

## 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 — 視察報告 (第2回) 米国における圃場・作物管理 —

白岩立彦<sup>1)</sup>・桂 圭佑<sup>1)</sup>・島田信二<sup>2)</sup>・川崎洋平<sup>1)</sup>・村田資治<sup>1)</sup>・  
本間香貴<sup>1)</sup>・義平大樹<sup>3)</sup>・田中朋之<sup>1)</sup>・田中 佑<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>京都大学農学研究科 (〒606-8502 京都市左京区北白川追分町)

<sup>2)</sup>農業・食品産業技術総合研究機構中央農業総合研究センター

(〒305-8666 つくば市観音台3-1-1)

<sup>3)</sup>酪農学園大学酪農学部 (〒069-8501 江別市文京台緑町582-1)

キーワード：灌漑, 作物管理, 収量, ダイズ, 米国

ダイズの単収は、日本では低迷しているが、米国では過去数十年間着実に増加し日本の1.5倍から2倍に達している。このようなダイズ単収の日米地域差をもたらしてきた要因に関する調査の一環として、2008年、2009年および2010年の夏に5日間～10日間訪米し現地視察を行った。2008年の視察結果から、ダイズの生産・出荷ならびに品種開発の状況、ダイズ生産技術の地域差について概要を報告した(桂ら2009)。本報告では、主に2010年の視察結果から、近年の圃場・作物管理技術の動向について紹介し、圃場・作物管理の面から米国における多収化要因を考察した。

### 1. 視察の概要

2010年7月17日～25日にイリノイ州(Champaign)から南に向かってルイジアナ州(Baton Rouge)まで自動車

で移動し、各地の農家圃場を観察した。この間計7ヶ所の大学および研究機関もしくは試験圃場を見学した。訪問した主な研究者・農家は、イリノイ大学・国立ダイズ研究センターのR. L. Nelson氏およびE. D. Nafziger氏、ミズーリ大学デルタ研究センターのE. D. Vories氏およびG. Shannon氏、アーカンソー大学のL. C. Purcell氏、同大学イネ研究普及センターのK. Moldenhauer氏、アーカンソー州農家のG. Sebree氏、USDA-ARS Jamie Whitten デルタ地域研究センターのJ. D. Ray氏、ミシシッピ州立大学デルタ研究・普及センターのT. W. Eubank氏およびT. H. Koger氏、ルイジアナ州立大学のJ. E. Board氏およびR. Levy氏であった。

米国におけるダイズ栽培技術については、前報(桂ら2009)でも述べているが、概略は第1表に示す通りである。ダイズの生産地帯は、南北にアイオワ州、イリノイ州をはじめとするコーンベルトと呼ばれる中西部、アーカンソー

第1表 米国におけるダイズ栽培の概要

	中西部	中南部		南部	
		早期栽培	慣行(単作)	慣行(2毛作)	早期栽培
品種の熟期型(MG)	II～IV	III～IV	V～VI	V～VI	IV
播種期	5月	4月	5月	6月	4月
収穫期	9～10月	8月	9月	10月	8月
作付体系	トウモロコシとの輪作	イネ、ワタ、トウモロコシ、コムギ、ソルガムなどの輪作		トウモロコシ、ワタ、コムギとの輪作	
灌漑	天水栽培	灌漑面積が増加		灌漑面積が増加	
栽植様式	慣行、狭条	慣行、狭条、畦上・複条		慣行、畦上・複条	

2011年4月7日受理

連絡責任者：白岩立彦 (shiraiwa@kais.kyoto-u.ac.jp)

州を中心とする中南部およびミシシッピ以南の南部およびサウスカロライナなどの東部に大別できる。中西部のダイズ作はトウモロコシ-ダイズ輪作、中南部以南はワタ、イネ、トウモロコシなどの輪作が主であり、中南部に対して南部のダイズ生産には、早期栽培が主流を占めつつある、湿害対策が重要であるなどの特色がみられる。よく知られるように、主要栽培品種は、北から南に向かうにしたがって熟期型 (MG) を表す数字の小さいものから大きいものにおき変わっていく。ただし、日本における夏ダイズと同様に、南部の早期栽培では早熟性を示す品種が用いられる。作付面積と生産量は中西部が最も多いが、中南部および南部でも約 10 州において州内の生産量が 20 万 t を超えている。中西部では、チェルノーゼムあるいはモリスルに分類される腐食に富む土層が深く発達している。一方、ミズーリ州以南はミシシッピ川に沿っており、一般に灌漑用の水資源が豊富な沖積土地帯として特徴づけられている。中西部では土壌の有効水分保持量が多いため灌漑はあまり行われていない。これに対して中南部以南では、有効土層が相対的に浅く、かつ夏の乾燥時の蒸発要求量が大きいので干ばつが生産阻害要因となりやすい。このため特に中南部において灌漑面積は増加してきた。不耕起栽培は中西部でより広く展開しており、中南部および南部では後述する畦間灌漑の必要性から比較的限られている。

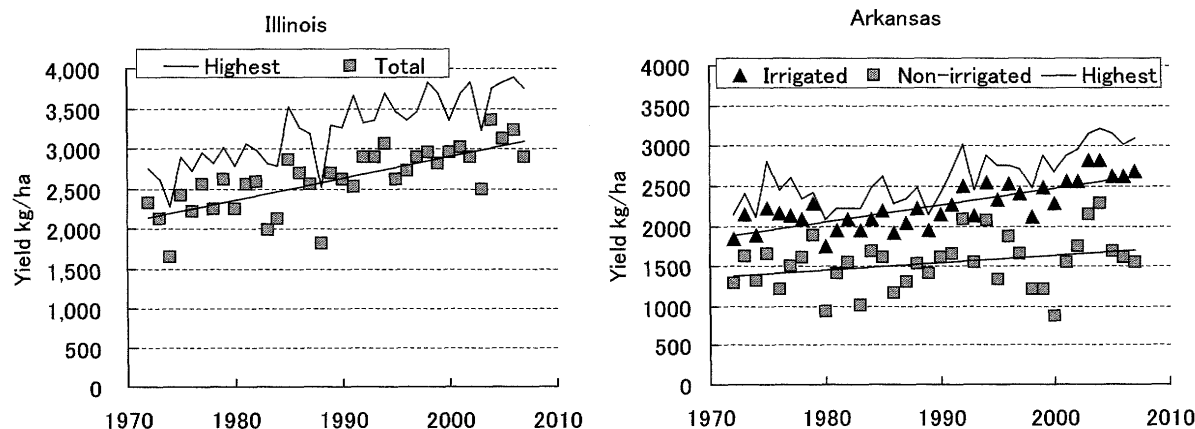
## 2. 除草剤抵抗性品種

グリホサート抵抗性品種は、その普及が始まった 1996 年からわずか 4 年目に全ダイズ作付面積の 50% に達し、2007 年以降は 90% 以上を占めている。米国のダイズ圃場の外観を日本の場合と比較したときにまず印象づけられる点は、地域によらずどの圃場でも雑草がよく防除されていることである。一般に、作付部分だけでなく周辺部分も周

到に雑草が抑制されており、グリホサートを用いた雑草防除の効果を示している。第 1 図に示すように、イリノイ州とアーカンソー州の灌漑圃場においてこれまで平均単収が増加してきたことが明らかであるが、最近の動向に注目すると、イリノイ州では収量の変動が少なくなり、アーカンソー州灌漑圃場では増収傾向がそれまでよりも明確になっている。このような変化をみると、雑草防除が過去 10 数年の増収に少なくとも部分的に寄与していることが強く示唆される。

しかし、グリホサートの使用が拡大するにつれて、抵抗性雑草の発生が問題になってきている。抵抗性作物が栽培されはじめてから 15 年間に、グリホサート抵抗性雑草として発見された植物数は指数関数的に増加し、その傾向は今後もつづくものと予測されている。米國中南部でみだされている主なものは、キク科のホースウィード (*Conyza Canadensis*)、イネ科のライグラス (*Lolium perenne* ssp. *multiflorum*)、ジョンソングラス (*Sorghum halepense*)、ヒユ科のパルマーアマランス (*Amaranthus palmeri*) などである。中でもパルマーアマランスは、生産される種子数が多いことにより急速に分布を拡大しており、中南部から南部の 6 州で確認されている。被害圃場を撮影した第 2 図のように、深刻な影響をもたらす場合がある。また、イリノイ州では、ダイズ圃場の中にトウモロコシ個体、すなわち前作の除草剤抵抗性作物の種子が自生している光景が多くみられ、それはこの数年間に明らかに増加し目立っている。ただし、現段階では収穫作業の障害にはならないのであまり問題視されていない。

抵抗性雑草が増加する中、グリホサートの使用回数は増える傾向にあり、当初は通常 2 回であったところが 3、4 回散布されることが多くなった。さらに、グリホサートによる雑草防除とは異なる代替技術も検討されている。特に 2009 年に登場したグリホシネート抵抗性品種の導入が注



第 1 図 中西部イリノイ州と中南部アーカンソー州における平均単収の推移 (USDA-NASS 公開データから作成)。

実線で示した推移は、各州において 3 万 ha 以上の作付面積があった数十のダイズ生産郡の中から、各年次で最も高い単収を示した郡の値。図中の回帰直線の係数は以下の通り。

$$\text{イリノイ州全体: } Y = 27.6 (X - 1970) + 2077 \quad (R^2 = 0.55)$$

$$\text{アーカンソー州非灌漑: } Y = 21.1 (X - 1970) + 1847 \quad (R^2 = 0.62)$$

$$\text{アーカンソー州灌漑: } Y = 8.9 (X - 1970) + 1365 \quad (R^2 = 0.08)$$

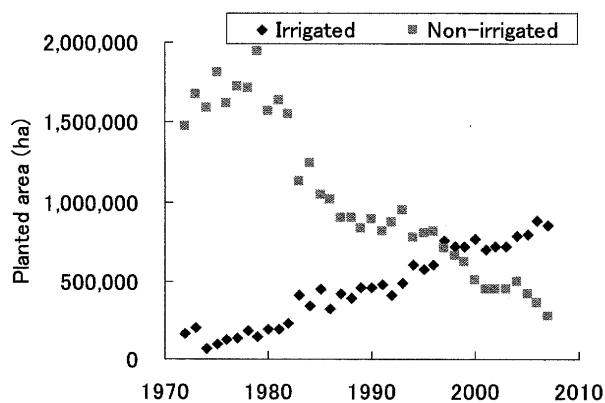


第2図 ダイズ圃場到大発生したパルマーアマランサス (*Amaranthus palmeri*)  
(2010年7月22日アーカンソー州にて撮影)

目されている。それだけでなく、選択性除草剤や土壌処理剤や耕種適防除を補助技術として復活させることや輪作の実施なども検討せざるを得ないという。除草剤抵抗性品種の利用は北米および南米のダイズ作に短期間で多大な変革をもたらしたことは間違いがないが、グリホサートに強く依存する雑草管理が今後どうなるかは不透明な状況にある。

### 3. 灌漑技術

第3図に、アーカンソー州における灌漑・非灌漑別作付面積の推移を示した。アーカンソー州では過去40年間にダイズ灌漑栽培が着実に増加し、現在では3分の2以上を占めるにいたっている。ミズーリ州では、ダイズとワタ圃場のおよそ50%、トウモロコシ圃場の約80%が灌漑されている。ミシシッピデルタは年間降水量がおよそ1000mmのところが多く、半乾燥地の灌漑農業で有名なグレートプレーンに比べると湿潤であるが、灌漑を行うことによる増収は、必要なコストを補うのに十分であるとみられている。第1図では、同州のダイズ平均単収の推移を灌漑圃場と非



第3図 アーカンソー州における灌漑・非灌漑別ダイズ作付面積の推移  
(USDA - NASS 公開データから作成)

灌漑圃場のそれぞれについて表した。灌漑を行った圃場の平均単収は行わない場合よりも常が高くかつ安定している。このことより、中南部における灌漑面積の増加が、この地域の単収増加に大きく寄与したことは明らかである。

ミシシッピデルタには膨大な地下水が深層 (Sparta 帯水層) および浅層 (Alluvial 帯水層) に存在し、灌漑は主に浅い方の帯水層から地下水を汲み上げて行われる。散布方法はセンターピボット方式と畦間灌漑方式に大別される (第2表)。

センターピボットは、送水パイプの全長が平均して約120mあり、中心に井戸と強力なポンプを有する大掛かりな設備である。設置コストが大きいので、利用の効率化が図られている。その一つは可動式システムである。特定の圃場に固定して使用するのではなく作付けに応じて圃場間の移動が容易になるよう工夫されている。これは徐々に普及が進んでおり、ミズーリ州にはおよそ4000機のセンターピボットがあるがその5分の1が可動式となっている (第2表)。またセンターピボットでは、通常、散水装置が描く円の内側しか灌水されないが、散水装置のアームが折れ曲がりかつ伸縮することによって圃場の隅まで灌水が行き渡る装置がある。その動きをGPS情報と連動して制御する装置が販売されていた。

一方、畦間灌漑は大掛かりな装置が必要ないので比較的導入しやすい。とくに圃場の枕地に井戸水ポンプに接続した使い捨てのプラスチックホース (直径約40cmのポリパイプ) をダイズの生育途中に据え、畦間を正確にねらって穴を開けることで給水する方法が普及している。ただし、ほとんどの圃場の長さが200mを超えるため、圃場全体にわたる送水に時間がかかる上に、畦間の前方では灌水の過剰が、後方では不足が生じる。このため、水利用量当たりでみた灌漑効率はセンターピボットよりも劣っている。

この問題の改善策として、精密な緩傾斜づくりとサージ灌漑がある。前者では、通水を促すために圃場の均平を十分に行った上で約0.1度の傾斜を精密につける。レーザーレベラーが重要な役割を果たし、委託作業として行われる。サージ装置は、灌漑ホースを真中で左右に分けて数時間ごとに片側のみ送水することにより、流量を増すことで畦末端への到達を速くする。本装置は、後述の灌漑施肥にも用

第2表 ミズーリ州における灌漑方式

灌漑方式		割合 (%)
畦間灌漑	ポリパイプ	29
	通常パイプ	10
センターピボット	固定型	44
	可動型	12
その他		5

(調査報告 "Bootheel Irrigation Surveys 1997-2005", ミズーリ大学デルタリサーチセンターより)

いられる。センターピボットと比較して畦間灌漑では設備コストが小さい。しかし、畦間灌漑では灌水作業にかかる労働と、レーザーレベリングの委託に経費がかかるため、全体でみたコストには大差がない。ミズーリ大学デルタ研究センターの研究者の一人は、費用対効果は畦間灌漑がまさるが、その主な理由は、少なくともダイズにおいては畦間灌漑の増収効果が大きいことによると主張していた。

灌漑スケジュールを必要に応じて立てることは、水利用量当たりの効率向上に重要である。Purcellら(2003)によれば中南部では6月から8月までの約3ヶ月の間1週間当たりの蒸発散量がおおよそ50mmであるのに対して、平均降水量は20mm～10mm程度となる。この間の気象的な水収支を、チャートとして毎日参照可能にし、灌水の必要度あるいは今後必要となる予想時期がわかるようにする、あるいは自身の圃場特性を加味した水収支のモデル計算を可能にするソフトをウェブ上で提供するなど、灌漑スケジュールの支援が行われている。

ミシシッピデルタでは一般に地下水が豊富であり、農業利用される水は自然の作用により比較的十分に補われてきた。しかし、Alluvial帯水層からの取水量は1965年から40年の間に6倍近くに増加し、アーカンソー州で行われた調査では、ミシシッピ川流域のAlluvial帯水層の地下水位は1年あたり-1.46m～+0.17m(平均-0.11m)変化した(Schrader 2010)。よって水資源の持続性が徐々に問題視されている。訪問したStuttgart近郊農家のSebree氏(イネ、ダイズを合わせて500haを作付)によると、使用している井戸の深さが過去40年に数10m下がり、揚水ポンプをより強力なものに替える必要が生じた例がある。

#### 4. 早期栽培

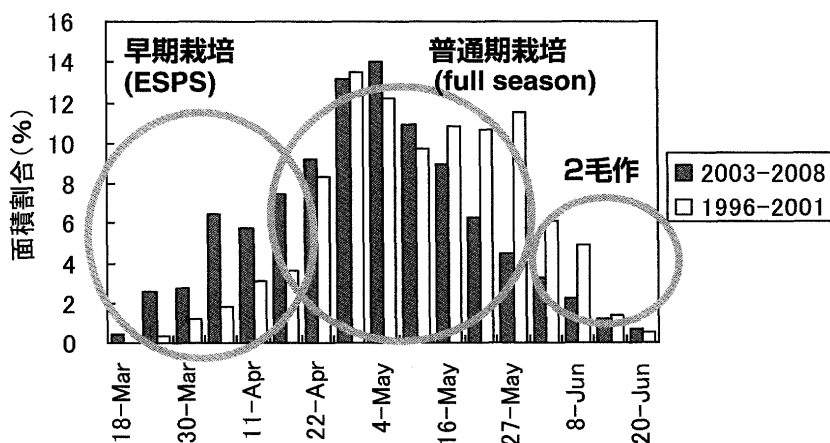
第4図は米国中南部のアーカンソー州東部におけるダイズ播種期の実態を、最近の5年間と約10年前の5年間に分けて示したものである。対象地域はおおよそ10万ヘクタールの作付面積を有している。当地域では、慣行のダイズの

作型として単作(full season)およびコムギとの2毛作があり、それぞれダイズは5月および6月期を中心に播種される。このうち2毛作は、コムギの収益性が良好でないため近年は減少傾向にあるという。これに対して、3月後半から4月播種の早期栽培が導入されており、それは増加傾向にある。その目的は、莢形成から子実肥大前半にかけての重要な収量形成時期にダイズが夏期とくに8月の強い干ばつに遭遇するのを回避することである(Purcellら, 2003)。米国の中南部および南部では、従来感光性の強い熟期型(MG)VI以上の品種が用いられてきたが、早期栽培では早生品種であるIVあるいは“Early IV”の品種が新たに用いられている。このように品種選択との組み合わせで進められた早期栽培は、ESPS(Early Season Production System)と呼ばれ、ミシシッピ州などの南部地域ではさらに増加し主要作型になりつつある。ESPSは、当地域でのダイズ生産の安定化に大きく貢献したとされている(HeatherlyとElmore, 2004)。

#### 5. 栽植様式

米国での典型的な播種密度は、日本のそれよりも2～3倍高い。収穫時の個体密度を25個体/m<sup>2</sup>確保することを目的にして播種量が決められ、適期からはずれた早期または晩期播種、狭畦栽培、不耕起播種などの場合は10%から50%増量する。条間を慣行の76cmに対して38cmに狭くする狭条栽培は、生育前期における受光率の増大による乾物生産促進と雑草抑制が利点とされ、多くの場合増収効果がある。ただし、狭条栽培は、草冠の早期遮蔽により病害のSclerotinia stem rot (*Sclerotinia sclerotiorum*, 菌核病)の発達を促進するとの指摘もあった。

前述のように使用種子の大部分は除草剤抵抗性品種であるが、その1ヘクタール当たりコストは、当初の37ドルから近年は125ドルまで上がり、2009年に新しく登場した多収型除草剤抵抗性品種(RR2Y品種)はさらに高価になった。種子代が生産費に占める割合は全国平均でおおよそ



第4図 アーカンソー州東部のダイズ作における播種期分布

13%を占めているため (SOYSTAT2008), 米国ダイズ作には近年疎植指向が生じている。ルイジアナ州立大学 (Board氏) では、ダイズの限界低密度の評価および低密度栽培適性の品種間差異の評価が行われていた。

2010年は、6月の降雨量が多くイリノイ州ではダイズの湿害が発生していた。機上から Champaign 空港付近で周囲に比べて黄色や褐色がかった不規則な斑点あるいは区域がみられた。ミシシッピデルタでは、湿害は重要な生産阻害要因とされ、個々の圃場レベルでも、また地域的なレベルでも排水が不調な場合に減収をもたらす。一方夏季は、蒸発散量が降水量を上回り干ばつが発生する。湿害と干ばつが時期を変えて同じ地域・年次に発生する状況は、日本の転換畑ダイズ作と共通するが、乾燥の程度では、米国の多くのダイズ栽培地帯で日本のそれを上回ると思われる。

生育前期の湿害を回避し、夏季の乾燥時の畦間灌漑を可能にするための作畦栽培が、中南部から南部のダイズ作地帯に広く普及した。100cm (40in) 間隔で10~25cm (4~10in) 畦上げし、畦あたり2条 (平均50cm幅) とするやり方が典型的である。圃場の排水条件に応じて播種床を広く低くする場合もある。なお、100cm 畦が選択されるのは、ワタ収穫機械の規格に合っており、ワタとダイズで共通の播種機を使えるという利点にもよっている。また南部では、サトウキビ栽培に合わせて2m幅の畦が作られることもある。中南部や南部では中西部に比べて、不耕起栽培が少なくなるが、上述のような作畦栽培が多いことが関係している。

## 6. 局所肥沃度管理など

米国のダイズ作圃場では、土壌のリン肥沃度が十分な場合が多く、土壌 pH が適切であればリン欠乏は問題にならない。しかしカリについては施用効果がみとめられることが多い。イネとの輪作が行われる場合も、イネによる持ち出しが多いためカリの意識的な補給が望ましいとされている。

土壌診断にもとづく施肥量調整が現在一般に奨励されているが、これは1990年代を通じて普及が進んだものである。現在はさらに Site specific management (圃場情報にもとづく局所管理) の普及が行われている。例えば、典型的な圃場サイズである16ヘクタール (40エーカー) を1ヘクタールごとに16等分し、それぞれの土壌サンプルを土壌診断サービスに送り、その結果にもとづいて施肥量を調整する。GPS と施肥量可変装置を備えた施肥機で局所管理を自動的に行える装置があり、その使用が増えているという。ダイズ栽培技術の普及を担当しているミシシッピ大学の Kogger 氏によれば、土壌診断に基づく施肥量調整はこの10年間で普及が大きく進み、同州農家の80%が採用している。

精密な施肥管理は灌水システムを利用して、必要な肥料を灌漑水に混入させて行われることもある。これには圃場

全体に均一に灌水できるセンターピボットが用いられると的確に行える。畦間灌漑でもサージ装置を備えることによって可能である。

## 7. まとめ

作物収量の地域差には、気象、品種および土壌環境を含む栽培技術が関わる。品種についていえば、1996年と1997年に米国のダイズ育種における遺伝子源の多様性を拡大する目的で、中国、韓国および日本の栽培品種が10州28ヶ所の試験地で試作された (USDA-ARS2006, 2007)。その結果によると中西部、中南部および南部のいずれの地域でも米国の主要品種の収量は日本産のそれよりも20%から25% (各場所平均) 上回っていた。つまり収量性の改良は米国品種が日本品種よりも進んでいると思われ、それは著者らが高槻市で行った日米品種比較の結果からも強く示唆されている (川崎ら2010)。ダイズ収量の日米地域差には栽培品種の収量性の差異が含まれている。

ダイズ作地帯の現地視察を通じて、多収性育種の進展とともに、過去数十年間において栽培技術でも大きく変化してきたことが強く認識された。除草剤耐性ダイズを用いた雑草防除、灌漑面積の増加、作期と品種熟期の組合せの変化 (早期栽培化)、栽植様式の変化 (狭条化と畦上栽培) および合理的施肥管理である。第1図で示したように、イリノイ州では、ダイズ作付圃場の多くが非灌漑であるが州全体の平均収量の増加速度が1年当たり約27.6kg/haと高く、アーカンソー州における灌漑圃場の増収速度の21.1kg/haをやや上回る。一方、南部に行くほど研究者および技術者が増収要因として栽培技術要因の変化を言及する場面が多くなった。このようなことから、中西部では改良品種の導入効果が、中南部および南部では栽培技術による生産の安定化が、それぞれの増収に対して相対的に大きく寄与してきたことがうかがわれる。

夏季の干ばつを回避するために南部で普及したESPSは、地域の気候に応じた品種・作期組合せの再構築であり Nelson 氏や Purcell 氏によれば近年のダイズ栽培における重要な“サクセスストーリー”である。同時に、作畦複条栽培や合理的灌漑技術なども物理環境を効果的に制御しつつある。このような適応と制御の両面からの技術革新の成果は、わが国のとくに西南暖地における栽培技術の改善にとっても参考になると考えられる。

米国ダイズ作は、圧倒的な生産規模に加えて、比較的好調な価格に支えられた生産意欲を背景に、数々の技術革新が導入され生産を増強している状況にあると思われる。

## 謝 辞

本視察は文部省科学研究費補助金 (No.20405021) によった。現地調査にあたり訪問機関および農家との事前連絡では、R. L. Nelson 氏、L. C. Purcell 氏、J. D. Ray 氏、フロリ

ダ大学のJ. K. Schueller氏および京都大学農学研究科のP.W. Lee氏に多大なご協力をいただいた。記して感謝申し上げます。

### 引用文献

Heatherly, L. G. and Elmore, R. W. 2004. Managing inputs for peak production. In H. R. Boerma and J. E. Specht eds. Soybeans: Improvement, Production, and Uses. 3rd ed. ASA-CSSA-SSSA., Madison, USA. 451 - 536.  
桂 圭佑・義平大樹・本間香貴・L. C. Purcell・田中朋之・白岩立彦(2009)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) -。

作物研究 54 : 149 - 154.

川崎洋平, 田中 佑, 桂 圭佑, Larry C. Purcell, 本間香貴, 田中朋之, 白岩立彦: ダイズの収量および乾物生産性における日米品種間差異 - 暖地における比較 -。 日作紀 79 (別2) : 102 - 103.

Purcell, L.C., Sinclair, T.R. and McNew, R.W. 2003. Drought avoidance assessment for summer annual crops using long-term weather data. Agron., J. 95 : 1566 - 1576.

Schrader, T.P., 2010, Water levels and selected water-quality conditions in the Mississippi River Valley alluvial aquifer in eastern Arkansas, 2008: U. S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010 - 5140, USGS. 1 - 71.

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

### - Field and crop management in USA -

Tatsuhiko Shiraiwa<sup>1)</sup>, Keisuke Katsura<sup>1)</sup>, Shinji Shimada<sup>2)</sup>, Yohei Kawasaki<sup>1)</sup>, Motoharu Murata<sup>1)</sup>, Koki Homma<sup>1)</sup>, Taiki Yoshihira<sup>3)</sup>, Tomoyuki Katsube-Tanaka<sup>1)</sup> and Yu Tanaka<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Graduate School of Agriculture, Kyoto University (Kitashirakawa-Oiwakecho, Sakyo-ku, Kyoto, 606 - 8502, Japan)

<sup>2)</sup> Faculty of Dairy Science, Rakuno Gakuen University (582 - 1, Midorimachi, Bunkyo-dai, Ebetsu, Hokkaido, 069 - 8501, Japan)

<sup>3)</sup> National Agricultural Research Center (3 - 1 - 1 Kannondai, Tatsukuba, Ibaraki, 304 - 8666, Japan)

**Key words:** Crop management, Irrigation, Soybean, USA, Yield.

Journal of Crop Research 56: 93 - 98 (2011)

Correspondence: Tatsuhiko Shiraiwa (shiraiwa@kais.kyoto-u.ac.jp)