

開発途上地域の
農林水産業研究についての
情報・広報誌

JIRCAS
NEWS

2023 November No.95

特集 BNI (生物学的硝化抑制) 研究

目次

巻頭言 「BNI技術」の意義 3

特集 BNI（生物的硝化抑制）研究

- JIRCAS発！のBNI研究とは 4
- 異種の遺伝資源を用いたコムギの改良
—野生コムギからのBNI能の導入 6
- SATREPSプロジェクト
「生物的硝化抑制(BNI)技術を用いたヒンドゥスタン平原における
窒素利用効率に優れたコムギ栽培体系の確立」 7
- LCAに基づくBNI強化コムギ導入の温室効果ガス削減効果の評価 8
- 世界で最も多く生産されるトウモロコシでのBNIの利用に向けて 9

JIRCASの動き

【研究成果紹介】

- コメ増収はマダガスカル農家の栄養改善に有効
—主食作物の生産性向上によりアフリカの栄養問題解決に期待— 10
- 熱帯雨林樹木の葉脈構造とその機能を解明
—葉脈構造の理解が環境適応性の高い樹種選定に貢献— 10
- 高CO₂環境でイネを増収させる「コシヒカリ」由来の遺伝子を発見
—気候変動下での持続可能な稲作に貢献— 11
- 熱帯島嶼河川の栄養塩濃度を機械学習で予測
—沿岸生態系の保全対策への活用期待— 11
- トウモロコシの生物的硝化抑制の鍵となる物質の同定に成功
—窒素施肥量を削減できるBNI強化トウモロコシの開発に前進— 12
- 水稻施肥技術「リン浸漬処理」は冠水害の回避にも有効
—サブサハラアフリカの安定的かつ持続的なコメの生産に貢献— 12

「BNI技術」の意義

理事長 小山 修

気候変動などの地球規模の課題が顕在化する中、国際社会共通の目標であるSDGs（持続可能な開発目標）達成に向けた多くの活動が展開されています。2021（令和3）年には国連食料システムサミットが開催され、食料に関わる一連の活動を持続可能なシステムへ転換していくことが確認されました。我が国も、食料・農林水産業の生産力向上と持続性の両立をイノベーションで実現するための中長期的な視点での政策方針「みどりの食料システム戦略」を策定し、取り組みを進めています。国際農研（JIRCAS）が推進する生物的硝化抑制（BNI）技術は、このような課題の解決に向けた最も有望な技術の一つです。

国際農研は、早くから土壌微生物や植物栄養の分野で多くの研究成果を出していましたが、BNIに関する研究は、1995（平成7）年に南米の熱帯イネ科牧草（ブラキアリア）のアンモニア態窒素利用の特徴に着目して開始した試験が始まりです。当時から、硝酸塩や亜酸化窒素などによる環境問題を意識した研究でした。その後、ブラキアリアの硝化抑制機能についての論文化や、根から出る物質の化学的同定などが進み、2006（平成18）年には当所スバラオ研究者らによってBNIの概念が整理されました。5年間のプロジェクトを3期、15年間継続し、その間には対象作物も増え、国際農業研究協議グループ（CGIAR）の研究センターとともにBNIコンソーシアムが結成されて国際連携の輪も広がっていきました。

そのような中、コムギ近縁種を交配したBNI能を強化したコムギが開発されました。スバラオ研究者らの論文は、アメリカ科学アカデミー紀要（PNAS）という主要な科学雑誌の2021年の年間最優秀論文に選ばれ、同研究者が著名なTEDトークの講演者となるなど、「BNI技術」は世界レベルの市民権を得ました。BNI強化コムギは、2023年4月にインドで開催されたG20首席農業科学者会議の場で紹介され、我が



国が議長国となって宮崎市で開催されたG7農業大臣会合でも展示、紹介されました。研究資金の獲得も相次ぎ、国内やインド、ネパールなどで現地実証が開始されています。科学論文の執筆からわずか数年で、我が国を含む世界の複数国で圃場試験が行われ、良好な結果が得られているという普及面を含め、世界から高い注目を集めています。

人類の生存は、微妙なバランスで成り立つ地球生態系の枠を保ちつつ、食料システムを長い将来にわたって持続的に維持していけるかどうかにかかっています。そのためには、土壌や気象の理解に加え、作物、微生物、昆虫などの生物相互間の関係の科学的な理解に立脚した技術開発が不可欠です。「BNI技術」は、土壌・微生物・作物の相互依存関係の上に開発された地球環境にやさしく、生産者が容易に導入可能な、未来を先取りした技術です。

国際農研では、現在4期目にあたる「BNIシステム」プロジェクトが進行していますが、研究はまだ途上です。今後、研究の進展、技術の普及に伴って様々な分野での新たな協働が必要になると考えています。この特集記事を読まれる関係の皆様への「BNI技術」へのご理解とご協力を切にお願い申し上げます。

JIRCAS 発!の BNI 研究とは

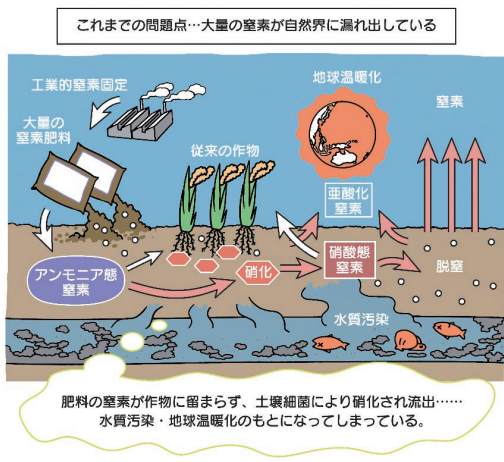
BNIシステムプロジェクト プロジェクトリーダー 吉橋 忠
生産環境・畜産領域 グントゥール ベンカタ スバラオ

我々の豊かな食生活を支えているのは、窒素肥料を農地に投入することで成り立っている近代農業です。農地に投入される窒素肥料は、化石燃料により空気から工業的に製造される化学肥料が担っています。一説には人間を構成する窒素の半分以上が、工業的窒素固定に由来すると言われます。この化学肥料と高収量品種との組み合わせによる「緑の革命」は、人類が直面した食料不足を解消し、1970年にノーマン・ボーローグ博士がノーベル平和賞を受賞しています。

一方で、投入された窒素肥料の半分以上が作物に利用されずに損失していることも指摘されています。この損失の多くは、農地土壌の微生物が窒素肥料からエネルギーを得る「硝化」を原因としています。硝化は、窒素肥料を構成するアンモニア態窒素を硝酸態窒素へと酸化する経路で、一部の土壌微生物のエネルギー源となっています。この経路は、地球の窒素循環にとって重要な過程ですが、農地への窒素肥料の投入が過多となると、作物生産を向上させるだけでなく、これらの土壌微生物の活動を一方的に活性化することになります。硝化により発生した硝酸態窒素は負の電荷を持ち、同じく負の電荷をもつ土壌粒子に吸着されにくい性質を持ちます。土壌から流れ出した硝酸態窒素には毒性があり、地下水汚染やアオコの大発生など富栄養化

を引き起こします。また、硝化に伴いCO₂の298倍もの温室効果のある亜酸化窒素(N₂O)が発生します。食料生産のために投入した窒素肥料の多くは、作物ではなく土壌微生物を養い、環境に負荷を与え、必要な食料の確保により多くの窒素肥料が必要とされます。それが、さらに土壌微生物を活性化させ、地球規模の問題を発生させるという負の連鎖に陥っています(図1)。

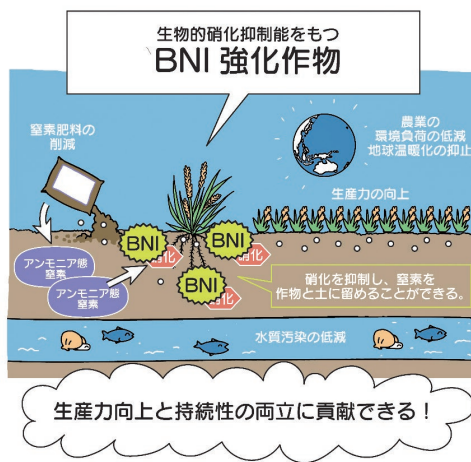
1986年、コロンビアにある国際熱帯農業研究センターが、奇妙な現象を報告しました。ある種の熱帯イネ科牧草の圃場では、「土壌に硝酸態窒素が全く見られない」というものです。国際農研は1995年に、この現象に科学的なメスを入れようと共同研究を始めました。その結果、その熱帯牧草(ブラキアリア)では、硝酸態窒素が見られないだけでなく、土壌の硝化を引き起こす微生物の量が少ないことが分かりました。我々は、牧草そのものに硝化を抑制する機能があると考察し研究を進めたところ、根から放出される物質が、土壌の硝化を司る微生物を選択的に抑制することを見出しました。これに伴って、窒素による環境負荷も低減されます。これを「生物的硝化抑制(Biological Nitrification Inhibition; BNI)」と名付け、同じイネ科作物にこの機能を付与した作物、「BNI強化作物」を開発することを目指しました(図2)。



Science Manga Studio (2021)

図1 畑地における窒素循環

工業的に生産された窒素肥料の多くは作物に吸収されず、微生物のエネルギー源として利用され、環境負荷となります。



Science Manga Studio (2021)

図2 BNI強化作物

作物の根から分泌される BNI 物質により土壌の硝化が抑えられ、与えられた肥料が土壌に留まり、効率よく作物に吸収されます。

特集 BNI（生物的硝化抑制）研究

コムギは「肥料で獲る」と言われるほど施肥が重要とされる作物で、世界で最も窒素肥料が使われている作物です。しかし、現在使われている品種群にはBNI活性はありませんでした。そのため、コムギと掛け合わせ可能な野生コムギ近縁種から、オオハマニンニクがBNI能を持つことを見出し、その機能を高収量コムギ品種に付与する研究を10年以上かけ実施しました。現在では、「BNI強化コムギ」と言われるプロトタイプの作出に成功し、世界各地の圃場試験で、窒素肥料を効率的に利用し、環境負荷を低減することが実証されつつあります。

国際農研は、このBNIを活用した生産システムを構築すべく、「BNIシステムプロジェクト」を推進しています。この中で、熱帯牧草ブラキアリア、コムギの他に、ソルガム、トウモロコシ、そして雑穀の一部などをターゲットとして、BNI強化作物の作出と生産システムでのBNIの活用を目標に研究を進めています。国際農研のBNIという研究コンセプトが、およそ20年もの年月を経て、社会実装に向け動き始めています。

また、国際農研は「BNI国際コンソーシアム」を主宰し、隔年で国際コンソーシアム会議を開催し、世界各国の研究者と連携をしています。BNI研究は、作物開発、植物栄養のほか、土壌に関わるあらゆる研究分野、さらにはBNI物質の特定、生合成や作用機作を検討する化学、BNI強化作物の導入を評価する社会科学分野など、大きな広がりを見せはじめています。コロナ禍により4年ぶりの開催となりましたが、2022年11月につくば国際会議場で、第4回BNI国際コンソーシアム会議を開催し、60名（うち、海外からの参加者40名）の参加を得ました（写真1）。

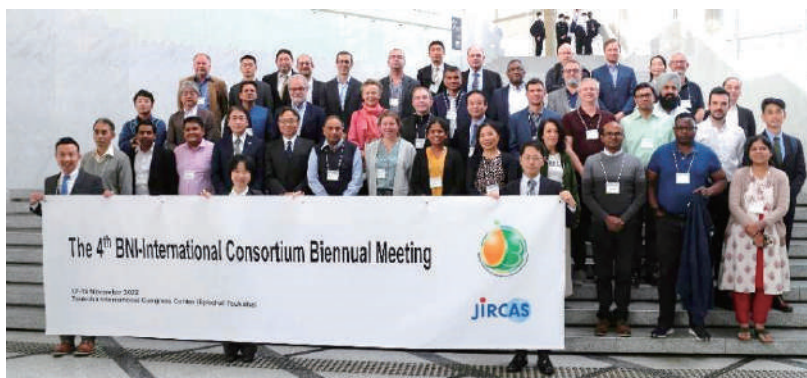


写真1 第4回 BNI 国際コンソーシアム会議
20カ国を代表する60名の研究者が集い、BNI研究に関する進捗や方向性について意見を交わしました（2022年11月17～19日：つくば国際会議場）

BNI強化作物のプロトタイプ、BNI強化コムギの圃場試験での効果の確認から初めての国際コンソーシアム会議でしたが、多くの国際機関、コムギ生産国関係者が参加し、この興奮を共有すると共に、BNI強化作物を活用し、環境に対応した世界の食料問題の解決、言わば「第二の緑の革命」を実現しようと意気込んでいます。

BNI強化コムギは、インドでのSATREPS（地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム）プロジェクトで、インドの穀倉地帯、ヒンドゥスタン平原における社会実装に向け、実証と現地優良系統へのBNI能の導入が図られているほか、農林水産省が2021年5月12日に策定した「みどりの食料システム戦略」に対応したグリーンアジアプロジェクトでは、ネパールにおけるBNI強化コムギの社会実装に向けた多地点試験を実施しています。2023年4月からは、日本国内の優良コムギ系統へのBNI能導入に向けたプロジェクト「国内向けBNI強化コムギの開発の加速化」もスタートし、日本各地での導入が始まっています。また、2023年4月のG7宮崎農業大臣会合、同年6月のG20農業大臣会合では、環境にやさしい食料生産技術としてBNI強化コムギが紹介され、G7、G20各国との共同研究に関する協議も進んでいます（写真2）。

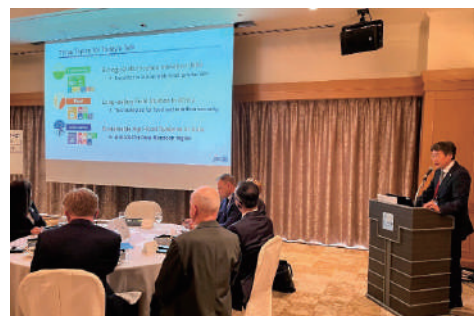


写真2 G7 宮崎農業大臣会合でのイタリア、ロッソブリージダ農業・食料主権・森林大臣の国際農研ブース訪問と国際農研 小山市理事長のワーキングランチにおける発表

異種の遺伝資源を用いたコムギの改良 —野生コムギからのBNI能の導入

生物資源・利用領域 岸井 正浩

コムギは3つのゲノムセットを持った倍数体であり、また野生種を育種に活用し易いことが特徴の一つとして挙げられます。他の主要穀物であるイネやトウモロコシは、ゲノムを1セットのみしか持っていないので、染色体が1本でも欠失すると、その植物体は致死してしまいます。一方、コムギは同じような遺伝子や染色体を3つ持っていることになるので、1つ無くなっても他の2つが残っているため致死に至りません。野生種との交配を行うと、多くの場合で染色体数が変化してしまい、イネやトウモロコシでは植物が致死してしまうのですが、コムギは、その染色体数変化を乗り越えることができます。この特徴によって、コムギでは野生種をコムギ育種に活用する事が多くなってきました。

野生種の活用は、コムギ改良において大きな可能性をもたらします。野生種の中には、栽培コムギが（人の助けなしで）生存できないような乾燥地でも生育できるものや、また殆ど栄養分が無い荒地でも育つものがあります。これらの特徴をコムギに導入できれば、これまでに無い画期的なコムギを育成できる可能性があります。

コムギ遠縁野生種の一つに、ハマニンニク属という一連の植物種があります。この植物は海岸の水際に自生しており、砂地という殆ど栄養分が無い場所でも極めて強健に育っていることから、栄養分吸収や活用において、何らかの優秀な性質を持っていることが考えられます（写真1）。そこで、国際農研において、ハマニンニク属植物の一種であるオオハマニンニクのBNI能を解析したところ、コムギと比べて遥かに高いBNI活性が見つかりました。このオオハマニンニクのBNI能を、コムギに導入することにしました。まず、コムギとオオハマニンニクの雑種を交雑で獲得して、その後オオハマニンニク染色体を一つずつコムギに導入したオオハマニンニク染色体添加

コムギ系統を作成し、さらに、オオハマニンニク染色体断片をコムギに導入したオオハマニンニク染色体転座コムギ系統を育成しました。これらの系統の中で、オオハマニンニクのN染色体短腕部（*Lr-N* 短腕）が導入されたコムギが高いBNIを示し、この部分に高いBNI能が存在することが明らかになりました（写真2）。

オオハマニンニクのN染色体短腕部のBNI効果を見るために、低窒素圃場での栽培試験を行いました。写真2では左側がオオハマニンニクのN染色体短腕部を導入した系統「BNI強化Munal」であり、右側が親コムギ品種「Munal」になります。下段は染色体図で、左側でピンク色に染めてある部分が導入されたN染色体短腕部になり、この部分のみが両者で違っています。植物の生育を比べると、親コムギ品種「Munal」では、窒素欠乏による葉の黄化が出て生育不全が見られます。一方で、「BNI強化Munal」では、それが全く見られません。植物の生重量や収量も「BNI強化Munal」が親コムギ品種「Munal」と比べて、遥かに多くなっています。これは、植物がBNI能を持つと窒素肥料が少なくても旺盛に生育できることを示しています。

国際農研のこれらの研究により、野生種オオハマニンニクの一染色体断片には、BNI形質が高い効果を持っていることが明らかになりました。



写真1 北海道網走付近に生育しているハマニンニク植物種
栄養分が少ない砂地に自生しているが、旺盛な生育を示している（左側）。ハマニンニク植物が自生する生え際は、波浪による浸食により根茎が剥き出しになっている（右側）。

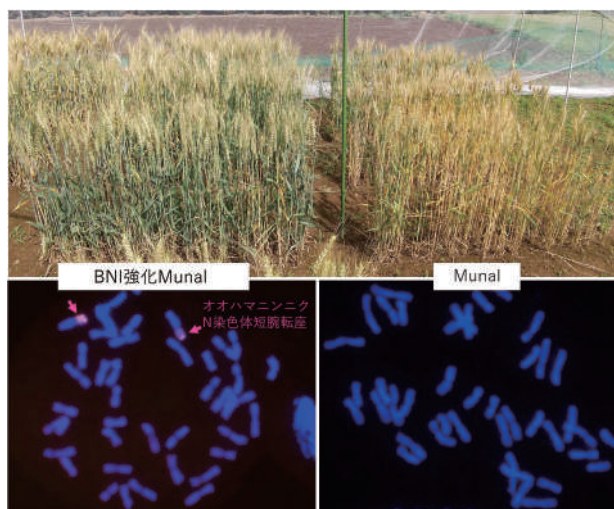


写真2 BNI強化コムギ
「BNI強化Munal」（左側）と親コムギ品種「Munal」（右側）。上段は圃場試験であり、親コムギ品種「Munal」は窒素欠乏により黄化する一方、BNI強化「Munal」は緑色を保持している。また BNI強化「Munal」は親コムギ品種「Munal」に比べて、遥かに多い生物産量を示している。下段は染色体図で、BNI強化コムギ「Munal」では、BNI能を持つオオハマニンニクN染色体短腕（*Lr-N* 短腕; ピンク色部分）が導入されている。

SATREPS プロジェクト「生物的硝化抑制(BNI)技術を用いた ヒンドゥスタン平原における窒素利用効率に優れたコムギ栽培体系の確立」

日本大学生物資源科学部 教授
国際農研 特定研究主査 飛田 哲

インド亜大陸北部に位置するヒンドゥスタン平原は、パキスタンからインド、ネパールを経てバングラデシュに至る東西に2千キロメートル、面積70万平方キロにも及ぶ帯状の大平野です。この地域は1960年代に、優良コムギ品種と灌漑と施肥栽培の組み合わせによって、ポーローグ博士らによる「緑の革命」が成功した舞台として知られています。今やインドにとって、この地域はコムギ生産の8割を占める一大穀倉地帯であり、今年世界一となった14億人の人口の食料安全保障の要となっています。コムギはたくさんの肥料を与えて栽培される作物で、インドでも例外ではありません。ヒンドゥスタン平原では、10アール当たり20キロもの窒素が施肥されることが常で、北西部のパンジャブ州やハリヤナ州では、同30キロもの窒素が投入されています。しかし、コムギが実際に吸収利用する窒素の割合（窒素利用効率：NUE）は、3割かそれ以下です。吸収されなかった窒素は農業の現場から急速に失われ、硝酸による環境汚染や N_2O の発生を通じた地球規模の温暖化の要因になっています。また、インドでは2005年以降、窒素肥料の国内生産量を消費量が上回っており、尿素肥料の輸入や農家への補助金による国家予算も莫大な額となっています。これらのことから、ヒンドゥスタン平原のコムギ生産システムにおいては、NUEを改善し窒素の施用量を削減することが強く求められています。

国際農研は、国際トウモロコシ・コムギ改良センター（CIMMYT）と共同研究を進め、国際コムギ品種であるMunalを材料に、BNI能力を強化したコムギ系統を育成することに成功しました。この系統は根圏土壌の硝化ポテンシャルを低下させ、とりわけ窒素施肥量の低い土壌条件での生育と窒素吸収量が親品種Munalに比べて優れています。従って、高いNUEを示すことが日本国内で行った圃場試験で示されました。これを受け国際農研は、SATREPSの研究資金を獲得し、BNI強化コムギをヒンドゥスタン平原に適用し、コムギ生産システムにおけるNUEの改善を目指すプロジェクトをインドで開始しました。

このプロジェクトはCIMMYTの傘下にあつて、インドのコムギ研究と成果普及に大きく貢献しているポーローグ南アジア研究所（BISA）を中心に、インド国立農業研究委員会（ICAR）の3つの研究所（インド農業研究所、コムギ・オオムギ研究所、中央土壌塩類研究所）をカウンターパートとしています。ここで、BNI技術を導入した新しいコムギ生産体系において、窒素施肥量を1~2割減らしても収量と品質が維持されることを実証します。そして、5年後の達成

目標として、ヒンドゥスタン平原において窒素負荷の少ないコムギ栽培システムを提案することを掲げています。

そのための活動として、まず、インド各地の優良品種を材料にBNI能力を強化したインド向けコムギ系統の育成を開始しました。そして、気象と土壌特性ならびに推奨施肥量が異なるヒンドゥスタン平原の4カ所（パンジャブ州のルディヤナ、マディアプラデシュ州のジャバルプール、ビハール州のサマスティプール、デリー連邦直轄地）で、多地点連絡栽培試験を開始しました（写真）。また、ライシメーターを用いた試験では、“土壌—植物—大気”のつながりの中での窒素の形態と動きを調査し、既存のモデルにBNI機能を組み込んだ新しい窒素動態モデルを構築する予定です。これにより、BNIの便益をより定量的に示し、広域かつ長期的な効果をより正確に事前評価することができます。

BNI技術は、基本的にはコア技術となるBNI能力を強化した品種への置き換えと窒素肥料の減肥栽培の組み合わせのため、農家にとってのハードルは高くないように見えます。しかし、BNIは新しいコンセプトであり、とりわけ保守的な農家にとって減肥は収量減や品質低下に結びつくのではないかという躊躇があると同時に、何よりBNI技術を導入することによる環境へのメリットに比べ、農家へのメリットが見えにくいことが特徴だと考えられます。従って、BNI技術の普及のためには、栽培農家のインセンティブを引き出すことはもちろんのこと、州や連邦政府の関係機関や関連するステークホルダー（製粉業界、肥料会社、環境関連のNGOなど）を巻き込み、この新技術への理解を促すための活動を実施します。インドの各地域でBNI能力強化優良品種が登録され、ヒンドゥスタン平原の農家に広く普及するのは、このプロジェクトの実施期間終了後だと考えられます。そのため、関連のステークホルダーが実際にBNI品種導入による便益を享受し、近代農業における普遍的技術としてのBNIの有用性を理解することを、このSATREPSプロジェクトの上位目標としています。



写真 ルディヤナ（パンジャブ州）のBISA圃場での多地点連携試験（2023年3月）。窒素施肥ゼロ区におけるBNI能力強化国際品種（右）とその親品種（左）。

LCAに基づくBNI強化コムギ導入の温室効果ガス削減効果の評価

社会科学領域 レオン 愛

2015年に締結されたパリ協定では、「世界の気温上昇を産業革命以前に比べて2℃より十分低く保ち、1.5℃に抑える努力を追求する」ことが世界共通の目標になっています。さらに、長期低排出発展戦略の策定が求められており、我が国は2050年までにカーボンニュートラルの実現を目指すことを宣言し、取り組みを進めています。一方で、2050年の世界の食料需要は2010年と比較して、1.7倍となることが予想されています。このため、温室効果ガスを削減し、環境負荷を軽減しながら、食料生産を増加させる持続的な食料システムを世界的に構築していく必要があります。

国際農研では、窒素汚染防止と食料増産を両立するためBNIによる「アンモニウムの活用」を提案し、CIMMYT等と共同で、約30%の硝化抑制率を有し、少ない窒素肥料で高い生産性を示すBNI強化コムギの開発に成功し、2050年カーボンニュートラルの実現に向け、硝化抑制率40%を実現可能な目標として開発を進めています。

では、BNI強化コムギが普及した場合の環境負荷低減量はどのくらいになるのでしょうか。ここでは、ライフサイクルアセスメント(LCA)手法を用い、BNI強化コムギによる窒素肥料由来の温室効果ガス削減を考慮しながら、資材及び機械の製造からコムギ栽培に至る各段階で発生する温室効果ガスの総排出量をライフサイクル温室効果ガスとして評価します（図1）。

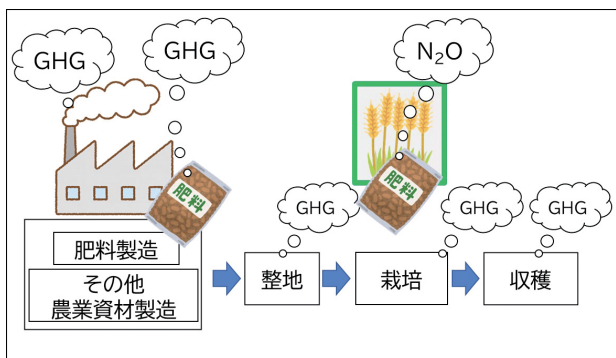


図1 BNI強化コムギのライフサイクル温室効果ガス

LCA手法を用いた評価に基づくと、開発済の硝化抑制率30%のBNI強化コムギが2030年までに普及した場合、ライフサイクル温室効果ガス排出量は12.3%、施肥窒素量を11.7%削減でき、窒素利用効率は12.5%向上可能と試算されます（図2、横軸30%）。そして、2050年までに硝化抑制率40%のBNI強化コムギが普及した場合、ライフサイクル温室効果ガス排出量は15.9%、施肥窒素量は15.0%それぞれ低減し、コムギの窒素利用効率は16.7%向上する試算結果になりました。さらに、この硝化抑制率40%のBNI強化コムギが、最適栽培地域に導入された場合、LCA評価に基づくと、2050年までに世界のコムギ栽培地域から窒素肥料由来の温室効果ガスを9.5%削減可能と推定されます。ただし、硝化抑制作用は、最適栽培地域以外でも一定の効果が期待されており、さらなる温室効果ガス削減が見込まれます。

世界の様々な食料システムにおいて、地域に適應したBNI強化作物を開発し、導入していくことにより、ライフサイクル温室効果ガス削減に寄与することが期待できます。これにより、高い生産性と農業からの環境負荷軽減を両立させる農業システムの構築に貢献し、地球温暖化の緩和への効果も期待出来ます。

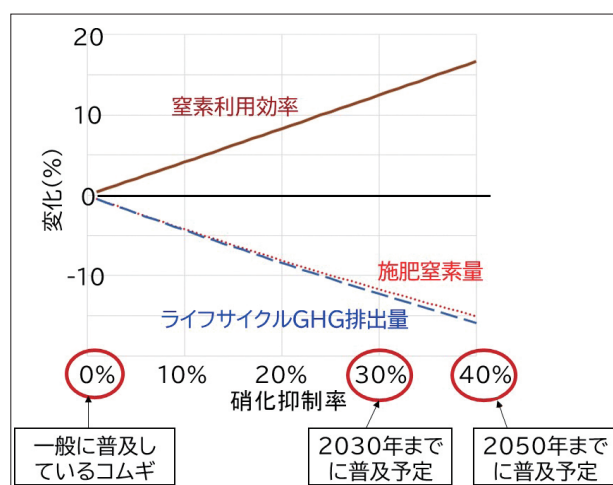


図2 硝化抑制率の変化に伴うライフサイクル温室効果ガス排出量、施肥窒素量、窒素利用効率の変化の推定

世界で最も多く生産されるトウモロコシでのBNIの利用に向けて

生物資源・利用領域 大高 潤之介

トウモロコシは世界で最も広く栽培されている畑作物で、年間10億3,000万トンの生産量を誇り、食用作物として、また家畜の飼料用、デンプンなどの工業原料として幅広く利用されている重要な作物です。しかし、その窒素利用効率率は約50%と非常に低いことから、国際農研ではBNIを活用したトウモロコシ生産システムを構築すべく研究を進めています。この生産システムに必要なBNI強化トウモロコシの開発には、トウモロコシのBNI物質を根から放出される物質から見つけ出し、BNI強化の足掛かりを得ることが必要になります。

根から分泌される物質は水への溶けやすさによって、疎水性と親水性に分類されます。疎水性物質は水に溶けにくく、根の近くの根圏に留まりやすい一方で、親水性物質は水に溶けるため土壌中の広い範囲に拡散し、その効果をより強く発揮すると考えられます。このため、トウモロコシ根から放出される疎水性と親水性の物質を集めました。BNI活性（硝化菌の硝化を抑える力）を指標に、様々な物質が含まれる根の分泌物から、BNI物質をそれぞれ1つずつ分離し、同定していく地道な作業を行いました。その結果、疎水性BNI物質として「ゼアノン」と「HDMBOA」を、親水性BNI物質として「MBOA」を同定しました。その中でも、ゼアノンは天然からは初めて見出された物質になります。また、MBOAとHDMBOAは一部のイネ科作物（トウモロコシ、コムギ、ハトムギなど）が共通して作り出す天然物質です。3種の物質のBNI活性はMBOA > ゼアノン > HDMBOA の順に強いことが明らかになりました。さらに、根の内部から2種の弱いBNI物質「HMBOA」と「HDMBOA-β-glucoside」も同定しました。

続いて、最も活性の強いMBOAの機能解析により、MBOAが硝化菌の硝化と増殖を強く抑制すること（写真）、MBOAの添加により、土壌培養試験においても土壌での硝化を抑制すること、そして、土壌微生物によるMBOAの分解に伴い、土壌中ではMBOAによる硝化抑制活性が時間の経過とともに減少することを見出しました。

このことから、トウモロコシでのBNI発現メカニズムは図のように考えられます。トウモロコシ根表層から放出される疎水性BNI物質ゼアノンとHDMBOAは根圏で、親水性BNI物質MBOAは土壌のより広い範囲で硝化を抑制することができます。根表層で産生されるHDMBOAは、土壌中でより強力なBNI活性を有するMBOAに変換されます。さらに根内部に蓄積したHDMBOA-β-glucosideも糖分解酵素によって高いBNI活性を持つHDMBOAに変換され、自動的にMBOAとなります。生成したMBOAは土壌微生物により分解されますが、トウモロコシ根から常に新たに供給されます。それらのことから、トウモロコシのBNI発現における重要な鍵となる物質は、MBOAであることが明らかになりました。

今後は得られた知見を活かし、品種間におけるBNI物質量の比較やBNI物質の分泌メカニズムの解明、圃場試験などを実施することで、農業分野での実利用に適したBNI強化トウモロコシを開発し、環境負荷を軽減した持続的なトウモロコシ生産システムの開発を推進します。



写真 MBOAの硝化菌の生育へ与える影響
増殖した菌によって白濁した液体培地（左の三角フラスコ）とMBOAの存在下で強力に増殖阻害され、透明のままの液体培地（右の三角フラスコ）。

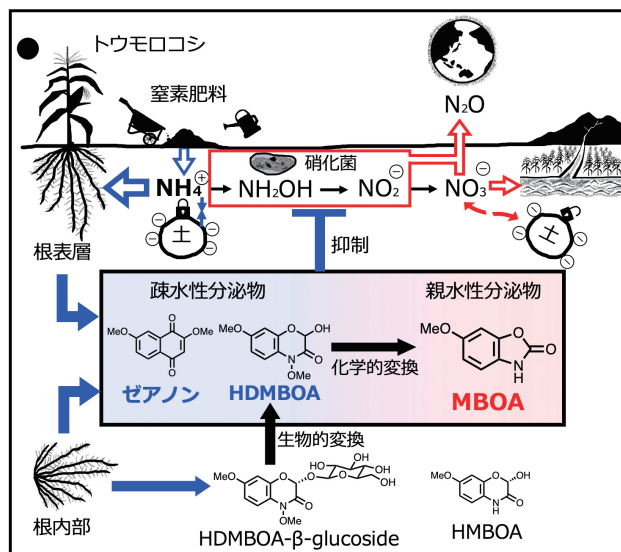


図 トウモロコシの生物的硝化抑制 (BNI) の予想メカニズム
トウモロコシのBNIは、3種のBNI物質（疎水性・親水性）によって発現します。HDMBOAと根内部のHDMBOA-β-glucosideは、土壌中で最終的にMBOAに変換されます。このため、強力なBNI物質であるMBOAは、トウモロコシのBNIの鍵となる物質です。

【研究成果紹介】

○コメ増収はマダガスカル農家の栄養改善に有効

—主食作物の生産性向上によりアフリカの栄養問題解決に期待—

国際農研は、東京大学大学院農学生命科学研究科およびマダガスカル国立栄養局と共同で、深刻な栄養問題を抱えるマダガスカルの農村地域を対象に、主食である水稻の収量増加が農家の栄養改善に有効であることを、計量経済学的手法によって明らかにしました。

本研究による分析では、水稻収量が増えるとコメの自家消費量だけではなく、コメを販売した現金収入で栄養価の高い食品（野菜、果物、肉・魚）の購入量も増加することがわかりました。これらの購入行動を通じた消費する食品の多様化により、エネルギー供給量だけでなく、ビタミンA、亜鉛、鉄分などの微量栄養素の供給量、すなわち、量と質の両面において栄養改善に貢献することが示唆されました。

これまで、サブサハラ・アフリカの農村地域において、主食作物の生産性の向上が農家の栄養供給に及ぼす影響を評価した事例は限られていました。この研究は、水稻の生産性向上に関する技術的介入によって、消費や市場を通じた購買行動の多様化が生じ、貧困農家の栄養改善につながることを見出したもので、持続可能な開発目標（SDGs）の目標2「飢餓をゼロに」への貢献が期待されます。



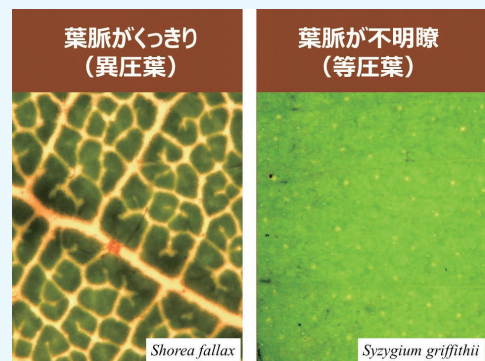
○熱帯雨林樹木の葉脈構造とその機能を解明

—葉脈構造の理解が環境適応性の高い樹種選定に貢献—

国際農研では、熱帯林樹木の環境への適応能力を評価し、植林地の環境に適した樹種の組み合わせにより、林業生産力と環境適応性を強化する造林技術の開発に取り組んでいます。この度、国際農研は、高知大学、マレーシア サラワク森林局と共同で、マレーシア熱帯雨林樹木の葉脈の構造が、葉の丈夫さと光合成能力に密接に関係していることを明らかにしました。

昆虫や草食性の動物等、葉を食べる植食者と光は地面から林冠方向に向かって増加するため、樹木は樹高とともに葉を丈夫にする必要があり、高い光合成能力を持つ方が有利になります。葉は、葉脈の周囲に透明な繊維質の組織を持ち、光に透かすと葉脈が明瞭に見える葉（異圧葉）と、この組織がなく葉脈が見えにくい葉（等圧葉）があり、樹種によって決まっています。異圧葉は、繊維質の組織を持つため丈夫でありながら、葉内に光が透過しやすく葉全体の光合成能力が高くなると考えられます。すなわち異圧葉を持つ樹木は、高い光合成と葉の防御力の両者を備えており、林冠のように明るく被食圧が高い環境で有利な樹木といえます。一方、等圧葉は、繊維質の組織の代わりに葉緑体を持つ細胞を隙間無く配置し、弱い光を効率的に利用できるため、森林の地表付近の暗い環境で有利になります。

環境適応性を強化する造林では、植林地の環境に適した樹種の選定が重要であり、葉脈構造の理解によって、多様な熱帯雨林樹種の中から環境に適した樹種の選定や、樹種の機能的特性を考慮した植林の実施が期待されます。



【研究成果紹介】

○高CO₂環境でイネを増収させる「コシヒカリ」由来の遺伝子を発見 —気候変動下での持続可能な稲作に貢献—

国際農研、農研機構、名古屋大学、横浜市立大学、理化学研究所、明治大学、かずさDNA研究所の共同研究グループは、稲穂の基となる腋芽の生長を促し、穂数の増加に働く遺伝子MP3を「コシヒカリ」から同定しました。

MP3の遺伝子配列（遺伝子型）はイネの品種ごとに異なり、「コシヒカリ」に代表される日本イネの一部は、インディカイネと呼ばれる海外の品種には見られない、穂数を増やす遺伝子型であることが分かりました。日本の多収品種「タカナリ」は、インディカ型のMP3を持つことから、「コシヒカリ」型のMP3と入れ替えたイネを開発したところ、穂数が20～30%増加しました。さらに、将来予想される高CO₂条件を再現した水田試験において、開発したイネは「タカナリ」に比べて6%増収することを明らかにしました。

世界的な気候変動が進行する中で、持続可能な作物生産を実現するための技術開発が喫緊の課題となっています。MP3はその技術の1つとして、将来の高CO₂環境でのイネの安定生産に貢献することが期待されます。



○熱帯島嶼河川の栄養塩濃度を機械学習で予測

—沿岸生態系の保全対策への活用期待—

国際農研は、機械学習を用いて、沖縄県石垣島の河川水に含まれる栄養塩（窒素、リン、ケイ素）濃度を高い精度で予測する新たなモデルを作成しました。

本研究で作成したモデルは、石垣島の上流域の土地利用や表層地層などの流域特性から栄養塩濃度を機械学習手法「ランダムフォレスト」により予測するものであり、それぞれの栄養塩に対してどのような流域特性が大きな影響を及ぼしているかについても評価することができます。また、従来のシミュレーションモデルの多くは、窒素とリンを対象に栄養塩濃度を推定していましたが、本モデルはこれらに加えてケイ素についても濃度の予測が可能であり、窒素、リンの過剰負荷に起因するサンゴ礁の衰退やケイ素の減少に起因する渦鞭毛藻（うずべんもうそう）など有害藻類発生リスク評価などへの活用も可能になります。

さらに、陸域から流出する栄養塩の量を推定・予測するためには、河川流量と水質の観測やシミュレーションモデルなどの高度な専門知識・技術の習得ならびに労力が必要でしたが、本モデルでは、流域の土地利用や表層地質、人口密度のデータがあれば比較的簡便な操作で栄養塩濃度を予測することが可能になります。

熱帯島嶼では、気候変動に伴う海洋環境の変化に加えて、陸域からの過剰な栄養塩の流入による、サンゴ礁などの沿岸生態系への悪影響が懸念されています。本研究の成果によって、陸域から流入する栄養塩の量を適正に管理し、健全な沿岸生態系を保全するための施策立案への活用が期待されます。



JIRCASの動き

【研究成果紹介】

○トウモロコシの生物的硝化抑制の鍵となる物質の同定に成功

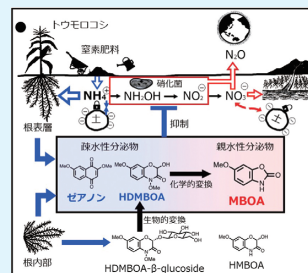
—窒素施肥量を削減できるBNI強化トウモロコシの開発に前進—

国際農研は、農研機構と共同で、トウモロコシの根から産生される生物的硝化抑制（BNI）の鍵となる親水性BNI物質「MBOA」の同定に成功しました。

近代農業では、工業生産されたアンモニア態窒素肥料が農地に多量に投入され、土壌微生物（硝化菌）による硝化によって硝酸態窒素へと変換されることで、水質汚染や温室効果ガス発生など、様々な問題を引き起こしています。

MBOAは、特定のイネ科植物（トウモロコシ、コムギ）が産生する二次代謝物質であることが知られています。研究グループは、土壌とBNI物質による培養実験や化学分析により、MBOAが硝化菌の硝化反応と増殖を抑制し、硝化を阻害することを明らかにしました。さらに、疎水性BNI物質であるHDMBOAが土壌中で化学的により安定で強力なBNI活性を持つMBOAに変換され、BNIを発揮することを見出しました。

BNI発現において重要なMBOAを指標とし、世界で最も多く生産される畑地作物であるトウモロコシ（生産量は10.3億トン、コムギは7.4億トン）のBNI能を強化することは、窒素肥料の流出と環境汚染を減らし、地球の窒素循環の改善に繋がります。これにより、農業の生産力と持続性を高め、みどりの食料システム戦略の推進に貢献していきます。



○水稻施肥技術「リン浸漬処理」は冠水害の回避にも有効

—サブサハラアフリカの安定的かつ持続的なコメの生産に貢献—

国際農研は、マダガスカル国立農村開発応用研究センター（FOFIFA）およびアンタナナリボ大学放射線研究所との共同研究により、水稻施肥技術「リン浸漬処理（通称：P-dipping）」の効果を、マダガスカルの気象や地形条件が異なる農家圃場で検証し、同技術が肥料の利用効率を大幅に改善するだけでなく、生育初期に生じる冠水害の回避にも有効であることを明らかにしました。

国際的な肥料価格の高騰や気候変動に伴う極端気象の頻発化は、マダガスカルをはじめ、購買力が低く、生産基盤が脆弱な貧困農家の農業生産をより困難にしています。

今回得られた成果は、P-dippingを採用することで、肥料の利用効率を高め、頻発化している冠水害の対処にもつながる可能性を示したものです。同技術を普及拡大することで、サブサハラアフリカでの安定的かつ持続的なイネ生産に貢献することが期待されます。



国際農研では、「JIRCASメールマガジン」を配信して、国際農研のさまざまな情報をお知らせしています。

下記URLで、バックナンバーを確認することができます。

「JIRCAS メールマガジン」の配信を希望される方は、受信環境を確認のうえ、ご登録ください。

https://www.jircas.go.jp/ja/public_relations/jircas_mailmagazine

JIRCAS NEWS No.95

2023年11月発行

編集：国際農研（国立研究開発法人国際農林水産業研究センター）情報広報室

発行：国際農研（国立研究開発法人国際農林水産業研究センター）

〒305-8686 茨城県つくば市大わし 1-1

TEL 029-838-6313 FAX 029-838-6316

<https://www.jircas.go.jp/>



リサイクル適性 (A)

この印刷物は、印刷用の紙へリサイクルできます。