

植物機能リモートセンシング —植物診断、フェノミクス研究への応用—

Remote Sensing of Plant Functioning —Applications in Plant Diagnosis and Phenomics Researches—

大政謙次*
Kenji Omasa*

東京大学大学院農学生命科学研究科 〒113-8657 東京都文京区弥生1-1-1
The University of Tokyo, Graduate School of Agricultural and Life Sciences
Yayoi 1-1-1, Bunkyo, Tokyo 113-8657, Japan

1. はじめに

リモートセンシングは対象を遠隔から計測する技術であり、その進歩には著しいものがある。これは、センサなどの要素技術の進歩に加えて、センサを搭載するプラットフォームや情報通信技術 (ICT) などの進歩によるところが大きい。そして、例えば、地球観測の分野では、人工衛星や航空機などの広域リモートセンシングだけでなく、地上観測による検証を含めた階層的リモートセンシングへと発展してきている (大政他, 1988; 1993b; 久米・大政, 2013)。また、農業分野では、ICT を仲介として、気象や土壌などの環境情報や作物情報を計測し、知識ベース化とクラウドコンピューティングにより、生産段階だけでなく、流通や消費段階でのイノベーションに利用しようというスマート農業、アンビエント農業への期待がある (東京大学アンビエント社会基盤研究会農林 WG, 2012; 大政, 2014)。その際、非破壊、非接触のバイオイメージング (リモートイメージング) を含めた植物機能リモートセンシングの重要性が認識されている (大政, 2007; 2010; Jones and Morison, 2007; Furbank, 2009)。さらに、植物科学の分野でも、遺伝子・細胞のレベルから、個体レベルまでを対象としたバイオイメージングの研究が盛んに行われており、最近では、この中でも特に、植物機能リモートセンシングの技術を用いて、植物のもつ表現型 (Phenotype) を遺伝子型と環境の両面から研究し、植物科学の分野だけでなく、育種や栽培、

環境管理などに生かしていこうという植物フェノミクスの研究が世界的に注目されている (Omasa et al, 2002; Furbank, 2009)。ここでは、これらの分野に関連する植物機能リモートセンシングについて筆者らの研究を中心に簡単に述べるとともに、植物診断やフェノミクスの研究への展開について紹介する。

2. リモートセンシングの技術的トレンドとその利用

図1は、分子から地球観測のレベルまでを対象としたイメージング技術と生命科学や生物生産、環境などの分野への利用について、流れ図として簡単に図化したものである。この図では、植物個体レベルのスケールを大凡の境界として、バイオイメージングと広域を対象とした狭義のリモートセンシングに分けているが、上述のように、バイオイメージングの中にもリモートセンシングの技術が含まれており、リモートイメージングと呼ばれるこれらの分野も含めて広義のリモートセンシングとして扱うこともできる。計測された画像情報は、実験室やフィールド観測により検証され、また、モデルや地理空間情報と同化することにより、右端の例に示したような基礎科学分野に加えて、農業や環境などの分野における様々な用途に利用される。

人工衛星などからの広域リモートセンシングの技術の発達には目覚ましいものがあり、その技術的トレンドは、高空間解像度化、高波長分解能化、3次元画像化、

*Corresponding author : E-mail: aomasa@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp

高頻度観測、レーザーやマイクロ波などの能動的センサや各種センサのコンポジット利用、観測とモデルとの同化などである(大政, 2007; 大政他, 1988; 1993b; 久米・大政, 2013)。植物機能を計測する場合には、人工衛星などからの広域リモートセンシングでは、特に、空間解像度と高頻度観測の点で問題がある。このため、高空間解像度のセンサ搭載が可能で、より自由度のあるプラットフォームからのリモートセンシングが必要とされ、GPSや準天頂衛星(QZS)などの全地球的衛星航法システム(GNSS)の受信機やIMU(慣性計測装置)、無線通信システムなどを搭載したヘリコプターや飛行船、小型無人飛行機(UAV)、また、地上での計測車や農作業車、さらに、高所作業用ブームや伸縮ポールなどを利用したプラットフォームからの近接での植物機能リモートセンシング(リモートイメージング)技術が開発されている(図2)。特に、最近では、搭載重量が数kg、飛行時間が10-20分程度のマルチコプターと呼ばれる電池駆動の小型UAVが比較的安く入手でき、普及してきている。

植物機能リモートセンシングは、葉のレベルから植物個体、さらには個体群やより広域の植生を対象としたリモートセンシングまで多種多様である。また、先に述べたように遺伝子のスクリーニングや解析などの基礎科学研究のためのバイオイメージングの分野も含んでいる。最近、植物フェノミクスの研究分野では、遺伝子や細胞レベルから個体レベルまでの様々な植物情報を数量化し、統計的に処理する必要から、植物機能リモートセンシングの積極的な導入が図られている。また、植物工場や土地利用型の農業においても植物診断や自動化のための導入が盛んである。リモートイメージングは、通常のカラカメのレベルから、可視から近赤外域を対象としたマルチバンドカメラやハイパースペクトルカメラ、また、熱画像計測用のカメラ、受動的あるいは能動的な蛍光計測システム、3次元計測のためのレンジライダーなど、様々なものが市販あるいは研究用に開発されている(大政他, 1988; 2007; Jones and Morison, 2007; 久米・大政, 2013)。そして、単独使用だけでなく、階層的複合リモートセンシングにも利用される。さらに、これらの分野では、上述したように無線通信やインターネットなどの情報通信技術(ICT)や地理空間情報システム(GIS)、全地球航法衛星システム(GNSS)などと組み合わせ合わせたシステムの開発が期待される。また、データ量が膨大(ビッグデータ)になることから、クラウドコンピューティングによるサービスが求められる。筆者の研究室でも、実際に、衛星データや地理空間情報、GCM

の予測データなどを、世界各国のデータベースセンターからネットワーク経由で取得し、解析に利用している。また、海外に設置したWebカメラを日本からの信号で制御し、観測に利用したり、国内外の共同研究機関とネットワークを介して計測データを共有したりしている。

3. 植物機能リモートセンシング

3.1 分光反射リモートセンシング

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(大政他, 1993b; 大政, 2002)。可視・近赤外分光反射リモートセンシングは、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、背景となる土壤等に比べて、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・近赤外反射分光リモートセンシ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、活力度等評価するための様々な植生指数が提案されている(大政, 2007; 久米・大政, 2013)。植生指数の計算には分光反射率を求める必要があるが、植物形状がわかるぐらい空間解像度が高くなると、方向性反射率や影の影響などの問題で、それぞれの画素で正確な分光反射率を求めることは容易ではない。このため、異なる波長の比をとるといった簡単な指標が用いられる場合もある。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、かえって相関が悪くなる場合や、逆に、カロチノイドやアントシアニンのような植物色素を含有する時には、その

影響の小さいレッドシフトの波長域が有効である場合があるなど、使用の際には注意を要する。

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、より多くの植物機能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メトリックスを用いた方法が注目されている。しかし、生育している植物で、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。即ち、成分抽出された溶液の吸収帯はあくまで参考であって、生葉での計測では、溶液での波長に比べて長波長側に吸収帯がずれ、また、他の主要吸収成分との関係によって推定式が決まるので、その適用範囲を知るにはそのメカニズムを知ることが重要である。前述したクロロフィル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。葉が枯れるような乾燥状態では、水の吸収帯（1940、1450、1200、960 nm）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、気孔（蒸散）や形状変化の計測の方が有効である（藤野他，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が変化する。このため、施肥効果をみるには、窒素の吸収帯よりも、550 nmと近赤外域との比や700 nm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。精密農業などで土壌の窒素含有量を推定する場合も同様なことがいえる。一般に、可視・近赤外分光法で推定する場合には、土壌中の窒素含有量と有機物含有量との相関関係を利用して求めるが、化学肥料などに含まれる窒素は通常の施肥量では検知できないことに注意する必要がある。なお、含有成分量を推定する場合、植生指数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、実際には上下限值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の指標としてみた方がよい（Rahimzadeh-Bajgiran et al. 2012a）。これらの点を注意すれば、分光反射リモートセンシングは、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、実用利用の可能性は大きい。

3.2 蛍光リモートセンシング

蛍光リモートセンシングは、分光リモートセンシ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（Omasa, 1990; Omasa et al. 2002; 2009; Papageorgiou and Govindjee, 2004; 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も指摘されているが、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、スマート農業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3は、励起光波長を300～600 nm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β-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化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、葉の成分分析に加えて、果実や食肉等の診断への利用が試みられている。

図3の400 nm以上の励起光で得られた650 nm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年の筆者らの研究 (Omasa et al., 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 (Φ_{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市販されている。ここで、 Φ_{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の指標として用いられる。しかしながら、 Φ_{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、光合成反応に関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。また、遠隔での計測を目的として、レーザーを光学的にスキャニングし、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。筆者は、1980年代半ば頃から、レーザー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を開発し、このシステムを用いて蛍光誘導期現象を計測したところ、レーザーによる光は、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)。また、励起照射の方法を工夫することにより、蛍光パラメータの解析が可能な LIFT システムも開発されている。一方、最近、受動的な方法であるフラウンホーファー線を利用した太陽光クロロフィル蛍光リモートセンシングが注目されているが、定常蛍光では、光合成

の反応成分とクロロフィル含有量との相反性に注意を有する。また、リモートセンシングではないが、葉の3次元構造を破壊することなく、葉緑体レベルでのクロロフィル蛍光パラメータ解析できる3Dリアルタイム共焦点顕微鏡システムも開発されている (Omasa et al. 2009)。

3.3 サーマルリモートセンシング

サーマルリモートセンシングは、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 μm 付近である。この波長域での植物葉の放射率は0.95~0.99と大きく、また、環境からの短波放射の影響も小さい。このことから、植物温度の計測には、8~13 μm 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、ポータブルの非冷却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 μm 程度の解像度をもつ顕微鏡タイプのものもある。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°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のと同じ効果である。

植物分野のサーマルリモートセンシングについては、現在までに、数多くの報告がみられる (例えば、大政他, 1988; Omasa, 1990; Hashimoto et al., 1990; Omasa and Croxdale, 1992; Omasa et al., 2002; 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/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 (Omasa et al. 1981)。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4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、 Φ_{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、圧ポテンシャルの低下に伴って気孔が閉鎖し、次にさらに、浸透ポテンシャルの低下に伴って Φ_{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、莖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遅れる。図5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 Φ_{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、 Φ_{PSII} 画像とNPQ画像ではその影響が認められない。図5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 Φ_{PSII} 及びNPQの関係を示す。気孔の閉鎖により、急激に Φ_{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、 Φ_{PSII} とNPQが変化する値が大きくなることがわかる。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4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(大政他, 1990; 大政他, 1993a)。熱環境が変化した状態でもサーマルリモートセンシングによる蒸散機能診断の手法の提案もなされている(Ishimura et al., 2011; Rahimzadeh-Bajgirani et al., 2012b)。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。

3.4 3次元形状リモートセンシング

3次元形状リモートセンシングには、計測のためにレーザー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。航空機や人工衛星から広域リモートセンシングでは受動的方法であるステレオ法による3次元地図作成が実用化されている。また、最近では、航空機からのレーザ距離計測による地形や植生の3次元計測やバイオマス推定も行われている(大政他, 2000; Omasa et al., 2003; 2007; 2008)。図6は、能動的方法である可搬型イメージングライ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次元構造やバイオマス、葉面積指数(LAD)、葉面積密度(LAI)、葉傾斜角だけでなく、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(大政他, 2002; Omasa et al., 2007; Hosoi and Omasa, 2009; Konishi et al., 2009; Hosoi et al., 2010; 2011)(図7)。

4. 植物の環境応答解析と植物フェノミクスの研究への展開

植物と環境との関係を研究する分野では、環境と植物の計測と制御が重要な方法論として位置づけられる。ここでは、筆者の経験を振り返りながら、この分野の発展を紹介する。多少我田引水になることをお許し頂きたい。筆者は、つくばの国立公害研究所(現国立環境研究所)に就職した1976年から、植物と環境との関係を研究するファイトトロン(生物環境実験施設)の建設と、ファイトトロンや実験ほ場における植物機能リモートセンシングに関する研究開発を行ってきた。1981年に竣工した自然環境シミュレータは、植物環境の制御技術としてその粋を極めたもので、光源がLEDの発明により高波長分解能制御ができるようになったことを除けば、光-大気-植物-土壌系の複合環境調節施設としては、現在でも世界にも類をみない。この頃の筆者の研究を、執筆した文献をもとに振り返ってみると、1980年頃には、ファイトトロンや圃場で生育している植物の熱赤外(葉温)画像や近紫外～近赤外分光反射画像を、光ファイバ通信(インターネットのように高速ではなく、また、光ファイバも自ら敷設するものであったが)によりオンラインで自動計測し、解析するシステム

を構築し、蒸発散や汚染ガス吸収、植物環境応答等の解析と環境抵抗性あるいは感受性品種の選抜に利用していた（図8）（大政・相賀，1981；Omasa et al., 1981；大政他，1988；Omasa, 1990）。また、ファイトトロンや圃場での計測と航空機・人工衛星を組み合わせた複合リモートセンシングについてもその必要性を論じている。なお、この頃、現在のクラウド農業やアンビエント農業の考え方である、情報通信技術（ICT）を利用してデータセンタと結び、コンピュータの階層的利用により、多くの温室や植物工場群を制御、管理する考え方や、人工知能や画像センサ、ロボット等を利用した先端農業の考え方を提案している（大政，1983）。その後、植物機能リモートセンシングに関する研究は、顕微鏡画像や分光蛍光画像、3次元画像等を加えた複合画像計測システムへと発展していったが、恩師の橋本康先生と“Water Relations of Plants and Soils”の著書で有名なDuke大学のP. J. Kramer名誉教授が企画され、1985年に東京で開かれた“Instrumentation and Physiological Ecology”の日米セミナー（Hashimoto et al., 1990）を経て、Duke大学のファイトトロンやColumbia大学Biosphere 2センター等でも研究が行われ、さらに、1990年代以降、遺伝子実験施設と融合した新しい分野である変異体のスクリーニングや解析を含む植物フェノミクス研究へと発展していった（Omasa et al. 2002; Furbank, 2009）。この頃は、プラザ合意にみられるように、日本の産業界が絶好調の時代で、米国内に日本への圧力と同時に、日本を見習おうという風潮があった。東京での日米セミナーと国立公害研究所の見学は、米国の研究者にとっても十分インパクトのあるものであり、筆者のその後の国際交流の原点となった会議であった。筆者の博士論文のご指導を頂いた尾上守夫東大生産技術研究所長との共著のポット植物の土壌-根系のMRI研究（Omasa et al., 1985）が、Kramer先生によってこの分野の最初の研究として位置づけられ、米国へ帰国後さらに発展し、環境科学や植物フェノミクス研究の一分野として現在も研究が進められていることは研究者冥利に尽きる（Furbank, 2009; Simpson et al., 2011）。Kramer先生は、1995年に亡くなられたが、その後もDuke大学のファイトトロンとは、日米科学技術協定に基づく交流を継続し、ファイトトロンの責任者であったB. R. Strain教授やJ. F. Reynolds教授との交流が続いた。両先生は、1990年頃から盛んになったファイトトロンの地球環境研究への利用に興味を持ち、屋外でのFACE（Free-Air CO₂ Enrichment）との併用研究に熱心であったが、筆者が東京大学に異動した頃（1999年）には、地球

環境分野でのフィールド科学研究の重要性が叫ばれ、また、分子生物学や遺伝子工学の進歩により、世界的にファイトトロン研究の再構築が求められるようになった。

なお、1982年のベルリンでのIMEKOの会議の前に、研究所を訪れ旧知であった“Physiological Plant Ecology”の著書で有名なInnsbruck大学のW. Larcher教授（Institute of Botany）を訪ね、その頃、同僚の島崎研一郎博士と開発をしていたChlorophyll Fluorescence Imaging（CFI）研究の相談に乗って頂いた。その後、Plant Physiology（Omasa et al., 1987）に掲載された論文が、この分野の最初の研究となった。最近、CSIROのPrometheusWikiに執筆を頼まれ、歴史的な経過を含めて、この分野の最新の3D-CFI研究の簡単な紹介をした。また、Strain教授からの紹介でWisconsin-Madison大学のJ. G. Croxdale准教授（Department of Botany）から米国のNSF予算での共同研究の依頼があり、1988-1992年にわたってCFIや熱画像計測の共同研究を実施し、幾つかの研究結果をPlant Physiology等に発表した。後に、彼女の教授昇進の際の評価を、Wisconsin大学のバイオトロンの責任者であったT. D. Sharkey教授（現：Michigan州立大学，Department Chair of Biochemistry & Molecular Biology）から依頼されたが、Sharkey教授がバイオトロンの責任者になった1990年代の半ば以降、バイオトロンを分子生物学や遺伝子工学に対応した施設に改修した。それまでのT. W. Tibbits教授らによるLife Support Systemの研究は、弟子のR. Wheeler博士（NASA’s Kennedy Space Center）によってNASAで引き継がれている。

一方、開発途上国での人口の爆発的な増加と地球規模での経済発展が、食料やエネルギー、資源等の争奪を引き起こし、気候変動（地球温暖化）をはじめとした地球環境問題を顕在化させた。このため、環境に配慮した持続的な開発（Sustainable Development）の必要性が認識され、国連の「環境と開発に関する世界委員会」が1987年に公表したBrundtland Report “Our Common Future”における中心的な理念となり、また、気候変動に関する科学的知見の取り纏めのために、国連の「気候変動に関する政府間パネル（IPCC）」が1988年に設立された。この理念は、1992年のリオデジャネイロでの国連地球サミットにおいて「環境と開発に関するリオ宣言」や国際的な枠組みに関する行動計画である“Agenda 21”として纏められた。

このような状況の中で、ファイトトロンも、地球環境研究の一端を担うことになり、農作物や樹木、野生の草本植物などを対象として、高温や高CO₂影響、植

物や土壌と大気との CO₂ やメタン、N₂O 交換等の地球温暖化に関連した研究や紫外線影響等のオゾン層破壊に関連した研究、また、砂漠や半乾燥地、熱帯地域で生育している多様な植物種の機能、環境修復等に関連した研究等が実施されるようになった。さらに、大気汚染研究の分野では、国境を越えた越境大気汚染や酸性雨に関連して、その影響研究や大気浄化に関する研究が有機汚染ガスを含めて行われるようになった。これらの地球環境研究の特徴は、トップダウンの目的指向型で、分野横断型研究として実施され、影響メカニズムの解明だけでなく、全球気候モデル (GCM) 等の数値シミュレーション研究の要素研究として位置づけられ、屋外での FACE 研究やフィールド観測研究と相互補完的に実施されるようになったことである。また、数値シミュレーションと観測研究との同化の重要性が認識され、大気と植物や土壌との相互影響を、より厳密に解析し、モデル化しようという流れの中で、ファイトロンやフィールドでの実験で得られた知見が有効的に利用されている。また、地球規模の観測研究においても同様で、ファイトロン等で得られた画像情報等の知見が、航空機や人工衛星からの新しい機能リモートセンシング等の開発研究に利用されている (大政, 2011)。この関連の国際会議が、最近、様々な分野で頻繁に開催され、筆者も招待されることが多いが、“Plant and Microclimate” の著書で有名な Dundee 大学の H. G. Jones 教授 (School of Biosciences) に招待して頂いた、2006 年の英国 Canterbury 大学での The Society for Experimental Biology の年会における “Imaging Techniques for Understanding Plant Responses to Stress” のシンポジウムでは、筆者らの 3D lidar imaging for detecting and understanding plant responses and canopy structure の研究 (Omasa et al., 2007) を紹介し、その後のこの分野の研究の流れに幾らかの影響を与え、また、筆者らの研究成果がこの学会の絵葉書に採用されたという点で記憶に残っている。シンポジウムの成果は、Journal of Experimental Botany の特集号 (Jones and Morison, 2007) として出版されている。なお、ファイトロンを用いた温暖化研究では、1990 年代の半ば頃から、イネの高温不稔の先駆けとなった研究を、堀江武京大農学部教授 (現: 農研機構理事長) のアイデアで実施し、お弟子さんの松井勤助手 (現: 岐阜大准教授) の頑張りもあって、約 10 報の共著論文として取り纏めた。また、農業気象分野の内嶋善兵衛宮崎公立大学学長や張新時中国科学院植物研究所長には、温暖化プロジェクトでご指導頂き、その成果を Climate Change and Plants in East Asia (Omasa

et al. 1996) として Springer から出版し、また、気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の報告書作成に Expert Reviewer として貢献した。

一方、遺伝子組換え等のバイオテクノロジーの実験施設としての対応は、植物を対象とするファイトロンでは比較的容易である。このため、現在では、多くのファイトロンが、組換え体植物の研究に利用されている。国立環境研究所でも、1990 年代の初めに、ファイトロンの改造と遺伝子実験棟の建設を行った。また、ファイトロン研究の新しい流れが前述した植物フェノミクス研究である。これは、植物のもつ表現型 (Phenotype) を遺伝子型と環境の両面から研究しようとするもので、2009 年に、Canberra の CSIRO ファイトロンの改築のために “1st International Plant Phenomics Symposium: from Gene to Form and Function” が開催された (図 9)。その中心は、前述したファイトロンでの画像計測の変異体のスクリーニングや解析を含む植物フェノミクス研究への応用であった。筆者らのグループもこの会議に招待され、新しい 3 次元植物機能計測研究等に関する幾つかの論文を発表した。その成果が Functional Plant Biology の特集号 (Furbank, 2009) として出版され、その表紙に筆者らの研究成果の画像が掲載された。現在、CSIRO の HRPPC とは客員科学者として共同研究を実施しており、また、コロンビアの国際熱帯農業センター (CIAT) とは、インターネットを利用して、機能リモートセンシングによる圃場でのイネのフェノミクス研究を実施している。図 10 は、2009 年のシンポジウムの後に建設された HRPPC の植物フェノミクス研究施設である。ファイトロンの改造とフィールドフェノミクスへの対応のための GPS と IMU を搭載したほ場計測車での計測を実施している。

図 11 は、現在、CIAT と実施している、温暖化対策や乾燥耐性のための窒素および水利用効率のいいイネの開発のためのフィールドフェノミクス研究である。CIAT に設置した Web カメラを日本からの信号で制御し、観測に利用したり、マルチバンド画像データや環境データ、作物データなどをネットワークを介して共有し、利用している。今後は、Phenomics、Genomics、Informatics が融合するかたちでこの分野の研究が発展していくことを期待している。

引用文献

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. *Funct. Plant Biol.*, **36**, 845-1026.
- Hashimoto, Y., Kramer, P. J., Nonami, H. and Strain, B. R. (eds.), 1990: *Measurement Techniques in Plant Sciences*. Academic Press, San Diego, pp. 373-386.
- Hosoi, F., Nakabayashi, K. and Omasa, K., 2011: 3-D Modeling of tomato canopies using a high-resolution portable scanning lidar for extracting structural information. *Sensors*, **11**, 2166-2174.
- Hosoi, F., Nakai, Y. and Omasa, K., 2010: Estimation and error analysis of woody canopy leaf area density profiles using 3-D airborne and ground-based scanning lidar remote-sensing techniques. *IEEE T. GeoSci. Remote Sens.*, **48**, 2215-2222.
- Hosoi, F. and 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 J. Photogramm. Remote Sens.*, **64**, 151-158.
- Ishimura, A., Shimizu, Y., Rahimzadeh Bajgiran, P. and Omasa, K., 2011: Remote sensing of Japanese beech forest decline using an improved Temperature Vegetation Dryness Index (iTVDI). *iForest*, **4**, 195-199.
- Jones, H. G., 2004: Application of thermal imaging and infrared sensing in plant physiology and ecophysiology. *Adv. Bot. Res.*, **41**, 107-163.
- Jones, H. G. and Morison, J. (eds.), 2007: Special Issue: Imaging Stress Responses in Plants. *J. Exp. Bot.*, **58**, 743-898.
- Konishi, A., Eguchi, A., Hosoi, F. and Omasa, K., 2009: 3D monitoring spatio-temporal effects of herbicide on a whole plant using combined range and chlorophyll a fluorescence imaging. *Funct. Plant Biol.*, **36**, 874-879.
- 久米 篤・大政謙次 (監訳), 2013: 植生のリモートセンシング (Jones H. G. and Vaughan R. A.) 森北出版, 東京, 446 p.
- 大政謙次, 1983: 環境制御機器. 人工環境栽培施設用機材としての新素材・新技術の応用. 流通システム研究レポート No. 23, pp. 179-199.
- Omasa, K., 1990: Image instrumentation methods of plant analysis. In *Modern Methods of Plant Analysis*. New Ser. Vol. 11. (ed. by Linskens, H. F. and Jackson, J. F.), Springer, Berlin, pp. 203-243.
- 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. 農業電化協会, 東京, 154 p.
- 大政謙次, 2010: 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. 農業および園芸, **85**(11), 1100-1109, 口絵.
- 大政謙次, 2011: 植物機能のリモートセンシングと空間情報解析に関する研究. 平成 23 年度 日本農学賞論文要旨. 日本農学会, 東京, pp. 1-3.
- 大政謙次, 2014: スマートグリーンハウスへの展望 - 工場生産方式、環境・エネルギー対策、そして情報化・知能化 -, 植物環境工学 (印刷中).
- 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.
- 大政謙次・秋山幸秀・石神靖弘・吉見健司, 2000: ヘリコプター搭載の高空間分解能 Scanning Lidar システムによる樹冠高の 3次元リモートセンシング. 日本リモートセンシング学会誌, **20**, 34-46.
- Omasa, K. and Croxdale, J. G., 1992: Image analysis of stomatal movements and gas exchange. *Image Analysis in Biology* (ed. by Häder D.-P.). CRC Press, Boca Raton, FL., pp. 171-193.
- Omasa, K., Hashimoto, Y. and Aiga, I., 1981: A quantitative analysis of the relationships between O₃ sorption and its acute effects on plant leaves using image instrumentation. *Environ. Control Biol.*, **19**, 85-92.
- Omasa, K., Hosoi, F. and Konishi, A., 2007: 3D lidar imaging for detecting and understanding plant responses and canopy structure. *J. Exp. Bot.*, **58**, 881-898.
- Omasa, K., Hosoi, F., Uenishi, T. M., Shimizu, Y. and Akiyama, Y., 2008: Three-dimensional modelling of an urban park and trees by combined airborne and portable on-ground scanning LIDAR remote sensing. *Environ. Model. Assess.*, **13**, 473-481.
- Omasa, K., Kai, K., Taoda, H., Uchijima, Z. and Yoshino, M. (eds), 1996: *Climate Change and Plants in East Asia*. Springer-Verlag, Tokyo, 215 p.
- Omasa, K., Konishi, A., Tamura, H. and Hosoi, F., 2009: 3D confocal laser scanning microscopy for analysis of chlorophyll fluorescence parameters of chloroplasts in intact leaf tissues. *Plant Cell Physiol.*, **50**, 90-105.
- 大政謙次・近藤矩朗・井上頼直 (編著), 1988: 植物の計測と診断. 朝倉書店, 東京, 239 p.
- Omasa, K., Onoe, M. and Yamada, H., 1985: NMR imaging for measuring root system and soil water content. *Environ. Control Biol.* **23**: 99-102.
- Omasa, K., Qiu, G. Y., Watanuki, K., Yoshimi, K. and Akiyama, Y., 2003: Accurate estimation of forest carbon stocks by 3-D remote sensing of individual trees. *Environ. Sci. Technol.*, **37**, 1198-1201.

Omasa, K., Saji, H., Youssefian, S. and Kondo, N. (eds.), 2002: Air Pollution and Plant Biotechnology -Prospects for Phytomonitoring and Phytoremediation. Springer-Verlag, Tokyo, 455 p.

Omasa, K., Shimazaki, K., Aiga, I., Larcher, W. and Onoe, M., 1987: Image analysis of chlorophyll fluorescence transients for diagnosing the photosynthetic system of attached leaves. Plant Physiol., **84**, 748-752.

大政謙次・清水英幸・小川和雄・増喜彰久, 1993a: サーモグラフィ装置によるヘリコプターからの樹木の診断. 生物環境調節, **31**, 161-168.

Omasa, K. and 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 Physiol., **44**, 1290-1300.

大政謙次・田島彰・宮坂佳代子, 1990: サーモグラフィによる街路樹(仙台市ケヤキ並木)の診断. 農業気象, **45**, 271-275.

大政謙次・恒川篤史・福原道一(監訳), 1993b: 生物圏機能のリモートセンシング (ed. by Hobbs H. J. and Mooney H. A.) シュプリンガー, 東京, 397 p.

大政謙次・浦野豊・小熊宏之・藤沼康実, 2002: 可搬型

Scanning lidar データを用いたカラマツ林の樹林マッピングと胸高直径及びバイオマスの推定. 日本リモートセンシング学会誌, **22**, 550-557.

Papageorgiou, G. C. and Govindjee (eds.), 2004: Chlorophyll a Fluorescence. Springer. Dordrecht, 818 p.

Rahimzadeh-Bajgiran, P., Munehiro, M. and Omasa, K., 2012a: Relationships between the Photochemical Reflectance Index (PRI) and chlorophyll fluorescence parameters and plant pigment indices at different leaf growth stages. Photosynth. Res., **113**, 261-271.

Rahimzadeh-Bajgiran, P., Omasa, K. and Shimizu, Y., 2012b: Comparative evaluation of the Vegetation Dryness Index (VDI), the Temperature-Vegetation Dryness Index (TVDI) and the improved TVDI (iTVDI) for water stress detection in semi-arid regions of Iran. ISPRS J Photogram. Remote Sens, **68**, 1-12.

Simpson, A. J., McNally, D. J. and Simpson, M. J., 2011: NMR spectroscopy in environmental research: From molecular interactions to global processes. Progress in NMR Spectroscopy, **58**, 97-175.

東京大学アンビエント社会基盤研究会 農林環境 WG, 2012: アンビエント農業- ICTで未来の農業を創る-. 東京大学アンビエント社会基盤研究会, 東京., 121 p.

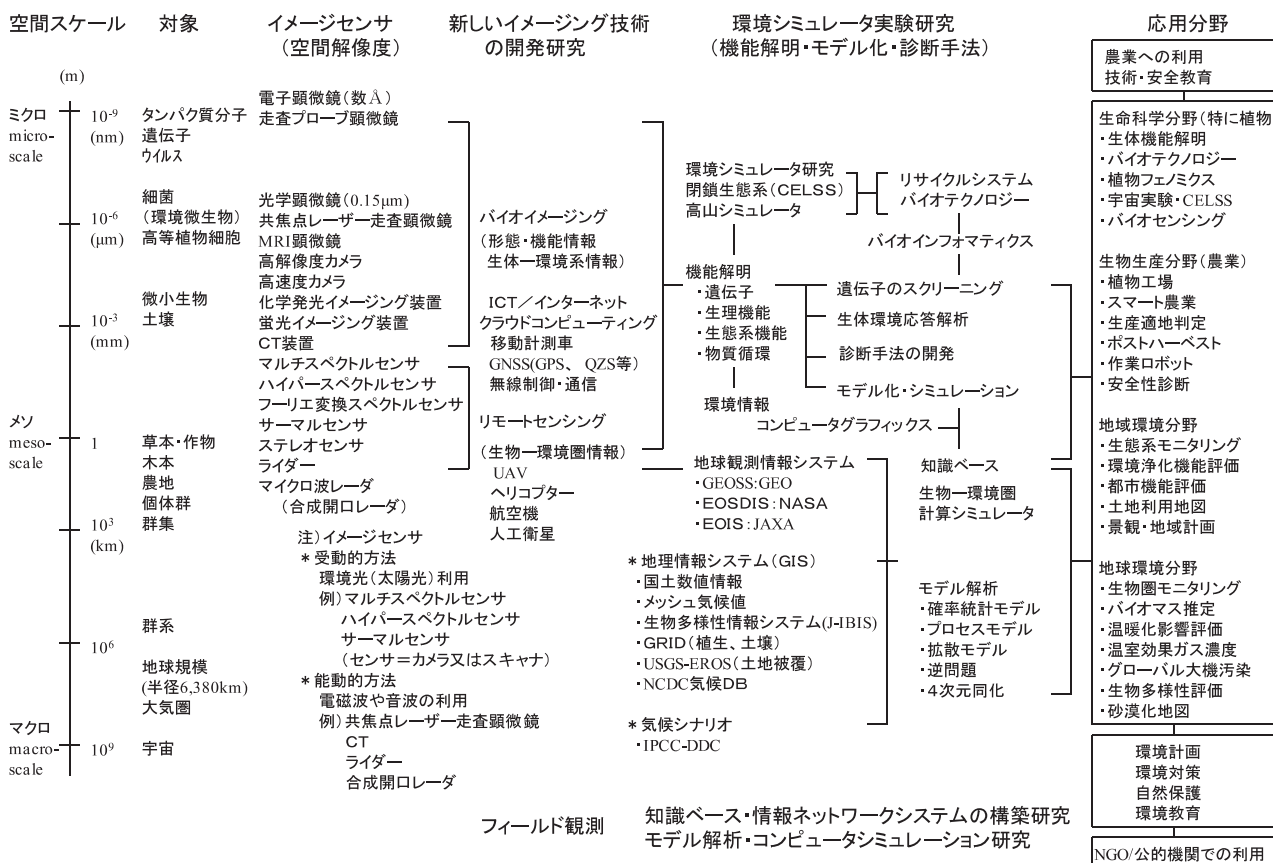


図1 イメージング技術と生命科学や生物生産、環境などの分野への利用の流れ図 (大政 2007)。

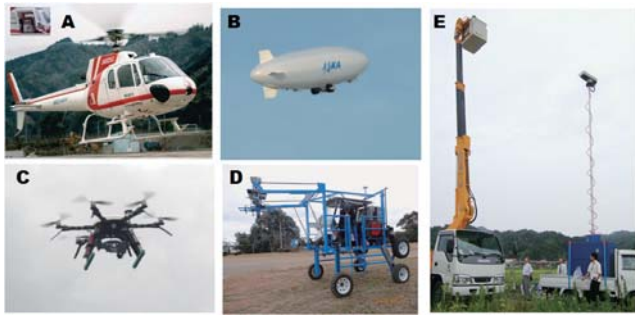


図2 高空間解像度センサが搭載でき、高頻度観測が可能なプラットフォーム。A：ヘリコプター、B：飛行船、C：マルチコプター、D：ほ場計測車、E：高所作業ブームと伸縮ポール。AからDは、GNSSとIMUを搭載し、自動走行あるいは位置情報の検知が可能である。

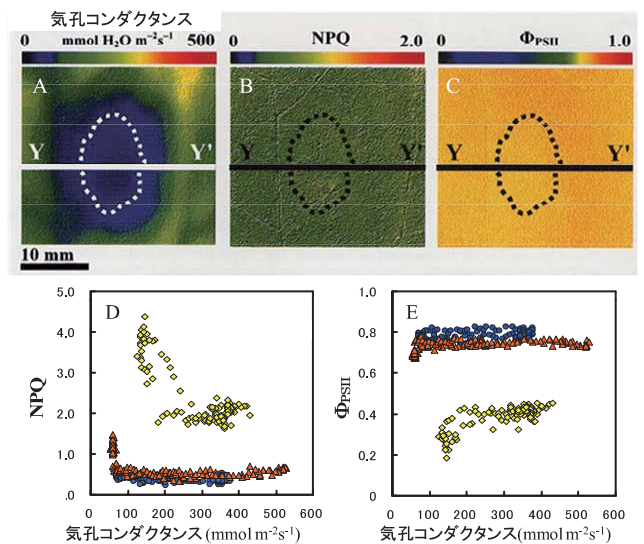


図5 インゲン葉の葉温画像から葉面の熱収支を解析し、推定した気孔コンダクタンス画像とクロロフィル蛍光画像から推定したNPO画像、 Φ_{PSII} 画像及びY-Y'の部位における異なる光環境下での気孔コンダクタンスとNPO及び Φ_{PSII} の関係(図D、Eの記号の紺色は、環境光が270、赤色は350、黄色は700 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ P P Fである)(Omasa and Takayama, 2003)。

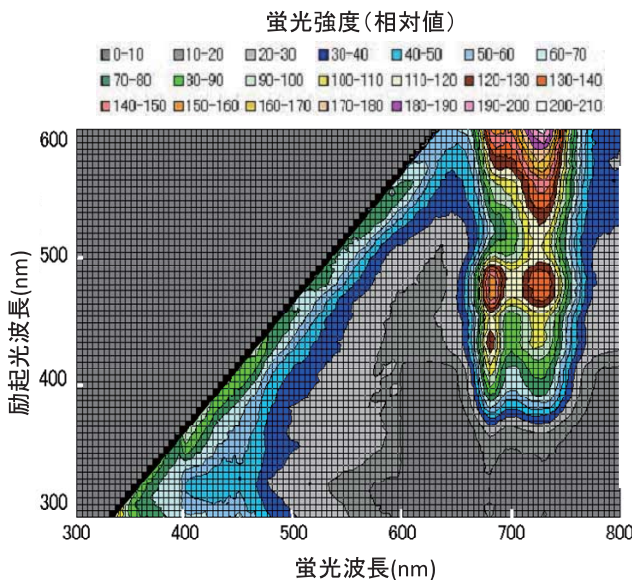


図3 励起光波長を300～600 nmまで変えたときのキュウリ葉からの steady-state 蛍光を分光測定した例 (Omasa et al., 2002)。



図6 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 et al., 2007; Hosoi et al., 2011)。

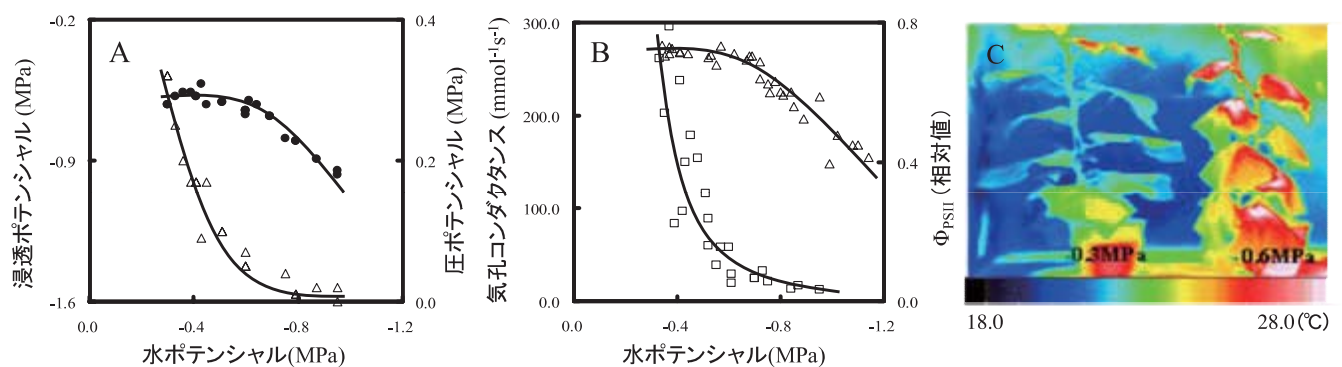


図4 水ストレスに伴う水ポテンシャルと圧ポテンシャル (Δ 図A)、浸透ポテンシャル (\bullet 図A)、気孔コンダクタンス (\square 図B)、 Φ_{PSII} (Δ 図B) との関係及びキュウリ葉の温度上昇 (藤野他, 2002)。

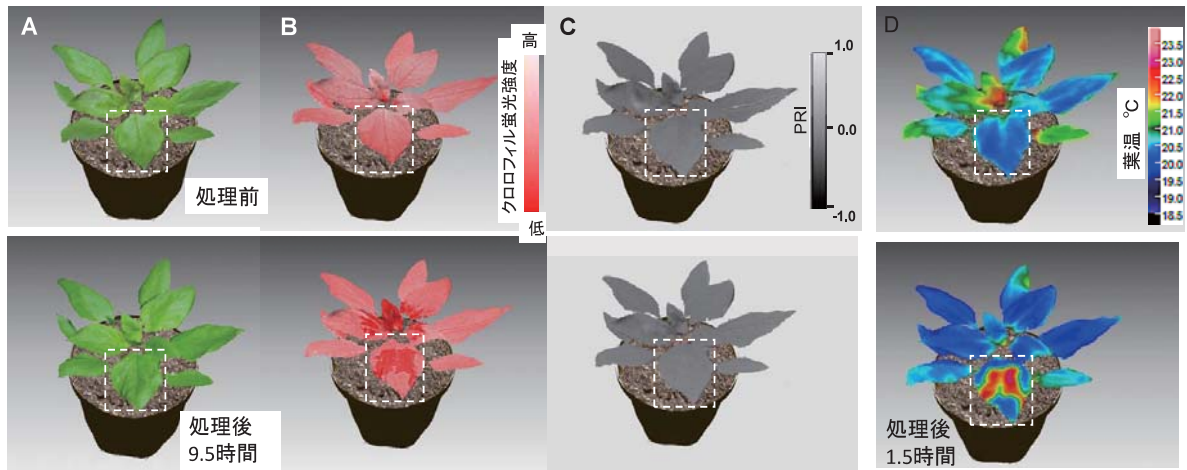


図7 除草剤処理（白い点線で囲った部分）に伴うカラー、クロロフィル蛍光、PRI、葉温の変化の3次元画像（Omasa et al., 2007）。クロロフィル蛍光と葉温の画像には影響がみられるが、カラーとPRIの画像には影響が見られない。また、PRIには、除草剤処理部位以外に影の影響がみられる。

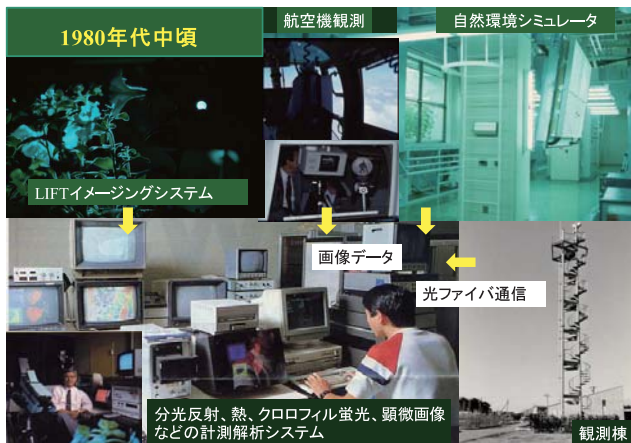


図8 1980年代中頃の自然環境シミュレータ制御室に設置された植物機能の画像計測処理システム。左上は光合成機能診断のためのLIFT（Laser Induced Fluorescence Transients）イメージングシステムによる植物計測の例。



図10 オーストラリアHRPPCの植物フェノミクス研究施設。植物機能リモートセンシング技術の開発と植物フェノミクスに関する共同研究を実施している。



図9 2009年のCanberraでの“1st International Plant Phenomics Symposium: from Gene to Form and Function”とFunctional Plant Biologyの特集号の表紙。表紙下部の左側の3次元画像は、筆者等のクロロフィル蛍光による光合成機能診断の例。

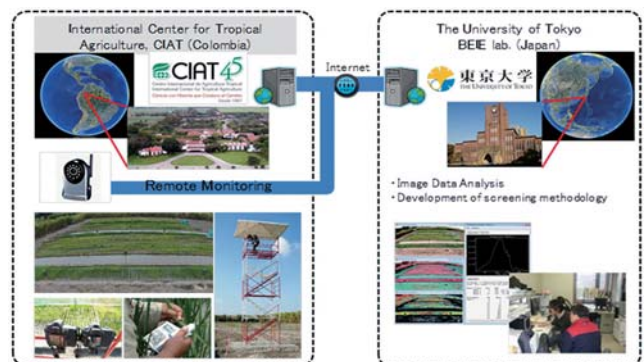


図11 コロンビアCIATとのイネのフィールドフェノミクスのための共同研究。