

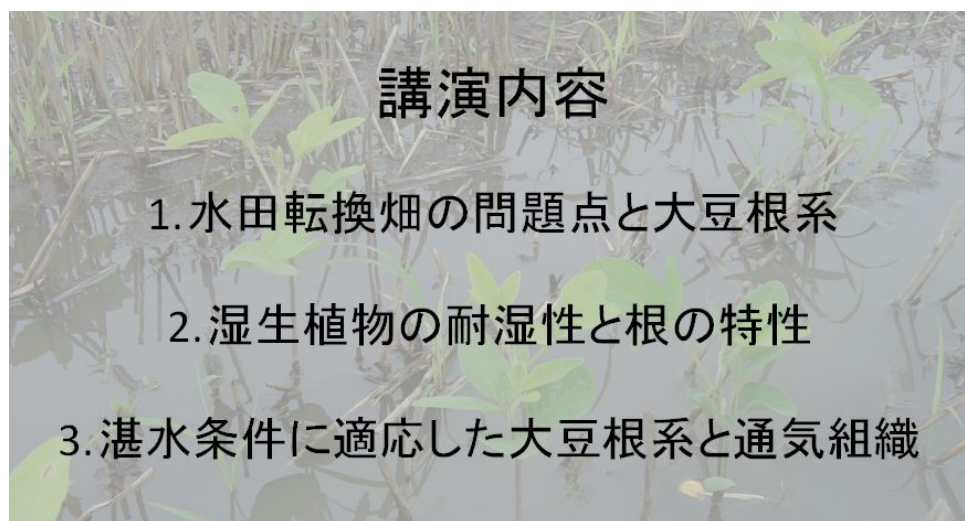
第2部 湿害解決に向けた研究の展開

これからは湿害のハードルをどう乗り越えようかという、乗り越える側の作物のお話になります。第2部の最初の講演者は作物研究所大豆生理研究チームの島村聡さんです。福岡県のご出身で、作物学がご専門です。耐湿性のメカニズム研究をされておりまして、大豆の根の耐湿性能力を明らかにして耐湿性の向上を目指しているということです。ここでは、大豆の通気組織のお話をさせていただきますが、次の演者の間野さんはイネ科のトウモロコシ属の通気組織のお話をされますので、それぞれ属、種が違う双子葉・単子葉ということで比較をしながらお聞きいただければと思います。

講演4 「大豆の耐湿性における二次通気組織の役割と機能」

◇はじめに

私の話は、二次通気組織というあまり聞き慣れない植物組織の話ですので、できるだけ詳しくお話したいと思います。また、通気組織だけではなく、実際の転換畑での大豆の根系がどのようなになっているのか、その問題点を加えて説明します（図4-1）。

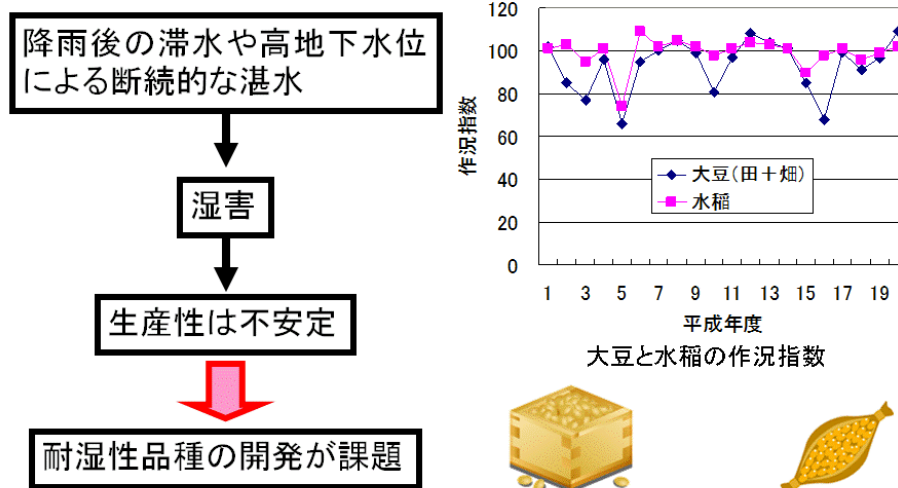


(図4-1)

まず初めに、水田転換畑の大豆栽培でどういう問題があるのか、また、そのときの大豆の根系はどのようなになっているのかを簡単に説明します。湿害研究の背景として、ご存じのように転換畑で大豆の作付けが本格化していますが、転換畑では水がたまりやすく、地下水位が高いために湿害が発生し、生産性が不安定になります。大豆と水稻の作況指数の推移を年度ごとに示したグラフで見ると、水稻の場合は100前後で比較的安定している一方、大豆は水田作と畑作を合わせた数値になりますが、年により大きく変動します。転換畑での大豆作の安定性のため、生産現場では耐湿性品種が求められており、研究サイドでは耐湿性品種の開発が重要と考えています（図4-2）。

大豆耐湿性研究の背景

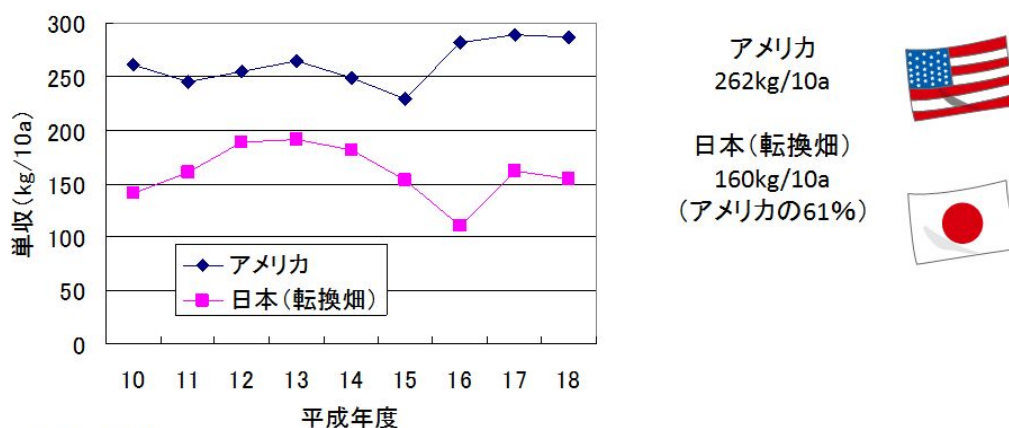
大豆の作付面積は水田転換畑が普通畑を大きく上回るようになって、転換畑における大豆生産の安定性や収量向上の重要性が高まっている。



(図4-2) 大豆耐湿性研究の背景と大豆の作況指数の推移

さらに単収も問題です。日本（転換畑のみ）とアメリカ合衆国の大豆の単収を比較しますと、10 aあたりで100 kg程度の差があります（図4-3）。品種や栽培体系、気候条件

平成10～18年度の大豆単収



その要因として

- ◆ 品種
- ◆ 栽培体系
- ◆ 気候
- ◆ 栄養成長期の湿害による減収例
- ◆ 湛水1日当たり8.9kg/10aの減収
- ◆ 7日間の湛水で36～46%減収

(図4-3) 大豆の単収の推移

などが違うとは思いますが、転換畑で栽培しているということも大きな要因ではないかと思えます。大豆の生育期の湿害によって一日あたりどれだけ減収になるのかをこれまでの報告などを参考に調べたところ、10 aあたり 9kg 程度も減収していることがわかりました。また、7日間連続して湛水になった場合、平均して40%も減収してしまうということです。転換畑での湿害をいかに克服するかということが日本で大豆の収量を上げるために重要であると思えます。

1部で加藤さんが苗立ちの重要性について説明されたように、転換畑で湿害に遭いますと苗立ちが不良になり欠株が生じます(図4-4)。そうしたところでは、雑草が繁茂して収穫が難しくなり、収穫放棄となってしまいうという問題があります。しかしながら、大豆栽培では生育期の湿害も大きな問題です。これは転換畑での大豆生育期の湿害の様子ですが、転換畑で梅雨時期にこのように水がたまるというのは、皆さんよく目にすることだと思います(図4-5)。この時期の湿害の症状は、葉が黄化してくることで。湿害の二次的な影響として雑草の繁茂もあり、その後の大豆の生育に影響を及ぼしますが、特に生育障害を起こすということが非常に大きな問題です。



写真左: 湛水による苗立ち不良
欠株の原因となる。

写真右: 湿害により欠株が生じて雑草が繁茂した大豆畑
このような圃場は収穫皆無となる。

(図4-4) 出芽期の大豆の湿害



転換畑での大豆生育期の湿害

大豆は湿害によって葉が黄化している。

(図4-5) 生育期の大豆の湿害

◇転換畑での大豆の根系

では転換畑での大豆の根系はどうなっているのでしょうか。これは特殊な品種で根粒超着生大豆の例ですが、健全な個体では葉は緑色をしていますし、根はよく張っていて、根粒がびっしりとついています。ところが湿害に遭った個体は、葉の色が悪くなり、根を見ると張りが非常に悪く、根粒もポツポツついているという状況で、湿害の影響が出ています（図4-6）。根粒は窒素固定を行う場ですが、大量の酸素を必要とします。そのため土壌が湛水状態になると根粒の生理活性が低下し、葉の色が落ちてしまいます。このような状態で湿害が起きているということです。



左:健全な個体
中央と右:湿害個体

湿害条件では根粒活性を維持できない。根粒は根の呼吸量の5~7倍。

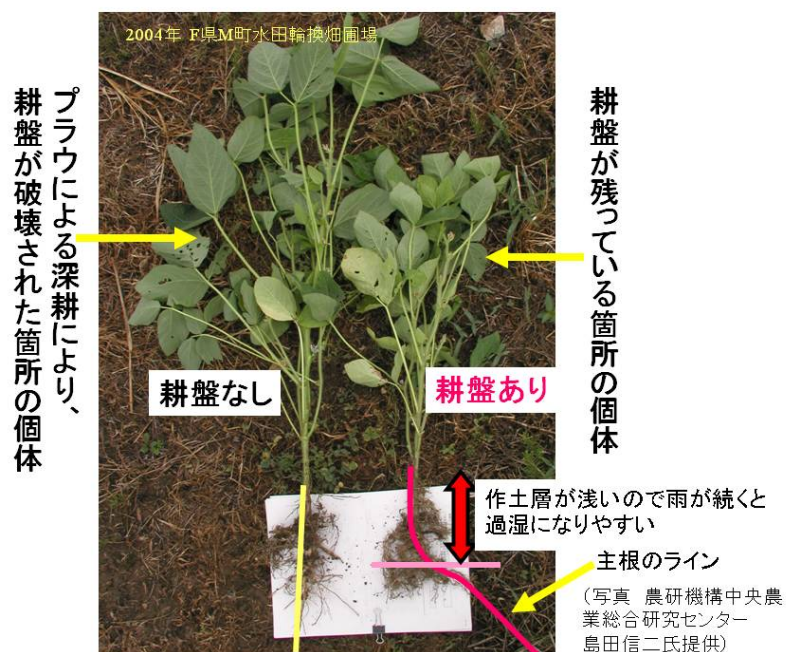


根粒超着生大豆品種関東100号の根系の様子

(図4-6) 湿害による大豆根系への影響

さらに転換畑に特有な問題として、耕盤があります。転換畑の耕盤を壊した場所と壊していない場所での大豆の生育はかなり異なります。耕盤を壊した場所では大豆の生育は非常に良いのです。特に根に注目すると、主根は真っすぐ下に伸び、それに沿って側根も大きく伸ばしています。それに対して耕盤がある場所で育った大豆は生育が悪く、その主根は耕盤に当たると下に伸びづらく、大きく曲がってしまっています。また、側根も作土層に集中しています（図4-7、農研機構中央農業総合研究センター島田信二氏提供）。このような根系になると、作土層は非常に浅いので雨が降ると作土層に水がたまって過湿になりやすく、根が湿害を受けて生育障害が出てくると考えられます。ここまでの話で、排水対策が湿害の有効な手段ということがわかんと思います。排水対策の一例で、FOEASという地下水位を制御するシステムがあります。そのシステムを導入した区としていない区で大豆の生育を見ると、導入していない対照区では湿害が出るのに対して、排水性のよい

FOEAS区では大豆が非常によく生育します（図4-8）。しかし、圃場の状況や、コストの面等でFOEASを導入することが難しい場合もありますので、長期的な視点では、耐湿性の強い大豆品種を育成することが重要になってくると思います。

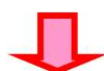


(図4-7) 水田転換畑における大豆根系の特性

現在のところ排水対策が湿害対策の有効な手段



大豆への地下水位制御システム(FOEAS)の効果
農林水産技術会議資料より



長期的には耐湿性大豆品種の育成による対応

(図4-8) 転換畑における大豆生育への排水効果

◇耐湿性の強い植物の根の特性

ここまで大豆についてお話してきましたが、湿生植物、特にイネなどは根が水に漬かっても生育できる、すなわち強い耐湿性を持っています。どうして耐湿性が強いのか、特に根の形態的な特性について紹介したいと思います。イネは湛水で栽培しても湿害の影響がありません（図4-9）。では、どうして湛水状態でもよく生育するのかというと、根に形

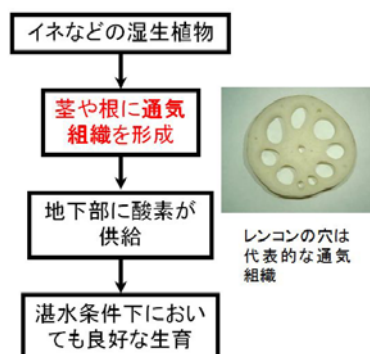


イネは湛水で栽培しても湿害の影響はない

（図4-9）湛水状態で生育するイネ

態的な特徴があるということがわかります。イネなどの湿生植物は、茎や根に通気組織を形成します。通気組織のわかりやすい代表的な例はレンコンの穴です。通気組織が茎や根に形成されると、地上部で大気中の酸素が葉から取り込まれ、通気組織の穴を通して地下部に供給されて、根に酸素補給を行うことができます。（図4-10）そのため、湛水条件下においても生育できるということで、通気組織の形成が耐湿性を獲得するための一つのカギになります。イネの通気組織を見ますと、葉身にこのように大きく空隙ができており、そして、葉鞘にも、根にも同じように空隙が形成されています。このように、イネの体の中を空隙が連続してつながって、根に酸素を供給しています。

イネで湿害が発生しない要因とは？



（図4-10）

また、小柳さんの講演でも土壌中の有害な還元物質の話がありましたが、湛水によって土壌中が酸欠になると、マンガンや二価鉄、硫化水素などが発生し、これらの物質は根の障害を助長します。では、イネは有害な還元物質にどのように対応しているのでしょうか。イネの根を掘り上げると、イネの根の表面が褐色化していることがわかります。これは、通気組織によって根に送られた酸素が根の表面から放出されて、有害な二価鉄が酸化され、無害な三価鉄に変化している状態です（図4-11）。根の褐色の部分には赤さびが付着している状態です。このようにしてイネは有害な還元物質に対しても耐性を持っています。



根の表面から放出される酸素により二価鉄が三価鉄になっている

赤褐色化したイネの根の様子

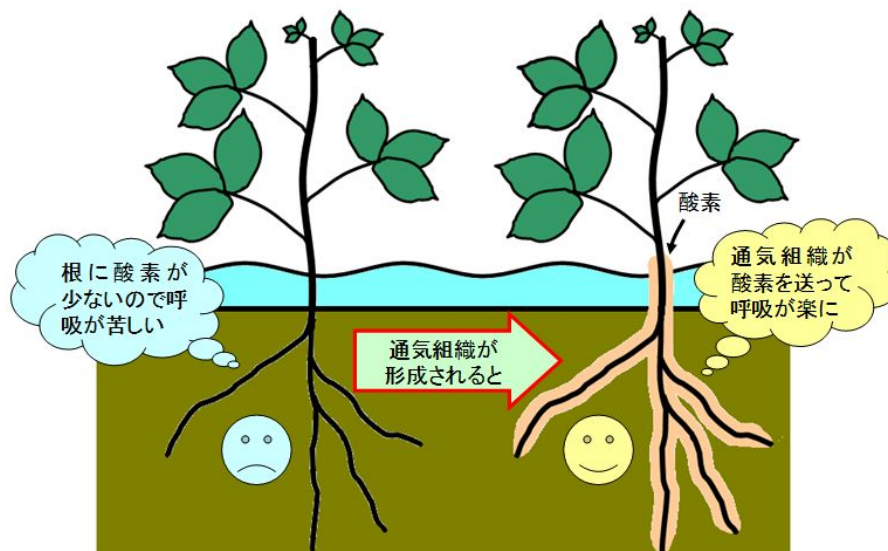
（図4-11）イネの根の酸化力

◇マメ科植物の根系

ここまで、転換畑での問題やイネなど耐湿性の強い植物について説明しましたが、大豆や他のマメ科植物では湛水に適応した根系や通気組織は形成されるのか、ということに関して、私が調べた研究についてご紹介いたします。まず、マメ科植物ではどうかということ、耐湿性が強いセスバニアなどの例で説明します。セスバニアは転換畑などでも緑肥として使われている植物で、湛水状態では茎に白色スポンジ状の組織を形成します。これがイネと同じように酸素を送る通気組織の役割を持っています。その部分の横断面を観察しますと、中心柱の周囲のコルク形成層から二次的に外側に形成されていることがわかり、このため二次通気組織と呼ばれています。セスバニアは湛水条件で通気組織を形成し、水面上に発達している茎の部分から空気中の酸素を取り込み、根や根粒に酸素を送ることで耐湿性を獲得しています。では、耐湿性の弱いマメ科植物ではどうでしょうか。インゲンやササゲは耐湿性が弱いのですが、これらにはセスバニアのような通気組織はほとんど発達しないことがわかっています。

セスバニアの耐湿性と通気組織の関係について、模式図で説明します（図4-12）。セスバニアは畑状態では通気組織が形成されませんので、湛水になると根はちょっと呼吸が苦しくなります。しかし、すぐに茎と根系に二次通気組織が形成され、この組織を通じて空気中の酸素が取り込まれ、根全体に送られるため、呼吸が楽になります。このように、

二次通気組織は耐湿性に重要な要素となっています。ここで通気組織について組織学的な話をしますと、イネの通気組織は皮層中にこのように大きな空隙を形成します。皮層は一



湛水条件下で通気組織が形成されたときの耐湿性マメ科植物への影響の概略図。

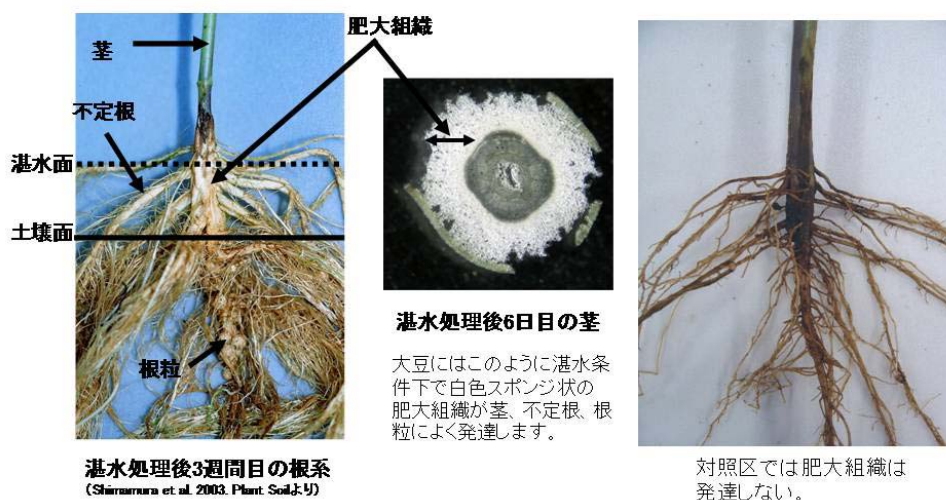
(図4-12)

次組織なので一次通気組織と呼ばれています。セスバニアのほうは二次通気組織です。非湛水では通気組織は形成されずに皮層はしっかり詰まっています、イネのような空隙は形成されていません。しかし湛水状態になると、中心柱と皮層との間の部分にコルク形成層という組織が発達してきて、そこから二次的に外側に通気組織を形成し、そこにはたくさんの空気を含んでいます。皮層は外側に追いやられて崩壊します。

◇大豆に形成される通気組織

そこで大豆にセスバニアのようにスポンジ状の組織が形成されるのか、また、それが効果的に根に酸素を供給する通気組織として機能しているのかということ調べてみました。大豆を湛水条件にすると、ここでは初生葉展開期から3週間、湛水にしたものですが、根系や根の形態が大きく変わることがわかりました。まず根系の変化について説明します。これまでの主根主体の根系は湛水によって障害を受けてしまうのですが、それに代わって新たに不定根がたくさん出てきます。もう一つ、セスバニアと同様に、白色スポンジ状の肥大組織が根全体に発達してきます(図4-13)。この図の左側の写真は、白色の肥大組織が水面上の茎から水面下の茎、一部の主根、根粒、そして不定根に連続して形成されていることを示しています。一方、右の写真のように、畑状態で育てた大豆にはこの肥大組織は見られないので、湛水に対する反応で形成されるということがわかります。

大豆を湛水条件下で栽培すると？

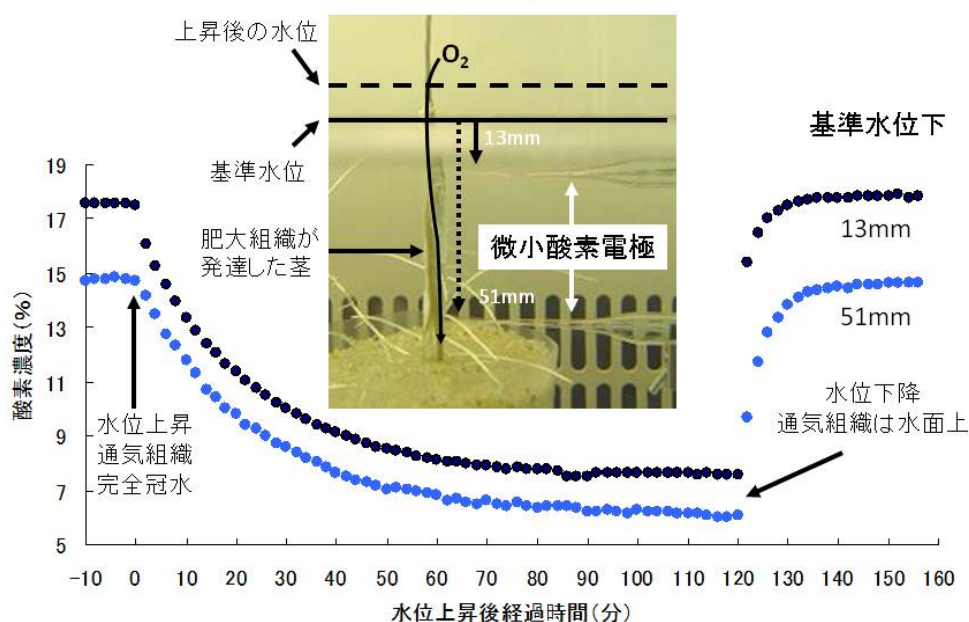


不定根の発達と茎や根に発達する大豆の肥大組織。

(図4-13) 湛水条件下に適応した大豆根系と通気組織形成

次に、大豆の肥大組織に酸素を供給する能力があるのかということ調べてみました。茎に肥大組織がよく発達し、その組織の上端が水面上にポツンと出ている状態になっている大豆を用いて、組織中の酸素濃度を測ることができる微小酸素電極を茎の上下2カ所に挿入しました。この状態ですと、肥大組織中の酸素濃度は高く安定しています。そこで、水位を上昇させ、肥大組織を完全に水面下に没するようにしてしまうと、酸素濃度は徐々に低下して2時間後には水位上昇前の40%に低下してしまいます。さて、再び水位を下げて肥大組織の上端が水面上に出てくるようにするとどうでしょうか。酸素濃度は急上昇し、10分後には実験前とほぼ同程度まで回復しました(図4-14)。この結果は、水面上にある茎の上部から水面下にある茎の下部まで、肥大組織を通じて空気中の酸素が取り込まれてきていることを示しています。すなわち、茎に発達している肥大組織は、地下部へ積極的に酸素を供給する機能を持つシュノーケルのような役割を果たす通気組織であるということがわかりました。

肥大組織は酸素を供給するのか？



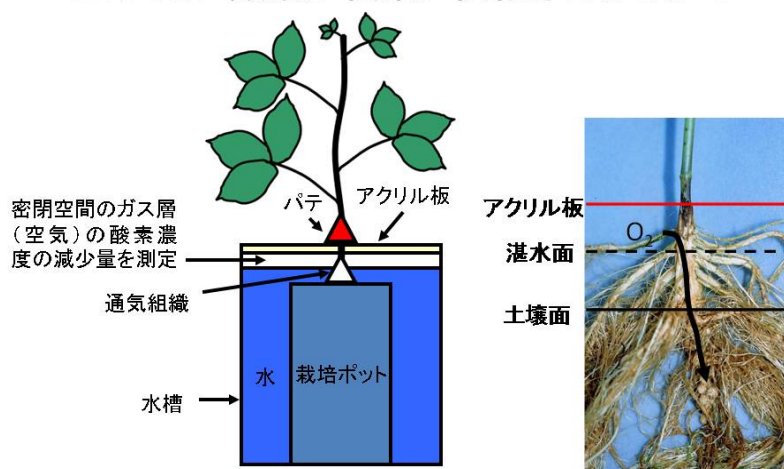
湛水条件下で大豆の茎に発達した肥大組織による酸素供給
 この実験により大豆の茎に形成される肥大組織は地下部へ酸素を積極的に供給する**シュノーケル**のような役割があり、**通気組織**であることを証明した。

(図4-14) シュノーケルとして機能する大豆通気組織

◇通気組織の酸素運搬能

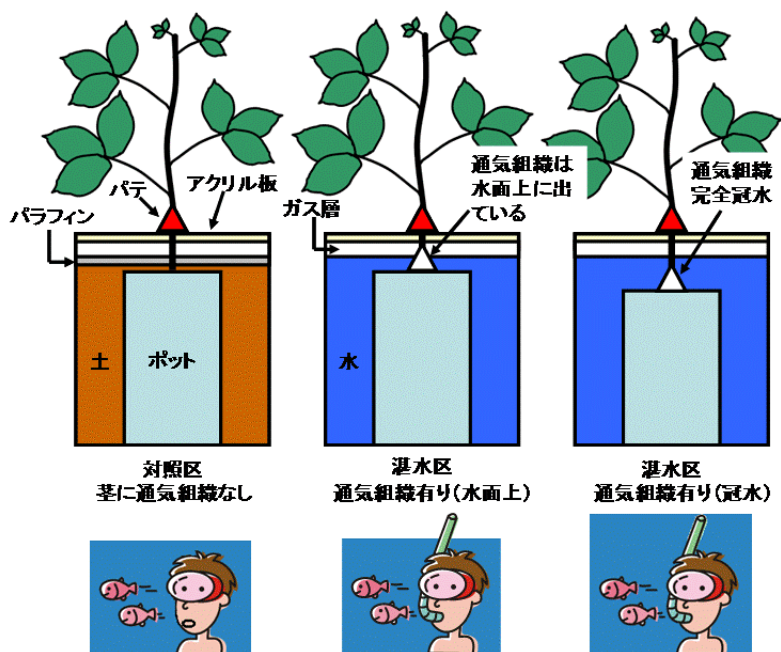
この通気組織を通じて、大豆では実際にどのくらいの酸素が送られているかを調べるのが重要になってくると思います。大気中の酸素は水面上の茎に発達した通気組織から取り込まれ、根で利用されていると考えられます。それで、このようにポットの上部にアクリル板を張って、水面上に密閉したガス空間をつくった装置を使い、この空間の酸素濃度の減少量を測定しました(図4-15)。この減少量が、根に向けて送られた酸素の供給量と考えられます。試験区として、対照区は畑状態で育てて茎や根系には通気組織が発達していない、すなわちシュノーケルがない状態の大豆です。湛水区では、茎の通気組織が水面上に出て、シュノーケルの先端が水面上にあるもの。もう一つの湛水区では、茎の通気組織が完全に冠水している場合、すなわちシュノーケルの先端が水面下にある場合です(図4-16)。このような三つの条件でガス空間の酸素がどれだけ根に送られていくかということを見ています。その結果について説明します。ここでは、根の乾物1gあたり、1時間あたりどれだけ根に酸素が送られているかということで評価しています。まず対照区で茎に通気組織が形成されていない場合には、根にはほとんど酸素は送られていませんでした。また、湛水条件下で通気組織が形成された後であっても、冠水してシュノーケルの先端部分が水面下にある場合でもやはり酸素の供給量は低いものでした。しかし湛水条件下

どのくらい酸素が根系に供給されるのか？



播種後10日目から湛水処理
約5週間経過した植物を使用

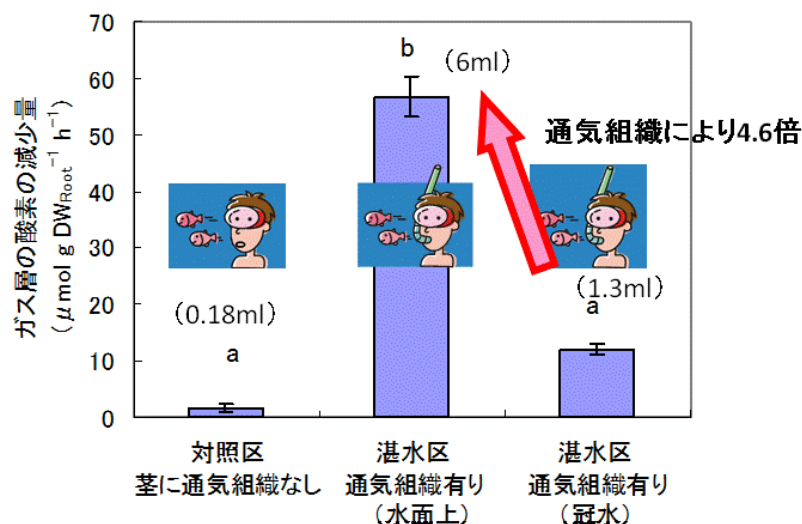
(図4-15) 通气組織の酸素供給効果の確認法



(図4-16) 通气組織の効果を確認するための試験区

で通气組織が水面上にある、すなわち通气組織をシュノーケルと考えた場合にその先端部が水面上にある場合では、酸素の供給量は高くなっていました(図4-17)。すなわち通气組織が機能することで、呼吸が4.6倍高まっているということになりました。酸素量を空

気量に換算して、どれだけ空気が送られているかというのを示したのが括弧の数値ですが、通気組織が機能することによって根に1時間当たり 4.7 ml の空気が送られているということがわかりました。



通気組織を通じた地下部への酸素供給量.

通気組織が発達していない茎(対照区)や通気組織が冠水している区(湛水区右)ではガス層の酸素はほとんど減少しませんが、通気組織が発達した茎で組織が水面上に出ている区(湛水区左)では、酸素の減少速度が大きくなる。

括弧の数値は酸素21%を含む空気に換算した量。

(図 4 - 1 7)

◇通気組織形成機構の解明が重要

こうして、大豆にも通気組織が形成され、酸素を供給していることがわかりました。それにもかかわらず、現場では大豆は湿害に弱いということで問題になっています(図 4 - 1 8)。この矛盾はどうして生じるのでしょうか。実は、大豆に発達する通気組織は、湛水処理を開始してから実際に根全体にそのネットワークが形成されるまで、約3週間ほど必要です。従って、湛水環境になってからかなりの期間、根が低酸素状態にさらされて、呼吸が抑制されて生育が停滞してしまうのです。では、今後どうやったら耐湿性を強化できるでしょうか。イネのような湿生植物では湛水環境に置かれなくても、常に通気組織が形成されているので、突然雨が降ってきたりして圃場が水浸しになっても生育は停滞しません。また、セスバニアでは大豆と同じように畑状態では通気組織は形成されていませんが、湛水状態になるとすぐに通気組織が形成されて、湛水に適応するという能力があります。したがって、大豆においてもイネのように常に通気組織ができる、もしくはセスバニアのように通気組織を早く形成させる、そのような能力を付与することで梅雨時期の雨による湿

害に対して回避が可能になると考えられます。そのため、今後の研究では通気組織の形成機構の解明が重要になってきます。

通気組織が形成されるのに なぜ大豆は湿害になるのか？

- ◆大豆は湛水処理開始後約3週間で根系に通気組織のネットワークが形成されるが、その間生育は抑制される。
- ◆イネのような湿生植物は常時通気組織が形成されているので、突然の湛水に対して生育は停滞しない。
戦略として
- ◆セスバニアは通気組織形成が早く、湛水に対応する。

大豆においても常時または早く通気組織が形成されると、長雨や大雨による湿害に対して回避可能になる？



通気組織の形成機構の解明が重要

(図4-18) 通気組織形成と大豆の湿害

◇今後の研究課題

今後の研究の予定、期待について簡単に説明いたします(図4-19)。大豆にも通気組

今後の予定・期待

- ◆ 通気組織による湿害緩和の有効性をさらに明らかにする。
- ◆ 通気組織の形成に関わる遺伝子や生理的な形成機構を検討する。



湿害を回避できる大豆の開発

(図4-19)

織が形成されるということがわかりましたが、圃場条件で栽培した大豆では、通気組織に湿害を緩和する効果がいったいどのくらいあるのかということについてはまだ具体的にデータがありませんので、これを調べたいと考えています。また、大豆の通気組織形成に関わる遺伝子はわかっていませんし、二次通気組織がどのようなメカニズムで形成されてく

るのかということも明らかではありませんので、これについてより詳細な調査を行いたいと考えています。これらの研究を進めることにより、今後湿害を回避できるような大豆の開発につなげていけると考えています。なお、本研究は農研機構の交付金プロジェクト「実用遺伝形質の分子生物学的解明による次世代作物育種」で行われています。

以上で講演を終わります。ご清聴ありがとうございました。

[質疑応答]

川口 ありがとうございます。第1部と違いまして第2部はどちらかという作物側の形質の話で、基礎研究という場でもあります。ようやく、大豆では通気組織が機能していて、酸素を運んで耐湿性に関わっていることがわかったので、そのメカニズムを利用して耐湿性育種等につなげていけるのではないかというお話でした。この通気組織関連、耐湿性形質関連でご質問がありましたらよろしくお願ひいたします。

◇通気組織を現場の技術に生かす上での課題

Q: 大豆は湛水して通気組織ができるというところまではわかりますが、例えば根の断面とか、根そのものの形態はやはり通常の畑条件とは変わってきているのでしょうか。実験では、水をずっと張っている場合の収穫作業等については触れられていません。農業現場では、大豆を収穫する際には茎水分は下がっていないといけないですし、その他にも、機械の作業性の観点で言えば、圃場の土も硬くなっていないといけないと思います。その点で耐湿性を考えた場合に、通気組織を作る条件として湛水条件をずっと維持しておくべきなのか、それとも作業性を考えて、すぐ水を抜くようにするのか、どのようにお考えなのかという点を伺います。

島村 大豆を湛水状態にしますと、根の形態は先ほど示したように変化し、通気組織が根にもきちんとできます。また、畑状態で育った根は根毛がたくさん形成されていますが、湛水で育てたような大豆では根の表面の根毛が少ないというような形態的な違いがあります。ご質問のポイントは、大豆を長期間、湛水で栽培した場合に、その後の収穫との兼ね合いはどうするのかという点です。ご紹介した実験条件は、あくまでも大豆に通気組織ができるかどうかという調査が目的です。このため、長期間にわたり湛水状態で大豆を栽培した場合に、コンバインが入れるかどうかということについてはまだ検討はしていません。現場での作業を考えるとやはり排水をしないとけないと思います。そのため、湛水して大豆を栽培するという目的のための試験をする場合には、排水対策を含めた検討をする必要があると考えています。

Q: 湛水処理によって大豆の根の形態が変わり、湛水条件にはよく適応できたとしても、その後に排水して土を乾燥させた時に、根が乾燥状態に対してきちんと正常に機能できるのかという疑問があります。

島村 湿害に遭うと、先ほど示しましたように浅い根系を形成します。浅い根というの

はきちんと機能はしていますが、土壌の表面に出てきますので水が引いた後、特に梅雨明け後の干ばつなどでは根の障害はもしかしたら出てくる可能性はあると思います。

川口 今の段階では、現場の技術に完成させるまでにはまだ距離があり、人為的に湛水環境を継続してやれば通気組織が立派に形成されるかもしれないが、その後の作業性が問題です。理想的には、湛水処理しなくても通気組織が早く形成され、普通の畑条件でも、湛水条件でもよく生育するというようなスーパー品種ができればいいのだらうと思います。そこまで行くのにはもう少し時間がかかると思います。現状では、メカニズム研究をすることにより、遺伝的にどのように改良していけば大豆の湿害を軽減するのによいかということがわかる、というストーリーでしょうか。

島村 そうですね。

◇大豆の遺伝資源とイネ

川口 例えば大豆とイネを比較して、イネはもともと通気組織が形成される。一方、大豆はもともとはできないけれど、湛水処理により誘導的に形成されるということだと思います。大豆の遺伝的中心というのは中国でしょうか。

島村 中国、日本です。

川口 イネも似たようなところですね。そうすると似たような中でも、地理的には違う場所に生育したことにより、進化して、それぞれの特異的な形質を持っているのだらうというふうに考えていいのでしょうか。

島村 大豆は日本とか中国とか雨が多い地域で発達してきたので、そういう地域性に適応している大豆という遺伝資源もあると思います。また、大豆の野生種のツルマメというのもやはり日本、中国、韓国で育っていますので、野生種を使ってそういう違いを見つけることは重要だとは思っており、そのような種から形質を導入できる可能性もあります。

川口 イネと大豆は分類上は離れた植物なのに、それぞれの通気組織の形成過程は違うけれども、似たような形態を作るというのが非常に興味深いと思いました。

島村 ありがとうございます。