原料作物のエリアンサスとネピアグラスの根

関谷信人 ^{*1)}・塩津文隆 ²⁾・阿部淳 ³⁾・森田茂紀 ⁴⁾

1) 東京大学大学院農学生命科学研究科附属生態調和農学機構

2) 茨城大学農学部

3) 東海大学農学部

4) 東京農業大学農学部

要 旨：エリアンサスとネピアグラスは、多年生で C4 型光合成経路を有する大型のイネ科草本である。私達は、セルロース系バイオエタノールの原料作物として利用するため、両植物種の栽培技術を研究している。原料作物は食糧生産と競合しないように荒廃地などの非農地でも栽培されるため、劣悪土壌から養水分を獲得する根の能力が必要である。また、地上部全量を系外へ持ち出してしまうため、土壌に還元される唯一の有機物となる根が土壌生産性の向上に果たす役割が非常に大きい。そこで、私達は両植物種の栽培技術だけではなく、根も同時に調査した。両植物種は、浅い土層に多くの根を発達させつつ、かなり深い土層まで到達するような根の分布を示す。その結果、単位面積当たりの現存根量が主要な食用作物と比較して非常に多い。同時に多量の根を土壌中へ脱落させている。節根は太く、多数の導管を有する中心柱には秋頃にデンプン粒が多量に蓄積する。外皮、内皮、中心柱は、他のイネ科植物とは異なる特殊な構造を示す。根毛が密に発達することで soil sheath が付着し、皮層には空隙も形成される。硬く痩せた土地や湛水条件下で栽培しても旺盛に根を発達させ、大きな地上部を支えるための養水分を良く獲得する。さらに、地上部全量を系外へ持ち出しても土壌炭素濃度は増加する。以上のように、エリアンサスとネピアグラスは、巨大な地上部バイオマスだけではなく、根の機能面からも原料作物に適している。

キーワード：エネルギー作物、改良土壌断面法、深根性、多年生草本、バイオエタノール。

Roots of *Erianthus* and *Napier* grass as energy crops : Nobuhito SEKIYA^{*1)}, Fumitaka SHIOTSU²⁾, Jun ABE³⁾ and Shigenori MORITA⁴⁾ (¹⁾Institute for Sustainable Agro-ecosystem Services, Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo, ²⁾College of Agriculture, Ibaraki University, ³⁾School of Agriculture, Tokai University, ⁴⁾Faculty of Agriculture, Tokyo University of Agriculture)

Abstract : *Erianthus* and *Napier* grass are large, C4 perennial grasses. Currently, we study on cultivation techniques of the two species in an attempt to use them as raw materials for cellulosic bioethanol. Energy crops should be grown in non-arable lands to avoid disturbance of food production so that their roots should be capable of acquiring water and nutrients from degraded soils. Because the entire aboveground biomass is harvested as raw materials, roots are only organic matters incorporated into soils. In energy crop cultivation, few studies were conducted belowground despite its importance. Thus, roots of the two species are also investigated in our study. *Erianthus* and *Napier* grass develop a large amount of roots in shallow soil layers while penetrating deeply. As a result, the amount of standing roots becomes very large compared with common crops, and a substantially large amount of dead roots is released into soils. Nodal roots are thick in diameter, and many starch grains accumulate in pith of their steles in autumn. Exodermis, endodermis and stele are unique in structure among gramineous plants. Soil sheath forms on root surfaces due to dense root hairs, and large air spaces are found in cortex. The two species can grow well in hard, poor soils and/or under flooded conditions. Soil carbon concentrations increase even after the repeated removal of entire aboveground biomass. Therefore, *Erianthus* and *Napier* grass should be potential energy crops in terms of their root growth and functions as well as their large aboveground biomass.

Keywords : bioethanol, deep rooting system, energy crop, improved soil profile method, perennial grass.

1. はじめに

世界のバイオエタノール生産量は、ここ 10 年程の

間、急速に増加し続けてきた (US EIA 2012)。商業生産されているバイオエタノールの多くは“第一世代”と呼ばれ、サトウキビ、トウモロコシ、コムギ、テンサ

イなどの食用作物の糖やデンプンから精製される (Hattori and Morita 2010). バイオエタノールの生産量増加と時期を同じくして国際穀物価格が高騰したことから、食糧から燃料を生産する第一世代バイオエタノールに多くの批判が集中した (Boddiger 2007; 服部ら 2010). そこで、非食用のセルロース系バイオマスからエタノールを生産する“第二世代”に注目が集まり、日本を含めた各国で技術開発が進められてきた (Shiotsu et al. 2011). 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の実施した「セルロース系エタノール革新的生産システム開発事業」もその一つで (NEDO 2014), 著者らは「セルロース系目的生産バイオマス (原料作物) の栽培から低環境負荷前処理技術に基づくエタノール製造プロセスまでの低コスト一貫生産システムの開発」において、原料作物の栽培研究を担当した (森田ら 2013a). そこでは、エリアンサス (*Erianthus arundinaceus*) とネピアグラス (*Pennisetum purpureum*) を原料作物として選抜し (Hattori and Morita 2010; Hattori et al. 2010; Ra et al. 2012), 主に前者を日本国内で (森田ら 2013a), 後者をインドネシア共和国ランブ州で栽培することを提案した (Sekiya et al. 2014b). 原料作物には、食糧との競合を回避するために食糧生産に利用できない荒廃地で栽培することが求められることから (Hattori and Morita 2010; 塩津ら 2010; Shiotsu et al., 2011; 森田ら 2013a), 劣悪土壌においても養水分を獲得し、地上部バイオマスの生産性を高く維持する根の機能が不可欠である。また、原料作物栽培では地上部全量を利用するため、可食部以外の植物残渣 (有機物) を土壌へ還元する一般的な作物栽培とは対照的に、土壌の肥沃度や水分保持能が低下する可能性が指

摘されている (Cruse et al. 2010; Galdos et al. 2010). したがって、原料作物栽培において唯一の有機物供給源である根が、土壌機能を維持する上で大きな役割を果たすことになる。しかし、アメリカで原料作物としての利用が期待されるスイッチグラス (*Panicum virgatum* L.) の根を調査した数例を除いて (Ma et al. 2000a, b), 原料作物の根に関する情報は少ないのが現状である。そこで私達は、原料作物として選抜したエリアンサスとネピアグラスの地上部だけではなく、地下部についても幾つかの調査を実施した。このミニレビューでは、その調査結果について報告する。

2. エリアンサスとネピアグラス

エリアンサス属 (*Erianthus*) の植物種は、イネ科 Andropogoneae 連に属し、C4 光合成回路を有する大型草本である (第1図 a). *Erianthus* は、種間交雑、属間交雑、染色体倍化を起こし易いために分類が難しく、研究者によって見解が異なっている (Jackson and Henry 2011). 大きくは旧世界群 (Old World Species) と新世界群 (New World Species) に分類されるが、前者が *Ripidium* で後者が *Erianthus* と分類する場合もあれば、前者を *Saccharum* に分類する場合もある。インドで紙やアルコールの原料として利用されていたという報告があるものの (Amalraj et al. 2013), その他に作物としての用途例は少ない。*Erianthus* は、*Saccharum*, *Narenga*, *Sclerostachya*, *Miscanthus* と共に *Saccharum* complex を形成する。*Saccharum* complex は属間交雑と倍数化を連続して経験し、その遺伝プールが栽培サトウキビの起源となっていることから (Amalraj and Balasundaram 2006; Jackson and Henry 2011; Suman et

第1図 エリアンサスとネピアグラス。

- (a) 生態調和農学機構 (西東京市) で栽培したエリアンサス (植付け後3年目)。
- (b) 生態調和農学機構 (西東京市) で栽培したネピアグラス (植付け後5ヶ月目)。

al. 2012), 最近では *Erianthus* を用いたサトウキビの品種改良が試みられている (Piperidis et al. 2000; Cai et al. 2005; Matsuoka 2006; Tsuruta et al. 2012). また, *Erianthus* は巨大な地上部バイオマス (乾物重 40 ~ 60 t ha⁻¹) を生産するため, 原料作物としての利用が以前から期待され (Mislevy et al. 1997), その研究は日本において精力的に行われている (NARO 2008; Matsumoto et al. 2009; Hattori et al. 2010; Uwatoko et al. 2011; Horikawa et al. 2012; Yamamura et al. 2013).

ネピアグラス (*Pennisetum purpureum*) は多年生で C₄ 光合成回路を有するイネ科の大型草本である (第 1 図 b). アフリカ原産で, elephant grass, Ugandan grass などとも呼ばれている. 出穂しても種子の多くが不稔のため, 自然条件下では側芽や匍匐茎から再生し, 栽培条件下では切断茎の移植により栄養繁殖させる (稲永ら 1990; 石井ら 2000). エリアンサスとは異なり, ネピアグラスは古くから飼料として利用されてきた. また, 20 世紀以降, 土壌改良 (緑肥), 土壌浸食防止, 土壌被覆 (マルチ), 防風, 防火, 燃料, 害虫駆除 (おとり植物) などの幅広い用途に利用されるようになった (詳しくは Farrell et al. 2002 を参照). ネピアグラスは貧栄養条件下でも旺盛に生育し, 巨大な地上部バイオマス (草丈 2 ~ 8 m, 乾物重 20 ~ 90 t ha⁻¹) を生産する. 窒素利用効率の高いことが報告され (Ra et al. 2012), 生物学的窒素固定の関与も指摘されている (Morais et al. 2012; Videira et al. 2012).

3. エリアンサスとネピアグラスの根の分布

【概観】

エリアンサスとネピアグラスは, いずれも同様に, 浅い土層で多量の根を発達させつつも, かなり深い土層まで到達するような根の分布を示す. 西東京市のハウス内で栽培したエリアンサスとネピアグラスの土層別根重・根長密度からも, そうした根の分布を推察できる (第 2 図). 私達は, ハウスに隣接する屋外圃場やインドネシア (ランブン州) の試験圃場においても, 同様な根の分布を観察した (Sekiya et al. 2013).

【浅い土層に多量の根】

エリアンサスは深さ 0 ~ 0.6 m の土層に多量の根を発達させ (第 2 図 a, b), ネピアグラスはエリアンサスよりも浅い表層付近の深さ 0 ~ 0.2 m の土層に集中的に根を発達させる (第 2 図 c, d). ハウスに隣接する屋外圃場で栽培したエリアンサスとネピアグラスを掘り返してみても, 前者では深さ 0 ~ 0.4 m の土層で (第 3 図 a, b), 後者では表層付近の深さ 0 ~ 0.2 m の土層 (第 3 図 c, d) で多量の節根と側根が観察された.

第 2 図 エリアンサスとネピアグラスの根の分布 (Sekiya et al. 2013 から作図).

- (a) エリアンサス (植付け後 2 年目) の土層別根重密度.
 - (b) エリアンサス (植付け後 2 年目) の土層別根長密度.
 - (c) ネピアグラス (植付け後 2 年目) の土層別根重密度.
 - (d) ネピアグラス (植付け後 2 年目) の土層別根長密度.
- いずれの植物種も生態調和農学機構 (西東京市) のハウス内で栽培し (n = 3), 改良土壌断面法 (詳細は森田ら 2013b を参照) により調査した.

【深い土層まで伸長する根】

エリアンサスとネピアグラスの根は, 同様に深さ 2.6 m の土層まで伸長する (第 2 図). ネピアグラスで観察される表層付近の多量の根群は (第 3 図 d), 草地や水稻などに発達するルートマットと形状が酷似する. この表層付近に発達する多量の根群のために, ネピアグラスはしばしば浅根性植物と認識されてきた (Angima et al. 2002; Ma et al. 2012; Mutegi et al. 2008). しかし Matsuo et al. (2002) は, 東北タイにおいて, エリアンサスが深さ 2.5 m まで, ネピアグラスが深さ 1.5 m まで到達することを報告した. エリアンサスは深さ 1.5 m に存在する硬盤層を貫入したものの, ネピアグラスは硬盤層で伸長が阻害されたという. また Knoll et al. (2012) は, 深さ 0.91 ~ 1.07 m の土層にネピアグラスの根を観察した. さらに, 土壌と植物体に含まれる窒素とカリウム含量を測定し, ネピアグラスの根が深さ 1 m 以下

第3図 浅い土層に発達したエリアンサスとネピアグラスの根。

- (a) 浅い土層に発達した植付け後1年目のエリアンサスの根群。白線は0.1 mを示す。
 (b) 植付け後1年目のエリアンサスの分茎の基部に発達した節根と側根。
 (c) 浅い土層に発達した植付け後1年目のネピアグラスの根群。白線は0.1 mを示す。
 (d) ルートマット状に発達した植付け後1年目のネピアグラスの根群。

エリアンサスとネピアグラスは、それぞれ生態調和農学機構（西東京市）の屋外圃場とハウス内で栽培した。

の土層からも多量の養分を吸収する可能性を指摘した（ただし土壌コア法の限界で深い土層まで調査していない）。

【深根性】

これまでに報告された事例と私達の調査結果を合わせると、エリアンサスは深さ2.5 mの土層まで到達し、ネピアグラスは少なくとも深さ1.0 mの土層まで到達すると言える。したがって、両種とも深根性植物の範疇に収まると言えそうだ。そこで、根の深さについて定量的に議論するため、両種について根の平均的な深さを示す根の深さ指数を算出し（Oyanagi et al. 1993; 小柳1998）、これまでに報告されている主要作物の根の深さ指数と比較した（第1表）。その結果、エリアンサス（根の深さ指数：0.34～0.79）とネピアグラス（根の深さ指数：0.24～0.73）は、イネ、コムギ、ダイズ、サトウキビ（根の深さ指数：0.06～0.27）よりも根の深いことが示唆された。ただし、これまでの報告は浅い土層（0.2～1.0 m）のみ調査しており、調査深度が深くなれば根の深さ指数も増加する可能性がある（Oyanagi et al. 1998）。そこで、主要作物（イネ、サトウキビ、ソルガム、トウモロコシ、コムギ、セイヨウアブラナ、ダイズ、ワタ）の層別根長を深い土層（0.8～2.0 m）まで調査した報告を利用して、各作物の根の深さ指数を推定した。その結果、エリアンサスとネピアグラスの根は、単子葉類の作物（根の深さ指数：0.16～0.36）よりも深く、

双子葉類の作物（根の深さ指数：0.34～1.2）と同程度の深さであることが示唆された。

4. エリアンサスとネピアグラスの根の量

【概観】

エリアンサスとネピアグラスは、浅い土層から深い土層に渡って根を発達させる結果、単位面積当たりの根量（現存根量）が大きくなる（Sekiya et al. 2013）。またエリアンサスでは、春から冬に掛けて、多量の根が土壌中へ脱落する一方で、それを上回る量の根が新たに生産されるため、多量の現存根が残る。

【多量の現存根】

Gregory (2008) は、主要作物の現存根を調査した様々な圃場試験の結果を比較し、各作物の根重と根長の最大値を抽出した。そこで Gregory (2008) を利用して、私たちがこれまでに観察したエリアンサスとネピアグラスの根重と根長の最大値を主要作物と比較した（第2表）。コムギの根重、ソルガムの根長、セイヨウアブラナの根長は大きな値を示し、エリアンサスとネピアグラスの値に比較的近かったものの、エリアンサスとネピアグラスの根量は概して主要作物よりも大きい値であった。根重についてはエリアンサスで主要作物の2.4～33.3倍、ネピアグラスで1.3～17.6倍で、根長についてはエリアンサスで1.3～18.8倍、ネピアグラスで1.5～22.9倍であった。

第1表 エリアンサス、ネピアグラス、主要作物の根の深さ指数の比較.

植物	根の深さ指数 (m)	調査深度 (m)	分類	引用文献
＜文献中に根の深さ指数が掲載されている植物＞				
エリアンサス	0.34 - 0.79	2.0	単子葉	Sekiya et al. (2013)
ネピアグラス	0.24 - 0.73	2.0	単子葉	Sekiya et al. (2013)
イネ	0.08 - 0.14	0.2 <	単子葉	Cheng et al. (2009)
コムギ	0.06 - 0.12	0.3	単子葉	Oyanagi et al. (1993) Oyanagi (1994)
ダイズ	0.08 - 0.1	0.3	単子葉	Izumi et al. (2004)
サトウキビ	0.16 - 0.27	0.5 - 1.0	単子葉	福澤ら (2009)
＜文献中の根系調査の結果を元に著者らが根の深さ指数を算出した植物＞				
イネ	0.17	0.8	単子葉	Kondo et al. (2000)
サトウキビ	0.16 - 0.36	1.0 - 2.0	単子葉	Ball-Coelho et al. (1992) Laclau and Laclau (2009)
ソルガム	0.19	1.4	単子葉	Myers (1980)
トウモロコシ	0.27 - 0.29	1.5	単子葉	Wiesler and Horst (1994)
コムギ	0.26	1.8	単子葉	Gregory et al. (1978)
セイヨウアブラナ	0.34	1.8	双子葉	Barracough (1989)
ダイズ	0.75	1.8	双子葉	Sivakumar et al. (1977)
ワタ	0.66 - 1.2	1.8	双子葉	Klepper et al. (1973)

第2表 エリアンサス、ネピアグラス、主要作物の根重と根長の最大値 (Gregory 2008を改編).

植物	根重 (g m^{-2})	根長 (km m^{-2})	引用文献
エリアンサス	850	35.8	Sekiya et al. (2013)
ネピアグラス	448	43.6	Sekiya et al. (2013)
サトウキビ	158	14.6	Sekiya et al. (2013)
オオムギ	98	5.3	Gregory et al. (1992)
カリフラワー	-	12.7	Kage et al. (2000)
ヒヨコマメ	45	4.5	Brown et al. (1989)
ソラマメ	98	2.9	Manschadi et al. (1998)
ラッカセイ	103	12.1	Ketring and Reid (1993)
トウモロコシ	160	15.1	Mengel and Barber (1974)
トウジンビエ	63	4.2	Gregory and Squire (1979)
キマメ	145	1.9	Devi et al. (1996)
ジャガイモ	25.5	8.7	Opena and Porter (1999)
セイヨウアブラナ	163	28.3	Barracough (1989)
水稻	86	20.7	Thangaraj et al. (1990)
ソルガム	100	26.5	Myers (1980)
ダイズ	58	5.5	Sivakumar et al. (1977)
サトウダイコン	76	9.7	Pearson and Jacobs (1985)
コムギ	350	18.4	Savin et al. (1994)
冬コムギ	105	23.5	Gregory et al. (1978)
主要作物の平均	114.6	12.6	

【多量の脱落根】

西東京市の屋外圃場で植付け後3年目のエリアンサスを対象に、イングロース・コア法を使用して（詳細は森田ら2013cを参照）、深さ0.3 mの土層における全根長、現存根長、脱落根長の季節変動（2013年4月～2014年1月）を測定した。10ヵ月の調査期間中、エリアンサスは 28 km m^{-2} に達する根量を土壤中へ脱落させた一方で、新規に 40 km m^{-2} を生産した結果、現存根長は 19 km m^{-2} （2013年4月）から 31 km m^{-2} （2014年1月）まで増加した。

5. エリアンサスとネピアグラスの根の内部形態

【概観】

エリアンサスとネピアグラスの節根は、イネ科としては太く、中心柱に多くの導管を持つ。皮層には空隙を形成し、晩秋から冬にかけて中心柱にデンプン粒を蓄積する。エリアンサスの根の内部形態の基本構造はサトウキビに類似し、外皮、内皮、中心柱の構造がトウモロコシなどのイネ科作物とは異なる。

【Soil sheathの形成と外皮】

エリアンサスでは、表皮が根毛を密に形成し、根の表面に土壌を鞘状に強く付着させる（第4図a; Shitsutsu et al. 2015）。こうした構造は、トウモロコシではsoil sheathと呼ばれ、乾燥などのストレス条件下で根の機能を保持する可能性が指摘されている（McCully 1999）。表皮のすぐ内側には、1層の外皮と1～3層の厚膜組織からなる下皮が形成される（第4図b; Shitsutsu et al. 2015）。下皮では、複数の層にまたがる細胞壁の二次修飾も観察され、soil sheathと共に根のストレス耐性を高めている可能性がある。

【皮層の空隙】

エリアンサスとネピアグラスは皮層に空隙を形成する（第4図a; 阿部ら2012; Shitsutsu et al. 2015）。この空隙に通気機能があるとすれば、両種が一時的な湛水や過湿に対して強い耐性を持ち、畑状態であっても酸素濃度の低い深い土層まで根が伸長できる一因かもしれない。イネ科作物では、皮層崩壊（空隙形成）により溶出した養分が側根形成に再利用されており（林ら2014）、エリアンサスとネピアグラスにおいても、そうした意義があるかもしれない。

【内皮と中心柱】

エリアンサスでは、内皮の一部が並層分裂により2層になる場合がある（第4図c; Shitsutsu et al. 2015）。エリアンサスとネピアグラスでは、同様に中心柱側の細胞壁が厚く肥大し、ケイ酸を高い濃度で蓄積する（阿

第4図 エリアンサスの節根の内部構造（Shitsutsu et al. 2015 より出版社の許可を得て転載）。

- (a) 12月に採取した節根の概観。根が厚いsoil sheath(ss)に覆われ、皮層に通気組織とみられる空隙がある(ae)。中心柱には、多数の大きな後生木部導管(lx)がリング状に並び、芯の柔細胞(pt)にはデンプン粒が詰まっている。黒線は $500 \mu\text{m}$ を示す。
- (b) 根の外縁部分。表皮(ep)の内側に外皮1層(ex)と厚膜組織数層(sc)からなる下皮(hp)が形成されている。黒線は $100 \mu\text{m}$ を示す。
- (c) 内皮(en)および中心柱の外縁部分。内皮の一部に並層分裂がみられる。内鞘にはラグビーボール型の細胞(ov)が数層並び、その内側に木部(xy)と篩部(ph)が並んでいる。黒線は $100 \mu\text{m}$ を示す。
- いずれも、フロログルシノール・塩酸法でリグニンを赤く染色して光学顕微鏡で観察した。

部ら 2010). 特にエリアンサスでは、ソルガムの根にみられるように (Lux et al. 2003), 瘤状の構造にケイ酸の蓄積が認められる. トウモロコシなどのイネ科作物では、中心柱の最外層である内鞘は 1 層であるが、エリアンサスでは細胞壁が強くリグニン化したラグビーボールのような形の細胞が数層並んでいる (第 4 図 c). 根の直径と中心柱の直径は比例し、側根においても 1 次根と同じ近似直線で表すことができる. さらに、原生木部数や大きな後生木部導管の直径も根の直径と密接な関係が認められる (Shiotsu et al. 2015). エリアンサスとネピアグラスは同様に、晩秋から初冬に掛けて中心柱の柔組織やラグビーボール型の内鞘にデンプン粒を蓄積する (阿部ら 2010; Shiotsu et al. 2012; Shiotsu et al. 2015). 特にエリアンサスでは顕著である (第 4 図 a). しかし、夏季には、デンプン粒は僅かしか観察されない. 晩秋にエリアンサスの地上部を刈取ると翌春の再生が抑制されることが報告されており (松波ら 2014), 晩秋から初冬にかけて蓄積したデンプンが翌春の茎葉再生の原資として消費されている可能性が高い. 特にエリアンサスにおいては、根が重要な貯蔵器官として働いていると考えられる.

6. 根から見たエリアンサスとネピアグラスの原料作物としての適性

【概観】

エリアンサスとネピアグラスは、土壤環境が劣悪で農地としての利用が困難な土地でも旺盛に生育する. また、劣悪土壤で栽培し、地上部全量を系外へ持ち出しても、土壤炭素濃度を増加させる.

【硬く痩せた土地での生育 (エリアンサス)】

千葉県富津市には、標高 160 m ほどの浅間山が存在したが、東京湾に人口島を造成するため 1971 年～1980 年に約 2 億 m^3 の砂が掘り出された結果、山は消失して約 200 ha の平地が造成された (多田 1982). 平地の土壤は、一般的な農地土壤と比較すると、窒素 ($\text{NO}_3\text{-N}$: n.d., $\text{NH}_4\text{-N}$: 0.37 $\text{mg } 100\text{g}^{-1}$) とリン酸 (P_2O_5 : 4.8 $\text{mg } 100\text{g}^{-1}$) が欠乏し、カルシウム (CaO : 199 $\text{mg } 100\text{g}^{-1}$) が非常に多かった. また、腐植 (0.1%) が少なく塩基置換容量 (8.8 cmolc kg^{-1}) も小さいことから、塩基飽和度 (114%) が異常に高く、pH (7.6) を高く押し上げる要因になっていた. さらに、土壤硬度が非常に高く、深さ 0.1 m 付近で 1.5～2.0 Mpa であった. そこで私達は、原料作物が荒廃地でも生育できることを実証するため、平地の一部でエリアンサスの栽培試験を実施した (第 5 図). 植付け後 8 ヶ月目と 22 ヶ月目の地上部乾物重はそれぞれ 0.6 t ha^{-1} と 1.6 t ha^{-1} と非常に小さかった (第 5 図 a). エリアンサスでは、植付け後 1～2 年目の地上部乾物重が低いことが知られており (NARO 2008; Ando et al. 2011; Ra et al. 2012), 植付け

後 22 ヶ月目までの低生産性は、採砂跡地の悪環境だけではなく、エリアンサスの生産特性にも起因した可能性がある. その後、NARO (2008) や Ando et al. (2011) と同様に地上部乾物重が増加し、29 ヶ月目に 9.5 t ha^{-1} (第 5 図 a, b), 40 ヶ月目に 9.6 t ha^{-1} であった (第 5 図 a). 植付け後 12 ヶ月目以降は無施肥で栽培試験を継続しており、40 ヶ月目でも比較的高い乾物生産を維持できたのは驚くべきであろう. 試験終了時 (植付け後 42 ヶ月目) には、少なくとも深さ 1 m の土層で根を観察した (第 5 図 c). 硬い土壤でも深く大きな根を発達させ、濃度の薄い養分を広範囲の土壤から獲得したことが、植付け後 40 ヶ月目における高い乾物生産に寄与している可能性がある. いずれにしても、エリアンサスは荒廃地でも生育可能であることが示された.

第 5 図 採砂跡地 (千葉県富津市) で実施したエリアンサスの栽培試験.

(a) エリアンサスの地上部バイオマス収量の経時変化 ($n = 5$).

(b) 植付け後 29 ヶ月目のエリアンサス.

(c) 深さ 0～1 m の土層断面に露出した植付け後 42 ヶ月目のエリアンサスの根. 拡大写真中の矢印は深さ 1 m の土層に発達したエリアンサスの根を示す.

2010 年 6 月にエリアンサスの苗を移植し、毎年地上部を刈取りながら、2013 年 12 月 (植付け後 42 ヶ月目) に試験を終了した.

【湛水条件下での生育 (ネピアグラス)】

GIS 解析の結果、インドネシア共和国ランブン州はバイオマス生産に好適な気候帯に属することに加えて、非農地、荒廢地、未利用地を多く抱えるため、原料作物栽培に適することが示された (Sekiya et al. 2014b). また現地調査により、未利用地の一つとして、氾濫原や低湿地が多く存在することも判明した. そこで、氾濫原や低湿地をネピアグラスの栽培地として活用するために、栽培試験を実施した. 圃場を湛水してネピアグラスとトウモロコシを栽培したところ、トウモロコシの地上部乾物重は対照区よりも大きく減少したのに対して、ネピアグラスではむしろ対照区よりも増加する傾向

を示した (阿部ら 2012). 次に大型ポットに栽培したネピアグラスを湛水して根の反応を調査した (第 6 図 a). ネピアグラスはポット全体に多量の根を発達させ (第 6 図 b), その内部、特に節根の基部から中央部に掛けて、皮層に多くの空隙を形成していた (第 6 図 c). ネピアグラスでは、この空隙を通じて湛水条件下の根に酸素を供給していることが示唆された. ただし、皮層の空隙は、湛水条件に限らず、水の少ない畑条件でも同程度に形成される (阿部ら 2012). それに対して、湛水条件では特異的に、茎から水中に不定根 (水中根) が発達し (第 6 図 d), さらに水中根が上方へ伸長して水上に突き抜ける様子が観察された (第 6 図 e). これら水中根が酸素を獲得し、皮層の空隙を通じて、完全に湛水した根に供給している可能性がある. いずれにしても、ネピアグラスは耐湿性が高く、ランブン州の氾濫原や低湿地を栽培地として活用できる可能性が示された.

【多量の炭素供給】

インドネシア共和国ランブン州には、未利用地の一つとして、石炭や鉄鉱石を採掘した小規模な露点掘り跡地も点在する. そこで、露点掘り跡地を原料作物の栽培地として活用するため、栽培試験を実施した (第 7 図 a). 試験圃場が立地する土地では、鉄鉱石の採掘を目的に深さ 2 ~ 3 m まで露天掘りされたものの、埋蔵量が少ないために 2007 年に放棄された. 露出した赤黄色土は oxide 層に分類され、粘土含量は高いものの塩基置換容量が低く ($1.9 \sim 2.8 \text{ cmolc kg}^{-1}$), リン酸 ($12 \sim 14 \text{ mg } 100\text{g}^{-1}$) やカリウム ($2 \sim 4 \text{ mg } 100\text{g}^{-1}$) 濃度が低いことに加えて、水分保持能も低いという特徴を持つ (Fauzi et al. 2011). 鉱山としては、ほとんど機能していないことから、重金属等による汚染はない. 肥沃度や水分保持能が低く、硬い土層が露出しているため、植生回復が妨げられていた (第 7 図 a の赤黄色土が露出した場所). エリアンサスとネピアグラスは、このような露点掘り跡地においても旺盛に生育し (第 7 図 b), 18 ヶ月間でそれぞれ 16.3 t ha^{-1} と 24.0 t ha^{-1} の地上部乾物重を生産した (第 7 図 c). その間、深さ 0 ~ 0.3 m の土層で土壤炭素濃度が大きく増加した (第 7 図 d). 植付け後 19 ヶ月目に深さ 2.0 m の塹壕を掘削したところ (第 7 図 e), エリアンサスの根は深さ 1.8 m (第 7 図 f), ネピアグラスの根は深さ 2.0 m の土層 (第 7 図 g) まで到達していた. 自然条件下で植生回復しないような露点掘り跡地においても、エリアンサスとネピアグラスは生育可能で、特にネピアグラスの生産性が高いことが示された. また、両植物種の地上部を刈取って全量を持ち出しても、少なくとも深さ 0 ~ 0.3 m の土層で土壤炭素濃度が増加し、土壤肥沃度が低下しない可能性が示唆された.

第 6 図 ネピアグラスの湛水試験 (阿部ら 2013 を改編).

- (a) 湛水条件で大型ポット栽培したネピアグラス (植付け後 9 週目) の地上部.
- (b) 湛水条件で大型ポット栽培したネピアグラス (植付け後 9 週目) の根系.
- (c) ネピアグラス (植付け後 9 週目) の節根に発達した空隙.
- (d) ネピアグラス (植付け後 9 週目) の茎から水中へ発達した不定根 (水中根).
- (e) 上方へ伸長するネピアグラス (植付け後 9 週目) の不定根 (水中根).

TOYOTA BIO INDONESIA (インドネシア共和国ランブン州) の試験圃場において 2012 年 6 月 ~ 2012 年 8 月まで実施した.

第7図 露天掘り跡地（インドネシア共和国ランブン州）で実施したエリアンサスとネピアグラスの栽培試験（Sekiya et al. 2014a を改編）。

- (a) 植付け後8ヵ月目の栽培試験圃場。
- (b) 植付け後8ヵ月目のエリアンサス（左）とネピアグラス（右）。
- (c) 植付け後18ヵ月目のエリアンサスとネピアグラスの地上部乾物重。
- (d) 生育期間中（18ヵ月間）の土壤炭素濃度の変化。
- (e) 植付け後19ヵ月目に掘削した塹壕。
- (f) 深さ1.6～1.9mの土層に発達したエリアンサス（植付け後19ヵ月目）の根。
- (g) 深さ1.9～2.1mの土層に発達したネピアグラス（植付け後19ヵ月目）の根。

2012年4月、エリアンサス、ネピアグラス、植物なしの3水準を3反復で植え付けた。エリアンサスは植付け後10ヵ月目と18ヵ月目の2回刈取り、ネピアグラスは10ヵ月目、14ヵ月目、18ヵ月目の3回刈取った。(c)における地上部乾物重は18ヵ月間に生産された全乾物重を示す。

7. おわりに

エタノール生産においては、最終産物のエタノールに含まれるエネルギー量よりも生産工程で消費されるエネルギー量が小さくなければならない。その関係が逆転し、多量のエネルギーを消費して少量のエネルギー

を生産するようでは、そもそもエタノールを生産しない方がよいという議論になる。エリアンサスとネピアグラスは多年生草本であり、一年生作物とは異なって、圃場の準備や植付けを毎年行う必要がない。また採砂跡地や露点掘り跡地で経験した通り、エリアンサスとネピアグラスの栽培には、一年生作物の栽培ほどに肥料

や薬剤を投入する必要がない。このように耕種管理に要するエネルギー量が抑制されるため、エリアンサスとネピアグラスは原料作物として非常に有望である。しかし、原料として地上部全量を系外へ持ち出すため、土壌へ還元される有機物が減少し、土壌の肥沃度や保水性が低下する懸念がある。このため、原料作物栽培ひいてはエタノール生産の持続性を担保するには、堆肥などの有機物を土壌へ還元する必要がある。しかし、堆肥の収集、運搬、鋤き込みには、多くのエネルギーが消費されるため、エネルギー収支が合わない可能性がある。しかも、土壌中で容易に分解される無害な有機物を多量に確保することは食用作物栽培でも難しく、原料作物の栽培体系に合わせて必要量の堆肥を安定的に確保できるか疑問である。西東京市やインドネシアで観察したように、エリアンサスとネピアグラスは多量の現存根を発達させると同時に多量の脱落根を土壌へ供給する。現存根から滲出する低分子の有機物や脱落根の一部は、土壌有機炭素として蓄積する。露天掘り跡地で観察した通り、エリアンサスとネピアグラスの栽培により、地上部全量を系外へ持ち出したとしても、根からの有機物供給で土壌炭素濃度が増加する。増加した炭素濃度が土壌の肥沃度や保水性の維持に貢献できれば、低投入で持続的にエリアンサスとネピアグラスを栽培することが可能になるだろう。エリアンサスとネピアグラスの根が、硬い土壌を貫入する能力や貧栄養土壌から養分を獲得する能力などと合わせて、土壌へ有機物を供給する能力について、さらに研究する必要がある。

引用文献

- 阿部淳・塩津文隆・森田茂紀・辻渉・谷本英一 2010. エリアンサスの根におけるケイ素とデンプンの蓄積：低真空走査電子顕微鏡とX線分析装置による観察。根の研究19 (2) : 59.
- 阿部淳・林智仁・塩津文隆・森田茂紀 2012. バイオ燃料原料作物ネピアグラスとエリアンサスの過湿条件下での生育と根の通気組織形成－インドネシアでの予備的圃場試験。根の研究21 (3) : 84.
- 阿部淳・林智仁・関谷信人・森田茂紀 2013. バイオ燃料原料作物ネピアグラスの湛水処理への反応－ポット試験における生育と茎・根の形態の変化。根の研究 22 (2) : 85.
- Amalraj, V.A., Balasundaram, N. 2006. On the taxonomy of the members of 'Saccharum complex'. Genetic Resources and Crop Evolution 53 (1) : 35-41.
- Amalraj, V.A., Rakkiyappan, P., Devi, A.R. 2013. Evaluation of wild sugarcane *Erianthus arundinaceus* (retz) jesw. germplasm. Journal of Sugarcane Research 1 (2) : 23-27.
- Ando, S., Sugiura, M., Yamada, T., Katsuta, M., Ishikawa, S., Terajima, Y., Sugimoto, A., Matsuoka, M. 2011. Overwintering ability and dry matter production of sugarcane hybrids and relatives in the Kanto region of Japan. JARQ 45: 259-267.
- Angima, S.D., Stott, D.E., O'Neill, M.K., Ong, C.K., Weesies, G.A. 2002. Use of Calliandra-Napier grass hedges to control erosion in central Kenya. Agriculture, Ecosystems & Environments 91 (1-3) : 15-23.
- Ball-Coelho, B., Sampaio, E.V.S.B., Tiessen, H., Stewart, J.W.B. 1992. Root dynamics in plant and ratoon crops of sugar cane. Plant and Soil 142 (2) : 297-305.
- Barracough, P.B. 1989. Root growth, macro-nutrient uptake dynamics and soil fertility requirements of a high-yielding winter oilseed rape crop. Plant and Soil 119 (1) : 59-70.
- Boddiger, D. 2007. Boosting biofuel crops could threaten food security. The Lancet 370(9591) : 923-924.
- Brown, S.C., Gregory, P.J., Cooper, P.J.M., Keating, J.D.H. 1989. Root and shoot growth and water use of chickpea (*Cicer arietinum*) grown in dryland conditions: effects of sowing date and genotype. Journal of Agricultural Science 113 : 41-49.
- Cai, Q., Aitken, K., Deng, H.H., Chen, X.W., Fu, C., Jackson, P.A., McIntyre, C.L. 2005. Verification of the introgression of *Erianthus arundinaceus* germplasm into sugarcane using molecular markers. Plant Breeding 124: 322-328.
- Cheng, S.H. Cao, L.Y., Zhuang, J.Y., Wu, W.M. Yang, S.H., Zhan, X.D. 2009. A breeding strategy for hybrid rice in China. In Xie, F. and Hardy, B. eds., Accelerating Hybrid Rice Development, IRRI, Manila. 25-34.
- Cruse, R.M., Cruse, M.J., Reicosky, D.C. 2010. Soil quality impacts of residue removal for biofuel feedstock. In Lal, R. and Stewart, B.A., eds., Soil Quality and Biofuel Production, CRC Press, Boca Raton. 45-62.
- Devi, G., Ito, O., Matsunaga, R., Tobita, S., Rao, T.P., Vidyalakshmi, N., Lee, K.K. 1996. Simulating root system development of short-duration pigeonpea. Experimental Agriculture 32 : 67-78.
- Farrell, G. Simons, S.A., Hillocks, R. J. 2002. Pests, disease and weeds of Napier grass, *Pennisetum purpureum*: a review. International Journal of Pest Management 48 (1) : 39-48.
- Fauzi, A.I., Agus, F., Sukarman, N.K. 2011. Characterizing the soil for improved nutrient management in selected maize growing areas of Indonesia. Indonesian Journal of Agricultural Sciences 12 : 17-32.
- 福澤康典・小宮康明・上野正実・川満芳信 2009. サトウキビ初期生育における根の種類・量と生育量に関する研究。日本作物学会紀事78 (3) : 356-362.
- Galdos, M.V., Cerri, C.C., Bernoux, M., Cerri, C.E.P. 2010. Ethanol production from sugarcane and soil quality. In Lal, R. and Stewart, B.A. eds., Soil Quality and Biofuel Production, CRC Press, Boca Raton. 137-150.
- Gregory, P.J., McGowan, M., Biscoe, P.V., Hunter, B. 1978. Water relations of winter wheat: 1. Growth of the root system. The Journal of Agricultural Science 91(1) : 91-102.
- Gregory, P.J. 2008. Development and growth of root systems. In, Plant Roots: Growth, Activity and Interactions with the Soil. John Wiley & Sons, Oxford. 45-79.
- Gregory, P.J., Squire, G.R. 1979. Irrigation effects on roots and shoots of pearl millet (*Pennisetum typhoides*). Experimental

- Agriculture 15 : 161-168.
- Gregory, P.J., Tennant, D., Belford, R.K. 1992. Root and shoot growth, and water and light use efficiency of barley and wheat crops grown on a shallow duplex soil in a mediterranean-type environment. *Australian Journal of Agricultural Research* 43 : 555-573.
- Hattori, T., Morita, S. 2010. Energy crops for sustainable bioethanol production; which, where and how?. *Plant Production Science* 13 (3) : 221-234.
- Hattori, T., Shiotsu, F., Doi, T., Morita, S. 2010. Suppression of tillering in *Erianthus ravennae* (L.) Beauv. due to drought stress at establishment. *Plant Production Science* 13 (3) : 252-255.
- 服部太一郎・塩津文隆・森田茂紀 2010. 食糧生産とバイオエタノール生産の動向. 鮫島正浩 編 次世代バイオエタノール生産の技術革新と事業展開—持続可能社会実現に向けたセルロース系バイオマスの利用技術—. フロンティア出版, 東京. 25-33.
- 林智仁・茶谷円・三屋史朗・山内章 2014. 過湿条件下におけるコムギの根通気組織形成と側根発達の関係. 第238回日本作物学会講演会要旨集 280.
- Horikawa, Y., Imai, T., Takada, R., Watanabe, T., Takabe, K., Kobayashi, Y., Sugiyama, J. 2012. Chemometric analysis with near-infrared spectroscopy for chemically pretreated *Erianthus* toward efficient bioethanol production. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 166 : 711-721.
- 稲永忍・伊藤浩司・矢島経雄・稲生英夫・秦野茂 1990. ネピアグラス (*Pennisetum purpureum* Schumach.) の側芽の生存率と伸長に及ぼす温度の影響. 日本作物学会紀事 59(4) : 747-751.
- 石井康之・伊藤浩司・福山喜一 2000. 南九州におけるネピアグラスの越冬性に及ぼす種々の栽培的要因の影響. 日本作物学会紀事 69 (2) : 209-216.
- Izumi, Y., Uchida, K., Iijima, M. 2004. Crop production in successive wheat-soybean rotation with no tillage practice in relation to the root system development. *Plant Production Science* 7 (3) : 329-336.
- Jackson, P., Henry, R.J. 2011. *Erianthus*. In Kole, C. ed., *Wild Crop Relatives: Genomic and Breeding Resources, Industrial Crops*. Springer-Verlag, Berlin. 97-108.
- Kage, H., Kochler, M., Stützel, H. 2000. Root growth of cauliflower (*Brassica oleracea* L. *botrytis*) under unstressed conditions: measurement and modelling. *Plant and Soil* 223 : 131-145.
- Ketring, D.L., Reid, J.L. 1993. Growth of peanut roots under field conditions. *Agronomy Journal* 85 : 80-85.
- Klepper, B., Taylor, H.M., Huck, M.G., Fiscus, E.L. 1973. Water relations and growth of cotton in drying soil. *Agronomy Journal* 65 (2) : 307-310.
- Knoll, J.E., Anderson, W.F., Strickland, T.C., Hubbard, R.K., Malik, R. 2012. Low-input production of biomass from perennial grasses in the coastal plain of Georgia, USA. *Bioenergy Research* 5 (1) : 206-214.
- Kondo, M., Murty, M.V., Aragones, D.V. 2000. Characteristics of root growth and water uptake from soil in upland rice and maize under water stress. *Soil Science and Plant Nutrition* 46(3) : 721-732.
- Laclau, P.B., Laclau, J.P. 2009. Growth of the whole root system for a plant crop of sugarcane under rainfed and irrigated environments in Brazil. *Field Crops Research* 114 (3) : 351-360.
- Lux, A., Luxova, M., Abe, J., Tanimoto, E., Hattori, T., Inanaga, S. 2003. The dynamics of silicon deposition in the sorghum root endodermis. *New Phytologist* 158 : 437-441.
- Ma, Z., Wood, C. W., Bransby, D. I. 2000a. Soil management impact on soil carbon sequestration by switchgrass. *Biomass and Bioenergy* 18 (1) : 469-477.
- Ma, Z., Wood, C. W., Bransby, D. I. 2000b. Impacts of soil management on root characteristics of switchgrass. *Biomass and Bioenergy* 18 (2) : 105-112.
- Ma, C., Naidu, R., Liu, F., Lin, C., Ming, H. 2012. Influence of hybrid giant Napier grass on salt and nutrient distribution with depth in a saline soil. *Biodegradation* 23 (6) : 907-916.
- Manschadi, A.M., Sauerborn, J., Stützel, H., Gobel, W., Saxena, M.C. 1998. Simulation of faba bean (*Vicia faba* L.) growth and development under Mediterranean conditions: model adaptation and evaluation. *European Journal of Agronomy* 9 : 273-293.
- Matsumoto, N., Sano, D., Elder, M. 2009. Biofuel initiatives in Japan: strategies, policies, and future potential. *Applied Energy* 86 : S69-S76.
- 松波寿弥・小林真・安藤象太郎・寺島義文 2014. 刈取りの時期および高さが越冬後の数系統のエリアンサス (*Erianthus arundinaceus* (L.) Beauv.) の再生に及ぼす影響. 日本草地学会誌 59 (4) : 253-260.
- Matsuo, K., Chuenpreecha, T., Matsumoto, N., Ponragdee, W. 2002. Eco-physiological characteristics of *Erianthus* spp. and yielding abilities of three forages under conditions of cattle feces application. *JIRCAS Working Report* 30 : 187-197.
- Matsuoka, M. 2006. Sugarcane cultivation and sugar industry in Japan. *Sugar Tech* 8: 3-9.
- McCully, M.E. 1999. Roots in soil: unearthing the complexities of roots and their rhizospheres. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* 50 : 695-718.
- Mengel, D.B., Barber, S.A. 1974. Development and distribution of the corn root system under field conditions. *Agronomy Journal* 66 : 341-344.
- Mislevy, P., Martin, F.G., Adjei, M.B., Miller, J.D. 1997. Harvest management effects on quantity and quality of *Erianthus* plant morphological components. *Biomass and Bioenergy* 13: 51-58.
- Morais, R.F., Quesada, D.M., Reis, V.M., Urquiaga, S., Alves, B.J., Boddey, R.M. 2012. Contribution of biological nitrogen fixation to Elephant grass (*Pennisetum purpureum* Schum.). *Plant and Soil* 356 (1-2) : 23-34.
- 森田茂紀・関谷信人・阿部淳 2013a. セルロース系バイオエタノール原料作物の研究戦略. 日本エネルギー学会誌 92 (7) : 562-570.
- 森田茂紀・関谷信人・阿部淳 2013b. 根の形態を「見る」. 根の研究 22 (1) : 9-17.
- 森田茂紀・関谷信人・阿部淳 2013c. 根の形成を「見る」. 根の研究 22 (3) : 111-118.

- Mutegi, J.K., Mugendi, D.N., Verchot, L.V., Kung'u, J.M. 2008. Combining Napier grass with leguminous shrubs in contour hedgerows controls soil erosion without competing with crops. *Agroforestry Systems* 74 (1) : 37-49.
- Myers, R.J.K. 1980. The root system of a grain sorghum crop. *Field Crops Research* 3 : 53-64.
- NARO. 2008. エリアンサスは乾物生産性が高くセルロース系資源作物として有望である. <http://www.naro.affrc.go.jp/project/results/laboratory/karc/2008/biomass08-03.html>
- NEDO (独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構) 2014. セルロース系エタノール革新的生産システム開発事業. http://www.nedo.go.jp/activities/FF_00042.html
- Opena, G.B., Porter, G.A. 1999. Soil management and supplemental irrigation effects on potato: II. Root growth. *Agronomy Journal* 91 : 426-431.
- Oyanagi, A., Nakamoto, T., Wada, M. 1993. Relationship between root growth angle of seedlings and vertical distribution of roots in the field in wheat cultivars. *Japanese Journal of Crop Science* 62 (4) : 565-570.
- Oyanagi, A. 1994. Gravitropic response growth angle and vertical distribution of roots of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plant and Soil* 165 (2) : 323-326.
- 小柳敦史 1998. 深さの定量化による作物根系の新しいとらえかた. *日本作物学会紀事* 67(1) : 3-10.
- Oyanagi, A., Nakamoto, T., Wada, M. 1998. How deep should we measure root length to find a varietal difference of root distribution in wheat? In Box, J.E. ed., *Root Demographics and Their Efficiencies in Sustainable Agriculture, Grasslands and Forest Ecosystems*, Kluwer Academic Publisher, Dordrecht. 789-793.
- Pearson, C.J., Jacobs, B.C. 1985. Root distribution in space and time in *Trifolium subterraneum*. *Australian Journal of Agricultural Research* 36 : 601-614.
- Piperidis, G., Christopher, M.J., Carroll, B.J., Berding, N., D'Hont, A. 2000. Molecular contribution to selection of intergeneric hybrids between sugarcane and the wild species *Erianthus arundinaceus*. *Genome* 43: 1033-1037.
- Ra, K., Shiotsu, F., Abe, J., Morita, S. 2012. Biomass yield and nitrogen use efficiency of cellulosic energy crops for ethanol production. *Biomass and Bioenergy* 37 : 330-334.
- Savin, R., Hall, A.J., Satorre, E.H. 1994. Testing the root growth subroutine of the CERES-Wheat model for two cultivars of different cycle length. *Field Crops Research* 38 : 125-133.
- Sekiya, N., Abe, J., Shiotsu, F., Morita, S. 2014a. Cultivation of *Erianthus* and Napier grass at an abandoned mine in Lampung, Indonesia. *American Journal of Plant Sciences* 5 : 1711-1720.
- Sekiya, N., Hattori, T., Shiotsu, F., Abe, J., Morita, S. 2014b. Identifying potential field sites for production of cellulosic energy plants in Asia. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 7(3) : 59-67.
- Sekiya, N., Shiotsu, F., Abe, J., Morita, S. 2013. Distribution and quantity of root systems of field-grown *Erianthus* and Napier grass. *American Journal of Plant Sciences* 4 (12A) : 16-22.
- Shiotsu, F., Abe, J., Doi, T., Gau, M., Morita, S. 2015. Root morphology and anatomy of field-grown *Erianthus arundinaceus*. *American Journal of Plant Sciences* 6 (1) : 103-112.
- Shiotsu, F., Abe, J., Morita, S. 2012. Root system distribution and root morphology of energy crop *Erianthus*. 8th Symposium of the International Society of Root research. *Roots to the Future*. 26-29.
- Shiotsu, F., Hattori, T., Morita, S. 2011. Biomass as energy resource. In United Nations University ed., *Designing Our Future : Local Perspectives on Bioproduction, Ecosystem and Humanity*. United Nations University Press, Tokyo. 88-98.
- 塩津文隆・服部太一郎・森田茂紀 2010. バイオエタノール原料作物の低投入持続的栽培. 鯨島正浩 編 次世代バイオエタノール生産の技術革新と事業展開—持続可能社会実現に向けたセルロース系バイオマスの利用技術—. フロンティア出版, 東京. 87-95.
- Sivakumar, M.V.K., Taylor, H.M., Shaw, R.H. 1977. Top and root relations of field-grown soybeans. *Agronomy Journal* 69 (3) : 470-473.
- Suman, A., Ali, K., Arro, J., Parco, A. S., Kimbeng, C. A., Baisakh, N. 2012. Molecular diversity among members of the Saccharum complex assessed using TRAP markers based on lignin-related genes. *BioEnergy Research*, 5: 197-205.
- Thangaraj, M., O' Toole, J.C., De Datta, S.K. 1990. Root response to water stress in rainfed lowland rice. *Experimental Agriculture* 26 : 287-296.
- 多田堯 1982. 山を削ると地殻は隆起する. *地震* 35 (3) : 427-433.
- Tsuruta, S.I., Ebina, M., Kobayashi, M., Hattori, T., Terauchi, T. 2012. Analysis of genetic diversity in the bioenergy plant *Erianthus arundinaceus* (Poaceae: Andropogoneae) using amplified fragment length polymorphism markers. *Grassland Science* 58: 174-177.
- US EIA (The United States Energy Information Administration) 2012. International Energy Statistics. <http://www.eia.gov/cfapps/ipdbproject/IEDIndex3.cfm?tid=79&pid=79&aid=1>
- Uwatoko, N., Tanaka, M., Saito, A., Gau, M. 2011. Establishment of plant regeneration system in *Erianthus arundinaceus* (Retz.) Jeswiet, a potential biomass crop. *Grassland Science* 57 : 231-237.
- Videira, S.S., Oliveira, D.M., Morais, R.F., Borges, W.L., Baldani, V.L.D., Baldani, J.I. 2012. Genetic diversity and plant growth promoting traits of diazotrophic bacteria isolated from two *Pennisetum purpureum* Schum. genotypes grown in the field. *Plant and Soil* 356 (1-2) : 51-66.
- Wiesler, F., Horst, W.J. 1994. Root growth and nitrate utilization of maize cultivars under field conditions. *Plant and Soil* 163 (2) : 267-277.
- Yamamura, M., Noda, S., Hattori, T., Shino, A., Kikuchi, J., Takabe, K., Tagane, S., Gau, M., Uwatoko, N., Mii, M., Suzuki, S., Suzuki, S., Shibata, D., Umezawa, T. 2013. Characterization of lignocellulose of *Erianthus arundinaceus* in relation to enzymatic saccharification efficiency. *Plant Biotechnology* 30 : 25-35.