飼料イネ生産と結びついた肉用繁殖生産システムの 窒素の利用性と循環性に関するモデル分析

広岡博之¹・石川哲也²・草佳那子²・石田元彦²

¹ 京都大学大学院農学研究科, 京都市左京区 606-8502

² 中央農業研究センター, つくば市 305-8666

(2008. 8. 4 受付, 2008. 10. 23 受理)

要 約 日本では近年, 米消費の減少によって過剰の水田が増加している. その過剰の水田を利用して, 飼料用のイネを栽培し, また家畜からの糞尿を堆肥として農地に還元する試みがなされている. そのようなシステムにおいては, 飼料イネが稲発酵粗飼料 (WCRS) として, 家畜に給与されている. 本研究の目的は, (1) 飼料イネ生産と結びついた肉用繁殖生産システムに関するシミュレーションモデルを開発し, (2) そのモデルを利用して, そのようなシステム内における窒素の流れと循環を定量化し, (3) 窒素の流れや窒素利用効率, 循環性に対する飼料イネの生産と WCRS の栄養価の影響を調べる 3 つのシナリオを分析することであった. 本研究ではまず, 繁殖雌牛とその後代子牛の生涯のエネルギー要求量を, 2000 年版飼養標準 (肉用牛) をもとに決定し, WCRS を含む給与飼料は 2006 年に出版された稲発酵粗飼料の生産・給与技術マニュアルに従って設定した. WCRS 摂取量および窒素の摂取量と排泄量は日ベースで計算し, それらをもとに生産システム内の窒素フローとバランスを算出した. 次に 3 つのシナリオ (飼料イネの単収の増加, WCRS の粗タンパク質含量と TDN 含量の増加) を想定して, それらのシナリオが窒素管理に及ぼす影響をシミュレーションによって評価した. その結果, 飼料イネの単収の増加や WCRS の粗タンパク質含量の増加がシステム内の窒素利用効率や循環率を低下させることが示唆された. 特に, 飼料イネの単収の増加は経済的には正しい選択であると考えられるが, 本研究の結果は経済的な最適化と窒素管理の最適化が異なる可能性を示唆しているものと推察された.

日本畜産学会報 80 (1), 17-25, 2009

わが国における食用としての米の消費量は年々低下しており, 生産調整が続いている. そのような中, 洪水防止, 国土保全, 水源涵養などの水田の機能を維持したまま家畜の飼料として利用できる飼料イネが国産自給飼料として大いに期待され, ここ数年で作付面積が急速に増加している. さらに, 最近の世界的な穀物不足による輸入飼料の価格の高騰により, 自給飼料生産の切り札として飼料イネ生産に対する期待が高まっている.

飼料イネは, 一般的に稲発酵粗飼料 (WCRS; whole crop rice silage) として利用されている. 稲の子実が完熟前に子実と茎葉を同時に収穫し, ホールクロップサイレージとして調節したもので, 収穫期は黄熟期が最適と考えられている (石田 2002). 飼料イネと家畜生産, 特に肉用牛や酪農生産と組み合わせることにより, WCRS としての飼料利用に加えて, 家畜生産から排泄された糞尿を堆肥として飼料イネ圃場に還元することで, 資源循環

型耕畜複合生産の促進が可能になると考えられる.

これまで飼料イネに関する研究はさまざまな分野で幅広く行われてきた. 家畜栄養学の分野では, 古くから WCRS を対象とした研究が行われてきた (小川 2003) が, 最近では, Islam ら (2004) が WCRS の栄養価とその乳生産への効果について研究し, 石田 (2002) は飼料イネのサイレージ調製について総説を行っている. また, 飼料イネ生産の経済性については, 最近, 農業経営学の分野を中心に数多くの研究が行われている (小野 2002; 平児と千田 2006; 藤本と恒川 2007).

一方, 飼料イネ生産を資源循環の視点から定量的に捉えようとする研究はまだまだ少ない. 最近, 竹内ら (2008) は飼料イネを作付けし, WCRS として利用している肉用牛繁殖農家を対象に, 窒素, リン, カリウムのフローを定量的に調べる事例研究を実施し, 加えて簡単なシミュレーションを行うことで転作作物として飼料イ

連絡者: 広岡博之 (fax: 075-753-6373, e-mail: hirooka@kais.kyoto-u.ac.jp)

ネが生産システム全体の栄養素収支、利用効率、資源循環性に及ぼす影響を調べている。

近年、農家レベルで家畜生産と耕種作物との間の窒素をはじめとする栄養素の循環を、シミュレーションモデルを用いて調べようとする研究が数多く行われている (Dou ら 1996 ; 広岡 1998 ; Rotz ら 1999, 2005 ; Gradiz ら 2007 ; Schils ら 2007)。そこで本研究では、飼料イネを利用する肉用牛繁殖生産を対象とした耕畜複合生産システムモデルを開発し、そのモデルを用いてシステム内の窒素フローを定量化することおよび飼料イネ生産と WCRS の栄養価に関連する 3 つのシナリオを仮定した時のそれらがシステム全体の窒素利用効率や循環性に及ぼす影響を調べた。

材料および方法

1. モデル

図 1 は肉用牛繁殖生産と飼料イネ生産を組み合わせたシステムの窒素循環をモデル化した模式図を示したものである。このモデルは、繁殖雌牛とその後代子牛からなる家畜生産と飼料イネ生産に関する 2 つのシステムから成り、これらのシステム間では、飼料イネは稲発酵粗飼料 (WCRS) としてウシに給与され、ウシから排泄された糞尿は堆肥として利用されると仮定した。

肉用牛の生産モデルにおいては、繁殖雌牛の飼料摂取

量および生産される後代子牛の飼料摂取量を代謝エネルギー要求量 (Mcal/日) と飼料中の代謝エネルギー含量 (Mcal/kg) から算出した。繁殖雌牛とその後代子牛の代謝エネルギー要求量は、5% の安全率を見込んで、2000 年版日本飼養標準 (肉用牛) をベースに繁殖雌牛の繁殖集団に導入されてから淘汰までとその後代子牛を市場に出荷するまでの期間について日ベースに推定した。

すべての家畜は、離乳時までは直線式、離乳後は Brody (1945) の成長曲線にしたがって成長すると仮定した (Kahn 1983 ; Hirooka ら 1998)。更新用雌子牛は、繁殖雌牛群に導入されてから、67% の成熟率 (成熟体重に対する体重の比) に達したときに初回交配が行われ、その後、妊娠、分娩、離乳を繰り返して、最終の繁殖サイクルの離乳時にすべて淘汰されるものと仮定した。生産された子牛のうち、雄子牛はすべて去勢牛として、設定された体重に達した時に子牛市場に出荷され、一方、雌子牛については繁殖雌牛集団に導入される更新用雌子牛を除いてすべて設定された体重で子牛市場に出荷されるものと仮定した。本モデルでは、繁殖雌牛と後代子牛の頭数は補説の項で示した方法で推定するものとした。

家畜の窒素摂取量は、摂取した濃厚飼料、WCRS および乾草の粗タンパク質含量をタンパク質と窒素との間の変換係数の 6.25 で除することで算出した。これらの摂取した窒素のうち、濃厚飼料と乾草から摂取した窒素の

Figure 1 Schematic representation of the present model for beef cow-calf and forage rice production. Solid arrows represent material flows and broken arrows represent information flows.

合計はシステム外部から搬入された窒素と分類され、WCRS から摂取した窒素はシステム内の循環窒素と分類することにした。

一方、販売される淘汰雌牛と販売子牛の体窒素量は、生時から販売されるまでの日々の窒素蓄積量の累積量にそれぞれの頭数を乗じて求めた。なお、生時の体窒素量は、AFRC (1993) の胎児の体タンパク質量を推定する式から、雌雄の生時体重の相違で補正して算出し、さらに生時から販売されるまでの体窒素蓄積量は日本飼養標準 (農林水産省 2000) の増体中のタンパク質蓄積量の合計を 6.25 で除することによって算出した。販売牛の窒素合計は、システム外に搬出される窒素と見なすことができる。

家畜から糞尿として排泄される窒素量は、摂取した飼料の粗タンパク質量 (増体、妊娠、泌乳) を差し引いた量を 6.25 で除することによって推定した。堆肥化の過程で家畜糞尿中の窒素は大気中に揮散するが、その揮散量は飼養形態、堆肥化の条件、堆肥化の方法によって異なる。ここでは堆肥化の過程での窒素の揮散割合は、20% と仮定した。

飼料イネの生産には、堆肥と化学肥料が用いられ、その窒素要求量は土壌や飼料イネの品種、収量、窒素吸収量によって異なる。本研究では、中央農業研究センター関東飼料イネ研究チームが行った飼料イネ品種リーフスターに対する牛糞堆肥施用試験の結果 (未発表) を用いて、窒素吸収量 (A ; kg/ha)、化学肥料中の窒素量 (C ; kg/ha) および堆肥中の窒素量 (M ; kg/ha) について次のような関係式を導いた。

$$A = 0.051M + 0.574C + 82.5 \quad (1)$$

この式から、窒素肥料による窒素投入量は

$$C = (A - 0.051M - 82.5) / 0.574 \quad (2)$$

と求められる。なお、窒素吸収量は、飼料イネ 1 ha 当たりの収量とその粗タンパク質含量の積を 6.25 で除することによって求め、また、堆肥による窒素投入量 (M) は、前に示したように排泄された糞尿中の窒素量のうち揮散された窒素を差し引いて算出した。本研究においては敷料に関しては、稲わらやオガクズ、モミガラなどさまざまなケースが考えられ、さらにそれらを購入するケースや系内で自給するケースなど複雑であるため、考慮しないこととした。

本研究では、生産システムの評価は年当たり単位面積当たりで行うこととした。したがって、本モデルでは肉用牛生産は、繁殖雌牛の生涯生産性を単位に計算されているので、繁殖雌牛の繁殖サイクルごとの頭数およびその後代子牛の頭数を計算し (補説 A)、肉用牛の生産モデルから生涯生産単位で得られた摂取量や排泄量などに 365/ASP (ASP は集団における繁殖雌牛の平均滞在期

間) を乗じて、年当たりの量を変換した (補説 B)。

1 頭の雌牛の生涯とその後代子牛の WCRS の乾物摂取量はサイレージ化する前の飼料イネの乾物摂取量と等しいと仮定し、想定した単位面積当たりの飼料イネ収量との比から必要な飼料イネ作付面積 (ha) を推定した。なお、システム内の窒素量は単位面積当たりに統一して表した。

2. 入力条件

表 1 は、繁殖雌牛とその後代子牛に給与されると仮定した飼料の内訳を示したものである。濃厚飼料については、繁殖雌牛生産を想定して Ogino ら (2007) が設定した飼料成分を用い、WCRS については、乾物割合が 37.3%、乾物中粗タンパク質含量が 6.8%、乾物中の TDN 含量が 53.1% と仮定した。その他の粗飼料に関しては、良質の乾草を与えるものと仮定した。これらの飼料の給与量は、基本的には稲発酵粗飼料生産・給与技術マニュアル (全国飼料増産行動会議編 2006) をもとに、繁殖雌牛に関しては維持期には WCRS と乾草を原物比で 1 : 0.4、妊娠末期や泌乳期には WCRS、濃厚飼料、乾草をそれぞれ原物比で 1 : 0.22 : 0.4 の割合で給与するものと仮定した。また、育成子牛には、4 ヶ月齢以降に、濃厚飼料とともに WCRS も給与するものと仮定した。

表 2 は、肉用牛と飼料イネに関する主な入力条件を示したものである。肉用牛に関しては、わが国の黒毛和種を想定して (Hirooka ら 1998)、遺伝的能力と管理条件を設定し、また飼料イネについては、収量 (20% の刈り取りロスを考慮した刈り取り後の収量) は 10 a 当たり乾物で 1,000 kg とした。

3. 評価指標

システム全体の窒素の利用性と循環性は、それぞれ窒素利用効率 (NUE) および Finn (1980) の循環指標 (Cycling index : Cind) を用いて表した。

$$NUE = \frac{E_1}{I_1 + I_2} \quad (3)$$

$$Cind = \frac{f_{12}f_{21}}{(I_1 + f_{12})(I_2 + f_{21})} \quad (4)$$

ここで、 I_1 は購入飼料中の窒素量 (kg/ha)、 I_2 は化学肥料中の窒素量 (kg/ha)、 E_1 は淘汰雌牛と販売用の後代子牛中の窒素量 (kg/ha)、 f_{12} は堆肥中の窒素量 (kg/ha)、 f_{21} は WCRS 中の窒素量 (kg/ha) である。

4. シナリオ分析

本研究では、飼料イネの品種改良や生産技術の向上によって、単位面積当たりの収量が増加した場合 (1,000 kg DM から 1,200 kg DM)、WCRS の粗タンパク質含量が向上した場合 (CP 6.8%/kgDM から 7.8%/kgDM)、WCRS の TDN 含量が向上した場合 (DM 当たり 53.6% から 58.0%) の 3 つのシナリオを検討した。

Table 1 Assumed composition of diets used in this study

	% of diet	DM (%)	TDN (% DM)	CP (% DM)
Concentrate for the cow				
Corn	30	86.5	92.4	10.2
White bran	70	87.0	72.3	17.7
Roughage for the cow ^a				
WCRS ^b	71, 77	37.3	53.6	6.8
Hay	29, 23	85.9	60.1	10.7
Concentrate for calves				
Corn	42	86.5	92.4	10.2
Soybean meal	18	88.3	86.7	52.2
Wheat bran	6	87.0	72.3	17.7
Corn gluten feed	4	88.9	82.7	22.3
Alfalfa	43	89.2	55.4	16.5
Roughage for calves				
WCRS	100	37.3	53.6	6.8

^a : Given according to the technical manual for WCRS production and feeding (71 : 29 for maintenance and 77 : 23 for pregnancy and lactation).

^b : Whole crop rice silage.

Table 2 Assumed values for main input variables of the model

Variables	value
Cow-calf production model	
Mature weight (kg)	480 ^a (×1.2) ^b
Birth weight (kg)	30 (×1.07)
Weaning weight (kg)	164 (×1.2)
Pregnant period (day)	285
Weaning period (day)	180
Degree of maturity at the first conception (%)	65
Live-weight at the calf market (kg)	250 (300)
Maximum allowable reproductive cycle	6
Survival rate in each reproductive cycle (%)	80
Calving interval (day)	420
Forage rice production model	
Harvestable DM yield (kg/10 a)	1000
CP content (% DM) for WCRS	6.8
TDN content (% DM) for WCRS	53.1

^a : For female.

^b : For male.

結 果

図2は雌牛の生時から淘汰時までのWCRSと濃厚飼料の摂取量を予測したものである。WCRSの予測値は、複雑な動きを示しているが、哺乳期から育成期にWCRSの摂取量は急速に増加し、その後は、妊娠後期から泌乳

Figure 2 Simulated daily WCRS intake for a cow from birth to culling.

のピークまでエネルギー要求量の増加に伴って、WCRSの摂取量も増加し、泌乳量がピークに達した後はエネルギー要求量の減少とともに、WCRSの摂取量も低下すると予測された。

表3は、各繁殖サイクル別の雌牛とその後代子牛の分

Table 3 Herd dynamics and WCRS intake for a cow and her calves

		Proportion of survivor ^a				WCRS intake	
	Period (days)	Cow	Male	Female	Replacement female	Individual Basis (kg)	Cow-calf basis (kg/unit) ^b
Cow							
1 ^c	578	1.000	0.500	0.500	0.271	6858	7258
2	420	0.800	0.400	0.400	0.217	4349	3799
3	420	0.640	0.320	0.320	0.173	4188	2936
4	420	0.521	0.256	0.256	0.139	4134	2321
5	420	0.410	0.222	0.222	0.111	4116	1850
6	420	0.328	0.178	0.178	0.089	4111	1478
Calves							
Male	273					443	
Female	275					356	

^a : Probability at introduction into the herd for cow surviving to each reproductive cycle (No. of alive at the start of each reproductive cycle)/(No. of alive at introduction of the cow into the herd).

^b : Total WCRS intake for a cow and her calves in the herd (proportion of survivor x individual intake for a cow and her calves).

^c : Reproductive cycle.

布を個体ごとの WCRS 摂取量および総 WCRS 摂取量を示したものである。最初の繁殖サイクルは、更新用雌子牛が繁殖集団に入ってから最初の分娩までで、育成期間も含まれているため期間が長い。その後、一定の分娩期間を仮定しているため、いずれも 420 日であった。個体レベルの WCRS 摂取量は、初回の繁殖サイクルは期間が長いので最も多く、その後繁殖サイクルが進むに連れて減少した。この結果は、成長に伴って増体量が減少するため、増体に要するエネルギー量が少なくて済み、それゆえ WCRS 摂取量も減少したことによるものであった。繁殖サイクルごとの総 WCRS 摂取量は、個体ごとの摂取量に繁殖雌牛の割合と後代子牛の割合を乗じて求められ、繁殖サイクルが進むに伴って、大きく減少した。

表 4 は飼料イネに関する 3 つのシナリオを想定した場合の窒素の利用効率と循環率を示したものである。単位面積当たりの飼料イネ収量の増加を仮定した場合、飼料イネから生産される WCRS の量も増え、より多くの頭数を飼養することができるが、同時に濃厚飼料の摂取量も増えるため、外部から搬入される濃厚飼料中の窒素量も増加した。また、飼養頭数の増加によって、糞尿による窒素排泄量も増加し、堆肥による窒素の農地還元量は増加した。しかし、その一方で、単位面積当たり飼料イネ収量の増加は、単位面積当たりの飼料イネの窒素吸収量を増加させるため、飼料イネ生産のための窒素必要量が増加し、その増加量が堆肥による農地還元量の増加量よりも大きかったため、外部からの化学肥料による窒素必要量は大幅に増加した。これらの関係から、単位面積当たりの飼料イネの収量を増加させた場合、システム全

体の窒素循環性も窒素利用性も大幅に低下することが示された。

粗タンパク質含量の高い WCRS を給与すると仮定した場合、本モデルの仮定の下では、粗タンパク質含量の変化は代謝エネルギー要求量に影響を与えないため、TDN 摂取量（すなわち、代謝エネルギー摂取量）は一定で、濃厚飼料の摂取量や淘汰雌牛や子牛の販売量はベース条件と変わらないと予測されるが、他方、粗タンパク質摂取量、すなわち窒素摂取量は増加するため、糞尿として排泄される窒素量は増加し、堆肥による還元量は増加した。また WCRS の粗タンパク質含量が高いと、飼料イネの窒素吸収量が増加するため、飼料イネの窒素必要量は多くなり、化学肥料がより多く必要となった。その結果、窒素利用効率と循環指標は低下した。

TDN 含量の高い WCRS を給与すると仮定した場合、飼料全体の TDN 含量（エネルギー価）も高くなるため、少ない乾物摂取量で必要なエネルギーが満たされ、WCRS の乾物摂取量は少なくてすんだ。その結果、飼料イネの単位面積当たりの飼養頭数は増加し、濃厚飼料による窒素搬入量も販売家畜による窒素搬出量もともに増加した。また、堆肥による還元量はわずかに増加したが、化学肥料による還元量はわずかに減少した。WCRS による窒素の摂取量は、ベース条件の場合と等しかった。これは、本モデルでは、飼料イネの乾物収量と WCRS の乾物摂取量との比によって飼養頭数が決定されているため、このシナリオにおいては、単位面積当たりの飼料イネの収量はベース条件と等しく、かつ乾物当たりの窒素含量も同じであったことから、WCRS による窒素摂取量

Table 4 Nitrogen flows in baseline and alternative scenarios

Nitrogen flows in ha of rice forage production	Alternative scenarios			
	Baseline	A	B	C
Input variables				
Harvestable DM yield (kg/10 a)	1000	1200	1000	1000
CP content (% DM)	6.8	6.8	7.8	6.8
TDN content (% DM)	53.1	53.1	53.1	58.0
No. of cow (head/ha)	6.38	7.66	6.38	6.93
Import (kg/ha)				
Purchased feed	245.8	295.0	253.7	253.3
Chemical fertilizer	72.6	115.9	105.6	72.5
Export (kg/ha)				
Cull cows and calves	89.3	107.2	89.3	96.9
Recycle (kg/ha)				
Manure	232.5	279.0	253.7	234.1
WCRS	108.8	130.6	124.8	108.8
N use efficiency	0.280	0.261	0.246	0.297
Cycling index	0.291	0.257	0.269	0.288

がベース条件と一致したことによるものであった。以上の関係から、TDN 含量の高い WCRS を給与した場合、窒素利用効率は高まったが、窒素循環指標はわずかに低下した。

考 察

本研究の目的は、シミュレーションモデルを用いて、飼料イネと肉用繁殖生産を組み合わせた耕畜連携生産における窒素の利用性と循環性を調べることであった。耕畜複合生産の生産性や循環性を評価する場合、マクロな視点からの分析が必要となる。

このような問題に対するアプローチとして、次に述べる3つのアプローチが考えられる。その第1は、ファームゲートバランス、フィールドバランス、システムバランスなど、農家内の物質収支を対象とする方法である。この方法では、実際に対象農家において、農家内の物質収支を調査し、それをもとに農家全体の栄養素のバランスを定量化することができる (Aarts ら 2000 ; Oborn ら 2003 ; Oenema ら 2003)。第2のアプローチは、線形計画法などの数理計画法を用いて、農家レベルで耕種作物と家畜生産の最適化を図る方法である。このアプローチに関しては、ヨーロッパを中心に耕種作物と結びついた酪農生産を対象とした研究が進んでいる (Berentsen と Gielsen 1995)。第3のアプローチは、シミュレーションモデルを用いて、農家や地域レベルで分析を行おうとするものである。この手法には、Dou ら (1996)、Rotz ら (1999)、Schils ら (2007) の研究がある。

わが国における耕畜連携生産に関する研究を概観する

と、田端ら (2005) が肉用肥育と水稻複合生産における窒素の収支を第1のシステムバランスアプローチ (第1のアプローチ) を用いて調べ、久保田と西村 (2001) は、畑作と肉用繁殖複合生産を対象に線形計画法 (第2のアプローチ) を用いて、最適な方策を調べる研究を試みている。第3のアプローチに関しては、広岡 (1998) が肉用肥育・水稻複合生産システムを想定してそのシステムの経済性と窒素収支の両方を分析するためシミュレーションモデルを開発し、また、劉ら (2002) は肉用肥育・水稻複合生産システムの窒素循環を予測するシミュレーションモデルを開発している。最近、Gradiz ら (2007) は、シミュレーションモデルを用いて、種子島のサトウキビと肉用繁殖牛の複合生産システムを対象にその経済性や窒素、リンの循環性を検討している。

飼料イネと肉用繁殖生産を組み合わせた生産システムについては、最近、竹内ら (2008) が田端ら (2005) の方法を用いて、システム内の窒素、リン、カリウムの利用性と循環性を定量化することに成功している。竹内ら (2008) の報告から得られた窒素フローと本研究からシミュレーションによって得られた窒素フローを比較すると、竹内ら (2008) におけるウシ飼養と飼料イネの間の窒素フローは、堆肥としての農地への窒素還元量が 58 kg/ha、WCRS による窒素摂取量が 71 kg/ha、化学肥料による窒素還元量が 56 kg/ha で、本研究で得られた WCRS による窒素摂取量と堆肥による窒素還元量 (図3) は、竹内ら (2008) の報告よりかなり大きな値であった。このことは、本モデルでは年間を通じて WCRS を給与されていると仮定されているため、WCRS が現実より

Figure 3 Calculated nitrogen flows from the present model.

もかなり多く給与されていると仮定されている点や、堆肥が、飼料イネ水田のみに還元されたと仮定されている点に起因すると考えられた。実際、竹内ら（2008）の調査した農家では、飼料イネ以外にも食用米水田や放牧地を所有しており、これらの農地にも堆肥が還元されていた。そこで比較を容易にするために、竹内ら（2008）の報告で、糞尿由来の窒素が堆肥としてすべて飼料イネ水田に還元されたと仮定すると 190 kg/ha となり、本研究の数値より低かったものの比較できる数値となった。

本研究のベース条件における窒素の利用効率 は 0.280 であった（表 3）。田端ら（2006）の報告によると、肉用繁殖雌牛と水稻の複合生産を営んでいる 3 農家の窒素利用効率は高い順から 0.33, 0.35, 0.22 で、本研究で得られた窒素の利用効率はこの範囲内にあったが、同じく WCRS を利用している農家を対象に調査した竹内ら（2008）の報告における 0.44 よりもかなり低い値であった。竹内ら（2008）の調査で高い窒素利用率が得られたのは、この農家では玄米を農作物として販売されていたため、搬出窒素量が大きくなり、そのことが窒素の利用効率の向上をもたらしたためと考えられた。一方、窒素の循環指標については、竹内（2008）らの報告では 0.25 と求められており、本研究の循環指標の方が高かった。この結果は、竹内ら（2008）の報告の農家よりも本研究で想定したシステムの方が、単位面積当たりの WCRS と堆肥の窒素フロー量が大きく、循環指標が高く推定されたためと推察された。

飼料イネと肉用繁殖生産を組み合わせることの意義を定量的に示すためには、肉用繁殖生産単独のシステムにおける窒素利用効率と飼料イネ生産と組み合わせた場合の窒素利用効率を比較すればよい。図 3 の数値を例に考えれば、肉用繁殖生産のみの場合、WCRS による窒素の摂取量を濃厚飼料やその他の粗飼料によって補う必要があるため、肉用繁殖生産のみの窒素利用効率は 0.252（＝89.3/(245.8+108.8)）となり、組み合わせた場合よりも低くなった。このことから、飼料イネを利用して耕畜連携を図ることは、システム内での窒素利用効率の向上に

結びつき、環境負荷の観点から望ましいシステムであると考えられた。この結果は、サトウキビと肉用繁殖生産の耕畜連携のメリットについて調べた Gladiz ら（2007）の結果とよく一致していた。

シナリオ分析のうちで、単位面積当たりの飼料イネ収量の増加が、窒素の利用効率や循環性を低下させるとする結果は予想外のものであった。一般的に、経済性から見た場合、単位面積当たりの飼料イネの収量を増加させることは、生産コストの低減につながるため、経済的であると言える（小野 2002）。しかしながら、単位面積当たりの飼料イネの収量の増加が窒素の利用性や循環性を低下せるとした本研究の結果は、経済性と環境負荷の問題との間に一種のトレードオフ関係のあることを示唆していると考えられた。一般にこれまでの研究では、生産性の向上がエネルギーや栄養素の利用効率を高め、結果として環境負荷を低減すると考えられていた（Vande-Haar と St-Pierr 2006）。しかし、本研究においては単位面積当たりの飼料イネ収量の増加によって、飼養できる頭数が増加し、外部からの購入飼料が増加することと、単位面積当たりの飼料イネの窒素吸収量が増加し、その結果、飼料イネ生産のための窒素必要量が増加し、より多くの化学肥料が必要となったことから、窒素利用効率や窒素の循環率が低下することとなった。このことから、環境負荷の問題を解決するためには、購入飼料に対して自給飼料の給与割合を増加させることや化学肥料の代わりに積極的に堆肥を使うなど、生産性の向上と適切な窒素管理のバランスを図ることが必要であることが示唆された。

謝 辞

本研究は農林水産省委託プログラム（粗飼料多給による日本型家畜飼養技術の開発：課題番号 JFS-08-26006-1）によって行われたものである。

補 説

A. 牛群ダイナミックスの概要

本モデルでは、 N_0 頭の更新用雌子牛が繁殖雌牛集団に導入され、決められた繁殖サイクル（M）を経て、最後の繁殖サイクルの離乳時にすべて淘汰されるものと仮定した。ここでは、最初の繁殖サイクルは雌子牛が集団に導入されてから最初の離乳までと定義し、その後は離乳から離乳までを 1 繁殖サイクルと定義した。それぞれの繁殖サイクルにおいては、不受胎などの理由から $1-s_i$ （ s_i は i 番目の繁殖サイクルにおける生存割合）の割合で淘汰され、他方、割合 s_i が次の繁殖サイクルに移るものと仮定した。なお、本研究では流産や死産など個別の死亡率については考慮せず、各繁殖サイクルの生存率を想定して、すべてその生存率に含まれるものと仮定した。また、この生存率には、人為的な淘汰も含まれるものとし

た。これらの仮定の下では、最初の繁殖サイクルに N_1 ($= N_0$) であった雌牛のうち、2 回目の繁殖サイクルまで残る頭数は N_2 ($= N_1 S_1$) となる。以降、最後の繁殖サイクルに達するまで同様の計算が行われる。

一方、 i 回目の繁殖サイクルで生産される子牛の数は、性比を 1 : 1 と仮定すると、雄子牛の頭数は $0.5N_i$ 頭、雌子牛の頭数も $0.5N_i$ 頭となる。生産された雌子牛のうちで更新用として集団に導入される雌子牛の割合を r (更新率) とすると、 M 回の繁殖サイクルで生産される更新雌子牛の頭数の和は、最初の N_0 頭に等しいので、次の関係が成り立つ。

$$\begin{aligned} N_0 &= 0.5r(N_1 + N_2 + \cdots + N_M) \\ &= 0.5rN_0(1 + S_1 + S_1 S_2 + \cdots + S_1 S_2 \cdots S_{M-1}) \end{aligned}$$

したがって、更新率は、

$$r = \frac{2}{(1 + S_1 + S_1 S_2 + \cdots + S_1 S_2 \cdots S_{M-1})}$$

と求められる。また、 i 回目の繁殖サイクルにおける更新雌子牛の頭数は $0.5rN_i$ 頭、販売雌子牛頭数は $0.5(1-r)N_i$ 頭となる。これらの関係において、最初の導入時の頭数 N_0 は更新率に関係しないため、たとえば N_0 を 1 頭とすれば、1 頭の雌牛の生涯にわたる生産子牛頭数を計算することができる。

各繁殖サイクルの期間の長さは、以下のように設定できる。本モデルでは、販売用の子牛が子牛市場に出荷される時に更新用雌子牛が繁殖雌牛集団に導入されると考え、設定された雌子牛の市場出荷体重から Brody モデルを用いて逆算することで市場出荷日齢を計算し、また初回の受胎が成熟度で 67% の時に起こるものとして、同様にその日齢を計算し、受胎日齢に妊娠期間、離乳日数を足し合わせて、出荷日齢から最初の離乳までの日数を最初の繁殖サイクルの日数とした (D_1)。以降の繁殖サイクルは、分娩間隔と考え、本モデルでは一定の CI とした。

B. 年単位への変換係数

耕畜連携システムの生産性や循環性は、飼料イネ生産が 1 年をベースに行われるため、年当たり単位面積当たりで考える必要がある。しかしながら、本モデルでは、家畜の生産はすべて繁殖雌牛の生涯をベースに計算されているため、年ベースに変換することが必要となる。繁殖雌牛集団における雌牛の平均滞在期間 (ASP) は、

$$ASP = D_1 N_1 + CI(N_2 + N_3 + \cdots + N_M)$$

と求められる。ここで、 N_i は i 回目の繁殖サイクルにおける頭数、 D_i は i 回目の繁殖サイクルの日数、 CI は分娩間隔である。したがって、1 年当りに変換する変換係数は、 $365/ASP$ となる。

文 献

- Aarts HFM, Habekotte B, van Keulen H. 2000. Nitrogen (N) management in the 'De Marke' dairy farming system. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **56**, 231-240.
- Agricultural and Food Research Council (AFRC). 1993. *Energy and Protein Requirements of Ruminants*. CAB International, Wallingford, UK.
- Berensten PBM, Giesen GWJ. 1995. An environmental-economic model at farm level to analyse institutional and technical change in dairy farming. *Agricultural Systems* **49**, 153-175.
- Brody S. 1945. *Bioenergetics and Growth*. Reinhold, New York.
- Dou Z, Kohn RA, Fergnson JD, Boston RC, Newbold JD. 1996. Managing nitrogen on dairy farms : a integrated approach 1. Model description. *Journal of Dairy Science* **79**, 2071-2080.
- Finn JT. 1980. Flow analysis of models of the Hubbard Brook ecosystem. *Ecology* **61**, 562-571.
- 藤本高志, 恒川磯雄. 2007. 飼料用稲を基軸とする耕畜連携システム導入の費用と便益—飼料自給・糞尿循環利用・水田保全に及ぼす影響の経済評価—. *農業経営研究* **45**, 1-11.
- Gradiz L, Sugimoto A, Ujihara K, Fukuhara S, Kahi AK, Hirooka H. 2007. Beef cow-calf production system integrated with sugarcane production : Simulation model development and application in Japan. *Agricultural Systems* **94**, 750-762.
- 平児慎太郎, 千田雅之. 2006. 稲発酵粗飼料の潜在需要と利用促進の方策—選択型コンジョイント分析の適用—. *農業情報研究* **15**, 165-172.
- 広岡博之. 1998. 肉用肥育・水稲稲作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* **14**, 65-73.
- Hirooka H, Groen AF, Hillers J. 1998. Developing breeding objectives for beef cattle production. 1. A bio-economic simulation model. *Animal Science* **66**, 607-621.
- 石田元彦. 2002. 飼料イネのサイレージ調製と給与. *関西畜産学会報* **150**, 17-27.
- Islam MR, Ishida M, Ando S, Nishida T, Yoshida N. 2004. Estimation of nutrient values of whole crop rice silage and its effect on milk performance by dairy cows. *Asian-Australian Journal of Animal Science* **17**, 1383-1389.
- Kahn HR. 1982. *The Development of a Simulation Model and Its Use in the Evaluation of Cattle Production Systems*. PhD Thesis, University of Reading, Reading, UK.
- 久保田哲史, 西村直人. 2001. 和子牛価格形成の特徴と繁殖牛経営の将来展望. *農業経営研究* **39**, 26-36.
- 農林水産省農林水産技術会議事務局編. 2000. 日本飼養標準肉用牛 (2000 年版) pp. 1-221. 中央畜産会, 東京.
- Oborn I, Edwards AC, Witter E, Oenema O, Iversson K, Withers PJA, Nilsson SI, Richert Stinzing A. 2003. Element balances as a tool for sustainable nutrient management : a critical appraisal of their merits and limitations within an agronomic and environmental context. *European Journal of Agronomy* **20**, 211-225.
- Oenema O, Kros H, de Vries W. 2003. Approaches and uncertainties in nutrient budgets : implications for nutrient management and environmental policies. *European Journal of Agronomy* **20**, 3-16.
- 小川増弘. 2003. 飼料イネに関する研究レビュー. *肉用牛研究会報* **75**, 15-22.
- Ogino A, Orito H, Shimada K, Hirooka H. 2007. Evaluating environmental impacts of the Japanese beef cow-calf system

- by the life cycle assessment method. *Animal Science Journal* **78**, 424-432.
- 小野 洋. 2002. 飼料イネ栽培の現状とその経済的評価. 農政調査時報 **No 564**, 62-70.
- Rotz CA, Buckmaster DR, Comerford JW. 2005. A beef herd model for simulating feed intake, animal performance, and manure excretion in farm systems. *Journal of Animal Science* **83**, 231-242.
- Rotz CA, Mertens DR, Buckmaster DR, Allen MS, Harrison JH. 1999. A dairy herd model for use in whole farm simulation. *Journal of Dairy Science* **82**, 2826-2840.
- 劉 晨, 吉村哲彦, 守屋和幸, 酒井徹郎. 2002. システムダイナミックスによる肉用肥育・水稲稲作複合生産のシミュレーション. 肉用牛研究会報 **72**, 59-66.
- Schils RLM, de Haan MHA, Hemmer JGA, van den Pol-van Dassellaar A, de Boer JA, Evers AG, Holshof G, van Midelkoop JC, Zom RLG. 2007. DairyWise, a whole-farm dairy model. *Journal of Dairy Science* **90**, 5334-5346.
- 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 **76**, 321-330.
- 田端祐介, 石田定顕, 稲村達也, 野田昌伸, 広岡博之. 2006. 和牛繁殖-水稲作複合システムにおける窒素とリンの利用と循環. 肉用牛研究会報 **82**, 4-12.
- 竹内佳代, 田端祐介, 長命洋佑, 熊谷 元, 佐藤健次・広岡博之. 2008. 飼料イネが肉用牛繁殖経営農家における窒素, リンおよびカリウムの利用状況に及ぼす影響. 肉用牛研究会報 **86**, 14-21.
- VandeHaar MJ, St-Pierre N. 2006. Major advances in nutrition : relevance to the sustainability of the dairy industry. *Journal of Dairy Science* **89**, 1280-1291.
- 全国飼料増産行動会議編. 2006. 稲発酵粗飼料生産・給与技術マニュアル. pp. 1-136. 日本草地畜産種子協会, 東京.

Modeling approach for nitrogen use efficiency and cycling in beef cow-calf production systems integrated with forage rice production

Hiroyuki HIROOKA¹, Testuya ISHIKAWA², Kanako KUSA² and Motohiko ISHIDA²

¹ Kyoto University, Sakyo, Kyoto 606-8502, Japan

² National Agricultural Research Center, Tsukuba 305-8666, Japan

Corresponding : Hiroyuki HIROOKA (fax : +81 (0) 75-753-6373, e-mail : hirooka@kais.kyoto-u.ac.jp)

In recent, surplus paddy rice fields have been increasing in Japan due to decreased rice consumption. The surplus fields can be utilized for forage rice production and animal excretion can be applied to the fields as manure. In such systems, forage rice is supplied to cattle as whole crop rice silage (WCRS). The objectives of this study were to (1) develop a simulation model for beef cow-calf production systems integrated with forage rice production, (2) apply the model to quantify the nitrogen (N) flows in the systems and (3) examine the effects of alternative scenarios for forage rice production and nutrient values of WCRS on N flows, N use efficiency and cycling index in the systems. The life cycle energy requirements of a cow and her calves were determined based on Japanese Feeding Standard for beef cattle published in 2000 and diets involving WCRS were formulated according to the technical manual for WCRS production and feeding in 2006. The WCRS intake, N intake and N excretion were calculated in daily basis and then N flows and N balances in the system were calculated in annual basis. The three alternative scenarios (increases in harvestable forage rice yield and CP and TDN contents of WCRS) were evaluated by simulation. The result showed that increases in harvestable forage rice yield and CP content of WCRS lead to decreases in N use efficiency and cycling index in the systems. In particular, since improvement of harvestable forage rice yield appears to be supported from economic point of view, this result may indicate the discrepancy between economic optimization and N management optimization.

Nihon Chikusan Gakkaiho **80** (1), 17-25, 2009

Key words : beef cow-calf, forage rice, model, nitrogen, whole crop rice silage.