

H25～29 食糧生産地域再生のための先端技術展開事業（岩手県内）

中山間地域における施設園芸技術の実証研究報告書

寒冷地中小規模施設における 複合環境制御技術の導入手引き



×



岩手県農業研究センター

はじめに

岩手県は、夏季冷涼な気候を活かした雨よけ夏秋栽培が盛んな地域ですが、一部の地域では加温半促成栽培などの長期どり栽培にも取り組んでいます。しかし、これまでの加温栽培では、植物生産の基本的な考え方に偏りがあったため、作期を拡大しても期待するような収量が得られず、経営リスクの高い作型になっていました。また、2007年以降の原油等高騰の影響により、多くの品目で暖房費が経営を圧迫するようになり無加温栽培へ転換することになりました。

しかし、近年の施設栽培では、環境制御やICT技術を活用することで、設備やエネルギーへ積極的に投資して飛躍的に高収量、高収益経営へ転換する事例が増えてきています。これまでは、加温栽培や環境制御は温暖地域の技術と捉えられていましたが、海外の先進事例の栽培技術を導入することで、本県でも多収生産が可能という結果が得られました。このことから、本県の気候でも十分に適用可能な技術であり、本県の施設栽培の持続的な展開が期待されます。

本手引き書では、復興庁・農林水産省委託プロジェクト研究「食糧生産地域再生のための先端技術展開事業(H25～29)」での実証研究活動を取りまとめ、県内で環境制御などに関心ある生産者や指導者の皆様に広く活用いただけるよう、多収化への転換につながった植物生産の基礎理論、運用技術、視点などについて取りまとめました。本書の内容を網羅的に理解するというよりは、関心のある技術に取り組みながら、理解を深めたいときに本書を活用いただければと思います。

東日本大震災被災地域の施設栽培の発展はもとより、本県広域の施設栽培の発展のために有効活用いただければ幸いです。

複製、転載については、原著者の承諾を得てください。

この手引き書で紹介する環境制御の管理方法や、機種、システムなどは参考事例として示したものですので、それぞれの施設条件や栽培環境に応じて運用方法を工夫する必要があります。また、基礎理論などについても主要な果菜類での考え方を主体に取りまとめたものですので、他品目へはそのまま流用できない場合がありますのでご了承ください。

内容

第1章	植物生産のきほん	1
第1節	栽培管理	1
第2節	植物生産と光合成	1
第3節	成長と発育	7
第4節	リービヒの最小律	8
第2章	環境要因	9
第1節	光	10
第2節	水	12
第3節	二酸化炭素(炭酸ガス)	15
第4節	湿度	16
第5節	温度	17
第6節	気流	18
第7節	地下部環境	19
第8節	考慮すべき植物生理	21
第3章	実践につなげるための例題	26
第1節	高温対策	26
第2節	良苗生産	26
第3節	土づくり	26
第4節	摘葉	26
第5節	葉面散布剤	26
第6節	増収のための取り組み	26
第4章	環境制御の運用技術	27
第1節	環境計測	27
第2節	環境制御	28
第3節	養液栽培	40
第4節	濃度施用と量施用	42
第5節	生育調査	43
第5章	多収化モデルによる運用技術	47
第1節	多収化モデルの技術様式	47
第2節	要素別の技術概要	48
第3節	育苗管理(1～2月)	58
第4節	定植後の初期管理(2～3月)	59
第5節	初期生育(4～5月)	60
第6節	収穫開始以降の管理(6月)	61
第7節	梅雨時期の管理(7月)	62
第8節	高温期の管理(8月)	63
第9節	秋雨期の管理(9～10月)	64
第10節	厳寒期の終盤管理(11～12月)	65
第11節	運用上の参考事項	66
第6章	実践的な視点・考え方	72
第1節	イノベーター理論	72
第2節	D-OODAループ	73
第3節	グロース・マインドセット	76
第7章	引用文献	79

第1章 植物生産のきほん

第1節 栽培管理

耕地に作物を育てて収穫をあげるすべての手段を「栽培」といい、農業生産の主体となります。植物生産では一定面積の耕地から最大の生産を得るという目的を達するために、作物の生産能力を高める必要があります。特に植物の先天的性質である遺伝性が優秀でない限り増収は難しく、例え遺伝的性質が優れていても植物をとりまく環境が不適であればその能力を十分に発揮できません。自然条件では完全な環境となる場合はほとんどなく、そのままでは生産力を高めることができませんが、人為的に環境を改良することで、生産性を向上させることができます。

私たちは、地下部環境の改善のため、耕運や施肥によって土壌物理性や養分条件を改良し、かん水により土壌水分状態を適当な状態に維持することができます。地上部環境も植物体の配置や成長を調整したり、温室などの施設を用いて温度を補給したりできます。また、病虫害防除などを行うことで生物的環境を改善する場合があります。これらはすべて栽培技術・栽培管理といわれているものです。つまり、①作物の遺伝性・②栽培環境・③栽培技術の間に合理的な調和が得られたときに植物の最大能力が発揮されて、栽培の究極の目的である最大収量が得られることとなります(図1)。

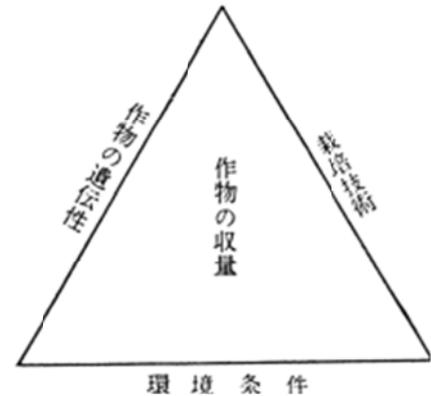


図1 作物栽培の三角形 [野口弥吉, 1979]

第2節 植物生産と光合成

植物生産の基本は光合成です。一般的な栽培環境では、十分な太陽光と水と二酸化炭素があればあるほど光合成は活発になるといえます。

植物生産の基本 光合成と呼吸



「呼吸」は逆反応：酸素 O_2 + 糖 \rightarrow CO_2 + 水 H_2O
光合成は収入 (+)、呼吸は支出 (-) の関係

光合成 (速度) の増大が収量アップにつながる

第1項 光合成

光合成に深い関わりをもつグルコースを中心に光合成と呼吸の反応を方程式にまとめると、



となり、光合成と呼吸は逆方向の反応になります。

光合成の反応は複雑で、光、湿度、炭酸ガス濃度、温度、水分、肥料等の多くの要素が関与しています。光合成の関係性を理解するときにこのような多くの要素間の関わりを複合的に理解することは難しいため、いくつかの条件を一定にして光合成と環境要因との関係について理解を深めていきます。

下図は、有名なブラックマンの限定要因説を示したもので、最も限定的な要因によって光合成量が決まってしまうという説です。この考え方は、環境制御を行う上で重要になります。

例えば、晴天日の気温が 25℃、CO₂濃度が 400ppm という温室環境であれば、

(1)からBの状態 光以外が限定要因になっている

(2)からAの状態 温度以外が限定要因になっている(光合成に十分な温度域)

(3)からAの状態 CO₂濃度が限定要因になっている

と考えることができます。この場合はCO₂濃度が光合成を制限しているの、CO₂濃度を高めることができれば、光合成量を増やし増収することができると思えることができます。

(1) 光合成と光の強さ 温度・CO ₂ 濃度一定	(2) 光合成と温度 CO ₂ 濃度一定	(3) 光合成とCO ₂ 濃度 温度一定
<p>Ⓐ 限定要因は光</p> <p>Ⓑ 限定要因は光以外</p>	<p>Ⓐ 限定要因は温度</p> <p>Ⓑ 限定要因は光</p>	<p>Ⓐ 限定要因はCO₂濃度</p> <p>Ⓑ 限定要因は光</p>
<p>光飽和点までは光の強さを増すごとに、光合成速度も増加するがそれ以上は増加しない。</p>	<p>強光の場合：温度上昇と共に光合成速度増加(30℃付近まで)</p> <p>弱光の場合：温度変化にはほとんど無関係</p>	<p>CO₂濃度に比例して光合成は盛んになるが、それを超すと光合成速度は増加しない</p>

図 2 ブラックマンの研究—限定要因説—(1905) [福島県教育委員会, 昭和 59 年 3 月 1 日]

第2項 光合成に重要な気孔の働き

光合成には、気孔の開閉が大きく関与しています。気孔には①ガス交換能、②蒸散能、③光応答能といった働きがあります。たとえ光が十分にあって気孔を閉鎖させてしまう環境条件が続くようだと、光合成が制限され増収することは難しくなります。

1. ガス交換能

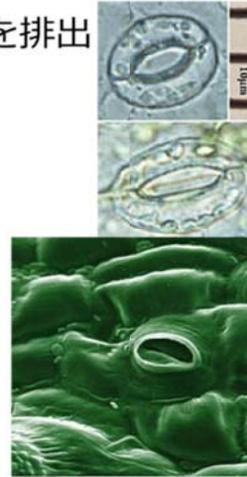
- A) 光合成：CO₂の95%以上を取り込む
- B) 呼吸：同化産物を消費し、酸素O₂と水を排出

2. 蒸散能

- A) 養水分の吸収
- B) 葉温の調節と群落内の調湿効果
- C) ストレス遭遇時に過蒸散を抑制
- D) 葉の水蒸気濃度（約98%RH）

3. 光応答

- A) 光強度、周期性



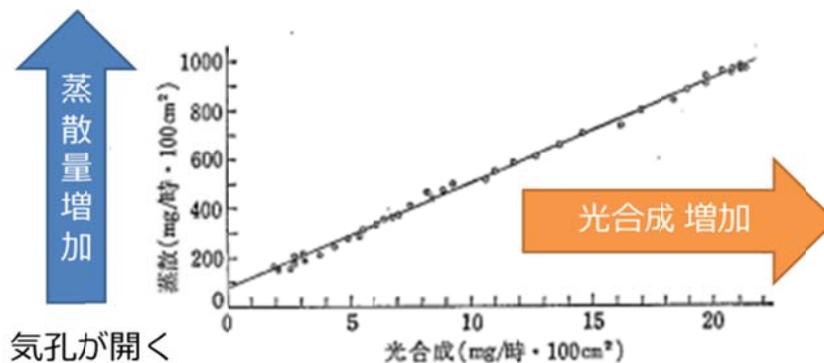
気孔の開閉に気温は関与しない

Wikipedia contributors. "気孔." Wikipedia. Wikipedia, 14 Jul. 2015. Web. 31 May. 2016.

極端なストレス環境(高温や低温などの限界温度やかん水不足など)を除くと、気孔の開閉は光と湿度、炭酸ガス濃度とであらわすことができます。

気孔の開閉 = 光強度 × 相対湿度 / CO₂ 濃度
Ball et al. (1987)を一部改変

下図はヒマワリの例ですが、蒸散量が増えると光合成速度も増加するという関係を示しています。



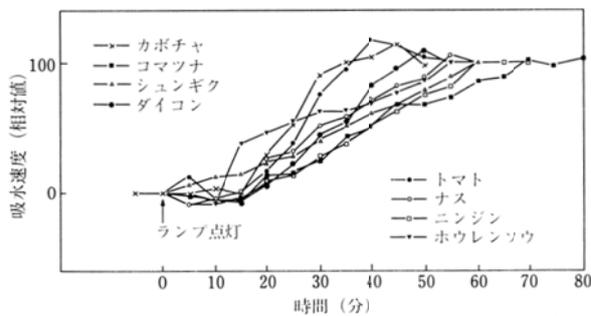
図IV-20 ヒマワリの光合成と蒸散との関係 (Barra, 1968)

蒸散が盛んだと光合成量も増える

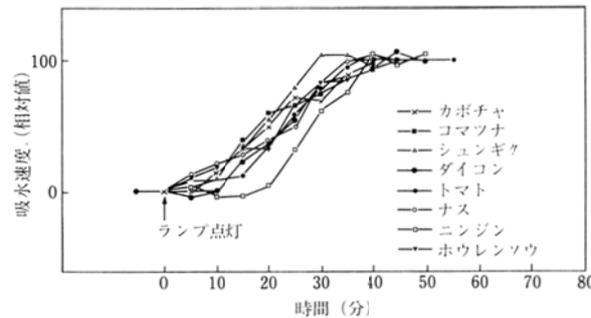
気孔は環境変化に対応できるよう緩やかな応答を示します。

図 3 では気孔が全開するまでに 30～60 分程度を要しています。気孔が開く条件は、光がある、湿度が高い(飽差が低い)、CO₂濃度が高い場合などですが、乾燥ストレス(大気湿度、根域水分など)や限界を超えた温度ストレスに遭遇しつづけると図 4 のように気孔は閉鎖し、光合成速度も低下してしまいます。気孔が全開している方が光合成速度は高くなりますが、栽培環境では安定した湿度環境を維持することは難しいため、過乾燥が 10 分以上続くような環境を避けることが重要と考えられます。

また、図 5 のように一度、強い乾燥ストレス(≒萎れ)を経験するとそれ以降、見た目では萎れが回復していても光合成速度は低下してしまいます。いいかえると一度、萎れを経験させてしまうと、植物は乾燥ストレスに対する危険を察知して、その後は過蒸散で枯れないよう気孔の開き方を鈍くし、光合成を犠牲にしてでも環境ストレスに適応していると考えられます。



(a) 点灯後の各種作物の吸水速度の経時変化 (温度20℃、湿度80%)



(b) 点灯後の各種作物の吸水速度の経時変化 (温度25℃、湿度80%)

図 3 気孔全開までの時間(矢吹・片山・原図) [矢吹万壽, 1990]

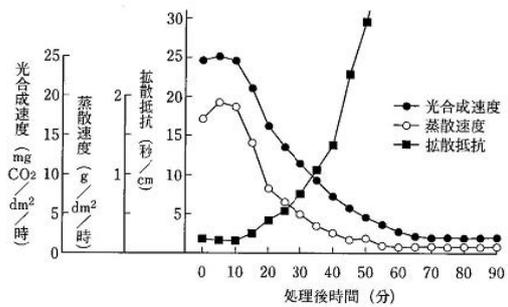


図 4 水ストレスを与えたトマト葉の光合成速度、蒸散速度、拡散抵抗の変化(-0.5MPa 処理) [穴戸良洋, 2016]

(参考: -0.5MPa = やや強い萎れ)

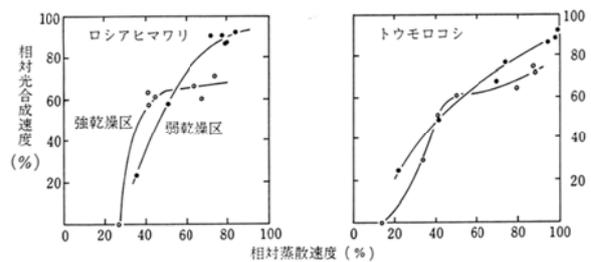


図 5 給水による水ストレス解除後の回復期における相対光合成速度と相対蒸散速度の関係(田崎・藤沼・牛島)

第3項 呼吸

植物の呼吸は、一般的に「維持呼吸」と「成長呼吸」の2つの要素にモデル化されています。

呼吸 = 維持呼吸 + 成長呼吸

「維持呼吸」は、植物体が生存できる最低限の呼吸活動のことです。維持呼吸は植物の大きさや温度に依存します。特に温度上昇に対して呼吸速度が指数的に上昇するといった関係があり、 10°C 上昇した場合の呼吸速度の変化率を呼吸係数 Q_{10} であらわします。 Q_{10} は、一般的な植物では2~3の値をとります。たとえば、「 $Q_{10}=2$ 」ということは、葉の温度が 10°C 上昇すると呼吸速度がほぼ倍増するということを示します。

「成長呼吸」は、光合成により生産された同化産物(主にグルコースやデンプン)などが新しい器官の分化と発達に使われる呼吸活動のことです。成長呼吸は、植物体の大きさ(乾物重)によって決まり、基本的に温度に直接依存しないものとして捉えます。

以上のことから、植物生産では主に光合成による同化産物(収入)が呼吸により消費(支出)する関係が成り立ちます。植物の成長には炭素収支が正(収入>支出)になることが必要であり、植物生産として収量を増やすためには、呼吸消費を抑制することも一つとなります。

なお、これまで述べてきた内容は、いわゆる「暗呼吸」とよばれるものになります。近年、光や炭酸ガスのストレス環境下で生じる光呼吸という現象が解明されてきています。

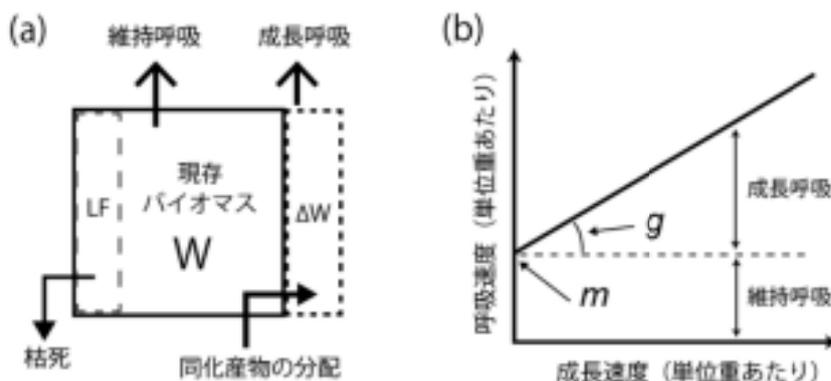


図 6 維持呼吸と成長呼吸の概念 [伊藤昭彦, 野口航, 2014]

第4項 みかけ光合成量

一般的に光合成量と表現する場合は、みかけの光合成量のことになります。みかけ光合成量とは、炭酸ガスの吸収(光合成)と排出(呼吸)の差し引きにより求めることができます。

下の模式図は光-光合成曲線とよばれ、光強度と光合成速度の関係を表しています。もし、温度が一定であるなら呼吸による二酸化炭素の排出量もほぼ一定となります。光がゼロ=暗黒条件では、光合成が行われなため呼吸により二酸化炭素が排出されるため、光合成速度はマイナス(負)の値となります。弱光下での光合成速度と呼吸速度が同じになり光合成速度がゼロとなる光強度を「光補償点」とよびます。一方で、光合成速度は光が強いほど増加しますが、ある光強度以上では飽和状態に達する関係があり「光飽和点」とよびます。

真の光合成速度から呼吸速度を引いた値を「みかけの光合成速度」とよび、プラス(正)の値であれば光合成による植物生産が行われることになります。

$$[\text{みかけの光合成速度}] = [\text{真の光合成速度}] - [\text{呼吸速度}]$$

光補償点は保温カーテン、光飽和点は遮光カーテンを開閉する指標値として活用できます。

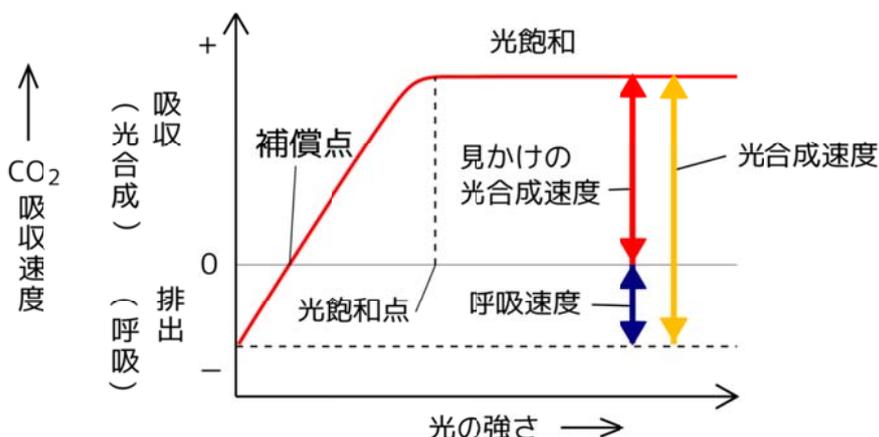


図 7 光-光合成曲線の模式図 [Wikibooks への寄稿者ら, 2017 年 9 月 27 日 04:42]

下の模式図は光合成速度と光強度・温度・二酸化炭素濃度との関係をあらわしたものです。光合成の最大化を制限している条件が何かを、一つの環境要因にとらわれず、総合的に判断するようにしましょう。

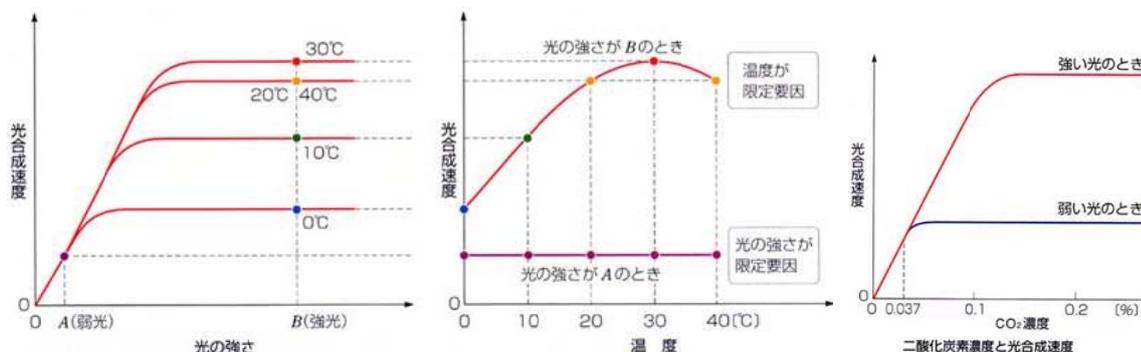


図 8 光強度・温度・二酸化炭素濃度と光合成曲線の模式図 [啓林館, 平成 20 年]

第3節 成長と発育

「生育」という表現は、具体的には「成長」と「発育」の2つの要素に区分することができます。「成長」と「発育」は量と質の違いになり、植物生産の究極の目的である最大収量を目指すためには、成長に対する栽培管理が重要となります。「生育が良い・悪い」という表現がよく使われますが、成長と発育のどちらの要素を評価しているか意識するようにしましょう。



2つの要素と環境の影響度は下表のようになります。温度は収量(成長)への影響度が低く、これまでのような温度管理に偏った管理では増収は期待できないことが分かります。

区分	要素	温度	光	湿度	CO ₂	水・肥料
成長	光合成	+	+++	+	+++	+++
発育	呼吸	+++				
成長	養水分吸収	+	+++	+++	+	+++
成長	蒸散	+	+++	+++	+	++
発育	発育 (葉や花の形成)	+++				
発育	開花	++	++		+	
発育	着果	++	++	++	+	
発育	糖の転流	+++				
発育	組織形成	++		+		++
発育	細胞・器官の伸長	+++	++	+		+
発育	果実の成熟	+++	++			

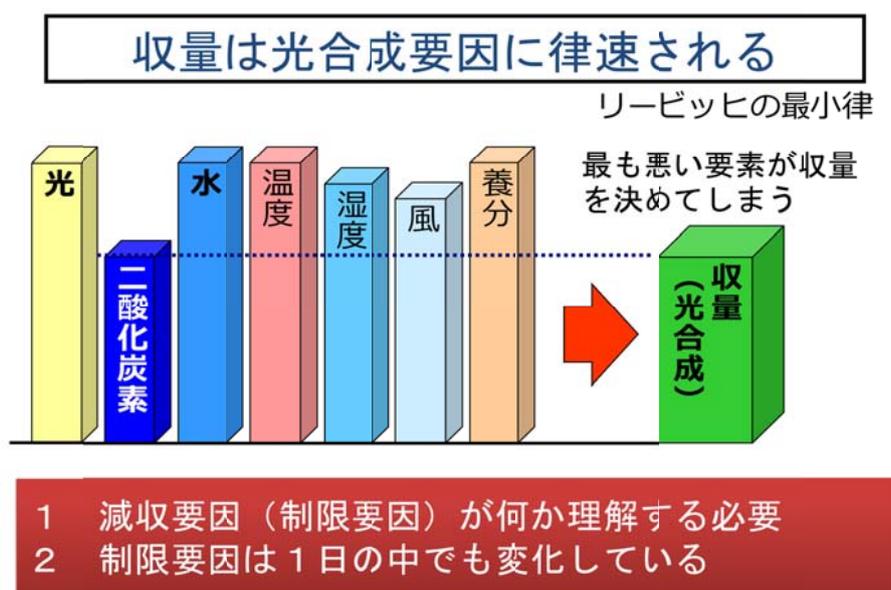
(Houter, 2008を池田一部改変)

影響度 +++ : 大 ++ : 中 + : 小 温度 15 ~ 30℃の場合に有効

第4節 リービッツの最小律

リービッツの最小律とは、もともと植物の収量は最も少ない養分にのみ収量が影響されるという概念で、光合成を意識した栽培管理を行うためにも役立ちます。先のブラックマンの限定要因説も同様の考え方になります。現在、トマトの理論収量(ポテンシャル収量)は200t/10aといわれていますが、この概念によれば品種や環境要因などが減収要因となって、現在の収量水準まで落ち込んでいるといった方が正しいかもしれません。

また、施設園芸の先進国であるオランダでは100t/10aを達成している状況に対し、本県の平均反収は20年以上、5t/10a(岩手県農林水産年報)と横ばいです。収量を制限(律速)している環境要因が何かをそれぞれが明らかにし対策していく時期に来ているといえます。



第2章 環境要因

植物生産における環境要因は地上部と地下部に大別できます。

地上部環境要因として、光、二酸化炭素、温度、湿度、風速が関与します。地下部環境要因として、水、酸素、栄養状態(肥料)、pH(酸度)、塩濃度(EC:electrical conductivity)などが関与します。さらに地上部、地下部とも生物的な環境として、微生物相や生菌数、害虫や益虫の密度などの要素が関与し、遺伝的環境(品種)も関与しています。



第1節 光

要素名	単位	意味	植物とのかかわり
日射強度	W/m ² , kW/m ²	光の強さ	光合成速度、光障害、光飽和、光補償点、蒸散
日射量	MJ/m ² (1kW/m ² =0.1J/cm ²)	光の量	光合成量、収量
日長	時間/日	明るい時間	花芽分化、休眠打破
受光量	MJ/m ²	植物が受光した日射量	光合成量、収量
LAI	m ² /m ²	単位面積あたり葉面積	光合成量、収量

日射強度(irradiance)と日射量(radiation)、日長(photoperiod)の要素がある。

① 日射強度

太陽放射のエネルギーの強さを示し、1秒あたりの瞬間値であらわします。単に日射という場合は、日射強度を示すことが多いです。また、日射は、直達光と散乱光の2つの成分で構成されます。直達光は太陽から直接届く光で、影ができます。散乱光は光が空気中の塵などにより屈折や反射することで散乱した光で、影ができにくい特徴があります。晴天日は直達光が6~7割で残りが散乱光、曇雨天日や早朝や夕方はほとんどが散乱光となります。

② 日射量

1秒毎の日射強度の積算値を示し、積算日射とよばれることもあります。成長に影響し、光合成量や収量に関与します。露地栽培では、日照時間がしばしば用いられますが、基本的に長さの単位であり、光合成量や収量との関係を考える場合には不適であるため、施設栽培では日射量で評価します。

③ 日長

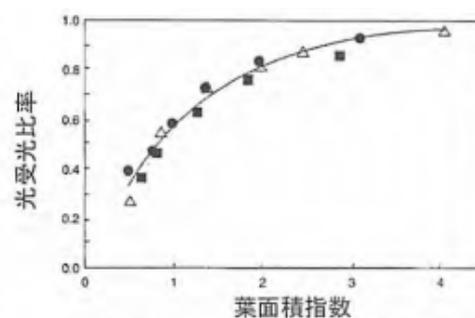
明期と暗記を合わせた1日24時間のうち明期の長さを示します。日長は発育に影響し、花成誘導、花芽分化、休眠に関与します。

④ 受光量(APAR)

植物体が受光した日射量を示し、土地1m²あたりの積算受光量としてあらわします。より多くの光を葉にあてて受光量を増大することができれば、光合成量≒収量が増えることになるので、最大限光を利用できるような環境づくりが必要となります。

⑤ 葉面積指数(LAI:Leaf Area Index)

土地1m²あたり葉の総面積として示し、土地1m²あたり葉が何倍あるかという、葉の繁茂程度を示したもので、受光量や収量との関係が強い重要な指標値になります。LAIは時期によって光を最大限利用できる最適LAIが存在し、葉数や栽植密度、主枝本数など



●2月26日、△3月18日、■7月13日に測定

図9 トマトでの葉面積指数と光受光率の関係 (Heuvelink, 2014)

第2章 環境要因

で調整します。夏秋期のトマトではLAIが3～4、キュウリは4～5が良いとされています。当センターで行ったトマトの栽培試験でもLAIが3程度で収量が飽和する傾向があり、適正值と考えられました。ただし、光透過率に劣るパイプハウスでの結果ですので、より光が多く入ってくる施設であれば最適LAIも高くなる可能性があります。

最適LAIへ調節する場合は、まず栽植密度や主枝本数で目標LAIに到達できる密度へ高めた上で、葉数で微調整します。なお、トマトでは、適当な群落形成がなされていれば、1株あたり12～15枚で光の9割以上を吸収します。このため、おやみに葉を多く残してLAIを高めようとしても、下の葉は陰葉として光合成や収量には寄与しないため、みかけ上のLAIは高まりますが、実質生産上のLAIを高めたことにはなりません。

LAIを求めるためには、厳密には全ての葉を刈り取って実測することになりますが、実栽培ではこのような調査は困難ですので、栽培期間中は葉数から推定します。

●大玉トマトの場合(農研センターでの調査事例として)

[推定LAI] = 開花花房以下の葉数 × 0.05～0.07 × 栽植密度(株/m²)

○キュウリの場合(農研センターでの調査事例として)

[推定LAI] = 展開した葉数 × 0.03～0.05 × 栽植密度(株/m²)

⑥ 光の質、成分

光の波長域(可視光であれば色)によっても植物の形態が変化します。紫外線や近赤外線と赤色光の比(F/FR比)などは形態形成に、日長反応のある品目では青色や赤色光成分により花成誘導に影響を受けます。電照栽培では、白熱灯から蛍光灯への移行が増えてきていますが、花成誘導に反応する特定波長域の光の量がするため、電球数を増やす必要があります。また、近年、黄色や緑色光を利用した防蛾灯が市販されていますが、栽培品目への影響が無いか確認する必要があります。

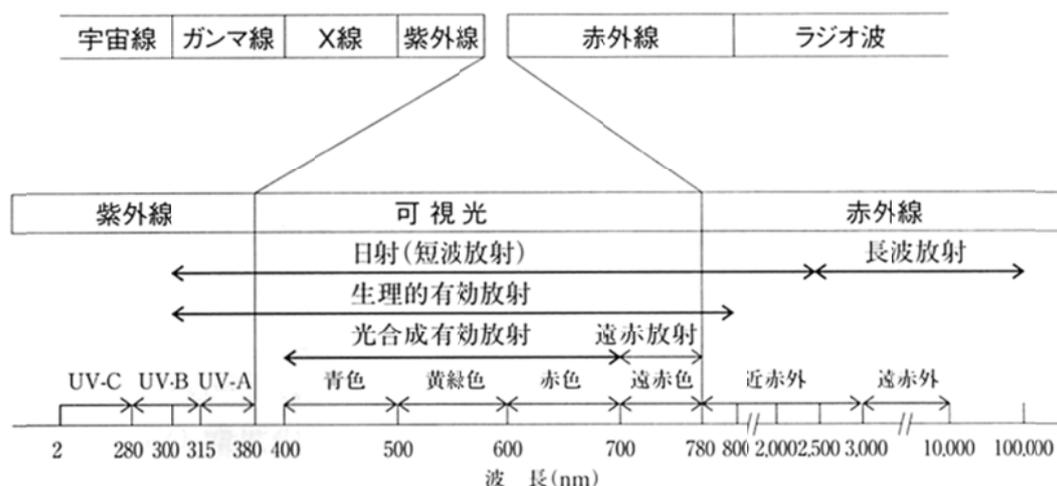


図 10 光の波長と有効放射

第2節 水

要素名	単位	意味	植物とのかかわり
有効水分(率)	kPa, (%)	植物が吸収できる水分	蒸散、保水性、養水分吸収、収量
(土壌)水分張力	kPa	土壌や培地の水分状態	光合成速度、蒸散、養水分吸収、収量
pF値	無し		
体積含水率	%, m^3/m^3	土壌や培地に含まれる水分の比率	保水性、有効水分率
吸水量	mL/株 mL/m ² など	植物が吸収する水分量	蒸散量、収量、かん水

ここでは、根からの水吸収として説明します。植物の新鮮重の80～90%は水で構成されていることから、適切な水分状態の維持と吸水量(要求量)を把握することが重要です。

① 有効水分、水分張力(土壌や培地)

植物は、土壌や培地の水分を全て吸収できません。植物の吸水の原動力は蒸散で、蒸散により葉が陰圧になることで、土壌中の水分を吸い上げることができます。ストローで水を吸い上げる力が吸水の原動力になっているといえば想像しやすいと思います。簡単に水を吸うことができる水分状態を**易有効水分域**(正常生育有効水分、自由水とも呼ばれる)といい、表面張力によって保持されている水分です。しかし、土壌や培地も水を引き込む(吸い込む)力があるため、水分が減ってくると植物の水を吸う力と土壌が吸う力が競合することになり、水の吸い上げが難しい状態の**難有効水分域**に移行し、さらに水分が無くなると植物が吸い上げることができない水分状態となる**非有効水分域**に到達します。極端に肥料濃度が高い場合を除けば、易有効水分状態では植物は自由に水を吸水することができ、根が水ストレスを受けずに済みます。

土壌や培地中の水分を飽和状態から徐々に減少し、ある水分以下(易有効水分域から難有効水分域)になると植物は萎凋し始めます。このような状態の起点を初期しおれ点といい、pF3.8程度です(図 11)。さらに水分含量が減少していき、萎凋した植物に再び水を与えても回復できず枯死状態になる点のことを永久しおれ点といいます。作物栽培では初期しおれ点に達しないような管理が重要で、水分不足などの水ストレスによる萎凋は、光合成や蒸散の抑制を通して植物の生産能力を著しく低下させます。一方、排水不良畑などによる土壌の過湿状態は、根域の酸素不足を招き湿害につながります。なお、有効水分の概念を理解するためには、水ポテンシャルという概念が必要になりますが、ここでは割愛します。

② 体積含水率

土壌や培地に含まれる水分率を示し、土壌を構成する固相、液相、気相の三相分布のうち液相率に相当します。植物が土壌や培地から吸収できる水分の比率を、有効水分(自由水ともよばれる)といいます。土壌や培地の含水量とそこから植物が吸収できる水分量は異なります。

第2章 環境要因

砂質土や軽量な有機質培地では体積含水率や有効水分率が低く、ロックウール培地では体積含水率が高く有効水分率も高い特性があります。これら砂質土や隔離培地は排水性が良く、水分コントロールによる生育制御や品質向上が容易になるメリットがある一方で、適湿状態から乾燥状態への移行が速く、水分不足になると急激に萎れやすいデメリットもあるため、多頻度かん水によって有効水分域に維持するようにします。

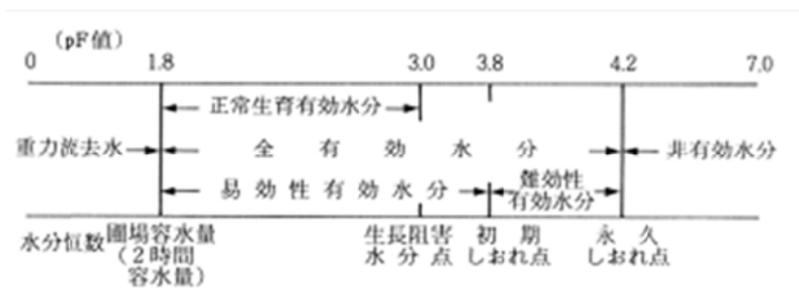


図 11 作物の給水利用からみた土壌水分の分類 [土壌物理性測定法委員会, 1972]

注) 目安として示した図であり、作物の状態や周囲の環境によって異なる。

③ 水ストレスによる光合成速度への影響

多少の萎れがあっても植物への影響は少ないように感じますが、実際はわずかな萎れが光合成を大きく低下させています(図 12)。下図のように、わずかな萎れ(○)であっても光合成能を抑制し、40%程度の光合成の低下がみとめられています。

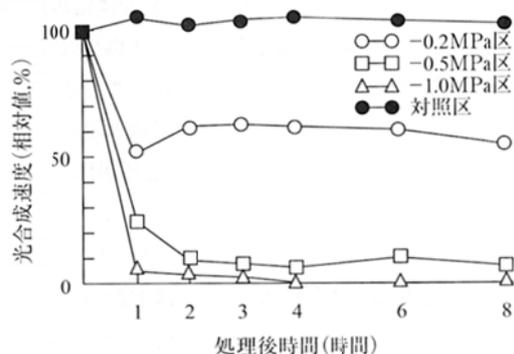


図 12 水ストレスを与えたトマト葉の光合成速度の変化 [宋戸良洋, 2016]

注) -0.2MPa: わずかな萎れ、-0.5MPa: やや強い萎れ -1.0MPa: 極端な萎れ

④ 水分率と有効水分の関係

①で説明したように植物の吸水は有効水分が関与しますが、この値を直接計測することが難しいのが実状です。pFメーター(テンシオメーター)を利用できる土壌であれば、有効水分域を計測できますが、隔離栽培などではこれを利用することができないため、水分率センサ等を用いて間接的に易有効水分域を判断することになります。水分率センサは培地や土壌に合わせた計算式(検量線)が必要になりますし、設置方法で計測値が不安定になる傾向があります。このため、計測値=水分率として数値をそのまま水管理に利用せず、最高最低の推移をみながら易有効水

第2章 環境要因

分域を維持できているか、水分変動が大きく難有効水分域に近づきすぎて水ストレスを与えすぎているかといった見方をしながら、水管理に活用します。

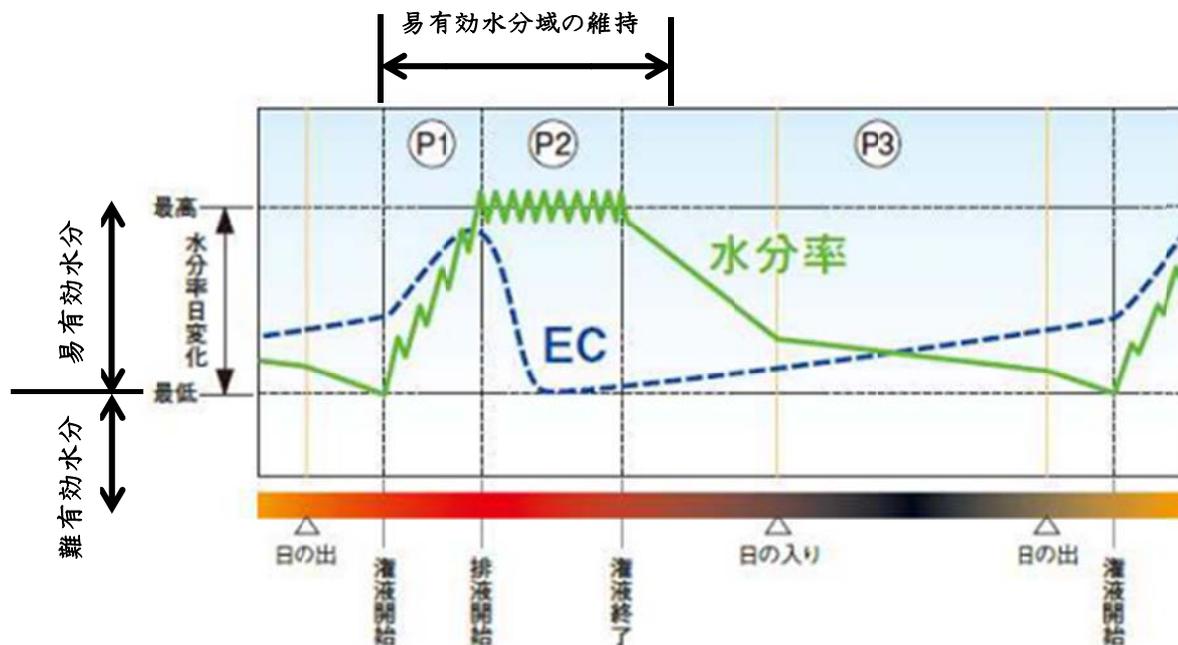


図 13 1日の水分管理モデル(一部改変)[吉田征治(日東紡グリーン事業部), 2012年]

培地の水分率が最高(かん水や給液により飽和状態)になる状況は易有効水分域になるため、植物が養水分をストレス無く吸収できる根域環境となります。光合成が盛んな日中は易有効水分域を維持することが水ストレスによる光合成の低下を回避するために重要となります。このため、隔離栽培や排水性の良い土壌では、少量多頻度かん水にした方が植物の根の環境としては優れていると考えられます。

第3節 二酸化炭素（炭酸ガス）

要素名	単位	意味	植物とのかかわり
炭酸ガス濃度	ppm	炭酸ガスの濃度	光合成速度、呼吸速度
発生量	kg/h	炭酸ガスの供給能力	光合成速度、施肥効率

二酸化炭素(carbon dioxide)は気孔から取り込まれて光合成により炭素固定され、呼吸により排出されます(図 14)。植物生産の原料かつ成長のエネルギー源であり、単位は ppm を用います。大気中の二酸化炭素濃度は 380~400ppm 程度で、季節や日変動があります。植物の光合成に対する CO₂ 濃度の影響は、光強度や温度など他の環境要因により大きく異なります。

図 15)。露地栽培では植物群落付近の大気とその上層部との大気の混合があるため、二酸化炭素濃度の変化幅は小さくなるのに対し、温室のような閉鎖的な環境ではこのような混合作用が少なく、二酸化炭素濃度が室外に比べて夜間の濃度上昇も日中の濃度低下も著しく、1日の変化幅がきわめて大きくなります。

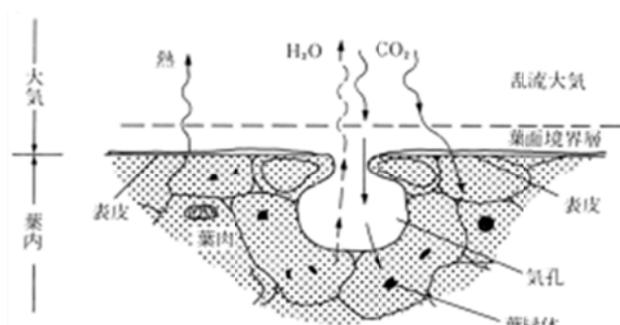


図 14 気孔のガス交換 [矢吹万壽, 1990]

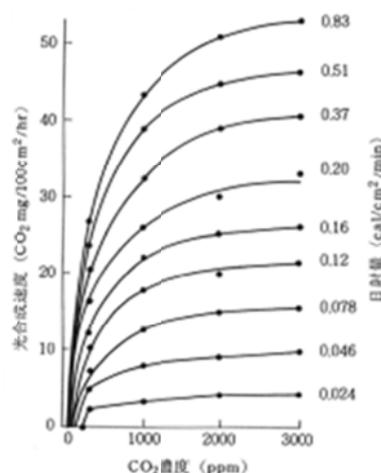


図 15 日射量とCO₂濃度環境下での光合成速度との関係 [矢吹万壽, 1990]

表 1 CO₂濃度と成長量の関係 [Nederhoff, 1994]

CO ₂ 濃度の変化	350→450ppm	600→700ppm	1000→1100ppm	350→250ppm
成長量の増減率	12%増	4%増	1.5%増	19%減

第4節 湿度

要素名	単位	意味	植物とのかかわり
飽差HD	g/m ³	飽和までの残り水蒸気量	蒸散、養水分吸収
露点	℃	結露が発生する温度	結露、病害
相対湿度	%	空気の湿り具合	病害
容積絶対湿度	kg/m ³	1m ³ あたりの水蒸気量	蒸散、除湿
飽和水蒸気量	g/m ³	空気の最大水蒸気量	(相対湿度、飽差)
飽差 VPD	Pa	飽和までの残り水蒸気圧	蒸散、養水分吸収

湿度は空気に含まれる水蒸気の量を表し、水蒸気を含む空気を湿り空気といい、全く含まない場合を乾き空気といいます。植物生産では主に気孔の開閉と蒸散、病害発生に関与します。湿度は様々な表現があり、それぞれの単位を使い分けて理解する必要があります。湿度は温度の影響が大きいので、湿度管理をするときは温度管理にも気を付ける必要があります。

① 飽差HD(humidity deficit)

ある空気が水蒸気で飽和するまでに必要な容積あたり残り水蒸気量(質量)で、空き水蒸気量として考えることもできます。施設園芸分野で用いられる独自の表現で、施設園芸先進国のオランダで開発された産業向け単位として、温室内の湿度環境を把握するだけでなく、加湿や除湿設計として用いられます。蒸散は葉内水蒸気圧と空気中水蒸気圧との差によるものであるため、植物生理からは本質的に不適な表現ですが、実用上問題ないことや、制御にも活用しやすい単位であるため本書でも飽差といえば、飽差 HD を意味します。

② 露点(Dew Point)

ある湿り空気の状態点から冷却の方向に向かった場合に、飽和水蒸気となる温度になります。相対湿度が100%となり結露が発生する温度で、病害発生や果実の裂果等の障害果の発生に関与します。

③ 相対湿度(relative humidity)

ある空気の水蒸気圧 e と飽和水蒸気圧 e_s との比として百分率(%)で表します。乾燥空気は0%、水蒸気で飽和した空気は100%となります。

④ 容積絶対湿度(volumetric humidity)

ある湿り空気に含まれる水蒸気の容積あたり質量になります。

⑤ 飽和水蒸気量

ある温度 t [℃] の空気が含むことのできる容積あたり最大水蒸気量になります。空気の温度がより高い方が、より多くの水蒸気を含むことができます。

$$\text{飽和水蒸気量 } a(t) = 217 \cdot e(t) / (t + 273.15)$$

$$\text{飽和水蒸気圧 } e(t) = 6.1078 \times 10^{(7.5 \cdot t / (t + 237.3))} \text{ Tetens の式}$$

⑥ 飽差VPD(vapor pressure deficit)

ある温度条件の空気中における水蒸気圧 e と飽和水蒸気圧 e_s との差で表します(Pa)。気孔の開閉や蒸散に影響する単位で、光合成速度に影響することから植物生産からみて重要です。

第5節 温度

要素名	単位	意味	植物とのかかわり
気温		空気の温度	
葉温	℃	葉の温度	形態形成、光合成速度、成長速度、成長限界
果実品温		果実の温度	
根温(培地温)		根の温度	
積算温度	℃・日、℃・時間	日や時間単位毎に平均値を累積した温度	成長速度(成長、収穫予測)
DIF	℃	明期と暗期の温度差	茎の伸長、形態形成
平均温度	℃・日、℃・週	ある単位時間で平均した温度	成長速度(成長、収穫予測)

温度は生育のあらゆるところに関与し、各作物は生育に対して最適温度域のほか、最低と最高温度をもっています。温暖作物は比較的高い生育温度範囲をもち、冷涼作物は比較的低い温度範囲をもちます。大多数の作物は15～32℃の範囲でよく生育しますが、これより高いか低い温度で障害が発生する温度を、生育限界とよびます。生育限界温度は生育段階や作物の種類によって異なります。一般的に気温と地温(根温)を指標に用いますが、光合成においては葉温が重要で、二酸化炭素濃度に対応した最適光合成温度域が存在します(図4-8)。

栽培における温度管理は、光合成時間帯における最適域、発芽や果実の開花～成熟、分化による形態形成(品質)、呼吸による光合成産物の消費抑制などを重視します。

生育や果実の肥大成熟などの生育速度は温度要因の影響が大きいことから、簡易な生育モデルとして、日平均気温を積算していく積算温度法が用いられます。また、成長できる最低温度を基準温度として、冷涼作物では5℃、温暖作物では10℃、熱帯作物では15℃として、日平均気温がこの有効温度以上であれば、その作物の生育期間の日数で積算していく方法を有効積算温度法とよび、植物の開花予測や収穫日予測などの生育予測や害虫の発生予測に用いられます。

また、暖房している施設では、暖房した熱は時間とともに屋外に放熱していきます。この熱の移動にはおおきく3つの要素が関わっていて、被覆材や構造体を伝わって移動する「貫流伝熱」、すき間から逃げる「隙間換気」、地中へ伝わって移動する「地表伝熱」が関わります。このうち、施設内の熱が奪われる最も大きい要因は貫流伝熱で、6割以上は被覆材や骨材から熱が逃げてしまうことになります。

第6節 気流

要素名	単位	意味	植物とのかかわり
風速	m/s	植物群落内の風の流れ 屋外の風の強さ	光合成速度、蒸散、炭酸ガス吸収、結露、保温性、換気
風向	方位	風の向き	換気、保守
瞬間最大風速	m/s	屋外の風の強さ	保守

温室内の風速あるいは気流は、空気中の水蒸気、二酸化炭素濃度、熱などの拡散を促進します。

① 施設内の風(群落内気流)

光合成に最適な風速は光強度や飽差、植物の葉の形態、群落形成などの条件で異なります。大気が乾燥している環境下では風速が大きいと光合成や蒸散を抑制し、最適飽差域とされる条件では風速が大きい方が光合成速度も増加する報告もあることから、風速と湿度との関わりは重要な要素であると考えられます。

② 葉面境界層

大気中の炭酸ガスは葉の気孔から取り込まれますが、葉の表面に葉面境界層という周辺ガス濃度よりも低濃度の気層を形成するため、炭酸ガスの取り込みが抑制されます(図 16)。この葉面境界層は植物群落内の風が弱いほど厚くなり光合成速度の低下を招くため、強制的に気流を発生させて葉面境界層を打破することが光合成量を増やすことになります。なお、葉面境界層抵抗の逆数を気孔コンダクタンスとよび、熱や気体の収支などを評価するときに用いられます。

③ 屋外の風

屋外風速は、温室の保守管理の指標として、強風時の天窗や側窓などの換気窓の閉鎖の判断をし、おおよそ7~9m/sを目安に全閉します。また、風が強いと温室のすき間換気回数(量)に影響するため、暖房効率やCO₂の施肥効率に影響することがあります。

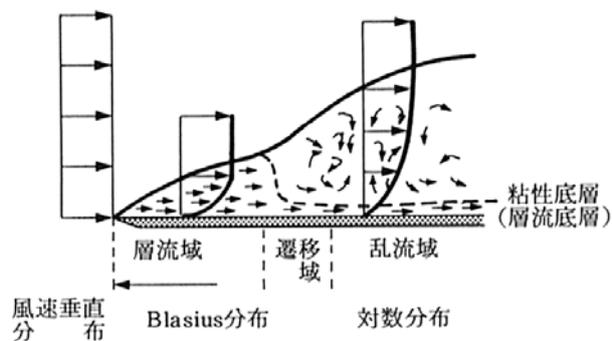


図 16 平板の表面境界層の構造 [矢吹万壽, 1990]

第7節 地下部環境

要素名	単位	意味	植物とのかかわり
溶存酸素濃度	ppm	水に含まれる酸素の濃さ	根の呼吸
水素イオン指数(pH)	無し	水溶液の性質(酸性・アルカリ性の程度)	根の伸長、養水分吸収、溶解性
電気伝導度(EC)	dS/m (mS/cm)	全ての肥料塩の濃度	養水分吸収

第1項 酸素 (根部)

根は酸素を要求する呼吸器官で、根域の酸素濃度が高い方が根・地上部ともに生育に優れます。

① 養液栽培

酸素の水への溶解度は水温が上がるほど低下しますが、温度の上昇と比例的に根の酸素要求量は増加します(図 17)。隔離栽培では、培地耕であれば給液頻度を高めて新鮮な培養液を供給したり、気相が確保しやすい培地を選定したりします。また、水耕では培養液を一時中断して根が直接酸素に触れるようにしたり、エアレーションや培養液を冷却したりすることで酸素富化を図ります。

② 土耕栽培

降雨などにより土壌の地下水位が上昇した状態が続くと、地下層が湛水状態となって酸素供給量が低下します。根が酸素欠乏になり呼吸活性や養水分吸収の低下、植物ホルモンの合成異常が発生し、生育遅延や根腐れによる生育障害が発生します。このため、排水対策や有機物施用などの土壌改良により物理性の改善を行い、土壌中の気相を確保します。根の伸長や呼吸に対する理想的な気相率は 20%以上であるといわれています。

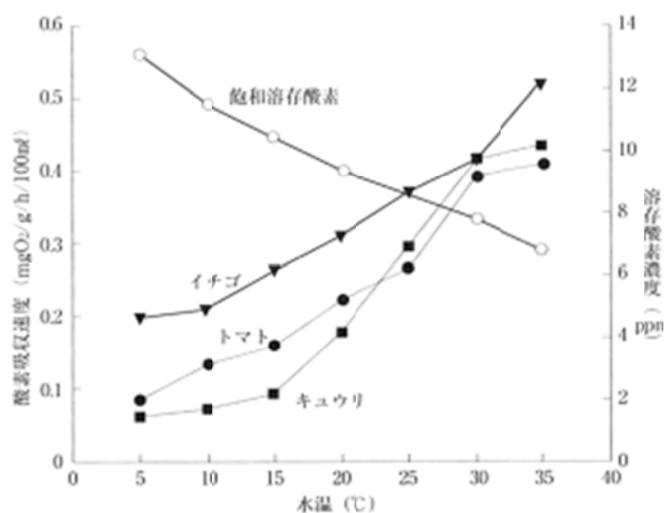


図 17 水温と飽和溶存酸素濃度および根の呼吸速度との関係 [社団法人日本施設園芸協会・日本養液栽培研究会, 2012 年]

第2章 環境要因

第2項 pH

pHは溶液中の水素イオン(H^+)濃度を示す指標で、 H^+ 濃度の逆数の対数を取り $\text{Log}_{10}(1/[H^+])$ の値となります。pH7が中性となり、それより低いと酸性、高いときはアルカリ性を示すことになり、作物により根域環境での好適範囲が存在します。一方で、栄養成分となる必須元素はpHにより溶解性が異なり、おおむね弱酸性領域のバランスが良くなります。高pH条件下では、作物の好適範囲外であるだけでなく、必須元素が不溶化し作物が吸収できない状態(不可給化)となり生育不良を招きます。

土壌でのpH(土壌酸度)の測定は、土壌を風乾細土した後、重量比で土1:純水2.5の割合でスチロールびんに入れ、懸濁後に30分静置し、その上澄み液を測定します。有機質培地で上澄み液が得られにくいときは、培地1:純水5の割合で抽出します。

第3項 EC

土壌中あるいは培養液中に溶けている全てのイオン成分(肥料塩)の濃度を示す指標として電気伝導度(electric conductivity: EC)があり、導電率ともよばれます。農業分野ではdS/mあるいは旧単位のmS/cmを用います。EC値が大きいほど植物が吸収できる水溶性のイオン成分の総量も多いと推定でき、土壌中あるいは培養液中の肥料塩類濃度の評価に用いられます。

EC計は安価で測定も簡便であるため、土壌中の肥料成分量の簡易分析(土壌診断)に用いられます。また、養液栽培では培養液のEC値を基準として、生育段階別に養分吸収特性に合わせて成分濃度を調整する濃度管理(肥培管理)が広く行われています。

土壌塩類濃度EC値の測定は、土壌を風乾細土した後、重量比で乾土1:純水5の割合でスチロールびんに入れ、懸濁した後60分後に上澄み液を測定します。

第8節 考慮すべき植物生理

第1項 開花と結実

植物がある一定の段階以上に成熟すると、環境条件による刺激を受けて花成誘導と呼ばれる栄養成長から生殖成長への相転換が起こり、花の原基である花芽を分化、形成するようになります。花芽分化あるいは開花と結実を制御することは、作物生産における重要技術の1つです。栽培作物では市場の需要期と収穫期が一致することが営利的に望ましいため、育種による品種改良や開花調節により栽培技術が体系化(作型)されています。

① 花芽分化

花芽分化は環境条件に特異的に反応する性質があり、重要な環境要因は日長と温度で、副次的に体内栄養レベル(主に体内窒素濃度)が影響します。日長は1日のうちの明期の時間をあらわし、多くの植物の成長や開花を直接制御する環境要因です。日長の周期的な刺激によって引き起こされる反応性を光周性とよびます。

② 限界日長

花芽分化に必要な特定の日長を限界日長とよび、限界日長以下の条件で花芽分化が促進される植物を短日植物、限界日長以上の条件で促進されるものを長日植物とよび、日長が影響しない植物を中性植物とよびます。光周期による花芽分化の制御では、明期の長さよりも継続した暗期の長さ(限界暗期)が重要で、短日植物の場合は、夜間暗期に一定時間だけ電灯照明を与えると、限界日長以下であっても花芽分化が阻害されます。対して長日植物の場合は、花芽分化が促進されます。このような光周性は弱い光にも反応性を有し、少ないエネルギー量で開花調節できるため栽培に応用され、電照栽培とよばれています。

③ 開花調節技術

電照栽培では暗期中断(night break)か日長延長により日長を制御することで、キクの開花調節やイチゴの生育制御などを行います。これに対して、遮光フィルムなどで暗黒条件にすることで日長を制限し、花芽分化を促進する場合があります。これを、短日処理(short-day treatment)とよび、トルコギキョウやイチゴの開花調節に用いられています。一方で花芽分化には適温度域が存在するため、その温度範囲外では果実に障害が発生し商品性の低下を招いたり、花成誘導が停止あるいは消失したりする限界温度が存在します。このため、夏季などは限界温度を超えて花成誘導が阻害されないように、日長処理に夜冷処理を併用する場合があります。

第2項 休眠と休眠打破

植物には、ある発育段階において一定期間の低温あるいは高温遭遇や、日長の長短などの環境条件により、生長が停止するか、きわめて緩慢な生長となる場合があります。この現象は休眠とよばれ、発芽や開花をしない、植物体がわい化(ロゼット)するといった性質をもつ場合があります。

第2章 環境要因

① 休眠と休眠打破

成長が停止した原因が、限界温度を超えるなどの不適な外部環境による場合は他発休眠、植物体内部にある場合を自発休眠として区別します。他発休眠では生長に適した環境条件になれば再び成長を始めますが、自発休眠では植物体内に存在する生理活性物質(植物ホルモン)により生長が抑制されているため、外部環境が良好になっても成長は停滞したままです。休眠後に成長を再開するためには休眠打破が必要で、特別な条件を必要とせず自然に打破されるタイプと、温度などの特別な条件を必要とするタイプがあります。植物生産において、自発休眠が続くことは生産性を低下させることになるため、対象とする植物の休眠生理を理解して、休眠打破あるいは休眠制御する技術が必要となります。休眠誘導については、生長過程に伴い自然に誘導されるタイプと、温度・日長などの環境条件により誘導されるタイプが知られています。

② 休眠の流れ

休眠ステージの変化の一例として、休眠の誘導につながる生育あるいは環境条件に遭遇することで自発休眠への誘導が始まり(自発休眠導入期)、この条件が続くと自発休眠に移行し、生育が停滞するようになります(自発休眠期)。さらに自発休眠に適した条件が続くと休眠打破して成長できる状態になりますが、低温などの不適な外部環境による他発休眠期へ移行し、生育は停滞したままとなります。やがて、外部環境が良好になると成長が再開するという流れになります。

休眠サイクルの代表例はサクラの開花ですが、春に花が散ったあと、夏から秋にかけて気温の高いうちに花成誘導されて、花芽を分化～形成します。冬が始まると低温により休眠導入がはじまり、生長は一旦止まります。さらに気温が下がり一定期間低温遭遇を続けると、厳しい寒さの中で休眠打破したまま他発休眠に移行します。それから春になり気温が上がるにつれて一気に生長し、つぼみがふくらんで花が咲くこととなります。

③ 休眠打破

休眠打破に対するアプローチは休眠特性により様々で、種子のように種皮に休眠誘導物質が存在するときは物理的に種皮を損傷させたり、温度や薬剤したりすることで発芽を促進する処理を行う場合があります。多年生植物などでは、温度や日長を調節したり、薬剤処理したりすることで休眠打破を誘導するなどの手法が用いられます。

第3項 シンクとソース

光合成の場をソース、光合成産物を材料として成長が行われる場をシンクとして考えます。植物ではソース器官は光合成を行うほぼ葉に限られ、シンク器官は新しく成長している葉、茎、根といった成長器官や果実、種子、貯蔵茎・根といった貯蔵器官が該当します。

ソース器官(展開葉)で生産された光合成産物はシン

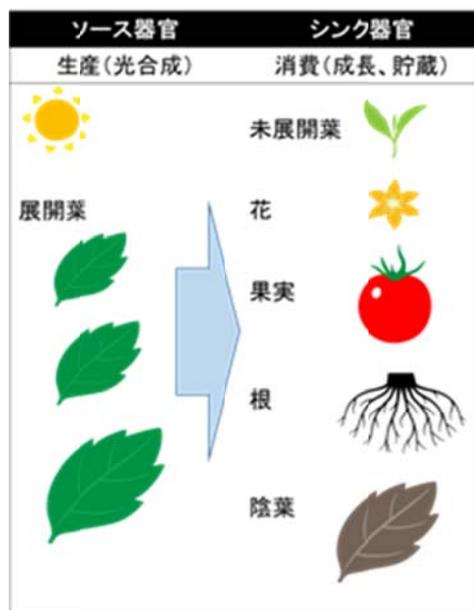


図 18 ソースとシンク器官の分類

第2章 環境要因

ク器官のシンク強度に応じて分配されますが、果実生産では果実が大きなシンク器官となります。シンク器官(例えば果実)が増えてシンク能がソース能(葉の光合成能)を上回ると、積極的にシンク器官へ光合成産物の転流分配が行われるため、葉の光合成速度は高まります。しかし、シンク強度の高い果実や種子へ転流が偏りすぎると、それよりシンク強度の低い新葉や茎などへの分配量が不足するため、成長が停滞する場合があります。反対にソース能がシンク能を上回ると、葉の光合成産物の受け取り先(転流)が少なくなり葉に糖が蓄積するため光合成能が低下する場合があります。

このようにソース器官とシンク器官との間には、量的、機能的なバランス関係が存在し、シンク-ソースバランスといいます。例えば、果実生産における摘花・摘果という作業は、シンクに対するソースの割合を高めることで果実肥大や品質向上を図ったり、シンク強度の低い新葉側への転流量を増やすことで栄養成長と生殖成長のバランスを調整したりしていることとなります。

第4項 発育相の偏り

植物は成長の過程を、栄養成長相と生殖成長相という2つの発育相に区別できます。栄養成長相は、茎や葉を成長させる成長相をいい、生殖成長相は、果実や種子を成長させる成長相のことをいいます。被子植物では、はじめに葉や茎をつくる栄養成長を行い、ある刺激をきっかけに花をつくるようになり、花が咲いて果実が肥大する生殖成長へ徐々に移行していきます。

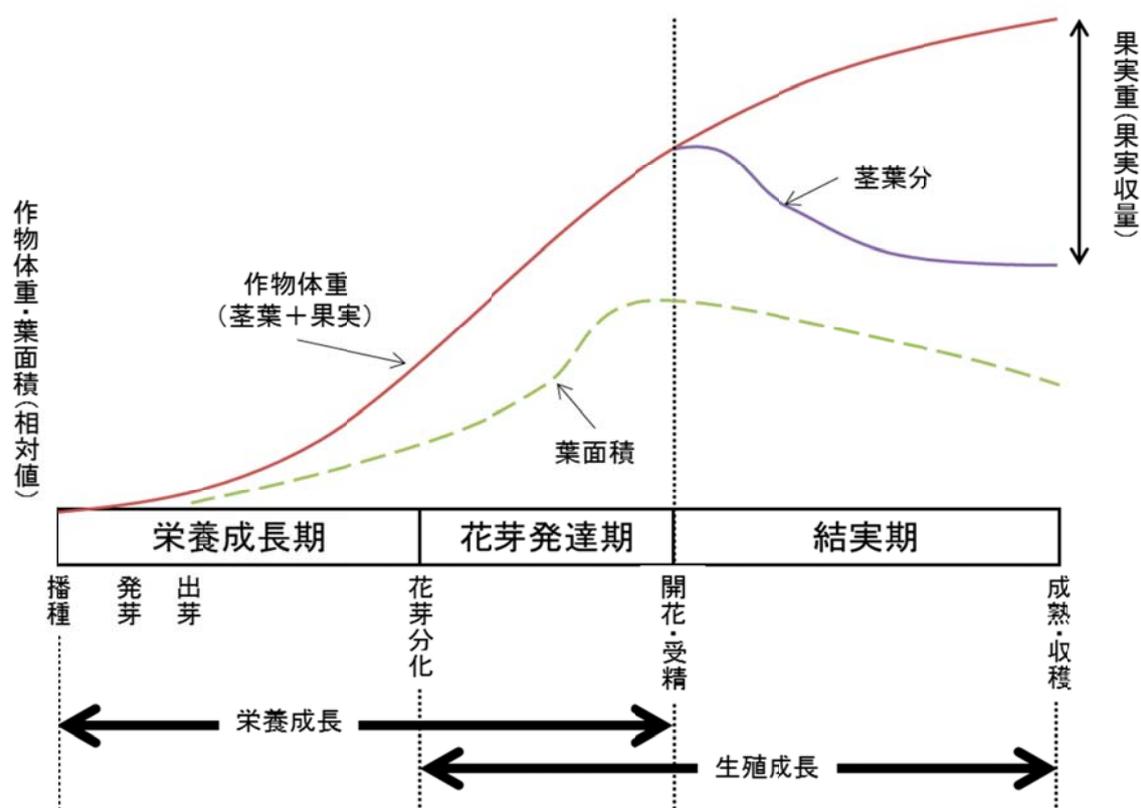


図 19 1 年生作物の一生と成長(模式図)

① 発育相の偏り

トマトなどの果菜類や果樹などでは、この栄養成長と生殖成長が繰り返し行われます。果実を

第2章 環境要因

生産する作物では、栄養成長への偏りが強いと結実不良や果実の品質低下を招きます。反対に生殖成長が偏りすぎると結実するものの果実が小玉化し、新たな成長のための栄養成長を確保できずに、弱い生育が続いてしまうため、収量が低下します。このため、果実生産では、生育相(栄養成長と生殖成長)のバランスをとる必要があるため、観察や生育調査による生育診断を行いながら栽培管理をすることが重要になります。生育調査の方法については第4章第5節で説明します。

② 成長の周期性

果菜類などのように栄養成長と生殖成長が連続あるいは同時進行で成長していく場合、生育相の偏りに周期性がみとめられます。植物の成長は栽培期間全体をみると、栽培日数と開花速度や茎の伸長量、成長量、収量などとの間に直線的な増加関係が認められますが、より短い期間で区切ってしてみると、波をうって変動していることが分かります。例えば、トマトでは茎が太くなったあとに細くなる(栄養成長が強くなったあとに生殖成長が強くなる)といった成長の推移をたどることになり、このような周期性が認められます。環境制御では、この成長の周期性を予め考慮して環境をコントロールし、成長の変動幅(草勢の強弱)をできるだけ小さくすることが、結果的に草勢維持や収量の安定化につながると考えられます。

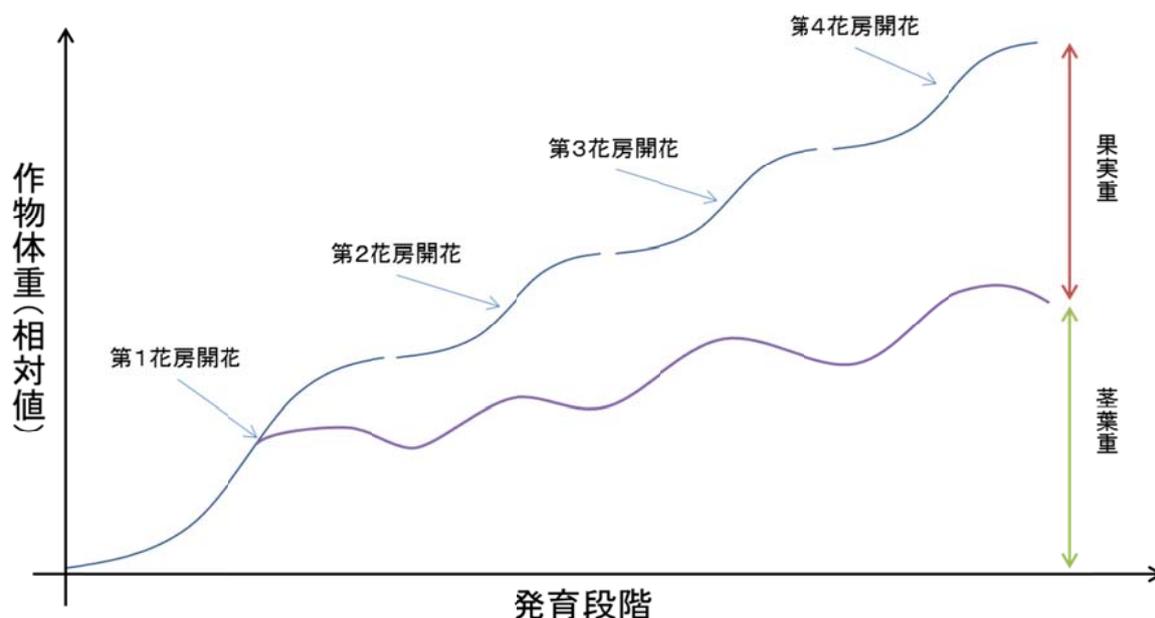


図 20 トマトでの経時的な成長と周期性(模式図)

③ 草勢のコントロール

草勢とは植物の成長を勢いとしてとらえた概念的な表現で、基本的に草勢の強弱といえば生育相のバランスをあらわすことになりませんが、現在の植物の形態(主に葉の大きさ、茎の太さなどの繁茂指標や葉色などの栄養状態)なども含みます。また、植物の「現在の形態・状態」と生長点で分化発達している「将来の形態・状態」として区分してとらえることもできます。現状では栄養成長状態で繁茂していても、生長点側では生殖成長への偏りが強く、新たに発達した葉や茎が

第2章 環境要因

弱小化してしまうといったことがありますので、草勢をコントロールするときは、今の植物の形態(草姿や繁茂のさせ方)をコントロールするのか、生長点の発育相の偏りをコントロールするのかを区分して考えて管理することが大事です。

第3章 実践につなげるための例題

環境制御を行うということは、はじめのうちは概念的、主観的な要素をできるだけ排除して、客観的かつ論理的に植物や環境を捉えることが重要になります。生産現場で良く用いられる概念的な表現をいくつか取り上げましたので、より具体的に表現できるよう技術要素を整理してみてください。それぞれの目的や意義を明確に意識いただくための設問で、正解を求める必要はありませんので、各自が関心のある内容について理解を深めていただきたいと思います。

第1節 高温対策

- Q1 高温の問題点は何か？
- Q2 高温対策として有効な技術は何か？
- Q3 高温対策した結果、収量にどう影響するか？

第2節 良苗生産

- Q1 良い苗の条件は何か？
- Q2 良い苗はどのような育苗管理をしたら良いか？
- Q3 良い苗は、収量にどう影響するか？

第3節 土づくり

- Q1 土づくりとは何を改良しているか？
- Q2 よい土とはどういう条件か？
- Q3 土づくりは、収量にどう影響するか？

第4節 摘葉

- Q1 摘葉作業の意義はなにか？
- Q2 摘葉すべき葉とはどういう条件か？
- Q3 正しい摘葉は、収量にどう影響するか？

第5節 葉面散布剤

- Q1 葉面散布の意義は何か？
- Q2 葉面散布により吸収される成分量は？
- Q3 葉面散布の費用対効果はいくらか？

第6節 増収のための取り組み

- Q1 増収するために導入した技術の目的は？
- Q2 その目的は成功と失敗のどちらですか？
- Q3 その要因は？
- Q4 失敗した場合、その次に対策したことは？

第4章 環境制御の運用技術

第1節 環境計測

① 環境計測の意義

環境計測(モニタリング)とは、光合成速度や呼吸速度、病虫害の発生などの栽培環境、ストレス応答などの植物反応を定量化(数値化・客観化)する手段です。また、制御機器の動作設定の確認といったようなモノの機能性を評価する手段でもあります。

測定と計測は混同しやすい言葉ですが、その意味は大きく異なります。測定とは「ある量を基準として用いる量と比較し、数値又は符号を用いて表すこと」と定義でき、単に値の比較に目的があります。一方で、計測とは「特定の目的をもって、事物を量的にとらえるための方法・手段を考究し、実施し、その結果を用いて所期の目的を達成すること(JISZ8103)」と定義され、あくまでも**目的達成のための手段**になります。つまり、単に環境測定値を見ているだけでは増収は期待できません。増収や品質向上などの「**目的達成のために**」、計測値から必要な環境の改善点を「**気づき**」、環境制御などのあらゆる手段をつかって「**環境改善する**」ことが、環境計測の意義と考えられます。

② 正しい計測とは？

センサなどから得られる計測値が、本当の環境値(真値)であるとは限りません。計測法の誤りやセンサの特性、劣化、日射放射などの影響によって、真値と計測値の間には必ずズレ(誤差)が生じます。正しい計測を行うためには、できるだけ誤差要因を排除し、計測したい対象に適した計測方法を選択します。仮に、暖房温度が同じままで暖房費が昨年より増えたとしても、温度センサが劣化により誤差が大きくなっていれば、寒さで暖房費が増えたかどうか分からなくなります。また、精密と正確は異なり、気温が小数点以下 10 桁まで精密に表示できたとしても、真値からのズレが大きければ正確ではないので、計測値の信頼性を確保することにはなりません。

③ 外乱

外部要因による計測値の乱れのことで、外乱要因が太陽放射のときは温湿度、風速が温湿度・光、湿度が炭酸ガス・風速の計測値に影響する場合があります。外乱要因をできるだけ排除するために、放射除けや通風、除湿などの対策を行います。また、制御機器から発生するノイズが計測値に影響する場合は、計測機器と制御機器との距離を離し、シールド線やアースで対策することがあります。

④ センサ

センサは様々な対象とするものの量を電気信号に変換して数値化します。私生活でも使用する機会の多い温度センサは、用途が広く、安価で高精度、耐久耐候性、信頼性の高い製品が豊富です。温室環境計測では気温以外にも日射、湿度、CO2濃度、風速、雨なども計測対象となります。実は、温度センサは特殊なケースであって、他の環境センサは温度センサほど優れた特性をもっていない場合が多くあります。制御情報として利用できるような

第4章 環境制御の運用技術

信頼性の高いセンサは、温度、日射、乾湿球温度(湿度)、感雨などです。特に私たちが使用する普及価格帯のセンサでは、特性に偏りがある場合もあるため、測定原理やセンサの特性について理解を深めることは、計測対象を適正に評価できることにつながります。

⑤ 環境計測値の評価

計測値をどう評価するかは個々の判断になりますが、計測値の「絶対的な評価」をするのか、「相対的な評価」をするのかを意識します。

絶対的な評価とは、計測値そのものに意味がある場合で、測定値の精度(誤差)が重要になります。例えば、異なる測定系(モニタリングの製品やセンサが異なるなど)で生産者間の環境値を比較するときは、精度が問われます。また、平均温度や積算温度などを用いて環境管理や生育予測などを行うときも同様です。

相対的な評価とは、比較することに意味がある場合で、多少精度が低く、誤差があるとしても許容して評価できます。例えば、同一測定系(製品やセンサが同じ)で、数カ所にセンサを設置して温室内の環境ムラを把握したいときや、時系列的に環境の変動を把握したいときなどは、相対的な評価をしていることになります。

第2節 環境制御

施設栽培では、主に露地栽培では生育できない低温期での栽培を可能とするため、被覆資材を使って屋外と遮断した閉鎖～半閉鎖環境を作り出しています。これによって、昼間は太陽熱、夜間は土壌からの放熱や暖房によって、外気温以上の環境に維持することができます。しかし、夏の快晴日には、外気温以上に高温となったり、気温以外にも他の環境要因(湿度、光、二酸化炭素濃度、気流速など)が、屋外環境よりも不適になったりする場合も多くあります。しかし、閉鎖的な温室では環境条件を人為的に制御することが容易で、露地環境よりも作物の好適環境を維持することもでき、植物生産の目的である最大収量へ近づけることができます。経営的利点さえあれば、様々な環境制御技術を活用することができます。環境制御技術では、これまでに紹介してきた光、二酸化炭素、温度、湿度、気流速、養水分吸収などをコントロールすることで、高い生産性を実現することを目指します。

第1項 光環境の制御

① 日射強度や日射量の制御

基本的に光の量を増やすことが重要になり、施設構造物や被覆フィルムにより光透過率を増やします。屋外日射に対し、ハウス内日射はおおよそ半分まで減衰します。被覆材としては光線透過率の経年劣化が小さいフッ素系樹脂フィルムやガラスが優れています。パイプハウスや内部カーテンなどで広く用いられている軟質フィルムは、フィルム自体の劣化や汚れの付着により、光線透過率が毎年10～20%程度減少します。これは、他の栽培条件がすべて同じであっても被覆材の光線透過が低下する影響で前年よりも数～10%程度の収量低下を招く可能性があることになります。軟質フィルムは、定期的に更新したり洗浄したりすることで、ハウス内への入射光の減少を防ぎます。

第4章 環境制御の運用技術

供試資材	公称厚さ (mm)	暴露開始年	日射透過率 (%)								日射透過率の初期に対する減少率 (%)																													
			初期	8か月	1年	2年	3年	4年	5年	6年	7年	8年	8か月	1年	2年	3年	4年	5年	6年	7年	8年																			
軟質PVCフィルムA	0.1	1974	92	81	76	74															12	18	20																	
〃 B	0.1	1974	92	81	76	74																12	17	19																
〃 C	0.1	1974	92	88	80	77																4	13	16																
硬質PVCフィルムA	0.1	1974	92	91	89	86	87	86														1	4	6	6	6														
〃 B	0.15	1977	93	-	89	88	85	86	84													-	5	6	9	8	10													
PETフィルム	0.175	1977	92	-	86	87	86	84	81													-	7	6	7	9	12													
PVC波板	1.0	1974	89	88	86	84	84	85	84	83	81	81										1	3	6	5	5	6	7	9	9										
FRP波板A	0.7	1974	89	88	85	81	78	71	61	52	43	43										1	5	10	13	20	31	42	52	52										
〃 B	0.8	1974	86	85	84	82	82	81	80	77	75	71										1	3	5	5	6	7	11	13	18										
〃 C	0.7	1977	90	-	86	85	81	77	68													-	4	5	9	15	24													
〃 D	0.8	1979	88	-	85	84	77															-	4	5	13															
FRA波板A	0.8	1974	91	90	89	86	86	83	81	75	69	69										1	3	6	5	9	11	17	24	25										
〃 B	0.6	1976	91	-	87	85	83	76	72	67												-	5	6	9	16	20	27												
〃 C	0.7	1977	92	-	86	85	77	71	67													-	6	8	16	22	27													
〃 D	0.8	1979	90	-	88	86	84															-	2	5	7															
MMA波板A	1.8	1980	92	-	90	88																-	3	4																
〃 B	1.0	1980	92	-	90	88																-	3	5																
PC波板	0.7	1980	91	-	86	83																-	5	9																
ガラスA	4.0	1974	80	79	78	76	77	76	77	77	76	76										1	2	5	3	5	4	5	4	5	4	4								

表 2 被覆資材の日射透過率の経年変化 [黒住徹, 川島信彦, 1983]

一方で、強光による光障害を回避する必要がある場合は、遮光により障害を回避する場合があります。定植直後の植物は、光の要求量が少ないことや葉数が少なく環境への適応性が弱いことなどから、真夏の屋外日射(全天日射)が 700~900W/m²を超えるような強日射条件では遮光が必要となります。

例えば、トマトが 500W/m² 以上の光強度で光障害が起こるとした場合、屋外日射が 1000W/m²という強日射の条件では、

遮光しない場合に施設内に入射する日射強度は、

$$700\text{W/m}^2 = 1000\text{W/m}^2(\text{屋外日射}) \times 0.7[\text{施設内への日中の光透過率}]$$

となり、30%遮光した場合に植物の上位葉に照射される日射強度は、

$$490\text{W/m}^2 = 700\text{W/m}^2 \times (1 - 0.3[\text{カーテンの遮光率}])$$

となり光障害を回避することができると考えられます。これは、遮光の要否を判断するための考え方を紹介したものですので、実際の栽培条件や作物の状態に合わせて検討します。

また、強光による光障害は直達光の影響が大きいため、散乱光資材を活用することで遮光するよりも多くの光を光合成に利用させることができると考えられます。ただし、散乱光フィルムを外の屋根被覆材として用いると、ハウス内へ入射する日射量が数%減少してしまいます。本県では、日射量が不足する秋冬期の光環境を悪化させることにつながるため、散乱光資材は内部カーテンとして導入するようにします。また、散乱光資材とよばれるものは直達光から散乱光への変換効率は高くなりますが、一般的なフィルムであっても散乱光への変換や遮光が起こりますので栽培条件や目的を明確にして導入するようにします。

一部では、光量不足を補うために高圧ナトリウムランプや LED 等の人工光源を利用して、補光することで光合成量を増やす場合もありますが、光源や光合成のエネルギー変換効率が低いためにコストに課題を抱える場合があります。

第4章 環境制御の運用技術

② 受光環境の制御

光の受け手である植物体の受光量が増えるよう、栽植密度や葉の配置などを栽培管理で調節することも重要です。複合環境制御下においては栽植密度や主枝本数を調整して、葉面積指数(leaf area index:LAI)を最適範囲内に制御することで生産性を高めることができます。受光体勢の改良のため、誘引や摘葉により葉の空間的な配置をできるだけ均等かつ斉一にすることが必要です。また、作業性を優先するあまり通路幅を広げてしまうと、光合成にとって必須である光を通路にあてて無駄にしてしまうため、増収は見込めなくなってしまいます。

③ 日長制御

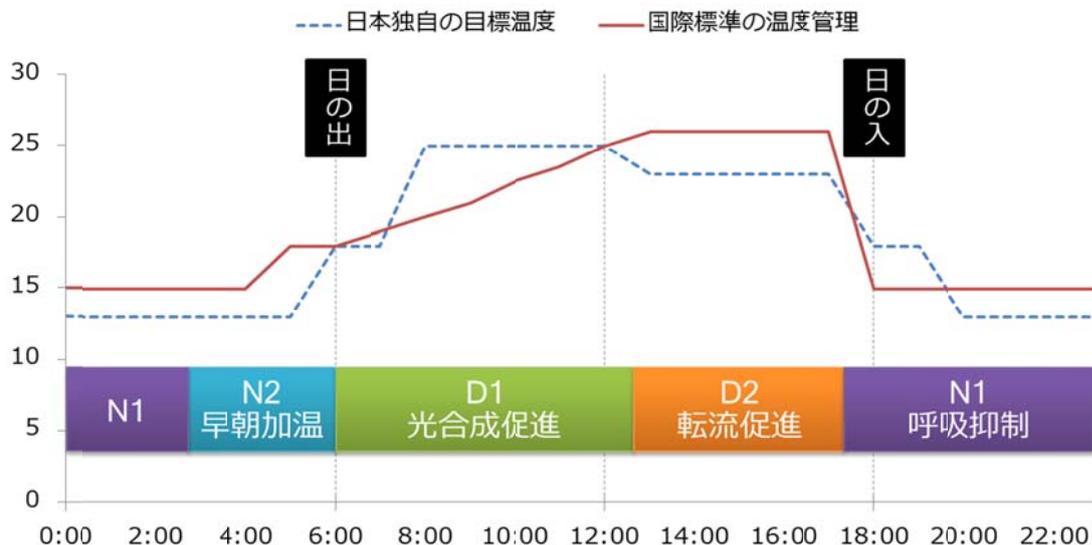
果実や花き生産では、花芽分化が光周期(日長)に誘導されるものが多く、光合成を充たす光強度でなくても、作物が日中とみなすことができる程度の弱光(照度換算で数~数10lx)を夜間点灯して日長延長することで、開花時期を調節する電照(処理)処理が利用されています。反対に、遮光などで日長を制限することで花芽分化を誘導し、開花時期を促進する場合は暗黒あるいは短日処理といった方法が利用されます。

④ 光質制御

植物の形態形成は、光質(波長域)の影響を受けることが知られています。赤色光と遠赤色光の光量子束比(R/FR比)を変えると茎や葉の伸長を調節でき、このR/FR比が小さいと伸長促進、大きいと伸長抑制効果が得られます。また、青色光と赤色光の光量子束比(B/R比)では、低いと茎の伸長や葉面積の拡大、高いと茎の伸長抑制の効果があります。これらの反応は、植物にある光受容タンパク質が関与し、光合成のための光受容体であるクロロフィル(葉緑素)の他に、光の強さや明暗周期などの光環境を認識するフィトクローム(主に赤色光、遠赤色光を吸収)や、クロプトクローム(青色光を吸収)、フォトロピン(青色光を吸収)があります。

第2項 温度制御

換気、保温、暖房、冷房、遮光により温度調節(調温)を行います。近年は、最低最高温度を基準とした2変温管理から、光合成や転流を意識して1日を4~6時間帯に区分して時間帯毎に環境目標値を変化させる時間帯変温管理が行われています。



N 2 : 日の出前から光合成適温18°Cへ、結露による裂果予防 (要暖房)
 D 1 : 緩やかに温度を上げ、環境変化、昼寝現象を抑える
 D 2 : 気温を上げ積極的に転流させ、光合成と呼吸のバランスをとる
 N 1 : 日の入前から気温を下げて同化産物を果実へ移行させる

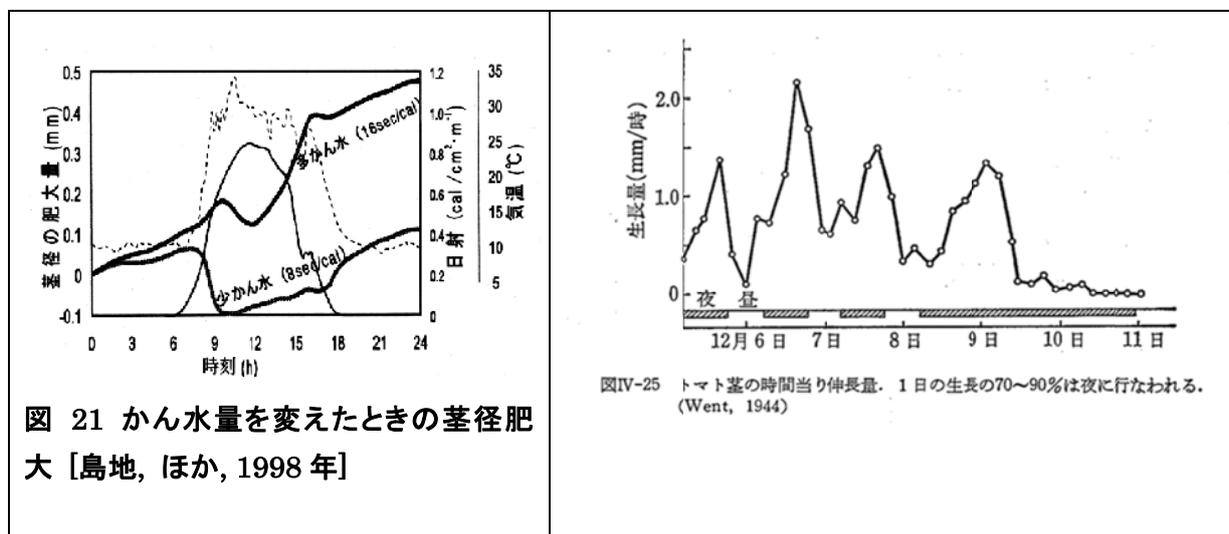


図 21 かん水量を変えたときの茎径肥大 [島地, ほか, 1998 年]

図IV-25 トマト茎の時間当り伸長量. 1日の生長の70~90%は夜に行なわれる. (Went, 1944)

① 換気

換気は、温室内の過度の気温上昇を抑制することにあります。また、光合成の原料となる二酸化炭素を外気から補給したり、湿度を調節(調湿)したり、換気により気流を生じて作物群落内のガス交換を促進したりする効果があります。一方で、換気では外気よりも優れた環境条件にすることができません。換気には、換気窓の開閉による自然換気と換気扇による強制換気があり、換気

第4章 環境制御の運用技術

面積が大きいほど換気量が増えるため、換気窓の開度制御が換気制御の基本となります。低温期でハウスが閉鎖環境であれば強制換気だけでも十分な換気量が得られますが、春以降の日射量が多い時期は強制換気では換気量が不足するため換気窓を用います。

自然換気で空気が入出流する原動力は、温度差換気と風力換気とがあります。屋外風速2 m/s以下の弱風では、窓上部と下部との温度差(圧力差)による上昇気流の影響が大きくなり、天窗と側窓といった高さの異なる換気窓の設置が効果的になります。それ以上の風速では、風力換気の影響が大きくなり、風速に比例して換気効率(換気回数)が増加するようになります。

強制換気は、ハウス構造上や強風の常襲地帯などで天窗の設置が困難だったり、細霧などの蒸発冷却法を使った冷房を行なったりするときに有利となります。換気扇は有圧タイプを選定しますが、十分な換気量を確保しようとすると設置台数が多くなります。また、1台あたりの使用電力が大きく、外風速の影響で能力低下することもあり、補助換気としての活用がコスト面で有利と考えられます。なお、近年、換気窓に防虫ネットを展長する事例が増えていますが、微小害虫(コナジラミ類、アブラムシ類、アザミウマ類など)を対象にすると0.4~1.0mm目合いの細かい防虫ネットが必要ですが、通気性が悪化し換気量が低下するため、低下分を補うために換気扇が必要となります。微小害虫の直接的な加害よりも媒介するウイルス病対策として導入されていますが、換気量の低下に伴うハウス内の昇温などを考慮すると、夜蛾(ヨウガ、タバコガなど)の侵入抑制に有効な4mm目合い程度でも十分と考えられます。この場合は、微小害虫は圃場衛生と薬剤防除で対策する必要がありますが、自然換気で十分な換気量を確保できるため、ハウス内環境としては有利であると考えられます。

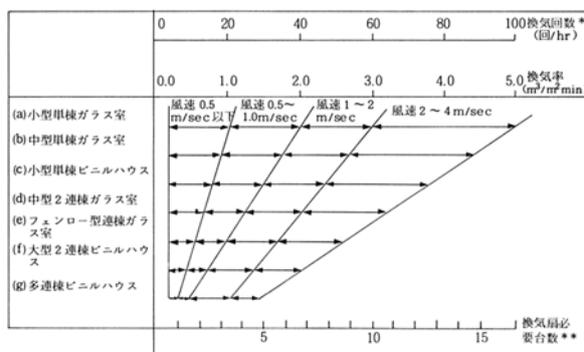


図17 温室種類別、風速別の最大可能自然換気率の概略値(古在)

注) すべての換気窓を全開した場合

* 温室平均高さ3mとして換算

** 床面積1000m²、温室平均高さ3m、換気扇風量300m³/minとして換算

図22 温室種類別、風速別の最大可能自然換気率の概略値(施設園芸環境委員会1979)

[日本施設園芸協会, 2015年]

表3 高温抑制のための必要換気率数例(施設園芸環境委員会1979)

換気目的	設定室温	必要換気率 (m ³ /m ² min)		
		床面乾燥気味 (カーネーション、バラ、定植後15日以内)	床面湿りきみ (観葉植物、キュウリ)	人為加温* (温室冷房)
冬、快晴日の正午	26℃	0.2~0.4	0.1~0.3	—
春、秋、初夏、快晴日の正午	30℃	1.2~1.5	1.0~1.4	—
盛夏、快晴日の正午	38℃	1.0	0.8	0.4
"	35℃	2.5	2.0	0.6
"	33℃	10.0以上	8.0以上	1.2
"	30℃	(不可能)	(不可能)	1.5

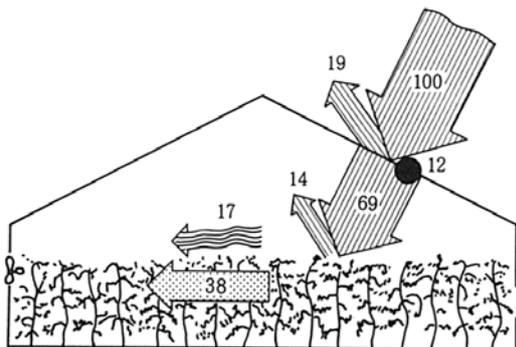


図15 温室の熱収支 (高倉)

図 23 温室の熱収支(高倉)

② 保温

保温は暖房費節減につながるため、表 4 を参考に保温特性に優れ、カーテンの開閉機構に適した被覆資材を選択します。温室からの放熱は図 24 のように、①被覆材や構造物を直接通過する伝熱(貫流伝熱)、②出入口などの隙間を通しての伝熱(隙間換気伝熱)、③地中への伝熱(地表伝熱)の3つに分けることができます。貫流伝熱量は放熱(暖房熱量)に占める割合が最も大きいため、内部被覆で断熱性を高めて暖房効率を上げることが最も重要になります。暖房による投下エネルギー量を抑制できます。

外張りフィルムと保温カーテンや2重被覆にした各フィルムの間隔は5~10cm程度の間隔を持たせます。また、フィルムの素材特性だけでなく、各被覆フィルム間の空気の断熱層を確保することで、保温性を高めることができます。なお、無加温温室では屋外気温の低下にやや遅れて追従して低下し、最低気温は外気温と同じになってしまうため、内部カーテンの2重+トンネル被覆などの多層化により地面からの放熱をできるだけ逃さないようにする必要があります。

表 4 保温被覆の熱節減率

表 5-6 保温被覆の熱節減率

保温方法	保温被覆資材	熱節減率	
		ガラス室	ビニルハウス
二重被覆	ガラス, 塩化ビニルフィルム	0.40	0.45
	ポリエチレンフィルム	0.35	0.40
一層カーテン	ポリエチレンフィルム	0.30	0.35
	塩化ビニルフィルム	0.35	0.40
	不織布	0.25	0.30
	アルミ粉末混入フィルム	0.40	0.45
二層カーテン	アルミ蒸着フィルム, アルミ箔ポリエチレンラミネートフィルム	0.50	0.55
	ポリエチレンフィルム二層	0.45	0.45
外面被覆	ポリエチレンフィルム+アルミ蒸着フィルム, アルミ箔ポリエチレンラミネートフィルム	0.65	0.65
	温室用ワラゴモ	0.60	0.65

(岡田 1980)

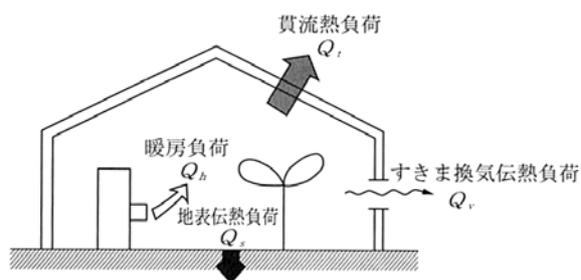


図 3-1 暖房温室の熱収支 (林)¹⁴⁾

図 24 暖房温室の熱収支(林)

③ 暖房

国内での暖房方式は、主に石油を燃料とする温風暖房式が全体の9割を占めます。その他の方式には、温水、蒸気、ヒートポンプ、電熱暖房等があります。温水暖房は海外では空気加温に用いられますが、国内では地中加温としての利用が多くなります。暖房方式の種類により適用対象となる施設が異なり、最大暖房負荷(栽培期間中に何℃確保したいか)、熱利用効率や制御性、保守、設備費などを考慮して導入する必要があります。

温風暖房式では、温風の吹き出し位置が上部と下部吹き出しとする場合がありますが、図25のように水平と垂直方向とで温度分布の均一性が異なります。このため、図26のようにポリダクトを配置して、温度ムラと気流改善を図ります。

ポリダクトは、単価は高くなりますが三層タイプのものや一層タイプなら0.1mm厚など、耐候性に優れ長期耐久性があり省力的です。これより薄い一層ポリダクトを用いるときは、安価な分、紫外線や擦れなどに対する耐久性に劣り、栽培中に補修や交換作業が必要になることもあるため、ダクトの配置などに気を付ける必要があります。

また、暖房機の送風機能を利用して炭酸ガスを供給する方法がありますが、このときは、炭酸ガス発生機と連動して間欠送風するより、手動で連続送風としたほうがダクトの膨縮などによるダクトの損傷が軽減することができます。

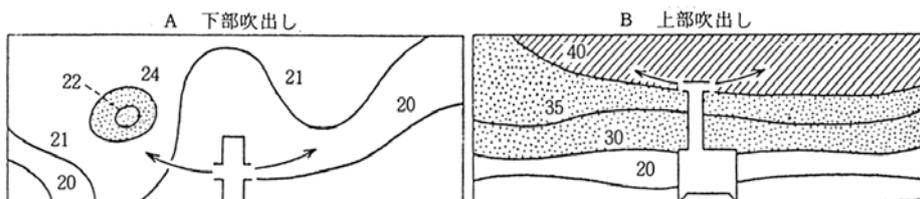


図49 温風の吹き出し位置による温度分布の違い(神谷)

図 25 温風の吹き出し位置による温度分布の違い(神谷) [小澤, ほか, 1993 年]

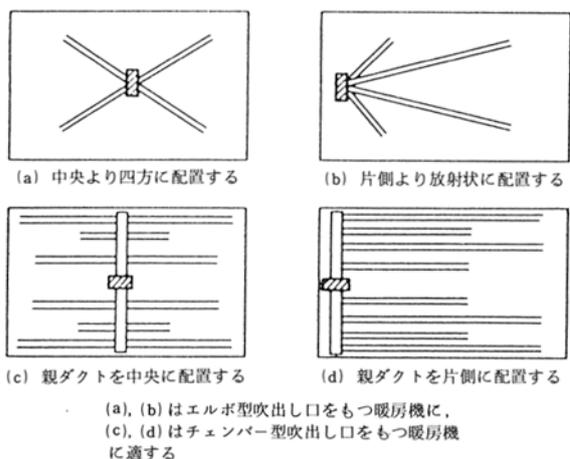


図50 送風ダクトの設置方法(鎌仲)

図 26 送風ダクトの設置方法(鎌仲)

第4章 環境制御の運用技術

④ 冷房

温室内の気温を外気よりも低くする唯一の方法ですが、日中の冷房は真夏の晴天日であれば1000m²の温室に対して家庭用のヒートポンプ(冷房性能2.8kW)113台が必要となるため経済的に見合わないと考えられます。夜間は日中の10~20%の冷房負荷で冷房できるため、ヒートポンプや地下水などの自然冷熱源を用いたりして、呼吸消費の抑制や開花調節を目的とした夜間冷房(夜冷)が現実的で経済的に見合う場合があります。

日中の冷房は水の気化熱を利用した蒸発冷却法(細霧冷房)で行うのが現実的です。蒸発冷却法は、気化した水蒸気が温室外に移動(排熱)することで冷房効果が得られるため、換気が必須になります。また、外気湿度が高い条件では冷房効果が劣ります。この方式には自然換気型あるいは強制換気型の細霧方式と、温室側面に水滴を滴下したパッドを取り付け反対側に強制換気扇を設置して、外気がパッドを通過するときに気化冷却された空気を温室内に取り入れるパッドアンドファン方式があります。細霧冷房は温室内にミストノズルを配置し、微細水滴が落下する間に気化しますが、気化しきれなかった水滴が植物体に付着して葉濡れが生じやすい方式です。パッドアンドファン方式では植物が濡れることが無く運転制御性に優れますが、温度勾配が生じるため40~50mを超える温室には不向きとなります。

⑤ 温度勾配

時間帯温度制御を行う場合、午前中は温度変化を緩やかにしつつも昇温していく管理をおこなうこととなります。この変温管理の指標として、1時間あたりの温度勾配(単位℃/hr)を用います。主に温室内の露点や飽差を考慮し、早朝の昇温は1~2℃/hr程度の温度勾配とすることを目安にします。午前中の温度勾配を高くて急な温度上昇をしてしまうと、温室内が急激に乾燥するため水ストレスを与えることになったり、果実結露が発生して品質低下を招いたりすることがあります。

第3項 湿度制御

乾燥時は日中の気孔開閉を制御して光合成量を増加する加湿制御と、夜間に植物の蒸散などで高湿度条件が続くときの病害発生回避や徒長抑制などの品質向上のための除湿制御が行われます。

① 加湿制御

加湿制御では、一流体のミストノズルを用いた細霧方式とパッドアンドファン方式が一般的です。これらの方式は加湿効率に劣りますが、加湿量を多くすることができるため温室に適した方法です。加湿効率を高めるためには、ミストの粒径が小さい方が蒸発しやすく優れますが、水源に含まれるイオン成分や異物等の不純物によるノズルの目詰まりが発生しやすいため、予め物理・化学的にろ過するか、ミスト粒径を大きくします。不純物の多い水質を使用してミストを行う場合、中小規模施設では水使用量が問題になることが少ないため、ミストの粒径を大きくしたり、水道水を用いたりした方がコスト的に優れることがあります。

大規模施設では水の利用効率を考慮する必要があるため、導入コストが高くても加湿効率の高いシステムを選択した方が有利になることがあります。また、日射の影響を受けないキノコ栽培や完全閉鎖型施設などでは加湿効果の高い超音波加湿方式が用いられる場合があります。

- 光合成 = 収量の最大化のため、**全国的に飽差管理が導入**されてきている
- 植物生理上の意義
 - 飽差は湿度の単位で、 $3 \sim 5 \text{ g/m}^3$ 程度が光合成に最適とされている（栽培上は $3 \sim 9 \text{ g/m}^3$ ）
 - 最適域 蒸散量の増加による光合成促進
 - 不適域 **水ストレス**による気孔閉鎖の回避
- 栽培管理でのポイント
 - 飽差の急激な変動を抑制（**激変緩和**）
 - **連続した乾燥環境を回避**（過蒸散抑制）
 - 湿度は間接的な環境要素（炭酸ガスは直接的）

加湿制御

1. 植物体をきちんと繁茂させる
 - A) 気温上昇抑制、葉の蒸散利用
2. 日中の乾燥環境への移行を緩やかにする
 - A) 少なくとも10分に1回は乾燥を打ち消す
 - B) 瞬間的な乱高下は気にせず、平均的にみる
3. 給液量を十分量与える
 - A) 最大の水ストレスは水不足 = 光合成の強い抑制
4. 最適飽差域では積極的にCO₂濃度を上げる
 - A) 光合成速度はCO₂濃度で決まるようになる

加湿制御の意義は、最適飽差域の維持による光合成速度の最大化にあります。圃場レベルでは飽差の急激な変動を抑制して、過蒸散による水ストレスを回避することの方が重要と考えられます。これまで紹介してきた通り気孔の応答には遅れがあるため、一時的な乾燥よりも乾燥した環境が連続することで強い水ストレスを受けようになります。湿度は日射や温度の影響で変動が激しい環境要素ですので、最適飽差域の維持を中心に管理するよりも、数分サイクルで急激な乾燥をミストなどで打ち消して、徐々に乾燥環境へ移行するような環境が良いと考えられます。

後述する多段階飽差制御では、適湿～過乾燥までを3段階に設定でき緩やかに乾燥環境に移行できる制御法で、曇天が続いた後の晴天など、気孔応答が鈍っているところに急激な乾燥環境に遭遇しても、植物が萎れるリスクを軽減できます。また、加湿設定が1設定しかない制御盤では、設定値を最適飽差域値の $3 \sim 5 \text{ g/m}^3$ ではなく、過乾燥に移行し始める $7 \sim 9 \text{ g/m}^3$ 程度で加湿するようにした方が良いと考えられます。また、温暖になってくる時期には、急激な温度上昇によって乾燥を招いている場合があり、加湿よりも換気による昇温抑制を優先した方が湿度変動を小さくできることがあります。

表 5 最適飽差の目安

	相対湿度 (%)									
	95	90	85	80	75	70	65	60	55	50
16	0.7	1.4	2.0	2.7	3.4	4.1	4.8	5.5	6.2	6.7
17	0.7	1.5	2.2	2.9	3.6	4.3	5.0	5.8	6.5	7.2
18	0.8	1.5	2.4	3.1	3.8	4.6	5.4	6.2	7.0	7.7
19	0.8	1.6	2.5	3.3	4.1	4.9	5.7	6.5	7.4	8.2
20	0.9	1.7	2.6	3.5	4.4	5.2	6.0	6.9	7.8	8.7
21	0.9	1.8	2.7	3.7	4.6	5.5	6.4	7.4	8.3	9.3
22	1.0	2.0	2.9	3.9	4.9	5.7	6.8	7.7	8.8	9.7
23	1.0	2.1	3.1	4.2	5.2	6.3	7.3	8.3	9.3	10.3
24	1.1	2.2	3.3	4.4	5.5	6.5	7.7	8.7	9.8	10.9
25	1.2	2.3	3.5	4.7	5.8	6.9	8.1	9.3	10.4	11.5
26	1.3	2.5	3.7	4.9	6.1	7.4	8.5	9.8	10.9	12.2
27	1.3	2.7	3.9	5.2	6.4	7.7	9.0	10.3	11.6	12.9
28	1.4	2.8	4.2	5.6	6.7	8.2	9.5	10.9	12.3	13.6
29	1.4	2.9	4.4	5.8	7.3	8.6	10.1	11.5	13.0	14.4
30	1.5	3.0	4.7	6.2	7.6	9.1	10.6	12.1	13.6	15.2

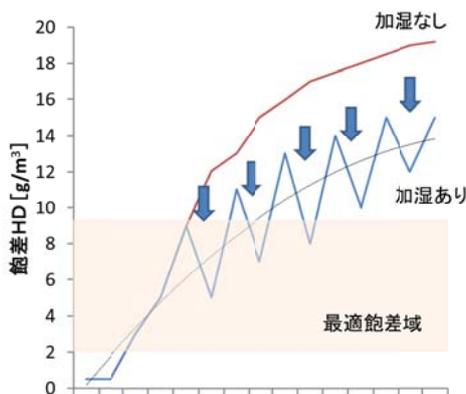


図 27 加湿制御のイメージ図

※栽培上は、最適飽差域の維持よりも不適飽差域を打ち消すことを主眼にすると良い

② 除湿制御

最もランニングコストが安い換気除湿が基本となり、外気の冷えた空気と入れ換えることで湿度を下げるため、内外気温差がある環境で除湿効果が高くなります。換気除湿では、外気環境の影響を受けやすく除湿効果が不安定で、温室内の熱を排熱してしまうという特徴があります。

換気除湿が難しい季節は、制御機器を利用して除湿効果を高めることができます。主に夜間の除湿が対象になりますが、冬期であれば暖房機を利用した加温除湿を行うことができます。加温除湿では、換気と併用して湿度の高い空気を入れ替えることで除湿効果を高めます。

夜間に暖房機が動作しないような環境では、全熱交換機を用いた換気除湿やヒートポンプを利用した除湿を行います。全熱交換機による換気除湿は、排熱量は少なくなりますが換気により炭酸ガス施用時のCO₂濃度を低下することになります。また、面積あたりの必要台数が多く、ランニングコストが安いといった特徴があります。一方でヒートポンプでの除湿を行う場合は、夜温が高い時期は冷房運転だけによる冷房除湿、夜温が低い時期は冷房運転をしながら暖房機も運転する再熱除湿により除湿しますが、全体的にコストが高いという特徴があります。ただし、ヒートポンプは除湿だけでなく冷房も含めて運用することで増収へつなげることも期待できることから、本県での適用技術の開発が必要と考えられます。

第4項 炭酸ガス制御

炭酸ガス施肥あるいは施用と呼ばれ、温室内の二酸化炭素濃度を人為的に高めて光合成速度を向上、生産性を高める技術です。二酸化炭素の供給方法は、石油燃料や天然ガスを用いた燃焼方式と液化炭酸ガスを用いた生ガス方式があります。

燃焼式は低温期であればハウス内暖房にも寄与して省エネ効果が得られますが、乾燥した空気を送り出し湿度環境は悪化するため、光合成に適した湿度へ調節する必要があります。燃焼方式のうち灯油燃料は導入コスト、ランニングコストが低いことから、広く普及していますが、不純物の多い灯油や劣化した灯油を用いると不完全燃焼や有害ガスが発生する可能性があるため、燃料の品質管理に注意します。LPGなどの天然ガス燃焼方式は灯油よりも運転制御性が良く、ランニングコストがやや高い傾向があります。生ガス方式(液化炭酸ガス)方式は、温湿度への影響が少なく環境が制御しやすくなります。導入設備は簡素で安価になりますが、ランニングコストは最も高いため、地域での入手価格を把握した上で導入の可否を判断します。また、ダクトや有孔パイプなどを利用した群落内施用などを行うことで施用効率を高めます。

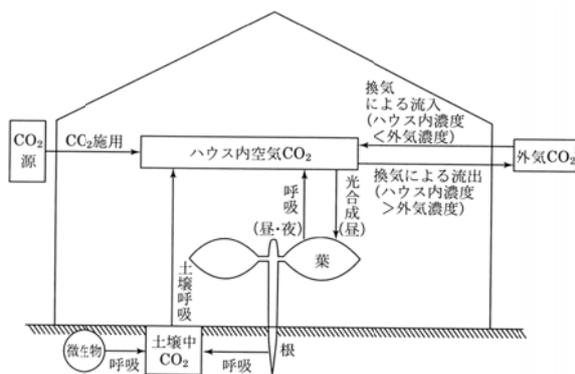


図4-3 ハウス内における炭酸ガス収支の模式図¹³⁾

図 28 ハウス内における炭酸ガス収支の模式図 [古在, ほか, 1998 年]

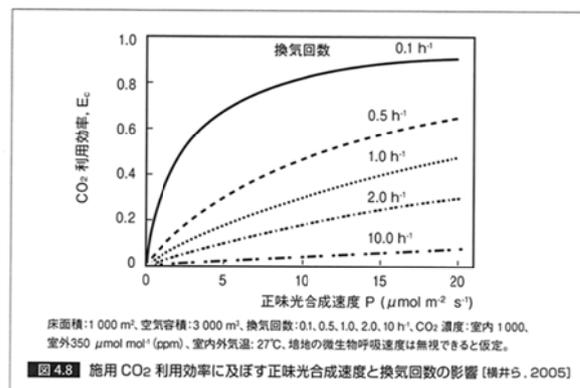


図 29 施用CO2利用効率に及ぼす正味光合成速度と換気回数の影響(横井ら, 2005)

表 6 時間あたり純光合成速度(g/m²・hr)の概略値(古在)

日射量	屋外日射量 (kcal/m ² ・min)			
	1.5	3.0	7.0	10.0
作物の繁茂度	快晴日の日の出後30分, 日没前30分および曇天日	快晴日の太陽高度15°	快晴日の太陽高度30°(冬至の正午)	快晴日の太陽高度50°(春分の正午)
移植後20日 (LAI=1)	0.5	1.0	2.0	2.5
移植後40日 (LAI=2)	1.0	2.0	3.0	3.5
移植後50日 (LAI=3)	1.5	3.0	4.0	5.0

(注) LAI = 葉面積指数 = (作物の総葉面積/床面積)

表 7 時間あたり土壌面炭酸ガス発生量(g/m²・hr)の概略値(古在)

土壌の種類	地下10cmの地温 (°C)		
	15°C	20°C	25°C
温室用肥土	0.4	0.6	0.9
堆肥施用土	0.6	0.8	1.2
圃(ほ)場耕土	0.2	0.3	0.5
水 耕	0.1	0.2	0.3

表 8 炭酸ガス源と制御への適応性

	液化CO ₂ (生ガス)	プロパンガス	白灯油
分子式	CO ₂	C ₃ H ₈	C ₁₀ H ₂₂ ~C ₁₆ H ₃₄
CO ₂ 発生量	1kgCO ₂ /kg	6.3kgCO ₂ /m ₃	2.5kgCO ₂ /L
CO ₂ 発生量の調節	容易	可能	不可
CO ₂ 濃度の制御性	優れる	やや優れる	劣る
燃焼熱の暖房利用	不可	可能	可能
有害ガス	無し	CO、NO ₂ 、C ₂ H ₄	CO、NO ₂ 、C ₂ H ₄ 、SO ₂
入手の容易性	限定的	容易	容易
導入コスト	安価	高価	やや高価
1kgCO ₂ 単価	150円	80円	40円

第5項 換気・気流制御

① 換気制御

換気窓の開閉による自然換気と、換気扇による強制換気があります。換気面積が大きいほど換気量が増えるため、換気窓の開度制御が換気制御の基本になります。低温期は強制換気だけでも十分な換気量が得られますが、日射量が増えるようになると強制換気では換気量・回数が不足するため換気窓が必要になります。換気は日中の過度の温度上昇を抑制する目的があり、光合成の原料である二酸化炭素を外気から補給したり、湿度を調節したり、換気により気流を生じて作物群落内のガス交換を促進する効果があります。ただし、換気では外気よりも優れた環境条件にすることはできず、限界があります。

② 気流制御

温室内では循環扇や暖房機のダクトを利用した局所送風、換気などにより気流を発生させます。目安としては0.5m/s以上の気流を確保し、そよ風で葉が揺れているような環境づくりを目標とします。

第6項 農業における自動制御

施設栽培ではプロセス制御のオン・オフ、PID等のフィードバック制御系が良く用いられ、かん水制御などではシーケンシャル制御(順序制御)系も利用されます。温室の制御は日射や風などによる外乱の影響が多いことから、基本的に環境目標値への追従性が悪い傾向があります。制御機器はオン・オフ動作が大半ですが、換気窓の開閉や温湯暖房などについてはPID制御が用いられます。ただし、外乱の多い温室制御では、PID(比例積分微分)動作ではオーバーシュートやハンチングにより目標値への収束性が悪くなる傾向があるため、P(比例)あるいはPI(比例積分)制御が用いられることが多くなります。

第3節 養液栽培

養液栽培とは、土以外の培地あるいは無培地で隔離床を用いて土壌と離れた状態で、作物の生育に必要な養分を水に溶かした液状肥料(培養液)として与えて栽培する方法です。この栽培方式では、土のないところでも作物栽培でき、土壌病害や塩類集積などの連作障害を回避したりすることで安定生産が可能になります。また、給液や施肥の自動化やシステム化が可能で省力的です。土耕栽培に比べ肥料や水の利用効率が高いため、特に培養液を閉鎖系で管理した場合は、環境負荷の軽減することができます。

① 養液栽培の方式

培地の有無により固形培地耕と水耕および噴霧耕とに大別できます。培地を用いない水耕のうち、湛液型循環式水耕(DFT)は、根の全体から一部が培養液に浸かっている方式です。この方式の特徴はベッド内の培養液量が多いため、根域環境の変動を小さくでき、培養液の温度制御が比較的容易である一方、循環用のタンクやベッドは大きくなります。

固形培地耕では、無機培地のロックウール栽培の割合が多く、培養液はチューブを用いて給液します。ロックウールの主原料は天然岩石で、主成分はケイ酸とカルシウムです。有機質培地では、価格と入手の容易性からヤシ殻を用いたものが良く使われますが、塩分やアク成分、撥水性、窒素飢餓などが懸念されるため、製品品質を事前に確認し、作付け前の前処理を丁寧に行うようにします。本県では、これらの特性を解消し隔離栽培に適した隔離床用培土が県内の培土メーカーから市販されていますので、それを活用することができます。

② システムの選定

水耕は培地が不要であるため導入コストを下げることはできますが、常に培養液が循環しているため水分制御による品質向上ができないことや、栽培期間が長期化すると根量の増加に伴う根詰まりしやすいこと等から、1作あたりの栽培期間が短いリーフレタスやミツバなどの葉菜類に適しています。一方で、固形培地耕は根域環境の水分状態を調節することが容易で、根詰まりも起こらないことから、果菜類などの長期栽培が必要な品目に適します。

③ 有効水分域(培地水分率)のコントロール

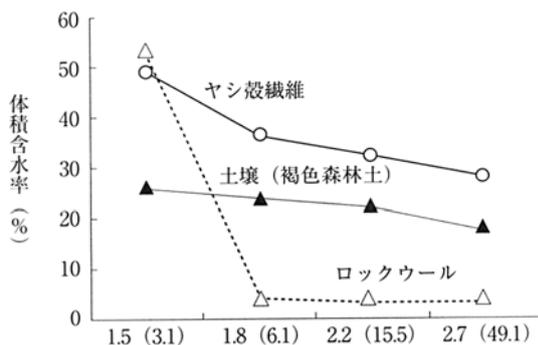
第2章第2節で述べたとおり、植物が吸水する原動力は蒸散にあり、根域の水分状態が易有効水分域(pF値で1.8~3.0程度)であれば、植物がストレス無く養水分を吸収できる環境となり光合成の最大化につながります。つまり、植物にしてみたら私たちがかん水の指標としてよく用いる日あたりかん水量や日あたり吸水量といったことは無縁で、単に易有効水分域であればより多くの養水分を吸収できるということになります。かん水して土壌や培地から排水されるような状態(飽和)が最も植物が吸収しやすい根域環境となり、その後は、吸水や表面からの蒸発により徐々に易有効水分域から難有効水分域側の不適な根域環境へ移行していきます。このため、水管理では、光合成時間帯であれば給液量よりも易有効水分域の維持すること(≒頻度)の方が重要になります。図30は、ロックウールは易有効水分域(pF1.5~2.7)での含水率が高く、培地容量の50%を植物がストレス無く吸収できることを示しています。一方でヤシ殻は20%、土壌(褐色森林土)は5%程度しか自由に吸収できる水分が無いということになります。一方で、ロックウール

第4章 環境制御の運用技術

は水を吸いきると一気に難有効水分域まで到達するため、水が無くなるとすぐ萎凋するといった二極的な特性があるのに対し、ヤシ殻や土壌は容量あたりの自由水は少ないものの、徐々に水を吸収できなくなるため、萎れにくい特性を有していることになります。ただし、ヤシ殻培地は少量培地耕で用いられることが多いため、培地容量が少ないことで水不足になりやすく萎れやすい培地という印象が強くなると思います。このように培地や土壌の特性を把握し、どの程度自由に吸収できる水分を保持(容水量)でき、萎れやすい培地(pF-水分曲線)かどうかを理解することは、かん水頻度を決定する上で重要になります。実際の水管理は量や頻度で調節することになりますが、植物にとって重要な易有効水分域が維持できる量や頻度に調節することが大事です。

このように、植物からすると易有効水分域であれば水ストレスを与えずに光合成を活発に行えるようになるため、給液量にかかわらず常に培地や土壌が飽和状態であれば良好な根域環境を維持できることになりますので、日中は乾湿差を大きくせず、常に湿潤な状態を維持する方が有利になり、少量多頻度かん水が有効になると考えられます。給液量は水や肥料の利用効率の問題ですので、まずは易有効水分域を維持した上で、給液量を最適な量に調整して効率を上げるという順序立てて捉えます。近年、水肥料の利用効率が高い日射比例制御や排液量センサなどを水管理に活用する事例が増えていますが、これらの手法を取り入れるときは易有効水分の概念を人が補完して水管理します。具体的には、日射比例だけで制御すると培地の水分状態に関わらずかん水することになるため、曇天が続くと光合成にとっては十分な光があってもかん水開始が遅くなり難有効水分域側に近い水分状態で水ストレス(乾燥ストレス)を与え光合成を抑制する場合があります。このため、別途タイマーや手動かん水により日の出後に培地を飽和状態にするといった修正が必要になる場合があります。

なお、常に飽和状態が最適な水分環境にはなりませんが、排水性が悪く水の移動がないような状態では、第2章第7節第1項で述べたとおり溶存酸素がすぐに無くなり根が窒息して根腐れを招きますので、排水性の良い培地や土壌であることが大前提となります。



水分張力 (pF 値) ()内はマトリックポテンシャル (-kPa)

図 30 pF-水分曲線の例 [社団法人日本施設園芸協会・日本養液栽培研究会, 2012 年]

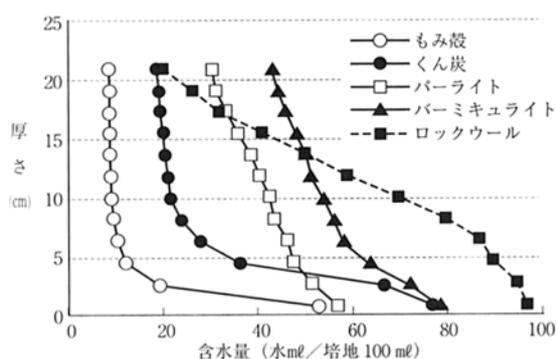


図-1 固形培地の含水量

図 31 固形培地の含水量 [社団法人日本施設園芸協会・日本養液栽培研究会, 2012 年]

第4章 環境制御の運用技術

④ 養液濃度のコントロール

現在主流のかけ流し栽培では、EC(電気伝導度)センサを活用することで利用効率の高い肥培管理が可能になります。ECは肥料イオンの総量を示したもので、EC値が高ければ肥料濃度が高い、低ければ肥料濃度が低いということになります。例えば、給液濃度ECを1.0dS/m(あるいはmS/cm)としたときに、排液側のECが高い場合は給液量が不足して培地内で濃縮されて排液されている可能性があるため、給液濃度をECで0.1~0.2dS/m下げて給液量や頻度を増やします。一方で排液が0.2~0.3dS/mと低い値を示した場合、給液している肥料濃度が低い(肥料不足)の状態であると判断できるため、給液量や頻度を増やしたり、給液濃度を高めたりします。ECセンサはハンディタイプの簡易なもので良く、HORIBA社のLAQUAtwin-EC-33Bは微量で安定した値が計測できることや、校正頻度が少なくても計測値のズレが少ないので、培養液管理で使いやすい製品になっています。

第4節 濃度施用と量施用

炭酸ガス施肥や培養液の施用法として、「濃度施用」と「定量施用」の2つの方法があります。基本的にはどちらも目標濃度を維持できるように動作させる濃度施用法で行いますが、夏季のように換気や過蒸散が多くなる時期は過剰供給になりやすく、濃度施用では施用効率が低下します。炭酸ガス施肥の定量施用であれば、晴天日にLAI=3であるときの炭酸ガス供給量は1時間あたり3kgCO₂/10a程度の吸収量が見込まれるため、少なくとも吸収量分は濃度に関係なく間欠燃焼させて3kgを定量施用します。培養液管理では、株あたり日窒素吸収量が120mgN/株と見込まれるときは、日かん水量から株あたり窒素施肥量を求め、培養液濃度を調整して定量施用します。定量施用する際の留意点として、炭酸ガス施肥では換気による損失、培養液管理では、かけ流し式の場合は排液による流失などがあるため、これらの損失分を考慮して、上記の施用量よりも2~3割程度多く施すようにします。

第5節 生育調査

第1項 定期的な生育調査の意義

定期的な生育調査は植物状態を把握したり、予測したりするために重要な情報となります。少なくとも7～10日毎に1回は調査することで、植物状態を把握できるようになります。調査株数は8株で行うことが推奨されますが、調査時間を確保するのが難しい場合には、中庸な株4株(ハウス立地が南北棟なら東と西、東西棟なら南と北2株ずつが対象)としても、概ね代表的な生育値を得ることができます。

生育調査を環境管理に活用するためには、調査間隔は短い方が望ましいです。調査株を多くして月1回の調査とするよりも、調査株が少なくとも週1回程度の調査で植物の状態変化が把握できる方が、環境管理に活用できるデータ(=時系列データ)になります。

トマトでは、メジャー1本で計測できる手法が提案され、調査労力も軽減できることから、誰でも簡単に生育調査に取り組むことができるようになってきました。メジャーは、目盛り精度を確保するため、JIS1級品のグラスファイバー入りメジャーを使用します。また、0基点までに5cm程の余白があるメジャーの方が、位置合わせがしやすく、茎周や開花花房高さなどを測るときの扱いが容易です。

参考商品)プロマート 抗菌メジャー 12mm×1.5m KA-15 市場価格 500 円程度

第2項 生育調査項目

① トマトの生育調査項目の事例

実証事業で行った調査項目は、下表の通りです。この他にも、花色や花の咲き方なども観察して記載する場合があります。

表 9 大玉トマトの生育調査項目

	調査項目	単位	調査方法
A	茎周	mm	開花花房直下の茎の周囲長
B	開花段位	段	1花以上開花している花房段位
C	開花花房高さ	cm	開花花房から成長点までの長さ
D	前回開花花房高さ	cm	前回調査した開花花房から成長点までの長さ
E	葉長	cm	開花花房直下葉の葉柄基部から葉先端までの長さ
F	葉幅	cm	開花花房直下葉の最大葉幅長
G	生葉数	枚	開花花房以下の生葉数
H	収穫段位	段	収穫中の花房段位
I	着果数	果	結実した総果実数
J	着果段数	段	開花段位－着果段位
K	茎伸長速度	cm/日	([今回のD]－[前回のC])／調査間隔日数
L	開花速度	段/日	([今回のB]－[前回のB])／調査間隔日数

② 茎の太さ

茎の太さを評価するとき、ノギスを用いた茎径による調査方法もありますが、茎周に比べて測定誤差が大きく調査データの再現性や信頼性に劣ります。メジャーだけで他の調査項目も網羅

第4章 環境制御の運用技術

できる茎周の方が、データの信頼性や再現性が高く、安価に生育調査をすることができます。

③ 調査項目と評価指標

今回紹介した調査項目は、制御設定だけでなく栽培管理に必要な判断材料(意志決定)につながる評価指標値となります。各調査項目が意図する評価内容は下表を参考に、今後の生育状態を予測しながら決定します。

表 10 評価指標と調査項目の関係性

評価指標	該当する調査項目	栽培管理への活用
発育相の偏り (栄養成長と生殖成長)	茎周、開花花房高さ、葉長、葉幅、茎伸長速度、開花速度	主に温度管理
収量(LAI)	生葉数、葉長、葉幅	LAIの推定、摘葉数
ソース・シンクバランス (着果負担)	生葉数、着果数、収穫段位、開花段位	摘葉や摘果数 (日射量を考慮の上)

第3項 ウィークリーレポートの活用

環境管理の高度化を図る上で、ウィークリーレポート(週報)の活用が求められています。ウィークリーレポートでは、生育調査や管理状況、病虫害や環境値などを週単位で記録していきます。ウィークリーレポートを作成する意義は、現状把握と将来予測、生産履歴、制御機器やセンサ類の動作確認、投下エネルギーや水・肥料の利用効率向上などにあります。(社)施設園芸協会のホームページに、次世代施設園芸導入加速化支援事業(全国推進事業)事業報告書として活用事例が紹介されています。下表は、実証研究で行った調査項目例です。

はじめて実践するときには、調査項目を全て網羅するよりも、関心の高い調査項目をピックアップして調査して、必要性を感じた項目を追加していく方が取り組みやすいです。初めての場合は、最低限、茎周、開花段位、開花花房高さ、日平均温度を調査し、それ以外で関心のある項目を追加するような形で取り組むと良いと思います。

表 11 ウィークリーレポートの調査項目例

対象	項目	方法
生育	茎周・開花段位・開花花房高さ・葉長・葉幅・葉数・収穫段数・茎伸長量・開花速度・着果数・(LAI)	4株平均
培養液	給排液pH、EC	1列
病虫害 生理障害	被害指数[0無～4多発] 障害指数[0無～4多発]	達観
環境値	温度(日平均、日中、夜間) 相対湿度(日中、夜間、95%高湿度遭遇時間) 飽差(日中、夜間) CO2濃度(日中、夜間) 日射(日積算、最高)	表計算ソフトや モニタリングソフトでの集計

第4項 定期調査による課題発見

① 時系列データの活用事例

下図は、実証圃での生育調査の推移を示したものです。調査項目値が大きく低下し、生殖成長への偏りが強い(草勢が低下した)時期がありました。この要因として、その前の時期に養分欠乏や萎れの発生が認められ、給液管理に課題があることが推察されたことから、翌年度の給液管理設定を見直すことにつながりました。また、変動幅が大きかったため、次年度以降の管理では、調査データの変化に応じて、制御設定値を変更することができるようになりました。

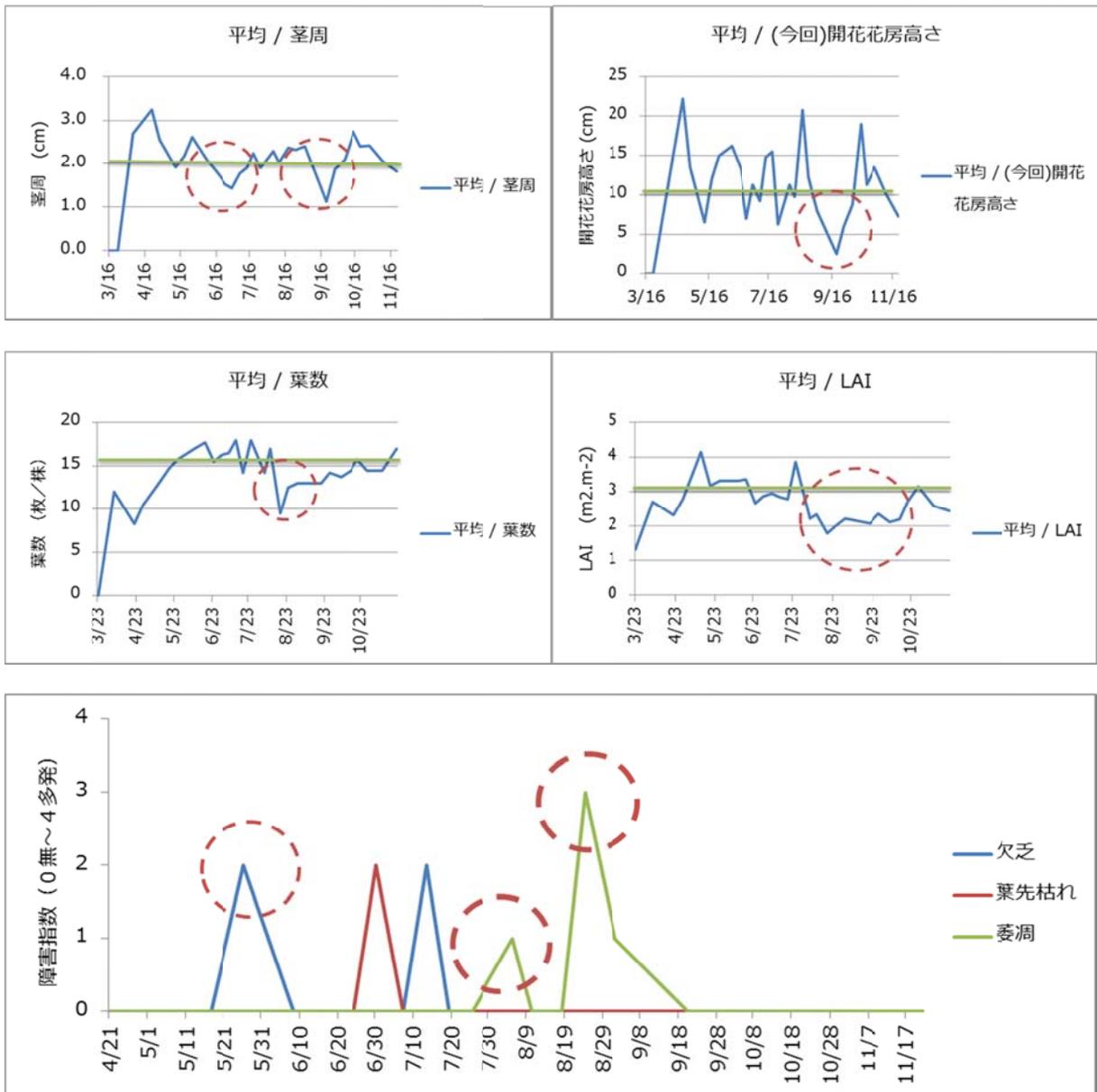


図 32 生育調査のグラフ推移(2016年)

② 時系列データの解析と予測

より高度な生育調査データ活用を行いたい場合は、時差相関法という統計手法を用いることで、現在の調査値(現況値)から将来予測ができるようになります。茎周の自己相関を求めた場

第4章 環境制御の運用技術

合、相関係数が徐々に低下して負の値に移行していることが分かります。これは、調査時点で茎が太ければ、おおよそ30日後には茎が細くなるという傾向が予測できます(茎が細い場合は、逆の推移となります)。一方で、開花速度が速い場合、開花花房高さは、おおよそ10日毎に徐々に低下していくことが分かります。これは、おおよそ10日周期で生殖成長への偏りが大きくなる(開花速度が遅れている場合は、逆の推移)ことが予測できます。これらの関係性から、おおよそ10日周期で発育相の偏りが徐々に強まっていき30日後に最も偏りが大きくなる、つまり、栄養成長へ偏った草勢が強い状態であれば、10日周期で生殖成長への偏りが大きくなっていき、30日後には生殖成長への偏りが最も強く草勢が弱い状態になり、その後回復していく傾向があることが予測できます。

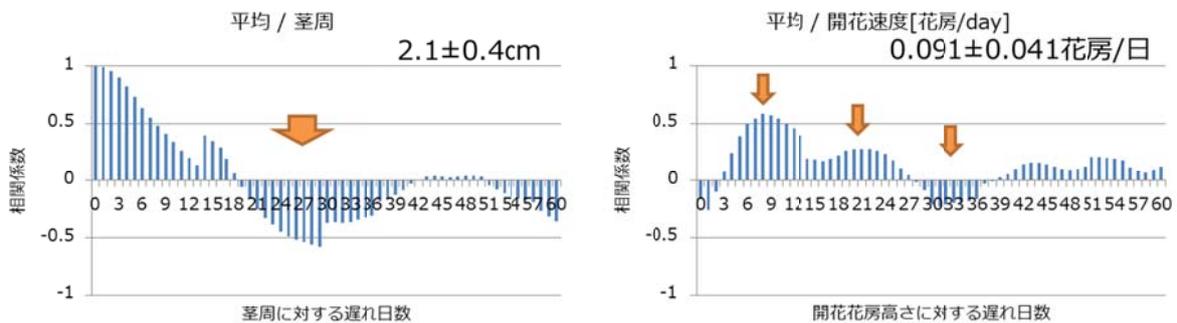


図 33 茎周の自己相関(左図)と開花速度に対する開花花房高さの相互相関(2016年)

解析結果が分かりにくいところがありますが、現在の草姿(草勢)が強いとしても、もし10日周期で樹勢が弱まっていくことが予測できるようになれば、今後、下図のように見た目の草姿だけにとらわれず、この先の生育状態を見越した管理できるようになり、安定した生育状態を維持することで安定生産につなげることが期待されます。

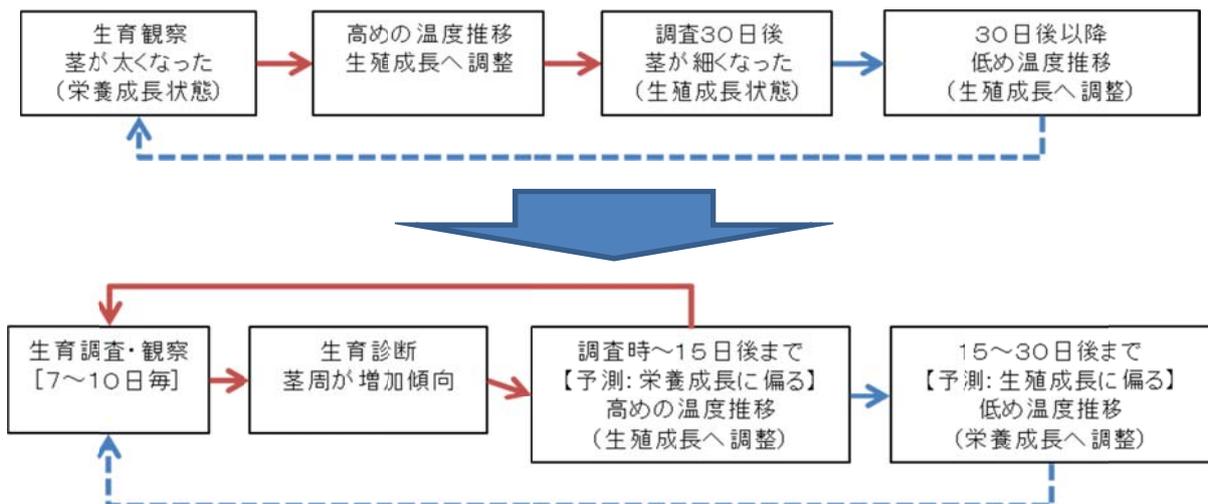


図 34 生育予測型環境管理への転換イメージ

第2節 要素別の技術概要

第1項 光環境の改善

① 栽植密度と誘引高さ[受光量の増大、受光体勢の改善]

適正な栽植密度を設定することで、単位面積あたりの受光量(≒光合成量)が増加することができ、収量や投下した資源(エネルギー)の利用効率を高めることができます。トマトの最適LAIは3~4を維持できるように、栽植密度は3~4株/m²(2本仕立苗は2~3株)を確保します。栽植密度を高めるときは、株間よりも列間を狭くしてベッド数を増やすことを考えます。受光量を増大させるためには、施設内に入ってくる日射を全て葉で受け止めることができれば最大限利用できる環境ともいえます。水田や森林のように植物群落が、むらなく日射を受け止めている様子を思い浮かべると分かりやすいかもしれません。作業性を優先して通路を広げすぎないようにして、晴天日でも通路は木陰のような状態になるように、ハウス仕様に応じて栽植密度(特に列の配置)を設計します。列間(通路)を狭くするためには、誘引高さを高くして足下をすっきりさせる必要があるため、軒高のないハウスであっても誘引高さは2mを確保するようにして、高い位置で誘引作業等を行います。

これらの改善により受光量が増大するだけでなく、施設内気温の昇温抑制、湿度の安定化、果実の着色促進、環境制御による増収効果が得られやすくなります。

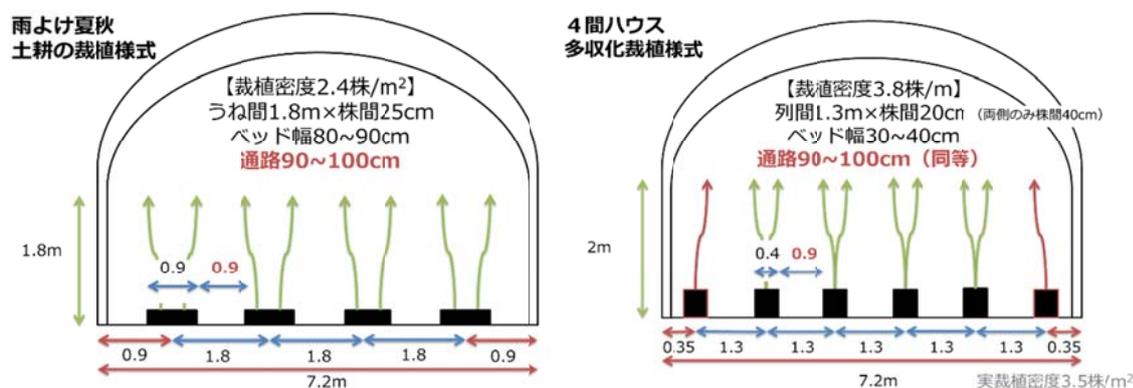


図 35 従来の栽植様式(左)と多収化モデルの栽植密度(右)

誘引高さを高く、隔離床でベッド幅を狭くすることで、作業性を損なわず通路を狭くでき、両側面にベッドを追加することができる。



図 36 多収化モデルの栽培状況(左)と側面栽植様式(中央)、誘引整枝作業用の下駄(右)

② 光反射資材の敷設[受光量の増大、昇温抑制]

白黒ダブルマルチ、白黒防草シートなどで通路面を被覆します。白単色の除草シートを使う場合は、光を透過して除草効果が劣る場合があるため、抑草効果の高い黒色のマルチや除草シートを敷設したうえで施工します。なお、アルミ蒸着などの銀色の反射率の高い資材もありますが、強い日射(直達光)をそのまま反射することで日焼けの原因になりやすいため、白色シートで光散乱させて反射します。

③ 定期的な屋根フィルム、内張フィルムの更新[光の増加]

第4章第2節第1項で解説したように、フッ素を除く樹脂性の被覆フィルムは年々光の透過率が低下します。一般的な軟質フィルムは、5年経過すると導入当初よりも10～30%性能低下するため、ハウス内への入射光量を減らし、減収要因になります。栽培終了時には、曇天日に屋外と屋内の照度や日射を数カ所で計測・平均し、光透過率を求めるなどしてフィルム更新の要否を確認しましょう。安価な照度計としてLX-1010Bが数千円で購入可能です(秋月電子通商など)。精度や特性は高額な照度計より劣りますが、相対的な光環境の評価には十分活用できます。

$$[\text{光透過率}(\%)] = (1 - \text{屋内照度} / \text{屋外照度}) \times 100$$

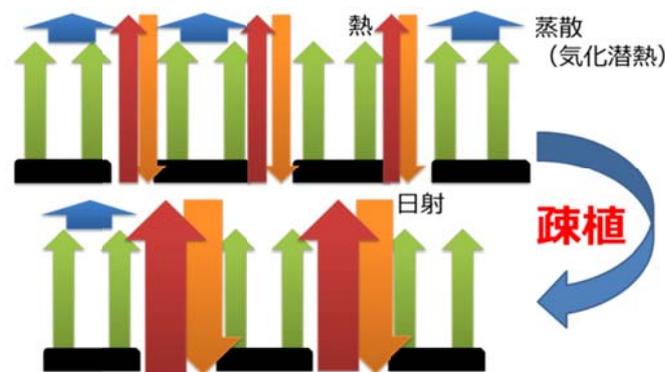
④ 内部カーテンの遮光兼用動作

基本的に保温のためですが、強日射時だけは遮光のために動作させます。第4章第2節第1項で触れたように、フィルムだけでも10～30%程度の遮光となります。屋外日射で800W/m²を超えるような強日射時は、葉温やハウス内気温の上昇を抑えるため、内部カーテンを閉めることがあり、全閉せず30cm程度開けて換気できる状態にします。

なお、成果では導入コスト削減のため巻き上げ式の1層カーテンとしましたが、2層カーテンとすることで暖房コストの1割削減が見込まれますので、総合的にコスト削減につながる2層化が望ましいです。なおこれ以上の複層化は、1層と2層との違いほどの削減率(保温性)が見込めないため、1～2層カーテンで被覆材に保温性の高い資材を選定します。2層の場合は、上層を遮光と保温兼用、下層を保温用の被覆資材とすることで、環境管理しやすくなります。

⑤ 疎植による相乗的な減収

近年、気候変動にともなう異常気象の発生が増えています。これまでは、春～初夏は比較的気候が安定していて栽培管理も容易な時期でしたが、真夏日のような高温や強日射日が出現するようになり、不適な環境が突発的に遭遇するようになってきました。近年、下図のように疎植にする事例が増えてきましたが、ハウス内環境の悪化を助長し、異常気象による高温強日射などへの適応性が低下するおそれがあります。



植物の蒸散が減る = 気化潜熱量が減り葉温と気温が上がる
 通路に日射が多く到達する = 光が熱に変わり高温乾燥
 => 高温乾燥を助長する => 気孔閉鎖 => 減収

図 37 列間がハウス内環境を悪化させる模式図

第2項 炭酸ガス環境の改善

① 濃度施用と定量施用

外気温が高くなると換気回数が多くなり、供給した炭酸ガスが屋外に放出しやすくなるため、1000ppm といった高濃度条件を維持することが困難で、濃度施用が適さない場合があります。このような換気が多い環境下では、炭酸ガスを目標濃度まで連続供給せず、大気濃度以下の時に間欠運転して定量施用するようにします。

運用上の留意事項としては、現在用いられている炭酸ガスセンサは精度がそれほど高くなく±30～50ppmの誤差を含みますので、大気濃度400ppmを下回ったときに稼働させるような設定では、ほとんど施肥しない場合があります。このため、設定値は大気濃度よりもやや高い450ppmにするなどして、定量施用の動作にすることで換気中でも積極的に炭酸ガスを供給することができるようになります。

図 38 炭酸ガス施肥の施用法の判断目安



② ダクト送風による炭酸ガスの供給方法

(1)暖房機と炭酸ガス発生機が隣接できる場合	(2)暖房機と炭酸ガス発生機が隣接できない場合
暖房機の送風ファン連動機能をつかって供給します。	シロッコファンやダクトファンを導入し、発生機の近くに設置し、供給します
 <p>制御盤にある暖房機の送風運転入力端子と炭酸ガス発生機の送風機連動出力端子を配線接続すると連動運転できる。</p>	  <p>CO₂施肥用穴あきダクトは通路上部に設置</p>

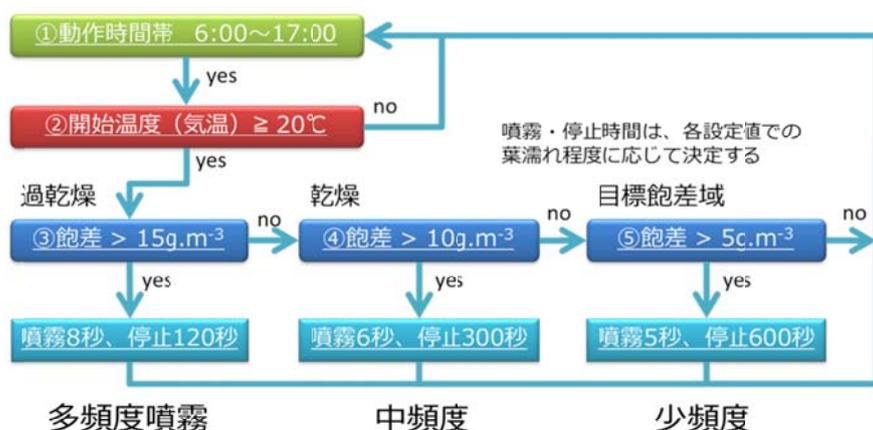
※説明書に記載の通り、炭酸ガス発生機にダクトを直接接続することはできません。不完全燃焼の原因となり一酸化中毒などの健康被害をまねく恐れがあります。

第3項 湿度環境の改善（加湿）

多収化モデルでは、安価に導入できる低圧細霧ノズルを選定しました。低圧細霧はミスト粒径が荒く霧の質としてはやや劣りますが、想定している中小規模施設では水使用量（効率）が問題になりにくく、鉄やカルシウムの多い水源でも目詰まりが起こりにくいため、井水がそのまま利用できることなどが挙げられます。

① 多段階飽差制御

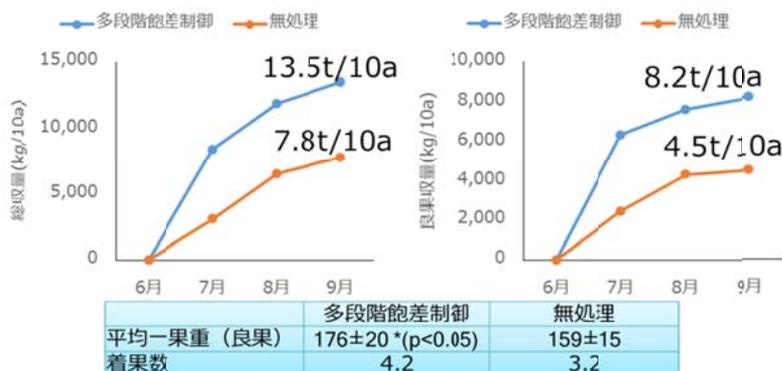
低圧細霧ノズルは安価に導入できる反面、気化しにくい、葉濡れしやすいことや調湿効果に劣ることが課題でした。そこで、飽差の変動に追従できる多段階飽差制御ロジック（加湿の比例制御）を開発しました。これにより、従来の適湿度域での過剰噴霧や過乾燥時の噴霧不足といった制御性の悪さを改善することができました。



ミストの噴霧サイクルを湿度条件に応じて細かく追従
パイプハウスでも**効果的な加湿制御が可能**（比例制御の導入）

図 39 多段階飽差制御ロジック

夏秋作でも飽差制御を導入することで、増収する結果も得られています。



飽差制御の導入により 1.5 倍以上の増収効果

H27は5月から高温乾燥が続き顕著な差となった

図 40 夏秋栽培での導入効果

高温期は細霧冷房効果もあり、従来のような温度条件で動作させる必要はありません。多段階飽差制御では、加湿と細霧冷房との兼用動作となりますので、基本的に光合成に重要な飽差で管理していれば良いことになります。

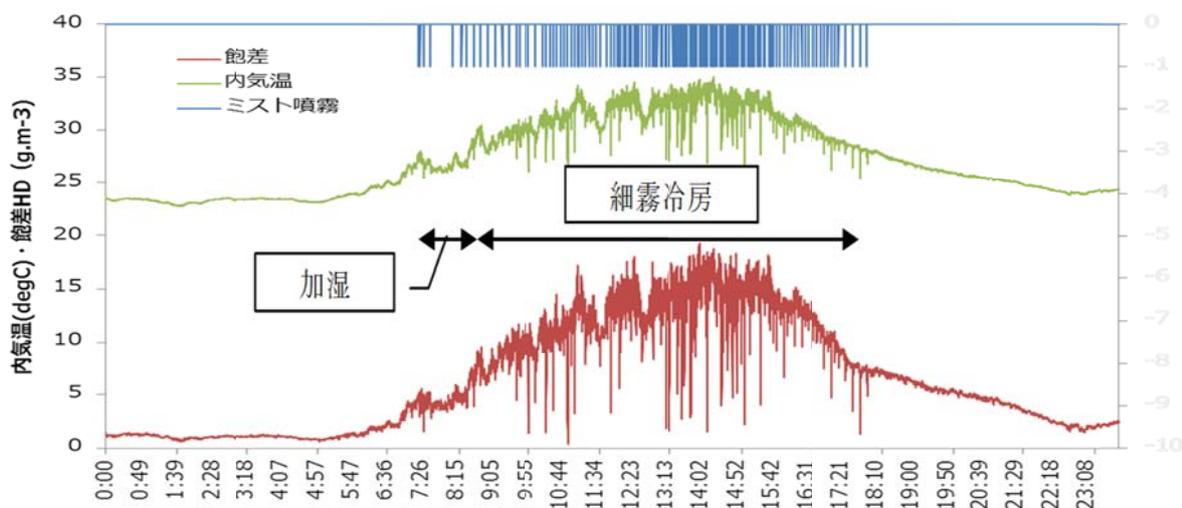
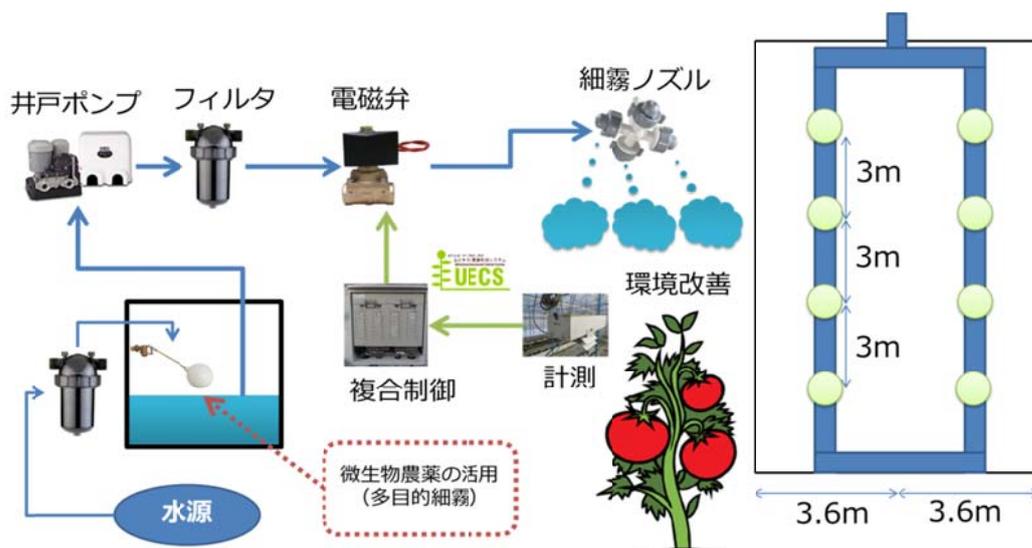


図 41 真夏日の制御状況(2015/8/7)

② 加湿システムの全体構成



③ 加圧ポンプ(井戸ポンプ)の選定

低圧細霧では、流量が多くなるため事前に加圧ポンプ性能(水圧、水量)を確認しておきます。必要水量については、ノズル数とノズルあたり噴霧量から概算できますので、ポンプ送水能力が噴霧量以上であることを確認しておきます。ノズル間隔は、噴霧距離が重ならない程度とし、多収化モデルで採用したクールネットプロヘッド(5.5L/H)の場合、1.5~3m間隔でノズルを配置します。また揚程なども考慮する必要があるため、導入時には業者と相談の上、配管設計、導入機種を選定を行うようにします。



図 42 ノズルの設置方法

低軒高でも浮遊距離を確保するため、ノズル側に重石を入れません。ノズルは内張カーテンの骨材などに固定しますが、骨材近くでノズルを固定するとノズルがよれにくくなります。また、ポリエチレン管は温度に対して伸縮膨張しやすい(10℃上昇すると1%伸びる)ため、晴天日に施工するとたるみにくくなります。多少手がかかりますが、ポリエチレン管を引っ張りながらノズルを固定していくと更にたるみにくくなり、きれいに設置できます。

第4項 湿度環境の改善（除湿）

① 植物体の結露

主に果菜類では果実が結露することで、病害を助長するだけでなく果実品質の低下を招く場合があります。果実結露は、気温と果実表面温度との差によって生じますが、空気と果実(水)との熱伝導率や熱容量の違いなどで、気温よりも果実温度の上昇が遅れを生じることが要因となります。なお、気温と果実表面温度との差をなくすために、循環扇などで空気を攪拌し結露水の蒸発を促進することもできますが、風速が十分に確保できなかったり相対湿度が100%付近の高湿度環境だったりする場合には、結露を助長して逆効果になる場合があるため、風による結露対策を行うときには、十分な風速が確保できているか確認して運用する必要があります。

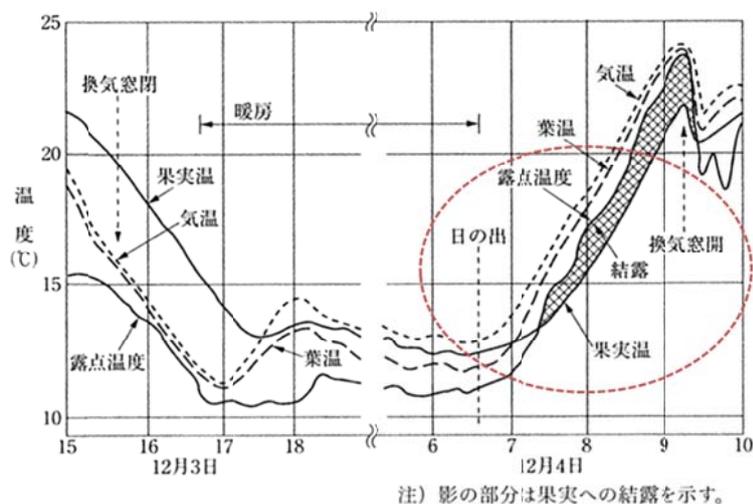


図 43 冬期のキュウリ栽培温室内の気温、葉温、果実温度、露点温度の経時変化 [三原義秋, 1980年]

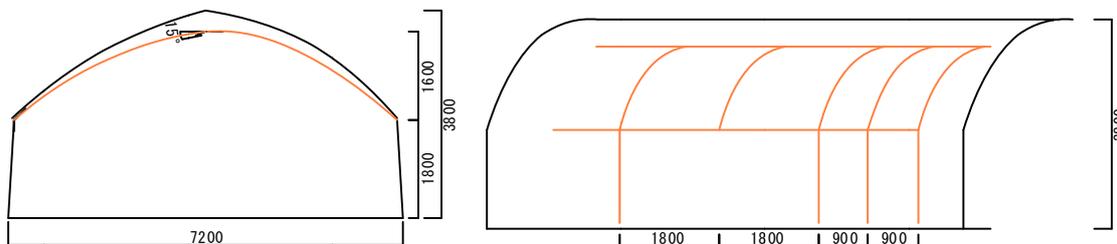
第5項 温度環境の改善（保温）

暖房費の削減と作期を拡大するために保温カーテンは必須です。多収化モデルでは、既存のパイプハウスへの追加整備で増収できることを想定し、内部カーテンでは低コスト導入できる巻き上げ式の1層カーテンを選定しています。基本的にパイプハウスを建てる工程と同様ですので、自家施工することも容易です。施工のポイントは、できるだけ外構造の軒高と同じか高い位置に内部カーテンの軒高を合わせて誘引高さ1.8～2mを確保すること（有効スペースの確保）、有孔あるいは透水性のフィルムを使用することで結露水が溜まらないようにして強度を高くしないようにすること（骨材削減）、フィルム押さえはパッカーを使ってフィルム交換などが容易にすること（保守管理の容易さ）、自動巻き上げの場合は屋根勾配を15°以上を確保すること、などに配慮して設計施工します。内部カーテンの屋根は自動化した方が管理の省力化になりますが、内部カーテン側面は季節の変わり目に全開か全閉するだけですので、手動巻き上げで充分です。

① 保温カーテンの部材（屋根部）

区分		供試資材名
骨材	主骨材	19φ丸パイプ
	屋根固定継ぎ手	サイドホルダー（佐藤産業）
	峰部パイプ継ぎ手	天井ジョイント（佐藤産業）
	峰部直交連結	トップクロス（佐藤産業）
	直交連結	パイプクロス（佐藤産業）
フィルム	被覆フィルム	トーカンウォーターパス0.75mm
巻き上げ	巻き上げパイプ	22φ丸パイプスエジ加工
	フィルム押さえパッカー	コーワパッカー
	巻き上げ装置	ウィンドリーマー、くるファミACE谷換気仕様

② 設計例



※ 橙色の線が骨材をあらわします

③ 設置状況



巻き上げ原動機の取付

屋根部分の施工状況

側面の施工状況

④ 保温カーテンの遮光兼用

第5章 多収化モデルによる運用技術

保温カーテンではありますが、全閉せずに30～50cm程度隙間を残して閉めておくことで、遮光利用もできます。植物が健全な状態で維持できているときは遮光不要でも良いのですが、水ストレスや病害などで草勢が極端に落ちているときは、強い日射で葉焼けや生長点の枯死を招くことがあるため、遮光が必要になります。カーテンフィルムでも10～20%程度の遮光が期待でき、本県での真夏の強日射を回避する目的としては概ね妥当な遮光率と考えられます。

第6項 根域環境の改善

① 養液栽培システム

区分		供試資材名
培地耕 (ロックウール)	発泡スチロール製架台	MS-10(丸昇農材)
	ロックウール培地	グロトップクラシック、マスター(グロダン) やさいはなベッド(日本ロックウール)
培地耕 (有機質)	発泡スチロール製容器	トロ117(東北資材容器)
	樹脂製栽培容器	ゆめ果菜恵(サンポリ)
	不織布ハンモック	ジャームガード(東洋紡)
	有機質培地	隔離床専用培土(三研ソイル)
給液	点滴チューブ	スーパータイフーン100(10cmピッチ)
	フラッシングバルブ	TV16J(チューブが目詰まりしやすい場合)
給液装置	タイマー式液肥混入機	ミニシステム

② 施工



発泡スチロール製架台に、ポリマルチやポリエチレンフィルムなどを防水シートとして展長、被覆する。

その上にロックウールスラブを配置する。ロックウールを用いる場合、ラッピング品よりもラッピング無し品の方が乾燥状態や根の拡大状況が把握しやすい。

給液には低コストで導入できる点滴チューブを用いる。アロードリッパーなどを用いた株単位の方法もあるが、コスト高であることや、スラブ全体が湿潤せず、根域をスラブ全体で確保できない場合がある。

チューブが蛇行しないよう被覆針金などで長さ10cm位のU字ピンをつくり1m間隔でチューブとロックウールキューブを固定する。

定植時は、点滴チューブの吐出口と定植株の位置を合わせる

第3節 育苗管理（1～2月）

第1項 管理方針

<ul style="list-style-type: none"> ・幼苗期で栄養生長期 ・栄養成長に偏りすぎないように平均気温20℃を目標に積極的に加温 ・徒長防止のため日射に応じて給液開始時刻を調整 ・移植用キューブは事前に飽和させ、根の乾燥枯死を回避

第2項 環境管理

① 地上部環境

	D1 日の出前	D1 日の出後	D3 光合成促進	D4 転流促進	D5 日の入前	N 夜間
時間帯	日の出1h前 ～日の出	日の出後 ～10:00	10:00 ～12:00	12:00 ～日の入1h前	日の入1h前 ～日の入	～日の出2h 前
換気	22℃	22～25℃	22～28℃	26～28℃	18℃	18℃
暖房	18℃	20℃	22℃	24℃	18℃	15℃

② 給液

時間帯	日の出 2 時間後～10:00 頃	(不足時)13:00
頻度	1回	1回
給液濃度	0.8～1.0dS/m (底面給液時1.0～2.0)	0.8～1.0dS/m (底面給液時1.0～2.0)

③ 内部カーテン

基準	早朝:屋外日射 50W/m ² 以上	30～60 分後	日中	夕方:屋外日射 50W/m ² 以下	夜間
開度	20～30%	100% (全開)	100% (全開)	20～30%	0% (全閉)

第3項 栽培管理

① ずらし

葉が重なり合って徒長しすぎないように、適宜スペーシングする。育苗面積が不足する場合は、本圃の隔離床上に据置して給液チューブ等で給液して育苗する。ただし、移植用のキューブに根が広がらないうちは本圃の培地には植え付けない。キューブ内で根鉢が形成できるように、培地の上にマルチフィルムを敷設するなどの防根対策を図り、定植までにキューブ内で根群を十分に発達させておくこと。

② その他

ホルモン処理で確実に着果させる

第4節 定植後の初期管理（2～3月）

第1項 管理方針

<ul style="list-style-type: none"> ・栄養生長期 ・栄養成長に偏りすぎないように平均気温20℃を目標に積極的に加温 ・活着促進～根域拡大のための高頻度かん水
--

第2項 環境管理

① 地上部環境

	D1 日の出前	D2 日の出後	D3 光合成促進	D4 転流促進	D5 日の入前	N 夜間
時間帯	日の出2h前 ～日の出	日の出後 ～10:00	10:00 ～12:00	12:00 ～日の入1h前	日の入1h前 ～日の入	～日の出2h 前
換気	20℃	22～25℃	22～28℃	26～28℃	18℃	18℃
暖房	18℃	20℃	22℃	24℃	15℃	15℃
CO ₂		600ppm	800ppm	1000ppm		
ミスト		> 5g/m ³ 8秒 / 600秒 (ON秒 / 周期秒) > 7g/m ³ 8秒 / 360秒 > 10g/m ³ 8秒 / 300秒				

② 給液

時間帯	日の出1時間後～10:00	10:00～14:00	14:00～日の入1時間前
頻度	45 / 15分	45秒 / 10分	45秒 / 15分
給液濃度	0.6～0.8dS/m	0.6～0.8dS/m	0.6～0.8dS/m

③ 内部カーテン

基準	早朝:屋外日射 100W/m ² 以上	～30分後	日中	夕方:屋外日射 100W/m ² 以下	夜間
開度	20～30%	100% (全開)	100% (全開)	20～30%	0% (全閉)

第3項 栽培管理

③ 摘葉

老化葉、わき芽は適宜除去する

④ その他

ホルモン処理で確実に着果させる

第5節 初期生育（4～5月）

第1項 管理方針

- ・栄養生長～生殖成長転換期
- ・発育相の偏り程度を観察しながら、平均気温20℃を基準に温度管理で調整
- ・気温と飽差が急上昇するようになったら、換気の開閉を早める温度管理へ
- ・環境変動に強い根群形成のため、給液頻度を下げる

第2項 環境管理

① 地上部環境

	D1 日の出前	D2 日の出後	D3 光合成促進	D4 転流促進	D5 日の入前	N 夜間
時間帯	日の出2h前 ～日の出	日の出後 ～10:00	10:00 ～12:00	12:00 ～日の入1h前	日の入1h前 ～日の入	～日の出2h 前
換気	20℃	22～25℃	22～28℃	26～28℃	18℃	18℃
暖房	18℃	20℃	20℃	22℃	15℃	15℃
CO ₂		600ppm	800ppm	1000ppm	600ppm	
ミスト		>5g/m ³ 8秒/600秒(ON秒/周期秒) >7g/m ³ 8秒/300秒 >10g/m ³ 8秒/240秒				

② 給液

時間帯	日の出1時間後～10:00	10:00～14:00	14:00～日の入1時間前
頻度	60秒/15分	60秒/10分	60秒/15分
給液濃度	0.8～1.2dS/m	0.8～1.2dS/m	0.8～1.2dS/m

③ 内部カーテン

基準	早朝:屋外日射 100W/m ² 以上	～30分後	日中	夕方:屋外日射 100W/m ² 以下	夜間
開度	20～30%	100% (全開)	100% (全開)	20～30%	0% (全閉)

第3項 栽培管理

① 摘葉

老化葉、わき芽を適宜除去、果実肥大中期(白熟期)の花房直下葉の除去

② その他

第6節 収穫開始以降の管理（6月）

第1項 管理方針

- ・生殖成長への偏りやすい
- ・生殖成長への偏りが強いときは、平均気温20℃を基準に低めの温度管理
- ・換気回数が増えて施用効率が低下するが、炭酸ガス施肥を積極的に行う
- ・吸水量が増えるため、給液頻度を上げる

第2項 環境管理

① 地上部環境

	D1 日の出前	D2 日の出後	D3 光合成促進	D4 転流促進	D5 日の入前	N 夜間
時間帯	日の出2h前 ～日の出	日の出後 ～10:00	10:00 ～12:00	12:00 ～日の入1h前	日の入1h前 ～日の入	～日の出2h 前
換気	20℃	20～24℃	24～26℃	26～28℃	18℃	18℃
暖房	18℃	18℃	18℃	20℃	13℃	13℃
CO ₂		600ppm	4kg/h	4kg/h	600ppm	
ミスト		>5g/m ³ 8秒/600(ON秒/周期秒) >7g/m ³ 8秒/300 >10g/m ³ 8秒/240				

② 給液

時間帯	日の出1時間後～10:00	10:00～16:00	16:00～日の入1時間前
頻度	60秒/10分	60秒/10分	60秒/10分
給液濃度	1.2～1.4	1.2～1.4	1.2～1.4

③ 内部カーテン

基準	日の出 30分前	日の出	日中	夕方	夜間
開度	20～30	100 (全開)	100 (全開)	100 (全開)	0 (全閉)

第3項 栽培管理

① 摘葉

老化葉、わき芽を適宜除去、果実肥大中期(白熟期)の花房直下葉の除去

② その他

第7節 梅雨時期の管理（7月）

第1項 管理方針

- ・日射不足から高温期となり生殖成長へ偏りやすい
- ・平均気温20℃を基準に低めの温度管理
- ・梅雨の晴れ間によるしおれを回避するためミストの設定を再確認する
- ・吸水量が増えるため、給液頻度を上げる梅雨明けから給液濃度を下げる

第2項 環境管理

① 地上部環境

	D1 日の出前	D2 日の出後	D3 光合成促進	D4 転流促進	D5 日の入前	N 夜間
時間帯	日の出2h前 ～日の出	日の出後 ～8:00	8:00 ～12:00	12:00 ～日の入1h前	日の入1h前 ～日の入	～日の出2h 前
換気	20℃	20～24℃	24℃	24℃	18℃	15℃
暖房	18℃	18℃	18℃	20℃	13℃	13℃
CO ₂		600ppm	3kg/h	3kg/h	600ppm	
ミスト		>5g/m ³ 8秒/600秒(ON秒/周期秒) >7g/m ³ 8秒/300秒 >10g/m ³ 8秒/240秒				

② 給液

時間帯	日の出1時間後～9:00	10:00～16:00	16:00～日の入1時間前
頻度	60秒/10分	60秒/10分	60秒/10分
給液濃度	1.0～1.2dS/m	1.0～1.2dS/m	1.0～1.2dS/m

③ 内部カーテン

基準	終日	ただし、屋外日射 900W/m ² 以上の強日射が続く場合
開度	100% (全開)	30% (強日射時間帯+生殖成長が強い場合)

第3項 栽培管理

① 摘葉

老化葉、わき芽を適宜除去、果実肥大中期(白熟期)の花房直下葉の除去

② その他

第8節 高温期の管理（8月）

第1項 管理方針

- ・高温期となり生殖成長へ偏りやすい
- ・平均気温20℃を基準に夜温はできるだけ下げる
- ・生殖成長への偏りが強いときは、遮光して強日射時を回避する
- ・過蒸散がおき吸水量が増えるため、給液頻度を上げ、給液濃度は下げる

第2項 環境管理

① 地上部環境

	D1 日の出前	D2 日の出後	D3 光合成促進	D4 転流促進	D5 日の入前	N 夜間
時間帯	日の出2h前 ～日の出	日の出後 ～8:00	8:00 ～12:00	12:00 ～日の入1h前	日の入1h前 ～日の入	～日の出2h 前
換気	20℃	20～24℃	24℃	24℃	18℃	15℃
暖房	18℃	18℃	18℃	20℃	13℃	13℃
CO ₂		600ppm	3kg/h	3kg/h	600ppm	
ミスト		>5g/m ³ 8秒/600秒(ON秒/周期秒) >7g/m ³ 8秒/300秒 >10g/m ³ 8秒/240秒				

② 給液

時間帯	日の出1時間後～10:00	10:00～16:00	16:00～日の入1時間前
頻度	60秒/10分	90秒/10分	60/10分
給液濃度	1.0dS/m	1.0dS/m	1.0dS/m

③ 内部カーテン

基準	終日	ただし、屋外日射 900W/m ² 以上の強日射が続く場合
開度	100% (全開)	30% (強日射時間帯+生殖成長が強い場合)

第3項 栽培管理

① 摘葉

老化葉、わき芽を適宜除去、果実肥大中期(白熟期)の花房直下葉の除去

② その他

第9節 秋雨期の管理（9～10月）

第1項 管理方針

- ・気温低下により栄養成長（生育が回復）
- ・日の出と日の入り時刻の変化に合わせて、時間帯毎の制御設定を変えていく
- ・秋雨の晴れ間に起こる、飽差の急激な変化を避ける
- ・夜間に高湿度、結露が生じやすいため、加温除湿を行う
- ・裂果対策のため、給液開始時刻を遅らせ給液頻度を下げ、給液濃度は上げる

第2項 環境管理

① 地上部環境

	D1 日の出前	D2 日の出後	D3 光合成促進	D4 転流促進	D5 日の入前	N 夜間
時間帯	日の出2h前 ～日の出	日の出後 ～8:00	8:00 ～12:00	12:00 ～日の入1h前	日の入1h前 ～日の入	～日の出2h 前
換気	20℃	20～24℃	24℃	24℃	18℃	15℃
暖房	18℃	18℃	20℃	22℃	15℃	13℃ (除湿時18℃)
CO ₂		600ppm	4kg/h	4kg/h	600ppm	
ミスト		>5g/m ³ 7秒/600秒(ON秒/周期秒) >7g/m ³ 7秒/450秒 >10g/m ³ 7秒/300秒				

除湿のための暖房運転は夜間30分間だけ18℃設定で運用した

② 給液

時間帯	日の出90分後～10:00	10:00～16:00	16:00～日の入90分前
頻度	15分毎	10分毎	10分毎
動作時間	60秒/回	90秒/回	60秒/回
給液濃度	1.4dS/m	1.4dS/m	1.4dS/m

③ 内部カーテン

基準	早朝:屋外日射 50W/m ² 以上	30～60分後	日中	夕方:屋外日射 50W/m ² 以下	夜間
開度	20～30%	100% (全開)	100% (全開)	20～30%	0% (全閉)

第3項 栽培管理

① 摘葉

老化葉、わき芽を適宜除去、果実肥大中期(白熟期)の花房直下葉の除去

第10節 厳寒期の終盤管理（11～12月）

第1項 管理方針

- ・気温低下により栄養成長（生育が回復）
- ・日の出と日の入りの変化が早いので、時間帯毎の制御設定を変えていく
- ・秋雨期となり、飽差の急激な変化を避ける
- ・夜間に高湿度、結露が生じやすいため、加温除湿を行う
- ・裂果対策のため、給液開始時刻を遅らせ給液頻度を下げ、給液濃度は上げる

第2項 環境管理

① 地上部環境

	D1 日の出前	D2 日の出後	D3 光合成促進	D4 転流促進	D5 日の入前	N 夜間
時間帯	日の出2h前 ～日の出	日の出後 ～9:00	9:00 ～12:00	12:00 ～日の入1h前	日の入1h前 ～日の入	～日の出2h 前
換気	22℃	22～24℃	24～28℃	28℃	18℃	15℃
暖房	18℃	20℃	22℃	22℃	15℃	13℃
CO ₂		800ppm	1000ppm	1000ppm	500ppm	
ミスト		> 5g/m ³ 6秒 / 600秒 (ON秒 / 周期秒) > 7g/m ³ 6秒 / 300秒 > 10g/m ³ 6秒 / 240 秒				

② 給液

時間帯	日の出2h後～10:00	10:00～14:00	14:00～日の入90分前
頻度	15分毎	15分毎	15分毎
動作時間	60秒 / 回	60秒 / 回	60秒 / 回
給液濃度	1.8～2.4dS/m	1.8～2.4dS/m	1.8～2.4dS/m

③ 内部カーテン

基準	早朝:屋外日射 50W/m ² 以上	30～60分後	日中	夕方:屋外日射 100W/m ² 以下	夜間
開度	20～30%	100% (全開)	100% (全開)	20～30%	0% (全閉)

第3項 栽培管理

① 摘葉

老化葉、わき芽を適宜除去、果実肥大中期(白熟期)の花房直下葉の除去

第11節 運用上の参考事項

第1項 設定値の記録について

設定値の記録は、環境推移の振り返りや次作の制御設定値を決定する参考資料となります。しかし、複雑な制御を行う複合環境制御盤の設定値を網羅して記録したとしても、次作の気象やハウス内環境は同一ではありませんので、以前の設定値をそのまま流用することができません。設定値を全て記録するよりも、どういった目標をもって管理をしようとしていたのか、制御設定の意図が分かる程度の設定項目に絞り込んで、その設定値を記録すれば十分です。

下表は、制御設定の記録例です。実際の時間帯や設定値とは多少異なりますが、要点を絞った記録にした方が活用しやすく、運用上は、この程度の記録でも十分と思われます。

表 12 制御設定の記録例

設定日	制御機器	項目	単位	夜間：日の出前	午前：日の出後	午前：光合成促進	午後：転流促進	午後：日の入前	夜間：日の入り後
				第1時間帯	第2時間帯	第3時間帯	第4時間帯	第5時間帯	第6時間帯
5月1日	時間帯	開始時刻	h:mm	3:00	4:30	10:00	13:00	17:30	18:30
	側窓(外張)	換気温度	degC	20	21	24	26	22	18
		開度	%	20	22	24	26	22	20
	側窓(内張)	換気温度	degC	20	20	20	20	20	20
		開度	%	20	20	20	20	20	20
	温風暖房機	暖房温度	degC	15	18	20	20	18	15
		温度勾配	degC/hr	1	1	0	0	-5	2
		送風動作	On/Off	100	100	0	0	100	100
	CO2発生機	濃度	ppm	400	400	800	900	600	400
		動作時間	秒	120	60	120	120	90	120
		休止時間	秒	480	240	180	180	510	480
	ミスト発生機	開始飽差	g/m3		5	5	5		
		動作時間	秒		6	6	6		
		休止時間	秒		600	600	600		

第2項 環境モニタリング（環境値）のみかた

はじめて環境モニタリングをしてみたとき、どうやって見たらよいか、活用方法が分からないといった場合があります。環境モニタリングの意義は以下の3つになります。

- (1) 植物の環境を数値化する
- (2) 植物の状態を数値化する
- (3) 制御機器の状態を把握する

重要なことは、モニタリングで数値化して客観的に評価し、ハウス内環境の課題に「気づく」ことにあります。さらに重要なことは、気づいた環境の課題について、「改善策を考えて試してみる」ことです。例えば、「ハウス内気温の上昇が早いことに気づき、換気を早めてみたところ、目標とする温度推移になった」という取り組みが必要になります。

環境モニタリングを導入したときに、モニタリングをすること自体が目的になってしまっている場合がみられます。環境モニタリングは環境推移を確認して課題を見つける手段(ツール)であり、環境改善で増収することが目的です。モニタリング装置を導入して満足しないよう注意しましょう。

環境モニタリングは、まずは、次の3つの視点で判断します。

① 自分が目標とする環境推移の方針をもつ

環境データのみかたが分からないというときは、そもそも自分がどういった環境管理をしてみたいかなど、大まかな環境管理の方針(推移のイメージ)が決まっていない場合があります。必ず、自分自身で環境要素毎に環境推移をどうしたいか、大まかなイメージを持つようにして、環境データと比較検討できるようにしましょう。

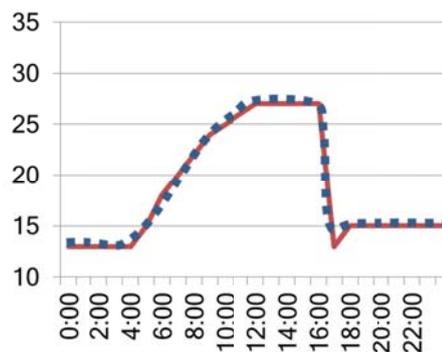


図 44 温度管理の方針(例)

② 短い期間での変化・改善点を知る

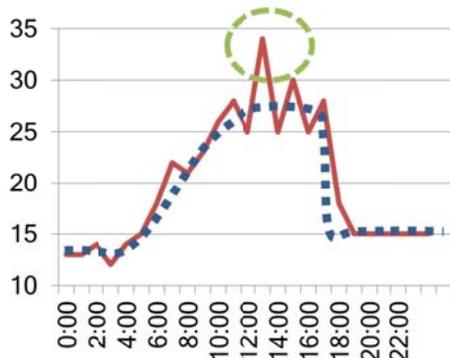


図 45 管理方針と瞬間値の違い

環境グラフは毎日、最低でも3日に1回は確認します。グラフ画面も3日分を表示することで直近の環境推移や傾向が把握しやすくなります。グラフは、瞬間的な変化だけに注目せず、平均的な推移で判断するようにします。左図のような気温推移(赤実線)をした場合、瞬間的には高温となる時間がありますが、全体の気温推移からみると、おおむね目標とする環境推移(青点線)と判断します。また、下図のように、3日間のうちの1日だけ28℃以上の高温となる日(赤点線)がありますが、これもおおむね目標とする環境推移と判断できます。もし、3日間とも同じように高温となる日が続くのであれば、管理に改善が必要と判断します。

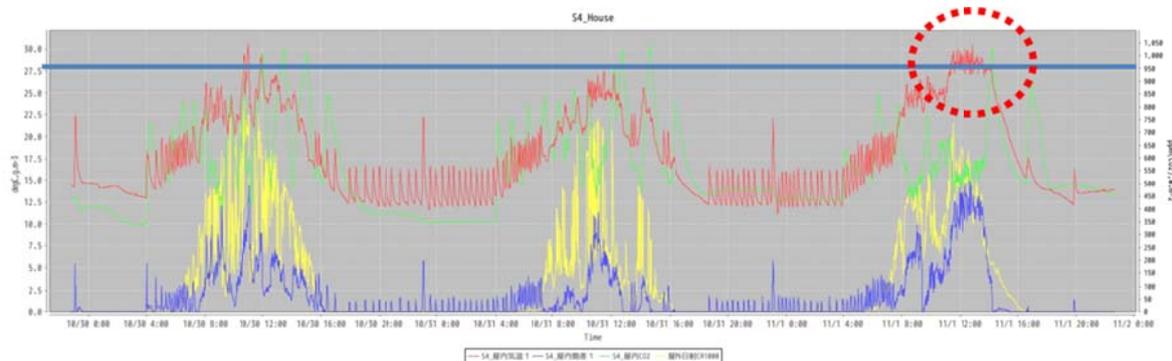


図 46 直近3日間での一時的な管理方針とのズレ

③ 環境の課題を改善する

前述したとおり、環境モニタリングでは直近の環境推移の課題を明確にして、管理方針や目標値とのズレを修正することが増収につなげるために重要です。

図 47 の赤枠のように、午前中の気温や飽差の急上昇が続くような場合、植物にストレス環境を与えている判断されます。そこで、早い時間帯から換気温度を下げて急激な変動を緩和するように管理(設定値の変更)を変えたところ、以前よりは急激な気温や飽差の上昇が無くなり、比較的なだらかに環境が推移するようになりました。

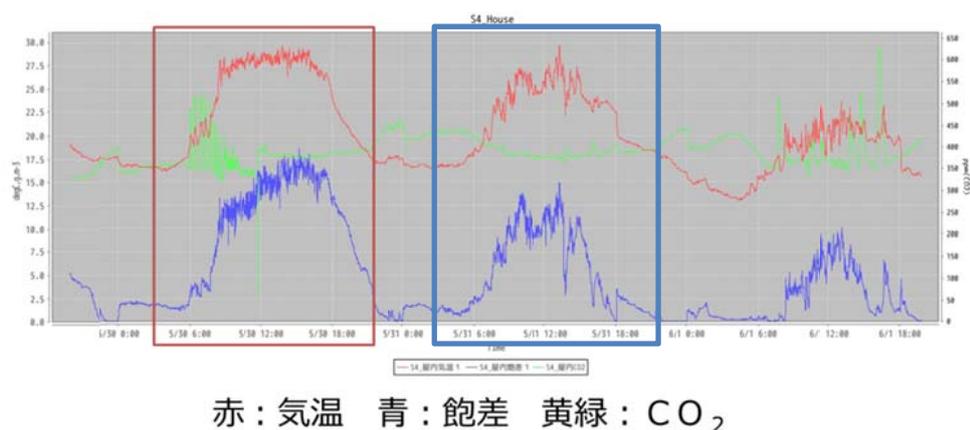


図 47 環境管理を改善した場合の推移

第3項 多収化モデルの経営試算

表 13 多収化モデルの経営試算(2016年 100坪×3棟)

費目	多収化	高規格温室加温	雨よけ夏秋
可販収量(t/10a)	29.0	21.6	12.0
単価(円/kg)	362	373	359
A 販売額(千円)	10,505	8,057	4,308
栽培経費	2,148	1,779	929
光熱費	826	672	16
流通経費(A×0.3)	3,152	2,417	1,292
B 支出計	6,125	4,868	2,237
C 固定費(実耐用年数法:施設、農機具)	1,788	1,907	848
(うち制御機器類)	(672)	(358)	(33)
D 所得(A-B-C)	2,592	1,282	1,223

※雨よけ夏秋栽培は生産技術体系 2010 を一部改変。試算はハウス施工費のみ含む。

制御機器類は、暖房機、炭酸ガス発生機、細霧発生機、自動換気装置、複合制御盤を含む。

第4項 雨よけ夏秋向け低コスト細霧システム

自動灌水タイマー Doバルブ 温度センサセット DOV-25C2-TS
ソフトウェア付き通信ケーブル USB-3141
トイレ換気ファン + V P管φ100 30cm



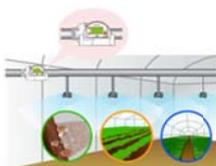
販売価格：
27,000円(税8%込)



販売価格：
5,400円(税8%込)



価格：
4,400円 (税込)



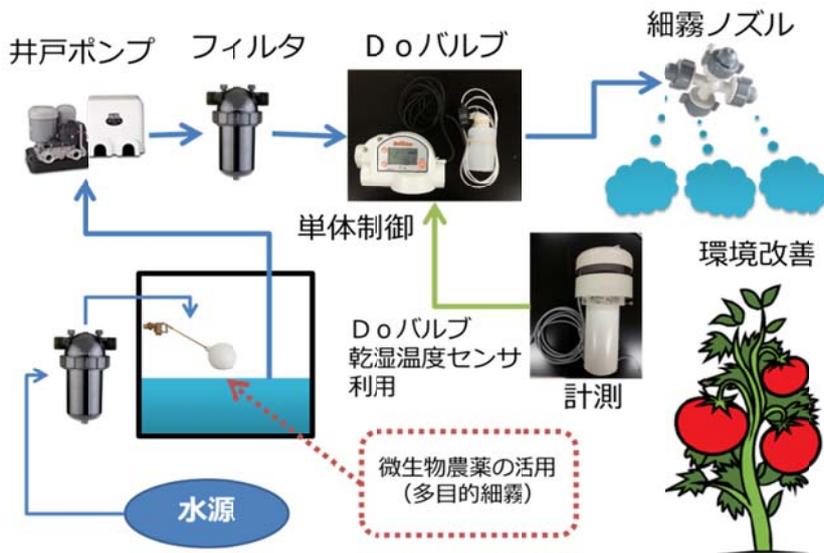
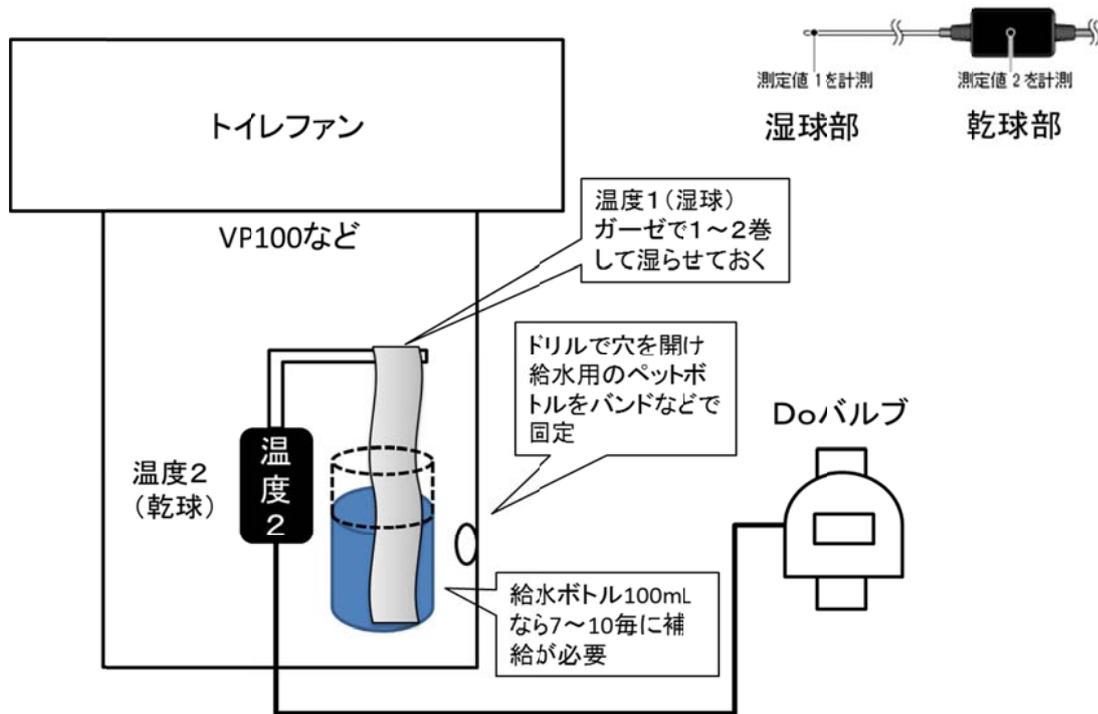
乾湿球温度計を自作してもらう (精度は高)



黒い方が乾球、先端に不織布を巻いた方が湿球。これを通風筒の中に固定する。湿球のボトルは定期的に補水するため、輪ゴムやリピータイで固定する



センサケーブルが短いため、Doバルブはできるだけ植物体に近いところで配管



設定番号	曜日	開始時刻	開時間	周期	終了時刻	温度	温度条件
1	毎日	日の出時刻	8秒	10分毎	日の入り 1~2時間前	-1.0 [飽差5以上]	4温度差 設定未 満
2	同上	同上	10秒	5分毎	同上	-1.5 [飽差7.5以上]	同上
3	同上	同上	10秒	3分毎	同上	-2.0 [飽差10以上]	同上

乾球温度 (測定値 2)	乾球 (測定値 2) と湿球 (測定値 1) の温度差										
	0	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-9	-10
35	100	93	87	81	75	69	64	59	54	49	44
30	100	93	86	79	73	67	61	55	50	44	39
25	100	92	84	77	70	63	57	50	44	38	33
20	100	91	83	74	66	59	51	44	37	30	24

濃い枠が最適飽差域、薄い枠が許容飽差域に該当する相対湿度(%)

第6章 実践的な視点・考え方

第1節 イノベーター理論

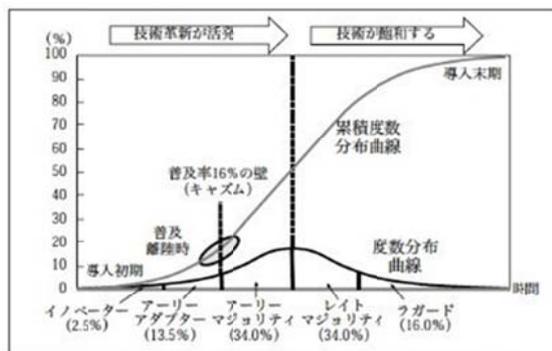


図3 ロジャース教授のイノベーションの普及理論

【図表1】イノベーター理論による採用者カテゴリ



資料：三菱総合研究所

カテゴリ	特徴1	特徴2	利益
イノベーター	革新的	新技術への関心高く、進んで採用する 冒険的、先進的で、専門知識も高い	大
アーリーアダプタ	先進的	社会的に影響を持つオピニオンリーダー 新技術に敏感で、周囲の人から参考にされる存在	▼
アーリーマジョリティ	実利的	新技術の採用に慎重なタイプ 価値や使い勝手を慎重に見極めてから採用	
レイトマジョリティ	保守的	新技術の採用に懐疑的なタイプ 周囲が採用し不安が取り除かれてから採用	
ラガード	無関心	新技術に最も保守的、無関心。 確実な実利が無ければ採用しない	低

第2節 D-OODAループ

第1項 PDCAサイクルとD-OODAループ

環境制御で成功するために適する考え方として、「D-OODAループ」という意志決定理論を紹介します。D-OODAループ(ドゥーダ・ループ)は、アメリカ空軍のジョン・ボイド大佐によって提唱されました。広く周知されているPDCAサイクルは組織運用においては非常に有効ですが、現場レベルで行われる栽培・環境管理といった変化の激しい環境には適用しにくい欠点があります。環境制御では「光合成の低下要因に気づき、機動的に解決する」といったことが求められます。これまでのような年1回の反省会では、直面する栽培の諸問題への気づきや解決が遅いため、増収することは困難でした。いいかえれば、ある環境要因が収量を低下させていても、その要因に気付かないまま年1作が終わっていたと捉えることもできます。

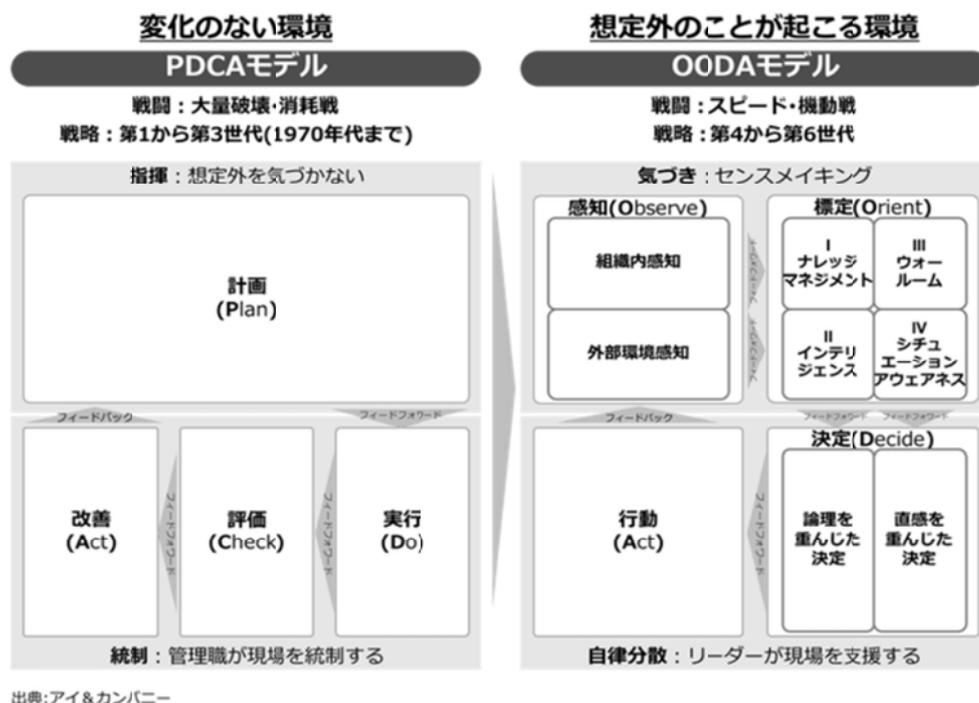


図 48 PDCAモデルとOODAモデルの比較 [アイ&カンパニー, 2016]

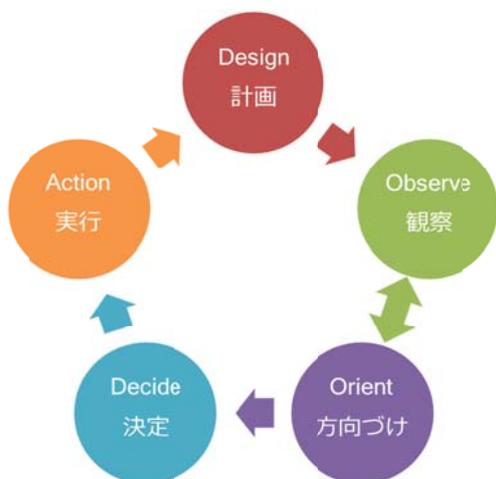


図 49 D-OODAループによる意志決定の流れ

D-OODAループでは、「計画・観察・方向づけ・決定・実行」の流れに基づいて意志決定が行われます。PDCAのように一方通行ではなく、必要に応じて観察と方向付けを繰り返しながら意志決定を行います。また、PDCAのような厳格な計画ではなく、大まかな方向性(方針)で充分です。例えば、「収量 30t/10a 達成」といった方針だけ示し、あとは現場での意志決定を重視して運営します。

第2項 D-OODAループ

PDCAは組織視点で開発された手法であり、事前の計画が重視されます。このため、計画に縛られやすく、現場での柔軟な対応ができない事態に陥ることがあります。一方で、D-OODAは現場視点で開発された手法で、観察に基づき意志決定を迅速にすることが重視されます。このため、現場の諸問題に対して迅速に解決できる反面、個人の能力に依存しやすく、無法地帯になりやすいので、個々の能力向上を図ったり、事前に方向性を共有したりすることが必要です。

表 14 PDCAとD-OODAのメリットとデメリット

	メリット	デメリット
PDCA	<ul style="list-style-type: none"> ・ 管理的、組織視点 ・ 計画・実行・改善の関係が明確 ・ 目標値を設定しやすい ・ 製造業の品質管理手法が原点 ・ 統制的：管理職が現場を管理 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 環境の変化に弱い、対応できない ・ 事前の計画に縛られる ・ 全てが制御できる環境下でしか適用できない ・ 計画と現場に乖離が生じる
D-OODA (OODA)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 機動的、現場視点 ・ 状況に応じて意志決定できる ・ 気づきが重要 ・ 自律分散的：リーダーが現場支援 ・ 軍隊の意志決定の迅速化が原点 ・ 個人の裁量が大きくなる 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 前提として目標の共有が必要 ・ 混沌による無秩序化が生じる ・ 10人程度の小規模組織向き ・ 個人の能力、裁量に依存

下表は、原油高で暖房コストを削減する必要があるとしたときに、それぞれの視点で意志決定するとどのような結果(実行)となるか示した例です。PDCAでは、**計画達成のために無条件で**暖房温度を下げようとするが、D-OODAでは、暖房温度を下げるために現在の環境や植物の状態を**観察した上で方針を決めている**点が大きく異なります。注意点としては、ここでの「観察」とは生育調査や環境推移などの数値などによる「**客観的な判断**」によるもので、決して達観や経験則だけで観察とすることではありません。PDCAでもD-OODAでも客観性を重視する点は共通していますし、環境制御においても客観性をもって判断しないと最善策にはたどり着くことができず、増収につなげることができなくなります。

表 15 暖房コスト削減における視点の違い

D-OODA		PDCA	
D = 方針	暖房コストを1割下げよう	P = 計画	暖房コスト1割削減 暖房温度を15℃から1℃下げる
		D = 実行	一律1℃下げる
O = 観察	栄養成長気味 低温管理を続けたら栄養成長を助長する状況		
O = 方向づけ	今は暖房を積極的にする状況なので、極端に暖房温度を下げるのは避けよう	C = 評価	暖房コスト1割削減できていない(目標未達成)
D = 意思決定	夜間は多少低くしても、日中は高くして暖房コストを削減してみよう	C = 改善策	限界温度は8℃なので、もっと暖房温度を下げるができる
A = 実行	夜間1℃下げる 日中1℃上げる	A = 実行	設定温度を2℃下げる

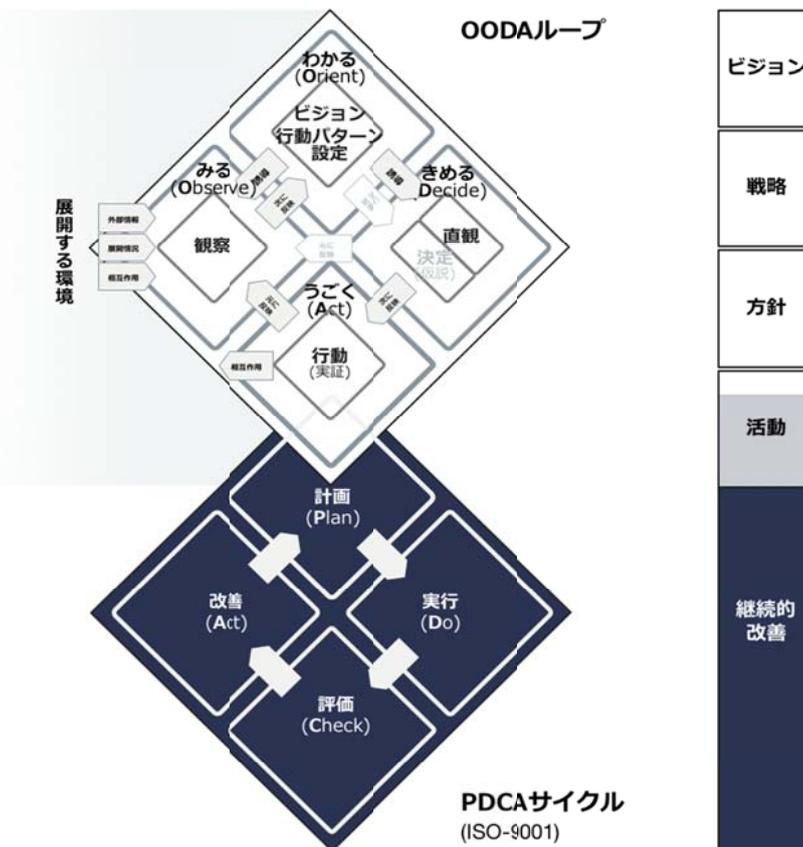
D-OODAの判断の方があたり前のように思われるかもしれませんが、コスト削減のために目標設定するとPDCAの視点になりやすく、現状を観察もせず暖房温度を下げる判断してしまうといった落とし穴があります。

どちらの考え方が妥当ですか？

第3項 D-OODAループの位置づけ

これまで述べてきたようにD-OODAループは、現場での柔軟な意志決定によって、効果的な結果を出したいときに非常に有効な手法と考えられ、環境制御の考え方とよく合います。しかし、経営目標などの基本的な目標設定や評価はPDCAサイクルで行います。これまで、D-OODAで適用拡大してしまうと、現場対応に偏ってしまい収集がつかなくなるおそれがあるためです。あくまで、PDCAサイクルでは対応できない分野(現場での運用)への補完的な位置づけになります。

OODAループとPDCAサイクル



出典:アイ&カンパニー

- 1 経営目標、生産目標の設定・評価には「PDCAサイクル」を用います
- 2 この計画が前提にある上で、環境制御や栽培管理を現場で運営していくために必要となるのが「D-OODAループ」です

第3節 グロース・マインドセット

環境制御で多収を達成するためには、考え方(マインドセット)の切り替えが必要です。スタンフォード大学のキャロル・S・ドゥエック教授は、人のマインドセットは大きく2つのタイプに分けることができるとし、グロース・マインドセットという概念で整理しています。一つ目は「硬直(フィックス)マインドセット」とよばれ、生まれ持った能力がその人を決めるといった考え方をもつタイプ、二つ目は「しなやか(グロース)マインドセット」とよばれ、人は努力次第でいつでも変わることができるという考え方をもつタイプとに区分されます。

第1項 硬直マインドセットの特徴

自分ができる能力は決まっていて限界がある、失敗を恐れてできることしかやらない、「あなたはすごい」とほめられたい、失敗や他人からの評価に対して自分より下位の人物を見つけようとするといった傾向があります。

第2項 しなやかマインドセットの特徴

成長型マインドセットともよばれ、自分ができる能力は努力や経験を重ねて成長できる、失敗をおそれずそこから学ぶために努力する、「よくがんばった」とほめられる方に喜びを感じる、失敗よりも学びを楽しみ、他人からの評価よりも自分の成長に関心が高いといった傾向があります。

第3項 生産現場で生じやすい硬直マインドセット

本県の施設栽培では、これまで植物生産に対する考え方が未成熟であったため、約30年前に雨よけハウスが導入されて以降、技術革新が停滞し収量も頭打ち状態が続いていました。このため、本県での施設栽培による生産量は決まっていて限界があるため新たな技術の導入は無駄と感じたり、不安を感じたりする硬直マインドセットになりやすい状況となっていると考えられます。例えば新たな環境制御技術を導入して成功している経営体があらわれていたとしても、立派な施設・装備があるから成功していて自分とは違うと捉えるか、立派な施設・装備を導入するに至った経緯や運用方法を学ぼうと捉えるかでは、自身の農業経営の可能性も変わってしまうかもしれません。

「硬直」と「しなやか」は一人の人間に共存するマインドセットです。はじめは、自分が今どちらのマインドセットかを意識し、「硬直」ではなく「しなやかマインドセット」で考える機会を増やしていき、徐々に身につけていくようにしましょう。

第4項 より詳しく知りたい方へ

TED キャロル・ドゥエック 必ずできる！未来を信じる「脳のカ」

https://www.ted.com/talks/carol_dweck_the_power_of_believing_that_you_can_improve?utm_campaign=tedsread--a&utm_medium=referral&utm_source=tedcomshare

キャロル・S・ドゥエックの格言

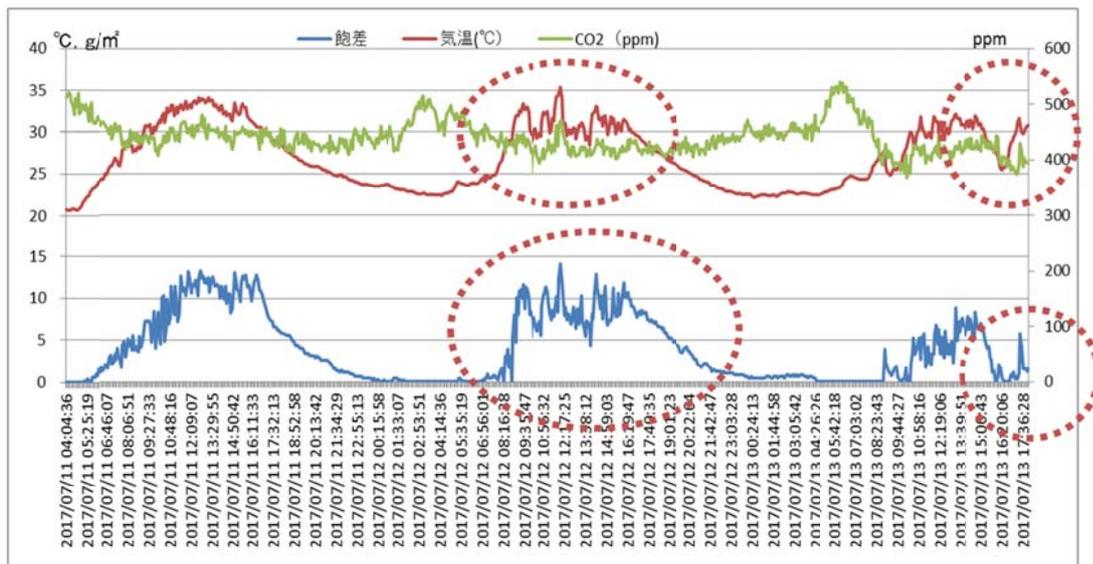
あこがれの人物を思い浮かべよう。その人は、ほとんど努力せずに、何でもできてしまう、驚異的な能力の持ち主だと思ってはいないだろうか。実際はどうか？その業績の陰にとてつもない努力があったことを知ろう。そして、その人をいっそう素晴らしいと感じよう。



図 50 2つのマインドセットの特徴 [キャロル・S・ドゥエック, 2016]

表 16 ミスト導入事例とマインドセットの違い

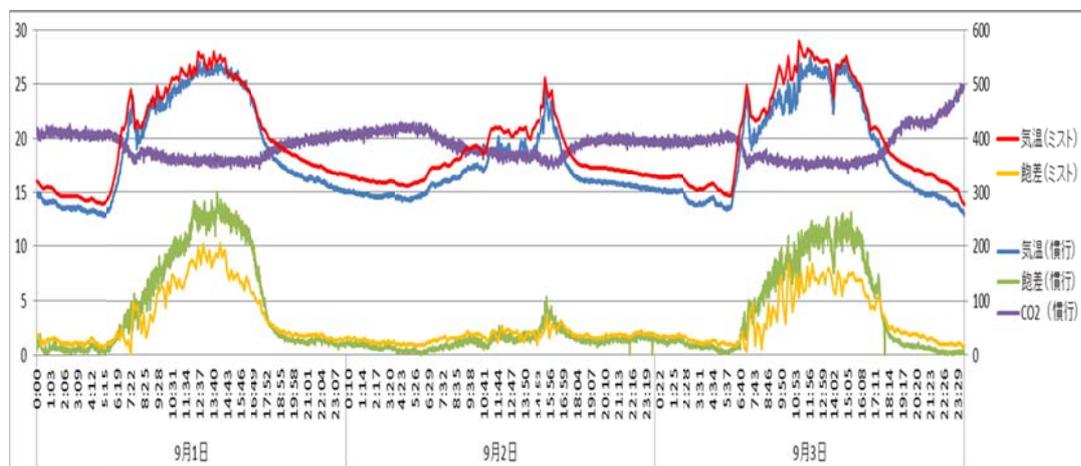
	硬直 (FIXED)	しなやか (GOWTH)
課題・挑戦 ・既存の細霧を活用したい ・環境モニタリングを導入	・既存のシステムを そのまま使いたい ・ハウスが乾燥するのは分かっているのに、 環境推移を見ない	・既存のシステムを改造してでも 良い環境にしたい ・本当にハウスが乾燥しているか 随時確認する
障害 ・タイマー制御盤しかない	・ このままで良い	・低コストで 飽差制御できない か情報収集する
努力 ・ハウス内環境を改善	・ハウスが乾燥していても収穫もできるし 意味が無い ・ 高温だと感じたとき に手動で噴霧させる	・モニタリングの推移をみて 乾燥しやすい時間帯に合わせて噴霧させてみる
批判 ・細霧冷房では増収しない	・ 無視する	・細霧冷房と加湿の 意味を理解しようとする
他人の成功 ・飽差制御で増収	・それはそれ、 私にとっては高温対策が重要	・飽差制御の方法を 学び、試してみる



収量に影響する湿度（飽差）を気にしていない
何のためにモニタリングやミストをしているか？

図 51 硬直マインドセット型の取り組み事例

前表で示した硬直マインドセットの事例です。ミストを細霧冷房に限定して運用していたハウス内環境の推移です。これまでの増収のための環境管理(飽差)に対するアプローチが不足していて、日中の高温にだけ関心が高いようです。



研究成果をそのまま取り入れて環境改善できた
ミストでハウス内の過乾燥や急激な乾燥が緩和
よく分からないまま始めたけど、何となく分かってきた

図 52 しなやかマインドセット型の取り組み事例

前表でしめたしなやかマインドセットの事例です。栽培期間中にハウス内環境の課題に「気付き」、他人の意見も学び、環境改善を繰り返した結果、飽差だけでなく温度管理も改善できているようです。

第7章 引用文献

Effects of CO₂ concentration on photosynthesis, transpiration and production of greenhouse fruit vegetable crops [論文レポート] / 著者 Nederhoff. - [出版地不明] : Agricultural University, Wageningen., 1994.

PDCA では生き残れない [書籍] / 著者 アイ&カンパニー. - [出版地不明] : <http://iandco.jp/>, 2016.

ハウス用被覆資材の屋外暴露による経年変化 [論文レポート] / 著者 黒住徹, 川島信彦. - [出版地不明] : 奈良県農業試験場研究報告, 第14号, 1983.

マインドセット「やればできる!」の研究 [書籍] / 著者 キャロル・S・ドゥエック. - [出版地不明] : 草思社, 2016.

ロックウール栽培での水分管理について [論文レポート] / 著者 吉田征治(日東紡グリーン事業部). - [出版地不明] : 平成24年度スーパーホルトプロジェクト協議会講演資料, 2012年.

園芸施設学入門 改定増補版 [書籍] / 著者 小澤行雄, 内藤文男. - [出版地不明] : 川島書店, 1993年.

温室設計の基礎と実際 [書籍] / 著者 三原義秋. - [出版地不明] : 養賢堂, 1980年.

解説 植物の呼吸と地球環境変動:モデルの観点から [書籍のセクション] / 著者 伊藤昭彦, 野口航 // 光合成研究 24(1). - [出版地不明] : 日本光合成学会, 2014.

改訂版栽培原論 [書籍] / 著者 野口弥吉. - [出版地不明] : 養賢堂, 1979.

光合成産物の転流と分配 [書籍] / 著者 宍戸良洋. - [出版地不明] : 養賢堂, 2016.

高等学校生物/生物 I/細胞とエネルギー [書籍] / 著者 Wikibooks への寄稿者ら. - [出版地不明] : Wikibooks, フリー教科書., 2017年9月27日 04:42.

施設園芸・植物工場ハンドブック [書籍] / 著者 日本施設園芸協会. - [出版地不明] : 一般社団法人 農山漁村文化協会, 2015年.

施設栽培学 [書籍] / 著者 安井秀夫. - [出版地不明] : 川島書店, 1990年.

新施設園芸学 [書籍] / 著者 古在豊樹, 狩野敦. - [出版地不明] : 朝倉書店, 1998年.

新編生物 I 改訂版 [書籍] / 著者 啓林館. - [出版地不明] : 啓林館, 平成20年.

土壌物理性測定法 [書籍] / 著者 土壌物理性測定法委員会. - [出版地不明] : 養賢堂, 1972.

風と光合成 [書籍] / 著者 矢吹万壽. - [出版地不明] : 農文協, 1990.

野菜茶業研究所成果情報 [論文レポート] / 著者 島地英夫, 高市益行, 東出忠桐. - [出版地不明] : (国独)農研機構, 1998年.

養液栽培のすべて [書籍] / 著者 社団法人日本施設園芸協会・日本養液栽培研究会. - [出版地不明] : 誠文堂新光社, 2012年.

理科学習指導資料高等学校「理科2」の指導 [書籍] / 著者 福島県教育委員会. - [出版地不明] : 福島県教育センター, 昭和59年3月1日.

寒冷地中小規模施設における複合環境制御技術の導入手引き

食料生産地域再生のための先端技術展開事業(平成 25～29 年)

研究課題名「中山間地域における施設園芸技術の実証研究」

平成31年3月発行 岩手県農業研究センター

問い合わせ先:岩手県農業研究センター技術部野菜花き研究室

(〒024-0003 岩手県北上市成田20-1 TEL0197-68-4420 FAX0197-71-1083)