

農業・環境分野における 先端的画像情報利用

—フライトイメージングからリモートセンシングまで—

東京大学 大学院
農学生命科学研究科 教授 大政 謙次 編著

社団法人 農業電化協会

第2章



施設園芸・植物工場における イメージセンシング

1. はじめに

施設園芸や植物工場における作物栽培は、人間が多くの環境要因をコントロールできるといって露地栽培とは大きく異なっている。この利点を生かし、植物の状態に応じて適切に環境を制御して、高収量かつ高品質・高付加価値の農産物生産を実現するためには、第一に、植物の状態を正確に把握するための植物診断法を確立する必要がある。SPA-I (Speaking Plant Approach with Imaging) とは、モノ言わぬ植物の生体情報をイメージングセンサーを用いて取得し、それに基づいて植物を診断し^{1,2)} 環境条件を植物の生育にとってより良い状態に制御する技術のことである。本章では、今後の施設園芸および植物工場において利用が期待されるイメージングを利用した植物診断技術について紹介する。

2. デジタルカラー画像計測による水ストレス診断

—高糖度トマト生産のための自動給液システムの開発—

デジタルカメラの普及によりデジタルカラー画像の利用は一般家庭にも浸透している。農業生産の分野も例外ではなく、その利用は盛んであり、栽培現場の遠隔モニタリングや生育状態の記録、病害診断といった様々な場面で利用されている。本節では、デジタルカラー画像を用いてトマト個体の“しおれ（水ストレス）”を数値評価する技術と、それをベースに製作した高糖度トマト生産のための自動給液システムの概要について述べる。

2.1 高糖度トマト生産と低水分管理

高糖度トマトとは、一般に糖度8Brix%以上の甘みの強いトマトのことをさし、水遣り（給液）を制限した低水分管理によって、植物体に適度な水ストレスをかけなが

ら栽培することにより生産される高付加価値農産物である。ただし、この低水分管理は容易ではなく、高糖度トマトを生産することができる少数の熟練農家は、植物体の“しおれ”の程度を目視で診断し、これまでの経験と勘に基づいて適切な給液のタイミングを決めている。このような給液制御を自動化するためには、まず、植物体の水ストレスの程度を数値評価する技術の確立が求められる。そこで我々のグループでは、トマト個体の投影面積を連続的にモニタリングして“しおれ”を数値評価する技術の開発に取り組んだ。

2.2 デジタルカラー画像を用いたトマト個体の“しおれ”の数値評価

デジタルカメラを用いて撮影したトマト個体のデジタルカラー画像に判別分析法を適用して植物体領域のみを抽出し、そのピクセル数をカウントすることにより投影面積の算出が可能である。図1は、給液を停止した（水切処理）後、トマト個体がしおれてゆく様子を真横（撮影角度0°）からと直上部（撮影角度90°）から撮影したデジタルカラー画像である。なお、図中の“[数字]”は水切処理直前（I）の投影面積を100%としたときの各時点の投影面積の割合 [%]（以降、投影面積比）である。

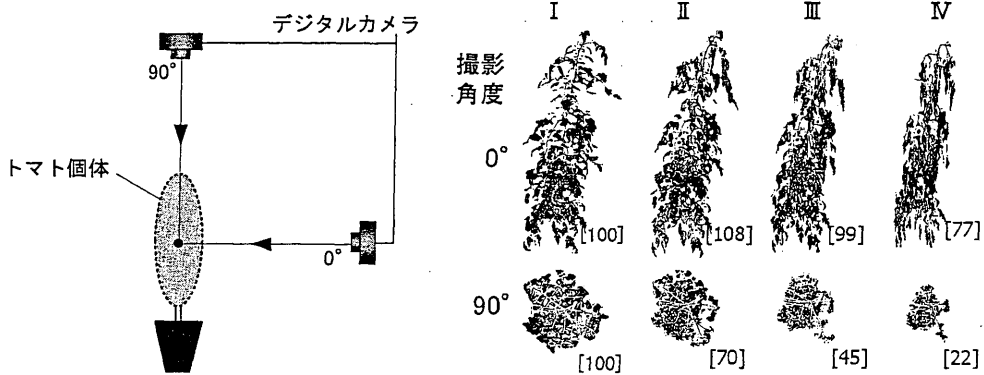


図1 トマト個体のしおれと投影面積比（[%]）の変化³⁾

しおれが進行するとともに投影面積比が低下していることがわかる。ただし、目視でわずかなしおれを確認できる程度である初期段階のしおれ期（図1のI～II）では、撮影角度90°では投影面積比の顕著な低下が確認できるものの、撮影角度0°では投影面積比の低下は認められない。さらに水ストレスが進行し、目視でもしおれを明確に確認できるようになると（図1のIII～IV）、撮影角度0°でも投影

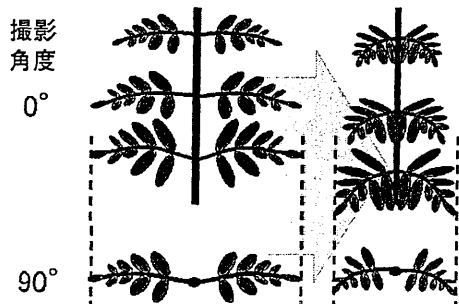


図2 トマト個体の初期段階のしおれの模式図

面積比が低下し始める。これは、しおれの初期段階では葉全体が下方に垂れ下がる現象が顕著であるため（図2）、撮影角度90°ではこの形状変化を敏感に捕らえたものと考えられる⁴⁾。

2.3 高糖度トマト生産のための自動給液制御システム

デジタルカラー画像を用いた水ストレス診断技術をベースに、高糖度トマト生産のための自動給液システムを開発した。図3-Aは、温室内のトマト群落とその直上部（群落上1.4m）に設置したデジタルカメラの様子である。デジタルカメラには市販の有効画素数500万画素のものを用いた。また、本システムでは、撮影したデジタルカラー画像からの植物体領域の抽出、投影面積および投影面積比の算出、給液のタイミング判定、給液制御をすべて自動化してある。なお、投影面積比算出には、給液と連動した独自のアルゴリズムを採用し、“投影面積比=直前の給液以降の投影面積の最大値を100%としたときの相対値”と定義した。このアルゴリズムにより、葉かきなどの人為的な栽培管理作業が投影面積算出に及ぼす影響を速やかに除去することができる。

図3-Bは、本システムを用いた約1週間の給液制御の様子であり、トマト群落の投影面積比の経時変化と特徴的な時点における投影画像を示してある。この処理区では、投影面積比が60%を下回ったときに給液を行うように設定した（60%区）。水ストレスの進行にともなって投影面積比が低下し、1/18の16時に投影面積比が60%を下回ったため給液が行われ、その後、しおれが解消

表1 トマト果実の糖度・重量・果皮硬度の違い (n ≥ 22)

	糖度 (Brix%)	重量 (g)	果皮硬度 (kg)
対照区	5.5 ± 0.7b	121.6 ± 21.2a	1.39 ± 0.30b
60%区	8.6 ± 0.8a	54.6 ± 21.5b	2.41 ± 0.53a

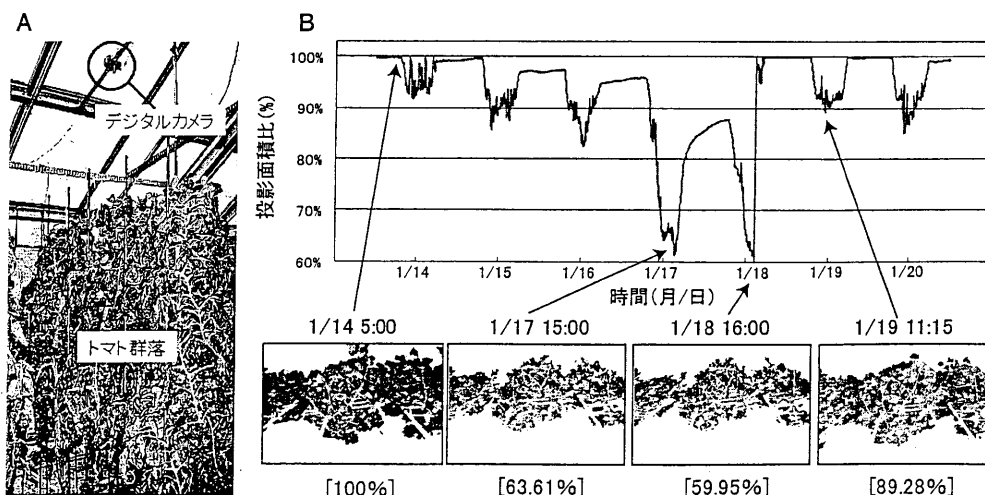


図3 トマト群落を対象とした投影面積比に基づいた給液制御の様子⁵⁾

されていることがわかる。

このような給液制御を約2カ月間継続し、収穫されたトマト果実の糖度、重量、果皮の硬度を調べた(表1)。対照区(毎日2回給液を行う区)と比較して60%区では、果実の小型化と果皮の硬化が認められたものの、糖度は有意に大となっており、投影面積変化に基づいた給液制御システムを用いることで高糖度トマトの生産が可能であることが示された。

2.4 本節のまとめ

デジタルカメラにより撮影されたデジタルカラー画像を用いた給液制御システムは、非常に安価に構築できるシステムであるため、今後、様々な植物への給液システムなどへの応用も期待される。なお、現在我々のグループでは、本システムをさらに発展させた高糖度トマト量産のための給液制御システムの開発に取り組んでいる。

3. 熱赤外画像計測による蒸散機能診断

熱赤外画像計測装置は、対象物の表面温度画像を非接触で計測できる装置である。そのため、同じ非接触温度測定法であっても、一定領域の平均温度を測定する放射温度計などを用いた温度測定では見落としてしまうような局所的な温度変化の検知が可能である。本節では、熱赤外画像計測法を用いた植物の蒸散機能診断について述べる。

3.1 熱赤外画像計測による蒸散機能診断の原理

(1) 植物葉における蒸散

植物葉は、光エネルギーを利用して二酸化炭素から糖を合成するいわゆる光合成を行うための器官である。光合成の材料となる二酸化炭素は、葉面に分布する気孔(図4-A)を開くことにより周辺大気から葉内に取り込まれるが、このとき、葉内から水蒸気が大

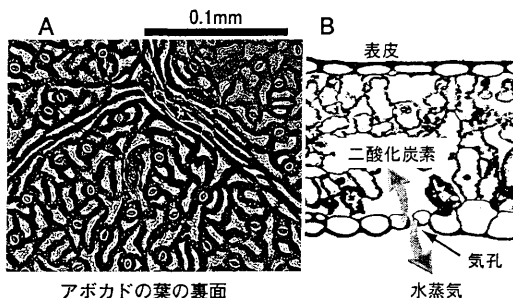


図4 気孔の顕微鏡画像と葉の断面の模式図

気中へと放出される(図4-B)。この現象は蒸散とよばれ、健康な葉であれば蒸散が活発な葉ほど光合成も活発であると考えてよい。

(2) 葉面におけるエネルギーバランス—蒸散と葉温の関係—

葉面の温度(葉温)は、葉に入射するエネルギーと葉から外界へと放出されるエネルギーのバランスによって決まる(図5)。太陽光条件下では、葉に入射するエネルギーは主に太陽からの放射(日射)(主に短波放射： $\lambda < 3\mu\text{m}$)であるが、施設園芸および植物工場においては施設資材からの長波放射($\lambda > 3\mu\text{m}$)も入射する。他方、葉か

ら外界へと放出されるエネルギーは、葉温に対応した長波放射、周辺大気との間の顕熱伝達（葉温・気温・気流の関数）、さらに、蒸散による潜熱伝達で説明される。したがって、環境条件が一定の場合、葉温は蒸散速度（単位時間・単位葉面積あたりの蒸散量 $[gm^{-2}s^{-1}]$ ）によって大きく変化することになる。具体的にいえ

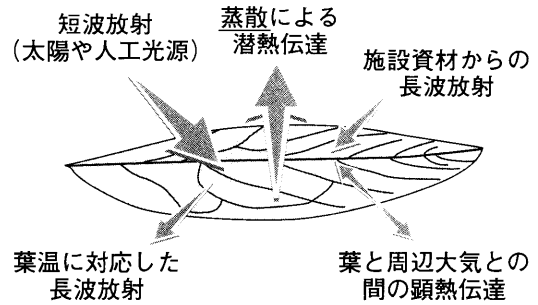


図5 葉面におけるエネルギーバランスの模式図

ば、蒸散速度が大きいと、葉からの潜熱伝達量が大きくなるため葉温は低くなり、逆に、蒸散速度が小さいと葉温は高くなる。つまり、葉温は蒸散を活発に行っているかどうか（光合成を活発に行っているかどうか）の指標となる。

3.2 葉面における蒸散機能の不均一分布の解析

図6は、インゲンマメの葉面にアブシジン酸（ABA：気孔を閉じさせる働きを持つ植物ホルモン）溶液を塗布したときの葉温の変化を表している。ABA塗布処理前の葉温はほぼ均一であり（葉脈には気孔が分布していないため温度が高い）、葉面全体の平均温度は25.9℃であったが、

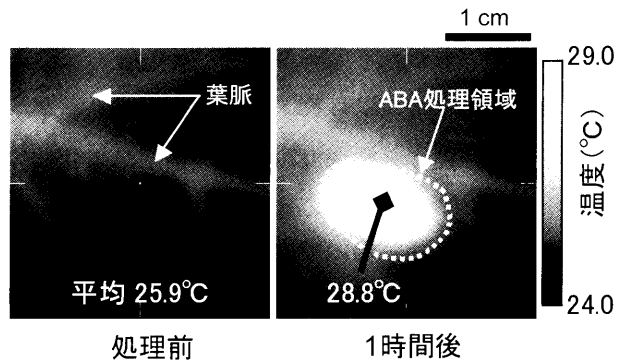


図6 ABA塗布処理による葉温変化

ABA塗布処理後1時間経過時には、ABA塗布領域の中心部の葉温は28.8℃まで上昇していた。これは、ABA塗布処理により気孔が閉鎖し、蒸散が妨げられたことにより潜熱伝達量が減少したため葉温が上昇したものと解釈される⁶⁾。

3.3 トマト個体の蒸散機能診断

図7は、熱赤外画像計測による温室内のトマト個体を対象とした蒸散機能診断の様子である。ここでは、水切処理前後のトマト個体の温度変化例を示している。測定日時によって環境条件が異なるため、十分に給液してあるトマト個体を同一画像内におき、これを対照区として比較することでストレス状態を評価する。水切処理前には2個体間に大きな違いはみられないが、水切処理後には水切区の葉温が著しく上昇していることがわかる。これは、水切処理により水ストレス状態となった水切区の個体で

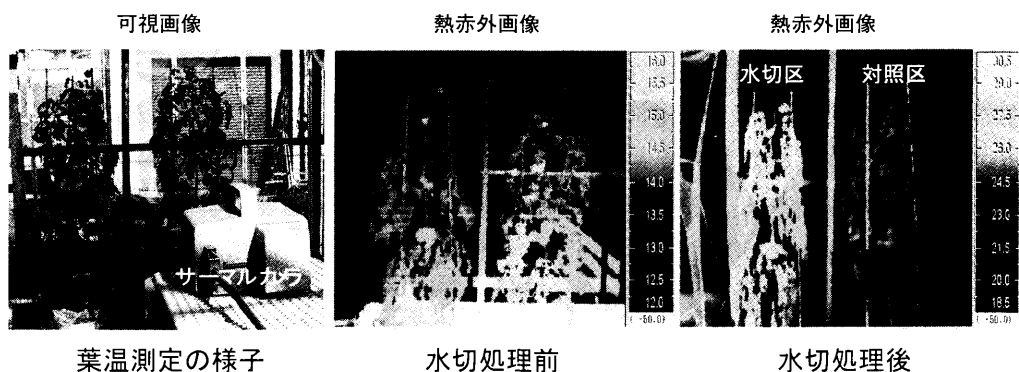


図7 水切処理によるトマト個体の葉温変化

は、気孔が閉鎖して蒸散機能が低下していることを示している。なお、同時に測定した光合成速度の測定結果から、水切区では光合成速度も著しく低下していることがわかっている。これらの測定結果は、熱赤外画像計測装置を用いて葉温をモニタリングすることにより、植物体全体の蒸散機能や光合成機能の診断が可能であることを示すものである。

3.4 本節のまとめ

本節では、熱赤外画像計測による個葉および個体レベルにおける蒸散機能診断について紹介したが、同様の方法を用いて群落を対象とした蒸散機能診断も可能である。特に、施設や植物工場内では、熱環境が安定しているため、葉温画像を定期的に測定することにより蒸散機能や光合成機能のモニタリングが可能であると考えられる。

4. PRI 画像計測による光合成機能診断

PRI (Photochemical / Physiological Reflectance Index) 画像計測は、光学フィルターを用いて特定の波長（色）の光の反射画像を計測する分光反射画像計測法の一種である。PRIは、波長531nmの反射率（R531）と570nmの反射率（R570）を用いて次式で求められる⁷⁾。

$$PRI = \frac{R531 - R570}{R531 + R570}$$

4.1 PRI による光合成機能診断の原理

光合成の反応は、明反応（チラコイドでの反応）と暗反応（ストロマでの反応）とに大別される。明反応では、葉緑体のチラコイド膜において光合成色素により集められた光エネルギーを用いて化学エネルギー（NADPHやATP）が生成され、暗反応ではその化学エネルギーを使って二酸化炭素から糖が合成される（図8）。

図9は、明反応の初期反応（光化学系IIにおける反応）について詳しくみたものである。光合成反応がスムーズに進行している場合には、周辺集光装置に吸収された光エネルギーは中心集光装置を介して

“反応中心”と呼ばれる部位に集められ、そこで水が分解されて水素イオンと電子が取り出され、これらを用

いて化学エネルギーが生成される。なお、周辺集光装置に吸収された光エネルギーのうちで光合成反応に用いられなかったものは熱として捨てられている⁸⁾。

水ストレスや低温ストレスなどにより暗反応の反応速度が低下し、暗反応で消費される化学エネルギー量が減少した場合、光合成反応系にとって光エネルギーが過剰な状態となる。過剰な光エネルギーは活性酸素種の生成を誘導するなど植物にとって有害であるため、光エネルギー過剰状態を感知した植物は、周辺集光装置内の色素（キサントフィル類）の性質を速やかに変化させ、数十秒間のうちに反応中心へのエネルギー供給を停止し、余分な光エネルギーを熱として積極的に捨てるようになる。PRIは、この周辺集光装置内の色素の性質変化に対応して変化し、熱放散量が増えるとPRI値が低下すると考えられており⁷⁾、光合成反応系の新たな診断指標として有望視されている。

4.2 PRI と光合成速度の関係

図10は、植物本体についた状態のトマト葉の反射スペクトル（葉柄切断前）と、この葉を葉柄から切断して1時間経過した後（葉柄切断後1時間経過時）の同一箇所の反射スペクトルである。葉柄切断後1時間でスペクトル形状が大きく変化しているこ

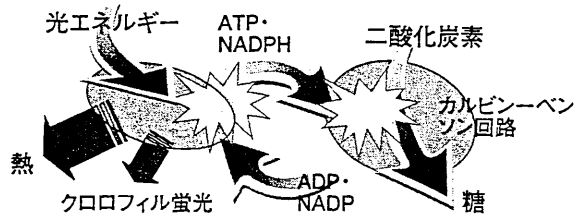


図8 光合成反応の概略

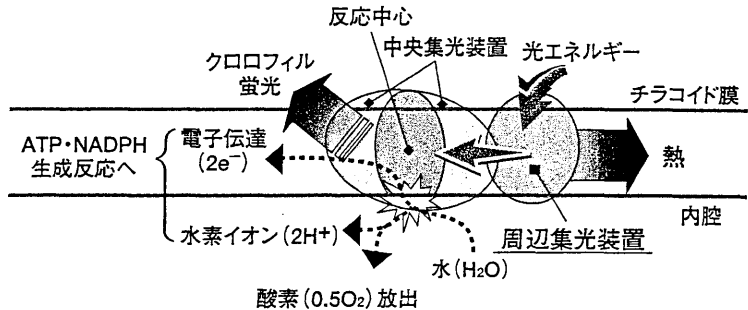


図9 光化学系IIにおける反応と熱放散

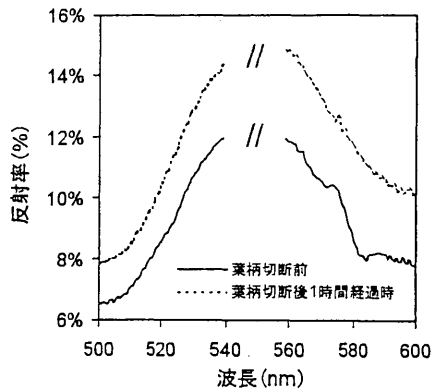


図10 水ストレスによる反射スペクトルの変化

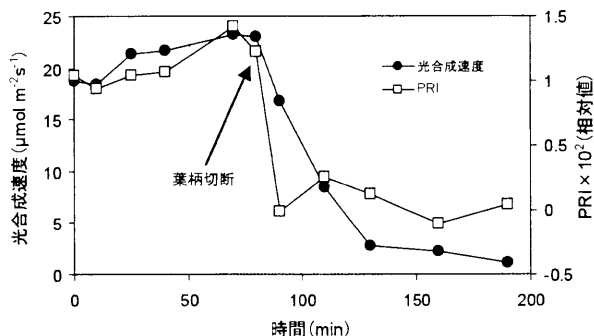


図11 葉柄切断前後の光合成速度と PRI の経時変化

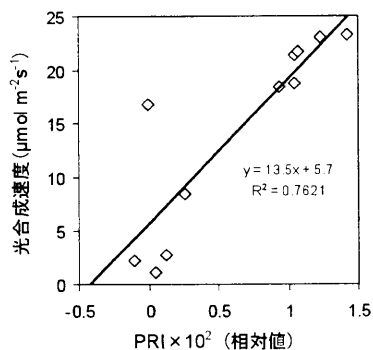


図12 PRI と光合成速度の関係

とがわかる。図11は、葉柄切断前後200分間の光合成速度と PRI の経時変化である。葉柄を切断すると、葉に水ストレスがかかり気孔が閉じて光合成速度が急激に低下するが、これにともなって PRI も低下していることがわかる。なお、この間の PRI と光合成速度との間には高い正の相関が認められる (図12)。これらの結果は、PRI 計測による光合成機能診断が可能であることを示すものである⁹⁾。

4.3 PRI 画像計測によるトマト群落のストレス診断

CCD カメラの前部に531nm、570nm に透過ピークを持つ2種類のバンドパスフィルターを交互におくことで PRI 画像計測が可能となる。図13は、温室内で栽培されているトマト群落のデジタルカラー画像、531nm 分光反射画像、570nm 分光反射画像である。画像中の左側のトマト個体群 (対照区) には十分に給液が行われており、右側のトマト個体群 (水切区) は約2日間給液を停止した状態にある。また、両処理区に挟まれた通路の中央部に反射率算出用の標準白色板をおいた。対照区および水切区の PRI の平均値はそれぞれ -0.0025 および -0.0521 であり、水切区の PRI が対照区よりも低くなっていた。

この結果は、PRI 画像計測を用いた温室内で栽培されている植物群落を対象とした光合成機能診断が可能であることを示している。

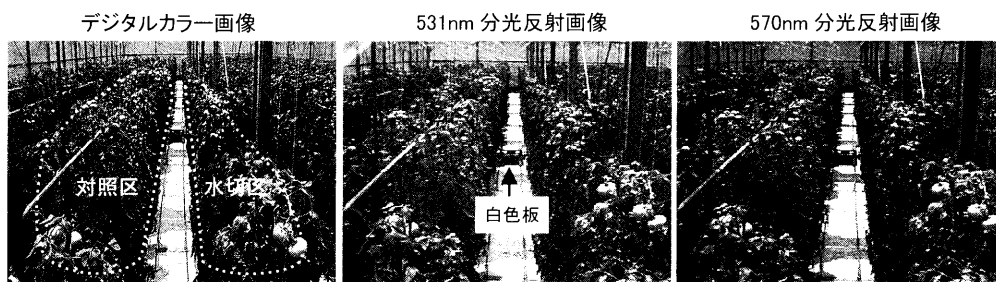


図13 温室内のトマト群落の PRI 画像計測

4.4 本節のまとめ

PRIは、ごく最近注目され始めたばかりの指標であり¹⁰⁾、生理学的な意義については未解明の部分もあるため、今後さらなる検討が必要である。また、PRIはあくまでも“光合成反応において光エネルギーが過剰な状態”になって初めて変化するパラメータであるため、水ストレスにより植物体がひどくしおれていても、光強度が弱ければPRIは変化しないと考えられる。そのため、太陽光利用型の温室においてPRI画像計測を用いた植物診断を行おうとする場合、同一画面内に常に対照区を入れて比較に用いるか、画像計測時の光強度（PPF：Photosynthetically active Photon Flux；光合成有効光量子束）を測定しておき、診断の参考として用いる必要がある。一方、完全人工光利用型植物工場では、植物に照射される光の強度やスペクトルがほぼ一定であるため、連続的にPRI画像を計測することで光合成機能のモニタリングが可能であると考えられる。

5. クロロフィル蛍光画像計測による光合成機能診断

植物は光合成色素で吸収した光エネルギーを用いて光合成を行うが、吸収したすべての光エネルギーを光合成に利用できるわけではない。光合成に使われなかった余剰な光エネルギーは熱として捨てられる（熱放散）か、吸収した光よりも波長の長い光（クロロフィル蛍光）として捨てられる（再発光される）ことになる（図14、図9も参照のこと）。クロロフィル蛍光は、クロロフィルaから発せられるピーク波長683nm以上の赤色光であるため、この波長域を選択的に透過させる光学フィルターを使用することでクロロフィル蛍光の測定が可能となる。クロロフィル蛍光の画像計測は、Omasa et al. (1987)¹¹⁾によって初めて行われ、以降、植物生理学や植物生態学の分野で盛んに利用されるようになった^{1, 2)}。最近では、数社からクロロフィル蛍光画像計測装置が販売されており、光合成反応系に変異を持つ突然変異株のスクリーニングなどに利用されている。

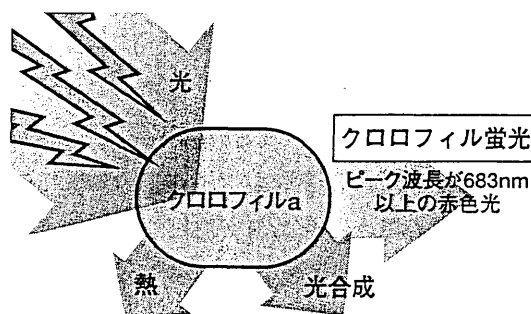


図14 クロロフィル蛍光発光の概念図

5.1 飽和パルス法による最大量子収率 (F_v/F_m) の測定—光合成活性の非接触評価—

吸収された光エネルギーのうちでクロロフィル蛍光として再発光されるものの割合をクロロフィル蛍光収率とよぶ。クロロフィル蛍光収率は光合成反応の活性化状態によって大きく変化するため、これを正確に計測することにより光合成反応系について

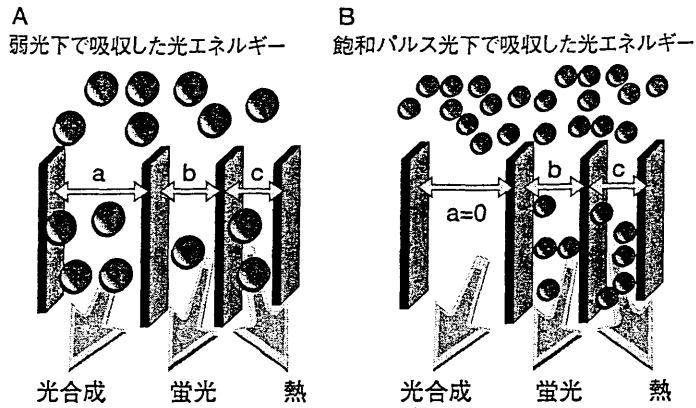


図15 吸収した光エネルギーの分配の様子

の正確な情報を非破壊かつ非接触で取得することができる。飽和パルス法では、パルス化した強光（約1秒間のPPF $5000\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 程度の光）を照射し、照射直前と照射中のクロロフィル蛍光収率を測定することにより光合成活性を定量的に評価する。

光強度が極めて弱い条件下では、植物葉に吸収された光エネルギーは最も高い効率で光合成に利用される。このときのクロロフィル蛍光収率は最小蛍光収率 (F_0) と呼ばれ、図15のエネルギー分配比を用いて $F_0 = b/(a+b+c)$ で表される (図15-A)。一方、パルス化した強光を照射すると、光合成反応系内でエネルギーが瞬間的に飽和した状態となり、一時的に光エネルギーを受け入れなくなる (図15-Bの $a=0$)。この間に吸収された光エネルギーは蛍光もしくは熱として捨てられることとなり、このとき蛍光収率は最大値をとる。この蛍光収率を最大蛍光収率 (F_m) とよび、 $F_m = b/(b+c)$ で表される (図15-B)。このようにして測定された F_0 と F_m を用いて、次式により最大量子収率 (F_v/F_m : 吸収した光エネルギーのうちで光合成に使うことができるものの割合の最大値) を算出することができる。 F_v/F_m は、光合成反応系の能力を表す指標として広く用いられている¹²⁾。

$$F_v/F_m = \frac{F_m - F_0}{F_m} = \frac{\frac{b}{b+c} - \frac{b}{a+b+c}}{\frac{b}{b+c}} = 1 - \frac{b+c}{a+b+c} = \frac{a}{a+b+c}$$

5.2 クロロフィル蛍光画像計測によるトマト苗の強光ストレス診断

図16は、市販されているクロロフィル蛍光画像計測装置を用いてトマト苗の光合成機能の画像診断を行っている様子である。黒色チャンバ内の上部には橙色LEDパネルが多数配置されており、トマト苗程度の大きさであれば植物体全体を対象とした F_v/F_m 画像計測が可能である。

図17は、強光処理（生育条件の光強度の約2倍の強度の光を10分間照射）によるトマト苗の F_v/F_m の変化の様子である。強光処理前は0.8以上であった F_v/F_m が、強光処理後には0.5以下にまで低下していることがわかる。これは、生育条件の光強度を大きく上回る強光が照射されたことにより、光合成反応系（特に明

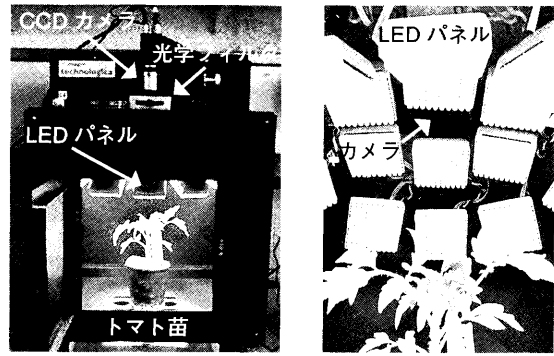


図16 トマト苗のクロロフィル蛍光画像計測の様子

反応)がダメージを受け、光合成機能が著しく低下したことを意味している。さらに、下方の葉の F_v/F_m の低下が顕著であることから、下方の葉ほど強光によるダメージを受けやすいこともわかる。

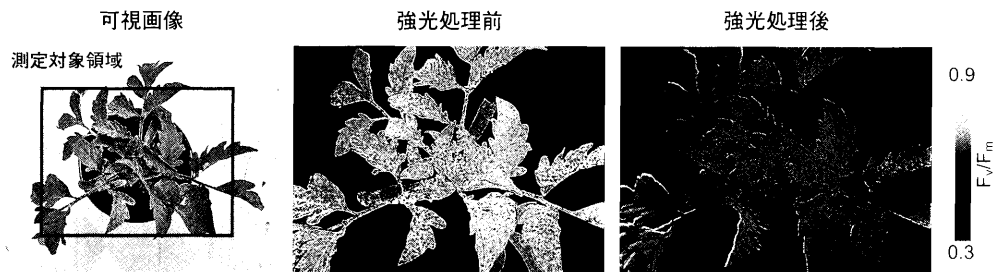


図17 強光ストレスによるトマト苗の F_v/F_m の変化

5.3 本節のまとめ

本節において、クロロフィル蛍光画像計測法を用いて診断した光合成機能障害は、強光処理による光ストレス以外でも、低温・高温ストレスや低 CO_2 ストレスといった様々なストレスにより引き起こされる。今後、計測機器の廉化が進むことで、植物工場や育苗施設内で栽培されている植物の健康状態の診断やストレス状態の把握、さらには病害の早期検知等の目的での利用が期待される。

6. おわりに

現在、わが国の施設園芸および植物工場分野、特に作物栽培の現場においては、イメージング技術が十分に活用されているとは言い難い。その大きな理由として、イメージング装置が農家にとって非常に高価であるという点が挙げられる。しかし、本章で紹介したイメージング技術については、最も高価な熱画像計測装置であっても300万円以下で購入することができる。最近、わが国でも大規模な温室や施設を有した資金力のある農業法人も出てきており、このような経営・栽培形態の農業において

は、広大な栽培エリアの植物の状態を一度に診断することができる植物画像診断技術が積極的に導入されていくものと考えられる。

〈引用文献〉

- 1) 大政謙次 (1988) 画像計測とリモートセンシング. IN 大政謙次ら (編), 植物の計測と診断, 朝倉書店, 東京, 155-192.
- 2) 大政謙次 (2002) プレシジョン・アグリカルチャーのための画像センシング, 農業情報研究, 11, 213-230.
- 3) 仁科弘重・高山弘太郎・山本展寛・久枝和昇・羽藤堅治 (2005) デジタルカラー画像から求めた投影面積変化によるトマトの水ストレス状態の診断. 農業環境工学関連7学会2005年合同大会 講演要旨集, 390.
- 4) 藤野素子・遠藤良輔・大政謙次 (2002) キュウリ葉における水ストレスの非破壊計測に関する研究—分光反射率, 気孔コンダクタンス, PSII Yield および形状の変化の比較—. 農業情報研究, 11, 161-170.
- 5) 高山弘太郎・村川昇万・仁科弘重 (2006) 高糖度トマト生産のための投影面積変化に基づいた給液制御システム, 農業環境工学関連学会2006年合同大会 講演要旨集 (CD-ROM), O021225.pdf.
- 6) 大政謙次・高山弘太郎 (2005a) 植物のもつ環境浄化機能. IN 長野敏英・大政謙次 (編), 新 農業気象・環境学, 朝倉書店, 192-194.
- 7) Gamon, J.A., Serrano, L. and Surfus, J.S. (1997) The photochemical reflectance index: An optical indicator of photosynthetic radiation use efficiency across species, functional types, and nutrient levels. *Oecologia*, 112, 492-501.
- 8) 高宮健一郎ら (編) (2003) 光合成事典, 学会出版センター, 430pp.
- 9) Takayama, K., Sakai, Y., Nishina, H. and Omasa, K. (2006) Simultaneous measurement of PRI, chlorophyll fluorescence parameters and gas exchange of tomato plant leaf. *ComBio 2006, Abstracts*, 208.
- 10) 松村香・荊木康臣 (2005) 培養小植物体の Photochemical Reflectance Index (PRI) 画像計測. 農業環境工学関連7学会2005年合同大会 講演要旨集, 330.
- 11) Omasa, K., Shimazaki, K., Aige, I., Larcher, W. and Onoe, M. (1987) Image analysis of chlorophyll fluorescence transients for diagnosing the photosynthetic system of attached leaves. *Plant Physiology*, 84, 748-752.
- 12) 大政謙次・高山弘太郎 (2005b) 植物反応の画像計測. IN 長野敏英・大政謙次 (編), 新 農業気象・環境学, 朝倉書店, 141-146.