

— 資 料 —

ダイズ単収の日米地域差の拡大要因に関する作物学的調査 —米国における視察報告（第1回）—

桂 圭佑¹⁾・義平大樹²⁾・本間香貴³⁾・Larry C. Purcell⁴⁾・田中朋之³⁾・白岩立彦³⁾

¹⁾京都大学大学院農学研究科附属農場 (〒569-0096 高槻市八丁畷町12-1)

²⁾酪農学園大学酪農学科 (〒069-8501 江別市文京台緑町582-1)

³⁾京都大学大学院農学研究科 (〒606-8502 京都市左京区北白川追分町)

⁴⁾*Department of Crop, Soil, and Environmental Sciences, University of Arkansas
(1366 W. Altheimer Drive Fayetteville, AR, 72704, USA)*

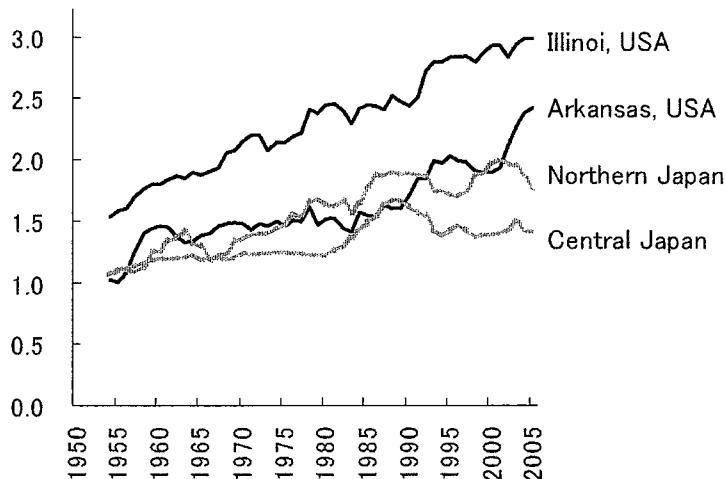
キーワード：キーワード：ダイズ、単収、アメリカ合衆国、遺伝子組換え

ダイズの国内自給率は5%前後と極めて低く（農林水産省, 2008a), ダイズの生産性と安定性の向上が強く望まれている。一方で、国内のダイズの単位面積当たりの平均収量（単収）は1.7t/ha程度（農林水産省, 2008b)と、米国のそれ(2.7t/ha; USDA-NASS, 2009)と比較しても極めて低く、さらに両国間におけるダイズ単収の差は1950年代以降拡大の一途をたどっている（第1図）。また、両国とも地域により単収が大きく異なっている。このようなダイズ単収の地域間差異をもたらす要因の解明は、国内のダイズ単収の増大に向けた方策の検討にあたり、極めて重要な情報になると考えられる。そこで著者らは、まず、米国におけるダイズ栽培の実態の把握を目的として、2008年9月28日から10月5日まで、米国イリノイ州、ミズーリ州、アーカンソー州を巡り、米国の大学、研究機関、現地圃場などの視察を行った。ここでは視察結果より、米国におけるダイズ栽培の現状を中心に紹介する。

1. 米国におけるダイズ栽培の概要

米国は、世界最大のダイズ生産国で、同国の生産量は世界の全生産量の32%を占めている。米国内におけるダイズは1970年代に栽培が本格化し、近年のダイズ作付面積は3000万haほどで推移している。2007年度はバイオエタノールの需要増にともなうトウモロコシの作付面積の増大などにより、2600万haに減少したものの、なおもこれはトウモロコシに次いで2番目の広さである。

今回の視察で最も印象に残ったのは、農家による作付割合や採用品種の決定、あるいは品種の研究・開発まで、農業にかかわる全ての過程が経済的な原理によって強力に決定・推進されていたことである。例えば、ダイズの作付割合は、近年劇的に変化している。上述のように2007年度はバイオエタノールの需要増により、ダイズの作付割合は急激に減少している。また、現地での聞き取り調査では、近年の原油高などによる肥料価格の高騰のため、来年度以



第1図 日米におけるダイズ単収の推移 (t/ha; 5年移動平均).

2009年2月25日受理

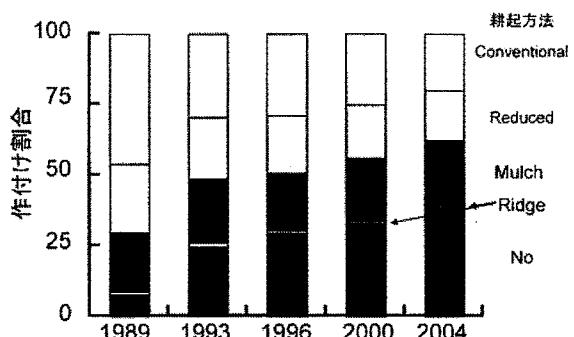
連絡責任者：桂 圭佑 (kkatsura@kais.kyoto-u.ac.jp)

降は化学肥料を大量に必要とするトウモロコシの作付割合を減らしていくという農家も多かった。農家は10月上旬の段階で、来年の作付を決定し、種子や肥料の注文を始める必要がある。この意思決定の時期は年々早期化しているが、背景に肥料や種子の価格高騰がある。このように、農家は、常に市場経済を注視しており、あるいはその影響を強く受けており、所有する何百ha～何千haという広大な農地の作付体系を柔軟に変化させている。ある農家の「I am an economist.」という言葉が非常に印象的であった。

また、品種の開発も米国では活発であった。米国のダイズの大半が油糧用であることに加え、子実の成分や用途などに着目した市場も未発達で、取引が主に容量ベースで行なわれるため、品質の向上よりも収量性に関連したストレス耐性や病害虫抵抗性が育種の最大の関心事であった。米国のダイズ品種の寿命は3～5年と短く、毎年何十という品種が開発されている。品種の開発には大学も深く関わっており、品種そのものの開発のほか、交雑後代の種子会社への提供なども行なっていた。また、大学は各社が開発した品種について多地点で収量性検定試験を行い、その結果を公表している(e.g. Dombek et al., 2007)。この結果は農家が品種を選択する際の資料になり、種子会社も品種の売り込みの際に積極的に用いている。こうした状況は、日本国内の主力品種をフクユタカやエンレイなどの数品種が占め続けているのとは対照的である。米国におけるダイズ単収の順調な増加の背景には、このような活発な新品種の開発があるであろう。

近年のダイズ新品種のほとんどは遺伝子組換え(GMO)品種である。GMO品種は1996年に普及が始まり、現在、米国内のGMOダイズ品種の作付は全ダイズ品種の95%を占めている。現地の穀物集積企業の一つで、日本にも多くの穀物を輸出している、CGB(Consolidated Grain and Barge, Enterprises, Inc)社では、近年のGMO品種の急増に伴い、IPハンドリング(分別生産流通管理)によってGMO品種と非GMO品種を区別して管理している(同社では非GMO品種はGMO品種の混入率が3%未満を許容範囲としている)。近年は多くの農家が、その栽培管理に手間がかからないことから、GMO品種を好んで栽培するようになってきているため、CGB社は非GMO穀物の確保に苦労しているようである。

一つの農家は、複数のダイズ品種(5品種ほど)を栽培しており、品種は生育期間で収穫作業が重ならないように選んでいる。種子は毎年種子会社から購入するためコストが嵩み、生産費の35%以上を占める(Soy Stats, 2008)。しかしながら、“自家採取しないのか?”との問い合わせに対しては、“GMO品種は自家採取が禁止されているが、たとえ可能であったとしても、毎年改良された品種が出てくるので、自家採取するメリットがない”との答えであった。この答えには種子会社から種子を買うことは、種子会社への投資であるとの考えが含まれているようであった。GMO品種を栽培する場合は、除草剤散布は播種1ヶ月後に1回、雑



第2図 アメリカにおけるダイズの耕起方法の変遷。

Conventional tillage: 収穫残渣の被覆率15%以下, Reduced tillage: 同15～30%, Mulch tillage: 同30%以上. Conservation tillageという場合はMulch, Ridge, No tillageを指す。Conservation Technology Information Center (<http://www.conervationinformation.org/>)より作成。

草がひどい場合には播種直前にも1回散布するケースが多い。また、除草剤抵抗性のGMOダイズ品種は、保全耕起栽培の増加にも貢献している。米国では土壤流出を防止するために保全耕起栽培が一般的になりつつあり、ダイズの場合1993年の時点で既に作付面積の50%に達している(第2図)。その後3年間、保全耕起栽培の割合に大きな変化はないが、GMO品種の普及と共に再び増加に転じ、2004年には62%に達している。1996年以降でみると、特に不耕起栽培が増加している。不耕起栽培では、通常栽培と比較して单収が不安定になるが、投入コスト(input cost)が低く抑えられるため(不耕起栽培の投入コストは耕起栽培に比べて25\$/エーカーほど安くなる)、多くの場合、結果として全体の利益は多くなるらしい。米国におけるダイズ栽培の近況はSoy Stats 2008 editionによくまとめられている(<http://www.soystats.com/>からも閲覧可能)。

2. モンサント社におけるGMO品種開発

モンサント社は、世界最大のGMO品種の種子会社である。1996年に、最初のGMO品種を開発して以降、GMO品種を次々とリリースして急成長した。最初のGMO作物は繊維作物のワタで、その後、トウモロコシやダイズ、ナタネ(Canola)を始めとした油糧作物、野菜や果物、アルファルファのGMO品種を次々とリリースしている。GMO開発には、

- ①他の生物の遺伝子の情報を得る過程
- ②その有用遺伝子を目的作物に導入する過程
- ③カルスからの組織培養
- ④植物体として再生した段階でのガラス室での選抜
- ⑤選抜した個体の圃場検定

の各段階があり、本社だけでも総勢400人の研究者が各段階で研究・開発を行っている。

トウモロコシでは耐虫性、多収性、耐乾性、除草剤耐性、高窒素利用率、高油成分含量などのGMOを、ダイズでは

センチュウ耐性、多収性、除草剤耐性、耐病性、高油成分含量、高ステアリン酸含量、耐干性、耐冠水性など、イネでは耐寒性の遺伝子導入品種を開発している。現在GMOダイズ品種は、除草剤グリホサートの抵抗性品種のみである。GMO品種の普及にともなう除草剤グリホサートの使用の拡大により、米国では抵抗性雑草の被害が問題になってきている。この対応策として、既に別の除草剤の抵抗性遺伝子を導入した品種開発に着手している。各作物の各目標形質の達成度は、第1表のように4段階に分けており、社内の研究達成目標の明確化・共通化や研究者の意識高揚を進め、社外へもアピールしている。

栽培したGMO品種を農家が自家採種して来年度以降の種子として使用することは契約で禁じられているため、農家は毎年GMO種子を購入する必要がある。しかし、GMO種子の使用により種子代が多少増加しても、明らかに収量増や防除回数の減少により農家の収益は増加し、また、種子代は最終的には新たなGMO品種の開発に活用され、農家の利益につながることを、モンサント社は強調していた。しかしながらダイズの栽培環境は多岐にわたり、1社では対応しきれない。そこでGMO開発の優位性を活かして独占を目指すのではなく、他社に使用ライセンスを売り収入を得る方式を取っている。従って除草剤グリホサート抵抗性品種の普及率は95%でも、モンサント社自体のシェアは25%である。こうしたライセンスの購入先には、種子会社大手だけでなく中小の種子会社や大学なども含まれている。前述した穀物商社CGBの市場開発部長は、こうしたライセンス販売戦略がアメリカでGMOが広く受け入れられた要因の一つであると分析していた。

研究施設の規模の大きさ、研究スタッフの充実度など、その規模の大きさは圧倒的であった。なお、世界のGMO作物の動向はISAAA(International Service for the Acquisition of Agri-biothec Application)のホームページで調べることができる(<http://www.isaaa.org/>)。

3. 米国内におけるダイズ栽培の地域間差

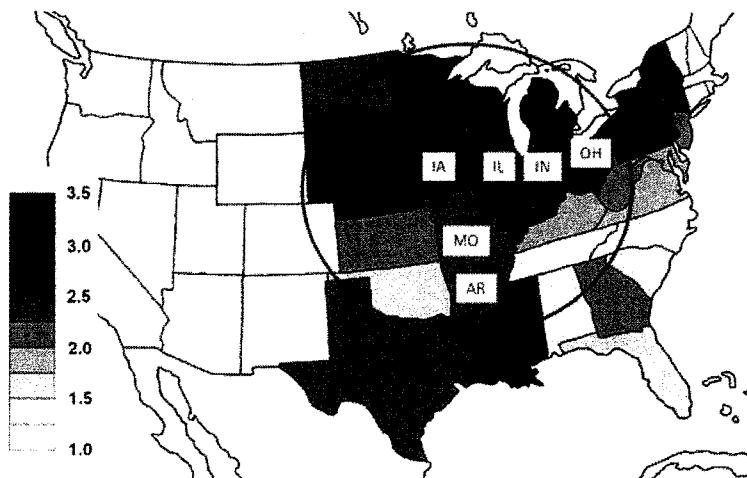
米国におけるダイズの单収は、近年も順調に増加しており、2005年度には2.89t/haを記録している。一方で、州別の单収を見てみると、大きな変異があることが分かる(第3図)。米国におけるダイズ栽培は五大湖南西部のアイオワ州、イリノイ州を中心とした辺りが中心で、アメリカ大陸西部ではほとんど生産は行われていないが、2007年の州別のダイズ单収を見ると、アイオワ州で3.46t/haを記録しており、緯度が同州と同程度あるいは高い州では、3t/ha近い单収を達成していることがわかる。一方で、南部は2~2.5t/ha前後の地域が多く、特に南東部は1.5t/haに満たない州も多く見られ、概して单収は低い。ここでは、現地での圃場の視察や聞き取り調査によって得られた知見をもとに、この单収の地域間差を考えてみる。ちなみに、著者らが視察した州の中では、ダイズの单収は、イリノイ州が2.89t/ha(2007年度、以下同様)と、中南部のミズーリ州(2.49t/ha)やアーカンソー州(2.42t/ha)と比較して高い。

3-1 イリノイ州におけるダイズ栽培

イリノイ州はダイズの栽培面積、生産量とも、アイオワ州に次ぐ第2位を占めており、米国におけるダイズ栽培の中心地の一つである。上述のとおり、单収も2.89t/haと高い。USDAの土壤分類によると、この一帯にはMollisolやAlfisolが広がっている(Soil Survey Staff, 1999)。多くの研究者が、イリノイ州のダイズ多収要因として、土壤肥沃度を挙げていた。アイオワ州、イリノイ州、インディアナ州、オハイオ州の土壤は概して肥沃であり、実際にイリノイ州の土壤は、ミズーリ州、アーカンソー州の土壤よりも、有機物が多い印象を受けた。ミズーリ大学Delta Research Centerの研究者の話によると、イリノイの土壤の有機物含有率は3~4%であるのに対し、ミズーリ州のそれは1%程度と低い。また、作土層も深く土壤有効水分量

第1表 モンサント社における遺伝子導入品種開発の達成段階と2008年におけるダイズにおける主な達成例

	Phase I Proof of concept	Phase II Early product development	Phase III Advanced Development	Phase IV Prelaunch
達成項目	・目的遺伝子の特定 ・特定作物導入への初期段階 ・小規模の圃場検定	・より多数の材料での遺伝子導入 ・目的形質の良質化 ・データの蓄積 ・圃場検定	・目的形質改良の達成度の決定 ・大規模な圃場検定 ・許可申請用データの測定	・許可申請 ・種子の増殖 ・市場戦略の考案
平均的な達成期間	12~24ヶ月	12~24ヶ月	12~24ヶ月	12~36ヶ月
達成度	25%	50%	75%	90%
例	センチュウ抵抗性 高ステアリン酸	多収性	高脂質 MDBA抵抗性	グリホサート抵抗性 (第2世代)



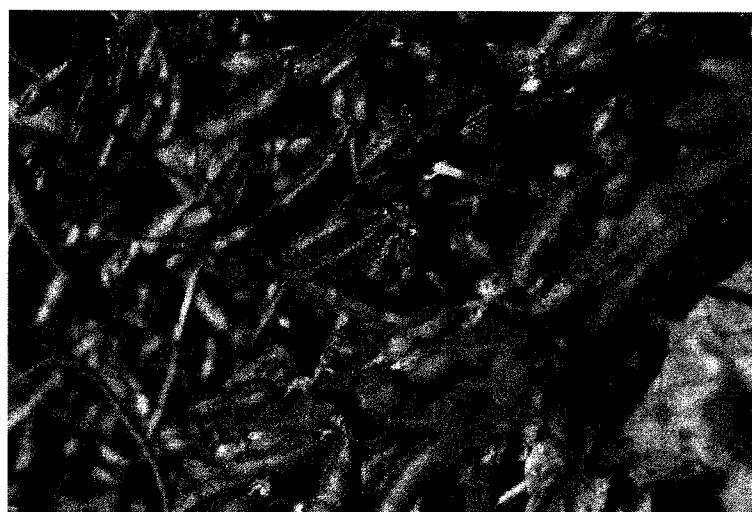
第3図 米国における2007年度の州別のダイズ単収(t/ha).
丸枠内は米国内における主要ダイズ栽培地域。
IA: アイオワ州; IL: イリノイ州; IN: インディアナ州; OH: オハイオ州; MO: ミズーリ州; AR: アーカンソー州.
Soy stats 2008より作図.

も多いことが指摘されている。実際、イリノイ州のダイズ栽培圃場には灌漑設備がほとんどなかった。

イリノイ州では、1900年代以降、トウモロコシが主要作物であったが、1970年代からダイズ-トウモロコシの1年1作が基本的な作付体系となっている。この場合、投入する肥料はトウモロコシ作付前には P_2O_5 , K_2O を 100 ~ 200kg/ha, N を 200kg/ha 程度、ダイズ作付前には P_2O_5 , K_2O を 50kg/ha 程度である。各作物を連作する場合もあるようだ、トウモロコシ2年-ダイズ1年の作付で、ダイズの単収が高くなるという情報もあった。投入コストは、ダイズの 300\$/エーカーに対して、トウモロコシは 500\$/エーカーで、この差は肥料などの価格の高騰により拡大している。ダイズの栽植密度は 25 ~ 30 個体/m² が適当と考えられており、視察した農家圃場でも畝間 45cm, 株間

15cm の 2 ~ 3 粒播くらいの栽植様式と、日本の慣行栽培よりも密植の傾向が見られた。ここでは 1 株の莢数は 50 莢ほどで、5 ~ 6t/ha 近くは達成していたであろう(第4図)。

ちなみに、イリノイ州のトウモロコシの単収は 10 ~ 12t/ha で、ダイズと同じく多くが GMO 品種であった。相対熟度が 115 ~ 130 日のものが使用されており、播種期は 4 月中旬で、全てを完熟期に収穫する体系を取っている。濃厚飼料用、デンプン用、エタノール原料用のそれぞれの用途に対応した品種があるわけではなく、ほぼ共通品種で対応し、価格の高いところへ売るようである。イリノイ州は酪農家が多く、サイレージとして用いられることはほとんどない。一方で、ウィスコンシン州、ミシガン州では酪農家が多く、サイレージとしてトウモロコシを用いている。



第4図 視察圃場でのダイズの着莢の様子。
比較的密植にもかかわらず、非常に莢着きが良かった。

3-2 ミズーリ州、アーカンソー州におけるダイズ栽培

前述のとおり、ミズーリ州やアーカンソー州のダイズの单収は、イリノイなどの北に位置する州と比較して低い(第3図)。USDAの土壤分類によると、この一帯にはAlfisolやUltisolが広がっており、ミシシッピ川流域のあたりにはVertisolが広がっている(Soil Survey Staff, 1999)。イリノイ州の道中では、作物といえばトウモロコシかダイズしか見なかつたのだが、ミズーリ州とアーカンソー州では、これらに加え、イネ、ワタなどもみられた。大別すると、ダイズ主産地の北部はトウモロコシ-ダイズの輪作地帯で、南部はトウモロコシ、ダイズ、イネ、コムギ、ワタなどを輪作しており、2年3作で作付けている例もあるようである。南部はさらに上記5種を作付けている地域とイネとダイズの輪作地域に分かれていた。作目は、どの作物が一番儲けられるかによって、年々大きく変化する。イネは市場価格が高いので、比較的肥沃な土壤で栽培され、砂質で乾燥害が起こるようなところではトウモロコシやワタが栽培されている。しかし、土壤は北部と比較すると概して瘦せており、作土層も浅いため、しばしば干ばつに見舞われる。そのため、多くの農家が地下水をくみ上げる灌漑施設をもっていた。このような場合、頻繁に土地を均平化して、畝を作り、灌水の度に数cmの水を張る。イネとの輪作をしている場合には、ダイズは冠水害にあうこともあるようである。

コムギの後作として、しばしばダイズが栽培されることがあるが、その場合、ダイズの播種期が遅れるため(コムギの収穫は6月頃)、生育期間の短いダイズ品種が求められる。生育期間の長短と单収は、正の相関にあるため、このような場合のダイズ单収は低くなることが多い。ある農家では、コムギ後のダイズ栽培では、栽植密度を高くして、

初期生育を確保するなどの工夫をしていた。栽植様式は、畝幅が20cmくらいの場合から1m超のところもあり、非常に多様であったが、栽植密度は約30株/m²と概して高いところが多かった。こうした密植にもかかわらず着莢は非常に良く、個体密度の低下に対しても補償作用の大きいことが観察された。イネとの輪作をしている地域では、イネとダイズで同じ播種機を使用するため、ダイズの畝間は20cmくらいと狭い場合が多い。株間は3~15cmと多様であったが、このような畝間の狭い圃場でも、单収は3t/ha以上は達成しており、冠水害さえ回避できれば多収となっている印象を受けた。また、アメリカダイズ協会によると、米国の主なダイズの用途は油糧用であるが、南部では、一部で高タンパクダイズも栽培されているそうである。アーカンソー州の種子会社では、シカ(ハンティング用)を飼育するための飼料用品種やトウモロコシとの混作用の品種など多様なダイズ品種の育成も行っていた(第5図)。

ちなみに、米国はコメの生産量も多く、ミシシッピ川流域は米国のイネの主産地の一つである。ミズーリ州やアーカンソー州では、大面積の稻作圃場が多く見られた。現地で見た品種の全てが、粉に毛のない無毛性の長粒品種であった。播種は4月下旬に乾田状態で直播し、播種後3週間後くらいから灌水状態を保つ。施肥はN:P₂O₅:K₂O=150:150:150(kg/ha)ほどを施用し、全N施肥の2/3の量とP₂O₅、K₂Oを元肥として灌水前に、幼穗形成期ごろにNの残り1/3の量を飛行機を用いて散布する。ハイブリッド品種も多く用いられている。農家圃場の見学によると、直播にもかかわらず、稈が太くてしっかりしているためか、倒伏の心配はなさそうであった。視察したどの圃場も畝間は約20cmで、穗数は1mあたり70~100本ほど、单収は9~12t/haくらいはありそうであった。



第5図 シカ(ハンティング)用の飼料用品種。

Eagle Seed Companyにて、早晩性程度(MG) VII、子実肥大始期(R5)における乾物量
が通常のダイズの約2倍、子実収量は2分の1。

4. まとめ

米国におけるダイズ栽培の最新の情報を多く得ることができた今回の視察は非常に有意義なものであった。何よりも印象的であったのは、ダイズに限らず農業にかかわる全ての過程が、経済的な原理によって強力に決定・推進されていたことである。日本との差に関しては、活発な品種開発と高い栽植密度が特徴的であった。日本ではまだ一定品質の量の確保が課題であるが、品種開発については、これまでの品種単位の取引ではなく、府県や農業共同組合単位での銘柄取引の推進により、新品種の導入を活性化させることも必要ではないかと感じた。銘柄取引は世界のコムギ市場では一般的だが、品質が規定される代わりに品種には一定の幅をもち、従って品種のマイナーチェンジが可能である。栽植密度については日本でも狭畦密植栽培に関心がもたれているが、ダイズの生産性向上および安定化のためには取りうるべき方針の一つであると考えられた。また、ダイズ単収の日米間差だけでなく米国内での地域間差についても、土壌、作付体系、品種、栽培管理が関わっているようであった。今後、これらの基礎的な知見を整理し、今回考察できなかった気象要因などの要因も考慮して、量的な解析を加えていきたい。

謝 辞

本報告は、現地での聞き取り調査や現地調査を中心としたものである。現地では、イリノイ州立大学の Randall L. Nelson 博士、Emerson D. Nafziger 博士、CGB 社の James Stitzlein 氏、Tim Dillon 氏、Brett Rohlk 氏、モンサント社の Gary F. Barton 氏、アメリカ大豆協会の Paul Burke 氏、Kim Nill 氏、Craig Ratajczyk 氏、ミズーリ大学 Delta Research Center の Gene Stevens 博士、David J. Dunn 博士、Joe Henggeler 博士、Jeong-Dong Lee 博士、Eagle Seed Company の Brad Doyle 博士らの多くの関係者および圃場見学を快諾してくださった農家の方々に大変お世話になった。ここに謝意を表す。

引用文献

- Dombek, D. G., R. D. Bond, I. L. Eldridge, R. M. Pryor (2007) Arkansas soybean performance tests 2007. Arkansas Agricultural Station, Division of Agriculture, University of Arkansas.
- 農林水産省 (2008a) 食料需給表. 平成 18 年度. 農林統計協会, 東京 1 - 277.
- 農林水産省(2008b)作物統計. 平成 19 年産. 農林統計協会, 東京 1 - 197.
- Soil Survey Staff (1999) Soil Taxonomy, 2nd ed., Natural Resources Conservation Service, USDA.
- USDA-NASS (2009) Crop Production Reports (<http://www.nass.usda.gov/>).

Field Studies on Factors Causing the Widening Gaps in Soybean Yield between Japan and USA.

– Field Observation Reports in USA –

Keisuke Katsura¹⁾, Taiki Yoshihira²⁾, Koki Homma³⁾, Larry C. Purcell⁴⁾, Tomoyuki Katsume-Tanaka³⁾ and Tatsuhiko Shiraiwa³⁾

¹⁾Experimental Farm, Graduate School of Agriculture, Kyoto University
(12-1, Hatchonawate, Takatsuki, Osaka, 569-0096, Japan)

²⁾Faculty of Dairy Science, Rakuno Gakuen University
(582-1, Midorimachi, Bunkydai, Ebetsu, Hokkaido, 069-8501, Japan)

³⁾Graduate School of Agriculture, Kyoto University (Kitashirakawa - Oiwakecho, Sakyo-ku, Kyoto, 606-8502, Japan)

⁴⁾Department of Crop, Soil, and Environmental Sciences, University of Arkansas
(1366 W. Altheimer Drive Fayetteville, AR, 72704, USA)

Key words: Soybean, Yield, USA, GMO