

SICORP 日本-スペイン-フランス-ドイツ
「食料及びバイオマスの生産技術」領域 事後評価報告書

1 共同研究課題名

「気候変動下における穀物資源の利用効率化に関する包括研究」

2 日本一相手国研究代表者名（研究機関名・職名は研究期間終了時点）：

日本側研究代表者

三ツ井 敏明（新潟大学・教授）

スペイン側研究代表者

イケル・アランフェロ（スペイン高等科学研究院・室長）

ホセ・ルイス・アラウス（バルセロナ大学・教授）

フランス側研究代表者

ベルトランド・ガキエレ（パリ第 11 大学・学部長）

ドイツ側研究代表者

エカルト・プリエサク（ヘルムホルツ協会・グループ長）

3 研究概要及び達成目標

本研究では、さまざまな環境下における穀物の生産性および品質並びに養分利用効率を制御する作物学的、生理学的、分子的ボトルネックを特定する。また、気候パラメータの変化を考慮した養分利用効率を最適化するための予測モデルの開発を行う。具体的には、日本グループはイネを用いた研究を実施し、スペイングループは小麦・新穀物トリトルデウムを用いた研究を、フランスグループはメタボローム研究、そしてドイツグループはモデル構築を実施する。日欧の研究チームが相互補完的に取り組むことにより、世界人口の増加と変化するグローバル環境に対応する農業作物の高生産性および栄養価の最適化技術を開発する。

4 事後評価結果

4.1 研究成果の評価について

4.1.1 研究成果と達成状況

本研究課題では、日本グループはイネを、スペイングループは小麦・新穀物トリトルデウムを材料とし栽培試験を行うとともに、フランスグループはメタボローム研究、そしてドイツグループはモデル構築と、それぞれの専門を相互補完して研究が行われた。

まず、スペイングループでは、バルセロナ大学が保有する 50 種のパンコムギ遺伝子型と Agrasys 社から提供された高栄養価で良食味の 10 種のトリトルデウム（二倍体 *Hordeum chilensis* とデュラムコムギの交雑種）を材料として圃場試験が行われた。当初予定の水ストレス試験は想定外の降水のため計画変更となったが、早（晩秋）・遅（晩冬）蒔きによる高温ストレス試験の結果、温度上昇が

特に冬コムギ遺伝子型の収量に悪影響を及ぼすことが判明した。また、 $\delta^{13}\text{C}$ や成熟粒の N 含有量が収量と良い相関を示すこと、リモートセンシングによるコムギ収量の遺伝子型評価改善に貢献できることを明らかにした。圃場栽培試験の結果に基づいて選抜された高・低収量のコムギ 10 品種とトリトルデウム 4 品種を CO_2 制御温室で解析した結果、すべてのトリトルデウム系統は高温・高 CO_2 環境条件下で成熟するが、パンコムギは 3 系統のみが成熟し、 CO_2 上昇は、止葉と穂の応答に異なる影響を及ぼした。また、コムギとトリトルデウム遺伝子型の間で、穀粒代謝産物プロファイルに有意差があった。一方、窒素利用効率 (NUE) 関連遺伝子としてフラボドキシンを強発現した遺伝子組換えコムギは高 CO_2 環境下で野生型よりもバイオマスの増加を示した。また、最高および最低の収量と NUE を持つコムギ・トリトルデウム遺伝子型を異なる CO_2 環境および施肥環境で栽培した結果、高 CO_2 環境下における遺伝子型間での施肥への異なる応答が観察された。また、UAV (ドローン) で構築されたマルチスペクトル線形モデルを衛星スケールで使用することでフィールドにおける穀物 N 含有量を効率的に決定できる可能性が示された。

一方、日本グループは、新潟大学の水ストレス圃場において 20 種類のイネ品種を栽培し、高・低収量および高・低 NUE を示す 10 種類のイネ遺伝子型を選抜・同定した。選抜した 10 種類のイネ遺伝子型を自然光型温室バイオトロンで栽培し、開花・登熟期における高温と高温・高 CO_2 に対する感受性を調べた結果から、五百万石を含む酒米品種は、水ストレス、高温ストレス並びに高 CO_2 ストレスへの感受性が明らかになり、高温・高 CO_2 応答性が異なるイネ遺伝子型が選別された。水ストレス下で栽培・収穫されたイネの澱粉プロファイリングから、水ストレスが葉の澱粉含量を抑えること、アイソトポミクス解析により子実と葉の $\delta^{15}\text{N}$ は水ストレス処理により低下することが明らかになった。なお、分析したすべてのパラメータ中で、子実の N は収量と最もよく相関した。さらに、高温登熟した登熟種子のペプチドーム解析の結果、登熟温度による異なるペプチドの生成が明らかになった。興味深いことに、厳しい高温条件ではオートファジー関連タンパク質発現に変化が見られ、米粒白濁化とオートファジー機能との関連が推察された。以上の解析で、酒米品種はストレス感受性で、低 NUE を示すことが分かった。さらなる解析の結果、高温条件においてアミロペクチン画分の顕著な増加と長鎖化が認められ、これらの変化は澱粉枝付け酵素 BEIIb 変異体の特徴に類似していた。そこで、酒米を母系、コシヒカリ NIL(Sdr4-k)を父系とした交配育種により、穂発芽耐性・高温登熟耐性を改良した越淡麗 Sdr4-k が、光周期・温度管理と胚救済を駆使した迅速世代促進技術により約 1 年半で作出された。越淡麗(Sdr4-k)では越淡麗の高温登熟による穂発芽性が改善され、 α -アミラーゼ活性発現も抑えられた。圃場栽培でも酒米への Sdr4-k 遺伝子導入は NUE には影響せず、また、GFR4-GIF1-SLR1 系とは異なる経路によりその収量性や品質を向上したと推察された。一方、先に選抜されたイネ 5 品種について、バイオトロンを用いて平温 (26°C/23°C, 400ppmv CO_2)、高温・高 CO_2 条件 (30°C/25°C, 800ppmv CO_2) および異なる追肥条件で栽培した結果から、高温・高 CO_2 環境下での窒素利用効率の品種間差異を認めた。

以上のように、高温、高 CO₂ 条件におけるイネ、コムギ、トリトウデウムの品種間差を生理学的に明らかにしたことに加え、高温登熟耐性に有用な遺伝子資源 (Sdr4-k) を同定する等の成果を上げていることは高く評価される。今後、本プロジェクトで得られた、環境条件、農業形質および代謝プロファイル解析等のデータが統合され、最適化予測モデルが構築されること、さらに作物種間での相違点の検証、選抜された品種を用いた遺伝学的手法での有用遺伝子資源の探索が期待される。さらにリモートセンシング技術でより精細な形質評価がなされ、遺伝子情報と組み合わせることにより、変動環境に耐性を示す品種の選抜や作出のさらなる展開・効率化を期待したい。

4.1.2 国際共同研究による相乗効果

共同研究の実施にあたり、遺伝資源や研究施設の共有が図られた。具体的には、4 回のプロジェクトミーティングならびに 3 回の国際シンポジウムが開催されるとともに、研究者の新潟大学への受入れ、新潟大学院生の留学プログラムへの採択、研究者・学生の滞在・留学などが行われ、コンソーシアム全体での研究論文発表総数 107 編 (日本側 19 編) という活発な研究成果の発表もなされている。ただ、共著の総説は発表されているが、共著の原著論文は掲載発表に至っておらず、また、当初計画にあったモデルの開発は道半ばであるが、継続的な共同研究によるさらなる展開を期待する。

4.1.3 研究成果が与える社会へのインパクト、我が国の科学技術協力強化への貢献

本プロジェクトでは、イネ、小麦、新穀物トリトルデウムを用い、さまざまな環境下、特に、地球規模での気候変動において課題となる高温・高 CO₂ におけるこれら穀物の生産性および品質並びに養分利用効率を制御する作物学的、生理学的、分子的ボトルネックの特定に肉薄した。特に、日本グループによるイネの高温登熟耐性に有用な遺伝子資源 (Sdr4-k) の同定は高く評価でき、今後の持続的農業生産の開発において重要な貢献をしたと評価できる。また、欧州グループが開発した信頼性が高く、洗練されたイメージングおよびリモートセンシング技術は今後の圃場レベルでの作物栽培における革新的なアプリケーションをもたらし、科学的、経済的および社会的に貢献すると期待される。

4.2 相手国研究機関との協力状況について

本研究プロジェクトをさらに発展させるべく、スペイン、オーストリア、ベルギー、フィンランド、英国、チリ、アメリカ、日本、中国の研究グループや企業との学際的なコンソーシアムが構築され、「環境変動下で栽培される重要作物の収量・品質・特性について低価格で信頼性の高い表現型評価の新規技術的アプローチの開発 (CropYQualT-CEC : H2020-MSCA-RISE-2019)」に関するプロジェクトが開始されている。新潟大学は EU 外のパートナーであるが、作物の形質評価技術および育種は新品種選抜や開発に直結すると期待される。今後、

日本側が主要なパートナーとして活躍することを期待したい。

4.3 その他

本プロジェクトに関連した研究として、高温耐性のコシヒカリ NU1 号の成果は多くのメディアで取り上げられており、社会に対して環境耐性の品種開発の意義を伝えたことは、高く評価できる。