ハウス内の環境を「見える化」して
収量増加・品質向上につなげませんか

施設園芸において、生産環境等に関するデータを測定･見える化（環境モニタリング）し、さらに、作物の生育に好適な環境へ改善（環境制御）して栽培管理の最適化を図ることで、生産性や収益の向上につながります 。

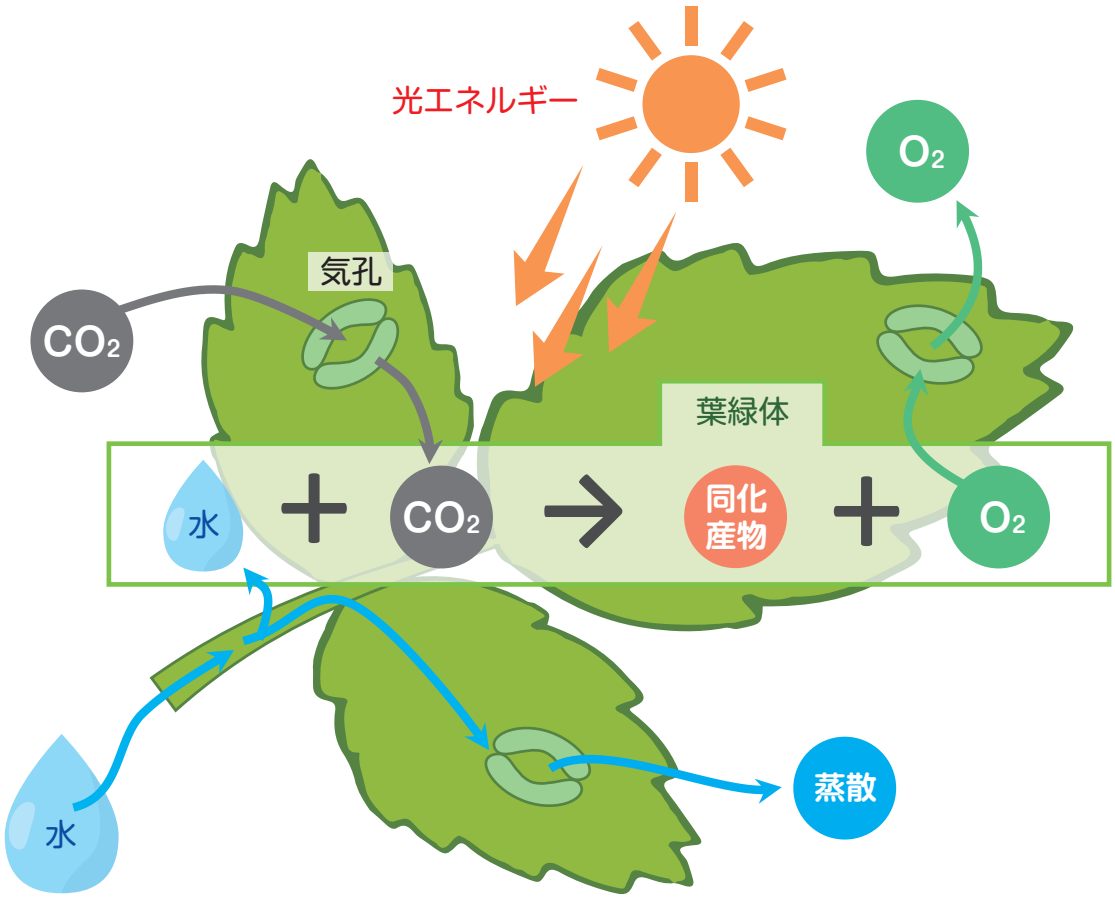
皆さんの経営にも、できるところからモニタリングや環境制御技術を取り入れてみませんか。

かがわデータ駆動型農業技術導入推進協議会

作物の生育～光合成について

光合成とは、葉に照射される光エネルギーを色素の働きにより吸収・変換し、空気中のＣＯ$_2$と根から吸収される水を用いて糖などの炭水化物（同化産物）を生成する作用（同化）です。この同化産物が、植物の葉や根、果実などに送られ（転流）、生長や貯蔵に使われます。

光合成を高める＝同化産物の生産量を増やすためには、光エネルギーや同化産物の原料となる物質を滞ることなく植物へ供給することが重要となります。



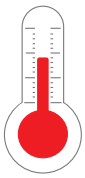
ハウス内環境の測定と改善の必要性

換気が不十分な施設栽培では、光合成が盛んに行われることでハウス内のＣＯ$_2$が植物に消費され、ＣＯ$_2$の不足が起こっている場合があります。また、光とＣＯ$_2$、水は十分に供給されていても、湿度が急激に低下した場合などに、ＣＯ$_2$の取り込み口である気孔が閉じ、植物体のＣＯ$_2$吸収が妨げられ、光合成量は減少します。（「飽差」の項参照）

光合成能力はハウス内の光強度、ＣＯ$_2$などが滞ることなく供給されることに加え、温度や湿度が好適であることでさらに高まります。環境測定機器などを導入し、それぞれの項目をリアルタイムに測定、作物の好適値に近づくよう制御することで、光合成量を増やし、作物の生育や収量を向上させることが可能となります。

測定項目と注意点

温度（℃）

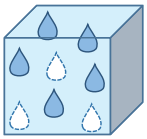


・温度は光合成や糖の転流、葉や花房の出現・展開速度、呼吸など作物の全ての反応に影響します。低すぎても高すぎても良くなく、作物に適した温度帯にすることが重要です。
・夜間の温度が低すぎると、作物の生育に影響する他、果実の着色不良や裂果の発生につながります。
・夜間の温度が高すぎると、作物の呼吸量が増加し同化産物の消耗につながります。

湿度（%、g/㎥）

・空気中に含まれている水の量を示す指標で、相対湿度と絶対湿度があります。
・相対湿度は、空気中に含まれている水蒸気量を、含むことができる最大の水蒸気量（飽和水蒸気量）に対する割合（%）で表したものです。
・絶対湿度は、１㎥の空気中に含まれている水蒸気を質量（g/㎥）で表したものです。
・高湿度条件が続くと、病害発生のリスクが上昇します。逆に、低湿度条件は光合成の抑制や作物の萎れにつながります。

飽差（g/㎥）



・１㎥の空気中にあとどれだけの水蒸気を含むことができるかを示す値です。
・作物に適した飽差は３～６g/㎥といわれており、値が高いと乾燥、低いと湿潤条件になります。
・飽差は葉の気孔の開閉に係る要素であり、作物の蒸散に大きく影響します。特に、日射量の増加等に伴い飽差が急激に上昇すると、気孔閉鎖の原因となり、光合成量が低下します。光合成を促進させるには、気孔を閉じさせない飽差管理が重要です。

CO_2濃度（ppm）

・空気中に含まれるCO_2の割合のことで、作物が光合成を行い、成長に必要な養分（糖）を作るためにはCO_2（と水、光エネルギーほか）が必要です。
・CO_2濃度は光合成の速度に影響し、光や温度の条件にもよりますが、高濃度のCO_2は光合成を促進させ、逆に、濃度が低下すると光合成も低下します。
・大気中（外気）のCO_2濃度はおよそ400ppm（空気中の0.04%）と言われています。盛んに光合成が行われているときは、植物群落内のCO_2濃度は群落外よりも低下している場合があります。

日射量（W/㎡、ＭＪ/㎡）

・植物が光合成を行うための光エネルギーの強さ・量です。
・日射量は光合成速度に影響し、一般的に値が大きいほど光合成量が増加します。曇雨天（低日射）が続いた場合、光合成量が低下し植物の生育に影響します。
・蒸散量は積算日射量と高い相関関係があるため、積算日射量に応じた潅水を行う必要があります。

設置場所などの注意

・センサーはできるだけハウスの中央で、ハウス内の平均的な環境条件と思われる場所に設置しましょう（中央部に加温機やＣＯ$_2$発生装置などがある場合は機器を避けて設置しましょう）。
・複数のハウスで測定する場合は、センサー設置場所、高さなどの条件を揃えるようにしましょう。
・温度センサーについては、直射日光や放射等の影響を避けて実際の気温を測定するために、センサー部に通風装置等を設置したうえで測定することが望ましいです。
・センサー（特に、湿度センサーやＣＯ$_2$センサー）は機械ごとに誤差が生じる場合があります。また、使用により測定精度が落ちてくるため、定期的に校正（または交換）する必要があります。

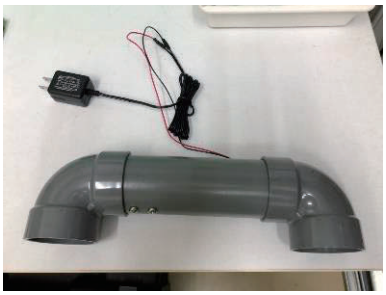


図１　通風装置の例

＜昼寝現象とは＞
　晴天時の昼間に植物の光合成速度が低下する現象のことです。
　空気中の湿度の低下などにより植物の蒸散量が吸水量より多くなると、植物体内水分の減少を防ぐために気孔を閉じる現象が起こり、二酸化炭素の吸収が妨げられることや、光合成で作られた糖・デンプンの転流が十分に進まず、糖やデンプンが葉緑体に滞留して濃度が高まり、光合成を抑制することで起こるといわれています。
　ただし、これらの要因で光合成速度が若干低下しても光合成は継続しているので「午後は光合成をしていない」かのように考えるのは間違いです。

事例：冬季のハウス内環境について

冬季のハウス内温度変化

晴天日

・午前中、ハウス内の日射が強くなり始める９時頃からハウス内の温度は急激に上昇します（図２　①部分）。

・換気を行わないと厳寒期でも 30℃以上となることがありますので、換気を行いますが、徐々にハウス内温度を上げる管理が望ましいです（図２　②部分）。

・ハウス内気温が急激に上昇すると、飽差も上昇し、気孔が閉じることで、光合成速度が低下します。さらにひどい場合には、葉からの蒸散に根からの吸水が追いつかずに植物体が萎れ、葉焼けが発生します。

・夕方、日射量が少なくなる 15 時頃からハウス内の温度が急激に低下しますので、保温カーテンと加温装置を使用して目標の温度になるよう調整します。

曇雨天日

・日射量の少ない曇雨天日では、ハウス内の気温はほとんど上昇しません（図２　③部分）。しかし、急に天気が回復し、日射量が多くなると、ハウス内の温度は急激に上昇しますので注意が必要です。

事　例

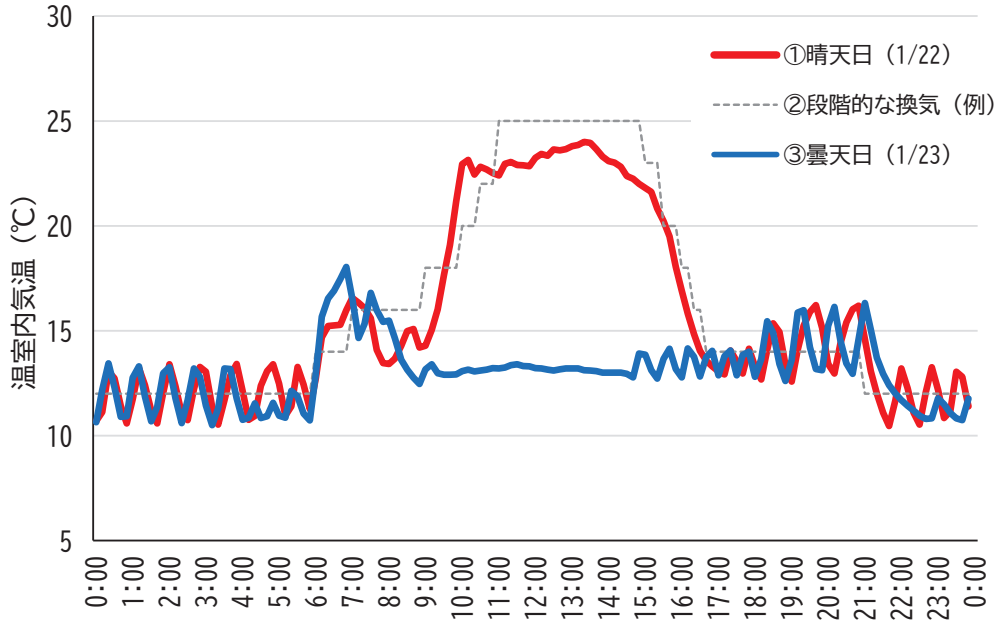


図２　晴天日と曇天日のハウス内気温の推移（Ａ農園）

温度と光合成

・温度は、日射量やCO_2濃度に次いで、光合成速度に影響します。15～25℃が最適な範囲で、30℃を超えると呼吸量が多くなり、純光合成速度（＝真の光合成速度－呼吸速度）が減少します。

温度と転流分配

・温度は、光合成そのものよりも同化産物の転流分配により大きな影響を及ぼします。転流の適温は光合成適温よりも高く、特に日射量の多い晴天日の日中（＝光合成量が多い時間帯）は高めの温度管理で転流を促します。

温度と葉・花房出現速度

・トマトでは、温度と葉・花房の出現には密接な関係があり、一般に高温ほど、葉・花房の出現速度は速くなります。なお、現地での調査結果でも、日平均気温が 1.6℃高いと、開花花房の増加が３カ月間で 0.8 花房多くなっていました（表１）。

表１　厳寒期におけるハウス内温度の違いと開花花房増加数

	積算温度（℃）	日平均温度（℃）	開花花房増加数
B農園	1,397	16.1	7.8
C農園	1,261	14.5	7.0

※調査期間：2021年12月3日～2022年2月28日

冬季の温度管理

管理温度の現状

・モニタリングの結果、日中は 20～23℃程度で管理、夜間は 11～12℃程度で加温する生産者が多い状況となっています。

増収に向けた温度管理とCO_2濃度

・試験研究での事例では、CO_2施用に加えて日中に 28℃の高温管理を行うことで、収量が増えるという報告があります。

トマトの生育と温度

・高めの温度管理を行うことで、葉や果房の出現、果実の成熟などが促進されるため収量増加が期待できます。ただし、それに見合うだけの光合成量を確保する必要があり、同化産物が不足すると軟弱徒長となりますので、日射量を確保しつつ、CO_2濃度を高めるような管理を行います。
・したがって、CO_2施用によりCO_2濃度を外気並み（またはそれ以上）に維持できる場合は、慣行よりやや高めの温度管理（25℃程度）とします。
・一方、CO_2を施用しない場合は、飢餓状態を避けるため、一定の気温の確保ができる範囲で、換気により外気からCO_2を取り込みます。
・夜間の最低温度は、12℃を確保できるよう加温を行い、裂果や着色不良果の発生を防ぎます。

夜間の相対湿度

低温期のハウス内は夜間密閉するため相対湿度が高く推移します。

相対湿度 100%になることもあり、病害の発生やミニトマトの裂果が生じやすくなります。

特に密閉開始時期（初冬）、終了時期（春）は加温機の運転が少なく高湿度になりやすいです。

密閉されたハウス内の水蒸気量はほぼ変わらないので、気温が下がるほど相対湿度は高くなります。

一般の加温機では運転によってハウス内の水蒸気量は減らないので、温度上昇・低下で相対湿度も低下と上昇を繰り返します。

事　例

ハウス内気温が高い時に換気を止めてハウスを密閉

↓

気温の低下によって夜間の相対湿度が上昇

密閉中のハウス内の水蒸気量を減らすには夜間も換気する必要がありますが、加温の効率が下がるので通常は密閉度を高く管理しています。

そこで夜間の換気に比べると効果は限られますが、密閉前に換気によって絶対湿度を下げることが考えられます。

日没時の強換気によるハウス内絶対湿度の低下

例）換気温度を時間別に設定できる場合

日没の時間帯の換気温度を日中より低く設定して密閉時間を遅くする。

日没時（16：00～）換気温度　15℃（加温機の運転温度に応じて調整する）。

日没～翌朝までの温度、相対湿度の推移を見ながら日没時の換気を調整する。

夜間継続して換気することに比べると湿度低下には限りがありますが、絶対湿度が高いまま密閉するよりは、少しでも湿度低下してから密閉することは湿度低下に有効です。

ただし、一時絶対湿度を下げても、日没までに蒸散によって再び絶対湿度が上昇するタイミングで行うと効果は無いと思われます。

現地で実施した事例では前年度より湿度低下する傾向があり、一定の効果はあるとみられます。

事　例

2022 年 11 月 30 日–12 月 1 日　D農園のハウス内気温、相対湿度、絶対湿度

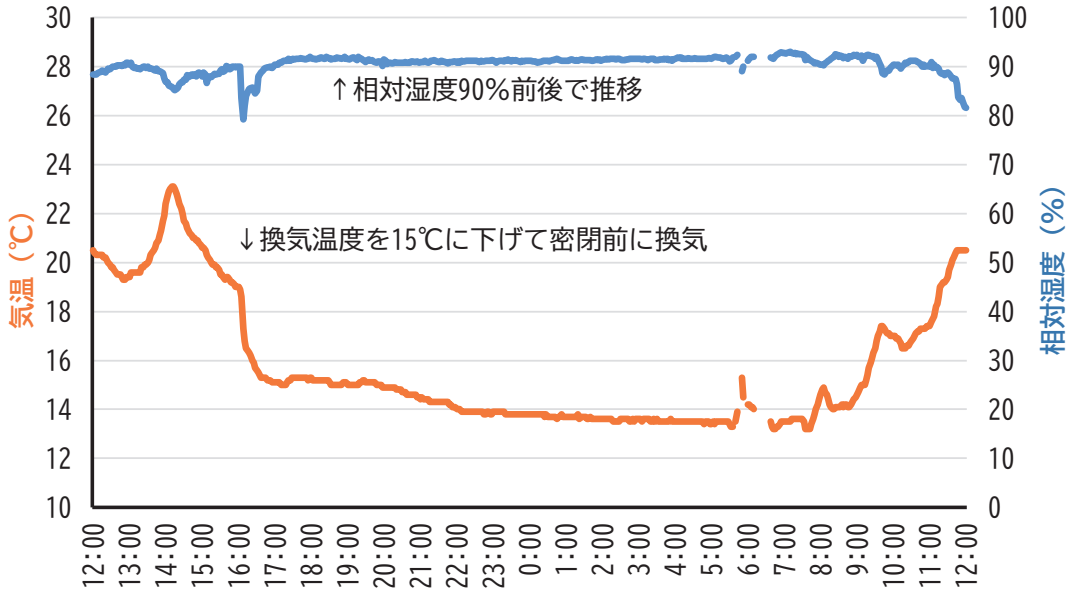


図３　温度、相対湿度の推移

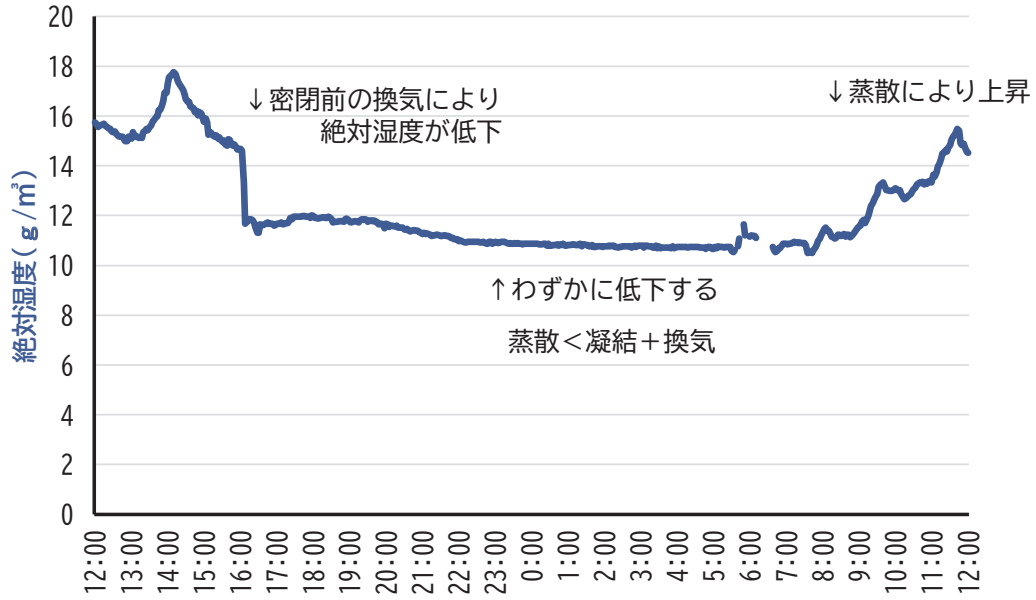


図４　絶対湿度の推移

絶対湿度

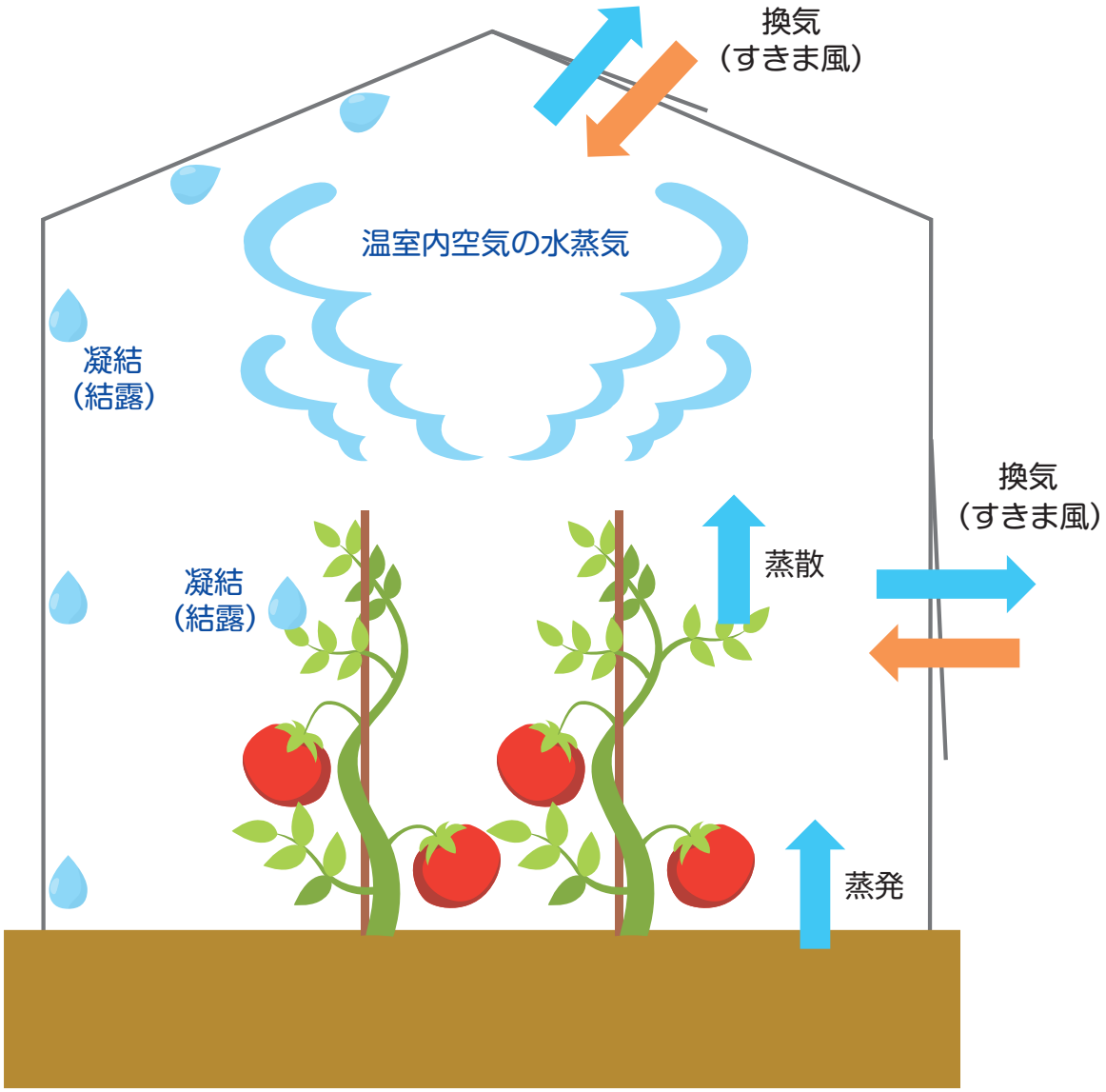
絶対湿度は空気中に含まれる水蒸気の質量であり、ｇ/㎥で表します。
同じ温度であれば、絶対湿度が高いほど相対湿度も高くなります。

ハウス内の水蒸気の量は何によって変化するか？

主なハウス内水蒸気量の変化要因は以下のとおりです。

＜増加する＞
植物からの蒸散
土壌からの蒸発

＜減少する＞
被覆内面への凝結
植物体への凝結
換気（すきま風）



事　例

2022 年 12 月 7 日–12 月 8 日　D農園のハウス内気温、相対湿度、絶対湿度

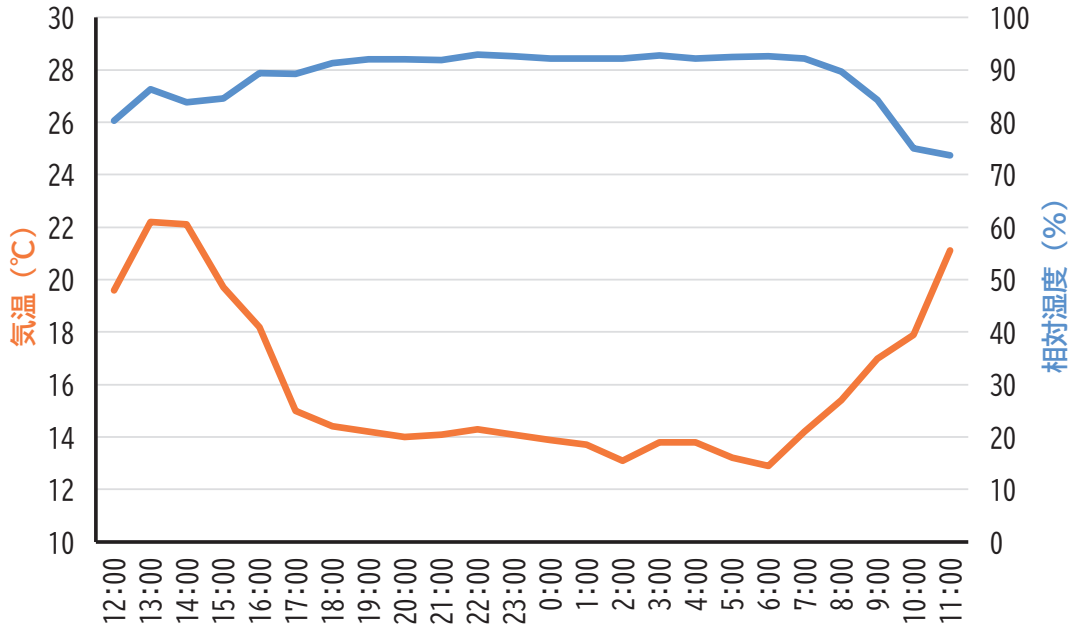


図５　気温、相対湿度の推移

絶対湿度（ハウス内の水蒸気量）は夜間低下している

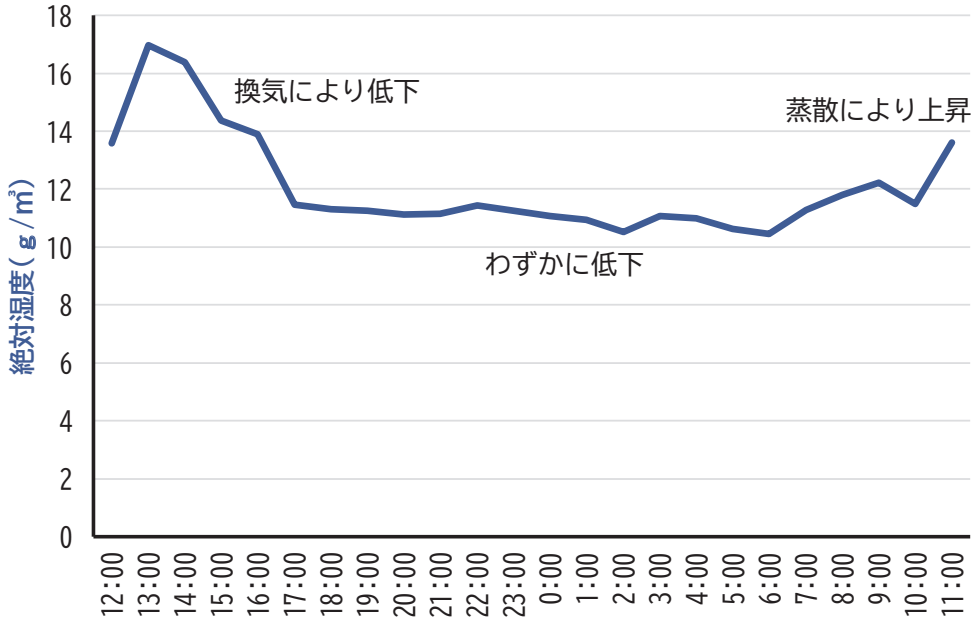


図６　絶対湿度の推移

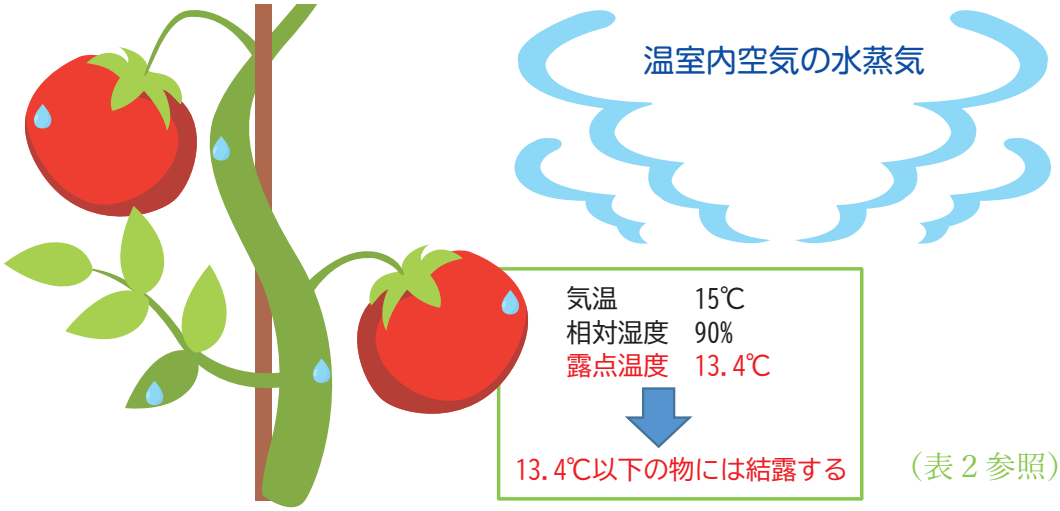
露点温度

露点温度とは空気中の水蒸気が凝結して水になる温度です。
同じ気温であれば、相対湿度が高いほど露点温度が高くなります。
すなわち、相対湿度が高いと気温よりわずかに低い作物体の表面に結露を生じます。
特に果実温度は気温に比べて上昇しにくいため結露しやすく、灰色かび病等の病害やミニトマトの裂果の原因となります。

例）気温 15℃相対湿度 95%の時、露点温度は 14.2℃（0.8℃差で結露）
　　気温 15℃相対湿度 80%の時、露点温度は 11.6℃（3.4℃差で結露）　（表２参照）

作物体の結露を防止するためには

気温が上昇する日の出時の相対湿度を下げる管理を行います（「夜間の相対湿度」参照）。
気温の上昇が 1 時間に 2℃程度になるよう（作物体との温度差が小さくなるよう）加温機の設定を段階的に上げます。
結露は相対湿度が高く気温が低い状態から上昇に転ずる早朝に生じやすく、ある程度の気温上昇後は相対湿度が低下しているので結露はしにくくなります。



（表２参照）

表２　温度と相対湿度による空気の露点温度

空気温度（℃）	相対湿度に対する露点温度（℃）													
	30%	35%	40%	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%	85%	90%	95%
20	1.9	4.1	6.0	7.7	9.3	10.7	12.0	13.2	14.4	15.4	16.4	17.4	18.3	19.2
19	1.0	3.2	5.1	6.8	8.3	9.8	11.1	12.3	13.4	14.5	15.5	16.4	17.3	18.2
18	0.2	2.3	4.2	5.9	7.4	8.8	10.1	11.3	12.5	13.5	14.5	15.4	16.3	17.2
17	-0.6	1.4	3.3	5.0	6.5	7.9	9.2	10.4	11.5	12.5	13.5	14.5	15.3	16.2
16	-1.4	0.5	2.4	4.1	5.6	7.0	8.2	9.4	10.5	11.6	12.6	13.5	14.4	15.2
15	-2.2	-0.3	1.5	3.2	4.7	6.1	7.3	8.5	9.6	10.6	11.6	12.5	13.4	14.2
14	-2.9	-1.0	0.6	2.3	3.7	5.1	6.4	7.5	8.6	9.6	10.6	11.5	12.4	13.2
13	-3.7	-1.9	-0.1	1.3	2.8	4.2	5.5	6.6	7.7	8.7	9.6	10.5	11.4	12.2
12	-4.5	-2.6	-1.0	0.4	1.9	3.2	4.5	5.7	6.7	7.7	8.7	9.6	10.4	11.2
11	-5.2	-3.4	-1.8	-0.4	1.0	2.3	3.5	4.7	5.8	6.7	7.7	8.6	9.4	10.2
10	-6.0	-4.2	-2.6	-1.2	0.1	1.4	2.6	3.7	4.8	5.8	6.7	7.6	8.4	9.2

事　例

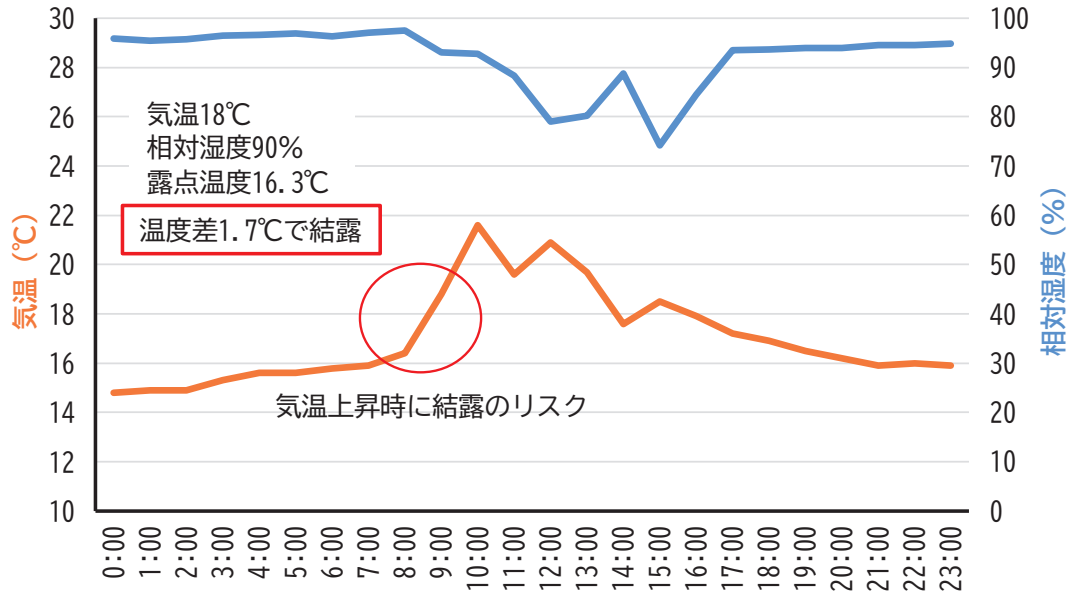


図7　2021年11月25日　ハウス内気温、相対湿度の推移（D農園）

水蒸気量の増減に影響する？しない？

加温機の運転は基本的には温度を上げているだけで水蒸気量を変化させません。ただし、ハウス内の空気を吸い込んで燃焼後ハウス外へ排出していることが多い（排気と同じ量の外気を被覆の隙間から吸い込んでいる）ので、若干の換気を伴っています（水蒸気量を減らしている）。

循環扇による空気の攪拌はハウス内の水蒸気の総量を変化させません。ただし、作物周辺の湿った空気の偏りを動かす効果はあります。

灯油燃焼のCO_2発生機は、灯油1ℓを燃焼すると空気中に水を約1ℓ排出しています。

密閉したハウス内の絶対湿度（水蒸気量）は夜間増える？

日没後、気温の低下によりハウス内の相対湿度は上昇します。

蒸散、蒸発による水蒸気量の増加と、凝結、換気による減少は拮抗して、水蒸気量はほぼ変化しないと言われています。

実測した相対湿度と気温から算出すると、夕方ハウス密閉時の絶対湿度は、翌朝まで変化しないか、やや低下する傾向にあります。

湿度と飽差

空気中に含むことのできる水蒸気量と実際に含んでいる水蒸気量の差を飽差と言います。同じ水蒸気量であれば温度が上がるほど飽差は上昇します。

光合成には気孔からのCO_2の取り込みが必要ですが、飽差が高すぎても低すぎても気孔が閉じるため、光合成に好適な飽差は３～６ｇ/㎥と言われています。

飽差が低いのはどんな時？

通常栽培ハウス内の飽差が３ｇ/㎥以下になる（気温が低く、湿度が高い）条件は、ほぼ夜間または曇雨天なので光合成への影響は少ないと考えられます。

飽差が高いのはどんな時？

飽差が６ｇ/㎥以上になるのは気温が高く湿度が低い条件で晴天日に起こりやすく、光合成速度への影響が考えられます。

晴天日にハウス内の気温が上がると相対湿度が下がります。換気によって乾燥した外気を取り入れることでも相対湿度が下がります。これらにより飽差は上がりやすくなります。

表３　飽差表　（ｇ/㎥）

温度（℃）	相対湿度（%）									
	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95
10	4.7	4.2	3.8	3.3	2.8	2.4	1.9	1.4	9.0	0.5
11	5.0	4.5	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0	0.5
12	5.3	4.8	4.3	3.7	3.2	2.7	2.1	1.6	1.1	0.5
13	5.7	5.1	4.5	4.0	3.4	2.8	2.3	1.7	1.1	0.6
14	6.0	5.4	4.8	4.2	3.6	3.0	2.4	1.8	1.2	0.6
15	6.4	5.8	5.1	4.5	3.9	3.2	2.6	1.9	1.3	0.6
16	6.8	6.1	5.5	4.8	4.1	3.4	2.7	2.0	1.4	0.7
17	7.2	6.5	5.8	5.1	4.3	3.6	2.9	2.2	1.4	0.7
18	7.7	6.9	6.2	5.4	4.6	3.8	3.1	2.3	1.5	0.8
19	8.2	7.3	6.5	5.7	4.9	4.1	3.3	2.4	1.6	0.8
20	8.7	7.8	6.9	6.1	5.2	4.3	3.5	2.6	1.7	0.9
21	9.2	8.3	7.3	6.4	5.5	4.6	3.7	2.8	1.8	0.9
22	9.7	8.7	7.8	6.8	5.8	4.9	3.9	2.9	1.9	1.0
23	10.3	9.3	8.2	7.2	6.2	5.1	4.1	3.1	2.1	1.0
24	10.9	9.8	8.7	7.6	6.5	5.4	4.4	3.3	2.2	1.1
25	11.5	10.4	9.2	8.1	6.9	5.8	4.6	3.5	2.3	1.2
26	12.2	11.0	9.8	8.5	7.3	6.1	4.9	3.7	2.4	1.2
27	12.9	11.6	10.3	9.0	7.7	6.4	5.2	3.9	2.6	1.3
28	13.6	12.3	10.9	9.5	8.2	6.8	5.4	4.1	2.7	1.4
29	14.4	12.9	11.5	10.1	8.6	7.2	5.8	4.3	2.9	1.4
30	15.2	13.7	12.1	10.6	9.1	7.6	6.1	4.6	3.0	1.5

ハウス内の飽差の変化の実際

例）天窓、谷窓の開閉による換気の場合

飽差３～６ｇ/㎥が最適と言われていますが、換気率の低い低温期は概ねその範囲内で推移します。

常時換気している高温期は日中のほとんどが飽差６ｇ/㎥を超えます。

夜間密閉し昼間高温になる時期は、温度の上昇と換気によって日中の飽差が高くなり、また急激な飽差の上昇が起こることもあります。

植物は飽差の急変に反応して一気に気孔を閉じますが、飽差が６ｇ/㎥を超えてもその変化がゆっくりであれば気孔を閉じることを避けられると言われています。

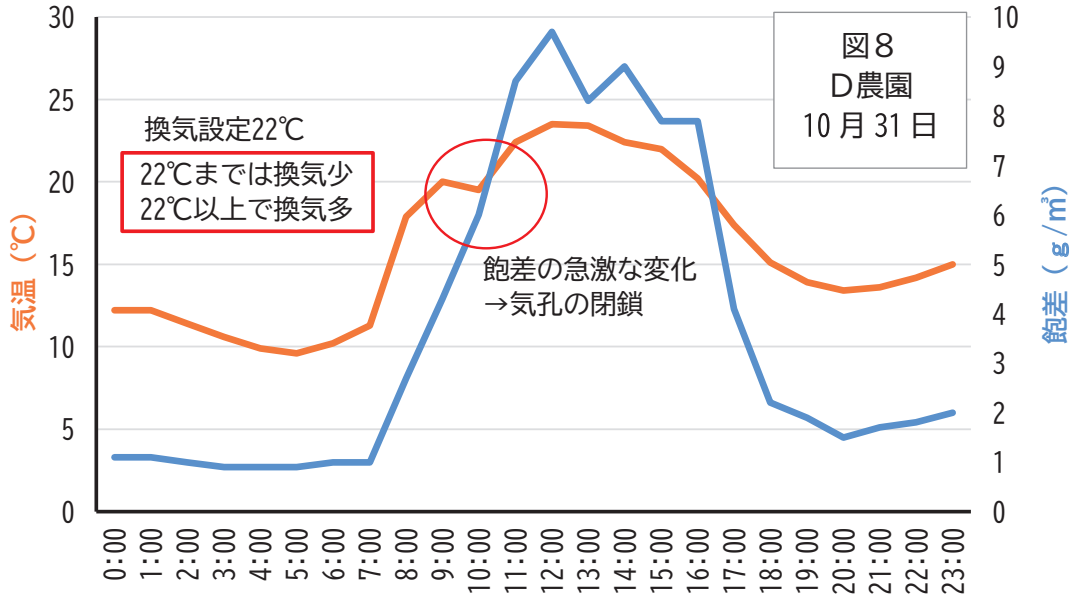
時期によっては飽差が６ｇ/㎥を超えることが避けられないが、できるだけ急激な変化は避ける

事　例

Ｄ農園の換気設定の違いによる気温と飽差の推移

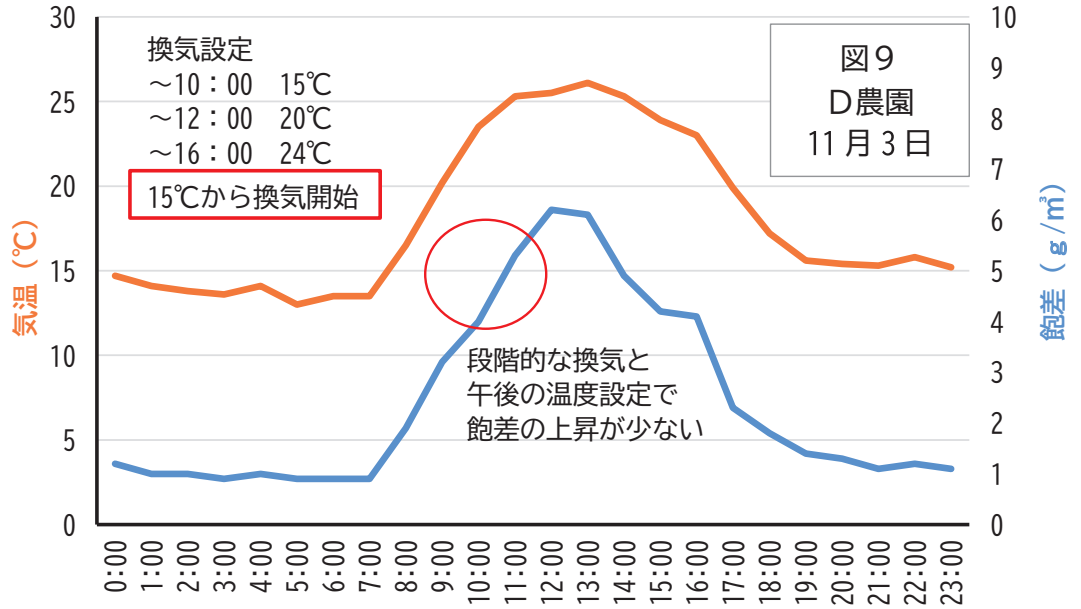
●10 月 31 日　　自動換気設定温度 22℃

日の出後急激な温度上昇→温度上昇ともに換気度が増え相対湿度が低下して飽差が上昇



改善点

①自動換気開始温度が終日 22℃→朝の自動換気開始温度を低く設定して段階的に上げる。
②午後の換気設定温度を上げて換気率を下げる。



※自動換気が多段階設定できない場合は、朝、自動換気が動作する温度になる前から、手動の換気により少し開ける等を行う。
自動換気が無い場合も、一度に換気を全開にするより、徐々に開度を上げる。

栽培ハウス内のＣＯ$_2$濃度

大気のＣＯ$_2$濃度は約 400ppm です。トマトの促成栽培では、栽培初期及び終期の高温期にはハウスの天窓、サイドは解放され、換気により光合成が行われる日中でも大気並みのＣＯ$_2$濃度が保たれます。ところが栽培中期の低温期には室温を保つために積極的には換気が行われなくなります。締め切ったハウス内では夜間に続けられる呼吸によりＣＯ$_2$濃度は 700−800ppm に高まります。一方で日中は換気により外から入るＣＯ$_2$の量よりも光合成によって吸収される量の方が上回ります。そのためハウス内のＣＯ$_2$濃度は外気よりも低下します。

事　例

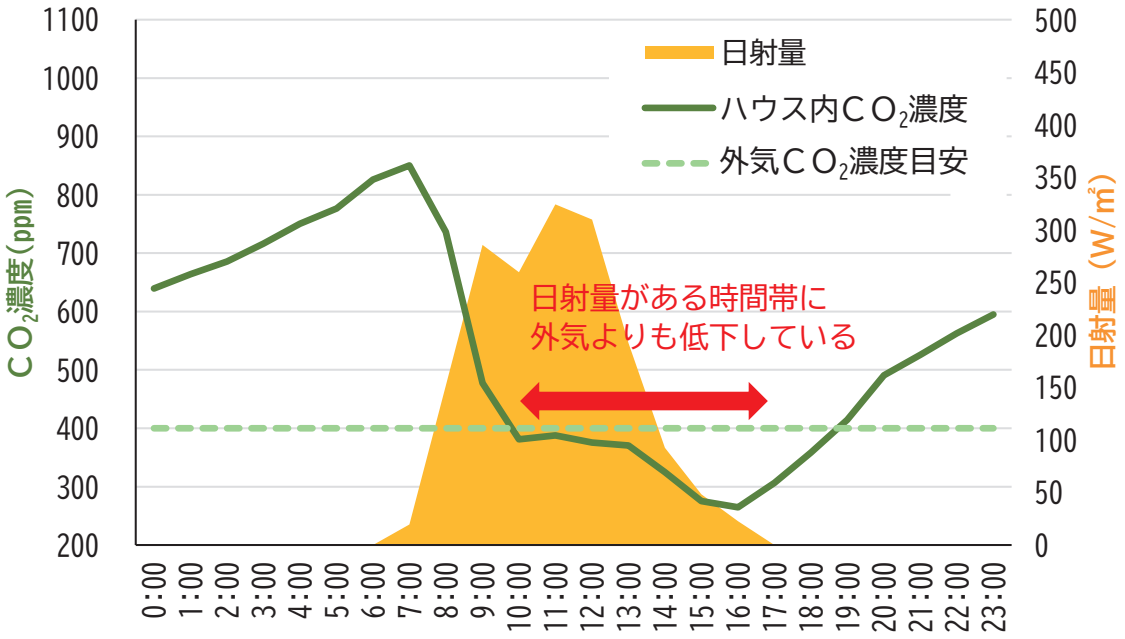


図 10　日中のＣＯ$_2$施用なし事例（Ａ農園）

ＣＯ$_2$が少なくなれば、光合成量は減少し草勢や果実に影響します。

光合成を促進するため、灯油燃焼式のＣＯ$_2$発生器の利用が進んでいます。従来の利用方法は、加温機を運転する時期の締め切った早朝の時間帯に、ＣＯ$_2$発生器を連続運転して 1,000ppm 以上に濃度を高めています。これは、夜間最低温度 14℃から早朝加温により 17℃以上に高める温度管理と同時に行われます。日の出後は光合成が行われるにつれＣＯ$_2$濃度が低下します。晴天で日射により室温が上がり、温度管理のために換気が行われたとしても、換気率が低いため十分には外気が入らず、光合成も継続しているためＣＯ$_2$濃度は 400ppm を下回ります（図 11）。

事　例

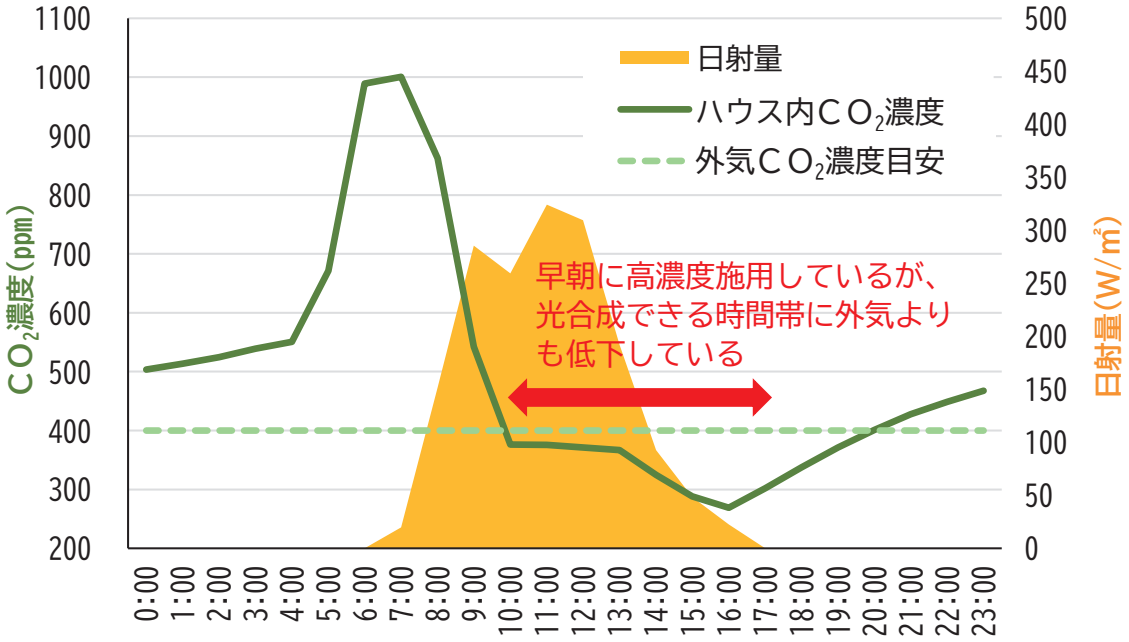


図 11　早朝ＣＯ$_2$施用事例（Ａ農園）

大気並み濃度施用

光合成に必要なＣＯ$_2$施用が真に必要なのは日中です。ところが、換気が行われる日中のＣＯ$_2$施用は、発生器を運転しても換気とともに外部に逃げていく怖れがあるとして避けられてきました。また、700-800ppm を日中維持しようとするとコストも増加します。

そこで、光合成が行われる日中に、大気並み濃度となるようにＣＯ$_2$を施用する方法、大気並みＣＯ$_2$施用を提案します。この方法だと、光合成量の減少を回避しつつ、ハウス内外のＣＯ$_2$濃度差が少ないため、外部に漏れだすＣＯ$_2$の量も抑えられます。

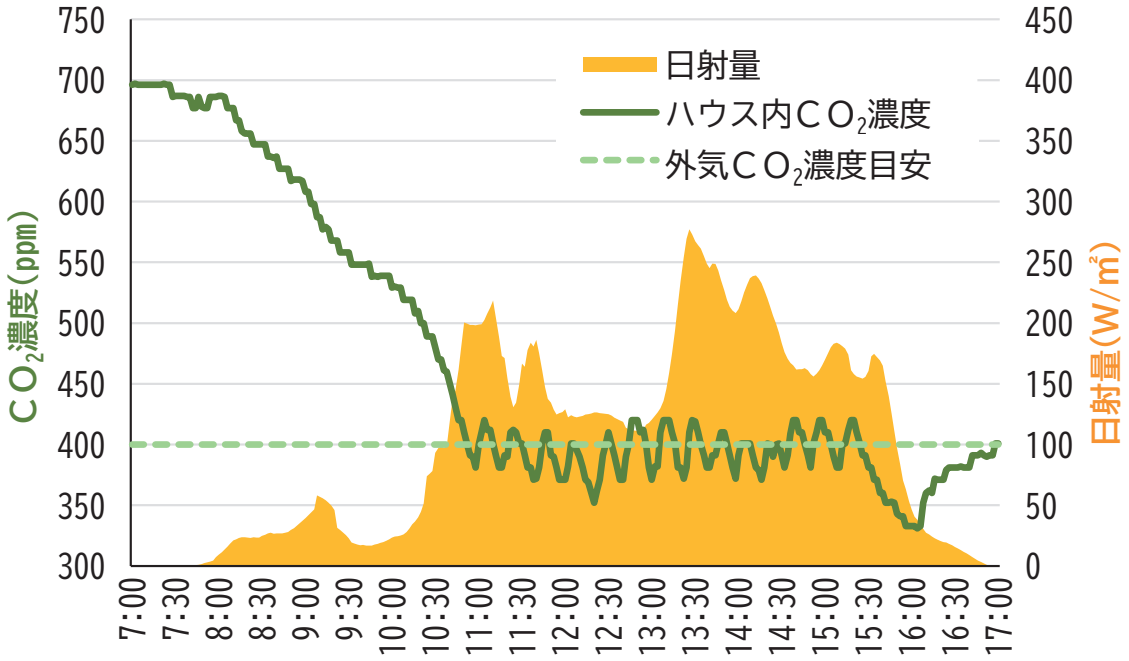


図 12　大気並みＣＯ$_2$施用事例（Ｄ農園）

CO_2の拡散状況

ハウス内に施用されたCO_2は速やかに拡散します。２圃場について、CO_2濃度の変化から拡散の状況を確認しました。

事　例

図 13 は、冬期にCO_2を施用したことによるハウス内のCO_2濃度の推移を示しています。朝６時 30 分にCO_2施用が開始されると、センサー位置のCO_2濃度は施用 2 分後から上昇しており、ハウス内に速やかに拡散していることが分かります。

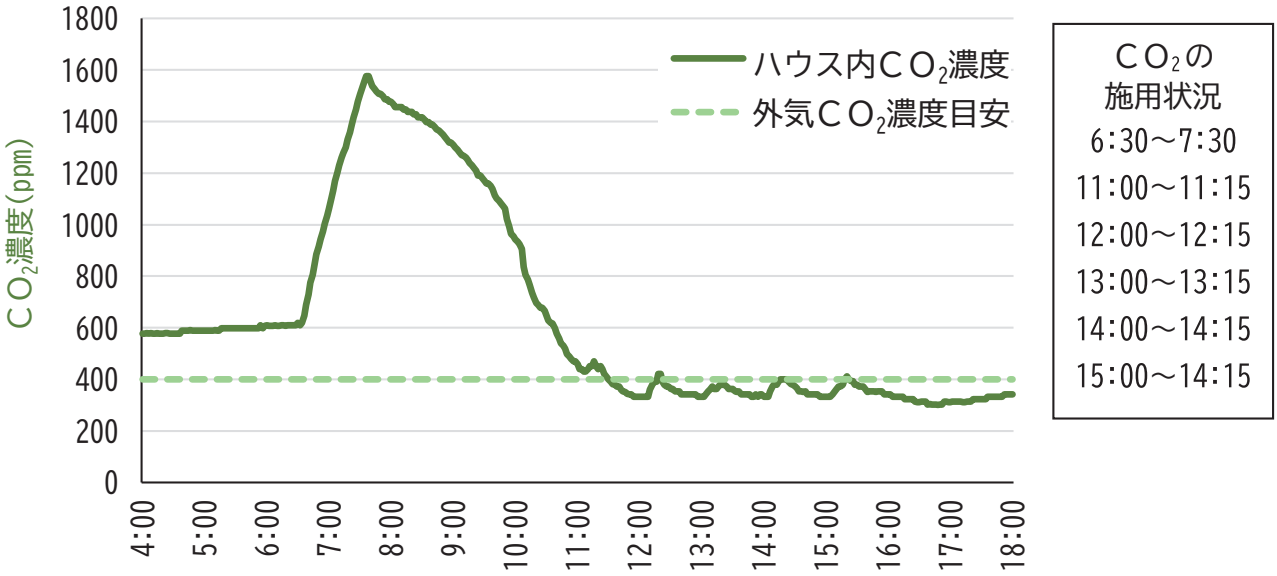


図 13　ハウス内CO_2濃度の推移（Ｅ農園）

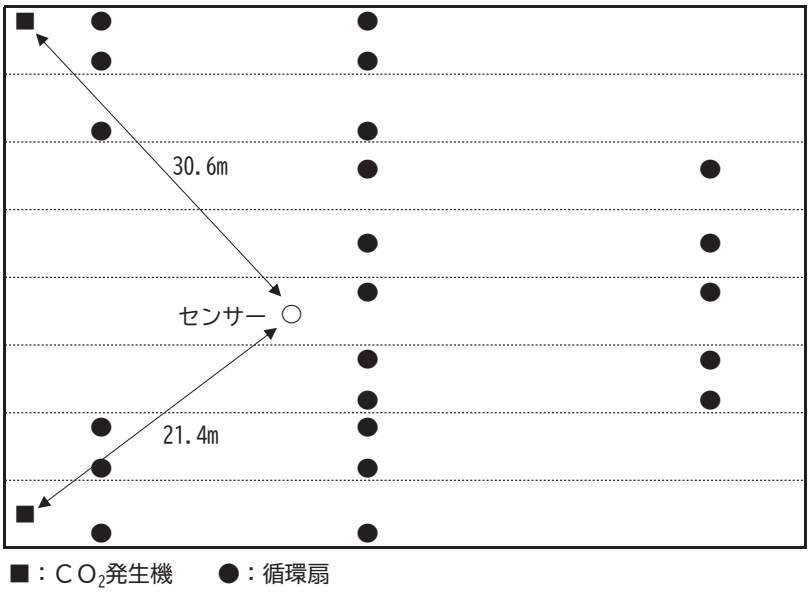
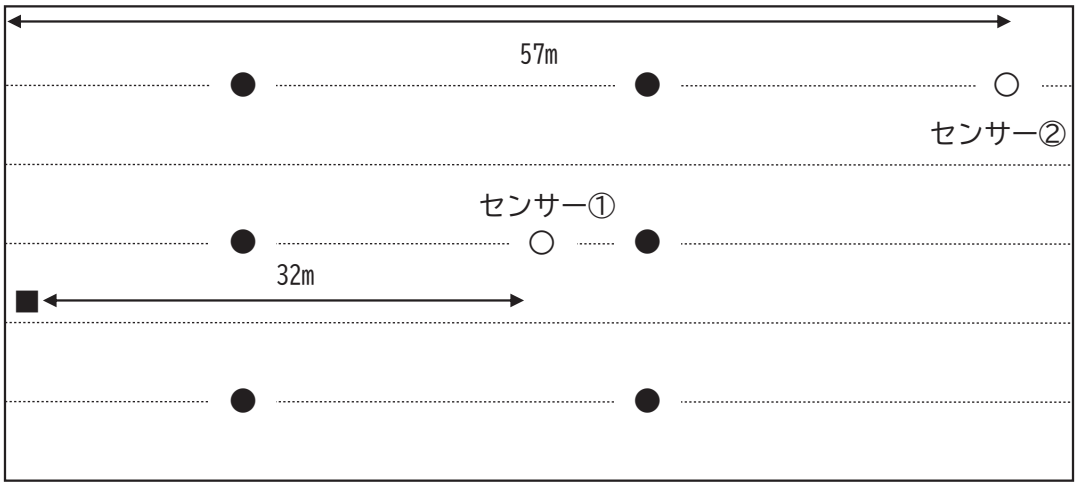


図 14　Ｅ農園模式図　CO_2発生機とセンサーの位置

事　例

図 15 のハウスにおいて、■の位置にあるＣＯ$_2$発生機を 10：00 から 10：15 の間運転しました。その結果、ＣＯ$_2$発生機が運転を開始した 6 分後に①地点のＣＯ$_2$濃度は上昇を始め、12 分後には②地点のＣＯ$_2$濃度が上昇を始めたことから、ハウス中央まで 6 分、最も遠い位置まで 12 分程度で到達していることがわかりました。



■：ＣＯ$_2$発生機　　●：循環扇

図 15　Ｆ農園ハウス模式図　ＣＯ$_2$発生機とセンサーの位置

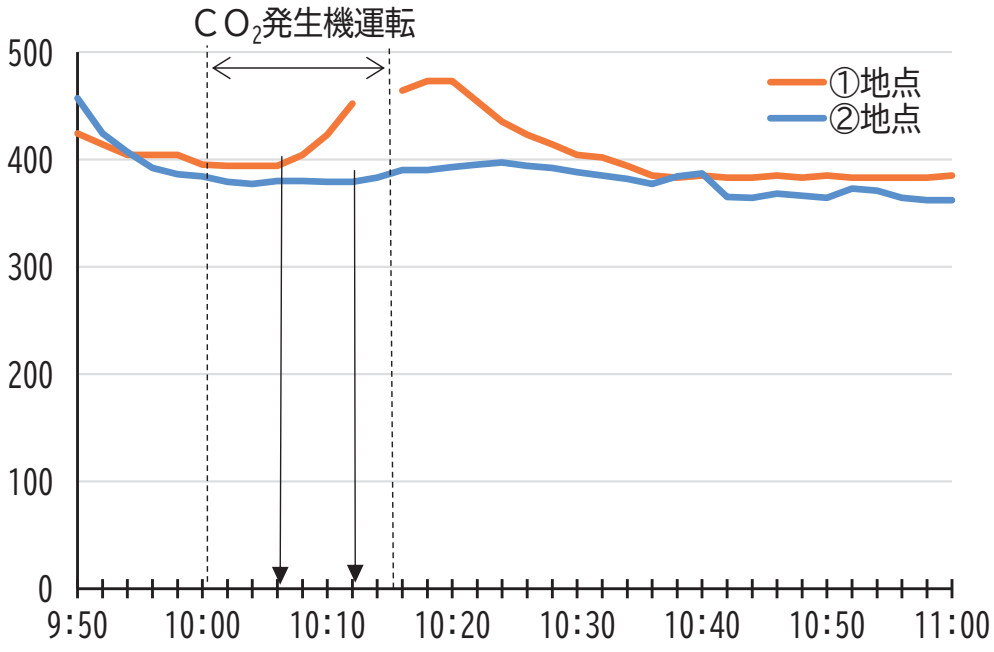


図 16　ＣＯ$_2$発生機運転時における地点ごとの濃度推移（Ｆ農園）

春先の萎れ対策

トマト類は光合成の光飽和点（光合成速度が最大となる光の強さ）が高いため、基本的に遮光は必要ありません。しかし、春先以降に、天気の変化で低日射条件から急激に高日射条件になると、蒸散量に対して根からの給水量が不足し、萎れが発生することがあります。萎れが続くと草勢の低下につながります。

遮光をすることは一時的な萎れ対策になりますが、光合成量は低下しますので、可能な範囲で遮光に頼らない管理を行いましょう。

事　例

遮光の実施時期

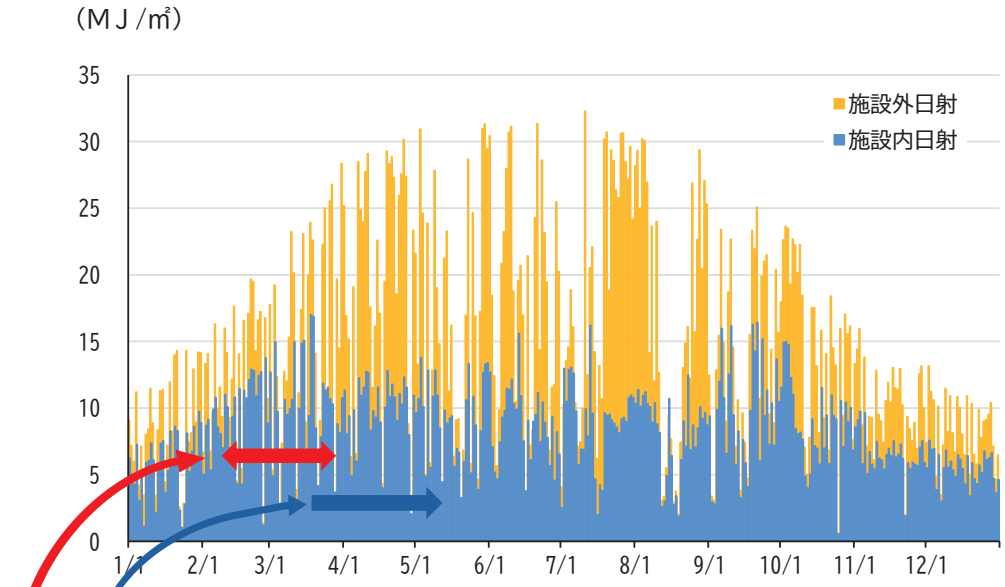


図 17　日射量（ハウス外・内）の推移（A農園　2021 年）

このあたりから外日射と内部日射の差が拡大　→　遮光を実施した時期

↓

遮光のみに頼らず、日射量が増加するこの時期から潅水量を増やしていく

改善方法

・春先以降の、茎葉の萎れが発生しやすい急激な天気の変化が予想される時期の前から、徐々に潅水量を増やす。
・潅水を増やしても急激に高日射条件になることが予想される時期には、早めに適宜遮光を行う。

令和2年度～4年度

データ駆動型農業の実践・展開支援事業

（データ駆動型農業の実践体制づくり支援）