学術賞受賞研究要旨

緑色植物の弱光照射 CA 貯蔵に関する実証研究

富 士 原 和 宏

東京大学大学院農学生命科学研究科

Low Light Irradiation-CA Storage of Green Plants

Kazuhiro FUJIWARA

*Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo,
Bunkyo-ku, Tokyo 113-8657, Japan*

はじめに

発光ダイオード (LED) を光源とした弱光照射 CA (Controlled Atmosphere) 貯蔵に関する標記の研究が、生物環境調節学の発展に貢献をなしたとして、栄えある日本生物環境調節学会学術賞を授与され、身に余る光栄に存じます。緑色植物の貯蔵環境調節という限定的な分野を研究対象とした試行錯誤的実証研究に對しまして、学術賞を授与することをご決断されました学会賞選考委員会委員の先生方ならびにご高配を賜りました関係の先生方に厚くお礼申し上げます。この受賞を機に一層研究に心を傾ける所存でございます。

以下に、研究の経過および主要成果の概要等を記述致します。

出 発 点

緑色植物の貯蔵に関する研究の出発点は、千葉大学園芸学部園芸環境工学 (現 環境調節工学) 研究室勤務時に、当時 Michigan State University の Royal Heins 教授のグループが行っておりました弱光照射によるセル成型苗の低温貯蔵期間延長に関する一連の研究成果を、古在豊樹教授よりご紹介いただいたことでもあります。その内容は、鉢物花卉やトマトのセル成型苗の低温貯蔵中に 55 lx 程度の弱光を照射すると貯蔵可能期間が長くなるというものでした。ご紹介いただいたときの簡単な議論において、弱光照射の第一の効果は、呼吸により放出される CO₂ を光合成により再吸収することに

より植物体内の炭水化物量を維持するというものであるとの認識にあっさりと至ったと記憶しております。古在先生は、この貯蔵法は組織培養苗の培養器内での貯蔵や挿し穂のビニール袋内での貯蔵にも利用可能であると推察され、先生のご指導により、組織培養苗については博士課程に在籍しておりました久保田智恵利氏 (現 University of Arizona, 助教授) が一足先に、そして 1 年ほど遅れて挿し穂については私が、それぞれ研究を開始することとなりました。一足先に開始しました久保田氏は組織培養苗を貯蔵対象植物として精力的に研究を進めていたのに対し、私の方は卒論・修論研究指導補助の範囲内での取組でありました。

弱光照射低温貯蔵への本格的な取組は、植物生産工学研究室への異動を機に開始されることとなりました。この異動が決まりましたときに、貯蔵に関する研究を継続するならば弱光照射に CA を組み合わせようと考えました。CA (低 O₂ 濃度 + 高 CO₂ 濃度) により呼吸速度を低下させた上で弱光照射を行えば、より低光強度でかつより植物体の消耗を抑えた状態で貯蔵ができる、すなわち弱光照射単独よりも品質を一層長く維持できると推察したからです。古在先生が寛大にも、異動後も弱光照射低温貯蔵に関する研究の継続をご快諾下さいましたことから、植物生産工学研究室にて、苗だけでなく収穫後の葉菜類等も対象とした本受賞研究の実質的なスタートを切ることとなりました。

赤色 LED および収穫後葉菜類への養液ゲル利用の有効性の検証

本研究では、その機能的・形態的な特徴だけでなく個人的な好みもあり、弱光照射用の光源には一貫して LED を中心として用いました。この LED への執着は、現在の中心的研究課題であります波長組成制御型 LED 擬似太陽光光源の開発へと繋がっております。

弱光照射へ CA を組み合わせる効果の実証研究に取り掛かる前に、光源としての赤色 LED の有効性を確かめる試験を、生食用ハーブの中では収穫後の品質劣化が著しく早いチャービル（ニンジン葉のような形態）を用いて行いました（1997, 1999a）。収穫後の葉菜類の弱光照射には、水分を供給する手段が必要であることは挿し穂貯蔵の経験から理解しておりましたので、収穫時の切り口の部分に養液をゲル化させたもの（養液ゲル）を用いる効果も同時に実証することにしました。水分供給が必要となるのは、暗黒下での貯蔵よりも弱光照射下の方が蒸散速度が大きくなるからです。これらの研究により、収穫後の葉菜類のように水や養分（無機成分）の供給源のない状態下にある植物体を弱光照射貯蔵する場合においては、水および養分の両方の供給がないと暗黒下での貯蔵以下の外観品質になりうる（水のみの供給では品質維持できない）、および赤色 LED による弱光照射の方が白色蛍光灯よりも外観品質を高く維持できることを明らかにしました。他方光源の差は、チャービル入りパック内の上面（光照射側面）でのチャービルの受光量（PPFD）は同じであったにもかかわらず、パックを透過した光量は白色蛍光灯の場合では赤色 LED の場合の半分以下でありました。このことから、光源の波長組成により数層に横積みされたチャービルを透過する光合成有効波長域の光の透過率に差があったことが直接的な原因であると考察されました。

CA 組合せ効果の検証および弱光照射 CA 貯蔵の提案

弱光照射へ CA（低 O_2 濃度 + 高 CO_2 濃度）を組み合わせる効果は、当初の期待に近いものとなりました。チャービル（1998）、トマト接ぎ木セル成型苗（1999b）ともに、10% O_2 + 0.5% CO_2 の CA と弱光照射の組合せでは、通常大気に近い 20% O_2 + 0.05% CO_2 との組合せ（弱光照射単独）よりも、外観品質を高めて貯蔵可能期間を延長できることを実証しました。より強度の CA として用意した 5% O_2 + 1% CO_2 との組合せは、10% O_2 + 0.5% CO_2 との組合せと大差ないか若干劣る結果でした。これらにより、水および養分の供給が確保さ

れている苗の場合は問題なく、そうでない収穫後葉菜類等の場合にはそれらの供給を条件として、弱光照射 CA は緑色植物の貯蔵に適用可能であり、かつ弱光照射単独よりも有意に高い効果が得られることが実証されました。

さて、通常の CA 貯蔵では、 O_2 濃度を下げて同時に CO_2 濃度を高めるということを行っていることから、上記の研究でも低 O_2 濃度 + 高 CO_2 濃度の効果を調べました。しかしながら、貯蔵施設への初期投資と運転経費の抑制、および貯蔵室内を低 O_2 濃度にするものの人に対する危険性回避のためには、 CO_2 濃度を高めることのみの CA が実用的であるといえます。そこで 1) CO_2 濃度を高めることのみの CA の効果はどの程度か、2) その CA により CO_2 交換速度を 0 とする PPFD をどの程度低くすることができるのか、さらには、3) CO_2 交換速度を 0 とする PPFD と CO_2 濃度の組合せは無限にあるから、その中でも特に品質維持に最適な PPFD と CO_2 濃度の組合せが存在するのではないか、などの疑問点を明らかにしようと考えました。

CO_2 交換速度面および有効最低光強度

上記の 1～3) を明らかにするために、収穫後チャービル（1999c）およびトマト接ぎ木セル成型苗（2001a）をそれぞれ用いて、次のような実験を行いました。まず、 CO_2 濃度と PPFD を 2 本の横軸に、そして CO_2 交換速度を縦軸にプロットして CO_2 交換速度面を描き、その面と CO_2 交換速度 = 0 の面との交線、すなわち CO_2 交換速度が 0 となる CO_2 濃度と PPFD の組合せを示す線を求めました。その線上の CO_2 濃度と PPFD の組合せならば、どの組合せにおいても供試植物の CO_2 交換速度は 0 となります。その線上から CO_2 濃度数レベルとそれらに対応する PPFD の組合せを選び出し、 CO_2 交換速度面を求めたのと同じ条件（貯蔵温度、 O_2 濃度、相対湿度）下で貯蔵することで、その植物の最適弱光照射 CA 貯蔵条件を見出すことを試みました。その結果、 CO_2 濃度を 0.05, 0.5, 1.0% と高めると CO_2 交換速度を 0 とする PPFD は、チャービルで 1.6, 0.5, 0.2 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ へと、トマト接ぎ木セル成型苗では 2.5, 1.3, 0.5 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ へと低下し、まず上記の 2) に対する回答が得られました。そして貯蔵試験の結果、外観品質維持に最も有効であった CO_2 濃度と PPFD の組合せは、チャービルでは 0.5% + 0.5 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、トマト接ぎ木セル成型苗では 0.25% + 1.9 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ であり、それぞれ他の組合せよりも有意に外観品質評価値が大きくかつ有意に葉色の変化が

小さくなることが示されました。この結果は、貯蔵中の植物体の CO_2 交換速度を 0 とする各環境要素の組合せの中に最適な組合せが存在すること、および弱光照射の十分な効果を得るためには最低限必要な光強度（有効最低光強度）が存在することを示すものでありました。前者は、「光補償点は、緑色植物の品質維持のための万能な最適貯蔵条件ではない」ということを意味します（このことは後述の自動制御システムに若干の要求を突きつけるものとなります。また後者は、「植物体の乾物重維持については CO_2 交換速度を 0 付近に維持することでほぼ達成可能であるが、クロロフィル含量やクロロフィル活性のような光合成関連組織量や機能・活性の維持については、それらの維持に必要な最低限の光強度が存在する」ということを意味すると考察できます。そして、それぞれの植物の有効最低光強度は、上記の最適な組合せの PPFD の近辺にあるものと推察されました。このようにして、残りの 1) および 3) についても回答が得られたわけです。

また、両植物ともに、弱光照射区では貯蔵開始後徐々に CO_2 交換速度（ CO_2 放出が正符号）が 0 付近から低下し（弱光順化）、やがて一定値になった後、増加に転じるという推移を示したのですが、この増加に転じる 2~3 日前から両植物とも葉色の変化が大きくなり始めていたことがわかりました。 CO_2 交換速度が増加に転じる時期は、植物体の光合成あるいは呼吸に関する量的な転換点となっているはずであると考えれば、この時期をその貯蔵対象植物の貯蔵可能期間の判定指標として利用できる可能性があると推察できます。

青色光混合照射

依然高価ではありますが青色 LED を用いて、トマト接ぎ木セル成型苗に対する赤色・青色光混合照射の効果も調べております（2003）。その結果、青色光の比率を大きくすると長期間の貯蔵後であっても葉が立っており、赤色光単独区と比較して草姿が改善されること、および赤色光への青色光混合に対する低温弱光下における生長・形態反応の中には、常温下におけるそれとは異なるものがあることなどを見出しました。また、この実験で青色光を混合すると光補償点が低下すると結論せざるを得ないデータが得られましたが、それが事実であることは、次の自動制御システムを用いた実験で確認されました。

CO_2 交換速度を 0 とする PPFD 自動制御システム

弱光照射貯蔵のための PPFD の設定には厄介な問題が含まれています。まず、貯蔵対象植物の貯蔵中の

CO_2 交換速度を 0 とする PPFD、すなわち光補償点を貯蔵開始前に探し出す必要があります。もし、闇雲に設定すれば、高すぎた場合には乾物重が増加し、低すぎた場合には減少することになり、いずれの場合もその程度が大きければ著しい品質低下をもたらします。そして、実際の貯蔵温度で実際の貯蔵対象植物を用いて数レベルの光強度下で CO_2 交換速度を測定するという時間と労力だけでなくそれなりの実験設備をも必要とする作業となります。しかも、そうして探し出した PPFD に設定しても、前述の通り、貯蔵期間を通じてその植物の CO_2 交換速度を 0 に維持できる訳ではないので、貯蔵期間を通して考えると炭素収支を 0 にはできない、つまり弱光照射低温貯蔵の第一の効果を十分に得ることができない、ということになります。そこで、貯蔵対象植物の CO_2 交換速度をつねに 0 とするよう照射光の PPFD を自動制御するシステムの開発を行いました（Fujiwara et al. (2004) 投稿中）。本システムは、貯蔵庫への流入空気と流出空気中の CO_2 濃度差がつねに 0 になるように、照射光 PPFD を自動制御することで、貯蔵庫内の緑色植物の CO_2 交換速度を 0 に維持するというものです。トマト接ぎ木セル成型苗の 7 週間貯蔵運転試験の結果、PI 制御で十分な安定性、速応性が得られることが示され、本システムが発光ダイオード弱光照射低温貯蔵実用化システムのプロトタイプとして提案しうるものであることを確認しました。

今後の展開

今後は、重大に問題となっている貯蔵病害を防除するための研究に着手し、その研究成果と本研究成果を統合することにより、緑色植物の高品質長期貯蔵法の提案へと発展させたいと考えております。それには、電解水に関する最近の研究（Fujiwara and Fujii (2002) *Ozone Sci. Eng.* 24(6); Fujiwara and Fujii (2004) *Ozone Sci. Eng.* 26(5)) を足掛かりに展開する予定です。また、光源としては注入型 EL (electroluminescence) である LED だけでなく、真性 EL である薄膜型 EL の利用も検討したいと考えております。

謝 辞

本研究に着手致しました千葉大学園芸学部園芸環境工学（現 環境調節工学）研究室では、教授に古在豊樹先生、助教授に北宅善昭先生（現 大阪府立大学）がられました。古在先生には冒頭に述べましたように本

研究の端緒を開きご指導を賜りますとともに、本賞へのご推薦の労を執って下さいました。この度の受賞は正しく古在先生のご指導があってこそと存じます。心より厚くお礼申し上げます。北宅先生には、ウィットに富んだお言葉・会話の中で度々有益なあるいは核心的なご教示を頂戴致しました。記してお礼申し上げます。また、当時博士課程在籍の久保田智恵利博士（前出）との意見・情報交換は研究推進のための刺激となりました。修士課程在籍の渋谷俊夫博士（現 大阪府立大学助手）の実用的観点からの率直なご指摘は、研究の方向性の適否を省みる機会を与えるものとなりました。記して両博士に謝意を表します。

受賞対象研究の中心部分は、同学部植物生産工学研究室への異動後に行われたものであり、弱光照射にCAを加えることの発想・実行も当研究室への異動があって初めて可能であったと思っております。当時の植物生産工学研究室では、教授に飯本光雄先生がおられ、私の着任の2年後に谷野章先生（現 島根大学助教授）が助手として赴任されました。飯本先生には大所高所よりご指導戴きますとともに、まさに自由な研究環境を与えて戴きました。本研究を現在まで継続し、この度の受賞対象となる業績まで積み上げることができましたのも飯本先生のお陰であります。心より厚くお礼申し上げます。谷野先生には、ご専門である電気電子計測の関連で有益なご指摘を戴きました。記してお礼申し上げます。

植物生産工学研究室で行われました研究の遂行には、学部3年から修士課程修了まで卒論・修論テーマとして取り組んでくれました高久晃一氏（現 本田技研工業株式会社）ならびに磯部佐保子氏が大きく貢献しております。両氏が収穫後チャービルおよびトマト接ぎ木セル成型苗の貯蔵を卒論・修論テーマとして選択していなければ、本研究をここまで展開・継続してこれたかは甚だ疑問であります。両氏に深く感謝の意を表します。UC Davisで開催された国際シンポジウムCA'97への出席・研究発表は、Adel Kader教授（University of California, USA）およびErrol Hewett教授（Massey University, New Zealand）から貯蔵研究の展開について有益な示唆を戴く貴重な機会となりました。シンポジウムへの出席機会を与えて下さいますとともに、切り花貯蔵・強制開花（Fujiwara et al. (2004) *J. Hortic. Sci. Biotech.* 79(1)）等の関連研究に対して多大なご支援を賜りました株式会社アライド社長（当時）の鈴木唯史氏（故人）に深甚の謝意を表します。

最近の成果は、東京大学大学院農学生命科学研究科生物環境工学研究室への異動後に行われた研究の成果であります。同研究室教授の蔵田憲次先生は、生物環境工学の主要分野ではない貯蔵研究を継続することをご了承下さり、また本研究に対しまして随時的確なご指導・ご教示を賜りました。厚くお礼申し上げます。大橋敬子先生には、貯蔵苗の植物栄養・生理学的側面（Kaneko-Ohashi et al. (2004) *Environ. Control in Biol.* 42(1)）に興味を持って戴き、感謝致しております。また、本研究室で行われました研究の遂行には、学部3年から修士課程修了まで卒論・修論テーマとして取り組んでくれました木村好克氏（現 農林水産省九州農政局）の貢献があります。記して謝意を表します。

主要原著論文（筆頭著者論文のみ抜粋）

- Fujiwara, K., Takaku, K., Iimoto, M. 1997. Low light irradiation using red light emitting diodes and nutrient gel application for low temperature storage of postharvest chervil (*Anthriscus cerefolium* L.). (Japanese text with English abstract and captions) *Environ. Control in Biol.* 35: 135-138.
- Fujiwara, K., Takaku, K., Iimoto, M. 1998. Effects of controlled atmosphere, low light irradiation using red light emitting diodes and nutrient gel application during low temperature storage on the visual quality of postharvest chervil (*Anthriscus cerefolium* L.). (Japanese text with English abstract and captions) *Environ. Control in Biol.* 36: 201-208.
- Fujiwara, K., Takaku, K., Iimoto, M. 1999a. Availabilities of red light-emitting diodes as light source for low light irradiation and mineral nutrient supply using nutrient gel during low temperature storage of postharvest chervil (*Anthriscus cerefolium* L.). (Japanese text with English abstract and captions) *Environ. Control in Biol.* 37: 137-141.
- Fujiwara, K., Isobe, S., Iimoto, M. 1999b. Effects of controlled atmosphere and low light irradiation using red light emitting diodes during low temperature storage on the visual quality of grafted tomato plug seedlings. (Japanese text with English abstract and captions) *Environ. Control in Biol.* 37: 185-190.
- Fujiwara, K., Takaku, K., Iimoto, M. 1999c. Optimum conditions of low light irradiation-CA storage for preservation of the visual quality of postharvest chervil (*Anthriscus cerefolium* L.). (Japanese text with English abstract and captions) *Environ. Control in Biol.* 37: 203-210.
- Fujiwara, K., Isobe, S., Iimoto, M. 2001a. Optimum conditions of low light irradiation-CA storage for quality preservation of grafted tomato plug seedlings. (Japanese text with English abstract and captions) *Environ. Control in Biol.* 39: 111-120.
- Fujiwara, K., Isobe, S., Iimoto, M. 2001b. Maximum storage duration for grafted tomato plug seedlings under red-LED low light irradiation-CA conditions. (Japanese text with English abstract and captions) *Environ. Control in Biol.* 39: 297-304.
- Fujiwara, K., Kimura, Y., Kurata, K. 2003. Effect on the quality of grafted tomato plug seedlings of blue-light PPFD percentage during red and blue LEDs low light irradiation storage. (Japanese text with English abstract and captions) *Environ. Control in Biol.* 41: 361-368.