

# 自給粗飼料を活用した環境保全・節水型高泌乳牛飼養

久米新一（京都大学大学院農学研究科）

## 1. はじめに

わが国ではBSE、鳥インフルエンザ、口蹄疫などの発生により、近年、畜産物の安全・安心に対する消費者の関心が非常に高まっている。また、牛のゲップに含まれるメタンが地球温暖化を促進し、家畜の糞尿から排泄される窒素、リンなどが湖沼や河川を汚染するため、家畜生産はグローバルな環境問題である地球温暖化やローカルな環境問題である畜産環境汚染に直面している。これらの課題を背景にして、わが国ではさまざまな研究分野から緊急に問題の解決を図る試みがなされ、また「食品安全基本法」、「家畜排せつ物法」、「食品リサイクル法」などが制定され、法律による整備も進んでいる。このような情勢を踏まえると、21世紀の家畜生産は環境と調和した持続的な家畜生産システムをさらに進展させることが重要といえる。

一方、家畜の遺伝的能力の向上に伴って家畜の生産性は急激に改善しているが、今後、世界の人口が90億人にも達して食料危機が高まると予想されるなかでは、畜産物の安定供給のために効率的な家畜生産技術の開発が急務である。また、安全・安心な畜産物を生産するためには、輸入飼料に依存するのではなく、飼料自給率を高めて、自給飼料を最大限に活用しなければならない。特に、食の安全と関係するわが国の飼料自給率（2008年）は、酪農で33.6%、肉用繁殖経営で55.4%にまで低下し、肉用肥育経営に至っては1.0~1.9%と極度に低いことから、飼料自給率の向上が急務になっている。これらのことは、遺伝的能力の高い家畜を用いて、高品質畜産物の効率的生産、飼料自給率向上と環境負荷物質低減を同時に達成することが必要なことを意味している。

乳牛の栄養管理ではエネルギー、タンパク質、ビタミン、ミネラルなどの栄養素を適正給与することが第一に必要なものであるが、忘れてならないのは水である。飼料中には水が一定量含まれ、また家畜は代謝水として体内で水を生成できるものの、家畜に対してはヒトと同様に飲料水としての水を供給することが欠かせない。特に、泌乳牛では水摂取量が減少する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ため、泌乳牛は水を適正摂取できる環境がきわめて重要である。一方、水の過剰摂取は尿量の増加による環境汚染をもたらすため、水の適正給与によって尿量の低減を図ることも大切である。

ここで、日本学術会議が「変貌する農業と水問題—水と共生する社会の再構築に向けて—」（2008年8月28日）を提言として公表し、農業と水問題の関係を今後の重要な課題としていることに着目したい。わが国では「家畜排せつ物法」が制定され、家畜糞尿の管理は以前よりも厳しくなっているが、2004年11月からは野積み・素堀の禁止と糞尿処理施設の設置が義務づけられ、さらに厳密化されている。しかし、乳牛の水摂取量や尿量は栄養管理や環境変化によって変動するため、乳牛では水資源の適正な管理法についてはまだ十分に明らかにされていない。

筆者らは、乳牛からのメタン、窒素、リン、カリウムなどの低減法に関する一連の成果（Kumeら、2001, 2002, 2008a, 2008b；久米ら、2004a, 2004b；Kojimaら、2005）を「栄養学からみた畜産環境問題」（久米、2009）としてすでに取りまとめている。本報では水を限りある資源としてとらえ、乳牛の水摂取量と尿量を制御する要因に焦点をおいて（Kumeら、2010）、「環境保全型・節水型酪農システム」の視点に立った高泌乳牛の飼養管理法を紹介したい。特に、タンパク質とカリウム摂取量の増加が尿量と水摂取量の増加をもたらすことから、栄養素ではタンパク質とカリウムを中心に考えた。

## 2. 乳牛と水—体液と動物の恒常性

動物が生命を維持するためには体内の恒常性を一定に保つことが必要であり、動物の内部環境としての体液が重要な役割をはたしている。原始の生物は海水中で物質交換をしていたが、陸にあがると体の中に海水環境をもちこんで細胞外液とし、外部環境が大きく変化しても体内の恒常性を一定に維持する機能を発達させた。特に、海水中にはナトリウム、塩素などのミネラルが豊富に含まれ、動物の恒常性維持機構の基本である体液調節（循環血液量、血漿浸透圧、酸塩基平衡など）のしくみは、水と電解質の出納を調和することで維持されている。

動物が海から陸に上がった最大の利点は空気中の酸素を利用してエネルギー利用効率を高めたことであるが、逆に最大の脅威は脱水による死の危険であり、動物は体内からの水の損失を最小限にするために巧妙なしくみを働かせている。このことは、動物はあらゆる条件下で一定量の水を体内に保持する能力を発達させ、脱水による死の危険から逃れていることを意味している。動物は酸素を利用することによって一定量の水を体内代謝で生成している ( $C_6H_{12}O_6(180g)+6O_2(192g) \rightarrow CO_2(264g)+H_2O(108g)$ ) が、一般に水の損失（糞・尿への排泄、体表面や呼吸器官からの蒸発など）と水の獲得（飲水、食物からの水、代謝水など）を一定にして、体内の水分平衡を維持している。しかし、哺乳類は体水分の10%程度の損失に耐えられるものの、それ以上になると死の危険性が急激に高まる。乳牛体内の水分量は発育に伴って減少し、この水分量の減少は体脂肪の増加と密接に関係しているため、乳牛は短期間の飢餓に対しては体脂肪の動員などによって生存が可能であるものの、水が利用できないと死の危険性が加速されることになる。

乳牛の水摂取量は、主に給水装置からの飲水と飼料中に含有される水分に由来する。飲水は基本的に自由摂取であるが、乳牛の飲水量は生理状態や給与飼料によって異なり、サイレージよりも水分の少ない乾草給与時に多くなる。またアルファルファ給与牛では飲水量が急増するが、これは後述するように尿量の増加を補うために飲水量を増やしたことによる。また、飲料水のなかに有害物質が含まれると乳牛の健康状態を損なうため、安全な水を安定供給できることが乳牛の飼養管理では重要である。

## 3. 自給粗飼料多給による乳牛の飼養管理

### 1) 高品質自給飼料の利用

近年、輸入している農産物を自国で生産する場合に必要な水資源量をバーチャルウォーター（仮想水）と呼び、大量の食料輸入は世界の水資源に悪影響を及ぼすことが危惧されている。例えば、牛肉1kgの生産に要する穀物量（日本の飼養方法に基づいたトウモロコシ換算による試算）を約11kg、トウモロコシ1kg生産に必要な水を約900Lとすると、牛肉1kg生産には約1万Lの飼料由来の水が必要になるが、それに加えて飲料水や洗浄水（牛体、牛舎など）もバーチャルウォーターに含まれる。したがって、わが国では畜産物輸入により世界各国から大量のバーチャルウォーターを輸入していることになる。

今後、バーチャルウォーターの概念はさらに広まると予想されるが、飼料価格が高騰しているなかで酪農家がコスト低減のためにまず取り組むべきことは、自給粗飼料給与量を増やして濃厚飼料給与量を減らすことである。しかし、泌乳初期におけるエネルギー不足など、粗飼料主体の飼料設計によって高泌乳牛の生理・生産機能が阻害されると、乳量減少などの乳牛の生産性低下が懸念される。特に、収量が多くても、栄養価が低く、嗜好性の悪い粗飼料を多給すると、高泌乳牛の健康状態や乳量・乳質をさらに悪化させることになる。

そこで高品質粗飼料の利用が望まれることになるが、図1には牧草の女王と呼ばれるアルファルファの生育によるCPとカリウム含量の変動を示した。アルファルファのCP含量は草丈の伸長とともに急激に減少するため、高品質のアルファルファ生産のためには適期刈り取りと適切な調製法がまず

求められる。またアルファルファの草丈の伸長や栄養価は土壌、施肥量、気候などさまざまな要因に影響されるが、乳牛飼養で問題になるのはアルファルファのカリウム含量の高いことである。ここで、アルファルファの刈り取り適期をC P含量として20%に設定すると、1番草のカリウム含量は3.5%に達する。粗飼料中のカリウム含量は施肥量の増加により急激に上昇することから、施肥量が多いとアルファルファのカリウム含量はさらに高まる。

同様のことは北海道のイネ科主体の集約放牧草でもみいだされ、集約放牧では牧草中のC P含量が20%、カリウム含量が3%以上に達することも珍しくない(図2)。したがって、高品質粗飼料では飼料中のC P含量とカリウム含量が同時に高まり、またわが国では飼料畑への糞尿の大量還元により、牧草中のカリウム含量が3%を超えることが珍しくないことを忘れてはならない。

## 2) 自給粗飼料多給による乳牛飼養と環境保全

わが国で利用されている代表的な粗飼料はイネ科牧草、マメ科牧草とトウモロコシサイレージであるが、アルファルファはタンパク質が多く、繊維の少ないことが特性である。高泌乳牛ではアルファルファを多給すると乳量が増加するだけでなく、ルーメンからのメタン発生量も減少する。そのため、わが国でよく利用されているイネ科牧草でなく、アルファルファなどのマメ科牧草を利用すると、牧草を主体に給与しても牛からのメタン発生量を減らすことが可能になる。また、エネルギー含量の高い粗飼料の利用は畜産環境面では糞量の低減に直接結びつくが、トウモロコシサイレージはエネルギーの利用効率(代謝率)が高いので、アルファルファと組み合わせると実際の栄養管理ではメタン低減効果が大きくなる。

表1はホルスタイン種乳牛50頭(乾乳牛34頭および泌乳牛16頭)を用いて、イネ科牧草(チモシー乾草とオーチャードグラスサイレージ)、アルファルファサイレージ、トウモロコシサイレージ、オーチャードグラスとアルファルファの混合サイレージ、オーチャードグラスとトウモロコシの混合サイレージ、アルファルファとトウモロコシの混合サイレージなどを給与し、供試牛を代謝実験室に収容して全糞尿採取法による代謝試験を実施した結果である。本試験では供試牛の体重、飼料摂取量、飲水量、乳量、糞尿量、酸素・メタン発生量などのデータから、水の獲得(飼料と飲水による水摂取量、体内で生成した代謝水)と水の損失(糞および尿による排泄と乳による移行)を計算し、また水の獲得量から水の損失量を差し引いたものを蒸発量とみなして乳牛の水代謝を求めた。また、窒素、カリウム出納などのデータを利用して、乾乳牛および泌乳牛の水収支に及ぼす諸要因の影響を解析した。なお、乳牛の飲水量は環境温度によって大きく変動するため、本試験は環境温度20℃、相対湿度60%の一定条件下で実施した。

乾乳牛のエネルギー摂取量に対する糞エネルギーの比率は、トウモロコシサイレージの26.3%からアルファルファサイレージの35.3%までであり、糞によるエネルギー損失はトウモロコシサイレージ給与牛でもっとも少なかった。イネ科牧草やマメ科牧草の消化率は熟期が進むと低下するため、熟期が進み、品質の低下した牧草を給与すると糞排泄量は増加するが、アルファルファではリグニン含量が高いことも糞排泄量の増加に影響している。一方、トウモロコシサイレージはエネルギー含量が高いため、養分要求量を満たすための給与量が少ないことによって糞排泄量は一層少なくなる。

## 4. 自給粗飼料多給時における乳牛の窒素およびカリウム排泄量

### 1) 窒素およびミネラルによる環境汚染

乾乳牛と泌乳牛の窒素およびカリウム出納の結果を図3に示したが、窒素・カリウムとも尿中への排泄量が多いものの、カリウムはその比率が非常に高いことが特徴としてあげられる。排泄された窒素は大気中にも飛散するが、地下水などに移行した硝酸態窒素は水質汚染源として大きな問題になっている。

リン、カリウムなどのミネラルは大気中に飛散することはほとんどなく、糞尿中に大量に排泄されたミネラルが河川などの汚染源になる。

畜産における環境汚染として問題になるのは、窒素、リン、カリウム、重金属（亜鉛、銅、カドミウムなど）などによる土壌や水質の汚染である。これらのなかで、窒素、リン、カリウム、亜鉛、銅などは牛にとって必須な栄養素であるが、過剰給与すると排泄量が増えるだけでなく、牛に中毒症状の発生することもある。また、カドミウムのように有害重金属とみなされているミネラルも多く、これらの排泄量低減は環境保全のために必須である。牛のミネラル排泄量の特徴は摂取量が増えると糞尿中への排泄量が急増するため、牛体内にはほとんど蓄積されないことである。また、カリウム、ナトリウム、塩素などの電解質の主要な排泄経路は尿中であるが、リンを含めたそれ以外のミネラルでは大部分が糞中に排泄される。

## 2) 乳牛の窒素排泄量

乳牛が摂取したタンパク質はルーメン内でペプチドを経てアミノ酸やアンモニアにまで分解され、ルーメン微生物がそれらを利用して菌体タンパク質を合成する。また、産生したアンモニアはルーメン壁からも吸収され、肝臓で尿素に合成された後にその一部は唾液を経てルーメンに流入し、アミノ酸組成に優れた良質の菌体タンパク質になって小腸から吸収される。しかし、ルーメンで過剰に産生したアンモニアが体内に吸収されると血漿中の尿素態窒素濃度の上昇を招き、尿中への窒素排泄量が増加する。

乾乳牛と泌乳牛の窒素およびカリウム吸収率とそれらの尿中排泄量を図4と図5に示したが、乾乳牛と泌乳牛の窒素吸収率は約72%とほぼ一定していた。窒素摂取量の増加に伴って糞尿中への窒素排泄量が増加したが、尿中への窒素排泄量の増加率が糞中への窒素排泄量の増加率よりもやや多く、また窒素は乳タンパク質として乳中へも一定量分泌されている。

ここで尿中への窒素排泄量の増加率が糞中への窒素排泄量の増加率よりもやや高いことは、体内に過剰に吸収された窒素は内因性の窒素として尿中へ排泄されやすいことを意味している。一般に、飼料中のタンパク質はルーメンで分解されるタンパク質を分解性タンパク質、すぐに溶解するタンパク質を溶解性タンパク質と称しているが、粗飼料は分解性タンパク質と溶解性タンパク質の比率が高い。図1のアルファルファ生草では、飼料中のタンパク質含量が変動しても飼料中のタンパク質に占める分解性タンパク質の比率は69%、溶解性タンパク質の比率は43%とほぼ一定であった。アルファルファはタンパク質を豊富に含んでいるが、このような分解性タンパク質の多いアルファルファを乳牛に多給すると尿中への窒素排泄量が急増するが、イネ科牧草のなかでも放牧草のようにタンパク質含量が20%にも達する場合にはアルファルファと同様に尿中窒素排泄量が増加することになる。

## 3) 乳牛のカリウム排泄量

カリウムは牧草や乳中に最も多量に含まれているミネラルであり、乳牛や肉牛のカリウム要求量は代表的なミネラルであるカルシウムやリンよりも多い。また、草食動物である牛は牧草中のナトリウム含量が非常に少ないことから、牧草中のカリウムを有効利用して、酸塩基平衡などの体内の恒常性維持に役立っている。このように、草食動物である牛はカリウムを最大限有効利用できるように進化したが、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。そのため、自給粗飼料を多給している乳牛ではカリウム過剰の状態になりやすく、カリウムを過剰摂取した牛は尿中へのカリウム排泄量が急増するだけでなく、乳熱、グラスステニー、乳房浮腫などの疾病が発生しやすくなる。

乾乳牛と泌乳牛のカリウム吸収率は97-100%と非常に高い値であったが、カリウムは尿中への排泄量が非常に多く、過剰に摂取したカリウムの大部分は尿中に排泄された(図4と図5)。このことは、カリウムの乳中への分泌量が相対的に少なく、また糞中への排泄量は100g/日以下なことが反映している。

乳牛のカリウム代謝の特徴は、給与したカリウムの90%以上を消化管から吸収可能であり、必須ミネラルのなかではもっとも吸収されやすいことと、体内に吸収されたカリウムはすぐに尿中に排泄され、体内にほとんど蓄積されないことである。特に、わが国ではカリウムを要求量の2倍以上も乳牛に給与している事例が多いので、農家では尿中へのカリウム排泄量が過剰になりやすい状況にある。

## 5. 自給粗飼料多給時における乳牛の尿量および水摂取量

### 1) 窒素・カリウム排泄量と尿量

乳牛の栄養素のなかで、尿中への排泄量が多いのは窒素と電解質（カリウム、ナトリウム、塩素）である。乳牛は血液や尿の浸透圧を一定に保つために、窒素や電解質の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窒素や電解質を尿中へ排泄する。

牛の尿中窒素排泄量は血漿尿素態窒素濃度を指標にして求められる（図6）が、牛以外の羊、山羊、馬、豚、ラットでも同様に推定可能である。尿中に排泄される窒素は腎臓から排泄されるが、窒素を排泄するために必要な腎臓の血流量を腎クリアランスと呼んでいる。Kohnら（2005）による窒素排泄のための腎クリアランス（体重1kg当たりの腎血流量、L/日）は、牛（1.3L）は豚（3.1L）よりも少なく、図6の乳牛でも約1.6Lであった。牛と豚の窒素の腎クリアランスの比較から、牛は過剰な窒素を尿中に排泄しているものの、ルーメンにおける尿素の再利用などによって窒素を可能な限り有効利用していることが推察される。しかし、ルーメンで過剰に産生したアンモニアが体内に吸収されると血漿中の尿素態窒素濃度の上昇を招き、尿素態窒素濃度の上昇は血漿浸透圧（コロイド浸透圧）を一定に保つために尿中へ過剰の窒素を水とともに排泄することが必要になり、その結果尿量が増加したと考えられる（図7）。

乳牛は尿中カリウム摂取量の増加とともに尿量が増加したが、窒素とは異なってカリウム排泄量と血漿カリウム濃度間には明確な関係は認められなかった。しかし、尿中のカリウム含量は尿中カリウム排泄量が150g/日までは急激に増加し、その後はほぼ1.3%に一定していた。このことから、尿中カリウム排泄量が150g/日までは乳牛は濃縮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とが推察された。また粗飼料中のナトリウム含量が非常に低い（0.1%程度）ことから、尿中へのナトリウム排泄量が増加しても尿量は増加しなかった。

動物の恒常性を維持するために浸透圧は重要な働きをしているが、尿中への窒素・カリウム排泄量の増加と尿量の増加は体内の浸透圧を維持するためのしくみであり、特に窒素排泄は血漿浸透圧、またカリウム排泄は尿浸透圧を維持する働きが大きい。したがって、尿量の低減には飼料からの窒素とカリウム摂取量を減らすことが効果的であるが、なかでも尿量の増加には窒素よりもカリウム排泄量の影響が大きいので、カリウム摂取量の低減がもっとも効果が高いといえる。

### 2) 窒素・カリウム排泄量と水摂取量

乳牛は水の摂取量と水の損失量を一定に保ち、体内の水分を保持している。図8は乾乳牛と泌乳牛の水摂取量および水損失量を示したが、平均代謝水は乾乳牛で2.1kg/日、泌乳牛で3.4kg/日と非常に少ないことから、乳牛の水摂取は飼料水と飲料水で大部分が構成されている。また、乾乳牛では飼料水による水の摂取が比較的多いものの、泌乳牛では飲水量の比率が76%と非常に高くなっている。泌乳牛では尿中への水損失量も多いものの、糞中への損失の比率が相対的に高くなっている。

乳牛の水摂取量を制御する要因や乳牛の水収支が明らかになることで、個体レベルにおける飲料水の効率的な利用法だけでなく、尿量の低減法も提示できる。環境温度が上昇すると乳牛の飲水量は増加するが、適温条件下では飼料中成分の変動による影響が大きい。特に、飼料中のCPと電解質は飲水量を

増加させる大きな要因であり、飼料中のC Pとカリウム含量が増加すると乳牛の水摂取量（飼料水＋飲料水）は増加し、飼料中カリウム含量が2.5%になると泌乳牛の水摂取量は118kg/日に達した（表2）。また、飼料中C P含量とカリウム含量との相関関係を調べると、飲水量よりも水摂取量の相関係数が高かったことから、乳牛の水収支ではまず水摂取量を基準にすることが必要である。

飼料中の水分含量は飲水量にもっとも大きな影響を及ぼし、乳牛は飼料中の水分含量が減少すると飲水量を増加させ、飼料水からの水不足を補おうとする。特に、飼料中のC P含量とカリウム含量が高い場合には、乳牛は体内の浸透圧を一定に維持するために飲水量を増加させ、尿中への窒素とカリウム排泄量を増加させる。表3には飼料中乾物含量の変動による飼料水と飲料水を示したが、飲料水は飼料中乾物含量の増加に伴って増加し、泌乳牛では飼料中乾物含量60%の際に飲水量は91kgに達した。

一方、乳牛の最大乾物摂取量は飼料中水分の影響をうけるものの、最大乾物摂取量を得るための最適な飼料中乾物含量は明確ではない。しかし、飼料中の水分含量が50%以下の場合には乳牛の乾物摂取量はほとんど影響されないことから、飼料中乾物含量が40-60%における酪農家モデル（泌乳牛50頭＋乾乳牛10頭）の年間飲料水を試算したところ、1,156-1,800tであった。この数値は表1のデータを基準にして求めたため粗飼料多給型のモデルであるが、さらに精密化すると農家で応用可能な標準的な数値を提示でき、「節水型畜産」に基づいた水の有効活用法を個体レベル並びに農家レベルで示せることになる。

農家の環境保全と経営改善への応用面では、水摂取量と水損失量の標準的な数値を実際の酪農経営の水収支の計算に使えば、乳牛レベルや農家レベルにおける飲水量と尿量を把握できる。また、これらの数値に基づいて農家における飲料水の効率的な利用法を提示し、酪農家における飲水量や尿量の低減も可能になる。特に、水道水を飲料水として乳牛管理に利用している場合には使用水量の低減による経費削減効果も大きい。

### 3) 自給粗飼料多給時における窒素とカリウム排泄量の低減

実際の粗飼料多給型経営で飲水量や尿量を低減するためには、トウモロコシサイレージを活用することが効果的である。表4ではトウモロコシサイレージ給与によって水摂取量と尿量が低減したが、これはトウモロコシサイレージの特徴である低C P含量と低カリウム含量、特に低カリウム含量による効果が大きい。

飼料のコスト面を考えると、大豆粕などのタンパク質飼料は価格が高いことから、タンパク質要求量を超えて給与することは窒素排泄量を増やすだけでなく、経営を圧迫することにもなる。実際に分解性タンパク質の多い自給粗飼料を多給した場合には、非分解性タンパク質を多く含む加熱大豆などを給与することが窒素排泄量と尿量の低減だけでなく、乳量や乳タンパク質生産量を増加させる効果がある。また、窒素と炭水化物はルーメン微生物の増殖に必須なことから、デンプン含量の多いトウモロコシサイレージの給与は微生物タンパク質として有効利用される効果と窒素排泄量の低減効果が期待できる。

それに対して、粗飼料のなかではイネ科牧草、混播牧草やアルファルファでカリウム含量が高いため、自給粗飼料多給時の乳牛では要求量の2倍以上のカリウムを摂取していることも珍しくない。したがって、カリウム含量の低いトウモロコシサイレージを適度に組み合わせることによって、乳牛からのカリウム排泄量の低減だけでなく、尿量や飲水量の低減を図ることが農家段階ではもっとも効果的な「環境保全・節水型酪農システム」と考えられる。

## 6. 自給粗飼料を活用した環境保全・節水型高泌乳牛飼養

### 1) 自給粗飼料を活用した高泌乳牛飼養

環境保全・節水型高泌乳牛飼養を農家に普及するためには、農家の収益向上と環境負荷物質低減を同時に達成できる飼養管理法が求められる。また、安全・安心な畜産物生産を求める消費者の要望に応え

るためにはそれに加えて飼料自給率向上が必須であるが、乳牛の栄養管理では自給粗飼料からエネルギー、タンパク質、ミネラルなどの栄養素を適切に摂取できることが鍵となる。自給粗飼料の栄養価から考えると、タンパク質含量の高いマメ科牧草とエネルギー含量の高いトウモロコシを適切に組み合わせるとエネルギーとタンパク質を自給粗飼料から適量摂取でき、同時に窒素などの低減が可能になる。

図9は粗飼料多給でも乳牛の生産性が改善した試験結果であるが、ここでは分娩3週間前から分娩10週間後まで3種類のサイレージを給与している。分娩前の粗飼料給与比率はいずれも70%に設定しているが、トウモロコシ+アルファルファ給与区では泌乳前期の粗飼料給与比率を60%にしてもオーチャードグラス主体給与区（粗飼料給与比率は50%）よりも乾物摂取量や乳量が多く、アルファルファ主体給与区（粗飼料給与比率は50%）とほぼ同じ成績であった。分娩後10週間の乳量の推移と粗飼料給与比率を泌乳前期（60%）、泌乳中期（70%）、泌乳後期（80%）に設定すると、トウモロコシサイレージとアルファルファが利用できれば粗飼料給与率を70%に高めても1乳期で乳量1万kgの達成は可能であり、また個体によっては1乳期の乳量が12,000kg程度（ピーク乳量50kg）まで期待できる。

日本飼養標準によるTDN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が分娩10週間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。それに対して、CP充足率は分娩4週後に各区とも充足し、特にトウモロコシ+アルファルファ区ではCP摂取量が過剰になることはなく、ほぼ100%を維持していた。このように、トウモロコシ+アルファルファ区ではタンパク質とエネルギー充足率がほぼ100%で高乳量を維持していたことから、エネルギーとタンパク質の適正給与によって乳牛の生産性を高められることと、タンパク質の過剰給与を防ぎ、窒素排泄量の低減にも効果的な飼養管理法といえる。この結果は、高品質粗飼料利用によって乳牛の乾物摂取量、乳量の増加が可能であることを示している。また、酪農家の栄養管理で第一に求められることは、乳牛が栄養不足や栄養過剰にならないように飼料設計することであるが、トウモロコシサイレージとアルファルファを組み合わせると粗飼料多給条件下でも飼料設計が容易なこともメリットとしてあげられる。

## 2) わが国の環境保全・節水型高泌乳牛飼養

アルファルファとトウモロコシサイレージをそれぞれ1/3から2/3の範囲で組み合わせると、酪農家の経営が改善されるだけでなく、窒素排泄量が5~15%減少したことが報告されている（Dhimanら、1997）。わが国ではアルファルファが栽培できない場合は混播牧草でも同様の効果が期待でき、トウモロコシサイレージ給与牛ではカリウム排泄量と尿量・水摂取量が減少する。したがって、アルファルファ・トウモロコシサイレージあるいは混播牧草・トウモロコシサイレージ給与体系は飼料自給率を高めても生産性向上と環境負荷物質低減が同時に可能な飼料構成といえる。

乳牛の栄養管理の改善による乳量増加に加えて、わが国の乳牛の育種改良による効果は非常にめざましく、乳用牛群能力検定成績（家畜改良事業団）の305日間総乳量は5,826kg（1975年）から9,118kg（2008年）に増加している。一方、わが国における乳牛の飼養頭数は206万頭（1990年）から153万頭（2008年）に減少しているものの、乳生産量は820万トン（1990年）から795万トン（2008年）とほぼ同じである。このことは乳牛1頭当たりの乳生産の増加が非常に著しいことを反映した結果であるが、乳牛の飼養頭数はこの期間に約26%減少している。京都議定書では1990年を基準にして、2008~2012年の温室効果ガス削減量として6%をわが国に課しているが、乳牛では飼養頭数の減少だけで6%を超えている。したがって、わが国の酪農経営では乳生産量をほぼ維持しながら、飼養頭数の減少によって京都議定書で課されている温室効果ガスの削減量を満たしていることになる。同様のことは、尿量、窒素・リン・カリウム排泄量削減にもあてはまり、わが国では乳牛の生産性向上による環境負荷物質の排泄量低減が実際にはもっとも効果的な「環境保全・節水型高泌乳牛飼養」と指摘できる。

## 7. おわりに

本報では、自給粗飼料多給条件下でも乳牛の生産性向上によって乳生産量を維持し、乳牛の飼養頭数の減少によって尿量、窒素・ミネラル排泄量などを低減できることを示した。しかし、このことはわが国全体からの排泄量の低減には大きく貢献するが、局地的にみると大規模酪農経営などでは窒素・ミネラル排泄量が特定の飼料畑に過剰還元される危険性をはらんでいる。したがって、今後は乳牛の栄養管理を一層精密化することによって、糞尿量、メタン発生量、窒素・ミネラル排泄量などを削減できる技術開発がわが国では求められよう。

また、「家畜排せつ物法」の制定により家畜糞尿の管理は以前よりも厳しくなっているが、本研究成果を応用して乳牛の栄養管理を改善すれば乳牛の飲水量・尿量の低減が可能になり、糞尿処理にかかる経費も削減できる。特に、農家では水に対する関心が低いが、「節水型畜産」を全国の酪農経営にも応用できると農家の水に対する関心が高まり、農村で水が有効活用されるとともに、「環境保全・節水型酪農システム」に基づいた新技術開発の進展も期待できる。

## 参考文献

- Dhiman, T.R. and L.D.Satter. (1997) Yield response of dairy cows fed different proportions alfalfa silage and corn silage. *J.Dairy Sci.* 80:2069-2082.
- Kohn,R.A., M.M.Dinneen and E.Russek-Cohen(2005) Using blood urea nitrogen to predict nitrogen excretion and efficiency of nitrogen utilization in cattle, sheep, goats, horse, pigs and rats. *J. Anim. Sci.* 83:879-889
- Kojima,H., S.Kume, K.Nonaka, T.Oshita, T.Kozakai and H.Hirooka (2005) Effects of feeding and animal performance on nitrogen, phosphorus and potassium excretion by Holstein cows. *Anim. Sci. J.* 76: 139-145.
- Kume, S., T.Toharmat, K.Nonaka, T.Oshita, T.Nakui and J.H.Ternouth. (2001) Relationships between crude protein and mineral concentrations in alfalfa and value of alfalfa silage as a mineral source for periparturient cows. *Anim. Feed Sci. Tech.* 93:157-168.
- Kume S.(2002) Establishment of profitable dairy farming system on control of methane production in Hokkaido Region. *Greenhouse Gases and Animal Agriculture.* 87-94. Elsevier Science.
- 久米新一・野中和久・大下友子・山口直己(2004a) 自給粗飼料多給時における乾乳牛の維持に要する代謝エネルギー要求量の推定, *日本畜産学会報.* 75:31-35.
- 久米新一・野中和久・大下友子・小酒井貴晴・小島英紀(2004b) 自給粗飼料多給時における乾乳牛, 妊娠牛および泌乳牛のカリウム排泄量, *日本畜産学会報.* 75:179-184.
- Kume,S., K.Nonaka, T.Oshita, T.Kozakai and H.Hirooka (2008a) Effects of urinary excretion on nitrogen, potassium and sodium on urine volume in dairy cows. *Livestock Science.* 115:28-33.
- Kume S, Numata K, Takeya Y, Miyagawa Y, Ikeda S, Kitagawa M, Nonaka K, Oshita T, Kozakai T (2008b) Evaluation of urinary nitrogen excretion from plasma urea nitrogen in dry and lactating cows. *Asian-Aust. J. Anim. Sci.* 21:1159-1163.
- 久米新一(2009) 栄養学からみた畜産環境問題、「耕畜連携をめざした環境保全型畜産システムの構築とその評価」. 1-21. 農林統計出版.
- Kume S, Nonaka T, Oshita T, Kozakai T (2010) Evaluation of drinking water intake, feed water intake and total water intake in dry and lactating cows fed silages. *Livestock Science* 128:46-51.



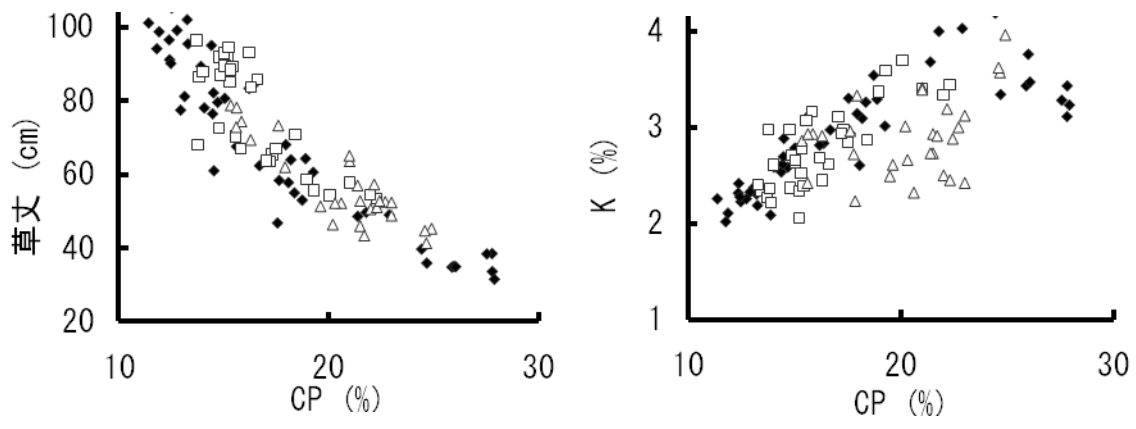


図1 アルファルファの1番草(◆)、2番草(□)、3番草(△)のCP含量と草丈、カリウム含量の関係

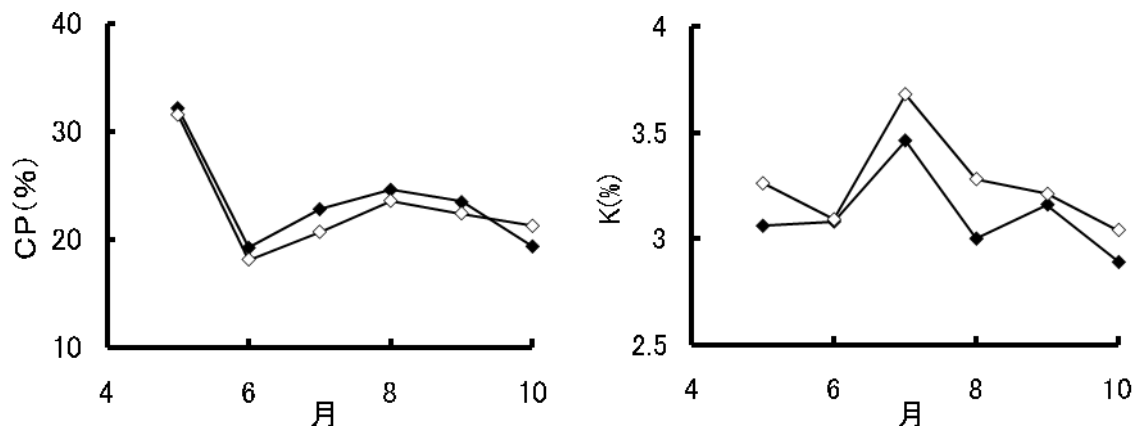


図2 集約放牧(3戸)における牧草中(2圃場)のCP含量とカリウム含量の変動

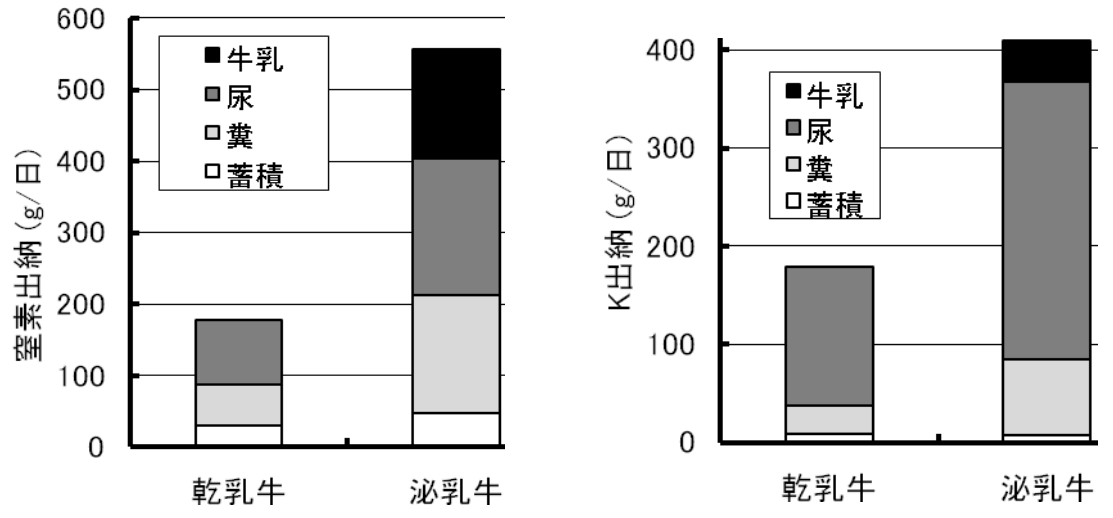


図3 乾乳牛と泌乳牛の窒素およびカリウム出納

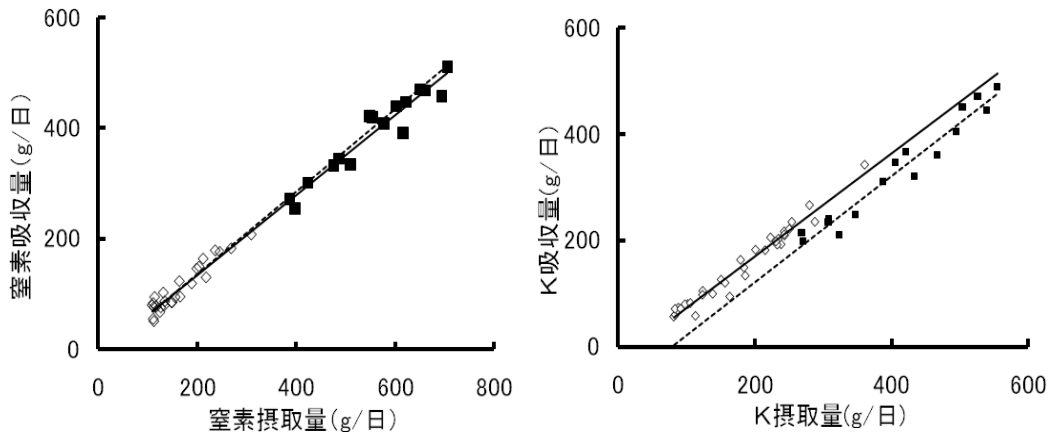


図4 乾乳牛(◇)と泌乳牛(■)の窒素およびカリウム摂取量とそれらの吸収量の関係

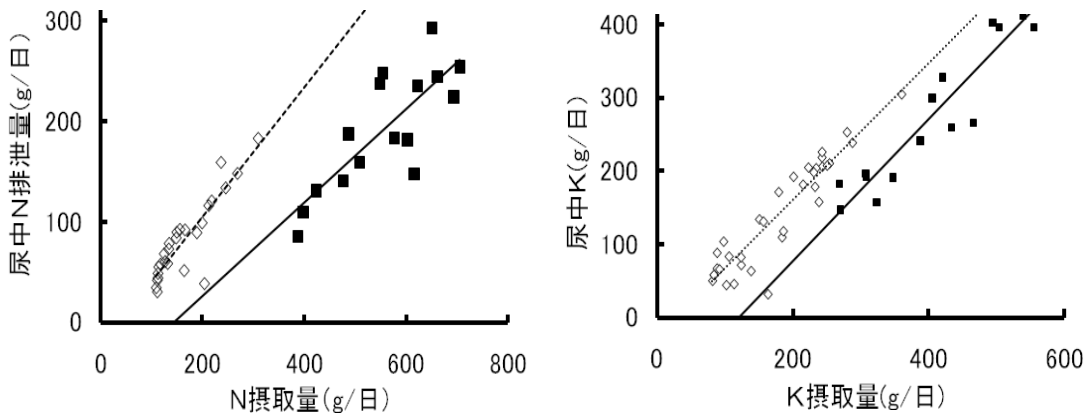


図5 乾乳牛(◇)と泌乳牛(■)の窒素およびカリウム摂取量とそれらの尿中排泄量の関係

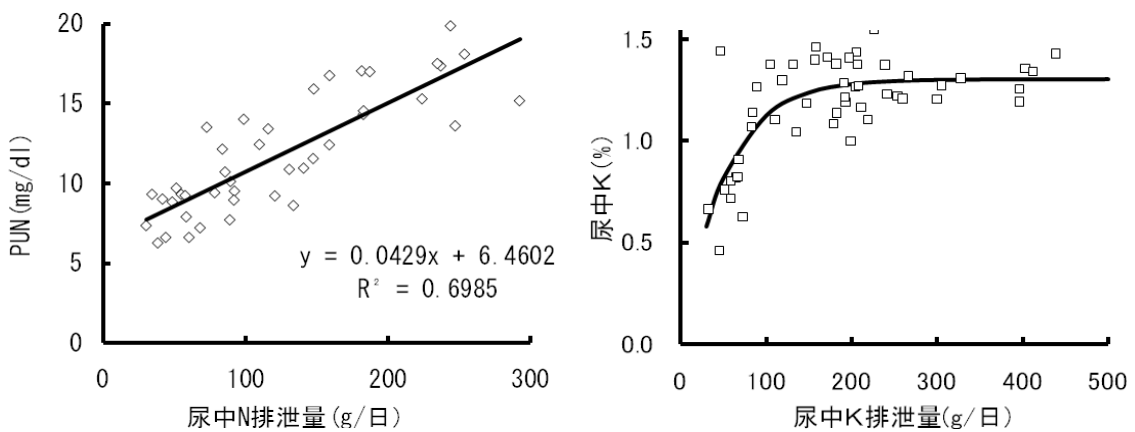


図6 乳牛の尿中窒素排泄量と血漿尿素態窒素(PUN)および尿中カリウム排泄量と尿中カリウム含量の関係

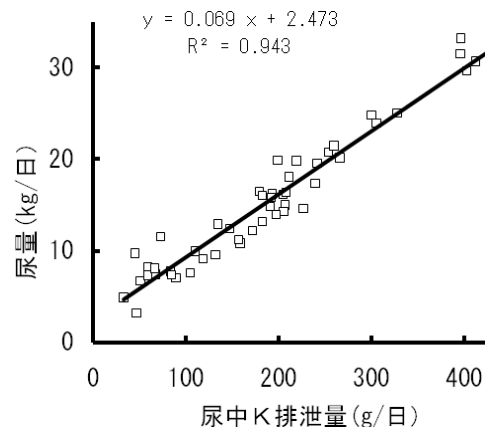
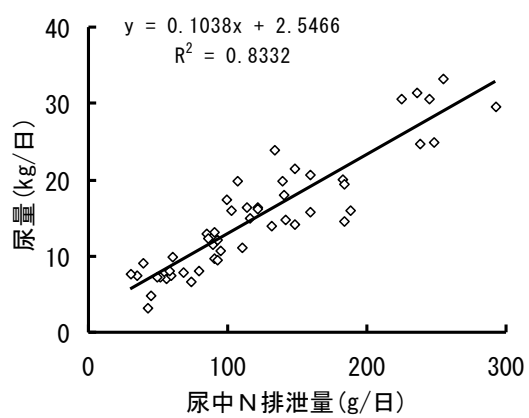


図7 乳牛の尿中窒素およびカリウム排泄量と尿量の関係

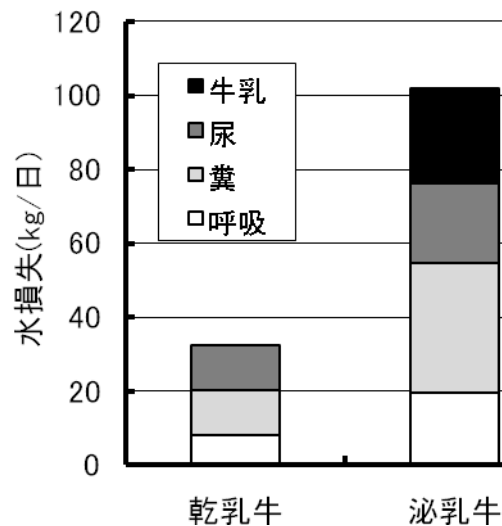
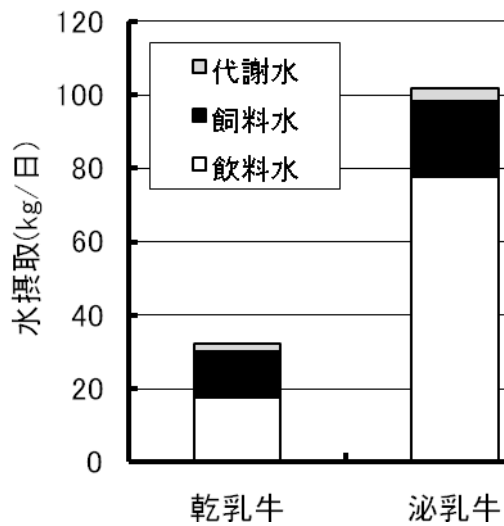


図8 乾乳牛と泌乳牛の水摂取量および水排泄量

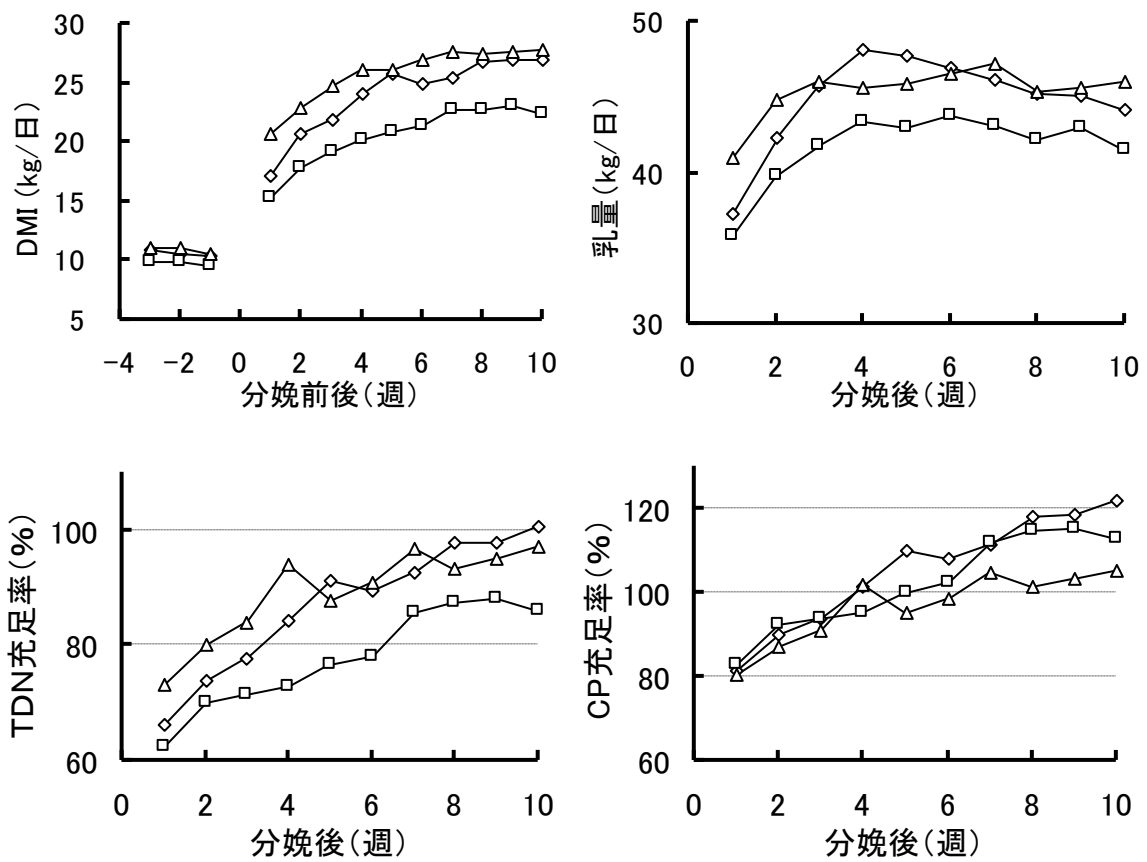


図9 グラスサイレージ (□:n=6)、アルファルファサイレージ (◇:n=7) とアルファルファ+トモロコシサイレージ (△:n=4) 給与牛の乾物摂取量、乳量およびTDN・CP充足率

表 1、供試牛の乾物と水摂取量 (kg/日)

	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%)		
乾物	43.8	51.2
CP	14.5	16.6
K	2.3	2.0
.....		
体重、kg	616	614
DMI	7.6b	20.7a
水摂取量	30.1b	98.5a
尿量	12.1b	21.9a
乳量	—	29.5

水摂取量 : 飲水量 + 飼料中の水, a, bP<0.05

表 2. 乳牛の水摂取量と飼料中CPとカリウム含量

	飼料中CP (%)		
	12	15	18
乾乳牛 (kg/日)	25.7	30.3	34.9
泌乳牛 (kg/日)	79.2	91.7	104.1
	飼料中K (%)		
	1.5	2.0	2.5
乾乳牛 (kg/日)	23.9	27.7	31.4
泌乳牛 (kg/日)	81.9	100.0	118.2

表 3. 乳牛の水摂取量と飼料中乾物含量

	飼料中乾物含量 (%)		
	40	50	60
乾乳牛 (kg/日)			
飼料水	13.2	7.5	—
飲料水	17.8	27.0	—
合計	31.0	34.5	—
泌乳牛 (kg/日)			
飼料水	29.3	21.7	14.1
飲料水	59.8	75.6	91.4
合計	89.1	97.3	105.5
酪農家 (t/年、泌乳牛50頭+乾乳牛10頭のモデル)			
飼料水	583	423	264
飲料水	1156	1478	1800
合計	1739	1901	2064

表 4. 乳牛の水摂取量とカリウム摂取量

	牧草	牧草+トウモロコシ	トウモロコシ <sup>1)</sup>
	(n=24)	(n=4)	(n=6)
DMI、kg/日	7.9a	7.2	6.8b
水摂取量、kg/日	34.0a	24.8b	18.1b
尿量、kg/日	13.7a	9.4	7.5b
飼料中CP、%	15.8a	12.1b	11.1b
飼料中K、%	2.7a	1.8b	1.3b
K摂取量、g/日	210a	132b	86b
K尿中排泄量	165a	113	65b

a, b P<0.05 <sup>1)</sup>大豆粕を9%添加