

日本の畜産をめぐる窒素フローの問題点と改善策

北里大学獣医学部 寶示戸雅之

1. はじめに

輸入飼料に依存したわが国の畜産において、窒素等の養分フローはゆがんでいる。土地を利用しない形態の食料生産の結果であり、すでにそのことは多くの農業研究者は知っている。本稿では、ゆがんだ養分フローの影響を具体的に示し、その改善方策を（当たり前のことではないが）提案する。

2. 余剰窒素を水の濃度として評価する⁴⁾

人口に比べて狭小な農耕地で集約的な作物生産と、輸入飼料に依存した乳肉生産を行うわが国農業において、窒素収支は輸入過剰にあり、これを反映して単位耕地面積あたりの窒素収支からみた環境リスクは高い。耕地土壌における窒素養分の過不足を表す手段として、化学肥料や家畜ふん尿として耕地に投入される全窒素養分量と、作物生産にともなう収奪量との差を求め、この収支から評価する方法が考えられる。この場合、家畜ふん尿に由来する窒素成分は投入量全体に占める割合が大きく、収支の精度に強い影響を及ぼす。窒素収支の指標として溶脱水中の窒素濃度として計算する方法を提案した。これは余剰窒素がある場合に、そのすべてが土壌浸透水（降水量と蒸発散量の差）に溶出すると仮定する、一種の危険予測である。

耕地土壌窒素余剰量と余剰降水量から求めた年間平均溶脱水窒素濃度推定値の全国平均は 7.8 mg NL^{-1} 、北海道を除く府県平均で 8.8 mg NL^{-1} 、北海道で 2.9 mg NL^{-1} であった。都道府県間のばらつきが大きく、 30 mg NL^{-1} を超える場合が2県、 20 mg NL^{-1} を超える場合が3県など極端に高い県と、富山県、福井県のように値がマイナスを示す（すなわち土壌表面における窒素収支が収奪>施用となることを意味する）県とに分かれた。

溶脱水窒素濃度推定値は余剰窒素量と余剰降水量の関係で決まるが、余剰窒素量の影響がとくに大きい。余剰窒素量が -19.7 kg ha^{-1} （富山県）から 392 kg ha^{-1} （静岡県）まで大きく変動し、これを受け両者には強い相関が認められるが、群馬県、香川県はこの傾向から若干離れる傾向にある。一方、溶脱水窒素濃度推定値は年間余剰降水量にも強く影響される。わが国の幅広い気候を反映して余剰降水量には $569 \sim 2347 \text{ mm}$ の大きな違いが認められる。溶脱水窒素濃度推定値が高い県の場合、溶脱水量が少ないことが要因となる場合もあり、香川県がこの例である。

これらの結果から、溶脱水窒素濃度推定値が高い府県では余剰窒素量が多く家畜ふん尿窒素負荷が高い場合が多い一方で、これらを含む多くの県において化学肥料窒素施用量のみでは窒素濃度は説明できないことが示唆された。

溶脱水窒素濃度推定値のわが国全体の平均値は 7.8 mg NL^{-1} であるが、多くの府県で 10 mg NL^{-1} を超えている。濃度指標は都道府県間の相対評価を行うための環境指標であり、地下水等の窒素濃度とは同一ではない。しかしこの値の概念は地下水の窒素濃度に近似するので、ひとつの比較対照として考えることは可能である。その場合、今回の計算結果は、現在の耕地面積当たり窒素負荷量が相当に高いレベルにあることを示唆する。つまり、ゆがんだ窒素フローの影響はすでに無視

できない状況にあると言える。

3. 揮散するアンモニアを評価する^{2,3,4,5)}

わが国の畜産が欧米諸国と大きく異なる点のひとつは、主要な家畜ふん尿処理体系が堆肥化にあることである。堆肥化では窒素成分の多くがアンモニア NH_3 として大気中に放出される。しかしその NH_3 はいずれ再び大地に舞い戻る。本項では大気の NH_3 を介した窒素フローの実態を推定する。

3-1 アンモニア発生量推定値

原単位を用い我が国の畜産起源 NH_3 発生量を都道府県別に推定した。家畜ふん尿起源の窒素負荷量は、築城ら 1997 の推定モデルに準じたが、できるだけ実態に合わせるために様々な修正を行った。その上で、すべての畜種の家畜ふん尿からの NH_3 としての発生量を推定した。こうして求めた NH_3 発生量は、全国土面積当たりの我が国平均値として 9.6 kgNha^{-1} である。20 kg 以上の府県が 7 県存在する。この値が 15.4 kg Nha^{-1} の栃木県において、大気の NH_3 を介した窒素循環の実態を調査した。

3-2 アンモニア実測例

1) 大気中アンモニア濃度の観測

栃木県北部の集約酪農地帯において、比較的簡便なパッシブサンプラー法を用いて大気中 NH_3 濃度を測定した。6 年間にわたり継続観測した 1 ヶ月の平均 NH_3 濃度は地点間の違いが非常に大きく、長期間を通覧すると特徴的な季節変動は観察されなかった。それよりは、酪農地帯中央部の観測地点が常に高濃度で、変動が大きい。地点別平均値で見ると、酪農地帯中央部で非常に高濃度で常時 $10 \mu\text{gNm}^{-3}$ 以上（最大値 $66 \mu\text{gNm}^{-3}$ ）を示すのに対し、農業の影響がほとんどない山間部においては常に非常に低濃度で $0.7 \mu\text{gNm}^{-3}$ 以下であった。地点別 NH_3 濃度を直近のふん尿施設からの距離との関係で見ると、距離が 1000 m 以下の場合、距離が小さいほど高まった。このように大気の NH_3 濃度はふん尿の影響を受けて地点間差が大きいことがわかった。

2) 湿性沈着量

上記の集約酪農地帯において 2003 年 4 月から 2007 年 10 月までの 4 年半の間、1 ヶ月毎のオープンバルクサンプル（常時開放型採取器による雨水サンプル）を採取した。またこの地点のうち、畜産地帯中央部において上記の 4 カ所を含む合計 6 カ所で降雨時開放型イベントサンプルを採取し、雨水の窒素成分を分析した。

その結果、雨水（バルクサンプル）の全窒素濃度は春に高く秋に低い傾向を示し、アンモニア態窒素、硝酸態窒素もほぼ同様であった。4 年間の平均全窒素濃度は酪農地帯中心部で $1.3\sim 1.7 \text{ mgNL}^{-1}$ であるのに対し対照山間部では $0.5\sim 0.7 \text{ mgNL}^{-1}$ であった。平均採取雨量は年間 1710 mm で、この雨水による年間の全窒素湿性沈着量は酪農地帯中心部で 18.5 kgNha^{-1} に対し対照山間部では 5.5 kgNha^{-1} であった。この結果から、酪農地帯中心部と対照山間部の沈着量の差約 13 kgNha^{-1} が家畜ふん尿窒素起源と考えられた。

一方、降雨イベントサンプルの全窒素はいずれの観測地点においても降り始めほど極端に高濃度であり、最初の 1 ミリサンプルでは 10 mgL^{-1} を超えることもしばしば観測された。ま

た、観測地点別の年間平均大気中濃度と雨水全窒素濃度には正の相関がみられ、つまり、大気中の NH₃ 濃度が高い地点では湿性沈着も増加するという関係が認められた。

3) 乾性沈着量¹⁾

集約酪農地帯の草地における NH₃ フラックスを濃度勾配法によって3年間連続測定した。その結果、NH₃ フラックスは施肥直後に明瞭な揮散ピークがみられ、とくに7月および9月施肥時の揮散ピークが大きかったのに対し、3月と5月は小さかった。施肥直後を除くとフラックスは負の値を示し、大半の期間において牧草地への NH₃ 沈着を示した。堆肥区では11月の堆肥施用直後に明瞭な揮散ピークを示した。年間のフラックスを積算すると、堆肥区で-10~-19 kg_{ha}⁻¹ yr⁻¹ (平均-14.4)、化学肥料区で-15~-20 kg_{ha}⁻¹ yr⁻¹ (平均-18.6) であり、両者で平均 16.5 kg_{ha}⁻¹ の乾性沈着が生じた。施用窒素 (T-N) に対する揮散率は3年の平均で2.0% (堆肥区) ~3.5% (化学肥料区)、NH₄-N に対する揮散率は4.4~11.6%であった。

3-3 大気を介した地域内窒素循環の推定

窒素沈着量 (湿性+乾性) が得られたことにより、NH₃ 発生量を推定すれば、この地域の大気を介した窒素循環量が求められる。そこで、対象地域を農業センサス 2000 にあてはめ、8310 ha (うち耕地面積 2161 ha) の集落に絞り込んだ上で、この集落の家畜頭数からふん尿窒素発生量を求めた (1650t : 764 kgN_{ha}⁻¹)。このうち、仮に 25%が NH₃ として大気中に放出されるとすれば、NH₃ 発生量は 413t : 50 kgN_{ha}⁻¹ (①) となる。次に湿性沈着量を 108t : 13 kgN_{ha}⁻¹ (②) と見積もる。さらに、今回測定した草地における NH₃ フラックスから求めた乾性沈着量が、この地域の代表値と仮定し、これを 125t : 15 kgN_{ha}⁻¹ (③) とする。この値から、この地域の NH₃ 発生量 413t (①) に対し、湿性沈着量 108t (②) が 26%、乾性沈着量 125t (③) が 30%、合計 56%という推定が成立する。つまり地域で発生した NH₃ の半分以上がその地域内に舞い戻っているということである。

現時点におけるこの推定には多くの不確定要因がある。しかし、いずれの手法で計算しても、家畜ふん尿に起因する NH₃ は地域の発生量の少なくとも半分以上が大気を介して再び同じ土地に降り注ぐ。飼料畑ではこの窒素が再び飼料作物に利用されて、家畜に摂取され、ふん尿として排出される。つまり、過剰な窒素は地域内で再循環しながら、耕地林地を問わず窒素負荷を与えているのである。発生に対する沈着の割合について、全球レベルでの計算例からは、発生量は沈着量とほぼ等しくなることが示されている。時空を無視すれば、発生したものはいずれ沈着するので当然である。これを特定の地域、今回は 8300 ha (9.1×9.1 km) の集約酪農地帯に限定して観測すると、発生量の半分以上の沈着という結果であった。

4. 改善方策

輸入依存型畜産が主流のわが国において、余剰窒素をはじめとした環境負荷を軽減し、効率的な乳肉生産を行う手段として考えられることは、第一に耕畜連携による家畜ふん尿窒素負荷の軽減があげられる。すなわち、主たる環境負荷源となる家畜ふん尿を、畜産農家の飼料畑だけではなく、畑作、水田等の耕種農家にも限りなく均等に配分し、いわば窒素負荷の希釈を行うことである。たとえば、都道府県別に家畜ふん尿窒素負荷を計算し、草地飼料畑のみにそれを施用したと仮定すると、わが国全体の1年あたり家畜ふん尿窒素負荷は 648

kg ha^{-1} となるが、これをすべての農地に均等に施用すると仮定すれば146 kg ha^{-1} と激減する。前者が実態を示し、後者が耕畜連携の成功結果といえる。このことはつまり、畜産農家から生産される家畜ふん尿を広く流通できるように良質の堆肥を製造することであり、わが国の得意分野である。

第二の方策は耕作放棄地の農業・畜産利用である。多量の食料を輸入し、食料自給率を下げ、環境汚染を引き起こしながら、わが国には40万haもの耕作放棄地が存在する。その未利用農地に飼料作物等の耕作を行い、家畜ふん尿を施用すれば、これも結果的に家畜ふん尿窒素負荷の希釈効果により、わが国全体の窒素汚染問題（重金属蓄積問題を含む）が改善される。

第三の方策として、畜産から出る窒素を回収・除去する技術の導入である。そのひとつとして、堆肥化課程で発生するアンモニアを再利用することが考えられ、すでに畜草研により実用化技術として完成している。また、伏流式人工湿地の実用化も進められている。このような人為的な窒素除去は、直接的な余剰窒素対策として最も効率的である。

5. 究極の土地利用型畜産の事例：八雲牧場の窒素フロー

上記の改善方策と同列ではないが、北里大学が推進している資源循環型畜産は興味深い養分フローを示す。

北里大学八雲牧場では資源循環型畜産、すなわち自給粗飼料のみを使った肉牛生産を実践している。2005年以来、無肥料、無農薬で草地管理を行い、牧場で生産されるふん尿を堆肥として草地に施用しつつ、肉牛（北里八雲牛）を生産するシステムである。

八雲牧場

北海道八雲町（年平均気温7.5度、降水量1500mm）に、総面積370ha（このうち草地220ha）において肉牛（日本短角とサレール種の交雑種主体）約250頭を夏山冬里方式（5～11月は放牧、冬期間は舎飼）で飼養し、年間約70頭を出荷している。一部の敷料を除くと系外からの物資の投入はない。草地に施用するのは牧場内で生産された堆肥のみである。

2008年から2012年の八雲牧場の窒素フローをとりまとめた。220haの草地が持つ土壌の窒素ストックは915tと構成要素の中で最大であった。これに対し、牧草生産に伴う窒素吸収は14.3tであり、このうちマメ科牧草による窒素固定量が2.6tを占めた。つまり牧草が吸収した窒素の2割程度がクローバの根粒菌によって空気から取り込んだ固定窒素であった。一方、飼養されている牛の生体による窒素ストックは約3tであり、牛肉出荷量は1.4tであった。堆肥として草地に投入される窒素は16tであり、これには副資材として投入された1.7tが組み込まれていることになる。この他、純粋な系外からの投入として沈着があり、これは湿性沈着と乾性沈着をあわせて2.9t程度であった。この解析にはアンモニア揮散が含まれていないが、施用される堆肥の全窒素からみて、沈着量に近い窒素量が揮散で損失していると推定された。しかし、全体としてみると、八雲牧場の窒素収支はきわめてゆったりとしたもので、余剰窒素が周辺水系に漏出するリスクも、温暖化ガスを発生する懸念も小さい、理想的な営農形態と言える。輸入飼料に依存しない畜産はこのようにして実現できる。

6. おわりに

輸入飼料に依存する畜産体系が余剰窒素を生むことは容易に理解できる。良質なタンパク質を得るために家畜は不可欠なので、必ず排泄物が伴う。排泄物は良質な堆肥として圃場に戻すにしても、その面積は足りない。堆肥化過程では多くの窒素がアンモニアとして揮散し、それもいずれ耕地に舞い戻る。これらの窒素は土壌酸性化を促進し、一酸化二窒素 N_2O の起源となるので、放置はできない。その一方で、利用されない農地面積は増えるばかりである。食料自給率は極めて低い。農業・畜産の生産性には限界があり、消費者は安価なものを求めるので、結局、現状では農業・畜産は魅力的な産業ではなくなっている。だからといって、太陽と土地を見放し、植物工場で食料を生産すれば、ますます農地は使われず、国土が荒れる。規模に応じた、土地利用型の様々な食料生産の取り組みに対して、財政的な支援が必要である。そのときに、余剰窒素を出来る限り縮小し、耕地に対する負荷を和らげる対策を常に考えねばならない。八雲牧場は特殊な取り組みではあるが、ひとつのモデル事例としては良い参考になる。

参考文献

- 1) Hojito M., Hayashi K., Matsuura S. (2010) Ammonia exchange on grasslands in an intensive dairying region in central Japan. *Soil Science and Plant Nutrition* **56**: 503-511.
- 2) 寶示戸雅之、松波寿弥、林健太郎、村野健太郎、森 昭憲 (2006) 集約的畜産地帯における窒素沈着の実態 日本土壌肥料学雑誌、77:45-52.
- 3) 寶示戸雅之、林健太郎、村野健太郎、森 昭憲 (2006) 集約的畜産地帯における大気中アンモニア濃度の実態 日本土壌肥料学雑誌、77:53-57.
- 4) 寶示戸雅之、池口厚男、神山和則、島田和宏、荻野暁史、三島慎一郎、賀来康一 (2003) わが国農耕地における窒素負荷の都道府県別評価と改善シナリオ、日本土壌肥料学雑誌 74(4): 467-474.
- 5) 農業由来のアンモニア負荷—その影響と対策—日本土壌肥料学会編(2010)、博友社、東京.