

令和 2 年 5 月 26 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (海外学術調査)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H04615

研究課題名(和文) 北米干ばつ地帯におけるフィールド調査に基づく耐乾燥性エネルギー作物の開発

研究課題名(英文) Development of drought tolerant energy crops based on field researches in the North American arid areas

研究代表者

山田 敏彦 (YAMADA, Toshihiko)

北海道大学・北方生物圏フィールド科学センター・教授

研究者番号：70343952

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,300,000円

研究成果の概要(和文)：バイオ燃料など再生可能エネルギー原料として注目のススキ属など非可食用エネルギー作物は、干ばつなどが発生しやすい耕作限界農地で栽培が求められる。日米の2地点で、ススキ属系統を供試し、耐乾性評価を行うとともに光合成能特性関連形質を計測した。乾燥耐性に優れる系統は日米両試験でほぼ一致し、長江 秦嶺山脈地域から収集されたススキ「PMS-285」は、乾燥耐性に優れ、干ばつ条件でも比較的高い光合成能力を示した。また、ミスケーン(ススキ属とサトウキビとの雑種)について、乾燥耐性と関連がある低温時での光合成能力が両親の中間であり、サトウキビの不良環境適応性の付与にススキ属の寄与が期待でき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

今後予想される地球での人口増加や温暖化の対応策の一つとして、バイオマス利用による再生可能エネルギー確保は重要な取組である。非可食用エネルギー作物はその一つの原料であり、その安定生産が求められている。食料との競争を避けるために、エネルギー作物は限界農地で栽培されることを考えると、干ばつや低温など環境ストレス耐性に優れる品種を開発することが鍵となる。今回の一連の研究で、エネルギー作物としてのススキ属における耐乾燥性に優れる材料を同定することができた。また、エネルギー作物としても重要なサトウキビにススキ属を交配することにより、環境ストレス耐性を有するサトウキビ品種を開発できる可能性を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Non-food energy crops such as *Miscanthus* spp. have been taken attention as one of feedstocks for renewable energy such as biofuels. They are required to be cultivated in marginal agriculture lands where environmental stresses such as droughts occur. At the two sites in Japan and the United States, we evaluated the drought tolerance and measured photosynthetic characteristics using various strains of *Miscanthus* spp. Genotypes with excellent drought tolerance were almost consistent in both sites experiments, and *Miscanthus sinensis* "PMS-285" from the Yangtze-Qinling Mountains region showed excellent drought tolerance and high photosynthetic ability even in drought condition. In addition, regarding Miscane (hybrids between *Miscanthus* and sugarcane), the photosynthetic ability at low temperature, which is related to drought tolerance, is intermediate between both parents. This finding reveals that *Miscanthus* could contribute to improve environmental adaptability of sugarcane.

研究分野：植物資源開発学

キーワード：バイオ燃料作物 乾燥耐性 低温耐性 遺伝資源 光合成形質 ススキ サトウキビ ミスケーン

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

地球上の人口は増加の一途を辿り、数十年後には 100 億人に達すると予想され、開発途上国であるアジア・アフリカ諸国では、さらなる人口増加が見込まれる。一方で、活発な人間活動に伴い、二酸化炭素、メタン、および一酸化二窒素の温室効果ガスが大気中に大量に放出され、「地球温暖化」は今日における危急な問題である。その大きな影響の一つとして、地球各地で干ばつ等の異常気象が多発している。地球上の人口増加や地球温暖化・気象変動が進行する中で、バイオマス資源から食料やエネルギーを安定的に確保することは、人類生存の基盤として必須である。近年、バイオ燃料など再生可能エネルギーを確保するという観点から、非可食用エネルギー作物を農耕地で栽培することが注目されている。食料との競合を避ける意味で、エネルギー作物を栽培する場合、干ばつ等が発生しやすいような環境条件の悪い耕作限界農地に栽培されることが想定される。そのため、耐乾性等エネルギー作物を開発することは、非常に重要な研究課題として位置づけられる。

2. 研究の目的

アメリカ合衆国およびヨーロッパ諸国において、わが国在来種であるイネ科 C_4 植物のススキ属 (*Miscanthus* spp.) は、非可食用エネルギー作物として期待されている。特に、ススキ (*Miscanthus sinensis*) とオギ (*Miscanthus sacchariflorus*) との雑種であるジャイアントミスカンサス (*Miscanthus x giganteus*) は、高いバイオマス生産性を示し、窒素やリン等の効率的な養分循環のために低施肥栽培や耕作限界農地での栽培が可能である。欧米ではジャイアントミスカンサスの商業栽培も始まっているが、干ばつには必ずしも耐性ではないことが指摘されている。そこで、ススキ属植物における耐乾性を評価する手法を開発するとともに、ススキおよびオギの遺伝資源集団から、耐乾性等に優れた遺伝子型を選抜することを目的とする。また、サトウキビ品種 (*Saccharum* spp. hybrid) はススキ属植物と交雑が可能であり、ススキ属が有する環境ストレス耐性形質を付与するための基礎的な知見を得る。さらに、アメリカ大陸に自生し耐乾性に優れたアガベ (リュウゼツラン) (*Agave* spp.) から有用な遺伝資源を選抜する。本研究は日本の国際共同研究として実施する。

3. 研究の方法

- (1) 研究代表者らはこれまでの国際共同研究の中で、中国、韓国および日本などから収集されたススキ属 (*Miscanthus* spp.) 集団の遺伝構造を同定した (Clark et al. 2014, 2018)。約 1,500 遺伝資源に関して、Restriction Site-Associated DNA Sequencing (RAD-seq) による SNPs 約 3 万 5 千個と GoldenGate SNPs 約 500 個の DNA マーカー等を取得し、多型解析を行った。その遺伝構造解析の結果に基づき、地域性を考慮にいれ、選定したススキ属コア集団としての 60 系統を供試した。日本 (北海道大学) およびアメリカ合衆国 (ブリガムヤング大学) において、耐乾性に関する評価試験を行うとともに光合成能特性関連形質の計測を行った。
- (2) ススキ属植物で高バイオマスを示すススキ「塩塚」およびオギ「都城」のそれぞれの系統とサトウキビ育成系統との間で、属間交雑を行い作出された雑種 (ミスケーン) を用いて、光合成能特性関連形質等を計測した。
- (3) 北米に自生しているアガベの野生系統を北米の乾燥地で収集を行った。

4. 研究成果

(1) ススキ属耐乾性評価法の確立:

アメリカ合衆国ブリガムヤング大学の Stewart 教授と共同で、図 1 に示すような、土壌センサーと電磁弁制御によるススキ属植物における耐乾性評価手法を確立した。この方法で、土壌水分を正確に計測しながら、土壌水分を減らすことが可能になった。本手法は耐乾性機構の生理学的解析等に有用な手法であると考えている。Liu et al. (2015) の手法に準じて、干ばつストレス指数 (DSI) と DSI 値による主成分分析 (PCA) により遺伝子型における耐乾性の順位付けを行った。

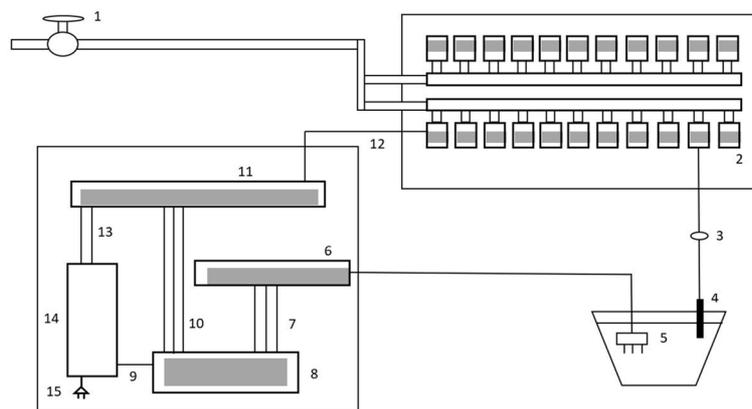


図 1. 土壌センサーと電磁弁制御による耐乾性評価システム

(1) 水源; (2) 電磁弁; (3) ウッドピッカーエミッター; (4) ドリップエミッター; (5) 土壌水分センサー; (6) 熱電対マルチプレクサ; (7) CR6 データロガーとマルチプレクサ間の接続ワイヤー; (8) CR6 データロガー; (9) CR6 データロガーへの電源供給; (10) CR6 データロガーと SDM 16 AC / DC リレーコントローラ間の接続ワイヤー; (11) SDM-CD16AC 16チャンネル AC / DC リレーコントローラ; (12) 電磁弁への電源供給; (13) SDM 16 AC / DC リレーコントローラへの電源; (14) PS150 バッテリー、上記の図は 1ポットの例。

この方法で、土壌水分を正確に計測しながら、土壌水分を減らすことが可能になった。本手法は耐乾性機構の生理学的解析等に有用な手法であると考えている。Liu et al. (2015) の手法に準じて、干ばつ

(2) 日米耐乾性評価試験の比較：

北大で実施した土壌センサーと電磁弁制御による耐乾性評価手法とアメリカのプリガムヤング大学での耐乾性評価試験を比較した。光合成関連形質についての DSI 値でみると相関係数は 0.52 であり、中程度の相関関係であった。

(3) 耐乾性ススキ系統：

長江 秦嶺山脈地域から収集されたススキ「PMS-285」は、日米での両試験における乾燥土壌条件で、DSI 値に基づく耐乾性に関して他の遺伝系統との比較で優れ（図 2）、干ばつ条件でも比較的高い光合成能力を示した。長江 秦嶺山脈地域の他の系統についても耐乾性に優れる系統があり、今後、耐乾性育種を進めるにあたり、当該地域の遺伝資源は育種素材として有用であると示唆された。

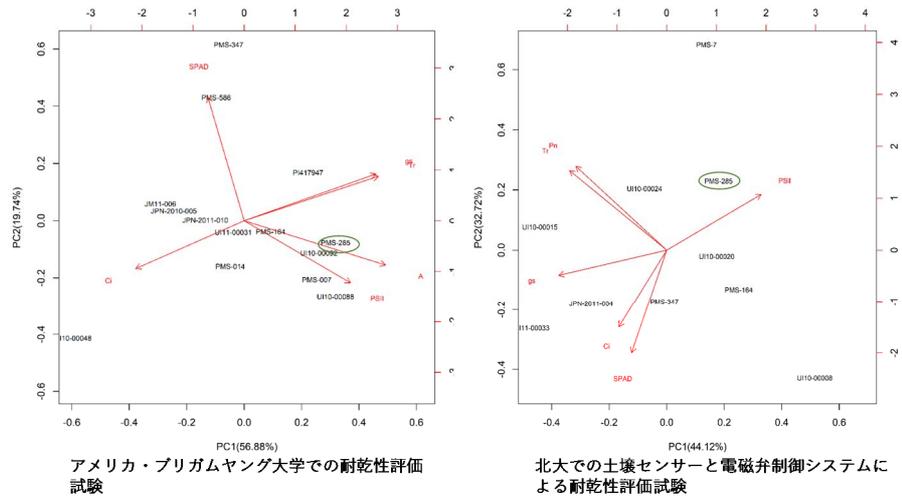


図 2. ススキ属植物における干ばつ条件での光合成能特性関連形質の DSI 値に基づく主成分分析バイプロット

光合成速度 (Pn)、気孔コンダクタンス (gs)、蒸散速度 (Tr)、細胞間CO₂濃度 (Ci)、クロロフィル含有量 (SPAD値) (SPAD)、クロロフィル 蛍光 (PSII)

(4) ススキ属における耐乾性：

全体として、ススキはオギより耐乾性に優れていた。オギについては、中国原産の二倍体のオギが日本で広く分布している四倍体のオギより耐乾性に優れていた。耐乾性に優れるジャイアントミスカンサスの開発には、耐乾性に優れる二倍体オギとススキとの交雑することが必要であることが、本研究から示唆された。

表 1. ミスケーン18系統およびサトウキビとススキ親品種個体における低温処理による CO₂吸収量 (μmol m⁻²s⁻¹) の変化

		22-25 / 13-15		12-13 / 7-9	12-13 / 7-9
		昼/夜 対照区	一週間処理区	昼/夜 一週間処理区	二週間処理区
ミスケーン	Max.	29.6	15.1	13.4	
	Min.	18.1	7.4	6.4	
	Avg.	23.0	11.6	9.1	
サトウキビ	Avg.	29.5	8.0	5.8	
ススキ	Avg.	20.7	14.6	13.5	

(5) ミスケーンにおける環境ストレス耐性：

ミスケーン植物体 (ススキおよびオギとサトウキビとの雑種植物体) について、耐乾性と関連のある低温時での光合成能力に関する各種パラメーターを計測したところ、雑種個体は両親であるススキ属とサトウキビの中間であり、サトウキビへの低温環境適応性の付与にススキ属由来遺伝子が寄与できることが期待できた。

(6) アガベ遺伝資源

北米ユタ州の乾燥地から合計で 10 点のアガベ遺伝資源系統をプリガムヤング大学と北大とで共同収集した。プリガムヤング大学で特性調査を実施中である。北限の材料であるので、低温耐性を付与しているので、有用な育種素材として期待される。

< 引用文献 >

Clark L V, Brummer J E, Glowacka K, Hall M, Heo K, Long SP, Peng J, Yamada T, Yoo JH, Yu CY, Zhao H, Sacks EJ. A footprint of past global climate change on the population genetic structure of *Miscanthus sinensis*. *Annals of Botany*, 141, 97-107 (2014)

Clark L, Jin X, Petersen K, Anzoua K, Bagmet L, Chebukin P, Deuter M, Dzyubenko E, Dzyubenko N, Heo K, Johnson D, Jørgensen U, Kjeldsen J, Nagano H, Peng J, Sabitov A, Yamada T, Yoo JH, Yu CY, Long S, Sacks E. 2018. Population structure of *Miscanthus sacchariflorus* reveals two major polyploidization events, tetraploid-mediated unidirectional introgression from diploid *M. sinensis*, and diversity centered around the Yellow Sea. *Annals of Botany*, mcy161 (2018)

Liu Y, Zhang X, Tran H, Shan L, Kim J, Childs K, Ervin EH, Frazier T, Zhao B. Assessment of drought tolerance of 49 switchgrass (*Panicum virgatum*) genotypes using physiological and morphological parameters. *Biotechnology for Biofuels*, 8, 152 (2015)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Kar Suraj, Zhang Na, Nakashima Taiken, Villanueva Morales Antonio, Stewart J. Ryan, Sacks Erik J., Terajima Yoshifumi, Yamada Toshihiko	4. 巻 11
2. 論文標題 Saccharum × Miscanthus intergeneric hybrids (miscanes) exhibit greater chilling tolerance of C4 photosynthesis and postchilling recovery than sugarcane (Saccharum spp. hybrids)	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 GCB Bioenergy	6. 最初と最後の頁 1318 ~ 1333
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/gcbb.12632	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 該当する
1. 著者名 Kar Suraj, Weng Tzu-Ya, Nakashima Taiken, Villanueva-Morales Antonio, Stewart J. Ryan, Sacks Erik J., Terajima Yoshifumi, Yamada Toshihiko	4. 巻 13
2. 論文標題 Field performance of Saccharum × Miscanthus intergeneric hybrids (Miscanes) under cool climatic conditions of northern Japan	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 BioEnergy Research	6. 最初と最後の頁 132 ~ 146
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s12155-019-10066-x	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Clark Lindsay V., Dwiyantri Maria S., Anzoua Kossonou G., Brummer Joe E., Ghimire Bimal Kumar, Glowacka Katarzyna, Hall Megan, Heo Kweon, Jin Xiaoli, Lipka Alexander E., Peng Junhua, Yamada Toshihiko, Yoo Ji Hye, Yu Chang Yeon, Zhao Hua, Long Stephen P., Sacks Erik J.	4. 巻 11
2. 論文標題 Biomass yield in a genetically diverse Miscanthus sinensis germplasm panel evaluated at five locations revealed individuals with exceptional potential	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 GCB Bioenergy	6. 最初と最後の頁 1125 ~ 1145
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/gcbb.12606	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 該当する
1. 著者名 Clark Lindsay V., Dwiyantri Maria S., Anzoua Kossonou G., Brummer Joe E., Ghimire Bimal Kumar, Glowacka Katarzyna, Hall Megan, Heo Kweon, Jin Xiaoli, Lipka Alexander E., Peng Junhua, Yamada Toshihiko, Yoo Ji Hye, Yu Chang Yeon, Zhao Hua, Long Stephen P., Sacks Erik J.	4. 巻 11
2. 論文標題 Genome wide association and genomic prediction for biomass yield in a genetically diverse Miscanthus sinensis germplasm panel phenotyped at five locations in Asia and North America	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 GCB Bioenergy	6. 最初と最後の頁 988 ~ 1007
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/gcbb.12620	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 該当する

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Yamada T
2. 発表標題 Saccharum × Miscanthus intergeneric hybrids (Miscanes) show low temperature stress tolerance
3. 学会等名 Plant & Animal Genome XVIII, San Diego, USA (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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	中島 大賢 (NAKASHIMA Taiken) (70710945)	北海道大学・農学研究院・助教 (10101)	
研究 協力者	スチュワート ジョン ライアン (STEWART John Ryan)	ブリガムヤング大学・教授	
研究 協力者	サックス エリック ジョシュア (SACKS Erik Joshua)	イリノイ大学アーバナ・シャンペーン校・准教授	