

令和 6 年 6 月 8 日現在

機関番号：82104

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2023

課題番号：20H02972

研究課題名(和文) イネの収量ポテンシャル向上を目指すシンク・ソース遺伝子の単離とその利用

研究課題名(英文) Cloning and utilization of sink-source related genes toward increasing rice yield potential

研究代表者

高井 俊之 (Takai, Toshiyuki)

国立研究開発法人国際農林水産業研究センター・生産環境・畜産領域・主任研究員

研究者番号：40547725

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、イネの収量ポテンシャル向上を目指して、(1)多収品種「タカナリ」背景で穂数を増加させる遺伝要因MP3および個葉光合成能を増加させる遺伝要因GPS7の原因遺伝子の単離と(2)収量ポテンシャル向上への寄与を解明することを目的として試験を行った。MP3およびGPS7ともに原因遺伝子を同定し、「コシヒカリ」型のMP3が多くのインディカ品種の穂数を増加させるのに有効であることを明らかにした。また、「タカナリ」背景でMP3およびGPS7を集積し、穂数および個葉光合成能を相加的に増加できることを確認した。さらに、MP3は「北陸193号」背景で収量を増加させることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

世界的な人口増加や食料安全保障の観点から、イネの収量性を向上させることが求められている。本研究では、収量性に関与する穂数および光合成を増加させる遺伝子を同定し、同定した遺伝子が収量増に寄与する一端を明らかにした。本研究で同定した遺伝子を育種で利用することにより、世界的な食料問題の解決に向けての貢献が期待される。

研究成果の概要(英文)：This study was conducted to (1) identify the causal genes of MP3, which increases panicle number in the high-yielding "Takanari" variety, and GPS7, which increases leaf photosynthetic capacity, and (2) elucidate their contribution to improvement of yield potential in rice. We successfully cloned the causal genes of MP3 and GPS7, and found that the Koshihikari allele of MP3 was effective in increasing the number of panicles in many indica varieties. We also confirmed that pyramiding MP3 and GPS7 in the Takanari background could additively increase panicle number and leaf photosynthetic capacity. Furthermore, we observed that MP3 contributed to increase grain yield in the Hokuriku 193 background.

研究分野：作物学

キーワード：イネ 収量ポテンシャル シンク・ソース能 MP3 GPS7

1. 研究開始当初の背景

イネはアジアを中心に世界的な主要穀物であり、今後も増加が予測される世界人口に十分な食糧を供給するために、収量性(収量ポテンシャル)の向上を通してイネの生産量を上げることは非常に重要な課題である。また、国内においても食料自給率向上の観点から、米粉用や飼料用などの新規需要米を低コストで生産するために、収量ポテンシャルの高いイネ品種が求められている。

イネの収量は一般に、光合成で同化された産物の量(ソース能)と同化産物を蓄積する穂の容量(シンクサイズ)のバランスで決まる。国内で育成されたインド型多収品種「タカナリ」は一穂が大きいことに加え、生殖生長期以降の個葉光合成速度も高く、シンクサイズとソース能の両者が改良されたことで $10t\ ha^{-1}$ を超える国内トップレベルの収量ポテンシャルを有している(Takai et al. 2010; Yoshinaga et al. 2013)。熱帯の多収品種としては、1960年代にフィリピンの国際稲研究所(IRRI)で初めて育成された「IR8」に始まり、東南アジアの1000万haの水田で栽培された「IR64」など多くの品種があるが、一般的にインド型であり、穂数が多いことで大きなシンクサイズを確保している(Takai et al. 2019)。

応募者は、国内多収品種「タカナリ」の改良に向けて、日本型品種「コシヒカリ」との交雑を行い、戻し交雑自殖系統群(BILs)や染色体断片置換系統群(CSSLs)を育成してきた(Takai et al. 2014)。これらを用いて遺伝解析を進めた結果、「コシヒカリ」型が「タカナリ」背景で個葉光合成能(ソース能形質)を増加させる遺伝要因 *GPS7*、同じく「コシヒカリ」型が「タカナリ」背景で穂数(シンクサイズ形質)を増加させる遺伝要因 *MP3* を見出した。さらに、準同質遺伝子系統(NIL)を育成したところ、「NIL-*GPS7*」は葉身のクロロフィル含量が高いことで「タカナリ」よりも個葉光合成能が向上していること、「NIL-*MP3*」は生育初期からの分けつ発生が旺盛なことで最終的な穂数が「タカナリ」よりも多くなることを明らかにした。このように、*GPS7*、*MP3* はインド型多収品種「タカナリ」のソース能・シンクサイズを高めるため、国内外のインド型多収品種の収量ポテンシャル向上に向けて非常に有望な素材である。従って、*GPS7*、*MP3* の原因遺伝子の正体を明らかにし、そのゲノム情報を基に国内外の多収品種に *GPS7*、*MP3* を導入し、導入系統の収量ポテンシャルの向上を見極めていくことが、科学的にも実用的にも非常に重要であると考えた。

2. 研究の目的

本研究の最終目標は、イネの収量ポテンシャル向上のための品種開発や栽培技術開発の基盤を構築することである。その達成のため、また上述の学術的「問い」に対する答えを得るために、

- (1) 遺伝・分子生物学的手法により *GPS7* と *MP3* の原因遺伝子を特定する
- (2) (1)で得られたゲノム情報を基に、育種学的手法により「タカナリ」背景で *GPS7* と *MP3* を集積させた系統の育成や国内外の多収品種に導入した系統を育成する
- (3) (2)で育成した系統を栽培試験に供試し、その収量ポテンシャルを評価する

を研究の目的とした。

3. 研究の方法

(1) これまでに *GPS7* および *MP3* の候補領域をそれぞれ 154kb と 899kb に絞り込んでいたが、更なる絞り込みに向けて、同領域内で組換えが起こり「タカナリ」型と「コシヒカリ」型に固定した系統を複数作成した。これら組換え固定系統を用いて、茨城県つくば市に位置する国際農林水産業研究センター(以下、国際農研)の水田圃場にて、上述の組換え固定系統を3列ずつ栽培した。*MP3* については、成熟期に中央の列の個体について穂数を計測し、「タカナリ」型と「コシヒカリ」型間で穂数の有意差を解析することで、マップベースクローニングにより候補領域を絞り込んだ。*GPS7* については、光合成・蒸散測定装置(LI-6400)を用いて組換え固定系統の個葉光合成速度の測定を生殖生長期に行い、*MP3* と同様の手法で候補領域を絞り込んだ。

絞り込んだ *GPS7* および *MP3* の候補遺伝子について、相補性検定のための形質転換体やCRISPR-Cas9によるノックアウト変異体等を作成し、個葉光合成速度および穂数の変化から原因遺伝子を見極めた。また、*MP3* については、さまざまな品種のゲノム配列を参照し、ハプロタイプの分化について解析し、*MP3* が利用可能な品種群を見極めた。

(2) 「NIL-*MP3*」と「NIL-*GPS7*」の交配を進め、 F_2 集団から *GPS7*、*MP3* とともに「コシヒカリ」型に固定した集積系統の選抜を試みた。また、国内最多収記録をもつインド型多収品種「北陸193号」および熱帯多収品種「IR64」背景でも戻し交配を進め、*MP3* が付与された準同質遺伝子系統の選抜を試みた。

(3) 国際農研の水田圃場にて、(2)で育成した系統を栽培試験に供試した。生育期間中に個葉光合成速度や分けつ発生などを調査し、*GPS7* および *MP3* の各遺伝背景での効果を見極めた。成熟期に収量調査を行い、それぞれの系統の収量ポテンシャルを親品種と比較解析した。

4. 研究成果

(1) マップベーススクローニングの結果、MP3の候補領域を第3染色体長腕の48.5kbの領域に絞り込んだ(図1a)。この領域にはトウモロコシの栽培化遺伝子である*TB1*のオースログである*OsTB1/FC1*という既知の遺伝子が1つ存在していた。*OsTB1/FC1*の「タカナリ」と「コシヒカリ」の配列を解析したところ、5'UTR、遺伝子コード領域、3'UTRの3ヶ所に多型が存在した(図1b)。「タカナリ」型*OsTB1/FC1*のゲノムDNAを「NIL-MP3」に導入して形質転換体を作成したところ、形質転換体「#1-6」「#1-8」ともに「NIL-MP3」およびベクターコントロール「Null3」よりも穂数が有意に減少し相補した(図1c, d)。以上より、MP3の原因遺伝子は*OsTB1/FC1*であると判断した。

「タカナリ」と「コシヒカリ」間のMP3の3ヶ所の多型を用いて、国際稲研究所のRice SNP-Seek Databaseに登録されている1,974品種についてHaplotype解析したところ、温帯ジャポニカの70%以上はHap2に分類される「コシヒカリ」型であり、インディカの50%以上はHap7に分類される「タカナリ」型であった(図2)。

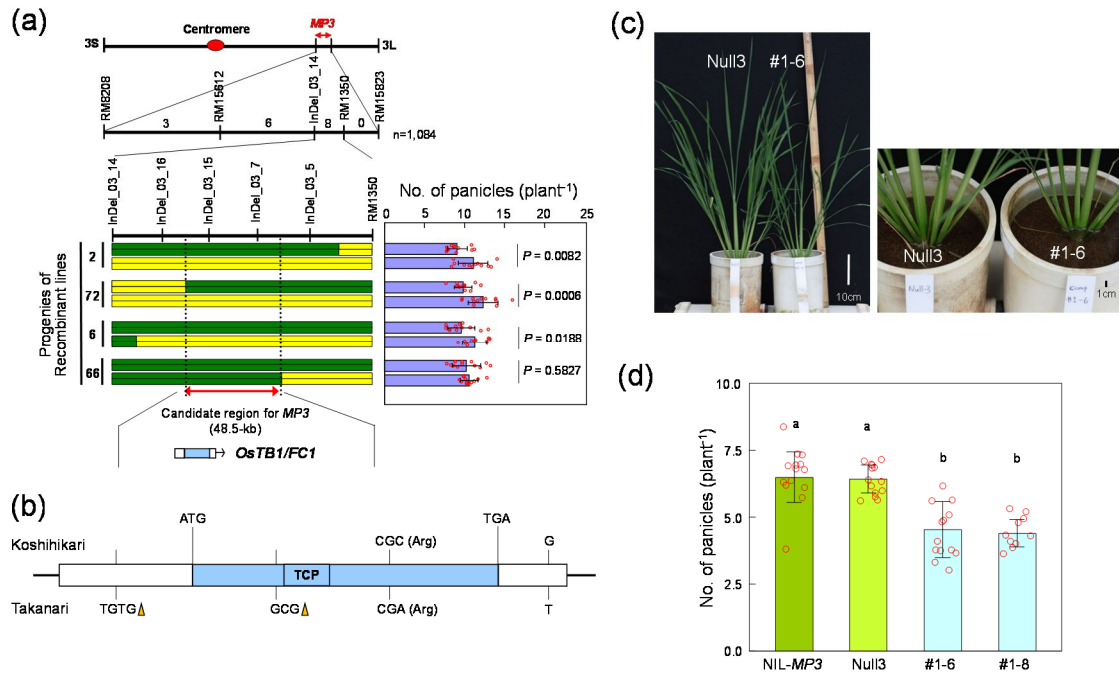


図1. MP3の原因遺伝子の特定。(a)マップベーススクローニング (b)*OsTB1/FC1* 遺伝子の「コシヒカリ」「タカナリ」間の多型 (c)ベクターコントロール「Null3」および形質転換体「#1-6」の草型 (d)「NIL-MP3」「Null3」「#1-6」および「#1-8」間の穂数の比較。異なるアルファベットはTukey検定で有意に穂数が異なることを示す。

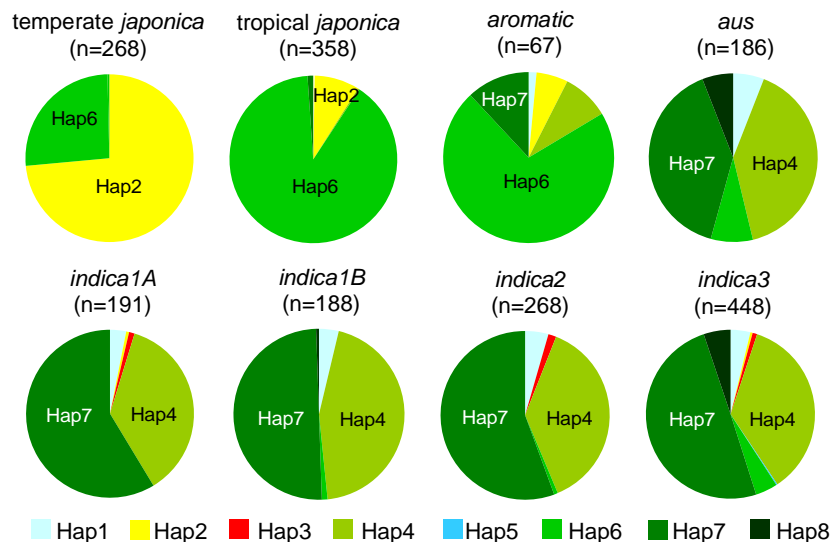


図2. 「タカナリ」と「コシヒカリ」間のMP3の3ヶ所の多型による、イネ1,974品種のハプロタイプ解析。

*MP3*と同様に *GPS7*のマップベースクローニングを進めた結果、候補領域を第7染色体長腕の21.7kbに絞り込んだ(図3a)。この領域には遺伝子が1つ(*ORF1*)が予測されていた。この候補遺伝子について、「日本晴」背景でノックアウト個体「KO」および過剰発現体「OX」を育成し調査した結果、「KO」は「日本晴」よりも個葉光合成速度(A)が有意に低下し、「OX」は日本晴よりも有意に増加した(図3b)。以上より、*GPS7*の原因遺伝子は *ORF1*であると判断した。

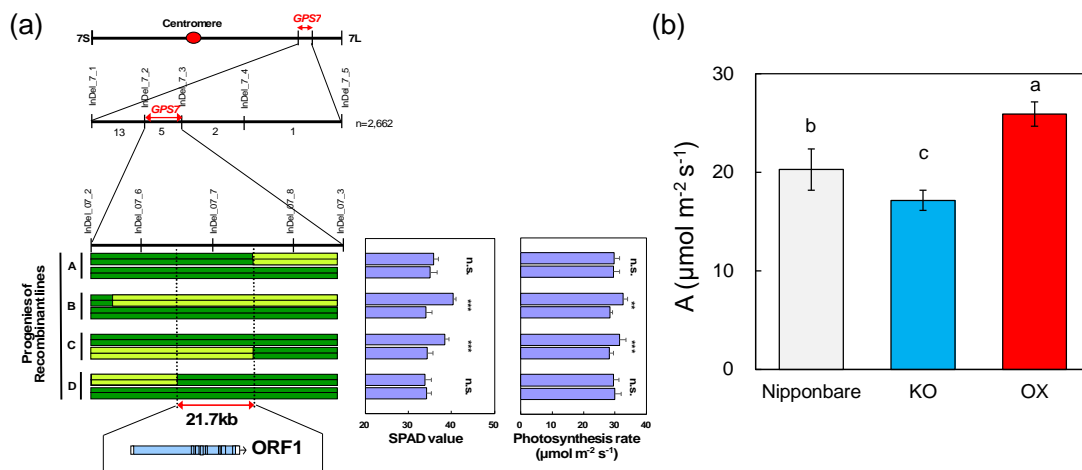


図3. *GPS7*の原因遺伝子の特定。(a)マップベースクローニング (b)「日本晴」「ノックアウト個体, KO」および「過剰発現体, OX」における個葉光合成速度(A)の比較。異なるアルファベットは Tukey 検定で有意に A が異なることを示す。

(2) 「NIL-*MP3*」と「NIL-*GPS7*」の交配により、集積系統「NIL-*MP3+GPS7*」を育成した(図4)。また、ハプロタイプ解析により「コシヒカリ」型 *MP3* は多くのインディカ品種に利用できることが示唆されたため「北陸 193 号」背景および「IR64」背景に *MP3* が付与された「北陸 193 号-*MP3*」および「IR64-*MP3*」を育成した。

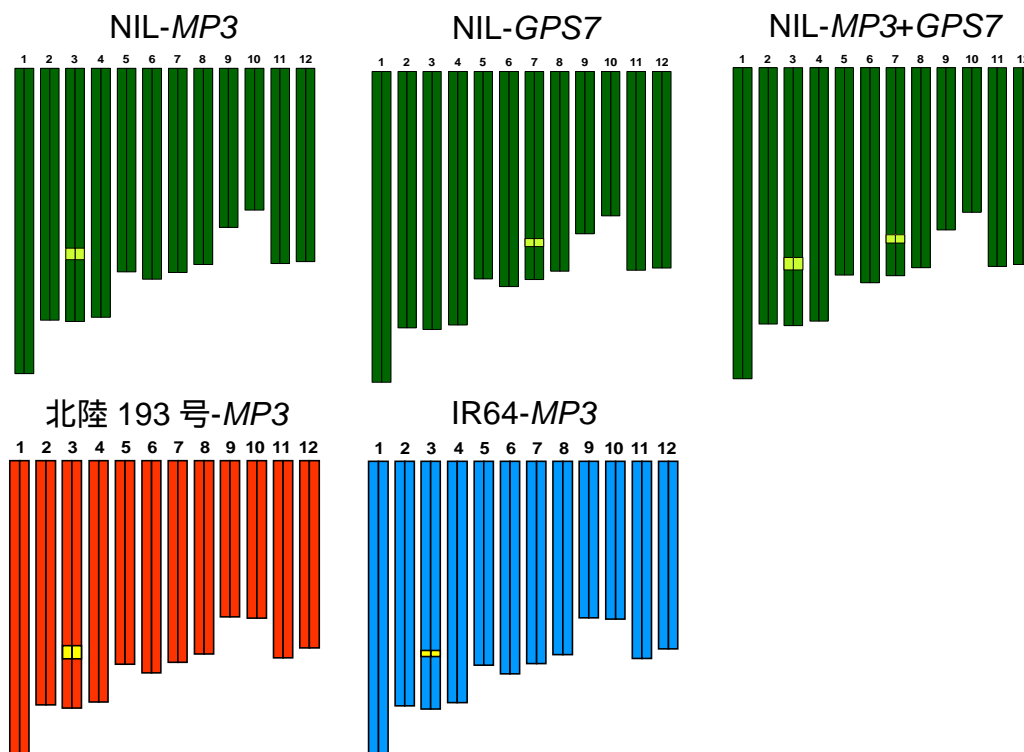


図4. *MP3* および *GPS7* について育成した準同質遺伝子系統

(3) *MP3* と *GPS7* を集積させた「NIL-*MP3+GPS7*」は個葉光合成速度 (A) および穂数ともに「タカナリ」に比較して有意に増加することを確認した (図 5a, b)。しかしながら、収量は「タカナリ」と同程度であった。このことは、「タカナリ」背景で *MP3* によって増加させたシンクに対して、*GPS7* によって炭水化物を十分に供給できていないことを示唆した。一方で、「北陸 193 号-*MP3*」は「北陸 193 号」よりも有意に 7% 増収することを確認した。このことは、「北陸 193 号」はソース能に余力があり、*MP3* によって増加したシンクに炭水化物を十分に供給できたことを示唆した。今後は、「北陸 193 号」の高いソース能に関与する遺伝要因を解明することも重要であると考えられた。

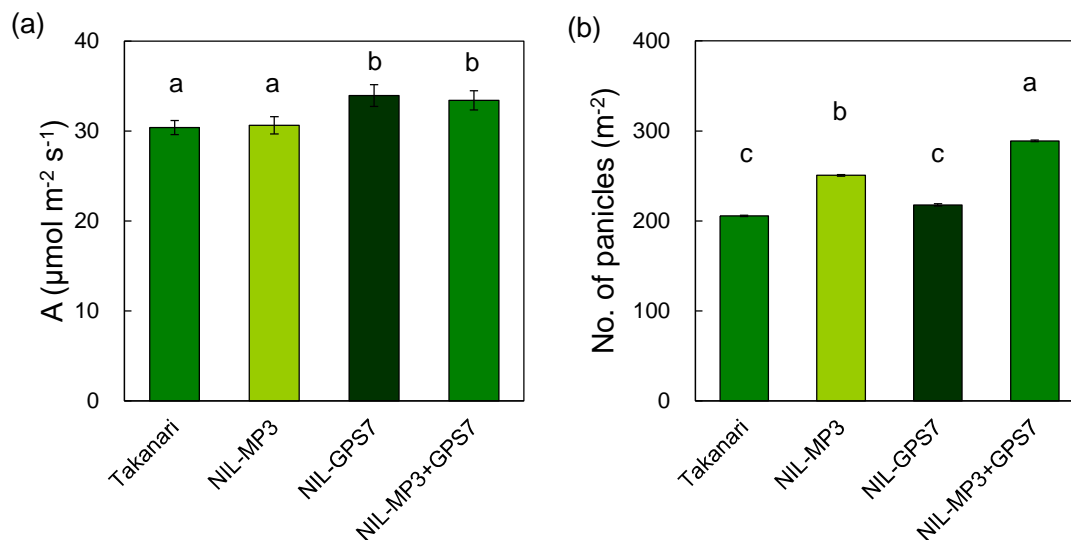


図 5. 「タカナリ」, 「NIL-*MP3*」, 「NIL-*GPS7*」および集積系統「NIL-*MP3+GPS7*」の個葉光合成速度 (A) および穂数の比較。異なるアルファベットは Tukey 検定で有意に A および穂数が異なることを示す。

<引用文献>

- Takai T, Yano M, Yamamoto T. 2010. Canopy temperature on clear and cloudy days can be used to estimate varietal differences in stomatal conductance in rice. *Field Crops Research* 115, 165-170.
- Yoshinaga S, Takai T, Arai-Sanoh Y, Ishimaru T, Kondo M. 2013. Varietal differences in sink production and grain-filling ability in recently developed high-yielding rice (*Oryza sativa* L.) varieties in Japan. *Field Crops Research* 150, 74-82.
- Takai T, Lumanglas P, Simon EV, Arai-Sanoh Y, Asai H, Kobayashi N. 2019. Identifying key traits in high-yielding rice cultivars for adaptability to both temperate and tropical environments. *The Crop Journal* 7, 685-693.
- Takai T, Ikka T, Kondo K, Nonoue Y, Ono N, Arai-Sanoh Y, Yoshinaga S, Nakano H, Yano M, Kondo M, Yamamoto T. 2014. Genetic mechanisms underlying yield potential in the rice high-yielding cultivar Takanari, based on reciprocal chromosome segment substitution lines. *BMC Plant Biology* 14, 295.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Takai T, Taniguchi Y, Takahashi M, Nagasaki H, Yamamoto E, Hirose S, Hara N, Akashi Hi, Ito J, Arai Sanoh Y, Hori K, Fukuoka S, Sakai H, Tokida T, Usui Y, Nakamura H, Kawamura K, Asai H, Ishizaki T, Maruyama K, Mochida K, Kobayashi N, Kondo M, Tsuji H, Tsujimoto Y, Hasegawa T, Uga Y	4. 巻 114
2. 論文標題 MORE PANICLES 3, a natural allele of OsTB1/FC1, impacts rice yield in paddy fields at elevated CO2 levels	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Plant Journal	6. 最初と最後の頁 729 ~ 742
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/tpj.16143	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Takai Toshiyuki	4. 巻 75
2. 論文標題 Potential of rice tillering for sustainable food production	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Experimental Botany	6. 最初と最後の頁 708 ~ 720
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/jxb/erad422	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 高井俊之・谷口洋二郎・高橋徳・長崎英樹・山本英司・廣瀬咲子・原奈穂・赤司裕子・井藤純・荒井（三王）裕見子・堀清純・福岡修一・酒井英光・常田岳志・白井靖浩・中村浩史・川村健介・浅井英利・石崎琢磨・圓山恭之進・持田恵一・小林伸哉・近藤始彦・辻寛之・辻本泰弘・長谷川利紘・宇賀優作
2. 発表標題 気候変動下でのイネの理想草型形成と増収に寄与する「コシヒカリ」由来の遺伝子MP3の単離
3. 学会等名 日本育種学会第145回講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 高井俊之・谷口洋二郎・高橋徳・長崎英樹・山本英司・廣瀬咲子・原奈穂・赤司裕子・井藤純・荒井（三王）裕見子・堀清純・福岡修一・酒井英光・常田岳志・白井靖浩・中村浩史・川村健介・浅井英利・石崎琢磨・圓山恭之進・持田恵一・小林伸哉・近藤始彦・辻寛之・辻本泰弘・長谷川利紘・宇賀優作
2. 発表標題 イネ品種「コシヒカリ」由来で穂数を増加させるMP3は高CO2環境下で多収品種「タカナリ」を増収させる
3. 学会等名 日本作物学会第257回講演会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

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
<https://www.jircas.go.jp/ja/release/2022/press202225>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	吉田 均 (Yoshida Hitoshi) (30355565)	国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・生物機能利用研究部門・研究領域長 (82111)	
研究分担者	黒羽 剛 (Kuroha Takeshi) (50415155)	国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・生物機能利用研究部門・上級研究員 (82111)	
研究分担者	谷口 洋二郎 (Taniguchi Yojiro) (50462560)	国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・作物研究部門・上級研究員 (82111)	
研究分担者	大井 崇生 (Oi Takao) (60752219)	名古屋大学・生命農学研究科・助教 (13901)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------