



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	バイオマス作物としてのススキ属植物の期待：遺伝資源の評価と優良系統の育成
Author(s)	山田, 敏彦
Citation	農業および園芸, 88(6), 663-667
Issue Date	2013-06-01
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/53696
Type	journal article
File Information	2013_88_6_663.pdf



バイオマス作物としてのススキ属植物の期待 — 遺伝資源の評価と優良系統の育成 —

山田 敏彦*

【キーワード】: バイオリファイナリー, 多年生草本植物, 高バイオマス, 寒冷適応, 持続的生産, 在来種

1. はじめに

今日, 低炭素社会の構築が世界的に求められ, 植物の光合成変換能力を最大限に活かして, バイオエタノール等のバイオ燃料のエネルギーのみならず, より高付加価値の化学品(すなわちバイオベース製品)をバイオマスから創製するバイオリファイナリーの構築は緊急の課題として位置づけられている。これまでバイオエタノールなどはトウモロコシなどの子実を糖化させて製造されてきているが, さらに増加し続ける人口や温室効果ガス削減に寄与する観点から, 食料と競合しない非食用植物を用い, 地球上の限りある農耕地を有効的に利用しながら, 再生可能なバイオマスフィードストック(原料)として工業サイドへ安定して供給することが鍵となる。すなわち, 高生産性で高効率なリファイナリー特性を有するバイオマス作物を計画的に栽培して, 工業原料として安定供給システムを構築すること

が求められる。このような背景の中で, 多年生イネ科植物は再生可能なリグノセルロース系資源として有望である。なかでもススキ属(*Miscanthus* spp.)は, 最も有望なバイオマス作物候補の一つである。著者たちは, 農水省受託プロジェクト研究「地域活性化のためのバイオマス利用技術の開発(地域バイオマスプロ)」で, ススキ属植物の品種開発に関する研究を実施してきたので, 本稿ではその得られた成果を中心に紹介する。

2. ススキ属のバイオマス資源作物としての可能性

ススキ属(*Miscanthus* spp.)は, 北海道～沖縄に広く分布するススキ(*M. sinensis*) (二倍体, $2n=38$) (写真1), オギ(*M. sacchariflorus*) (四倍体, $2n=76$) (写真2) および, 関東～沖縄の暖地に自生するトキワススキ(*M. floridulus*) (二倍体, $2n=38$) が代表的な種である。ススキとオギが自然交雑した三倍体雑種のジャイアントミスカンサス(*M. × giganteus*) (写真3) がバイオマス作物として注目され, 特に欧米で関心が高い。欧州での調査から, ジャイアントミスカンサスは最大 44t/ha/年の高い乾物量の生



写真1 ススキ (*Miscanthus sinensis*)



写真2 オギ (*Miscanthus sacchariflorus*)



写真3 ジャイアントミスカンサス (*Miscanthus × giganteus*)

*北海道大学北方生物圏フィールド科学センター (Toshihiko Yamada)

産が可能である^{8, 9)}。この植物は1935年に欧州へ当初観賞用としてわが国から持ち出され、70年代のオイルショック以降、その優れた生産性が欧州各国で認められた²⁾。ジャイアントミスカンサスは不稔であるため、根茎による栄養繁殖が用いられる。欧州では火力発電用などの燃焼原料に利用されているが、バイオ燃料製造等の原料としても検討されている³⁾、一方、米国では、イリノイ大学が中心になって、石油メジャーBP社が出資したEnergy Biosciences Instituteの研究資金でジャイアントミスカンサスの研究が精力的に行われている。イリノイ州では、最大で61t/ha/年、平均で30t/ha/年の報告がある⁹⁾。札幌でもジャイアントミスカンサスは40t/ha/年の乾物収量を示す(未発表)。ただし、限られた遺伝子型のため、遺伝資源の収集と遺伝変異の拡大、新品種開発が強く求められている。一方、ジャイアントミスカンサスは増殖に費用がかかり、耐寒性に劣ることも指摘されているため、ススキ自体を遺伝改良する戦略も考えられている⁷⁾。著者らは、原料生産費削減という観点から、全国各地で収集したススキ遺伝資源のバイオマス関連特性を評価し、優良個体を選抜して、種子による増殖用ススキの品種を開発する目的で新系統の開発を行っている。

3. ススキ属植物の利点

ススキ属植物が持続的なバイオマス生産に優れているといわれるのは、主に、次の理由からである。

第一に、高い光合成能力が上げられる。ススキ属植物はC₄植物であるため、C₃植物よりバイオマス生産に適する。特に、低温条件では、トウモロコシより光合成能力に優れる¹⁾。25℃/20℃と14℃/11℃(昼/夜)の環境条件で栽培したところ、トウモロコシは低温下では光合成量子収量が80%減少するが、ススキではその減少がみられない¹⁰⁾。暖地では、エリアンサス(*Erianthus* spp.)やネピアグラス(*Pennisetum purpureum* Schumacher)などのイネ科植物が高いバイオマス生産を示すことが知られているが、寒冷地には高バイオマス生産の可能な植物が少ない中で、ススキが目玉されるのはこの点にある。

第二には多年生があげられる。一年生のトウモロコシよりは、環境面とともに栽培コストに有利である。トウモロコシなどの一年生作物のように、毎年

土地を耕起して播種する必要がなく、造成するときに種子を播種して植物体のスタンドが一旦形成できれば、その後は毎年播種することなく、長年にわたって刈取ってバイオマスを利用できる。また、毎年の耕起がないことは、地下部に炭素蓄積(carbon sequestration)を促進する。著者らは、刈取りや野焼きによって千年以上管理されてきた阿蘇山地域のススキが優占する半自然草地における土壌炭素蓄積量および土壌炭素蓄積速度の定量化を行った^{13, 14)}。阿蘇6地点の平均的な土壌炭素蓄積量は232t C/ha(28-417t C/ha)であり、7,300年間の平均的な土壌炭素蓄積速度で32kg C/ha/年に相当していた。34, 50, および100年間の平均的な年土壌炭素蓄積速度は、土壌炭素蓄積速度および土壌炭素の蓄積期間の関係からそれぞれ618, 483, 332kg C/ha/年と定量化することができた。この結果は、ススキを持続的に栽培管理すれば、重要な炭素吸収源になることを示しており、このような炭素蓄積はバイオマス資源作物の重要な役割として評価される。

第三の特徴は、効率的な窒素、リン、カリなどの養分循環である(図1)。ススキ属など多年生イネ科植物のバイオマス生産の持続性は、この点が重要なポイントとなる。すなわち、ススキは、春から夏にかけては地下部の栄養養分を吸収して、光合成によりバイオマス生産を行うが、秋になると地上部の生長が止まり、栄養養分が地下部へ転流する。そのため、冬に刈取りしてバイオマスを系外へ搬出すれば、翌春の再生に必要な栄養養分は地下部に蓄積される。このような養分の循環により、肥料施肥を抑えながら、持続的なバイオマス生産が可能になる。

4. 遺伝資源の収集とその特性評価

わが国はススキ属植物が北海道から沖縄の全国各地の至る所で自生しており、遺伝的多様性の中心地の一つである^{5, 12)}。そこで、北海道大学では全国各地からススキ属植物の遺伝資源を収集し、現在、ススキ700点およびオギ100点を保管するとともに、特性調査を実施している。ススキは多年生植物で、数年のバイオマス評価が必要となるので、ここでは、2007~2011年に実施した試験データを示す。

北海道地域を中心として全国各地から収集したススキ43系統の遺伝資源を2007年に圃場へ移植し、5年間バイオマスの特性調査を行った。その結果、

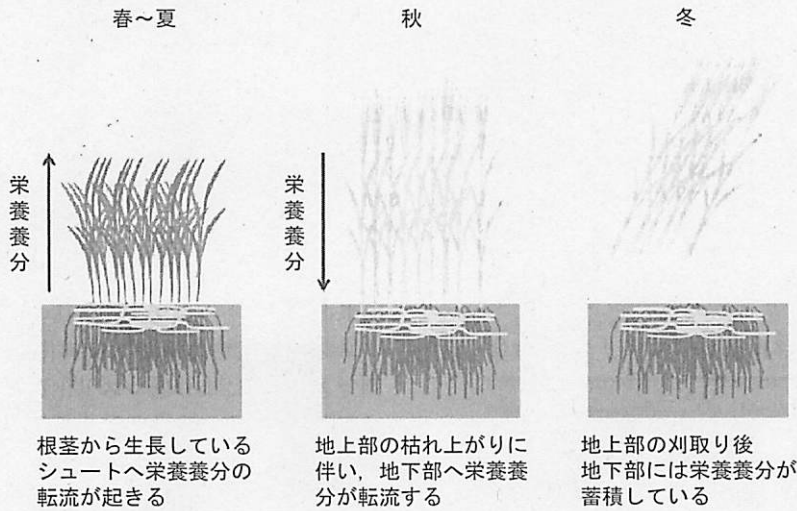


図1 ススキなどの多年生イネ科植物における効率的な栄養分循環とバイオマス利用の概念

ススキには大きな変異が存在することが明らかにしている。バイオマス量について、収集した地域別の系統平均値を表1に示した。ススキは造成初期の生育が緩慢であるが、ほぼ5年目で最大バイオマスを示すことが明らかになった。また、北海道から収集した系統より、本州以南で収集した系統でバイオマス量が多かったが、九州から収集された系統はバイオマス量が少なかった。結論として、系統別にみると本州以南の高標高地から収集されたものに、バイオマス特性に優れるものが多かった。

5. 選抜系統の評価

2008年に、上記の遺伝資源特性評価の利用2年目でバイオマス量が優れていた収集系統「松前」、「盛岡」、「明野」および「塩塚」と別の予備特性試験で優れていた「群馬」について、放任受粉条件下でそ

れぞれ優良個体から種子を採取した。これらの種子について、2009年6月に移植し、無施肥条件で栽培試験を実施し、2カ年にわたりバイオマス量の調査を行った。

表2に2010と2011年度のバイオマス量のデータを示した。「明野」、「塩塚」、「盛岡」の系統において、1ha当たり20tを超えるバイオマス生産を示すことが明らかになった。定着3年以降には30tを超えることが期待できる。山梨県から収集した「明野」、徳島の標高が高い地点で収集された「塩塚」の中で優れた個体間で交雑した系統において、バイオマスの生産性に優れ、今後、品種登録を予定している。これらの系統についてリグニン含量を分析した結果を表3に示す。「塩塚」系統はリグニン含量が低く、エタノール製造原料として有望であることが示唆された。一方、リグニン含量の多い系統は燃焼利

表1 地域別にみた遺伝資源系統のバイオマス量(乾物 g/個体)

年次 地域	乾物収量 (g/個体)			合計
	2009年 (利用3年目)	2010年 (利用4年目)	2011年 (利用5年目)	
道北	1,017	1,744	1,622	4,383
道東	759	1,230	2,467	4,457
道央	1,023	1,902	2,662	5,383
道南	1,062	1,900	2,615	5,577
東北	1,842	5,435	3,149	10,426
関東	1,033	1,764	4,713	7,510
中部	1,650	2,665	3,775	7,461
四国	1,778	2,769	3,293	7,840
九州	683	868	821	2,372

表2 優良ススキ系統における定着2年目(2010)および定着3年目(2011)の乾物収量(t/ha)

系統	2010年			2011年	
	10月25日 収穫	11月26日 収穫	4月22日 収穫	10月10日 収穫	12月10日 収穫
明野	11.2	11.9	8.6	27.8	15.6
群馬	10.7	8.9	8.9	28.3	13.8
松前	11.7	3.3	3.3	17.6	24.5
盛岡	8.1	5.0	3.9	22.9	25.3
塩塚	12.2	5.5	6.3	18.7	23.9

表3 優良ススキ系統におけるリグニン含量

系統	リグニン		
	酸不溶性	酸可溶性	合計
明野	17.13±2.40	1.30±0.16	18.43
群馬	12.96±1.67	1.22±0.08	14.18
松前	21.19±0.57	1.19±0.09	22.38
盛岡	20.31±1.58	1.12±0.11	21.42
塩塚	16.73±2.05	1.13±0.06	17.85

用に使用できると考えられた。バイオマス生産量とともにリグニン成分含有量は重要な形質であり、バイオエタノール原料として考えた場合は、リグニン含量が低いもの、また、ペレットによる直接燃焼を考えた場合はリグニンの含量が高いものがよいとされる。リグニン含量には遺伝資源内に大きな変異があることが明らかになったので、今後、成分育種を実施し、高バイオマス特性を示し、かつ品質の優れた資源作物の開発は重要な戦略として考えられる。北海道大学では、数多くの遺伝資源を保存しているので、今回育成した系統を上回るススキ系統を今後育成することは容易であると考えられる。

ススキの栽培体系では飼料作物の収穫体系が利用でき、これにより低コスト化が図れると期待できるが、さらに実証試験を積み重ねていく必要がある。

6. 育成品種の環境への影響評価

バイオマス作物として育成したススキ品種を大規模に栽培する場合には、各地に自生しているススキ地域個体群との交雑リスクを評価し、交雑回避策を取ることが必要になる。北海道の札幌近郊の自生個体群と新品種候補系統「塩塚」や「明野」との開花期は1ヶ月程度のズレがあることが観察されているので、そのリスクは極めて少ないと考えている(写真4)。しかしながら、各地域個体群の開花期の変動や、別の地域で栽培した場合の開花期の変化について定量的な知見は得られていない。また、交雑が起こった場合、地域個体群にどのような影響が生じるかについての知見は皆無である。そのため、今後、育成品種の栽培利用に当たっては、環境への影響評価も重要になってくる。



写真4 北海道に自生しているススキ系統と新品種候補系統の出穂時期の違い
 左: 北海道苫小牧市在来ススキ: 早生タイプ
 右: 新品種候補「塩塚」: 晩生タイプ
 いずれも平成24年8月31日に北海道大学構内で撮影。

7. 今後の課題

これまで、バイオマス作物としてのススキの品種改良は皆無であったが、豊富な遺伝資源があることから、今後、品種改良できる可能性がこれまでの研究から明らかになった。今後、高バイオマス資源作物開発を考えた場合、ススキとオギの雑種であるジャイアントミスカンサスを開発することがポイントであると考えられる。オギとススキの同所集団からの自然雑種の探索^{4, 11)}や今回遺伝資源収集したススキとオギとの間で人工交配を検討していく必要がある。また、著者らのグループでは、カフェ酸 O-メチルトランスフェラーゼ (シナミルアルコールデヒドロゲナーゼ (CAD), シナモイル-CoA レダクターゼ (CCR), 4-クマル酸: CoA リガーゼ (4CL) の各リグニン生合成酵素遺伝子をススキから単離している (Dwiyanthi ら 未発表)。また、ススキの遺伝子組換え技術開発にも成功している¹⁵⁾。今後、これらの遺伝子の発現解析やメタボローム解析を通じて、リグニン代謝の分子育種に関する研究が進むことにより、リファイナリー特性の遺伝改良が進展するものと期待される。

引用文献

- 1) Beale, C. V. and S. P. Long 1995. Can perennial C4 grasses attain high efficiencies of radiant energy conversion in cool climates? *Plant Cell Env.* 18: 641-650.
- 2) Clifton-Brown, J. C., W. C. Chiang, and T. R. Hodkinson 2008. *Miscanthus* genetic resources and breeding potential to enhance bioenergy production. In: *Genetic Improvement of Bioenergy Crops* (Ed. Vermerris W). Springer Science. New York. pp. 273-294
- 3) Clifton-Brown, S. Renvoize, Y.-C. Chiang, Y. Ibaragi, R. Flavell, J. Greef, L. Huang, T. W. Hsu, D.-S. Kim, A. Hastings, K. Schwarz, P. Stampf, J. Valentine, T. Yamada, Q. Xi, and I. Donnison 2011. Developing *Miscanthus* for Bioenergy. In: *Energy Crops* (Eds. N.G. Halford, A. Karp). Royal Society of Chemistry. Cambridge. pp.301-321.
- 4) Dwiyanthi, M. S., A. Rudolph, K. Swaminathan, A. Nishiwaki, Y. Shiono, S. Kuwabara, H. Matuura, M. Nadi, S. Moose, J. R. Stewart, and T. Yamada 2013a. Genetic analysis of putative triploid *Miscanthus* hybrids and tetraploid *M. sacchariflorus* collected from sympatric populations of Kushima, Japan. *BioEnergy Reseach.* (in press)
- 5) Dwiyanthi, M. S., J. R. Stewart, T. Yamada 2013b. Gemplasm Resources of *Miscanthus* and Their Application in Breeding. In: *Bioenergy Feedstocks: Breeding and Genetics* (Eds. M. C. Saha, H. S. Bhandari, and J. H. Bouton). Wiley-Blackwell. Hoboken. NJ. 49-66.
- 6) Heaton, E. A., F. G. Dohleman, A. F. Miguez, J. A. Juvik, V. Lozovaya, J. M. Widholm, O. A. Zabolina, G. F. McIsaac, M. B. David, T. B. Voigt, N. N. Boersma, and S. P. Long 2010. *Miscanthus*: A Promising Biomass Crop. *Advances in Botanical Research* 56: 75-137
- 7) Jørgensen, U., H. J. Muhs 2001. *Miscanthus* breeding and improvement. In: *Miscanthus for Energy and Fibre* (Eds. M. B. Jones and M. Walsh). James & James. London. pp.68-85.
- 8) Lewandowski, I., J. C. Clifton-Brown, J. M. O. Scurlock, and W. Huisman 2000. *Miscanthus*: European experience with a novel energy crop. *Biomass and Bioenergy* 19: 209-27.
- 9) Lewandowski, I., J. M. O. Scurlock, E. Lindvall, and M. Christou 2003. The development and current status of perennial rhizomatous grasses as energy crops in the US and Europe. *Biomass and Bioenergy* 25: 335-361.
- 10) Naidu, S. L., S. P. Moose, A. K. AL-Shoaibi, C. A. Raines, and S. P. Long 2003. Cold-tolerance of C₄ photosynthesis in *Miscanthus x giganteus*: Adaptation in amounts and sequence of C₄ photosynthetic enzymes. *Plant Physiol.* 132: 1688-1697.
- 11) Nishiwaki, A., A. Mizuguti, S. Kuwabara, Y. Toma, G. Ishigaki, T. Miyashita, T. Yamada, H. Matuura, S. Yamaguchi, A. L. Rayburn, R. Akashi, and J. R. Stewart 2011. Discovery of natural *Miscanthus* (Poaceae) triploid plants in sympatric populations of *Miscanthus sacchariflorus* and *Miscanthus sinensis* in southern Japan. *American Journal of Botany* 98: 154-159.
- 12) Sacks, E. J., J. A. Juvik, Q. Lin, J. R. Stewart, T. Yamada 2013. The gene pool of *Miscanthus* species and its improvement. In: *Genomics of the Saccharinae* (Ed. A. H. Paterson). Springer. New York. pp.73-101.
- 13) Toma, Y., K. Armstrong, J. R. Stewart, T. Yamada, A. Nishiwaki, G. Bollero, and F. G. Fernández 2012. Carbon sequestration in soil in a semi-natural *Miscanthus sinensis* grassland and *Cryptomeria japonica* forest plantation in Aso, Kumamoto, Japan. *Global Change Biology Bioenergy* 4: 566-575.
- 14) Toma, Y., J. Clifton-Brown, S. Sugiyama, M. Nakaboh, R. Hatano, F. G. Fernández, J. R. Stewart, A. Nishiwaki, and T. Yamada 2013. Soil carbon stocks and carbon sequestration rates in semi-natural grassland in Aso region, Kumamoto, southern Japan. *Global Change Biology.* (in press)
- 15) Wang, X., T. Yamada, F.-J. Kong, Y. Abe, Y. Hoshino, H. Sato, T. Takamizo, A. Kanazawa, and T. Yamada 2011. Establishment of an efficient *in vitro* culture and particle bombardment-mediated transformation systems in *Miscanthus sinensis* Anders., a potential bioenergy crop. *Global Change Biology Bioenergy* 3: 322-332.