

アメリカ合衆国ネブラスカ州の大豆研究事情

気象と土壌情報を活用した灌漑支援ウェブアプリケーションを中心として

誌名	農業および園芸 = Agriculture and horticulture
ISSN	03695247
著者名	熊谷,悦史 高橋,智紀 中野,聡史 松尾,直樹
発行元	養賢堂
巻/号	91巻6号
巻号補足	
掲載ページ	p. 608-617
発行年月	2016年6月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター

Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



アメリカ合衆国ネブラスカ州の大豆研究事情

—気象と土壌情報を活用した灌漑支援ウェブアプリケーションを中心として—

熊谷悦史*・高橋智紀*・中野聡史**・松尾直樹***

【キーワード】：IT, 灌漑計画支援, 気象情報, 大豆, 土壌情報, 多収

1. はじめに

大豆は日本食の中心となす醤油, 豆腐, 納豆などの原料として, 国内で古くから栽培されている。現在(平成26年度)は, 年間131,600ha作付され, 全国の平均単収は, 176kg/10a, 収穫量は231,700tであり, 世界の収量水準と比較して低くなっている。国内の大豆は, 転作作物として水田転換畑で栽培されており, 梅雨の影響があるため, 過湿害が生産を阻害する最大要因となっている。一方で, 水田転換畑の下には耕盤層が存在し, これにより根の生長が制限されており, 乾燥害を受けやすい状況でもある。関東以北では, 慣行的に梅雨前の5, 6月に大豆を播種し, 生育初期の根の生長が盛んな時期と梅雨期が重なるために, 根の生長が抑制される場合が多いとされる(Hirasawa et al. 1998)。実際に, 温暖化に伴う気候変動の拡大によって, 少雨や干ばつによる大豆の減収や品質低下が報告されている(松波ら2013など)。干ばつによる減収や品質低下を防ぐ技術としては, 灌漑が最も効果的な対策とされるが(高橋2002), 排水性の悪い圃場での灌漑は逆に過湿害を起こす危険性がある。また, 灌漑の判断基準として, 土壌の乾きぐあい, 気孔開度, 葉温などが幾つか提案されているが(高橋2002), 生産者が判断するのは極めて難しいのが現状であり, 生産者の灌漑スケジュールを支援する技術が求められる。

近年, 気象情報を農作業の意思決定に利用する試みがなされている。例えば, 東北地方では, 近年夏季の天候の年次変動が拡大傾向にあり, 気象災害の危険性が高まっている。農業・食品産業技術総合研究機構(農研機構)東北農業研究センター(東北農研)では, 気象予測データを利用して, 各生産者の

圃場位置・品種・移植日などに対応した1週間先までの水稻の生育予測, 冷害・高温障害予測, 病害発生予測が可能なシステムを開発している(<https://map2.wat.soft.iwate-pu.ac.jp/narct2015/log/>)。このシステムでは東北農研が作成した東北地方の1kmメッシュの日平均気温の平年値と, 気象庁が作成している2週目までの予測値を用いて, 1kmメッシュの気温予測値を提供しており, この予測値を基に水稻栽培管理警戒情報を, ウェブサイトを通じて発信し, 事前に適切な栽培管理をとれるように支援している。同様に, 農研機構農業環境変動研究センターは, 全国版の1kmメッシュ農業気象データを作成・提供しており, これには日射量や降水量なども含まれている(大野2014)。筆者らは, 現在, この1kmメッシュ農業気象データを利用し, 圃場毎の土壌水分等の灌水判断基準をリアルタイムに提供し, 大豆生産者の灌水の意思決定を支援する技術の開発に取り組んでいる。すでに, アメリカ合衆国ネブラスカ州立大学リンカーン校(University of Nebraska-Lincoln, UNL)では, 気象情報等を利用し大豆生産者の灌水の意思決定を支援するウェブアプリケーション「Soywater」が開発されている。筆者らは, 2015年11月3, 4日にUNLのSoywater開発責任者である名誉教授のJames E. Specht博士を訪問する機会を得た。ここでは, UNLでの大豆研究とその普及活動を, Soywaterを中心に報告したい。

2. ネブラスカ州の気候と大豆生産

アメリカ合衆国の中西部に位置するネブラスカ州は, コーンベルト地帯の最西にあり, 州の大部分は平坦なグレートプレーンズに属しており, トウモロコシと大豆の輪作地帯である。アメリカの大豆の年間の生産量は84Mtであり, 全世界の生産量の35%を占める。ネブラスカ州の大豆の単収は, 290~390kg/10aであり, 年間の生産量は6.5Mtで全米第5位の生産量をほこる(Grassini et al. 2015)。ネブラ

*農研機構 東北農業研究センター (Etsushi Kumagai, Tomoki Takahashi)

**農研機構 農業環境変動研究センター (Satoshi Nakano)

***農研機構 九州沖縄農業研究センター (Naoki Matsuo)

スカ州は、西部の一部を除いて湿潤大陸性気候である。筆者らが訪問したリンカーン市の気候を、国内のほぼ同緯度である秋田県大仙市と比較すると、盛夏（7、8月）の平均気温はほぼ同じであるが、降水量は140mmと非常に少なく、日射量が多いために蒸発散量が降水量を上回る（図1）。ネブラスカ州の大豆播種期は5月であり、7、8月は開花・登熟期間に当たり、その時期は大豆にとって最も水が必要な時期であり、この地域での灌漑は収量確保に必須な技術である。ネブラスカ州の大豆栽培面積（1.9Mha）の46%に、井戸からポンプで揚水した地下水を自走しながら円形に散布するセンターピボットを中心とした灌漑システムが導入されており、常時灌水が可能となっている。しかしながら、近年は地下水枯渇や揚水のために必要な燃料価格の高騰が懸念されており、水とエネルギーなどの資源利用の最適化が求められている。また、最近ではインターネットが生産者に普及している。このような背景の下、2010年の5月に大豆生産者がインターネットでアクセス可能なウェブアプリケーションの灌漑支援システム「Soywater」が開発され、現在も運用されている。

3. Soywater について

図2はSoywaterの構成の概略を示したものである。GoogleMap上で、利用者は圃場位置を指定し、品種の成熟群（北米ではMaturity Groupというグループで、各品種が適している地域を区分している。区分地域は000からXまで13に分類される。数字が大きいほど晩生.）、出芽日（もしくは播種日）、

土性を入力する。指定された位置情報（緯度、経度など）を基に、最寄り（あるいは指定した）の気象観測所から、気象要素の平年値と当年値が提供される。品種のMaturity Group、出芽日、位置情報、気象要素の日別値から、日々大豆の发育ステージ（〇葉期、開花期、着莢期、子実肥大開始期、成熟期など）が計算され、それに対応した日々の作物係数が計算される。作物係数と気象データから、日々大豆群落からの蒸散量と土壌からの蒸発量の和である蒸発散量が計算され、さらに、蒸発散量と土性から、作土層の水収支が推定される。最終的に利用者には日々と作付期間中の積算の蒸発散量、積算降水量、積算灌水量、根域の土壌水の減少量が日単位で提供される。

筆者らは、Specht博士によるSoywaterのデモンストレーションを受けた。ここで、そこで教えていただいた具体的な操作方法について紹介する。<http://www.hprcc3.unl.edu/soywater/>へとアクセスすると図3の画面になる。ここで、Soy Irrigation Toolをクリックするとユーザー登録画面に移り、登録が済むとログインが可能となる。Google Map上で圃場を指定すると（図4左）、最寄りの気象観測所が選択される。圃場名を入力し、土性、土壌水分の初期値、基点としての播種日か出芽日いずれかを選択し、暦日を入力し、Maturity Groupの数値を選択する。出力データは、図5のようなスプレッドシートで、暦日毎に、Fehr and Caviness (1977)に基づく发育ステージ（Vは栄養生長で数値は本葉の枚数、V8は第8本葉期、Rは生殖生長で、R2は開花盛、R3は着莢

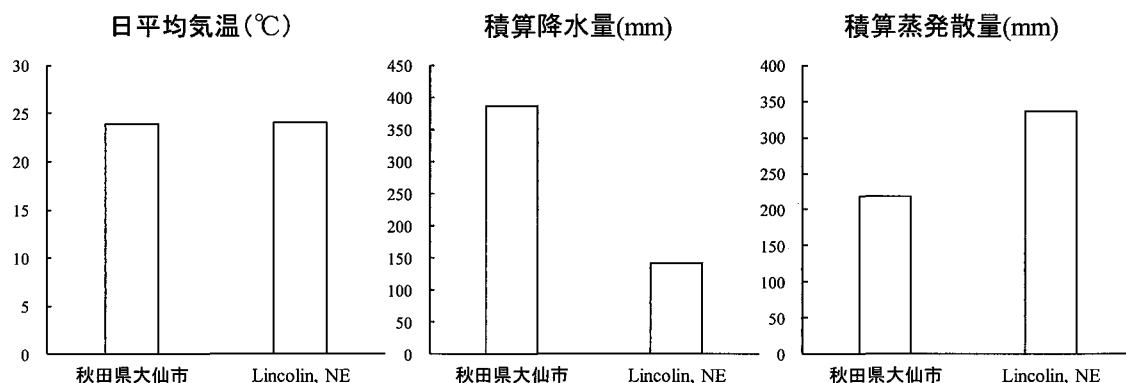


図1 ネブラスカ州リンカーン市と秋田県大仙市の盛夏（7、8月）の気象データ

（注）リンカーン市（緯度40.8°）はGrassini et al. (2015)、大仙市（39.5°）は農環研データベースより作図。蒸発散量は、FAO基準蒸発散量を示す。

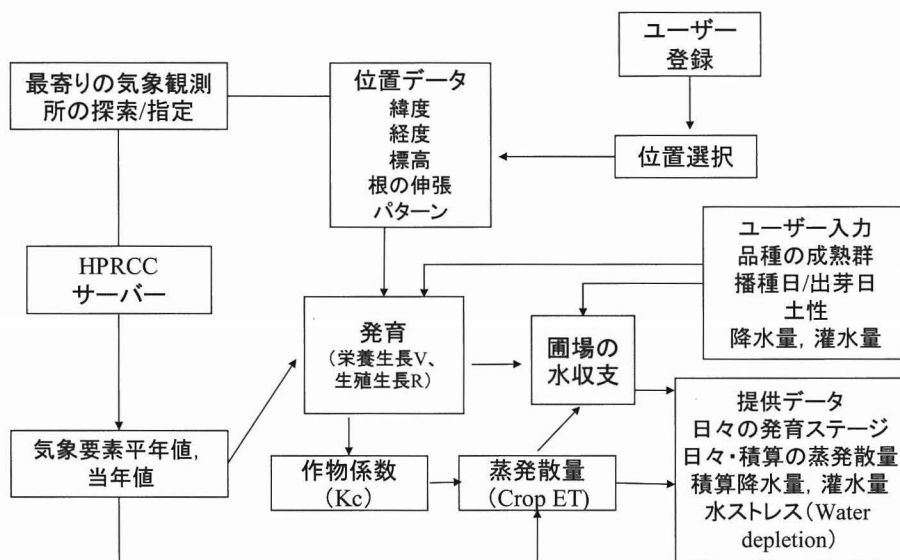


図2 Soywaterの基本構成
(注) Specht博士より提供された資料より作図。

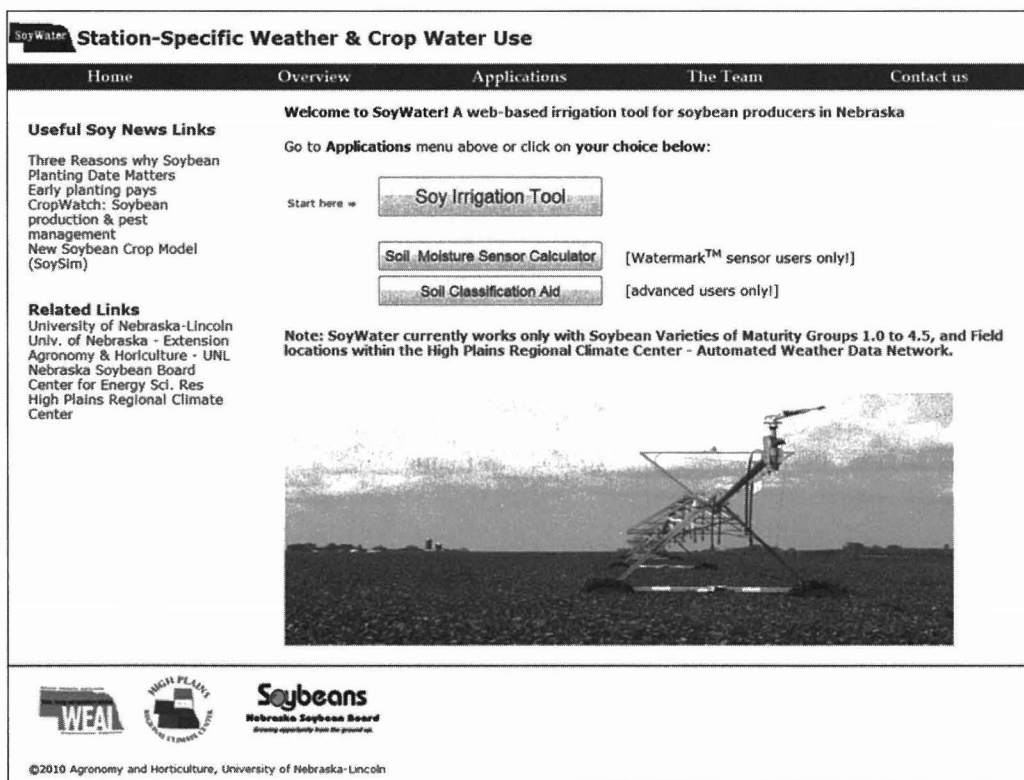


図3 Soywaterのホームページ画面
(注) 下の写真はセンターピボット灌漑システム。

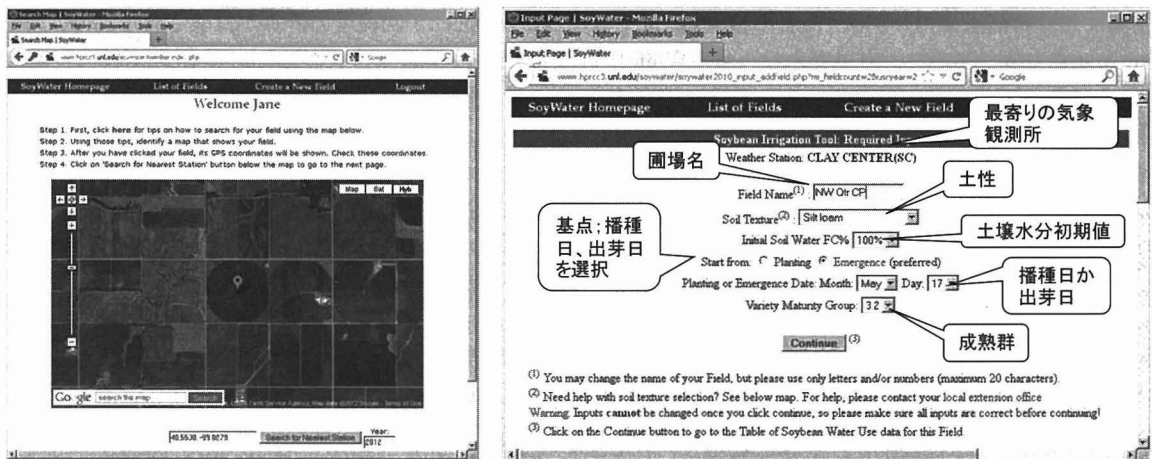


図4 圃場指定画面(左), 入力情報画面(右)

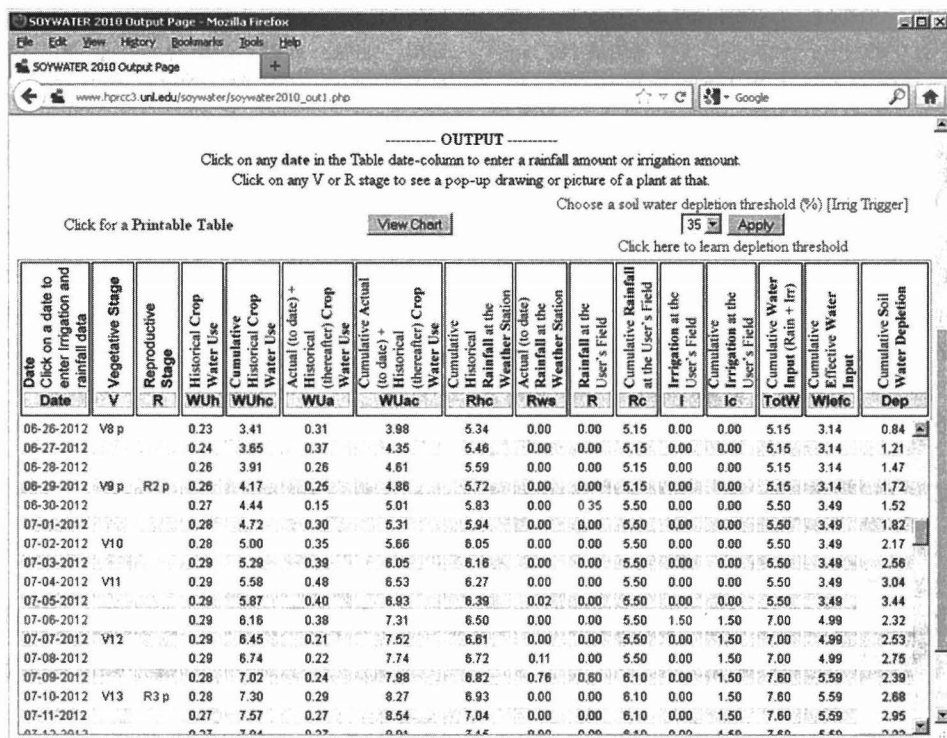


図5 出力画面

(注) スプレッドシート左から Date: 暦日, V: 栄養生長期のステージ, R: 生殖生長期のステージ, WU_h: 日蒸発散量(平年値), WU_{hc}: 積算蒸発散量(平年値), WU_a: 日蒸発散量(当年値), WU_{ac}: 積算蒸発散量(当年値), R_{hc}: 積算降水量(平年値), R_{ws}: 積算降水量(当年値), R: ユーザー圃場の日降水量, R_c: Rの積算値, I: 圃場の灌水量, I_c: Iの積算値, TotW: R_c+I_c, Wlefc: 積算有効水量, Dep: 土壌水減少量(WU_{ac}-Wlefc), 単位は Inch.

始を表す)が表示されるとともに、最寄りの気象観測所の平年の蒸発散量の日別値(WU_h)と積算値(WU_{hc})、当年の蒸発散量の日別値(WU_a)と積算

値(WU_{ac})、最寄りの気象観測所の平年の積算降水量(R_{hc})、当年の積算降水量(R_{ws})、当年の登録圃場の降水量の日別値(R)と積算値(R_c)、登録

圃場における灌水量の日別値 (I) との積算値 (Ic), Rc と Ic の総量 (TotW), 有効な水投入量 (Wlefc) の積算値, Wuac と Wlefc の差である作土の有効土壌水の減少量 (Dep) の日別値が表示される. 当年値から計算される要素については, アクセスした前日までが当年値, 翌日以降は平年値を使用している. Dep の閾値は Irrigation Trigger として利用者が選択できる. 例えば, 図5ではその値を 35% に設定しており, Dep が選択した土性での有効土壌水の 35% を越えると, Dep のセルが黄色で強調され, 登録圃場における水ストレス, 灌水の必要性を警告する. 登録圃場の降水量や灌水量は, スプレッドシートの暦日をクリックすると, 図6の画面上で入力することが可能で, 入力したデータはスプレッドシートに赤字で反映される (図5). この場合は, 7月5日には Dep が黄色塗りになり, 水ストレスが警告されていたが, 7月6日に 1.5inch の灌水を実施したので, 警告は解除されている. これらのデータ要素はグラフとしても閲覧でき, 表示する要素については選択できる (図7).

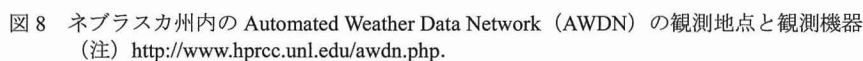
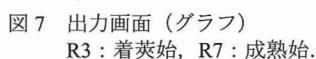
Soywater の基本構造はアメリカの灌水支援システムとして従来から利用されてきた Checkbook 法 (Melvin and Yonts, 2009) と等しい. Checkbook 法とは生産者が蒸発散量, 降水量および灌水量を圃場毎に記録し, これらの水収支を手計算することで灌水が必要な時期を見積もる方法である. Checkbook

法では週に 1 回程度の計算が推奨されており, 蒸発散量等の基礎データとして各作物で整備された表の値を用いる. Soywater の原理は Checkbook と同じであるが, 計算に必要な気象要素は最寄りの気象観測地点から得, 数表の代わりに发育モデルおよび土壌水分推定モデルが活用されている. このため簡便でありながら更新頻度が高く, より高精度な推定が可能になっている.

Soywater を構成する基本要素について説明する. まず, 気象データについてである. アメリカ海洋大気局の関係機関である High Plains Regional Climate Center (HPRCC) が 9 つの州にまたがる Automated Weather Data Network (AWDN) を管理・運営しており, 図8のように, ネブラスカ州内の 63 地点に気象観測装置が設置されている. この気象観測所では, 気温, 地温, 日射量, 風向・風速, 相対湿度, 降水量が計測されており, HPRCC のサーバーを通じて, 平年値や当年の日別値が Soywater に提供される.

发育予測には, UNL で開発された大豆の生育モデル「SoySim」が使われている. Soysim は, 日長, 平均気温, 日射量などの環境要素を説明変数として, 日単位での发育段階, 生長量, 最終的な収量をシミュレーションする作物生育モデルであり, 既存の光合成モデル (Farquhar et al. 1980), 乾物の蓄積と分配モデル (van Diepen et al. 1989) と UNL で新たに開発された发育モデル「Soydev」 (Setiyono et al.

図6 圃場における降水量や灌水量の入力画面



2007)と葉面積展開モデル(Setiyono et al. 2008)のサブモデルから構成される。Soywaterでは、発育のサブモデルのみが使用されているので、ここではその概要について説明する。その他のサブモデルの詳細については、Setiyono et al. (2010)もしくは、http://soysim.unl.edu/SoySim_Manual.htmlを参照してほしい。発育モデルでは、葉の展開、開花、子実肥大、成熟などの発育現象は、これらの現象に向けてある量的な変化が進行し、その変化の積算値がある一定の値となったときに質的变化となって現れると考え、この1日当たりの量的変化を発育速度と表現する(中川・堀江 1995)。Soydevでは、図9に示したベータ関数による数式で、日長と日平均気温から日々の発育速度を計算する。発育への日長や温度の影響は生育ステージで異なり、出芽から子葉期までは温度のみ、子葉期から花芽分化の終末期(R0)までは日長のみ、R0から開花始(R1)までは温度のみ、R1から成熟始(R7)までは日長と温度の両要素の数式を使い、その積より発育速度を算出する。Soydevで最も特徴的な点は、図9(b)に示した日長反応の数式を特徴づける2つのパラメータである最適日長(P_{opt})と限界日長(P_{crit})をMaturity Groupの数値と対応させた、すなわち、Maturity Groupの数値から両パラメータ値の推定を可能にした点である。既存のモデルでは、これらのパラメータは品種毎に決定する必要がある(鮫島 2000など)。代表的な生育モデルのCROPGRO-Soybeanでは、品種毎に、「主要なステージ間の有効積算気温、登熟期間、最適日長、限界日長など」の入力パラメータが15個も必要になる(Boote et al. 1998)。一方で、Soysim

ではMaturity Groupの数値と伸育型(無限型か半無限型)の2つの入力パラメータのみで生育量や収量予測を可能としている。北米では、種子会社などから品種のMaturity groupの数値が提供されているので、多くの品種の発育予測となっている。Soydevの予測精度については、研究機関の試験圃場や生産者圃場で検証されており、高い予測精度を示すことが報告されている(Torrion et al. 2011)。Soysimは、最適な気象条件での収量、いわば「ポテンシャル収量」を予測するために開発されたものであり、ネブラスカ州でよく見られる土壤乾燥は反映されていない。土壤乾燥は成熟を早めるなど、発育に影響を及ぼすことが知られているので、この点は今後改良の余地があるということであった。

土壤水分は日降水量、日蒸発散量などの日々の水収支の積算から推定する。蒸発散推定モデルには世界的に活用されているPenman-Monteith式が使われている(Allen et al. 1998)。実際の日蒸発散量は、ポテンシャル蒸発散量に作物係数(K_c)をかけ、算出している。図10に示すように、日々の K_c は予測される発育ステージと対応させている。例えば、 K_c は子葉期の0.2からR3の1.1まで直線的に増加し、子実肥大盛期(R6)まで頭打ちになり、その後、成熟に向けて減少する。降水量あるいは灌水量は気象データと生産者の入力によるが、圃場容水量を超えた過剰水は流去水として系外に排出され作物に対する有効水にならないといった細かな調整がなされている。このように求めた日蒸発散量と降水量・灌水量から圃場の日単位の水収支を整理し、有効土壤水の減少量(D_{ep})が閾値に達したか否かがチェッ

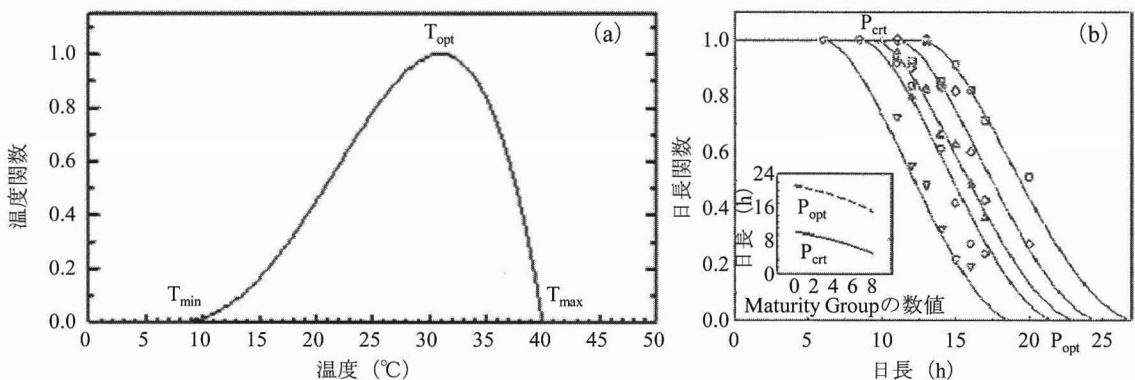


図9 Soydevにおける発育速度と日長、気温との関係式
http://soysim.unl.edu/SoySim_Manual.html.

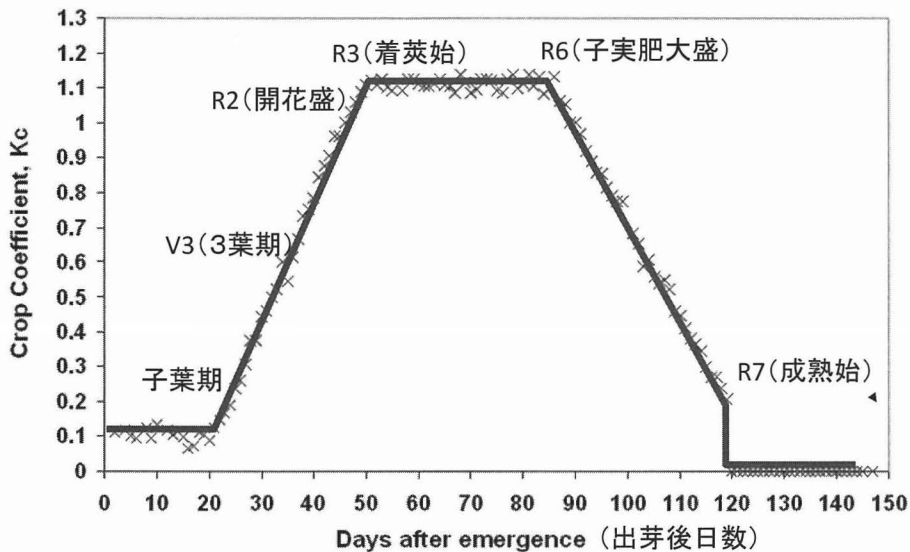


図10 Soywater における発育ステージと作物係数 (Kc) の関係
注) Specht 博士より提供された図。

クされる。有効土壌水の保持容量は単純なバケツモデル (Hillel 1998) にもとづいており、(圃場容水量－永久しおれ点)×有効土層によって求められる。2つの土壌特性値は土性から推定する仕組みになっており、土性はアメリカ農務省 (USDA) が整備したデータベース (Soil Survey Geographic database, Beaudette and O'Geen 2009) より取得される。Soywater では根が存在する有効土層が明示されておらず、3.5ft が使用されているとのことだった。これは概ね R3 から R6 の根の深さに相当する (Melvin and Yonts 2009)。一例として Loam 土壌の有効土壌水の保持容量を計算すると、圃場容水量が 0.225、永久しおれ点が 0.102 という統計値があるので、 $(0.225-0.102) \times 3.5=0.43\text{ft}=131\text{mm}$ となる。閾値を 35% に設定した場合、有効土壌水が 46mm、つまり 85mm の有効水が失われた時点で図 5 のようにセルが黄色くなり Soywater が水ストレスを警告する。

Soywater の登録者数は 2015 年 11 月 12 日の時点で 1062 名で、広く普及している。2015 年に、UNL の Haishun Yang 博士、大学院生の James Han 氏を中心に、トウモロコシにも拡張した「Corn Soywater」が開発され、スマートフォンのアプリケーションとしても利用可能となっている。基本的な構成は Soywater と大きな変化はないものの、よりグラフィカルな仕様となっている。現状の登録者数は少

ないが、複数の企業が興味を示しており、今後の普及を見込んでいるとのことであった。

4. そのほかの研究について

滞在期間中、UNL での大豆研究に関して、興味深い情報を得ることができたので幾つか紹介したい。大豆の灌水利用効率の向上を図る為には、いつの時季の、どれくらいの量の灌水が収量に効果的かを明らかにする必要がある。Soywater に従い、1) 全生育期間を通して、Dep が圃場容水量の 35% をこえると、前回の灌水日からの積算蒸発散量の 100% に相当する量を灌水する条件、2) R3 以降から、1) と同様に灌水する条件、3) R3 以降から、1) と同様に灌水するが、灌水量を 2/3 に抑える条件、4) 無灌水条件での収量水準を比較すると、1) = 2) > 3) > 4) であった。UNL の条件では、1) の全期間を通して灌水した条件と 2) の R3 以降に灌水した条件で収量差が無いので、灌水が必要なステージは R3 以降と判断されるとのことだった (Torrior et al. 2014)。また、灌水のタイミングや量を決める際には、根域の把握が重要であり、根の生長動態が精査されていた (Torrior et al. 2012)。非常に興味深いことに、UNL の圃場環境下では、主根の長さが出芽時に 10cm を越え、子実肥大期には 120cm に達していた。このような大きな根域には、作土が厚いこと

や前作が深根性のトウモロコシであること、プラウによる秋耕を実施していることが関連していると思われた。

Suat Irmak 博士を中心に進められている Nebraska Ag Water Management Network (NAWMN) での取り組みも非常に興味深かった。NAWMN は、生産者の灌水に関する最先端技術の利用を促進するために設立された、生産者、研究者、UNL の普及員、自然資源保護局、コンサルタントなどの約 500 名からなるネットワークである。NAWMN では、生産者が圃場の蒸発散量や土壌水分を実測するために、改良した蒸発計 (ETgage) や土壌水分センサーの使用方法などを、研究者が直接生産者を訪問し講義している。実際に、これらの計測を通じて、不必要な灌水が抑えられ、燃料費の削減につながっているとのことであった。米国の州立大学には、研究成果から期待される新技術について、その現場における適応性評価や問題点抽出などをおこなう専門の Extension Agronomist が存在し、普及活動に注力しているとされるが (梅本・島田 2013)、UNL でもこのことが当てはまった。Irmak 博士は、生産者への技術普及においては、一対一での教育 (One-on-one education) の重要性を強調していた。

Patricio Grassini 博士が中心に行った生産者圃場の収量データの解析も興味深かった (Grassini et al. 2015)。2010~2012 年に州内の 516 の生産者を対象に、収量データと耕種概要 (播種日、播種密度、品種の Maturity group、耕起方法) や資材投入量 (灌漑、肥料、堆肥、防除)、その他の減収要因 (センチュウ害、雹害、霜害、湿害など) をメールで調査し、生産者圃場における収量決定要因を解析した。解析には Soysim が利用され、その地点の気象条件で得られるポテンシャル収量と実収量の差「Yield gap」が評価された。解析結果の概要としては、1) ネブラスカ州の灌漑農家および非灌漑農家の Yield gap の数値は、それぞれポテンシャル収量の 10~30% および 30~35% である、2) 播種日が 1 日遅れるとポテンシャル収量が 32~52kg/ha が減少する、3) その他、耕起方法の違い、窒素やリン施用、防除の有無などが Yield gap に関わる要素であるとのことだった。Grassini 博士は、生産者から得られるデータの利用は、収量阻害要因を明らかにするための強力かつ効率的な方法で、時間や労力の節約につ

ながる点を強調していた。

その他、George Graef 博士、大学院生の Leaf Ruff 氏から、ネブラスカ州と南米のチリでの水利用効率 (1mm の降水や灌水当たりの収量) の高い品種の選抜試験、水利用効率の向上における雑種強勢の利用なども紹介された。全米の大豆の単収増加には活発な品種育成が関連しているとされるが (桂ら 2010)、このことはネブラスカ州周辺の地域で栽培される Maturity group が II~IV の品種群にも当てはまり、品種の育成年と収量は比例関係にあり、過去 80 年の 1 年当たりの収量の増加率は 20~23kg/ha であった (Rincker et al. 2014)。加えて、最近の米国品種はより好適な環境条件で多収を発揮する性質を有するというのであった。

5. さいごに

今回の視察では、大豆の灌漑支援技術を中心に多くの最新情報を得たことが大変有意義であった。特に印象に残ったのは、Soywater における Irrigation Trigger、すなわち、灌水判断基準である Dep の閾値は 30~50% を推奨しているが、最終的な数値の決定は利用者の判断に任せている点であった。Soywater はリスク管理は生産者に委ねており、生産者の水管理に対する感覚を鍛えるツールであるようにも感じた。NAWMN では、研究者や普及員の熱心な指導の元、生産者が圃場の蒸発散量や土壌水分を計測している。このような形で得られたデータは、今後、研究者側にフィードバックされ、Soywater の改良に利用されるとのことであった。ネブラスカ州と日本の大豆では、根域の厚さに大きな違いがある。先述のように、国内の水田転換畑の下には耕盤があり根域が制限されており、実際に、東北地方での生産者圃場の調査結果では、根域の厚さは 3~34cm であった (高橋ら 2014)。このような理由で、UNL で得られた灌水のタイミングや量についてはそのまま国内に適用できないと考えられるので、検証する必要がある。今後は、今回の視察で得られた情報を参考に、国内大豆生産者向けの灌漑支援システムの開発を進めてきたいと考えている。

謝辞

UNL では、James E. Specht 博士、Suat Irmak 博士、George L. Graef 博士、Haishun Yang 博士、Patricio

Grassini 博士, James Han 氏, Leaf Ruff 氏に御世話になった。ここに謝意を示す。今回の視察は、科学技術・イノベーション会議の SIP (戦略的イノベーション創造プログラム)「次世代農林水産業創造技術」(管理法人：農研機構生物系特定産業技術研究支援センター)の支援を受けて行った。

引用文献

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements, FAO Irrigation and Drainage Paper No 56. Food and Agriculture Organisation, Land and Water. Rome, Italy.
- Beaudette, D.E., O'Geen A.T. 2009. Soil-Web: An online soil survey for California, Arizona, and Nevada. *Computers & Geosciences* 35: 2119-2128.
- Boote, K.J., Jones, J.W., Hoogenboom, G., Pickering, N.B. 1998. The CROPGRO model for grain legumes. In: Tsuji, G.Y., Hoogenboom, G., Thornton, P.K. (Eds.), *Understanding options for agricultural production*. Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA. pp.99-128.
- van Diepen C.A., Wolf, J., van Keulen H., Rappoldt C. 1989. WOFOST: a simulation model of crop production. *Soil use and Management* 5: 16-24.
- Farquhar G.D., von Cammerer S., Berry J.A. 1980 A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species. *Planta* 149: 78-90.
- Fehr, W.R., Caviness, C.E. 1977 Stages of soybean development. Special Report 80, Iowa Agricultural Experiment Station, Iowa Cooperative External Series, Iowa State University, Ames.
- Grassini, P., Torrión, J.A., Yang, H.S., Rees, J., Andersen, D., Cassman, K.G., Specht J.E. 2015. Soybean yield gaps and water productivity in the western U.S. Corn Belt. *Field Crops Res.* 179: 150-163.
- Hirasawa, T., Nakahara, M., Izumi, T., Iwamoto Y., Ishihara, K. 1998. Effects of pre-flowering soil moisture deficits on dry matter production and ecophysiological characteristics in soybean plants under well irrigated conditions during grain filling. *Plant Prod. Sci.* 1: 8-17.
- Hillel, D. 1998. *Environmental Soil Physics*. Academic Press, San Diego, USA.
- 桂圭佑・義平大樹・本間香貴・Purcell Larry C・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.
- 松波寿典・井上一博・工藤忠之・伊藤信二・長沢和弘・柴田康志・神崎正明・千田洋・二瓶直登・荒井義光・小林浩幸・山下伸 2013. 2010 年の夏季異常高温が東北地域のダイズの生育, 収量, 品質に及ぼした影響. *日作紀* 82: 386-396.
- Melvin, S. R. and Yonts, D. D. 2009. Irrigation scheduling: Checkbook method; EC709, University of Nebraska Lincoln Extension. <http://extensionpubs.unl.edu/publication/9000016366528/irrigation-scheduling/>
- 中川博視・堀江武 1995. イネの発育過程のモデル化と予測に関する研究 第 2 報 幼穂の分化・発達過程の気象的予測モデル. *日作紀* 64: 33-42.
- 大野宏之 2014. メッシュ農業気象データ利用マニュアル. 中央農業総合研究センター 研究資料 9: 1-77.
- Rincker, K., Nelson, R., Specht, J.E., Slepner D., Cary T., Cianzio S.R., Casteel S., Conley S., Chen P., Davis V., Fox C., Graef G., Godsey C., Holshouser D., Jiang G.L., Kantartzi S.K., Kenworthy W., Lee C., Mian R., McHale L., Naeve S., Orf J., Poysa V., Schapaugh W., Shannon G., Uniatowski R., Wang D., Diers B. 2014. Genetic improvement of US soybean in maturity groups II, III, and IV. *Crop Sci.* 54: 1419-1432.
- 鮫島良次 2000. 気象環境要因に対するダイズの生育反応の解析およびモデリングに関する研究. 農業研究センター研究報告.
- Setiyono, T.D., Weiss, A., Specht, J.E., Bastidas, A.M., Cassman, K.G., Dobermann, A. 2007. Understanding and modeling the effect of temperature and daylength on soybean phenology under high-yield conditions. *Field Crops Res.* 100: 257-271.
- Setiyono, T.D., Weiss, A., Specht, J.E., Cassman, K.G., Dobermann, A. 2008. Leaf area index simulation in soybean grown under near-optimal conditions. *Field Crops Res.* 108: 82-92.
- Setiyono, T.D., Cassman K.G., Specht J.E., Dobermann A., Weiss A., Yang H., Conley S.P., Robinson A.P., Pedersen P., De Bruin J.L. 2010. Simulation of soybean growth and yield in near-optimal growth conditions *Field Crops Res.* 119: 161-174
- 高橋智紀・持田秀之・榊原充隆・森本晶・小林浩幸・相場聡 2014. 寒冷地における生産現場でのダイズ低収要因の解析. *東北農研研報* 116: 89-118.
- 高橋幹 2002. 大豆一自給率向上に向けた技術開発-第 3 章 栽培生産技術 灌漑. 農林水産省農林水産技術会議事務局. pp.285-291.
- Torrión, J.A., Setiyono, T.D., Cassman K., Specht, J.E. 2011. Soybean phenology simulation in the North-Central United States. *Agron. J.* 103: 1661-1667.
- Torrión, J.A., Setiyono, T.D., Graef, G.L., Cassman, K.G., Irmak S., Specht, J.E., 2014. Soybean irrigation management: Agronomic impacts of deferred, deficit, and full-season strategies. *Crop Sci.* 54: 2782-2795.
- Torrión, J.A., Setiyono, T.D., Graef, G.L., Cassman, K.G., Ferguson, R.B., Irmak S., Specht, J.E. 2012. Soybean root development relative to vegetative and reproductive phenology. *Agron. J.* 104: 1702-1709.
- 梅本雅・島田信二 2013. 大豆生産振興の課題と方向. 農林統計出版.