

# 高泌乳牛の代謝特性と暑熱ストレスの影響

久米新一（京都大学大学院農学研究科）

## 1. はじめに

わが国では乳牛の遺伝的能力の改良と飼養管理の改善により、乳牛の乳量と乳成分が急速に向上し、現在では多くの酪農家で1万kg以上の高泌乳牛が飼養されている。高泌乳牛の特徴は、遺伝子・細胞・組織・器官などを含めて体内代謝にさまざまな改善が図られ、摂取した栄養素を乳生産に効率的・優先的に利用していることといえる。このことは高泌乳牛の生産性向上には非常に貢献したものの、飼養管理に少しでも不備があると健康状態が損なわれるため、高泌乳牛に対しては高度な飼養管理技術が求められることになる。

筆者は高泌乳牛の生産性向上のために移行期の栄養管理が重要なことを本誌で紹介した<sup>1)</sup>が、乳生産の阻害要因としては夏季の暑熱ストレスも重要な課題としてあげられる。特に、高泌乳牛では乳生産のための体内代謝が活発になり、酸素消費量、熱発生量、血流量などが急激に増加している。したがって、熱発生量の多い高泌乳牛では暑熱ストレスによる悪影響が非常に大きくなるため、地球温暖化がこのまま進むと高泌乳牛の生産性低下は非常に著しくなると考えられる。また、2050年頃には世界の人口が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、牛乳や乳製品の安定供給のために高泌乳牛の防暑対策技術の開発が急務といえる。

そこで、本報では高泌乳牛の生産性向上のために、高泌乳牛の代謝特性と暑熱ストレスの影響について、エネルギー代謝を中心に紹介したい。

## 2. わが国の乳生産と暑熱ストレスの影響

わが国の乳生産では、暑熱ストレスによる影響を無視することができない。わが国では乳牛の乳量増加は非常に著しく、乳用牛群能力検定成績（家畜改良事業団）の305日乳量は5,826kg（1975年）から2009年には北海道で9,143kg、また都府県では9,369kgに達している（図1）。酪農家の乳量水準でも1万kgレベルを超える農家が多くなっているが、今後も飼養環境などに大きな変化がなければ乳量はさらに増加することが期待できる。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1976年には北海道で401日、また都府県で409日であったものが、2009年には北海道で428日、また都府県で443日にまで延びている。さらに、乳房炎、蹄病、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であるが、暑熱ストレスが加わるとその発症率を一層加速させることになる。

ここで、牛群検定成績の乳量と平均分娩間隔の経年的な変化をみると、乳量は牛群検定開始時からほぼ毎年増加しているのに対して、分娩間隔は1990年頃まではそれほど大きな変化はみられない。平均分娩間隔に非常に大きな変化がみられるのは1995年であり、前年と比較すると都府県で419日から429日に、また北海道で401日から412日といずれも10日以上増えている。このことは、1993年と1994年の2年続きの夏季の猛暑が乳生産よりも繁殖成績を大きく悪化させたことを意味している。不思議なことに、一度悪化した分娩間隔はその後回復することなく、また猛暑が訪れるとさらにその間隔が長くなっている（1999年の都府県と2000年の北海道）。さらに、夏季の暑熱ストレスの影響は北海道と都府県の平均分娩間隔の相違にもみられ、分娩間隔は各年次を通して都府県が北海道よりも10日以上長くなったが、同様の結果は北海道と都府県の乳脂率の季節変動にもみられ、乳脂率は5月から10月頃まで低下しているものの、年間を通して都府県が北海道より低く推移している（図2）。

これらの結果から、高泌乳牛に対する暑熱ストレスの悪影響は温暖な西南暖地だけでなく、現在では北海道を含めた全国に及んでいることが認識できる<sup>2)</sup>。筆者が数年前まで在籍していた北海道農業研究センター（札幌市）の月平均気温は、夏季の7月と8月でも平年は20-21℃程度であり、猛暑の年でも24℃に達しないが、暑熱ストレスの影響は平年でも明確に現われ、乳量の減少だけではなく、乳脂率と乳タンパク質率は冬季に比べて夏季に0.2-0.3%低下した。特に、夏季分娩牛では泌乳最盛期の乳量が最も低く、また1乳期を通して低く推移したことから、夏季分娩牛の1乳期の乳量は他の分娩月の乳牛よりも300-600kg程度減少した。このことは熱発生量の多い高泌乳牛の増加と密接に関係し、1万kgレベルの高泌乳牛では平均気温が20℃程度から暑熱ストレスの影響をうけることを意味している。

わが国では夏季は高温多湿となるため、気温の上昇に加えて湿度の上昇が乳牛の生産性をさらに悪化させる。図3に札幌（北海道）と東京・京都・熊本（都府県）の月別平均気温を示したが、高泌乳牛の生理・生産機能に悪影響を及ぼす気温を20℃とすると、都府県では図2の乳脂率の変動と同様に5月から10月頃まで暑熱ストレスの影響をうけることになる。なかでも、猛暑の年には夏季の平均気温が平年よりも1-2℃近く上昇するため、高泌乳牛の体内代謝に及ぼす悪影響は非常に大きい。

以上のように、わが国では夏季の長い暑熱の期間と数年ごとに訪れる猛暑が高泌乳牛の生産性を大きく低下させているが、栄養管理に不備があるとその悪影響にさらに拍車をかけることになる。

### 3. 高泌乳牛のエネルギー代謝の特徴

高泌乳牛の体内代謝では、エネルギー代謝に及ぼす影響が大きい。特に、分娩直後の乳量の急増によって体重減少が非常に著しくなると、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。そこで、高泌乳牛ではエネルギー代謝の特徴を把握し、その改善を図ることが重要である。

#### 1) 自給粗飼料の栄養価

表1と図4は北海道農業研究センターで自給粗飼料の栄養価を調べた試験結果<sup>1-4)</sup>であるが、供試した乳牛は1万kgの泌乳能力を有している。乾乳牛にはイネ科牧草、アルファルファおよびトウモロコシサイレージを維持量給与したが、供試飼料のTDN含量は60%以上、また代謝率（摂取エネルギーに対する代謝エネルギーの比率）は50%以上の高い値であった。特に、わが国でよく利用されているイネ科牧草（ここではチモシーとオーチャードグラス）のTDN含量は60-70%の範囲にあり、またNDF含量が69%と品質が劣っていてもTDN含量は59.5%であった。同様に、オーチャードグラスあるいはアルファルファサイレージの給与比率を60%に設定した泌乳牛（乳量：29.5kg）では、飼料のTDN含量は69.8%、また代謝率は59.8%と高い値であった。これらの栄養価の数値は、農協、民間会社などの粗飼料分析センターから得られる数値よりも高くなっている。したがって、高泌乳牛では粗飼料のエネルギー利用効率が高く、特に有機物と繊維の消化率が高いことから、消化管における利用効率の優れていることが認められた。

粗飼料の栄養価を比較すると、糞中へのエネルギー損失量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%までであったが、黄熟期刈りのトウモロコシサイレージはデンプン含量が高いため、自給粗飼料のなかではエネルギー源として最も優れている。それに対して、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、高泌乳牛に対しては適期刈りした高品質サイレージを給与することが望まれる。一方、アルファルファはリグニン含量が高いため乾物や繊維の消化率は低下するものの、イネ科牧草よりも消化管通過速度が速いので、高泌乳牛では乾物摂取量と乳量の増加をもたらす効果がある。さらに、メタンもエネルギー損失の一因であり、乾乳牛の総エネルギー摂取量に対するメタンのエネルギー損失量の比率は7.4~9.9%の範囲にあったが、アルファルファ給与牛のメタン発生量はイネ科牧草給与牛よりも少なかった。

自給粗飼料の栄養価からは、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サイレージ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、栄養素の充足を容易に図れるとともに、高泌乳牛の乾物摂取量と乳量の増加が期待できる。

## 2) 高泌乳牛のエネルギー要求量

自給粗飼料の有効利用のためには粗飼料のエネルギー価だけではなく、自給粗飼料給与時における高泌乳牛のエネルギー要求量の精密化が求められる。乳牛では泌乳能力の向上に伴い、血流量の増加、ルーメン機能や肝機能の活性化、飼料利用効率の改善などにより、維持に要する代謝エネルギー要求量 ( $ME_m$ ) が増加している<sup>5)</sup>。Yan ら<sup>6)</sup>は泌乳牛を用いた 221 回の代謝試験の結果から  $ME_m$  要求量は  $0.67MJ/kg^{75}$  の値となり、英国の従来の要求量である  $0.48MJ/kg^{75}$  (ARC)<sup>7)</sup> よりも増加したことを報告している。日本飼養標準<sup>8)</sup>では  $ME_m$  要求量として  $0.49MJ/kg^{75}$  を採用しているが、北海道農業研究センターで平均乳量 34kg の泌乳牛を用いた 53 回の代謝試験の結果から、早坂ら<sup>9)</sup>は代謝率 0.56 の飼料では  $ME_m$  要求量として  $0.585MJ/kg^{75}$  の値を、また本試験では乳牛の  $ME_m$  要求量は  $0.596MJ/kg^{75}$  (代謝率:0.53) であった。Agnew と Yan<sup>5)</sup>は、欧米で利用されている  $ME_m$  あるいは維持に要する正味エネルギー要求量は 30 年以上前のデータに基づいているため、現在の高能力牛の要求量よりも低く、改善が必要なことを指摘している。

牛群検定成績では 2000 年以前の乳量の増加率に比べると現在の増加率はやや鈍化している (図 1) もの、乳量は毎年増加していることから、後継牛の遺伝的能力は母牛より高く、体内代謝もさらに活発化することが予想できる。このことは、酪農家にとっては牛群の栄養管理の改善が常に必要なことを意味しているため、今後は高泌乳牛に適した栄養要求量や飼料設計を確立することが重要といえる。

## 3) 高泌乳牛の移行期のエネルギー代謝

高泌乳牛のエネルギー代謝では、移行期<sup>1)</sup> (分娩 3 週間前から分娩 3 週間後の期間) のエネルギー代謝の改善が最も重要である。高泌乳牛では粗飼料のエネルギー利用効率が高く、また維持に要する代謝エネルギー要求量の高まることが認められたが、このことによって高泌乳牛は分娩直後の急激な乳量増加にもある程度対応できていると考えられる。しかし、高泌乳牛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い。したがって、この時期に適切な栄養管理ができないと、乳生産の低下だけでなく、ケトosis・脂肪肝などの疾病増加、受胎率低下などをもたらすことになる。特に、米国ではケトosis・脂肪肝の発生は 1980 年代には分娩 2～4 週後に多発したものの、現在の高泌乳牛では分娩 10 日頃までに多発していると報告されている<sup>10)</sup> ことから、高泌乳牛の実情にあわせた栄養管理の改善が急務といえる。

高泌乳牛では体脂肪の動員により血中遊離脂肪酸が急増して脂肪酸代謝障害が生じると、体内にアセト酢酸などのケトン体が増加し、痙攣、麻痺などの脳・神経障害によるケトosisを発症する。また、肝臓に大量に動員された脂肪を処理できなくなると大量のケトン体の生成による肝機能の減退を起し、脂肪肝を発症する。一方、乳中の乳糖が少ないと浸透圧の影響によって乳腺への水の移行が減少するため、高泌乳牛の乳量増加では乳腺における乳糖の合成を促進させることが重要である。特に、乳中の乳糖含量は乳期を通して変動が少ないものの、泌乳前期には 4.6%前後のやや高い値を維持している (図 5) ことから、高泌乳牛では高乳量を維持するために分娩直後から血漿グルコース濃度の低下を防ぐことが必要になる。しかし、ここで注意しなければならないことは、乳牛は体内の浸透圧を一定に維持するために、水摂取量が給与粗飼料によって大きく変動することである (表 1)。本誌<sup>1,3)</sup>ですでに紹介したが、乳生産の向上のために水が欠かせないことから、移行期には水を安定供給しなければならない。

高泌乳牛の栄養管理では、分娩後のエネルギー摂取量を早期に充足させることが大切であるが、図 6 では分娩直後から乾物摂取量が増加したものの、分娩後 1 週間の体重減少は 3.4～5.6kg/日であった<sup>11)</sup>。また、乳牛の血漿遊離脂肪酸濃度が分娩直後に急増し、血漿グルコース濃度は分娩後に減少したが、乾

物摂取量の増加に伴って分娩2週間後には回復傾向を示している。したがって、高泌乳牛では分娩直後には体脂肪を利用してエネルギーを補給し、体内のアミノ酸などから糖新生でグルコースを産生しているものの、乾物摂取量を早期に増加できると分娩2週間後頃にはエネルギー不足も緩和すると考えられる。また、自給粗飼料のなかではデンプンの多いトウモロコシサイレージがエネルギーの補給に適しているが、酪農家段階では各農家の実情にあわせて飼料設計を改善し、エネルギーを初めとして、各栄養素の要求量を早期に充足させることが移行期の栄養管理で求められる。

#### 4. 初産牛と経産牛の栄養管理

高泌乳牛の最近の特徴としては、生産コスト低減のために育成牛の増体率を高めて初産月齢を21カ月程度にまで早める傾向があげられる。それに対して、牛群検定成績では初産月齢は25.6カ月齢であり、また平均産次も2.7産と低いため、これらの改善が求められている。

##### 1) 初産牛と経産牛の乳量と体重

米国では初産月齢21カ月でも増体を適正に保つと初産時の乳量が9,000kgを超え、その後の乳生産や繁殖成績も問題なかったことが報告され<sup>12)</sup>、わが国でも北海道農業研究センターの研究成果からSakaguchiが同様の報告をしている<sup>13)</sup>。図7には北海道農業研究センターの育成牛40頭の体重と体高の推移を示したが、12カ月齢の乳牛の体重(366kg)と体高(127cm)がほぼ受精開始時期の目安(体重350kg、体高125cm)に達しているため、わが国の高泌乳牛では12カ月齢における種付けも可能と考えられる。

図8には、図7の育成牛のその後の乳生産も含めて、北海道農業研究センターの乳牛の1994～1997年における305日乳量と体重の変動を示した<sup>14)</sup>。これらのデータは10年以上も前のものであるが、初産牛の乳量は7,500kg台とやや低いものの、2産牛では9,000kgを超え、その後産次の上昇とともに増加し、5産以上の牛では10,000kgに達した。この結果は現在の牛群検定の成績とも近似しているが、初産牛と2産以上の牛では体重の変動に大きな相違がある。

ここで栄養管理の問題点としてとりあげられることは、初産牛の乳量が急増したため増体に必要な養分が十分に供給されず、その結果、受胎率低下、疾病増加などにつながり、最終的には廃用になるケースが増えていることである。特に、牛群検定では牛群のなかで初産牛の占める比率が約30%と高く、この傾向は多くの酪農家でも同様なことから、初産牛の適切な栄養管理が牛群の生産性向上に効果が大きいといえる。また初産牛は増体と泌乳のための栄養素が必要であり、特に泌乳前期に十分なエネルギーを供給して増体を早めることが必須なため、経産牛とは異なった栄養管理が必要になる。

一方、泌乳末期にはエネルギーが脂肪として蓄積されるが、分娩間隔が伸びて1年以上搾乳している場合には過肥となる危険性が高い。また、乾乳期に太りすぎても、やせすぎても、分娩前後の乾物摂取量に支障をきたすため、移行期には3.5前後のボディコンディションスコア(BCS)になるように泌乳末期から注意することも忘れてはならない。

##### 2) 初産牛と経産牛の栄養管理

わが国では育成から初産時の増体を適正に保ち、初産月齢24カ月、分娩間隔13カ月を目標にした栄養管理を行い、生涯生産性の向上をめざすことが重要といえる。移行期の産次毎の成績では、分娩後の乳量は初産牛では少ないものの、3産以上の牛では分娩後3日目に30kgに達していた(図9)。それに対して、分娩後5日間で初産牛と2産牛では体重が2.2kg/日、また3産牛と4産以上の牛では5.4kg/日減少し、経産牛では分娩直後の体重減少が非常に著しいことが認められた。またエネルギー代謝と関連する血漿グルコース濃度は4産以上の牛で低く、逆に遊離脂肪酸濃度が高くなり、老齢牛ではケトシス、脂肪肝が発生しやすい状況になっている<sup>15)</sup>。同様に乳牛の血漿中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<sup>1)</sup>。

これらの結果から、2産以上の経産牛では分娩後の養分要求量を早期に充足させ、乳量増加とともに移行期の疾病予防に焦点をおいた栄養管理が求められる。特に、加齢とともにケトシス・脂肪肝・乳熱発生の危険性が高まるため、経産牛ではエネルギー摂取量を適正に保つとともに、カルシウムとリン代謝を活性化させる飼養管理が重要といえる。それに対して、初産牛では乳量増加とともに成長のための増体を高めることが必要であり、エネルギーの充足を早期に高める栄養管理法が最も求められる。

## 5. 高泌乳牛の暑熱期の代謝特性

夏季の暑熱ストレスは乳牛の生理・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、熱発生量の多い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くだけでなく、乳量や繁殖成績を著しく低下させる。したがって、暑熱期の栄養管理では暑熱ストレスの悪影響を可能な限り低減することが求められるが、その場合には暑熱期の体内代謝の特性、特に恒常性を維持するしくみを十分に理解したうえで暑熱対策に取り組むことが必要である。

### 1) 暑熱ストレスによる影響

乳牛の恒常性を維持するなかで、恒温を保つことは最も重要な機能の一つである。乳牛は環境温度が低くなると熱発生量を増加し、環境温度が高くなると熱放散量を増加して、体温を一定に保とうとする。乳牛が摂取したエネルギーは乳生産だけでなく、体温を含めたさまざまな生命活動に利用されるが、高泌乳牛のように能力の高い家畜は気温、湿度、風力などの影響を受け、体温が変動しやすくなっている。特に、わが国では夏季の暑熱ストレスの影響が大きく、地球温暖化に伴って気温がさらに上昇すると乳生産に及ぼす悪影響は莫大になると予想されている。

環境温度が上昇すると、乳牛は神経・内分泌による調節、脱毛などの形態的な調節で体温を一定に維持するしくみがある。乳牛の体温は脳の前視床下部の放熱中枢と後視床下部の熱産生・保持中枢で調節され、高温環境下では皮膚や各器官のセンサーが高温の情報を受け取ると発汗や呼吸数を増やして、熱放散を活発化する。また、内分泌では生産と関係する成長ホルモンや甲状腺ホルモン濃度の低下、インスリン分泌の増加などが起こり、熱生産を抑制する方向に働く。しかし、これらの反応は乾物摂取量や乳生産も減少させるので、暑熱期の栄養管理では体温の上昇を防ぐとともに、乳牛の生産性の低下を防ぐことが重要といえる。

### 2) 暑熱ストレスと乳牛の体温・呼吸数

乳牛の体温は熱産生と熱放散のバランスで決まるが、高温環境下では乳牛は放射・対流・伝導による顕熱放散量が減少するため、蒸散による潜熱放散量を増加させることが必要である。また潜熱放散では気化熱が重要で、皮膚表面や呼吸器から1gの水が蒸発するときに約0.58kcalの熱が失われる。潜熱放散の一つに発汗があるが、乳牛の発汗機能は劣っているので発汗だけでは熱を十分に放散できない。そのため、高温環境下では呼吸数を増加させて、呼吸器からの蒸散による熱放散を高める。乳牛の呼吸数は多いときには100回/分を超えることもあるが、呼吸数の増加による熱放散量が熱発生量よりも少なくなると恒温を維持できなくなり、体温が上昇する。

図10は環境制御室で調べた結果<sup>16)</sup>であるが、飼料摂取量が乾乳牛の2-3倍の泌乳牛では体温と呼吸数が乾乳牛よりも高く、また乾乳牛では26℃で体温はまだ上昇していないものの、泌乳牛では26℃から体温の上昇がみられた。このことは、乳牛は気温が上昇すると呼吸数の増加による熱放散を高めて体温上昇の抑制を図っているものの、泌乳牛では熱発生量が多いため乾乳牛よりも体温上昇が早いことを意味している。それに対して、30℃では熱放散だけでは体温の上昇を抑制できないため、乾物摂取量を減らして熱発生量を減少させているが、それでも体温は急激に上昇し、泌乳牛では危険域の40℃を超えてい

た。これらの結果から、高温環境下では高泌乳牛は恒温を維持することが非常に困難なため、適切な防暑対策を行うことが大切といえる。

## 6. 高泌乳牛の暑熱期の栄養管理

高泌乳牛の栄養管理の基本は、エネルギー、タンパク質、ミネラル、ビタミンなどの栄養素をバランスよく給与することである。しかし、夏季の暑熱ストレスは高泌乳牛の飼料摂取量や乳量を減少させるため、高温環境下では日本飼養標準<sup>8)</sup>などを参照して栄養管理の改善を図ることが必要である<sup>2)</sup>。ここでは、エネルギー代謝、イオンバランス、抗酸化作用による改善法を紹介するが、夏季にはサイレージの変敗、水槽の汚染などが発生しやすいため、安全な飼料と水の供給が基本であることを忘れてはならない。

### 1) 暑熱期におけるエネルギー代謝の改善

乳牛の防暑管理の基本は体温上昇の抑制にあるが、高泌乳牛ではエネルギー利用効率が高いため、乳牛体内からの熱発生量が非常に多くなる。したがって、夏季の暑熱ストレスは高泌乳牛にとって乳生産の大きな阻害要因となるが、図4のサイレージ給与牛の熱発生量はオーチャードグラスで85MJ/日、トウモロコシで76MJ/日、アルファルファでは72MJ/日であった。給与粗飼料によって乾乳牛の熱発生量は異なるが、摂取したエネルギーの48～58%が熱に変換されている。高泌乳牛では乾乳牛の3倍程度の飼料を摂取しているため、乳に利用されるエネルギー(94MJ/日)を差し引いても体内の熱発生量(113MJ/日)は乾乳牛よりも増加し、図10のように体温を上昇させる要因になる。

乳牛体内では栄養素の燃焼(酸化)によって熱が発生し、その一部は体温の維持に必要であるが、代謝活動(消化・吸収、運動、乳・肉生産、胎児の成長など)が活発になると熱発生量が増加する。特に、高泌乳牛では乾物摂取量の増加に伴って体内の血流量が増加し、各器官からの熱発生量が急激に増加する。それに対して、高温時には熱放散の増加や体温上昇による代謝量の増加などが加わるので、暑熱期にはその増加分を補うために維持に要する代謝エネルギー要求量が約10%増加する。しかし、高温時には暑熱ストレスの影響で飼料摂取量が減少することから、エネルギー要求量を満たすためにはエネルギー含量の高い濃厚飼料や脂肪酸カルシウムなどの給与量を増やすことが求められる。

一方、乳生産に対する暑熱ストレスの影響を低減するためには、むだな熱発生量を少なくして、摂取したエネルギーを優先的に乳生産に使うことが必要である。栄養素の代謝に伴う熱量増加は、タンパク質、炭水化物、脂肪の順に少なくなり、セルロースなどの繊維成分よりもデンプンなどの濃厚飼料で少なくなる。また、品質の低下した粗飼料を給与するとルーメンからの熱発生量が非常に多くなる。このことから、夏季の栄養管理では濃厚飼料、良質粗飼料、脂肪酸カルシウムなどをTMRで給与して、乳生産の改善を図ることが重要である。

夏季の栄養管理では、タンパク質を過剰給与しないことも欠かせない。タンパク質は乳量増加のために必須な栄養素であるが、過剰給与されたタンパク質は血漿尿素態窒素濃度を高めて尿中に窒素として排泄されるため、タンパク質がむだになるだけでなく、エネルギーのむだにもなる。また、過剰に摂取した窒素を体内で尿素態窒素に変換する際に多量のエネルギーを必要とするため、高泌乳牛では熱発生量が増加し、体温の上昇につながりやすい。特に、分解性タンパク質の過剰給与は熱発生量をさらに高めるので、夏季には非分解性タンパク質の増給など、タンパク質の適正給与が大切である。

前報<sup>1)</sup>で詳細に示したが、夏季分娩牛がエネルギー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℃にも達していた。したがって、防暑対策では夏季分娩牛に最大限に注意し、分娩前後から泌乳最盛期の暑熱対策を優先的に実施することが最も重要である。また、乳牛の防暑対策としては適切な栄養管理だけではなく、畜舎環境の改善もあわせて実施すると効果が高い。最近で

は、分娩前の乳牛に気化冷却装置を利用して、送風と散水を組み合わせて熱放散を促進することも考えられているが、酪農家段階の防暑対策ではさまざまな工夫が必要といえる。

## 2) イオンバランスによる改善

暑熱期に乳牛が発汗量を増やして体温上昇を抑制することは、恒温を維持するための重要な代謝特性である。しかし、乳牛の発汗量の増加とともに水と電解質（ナトリウム、カリウム、塩素）も同時に失われるので、これらを補給しないと乳牛の恒常性が損なわれることになる。暑熱期には発汗、流涎などによって乳牛の電解質損失量は増加するが、ナトリウム損失量が最も多い人間とは異なって、乳牛の電解質損失量はカリウムが最大で、次いでナトリウム、塩素の順になる。また、牧草中のナトリウム含量が非常に少ないことから、乳牛は体内のナトリウムを重曹 ( $\text{NaHCO}_3$ ) の形態で唾液を経てルーメンに還流させているが、高温時に粗飼料摂取量が減少すると反芻が少なくなり、ルーメンへの唾液（重曹）の流入量が減少する。その結果、ルーメンpHが低下して揮発性脂肪酸の産生量の減少など、ルーメン機能が減退し、乾物摂取量の減少、乳量・乳成分の低下につながる。

そこで、高温時における乳牛の生産性低下を防ぐために重曹、カリウムなどを補給すると、乳牛の生産性低下の防止に効果的であったことが数多く報告されている<sup>17)</sup>。また、高温時における乳牛の生産性低下の防止では、イオンバランス ( $(\text{Na}+\text{K})-\text{Cl}$  をミリ当量で示した式) が利用されている。この式は前報<sup>1)</sup>で紹介した乳熱予防のためのイオンバランスの式とは異なるが、重炭酸ナトリウムや重炭酸カリウムなどの緩衝剤を泌乳牛に給与してイオンバランスを正にすると、飼料摂取量、乳量、乳成分などに改善効果がみられている。緩衝剤による乳生産の改善効果は、緩衝剤に含まれているナトリウムとカリウムが消化管から吸収されやすく、また重炭酸塩によるルーメンの緩衝作用が比較的速やかなため、ルーメン環境の適正化とともに体内の酸塩基平衡の適正化を反映した結果といえる。それに対して、塩素の多給が乳牛の生産性低下をもたらしたことから、イオンバランスを基準にしたミネラル給与法が夏季の防暑対策では優れていると考えられている。

しかし、ここで注意しなければならないことは、分娩前の乳牛にカリウムを過剰給与すると乳熱発生を促すことである。そのため、分娩前の乳牛では飼料中のカリウム含量を2%以下にし、カリウムの過剰給与を避けることが必要といえる。

## 3) 抗酸化作用による改善

高泌乳牛は高水準の乳生産を維持するために、体内で活発なエネルギー代謝や物質代謝を行っているが、その際に多量の酸素を必要とする。酸素が乳牛の生存のために不可欠なことはいうまでもないが、体内で酸素を利用した際に生成する活性酸素が細胞の生体膜を損傷するなど、活性酸素による細胞機能の障害作用が問題にされている。特に、エネルギー代謝の活発な高泌乳牛では体内で大量に生成される活性酸素が健康を阻害し、繁殖成績の低下や乳房炎などの疾病増加をもたらすが、その悪影響は暑熱時に一層顕著になる。

そこで、活性酸素の有害作用を消去するために抗酸化作用を有する栄養素への関心が高まっている。なかでも、微量ミネラルはスーパーオキシドジスムターゼ（亜鉛、銅、マンガン含有酵素）、グルタチオンパーオキシターゼ（セレン含有酵素）、カタラーゼ（鉄含有酵素）など、抗酸化作用のある酵素の構成成分として、またβ-カロテン、ビタミンA、ビタミンEなどの脂溶性ビタミンには生体膜の脂質酸化を防止する抗酸化作用があり、高泌乳牛の健康保持に必須の働きをしている<sup>17)</sup>。わが国の飼料中の微量ミネラル含量では粗飼料中の亜鉛、銅およびセレン含量が低いこと（表2）や、暑熱時や分娩前後には血漿中の微量ミネラルや脂溶性ビタミン濃度が低下しやすい（図11）ことから、夏季には乳牛の疾病防止や繁殖成績の向上のために微量ミネラルや脂溶性ビタミンを適切に補給することが大切といえる。また、筆者の研究室ではβ-カロテンによる新生児の腸管免疫の改善、アスタキサンチンによるウシ初

期胚の暑熱ストレス緩解効果などを報告している<sup>18-20)</sup>が、高泌乳牛の健康保持に飼料中の機能性成分を十分に活用することが望まれる。

## 7. おわりに

高泌乳牛の栄養管理では、筆者も乳熱発生などによって試験から除外したケースもあったように、さまざまなリスク要因が存在する。しかし、高泌乳牛の生産性向上に伴ってわが国でも乳牛の栄養管理に関する成果が数多く発表され、酪農家段階でリスク低減と生産性向上を同時に達成できることが可能になっている。したがって、今後はできるだけ有益な情報を酪農家に提供し、酪農家段階で高泌乳牛の栄養管理の改善を実践することが重要といえる。

## 参考文献

- 1) 久米新一ら：畜産の研究, (印刷中)
- 2) 久米新一:暑熱期の代謝特性と栄養管理, 「国産飼料の利用拡大に対応した乳牛の栄養管理」. 176-182, デーリィマン, 東京 (2009)
- 3) 久米新一・宿院 享：畜産の研究, 64(11), 1063-1073 (2010)
- 4) 久米新一ら：日畜会報, 75, 31-35 (2004)
- 5) Agnew RE, Yan T.: *Livest. Prod. Sci.* 66, 197-215 (2000)
- 6) Yan Tら： *Livest. Prod. Sci.*, 51:141-150 (1997)
- 7) Agricultural Research Council (ARC): *The Nutrient Requirements of Ruminant Livestock*. CAB. London (1980)
- 8) 農業・食品産業技術総合研究機構編. *日本飼養標準 乳牛* (2006年版). 中央畜産会. 東京. (2006)
- 9) 早坂貴代史ら：日本畜産学会報, 66:374-382 (1995)
- 10) Goff JP ら: *J. Dairy Sci.*, 89, 1292-1301 (2006)
- 11) Kume S ら: *Res. Bull. Natl. Agric. Res. Cent. for Hokkaido Reg.*, 181,1-14 (2004)
- 12) Van Amburgh MEら： *J. Dairy Sci.*, 81, 527-538 (1998)
- 13) Sakaguchi M ら: *J. Reprod. Dev.* 57, 17-33 (2011)
- 14) Kume S ら: *Res. Bull. Hokkaido Natl. Agric. Exp. Stn.*, 173, 37-45 (2001)
- 15) Kume S ら: *Anim. Sci. J.*, 74,211-215 (2003)
- 16) 栗原光規ら：九州農試報告, 29, 21-107 (1995)
- 17) 久米新一: ミネラル・ビタミン, 乳牛栄養学の基礎と応用, 81-106, デーリィジャパン社, 東京 (2010)
- 18) Nishiyama Y ら： *Brit. J. Nutr.*, 105, 24-30 (2011)
- 19) Nishiyama Y ら： *Livest. Sci.*, 137, 95-100 (2011)
- 20) Namekawa Tら： *Reprod. Domest. Anim.* , 45, e387-e391 (2010)



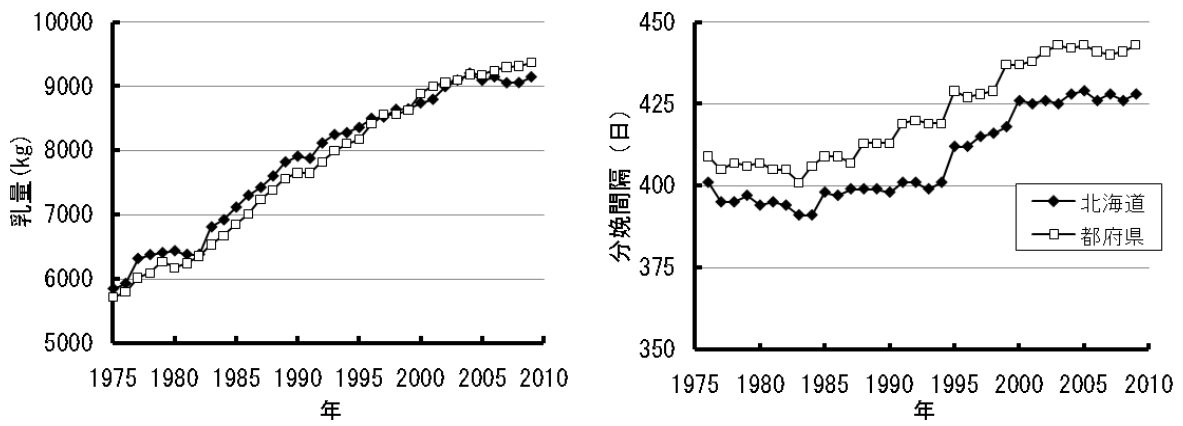


図1 北海道（◆）と都府県（□）の分娩間隔と乳量の推移（牛群検定成績，2009年）

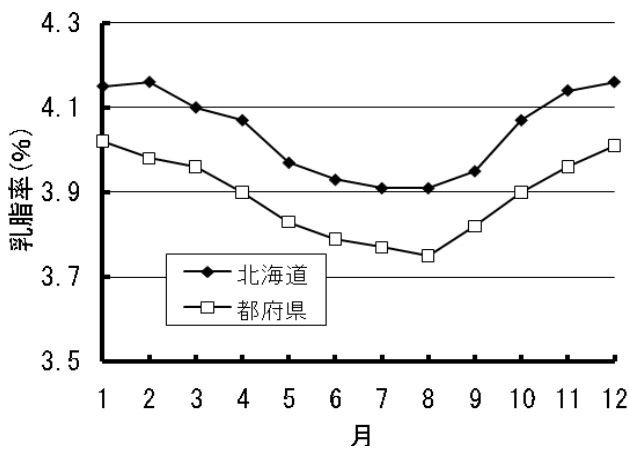


図2 北海道（◆）と都府県（□）の乳脂率の季節変動（牛群検定成績，2009年）

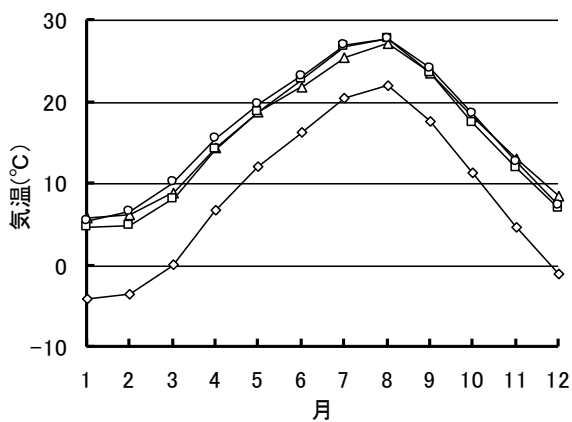


図3 札幌（◇）、東京（△）、京都（□）、熊本（○）の月平均気温（理科年表より引用）

表1 自給粗飼料主体給与の乾乳牛と泌乳牛の消化率

	苜蓿乾草	オーチャートグラスサイレージ	アルファルファサイレージ	トウモロコシサイレージ	泌乳牛
頭数	4	4	14	4	16
栄養価, 乾物当たり%					
DM	86.8	29.2	45.1	37.0	51.2
OM	93.2	93.1	89.5	94.7	92.5
CP	10.7	13.0	18.3	11.1	16.6
ADF	36.0	38.3	35.3	23.3	26.4
NDF	63.1	60.6	44.9	37.8	39.4
体重, kg	590	620	633	606	614
DMI, kg/日	7.0 <sup>b</sup>	8.5 <sup>a</sup>	8.1 <sup>ab</sup>	6.9 <sup>b</sup>	20.7
水出納, kg/日					
飲水量	27.7 <sup>a</sup>	9.5 <sup>b</sup>	25.5 <sup>a</sup>	5.3 <sup>b</sup>	77.6
水摂取量	28.7 <sup>b</sup>	30.2 <sup>ab</sup>	37.2 <sup>a</sup>	17.3 <sup>c</sup>	98.5
尿量	6.5 <sup>b</sup>	9.4 <sup>b</sup>	16.9 <sup>a</sup>	7.3 <sup>b</sup>	21.9
乳量	--	--	--	--	29.5
消化率, %					
OM	69.6 <sup>ab</sup>	66.7 <sup>b</sup>	66.3 <sup>b</sup>	75.2 <sup>a</sup>	71.3
ADF	67.3 <sup>a</sup>	64.7 <sup>a</sup>	56.8 <sup>b</sup>	62.5 <sup>ab</sup>	60.1
NDF	71.8 <sup>a</sup>	67.6 <sup>a</sup>	57.9 <sup>b</sup>	63.0 <sup>ab</sup>	58.6
代謝率, %					
TDN, %	53.0	52.8	51.7 <sup>b</sup>	59.6 <sup>a</sup>	59.8
	66.6 <sup>bc</sup>	67.8 <sup>b</sup>	62.7 <sup>c</sup>	74.5 <sup>a</sup>	69.8

注) 苜蓿乾草とトウモロコシサイレージはCP含量が低いため、大豆粕を4~10%添加、水摂取量：飲水量+飼料中水、<sup>a, b, c</sup>P<0.05

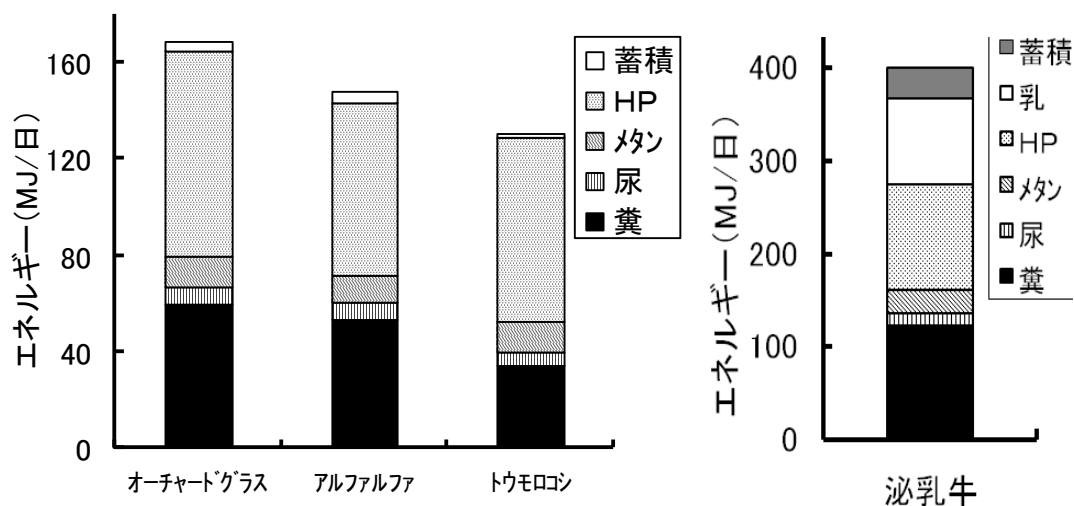


図4 サイレージ主体給与の乾乳牛と泌乳牛のエネルギーの分配 (HP：熱発生量)

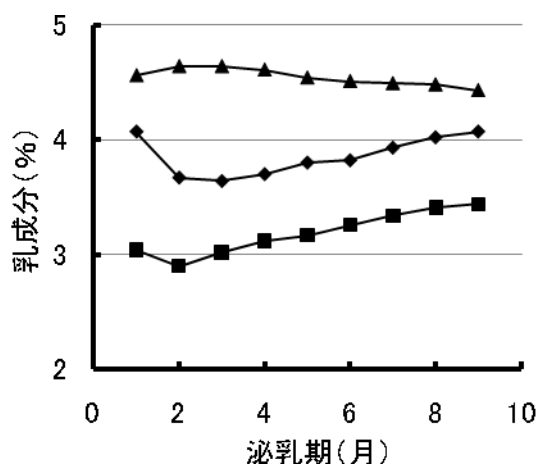


図5 乳牛の乳中の乳糖 (▲), 脂肪率 (◆) とタンパク質率 (■) の乳期における変動(n=125)

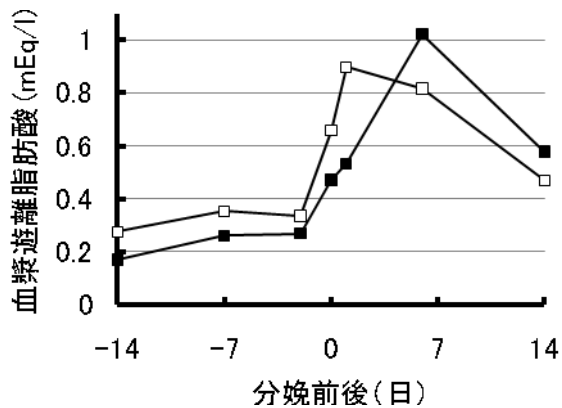
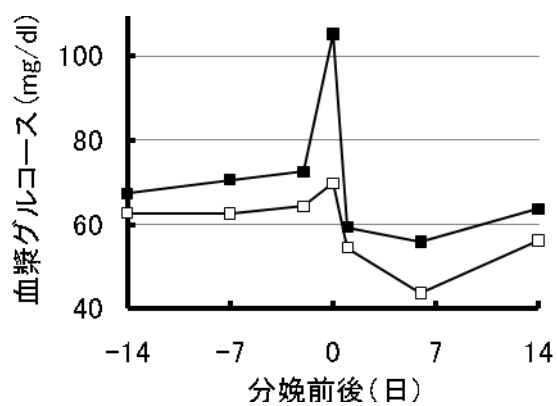
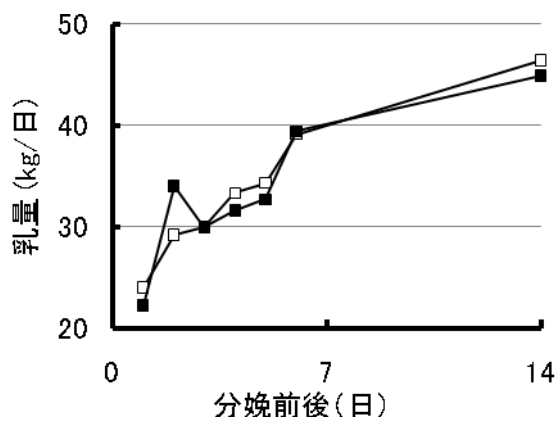
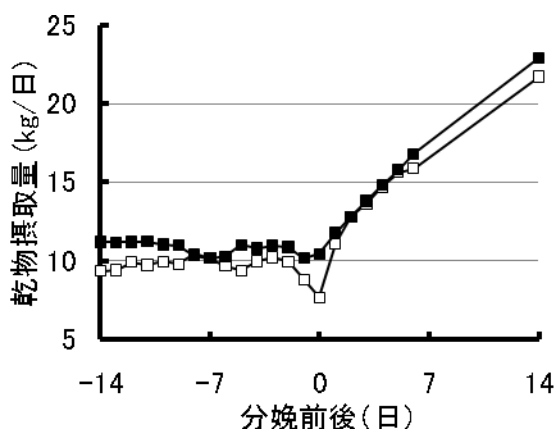


図6 アルファ主体給与牛 (□:n=4) とアルファ+コン給与牛 (■:n=4) の分娩前後の乾物摂取量, 乳量と血液成分 (粗濃比は分娩前 (70:30) と分娩後(アルファ区 50:50, アルファ+コン区 60:40 とした)

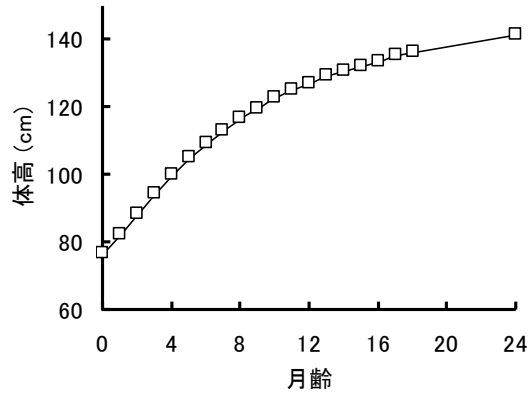
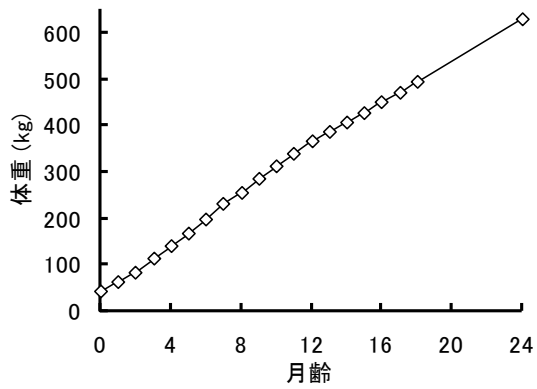


図7 育成牛 (n=40) の体重と体高の変動

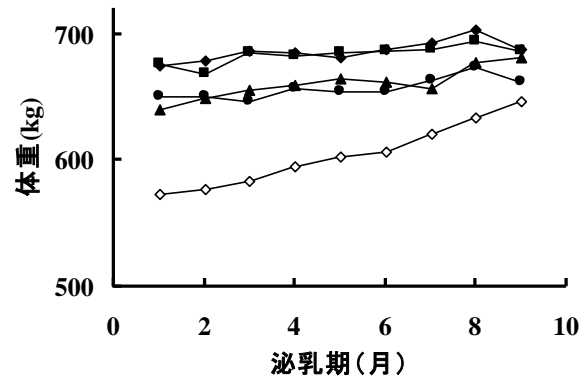
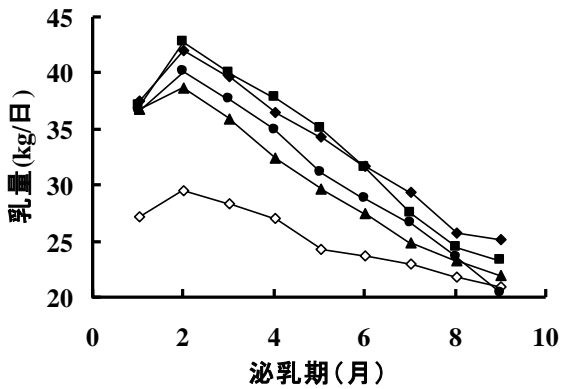


図8 初産(◇), 2産(▲), 3産(●), 4産(■), 5産以上(◆)の牛の乳量と体重(n=125)

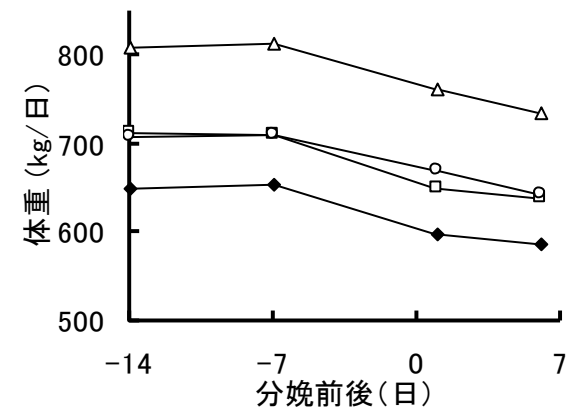
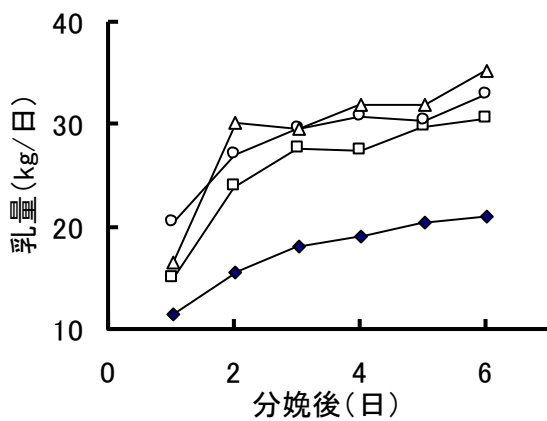


図9 初産 (◆)、2産 (□)、3産 (○) および4産以上 (△) の牛の乳量と体重 (n=63)

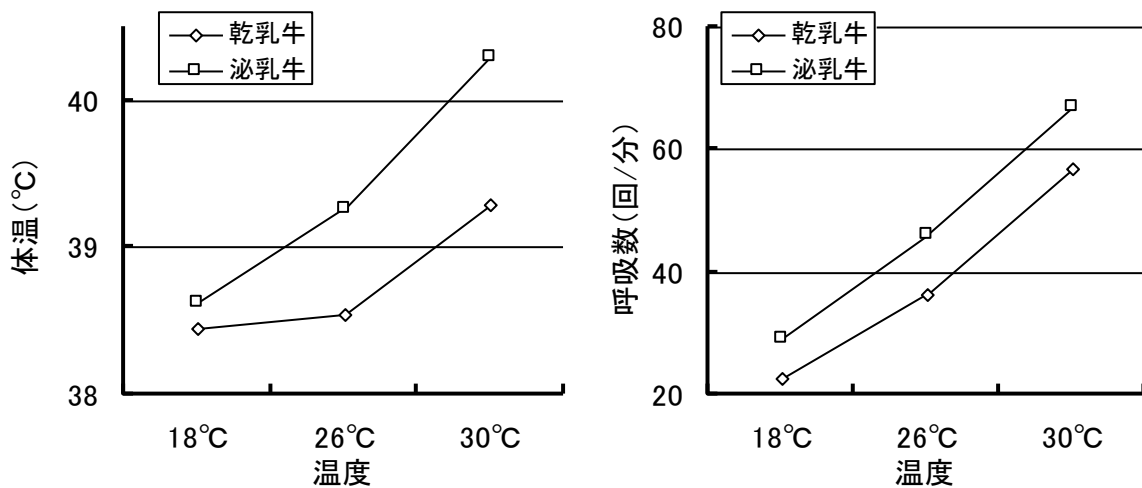


図10 乾乳牛と泌乳牛の体温と呼吸数（栗原ら、1995）（乾乳牛は32度に設定）

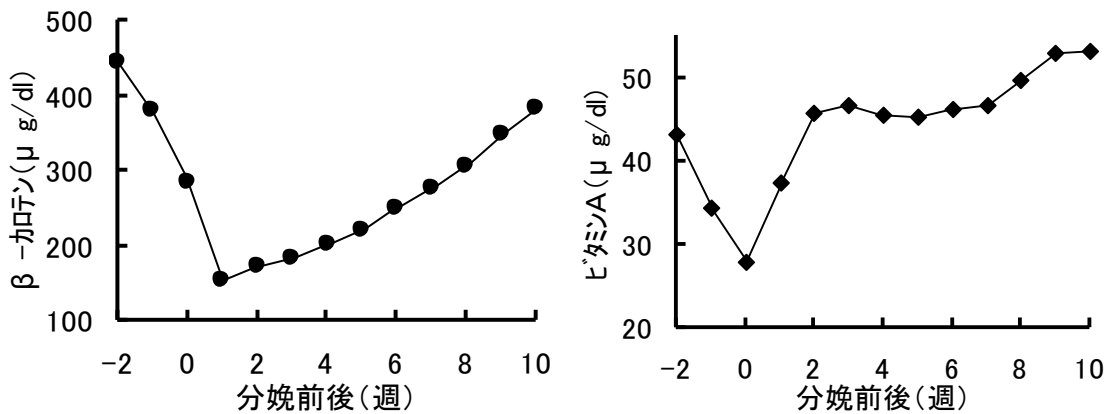


図11 乳牛の分娩前後の血漿中β-カロテンとビタミンA濃度

表2 飼料中の微量ミネラル含量（乾物当たりppm）

	鉄	亜鉛	銅	マンガ	セレン
配合飼料	241	56	13.5	57	0.20
大豆粕	116	54	19.4	44	0.17
イネ科サイレージ	1040	19	4.9	73	0.04
ユンサイレージ	133	20	6.8	60	0.04
要求量（日本飼養標準）	50	40	10	40	0.10