

知能的太陽光植物工場の新展開〔11〕  
 —アグリバイオイメージングの新たな展開—

大政 謙次\*



図1 P 1102

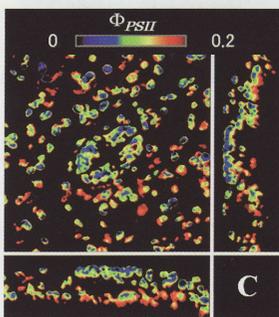


図3C P 1104

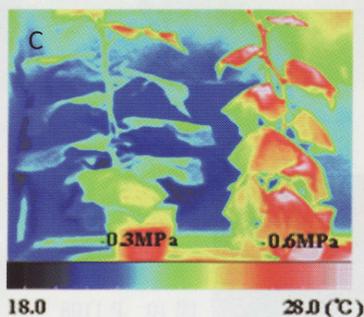


図5C P 1105

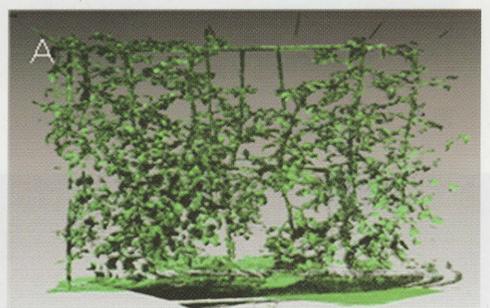


図8 P 1107

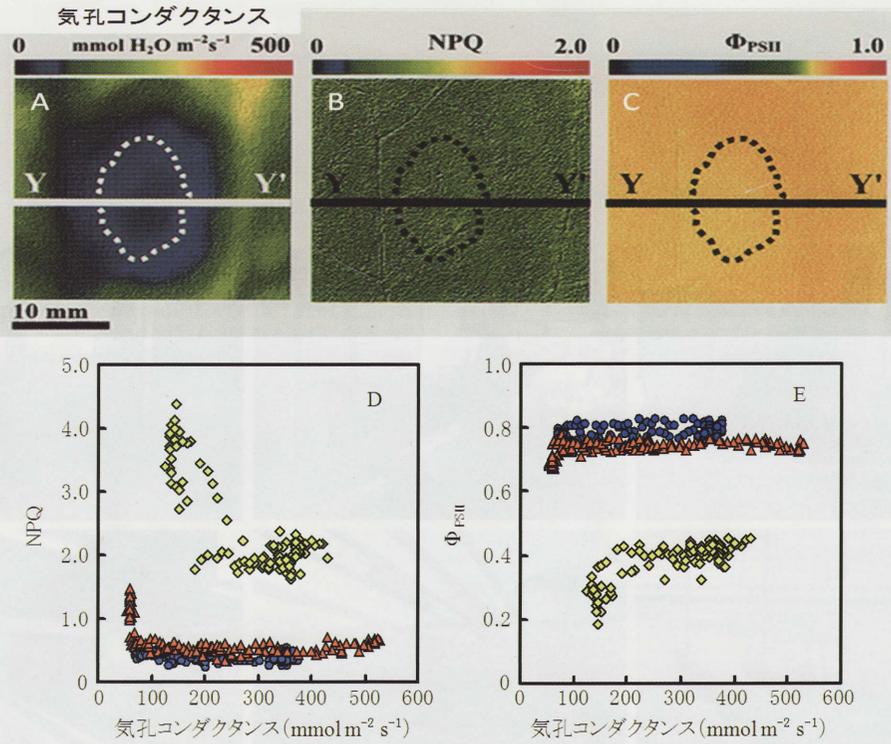


図6 P 1106

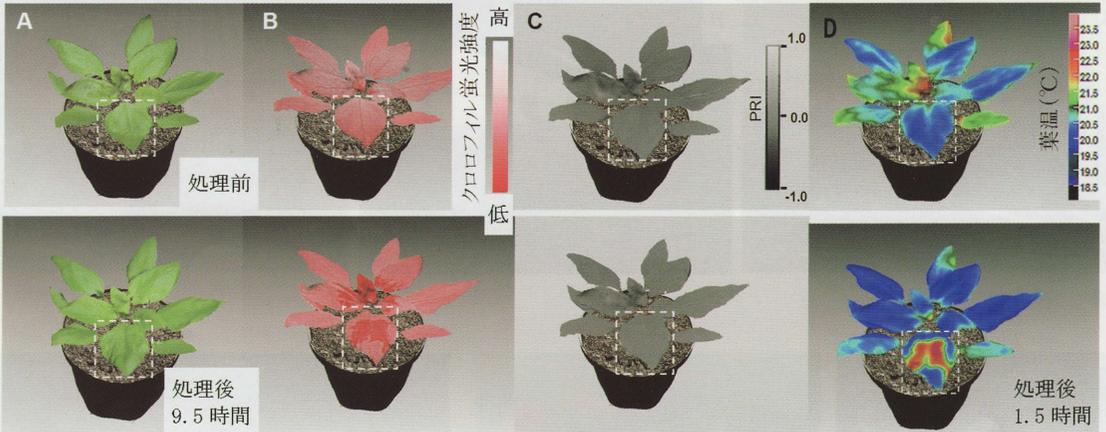


図9 P 1108



図10 P 1108

## 知能的太陽光植物工場の新展開〔11〕 —アグリバイオイメージングの新たな展開—

大政 謙次\*

〔キーワード〕: 植物, 分光反射, 葉温, 蛍光,  
3次元, イメージング

### 1. はじめに

生物科学や農学の分野における近年のイメージング技術の発達には目覚ましいものがある(例えば, Hills 1998, Häder 2000, Govindjee and Nedbal 2000, Omasa ら 2002, 大政 2002, 2007, Jones and Morison 2007, Furbank 2009, Sun 2010). アグリバイオイメージングは, これらの分野を対象としたバイオイメージングや機能リモートセンシング等のイメージング技術を総称する造語であり, 細胞や組織, 個体等を対象とした生体内での機能や物質の移動等のイメージング技術に加えて, 食料生産や環境, 生態系, そして, 食の安全・機能性等を対象とした応用分野のイメージング技術を含む。

植物工場に関連したアグリバイオイメージング技術の発展は, ファイトトロニクスに代表される植物環境実験施設(ファイトトロン)での植物生体反応のセンシング及び解析のための研究にその源流をみることができる。この分野の研究は, 1970年代の半ば頃から始まり, コンピュータとイメージング技術の発達とともに発展してきた(例えば, Matsui and Eguchi 1978, 橋本ら 1979, 大政・相賀 1981, Omasa and Aiga 1987, 大政ら 1988, 1994, Hashimoto ら 1990, Omasa 1990). 1980年代の初めには, 現在の植物工場研究で提案されているような植物の環境応答を解析し, その生育診断を行うシステムの原型ができあがっていた。この分野の研究をリードしてきたのは我々日本の研究者であることが世界的にも知られており, 1985年に東京で開かれた”Instrumentation and Physiological Ecology”のシンポジウムを経て(Hashimoto ら 1990), デューク大学のファイトトロンやバイオスフェア2等でも研究が行

われ, 現在, 遺伝子実験施設と融合した新しい分野である Plant Phenomics の研究へと発展してきている(Omasa ら 2002, Furbank 2009). この研究分野では, その社会への出口として, 食料生産や地球観測, 宇宙実験に関連した研究も行われており, 採算を度外視した科学技術研究としてみれば, 植物工場の最先端イメージング研究分野ともいえる。

一方, グリーンハウス等の実利用システムからみれば, 園芸先進国といわれるオランダでは, 既に, 太陽光利用型完全自動化植物工場に近いものが実稼働しており, 日本にも輸入されている。この分野へのイメージング技術の導入の歴史は, 上述したファイトトロン研究の成果でもあるが, グリーンハウスの複合環境制御や栽培・収穫等の実利用分野での自動化への要求でもあった(例えば, 高倉 1980, Hashimoto 1980, 橋本 1994, 大政 2010). 例えば, Walking Plant System はオランダで開発された自動化のシステムで, 個別識別が可能な IC タグやバーコード付きのパレットに植物を乗せ, ベルトコンベアで移動しながら, イメージング技術により植物生育を診断し, 複合環境制御と組み合わせて, グリーンハウス内での栽培を自動化するシステムである。現在は, ポット花卉の栽培に限定されているが, 太陽光利用型完全自動化植物工場に近いものである。このシステムの中で, 植物の品質や生育を診断するイメージング技術は, 自動化のためのキーテクノロジーといえる。現在, 検知情報は形体や色情報に限定されているが, Plant Phenomics の研究と融合した今後の更なる発展が期待されている。

ここでは, アグリバイオイメージングに関する研究, 特に, 筆者らが行ってきた可視・近赤外分光反射イメージング, 蛍光イメージング, サーマルイメージング, 3次元形状イメージング等を中心に紹介するとともに, 植物工場における利用の可能性に

\*東京大学大学院農学生命科学研究科 (Kenji Omasa)

について考える。

## 2. 可視・近赤外分光反射イメージング

可視から近赤外の波長域 (400~2,500nm) における植物の分光反射、透過、および吸収特性は、表面あるいは内部の構造、含有色素(クロロフィル a, b, カロチノイド, フラボノイド等) や微量成分(窒素, カリウム, リン, マグネシウム, デンプン, 糖, タンパク質, リグニン, セルロース等) の種類および量, 水分状態等の多くの情報を含んでいる(大政 2002)。可視・近赤外分光反射イメージングは、この波長域の分光特性の違いを利用して、背景から植物や植物器官を分離し、生体情報と関連づけた生育診断を行うものであり、マルチバンドカメラやハイパースペクトルカメラ、そして可視域のカラー情報を得るためのカラーカメラ等が利用できる。例えば、植物は、背景となる土壌等に比べて、800~1,200nm の帯域の反射が大きいことから、モノクロ CCD カメラに 800nm 以下をカットする光学フィルターを通して得たスペクトル画像を二値化することにより、背景から容易に植物領域を抽出し、被覆面積や成長の解析に利用される。また、複数の方向から群落を計測することにより、葉面積、葉面積指数、乾物重、草丈等の群落成長の特徴量や形状パラメータ等を推定できる。しかし、背景が複数の要素で構成され複雑な場合には、領域抽出のために、複数の分光画像や統計的な分類による抽出法を用いる必要がある。

可視・近赤外反射分光イメージングにより得られた波長の異なる分光画像を用いて、植物の含有色素量や水分状態、構造、活力度等を評価するための様々な指数が提案されている(大政 2007)。光合成に関係する葉のクロロフィルについても幾つかの指標が提案されているが、太陽光等の光強度の影響を除去するために異なる波長の比をとるといった簡単な指標でも葉のクロロフィル量を推定できる。この場合、反射の大きい近赤外域(例えば 850nm) と緑の帯域(550nm) の比を使用すると相関係数が高い(0.95 以上)(大政・相賀 1981, Omasa and Aiga 1987)。葉の場合、クロロフィル吸収帯の 450nm や 680nm を用いると吸収が大きすぎて、却って相関が悪くなることに注意を有する。このように、2 波長の光学フィルターを使用した安価なカメラでも有

用な生体情報を得ることができるので、古くから、植物の成長(被覆面積や器官成長)や病虫害、施肥効果、環境汚染害、体内成分量、水分状態等の診断に使用されてきた。また、背景である土壌の種類や含有成分、水分等の情報も得ることができる。

さらに、複数の光学フィルター(干渉フィルター)を自動的に切り替え可能なマルチスペクトルカメラや可視から近赤外域を数百バンドで分光可能なハイパースペクトルカメラ等のより高価な装置を利用することにより、より多くの生体情報を得ることができる。特に、ハイパースペクトル画像の解析では、分光分析の分野で用いられているケモトリックス(多くが多変量解析)を用いた方法が注目されている。しかし、生育している植物から、実際に微量成分の量等を計測するには限界があることにも注意を要する。この場合、それぞれの成分の吸収帯は、あくまで参考であって、生葉での計測では、生体内の状態や反応によって他の波長を用いた方が有用な場合がある。前述したクロロフィル a の場合もそうであったが、水ストレスの影響や窒素施肥効果をみる場合にもこのことがいえる。葉がかわるような乾燥状態では、水の吸収帯(1940, 1450, 1200, 960nm)を利用すれば診断できるが、通常の生育状態の萎れ程度の水ストレス(-1.0MPa 以上)では、葉からの反射スペクトルは変化するが、その変化は殆ど一様でバンド比で見ると余り差がみられない。それゆえ、水ストレスの診断には、形状変化の計測の方が有効である(藤野ら 2002)。窒素施肥の場合、生体内の窒素含有量の増加とともに、クロロフィルの状態を変化させる。このため、施肥効果をみるには、窒素の吸収帯よりも、550nm と近赤外域との比や 700nm 付近の吸収エッジの変化(シフト)等、クロロフィル含有量と関係する波長の画像を解析した方が有効である。なお、含有色素や微量成分の量を推定する場合、画像濃度との関係を相関解析により求める方法をよく用いるが、相関係数が 0.9 以上であっても、実際には上下限値に数倍の差が生じるので、定量的な成分分析に利用するときには、注意を要する。また、光合成の熱放散の指標とされる PRI (Photochemical Reflectance Index) も実際の生育条件下の利用ではノイズ成分の方が大きく、クロロフィル等の植物色素等の指標としてみた方がよい。これらの点を注意すれば、スペクトル画像計測は、

得られる生体情報も多く、安価で、かつ高速処理も可能なことから、植物生産分野での実用利用の可能性は大きい。

図1は、オランダのグリーンハウスにおける鉢花 (*Kalanchoe blossfeldiana* cv.) の自動栽培システムの一連の作業工程の写真である。人工培土(ピートモス)が自動的に鉢に詰められた後、給水、植え付けが行われる。そして、約1,000鉢単位で、栽培コンテナに移され、グリーンハウス内で生育させる。その位置はコンテナ単位でコンピュータにより管理される。一定期間生育させた後、個々の鉢が、個別識別が可能なICタグ付きのパレットに移され、ベルトコンベアで移動する。そして、生育状態がマルチカメラの画像計測装置で診断され、分類される。同一の生育状態に分類された鉢を、再度栽培コンテナに移し、グリーンハウス内に戻す。これを繰り返し、花が咲き、出荷できるような状態にまで生育した鉢は、規格を整えて出荷する。その際、出荷先の

国の通貨での価格を、生産者ブランドのラベル表示により付けている。なお、一連の過程で、自動化されていないのは、植え付けと最終段階の包装だけである。グリーンハウス内の給水や養液管理、細霧冷房、加温、CO<sub>2</sub>施肥、補光等は、複合環境制御システムにより制御される。オランダで稼働している上記のような生産方式は、生産性の向上だけでなく、工業製品と同じように、規格化され、また、安定した価格の製品のジャストインタイムでの納入ということで、市場で受け入れられている。栽培の自動化の最もコアとなる生育診断には、カラー情報を含む可視・近赤外反射分光イメージングが利用されている。

### 3. 蛍光イメージング

蛍光イメージングは、分光イメージングの一種であるが、多くは能動的な計測方式で、励起光を生体に照射し、発せられる蛍光画像から生体情報を得ようとするものである(例えば、Omasa 1990, 2002,

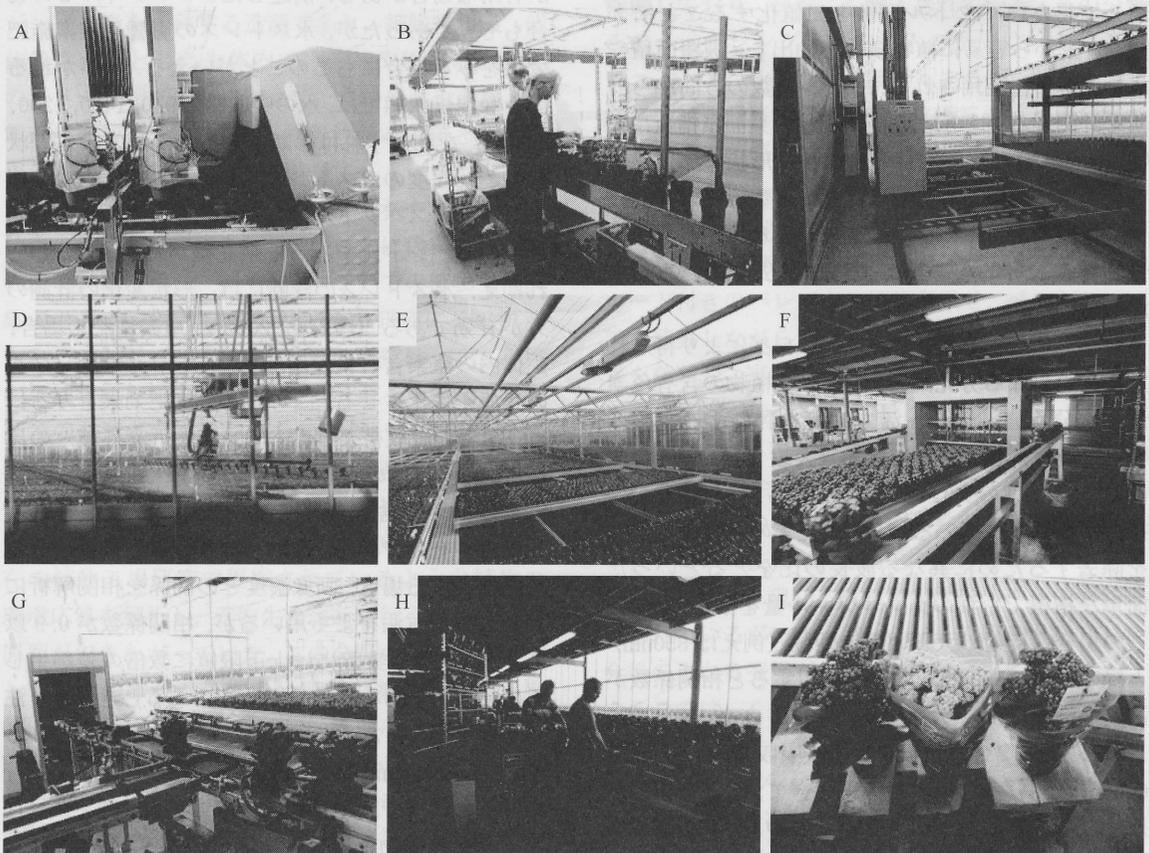


図1 鉢花 (*Kalanchoe blossfeldiana* cv.) の自動栽培システムの一連の作業工程 (大政 2010) (口絵参照)

Govindjee and Nedbal 2000, Jones and Morison 2007, Furbank 2009). 蛍光顕微鏡による生物試料の観察は広く普及しており、最近では、外から蛍光色素(外部プローブ)をタンパク質分子に標識し、光学顕微鏡の分解能より小さい分子レベルでの現象の観察も可能になってきている。外部プローブ法の欠点として、生体への影響や蛍光強度の環境依存性、得られた結果の多義性等の問題点が指摘されているが、細胞機能を研究するうえで重要な遺伝子や無機イオンの挙動等を解明するための新しい外部プローブや可視化技術の研究が急速に進んでいる。また、共焦点レーザスキャン顕微鏡技術の進歩により、細胞や組織の鮮明な3次元蛍光顕微鏡画像が得られるようになってきている。生物を利用したバイオモニタリングの分野では、ダイオキシン等の汚染物質に反応する外部プローブの開発も始まっており、今後、この分野の研究が発展すると、環境モニタリングだけでなく、プレシジョン・ファーミングの分野での利用の可能性もある。

一方、葉中に天然に存在する蛍光プローブ(内在蛍光プローブ)を利用し、生体情報を得ることもできる。図2は、励起波長を300~600nmまで変えたときのキュウリ生葉からの steady-state 蛍光を分光測定した例である。蛍光を発する内在蛍光プローブは、クロロフィルや  $\beta$ -カロテン、フラビン等の植

物色素の他、細胞膜のフェノール類、液胞内の色素や各種有機酸等数多く存在するので、各波長の強度を解析することにより、反射スペクトルの解析では得られない微量成分の検出や定量ができる可能性がある。この分野では、励起光としてレーザーを用いた LIF (laser induced fluorescence) の研究が盛んに行われており、植物生産の分野では、果実や食肉等の診断への利用が試みられている。将来的には、蛍光イメージングスキャナーとして、また、加工ラインに実装されたシステムとして発展していくものと考えられる。

図2の400nm以上の励起光で得られた650nm以上の強い蛍光は、主にクロロフィルaからの蛍光である。この蛍光は、暗所に置いた後、光を照射すると、過渡的にその強度が複雑に変化する現象として観察される。この現象は、クロロフィルaの蛍光誘導期現象(Kautsky効果)として知られており、光合成の光化学系IIの電子受容体 $Q_A$ の酸化還元状態や電子伝達反応、光リン酸化反応等が関係する葉緑体チラコイド膜のエネルギー状態等を反映する。それゆえ、この蛍光誘導期現象を画像解析することにより、組織培養を含む光合成器官の発達段階の診断や病虫害、除草剤、環境ストレス等による光合成機能障害の診断に利用できる。

蛍光誘導期現象の画像解析の研究は、1987年の筆

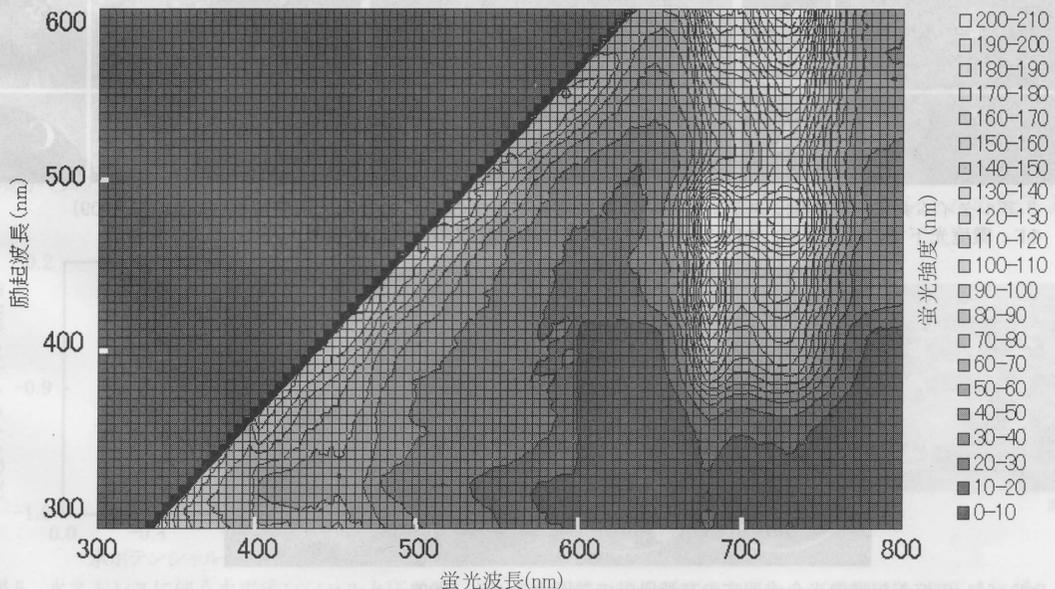


図2 励起波長を300~600nmまで変えたときのキュウリ葉からの steady-state 蛍光を分光測定した例(Omasaら 2002)

者らの研究(Omasa ら 1987)が最初であるが、その後、より定量的な解析のために、励起光の照射に加えて、強い飽和パルス光を照射し、photochemical quenching ( $\Phi_{PSII}$ , PSII yield) と nonphotochemical quenching (NPQ) とに分離して解析する方法が開発され、最近では、ポータブル型の装置も開発されている。ここで、 $\Phi_{PSII}$  は PSII における電子伝達速度の指標として、また、NPQ は主にチラコイド膜を隔てての  $H^+$  濃度勾配に由来する熱放散や光呼吸の指標として用いられる。しかしながら、 $\Phi_{PSII}$  と NPQ を求めるには強い飽和パルスによる計測が必要であるので、葉の狭い領域の計測には適しているが、植物個体や群落といったレベルでは、定性的ではあるが、弱い照射光で計測可能な蛍光誘導期現象による診断の方が有効である。なお、クロロフィル a の含有量を蛍光法によって推定する場合には、光合成反応に關係しての強度の変化や可視障害が現れる過程において、実際にはクロロフィル a の含有量が減ったにもかかわらず、蛍光強度が増す等の現象が

みられるので注意を要する。

図3は、筆者らが世界に先駆けて開発したリアルタイム共焦点顕微鏡システムを用いた葉緑体レベルでのクロロフィル蛍光の3次元解析の例である。表皮、気孔、葉肉細胞の葉緑体でクロロフィル蛍光収率と  $\Phi_{PSII}$  に違いが見られる。また、深さ方向で、クロロフィル蛍光収率の減衰に伴い、 $\Phi_{PSII}$  が大きくなっていることがわかる。図4は、ニンジン(ダイコン)の培養組織の光合成器官の発達段階を蛍光誘導期現象により計測することにより診断した例である。カルス(a)から従属栄養(b)、独立栄養(c)の段階へ成長するに従って、蛍光強度が増大し、また、誘導期現象が顕著に認められるようになった。また、遠隔での計測を目的として、レーザを光学的にスキャンし、蛍光誘導期現象を遠隔で計測できる LIFT イメージングシステムなどの例もある。筆者等は、レーザ光を、ポリゴンとガルバノの両スキャナーを用いて、面的に照射するシステムで、このシステムを用いた蛍光誘導期現象を計測したところ、レー

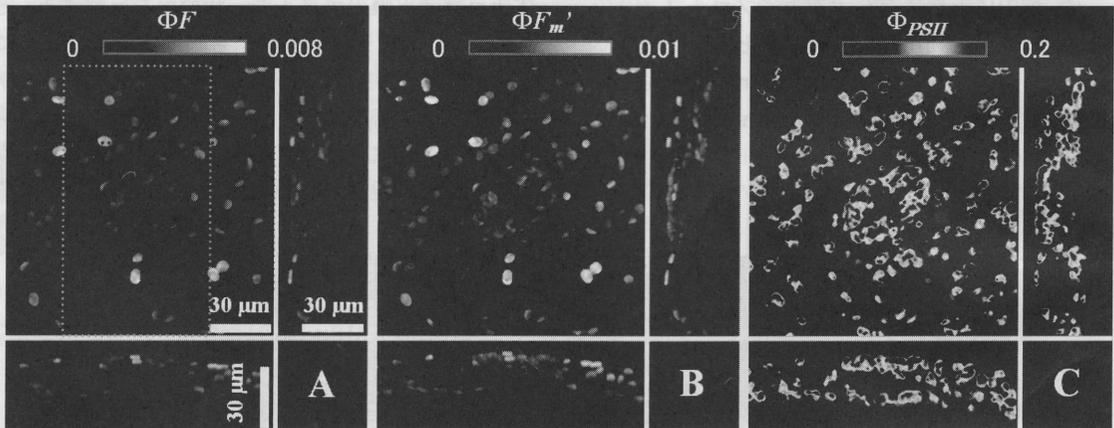


図3 リアルタイム共焦点顕微鏡システムを用いた葉緑体レベルでの  $\Phi_{PSII}$  の3次元画像解析(Omasa ら 2009)  
 $\Phi F$ : 環境光下での蛍光収率,  $\Phi F_m'$ : 飽和パルス下での蛍光収率 (口絵参照)

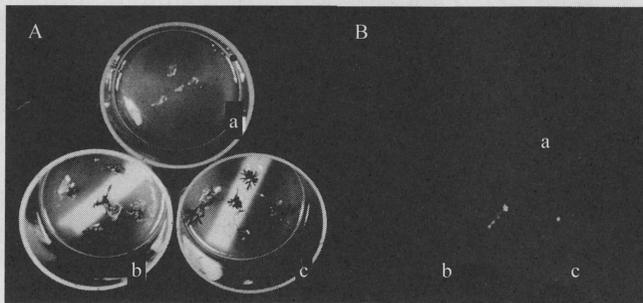


図4 ニンジンの培養組織の光合成器官の発達段階の診断 (Omasa 1992).

A: カラー写真, B: クロロフィル蛍光画像. a はカルス, b は従属栄養, c は独立栄養の成長段階.

ザースキャナーによる光は、高速の間欠照明であるが、蛍光誘導期現象が観察され、診断に利用できることがわかった(Omasa 1998)。

励起光を切ってから、生葉から発せられる遅延蛍光も光合成反応の情報を含むことから、1970年代の後半から80年代の前半にかけて盛んに画像診断に利用する試みがなされた。しかし、光合成反応についての情報が蛍光よりも曖昧で、イメージインテンシファイヤを装着して、微弱光を計測するために画質も悪いことから、最近では余り使われなくなった。

#### 4. サーマルイメージング

サーマルイメージングは、植物から放射される熱赤外域の電磁波を画像計測することにより、単に植物温度を得るということだけでなく、得られた温度画像から、生理生化学的な反応に関係する発熱や気孔反応、蒸散、その他のガス交換機能等を診断しようとするものである。

常温付近で、植物からの熱赤外放射が最大になる波長は $10\mu\text{m}$ 付近である。この波長域での植物葉の放射率は $0.95\sim 0.99$ と大きく、また、環境からの放射の影響も小さい。このことから、植物温度の計測には、 $8\sim 13\mu\text{m}$ に感度を有するサーマルカメラが用いられる。以前は、冷却型のHgCdTeを検出器とした装置が用いられていたが、最近では、温度分解能や安定性の点では劣るが、ポータブルのビデオタイプのものが市販されている。このタイプの装置で厳密な温度計測をする場合にはドリフトの補正に特に注意を有する。また、 $15\mu\text{m}$ 程度の解像度をもつ顕微鏡タイプのももある。温度計測の精度に関しては、校正のための内蔵黒体炉をもち、放射率や環境からの放射を補正する機能をもつ装置を用い

れば、 $0.1^\circ\text{C}$ の精度で、植物温度を計測することができる。しかし、葉面に限らず一般に、計測面とカメラヘッドの対物面の角度が $60$ 度を超えると急激に放射率が落ち、温度の計測精度が悪くなるので注意を要する。ただし、群落の場合には、葉の重なりで、赤外線が多重反射し、放射率があがると同時に指向性が弱められる。これは、黒体炉で、多孔円錐空洞により放射率があがると同じ効果である。

植物分野のサーマルイメージングについては、現在までに、数多くの報告がみられる(例えば Hashimotoら 1990, 大政 1988, Omasa 1990, 2002, Omasa and Croxdale 1992, Jones 2004)。筆者も、1970年代の後半頃、画像解析ができるサーモグラフィ装置を日本電子(株)と共同で開発し、葉面の熱収支を解析することにより、葉温画像から、蒸散速度や気孔拡散抵抗( $1/\text{気孔コンダクタンス}$ )、汚染ガス吸収速度等の葉面分布の推定を世界に先駆けて行った。これらの研究で得られた知見を利用して、制御環境下や野外での植物の蒸散やガス交換機能を指標としたストレス診断や植物群落のもつガス交換機能と熱環境緩和機能の診断についての研究を行ってきた。

図5は、人工気象室内で温湿度や光環境が一定の条件下におかれたキュウリの水ストレスによる水ポテンシャルと圧ポテンシャル、浸透ポテンシャル、気孔コンダクタンス、 $\Phi_{\text{PSII}}$ との関係とキュウリ葉の温度上昇温度画像である。図から、水ストレスにより、まず、気孔が閉鎖し、次に圧ポテンシャルが低下し、さらに、浸透ポテンシャルの低下に伴って $\Phi_{\text{PSII}}$ が低下することがわかる。葉温画像は気孔変化に伴って変化するが、形態変化は、茎や葉脈の力学的な問題により、葉の圧ポテンシャルの低下よりも

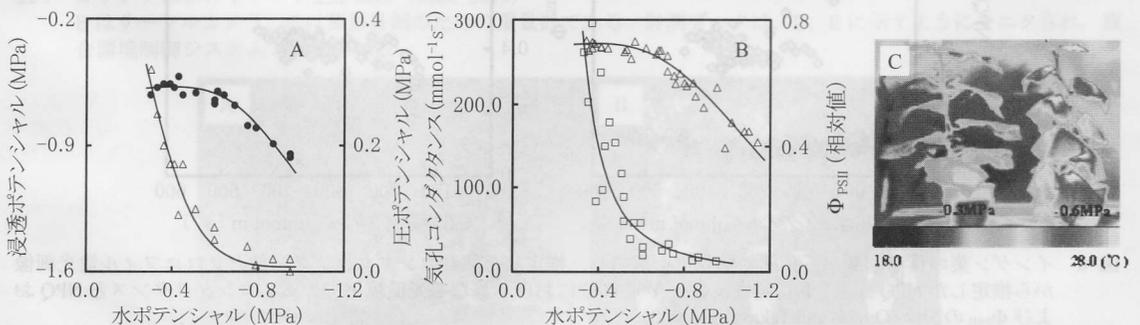


図5 水ストレスに伴う水ポテンシャルと圧ポテンシャル(△図A)、浸透ポテンシャル(●図A)、気孔コンダクタンス(□図B)、 $\Phi_{\text{PSII}}$ (△図B)との関係及びキュウリ葉の温度上昇(藤野ら 2002) (図絵参照)

遅れる。図6は、サーマルカメラによる葉温画像から葉面の熱収支を解析し、推定した気孔コンダクタンス画像とクロロフィル蛍光画像から推定した $\Phi_{PSII}$ 画像、NPQ画像の例である。気孔コンダクタンス画像の中央部がABA処理による気孔閉鎖の影響で値が小さくなっているが、 $\Phi_{PSII}$ 画像とNPQ画像ではその影響が認められない。図6のD、Eは、A~CのY-Y'の部位における異なる光環境下での気孔コンダクタンスと $\Phi_{PSII}$ およびNPQの関係を示す。気孔の閉鎖により、急激に $\Phi_{PSII}$ が低下し、NPQが上昇することがわかるが、低光強度では殆ど気孔が閉鎖した状態でないとこれらの値は変化しない。これらの関係は、光強度の上昇に伴って、 $\Phi_{PSII}$ とNPQが変化する値が大きくなることわかる。何れにしても、このことは、クロロフィル蛍光画像よりも葉温画像の方が、気孔閉鎖と、それに伴う蒸散機能や光合成機能低下の早期診断に有効であることを示している。この結果は、また、図5の結果を支持す

る。

太陽光下で生育している農作物でも、熱環境が一定の条件下では葉温画像の計測による気孔閉鎖を指標とした診断が可能である。植物種にもよるが、風が弱く晴れた日で陰がない状態では、概して葉温が気温と同じかそれよりも低い温度であれば健全である。熱環境が変化した状態でもサーマルイメージングによる気孔閉鎖や蒸散機能診断の手法の提案もなされている。何れにしても、葉温画像による診断には誤差を伴うので、正確な診断のためには、同時にポロメータ等による測定との相互比較が必要である。

図7は、オランダのトマト栽培施設の例である。オランダでは、弱小農家の淘汰で、生産規模の拡大が進んでおり、40haの経営規模のものも出現している。温室内の環境は、鉢花栽培と同様、複合環境制御システムで制御される。その際、気象条件や培養液のモニタリングだけでなく、サーマルカメラによ

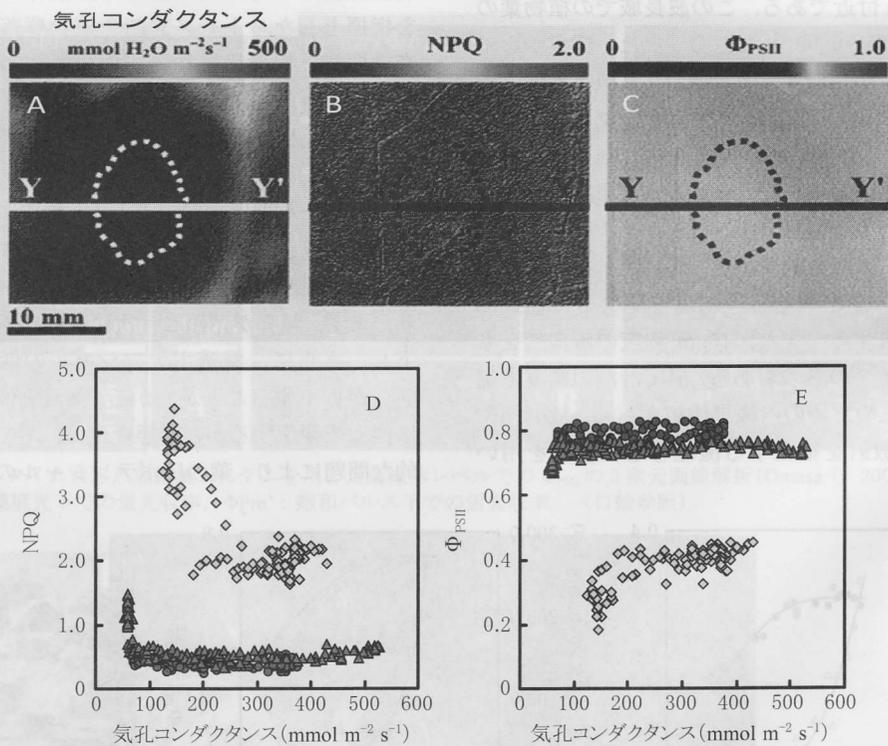


図6 インゲン葉の葉温画像から葉面の熱収支を解析し、推定した気孔コンダクタンス画像とクロロフィル蛍光画像から推定したNPQ画像、 $\Phi_{PSII}$ 画像及びY-Y'の部位における異なる光環境下での気孔コンダクタンスとNPQおよび $\Phi_{PSII}$ の関係(Omasa and Takayama 2003)

図D、Eの記号の紺色は、環境光が270、赤色は350、黄色は700 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ PPFである) (口絵参照)

る葉温画像の計測や重量法による蒸散速度のモニタリングを行っている施設もある。以前に比べればサーマルカメラも小型化し、温度計測精度は多少落ちるが数十万円程度の廉価なものも市販されており、植物工場での利用が期待される。

### 5. 3次元形状イメージング

3次元形状イメージングには、計測のためにレーザ光等の電磁波を照射し、その反射を計測することによって距離画像を得る能動的方法と計測のために電磁波を使用しない受動的方法とがある。一般に、能動的方法は、装置が複雑で、高価であるが、計測精度がよい。これに対して、受動的方法は、3次元画像の生成を、2次元平面に投影された通常の画像（CCDカメラ等によって得られる）から画像生成過程の逆問題を解くというソフトウェアによって

行うことから、一般に、装置は安価であるが、高速処理が難しく（ハードウェア化によって早くはできる）、精度は計測対象のテクスチャに依存する。図8は、能動的方法である可搬型イメージングライダー（イメージングレンジファインダー）を用いて計測したトマト群落と水ストレスに伴う3次元形状変化の例である。非常に高精度で形状変化が計測できていることがわかる。最近では、植物群落の3次元構造や葉面積指数(LAD)、葉面積密度(LAI)、葉傾斜角、バイオマスだけでなく、カラー画像やクロロフィル蛍光画像、温度画像等とのコンポジット計測が可能になってきている(図9,10)(Omasaら 2007, Hosoi and Omasa 2009, Konishiら 2009)。

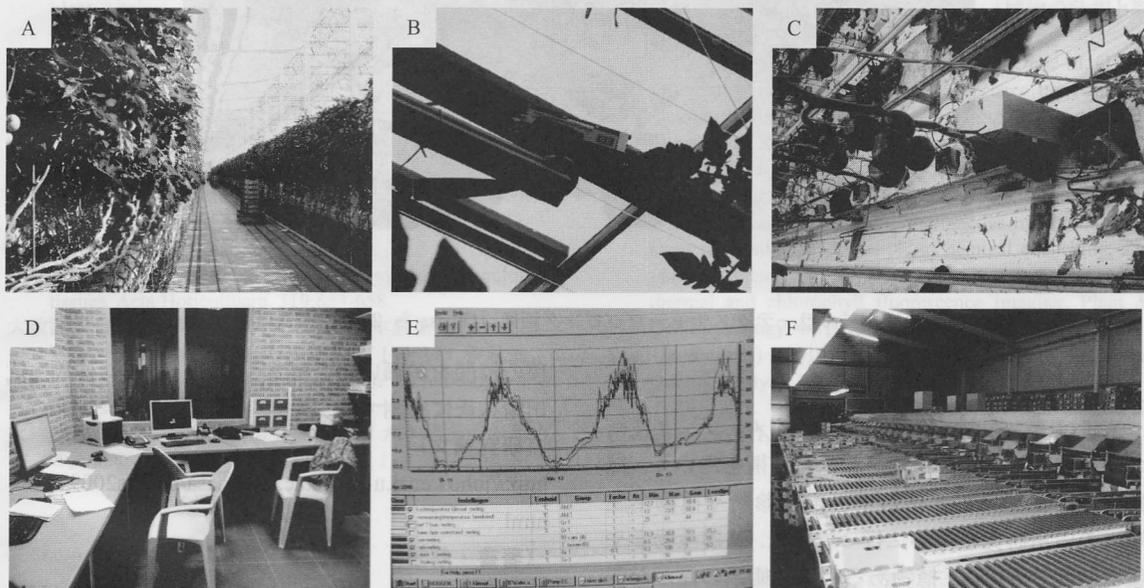


図7 オランダにおけるトマト生産施設(大政 2010)

Bはサーマルカメラ, Cは蒸散計測のための重量計である。計測データは, D, Eに示すようにモニタされ, 複合環境制御システムで利用される

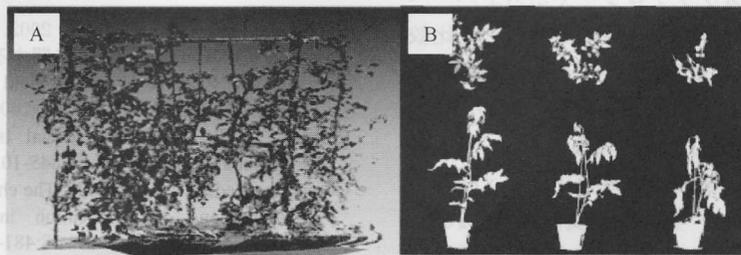


図8 トマト群落(A)と水ストレスに対する形状変化(B)の3次元画像(Omasaら 2007) (口絵参照)

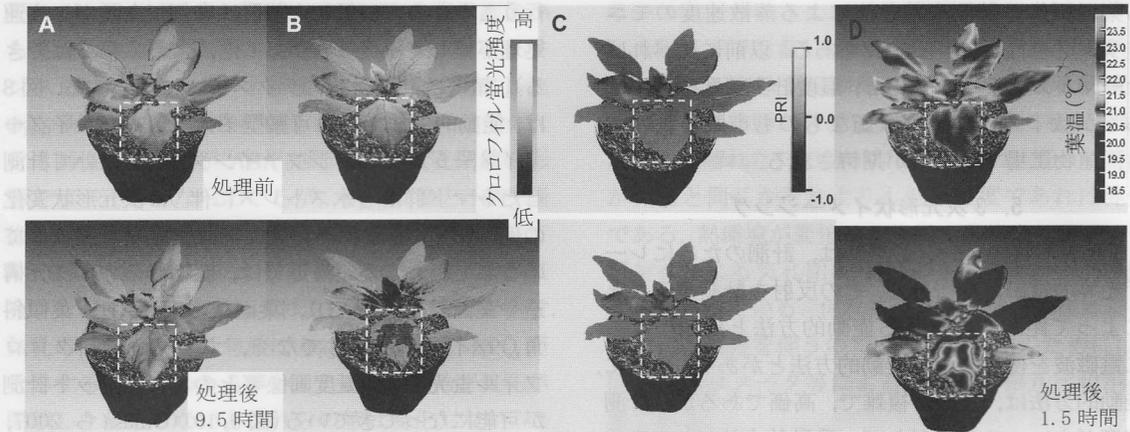


図9 除草剤処理(白い点線で囲った部分)に伴うカラー、クロロフィル蛍光、PRIの変化の3次元画像(Omasaら 2007) クロロフィル蛍光と葉温の画像には影響がみられるが、カラーとPRIの画像には影響が見られない。また、PRIには、除草剤処理部位以外に影の影響がみられる。(口絵参照)



図10 ナスの生育状態の3次元カラーテクスチャーマッピング画像(Omasaら 2007) (口絵参照)

## 6. おわりに

筆者は、これまで、生物情報のイメージング技術の開発と、開発したイメージング技術を用いて、植物生体や生態系の機能解明と環境診断や植物生産等への応用研究を中心に行ってきた。基礎生物学や環境研究分野では、植物あるいは生態系の僅かな変化をイメージングにより診断できれば、装置が多少高価であっても許されるという側面がある。植物生産の分野でも、バイオテクノロジーやポストハーベスト等の高い収益性を有する分野においては、比較的高価な装置であっても実用される。栽培分野でも、植物工場のように、栽培から収穫、選別、梱包までを一貫システム化した大規模施設では、導入されてきている。今後、施設の大規模化とイメージング装置の低廉化により、更なる普及が期待される。

なお、筆者らの最新の研究論文や著書・解説等については、下記のサイトを参照されたい。また、本

稿の校閲をお願いした橋本 康氏、野口 伸氏、位田晴久氏に感謝する。

(研究論文)

<http://joho1.en.a.u-tokyo.ac.jp/Omasa/papers20091216.html>

(著書・解説)

<http://joho1.en.a.u-tokyo.ac.jp/Omasa/books20090123.html>

## 参考文献

- 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 11:151-160.
- Furbank, R. T. (ed) 2009. Special Issue: Plant Phenomics. Functional Plant Biology 36:845-1026
- Govindjee, Nedbal L. (eds) 2000. The chlorophyll fluorescence imaging and its application in plant science and technology. Photosynthetica 38:481-599.
- Häder, D-P. 2000. Image Analysis: Methods and Applications. 2nd ed. CRC Press.

- 橋本 康・五百木啓三・船田 周・丹羽 登・杉 二郎 1979. 植物生育のプロセス同定とその最適制御 (VI) 葉温の画像処理. 生物環境調節 17:27-33.
- Hashimoto, Y. (1980) Computer control of short term plant growth by monitoring leaf temperature. *Acta Horticulturae*. 106:139-146.
- 橋本 康(編著) 1994. グリーンハウスオートメーション. 養賢堂
- Hashimoto, Y., Kramer, P. J., Nonami, H., Strain, B. R. (eds) 1990. *Measurement Techniques in Plant Sciences*. pp.373-386. Academic Press.
- Hills, B. 1998. *Magnetic Resonance Imaging in Food Science*. Wiley-Interscience.
- Hosoi F., Omasa K. 2009. Estimating vertical plant area density profile and growth parameters of a wheat canopy at different growth stages using three-dimensional portable lidar imaging. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 64:151-158.
- Jones, H.G., Morison J. (eds) 2007. Special Issue: Imaging Stress Responses in Plants. *J. Exp. Bot.* 58:743-898.
- Konishi, A., Eguchi A., Hosoi, F. Omasa. K. 2009. 3D monitoring spatio-temporal effects of herbicide on a whole plant using combined range and chlorophyll a fluorescence imaging. *Functional Plant Biology* 36:874-879.
- Matsui, T., Eguchi, H. 1978. Image processing of plants for evaluation of growth in relation to environment control. *Acta Horticulturae* 87:283-290.
- Omasa, K. 1990. Image instrumentation methods of plant analysis. H.F. Linskens and J.F. Jackson (eds) *Modern Methods of Plant Analysis*. New Ser. Vol.11. 203-243. Springer.
- Omasa, K. 1992. Image diagnosis of photosynthesis in cultured tissues. *Acta Horticulturae*. 319:653-658.
- 大政謙次(1994) 植物生体画像計測. 日本農業気象学会編. 新しい農業気象・環境の科学. pp.149-173 養賢堂
- Omasa, K. 1998. Image instrumentation of chlorophyll a fluorescence. *SPIE* 3382:91-99.
- 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.
- 大政謙次(編著) 2007. 農業・環境分野における先端的画像情報利用—ファイトイメージングからリモートセンシングまで—. 農業電化協会 : 1-154.
- 大政謙次 2010. グリーンハウスオートメーション—栽培の自動化と品質管理, そして環境対策. 遺伝 64(2) :87-95.
- 大政謙次・相賀一郎 1981 画像処理による植物の生育・生理反応の評価. 遺伝 35 : 25-31.
- Omasa, K. and Aiga, I. 1987. Environmental measurement: Image instrumentation for evaluating pollution effects on plants. M.G. Singh(ed) *Systems & Control Encyclopedia* pp.1516-1522. Pergamon Press.
- Omasa, K., Croxdale, J. G. 1992. Image analysis of stomatal movements and gas exchange. D.-P. Häder (ed) *Image Analysis in Biology*. pp.171-193. CRC Press.
- Omasa K., Hosoi, F., Konishi, A. 2007. 3D lidar imaging for detecting and understanding plant responses and canopy structure. *Journal of Experimental Botany* 58:881-898.
- Omasa K., Konishi, A., Tamura, H., Hosoi, F. 2009. 3D confocal laser scanning microscopy for the analysis of chlorophyll fluorescence parameters of chloroplasts in intact leaf tissues. *Plant & Cell Physiology* 50:90-105.
- 大政謙次・近藤矩朗・井上頼直編 1988. 「植物の計測と診断」. 朝倉書店.
- Omasa K., Shimazaki K., Aiga I., Larcher W., Onoe M. (1987) Image analysis of chlorophyll fluorescence transients for diagnosing the photosynthetic system of attached leaves. *Plant Physiology* 84: 748-752.
- Omasa, K., Saji H., Youssefian, S., Kondo N. (eds) 2002. *Air Pollution and Plant Biotechnology*. Springer.
- Omasa K., Takayama, K. 2003. Simultaneous measurement of stomatal conductance, non-photochemical quenching, and photochemical yield of photosystem II in intact leaves by thermal and chlorophyll fluorescence imaging. *Plant & Cell Physiology*. 44:1290-1300.
- Sun, D-W. (eds) (2010) *Hyperspectral Imaging for Food Quality Analysis and Control*. Academic Press.
- 高倉 直 1980. 栽培工場のシステム制御. 計測と制御 14 : 460-471.