

3. 農業生産研究グループ

(1) 研究課題と組織

研究課題は乾燥地圃場を対象として、1. 土壌診断による塩類化リスクの評価、2. 節水灌漑・除塩技術、3. 保水性・保肥性の改善のための有機物・廃棄物・保水材の利用、4. 好塩性植物による塩類土壌修復（ファイトレメディエーション）、の4つである。

植物、水・塩、土壌の3つのサブグループはそれぞれ藤山英保・山田智、井上光弘・猪迫耕二、山本定博・遠藤常嘉から構成されている。それぞれのサブグループは独自の研究課題とともにサブグループ相互の研究課題に取り組んだ。

(2) 研究の目的と期待される成果

乾燥地は日射に恵まれるために本来は農業の生産性が高いが、現実には不適切な灌漑による水資源の枯渇、塩類集積による土壌劣化といった収奪的な農業が行われている。本研究は高い生産性を維持でき、しかも持続可能な農業技術を提供するものであり、その成果は世界の食料生産を飛躍的に高め、人口増加に対処することを可能にする。研究目的は「乾燥地における持続可能な農業生産技術の確立」である。すなわち、乾燥地の圃場における最適の水・土壌・作物管理技術を用いた持続的農業生産を確立し、技術マニュアルを作成し、農家に提供することである。

(3) 研究対象地域と研究方法

研究課題1については、中国陝西省黄土高原にある洛恵渠灌区（320 km²）とメキシコ・カリフォルニア半島の塩類集積土壌の表層から下層までの詳細な調査を行った。研究課題2については、ケニアとモーリタニアの圃場において、廃タイヤや廃ガラスから再生した資材を用いた灌漑チューブやキャピラリーバリアの有効性を調査した。研究課題3については、研究課題1と同じ地域において、有機物資材やCa資材による土壌の塩類化防止に関する研究を行った。研究課題4についてはメキシコ・カリフォルニア半島の塩類集積土壌にヒユ科の好塩性作物を栽培し、塩類土壌修復と作物生産の両立について調査・検討した。

最終年度の2011年に中国山東省東営市の塩類集積ワタ圃場において研究課題1～4を組み合わせて実証試験を行った。

(4) 研究成果

研究課題1：土壌診断による塩類化リスクの評価

中国陝西省黄土高原にある洛恵渠灌区（320 km²）とメキシコ・カリフォルニア半島の塩類集積土壌の表層から下層までの詳細な調査を行った。

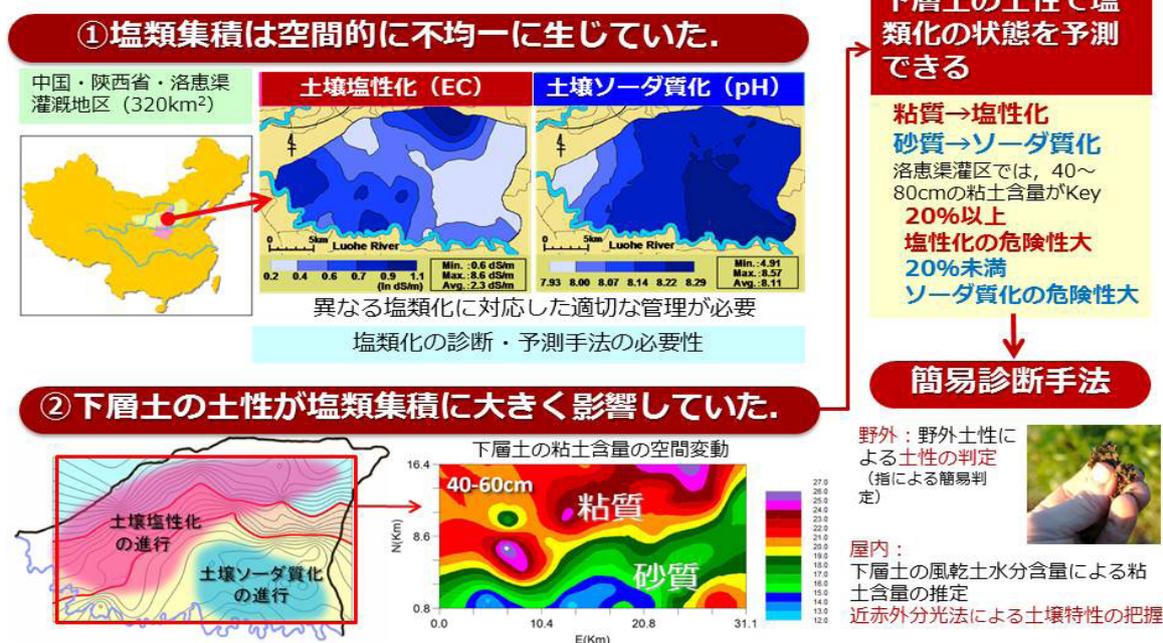
①中国およびメキシコの灌漑農地の調査に基づく土壌塩類化診断と評価

中国陝西省黄土高原にある洛恵渠灌区、曹埠チェックダムおよびメキシコ・カリフォルニア半島南部の農地を対象とし、当該地域における農地の塩類化の現状と灌漑水や地下水の挙動が土壌塩類化に及ぼす影響などを明らかにした。そして、土壌診断による塩類化リスクの評価を行うことにより、適切な土壌管理法を提案した。また、空間的・時間的に不均一である土壌の塩類集積状態と塩類集積要因との関係を広域的かつ長期にわたって調査・解析し、土壌塩類化機構を明らかにするとともに、土壌塩類化の防止・修復のための対策を提言した。

中国陝西省洛恵渠灌区（320 km²）内の標高は北から南に緩やかに傾斜しており、大きく三段の段丘面（上位面、中位面および下位面）からなっていたが、上～中位面の土壌層位はA-BまたはA-BC、下位面はA-BまたはA-Cであり、下位面ほど未熟な土壌断面であった。農地内は主に粘

土 15~35%、微砂 15~40%、砂（細砂主体）40~70%の埴壤土~軽埴土の堆積物で構成されていたが、段丘面によって堆積様式が異なっていた。上位面では下層において粘土と微砂含量が多くなるのに対して、下位面では全層にわたり比較的粗粒な土壌であった。また、段丘面により異なった塩類動態が認められ、上位面では、全層にわたり土壌 EC は高く、土壌 pH は低いのに対し、中~下位面では、土壌 EC は低く、土壌 pH は高い傾向を示した（図Ⅲ-3-1）。つまり、上位面では下層土の粘土と微砂含量が多いため、塩類が洗脱されにくい環境下に置かれているのに対し、中~下位面では粗粒な下層土であるため、塩類が洗脱され易い環境下に置かれていた。そのことにより、中~下位面ではナトリウム炭酸塩を含む灌漑水による土壌中の塩類の洗脱過程で塩類組成が変化し、土壌 pH が上昇したと考えられた。土壌塩性化の防止と改良のためには、塩類を効率的に洗い流すことが必須であり、洛惠渠灌区にはそのための排水設備が導入されており、塩害に対する対策は講じられている。しかし、ソーダ質土壌の場合には水による塩類の洗脱では根本的な改良はできないばかりか、乾燥地域に特有な重炭酸イオン濃度の高い水による過度の洗脱はソーダ質化を助長してしまう。そのため、石膏のようなカルシウム資材、難溶性カルシウム塩の可溶化を促進させるための硫黄華などを施与するとともに、補足的に、高 pH の環境で不可給化しやすい微量元素を作物が吸収しやすいように養分元素のバランスも適正状態に維持する必要もある。また、経済性が栽培作物を決める非常に大きな要因になっているが、農地の生産性の持続性を第一に考えれば、適地適作という考えも重要である。今後、塩類化を防止して持続的な栽培と安定的な収入を可能にするためには、いくつかの経営モデルを策定して試算し、その中から適用可能な塩害防止技術を選定し、それらの効果についての伝統的知識も加味した検証が必要であると考えられた。

土壌診断：灌漑農地の土壌塩類化の簡易診断技術の開発



図Ⅲ-3-1 土壌断面内の塩類動態（中国・洛惠渠灌区）

また、チェックダム農地における適切な土壌管理法を検討するために、小河沟流域の曹岬ダム農地内 (36 ha) の上流、中流および下流のそれぞれにおいて土壌断面調査を行なった。その結果、

それぞれの地点において異なった土壌堆積様式が認められていた。つまり、上流に比較して、中～下流の上層では多量の粘土とシルト画分が厚く堆積されていた。また 2010 年 6 月に調査した時には、農地内における 1 m 以内には地下水は確認できなかったが、雨期の同年 9 月に調査した時には、上流において約 50 cm において地下水が確認された。異なる地下水位の深さに起因して、塩類集積状況も異なり、下流では塩類の集積は認められなかったが、中流では塩性土壌、上流では塩性—ソーダ質土壌が認められた。土壌塩性化の程度は、表層において顕著であった。そこで、ダム農地内全域において、表層土壌を 50 地点採取したが、同様の傾向が認められた。同一ダム農地内においても、塩類集積状況に応じて、異なる栽培管理を行なうとともに、それぞれの区域で土壌塩類化の進行もしくは予防を行なわなければならないことが示唆された。つまり、下流域においては、これまでのトウモロコシ栽培を土壌塩性化に配慮しながら続けうるとしても、土壌塩性化が進行している上流域においては、耐塩性および耐ソーダ質性である綿花等の異なる栽培作物を主流とした管理が必要であると考えられた。また、表層における土壌塩性化が顕著であることから、土壌中の塩類除去後、土壌ソーダ質化の予防のためのカルシウム資材の施用も一つの方策であると考えられたが、農家の経済性から現実的には難しいと考えられた。そこで、カルシウム資材と有機物資材の併用により土壌ソーダ質化を抑制する対処も必要であると考えられた。

メキシコ・カリフォルニア半島南部に位置するラパス周辺の灌漑農地の土壌断面形態と塩類集積状況について調査した結果は、以下の通りであった。近郊農地によっても土壌中の塩類動態は異なり、土壌の性質、土壌中の集積塩類量、組成および灌漑水質、量等の要因が複合的に絡み合ったものであった。また、これまでの栽培歴に由来し、土壌中への塩類集積状況も農地によって明瞭な差異が認められた。砂質～壤土質農地では土壌中への塩類集積は認められなかったが、土壌の保水性が低いため過剰灌漑の傾向であった。灌漑水中のナトリウム炭酸塩が多量に土壌へ付加された結果、ソーダ質土壌を生成しており、さらに土壌のアルカリ性化が進行している農地もあった。これらの土壌劣化を防ぐには、節水節肥栽培が重要であり、なるべく少ない水と肥料で効果的に栽培作物の養分を維持するための管理を行うことで、水資源の枯渇防止に直結するとともに、土壌劣化の防止という重要な意味を持つと考えられた。一方、埴土質農地では、長期の過剰灌漑によって表層に白色の塩類結晶が多量に析出し、土壌断面内にも塩類集積が認められた。特に、土壌断面内には多量の塩類が析出しているとともに、土層は極めて堅かった。この緻密な土層のために根圏は狭く制御され、作物生育不良の一因にもなっていた。栽培作物の生育状況は明瞭で、塩類集積している地点の生育は極めて不良であった。農地内の灌漑水の塩類濃度は比較的高く、主要な塩類形態は塩化物塩、炭酸塩であった。灌漑水中のナトリウム炭酸塩が土壌に多量に付加した結果、ソーダ質土壌が生成され、土壌のアルカリ性化も併発していた。このような農地における土壌改良は、心土破碎によって土壌断面内の硬盤層を破壊することにより透水性を改善し、塩類を下層に洗脱させるとともに、根群域を広範囲に確保することである。また、石膏等の土壌改良剤、ビート等のクリーニング作物導入によって塩類を作物に吸収する試みも有効であると考えられた。

以上のように、調査したいずれの農地においても、灌漑農地の塩類の集積状況には、土壌の性質、とくに下層土の透水特性が大きく影響していた。このような下層土の土性と表層における塩類集積状況の関連性は、中国山東省東営市の塩類集積ワタ圃場においても、明らかに認められた。このように土壌塩類化の危険性のある農地においては、野外土性のような簡便な判定指標によって、今後起こりうる塩類集積の状態や危険性を予測して土壌管理に反映させることができれば有益な情報となると考案した。下層土が粘質であれば、表層に塩が析出していなくても、塩性化の危険性が高いので、適切な除塩や排水対策を講じる必要がある。土壌塩性化の防止と改良のため

には、塩類を効率的に洗い流すことが必須である。したがって、下層土に難透水性の層が存在する場合、暗渠などの地下排水性を確保するための方策が必要である。一方、下層土が砂質であれば、除塩対策よりもソーダ質化の対策を積極的に講じる必要がある。ソーダ質土壌の場合には水による塩類の洗脱では根本的な改良はできないばかりか、乾燥地域に特有な重炭酸イオン濃度の高い水による過度の洗脱はソーダ質化を助長してしまう。ソーダ質土壌の改良は土壌化学性の改良が基本となり、土壌溶液中のカルシウム濃度を高め、土壌コロイド上のナトリウムをカルシウムと交換する必要がある。そのため、石膏のようなカルシウム資材、難溶性カルシウム塩の可溶化を促進させるための硫黄華などが施与することも必要である。このような高 pH 環境下で、不可給化しやすい微量元素が作物へ吸収されるように養分元素のバランスも適正状態に維持するための検討も必要である。栽培作物や土壌改良資材の選定など、大規模な灌漑区における塩類集積の問題は、塩類の集積状態の多様性、不均一性を広域的に評価し、適切に対処しなければならない。

②近赤外分光法による乾燥地土壌の塩類組成および理化学性の簡易分析の検討

下層土の野外土性に基づく土壌塩性化リスク評価などの簡易な現場での診断法を提案したが、広域的かつ戦略的に灌漑農地の土壌塩類化に対処するためには、灌漑ブロック内、あるいは圃場一筆内で空間的に不均一に生じる土壌塩類化の実態を的確に捉える必要がある。農地における三次元的な塩類の存在状態の不均一性はジオスタティスティクス等のペドメトリックスの手法を用いて、捉えることが可能であるが、位置情報を持つ多数の土壌試料の分析値が必要である。しかしながら、従来の分析法では、この要求に対応できない。そこで、非破壊、迅速、簡便に同時多項目の分析が可能である近赤外分光法（NIR 法）を乾燥地土壌の塩類組成と理化学性分析に適用しその分析精度を検討した。

供試土壌として、EC、pH、SAR、可溶性塩類、粒径組成、未風乾土水分含量、風乾土水分含量の分析値既知の中国、カザフスタン、メキシコ土壌、合計 818 点の風乾細土を供試し、近赤外分析装置（ビーエルテック社 Spectra Star 2400）を用いて 680～2500nm の波長範囲のスペクトルを解析して分析検量線を作成し、その分析精度を評価した。

分析項目によって、検量線作成のためのスペクトル処理条件が異なっており、その定量精度にも差異があったが、おおむね、塩類化の要因として作用する土壌特性を掌握し、圃場の管理に適用するには十分な精度の結果が、非常に簡便かつ迅速に得られることが明らかになった。このたびは、14 項目についての検量線を作成し、検量線のある項目は、1 検体につき 3 分程度で分析できた。14 の分析項目の中で分析の精度が最も高かったのは、粒径組成に関する項目、すなわち粘土、シルト、砂含量であった。この分析項目は、定量に最も時間を要するものであり、土壌塩類化リスクマップ作成に NIR 法は強力かつ有効なツールになることが明らかになった。塩類の含量、組成に関する分析項目は、粒径組成に比べ分析精度がやや低いものの、塩性土壌の判定、さらに作物の栽培可能性と塩類集積量の関係を読み取るには十分な精度であり、さらに土壌 pH も同時に読み取れることから、圃場管理に適応することでより精密な管理が可能になると考える。さらに、NIR 法で特筆すべき点は、過去の土壌状態を予測できるということである。NIR 法には風乾土壌を供試するが、風乾する前の土壌の水分量、すなわち、圃場に存在する土壌水分量も予測できる。これは、現在の状態から過去の状態を予測できるということであり、深さを変えてサンプリングした風乾細土があれば、ある時期の圃場中の水分状態を三次元的に捉えることができ、排水対策等の圃場改良にも活用できる。このように、NIR 法は灌漑農地を診断するきわめて強力なツールになることが明らかになった。

今後は、可溶性塩類の分析精度をさらに高めるために、近赤外領域での吸収ピークと土壌構成

成分との帰属等、より詳細な解析を行うとともに、栽培前の風乾細土の NIR 分析により作物収量、栽培終了後の土壌塩類集積量などの未来の状態の予測への適用についても検討を行う予定である。

研究課題 2：節水灌漑・除塩技術

ケニアおよびモーリタニアの圃場において、廃タイヤや廃ガラスから再生した資材を用いた節水灌漑システムとキャピラリーバリアの有効性の実証試験と国内では基礎的な理論検証を行った。

ケニア・モーリタニアの事例：降水量が少ない乾燥地で継続的かつ安定した農業生産を行うためには、塩類集積を起こさないように、また水資源が枯渇しないように適切な灌漑を行う必要がある。そこで、リサイクル資材を用いた省力型持続的節水灌漑システムを提案し、国内の砂地圃場で実験を行い、海外で実証試験を行った。具体的には、モーリタニアでは、厚さ 2 cm の廃ガラス層を深さ 30 cm に埋設して、深さ 7 cm に廃タイヤから製造したポラスチューブを浸潤型地中灌漑システムとして設置した。2008 年 11 月にトマトを移植して翌年 3 月に収穫、2009 年にはオクラを栽培した。これらの灌漑水量の決定には前日の気象データから蒸発散位と作物係数を参考にした。ケニア共和国では、現地のジョロによる手灌漑、バケット点滴灌漑と、今回提案した定水位地中灌漑の比較試験を行った。2010 年 7 月にケニアハウレンソウを播種し、9 月に収穫した。いずれの野菜栽培の実験結果からも、今回提案した灌漑システムは水利用率が高く、節水であることが認められ、新しい灌漑システムの有効性を確認した（図Ⅲ-3-2）。



図Ⅲ-3-2 砂質土壌における再資源化資材を用いた節水型野菜栽培技術

国内基礎実験①：以前に実施したタンザニアでの籾殻暗渠による塩害水田の除塩効果を検証するために室内実験と数値シミュレーションによる解析を行った。高さ60cm、横50cm、幅15cmの土槽に現地圃場を模擬した塩害水田と籾殻暗渠を設け、リーチングによる除塩水量の計測等を行った。また、数値モデル (HYDRUS-3D) を用いて、現象を再現し、さらに圃場条件を変化させた数値実験を行った。

国内基礎実験②：キャピラリーバリアを敷設した農地において、リーチングによる除塩と浅い地下水からの毛管上昇水の遮断による塩類集積の防止が両立されるか否かについて実験室内で土壌

カラムによる実証実験を行った。ここでは、地下水面が存在しない場合と浅い地下水面が存在する場合の2つの条件下で実験を行った。各実験とも内径5cmのアクリルカラムを使用し、砂土層のみと粗粒層ありの2種類の実験カラムを作成した。実験1では実験カラム下端での自然排水を可能とするために、砂土を充填した50cmの下層土カラムを連結させた。実験2では実験カラムの下端から2cmの位置にEC 30 dS m⁻¹の地下水面を作成した。なお、細粒土には砂土（鳥取砂丘砂）を用い、粗粒土には粒径5~10mmの礫を用いた。実験は、温度25℃、湿度25%の恒温で行い、蒸留水でリーチングした後にカラム上部から送風して蒸発させた。実験1では実験開始後1、10、20日目にカラムを解体し、体積含水率とEC_{1.5}を計測した。実験2では実験開始後1、7日目にカラムを解体した。いずれの実験においても、実験前後の質量変化から蒸発量と作土層以深への下方浸透量を計測し、水収支を求めた。

研究課題3：保水性・保肥性の改善のための有機物・廃棄物・保水材の利用

乾燥地域における土壌の塩類化防止の一助とするため、有機物資材などを用いたソーダ質土壌の改良法についての検討を行った。有機物資材は多種多様であるが、カルシウム溶解特性は大きく異なる。そこで、炭酸カルシウムを10%（W/W）添加した砂丘未熟土に、異なる種類の有機物資材（鶏糞、都市下水コンポスト、トウモロコシ残さ）を、乾物換算で2 Mg ha⁻¹相当量添加した。そして、最大容水量の60%の水分条件下で一定とし、カルシウム溶解特性の経時変化を比較した。石膏や硫黄華等の化学資材と比較すると、有機物資材のカルシウム溶解能は小さいが、有機物の種類によってその特性は大きく異なり、動物糞や堆肥よりも、トウモロコシの作物残さのような新鮮有機物資材の方が数倍~10倍高いカルシウム溶解能を示した。圃場で発生する作物残さはソーダ質土壌の改良資材として効果的であり、高価な化学肥料の購入が難しい農家にとって有用な資材になり得ると考えられた。

以上の結果からも、有機物資材は、化学資材と比較して即効的な改良は望めないが、ソーダ質化抑制資材として連用することにより、ソーダ質化の直接的な改良ばかりではなく、総合的な土壌改良も期待できる。たとえば、有機物から生成する有機酸は、ソーダ質化により強アルカリ性化した環境で不可給化しやすい鉄や亜鉛などの微量元素の可給度を高めること、土壌中に腐植物質として付加される画分は、ソーダ質化によって分散した粘土粒子を凝集させ、団粒化を促進させることによって、土壌物理性の改善を促すなど、土壌の総合的な改良が期待できる。さらに、鶏糞、都市下水コンポストおよびトウモロコシ残さなどの有機物資材に、化学資材（石膏、硫黄華）を0.5%（W/W）添加すると、化学資材を単独で施用するよりも土壌溶液のカルシウム濃度が高くなった。化学資材と有機物資材の併用は、化学資材による即効的な改良と有機物資材による土壌の総合的な改良も期待され、ソーダ質化の進行した圃場では、化学資材と植物残さの併用が望ましいと考えられた。

中国山東省東営市の塩類集積ワタ圃場においても、有機物施用試験（トウモロコシ残さ2 Mg ha⁻¹相当施用）の結果、ワタの収穫指数がやや改善された。しかし、有機物資材の改良効果を短期的な効果として捉えることは難しく、有機物による土壌改良効果は連用による長期的な効果として評価することが重要であると考えられた。

砂丘に分布する砂質土壌は保水性に乏しく保肥力がないので、他の土壌と比較して農業生産が少ない。そこで、保水性を高め生産量を高めるために種々の保水材が試みられている。CMCゲル吸水材の物理的・化学的特性を明らかにして、トマト栽培を行い、最適な砂との混合比について検討した。具体的には、CMCゲル吸水材の形状（粉末状、粒状）、混合率（砂層10cmの厚さに0.1%、0.3%）そして4 dS m⁻¹の塩水灌漑についても検討を加えた。その結果、保水材が粉末状よりも粒状

の方が同じ混合率では保水性が高まること、粒状の0.3%混合区はトマトが約58%増収する結果を得、CMCゲル吸水材の有効性を確認した。また、堆肥の炭化による土壌改良材の検討も行き、栽培試験で有効性を確認した。

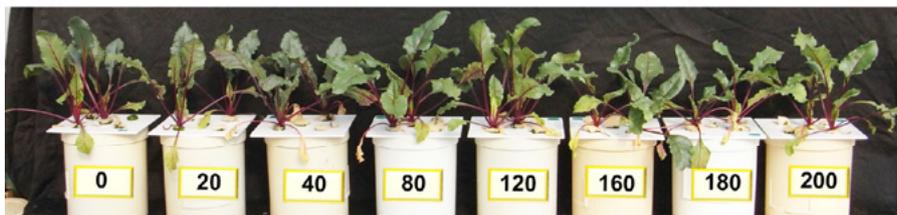
研究課題4：好塩性植物による塩類土壌修復（ファイトレメディエーション）

メキシコ・カリフォルニア半島の塩類集積土壌にヒユ科の好塩性作物を栽培し、塩類土壌修復と作物生産の両立について検討した。すなわち乾燥地農業でもっとも深刻な害を及ぼす元素であるナトリウム（Na）を植物によって除去する。Naの超集積植物としては塩生植物のアッケシソウ（*Salicornia* spp.）が知られている。アッケシソウはNaがない培地では生存できない（写真Ⅲ-3-1）。Naを積極的に吸収し、成長部位に輸送し、地上部のNa含有率は10%を超える。障害が発生しないどころか、生育が促進される。アッケシソウほどではないが、好塩性作物であるテーブルビート、フダンソウ、スアエダ・サルサ等も利用できる可能性がある。Naは動物にとっては生存に欠かせない必須元素であるため、Naを多く含む収穫物は食料や飼料として利用できる。

これまでの研究で、アッケシソウの最適培地 Na 濃度は 200 mmol L^{-1} （海水濃度のおよそ 2/5）、テーブルビートとフダンソウは 80 mmol L^{-1} であることがわかっている（写真Ⅲ-3-2、3）。



写真Ⅲ-3-1 培養液中の NaCl 濃度がアッケシソウの生育に及ぼす影響



写真Ⅲ-3-2 培養液中の NaCl 濃度がテーブルビートの生育に及ぼす影響

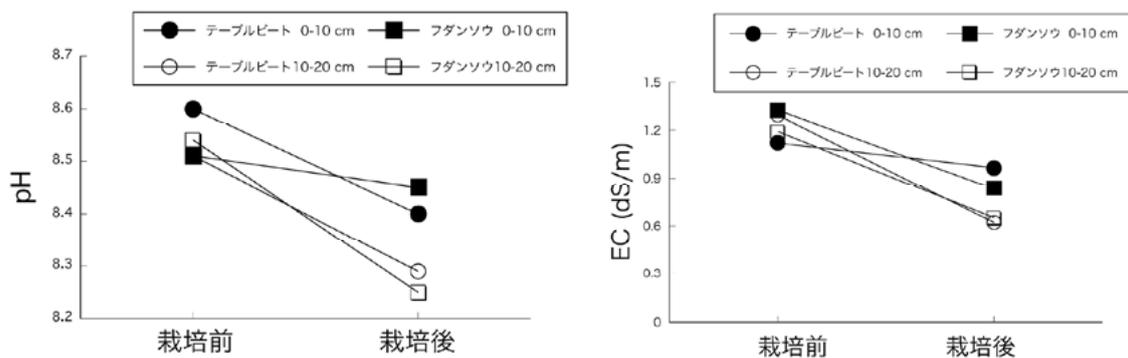


写真Ⅲ-3-3 培養液中の NaCl 濃度がフダンソウの生育に及ぼす影響

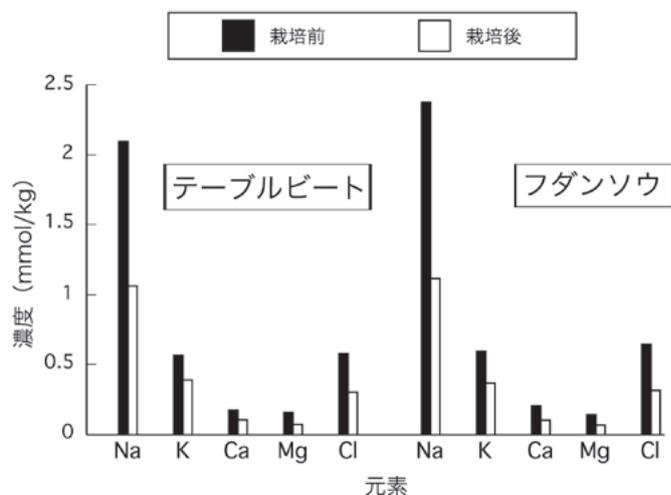
2010年にメキシコ・ラパス市のメキシコ北西部生物学研究センターのソーダ質土壌の圃場においてテーブルビートとフダンソウによる土壌修復実証試験を行った。両植物種とも旺盛な生育を示した(写真Ⅲ-3-4)。収穫後の土壌pHは8.5以下となり(図Ⅲ-3-4左)、ソーダ質土壌が改善されたことがわかる。土壌電気伝導度(EC)も低下し(図Ⅲ-3-4右)、作物にとってより好適な環境になったことがわかる。また、両植物種ともにNaを特異的に吸収したことがわかった(図Ⅲ-3-5)。これらの結果から両植物種が塩類集積土壌の修復に有効であると結論できる。



写真Ⅲ-3-4 メキシコのソーダ質土壌におけるテーブルビートとフダンソウの栽培



図Ⅲ-3-4 テーブルビートとフダンソウの栽培が土壌 pH と電気伝導度 (EC) に及ぼす影響



図Ⅲ-3-5 テーブルビートとフダンソウの栽培が土壌中元素濃度に及ぼす影響

最終年度の2011年に中国山東省東営市の塩類集積ワタ圃場において研究課題1～4を組み合わせ、実証試験を行った。

中国山東省東営地区の事例：過度な塩類集積によって耐塩性の高いワタさえも生育できない圃場においてキャピラリーバリアの有効性に対する実証実験を行った。礫の使用が土地所有者に認められなかったため、キャピラリーバリアの資材としては現地で容易に入手できるワタの残渣を使用した。2m四方の穴を深さ75cmまで掘り下げ、ワタの残渣を10cm敷き詰めた。その後、再び土壌で被覆し、その上に綿花炭を10cm敷き詰めた。地表面にマルチを張ったうえでワタを栽培した。また、裸地区において土壌水分と塩分の挙動を調べるために土壌水分・塩分センサーを埋設した裸地区を設けた。裸地区は1m×1mであり、その他の規格はワタ栽培区と同じとした。また、圃場近傍に地下水位の観測井を設けた。

山東省に自生する *Suaeda salsa* とホウキギ及び市販のテーブルビートとフダンソウによるファイトレメディエーション実証試験を行った。現地は耐塩性強のワタしか栽培できない塩類集積地帯である。事前調査によって土壌ECが 14 dS m^{-1} であればワタの発芽が困難となることがわかっている。4種の植物を栽培した結果、1作で吸収するNa (kg ha^{-1}) はスアエダ・サルサが333、テーブルビートが107、フダンソウが73、コキアが75であった。これらのデータをもとにワタ収量の段階ごとに修復に必要な年数を算出した(図Ⅲ-3-6)。例えばワタの50%の収量を得るためにはスアエダ・サルサを1回(1.04年)栽培すればよい。

実証試験に供試した植物はすべて人間の食料や家畜の飼料として用いられているものである。フダンソウは乾燥地、塩類土壌に適する葉野菜として重要である。テーブルビートはテンサイ(サトウダイコン)の近縁種であり、塊根の糖濃度が高いためにジュース、スープ、ジャム等、用途が多岐にわたっている。スアエダ・サルサは中国ではレストランでの料理に加え、人々の食卓にも登場する普通の野菜として利用されている。写真Ⅲ-3-1のアッケシソウはこれらの作物よりもさらに高濃度の塩に適応し、海水灌漑が可能であるほど好塩性である。アッケシソウはこれまで食料や飼料として用いられてきたが、種子の成分がダイズと似ていることから、近年はバイオ燃料として注目されている。これらの好塩性植物を塩類集積土壌に栽培することによって、土壌修復を達成しながら農家に収益をもたらすことができる。



ワタ収量	その時のEC	各割合のワタ収量を得る土壤ECに修復するまでの年数			
		スアエダ・サルサ 一毛作	テーブルビート 二毛作	フダンソウ 二毛作	コキア 一毛作
50%	12.9 dS m ⁻¹	1.04年	1.62年	2.40年	4.62年
75%	8.9 dS m ⁻¹	4.70年	7.31年	10.8年	20.8年
100%	5.0 dS m ⁻¹	8.35年	13.0年	19.2年	37.0年

図Ⅲ-3-6 中国山東省東営市塩類集積土壤のワタ栽培地帯におけるファイトレメディエーション実証試験

(5) 成果の公表

農業生産研究グループの各メンバーが研究実施対象地域で行った研究および2011年度に中国山東省東営市で行った共同研究の成果をとりまとめた圃場管理に関する技術マニュアル冊子を英文と和文で刊行した。

(6) 今後の展開

農業生産研究グループの研究目的である乾燥地における持続可能な農業生産技術を確立するためには、その基盤となる水・土壌資源の利用と技術を広く普及することが重要であると考えられる。その内容については、1. 治水・利水技術、2. 集水・造水技術、3. 節水技術、4. 生態的修復技術、そして、5. 持続的・経済的な農業技術の発展についてまとめて、国際農林業協力の35巻2号(2012)に公開された。乾燥地農業の重要課題である塩類集積については、地盤工学会誌に「塩類化の現状と除塩技術」と題して、1. 塩類化の原因(自然的要因、人為的要因)、2. 塩類化の現状(塩類土の分類、塩分濃度の測定、海外の塩類化の現状)、3. 塩類集積の軽減と予防対策(上向きの塩移動、下向きの塩移動)、4. 塩類集積地の除塩技術(水理的除塩技術:リーチング、化学的除塩技術:ソーダ質土の改良、生物的除塩技術:ファイトレメディエーション、土木工学的除塩技術)を解説した。

ポストGCOEの研究テーマについては、中国山東省での応用実験で得られた成果の基礎となる理論を構築する研究を進めている。農業用水を造水するための減圧型蒸留法の開発(ヤンマー)、塩類集積の原因になる毛管上昇の切断、集水効率の向上に効果があるキャピラリバリアの活用(飛鳥建設)、定水位省力型地中灌漑システムの応用版として温水利用による砂ベッド野菜栽培の実用化(大協組)などの共同研究を継続している。塩類集積を防止するためには、土壤中の塩分測定が不可欠で、正確な水分、塩分の測定技術の向上のための研究を継続している。塩類集積土壤の

ファイトレメディエーションについては、好塩性植物（作物）種を拡大し、最適塩濃度についてさらに調査を進めている。

外部資金の獲得に関しては、それぞれのサブグループが科学研究費（海外学術調査）を初めとする外部資金を申請し、特に中国やメキシコの現場での応用研究を目指している。

（藤山英保）

(4) 研究成果

本研究の5年間の成果（まとめ）コムギ近縁野生種および野生種の染色体を導入した系統の耐乾性調査を、環境が制御された人工気象機および実際の乾燥地の圃場で行った。その結果、耐乾性には遺伝的な多様性があることを見だし、耐乾性系統を選抜できた。耐乾性に重要な形質として、止葉での光合成活性の維持や、土壌水分の吸収があまり高くなく、節水できる性質のあることが解明された。また、染色体添加コムギ系統の中には乾燥地で問題となる肥料やミネラルの吸収力が高く、節肥性や高含量のミネラルを含む系統が存在することを見いだした。さらに、ストレスに強く、コムギに染色体導入された野生種から、ユニークな遺伝子を単離することができた。一方で、ストレスを受けたときに、細胞内に蓄積される活性酸素を除去するアスコルビン酸やグルタチオン代謝系がストレス耐性に重要であることを見だし、これに関与する遺伝子をモデル植物やジャガイモに導入し、ストレス耐性を示す系統を育成した。さらに、この遺伝子をコムギに導入した系統を育成することができた。

年次毎に、研究の進捗を見ると、平成19年度は、本研究課題の目的達成のために、既往研究の中から本研究課題に関連する研究を抽出し、Ⅲ-4-1の①～④の研究を中心に位置づけた。

平成20年度はこれら研究を発展させた。また、アグロバクテリウム法で遺伝子組換えの容易なタバコの遺伝子組換え体を開発し、そのストレス評価を行った。一方、コムギは遺伝子組換えが極めて難しいため、パーティクルガン法を用いた研究が先行して実施されていたエジプト国AGERIと協定を結び、共同研究を開始した。また、同法関連の遺伝子導入機器を購入し、AGERIで習得した技術を、本学でも遂行するための準備を行った。一方で、今後の栽培試験のためICARDAとも協定書を交わし、生理生態反応について検討を始めた。初年度の研究成果は以下の通りである。

① 塩性植物の耐塩性機構の解明

- ・ 塩性植物アッケシソウが NaCl を浸透物質として蓄積し、吸水の原動力として浸透濃度を高めていること、塩処理によって細胞壁の粘性の低下がおり、胚軸の伸長成長を促進していることを見いだした（図Ⅲ-4-2 下）。

② 耐乾性の分子機構の解明

- ・ インゲンマメ、コムギ、イネ、アトリプレックス等の植物の、塩や乾燥ストレス等に対する生理反応および抗酸化酵素活性等の動態を調査した。また、これらの反応に及ぼす珪酸、光、温度の影響を調査した。
- ・ 塩や乾燥ストレスに係る酵素遺伝子や液胞アンチポーター制御タンパク遺伝子を導入したタバコをつくり、この植物がオゾン、塩、浸透圧に対して耐性を示すことを見いだした。
- ・ コムギ系統を大規模に調査し、種子の硬軟質性に関与する遺伝子の変異を調べた。種子の硬軟質性は耐乾性と関わる形質の一つであると考えられる。

③ コムギの生理生態反応の解明

- ・ 耐乾性の異なる派生合成コムギ系統を ICARDA の圃場において、乾燥ストレスの影響を調査したところ、開花直前の補助灌漑が収量に最も影響を与えることが分かった。
- ・ 耐塩性ダイズがもつ重要遺伝子をマイクロアレイにより見だし、この機能解析をウイルス誘導性遺伝子サイレンシングによって明らかにする一連の実験手法の確立を行うための研究を行った（図Ⅲ-4-2 上）。

④ 遠縁交配法の開発

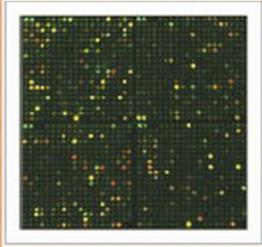
- ・ コムギ近縁野生植物の染色体構造を分子細胞学的に調査し、染色体導入の際にコムギ染色

- 体と識別できるようにした。また、異種染色体導入時に、重要なコムギの1D染色体が脱落する傾向があり、注意する必要があることを見いだした。
- ・ オオハマニンク染色体添加コムギ系統に生物的硝化抑制作用があることを見だし、乾燥地で有効な節肥コムギの育種母本を提案した。
 - ・ 耐乾性作物パールミレットの染色体をコムギに導入するための前実験として、パールミレットおよびその近縁植物の染色体に関する研究を行った。
 - ・ 植物受精のモデル生物であるトレニアを用い、種間受精で見られる受精障壁について研究した。この研究結果により種間雑種を育成するときに考慮すべき情報を得た。

新奇遺伝子単離 — 耐乾性・耐塩性関連遺伝子の探索

▶ **耐塩性ダイズから新奇遺伝子を同定した**

Microarray



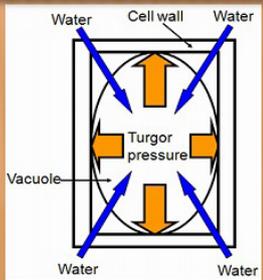
VIGS



▶ **アッケシソウはNaCl存在下で細胞が伸長しやすくなる事を発見した**

Salicornia herbacea L.





図Ⅲ-4-2

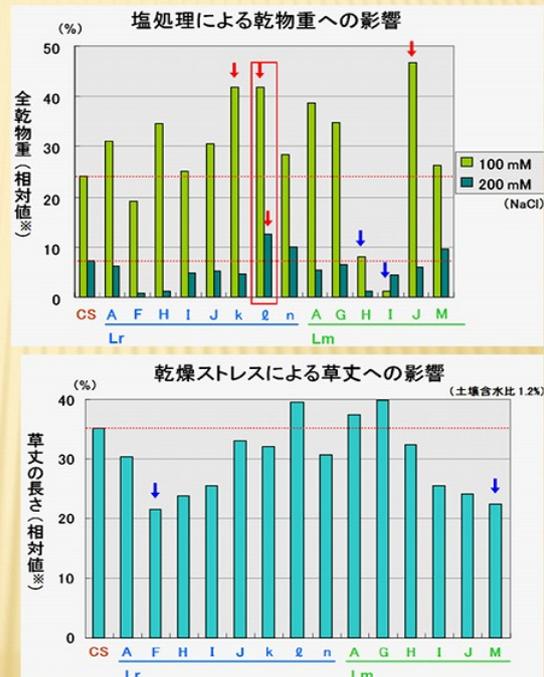
平成 21 年度は、研究が工程図（図Ⅲ-4-1）において⑦～⑩の部分に移行した研究が開始され、成果が現れ始めた。これらの研究は、（1）耐乾性コムギ系統育成のための野生・異種染色体コムギ系統の作成と評価、（2）新奇遺伝子単離、遺伝子組換えによる耐乾性・耐塩性植物の開発、（3）適切な評価法の開発として、取りまとめ遂行された。

（1）耐乾性コムギ系統育成のための野生・異種染色体コムギ系統の作成と評価

- ・ 野生植物タルホコムギ (*Aegilops tauschii*) のゲノムをもつ合成6倍体コムギ系統の栄養成長期の耐乾性について調査をした。その結果、光合成速度および気孔コンダクタンスが耐乾性に関与することを見だし、耐乾性形質と関係する量的遺伝子に連鎖する 3 マーカーを同定した（図Ⅲ-4-3）。

オオハマニンニク染色体添加コムギ系統の評価

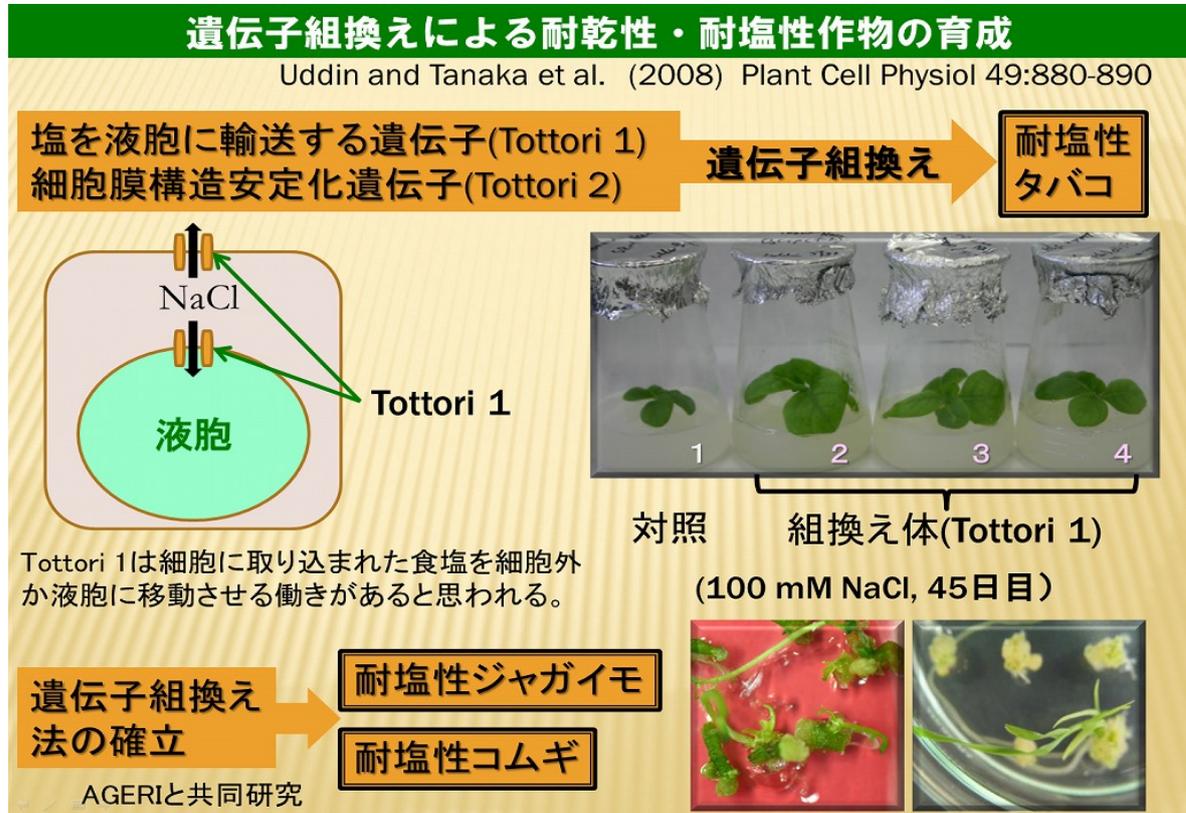
▶ 染色体添加系統を評価した



図Ⅲ-4-3

- 耐乾性作物であるトウジンビエの染色体をムギ類に導入するため、様々なゲノムをもつムギ類系統にトウジンビエ花粉を授粉し、雑種初期胚におけるトウジンビエ染色体の行動を調査した。その結果、エンバクとの交雑では染色体脱落が起こらず、完全雑種細胞ができることを見いだした。
- (2) 新奇遺伝子単離、遺伝子組換えによる耐乾性・耐塩性植物の開発
- 生体膜再生に関わる糖脂質合成酵素遺伝子（モノガラクトシルジアシルグリセロール合成酵素）を過剰発現させたタバコは糖脂質含量が高く、また、高塩ストレス下でも高い光合成と成長を示した（図Ⅲ-4-4）。
 - 液胞膜への塩輸送を制御するタンパク質（OsARP）を過剰発現させたタバコは高塩ストレス下でも高い光合成と成長を示した。
 - シロイヌナズナのゲノム中にARP様タンパク質が3種存在することを確認した。それぞれの遺伝子の機能を抑制したシロイヌナズナ、過剰発現させたシロイヌナズナの作出を試み、ゲノムPCRで遺伝子の欠損、過剰発現を確認できた。
 - コムギの遺伝子組換え法を確立し、OsARP遺伝子を導入した組換えコムギ個体を育成した。
 - ハマニンニク、ソルガムにおいて塩・珪酸で誘導される遺伝子群の中から、有力な塩耐性遺伝子を見いだした。
- (3) 適切な評価法の開発
- デュラムコムギをICARDA圃場に栽培し、乾燥ストレス条件下での開花前および開花後の同化産物を調査した。その結果、耐乾性には開花後の乾物生産量の増加とその同化産物の子実への効率的な分配が関係したと考えられた。

- 低窒素条件下でアブシジン酸を処理することによりクロロフィル生合成の律速段階であるアミノレブリン酸合成酵素の遺伝子発現が増加することを明らかにした。このことから低窒素条件下においてはアブシジン酸がクロロフィルの生合成を促進していることが示された。



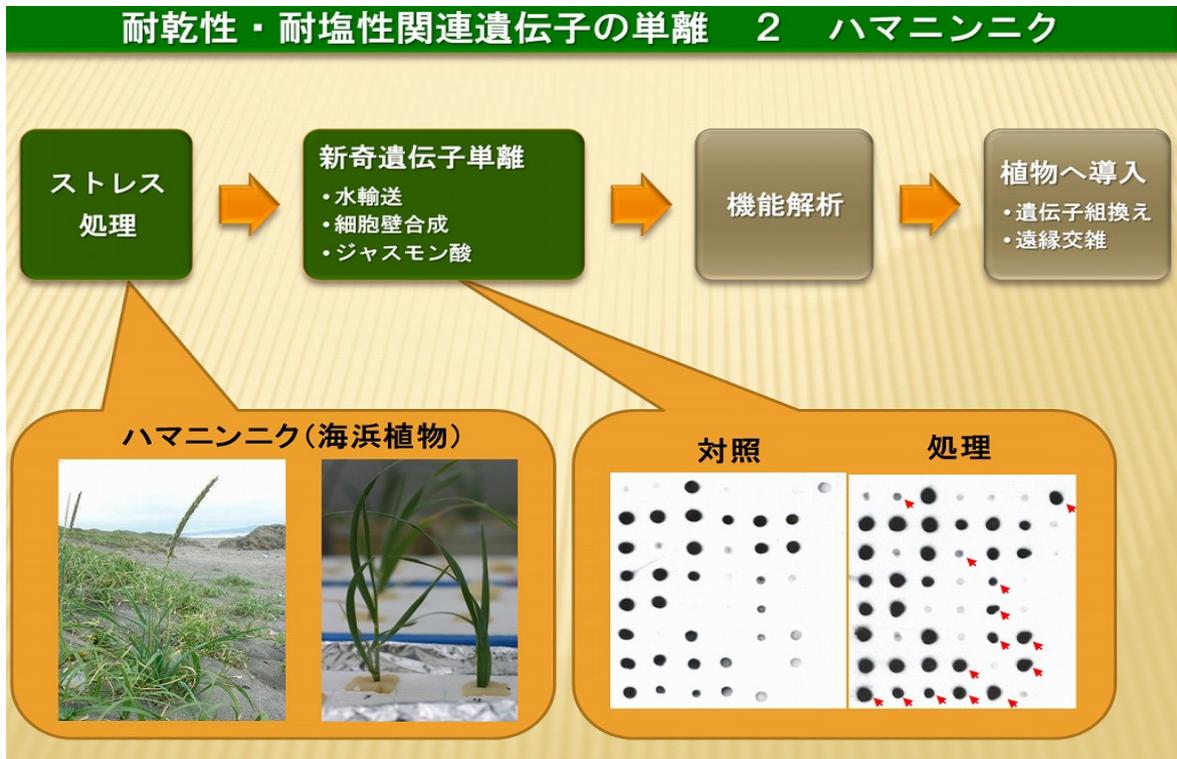
図Ⅲ-4-4

平成22年度は、それぞれの課題が発展し新奇遺伝子を複数単離でき、またジャガイモに導入した系統が耐乾性を示した。コムギについては組換え体を得られ、遺伝子の固定と種子の増殖を行った。基礎研究による論文執筆のみでなく、植物系統も次々と開発された。

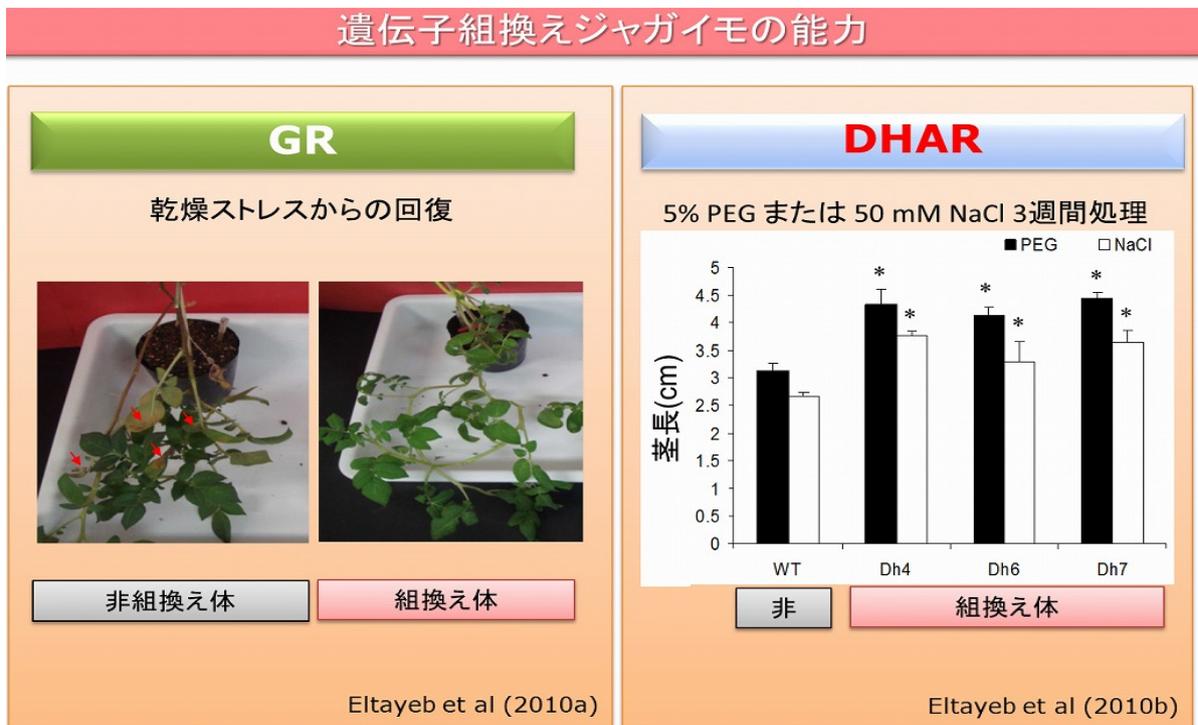
- (1) 耐乾性コムギ系統育成のための野生・異種染色体コムギ系統の作成と評価
 - ・ 合成6倍体コムギ派生系統の耐乾性は、開花後に止葉の水ポテンシャルが低下しても光合成速度を高く保ったことに関係することが分かった。
 - ・ 耐乾性の合成6倍体コムギ派生系統は、高温耐性も強かった。この高温耐性には、気孔開度と光化学系の活性の高さが関与していることが分かった。
 - ・ エンバクに耐乾性作物パールミレットを交配し、亜科間雑種細胞を得た。
- (2) 新奇遺伝子単離、遺伝子組換えによる耐乾性・耐塩性植物の開発
 - ・ 乾燥、高塩耐性作物のハマニンニクとソルガムから、数種の乾燥、高塩耐性遺伝子を単離、構造解析した。(図Ⅲ-4-5)
 - ・ 塩を液胞に輸送することで作物に耐塩性を与えることのできる新奇の遺伝子を発見した。この遺伝子を組換えたコムギ、イネ、シロイヌナズナを作出した。
 - ・ 耐乾性系統において、乾燥ストレスに応答する遺伝子の発現をSuperSAGE法で網羅的に解

析した。その結果、乾燥ストレスに応答して発現が増減した既知遺伝子の他、データベースにはない未知遺伝子も多数見いだすことができた。

- ・ 抗酸化物質グルタチオンを還元型に再生する酵素を過剰発現した遺伝子組換えジャガイモが乾燥耐性を示した (図Ⅲ-4-6)。

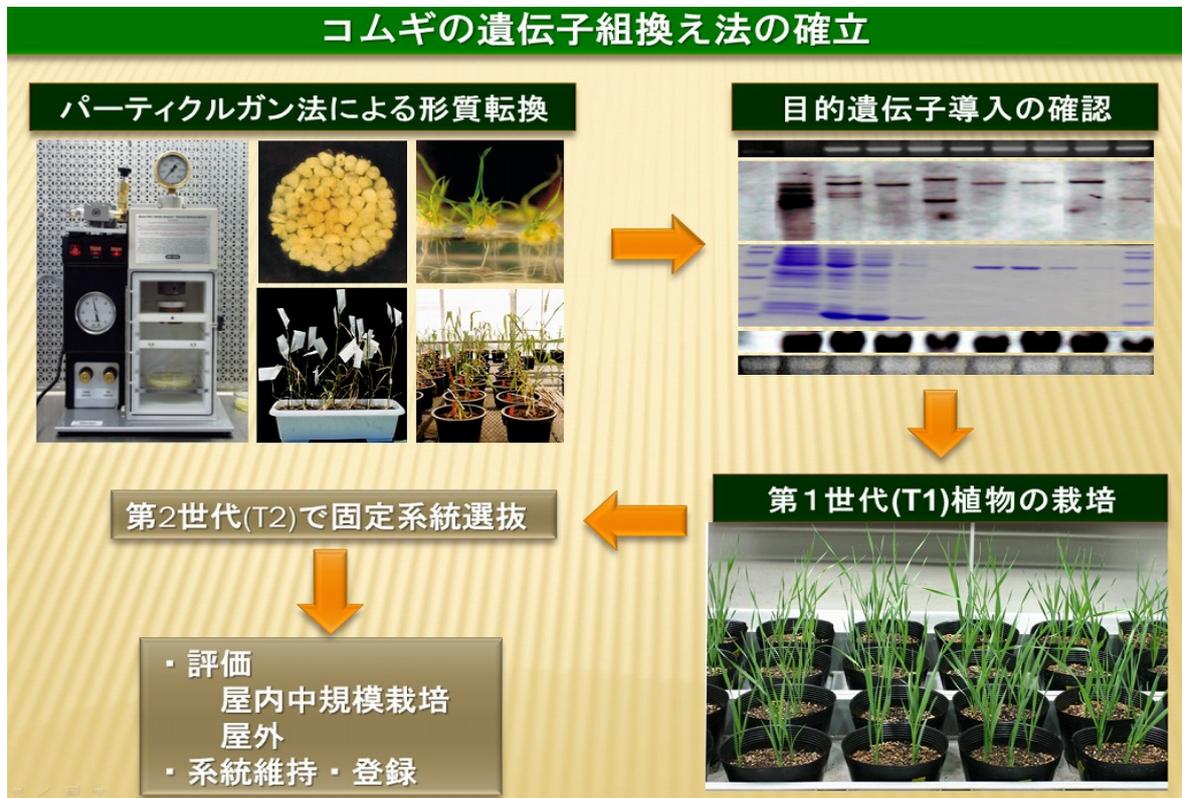


図Ⅲ-4-5



図Ⅲ-4-6

- ・ コムギの遺伝子組換えについて検討し、第一世代の遺伝子発現を確認し、種子を取得した（図Ⅲ-4-7）。
- ・ 高塩濃度条件下において、塩生植物であるアッケシソウは、ナトリウムを取り込むことにより浸透圧を高めて吸水を促進するとともに、細胞壁の粘性および弾性を低下させて伸展性を増加させることにより、胚軸の伸長を促進することを明らかにした。



図Ⅲ-4-7

(3) 適切な評価法の開発

- ・ 耐乾性評価の1つとして、コムギ葉のRate of Water Lossを測定した結果、耐乾性系統ではその反復親と同程度に水分を奪われにくいことがわかった。
- ・ 乾燥ストレスを与えた時の収量の異なるコムギを高浸透圧環境下で育てたところ、収量の少なかったコムギ品種では幼植物体においても成長抑制が大きく、収量の多かった品種では成長抑制が小さいことがわかった。成長抑制が小さい品種においては、葉緑素量が多く、気孔コンダクタンスが高いことにより光合成能力が高く維持されることが明らかとなり、生育初期の光合成能力と生育後期の収量に相関がある可能性が示された。
- ・ 昨年度、Dゲノム提供親の異なる合成コムギについて耐乾性評価を行った結果を元に、Dゲノムに由来するDNAマーカーを用いて連鎖不平衡解析を行った。その結果、乾物重と光合成速度に連鎖する可能性がある染色体を特定できた。
- ・ 乾燥耐性作物作出の指標物質として、酸化型グアノシンが使えることを明らかにした。同様に脂質過酸化により生じるアルデヒド化合物が指標物質として使えること、この化合物生成を抑制することで、乾燥耐性作物を作出できることを示した。
- ・ 乾燥地で起こりやすい窒素制限条件下で栽培したキュウリにおいて、ABA生合成系の遺伝子

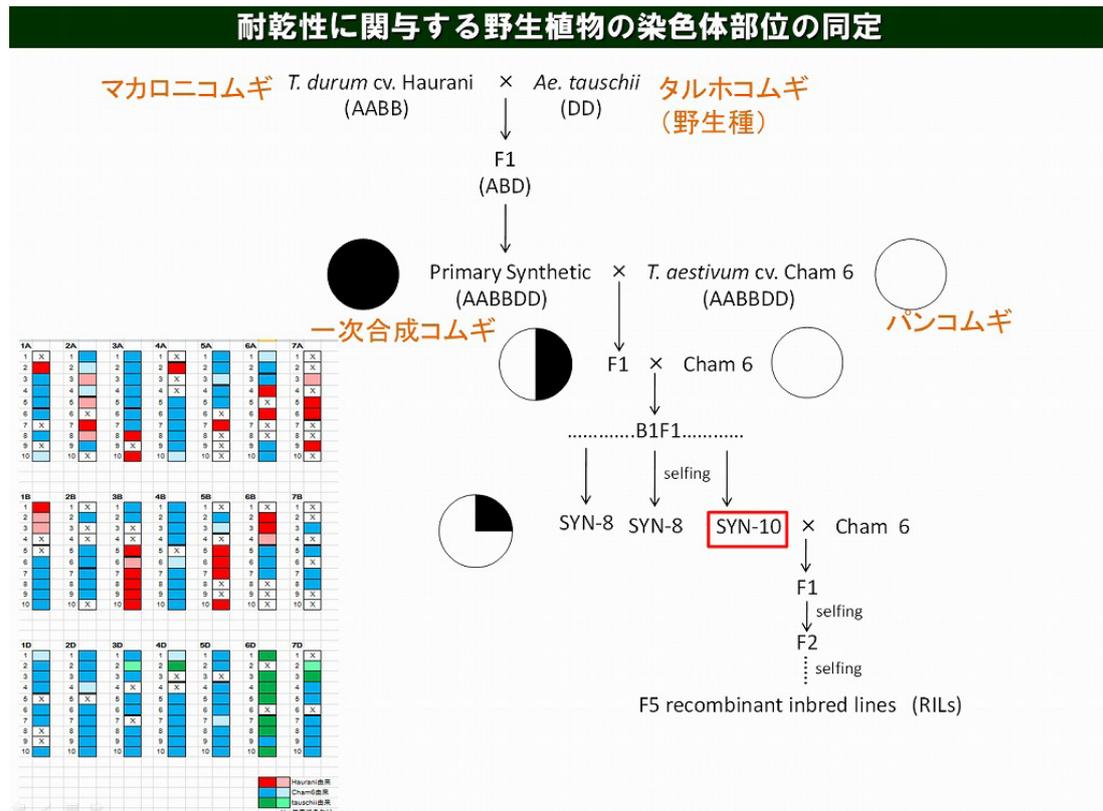
発現が増加することを明らかにした。

- ・ 窒素制限下において通常植物の葉は黄化していくが、植物ホルモンであるABAを添加することにより、クロロフィルの生合成が促進されるとともに分解が抑制され、葉の緑色が保持されることを明らかにした。

平成23年度は、プログラムの最終年度として、耐乾性コムギ系統育成に向けての研究を行った。以下の研究において、ほぼ目的の系統は開発でき、そのストレス耐性は研究室レベルで評価することができた。しかし、AGERIのあるエジプト、ICARDAのあるシリアにおいて、政治的動乱が生じ、それら系統の圃場での評価と普及に向けての研究が進まなかった。具体的な研究内容を以下に示す。

(1) 耐乾性コムギ系統育成のための野生・異種染色体コムギ系統の作成と評価

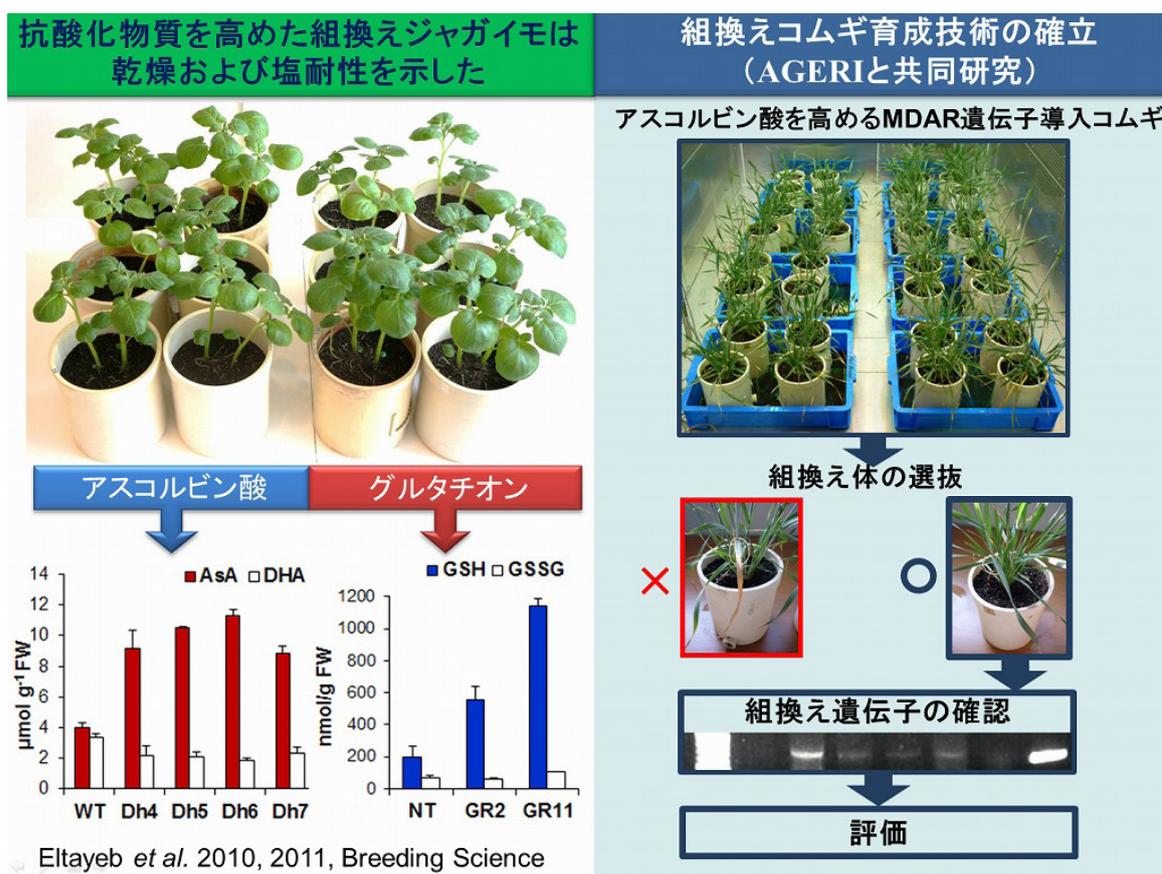
- ・ 乾燥地で問題となるリン酸欠乏症に耐性を示す、異種染色体添加コムギ系統を見いだした。
- ・ 乾燥地で問題となる鉄と亜鉛を穀粒に大量に蓄積する異種染色体添加コムギ系統を見いだした。
- ・ 野生植物の遺伝資源を利用して、耐乾性関連形質を向上させる育種法を考案した。
- ・ 耐乾性を示す合成コムギ派生系統において、グラフィカルジェノタイピングを行い、野生植物およびマカロニコムギ由来の染色体部位を同定した。(図III-4-8)



図III-4-8

(2) 新奇遺伝子単離、遺伝子組換えによる耐乾性・耐塩性植物の開発

- ・ 乾燥耐性を与えるケイ酸を処理したソルガムにおいて、ポリアミン含量とその合成酵素の遺伝子発現が上昇すること、ショ糖含量とその合成酵素の遺伝子発現が上昇すること、エチレン含量とその合成酵素遺伝子の発現が低下することを見出した。
- ・ 抗酸化物質アスコルビン酸を還元型に再生する酵素を過剰発現した遺伝子組換えジャガイモが乾燥耐性を示した。(図III-4-9左)
- ・ MDAR遺伝子導入コムギにおいて、導入遺伝子を確認し、種子を増殖した。(図III-4-9右)
- ・ デンプン含量の増加と環境ストレス耐性を増加させる可能性の高い新奇遺伝子グリコゲンイングルコシルトランスフェラーゼを過剰発現させたジャガイモの作出に成功した。



図III-4-9

- ・ 窒素制限下におけるアブシジン酸の緑色保持効果は、活性酸素の蓄積を抑制することによるものであることを明らかにした。また、それはカイネチンと拮抗作用を示すことが示唆された。
- ・ 高塩濃度条件下において、塩生植物であるアッケシソウは、細胞壁の粘性および弾性を低下させて伸展性を増加させることにより、胚軸の伸長を促進することを示した。細胞壁の粘性の低下は細胞壁構成多糖のペクチンやヘミセルロース含量の減少に起因することが示唆された。

(3) 適切な評価法の開発

- ・ 合成コムギとその親になった野生種 *Ae. tauschii* の耐乾性関連形質を調査し、それぞれの系

統で耐乾性の強弱に大きい変異があるが、親子間では無相関であることが分かった。

- ・ 地中海型半乾燥地域では無灌漑でコムギを栽培した場合に、生育後期（4月以降）に土壤乾燥による水ストレスが厳しくなると同時に、土壤表面が40℃を越す高温障害が発生することが分かった。また、補助灌漑により土壤表面の温度上昇を最大で約20℃抑制できることが分かった。
- ・ 地中海型半乾燥地域では無灌漑でコムギを栽培した場合に、子実収量の高い品種は開花後の同化産物生産量の高い品種であることが分かった。

(5) 成果の公表

- ・ 論文および著書により公開する。
- ・ 開発された系統は、系統の増殖と評価後、「乾燥地研究センター乾燥地植物資源バンク」に保存し、乾燥地での評価および普及を行う。

(6) 今後の展開

- ・ 研究の一部の課題については、大学経費、文部科学省科学研究費補助金、JICA/JST地球規模課題対応国際科学技術事業、カタール国立研究基金、中国科学院の支援を受け続けている。組織については、プロジェクトメンバーの退職および配置換えのため、新たなメンバーを含めた組織「耐乾性作物育種グループ」を学内に作り進めていく予定である。

(辻本壽)