# エネルギー作物としてのススキ属植物への期待


| | |
|---|---|
| 誌名 | 日本草地学会誌 |
| ISSN | 04475933 |
| 著者名 | 山田,敏彦 |
| 発行元 | 日本草地学会 |
| 巻/号 | 55巻3号 |
| 巻号補足 | |
| 掲載ページ | p. 263-269 |
| 発行年月 | 2009年10月 |



農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council Secretariat

AgriKnowledge

日草誌 55 (3) : 263-269 (2009)

特　集　—新 MIDORI 革命　—夢エネルギーを追う—

# エネルギー作物としてのススキ属植物への期待

山田　敏彦*

北海道大学北方生物圏フィールド科学センター生物資源創成領域（060-0811 北海道札幌市北区北 11 条西 10 丁目）

受付日：2009 年 6 月 29 日/受理日：2009 年 7 月 10 日

キーワード：育種，サスティナビリティー，セルロース系バイオマス，バイオ燃料.

Potentiality of *Miscanthus* spp. as an Energy Crop

Toshihiko Yamada*

Field Science Center for Northern Biosphere, Hokkaido University,
Kita 11, Nishi 10, Kita, Sapporo, Hokkaido 060-0811, Japan

**Key words** : Biofuel, Breeding, Cellulosic biomass, Sustainability.

## 1. はじめに

地球温暖化への対策や化石燃料の枯渇問題などから，サスティナブルな低炭素社会構築を目指し，持続再生可能なエネルギー生産のシステム開発が各方面で注目されている。アメリカ合衆国オバマ大統領のグリーン・ニューディール政策をはじめ，各国でその取り組みが開始されている。植物バイオマス資源からバイオ燃料，特にバイオエタノールを製造する技術もその一つである。アメリカ合衆国ではトウモロコシ子実からバイオエタノールを製造するためのプラント建設が，2000 年以降急激に拡大し，2007 年には 25 百万 kL のエタノールが生産されている（Tyner 2008）。2008 年には穀類の品薄感から，シカゴ商品取引所のトウモロコシ価格がかつてない高値に高騰したことは記憶に新しい。穀類からバイオエタノールを製造することは人の食糧との競合問題を引き起こし，開発途上国では暴動までに発展したことから，バイオ燃料は人類の「救世主」でなく，「悪魔」という声もささやかれた（ボーン Jr 2007）。そのため，食糧との競合を避ける意味で，セルロース系バイオマス資源が，将来の原料として，にわかに注目を浴びることになった（Hill ら 2006 ; Yuan ら 2008）。セルロース系バイオマスには，作物残渣である稲わら，麦わらやトウモロコシ・ストーバー（茎・葉）および木本植物の早生樹（ヤナギ，アカシア，ユーカリなど）があるが，ここでは草本系植物として，イネ科草類，特に，ススキ属植物について言及する。ススキ属植物は日本の在来草種で野草として，伝統的な建築資材などの繊維材料，肥料として堆肥の原料，家畜の飼料として，古くから利用されてきているが，最近ではエネルギーとしての利用も検討されている（高橋 2008）。広大な草原が広がる阿蘇ではバイオマスエネルギーシステムを構築する実証試験が実施されている（NPO 法人九州バイオマスフォーラム，http://kbf.sub.jp/）。近年，欧米では，ススキ属植物はミスカンサスという名前で呼ばれ，スイッチグラスとともにバイオマス資源利用のためのエネルギー作物として期待されている（Karp・Shield 2008 ; Yuan ら 2008）。そこで，ここでは主に欧米におけるススキ属研究を紹介しながら，バイオ燃料のフィードストック用エネルギー作物としてのススキ属への期待について触れたい。

## 2. バイオ燃料

バイオ燃料ガソリンの代替として利用されるバイオエタノール生産については，原料となるフィードストックには大きく分けて 3 種類ある：糖質原料（サトウキビ，テンサイ），デンプン質原料（コメ，トウモロコシ，麦類など），セルロース系原料（木質バイオマス，稲わら，イネ科草類など）である。変換技術がすでに確立している糖質原料やデンプン質原料が実用化されており，ブラジルではサトウキビから，アメリカでトウモロコシからエタノールが実際に製造され，その量は年々増加している。トウモロコシ子実由来のエタノールはエネルギー収支（燃料生産に投入されるエネルギーと，その燃料から得られるエネルギー比）から見る限り，1 : 1.3 で，温室効果ガス排出の削減量は 22% と少ない（表 1）。一方，ブラジルで生産されるサトウキビ由来エタノールのエネルギー収支は 1 : 8 で，温室効果ガスの削減量も 56% で，トウモロコシより有望である。しかし，今後，サトウキビ作付面積が急増すれば，森林伐採が進み，生物多様性の喪失が危惧される。また，デンプン質原料は人の食糧とともに家畜の飼料としても利用され，これがバイオ燃料生産に向けられれば，競合問題を引き起こすことから，昨今，この問題が強く指摘されて

* yamada@fsc.hokudai.ac.jp

表 1. エタノール生産におけるエネルギー収支と温室効果ガスの排出量.

| フィードストック | エネルギー収支（燃料生産に必要な化石燃料（投入量）と生産されるバイオ燃料（生産量）の比） | 温室効果ガスの排出量（生産時と使用時）エタノール/ガソリン |
|---|---|---|
| トウモロコシ子実 | 1.3 | 1.93/2.44<br>22%削減 |
| サトウキビ | 8 | 1.07/2.44<br>56%削減 |
| セルロース系 | 2<br>（可能性 36） | 0.22/2.44<br>91%削減 |

ボーンJr（2007）から作成

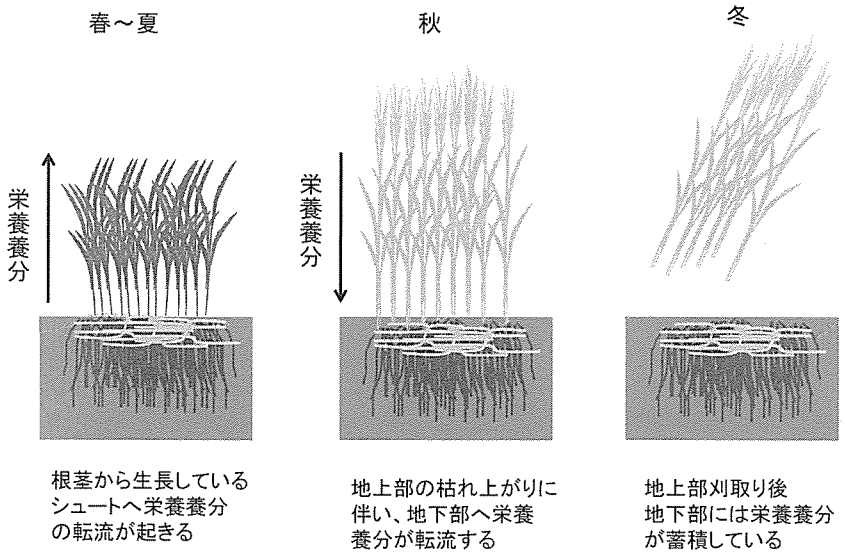


図 1. 永年生草類の効率的な栄養養分循環とバイオマス利用の概念.

いる。そこで，注目を浴びているのが，セルロース系フィードストックからのエタノール生産である。しかしながら，そのポテンシャリティーは高いものの現在のエタノール変換技術ではエネルギー収支はまだかなり低いため，効率的なエタノール変換技術開発が急務である（Liら 2008）。

### 3. 永年生イネ科草類

アメリカ合衆国やヨーロッパでは，1970年代のオイルショック以降，永年生イネ科草種をバイオマス資源作物として利用することへの可能性が検討され，その過程で永年生イネ科草類をバイオマス資源作物として利用する場合の特徴が整理されている。一つ目の重要な特徴は，永年生である。トウモロコシなどの一年生作物のように毎年，土地を耕起して種子を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，地下部に炭素固定（carbon sequestration）を促進し，土壌浸食が問題となる地域ではその危険も回避することにつながる。二つ目に重要な特徴は，効率的な栄養養分循環である。図1に永年生草類の効率的な栄養養分循環とバイオマス利用の概念を示した。草類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。このような栄養養分の循環により，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。三つ目に，永年生草類は不良栽培環境地域でも栽培が可能である。穀類は夏に冷涼な地域や高温旱魃になる地域および土地がやせている地域では，十分な子実生産はできない。しかし，茎や葉を利用するために栽培されるイネ科草類は，このような不良栽培環境地域でも栽培が可能である。四つ目に，永年生草類に対しては，一般には肥料の施用が少なく，農薬も滅多に散布されないので，野生植物，昆虫，動物などの自然生態系をより保全できる利点があげられる。

アメリカ合衆国エネルギー省（DOE）は早生樹とともに永年生草類のバイオマスについての評価を1980年代からすでに実施し，全米各地でバイオマス生産性に関する調査が行われた（DOE2006）。その結果，暖地型草種のスイッチグラス（*Panicum virgatum* L.），ネピアグラス（*Pennisetum purpureum* Schum），ジョンソングラス（*Sorghum halepense* (L.) Pers.），ウィーピングラブグラス（*Eragrostis curvula* (Schrad.) Nees），ビッ

表 2.　ススキ属の植物.

| 学名 | 和名など |
|---|---|
| *M. floridulus* (Labill.) Warb. | トキワススキ |
| *M. intermedius* (Honda) Honda | オオヒゲナガカリヤスモドキ |
| *M. longiberbis* Nakai | |
| *M. lutarioparius* | |
| *M. oligostachyus* Stapf. | カリヤスモドキ |
| *M. paniculatus* (B.S. Sun) Renvoize & S.L. Chen | |
| *M. sacchariflorus* (Maxim.) Hack | オギ |
| *M. sinensis* Anderss. | ススキ |
| *M. tinctorius* (Steud.) Hack. | カリヤスモドキ |
| *M. transmorrisonensis* Hayata | |
| the hybrid *M.*×*giganteus*　Greef & Deuter ex Hodkinson and Renvoize | ジャイアントミスカンサス |
| *M. sinesis* ssp. *condensatus* (Hackel) T. Koyama=*M. condensatus* | ハチジョウススキ |

グブルーステム（*Andropogon gerardii* Vitman）などで高いバイオマス収量を示すことが報告されている（Lewandowski ら 2003）。なかでも，北アメリカの草原地帯に広く自生しているスイッチグラスが，最も有望視されている。これまでの収量調査から，最大 30 t/ha/年の乾物収量が期待できると報告されている（Lewandowski ら 2003）。このスイッチグラスがバイオマス資源作物として注目される理由としては，1）アメリカ全土に広く分布している，2）アメリカの在来イネ科草種の中で，地下部および地上部のバイオマス生産性が高い，3）低肥料条件下で高いバイオマス生産が可能である，4）これまで研究が多く行われていないため，育種，バイオテクノロジー，栽培管理によるバイオマス改良の期待ができることなどがあげられる。

Schmer ら（2008）によれば，ネブラスカ州などアメリカ中央部の農耕限界地帯で 10 か所の農家のスイッチグラス草地（3-9ha）で年間乾物生産性は 5.2-11.1 t/ha，正味エネルギー量は 60 GJ/ha/年であり，スイッチグラスは消費されるエネルギーに対して 540% の再生エネルギーを生産することが可能である。このデータは，スイッチグラスがエタノール資源作物として有望であることを示している。

ブッシュ前大統領の「10 年間で 20% ガソリン使用量削減計画」を目指し，2007 年から DOE が 3 つのセルロース系に関するバイオエネルギー研究センターを立ち上げた。ゲノム基礎研究についてもアメリカ合衆国で大々的に開始された（http://genomicsgtl.energy.gov/centers/）。スイッチグラスについても育種とともにその基盤となるゲノム解析が DOE のプロジェクトで進められている（Bouton 2008a, 2008 b）。

## 4.　ススキ属

欧米では，わが国にも広く自生しているススキ属（*Miscanthus* spp.）植物がバイオマス資源作物として検討されている。なかでも，ススキ（*M. sinensis* Anderss.）（二倍体，2n＝38）とオギ（*M. sacchariflorus* (Maxim.) Hack）（四倍体，2n＝76）と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* Greef & Deuter ex Hodkinson・Renvoize）が，特に注目されている。これまでのヨーロッパにおけるバイオマス調査では，十分な土壌水分と気温の栽培環境が整えば，草丈が 7 m にも達し，最大 45 t/ha/年の高い乾物量を生産することが可能である。また，永年生草種であり，図 1 で示したように，生育期が終了する晩秋には栄養養分の地下部への転流がみられることから，低い施肥水準で，持続的な栽培が可能である。また，トウモロコシなどの他の C4 植物とは違い，低温の環境条件下でもジャイアントミスカンサスの光合成能力は低下しないことや生育地が広いことから地域適応性が高いなどの理由で注目されている（Clifton-Brown ら 2008）。

ススキ属はキビ亜科（Panicoidea），ヒメアブラススキ族（Andropogoneae），サトウキビ亜族（Saccharinae）に分類される。この亜族には，ススキ属以外には，チガヤ属（Imperata）およびサトウキビ属（Saccharum）などの暖地型多年生草類が含まれる。ススキの分類は，形態の変異が大きく，分類が難しいとされているが，松村（1997）は足立（1958）の分類に従い，ススキ属をススキ節（Eumiscanthus），オギ節（Triarrhena），カリヤス節（Kariyasua）の 3 節に分類している。リボゾーム DNA の ITS 領域や葉緑体 DNA の *trnL* イントロンなどの分析（Hodkinson ら 2002a）および AFLP と ISSR マーカーによる分析（Hodkinson ら 2002b）の分子生物学的な分類手法などの結果から，12 種の植物がススキ属に分類されている（Clifton-Brown ら 2008）（表 2）。ススキ属植物の染色体の基本数は 19 本であることから，2n＝18 である Saccharininae 群の植物と 2n＝20 の Eulaliininae 群植物との間の雑種形成と倍数化によるものと推測されている（Adati・Shiotani 1962）が，いまだに不明である。

ススキ属植物は東アジア，東南アジア地域に分布している。北緯 50° のシベリア大陸から南緯 22° のポリネシア諸島まで広範囲に分布していることから，その地域適応性が高い（Clifton-Brown ら 2008）。*M. floridulus* は太平洋諸島に広く分布している。日本には表 2 の和名表記のある種が分布し，特に，ススキとオギは北海道から沖縄にかけて広く分布している。1950 年-60 年代にはススキを飼料作物として利用する目的で育種学的研究が三重大学や岐阜大学などで実施

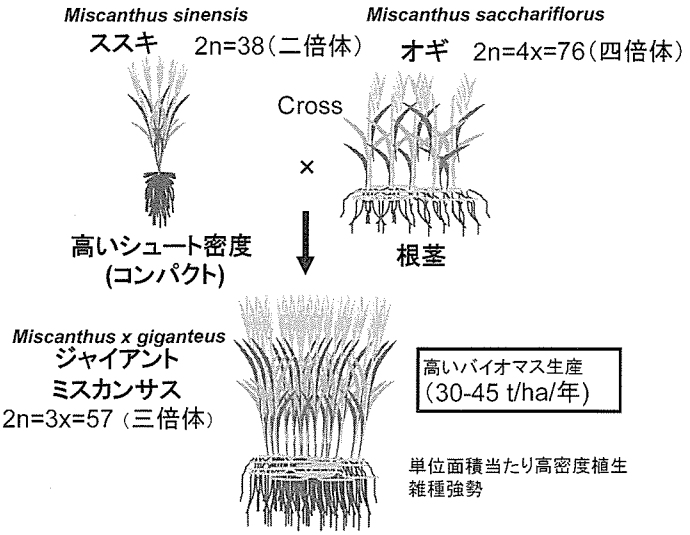


図 2. オギとススキとの雑種，ジャイアントミスカンサス（*Miscanthus*×*giganteus*）がバイオマス生産に優れる理由.

された（足立 1958；平吉功先生退官記念事業会 1976）が，その後は途絶えた。その理由としては，飼料作物に求められる高品質飼料には早刈りが必要で，ススキは頻繁な刈取りに耐えられないことがあげられ，その後は，導入牧草で草地が広く造成された。最近では，低投入型肉牛生産にススキ野草地の価値が見直されている（西脇・横田 2001）。

## 5. ジャイアントミスカンサス

欧米では，ススキとオギとの自然雑種であるジャイアントミスカンサス（*M.*×*giganteus* Greef & Deuter ex Hodkinson・Renvoize）のエネルギー作物としての可能性が議論されている。その学名は，*M. sinensis* 'Giganteus', *M. giganteus*, *M. ogiformis* Honda および *M. sacchariflorus* var. *brevibarbis* (Honda) Adati として表記されたことがあるが，現在では *M.*×*giganteus* が用いられる。ジャイアントミスカンサスは四倍体オギを種子親，二倍体ススキを花粉親として自然交雑により形成されたと考えられる（Greef・Deuter 1993；Linde-Lausen 1993；Hodkinson ら 2002c）。ジャイアントミスカンサスは，図2に示すように，ススキのコンパクトな高いシュート密度とオギの根茎を有する形態の中間型を示し，単位面積当たりのシュート密度が高いことが，高いバイオマス生産の要因となっている（Jones・Walsh 2001；Clifton-Brown ら 2008）。

ジャイアントミスカンサスは1935年にデンマークの植物コレクターが日本の横浜からヨーロッパへ当初観賞用植物として持ち出したものである。1960年代にデンマークでその高いバイオマスが認められた。1970年代のオイルショック以降，その優れたバイオマス生産が欧州各国で高く評価され，1993年には European *Miscanthus* Productivity Network が10か国，18の機関により立ち上げられ，その研究成果が Jones・Walsh（2001）によりとりまとめられている。その連絡試験から得られたジャイアントミスカンサスのバイオマスデータと気象データに基づいて，ヨーロッパ各地域における賦存量が GIS-モデルシステムから推定されている（Stampfl ら 2007）。南アイルランドにおける15年間に及ぶジャイアントミスカンサスの連年試験から，平均乾物重量で，秋収穫は 13.4 t/ha，越年させた春収穫では 9.0 t/ha のバイオマス量が得られ，試験経年によるバイオマス量低下はみられていない（Clifton-Brown ら 2007）。また，この15年間にわたる試験期間内に，5.2-7.2 t/ha/年の炭素が土壌に蓄積された。

ジャイアントミスカンサスは三倍体雑種であるために不稔で種子を生産しない。そのため，増殖には根茎による栄養繁殖が用いられ，その手法は以下のようである（DEFRA 2007）。根茎を冬に地下部から掘取り，小分けし発根しないように冷蔵貯蔵する。春に，地中深さ 5-10 cm で 1 m$^2$ 当たり約1個体の植付けを専用プランターで行う。初期の定着が重要であり，植付け後，土壌処理用の除草剤で雑草の発生を抑え，場合により2年目も散布する。移植 3-4 年後に旺盛なバイオマスが得られる。また，組織培養による大量増殖法が検討されている（Jones・Walsh 2001）が，まだ普及には至っていない。

ジャイアントミスカンサスは，現在はヨーロッパで火力発電用の燃焼原料に利用されている。一部は石炭と混合燃焼で，火力発電が行われている。最近では，ジャイアントミスカンサスがヨーロッパでもバイオ燃料製造の原料として検討され始めた。

アメリカ合衆国では，イネ科草種としては，スイッチグラスの研究が多いが，イリノイ大学ではジャイアントミスカンサスの研究が盛んに行われている。最近，イリノイ大学のグループでは，最大で 61 t/ha/年のバイオマス，平均で 30 t/ha/年のバイオマス生産が可能であると報告されている（表3）。アメリカで必要とされる 1.3 億 kL のエタノールを生産するのに，9% の耕地で賄えると推測されている（Heaton ら 2008）。一方，同じジャイアントミスカンサスのバイオマスデータを用いて，火力発電用燃料としてもコスト計算がされているが，安価な石炭には対してはコスト高であると試算されている（Khanna ら 2008）。

表 3.　アメリカ合衆国におけるバイオマス生産量とエタノールの生産ポテンシャリティー.

| フィードストック | 収穫可能なバイオマス量（t/ha） | エタノール（L/ha） | 1.3 億 kL エタノール生産に必要な土地（百万 ha） | US 2006 年耕作地面積に対する割合（%） |
|---|---|---|---|---|
| トウモロコシ子実 | 10.2 | 4,266 | 31.0 | 24.4 |
| トウモロコシ茎葉 | 7.4 | 2,805 | 47.2 | 37.2 |
| トウモロコシ全体 | 17.6 | 7,070 | 18.7 | 14.8 |
| 草原（LIHD） | 3.8 | 1,438 | 92.1 | 72.5 |
| スイッチグラス | 10.4 | 3,936 | 33.7 | 26.5 |
| ミスカンサス | 29.6 | 11,204 | 11.8 | 9.3 |

Heaton ら（2008）を一部改変

## 6.　ススキ属植物のメリット

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は適する。低温条件では，トウモロコシより光合成能力に優れる（Beale・Long 1995）。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，ジャイアントミスカンサスではその減少がみられない（Naidu ら 2003）。光合成回路の 2 つの酵素，ピルビン酸・リン酸ジキナーゼ（PPDK）とルビスコ（RuBisCO）の活性に関して，ジャイアントミスカンサスは低温下ではその活性が低下しないが，トウモロコシではそれぞれ 50%，30% の低下が観察されている。PPDK と RuBisCO の低下がみられないことは，光阻害を受けにくく，高い光吸収能力が維持されることが原因していることが考えられている（Naidu・Long 2004）。また，Farage ら（2006）は低温条件下では，ジャイアントミスカンサスは別の炭酸同化シンクをもち，光不活性や障害から光化学系 II を保護するために Mehler 反応によって酸化還元が起きていると推測している。

Boehmal ら（2008）は，トウモロコシとジャイアントミスカンサスをエネルギー作物としてのポテンシャルを比較し，トウモロコシは得られるエネルギー量には優れるが，投入量が大きすぎることを指摘している。得られるエネルギー/投入したエネルギーでは，ミスカンサスが勝り，その比は 22-50 である（Clifton-Brown ら 2008）。また，永年生であることから，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。

これ以外に，ススキ属植物が他の草類より優れている点として，低い栄養分要求性（Lewandowski ら 2003），水分利用効率（Clifton-Brown ら 2002），土壌への炭素蓄積能（Clifton-Brown ら 2007）や，広い地域で高いバイオマス生産が得られる広域適応性をもっていること（Clifton-Brown ら 2001）があげられる。

ジャイアントミスカンサスは，三倍体雑種であることから，種子稔性がないため，造成に経費がかかる不利益性があるが，一方，種子飛散による在来植生への侵入がなく，外来植物としての侵入性は少ないという利点がある。

草本は木質より灰分含量が多く，ジャイアントミスカンサスには 2% 含まれている。これを減らすことは育種の一つの目標になると考えられる。現在利用されているジャイアントミスカンサスは一つの遺伝子型由来のものが栄養繁殖されているもので遺伝的背景がきわめて狭いことや耐寒性に劣るなどの問題もあることから，今後，育種により改良していく必要がある。

## 7.　エネルギー作物としてのススキ属植物の開発

植物バイオマス生産は気温・降雨量の気象条件や土壌条件に大きく支配されるために，各地域に適したススキ遺伝子型を選抜して，エネルギー作物としての品種を開発することが重要になってくる。種間雑種のジャイアントミスカンサスでは非常に高いバイオマス生産が期待できるので，日本国内における遺伝資源探索による新たなオギとススキとの雑種個体の収集ならびに人工交配によるオギとススキの雑種個体の作出を図っていく必要がある。また，ススキ属植物をエネルギー作物として実用化を図って行くには，低コストの栽培技術を確立する必要もある。幸い，ススキについては，これまで野草としてのバイオマス評価や生態学研究に関して，豊富な研究蓄積があるので，これらを参考にしながら，研究を展開することができる。また，エタノール発酵材料の周年供給が求められることから，ススキ属植物だけではなく，いくつかの草種を組み合わせた栽培体系の構築も必要になってくる。

著者たちは，現在，全国各地からススキ属の遺伝資源収集を行っている（写真 1）。また，収集したススキ属の特性評価を行っている（写真 2）。北海道から収集されたススキは出穂期が早く，秋の成長停止が早いが，西日本由来のススキは，札幌の環境下では出穂しないものもあり，バイオマス量は高いものの札幌の環境下では越冬できないものもある。これまでに収集したススキ属遺伝資源には大きな遺伝変異があることを明らかにしてきているので，今後本格的なエネルギー作物としての育種を検討している。エネルギー作物開発のためには，単にバイオマス生産としての乾物重量，耐病虫害抵抗性，耐冬性や耐旱性などの環境ストレス耐性の改良のみならず，植物体成分（リグニン，灰分など）の改変を今後エタノール製造過程の担当者と連携しながら検討していく必要がある。バイオマス量と品質の両面を遺伝改良して，エネルギー作物としての新品種を開発していくことが，今後原料供給サイドでは必要になろう。

品種改良は当面選抜・交雑という従来からの育種手法によるが，さらに飛躍的なバイオマス原料生産を可能にするには，遺伝子組換え技術や DNA マーカー技術などの分子育種

写真 1. ススキ属植物の遺伝資源収集（北海道，2006年9月）.

写真 2. ススキ属植物の特性評価試験（北海道大学，2008年10月）.

技術が期待できる。具体的には，リグニン合成酵素遺伝子の発現を抑えてリグニン含量を減らす試みが，いまのところ主流である（Hisano ら 2009）。牧草における先行研究として，トールフェスクを用いてリグニン合成酵素遺伝子の発現を抑制する遺伝子操作により，リグニン含量の低減と家畜の消化性の向上が報告されている（Chen ら 2003，2004）。スイッチグラスでは，リグニン合成酵素遺伝子の発現を抑えた形質転換植物体がすでに得られ，エタノール変換効率の調査が行われている（Wang 私信）。食品としての安全性評価を行う必要はないが，イネ科草種は風媒花であるために生態系への遺伝子拡散影響評価は必要になる。稔性のない遺伝子組換え植物が開発されれば，その実用化は近いと考えられる。著者たちは，ススキ属植物におけるカルス培養技術や遺伝子導入技術の確立を検討中である。

一方，DNA マーカー選抜は育種には有用なツールとして期待され，現在主要な作物では DNA マーカー選抜が検討されている。ススキ属植物については，サトウキビやトウモロコシなど近縁植物の SSR マーカー利用の実績があり（Cordeiro ら 2001；Hernandez ら 2001），著者のグループでも全国各地から収集した遺伝資源について SSR マーカーにより多型解析を行い，収集地域によるグルーピングができた（未発表）。今後さらに多数の DNA マーカーによるジェノタイピングや選抜のためのアソシエイション解析などの検討が必要になろう。

## 8. 終わりに

バイオ燃料の普及に向けて，政府がインフラ整備や税制面の優遇などの政策を強く推し進めなければ進展は望めない。わが国は土地の制約があるものの，バイオ燃料用フィードストックのためにエネルギー作物を栽培できる土地が無いわけではない。多くの耕作放棄地を抱えているとともに里山や水辺には，ソフトセルロース系バイオマスとして，ススキを始め在来イネ科永年草種がほとんど利用されずに蓄積されている。これらの在来イネ科草類を古来我々は，いろいろな生活面でこれらの植物資源を利用してきた。ススキなどをセルロース系バイオ燃料原材料として利用できれば，里山の復活と地域振興にも貢献するであろう。最後になるが，リグニン含量が少なく，家畜にとって消化性が高く収量性に優れる牧草は，エタノール発酵のためのフィードストックとしても適する。今後は飼料とエネルギーの両面の目標を見据えて，ススキ属植物などの永年生イネ科草類の遺伝改良を進めていくことが必要であろう。そのため，従来の飼料作物のみならずエネルギー作物開発に今後草地学分野が果たす役割は大きいと考える。

## 引 用 文 献


足立昇造（1958）ススキ属植物の飼料作物化に関する育種学的基礎研究．三重大学農学部学術報告 17：1-112

Adati S, Shiotani I (1962) The cytotaxonomy of the genus *Miscanthus* and its phylogenic status. Bull Fac Agri Mie Univ 25：1-24

Beale CV, Long SP (1995) Can perennial C4 grasses attain high efficiencies of radiant energy conversion in cool climates? Plant Cell Env18：641-650

Boehmel C, Lewandowski I, Claupein W (2008) Comparing annual and Perennial energy cropping systems with different management intensities. Agric Syst 96：224-236

ボーン Jr JK（2007）地球の悲鳴　バイオ燃料　実用案にもお国柄．National Geographic 日本版，13：40-61

Bouton JH (2008a) Molecular breeding of switchgrass for use as a biofuel crop. Curr Opin Genet Develop 17：553-558

Bouton JH (2008b) Genetic Improvement of Bioenegy Crops (Ed Vermerris W), Springer, New York, p 295-308

Chen L, Auh C, Dowling P, Bell J, Chen F, Hopkins A, Dixon RA, Wang Z-Y (2003) Improved forage digestibility of tall fescue (*Festuca arundinacea*) by transgenic down-regulation of cinnamyl alcohol dehydrogenase. Plant Biotechnol J 1：437-449

Chen L, Auh C, Dowling P, Bell J, Lehmann D, Wang Z-Y (2004) Transgenic down-regulation of caffeic acid O-methyltransferase (COMT) led to improved digestibility in tall fescue (*Festuca arundinacea*). Funct Plant Biol 31：235-245

Clifton-Brown J, Lewandowski I, Andersson B, Basch G, Christian DG, Kjeldsen JB, Jørgensen U, Mortensen JV, Riche AB, Schwarz K-U, Tayebi K, Teixeira F (2001) Performance of 15

*Miscanthus* genotypes at five sites in Europe. Agron J 93 : 1013-1019

Clifton-Brown JC, IL, Bangerth F, Jones MB (2002) Comparative responses to water stress in stay-green, rapid- and slow senescing genotypes of the biomass crop, *Miscanthus*. New Phytol 154 : 335-345

Clifton-Brown JC, Breur J, Jones MB (2007) Carbon mitigation by the energy crop, Miscanthus. Global Change Biol 13 : 2296-2307

Clifton-Brown J, Chiang Y-C, Hodkinson TR (2008) Genetic Improvement of Bioenegy Crops (Ed Vermerris W), Springer, New York, p 273-294

Cordeiro GM, Casu R, McIntyre CL, Manners JM, Henry RJ (2001) Mcrosatellite markers from sugarcane (*Saccharum* spp.) ESTs cross transferable to erianthus and sorghum. Plant Sci 160 : 1115-1123

DEFRA (2007) Planting and Growing *Miscanthus* —Best practice guidlines http : //www.naturalengland.org.uk/Images/miscanthus-guide_tcm6-4263.pdf

DOE (2006) : Breaking the Biological Barriers to Cellulosic Ethanol : A Joint Research, p 1-206, DOE/SC-0095

Farage P, Blowers, Lond S, Baker N (2006) Low growth temperatures modify the efficiency of light use by photosystem II for $CO_2$ assimilation in leaves of two chilling-tolerant $C_4$ species, *Cyperus longus* L. and *Miscanthus*×*giganteus*. Plant Cell Env 29 : 720-728

Greef JM, Deuter M (1993) Syntaxonomy of *Miscanthus x giganteus* GREEF et DEU. Angrew Bot 67 : 87-90

Heaton EA, Dohleman FG, Long SP (2008) Meeting US biofuel goals with less land : the potential of *Miscanthus*. Global Change Biol 14 : 2000-2014

Hernandez P, Dorado G, Laurie DA, Martin A (2001), Microsatellites and RFLP probes from maize are efficient sources of molecular markers for the biomass energy crop *Miscanthus*. Theor Appl Genet 102 : 616-622

Hill J, Nelson E, Tilman D, Polasky S, TiffanyD (2006) Environmental, economic, and energetic costs and benefits of biodiesel and ethanol biofuels. Proc Natl Acad Sci USA 103 : 11206-11210

平吉功先生退官記念事業会（1976）ススキの研究. p 1-222

Hisano H, Nandakumar R, Wang Z-Y (2009) Genetic modification of lignin biosynthesis for improved biofuel production. In Vitro Cell Dev Biol, Plant 45 : 306-313

Hodkinson TR, Chase MW, Lledo MD, Salamin N, Renvoize SA (2002a) Phylogenetics of *Miscanthus, Saccharum* and related genera (Saccharinae, Androgoneae, Poaceae) based on DNA sequences from ITS nulear ribosomal DNA and plastid trnL intron and trnL-F intergenic spacers. J Plant Res 115 : 381-392

Hodkinson TR, Chase MW, Renvoize SA (2002b) Characterization of a genetic resources collection for *Miscanthus* (Saccharinae, Andropogoneae, Poaceae) using AFLP and ISSR PCR. Ann Bot 89 : 627-636

Hodkinson TR, Chase MW, Takahashi C, Leitch IJ , Bennett MD, Renvoize SA (2002c) The use of DNA sequencing (ITS and *trnL-F*), AFLP, and fluorescent in situ hybridization to study allopolyploid *Miscanthus* (Poaceae). Am J Bot 89 : 279-286

Jones MB, Walsh M (Eds) (2001) Miscanthus for energy and fibre, James & James Science Publishers, London, p 1-192

Karp L, Shield I (2008) Bioenegy from plants and the sustainable yield challenge. New Phytol 179 : 15-32

Khanna M, Dhungana B, Clifton-Brown J (2008) Costs of producing miscanthus and switchgrass for bioenergy in Illinois. Bioma Bioe 32 : 482-493

Lewandowski I, Scurlock JMO, Lindvall E, Christou M (2003) The development and current status of potential rhizomatous grasses as energy crops in the US and Europe. Bioma Bioe 25 : 335-361

Li X, Weng J-K, Chapple C (2008) Improvement of biomass through lignin modification. Plant J 54 : 569-581

Linde-Laursen IB (1993) Cytogenetic analysis of *Miscanthus* 'Giganteus', an interspecific hybrid. Hereditas 119 : 297-300

松村正幸（1997）イネ科主要在来野草の個生態［15］—持続的利用の基礎として—. 畜産の研究 51 : 1326-1332

Naidu SL, Moose SP, Al-Shoabi KA, Raines CA, Long SP (2003) Cold-tolerance of $C_4$ photosynthesis in *Miscanthus x giganteus* : Adaptation in amounts and sequence of $C_4$ photosynthetic enzymes. Plant Physiol 132 : 1688-1697

Naidu SL, Long SP (2004) Potential mechanisms of low-temperature tolerance of photosynthesis in *Miscanthus*×*giganteus* : an *in vivo* analysis. Planta 220 : 145-155

西脇亜也・横田浩臣（2001）野草地と野草地の評価—緒言. 日草誌 47 : 194-195

Schmer MR, Vogel P, Mitchell RB, Perrin RK (2008) Net energy of cellulosic ethanol from switchgrass. Proc Natl Acad Sci USA 105 : 464-469

Stampfl P, Clifton-Brown JC, Jones MB (2007) European-wide GIS-based modeling system for quantifying the feedstock from Miscanthus and the potential contribution to renewable energy targets. Global Change Biol 123 : 2283-2295

高橋佳孝（2008）野草資源バイオマス利用 —畜産だけでない草利用の古くて新しい分野. 日草誌 53 : 318-325

Tyner WE (2008) The US ethanol and biofuels boom : Its origins, current status, and future prospects. Bioscience 58 646-653

Yuan JS, Tiller KH, Al-Ahmad H, Stewart NR, Stewart Jr NC (2008) Plants to power : bioenergy to fuel the future. Trend Plant Sci 13 : 421-429