

## ネピアグラス (*Pennisetum purpureum* Schumach) のカドミウム集積能力の推定 およびカドミウム汚染土壌の浄化に向けた乾燥技術の開発

濱野 琴美<sup>1)</sup>, 石井 康之<sup>2)\*</sup>, 山野明日香<sup>1)</sup>, 森 康太郎<sup>1)</sup>, 井戸田幸子<sup>2)</sup>, 姜 東鎮<sup>3)</sup>, 西脇 亜也<sup>3)</sup>

(<sup>1)</sup>宮崎大学大学院農学研究科・<sup>2)</sup>宮崎大学農学部・<sup>3)</sup>弘前大学農学生命科学部)

A case study for the estimation of cadmium absorption capacity and the development of low-cost drying technology of herbage in the cadmium-contaminated soil using napiergrass (*Pennisetum purpureum* Schumach)

Kotomi HAMANO<sup>1)</sup>, Yasuyuki ISHII<sup>2)\*</sup>, Asuka YAMANO<sup>1)</sup>, Koutarou MORI<sup>2)</sup>, Sachiko IDOTA<sup>2)</sup>,  
Dong-Jin KANG<sup>3)</sup> and Aya NISHIWAKI<sup>3)</sup>

(<sup>1)</sup> Graduate School of Agriculture, Univ. Miyazaki, <sup>2)</sup> Faculty of Agriculture, Univ. Miyazaki,

<sup>3)</sup> Faculty of Agriculture and Life Science, Hirosaki Univ.)

重金属はヒトの体内に一定限度以上取りこまれると健康障害を引き起こすため、環境排出規制が行われている。現在わが国のカドミウム (Cd) 濃度規制はFAO/WHOによって設置されたコーデックス委員会に準拠し、平成23年2月末日より精米中の基準値が0.4 mg/kg未満に強化された(農林水産省 2011)。したがって、重金属に汚染され、浄化が必要となる土壌の範囲が拡大し、それらを低コストで浄化できる技術開発の必要性が益々高まっている。客土あるいは土壌洗浄などの高コストな物理化学的方法に代わって、工場跡地などに比べて重金属汚染の程度が比較的低い農地では、低コストで周辺環境に悪影響を及ぼしにくい植物を利用した環境修復(ファイトレメディエーション)が注目されている(Kumarら 1995, 杉山ら 2004)。一方、重金属を集積した植物体の処理として一般的な焼却処理のためには、浄化植物体の含水率を低下させることがコスト削減には必須であり(農林水産省 2008)、加熱処理に代わって圃場在庫中の乾燥手法の開発が試みられている(NEDO 2009)。そこで本研究では、超多収バイオマス作物で、南九州低標高地では多年生の暖地型牧草ネピアグラス(*Pennisetum purpureum* Schumach) (伊藤ら 1991)を用いたファイトレメディエーション手法の九州地域への適応性および浄化植物体の低コスト乾燥技術の検討を行った。

### 材料と方法

#### 1. 圃場試験(実験1)

西南暖地内のカドミウム汚染水田転換畑(灰色低地土)に、ネピアグラス2品種Wruk wona(以下WK)およびMerkeron(以下ME)を、乱塊法により3反復で栽培した。2010年6月5日に発根げつ苗(草高約30 cm, 1本立て)を2株/m<sup>2</sup>で移植し、基肥として緩効性化成肥料(エムコート777, ジェイカムアグリ株式会社, N:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:K<sub>2</sub>O=17:17:17, 100目型, 成分量として各42.5 kg/

10 a)を、追肥として1番草刈取り時に普通化成肥料(14:14:14, 株式会社サンアンドホープ, 成分量各7.5 kg/10 a)を, N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>Oの成分量で各50 kg/10 aになるように施用した。地上部植物体の生育調査(草高, 部位別乾物重)を各品種各反復につき2個体について約1ヶ月間隔で行い, 9月13日に1番草を, 11月23日に2番草を地表10 cmで刈り取った。地上部の葉身(LB)および葉鞘を含む茎(ST)の部位別に, Cd含有率はマイクロウェーブ分解後にICP質量分析法により測定した。また土壌中のCd含有率は試験区の土壌を15 cm深まで5ヵ所採取し, 風乾し夾雑物を除去し, プラスチック製の2 mm目のふるいを通過させ, 農林省令第47号別表第二に基づき原子吸光法(波長2288 Åの吸光度)により測定した。

#### 2. 乾燥試験(実験2)

宮崎大学農学部内圃場で栽培したネピアグラスWKの地上部を収穫し, 透湿防水シート(乾つとシート, 三菱化学(株), 東京; 以下シート区)および透明ビニルトンネル(以下トンネル区)内のラティス(1.1 m×1.1 m)上に, 植物体を折り曲げひもで固定した。試験は梅雨期(以下A), 梅雨明け直後(B), 9月(C), 11月(D)の4期間とし, すべて27日間3反復で行った。各期間の両区内部に自記温度計(サーモリーフ, 大成化工(株), 大阪)を設置し, 温度(気温)を計測した。処理開始後, 毎日午後5時に植物体の現物重量を測定し, 調査開始時の生体重量と別途調査したサンプルから求めた含水率から算出した乾物重に対する各調査時の含水率を算出した。なお, 乾燥処理後27日目における乾燥程度の最も小さい期間Dの上記乾燥試験後の植物体については, 衝撃式粉碎乾燥装置(S-2型, スチールプランティック(株), 神奈川)を併用(衝撃処理)した。また, 各期間の各処理後の植物体の含水率を測定した後に, 1 mmメッシュの篩を通るように粉碎し, ペプシン-セルラーゼ法により*in vitro*乾物消化率(IVDMD)の測定を

キーワード: カドミウム, 透湿防水シート, ネピアグラス, ファイトレメディエーション

\*連絡責任者: yishii@cc.miyazaki-u.ac.jp

行った。

### 3. 統計処理

品種および処理の効果を検定するために統計解析ソフト（エクセル統計 2010）を用い、実験 1 については各形質に対して t 検定を行い、実験 2 については各処理を要素とする一元配置分散分析と Bonferroni 法による多重比較により、5%水準での有意性検定を行った。

## 結果と考察

### 1. 植物体の成長、収量およびCd吸収量（実験 1）

植物体の成長過程として、草高および部位別の乾物収量の推移を第 1 表に示した。草高および部位別の乾物収量は、9月13日の1番草刈取り時まで両品種ともに増加を続け、9月13日の草高を除いていずれの時期も有意差はないものの ME に比べ WK で高くなる傾向で、これは主に茎の収量の差によっていた（第 1 表）。この傾向は、黒ボク土壌（Mukhtarら 2003）および砂質土壌（Sunusiら 1999）と同様であったが、それらの研究に対し、1 番草刈取り時の乾物収量が低かった理由は、移植時期が約 1 ヶ月遅かったためであるが、2 番草の収量は非常に限定的であった。Cd含有率は葉身に比べて茎でいずれの品種、時期においても高く、MEに比べてWKで高くなる傾向であった。また植物体内のCd含有率は、両品種ともに11月の2番草で最も高くなった。植物体内のCd総蓄積量は乾物収量が最大である9月に最も高く、MEに比べてWKで、いずれの調査時期でも高く、特に8月および9月では、品種間で有意な差が認められた。1 番草と 2 番草を合わせた地上部における年間Cd総蓄積量は、MEに比べWKで高くなる傾向を示した（第 1 表）。しかし、ネピアグラスの高い乾物収量にも関わらず、Cd含有率は11月を除くとケナフ（栗原ら 2005）やヒマワリに比べて低く、単位面積当たりのCd総蓄積量も低かった。一方、2 番草収穫後の11月における土壌Cd含有率は1.48 mg/kg乾土であり、試験開始前（1.74 mg/kg乾土）に比べ約14%低減した。土壌中のCd含有量（深さ15 cm）は、試験期間中に261 mg/m<sup>2</sup>から222 mg/m<sup>2</sup>に約40 mg/m<sup>2</sup>減少した。ネピアグラスの地上部における

年間Cd蓄積量（WK, MEそれぞれ4.2, 2.7 mg/m<sup>2</sup>）には品種間差異が認められたことから、WKとMEの間で、土壌あるいは植物体の地下部から植物体地上部へのCdの移行パターンが異なる可能性が示唆された。

### 2. 植物体の乾燥特性（実験 2）

トンネル区およびシート区の含水率は、試験期間（A～D）の処理後27日目ではトンネル区（15.6～22.2%）が透湿防水シート区（27.5～36.2%）をいずれも下回った（第 1 図）。また期間AおよびBに比べて、期間CまたはD終了時の含水率が徐々に高くなる傾向であった。そこで、含水率の低下に大きく影響する気象要因を調べたところ、両処理区ともに、全日日射量×日平均温度の積算値と含水率との間に1%水準で高い負の相関関係があった（第 2 図）。すなわち、照射される日射量が高く、区内の温度が高いほど含水率が低下しやすいことが示され、また、同一の積算値の下では、シート区がトンネル区よりも含水率が約13ポイント程度高くなった。しかし、同一積算値の下でも期間Dでは他の期間と比べて含水率の低下が速かったことから、シート区の底上げにより通気が促進されたと考えられた。一方、トンネル区における含水率の低下促進に関わる様々な要因を検討したが、結論を出すには至らなかった。

一方、ネピアグラスでは植物体の齢を示す指標としてIVDMDが用いられており、IVDMDは生育が進むにつれ低下する（深川ら 2000）ことから、各期間の各部位におけるIVDMDを含水率低下速度と比較したところ、IVDMDの最も高かった期間Bで含水率低下が最も速く、IVDMDの低い期間CおよびDで、その低下が遅かったことがわかった（第 3 図）。これは齢の進行に伴い植物体内（特に茎部）にリグニンが蓄積し木化が進行したため、期間CおよびDではIVDMDが著しく低下し、含水率の低下を抑制したと推察される。トンネル区およびシート区への設置27日目における含水率は時期が遅くなるほど高まる傾向であったが、いずれの期間ともシート区に比べてトンネル区で低かった。一方、シート区の期間Dでも衝撃処理により、長期保存が可能な含水率15%未満に低下させることができた（第 1 図）。衝撃式粉碎乾燥装置による含水率の低下は、投入する原材料の含水率に依存する（山口ら 2009）と報告され

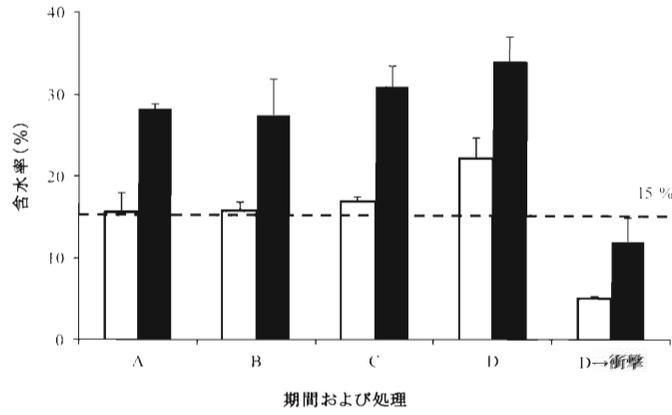
第 1 表 ネピアグラス植物体の草高、部位別乾物重、植物体中のカドミウムの含有率および蓄積量の推移（実験 1）。

| 調査日    | 品種 | 草高 (cm) | 乾物重 (g/m <sup>2</sup> ) |       |         | Cd含有率 (mg/kg DM) |       |         | Cd蓄積量 (mg/m <sup>2</sup> ) |      |         |
|--------|----|---------|-------------------------|-------|---------|------------------|-------|---------|----------------------------|------|---------|
|        |    |         | LB                      | ST    | LB + ST | LB               | ST    | LB + ST | LB                         | ST   | LB + ST |
| 8月6日   | WK | 185.0   | 221.2                   | 207.0 | 428.2   | 3.12*            | 3.98  | 3.54*   | 0.69*                      | 0.82 | 1.51*   |
|        | ME | 156.8   | 193.3                   | 165.4 | 358.7   | 1.43             | 3.35  | 2.32    | 0.28                       | 0.55 | 0.83    |
| 9月13日  | WK | 257.2*  | 446.5                   | 741.2 | 1187.6  | 1.73             | 2.41  | 2.15    | 0.77                       | 1.79 | 2.56*   |
|        | ME | 217.7   | 415.9                   | 606.0 | 1021.9  | 1.08             | 2.06  | 1.66    | 0.45                       | 1.25 | 1.70    |
| 11月23日 | WK | 25.3    | 14.1                    | 1.7   | 15.9    | 8.07             | 12.00 | 8.50    | 0.11                       | 0.02 | 0.13    |
|        | ME | 21.5    | 17.5                    | 1.5   | 19.0    | 6.00             | 11.00 | 6.40    | 0.10                       | 0.02 | 0.12    |

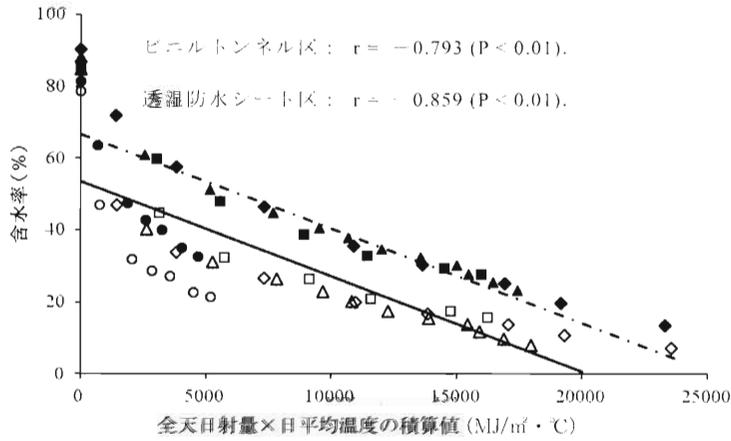
\*は、5%水準で品種間に有意差あり。

1) 品種：Wruk wona (WK), Merkeron (ME)。

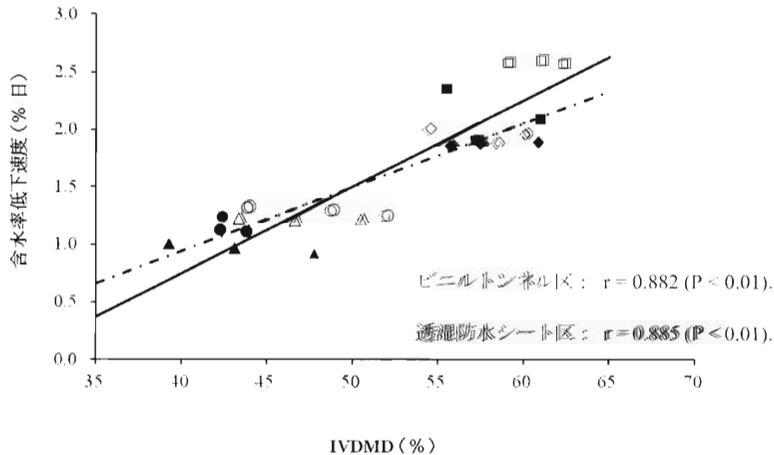
2) 部位：葉身 (LB), 葉鞘を含む茎 (ST)。



第1図 試験期間(A~D)の乾燥処理後27日目およびD処理後の衝撃式粉碎乾燥装置処理(D→衝撃)後におけるネピアグラス植物体内の含水率(実験2)。  
 1) ビニルトンネル区(□), 透湿防水シート区(■)。  
 2) 図中の棒線は標準偏差(n=3)を示す。



第2図 全天日射量×日平均温度の積算値とネピアグラスの含水率との関係(実験2)。  
 1) 白抜き(ビニルトンネル区), 黒塗り(透湿防水シート区)。  
 2) 期間:A(◇, ◆), B(□, ■), C(△, ▲), D(○, ●)



第3図 ネピアグラスのin vitro乾物消化率(IVDM)と含水率低下速度との関係(実験2)。  
 1) 白抜き(ビニルトンネル区), 黒塗り(透湿防水シート区)。  
 2) 期間:A(◇, ◆), B(□, ■), C(△, ▲), D(○, ●)

ており、多様な原材料での確認が必要である。

九州地域における重金属汚染土壌でネピアグラスが経年的に利用できるかどうか、また遷移金属元素ではあるが、カドミウムと同じ2価重金属の銅のネピアグラスにおける蓄積は地上部（茎葉部）より地下部（根）で高いという報告（Liuら 2009）もあり、地下部におけるカドミウム蓄積量や地上部への移行パターンの検討が必要である。

## 摘 要

多年生暖地型イネ科牧草のネピアグラス2品種（Wruk wonaおよびMerkeron）を用いて、カドミウム汚染圃場におけるファイトレメディエーション植物としての適性を検討し、低コスト浄化技術として透湿防水シートを用いた乾燥試験を行った。圃場試験では、Wruk wonaが乾物収量、カドミウム含有率および蓄積量ともに高くなったが、越冬後の成長および蓄積能力の継続的調査が必要である。乾燥試験では、透湿防水シートはビニルトンネルと比較して、含水率の低下速度は劣るが、衝撃式粉砕乾燥装置の併用によりいずれの調査時期であっても、透湿防水シート区でも長期保存が可能な15%以下の含水率まで低下させることができた。また、含水率の低下には区内の温度および日射量に加え、ネピアグラスの乾物消化率（生育ステージ）が関与していることが明らかとなった。土壌浄化後の植物体の低コスト処理技術として、透湿防水シートによる圃場乾燥あるいは生育ステージ・処理時期に応じた衝撃式粉砕乾燥装置の併用が有効であると考えられる。

## 謝 辞

本研究を行うにあたり、御助言および御協力頂きました、三菱化学株式会社コーポレートマーケティング部土壌環境浄化担当部長の谷口 彰氏、同社・大阪支社の中野邦弘氏、宮崎大学工学部の大島達也准教授、ならびに宮崎大学農学部附属フィールド科学教育センター技術職員の富永充洋氏に深謝申し上げます。

## 引用文献

Sunusi, A.A., K. Ito, Y. Ishii, M. Ueno and E. Miyagi 1999. Effects of the level of fertilizer input on dry matter productivity of two varieties of napiergrass (*Pennisetum purpureum* Schumach).

Japan. J. Grassl. Sci. 45: 35-41.

深川 聡・伊藤浩司・石井康之 2000. ネピアグラスにおける呼吸活性と乾物消化率の生育に伴う変化. 日草誌 46: 167-174.

伊藤浩司・中村佳照・石井康之・河野明彦・沼口寛次・田中重行 1991. 南九州におけるネピアグラスの乾物生産力. 日草九支報 21: 7-10.

Kumar, P.B.A.N., V. Duschkov, H. Motto and I. Paskin 1995. Phytoextraction: The use of plants to remove heavy metals from soils. Environ. Sci. Technol. 29: 1232-1238.

栗原宏幸・渡辺美生・早川孝彦 2005. カドミウム含有水田転換畑におけるケナフ (*Hibiscus cannabinus*) を用いたファイトレメディエーションの試み. 日土肥誌 76: 27-34.

Liu, X., Y. Shen, L. Lou, C. Ding and Q. Cai 2009. Copper tolerance of the biomass crops elephant grass (*Pennisetum purpureum* Schumach), vetiver grass (*Vetiveria zizanioides*) and the upland reed (*Phragmites australis*) in soil culture. Biotech. Adv. 27: 633-640.

Mukhtar, M., Y. Ishii, S. Tudsri, S. Idota and T. Sonoda 2003. Dry matter productivity and overwintering ability of the dwarf and normal napiergrass as affected by the plant density and cutting frequency. Plant Prod. Sci. 6: 65-73.

NEDO 2009. 成果報告書. 「P-1 草本系バイオマスの運搬と在庫及びエネルギー転換時の前処理工程を改善する可搬式ペレット化技術の開発」. 1-2.

農林水産省 2008. 農林水産生態系における有害化学物質の総合管理技術の開発研究成果発表資料.

URL: [www.maff.go.jp/](http://www.maff.go.jp/) (2011年10月3日 参照).

農林水産省 2011. 消費・安全 食品中カドミウムに関する国内新基準値.

URL: [www.maff.go.jp/](http://www.maff.go.jp/) (2011年10月3日 参照).

杉山 恵・阿江教治・羽鹿牧太・石川 覚・村上政治 2004. カドミウム汚染対策土壌に対するファイトレメディエーションの有用性と問題. 第21回土・水研究会資料「農耕地における重金属汚染土壌の修復技術の現状と展望」. 8-14.

山口隆二・小倉秀夫・久保博嗣 2009. 衝撃式粉砕乾燥装置の開発. バイオマス科学会議発表論文集 4: 90-91.