

高泌乳牛の移行期の特徴と移行期におけるミネラル代謝の改善

久米新一（京都大学大学院農学研究科）

1. はじめに

近年、乳牛の生産性向上は非常に著しく、わが国では牛群の個体乳量が急激に増加している。それと同時に、メガファームにみられるような酪農家の規模拡大が急速に進んでいることも最近の大きな特徴である。このような状況下で、現在、わが国の乳牛の飼養管理における最大の問題点は分娩前後における疾病（周産期病）の増加と繁殖成績の低下といえる。実際に、乳用牛群能力検定成績の305日乳量は5,826kg（1975年）から9,152kg（2008年）に増加し、個体乳量はさらなる増加が予想されている。それに対して、乳牛の繁殖成績は改善が一向に進まず、分娩間隔は431日（402日：1985年）にまで延び、また代謝障害・繁殖障害などの疾病による淘汰も乳牛の生産性低下の大きな要因となっている。

分娩は乳牛にとって多大な生理的ストレスであるが、分娩前後の乳牛は生理機能・内分泌機能の急激な変動に加えて、免疫機能が低下する。そこで、高泌乳牛の生産性向上のために分娩前後（移行期）の栄養管理に関する研究が進展し、ミネラル栄養に関する新知見も最近では数多く報告されている。また、乳牛の周産期病のなかでは乳熱（低カルシウム血症）もよく研究され、乳熱発生のメカニズムや予防方法が解明されてきているものの、いまだに発生が減少していない疾病である。乳牛が乳熱にかかるると治療に要する経費やその後の乳量低下、関連する疾病（第4胃変位など）の増加などにより、酪農家にとっては経済的損失が非常に大きくなる。そのため、乳熱をどのように予防するかが、移行期の栄養管理の重要な課題の一つになっている。

筆者は乳牛のミネラル代謝に関する研究を長年続けてきたが、本報では筆者らの研究成果¹⁻¹⁵⁾を中心にして、高泌乳牛の移行期の特徴と移行期におけるミネラル代謝、特にカルシウム、リンおよびマグネシウム代謝の改善法を紹介したい。

2. 高泌乳牛の移行期の特徴とミネラル代謝

乳牛の分娩前後にはさまざまな名称があるが、高泌乳牛の栄養管理では移行期（Transition period）がふさわしいと考えられる^{1,2)}。移行期の最大の特徴は、育種改良の進展により分娩直後の乳量増加が顕著であるのに対して、エネルギー不足による体重減少が非常に大きく、そのことが乳牛の疾病増加や受胎率低下を招いている。それに対して、乾乳期は乳生産をしていないことから、酪農家も飼養管理を軽視しがちであったことは否定できない。しかし、1万kgレベルの高泌乳牛が増えるに従って、現在は分娩前の適正な栄養管理が分娩後の乾物摂取量、乳生産、繁殖成績などの改善に非常に重要なことが認められている。特に、分娩は母牛にとって生理的ストレスになるが、分娩前の栄養管理が適切でないと分娩時の事故や代謝障害・繁殖障害が多発し、その後の乳量減少や受胎率低下にもつながる。そこで、移行期は乾乳後期～分娩時～泌乳初期と連続してとらえられ、現在では分娩3週間前から分娩3週間後までの期間と考えるのが一般的である。

高泌乳牛では妊娠末期の分娩前数日間は胎児の成長でルーメンが圧迫されることや分娩に伴う代謝機能・内分泌機能の変化などにより、乾物摂取量が減少する。例えば、分娩前の血中エストロゲンの急上昇は乾物摂取量の減少や免疫機能の低下をもたらし、分娩前後の免疫機能の低下は病原菌の体内侵入を容易にして、乳房炎などの疾病増加につながっている^{16,17)}。また、泌乳前期の分娩後3週間は乳量の急激な増加に対して乾物摂取量の増加が追いつかない特徴がある。その結果、泌乳前期には体内に蓄積している養分を泌乳のために利用せざるをえなくなり、高泌乳牛ではこの時期に体重が減少する。したが

って、育種改良の効果に対して栄養管理が追いつかない現象は移行期に集中し、移行期は栄養管理に少しでも不備があると乳牛の健康状態がすぐに破綻する時期といっても過言ではない。

図1にはそのことが明瞭に示されているが、乳量は分娩4日後に30kgを超え、2週間には40kgに達するなど、育種改良による効果がこの時期に顕著に現れている。しかし、分娩後2週間の体重減少が非常に著しく、乳牛は血漿中遊離脂肪酸濃度が急激に上昇して、エネルギー不足によるケトosisや脂肪肝発生の危険性が高まる。この試験では分娩前後に消化試験を実施した(表1)が、分娩前の窒素とミネラル出納はプラスなもの、分娩2-4日後には乳量が30kg/日以上に急増したため、体重減少が4.8-6.5kg/日と非常に著しく、また窒素、カルシウム、リン、マグネシウム、カリウム出納もマイナスになった³⁾。したがって、分娩直後の高泌乳牛は体重減少、窒素・ミネラル蓄積量の減少が非常に顕著なため、分娩後の乾物摂取量を早期に増加させ、同時に窒素・ミネラル蓄積量を増加させる飼養管理が重要になる。

これらの結果から、高泌乳牛が高乳量を維持するとともに、繁殖成績を向上し、疾病を予防するためのポイントは、分娩後の乾物摂取量を早期に高めることと、ミネラル栄養だけでなく、エネルギー、タンパク質、ビタミン栄養の改善を同時に図ることが基本になる。そのため、移行期には(1)分娩後の乾物摂取量を早期に高めて、エネルギーや栄養素の充足を早めるための精密な栄養管理と、2)乳牛の健康を維持し、分娩前後の代謝障害・繁殖障害を減らすための適切な栄養管理(イオンバランスなど)が求められる。また、移行期の栄養管理では飼料から栄養素を過不足なく摂取できること、ルーメン環境を適正に維持できること、分娩後の乾物摂取量の早期増加が可能なことのために、TMRで給与することが最も望ましい。

移行期の栄養管理で、分娩に伴って劇的に変化するの乾物摂取量よりも水摂取量(飲水量+飼料中の水)である⁴⁾。妊娠牛(n=8)の分娩1週間前の飲水量は21.0kg/日、水摂取量は31.6kg/日であったが、乳量が29.5kgの泌乳牛では水摂取量が98.5kg/日に達している(表2)。表1の分娩後の泌乳牛では、体重減少に伴う体内の水と体内代謝で生成する水(代謝水)をあわせても5kg程度であり、また乾物摂取量が少ないことから飼料由来の水も少なく、約80kgの水を飲料水として摂取しなければならない。このことから、分娩直後の飼養管理では安全な水を安定供給できることが非常に重要であり、また後述するように水の摂取不足が移行期のミネラル代謝に多大な影響を及ぼすことになる。

3. 乳牛のミネラル出納の特徴

移行期の乳牛のミネラル代謝は、乾乳牛と泌乳牛のミネラル代謝とは大きく異なる。分娩直後には初乳中のカルシウム、リンおよびマグネシウム含量が常乳の2倍以上になるため、乳中への分泌量の増加によって乳牛のカルシウム、リンおよびマグネシウム代謝は急激に変化する(図2)^{5,6)}。特に、分娩後の急激な乳量増加は乳中へ大量のカルシウムが失われるため、小腸からのカルシウム吸収と骨吸収でカルシウムが直ちに補給されなければ、乳牛は血漿中のカルシウム濃度が急速に低下し、乳熱発生に至る。

そこで、ここではまず乾乳牛と泌乳牛のミネラル出納の特徴を紹介する(北村・久米、未発表)。表2は自給粗飼料を主体に飼養したホルスタイン種乳牛50頭(乾乳牛34頭および泌乳牛16頭)のデータであるが、飼料中のリンとマグネシウム含量は乳牛の要求量をほぼ満たしている。それに対して、飼料中のカルシウム含量は乳牛の要求量よりも1.3倍以上多く、またカリウム含量は要求量の2倍以上に達している。乳牛のカリウム代謝の特徴は前報⁴⁾で詳細に論じているので、ここではカルシウム、リンおよびマグネシウム出納の結果を示した(図3)が、乳中への分泌量はカルシウム(37.3g/日)、リン(28.1g/日)、マグネシウム(3.1g/日)であり、マグネシウムの乳中分泌量がカルシウムとリンよりも非常に少ない。したがって、泌乳による影響が大きいのはカルシウムとリン代謝であるが、この試験では乾乳牛

と泌乳牛の血漿のカルシウム、リンおよびマグネシウム濃度は正常範囲内にあり、また泌乳牛のリン蓄積量がややマイナス (-0.3g) なものの、それ以外は全てプラスであった。さらに、カルシウムとリンの主要な排泄経路は糞中であったが、マグネシウムでは体内の吸収量が増えると尿中へのマグネシウム排泄量が増加した。

分娩直後の乳中への分泌量は、カルシウム (21.4g/日)、リン (18.0g/日)、マグネシウム (2.9g/日) であった⁶⁾。また、分娩2-4日後の乳中への平均分泌量 (表1) はカルシウム (42.1g/日)、リン (36.8g/日)、マグネシウム (3.5g/日) であったが、分娩後のアルファルファ区のカルシウムとリンの吸収率がグラス区よりも多かったことから、体内からのカルシウムとリンの損失量もアルファルファ区で少なかった。これらの結果から、分娩直後には乳中へのカルシウムとリンの損失量が多いものの、飼養管理を工夫することによって移行期でもミネラル栄養を適切に維持できることが期待できる。

4. 移行期のミネラル代謝と乳生産

動物は常に変動する外界からの情報を受け取り、それに適切に対応しながら、体内の恒常性を常に一定の範囲内に維持している。また、体内代謝などの変化に対しては神経系・内分泌系・免疫系などの機能を適応させて、体内の変化を最小限にするしくみがある。移行期のミネラル代謝では乳熱予防が重要であるが、高泌乳牛には分娩前後のカルシウム代謝を適切に維持するしくみが備わっている。

1) 移行期のミネラル代謝の特徴

高泌乳牛の乳熱発生にはさまざまな要因が影響しているが、乳熱予防のポイントは分娩前後のカルシウム代謝を正常に維持することである。しかし、この簡単にみえることが実は非常に難しいため、現在でも最適な乳熱予防法が見いだされていない。乳牛は泌乳開始に伴って初乳中へのカルシウム損失量が増加すると、血漿中のカルシウム濃度の急激な低下を防ぐために、副甲状腺ホルモン産生量を高める。副甲状腺ホルモンの主な働きは骨の破骨細胞を活性化して骨から血液へのカルシウムの移行 (骨吸収) を高めることと、肝臓、腎臓でビタミンDを水酸化して活性型ビタミンD産生量を高めることである。腎臓で活性型ビタミンD産生量が高まると小腸からのカルシウム吸収量が増加し、骨吸収量とカルシウム吸収量の増加で乳牛は血漿カルシウム濃度を正常範囲内に維持して、乳熱発生を防止する。

図4にはこのことが端的に示されているが、分娩直後に乳牛の血漿カルシウムと無機リン濃度が低下したものの、分娩直後に副甲状腺ホルモン (PTH) と活性型ビタミンD (1, 25(OH)₂D) が急上昇し、分娩6日後には血漿カルシウムと無機リン濃度がほぼ正常範囲内に回復している⁷⁾。高泌乳牛では分娩直後に乳中へ多量のカルシウムとリンが分泌されるため、分娩直後に血漿カルシウムと無機リン濃度が低下することは避けられない。しかし、乳牛には血漿カルシウムと無機リン濃度の低下を最小限に抑えて、その後の回復を促す機能が働くため、移行期にはその機能を高める栄養管理が必要になる。なお、この試験では分娩直後の乾物摂取量と乳量の増加が順調に進み、分娩6日後の乳量は約40kg/日に達し、ケトosisなどの他の周産期病も発生しなかった。

2) 泌乳前期の乳生産向上

移行期には一定量の粗飼料が欠かせないことから、高品質粗飼料を活用した乳量増加、疾病予防、繁殖成績改善を図ることが必要といえる。図5は、図4の供試牛も含めてトウモロコシ+アルファルファ給与区 (粗飼料給与比率60%)、オーチャードグラス主体給与区 (粗飼料給与比率50%) とアルファルファ主体給与区 (粗飼料給与比率は50%) の乳生産の結果である^{2,4)}。トウモロコシ+アルファルファ区とアルファルファ区では分娩6週後以降に体重当たりの乾物摂取量がほぼ4%を超え、また日本飼養標準によるTDN充足率は分娩10週後にほぼ充足していたが、グラス区では90%程度と乳量の減少に加えてやや栄養不足であった。しかし、この試験では受胎率などの繁殖成績は各区とも良好であった。

また、カルシウムの充足率はトウモロコシ+アルファルファ区とアルファルファ区では分娩4週後以降に充足し、またリンの充足率も分娩7週後以降にほぼ充足していたが、グラス区ではカルシウムとリンは充足しなかった。これらの結果から、泌乳前期では栄養管理によってミネラルの充足率に相違があるものの、ミネラル栄養ではリンの充足を図ることが特に重要と考えられた。

乳牛の乳量増加は遺伝的能力の改良による効果と飼養管理の改善による効果で説明できるが、現在は遺伝的能力の改良による効果が非常にめざましい。このような遺伝的能力の改良により乳牛の乳量、乳成分は急速に向上したが、逆に高泌乳牛の飼養管理における最大の問題点はその生産性向上にみあう飼養管理技術が確立していないことである。その結果、農家では栄養素の過不足による乳牛の代謝障害・繁殖障害などが移行期に多発し、高泌乳牛はその高い泌乳能力を発揮する前に淘汰されるケースが増えている。本報の結果は、移行期に代謝障害・繁殖障害を予防し、高泌乳牛の健康を維持できれば、粗飼料給与率を高めても1乳期で10,000-12,000kgの乳量と繁殖成績の改善が可能なことを意味している。

それでは、飼養管理の観点から泌乳能力の現状をどのように考えればよいだろうか。乳牛の泌乳能力を基本に考えると、高泌乳牛の生理・生産機能に問題が生じるのは移行期における単純な栄養不足ではなく、移行期の飼養管理技術の認識不足が原因といえる。例えば、泌乳能力が8,000kg程度の牛では飼養管理をいくら改善しても1万kg以上に増やすことは不可能である。しかし、乳用牛群能力検定成績の305日間乳量が9,152kg(2008年)に達していることから、現状では1万kg以上の泌乳能力のある牛を飼養管理の不備によって8,000kg程度しか搾っていないような、能力を十分に発揮できていないケースで問題が生じている。したがって、高泌乳牛の泌乳能力に応じた飼養管理が可能になれば、健康も維持しながら高泌乳を達成できると考えられる。

5. 移行期のミネラル代謝の阻害要因とその改善

乳牛の栄養管理の基本は、乳生産向上のために栄養素を適正給与することであるが、育種改良の急速な向上に伴って乳牛では分娩直後の乳量増加が顕著になり、分娩後にエネルギーが極度に不足する事態が生じている。分娩直後の急激な乳量増加と不十分な乾物摂取量による栄養不足、実はこれが乳熱を発生させる主な要因である。しかし、前述したように移行期の栄養管理を適切に維持し、代謝障害・繁殖障害の発生を防止できれば、乳量増加と繁殖成績の改善が達成できる。そこで、ここでは高泌乳牛の移行期におけるミネラル代謝の阻害要因とその改善法を紹介する。

1) 加齢による影響

乳熱発生など、高泌乳牛のミネラル代謝の阻害要因としては加齢の影響が大きい。乳牛の分娩直後の血漿カルシウムと無機リン濃度は加齢とともに低下し、3産以上の牛では乳熱発生の危険性が高まっている(表3)⁸⁾。また血漿副甲状腺ホルモンは4産以上の老齢牛で高い値を示したが、カルシウム代謝を制御する副甲状腺ホルモンの上昇はカルシウム濃度の急激な低下を阻止し、乳熱予防を図っていることを意味している。しかし、血漿マグネシウム濃度には加齢の影響は認められなかった。

このことから、初産牛は副甲状腺ホルモンの分泌量が少なくてもカルシウムとリン代謝を正常に維持できるが、加齢とともに骨などの働きが弱体化するため、老齢牛、特に3産以上の牛では副甲状腺ホルモンの分泌量が多くても血漿カルシウムと無機リン濃度の低下を防げなかったといえる。また、この試験では4産以上の牛で血漿遊離脂肪酸濃度が急上昇し、加齢とともにケトosisや脂肪肝発生の危険性も高まるため、経産牛ではカルシウムとリン代謝を活性化させるだけでなく、エネルギー摂取量を適正に保つことが重要である。

一方、表3では初産月齢が25.5カ月で初産から2産あるいは3産までの分娩間隔が12.7カ月および23.6カ月となっているように、試験場の成績ではあるものの栄養管理を適正に保てば高泌乳牛でも1年

1産が可能といえる。このことは、高泌乳牛を飼養している一部の酪農家で非常に良好な繁殖成績を達成している例があるように、栄養管理などを適正に維持できれば高泌乳牛でも1年1産が可能になると考えられる。

2) カリウムによる影響

乳牛の乳熱発生要因として、従来はカルシウム過剰摂取が問題になっていたが、最近ではカルシウムよりもカリウム過剰摂取による影響が大きいと報告されている(NRC, 2001)¹⁷⁾。わが国では土壌中への糞尿の大量還元などにより、牧草中のカリウム含量が3%以上になることも多く、泌乳牛のカリウム要求量(0.80%)をはるかに超えているのが現状である^{9,10)}。ミネラルのなかでもカリウムは消化管で溶解・吸収されやすく、また乳牛体内に過剰に吸収されたカリウムは血液をアルカリ化し(代謝性アルカローシス)、消化管あるいは乳牛体内でカルシウムやマグネシウムの吸収や利用を阻害する。したがって、乳熱予防のための栄養管理ではカリウム摂取量の低減を図ることが非常に重要である。

筆者らの一連の試験のなかで高カリウム含量(3.4%)のアルファルファを給与すると、供試牛4頭のうち2頭に乳熱が発生した(図6)⁷⁾。乳熱発生牛では血漿カルシウムと無機リン濃度が急減したが、血漿副甲状腺ホルモンは分娩直後に上昇し、血漿マグネシウム濃度も高い値を維持していた。しかし、骨吸収の指標となる血漿ヒドロキシプロリン濃度が低かったことから、骨の副甲状腺ホルモン受容体の適応が不十分なことが推察された。

乳牛が乳熱になっても、副甲状腺ホルモンと活性型ビタミンDの分泌量はそれほど変わっていない。NRC(2001)では周産期の乳牛がアルカローシスになると副甲状腺ホルモン受容体の機能が損なわれ、消化管からのCa吸収量と骨吸収量の減少により、乳熱が発生すると報告している。また、乳熱発生要因としては低マグネシウム血症もあげているが、低マグネシウム血症になると副甲状腺ホルモン分泌量の減少と副甲状腺ホルモン受容体の機能低下を生じ、乳熱発生が促されるとしている。

一方、図6の乳熱発生牛は低マグネシウム血症にはならなかった。しかし、乳牛ではマグネシウムの主な吸収部位はルーメンであるが、ルーメンpHが6.5を超えるとマグネシウムの溶解性が低下し、マグネシウムの吸収率が低下する。図7に乾草給与後のルーメンにおけるミネラルの溶解を示したが、カリウムは給与後にルーメンで急速に溶解されるのに対して、マグネシウムもルーメンで溶解されるものの、その溶解量はカリウムの1/10以下であった。したがって、飼料中のカリウム含量が高いとルーメンpHが上昇し、マグネシウムの吸収が阻害されるため、移行期の乳牛では低マグネシウム血症に注意が必要といえる。

さらに、移行期の乳牛では水摂取量を制御できないと乳生産が減少するだけでなく、浸透圧や酸塩基平衡など、体内の恒常性維持に悪影響を及ぼす。乳牛は血液や尿の浸透圧を一定に保つために、カリウム摂取量が増加すると飲水量を増加させ、最終的には尿量を増加させて過剰なカリウムを尿中へ排泄する^{11,12)}。特に、乳牛は尿中カリウム排泄量が150g/日まではカリウムを濃縮した尿を生成してカリウム排泄量を促進するものの、150g/日を超えると腎臓で濃縮尿を生成できなくなり、腎臓の集合管からの水の排泄促進で尿量を増加させ、過剰なカリウムを排泄している。このことから、移行期の乳牛が水を十分に摂取できないとカリウムの排泄が阻害され、代謝性アルカローシスを促進することになるので、移行期の乳牛では水を適正摂取できる飼養環境の整備がきわめて重要といえる。

3) カチオン・アニオンバランスによる影響

近年、乳熱予防では飼料中のミネラルが有する電位差(カチオン・アニオンバランス:DCAD)を有効利用する方法が注目されている^{1,2)}。ミネラルは家畜の細胞内外でさまざまな濃度差を有し、その濃度差を利用して情報伝達、物質輸送、酸塩基平衡、浸透圧など、さまざまな体内代謝を調節している。一般にDCADは表4の式で計算されるが、基本的には飼料中のカリウム、ナトリウム、カルシウム、マグネシ

ウムなどのカチオン（陽イオン）と、イオウ、塩素、リンなどのアニオン（陰イオン）との電位差をみたものである。

DCAD 給与による目標は、周産期の乳牛をアシドーシスにして副甲状腺や副甲状腺ホルモン受容体などの機能を活性化し、消化管からのカルシウム吸収量の増加と骨吸収の促進により、分娩直後の血漿カルシウム濃度の急激な低下を防ぐことである。また DCAD による給与では、表 4 の式をマイナスにすると分娩前後のカルシウム代謝が正常に保たれ、乳熱予防に効果的とされている。そこで、飼料中の DCAD をマイナスにするためにイオウや塩素を添加した飼料が開発されているが、過剰な陰イオン塩の給与は飼料摂取量の減少などの悪影響をもたらすため、現在は DCAD を 0 ミリ当量/kg 程度にすることが推奨されている。

わが国では自給粗飼料中の DCAD はほとんどが正の高い値となっている（表 4）が、牧草中のナトリウム含量が低いため、牧草中の高カリウム含量が DCAD を上昇させる最大の要因である。また、DCAD による給与では尿中 pH を指標にして陰イオン塩を給与しているが、尿中 pH を上昇させる主な要因は飼料中のカリウムである。したがって、移行期には 2% 以下の低カリウム含量の粗飼料を利用し、給与飼料中のカリウム含量を可能な限り少なくすることがまず第一に必要である。また、自給粗飼料のなかではトウモロコシサイレージのカリウム含量が非常に低く、同時に DCAD も低い値であったことから、自給粗飼料給与ではトウモロコシサイレージを活用することが望まれる。

一方、乾乳期の飼養管理では分娩後の乾物摂取量を早期に高める飼料構成が重要なため、陰イオン塩飼料による乾物摂取量の減少を避ける工夫が必要である。例えば、育成雌牛では乳熱はほとんど発生しないことと成長のための増体が必要なことから、陰イオン塩の利用は推奨できない。そのため、陰イオン塩の利用は高カリウム飼料を給与している経産牛に限定し、また DCAD を 0 ミリ当量/kg 程度に設定して過剰な陰イオン塩の利用を避けることが大切である。また、NRC 標準（2001）では乳熱予防のために飼料中のマグネシウム含量を 0.35-0.40% に高めることを推奨しているが、マグネシウム剤も嗜好性がよくないので、マグネシウム給与では乾物摂取量の低下に注意しなければならない。

4) 暑熱ストレスによる影響

夏季の高温環境は乳牛の生理・生産機能にさまざまな悪影響を及ぼし、体温・呼吸数の上昇、採食量の減少、乳量・乳成分の低下とともに、疾病の増加や繁殖成績の低下などをもたらす。特に、体内代謝の旺盛な高泌乳牛ほど暑熱ストレスの影響を受けやすく、なかでも猛暑の年には乳牛の死廃頭数の増加を招き、乳量や繁殖成績を著しく低下させる。また、暑熱ストレスが乳牛のミネラル代謝に及ぼす影響では、カルシウムとリン代謝に及ぼす影響が最も大きい。

暑熱期における泌乳牛のカルシウムおよびリン代謝の特徴をあげると、カルシウムとリン摂取量の減少とそれらの吸収率の低下により、消化管からのカルシウムとリンの吸収量が減少することである。その結果、乳牛体内で生理・生産機能に利用可能なカルシウムとリンの量が減少し、血清中のカルシウムと無機リン濃度の低下や乳中のカルシウムとリン含量が減少する。さらに影響が大きくなると、体内におけるカルシウムとリンの恒常性が障害され、カルシウムとリンが制御する体内代謝や情報伝達などの生体調節機構に悪影響を及ぼすことになる。

高泌乳牛では暑熱ストレスの影響により飼料摂取量が減少するため、多くの牛がエネルギー不足になるが、その影響は移行期で特に大きい^{1,2)}。表 5 は、夏季と秋・冬季分娩牛 32 頭に分娩 4 週間前から TDN の維持要求量給与（M：乾物摂取量 6kg）区、維持+妊娠要求量給与（MP：乾物摂取量 8.5kg）区と MP 区の 1.2 倍給与（HMP：乾物摂取量 10.3kg）区を設けた試験結果である。飼料摂取量が少ない M 区では増体率が約 0.2kg/日と少なく、また夏季分娩牛では MP 区でも増体が 0.2kg/日と暑熱ストレスによる影響が大きかった。

乳牛の防暑対策の基本は体温上昇の抑制であるが、この試験では興味深い成果が得られている(図8)。冷涼な秋・冬季分娩牛では飼料摂取量の増加とともに熱発生量が増加するため、体温はHMP区で最も高い。それに対して、暑熱ストレスの影響をうける夏季分娩牛では体温は秋・冬季分娩牛よりも上昇しているが、逆に飼料摂取量の少ないM区の体温が最も高くなった。このことは、M区の乳牛は栄養不足により体脂肪を熱エネルギーに変換して体内代謝に利用したものの、夏季分娩牛では周囲の環境温度が高いためその熱を十分に放散できなかったことが原因と考えられる。この試験では夏季に乳牛が栄養不足になると分娩前の体温の急上昇を招き、特に分娩直前に体温は危険域の40°Cにも達していた。このような事例は農家でもよくみられ、夏季に熱中症などで致死となることも多い。特に、猛暑の年であった1993年には約4,600頭の乳牛が斃死したが、なかでも分娩前後の牛に多い傾向があった。牛群検定では夏季(6-8月)分娩牛が全体の25%以上と高い比率を示しているため、防暑対策では夏季分娩牛に最大限に注意し、気化冷却装置を分娩前から導入するなど、移行期の暑熱対策を優先的に実施することが必要である。

乳牛のミネラル代謝では、分娩前の血漿中ミネラル濃度には影響が認められなかったものの、初乳中のカルシウム、リンおよびマグネシウム含量が夏季に低下したことから、暑熱ストレスによって体内で利用可能なミネラルの減少したことが推察された。特に、移行期の高泌乳牛では骨からのカルシウムとリンの損失が多量なため、この時期に暑熱ストレスの悪影響が加わると乳牛は乳熱などの代謝異常を起こしやすくなる。したがって、夏季分娩牛では飼料摂取量を減少させないこと、分娩前にカリウムの過剰給与を避けることなどによって、乳熱の予防を図ることが重要である。

5) 植物エストロゲンによる影響

分娩前の乳牛にマメ科牧草を多給すると乳熱が多発したことから、当初はマメ科牧草に多量含有されているカルシウムが乳熱発生要因と考えられたが、その後マメ科牧草にはカリウムも多量含有されていることが判明し、乳熱発生にはカルシウムよりもカリウムの影響が大きいとされている。しかし、筆者はアルファルファを多給した乳牛の乳熱発生をカリウムやカルシウムの過剰摂取だけでは説明できなかったことから、マメ科牧草に含有されている植物エストロゲンなど、他の要因も影響したのではないかと考えている。

マメ科牧草にはイソフラボンなどの植物エストロゲンが多量含有されているが、アルファルファには植物エストロゲンの一つであるクメステロールが多い。植物エストロゲンはその構造が内因性のエストロゲンである17 β -エストラジオールと類似していることから、生体内でエストロゲン受容体に結合し、カルシウム代謝に影響することが知られている。特に、ヒトでは閉経後にエストロゲン不足になると骨吸収が促進し、骨粗鬆症になることから、植物エストロゲンが骨粗鬆症の予防薬としても使われている。その一方で、羊の生殖障害であるクローバー病の発生など、家畜では植物エストロゲンによる有害作用も報告されている。

分娩直前の乳牛は高エストロゲンの状態になることを前述したが、このような高エストロゲンの状態で植物エストロゲンを多量摂取すると、骨吸収の抑制などによって分娩後の乳熱発生につながる事が予想される。そこで、妊娠マウスにクメステロールを200 μ g/kg体重/日を投与したところ、血清カルシウム濃度は変化しなかったものの、分娩直後に十二指腸のアルカリファスファターゼ活性が減退した^{13,14)}。次に、内分泌攪乱物質の一つであるビスフェノールAを20mg/kg体重/日投与(クメステロール投与の100倍)すると、分娩直後の血清カルシウム濃度が低下した¹⁵⁾。乳牛では加齢に伴って血漿カルシウム濃度だけでなく、血漿アルカリフォスファターゼ活性も分娩直後に低下した(表3)が、今回の結果は実験動物の段階ではあるものの、乳牛に植物エストロゲンを多量含有しているマメ科牧草を多給すると乳熱発生を促すことが示唆された。

7. おわりに

高泌乳牛に対するミネラルの役割は、遺伝子や酵素の発現調節から骨形成に至るまで非常に多岐にわたっている。移行期に乳牛のミネラル代謝を正常に維持できると、高泌乳牛の代謝障害・繁殖障害を防止できるだけでなく、乳量の増加や繁殖成績の改善にもつながる。特に、乳熱は一連の周産期病の初期段階で発生することから、乳熱予防によって他の周産期病の予防も期待できる。したがって、移行期の飼養管理ではミネラル栄養に十分に配慮することの重要性を最後に強調しておきたい。

参考文献

- 1) 久米新一: Ca 代謝 (低 Ca 血症) とカチオン・アニオンバランス, 農業技術体系・畜産・技 278 の 58-65, 農文協, 東京 (2002)
- 2) 久米新一: ミネラル, 乳牛栄養学の基礎と応用, 81-91, デーリィジャパン社, 東京 (2010)
- 3) Kume S ら: Anim. Feed Sci. Tech., 93:157-168 (2001)
- 4) 久米新一・宿院 享: 畜産の研究, 64(11), 1063-1073 (2010)
- 5) 久米新一ら: 日畜会報, 63, 864-866 (1992)
- 6) Kume S ら: J. Dairy Sci., 76,1654-1660 (1993)
- 7) Kume S ら: Res. Bull. Natl. Agric. Res. Cent. for Hokkaido Reg., 181,1-14 (2004)
- 8) Kume S ら: Anim. Sci. J., 74,211-215 (2003)
- 9) 久米新一ら: 日畜会報, 75, 179-184 (2004)
- 10) 久米新一: 家畜診療, 58, 67-72 (2011)
- 11) Kume S ら: Livest. Sci., 115,28-33 (2008)
- 12) Kume S ら.: Livest. Sci., 128, 46-51 (2010)
- 13) Kirihata Y ら: J. Reprod. Dev. 54:35-41. (2008)
- 14) Kirihata Y ら: Phytotherapy Research 25:654-658 (2011)
- 15) Otsuka H ら: Anim. Sci. J., (accepted)
- 16) Goff JP ら: J. Dairy Sci., 89,1292-1301 (2006)
- 17) National Research Council (NRC): Nutrient Requirements of Dairy Cattle, 7th rev. ed., National Academy Press, Washington, DC (2001)

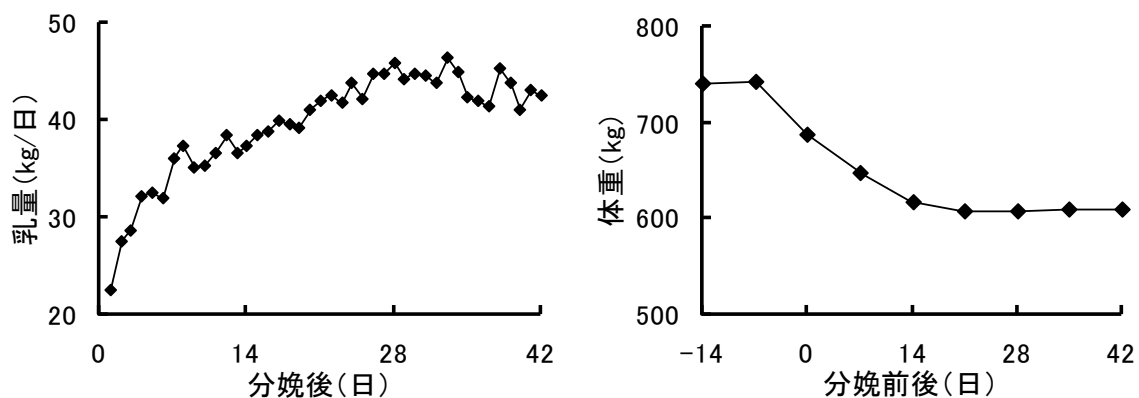


図1 乳牛の移行期における体重と乳量の変動 (n=4)

表1 乳牛の分娩1週間前(3日間)と分娩2-4日(3日間)後のミネラル出納

	分娩前		分娩後	
	グラス区	アルファルファ区	グラス区	アルファルファ区
体重, kg	754	733	711	643
増体, kg/日	0.15	0.65	-4.8	-6.5
乾物摂取量, kg/日	10.0	11.0	13.3	13.3
乳量, kg/日	—	—	29.5	31.9
尿量, kg/日	11.3	12.6	15.5	22.9
尿中 pH	8.20	8.31	8.19	7.75
窒素摂取量, g/日	218	240	309	322
蓄積量, g/日	49	64	-93	-72
Ca 摂取量, g/日	46.6	81.3	69.5	111.0
蓄積量, g/日	11.7	18.9	-20.3	-1.4
P 摂取量, g/日	32.5	36.0	48.1	48.2
蓄積量, g/日	11.6	11.2	-16.5	-7.0
Mg 摂取量, g/日	19.6	24.7	26.3	30.8
蓄積量, g/日	2.8	3.9	-0.5	2.7
K 摂取量, g/日	194.8	203.7	218.9	192.5
蓄積量, g/日	0.1	2.9	-50.2	-18.9

注) 粗濃比は分娩前(70:30)と分娩後(50:50)とした(計4頭)

表2 乾乳牛と泌乳牛の飼料中ミネラル含量

	乾乳牛	泌乳牛
頭数	34	16
粗飼料給与比率, %	90-100	60
飼料成分 (乾物%)		
CP	14.5	16.6
Ca	0.77	0.80
P	0.26	0.37
Mg	0.20	0.21
K	2.33	1.96

体重, kg	616	614
乾物摂取量, kg/日	7.6 ^b	20.7 ^a
水摂取量	30.1 ^b	98.5 ^a
乳量, kg/日	—	29.5
血漿, mg/dl		
Ca	10.0	10.2
Pi	5.5 ^a	4.4 ^b
Mg	2.2 ^b	2.6 ^a

水摂取量 : 飲水量 + 飼料中の水, ^{a, b}P < 0.01

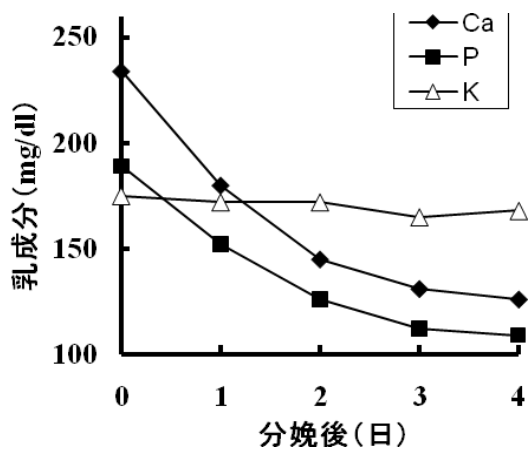


図2 乳牛の初乳中ミネラル含量の変動 (n=23)

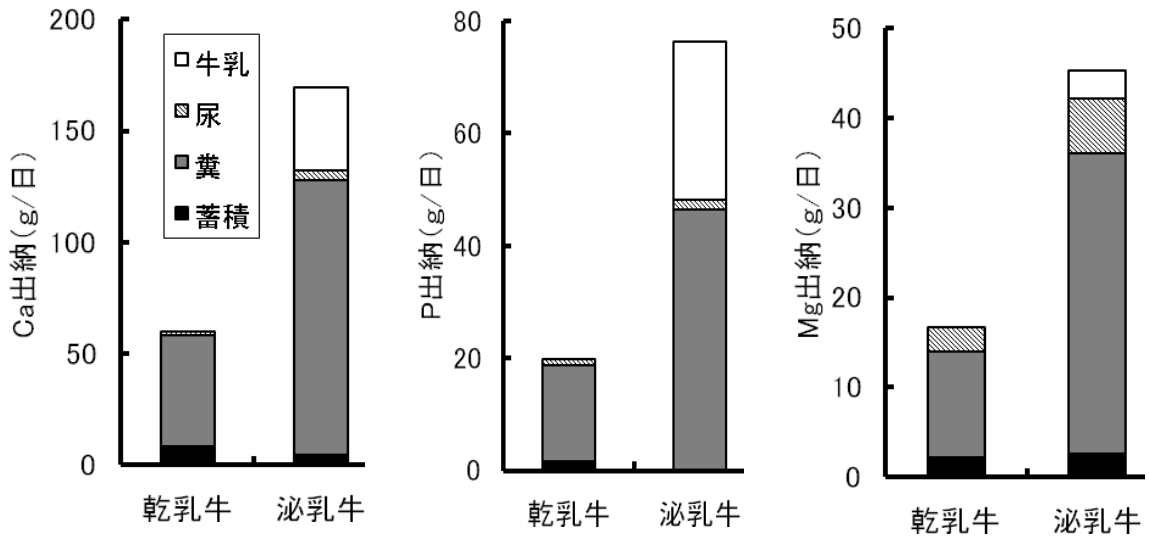


図3 乾乳牛と泌乳牛のCa、PおよびMg出納

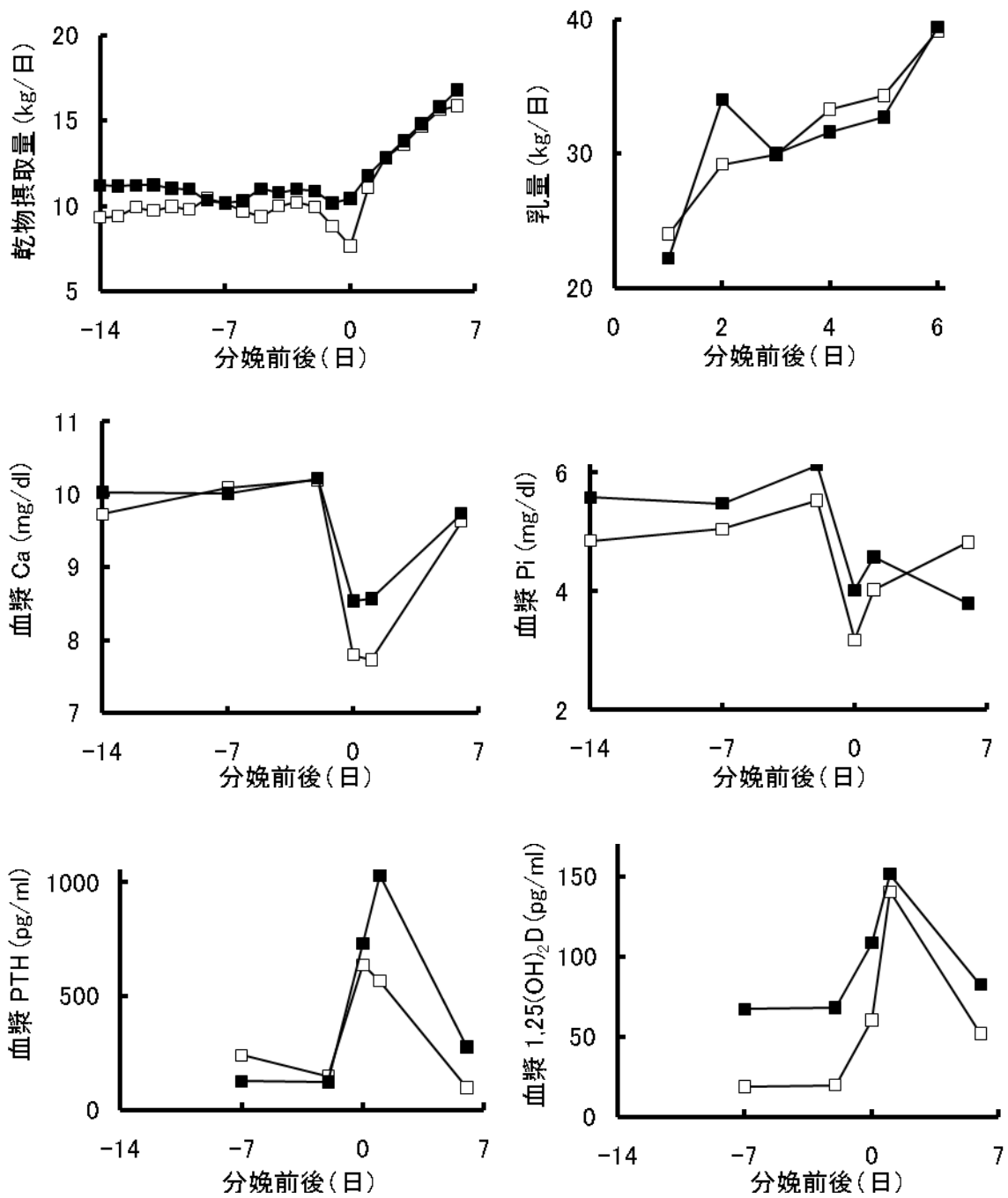


図4 アルファルファ主体給与牛 (□:n=4) とアルファルファ+コーン給与牛 (■:n=4) の分娩前後の乾物摂取量, 乳量と血液成分 (粗濃比は分娩前 (70:30) と分娩後 (50:50) とした)

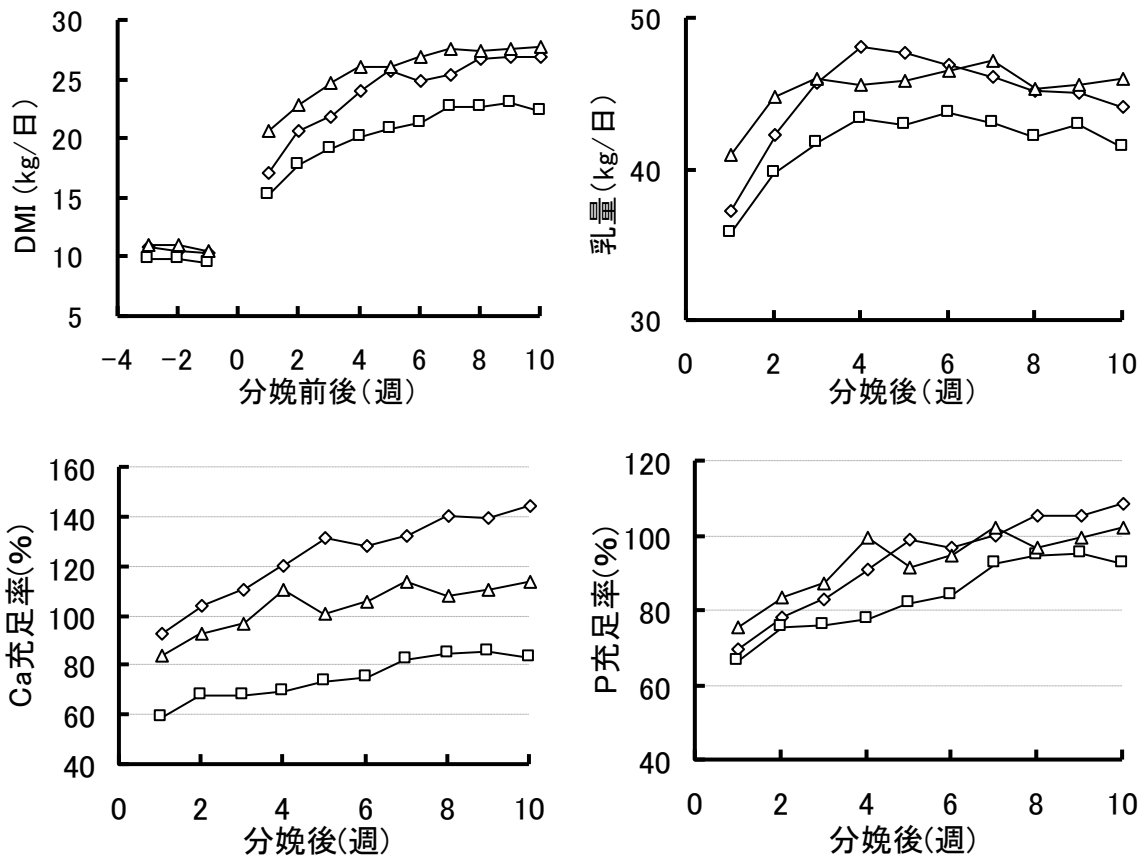


図5 グラスサイレージ (□:n=6)、アルファルファサイレージ (◇:n=7) とアルファルファ+トモロコシサイレージ (△:n=4) 給与牛の乾物摂取量、乳量およびCa・P充足率

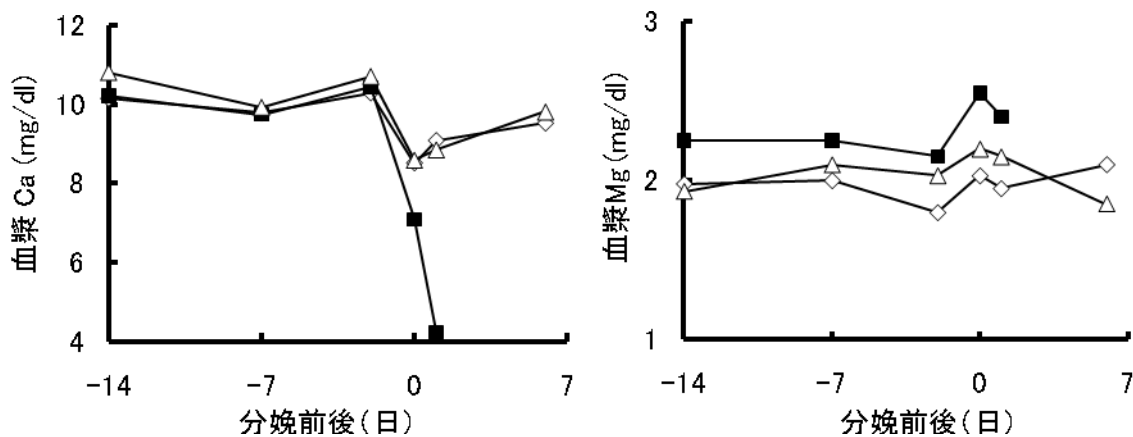


図6 グラス(◇:n=4)区、アルファルファ・正常(△:n=2)区およびアルファルファ・乳熱(■:n=2)区の血液成分

表3 乳牛の分娩直後の血液成分

	初産	2産	3産	4産以上
頭数	27	14	8	14
月齢	25.5	38.2	49.1	76.0
体重, kg	602 ^c	648 ^b	666 ^b	762 ^a
子牛体重, kg	43.3 ^b	47.2 ^a	47.9 ^a	47.7 ^a
血漿成分				
Ca, mg/dl	8.8 ^a	8.6 ^{ab}	8.1 ^{bc}	7.5 ^c
Pi, mg/dl	4.8 ^a	4.7 ^{ab}	3.9 ^{bc}	3.7 ^c
Mg, mg/dl	2.2	2.2	2.2	2.2
ALP, IU/l	219 ^a	152 ^{ab}	125 ^b	102 ^b
PTH, pg/ml	166 ^b	425 ^b	385 ^b	921 ^a

a, b, c P<0.05、ALP: アルカリフォスファターゼ活性

表4 飼料中のカチオン・アニオンバランス (DCAD)

	n	Na	K	Cl	S	DCAD
乾物当たり% (ミ, 当量/kg)						
配合飼料	3	0.10	0.81	0.20	0.22	59
大豆粕	3	0.02	2.33	0.02	0.40	350
イリアンライグ草サイレージ	5	0.08	3.13	1.79	0.24	184
オーチャード草サイレージ	5	0.27	2.11	1.17	0.21	201
アルファルファサイレージ	8	0.05	3.23	1.02	0.29	379
トウモロコシサイレージ	2	0.03	1.00	0.27	0.09	139

注) DCAD = ((Na/23.0 + K/39.1) - (Cl/35.5 + S/16.0)) × 10,000

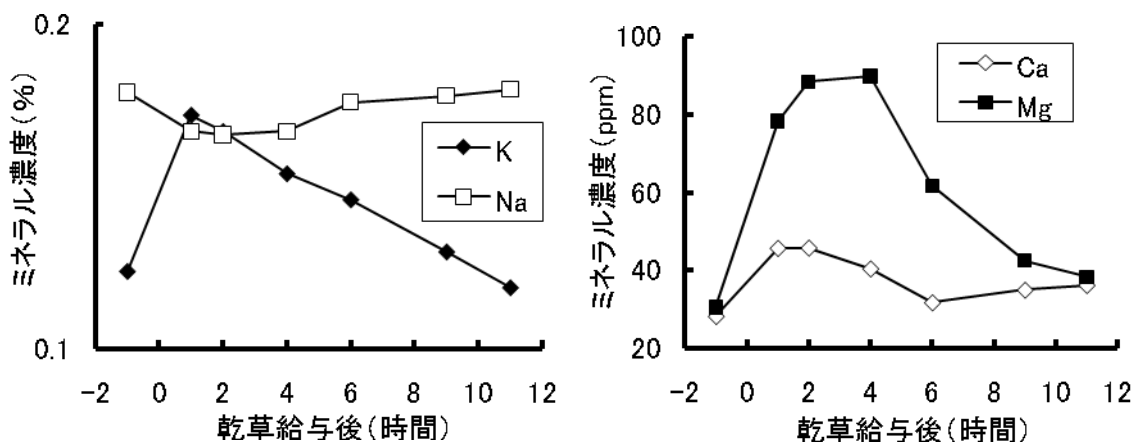


図7 めん羊(4頭)の乾草給与後のルーメン液中ミネラル濃度

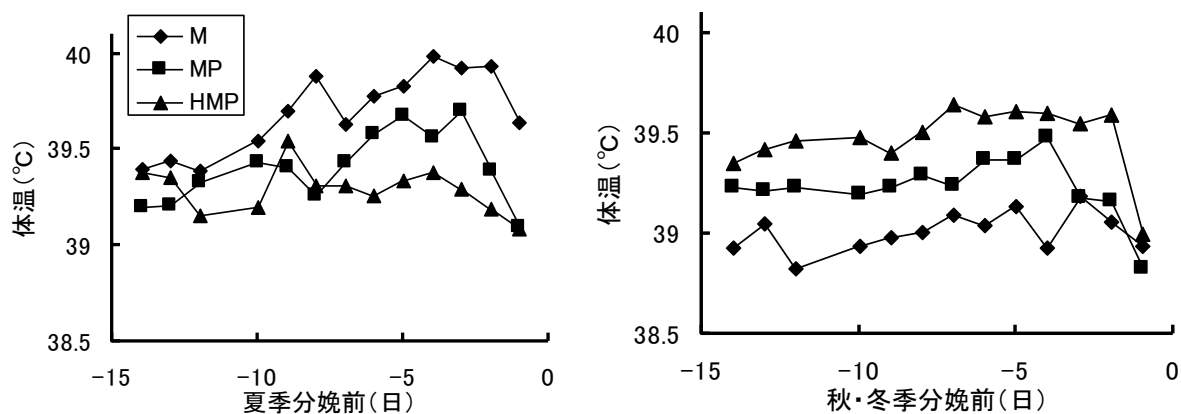


図8 夏季および冬季分娩牛の15:30の体温の変動

表5 乳牛の分娩前の血漿ミネラル濃度と初乳ミネラル含量

	夏季			秋・冬季			効果		
	M	MP	HMP	M	MP	HMP	飼料	季節	DxW
例数	4	8	4	4	8	4			
妊娠期間、日	284	281	281	285	282	283	NS	NS	NS
体重、kg	663	664	679	560	651	665	NS	NS	NS
増体率、kg/日	0.21	0.17	1.35	0.17	0.79	0.80	NS	NS	NS
DMI、kg/日	6.09	8.50	10.35	6.04	8.63	10.31	***	NS	NS
直腸温、°C									
08:30	39.0	38.8	38.7	38.5	38.7	38.8	NS	**	***
15:30	39.6	39.3	39.2	39.0	39.2	39.4	NS	*	**
血漿Ca, mg/dl	9.81	9.72	9.69	9.70	9.83	9.99	NS	NS	NS
Pi, mg/dl	5.45	4.89	4.78	5.07	4.85	4.26	NS	NS	NS
Mg, mg/dl	2.03	2.13	2.19	2.22	2.18	2.04	NS	NS	NS
初乳Ca, mg/dl	201	164	192	210	247	233	NS	**	NS
P, mg/dl	183	152	169	203	214	295	NS	**	NS
Mg, mg/dl	36	27	35	43	48	42	NS	**	NS

*P<0.05, **P<0.01, ***P<0.001