1</sup>であり、ロックウールスラブと同等の価格 (380円 スラブ<sup>-1</sup>) であった。多種バーク、スギ・ヒノキ皮およびロックウール培地に定植したトマトの個体数は、生産者Bでは、2004年にはそれぞれ104個体、128個体および297個体、2005年にはそれぞれ125個体、150個体および150個体とし、生産者C (2005年) では、それぞれ349個体、274個体および142個体とした。収量は、培地毎にすべての個体の合計収量として求めた。

## 2) 結果および考察

樹皮培地のうち、多種バークでは、pF1.0 のときの体積含水率は66.8 (%) であり、飽和透水係数は $1.01 \times 10^{-3}$  (m s<sup>-1</sup>)、N:P(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>):K の比率は、それぞれ、0.97:0.01:0.02 (乾物%) であった。スギ・ヒノキ皮培地では、pF1.0 のときの体積含水率は70.8 (%) であり、飽和透水係数: $2.19 \times 10^{-3}$  (m s<sup>-1</sup>)、N:P(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>):Kの比率はそれぞれ0.85:0.00:0.01 (乾物%) であった。したがって、両者の培地としての物理的特性には大きな差はないといえる。

それぞれの培地におけるトマトの茎長および展開葉数には大きな差や特徴的な傾向は認められなかつ

第10表 培地の種類がトマトの果実収量に及ぼす影響

培地の種類	果実収量 (kg plant <sup>-1</sup> )		
	生産者 B		生産者 C
	2004	2005	2005
多種バーク <sup>1)</sup>	5.09	5.14	4.87
スギ・ヒノキ <sup>2)</sup>	5.13	5.80	5.06
ロックウール	5.87	5.45	5.00

1) 日生開発社製、香川、pF1.0 体積含水率: 66.8 (%)、飽和透水係数: $1.01 \times 10^{-3}$  (m s<sup>-1</sup>)、N:P(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>):K = 0.97:0.01:0.02 (乾物%)。

2) ジャパングリーンシステム社製、大分、pF1.0 体積含水率: 70.8 (%)、飽和透水係数: $2.19 \times 10^{-3}$  (m s<sup>-1</sup>)、N:P(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>):K = 0.85:0.00:0.01 (乾物%)。

た。また、すべての培地の植物体において、養水分欠乏などの障害はみられず、健全な生育がみられた。

第10表は、培地の種類がトマト果実収量に及ぼす影響について生産者および実験年毎に示している。生産者Bの2004年では、多種バークおよびスギ・ヒノキ皮培地に比べ、ロックウール培地の場合にやや収量は多かった。一方、2005年では生産者BおよびCともに培地による収量の差はみられなかった。生産者Bの2004年では、ロックウール培地の個体数が樹皮培地に比べて多かったため、生産者はロックウール培地で生育する植物体を基準として管理する傾向にあった。これに対し、2005年には、生産者Bでは各培地の個体数はほぼ同等とし、生産者Cでは樹皮培地の個体数が多かった。これらの点から2004年生産者Bの収量差は、培地の差よりも管理の影響の方が大きかったのではないかと推定される。生産者および年を問わずに培地間の果実収量を比較した場合、培地による収量の差はみられなかった (P = 0.40)。したがって、傾斜地養液栽培システムの培地として、これらの樹皮培地の利用が可能であり、ロックウールスラブを用いた場合と同等な収量が得られるものと考えられた。

## 2 夏秋トマトの傾斜地養液栽培における給液制御法

傾斜地養液栽培システムは、一般の養液栽培システムと異なり、特に中山間傾斜地を対象としたものである。中山間傾斜地では、平地に比べて施設規模が小さく、生産者あたりの耕地面積も少なく、生産者の高齢化も進んでいる。このため、精密な給液制御よりも、低コストで容易な操作によって管理することが重要である。そこで、中山間地を対象とした傾斜地養液栽培システムに適する安価で容易な給液制御法として、タイマー制御を取り上げた。ここでは、夏秋トマト栽培の給液制御法として、タイマー制御と、日射センサを用いて自動的に給液頻度が調整される日射比例制御とを比較して収量などに対する影響を調査した。

### 1) 材料および方法

実験は、徳島県東みよし町K地区のトマト生産者Cの傾斜ハウス (標高約310m、傾斜4° 東斜面、

床面積495m<sup>2</sup>)において行った。2005年5月4日および11日、'桃太郎8'を傾斜地養液栽培システムに定植した。大塚 SA 処方培養液を用い、培地には多種バークを用い、栽植密度は2.6 個体 m<sup>-2</sup>とした。

培養液の給液制御法として次の2種類の方法を比較した。1つめの方法として、センサで日射を毎分測定して値を積算していき、積算値が閾値(0.75-1.0MJ m<sup>-2</sup>)に達した場合に給液を行う「日射比例制御」方式による給液を行った。もう1つの方法として、タイマーのみを用いて給液を行う「タイマー制御」方式を用いた。タイマー制御では、24時間タイマー(タイムスイッチ TB36109, National, 大阪)とサブタイマー(ソリッドステートタイマ H3CR-A, Omron, 京都)のみ用い、センサやコントローラは必要ないため、安価で(資材費9,000円程度)、操作は容易である。日射比例制御には温室サポートシステム(四国計測, 香川)を用いた。タイマー制御では、1日10回~20回程度に分けて給液を行い、1日の給液量は定植直後では1個体あたり0.3L程度とし、その後、約2L 個体<sup>-1</sup>まで増加させ、8月中旬以降、徐々に減少させた。両給液制御法ともに、排液量は温室サポートシステム(四国計測)を用いて計測し、1日の総給液量の20~30%が排液となるように給液量を適宜、調整した。

栽培実験は無加温で行い、2005年6月下旬から収穫を開始して同年12月4日に実験を終了した。それぞれの給液制御方式によって栽培したトマトの生育、収量および吸水量を調査した。用いたトマトの個体数は、タイマー制御では349個体、日射比例制御では135個体とした。収量は、給液制御法毎にすべての個体の合計収量として求めた。また、生産者には栽培期間中、毎朝、その日の天候を晴、曇、雨のうちのいずれかに分類して記録するよう依頼した。

## 2) 結果および考察

第11表は、傾斜地養液栽培システムにおける給液制御法が、給液量、排液量およびトマトの果実収量に及ぼす影響を示している。個体あたりの総給液量は、日射比例制御に比べてタイマー制御の方が多かった。しかし、栽培期間中の排液率は、両方式ともに等しく、約20%であった。トマトの果実収量も両方式ではほぼ等しかった。したがって、傾斜地養液栽培では、タイマーのみによる安価な方式でも給液制御が可能であると考えられる。

第18図は、栽培期間を摘心までの前期(6月15日~9月30日)と摘心以後の後期(10月1日~12月10日)の2つにわけ、1日の積算日射とトマトの吸水量との相関関係および生産者の天候判定を示したものである。積算日射とトマトの吸水量との間には、栽培期間の前期後期ともに高い相関がみられ、相関係数rは、前期では0.93、後期では0.96であり、ピアソン相関関係の検定におけるP値は両者ともに0.0001未満であった。栽培期間前期には、積算日射の増加に伴う吸水量の増加が大きく、積算日射の増減幅も大きかった。一方、摘心後の栽培期間後期では、積算日射の範囲も小さくなく、積算日射の変化に伴う吸水量の変化も小さいことがわかる。生産者の天候判定によって、積算日射はある程度、分類されていた。ただし、栽培期間後期における雨と曇の判定の場合に積算日射の重複範囲が大きく、明確に区別することは難しかった。

実験期間中のトマト植物体の吸水量、第18図に示した積算日射と吸水量との関係式および生産者による天候判定と日射の関係をもとに、傾斜地養液栽培システムによる夏秋トマト栽培における給液設定例を作成したものが第19図である。給液制御の手段としてタイマーを用い、1日の給液回数は少ない場合には10回、高温期には20回程度として、1日の給液

第11表 給液制御法が実験期間中の総給排液量およびトマト果実収量に及ぼす影響

給液制御法 <sup>1)</sup>	給液量 L plant <sup>-1</sup>	排液量 L plant <sup>-1</sup>	排液率				果実収量 kg plant <sup>-1</sup>
			最大 (%)	最小 (%)	平均 (%)	分散	
タイマー	228.0	48.6	62.0	0.0	19.9	9.0	4.87
日射比例	172.3	36.5	54.5	0.0	20.3	9.9	4.97

1) タイマー制御：給液量0.3-2.0 L 個体<sup>-1</sup> day<sup>-1</sup>, 10-20 times day<sup>-1</sup>; 日射比例制御：給液量0.3-2.0 L 個体<sup>-1</sup> day<sup>-1</sup>, 積算日射>0.75-1.0 MJ m<sup>-2</sup>で給液。



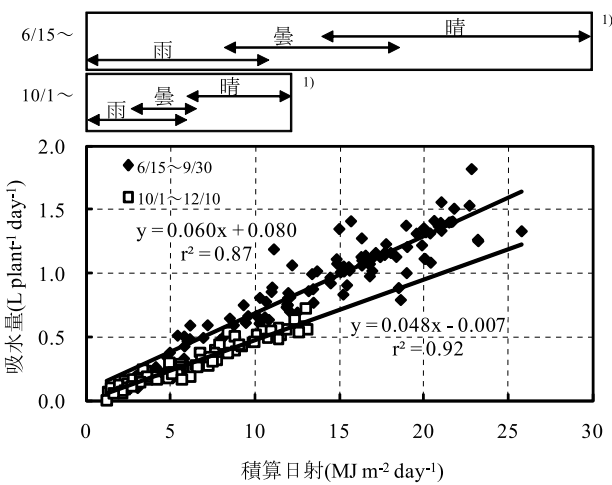
量は定植直後では1個体あたり0.3L程度とし、その後40日程度で1.75L 個体<sup>-1</sup>まで増加させ、8月中旬以降、徐々に減少させる。また、1日の給液量は、季節や天候によって調節し、雨天時は設定給液量の20~30%、曇天時は50~70%にする。以上のような給液設定例が四国の中山間傾斜地域の夏秋トマト栽培においては適正であると考えられた。

3 総合考察

IV-1では、傾斜地養液栽培システムにおいて夏秋トマト栽培を行う場合の培地として樹皮培地を検

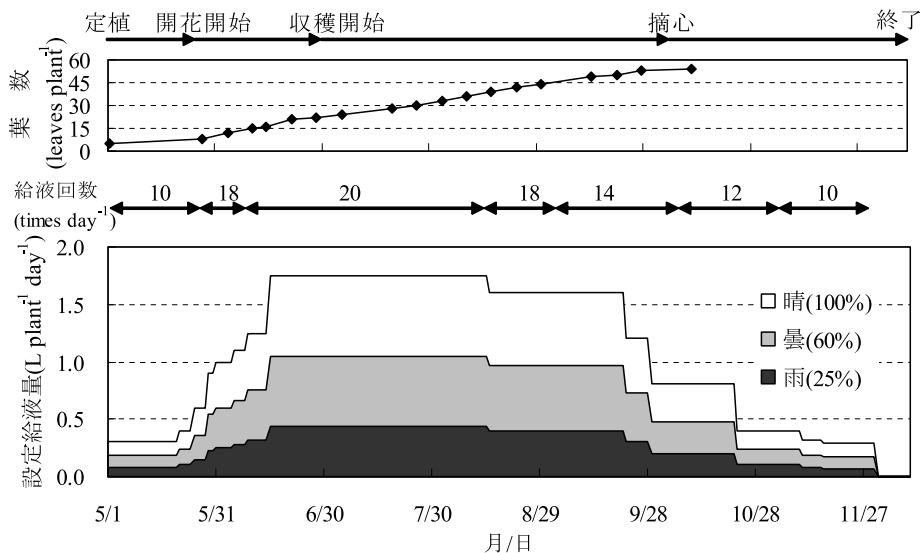
討し、ロックウールと収量などを比較した。栽培実験を生産者Bにおいて2年2作、生産者Cにおいて1作の計3作行った結果、これらの樹皮培地は、培地として利用可能であり、ロックウールスラブを用いた場合と同等な収量が得られた。このとき、多種バーク培地は実験地の近くで生産され、価格も最も安いことから、この地域における傾斜地養液栽培システムの培地として、多種バーク培地が最も適していると判断された。

IV-2では、この多種バークを培地として用いた傾斜地養液栽培システムによる夏秋トマト栽培において、タイマーのみによる給液制御と積算日射が一定に達すると自動給液を行う日射比例制御とを比較した。その結果、タイマーのみによる安価な給液制御方式でも、センサを用いた日射比例制御の場合と同等な排水率およびトマト収量を得ることができた。したがって、タイマーのみの給液制御でも生産者が天候や生育ステージに応じて手動で給液量および回数を調整することにより、適正な管理が可能であると考えられる。このとき、第18図のように生産者による天候判定によってその日の積算日射の範囲はある程度、分類されていた。センサを用いないタイマー制御では、生産者の天候判定はその日の給液量を設定する場合に重要となる。日射を測定しなくても生産者の判断によって積算日射がある程度、推定できたことから、これが日々の給液量の調整に利用できるものと考えられた。



第18図 1日の積算日射とトマトによる吸水量との相関関係および生産者の天候判定

1) 1日の天候を生産者によって晴、曇、雨に分類して記録。



第19図 傾斜地養液栽培システムによる夏秋トマト栽培における給液設定例

タイマー制御は、低コストで操作が容易であることから傾斜地養液栽培システムの対象とする中山間地の小規模農家にとって適していると考えられる。しかし、タイマーのみの制御では、作物のステージや天候による給液量や頻度の違いをあらかじめ把握しておき、適宜、設定を変更していく必要がある。第19図は、日射と作物の吸水量の関係および生産者による天候判定から、実験地域の作型や気象条件に応じた給液設定例を提案したものである。タイマー制御の場合、このように地域の作型や気象条件に応じた給液設定値を構築していくことが重要であると考えられる。

#### 4 摘 要

傾斜地養液栽培システムによって夏秋トマトの養液栽培を行う際の培地として中山間地に豊富にある樹皮培地に着目し多種パークおよびスギ・ヒノキ皮の2種類の樹皮培地およびロックウールを用いてトマト栽培を行い、収量などを比較した。合計3作の栽培実験の結果、これらの2種類の樹皮培地を用いた場合の収量は、ロックウールを用いた場合と同等であり、本システムの培地としてこれらの樹皮培地は十分に利用可能であった。このとき、多種パーク培地は実験地の近くで生産され、価格も最も安いことからこの地域における培地として最も適していると判断された。また、この多種パークを培地として用いた夏秋トマト栽培において、タイマーのみによる給液制御と積算日射が一定に達すると自動給液を行う日射比例制御とを比較した結果、タイマーのみによる安価な給液制御方式でもセンサを用いた日射比例制御の場合と同等な排水率およびトマト収量を得ることができた。タイマー制御は、低コストで操作が容易であることから、傾斜地養液栽培システムの対象とする中山間地の小規模農家にとって適していると考えられた。しかし、タイマー制御では作物のステージや天候による給液量や頻度の違いをあらかじめ把握して設定を変更していく必要がある。このため、日射と作物の吸水量の関係および生産者による天候判定を利用して実験地域の作型や気象条件に応じた給液設定例を提案した。

## V 中山間傾斜地における傾斜ハウスおよび傾斜地養液栽培システムの導入効果

### 1 夏秋トマト栽培に対する傾斜ハウスおよび傾斜地対応型養液供給システムの導入効果

四国の中山間傾斜地では、夏季の冷涼な気候を利用し、夏秋トマト栽培を行っている。傾斜地のトマト栽培は、プラスチックシートで畝毎に簡単な被覆を行う簡易雨よけ施設によって行われているが、側面が開放状態のため強風や害虫、降雨によって生産が不安定となっている。傾斜地では、一般のアーチ型パイプハウスの建設は極めて困難であることから、傾斜地用の栽培施設として傾斜ハウスが開発され、傾斜地での安定的な施設栽培が可能となった<sup>70, 82, 83</sup>。

一方、傾斜地では、圃場表土が傾斜上部から下部に向かって落ちるため、栽培前の土揚げ作業が必須となっており、長年の連作による土壌伝染性病害も深刻である。夏秋トマトの安定生産をめざし、IIでは、これらの問題を回避するために傾斜地でも均一に給液できる傾斜地対応型の養液供給技術を開発するとともに、傾斜地用の養液栽培システムを開発した<sup>30, 39, 40</sup>。また、III～IVでは、傾斜地養液栽培を実際の傾斜地トマト栽培に導入・普及させるため、生産現場に適した培地および給液制御法を開発した。

V-1では、開発した養液栽培技術および傾斜ハウスを中山間傾斜地のトマト生産に導入し、夏秋トマト栽培の実証実験を行い、開発した技術の効果について検討した。

#### 1) 材料および方法

##### (1) 実験地、施設および装置

栽培実験は、徳島県東みよし町K地区において行った。この地区は、標高300～600m、傾斜度4～25°の山腹型傾斜畑地域であり、傾斜が急なために通常ハウスの建設は極めて困難な地域である。現状では、簡易雨よけ施設によって夏秋トマト栽培を行っているが、気象要因による裂果などの発生や病虫害の多発、価格の低迷など多くの問題点がある<sup>100</sup>。

そこで、K地区の3戸のトマト生産者に第20図のような傾斜ハウスおよび傾斜地対応型養液供給シス

テム（以下、養液供給システム）を導入した。なお、この養液供給システムは、原水から培養液の供給部分までを意味し、養液土耕に利用できる。養液供給システムに栽培ベッドや排液回収系まで含めたものを傾斜地養液栽培システムとする。各傾斜ハウスは、生産者Aでは傾斜度 $20^{\circ}$ の東南東斜面に2002年に建設し、床面積は $440\text{m}^2$ であり、生産者Bでは傾斜度 $4^{\circ}$ の北斜面に2003年に建設し、床面積は $284\text{m}^2$ であり、生産者Cでは傾斜度 $6^{\circ}$ の東斜面に2004年に建設し、床面積は $495\text{m}^2$ であった。傾斜ハウスの初期投資額（資材費）は10aあたり約300万円であった。また、養液供給システムは、主に原水の水压を原動力として給液および肥料混入を行う低コスト・省エネルギー型のシステムであり、給液が不均一になることを防ぐため、管内水压が一定以下になると液の吐出が停止する点滴資材を用い、本管の途中に逆止弁を設置して給液バルブを閉鎖した後の培養液の漏出を防止することができるものである（第20図）<sup>39)</sup>。養液供給システムは容易に自作でき、資材費は10aあたり50万円であった。養液栽培（樹皮、ロックウール培地など）を行う場合はさらに66万円程度必要であった。

## (2) 傾斜ハウス・養液供給システムを利用した栽培および慣行栽培の概況

栽培実験は、生産者Aでは2002～2005年、生産者Bでは2003～2005年、生産者Cでは2004～2005年に行い、傾斜ハウスおよび養液供給システムを利用した栽培（以下、ハウス養液栽培）と慣行の簡易雨よけ施設による栽培とを比較した。なお、ハウス養液栽培では、生産者Aは養液土耕栽培を、生産者BおよびCはロックウールおよび樹皮培地による養液栽培を行った。慣行の雨よけ栽培は、晩霜のおそれがない時期、5月下旬～6月上旬に定植し、低温により収穫が不可能になる10月下旬～11月上旬まで栽培するものであるが、ハウス養液栽培では、施設により霜や低温の影響を受けにくいと考えられるため、第21図に示すような作型を設定した。また、傾斜ハウスにおいては、慣行雨よけ栽培では施設の構造上、設置が困難な防虫ネット（目合い $0.6\text{mm}$ ）および非散布型製剤であるピリプロキシフェンテープ（ラノーテープ、住友化学、東京）を利用した。農薬散布は、

各生産者の判断で病害虫の発生状況に応じて行った。

第12表に、ハウス養液栽培および慣行雨よけ栽培における生産者および年毎の使用品種、定植日、収穫終了日および栽植密度などを示した。ハウス養液栽培では、2004年のみ加温を行い、他の年は無加温で栽培した。養液供給システムでは、大塚 SA 処方培養液を使用し、ECを $1.2\sim 2.5\text{dS m}^{-1}$ とし、給液は24時間タイマーとサブタイマーで制御した。1日の給液量は個体あたり $0.3\sim 1.8\text{L}$ 程度とし、天候や生育ステージに応じて1日10回～20回程度に分けて給液を行った<sup>43)</sup>。雨よけ栽培では、灌水は生産者の判断で行い、施肥については、生産者Aはパーク堆肥による元肥と養液栽培と同一な液肥による追肥を行い、生産者BおよびCはこの地域の慣行施肥と同様に土壌分析に基づいて元肥を施肥し、化成肥料による追肥を行った。収穫終了段数は、いずれの年、生産者とも、ハウス養液栽培では14～16段、慣行雨よけ栽培では10～13段とした。生産者毎にハウス養液栽培および慣行雨よけ栽培におけるトマト果実の収量、A品率などを調査した（第22図）。

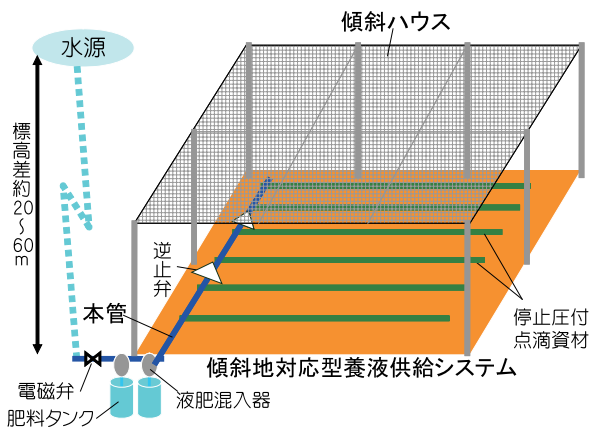
## 2) 結果および考察

殺虫剤の使用回数は、慣行雨よけ栽培に比べてハウス養液栽培の方が少ない傾向がみられた（第13表）。慣行雨よけ栽培ではコナジラミ類の発生が著しく、これに対応するために多くの回数の殺虫剤散布が必要であった。一方、ハウス養液栽培では、ハウス内でのコナジラミ類の発生は少なかった。これは、防虫ネットおよび非散布型製剤（ピリプロキシフェンテープ）の効果によるものと考えられた。殺菌剤の使用回数は、ハウス養液栽培および慣行雨よけ栽培との間で明確な差はみられなかったが、ハウス養液栽培では栽培期間が慣行雨よけ栽培よりも1～2か月も長かったことから、使用頻度としては低かった。一方、ハウス養液栽培では、栽培期間の拡大に伴い、栽培後期の夜間にハウスを閉め切ることから、結露や高湿度による灰色かび病などの病害が発生しやすい傾向がみられた。なお、殺菌剤のうち、特定農薬および微生物農薬については生産者が使用方法を習熟しておらず、発病初期の散布が効果的な薬剤を全く発生のおそれのない時期に散布したり、

第12表 ハウス養液および慣行雨よけ栽培における使用品種および栽植密度

生産者	年	品種	ハウス養液			慣行雨よけ			
			定植日 月/日	収穫終了日 月/日	栽植密度 個体 m <sup>-2</sup>	品種	定植日 月/日	収穫終了日 月/日	栽植密度 個体 m <sup>-2</sup>
A	2002	桃太郎8	5/29	12/25	2.20	桃太郎8 桃太郎ファイト	5/17, 5/31	11/18	2.20
	2003	桃太郎ファイト	4/29	12/18	2.35	桃太郎8	5/19	11/7	2.28
	2004	桃太郎8	4/19	12/1	2.27	桃太郎8	6/1	9/8	2.47
	2005	桃太郎8	4/26	12/1	2.28	—	—	—	—
B	2002	— <sup>1)</sup>	—	—	—	—	—	—	—
	2003	桃太郎ファイト	4/25	12/11	2.27	桃太郎8 桃太郎ファイト	5/16, 5/17	11/21	2.20
	2004	桃太郎ファイト	4/19, 5/1	11/19	2.20	桃太郎8	6/1	11/19	2.20
	2005	桃太郎8	5/4, 5/16	12/26	2.56	桃太郎ファイト	5/20, 6/1	11/3	2.28
C	2002	—	—	—	—	—	—	—	—
	2003	—	—	—	—	—	—	—	—
	2004	桃太郎8	4/23, 5/4	11/16	2.20	桃太郎ファイト	5/21, 5/22	11/4	2.20
	2005	桃太郎8	5/4, 5/11, 21	12/4	2.63	桃太郎ファイト	5/20, 5/21	11/3	2.20

1) 栽培なし。



第20図 傾斜ハウスおよび傾斜地対応型養液供給システム



第22図 中山間傾斜地の生産者圃場における傾斜地トマト養液栽培の実証実験

生産者B傾斜ハウス(傾斜度4°,北斜面,ハウス床面積:284m<sup>2</sup>),収穫期。

の場合に多くの農薬散布が必要であったためではなかった。これは、生産者にとっては農薬の削減は経費削減にはなるが、それ以上の利点は少なく、1回の散布で複数の圃場に対応するための作業的な面を優先した結果があらわれたものである。

トマト果実の収量は、すべての生産者および栽培年において、ハウス養液栽培で慣行雨よけ栽培に比べて著しく多く、ハウス養液栽培の収量は、2005年にはどの生産者においても 14kg m<sup>-2</sup> (10 aあたり 14 t) を超えた(第14表)。一方、慣行雨よけ栽培では、収量が低だけでなく、生産者による違いや年による差も大きく、生産は不安定であった。慣行

作型	月											
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
ハウス養液	○	●	—	—	—	—	—	—	—	—	—	○
慣行雨よけ	○	●	—	—	—	—	—	—	—	—	—	○

○: 播種 ▲: 接ぎ木 ◎: 定植 #: 雨よけ  
 .....: 育苗期間 —: 本圃育成期間 ■■■■■: 収穫期間

第21図 標高300m以上の中山間傾斜地における夏秋トマト栽培の作型

発病前に散布すべき薬剤を病害が蔓延してから散布したりなど、効果が低い状況での散布も多かった。また、生産者Aの2005年の農薬使用回数が他に比べて著しく多いのは、実験以外のハウスで必要となった防除を兼ねて行ったからであり、ハウス養液栽培

第13表 ハウス養液および慣行雨よけ栽培における農薬使用回数

生産者	年	農薬使用回数 (剤・回)					
		ハウス養液			慣行雨よけ		
		殺虫剤	殺菌剤 <sup>1)</sup>	殺菌剤 <sup>2)</sup>	殺虫剤	殺菌剤 <sup>1)</sup>	殺菌剤 <sup>2)</sup>
A	2002	2	7	0	12	8	0
	2003	2	12	17	13	16	0
	2004	5	9	13	11	4	4
	2005	26	18	1	-	-	-
B	2002	- <sup>3)</sup>	-	-	-	-	-
	2003	3	3	8	4	6	3
	2004	-- <sup>4)</sup>	--	--	--	--	--
	2005	9	13	3	9	8	0
C	2002	-	-	-	-	-	-
	2003	-	-	-	-	-	-
	2004	9	8	4	11	6	2
	2005	11	11	1	13	12	0

1) 化学合成農薬.

2) 特定農薬または微生物農薬.

3) 栽培なし.

4) データなし.

第14表 ハウス養液および慣行雨よけ栽培における収量およびA品率

生産者	年	収量 (kg m <sup>-2</sup> )		A品率 (%)	
		ハウス養液	慣行雨よけ	ハウス養液	慣行雨よけ
		A	2002	13.14	7.27
	2003	15.01	7.37	79.7	77.6
	2004	12.74	9.16	79.8	78.6
	2005	15.45	-	76.9	-
B	2002	- <sup>1)</sup>	-	-	-
	2003	12.83	3.62	96.7 <sup>2)</sup>	92.6
	2004	12.36	8.46	97.4	82.4
	2005	14.08	10.71	98.0 <sup>2)</sup>	79.5
C	2002	-	-	-	-
	2003	-	-	-	-
	2004	13.32	9.91	88.9	74.3
	2005	14.09	9.70	90.4	74.4

1) 栽培なし.

2) 一部 (農協出荷分) を除く.

雨よけ栽培の収量が低い原因としては、台風や病害などの影響が考えられる。台風の被害としては、2004年8月30日の台風16号および同年9月7日の台風18号による記録的な豪雨と暴風による被害が大きかった。地域の観測点における最大瞬間風速は台風16号で 41.0m s<sup>-1</sup>、台風18号で 36.7m s<sup>-1</sup> であり、簡易雨よけ施設の一部は壊滅的な被害を受けた。そのため生産者Aは慣行雨よけ栽培を途中で打ち切るとともに、翌年以降、慣行雨よけ栽培を取り止めることとなった。病害としては、生産者Aの雨よけ栽培

では2002年には青枯病が多発し、翌年以降も一部の圃場の作付けを中止しており、2003年には萎凋病も発生した。生産者BおよびCでも2004年に青枯病および軟腐病の発生がみられた。生産者Cでは、2005年に黄化萎縮病などのウイルス病が多発した。生産者Bにおける2003年の慣行雨よけ栽培の収量が著しく低い理由は特定できないが、北斜面の圃場であるため天候不順による日射不足や土壌水分の過剰、栽培管理の不備が考えられる。慣行雨よけ栽培では追肥の効果が天候によって大きく左右されるた

め、養水分の過不足による障害がしばしばみられた。具体的には、養水分過剰による異常茎（窓開き、芯止まり）の発生や、逆に養水分不足によって生長点付近の茎が細くなり、着果数が減少する現象も多く、短期的な収穫量の変動がみられた。以上の点から、ハウス養液栽培において収量が大幅に増加した要因としては、無加温でも慣行雨よけ栽培に比べて収穫期間が前後に拡大されたこと、病害や天候による被害が回避でき、樹勢が適正に維持されたことが考えられる。

A品率は、生産者によって程度の差はあるが、ハウス養液栽培が高い傾向がみられた。また、数値では示せないが、生産者や市場関係者からは、ハウス養液栽培の果実の方が雨よけ栽培よりも果皮が薄く食感がよく、表面にシミや汚れなどがなくきれいであるという意見が多かった。これは、畝の上部しか被覆しない簡易雨よけ施設では雨滴が直接、果実を濡らすのに対し、傾斜ハウスでは雨滴が作物を直接濡らすことはないからであると考えられる。今回、各生産者ともハウス養液栽培と慣行雨よけ栽培のトマトを分けて出荷した結果、出荷価格はハウス養液栽培でやや高い傾向がみられた。市場出荷を行う現状の出荷形態では、生産者個人レベルでの農薬削減が出荷価格に反映されることは少ないものとみられるが、この出荷価格の差が何に由来するものかは特定することはできなかった。

## 2 コンテナ養液栽培に適するブルーベリー品種

傾斜地の夏秋トマト栽培の問題点を解決するためにⅡ～Ⅳにおいて開発した技術により、夏秋トマトの収量は大幅に増加し、12月まで収穫可能となったが、施設を有効に利用するには、次のトマト作付けまでの作目の導入が必要である。そこで、中山間傾斜地の気象特性を活かし、かつ、傾斜ハウスや養液栽培システムなどを有効に利用する作目として、ブルーベリー (*Vaccinium corymbosum*) の促成栽培に着目した。近年、全国的にブルーベリーの栽培面積は大幅に増加しているが、四国地域の栽培面積は1haにも満たない<sup>89)</sup>。また、果樹栽培において施設栽培の普及と発展が著しいが<sup>65)</sup>、ブルーベリーの促成栽培の研究例はほとんどない。さらに、養液栽培では培養液のpHの調製が容易であることから、酸

性土壌を好むブルーベリーに対応可能と思われるが、果樹であるブルーベリーを養液栽培で栽培する例はこれまで少なかった。このため、培養液組成や管理法などは確立していない。また、ブルーベリーには多数の品種があり、品種によって養液栽培に対する特性も異なるものと思われる。ここでは、ハイブッシュタイプのブルーベリー品種を用い、コンテナ養液栽培に適する品種を検討した。

### 1) 材料および方法

近畿中国四国農業研究センター（香川県善通寺市）傾斜ハウスにおいて、2004年4月7日、8月11日および11月5日、2～4年生のブルーベリー苗木をポリコンテナ（48×32×30cm）に、コンテナあたり約30Lのピートモスを培地として定植した。傾斜地養液栽培システムにより培養液を点滴供給し、培養液には養液土耕用肥料（OK-F-3、大塚化学）25～50%濃度液（EC：0.6～1.3dSm<sup>-1</sup>、pH：6.5～7.0）あるいは大塚 SA 処方25～50%濃度培養液（EC：0.8～1.4dSm<sup>-1</sup>、pH：6.4～7.0）を用いた。各培養液の50%濃度時の養分組成は、OK-F-3では10mM全窒素（1.5mM NO<sub>3</sub><sup>-</sup>を含む）、5.3mM K<sup>+</sup>、1.4mM Ca<sup>2+</sup>、0.6mM Mg<sup>2+</sup>、1.1mM H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup>、1.0mg L<sup>-1</sup> Fe、0.8mg L<sup>-1</sup> Mn、0.31mg L<sup>-1</sup> B、大塚 SA 処方では0.22mM NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、1.9mM NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、5.1mM K<sup>+</sup>、4.1mM Ca<sup>2+</sup>、1.5mM Mg<sup>2+</sup>、0.7mM H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup>、1.1mg L<sup>-1</sup> Fe、0.3mg L<sup>-1</sup> Mn、0.16mg L<sup>-1</sup> B、0.05mg L<sup>-1</sup> Zn、0.02mg L<sup>-1</sup> Cu、0.02mg L<sup>-1</sup> Moである。用いた品種はハーフハイブッシュタイプ：早生系の‘Northland’、ノーザン（ハイチル）ハイブッシュタイプ：極早生系の、‘Earliblue’、‘Weymouth’、早生系の‘Duke’、‘Patriot’、‘Spartan’、中生系の‘Berkeley’、‘Bluecrop’、‘Sierra’、中晩生の‘Brigitta’、‘Elizabeth’、‘Nelson’、サザン（ローチル）ハイブッシュタイプ：早生系の‘O’Neal’、早中生系の‘Sharpblue’、中晩生系の‘Sunshineblue’とし、各品種2～29個体、計178個体の栽培を行った。このうち、生育状態が良好で最長枝が80cm以上の56個体は、徳島県東みよし町において後述の促成栽培に用い、他の個体は研究センター内ハウスで栽培（非促成）した。コンテナ養液栽培に対する各品種の適合性を調査するため、2005年

9月6日、すべての個体を対象に生存状態を調査した。

## 2) 結果および考察

ブルーベリーをコンテナで養液栽培を行った場合、供試個体数の多いもので最も枯死率が高かったのは 'Earliblue' であった。また、'Northland', 'Spartan', 'Sunshineblue' についても枯死率は高かった (第15表)。供試個体数の少ない品種については、さらに検討が必要である。促成栽培に用いた個体は、最長枝80cm以上で生育良好なものであったことから、非促成栽培のものと促成栽培で枯死率を比較することはできないが、両者で枯死率が大きく異なることはないと思われた (第15表)。定植時期の違いによる枯死率への影響は明確ではなかった。

コンテナ養液栽培を行うことによってブルーベリ

一個体が枯死した原因のひとつには、移植時の活着不良があげられる。これは 'Spartan' で多くみられ、移植後、全く伸長せずに枯死したが、活着不良の原因は不明であった。一方、移植時の活着が良く、しばらくの間、良好な生育を示したが、その後枯死したのも多かった。ブルーベリーには、酸性土壌が適し、窒素肥料としては硝酸態窒素よりもアンモニア態窒素で生育が優れることが知られている<sup>119, 120)</sup>。今回、培地としては pH 未調整のピートモス (pH 4~5) を用いているが、培養液組成はトマトなどに用いられる汎用的なものでブルーベリー用に調整されたものではない。このため、培養液の pH は6.4~7.0であり、ブルーベリーに対しては高く、アンモニア態窒素の含有割合も低い。この培養液組成への不適合も、大きな枯死原因であると考えられ、品種によって pH や窒素形態への適合性が異なるものと

第15表 ブルーベリーをコンテナ養液栽培した場合の各品種の生存個体数および枯死率に対する影響

タイプ	品種	生存個体数 / 全個体数			枯死率 %
		促成 <sup>1)</sup>	非促成 <sup>1)</sup>	促成 + 非促成	
ハーフハイ フレッシュ	Northland <sup>2),3)</sup>	10 / 11	0 / 2	10 / 13	23.1
ノーサンハイ フレッシュ	Berkeley <sup>2),3)</sup>	1 / 1	7 / 8	8 / 9	11.1
	Blue Crop <sup>2),3)</sup>	10 / 11	3 / 4	13 / 15	13.3
	Brigitta <sup>3),4)</sup>	— <sup>5)</sup>	10 / 12	10 / 12	16.7
	Duke <sup>2),3)</sup>	1 / 1	20 / 21	21 / 22	4.5
	Earliblue <sup>2),3)</sup>	0 / 2	7 / 14	7 / 16	56.3
	Elizabeth <sup>4)</sup>	—	5 / 5	5 / 5	0
	Legacy <sup>3)</sup>	—	2 / 2	2 / 2	0
	Nelson <sup>4)</sup>	—	5 / 5	5 / 5	0
	Patriot <sup>2),3),4)</sup>	11 / 12	13 / 13	24 / 25	4.0
	Reveille <sup>3)</sup>	—	2 / 2	2 / 2	0
	Sierra <sup>3)</sup>	—	1 / 2	1 / 2	50.0
	Spartan <sup>2),4)</sup>	—	20 / 29	20 / 29	31.0
	Weymouth <sup>2),3)</sup>	10 / 10	2 / 2	12 / 12	0
ササンハイ フレッシュ	O'Neal <sup>3)</sup>	1 / 1	2 / 2	3 / 3	0
	Sharpblue <sup>2),3),4)</sup>	4 / 4	1 / 1	5 / 5	0
	Sunshineblue <sup>2)</sup>	2 / 2	1 / 4	3 / 6	50.0

1) 促成：徳島県東みよし町，非促成：香川県普通寺市。

2) 2004年4月7日定植。

3) 2004年8月11日定植。

4) 2004年11月5日。

5) 供試個体なし。

推察される。

ブルーベリーの養液栽培は一部では行われているが<sup>108)</sup>、研究例はほとんどみられず、適する培養液組成や品種による吸肥特性の違いは明らかになっていない。また、ここで検討している栽培法では、トマトの養液栽培と装置や肥料原液を同時に利用する場合があることから、ブルーベリーに特化した培養液組成を使用することは難しい。したがって、枯死率の高い‘Earliblue’は、本方式によるコンテナ養液栽培には適さないものと判断できる。

### 3 傾斜地養液栽培システムを利用したブルーベリーのコンテナ養液促成栽培

落葉果樹であるブルーベリーは自発休眠の覚醒に低温を必要とする習性を持つ。ブルーベリーをコンテナに定植することにより、ハウスと露地間の移動が可能となる。コンテナ個体を自発休眠の覚醒のために露地圃場で低温に遭遇させた後、ハウスに搬入して加温を行えば、開花や収穫の時期を早めることが期待できる。中山間傾斜地で夏秋トマトを生産しているハウスでは、夏秋トマトの栽培期間は5～12月であり、装置を有効に利用するにはトマト作付け期以外の作目導入が必要である。そこで、中山間傾斜地の気象特性を活かし、施設を有効利用する作目としてブルーベリーのコンテナ養液促成栽培を検討した。ここでは、傾斜ハウスにおいて夏秋トマトの養液栽培を行っている生産者において、ブルーベリーのコンテナ養液促成栽培を導入して促成効果や収量などについて検討した。

#### 1) 材料および方法

促成栽培用のコンテナ個体として、V-2において2004年4月7日および8月11日に定植したブルーベリー個体のうち、生育状態が良好で最長枝が80cm以上の56個体を、2004年11月22日、徳島県東みよし町K地区生産者の露地圃場（標高約310m）に搬入、静置した。これらのコンテナ個体を、2005年2月3日、同生産者の傾斜ハウスに搬入し、暖房設定温度を2月3日～3月4日までは15℃、それ以降は10℃として加温を行った。ハウス内の面積81㎡に56個体を置き、栽植密度は0.69 個体 m<sup>-2</sup>（10 aあたり694個体）とし、同年2月26日、傾斜地養液栽培システ

ムにより培養液供給を開始した（第23図）。ハウス内のブルーベリーの花粉媒介昆虫としてはマルハナバチが有効である<sup>131)</sup>ことから、同年3月4日、セイヨウオオマルハナバチをハウスに導入した。促成栽培に用いたコンテナ個体は、2005年5月26日、ハウス外に搬出した。一方、促成を行わない残りのコンテナ個体（非促成）は、近畿中国四国農業研究センター（香川県善通寺市）傾斜ハウスにおいて2004年12月27日までは暖房設定温度を12℃として加温し、それ以降は配管の凍結防止のため暖房設定温度を2℃とした。すべての個体について開花日および収穫日を調査し、促成栽培の個体については収量を調査した。促成栽培の収穫果実は、果実直径が16mm以上を2 L、13～16mmをL、10～13mmをM、それ以下をSとして、約125 g入りのパックに詰めて市場出荷した。

#### 2) 結果および考察

##### (1) 促成栽培における気温推移および開花日、収穫開始日にみられる影響

促成個体および非促成個体のそれぞれの周囲の気温についてみると、促成栽培では露地圃場に置いてあった2005年2月初めまでは、非促成ハウスに比べて、気温は5℃程度低く推移した。促成栽培のハウス搬入後の気温は、非促成に比べて8℃程度高く推移した。同年4月以降は促成栽培と非促成栽培の気温には、大きな違いはみられなかった（第24図）。なお、非促成ハウスにおいて12℃設定で加温を行っていた期間の気温は欠測となってしまったが、その間にハウス内の最低気温が9℃以下になることはなかった。また、促成ハウス内では、当初、農ビによる内張りをしていたが、最高気温が40℃を超える場合があったため、同年3月5日に内張りを撤去した。

開花開始日は、非促成の場合、‘O’Neal’および‘Sunshineblue’では3月下旬であり、多くの品種では4月上旬であった。一方、促成栽培では、‘Sunshineblue’の開花が2月中旬と最も早く、他の品種も2月下旬から開花が始まり、非促成栽培（2004年、2005年）に比べると、多くの品種で35日以上早く、満開は40日程度早かった。各品種の開花までの7℃以下の低温遭遇時間は、2005年の非促成の場合、1000～1100時間であった。促成栽培では、



第16表 促成栽培がブルーベリー品種の開花日に及ぼす影響および開花までの低温遭遇時間

品 種	開花開始日(月/日)			満開日(月/日)			7℃以下遭遇時間(h)	
	非促成		促成	非促成		促成	非促成	促成
	2004	2005	2005	2004	2005	2005	2005	
Northland	4/5	— <sup>1)</sup>	2/26	4/19	—	3/5	—	1239
Berkeley	4/12	4/12	2/26	4/19	5/6	3/18	1096	1239
Blue Crop	4/12	4/4	2/26	4/19	4/22	3/11	1083	1239
Duke	—	4/4	3/5	—	4/28	3/18	1083	1239
Earliblue	4/5	4/12	3/5	4/12	4/28	3/5	1096	1239
Patriot	4/5	4/4	2/26	4/5	4/22	3/5	1083	1239
Weymouth	4/12	4/4	2/26	4/19	4/22	3/5	1083	1239
O'neal	—	3/20	2/26	—	3/23	3/11	1007	1239
Sharpblue	4/5	4/12	2/26	4/12	4/12	3/11	1096	1239
Sunshineblue	4/5	3/20	2/19	4/19	3/23	3/5	1007	1239

1) 供試個体なし。

第17表 促成栽培がブルーベリー品種の収穫開始に及ぼす影響および開花から収穫までの積算気温

品 種	収穫開始日(月/日)			非促成(2005)との差(日)			開花 <sup>1)</sup> から収穫までの積算気温(℃)		
	非促成		促成	非促成		促成	非促成		促成
	2004	2005	2005	2004	2005	2005	2004	2005	2005
Northland	6/2	— <sup>2)</sup>	4/29	0	—	-38	1259	—	978
Berkeley	6/9	6/11	5/8	0	0	-45	1286	1242	1164
Blue Crop	6/23	6/5	4/29	8	0	-37	1628	1213	978
Duke	—	6/5	5/8	—	0	-30	—	1213	1164
Earliblue	6/2	6/5	4/29	-7	0	-38	1259	1073	978
Patriot	6/2	6/5	4/29	1	0	-37	1259	1213	978
Weymouth	6/2	6/5	4/29	8	0	-37	1121	1213	978
O'neal	—	6/5	4/29	—	0	-22	—	1430	978
Sharpblue	6/16	—	4/29	-7	0	-45	1585	1073	978
Sunshineblue	6/23	6/5	5/18	16	0	-29	1766	1430	1596

1) 促成ではマルハナバチ導入より。

2) 供試個体なし。

加温開始までの7℃以下の低温遭遇時間は1239時間であり、加温開始後に7℃以下に遭遇することはなかった(第16表)。

促成栽培では、多くの品種で4月下旬～5月上旬に収穫が始まり、6月上旬に収穫開始となる非促成に比べて35日程度、収穫期が促進された(第17表)。促成栽培の‘Sunshineblue’の収穫開始は5月中旬で、他の品種に比べて遅かった。開花あるいは受粉昆虫導入から収穫までの日平均気温の積算は、多くの品種において促成栽培では1000℃前後であり、非促成栽培の1200℃前後に比べて少なかった。‘Sunshineblue’では、開花から収穫までの積算気温が大きく、促成栽培でこの傾向がより顕著に現れ

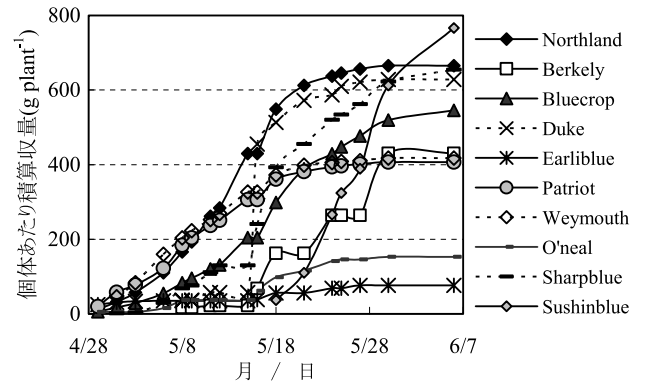
ていた。本実験の結果から、開花から収穫までの期間は品種によって大きく異なるものと考えられ、‘Sunshineblue’は、開花開始は早いですが、収穫までの期間が長いことから、促成栽培には不向きであると判断された。

## (2) 促成栽培の収量推移、出荷価格および基本作型

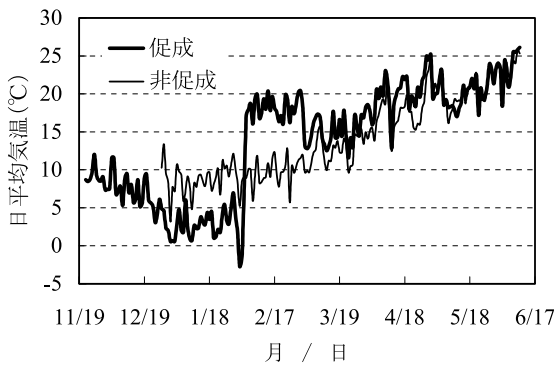
第25図は、促成栽培における各品種の収量推移を示したものである。‘Patriot’および‘Weymouth’では、初期収量は多いが、最終的な収量は中程度で、1個体あたり約400g(以下、g 個体<sup>-1</sup>)であった。‘Northland’および‘Sharpblue’で収量が多く、



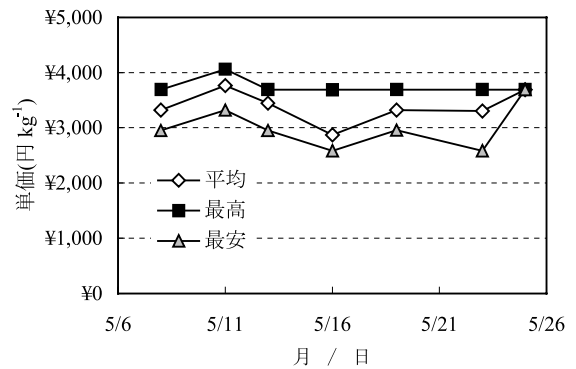
第23図 傾斜地養液栽培システムを利用したブルーベリーのコンテナ養液促成栽培



第25図 促成栽培における各品種の収量推移



第24図 促成および非促成栽培における日平均気温の推移



第26図 促成ブルーベリーの出荷単価の推移

作型(地域)	月												品種主要	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
コンテナ促成 (中山間傾斜地 標高300m以上)	加温	加温			(ハウス)									ノーザンハイブッシュ サザンハイブッシュ (極早生～中生)
	↑				↓									(露地)
														収穫終了

▼:開花 □:加温開始 —:本園育成期間 ■■■:収穫期間

第27図 中山間傾斜地における促成ブルーベリーの基本作型

平均収量は650 g 個体<sup>-1</sup>を超えた。‘Sunshineblue’は、実験期間中の収量は 766g 個体<sup>-1</sup>に達したが、収穫ピークが遅く、トマト作に不都合であったため途中で収穫を打ち切った。供試個体数が少ない‘Berkley’、‘Duke’および‘O’Neal’については、さらに検討が必要である。特に‘O’Neal’については害虫による食害が著しく、このために収量が低かったものと考えられた。‘Earliblue’は、収量が少

ない点からもコンテナ促成栽培には不向きであると考えられた。

促成栽培の収穫果実は、5月8日～25日まで市場出荷を行い、期間中の各規格の割合は2L:26%、L:41%、M:25%、S:8%であった。出荷単価は、2LおよびLが高く、Sが安くなっており、最安値2,584円 kg<sup>-1</sup>から最高値4,062円 kg<sup>-1</sup>の間で推移し、平均単価は3,389円 kg<sup>-1</sup>であった(第26図)。

市場において、国産ブルーベリーの取り扱いが多い時期は6月～8月であり、その時期の平均単価は1,600～2,200円 kg<sup>-1</sup>であった<sup>92)</sup>。今回、示した促成栽培では、出荷量が少ない5月に出荷できるため、高値で取引されるものと考えられる。

以上の結果より、四国の中山間傾斜地においてブルーベリーの促成栽培を行う場合、2月初旬まで露地圃場に置いた後、加温ハウスに搬入し、4月下旬から収穫する第27図のような作型が提案できる。

#### 4 総合考察

簡易雨よけ施設による夏秋トマト栽培は岐阜県の中山間地に始まり<sup>23)</sup>、各地に広がったものであり<sup>116, 124, 132)</sup>、露地栽培に比べると収穫期間が延長し、収量が向上するのが特徴である<sup>129)</sup>。しかし、本研究の結果から示されるように、傾斜ハウスと比べると簡易雨よけ栽培では病虫害や台風などの被害を受けやすく、生産は不安定であるといえる。簡易雨よけ施設の資材費は10aあたり約60万円と安価であるが、傾斜ハウスの資材費は、通常のパイプハウスと同程度の10aあたり約300万円である<sup>100, 101)</sup>。これに養液供給システムを入れると約350万円となる。日本施設園芸協会(2005)<sup>87)</sup>は、施設園芸に関する将来ビジョンにおいて、小規模パイプハウスによる高冷地・中山間地の夏秋トマト栽培の収量を現状の10aあたり8tから、将来は10aあたり約11tに増加すると試算している。

V-1に示したように、本実験の傾斜ハウスに養液供給システムを導入した場合の収量は、この試算の11tを超え、10aあたり14t以上となった。トマトの出荷単価を300円 kg<sup>-1</sup>とすると6tの収量の増加に伴い、農家収入は180万円増加すると試算されることから、傾斜ハウスおよび養液供給システムの導入効果は大きいと判断される。日本施設園芸協会<sup>87)</sup>の試算では、パイプハウスの施設費を10aあたり136万円としており、傾斜ハウスよりも安価である。しかし、傾斜地に簡易ハウスを建設することは非常に困難であり、さらに傾斜ハウスは簡易ハウスよりも強度的に優れる<sup>52)</sup>ことから、台風などの被害も受けにくいと考えられる。

傾斜ハウスおよび養液供給システム導入によるそ

他の効果としては、慣行雨よけ栽培に比べて栽培期間が2か月程度拡大したのにもかかわらず、殺虫剤使用量を削減でき、薬剤費および作業時間を低減できることがあげられる。また、トマト栽培の後に他の作目を導入して、施設や装置を有効利用することによる収入増も可能である。さらに傾斜ハウスの導入により、雨天時でも作業ができることは生産者の労働配分などにとって大きな利点となる。それに加えて養液栽培を導入すると、土壤病害、土作り、傾斜地特有の土揚げ作業などが回避できるなど、利点は多い。一方、今後の課題としては、夏季の高温、栽培期間後半に発生しやすい糸状菌による病害への対策などがあげられる。

以上のように傾斜ハウスおよび養液供給システムの導入によって夏秋トマトの生産性は向上し、12月まで収穫可能となったが、施設を有効に利用するには、次のトマト作付けまでの作目の導入が必要である。そこで、V-2および3では、中山間傾斜地の秋冬季の気象特性を活かし、かつ、傾斜ハウスや養液栽培システムなどを有効に利用する作目として、ブルーベリーの促成栽培に着目した。

一般的にブルーベリーをはじめとする落葉果樹の休眠覚醒の温度条件として7.2℃以下の低温遭遇時間を基準にする場合が多い<sup>88)</sup>。また、ブルーベリーの開花は、冷蔵によって促進されることが報告されている<sup>9, 10)</sup>。ブルーベリーの休眠覚醒に必要な低温遭遇時間は、本実験の結果だけでは明らかにならないが、非促成(香川県善通寺市)における開花までの7℃以下の低温遭遇時間は1000～1100時間であったことから、それ以下であるものと推測できる。したがって、促成栽培での1239時間の低温遭遇は休眠覚醒に十分であったと考えられる。本実験では2月3日に加温ハウスに搬入したが、もっと早い時期に搬入して開花をさらに早めることも可能であると考えられる。

杉浦・本條(1997)<sup>112)</sup>は、ニホンナシにおいて自発休眠覚醒と温度の関係について解明してモデル化を行っており、本條ら(2005)<sup>49)</sup>は、ある程度の低温遭遇後の高温処理が休眠覚醒に効果のあることを報告している。これらの研究は、ブルーベリーの促成栽培についても有効であると考えられ、詳細な解析を行えば、加温開始時期や設定温度、開花期予測

などへ利用できるものと考えられる。また、Suzuki・Kawata (2001)<sup>113)</sup> は、ブルーベリーでは開花日の早い花ほど収穫日が早いことを報告している。本実験の促成栽培では、多くの品種（‘Northland’、‘Berkeley’、‘Bluecrop’、‘Patriot’、‘Weymouth’、‘O’Neal’、‘Sharpblue’ および ‘Sunshineblue’）で開花開始から受粉昆虫の導入までにしばらく時間があった。これらの品種の場合、開花時から受粉昆虫が導入されていれば、さらに収穫開始は早まった可能性が考えられる。

‘Northland’ や ‘Sharpblue’ などの収量の多い品種を用いてブルーベリーの促成栽培を行った場合、650 g 個体<sup>-1</sup> の収量とすれば、栽植密度10 a あたり700個体で455kgの収量が試算できる。仮に単価を3,389円 kg<sup>-1</sup> として、収量の80%が出荷できるとすれば、出荷額は10 a あたり123万円程度と試算できる。中山間地の冬春季のハウス利用のひとつとして、今回、行ったブルーベリーの促成栽培は有望な作目であると考えられる<sup>42)</sup>。早い時期に自発休眠の覚醒に十分な低温に遭遇できる中山間傾斜地では、さらに開花期や収穫期の前進化を図ることも可能であると考えられるが、暖房コストの点からハウス搬入時期や加温温度などの検討が必要である。また、コンテナ個体の重量は、培地が水分を多く含んだ状態では20kg以上になることから、コンテナ個体の軽量化や運搬の軽労化を図ることも必要である。

## 5 摘 要

中山間傾斜地における夏秋トマトの安定生産のために開発した傾斜ハウスおよび傾斜地対応型養液供給システム（養液供給システム）を、徳島県東みよし町K地区（標高300～600m、傾斜度4～25°）、山腹型傾斜畑地域の3戸のトマト生産者に導入し、その効果を検討した。傾斜ハウスの資材費は10 a あたり300万円程度、養液供給システムの資材費は10 a あたり50万円であり、養液栽培を行う場合はさらに66万円程度必要であった。

2002～2005年に傾斜ハウスおよび養液供給システムを利用した栽培（ハウス養液栽培）と慣行の雨よけ栽培とを比較した。ハウス養液栽培では、慣行雨よけ栽培では設置が困難な防虫ネットおよび非散布型製剤の利用により、殺虫剤の使用回数を減らすこ

とができた。殺菌剤の使用回数は、ハウス養液栽培と慣行雨よけ栽培との間で明確な差はみられなかった。トマト果実の収量は、すべての生産者および栽培年において、ハウス養液栽培の方が慣行雨よけ栽培に比べて著しく多かった。雨よけ栽培では、収量が少ないだけでなく、台風や病虫害の影響を大きく受けて収量変動しやすいことが推察された。以上より、傾斜ハウスおよび養液供給システムは、安価な簡易雨よけ施設に比べるとコストはかかるものの、収量の増加と安定生産によって農家収入も増加することから、導入効果は大きいと判断された。

また、中山間傾斜地の気象特性を活かし、開発した傾斜ハウスや養液供給システムなどを有効に利用できる作目として、ブルーベリーの促成栽培を検討した。ブルーベリーは、移動できるようにコンテナに定植して養液栽培を行った。定植より10～17か月後、各品種の枯死率を調査したところ、‘Earliblue’の枯死率が最も高く、本養液栽培には‘Earliblue’は不適であると判断された。促成栽培では、中山間傾斜地の露地圃場（徳島県東みよし町、標高約310 m）で低温に遭遇させた後、2月初旬に隣接の加温傾斜ハウスに搬入した。促成栽培の開花および収穫は、促成を行わない場合（香川県善通寺市）に比べると、35日以上早く、多くの品種で4月下旬～5月上旬に収穫開始となった。促成栽培の初期収量は‘Patriot’ および ‘Weymouth’ で多かったが、収穫期間全体の収量は‘Northland’ および ‘Sharpblue’ で多かった。‘Sunshineblue’ は、収穫のピークが遅く、促成栽培には不向きであった。促成栽培の収穫果実の出荷単価は1 kgあたり平均3,389円であり、他の時期に比べて高かった。以上より、ブルーベリーのコンテナ養液促成栽培は、四国をはじめとする中山間傾斜地の施設利用の作型として有望であると考えられた。

## VI 受光特性からみた傾斜地トマト個体群の高収量要因の解明

近年、地球温暖化は深刻な環境問題となっており、トマトにおいても緩やかな気温上昇は着果を抑制し、収量が減少する可能性があるといわれている<sup>104)</sup>。こうなった場合、現在、夏季のトマト生産が行われ

ている地域では生産量が減退すると推測され、冷涼な中山間地域の役割が増大する可能性がある。中山間傾斜地における野菜生産を促進するために開発された傾斜ハウス<sup>81)</sup>、傾斜地養液栽培システム および給液制御法 (Ⅱ～Ⅳ)<sup>38, 39, 40)</sup> の導入によって、傾斜地域のトマト収量は大幅に増加することが示された (Ⅴ-1)<sup>31, 44)</sup>。

傾斜ハウスおよび傾斜地養液栽培システムの導入による収量増加の要因としては、傾斜ハウスによる栽培期間の拡大、病害虫の忌避、養液栽培による養水分管理の向上などが上げられる。一方、これらの要因だけでなく、傾斜地と平地のトマト個体群の受光特性の違いにより、傾斜地の方が平地よりも潜在的に乾物生産効率が高く、このために傾斜地で高い収量が得られた可能性も考えられる。

圃場の日射量は、圃場の傾斜角度、面する方位によっては傾斜地の方が平地よりも高い場合がある。佐藤 (1967)<sup>103)</sup> は、傾斜地域のテラス圃場および傾斜圃場において、方位や傾斜角度と地表面日射の日変化、季節変化および緯度との関係を検討した。その結果、北向きを除いたすべての斜面方位において、テラス圃場よりも傾斜圃場の日射量が多いことが示された。また、藤原・阿部 (1973)<sup>20)</sup> は、東北地方の傾斜地を対象に南斜面の有利性について報告した。黒瀬ら (1991)<sup>74)</sup> は、標高データを用いて中山間傾斜地域の日射受光量を推定するモデルを作成し、南斜面の有利性を示し、山間地において実際に生産が行われている圃場は、このモデルで算出された高日射地域と一致することを示した。これらの報告に示されるように、傾斜地の圃場は受光量の面で平地よりも有利な場合がある。

圃場の日射だけでなく、傾斜地の作物個体群は傾斜によって植物体の高さが異なり、個体同士の相互遮蔽が少なくなることから、直達光の受光に有利であることが考えられる。受光量が多ければ、圃場面積あたりの乾物生産性が高い可能性があり、山間地や丘陵地において施設栽培を行う場合の有力な利点となると考えられる。しかし、傾斜地の植物個体群の受光量に関してはこれまでに研究例がなく、単に圃場に照射された日射が多いために作物の受光量が増加するのか、傾斜が受光態勢に及ぼす影響によって作物の受光量が増加するのかは明確でない。

Monsi・Saeki (1953)<sup>78)</sup> は、作物群落の受光量を葉面積指数 (LAI) と吸光係数による簡単な式で示し、それ以来、作物群落の受光量や生産性に関する多くの成果が報告された。このとき、一般作物と異なり、個体を列状に配置する園芸作物では畝の方位や個体間隔が受光量に及ぼす影響が大きいことから、個体配置と受光量との関係についての報告がいくつかある<sup>63, 94, 95)</sup>。トマトについては、Papadopoulos・Pararajasingham (1997)<sup>96)</sup> によって、受光量および光合成速度に対する植物体配置の影響に関する総説が報告されている。しかし、傾斜地の個体群では、畝方位や個体間隔だけでなく、3次元 (3D) 的な配置の影響も加わり、その影響はより大きいものと予想され、平地を対象としたこれまでの報告を適用することは難しいと考えられる。

ところで、コンピュータや情報技術の発達に伴い、植物の形状をコンピュータ内に導入する試みが行われている。植物体形状をコンピュータに取り込むことによって、受光量の算出が可能となり、作物生産における応用が可能となる。Andrieu et al. (1995)<sup>5)</sup> は、トウモロコシ個体群について、3Dモデルによる受光量シミュレーションを行い、その有効性を実際の測定と比較して示した。また、Percy・Yang (1996)<sup>98)</sup> および Takenaka et al. (1998)<sup>118)</sup> は、測定した茎の長さおよび方向、空間における葉と枝の配置に基づき、コンピュータ上で植物の3D構造を表現した。彼らの開発したシステムでは、ともに全天空写真と日射の入射方向とから、個葉の受光量が推定可能である。

一方、植物形状をコンピュータに導入するためには、葉の形状や角度などを測定する必要がある。Sinoquet et al. (1991)<sup>111)</sup> は、3Dデジタイザによる計測によってダイズ植物体の形状構造を表現できることを報告した。3Dデジタイザによる植物の測定は精確であるが、手間と時間が非常にかかる。このため、庄野 (1995)<sup>109)</sup> および本條・庄野 (2001)<sup>48)</sup> は、画像計測によって葉の傾斜角や分布を示すことが可能であると報告した。また、庄野・佐瀬 (1996)<sup>110)</sup> は、トマトの層別の葉角度と概略的の形状とを3D画像計測によって測定し、コンピュータ上で形状を再現した。

さらに上記のような実際の作物の計測に加え、コ

ンピュータに植物形状を導入する手法としては、Lシステムのような生長のアルゴリズムに基づいた方法がある<sup>99)</sup>。Lシステムによる手法としては、キュウリ<sup>33, 64)</sup>、ヒマワリ<sup>117)</sup>、イネ<sup>127)</sup>など、比較的、葉の形状が簡単な植物を対象としたものが報告されている。しかし、トマトの葉の形状は複雑であり、また、たくさんの品種および品種間差がある。このため、トマト植物体のコンピュータへの導入は、デジタル計測によってもモデル化によっても難しく、現時点では開発中の段階であると考えられる。したがって、傾斜地のトマトの受光量を検討する際に、上に示したような研究例を適用することは難しい。そこで、筆者らは3D植物モデルの受光量をレイトリング法によって求めるシミュレーターを開発し<sup>36)</sup>、傾斜地個体群の受光量算出に適用した。

ここでは、作物の生産性に関係する重要な要素のひとつである受光態勢に対する傾斜地の影響を明らかにするため、傾斜地および平地におけるトマト個体群の受光量を調査した。その際、傾斜地および平地の個体群における個葉の受光量を実際に測定するとともに、3Dモデルによるシミュレーションによって個葉受光量を算出し、受光特性について解析を行った。

## 1 傾斜地および平坦地におけるトマト個体群の受光特性の違い

傾斜ハウスおよび養液栽培システムの導入により、傾斜地のトマト収量は大幅に増加した。ここでは、傾斜地養液栽培のトマトの収量が高い原因について、受光態勢の面から明らかにするため、傾斜地および平地のトマト個体群の受光量を実際に測定して、その違いを検討した。

### 1) 材料および方法

徳島県東みよし町K地区（北緯34° 00′，東経133° 55′，標高355m）において、傾斜ハウス（農POフィルム被覆，透過率：0.90）および通常のパイプハウス（農ビフィルム被覆，透過率：0.90）のトマト個体群の受光量を測定した。傾斜ハウスは傾斜度20°の東南東斜面に建設されており、等高線方向に長さ約40m，傾斜方向に長さ13m，床面積は440m<sup>2</sup>であった。パイプハウス（平地ハウス）は、

傾斜度0°のテラス圃場に、傾斜ハウスから約5m離れて並行に建設されており，幅7.2m，長さ24.4m，床面積は177m<sup>2</sup>であった。

トマト植物体（‘桃太郎8’）を、傾斜ハウスには2002年5月29日に、平地ハウスには同年5月30日にそれぞれ定植した。両ハウスともに畝方向は南南西-北北東方向とし，株間を40cm，栽植密度を2.2個体 m<sup>-2</sup>とした。畝間隔は傾斜ハウスでは80-130cmとし，平地ハウスでは90-110cmとした。両ハウスともに生育に伴い下葉は除去した。それぞれのハウスの高さの制限のため，傾斜ハウスでは垂直ひも誘引を，平地ハウスでは斜め誘引を行い，植物体の地上高は傾斜ハウスでは170-190cm，平地ハウスで約160cmとした。

両ハウスにおける植物体の個葉の受光量を簡易積算日射フィルム（オプトリーフ R-2D，大成 E&L，東京）によって2002年9月20-27日に測定した。簡易積算日射フィルム（日射フィルム）は日射を感光する色素の残存量によって積算日射を測定するものであり，植物群落上層から下層までの個々の葉の受光量のような多数の計測が同時に可能なのが特徴である<sup>45, 56, 126)</sup>。それぞれのハウスの中央部の6個体の植物体について，すべての葉の受光量を測定した。2002年9月20日，日射フィルムを2-3cmの長さに切り，各葉の中央部に貼り付けた。このとき，測定対象の葉の葉面積を算出するため，葉長および葉幅を測定した。

個体群落上の光強度を得るため，ハウス内で植物に遮蔽されない場所に放射熱センサ（LI-200SB，Li-Cor，Lincoln，USA）を設置して日射を測定し，データロガー（DC3100，NEC 三栄，東京）によって記録した。日射フィルムと受光量との関係を示す検量線を得るために，放射熱センサと同地点に日射フィルムを水平に設置し，この日射フィルムの吸光度を吸光度計（THS-470，大成 E&L，東京）によって24時間毎に測定した。これによって得られた検量線の式は以下の通りであり，これに基づいて個葉の受光量を求めた。 $R_s = -105.35 \times A_f + 212.57$  ( $R_s$ : 積算日射 (MJ m<sup>-2</sup>),  $A_f$ : フィルムの吸光度,  $r^2 = 0.9826$ )。各葉に貼り付けたフィルムは2002年9月27日に回収し，吸光度計によって吸光度を測定した。日射フィルムによる測定の後，破壊調査によって

第18表 傾斜地および平地圃場で生育するトマトの平均葉長、葉幅、個葉の葉面積、展開葉数、残存葉数および総葉面積

圃場	葉長 cm 葉 <sup>-1</sup>	葉幅 cm 葉 <sup>-1</sup>	個葉面積 cm <sup>2</sup> 葉 <sup>-1</sup>	展開葉数 葉 個体 <sup>-1</sup>	残存葉数 葉 個体 <sup>-1</sup>	総葉面積 m <sup>2</sup> 個体 <sup>-1</sup>
傾斜地	39.6	37.0	522.0	50.8	17.7	0.92
平地	36.9	42.3	526.9	43.8	24.3	1.28
有意差 <sup>1)</sup>	*	***	ns	***	***	**

1) *t*-testによる有意差, ns: P=0.05レベルで有意差なし; \*, \*\*, \*\*\*: P=0.05, 0.01, 0.001レベルで有意差あり.

第19表 平均個葉受光量に及ぼす圃場の傾斜および葉の位置の影響

圃場	平均受光量 (MJ m <sup>-2</sup> day <sup>-1</sup> )				
	1-5 葉 <sup>1)</sup>	6-10 葉	11-15 葉	16-20 葉	21-25 葉
傾斜地	3.0	2.2	1.8	1.4	- <sup>2)</sup>
平地	2.5	1.4	1.1	1.0	0.7
有意差 <sup>3)</sup>	ns	**	**	ns	-

1) 個体最上部からの葉数.

2) 葉はない.

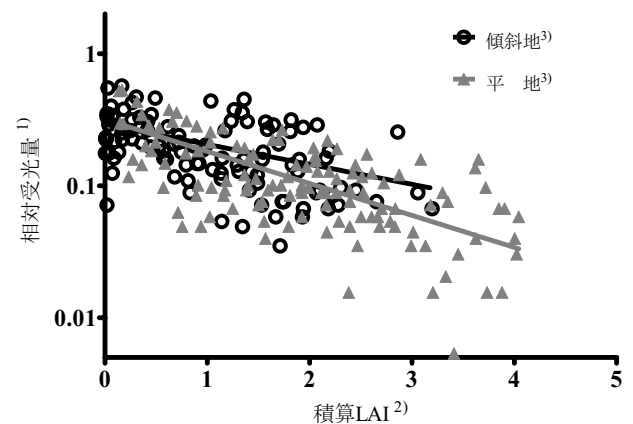
3) *t*-testによる有意差, ns: P=0.05レベルで有意差なし; \*, \*\*, \*\*\*: P=0.05, 0.01, 0.001レベルで有意差あり.

149葉の葉面積を測定した. 葉長・葉幅の積と葉面積との間には相関関係がみられ ( $r = 0.82$ ,  $P < 0.0001$ ,  $n = 149$ ), これから得られた式,  $A_l = 0.3337 \times L_l \times W_l$  ( $A_l$ : 葉面積 (cm<sup>2</sup>),  $L_l$ : 葉長 (cm),  $W_l$ : 葉幅 (cm)) から, 個葉の面積を求めた. 測定値の *t* 検定, ピアソンの相関関係の検定, 非線形回帰などの統計処理には, 統計ソフト, Prism 5 for Windows 5.00 (Graphpad Software Inc., San Diego, USA) を用いた.

## 2) 結果および考察

傾斜ハウスの植物体の葉長は, 平地ハウスのものに比べて有意に長かったが, 葉幅は平地ハウスの植物体の方が傾斜ハウスのものに比べて有意に長かった (第18表). 個葉の葉面積については傾斜ハウスと平地ハウスとの間に有意な差はみられなかった. 展開葉数については, 傾斜ハウスの方が平地ハウスに比べて多かったが, 測定時に植物体に残っている葉数は平地ハウスの方が多かった. このため, 個体あたりの総葉面積は, 平地ハウスの方が傾斜ハウスよりも多かった.

第19表は, 傾斜ハウスおよび平地ハウスの植物体

第28図 傾斜地および平地の植物体の個葉の相対受光量と積算葉面積指数との関係<sup>4)</sup>

- 1) 植物個体群上の水平面受光量に対する相対値, 7日間 (2002年9月20日~27日) の平均.
- 2) 個体群上部からの積算葉面積指数.
- 3) 直線は指数回帰式, 傾斜地:  $y = 0.29 e^{-0.35 F}$  ( $r^2 = 0.22$ ,  $y_0$  および  $k$  の95%信頼区間はそれぞれ0.25-0.33および0.21-0.49), 平地:  $y = 0.32 e^{-0.56 F}$  ( $r^2 = 0.45$ ,  $y_0$  および  $k$  の95%信頼区間はそれぞれ0.27-0.36および0.44-0.68).
- 4) 個体間隔: 40cm, 列間隔: 100cm, 列方位: 南南西-北北東, 圃場の傾斜度: 0° (平地) および20° (傾斜地).

における個葉の受光量を葉層別に示したものである. 両ハウスとも下葉になるほど, 受光量は減少していた. 最も上の葉を第1葉として, 第1-5葉の受光量は, 傾斜ハウスと平地ハウスで有意な差はみられなかった. 第6-10葉および第11-15葉の受光量は, 平地ハウスに比べて傾斜ハウスで有意に多かった. 第16-20葉の受光量については平地ハウスと傾斜ハウスで有意な差はみられなかったが, 傾斜ハウスの平均葉数は17.7葉であり, 第18葉以下がなかったことから, この葉位における両者の比較は妥当でないと考えられる.

第28図は, 個体群最上部からの積算葉面積指数と個葉の相対受光量との関係を示す. 図中において平

地ハウスの点が横軸方向の広い範囲に分布しているのは、個体あたり葉面積が多かったためである。相対受光量は、両ハウスともに積算葉面積指数と有意な相関関係を示した ( $P < 0.0001$ )。積算葉面積指数の増加に伴って受光量は減少しており、この関係を指数関数式： $y = y_0 e^{-k F}$  ( $y$ : 個葉の受光量,  $y_0$ : 係数,  $k$ : 吸光係数,  $F$ : 最上部からの積算葉面積指数) で示したところ、傾斜ハウスおよび平地ハウスのトマト個体群から得られた式は、それぞれ、 $y = 0.29 e^{-0.35 F}$  ( $r^2 = 0.22$ , 95%信頼区間  $y_0$ : 0.25 - 0.33,  $k$ : 0.21 - 0.49) および  $y = 0.32 e^{-0.56 F}$  ( $r^2 = 0.45$ , 95%信頼区間  $y_0$ : 0.27 - 0.36,  $k$ : 0.44 - 0.68) となった。傾斜ハウスの個体群の吸光係数  $k$  は、平地のものに比べて小さかったが、95%信頼区間からは有意な差ではなかった。

## 2 3次元モデル植物シミュレーションによる傾斜地個体群の受光特性の解明

トマト個体群の受光量に対する圃場の傾斜の影響を明らかにするため、3Dモデル植物によるシミュレーションによって、傾斜地および平地のトマト個体群の受光特性の違いを検討した。

### 1) 材料および方法

トマトの葉は極めて複雑な形状をしているため、シミュレーションを行うために以下のように単純化した。すなわち、莖は地面に対して垂直な直線とし、葉は平面状の円とし、葉の角度、長さおよび節間長は個体内の部位にかかわらず等しいものとした。また、すべての個体は同じ形状を持つものとした。

まず、葉序に基づく水平面上の葉の開度を  $\gamma$  とし、 $n$  番目の葉の角度を  $\theta_n$ 、 $\theta_0 = 0$  とすると、 $\theta_n$  は以下となる。

$$\theta_n = \theta_{n-1} + \gamma$$

次に、 $xyz$  空間において、 $xz$  平面上で  $z$  軸に対する葉の角度を  $\alpha$ 、葉序角度 ( $xy$  平面上で  $x$  軸に対する角度) を  $\theta$  とする平面を葉とすると、その法線ベクトル  $h$  は以下の通りである。

$$h(h_x, h_y, h_z) = (\cos\theta \cos\alpha, \cos\theta \sin\alpha, \sin\theta)$$

法線ベクトルが  $h$  で、点  $P_0(x_0, y_0, z_0)$  を通る平

面を葉とすると、葉の平面の方程式は以下の通りである。

$$h_x x + h_y y + h_z z - (h_x x_0 + h_y y_0 + h_z z_0) = 0$$

また、葉の基部の点を  $Q(q_x, q_y, q_z)$  とし、基部から葉の中心点までの距離を  $l$  とすると、葉の中心点の座標  $P$  は、以下の通りである。

$$P(p_x, p_y, p_z) = (q_x + l \cdot h_x, q_y + l \cdot h_y, q_z + l \cdot h_z)$$

葉内の点が光を受けているか、受けていないかを調べるため、レイトレーシング法により、葉内の点から太陽光の照射方向 (以下、光軸方向) に追跡を行い、その点が他の葉によって遮蔽されているかを判断した。しかし、葉内の点をすべて検討することは困難であるため、ここでは1つの葉を面積が等しくなるように5分割し、1葉につき5点の受光状態を判定した。葉を半径  $r$  の円と仮定すると、葉平面の中心から受光判定の追跡を行う点までの距離  $d$  は、以下の通りである。

$$d = 1/2 r (1 - \sqrt{5}/5)$$

受光判定を行う点は、以下のように、葉の中心点  $P_0$ 、直線  $Q P_0$  に垂直で点  $P_0$  より距離が  $d$  である点  $S_{01}(s_{01x}, s_{01y}, s_{01z})$  および  $S_{02}(s_{02x}, s_{02y}, s_{02z})$ 、直線  $Q P_0$  上で点  $P_0$  より距離が  $d$  である点  $T_{01}(t_{01x}, t_{01y}, t_{01z})$  および  $T_{02}(t_{02x}, t_{02y}, t_{02z})$  とした。

$$S_{01}(s_{01x}, s_{01y}, s_{01z}) = (p_{0x} - d \cdot h_x, p_{0y} + d \cdot h_y, p_{0z})$$

$$S_{02}(s_{02x}, s_{02y}, s_{02z}) = (p_{0x} + d \cdot h_x, p_{0y} - d \cdot h_y, p_{0z})$$

$$T_{01}(t_{01x}, t_{01y}, t_{01z}) = (p_{0x} + d \cdot h_x, p_{0y} + d \cdot h_y, p_{0z} - d \cdot h_z)$$

$$T_{02}(t_{02x}, t_{02y}, t_{02z}) = (p_{0x} - d \cdot h_x, p_{0y} + d \cdot h_y, p_{0z} + d \cdot h_z)$$

受光判定の出発点から、光軸方向に  $dz$  ずつ点を移動して追跡を行った。このとき、 $dz$  増分に対する  $x$  の増分は  $dx/dz$ 、 $dz$  増分に対する  $y$  の増分は  $dy/dz$  となり、太陽仰角を  $k$ 、時角を  $t$  とすると、 $dx/dz$ 、 $dy/dz$  は以下の通りである。

$$dx/dz = \sin t / \sin k$$

$$dy/dz = \cos k / \sin t$$

光軸方向への追跡点と他の葉の位置関係から出発点が遮蔽されているかを調べるため、追跡点を  $S(s_x, s_y, s_z)$ 、検討対象の葉の中心点を  $P(p_x, p_y, p_z)$



とすると、光軸追跡点  $S$  と葉の中心点  $P$  との距離  $D_{sp}$ 、光軸追跡点  $S$  と葉の平面との距離  $D_{sl}$  は、それぞれ以下の通りである。

$$D_{sp}^2 = (s_x - p_x)^2 + (s_y - p_y)^2 + (s_z - p_z)^2$$

$$D_{sl}^2 = \{h_x(s_x - p_x) + h_y(s_y - p_y) + h_z(s_z - p_z)\}^2 / (h_x^2 + h_y^2 + h_z^2)$$

追跡点  $S$  が、この葉の平面方程式上で、かつ、 $S$  が葉の範囲内にあるとき、すなわち、 $D_{sl} = 0$  のとき出発点は葉に遮蔽されていると判断できる。しかし、光軸上のすべての点を調べることはできない。そこで以下のような条件を満たしたとき、出発点は葉に遮蔽されているものとし、この条件を1度も満たすことがない場合のみ、出発点は直達光を受けていると判断した。

$$D_{sl} < 1/2 \sqrt{(dx/dz)^2 + (dy/dz)^2 + dz^2}$$

$$D_{sp} < r$$

受光を判定した点が、直達光を受けていると判断された場合、葉への光の進入角度から受光量を算出した。光軸ベクトルを  $s$ 、太陽の時角を  $t$ 、仰角を  $k$ 、出発点の面積を  $da$ 、光軸と法線ベクトル  $h$  とのなす角を  $A$ 、光軸に対して垂直面における光強度を  $I$ 、出発点の受光量を  $L$  とすると、これらは以下の通りとなる。なお、葉あたり受光量は、葉内の5点  $P_0, S_{01}, S_{02}, T_{01}$  および  $T_{02}$  の平均値とした。

$$s = (\cos k \cos t, \cos k \sin t, \sin k)$$

$$L = I \cos A da$$

$$s \cdot h = |s| |h| \cos A$$

$$\cos A = h_x \cos k \cos t + h_y \cos k \sin t + h_z \sin k$$

以上のように、個葉の受光量をシミュレーションで求めた。このときの入力パラメータは、葉の水平角、葉序に基づく葉の開度、個体あたり葉数、葉の長さ、節間長、葉柄長、個体の間隔、列の間隔、列あたりの個体数、列の方位、緯度、太陽赤緯、圃場の傾斜度、斜面の方位角、シミュレーションの開始および終了時刻、出力間隔とした。なお、2/5葉序のトマトでは、葉の方位角は5葉毎に720°回転する。個葉受光量は方位角の影響を大きく受けることから、すべての方位の個葉受光量を得るために、シミュレーションで算出された受光量を5葉毎に移動

平均を取り個葉受光量とした。また、円と仮定した個葉の面積は、VI-1で測定した平均個葉面積に等しいとした。ただし、実際のトマトの葉はこの円の直径よりも長い場合、シミュレーションでは、円の直径と葉柄長の和が、VI-1で測定した植物体における最大葉長と等しいものと仮定した。これ以外の条件、すなわち、圃場角度、個体および列の間隔、方位などは、VI-1に準じ、具体的な値は以下の通りとした。個体間隔：40 (cm)、列間隔：100 (cm)、列あたり個体数：7、列数：5、葉の水平面に対する角度：-25 (°)、葉の開度：144 (°)、個体あたり葉数：22、節間長：8 (cm)、葉の直径：26 (cm)、葉柄長：34 (cm)、列方位角：112.5 (°、真北を0)、圃場傾斜角度：20および0 (°、傾斜地および平地)、斜面方位角：-67.5 (°、真北を0)、緯度：34 (°、北緯)、太陽赤緯：0 (春秋分の日)、開始時刻：6：10、終了時刻：17：50、出力間隔：10 (min)。

VI-1で述べたように、受光量の計測を行った植物体は傾斜ハウスでは垂直誘引であり、平地ハウスでは斜め誘引であった。トマトの葉の角度の計測は容易ではなく、また、測定しても葉角度は広い範囲に分布して取り扱いも難しいことから、本実験では葉の角度は測定しなかった。そこでシミュレーションでは、傾斜地と平地において葉の角度が異なる場合を想定し、傾斜地の個体群における水平面に対する葉の角度が5°大きい場合（葉の水平面に対する角度：-30°）も検討に加えた。

シミュレーションプログラムは Java™2 SDK Version 1.3.1 および Java 3D 1.2.1\_01 を用い、富士総合研究所（現 みずほ情報総研株式会社、東京）によって作成した<sup>36</sup>。プログラム画面では、植物の形状および配置、圃場の角度および方位の状態がわかるように3次元で可視化した（第29図）。

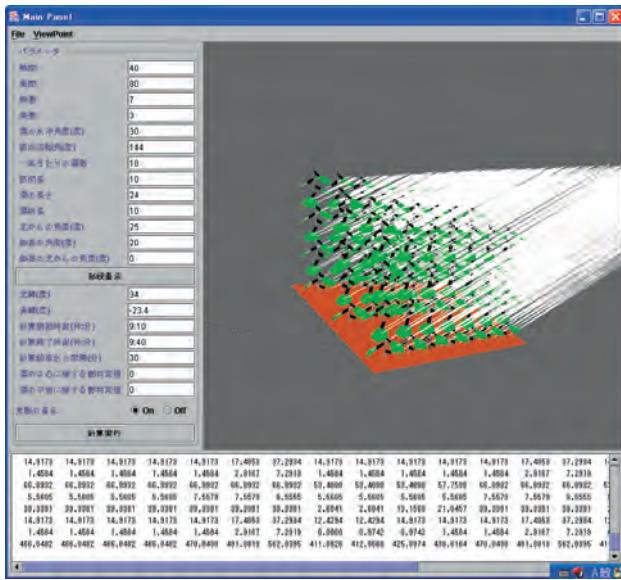
## 2) 結果および考察

第30図は3Dモデル植物のシミュレーションで求めた個葉の相対受光量と積算葉面積指数との関係を示したものである。LAIが0-1の個体群落上部では、平地および傾斜地の受光量には大きな差はみられない。一方、LAIが1.5-3.0の個体群落下部では、平地に比べて傾斜地の場合の受光量が多い。LAIの増加に伴って受光量は減少していることから、VI-

1の実測と同様に、その減少割合について指数回帰式  $y = y_0 e^{-kF}$  で示した。その結果、傾斜地における吸光係数  $k$  は、平地よりも有意に小さかった。これは平地よりも傾斜地の個体群の方が、中位葉および下位葉において受光量が多いことを意味する。VI-1において実測した植物体では、傾斜地は垂直誘引、平地では斜め誘引を行ったことから、傾斜地において葉の角度が  $5^\circ$  小さい場合についてもシミュレーションした。

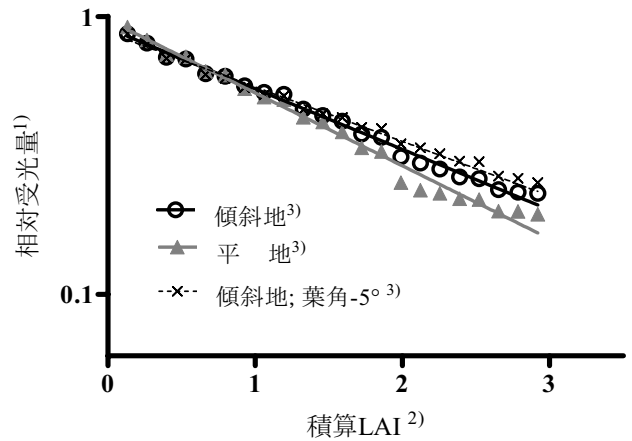
この場合の吸光係数  $k$  は、傾斜地で葉角度を変えなかった場合よりもさらに小さいものとなった。

第31図は、レイトレーシングシミュレーションに



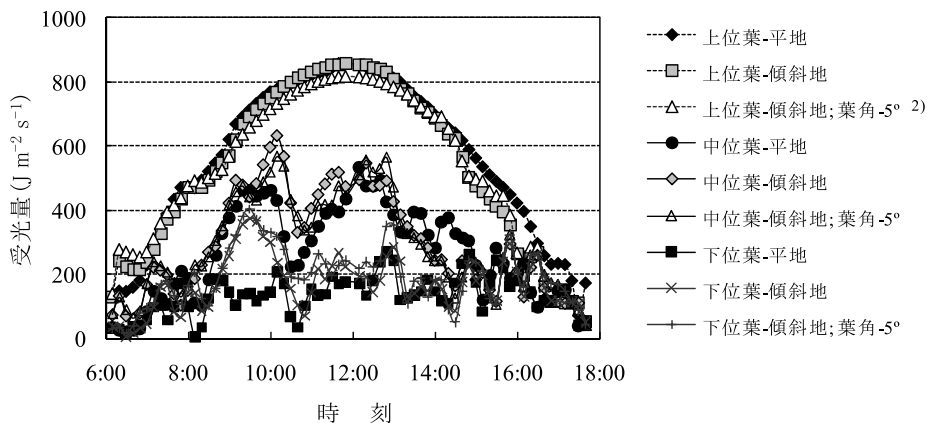
第29図 3Dモデル植物の受光量シミュレーションプログラム（著作権登録P7834号-1）における表示画面

左側：パラメータ入力部、右側：形状表示部（白線は光軸を示す）、下部：計算結果表示部。



第30図 レイトレーシングシミュレーションで求めた傾斜地および平地のモデル植物体の個葉の相対受光量と積算葉面積指数との関係<sup>4)</sup>

- 1) 植物個体群上の水平面受光量に対する相対値、圃場内部の9個体の平均値。
- 2) 個体群上部からの積算葉面積指数。
- 3) 直線は指数回帰式、傾斜地： $y = 0.91 e^{-0.50 F}$  ( $r^2 = 0.99$ ,  $y_0$  および  $k$  の95%信頼区間はそれぞれ  $0.89 - 0.93$  および  $0.48 - 0.52$ )、平地： $y = 0.97 e^{-0.60 F}$  ( $r^2 = 0.99$ ,  $y_0$  および  $k$  の95%信頼区間はそれぞれ  $0.94 - 1.00$  および  $0.58 - 0.63$ )、傾斜地・葉角度  $-5^\circ$ ： $y = 0.87 e^{-0.45 F}$  ( $r^2 = 0.99$ ,  $y_0$  および  $k$  の95%信頼区間はそれぞれ  $0.85 - 0.90$  および  $0.43 - 0.47$ )。
- 4) 個体間隔：40cm, 列間隔：100cm, 列方位：南南西-北北東, 圃場の傾斜度： $0^\circ$  (平地) および  $20^\circ$  (傾斜地)。



第31図 レイトレーシングシミュレーションに基づいた傾斜地および平地における上位葉、中位葉および下位葉<sup>1)</sup>の受光量の日変化

- 1) 上位、中位および下位葉：群落上部から第1-5葉, 第10-14葉, 第18-22葉。
- 2) 葉角度, 個体間隔：40cm, 列間隔：100cm, 列方位：南南西-北北東, 圃場の傾斜度： $0^\circ$  (平地) および  $20^\circ$  (傾斜地)。

に基づき、傾斜地および平地における上位葉、中位葉および下位葉の受光量の日変化を示したものである。上位葉における受光量は、15:00までは傾斜地でも平地でもほぼ同程度であり、15:00以降は傾斜地の方が平地よりもわずかに少なかった。中位葉の受光量は、10:00から12:00までは傾斜地において多く、13:00から15:00までは平地において多かった。下位葉における受光量は、8:30から12:00までは傾斜地の方が平地よりも多く、特に8:30から10:00まではその傾向が顕著であった。傾斜地で葉角度が $-5^\circ$ の場合における上位葉の受光量は、8:00から14:00までは他の場合よりも少なかった。また、傾斜地で葉角度が $-5^\circ$ の場合における中位葉の受光量は10:00から12:00まで平地よりも多く、下位葉の受光量は8:30から12:00まで平地より多かった。

### 3 総合考察

作物群落の受光量は、 $I = I_0 e^{-KF}$  ( $I$ : 水平面の光強度,  $I_0$ : 群落上の水平面光強度,  $K$ : 吸光係数,  $F$ : 群落上部からの積算葉面積指数) の式で表すことができる<sup>78)</sup>。吸光係数を求める場合、異なる LAI 地点の水平面の光強度を測定するが、VI-1では個葉の受光量を直接、測定した(第28図)。それぞれの個葉は様々な方向に向かって展開しており、その方向によって受ける光強度は様々である。この結果、測定した個葉の受光量は、水平面光強度よりも広い範囲にわたったものと考えられる。このため、式  $I = I_0 e^{-KF}$  で近似した場合、誤差が大きくなることから、ここでは受光量と積算葉面積指数の関係を  $y = y_0 e^{-kF}$  ( $y$ : 個葉の受光量,  $y_0$ : 係数,  $k$ : 吸光係数,  $F$ : 最上部からの積算葉面積指数) で近似した。この式における吸光係数  $k$  も、Monsi・Saeki<sup>78)</sup> の式の吸光係数  $K$  に相当するものであり、 $k$  が小さい個体群では群落内部まで光が侵入し、 $k$  が大きい個体群では群落下層部の光は少ない。VI-1で得られた吸光係数  $k$  は、平地よりも傾斜地の個体群で小さかったが、95%信頼区間からみた場合、有意な差ではなかった。吸光係数  $k$  に有意差が表れなかった理由は、先述のように個葉の受光量のばらつきが大きいことによると考えられる。個体最上部から第6-10葉および第11-15葉の受光量

は、平地に比べて傾斜地の方が有意に多く(第19表)、VI-2のシミュレーションでは吸光係数  $k$  は平地よりも傾斜地の個体群の場合に有意に小さかった(第30図)ことから、傾斜地と平地の個体群では受光特性に違いがあると考えられる。

なお、第18表に示すように、VI-1における測定個体群の LAI は傾斜地の個体群よりも平地の個体群の方が大きかった。そこで、近似式  $y = y_0 e^{-kF}$  に対する LAI の違いの影響を確認するため、両者の LAI を2.0以下の範囲に限定し、近似式を再算出した。その結果、VI-1と同様に受光量は積算葉面積指数と有意な相関関係にあった ( $P < 0.0001$ )。また、傾斜地および平地の個体群における近似式は、それぞれ、 $y = 0.29 e^{-0.34F}$  ( $r^2 = 0.16$ , 95%信頼区間  $y_0$ : 0.25-0.33,  $k$ : 0.17-0.51) および  $y = 0.36 e^{-0.75F}$  ( $r^2 = 0.37$ , 95%信頼区間  $y_0$ : 0.28-0.43,  $k$ : 0.49-1.0) となり、LAI を制限しないVI-1の結果と同様な傾向であった。したがって、傾斜地および平地個体群における受光量と LAI の関係は、両個体群で LAI が異なることによるものではないといえる。

傾斜地と平地の個体群で吸光係数が異なる、つまり、傾斜地で吸光係数が小さくなるのが正しいとしたら、その理由としては以下の2つが考えられる。まず、ひとつめは個体配置に対する傾斜の直接の影響、つまり、幾何学的に決まる個体同士の関係からもたらされる要因である。この個体の幾何学的配置の影響は、実際の測定よりもシミュレーションにおいて顕著に現れると考えられる。なぜなら、実際の葉は曲面で葉の角度は個体内および個体間で異なるのに対して、シミュレーションでは葉を平面とし、すべての個体で同じ形状としており、個体配置の影響のみが結果に現れるからである。第30図に示したように、傾斜地個体群の吸光係数  $k$  は平地の場合に比べて有意に小さかった。したがって、傾斜地個体群において吸光係数が小さいのは主に個体の幾何学的配置の影響によるものであると考えられる。

この他に、傾斜地と平地で吸光係数が異なる原因として考えられるものには、葉の角度、分布および形状の違いがあげられる。吸光係数は葉の角度の影響を強く受け<sup>78)</sup>、葉の角度が垂直に近くなれば、吸光係数は減少し、群落内部まで光が到達する。反対に葉の角度が水平面に近ければ、吸光係数は大きく

なり、群落下部の光強度は小さくなる。Goudriaan (1988)<sup>26)</sup> は、葉角分布が異なる植物群落における吸光係数に対する LAI と日射の入射角の影響について報告した。また、Flenet et al. (1996)<sup>17)</sup> は、トウモロコシ、ソルガム、ダイズおよびヒマワリにおいて、吸光係数は列間隔の影響を大きく受けて変化することを報告している。岩切・稲山 (1974b)<sup>60)</sup> は、キュウリの葉の角度は個体群落下層部では水平に近く、上層部では垂直に近いことを報告した。一方、Acock et al. (1978)<sup>1)</sup> は、トマトの個体群落の下層部では、水平面に対する葉角度が増加することによって光透過性が増し、このため、上層部における吸光係数は0.63であるのに対して、全層部の吸光係数は0.52であったと報告した。このように多くの報告で葉の角度、個体の間隔と吸光係数の関係が報告されているが、圃場の傾斜角度の吸光係数や葉角度に対する影響に関する報告はこれまでにない。また、今回の測定では、傾斜地、平地ともに栽植密度は同じであったが、傾斜地では垂直誘引であったのに対して、平地では斜め誘引であった。地上から群落最上部のまでの距離は、平地に比べて傾斜地の個体群の方が長かったが、植物体が保持している葉の数は平地の方が多かった(第18表)。これは、隣接した節の葉同士の間隔が、平地よりも傾斜地で大きいことを示す。つまり、傾斜地の葉の方が空間的な自由度は大きく、水平面に対する葉角度の変化できる範囲が、平地の場合よりも大きかったと考えられる。さらに、今回の測定では、個葉の葉面積は傾斜地と平地の個体群で違いはなかったが、葉長および葉幅は両個体群で異なった。傾斜地の個体群では葉長が長く、葉幅が短く、平地の個体群では葉長が短く、葉幅が長かった。ここでは、この葉の形状の違いが何によるものか特定することはできないが、これが受光態勢に影響を及ぼした可能性があるとともに、受光態勢による影響を受けた可能性もあると考えられる。

VI-2では、シミュレーションによって個葉の受光量を10分間隔で調べた。中位葉の受光量は、10:00~12:00に傾斜地で平地よりも多く、下位葉の受光量は、8:30~12:00に傾斜地で平地よりも多かった(第31図)。つまり、傾斜地個体群の中位葉および下位葉の受光量は、常に平地よりも多いわけで

はなく、1日のうちの特定の時間に多かったものといえる。この特定の時間の受光量の違いから、平地よりも傾斜地の個体群で吸光係数が小さくなったものと考えられる。また、シミュレーションでは傾斜地の個体群について葉の角度を5°減少させた場合も想定した。この場合にも、中位葉の受光量は10:00~12:00に傾斜地で平地よりも多く、下位葉の受光量は8:30~12:00に傾斜地で平地よりも多かった。また、葉角度-5°の場合、上位葉の受光量は8:00~14:00に他の場合よりも低かった。したがって、葉角度-5°の個体群では、中下位葉の受光量が特定時刻に多いことと、上位葉の受光量が午前から日中の間で少ないことの2つの作用を受けて吸光係数が小さくなったものといえる。

作物の受光量に対する列の方位や季節の影響についていくつか報告されている。Allen (1974)<sup>4)</sup> は、ソルガム個体群の受光量は、8月には東西畝よりも南北畝の場合に多いことを報告した。岩切・稲山 (1974a)<sup>59)</sup> は、キュウリ個体群の受光量は夏至には東西畝の場合に南北畝よりも少なく、冬至や春秋分には東西畝の方が多くなることを報告した。蔵田ら (1988)<sup>73)</sup> も、トマトにおいて魚眼レンズを用いた解析を行い、同様な結果を報告した。VI-2のシミュレーションでは、傾斜地および平地ともに南南西-北北東畝に植えられた植物体を想定した。その結果、中下位葉の受光量は、主に1日のうちの午前中に平地よりも傾斜地で多かった(第31図)。つまり、東南東斜面の植物個体群は、受光量の面においては午前中に有利であったといえる。これに対して西北西の斜面を想定した場合、1日の総受光量は同じであっても、午後の割合が大きいくと考えられる。つまり、受光量の多い時間帯は斜面の方位によって決まるといえる。一般に知られているように、作物の光合成速度は、光強度が等しくても午後よりも午前において高い場合が多い。したがって、受光量の重要性は、午後よりも午前の方が高いと考えられる。わが国の多くの傾斜地域では、谷を挟んで同様な斜面がある場合が多く、その斜面の面する方位は反対となる。本研究で測定を行った地域もそういった地域のひとつであり、谷を挟んで西北西斜面が存在する。両斜面の気候や温度条件は、同一地域内で標高も同程度であるためにほとんど同じである。しかし、

測定対象の東南東斜面には30戸以上のトマト生産者がいるのに対して、向かい側の西北西斜面にはトマト生産者はほとんどいない。生産者の分布には他の多くの要因が関わっていると思われるが、傾斜方位による受光量面で有利な時間帯がトマト生産の適合性を左右するひとつの要因であった可能性がある。つまり、西北西斜面よりも東南東斜面の方が午前中の受光量の面で有利なためにトマト生産に適していた可能性がある。

以上のように、傾斜地のトマト個体群では、中位葉および下位葉の受光量は平地の個体群よりも多いことが明らかになった。また、個体群落の吸光係数は平地よりも傾斜地の個体群の方が小さいと考えられる。さらに中位葉および下位葉でみられる受光量の違いは、1日のうちの特定時刻の受光量の違いによるものであることが3Dシミュレーションにより明らかになった。第28図に示した積算葉面積と受光量の関係式とトマト個葉の光合成曲線に基づけば個体あたりの光合成速度が求められる。これによれば、平地よりも傾斜地において個体光合成速度が高く、乾物生産効率が高いことが推定できる。このような土地生産性の高さは中山間傾斜地で集約的にトマト生産を行う際の有力な利点の一つとなり、中山間傾斜地におけるトマト栽培の拡大を促進する動機となる可能性がある。

#### 4 摘 要

標高の高いことにより夏季に冷涼な中山間傾斜地域におけるトマト生産を促進するため、受光特性の面から傾斜地の植物個体群の利点について検討した。傾斜度20°の東南東斜面および平地圃場に南南西-北北東列に植えられたトマト植物体を調査対象とした。両圃場の個葉の受光量を簡易積算日射フィルムによって実際に測定するとともに、レイトレーシング法によるシミュレーションによってそれぞれの圃場における個体群の受光量を算出して比較した。このとき、シミュレーションでは、葉を平面状の円、莖を垂直な直線とし、葉の角度および長さ、節間長などはすべての個体で同じものとした。実測による中位葉および下位葉の受光量は、平地よりも傾斜地の場合に有意に多かった。個体群最上部からの積算葉面積指数と相対受光量との関係を、指数関

数式  $y = y_0 e^{-kF}$  ( $y$ : 相対受光量,  $y_0$ : 係数,  $k$ : 吸光係数,  $F$ : 積算葉面積指数) で表したところ、傾斜地の吸光係数は平地に比べ小さかったが、信頼区間からは有意な差とはならなかった。一方、シミュレーションでは、吸光係数は平地よりも傾斜地において有意に小さかった。また、傾斜地において中下位葉の受光量が多く、吸光係数が小さい理由としては、1日のうちの特定の時間帯における中下位葉の受光量が平地よりも傾斜地において高いためであることがシミュレーションによって明らかになった。

#### Ⅶ 中山間傾斜地トマト栽培における安定出荷のための収量変動要因の解析および収量予測

ここまでに、傾斜地養液栽培システムの開発<sup>38, 39, 40</sup>、開発したシステムおよび傾斜ハウス<sup>81, 84</sup>を導入した場合のトマト生産に対する効果<sup>31, 44</sup>などについて述べた。これらの技術開発によって中山間傾斜地でもトマトの養液栽培が可能となり、果実収量は慣行の雨よけ栽培に比べて大幅に増加することが示された。

先に述べたように、西日本の多くの地域では夏季に細霧冷房やパッドアンドファンのような特別な冷房装置を使わないで施設内でトマトを作るのは困難であることから、夏秋季のトマト生産は比較的涼しい中山間傾斜地で行われることが多い。しかし、冷涼な中山間傾斜地で栽培した場合でも、トマトの収量は日によって大きく異なる。また、同一地域では生産者、施設、定植日および栽培法が異なっても、トマトの収量は同時期に増減する傾向があるといわれる。不安定な収量は、出荷価格の変動を招き、産地の信頼性の低下、労働力分配の不均衡など、多くの問題を生じる。

トマトの収量予測に関してはいくつかの報告<sup>2, 28</sup>があるが、週間収量の変動を予測するのは困難である。久枝・仁科(2007)<sup>47</sup>は、収穫の8週間前から1週間までの積算日射に基づき、大規模温室トマトの週間収量を予測できることを示した。しかし、彼らの予測は、高温や生育ステージの影響を避け、12月から5月までの冬春季のみを対象としたものである。日本の夏季のような高温期の週間収量を予測す

ることは困難であるといえる。

Bertin (1995)<sup>12)</sup> は、果実位置による同化産物の競合がトマトの着果に影響することを報告した。その中で、果房内基部側の果実は末端の果実に比べて果房位置の影響を強く受け、果房内末端の花は果房内と他の果房との両方の競合にさらされることが示された。そして、これらの競合が着果不良や果実生長の遅滞を引き起こすと報告した。このようなシンク・ソースの競合が、果実収量の増減を引き起こす原因のひとつであると考えられる。

トマトの果実生育、着果負担および収量パターンに対する高温の影響に関して、いくつか報告されている。De Koning (1989)<sup>16)</sup> は、同じ温度条件で栽培したトマトの植物体に対して開花初期から8週間のみ異なる温度条件を与え、その後は元の温度条件に戻したところ、高温によって栄養生長の代わりに果実の生長が促進することを示した。また、高温による果実への同化産物の分配の増加は、葉の生育を抑制するだけでなく、落花やその後の果実生育の遅延にも影響することを示した。Adams・Valdes (2002)<sup>3)</sup> は、高温条件を1週間与えると、トマトの収量はその週内にいったん上昇するが、その後、低下し、最終的な積算収量には影響がないことを示した。これらの報告は、トマトの果実生育や成熟からみた収量変動に対する温度の影響を示したものである。

一方、トマトの高温による花粉の放出量や稔性の低下によって、着花・着果不良が引き起こされることが報告されている<sup>18, 97, 105, 106, 115)</sup>。また、遮光によっても着花・着果不良が生じ<sup>19)</sup>、Cockshull et al. (1992)<sup>14)</sup> および Wada et al. (2006)<sup>125)</sup> は、強遮光による低光強度によって着果数が減少することを報告している。着花・着果不良は果実数に大きな影響を与えることから、収量変動への影響は大きいものと考えられる。

ここでは、中山間傾斜地の夏秋トマト栽培で問題となる収量変動を回避して、安定出荷を行うため、まず、栽培時期の収量変動への影響を調査し、次に夏季高温期のトマトの週間収量の変動と生育ステージ毎の環境データとの関係について解析した。また、それによって明らかになった環境要因と週間収量との関係をもとに週間収量の予測を試み、検証を行った。

## 1 傾斜地養液栽培トマトの週間収量に及ぼす栽培時期の影響

トマトの収量変動に対する栽培時期の影響を調査するため、実験温室において異なる季節に3回の栽培実験を行い、着果および収量の変動にみられる影響を調査した。

### 1) 材料および方法

実験は近畿中国四国農業研究センター内の傾斜ハウスで行った。傾斜地養液栽培システムを用いて、異なる季節に計3回のトマト栽培実験を行った。

2003年1月27日に85個体（‘桃太郎ファイト’）、同年3月3日に41個体（‘桃太郎8’）、同年7月15日に10個体（‘桃太郎ファイト’）および13個体（‘優美’、丸種、京都）のトマト植物体をそれぞれ定植した。栽植密度はすべての時期において3.3個体  $m^{-2}$  とした。1月および3月に定植した植物体は第6果房上で摘心し、第1果房から第6果房まで収穫した。7月に定植した植物体については第10果房上で摘心し、第1果房から第9果房まで収穫した。培養液には園試処方50%濃度液（8mM  $NO_3^-$ 、4mM  $K^+$ 、4mM  $Ca^{2+}$ 、2mM  $Mg^{2+}$ 、0.7mM  $H_2PO_4^-$ 、3mg  $L^{-1}$  Fe、0.05mg  $L^{-1}$  Mn、0.5mg  $L^{-1}$  B、0.05mg  $L^{-1}$  Zn、0.02mg  $L^{-1}$  Cu、0.01mg  $L^{-1}$  Mo)<sup>50)</sup> を用いた。ハウスでは自然換気を行い、最低気温が15℃以下とならないように加温した。着花促進のために4-クロロフェノキシ酢酸（4-CPA）15mg  $L^{-1}$  を各花房の第2花および第5花開花時に散布し、この処理日を開花日とみなした。

各実験とも、収穫したすべての果実ひとつずつの新鮮重を測定した。屋外日射、ハウス内の気温、日射および光合成有効放射の計測は、5分毎に温室コンピュータ（GM02、ESD（現 山武）、東京）および付属のセンサによって行った。

### 2) 結果および考察

第20表は果房毎の果実収量、果実数および1果重を示す。1月および3月定植の植物体の場合、果実収量および果実数は上位果房になるほど減少し、1果重には果房位置による影響はみられなかった。したがって、果実収量の変化は、主に果実数の変化によるものであるといえる。7月定植の植物体では、

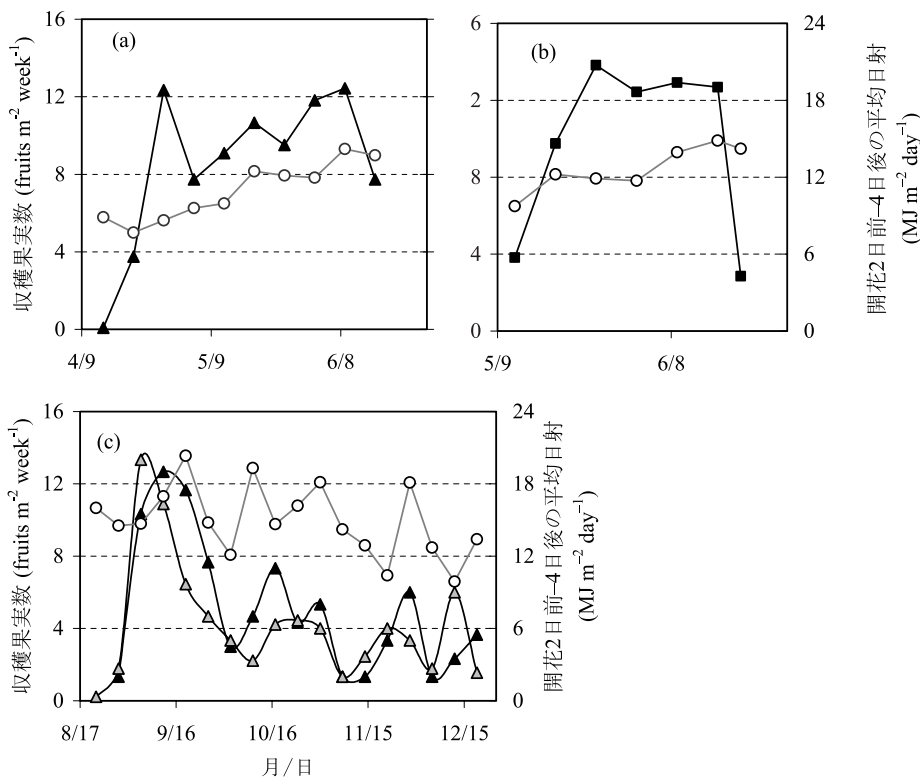
果房あたりの収量，果実数および1果重は他の時期に比べて少なかった。このことより，7月定植の植物体は7～8月の高温（平均気温23～30℃）によって生育が抑制されていたものと考えられる。7月定植の植物体では，‘優美’の第1果房を除き，第1果房から第4果房にかけて収量は減少し，第5果房から第7果房にかけて増加した後，再び減少してい

た。果実数についても，‘優美’の第1果房を除き，第1果房から第3果房にかけて減少し，‘桃太郎ファイト’では第4果房から第6果房にかけ，‘優美’では第4果房から第7果房にかけて増加した後，再び減少していた。本実験では花房あたりの開花数は調査していないが，果実数の変化は主に着果数および着果率の変化によるものと考えられる。また，7

第20表 果房毎の平均果実収量，果実数および1果重

	果実収量 (g truss <sup>-1</sup> )				果実数 (fruits truss <sup>-1</sup> )				1果重 (g fruit <sup>-1</sup> )			
	1/27 <sup>1)</sup>		3/3		1/27		3/3		1/27	3/3	7/15	
	M.F. <sup>2)</sup>	M.8	M.F.	優美	M.F.	M.8	M.F.	優美	M.F.	M.8	M.F.	優美
第1果房	1236	1231	624	298	6.6	5.8	4.5	3.2	187	213	139	92
第2果房	983	1016	623	503	5.5	4.6	4.2	4.5	178	219	148	123
第3果房	719	752	397	473	4.2	3.5	2.6	2.5	172	217	153	170
第4果房	671	709	308	318	3.4	3.2	2.8	2.4	196	218	110	140
第5果房	604	607	353	344	3.4	3.2	3.1	2.7	178	191	114	125
第6果房	523	364	365	400	3.1	2.1	3.2	2.8	171	174	114	144
第7果房	- <sup>3)</sup>	-	448	559	-	-	3.0	3.5	-	-	154	153
第8果房	-	-	325	229	-	-	1.7	1.6	-	-	191	161
第9果房	-	-	231	224	-	-	1.2	1.5	-	-	193	133

- 1) 定植日 (月/日)。
- 2) M.F.: 桃太郎ファイト, M.8: 桃太郎8。
- 3) 第6果房1葉上で摘心。



第32図 開花2日前から4日後までの平均日射および週間収穫果実数の推移  
 2003年1月27日定植 (a) ; 2003年3月13日定植 (b) ; 2003年7月15日 (c)。  
 週間収穫果実数 ‘桃太郎8’: ▲, ‘桃太郎ファイト’: ■, ‘優美’: ▲, 平均日射: ○。

月定植における1果重は、第1果房から第3果房にかけて増加し、その後、第5果房にかけ減少し、第5果房から第8果房にかけて、再び増加していた。7月定植の‘桃太郎ファイト’および‘優美’における収量と収穫果実数との間には正の相関関係がみられた ( $r = 0.89$ および $0.76$ ,  $P < 0.01$ および $P = 0.016$ )。したがって、7月定植における果房あたり果実収量の変化は、1果重の変化の影響も受けているが、主に果実数の変化によるものといえる。

第32図は、週毎の収穫果実数とその果実の開花2日前から開花4日後までの7日間の平均日射を示す。1月定植および7月定植の植物体では、週毎の収穫果実数には大きな増減がみられた。3月定植の場合、収穫期間の最初と最後を除き、週毎の果実数の増減はみられなかった。果房の出現速度はほぼ一定であったことから、収穫果実数の増減は第20表に示したように果房あたりの果実数、すなわち、着果数によるものと考えられる。1月定植および3月定植の場合、開花2日前から4日後の平均日射には大きな変動はみられなかった。一方、7月定植の場合、開花2日前から4日後の日射の増減と週間収穫果実数の増減とは、しばしば一致した。なお、週間収量についても果実数とほぼ同様な増減パターンを示した。

## 2 傾斜地トマトの週間収量変動に及ぼす開花前の日射の影響

夏秋トマトの収量変動と環境要因との関係を明らかにするため、2戸の生産者ハウスにおいて開花および収穫前の日射および気温を調査した。また、これらの関係に基づいて収量変動の予測を行い、新たなデータを用いて検証した。

### 1) 材料および方法

#### (1) 週間収量変動に及ぼす開花前後および収穫前の環境条件の影響

実験は徳島県東みよし町の2戸のトマト生産者が所有する傾斜ハウスにおいて行った。生産者AおよびBのハウスは、傾斜度 $20^\circ$ の東南東斜面および傾斜度 $4^\circ$ の北斜面にそれぞれ建設されており、標高はそれぞれ355mおよび330mで、ハウス床面積はそれぞれ440 $m^2$ および284 $m^2$ であった。

トマト品種‘桃太郎8’を用い、ハウスAでは2005年4月26日に1004個体、ハウスBでは同年5月4日に725個体を、それぞれ定植した。ハウスAおよびBにおける栽植密度は、それぞれ2.28および2.56 個体  $m^{-2}$ とした。ハウスAでは、傾斜地養液栽培システムを改造した養液土耕システム<sup>39)</sup>によって栽培を行った。ハウスBでは傾斜地養液栽培システムを用い、培地にはポリエチレンバッグ (30×90cm) に樹皮を詰めて用いた<sup>43)</sup>。両ハウスともに、大塚 SA 処方50%濃度液 (大塚化学, 大阪) を、電気伝導度を  $1.2 \sim 2.5 dS m^{-1}$  に調整して用いた。培養液組成は、8.8mM  $NO_3^-$ , 5.1mM  $K^+$ , 4.1mM  $Ca^{2+}$ , 1.5mM  $Mg^{2+}$ , 0.7mM  $H_2PO_4^-$ , 3mg  $L^{-1}$  Fe, 0.05mg  $L^{-1}$  Mn, 0.5mg  $L^{-1}$  B, 0.05mg  $L^{-1}$  Zn, 0.02mg  $L^{-1}$  Cu および 0.01mg  $L^{-1}$  Mo とした。培養液供給は、両ハウスともにタイムスイッチによって制御し、ハウスBでは、1日の総給液量に占める排液の割合 (排液率) が20–30% となるように調節した<sup>43)</sup>。2005年10月上旬、両ハウスの植物体を第15–17果房上で摘心した。両ハウスともに自然換気を行い、加温は行わなかった。また、害虫の侵入防止のために0.6mm目合いの防虫ネットをハウスサイドに設置し、ハウス内ではオンシツコナジラミ抑制のためにピリプロキシフェンテープ (ラノーテープ, 住友化学, 東京) を用いた。着果促進のため、第1–3花房には4-CPA, 15mg  $L^{-1}$  を散布し、第4–16花房にはセイヨウマルハナバチを受粉昆虫として用いた。両ハウスともに2005年7月上旬より果実の収穫を開始し、同年12月初旬、第14–16果房まで収穫を行った。

週1回の頻度で、花房出現数、開花数および果房あたりの収穫果実数について、ハウスAおよびBにおいて、それぞれ、10個体および45個体ずつ記録した。また、収穫毎にハウス全体の収量および収穫果実数について測定した。ただし、ハウスBについては、収穫果実数は記録しなかった。気温、屋内外日射および光合成有効放射などの環境データは、両ハウスともに、それぞれ、熱電対、放射熱センサ (LI-200SB, Li-Cor, Lincoln, USA) および光量子センサ (LI-190SB, Li-Cor) によって測定し、1分毎にデータロガー (DX112, 横河電機, 東京) で記録した。



週間収量 ( $Y$ ) および収穫果実数 ( $Nf$ ) と開花前後の日射 ( $Sr$ ) および気温 ( $Tm$ ), 収穫前の気温との相関関係を調査した。このとき,  $Y$ ,  $Nf$ ,  $Sr$  および  $Tm$  は季節的トレンドを持ち,  $Y$  および  $Nf$  の季節的トレンドは, しばしば,  $Sr$  および  $Tm$  の季節的トレンドと同様な傾向を示す場合がある。このため, これらの間の相関関係を調べる際, 季節的トレンドの影響を取り除くために以下のように解析した。まず,  $Y$ ,  $Nf$ ,  $Sr$  および  $Tm$  について, それぞれ, 5週間 (2週前~2週後) の移動平均を求め,  $Y_{MA}$ ,  $Nf_{MA}$ ,  $Sr_{MA}$  および  $Tm_{MA}$  とした。次にこれら移動平均に対するそれぞれの値の変動率, すなわち  $Y/Y_{MA}$ ,  $Nf/Nf_{MA}$ ,  $Sr/Sr_{MA}$  および  $Tm/Tm_{MA}$  を求め, 変動率同士の相関関係を調査した。

## (2) 週間収量および収穫果実数の予測

環境データと収量および収穫果実数との相関関係より得られた回帰式をもとに, 収量および収穫果実数の変動の予測を試みた。予測の検証には2004年のハウスCにおけるデータを用いた。ハウスCは, 同一地域において, 標高310m, 傾斜度 $6^\circ$ の東斜面に建設されており, ハウス床面積は495 $m^2$ であった。1090個体の植物体を2004年4月23日および5月4日に栽植密度2.20 個体  $m^{-2}$  で定植し, 品種, 作物管理などについては2005年のハウスBと同様であった。環境データは, 温室サポートシステム (四国計測, 香川) によって計測し, 10分毎に記録した。収穫毎にハウス全体の収量および収穫果実数を求めた。

## 2) 結果および考察

### (1) 週間収量変動に及ぼす開花前後および収穫前の環境条件の影響

第33図は, 実験期間中の屋外日射および両ハウスの日平均気温の推移を示す。日平均気温は5月下旬には $20\sim 25^\circ C$ であり, 8月初旬にかけて約 $30^\circ C$ まで上昇した後, 徐々に低下した。屋外日射は, 非常に大きく変動しており, 特に5月から7月にかけては,  $25MJ m^{-2} day^{-1}$  以上となる日もあれば,  $5MJ m^{-2} day^{-1}$  以下となる日もみられた。なお, 両ハウスともに日最高気温は5月よりほとんどの日で $30^\circ C$ 以上であり, 7月から9月にかけてしばしば $40^\circ C$ に達し,

日最低気温は, 7月から9月では, ほとんどの日において $20^\circ C$ 以上であった。

両ハウスともに5月中旬より開花が始まった。花房数はほぼ一定の速度で増加し, 9月下旬には第15花房が開花した。また, 両ハウスともに7月上旬より収穫が始まった。収穫果房は9月中旬まではほぼ一定の速度で上昇したが, その後, 上昇速度は鈍化した。開花から収穫までの日数は, 5月下旬開花の場合, 約40日であり, 9月初旬開花の場合, 約70~80日であった (第34図)。

ハウスAにおける週間収穫果実数と収量との間には極めて高い相関関係がみられ (ハウスBでは収穫果実数は未記録), 相関係数は0.95であった ( $P < 0.001$ )。したがって, 週間収量の変化は主に収穫果実数の変化によるものであるといえる。また, 週間収穫果実数の増減は, VII-1で示したように主に着果数の増減によるものであると考えられる。

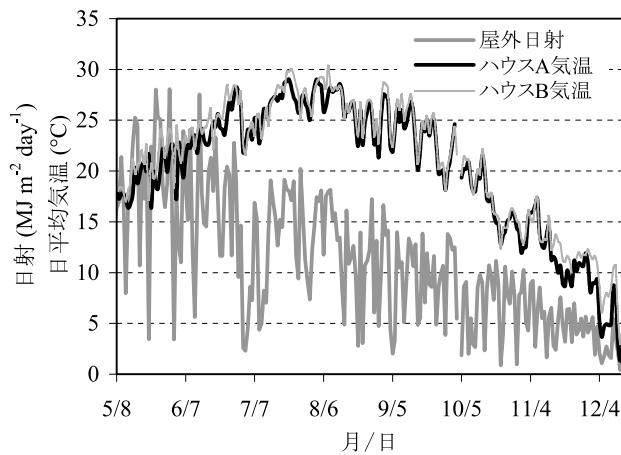
第35図は, 週間収量, 週間収穫果実数および開花10-4日前の平均日射の推移を示す。なお, 開花10-4日前の日射は, 週間収量として示された果実の開花日を起点として, 10日さかのぼった日から1週間の平均日射を示す。例えば, 8月20~26日の1週間に収穫した果実が7月9~15日の1週間に開花したものであれば, その10-4日前の7日間, つまり, 6月29日~7月5日の平均日射が, 開花10-4日前の日射となる。週間収量は, 両ハウスにおいて7月から10月にかけて大きく増減しており, 多い場合には  $1.0kg m^{-2} week^{-1}$  以上となり, 少ない場合には  $0.6kg m^{-2} week^{-1}$  以下となった。また, 両ハウスにおいて週間収量の一時的低下が同時期にみられた (8月上旬, 8月中下旬および9月中下旬)。週間収穫果実数は, 収量と同様な増減を示した。週間収量の増減と開花10-4日前の日射の増減は多くの場合, ほぼ同時にみられた。

第21表は, 開花の何日前あるいは何日後の日射が, 週間収量および週間収穫果実数の変動と相関が高いかを示したものである。なお, ここでの日射は, 開花14日前から開花4日後までの期間内で, 連続した7日間の平均を求めたものである。また, 収穫第1週目は, 週の途中から収穫が始まっているので, 相関関係の解析には用いなかった。両ハウスともに週間収量および週間収穫果実数の変動率 ( $Y/Y_{MA}$  お

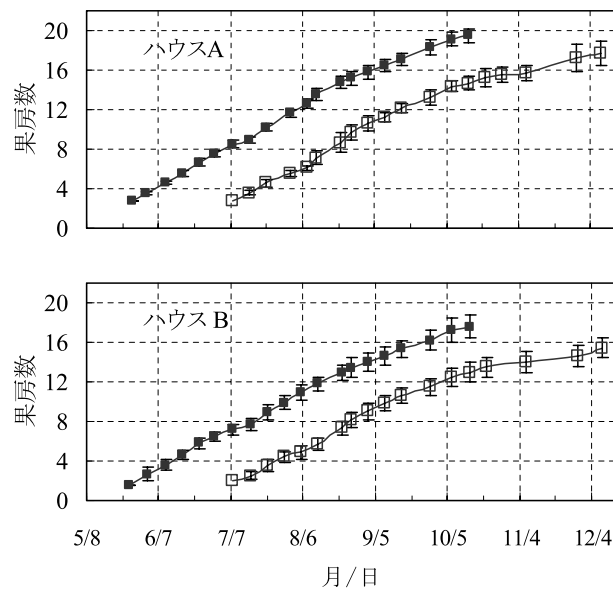
よび  $Nf/Nf_{MA}$ ) と開花12日前から0日前までの範囲における7日間の平均日射の変動率 ( $Sr/Sr_{MA}$ ) との間には、ハウスAの開花6-0日前の  $Y/Y_{MA}$  を除き、有意な正の相関関係がみられた。このうち、週間収穫果実数の変動率との相関が最も高かったのは、開花10-4日前の日射の変動率であった ( $r = 0.65, P < 0.001$ )。したがって、この時期の日射が着果数および果実数の決定に対して影響が大きいと考えられる。また、先に述べたように週間収量は主に収穫果実数によって決まることから、この時期の

日射が収量の決定に対しても重要であるといえる。週間収量の変動率と日射の変動率で最も相関が高かったのはハウスAおよびBともに開花10-4日前であった ( $r = 0.59$ および $0.63, P < 0.01$ )。

開花10日前~2日後における7日間の平均気温の変動率 ( $Tm/Tm_{MA}$ ) と、週間収量および週間収穫果実数の変動率との間にも、ハウスAの開花6日前~2日後の  $Y/Y_{MA}$  を除き、日射の場合と同様に有意な正の相関関係がみられた ( $r = 0.46 - 0.63, P = 0.03 - < 0.001$ )。これは、気温の変動率と日射

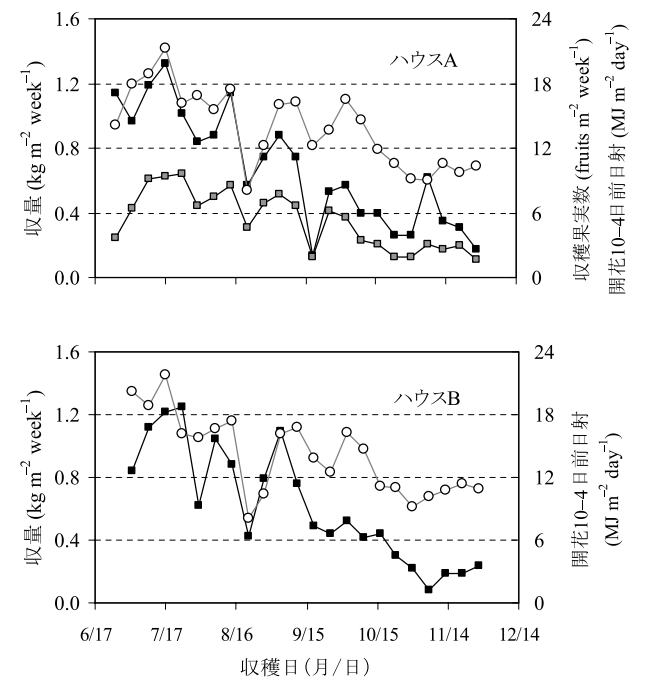


第33図 実験期間中の屋外日射，ハウスAおよびB内の日平均気温の推移 (2005年)



第34図 ハウスAおよびBにおける各果房の開花日および収穫日 (2005年)

エラーバーは標準偏差 (n=10 (ハウスA), 45 (ハウスB)) を示す。



第35図 週間収量 (■), 週間収穫果実数 (■) および開花10-4日前の日射 (○) の推移 (2005年)

第21表 開花前後の日射の変動率 ( $Sr/Sr_{MA}$ ) とトマトの週間収量および収穫果実数の変動率 ( $Y/Y_{MA}$  および  $Nf/Nf_{MA}$ ) との相関関係

期間	各期間の $Sr/Sr_{MA}$ と各項目との相関係数 <sup>1)</sup>			
	$Y/Y_{MA}$		$Nf/Nf_{MA}$	
	ハウスA	ハウスB	ハウスA	ハウスB
開花14-8日前	0.23	0.29	0.20	- <sup>2)</sup>
開花12-6日前	0.49 *	0.47 *	0.42 *	-
開花10-4日前	0.59 **	0.63 **	0.65 ***	-
開花8-2日前	0.52 *	0.54 **	0.60 **	-
開花6-0日前	0.40	0.43 *	0.48 *	-
開花4日前-2日後	0.17	0.14	0.33	-
開花2日前-4日後	-0.26	-0.09	-0.14	-

1) ピアソン相関係数。ただし、収穫第1週は除外。\*, \*\*および\*\*\*は、それぞれ0.05, 0.01および0.001レベルで有意。

2) 測定なし。

第22表 開花前後の平均気温の変動率 ( $T_m/T_{mMA}$ ) と トマトの週間収量および収穫果実数の変動率 ( $Y/Y_{MA}$  および  $Nf/Nf_{MA}$ ) との相関関係

期間	各期間の $T_m/T_{mMA}$ と各項目との相関係数 <sup>1)</sup>			
	$Y/Y_{MA}$		$Nf/Nf_{MA}$	
	ハウスA	ハウスB	ハウスA	ハウスB
開花14-8日前	0.04	0.16	0.12	- <sup>2)</sup>
開花12-6日前	0.35	0.18	0.21	-
開花10-4日前	0.52 *	0.47 **	0.53 **	-
開花8-2日前	0.48 *	0.59 **	0.63 **	-
開花6-0日前	0.27	0.62 *	0.52 *	-
開花4日前-2日後	0.18	0.46 *	0.52 *	-
開花2日前-4日後	0.08	0.21	0.41	-
収穫21-15日前	0.31	0.00	0.21	-
収穫14-8日前	0.05	0.28	0.11	-
収穫7-1日前	0.27	0.23	0.14	-

1) ピアソン相関係数。ただし、収穫第1週は除外。\*、\*\*および\*\*\*は、それぞれ0.05, 0.01および0.001レベルで有意。  
2) 測定なし。

の変動率との間に強い相関があるためであると考えられる ( $r = 0.71 - 0.83$ ,  $P < 0.01 - 0.001$ )。収穫3~0週前における7日間の平均気温の変動率と週間収量および週間果実数の変動率との間には、有意な相関関係はみられなかった (第22表)。

(2) 週間収穫果実数および週間収量の予測

週間収穫果実数および週間収量を予測するため、両ハウスにおける  $Nf/Nf_{MA}$  および  $Y/Y_{MA}$  と開花10-4日前の  $Sr/Sr_{MA}$  との相関関係から、次の一次回帰式が得られた。

$$Nf/Nf_{MA} = 1.182 Sr/Sr_{MA} - 0.193 (r^2 = 0.42)$$

および

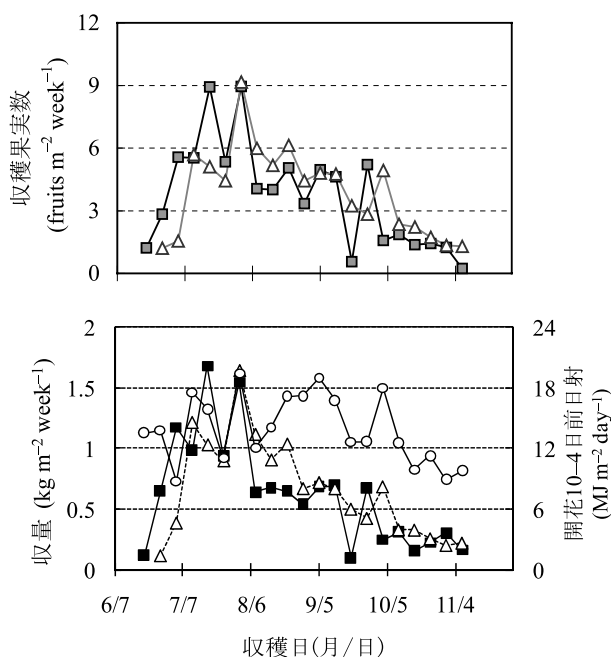
$$Y/Y_{MA} = 1.082 Sr/Sr_{MA} - 0.083 (r^2 = 0.36) \quad (4)$$

予想週間収穫果実数 ( $Nf_p$ ) および予想週間収量 ( $Y_p$ ) は、それぞれ、概算果実数 ( $Nf'$ ) と  $Nf/Nf_{MA}$  および概算収量 ( $Y'$ ) と  $Y/Y_{MA}$  との積とした。

$$Nf_p = (1.182 Sr/Sr_{MA} - 0.193) Nf' \quad \text{および}$$

$$Y_p = (1.082 Sr/Sr_{MA} - 0.083) Y' \quad (5)$$

ハウスCの2004年におけるデータを用い、式(5)に基づいて予測した収穫果実数および収量と、実測値とを比較したものが第36図である。予想果実数および収量は、実測値としばしば同時期に増減を示した。なお、このとき、概算果実数 ( $Nf$ ) および収量



第36図 式(5)によって予測した週間収穫果実数 ( $\Delta$ +灰色実線) および週間収量 ( $\Delta$ +破線) と 実際 (2004年) の週間収穫果実数 (■), 週間収量 (■) および開花10-4日前の日射 (○)

( $Y'$ ) には、それぞれの3-1週前の平均値を用い、 $Nf'$  および  $Y'$  と収穫果実数および収量の実測値との間には  $r = 0.63$  および  $0.67$  (ともに  $P < 0.01$ ) の正の相関関係がみられた。これに対して、式(5)に基づいて予測した果実数および収量と実測値との間にはより強い相関関係がみられた ( $r = 0.77$  および  $0.88$ , ともに  $P < 0.001$ )。果実数および収量における回帰式の傾きから (傾き =  $0.99$  および  $0.91$ )、予想果実数および収量は実測値よりも、それぞれ1%および9%過少に予測されたといえる。

3 総合考察

週間収穫果実数および週間収量の変動は、開花前の日射の変動と相関関係を示した。Cockshull et al. (1992)<sup>14)</sup> および Wada et al. (2006)<sup>125)</sup> は強遮光による低光強度はトマトの着果数を減少させることを報告した。また、藤井ら (1941)<sup>19)</sup> は、50%遮光条件で栽培したトマトの花粉を、100%光条件のトマトに与えた場合、着果率は低下するが、100%光条件で栽培したトマトの花粉を50%遮光条件のトマトに与えた場合、着果率は低下しないことを報告した。これは遮光によって花粉の活性が低下することを意

味し、この花粉活性の低下は、光の直接的な影響というよりも光合成産物の低下によるものと推測できる。しかし、Ⅶ-1では着果促進剤(4-CPA)を用いたのにもかかわらず、夏秋季栽培における果実数の増減は開花前の日射と同様に推移した(第32図)。したがって、開花前の日射は、花粉活性だけでなく、着果数に関連する他の要因にも影響を与えるものと推測できる。

De Koning (1989)<sup>16)</sup>は、高温条件では栄養生長よりも果実生長が優先することを示した。また、Bertin (1995)<sup>12)</sup>は、同化産物の競合が着果率に影響することを報告した。これらはシンク強度が着果率に影響することを示す。今回の実験は、夏秋季の高温条件で行ったものであり、他の時期に比べて栄養生長よりも果実生長が優先すると考えられる。このとき植物体は、果房出現速度が高いためにたくさんの果実をつけており、また、果実生育速度も速いことから、シンク強度は常に高い状態であったと考えられる(第34図)。一方、日射は激しく変動しており(第33図)、これに伴ってソース強度も激しく変動したと考えられる。日射の急激な減少は、一時的に光合成生産、すなわち、ソース強度を低下させる。このため、シンク・ソース比は急激に上昇し、その結果、着果率が低下したものと考えられる。開花数日前は着果において最も感受性の高い時期であり、この時期のソース強度、すなわち、日射が収穫果実数の決定に大きな影響を及ぼしたと考えられる。

Adams (2002)<sup>2)</sup>は、果実の成熟ステージと温度との関係より、トマトの週間収量が増減することを報告した。また、Adams・Valdes (2002)<sup>3)</sup>は、収穫直前の高温は、成熟終期の果実成熟を促進させるため、一時的に収穫果実数は増加するが、その後、収穫果実数は低下し、最終的な合計収量には影響しないことを報告した。しかし、本実験では、収穫3~0週前の7日間の気温の変動率と果実数および収量の変動率との間には有意な相関関係はみられず、上記の報告のような温度の影響は確認することができなかった。

トマトの開花数日前は、花粉の減数分裂期にあたり、最も感受性の高い時期であることが報告されている<sup>58)</sup>。また、開花前の数日間における高温が着果

数に影響することについていくつか報告されている<sup>18, 97, 105, 106, 115)</sup>。これらの報告に基づけば、開花前の温度と果実数との間には負の相関傾向がみられるものと推測される。しかし、本実験では、開花前の気温の変動率と果実数および収量の変動率との間には、負の相関関係はみられなかった。果実数および収量の変動率は、日射の場合と同様に開花前の気温の変動率と有意な正の相関を示した。これは、気温は日射に強い相関があるためであると考えられる。

開花数日前の日射の変動は着果数に影響を与えることから、この影響が収穫果実数にもあらわれると考えられる。そこで、Ⅶ-2では、開花10-4日前の日射の変動に基づいて週間収穫果実数および週間収量の予測を試みた。このとき、予測に用いた概算果実数および収量は、収穫3-1週前のそれぞれの平均値を用いた。開花前の日射の変動と概算果実数および収量との積による予測は、概算値自身と実測値を比較した場合に比べて、予測精度を $r = 0.63$ および $0.67$  ( $P < 0.01$ ) から $r = 0.77$ および $0.80$  ( $P < 0.001$ ) に向上させた。予想果実数および収量と実際のデータとを比べると、ほぼ同様な時期に増減を示した(第36図)。したがって、開花前の日射による予測は、収穫果実数および収量の増減時期を予測するのに利用できる。また、この開花前の日射の変動に基づいた予測では、概算の果実数および収量を乾物ベースモデルや時系列モデルなどでより正確に予測すれば、さらに予測精度が向上するものと考えられる。

以上の結果より、夏秋トマトの週間収量の変動は、主に週間収穫果実数の変動によって生じており、週間収穫果実数の変動は、開花12~0日前の日射の変動と相関関係があることが明らかになった。このため、開花10-4日前の日射の変動に基づいて、週間収穫果実数および週間収量の予測が可能となった。そこで新たなデータによって、この予測式の検証を行ったところ、予測値は実際の値に有意に一致し、実測値とほぼ同時期に増減することが検証された。

#### 4 摘 要

中山間傾斜地における夏秋トマトの安定出荷のため、収量変動に対する開花前後の日射および収穫前

の気温の影響を調査した。週間収量の変動は、主に収穫果実数の変動によるものであった。果実数および収量の変動は、冬春季に行った短期間の実験ではみられなかった。2戸の生産者ハウスにおける夏秋季の実験では、週間収穫果実数および週間収量の変動率と開花12～0日前における7日間の平均日射の変動率との間には有意な正の相関関係がみられた。週間収穫果実数および週間収量の変動と収穫3～0週前の7日間の平均気温の変動との間には有意な相関関係はみられなかった。これらの結果より、開花10～4前の日射の変動に基づいて、週間収穫果実数および週間収量を予測した。新たなデータによって予測の検証を行ったところ、予想収穫果実数および週間収量と実測値との間には有意な相関関係がみられ ( $r = 0.77$ および $0.80$ )、予測値および実測値はほぼ同時期に増減を示した。

## Ⅷ 総 括

四国の中山間地域では傾斜地が多く、夏季の冷涼な気候を利用した夏秋トマト栽培などが行われている。傾斜地における施設生産を可能とする目的で傾斜ハウスが開発され、現地での導入が始まっているが、作付けの前の土揚げ作業や連作による土壤伝染性病害など大きな問題が残されている。これらの問題解決のためには養液栽培の導入が考えられるが、傾斜地用の養液栽培システムはこれまでに開発されておらず、平地用のシステムをそのまま利用した場合、様々な問題が生じると考えられる。そこで、本研究では、Ⅱにおいて、傾斜地で養液栽培を行う場合の問題点やその対策を検討し、傾斜地条件を利用した低コストで環境保全的な傾斜地養液栽培システムを開発した。Ⅲでは、養液栽培における精密な給液制御のために微量な排水の計測手法を開発し、生体情報に基づいた給液制御法を検討した。Ⅳでは、傾斜地のトマト養液栽培に適する培地の選定と生産者の導入しやすい給液制御法を検討した。Ⅴでは、中山間傾斜地のトマト生産に対して、開発したシステムおよび技術を導入した際の効果を調査するとともに夏秋トマトと組み合わせる作目についてブルーベリーの促成栽培を検討した。Ⅵでは、傾斜地トマト栽培における生産特性を明らかにするため、収量

に関わる重要な要素のひとつである受光態勢に対する傾斜地の影響を検討した。Ⅶでは、中山間傾斜地におけるトマトの安定生産のため、収量と生育ステージ毎の環境データとの関係から、収量変動の要因を調査し、予測が難しいとされる夏秋トマトの週間収量の予測を試みた。以下に得られた結果について概括する。

Ⅱでは、傾斜地における給液の問題点を明らかにするため、まず、圧力補正機能付の点滴チューブを傾斜圃場において等高線方向に配置したところ、給液中の定常状態における吐出速度には位置的な差異はみられなかったが、給液停止後チューブ内の水が低い位置から吐出した。そこで、一定水压以下になると吐出が停止する点滴器具を用い、チューブ間の高低差に起因するチューブ内水压の差が停止圧以内になるように配管を逆止弁で分割したところ、給液停止後の吐出はほとんどなくなった。また、傾斜地に等高線方向にロックウールベッドを配置し、原水压で培養液を給液する傾斜地養液栽培システムを試作してトマトを栽培したところ、位置的に高いベッドよりも低いベッドにおいて果実収量が多かった。これは原水压の不足による給液量の差異によるものと考えられたため、同装置で原水压を十分な高さに設定してトマトを栽培したところ、位置的な収量の差はみられなかった。この傾斜地養液栽培システムを改良し、圃場の傾斜によって排水を回収し、アスピレーターにより無動力で再混入させる閉鎖システムを作成し、約7か月間トマトを栽培したところ、10aあたり12.8tの収量が得られた。

Ⅲでは、養液栽培において植物の生体情報を給液制御にフィードバックして精密な給液を行うため、微量な排水を連続的に測定する手法を開発した。転倒マス式の排水補助具を電子天秤の上に設置し、重量を連続測定することにより、微小な排水速度の連続測定が可能となった。これにより、実際の栽培状態にある作物の水分吸収について、連続的な算出が可能となった。そこでキュウリの噴霧耕において、作物の水分吸収に基づいた給液制御を検討した。新しい給液方式として、その時点の日射を前日における日射と吸水量との1次回帰式に代入して給液制御を行う方法を検討し、従来の日射比例による方式と比較した。吸水量は、生育前半には日射比例方式よ

りも新方式の方が多かったが、生育後半には両方式で同程度であった。果実収量は、新方式の方が日射比例方式よりも有意に多かった。

Ⅳでは、傾斜地養液栽培システムによって夏秋トマトの養液栽培を行う際の培地として、中山間地に豊富にある樹皮培地に着目した。同システムの導入施設において、多種バークおよびスギ・ヒノキ皮の2種類の樹皮培地およびロックウールを用いたトマト栽培実験を行い、収量などを比較した。合計3作の栽培実験の結果、これらの2種類の樹皮培地を用いた場合の収量は、ロックウールを用いた場合とほぼ同等であり、本システムの培地としてこれらの樹皮培地は十分に利用可能であることが明らかになった。このとき、多種バーク培地は実験地の近くで生産され、価格も最も安いことから、この地区における培地として最も適しているものと判断された。また、この多種バークを培地とした夏秋トマト栽培において、タイマーのみによる給液制御と積算日射が一定に達すると自動給液を行う日射比例制御とを比較した結果、タイマーのみによる安価な給液制御方式でも日射センサを用いた日射比例制御と同等な排液率およびトマト収量を得ることができた。タイマー制御は、日射比例制御よりも低コストで操作が容易であることから、傾斜地養液栽培システムの対象である中山間地の小規模農家にとって適していると考えられた。ただし、タイマー制御では作物のステージや天候による給液量や頻度の違いをあらかじめ把握して設定を変更していく必要がある。このため、日射と作物の吸水量の関係および生産者による天候判定を利用し、対象地域の作型や気象条件に応じた給液設定例を作成した。

Ⅴでは、傾斜ハウスおよび開発した養液供給システムを、徳島県東みよし町K地区（標高300～600m、傾斜度4～25°）、山腹型傾斜畑地域の3戸のトマト生産者に導入し、トマト栽培に関する効果を検討した。傾斜ハウスの資材費は10aあたり300万円程度、養液供給システムの資材費は10aあたり50万円であり、養液栽培を行う場合はさらに66万円程度必要であった。2002～2005年に傾斜ハウスおよび養液供給システムを利用した栽培（ハウス養液栽培）と慣行の簡易雨よけ栽培とを比較したところ、ハウス養液栽培では、慣行雨よけ栽培では設置が困難な防虫ネ

ットおよび非散布型製剤の利用により、殺虫剤の使用回数を減らすことができた。殺菌剤の使用回数は、ハウス養液栽培と慣行雨よけ栽培との間で明確な差はみられなかった。トマト果実の収量は、すべての生産者および栽培年において、ハウス養液栽培の方が慣行雨よけ栽培に比べて著しく多かった。雨よけ栽培では、収量が少ないだけでなく、台風や病虫害の影響を大きく受けて収量変動しやすいことが推察された。以上より、傾斜ハウスおよび養液供給システムは、安価な簡易雨よけ施設に比べると導入コストはかかるものの、収量の増加と安定生産によって農家収入も増加することから、導入効果は大きいと判断された。また、夏秋トマトと組み合わせてハウスおよび養液栽培システムを有効に利用する作目として、ブルーベリーの促成栽培を検討した。ブルーベリーは、移動できるようにコンテナに定植して養液栽培を行った。まず、コンテナ定植より10～17か月後、各品種の枯死率を調査したところ、‘Earliblue’の枯死率が最も高く、本養液栽培には‘Earliblue’は不適であると判断された。促成栽培の実験では、徳島県東みよし町の中山間傾斜地の露地圃場（標高約310m）で低温に遭遇させた後、2月上旬に隣接の加温傾斜ハウスに搬入した。促成栽培の開花は、多くの品種で2月下旬から始まり、促成を行わない場合（香川県善通寺市）に比べると35日以上も早かった。促成栽培における収穫は、多くの品種で4月下旬～5月上旬に始まり、促成を行わない場合の6月上旬に比べて35日程度早かった。促成栽培における収穫果実の出荷単価は1kgあたり平均3,389円であり、他の時期に比べて高かった。以上より、ブルーベリーのコンテナ養液促成栽培は、四国をはじめとする中山間傾斜地の施設利用の作型として有望であることが明らかになった。

Ⅵでは、中山間傾斜地域におけるトマト栽培の生産性を明らかにし、開発した技術の普及、拡大を促進するため、受光特性の面から傾斜地の利点について検討した。傾斜度20°の東南東斜面および平地圃場に南南西－北北東列に植えられたトマト植物体を調査対象とした。両圃場の個体群における個葉の受光量を簡易積算日射フィルムによって実際に測定するとともに、レイトレーシング法によるシミュレーションによって個体群の受光量を算出して比較し

た。シミュレーションでは、葉を平面状の円、莖を垂直な直線とし、葉の角度および長さ、節間長などはすべての個体で同じものとした。実測による中位葉および下位葉の受光量は、平地よりも傾斜地の場合に有意に多かった。また、傾斜地個体群群落の吸光係数は平地に比べ小さかったが、信頼区間からは有意な差とはならなかった。一方、シミュレーションでは、吸光係数は平地よりも傾斜地において有意に小さかった。また、傾斜地と平地との受光量の違いは、1日のうちの特定の時間帯における中下位葉の受光量が傾斜地において高いためであることがシミュレーションによって明らかになった。

Ⅶでは、中山間傾斜地におけるトマトの安定生産のため、夏秋トマトにおいて問題となる収量変動について開花前後の日射および収穫前の気温などの影響を調査した。その結果、週間収量は収穫果実数と非常に高い相関関係があることから、週間収量の変動は主に収穫果実数の変動によるものであることが明らかになった。また、週間収穫果実数および週間収量の変動と、開花12～0日前における7日間の平均日射の変動との間には相関関係がみられた。一方、週間収穫果実数および週間収量の変動と収穫3～0週前の7日間の平均気温の変動との間には相関関係はみられなかった。そこで開花10～4日前の日射の変動に基づいて、週間収穫果実数および週間収量の予測を行い、新たなデータを用いて検証した。その結果、予測された週間収穫果実数および週間収量は実際の果実数および収量とほぼ一致し ( $r = 0.77$  および  $0.80$ )、週間収量の増減時期の予測が可能となった。

以上のように、本研究によってⅡからⅣに示した中山間傾斜地用の養液栽培システムおよびその利用技術が開発され、土揚げ作業や土壌病害などの中山間傾斜地域における施設栽培の問題点が解決するに至った。また、開発したシステムおよび技術を実際の生産現場に導入したところ、Ⅴに示したようにトマト収量は大幅に増加し、非常に高い導入効果があることが示された。また、本研究では中山間傾斜地のトマト栽培の問題を解決するだけにとどまらず、傾斜地における作物生産性の特徴を示すため、Ⅵでは受光態勢に対する傾斜地の影響を検討し、平地よりも傾斜地の個体群において中下位葉の受光量は多

く、群落の吸光係数が小さい可能性があることを示した。さらにⅦでは、中山間傾斜地におけるトマトの安定生産のため、予測が難しい夏秋季の週間収量の変動について生育ステージと環境要因との関係から解析を行い、週間収量は主に収穫果実数によって決定しており、開花前の日射の変動と相関関係があることを明らかにした。また、これにより、開花前日射の変動に基づいて夏秋トマトの週間収量の増減時期を予測できることを示した。これらの成果は、現在の中山間傾斜地におけるトマト栽培の改善に利用できるだけでなく、将来のトマト生産の発展にも利用される重要な研究成果であると考えられる。近年、深刻な環境問題となっている地球温暖化は、トマトの生産に対しても影響し、現在の夏季のトマト産地における生産は、将来的には減退するおそれがある。この場合、比較的冷涼な中山間傾斜地がトマト生産において果たす役割はさらに大きくなると考えられ、同時に本研究の果たした意義も大きくなるものと考えられる。

## 謝 辞

本論文は、京都大学学位審査論文(平成20年11月論農博第2696号)を基に編集、加筆したものである。本研究の一部は、農研機構、地域先導技術総合研究「傾斜地特性を活用した野菜等の高付加価値生産技術体系の確立(2002～2006)」で行ったものである。本論文の一部は、園芸学研究, 4:33-40(2005), *Acta Horticulturae*, 691:243-248(2005), *Environment Control in Biology*, 42:277-286(2004), *Acta Horticulturae*, 588:39-42(2002), *Acta Horticulturae*, 761:567-571(2007), 園芸学研究, 6:91-95(2007), 園芸学研究, 5:303-308(2006), *Agricultural and Forest Meteorology*, 149:756-762(2009), *HortScience* 44:1874-1878(2009), *Japanese Journal of Plant Science*, 1:30-35(2007)において発表したものである。

本論文をとりまとめるにあたり、京都大学大学院農学研究科教授 矢澤 進博士に、終始、懇切丁寧なご指導とご校閲を賜った。心より感謝の意を表す。また、本研究の遂行にあたって、農業・食品産

業技術総合研究機構 高市益行博士, 濱本 浩博士, 伊吹俊彦氏, 角川 修氏, 笠原賢明氏, 迫田登稔博士, 木下貴文氏, 元同機構 島地英夫氏, 鹿沼隆宏氏, 島根大学生物資源科学部農業生産学科教授 青木宣明博士, ワーゲニンゲン大学 Horticultural Supply Chains group 准教授 Ep Heuvelink 博士に, 有益な示唆とご激励をいただいた。深く感謝の意を表す。実験の遂行にあたっては, 農業・食品産業技術総合研究機構 岩切浩文氏, 初山敏夫氏, 宮西克明氏, 塩本 知氏, 元同機構 太田栄一氏, 平田孝和氏にご協力いただいた。深く感謝の意を表す。実証実験では, 徳島県東みよし町のトマト生産者, 谷 操氏, 久保春好氏, 久保治氏およびそのご家族のみなさまには, 圃場をお貸しいただいた上に作物の管理および実験データ取得にもご協力いただいた。心より感謝の意を表す。

#### 引用文献

- 1) Acock, B., Charles-Edwards, D.A., Fitter, D.J., Ludwig, D.W., Warren Wilson, J. and Withers, A.C. 1978. The contribution of leaves from different levels within a tomato crop to canopy net photosynthesis: An experimental examination of two canopy models. *J. Expt. Bot.* 29: 815-827.
- 2) Adams, S.R. 2002. Predicting the weekly fluctuations in greenhouse tomato yields. *Acta Hort.* 593: 19-23.
- 3) Adams, S.R. and Valdes, V. 2002. The effect of periods of high temperature and manipulating fruit load on the pattern of tomato yields. *J. Hort. Sci. Biotech.* 77: 461-466.
- 4) Allen, L.H.Jr. 1974. Model of light penetration into a wide-row crop. *Agron. J.* 66: 41-47.
- 5) Andrieu, B., Ivanov, N. and Boissard, P. 1995. Simulation of light interception from a maize canopy model constructed by stereo plotting. *Agric. For. Meteorol.* 75: 03-119.
- 6) 安養寺久男・I-pai Wu 1985. 点滴灌漑の滴下管の設計方法に関する研究. *農土論集.* 120: 11-17.
- 7) ———・——— 1986a. 点滴灌漑の給水管路の設計方法に関する研究. *農土論集.* 121: 9-16.
- 8) ———・——— 1986b. 点滴灌漑の散布ブロック内の管路系の設計方法に関する研究. *農土論集.* 121: 17-21.
- 9) 青木宣明・植田尚文 1996. 冷蔵時期, 期間および品種の違いがブルーベリー促成鉢花の開花に及ぼす影響. *農業生産技術管理学会誌* 3: 7-12.
- 10) ———・植田尚文・浅尾俊樹・内藤 整 1995. ブルーベリーの花芽分化期と切り枝の休眠打破. *農業生産技術管理学会誌* 2: 9-14.
- 11) 朝倉利員 1998. 施設栽培された夏作, 冬作の温室メロンの蒸発散量の生育時期別変化, 日変化の特徴と蒸発散量に対する気象要因および植物要因の影響. *園学雑.* 67: 843-848.
- 12) Bertin, N. 1995. Competition for assimilates and fruit position affect fruit set in indeterminate greenhouse tomato. *Ann. Bot.* 75: 55-65.
- 13) 近乗偉夫・安部勇徹・宝満利行 1992. もみがらを培地とした低コスト養液栽培装置の開発. *大分県農技センター研報.* 22: 97-110.
- 14) Cockshull, K.E, Graves, C.J. and Cave, C.R.J. 1992. The influence of shading on yield of glasshouse tomatoes. *J. Hort. Sci.* 67: 11-24.
- 15) 大黒正道 2005. 傾斜畑用土揚げ機. *近畿中国四国地域における新技術* 4: 61-63.
- 16) De Koning, A.N.M. 1989. The effect of temperature on fruit growth and fruit growth load of tomato. *Acta Hort.* 248: 329-336.
- 17) Flenet, F., Kiniry, J.R., Board, J.E., Westgate, M.E. and Reicosky, D.C. 1996. Row spacing effects on light extinction coefficients of corn, sorghum, soybean, and sunflower. *Agron. J.* 88: 185-190.
- 18) 藤井健雄 1946. 蕃茄の落花に関する研究 (第3報). 高温が落花に及ぼす影響. *園学研集録.* 3: 12-28.
- 19) ———・齋藤博明・中村平和 1941. 蕃茄の落花に関する研究 (第1報). 光度の減少が落花



- に及ぼす影響. 農および園. 16: 6-10.
- 20) 藤原 忠・阿部博史 1973. 標高および傾斜方位の相違による気象条件の変化. 東北農試研報. 16: 3-10.
- 21) 藤原隆宏・吉岡 宏・佐藤文生 2001. エブ&フロー灌水と培養液への NaCl 添加によるセル成型育苗の省力化とキャベツ苗品質の向上. 農作業研究 36: 153-161.
- 22) 福井県農試 1997. 粉碎粕がらを利用したトマトの養液栽培. 北陸農研成果情報. 13: 120-121.
- 23) ニツ寺勉・小池法雄・羽賀 豊 1976. 冷涼地夏秋トマトの新作型設定に関する研究. 岐阜高冷地農試研報. 1: 1-63.
- 24) Gieling, T.H., Bontsema, J., Bouwmans, T. W. B.M. and Steeghs, R.H. 1997. Modelling and simulation for control of nutrient application in closed growing systems. *Neth. J. Agric. Sci.* 45: 127-142.
- 25) ———, Janssen, H.J.J., Van Straten, G. and Suurmond, M. 2000. Identification and simulated control of greenhouse closed water supply systems. *Comput. Electron. Agric.* 26: 361-374.
- 26) Goudriaan, J. 1988. The bare bones of leaf-angle distribution in radiation models for canopy photosynthesis and energy exchange. *Agric. For. Meteorol.* 43: 155-169.
- 27) 長谷部次郎 1971. 傾斜地山水かんがいにおける散水分布均等性の改善に関する研究. 東近農試研報. 22: 5-134.
- 28) Heuvelink, E. 1995. Dry matter production in a tomato crop: measurements and simulation. *Ann. Bot.* 75: 369-379.
- 29) 東出忠桐 2003. 灌水機器・装置. 施設園芸ハンドブック5訂. p. 228-236. 日本施設園芸協会. 東京.
- 30) ——— 2006. 山間の傾斜地を利用したトマトの施設生産. 野茶研集報. 3: 85-90.
- 31) ———. 2007. Soilless culture on sloping land. Invited mini-review. *Jpn. J. Plant Sci.* 1: 30-35.
- 32) ———, Shimaji, H. and Takaichi, M. 1996. Effects of diurnal control in the mineral concentration of nutrient solution on tomato yield and nutrient absorption in hydroponics. *Acta Hort.* 440: 326-331.
- 33) ———, ——— and ———. 2000. Modeling of cucumber growth using the L-system. *Acta Hort.* 519: 43-52.
- 34) ———, ——— and Hamamoto, H. 2002. Feedback control of nutrient solution supply based on flow rate of drainage in a mist culture of cucumber. *Acta Hort.* 588: 39-42.
- 35) ———・———・———・渡辺慎一・中野有加・川嶋浩樹 2003a. 養液栽培における微少排液の連続測定法とそれに基づく給液制御法. 平14野茶研成果情報. 35-36.
- 36) ———・伊吹俊彦・角川 修・笠原賢明・鹿沼隆宏・高市益行 2003b. 3D形状モデルによる植物個体群受光量解析プログラム. 著作権登録P7834号-1.
- 37) ———, Shimaji, H., Hamamoto, H. and Takaichi, M. 2004. A method to measure low drainage flow and to control nutrient solution supply in aeroponics system. *Environ. Cont. Biol.* 42: 277-286.
- 38) ———・———・——— 2005a. 排液量測定手段と該排液量測定手段を用いた養液栽培における自動給液方法と自動給液装置, 並びにこれを用いた養液栽培方法と養液栽培装置. 特許第3660986号.
- 39) ———・笠原賢明・伊吹俊彦・角川 修 2005b. 傾斜地トマト栽培のための低コスト・閉鎖系養液栽培システムの開発. 園学研. 4: 33-40.
- 40) ———, ———, ——— and ———. 2005c. Development of closed, energy-saving hydroponics for sloping land. *Acta Hort.* 691: 243-248.
- 41) ———・———・———・———・平田孝和・宮西克明 2006a. 育苗装置. 特許第3803711号.
- 42) ———・青木宣明・木下貴文・伊吹俊彦・笠原賢明 2006b. 中山間傾斜地におけるブルーベリーのコンテナ養液促成栽培の実用化. 園学研. 5: 303-308.

- 43) ———, Ibuki, T., Kasahara, Y. and Kinoshita, T. 2007a. Control of nutrient solution supply to tomato plants grown in a soilless culture system suitable for use on sloping land. *Acta Hort.* 761: 567–571.
- 44) ———・————・————・角川 修・迫田登稔・木下貴文 2007b. 傾斜ハウスおよび傾斜地対応型養液供給システムによる夏秋トマト栽培. *園学研.* 6: 91–95.
- 45) Hikosaka, K., Nagashima, H., Harada, Y. and Hirose, T. 2001. A simple quantification of interaction between individuals competing for light in a monospecific stand. *Func. Ecol.* 15: 642–646.
- 46) ———・北条雅章・丸尾 達・篠原 温・伊東正 2002. 培養液の排液率ならびに更新が有機質を培地とした循環型養液栽培キュウリの生育に及ぼす影響. *生物環境調節* 40: 187–194.
- 47) 久枝和昇・仁科弘重. 2007. 大規模トマト生産温室における生産性向上に関する研究—積算日射量に基づいたトマトの出荷量予測—. *植物環境工学* 19: 11–18.
- 48) 本條毅・庄野浩資 2001. 画像処理と三次元デジタルタイザによる葉面傾斜角の測定. *農業気象* 57: 101–106.
- 49) 本條 均・福井 糧・朝倉利員・杉浦俊彦 2005. 微気象変化による落葉果樹の新作型の開発. *農業環境工学関連7学会2005年合同大会講要.* 643.
- 50) 堀 裕 1966. 蔬菜・花卉の礫耕栽培. p. 60–80. 養賢堂 東京.
- 51) 細川卓也・小松秀雄・前田幸二・中村和洋・吉田徹志・福元康文 2006. ヤシガラ・バーク成型培地を用いた養液栽培での日射比例給液制御による長段どりトマトの高糖度果実生産 (栽培管理・作型). *園学研.* 5: 39–44.
- 52) 伊吹俊彦・角川 修・東出忠桐・笠原賢明・篠和夫 2006. 平張型傾斜ハウスの構造変更による適用性拡大. *平17近中四農研成果情報.* 177–178.
- 53) 一戸貞光・工藤健一 1956. 土壤浸食防止に関する研究 第3報 等高線栽培について. *東北農試研報.* 8: 46–54.
- 54) 猪之奥康治・角川 修・岡戸敦史・田中宏明 2003. 中山間傾斜地における土揚げ作業について (1). *農機学会関西支部報.* 93: 42–45.
- 55) 入口義春・原 英雄・西野敏勝・小島勝次郎 1995. 中山間傾斜地を活用した多日射・耐風構造ハウスの開発とガーベラの多収栽培. *長崎総農林試研報.* 22: 22–33.
- 56) 磯田昭弘・吉村登雄・石川敏雄・中村康志・野島 博・高崎康夫 1990. 簡易積算日射計フィルムによるイネ群落の受光態勢の解析. *千葉大学園芸学部学術報告* 43: 39–43.
- 57) 伊藤建次・松岡匡一・川上剛志 1953. 斜面の作付体系に関する研究 第1報 作付様式と水及び土壌の流亡との関係について. *四国農試研報.* 1: 10–17.
- 58) Iwahori, S. 1965. High temperature injuries in tomato. IV. Development of normal flower buds and morphological abnormalities of flower buds treated with high temperature. *J. Jpn. Soc. Hort. Sci.* 34: 33–41.
- 59) 岩切 敏・稲山光男 1974a. 施設園芸作物の群落光合成に関する研究 (1) キュウリ群落の幾何学的構造と受光特性. *農業気象* 30: 1–9.
- 60) ———・———— 1974b. 施設園芸作物の群落光合成に関する研究 (2) 畦栽培キュウリ群落内の日向葉面積率分布. *農業気象* 30: 17–26.
- 61) 岩崎泰永・三枝正彦 2001. 培養液の  $\text{NO}_3\text{-N}/\text{NH}_4\text{-N}$  比がやし殻繊維を培地とする循環型養液栽培における培養液組成とトマトの生育・収量に及ぼす影響. *土肥誌.* 72: 214–22.
- 62) ———・千葉佳朗 2000. 有機質資材を培地としたトマトの循環型養液栽培システムの開発. *宮城園試研報.* 12: 1–11.
- 63) Johnson, R.S. and Lakso, A.N. 1991. Approaches to modeling light interception in orchards. *HortScience* 6: 1002–1004.
- 64) Kahlen, K. 2006. 3D architectural modeling of greenhouse cucumber (*Cucumis Sativus* L.) using L-systems. *Acta Hort.* 718: 51–58.
- 65) 鴨田福也 1990. 施設栽培の技術動向. *農業技術大系果樹編* 第8巻. 共通技術. 施設栽培 p.

- 3-15. 農文協. 東京.
- 66) 笠原賢明・東出忠桐・伊吹俊彦・角川 修・平田孝和・宮西克明 2004. 養液栽培の方法. 特許公開2004-357561.
- 67) ———・———・角川 修・伊吹俊彦 2005. 養液栽培においてアスピレーターの使用により排水を再利用する方法. 土肥誌. 76: 49-52.
- 68) Kawashima, H., Nonaka, M. and Nagasaki, Y. 2000. The drip fertigation system for vegetable cultivation in sloping greenhouses. Proc. Int. Agric. Eng. Conf. 272-276.
- 69) 河内博文・大西 力・才木康義 2003. 中山間傾斜地帯における葉菜類省力周年栽培技術体系の確立. 愛媛農試研報. 37: 47-55.
- 70) 近畿中国四国農業研究センター 2002. 平張型傾斜ハウスの施工マニュアル. p.1-26. 近畿中国四国農業研究センター 福山.
- 71) ——— 2003. 周年マルチ点滴灌水同時施肥法(マルドリ方式)技術マニュアル. p.1-29. 近畿中国四国農業研究センター 福山.
- 72) 金野隆光 1990. 傾斜地(中山間地)利用農業. 農林水産技術研究ジャーナル 13: 21-31.
- 73) 蔵田憲次・岡田益己・佐瀬勘紀 1988. トマト群落の畝方位と直達光受光率. 農業気象 44: 15-22.
- 74) 黒瀬義孝・林 陽生・真木太一 1991. 複雑地形地域における日射環境の把握. 四国農試研報. 54: 147-160.
- 75) 真木太一・玉置磐彦 1986. 気象指標から見た四国傾斜地における野菜栽培の立地配置. 農業気象 42: 293-247.
- 76) 増渕隆一 1997. 傾斜地農業の地域特性と再編課題. 四国農試研報. 61: 135-147.
- 77) 宮本二郎 1968. 温室内の日射量に関する研究(第2報). 農および園. 43: 1749-1750.
- 78) Monsi, M. and Saeki, T. 1953. Über den lichtfaktor in den pflanzengesellschaften und seine bedeutung für die stoffproduction. Jpn. J. Bot. 14: 22-52.
- 79) 森永邦久・吉川弘恭・中尾誠司・村松 昇・長谷川美典 2004a. 露地ウンシュウミカンにおける周年マルチ点滴かん水同時施肥法の開発. 園学研. 3: 45-49.
- 80) ———・———・———・———・——— 2004b. 露地ウンシュウミカンにおける周年マルチ点滴かん水同時施肥法の効果. 園学研. 3: 33-37.
- 81) 長崎裕司 2002. 中山間傾斜地農業における作業技術研究に関する一考察. 農機学会誌. 64: 14-18.
- 82) ——— 2005. 中山間傾斜地の施設生産における省力化・快適化の現状と課題. 野茶研集報. 2: 45-50.
- 83) ——— 川嶋浩樹・野中瑞生・吉川省子. 1999. 不整形な傾斜圃場に適した低コスト平張型傾斜ハウス. 平11四国農研成果情報. 18-19.
- 84) ———・———・———・的場和弘 2001. 中山間傾斜地に適した平張型傾斜ハウス. 機械化農業 10: 18-23.
- 85) 中林和重・布施康宏・渡邊涼子 1998. ストレインゲージにより測定した植物茎の微小変動および日射量と植物の吸水量との関係. 植物工場学会誌 10: 249-253.
- 86) 中村忠次郎・田辺 一・来田 茂・金野信朗 1962. 傾斜畑地の段畑化に関する研究 第3報 簡易段畑造成後の作物栽培試験. 四国農試研報. 6: 367-380.
- 87) 日本施設園芸協会 2005. 6. 施設園芸に関する将来ビジョン 体系5-1 小規模簡易ハウス高付加価値栽培 トマト(高冷地・中山間地). 平成16年度最先端施設園芸技術実用化促進事業報告書 147-152; 184-188.
- 88) 西元直行 1991. 落葉果樹の休眠覚醒と低温要求量. 農業技術大系果樹編 第8巻. 共通技術. 施設栽培 p. 50・2-50・7. 農文協. 東京.
- 89) 農林水産省 2005. 1 種類別栽培状況2) かんきつ類以外の果樹. 平成15年産特産果樹生産動態等調査 54.
- 90) 大石直記・小杉敏己・斉藤和夫 1997. トマト養液栽培用培地としての土壌焼成多孔体の利用. 静岡農試研報. 42: 1-13.
- 91) ——— 2002. トマトの養液栽培における水分ストレスに応じた給液制御システムの開発(1). 生物環境調節 40: 81-89.

- 92) 大阪市 2005. 年間月別産地別取扱高表「果実, ブルーベリー」. 平成16年大阪市中央卸売市場年報 327.
- 93) 大塩裕陸・仁井文夫・浪岡日左雄 1981. 養液栽培用培地としてのくん炭の特性. 園学雑. 50: 231-238.
- 94) Palmer, J.W. 1977. Diurnal light interception and a computer model of light interception by hedgerow apple orchards. J. Appl. Ecol. 14: 601-614.
- 95) ———. 1989. The effects of row orientation, tree height, time of year and latitude on light interception and distribution in model apple hedgerow canopies. J. Hortic. Sci. 64: 137-145.
- 96) Papadopoulos, A.P. and Pararajasingham, S. 1997. The influence of plant spacing on light interception and use in greenhouse tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill): a review. Sci. Hortic. 69: 1-29.
- 97) Peet, M. M., Sato, S. and Gardner, G. 1998. Comparing heat stress effects on male-fertile and male-sterile tomatoes. Plant, Cell Environ. 21: 225-231.
- 98) Percy, R.W. and Yang, W. 1996. A three-dimensional crown architecture model for assessment of light capture and carbon gain by understory plants. Oecologia 108: 1-12.
- 99) Prunskiewicz, P., and Lindenmayer, A. 1990. The algorithmic beauty of plants. Springer-Verlag, New York.
- 100) 迫田登稔・室岡順一・島 義史 2005. 四国傾斜畑地域における営農に対する新技術導入の効果と課題. 農林漁業問題研究 158: 135-140.
- 101) ———・————・———— 2006. 四国傾斜畑地域における営農の現状と課題. 農および園. 81: 863-876.
- 102) 佐久間青成 2001. 低コスト簡易な養液栽培装置による葉菜類の栽培. 農および園. 76: 797-802.
- 103) 佐藤正一 1967. 中緯度における棚田段畑および斜面畑の日射に関する基礎的考察. 九州農試彙報. 12: 281-341.
- 104) Sato, S., Kamiyama, M., Iwata, T., Makita, N., Furukawa, H. and Ikeda, H. 2006. Moderate increase of mean daily temperature adversely affects fruit set of *Lycopersicon esculentum* by disrupting specific physiological processes in male reproductive development. Ann. Bot. 97: 731-738.
- 105) ———, Peet, M.M. and Thomas, J.F. 2000. Physiological factors limit fruit set of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) under chronic, mild heat stress. Plant, Cell Environ. 23: 719-726.
- 106) ———, ———, ———. 2002. Determining critical pre- and post-anthesis periods and physiological processes in *Lycopersicon esculentum* Mill. exposed to moderately elevated temperatures. J. Expt. Bot. 53: 1187-1195.
- 107) 柴田昇平・菅谷 博・伊吹俊彦・笠原賢明・東出忠桐 2003. 徳島県三加茂地区における谷風と傾斜ハウスの自然換気能の関係. 中国・四国の農業気象 16: 34-37.
- 108) 嶋本久二 2005. フェノール発泡樹脂(粒状アクアフォーム)を使用したブルーベリーの養液栽培. ハイドロポニックス 19: 39-40.
- 109) 庄野浩資 1995. テクスチャ特徴量に基づく葉傾斜角の画像計測手法の提案とその有効性の検討. 生物環境調節 33: 197-207.
- 110) ———・佐瀬勘紀 1996. トマト作物体を対象とした葉傾斜角と概略的形状の3次元画像計測. 生物環境調節 34: 75-85.
- 111) Sinoquet, H., Moulia, B. and Bonhomme, R. 1991. Estimating the three-dimensional geometry of a maize crop as input of radiation models: comparison between three-dimensional digitizing and plant profiles. Agric. For. Meteorol. 55: 233-249.
- 112) 杉浦俊彦・本條 均 1997. ニホンナシの自発休眠覚醒と温度の関係解明およびそのモデル化. 農業気象 53: 285-290.
- 113) Suzuki, A. and Kawata, N. 2001. Relationship between anthesis and harvest date in

- highbush blueberry. J. Jpn. Soc. Hortic. Sci. 70: 60-62.
- 114) 鈴木隆志・松尾尚典・岩屋千恵子 1998. 果菜類の簡易養液栽培施設と培地の開発. 岐阜農総研セ研報. 11: 20-27.
- 115) 高橋和彦 1964. 果菜類の高温障害と対策. 農および園. 39: 803-806.
- 116) 高橋春實・高井隆次 1983. 寒冷地における夏秋トマト栽培に関する研究. 秋田県農短大研報. 9: 119-127.
- 117) 武田知己・平野高司・浦野慎一・堀口郁夫 2001. Lシステムを用いたヒマワリの形状モデリング. 農業気象 57: 145-153.
- 118) Takenaka, A., Inui, Y. and Osawa, A. 1998. Measurement of three-dimensional structure of plants with simple device and estimation of light capture of individual leaves. Func. Ecol. 12: 158-165.
- 119) 玉田孝人 1997a. ブルーベリー生産の基礎 [14]. 農および園. 72: 928-934.
- 120) —— 1997b. ブルーベリー生産の基礎 [17]. 農および園. 72: 1239-1243.
- 121) 玉置磐彦・真木太一・藤田 聡 1987. 四国地域の傾斜地における気象・土地条件による野菜の立地配置基準. 四国農試研報. 48: 113-137.
- 122) 田中和夫・安井秀夫 1992. ロックウール栽培の実用化に関する研究. 野菜茶試報告A. 5: 1-36.
- 123) 栃木県農試 1997. クリプトモスを利用したトマトの養液栽培. 平9 関東東海農研成果情報. 450-451.
- 124) 富田秀弘・柳田雅芳・大場貞信・岩瀬利己 1981. 寒冷地における雨よけ栽培トマトの品質について. 東北農業研究 29: 247-248.
- 125) Wada, T., Ikeda, H., Matsushita, K., Kambara, A., Hirai, H. and Abe, K. 2006. Effects of shading in summer on yield and quality of tomatoes grown on a single-truss system. J. Jpn. Soc. Hort. Sci. 75: 51-58.
- 126) 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. 生物環境調節 39: 121-125.
- 127) Watanabe, T., Hanan, J.S., Room, P.M., Hasegawa, T., Nakagawa, H. and Takahashi, W. 2005. Rice morphogenesis and plant architecture: measurement, specification and the reconstruction of structural development by 3D architectural modeling. Ann. Bot. 95: 1131-1143.
- 128) 山本太平・小野順次・長 智男 1977. ドリップホースの緩傾斜地への適用. 砂丘研究 23: 51-55.
- 129) 山本忠志・佐藤忠弘・長谷川一 1983. 夏秋トマト栽培に関する研究, 第1報 雨よけ施設の経済性. 東北農業研究 33: 221-222.
- 130) 山下文秋・武井昭夫・山田金雄・伊藤克己 1982. 夏系キュウリの長期栽培に関する研究 台木, は種期, 土壤水分及び施肥量の影響. 愛知農総試研報. 14: 120-127.
- 131) 叶 玉紅・青木宣明・古西尚幸・加古哲也 2004. ブルーベリーの促成栽培におけるマルハナバチの利用と品種選択. 園学研. 3: 165-170.
- 132) 雪竹照信 1982. 中山間地域における夏秋トマトの簡易被覆栽培法に関する研究. 佐賀農試研報. 22: 39-63.

## Development of soilless culture for increased yield and stable production of greenhouse crops on sloping land in Japan

Tadahisa HIGASHIDE<sup>1</sup>

### Summary

To avoid problems such as lifting soil up and soil-borne diseases, when growing tomatoes (*Solanum lycopersicum*) on hillside fields, a soilless culture system suitable for use on sloping land was developed. Two kinds of drip tubing were tested in a sloped greenhouse in which the 20° gradient and the difference in elevation between the highest and the lowest lines was about 4.5m. When the main water valve was open, the flow rate was almost the same in each dripper line because both tubings included an internal pressure-compensating mechanism to maintain a constant flow rate over a wide pressure range. However, the amount of leakage from the lowest line after closing the water valve differed depending on the type of tubing. With tubing that had a shut-off mechanism and when check valves were inserted into the main line to divide the dripper lines into sections, the outflow from the lowest line in the greenhouse stopped even faster.

A soilless culture system suitable for use on sloping land was developed to avoid problems experienced on hillside fields. The soilless culture system was constructed from individual drippers that had mechanisms of pressure-compensated and shut-off inserted into polyethylene blank tubing, fertilizer tanks, a disk filter, fertilizer injectors, a drainage reservoir, an aspirator, an electromagnetic valve, and a time switch. The nutrient solution supply and injection of fertilizer were powered only by water pressure, without electric power or a pump. Nutrient solution that was not absorbed by the plants drained into the lower side of the thick plastic sheeting. Cultivation beds were placed along contour lines. The unabsorbed nutrient solution drained within the plastic sheeting along the slope of the ground into a reservoir tank. Used nutrient solution from the reservoir tank was mixed with fresh solution for re-use by means of an aspirator.

The impact of installing the soilless culture system and a sloped greenhouse in tomato-growing farms was investigated in Shikoku area, Japan. Tomato yields in the sloped greenhouse with the soilless culture system were exceedingly higher (170%) than those under the conventional rain shelters.

To promote tomato production on sloping land, light interception by plants was investigated. Tomato plants were grown in a sloped greenhouse and in a conventional greenhouse on a ground terrace and transplanted in south-south-west to north-north-east lines in both greenhouses. Light interception by middle and lower leaves on the sloped field were higher than that on the flat field. The light attenuation in the plant canopy on the slope was significant less than that on the flat land.

The number of harvested fruits and the yield of plants grown in summer and autumn were significantly and positively correlated with solar radiation during the days before anthesis. Therefore, fluctuations in fruit number and yield could be predicted by a model based on the solar radiation from 10 to 4 days before anthe-

---

Research team for protected cultivation in hilly and mountainous areas

<sup>1</sup> Advanced Greenhouse Production Research Team, National Institute of Vegetable and Tea Science

sis. Validation based on a dataset independent of the one used to develop this model showed a good correlation between observed and predicted results for plants grown in summer and autumn. Thus, solar radiation before anthesis was one of the important factors in prediction of tomato yield under warm greenhouse conditions.