環境制御技術導入のための 指導者向けマニュアル

目 次

CONTENTS

第1章	植物生理と環境反応	
1.	光合成と呼吸	· P1
2.	転流と分配	
3.	植物の生育	
4.	水と物質の輸送	· P7
第2章	環境制御と植物体管理の基礎	
地上部	邓の環境制御	
1.	光の管理	·P13
2.	CO2の管理 ····································	·P18
3.	湿度の管理	·P21
4.	温度の管理	P25
地下部	の環境制御	
1.	養水分の管理	P30
植物体	本の管理	
1.	摘果 (摘花)	P33
2.	摘 葉	P33
3.	増 枝	P34
4.	誘 引	P35
第3章	モニタリング	
1.	環境モニタリング	P36
2.	生育モニタリング	

[参考資料]

環境制御技術を導入するにあたり(立地条件等) 野菜施設園芸における農業用被覆資材の機能と特性

第章植物生理と環境反応

施設栽培における環境制御の目的は、作物の生育に最適な環境をつくり、生育・収量を最大化することである。 そのためには、環境モニタリングデータや生育調査データを基に施設内の被制御機器および植物体そのものをコ ントロールする必要がある。

それぞれの環境要因が植物の生育にどのように影響するかをある程度個別に捉えることができれば、従来、複 雑と考えられてきた栽培の方針決定や改善もしやすくなると考えられる。

まずは、環境要因と植物生理の関係を理解する必要がある。そして、環境データの測定、生育がどのように変化 したかを判断するための生育調査を通して、生育、収量を制限している環境要因を知る必要がある。



光合成と呼吸

(1) 光合成

光合成とは、空気中のCO2と葉に照射される光のエネルギーを用いて糖などの炭水化物を生成する作用(同 化)であり、次式で示される。

6CO₂+12H₂O+光エネルギー→C₆H₁₂O₆+6O₂+6H₂O

すべての生産の基本となる光合成は、葉緑体内で進行する、 光エネルギーの変換反応と炭素同化反応の2つの反応からなる (図1)。最初の反応では、光化学系 (PSI、II)、電子伝達系の 2 つの光化学系の駆動により、クロロフィルで吸収された光エネ ルギーが、生体内で利用可能なエネルギー(ATP、NADPH) に変換される。続く炭酸同化反応では、変換されたエネルギー を使い、カルビン回路において、「ルビスコ」と呼ばれる酵素の 働きにより、気孔から取り入れたCO2が固定され、一連の反応系 で糖に変換される。「ルビスコ」は光合成に中心的な役割を果た

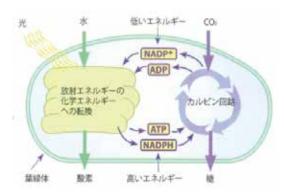


図1 光合成における光エネルギー変換反応と炭素同化 (「環境制御のための植物生理」より)

す酵素であるが、CO2だけでなく酸素とも親和性が高い。酸素を固定すれば、せっかくのエネルギーを無駄に費や してしまう「光呼吸」という望ましくない反応も起こる。光合成による炭素同化を高めるためには、光を最大限にエ ネルギーとして活用し、CO₂を滞りなく供給することが重要である。

1) 光に対する光合成の反応

光合成において光はエネルギーであり、光の増大は光合成の増大につながる。光強度と光合成速度との関係は 光-光合成曲線であらわされる。光合成と呼吸(主に植物体維持に必要な暗呼吸)が釣り合う光強度を光補償点 といい、さらに光が増加しこれ以上光が増しても光合成速度が頭打ちになる光強度を光飽和点という(図2)。光

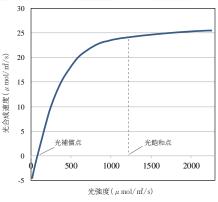


図2 光合成速度と光強度の関係

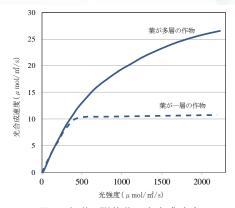


図3 個葉と群落葉の光合成速度 (「コンピューターによる温室環境の制御」より改変)

補償点から光飽和点までの間では、光強度が増すごとに光合成速度が上がることから、光強度が律速要因となる。飽和点以上の光強度では、主にCO2が律速要因の可能性がある。

多くの作物において、光飽和点となる光強度は、1 枚の葉でみたときには、晴天日の日中の光強度よりも低い。しかし、群落を形成した作物では、直射光を受け取ることができる葉は頂上の一部であり、光の当たりにくい下層の葉も含めると、群落全体が光飽和点に達することは少ない(図3)。

さらに、施設内の光強度は被覆材や骨材の影響で減衰する。施設内へ光を最大限、無駄なく取り込むことが光 合成の増大に重要である。また、入射した光を植物がより多く受光できるよう、葉面積指数 (LAI; 床面積に対する 葉の面積比 (㎡/㎡))を基に、受けて側の植物を適切に管理することが重要である。

なお、表1に光強度の表し方、図4に光合成有効放射 (PAR) の波長域、表2に各種光源の光強度のおおまかな

表1 光強度の表し方

用語	単位	意味
光合成有効光量子束密度 (PPFD)		光合成に有効な波長域(400~700nm)において単位時間、単位面積当たりに入射する光量子数。 光環境を光合成などの植物生理との関連でとらえる場合に利用される。
放射照度	W/m^2	放射束密度とも呼び、単位時間、単位面積当たりに入射する放射エネルギー量。このうち光合成に有効な波長域(400~700nm)を光合成有効放射 (PAR)といい、日射のうち45~50%を占める。 光環境をエネルギー収支などとの関連でとらえる場合に利用される。
照度		人間の眼に感じる明るさを表す物理量。 550nmをピークに感度調整されているため植物の光の影響を評価するには 不適である。

表2 種々の光源に対する400~700nm の換算係数 (Thimijan and Heins,1983 より改変)

, , , , , , , , , , , , , , , , , , , ,							
換算単位	Wm^{-2} / klx	$\mu \operatorname{molm}^{-2} \operatorname{s}^{-1} / \operatorname{klx}$	$\mu \text{molm}^{-2} \text{s}^{-1} /$				
昼光	4.05	18. 52	4. 57				
高圧ナトリウムランプ	2.45	12. 20	4. 98				
メタルハライドランプ	3.06	14. 08	4. 59				
白色蛍光灯	2.94	13. 51	4. 59				
白熱電球	4.00	20.00	5. 00				
赤色LED	24. 00	132.00	5. 52				

例)真夏の直射日光110,000lxであれば、PARは440W/㎡、PPFDは2,000µmol/㎡/sとなる。

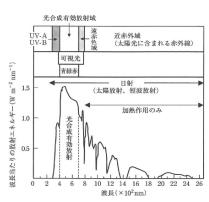


図4 日射の波長当たりのエネルギー強度 分布と各波長の名称(古在,2006)

換算値を示した。

環境制御における光環境の測定は、日射センサーの放射 照度(W/m)と積算時間(秒)から積算日射量として求め る。300W/mの光が10時間継続した場合の積算日射量は、 300W/m×3600s×10h=10,800,000W/m=10.8MJ/m= 1,080J/cmとなる。

2) CO2に対する光合成の反応

CO2濃度と光合成速度の関係も光と同様の曲線であらわされる(図5)。CO2濃度が極めて低い状態でガス交換がみかけ上0となるCO2補償点(概ね60~75ppm)から、CO2飽和点(概ね1000ppm)までの間、CO2濃度の増加に伴い著しく光合成速度が増す。CO2は光合成の基質であり、濃度を高めることにより広範囲の濃度でCO2の増加が光合成を促進することがわかる。CO2を高めることによりCO2の利用効率が上がり、光強度を高めたことと同じ効果が得られる。

CO2は葉裏に多く分布する気孔から取り込まれる。しかし、 積極的にCO2を取り込む訳ではなく濃度差による拡散を通じ て葉内へ運ばれる。取り込みの際には、葉面の境界層、葉内 細胞の隙間や液相が抵抗になるが、中でも気孔抵抗は最も大 きい(図6)。水の蒸散のしやすさに比べて20倍の抵抗にな る。気孔が開いていることがCO2同化に必須となるが、気孔の 開度は植物の水分状態や外気の湿度、光強度、光質など様々 な条件により調整が行われている。気孔開度は、特に光強度 に影響される。受光量が増加すると同化量が増加し、葉内の CO2濃度が低下すると、これが信号となり気孔が開き、CO2 の取り込みを促す。

CO2濃度が低くなると、ルビスコが酸素と結び付く確率が高くなり、光呼吸が増加する。これは光合成速度を低下させる要因となる。通常の大気では、CO2固定は酸素固定の3倍程度の速度を持つが、気孔抵抗や光合成により生じた酸素の発生により、葉緑体内ではさらに酸素の割合が高くなり、酸素同化が増えると考えられる。従来、「弱光下では、光不足が光合成の制限要因であるためCO2施用の効果はない」、と考えられてきたが、図5に見るように弱光条件でもCO2施用によりこの光呼吸が抑制され光合成速度は増加する。

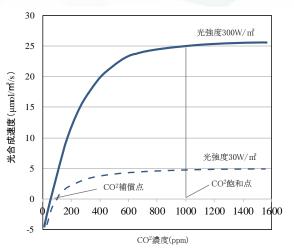


図5 光合成速度とCO2濃度の関係 (「コンピューターによる温室環境の制御」より改変)

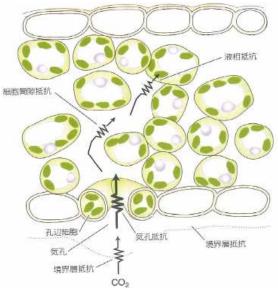


図6 葉の外部から葉緑体までのCO2の拡散に抵抗が起こるポイント (「テイツ/ザイガー植物生理学第3版」より)

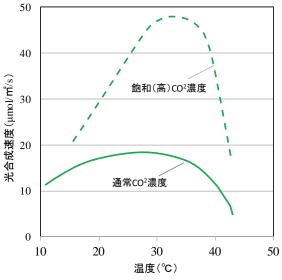


図7 光合成速度と温度の関係 (「テイツ/ザイガー植物生理学第3版」よりトレース)

3) 温度に対する光合成の反応

温度は、光合成におけるすべての生化学反応に影響を与える。ある一定の範囲であれば温度が高いほど酵素活性が高まり反応が進む。温度に対する光合成速度の関係をみると、その曲線は山なりのベル型となる(図7)。低温側では、温度の上昇に伴い光合成速度が上がる。これは、光合成速度が温度に依存して促進されることを示しており、さらに高温側になると酵素の失活など有害な影響により速度が低下し、回復不能な障害を与える場合もある。光合成の温度への反応を通常のCO2濃度と高CO2濃度で比べるとわかる。高CO2条件では炭酸同化部位に十分なCO2が供給されているため、酸素同化が起こらず、温度に依存して光合成速度が上がる。通常CO2濃度では、光合成はルビスコの活性に制限されるため、①温度上昇とともに炭素同化速度が上がる、一方で、②ルビスコのCO2との親和性が低下する(酵素特性と高温に伴う溶存CO2の減少)、2つの効果が打消しあうことで、通常CO2濃度では光合成の温度への依存性はあまりないことがわかっている。

(2) 呼吸

呼吸とは、体外から酸素を取り入れ、CO₂を体外に排出する生理作用であり、光合成で生産された糖をエネルギー源とし生理活動や生長に利用する作用(異化)であり、次式で示される。

C₆H₁₂O₆+6H₂O+6O₂→6CO₂+12H₂O+エネルギー

解糖系、クエン酸回路でのブドウ糖の酸化と分解により還元力が蓄えられ、この還元力を使い、電子伝達系でエネルギー (ATP) が合成される。多くの草本植物では1日の光合成で同化した炭素の30~60%を呼吸によって消費することがわかっている。

この呼吸で得られたエネルギーを利用し、さらに地下部から吸収したN、P、Sなどの無機養分と光合成で同化した炭素から、植物体を支える細胞壁や繊維、生体膜を形成する脂肪酸、種々の酵素、膜輸送体など代謝維持に不可欠なタンパク質の基となるアミノ酸、DNAなど遺伝情報を担う核酸などが生合成される。これら構造物の合成に必要なエネルギーを生み出す呼吸を「生長呼吸」という。また、生体膜や酵素活性の維持など、昼夜を問わず続く生存のために最低限必要な呼吸を「維持呼吸(暗呼吸)」という。

1) 温度と呼吸の関係

生合成反応である呼吸も温度上昇に伴い速度が増加する。一般に0~30℃の間では、10℃の増加つき維持呼吸は2倍となる。植物体の重量にも比例して多くなる。組織や器官でも異なり、細胞分裂が盛んで代謝活性の高い生長点や根で高い。総光合成速度から暗呼吸を差し引いた残りが純光合成速度であり、植物が生長に利用できる光合成産物量となる。

図8の例では、総光合成速度は17℃以上の広い範囲で増加 しないが、維持呼吸は温度に伴って増加し、差し引きの純光 合成速度には最適値が存在する。しかし、実際には正味の光

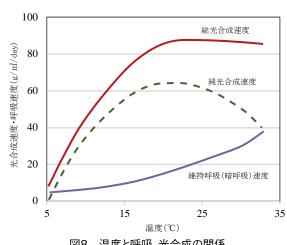


図8 温度と呼吸、光合成の関係 (「環境制御のための植物生理」よりトレース)

合成量は、多くの植物で通常の施設温度の範囲 (トマトでは15~28℃) ではほぼ無視できるとされる。温度を下げることで呼吸を抑えると生長を抑えることにもつながる。また、物質生産を高めるためには、糖の転流、代謝を促すための高い温度も必要である。

2

転流と分配

(1) 転流

葉で光合成され生産された糖は、これを必要とする他の部位へ輸送しなければならない。その物質輸送は、師管を通して行われる。光合成を行う部位を「ソース」といい、光を受ける展開葉である。葉は成熟したとき大きさの概ね1/2の大きさになったときからソースとして機能する。一方で光合成産物を受け取り、消費や貯蔵をしたりする部位を「シンク」といい、果実や生長点、若い葉、根などにあたる。ソースで生産された糖やアミノ酸などの光合成産物と無機塩類が水とともに師管を通してシンクへ輸送されることを転流という(図9)。

花や果実、根、生長点のそれぞれの器官は、生長のために、 糖をできるだけ多く引き込もうとし、他の器官と激しく競合す る。全シンク容量は、トマトの場合ではソースの2倍にもなり、

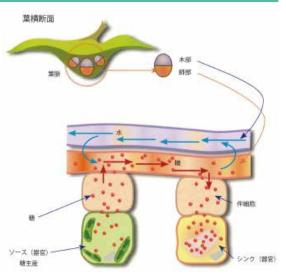


図9 葉(ソース)から生長器官(シンク)への糖輸送 (「環境制御のための植物生理」より)

茎葉で生産される糖の量よりもはるかに大きい。輸送される糖の形態は主にショ糖であり、ソースからのショ糖を師管へ移動させるためには、エネルギーを使った能動輸送が必要である(ローディング)。師管内のショ糖濃度が上昇を続けると、浸透作用により伴細胞と呼ばれる周辺細胞から水を引き寄せようとする。ショ糖が果実などのシンクへ達すると、まったく逆の作用で糖が放出されると同時に浸透作用が加わり、ショ糖の放出が進む(アンローディング)。師管での輸送速度は1m/時間とされる。

ローディングやアンローディングの過程に温度の影響は大きくないが、シンクが糖を受け取った後の代謝には、多くの酵素が関わるため、温度が高いほど早く反応が進む。長期間にわたり低温管理によってシンクでの代謝速度の低下が起こった場合、葉にデンプンが蓄積し、ソースの光合成能力に影響する。そして、光やCO2が十分で同化産物のソースからの供給が高い場合、転流を促進するための高めの温度管理が必要となる。

シンクーソースバランスの管理に失敗した例が、トマトでは葉の過繁茂や生長点の葉が巻き込み強く、いわゆる 暴れるといわれる現象として現れる。なお、従来は日中に葉で蓄積された光合成産物が夜間に果実に転流すると されてきたが、実際には光合成と転流は同時に進み、むしろ夜間の転流割合はさほど多くない。

(2) 分配

光合成産物の各器官への割り当てを分配という。分配の優先順位は、生育ステージにより異なるが、1段の開花期には、根>茎葉>花の順に大きく、着果・収穫以降の果実期には、果実>茎葉>花、根の順に大きくなるとされる。花は他器官に比べ、細胞分裂活性が低いため、分配における強度は意外に小さい。

分配の比率を説明する要因として「シンク強度」がある。シンク強度とは、果実などのシンク器官が光合成産物を引き付ける力を意味し、シンクサイズ×シンク活性で定義される。シンクサイズは細胞数を、シンク活性はアンローディングとその呼吸など代謝を反映した利用率として考えることができる。中でも果実のシンク強度が最強であり、

トマトでは同化産物の70%が果実へ分配されるともいわれる。また、果実の発育中期頃が最も強く引き付ける。

分配には、光や温度、CO2濃度による直接的な影響はないが、果実数に強く影響を受ける。花房当たりの果実数を2個→7個にした場合、果実への分配はおよそ2倍になる。ただし、1果実重は、果実同士の同化産物の競合により減少する。経験的に知られる知見として、トマトの花房と葉の分配がある。花房のシンク強度が3であれば、シンク強度が1の葉よりも3倍の同化産物を受け取ることができるとされるものである。光合成でできた糖が多くても少なくてもこの比率は変わらない。すなわち、着果数が多いほど果実への分配が増加するが、同化産物の量は一定であるため、生長点や根への分配が減少する。その結果、栄養生長が不十分となり、生育バランスが維持できなくなる。分配に最も影響を与えるのが着果負担であり、着果数を適正に管理することが重要である。



植物の生育

「生長」は、葉の拡大、茎の肥大、果実肥大など量的変化を、また、「発育」は、発芽、葉の展開、出蕾、開花、着果、果実成熟などの状態変化をあらわす。これらをあわせて「生育」と呼ぶ。植物の生育すべての過程において温度は直接的、間接的に影響を与える。

(1) 発育に対する温度の反応

発芽、葉の展開、出蕾、果実成熟などの発育の速度は、温度により決定される。しかも、最高、最低といった瞬間的な値ではなく、平均温度に依存する。日中の温度を正確に管理することよりも、1日あるいは数日の平均温度に注目して温度管理すべきである。

トマトの葉の展開速度 (図10) は、極端な温度不足による生育抑制の場合を除き、光、CO2、養水分などの他の要素にほとんど影響されない。特にLAIが低い生育初期においては、高温管理することで、葉の展開が進む→葉面積の増加→受光量の増加→光合成産物の増加、の好循環が生まれ、発育を進めることでトータルとして生育の促進につながる。

トマトでは3葉に1花房の単位で進む花房の発生速度、果実の成熟も温度で決定される。光強度、CO2、湿度、着果負担、地下部環境など温度以外の要因はほとんど関与しない。温度が高いと果実の成熟は促進され、開花~収穫までの日数は短くなる。また、高い温度により成熟日数が短くなれば果実重も小さくなる。

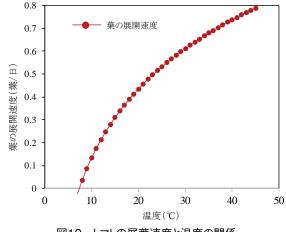


図10 トマトの展葉速度と温度の関係 (De Koning(1994)の式よりプロット)

果実の着色に対する温度の影響もある。リコペン含量は、桃熟期から急激に増加するが、その生合成は、12℃以下および32℃以上で抑制され、35℃以上では生成されない。生成適温は19~24℃とされ、生成の適温からはずれやすい高温期や冬季の夜間低温では、着色不良あるいは肩部に黄色部と赤色部がまだらとなる不均一な着色をきたすことがある。一方、黄色色素であるカロテン生成は8~35℃とされ、30℃以上でも生成されることから、リコペンとの生成温度の違いが不均一な着色の原因につながる。

(2) 積算温度の考え方

植物の温度に対する反応は大きく2つの種類に分けられる。1つは短時間の温度変化に対する反応、もう1つは平均温度に対する反応である。前者の反応を利用した制御の例として、昼夜温度差 (DIF) や日の出時の一時的な急激な温度低下 (DROP) を与えることによる鉢花類の小型化がある。一方、光合成による物質生産や開花~果実成熟は、後者の反応を利用した制御であり平均温度に依存する。生長や発育速度が温度と直線的な相関関係を持つとき、ある期間中に目標とする温度よりも低温で推移しても、低下した温度の分だけその後の期間に高めに温度管理することで期間全体の平均では目標とする気温にすることができる (図11 (a))。このとき低温の影響は相殺され、同一期間を一定温度で管理した場合と同じ生育となる。これを積算温度管理という。しかし、植物の温度反応の大部分は、ある範囲に最適温度を持つ非直線的なものであり、短期間の極端な低温 (高温)をその後の短期間の高温 (低温)で相殺できず生育が取り返せない場合もある (図11 (b))。温度に対する植物のほぼすべての反応は図11 (c)のような曲線を示し、最適な温度範囲において積算温度制御が有効となり、施設における省エネに貢献する管理方法につながる。期間にも限界があり、1カ月の高温は、その後1カ月の低温で相殺されない。また、低夜温によって昼の高温の影響が打ち消される場合があり、その反対もある。

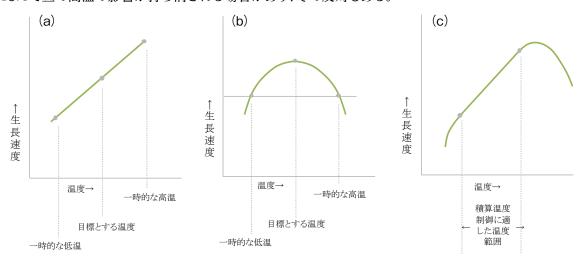


図11 温度と生長の関係(「環境制御のための植物生理」よりトレース) (a)温度と生長が直線的な相関関係にある場合、(b)生長に対して最適温度が存在する場合、(c)温度と生長の一般的な関係

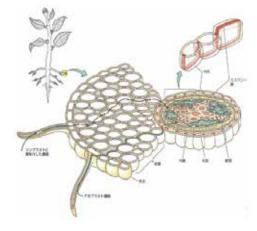
4

水と物質の輸送

植物体を構成する個々の細胞は、細胞壁を貫く細胞質の糸(原形質連絡)でひとつながりになった巨大な細胞

体と考えられる。この構造を「シンプラスト」といい、これに対して、細胞壁の連続構造を「アポプラスト」と呼ぶ(図12)。隣接した細胞間の距離は短く拡散で物質が輸送できる。一方、根と生長点といった遠くに離れた細胞どうしで物質のやりとりを行う機構が「維管束」であり、遠距離輸送を行うための管が連なって全体に張りめぐらされている。維管束には、道管と師管が配置され、道管は地下部から地上部へ水と無機養分、また、師管は光合成で生産した糖などの生体物質を植物全体に運ぶ。

図12 根における水の吸収通路 (「テイツ/ザイガー植物生理学第3版」より)



(1) 根からの養水分の吸収

養分の吸収においては、根の表皮細胞の一部から形成された根毛が重要である。根毛の細胞膜では、各物質に固有の膜輸送体が存在し、無機養分を取り込むことができる。取り込まれた養分は、シンプラストを通って根の中心にある維管束まで運ばれる。また、表皮細胞で吸収されなかった水や無機養分の一部は、アポプラストを通って根の中心に向かって浸透していくが、途中にある内皮組織でほとんどが吸収される。内皮には「カスパリー線」と呼ばれる疎水性物質(スベリン)の壁構造が存在するため、アポプラスト経由の自由な養水分の移動を遮断している。カスパリー線があることで、養水分は根のどこかの細胞で必ず細胞膜を介した膜輸送による選別を受けることになる。なお、若い根の先端は、カスパリー線が未発達であるため、最も養水分が吸収されやすい。

(2) 蒸散による吸水

葉裏の気孔内の隙間には内部から水が供給され常に湿度100%の状態になっている。外気湿度が低くなれば、その圧力差が原動力となり、水蒸気として気孔から放出され、その結果、道管内に大きな負圧がかかり、道管中の水は地下部から最上部まで引き上げられる。日射が強いほど葉温が上昇し、蒸散速度が増加する。このときの水の輸送速度は数mm/秒、草丈1mの植物では根から生長点まで数十分で行われる計算になる。根から吸い上げた水の90%以上をこの蒸散で消費する。蒸散は水とともに養分を地上部へ引き上げる。また、蒸散に伴う気化潜熱により、植物体の冷却が行われる。蒸散は、植物の生命維持に不可欠であり、常に一定以上の蒸散が必要である。通常、蒸散による水の損失分は同じ速度で根から吸水され、このときの水の輸送は受動的なものである。蒸散がなくなれば、根からの養水分の吸収も停止し、新しく生成された細胞の生長に影響する。生命維持において常に一定の蒸散が必要である。一方、根から吸収された大量の水が蒸散で放出されることで、施設内の水蒸気が増加し、湿度に影響を与える。気孔の開閉は、光量・光質、CO2濃度、根域の水分条件、その他多くの要因に影響されるため、湿度だけで蒸散を制御することは困難であるが、湿度の急変による水分ストレスの軽減や病害発生を低減する上で重要であり、その表し方を理解しておく必要がある(表3)。

また、空気は温度が高いほど含むことのできる水蒸気の量も多くなる。例えば、同じ相対湿度60%で30℃と20℃をみると、20℃に比べ30℃の飽差が1.8倍大きく(表4)、蒸散速度は早くなる。植物の蒸散は、相対湿度よりも飽差で考える方が適切である。植物にストレスの少ない飽差の範囲は概ね3~6g/mとされている。

表3 湿度の表し方

用語	単位	意味		
飽和水蒸気量 (=飽和水蒸気分圧)	g/m³ (kPa)	ある温度の空気が含める最大限の水蒸気量 (ある温度の空気が最大限水蒸気を含んだときの水蒸気分圧)		
絶対湿度 (=水蒸気分圧)	g/m³ (kPa)	空気に含まれる水蒸気量 (空気に含まれる水蒸気分圧)		
相対湿度	%	飽和水蒸気量(分圧)に対する絶対湿度(水蒸気分圧)の割合		
飽差(HD) (=飽差(VPD))	g/m³ (kPa)	飽和水蒸気量(分圧)と絶対湿度(水蒸気分圧)の差		
露点温度	$^{\circ}\!$	空気の温度を低下させたときに凝結が始まる温度		

<水蒸気圧から水蒸気量への換算式>

水蒸気密度(kg/m³)=0.00217÷(273.15+温度(℃))×水蒸気分圧(Pa))

表4 飽差表

株分類 株式 株式 株式 株式 株式 株式 株式 株	90% 0.8 0.9 0.9 1.0 1.1 1.1	95% 0.4 0.4 0.5 0.5
8°C 5.0 4.6 4.1 3.7 3.3 2.9 2.5 2.1 1.7 1.2 9°C 5.3 4.9 4.4 4.0 3.5 3.1 2.6 2.2 1.8 1.3 10°C 5.6 5.2 4.7 4.2 3.8 3.3 2.8 2.4 1.9 1.4 11°C 6.0 5.5 5.0 4.5 4.0 3.5 3.0 2.5 2.0 1.5 12°C 6.4 5.9 5.3 4.8 4.3 3.7 3.2 2.7 2.1 1.6 13°C 6.8 6.2 5.7 5.1 4.5 4.0 3.4 2.8 2.3 1.7 14°C 7.2 6.6 6.0 5.4 4.8 4.2 3.6 3.0 2.4 1.8	0.8 0.9 0.9 1.0 1.1	0.4 0.4 0.5 0.5
9°C 5.3 4.9 4.4 4.0 3.5 3.1 2.6 2.2 1.8 1.3 10°C 5.6 5.2 4.7 4.2 3.8 3.3 2.8 2.4 1.9 1.4 11°C 6.0 5.5 5.0 4.5 4.0 3.5 3.0 2.5 2.0 1.5 12°C 6.4 5.9 5.3 4.8 4.3 3.7 3.2 2.7 2.1 1.6 13°C 6.8 6.2 5.7 5.1 4.5 4.0 3.4 2.8 2.3 1.7 14°C 7.2 6.6 6.0 5.4 4.8 4.2 3.6 3.0 2.4 1.8	0.9 0.9 1.0 1.1	0.4 0.5 0.5
10°C 5.6 5.2 4.7 4.2 3.8 3.3 2.8 2.4 1.9 1.4 11°C 6.0 5.5 5.0 4.5 4.0 3.5 3.0 2.5 2.0 1.5 12°C 6.4 5.9 5.3 4.8 4.3 3.7 3.2 2.7 2.1 1.6 13°C 6.8 6.2 5.7 5.1 4.5 4.0 3.4 2.8 2.3 1.7 14°C 7.2 6.6 6.0 5.4 4.8 4.2 3.6 3.0 2.4 1.8	0.9 1.0 1.1	0.5 0.5
11°C 6.0 5.5 5.0 4.5 4.0 3.5 3.0 2.5 2.0 1.5 12°C 6.4 5.9 5.3 4.8 4.3 3.7 3.2 2.7 2.1 1.6 13°C 6.8 6.2 5.7 5.1 4.5 4.0 3.4 2.8 2.3 1.7 14°C 7.2 6.6 6.0 5.4 4.8 4.2 3.6 3.0 2.4 1.8	1.0 1.1	0.5
12°C 6.4 5.9 5.3 4.8 4.3 3.7 3.2 2.7 2.1 1.6 13°C 6.8 6.2 5.7 5.1 4.5 4.0 3.4 2.8 2.3 1.7 14°C 7.2 6.6 6.0 5.4 4.8 4.2 3.6 3.0 2.4 1.8	1.1	
14°C 7.2 6.6 6.0 5.4 4.8 4.2 3.6 3.0 2.4 1.8	1.1	0.5
	1.1	0.6
15°C 7.7 7.1 6.4 5.8 5.1 4.5 3.9 3.2 2.6 1.9	1.2	0.6
	1.3	0.6
16℃ 8.2 7.5 6.8 6.1 5.5 4.8 4.1 3.4 2.7 2.0	1.4	0.7
17°C 8.7 8.0 7.2 6.5 5.8 5.1 4.3 3.6 2.9 2.2	1.4	0.7
18°C 9.2 8.5 7.7 6.9 6.2 5.4 4.6 3.8 3.1 2.3	1.5	0.8
温 19℃ 9.8 9.0 8.2 7.3 6.5 5.7 4.9 4.1 3.3 2.4	1.6	0.8
20°C 10.4 9.5 8.7 7.8 6.9 6.1 5.2 4.3 3.5 2.6	1.7	0.9
21°C 11.0 10.1 9.2 8.3 7.3 6.4 5.5 4.6 3.7 2.8	1.8	0.9
22°C 11.7 10.7 9.7 8.7 7.8 6.8 5.8 4.9 3.9 2.9	1.9	1.0
23°C 12.4 11.3 10.3 9.3 8.2 7.2 6.2 5.1 4.1 3.1	2.1	1.0
24°C 13.1 12.0 10.9 9.8 8.7 7.6 6.5 5.4 4.4 3.3	2.2	1.1
25°C 13.8 12.7 11.5 10.4 9.2 8.1 6.9 5.8 4.6 3.5	2.3	1.2
26°C 14.6 13.4 12.2 11.0 9.8 8.5 7.3 6.1 4.9 3.7	2.4	1.2
27°C 15.5 14.2 12.9 11.6 10.3 9.0 7.7 6.4 5.2 3.9	2.6	1.3
28°C 16.3 15.0 13.6 12.3 10.9 9.5 8.2 6.8 5.4 4.1 29°C 17.3 15.8 14.4 12.9 11.5 10.1 8.6 7.2 5.8 4.3	2.7 2.9	1.4 1.4
29°C 17.3 15.8 14.4 12.9 11.5 10.1 8.6 7.2 5.8 4.3 30°C 18.2 16.7 15.2 13.7 12.1 10.6 9.1 7.6 6.1 4.6	3.0	1.4

(3) 根圧による吸水

水の大部分は蒸散の結果として受動的に吸収される。しかし、蒸散のない夜間にも吸水は続いている。根においては、エネルギーを使った無機養分の積極的、選択的な吸収が続き、その結果、水は浸透作用によって吸収される。これにより道管内に生まれる陽圧を根圧といい、蒸散の少なくなった夕方から夜間にかけて最大となる。この根圧の作用により、日中の受動的な吸水では届きにくい果実や生長点、葉の先端などの部位にも養水分を送ることができる。接ぎ木による大きな強い根系、地下部環境の低EC、根の呼吸速度の増加(酸素が十分にあり、温度が高いとき)などの条件で根圧は高まる。

吸水により細胞の外側に向いた圧力(膨圧)が形成され、新しく若い細胞ではこの膨圧により細胞壁が緩むことで細胞伸長が起こり、生長につながる。ただし、細胞伸長にも最適なレベルがある。根圧や膨圧が過剰に増加することで植物体が過繁茂になる場合もある。かん水量・頻度や養液濃度など、地下部環境もまた適切に管理する必要がある。

(4) 無機養分の役割

植物は光合成により外気からのCO2吸収と地下部からの水吸収により、主要元素C、H、Oを取り込み有機物合成に用いる。乾物重の90~95%はこれらで占めるが、生育には地下部からの適切な無機養分の吸収が不可欠である。植物の生育においては、9種類の多量要素と7種類の微量要素、計16種類が必須要素となっている(表5)。

多量要素は、通常最も酸化された形、 CO_2 、 H_2O 、 NO_3 で、 SO_4 2・、 NH_4 +、K+、 Ca^2 +、 Mg^2 + で吸収される。N、P、Sは代謝によって様々な有機化合物中に、Mgはクロロフィルやその他の構成材料として、取り込まれる。Kは有機化合物の材料としてどこにも組み込まれず細胞内の溶液環境の調節、膨圧の形成など多様な働きをする。Caは細胞壁のペクチンの構成要素であるが、それ以上に生体膜の機能維持、ホルモン様の情報伝達物質として重要である。

表5 植物生育の必須要素と主な機能

			主な機能
	⊔ ±		
	炭 素	С	有機物の構成要素
主要必須元素	酸素	0	有機物の構成要素
	水 素	Н	有機物の構成要素
	室 素	N	アミノ酸、タンパク質、核酸等の構成要素
	カリウム	K	浸透圧形成、イオン環境維持、酵素の活性調節
	カルシウム	Ca	生体膜の維持、細胞内二次情報物質、酵素の活性調節
	リン	P	核酸、リン脂質の構成要素、生体エネルギー物質の構成要素
	マグネシウム	Mg	クロロフィルの構成要素、酵素の活性調節
	硫黄	S	アミノ酸、補酵素の構成要素
	塩 素	C1	浸透圧形成、イオン環境維持、光合成酵素発生系構成要素
微量必須元素	銅	Cu	酵素の構成要素
	鉄	Fe	チトクローム・ニトロゲナーゼ等の構成要素
	マンガン	Mn	酵素の構成要素、光合成酵素発生系の構成要素
	亜 鉛	Zn	酵素の構成要素
	モリブデン	Mo	窒素固定、窒素同化
	ホウ素	В	Ca代謝、核酸合成、生体膜・細胞壁の維持
	ニッケル	Ni	
有用元素	ナトリウム	Na	
	ケイ素	Si	
	コバルト	Со	

1) pH

養液栽培においては、培養液のpHに注意が必要である。pHが5以下、または7以上となると微量要素などの吸収が減り欠乏症を引き起こす場合がある(図13)。難しいのは、植物の根圏pHとそれより離れた部分のpHが異なることであり、植物の根が電気的バランスを維持しようとすることに起因する。すべての養分は+かーに帯電したイオンの形で吸収する。NO3でなどの陰イオンを吸収すると根の内部は一の電荷を帯びる。一方、NH4+などの陽イオンを吸収すると+に電荷する。陰イオンではアルカリイオンを外部に、陽イオンでは水素イオンを外部にそれぞれ放出し、植物の根は中性を保とうとする。水素イオンの放出は根圏周辺のpH低下、アルカリイオンの放出はpH上昇につながる。Nは多量に吸収されるため、根の周辺pHにかなり影響を与え、Pの吸収に影響を与えることもある。NH4+-Nの吸収は培地を酸性に、NO3-Nの吸収はアルカリ性にそれぞれ傾き、養液ならば培養液のpHにも大きく影響を与



図13 元素ごとの好適pH範囲 (「環境制御のための植物生理」より)

える。植物は一般に NH_4^+ -N の吸収を好む傾向があり、適量を培養液に添加することで多くの作物で生育が促進される。

また、作物の生育ステージもpHに影響し、トマトでは果実肥大期のK⁺の多量吸収で水素イオンが放出され、培養液pHが低下することがある。

2) EC

細胞内のイオン濃度は外部より高く維持されている。浸透圧効果により外部から内部へ水が引き込まれるが、外部が低いECであれば水をよく吸収し、反対に高いECでは吸水が制限される。高ECにより吸水が制限されると、新しい細胞が十分な膨圧を維持できず、葉の伸長が抑制される。葉面積の減少により、受光量が減少し、光合成量が低下する。また、水ストレスを軽減するために気孔が閉鎖され光合成量が低下する。トマトでは、同化産物の分配は変わらないため、果実の乾物重は一定を保つ。果実への水の流入が減るため、果実重は小さくなるが、乾物率が上がるため、糖度の高い良食味トマトとなる。高ECは同時に尻腐れ果を多くする。

養水分の吸収は生育ステージや季節、天候によって変動するため、常に注意してバランスを取り続ける必要がある。養液栽培では、EC濃度や給液方法の調整により樹勢管理に活用できる。

3) 窒素

窒素の主な施用形態は NH_4^+ -N、 NO_3^- -Nであり、両形態の窒素は他の養分吸収や水耕培地のpHに影響する。 NO_3^- -Nは根において能動的に、 NH_4^+ -Nは受動的にそれぞれ吸収される。 NH_4^+ -NはCa、Mgなど陽イオンと拮抗し吸収を抑制する。

トマトでは、生育ステージごとに窒素吸収量が異なり、第2~3花房が形成される間は、窒素とカリウムは同等に吸収されるが、着果負担が増えるにつれKの吸収が増加し、NとKの吸収比率は1:2になる。

4) リン

必要とされる量はNやKと比べ少ないが、核酸、脂質膜、生体内でのエネルギー物質 (ATP) の構成元素として無数の代謝課程に関わり、Pは継続的に供給する必要がある。根において能動的に吸収される。地下部の低温はPの吸収を抑制する。欠乏により、小葉化し典型的な紫色の色素があらわれる。

5) カリウム

植物体内で窒素の次に多い元素である。NやPと異なり植物体内に構成される物質分子のどこにも組み込まれておらず、もっぱら溶解した形で見られる。Kは、少なくとも60の酵素反応に重要な役割を果たしており、タンパク質の形成など酵素の補助因子として働く。また、気孔の開閉に重要な細胞の浸透圧の維持、糖とミネラルの移動における師部輸送の補助など様々な働きを担う。Nの体内輸送において、陰イオンであるNO3-Nを根から葉に多量に送ることは植物体内で電気的な不均衡が起こるため、中和するための+イオンとしてKが一緒に輸送される。Kは植物体内を移動し再利用される。移動によりKの失われた部位の組織では水分バランスが維持できなくなり、葉先や葉縁部の壊死症状としてあらわれる。

6) マグネシウム

クロロフィルの中心に位置するため、欠乏症状は葉脈間の黄化として直接外観に現れる。植物体中の5%のMgがクロロフィルに存在する。欠乏すると、他の生理的なプロセスを犠牲にして光合成系に優先的にMgが振り分けられる。植物体内を移動するため、古い葉が黄化する。土壌や培地中に重金属が多い場合、カドミウム、亜鉛、鉛などの重金属はMgにそっくり取り代ってクロロフィルの中心を占有し、光合成が停止する。重金属が植物に対して障害を引き起こす主なメカニズムとなる。Mgは細胞壁にも含まれるが、最も多量に含まれるのが細胞質であり、

様々な酵素反応を担い、この点ではKに似ている。タンパク質合成のための遺伝子翻訳機構、タンパク合成のためのリボゾームの形成、光合成に引き続くプロセスへの関与、エネルギー供給のためのATPの形成、葉緑体内のpH を調節する特殊機能、細胞質内に多いため浸透圧調節物質としても機能する。

7) カルシウム

根におけるCaのほとんどが受動的に吸収される。蒸散が過剰になって水分供給が間に合わない状況になると、欠乏が起こりやすくなる。また、水の流れは蒸散の盛んな部位に向かうため、生長点や果実、若い葉や葉の先端などほとんど蒸散しない部位への水供給が少なく欠乏が発生しやすくなる。カスパリー線はCaの吸収の大きな障壁となるが、分裂の盛んな若い根の先端にはまだカスパリー線が形成されていないため、水と一緒に吸収されやすい。Caは根において吸収するゾーンが限られている。このため、Ca吸収のためには若く健康な根が必要である。そして、Caは植物体内での移動性が低く、ほとんど再移動しない。また、水分が欠乏していくような部位から師管を通して再輸送されることもない。トマトでは果実に流入する水分の80%以上が師管液であるが、その師管液のCa濃度は低い。

〈参考図書〉

- ・P.G.H.Kamp, G.J.Timmerman (2004), コンピュータによる温室環境の制御, 誠文堂新光社
- ·L.Taiz, E.Ziger (2004), テイツ/ザイガー植物生理学 第3版, 培風館
- ・三村徹郎, 鶴見誠二 (2009), 基礎生物学テキストブック7 植物生理学, 化学同人
- ·古在豊樹他 (1992), 新施設園芸学, 朝倉書店
- ・Ep Heuvelink, Tiji Kierkels (2017), 環境制御のための植物生理, 農山漁村文化協会
- ·Ep Heuvelink (2012), トマト オランダの多収技術と理論 100トンどりの秘密, 農山漁村文化協会
- ・嶋津光鑑(2017), 施設と園芸 No.176, 日本施設園芸協会

第2章

環境制御と植物体管理の基礎

Plan

環境・作業の管理方法の決定

環境管理は光合成能力を決める大きな要因。地上部の要因として、温度、湿度、日射量、CO₂、地下部の要因として、養液pH、EC、給排液量など、植物生理を理解した上で管理方針を決定する。

Do

管理の実施

Planに基づき、栽培管理を実施する。 作業が遅れることがないよう、工程通りの実施を心がける。

Check

環境モニタリングと生育調査

管理を行う上で必要な目安となる開花花房距離、茎径、伸長量などの生育調査、および、設定した環境要因をデータ化する。

Act

管理方法の調整

生育調査と環境計測データをもとに、管理の実施により、どのように植物の樹勢や生育バランスが変化したかを分析し、次週以降の気象条件も考慮しつつ、管理方法の改善や修正点について検討を行う。

■ 地上部の環境制御



光の管理

光は光合成のエネルギーとして最も重要な環境要因である。日々光を受けて生長するトマトでは、光合成量=生育期間中の光の積算量ともいえる(図1)。

光合成生産は、葉、茎、果実などすべての器官の乾物重の積算(総乾物生産)であり、総乾物生産=受光量×光利用効率で表すことができる。総乾物生産を増大させるには、受光量、光利用率のいずれかを高める必要がある。

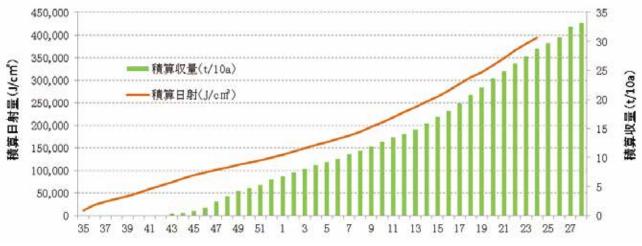


図1 積算日射量と積算収量の推移(㈱)兵庫ネクストファーム2016年度作データより)

トマトの光利用効率は、個葉の光合成能力に加え、葉の形状、角度など受光体勢が関連するため、品種による影響が大きい。一般的に、国産の大玉トマト品種に比べ、オランダ産品種では受光体制がよく個葉の光合成能力も高い。しかし、消費者や実需者のニーズからオランダ産品種の導入が可能なケースは限られるため、光利用効率や受光量を高めるための対策が必要となる(図2)。

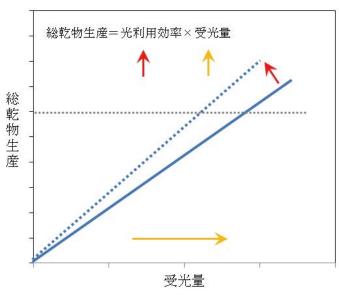


図2 受光量と総乾物生産との関係(模式図) (農業技術体系トマト 基560の5よりトレース)

(1) 受光量を増やす

1) 施設への日射透過量

光量が1%増加すると収量が1%増加するとされ、「光1%理論」と呼ばれている。施設への日射透過量を高めることが収量性向上のために重要とされている。

日射透過量は施設構造 (骨材の太さ・量)、被覆資材の光透過性、散乱特性、汚れ、流滴性等に影響される。 フィルムや骨材の影響で屋外日射に対する施設内への日射透過率は概ね60%程度まで減少する。またフィルムの 汚れ、流滴性 (結露水の付着)も透過率を低下させる要因となる (図3)。

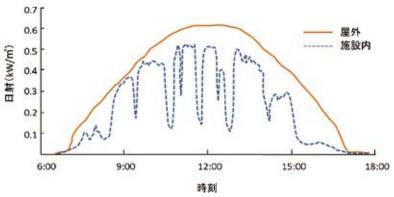


図3 晴天時における温室内外の日射の変化 (農業技術体系第2編トマトよりトレース)

2) 散乱光の活用

光は葉によって吸収されるので、発達した植物群落では下部ほど透過光の割合が減少するが、その減少は直達 光に比べ散乱光で少ない(図4)。

施設の外部被覆資材に散乱光フィルムが用いられている場合、植物体上部の葉が受ける光量は減るが、下部の葉が受ける光は増える。この時、上部の葉は光飽和点に近い光強度のままであるが、下部の葉は光強度が増加することで同化量が大きく増加する。その結果、群落全体としての光合成総量は増加する(図5)。

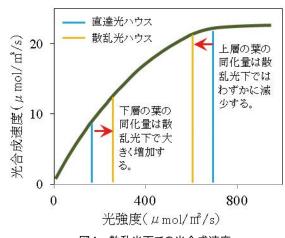


図4 散乱光下での光合成速度 (「環境制御のための植物生理」よりトレース)

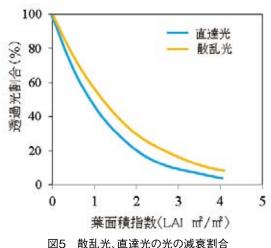


図5 散乱光、直達光の光の滅衰割合 (「環境制御のための植物生理」よりトレース)

3) 適切な葉面積 (LAI) の確保

LAIを1から2に増大させると、群落全体での受光量は20%増加する。しかし、LAIを3から4に増大した場合の群落全体の受光量増加は6%にすぎず、頭打ちとなる。よって、入射光の90%を利用できるLAI3付近が、光合成にとって好ましいとされる(図6)。しかし実際には、LAI3を上限として、生育ステージや栽培時期に合わせて、LAIを調整する必要がある。

日射の少ない時期にLAIを高め過ぎると、上位葉による遮蔽で群落下部の光量が極端に減少し、群落全体として光合成量が低下する。また相互遮蔽により個葉当たりの受光量が減少するため、より光を多く受けようと葉が大きく展開し、生育バランスは栄養生長に傾きやすくなる。さらに過繁茂となると、病虫害の発生を助長するばかりか、果実への直達光が減少すると物分配が不良となり、成熟遅れにもつながる。

日射の多い時期にLAIが低いと、群落の光利用効率が低くなり、日射が多いにもかかわらず群落全体での光合成量が低くなる。また葉からの蒸散量が少なくなるため過乾燥となり、生育に適した湿度環境が維持できず生育バランスは生殖生長に傾きやすくなる。また果実への直達光が過多となると日焼け果や裂果の発生を助長し、過昇温による果実の着色不良など多くの生理障害を引き起こすこととなる。

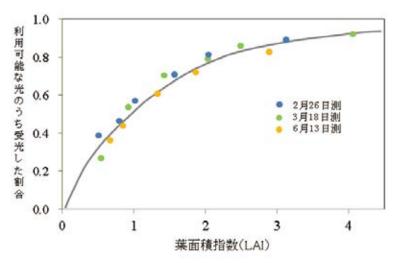


図6 受光量と葉面積指数の関係 (「環境制御のための植物生理」よりトレース)

ここで、LAI3とは、栽植密度2,500株/10aの場合を例に取ると、個葉の葉面積が0.07㎡で、展開済みの生葉が株当たり18枚ある状況といえる。

(LAI=2,500株/1,000m2×0.05m2/枚×18枚=3)

実際にLAIを管理する場合、個葉の葉面積は制御が困難であるため、栽植密度および株当たりの生葉数を調整する。栽植密度は、定植時の株間と条間(ベッド間)で決まるが、その後の増枝によっても増やすことができる。株当たり生葉数は摘葉によりコントロールできる。

(増枝、摘葉については別項に詳細を記載)

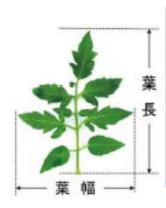
4) 光反射マルチ (白マルチ) の利用

光反射マルチを利用し、通路やベッド下など植物体以外に落ちた光を再利用することで光の利用効率を高めることができる。また、群落下部の放射照度が増加することで下位葉の弱行順化による光合成能力の低下を防ぐことができ、群落全体としての光合成総量の増加につながる。

〈トピックス〉

LAIの簡易測定(あいち植物工場マニュアルより)

- ①施設内から平均的な大きさの葉を10枚ほど選び、下表から葉面積を推定します。
 - 表 葉長・葉幅から推定したトマトの葉面積(単位:cm)



りんか409		葉 長(cm)									
לוטוני	1409	30	35	40	45	50	55	60			
	30	271	327	384	443	504	565	628			
莱	35	327	394	463	534	607	682	757			
ATT.	40	384	463	545	628	714	801	891			
幅	45	443	534	628	725	824	924	1,027			
cm	50	504	607	714	824	936	1,051	1,167			
J	55	565	682	801	924	1,051	1,179	1,311			
	60	628	757	891	1,027	1,167	1,311	1,457			

(愛知農総試, 2015)

②次式より、施設内の葉面積指数を大まかに推定できます。

葉面積指数=平均的な1葉の葉面積(cm)÷10,000×1株当たり着葉数×栽植株数÷栽植部分の床面積(m)

注) 葉面積と床面積の単位を揃えることが必要です。上の式では、葉面積の単位 [cm] を [m] に変換するため、10,000で除しています。

(2)光の利用効率を高める

1) CO₂施用

トマトの光利用効率は CO_2 濃度 100μ mol/mol当たり $6\sim15\%$ 増加する。よって CO_2 施用によって光利用効率を高めることができる(図7)。

(CO2施用の詳細については別項に記載)。

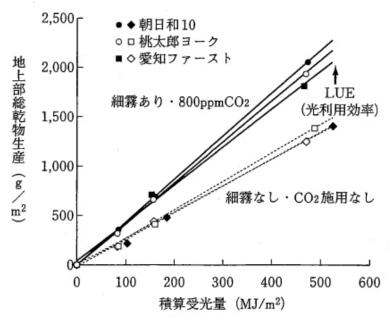


図7 CO2施用と光利用効率 (「環境制御のための植物生理」よりトレース)

2

CO2の管理

CO2は光合成の材料として重要である。CO2が高濃度になれば葉に取り込まれるCO2も増加し、光合成速度は増加する。光合成が盛んな日中の施設内CO2濃度は外気以下に低下しやすい。まずは、CO2を不足させないこと、そして光合成生産に見合った温度管理に留意しなければならない。

(1) 施設内のCO2濃度

光合成が盛んな日中において、換気のない、あるいは少ない期間は、施設内CO₂濃度が外気以下に低下し、光 合成の律速要因となる(図8)。

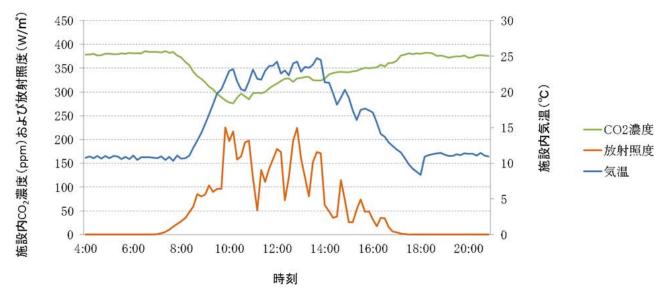
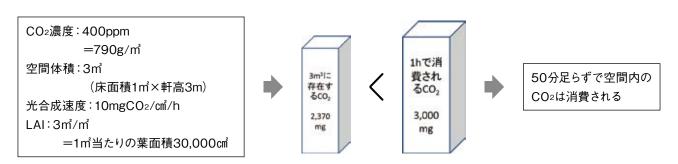


図8 冬季トマト栽培施設内におけるCO2濃度の推移(2017年12月.農技総セ場内データより)

以下の条件で試算すると、完全に密閉された空間で植物が光合成を行った場合、1時間以内に内部のCO₂が底をつくことがわかる。



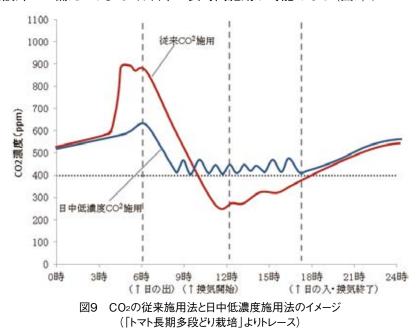
(2) ゼロ濃度差CO₂施用

CO₂の施用濃度が高くなるに連れトマトの生長量は増加するが、その増加量はある程度のところで頭打ちとなる。また、施設内のCO₂濃度を高く保つにはコストがかかるため、実際の栽培温室でのCO₂高濃度施用は費用対効果が低い。一方、CO₂濃度が外気より低くなった場合、トマトの生長量は著しく減少する。よって、高濃度施用による増収を狙うより、濃度低下を防ぐことで減収を回避する方が効果的である(表1)。

!	350ppmから250ppmへ減少	-100ppm	-19 %
	1,000ppmから1,100ppmへ増加	+100ppm	+1.5%
	600ppmから700ppmへ増加	+100ppm	+4%
	350ppmから450ppmへ増加	+100ppm	+12%
	温室内CO ₂ 濃度	CO ₂ 増減値	トマト生長量

表1 CO2施用濃度がトマトの生長量に与える影響(ハウスの環境制御ハンドブックより一部改変)

そこで、午前に高濃度施用する「従来CO₂施用法」に対し、日中の施設内CO₂濃度を外気並(350~450ppm 程度)に保つ「ゼロ濃度差施用法(日中低濃度施用法)」が有効である。本手法では、外気と施設内の濃度差が少ないため、CO₂の施設外への漏えいが少なく、日中の長時間施用が可能である(図9)。



一方で、日中の外気温が低く換気が行われない日には、CO2濃度を外気よりやや高めに設定することで、効率的にCO2施用量を増やすことができる。

長期長段どり栽培において、CO₂施用を実施する時期は、植物生理的には着果負担が増える頃 (第一花房の肥大期) から収穫終了までが好ましい。しかし経営的な観点からは、天窓・側窓の開閉のある10月頃~翌年5月頃までが妥当といえる。

(3) 光合成速度に見合った温度管理

CO₂施用により光合成速度が向上すると、これにあわせて生産された糖の果実への転流を促す管理も必要となる。糖が茎葉に滞ると、光合成能力の低下、樹勢バランスの崩れを招く。転流は温度が高いほど促進されるため、午後の温度を高めるなどで複合的に管理を行う。

転流とは、光合成により葉 (ソース器官) で生成された糖が、師部を通して生長点・茎・果実・根 (シンク器官) に 運ばれることであり、シンク器官に糖が転流された後のプロセスには、多くの酵素反応がかかわる。よって、温度が 高いほど早く反応が進む (図10)。

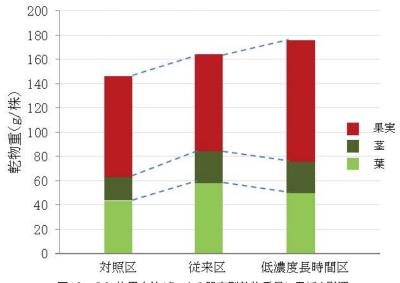


図10 CO2施用方法がトマトの器官別乾物重量に及ぼす影響 (「農業技術体系野菜編2トマト」よりトレース)

対照区: 換気温度28℃、CO2施用なし

従来区: 早朝~換気 (28°C) まで2000ppm施用

低濃度長時間区: 早朝~夕方まで600ppm施用、早朝加温+換気 (30℃)

3

湿度の管理

栽培施設において、換気の少ない冬場は、日中の蒸散や夜間の気温低下により高湿度条件になりやすい。一方、換気の行われる秋口や春先の日中には、換気時に乾燥した空気が流入することで低湿度条件になりやすい。高湿度は病害発生の原因に、低湿度は光合成の抑制、萎れの発生につながる。

また、急激な湿度の変化は植物体に過度のストレスを与える要因となる。特に極端な換気や気温の上昇により急激に湿度が低下した場合、植物体は過度の蒸散による萎凋を回避するため気孔を閉鎖するが、これによりガス交換が妨げられると葉内でのCO2濃度が低下し、光合成量が低下する(図11)。

よって、連続的かつ極端な高・低湿度条件や、急激な湿度の変化を回避するための管理が必要となる。このためには、湿度と密接な関係がある温度の制御も同時に必要となる。

(1) 飽差管理

飽差は1㎡の空気にあとどれだけ水分を含む余裕があるかを示す数値である。飽差が大きいと低湿度、飽差が小さいと高湿度条件であることを表すが、水の蒸発は相対湿度よりも飽差との関連性が深い。蒸散は気孔からの水の蒸発現象に他ならないため、植物体の蒸散も飽差と深く関わっている。このため、蒸散量を確保し光合成に適した飽差を維持する飽差管理が、近年盛んに行われている。

飽差を制御する手法としては、根の健全化・日射量や蒸散量に合わせた潅水・LAIの最適化等により植物体からの蒸散量を確保する手法や、天窓・側窓や内張資材、カーテン資材の開度調節による換気手法の他、細霧冷房システムやパッドアンドファンを用いたより積極的な加湿手法もある。

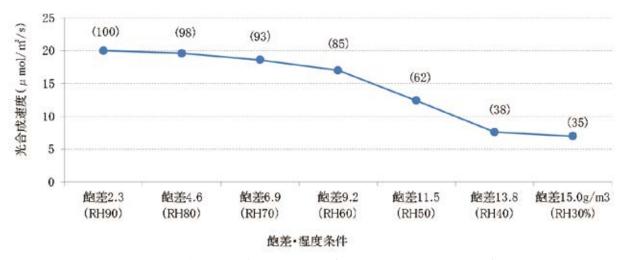


図11 飽差・湿度度条件と光合成速度(農業技術体系トマト編よりトレース)

(2) 低湿時の萎れ対策

1) 低湿度条件下での換気手法

外気の乾燥する春・秋季に換気が盛んに行われる場合、施設内が低湿度条件となり、樹勢がコンパクトになりやすい。また、急激な飽差の変化は過度の蒸散や気孔の閉鎖を引き起こすため避ける必要がある。この時期の換気手法としては、植物体からの蒸散により空中に保たれている水蒸気を、極力施設内に保つよう心がける一方で、乾燥した外気の急激な流入を避けるため、こまめな換気を行うよう管理する。

例えば、午前中の換気温度を高めに設定している場合や、タイマー・手動による換気開始時間が遅い場合、それまで施設内に蓄えられた水蒸気が換気開始と同時に施設外へ放出されるため、飽差の急激な変化が起こりやすい。よって、午前中の換気設定温度をやや低くしたり、目標とする換気温度より早めに換気を始めることで、徐々に換気を行い、急激な飽差の変化を回避することができる(図12)。

また、南北方向の施設で東から風が吹いている場合、風上となる東側の天窓ないし側窓の開度が大きいと外気の流入量が増加するため、風上側の開度を風下側より小さくするとよい。

		N					相対	湿度	20000100100				
		40%	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%	85%	90%	95%
	8°C	5.0	4.6	4.1	3.7	3.3	2.9	2.5	2.1	1.7	1.2	0.8	0.4
	9°C	5.3	4.9	4.4	4.0	3.5	3.1	2.6	2.2	1.8	1.3	0.9	0.4
	10°C	5.6	5.2	4.7	4.2	3.8	3.3	2.8	2.4	1.9	14	0.9	0.5
	11°C	6.0	5.5	5.0	4.5	4.0	3.5	3.0	2.5	2		7.0	0.5
	12°C	6.4	5.9	5.3	4.8	4.3	3.7	3.2	2.7	2,1		1.1	0.5
	13℃	6.8	6.2	5.7	5.1	4.5	4.0	3.4	2.8	-/4	1-1		0.6
	14°C	7.2	6.6	6.0	5.4	4.8	4.2	3.6	3.0	6時	持頃(日の)出)	0.6
	15℃	7.7	7.1	6.4	5.8	5.1	4.5	3.9	3.2	2.6	177	1.3	0.6
	16℃	8.2	7	6.8	6.1	5,5	48	4.1	3.4	2.7	2.0	1.4	0.7
	17°C	8.7		.2	6.5			1.3	3.6	2.9	20	1.4	0.7
_	18℃	9.2		7.7	6.9	①早	めの換	気 6	3.8	3.1	2.3	1.5	0.8
気温	19℃	9.3		3.4	7.3			4.9	1.1	3.3	2.4	1.6	0.8
/m	20°C	10.4		7	7.8	6.9	6.1	5.2	4.3	3.5	2.6	1.7	0.9
	21°C	11.0	10	9.2	8.3	7.3	6.4	5.5		3.7	2.8	1.8	0.9
	22°C	11.7	1107	₌ ^7	8.7	7.8	0.0	5.8	4.9	3.9	2.9	1.9	1.0
	23°C	12.4	11時	[#] 3	9.3	8.2	7.2	6.2		10時頃	3.1	2.1	1.0
	24°C	13.1	12.0	10	2180	8.7	7.0	6.5	5.4	4.4	33	2.2	1.1
	25°C	13.8	12.7	11.5	10.4	9.2	8.1	0.9	5.8	4.6	3.5	20	1.2
	26°C	14.6	13.4		11.0	9.8	8.5	7.3	481		3.7	2.4	1.2
	27°C	15.5	14.2	12.9	11.6	10.3	9.0	7.7			9	2.6	1.3
	28°C	16.3	15.0	13.6	12.3	10.9	9.5	8.2	(2)遁	めの技	一定	2.7	1.4
	29°C	17.3	15.8	14.4	12.9	11.5	10.1	8.6			4.3	2.9	1.4
	30°C	18.2	16.7	15.2	13.7	12.1	10.6	9.1	7.6	6.1	4.6	3.0	1.5

図12 春季の換気手法の違いと飽差(ハウスの環境制御ガイドブックより一部改変)

- ①早めの換気(もしくは段階を踏んだ換気、開度の小さい換気):急激な飽差の変化が起こりにくいため、植物体にストレスが少ない。
- ②遅めの換気(もしくは段階の少ない換気、開度の大きい換気): 飽差が急激に変化するため、気孔閉鎖や植物体のストレスの原因となる。

2) 遮 光

光1%理論より、施設内に入る光は可能な限り光合成に活用したい。よって、遮光はやむを得ない場合を除き、極力使用しない方がよいが、日射量が多すぎる、LAIが十分に高くない、根からの給水あるいは根域への給水が足りない場合など、萎れの発生が懸念される場合には、遮光資材による遮光をおこなう。

長期長段どり栽培では、夏季高温時に定植を行うが、LAIが最も低い状態で強光にさらされるため、この時期だけは積極的に遮光をおこなうとよい。ただし、苗の活着以降は徐々に遮光時間を減らし、遮光資材に頼らない管理に切り替えていく必要がある。

また、曇天が数日続いた後の晴天日には、急激な湿度変化や根圧の不足により蒸散量と吸水量にアンバランスが生じ、萎れが発生しやすくなる。このような場合には、本来遮光の必要がない期間であっても、適宜遮光を実施する必要がある。

3) 細霧冷房の活用と留意点

細霧冷房システムは、葉面積の確保が難しい定植~初期生育期や、換気が盛んに行われる時期において、空中湿度を確保するために有用なシステムである。一方で、飽差管理により高湿度条件を長期間維持し続けるような管理を実施すると、個葉の光合成速度そのものは最大化するが、いくつか問題も生じる。

例えば、細霧冷房システムを用い、光合成の促進に有効とされる飽差3~6g/m³を連続的維持した場合、空中湿度が高く維持されるため、葉からの蒸散量が慢性的に低下し、根からの給水・吸肥が緩慢となる。葉は薄く大きくなり、樹勢は栄養生長に傾きやすくなる。また、細霧の粒径が大きい場合や、噴霧ノズルから植物体までの距離が近い場合は、植物体に濡れを生じて病害発生リスクが高まる。

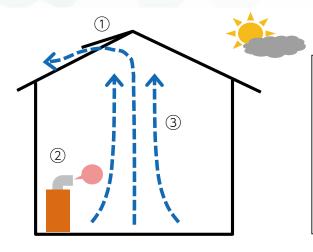
よって、細霧冷房を用いた飽差管理を行う場合は、光合成の促進だけを最優先するのではなく、目標とする飽差よりやや乾き気味の管理にとどめ、朝夕など施設内の空気を乾かす時間帯を設けることが重要である。

(3) 高湿度時の病害対策

1) 除湿のための換気方法

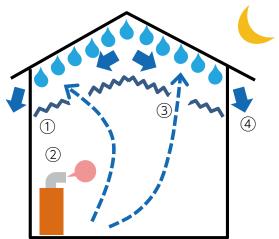
冬季に換気が少ない場合、作物の蒸散により施設内の水蒸気はすぐに飽和に達する。過度な高湿度環境は蒸散を抑制し、養水分の吸収低下にもつながる。

そこで、日中にはこまめな換気と加温を組み合わせることで、多湿空気を効率的に排出することができる。また、 夜間には暖房機の設定温度をやや高め、保温カーテンをわずかに開けることにより、施設内外の温度差を利用 して外部被覆資材の内側に結露させることができ、結露水を排水することで空中湿度を下げることができる(図 13)。



冬季の曇雨天日における日中の除湿管理

- ①天窓をわずかに開ける
- ②暖房機を通常の換気温度よりやや低い温度設定で稼働させる
- ③緩やかな上昇気流が起こり、多湿空気 を緩やかに排出できる



冬季の夜間における除湿管理

- ①保温カーテンをわずかに開ける
- ②暖房機を通常暖房温度よりやや高く 設定し稼働させる
- ③多湿空気がカーテンの隙間から屋根付近へ移動
- ④外被の内側に結露させ、樋などで受けて外部へ排水する

図13 日中および夜間における除湿手法(トマトの長期多段どり栽培より一部改変)

2) 早朝加温

灰色かび病や葉かび病の発生は結露による植物体の濡れが大きな要因となる。高湿度(低飽差)であるほど露点温度が高くなるため、日の出後、気温と比べ温度が上昇しにくい果実では温度差により果実表面に結露が発生 しやすい。

例えば、気温14 $^{\circ}$ 、相対湿度90%の空気の露点温度は12.4 $^{\circ}$ であり、この状況では気温よりわずか1.6 $^{\circ}$ 差で結露が発生することになる。

そこで、日の出前から加温を開始し、日射により急激に温度上昇が起こる日の出までに、施設内気温を高めておくとよい。ただし、暖房により急激に施設内気温が高まると、暖かい空気と冷えた果実との温度差により結露を生じるため、暖房温度の設定値は1時間当たり1~2℃程度の上昇幅となるような階段状の設定とするとよい。

3) 温度ムラ対策

同じ施設内であっても、場所や高さによって温度ムラが発生する。例え1℃の気温差であっても、相対湿度は5%以上の差がみられることもあるため、注意が必要である。

温度ムラを少なくするには、暖房機のダクトの活用や配置の見直し、更にダクトや内張資材に破れがないかを確認する。また、循環扇を設置し施設内の空気を撹拌・循環することも有効である。



温度の管理

温度は、トマトの生育に大きな影響を及ぼすが、特に展葉、出蕾、果実の着色、などの発育および糖の転流、呼吸に関与する。このため、栄養生長と生殖生長を同時に管理していく必要があるトマトでは、温度の制御はトマトの樹勢の強弱と生育バランスの制御に活用できる。

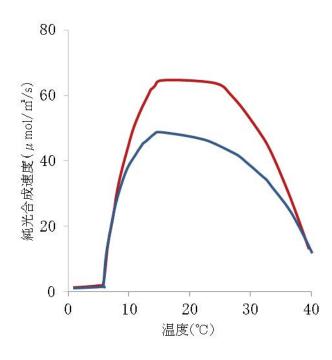
(1) 発育と温度の考え方

トマトが好適な生育を示す温度 (15~28℃) の範囲内であれば、最高温度や最低温度などの短期的な温度変化はトマトの光合成そのものにはほとんど影響がない (図14)。一方、日平均気温や積算温度などの中・長期的な温度の変化は葉や花房の展開や、果実の成熟に密接に関わっている (図15)。

例えば、日平均気温20Cの条件下では、1週間で3葉が展開する。トマトでは葉3枚につき花房が1つ出現するため、出蕾は葉の展開の1/3の速度となる。果実も開花後、積算温度約1,100C(日平均気温20C×55日)で着色し、収穫を迎える。

温度管理を変更すると、その後1週間~10日程度で生育に変化が現れるため、温度管理変更による生育への変化を評価するためには1週間程度かかる。したがって、植物体の生育のコントロールには、週単位での生育調査と、こまめな温度管理の調整が必要である。

なお、例外として短期的な温度変化であっても、トマトが好適な生育を示す温度帯を外れると、高温では花粉の 稔性低下やリコペン生合成阻害による果実の着色不良、低温では窓あき・チャック果をはじめとする生理障害果の 増加などの問題を引き起こす場合がある。



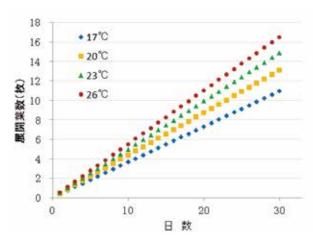


図15 CO₂施用がトマトの器官別乾物重に及ぼす影響 (De Koning (1994) の式より作図)

図14 トマトの光合成速度に与える温度、CO₂の影響 トマトの光合成速度に与える温度、CO₂の影響 1500μmol/㎡/sの 光強度におけるTOMSIM シミュレーション。 概ね15~28℃の温度範 囲では純光合成速度にほとんど影響がない。 (「トマト オランダの多収技術と理論 | よりトレース)

(2) 樹勢・生育バランスと温度管理

1) 日平均気温の管理

温度が光合成に及ぼす影響は限定的で、15~28℃の広い範囲で変わらないとされている。生長は光の総量で 決定され、発育は温度に依存する。同化産物の供給と消費のバランスを考えた温度管理が必要である(表2)。

光合成産物量が同じである場合、日平均気温が高いほどトマトの伸長速度は速くなり、エネルギー利用も多くなる。その結果、光合成によって獲得したエネルギーよりも伸長速度が上回る場合、樹勢は弱くなる。

一方、日平均気温が低くなると、トマトの伸長速度が鈍化し、その分エネルギー利用も少なくなる。その結果、樹 勢は強くなる。

これらの特性を活かして、日平均気温を管理することでトマトの伸長速度を増減させ、樹勢の強弱をコントロールすることができる。

表2 日射と温度管理の基本的な考え方

時期	日射	光合成 同化産物	温度管理	トマトの生育
冬季	少ない	少ない	低め	発育速度が低下するが、発育速度に見合って展開してくる葉や花房に十分な同化産物を供給でき、樹勢が低下しにくい。
《字	914V.	974(1	高め	少ない同化産物が果実へ多く配分され、成長点での利用割合が減り、樹勢が低下しやすい。
春季	夕い	夕山		発育速度の増大に見合った十分な同化産物を供給でき、樹勢のバランス がとりやすい。
甘学	多い	多い	低め	葉、花房の展開、果実成熟の速度低下により、同化産物の分配が滞り、樹 勢が強くなりすぎる。

2) 昼夜温度差の管理

昼夜温度差は、その差が大きいほど植物にストレスを与えることができる。よって、昼夜温差を大きくするとトマトの生育は生殖生長に傾きやすくなる。一方、昼夜温差を小さくするとストレスが小さくなり、トマトの生育は栄養生長に傾きやすくなる。

これらの特性を活かし、昼夜温差によりトマトの生育バランスをコントロールできる。

3) 温度による生育コントロール

①樹勢の強弱および栄養生長/生殖生長のバランスの考え方

【樹勢が強い】



植物がエネルギーを多く蓄えている状態。着果負担が少ない時、温度が低く生育速度が遅い時などになりやすい。

→判断基準: 茎径が太い、伸長量が多い、葉が大きく葉色が濃いなど

※エネルギー=同化産物

【樹勢が弱い】



植物のエネルギーが不足している状態。着果負担が大きい時、温度が高く生育速度 が速い時などになりやすい。

→判断基準: 茎径が細い、伸長量が少ない、葉が小さく葉色が薄いなど

【栄養生長】



エネルギーが栄養器官(根・茎・葉)により多く利用されている状態。昼夜温度差によるストレスが少ない時になりやすい。

→判断基準: 開花花房距離が長い、花梗がまっすぐ立ち上がる、 着果が遅いなど

【生殖生長】



エネルギーが生殖器官(花・果実)により多く利用されている状態。昼夜温度差によるストレスが多い時になりやすい。

→判断基準: 開花花房距離が短い、花梗が太短い、 着果が早いなど

4) 具体的な温度管理例

①樹勢が強く、栄養生長に寄りすぎている場合

樹勢を弱めて、生殖生長に傾ける必要がある。 日平均温度を上げ、昼夜温度差を大きくする。

例:日中平均温度を上げる

②樹勢が弱く、栄養生長に寄りすぎている場合

樹勢を強くして生殖生長に傾ける必要がある。 日平均温度を下げ、昼夜温度差を大きくする。

例:夜間平均温度を下げる

③樹勢が強く、生殖生長の場合

樹勢を弱めて栄養生長に傾ける必要がある。

日平均温度を上げ、昼夜温度差を小さくする。

例:夜間平均温度を上げる

④樹勢が弱く、生殖生長の場合

樹勢を強くして、栄養生長に傾ける必要がある。

日平均温度を下げ、昼夜温差を小さくする。

例:日中平均温度を上げる

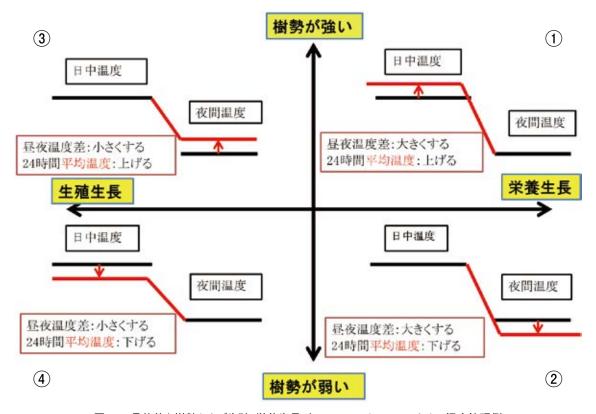


図16 具体的な樹勢および生殖/栄養生長バランスのコントロールのための温度管理例 (施設と園芸No.166より一部改変)

(3) 1日の変温管理

葉 (ソース器官) で光合成により精算された同化産物は、果実や生長点、根など (シンク器官) へ滞りなく転流させる必要がある。 転流の適温は光合成適温よりも高く、また、同化産物は相対的に温度の高い部位に移動しやすい。よって、 転流を促すために、 光合成の盛んな正午をピークに温度を高める (図17)。

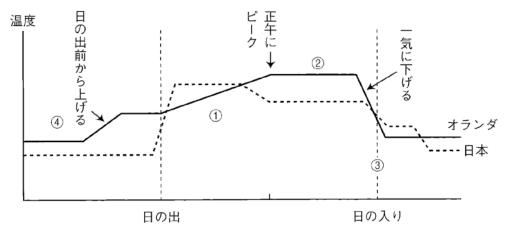


図17 光合成と転流分配を重視した変温管理のイメージ(ハウスの環境制御ガイドブックより)

- ①午前中は日射に比例して徐々に温度を上げ、正午頃をピークにする。
- ②午後から日の入までは高い温度をキープし、同化産物の転流を促進する。
- ③日の入り前後30~90分の間に温度を一気に降下させる。これにより葉温が速やかに低下し、質量の大きい果実や、培地内にある根との温度差ができ、葉からこれらの器官への同化産物の転流が促進される。茎葉への同化産物の分配が減ることで、徒長を防ぐ効果もある。
- ④日の出3時間前から徐々に温度を上げ、日の出時点での光合成適温を確保する。また、1時間当たり2℃までの温度上昇にすることで、植物体(特に果実)への結露を防ぎ、病害の発生を軽減する。

■ 地下部の環境制御



養水分の管理

水は、植物体重量の約90%を占め、光合成における構成原料、蒸散による冷却、養分の輸送を担う極めて重要な要素であり、不足なく供給しなくてはならない(図18)。

(1) 日射量に応じた灌水

トマトの長期長段取り栽培において、1日当たりの水の要求量は3月に入ると1.0L/株/日(2,500株/10aとすると2.5t/10a/日)を超え、以降増加し続ける。蒸散に最も影響するのが日射である。

最も日射の少ない冬季の日射量と灌水量を把握するとともに、春以降の日射の増加に合わせて不足しないよう 灌水量を増加させる。

一方、潅水量を増やす際には過剰な根圧で軟弱徒長にならないよう、養液濃度 (EC) を高める必要がある。



図18 日射量に応じた潅水の例(㈱兵庫ネクストファーム2016年度作データより)

(2) 受動的吸水と能動的吸水

養水分の吸収は、日中は蒸散により受動的に、夜間は根圧により能動的に行われる。受動的吸水では蒸散の少ない果実や生長点には日中ほとんど養水分が流れない。一方、能動的吸水では呼吸エネルギーを使って積極的に養水分を取り込むため、カルシウムやマグネシウムなど日中吸収されにくい養分を果実や生長点に供給するのに役立つ(図19)。

要素欠乏の多くのケースでは、肥料そのものの欠乏ではなく、根からの輸送がされていないために発生する。 カリ欠乏の葉先枯れは日中の十分な灌水、カルシウム欠乏の尻腐りは夜間の根圧を高めるなど、灌水の見直し も検討すべきである。

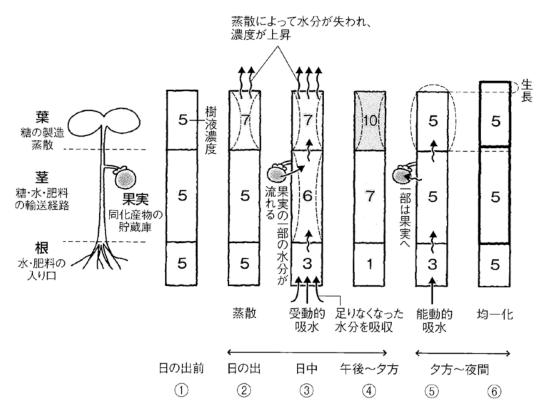


図19 受動的吸水と能動的吸水(ハウスの環境制御ガイドブックより)

(3) 潅水等による生育のコントロール

定植直後のトマトは旺盛な生育を示し、着果負担がないため栄養生長に傾いた状態となる。しかし、トマトは果 実生産を行うための作物であり、ある時点からはそのエネルギーを生殖生長に振り向けねばならない。空中湿度 や根域のEC、潅水方法など多くの手法は、栄養生長と生殖生長のバランスをとるために利用できる。

給液や培地内のECを低くする、潅水間隔を短くする、潅水開始時刻を早める、潅水切り上げ時刻を遅らせる、などの管理を行うと、植物体の根へのストレスが緩和され栄養生長に傾きやすくなる。逆に、給液や培地内のECを高くする、潅水間隔を長くする、潅水開始時刻を遅らせる、潅水切り上げ時刻を早める、などの管理を行うと、植物体の根へのストレスが増加し、生殖生長に傾きやすくなる(表3)。

表3 栄養生長と生殖生長を調節するための潅水と施肥の方法

	生育への影響						
	栄養生長	生殖生長					
湿度レベル	高くする(低飽差)	低くする(高飽差)					
培養液(スラブ内)のEC	低く	高く					
潅水の間隔	短く	長く					
潅水の頻度	多く	少なく					
朝の潅水開始時間	早く	遅く					
午後の最終潅水時間	午後あるいは夜遅くまで続ける	午後あるいは夜の早期に切り上げる					

(トマトオランダの多収技術と理論より一部改変)

植物体の管理



摘果 (摘花)

摘果作業は果実肥大期に実施し、奇形果や遅れて着果した花房先端の果実を切除し、花房当たりの着果数を揃える。ただし着果が良好な時期には開花3~6日後の時点で切除してもよい(摘花)。

従来、摘果作業の目的は、果実サイズを均一にするとともに果実サイズを大きくして品質を高め、奇形果や小果など商品価値の低い果実を摘除することで収量性・収益性を高めることとされてきた。

一方で、摘果作業には、株当たりの着果数をコントロールすることで植物体と果実への同化生産物の分配バランスをとる目的もある。一般的にトマト1株当たりの着果数は18果以下が望ましいとされているが、摘果による株当たりの着果の増減を利用して、生育差のある株同士や群落全体の樹勢管理にも活用することができる。

摘果の頻度もしくは1回当たりの摘果数を増やすと、株当たりの着果数が減少し、着果負担が減るため、樹勢は強くなる。一方、摘果の頻度を減らし1回当たりの摘果数を減じると、株当たりの着果数が増加し、着果負担が増えるため、樹勢は弱くなる。



摘 葉

(1) 若い葉の摘除(トップリーフ摘葉、上位葉摘葉)

これまでは花房近くの葉が同化産物の供給に重要であるとされてきたが、近年、花房と葉の距離は同化産物の供給に大きく影響しないことが示されている。よって、日射量に対しLAIが十分確保されていれば、開花花房近傍の若い葉を摘除することで、果実への同化産物の分配量を増やすことができる。

3葉毎に1花房が出現するトマトでは、同化産物の70%が花房へ、残りの30%が3枚の葉へそれぞれ10%ずつ分配される。今、3葉のうち1葉を切除すると、各器官への同化産物の分配割合は変わらないため、花房へは77%、残り2枚の葉へはそれぞれ11%ずつ同化産物が分配されることとなり、花房への分配量が相対的に増加する。

しかし、株全体で見ると、1株当たりの生葉数が減少するため、LAIも低下することになる。よって、若い葉の摘除を行う時期としては日射の少ない時期が適しており、かつ下葉かきのタイミングやかき取る葉枚数を調整し、LAIを最適に保つ管理も必要となる。強日射条件や、日射に対しLAIが低い状況で本処理を行うと、効果が得られないばかりか、光合成量低下により樹勢や収量性の低下につながるため留意する。

また、若い葉の摘除は、その葉長が最大葉の50%未満であるうちに行うことが重要である。完全展開葉では生 長のための乾物分配が完了しており、摘除しても果実への乾物分配が変わらなくなるためである。

さらに、若い葉を摘葉するとその上下の節間長が短くなるが、株ごとに摘葉の有無が異なると主茎長に差がつき、成長点や収穫花房の高さが揃わなくなることがあるため留意する。

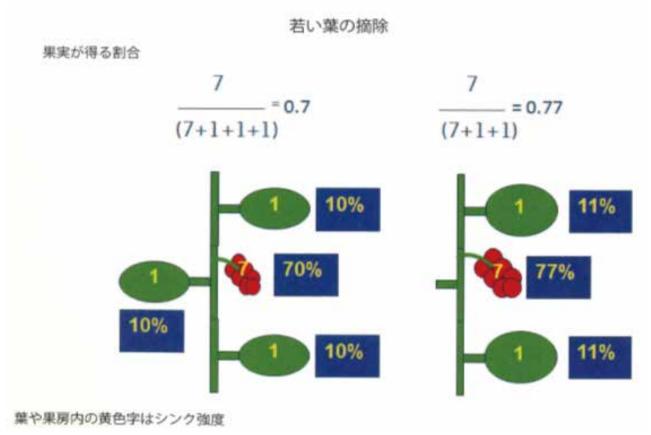


図20 トマトの若い葉の摘除が分配に及ぼす影響(環境制御のための植物生理より)

(2) 下葉かき

完全に生育した葉は同化産物を引きつける力がほとんどないため、古い葉の摘除は果実への同化産物分配には あまり影響しない。しかしながら、下位葉の摘除 (下葉かき) は、灰色かび病やコナジラミ類などの病害虫発生予防 に有効である。

LAIの設定に基づき葉の数が予定している最大値に達したら、その時点から週に2~3枚ずつ下葉を摘除する。 摘葉の枚数は、日平均気温ないし週当たり展開葉数により増減させる。摘除に消毒したナイフを用いると、切り口 がきれいになるので灰色かび病の侵入を防げる。また、葉を茎元で切除することで脇芽の発生を抑えることもでき る。

3 増 枝

栽植密度に対して光が十分に強い場合には、側枝を伸ばして増枝することで、LAIを増加することができる。増枝のタイミングは、1月以降の日射量が増加し始める時期がよい。増枝によりLAIが最適に保たれれば、光合成量の増大が期待できる。当然、単位面積当たりの果実数が増加するため、収量も増加する。



誘引

長期長段取り栽培でつる下ろし誘引法を行う場合、つる下ろし作業の頻度や誘引手法などの管理作業によって、 その後のトマトの生育に影響を及ぼすことが知られている。

つる下ろし作業の頻度が低い、もしくは主茎と誘引線をテープやクリップで固定する場合は栄養生長に傾き、つる下ろし作業の頻度が高い、もしくは主茎に誘引線を直接巻き付けて誘引している場合には、生殖生長に傾くとされている。

<参考図書>

- ・IGHプロジェクト (2017), 太陽光利用型植物工場イノベーティブグリーンハウスにおけるトマト50t採り栽培マニュアル, IGHプロジェクト事務局
- ・エペ・フゥーヴェリンク(2012),トマトオランダの多収技術と理論100トンどりの秘密,農文協
- ・(社)日本施設園芸協会・日本養液栽培研究会(2012),養液栽培のすべて,誠文堂新光社
- ・吉田剛 (2016), トマトの長期多段どり栽培 生育診断と温度・環境制御, 農文協
- ・社団法人日本施設園芸協会, コンピュータによる温室環境の制御 オランダの環境制御法に学ぶ (2004), 誠文堂新光社
- ・エペ・フゥーヴェリンク、環境制御のための植物生理、農文協
- ・農業技術体系野菜編2トマト、農文協
- ・斉藤章, ハウスの環境制御ハンドブック(2015), 農文協

第3章 モニタリング

作物の生育に関わる環境要因(温度、湿度、CO2濃度な ど)を環境測定装置により機械的に測定し(写真参照)、環境 データを計測・記録することをモニタリングと言います。また、 作物の生育(茎径、葉数など)を定期的に調査することもモニ タリングと言います。

ともに、モニタリングにより作物生育に関わる要因を『見え る化』することが出来ます(写真、図参照)。



測定装置による環境モニタリングの様子



環境モニタリング

(1) 温度(8.5℃:写真モニター画面数値)

施設内の温度は、作物の生育、病害虫の発生に影響し ます。

(2) 相対湿度(53.8%)

相対湿度は、施設内温度においてその空気に最大含むこと ができる水蒸気量と実際含まれる水蒸気量の比率です。高い 相対湿度が続くと病害の発生のリスクが高まります。また、低 すぎると葉からの水分の蒸散を防ぐため、気孔が閉じます。

(3) 飽差(4.0g/m³)

飽差は一定容積の空気にあとどれくらい水蒸気を含むこと が出来るかを示す指標で、乾きやすさの目安となります。

(4) 日射量(21W/m)

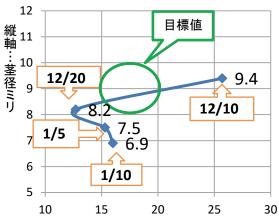
太陽から受ける放射エネルギー量です。値が大きいほど、光 合成量は増えます。

(5) CO2(二酸化炭素)濃度(379ppm)

空気中に含まれるCO2の割合で、施設内では夜間、呼吸 により増加し、昼間は光合成により低下します。通常、外気で 400ppm程度の濃度です。



環境モニタリングのモニター画面



横軸…生長点から開花果房までの長さ(センチ) 図 トマトの生育の推移

生育モニタリング

トマトでは、表のように生長点から開花果房までの長さ、茎径、葉長、葉幅、生葉数、開花段数、収穫段数、着果 数を定期的に調査し、作物の生育状況の『見える化』により、目標とする生育に近づける栽培管理を行うことが出 来ます。また、イチゴでも別表事項の定期調査により、『見える化』が可能です。

表 トマト生育調査(モニタリング)について

測定項目 (単位)	測定方法	判断
生長点長 (〇.〇㎝) 0.5cm間隔で可	生長点 (見た目の先端部分) から開花花房 (1~2花以上開花) までの長さ (黄色部 分)	栄養生長 生殖生長
茎 径 (○.○mm)	<u>生長点から15cm下の</u> 茎の太さ (ノギスの下から赤ラインが15cm:赤の矢 印の位置で測定)	樹勢
葉 長 # (○cm)	開花花房の直下葉の茎から先端までの長	
葉 幅 # (○cm)	さと最大葉幅	生長量 (#葉面積指数LAI と関連した項目)
生葉数#(○枚/株)	1株内における葉長20cm以上の葉の数 (摘葉があるので葉にマジックでナンバーリングすると数えやすい。)	
開花段数(〇段目)	調査日に開花している最上段数	生育ステージ
収穫段数(〇段目)	調査日に収穫している段数	生育ステージ
着 果 数(個/株)	1株当りの目で確認できる着果数 (段数毎)	着果負担

調査地点 環境測定装置周辺の定点

調査株数 |5株||:定点連続。枯れた場合は続きの株で調査

調査間隔 1週間毎に実施 調査曜日の固定

調査時間 午前中の定時を設定(収穫前)

生育調査野帳

品種 ハウス桃太郎 (台木 ベストガード) 定植日 7/31 植付本数 1500 本/10a

<u>調査日 1/5 金 (第 1 週) 施設栽培面積 15.2 a</u>

設定EC 2.3 mS/cm 設定日潅水量 0.3リットル/株/日

調査者名 兵庫 トマ子

<u> </u>						pre to		
	調査株番号			計	平均	備考		
調査項目	1	2	3	4	5			
生長点長	11.0	12.5	13.5	12.5	11.0	6 1 0	12.2	$(0.5\mathrm{c}\;\mathrm{m})$
茎径	8.8	9.0	9. 5	8.8	9.3	4 5 6	9. 1	(0.0mm)
葉長	3 8	4 1	4 3	3 9	4 5	206	41.2	(0 c m)
葉幅	2 9	3 2	3 4	3 0	3 5	160	32.0	(0 c m)
生葉数	1 5	1 6	1 6	1 5	1 6	7 8	15.6	(枚/株)
開花段数	1 1	1 2	1 1	1 1	1 2	5 7	11.4	(段)
収穫段数	8	9	7	8	9	4 1	8. 2	(段)
着果数	1	2	1	2	1			上位段(⑤)
(個/株)	② 3	ε	3	3	3			は花と果実
	3 2	2	3	2	2			が混在。下位
①が下位段	4 2	1	2	1	2			段(①) は収
数	<u>(5)</u>							穫のため、数
								値が低い。
	計8	8	9	8	8	4 1	8. 2	

病害: うどんこ病

害虫: コナジラミ

その他 週初めに雪降り、外気温-3℃に 今週より、着果3果から2果に

改善案 かいよう病株抜き取り。養液 循環を掛け流しに

収量

① 前年度収量 ____16 t/10 a

② 目標収量 20t/10a ③週間収量 600 kg/10a

表 イチゴ生育調査(モニタリング)について

測定項目 (単位)	測定方法	判断
草丈 (○.○cm)	地際から自然のままの草姿で最高位までの高さ (定規 0.5cm間隔で可)	樹勢
葉長 (〇.〇cm)	完全展開第1葉の先端の小葉の付け根から葉先までの長さ(定規)	(茶石建长粉1 41)
葉幅(○.○cm)	完全展開第1葉の先端の小葉の付け根から葉先まで最も広い部分の長さ (定規)	(葉面積指数LAI)
生葉数 (○枚/株)	同化作用を行っている葉面積が1/2以上 残った <u>完全展開葉</u> の枚数	← [葉ヘマジックで ナンバーリング]
花房間葉数(〇枚)	定植時〜第1花房までの葉数および次の花果までの葉数	生育速度
着果数 (○個/株)	1株に着果している果実数	着果負担

調査地点 環境測定装置周辺の定点

調査株数 |5株||:定点連続。枯れた場合は続きの株で調査

調査間隔 2週間毎に実施 調査曜日の固定

調査時間 午前中の定時を設定(収穫前) 設定EC 0.2 mS/m

生育調査野帳

 品種 章姫 (購入) 定植日 9/25 植付本数 6700 本/10a

 調査日 1/5 金 (第 1 週) 施設栽培面積 15.2a

調査者名 加西 いち男

設定日潅水量 0.2 リットル/株/日

調査項目	調査株番号			計	平均	備考		
	1	2	3	4	5			
草丈	18.5	19.0	17.0	20.0	18.5	93.0	18.6	
(0.5 c m)								
葉長	10.5	9.0	11.5	12.0	11.0	54.0	10.8	
(0.5 c m)								
葉幅	7.5	8.5	9.0	8.5	7.0	405	8.1	
(0.5 c m)								
生葉数	8	9	1 0	1 1	8	4 6	9.2	
(枚 /株)								
花房間葉数	5	6	5	5	6	2 7	5.2	
(枚)								
着果数	8	7	9	6	7	3 7	7.2	
(個/株)								

病害:	炭疽病2株有り	

その他 日射量が少なく、色づき悪い

改善案 炭疽病株抜き取り、ダニ天敵の追加、玉だし

事前把握事項

① 前年度収量 ____3.0 t/10a

害虫: ダニ

② 目標収量 4.5 t/10a 週間収穫量 117 kg/10a

環境制御技術を導入するにあたり

参考資料



立地条件

通常の施設栽培では基本的には①日当たり②水の便利③保水性排水性④風当たり⑤土質(肥もち、肥沃度) ⑥病害虫 ⑦前作⑧周辺作物等を考慮しますが環境制御技術を取り入れた大型施設では下記の点も注意が必要です。

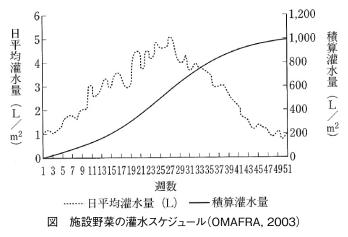
(1) 日射量

光は人工的には増加させることは難しく、制限要因になることが多い。環境制御技術は光合成を最大限活用する必要があり、周年的に日射量が好適レベルになるような立地条件を選ぶことは重要である。

(2) 水源(水質・水量)の確保

環境制御を地下部まで行うためには培地も均質化を図る必要がある。その点でロックウール等の培地が検討されるが緩衝能力が低いため、水質には特に注意が必要である。

また、トマト等の果菜類は葉菜類に比べ、1株当たりの吸水量が圧倒的に多い。生育が旺盛なトマト植物体に対しては、高温期の晴天時には5L/㎡ (栽植密度を2.5株/㎡とすると1株1日当たり2L)以上の給液が必要となる。よって10a当たり5t、1ha当たり50tの用水が必要であり、これに加えて防除や諸作業に必要な用水量も確保しなければならない。



(3) 周辺環境への配慮

軒高の高い大型施設の建設となれば、日照権、大型化した暖房機の騒音など住民トラブルも懸念する必要がある。

(4) 各種法律(都市計画法、治水法、農地法・・・等々)の確認

大型施設の建設となれば、付帯施設 (出荷調整場、加工場、従業員駐車場、直売所、等々)も必要である。農振 地域で事前に建設可能かどうか、各行政機関のどの部署 (農政課、土木課、都市計画課、等々)と相談しておく必 要があるのか確認が必要。



その他 (立地以外)

(1) ハウス性能の把握

ハウス壁面の熱貫流率が想定よりも大きい場合、暖房負荷は増大し、ひいては暖房コストが上昇する。またハウスの換気回数が大きかった場合、暖房コストとともに、CO2施用コストの増大を引き起こす。

他方、温室内の環境むらは、作物の生育むらを引き起こしてしまう可能性が高まる。具体にどの程度のむらがあるのか、作物栽培前に把握しておく方が好ましいと考える。

大規模施設の中でも連棟型と単棟型の考え方があったがそれぞれどのようなメリット・デメリットがあるか要検 討。雪国というデメリットからハウスメーカーが連棟型については首を縦に振らなかった事例もある。単棟型はエネルギーコストの効率も悪いが自前のエネルギーを用意することでカバーする必要がある。

(2) 病害虫の予防が重要

環境制御施設園芸では、施設内での環境が安定的であるため、施設内への侵入を許すと爆発的な拡大をもたらす可能性が高く、最大の防止策は「予防」である。

開放部をできるだけ減らし、床面はコンクリート舗装や防草シートと防湿シートの2重敷設を行う。また施設の 出入り口は2重にするほか、窓や天窓などの開放部には0.4mm以下の防虫ネットを張り、対策を施す。有色粘着版 を用いた虫のモニタリングを行うなど、常に病害虫の発生状況を確認する体制を構築する。

苗生産は分離(分業、圃場隔離)し、病害虫の持ち込みによる感染を防ぐ。

野菜施設園芸における農業用被覆資材の 機能と特性

参考資料



外張り用被覆資材に求められる機能 *1

(1) 光・温度・水分・湿度の環境形成に関わる物性

- ·光学的特性:光透過性、光選択制、散光性、光調整
- · 防曇性 (流滴性)
- ·防霧性

(2) 展張・開閉作業等の利便性を左右する物性

- ·機械的特性:展張性、開閉性、伸縮性、強度
- ・展張作業性:重さ、柔軟性

(3) 耐久性や強度

- ・耐候性:展張期間が長いと、張替労力・費用等削減効果
- ・防塵性:光透過性の維持

(4) 経済性

- ・価格
- · 耐用年数
- ·保温性



内張り用被覆資材に求められる機能

(1) 光・温度・湿度の環境形成に関わる物性

- · 遮光性: 光透過性、光調整
- ・保温性
- 透湿性

季節により、求める物性が異なる。

(2) 展張・開閉作業等の利便性を左右する物性

- ・機械的特性:展張性、開閉性、伸縮性、強度
- ・展張作業性:重さ、柔軟性 内張は展張頻度が多いため、劣化が早い。

(3) 耐久性や強度

- ・耐候性:展張期間が長いと、張替労力・費用等削減効果
- ・防塵性:光透過性の維持 耐久性が低下すると、効果が劣り、環境制御が困難になる。

(4) 経済性

- ・価格
- ·耐用年数



施設栽培の目的の変化

- (1) 栽培温度の確保:低温回避
- (2) 栽培作物の保護:強風、降雨などの外部気象の回避、鳥獣害からの保護
- (3) 栽培環境調整:高温回避、作物の生長調整、品質向上、長期・周年栽培
- (4) 病 害 虫 防 除:病害虫の侵入回避、増殖防止
- (5) 環 境 負 荷 軽 減:省エネルギー、減農薬
 - ・施設栽培において、当初温度の確保や作物の保護が目的であったが、環境調整設備の設置、施設構造の変化及び農業用資材の開発により、フィルム資材の高品質化・多機能化が進み、環境調整、病害虫防除及び環境負荷軽減が目的として付加されている。



外張り用被覆資材の役割

- ・外張り用被覆資材の役割は、図のように風雨や病害虫からの保護と太陽からの光を施設内に取り込み、植物の光合成により生育を調整するものである。
 - この役割を考慮して、栽培作物や目的に合せて資材を選択する必要がある。

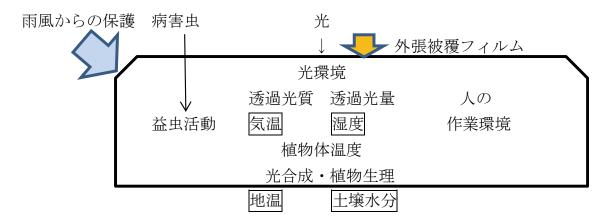


図 外張り用被膜フィルムの役割の概略



外張り用資材の種類 *2

(1) 軟質フィルム

① 塩化ビニール (PVC) フィルム [農ビ]

・農ビフィルムは、柔軟性・弾力性に富み、透明性が高く、長波放射の透過率が低く保温性が良く、防曇性が 優れて長期間持続する。しかし、資材が重いこと、可塑剤に起因するべたつきや、よごれの付着による光透 過率の低下が早い欠点がある。農ビフィルムには、透明と梨地のものがある。

② ポリオレフィン系フィルム [PO系フィルム]

・マルチ利用の農ポリ (PE) や内張・トンネル利用の農酢ビ (EVA) では、赤外線透過が大きいので、保温性に問題があった。保温性を向上させたPEとEVAをを多層構成にして正規凱旋吸収剤を配合した農業用ポリオレフィン系特殊フィルム (PO) が開発された。POは軽量でべたつきがなく、寒冷地でも使用できる。また、伸びが少ないのでバンドレスで展張できる(農ビはバンド必要)。これにより、台風時の取外し・再取付けなどの労力が軽減できる。POフィルムには、透明と梨地のものがある。

(2) 硬質フィルム

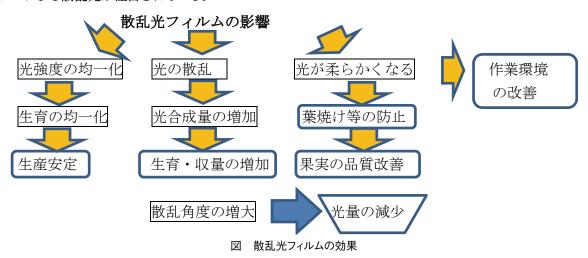
農業用フッ素樹脂 (FETE) フィルム

・炭層フィルムで、透明度が高く、光透過率は0.10mm厚手95%と他の外張り用資材に比べて非常に高い。経年劣化が極めて少なく長期展張が可能で、耐用年数の目安は厚さ0.06mmで約10から15年、厚さ0.10mmで15~20年、0.16mmで20年以上とされている。耐薬品性に優れ、農薬、硫黄燻煙ガスに対しても、他の素材より格段に強い耐性を持つ。砂やほこりが雨で流れやすく、滑雪性が高い。穴が空いたときに裂け目が簡単に広がることはない。FETEフィルムは、紫外線領域の透過が大きく、「自然光」に近いことを特長にしており、赤外線の透過率も低いので保温性は良い。FETEフィルムには、透明と梨地のものがある。



梨地(散乱光)フィルムの特長

・従来、栽培現場では直立光と開放感から、透明性の高いフィルムが好んで使用されているが、現在は梨地フィルムによる散乱光が注目されている。



・散乱光により、施設内の光強度が均一化され、植物の生育の均一化につながり、生産安定に寄与する。また、 光の散乱により葉に当たる光量が増え、光合成量の増加となり、生育・収量の増加に関与する。光が柔らかく なり、葉や果実への光量が減り、障害果を減らし、品質向上に結びつく。更に、施設内で作業をする人の環境 が改善される。以上4つの効果が見られる。ただ、散乱角度の増大により、施設内の光量はやや減少する。



内張り用被覆資材の役割

- ・内張り用被覆資材の役割は、太陽からの光の遮光と施設内温度の維持をし、植物の栽培環境を調整するものである。
- ・この役割を考慮して、栽培作物や目的に合せて資材を選択する必要がある。

8

内張り用被覆資材の種類

- ・内張り用被覆資材は、遮熱資材として昼間の施設内異常昇温の防止と夜間の保温性の向上の2つの目的がある。
- ・材質は、ポリエチレン+アクリル、アルミ+高密度ポリエチレン+アクリル、アルミ+アクリル+ポリエステル+高密度ポリエチレン等と遮光性、保温性及び耐久性を高めるために多くの材質を使った高機能の内張り用資材が販売されている。

【参考】

*1 :日本施設園芸協会「被覆資材の導入の手引き」改変

*2 :日本施設園芸協会「施設園芸ハンドブック」

発行 兵庫県次世代施設園芸技術習得支援協議会 作成 農業 ICT (施設園芸) プロジェクトチーム