

Development of cultivation technique for yield expansion utilizing the light signal responses of the plants

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-05 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/43871

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.



博士論文

植物の光応答を利用した栽培促進手法の開発

金沢大学自然科学研究科

生命科学 専攻

学籍番号：0923032511

氏名：佐藤正幸

主任指導教員名：坂本敏夫

提出年月：2016年3月

目次

第1章 緒論	1
1. 1 食糧増産技術開発の必要性和現状との対比	1
1. 2 日本の農業生産の実態	5
1. 3 日本の農業生産で目指すべき方向	8
1. 4 学術を活用した農業生産技術開発の推進	10
1. 5 北陸に適合した栽培施設の開発	11
1. 6 暗期単色光照射を伴う新規栽培手法の開発	13
1. 7 摘要	14
第2章 北陸に適合した植物栽培施設の開発	16
2. 1 緒言	16
2. 2 材料と方法	17
(1) ガラス温室の仕様と栽培区の設定	17
(2) 人工光による日中の補光	17
(3) 栽培区域の低温度防止対策	18
(4) 栽培区域の高温度防止対策	21
(5) 温室制御のモデル図と制御フロー	22
2. 3 結果	24
2. 4 考察	26
(1) 低温対策の追加改善策	27
a) 温室北側蓄熱槽設置の効果 (コンセプト)	27
b) 北側壁蓄熱槽の構造の ペットボトルによる先行試験	28
c) 北側蓄熱槽の構造の ポリタンクによる先行試験	29
(2) 高温対策の追加改善策	31
2. 5 摘要	32

第3章	イチゴ栽培における暗期緑色光照射効果	3 3
3. 1	緒言	3 3
3. 2	材料と方法	3 3
	(1) イチゴ栽培予備試験に用いた品種 と栽培経過	3 3
	(2) イチゴ栽培ベンチの構築	3 4
	(3) 日中の補光の方法	3 5
	(4) 緑色光照射の方法	3 6
	(5) 栽培区域の温度制御結果	3 7
	(6) イチゴの授粉、開花数 および果実収量の計測	3 7
	(7) 統計検定およびグラフ作成の手法	3 8
3. 3	結果	
	(1) 培地別収量差	3 8
	(2) 緑色光による収量差	3 8
	(3) 品種別の収量差	3 9
3. 4	考察	4 0
	(1) 緑色光照射によるうどんこ病抑制の効果	4 0
	(2) 緑色光照射による イチゴ果実収量増加の効果	4 1
	(3) 「宝交早生」のうどんこ病耐性の評価	4 1
	(4) 緑色光による植物の成長の影響に関する 研究報告調査	4 1
3. 5	摘要	4 4
第4章	暗期緑色光照射効果確認2次試験	4 6
4. 1	緒言	4 6
4. 2	材料と方法	4 6
	(1) イチゴ栽培試験に用いた品種と栽培経過	4 6

(2)	イチゴ栽培ベンチの構築	4 7
(3)	日中の補光の方法	4 7
(4)	緑色光照射の方法	4 7
(5)	イチゴの受粉、開花数 および果実収量の計測	4 7
(6)	統計検定およびグラフ作成の手法	4 8
4. 3	結果	
(1)	2年目栽培経過	4 8
(2)	開花数の推移	4 9
(3)	果実収量と果実個数	5 0
(4)	うどんこ病の影響	5 0
(5)	ハダニの発生程度	5 1
4. 4	考察	
(1)	イチゴ開花数および果実収量 の緑色光照射効果	5 1
(2)	緑色光照射による病害耐性向上	5 2
(3)	暗期緑色光照射応答のメカニズム究明	5 2
4. 5	摘要	5 3
第5章	各種単色光照射のイチゴ栽培への影響	5 4
5. 1	緒言	5 4
5. 2	材料と方法	5 5
(1)	栽培システムと光環境条件 (有色蛍光灯および補光)	5 5
(2)	有色蛍光灯の分光スペクトル	5 7
(3)	培地材料	5 7
(4)	イチゴの受粉、開花数 および果実収量の計測	5 7
(5)	ジャスモン酸とサリチル酸 の同時分析手法	5 8

(6)	統計検定およびグラフ作成の手法	58
5.3	結果	
(1)	有色蛍光灯照射による開花への影響	59
(2)	有色蛍光灯照射による イチゴ果実収量への影響	60
(3)	暗期照射の単色光による 植物ホルモンの誘導	62
(4)	ハダニ耐性の評価	63
5.4	考察	65
(1)	イチゴの果実収量と果実肥大	65
(2)	暗期の有色蛍光灯照射が 波長特有の植物ホルモン発現を誘導する	68
5.5	摘要	69

第6章 シロイヌナズナ変異体を使った

	暗期の緑色光照射効果のメカニズム解明	72
6.1	緒言	72
6.2	材料と方法	
(1)	栽培用施設	74
(2)	緑色光と青色光の制御	75
(3)	シロイヌナズナ種子の準備	75
(4)	シロイヌナズナの栽培	76
(5)	シロイヌナズナの根長と胚軸長の計測	76
(6)	ジャスモン酸とサリチル酸の同時分析手法	77
(7)	統計検定およびグラフ作成の手法	77
6.3	結果	
(1)	暗期単色光照射による 根長、胚軸長伸展の差異	77
a)	根長の伸長抑制	79
b)	葉数の差異	80

c)	胚軸長の伸長抑制	8 0
(2)	ジャスモン酸とサリチル酸の計測結果	8 0
(3)	シロイヌナズナの開花	8 1
6. 4	考察	8 3
(1)	シロイヌナズナの栽培試験で 明らかにになったこと	8 3
(2)	イチゴ栽培結果に対しての未解明な事項	8 5
6. 5	摘要	8 7
第7章	イチゴの有色蛍光灯の組合せ照射の効果	8 8
7. 1	緒言	8 8
7. 2	材料と方法	8 9
(1)	栽培システム	8 9
(2)	有色蛍光灯の組合せ照射方法	8 9
(3)	イチゴ品種と栽培経過	9 0
(4)	植物ホルモンの分析	9 0
(5)	統計検定およびグラフ作成の手法	9 0
(6)	葉面積と葉柄長の計測方法	9 1
7. 3	結果	9 1
(1)	草勢（葉面積、葉柄長）と開花数の比較	9 1
(2)	果実収量の比較	9 4
(3)	植物ホルモンの分析結果	9 6
7. 4	考察	9 9
(1)	暗期緑色光と赤色光の交互照射（G-R法） によるイチゴ収量増加について	9 9
(2)	暗期の有色蛍光灯照射に イチゴ苗が反応した理由	9 9
(3)	暗期緑色光と赤色光の交互照射（G-R法） によるオーキシン内在量の増加	1 0 0
7. 5	摘要	1 0 3

第 8 章 総括	1 0 5
謝辞	1 1 3
引用文献	1 1 5
発表論文	1 2 3
学会発表	1 2 3
特許申請	1 2 4

第一章 緒論

1.1 食糧増産技術開発の必要性と現状との対比

国際連合食糧農業機関（FAO）の報告¹⁾では2012～2014年における慢性的な飢餓人口を8.05億人と推定している。この飢餓人口は1990～1992年には9.94億人、2000～2002年には9.09億人と推定されていた。この20年間で約2億人、直近の10年間で1億人以上飢餓人口を減少できた。

しかしながら世界人口の12%の人々がいまだ飢餓に苦しんでいること、およびFAO目標では2015年までに飢餓人口を5億人以下としていたが達成は難しいのが現実であり更なる努力が必要となっている。

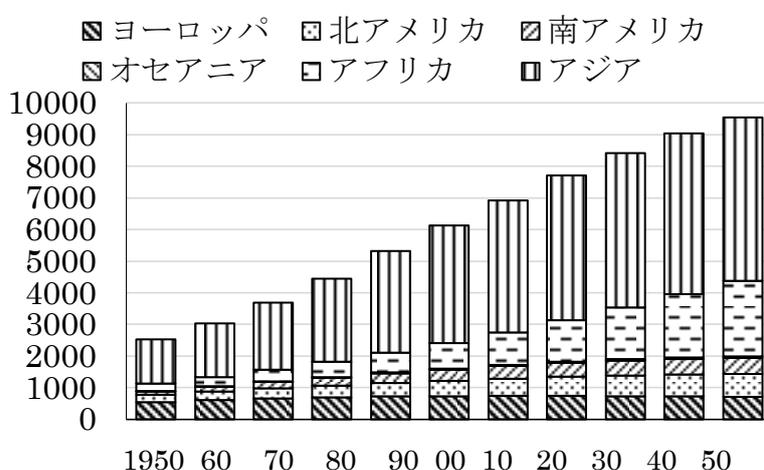


Fig.1.1 世界人口の推移（単位：百万人）
総務省統計局統計データ「世界の統計」より

今後の改善努力を検討するために直近の11年間の食糧生産と需要の実態を調べた。

世界人口はFig.1.1に示すように2000年に61億人だったが2011年には70億人に

達している。この間に9億人の人口増加があつたにもかかわらず1億人の飢餓人口を減少することができたことになり、食糧生産量が2000年から2011年の間に16.4%以上の増産が達成されていなければならない。

この確認のため飢餓対策としての直接効果が期待できる穀物類の生産量の変化を調べた。データはFAOから入手し

たが、その結果を Table.1.1 に示すが主食となる穀物は +22.5%と生産量が増加していた。

Table.1.1 穀物生産 2000年と2011年の比較

(単位億 ton)	2000年	2011年	変化率
穀物	20.58	25.92	+25.6%
小麦	5.86	6.99	+19.3%
米	5.97	7.25	+21.4%
トウモロコシ	5.92	8.88	+50.0%
大豆	1.61	2.62	+62.7%

GLOBAL NOTE(国際統計)経由で FAO データを入手し
2000年度と2011年度比較目的で著者が編集

世界人口は今後もアジア、アフリカの発展途上国で増加し続けて人口推計の中央値で2030年には85億人、2050年には96億人に達するとしている。この人口増加に対応し、また飢餓人口を減少させるためには更なる農業生産量の増加が必要となる。飢餓対策のためにはこの他に輸送貯蔵時の損耗防止や飢餓発生地域末端までのロジステックスが要求されるが、ここでは農業生産量の増加方策に焦点を当てて検討を進める。

農業生産量の増加のためには、「耕地面積の拡大」または「単位面積当たりの収穫量を増加」の2項目のいずれかを達成する必要がある。2000年から2011年の世界の農業生産量増加に対する耕地の拡大はどの程度寄与していたのであろうか。Table.1.2 に耕地面積の推移を示す。南米とアフリカで耕地面積は増加したがアジア、北米、欧州およびオセアニアで減少しており、世界合計では1%の耕地増加であった。

Table.1.2 耕地面積2000年と2011年比較

単位百万 ha	2000年	2011年	変化率
アジア	484.2	473.6	-2.2%
北米	257.7	240.2	-6.8%
南米	105.8	130.8	+23.6%
欧州	287.7	276.5	-3.9%
アフリカ	197.3	226.5	+14.8%
オセアニア	49.3	48.7	-1.2%
世界合計	1382.0	1396.3	+1.0%

GLOBAL NOTE(国際統計)経由でFAOデータ入手し
2000年度と2011年度比較目的で著者が編集

この間の農業生産量の拡大に耕地面積拡大は寄与していないのであるから、「単位面積当たりの収穫量増加」が農業生産量拡大の主要因である。この単位面積当たりの収穫量（以下単収と記す）拡大には灌漑、肥料、病虫害防止の農薬などの農学的な技術進歩が大きく寄与する。更にバイオテクノロジーを応用した遺伝子組換え作物の登場も特筆すべきであろう。

三石誠司著(2013)「遺伝子組み換え作物をめぐる世界の状況」²⁾が日本と世界の実情について詳細に報告しているので以下（「」内）その主旨を引用する。

「アメリカの種子メジャーであるモンサント社が遺伝子組換え作物による収穫量拡大を目指して圃場での実用栽培を開始したのが1996年である。遺伝子組換え作物が生物多様性を損なうリスクを回避するための国際ルールがカルタヘナ議定書の形で2003年にまとめられ、我が国においても2004年2月にカルタヘナ法（遺伝子組換え生物等の使用等の規制による生物の多様性の確保に関する法律）が制定された。開放系の圃場での遺伝子組み換え作物栽培に関す

る第一種使用と、閉鎖系の研究室などでの栽培に関する第二種使用の承認手続きが定められている。厳しい承認手続きを経て我が国においてもモンサント社およびデュポン社などから申請されたトウモロコシ、大豆、ナタネ、ワタの遺伝子組換え品種の栽培が承認されているが我が国における栽培実績はほぼ皆無の状態である。

一方海外ではアメリカを筆頭にインド、中国、ブラジル、カナダ、アルゼンチン、パキスタン、南アフリカなどで遺伝子組み換え作物の栽培面積が拡大し、2011年度においては160百万haに達しておりこの面積は全世界の耕地面積の11.5%である。アメリカ、ブラジルでは全耕地面積の43%が遺伝子組み換え作物の栽培地となっている。

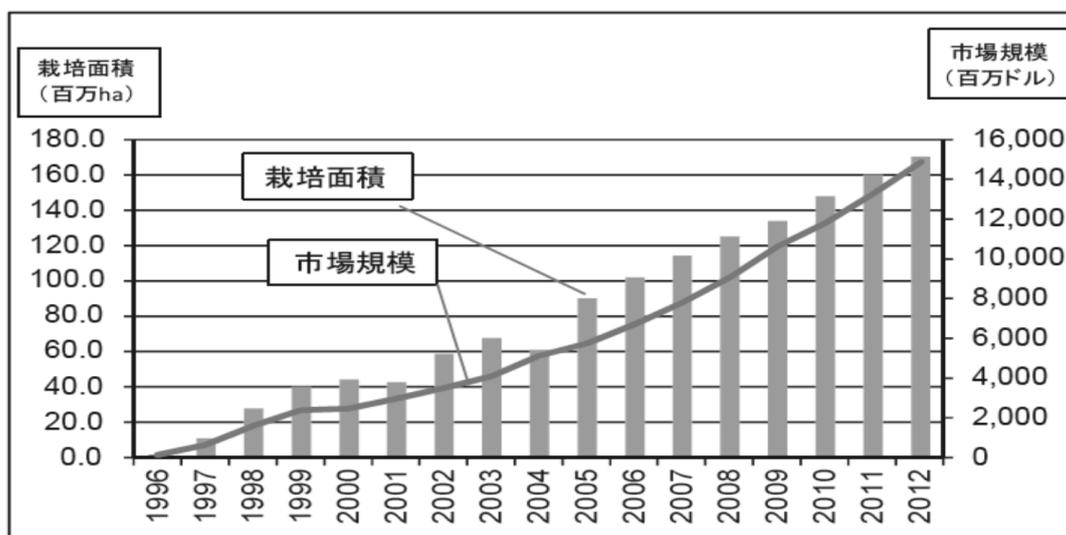


Fig.1.2. 遺伝子組換え作物の栽培面積（単位百万 ha）

三井誠司、遺伝子組換えをめぐる世界の状況²⁾：

J A 共済総合研究第67号 2013年9月から抜粋

Table.1.1 に示したように遺伝子組換え品種が承認されているトウモロコシと大豆では2000年比で2011年には50%を超える増収となっており、未承認作物である米、小麦の20%程度の増収率を大きく上回っている。この増収

率の差は遺伝子組換えによる品種改良の結果と想定できる。

モンサント社のホームページでは種子改良で2030年までに2000年比で2倍の収量達成を研究目標としていると明確に掲げている。農業に保護主義的な政策をとり、かつ人口増加による食糧増産のニーズのない日本と欧州では単収増加は指向していないし、また遺伝子組換え品種の栽培については極めて消極的である。世界的な取り組みが必要な食料増産のための技術開発をなおざりにしている日本の現状を検証する。

1.2 日本の農業生産の実態

Table.1.3 にこれまで述べた穀物類、耕地面積および人口の推移を2000年と2011年の比較で示す。日本の穀物生産は米が全穀物生産量の91.7%を占めている。また米の生産増は年率1%に過ぎず、需要が拡大している家畜の飼料用穀物のトウモロコシや大豆に至っては生産が減少しており飼料穀物は遺伝子組換え作物も含めて（実質はほぼ100%と推定）輸入に頼っている。

菜食主義国を除き各国ともに所得水準の上昇に伴い穀物食が減少し肉食が増える傾向にある。牛肉、豚肉、鶏肉を各1kg生産するのに必要な飼料は、順に10kg、4kg、2kgと言われており所得水準上昇に伴い飼料用穀物の需要が増加する。

更に石油資源の代替のためバイオ燃料生産のニーズもある。原油価格変動やセルロース系のエタノールの生産技術進歩の影響によりトウモロコシ由来のバイオ燃料生産の将来は変動する可能性があるがバイオ燃料生産用の穀物の需要は当面は増加していくと著者は考えている。日本貿易振興機構（ジェトロ）農林水産食品部シカゴ事務所の報告³⁾による米国のエタノールの年間生産量推移をFig.1.3に示す。ま

たエタノール生産の副産物のバイオディーゼルの生産量推移を Fig.1.4 に示す。従来は米国でのトウモロコシ由来のバイオ燃料はトウモロコシを発酵してエタノールを精製したあと、発酵カスを DDGS(Dried Distillers Grain)として畜産の飼料に転用していた。近年この発酵カスの DDGS を絞ってトウモロコシ油を絞り、これをバイオディーゼルとして使用する技術を確認している。

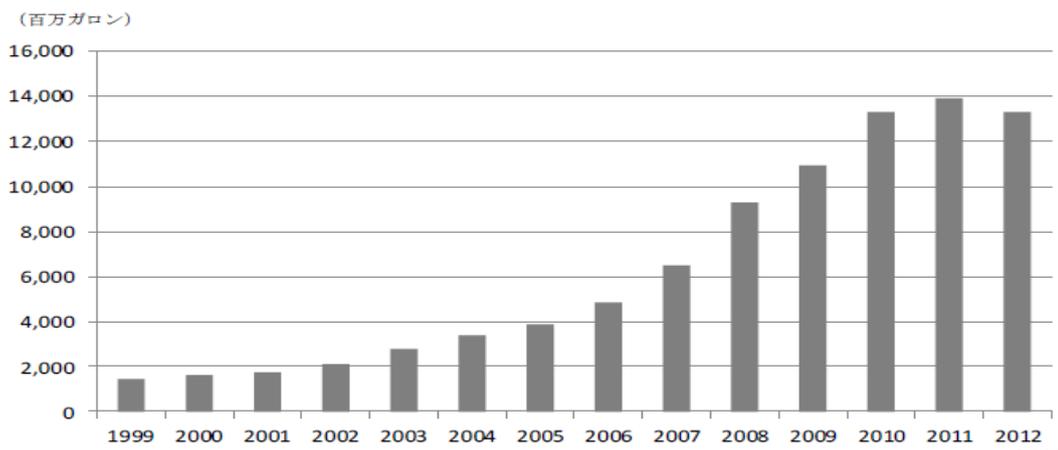


Fig.1.3 米国のエタノール年間生産量推移

ジェトロ農林水産食品部シカゴ事務所報告³⁾による

食糧となり得る穀物を使つての燃料生産については異論もあるが CO₂ 排出削減、および環境保護の観点からバイオ燃料は、地下水汚染による深刻な環境問題を発生させるリスクのあるシェールオイル、シェールガスよりは望ましいものと著者は判断している。

このように穀物の世界的な需要が高まるなかで飼料用穀物の栽培を放棄し、バイオ燃料生産も進めずに穀物も原油も輸入に頼り続ける日本の農業生産の現状は早急なる改革が必要な状態である。2011 年の農産物の実質輸入金額ベースでは(輸入金額－輸出金額)において日本は世界一の輸入大国である。

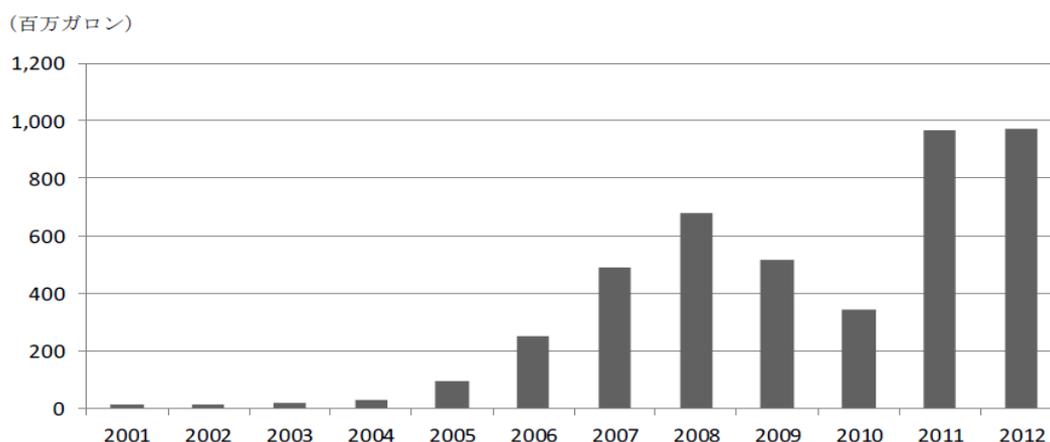


Fig.1.4 バイオディーゼルの年間生産量推移
 ジェトロ農林水産食品部シカゴ事務所報告³⁾による

Table. 1.3 日本の穀物生産量と耕地面積および人口推移
 2000年と2011年の比較

(単位百万 ton)	2000年	2011年	変化率	輸入比率
穀物	10.37	11.45	+10.4%	70.9%
小麦	0.688	0.746	+ 8.4%	85.8%
米	9.430	10.500	+11.3%	9.8%
トウモロコシ	0.289	0.240	-17.0%	100%
大豆	0.235	0.218	- 7.2%	94.9%
耕地面積 (百万 ha)	4.83	4.56	-5.6%	
人口 (百万人)	127	128	+ 0.8%	

GLOBAL NOTE(国際統計)経由でFAOデータを手出し
 2000年度と2011年度比較目的で著者が編集

また日本において自給率の高い米の平均単収は2011年度において10aあたり玄米で530kg、モミ収量で644kgであった。モミ収量基準でアメリカが714kg、韓国が650kgの単収との報告であり、日本の単収は残念ながら優れてはいない。同様に小麦で日本が350kgに対して最良のベルギーでは830kg、ドイツで700kgの単収がある。日本の単収はベ

ストプラクテスの国に対して大きく後塵を拝していることが FAO データから読み取れる。

世界の農業生産は人口増加対策および飢餓解消、また CO2 排出量削減による地球温暖化対策にむけて、遺伝子組み換えなど先進の学術を駆使して穀物生産量拡大を指向している。

一方で日本の農業生産においては生産量拡大を目指さず、結果的に穀物を初めとする食物の輸入量を増加させている。世界の飢餓解消の取り組みに遅れているだけでなく、飢餓に苦しむ最貧国に輸送されるべき穀物類を日本に輸入することで飢餓対策に逆行している恐れすらある。

1. 3 日本の農業生産で目指すべき方向

日本の農業の経営実態について清水徹朗が詳細な報告⁴⁾をしている。この報告によると「日本の農家は兼業農家が多く農業所得は 2011 年度において 1,196 千円、農業外所得と年金を合わせて 4,663 千円が農家の平均所得と農林水産省から報告されている。農業所得だけでみると赤字かまたは 500 千円以下の家庭菜園レベルの農家数が 58.1%を占めている。2,000 千円以下の農業所得農家は実に 81.1%に達する。」との実態が報告されている。

農業所得が赤字もしくは 500 千円以下の収入の農家は既に実質的には農業経営を放棄しながらも、補助金行政に頼り既得権益を放棄していない。このことが株式会社などの農業参入を妨げている点で国家的な損失のみならず、増加する世界人口に伴う飢餓対策の推進には大きな阻害要因となっている。この零細兼業農家の既得権益問題は政治的な対応で解決することになるが、結果的に世界で推進すべき飢餓対策の阻害要因となっていることを認識すべきであろう。

また日本の農業の単収が低い要因の一つには、消費者の期待もあり商用の出荷規格が厳しいことによる規格外品の廃

却問題もあると想定している。曲がったキュウリ、裂果したトマト、虫食いの痕跡のあるサツマイモやジャガイモなどは食品としての機能に問題はないにもかかわらず見栄えから農業生産品として出荷していない。スーパーマーケットでは日本人らしいきめ細かさで選別されて世界一美しく、かつ大きさがそろった青果が並ぶのが日常の姿となっている。この日本の慣習は農産物の廃却量を増大し単収低下の原因となり、その分価格を押し上げている。

更に1個1万円をこえるマンゴーやメロン、1粒300円のブドウなどを珍重する消費者と、その生産をブランド化しようとする都道府県が存在している日本の特殊性もまた日本の農業生産の単収増加の努力を妨げている。日本は農業生産額からみて農業大国であるとの議論も見聞きする。農耕地面積が世界の55位と狭く、かつ家庭菜園レベルの小規模農家が60%を占める日本の農業生産は金額ベースでは驚くことに、世界の第7位にランクされている。耕地面積が世界7位のカナダは1,000ha当りの農業生産額は0.55m.US\$, アメリカは1.133m.US\$, ドイツは2.13m.US\$であるが、日本は実に15.18m.US\$に達する。仮に農産品の単価が同一なら日本はアメリカの13.4倍の単収を達成していることになり耕地面積がアメリカの2.9%でも生産量は39%となる。人口比を考慮すると日本はアメリカ以上の農産品輸出が可能となるはずである。結局日本の農業生産額の大きさは日本国内の農産品の価格が高いことを表しているに過ぎない。

日本の農業生産における最大の問題点はコメの減反政策に関連する政府の補助金支出を抑える目的もあり、政府系の農業研究機関では単収増加を目的とした研究開発を抑制してきた。また資金力のある企業の農業参入を阻んできたこともあり、民間においても研究活動が進んでいない。

アメリカ発の遺伝子組み換え品は日本においてもカルタ

ヘナ法に適合して栽培が可能になっているにも拘らず、遺伝子組換え作物に関して具体的な根拠のない不安を拭い去る活動はなされていない。遺伝子組換えトウモロコシや大豆の栽培は飼料作物の国産化率を高め、結果的に飢餓対策に回す穀物を増加させることで国際貢献できるが進んでいない。世界の人口増加と飢餓人口削減の国際的な対策実施にあたり、日本は国力に見合った国際貢献の義務を自覚すべきである。

日本は単収拡大のための日本固有の技術開発を進めて、真剣に農業に取り組んでいる専業農家や農業生産法人の生産活動を支援するための学術的、技術的な取り組みを進める必要がある。飼料用穀物の他に、肉食増加とともに消費が増加する新鮮な葉物野菜、果菜類及び果実に関しては収量増加の技術開発を進めることが農業振興のため重要である。

1. 4 学術を活用した農業生産技術開発の推進

工業においては「学術」「技術」「技能」の連携が日本の競争力を強化するうえで重要な役割を果たしてきたと考えている。特に学術の支援なしには革新的な技術は生まれていない。また技能を発揮する現場を知らない技術は役に立たず、技術の仲介なくて学術が技能と連携することは不可能である。機械技術に長年携わってきた著者から見て、この三位一体の関係が日本の農業においては希薄であることが大きな問題であると考えていた。農業における「学術」「技術」「技能」の三位一体を実現に貢献するために、門外漢ながら学術的知見を習得し技術、技能の現場に橋渡しする役割を果たせないかと考え植物生理学の講座へ入学した。

四季の明確な日本の農業振興のためには冬期間も栽培可能な温室やビニールハウスを使った施設園芸が今後とも重要になる。施設園芸で使用可能な学術的知見を応用した収量増加のための技術開発を研究テーマに選択した。

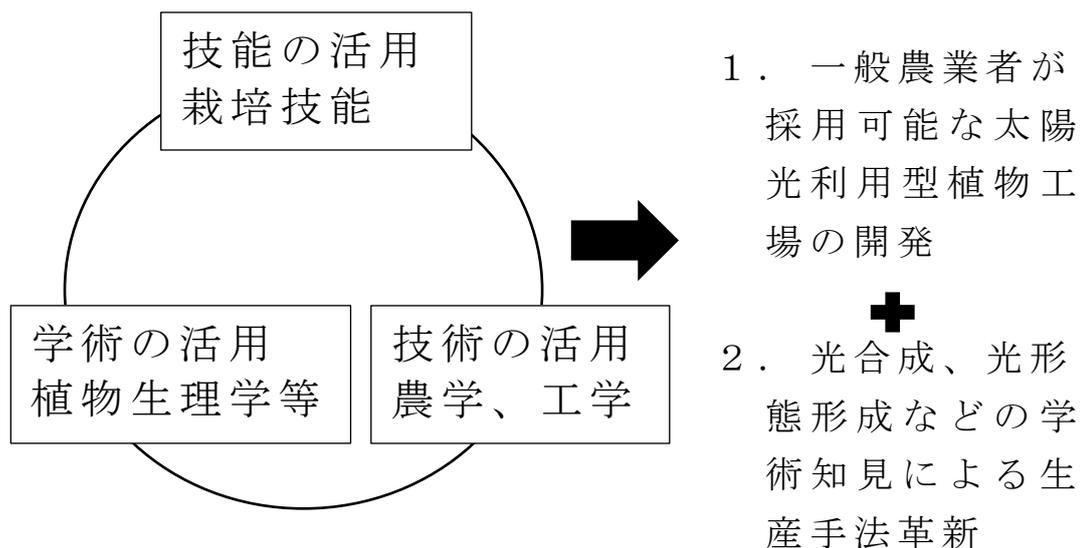


Fig.1.5. 学術を活用した農業生産技術開発の推進

1. 5 北陸に適合した栽培施設の開発

北陸の冬期（12月1日～3月31日の4か月）の日照不足および低温は、北陸の野菜、果実生産に大きなマイナス要因となっている。Table.1.4 に示したように、冬期間以外の8か月間の平均気温や日照時間が同緯度の北関東地方より野菜果実の栽培に有利にもかかわらず、北陸の生産金額は北関東3県の10%以下と低迷している。野菜生産金額の都道府県別順位では石川県が43位、福井県が46位、富山県が47位である。同緯度の北関東の埼玉県、群馬県、栃木県がこの順で6位、7位そして8位を維持している。この低迷している現状を打破するためには北陸の冬期に適合した安価で堅牢な栽培施設を開発する必要がある。

Table.1. 4 北陸と北関東の施設栽培の環境条件比較

			石川県 金沢	栃木県宇 都宮
位置		北緯 東経	36° 33' 136° 43	36° 32 ' 139° 53
年平均	気温	deg.	14.40	13.44
	降雨日率	%	51.39	32.26
冬 期 12/1~3/31	気温	deg.	4.6	3.1
	降雨日率	%	79.8	22.7
	晴天日率	%	15.6	72.4
春夏秋期 4/1~11/30	気温	deg.	17.6	16.8
	降雨日率	%	42.1	35.5
	晴天日率	%	45.2	43.1
全天日射量 *	1月度平均	MJm ⁻²	6.08	9.55
	2月度平均	MJm ⁻²	8.74	12.42
2012 野菜年間収穫金額		10 億円	8.3	81.5

1. 気温天候のデータは金沢地方気象台と宇都宮地方気象台発表データによる。
2. 全天日射量データは金沢気象台データが発表されていないため、富山地方気象台発表データで代用した。
3. 2012 年度野菜収穫金額は農林水産省データによる。

太陽高度が最も低い冬至日の金沢市における快晴時の日照量は、太陽からの最大放射量を $2000 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ とすれば、午前 8 時で $280 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、正午には $800 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の光強度が得られる計算⁵⁾になる。この計算値に近い値が実測値としても得られる。このことから、晴天であれば冬期であっても補光の必要がないことが分かる。曇天日（雲量 10）に施設内での光強度を実測すると、Table.1.5 に示すように午前 8 時で $34 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、正午には $60 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の光強度とな

った。植物の効率よい栽培のために光合成光量子束密度 PPF150 $\mu \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 程度の光強度が必要とされている^{6,7,8)}。

北陸の冬期の降雨降雪日の日照は散乱光のみで 60 $\mu \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 程度の光強度のため栽培には 90 $\mu \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 程度の補光を追加することが必要な自然環境下にある。一方北陸の冬期の早朝の温度は放射冷却が頻繁に起こる北関東ほどには低温とならないことに特徴がある。

以上の環境条件の認識から、北陸に適合した栽培施設とは日中の日照不足を必要最小限の人工光補光で補い、一方冷暖房など温度制御用のエネルギー消費を極力抑え込んだ太陽光利用型の簡易堅牢な植物工場が第一の研究開発の目標となる。

Table.1.5. 金沢市の冬至日の太陽高度と日射量

時刻	太陽高度角 (θ°)	晴天日の日射強度 $\mu \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$	曇天日の日射強度 $\mu \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
8:00	8.98°	280	34
12:00	30.1°	800	60
17:00	0	0 μ	0

1. 6 暗期単色光照射を伴う新規栽培手法の開発

太陽光利用の開放型の栽培施設は低コスト生産が可能であるが、一方で病虫害が発生しやすい環境となる。このため施設栽培における農薬使用を低減する方法の一つとして、生物が本来備えている光応答機構を利用した「光防除技術」が研究されてきた^{9,10,11,12,13)}。「光防除技術」の先行研究例の中に、暗期に短時間の緑色光を植物に照射して光刺激を与えることで、病虫害耐性を向上させるとともに^{12,13)}、作物の収量を増加させることができる¹⁴⁾、という報告がある。但し

そのメカニズムは解明されておらず、また収量増加についても統計検定での有意差は確認されていない。

冬期の日照不足と低温度により、野菜栽培が低迷している北陸に適合した安価かつ簡便な栽培システムを開発する。また開発した栽培システムを利用したイチゴ栽培試験により、光防除技術として活用できる可能性がある「暗期照射の緑色光」による病虫害防除のメカニズム解明と、同時に収量増加を目指す栽培手法を見出すことを目的として本研究を進めた。本稿にてそれを報告する。

1. 7 摘要

日本の食料の増産を目指さない農業政策は、世界の人口増加に伴う飢餓人口の増加対策に逆行しているのみならず、日本が高価格で輸入を続けることにより飢餓地域への食料供給を阻害する要因となる可能性がある。飢餓問題への国際貢献を考慮するなら、日本においても農作物の増産体制を整えるべきである。経済発展に伴い食料のニーズも変化し、肉食化が進行するため家畜生産用の飼料作物の需要が高まり、かつ同時に野菜、果実の需要も増大していく。日本においても遺伝子組み換え作物の飼料用生産や、野菜果実生産の収量増加に真剣に取り組むことが、間接的に世界の飢餓人口低減の対策となることを考慮すべきである。

日本国内の地域別で考慮すると、北陸3県の野菜生産は農業県のイメージとは程遠く生産金額は日本の都道府県ランキングでも最下位グループに低迷している。北陸地方の気候環境条件は冬期間の日照不足や低温が生産の阻害要因となっているが、冬期間の3か月を除く9か月では野菜生産上位の県が揃う北関東より日照などの環境条件は優位である。

学術と技術および技能を連携して、北陸の冬期に適応した安価な太陽光利用の開放型栽培施設構築と、開放型栽培施設

で発生しやすい病虫害に対して農薬使用量を削減できる可能性が高い「光防除技術」による対策、同時に光環境制御による栽培促進手法の開発により北陸地域の農業振興に貢献すること、これが結果的に日本の農業振興、そして世界の飢餓対策に繋がる。このような新規の栽培手法の創出を狙いとしました研究を開始した。

第2章 北陸に適合した植物栽培施設の開発

2.1 緒言

完全閉鎖型植物工場は栽培環境を任意に設定できる利点があるが、年間売上金額を超える投資を必要とする。また、ランニングコストとして光源用および空調用の消費電力負担も大きく、一般の農家が参入できる状況にはない。一方で太陽光利用の開放型植物工場は償却費負担や光源用の消費電力が低い優位性があるが、施設内の光や温度の環境の変化が激しいため、また病虫害が発生しやすい環境となるため、その調節には技術と工夫が必要となっている。

特に北陸地方では適合する太陽光利用の開放型栽培施設を構築できていないため、野菜生産金額の低迷の大きい要因となっている。北陸の冬期間の施設栽培においては日照不足が克服すべき最大の課題となる。冬期間における降雨日率は75%に達し、降雨日には外気温は0~5°C、日照はPPF60 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 程度で推移するが、北陸の栽培施設で補光設備を具備しているのは皆無に近い。作物成長のためには光合成が不可欠であり、暖房で光の代替はできない。降雨や曇天など悪天候時の補光の必要性を認識すべきである。ただし補光や低温対策の環境制御に投入するエネルギーを必要最小限度に抑制する技術開発が求められる。特に不可欠な補光についても電力消費を抑制するために、光強度と照射時間を必要最小限とすることが求められる。

研究の第一ステップとして、既存のガラス温室を利用して簡便な自動制御を付加し、光と温度を制御できる省エネルギー型栽培施設の構築を研究目標とした。本章では、制御の細部を設定して光熱費の節減を狙い、かつ栽培施設内の光と温度の制御を自動化できる北陸に適合した栽培施設用の制御システムを開発した¹⁶⁾ので、その内容を報告する。

2. 2 材料と方法

(1) ガラス温室の仕様と栽培区域の設定

金沢大学角間南キャンパス(北緯 36° 32' 46" , 東経 136° 42' 35")にあるガラス温室(床面積 100 m², 軒高さ 3 m, 天井高さ 5.9 m)の内部に, 3.6m×3.6m の栽培区域を設定し, この栽培区域内を自働制御によって温度と光量を一定の範囲内に保ち, 冬期にイチゴ栽培が可能となるシステム設置を目標とした.

(2) 人工光による日中の補光

光強度に関しては補光と日照を合わせて PPF150 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ と目標設定した。この光強度は閉鎖型植物工場における報告値を参照した^{6,7,8)}。冬期曇天時の太陽光による散乱光は 60 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 程度あるので, 補光用光源の PPF 目標値を 90 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ に設定した。200 型レフ電球 (RF110V180WH、日本電気 (株) 製) 1 個を 1.0m 長の培地の中央に設置し, 培地両端部の光量不足を昼光色相当の 60 型 LED ランプ (LDR6DW6.4W パナソニック製) 2 個を両端部の 0.9m 上方にそれぞれ設置した。この補光による PPF は培地上面において 85~120 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ が得られた。

光源の点灯時間を必要最小限とするため日照不足の適切な判定が求められる。これに対し当初採用を検討した光量子計は出力が微小のため, 制御回路が複雑となり価格および堅牢さの点で採用するのは難しいと判断した。この代案として温室最上部の気温が 8:00~17:00 の間に 20°C 以下になった場合に, 日照不足と判定して, 補光用光源を点灯する設定とした。Fig.2.1 に示すように北陸の冬期には日照の有無により温室内の気温、特に天井部の気温が極端に変動することを利用した制御方法である。

Fig.2.1 に示す温度データは 2012 年 1 月 30 日から 2 月 4 日の間、外気温と温室内温度の推移をボタン型温度データロガーのサーモクロン G タイプと解析ソフトの Thermomanager (KN ラボラトリー, 大阪府) を使用して 30 分間隔で計測した。こうした温度計測を栽培期間にわたって継続し, ガラス温室内の天井部で温度変化が大きいこと, 曇天時には天井部であっても 20℃には到達しないことが分かった。

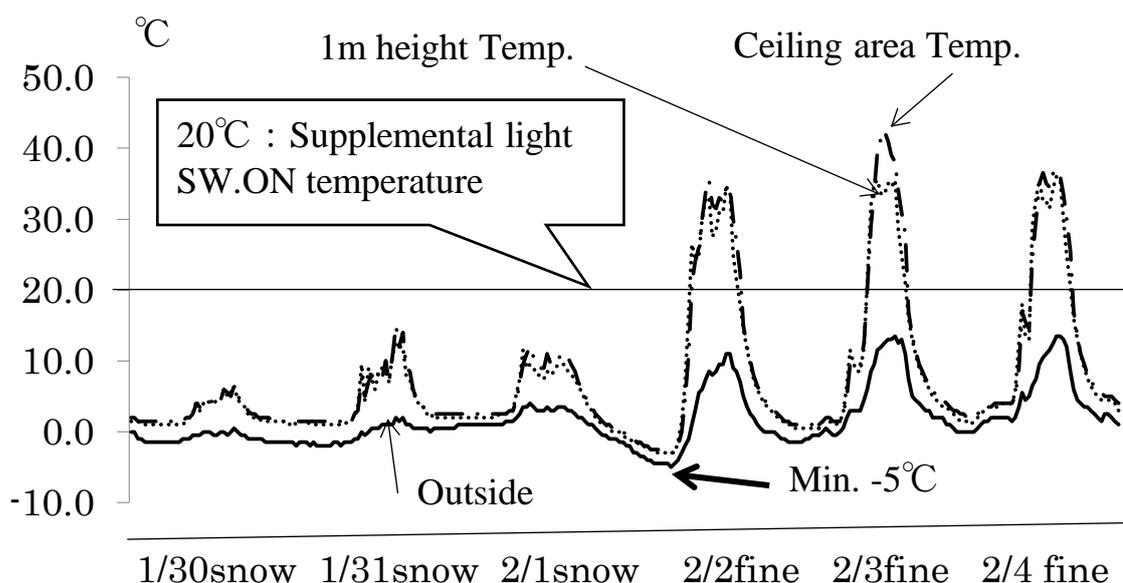


Fig.2.1冬期における温室内外気温変化.

実線は外気温、破線は温室内床上 1 m 高さ気温、
一点鎖線は温室天井部の気温を示す。
天井部気温が日照に応じて敏感に変化する

(3) 栽培区域の低温度防止対策

補光のエネルギー消費を第一優先としたため、温度制御には冷暖房機器を使わない手法を考案した。補光用光源からの発熱を利用するほかに、少ない日射により発生する暖気を有効活用して低温度対策として利用する手法である。

a) 補光光源の発熱を逃がさないビニール製内貼り

補光光源の上部を培地の高さまで厚さ 0.02mm のビニール製内貼りを設置した。

b) 天井暖気の還流と温度センサー設置用ダクト

天井から床まで直径 150 mm のアルミ箔製ダクトを設置し地上 3 m の高さに口径 150mm で能力 5.32CMM($\text{m}^3\text{min}^{-1}$)のブースターファン (Active Air, USA) を接続して、天井部の空気を栽培植物の近傍に還流した。ブースターファンによるダクト内の風速は 5 m s^{-1} である。このブースターファンは温度に関係なく、プログラムタイマーPT50DW (リーベックス, 埼玉県) により日中の 9 時間 8:00~17:00 の間稼働させた。このブースターファンで還流した天井部空気の温度を、ダクト内に設置したサーモスタット EAC3H と EAC3L(八光商事, 長野)のセンサーで感知し、天井部の温度が 20~32°C の範囲で、ブースターファンと直列にダクトに接続した口径 150mm で能力 12.7CMM($\text{m}^3\text{min}^{-1}$)の送風ファン (Active Air, USA) を駆動して天井部からの暖気を培地近傍に還流させ、32°C 以上の場合は培地近傍の異常高温を避けるため送風ファンを停止した。送風ファンは地上 2 m の位置に設置しており、ダクト内を風速 12 m s^{-1} で送風できる。この送風ファンは栽培区域の内貼り内部の空気量を 1 時間当たり約 30 回換気する能力を有する。

このダクト内の地上 1 m の位置に暖気還流ファン用のセンサーとは独立のサーモスタット EAC3 (光商事, 長野県) の補光点灯制御用のセンサーを設置した。ダクト内を流れる空気の温度が 20°C 以下の時に、リレーLY1A(オムロン製, 京都市) を経由して、2. 2 (2) 項の補光用光源を点灯制御した。

c) 水入りペットボトル(またはポリタンク)と保温ビニール膜による蓄熱槽



Fig.2.2.蓄熱槽の効果確認試験

Fig.2.2 に示したように水耕栽培用のタンク(容量 100 L)の近傍に、黒ビニールでカバーした容量 500 ml のペットボトル 31 本に水(総量 15.5 L)を入れて設置し、さらに栽培棚下部のタンク回りに透明ビニールで覆いをつけた。

この蓄熱槽を設置しなかった場合を対照区とし、タンク横の気温の変化を測定した。この結果を Fig.2.3 に示すが、蓄熱槽を設置することにより、低温に対しては、蓄熱槽なしの対照区と比べて最低温度がおよそ 3°C 高く、低温抑制効果が認められた

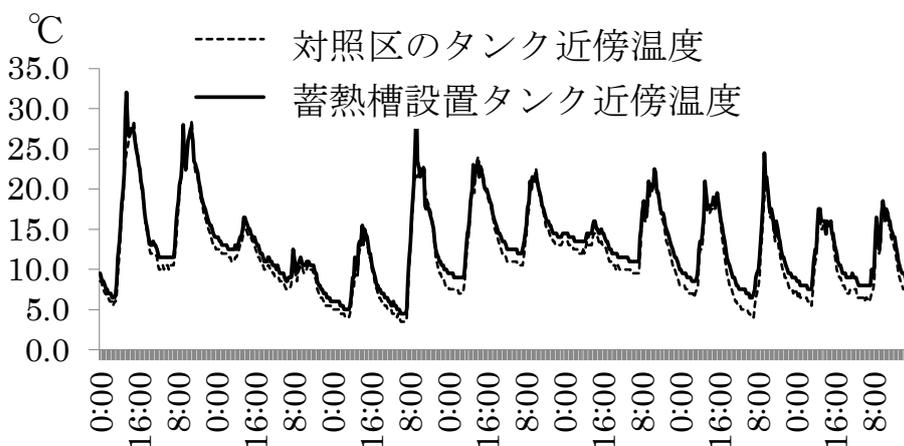


Fig.2.3 蓄熱槽の効果

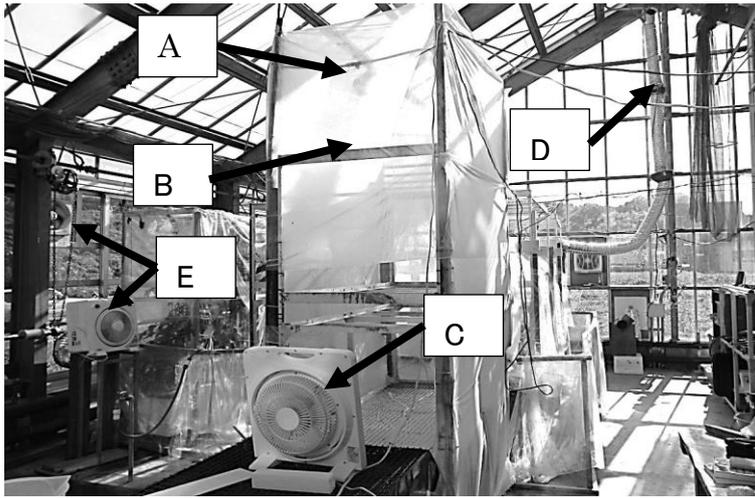
蓄熱槽により 3°C の低温抑制効果ある

(4) 栽培区域の高温度防止対策

冬期間であっても快晴時には温室内温度は 40℃程度まで上昇する。この冷却方法として培地近傍が 28℃を超えた時に外気を導入する他に、散水噴霧により冷風を作り栽培ベンチへと送風することで対応した。温度の制御はサーモスタット（八光商事 EAC4L）を 28℃にセットし、センサーを栽培区域内の床上 1.5m に設置した。

栽培区域の気温が 28℃以上に上昇すると、水道の蛇口部に接続したノルマルクローズ型電磁弁（CKD 製 AB31-AC100V）がサーモスタットの開口信号で作動し、水を散水噴霧ノズルから、Fig.2.4 に示すように栽培地エリアに近接する不織布で囲った 0.9m x 1.5m x 高さ 1.8m のチャンバー内に噴霧するように設定した。同時に散水噴霧チャンバー側方に設置したファンを作動させ、水の蒸発潜熱を応用し作成した冷風を栽培区域内に送風する仕組みを構築した。更に外気導入ファンも駆動して、換気と散水噴霧の組合せにより高温対策とした。

栽培区域外に設置した不織布で囲ったチャンバー内に散水噴霧したのは、水滴が直接作物にかかるのを防ぐ目的である。光が十分に照射された条件下で、葉に水滴がかかった場合には葉内にある CO₂固定の酵素 Rubisco に障害が発生するため、光合成能力が減少し生育障害を起こすとの報告¹⁵⁾があったことによる。



- 凡例
 A:散水噴霧ノズル
 B:不織布チャンバー
 C:ミストファン
 D:天井ダクト
 E外気導入換気扇

Fig.2.4 散水噴霧冷却装置

不織布で構成したチャンバー内に散水噴霧し不織布を湿らせた中に、ファンから送風することで冷風を作り栽培区域を冷却する

(5) 温室制御のモデル図と制御フロー

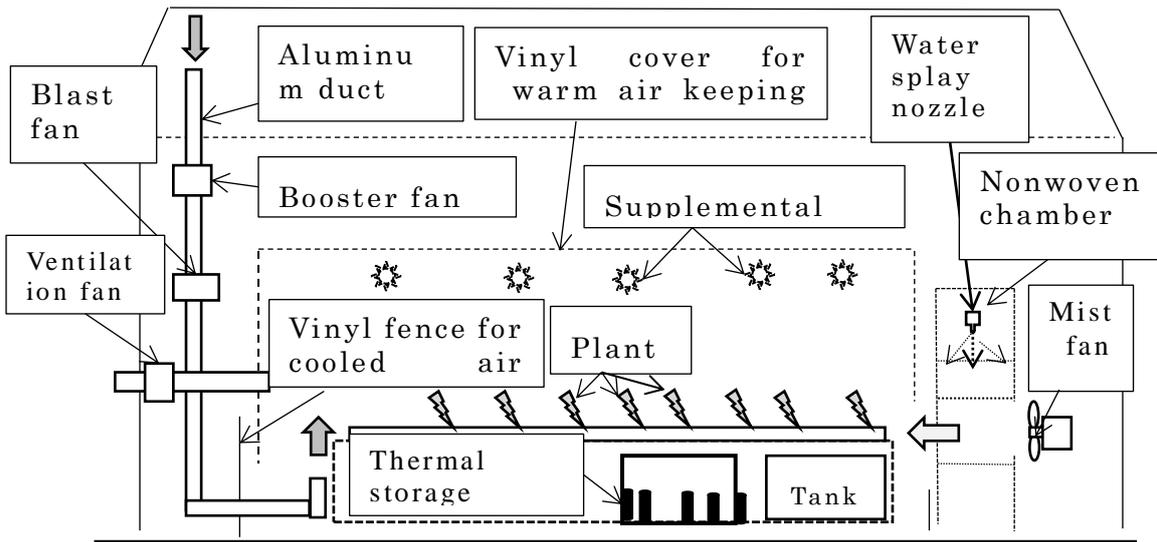


Fig. 2.5 温度制御システムのモデル図

温室の上方の暖気を培地近傍へと還流させるダクトとファンを設置。この暖気還流は 20~32℃の間に作動させている。補光は温室天井部の温度が 20℃以下に低下したときに、日照不足と判断し点灯させる。培地の気温が 28℃以上になると散水噴霧を不織布チャンバー内で開始し、同時に外気導入ファンとミストファンが駆動し培地近傍を冷却する。

温室の光と温度の制御をモデル図で Fig. 2.5 に示す。これらの要素の制御フローチャートを Fig. 2.6 に示す。安価で堅牢な制御システムとするために、市販の家庭用プログラムタイマーとサーモスタットで各要素を独立で制御する方式を採用した。制御用の機器の購入価はサーモスタット 4 個，電磁弁 1 個，リレー 2 個，送風ファン 4 個，アルミダクト 4 本，散水噴霧ノズル 4 セット，レフ型電球 6 個，LED 電球 12 個および配線，ソケットなど総額約 11 万円である。この制御システムで 4 年間のイチゴ栽培試験を継続した。

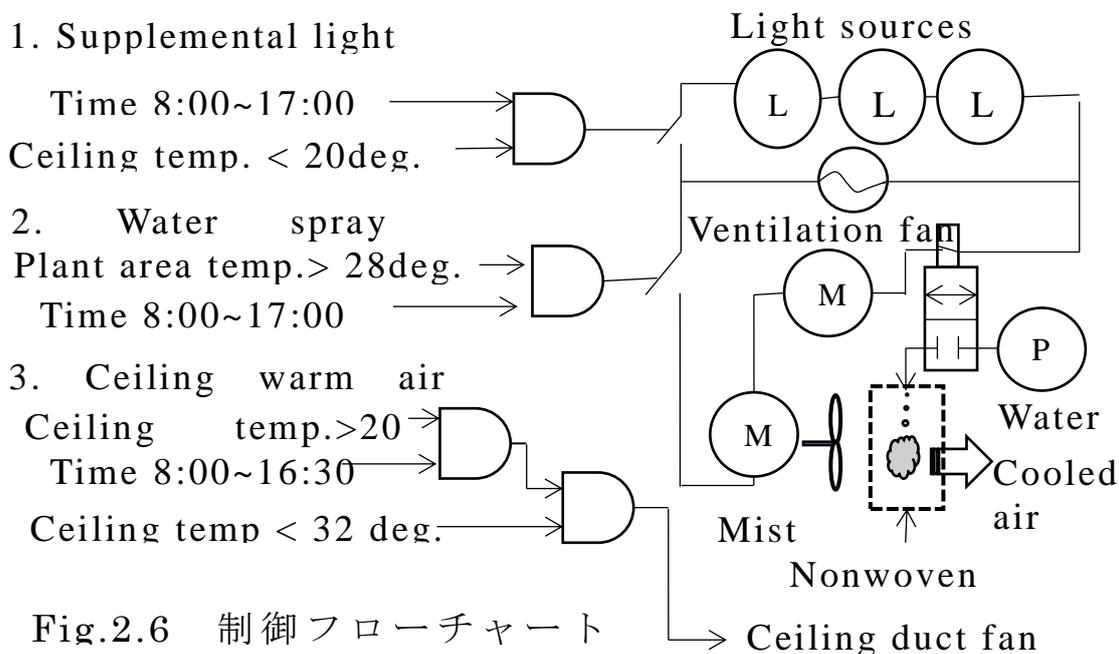


Fig.2.6 制御フローチャート

2. 3 結果

北陸の厳冬期における外気温と温室内温度およびシステムで温度制御された培地近傍の温度の推移をFig. 2.7に示す。降雪日は外気温、温室内温度とも $-3\sim+5^{\circ}\text{C}$ で変化するが、制御された栽培区域であるイチゴ棚においては $+5\sim+15^{\circ}\text{C}$ を維持している。晴天日においては早朝に放射冷却の影響で外気温 -5°C まで低下した後に、日射の影響で外気温は $+13^{\circ}\text{C}$ まで上昇している。この時の温室内は厳冬期でありながら $+35^{\circ}\text{C}$ を超えるまで上昇する。冷却制御された栽培区では 30°C 以下に温度上昇を抑えることができた。

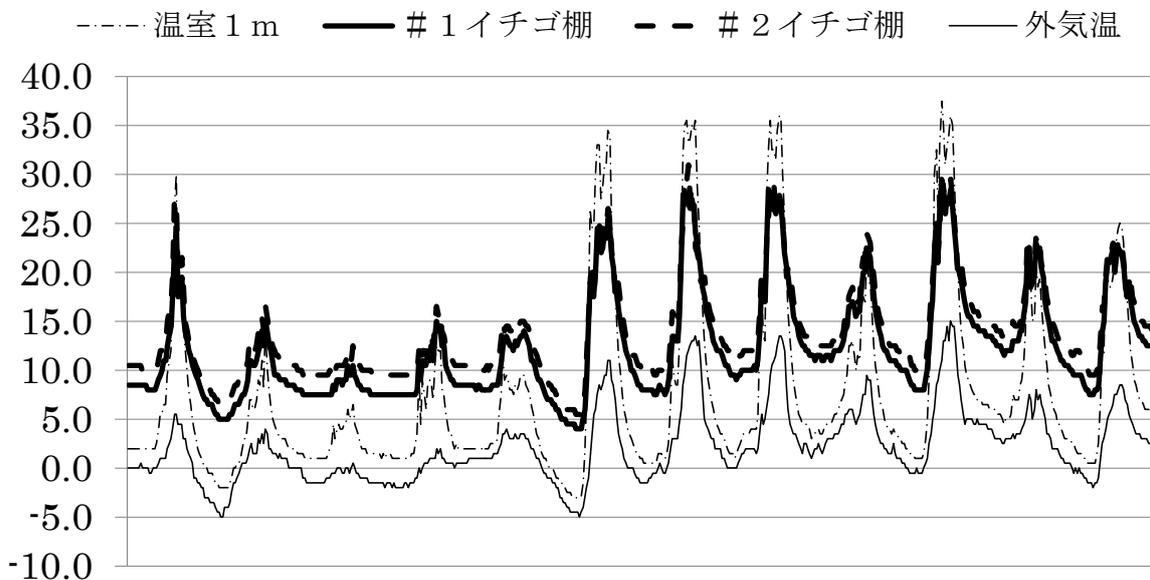


Fig.2.7 北陸厳冬期の外気温、温室内および栽培区域温度推移

2012年1月28日から2月8日までの温度計測データを示す。

イチゴ棚の温度は培地面の上方0.5m位置、温室 1 mは制御区域外の床上1m高さ位置、外気温は温室入口の軒下で、床上1 m高さ位置で計測した。ボタン型温度データロガーのサーモクロンGタイプと解析ソフトのThermomanager(KNラボラトリー，大阪府)を使用して30分間隔で計測した。

長期間にわたる温度計測データを Table. 2. 1 に示す。冬期に外気温が -5°C まで低下すると、非制御の温室内は 0°C まで低下するが、制御された栽培区では暖房器具の使用なしで $+5^{\circ}\text{C}$ 以上を保持できている。また最高温度は温室内の非制御区では $+41.5^{\circ}\text{C}$ まで上昇しているが、制御された栽培区では $+36^{\circ}\text{C}$ までの上昇で抑制されている。開発目標とした北陸における冬期間のイチゴ栽培には、適切な温度範囲に制御できている。この施設で10月上旬に苗を定植し、12月末にはイチゴ果実を収穫することができた。北陸の冬期においても、栽培棚を暖房装置なしでイチゴを栽培可能な温度範囲に維持できることを示す。

冬期の3ヶ月間（12月1日～2月28日）のイチゴの栽培実績に基づいて消費電力量を試算すると次のようになる。6台の栽培棚にそれぞれ補助光源（約200 W）を設置し635時間点灯した。補光の消費電力は762 kWhであった。換気ファン（60 W x 2）の作動時間は40時間、ダクトファン（20 W + 80 W）の作動時間は173時間で、これらを合計した消費電力は22 kWhであった。従って3ヶ月間の総電力消費量は784 kWh、農事用電力の従量供給料金を11.52 円/kWhとして料金は約9000円となる。本研究では、50株のイチゴを栽培しているので、1株あたりの電気料金としては厳冬期であったとしても月額60円となる。冬期間の温度制御としては、エネルギー消費も少なく、設備も安価であり実用的なシステムを構築できた。しかし春期に外気温が最高の $+31.5^{\circ}\text{C}$ まで上昇すると温室内では $+46^{\circ}\text{C}$ に上昇し、制御された栽培区においても $+41^{\circ}\text{C}$ まで上昇している。 37°C 以上ではイチゴの花の高温障害の報告もあるため、春期の高温対策として外気流入量増加などの追加改善が必要な結果である。

Table.2.1. 温室内外温度と制御された栽培区の温度推移.

		a 冬期		b 秋と春		
		8:00~ 17:00	17:00~ 8:00	8:00~ 17:00	17:00 ~8:00	
温度 °C	制御された	平均	18.1	12.2	23.6	15.9
	栽培区の 気温	最低	5.5	5.0	13.0	6.5
		最高	36.0	22.5	41.0	27.5
		平均	14.1	5.3	23.0	11.0
	温室内の 非制御区の 気温	最低	0.0	1.0	6.5	0.0
		最高	41.5	18.5	46.0	29.5
		平均	5.7	2.4	13.9	8.0
	温室外気温	最低	-4.5	-5.0	0.5	-2.0
		最高	20.0	13.5	31.5	26.0

^a: 冬期は12月から2月の3か月間を示す

^b: 秋と春は11月と3月、4月の3か月間を示す

2. 4 考察

本栽培施設の制御システムは、サーモスタット、リレーおよびタイマーといった汎用部品で構成しており、作動の信頼度が高い。後述の4年間のイチゴ栽培試験において補光光源ランプの球切れが2回あったが、温度制御の基本的な部品については故障がなかった。自動制御装置として十分に実用的であり、日常的な点検・調整・保守作業を必要としない。一般農業者でも採用できるレベルのメンテナンスフリー条件は整っていると考える。

本研究では、既存のガラス温室を利用して冷暖房機器を使わずに、低コストで光と温度を制御し、北陸に適合した栽培施設を構築する、という当初目的を達成することができた。

本研究で考案したいくつかの制御技術は、北陸地方の施設栽培の改善、特に省エネルギー化による収益性の改善に役立つものと考えている。栽培区における温度計測の結果、今回開発したシステムは、冬期のイチゴ栽培に暖房を使用しないで使用可能と判断し、引き続きイチゴ栽培における暗期単色光照射の効果確認試験に進むことにした。

但しイチゴ苗の休眠打破後の生育では最低気温を 10℃程度まで上昇させることで、更なる成長促進の可能性がある。またトマトなど他品種の冬期間の栽培を考慮すると、同様に最低気温を 10℃程度に上昇させる方策が望ましい。このためまず蓄熱槽による低温防止処置を検討した。また春期、秋期の日照による高温に対する対策も検討した。

(1) 低温対策の追加改善策

今回の開発実験で得られた栽培区の最低温度 +5℃はイチゴ栽培には十分適応している。しかしイチゴの更なる栽培促進や、トマトなど他の栽培種への適応を考慮すると最低温度を 10℃程度まで上昇させる追加の低温防止処置の検討が必要となる。この目的で蓄熱槽を温室の北側壁に設置した場合の低温防止対策を検討した。

a) 温室北側壁蓄熱槽設置の効果 (コンセプト)

温室の北側壁はガラスまたはビニールが一般的だが、日射が通り抜けるだけで温室内の温度上昇に寄与しない、更には熱貫流率が大きいため、暖気の放熱によるエネルギーロスが大きい。Fig. 2.8 に図示するように、北側壁に蓄熱槽を設置することで保温に活用できる。また垂直壁は太陽高度が低い冬期ほど単位面積当たりの照射エネルギーが高くなるため、冬期の温室の保温には理想的な熱源となり得る。一般の農家での普及を考慮すると、安価な蓄熱槽を考案す

る必要があり以下その検討を実施した。

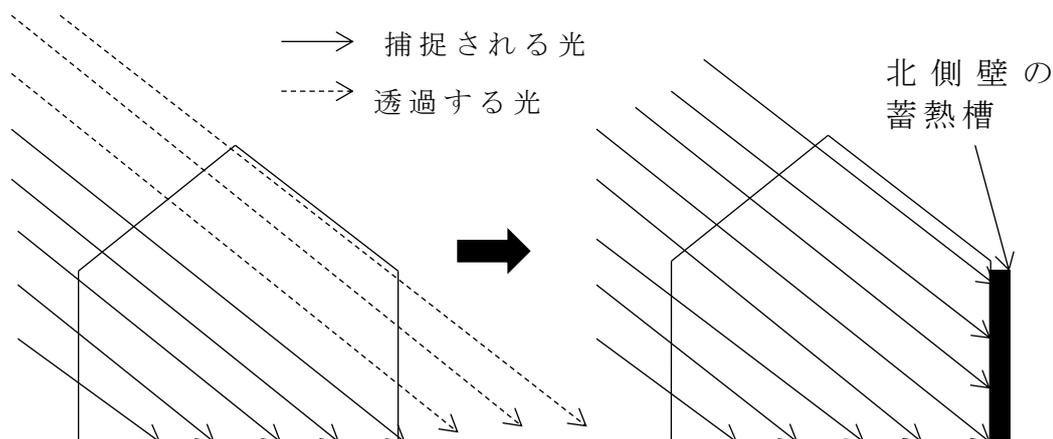


Fig.2.8 温室北側壁蓄熱槽の概念

ガラス壁への入射光を蓄熱槽で捕捉

b) 北側壁蓄熱槽の構造のペットボトルによる先行試験

蓄熱槽の媒体としては水が熱容量の関係で最適である。水に日射のエネルギーを吸収させるための構造について検討した。水を封入したペットボトルを温室の北側に垂直面に15度傾斜させた木製の棚に設置して水温の変化を計測した。試験条件を Fig.2.9 に示す。

ボトル内の水温計測結果を Fig.2.10 に示す。水温はボタン型温度データロガーのサーモクロンGタイプをビニールで密封しペットボトル内に挿入し10分間隔で計測した。

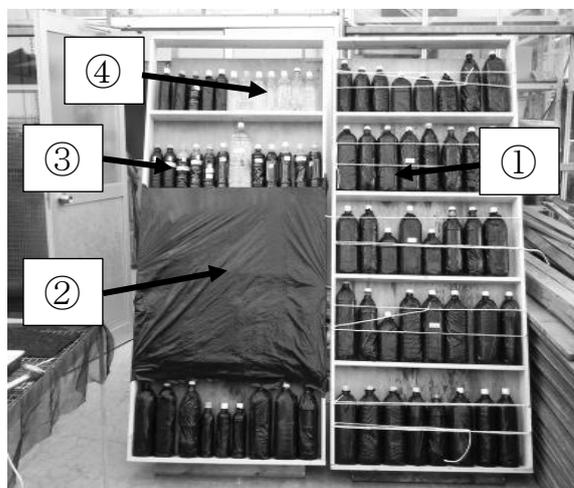


Fig.2.9 蓄熱槽予備試験

温室の北側に南向きで設置したパネルにペットボトル(以下PB)の下記水準を設定し、PB内部の水温変化を比較した

- ① : 水入り透明 PB
 - ② : 水入り PB 設置棚を黒ビニールでカバー
 - ③ : 水入り PB を 1 本毎黒ビニール包装
 - ④ ブラックリキッド*入り PB
- *ブラックリキッド水以外の組成
 エチレングリコール:40%
 ポリビニルピロリドン:1%
 活性炭:0.03%

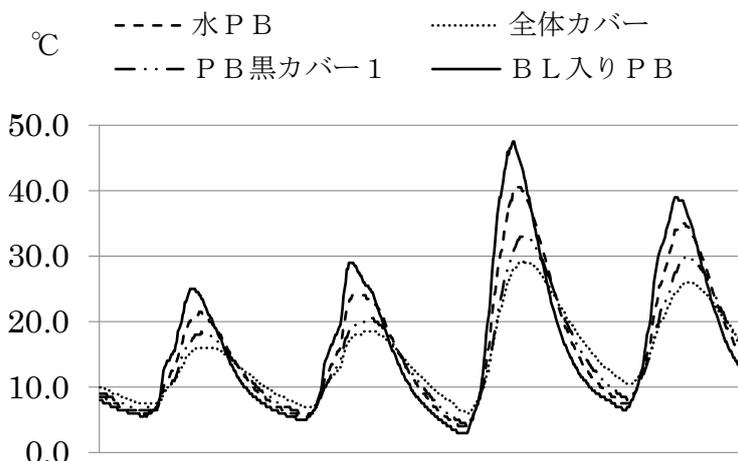


Fig.2.10 蓄熱パネル予備試験結果

活性炭を分散させたブラックリキッドは熱の吸収が良く温度上昇が早いですが、一方エチレングリコールのため比熱が低い。

このため温度低下も早い。

ペットボトルの廃棄処分の容易さ

を考慮し、直接塗装せずに黒ビニール包装したペットボトル内の水温変化は空気層を介在するためと思われるが、水温の変化が鈍感となった。透明ペットボトルは内部の水に太陽光を直接照射できるため黒ビニール包装より敏感に水温が変化していた。蓄熱槽による低温防止効果を主に期待する場合には、水温低下が鈍感な黒ビニール包装は有力な選択肢となる。Fig.2.2の実験で採用したペットボトル蓄熱槽は黒ビニール包装を採用した。

C) 北側壁蓄熱槽の構造のポリタンクによる先行試験

50m 長さのビニールハウスに蓄熱槽を設置することを考慮すると、20L 容量のポリタンクに水を封入して並べるのが安価な構成となる。市販のポリタンクには青色、赤色、乳白色がある。灯油用の青色や赤色のポリタンクは青色光や赤色光を反射して吸収エネルギーが少ない可能性がある。

このため安価な水用の乳白色ポリタンクと、乳白色ポリタンクに艶消し黒色塗装を施して作成した黒色ポリタンク内の水温変化を比較計測した。ポリタンクは密閉したガラス温室（奥行 1.5 m、高さ 2m、幅 3.6 m）内で、北側壁に

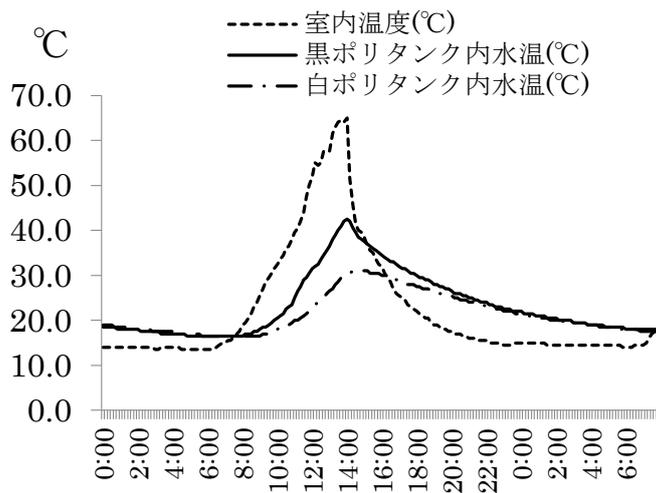


Fig.2.11 ポリタンク内の水温推移

沿って設置した。水温はボタン型温度データロガーのサーモクロンGタイプをビニールで密封しポリタンク内に挿入し10分間隔で計測した。計測は10月5日の晴天日に実施した。計測結果を Fig.2.11 に示す。7:30amには室温及び両ポリタンク水温

は16.5°Cで一致した。ここから14:00には黒色塗装したポリタンク内の水温は最高温度42.5°Cまで上昇し、乳白色ポリタンク内水温は最高温度31.0°Cまで上昇した。温室空気からの熱伝達は無視できるほど微小であるから、温度上昇の差異はポリタンクの外部色による日射のエネルギー吸収の差異による。20L水入りポリタンクの熱容量は86,516J/°Cであるから、黒色ポリタンクは日射により2.25MJの熱量を吸収し、乳白色ポリタンクは日射により1.25MJの熱量を吸収したことになる。10月5日の7:30から14:00までの間の温室所在値の太陽高度推移から計算したポリタンクの幅*高さの面積0.15㎡が受ける熱量は2.40MJとなる。これから黒色塗装のポリタンクの熱吸収率は0.94, 乳白色ポリタンクの熱吸収率は0.51となる。オムロン社の放射率一覧表

(<http://www.fa.omron.co.jp/product/special/53/es1/emission.html>) において黒色ラッカーの放射率が0.96~0.98となっており、黒色塗装ポリタンクの実験結果とは良い一致を示している。一方乳白色ポリタンクの実験結果は一般プラスチックのデータ(0.85~0.95)や白色エナメル of データ(0.91)とはかけ離れた低い数値となった。この結果から水用の乳白色ポリタン

クを太陽光用の蓄熱槽として使う場合には黒色塗装を施して使用する方が効率が良い。

(2) 高温対策の追加改善策

温室内温度の低下のみを考慮した場合には、散水噴霧の水量増加などによる高温対策が考えられるが、温室内の水蒸気圧が飽和水蒸気圧に達する点（相対湿度 100%）が温度降下の理論的限界となり、5℃程度の低下が限界となる。作物の成長を考慮した場合、相対湿度を高くしすぎると、葉の気孔周囲の水ポテンシャルの影響で、植物の気孔からの蒸散を阻害することで発育に悪影響を及ぼす。更には高温多湿の環境は病害のリスクを高める。

このため培地近傍での換気制御の改善が妥当な対策になると考えている。今回の実験では外気をフェンスで囲った栽培区域の中に強制的に送風して流入させ、栽培区域の暖気を押し出すように流出させる設計にしたが、春および秋の晴天時に外気温が 20℃前後でも、栽培区画の温度が日射で加熱されて Table. 2.1 にしめすように 40℃を超えた。すなわち外気の強制導入による栽培区の暖気を押し出す構造では冷却が不十分であり、培地近傍の気温は期待したほど低下しなかった。栽培区域内へ送風した冷気の大部分は、そのまま内貼り下部から流出した可能性がある。

対策としては、温室内貼りの上部に溜まった高温の空気を栽培区域の上部の排出口から強制排気する構造を追加して、給気と排気を組合せて栽培区域の換気と熱交換を改善することによって解決できると考えられる。この改善により培地近傍の最高温度を 30℃以下にとどめることが可能になると考えている。大型設備を設置する際は外気吸入と暖気排出は両者ともファンにより強制的に実施する必要があることが判明した。

2. 5 摘要

日本の農業の振興のためには、一般の農業者が導入可能な安価で堅牢な自働制御を付加した栽培施設の構築が必要である。特に北陸の冬期の日照不足に適合させるためには補光対策が不可欠である。最小限度の補光を実施し、冷暖房装置を使わずに、汎用の制御部品を利用し、安価に温室内の温度と光の環境を自動制御する省エネルギー型の植物栽培施設をガラス温室内に構築した。この施設を用いて、日照が限られている北陸地方の冬期にイチゴを栽培できることを示した。本施設は、冷暖房装置を用いていないため、導入コストが低だけでなく、ランニングコストも低いという特徴をもつ。今後、さらなる改良に継続して取り組み、温度制御の性能を向上して実用性を高めることができると考える。

第 3 章イチゴ栽培における暗期緑色光照射効果

3. 1 緒言

開放型の栽培施設は完全閉鎖型の植物工場と比較して初期投資額を抑えることができ、かつ電力費を抑制できるため低コスト生産が可能であるが、一方で病虫害が発生しやすい環境となる。このため施設栽培における農薬使用を低減する方法の一つとして、生物が本来備えている光応答機構を利用した「光防除技術」が研究されてきた^{9,10,11,12)}。「光防除技術」の先行研究例の中に、暗期に短時間の緑色光を植物に照射して光刺激を与えることで、病虫害耐性を向上させるとともに^{12,13)}、作物の収量を増加させることができる¹⁴⁾、という報告がある。

本章ではイチゴを実験材料に用いて病虫害耐性の向上と生育促進の両立を目指し、暗期の緑色蛍光灯照射の栽培試験を実施した。その試験結果を報告する。

3. 2 材料と方法

(1) イチゴ栽培予備試験に用いた品種と栽培経過

初年度の栽培予備試験においてイチゴ 4 品種「宝交早生 (N=8)」、「とよのか (N=12)」、「べにほっぺ (N=5)」、「アイベリー (N=5)」を栽培した。なおこの栽培試験では 1 培地に 5 本の苗を植えたが、「宝交早生」と「とよのか」を 1 培地に混植し、また「べにほっぺ」と「アイベリー」を同じ培地に混植した。定植前に初期のハダニ防除のためダニトロンフロアブル（日本農薬（株）製）を 1000 倍に希釈して苗を浸漬した後定植した。苗定植 2010 年 10 月 12 日、補光開始 11 月 1 日、開花開始 11 月 11 日、収穫開始 12 月 24 日の経過で栽培開始し、2011 年 5 月 25 日まで継続した。

(2) イチゴ栽培ベンチの構築

金沢大学植物栽培室（北緯 36°32'46"，東経 136°42'35"）のコンクリート床のガラス温室（床面積 100m²，軒高 3m，屋根高 5.6m）である。この内に 3.6 m x 3.6 m の区域をビニールフェンスで仕切り，第 2 章で開発した「北陸に適合した植物栽培施設」の制御システムを使用し、Fig.3.1 に示すように 3.6mx3.6m の栽培区域にイチゴ栽培用ベンチを 3 列に各 2 台を並べ、合計 6 台設置した。培地は栽培棚に 2 個設置可能だが、No. 5, No. 6 の栽培棚は通路が設定できず各 1 個の培地設置とした。液肥は EC1.3 ± 0.3dSm⁻¹ の濃度に調整し、各棚の培地下の容量 100 L の水耕溶液タンクに液肥を保持し，液肥を培地へハイポニカ製循環ポンプ（HHP-J-1、協和株式会社製）で供給した。

ポンプはプログラムタイマー（PT24、リーベックス（株）製）で作動時間を制御し 8:00～17:00 の間に 1 時間ごとに 15 分間作動させ，溢れた溶液は下部に設置したタンクに自然落下させる循環方式とした。なお初年度のイチゴ栽培試験においてはベンチ 3 台の計 6 培地を使い、緑色光照射区（3 培地）と非照射対照区（3 培地）を使い 3.2.(1)項に述べるイチゴ栽培品種を Table.3.1 に示すように定植した。

Table.3.1 栽培ベンチごとの設定条件と栽培品種

No	緑色光	培地	栽培品種 1	栽培品種 2
1-1	なし	ロックウール	とよのか（3）	宝交早生（2）
1-2	照射	ロックウール	とよのか（3）	宝交早生（2）
2-1	照射	ゼオライト	ベニホッペ（2）	アイベリー（3）
2-2	なし	ロックウール	ベニホッペ（3）	アイベリー（2）
3-1	照射	ゼオライト	とよのか（3）	宝交早生（2）
3-2	なし	ゼオライト	とよのか（3）	宝交早生（2）

ベンチ No.の配置は Fig.3.1 参照.品種名後の（ ）内は苗数を示す。

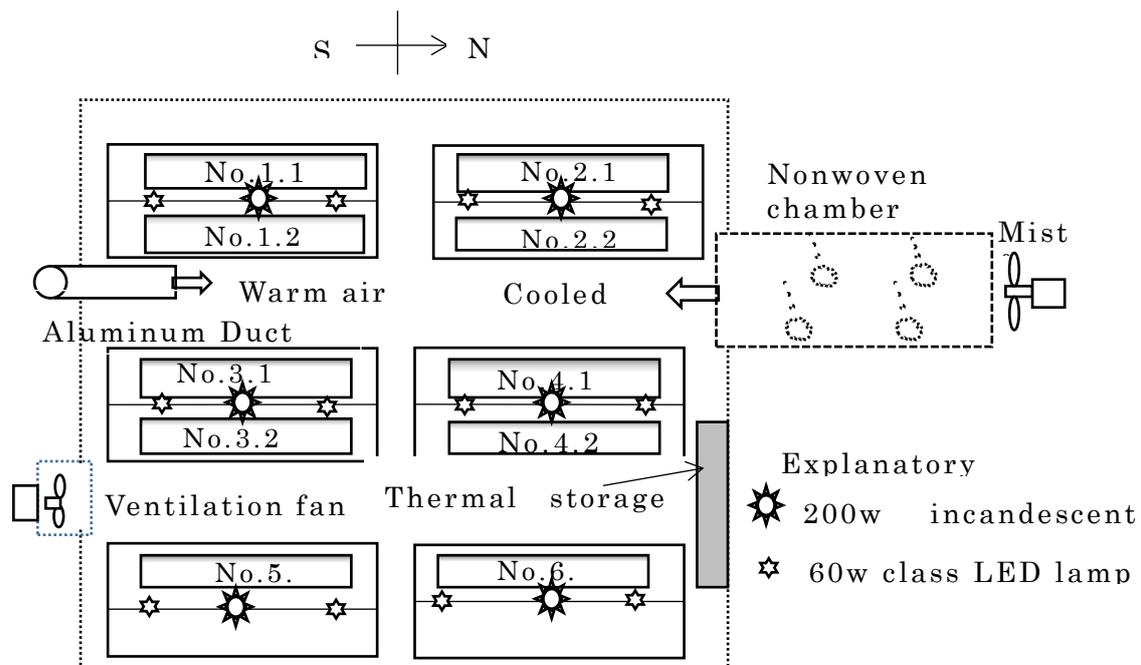


Fig.3.1 栽培区域の平面図

栽培棚を南北方向に2台、3列にして合計6台設置した。
 No.1～No.4 の各栽培棚には2セットの培地を設置した。
 各培地には0.23mピッチで5本のイチゴ苗を定植した。

培地用材料として水耕栽培用ロックウール（1000 x 150 x 75 mm, グロダン, オランダ）、または多孔質天然砂のゼオライト（ゼオフィル 1424, 新東北化学工業, 宮城県）をロックウールと同容積に計量して用いた。

(3) 日中の補光の方法

第2章.2.2.(2)項に記載の方法により、補光単独では $PPF90\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の光強度、補光と日照を合わせて $PPF150\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の光強度が得られに補光光源を設定した。

補光用光源点灯のための日照不足の判定は、温室最上部の気温が8:00～17:00の間に 20°C 以下になった場合に、日照不足と判定して、補光用光源を点灯する設定とした。

(4) 緑色光照射の方法

緑色光は Fig.3.2 のように培地側面上部に設置した。培地 1 列ごとに異なる照射条件の設定が可能となるようにブルーシートと農耕用黒色ビニールを組合せた遮光壁を設置した。緑色光照射の光源として 20W 直管式カラー蛍光管，東芝 FL20SG（緑色）を培地から高さ 0.45 m の位置に 2 本並べて設置した。照射光スペクトラムを小型ファイバー光学分光器（USB2000+, Ocean Optics, Florida USA）を用いて測定した結果を Fig.3.3 に示す。

緑色光は（週 3 回火，木，日曜日の夜間 2 時間（1:00～3:00am））で照射するように，週間制御タイマー ET55D（リーベックス，埼玉県）を使って設定した。この緑色光の照射スケジュールは，四国総研において実施されている先行研究^{12,13)}に合わせた。

緑色光の照射による培地上面における光強度は $PPF15.3 \sim 36.0 \mu \text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ となった。

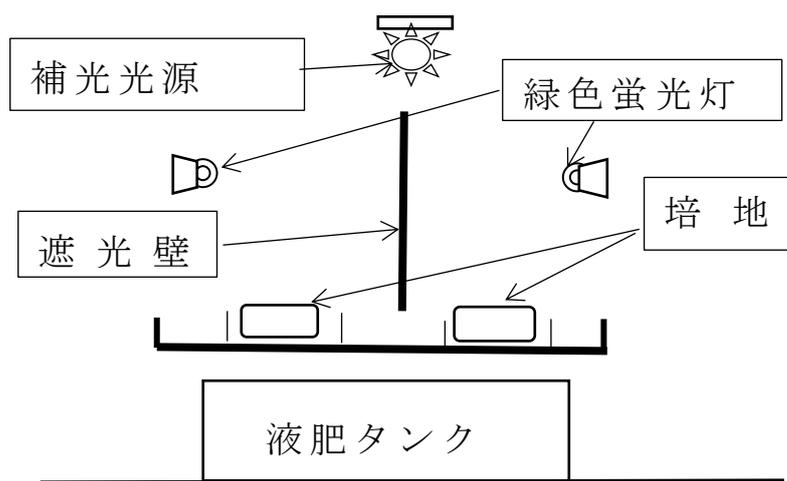


Fig.3.2 緑色光蛍光灯照射の方法

20W 緑色蛍光管を 2 本培地の側方で 0.45m 上方に設置。培地間に遮光壁を設置し、培地ごとに異なる照射制御を可能とした。補光用光源は 2 培地の中間の上方に設置し、2 培地を同時照射している。

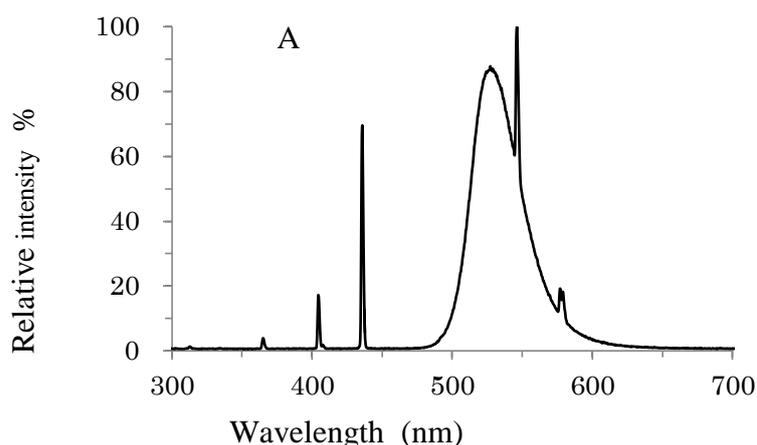


Fig.3.3 緑色蛍光灯の分光スペクトル

光学的スペクトロメータ (USB2000+, Ocean Optics, Florida USA) を使用して計測。東芝 FL20SG 緑色蛍光灯は波長 500~600nm に波長の主な領域があり、極大値は 530nm である

(5) 栽培区域の温度制御結果

第2章.2.3.項の Table.2.1 に記載のように、外気温が放射冷却により -5°C まで低下した厳冬期においても、制御された培地近傍は暖房なしで $+5.0^{\circ}\text{C}$ を維持した。冬期昼間の最高気温は温室内が 41.5°C まで上昇した際に、換気と散水噴霧冷却風導入により 36°C に抑えることができた。冬期間のイチゴ栽培に十分な環境となっている。

(6) イチゴの受粉、開花数および果実収量の計測

栽培苗数が少なく加温をしていないためマルハナバチによる受粉は採用せず、品種ごとに異なる絵筆を使い人工受粉した。受粉作業時に同時に苗毎に開花数を数えた。果実収量は人工的な外乱を排除するため摘果を行わず 4 g 以上の果実の個数と重さを計測した。重さの計測はドリテック社スリムスケールを使用して計測した。

(7) 統計検定およびグラフ作成の手法

統計的な有意差検定は株式会社エスミ製 Excel 統計 Ver.6.0 搭載のチューキー全群比較を使用し、グラフは平均値と標準誤差を表す誤差グラフを使用した。

3.3 結果

(1) 培地別収量差

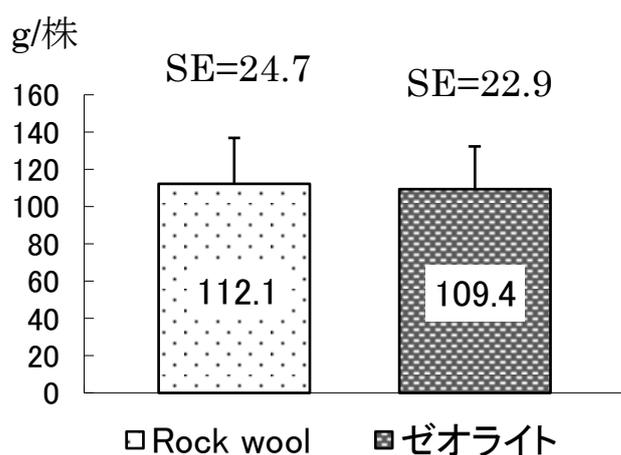


Fig.3.4 培地別イチゴ収量 (g/株)

数値は平均値と標準誤差を示す

培地材料としてロックウール(N=15)と多孔質天然砂のゼオライト(N=15)で栽培比較の結果、苗の成長および収量に培地による有意差はなかった。培地の準備では、ゼオライトは封入するための箱体を準備する必要があり

手間があかる、ロックウールは購入したバー材をそのまま使用できるため栽培準備が容易である。

一方培地材料の廃棄処理ではゼオライトが圃場に漉き込みやすく、かつ土壌改良にも使用できるため、優位である。本栽培試験ではこれ以降の栽培においては廃棄処分の優位さを考慮して培地材料をゼオライトに統一することにした。

(2) 緑色光照射による収量差

暗期に週3回、各2時間緑色光を照射した栽培区(N=15)と非照射の対照区(N=15)の収量比較を Fig. 3.5 に示す。緑色光照射区の収量は対照区(非照射区)比較で13%増加したが、

統計検定では有意差は検出できなかった。四国総研株式会社の先行研究^{12,13,14)}においても、統計検定による有意差は報告されていない。

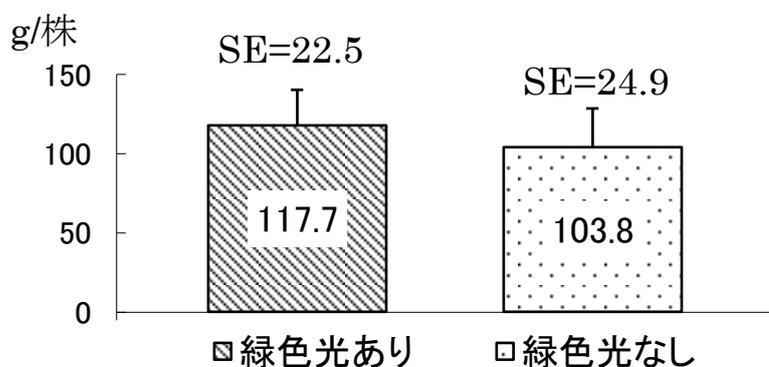


Fig.3.5 緑色光照射による収量差

数値は 平均値と標準誤差を示す

(3) 品種別の収量差

栽培品種は「とよのか (N=12)」、「宝交早生 (N=8)」、「ベニホッペ (N=5)」、「アイベリー (N=5)」の 4 品種とした。Fig.3.6 に示すように、宝交早生の果実収量は他品種の 2~4 倍の 211g/株と多かったが、統計検定での有意差はなかった。

本栽培試験では 1 培地に 5 本の苗を植えたが、「宝交早生」と「とよのか」を 1 培地に混植し、「べにほっぺ」と「アイベリー」を同じ培地に混植した。

栽培中に「とよのか」からうどんこ病（活物寄生糸状菌）が発生したが、同一培地に混植された「宝交早生」には感染せずに、異なる栽培棚に混植した「ベニホッペ」と「アイベリー」に感染が拡大した。緑色光照射の有無にかかわらず「とよのか」「ベニホッペ」「アイベリー」の 3 品種には、うどんこ病の感染が拡大した。また緑色光照射の有無にかかわらず「宝交早生」ではうどんこ病の感染はなかった。この結果か

ら緑色光照射によるうどんこ病抑制の効果はないことを示唆している。うどんこ病に感染しなかった「宝交早生」の収量が他品種より多く、うどんこ病の発症程度がひどかった「とよのか」の収量が少なかった事象に、うどんこ病の感染有無が影響している可能性が排除できない。

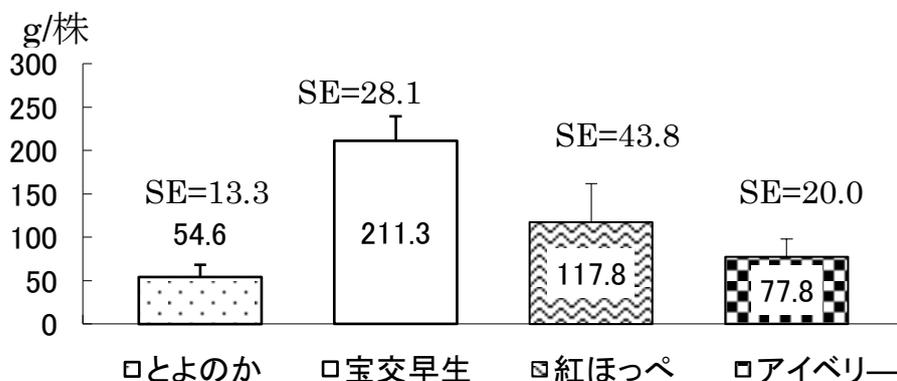


Fig.3.6 品種別収量差

数値は平均値と標準誤差を示す

3.4 考察

(1) 緑色光照射によるうどんこ病抑制の効果

緑色光照射の有無にかかわらず「とよのか」「ベニホッペ」「アイベリー」の3品種はうどんこ病の感染が拡大した。また緑色光照射の有無にかかわらず「宝交早生」ではうどんこ病の感染はなかった。この結果からうどんこ病抑制に関して緑色光照射の効果はなかった。「光防除技術」としての先行研究では緑色光照射によりジャスモン酸の誘導が確認されたとの報告がある¹²⁾。ジャスモン酸は炭そ病などの死細胞寄生糸状菌に対して防御応答を誘導することが報告されている。一方うどんこ病のような活細胞寄生糸状菌に対する防御応答はジャスモン酸との拮抗作用を有するサリチル酸により誘導されることが報告されている¹⁷⁾。これらの報告か

らは活物寄生糸状菌のうどんこ病への防御応答誘導を、ジャスモン酸誘導の報告がある緑色光照射では期待できず、今回の実験結果は先行する研究報告と一致した結果となっている。

(2) 緑色光照射によるイチゴ果実収量増加の効果

Fig.3.5 に示したように、緑色光照射により 13%果実収量が増加したが、統計検定では有意差がなかった。この結果が一般的なものか、うどんこ病発生の影響を受けた特殊条件によるものかは判別できない。緑色光照射による収量増加の単独の効果を確認するためには、うどんこ病の影響を排除した栽培試験により確認する必要がある。

(3) 「宝交早生」のうどん粉病耐性の評価

本章の栽培実験では、同一培地に混植した「とよのか」がうどんこ病に感染しても、となりの「宝交早生」には感染が伝搬せず、「宝交早生」がうどんこ病に耐性が高いことを示唆していた。

兵庫県立農林水産技術総合センター農業技術センターの 2003 年の研究報告¹⁸⁾において「宝交早生」はうどんこ病耐性が高いことから、新品種開発の指標品種として採用されており、「宝交早生」のうどん粉病耐性は認知されている。

これらの結果からうどんこ病の影響を排除した緑色光照射効果を確認するためには「宝交早生」に栽培品種を絞って栽培試験を実施するのが良い方法であると判断した。

(4) 緑色光による植物の成長の影響に関する研究報告調査

緑色光が植物に及ぼす影響について Kevin M. Folta が 2007 年に Review Paper¹⁹⁾をまとめているが、その題名が Green light: a signal to slowdown or stop である。緑色光

は赤色光や青色光による成長促進作用を阻害しているとの報告が数多く紹介されている。中には背景光のある中で緑色光を添加すると光量子束密度が上昇するにも係わらず、緑色光非添加の対照区より生育が劣るとの報告もある。

この Review Paper で紹介されている例外事例とし H. H. Kim .et, al.²⁰⁾ の報告がある。Table.3.2 にその結果をまとめて示したが、赤色 LED と青色 LED と緑色蛍光灯での照射を組み合わせて光量子束密度の合計を $150 \mu \text{ molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ に限定してレタスの栽培試験をした結果を報告している。青、緑、赤の各単色光の比率を順に 15:24:61 に設定した RGB 区において、従来成長が早いとされてきた 16:0:84 の比率の RB 区より生育が早く新鮮重で 45%良い結果となった。しかし緑色光比率が 51%に増加した CFW 区、および緑色光比率が 86%の GF 区では比葉面積 (SLA: Specific Leaf Area:単位重量当たりの葉面積) が大きくなったが新鮮重は減少した。緑色光比率が 50%を超えると、他の報告と同様に緑色光が生育抑制的な応答を発生させたものと考えられる。

また寺島一郎達²¹⁾ はクロロフィルの緑色光の吸収効率は赤色光や青色光より劣る。しかし光飽和状態にある葉では、赤色光や青色光は吸収されないが、緑色光は吸収されにくい結果海綿状組織で散乱されながら長い距離を進む間にクロロフィル層を通過する回数が増えて結果として緑色光が吸収されて光合成に効果があると報告している。

この寺島の報告と H. H. Kim の報告を照らし合わせて考慮すると、ナローバンドの赤色 LED と青色 LED 光源のレタスのクロロフィル層での吸収能力に限界があり、各々 $93, 25 \mu \text{ molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 程度で光飽和状態に達していると想定できる。このため赤色光が $126 \mu \text{ molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ に達して光飽和状態にある RB 区より、光飽和状態で緑色光を添加した RGB 区の生育が良い結果が得られたものと推察できる。ナローバンドの

LED 赤色光や LED 青色光が植物の葉において光飽和に達する PPF は高くないことに留意する必要がある。

しかし緑色光の比率が増加している CWF 区や G 区では、日陰回避応答の兆候の比葉面積の拡大（葉厚が薄くなり、葉面積を広げる）が発生しており成長阻害状況にあり、結果としても新鮮重低下となっている。

Table.3.2 緑色光添加比率とレタスの生育状況

Kim H.et.al., 2004 報告データ²⁰⁾ から抜粋

Parameter	Treatment			
	RB	RGB	GF	CWF
Photon flux	$\mu \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$			
PPF (400~700nm)	150	150	150	150
Blue (400~500nm)	24	23	15	29
Green (500~600nm)	0	36	129	76
Red (600~700nm)	126	92	6	45
Far-red (700~800nm)	2	2	2	7
Yield photon flux	130	127	122	134
Fraction	%			
PPF	100	100	100	100
Blue	16	15	10	19
Green	0	24	86	51
Red	84	61	4	30
Leaf Area (cm ²)	524.8 b	689.9 a	419.2 c	595.3 b
SLA (m ² /kg)	34.1 b	30.1 c	49.4 a	33.9 b
Shoot fresh Weight (g)	24.6 b	35.7 a	15.3 c	26.9 b
Shoot dry weight (g)	1.54 b	2.26 a	0.83 c	1.76 b
Pn ($\mu \text{ mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	9.3 a	8.6 a	7.4 b	8.8 a
Chl (g /m ²)	0.21 a	0.21 a	0.18 a	0.20 a
Canopy leaf temp (°C)	20.5 a	20.4 a	20.7 a	20.3 a

これらの結果は「光飽和に達する条件下での緑色光添加は光合成を増強し成長を促進するが、緑色光比率を高めると日陰回避応答を生じて成長を抑制する」ことを示唆している。

このように緑色光照射は成長に対して抑制的に作用するとの定説のなかで R. Kudo et.al.^{12,13,22)} が発表した「暗期の短時間緑色光照射は植物の病害応答を強化し、かつイチゴの収量を増加している」は特筆すべき報告に思えた。但し緑色光照射効果のメカニズムに関する説明はなかったが、報告内容から夜間に短時間の低 PPF 緑色光照射に関するものであり、光合成系における光の吸収に関するものではなく、光形態形成系の反応を利用したものと推測できる。

この現象の再現性を確認し、かつメカニズムを解明することができれば、減農薬で収量増加をもたらす画期的な農業生産手法になる可能性があると考えた。

本研究は、R. Kudo et.al.^{12,13,22)}の報告に触発されて「植物の暗期緑色光照射による信号応答機構の解明と、栽培促進手法としての採用可否の検討」を目標として研究開始した。

その第1ステップとして取り組んだのが、本章で報告したイチゴの暗期照射の緑色光による病害の光防除と収量増加効果の確認試験であった²³⁾。

3. 5 摘要

第2章の手法で開発した光と温度の制御システムは、北陸の日照が不足する冬期間において、暖房を使わずにイチゴ栽培が可能であることを確認した。

緑色光の暗期照射による病虫害耐性強化と収量増加の効果を期待して暗期緑色光照射を伴う栽培試験を実施した。収量は非照射の対照区と比較して13%増加したものの統計検定での有意差は検出できなかった。また栽培期間中に

「とよのか」、「べにほっぺ」、「アイベリー」にうどんこ病が発生したが、緑色光照射によるうどんこ病耐性向上の効果はなく、うどんこ病に対して緑色光照射は防御の効果がないことを示していた。緑色光の暗期照射により誘導されるジャスモン酸による防御応答は死細胞寄生糸状菌に対してのものであり、うどんこ病のような活細胞寄生糸状菌への耐性向上に寄与するサリチル酸とは、ジャスモン酸とは拮抗作用があるため¹⁷⁾、緑色光照射がうどんこ病耐性向上に寄与しなかった今回の栽培結果は、先行する研究報告と一致している。

うどんこ病に感染しなかった「宝交早生」の果実収量が他品種より多く、うどんこ病感染が激しかった「とよのか」の収量が少なかったことから、うどんこ病感染が収量に影響を与えた可能性を排除できず、今回の試験結果では効果を判断できない。緑色光照射の収量に関する効果を確認するためには、うどんこ病影響を排除した追加試験を実施して、差異を確認する必要がある。

第4章 暗期緑色光照射効果確認2次試験

4.1 緒言

第3章にて報告したが、前年度の暗期緑色光照射効果確認の栽培試験におけるイチゴ果実収量に、うどんこ病感染が影響した可能性が考えられた。このためうどんこ病の影響を排除した追加の栽培試験を企画した。栽培品種をうどんこ病に耐性が高い「宝交早生」1品種に絞ったのがその対策である。

しかしながら2011年3月11日に発生した東日本大震災による電力不足に対応し、大学施設においても省電力要請があったため、日照不足対応の補光用光源を200Wレフ球からLED電球に変更した。このため光量(PPF)の低下を招き、前年より光環境条件が悪化した栽培条件となったが、対照区との比較では補光の条件を合わせることができるので、暗期緑色光照射効果確認の第2次試験の実施は可能と判断した。

4.2 材料と方法

(1) イチゴ栽培試験に用いた品種と栽培経過

うどんこ病に耐性があるイチゴ品種「宝交早生 (N=30)」を栽培した。3ベンチに計6培地を設置し、Table.4.1に記載のように1培地に5本の苗を定植した。

Table.4.1 栽培ベンチごとの設定条件と栽培品種

No	緑色光	培地	栽培品種
1-1	なし	ゼオライト	宝交早生 (5)
1-2	照射	ゼオライト	宝交早生 (5)
2-1	照射	ゼオライト	宝交早生 (5)
2-2	なし	ゼオライト	宝交早生 (5)
3-1	照射	ゼオライト	宝交早生 (5)
3-2	なし	ゼオライト	宝交早生 (5)

ベンチ No.の配置は Fig.3.1 参照
品種名後の () 内は苗数を示す。

定植前に初期のハダニ防除のためダニフロアブル (日本農薬(株)製)を 1000 倍に希釈して苗を浸漬した後 2011 年 10 月 11 日に定植した。補光開始は 11 月 1 日であったが、電力消費抑制のため補光 PPF が低く成長が遅れ、開花開始は 2012 年 1 月 20 日、収穫開始 3 月 2 日となった。

(2) イチゴ栽培ベンチの構築

第 3 章 3. 2 (2) と同一の栽培ベンチを使用した。
培地材料は多孔質天然砂のゼオライト (ゼオフィル 1424, 新東北化学工業, 宮城県) に統一した

(3) 日中の補光の方法

第 2 章 2.2 項に記載の方法を使用した。但し電力使用量削減要請に対応するため、補光用電源の 200W レフ球を 60W 級 LED に交換した。このため補光の PPF は補光単独で $PPF30\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ の光強度、補光と日照を合わせて $PPF90\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ の光強度まで低下した。

補光用光源点灯のための日照不足の判定は、第 3 章と同様に温室最上部の気温が 8:00~17:00 の間に 20℃以下になった場合に日照不足と判定して、補光光源を点灯する設定とした。

(4) 緑色光照射の方法

緑色光照射の方法及びスケジュールは第 3 章 3.2.(4)に記載したのと同じとした。緑色光の照射による培地上面における光強度は $PPF15.3\sim36.0\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ であった。

(5) イチゴの受粉、開花数および果実収量の計測

栽培苗数が少なく加温をしていないためハチによる受粉は採用せず、品種ごとに異なる絵筆を使い人工受粉した。受粉作業時に同時に苗毎に開花数を数えた。果実収量は人工的な外乱を排除するため摘果を行わず 4 g 以上の果実の個数と重さを計測した。重さの計測はドリテック社スリムスケールを使用して計測した。

(6) 統計検定およびグラフ作成の手法

統計的な有意差検定は株式会社エスミ製 Excel 統計 Ver.6.0 搭載のチューキー全群比較を使用し、グラフは平均値と標準誤差を表す誤差グラフを使用した。

4. 3 結果

(1) 2 年目 (2011 年秋定植 2012 年収穫) 栽培経過

補光用電力消費量低減により補光の強度が $PPF90 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ から、 $30 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ へと低下した結果、Table.4.2 に記載のように開花が 70 日遅れ、収穫開始は 68 日おくれとなった。緑色光効果確認のための比較試験としては支障がないと判断しデータ計測した。この栽培経過の比較結果からも北陸の冬期の施設栽培では適切な補光が不可欠なことを示している。

Table.4.2 前年度との栽培条件および栽培経緯比較

	本年度栽培試験	前年栽培試験
栽培品種	宝交早生 1 品種	4 品種
補光用光源	60WLED 3 個	200W レフ球 + 60WLED 2 個
補光 PPF	$30 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	$90 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
定植	2011 年 10 月 11 日	2010 年 10 月 12 日
補光開始	2011 年 11 月 1 日	2010 年 11 月 1 日
開花開始	2012 年 1 月 20 日	2010 年 11 月 11 日
収穫開始	2012 年 3 月 2 日	2010 年 12 月 24 日

(2) 開花数の推移

Fig.4.1に緑色光照射区と非照射の対照区のイチゴ苗の比較栽培試験における開花数推移を示す。緑色光照射区の開花数は定植後170日までは対照区より遅れていたが、定植後191日(4/9)及び200日目(4/18)においては開花数が増加し対照区との比較において1%誤差水準で有意差があった。暗期緑色光照射が開花を促進している。



Fig.4.1 イチゴ (宝交早生) 苗の開花推移

緑色光区は苗数14、対照区は苗数15のデータ

** : 緑色光照射区の開花数は1%誤差水準で有意差ある。

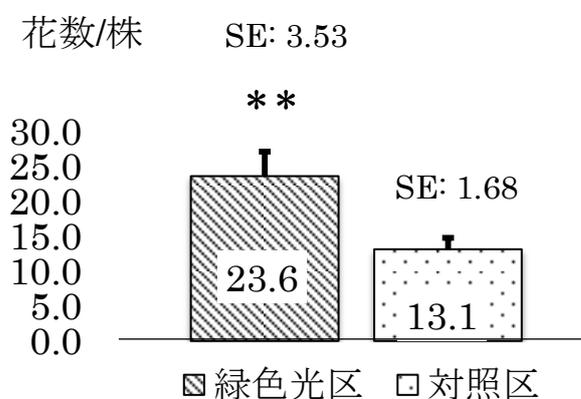


Fig.4.2に2012年4月18日の開花数を示す。緑色光照射区の開花数は対照区との比較で1.8倍増加しており、1%誤差水準で有意差がある。

Fig.4.2 4月18日の開花数比較

数値は平均と標準誤差を示す

** : 1%誤差水準で有意差ある

(3) 果実収量と果実個数

緑色光照射区では開花数の増加に追従して、果実収量が増加した。5月22日（定植後235日）まで継続した栽培試験結果でイチゴ果実収量差異を Fig.4.3 に示す。イチゴ果実収量は1%誤差水準での有意差をもって緑色光照射区の収量が増加していた。またイチゴ果実個数差異を Fig.4.4 に示す。果実個数も1%誤差水準で有意差をもって緑色光照射区の個数が増加していた。但し開花数の差ほどの収量差はなかった。

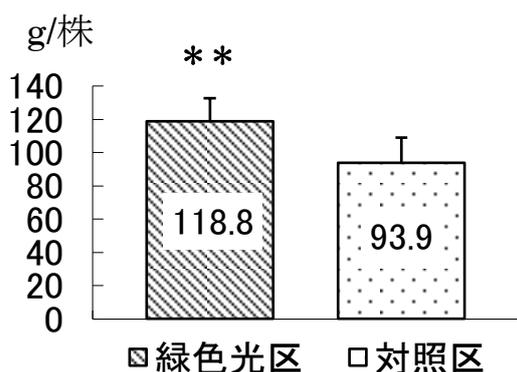


Fig.4.3 果実収量差異
数値は平均値、エラーバーは標準誤差を示す。 ** : 1%誤差水準の有意差を示す

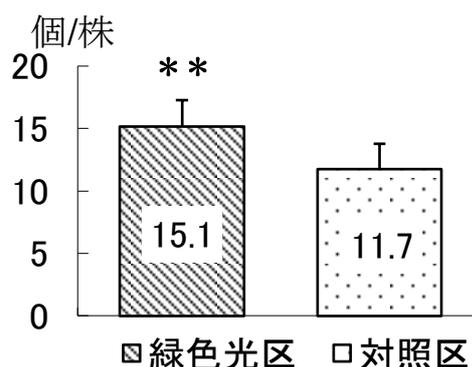


Fig.4.4 果実個数差異
数値は平均値エラーバーは標準誤差を示す。 ** : 1%誤差水準の有意差を示す

果実の平均重さは緑色光区で 7.9g, 対照区で 8.0g であり、差異はなかった。

(4) うどんこ病の影響

前年度の栽培試験結果および先行報告から、うどんこ病耐性が高いと判断した「宝交早生」を本年度の試験栽培品種に選択した。緑色光照射区および対照区の両方においてうどんこ病の発生はなかった。このため収量に対するうどんこ病感染の影響は排除できた。

(5) ハダニの発生程度

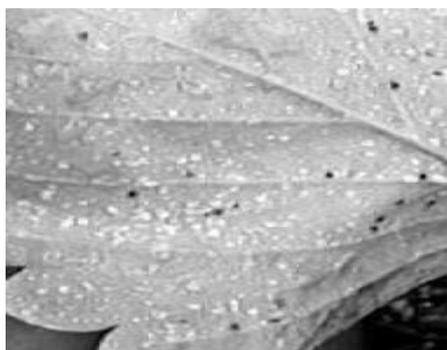


Fig.4.5 ハダニ発生
葉裏にハダニ付着
黒色の点がハダニ

定植 138 日後の 2 月 16 日にハダニが発生しているのを検出した。写真撮影した後にバロックフロアブル 2000 倍希釈液と刷毛で除去した。除去の途中で緑色光区のハダニ発生が対照区の半分程度と

少ないと気付いたが定量データは採取せず失敗した。次年度の栽培でデータ取得することにする。

4. 4 考察

(1) イチゴ開花数および果実収量の緑色光照射効果

東日本大震災後の電力供給不足から、省エネルギーを要求されたことから、補光強度は $PPF30 \mu \text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ と前年比 1/3 のレベルであった。このため定植後から開花開始および果実収穫開始までの期間が対前年比で約 70 日間と大きく遅れた。

これは結果的に北陸の冬期栽培における補光の重要性を示していたが、同時に暗期緑色光照射区では対照区との比較で開花が促進され、果実収量も有意に増加し、暗期緑色光照射の収量増加効果を示していた。

この収量増加が補光を十分な条件でも再現するののかに関しては、まだ疑問が残り継続した試験栽培の実施が必要である。

更に緑色光以外の単色光、例えば赤色光や青色光を暗期に照射したときに、緑色光照射だけが病虫害耐性向上と収量増加の特異性が発揮されるのかは興味深く、緑、赤、青色光照射の比較栽培試験を次年度栽培にて企画した。

(2) 緑色光照射による病虫害耐性向上

暗期緑色光照射により、ジャスモン酸生合成酵素である LOX, AOS の発現を確認し、また炭そ病などの死細胞寄生糸状菌による病害耐性向上と、ハダニの天敵ミヤコカブリダニの誘導によるハダニ耐性向上との R. Kudo et.al.^{12,13,22)}の報告がある。本章の試験では評価の定量化に失敗したが、ハダニの被害抑制に暗期緑色光照射が効果を発揮していた可能性がある。緑色光によるハダニ抑制効果を次年度の栽培試験で確認する。

(3) 暗期緑色光照射応答のメカニズム究明

暗期緑色光照射により発生する植物の応答のメカニズム究明の必要がある。このためには、まず緑色光の受容体は何か、またジャスモン酸や拮抗作用のあるサリチル酸の発現と光質の関係を確認できるのか。ジャスモン酸の発現は開花や果実収量に影響しているのか。ジャスモン酸は植物体の成長にどう作用するのかなどを解明することが求められる。

イチゴ栽培において緑色光以外に赤色光と青色光を暗期照射する比較試験の実施と、シロイヌナズナの光受容体欠損、およびジャスモン酸生合成酵素欠損の変異体を使った栽培試験を実施することを計画した。

またごく微量な成分分析が可能な LC-MS を使用して上記で栽培したイチゴおよびシロイヌナズナ試料のジャスモン酸とサリチル酸の内在量を計測²⁴⁾して、メカニズム究明の第一ステップとすることにした²⁵⁾。

4. 5 摘要

補光による PPF が $30 \mu \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ と低い条件下であったが、緑色光照射区では対照区との比較で、最初開花が遅れたが途中から急速に増加し 1 % 誤差水準の有意差をもって開花促進を示した。また収量も対照区との比較で 1 % 誤差水準の有意差をもって増加した。

しかし収量増加が補光不足条件下の特殊なものである可能性がある。また緑色光照射による収量増加が補光条件を回復させたあとも再現できると仮定しても、緑色光だけが特異的に、開花や収量増加などの応答を誘導するののかに関して試験で確認しておく必要がある。またメカニズム解明のために機能欠損の変異体の入手可能なシロイヌナズナにより緑色光の受容体の特定や、ジャスモン酸の機能を確認する試験を実施していく必要がある。次年度の試験でこれらに取り組む。

また緑色光照射区ではハダニの発生程度が、対照区より少なかったが、定量化に失敗した。緑色光によるハダニ抑制効果の定量化にも取り組む必要があるなど、多くの課題が残った。

第5章 各種単色光照射のイチゴ栽培への影響

5.1 緒言

暗期の緑色光照射がイチゴ「宝交早生」栽培において、対照区との比較で、花成誘導および収量の増加となったこと、またハダニ抑制の可能性があったことを第4章で報告した。R. Kudo^{12,13,22)}が報告しているように、暗期の緑色光照射がジャスモン酸を発現させているならば、ジャスモン酸は食害応答のVSP2遺伝子を発現させるので虫害防止の機能があることは報告されており²⁶⁾ハダニ抑制にも効果があるのは推測できる。

またシロイヌナズナでは師管伴細胞のクリプトクロム2が光刺激を受けるとCO蓄積からFTの誘導を經由して開花誘導するとの報告がある²⁷⁾。フラビンセミキノンが半還元状態にあるクリプトクロム2は緑色光を吸収する能力がある²⁸⁾ので、イチゴの花成誘導がシロイヌナズナと同様ならば、暗期の緑色光照射がクリプトクロム2を刺激して、イチゴの花成を誘導することは十分に想定できる。

しかしながら緑色光照射だけが花成誘導やハダニ抑制などの特異的な反応を誘導し、また収量増加に寄与するのかを確認しておく必要がある。この目的のために青色光や赤色光を暗期に照射する比較試験を企画した。

本章では緑色光照射区の他に、青及び赤色光照射区と非照射区をつくり、イチゴ（宝交早生）の栽培で比較試験を試みた。また各区の植物体を採取し植物ホルモンのジャスモン酸とサリチル酸の内在量をLC-MS/MSで同時に分析することにした²⁴⁾。なお日照不足時の補光条件は第2章報告で採用した補光単独で $PPF90 \mu \text{ molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、曇天や雨天時の散乱光と合わせて $150 \mu \text{ molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ の条件に設定した。

並行してモデル植物のシロイヌナズナ野生種およびクリプトクロム欠損変異体とジャスモン酸合成酵素欠損変異体を使い暗期の緑色光、青色光照射と非照射の比較実験をしてメカニズムの究明を目指した。シロイヌナズナの実験結果は第6章において報告する。

5. 2 材料と方法

(1) 栽培システムと光環境条件（有色蛍光灯および補光）

栽培システムは第2章に報告したとおりである。単色光照射条件は Table.5.1 にしめす。週3回 A パターン（火、木、日曜日）の 1 : 0 0 ~ 3 : 0 0 am に照射するようにタイマー設定をした。

Table 5.1 イチゴ栽培棚における光環境条件

光処理	有色蛍光灯照射			補光照射条件	
	PPF $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ^f	曜日	時間	PPF $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$	時間
対照区 ^a		非照射		85-121 ^e	8:00am-
緑色光区 ^b	21-36	A ^g	1:00am~3		17:00pm
青色光区 ^c	19-56	A	:00am		曇天時
赤色光区 ^d	14-33	A			

^a 暗期の有色蛍光灯の照射なし

^b 緑色蛍光灯（東芝 FL20SG）2本による照射.

^c 青色蛍光灯（パナソニック FL20SB）2本による照射

^d 赤色蛍光灯（東芝 FL20SR）2本による照射

^e 昼間の曇天または降雨日における補光と日射散乱光による合計の PPF は $150\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ である。

^f 有色蛍光灯照射時の PPF はイチゴ苗を定植した培地の上面において水平にセンサーを保持した状態で計測した。h

g A パターン照射は火曜日、木曜日、日曜日の照射を示す

各照射区のイチゴ栽培棚の配置を Table.5.2 に示す。宝交早生苗 40 本を各区に 10 本定植した。定植前に初期のハダニ防除のためダニトロンフロアブル（日本農薬（株）製）を 1000 倍に希釈して苗を浸漬した後に定植した。

Table.5-2 各培地の光照射区分とイチゴ品種、苗数

培地 No.	有色光照射区分	栽培品種	苗数
1-1	対照区 (N)	宝交早生	5 本
1-2	青色光区 (B)	宝交早生	5 本
2-1	対照区 (N)	宝交早生	5 本
2-2	緑色光区 (G)	宝交早生	5 本
3-1	青色光区 (B)	宝交早生	5 本
3-2	赤色光区 (R)	宝交早生	5 本
4-1	緑色光区 (G)	宝交早生	5 本
5-1	赤色光区 (R)	宝交早生	5 本

培地 No.の栽培区内の配置は Fig.2.4

4-2 および 6-1 の培地は別品種の試験に供試した。

Table.5.3 前年度との栽培条件および栽培経緯比較

	前年度栽培試験	本年度栽培試験
栽培品種	宝交早生 1 品種	1 品種
補光光源	60WLED 3 個	200W レフ球 + 60WLED 2 個
補光 PPF	$30 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	$90 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
定植	2011 年 10 月 11 日	2012 年 10 月 19 日
補光開始	2011 年 11 月 1 日	2012 年 11 月 1 日
開花開始	2012 年 1 月 20 日	2012 年 11 月 29 日
収穫開始	2012 年 3 月 2 日	2012 年 12 月 27 日

東日本大震災後の電力供給が安定化したことから、

Table.5.3に示すように補光条件を当初設定条件に戻した結果、開花及び果実収穫開始時期が早まり 2010 年栽培と同等の成長に復帰した。

(2) 有色蛍光灯の分光スペクトル

光学的スペクトロメータ (USB2000+, Ocean Optics, Florida USA) を使用して計測した有色蛍光灯の分光スペクトルを Fig.5.1 に示す。

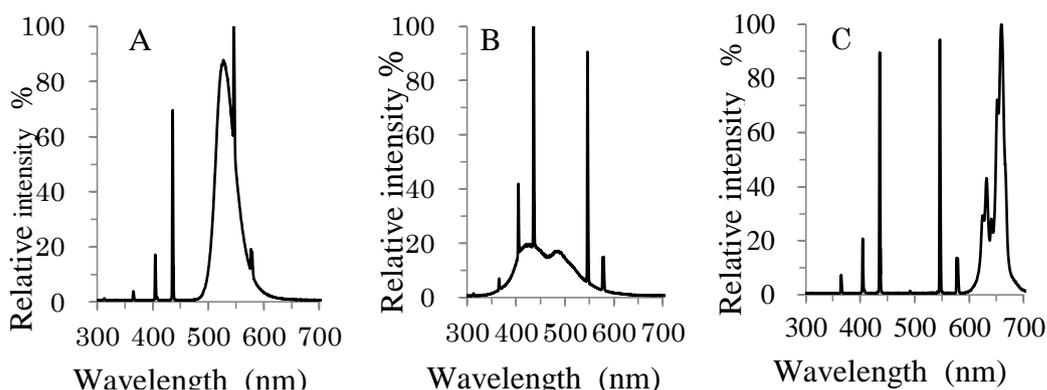


Fig.5.1 各有色蛍光灯の分光スペクトル

- (A) 緑色蛍光灯 (Toshiba FL20SG) の分析データ 500 to 600 nm (λ_{\max} at 530nm)に極大値.
- (B) 青色蛍光灯 (Toshiba FL20SB) の分析データ 400 to 600 nm (λ_{\max} at 430nm)に極大値.
- (C) 赤色蛍光灯 (Panasonic FL20SR) のデータ 600 to 700 nm (λ_{\max} at 670 nm)に極大値.

(3) 培地材料

培地は、多孔質天然砂であるゼオライト (新東北化学工業 (株) 製ゼオフィル 1 4 2 4) を (1000x150x75mm) の箱体に詰め込んだ培地とした。

(4) イチゴの受粉、開花数および果実収量の計測

栽培苗数が少なく加温をしていないためハチによる受粉は

採用せず、品種ごとに異なる絵筆を使い人工受粉した。受粉作業時に同時に苗毎に開花数を数えた。果実収量は人工的な外乱を排除するため摘果を行わず4 g以上の果実の個数と重さを計測した。重さの計測はドリテック社スリムスケールを使用して計測した。

(5) ジャスモン酸とサリチル酸の同時分析手法

栽培4ヶ月目の各栽培区のイチゴ苗から、完全展開した若葉(生重量6g)を採取した。試料は、採取後直ちに-30℃で凍結保存した後、株式会社ハウス食品分析テクノサービス(千葉県四街道市)に送付し、ジャスモン酸量とサリチル酸量を同時分析した。Segarraら²⁴⁾が報告した手法に従いLC-MS/MS(LC: Waters 2695alliance, MS: Waters Quattro Premier)を使用して定量した。

(6) 統計検定及びグラフ作成の手法

統計的な有意差検定は株式会社エスミ製Excel統計Ver.6.0搭載のチューキー全群比較を使用し、グラフは平均値と標準誤差を表す誤差グラフを使用した。

5.3 結果

(1) 有色蛍光灯照射による開花への影響

2012年10月19日に定植したイチゴ苗の開花数の推移をFig.5.1に示す。緑色光照射区は定植後70日(12月27日)では非照射区と比較しても開花が遅れている。しかし定植102日目(1月28日)には他の試験区に追いつき、定植118日(2月13日)には緑色光照射区の開花数は他区との比較で30%以上増加したが統計検定の結果有意差はなかった。この緑色光照射区の開花が当初遅れるが徐々に挽回し、結果的には開花数が非照射区より多くなる現象は、Fig.4.1, Fig.4.2に示した前年のイチゴ栽培での開花数と同様な経過となった。

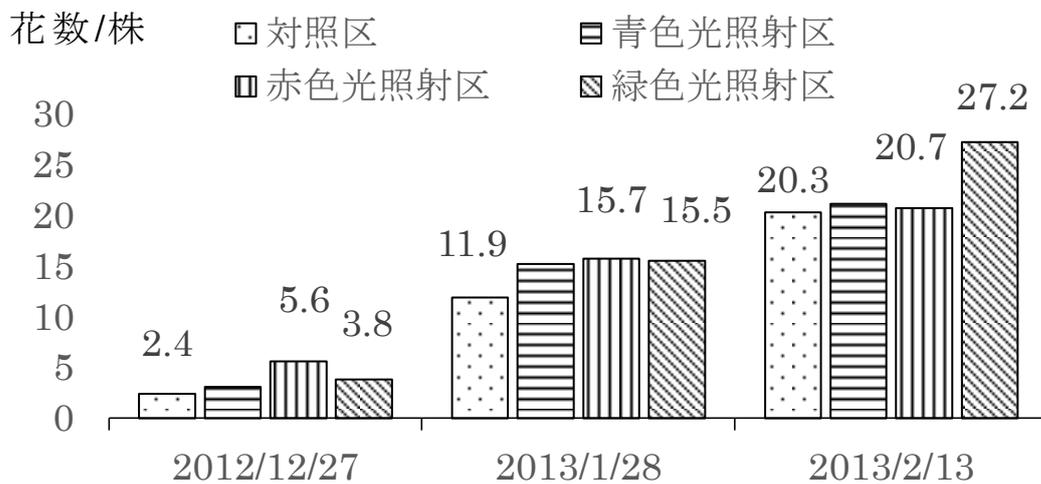


Fig.5.1 イチゴ(宝交早生)苗の開花推移

各区の苗数N=10のデータ

Table.5.4 および Table.5.5 に示すように 201年2月13日時点の各光照射区における開花数で有意差は検出できなかった。

Table.5.4 2/13 開花数分散分析表

要因	自由度	偏差平方和	不偏分散	分散比	P 値	判定
全体	39	5,590.8				
A	3	320.1	106.692	0.729	0.542	[]
誤差	36	5,270.7	146.408			

Table.5.5 2/13 開花数の母平均の差の検定と推定

区分名 1	区分名 2	平均 1	平均 2	差	統計量	5%	1%	判定
対照区	青色光区	20.3	21.1	-0.8	0.209	3.809	4.729	[]
対照区	赤色光区	20.3	20.7	-0.4	0.105	3.809	4.729	[]
対照区	緑色光区	20.3	27.2	-6.9	1.803	3.809	4.729	[]
青色光区	赤色光区	21.1	20.7	0.4	0.105	3.809	4.729	[]
青色光区	緑色光区	21.1	27.2	-6.1	1.594	3.809	4.729	[]
赤色光区	緑色光区	20.7	27.2	-6.5	1.699	3.809	4.729	[]

(2) 有色蛍光灯照射によるイチゴ果実収量への影響

開花数測定は2月13日で打ち切ったが、その後4月19日までに栽培を継続しイチゴ果実の収穫量を計測した結果をFig.5.2に示す。Fig.5.2.Aは緑色光照射区と非照射区の収量の比較、Fig.5.2.Bは各単色光照射区の収量の比較を示す。Fig.5.2.Cは果実数を示す。図中の棒グラフは平均値、エラーバーは標準誤差を示す。またN区は対照区、B区は青色光区、G区は緑色光区、R区は赤色光区を示す。

緑色光区は対照区との比較で10%の増収となっている。また青色光区は対照区より8%収量が少なかった。一方赤色光区は緑色光区より28%、対照区より40.1%収量が増加している。但し統計検定での有意差はない。

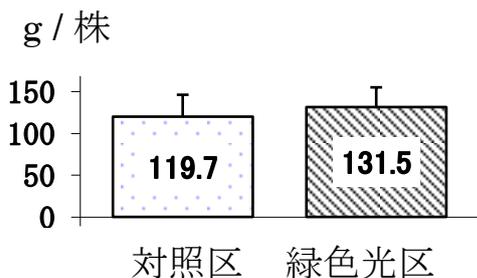


Fig.5.2.A 緑色光区と対照区の収量比較

数値は平均値、エラーバーは標準誤差を示す

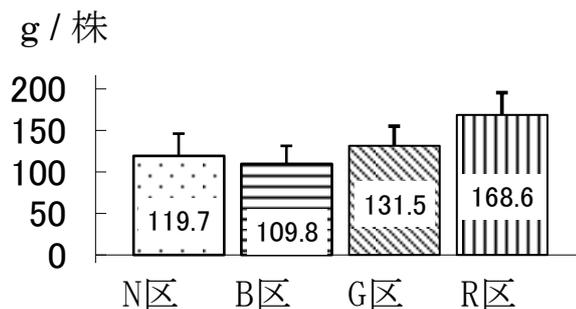


Fig. 5. 2. B 各区のイチゴ収量比較

数値は平均値、エラーバーは標準誤差を示す

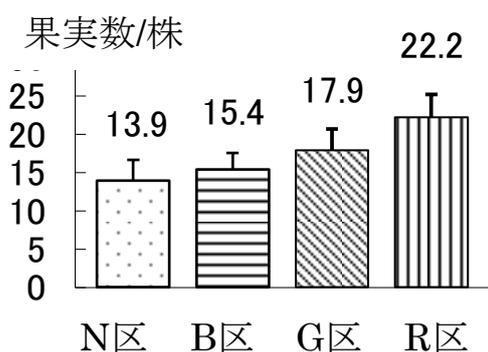


Fig. 5. 2. C 果実数比較

数値は平均値、エラーバーは標準誤差を示す

緑色光区の開花数および果実収量が対照区との比較で増加傾向を示したが、有意差がない結果となった。前年度の収量の有意差は再現できなかった。

前年の栽培結果は PPF 不足時の特殊条件下での差異の可能性はある。またデータの定量値を Table. 5. 6 に示す。

Table 5.6 有色蛍光灯の暗期照射のイチゴ収量への影響

光処理	開花数 数/株	果実数 数/株	果実重量 g/果実	果実新鮮 重 g/株	収量 比 ^a
対照区	20.3 ±4.7	13.9 ±2.8	8.61 ±0.3	119.7 ±26.4	100
緑色光区	27.2 ±3.2	17.9 ±2.8	7.35 ±0.2	131.5 ±23.4	110
青色光区	21.1 ±3.9	15.4 ±2.2	7.13 ±0.3	109.8 ±21.5	92
赤色光区	20.7 ±3.4	22.2 ±3.1	7.59 ±0.3	168.6 ±27.1	141

表中の数値は平均値±標準誤差 (N=10).

統計検定 (Tukey's test) による有意差は検出できない

開花数は定植後 4 か月までのデータである

果実収量は定植 6 か月までのデータである

^a 果実収量比の計算は下記による

果実収量比 = 各区果実新鮮重 / 対照区果実新鮮重 x100% T

(3) 暗期照射の単色光による植物ホルモンの誘導

暗期の緑色蛍光灯照射がジャスモン酸を発現させたことを示唆する報告²²⁾があり、確認のためジャスモン酸の内在量を液体クロマトグラフィー質量分析器 (LC-MS) で比較計測した。またジャスモン酸の誘導は緑色光照射による特異的な事象なのかを確認するために、対照区、青色光区、赤色光区と緑色光区の 4 栽培区から完全展開した若い葉茎を採取して LC-MS で分析した。またジャスモン酸と拮抗作用のあるサリチル酸内在量も同時に比較計測した。

結果をそれぞれ Fig.5.3.A と B に示す。緑色光区の試料からジャスモン酸の内在量が対照区および赤色光区、青色光区の試料より有意に増加しているのを確認した。また同時に青色光区においてサリチル酸の内在量が有意に増加していることを確認した。緑色光区のジャスモン酸、および青色光区のサリチル酸の内在量は統計検定結果 5 % 誤差水準での有意差が認められた。

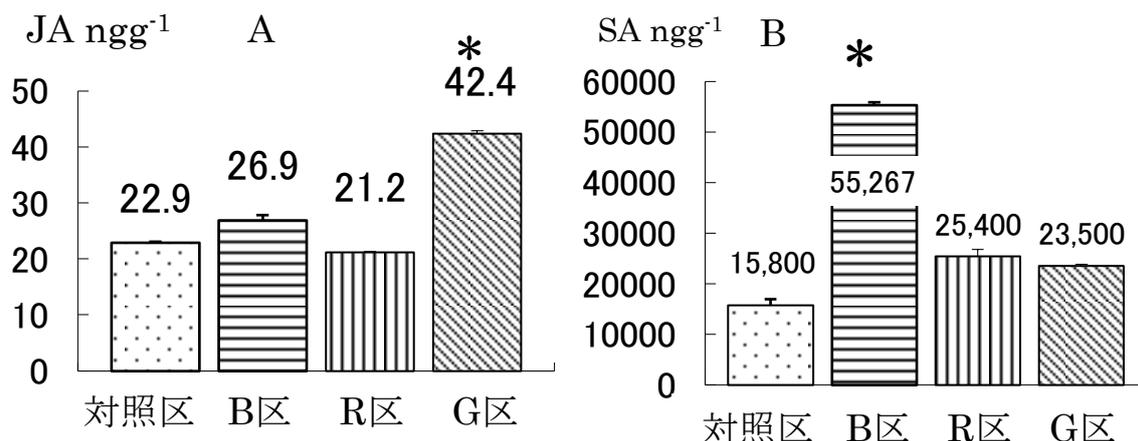


Fig.5.3.A. B ジヤスモン酸とサリチル酸の内在量分析結果、

分析は独立した3回の抽出液から実施した。棒グラフは平均値、エラーバーは標準誤差をしめす

*は5%誤差水準で有意差があることを示す

対照区は有色蛍光灯非照射、B区、R区、G区はそれぞれ青色光区、赤色光区、緑色光区を示す

(4) ハダニ耐性の評価

ハダニ耐性評価のための初期化として、定植前にダニトロンフロアブル（日本農薬（株）製）を1000倍に希釈して苗を浸漬した後に定植した。前年度の栽培試験でハダニが自然繁殖していたことから、各培地の初期のハダニ頭数の均等配置などはせずに、ハダニ発生は環境条件に依存することにした。

ハダニ耐性の定量的な評価方法として葉に付着したハダニを全て白紙上に落して撮影または直接個体数を数える方法も報告されていたが、個体数が多くなると計測自体の精度に自信がもてない。このため本章ではハダニの被害をイチゴの葉の変化をTable 5.7のようにスコア化して、葉のスコア平均値をもって被害量を定量化することにした。

ハダニが検出されない状態をスコア0、Fig.5.4のように葉裏に黒点状に付着している状態をスコア1、Fig.5.5のように葉裏にハダニが密集し葉裏の緑色の退色がみられる状況をス

コア 3, Fig.5.6 のようにハダニが葉を覆い尽くして蜘蛛の巣を張った状態をスコア 5 として、その途中を状態により計 6 段階に区分した。

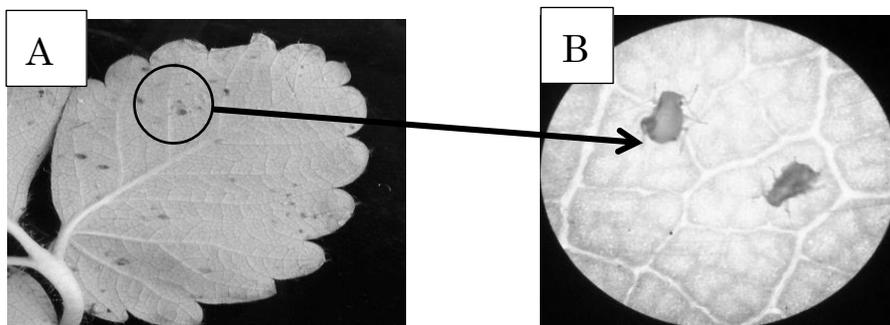


Fig.5.4 ハダニが葉裏に付着（被害スコア 1）

A: イチゴ葉裏の全体写真、黒点が目視できる

B: 黒点部分の顕微鏡写真。葉の変色は発生していない。

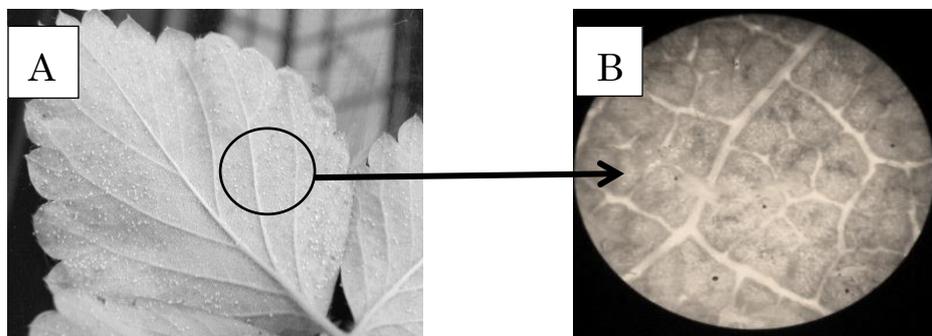


Fig.5.5 ハダニが葉裏に密集、葉裏の緑の退色があるが葉表の変色はない。（被害スコア 3）

A: イチゴ葉裏の全体写真、黄色に変色している

B: 変色部位の顕微鏡写真。ハダニが葉裏に密集。

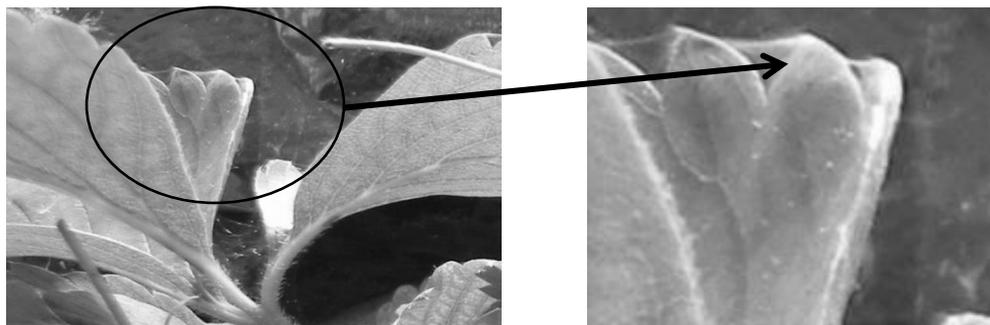


Fig.5.6 蜘蛛の巣が葉を覆っている（被害スコア 5）

Table.5.7 ハダニ被害量スコア

スコア	葉の状況
5	蜘蛛の巣が葉を覆った状態
4	葉裏は全体が変色、葉表は斑点状に変色
3	葉裏は全体が変色、葉表には変化ない。
2	葉裏は斑点状に変色、葉表には変化ない
1	葉裏に黒点状にハダニ検出、葉の変色なし
0	被害なし

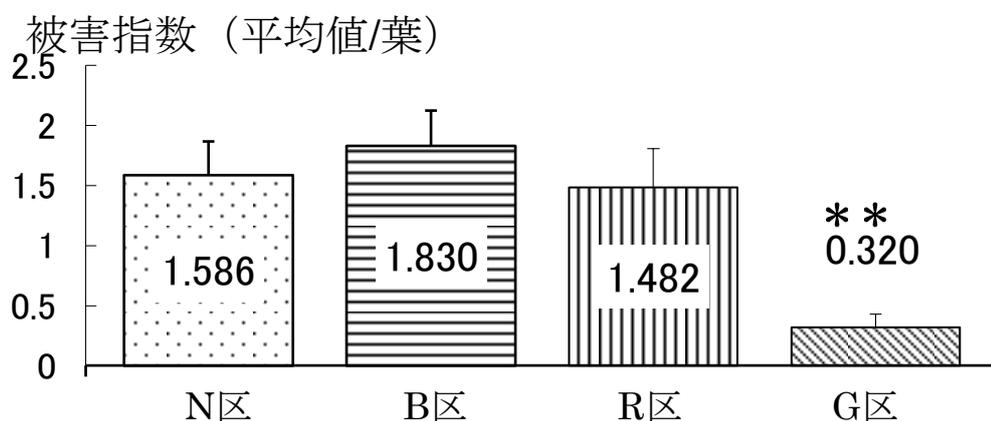


Fig.5.7 イチゴ苗のハダニ被害指数

各苗の三枚葉のついた葉柄数で9~12本の被害スコア合計値を葉数で除した平均値を示す。

エラーバーは標準誤差、**は1%誤差水準での有意差を示す。

Fig.5.7で示したように緑色光区はハダニ被害量が明らかに少なく、誤差水準1%で統計的な有意差がある。緑色光区におけるハダニ被害量の少なさと、食害防御応答を誘引するジャスモン酸の発現量の多さから、暗期照射の緑色光がハダニ被害を抑制していることを示唆している。

5.4 考察

(1) イチゴの果実収量と果実肥大

暗期の緑色光照射による果実収量は、初年度と2年度およ

び3年度の栽培結果を対照区との比較で Table.5.8 に示す。

Table.5.8 緑色光照射によるイチゴ果実収量への影響

項目	第1年度	第2年度	第3年度
収量比	113	127**	110
報告章	第3章	第4章	第5章

収量比 = 緑色光区の収量/対照区収量 x 100%

** : 1%誤差水準で有意差がある

電力問題により補光が不足気味であった第2年度でイチゴ果実収量が対照区比で有意差があったが、第1年度と第3年度では統計検定で有意差はなかった。しかしながら3年連続で緑色光区の果実収量は対照区比で増加の傾向があった。

暗期緑色光照射では Fig.5.3.A に示したようにジャスモン酸の発現が誘導されている。ジャスモン酸は病虫害耐性を強化するが、一方で成長抑制のシグナルとしても知られている。

イチゴの収量増加のためには開花し受粉した後でのイチゴ果実（花托）肥大のために Fig.5.8 に示すように、オーキシンの供給が不可欠との興味深い実験がある^{29,30)}。

暗期緑色光照射により成長抑制型のジャスモン酸を誘導しながら、逆に成長促進型植物ホルモンのオーキシンの誘導が不可欠なイチゴ果実肥大の傾向を示す興味深い現象が発生している。

近年の植物ホルモンの機能、および植物ホルモン間のクロストークの研究により、成長促進と成長抑制に関して一方向への偏りを避ける制御機構の存在が明らかになってきた。事例としては成長ホルモンのオーキシンは発現と同時に自らブレーキをかけるかのように AUX/IAA リプレッサーの発現を誘導しており⁶¹⁾、同時に成長抑制のジャスモン酸発現を刺激

する³¹⁾との報告がある。また成長抑制のジャスモン酸はオーキシン発現の生合成経路を刺激している³²⁾など、一方向への暴走を制御する恒常性維持（ホメオスタシス）機能を有していることが判明してきている。またオーキシンが発現すると遊離ジャスモン酸をアミノ酸 **Asp**, **Met**, **Trp** と結合させてジャスモン酸を不活性化するが、一方ジャスモン酸生合成酵素の **JAR1** はジャスモン酸をイソロイシンと結合させてジャスモン酸生合成の転写活性が強い **JA-Ile** を生成してジャスモン酸を活性化する³³⁾などのクロストーク現象が報告されている。

これらのジャスモン酸とオーキシンの連携作用が、モデル植物のシロイヌナズナを使った研究によって明らかになってきている。イチゴにおいてもシロイヌナズナと同様な植物ホルモン間のクロストークが存在すると仮定すると「暗期の緑色光照射がジャスモン酸の発現を誘導し、ジャスモン酸がオーキシン生合成経路を刺激して、続く昼間の太陽光照射によりオーキシン発現誘導が強化されるホメオスタシス機能が作用した結果、刺激のない対照区よりイチゴの成長が促進される傾向がでる。」との仮説は想定可能である。

光刺激によるオーキシン誘導に関しては、トマト苗への暗期の赤色光照射がオーキシンを誘導しているとの報告³⁴⁾がある。シロイヌナズナ苗では青色光受容体のクリプトクロム1への刺激でオーキシンが誘導されるとの報告³⁵⁾がある。

われわれが実施した暗期の赤色光照射の効果を調べたイチゴ栽培試験において Fig. 5.1 に示すように、開花数は多くないにもかかわらず Fig. 5.2.B、Fig. 5.2.C のように果実数および果実収量が増加した。この結果はイチゴにおいてもトマトと同様に暗期赤色光照射でオーキシン誘導を促進した可能性を示唆している。

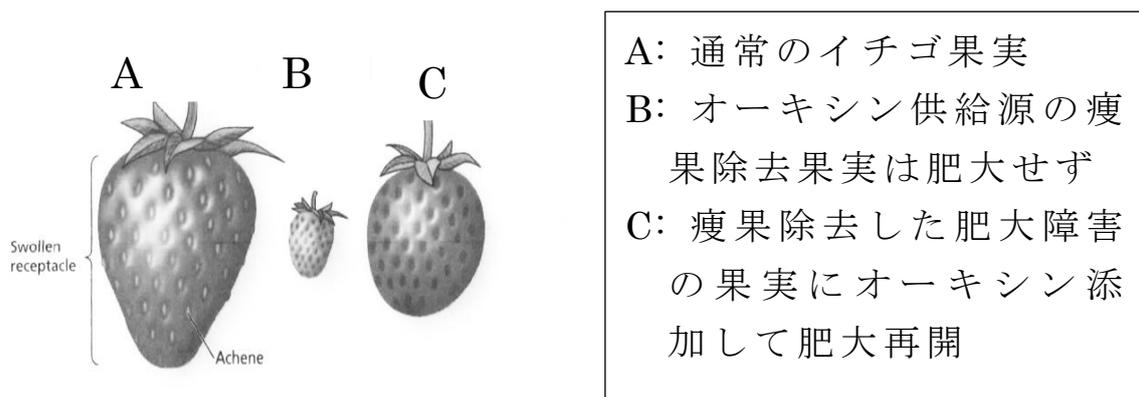


Fig.5.8 イチゴ果実（花托）肥大にオーキシンが寄与

L. Taiz、E. Zeiger 共著 Plant Physiology 5th Edition pp. 578 29) 転用

(2) 暗期の有色蛍光灯照射が波長特有の植物ホルモン発現を誘導する。

イチゴ苗（宝交早生）において緑色光はジャスモン酸を、青色光はサリチル酸の発現を誘導することが LC-MS での分析結果で明らかになった。先行する研究報告でも緑色光がジャスモン酸を誘導し病虫害耐性を向上させる^{13,22)}、また青色光照射がサリチル酸を誘導して植物の病害耐性を向上させる栽培手法の特許文献¹⁰⁾がある。これらの先行研究報告によってジャスモン酸が死細胞寄生糸状菌への耐性向上や虫害への耐性向上の信号伝達物質となっていること、またサリチル酸は活細胞寄生糸状菌への耐性向上の信号伝達物質であることが明らかにされてきた¹⁷⁾。

イチゴ品種の「宝交早生」はうどんこ病耐性が高いことが報告されているが¹⁸⁾、うどんこ病など活物寄生糸状菌の耐性向上に寄与するサリチル酸の内在量がジャスモン酸に比較して約 1000 倍の内在量の $15,800 \text{ ngg}^{-1}$ に達している。うどんこ病耐性が高いと報告されている³⁶⁾宮城県産出「もういっこ」のサリチル酸内在量が $2,000 \text{ ngg}^{-1}$ であり³⁷⁾、「宝交早生」がうどんこ病に特に強い耐性を有していることを裏付けたよう

なサリチル酸内在量の計測結果である。また青色光照射により更に 3.5 倍までサリチル酸内在量が上昇している。特筆すべきなのは緑色光照射の G 区ではサリチル酸内在量が対照区より上昇しながら、サリチル酸と拮抗作用が報告されているジャスモン酸の内在量も同時に有意差をもって上昇している。病虫害に対する「光防除技術」として暗期緑色光照射がサリチル酸内在量の多い品種でも適用できる可能性を示唆する。

トマト苗での暗期赤色光照射が植物成長のシグナル物質であるオーキシンの発現を誘導しているとの報告³⁴⁾があるが、我々に今回の栽培試験におけるイチゴ果実収量から、暗期照射の赤色光がオーキシンの発現を誘導している可能性が推測できる。

緑色光照射で誘導されているジャスモン酸の生合成経路を Fig.5.9 に示す。この図は Aurélie Gfeller, et.al., (2010)³⁸⁾を基に著者が作成した。ジャスモン酸は葉緑体などのプラスチドの膜脂質を構成するリノレイン酸から合成されている。植物の成長の源泉となる葉緑体の素材を原材料として、病虫害耐性向上や成長抑制シグナルのジャスモン酸を生成していることになる。成長にはマイナス面が多いと想定される暗期照射の緑色光により植物で発生する現象のメカニズムの解明は重要な課題となる。各種変異体が入手可及なモデル植物であるシロイヌナズナを使い、この解明に取り組む。

5. 5 摘要

暗期照射の緑色光によるイチゴの花成促進および果実収量は統計検定結果での有意性は検出できなかった。しかしながら Table.5.8 に示すように 3 年連続で収量増加の傾向を示した。成長抑制型のジャスモン酸を誘導しつつ、成長促進型のオーキシンの誘導が不可欠なイチゴ果実肥大の傾向を示す興

味深い現象が発生している。この結果はジャスモン酸による成長抑制と³⁹⁾、オーキシンによる成長促進の間の恒常性維持機能^{32,33)}が作用している可能性を示唆している。

また一方先行するトマト苗での研究報告³⁴⁾と、今回のイチゴ収量確認結果から暗期照射の赤色光が植物の成長やイチゴ果実肥大に欠かせないオーキシンを誘導している可能性を想定できる。

暗期照射の緑色光によるジャスモン酸発現やハダニ耐性向上、および暗期照射の青色光によるサリチル酸発現は「病虫害の光防除技術」として活用可能である。

これらの現象は、暗期の有色光照射が、光の波長に特有の植物ホルモンを誘導し、植物の成長や防御を制御できる可能性を示唆している。

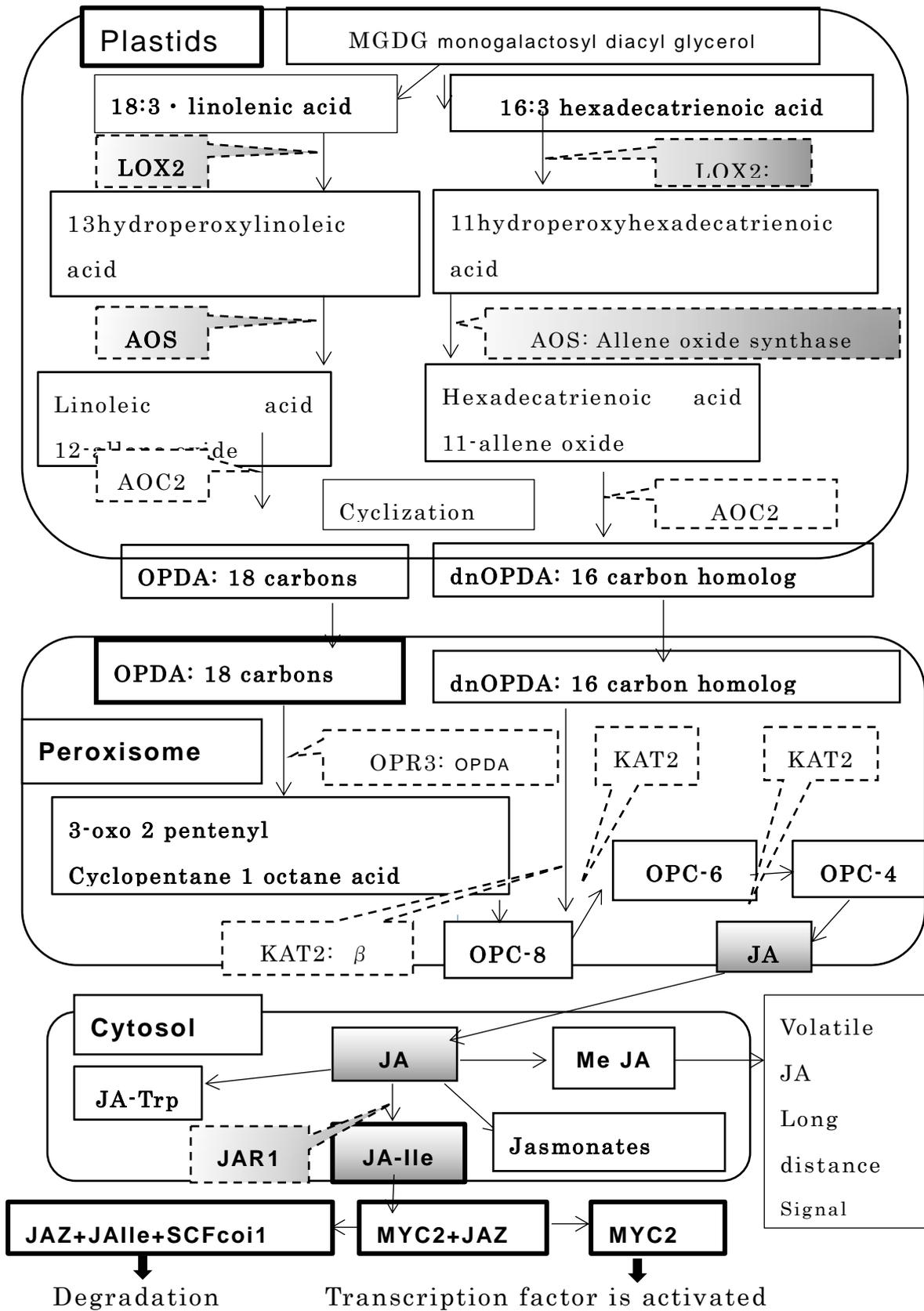


Fig.5.9 ジャスモン酸生合成経路³⁸⁾

第6章 シロイヌナズナ変異体を使った暗期の 緑色光照射効果のメカニズム解明²⁵⁾

6.1 緒言

暗期照射の緑色光の受容体究明が第一の課題である。究明のための実験開始前に先行する研究報告から候補を絞り込むための検討を開始した。最初にこの事象が「栄養成長に直接関与する光合成に関連するもの」か、または「光合成で作られた資源を環境に応じた配分を制御する光形態形成系に関するもの」かの層別から検討を始めた。

イチゴ栽培試験における緑色光は PPF レベルが低く光合成と呼吸が拮抗する光補償点程度の光強度であること、また照射時間も短時間であり昼間に照射した補光と散乱光の合計 PPF と1週間の累計値で比較すると最大でも3%未満であること、更に緑色光がクロロフィルやカルテノイドの吸収効率が低いことなどを考慮した結果、光合成の光受容体であるクロロフィルやカルテノイドは関係していないと判断した。

またジャスモン酸誘導など遺伝子に関与した反応であることから、青色光受容体のうち光に反応して初期段階で作動する役割のフォトトロピンは関与していないと想定できる。

現状で判明している光受容体のうち、残るのは赤色光受容体のフィトクロムか青色光の受容体であるクリプトクロムとなる。光受容体とジャスモン酸の関連を報告した研究報告にフィトクロム A が光刺激を受けるとジャスモン酸を誘導しているとの報告⁴⁰⁾がある。またシロイヌナズナの根の伸長においてクリプトクロム1とクリプトクロム2が拮抗作用をしているとの報告がある⁴¹⁾。クリプトクロム1が光刺激を受けると葉においてオーキシンを発現して根に輸送し根の伸長を促進するが、クリプトクロム2が光刺激を受けると根の伸長を抑制するとの報告である。根の伸長抑制の信号伝達物質の記

載はなかったがジャスモン酸合成酵素の欠損変異体の選抜に根の伸長抑制の発現⁴²⁾が使われていることからクリプトクロム2が光刺激を受けてジャスモン酸が発現している可能性が高い。ジャスモン酸誘導能力の点ではクリプトクロム2とフィトクロムAが候補となる。

このジャスモン酸発現を誘導するとの報告があるフィトクロムAとクリプトクロム2には共通点があり、フィトクロムAは赤色光の連続照射を受けると消去される⁴³⁾、またクリプトクロム2は青色光のような陽性の光質の連続照射を受けると消去される⁴⁴⁾。

次に緑色光の吸収能力に関してみると、フィトクロムAは赤、遠赤光だけではなく400nm前後の青色光をも吸収する能力をもつが500~570nm波長域の緑色光を吸収する能力は低い⁴³⁾。一方クリプトクロムを構成する分子の一部であるFAD (flavin adenine dinucleotide) は暗期には酸化状態であるが、光刺激により半還元状態、さらに完全還元状態へと変化する⁴⁵⁾。暗期にはこの逆をたどり酸化状態に戻る。この半還元状態のFADを持つクリプトクロムは遺伝子発現に活性であると同時に緑色光を吸収する能力を有する⁴⁶⁾。これらから暗期照射の緑色光はクリプトクロムが受容体として関与している可能性が高い。緑色光吸収能力の点ではクリプトクロム1とクリプトクロム2が受容体の候補として残る。

更にシロイヌナズナの花成に関して調査すると、花成は主にバーナリゼーション、長日、ジベレリン、自律的要因が誘導要因となるが、このほかに温度、光質などの環境要因も影響する⁴⁷⁾。この中でフィトクロムAとクリプトクロム2が受容体となってCOからFTを誘導し花の形態形成にいたるのが主要な経路との報告がある。ここでも花成に影響するのは赤色光や青色光の連続照射で消去される不安定なフィトクロムAとクリプトクロム2が受容体との報告である。

更にシロイヌナズナにおいてはクリプトクロム2が全て花成に影響するのではなく、師管伴細胞のクリプトクロム2が光刺激を受けるとCO蓄積からFT発現を誘導し花形態形成が起きるとの報告²⁷⁾がある。これらの報告はクリプトクロム2が暗期照射の緑色光の受容体となり、光刺激を受けたクリプトクロム2がジャスモン酸を誘導し、かつ花成を促進していることを示唆している。またクリプトクロム2が緑色光を受容してジャスモン酸を発現させると、日陰回避応答の一環である根長抑制が発生すると想定される。

これらの形態形成、花成誘導、およびジャスモン酸生成を確認することで緑色光の受容体特定と、ジャスモン酸の関与を確認する実験計画を策定、実行することにした。

準備したのはシロイヌナズナのクリプトクロム1の欠損変異体 *cry1* とクリプトクロム2の欠損変異体 *cry2* と野生株の Col-0 を暗期緑色光照射区、暗期青色光照射区および非照射の対照区で同時に育成して形態比較すること、およびジャスモン酸とサリチル酸の発現状況を確認することで緑色光の受容体がクリプトクロムのうちクリプトクロム1なのかクリプトクロム2なのかを確認できると考えた。

またジャスモン酸生合成経路³⁸⁾の酵素欠損変異体である *jar1* を比較栽培に追加することでジャスモン酸の花成や成長に対する作用を確認できると考えた。

本章では上記の事前検討に基づき、シロイヌナズナ変異体を使い暗期照射の緑色光の受容体の確認とその結果発生する形態形成、及び植物ホルモンの発現の確認試験を実施したのでその状況について報告する。

6. 2 材料と方法

(1) 栽培用施設

シロイヌナズナの栽培は人工気象器（コイトロン・

KG-50HLA) 内で 18 時間明期 (5:00am~9:00pm)、6 時間暗期(9:00pm~5:00am)で栽培した。光源は白色蛍光灯で光強度は $60\sim 85 \mu \text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ であった。明期の気温 23°C 、暗期の気温 17°C 、相対湿度 77% に設定した。

(2) 緑色光と青色光の制御

人工気象器内に緑色光と青色光の 20W 蛍光灯を使った緑色光区と青色光区を左右に設置し、中央に非照射の対照区を設置して合わせて 3 区の栽培区を設定した。青および緑色光の照射は週 3 回 (火、木、日) の 1:00am~3:00am で設定した。緑色光は培地上面で $29 \mu \text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、青色光は同じく $26 \mu \text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ であった。光源に使用した蛍光管は緑色蛍光灯 (東芝 FL20SG) と青色蛍光灯 (東芝 FL20SB) である。光源の分光分析結果は Fig.5.1.A に緑色光、Fig.5.1.B に青色光の分光分析結果を示してあるが、第 5 章で報告したイチゴ栽培で使用したのと同じの蛍光管を使用した。

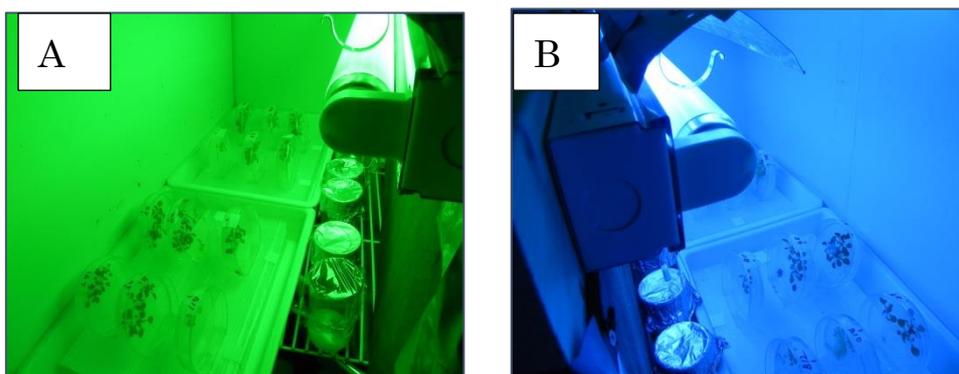


Fig.6.1 人工気象器内の緑色光照射と青色光照射状況

A:緑色光照射区、B:青色光照射区

(3) シロイヌナズナ種子の準備

シロイヌナズナ野生株の Co1-0、青色光の受容体クリプトクロム 1 とクリプトクロム 2 の欠損変異体 *cry1*, *cry2* およびジャスモン酸から転写活性型のジャスモン酸イソロイシ

ン (JA-Ile) への生合成経路の酵素の欠損変異体 *jar1* を準備した。*jar1* の種子は金沢大学遺伝子研究施設西内巧准教授から提供を受けた。また *cry1, cry2* の種子は ABRC (Arabidopsis Biological Resource Center) から入手した。

(4) シロイヌナズナの栽培

種子は 48 時間の 4°C の冷蔵庫内で春化处理をしたのち 150ml のガラス瓶内の 50ml 分量の MS 培地に播種した。発芽 2 週間後に、栽培区ごとに区分してガラス瓶培地から採取して (5) に示す方法で葉数、胚軸長、根長を測定した。その苗を計測後 100ml の黒色プラスチックポット内の土壌培地 (バーミキュライト : ピートモス : パーライト = 1 : 1 : 1) に移植し人工気象器内の同じ光処理区に戻した。この後開花まで栽培を継続した。

(5) シロイヌナズナの根長と胚軸長の計測

人工気象器内の MS 培地で発芽後 2 週間育成した苗を培地から抜き、黒色酸化被膜処理した平坦な鉄板上に水滴で濡らしたところに苗の根を真直に伸展させながら設置して定規と同時に写真撮影した。また葉数を数えると同時にノギスで胚軸長と根長を計測した。計測精度は ±0.2mm である。Fig. 6.2 に計測中の事例を示す。A が対照区の形態、B が緑色光照射区の形態を示す。N 区に比較して G 区根長は抑制されている。



Fig.6.2 野生株 *Col-0* の形態測定

A:対照区 (N) の苗の形態

B:緑色光照射区 (G) の苗の形態

(6) ジャスモン酸とサリチル酸の同時分析手法

試料は、採取後直ちに -30°C で凍結保存した後、株式会社ハウス食品分析テクノサービス（千葉県四街道市）に送付し、ジャスモン酸量とサリチル酸量を同時分析した。Segarra ら²⁴⁾が報告した手法に従い LC-MS/MS (LC: Waters 2695alliance, MS: Waters Quattro Premier)を使用して定量した。

(7) 統計検定およびグラフ作成の手法

統計的な有意差検定は株式会社エスミ製 Excel 統計 Ver.6.0 搭載のチューキー全群比較を使用し、グラフは平均値と標準誤差を表す誤差グラフを使用した。

6. 3 結果

(1) 暗期単色光照射による根長、胚軸長伸展の差異

Col-0 野生株と *cry1*, *cry2*, *jar1* 変異体を MS 培地で発芽から2週間、緑色光照射区、青色光照射区、対照区の3区で育成した後、根長、胚軸長、葉数を計測した結果を Table 6.1 に

示す。

Table 6.1.暗期に緑色光または青色光の短時間照射がシロイヌナズナの野生種と変異体の根長、胚軸長に及ぼす影響

項目	栽培種	名称	対照区 ^a	緑色光区 ^b	青色光区 ^c
根長 (mm)	野生種	Col-0	31.5 ± 1.2 (N=8)	25.3 ± 1.5* (N=7)	31.9 ± 1.7 (N=6)
		<i>cry1</i>	22.9 ± 1.4 (N=5)	14.9 ± 1.5* (N=4)	24.4 ± 2.4 (N=6)
	変異体	<i>cry2</i>	42.8 ± 5.4 (N=6)	41.2 ± 41.2 (N=6)	48.9 ± 3.4 (N=6)
		<i>jar1</i>	30.2 ± 4.1 (N=5)	50.0 ± 2.7* (N=6)	ND
胚軸長 (mm)	野生種	Col-0	4.6 ± 0.35	2.3 ± 0.3**	2.9 ± 0.2**
		<i>cry1</i>	8.5 ± 0.9	4.0 ± 0.6**	5.1 ± 0.5**
	変異体	<i>cry2</i>	3.3 ± 0.3	2.7 ± 0.1	4.8 ± 0.1**
		<i>jar1</i>	3.9 ± 0.3	3.7 ± 0.2	ND
葉数 (枚)	野生種	Col-0	8.0 ± 0.2	7.7 ± 0.5	7.0 ± 0.4
		<i>cry1</i>	7.4 ± 0.3	6.8 ± 0.9	6.2 ± 0.3
	変異体	<i>cry2</i>	7.5 ± 0.3	7.7 ± 0.2	7.8 ± 0.3
		<i>jar1</i>	8.4 ± 0.3	8.0 ± 0.3	ND

数値は平均値 ± 標準誤差。

Turkey 法により対照区との有意差を*(P<0.05), ** (P<0.01) で示す
 苗は 18h 明期、明期 23℃ 暗期 17℃ 湿度 70% にて発芽後 2 週間育成。

明期は白色蛍光灯で照射し PPF は 60~85 $\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 。

野生種のデータは 4 回の同一条件の栽培で同様な結果を示した。

変異体のデータは 2 回の同一条件の栽培で同様な結果を示した。

胚軸長と葉数の測定数は根長の測定数と同一である

^a 対照区は夜間の光照射なし

^b 緑色光区は PPF29 $\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ にて火, 木, 日曜日の夜間 2h 照射。

^c 青色光区は PPF26 $\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ にて火, 木, 日曜日の夜間 2h 照射。

a) 根長の伸長抑制

Fig. 6.3.A に示すように、野生種 Col-0 は対照区との比較で暗期緑色光照射により根長の伸長抑制が発生し、誤差水準 5% で有意差があったが、青色光照射では対照区と同等であり根長抑制は起きなかった。Fig. 6.3.B の *cry1* 変異体においても緑色光照射による根長の伸長抑制が発生し、誤差水準 5% で有意差があったが、青色光照射では対照区と同等であり根長抑制は起きなかった。*cry1* 変異体は野生種 Col-0 と同等の応答を示した。一方 Fig. 6.3.C に示すように *cry2* 変異体では緑色光照射による根長抑制は発生せず、対照区、青色光区との間で有意差は認められなかった。ジャスモン酸生合成酵素が欠損している *jar1* は緑色光照射によって対照区との比較で根長が逆に伸展していた。

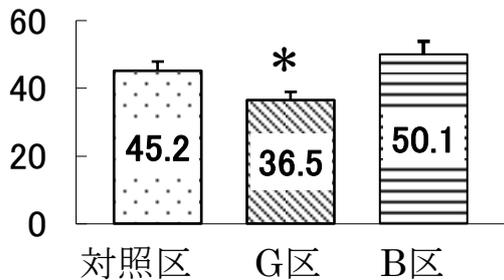


Fig. 6.3.A Col-0根長(mm)

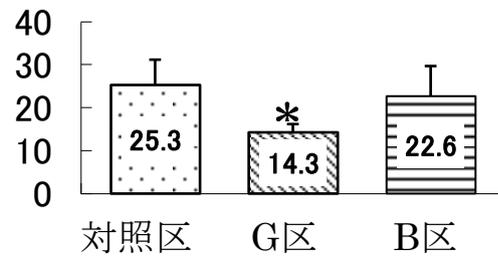


Fig. 6.3.B *cry1*根長(mm)

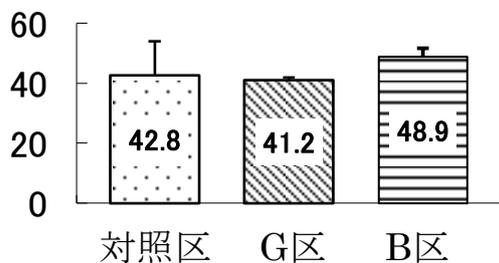


Fig. 6.3.C *cry2* 根長(mm)

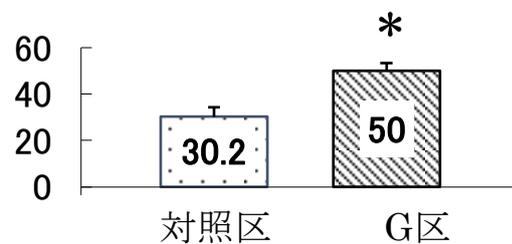


Fig. 6.3.D *jar1* 根長(mm)

Fig. 6.3.A, B, C, D : 根長比較

数値は平均値、エラーバーは標準誤差を示す。

*:5%誤差水準での有意差を示す

これらの結果から緑色光照射により起きる根長抑制はクリプトクロム2が受容体であり、ジャスモン酸が信号伝達物質となって根長抑制していることを示唆している。

b) 葉数の差異

葉数に関しては3区間での有意差はなかった。

c) 胚軸長の伸長抑制

野生種 Col-0 では緑色光区、青色光区でともに胚軸長の伸長の抑制が発生し1%誤差水準で有意差があった。*cry1* 変異体では野生種と同様に緑色光区、青色光区でともに胚軸長の伸長の抑制が1%誤差水準で有意差があった。

一方 *cry2* 変異体では青色光区で胚軸長が逆に伸長し1%誤差水準で有意差があったが、緑色光区では対照区と比較して有意差がなかった。*jar1* 変異体では緑色光区と対照区に有意差はなかった。

以上の結果は、シロイヌナズナの発芽2週間の苗の形態（根長と胚軸長）が暗期の緑色光照射をクリプトクロム2が受容体となりジャスモン酸を発生させて、*jar1* 変異体の形態変化がなかったことから、発生したジャスモン酸が信号伝達物質となって根長や胚軸長の形態を変化させていることを示唆している。一方葉数は光処理や今回準備した変異体により変化せず有意差はなかった。

(2) ジャスモン酸とサリチル酸の計測結果

Table 6.2 に Col-0 野生種と変異体 *cry2* のジャスモン酸、サリチル酸の含有量計測結果を示す。Table 6.1 で示した形態変化の結果から予測したように、野生種 Col-0 で暗期の緑色光照射によりジャスモン酸が有意に発現している。*cry2* 変異体でのジャスモン酸発現は緑色光区および対照区で有意差は

なかった。この結果はクリプトクロム2が緑色光を受容してジャスモン酸を発現させることを示している。

また野生種ではサリチル酸含有量が緑色光区で有意に発現していた。暗期緑色光照射がジャスモン酸とサリチル酸の両者の内在量を同時に上昇させる現象はイチゴ「宝交早生」の栽培試験においても Fig.5.3.B に示したように確認されていた。暗期緑色光照射が病虫害耐性を向上させる「光防除技術」として広く採用できる可能性を示唆している。

Table 6.2 暗期緑色光照射が野生種 Col-0 と変異体 *cry2* におけるジャスモン酸とサリチル酸の内在量に与える影響

	JA		SA	
	対照区 ^a	緑色光区 ^b	対照区 ^a	緑色光区 ^b
	ng g ⁻¹ FW		ng g ⁻¹ FW	
Col-0	16.5 ± 0.3	52.0 ± 4.7*	63.5 ± 1.6	95.6 ± 2.5**
<i>cry2</i>	38.9 ± 0.3	37.0 ± 0.5	105.3 ± 2.9	87.9 ± 2.5

数値は平均値 ± 標準誤差 (N =3).

対照区からの有意差は * (P<0.05), ** (P<0.01) で示す

苗は 18h 日長の条件にて 2 週間人工気象器内で育成した。

^a 対照区は暗期の照射なし

^b 緑色光区は発芽後 2,4,7,9 日目に夜間 2 時間照射した

(3) シロイヌナズナの開花

野生種 Col-0, クリプトクロム欠損変異体 *cry1, cry2* およびジャスモン酸生合成酵素欠損変異体 *jar1* の苗を人工気象器内で 16h 日長条件にて対照区、緑色光区、青色光区の 3 区において 2 週間 MS 培地を使い育成し形態を計測した。その後 100mL プラスチックポット内の土壌培地に移植し、各苗毎に同一の光照射条件区に戻し開花まで育成した。

ジャスモン酸生合成酵素欠損変異体 *jar1* は他のゲノタイプより開花が早く、*cry1* 変異体と野生株 Col-0 は同程度の開花の進行を示した。一方 *cry2* 変異体は極端に開花が遅れていた。Fig. 6.3.A に播種後 38 日目の *cry1* と *cry2* 苗の形態を示す写真を示す。*cry2* 変異体は葉が健やかに 12 枚まで展開しているが開花していない、一方 *cry1* 変異体ではロゼット葉 7 枚で開花している。Fig. 6.3.B は *jar1* 変異体がロゼット葉 5 枚で開花している事例を示す。

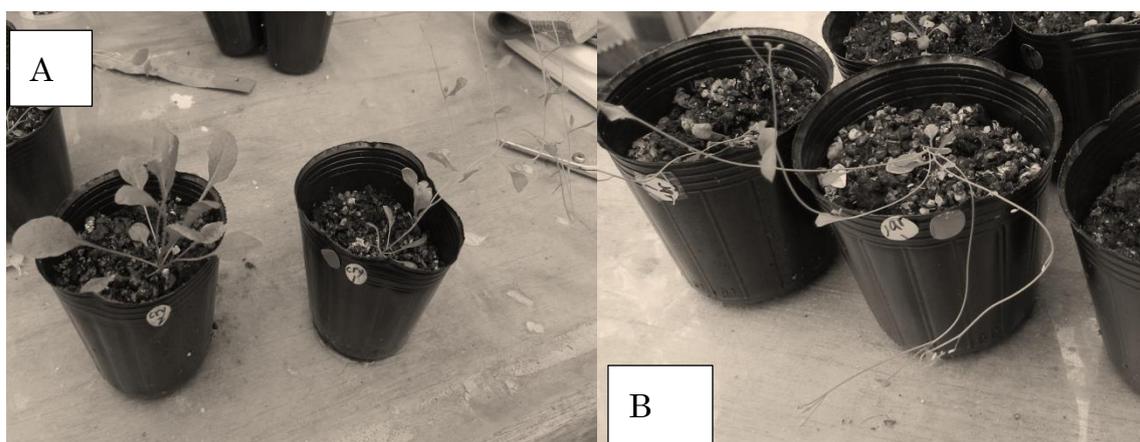


Fig.6.3 シロイヌナズナの開花状況（播種後 38 日目）

A: *cry2* 変異体と *cry1* 変異体の開花状況比較

cry2 はロゼット葉 12 枚でも開花せず、*cry1* は 7 枚で開花

B: *jar1* 変異体の開花状況、ロゼット葉 5 枚で開花開始

以上 4 種のゲノムごとの開花推進状況を Table 6.3 に示す。シロイヌナズナの開花進捗状況をロゼット葉数との対比で表現する論文が多いが、*cry2* 変異体の開花が極端に遅いこと、イチゴでは定植後の日数で開花状況を表していることから本章では播種後の日数でシロイヌナズナの開花進捗を示した。

どの光処理区においても *jar1* の開花が早く、*cry2* は DAP38 日ではまだ開花していない。野生種 Col-0 と *cry1* は同程度の開花率を示した。

Table 6.3 シロイヌナズナ光処理とゲノタイプ別の開花率

光処理	遺伝子型	N数	播種後の日数による開花率			
			DAP28	DAP30	DAP35	DAP38
^a 対照区	Col-0	20	0.00	0.05	0.15	0.30
	<i>cry1</i>	3	0.00	0.00	0.33	0.33
	<i>cry2</i>	7	0.00	0.00	0.00	0.00
	<i>jar1</i>	5	0.20	0.40	0.40	0.80
^b 緑色光区	Col-0	19	0.00	0.05	0.16	0.32
	<i>cry1</i>	5	0.00	0.00	0.20	0.40
	<i>cry2</i>	9	0.00	0.00	0.00	0.00
	<i>jar1</i>	5	0.00	0.00	0.60	0.80
^c 青色光区	Col-0	14	0.00	0.07	0.21	0.36
	<i>cry1</i>	4	0.00	0.00	0.00	0.25
	<i>cry2</i>	5	0.00	0.00	0.00	0.00
	<i>jar1</i>	11	0.18	0.18	0.36	0.55

苗は人工気象器内で 18h 日長、明時 23℃ 暗時 17℃、相対湿度 70% で播種後 2 週間 MS 培地で育成し、その後 100ml の黒色プラスチックポット内の土壌培地（バーミキュライト：ピートモス：パーライト＝1:1:1）に移植し人工気象器内の同じ光処理区に戻した。この後開花するまで栽培を継続した。人工気象器内は白色蛍光灯により照射し、明期で PPF60~85 $\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ と設定した。

^a 対照区は暗期の有色蛍光灯照射はない

^b 緑色光区は火、木、日曜日に暗期に 2 時間緑色光を照射した。

^c 青色光区は火、木、日曜日に暗期に 2 時間青色光を照射した。

6. 4 考察

(1) シロイヌナズナの栽培試験で明らかになったこと

先行研究の文献を調べていく過程で、この暗期緑色光照射

が植物にとって競合植物の日陰を判定するシグナルである可能性が強いと考えた (19,48,49,50,51,52,53)。

緑色光の受容体の特定、緑色光照射による形態形成の変化や開花への影響、またこれらに対するジャスモン酸の役割の解明などを目指した栽培試験から下記が明らかになった。

(A) 暗期照射の緑色光の受容体はクリプトクロム2である。

野生株 Col-0 では緑色光照射によりジャスモン酸が発現し、かつ根の伸長抑制が発生しているが、クリプトクロム2の欠損変異体 *cry2* では緑色光照射によるジャスモン酸発現は起きず、根の伸長抑制も発生しない。また開花も遅れる。

(B) クリプトクロム2が光刺激を受け根の成長を抑制している。ジャスモン酸合成酵素欠損変異体 *jar1* では根の伸長抑制が発生しないことから、ジャスモン酸が根長抑制の信号伝達物質となっていることを示唆している。一方クリプトクロム1が青色光の刺激を受けると根長を伸展する。この時の信号伝達物質は先行する研究報告⁴¹⁾からオーキシンであることが確認されている。

(C) クリプトクロム2への刺激が開花促進のシグナルとなることが報告^{27,47,54)}されている。これからクリプトクロム2の欠損変異体 *cry2* では緑色光刺激を受けても開花が遅れた実験結果は先行する研究報告と一致しており、開花にはクリプトクロム2への光刺激が重要である。

(D) ジャスモン酸合成酵素が欠損している *jar1* の開花が有意に早いことは、緑色光刺激により発生しているジャスモン酸が開花に対しては抑制的に作用していることを示唆している。しかしジャスモン酸が開花を遅らせるとの先行する研究報告は見出だせなかった。

ジャスモン酸と開花の関係では、唯一ジャスモン酸と拮抗作用をもつサリチル酸がアサガオのストレス状態で育成した

時に花成を促進しているとの報告⁵⁾は同じ現象を、サリチル酸に注目した別の角度で見ている可能性は考えられる。

またイチゴに対する緑色光照射により当初は開花が遅れるが、途中から急速に開花が進む現象がみられた。師管伴細胞のクリプトクロム2が緑色光を受けて開花促進タンパク質のCO,FTの生成を促進する一方で、ジャスモン酸が開花までの工程のどこかでブレーキをかけている、その抑制状態を上回るCO,FTが発現すると一気に開花が促進する。変異体 *jar1* においては、このジャスモン酸のブレーキが効いていないので開花が早いと想定すると、緑色光下での開花の進展状況を説明可能となる。

この想定が正しければイチゴにおいて緑色光照射でクリプトクロム2に刺激を与え、その後青色光照射でサリチル酸を発現させてジャスモン酸の作用を拮抗作用で抑制すると開花が早まると予想される。次期のイチゴ栽培で組合せ照射試験を実施して確認する。

花卉類の栽培においては、このメカニズムを究明すると開花時期を希望に近い形で制御する手法となる可能性が考えられるので、今後解明すべき課題である。

(2) イチゴ栽培結果に対しての未解明な事項

暗期緑色光照射によるイチゴ果実収量増加傾向となったメカニズムは依然未知のままである。最大の課題は成長抑制型のジャスモン酸が発現しながら、成長促進型のオーキシンの供給が欠かせないイチゴ果実の収量を増加させるメカニズムが不明のままである。

ジャスモン酸とオーキシンの相互作用に関して、近年の植物ホルモン同志のクロストークに関する研究報告がなされている中で、ジャスモン酸とサリチル酸の拮抗作用¹²⁾とは異なりオーキシンとジャスモン酸は機能としては真逆にも拘らず、

互いの生合成系を刺激しているとの研究報告がある。

ジャスモン酸が発現するとオーキシン生合成経路の酵素である YUCCA の発現を強化している³²⁾。また反対にオーキシンが発現するとジャスモン酸信号伝達経路の JAZ1 リプレッサーの発現を強化している³¹⁾。あたかも成長抑制のジャスモン酸がオーキシンの発現の準備をして反転する体制を整えているかのようである。

ジャスモン酸は本研究および先行する研究報告でも明らかになったが日陰シグナルを示す光質である緑色光および遠赤光の受容で発現する^{19,48,49,50,51, 52,53)}。一方オーキシンは赤色光³⁴⁾または青色光³⁵⁾の陽性の光質で発現しているとの報告である。これらの報告はジャスモン酸が日陰シグナルの信号伝達物質であり、陽性の光質への環境変化があると、即時オーキシンを発現させて形態を転換させるメカニズムを植物は保有している。逆に陽性光質から日陰性光質への環境変化においてもオーキシンとジャスモン酸の連携が作用して形態を転換させるメカニズムも植物は保有していると想定可能であろう。

我々の実験結果と、上記の植物ホルモンのクロストークの報告を合わせて考えると『暗期の緑色光照射によりイチゴの収量が増加となったのは開花促進されたこと、および同時に発現したジャスモン酸がオーキシン誘導の体制を準備^{31, 32, 33)}し、翌日以降の太陽光照射^{34, 35)}によりオーキシン誘導が促進された結果である』とのホメオスタシス効果仮説が設定できる。

この仮説が正しければ、暗期緑色光照射の後に、緑色光や遠赤光をも含む太陽光でオーキシンを誘導するより、暗期に赤色光または、青色光を照射することで、より積極的にオーキシンを誘導して成長を促進することができるのではないだろうかと考え得る。

この考察に基づきイチゴ（宝交早生）苗を使って暗期緑色光照射と暗期赤色光照射の組合せ交互照射による栽培（G-R法）と、暗期緑色光照射と暗期青色光照射の組合せ交互照射による栽培（G-B法）の効果を確認する試験を企画した。その内容を第7章で報告する。

6. 5 摘要

シロイヌナズナの野生種 Col-0 と変異体 *cry1, cry2, jar1* を人工気象器内に設定した緑色光区、青色光区、対照区の3区で栽培した結果、クリプトクロム2が緑色光の受容体となり、信号伝達物質としてジャスモン酸を発現させて、根長抑制などの形態形成を発生させている。クリプトクロム2が光刺激を受けると開花が促進させるが、ジャスモン酸生合成酵素欠損の変異体 *jar1* では開花が有意差をもって早くなっていることから、緑色光照射で同時に発生しているジャスモン酸は開花を抑制していると想定される。

緑色光の後に、サリチル酸を発現させてジャスモン酸の機能を押さえると開花の早まる可能性が考えられる。また緑色光の後にオーキシンを発現させることで植物の成長抑制を解除し成長を促進できる可能性がある。緑色光と赤色光また青色光の組合せ照射により植物の成長を制御できる可能性があり、イチゴで確認試験を計画する。

第7章 イチゴの有色蛍光灯の組合せ照射の効果⁶⁰⁾

7.1 緒言

『暗期の緑色光照射によりイチゴの収量が増加傾向となったのは、クリプトクロム2の刺激による開花促進だけでなく、同時に発現したジャスモン酸がオーキシン誘導の体制を準備し翌日以降の太陽光照射によりオーキシン誘導が促進された結果である』とのホメオスタシス効果仮説をたてた。

この仮説検証のため、またより効率の良い栽培方式の確立を目指してイチゴ（宝交早生）苗を使い、暗期緑色光と暗期赤色光の組合せ交互照射による栽培（G-R法）と、暗期緑色光と暗期青色光の組合せ交互照射による栽培（G-B法）の効果を確かめる試験を実施した。

特に暗期赤色光照射は先行した試験結果(Fig.5.2.B,C)と先行する報告³⁴⁾からオーキシン誘導が期待できるため、G-R法では暗期の緑色光照射により成長抑制型植物ホルモンのジャスモン酸を発現させて、反転成長のためのオーキシン誘導の準備体制を整えたところに³²⁾、暗期赤色光を照射することでオーキシンを誘導し³⁴⁾成長をより加速し、結果としてイチゴ収量の拡大の可能性が考えられる。

G-B法では、Fig.5.3.Bの結果および先行する研究報告^{9,10)}から、暗期の青色光照射によりサリチル酸を誘導して、ジャスモン酸とサリチル酸の拮抗作用¹⁷⁾を利用してジャスモン酸を消去できる可能性がある。暗期緑色光照射で開花を促進しながら、一方でジャスモン酸により開花抑制しているのがシロイヌナズナの開花により確認できているが、サリチル酸によってジャスモン酸を消去できれば開花を更に促進できる。この結果として果実数を増加することで収量を増加させる可能性がある。

これらは暗期の緑色光、青色光、赤色光照射が、光質に特異的な個別の植物ホルモンを誘導する能力を有すること、および

誘導された植物ホルモン間の相互作用を利用することで成長を制御できる可能性を追求する、まさに学術的な知見を活用した栽培技術革新の可能性の追求が本章の目標となっている。

7. 2 材料と方法

(1) 栽培システム

第2章に記載のイチゴ栽培システムを使用した。単色光照射方法以外は第3章～第5章に記載したイチゴ栽培方法を踏襲している。

(2) 有色蛍光灯の組合せ照射方法

有色蛍光灯の PPF と照射スケジュールを Table. 7.1 に示す。

Table 7.1 有色蛍光灯の組合せ照射条件

光処理	有色蛍光灯の照射			補光照射	
	PPF ^f $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$	照射パターン	照射時間	PPF $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$	照射時間
対照区 ^a	No irradiation			85-121	曇天又は雨天日の
G区			1:00am		8:00am
緑色光 ^b	15-23	A	~ 3:00am		~ 17:00pm
G-R区					
緑色光 ^b	3-21	A			
赤色光 ^c	2-28	B			
G-B区					
緑色光 ^b	2-24	A			
青色光 ^d	1-26	B			

^a 暗期の有色蛍光灯照射なし

^b 緑色蛍光灯 (東芝 FL20SG)照射

^c 赤色蛍光灯 (Panasonic FL20SR)照射

^d 青色蛍光灯 (東芝 FL20SB)照射

^e 曇天,降雨日の補光と散乱光による全 PPFは $150\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$.に達する。

^f 有色蛍光灯の光強度はイチゴ定植の培地上面の水平位置で計測した。

照射パターン A は火、木、日曜日の午前 1 時～ 3 時に照射

照射パターン B は月、水、金曜日の午前 1 時～ 3 時に照射

(3) イチゴ品種と栽培経過

イチゴ品種は宝交早生を使った。苗は JA 金沢から購入し、2013 年 11 月 4 日に定植、補光および有色蛍光灯照射は 11 月 7 日に開始した。開花は 12 月 6 日に開始、果実収穫は 2014 年 5 月 19 日まで継続した。

(4) 植物ホルモンの分析

各栽培区のイチゴ苗から採取した葉茎と果実を個別に -30℃ で凍結保存したのち、新潟大学自然科学研究科にて先に発表した方法^{55,56)}によりオーキシシン (インドール酢酸 IAA)、ジャスモン酸 (JA)、メチル化ジャスモン酸 (MeJA)、サリチル酸 (SA)、アブシシン酸 (ABA) を同時分析した。定量分析は LC-MS を用いて行った。イオン化法は大気圧科学イオン化法 (APCI)、分析モードは選択イオンモニタリング (SIM) で行い、内生植物ホルモン濃度は内部標準法を用いて測定した。植物ホルモンの内部標準物質として安定同位体で標識した以下の試薬を使用した。¹³C₆-IAA, d₆-ABA, d₂-JA, d₂-MeJA, d₄-SA.

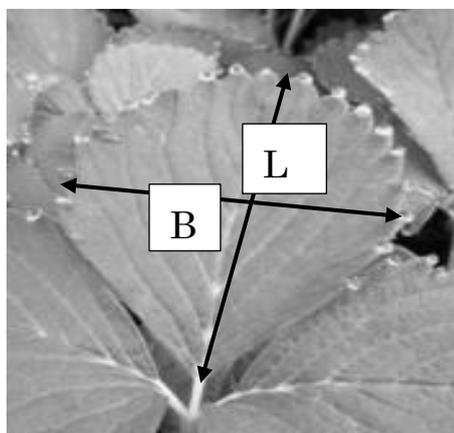
(5) 統計検定およびグラフ作成の手法

統計的な有意差検定は株式会社エスミ製 Excel 統計 Ver.6. 搭載のチューキー全群比較を使用し、グラフは平均値と標準誤差を表す誤差グラフを使用した。

(6) 葉面積と葉柄長の計測方法

Fig.7.1 に示すように、各光処理区から完全展開した若い葉を 20 枚抽出し、三つ葉の中央葉をノギスにて葉幅 W と葉長 L

を 0.1mm 単位で計測した。葉柄長は株の根元から三つ葉の分岐点までの長さをノギスにて 0.1mm 単位で計測した。葉面積は Hikida K. et, al 2013⁵⁷⁾が発表している近似式 ($A = (1.743 W \times L + 5.992) / 3$) を使って計算した。



葉幅 B と葉長 L をノギスで計測した。
葉面積 A は Hikida の式 $A = (1.743 \times W \times L + 5.992) / 3$ により、葉幅 B と葉長 L から計算で求めた。

Fig.7.1 葉面積の計測

7. 3 結果

(1) 草勢（葉面積、葉柄長）と開花数の比較

Table 7.2 に各光処理区の草勢、開花数比較を示す。G 区は対照区比で葉面積に増加傾向は見られたが有意差はなかった、また葉柄長は伸長し統計検定での有意差があった。G-R 区では葉面積が拡大、葉柄長が有意に伸長しており草勢が盛んとなっていた。一方で G-R 区と同一の有色蛍光灯の照射エネルギーを消費しながら 2 次照射の光質を青色光とした G-B 区では葉面積が縮小、葉柄長も短くなっており草勢が有意差をもって矮小化していた。Fig.7.2 に葉面積、Fig.7.3.A に葉柄比較写真、Fig.7.3.B に葉柄長比較グラフを示す。葉面積、葉柄長はイチゴ苗の栄養成長状態を示すので、光処理により栄養成長に大きな差異が発生したことになる。

Table 7.2 有色蛍光灯暗期組合せ照射の草勢と開花への影響

光処理	葉面積 cm ²	葉柄長 cm	開花数 数/株
対照区	24.1 ± 1.5 (N= 18)	15.2 ± 0.4 (N= 18)	6.8 ± 0.3 (N = 4)
G 区	27.9 ± 1.2 (N= 20)	18.3 ± 0.4** (N=18)	8.0 ± 0.9 (N = 9)
G-R 区	36.3 ± 1.9** (N= 20)	23.4 ± 0.6** (N=20)	8.5 ± 1.0 (N= 10)
G-B 区	14.4 ± 0.9** (N= 20)	13.4 ± 0.6 (N=20)	14.5 ± 2.0* (N= 10)

数値は平均 ± 標準誤差

対照区からの有意差は ** (P<0.01), * (P<0.05) で示す

有色蛍光灯の照射パターンは Table 7.1 参照

開花数のデータは定植 4 か月後での採取値

葉面積の計算は Hikida et al (2013)の報告に準拠した

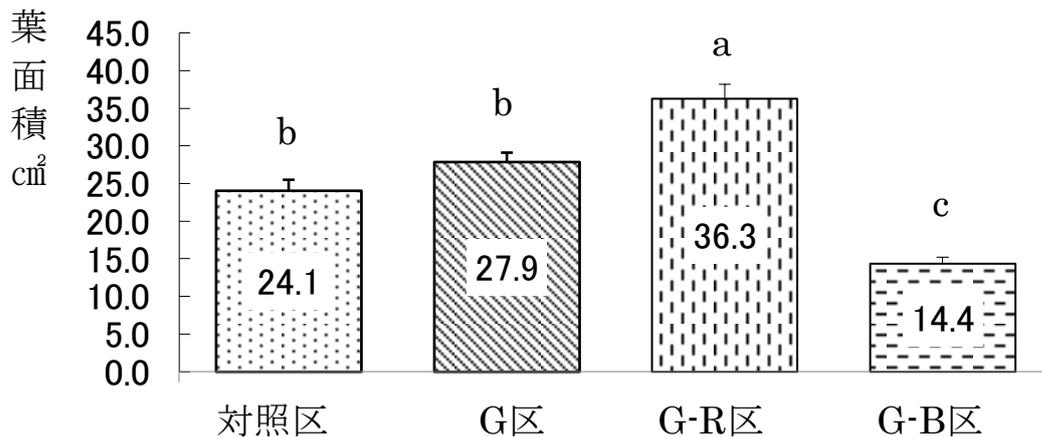


Fig.7.2 光処理による葉面積差異 (N=18~20)

数値は平均値、エラーバーは標準誤差を示す。

異なる英小文字は 1 % 誤差水準での有意差を示す。

Fig.7.3 A 葉柄長差異
 写真は下から G-R 区、G 区、G-B 区の葉柄示す

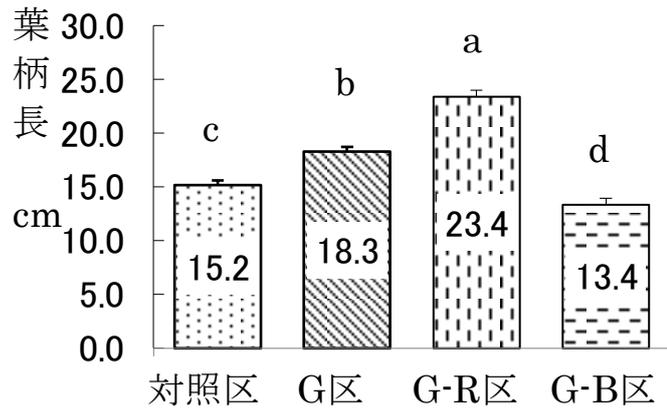


Fig.7.3B 光処理による葉柄長差異
 数値は平均値、エラーバーは標準誤差を示す。異なる英小文字は1%誤差水準での有意差を示す(N=18~20)

開花数は Fig.7.4 に示すように、対照区との比較で、特に G-B 区での開花数が有意に多くなっていた。Fig.5.1 に示した青色光単独照射区の開花数は対照区と同等であったことから、G-B 区で開花数が増加したのは、緑色光と青色光の組合せ照射が原因であることを示している。G 区、G-R 区では対照区より開花数の増加傾向があったが有意差はなかった。

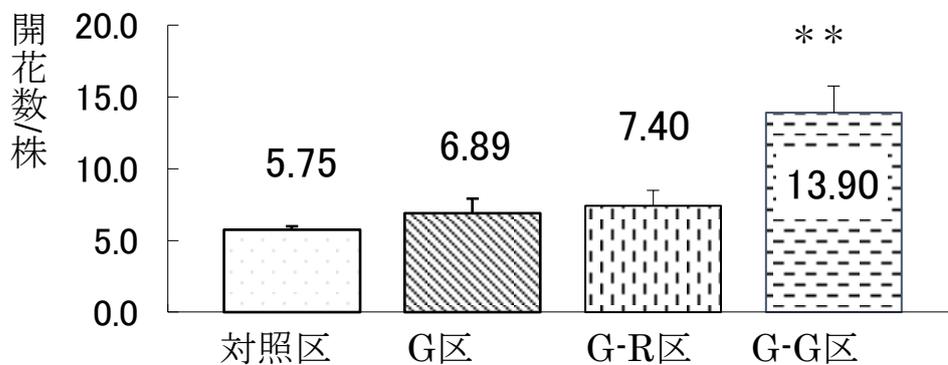


Fig.7.4 開花数比較 (定植4カ月後の3月3日の計測値)

数値は平均値エラーバーは標準誤差を示す
 **は対照区と1%誤差水準での有意差を示す

開花数は対照区との比較で、特に G-B 区での開花数が有意に

多くなっていた。Fig.5.1 の単独光処理では青色光単独照射区の開花数は対照区と同等であったことから、緑色光と青色光の組合せ照射により、開花数が有意に増加したことを示している。

G 区、G-R 区では対照区より開花数の増加傾向があったが有意差はなかった。

(2) 果実収量の比較

Table 7.3 有色蛍光灯暗期組合せ照射の果実収量への影響

光処理	果実数 数/株	果実単重 g/実	果実収量 g/株	収量比
対照区	9.0 ± 1.5 (N = 4)	9.7 ± 1.2 (N= 4)	82.4 ± 4.1 (N= 4)	100
G 区	11.2 ± 1.2 (N = 9)	8.3 ± 0.2 (N= 9)	91.9 ± 0.9 (N = 9)	112
G-R 区	17.0 ± 2.2* (N= 10)	9.3 ± 0.4 (N=10)	157.1 ± 19.8* (N=10)	191*
G-B 区	15.5 ± 1.5* (N= 10)	7.1 ± 0.3* (N=10)	108.7 ± 9.4 (N =10)	132

数値は平均 ± 標準誤差を示す。

対照区からの有意差は ** (P<0.01), * (P<0.05) で示す

有色蛍光灯の照射パターンは Table 7.1 参照

果実収量は定植 6 カ月後 (5 月 19 日) までの累積値を示す

^a 収量比 = 各処理区のイチゴ収量/対照区の収量 x 100%.

Table.7.3 および Fig.7.5 に果実収量の結果を示す。果実数が増加すると、果実の一個当たりの重さの平均単重が低下するのが通常である。対照区との比較で 140%増加と開花数が多かった G-B 区では、開花数差ほどの果実数の増加はなかったが、それでも対照区より有意に果実数は 72%増加した。しかし果実の肥大が進まなかったため平均単重が 7.1g と対照区の 9.7g に比較して 27%低下した。このため果実収量は 32%増加にとどまり、

収量の有意差はなかった。

一方 G-R 区では 3 月 3 日の開花数計測終了日以降も開花が継続し、これに伴い果実数は 88% 対照区より増加した。さらに果実数の増加にも関わらず果実単重が減少せず、結果として果実収量が 91% 増と大幅な収量増加となった。

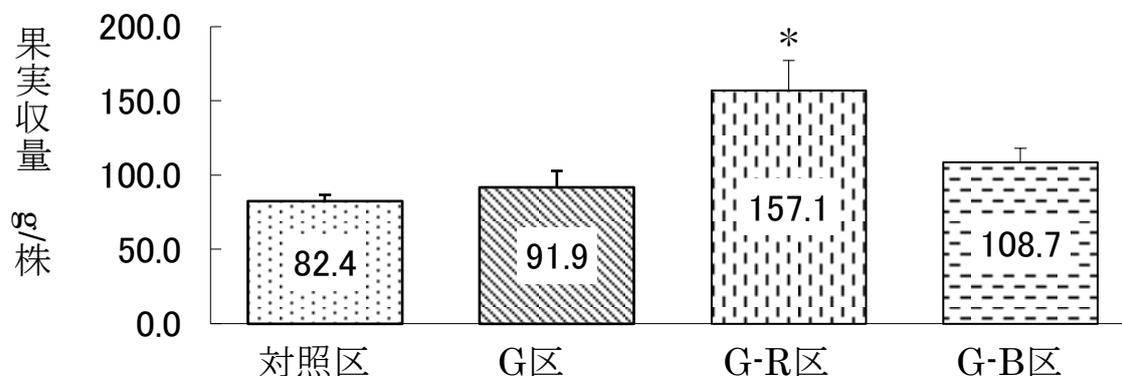


Fig. 7.5 果実収量比較 (定植 6 カ月の 5 月 19 日のデータ)

数値は平均値、エラーバーは標準誤差を示す

* : 5 % 誤差水準での有意差を示す

なお緑色光単独の暗期照射によるイチゴ収量増加は Fig.7.6 に示すように、4 年連続して対照区比で増加の傾向を示し 4 年平均で 15.3% 増加した。ただし統計検定で有意差が検出されたのは、電力制限下で栽培試験した 2012 年春の栽培の 1 回に留まった。

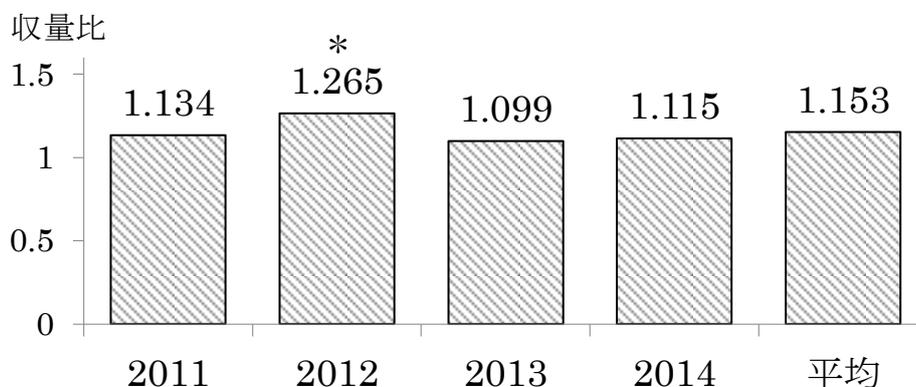


Fig.7.6 緑色光照射によるイチゴ収量増加傾向

非照射対照区との収量比率で示す。

* 印は 5 % 誤差水準の有意差を示す

2013年度と2014年度の各光照射区の収量を対照区の収量により平準化して Fig.7.7 に示す。G 区のデータは4年間の平均値を使用している。このデータも G-R の組合せ照射が優れた収量特性を示している。

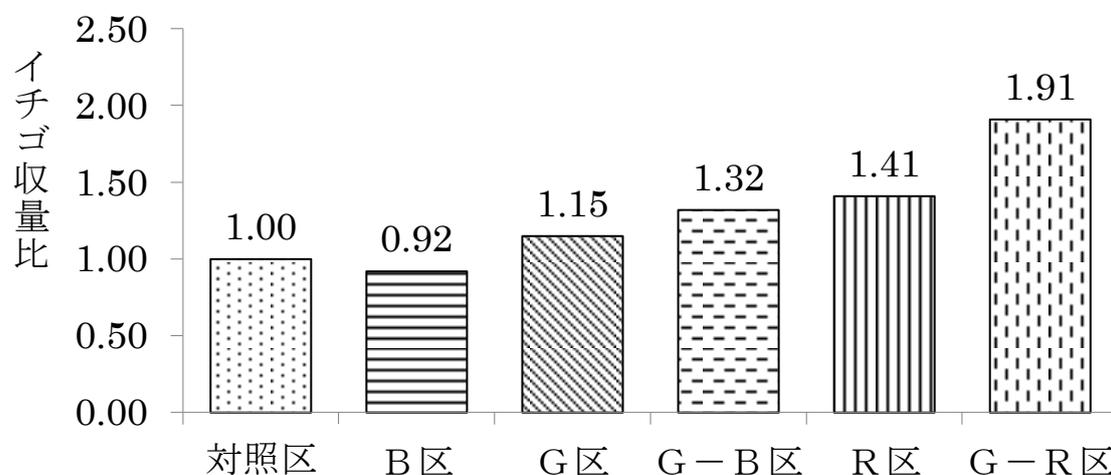


Fig.7.7 光処理によるイチゴ収量比較

2013年度の単色光照射試験と2014年度の組合せ照射試験によるイチゴ収量を、各年度で対照区の収量で平準化した収量比を示す。G照射区は4年間の平均値、B区、R区は2013年栽培結果、G-B,G-Rは2014年の栽培結果から収量比を算出した

(3) 植物ホルモンの分析結果

これらの単色光組合せ照射のうち対照区とG区およびG-R区における苗の植物ホルモンの変動を測定した。分析はシュート（葉茎）部位と果実に分けて行った。結果を Fig.7.8.A～Fig.7.8.D に示す。測定は新鮮重1g当たりの植物ホルモン内在量を pmol/FWg 単位で実施している。

Fig.7.8.A に示すように G-R 区では葉茎部位でオーキシン（IAA）量が大幅に増加している。果実ではオーキシン（IAA）内在量に差はなかったが G-R 区は果実数、果実収量も多いので1株単位での果実内のオーキシン IAA 総含有量は高い。

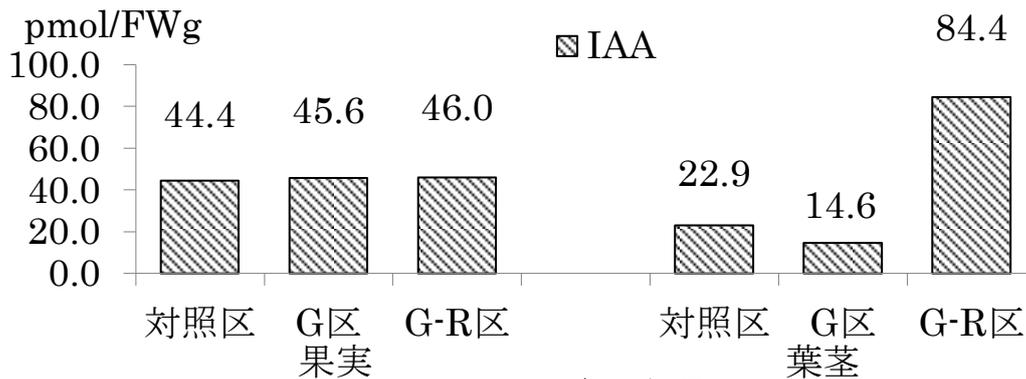


Fig.7.8.A オーキシン (IAA)内在量:
新鮮重1g当りのpmolで内在量を示す

Fig. 7.8. B に示すように G-R 区ではジャスモン酸 (JA) 量とメチル化ジャスモン酸 (MeJA) 量も上昇している。メチル化ジャスモン酸 (MeJA) はジャスモン酸が気化して近傍へストレス状態にあることを伝達する媒体⁵⁸⁾である。

また G 区の JA 量も増加しており、緑色光単独照射時にも JA 量増加となったが、今回も同様の結果である。

G-R 区の JA 内在量は G 区以上に大幅に増加している。

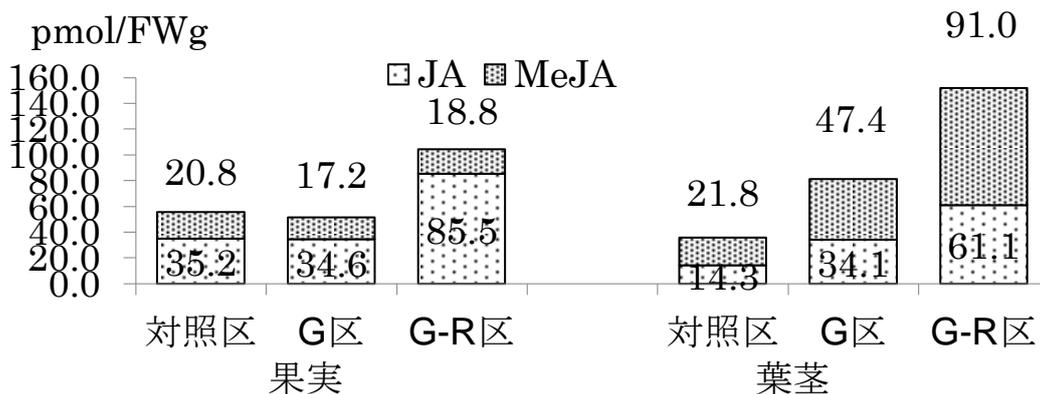


Fig.7.8.B ジャスモン酸 (JA)とメチル化ジャスモン酸 (MeJA) 内在量
新鮮重1g当りのpmolで内在量を示す

更に G-R 区ではアブシン酸 (ABA) 含有量も Fig. 7.8. C に示すように増加していた。サリチル酸内在量も G-R 区で増加した。アブシシン酸とサリチル酸に関しても拮抗作用に関する

報告がある⁵⁹⁾。またアブシシン酸が果実のシンク能力を増強する、および果実の糖度上昇に対して ABA が関与するとの報告もあり³⁰⁾、イチゴの果実収量増加に関与している可能性については今後の研究課題である。

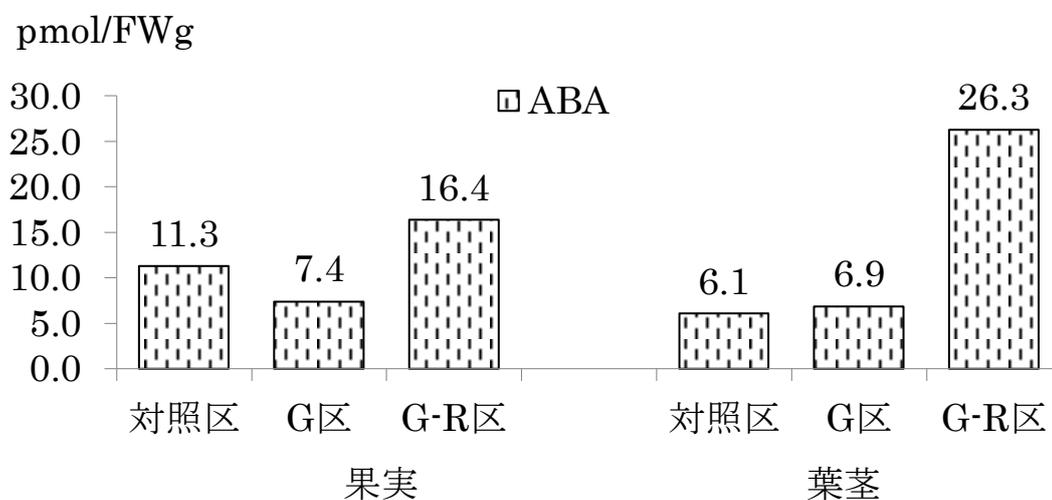


Fig.7.8.C アブシシン酸 (ABA)内在量
新鮮重 1 g 当たりのpmolで内在量を示す

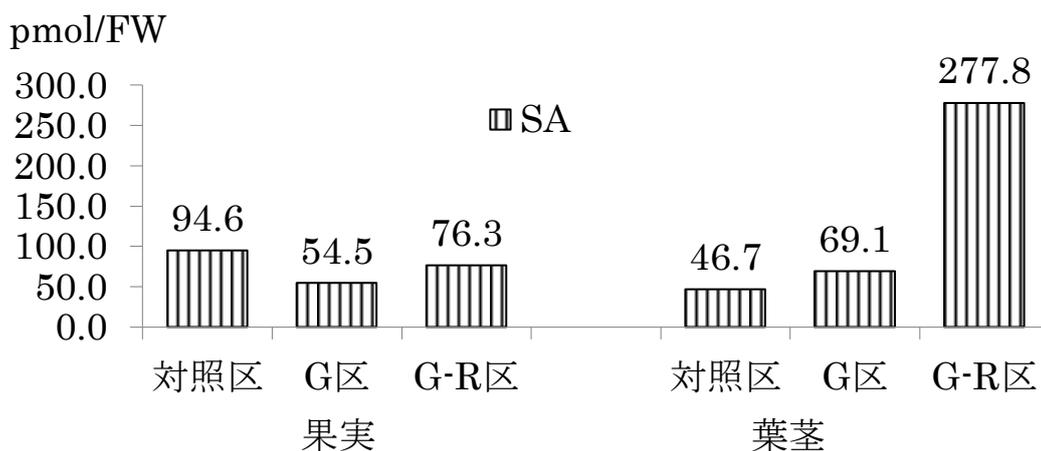


Fig.7.8.D サリチル酸内在量
新鮮重1g当たりのpmolで内在量を示す

7. 4 考察

(1) 暗期緑色光と赤色光の交互照射 (G-R 法) によるイチゴ収量増加について

G-R 法による栽培区 (G-R 区) でイチゴ果実収量が増加した要因としてオーキシシン (IAA) 内在量の増加が寄与していると考えられる。G-R 区では栄養成長も盛んであり、葉面積が対照区の 1.5 倍に拡大している。G-R 区の葉茎部内の IAA 内在量 (単位 FW 当りの IAA 含有量) が対照区の 3.7 倍高いことを加味すると G-R 区のシュート 1 株当たりの IAA 量は対照区の 5.5 倍に達する。ソースとなる葉面積が大きく、かつ IAA 内在量も高いことが、シンクとなるイチゴ果実を肥大させて、結果として収量の増加に寄与したものと想定する。

(2) 暗期の有色蛍光灯照射にイチゴ苗が反応した理由

暗期照射の単色光は自然界には存在しないのにもかかわらず、植物が何故反応したのかを考察する。

植物は昼間のように背景光がある中では、緑色光と青色光の比率や、赤色光と遠赤光の比率によって競合植物の日陰にあるか否かを判別している。しかし背景光がない暗期には、ごく弱い緑色光に対しても日陰応答を開始する事例として、避難路を示す緑色の安全灯に対して植物が応答した事例が K. Folta のレビューペーパー「Green light: a signal to slow down or stop」¹⁹⁾にも紹介されている。

今回のシロイヌナズナの暗期緑色光照射試験でも確認したが、緑色光受容体のクリプトクロム 2 は FAD (フラビンアデニンデヌクレオチド) 構造部位が半還元状態のときに緑色光を吸収できる²⁸⁾。またクリプトクロム 2 は連続的な青色光照射により消去される⁴⁴⁾ことから、緑葉日陰の緑色光を判別する機能を果たしている陰性の光受容体と考えられる。クリプトクロム

1 は対照的に明るい青色の光の陽性の受容体³⁵⁾と表現できる。

赤色光受容体のフィトクロムにおいてもフィトクロム A は陰性で主に遠赤光の受容体であり、赤色光の連続照射により消去される。半面フィトクロム B は赤色光と遠赤光の比率により形態を変えて反応する陽性光受容体⁴³⁾といえる。

クリプトクロム 2 が緑色光を受容する時、及びフィトクロム A が遠赤光を受容する時に、ともにジャスモン酸を発現させることからジャスモン酸の機能の一つは日陰応答の信号伝達物質であることを示唆している。

また生殖成長に不可欠な開花については第 6 章で検証したように、クリプトクロム 2 が光受容体となり開花誘導のプロセスをスタートさせることが報告されている^{27,47)}。生殖成長の開花を始動させるクリプトクロム 2 の欠損変異体 *cry2* で栄養成長が続き、開花が遅れた今回の実験結果もこれを裏付けている。

(3) 暗期緑色光と赤色光の交互照射 (G-R 法) による オーキシン内在量の増加

暗期緑色光照射が成長抑制型植物ホルモンであるジャスモン酸を発現させながら、成長抑制型植物ホルモンのオーキシンが不可欠なイチゴ収量の増加になったメカニズムが不明であった。この問題の解明のために、『暗期の緑色光照射によりイチゴの収量が増加となったのは開花促進だけでなく、同時に発現したジャスモン酸がオーキシン誘導の体制を準備し翌日以降の太陽光照射によりオーキシン誘導が促進された結果である。』とのホメオスタシス仮説を設定した。この仮説に基づき暗期の単色光照射試験においてオーキシン誘導が示唆された赤色光照射を暗期緑色光照射と組み合わせる栽培手法「G-R 法」によると、更にオーキシン発現を強化してイチゴ収量増加となると想定して栽培試験を実施した。

結果は仮説を裏付けるように暗期緑色光照射と暗期赤色光

照射を組み合わせた G-R 区で、葉茎のオーキシン内在量が対照区の 3.7 倍に増加した。この結果栄養成長が盛んとなり、葉面積の拡大およびオーキシン内在量の増加とソース葉としての機能が強化されている。イチゴ果実を肥大させるための体制が整った状態にある。この結果と想定するが、またイチゴ果実収量が対照区との比較で 91%の増収となった。

また G-R 区では、成長促進と抑制の反する機能を有するオーキシンとジャスモン酸の葉茎における内在量がともに増加していた。第 6 章. 6.4 考察においても言及したが、クロストークの研究において、オーキシンとジャスモン酸は機能としては真逆にも拘らず、互いの生合成系を刺激して相手の発現を促しているとの研究報告がある。

ジャスモン酸が発現するとオーキシン生合成経路の酵素である YUCCA の発現を強化している³²⁾。また反対にオーキシンが発現するとジャスモン酸信号伝達経路の JAZ1 リプレッサーの発現を強化している³¹⁾。成長抑制のジャスモン酸がオーキシンの発現の準備をして反転する恒常性維持機能（ホメオスタシス）を整えているかのようである。

またオーキシン (IAA) は、発現すると転写因子の ARF に重合している転写抑制因子（リプレッサー）である AUX/IAA を引きはがして ARF の 2 量体にして IAA の転写を活性化するが、一方で IAA 転写により新たに抑制因子 AUX/IAA を誘導して、成長因子 IAA の増加が加速するのを留めるメカニズムも有している²⁹⁾。

また IAA は転写因子 ARF グループ内の ARF6, ARF8 を經由して GH3.3, GH3.5, GH3.6 を発現させるが、この 3 つの GH がジャスモン酸に、アミノ酸のアスパラギン酸 (Asp)、メチオニン (Met)、トリプトファン (Trp) を重合させて、各々 JA-Asp, JA-Met, JA-Trp を生成することで、ジャスモン酸を不活性化することが L. Gutierrez et al, (2012)³³⁾によって明らかにされて

きた。同じ GH タンパク質でも GH3.11 はジャスモン酸生合成経路の酵素 JAR1 の作用によりジャスモン酸にアミノ酸のイソロイシンを重合させて JA-Ile を生成する。この JA-Ile はジャスモン酸類の中で最も転写活性が高いためジャスモン酸の成長抑制機能を発揮させる。

これらの研究報告からも、ジャスモン酸とオーキシンは成長に関しては、互いに相反する機能を有しているが、一方で協調して成長を制御する精密な仕組みを構築していることが明らかになってきた。

ジャスモン酸は本研究でも明らかにしたが日陰シグナルを示す光質である緑色光の受容で発現している^{13,48,49,50,51})。また遠赤光の受容体であるフィトクロム A の光刺激でも発現するとの報告がある^{52,53})。

これらの報告はジャスモン酸が日陰シグナルの信号伝達物質であり、陽性の光質への環境変化があると、即時オーキシンを発現させて形態を転換させるメカニズムを植物は保有している。

逆に陽性光質から日陰性光質への環境変化においてもオーキシンとジャスモン酸の連携が作用して形態を転換させるメカニズムも植物は保有していると考えられる。

またクリプトクロム 2 による緑色光の受容で発現したジャスモン酸が開花プロセスのどの位置に作用して開花を遅らせるのか、そのメカニズムは不明のまま残った。しかしシロイヌナズナのジャスモン酸合成系の欠損変異体 *jar1* の開花が早く、またイチゴにおいて緑色光照射の後に、サリチル酸を誘導できる青色光照射を組み合わせた G-B 区での開花が促進されたことからジャスモン酸が開花に対して抑制的に作用しているのは現象で確認できた。緑色光照射区が非照射区より開花が遅く始まり、途中で加速して開花が増加している現象にこのジャスモン酸による抑制効果が影響していることも考えられて、今後

の研究テーマとして興味深い。

今回得られた実験結果および先行する研究報告を整理して G-R 法で発生する収量増加効果などのメカニズムをモデル化して Fig.7.9 に示す。

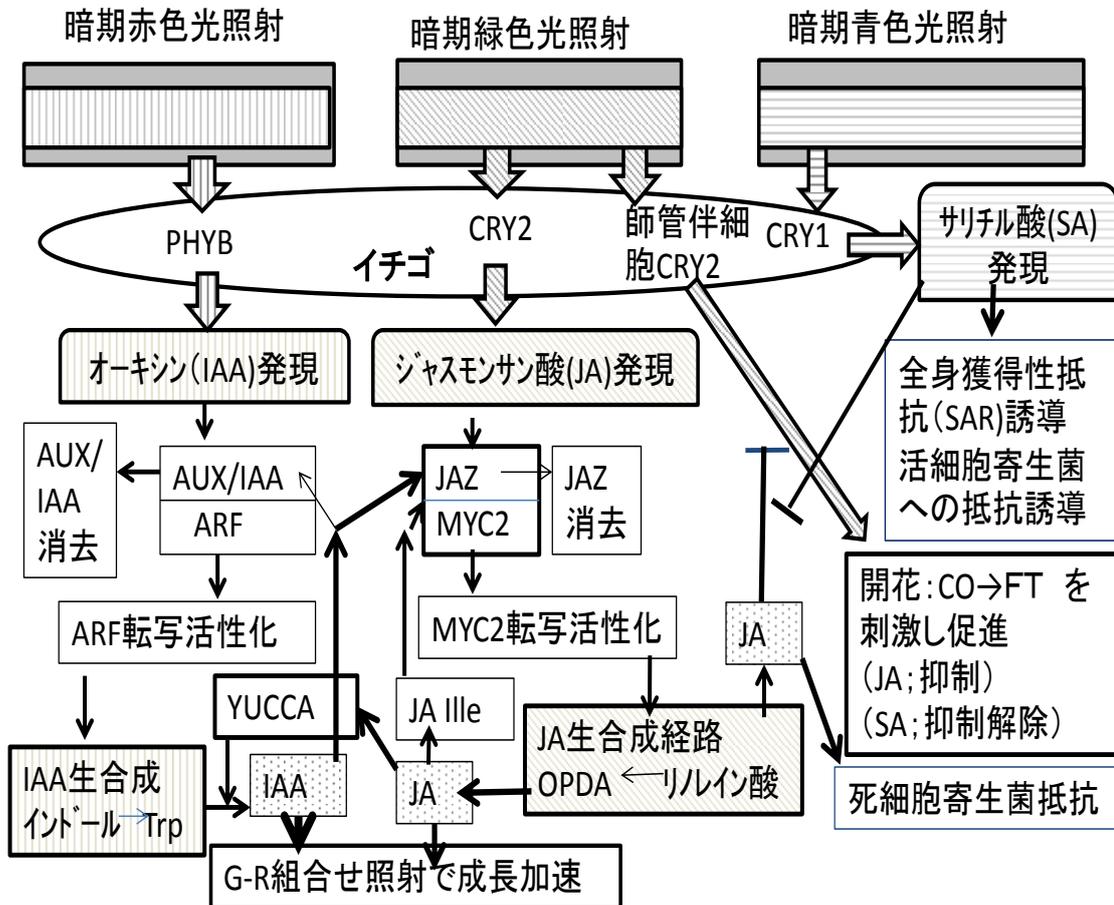


Fig.7.9 G-R 法による成長加速モデル

7. 5 摘要

暗期の緑色光と赤色光を組合せ照射した G-R 法は、イチゴ苗においてオーキシンとジャスモン酸の内含量が増加し、イチゴの草勢を盛んにして、葉面積拡大や葉柄長伸展などの栄養成長を促進した。また果実数を増加させると同時に果実肥大も進み結果として果実収量を有意に増加させた。

暗期の緑色光と青色光を組合せ照射した G-B 法は、イチゴ苗において草勢は抑制したが、開花数を有意に増加させた。第 6 章の試験後の想定で、緑色光照射によりクリプトクロム 2 を刺激して開花を促進し、同時に発生して開花抑制しているジャスモン酸の機能を、青色光により誘導するサリチル酸で拮抗し開花を促進できる可能性を予想した通りの結果となった。

暗期の単色光照射により、光質（波長）に対応した特有の植物ホルモンを誘導できる。その植物ホルモンに対応した植物の形態変化を発生させる可能性がある。

その単色光の組合せ照射で植物の栄養成長や、開花、結実および病虫害防除などを制御できる可能性があり、今後の研究継続が必要である。

その中でも G-R 法はイチゴ栽培において収量増加の有力な栽培手法となる可能性が高い。新規の栽培手法として大規模栽培施設での実証試験に進む計画である。

第8章 総括

現在においても飢餓人口は世界人口 70 億人の 12%に相当する 8 億人以上に達するとの国際連合 FAO の報告がある。人口は発展途上国を中心に更に増加を続けており 2025 年に 80 億人を超え、2050 年には 95 億人に達する見込みである。また新興国も経済の発展と共に高カロリーな肉食の比率が増加していき、これに伴い飼料用穀物の需要も増加する。21 世紀の前半に生きている我々は世界全体において食糧増産のニーズが高い時代背景の中に生活していることを自覚しなければならない。

一方人間社会の進化に大きく寄与してきた農耕開始から既に 1 万年を経過している現代の地球上で、農地の拡大余地は限られている。熱帯雨林の開墾は現在も進行しているが地球環境を維持するうえで制限が必要になる。

生産能力 = 耕地面積 × 単収

の簡単な数式から理解できるように耕地面積拡大に頼れなければ、単収の増加を目指すことになる。

世界的なニーズに対応するための単収増加を達成するには農耕技能だけでは限界がある。ここに技術と学術も結集して食料の単収増加を果たす必要がある。

この情勢下において、日本の農業の現状は国内消費用の米作が中心であり、政府予算統制から補助金抑制のため単収が上がると減反を進めている。農業者にとっては努力して単収を上げると減反による売上抑制を求められる悪循環となっている。単収増加のための研究は国内のローカルな視点ではニーズがなく、結果として国や都道府県の農業研究機関では単収増加のための研究開発は実施されていない。ローカルな僅かな食味の違いを求めての新しいブランド米を作る競争を、縮小する日本の小さな市場内で繰り広げている。これでは世界のニーズに対応できない。

安全でかつ科学的に合理的な手法で単収増加に貢献することが、世界的な課題解決に向けて日本の科学者、技術者が努力すべき一つの方向と信じる。

このような思いから機械の技術屋が専門外の植物生理学の講座で基礎から学び始めた。日本生物環境工学会の数ある口頭発表の中で『暗期の緑色光照射が植物の病害耐性を増強し、かつイチゴの収量も上がった。』との（株）四国総合研究所の報告が興味を引いた。発表者に確認してみるとメカニズムの解明はされていないとのことであった。また収量に関しては統計検定されたデータが提示されていない状況であった。

この暗期緑色光照射による現象の再現性が確認できて、かつメカニズムが検証できれば、減農薬の安全な作物の単収が増加する手法として定着可能である。世界的なニーズがある単収増加の技術開発になり、門外漢の研究テーマとして最適なテーマの一つと考えた。

また北陸の冬期の日照不足条件下でもイチゴを栽培できる施設を検討するにあたり、省エネルギーと安全性を考慮し、温室に簡便な自動制御システムを追加して、少なくとも5日間は無人で栽培可能なシステムを構築することも研究テーマの一つと考えた。

暗期緑色光照射効果に触発された暗期の単色光照射を伴う栽培方法の研究と、北陸に適合する栽培施設構築の二つのテーマを取り上げて、北陸のそして日本の農業の革新に寄与できる栽培手法の開発を研究目標にして本研究を行った。

第1章では、本総括章（第8章）の冒頭にも論じているが、総務省統計局と国連 FAO(Food Agriculture Organization)の統計データを主に使って、世界的な食料増産ニーズが高いこと。しかしながら日本は貢献していないどころか穀物類の輸入を増やし飢餓人口減少に逆行している現状と、食糧増産のために

は日本においても単収増加の技術開発が必要であることを論じた。

第2章では、既存のコンクリート床のガラス温室に安価な部品を組み合わせた制御を追加して、イチゴ栽培が可能なシステムを構築した。冬期間の日照不足に悩む北陸の農業者のビニールハウスや温室にも適用可能な安価な制御システム構築を目指した。補光にエネルギー消費の優先権を与え、暖房装置を使わない温度制御システムを作ることができた。

このシステムは暖房装置を使っていないため、無人でも安全性が高く、また暖房費を使わないことでコスト削減が可能な、簡易型植物工場である。北陸の農業者の冬期の野菜栽培に貢献できると考えている。

第3章では、第2章で構築した栽培システムを使い、イチゴにおける暗期緑色光照射の効果を確認した。暗期緑色光照射により「収量増加効果」と「病虫害の光防除」の先行研究報告があり、これにより、「安全で単収増加を狙える栽培技術」となる可能性を確認するためである。

4品種を使い、培地2種類、緑色光照射区と非照射の対照区で比較栽培を実施した。試験栽培区域内にうどん粉病の感染が広がり、うどん粉病に感染しなかった「宝交早生」の収量が感染拡大した他の3品種と比較して多い結果となった。この結果からうどんこ病の影響を排除した状態で、緑色光照射の影響を確認する試験栽培の企画が必要となった。ただし初年度の栽培試験で、下記を確認した。

- (1) 暗期緑色光照射による病害抵抗性の増強は、活物寄生糸状菌であるうどんこ病には効果がない。
- (2) 「宝交早生」は隣接して栽培している「とよのか」、「ベニホッペ」、「アイベリー」がうどんこ病に感染しても、感

- 染しない特性をもっている。この理由の解明も課題となる。
- (3) 「ゼオライト」と「ロックウール」との2水準で比較栽培では収量に有意差がない。
 - (4) 構築したイチゴ栽培システムは狙った機能を満足しており、次年度以降の栽培に適用できる。

第4章では、翌年度の栽培でイチゴ品種をうどんこ病耐性が高い「宝交早生」1品種に絞り、暗期緑色光照射の効果確認の栽培試験を実施した。この栽培試験においては東日本大震災後の電力消費抑制の要請から、補光の強度（PPF）を落とした栽培条件とした。この影響からイチゴ苗の開花及び果実収穫時期が大きくおくれた。この条件下で、暗期緑色光照射による花成の促進が確認できた。また果実収量は対照区に比較して緑色光区で+26.5%と増加した。この結果から、暗期の緑色光照射効果により果実収量増加の可能性があることを確認した。ただし補光強度不足による成長抑制状態での結果であり、一般化できるかには疑問は残った。

また暗期緑色光照射による花成誘導促進とその後の果実収量拡大のメカニズムは不明のままであった。

第5章ではイチゴ栽培で緑色光以外に赤や青色光を暗期照射する比較試験を試みた。花成誘導や収量増加が緑色光による特異的な現象なのかを確認するのが目的であった。花成は対照区と比較して緑色光照射により有意に誘導されていた。しかし開花数差ほどには緑色光区において果実収量は伸びず10%の果実収量に留まった。

暗期照射の緑色光によりジャスモン酸が誘導され、ハダニ耐性が向上しているのを確認した。暗期照射の青色光によりサリチル酸が誘導されたことを確認した。一方暗期照射の赤色光によって、果実収量の増加となったことから、オーキシンが誘導

された可能性を示唆していた。

これらを総合すると暗期照射の単色光が波長に特有の植物ホルモンを発生させて、形態形成に影響する可能性を示唆している。

第6章では暗期緑色光照射により発生する現象のメカニズム究明の一環として、機能欠損変異体での栽培試験が可能なシロイヌナズナを使ったメカニズムの検証試験を試みた。

暗期照射の緑色光はクリプトクロム2が受容体となり根長伸長抑制すること、開花誘導すること、およびジャスモン酸の発現を誘導することを確認した。またジャスモン酸は開花に対しては抑制的に作用していることを確認した。暗期緑色光照射はサリチル酸も同時に誘導しており、拮抗作用があるサリチル酸が存在してもジャスモン酸を発現させることは「病虫害の光防除技術」の観点で注目に値する。サリチル酸の内在量が豊富なイチゴ品種「宝交早生」においても暗期緑色光照射によりジャスモン酸を発現させた第5章の結果を裏付けている。

第7章では緑色光照射効果のメカニズムを確認する目的で、「緑色光によりジャスモン酸を発現させて、その後の太陽光照射により、恒常性維持機能（ホメオスタシス）が作用しオーキシンが誘導されて、成長を促進するのが、暗期緑色光照射による成長傾向のメカニズムである」との仮説をたてた。その検証のため暗期の緑色光照射だけでなく、暗期の緑色光と赤色光または青色光の組合せ照射によるイチゴ苗「宝交早生」の反応を調査した。

仮説が正しければ、太陽光には、波長的にホメオスタシス機能にネガティブな緑色光や暗赤光も含まれており、純粹に赤色光または青色光を照射したほうが、ホメオスタシス機能がより強く発揮され成長や果実肥大に必要なオーキシン（IAA）内在

量が増加すると考えたのが、その理由である。

近年の植物ホルモン間のクロストーク研究からジャスモン酸とオーキシンが互いに生合成経路を刺激して反転させる現象も報告されていることも、緑色光と赤色光または青色光との組合せ照射による成長促進の可能性を示唆していた。

暗期緑色光と暗期青色光を組合せ交互照射する G-B 法ではサリチル酸発現による拮抗作用でのジャスモン酸の消去を狙ったものだが下記特徴を示した。

- (1) 葉面積が拡大せず茎長も短い。
- (2) 開花数は対照区や他区と比較して有意に増加した。
- (3) 開花数の豊富さほどには果実収量は多くはならず、果実平均重さが小さくなっていた。

活物寄生糸状菌に対する防御反応を誘導するサリチル酸と、死物寄生糸状菌に対する防御反応を誘導するジャスモン酸を交互に発現させる G-B 法は、防御に資源を費やし植物本来の栄養成長が犠牲になっているように見える。但し花卉栽培には葉柄、花柄が短く花数が多い特徴が、適合している可能性がある。

一方暗期緑色光と暗期赤色光を組合せ交互照射する G-R 法では栄養成長促進および果実収量の大幅増加など下記の結果となった。

- (1) 葉面積が拡大し茎長が長いシュート形成を示す。
- (2) ジャスモン酸及びオーキシン共に発現量が多い。
- (3) 開花数が多い。
- (4) 果実収量は非照射対照区の 91% 増加を示した。

Fig.8.1 に示すように緑色光と遠赤光は植物にとって競合植物の日陰にあることを認知させる光信号である。緑葉の日陰に入ると光合成に必要な赤色光または青色光が競合植物に吸収されて、光合成が十分にできないことから生存競争に勝てない。この対策として緑葉日陰に入った植物は太陽光を求めるため

の形態を変える日陰回避応答を開始する。「根の成長を抑制する」、「葉の角度を小さくして葉の先端の高さを上昇させる」、「葉を広く薄くする」、「茎をのぼす」などの形態形成をすることは知られている。更に開花を早めて種子を残すことで個体としての生存不可に備える戦略をとることが知られてきた。しかし競合植物の排除された場合、風によるサンフレック（陽斑、木漏れ日）や太陽高度の変動により光環境が変化して陽性の光質が当たる環境になった場合には、通常栄養成長に速やかに戻す機能を備えている。サンフレックによる太陽光を受けてから、光合成活性がその光量子密度に応じた最大活性に至るまで、数分程度の時間で到達する。また光合成活性はサンフレックが過ぎてから数秒から数分間継続する。このように植物は環境に対応して短時間で反転させる機能をもつが、これが信号伝達物質であるジャスモン酸とオーキシンのホメオスタシス機能存在の理由となっているものと想定できる。

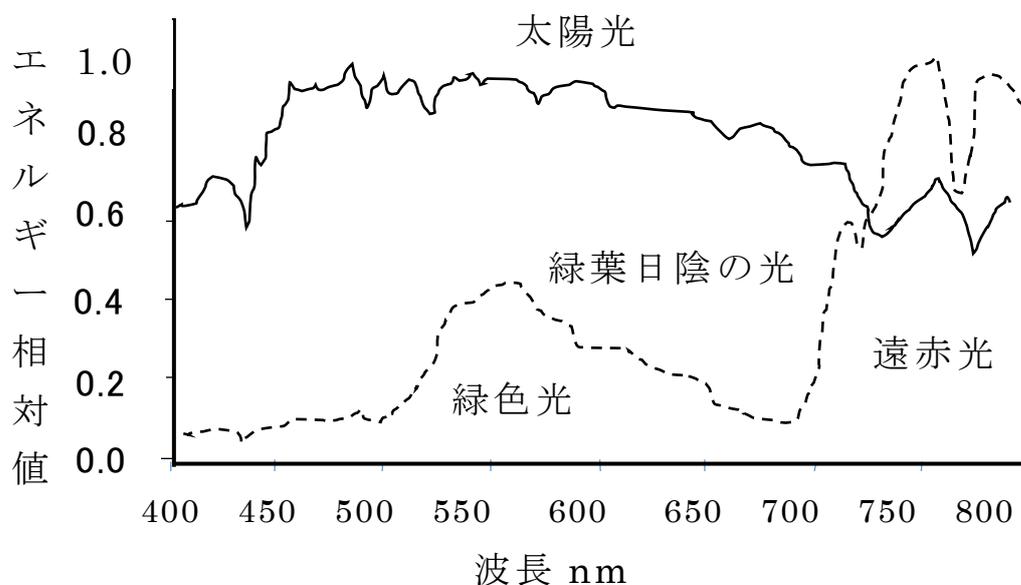


Fig. 8.1 自然光と緑葉日陰光の光質比較
(Folta et al, 2007 から参照)

本研究の開始のきっかけとなった「暗期の緑色光照射」により発生する現象は、以上の考察から植物固有の生存のために必要な日陰を意味する光信号への応答機構を利用した手法である。「暗期の緑色光照射」ではジャスモン酸発現による病虫害の「光防除」として採用できる可能性があるほか、栄養成長促進や果実収量の増加の傾向は見られた。しかし統計検定での収量増加の有意差が検出できたのは4年間の栽培で1度のみであり、「暗期の緑色光照射」が収量を増加させるとまでは言い切れない栽培結果であった。

この改良形として「暗期の緑色光と赤色光の交互照射によるG-R法」を創出した。このメカニズムは植物に固有の光質の変化に対応する能力を刺激した栄養成長促進、および果実の増収法である。イチゴ「宝交早生」の葉面積および葉茎が大きく成長し栄養成長を促進していることから、今回確認したイチゴだけでなく他の作物の単収増加に寄与できる可能性がある。

今回の研究は世界的な食料増産、特に穀物増産のニーズに対して直接的な効果はない。しかし肉食比率の増加など食生活の進化とともに増加する野菜や果実の需要増加に対して今回の研究は貢献できる可能性がある。

第2章で報告し、その後のイチゴ栽培で4年間継続使用した「北陸に適合した省エネルギー型植物栽培施設」と第7章の栽培試験で見出した成果である「G-R法」とを組み合わせて、北陸のそして日本の栽培技術の進化に貢献することが出来れば幸いである。

この「北陸に適合した省エネルギー型植物栽培施設」と「G-R法」とを組み合わせた栽培手法は、石川県産業創出支援機構（ISICO）の「2015年度、新技術・新製品開発支援事業」に採択され、50m級のビニールハウスを使った研究を2年間継続できることになった。研究結果は別の機会に報告したい。

謝辞

本研究は著者が金沢大学大学院自然科学研究科博士後期課程に在学中に金沢大学自然科学研究科生命科学専攻坂本敏夫准教授の指導の下に行ったものです。

何よりも先に生物学の初心者で、かつ還暦過ぎの著者に、6年間の長期履修制度による自然科学研究科生命科学専攻博士後期課程の入学を許容して頂いた金沢大学に感謝いたします。

またゼミや講義を通して植物生理学の基本と論文の読み方を丁寧に指導して頂いた金沢大学自然科学研究科生命科学専攻坂本敏夫准教授に心より感謝の意を表します。坂本先生からは、伊能忠敬も高齢になってから測量に関する学問を習得し、日本地図を作ったとの励ましを頂きました。学会発表用の要旨集の取りまとめの際や、学会誌への論文投稿に際してもご指導を頂いたことにも感謝いたします。

そして本研究の最初の障壁となったイチゴのうどんこ病発生に際して、植物の病害抵抗におけるジャスモン酸とサリチル酸の効能の違いをご教授頂いた金沢大学学際科学実験センター遺伝子研究施設西内巧准教授に深く感謝いたします。ジャスモン酸とサリチル酸の拮抗作用を教えて頂いたことで、その後の植物ホルモンに関する研究と調査の展開が開けました。またシロイヌナズナ変異体の種子入手に御尽力して頂いたことや、シロイヌナズナ栽培と論文作成にご指導頂きました。この結果緑色光照射による現象のメカニズム究明が進みました。

また研究成果を投稿論文にまとめるにあたり、テーマの絞り方など懇切丁寧なご指導を頂きました金沢大学理工研究域自然システム学系松郷誠一教授に感謝いたします。

植物ホルモンの分析に当たりご協力いただきました、株式会社ハウス食品分析テクノサービス、および新潟大学大学院自然科学研究科児島清秀教授および野村隼大さんには心より御礼

申し上げます。

株式会社四国総合研究所にて「暗期緑色光照射効果」をテーマに研究および啓蒙活動されている工藤りか博士、山本敬司研究員はじめ研究者の皆様には、研究開始のきっかけとなるお話をして頂いたこと、また日本生物環境工学会の発表会場におけるご教示を頂いたことに感謝いたします。

また金沢工業大学工学部平間淳司教授には有色蛍光灯の分光分析をお願いしました。また生物の生体電位やキノコの生育環境などについて貴重なお話をして頂き、工学と生物の境界での研究活動の実際を見学させて頂いたことに感謝いたします。

また金沢工業大学工学部平間教授や金沢学院短期大学ライフデザイン総合学科松井良雄教授を初めとする日本生物環境工学会の中部支部の会員の皆様には、学会および中部支部大会や懇親会で励ましを頂きましたことに感謝いたします。

一方企業人としての在職中に専門の機械工学からは全くの異分野の植物に関する研究を、大学の研究生として活動開始したいと相談したところ、研究をやるなら大学院に入学すべきと助言を頂いたコマツ萩原敏孝元会長に深く感謝いたします。また在職中の研究活動開始に当たり、ご協力いただいたコマツの同僚諸氏にもご迷惑をかけたことについて、お詫びすると同時に感謝申し上げます。

最大の支援者である妻の純子の理解と協力なしには研究活動の継続は不可能でした。筆者の癌や心臓病との闘病時には心配させた他に、食事療法につきあってもらったことなど、心より感謝します。

2016年3月 佐藤正幸

引用文献

- 1) Jose Graziano da Silva (2014). State of Food Insecurity in the World IN BRIEF , Food and Agriculture Organization of the United Nations
- 2) 三石誠司、遺伝子組み換え作物をめぐる世界の状況について、共済総合研究 67号、8-40、2013
- 3) 日本貿易振興機構（ジェトロ）農林水産・食品部シカゴ事務所、平成 23 年度米国食糧及びバイオ燃料生産の現状と課題, 2011-AFC-11
- 4) 清水徹朗、農業所得・農家経済と農業経営、その動向と農業構造改革への示唆、農林金融 2013.11,717-734
- 5) <http://keisan.casio.jp/exec/system/1185781259>
- 6) 彦坂昌子、吉田英生、吉野千里、後藤英司：青色光および明期が四季成り性イチゴの開花に及ぼす影響、日本生物環境工学会京都大会講演要旨集、8-9(2010)
- 7) 栃木菜穂美、彦坂昌子、後藤英司：LED 補光の光強度がトマトの果実成長および補光葉のクロロフィル濃度に及ぼす影響日本生物環境工学会高松大会講演要旨集、14-15(2013)
- 8) 吉田英生、彦坂昌子、後藤英司、高砂裕之、工藤善．完全人工光型植物工場における連続明期およびその開始時期が四季成り性イチゴ苗の開花までの日数および生育に及ぼす影響．植物環境工学 25(2), 77-82, 2013
- 9) 石渡正紀，山田真，内田達清，太市明伸．光波長の特性を応用した農業照明，パナソニック電工技報． 57(4)：46-51. 2009.
- 10) 伊藤真一，荊木康臣，吉村和正．病原抵抗性植物体およびその果実およびその葉茎およびその誘導方法および植物体栽培システム．特許広告番号 W02013015442A1

- 11) 水上宏二, 平田裕子, 森山友幸, 山田真, 石渡正紀. 緑色蛍光灯によるイチゴ「あまおう」の生育および花芽分化への影響とハスモンヨトウ防除に効果的な設置法, 福岡県農業総合試験場研究報告. 32. 2013.
- 12) 工藤りか. 緑色光照射による植物の病害抵抗性の誘導—緑色光によるイチゴ炭そ病防除から— . 植物防疫 66(11), 604-607. 2012-11.
- 13) Kudo R, Ishida Y, Yamamoto K (2011) Effects of green light irradiation on induction of disease resistance in plants. *Acta Hort* 907:251-254
- 14) 工藤りか, 山本敬司, 石田豊. 葉菜類の生産方法. 特許公開番号 2012-161313. 2012
- 15) 園池公毅. 光合成とはなにか. 講談社ブルーバックス. 2008
- 16) 佐藤正幸, 坂本敏夫. 北陸に適合した省エネルギー型植物栽培施設の開発, 生物工学 93. 542-546. 2015
- 17) Antonio Leon-Ryyes, Dieuwertje Van der Does, Elvira S. Lange, Carolin Delker, Claus Wasternack, Saskia C.M. Van der Wees, Tita Ritsema, Corne M.J. Pieterse: Salicylate-mediated suppression of jasmonate-responsive gene expression in *Arabidopsis* is targeted downstream of the jasmonate biosynthesis pathway. *Planta* (2010) 232; 1423-1432
- 18) 山元義久, 松本純一, 玉木克知, 杉本琢真, 塩飽邦子, 小林保. イチゴにおける連鎖地図の作成およびうどんこ病抵抗性 DNA マーカーの選抜, 兵庫県農技総セ研報. 51: 7-12. 2003.
- 19) Kevin M. Folta, Stefanie A. Maruhnich: Green light, a signal to slow down or stop. *Journal of Experimental Botany* Advance Access published July 13, 2007

- 20) H. H. Kim, G. D. Goins, R.M. Wheeler, J.C. Sagaer, Green-light Supplementation for Enhanced Lettuce Growth under Red and Blue- light -emitting Diodes, *Hort Science* 39(7) :1617-1622, 2004
- 21) Terashima I, Fujita T, Inoue T, Chow WS, Oguchi R (2009) Green light drives leaf photosynthesis more efficiently than red light in strong white light: revisiting the enigmatic question of why leaves are green. *Plant Cell Physiol* 50: 684-697
- 22) 工藤りか、山本敬司、石田豊：農作物への緑色光照射技術の開発-緑色光の多様な効果について-日本生物環境工学会2010年大会（京都）講演要旨. 9月8日-10日, 294-295. 2010
- 23) 佐藤正幸、坂本敏夫：暗条件下での緑色光照射によるイチゴ収穫量増加. 日本生物環境工学会 2012年大会(東京)講演要旨、170-171. 2012
- 24) Segarra G, Jáuregui O, Casanova E, Trillas I (2006) Simultaneous quantitative LC-ESI-MS/MS analyses of salicylic acid and jasmonic acid in crude extracts of *Cucumis sativus* under biotic stress. *Phytochem* 67: 395-401
- 25) Masayuki Sato, Takumi Nishiuchi, Toshio Sakamoto. Responses to intermittent exposure to green light during the dark period in *Arabidopsis thaliana* and possible involvement of cryptochrome2. *Plant Biotechnology* 32:1-5. 2015
- 26) F. Takahashi, R. Yoshida, K. T. Mizoguchi, S. Seo, M.Yonezawa, K. Maruyama, K. Y. Shinozaki and K.Shinozaki. The Mitogen-Activated Protein Kinase Cascade MKK3–MPK6 Is an Important Part of the

- Jasmonate Signal Transduction Pathway in Arabidopsis.
The Plant Cell March 2007 vol.19 no.3 805-818
- 27) Motomu Endo, Nobuyoshi Mochizuki, Tomomi Suzuki,
and Akira Nagatani CRYPTOCHROME2 in Vascular
Bundles Regulates Flowering in Arabidopsis. The
Plant Cell, Vol. 19: 84–93, January 2007
- 28) R. Banerjee, E. Schleicher, S.Meier, R. M.Viana, R.
Pokorny, M. Ahmad, R. Bittl, and A. Batschauer. The
Signaling State of *Arabidopsis* Cryptochrome 2
Contains Flavin Semiquinone. THE JOURNAL OF
BIOLOGICAL CHEMISTRY VOL. 282, NO. 20, p.
14916–14922, May 18, 2007
- 29) Lincoln Taiz, Eduardo Zeiger. Sinauer associates In.:
Plant Physiology Fifth Edition. Chapter 19, Auxin: The
First Discovered Plant Growth Hormone. 577-578,
2010
- 30) 児島清秀、果実のホルモン、ブックレット新潟大学 34
2004, pp.16–27
- 31) Wim Grunewald¹, Bartel Vanholme, Laurens Pauwels,
Eva Plovie, Dirk Inze, Godelieve Gheysen & Alain
Goossens. Expression of the Arabidopsis jasmonate
signalling repressor JAZ1/TIFY10A is stimulated by
auxin. EMBO report VOL 10 | NO 8 | 2009.
- 32) Mathias Hentrich, Christine B€ottcher, Petra
D€uchting, Youfa Cheng, Yunde Zhao, Oliver
Berkowitz, Josette Masle, Joaquin Medina and
Stephan Pollmann, The jasmonic acid signaling
pathway is linked to auxin homeostasis through the
modulation of YUCCA8 and YUCCA9 gene expression.
The Plant Journal (2013) 74, 626–637

- 33) L Gutierrez et al.: Auxin Controls Arabidopsis Adventitious Root Initiation by Regulating Jasmonic Acid Homeostasis. *The Plant Cell*. (2012) Vol. 24: 2515–2527
- 34) Xing Liu, Jerry D. Cohen, and Gary Gardner.: Low-Fluence Red Light Increases The Transport and Biosynthesis of Auxin. *Plant Physiology*, October 2011, Vol.157, pp891-904
- 35) Roberto C. Canamero, Nadia Bakrim, Jean-Pierre Bouly, Alvaro Garay, Elizabeth E. Dudkin, Yvette Habricot, Margaret Ahmad. Cryptochrome photoreceptors cry1 and cry2 antagonistically regulate primary root elongation in *Arabidopsis thaliana*. *Planta* (2006) 224: 995–1003
- 36) 宮城県農業園芸総合研究所. イチゴ促成栽培用品種「もういっこ」の病害特性. 平成 17 年宮城県農業園芸総合研究所研究報告. 59-61. 2005.
- 37) 阿波加和孝, 田伏栄徳, 石田芳明, 木村春昭, 柏雅一, 藤田俊弘. 緑色 LED 照明によるイチゴ育苗期及び定植後のうどんこ病抑制効果の実証, 日本生物環境工学会東京大会講演要旨集. 168-169. 2012.
- 38) Aurélie Gfeller, Lucie Dubugnon, Robin Liechti, Edward E. Farmer. Jasmonate Biochemical Pathway. *PLANT BIOLOGY* 16 February 2010 Vol 3
- 39) Kemal Kazan* and John M. Manners, The interplay between light and jasmonate signalling during defence and development, *Journal of Experimental Botany*, Vol. 62, No. 12, pp. 4087–4100, 2011

- 40) Frances Robson, Haruko Okamoto, Elaine Patrick, Sue-Re' Harris, Cus Wasternack, Charles Brearley, and John G. Turner. Jasmonate and Phytochrome A Signaling in Arabidopsis Wound and Shade Responses Are Integrated through JAZ1 Stability. *The Plant Cell*, Vol. 22: 1143–1160, 2010.
- 41) 佐藤正幸、坂本敏夫：暗条件下での単色光（緑、青）照射によるシロイヌナズナの防御シグナル誘導のメカニズム。日本生物環境工学会 2013 年大会（高松）講演要旨、100-101. 2013
- 42) P.E. Staswick, W. Su, and S. H. Howel. Methyl jasmonate inhibition of root growth and induction of a leaf protein are decreased in *Arabidopsis thaliana* mutant. *PNAS* August 1992 vol.89 no.15 6837-6840
- 43) Lincoln Taiz, Eduardo Zeiger. Sinauer Associates In: *Plant Physiology Fifth Edition*. Chapter17, Phytochrome and Light Control of Plant Development. 494-514, 2010
- 44) Ze-Cheng Zuoa, Ying-Ying Menga, Xu-Hong Yuc, Zeng-Lin Zhanga, De-Shun Fengb, Shih-Fan, Sunc Bin Liu and Chen-Tao Lin: A Study of the Blue Light Dependent Phosphorylation Degradation, and Photobody Formation of *Arabidopsis* CRY2. *Molecular Plant* •Volume 5 Number3 726-733. 2012
- 45) Jean-Pierre Bouly, Erick Schleicher, Maribel Dionisio Sese, Filip Vandenbussche, Dominique Van Der Straeten, Nadia Bakrim, Stefan Merier, Alfred Batschauer, Paul Galland, Robert Bittl, and Margaret Ahmad. Cryptochrome Blue Light Photoreceptors Are Activated through

- interconversion of Flavin Redox States. THE JOURNAL OF BIOLOGICAL CHEMISTRY VOL.282, NO.13, pp9383-9391 March 2007.
- 46) 佐藤正幸、坂本敏夫：暗条件下での単色光（緑、青、赤）照射がイチゴ栽培に及ぼす影響.日本生物環境工学 2013年大会（高松）講演要旨、98-99.2013
 - 47) 小柴共一、神谷勇治、勝見允行：植物ホルモンの分子生物学、第2章.2.6.生殖と花芽形成 . 179-187, 2009
 - 48) Tingting Zhang, Stefanie A. Maruhnich, and Kevin M. Folta: Green Light Induces Shade Avoidance Symptoms. August 2011. *Plant Physiol.* Nov 2011; 157(3): 1528–1536.
 - 49) Folta KM (2004) Green light stimulates early stem elongation, antagonizing light-mediated growth inhibition. *Plant Physiol* 135: 1407-1416
 - 50) Johkan M, Shoji K, Goto F, Hahida S, Yoshihara T (2012) Effect of green light wavelength and intensity on photomorphogenesis and photosynthesis in *Lactuca sativa*. *Environ Exp Bot* 75: 128-133
 - 51) Wang Y, Folta KM. Contribution of green light to plant growth and development. *Amer. J. Bot.* 100(1): 70-78. 2013
 - 52) Franklin KA, Whitelam GC (2005) Phytochromes and shade-avoidance responses in plants. *Annals of Botany* 96: 169-175
 - 53) Moreno JE, Tao Y, Chory J, Ballaré CL (2009) Ecological modulation of plant defense via phytochrome control of jasmonic sensitivity. *Proc Natl Acad Sci* 106: 4935-4940
 - 54) Guo H, Yang H, Mockler TC, Lin C (1998) Regulation of flowering time by *Arabidopsis* photoreceptors. *Science*

279: 1360-1363

- 55) 和田楓、近藤洋、竹能清俊：アサガオのストレス 応答花成におけるサリチル酸の関与．植物化学調節学会研究発表記録集（40）, 36, 2005-10-13
- 56) 太田祐樹、坂井優、知野秀次、福田陽子、児島清秀：液体クロマトグラフィー質量分析計を使用した果実の植物ホルモンの同時分析．J. Mass Spectrom. Soc. Jpn Vol. 59, No. 3, 2011
- 57) Hidaka K, Dan K, Imamura H, Miyoshi Y, Takayama T, Sameshima K, Kitano M, Okimura M (2013) Effect of supplemental lighting from different light sources on growth and yield of strawberry. *Environ Control Biol* 51: 41-47
- 58) P.E. Staswick, W. Su, and S. H. Howel. Methyl jasmonate inhibition of root growth and induction of a leaf protein are decreased in *Arabidopsis thaliana* mutant. PNAS August 1992 vol.89 no.15 6837-6840
- 59) Yasuda M, Ishikawa A, Jikumaru Y, Seki M, Umezawa T, Asami T, Maruyama-Nakashita A, Kudo T. Shinozaki K, Nakashita H. Antagonistic interaction between systemic acquired resistance and the abscisic acid-mediated abiotic stress response in *Arabidopsis*. *Plant Cell*, 2008 Jun, 20(6):1678-92
- 60) 佐藤正幸、坂本敏夫：暗条件下での単色光（緑、青、赤）組合せ照射のイチゴ栽培への影響．日本生物環境工学会 2014 年大会（東京）講演要旨 56-57. 2014
- 61) 島田幸久、萱原正嗣：植物の体の中では何が起きているのか．ベレ出版．第 3 章 173-175. 2015.

発表論文

1. 佐藤正幸、坂本敏夫. 北陸に適合した省エネルギー型植物栽培施設の開発, 生物工学 93. 542-546.2015
2. Masayuki Sato, Takumi Nishiuchi, Toshio Sakamoto. Responses to intermittent exposure to green light during the dark period in *Arabidopsis thaliana* and possible involvement of cryptochrome2. Plant Biotechnology 32:1-5. 2015

学会発表

1. 佐藤正幸、坂本敏夫：暗条件下での緑色光照射によるイチゴ収穫量増加. 日本生物環境工学会 2012年大会（東京）講演要旨、170－171. 2012
2. 佐藤正幸、坂本敏夫：暗条件下での単色光（緑、青、赤）照射がイチゴ栽培に及ぼす影響. 日本生物環境工学会 2013年大会（高松）講演要旨、98－99. 2013
3. 佐藤正幸、坂本敏夫：暗条件下での単色光（緑、青）照射によるシロイヌナズナの防御シグナル誘導のメカニズム. 日本生物環境工学会 2013年大会（高松）講演要旨、100－101. 2013
4. 佐藤正幸、坂本敏夫：暗条件下での単色光（緑、青、赤）組合せ照射のイチゴ栽培への影響. 日本生物環境工学会 2014年大会（東京）講演要旨 56－57. 2014

特許申請

1. 出願番号 特願 2014-164612

発明の名称 植物の生産方法

発明者 石川県金沢市角間町ヌ7番地

国立大学法人金沢大学内 佐藤正幸

特許出願人 石川県小松市おびし町157

株式会社光植栽研究所代表取締役佐藤正幸

2. 出願番号 特願 2015-

発明の名称

発明者 石川県小松市おびし町157 佐藤正幸

特許出願人 石川県小松市おびし町157

株式会社光植栽研究所代表取締役佐藤正幸