

光合成特性に着目した環境制御によるイチゴの生産性向上

田川, 愛

<https://hdl.handle.net/2324/6787664>

出版情報 : Kyushu University, 2022, 博士 (農学), 課程博士
バージョン :
権利関係 :

光合成特性に着目した環境制御による

イチゴの生産性向上

田川 愛

2023

目次

緒論	1
第 1 章 CO ₂ 濃度がイチゴ‘さがほのか’の収量，光合成速度および光合成産物の 転流・分配に及ぼす影響	
緒言	9
材料および方法	
1-1. 収量，果実 Brix および経済性	9
1-2. 光合成速度	12
1-3. 光合成産物の転流・分配	13
結果	
1-1. CO ₂ 濃度が収量，果実 Brix および経済性に及ぼす影響	15
1-2. CO ₂ 濃度が光合成速度に及ぼす影響	18
1-3. CO ₂ 濃度が光合成産物の転流・分配に及ぼす影響	23
考察	28
要約	32
第 2 章 湿度がイチゴ‘さがほのか’の光合成速度に及ぼす影響	
緒言	33
材料および方法	
2-1. ハウス内の調査	33
2-2. 人工気象器内の調査	35
結果	
2-1. 異なる湿度条件がハウス内で測定した光合成速度に及ぼす影響	38
2-2. 異なる湿度条件が人工気象器内で測定した光合成速度に及ぼす影 響	38
考察	41

要約	46
第 3 章 昼温および夜温がイチゴ‘さがほのか’の ¹³ C-光合成産物の転流・分配に及ぼす影響	
緒言	47
材料および方法	
3-1. 果実の成熟日数と果実重	47
3-2. ¹³ C-光合成産物の転流・分配	48
結果	
3-1. 果実の成熟日数と果実重に及ぼす昼夜温管理の影響	50
3-2. ¹³ C-光合成産物の転流・分配に及ぼす昼夜温管理の影響	50
考察	54
要約	61
第 4 章 冬季における日中の加温がイチゴ‘さがほのか’の収量, 光合成および ¹³ C-光合成産物の転流・分配に及ぼす影響	
緒言	62
材料および方法	
4-1. 収量および成熟日数	63
4-2. 温度と光合成速度の関係	66
4-3. ¹³ C-光合成産物の転流・分配	67
結果	
4-1. 日中加温が収量および成熟日数に及ぼす影響	69
4-2. 温度と光合成速度の関係	69
4-3. 日中加温が ¹³ C-光合成産物の転流・分配に及ぼす影響	76
考察	76

要約	83
総括	84
Summary	89
謝辞	95
引用文献	96

緒論

イチゴは、バラ科オランダイチゴ (*Fragaria*) 属に属する多年生草本植物である。栽培イチゴ (*F. × ananassa* Duch.) の起源は、18世紀にオランダで交雑された北アメリカ東部原産の *F. virginiana* と南アメリカ・チリ原産の *F. chiloensis* の種間雑種である (森下, 2014; 望月, 2015)。日本では、江戸時代後期にヨーロッパから栽培イチゴが導入された (織田・木村, 2004)。イチゴ栽培は大正期に本格化し、11月上旬に本圃に定植、翌年5月頃に収穫される作型で栽培されていた (森下, 2014; 川里, 2015)。この頃から、フレーム栽培と呼ばれる温床を利用した早期出荷栽培が始まり、静岡県では石垣栽培が考案され、冬季のイチゴ生産が開始された (森下, 2014)。現在、日本におけるイチゴ栽培は全生産量の90%以上がビニルハウスを用いた促成栽培であり、11月から5月に収穫期を迎える冬季の主要園芸作物となっている (Yamasaki, 2013)。長期どり促成栽培は、休眠の浅い品種を9月中旬に定植し、10月から電照による補光、カーテンによる保温や暖房機による加温を行うことで、11月から翌年5月まで連続して果実を収穫する栽培である (松田, 2000)。日本の西南部に位置する九州は、温暖な気候を活かしたイチゴの促成栽培が古くから盛んな地域である (川里, 2015)。九州におけるイチゴの作付面積は1,371 ha, 出荷量は48,670 tであり (農林水産省, 2017)、いずれも全国の約3割を占める。本研究の試験場所である佐賀県は九州北部に位置し、イチゴの作付面積は200ha, 出荷量は7,950t (農林水産省, 2017) であり、イチゴは佐賀県内の園芸生産において産出額第2位の主要な品目である (図1)。しかしながら、佐賀県におけるイチゴの出荷量および作付面積の推移を見ると、いずれも年々減少している (図2)。一方、単位面積当たり収量は4t/10a弱で横ばいであり、産地生産力の維持拡大のために単位面積当たり収量を増加させる技術開発が求められている。

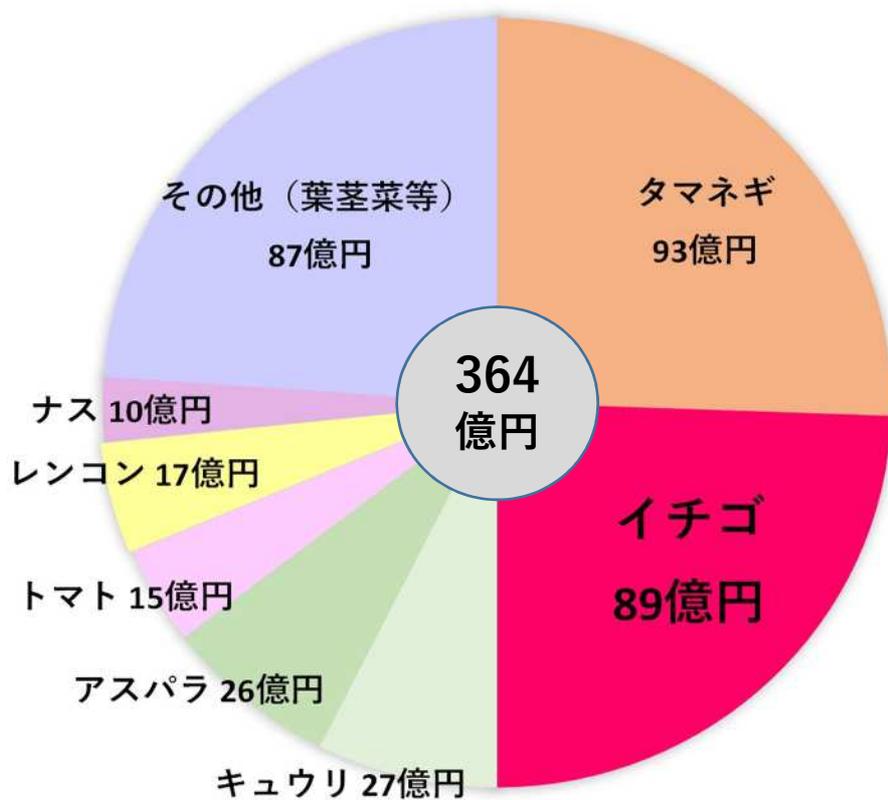


図1 佐賀県における野菜産出額 (2017年)

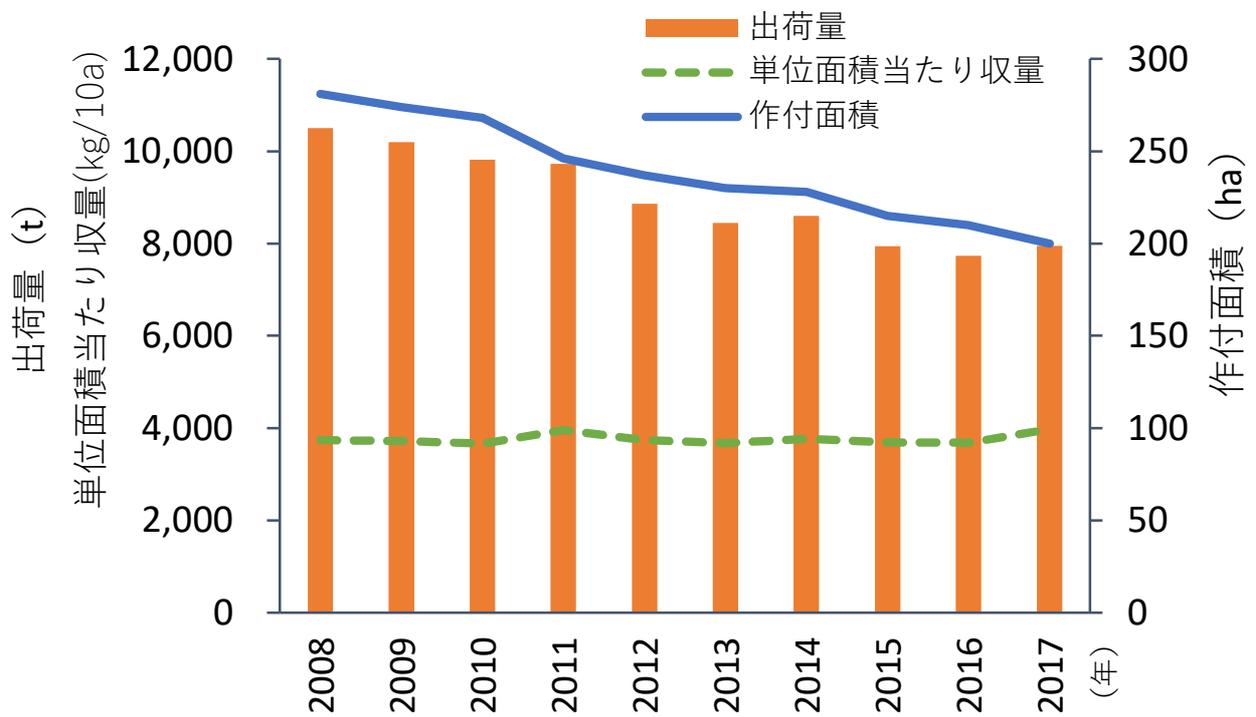


図2 佐賀県におけるイチゴの出荷量および作付面積の推移

資料：農林水産省「野菜生産出荷統計」

施設園芸の先進地であるオランダでは、トマトやイチゴ等の施設果菜類生産が盛んである。オランダの施設トマトの収量は、1980年代では約30 t/10 a/年であったが、2000年代には60 t/10 a/年以上になっており、多収化が著しい (Kwantitatieve Informatievoor de Glastuinbouw, 2005)。オランダで施設果菜類の収量増加に貢献した要素は、品種、施設、環境制御であるといわれており (Higashide・Heuvelink, 2009)、環境制御は収量増加に大きな影響を与えると考えられる。日本でもこれまでに、気温、日射量、CO₂濃度、飽差などの複数の環境計測項目と時間帯を複合させて各環境項目を制御する複合環境制御 (星ら, 2016)といわれる技術に関する研究が多数行われている (古在, 1982; 板木, 1983)。これらの環境要素の中で、CO₂は光合成の原料であり、植物に施用することによりその生産性が向上することが古くから知られているが、日本国内の施設内におけるCO₂施用技術の導入状況は、2007年に2.71%と一部に限られており、施用法については未解明の部分が多い (中野・安, 2010)。このような中、CO₂施用を中心とした環境制御技術については、CO₂施用方法や温湿度管理法を組合せた新しい技術の開発の必要性が指摘され、光合成と炭水化物の転流を促進する新しい複合環境調節技術開発に期待が高まっている (池田ら, 2009)。また、佐賀県内のイチゴ生産では、近年、急速にLPG (液化石油ガス) 燃焼式CO₂発生装置 (図3)の普及率が上昇し、2018年には県内におけるイチゴ生産面積の50%以上で同装置が導入されている。しかし、CO₂施用が増収に結び付かない事例が多く、CO₂発生装置を有効に活用したイチゴの増収技術の開発が求められている。

そこで、本研究では、CO₂濃度、湿度および温度などの環境がイチゴの光合成や光合成産物の転流・分配等の生理生態に及ぼす影響を明らかにし、さらにその環境条件が実際のイチゴ生産に及ぼす影響を生育、収量および経済性などの面から検討した。

まず第1章では、CO₂濃度がイチゴ‘さがほのか’の収量、光合成速度、光合成産物の転流・分配に及ぼす影響について検討した。CO₂施用が植物に与える影響



図3 LPG（液化石油ガス）燃焼式CO₂発生装置
（TC-2000S,（株）バリテック新潟）

については、海外または日本で古くから研究され、その有効性が示されている (Mortensen, 1987; Pooter, 1993; 川城, 2009; 川島, 1993). 日本においては、イチゴ‘女峰’や‘とよのか’などを用い、CO₂濃度を 750~1000 ppm 程度で施用することにより CO₂無施用と比較して増収した報告がある (川島ら, 1991a). しかし、佐賀県で育成され、全国的に栽培されているイチゴ‘さがほのか’の光合成や光合成産物の転流特性などは明らかにされておらず、最適なハウス内 CO₂濃度も不明である. また、CO₂施用を行う場合、外気より高い濃度で施用すると換気部が開いたときに外気との濃度勾配により、ハウス内の CO₂がハウス外へ流出し、コスト増大の他、環境への負荷も懸念される. このため、佐賀県のイチゴ生産では、外気より高濃度での CO₂施用は普及しておらず、1時間に1回、15~30分間タイマーで CO₂を施用することによってハウス内 CO₂濃度が外気の CO₂濃度 (約 400 ppm) を下回らないようにする制御が行われている. そこで、本章では、換気にもなう CO₂流出を考慮した CO₂濃度制御によるイチゴ‘さがほのか’の収量、品質および収益性の向上の可能性について検証し、さらに‘さがほのか’の CO₂濃度に対する生理的反応を明らかにするため、光合成および転流特性について検討した.

次に第2章では、湿度がイチゴ‘さがほのか’の光合成速度に及ぼす影響について検証を行った. 相対湿度は、施設園芸品目のトマトなどにおいて成長速度や収量に影響を及ぼす大変重要な環境要因であることが報告されている (Mortensen, 1986; Barker, 1990). キュウリではこれまでに、相対湿度を高めると葉の周辺の風速が高まっても光合成速度や気孔開度を維持しやすく、萎れにくいことが報告されている (矢吹ら, 1970). イチゴはキュウリより葉が厚く萎れにくいいため、実際の栽培現場ではキュウリのように繊細なハウス内湿度管理が行われていない. しかしながら、イチゴの葉が萎れていなくても、相対湿度の影響により気孔開度が小さくなり光合成速度が低下している可能性がある. 近年、午前中の温度を高め的一定に保つ従来の方法に代わって、徐々に上昇させるオランダ型温度

管理が提唱されており、この温度管理は相対湿度の急変を防ぐとされている（斉藤，2014）。そこで第3章では、'さがほのか'の光合成特性を解明するため、急激な相対湿度の変化が、イチゴ'さがほのか'の光合成速度に及ぼす影響について検討した。

さらに、第3章では、昼および夜の温度が光合成産物の転流・分配に及ぼす影響について安定同位体炭素 ^{13}C を用いた試験によって検討した。生産現場では CO_2 を施与しても茎葉は繁茂するが増収しない等の事例があり、光合成産物の果実への転流を促進する技術開発が求められている。これまでに、トマトでは、約 33°C までは温度が高いほど果実への転流が促進されることが報告されている（吉岡ら，1986）。イチゴでは、日平均温度 $15\sim 25^\circ\text{C}$ において、平均温度が 15°C より 20°C で果実の発育および成熟が早いことが報告されている（熊倉・穴戸，1994b）。しかしながら、北部九州の厳寒期におけるイチゴ施設内では日平均温度が 15°C 未満となり、このような条件下における温度と光合成産物の転流・分配の関係は不明である。そこで第3章では、北部九州の厳寒期において、温度制御により果実への転流・分配を促進する方法を開発するため、イチゴ'さがほのか'に ^{13}C を施与し、昼温および夜温と光合成産物の転流・分配の関係について調査した。

最後に、第4章では、冬季における日中の加温がイチゴ'さがほのか'の収量、光合成および ^{13}C -光合成産物の転流・分配に及ぼす影響について検討した。第3章で夜より日中の温度がイチゴの果実肥大や成熟に影響が大きいことが明らかになった。また、トマトでは、北部九州の促成作型において1~2月の日中にハウス内の気温を 20°C に加温し、昼温を高めることで、果実品質が向上し（龍・井手，2014）、商品果収量が増加することが明らかにされている（龍ら，2016）。日中の生育適温は、トマトでは $20\sim 27^\circ\text{C}$ であるのに対し、イチゴでは $18\sim 25^\circ\text{C}$ とやや低い（伊達，2012）。そこで本試験では、日中の加温温度を 18°C に設定し、北部九州の冬季イチゴ栽培において日中加温が光合成、転流および収量へ及ぼ

す影響を検証した。なお、第4章では、第1章で増収効果の高かった換気に応じたCO₂濃度800 ppm施用、第2章で明らかになった相対湿度管理、第3章で明らかになった日中温度管理を取り入れ、総合的な環境制御によるイチゴ高収量栽培について検討した。

本論文は、イチゴ生産の基盤となる光合成および光合成産物の転流・分配特性等の生理生態を解明し、その特性に応じた環境制御条件下でのイチゴの生育、収量および経済性を検証することにより、九州北部の冬季イチゴ栽培における生産力の向上を目指したものである。

第 1 章 CO₂ 濃度がイチゴ‘さがほのか’の収量，光合成速度および光合成産物の 転流・分配に及ぼす影響

緒言

九州北部は，西南暖地帯にありながら冬季の日射量が少ない地域であり（田中ら，1987），12～2月の厳寒期において，1日の全天日射量が $5.0 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ に満たない日が連続する．このような低日射下ではハウス内気温の上昇が十分ではないため果実の成熟が進まず，果実品質低下や減収の要因となっている．その一方で，厳寒期においても快晴条件下では日射量が $10.0 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ を超える日もあり，様々な気象条件に対応しながら，効率的に収量を向上させる栽培技術開発が求められている．緒論で述べたとおり，これまでに CO₂ 施用が植物に与える影響については，海外や日本で研究がなされており，その有効性が示されている．しかし，CO₂ 施用を行う場合，外気より高い濃度で施用すると換気部が開いたときに外気との濃度勾配により，ハウス内の CO₂ がハウス外へ流出し，CO₂ が無駄になりコストが増加することが懸念される．そこで，本章では，九州北部地域の気象条件下におけるイチゴの生産性向上を目的とし，コストや環境に配慮した CO₂ 施用について試験を実施した．本章では換気と連動させた CO₂ 制御，すなわち，無換気時には高濃度での施用を，換気時には外気と同程度の濃度での施用を行い，イチゴ‘さがほのか’の収量，品質および収益性に及ぼす影響を調査した．また，CO₂ 施用に対するイチゴ‘さがほのか’の生理的反応を明らかにするため，CO₂ 濃度と光合成速度の関係および CO₂ 濃度が光合成産物の転流および分配に及ぼす影響について検討した．

材料および方法

1-1. 収量, 果実 Brix および経済性

実験は, 2015 年 9 月 15 日~2016 年 6 月 30 日(2015 年定植)および 2016 年 9 月 16 日~2017 年 6 月 30 日(2016 年定植)に実施した. 佐賀県農業試験研究センター内に設置した間口 8 m, 奥行 12 m, 軒高 4 m の硬質フィルムハウスの 2 室を供試した. 材料として, 佐賀県で育成され全国で広く栽培されているイチゴ‘さがほのか’を用い, 高設ベンチ(矢崎化工株式会社製)に株間 20 cm, 2 条植えて定植した. 高設栽培の培地にはヤシがらを用い, 大塚 A 処方を 200~500 倍 (EC 0.6 ~1.05 mS · cm⁻¹) に希釈して施用した. 灌水は, 日射に応じて 1 株当たり 50 ~420 mL を 2~6 回 · d⁻¹ に分け統合環境制御装置(マキシマイザー, PRIVA)により日射比例制御で行った. ハウス内環境の制御および測定は, 統合環境制御装置で行った. 換気の設定温度は, 7~12 時を 27°C, 12~17 時を 24°Cとした. 3 月以降は相対湿度 50%以下でミスト(KYZ75A-4IK, 霧のいけうち)を噴霧した. 暖房にはヒートポンプ(NGP1010T-N, ネポン)を用い, 夜間の最低温度が 5°Cを下回らないように加温した. 15 時以降は, 外気温が 7°C以下の時, 保温カーテンを使用した. ハウス内 CO₂ 濃度は, 統合環境制御装置により制御および測定した. 高設ベンチの地表面から 20 cm 上に CO₂ 濃度センサを設置し, 株元に設置した多孔質チューブ(WTR100, 大和実業)で液化ガスにより CO₂ を施用した. CO₂ 濃度 400 ppm 区では常時 400 ppm 以上となるように制御し, 800 ppm 区では, 無換気時 800 ppm 以上, 換気時 400 ppm 以上となるように制御した(図 1-1). 2015, 2016 年定植のいずれも 11 月 20 日~翌年 5 月 10 日の期間, 8~17 時の時間帯に CO₂ 施用を行った. CO₂ 濃度, CO₂ 施用状況, 換気開度, 日射量, ハウス内気温については, 統合環境制御装置を用い 5 分間隔で測定した. このうち, CO₂ 濃度, 日射量, ハウス内気温は日の出から日の入りの日中平均値を日ごとに算出した後, 10 日ごとに平均し, 旬別平均値を算出した. 植物体の生育は, 草丈ならびに完全展開第 3 葉の中央小葉における葉長および葉幅を 2 週間おきに 1 区 5 株,

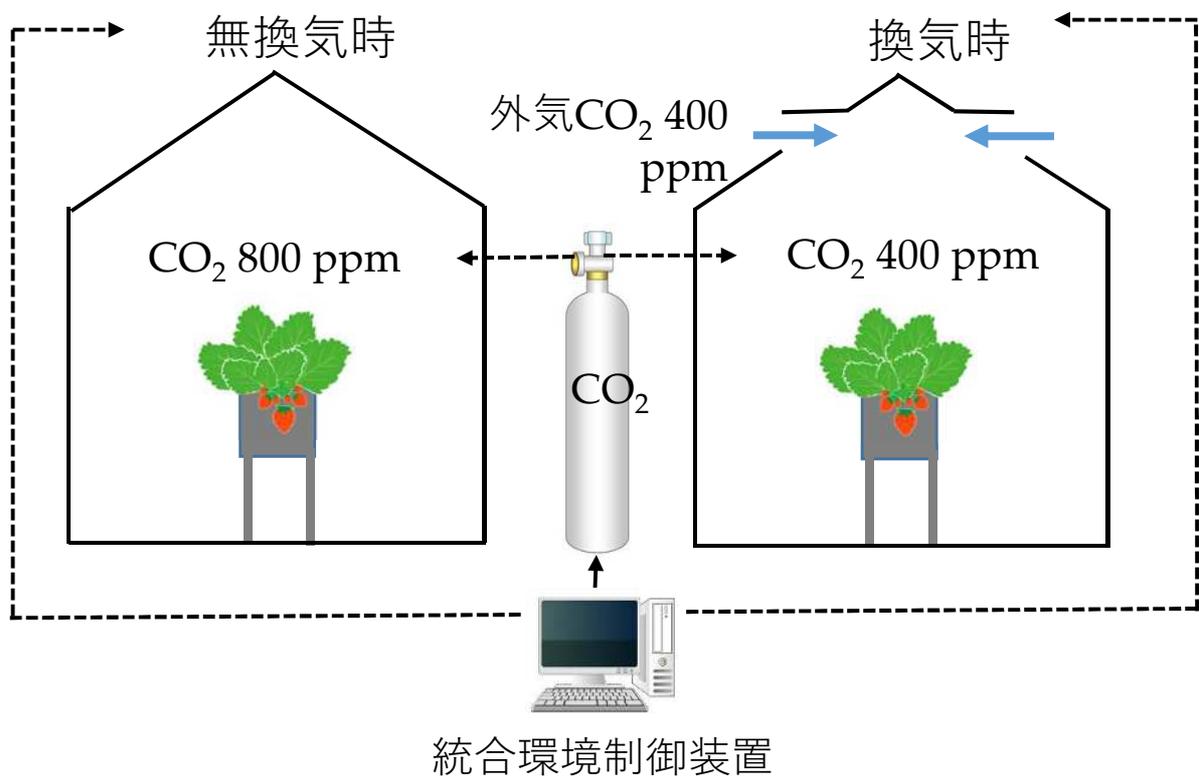


図1-1 800 ppm区における換気に応じたCO₂施用のイメージ図
換気時は400 ppm無換気時は800 ppmに制御

2 反復で測定した。果実の収穫は、週 3 回行い、8.0 g/個以上で奇形でないものを商品果とし、果数と果重を 1 区当たり 10 株、4 反復で調査した。果実 Brix は糖酸度計 (PAL-BXIACID4, ATAGO) を用いて 1~5 月の期間に 2 週間おきに 1 区 10 果、2 反復で測定し、1 か月毎の平均値を算出した。CO₂ 施用における経済性評価は、試験に CO₂ 濃度 400 ppm 区および 800 ppm 区で施用した CO₂ 使用量から試算した。試算は、佐賀県内に普及している CO₂ 発生装置を用い、CO₂ のハウス内への拡散方法を循環扇であると仮定して行った。循環扇拡散による CO₂ 使用量は、株元のチューブからの局所施用の約 146% (田川ら, 2015) として試算した。また、2015 および 2016 年定植の商品果収量と JA さが年間平均単価より粗収益および出荷経費を算出した。次に CO₂ 施用経費は、佐賀県内で普及している LPG 燃焼式 CO₂ 発生装置を使用した場合について試算した。CO₂ 施用の機材費として LPG 燃焼式 CO₂ 発生装置レンタル料および 800 ppm 区では温度連動型 CO₂ 濃度コントローラを使用し減価償却期間 7 年として試算した。燃料費は、LPG を 350 円・m⁻³ として試算した。最後に粗収益から出荷経費および CO₂ 施用経費を差し引いたものを収益の差として算出した。

1-2. 光合成速度

光合成速度は、2015 年 12 月~2016 年 1 月および 2017 年 1 月に、携帯型光合成蒸散測定装置 (LI-6400, LI-COR) を用いて、ハウス内 CO₂ 濃度 400 ppm 条件下で測定した。測定には、完全展開第 3 葉の中央小葉を供試し、4 株を用いて 4 反復とした。CO₂ 濃度と光合成速度の関係は、チャンバー内の設定を光量子束密度 1000 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、相対湿度 70%、葉温 20°C、CO₂ 濃度 0~2000 ppm として測定した。光量子束密度と光合成速度の関係は、チャンバー内の設定を光量子束密度 0~1500 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、相対湿度 70%、葉温 20°C、CO₂ 濃度 400 ppm および 800 ppm で測定した。

1-3. 光合成産物の転流・分配

光合成産物の転流・分配に関する調査では植物体を解体する必要があるため、1株ずつポットで栽培した‘さがほのか’を供試した。2020年9月25日に直径18cmポリポットに佐賀苺高設培土を充填して‘さがほのか’を定植し、1株当たりIB化成(N:P:K=10:10:10, N-75mg/粒)を3粒施用した。定植以降は、1か月毎に同量のIB化成を追肥した。佐賀県農業試験研究センター内の硬質フィルムハウスで第一次腋果房頂果の開花前まで栽培し、2020年12月11日に人工気象器(LPH-411PFQDT-SPC, 株式会社日本医科器械製作所)内にポットを移した。試験区は、明期中のCO₂濃度400ppm, 800ppmの2区を設定した。CO₂濃度以外の人工気象器内の設定は両区とも同様とし以下のとおりとした。明期は6:00~18:00とし、暗期は18:00~22:00および2:00~6:00とした。22:00~2:00は、慣行栽培に準じ電照時間とし暗期を中断した。明期における葉面の光量子束密度は、冬季のハウス内光強度を想定した約250 μmol・m⁻²・s⁻¹とし、暗期中断中は、160 μmol・m⁻²・s⁻¹とした。温度は、6:00~7:00を15°C, 7:00~8:00を20°C, 8:00~16:00を25°C, 16:00~17:00を20°C, 17:00~18:00を15°C, 18:00~6:00を10°Cとした。相対湿度は1日を通して70%に設定した。試験は、植物体を人工気象器に入庫し3日後の第一次腋果房頂果開花時から開始し、同果開花時、開花12日後(緑熟期)、開花24日後(白熟期)の9:00~10:00に¹³CO₂を施与した。植物体は葉数・果数をそれぞれ7枚、7果に揃えたソース・シンクユニットとした。チャック付きポリエチレンバッグ内に植物体(展開第3~7葉)と安定同位体標識炭酸バリウム(¹³Cバリウム)0.5gの入った遠沈管を入れて密閉し、ポリエチレンバックの外から注射器で遠沈管内の¹³C炭酸バリウムに10%乳酸を10mL加えて、展開第3~7葉に¹³CO₂を供給し(図1-2)、¹³CO₂施与開始1時間後にポリエチレンバッグを開封した。¹³CO₂施与開始



図1-2 人工気象器内における $^{13}\text{CO}_2$ 施与時の様子

から 24 時間後に株をサンプリングした。1 回当たりのサンプリング数は 1 区 4 株とした。サンプリング部位は、フィード葉（展開第 3～7 葉）、新葉（展開第 1～2 葉）、果梗、果実（第 1 果：頂果、第 2 果：2, 3 番果、第 3 果：4～7 番果）、クラウン、根とした。乾燥後、乾物重を測定し、粉碎した試料を安定同位体比質量分析計（IntegraCN, Sercon Ltd.）で分析した。分析で得られた各部位の ^{13}C 量より以下の計算式（宍戸, 2016）で転流率および分配率を算出した。なお、 ^{13}C -光合成産物の呼吸による消耗は無視した。

転流率 = (フィード葉を除いた植物体全部位から回収された ^{13}C 量 / 全植物体から回収された ^{13}C 量) $\times 100$

分配率 = (各部位から回収された ^{13}C 量 / フィード葉を除いた植物体全部位から回収された ^{13}C 量) $\times 100$

結果

1-1. CO_2 濃度が収量、果実 Brix および経済性に及ぼす影響

試験を実施した 2 か年の日中(日出から日入)における CO_2 濃度の旬別推移は、400 ppm 区では 400 ppm 程度で推移した。一方 800 ppm 区では、日射量の減少、外気温の低下により換気部を閉じ始める 11 月下旬頃から徐々に日中平均 CO_2 濃度が上昇し、換気部を閉じる時間が長くなる 12～2 月に日中平均 CO_2 濃度が高く推移した(図 1-3)。晴天日および曇天日のそれぞれ代表的な 1 日における CO_2 濃度の推移と換気および CO_2 施用状況を図 1-3 に示した。400 ppm 区では、晴天日、曇天日ともに CO_2 濃度が 400 ppm を下回らずに、ほとんど CO_2 施用機は稼働しなかった(図 1-4(a)(d))。一方 800 ppm 区では、晴天日において換気開度が

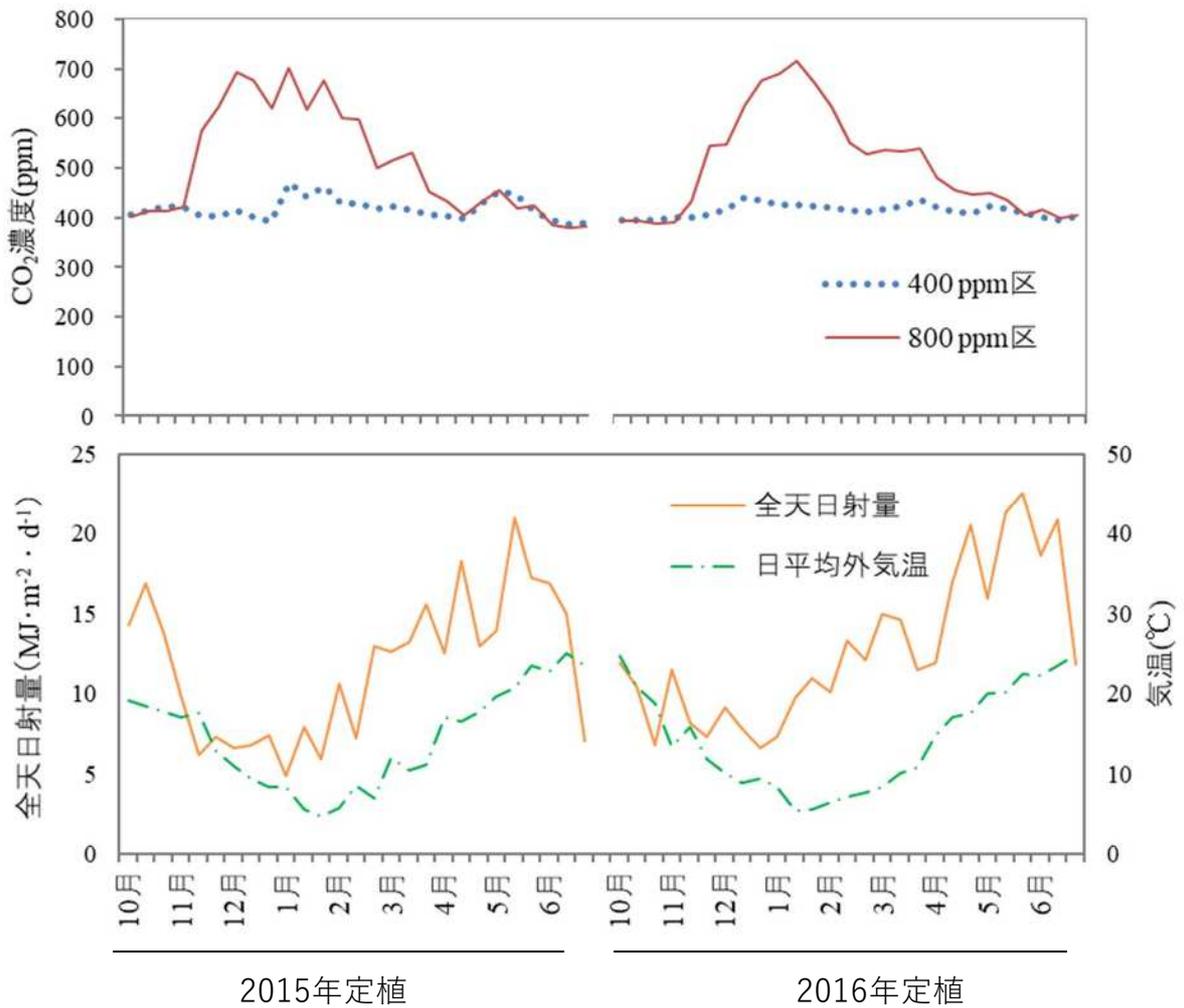


図1-3 CO₂濃度試験ハウス内における日中^z平均CO₂濃度^y, 全天日射量, 日平均外気温の推移

^z 日中は日出～日入

^y CO₂濃度を400 ppm区は常時400 ppm以上, 800 ppm区は換気時400 ppm 無換気時 800ppm以上に制御した

晴天日

曇天日

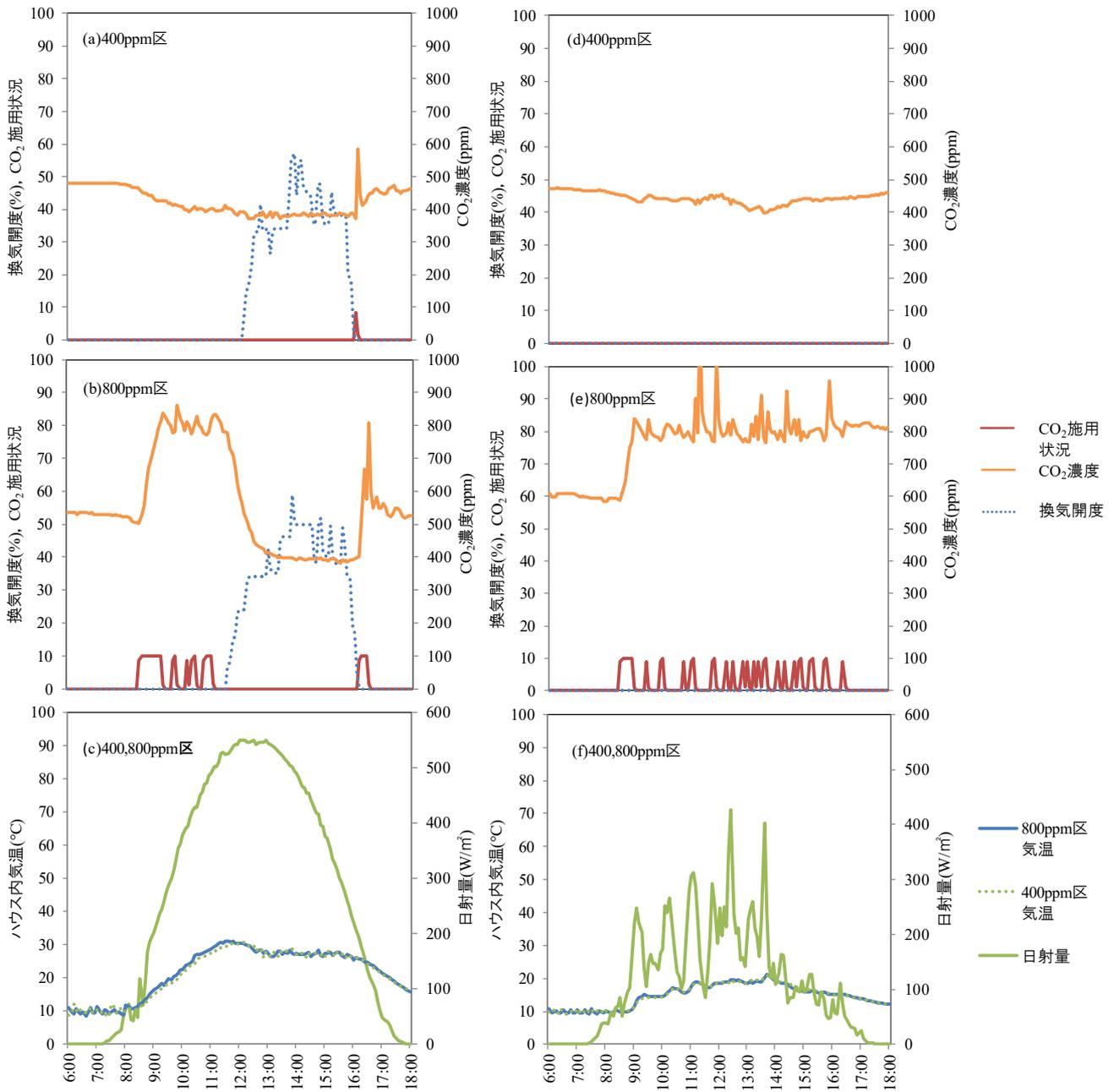


図1-4 晴天日(a,b,c)^zおよび曇天日(d,e,f)における換気開度,CO₂施用状況^y, CO₂濃度^xおよびハウス内気温,日射量の推移

^z 晴天日(a,b,c)は2017年1月28日, 全天日射量14.79 MJ · m⁻² · d⁻¹

曇天日(d,e,f)は2017年1月12日, 全天日射量5.40 MJ · m⁻² · d⁻¹

^y CO₂施用状況はON : 10,OFF : 0

^x CO₂濃度を400ppm区は常時400ppm以上, 800ppm区は換気時400ppm無換気時800ppm以上に制御した

0%で換気部が閉じた状態となる午前中と夕方のみ CO₂ を施用し(図 1-4 (b)), この日の日中平均 CO₂ 濃度は 563.9 ppm となった. 800 ppm 区の曇天日は, ハウス内気温が換気温度に達しないため換気開度が 1 日中 0%となったことから, 日中も CO₂ が 800 ppm 以上になるよう施用し続けたことにより(図 1-4(e)(f)), この日の日中平均 CO₂ 濃度は 780.0 ppm となった. ハウス内気温は, 晴天日, 曇天日ともに設定どおり 400 ppm 区, 800 ppm 区の両者で同様の推移を示した(図 1-4(c)(f)).

草丈および葉長×葉幅の推移は, CO₂ 濃度 400 ppm 区と 800 ppm 区において, 大半の時期で有意差が認められなかった(図 1-5). また, CO₂ 濃度が商品果収量に及ぼす影響では, CO₂ 濃度 400 ppm 区と 800 ppm 区で商品果率に有意差は認められなかった(表 1-1). 一方, 両年次とも 800 ppm 区において 400 ppm 区より, 商品果数, 平均果重が有意に増加し, 商品果収量が栽培期間を通して高く推移し, 全商品果収量は約 25%増加した. さらに, 果実 Brix は, CO₂ 濃度 800 ppm 区で 400 ppm 区と比較して 1~3 月において高くなる傾向にあった(図 1-6).

CO₂ の使用量は 400 ppm 区で 57.1 kg/a, 800 ppm 区で 288.1 kg/a となり, 800 ppm 区の方が 231.0 kg/a 多かった. 粗収益は, 400 ppm 区で 484 千円/a, 800 ppm 区で 616 千円/a であり, その差は 125 千円/a であった. 一方, CO₂ 施用経費は, LPG を使用し 800 ppm 区では温度連動型 CO₂ 濃度コントローラを使用したものとして試算したところ, 両区の差は機材費で 2.9 千円/a, 燃料費で 12.1 千円/a と試算された. これらの金額より, 粗収益から出荷経費と CO₂ 施用経費を差し引いた収益の差は 83.4 千円/a と試算された(表 1-2).

1-2. CO₂ 濃度が光合成速度に及ぼす影響

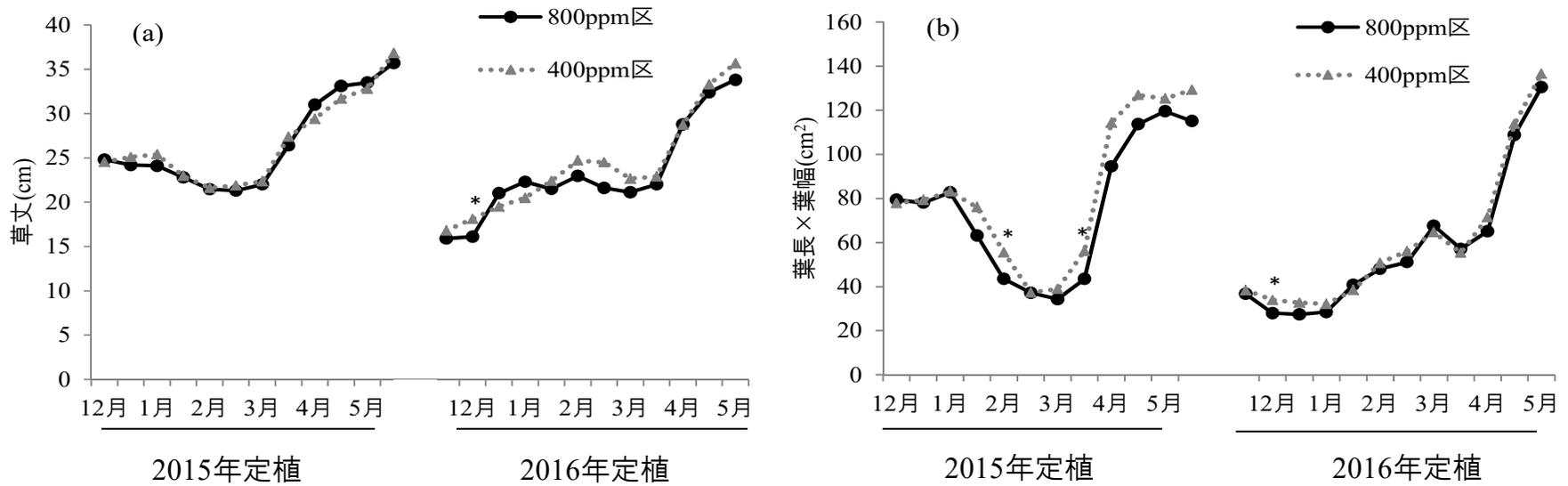


図1-5 異なる濃度のCO₂施用^zがイチゴ^さがほ^のかの生育に及ぼす影響^y(a草高, b葉長×葉幅)

^z CO₂濃度を400 ppm区は常時400 ppm以上, 800 ppm区は換気時400 ppm無換気時800 ppm以上に制御した

^y t検定により*は5%水準有意差有り

表1-1 異なる濃度のCO₂施用^zがイチゴ‘さがほのか’の商品果数, 平均果重, 商品果率, 商品果収量に及ぼす影響^y

年次	試験区	商品果数 (個/株)	平均果重 (g/個)	商品果率 (%)	商品果収量(g/株)				
					11~12月	1~2月	3~4月	5~6月	合計
2015年	400 ppm区	38.6	13.4	81.4	74.6	126.2	179.0	135.6	515.4
	800 ppm区	48.0	14.4	87.6	96.5	171.4	215.3	193.4	676.6
2016年	400 ppm区	35.4	13.5	78.8	50.3	124.6	158.1	143.5	476.4
	800 ppm区	41.4	13.9	80.8	67.1	129.0	186.7	193.0	575.8
年次		*	ns	ns	**	*	*	ns	*
CO ₂ 濃度		**	*	ns	*	*	**	**	**
交互作用		ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns

^z CO₂濃度を400 ppm区は常時400 ppm以上, 800 ppm区は換気時400 ppm無換気時800 ppm以上に制御した

^y **, *は2元配置分散分析によりそれぞれ1%, 5%水準で有意差あり, nsは有意差なし

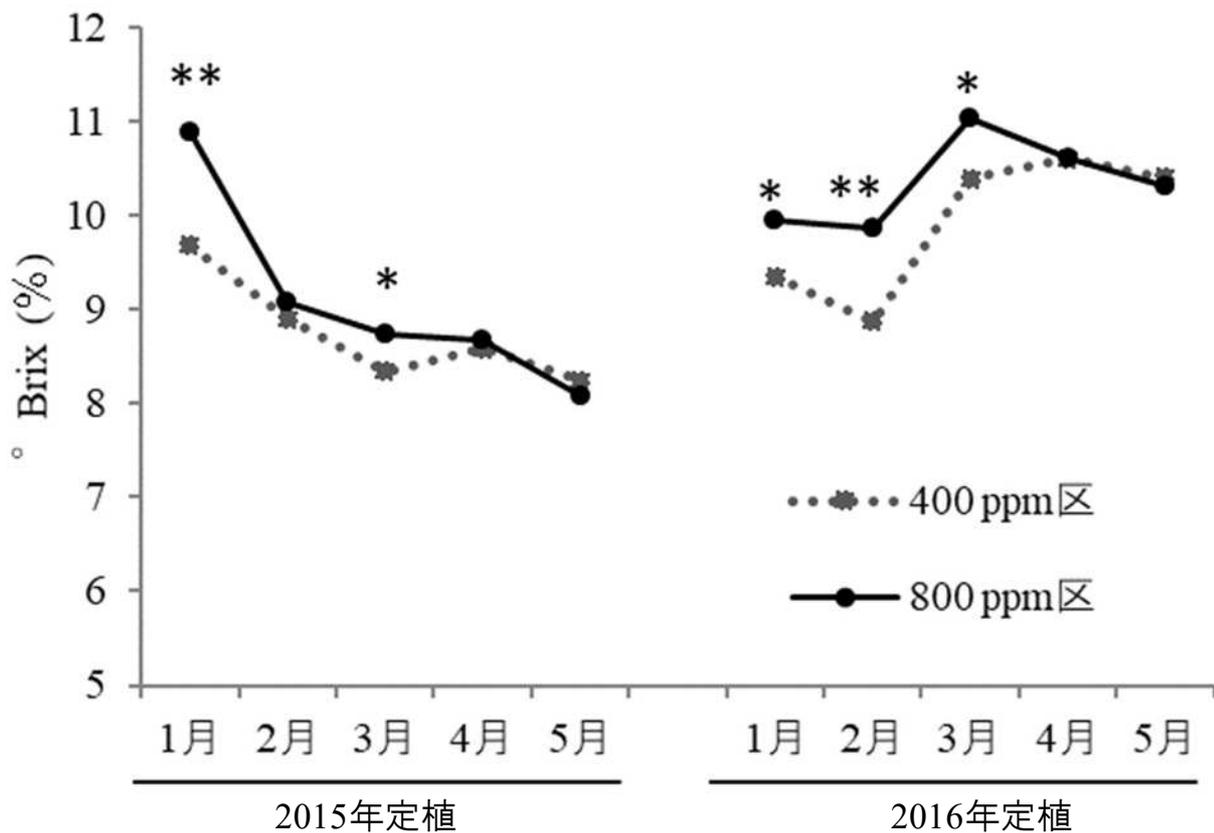


図1-6 異なる濃度のCO₂施用^zがイチゴ'さがほのか'のBrixの推移に及ぼす影響^y

^z CO₂濃度を400 ppm区は常時400 ppm以上、800 ppm区は換気時400 ppm 無換気時800 ppm以上に制御した

^y t検定により*は5%水準、**は1%水準で有意差有り

表1-2 異なる濃度のCO₂施用^zで栽培したイチゴ‘さがほのか’における経済性

試験区	CO ₂ 使用量	粗収益 ^z	出荷経費 ^y	CO ₂ 施用経費(円/a)		収益の差
	(kg/a)	(円/a)	(円/a)	機材費 ^x	LPG燃料費 ^w	(円/a)
		(a)	(b)	(c)	(d)	(a-b-c-d)
400 ppm区	57.1	484,783	105,683	1,500	2,997	—
800 ppm区	288.1	610,693	133,131	4,400	15,123	—
差	231.0	125,910	27,448	2,900	12,126	83,436

z CO₂濃度を400 ppm区は常時400 ppm以上、800 ppm区は換気時400 ppm無換気時800 ppm以上に制御した

x CO₂使用量は循環扇による拡散とし、局所施用による使用量の146%の値で試算

y 商品果収量および2015,2016年JAさが年間平均単価より試算

w 出荷経費は253.7円・kg⁻¹で算出(JAさが調べ)

v LPG燃烧式CO₂発生装置レンタル料. 800 ppm区は温度連動型CO₂濃度コントローラ（減価償却期間7年）を加えて試算

u LPGを350円・m⁻³として試算

CO₂濃度に対する光合成速度は、CO₂濃度が800 ppmまでは急激に増加し、800 ppm以上では緩やかに増加した(図 1-7)。また、CO₂濃度800 ppmでの光合成速度は、400 ppmの時の約1.6倍程度に上昇した。光量子束密度に対する光合成速度は、CO₂濃度400 ppm、800 ppmの両者ともに、光量子束密度300 μmol・m⁻²・s⁻¹までは急激に上昇し、300 μmol・m⁻²・s⁻¹以上では緩やかに上昇した。CO₂濃度400 ppmに比較して800 ppmの光合成速度は、光量子束密度100~1500 μmol・m⁻²・s⁻¹において有意に高く、その割合は、100 μmol・m⁻²・s⁻¹では137%であったのに対し、1500 μmol・m⁻²・s⁻¹では153%であり、CO₂濃度800 ppmの方が強光時における光合成速度の上昇率が大きかった(図 1-8)。また、光量子束密度300 μmol・m⁻²・s⁻¹は曇りの日、1000 μmol・m⁻²・s⁻¹は晴れの日ハウスの内における光強度に相当するが、光量子束密度が300 μmol・m⁻²・s⁻¹でCO₂濃度が800 ppmの時の光合成速度は、光量子束密度が1000 μmol・m⁻²・s⁻¹でCO₂濃度が400 ppmの時と同程度であった。

1-3. CO₂濃度が光合成産物の転流・分配に及ぼす影響

人工気象器内でCO₂濃度400 ppmと800 ppm条件下における部位別乾物重を比較した。その結果、第一次腋果房の開花24日後において、CO₂濃度400 ppmよりも800 ppmにおいて果実第1果乾物重が有意に高い値を示した(表 1-3)。また、葉、果房およびクラウンを合計した地上部乾物重は、同果開花時、開花12日後と比較し開花24日後において高い値を示し、さらにCO₂濃度400 ppmより800 ppmで有意に高い値となった。光合成産物の転流率は、開花24日後において開花時および開花12日後の20%以上高い値となったが、CO₂濃度の影響は認められなかった(図 1-9)。開花後日数が増加するにつれ果実への分配率が高くなり、開花12日後では30%程度であった果実への分配率が開花24日後にお

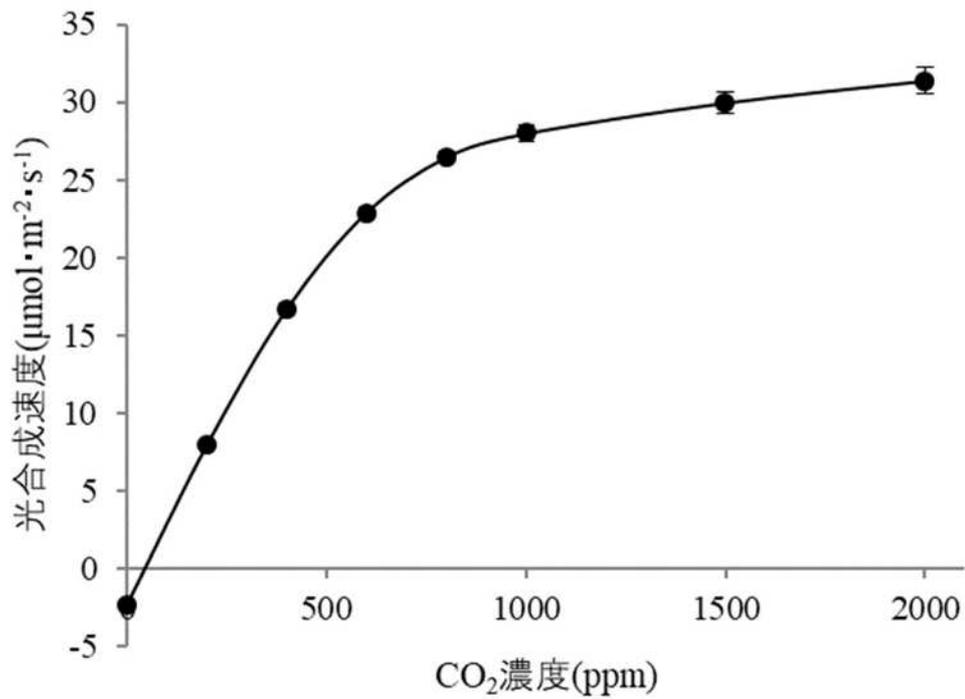


図1-7 イチゴ'さがほのか'におけるCO₂濃度^zと光合成速度の関係^y
^zチャンバー内空気のCO₂濃度
^y測定条件は光合成光量子束密度1000 μmol · m⁻² · s⁻¹, 葉温20°C,
 チャンバー内空気の相対湿度約70%
 誤差線は標準誤差を示す

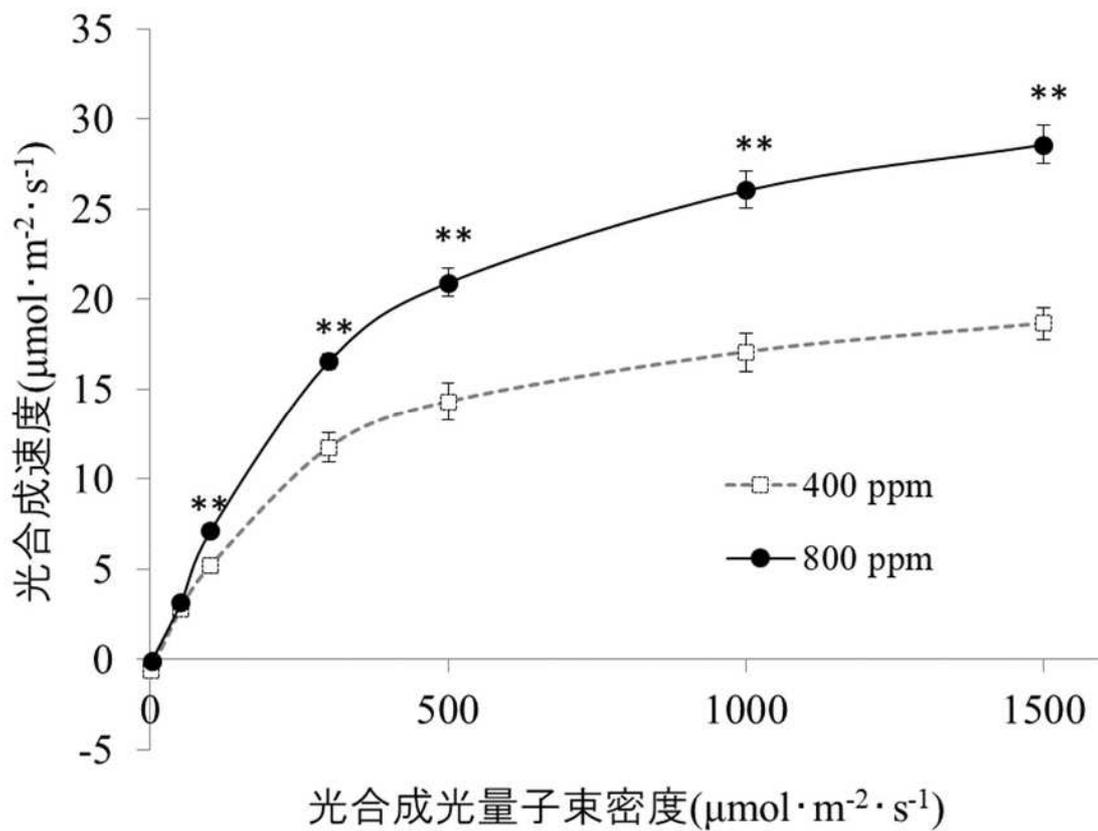


図1-8 イチゴ'さがほのか'における光量子束密度と光合成速度の関係^z

^z t検定により**は1%水準で有意差有り

誤差線は標準誤差を示す。

測定条件は、葉温20°C，チャンバー内空気の相対湿度70%

表1-3 異なるCO₂濃度（400, 800 ppm）条件下におけるイチゴ‘さがほのか’の第一次腋果房頂果開花0,12および24日後の部位別乾物重

試験区		CO ₂ 濃度	葉（第3～7葉）	新葉（第1～2葉）	葉合計 ^z	クラウン	地上部合計 ^x	根
時期								
開花時	（処理開始時）	-	6.90 ± 0.25 a	3.36 ± 0.24 a	10.26 ± 0.19 ab	2.42 ± 0.12	13.48 ± 0.24 c	6.86 ± 0.41 cd
開花12日後	（処理12日後）	400 ppm	7.52 ± 0.25 a	2.21 ± 0.23 c	9.73 ± 0.46 ab	2.79 ± 0.17	14.50 ± 0.31 c	8.62 ± 0.53 bc
		800 ppm	7.53 ± 0.17 a	1.96 ± 0.05 c	9.49 ± 0.19 ab	2.63 ± 0.16	14.38 ± 0.20 c	9.74 ± 0.88 ab
開花24日後	（処理24日後）	400 ppm	6.60 ± 0.20 a	2.23 ± 0.15 bc	8.83 ± 0.35 b	2.75 ± 0.06	17.47 ± 0.75 b	10.77 ± 0.26 ab
		800 ppm	7.66 ± 0.39 a	2.99 ± 0.15 ab	10.66 ± 0.47 a	2.88 ± 0.13	20.18 ± 0.66 a	11.07 ± 0.64 a

表1-3 （続き）

試験区		CO ₂ 濃度	果実（第1果）	果実（第2果）	果実（第3果）	果梗	果房合計 ^y	全体合計 ^w
時期								
開花時	（処理開始時）	-	-	-	-	-	0.81 ± 0.03 c	20.34 ± 0.62 cd
開花12日後	（処理12日後）	400 ppm	0.56 ± 0.06 c	0.39 ± 0.05 b	0.27 ± 0.04 b	0.75 ± 0.08 b	1.97 ± 0.20 bc	23.12 ± 0.36 bc
		800 ppm	0.63 ± 0.04 c	0.47 ± 0.04 b	0.34 ± 0.02 b	0.82 ± 0.05 b	2.27 ± 0.15 b	24.12 ± 0.90 b
開花24日後	（処理24日後）	400 ppm	2.35 ± 0.14 b	1.44 ± 0.19 a	0.93 ± 0.14 a	1.18 ± 0.13 a	5.90 ± 0.46 a	28.69 ± 0.82 a
		800 ppm	2.87 ± 0.12 a	1.56 ± 0.18 a	1.06 ± 0.10 a	1.16 ± 0.03 a	6.65 ± 0.36 a	31.25 ± 0.95 a

^z 葉合計＝葉+新葉

^y 果房合計＝果実（第1～3果）+果梗

^x 地上部合計＝葉合計+果房合計+クラウン

^w 全体合計＝地上部合計+根

^v 数値は5個体の平均値±標準誤差を示す

^u 同一カラムの英数字は異なる文字間にTukeyの検定により5%水準で有意差があることを示す

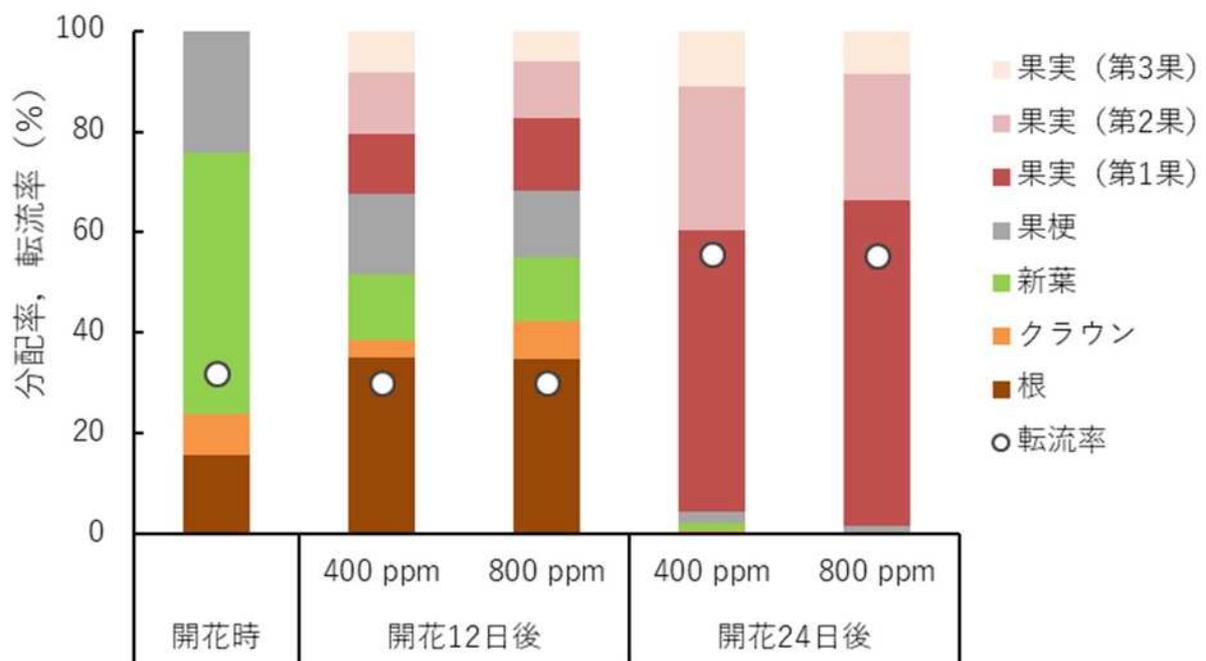


図1-9 CO₂濃度が第一次腋果房頂果開花0, 12および24日後の¹³C-光合成産物の転流率, 分配率に及ぼす影響

分配率 = (各部位から回収された¹³C量/フィード葉を除いた植物体全部位から回収された¹³C量) × 100
 転流率 = (フィード葉を除いた植物体全部位から回収された¹³C量/全植物体から回収された¹³C量) × 100

いては 90%以上となった。また、開花 12, 24 日後ともに CO₂ 濃度 800 ppm において 400 ppm より果実第 1 果の分配率が高い値を示した。

考察

施設園芸における CO₂ 施用は、閉鎖環境内へ CO₂ を補給する形で行われるのが一般的であり、換気が行われている状態で CO₂ を施用すると多くの CO₂ が屋外へ散逸する。特に日本の東海、西南暖地では、冬季でも日中には温度が上昇するため換気の必要があり、CO₂ 施用に適した時間帯が限られる。その結果、CO₂ 施用の効果を十分に得られないことが多く、そのことが海外と比べて日本で CO₂ 施用が広く普及しない要因のひとつとなっている（畔柳，2014）。佐賀県は、西南暖地にありながら冬季の日射量が低い日が多い一方で、晴天となれば長時間の換気が必要となる（図 1-4）。そこで本試験では、外気より高い CO₂ を無駄なく施用するため、換気と連動し CO₂ 施用濃度を自動で制御する方法、すなわち換気部が閉じ、ハウス内が閉鎖環境となった時のみに CO₂ 施用濃度を高める方法について検討した。

2015 年定植では、12～1 月の旬毎の平均全天日射量が 4.9～7.9 MJ・m⁻² と少なく、外気温も低く推移したため、換気部が閉じている時間が長く、12～1 月の CO₂ 濃度が高めに推移した。2016 年は、12～1 月の全天日射量が 6.6～11.0 MJ・m⁻² と、2015 年より多く、換気部が閉じている時間が短かったことにより CO₂ 濃度が 2016 年よりやや低く推移した（図 1-3）。無換気閉に 800 ppm、換気時に 400 ppm 以上とする 800 ppm 区の CO₂ 施用方法では、晴天日と曇雨天日でハウス内 CO₂ 濃度が異なっており（図 1-4）、特に 12～2 月の厳寒期において、常時 400 ppm 施用の 400 ppm 区よりも日中平均 CO₂ 濃度が高く推移した。一方、400 ppm 区に対する 800 ppm 区の商品果収量は、2015 年は 130%であったのに対し、2016 年は 120%であり、平均 CO₂ 濃度を高く保つことができた 2015 年に高い増収効

果が得られたと考えられた。川島ら(1991b)によると 高濃度の CO₂ 施用は、ハウスを閉め切る必要があるため、低温・寡日照地域に適した技術とされている。佐賀県のように冬季に寡日照となる地域は、施設園芸に不利な気象条件と思われてきたが、換気時間が短く CO₂ の高濃度施用が可能という面では、施設園芸に有利な気象条件であるとも考えられる。換気に応じた CO₂ 制御を実施した本試験結果は、冬季寡日照となる地域で有効に活用できることが推察される。

イチゴでは栄養成長期に CO₂ 濃度を 300 ppm から 900 ppm まで上昇させると葉や根の乾物重が有意に増加することが報告されている(Chen ら, 1997a)が、本試験では、草丈および完全展開第 3 葉における葉長×葉幅の推移に、CO₂ 濃度による差は認められなかった(図 1-5)。果実着色期における同化産物の分配について、転流分の 90%程度が果実に分配されることが報告されている(西沢ら, 1988)。本試験では、CO₂ 施用期間が果実肥大期であることから、CO₂ 濃度の上昇により増加した同化産物が主に果実へ分配されたため、草丈や葉の大きさには差が認められなかったことが推察された。一方、商品果数および商品果収量は有意に増加した(表 1-1)。これまでに、イチゴに対する CO₂ 施用の効果として、果数や一果重の増加による増収が報告されている(川島, 1991a; Chen ら, 1997b)。本試験の結果もこれらの報告と一致した。800 ppm 区における CO₂ 施用量は、4 月以降は換気時間が長くなり格段に減少したが、商品果収量は、栽培期間を通して 800 ppm 区の方が 400 ppm 区より有意に高かった。CO₂ 施用によるイチゴの増収効果は、同化量の確保による根の活性維持と、なり疲れの防止によるとされており(川島, 1991a)、本試験でも、冬季における CO₂ 施用の効果が 4 月以降の CO₂ 施用量減少期以降も継続したと考えられた。また、1~3 月期には CO₂ 濃度 800 ppm 区で 400 ppm 区よりも果実 Brix が高い傾向にあった(図 1-6)。CO₂ 施用によりイチゴ果実の糖含量が増加することはこれまでに報告されており(Peng ら, 2012; Chen ら, 1997b)、本試験の結果もこれらの報告と一致した。このことか

ら、高濃度の CO₂ 施用により光合成速度が上昇し、光合成産物がより多く生産されたことにより果実の糖含量が増加したと推察された。

本試験での CO₂ 使用量は 400 ppm 区において 57.1kg であったのに対し 800 ppm 区では 288.1 kg であった(表 1-2)。川島ら (1991a) によると棟高 2.8m の小型のハウスに CO₂ 濃度 750 ppm となるよう施用した場合、260~400 kg/10a の CO₂ が必要であった。本試験では、軒高 4.0 m、棟高 6.0 m の軒が高いハウスを使用したため、400 ppm 区では、ハウス内 CO₂ 濃度が 400 ppm を下回る頻度が少なく、CO₂ の使用量は少なかった。800 ppm 区では、ハウスの軒が高く空間が広いいため、CO₂ が拡散しやすく CO₂ 使用量が多く必要となると考えられるが、川島の報告の 260~400 kg/10a よりも少ない値である 197.3 kg/10a となった。その要因として、換気に応じた CO₂ 制御を実施したことが考えられた。近年、換気またはハウス内気温と連動して CO₂ 濃度を制御できる装置が施設園芸の生産現場に導入されつつあり(岩崎, 2015)、このような装置を活用することで、CO₂ の高濃度施用を実施しやすい環境となると考えられる。一方、本試験における実際の CO₂ 使用量は、400 ppm 区において 39.1 kg、800 ppm 区では 197.3 kg であった。本試験では、イチゴを 2 条に植え、条間中央部の株元に配置したチューブから CO₂ を施用した。経済性は、実施が容易である循環扇によるハウス内全体施用として試算したが、株元局所施用の方が CO₂ 使用量は少なくなる。Hidaka ら (2022) は、イチゴの CO₂ 施用方法について局所施用と循環扇のない全体施用を比較し、局所施用では全体施用より群落内 CO₂ 濃度が 100~200ppm 高くなること、燃料消費量が 27%低くなることを明らかにしている。Zhang ら (2022) は、同様に CO₂ の局所施用と全体施用を比較し、局所株元施用によりイチゴハウス内全体に CO₂ を均一かつ効率的に拡散できることを明らかにしている。また、Miyoshi ら (2017) は冬季において、Mochizuki ら (2022) は夏から秋のハウス換気が大きい時期において、局所施用ではイチゴ群落内の CO₂ 濃度を上昇させることができ増収効果があることを明らかにしている。このように、イチゴは植物体の草丈

が小さいため、株元のチューブより局所的に CO₂ を施用することで植物体近傍の CO₂ 濃度を上昇させ、より効率的に CO₂ 施用できると考えられる。

次に、CO₂ 濃度が‘さがほのか’の生理的反応を検証するため、CO₂ 濃度に対する光合成速度を測定した。その結果、CO₂ 濃度が 800 ppm 程度までは CO₂ 濃度の上昇にともない、光合成速度が急激に増加し、800 ppm での光合成速度は 400 ppm の時の 1.6 倍となった (図 1-7)。本研究では CO₂ 濃度 800~1000 ppm において‘さがほのか’の光合成速度が飽和する傾向にあったが、‘とちおとめ’でも同様の結果が報告されている (和田ら, 2010)。次に、光量子束密度に対する光合成速度を CO₂ 濃度 400 ppm と 800 ppm の条件下で比較した。光量子束密度と光合成速度の関係は、100 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上の光量子束密度において、CO₂ 濃度 400 ppm と比較し 800 ppm での光合成速度が有意に高い値を示したこと (図 1-8) から、冬季ハウス内における暗い曇りに相当する光強度でも CO₂ 濃度を高めることで光合成速度を高められると考えられた。これらのことから 400 ppm 区より 800 ppm 区の商品果収量が高かった要因として、光合成速度の上昇が影響しているものと考えられた。

さらに、高い CO₂ 濃度で光合成速度が高まった後の光合成産物の転流について CO₂ 濃度の影響を検証した。試験は、明期の CO₂ 濃度をそれぞれ 400 ppm と 800 ppm の一定とし、第一次腋果房の開花から白熟期までの 24 日間、人工気象器内で実施した。乾物重の変化を見ると、地上部合計重および果実第 1 果重は開花 12 日後より 24 日後で大きく、24 日後において 400 ppm より 800 ppm で有意に大きかった (表 1-3)。イチゴ果実のシンク能は催色期前後に最大となり、その後完熟期にかけて低下すると報告されている (Forney・Breen, 1985)。¹³CO₂ を用いた本試験の結果もこれらと同様であり、第 1 果の分配率は開花 12 日後において 10%前後であったが、開花 24 日後において 50%以上を占め最大となった (図 2-9)。一方、光合成速度は、400 ppm より 800 ppm で高い値となった (図 1-7, 図 1-8)。これらのことから、400 ppm より 800 ppm で光合成産物が多く生産

され、最大シンクである果実第 1 果に光合成産物が多く転流された結果、開花 24 日後における第 1 果は 400 ppm より 800 ppm で有意に大きくなったと考えられた。植物ポジトロンイメージング装置 (PETIS) による ^{11}C を用いたトレーサー実験では、イチゴ (Hidaka ら, 2019) およびナス (Kikuchi ら, 2008) において、 $^{11}\text{CO}_2$ が光合成産物に変換されてから果実へ取り込まれ始めるまでの時間はおおよそ 60 分前後であることが明らかにされている。Miyoshi ら (2021) は、イチゴを用いた PETIS の実験で、 $^{11}\text{CO}_2$ の分配パターンに光の照射時間は影響を与えず、ソース・シンク関係の影響が大きいことを明らかにしている。本試験も同様に、等しい量の $^{13}\text{CO}_2$ を取り込んだ場合の転流率は、イチゴの生育ステージによって変化するが、 CO_2 濃度の影響を受けないことが明らかになった。一方で、高い CO_2 濃度は光合成速度を促進し、光合成産物は最大シンクに多く転流され、その結果シンクの大きさが変化し、分配率に影響を与えた (最大シンクである第 1 果の分配率が高くなった) ものと考えられた。

要約

CO_2 施用が‘さがほのか’の収量、品質、経済性および光合成速度、光合成産物の転流に及ぼす影響について検討した。その結果、 CO_2 濃度を常時 400 ppm とするのに比べ、換気時に 400 ppm とし無換気時に 800 ppm とすることにより、商品果収量が約 25% 増加し、冬季の Brix が同程度~1.2% 高く、 CO_2 施用に関する経費を差し引いても収益が増加することが明らかになった。‘さがほのか’の CO_2 濃度と光合成および光合成産物の転流特性の関係から、 CO_2 濃度 400 ppm に比べて 800 ppm 条件下において、光合成速度が 1.6 倍に上昇すること、最大シンクへの光合成産物の分配率が高くなるのが CO_2 濃度 800 ppm 条件下で増収する要因と考えられた。

第2章 湿度がイチゴ‘さがほのか’の光合成速度に及ぼす影響

緒言

イチゴの光合成速度は、CO₂濃度 1000ppm 程度までは CO₂濃度の上昇に伴って高まることを前章で明らかにした。一方、光合成速度は、光、温度、湿度および土壌や植物体の水分状態等、植物周囲の環境条件で変化するとされている (Leonardi ら, 2000 ; 稲田ら, 2010 ; Lu ら, 2015)。施設園芸先進国のオランダでは、植物生理に基づいた環境制御技術が発達しており (Heuvelink・Kierkels, 2015, 江原ら, 2017)、世界最高水準の収量を実現している (池田, 2009)。日本とオランダのハウス管理温度を比較すると、従来の日本型では、午前中における温度を高めて一定に保つのに対し、オランダ型は徐々に上昇させていく (図 2-1)。このオランダ型管理温度は、「急激に湿度 (飽差) 等のハウス内環境を変化させないこと、湿度 (飽差) の急変は植物体の気孔を閉じさせ、光合成速度を低下させる」という考え方に基づくとされている (齊藤, 2014)。一方、日本型温度管理では、ハウス内温度が高まったところで換気が始まるため、一気にハウス内の空気が入れ替わり急激な湿度低下が起こりやすい。しかし、急激な湿度低下がイチゴの光合成速度に及ぼす影響については、これまでに報告がない。そこで、本章では急激な湿度低下が‘さがほのか’の気孔コンダクタンスや光合成速度に及ぼす影響について検討した。はじめにハウス内で光合成測定装置のチャンバー内に乾燥空気を送る条件下で測定し、次に植物体全体の周辺湿度を低下させた人工気象器内での測定を実施した。

材料および方法

2-1. ハウス内の調査

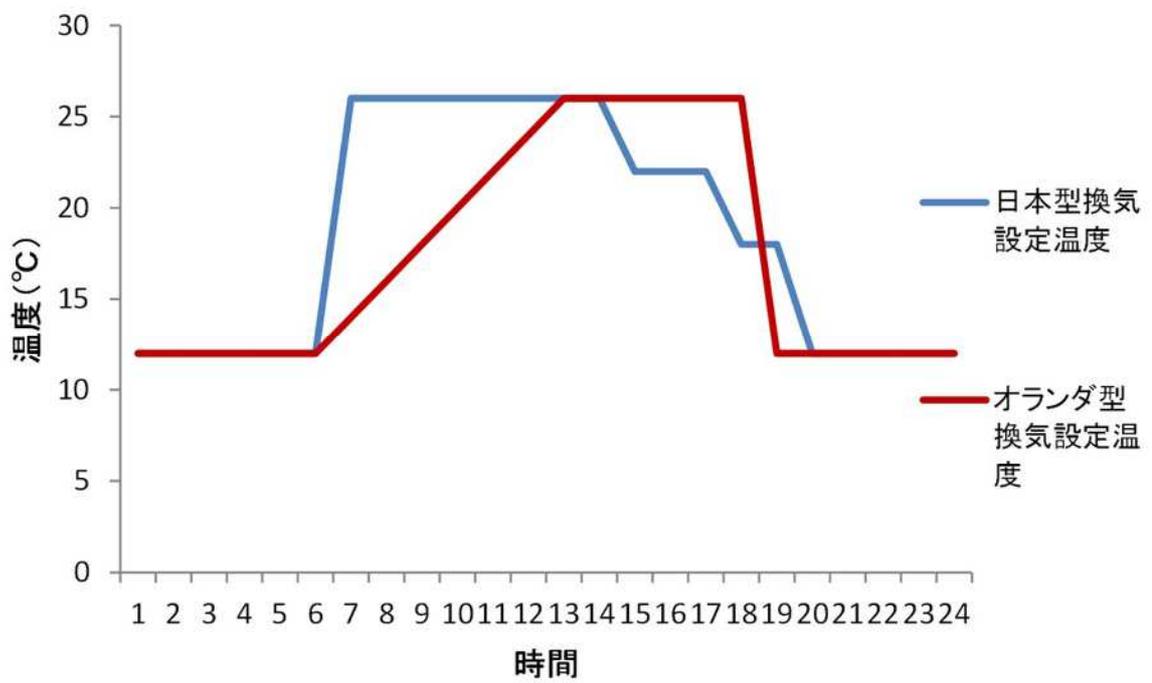


図2-1 日本型およびオランダ型の管理温度の例

試験は農研機構九州沖縄農業研究センター久留米拠点ハウス内において 2016 年 1 月に実施した。高設ベンチで栽培されている‘さがほのか’を用い、携帯型光合成蒸散測定装置 (LI-6400, LI-COR) により湿度が光合成速度に及ぼす影響を調査した (図 2-2)。測定条件は、光合成測定装置チャンバー内光合成有効放射 $1000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、気温 20°C 、 CO_2 濃度 400 ppm とした。相対湿度はハウス内の空気導入 (約 60%) からスタートし、チャンバー内湿度を 30 分間乾燥空気 (設定値 0%) とした。その後、再びハウス内の空気導入 (約 60%) に戻し、この間の光合成速度と気孔コンダクタンスの推移を測定した。

2-2. 人工気象器内の調査

試験は農研機構九州沖縄農業研究センター久留米拠点の人工気象器 (LPH-350SP, (株)日本医化器械製作所) を 3 台用い、2016 年 1~2 月に実施した。材料は硬質フィルムハウス内で 18 cm ポットに栽培したイチゴ‘さがほのか’を供試した。人工気象器は、気温 25°C 、相対湿度を乾燥状態を想定した 40% と適正状態を想定した 70% に設定した (図 2-3)。測定当日に実験植物を栽培圃場から人工気象器 No.3 (相対湿度 70%) へ移動し、1 時間以上経過後、No.1 (相対湿度 40%) および No.2 (相対湿度 70%) において光合成速度を測定した。移動後 90 分間の蒸散速度、気孔コンダクタンス、光合成速度、葉温の継時的変化を測定した。90 分間の測定後、人工気象器 No.1 (相対湿度 40%) のポットを No.2 (相対湿度 70%) へ移動させ、No.3 (相対湿度 70%) はポットを移動させずそのままとし、光合成速度を 90 分間測定した。測定条件は、人工気象器内気温 25°C 、光合成測定装置チャンバー内光合成有効放射 $1000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、気温 25°C 、 CO_2 濃度 400 ppm とした。



図2-2 ハウス内における光合成速度測定の様子



No.1 (湿度40%)

No.2 (湿度70%)

No.3 (湿度70%)

図2-3 異なる湿度条件における光合成速度測定時の様子

No.1（相対湿度 40%）および No.2（相対湿度 70%）で 90 分経過後の植物体の気孔の状態をスンプ法（鈴木式万能顕微鏡印画法）にて測定した。透明セルロイド板の表面を軟化させた後、葉の表面に密着させ、セルロイドの再硬化後はぎ取り、微分干渉顕微鏡（40 倍）で撮影した。さらに、同一植物体を用い、相対湿度 70% 条件下および相対湿度 40% 条件下（90 分経過後）において赤外線サーモグラフィ（FLIR SC620, FLIR Systems Inc.）で熱画像を撮影した。

結果

2-1. 異なる湿度条件がハウス内で測定した光合成速度に及ぼす影響

測定開始時のチャンバー内湿度は、ハウス内からの空気の取り込みにより 60% 程度であった。チャンバー内の湿度を乾燥空気（0% に設定）にした後、気孔コンダクタンスは $0.35 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ から $0.15 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ へ 1/3 程度に低下したものの、 $0 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ にはならなかった。またこの間、光合成速度は $12 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ から $10 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ になり、減少量はわずかであった（図 2-4）。

2-2. 異なる湿度条件が人工気象器内で測定した光合成速度に及ぼす影響

蒸散速度は、相対湿度 70% 条件下では $2.0 \sim 2.3 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 程度で一定であった。相対湿度 40% 条件下では 70% 条件下に比べて常に高い値で推移し、90 分間の処理前後における蒸散速度の減少割合（ Δ 蒸散速度）は、相対湿度 40% 条件下の方が 70% 条件下よりも大きかった（図 2-5(a)）。気孔コンダクタンスは、相対湿度 70% 条件下では $0.3 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 程度で一定であった。相対湿度 40% 条件下では 0.34 から $0.15 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ へ低下し、90 分後には相対湿度 70% 条

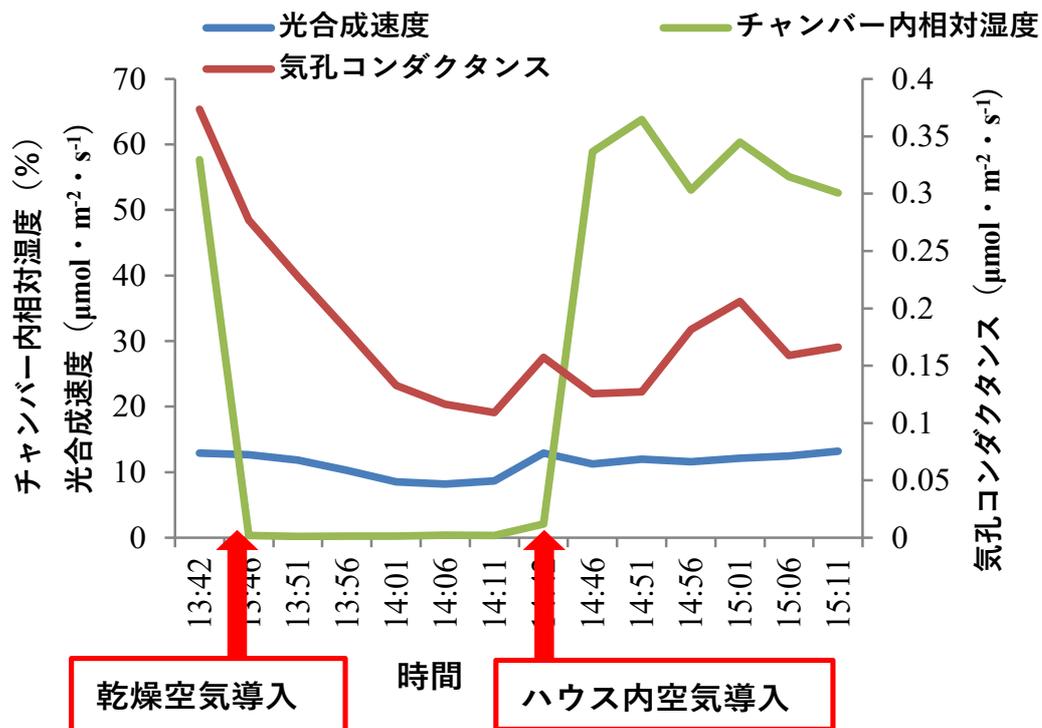


図2-4 チャンバー内相対湿度を変動させた条件下における光合成速度および気孔コンダクタンスの推移

- z 測定条件は、光合成測定装置チャンパー内光合成有効放射 $1000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、気温 20°C 、 CO_2 濃度 400ppm

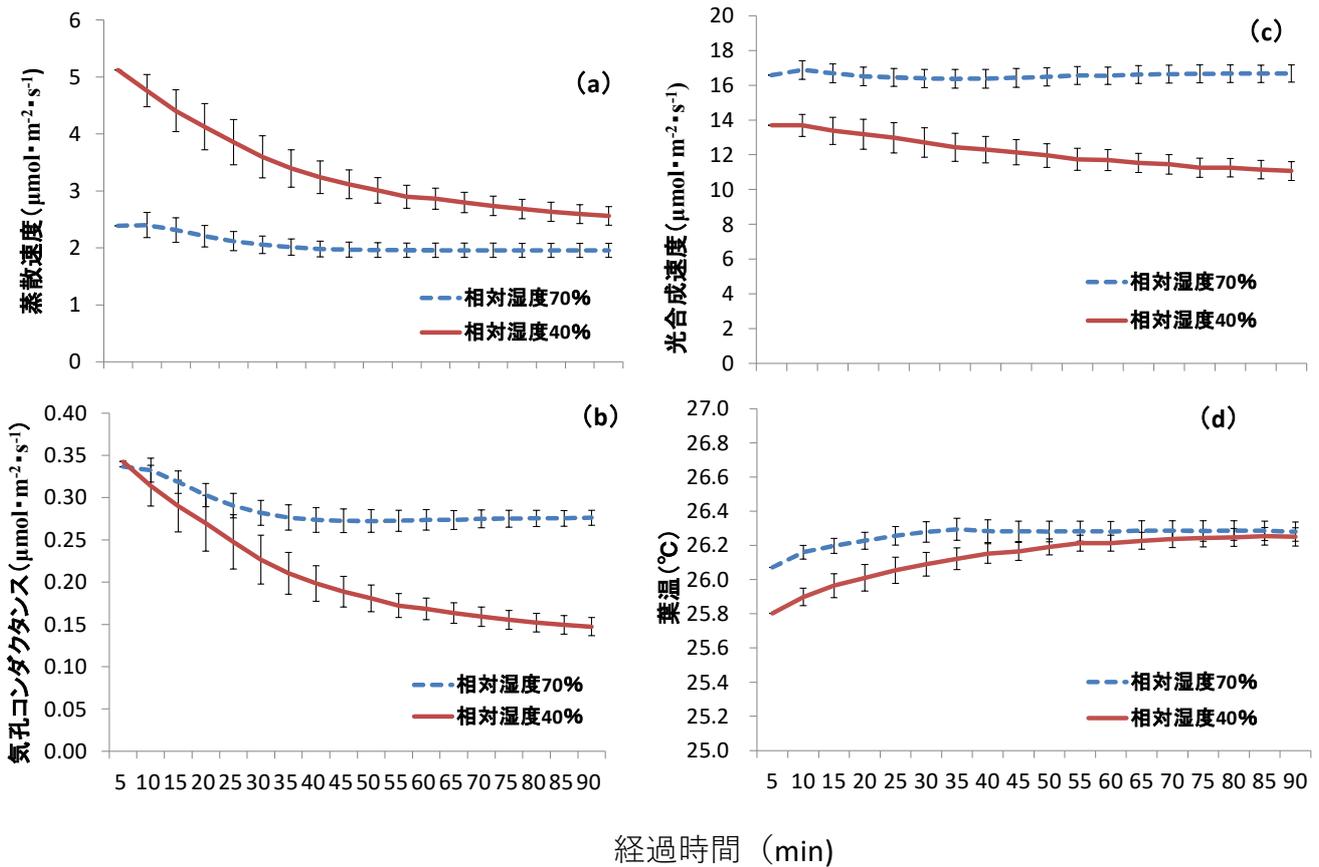


図2-5 相対湿度70%および40%条件下^zにおけるイチゴ'さがほのか'の蒸散速度(a), 気孔コンダクタンス(b), 光合成速度(c), 葉温(d)の経時変化^y

^z 測定条件は人工気象器内気温25°C,

^y 光合成測定装置チャンバー内光合成光量子束密度 $1000 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 気温25°C, CO_2 濃度400 ppm

n=11, 誤差線は標準誤差を示す

件下の 1/2 程度になった (図 2-5(b)). 光合成速度は, 相対湿度 70% 条件下では $16 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 程度で一定であったのに対し, 40% 条件下では, $14 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ から $11 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ へ低下した (図 2-5(c)). 葉温は, 相対湿度 70% 条件下では 90 分で 0.2°C 上昇したのに対し, 相対湿度 40% 条件下では 0.4°C 上昇した (図 2-5(d)).

次に相対湿度 40% から 70% に戻した場合の変化をみると, 蒸散速度は, 30 分程度で相対湿度 70% 条件下と同程度に回復した (図 2-6 (a)). 気孔コンダクタンスは, 相対湿度 40→70% 条件下において, 処理開始後 50 分程度は徐々に処理前の値に向け回復したが, その後は相対湿度 70% 条件下よりやや低い数値のまま推移した (図 2-6 (b)). 光合成速度は, 相対湿度 40→70% 条件下において, 処理開始後 40 分程度は徐々に処理前の値に向け回復したが, その後は相対湿度 70% 条件下よりやや低い数値のまま推移した (図 2-6 (c)). 葉温は, 相対湿度 40→70% 条件下において, 10 分程度は高く推移したが, その後, 相対湿度 70% 条件下と同程度で推移した (図 2-6 (d)).

相対湿度 40% 条件下および 70% 条件下におけるスンプ法による気孔の状態観察では, 湿度 70% 条件下では, 気孔が開き (図 2-7(a)), 40% 条件下の 90 分経過後では, 気孔が閉じている状況を確認できた (図 2-7(b)). 植物体の熱画像は, 相対湿度 70% 条件下および 40% 条件で 90 分経過後に撮影した. 相対湿度 40% 条件下では, 70% 条件下と比較して葉温が $2\sim 3^{\circ}\text{C}$ 高かった (図 2-8).

考察

第 1 章で述べたとおり, 相対湿度は, 施設園芸品目のトマトなどにおいて成長速度や収量に影響を及ぼす大変重要な環境要因であることが報告されている. また山中らは, 完全人工光型植物工場において冷房の稼働による飽差の急激な増大がイチゴ植物体に強い水分ストレスを与え, 果実肥大を一時的に停滞させ

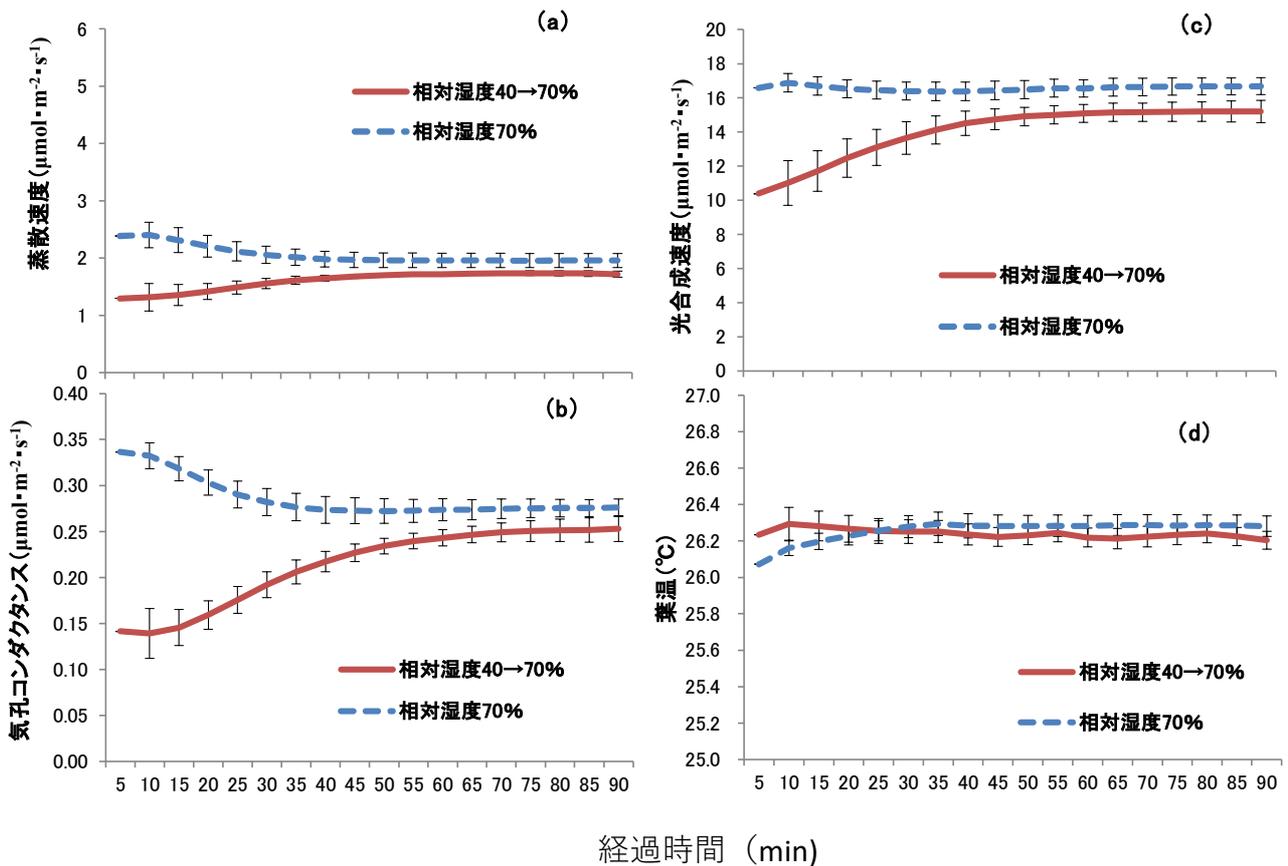


図2-6 相対湿度70%および40→70%条件下^zにおけるイチゴ‘さがほのか’の蒸散速度 (a), 気孔コンダクタンス (b), 光合成速度 (c), 葉温 (d) の経時変化^y

^z 相対湿度70%から40%の人工気象器へポットを移動させ90分後に70%に戻した

^y 測定条件は人工気象器内気温25 $^{\circ}\text{C}$

光合成測定装置チャンバー内光合成光量子束密度 $1000 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 気温25 $^{\circ}\text{C}$, CO_2 濃度400 ppm

n=4, 誤差線は標準誤差を示す

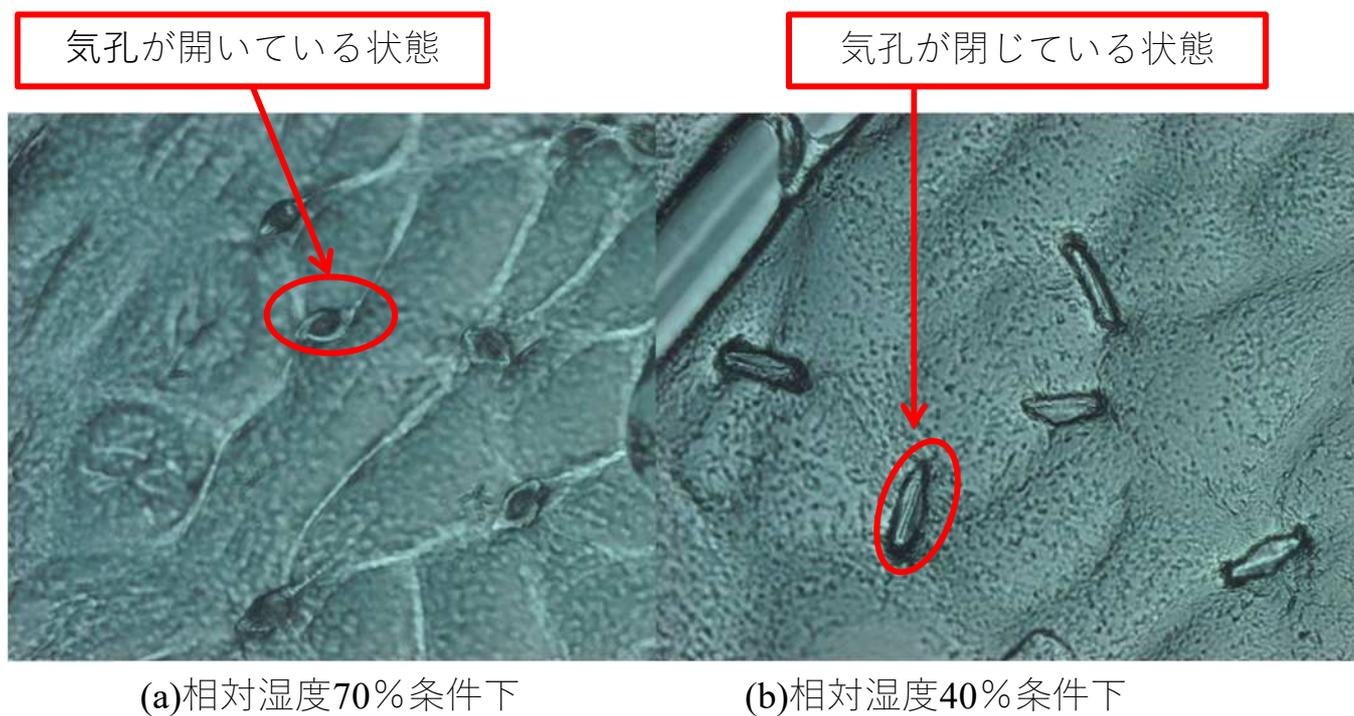
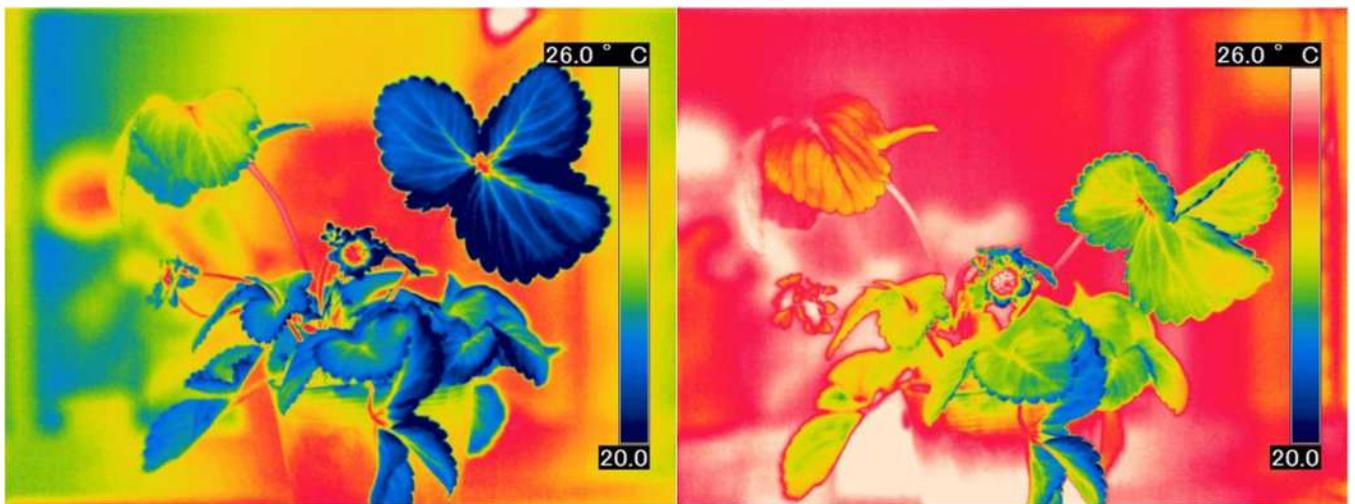


図2-7 異なる湿度条件下におけるイチゴ‘さがほのか’の気孔の顕微鏡写真^z

^z 微分干渉顕微鏡（40倍）で撮影



(a) 相对湿度70%条件下

(b) 相对湿度40%条件下

図2-8 異なる湿度条件下におけるイチゴ‘さがほのか’の熱画像

ることを明らかにしている（山中ら，2020）．本試験では，施設園芸先進国であるオランダで実践されている緩やかな温湿度管理（図 2-1）の有効性を検証するとともに，‘さがほのか’の光合成特性を明らかにするため，急激な相対湿度の変化が，イチゴ‘さがほのか’の光合成速度に及ぼす影響について検討した．最初に異なる湿度条件下でのハウス内における光合成速度測定を試みた．その結果，光合成測定装置チャンバー内の相対湿度を乾燥空気（0%に設定）にしたにもかかわらず，光合成速度や気孔コンダクタンスの大幅な低下が認められなかった．この要因として，光合成測定装置で測定しているチャンバー部分のみを低湿度としても，植物体内での水分移動が起こることにより，光合成速度や気孔コンダクタンスの反応が小さくなった可能性が考えられた．そこで，植物体全体の周辺湿度を低下させた条件を作るため，人工気象器内で実験 2 を実施した．人工気象器内で，相対湿度 40%と 70%条件下での 90 分間の反応を比較した結果，相対湿度 40%条件下では 70%条件下より，蒸散速度の上昇，気孔コンダクタンスの低下，光合成速度の低下，葉温の上昇が認められ，急激な湿度低下は光合成に影響することが明らかになった．Choi and Jeong（2020）は，相対湿度 40%と 60%条件下で 30 日間イチゴを栽培し，60%条件下において 40%条件下より根の活性や光合成速度が高くなったことを報告している（Choi and Jeong, 2020）．本試験では，90 分間の光合成速度測定であったが，Choi の結果と同様に高湿度条件下において光合成速度が高くなった．本試験の結果から，短時間でも急激な湿度低下はイチゴの光合成速度低下につながることであり，および，低湿度が長時間継続すると光合成速度の低下が蓄積され低収量につながることであり推察された．続いて，低湿度から高湿度条件に戻した時のイチゴ光合成速度の測定を実施した．気孔コンダクタンスは相対湿度 40→70%条件下において，処理開始後 50 分程度は徐々に処理前の値に向け回復し，光合成速度も同様に処理開始後 40 分程度は徐々に回復したが，その後は相対湿度 70%条件下よりやや低い数値のまま推移した（図

2-6 (b, c)). これらのことから、低湿度条件で低下した気孔コンダクタンスや光合成速度は、急激には回復しにくいことが明らかになった。

さらに、相対湿度 70%条件下と 40%条件 90 分経過後の気孔観察および植物体の熱画像から、40%条件下では気孔を閉じている状態であり、葉温が高くなっていることが明らかになった。光合成測定機で測定した葉温は、チャンバー内の温度を 25°C に設定していることから、相対湿度 40%条件下における葉温の上昇が 90 分間で 0.4°C 程度であった。一方、人工気象器内は一定温度に設定しているものの、熱画像では低湿条件での葉温上昇が認められた。植物の光合成と蒸散作用は密接な関係であり、蒸散作用は同時に葉温の調節機能としても働いている (島田, 1992)。本試験の結果から、相対湿度 40%条件下では、低湿度により気孔が閉じ蒸散速度が減少したことにより葉温が上昇したことが推察された。これらのことから、イチゴにおいても温湿度を急激に変化させないオランダ型の温度管理は光合成速度を高く保つために有効であることが示唆された。

要約

湿度がイチゴ‘さがほのか’の気孔コンダクタンスや光合成速度に及ぼす影響について検証を行った。その結果、イチゴにおいて急激な湿度低下は、気孔コンダクタンスや光合成速度の低下につながることを明らかになり、相対湿度を急激に変化させない管理はイチゴの光合成速度および生産性を高く保つために有効であると考えられた。

第3章 昼温および夜温がイチゴ‘さがほのか’の ^{13}C -光合成産物の転流・分配に及ぼす影響

緒言

近年施設野菜で注目されている CO_2 施用を中心とした環境制御は、イチゴの生産性向上を目的に九州各県で導入が進められている。前述のとおり佐賀県では2012年頃から液化石油ガス（LPG）燃焼式 CO_2 発生装置の普及率が急速に上昇し、2018年には県内イチゴ生産面積の50%以上で同装置が導入されている。しかし、 CO_2 を施用しても茎葉だけが繁茂して増収しない事例があり、光合成産物の果実への転流を促進する技術開発が求められている。施設園芸における環境制御では、光合成と同様に転流の最適化が重要であり（Braun ら, 2014）、環境制御により光合成だけでなく転流を最適化することが果実収量や品質を向上させると考えられる（Hidaka ら, 2019；Nakai ら, 2022）。これまでに、イチゴでは、日平均温度 $15\sim 25^\circ\text{C}$ において、平均温度が 15°C より 20°C で果実の発育および成熟が早いことが報告されている（熊倉・宍戸, 1994b）。しかしながら、北部九州の厳寒期におけるイチゴ施設内では日平均温度が 15°C 未満となり、このような条件下における温度と光合成産物の転流・分配の関係は不明である。そこで本試験では、北部九州の厳寒期における自然光条件下で、温度制御により果実への転流を促進する方法を開発するため、安定同位体 ^{13}C を用い昼温および夜温が光合成産物の転流・分配に及ぼす影響について検討した。

材料および方法

3-1. 果実の成熟日数と果実重

第一次腋果房頂果開花日が同一の株を供試し、4つの温度試験区に1試験区当たり15株ずつ配置した。第一次腋果房の頂果開花から収穫までの日数を果実成熟日数とし、収穫時の果実重量とともに調査した。

3-2. ^{13}C -光合成産物の転流および分配率

イチゴ‘さがほのか’を供試し、2018年9月28日に直径18cmポリポットに定植した。培土および施肥方法、施肥量は第1章と同様とした。佐賀県農業試験研究センター内の硬質フィルムハウス2棟をそれぞれ2区画に仕切って合計4区画とし、2018年12月～2019年2月に試験を実施した。試験場所である佐賀市における2018年9月から2019年5月までの全天日射量と日平均気温の月別推移を図3-1に示した。

試験は、昼を9:00～17:00、夜を17:00～翌9:00とし、第一次腋果房頂果の開花前まで、昼は換気温度を25°C、夜は加温開始温度を5°Cとした。開花後は昼温2区×夜温2区の4試験区を設けた。昼高温区は、換気温度28°C、9:00～16:00の加温開始温度18°Cとし、昼低温区は、換気温度23°Cで加温なしとした。夜高温区は、加温開始温度8°C、夜低温区は加温開始温度5°Cとした。第一次腋果房の頂果開花時から温度処理を開始し、各試験区の気温は、環境測定器（プロファインダーII、(株)誠和）を植物体群落の高さ（地際から25cm）に設置し、1分おきに測定した。なお、栽培期間中の CO_2 は無施用、湿度はなりゆきの管理とした。

温度処理前は、葉7枚および第1次腋果房のみにするため、頂果房、腋芽、第7葉より下位の葉を除去した。第1次腋果房頂果開花32日後は、葉7枚、果実7個に揃えるため第2次腋果房、腋芽、第7葉より下位の葉、7果より下位の果実を摘除した。第一次腋果房頂果の開花期および白熟期（開花32日後）の午前9時に $^{13}\text{CO}_2$ を施与した。開花期、白熟期ともに晴天日に $^{13}\text{CO}_2$ を施与し、それ

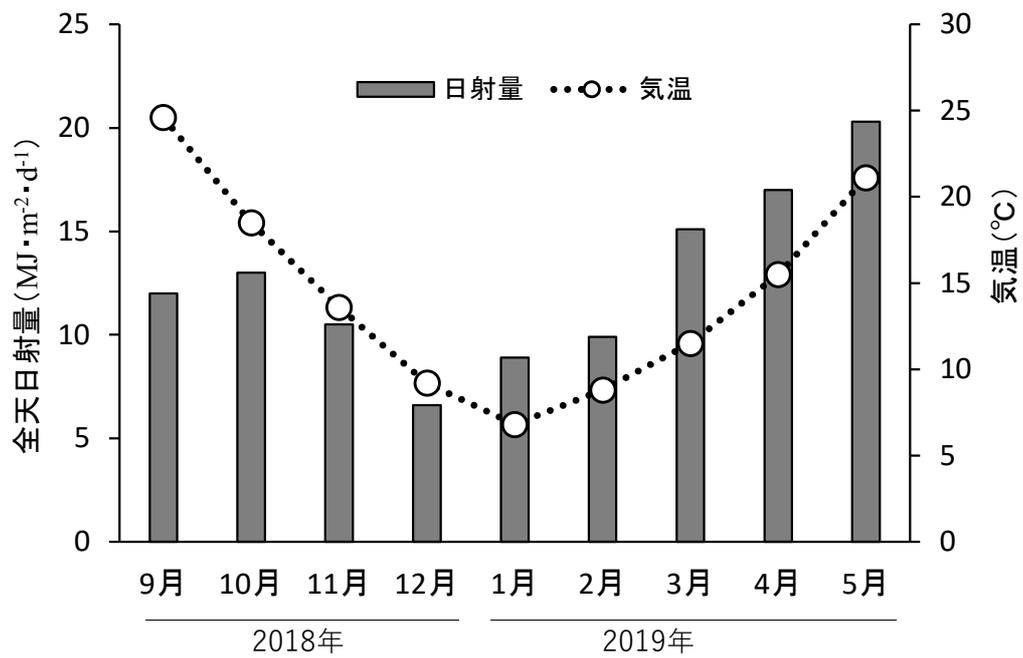


図3-1 佐賀市における全天日射量と日平均気温の月別推移

ぞれの全天日射量は $10.03 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ および $10.42 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ であった。 $^{13}\text{CO}_2$ 施与の方法は第 1 章 1-3.と同様とした。開花期は $^{13}\text{CO}_2$ 施与から 24 時間後、白熟期は $^{13}\text{CO}_2$ 施与開始から 8 時間後、24 時間後の 2 回に分けて株をサンプリングした。1 回当たりサンプリング数は 1 区 5 株とした。サンプリング部位、 ^{13}C 分析方法、転流率および分配率を算出方法は第 1 章 1-3.と同様とした。

結果

3-1. 果実の成熟日数と果実重に及ぼす昼夜温管理の影響

第一次腋果房頂果の成熟日数は、昼高温区が昼低温区より有意に短くなった (表 3-1)。また、頂果の新鮮重は昼低温区が昼高温区より大きく、昼高温区では夜高温の方が大きかった。

3-2. ^{13}C -光合成産物の転流および分配率に及ぼす昼夜温管理の影響

温度処理を実施した第一次腋果房頂果の開花から 32 日間のハウス内気温の日変化の平均値は、図 3-2 のとおりであった。この期間の昼 (9:00~17:00)、夜 (17:00~翌 9:00) および 24 時間の平均温度は、昼高・夜高区では、昼 21.9°C 、夜 11.2°C 、24 時間 14.6°C 、昼高・夜低区では、昼 21.8°C 、夜 9.0°C 、24 時間 13.2°C 、昼低・夜高区では、昼 18.3°C 、夜 10.3°C 、24 時間 13.0°C 、昼低・夜低区では、昼 18.0°C 、夜 8.3°C 、24 時間 11.6°C であった。また、この期間のハウス内 CO_2 濃度は各区とも 350~430 ppm の範囲内で同様に推移した。

$^{13}\text{CO}_2$ 施与 8 時間後の転流率は、昼高温区の方が昼低温区より有意に高かったが、夜温による影響は認められなかった (図 3-3)。 $^{13}\text{CO}_2$ 施与 24 時間後の転流

表3-1 第一次腋果房頂果^zの成熟日数および新鮮重

試験区	成熟日数 (日)			新鮮重 (g/個)		
昼高・夜高	39.2 ±	0.63	b ^y	39.1 ±	0.90	b
昼高・夜低	39.2 ±	0.71	b	34.2 ±	0.72	c
昼低・夜高	46.1 ±	0.93	a	48.6 ±	1.40	a
昼低・夜低	48.3 ±	0.82	a	47.5 ±	1.36	a

^z 開花日は12月15日

^y 同一カラム内の同じ文字間にはTukeyの多重検定により5%水準で有意差がないことを示す

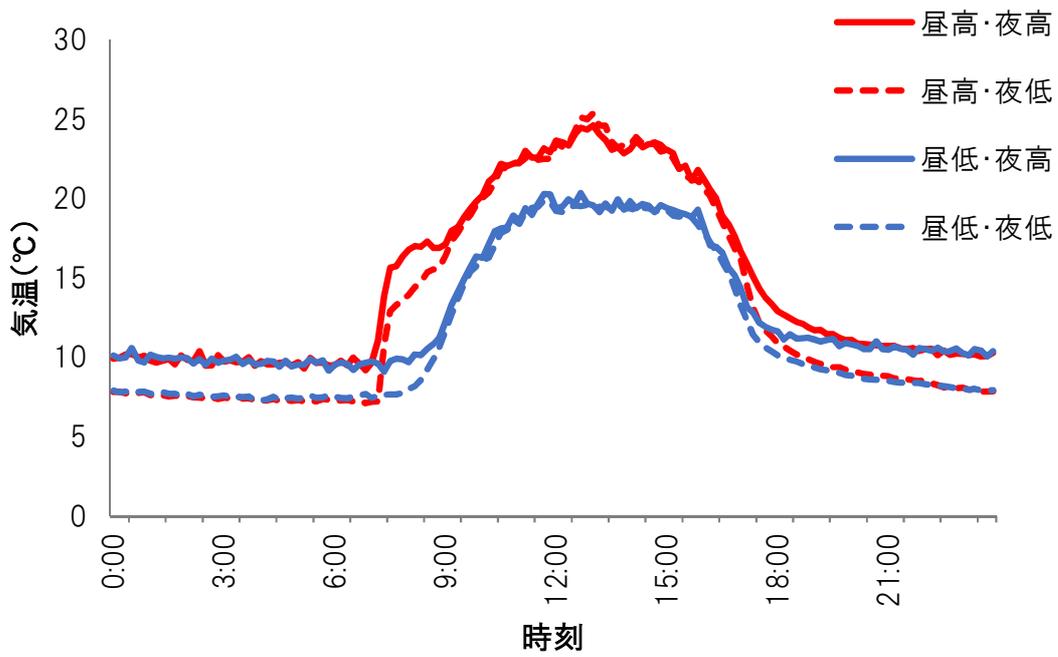


図3-2 温度処理期間^zにおけるハウス内気温の日変化

^z 2018年12月13日～2019年1月14日，期間の平均全天日射量 $7.43 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$

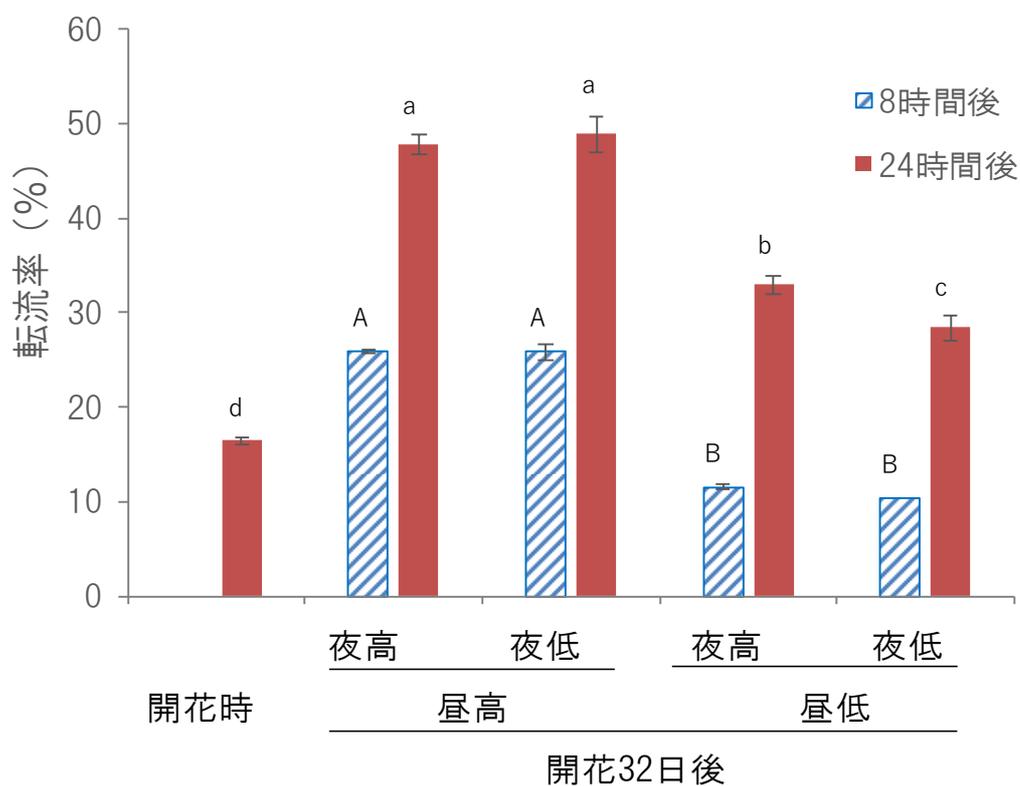


図3-3 開花時および開花32日後における¹³CO₂施与後の転流率^z

- ^z エラーバーは標準誤差を示す (n=5)
 同じ文字間にはTukeyの多重検定により5%水準で有意差がないことを示す
 転流率 = (フィード葉を除いた植物体全部位から回収された¹³C量/全植物体から回収された¹³C量) × 100

率は、開花時と比較して開花 32 日後において有意に高かった。特に昼高温区では昼低温区より転流率が高く、開花時の 2 倍以上の値となった。この転流率の 1 時間当たりの平均値を時間帯別に算出した (表 3-2)。その結果、開花 32 日後の昼の時間帯において昼高温区の平均転流率が昼低温区より有意に高かった。これに対し夜の時間帯において、夜高温区と夜低温区の平均転流率の間には有意差が認められなかった。転流率の 24 時間の平均値では、昼高温区が昼低温区より高く、昼低温区においては夜高温が夜低温よりやや高かった。また、開花時と比較すると開花 32 日後の転流率は、いずれの試験区においても有意に高かった。

^{13}C -光合成産物の分配率をみると、開花時は新葉に最も多く分配されており、続いて果梗、クラウン、根の順に高かった (図 3-4)。一方、開花 32 日後は、昼高温区において 8 時間後、24 時間後ともに果実へ 90% 以上分配された。特に第 1 果と第 2 果への分配率の合計は 80% 以上であり、根およびクラウンへの分配はわずかであった。一方、昼低温区では、8 時間後における果実への分配率が高いものの、24 時間後においては果実以外への分配率が高まり、夜低温区では果実への分配率が 74.9% と他の試験区より低くなった。

第一次腋果房頂果開花時および開花 32 日後における器官別乾物重を表 3-3 に示した。開花 32 日後の葉合計重およびクラウン重は、昼低温区で開花時より大きく増加したが、昼高温区では開花時と同等であった。果実重は、第 1 果、第 2 果ともに昼高温区が昼低温区より有意に大きく、果房全体でも同様の傾向にあった。開花 32 日後の地上部合計重は、開花時より有意に大きかったが、各試験区間の差は認められなかった。根重は、開花 32 日後の昼低・夜低区で最も高かった。開花 32 日後の全乾物重は、全試験区で開花時より有意に大きくなった。

考察

表3-2 昼および夜の温度が平均転流率に及ぼす影響

試験区		1時間当たりの平均転流率 (%)										
時期	温度処理	昼				夜				1日		
開花時	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.69	± 0.01	d
開花32日後	昼高・夜高	3.24	± 0.12	a ^z	1.37	± 0.09	a	1.99	± 0.04	a		
	昼高・夜低	3.22	± 0.02	a	1.45	± 0.13	a	2.04	± 0.08	a		
	昼低・夜高	1.44	± 0.11	b	1.33	± 0.12	a	1.37	± 0.05	b		
	昼低・夜低	1.30	± 0.04	b	1.13	± 0.07	a	1.19	± 0.04	c		

^z 同一カラム内の同じ文字間にはTukeyの多重検定により5%水準で有意差がないことを示す

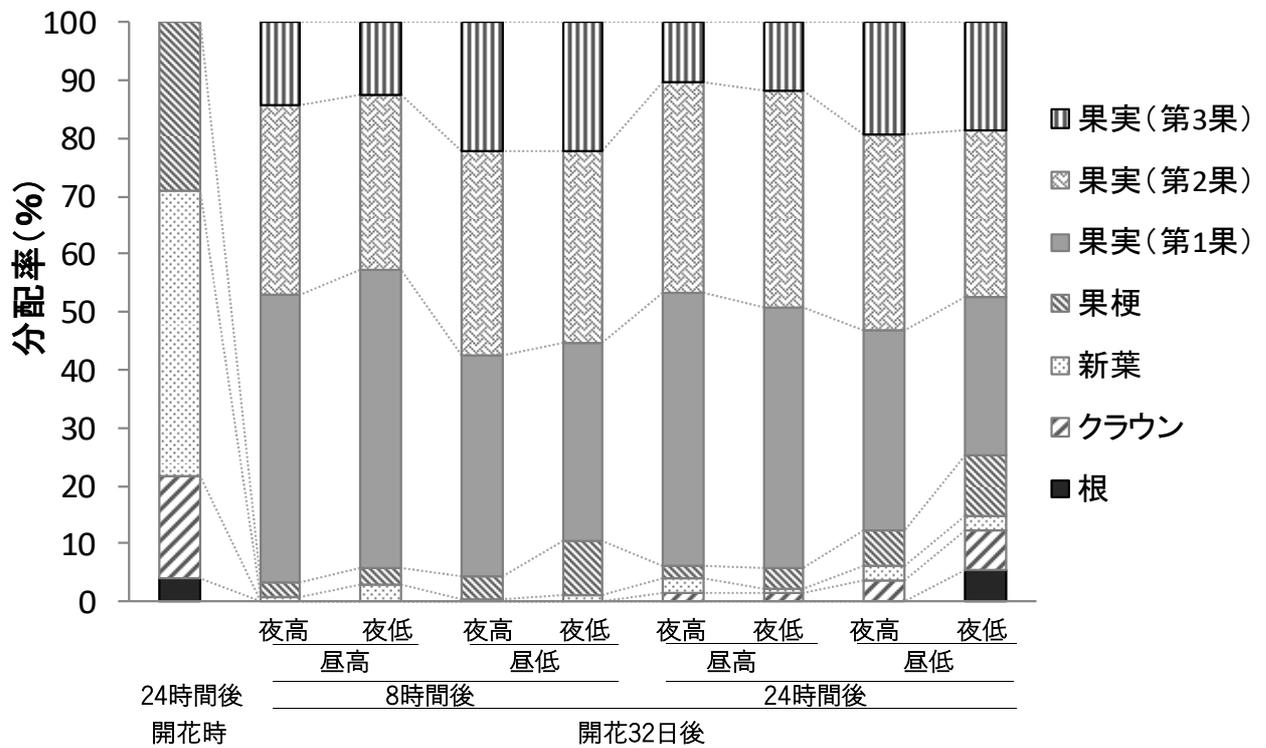


図3-4 第一次腋果房頂果開花時および開花32日後における¹³C-光合成産物の分配率^z

^z 分配率 = (各部位から回収された¹³C量 / フィード葉を除いた植物体全部位から回収された¹³C量) × 100

表3-3 頂果開花時および開花32日後におけるイチゴ各部位の乾物重 (g)

試験区		葉 (第3~7葉)	新葉 (第1~2葉)	葉合計 ^z	クラウン	地上部合計 ^x	根
時期	温度処理						
開花時	-	6.47 ± 0.10 b	3.01 ± 0.09 ns	9.48 ± 0.06 c	2.05 ± 0.12 c	12.13 ± 0.17 b	9.72 ± 0.54 ab
開花32日後	昼高・夜高	6.97 ± 0.26 ab	2.75 ± 0.20 ns	9.71 ± 0.45 bc	2.60 ± 0.11 bc	18.47 ± 0.32 a	9.02 ± 0.69 ab
	昼高・夜低	6.57 ± 0.11 bc	3.03 ± 0.18 ns	9.60 ± 0.29 bc	2.64 ± 0.06 abc	17.72 ± 0.50 a	8.61 ± 0.59 b
	昼低・夜高	7.96 ± 0.32 ab	3.08 ± 0.44 ns	11.03 ± 0.53 ab	3.17 ± 0.21 ab	18.26 ± 0.61 a	11.05 ± 0.69 ab
	昼低・夜低	7.95 ± 0.39 a	3.36 ± 0.29 ns	11.31 ± 0.31 a	3.26 ± 0.15 a	18.38 ± 0.49 a	11.33 ± 0.33 a

表3-2 (続き)

試験区		果実 (第1果)	果実 (第2果)	果実 (第3果)	果梗	果房合計 ^y	全体合計 ^w
時期	温度処理						
開花時	-	-	-	-	-	0.61 ± 0.03 c	21.85 ± 0.70 c
開花32日後	昼高・夜高	2.21 ± 0.11 a	1.66 ± 0.08 a	1.03 ± 0.09 a	1.26 ± 0.08 ns	6.16 ± 0.29 a	27.49 ± 0.56 ab
	昼高・夜低	2.04 ± 0.21 a	1.51 ± 0.11 a	0.78 ± 0.09 ab	1.16 ± 0.09 ns	5.48 ± 0.40 a	26.33 ± 0.24 b
	昼低・夜高	1.21 ± 0.07 b	1.05 ± 0.08 b	0.64 ± 0.05 b	1.16 ± 0.02 ns	4.06 ± 0.12 b	29.32 ± 0.67 a
	昼低・夜低	1.03 ± 0.06 b	0.92 ± 0.08 b	0.58 ± 0.04 b	1.28 ± 0.10 ns	3.81 ± 0.12 b	29.71 ± 0.63 a

^z 葉合計=葉+新葉

^y 地上部合計=葉合計+果房合計+クラウン

^x 果房合計=果実(第1~3果)+果梗

^w 全体合計=地上部合計+根

^v 数値は5個体の平均値±標準誤差を示す

^u 同一カラム内の同じ文字間にはTukeyの多重検定により5%水準で有意差がないことを示す

北部九州における施設イチゴ栽培において、光合成産物の果実への転流促進技術を開発することを目的に試験を実施した。イチゴ‘さがほのか’を用い、第一次腋果房頂果の開花から 32 日間、硬質フィルムハウス内の自然光条件下において、昼および夜の温度処理を実施した。

イチゴの成熟と果重の関係について、森下・本多（1985）は、促成栽培した‘はるのか’および‘宝交早生’を用い、開花から成熟までの日数（成熟日数）とビニルハウス内の温度の変化を調査し、両者の関係式を得て、有効積算温度を算出している。すなわち、イチゴの開花後の発育と成熟に有効な温度は約 5°C 以上であり、16~20°C の温度は成熟に有効に作用するが、それ以下の温度域では有効度が急激に低下し、また、それ以上の温度域でも有効度が緩やかに低下すると述べている。本試験では、昼低温区において昼高温区より成熟日数が長くなったが、夜間の温度は成熟日数に影響を及ぼさなかった。また、果実の新鮮重は成熟日数が長い昼低温区で大きくなった。成熟日数に夜温より昼温が大きな影響を及ぼしたことは、森下・本多（1985）の示す温度域ごとの有効度が低温域で小さく、高温域で大きいことと一致する結果であった。‘さがほのか’は有効積算温度 563°C 日で成熟するとされており、佐賀県内では過熟や傷み果などを回避し果実品質を良好に保つため 45 日以内で収穫することを推奨している（佐賀県，2006）。今回の試験結果から、日平均温度が同程度であっても果実肥大や成熟日数に差があり、昼間の温度の寄与が大きいことが確認された。

続いて、昼夜温が ^{13}C -光合成産物の転流・分配に及ぼす影響について検討した。その結果、 $^{13}\text{CO}_2$ 施与 24 時間後の転流率は、開花時と比較すると開花 32 日後において、1.7 倍以上であった（図 3-3）。イチゴ果実のシンク能は催色期前後に最大となり、その後完熟期にかけて低下すると報告されており（Forney・Breen, 1985），本試験においても、開花 32 日後には果実が強いシンクとなり転流率が高まったと考えられた。転流はソース器官である葉からのローディングと果実などシンク器官へのアンローディングからなり、この過程は、シンク・ソースバラ

ンスの他、気温や光強度やCO₂濃度などの環境要因に大きく影響される(Lemoineら, 2013). イチゴの収量や品質を向上させるためには、ソース・シンクのバランスや環境条件に対する転流の反応を明らかにし、これらを最適に調節することが重要とされている(Hidakaら, 2019). 今回の試験結果では、イチゴの生育ステージにより異なるシンク・ソースバランスにおいて、転流率や分配率で大きな違いが認められた. これらのことから、今後は、イチゴの生育ステージごとに、個葉の収量に対する寄与度などの生態的特性を明らかにすることが重要であると考えられた. また、¹³CO₂施与8時間後の転流率は、昼低温区と比較して昼高温区で2倍以上の値となっており(図3-3)、昼の時間帯の高温が転流に対して大きな影響を及ぼすことが明らかになった. 時間当たりの平均転流率は、夜の時間帯において処理区間で有意差が認められなかったが、昼の時間帯においては高温区で低温区より2倍以上高い値となった(表3-2). トマトではこれまでに、時間当たりの転流率は昼間において夜間より高くなることが報告されている(Hori・Shishido, 1977; Shishidoら, 1989). Shishidoら(1990)は、昼夜温25°C一定、8時間日長条件下でトマトの時間帯別の転流量を比較し、昼:夜=約7:3であったとしている. この時、昼間は8時間、夜間は16時間であり、昼間は夜間の4倍以上速い転流速度となった. さらに、夜間は前半の8時間より後半の8時間において転流速度が遅くなることを明らかにしている. これらのことから、日中には光合成と同時に光合成産物の転流が活発に行われることで、夜に比べて昼の環境が転流に大きな影響を与えるものと考えられる. ¹³C光合成産物の分配率を見ると、開花時は新葉への分配率が最も高かったが、開花32日後は果実への分配率が高く、昼高温区で90%以上、昼低温区で70%以上であった. イチゴ果実への光合成産物の分配率は開花から果実の発育とともに増加すると報告されており(熊倉・宍戸, 1994b; 西沢・堀, 1988)、本試験でも同様の結果が得られた. 開花32日後においては、昼高温区で第1果への分配率が高かったが、昼低温区では第1果への分配率が減少し第3果への分配率が増加した. 西

沢・堀（1988）によると、イチゴの果実は第1果と第2果の肥大成長がほぼ同時に起こり、やや遅れて第3果の肥大が始まる。このため、第1果と第2果の間よりむしろ遅れて生育が始まる第3果との間に競合があるものと考えられている。本試験の結果からも、第1果の肥大が進んでいる昼高温区では第3果への分配率が低く、第1果の肥大が遅れている昼低温区では第3果への分配率が高かった。昼高温区では第1果の果実肥大が進んだことにより、果実のシンク能力が高いステージとなり、第1果への分配率が高くなったと考えられた。一方、夜高温区と夜低温区を比較すると¹³CO₂施与24時間後の昼低温区では、夜温が低いほうがクラウンや根への分配率が高くなった（第3-4図）。熊倉・宍戸（1994b）によると、根への分配率は、常に果房への分配率の増減と逆の変化を示し、温度の影響よりも花房生育段階の影響が非常に大きいとされている。昼低・夜高区と昼低・夜低区において果実乾物重に有意差はなかったものの、日平均温度は昼低・夜低区が低く、果実の発育が遅かったことにより、果実への分配率が低く、クラウンや根の分配率が高くなったと考えられる。

昼高・夜低区と昼低・夜高区は、同程度の日平均温度であったが、開花32日後における果実乾物重は、昼高・夜低区で有意に大きかった（表3-2）。イチゴやトマトのように成熟した果実を収穫する品目では、温度は果実の発育と成熟のそれぞれに影響する。トマトでは、日平均温度が高いと果実への光合成産物の分配が促進され、果実の肥大量が増加するとともに成熟も促進されて、果実の肥大する期間が短縮されることが明らかになっている（宍戸, 2016）。熊倉・宍戸（1994a）は、人工気象条件下において15~25℃の間で温度がイチゴの果実肥大に及ぼす影響を検討し、平均温度が15℃より20℃で果実の発育および成熟が早いことを明らかにしている。本試験における成熟日数に関しては前述のとおりであり、第一次腋果房頂果の開花から32日間の乾物生産では、日平均温度が同程度である場合でも昼高温区で果実肥大が優れたことから（表3-1）、昼の高温が果実の発育を促進したと考えられ、熊倉・宍戸（1994a）の結果と一致した。一方、昼低

温区では、葉やクラウン、根の乾物重が大きくなっており、果実以外の部位への光合成産物の分配が多くなるものと考えられる。

以上の結果、厳寒期においては夜より昼の暖房設定温度を高くすること、あるいは換気の設定温度を高くしてハウス内の気温を確保することが、果実への転流・成熟を促進し収穫までの日数を短縮できることから、過熟や傷み果などを回避するためにも有効であると考えられた。一方、日射量が多く日平均温度を高く保つことができる時期や地域においては、昼の温度を低温に保つことで果実を緩やかに肥大させることができると考えられる。

要約

温度制御により果実への転流を促進する方法を開発するため、イチゴ‘さがほのか’の第一次腋果房頂果開花時および開花 32 日後において安定同位体炭素 ^{13}C を施与し、昼温および夜温が光合成産物の転流・分配に及ぼす影響について検討した。その結果、厳寒期の施設イチゴにおいて昼の温度を高めることは、果実の成熟および光合成産物の果実への転流を促進する効果があることが明らかとなった。

第4章 冬季における日中の加温がイチゴ‘さがほのか’の収量，光合成および¹³C-光合成産物の転流・分配に及ぼす影響

緒言

九州の北西部に位置する佐賀県は，西南暖地帯にありながら冬季の日射量が少ない地域である（田中ら，1987）．佐賀県におけるイチゴ栽培の作型は，9月に定植し5月頃まで収穫する促成栽培であり，12～2月の厳寒期において低日射の影響を受け，日中の気温が低く推移しやすく，ハウス内最高気温が15℃に満たない日もある．イチゴの成熟には積算気温が関係し（森下・本多，1985），低日射によるハウス内気温不足は，果実の成熟が進まず果実品質低下や減収の要因となる（佐賀県，2006）．これまでに，冬季のイチゴ栽培において，クラウン温度制御（壇ら，2019；佐藤・北島，2010）や培地加温（金ら，2009；重野ら，2001）による増収効果が報告されているが，いずれも導入コストが高く，佐賀県内ではほとんど導入されていない．一方，温風暖房機は夜間の加温のため促成栽培イチゴ生産者において既に導入されており，新規の導入コストがかからないメリットがあることから，本章では，温風暖房機を活用し冬季のイチゴの生産性を高める方法を検討した．第3章では，日平均気温が同等である場合，夜間より日中の気温が高い方がイチゴの果実肥大が促進され成熟日数が短縮されることを明らかにした．また，トマトでは，北部九州の促成作型において1～2月の日中にハウス内の気温を20℃に加温し，昼温を高めることで，果実品質が向上し（龍・井手，2014），商品果収量が増加することが明らかにされている（龍ら，2016）．日中の生育適温は，トマトでは20～27℃であるのに対し，イチゴでは18～25℃とやや低い（伊達，2012）．そこで本章では，日中の加温温度を18℃に設定し，北部九州の冬季イチゴ栽培において日中加温が光合成，転流および収量へ及ぼす影響を検証した．さらに，増収の生理的な要因を検討するため，温度と光

合成速度の関係および日中加温を想定した 18°C および日中加温なしを想定した 13°C 条件下における光合成産物の転流・分配について調査した。

材料および方法

4-1. 収量および成熟日数

2016 年 9 月 16 日～2017 年 6 月 30 日（2016 年定植）および 2017 年 9 月 22 日～2018 年 6 月 30 日（2017 年定植）に栽培試験を実施した。佐賀県農業試験研究センター内の間口 8 m，奥行 12 m，軒高 4 m の硬質フィルム（エフクリーン自然光（AGC グリーンテック（株））ハウスの 2 室を供試した。イチゴ‘さがほのか’を供試し，2016 年定植ではヤシがらを，2017 年定植では佐賀苺高設培土（赤玉土，ヤシピート，ピートモス，ボラ土，バーク堆肥など配合）を用い，高設ベンチ（矢崎化工（株））に株間 20 cm，2 条植えで定植した。2016 年定植では大塚 A 処方を 200～500 倍に希釈し施用した。2017 年定植では，肥効調節型肥料を N：P₂O₅：K₂O=2.7：2.0：2.4 g/株を基肥として施用し，3 月以降は 2016 年定植と同様に液肥を施用した。灌水は，統合環境制御装置（マキシマイザー，PRIVA 社）による日射比例制御とし，両年とも 8：00～14：00 の間，1.5～2.0 MJ・m⁻² ごとに灌水した。1 回当たりの灌水量は季節や株の大きさに合わせて 25～70 mL/株とし，1 日に 50～420 mL/株を灌水した。ヒートポンプ（NGP1010T-N，ネポン（株），定格暖房能力 28.0 kW）（図 4-1）により 12 月から加温を開始し，日中加温の有無により日中加温区および対照区を設けた。温室内の気温設定値（加温開始温度）は，以下のとおりとした。日中加温区では，6：00～10：00 を 6°C から段階的に 18°C とし，10：00～16：00 を 18°C，16：00 以降を 6°C とした。また対照区では，設定温度を終日 6°C とした（図 4-2）。なお，無加温下での日中における換気温度は，第 2 章で光合成速度の低下要因となることが明らか



図4-1 日中加温試験に使用したヒートポンプ

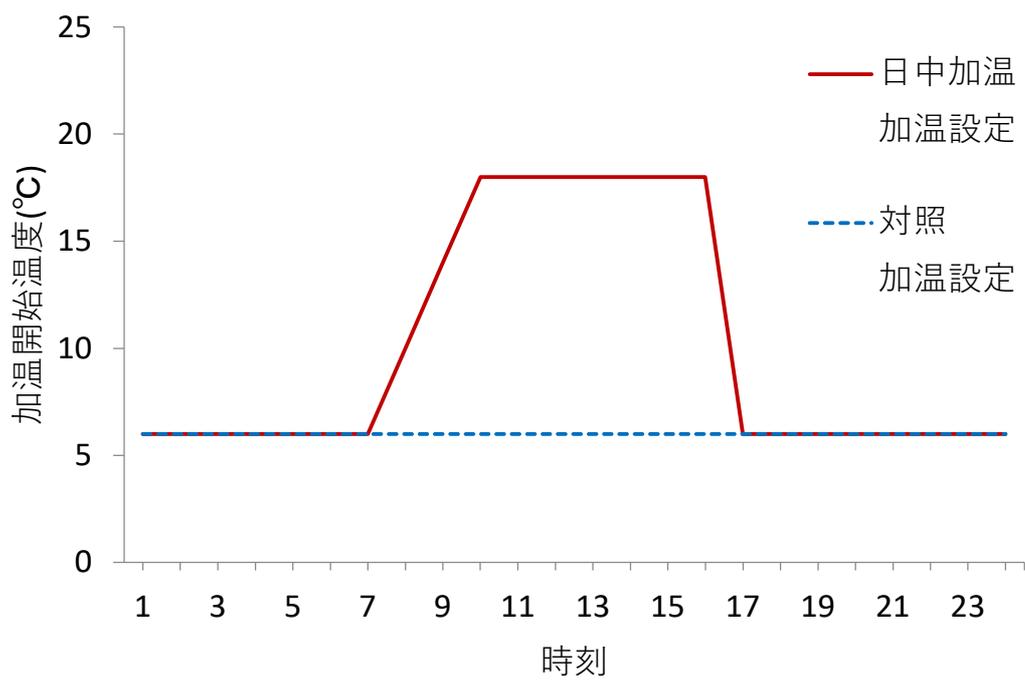


図4-2 日中加温試験における加温設定温度

になった急激な湿度変化を回避するため、7～12時は27℃まで徐々に換気温度を上げ、12～17時は24℃に設定した。統合環境制御装置(マキシマイザー, PRIVA社)で換気およびヒートポンプによる加温を制御し、ハウス内気温を5分おきに記録した。記録した気温データは、日の出から日の入りの日中平均値を日ごとに算出した後、10日ごとに平均し、旬別平均値を算出した。3月以降は相対湿度50%以下でミスト(KYZ75A-4IK, (株)いけうち)を1回当たり10秒間、最小間隔5分間の設定で噴霧した。15時以降は、外気温が7℃以下の時、保温カーテン(XLS10, (株)誠和)を使用した。CO₂は、第2章で増収効果を確認した換気時400 ppm, 無換気時800 ppm以下で施用する設定とした。展葉速度は、11月から翌3月の間、月に2回調査した。各果房の収穫日は、1区10株4反復調査した。果実の収穫は、週3回行い、8.0 g/個以上で奇形でないものを商品果とし、果数と果重を1区当たり10株、4反復で調査した。収量調査のデータは、エクセルを用い分散分析を行った。成熟日数は、2017年12月～2018年2月の第一次および第二次腋果房頂果開花時に各30株調査した。各試験区で同日に開花した花10株ずつを3回ラベリングして3反復とし、収穫日と1果重を調査した。

4-2. 温度と光合成速度の関係

4-1と同様に高設ベンチで栽培した2016年定植の‘さがほのか’を用い、2017年1月～2月に携帯型光合成蒸散測定装置(LI-6400, LI-COR社)でマルチコントロールRGB光源(6400-18A, LI-COR社)を用い、光合成速度を測定した。測定には、完全展開第3葉の中央小葉を供試し、5株を用いて5反復とした。葉温は日中加温を想定した18℃と日中加温なし(冬季における無加温ハウス内気温)を想定した13℃とし、光合成有効光量子束密度(以下PPFDと表記)を0, 50,

100 , 300 , 500 , 1000 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ の PPFD で, CO_2 濃度を 800 ppm, 相対湿度を 70% とし測定した.

4-3. ^{13}C -光合成産物の転流・分配

光合成産物の転流・分配に関する調査では植物体を解体するため, 1 株ずつポットで栽培した‘さがほのか’を供試した. 2018 年 9 月 28 日に直径 18 cm ポリポットに定植した. 培土および施肥方法, 施肥量は第 2 章と同様とした. 佐賀県農業試験研究センター内の硬質フィルム (エフクリーン自然光 (AGC グリーンテック (株))) ハウスで第二次腋果房頂果が白熟期となるまで栽培し, 2019 年 2 月 18 日に人工気象器 (LPH-411PFQDT-SPC, (株) 日本医科器械製作所) にポットを移し 2 月 21~22 日に試験を実施した. 試験区は, 10:00~17:00 の気温を, 日中加温を想定した 18°C (以下 18°C 区) および日中加温なしを想定した 13°C (以下 13°C 区) とする 2 区とした. 他の時間帯は両区とも同じ温度設定とし, 図 4-3 に示すように, 両区とも 17:00~18:00 の間に 6°C まで温度を低下させ, 18:00~6:00 を 6°C, 6:00 から段階的に温度を上げ 10:00 に各設定値になるように管理した. 人工気象器内の光源として, 天井に植物育成用高光量 LED, 扉面・左右背面に植物育成用蛍光灯型 LED プラントフレックを使用した. 明期を 6:00~17:00, 暗期を 17:00~6:00 とし, 明期における葉面 (ポットの地際から 12 cm の高さ) の PPFD を, 冬季における曇天のハウス内 PPFD を想定した約 200 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ とした. 1 日をとおして CO_2 濃度を 400 ppm, 相対湿度を 70% とした. 第二次腋果房頂果が白熟期になった植物体を人工気象器に入庫し, 3 日後 (開花 33 日後) の 9:00~10:00 に $^{13}\text{CO}_2$ を施与した. 植物体は葉数・果数をそれぞれ 7 枚, 7 果に揃えたソース・シンクユニットとした. $^{13}\text{CO}_2$ 施与方法は第 1 章と同様とした. $^{13}\text{CO}_2$ 施与開始から 8 時間後, 24 時間後の 2 回に分けて株をサンプリングした (図 4-3). 1 回当たりのサンプリング数は 1 区 4

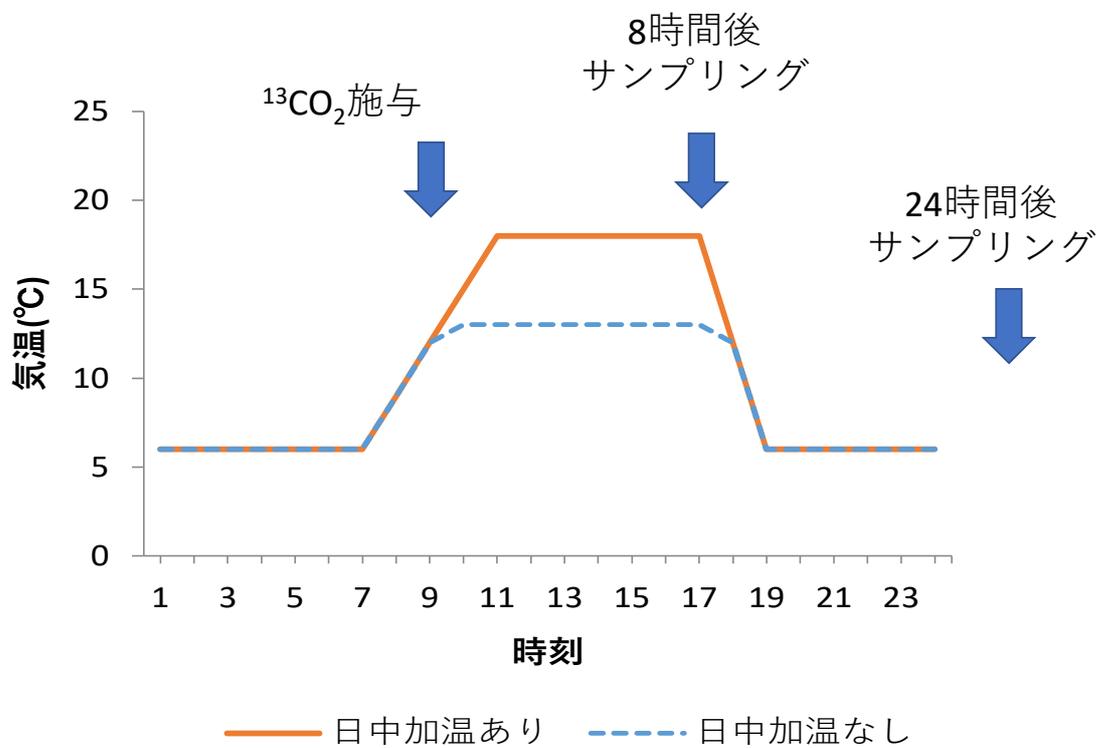


図4-3 $^{13}\text{CO}_2$ 施与試験における人工気象器の温度設定およびサンプリングのタイミング

株とした。サンプリング部位、 ^{13}C 分析方法、転流率および分配率の算出方法は第2章と同様とした。

結果

4-1. 収量および成熟日数

2016, 2017年定植の栽培期間中におけるハウス内日平均気温は、12~2月において2016年12月上中旬を除き日中加温区では対照区と同程度~1.5°C程度高く推移した(図4-4)。また、12~2月における日中(日の出~日の入り)の平均気温は、日中加温区の方が対照区より0.4~2.9°C高く推移した。曇天で日射量の低かった2017年12月12日の気温推移を図4-5に示した。日中加温区では10:00~16:00の間、18°C前後で推移し、対照区より1.5~5°C程度高かった。この日の10:00~16:00における平均気温は、日中加温区で17.6°C、対照区で12.8°Cであった。展葉速度は、2016年産の1月後半から2月に日中加温区でやや速かったが、それ以外の期間における差は認められなかった(図4-6)。18°Cの日中加温により、第一、二次腋果房頂果の1果重は対照と同程度であったが、成熟日数は5日程度短縮された(図4-7)。各果房の収穫開始日は、対象と日中加温で同等であった(表4-1)。また、18°Cの日中加温により、12~2月までの商品果では、平均1果重がやや小さくなるが、商品果率および果数が増加し収量が20%程度増加した。全期間では商品果収量が10%程度増加した(表4-2)。なお、日中加温処理開始前の11月の収量は、2016年定植は30g/株程度、2017年定植は10g/株未満とわずかであり、統計処理の結果、商品果果数、商品果平均1果重、商品果収量ともに有意差は認められなかった。

4-2. 温度と光合成速度の関係

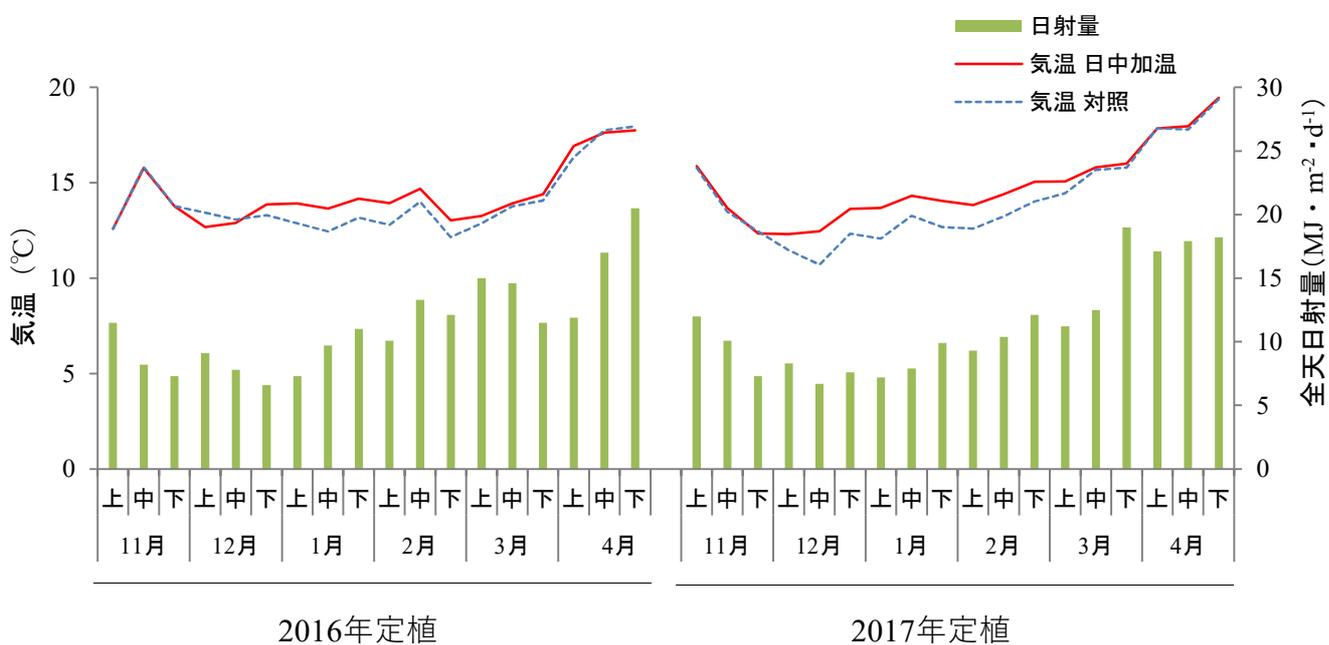


図4-4 各試験区におけるハウス内日平均気温および全天日射量の推移

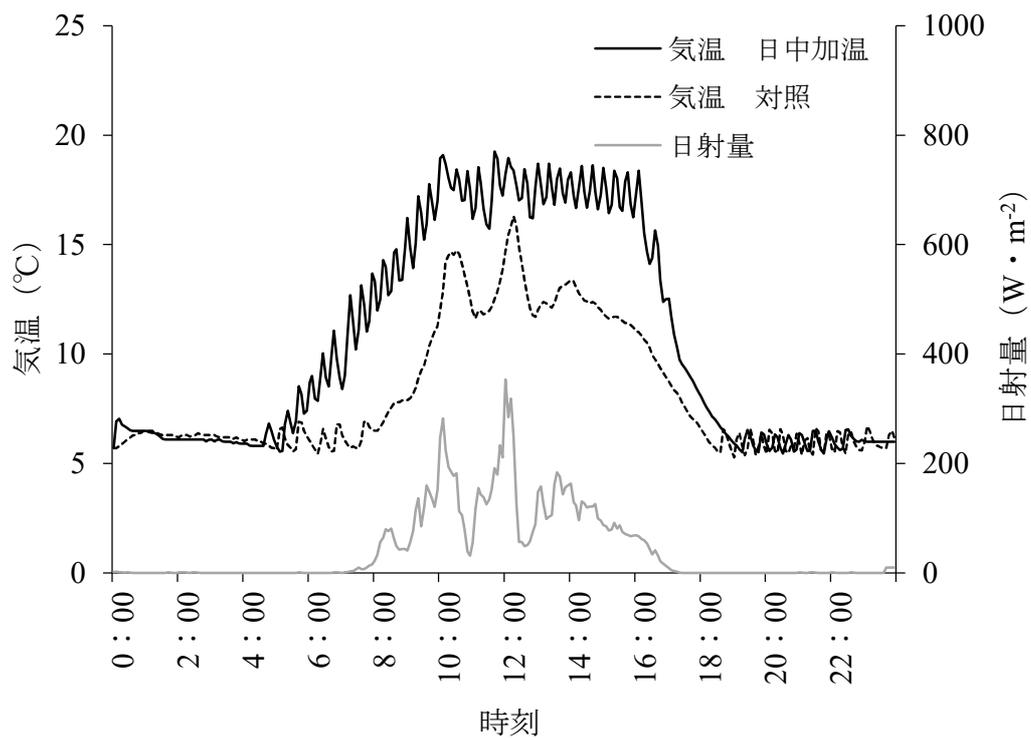


図4-5 各試験区におけるハウス内気温と日射量の推移
 2017年12月12日（曇り一時晴れ，全天日射量 $4.38 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ）の
 ハウス内気温

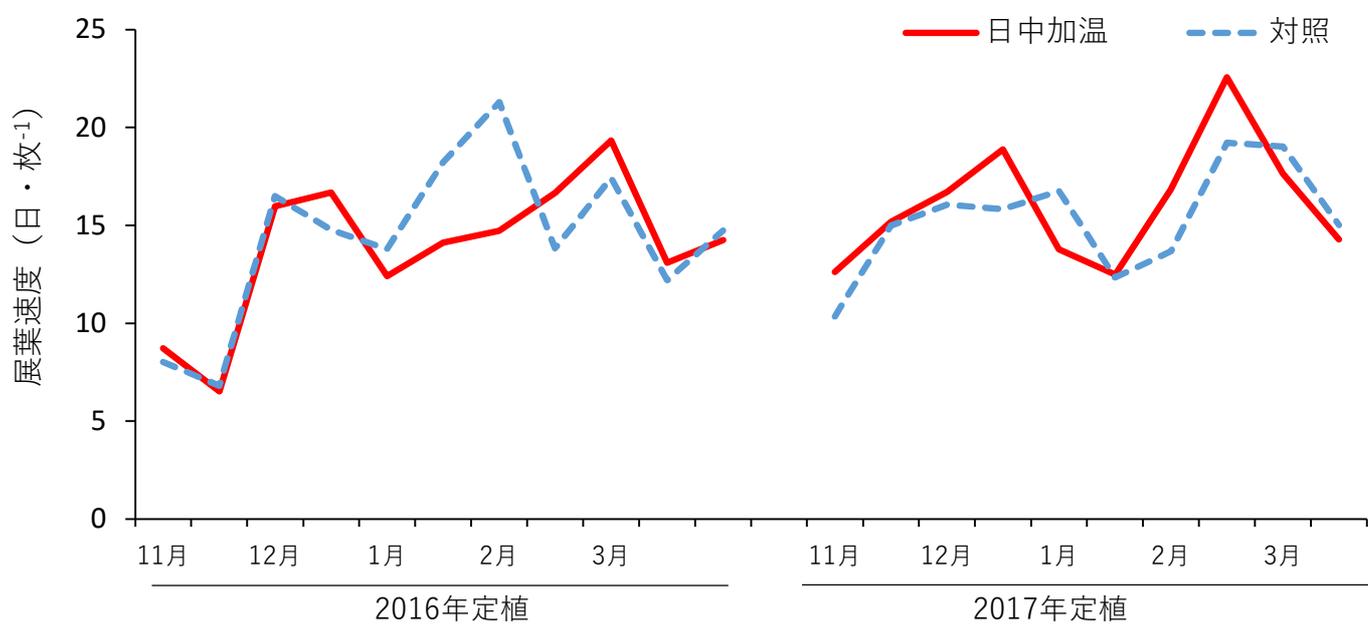


図4-6 日中加温が展葉速度に及ぼす影響

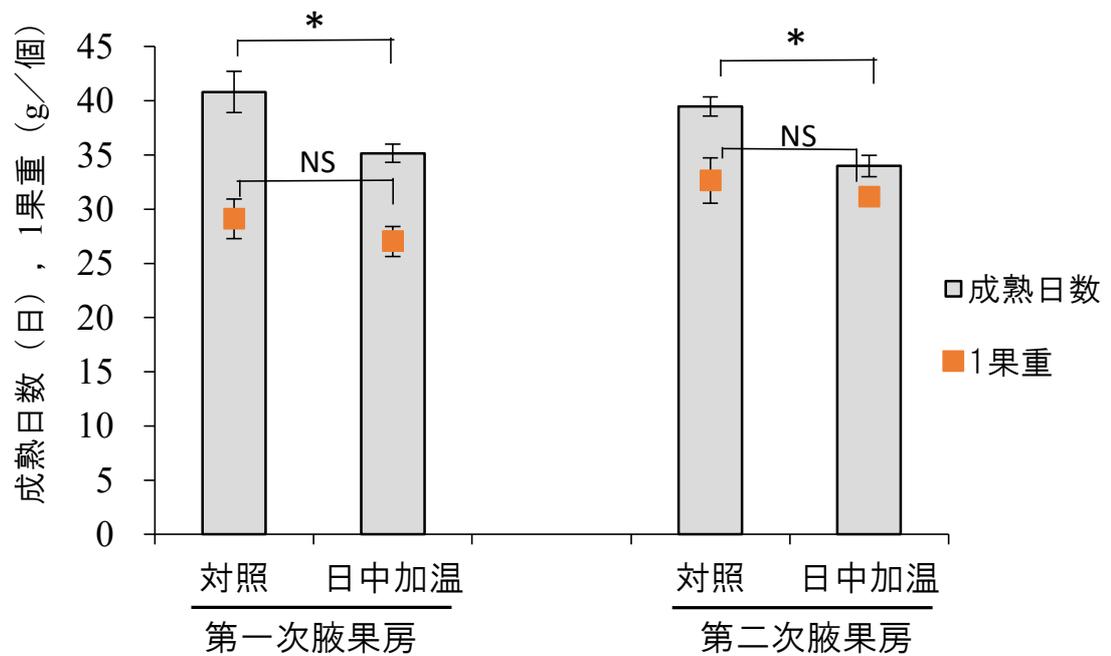


図4-7 日中の加温がイチゴ‘さがほのか’の成熟日数^zおよび各果房頂果の1果重に及ぼす影響

平均開花日は、第一次腋果房2017年12月28日，第二次腋果房2018年1月26日
t検定により*は5%水準で有意差有，NSは有意差なしを示す
エラーバーは標準誤差を示す (n=3)

表4-1 日中の気温が各果房頂果の収穫開始日に及ぼす影響

年次	処理	頂果房	第1次腋果房	第2次腋果房	第3次腋果房
2016年	対照	12月12日	1月28日	2月24日	3月23日
	日中加温	12月11日	1月25日	2月20日	3月21日
2017年	対照	12月10日	1月28日	3月2日	4月12日
	日中加温	12月7日	1月26日	2月27日	4月10日
処理		NS	NS	NS	NS
年次		NS	NS	*	*
交互作用		NS	NS	NS	NS

表4-2 日中の加温がイチゴ‘さがほのか’の商品果数, 果重, 収量に及ぼす影響

年次	処理	日中加温期間(12~2月)				全期間(11~6月)			
		商品果 ^z				商品果			
		果数 (個/株)	平均1果重 (g)	収量 (g/株)	商品果率 ^y (%)	果数 (個/株)	平均1果重 (g)	収量 (g/株)	商品果率 (%)
2016年	対照	10.6	15.8	169.0	84.0	41.4	13.9	575.8	86.8
	日中加温	13.6	15.3	205.7	92.0	45.0	13.9	626.4	88.8
2017年	対照	16.2	18.7	302.8	87.7	44.2	16.9	745.5	90.2
	日中加温	21.0	17.3	362.1	95.1	51.6	16.1	833.5	91.7
	処理	** ^x	**	**	**	**	NS	**	NS
	年次	**	**	**	*	**	**	**	*
	交互作用	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

^z 商品果は8.0 g/個以上で奇形でないもの

^y 総重量に対する商品果重量の割合

^x 分散分析により**は1%水準, *は5%水準で有意差有, NSは有意差なしを示す (n=4)

PPFD100 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下では、葉温による光合成速度の有意差は認められなかった。一方、PPFD300 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上の時、日中加温なしを想定した葉温 13°Cと比較して日中加温を想定した葉温 18°Cでは、光合成速度が 25%以上高く推移した (図 4-8)。

4-3. 日中加温が ^{13}C -光合成産物の転流・分配に及ぼす影響

転流率は、 $^{13}\text{CO}_2$ 施与 8 時間後、24 時間後ともに 13°C区より 18°C区の方が高かった (図 4-9)。1 時間当たりの平均転流率は、昼において 13°C区で 1.68% $\cdot \text{hr}^{-1}$ 、18°C区で 3.02% $\cdot \text{hr}^{-1}$ であり、13°C区と比較して 18°C区の方が有意に高かった (表 4-3)。これに対し、夜においては 13°C区で 1.23% $\cdot \text{hr}^{-1}$ 、18°C区で 1.39% $\cdot \text{hr}^{-1}$ であり、両区に有意差は認められなかった。18°C区における 1 日の平均転流率は 13°C区より有意に高かった。 ^{13}C 施与 8 時間後において、果梗への分配率が 18°C区で 13°C区より有意に低かったが、それ以外では有意差が認められなかった。 ^{13}C 施与 8 時間後、24 時間後ともに 13°C区と 18°C区で同様の分配パターンを示し、いずれも 90%以上が果実へ分配された (図 4-10)。

考察

クラウン温度制御や地中加温では、クラウンや地下部を温めることで出葉速度や果房の出現が速くなることが報告されている (壇ら, 2019; 金ら, 2009)。これに対し、本試験における生育調査の結果では、展葉速度や各果房の収穫開始時期は、日中加温によりやや早まる傾向であったものの、統計的に有意な差が認められなかった (図 4-6, 表 4-1)。一方、2017 年の第一次および第二次腋果房頂果の成熟日数は、日中加温処理によりそれぞれ 5 日間程度短縮された (図 4-7)。

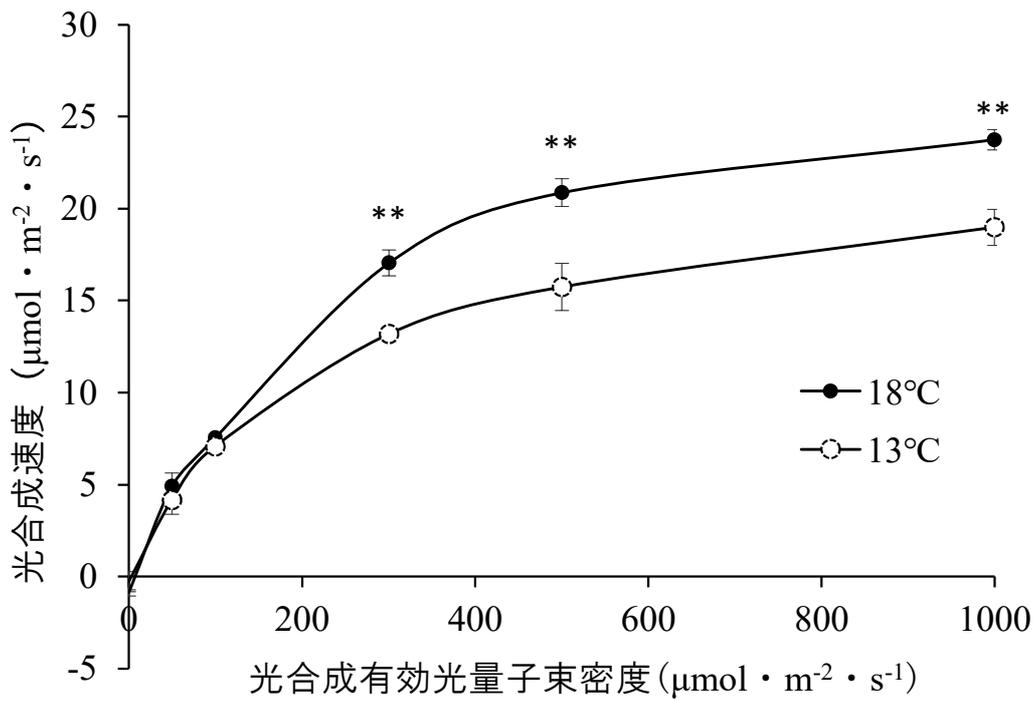


図4-8 異なる葉温におけるイチゴ‘さがほのか’の光-光合成曲線

エラーバーは標準誤差を示す (n=5)
 **はt検定により1%水準で有意差有を示す
 測定条件はCO₂濃度800 ppm, 相対湿度70%

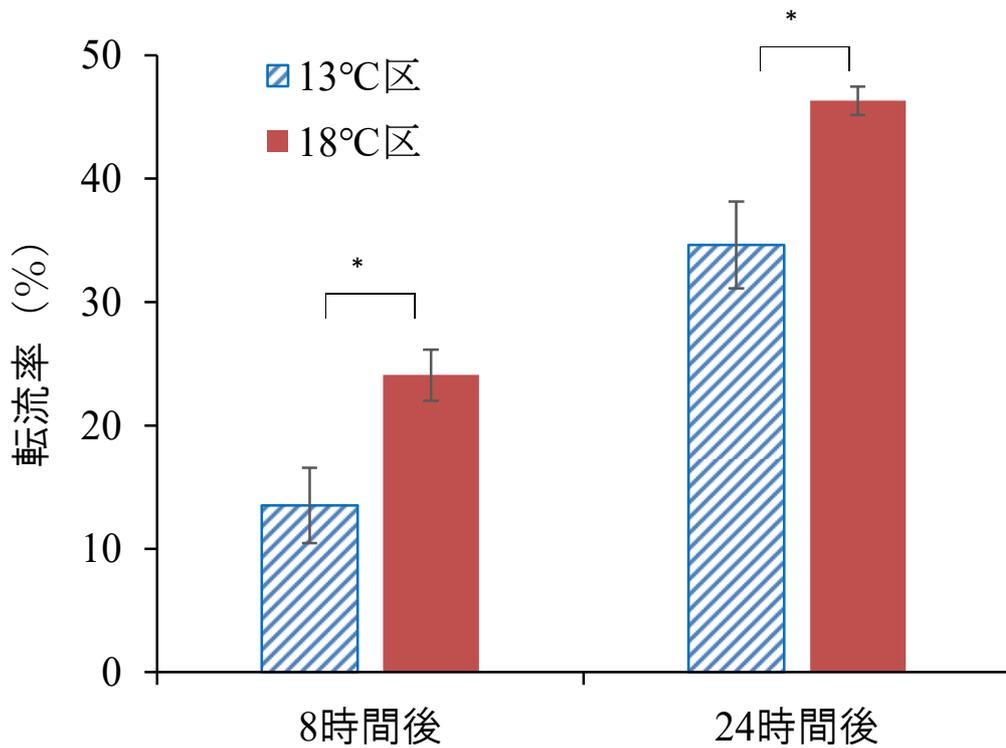


図4-9 異なる日中の気温が $^{13}\text{CO}_2$ 施与後の転流率に及ぼす影響

エラーバーは標準誤差を示す (n=4)

* はt検定により5%で有意差有を示す

転流率 = (フィード葉を除いた植物体全部位から回収された ^{13}C 量/全植物体から回収された ^{13}C 量) × 100

表4-3 日中の気温が平均転流率に及ぼす影響

試験区	1時間当たりの平均転流率 (%)		
	昼	夜	1日
13°C区	1.68 ± 0.38 *	1.23 ± 0.13 NS	1.38 ± 0.15 *
18°C区	3.02 ± 0.26	1.39 ± 0.13	1.93 ± 0.05

* はt検定により5%水準で有意差有, NSは有意差なしを示す

±後の数字は標準誤差を示す (n=4)

転流率 = (フィード葉を除いた植物体全部位から回収された¹³C量/全植物体から回収された¹³C量) × 100

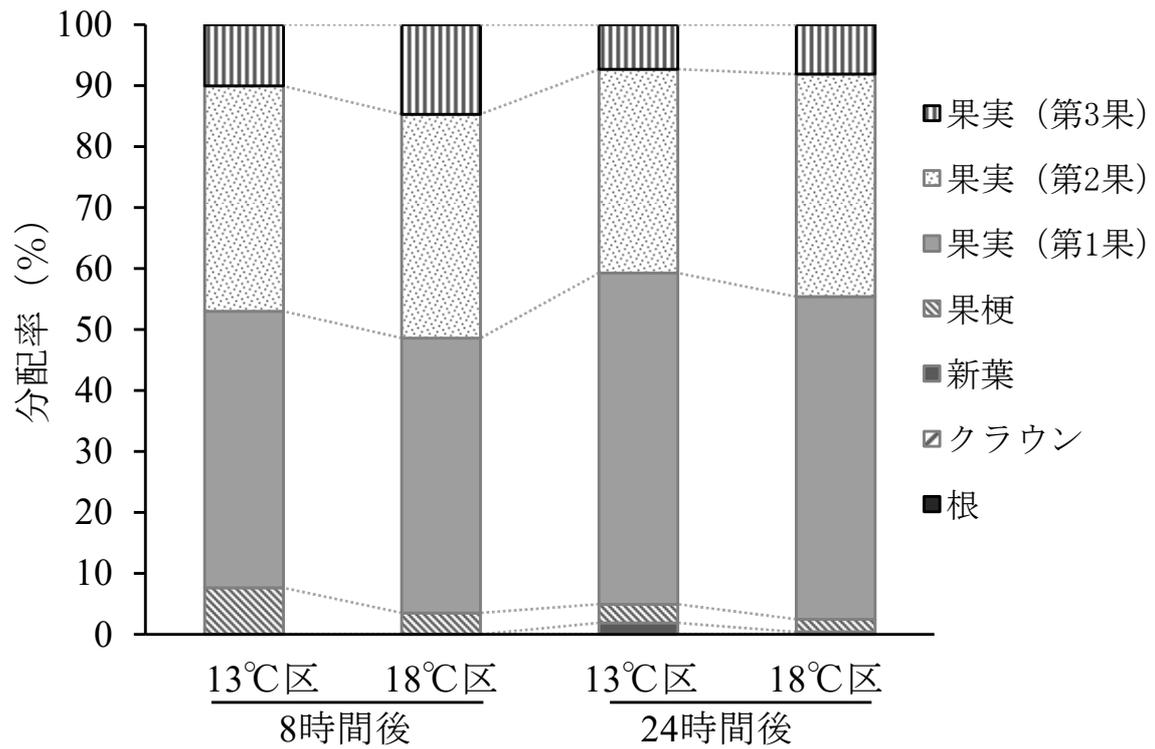


図4-10 異なる日中の気温が¹³CO₂施与後の分配率^zに及ぼす影響

^z 分配率 = (各部位から回収された¹³C量/フィード葉を除いた植物体全部位から回収された¹³C量) × 100

第 3 章では、日中のハウス内気温を高めることが果実の成熟期間を短縮すると同時に、果実への光合成産物の転流を促進することを明らかにしている。本章においても、日中加温によりハウス内気温が上昇したことで、光合成産物の果実への転流が促進され、商品果収量が増加したものと考えられた。本試験では、12～2月の日中加温に要する暖房用電気消費量が、温風暖房機設定を終日 6°Cとした対照区と比べ 20%増加した。暖房用燃料消費量の試算ツール（高市，2007）を用いて、佐賀県の一般的なハウス形状（間口 6 m，奥行 50 m，単棟，軒高 1.8 m），被覆条件（塩ビ被覆，内張 PO 一層）での暖房用燃料消費量を算出し，この値に 20%を乗じて日中加温の経費を算出した結果，10 a 当たり 4.3 万円程度（A 重油価格 100 円・L⁻¹ で算出）と試算された。本試験の結果，日中加温により，販売金額が 10 a 当たり 69 万円程度（増収効果は 2 か年の平均値，販売単価は 2016，2017 年の JA さが年間平均単価より試算）増加すると見込まれるため，選果などに要する販売経費の増加分 10 a 当たり 17.5 万円を差し引いても 10 a 当たり 47 万円程度収益が増加すると試算された。なお，本試験は，CO₂ 濃度を換気時 400 ppm，無換気時 800 ppm で施用した条件下で試験を実施したものである。光合成産物が十分でない条件下では，葉が薄くなるなど草勢を低下させる可能性があるため，着果負担状況や草勢を見ながら，日中加温の設定温度を調整することが望ましい。

光合成速度の測定結果では，佐賀県内の冬季ハウス内の雨天に相当する PPFD100 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下においては，葉温による光合成速度の差が認められなかった。このことから，雨や雪により PPFD が極端に低い場合には，日中加温による光合成促進効果は少なくなると考えられた。一方，佐賀県内の冬季ハウス内の曇天に相当する PPFD300 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上で葉温 18°C が 13°C より高い光合成速度であったことから，曇天時にも日中加温することで光合成を促進できることが明らかとなった。和田ら（2010）は，イチゴ‘とちおとめ’の温度と光合成速度の関係について，葉温 10～30°C のうち 10～20°C においては葉温が高いほ

ど光合成速度が高くなることを示している。本試験における PPF300 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上での結果は、和田ら (2010) と一致し、冬季ハウス内における低温管理は光合成を低下させていると考えられた。

日中加温が光合成産物の転流・分配に及ぼす影響について ^{13}C を用いた試験を実施した。第 3 章では、イチゴの第一次腋果房頂果の開花から白熟期において、昼の温度が高い方が果実への ^{13}C -光合成産物の転流・分配が高まり、果実乾物重が増加することを明らかにした。第 3 章での ^{13}C 試験は、晴天日に実施し、昼 (9:00~17:00) における平均気温が昼高温区で 25.4°C、昼低温区で 21.0°C と、本研究より高温域であった。前報における乾物生産調査期間には曇天が多く含まれていたものの、曇天のみの条件下における光合成産物の転流・分配は明らかにしていない。そこで、本研究における ^{13}C 試験は、人工気象条件下において、曇天日を想定した弱光下で、昼の温度を 18°C および 13°C として実施した。その結果、 $^{13}\text{CO}_2$ 施与後 8 時間後および 24 時間後の転流率は、13°C 区に対して 18°C 区の値がそれぞれ 1.78 倍および 1.34 倍となり、いずれも 18°C 区の方が 13°C 区より有意に高かった (図 4-9)。トマトでは、日平均温度 3~43°C の範囲において、約 33°C までは温度が高いほど果実への転流が促進されることが報告されている (吉岡ら, 1986)。イチゴでは、熊倉・穴戸 (1994a) が、人工気象条件下において 15~25°C の間で温度が果実肥大に及ぼす影響を検討し、平均温度が 15°C より 20°C で果実の発育が早いことを明らかにしている。本試験においても日中の温度が高い 18°C 区が 13°C 区より転流率が高く、13~18°C の範囲においても温度が高い方が転流を促進すると考えられた。1 時間当たりの平均転流率は、昼において 18°C 区が 13°C 区の 1.8 倍で有意に高かったが、夜においては有意差が認められなかった (表 4-3)。このことから、 $^{13}\text{CO}_2$ 施与 24 時間後の転流率において 18°C 区と 13°C 区に認められた有意差は、昼の転流率の差が反映された結果であることが明らかとなった。Shishido ら (1990) は、昼夜温 25°C 一定、8 時間日長条件下でトマトの時間帯別の転流量を比較し、昼:夜=約 7:3 であったとしている。

また、第2章で述べたように植物ポジトロンイメージング装置 (PETIS) による¹¹Cを用いたトレーサー実験では、ナスにおいて、¹¹CO₂が光合成産物に変換されてから果実へ取り込まれ始めるまでの時間はおよそ60分前後であることが明らかにされている (Kikuchiら, 2008)。これらのことから、日中には光合成と同時に光合成産物の転流が活発に行われているため、夜に比べて昼の環境が転流に大きな影響を与えると考えられる。一方、¹³C-光合成産物の分配率は、温度処理により大きな差が認められなかった (図4-10)。イチゴ果実への光合成産物の分配率は開花から果実の発育とともに増加すると報告されており (熊倉・穴戸, 1994b; 西沢・堀, 1988)、シンク強度の影響が大きい。本試験では、果実の大きさが揃った同じ生育ステージの株を選抜し、3日間人工気象器の環境に慣れさせたのち¹³CO₂処理を実施したことから、シンク・ソースバランスや生育ステージはほぼ同一条件での試験であり、分配率に差は認められなかったと考えられた。これらの結果から、日中の弱光条件下において13°Cと比較し18°Cに温度を高めると¹³C-光合成産物の分配パターンは同様であるが、転流率が高くなることが明らかになった。

要約

北部九州の冬季イチゴ栽培において、日中加温がイチゴ‘さがほのか’の収量に及ぼす影響を調査した。その結果、北部九州の冬季イチゴ促成栽培において、日中18°Cの加温は12~2月の果実成熟日数短縮、商品果数増加、商品果率向上、商品果収量増加に有効であることが明らかになった。また、増収の生理的な要因を検討した結果、日中の温度を高めることが、光合成および光合成産物の転流を促進していることが明らかになった。

総括

九州は日本の主要なイチゴ生産地域であり、作付面積、出荷量ともに全国の約1/3を占める。特に北部九州で生産量が多く、福岡、長崎、佐賀は全国でも有数のイチゴ産地となっている。北部九州は、日本列島の南部に位置するため温暖な気候である一方、厳寒期の日射量が少なく、ハウス内の気温が低く推移しやすい。低日射によるハウス内気温不足は、果実の成熟遅延や減収の要因となっている。このような背景から、近年、CO₂施用を中心とした環境制御技術が注目を集めており、佐賀県内でも半数以上のイチゴ生産者にCO₂発生装置が導入されている。しかしCO₂を施用しても増収しない事例があり、CO₂発生装置を有効に活用した厳寒期における収量低下対策技術の開発が求められている。施設環境制御の先進地であるオランダでは植物生理に基づいた環境制御技術が発達しており（Heuvelink・Kierkels, 2015）、施設園芸の多収化が著しい。そこで、本試験では、北部九州の厳寒期におけるイチゴの増収技術を開発するため、植物生理に基づいた有効なCO₂施用や温度管理等の環境制御技術について検討した。

はじめに、第1章ではCO₂濃度がイチゴ‘さがほのか’の収量、光合成速度、光合成産物の転流・分配に及ぼす影響について検討した。CO₂濃度を常時400 ppm以上に設定した400 ppm区と無換気時に800 ppm以上、換気時に400 ppm以上とした800 ppm区において‘さがほのか’の栽培試験を行ったところ、両試験区における草丈や葉の大きさの有意差は認められなかったが、800 ppm区において商品果数が有意に増加し全商品果収量は約25%増加した。800 ppm区の果実Brixは400 ppm区と比較して、1~3月において高くなる傾向にあった。経済性の試算では、400 ppm区に比べて800 ppm区の粗収益が125 千円・a⁻¹増加した。粗収益から出荷経費とCO₂施用経費を差し引いた試算収益も800 ppm区で83 千円・a⁻¹高くなり、換気に応じたCO₂制御により換気部からのCO₂流出を最小限に抑えながら効率的なCO₂施用が可能となることが示された。また、CO₂濃度に対す

るイチゴ‘さがほのか’の生理的反応を明らかにするため、光合成速度および光合成産物の転流・分配について測定した。その結果、CO₂濃度が800 ppm程度まではCO₂濃度の上昇にともない光合成速度が急激に上昇し、800 ppmでの光合成速度は400 ppmの時の1.6倍になることが明らかになった。さらに、第一次腋果房頂果開花から白熟期におけるCO₂施用濃度が¹³C-光合成産物の転流・分配に及ぼす影響を調査した結果、処理24日後の頂果白熟期において、CO₂濃度400 ppmに比べて800 ppmでは転流率に影響はないが最大シンクである果実第1果への分配率が高くなることが明らかになった。これらのことから、CO₂濃度400 ppmに比べて800 ppm条件下において、光合成速度が1.6倍に上昇すること、最大シンクへの光合成産物の分配率が高くなることがCO₂濃度800 ppm条件下で増収する要因と考えられた。

次に第2章では、施設園芸品目のトマトなどにおいて成長速度や収量に影響を及ぼす重要な環境要因であると報告されている湿度に着目し、イチゴの光合成速度に及ぼす湿度の影響を検討した。本章では、施設園芸先進国であるオランダで実践されている緩やかな温湿度管理の有効性を検証するとともに、‘さがほのか’の光合成特性を明らかにするため、急激な相対湿度の変化が、‘さがほのか’の光合成速度に及ぼす影響について検討した。人工気象器内において、相対湿度40%と70%条件下での90分間の反応を比較した結果、相対湿度40%条件下では70%条件下より、蒸散速度の上昇、気孔コンダクタンスの低下、光合成速度の低下、葉温の上昇が認められ、急激な湿度低下は光合成に影響することが明らかになった。これらのことから、短時間でも急激な湿度低下はイチゴの光合成速度低下につながることを、および、低湿度が長時間継続すると光合成速度の低下が蓄積され低収量につながるものと考えられた。イチゴにおいても温湿度を急激に変化させないオランダ型の温度管理は光合成速度を高く保つために有効であると考えられた。

第 3 章では、光合成産物の果実への転流を温度制御により促進する方法を開発するため、昼温および夜温が‘さがほのか’の ^{13}C 光合成産物の転流および分配に及ぼす影響を検討した。試験は、昼を 9:00~17:00、夜を 17:00~翌 9:00 とし、第一次腋果房頂果の開花時から昼温 2 区×夜温 2 区の 4 試験区を設けた。昼高温区は、換気温度 28°C、9:00~16:00 の加温開始温度 18°C とし、昼低温区は、換気温度 23°C で日中加温なしとした。夜高温区は、加温開始温度 8°C、夜低温区は加温開始温度 5°C とした。第一次腋果房頂果の成熟日数は、昼低温区において昼高温区より長くなったが、夜間の温度は影響を及ぼさず、日平均温度より昼の温度の影響が大きかった。第一次腋果房頂果開花時および開花 32 日後において安定同位体 ^{13}C を施与し、昼温および夜温を変化させ光合成産物の転流率・分配率を測定した。その結果、開花 32 日後の時間当たりの転流率は、昼の時間帯において昼高温区 ($3.23\% \cdot \text{hr}^{-1}$) が昼低温区 ($1.37\% \cdot \text{hr}^{-1}$) の 2 倍以上の値で有意に高かった。これに対し夜の時間帯において、夜高温区 ($1.35\% \cdot \text{hr}^{-1}$) と夜低温区 ($1.29\% \cdot \text{hr}^{-1}$) の間には有意差が認められなかった。このことから夜に比べて気温が高い昼の環境が転流すなわち果実肥大に及ぼす影響が大きくなると考えられた。開花時および開花 32 日後の $^{13}\text{CO}_2$ 施与 24 時間後における ^{13}C -光合成産物の分配率を比較すると、開花時において新葉に最も多く分配されていたのに対し、開花 32 日後では果実への分配率が高く、昼高温区で 90% 以上、昼低温区で 70% 以上となった。開花 32 日後の昼高温区においては、第 1 果への分配率が高く、これは昼高温で第 1 果の果実肥大が進んだことによると考えられた。開花 32 日後における果実乾物重は、昼高温区が昼低温区より有意に大きく、昼の高温が果実の発育を促進したと考えられた。以上の結果から、厳寒期の施設イチゴにおいて昼の温度を高めることは、光合成産物の果実への転流および成熟を促進する効果があることが明らかとなり、気象条件や草勢に応じてイチゴの生育をコントロールする方法のひとつとして活用できると考えられた。

最後に第 4 章では、北部九州の冬季イチゴ栽培において、日中加温がイチゴ‘さがほのか’の収量および光合成、光合成産物の転流・分配に及ぼす影響を明らかにし、日中加温の有効性を検証した。第 4 章では、第 1 章で優れた結果となった無換気時の CO₂ 濃度 800 ppm 条件および第 2 章で明らかとなった午前中の温度を徐々に上昇させることで湿度を急変させない条件下における栽培とし、第 3 章で明らかになった高昼温の効果を確認するため、日中加温の有無について試験を実施した。日中加温区では、6:00~10:00 を 6°C から段階的に 18°C とし、10:00~16:00 を 18°C、16:00 以降を 6°C とした。また対照区では、設定温度を終日 6°C とし、成熟日数や収量等を比較した。その結果、日中加温により 12~2 月の商品果果数および収量が増加することが確認された。第一次および第二次腋果房頂果の成熟日数は、日中加温処理によりそれぞれ 5 日間程度短縮された。また、増収の生理的な要因を検討するため、物質生産の基盤となる光合成速度および光合成産物の転流・分配について調査した。その結果、冬季曇天日におけるハウス内日中加温温度を想定した 18°C および日中加温なしを想定した 13°C の葉温における光合成速度は、PPFD300 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上で、葉温 13°C よりも 18°C において高い値を示した。日中の弱光条件下における ¹³C-光合成産物の転流率は、¹³CO₂ 施与後 8 時間後および 24 時間後において、いずれも昼温 18°C が 13°C より有意に高い値を示した。一方、昼温 18°C および 13°C とともに ¹³C-光合成産物の分配パターンは同様であった。以上の結果から、北部九州の冬季イチゴ促成栽培において日中 18°C の加温により、12~2 月の商品果収量が増加し、日中加温が有効であることが示された。また、増収の生理的な要因を検討した結果、日中の温度を高めることが、光合成および光合成産物の転流を促進していることが明らかになった。

以上のように、イチゴの環境制御による増収を目的として試験を実施した結果、換気に応じた CO₂ 高濃度施用により増収すること、急激な湿度変化を避けることにより光合成速度が維持できること、夜より昼の温度を上げる方が光合

成産物の転流や果実成熟に対する効果が高いこと、日中 18°Cでの加温により増収する効果があること等を明らかにした。環境制御による増収には、光合成の最大化および光合成産物を果実と茎葉へバランスよく分配させることが重要であるため、本論文では光合成産物の転流動態解明に特に注力した。光合成産物の動態は、これまでの研究事例が非常に少なく不明な点が多かったが、本研究でその一部分を明らかにすることができた。これにより、イチゴの生理生態に基づいた環境制御が可能となり、冬季に日射量の少ない北部九州において CO₂ 濃度や温度をコントロールで光合成および光合成産物の果実への転流・分配を制御でき、イチゴの生産性を高めることが可能であるものと考えられた。

Improvement of productivity by environmental controls focusing on photosynthetic characteristics in strawberry

Ai Tagawa

Summary

Kyushu is one of the main strawberry production areas in Japan, accounting for about one-third of the country's total planted area and shipping volume. The amount of production is particularly high in northern Kyushu, and Fukuoka, Nagasaki, and Saga Prefectures are the leading strawberry production areas in Japan. Northern Kyushu is located on the southern part of the Japanese archipelago, so that it shows a warm climate. The amount of solar radiation in this region is, however, low in winter season, and the temperature inside the greenhouses tends to be low. Insufficient temperature inside greenhouses due to low solar radiation results slow fruit maturation and is a cause of low yields. Under such climate background, environmental control technology centered on CO₂ application has been attempted in recent years, and more than a half of the strawberry producers in Saga Prefecture have introduced CO₂ generators. However, there are cases in which the yield does not increase even with the application of CO₂, and the development of a technology for increasing the yield during the extremely cold season by effectively using the CO₂ generator is required. On the other hand, the yields of horticultural crops in protected cultivation are increasing remarkably in the Netherlands, in which various environment control techniques have been advanced. This is attributed to the development of environmental control technology based on plant physiology in

the Netherlands (Heuvelink and Kierkels, 2015). Thus, environmental control is considered to have a great potential for the increase of crop yields. Therefore, in this research, environmental control techniques such as CO₂ application and controls of temperature and humidity were investigated in order to develop techniques for increasing strawberry yields during winter season in northern Kyushu.

First, effects of CO₂ enrichment on yield, photosynthetic rate, translocation and distribution of photosynthetic assimilates in strawberry 'Sagahonoka' were investigated in the Chapter 1. Two different CO₂ application treatments, the 400 ppm treatment where minimum CO₂ concentration was kept more than 400 ppm, and the 800 ppm treatment where minimum CO₂ concentration was kept more than 800 ppm and 400 ppm during no ventilation and ventilation, respectively, were examined in strawberry production. Although there were no significant differences in plant height and leaf size between both treatments, it was found that the 800 ppm treatment resulted in significant increases of the number and yields (21 – 30%) of the marketable fruits as compared with the 400 ppm treatment. Brix of fruit in the 800 ppm treatment showed the tendency to increase comparing with the 400 ppm treatment from January to March. According to the estimated economic efficiency, the rough income in the 800 ppm treatment was 125,000 yen · a⁻¹ higher than that in the 400 ppm. Even when expenditure due to CO₂ application and transportation cost was subtracted, the gross profit was estimated to be 87,000 yen · a⁻¹ in 800 ppm treatment. It was shown that CO₂ application relating to ventilation enabled efficient CO₂ control with high profit to minimize the CO₂ outflow from the ventilation. Furthermore, in order to clarify the physiological response of the strawberry 'Sagahonoka' to the CO₂ concentration, the photosynthetic rate, and translocation and distribution of

photosynthetic assimilates were investigated. As a result, it was found that the photosynthetic rate sharply rose as CO₂ application increased up to 800 ppm, and the photosynthetic rate at 800 ppm was 1.6 times as compared with the value at 400 ppm. And effect of CO₂ concentration on translocation and distribution rate of ¹³CO₂- photosynthetic assimilates at between anthesis to white ripening stage of the primary fruits in secondary inflorescence were investigated. From the results of the investigation, CO₂ enrichment at 800 ppm for 'Sagahonoka' was effective in increasing the photosynthetic rate and it was estimated that increase of the distribution of photosynthetic assimilates to fruits resulted the increase of yields at CO₂ 800 ppm. The yields of strawberry fruits could be increased efficiently by the method of automatically controlling the CO₂ concentration depending on the ventilation in the southern region of Japan.

Next, effects of humidity on the photosynthetic rate of strawberries were investigated in the Chapter 2. It has been reported humidity is a very important environmental factor that affects the growth rate and yield in greenhouse horticultural crops such as tomatoes. In this chapter, the author verified the effect of mild temperature and humidity control practiced in the Netherlands. Effects of rapid changes in relative humidity on the photosynthetic rate of strawberry 'Sagahonoka' were also investigated. As a result of comparing the reaction for 90 minutes under 40% relative humidity and 70% relative humidity conditions in the growth chamber, transpiration rate increased, stomatal conductance decreased, and photosynthetic rate increased under 70% relative humidity conditions compared to 40% conditions. That is to say, it was inferred that a rapid decrease in relative humidity, even for a short period of time, leads to decrease in the photosynthetic rate of strawberry plants, and that prolonged low humidity causes accumulation of decreased photosynthetic rate, leading to low yields. Dutch-style

temperature control, which changes mild in temperature and humidity, is also effective in keeping high photosynthetic rate for strawberry plants.

The effect of day and night temperature on translocation and distribution of ^{13}C -photosynthetic assimilates was investigated for clarifying fruit growth and ripening in the Chapter 3. The translocation rate in the daytime was twice higher than that in the nighttime, and the effect of day temperature on translocation and fruit growth was greater than that of the night temperature. ^{13}C -photosynthetic assimilates was most distributed to new leaves in the flowering stage, whereas the distribution rate to fruit was more than 90% under the high day-temperature and 70% at the low day-temperature in the white ripening stage (32 days after flowering). Dry weight of fruits in the white ripening stage under the high day-temperature was significantly heavier than the value under the low day-temperature, suggesting that the high temperature in the daytime promoted fruit growth. The ripening days of top fruits at the secondary inflorescence at the low day-temperature were longer than those at the high day-temperature, but the days were not affected by the night temperature. Furthermore, the effect of daytime temperature on the ripening days was greater than that of the daily average temperature. From these results, it was clarified that increasing the daytime temperature in the green house during winter season promotes the translocation and ripening of strawberry fruits. It could be used as one of the means to control the growth of strawberry.

Finally, effects of daytime heating on yield, photosynthesis, translocation and distribution of photosynthetic assimilates of strawberry 'Sagahonoka' during the winter season in northern Kyushu were examined in the Chapter 4. In this Chapter, strawberry plants were cultivated under the condition of 800 ppm CO_2 concentration during no ventilation based on the results in the Chapter 1, and the

condition of gradually increasing temperature in the morning based on results in the Chapter 2. In order to confirm the effect of high daytime temperature clarified in the Chapter 3, the author conducted a test with or without daytime heating. In order to confirm the effect of high temperature for daytime, daytime heating experiments were conducted. Daytime heating at 18°C resulted in increases of the marketable fruit number and yield from December to February. The days from flowering to ripening of top fruits in the first and second inflorescences were shortened by about 5 days by daytime heating treatment. The photosynthetic rate was higher at 18°C than at 13°C when PPFD was 300 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ or higher. The translocation rate of ^{13}C - photosynthetic assimilates under low light conditions was significantly higher at 18°C than at 13°C. On the other hand, the distribution patterns of ^{13}C -photosynthetic assimilates were similar at 18°C and 13°C in the daytime. Since daytime heating increased the commercial fruit yield from December to February, it was indicated that daytime heating is effective for high productivity in winter strawberry forcing culture in northern Kyushu. Physiological factors promoting an increase in yield involved higher temperatures accelerating photosynthesis and translocation rates.

As described above, the experiment was conducted with the aim of increasing yields by environmental control of strawberry plants. As a result, it was found that yields were increased by applying high concentration CO_2 depending on the ventilation, and photosynthetic rate was maintained by avoiding rapid changes in temperature and humidity. And it was clarified that increasing the day temperature in the greenhouse during a winter season promotes the translocation and ripening of strawberry fruit, and daytime heating at 18°C was effective for high productivity in winter strawberry. In order to increase yields through

environmental control, it is important to maximize photosynthesis and distribute photosynthetic assimilates to fruits and leaves in a well-balanced, in this paper, the author focused on the explication of the translocation dynamics of photosynthetic assimilates. However, the dynamics of photosynthetic assimilates has been unclear due to the limited number of studies, we could clarify a part of it in this report. As a result, it is possible to control the environment based on the physiological response of strawberries. By controlling CO₂ concentration and temperature to control photosynthesis and the translocation of photosynthetic assimilates to fruits, it will be possible to increase the productivity of strawberries.

謝辞

本論文の取り纏めにあって、終始丁寧な御指導を賜った九州大学大学院農学研究院教授尾崎行生博士、御助言と御校閲を賜った九州大学熱帯農学研究センター教授宮島郁夫博士、九州大学実験生物環境制御センター教授吉田敏博士、九州大学大学院農学研究院准教授安武大輔博士に深甚なる謝意を表します。また、ゼミ等を通じて、本研究に対して多くの助言を頂きました園芸学教室の皆様心から御礼を申し上げます。

元野菜茶業研究所の宍戸良洋博士には特に同位体を用いた転流試験に関する御指導、御助言と御校閲を賜りました。謹んで心より深謝申し上げます。

本研究を進めるにあたり、御助言をいただき、本研究で必要となりました同位体分析機を快くお貸しく下さり、研究への御指導を賜りました愛媛大学大学院農学研究科教授荒木卓哉博士に対し、ここに深く感謝の意を表します。

本論文の作成にあたり、親切な御指導と御助言をいただきました佐賀県農業試験研究センター野菜・花き部長の中島寿亀氏には心より感謝申し上げます。

本論文の実験を実施するにあたり、元佐賀県農業試験研究センター（現、佐賀県農業技術防除センター）の江原愛美氏、佐賀県農業試験研究センターの伊藤優佑氏をはじめ、佐賀県農業試験研究センター野菜・花き部野菜研究担当（栽培）に在籍した研究員各位には、多大な御協力をいただきました。謹んで深く感謝の意を表します。

試験を遂行するに当たり、佐賀県農業試験研究センター野菜・花き部野菜研究担当（栽培）の農業技術員北村浩一氏、会計年度任用職員溝口淳一氏をはじめ現場職員の皆様には、試験ほ場設営や調査などに御尽力いただきました。ここに記し、深く謝意を表します。

本研究を進める過程で御指導・御尽力をいただきました上記ならびに全ての佐賀県農業試験研究センターの職員および臨時職員の皆様に、心より感謝いたします。

引用文献

- Barker J. C. 1990. Effects of day and night humidity on yield and fruit quality of glasshouse tomatoes (*Lycopersicon esculentum* Mill.). J. Hortic. Sci. Biotech. 65:323-331. DOI : 10.1080/00221589.1990.11516061
- Braun, D. M., L. Wang, and Y. L. Ruan. 2014. Understanding and manipulating sucrose phloem loading, unloading, metabolism, and signalling to enhance crop yield and food security. J. Exp. Bot. 65: 1713–1735. <https://doi.org/10.1093/jxb/ert416>.
- Chen, K., G. Q. Hu and F. Lenz. 1997a. Effects of CO₂ concentration on strawberry. I Plant growth analysis. Angew. Bot. 71: 168-172.
- Chen, K., G. Q. Hu and F. Lenz. 1997b. Effect of CO₂ concentration on strawberry. VI. Fruits yield and quality. Angew. Bot. 195-200.
- Choi, H. G. and H. J. Jeong. 2020. Comparison of chlorophyll fluorescence and photosynthesis of two strawberry cultivars in response to relative humidity. Hort. Sci. Technol. 38: 66-77.
- 壇 和弘・菅野 亘・中原俊二・後藤直子・本間由紀子・遊佐真奈美・岩崎泰永・高野岩雄・高山詩織・日高功太・高山智光・今村 仁. 2019. 宮城県でのクローン温度制御を用いたイチゴの促成栽培. 九州沖縄農研セ報. 68: 10-21.
- 伊達修一. 2012. 第3章 用水と培養液の調整・管理. p. 99. 日本施設園芸協会, 日本養液栽培研究会共編. 養液栽培のすべて: 植物工場を支える基本技術. 誠文堂新光社. 東京.
- 江原愛美・田川 愛・東出忠桐. 2017. 午後高温・夕方急速降温管理が促成栽培キュウリの生育に及ぼす影響. 園学研. 16: 155–161. DOI: 10.2503/hrj.16.155
- Forney, C. F. and P. J. Breen. 1985. Growth of strawberry fruit and sugar uptake of fruit discs at different inflorescence positions. Sci. Hort. 27: 55-62.

- Heuvelink, E. and T. Kierkels. 2015. Plant physiology in greenhouses. Horti-Text BV, Woerden. p. 66–87.
- Hidaka, K., Y. Miyoshi, S. Ishii, N. Suzui, Y. Yin, K. Kurita, K. Nagao, T. Araki, D. Yasutake, M. Kitano and N. Kawachi. 2019. Dynamic analysis of photosynthate translocation into strawberry fruits using non-invasive ^{11}C -labeling supported with conventional destructive measurements using ^{13}C -labeling. *Front. Plant Sci.* 9: 1-12. DOI: 10.3389/fpls.2018.01946.
- Hidaka, K., S. Nakahara, D. Yasutake, Y. Zhang, T. Okayasu, K. Dan, M. Kitano, K. Sone. 2022. Crop-local CO_2 enrichment improves strawberry yield and fuel use efficiency in protected cultivations. *Sci. Hort.* 301: 111104. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111104>
- Higashide, T. and E. Heuvelink. 2009. Physiological and morphological changes over the past 50 years in yield components in tomato. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 134: 460–465.
- Hori, Y. and Y. Shishido. 1977. Studies on translocation and distribution of photosynthetic assimilates in tomato plants. I. Effects of feeding time and night temperature on the translocation and distribution of ^{14}C -assimilates. *Tohoku J. Agric. Res.* 28: 26-40.
- 星 岳彦・安場健一郎・黒崎秀仁. 2016.日本の施設園芸とユビキタス環境制御システムの現状と展望. *植物環境工学*. 28: 163-171.
- 池田英男・中野明正・安 東赫・岡 准慈・岩崎泰永・稲田秀俊・北宅善昭・和田光生・斉藤 章・加納賢三・福田直也 2009. C の動態に注目した高生産性施設環境調節技術の開発と生産現場への展開.野菜茶業研究所課題別研究会資料. pp.32-41.
- 稲田秀俊・水野（山邊）あずさ・中原正一. 2010. トマトの葉の気孔拡散伝導度および蒸散速度に対する環境要因の影響. *茨城農総セ研報*. 17: 17-22.

- 板木利隆. 1983. 施設園芸. pp.174-246. 誠文堂新光社. 東京.
- 岩崎泰永. 2015. 施設園芸・植物工場ハンドブック. 第5章. 二酸化炭素制御.
日本施設園芸協会. p. 186.
- 川里 宏. 2015. 草莓の歴史. 第4章. 20世紀前半の発展. p.25-26. 小林印刷.
栃木.
- 川島信彦. 1991a. 施設内における CO₂ 施用に関する研究 (第3報) イチゴの生育に関する効果. 奈良農試研報. 22: 65-72.
- 川島信彦. 1991b. 施設栽培における CO₂ 施用の現状と課題. 農業気象. 47: 177-182.
- 川島信彦・山本英雄・黒住 徹・谷川賢剛・田中良宏. 1993. 施設内における CO₂ 施用に関する研究 (第4報) 果菜類の生育に対する効果. 奈良農試研報. 24: 25-30.
- 川城英夫・土屋 和・崎山 一・宇田川雄二. 2009. 低濃度二酸化炭素施用が促成栽培キュウリの収量に及ぼす影響とその経済性評価. 園芸学研究. 8: 445-449.
- Kikuchi, K., S. Ishii, S. Fujimaki, N. Suzui, S. Matsushashi, I. Honda, Y. Shishido and N. Kawachi. 2008. Real-time analysis of photoassimilate translocation in intact eggplant fruit using ¹¹CO₂ and a positron-emitting tracer imaging system. J. Jpn. Soc. Hortic. Sci. 77: 199–205. DOI: 10.2503/jjshs1.77.199.
- 金 泳錫・遠藤昌伸・切岩祥和・陳 玲・糠谷 明. 2009.
固形培地耕における異なる生育段階での日中の培地加温がイチゴ‘章姫’の
開花, 生育, 収量に及ぼす影響. 園学研. 8: 315–320.
- 古在豊樹・伊東正・稲山光男・小林肇. 1982. マイクロコンピュータによる温室環境管理システムの開発と実用化試験. 農業気象. 38: 45-50.
- 熊倉裕史・穴戸良洋. 1994a. イチゴの果実肥大に及ぼす温度の影響. 園学雑. 62: 827-832.

- 熊倉裕史・宍戸良洋. 1994b. イチゴの果実発育期における光合成産物の転流・分配に及ぼす温度および葉位の影響. 園学雑. 62: 833-838.
- Kwantitatieve Informatie voor de Glastuinbouw. 2005. Proefstation voor de bloemistrij en glasgroente (PGB). Kwantitatieve Informatie voor de Glastuinbouw. 2005–2006, Wageningen, The Netherlands. (In Dutch with English summary)
- Lemoine, R., S. La Camera, R. Atanassova, F. Dédaldéchamp, T. Allario, N. Pourtau, J.-L. Bonnemain, M. Laloi, P. Coutos-Thévenot, L. Maurousset, M. Faucher, C. Girousse, P. Lemonnier, J. Parrilla and M. Durand. 2013. Source-to-sink transport of sugar and regulation by environmental factors. *Front. Plant Sci.* 4: 272. DOI: 10.3389/fpls.2013.00272.
- Leonardi, C., S. Guichard and N. Bertin. 2000. High vapour pressure deficit influences growth, transpiration and quality of tomato fruits. *Sci. Hort.* 84: 285-296.
- Lu, N. and T. Nukaya, T. Kamimura, D. Zhang, I. Kurimoto, M. Takagaki, T. Maruo, T. Kozai, W. Yamori. 2015. Control of vapor pressure deficit (VPD) in greenhouse enhanced tomato growth and productivity during the winter season. *Sci. Hortic.* 197: 17–23.
- 松田照男. 2000. イチゴ生産の現状と今後の展望. 今月の農業. 44: 16-23.
- Miyoshi, Y., K. Hidaka, Y. Yin, N. Suzui, K. Kurita and N. Kawachi. 2021. Non-invasive ¹¹C-imaging revealed the spatiotemporal variability in the translocation of photosynthates into strawberry fruits in response to increasing daylight integrals at leaf surface. *Front. Plant Sci.* 12: 1-14. DOI: 10.3389/fpls.2021.688887.
- Miyoshi, Y., K. Hidaka, T. Okayasu, D. Yasutake, and M. Kitano. 2017. Effects of local CO₂ enrichment on strawberry cultivation during the winter season. *Environ. Control. Biol.* 55: 165–170. DOI: 10.2525/ecb.55.165
- 望月佑哉. 2015. イチゴ‘紅ほっぺ’の多収性要因の生理生態学的解析. 東京農工大学大学院. <http://hdl.handle.net/10636/525>

- Mochizuki, Y., S. Murakami, T. Kobayashi, K. Worarad, Y. Yonezu, H. Umeda, T. Okayama and E. Inoue. 2022 Local CO₂ application within strawberry plant canopy increased dry matter production and fruit yield in summer and autumn culture. *Intl. J. Fruit Sci.* 22: 675-685. DOI:10.1080/15538362.2022.2103063
- 森下昌三. 2014. イチゴの基礎知識. 第1章. 栽培イチゴの誕生と我が国への伝来. p 11. 誠文堂新光社. 東京.
- 森下昌三・本多藤雄. 1985. 促成イチゴの成熟に関する研究. *野菜試報 C.* 8: 59-69.
- Nakai, H., D. Yasutake, K. Kimura, K. I, K. Hidaka, T. Eguchi, T. Hirota, T. Okayasu, Y. Ozaki and M. Kitano. 2022. Dynamics of carbon export from leaves as translocation affected by the coordination of carbohydrate availability in field strawberry. *Environ. Exp. Bot.* 196: 104806. <https://DOI.org/10.1016/j.envexpbot.2022.104806>.
- Mortensen, L. M. 1987. Review: CO₂ enrichment in greenhouses. Crop response. *Sci. Hort.* 33: 1-25.
- Mortensen, L. M. 1986. Effect of relative humidity on growth and flowering of some greenhouse plants. *Sci. Hort.* 29: 301-307. DOI:10.1016/0304-4238(86)90013-0
- 中野明正・安東赫. 2010. 低炭素社会に適合した施設生産のCO₂施用技術. *農業および園芸.* 85: 1071-1079.
- 西沢隆・堀裕. 1988. イチゴにおける¹⁴C光合成産物の転流・分配に及ぼす果房の発育段階の影響. *園学雑.* 57: 433-439.
- 農林水産省. 2017. 平成29年産野菜生産出荷統計. e-Stat 政府の統計窓口. <<https://www.e-stat.go.jp/dbview?sid=0003289929>>.
- 織田弥三郎・木村雅行. 2004. I 栽培イチゴの起源と来歴. pp. 3-12. 農文協編. *野菜園芸大百科 第2版 3 イチゴ.* 農文協. 東京.

- Peng, S., N. Mantri, H. Lou, Y. Hu, D. Sun, Y. Zhu, T. Dong and H. Lu. 2012. Effects of elevated CO₂ and temperature on yield and fruit quality of strawberry (*Fragaria × ananassa* Duch.) at two levels of nitrogen application. PLoS ONE. Vol.7 (7). E41000. <<http://www.plosone.org>>.
- Poorter, H. 1993. Interspecific variation in the growth response of plants to an elevated ambient CO₂ concentration. *Vegetatio*, 104/105: 77-97.
- 龍 勝利・井手 治. 2014. 促成トマト栽培における網入り果の発生に及ぼす昼温の影響. *園学研*. 13: 235-240.
- 龍 勝利・井手 治・森山友幸. 2016. 冬季における日中の加温が促成トマトの収量に及ぼす影響. *園学研*. 15: 297-303.
- 佐賀県. 2006. 平成 18 年度版「さがほのか」栽培指針. p. 22. 佐賀県.
- 斉藤 章. 2014. オランダに学んだ環境制御の取り入れ方. トマト. 農業技術大系野菜編 2. 基 560・32-560・53. 農文協. 東京.
- 佐藤公洋・北島伸之. 2010. 高設栽培におけるクラウン部局部加温の温度がイチゴの生育および収量に及ぼす影響. *福岡農総試研報*. 29: 27-32.
- 重野 貴・栃木博美・大橋幸雄・稲葉幸雄. 2001. 促成栽培におけるイチゴ「とちおとめ」の生育及び収量に及ぼす電照, 炭酸ガス施用及び地中加温の効果. *栃木農試研報*. 50: 39-49.
- 島田緑子. 1992. 光合成・蒸散過程の統合的理解について(I) 光合成モデルと気孔開閉の仕組み. *日緑工*. 17 224-235.
- 宍戸良洋. 2016. 光合成産物の転流と分配: 野菜の生産性を考察する. p. 3-4, p. 93-96. 養賢堂. 東京.
- Shishido, Y., N. Seyama, N. Imada and Y. Hori. 1989. Carbon budget in tomato plants as affected by night temperature evaluated by steady-state feeding with CO₂. *Ann. Bot.* 63: 357-367.

- Shishido, Y., N. Seyama, N. Imada and Y. Hori. 1990. Effect of the photosynthetic light period on the carbon budget of young tomato leaves. *Ann. Bot.* 66: 729-735.
- 田川 愛・緒方千佳・江原愛美・中島寿亀. 2015. イチゴ栽培ハウス内における CO₂ 拡散方法と濃度分布. 生環工講演要旨集. 164-165.
- 高市益行. 2007. 全国の半旬別気象データを利用した温室暖房コスト試算ツールの構築. 農業環境工学関連学会 2007 年合同大会講演要旨集: G35.
- 田中政信・田中 誠. 1987. 北部九州におけるカーネーションの高位生産技術に関する研究. 佐賀農試研報. 24: 1-82.
- 畔柳武司. 2014. 温室の二酸化炭素施用の歴史と効率的施用に向けた工学的なアプローチ. 農業および園芸. 89: 143-148.
- 和田義春・添野隆史・稲葉幸雄. 2010. 促成, 半促成栽培におけるイチゴ品種‘とちおとめ’の高 CO₂ 濃度下の葉光合成速度促進に及ぼす光と温度の影響. 日作紀. 79: 192-197.
- 矢吹万寿・宮川秀夫. 1970. 風速と光合成に関する研究(第 2 報) 風速と光合成との関係. 農業気象. 26: 137-141.
- 山中良祐・和田光生・古川一・東條元昭・平井規央・北宅善昭. 2020. 人工光下におけるイチゴの果実肥大特性の解析と果梗部切断面からの糖浸出量の評価. 日本冷空学論文集. 37: 215-224.
- Yamasaki, A. 2013. Recent progress of strawberry year-round production technology in Japan. *JARQ*, 47: 37-42.
- 吉岡 宏・高橋和彦・新井和夫. 1986. 果菜類における光合成産物の動態に関する研究. IX. トマトにおける ¹⁴C 同化産物の転流に及ぼす温度の影響. 野菜試報 A. 14: 1-9.
- Zhang, Y., D. Yasutake, K. Hidaka, T. Okayasu and M. Kitano. 2022. Crop-localised CO₂ enrichment improves the microclimate, photosynthetic distribution and energy utilisation efficiency in a greenhouse. *J. Clean. Prod.* 371: 133465.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133465>