

飼料作物における硝酸態窒素の低減に関する研究

原田久富美 (秋田県農業試験場 大潟農場)

hisatomi@affrc.go.jp

トウモロコシの黄熟期利用と乾物率を 50%以下にする秋作エンバク周年体系では、窒素多量施用条件においても家畜に硝酸中毒を発症させない飼料生産が可能であることを明らかにした。トウモロコシ、ソルガムでは、硝酸中毒を発症させないための品種選択の有効性を明らかにし、同時に、作物体の硝酸態窒素の簡易診断法を開発した。イタリアンライグラスでは硝酸態窒素を蓄積しにくい系統と選抜方法を開発した。

1. はじめに

畜産経営において、家畜ふん尿の余剰が深刻な問題となっており、飼料畑では家畜ふん尿を主体とする施肥により自給飼料が生産されている。現在、日本にはふん尿の圃場還元量について制約がなく、飼料畑には作物の吸収量を超える窒素が施用されることが多い。このような状況においては、家畜の硝酸塩中毒の原因となる硝酸態窒素が飼料作物中に高濃度で蓄積し、生産者の自給飼料生産に対する意欲と家畜の生産性を損なっている。そこで、本研究では、窒素多量施用条件下における飼料作物の硝酸態窒素の低減技術を開発して、自給飼料生産を促進し、飼料自給率と養分の利用率の向上に貢献することをねらいとした。

2. 夏作トウモロコシ - 秋作エンバクの適時収穫による硝酸態窒素低減技術

トウモロコシの硝酸態窒素濃度は生育ステージの進行と共に経時的に減少することが観察された¹⁾。この理由は、開花期以降、作物個体当たりの硝酸態窒素含量は変化しないが、登熟期の乾物生産により乾物あたりの硝酸態窒素濃度が減少するためであった。このような硝酸態窒素濃度の変化をよりモデル的に把握するため、トウモロコシでは硝酸態窒素のほとんどが茎に含まれていることから成立する近似式を利用して考察を進めた(図1)。

いくつかの品種や条件で検討した結果、濃度因子の最大値は $1.2\text{gNkg}^{-1}\text{FM}$ (新鮮物)程度であり、黄熟期の希釈因子は2程度になることから、黄熟期のトウモロコシの硝酸態窒素濃度の最大値は $2.4\text{gNkg}^{-1}\text{DM}$ (乾物)程度と推定された¹⁾。この値は、家畜ふん尿や堆肥を連年に多量施用した栽培試験の結果と合致

トウモロコシ・ソルガムでは硝酸態窒素の90%以上が茎に含まれるので
作物体全体の硝酸態窒素濃度 (乾物あたり)
茎の硝酸態窒素濃度 (新鮮物あたり、濃度因子)
× 乾物に占める茎割合 ÷ 茎の乾物率 (希釈因子)

図1 トウモロコシ、ソルガムの硝酸態窒素濃度の考え方

していた。これにより、黄熟期に収穫されたトウモロコシの硝酸態窒素濃度が、家畜に硝酸塩中毒を発症させないための飼料中の硝酸態窒素濃度の基準値とされる乾物当たり $2\text{gNkg}^{-1}\text{DM}$ を超えない理由が明らかとなった。つまり、トウモロコシを十分に登熟させ、黄熟期に収穫することで、窒素多量施用条件においても硝酸塩中毒を回避しながら自給飼料生産を行うことが可能であることが示された。⁴⁾

秋作エンバクの硝酸態窒素濃度を経時的に調べた結果、出穂期以降に冬季の低温条件が重なると、乾物あたりの硝酸態窒素濃度が急激に低下し、同時に乾物率の上昇が観察された⁹⁾。一方、新鮮物あたりの硝酸態窒素濃度には明らかな変化は認められず、飼料価値の変化もみられなかった。新鮮物あたりの硝酸態窒素濃度は、窒素多量施用条件においても $1\text{gNkg}^{-1}\text{FM}$ 程度であったので、収穫時の乾物率を 50%以上にできれば、硝酸態窒素濃度を乾物あたり $2\text{gNkg}^{-1}\text{DM}$ 以下に抑制できることが明らかとなった。これまでの栽培



図2 メッシュ気候値を用いた夏作トウモロコシ-秋作エンバク体系におけるエンバクの出穂日の推定

試験の結果から、収穫時の乾物率を50%以下とするためには、11月上旬に出穂するように播種期を調節することが重要である。そこで、メッシュ気候図の月平均気温から調和平均法により日平均気温を推定し、エンバクの出穂に必要な有効積算気温から収穫時の乾物率が50%とするための播種日についてメッシュ図を作成した。最後に、硝酸態窒素濃度を低く抑制できるトウモロコシ-エンバク周年体系の導入可能地域について、メッシュ気候値と生育モデルを用いて推定した結果、図2に示されたように関東以西の平地の広い地域で導入できると考えられた⁹⁾。

3. 立毛中トウモロコシ、ソルガムの硝酸態窒素濃度の簡易推定による適時収穫

トウモロコシやソルガム類など長大型の飼料作物の場合、作物体の硝酸態窒素濃度を測定することは労力と装備が必要となり容易ではない。そこで、トウモロコシ、ソルガムの茎を地際から1対3に内分する部位から茎切片を集め、切片

の搾汁液の硝酸態窒素濃度から濃度因子を推定し、トウモロコシでは子実のミルクライン降下度、ソルガムでは全体の乾物率から希釈因子を推定する式を作成して、立毛中の作物体の硝酸態窒素濃度を推定する手法を開発した⁶⁾。これにより、硝酸態窒素濃度を低減させるための収穫適期や硝酸態窒素を高濃度で含む茎下部の排除¹¹⁾が必要かどうか判断することが可能となった。

濃度因子の推定

- ・茎の下部1/4部位から5cm幅の切片を切り取る
- ・汁液を絞り、汁液中の硝酸態窒素濃度を測定
- ・下式より濃度因子を計算する
- 子実・兼用型: $0.68 \times \text{汁液中NO}_3\text{-N濃度}$
- ソルゴー型: $0.53 \times \text{汁液中NO}_3\text{-N濃度}$
- スーダン型、スーダングラス:
- $0.81 \times \text{汁液中NO}_3\text{-N濃度}$
- (トウモロコシ: $0.84 \times \text{汁液中NO}_3\text{-N濃度}$)

希釈因子の推定

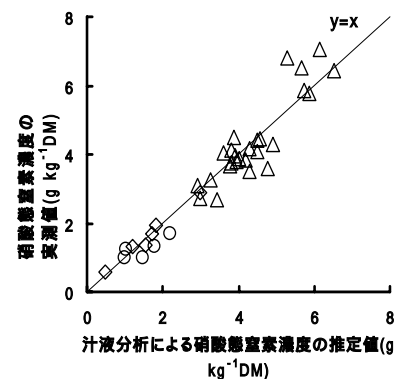
- ・乾物率から推定する
- 子実・兼用型: $0.00721 \times \text{乾物}\% - 0.503 \times \text{乾物}\% + 10.71$
- ソルゴー型: $0.00445 \times \text{乾物}\% - 0.337 \times \text{乾物}\% + 8.86$
- スーダン型、スーダングラス:
- $0.00605 \times \text{乾物}\% - 0.460 \times \text{乾物}\% + 10.82$
- (トウモロコシ: $2.1 - 0.1 \times \text{ミルクライン降下度}$)

(・直接測定する)

- 希釈因子=茎の新鮮重÷全植物体の乾物重

硝酸態窒素濃度の計算

- ・硝酸態窒素濃度=濃度因子×希釈因子



○:子実・兼用型, △:ソルゴー型,
△:スーダン型・スーダングラス

図3 立毛中トウモロコシ、ソルガムにおける硝酸態窒素濃度の簡易推定法

4. トウモロコシ、ソルガムにおける遺伝的変異の利用による硝酸態窒素の低減技術

トウモロコシの硝酸態窒素濃度には、比較的大きな品種間差が存在することを確認し、家畜に対してより低レベルの硝酸塩給与の影響を排除したい場合、硝酸態窒素を蓄積しにくい品種を利用すれば、窒素多量施用条件においても硝酸態窒素濃度を基準値の半分以下に抑制できることを明らかにした²⁾。トウモロコシの硝酸態窒素濃度は、前述の濃度因子と非常に強い相関関係が認められ、トウモロコシにおける硝酸態窒素濃度の品種間差は、硝酸態窒素の蓄積能力の違いに起因していた。ソルガム類についてもトウモロコシと同様に、生育ステージの進行に伴う硝酸態窒素濃度の減少が認められ、収穫時期の重要性が確認された³⁾。また、ソルガム類では濃度因子だけでなく希釈因子の違いも硝酸態窒素濃度に関係したが、これは草

型に大きな変異のあるソルガムの特性が反映された結果と考えられた⁵⁾。さらに、品種群毎に硝酸態窒素の蓄積特性を整理した結果、茎が乾性の遺伝形質をもつ子実・兼用型品種群は茎割合及び茎の乾物率が低いために希釈因子が小さくなることから、この品種群の場合、窒素多量施用条件下においても出穂後 5 週目では、硝酸態窒素濃度を $2\text{gNkg}^{-1}\text{DM}$ 程度に抑制できることを明らかにした^{5, 10)}。

一般に、窒素吸収量の高い飼料作物を栽培することは窒素の利用率を高め、資源の循環利用に貢献すると考えられる。トウモロコシ、ソルガムの場合、窒素濃度に比べ収量の品種間変異が大きく、高窒素吸収量を示す品種の特性は多収であると考えられた。従って、一般的には、収量性の良い品種を利用することが、家畜ふん尿に由来する窒素の利用効率を高めることを明らかにした⁸⁾。

5. 硝酸態窒素を蓄積しにくいイタリアンライグラス系統の育成

イタリアンライグラスではトウモロコシやソルガムのような乾物集積による硝酸態窒素濃度の希釈効果は小さく、適時収穫による硝酸態窒素の低減効果は期待できない。さらに、イタリアンライグラスは系統内により広い遺伝的背景を持つように育成されているので、市販品種では硝酸態窒素濃度について遺伝的分離が期待しにくいと考えられた。そこで、硝酸態窒素を蓄積しにくいイタリアンライグラス系統の作出を試みた。また、実際の品種育成を想定し、多数のイタリアンライグラス個体を評価できるように、幼植物時の硝酸態窒素濃度を指標選抜として利用できるかどうか検討した^{7, 12)}。

同一品種内においても幼植物時の硝酸態窒素濃度には大きな個体間差が認められ、圃場へ移植後、越冬させ、出穂期を迎えた成植物の硝酸態窒素濃度は、幼植物時の硝酸態窒素濃度と有意な相関関係が認められた。次に、幼植物時の乾物あたりの硝酸態窒素濃度を指標として選抜し交配させる表現型循環選抜を、選抜強度を 0.07 として 3 回繰り返して選抜系統を作出した。その後、選抜世代を同一条件で栽培して乾物あたりの硝酸態窒素濃度を比較した結果、幼植物の硝酸態窒素の実現遺伝率は 0.21、成植物では 0.57 であり、各選抜世代で確実な選抜効果が得られた。さらに、ポット試験の結果では、選抜が進むにつれて、新鮮物あたりの硝酸態窒素濃度の減少と同時に乾物率の上昇も認められた。3 回の表現型循環選抜により作出された成植物系統の乾物あたりの硝酸態窒素濃度は選抜基礎集団に比較して 60% 程度に減少しており、幼植物時の硝酸態窒素濃度を指標にして、硝酸態窒素の蓄積しにくいイタリアンライグラス系統を作出できることを明らかにした。本研究により、作出された系統と選抜方法は、すでに、イタリアンライグラス育成に利用されており、近い将来に硝酸態窒素を蓄積しにくいイタリアンライグラスの実用品種の登場が期待される。

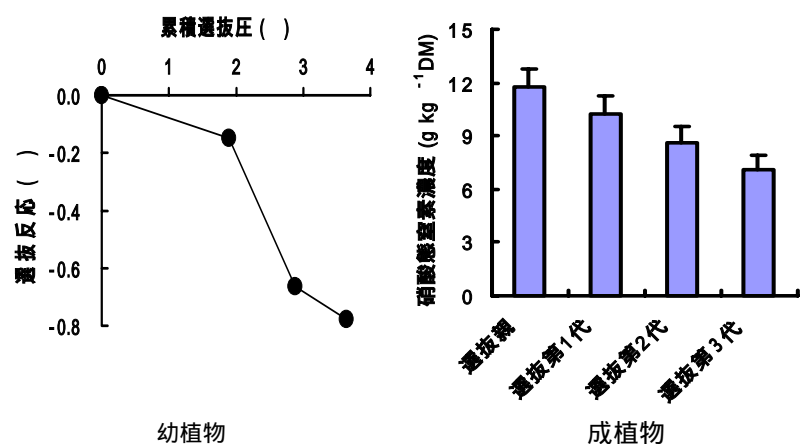


図4 イタリアンライグラスの幼植物成植物における選抜に対する応答

6. おわりに

本研究では、遺伝的変異の利用が硝酸態窒素濃度の低減に有効であることが明らかにした。畜産草地研究所では、現在、モデル植物であるシロイヌナズナも研究材料に取り入れ、QTL 解析や突然変異体を利用して硝酸塩蓄積に関係する遺伝子の同定と機能解析を行い、飼料作物に応用する研究を進めている。

謝辞

本研究は、農業技術研究機構畜産草地研究所(旧農林水産省草地試験場)飼料生産管理部作物栄養研究室で行われたものです。本研究の遂行に当たり、畜産草地研究所の杉原進氏(現農業環境技術研究所)、畠中哲哉博士、須永義人氏、清水矩宏博士、吉村義則氏、杉田紳一氏、魚住順博士(現東北農業研究センター)、神山和則博士、佐々木寛幸氏には、多大な御協力と御指導をいただきました。ケンブリッジ大学のR.A. Leigh教授には分子遺伝学研究のきっかけをいただきました。作物栄養研究室と所内の臨時職員の皆様、所内外の多くの方にも、多大な御助言と御支援をいただきました。皆様に心より感謝し厚くお礼申し上げます。

引用文献

- 1) 原田久富美・畠中哲哉・杉原進 (1996) 窒素多量施用条件下のトウモロコシ(*Zea mays* L.)の硝酸態窒素含量. 日草誌 41, 352-356
- 2) 原田久富美・須永義人・畠中哲哉 (1998) 窒素多量施用条件下におけるトウモロコシ(*Zea mays* L.)の硝酸態窒素濃度の品種間差. 日草誌 44, 286-291
- 3) 原田久富美・須永義人・畠中哲哉 (1998) 窒素多量施用条件下におけるソルガムの硝酸態窒素濃度の品種間差. 日草誌 43, 449-451
- 4) 原田久富美・須永義人・畠中哲哉 (1999) 飼料用トウモロコシの硝酸態窒素濃度の低減化対策. 土肥誌 70, 562-566
- 5) Harada H., Yoshimura Y., Sunaga Y. and Hatanaka T. (2000) Variations in nitrogen uptake and of nitrate-nitrogen concentration among sorghum groups. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 46, 97-104
- 6) Harada H., Sunaga Y., Yoshimura Y. and Hatanaka T. (2001) A simple method for estimating the nitrate nitrogen concentration based on dry matter in standing sorghum (*Sorghum bicolor* Moench) using stem juice test and dry matter ratio. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 47, 601-609
- 7) 原田久富美・杉田紳一 (2001) 低硝酸態窒素濃度のイタリアンラングラス及びその作出方法. 特願 2001-61891, 特開 2002 - 262688
- 8) 原田久富美・須永義人・畠中哲哉 (2001) トウモロコシ(*Zea mays* L.)における養分濃度の品種間差. 日草誌 47, 289-295
- 9) 原田久富美・吉村義則・魚住順・石田元彦・佐々木寛幸・神山和則・須永義人・畠中哲哉 (2002) 晩秋から冬季におけるエンバク(*Avena sativa* L.)およびソルガム(*Sorghum bicolor* Moench)の生育と硝酸態窒素濃度の経時変化. 日草誌 48, 433-439
- 10) 原田久富美 (2002) 硝酸態窒素の低減化のための飼料作物の収穫調製技術. テーリマン 52(9), 42-43
- 11) 原田久富美 (2002) ソルガム類の硝酸態窒素濃度の低減化対策. 畜産技術 8月号, 2-5
- 12) Harada H., Yoshimura Y., Sunaga Y., Hatanaka T. and Sugita S. (2003) Breeding for Italian Ryegrass (*Lolium multiflorum* Lam.) with the low nitrate concentration by young plant selection. *Euphytica* 129, 201-209
- 13) 原田久富美 (2003) 土壤肥料学研究者のための QTL 解析. 土肥誌 73, 93-98

Reduction in nitrate-nitrogen concentrations of forage crops

Hisatomi Harada (Akita Experimental Station, Ogata farm)

hisatomi@affrc.go.jp