乳牛におけるリン排泄量予測モデルの開発とシミュレーション

小島英紀・広岡博之・石田定顕・久米新一¹・島田和宏²・林 孝³

京都大学大学院農学研究科, 京都市左京区 606-8502

¹ 北海道農業研究センター, 札幌市豊平区 062-8555

² 畜産草地研究所, 茨城県筑波農林研究団地 305-0901

³ 中央農業研究センター, つくば市 305-8666

(2003. 6. 11 受付, 2003. 7. 28 受理)

要 約 本研究の目的は、乳牛のリン排泄量を予測するモデルを開発し、そのモデルを用いてシミュレーションを行い、乳牛によるリン排泄量抑制の手段を検討することであった。ホルスタイン種雌牛を用いた日米のリン出納実験のデータを用いてモデルの妥当性を検証した。その結果、日本のデータでは本モデルは予測値と実測値がよく一致したが、アメリカのデータでは過大に予測される傾向のあることが示唆された。このような結果が得られたのは、本モデルが日本飼養標準（1999）に基づいて作成されており、日本国内の飼養条件のみが考慮されているためと推察された。飼料中リン濃度（DPC；g/乾物kg）と305日間にわたる泌乳期間中の305日乳量（TMY；kg）をそれぞれ独立に変化させ、305日間の泌乳期間中のリン排泄量（ TP_{exc} ；kg）と、総リン摂取量に対する総リン排泄量の比（ I_1 ）および305日乳中のリン量に対する総リン排泄量の比（ I_2 ）の2種の環境負荷指標に対するこれらの要因の影響を調べた。その結果、DPCの低下は TP_{exc} と I_1 および I_2 を低下させ、TMYの増加は TP_{exc} を増加させるが、 I_1 および I_2 のいずれをも低下させることが示された。

日本畜産学会報, 74 (4) : 499-507, 2003

近年、日本国内では家畜の排泄物による環境問題が深刻化しており、とくにリンは、窒素と並んで周辺環境への負荷が大きい物質であるとされている（築城と原田 1996, 1997 a）。高度経済成長時代以降、わが国の畜産業では、経営の大規模化による家畜排泄物量の増加、耕種農業との乖離による家畜排泄物に由来する堆肥の利用量の減少などが起こり、国内、地域内および農家内のいずれのレベルにおいても、リンの循環利用は困難となってきた。それゆえ、畜産業における環境への負荷を低減するために、家畜によるリン排泄量を定量的に予測し、リン排泄量の低減に関する方向性を示すことは急務であると考えられる。

畜産業における家畜排泄物問題に対するアプローチの一つとして、モデル化とシミュレーションを用いたシステム分析がある（広岡ら 2001）。システム分析においては、家畜排泄物中のリン量を予測する式の作成が基本であり、この式に含まれる要因の設定条件を変化させることで、様々な飼養条件下での家畜によるリン排泄量の予測が可能となる。

乳牛のリン排泄量予測に関する研究としては、Wu ら（2000, 2001）は、リン摂取量と糞中リン排泄量のみに着目し、リン摂取量の関数として糞中リン排泄量を予測す

る式を示している。また、久米（1994）は、糞中リン排泄量をリン摂取量と体重の関数で表し、Morse ら（1992 b）は、乳中リン量も考慮してリン排泄量予測式を作成している。しかし、これらの式はリン排泄量の予測式としては実用的であるが、実験式であることから、より汎用性の高いモデルの開発が求められている。日本では、窒素に関しては寺田ら（1998）が肉用肥育牛の窒素排泄予測式を開発し、築城と原田（1997 b）は窒素摂取量と窒素蓄積量の差を窒素排泄量とする排泄量推定プログラムを開発している。また、広岡（1998）や広岡ら（2001）は、日本飼養標準に基づき、要求量以上に摂取された過剰な窒素が全て排泄されるとした肉用肥育牛のモデルを開発している。しかし、同様の研究はリンにおいては少なく、また、泌乳を考慮したものはほとんどなく、乳牛のリン排泄を予測するモデルの開発が望まれるところである。

本研究では、日本飼養標準（農林水産技術会議事務局編 1999）に基づき、日本国内の酪農業の様々な飼養条件に対応でき、実用性が高く、搾乳牛のみならず乾乳牛にも適用できる汎用性の高い乳牛のリン排泄予測モデルの開発を試みた。さらに、そのモデルを用いて305日にわたる泌乳期間全体のリン排泄量および環境負荷を予測す

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

Fig. 1. A flow diagram of phosphorus in the body of a lactating cow.

Table 1. Summary of data by Kume *et al.* (1991, 2001, 2003), Kume (1994)

	Lactating cows	Non-lactating cows
No. of observations	28	32
Body weight (kg)	594 (498~713)*	610 (425~803)
Dry matter intake (DMI : kg/d)	18.1 (12.7~21.6)	7.8 (5.8~9.3)
Dietary phosphorus concentration (g/DM kg)	4.4 (3.5~6.7)	2.6 (1.9~3.5)
Milk yield (kg/d)	27.5 (20.5~35.8)	
Phosphorus intake (g/d)	80.6 (47.4~114.5)	20.4 (13.3~27.7)
Phosphorus excretion (g/d)	56.7 (25.2~105.9)	19.1 (10.9~24.7)

* Average (range ; min, max).

るシミュレーションを行い、リン排泄量抑制の手段と可能性を検討した。

材料および方法

1. モデル

図1は、乳牛の体内におけるリンの流れを模式化したものである。飼料中に含まれるリンは、唾液や剥離した消化管内壁中に含まれるリンとともに消化・吸収を受け、消化されなかったリンは糞として排泄される。吸収されたリンは、体組織内で目的に応じて利用される。一部は、乳腺を経由して乳として体外に放出され、一方、体組織から放出され再利用されなかったリンは、血液、腎臓、膀胱を経て尿として排泄される。

以上のように、乳牛の体内に流入するリンは飼料中のリンのみで、一方、体外へ流出するリンは、糞および尿中に排泄されるものと、乳中へと分泌されるものとなる。体重増加や体組織へのリンの蓄積を無視すると、糞尿中のリン排泄量は、リン摂取量から乳中のリン量を差し引いたものであるとの仮説が成り立つ。本研究では、

この仮説に基づき乳牛によるリン排泄量に関するモデル化を試みた。図1に示すリンの経路のうち、摂取量と排泄量、乳中への分泌量にのみ着目し、単純なモデルを想定し、検討を行った（体重増加および体組織へのリンの蓄積はないものと仮定する）。

上記の仮定の下で、リン排泄量は、リン摂取量から乳中リン量を差し引いて次のように求めた。

$$P_{\text{exc}} = P_{\text{int}} - P_{\text{milk}} \quad (1)$$

$$P_{\text{int}} = \text{DMI} \times \text{DPC} \quad (2)$$

$$P_{\text{milk}} = \text{LPR} \times 0.5 \quad (3)$$

ここで、 P_{exc} はリン排泄量 (g/日)、 P_{int} はリン摂取量 (g/日)、 P_{milk} は乳中のリン量 (g/日)、DMIは乾物摂取量 (kg/日)、DPCは飼料中リン濃度 (g/乾物 kg)、LPRは泌乳によるリン要求量 (g/日) である。また、日本飼養標準（農林水産事務局編 1999）によれば、乳牛の乾物摂取量と泌乳によるリン要求量 (g/日) は以下の式で求められる。

$$\text{DMI} = 2.98120 + 0.00905 \times \text{BW} + 0.41055 \times \text{MY} \quad (4)$$

$$\text{LPR} = (0.90 \times \text{MY}) / 0.5 \quad (5)$$

Table 2. Summary of data by Knowlton and Herbein (2002)

Body weight (kg)	Dry matter intake (g/d)	Dietary phosphorus concentration (g/kg)	Milk yield (kg/d)	Phosphorus intake (g/d)	Phosphorus excretion (g/d)
609	23.2	3.4	50.0	78.9	37.3
598	22.4	3.4	48.9	70.0	37.2
606	27.4	3.4	50.3	93.1	45.3
607	26.6	3.4	49.9	90.3	46.5
606	26.8	3.4	48.6	91.0	46.6
599	24.4	5.1	52.8	110.2	86.1
564	26.8	5.1	51.0	139.3	87.0
573	27.2	5.1	50.1	143.6	100.5
565	27.8	5.1	46.1	144.5	83.1
565	26.6	5.1	42.2	138.2	87.1
606	22.1	6.7	47.5	148.0	107.6
585	22.5	6.7	45.4	150.6	103.9
588	24.3	6.7	45.2	163.0	114.5
598	24.8	6.7	45.6	166.2	115.2
601	26.8	6.7	45.4	179.7	121.1

ここで、BW は体重 (kg)、MY は乳量 (kg/日)、0.5 は消化吸収係数である。

2. 検証のためのデータ

本モデルの妥当性を検証するために、国内と海外で実施された 2 種類の実験データを用いた。表 1 は、日本国内で行われたホルスタイン種の搾乳牛 28 頭および乾乳牛 32 頭を用いたリン出納実験のデータの要約である (久米ら 1991, 2003 ; 久米 1994 ; Kume ら 2001)。他方、表 2 はアメリカで行われた 14 頭のホルスタイン雌牛を用いた 11 週間にわたるリン排泄量出納実験のデータの概要である (Knowlton と Herbein 2002)。この実験においては、供試牛は飼料中リン濃度が 0.34%, 0.51%, 0.67% の 3 群に分けられ、2 週間ごとに体重やリン摂取量、乳量、リン排泄量などが測定され、個体群ごと、期間ごとの平均値が示されている。

3. 他のリン排泄予測式との比較

本研究では、これまでに報告されている Morse ら (1992) および Wu ら (2000) の予測式を、久米ら (1991, 2003), 久米 (1994), Kume ら (2001) のデータと Knowlton と Herbein (2002) のデータに適用し、本モデルを用いた場合と比較した。

Morse ら (1992) の予測式においては、リン排泄量は

$$Y = 14.67 + 0.6786X + 0.00196X^2 - 0.317 \times MY \quad (6)$$

と求められている。ここで、Y は糞尿中リン排泄量 (g/日)、X はリン摂取量 (g/日)、MY は乳量 (kg/日) である。また、Wu ら (2000) はリン排泄量を

$$Y_f = 0.643X - 5.2 \quad (7)$$

と求めている。ここで、Y_f は糞中リン排泄量 (g/日)、X はリン摂取量 (g/日) である。なお、式 (7) では、リン

排泄量を糞中リン量についてしか考慮していないが、乳牛においてリン排泄量の 95~98% は糞中に含まれるとされており (NRC 2001)、本研究ではリン排泄量の 96% は糞中に含まれると仮定し、糞尿中のリン排泄量 (Y ; g/日) は以下のように求めた。

$$Y = (0.643X - 5.2) / 0.96 \quad (8)$$

4. シミュレーション

乳牛におけるリン排泄量に対する要因 (乳量、体重、飼料中リン濃度) の影響を調べるためのシミュレーションを行った。シミュレーションにおける 1 日当たりの泌乳量は、Wood (1967) のモデルを基礎として計算し、その際のパラメータとしては日本国内におけるホルスタイン種の実験データより求めた Hirooka (1992) のパラメータを用いた。Hirooka (1992) のモデルでは、分娩後 t 日目の泌乳量 (MY_(t) ; kg/日) は、以下のように推定される。

$$MY_{(t)} = a(t/7)^{0.208} e^{(-0.0342)(t/7)} \quad (9)$$

ここで、a は乳量の水準を表すパラメータである。今、305 日間の総乳量 (TMY) を定めると、パラメータ a は式 (9) を用いて、

$$a = TMY / \sum_{t=1}^{305} (t/7)^{0.208} e^{(-0.0342)(t/7)} \quad (10)$$

と求められる。

いくつかの 305 日間の乳量水準に応じた式 (9) を用いて、305 日にわたる泌乳期間の総リン摂取量と総リン排泄量は、以下のように算出される。

$$TP_{int} = \sum_{t=1}^{305} Pint(t) = \sum_{t=1}^{305} [DMI_{(t)} \times DPC]$$

$$\sum_{t=1}^{305} = [(2.98120 + 0.00905 \times BW$$

$$+0.41055 \times \text{MYJ}(t) \times \text{DPC}] \quad (11)$$

$$\text{TP}_{\text{exc}} = \sum_{t=1}^{305} \text{P}_{\text{exc}}(t) = \text{TP}_{\text{int}} - 0.90 \times \text{TMY} \quad (12)$$

ここで、 TP_{int} は総リン摂取量 (kg) で、 $\text{DMI}(t)$ は分娩後 t 日目の乾物摂取量 (kg)、 TP_{exc} は、総リン排泄量 (kg) である。

リンによる環境への負荷を評価する指標として、総リン排泄量 (TP_{exc}) に加えて環境負荷の大きさを表す 2 種のリンに関する環境負荷指数 (I_1 と I_2) を用いた。

$$I_1 = \text{TP}_{\text{exc}} / \text{TP}_{\text{int}} \quad (13)$$

$$I_2 = \text{TP}_{\text{exc}} / (\text{TMY} \times 0.9) \quad (14)$$

ここで、第 1 の環境負荷指数は総リン摂取量に対する総リン排泄量の比で、未利用で排出されたリンによる環境負荷を表す指標と考えられ、第 2 の環境負荷指数は、乳中に分泌された総リン量に対する総リン排泄量の比で、生産量に対する環境負荷の度合いを示す指標と考えられる。

シミュレーションの条件として、簡略化のために体重を 600 kg と固定し、わが国の飼養条件を想定し、飼料中リン濃度 (DPC ; g/乾物 kg) については乾物 1 kg 当たり 3 g から 5 g まで、305 日間の総乳量 (TMY ; kg) については 7,000 kg から 10,000 kg までの範囲を検討した。

結 果

1. 実験データによるモデルの評価

図 2 は、実験データの実測値と本モデルからの予測値を比較した結果である。直線 $Y=X$ は、実測値と予測値が一致したことを表す式で、モデルの妥当性の指標とな

る。本モデルを、久米ら (1991, 2003)、久米 (1994)、Kume ら (2001) の実験データに適用した場合、リン排泄量が少ない範囲内ではやや過大に推定されている場合があるものの、全体的には実測値と予測値が良く一致していると判断された。しかし個体別に詳しく見ると、過大予測された 4 頭の個体の存在が認められた。このような個体を調べた結果、いずれの個体も分娩直後の個体で、乳中のリン濃度がかなり高かった。

一方、Knowlton と Herbein (2002) の実験データに本モデルを適用した場合、全体的にリン排泄量は過大に予測されていた。

2. 他の排泄予測モデルとの比較

図 3 は、Morse ら (1992) の予測式を、久米ら (1991, 2003)、久米 (1994)、Kume ら (2001) のデータと、Knowlton と Herbein (2002) のデータに適用したものである。図 3 より、Morse ら (1992) の予測式は、リン排泄量を過大に予測していることが示され、いずれのデータにおいても妥当とは言えないことが示唆された。

同様に、図 4 は Wu ら (2000) の予測式を、久米ら (1991, 2003)、久米 (1994)、Kume ら (2001) のデータと、Knowlton と Herbein (2002) のデータに適用したものである。図 4 より Wu ら (2000) の予測式は、久米 (1994)、久米ら (1991, 2003)、Kume ら (2001) のデータでは、リン排泄量を過小に予測しているが、Knowlton と Herbein (2002) のデータではリン排泄量をよく予測していることが示された。

3. シミュレーション

図 5 から図 7 は、泌乳期間中の乳牛のリン排泄量に対

Fig. 2. A comparison between actual phosphorus excretion (X) and predicted one (Y) from this study (Eq (1)-(5)). Line of equality ; $Y=X$.

乳牛のリン排泄量予測

Fig. 3. A comparison between actual phosphorus excretion (X) and predicted one (Y) from the model of Morse *et al.* (Eq (6)). Line of equality ; $Y=X$.

Fig. 4. A comparison between actual phosphorus excretion (X) and predicted one (Y) from the model of Wu *et al.* (Eq (8)). Line of equality ; $Y=X$.

する 305 日間の総乳量と飼料中リン濃度の影響を示したものである。

総リン排泄量は、飼料中リン濃度や乳量の増加にともなって増加した。具体的に数値を示すと、飼料中リン濃度が 4g/乾物 kg、305 日間の総乳量が 8,000 kg の時（標準条件として設定）、総リン排泄量は 16.2 kg であった

が、他の条件を同一で、飼料中リン濃度を 5 g/乾物 kg とした時には、総リン排泄量は 22.0 kg となり、また総乳量を 9,000 kg とした時には、総リン排泄量は 16.9 kg となった。このことから、飼料中リン濃度 1g/乾物 kg と総乳量 1,000 kg のもたらす効果はそれぞれ 36% と 4% であることが示された。また、総乳量の効果は、飼料中

Fig. 5. Relationships of dietary phosphorus concentration and 305 days milk yield with total phosphorus excretion (TP_{exc}) (body weight 600 kg).

Fig. 6. Relationships of dietary phosphorus concentration and 305 days milk yield with phosphorus excretion ratio (l_1) (body weight 600 kg).

Fig. 7. Relationships of dietary phosphorus concentration and 305 days milk yield with phosphorus excretion ratio (l_2) (body weight 600kg).

リン濃度が高いほど大きかった (図 5)。

一方、総リン摂取量に対する総リン排泄量の比で表された環境負荷指数 (I_1 ; 式 (13)) および乳中に分泌された総リン量に対する総リン排泄量の比で表された環境負荷指数 (I_2 ; 式 (14)) に関しては、いずれも飼料中リン濃度の増加に伴って増加し、その増加割合は、 I_1 に関しては飼料中リン濃度の低いほど大きいことが示された (図 6, 7)。また、いずれの指数も総乳量の増加にともなって低下した。

以上の結果から、飼料中リン濃度の上昇は総リン排泄量とリン排泄率の両方を急激に上昇させ、乳量の増加は総リン排泄量を増加させるが、環境負荷指数を低下させることが示された。よって、乳牛のリンによる環境負荷を低減するには、飼料中リン濃度の低減がもっとも効果的であると判断された。

考 察

本研究では、乳牛によるリン排泄量を予測するためのモデルを提案し、そのモデルを用いて 305 日間の泌乳期間中のシミュレーションを行い、リン排泄量に対する乳量と飼料中リン濃度が及ぼす影響を調べた。

本モデルでは、糞尿中のリンの排泄量を、日本飼養標準 (農林水産技術会議事務局編 1999) に基づき、リン摂取量から乳中のリン量を差し引いたものと定義し、式もきわめて単純であった (式 (1))。同様の考え方は、肉用肥育牛では築城と原田 (1997) や広岡 (2001)、ブタでは de Boar ら (1997) により、すでに窒素の排泄予測モデルや窒素フローモデルにおいて採用されている。本モデルの利点としては、日本飼養標準 (農林水産技術会議事務局編 1999) に採用されている式を用いているために、日本飼養標準 (農林水産技術会議事務局編 1999) との併用が容易である点が挙げられる。また、Morse ら (1992b) や Wu ら (2000) のような、実験データから直接回帰式を作成する方法では、予測が利用したデータに依存し、異なるデータに対しては必ずしも同様の式が得られるとは限らず、本モデルのようにデータに直接依存しない理論モデルの方が、汎用性が高いと推察される。

その反面、本研究では、日本飼養標準 (農林水産技術会議事務局編 1999) に基づき、リン排泄量はリン摂取量から乳中のリン量を差し引いたきわめて単純化した式から求められているため、日本飼養標準の策定に際して収集されたデータの属性を越えた場合には、推定精度が劣る可能性がある。実際に、Knowlton と Herbein (2002) の実験データに本モデルを適用した場合、リン排泄量は過大に予測され、海外の飼養条件を想定した場合には本モデルの利用に注意を要することも考えられる。このような結果が得られた理由として、本モデルでは飼料の質 (代謝率や消化率) やカルシウムなど他のミネラルの影響が考慮されていない点が挙げられる。すなわち、本モ

デルはわが国の飼養条件を想定して作成された飼養標準に基づいて作成されているため、わが国で実施された実験データにはよくあてはまったが、気候風土条件を含む飼養条件や遺伝的背景が異なる海外の実験データには当てはまらなかったと考えられる。今後は、国内、海外を問わず、実際の酪農業のあらゆる状況に対応できるよう、体重増加、飼料の種類、乳牛の月齢や産次、泌乳期間、地域の気候差や乳牛の品種、飼養条件までも考慮した汎用モデルの開発が望まれるところである。

シミュレーションの結果、飼料中リン濃度の低減がリンによる環境負荷の問題に対するもっとも重要な解決法であることが示唆された。乳牛における飼料中リン濃度に関する研究では、Wu ら (2000) は、高泌乳牛において飼料中リン濃度は、0.38%~0.40% (3.8 g~4.0 g/乾物 kg) で十分であり、この範囲のリン濃度の飼料はリンの添加なしに調整が可能だとしている。また Valk と Sebek (1999) は、酪農業の現場での安全性を考慮し、305 日の泌乳期間中の総乳量が 9,000 kg 以上の乳牛においては、飼料中リン濃度は 3.0 g/乾物 kg 程度が望ましいとしている。一方、Wu ら (2001) は、305 日の泌乳期間中の総乳量が 9,000 kg 以上の乳牛においても、飼料中リン濃度が 0.31%~0.39% (3.1 g~3.9 g/乾物 kg) の範囲では泌乳能力や骨強度の低下などの問題は起こらず、NRC (2001) による推奨値 (具体的には、体重 680 kg、乳量 35 kg/日の条件で 0.35%) は適切であるとしている。さらに、この推奨値に従った場合、リン排泄量は 25~30% 低下し、搾乳牛 1 頭あたりのリン補助飼料の購入価格が低下するとしている。実際、Spears ら (2003) もまた、飼料およびリン補助飼料の購入量削減による飼料中リン量の低下が、乳牛のリン利用効率の向上につながるとしている。以上のいずれの研究においても、生産性を低下させることなく飼料中リン濃度を現行の水準から低下させることは可能であるとされており、環境調和性と経済性の両立は可能であることが示唆されている。

本研究では考慮されていないが、フィターゼの利用によるリン利用効率の向上も考えられる。以前は、乳牛はフィチン態リンのほぼすべてを利用可能であるとされていたが (Morse ら 1992a)、Bravo ら (2002) は、ルーメン内での微生物によるフィチン態リンの分解は、以前提唱されていたほど大きくはなく、飼料中にフィターゼを添加することで反芻畜のリン利用効率は向上するとしている。本研究においても、今後はこの酵素の利用も取り入れる必要があると推察される。

乳量の増加は、総リン排泄量の増加をもたらすものの、環境負荷指数を低下させることが示された。Spears ら (2003) は、乳量増加は飼料中リンの生産物中への移行割合の上昇につながるとしており、本研究の結論と一致していた。また Wang ら (2000) は、農場全体での乳量を 10% 増加させるためには、搾乳牛の個体数を増加さ

せるよりも搾乳牛1頭あたりの乳量を10%増加させた方が、窒素やリン、カリウムなどの物質の環境負荷を軽減でき、さらには飼料購入費も削減でき、家畜の生産性の向上は、家畜の増頭に比べ、環境、経済の両方の観点で優れているとしている。

総リン排泄量と2種の環境負荷指数のうち、どの指標を重視すべきかは、議論を要するところである。例えば、乳量を増加させた場合、2種の環境負荷指数は低下するが、総リン排泄量は増加し、リン排泄総量と環境負荷指数のどちらを用いるかにより環境負荷に関する結論がまったく異なることになる。また、家畜排泄物の処理費用や処理能力は、処理技術や周辺の耕種農業および社会全体の状況により異なり、そのような条件を考慮すれば、本研究の結論とは異なる結論が導かれることも予想される。今後、家畜排泄物の処理および利用には、家畜栄養学などの畜産業側からの視点だけではなく、耕種農業側からの視点も不可欠であり、家畜の頭数や種類に応じて堆肥などの処理産物を利用する包括的な農業システムの構築が望まれる。

文 献

- Bravo D, Meschy F, Bogaert C, Sauvant D. 2002. Effects of fungal phytase addition, formaldehyde treatment and dietary concentrate content on ruminal phosphorus availability. *Animal Feed Science and Technology*, 99 : 73-95.
- De Boer IJM, Peters HTA, Grossman M, Koop WJ. 1997. Nutrient flows in agriculture in the Netherlands with special emphasis on pig production. *Journal of Animal Science*, 75 : 2054-2063.
- Hirooka H. 1992. A comparison of two mathematical model of the lactation curve in dairy cattle. *Japanese Journal of Biometrics*, 13 : 15-24.
- 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.
- 広岡博之・島田和宏・林 孝・寺田文典. 2001. 肥育牛に関する窒素排泄予測モデルの比較. 日本畜産学会報, 72 : 610-617.
- Knowlton KF, Herbein JH. 2002. Phosphorus partitioning during early lactation in dairy cows fed diets varying in phosphorus content. *Journal of Dairy Science*, 85 : 1227-1236.
- 久米新一. 1994. 乳牛におけるリンの有効利用と排泄抑制. 畜産の研究, 48 : 867-871.
- 久米新一・栗原光規・高橋繁男・相井孝允. 1991. 適温及び高温環境下における泌乳牛のミネラル要求量. 九州農業試験場報告, 26 : 311-359.
- 久米新一・野中和久・大下友子. 2003. 乾乳牛のメタン発生量並びに窒素・ミネラル排泄量に及ぼす給与粗飼料の影響. 北海道農業研究センター報告, 178 : 21-34.
- Kume S, Toharmat T, Nonaka K, Oshita T, Nakui T, Ternouth JH. 2001. Relationships between crude protein and mineral concentrations in alfalfa and value of alfalfa silage as a mineral source for periparturient cows. *Animal Feed Science and Technology*, 93 : 157-168.
- Morse D, Head HH, Wilcox CJ. 1992a. Disappearance of phosphorus in phytate from concentrates *in vitro* and from rations fed to lactating dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 75 : 1979-1986.
- Morse D, Head HH, Wilcox CJ, Van Horn HH, Hissem CD, Harris B JR. 1992b. Effects of concentration of dietary phosphorus on amount and route of excretion. *Journal of Dairy Science*, 75 : 3039-3049.
- 農林水産技術会議事務局編. 1999. 日本飼養標準. 乳牛 (1999年版). 中央畜産会. 東京.
- NRC. 2001. *Nutrient Requirements of Domestic Animals. Nutrient Requirements of Dairy Cattle*. 7th revised edn. National Academy Press, Washington, DC.
- Spears RA, Young AJ, Kohn RA. 2003. Whole - farm phosphorus balance on Western dairy farms. *Journal of Dairy Science*, 86 : 688-695.
- 寺田文典・阿部啓之・西田武弘・柴田正貴. 1998. 肥育牛の窒素排泄量の推定. 日本畜産学会報, 69 : 697-701.
- 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) 窒素フロー量の推定. システム農学, 12 : 113-117.
- 築城幹典・原田靖生. 1997 a. 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 (2) リン・カリウムフロー量の推定. システム農学, 13 : 10-16.
- 築城幹典・原田靖生. 1997 b. 家畜の排泄物量推定プログラム. システム農学, 13 : 17-23.
- Valk H, Sebek LBJ. 1999. Influence of long-term feeding of limited amounts of phosphorus on dry matter intake, milk production, and body weight of dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 82 : 2157-2163.
- Wang SJ, Fox DG, Cherney DJR, Chase LE, Tedeschi LO. 2000. Whole-herd optimization with the Cornell net carbohydrate and protein system. III. Application of an optimization model to evaluate alternatives to reduce nitrogen and phosphorus mass balance. *Journal of Dairy Science*, 83 : 2160-2169.
- Wood PDP. 1967. Algebraic of the lactation curve in cattle. *Nature*, 216 : 164-165.
- Wu Z, Satter LD, Blohowiak AJ, Stauffacher RH, Wilson JH. 2001. Milk production, estimated phosphorus excretion, and bone characteristics of dairy cows fed different amounts of phosphorus for two or three years. *Journal of Dairy Science*, 84 : 1738-1748.
- Wu Z, Satter LD, Sojo R. 2000. Milk Production, reproductive performance, and fecal excretion of phosphorus by dairy cows fed three amounts of phosphorus. *Journal of Dairy Science*, 83 : 1028-1041.

Development and Simulation of a Model for Predicting Phosphorus Excretion in Dairy Cows

Hideki KOJIMA, Hiroyuki HIROOKA, Jouken ISHIDA, Shinnichi KUME¹, Kazuhiro SHIMADA²
and Takashi HAYASHI³

Graduate School of Agriculture, Kyoto University, Sakyo-ku, Kyoto-shi 606-8502, Japan

¹ Hokkaido Prefectural Agriculture Research Center, Toyohira-ku, Sapporo-shi 062-8555, Japan

² National Institute of Livestock and Grassland Science,
Tsukuba Norin Kenkyu Danchi, Ibaraki-ken 305-0901, Japan

³ Division of Agricultural Information, National Agricultural Research Center,
Tsukuba-shi, 305-8666, Japan

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

The purposes of this study were to develop a simulation model of phosphorus excretion in dairy cows, and to investigate means to reduce the environmental load of phosphorus from dairy cow excreta. The model was evaluated using two independent data from phosphorus balance experiments of Holstein cows conducted in Japan and America. The model showed a good agreement between the predicted and observed phosphorus excretions for Japanese data, whereas there was an over-prediction for American data. This disagreement might be because the construction of the model was based on Japanese Feeding Standards(1999) and thus it could apply only to Japanese feeding situations. The effects of independent changes in dietary phosphorus concentration (DPC ; g/kg DM) and total 305 day milk yield (TMY ; kg) on total phosphorus excretion (TP_{exc} ; kg) and two environmental loading indexes expressed as the ratio of total phosphorus excretion to total phosphorus intake (I_1) and the ratio of total phosphorus excretion to total milk phosphorus (I_2) were simulated by using the model. The simulation results revealed that reduced DPC brought decreases in TP_{exc} , I_1 and I_2 , and raised TMY led to an increase in TP_{exc} but decreases in I_1 and I_2 .

Nihon Chikusan Gakkaiho, 74 (4) : 499-507, 2003

Key words : Phosphorus excretion, Dairy cattle, Prediction