



Title	コンパートメントモデルによる耕畜連携営農集団の窒素循環解析
Author(s)	佐藤, 寿樹; Sato, Toshiki; 藤田, 泉 他
Description	研究論文
Citation	システム農学, 24(1), 1-10
Issue Date	2008
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/44288">https://hdl.handle.net/2115/44288</a>
Type	journal article
File Information	system_24.pdf



研究論文

## コンパートメントモデルによる耕畜連携営農集団の窒素循環解析

広島県立大学大学院生物生産システム研究科\* 佐藤寿樹  
 県立広島大学生命環境学部\* 藤田 泉

### 要旨

本論文では、コンパートメントモデルを使用し、耕畜連携営農集団の窒素循環について解析した。特に、シミュレーションにより耕畜連携システムの窒素循環における作物利用の効果について検討した。この解析から以下の結果が得られた。

1. 耕畜連携システムの窒素循環と農地単位面積当り牛飼養頭数とに顕著な相関が認められた。
2. 水田面積率、飼料作物単収、堆肥化過程における窒素損失率が窒素循環に大きな影響を与えた。
3. 中国地方の営農集団と都府県酪農の窒素循環比較において、農地単位面積当り牛飼養頭数が小さいにも関わらず、中国地方の営農集団の窒素循環率および窒素効率とは低くなった。この結果は、中国地方の営農集団の水田面積率が大きいことと飼料作物単収が小さいことが主な理由と考えられた。

キーワード: 窒素循環、営農集団、コンパートメントモデル、シミュレーション解析

### 1. はじめに

農業における物質循環の解析は、大規模集約的畜産経営と水系への硝酸塩濃度の上昇との因果関係が意識され始めたのがきっかけとなり、オランダなどヨーロッパの先進諸国で1998年ごろから盛んに行われてきた(田端・広岡 2006)。ヨーロッパにおける政策面では、EU 硝酸塩指令[注 1]のような環境負荷規制が1991年12月から施行され、農家単位での物質循環モニタリングの重要性を促している。

わが国でも、畜産を中心に実験農場や一般農家での窒素やリン循環解析事例が増えてきているが、特に経営体の解析数が非常に少ないのが現状である。経営体を対象とした循環解析事例は、田端ほか(2005)、村山ほか(2002)、松本(1999)、佐藤ほか(2007)により報告されている[注 2]。

ところで、わが国における農政の方向性は、担い手の育成・確保を掲げ、集落営農の組織化・法人化を推進する政策をとっている[注 3]。この方向性は、機械効率や労働効率という経営コストの観点から求められたもので、その物質循環や環境負荷の観点からの検討は不十分と考えられる。

そこで、佐藤ほか(2007)は、中国地方の耕畜連携営

農集団(以下、中国地方営農集団事例とする)の窒素循環分析を行い、その循環率などを示した。このような営農集団を対象とする窒素循環解析は、唯一行われた事例と考えられる。その結果は、都府県酪農の分析事例と比較して、窒素循環率と窒素効率が高い数値となった。このような要因を検証するために、本論は耕畜連携の営農集団を意識した循環コンパートメントモデル(本論において耕畜連携営農集団モデルと呼ぶ)を構築し、窒素循環解析を行った。まず、耕畜連携の基本的な循環特性を分析し、次に中国地方営農集団事例での循環の低下に寄与したと考えられる3つの項目(飼料作物単収の低さ、堆肥化過程における揮散等窒素損失の高さ、水田の利用)についてその影響度を分析した。そして、中国地方営農集団事例の循環結果をモデル解析から検証した。

### 2. 耕畜連携営農集団モデル

#### 2.1 モデル

耕畜連携営農集団モデルを図 1 に示す。このモデルは、農地コンパートメント、飼料コンパートメント、畜産コンパートメント、堆肥コンパートメントの4つのコンパートメントから構成されており、それぞれのコンパートメントの窒素収支により、コンパートメント間の窒素循環を計算する構造とした。農地コンパートメントでは、飼料畑に加え耕畜連携営農集団の特徴となる水田を考慮に入れ、また、畜産コンパートメントは、搾乳牛のみを考慮

\* 〒727-0023 広島県庄原市七塚町 562

(Correspondence:hq039003@grad.hiroshima-pu.ac.jp)



2.2.2 畜産コンパートメント

次に畜産コンパートメントの計算方法を示す。乳牛の飼養頭数  $n$  と 1 頭当りの消費粗蛋白質質量  $Fp$  から畜

産コンパートメントへ供給される飼料窒素量  $Nqf$  を求めた(表 2⑩)。ここでは、乳牛についてホルスタイン種を

表 1 記号設定

農地コンパートメント		変数	定数
農地面積	$Sa$		変数 : 0/40/80%
農地割合	$\alpha$		定数 : 550 kg/10a
水田単収	$Hrc$		変数 : 4,000/5,000/6,000 kg/10a
青刈トウモロコシ単収	$Hs$		定数 : 550 kg/10a
青刈トウモロコシ窒素率	$Nrrc$		定数 : 1.14%
青刈トウモロコシ窒素率	$Nrrs$		定数 : 0.34% (蛋白質率 2.1%) [a]
肥料利用率(水稲作)	$\gamma r$		定数 : 0.75%
肥料利用率(飼料作)	$\gamma c$		定数 : 35%
土壌窒素吸収率	$\delta$		定数 : 50%
代替率	$A$		定数 : 60%
			定数 : 30%
畜産コンパートメント		変数	定数
飼養頭数	$n$		変数 : 854 kg/頭/年 [b]
1頭当り消費粗蛋白質質量	$Fp$		定数 : 7.715 kg/頭/年 [c]
1頭当り搾乳量	$M$		定数 : 0.56%
乳窒素率	$Nrm$		
堆肥コンパートメント		変数	定数
堆肥散りなどの損失率	$Rloss$		変数 : 20/40/60%
肥効率	$\beta$		定数 : 60%

[a] 日本標準飼料成分表より  
 [b] 乳牛成雌牛の維持に必要な粗蛋白質量 212 kg/頭/年 (体重 650 kg) (産乳に要する粗蛋白質量 69 g/牛乳 1 kg (乳脂率 3.5%) として計算。  
 (『畜産大事典』日本飼養標準より)  
 [c] 必要粗蛋白質量 743 kg/頭/年 に対して、15% の上乗せを考慮している (鈴木 1959, p.36 より)  
 [c] 都府県平均 (『平成 18 年畜産経営の動向』より)

表 2 窒素量計算式

① 米自給	窒素量 $Nqr[a]$	$Sa \times \alpha \times 0.6 \times Hr \times Nrr$
② 米自給	飼料窒素量 $Nqc[b]$	$Sa \times (1 - 0.6\alpha) \times Hrc \times Nrc$
③ 青刈トウモロコシ	窒素量 $Nqs[a]$	$Sa \times \alpha \times 0.6 \times Hs \times Nrs$
④ 土壌窒素	窒素量 $Nqall$	$Nqr + Nqs + Nqc$
⑤ 土壌窒素	窒素量 $Nqsoil$	$Nqall \times \delta$
⑥ 土壌窒素	窒素量 $Nqino$	$\{(Nqr + Nqs) / \gamma r + Nqc / \gamma c\} \times (1 - \delta)$
⑦ 土壌窒素	窒素量 $Nqloss2$	$\{(Nqr + Nqs) (1 - \gamma r) / \gamma r + Nqc (1 - \gamma c) / \gamma c\} \times (1 - \delta)$
⑧ 土壌窒素	窒素量 $Nqfat$	$Nqino - Nqman \times \beta$
⑨ 土壌窒素	窒素量 $Nqfats$	$Nqman + Nqfat - (Nqr + Nqs + Nqc + Nqloss2)$
畜産コンパートメント		
⑩ 飼料窒素	窒素量 $Nqf[c]$	$n \times Fp \times 1/6.25$
⑪ 牛乳窒素	窒素量 $Nam$	$n \times M \times Nrm$
⑫ 糞尿窒素	窒素量 $Nqm$	$Nqf - Nam$
飼料コンパートメント		
⑬ 購入飼料窒素	窒素量 $Nqfp$	$Nqf \geq (Nqs + Nqc)$ のとき $Nqf - (Nqs + Nqc)$ , $Nqf < (Nqs + Nqc)$ のとき 0
⑭ 蓄積飼料窒素	窒素量 $Nqfs$	$Nqf \geq (Nqs + Nqc)$ のとき 0, $Nqf < (Nqs + Nqc)$ のとき $(Nqs + Nqc) - Nqf$
堆肥コンパートメント		
⑮ 堆肥散りなどの損失窒素	窒素量 $Nqloss1$	$Naz \times Rloss$
⑯ 自給堆肥窒素	窒素量 $Nqman$	$Nqino \times A \geq (Naz - Nqloss1) \times \beta$ のとき $(Naz - Nqloss1)$ $Nqino \times A < (Naz - Nqloss1) \times \beta$ のとき $Nqino \times A$
⑰ 堆肥在庫窒素	窒素量 $Nqstock$	$Naz - Nqloss1 - Nqman$

[a] 0.6 は、水と水田の稲田割合を示す。転作田が 4 割と仮定。  
 [b] 飼料畑で青刈トウモロコシの作付を仮定。  
 [c] 蛋白質中の窒素換算係数 6.25

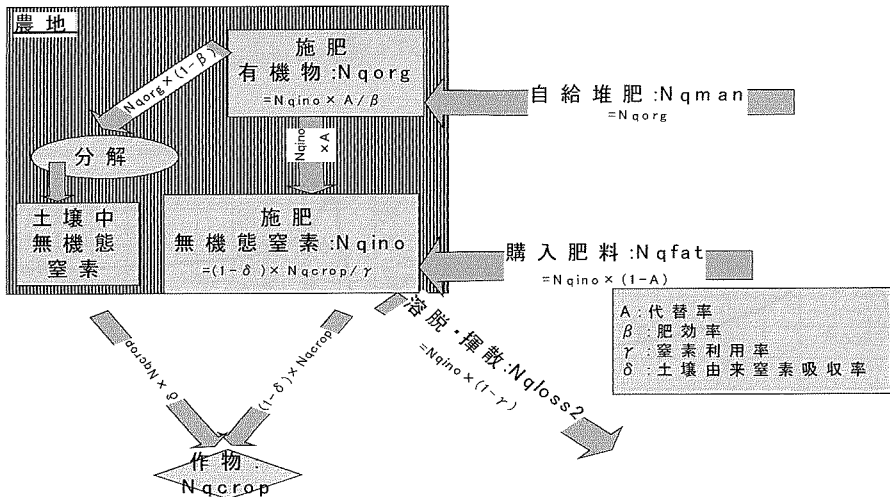


図2 農地コンパートメントにおける作物の窒素吸収の考え方

仮定し、その平均値である体重 650kg、乳脂肪率 3.5% (畜産大辞典編集委員会 1996, p.532)の条件にて必要粗蛋白質量を求めた。また、実際に消費する粗蛋白質量  $F_p$  は、必要粗蛋白質量に対し、15%の上乗せ(鈴木 1959)を考慮した。飼料により供給された窒素量  $N_{qf}$  は、牛乳と糞尿として全て排出されると仮定した。牛乳の窒素量  $N_{qm}$  を牛 1 頭当たりの搾乳量  $M$  と牛乳の窒素率  $N_{rm}$  から求め(表 2⑩)、 $N_{qf}$  との差分を糞尿の窒素量  $N_{qz}$  とした(表 2⑪)。

2.2.3 飼料コンパートメント

飼料コンパートメントでは、供給される窒素量を農地コンパートメントから入る稲わらおよび自給飼料の窒素 ( $N_{qs} + N_{qc}$ )とし、排出される窒素を畜産コンパートメントへ出る飼料窒素  $N_{qf}$  とした。その ( $N_{qs} + N_{qc}$ )と  $N_{qf}$  との差で、購入飼料窒素量と蓄積飼料窒素量が決まると仮定した。つまり、( $N_{qs} + N_{qc}$ ) >  $N_{qf}$  のとき、その差が蓄積飼料窒素量となり(表 2⑫)、( $N_{qs} + N_{qc}$ ) <  $N_{qf}$  のとき、その差が購入飼料窒素量となる(表 2⑬)と仮定した。

2.2.4 堆肥コンパートメント

堆肥コンパートメントでは、畜産コンパートメントから供給される糞尿窒素量  $N_{qz}$  から、揮散などの損失窒素

量  $N_{qloss1}$  を差し引いた窒素量が自給堆肥窒素量として発生する。そのうち、代替率や肥効率を考慮した条件式(表 2⑭)により変化する農地コンパートメントからの要求量  $N_{qman}$  との過不足で、堆肥在庫が蓄積される構造とした(表 2⑯)。今回のシミュレーションでは、揮散などの損失率  $R_{loss}$  について 20%を基準として 40%、60%と増やした場合の影響を解析した[注 5]。

3. 解析結果

3.1 基本的特性

図 3、4 にモデル解析結果を示す。図 3 は農地単位面積当り牛飼養頭数(牛飼養頭数/農地面積)に対する窒素循環率、図 4 は窒素効率を示している。ここで、本論における窒素循環率と窒素効率の定義を表 3 に示す。表 3 において、この系を循環している窒素( $N_{cyc}$ )は、図 1 における各コンパートメント間を移動する窒素のうちで、最小の値と定義した。また、系に投入される窒素 ( $N_{in}$ ) は購入肥料窒素 ( $N_{qfat}$ ) と購入飼料窒素 ( $N_{qfp}$ )、系から出る窒素 ( $N_{out}$ ) は農産物中窒素とし、米の窒素 ( $N_{qr}$ ) と牛乳の窒素 ( $N_{qm}$ ) を定義した。このときの計算条件として、飼料作物単収  $H_c=5,000\text{kg}/10\text{a}$ 、窒素損失率  $R_{loss}=20\%$ 、水田面積率  $\alpha=0\%$ (牧草地のみ)とした。

まず、図 3 より窒素循環率は農地単位面積当り牛飼

表 3 窒素循環率と窒素率の定義式

窒素循環率 $R_{ncyc}$	$R_{ncyc} = N_{cyc} / (N_{cyc} + N_{in})$ $N_{cyc} = \min[(N_{qs} + N_{qc}), N_{qf}, N_{qz}, N_{qman}] [a]$ $N_{in} = N_{qfat} + N_{qfp}$
窒素効率 $R_n$	$R_n = N_{out} / N_{in}$ $N_{out} = N_{qr} + N_{qm}$ $N_{in} = N_{qfat} + N_{qfp}$

[a]各コンパートメント間窒素移動量の中で最小値を窒素循環量と定義。  
min[ ]は、[ ]内の最小値を表現している。

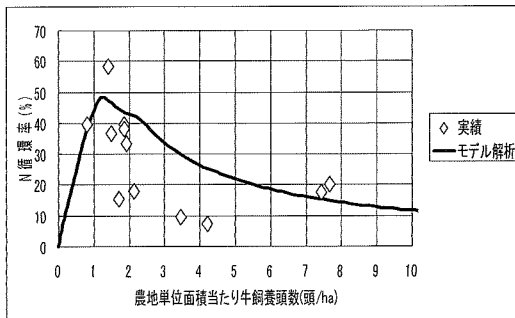


図 3 窒素循環率

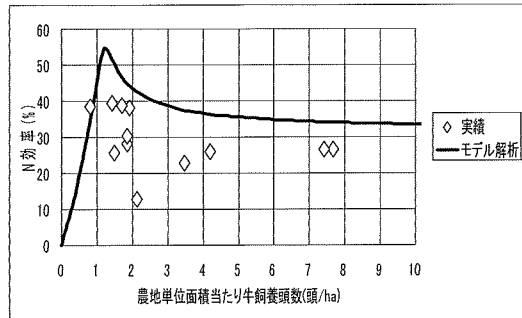


図 4 窒素効率

養頭数と顕著な関係性が見られ、農地単位面積当り牛飼養頭数が1~2頭/haで最も高い数値を示した。これは、牛飼養頭数が1~2頭/haで、農地と畜産のバランスが最も良い点があり、窒素循環がスムーズに行われていることを示している。耕畜連携の窒素循環を分析した先行研究から計算した窒素循環率と窒素効率の値(表4)を「実績」として図3、4に示しているが、ばらつきはあるもののシミュレーションの結果と比較的合う傾向を示していた。但し、農地単位面積当り牛飼養頭数で3頭/ha以上の先行研究実績が乏しく、現状でのシミュレーションとの比較に限界があることも否めない。

図4は、窒素効率を示しているが、窒素効率は窒素循環率ほど農地単位面積当り牛飼養頭数との関係性が強く現れなかった。窒素効率においても窒素循環率と同様、その最適点は存在し農地単位面積当り牛飼養頭数が1~2頭/haの範囲となっていた。

このように、窒素の循環は、農地の窒素生産能力と畜産の窒素消費能力のバランスが非常に重要な要素であり、循環から外れて系内に残存する窒素が窒素循環率を決定する主因となる。このバランスが、農地単位面積当り牛飼養頭数という変数による窒素循環率との関係として現れている。

### 3.2 飼料作物単収の影響

ここでは、中国地方の営農集団の窒素循環結果を検証するために、窒素循環に影響を与えたと考えられる3つの要素(飼料作物単収、窒素損失率、水田面積率)について検討する(表5、6)。

まず初めに、飼料作物単収の変化が及ぼす窒素循環率や窒素効率への影響を検討する。耕畜連携システムにおける窒素循環率や窒素効率は、農地単位面積当り牛飼養頭数と関係性があることを示した(図3、4)が、飼料作物単収は農地の窒素生産能力を決定する要素

である。表5は窒素循環率、表6は窒素効率への影響を解析した結果を示している。平成16年産青刈刈トウモロコシの10a当り収量は、関東・東山地方が最高で6、050kg/10a、中国地方が最低で3,740kg/10aとなっている。また、都府県平均は5,210kg/10aである(農林水産省大臣官房統計部2006)。シミュレーションでの飼料作物単収は5,000kg/10aを基準とし、4,000kg/10a、6,000kg/10aと基準から上下に変化させた。表5によると、農地単位面積当り牛飼養頭数に対する窒素循環率の曲線は基本的に図3と同様の形状を示すが、飼料作物単収が増加するにつれて、農地単位面積当り牛飼養頭数の増える方向へと曲線全体が移動する傾向を示した。これは、農地の窒素供給能力と畜産の窒素消費能力とのバランス点が移動することを意味する。また、農地単位面積当り牛飼養頭数を固定し、飼料作物単収の影響を見てみると、4頭/ha付近では飼料作物単収が1,000kg/10a変化するにつれて、約5ポイントの窒素循環率の変化が見られるが、農地単位面積当り牛飼養頭数が大きくなるにつれて飼料作物単収変化の窒素循環率に与える影響は小さくなり、8頭/ha付近では飼料作物単収が1,000kg/10a変化するにつれて、約2.5ポイントの窒素循環率の変化となった。表6の窒素効率に関しては、飼料作物単収の変化に対し窒素循環率と同様なバランス点の移動という結果を示したが、その数値的な影響は小さかった。

### 3.3 堆肥化過程における窒素損失率の影響

耕畜連携における窒素循環で、堆肥化過程における窒素損失は、窒素循環や窒素効率の上で重要な要素となる。堆肥化過程の損失には、揮散や流出などの項目が考えられるが、それがどれくらいの値となるのか明確なデータとして存在しないのが現状である。これは、堆肥化過程の方法、施設や気象条件などで、その損失

表4 先行研究事例から計算した窒素循環率と窒素効率

	農地面積(ha)	牛飼養頭数(頭)	農地単位面積当り 牛飼養頭数(頭/ha)	窒素循環率R <sub>ncyc</sub> (%)	窒素効率R <sub>ni</sub> (%)
①佐藤ほか2007	56.8	239	4.2	7.2	25.8
②松村ほか1981	10.4	20	1.9	33.2	38.2
③吉田1983	18.7	40	2.1	18.0	12.8
④松本1999	70.0	105	1.5	36.5	25.6
⑤田端ほか2005	5.9	10	1.7	15.5	38.7
⑥Van Keulen et al.2000	55.0	78	1.4	58.1	39.5
⑦Steinshamm et al.2004	27.4	22	0.8	39.6	38.3
⑧築城ほか1996	26.3	49	1.9	39.6	28.0
⑨築城ほか1996	3.0	23	7.7	20.3	26.5
⑩築城ほか1996	34.0	63	1.9	38.3	30.3
⑪築城ほか1996	3.5	26	7.4	17.6	26.6
⑫村山ほか2002	10.4	36	3.5	9.6	22.9

率が大きく変化するためであると考えられる。表5、6より、窒素損失率が上がると、窒素循環率、窒素効率ともに低下することがわかった。特に、窒素循環率に対する影響が顕著であり、農地単位面積当り牛飼養頭数が1〜2頭/haの付近で、大きな変化を見せた。逆に言うと、このことは農地単位面積当り牛飼養頭数が4頭/ha以上では、窒素損失率による窒素循環への影響がほとんどないという結果となった。これは、農地単位面積当り牛飼養頭数が4頭/ha以上となると、既に循環バランスが崩れており、堆肥コンパートメントにおける過剰蓄積分が単に損失の方へ迂回したためと考えられる。

### 3.4 水田面積率の影響

ここでは、営農集団の耕畜連携という観点から、農地における水田割合が耕畜連携の窒素循環にどのような影響を与えるのかを検討する。最近の農政での担い手政策から営農集団が注目されてきているが、耕畜連携を志向する営農集団では、その集団内の酪農家と水稲農家が連携するパターンがほとんどである。そのため、水田の利用が窒素循環にどのように影響を与えるのか傾向を把握しておくことに意義がある。耕畜連携における水田の利用方法は、主産物の米に対して副産物のわら

を粗飼料として畜産へ与える場合と飼料用稲を栽培し全部粗飼料として畜産へ与える場合がある。今回は、前者のパターンを考えた。全農地面積に対する水田の面積は、営農集団によりばらつくと思われるが、今回のシミュレーションでは水田面積率0%を基準として、40%、80%と増やした場合について検討した。ちなみに『平成17年耕地および作付面積統計』によると水稲作付面積は158万3,000ha、飼料作物作付面積は30万2,500haであり、それぞれの割合は84%と16%となる。表5、6より、水田面積率の増加は、窒素循環率を下げ、逆に窒素効率を上げる効果を示す。農地単位面積当り牛飼養頭数4頭/ha付近で、水田面積率40ポイントの変化に対し、窒素循環率は約5ポイントの変化となる。これは、飼料畑が水田に入れ替わることにより、系外へ移動する製品(米)の窒素が増えると共に、飼料としてトウモロコシから稲わらへ入れ替わる量が増えることにより循環する窒素量が減ったためである。このように、水田面積率の増加は、窒素循環率を下げる傾向にあるが、営農集団の耕畜連携はもともとそれぞれ単独で行われていた水稲栽培と酪農を物質循環で結びつける効果があり、農地単位面積当り牛飼養頭数を大幅に小さくする効果のあることを示唆している。築城・原田(1996)によると、

表5 窒素循環率への影響解析結果

シミュレーション条件		農地単位面積当り牛飼養頭数(頭/ha)																				
飼料単収 (kg/10a)	窒素損失率 (%)	水田面積率 (%)	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4	2.6	2.8	3.0	4.0	6.0	8.0	10.0
基準条件			窒素循環率[%]a																			
5,000	20	0	0.0	10.5	20.2	29.1	37.4	44.0	<b>48.5</b>	47.3	45.4	44.0	42.9	42.1	40.1	37.7	35.5	33.6	26.4	18.5	14.2	11.6
飼料単収の影響																						
4,000	20	0	0.0	13.0	24.7	35.4	44.0	<b>49.3</b>	46.2	44.3	42.9	41.9	38.8	36.0	33.6	31.5	29.6	27.9	21.8	15.1	11.6	9.4
6,000	20	0	0.0	8.8	17.0	24.7	31.9	38.7	44.0	47.8	<b>48.1</b>	46.2	44.8	43.8	42.9	42.2	41.0	38.8	30.8	21.8	16.8	13.7
窒素損失率の影響																						
5,000	40	0	0.0	7.9	15.4	22.5	29.1	35.4	<b>41.3</b>	40.2	38.4	37.0	36.0	35.3	34.7	34.2	33.7	33.4	26.4	18.5	14.2	11.6
5,000	60	0	0.0	5.3	10.5	15.4	20.2	24.7	29.1	<b>29.3</b>	28.6	28.1	27.3	26.6	26.1	25.7	25.3	25.0	24.0	18.5	14.2	11.6
水田面積率の影響																						
5,000	20	40	0.0	10.6	20.4	29.5	37.8	<b>44.3</b>	43.4	42.0	41.0	40.0	38.4	35.7	33.4	31.3	29.5	27.9	22.0	15.4	11.8	9.6
5,000	20	80	0.0	10.8	20.7	29.8	38.3	<b>38.9</b>	38.3	37.8	36.0	33.1	30.6	28.5	26.6	25.0	23.5	22.3	17.5	12.2	9.4	7.6

[a]□で囲んだ数値は、曲線が示す値の最大値を示す。

表6 窒素効率への影響解析結果

シミュレーション条件		農地単位面積当り牛飼養頭数(頭/ha)																				
飼料単収 (kg/10a)	窒素損失率 (%)	水田面積率 (%)	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4	2.6	2.8	3.0	4.0	6.0	8.0	10.0
基準条件			窒素効率[%]a																			
5,000	20	0	0.0	6.8	14.6	23.7	34.5	45.3	<b>54.4</b>	51.8	48.0	45.3	43.4	42.0	40.9	40.0	39.2	38.6	36.6	34.7	33.9	33.4
飼料単収の影響																						
4,000	20	0	0.0	8.6	19.0	31.6	45.3	<b>56.1</b>	49.7	45.9	43.4	41.7	40.4	39.4	38.6	37.9	37.4	36.9	35.4	34.0	33.4	33.0
6,000	20	0	0.0	5.6	11.8	19.0	27.1	36.5	45.3	52.9	<b>53.5</b>	49.7	47.0	45.0	43.4	42.2	41.2	40.4	37.8	35.4	34.4	33.8
窒素損失率の影響																						
5,000	40	0	0.0	6.6	14.1	22.3	31.6	42.2	<b>54.2</b>	51.8	48.0	45.3	43.4	42.0	40.9	40.0	39.2	38.6	36.6	34.7	33.9	33.4
5,000	60	0	0.0	6.5	13.6	21.1	29.2	38.0	47.5	<b>48.0</b>	46.4	45.2	43.4	42.0	40.9	40.0	39.2	38.6	36.6	34.7	33.9	33.4
水田面積率の影響																						
5,000	20	40	11.2	18.9	27.8	38.2	50.5	<b>62.0</b>	57.2	52.3	49.0	46.6	44.8	43.4	42.2	41.3	40.5	39.8	37.5	35.4	34.4	33.8
5,000	20	80	22.7	31.4	41.4	53.1	67.1	<b>62.5</b>	56.7	52.7	49.8	47.6	45.8	44.4	43.3	42.3	41.5	40.8	38.4	36.1	34.9	34.2

[a]□で囲んだ数値は、曲線が示す値の最大値を示す。

1990年の酪農家の都府県平均での農地単位面積当り牛飼養頭数は7.4頭/haであるのに対し、佐藤ほか(2007)による中国地方の営農集団でのそれは4.2頭/haであり、営農集団化により大きく農地単位面積当り牛飼養頭数を減らし、循環率を向上させる効果が期待できる。

### 3.5 営農集団における窒素循環の検討

ここで、中国地方の営農集団事例として解析した窒素循環解析結果をモデル解析から検証する。このとき、比較として築城・原田(1996)により解析された1990年都府県の酪農経営における窒素循環解析結果を引用する。これは、耕畜連携の営農集団を、基本的に酪農経営と水稻栽培経営の連携と考え、酪農経営に水稻経営が物質循環で結びつくことにより、どのような窒素循環の変化がもたらされるかを検証するものである。

中国地方営農集団事例は、水田30.7ha(稲作田18.5ha、転作田12.2ha)と牧草地26.1haをもつ。このうち、転作田と牧草地では、トウモロコシ、イタリアンライグラスの飼料作物とソバを栽培している。また、搾乳牛169頭、乾乳牛17頭、2歳未満育成牛53頭を飼育し、耕畜連携を行っている(佐藤ほか2007)。

中国地方営農集団事例と都府県酪農の窒素循環解析の結果を表7に示す。中国地方営農集団事例の窒素循環率は7.2%程度と1990年都府県酪農の17.6%と比較して、著しく低い値となっている。また、窒素効率に関

しては25.8%の数値となっており、1990年の都府県酪農の26.6%に対して低下している。前節まで述べてきたシミュレーション結果から農地単位面積当り牛飼養頭数が1~2頭/haに近いほど、窒素循環率や窒素効率は向上傾向にあった。しかし、中国地方営農集団事例の農地単位面積当り牛飼養頭数は4.2頭/haと都府県酪農の7.4頭/haに比べて1~2頭/haの値に接近しているにもかかわらず、窒素循環率と窒素効率は低くなっている。これは、主に飼料作物の単収と水田面積率の影響が出ていると考えられる。ここで、中国地方営農集団事例と都府県酪農の飼料作物単収と水田面積率、堆肥化過程での損失率を比較すると、表7ようになる。これらの相違を条件に、耕畜連携営農集団モデルで計算した結果が図5、6である(図中、H営農集団=中国地方営農集団事例)。図5、6から飼料作物単収と水田面積率および堆肥化過程での損失率の影響で、中国地方営農集団事例の窒素循環率は全体的に低下する曲線が得られる。この結果は、実際に窒素循環を分析した結果と比較的整合することから、都府県酪農と比較して中国地方営農集団事例の循環に関する低下要因が検証できたと考える。すなわち、都府県酪農の条件にて農地単位面積当り牛飼養頭数を7.4頭/haから4頭/haへ減少させると、窒素循環率は15%から25%程度に向上すると考えられるが、そこに、中国地方営農集団事例の飼料作物単収の低さと水田面積率の高さが影響し、それぞれ約10ポイント、約5ポイント、窒素循環率を低下

表7 中国地方営農集団事例と都府県酪農の条件

	中国地方営農集団事例	1990年都府県酪農	
農地単位面積当り牛飼養頭数 $n$ (頭/ha)	4.2[a]	7.4[b]	事例結果
窒素循環率 $R_{ncyc}$ (%)	7.2[a]	17.6[b]	
窒素効率 $R_n$ (%)	25.8[a]	26.6[b]	
飼料作物単収 $H_c$ (kg/10a)	2,780	5,470[c]	計算条件
水田面積割合 $\alpha$ (%)	54	0	
損失率 $R_{loss}$ (%)	75	24[d]	

[a]佐藤ほか2007  
 [b]築城・原田1996  
 [c]1990年産青刈トウモロコシ単収の都府県平均(農林水産省1992)  
 [d]安田・越野2001のデータを採用。

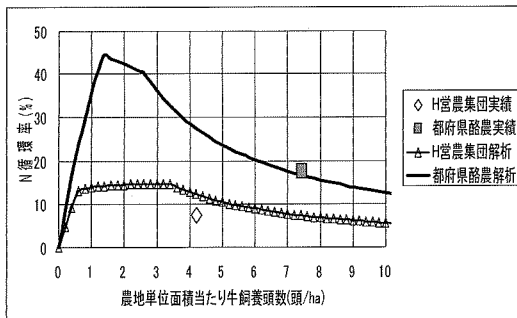


図5 営農集団の窒素循環率

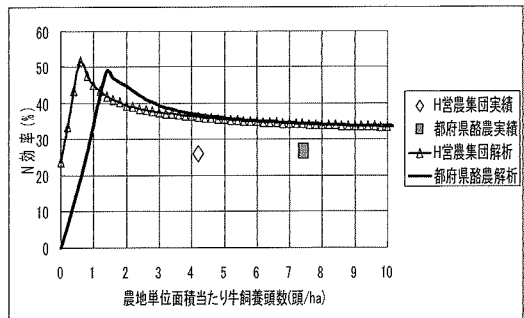


図6 営農集団の窒素効率

させ、結果として中国地方営農集団事例の窒素循環率は、10%弱の数値になったと考えられる。堆肥化過程における窒素損失率の影響は、今回の中国地方営農集団事例の農地単位面積当り牛飼養頭数 4.2 頭/ha の条件では、窒素循環率の低下にはほとんど寄与していないと考えられる(このことは、「3.3 堆肥化過程における窒素損失率の影響」で述べた)。

今回の解析は、仮定が多く実循環との整合性の検討が課題である。しかし、単純なモデルにより、窒素循環率や窒素効率の動向が各パラメータによりどのような傾向を示すのかということを試行できたことに意味を引き出せる。今後は、シミュレーションの精度を上げるべく、比較材料としての耕畜連携営農集団の窒素循環事例を加え、本モデルの精度を高めていくことが課題である。

#### 4. まとめ

耕畜連携営農集団モデルを構築し、窒素循環シミュレーションを行った。特に今回の解析では、農地単位面積当り牛飼養頭数というパラメータを定義し、窒素循環率と窒素効率の変化を解析した。また、窒素循環に影響を与えるパラメータとして、飼料作物単収、堆肥化過程における窒素損失率、水田面積率を取り上げ、それらの循環に対する影響を解析した。解析の結果以下のことが分かった。

① 耕畜連携における窒素循環は、農地における窒素生産能力と畜産における窒素消費能力とのバランスが重要であり、そのバランス点は農地単位面積当り牛飼養頭数で 1~2 頭/ha であった。この範囲において、窒素循環率、窒素効率が最も良くなると考えられる。

② 飼料作物の単収の変化は、窒素循環率の最適点となる農地単位面積当り牛飼養頭数を変化させるように窒素循環率の曲線全体を左右にずらす効果として現れた。単収が低いほど窒素循環率の曲線は全体的に、農地単位面積当り牛飼養頭数の小さい方向に動く。飼料作物単収の変化が窒素効率にも同様の変化を与えた。

③ 堆肥化過程における窒素損失率の変化は、窒素循環率と窒素効率ともに影響を与え、窒素損失率が大きいほど窒素循環率、窒素効率ともに低下した。特に、窒素循環率において、農地単位面積当り牛飼養頭数 1~2 頭/ha 付近での影響が顕著であった。

④ 水田面積率の変化は、窒素循環率と窒素効率ともに影響を与えるが、その影響方向はそれぞれ逆になった。つまり、水田面積率が高くなると、窒素循環率が低くなり、窒素効率は高くなる。

⑤ これらの特性をもとに、中国地方営農集団事例における条件でモデル解析した。その結果、都府県酪農の条件でモデル解析した結果に対し、約 15 ポイント窒素循環率が低下するとシミュレーションできた。このことにより都府県酪農と比較したときの中国地方営農集団事例の窒素循環率の低さが検証できた。飼料作物単収の低さと水田面積率の高さが主因として説明がつくと考えられた。

#### 注釈

[注 1] ヨーロッパの「硝酸塩指令」について次のように述べられている。「わが国にくらべて降水量が少なく、飲料水の地下水依存度が高いヨーロッパ連合(EU)各国では、農業に由来する地下水汚染は深刻な問題である。このため農業に対する環境規制も厳しい。それを反映して閣僚理事会は、1991年12月に「硝酸塩指令」を決定し、農地への許容限界N量を段階的に減少させることを加盟国に遵守するように命じた。それによれば、許容限界N量を1998年12月までに210kg/haとし、2002年12月には170kg/haまで減少させた。」(松中2003)

[注 2] 田端まか(2005)は、京都府の水稲栽培と肉牛肥育の複合生産システムを対象として、村山ほか(2002)は岩手県の酪農家、松本(1999)は北海道稚内市の酪農経営農家における窒素循環をそれぞれに分析している。

[注 3] 『平成18年度版食料・農業・農村白書』によると、「食料・農業・農村施策」において「集落営農の組織化・法人化等の推進」を掲げている。「集落営農の組織化・法人化等の推進」では、集落などが主体となって農地の利用調整を行う仕組みである農用地利用改善事業を活用して農地の面的な利用集積を図りつつ、集落営農の特定農業団体化・特定農業法人化を推進するとしている。

[注 4] 『農業技術大系』によると、土壌由来窒素について「イネで48~87%、畑作物で50~70%、牧草で55~85%をも占めている」(農山漁村文化協会1985、原理p.60)と示されている。窒素利用率について「一般に、窒素圃場での利用率は水田で20~50%、畑で40~60%といわれている」(農山漁村文化協会1985、原理p.49)と示されている。今回それぞれの中間値を採用した。代替率について「通常、代替率は30%以下とする。代替率を高くすると堆肥から持ち込まれるいずれかの

養分が過剰になることが多い」(農山漁村文化協会 1986、畑 p.162 の 9)と示されている。上限を採用した。肥効率については堆肥全窒素含有率(乾物当り)2~4%で堆肥を10年程度連用した場合(農山漁村文化協会 1986、畑 p.162 の 14)の値を採用した。

[注 5] 安田・越野(2001)によると、「窒素については畜舎内での滞留中や堆肥化・ばっ気の処理過程において、かなりの部分がアンモニアガスとして揮散するであろう。堆肥化過程での窒素の揮散率は、ふんの成分組成、堆肥化方式、処理期間、気候によって変動するが、牛ふんで24%、豚ふんで35%、鶏ふんで62~77%程度と見積もられている」と示されている。

#### 引用文献

- 広岡博之,1998,肉用肥育・水稲栽培複合システムに関する環境-経済モデルの開発とシミュレーション,システム農学,Vol.14,No.2,pp.65-72.
- 松本成夫,2000,地域における窒素フローの推定方法の確立とこれによる環境負荷の評価,農業環境技術研究所報告,Vol.18,pp.81-152.
- 松村昭治・渡部直吉・村山登,1981,東京農工大学農学部附属農場における肥料三要素の循環と土壌肥沃度の動向,東京農工大学農学部農場研究報告,Vol.10,pp.1-15.
- 松中照夫,1999,草地における物質移動・流出と環境汚染. 日本土壌肥料学会北海道支部編:北海道農業と土壌肥料 1999,北農会,pp.248-251.
- 松中照夫,2003,土壌学の基礎,農山漁村文化協会,東京,p.304.
- 村山義幸・築城幹典・雑賀優,2002,酪農経営における窒素循環量の定量的推定,日本草地学会誌,Vol.48(別),pp.46-47.
- 農林水産省経済局統計情報部編,1992,平成2年産作物統計,農林統計協会,東京.
- 農林水産省生産局畜産部畜産企画課編,2006,平成18年畜産経営の動向,中央畜産会,東京.
- 農林水産省大臣官房統計局編,2006,平成17年耕地および作付面積統計,農林統計協会,東京.
- 農山漁村文化協会,1986,農業技術大系,土壌施肥編 5-①土壌管理・土壌病害<1>,農山漁村文化協会,東京.
- 農山漁村文化協会,1985,農業技術大系,土壌施肥編 6-①施肥の原理と施肥技術<1>,農山漁村文化協会,東京.
- 佐藤寿樹・藤田泉・宮本誠,2007,物質循環からみる耕畜連携営農集団の持続性に関する課題 - 広島県庄原市一木営農集団の窒素循環事例から -, 農村研究,Vol.104,pp.42-53.
- Steinshamn, H., E. Thuen, MA. Bleken, UT. Brenoe, G Elerhult, C. Yri, 2004, Utilization of nitrogen(N) and phosphorus(P) in an organic daily farming system in Norway, *Agriculture, Eco-system and Environment*, Vol.104, pp.509-522.
- 鈴木嘉兵衛,1959,乳牛の飼料と飼養法,養賢堂,東京.
- 田端祐介・北川政幸・稲村達也・石田定顕・広岡博之,2005,肉牛肥育-水稲複合生産システムにおける農家レベルの窒素利用と窒素循環,日本畜産学会報,Vol.76,No.3,pp.321-330.
- 田端祐介・広岡博之,2006,畜産経営における物質収支の定量化とその研究事例(1),畜産の研究,Vol.60,No.5,pp.539-544.
- 畜産大事典編集委員会,1996,畜産大事典,養賢堂,東京.
- 築城幹典・原田靖生,1996,酪農経営における物質循環の定量的な把握に関する研究(1)窒素フローの推定,システム農学,Vol.12,No.2,pp.114-117.
- 築城幹典・原田靖生,1997,家畜の排泄物量推定プログラム,システム農学,Vol.13,No.1,pp.17-23.
- Van Keulen, H., HFM. Aarts, B. Habekotte, HG van der Meer, JHJ. Spiertz, 2000, Soil-plant-animal relation in nutrient cycling: The case of daily farming system 'De Marke', *European Journal of Agronomy*, Vol.13, pp.245-261.
- 安田環・越野正義編,2001,環境保全と新しい施肥技術,養賢堂,東京.
- 吉田重方,1983,名古屋大学農場における肥料養分の動態に関する調査研究,肥料科学,Vol.6, pp.121-153.

Contributed paper

## Analysis on nitrogen cycling of group farming systems by dairy and crop farmers using compartment models for nitrogen flows

Toshiki SATOU\* and Izumi FUJITA\*\*

Graduate School of Applied Biosciences, Hiroshima Prefectural University \*  
Faculty of Life and Environmental Sciences, Prefectural University of Hiroshima\*\*

(Received 28 May 2007; in final form 4 October 2007)

### Summary

In this paper, nitrogen cycling of group farming systems by dairy and crop farmers was analyzed using compartment models for nitrogen flows in the systems. In particular, the effects of crop utilization on nitrogen cycling in the systems were examined by simulation. The following results were obtained from the analysis.

1. There was a remarkable relationship between the number of cows per field area and nitrogen cycling in the systems.
2. Nitrogen cycling was largely influenced by the ratio of paddy rice field to total farming land, feed crop yield and nitrogen losses in process of manure production in the systems.
3. The nitrogen cycling and nitrogen use efficiency of group farming systems in Chugoku region were less than those of farming systems in overall Japan in spite of the fact that the number of cows per field area was smaller in the former systems. This result may be caused by larger paddy rice field and less crop yield in group farming systems in Chugoku region.

**Key words:** nitrogen cycling, group farming, compartment models, simulation analysis

---

\*562 Nanatsuka, Shobara, Hiroshima 727-0023, Japan  
(Correspondence:hq039003@grad.hiroshima-pu.ac.jp)