

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：12605

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25660014

研究課題名(和文) 倒伏抵抗性極強の水稻品種開発のための極強稈性の生理機構の解明

研究課題名(英文) Physiological mechanism on the strong-culm for developing superior lodging resistant rice varieties

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)・准教授

研究者番号：80213643

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：食用、飼料、バイオ燃料用の水稻品種の開発では、バイオマス生産量の増加と倒伏抵抗性の改良が主要な育種目標となる。リーフスターは太稈で断面係数が大きく、強稈質で曲げ応力が大きいため、稈基部の挫折強度が大きい特性をもつ。本研究では、リーフスターとその両親である中国117号とコシヒカリを用いて、強稈性の原因となる形質を解析した。その結果、リーフスターは稈基部節間のセルロース、ヘミセルロース密度が稈質が弱く曲げ応力が小さい中国117号より大きいこと、コシヒカリに由来する稈の皮層繊維組織が厚い特性と皮層繊維細胞の2次壁肥厚がよい特性をもつことを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：When developing new rice varieties for human food, feed and biofuel, the main goals are to enhance biomass production and lodging resistance. Among the improved varieties, Leaf Star has the highest bending moment at the basal culm at breaking because of its large section modulus, which is an indicator of culm thickness and higher bending stress, and thus, culm stiffness. Thus, Leaf Star has superior resistance to lodging because of its combination of culm thickness and culm stiffness. In this study, we investigated which traits are responsible for strong culm strength using strong-culm variety Leaf Star and its parents. The densities of both cellulose and hemicellulose in Leaf Star were higher than those in Chugoku 117. The cortical fiber tissue in the basal internode was thicker in Leaf Star than in Chugoku 117. The secondary walls of the cortical fiber cells of Leaf Star and Koshihikari were well-developed, whereas many hollow cortical fiber cells were observed in Chugoku 117.

研究分野：作物学

キーワード：水稻 倒伏抵抗性 強稈 セルロース ヘミセルロース 皮層繊維組織 リーフスター

## 1. 研究開始当初の背景

米粉など食用、飼料米、バイオ燃料用の子実多収水稻品種、ホールクロップサイレージ用の発酵粗飼料用品種では、重い穂および地上部バイオマスを支えるための倒伏抵抗性、すなわち極強稈性の品種を開発する必要がある。コシヒカリをはじめとするわが国のジャポニカ的水稻品種はいずれも稈が細いが、折れにくさを表す曲げ応力が大きい稈質を備えている。一方で、インディカ的水稻品種や熱帯ジャポニカ品種は稈は太いが、曲げ応力は小さく折れやすい稈質を持つ品種がほとんどである。多くの品種の中で、稈の太さと稈質の間には負の相関関係があり、トレードオフによって両形質によって決定される挫折強度が著しく大きい品種はほとんど育成されてこなかった。また、水稻では多肥条件で倒れにくい品種を育成するため、*sd1* など半矮性遺伝子を利用した結果、国内外においてほとんどが短稈品種となり、強稈性に関わる形質に関する研究、強稈遺伝子を利用した品種改良はほとんど行われてこなかった。水稻の強稈性を向上するにあたって、太稈性と強稈質を併せ持つ形質への改良が重要な課題となっている(Ookawa et al., Nature Communications 2010)。

飼料用水稻品種の改良では、植物体全体を利用するホールクロップサイレージ用水稻品種が育成され、長稈品種を利用してバイオマス生産量の高い品種が開発されるようになっている。これらのタイプの新品種は、飼料用の他、バイオ燃料用品種としても期待されている。このような品種では、長く重い地上部を支えるための倒伏抵抗性を高めることが不可欠となる。これまで、水稻長稈品種に不可欠な倒伏抵抗性に関わる性質について研究を行い、コシヒカリに比べて稈基部の挫折強度が約3倍と著しく大きい強稈性の長稈品種リーフスターを農研機構・作物研究所と共同で開発した(Ookawa et al., Plant Prod. Sci.2010)。この強稈性を導入することにより高いバイオマスをもつ地上部を支えることが可能となった。リーフスターは稈の太さを表す断面係数が大きく、かつ曲げ応力が大きく折れにくい強稈質を備えることによって強稈性を示す品種であり、このことから太稈性と強稈質をあわせもつことによって強稈化することは可能であり、強稈質に関わる稈の組織構造、構成成分の生理生化学的性質を解明し、稈の太さとのトレードオフを打破することによって効率的な品種開発に適用できると考えた。

## 2. 研究の目的

食用、飼料用、バイオ燃料用高収量、高バイオマス品種の開発において、地上部全体の大きなバイオマスを支える倒伏抵抗性の向上には強稈性の改良が重要な研究課題となる。強稈性には太稈性と強稈質に関わるが、一般に稈を太くすると稈質がもろくなる関

係があり、そのことが強稈性の改良を困難にしている。本研究では、これまで困難であった太稈性と強稈質を集積し水稻品種の強稈性を効率的に改良するため、これまでにほとんど解明されていない強稈性に関わる稈質を支配する生理的要因、太稈性と強稈質のトレードオフの要因を明らかにし、極強稈品種より作出した太稈性および強稈質の準同質遺伝子系統およびそれらの形質の集積系統を用いて、トレードオフを打破した2形質集積による飛躍的な極強稈化とその要因を解明することを目的とする。

## 3. 研究の方法

水稻の強稈性を高める太稈性および強稈質の両形質を高める稈の構造的形質、皮層繊維組織の細胞分裂など形態形成に関わる形質、セルロース、ヘミセルロース、リグニンなど細胞壁の構成成分に関わる形質を解明するため、強稈質に関わる曲げ応力に相違のある品種・系統、太稈で曲げ応力に相違がある極強稈性をもつ品種および準同質遺伝子系統を用いて、(1)強稈性を高める強稈質に関わる皮層繊維組織の構造的特性、(2)節間伸長期の皮層繊維組織の細胞分裂特性、(3)セルロース、ヘミセルロース、リグニンなど細胞壁構成成分に関わる性質を比較検討し、倒伏抵抗性品種を効率的に育成するための太稈性と強稈質を併せもつ品種の備えるべき性質を解明する。

## 4. 研究成果

(1)強稈性の大きく異なる品種を用いて、太稈、強稈質関連形質の品種間差を検討した。稈の挫折時モーメントはリーフスターがコシヒカリ、中国117号より大きかった。その要因を太稈性に関わる断面係数と強稈質に関わる曲げ応力の2つのパラメーターに分解して比較した。リーフスターはコシヒカリより断面係数が大きく、一方、タカナリ、中国117号と断面係数には相違がなかったが、曲げ応力が小さかった。断面係数を構成する外短径、稈壁の厚さについてみると、リーフスターは稈壁の厚さはコシヒカリと同様であったが、外短径はコシヒカリより大きかった。リーフスターは曲げ応力の小さい中国117号に比べて皮層繊維組織が厚かった。リーフスターは他の品種に比べて、セルロース、ヘミセルロースなどの細胞壁成分が多く蓄積する特徴があった。

(2)皮層繊維組織の発達程度を皮層繊維組織細胞層数と皮層繊維細胞長から検討した結果、曲げ応力の大きいリーフスターはコシヒカリと同様、曲げ応力の小さい中国117号に比べて、皮層繊維細胞長には相違がなかったが、皮層繊維細胞層数が多かった。これらのことから、曲げ応力が大きいリーフスターは皮層繊維細胞層が厚く発達し稈に細胞壁成分が多く蓄積する特徴をもつことが明らかになった。

(3) さらに、皮層繊維細胞の2次壁の肥厚を比較した結果、リーフスターは中国117号と比べて、皮層繊維細胞の細胞壁の2次成長がよく、細胞壁が厚く肥厚する性質をもつことがわかった。一方、曲げ応力の小さい中国117号では、皮層繊維細胞の2次壁の肥厚が悪く、中が空洞化する細胞が多くみられ、稈の脆さの原因となっていることがわかった。また、セルロース、ヘミセルロース密度が著しく高く、皮層繊維細胞のほか、柔組織細胞の細胞壁にも多く集積することが明らかになった。

これらの結果から、強稈質のリーフスターは親の中国117号と比べて皮層繊維組織が厚く発達し、皮層繊維細胞の細胞壁の2次成長がよく、細胞壁が厚く肥厚する性質をもつことがわかった。一方、稈質の弱い中国117号では、皮層繊維細胞の2次壁の肥厚が悪く、中が空洞化する細胞が多くみられ、稈の脆さの原因となっていることがわかった。また、リーフスターはセルロース、ヘミセルロース密度が著しく高く、皮層繊維組織のほか、柔組織細胞の細胞壁にも多く集積することが明らかになった。

(5) リーフスターのヘミセルロース含有率および密度を高める対立遺伝子は第5染色体にあり、コシヒカリの遺伝背景にリーフスターの第5染色体全域の断片をもつ組換え固定系統は、リーフスターと同様にヘミセルロース含有率、および密度が高い性質をもつことが明らかとなった。

本研究の結果から、リーフスターのもつ太稈遺伝子と強稈質遺伝子をコシヒカリに集積することにより、両者のトレードオフを打破し、強稈性の改良が可能となることがわかった。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計6件)

1. Yano, K, T.Ookawa, K.Aya, Y.Ochiai, T.Hirasawa, T.Ebitani, T.Takarada, M.Yano, T.Yamamoto, S.Fukuoka, J. Wu, T.Ando, R. L. Ordonio, K. Hirano, and M.Matsuoka, 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*, Vol.8,2015, pp303-314.  
doi: 10.1016/j.molp.2014.10.009
2. T.Ookawa, K.Inoue, M.Matsuoka, T.Ebitani, T.Takarada, T.Yamamoto, T.Ueda, T.Yokoyama, C.Sugiyama, S. Nakaba, R.Funada, H.Kato, M. Kanekatsu, K.Toyoda, T.Motobayashi, M. Vazirzanjani, S.Tojo and T.Hirasawa, Increased lodging resistance in long-culm, low-lignin *gh2* rice for

improved feed and bioenergy production, 査読有, *Scientific Reports*, Vol.4, 2014, pp6567

doi: 10.1038/srep06567

3. Adachi, S., L. Z. Baptista, T. Sueyoshi, K. Murata, T. Yamamoto, T. Ebitani, T. Ookawa, T.Hirasawa, Introgression of two chromosome regions for leaf photosynthesis from an indica rice into the genetic background of a japonica rice, 査読有, *Journal of Experimental Botany*, Vol.65, 2014, pp2049-2056.  
doi:10.1093/jxb/eru047
4. Adachi, S., T.Nakae, M.Uchida, K. Soda, T.Takai, T.Oi, T.Yamamoto, T. Ookawa, H.Miyake, M.Yano and T.Hirasawa, The mesophyll anatomy enhancing CO2 diffusion is a key trait for improving rice photosynthesis. *Journal of Experimental Botany*. 査読有, Vol. 64, No.4, 2013, pp1061 - 1072  
doi:10.1093/jxb/ers382
5. Takai, T., S.Adachi, F.Taguchi-Shiobara, Y.Sanoh-Arai, N. Iwasawa, S. Yoshinaga, S.Hirose, Y.Taniguchi, U. Yamanouchi, J. Wu, T. Matsumoto, K.Sugimoto, K.Kondo, T. Ikka, T.Ando, I.Kono, S.Ito, A. Shomura, T.Ookawa, T.Hirasawa, M.Yano, Motohiko Kondo and T.Yamamoto, A natural variant of *NAL1*, selected in high-yield rice breeding programs, pleiotropically increases photosynthesis rate, *Scientific Reports*, 査読有 Vol.3, 2013, pp2149  
doi: 10.1038/srep02149

[学会発表](計11件)

1. 小林俊也・山本敏央・平沢正・大川泰一郎、水稻における半矮性遺伝子 *sd1* が強稈性および収量に及ぼす影響 - タカナリとコシヒカリの正逆 NILs-SD1 を用いて - , 日本作物学会第238回講演会, 2015年3月27日, 日本大学(神奈川県藤沢市)
2. 鈴木浩貴・松木美紗・山本敏央・上田忠正・平沢正・大川泰一郎、水稻の強稈性に関与する太稈、強稈質関連形質の量的形質遺伝子座解析 - 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238回講演会, 2015年3月27日, 日本大学(神奈川県藤沢市)
3. 山本一洋・山本敏央・上田忠正・平沢正・大川泰一郎、水稻における強稈関連形質の量的形質遺伝子座の特定とその作用機作, 日本作物学会第238回講演会, 2015年3月27日, 日本大学(神奈川県藤沢市)
4. Kobayashi, T., R.Aoba, T.Yamamoto, T. Takai, C. Sugiyama, K.Yamamoto, T. Hattori, M.Vazirzanjani, T.Hirasawa, T. Ookawa, Analysis of QTLs for strong

- culm traits using reciprocal chromosome segment substitution lines derived from a cross between rice varieties Koshihikari and Takanari. 8th Asian Crop Science Association Conference, Hanoi, Vietnam, 23-25 September, 2014.
5. K.Yamamoto, T.Yamamoto, C.Sugiyama, T. Hirasawa, T.Ookawa, T.Kobayashi, T. Ebitani, T.Yamamoto, T.Hirasawa, Estimation of quantitative trait loci associated with lodging resistance using a set of reciprocal chromosome segment substitution lines derived from crosses between rice varieties Koshihikari and Takanari. 8th Asian Crop Science Association Conference, Hanoi, Vietnam, 23-25 September, 2014.
  6. T.Ookawa, New approach for improving the lodging resistance in rice using superior alleles of strong culm genes in natural variants. 8th Asian Crop Science Association Conference, Hanoi, Vietnam 23-25 September, 2014.
  7. 青羽遼・山本敏央・平沢正・大川泰一郎, コシヒカリ/タカナリ染色体断片置換系統群を用いた水稻の強稈性に関する量的形質遺伝子座の推定, 日本作物学会第237回講演会, 2014年03月29日, 千葉大学(千葉県千葉市)
  8. 古田 岳・伊山幸秀・蛭谷武志・丸山甲晃・平沢 正・大川 泰一郎, 水稻における倒伏抵抗性に関する第3染色体の強稈形質遺伝子座の機能, 日本作物学会第237回講演会, 2014年03月29日, 千葉大学(千葉県千葉市)
  9. Yamamoto, K., T.Yamamoto, C. Sugiyama, T.Hirasawa and T.Ookawa, Estimation of the locus for the traits associated with a strong culm, using reciprocal chromosome segment substitution lines derived from the cross between rice varieties, Koshihikari and Takanari. The 7th Rice Genetics Symposium. Manilla, Phillipines, 5-7 November, 2013.
  10. 山本一洋・山本敏央・上田忠正・杉山知里・岡庭侑香・平沢正・大川泰一郎, 水稻の倒伏抵抗性を高める強稈関連形質の遺伝子座の推定 コシヒカリとタカナリの正逆染色体断片置換系統群を用いて, 日本作物学会第236回講演会, 2013年9月10日, 鹿児島大学(鹿児島県鹿児島市)
  11. 丸山甲晃・伊山幸秀・蛭谷武志・小林俊也・平沢正・大川泰一郎, 水稻品種コシヒカリを遺伝背景とする強稈関連量的形質遺伝子座の集積, 日本育種学会第124回講演会, 2013年10月13日, 鹿児島大学(鹿児島県鹿児島市)

〔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・准教授  
研究者番号：80213643