

平成 30 年 6 月 20 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H04442

研究課題名(和文) 台風に強い多収イネ品種開発のための強稈・多収遺伝子の集積効果とその発現機構の解明

研究課題名(英文) Pyramiding effects of high-yielding and strong-culm genes and their mechanisms for developing high-yielding rice varieties with a superior resistance to typhoon

研究代表者

大川 泰一郎(Ookawa, Taiichiro)

東京農工大学・(連合)農学研究科(研究院)・教授

研究者番号：80213643

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,800,000円

研究成果の概要(和文)：イネの強稈遺伝子の集積効果とその機構を解明するため、コシヒカリの準同質遺伝子系統NIL-SCM1, SCM2, SCM3, SCM4を育成し、すべての組合せの二、三、四集積系統を育成した。四集積系統NIL-SCM1+SCM2+SCM3+SCM4は、すべての組合せの中で最も稈外径が大きく、稈強度が大きかった。強稈遺伝子の集積によって、多面発現的に集積が増すほど1穂粒数は増加した。SCM1を含む系統はとくに集積効果が大きく、その要因には皮層繊維組織が厚く発達することによっていた。これらのことから、倒伏抵抗性の多収品種の改良には優良な強稈遺伝子の特定とその集積の組合せが重要であることが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：To evaluate the pyramiding effects of strong culm genes in rice, SCM1~SCM4 on lodging resistance, NIL-SCM1, SCM2, SCM3 and SCM4 were developed. Then, we developed the pyramiding lines with double, triple and quadruple combinations derived from NIL-SCM1~NIL-SCM4. Quadruple pyramiding lines (NIL-SCM1+2+3+4) showed the largest culm diameter and the highest culm strength among the combinations, and increased spikelet number due to the pleiotropic effects of these genes. Pyramiding of strong culm genes resulted in increased culm thickness, culm strength and spikelet number due to their pleiotropic effect. SCM1 mainly contributed to enhance their pyramiding effect due to the development of cortical fiber tissue in the surrounded region of culm. These results in this study suggest the importance of identifying the combinations of superior alleles of strong culm genes among natural variation and pyramiding these genes for improving high-yielding varieties.

研究分野：作物学

キーワード：水稻 倒伏抵抗性 強稈遺伝子 集積効果 量的形質遺伝子座 多収性

### 1. 研究開始当初の背景

これまで水稻多収品種の改良は、半矮性遺伝子 *sd1* を利用した短稈化により倒伏抵抗性を高め、収穫指数の向上により成し遂げられてきた。単位面積当たり収量の増加は、収穫指数の増加だけでは限界があり、バイオマス生産量の増加により収量増加を達成しなければならない。今後の水稻の品種改良の方向のひとつとして、バイオマス生産能力を低下させる半矮性遺伝子を利用した品種改良の方向だけでなく、長稈品種等を利用し、強稈化により倒伏抵抗性を高め、収量の高い品種を育成することが重要となる。しかしながら、国内外において在来の長稈品種は倒伏しやすいため、短稈化する方向で育種されてきた。その結果、強稈化する方向での多収品種の改良は、国内外においてイネではほとんど行われてこなかった。*sd1* は短稈化のみで稈を細くする負の影響があり (Ookawa et al., 2010)、最近の台風の大規模化によって改良された半矮性多収品種の倒伏が東南アジアをはじめ国内外で問題となっており、さらにスーパー台風などの発生が頻発する将来においては、多収品種の倒伏抵抗性の飛躍的な向上が課題となっている。

大型化する台風に耐える倒伏抵抗性極強のイネ多収品種を開発するためには、収量の増加とともに太稈や強稈質による強稈性の付与による倒伏抵抗性の向上が不可欠となる。強稈性関連遺伝子では、これまで稈の太さや稈質に関わる突然変異体が見つかり、細稈遺伝子 (*fine culm1* など) (Minakuchi et al., *Plant Cell Physiol.*, 2010) が報告されているが、実用的な太稈遺伝子の報告はない。強稈性は複数の遺伝子が関与する量的形質であり (大川ら 1997)、関与する遺伝子の特定が困難であったが、最近では、イネゲノム情報を利用した農業重要形質の量的形質遺伝子座 (QTL) 解析が進み、染色体上の QTL が特定できるようになり、強稈性に関わる原因遺伝子の同定が可能な状況となっている。

これまで染色体断片置換系統 (CSSLs) や戻し交雑自殖系統 (BILs) を用いた QTL 解析から、たわみ型、挫折型倒伏抵抗性に関わる断面二次モーメントおよび断面係数を増加させる QTL として、八バタキに由来する *SCM1* (第 1 染色体)、*SCM2* (第 6 染色体)、中国 117 号に由来する *SCM3* (第 3 染色体)、*SCM4* (第 2 染色体) を特定している。このうち *SCM1* の領域は *Gn1a* を含むこと、*SCM2* の原因遺伝子は成長点での細胞分裂活性を高め、稈を太くするとともに穂の穎花数を増加させ収量ポテンシャルを高める多面発現遺伝子 *AP01* であること、*SCM3* の原因遺伝子はストリゴラクトンのシグナル伝達に関与する *FC1* であることを解明した (Ookawa et al., *Nat. Commun.*, 2010, Yano et al., 2015 *Mol. Plant*)。自然変異の中に優良な対立遺伝子として複数存在するこれらの強稈・多収の

多面発現性遺伝子をマーカー選抜によって複数 1 つの品種に集積することによって、効率的に収量ポテンシャルと倒伏抵抗性の飛躍的な向上が可能と考えられる。

### 2. 研究の目的

本研究では、倒伏抵抗性極強の超多収品種を開発するため、八バタキに由来する強稈遺伝子 *SCM1* (第 1 染色体)、*SCM2* (第 6 染色体)、強稈品種リーフスターの親である中国 117 号由来の *SCM3* (第 3 染色体)、*SCM4* (第 2 染色体) のコシヒカリ準同質遺伝子系統 (NIL) を用いて、マーカー選抜によりコシヒカリの遺伝背景に集積し、すべての組み合わせの 2 集積系統、3 集積系統、4 集積系統を作成し、その強稈形質への集積効果、組み合わせとその発現機構、および収量関連形質への多面的な効果を解明することを目的とした。

### 3. 研究の方法

強稈遺伝子 *SCM1*、*SCM2*、*SCM3*、*SCM4* のコシヒカリ背景の NIL を用いて、マーカー選抜により 2 集積系統 (*SCM1+2*, *SCM1+3*, *SCM1+4*, *SCM2+3*, *SCM2+4*, *SCM3+4*)、3 集積系統 (*SCM1+2+3*, *SCM1+2+4*, *SCM1+3+4*, *SCM2+3+4*)、4 集積系統 (*SCM1+2+3+4*) を作成した。本学農学部附属広域都市圏フィールドサイエンス教育研究センター FM 本町水田 (多摩川沖積土壌) に 22. 2 株/m<sup>2</sup> (30cm×15cm)、1 株 1 本植の 3 反復で 5 月 26 日に移植した。肥料は基肥として化成肥料 N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O 各成分で 5kg, 6kg, 6kg/10a を施用した。出穂 15 日後に材料試験機テンシロン (RTG1210, エアードディ社) を用い、主稈の第 1 節間中央部の挫折時モーメントとヤング率を測定した。断面二次モーメントと断面係数は稈外径および内径から算出し、曲げ剛性は断面二次モーメントとヤング率の積より、また稈の挫折時モーメントを断面係数で除して曲げ応力を求めた。株のたわみ型および挫折型倒伏抵抗性評価のための人工台風試験では、株を掘りとり根元を固定し、シャワー付き大型ファンで風速 15m/s の暴風雨を再現し、湾曲角度および挫折茎数の測定を行った。皮層繊維組織の厚さは稈の切片をフロログルシン塩酸でリグニン染色後、光学顕微鏡で観察、測定を行った。

### 4. 研究成果

(1) 強稈形質の集積効果とその組み合わせ八バタキの *SCM1*、*SCM2* と中国 117 号の *SCM3*、*SCM4* を組み合わせ、稈を太くする集積効果の高い組み合わせを検討するため、すでに育成した 2 つの太稈 QTL の集積系統を選抜・育成し、3 つの太稈 QTL の集積、さらに 4 つの太稈 QTL の集積を選抜・育成し、挫折型およびたわみ型倒伏抵抗性に関わる強稈形質の集積効果とその組み合わせに

について解析を行った。

挫折型倒伏抵抗性に関わる断面係数は四集積系統、三集積系統、二集積系統、単独NIL、コシヒカリの順で大きく、集積の効果が認められた。四集積系統のSCM1+2+3+4の断面係数はコシヒカリの約1.8倍に増加した。曲げ応力は集積により減少し、その結果、断面係数と曲げ応力の積である程の挫折時モーメントは集積により増加し、SCM1+2+3+4はコシヒカリに比べて約1.3倍に増加した。

たわみ型倒伏抵抗性に関わる断面2次モーメントは四集積系統、三集積系統、二集積系統、単独NIL、コシヒカリの順で大きく、集積効果がありSCM1+2+3+4はコシヒカリの約2.2倍と著しく増加した(図1)。ヤング率は集積により増加し、その結果、断面2次モーメントとヤング率の積である曲げ剛性は集積により著しく増加し、SCM1+2+3+4はコシヒカリに比べて約2.7倍に増加した。

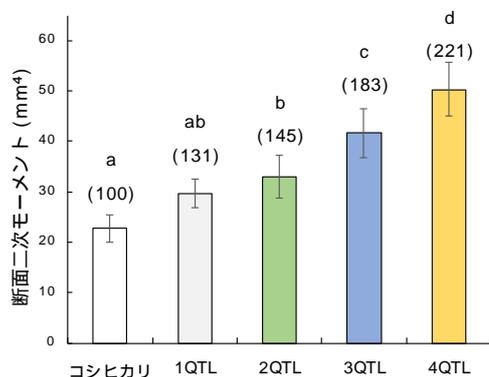


図1 断面二次モーメントの集積効果

ハバタキ由来のSCM1、SCM2に中国117号のSCM3、あるいはSCM4を集積すると、断面係数は増加し、両方を集積するとさらに断面係数は増加した。一方、中国117号由来のSCM3、SCM4にハバタキのSCM1、あるいはSCM2を集積しても断面係数は増加し、両方を集積するとさらに増加し、断面2次モーメントにも同様の集積効果があり、他品種に由来するQTLを多く集積することにより、断面係数、断面2次モーメントが増加することを確認した。

強稈遺伝子の集積効果はとくにSCM1を含む系統で大きく、重回帰分析により、SCM1~SCM4のいずれが集積効果への貢献度が大きいかわかる結果、SCM1、SCM3の貢献度が高く、とくにSCM1の貢献が大きかった。その要因を系統した結果、SCM1を含む系統では、稈外径が大きくなると同時に皮層繊維組織が厚く発達し強稈質となること、細胞数が多くなることに関係していた。このことから、Gn1aを含むSCM1では、稈の柔細胞の細胞分裂による外径の拡大に加えて、稈

外周部の機械組織である皮層繊維組織の細胞分裂により、ヤング率が大きくなり、集積効果に貢献することが明らかとなった。

## (2) 集積系統の倒伏抵抗性の評価

台風ジェネレーターによる倒伏抵抗性の評価から、人工台風試験で倒伏抵抗性を評価した結果、コシヒカリはたわみ型および挫折型倒伏する一方で、4集積系統のSCM1+2+3+4は湾曲角度が小さく、倒伏が抑えられた。四集積系統はコシヒカリより挫折型、たわみ型倒伏抵抗性が強化されていることを確認した。

## (3) 強稈遺伝子の集積が収量関連形質に及ぼす効果

SCM1~SCM4の集積が収量関連形質に及ぼす効果を検討した。その結果、収量関連形質では、集積数が増加するほど1穂穎花数が増加し、SCM1+2+3+4はコシヒカリに比べ、2次枝梗数および2次枝梗穎花数の増加により1穂穎数は163と約1.7倍に増加した。一方で1m²あたり穂数、登熟歩合が小さかったため、コシヒカリと同程度の収量であった。

以上、本研究の結果から、強稈品種ハバタキおよび中国117号に由来するSCM1~SCM4の4つのQTLのすべての組み合わせを用いて断面係数、断面2次モーメントへの集積効果と倒伏抵抗性への効果を検討した結果、多く集積するほど断面係数および断面2次モーメントは増加し、ヤング率への多面的効果によって曲げ剛性が増加し、挫折型倒伏抵抗性、とくにたわみ型倒伏抵抗性が強化させること、稈の外径と皮層繊維組織厚への効果により、SCM1との組み合わせがとくに効果が高いこと、が明らかとなった。さらに、強稈遺伝子の集積によってとくに2次枝梗数の増加により、1穂穎数が増加し、多面的な効果があることが明らかとなった。

## 5. 主な発表論文等

(雑誌論文)(計4件)

1. Mulsanti, IW, Yamamoto, Ueda, Samadi AF, Kamahora E, Rumanti IA, Thanh VC, Adachi S, Suzuki S, Kanekatsu M, Hirasawa T and Ookawa T, Finding the superior allele of japonica-type for increasing stem lodging resistance in indica rice varieties using chromosome segment substitution lines 査読有 *Rice* 2018, <https://doi.org/10.1186/s12284-018-0216-3>
2. Ookawa T, Aoba R, Yamamoto T, Ueda T, Takai T, Fukuoka S, Ando T, Adachi S, Matsuoka M, Ebitani T, Kato Y, Mulsanti IW, Kishii M, Reynolds M, Piñera F, Kotake T, Kawasaki S, Motobayashi T, Hirasawa T, Precise

- estimation of genome regions controlling lodging resistance using a set of reciprocal chromosome segment substitution lines in rice. 査読有, *Scientific Reports* 2016, 6: 30572. doi:10.1038/srep30572
3. Yano K, Ookawa T, Aya K, Ochiai Y, Hirasawa T, Ebitani T, Takarada T, Yano M, Yamamoto T, Fukuoka S, Wu J, Ando T, Ordonio RL, Hirano K and Matsuoka M, Isolation of a novel lodging resistance QTL gene involved in strigolactone signaling and its pyramiding with a QTL gene involved in another mechanism, 査読有, *Molecular Plant* 2015, 8: 303-314. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2014.10.009>
  4. Taguchi-Shiobara F, Ota T, Eban K, Ookawa T, Yamasaki M, Tanabata T, Yamanouchi U, Wu J, Ono N, Nonoue Y, Nagata K, Fukuoka S, Hirabayashi H, Yamamoto T and Yano M, Natural variation in the flag leaf morphology of rice due to a mutation of the *NARROW LEAF 1* gene in *Oryza sativa* L., 査読有, *Genetics* 2015, doi: 10.1534/genetics.115.181040.
- [学会発表](計 13 件)
1. 荒川直也, 野村知宏, 山本敏央, 上田忠正, 米丸淳一, 阿部陽, 安達俊輔, 平沢正, 大川泰一郎, 水稲の強稈・多収関連形質の量的形質遺伝子座解析 極太稈系統 LTAT-29 とタカナリの組換え自殖系統群を用いて, 日本作物学会第 245 回講演会, 2018 年 3 月 30 日.
  2. 野村知宏, 山本敏央, 上田忠正, 米丸淳一, 阿部陽, 高木宏樹, 安達俊輔, 平沢正, 大川泰一郎, 水稲の収量および倒伏抵抗性関連形質の量的形質遺伝子座解析 極多着粒・極強稈系統 LTAT-29 とタカナリの F<sub>2</sub> 分離集団を用いて, 日本育種学会第 132 回講演会, 2017 年 10 月 7 日.
  3. Mulsanti, I., Yamamoto, T., Ueda, T., Samadi, A., Adachi, S., Hirasawa, T. and Ookawa, T., Estimation of the quantitative trait loci associated with breaking and bending types lodging resistance in rice using chromosome segment substitution lines derived from a cross between Takanari and Koshihikari, 第 9 回アジア作物学会議, 2017 年 6 月 6 日.
  4. Nomura, T., Yamamoto, T., Ueda, T., Yonemaru, J., Abe, A., Adachi, S., Hirasawa, T. and Ookawa, T. Analysis on the quantitative trait loci for the strong-culm and yield associated traits in rice, using F<sub>2</sub> populations derived from a cross between the super thick-culm and super grain-bearing line LTAT-29 and Takanari, 第 9 回アジア作物学会議, 2017 年 6 月 6 日.
  5. Ookawa, T., Kamahora, E., Ebitani, T., Yamaguchi, T., Murata, K., Iyama, Y., Ozaki, H. and Adachi, S., Development of the pyramiding lines with strong culm genes derived from crosses among the SCM near isogenic lines in rice, 第 9 回アジア作物学会議, 2017 年 6 月 6 日.
  6. Samadi, A., Yamamoto, T., Ueda, T., Adachi, S., Hirasawa, T. and Ookawa, T., Identification of the quantitative trait loci for breaking and bending types lodging resistance in rice, using recombinant inbred lines derived from Koshihikari and a Strong culm variety, Leaf Star, 第 9 回アジア作物学会議, 2017 年 6 月 6 日.
  7. 釜洞 瑛里, 蛭谷 武志, 伊山 幸秀, 松岡 信, 矢野 憲司, 安達 俊輔, 平沢 正, 大川 泰一郎, 異なる水稲品種に由来する強稈遺伝子の組合せが強稈関連形質の集積効果に及ぼす影響, 日本作物学会第 243 回講演会, 2017 年 3 月 30 日.
  8. 野村 知宏, 山本 敏央, 上田 忠正, 米丸 淳一, 阿部 陽, 高木 宏樹, 安達 俊輔, 平沢 正, 大川 泰一郎, 水稲の強稈および収量関連形質の量的形質遺伝子座解析, 日本作物学会第 243 回講演会, 2017 年 3 月 30 日.
  9. 大川 泰一郎, 水稲稈の構造的, 非構造的炭水化物蓄積に関わる量的形質遺伝子座を同定し, 多用途稲品種の改良に適用する, 日本作物学会第 243 回講演会, 2017 年 3 月 30 日.
  10. 神山 遼, 山本 敏央, 上田 忠正, 福岡 修一, 安藤 露, 平沢 正, 安達 俊輔, 大川 泰一郎, 水稲の強稈質に関わる皮層繊維組織を厚くする量的形質遺伝子座の特定 - タカナリを遺伝背景とするコシヒカリ第 2, 9 染色体の組換え固定系統を用いて -, 日本作物学会第 241 回講演会, 2016 年 3 月 28 日.
  11. Indria Wahyu Mulsanti, 山本 敏央, 上田 忠正, 田原 佳奈子, 安達 俊輔, 平沢 正, 大川 泰一郎, タカナリを遺伝背景とするコシヒカリの染色体断片置換系統における挫折型およびたわみ型倒伏抵抗性に関わる量的形質遺伝子座の特定, 日本作物学会第 241 回講演会, 2016 年 3 月 28 日.
  12. Ahmad Fahim Samadi, 上田 忠正, 山本 敏央, 安達 俊輔, 平沢 正, 大川 泰一郎, 水稲の倒伏抵抗性に関与する強稈関連形質の量的形質遺伝子座の特定 - リーフスターとコシヒカリの組換え自殖系統を用いて -, 日本作物学会第 241 回講演会, 2016 年 3 月 28 日.

13.吉村 大, 蛭谷 武志, 伊山 幸秀, 平沢 正,  
安達 俊輔, 大川 泰一郎, 水稲の強稈およ  
び収量関連形質に関わる量的形質遺伝子  
座のコシヒカリへの集積効果, 日本作物  
学会第 241 回講演会, 2016 年 3 月 29 日.

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.tuat.ac.jp/~crop/>

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

大川 泰一郎 (OOKAWA TAIICHIRO)

東京農工大学・大学院農学研究院・教授

研究者番号：80213643

### (2)研究分担者

平沢 正 (HIRASAWA TADASHI)

東京農工大学・大学院農学研究院・名誉教授

研究者番号：30015119