

6-9 インターネットを利用した農場モニタリングシステム

¹ 東京大学大学院農学生命科学研究科生物環境情報工学研究室

² JICA 専門家 / JSPS 科学技術研究移転プロジェクトリーダー

³ 国際熱帯農業センター (CIAT) 農業生物多様性部門・カリ・コロンビア

浦野 豊^{1,2}、石谷 学³、大政 謙次¹

はじめに

農場での作物生育や生育環境のモニタリングの必要性が、作物生育と環境との関係を研究する基礎分野だけでなく、実利用を目的とした栽培や育種、農作業の自動化などの分野でますます増大している^{1,4)}。そして、食の安全のための農業管理や農地、水質、地球環境などの保全を目的とした水管理や施肥管理のモニタリング研究などが盛んに行われている。また、植物の表現型 (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、環境管理に活かしていこうという植物フェノミクス (Plant Phenomics) の研究が世界的に行われるようになってきた^{5,7)}。

このような状況において、リモートセンシングによる農場モニタリングが注目されている。人工衛星や航空機からのリモートセンシングは、最近、その空間解像度が飛躍的に向上し、農場モニタリングの手段として注目されているが、より高い空間解像度を必要とする場合や常時観測のためには、地上での近距離リモートセンシングシステムが必要である^{1,4)}。作物の生育・生理反応の評価を目的として、光ファイバなどを用いたオンライン、リアルタイムでの農場リモートセンシングシステムの開発は1970年代の末頃から始まったが^{8,9)}、最近では、インターネットの普及により、これまでのように専用通信システムを構築する必要がなくなったため、比較的安価で簡便に遠隔通信によるモニタリングシステムが実現できる時代になった。そして、世界のネットワーク事情が向上しデータ転送速度も早くなっていることもあり、リモートセンシングデータやその他の計

測データを扱う科学技術研究の分野でもインターネット通信を利用する例が増えてきている。農場の画像データや環境計測データを、遠隔で、より簡便にモニタリングするための無線通信を利用したフィールドサーバシステムなども開発されている³⁾。

インターネットは距離の概念がないため世界中のデータをリアルタイムで共有することができ、とくに農学の分野では気候の異なる国での農場や温室など離れた場所の情報やデータを別の国の研究機関から監視したり制御したりすることができる利点がある。本稿では東京大学とコロンビアの国際熱帯農業センター (International Center for Tropical Agriculture : CIAT) との共同研究のために実際に構築したインターネット利用の農場モニタリングシステムについて簡単に紹介する。

CIAT農場におけるイネ研究のためのモニタリングシステム

1. インターネット利用のモニタリングシステムの必要性

CIATは、北緯約3度、標高約1,000mのアンデスの盆地にあるコロンビア第3の都市カリ郊外にあり、おもに熱帯地域の貧しい農民のために環境負荷の低いイネの品種やその農業手法の開発などを研究している国際研究機関である。現地は日照時間が長く、年間を通じて最高と最低の平均気温が、それぞれ約30℃、20℃と一定で、温暖な気候条件であり、イネの播種から収穫までの期間は品種にもよるが約4か月、また播種は年間を通じて任意の時期に可能である。このため、1年間に3

度の収穫が見込まれるためイネの成長サイクルに関するデータも1年間に3度取得でき、日本の場合の四季に縛られた1年に1回と比較すると3倍のデータ量で、研究環境としては非常に恵まれている。

CIATでは屋外農場でイネを栽培する実験を行なっているが、これまでは農場の状況を把握するには現場に出向くしか方法はなかった。誰かが農場で撮影した写真をサーバーに格納し別の場所にいる研究者がその写真を見て農場の状況を把握することは可能であるが、その方法では手間と時間差が生じる。このため、リアルタイムの農場モニタリングシステムが必要とされていた。

また、CIATでは環境負荷の低い品種の開発や生産費用のコストの削減を図るための研究が進められているが、とくに現在、肥料管理による水質改善や温室効果ガス削減のための、窒素利用効率(Nitrogen Use Efficiency: NUE)の高いイネの開発に向けた研究が行われている最中である^{10,11)}。作物のNUEを把握するためには、植物体が含有する窒素量を定量し、その植物が肥料をどれだけ効率良く利用しているかを算出する必要がある。精密に植物体に含まれる窒素量を知るためには、イネ個体サンプルを実験室内で定量分析する破壊分析が必要である。しかし窒素量は、葉内の葉緑素(クロロフィル)量と相関があることから、葉緑素量を定量

することにより近似的に推定できる。葉緑素量を定量する従来の方法としては実験室内で植物体をすりつぶして溶媒に抽出したものを定量分析するか、あるいは非破壊の簡便法として、葉緑素計(コニカミノルタセンシング社製)で葉のSPAD値を測定し、葉緑素量の指標とする方法がある。また、窒素利用効率に関する研究では、イネの刈取りによる器官ごとの乾燥重量や草丈、分けつ数などの測定も必要である。

CIATでは、施肥量を変えた実験農場に異なる品種のイネを栽培し、成長に合わせて、年間を通じ成長解析やNUEを分析する実験を続けている。数多くの品種のイネから統計的に信頼のおけるデータを得るためには、できるだけ多くの個体で複数回数の分析が必要であるが、これまでは工数と費用の制限があったため実際に分析できる数や回数は自ずと限られていた。そこで筆者らは、環境データや栽培データに加えて、ワイヤレスウェブカメラや改造した一眼レフカメラからの画像情報を、インターネット通信を用いてデータ利用が可能なイネのモニタリングシステムを新たに構築した。

2 インターネットを利用したリアルタイム農場モニタリング

図1は、ワイヤレスウェブカメラや改造した一眼レフカメラからの画像情報に加えて、気象や土壌などの環境データや栽培管理データなどをアーカイブし、イン

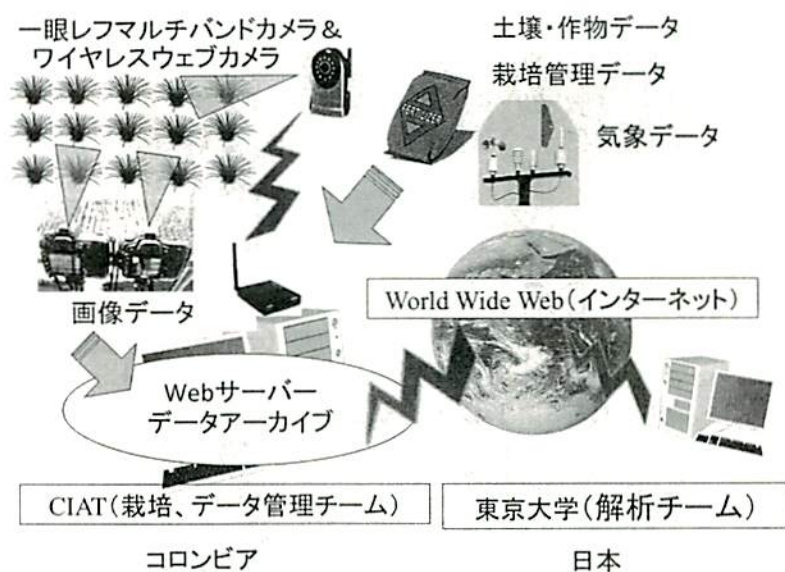


図1 インターネット通信を用いたイネのモニタリングシステムの概念図

ターネットを利用して、CIAT(石谷研究室)と東京大学(大政研究室)でイネの生育診断や植物フェノミクスの国際共同研究を行うために設置したモニタリングシステムの概念図である。また、図2にCIATの実験農場内に設置した高さ約9mの観測塔とワイヤレスカメラおよび無線発信装置を、図3にワイヤレスカメラによる観測例を示す。イネの実験農場は南北の方向に約44m、東西の方向に約88mの長方形の水田であり、その水田の東側辺中央の外側に1棟、東西方向に3等分する位置の南側辺外側に2棟の合計3棟の観測塔を設置した。そして、これらの観測塔から農場を見下ろすように、ワイヤレスカメラを地上から約6mに装着した。ワイヤレスカメラは、インターネットを介してCIATだけでなく、東京でも、昼夜を問わず遠隔で方向やズーム機能を制御でき、農場のリアルタイムモニタリングに利用することができる。

CIATでは、研究室や事務所がある周辺ではケーブルLAN(Local Area Network)だけでなくWi-Fi(Wireless Fidelity)も整っているが、研究室から約800m離れた農場はLANやWi-Fiの圏外であった。携帯電話などに使われる一般のデータ通信は可能であるが、一般の無線データ通信の常時接続で画像データを送ると通信費用の負担が大きくなり適切な速度も期待できない。そこで、農場の観測塔の1つに無線発信装置(図2右下)を設置し、CIATのラジオステーションに電波を飛ばすことによりLANに接続し、サーバーを介してインターネッ

ト回線で常時ワイヤレスカメラを利用できるシステムを構築した。これにより、ワイヤレスカメラとの接続が遠隔地の任意の端末からIDとパスワードを入力することにより可能になり、アクセス者は方向操作とズーム機能でワイヤレスカメラを制御しながら農場を観察できるようになった。なお、ワイヤレスカメラ(Panasonic ネットワークカメラ: WV-SW174W)の解像度はHD画質(1,280×960, H.264/MPEG-4 AVC)であり最大30fpsの画像の転送が可能であり、センサーはMOSの1.3メガピクセルが搭載されている。

今のところ、ワイヤレスカメラの役割は研究者が農場の様子を肉眼で常時観察し状況を把握することであり、ズーム機能(最大16倍、レンズズーム2倍、デジタルズーム8倍)を利用すれば、イネの草丈、出穂、開花、登熟などの様子を観察することができる。また、気象状況や冠水状態などの農場管理状況も同時に把握することができる。人間が肉眼で直接事象を観察することは、PC(Personal Computer)のモニターを介した映像であっても重要な作業であり、とくに共同研究では、高品質なリモートセンシングデータを取得するために、たとえば標準色の物体の設置について解析担当研究者から現場の研究者に指示することがあり、その際にワイヤレスカメラを通じて画像を見ながらリアルタイムに現場と情報交換を行える。これはCIAT内で約800m離れた研究室にいる研究者も地球の裏側にある東京大学の研究室にいる研究者も同様に利用者にとって距離

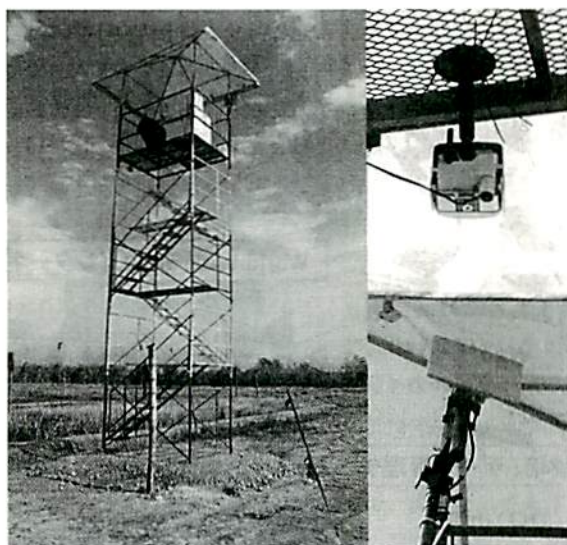


図2 観測塔(左)、ワイヤレスウェブカメラ(右上)、無線発信装置(右下)



図3 ワイヤレスウェブカメラでの農場モニタリングの例

を感じることなく、リアルタイムにシステムを通じて現場との情報交換が可能となる。

なお、現在のところワイヤレスカメラの利用目的は上述のとおり肉眼でのリアルタイムの観察および現場とのリアルタイムの情報交換のためであるが、今後さらにワイヤレスカメラを発展的に利用するためのシステム構築を進めている。その1つとして、画像データを継続的に記録し、成長の様子などの状況の変化をデータとして残すこと、さらに、次項で述べる一眼レフカメラの代用として、可視画像と同時に近赤外画像を取得することで、葉緑素や窒素含有量、成長量などに関係する植生指数を継続的に求めることである。ワイヤレスカメラのセンサーは近赤外線に感度があるので、フィルターの装着や多少の改造で植生指数を求める波長領域の画像データを取得することが可能である。なお、ワイヤレスカメラは年々、空間解像度や感度などの性能が向上しており価格も安価になりつつあるので、階調(量子化ビット数)の問題はあるが、将来、肉眼での観察のためだけのワイヤレスカメラから、データを取得するためのカメラに目的を置き換えることも可能であろう。限られた利用であっても、これらのデータを遠隔にいる関係研究者とリアルタイムに共有することができる利点は大きい。

3. 改造した一眼レフカメラによる

イネの生育モニタリングシステム

ワイヤレスカメラに比べて画像解像度や階調性能のよい2台の一眼レフカメラ(NIKON D300sおよびD80、それぞれ12.3メガピクセル(4,288×2,848ピクセル、14ビット非圧縮RAW)および10.2メガピクセル(3,872×2,592ピクセル、12ビット圧縮RAW))を改造し、可視3バンド(赤(R)、緑(G)、青(B))に加えて、近赤外線(IR)1バンド(約850nm以上 HOYA社製IR-85赤外透過可視吸収フィルター装着)の4バンドマルチスペクトル画像を取得できるようにした(図4)。これらの4バンドを用いて、葉緑素や窒素、成長などに関するNDVI(Normalized Difference Vegetation Index、正規化植生指数)などの植生指標を計算することができる(図5)。

この実験は、窒素利用効率の高いイネ品種の選抜のために、用水路と畦道で区分された区画を、施肥量が異なる3実験区に分け、それぞれの実験区に品種の違うイネを植え、窒素利用効率の違いを調べた例である。施肥量の違う実験区で、品種間差が生じたが、NDVIのような植生指標を用いてその違いが識別できた(未発表)。一眼レフカメラを用いた方法としては、穂肥を管理することにより米の品質を向上させることが実現しているが¹²⁾、一眼レフカメラの特徴としては、大きな画像素子(APS-Cサイズ:23.4mm×16.7mm)に加えて、

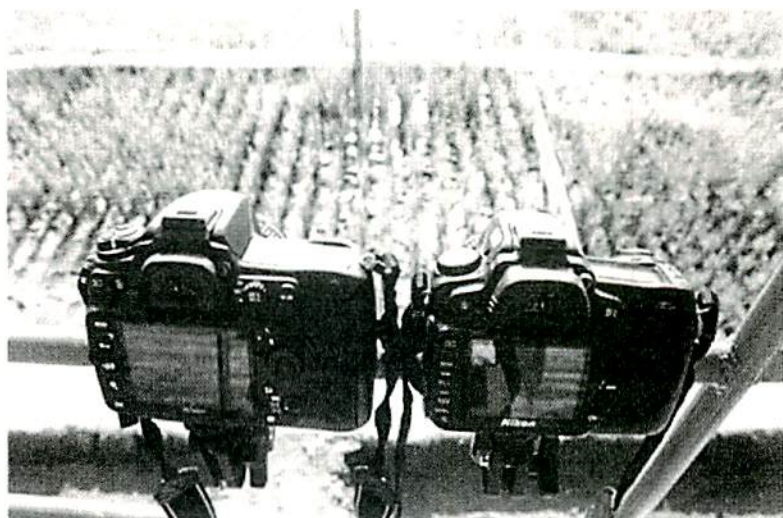
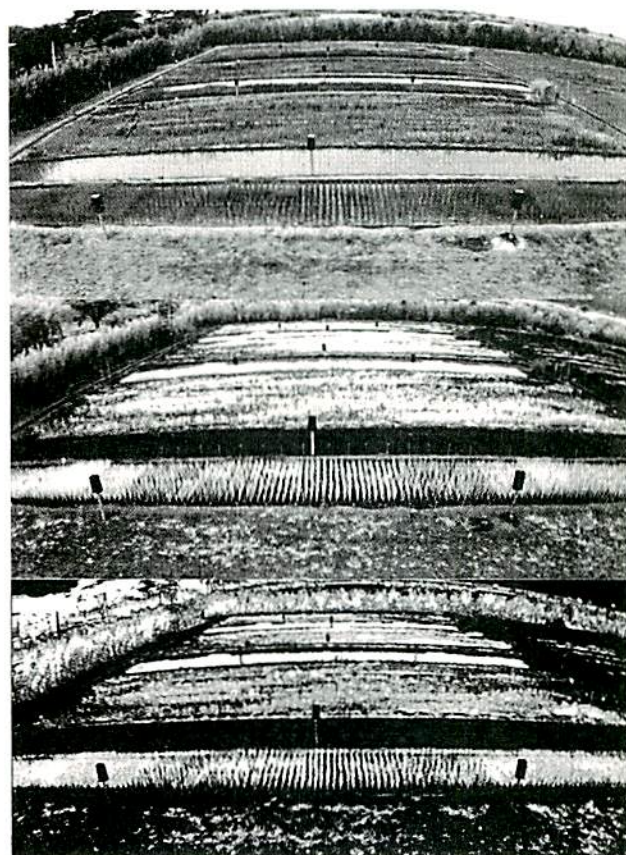


図4 一眼レフカメラを改造した4バンドカメラ



可視画像

近赤外画像

NDVI画像(グレースケール)
(黒から白になると値が大きくなる)

図5 改造した一眼レフカメラによる CIAT 農場での窒素利用効率の高いイネ品種の選抜モニタリングの例

対象とする農場の広さに合わせて市販されている規格レンズを容易に入手交換することができることにある。たとえば、対角180°の超広角(魚眼)レンズから望遠レンズまで目的に応じて画角を選択できる。とくにCIATでの研究はイネの品種間比較なので、多くの品種のイネが植えられている農場において、1枚の画像で広い範囲を短時間で取得する目的には適している。このため、広範囲に植えられた多くの品種間の定量的な比較がより正確に実現でき、統計的にも信頼性の高いデータが得られ、実験農場全体を可視化できる利点もある。さらに、統計的信頼性を上げるために計測回数を増やす場合も、これまでのようなハンディタイプのSPADのような計測器を使った直接接触計測やサンプル個体の破壊計測と比較併用すれば、従来の方法に比べて、工数や費用の面で圧倒的に負担が少なく実用的である。

4. インターネットを利用したデータ共有システム

一眼レフカメラやワイヤレスカメラを用いた計測は、短時間で、広範囲、高解像度の計測が可能になる利点があるものの、そのデータ量は膨大である。たとえばNIKON D300sで取得した12.3メガピクセルの1画像は、画像構成にもよるが最も品質の高いRAWファイル(14ビット)で約25.4メガバイト、TIFF(RGB)で約36.6メガバイト、低圧縮のjpegファイルにしても約6~8メガバイトの容量である。1回のデータ取得では3箇所の観測塔から複数方向の画像データを複数枚取得するため、すべての画像を合計すると容易に1ギガバイトを超えてしまう容量である。さらにそのような計測を何日も続けると、イネの生育期間4か月にもわたる計測では容易に1テラバイトを超える。このようにデータ容量は膨大であり、計測を続けるにつれデータ量は日々増え続ける。

このようなデータを、地球の裏側にある東京大学とコロンビアとの共同研究でデータ共有するためには、これまでの方法ではDVD-Rもしくはハードディスクに格納したデータを都度航空郵便で送る必要があったが、この方法では時間や費用がかかるということと発展途上国の場合郵政が完全ではないため途中で紛失や盗難に遭うなどのセキュリティ上の問題もある。そこで、万全のデータ保管と共有の運用を実現するために、まずはCIATにサーバーシステムを設置した。そのサーバーには数テラバイトのハードディスクを付帯し、ハー

ドディスク障害時のデータの消滅を防ぐミラーリングシステムを採用した。ハードディスクの容量は必要に応じ増やすことができるので、実質容量は無限定と見てよい。また、サーバーにはCIAT内のLANによりアクセスできるのでデータをサーバーまで持参して格納する必要はなく、CIAT内LANにつながる端末から高速(100~1,000Mbps程度)にデータをサーバーに格納することができる。ここで、セキュリティ上サーバーにアクセスできるのは固有のIDとパスワードを与えられた共同研究者に限っている。これらの管理はCIATのIT管理部に年間契約で依頼しており、期間中研究者はデータの格納と利用に集中できる。

CIAT内のLANと同様に、権限を与えられた共同研究者はCIAT外部から一般のインターネット回線を通じてサーバーのハードディスクにアクセスできる。つまり、このシステムを用いればIDとパスワードで権限を与えられた共同研究者は世界中どこからでもインターネット回線を通じてデータにアクセスでき共有できる。外部からのデータ転送速度はCIAT内と比較すると多少遅くなる(CIAT・東大間の実測で10~100Mbps程度)が通常の使用には差し支えない速度である。

同様のデータ共有システムとしては現在世界中のいくつかの企業が提供するクラウドサービスがあるが、現在のところデータ転送速度と容量が限られる場合が多いので、今回はデータ転送速度が早く容量も無制限大として扱える独自のサーバーをCIAT内に構築することを採用した。今後、一般のクラウドサービスの性能が向上し対費用効果が独自サーバーを上回るようになれば一般企業が提供するクラウドサービスに切り替えることも考えられる。

まとめ

本稿では、東京大学とコロンビアのCIATとのイネの生育診断や植物フェノミクスの共同研究のために構築したインターネットを利用した農場モニタリングシステムについて簡単に紹介した。現在では、地球上の広い地域で高速インターネット通信が利用できる時代である。CIATのようにすでにインターネット環境が整っている施設内ではそのLANに接続することにより、またLANがない地域でも携帯電話回線(モバイルインターネット)の電波が来ている地域であれば通信業者との契約によりデータ通信が可能となる。さらに静止衛星を

利用する国際海事衛星機構 (Inmarsat) により山岳部の僻地や海上であってもインターネットに接続してデータ通信が可能となっている。通信にかかる設備と費用さえ準備すれば、今や北極と南極の一部を除く世界の全域でデータ通信および音声通信が可能である。

構築費用が最も安価なのは、インターネット環境が整っている施設内でそのLANもしくはWi-Fiに接続することである。データ取得対象の実験農場までLANもしくはWi-Fiが届いていれば、管理者による通信プロトコルの発行と一般のPCなどの通信端末の設定により容易にデータ通信が可能となる。しかしながら、ここで述べたデータ共有の例では、コロンビアの研究機関の施設内にLANおよびWi-Fi環境が整備されているものの、建物から約800m離れている屋外の実験農場では有線LANはもとよりWi-Fiが届かない場所であった。このような場合、施設内の既存のインターネットに接続するためには有線でLANケーブルあるいは光ケーブルを設置するか、または近距離無線機を設置するかを選択となる。最も安価なのはLANケーブルによる接続であるが、距離が800mの場合通常のLANケーブルの適応外となり、また光ケーブルの設置は試算によると200～300万円以上もの費用がかかることがわかったので最終的に無線で接続する方法を選択した。無線で実験農場からCIAT構内のラジオステーションに電波を飛ばすのは、すでに建設されていた観測塔を利用することで容易であり、システム機器とその設置費用は建設当時の総額で約80万円ほどであった。

このように、現場の状況によって有効な通信方法と費用をその都度検討する必要があるが、いずれにしても現在の技術においては世界中のあらゆる現場からのデータを遠隔地から共有できる時代である。さらに、通信手法および通信機器、またワイヤレスカメラなどのセンサー機器や計測器類は日々進化高度化しており、毎年のようにより高速、高機能、高解像、さらに低価格のモデルが実現されている。したがって、今後はここで挙げた事例よりも同予算あるいは低い予算でさらに高度で高品質なデータ共有システムが実現できると

予想される。

また、本稿ではNUEでのシステム適応例を挙げたが、イネについては耐乾燥性改良研究も進められており⁷⁾、その実験においても今回構築したインターネットを利用した農場モニタリングシステムを利用する予定である。このように、今回構築したシステムは、今後、NUEだけでなく水利用効率、さらに収穫量および収穫品質など数多くの機能診断目的に合わせた農作物改良研究に適応でき、そのデータをリアルタイムに遠隔地の共同研究者同士が共有し解析診断を効率的に行えるという大きな利点と可能性を有している。

なお、本システムはJICA/JSPSの予算によるコロンビアへの科学技術移転プロジェクト(研究代表者: 浦野豊)において、CIATの石谷研究室と東京大学の大政研究室が共同で構築したものである。

【参考文献】

- 1) 農業情報学会編: 新農業情報工学, 養賢堂, 2004.
- 2) Munack A, ed.: CIGR Handbook of Agricultural Engineering, VI. Information Technology, ASABE, 2006.
- 3) 大政謙次編著: 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, 2007.
- 4) 鳥山和伸: 日本土壤肥科学雑誌, 80(1): 66-74, 2009.
- 5) Furbank R T, ed.: Funct. Plant Biol., 36: 845-1026, 2009.
- 6) 大政謙次: 植物環境工学, 24(3): 142-149, 2012.
- 7) 鴨下顕彦: 日本作物学会紀事, 80(1): 1-12, 2011.
- 8) 大政謙次, 相賀一郎: 遺伝, 35: 25-31, 1981.
- 9) 大政謙次ら編著: 植物の計測と診断, 朝倉書店, 1988.
- 10) Blair M W, et al.: BMC Plant Biol., 11: 171, 2012.
- 11) Subbarao G V, et al.: Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A., 106: 17302-17307, 2009.
- 12) 松田真典他: 遺伝, 64(2): 81-86, 2010.