

## 動物の生体と機能—動物と環境にやさしい科学をめざして

家畜は乳・肉・卵などの生産性を高めるために改良されてきた動物であり、ヒトや野生動物の生体機能とは基本的に異なった発達をしている。特に、家畜は遺伝的改良の進展により生産性が急速に向上しているが、逆にこのことが家畜の生体機能に大きな影響を及ぼしている。家畜のなかには、毎日卵を産む鶏や1日に100kg近い牛乳を生産する乳牛など、生産機能が驚ろくほど高まった事例もあるが、一般的には家畜の生産性改善のスピードが以前よりも速く、またほぼ一律的に向上したことが近年の特徴としてあげられる。このことは、多少の程度の差はあるにしても、わが国の畜産農家の多くは生産能力の高い家畜を飼っていることを意味している。

このような家畜の急速な生産能力の高まりに対して、どの農家でもその生産性を十分に発揮できているわけではない。病気になる家畜が多かったり、あるいは受胎しない家畜が増えたりすると、農家の経営状態は一気に悪化する。この原因としては、生産能力の高い家畜の生体機能を十分に理解できていないことがあげられるが、それと同時に家畜を取りまく環境要因も大きな影響を及ぼしている。

本稿では、家畜の能力を十分に発揮させるために必要な生体機能の特性と、その生体機能に影響する環境要因などを紹介する。

### 1. 家畜の構造と機能

わが国や欧米では家畜の改良が急速に進み、家畜の体型や能力も変わってきている。例えば、乳牛は乳量・乳成分の向上を中心にして改良を加えたことにより、乳量・乳成分が著しく向上している（図1）。最近30年間の変化をみても乳量は3,000kg以上増加しているが、このことは乳牛体内の器官や組織の働きを乳生産に優先的にむけてきたことを意味している。

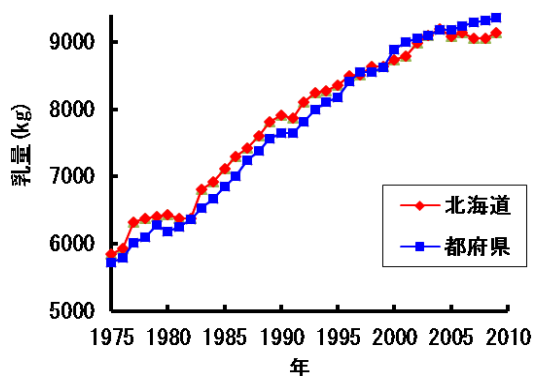
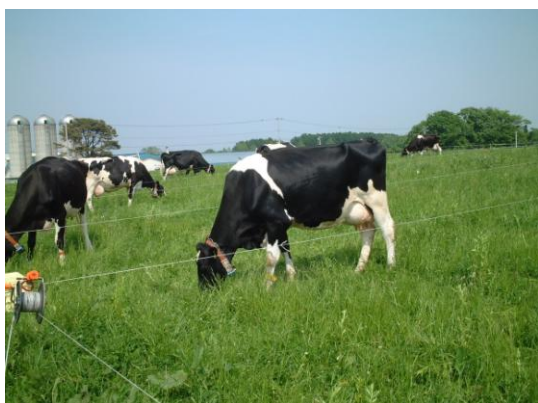


図1 ホルスタイン種乳牛と乳量（305日間における1頭の牛の総乳量）の改良（乳用牛群検定成績）

このように、家畜の有する能力を最大限に発揮できるように器官や組織の働きを高めてきたことが、近年の家畜改良の大きな特徴である。それでは、家畜の遺伝子、細胞、組織や器官はどのように変わったのであろうか。実は、このことはまだ明確には解明されていない。卵生産、肉生産、乳生産などは、生産量や品質としてすぐに把握できることから、

どのように変わってきたかを容易に理解できる。また、体型などのように外部から見てすぐに判断できるところは、改良が進んだことを理解しやすい。例えば、乳牛では乳生産の中心となる乳房などの泌乳器の改良を体型の変化から容易に判定できる。

それに対して、家畜体内の遺伝子・細胞・組織・器官などの変化は容易には判定できない。しかし、家畜の能力が急速に改善されたことは、遺伝子・細胞・組織・器官などが大きく変わったことに他ならない。このような動物体内における急激な変動を、生理学的、組織学的あるいは分子生物学的に解明することが求められている。また、これらの研究の進展は、家畜だけにとどまらず、野生動物の保護やヒトの疾病予防などにも貢献できる。

## 2. 動物と家畜の生体機能の特性

ヒトや動物では、生体の恒常性を維持する機構としてホメオスタシス (Homeostasis) という概念がよく使われている。生体の外の環境は外部環境であるが、それに対して生体内の環境を内部環境と呼ぶことを Bernard が 19 世紀に提唱し、動物には生体が正常な機能を維持するために内部環境を一定の範囲内に保つ機構があることを指摘した。その後、Cannon が神経・内分泌系の研究からこの考え方をさらに発展させ、生体の恒常性維持機構をホメオスタシスと名づけた。

動物が浸透圧、pH、熱平衡、血糖値などの内部環境を一定に維持するホメオスタシスの働きは、家畜にとっても生命を維持するための基本となる働きである。しかし、家畜はホメオスタシスとともに、体内の栄養素を生産のために優先的に分配する機構が発達した。1980 年に、Bauman は乳牛のこのような機構をホメオレシス (Homeorhesis) と名づけたが、家畜の高度な生産機能を理解するためには非常に適した概念といえる。

家畜のホメオスタシスとホメオレシスの関係を説明する場合に、乳牛の分娩前後の生理状態がもっとも適している(図2)。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内分泌機能の変化により、乾物摂取量が減少する。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急激に減少する。

図2で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週後には40kgに達するなど、遺伝的改良による効果がこの時期に顕著に現れている。しかし、この時期には体重が極端に減少するため、体脂肪が動員されて血漿中遊離脂肪酸濃度が急激に上昇する。その結果、乳牛はケトosisや脂肪肝など、エネルギー不足に起因する疾病発生の危険性が高まる。さらに、乳牛のエネルギー不足が長期に続くと乳量減少や受胎率低下にもつながる。

乳牛の分娩前後における生理・生産機能の最大の特徴は、遺伝的改良の促進により分娩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ことであり、そのことが乳牛の疾病増加・受胎率低下を招いている。また、乳牛の栄養素配分の優先順位では、栄養素は維持、成長、泌乳、脂肪蓄積の順に優先的に配分され、繁殖機能への配分は最下位に位置している。

以上のことは、乳牛はホメオレシスの働きで栄養素を優先的に乳生産に分配し、その結果ホメオスタシスが損なわれやすい状況にあることを示している。したがって、家畜の生体機能ではホメオスタシスとホメオレシスの調和を図ることが重要であり、またその考え

に基づいた研究成果が求められている。

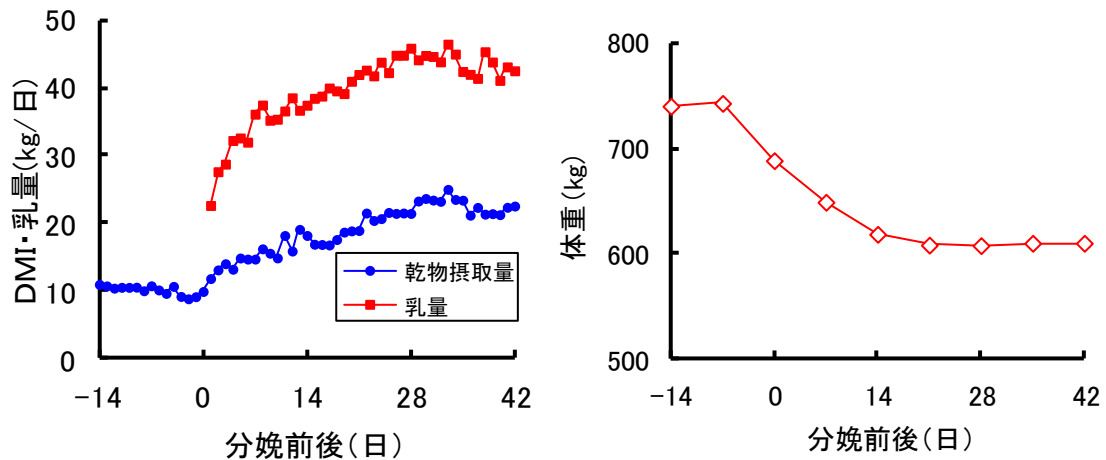


図2 乳牛の分娩前後における乾物摂取量、乳量、体重の変動

### 3. 環境と家畜の生体機能

動物は外部環境の大きな変化に対して、ホメオスタシスの働きで内部環境の変化をなるべく小さくするように機能している。家畜はヒトや野生動物とは異なって生産を優先する生理機能が発達したが、能力の高い家畜ではこれらの機能はヒトの管理下（ヒトによる飼料給与や飼養管理など）でしか効果を発揮できない。ヒトによる管理が十分でないとき生理機能はすぐに破綻し、家畜は生産性低下や致死にいたる。特に、能力の高い家畜は外部環境の変化に大きな影響を受けやすい。

また、最近では食料問題や環境問題が世界的に大きくとりあげられているが、なかでもエネルギー不足の問題がもっとも大きな課題である。食料危機はエネルギー不足を解消することがまず求められ、地球温暖化などの環境問題もエネルギーが基軸となる。家畜もエネルギー源である飼料を摂取して、体内で熱エネルギーに変換し、ホメオスタシスの働きで体温を一定に維持するとともに、貴重な食料となる畜産物を生産する。その反面、地球温暖化の一因となるメタンの発生源となることや、糞尿処理に無駄なエネルギーを必要とするなど、負の側面も抱えている。したがって、畜産分野でも家畜の生理・生産機能と環境要因との関係を十分に理解したうえで、家畜の能力を最大限発揮できるような技術を開発することが重要になる。

#### 1) 地球温暖化と家畜の生理・生産機能

気候変動に関する政府間パネル(IPCC)では過去100年間で0.74℃の気温上昇が起こり、今後100年でさらに1.1～6.4℃上昇することを報告した(2007年)。このような地球規模の温暖化は、畜産業を含めた農林水産業に多大な影響を及ぼすことが予想されている。また、気候変動枠組み条約に基づいて採択された京都議定書への対応として、温室効果ガスのモニタリングと排出削減技術の開発が求められているが、家畜から発生するメタンと亜酸化窒素も温室効果ガスの一つとして発生量の低減が求められている。

メタンと亜酸化窒素の発生量は二酸化炭素に比較すると少ないが、温室効果としてメタンガスは二酸化炭素の約20倍、亜酸化窒素は約300倍と高いため、これらの低減が求められている。畜産が関係する温室効果ガスとしては、メタン（主に反芻動物のルーメン

発酵由来と糞尿由来)と亜酸化窒素(糞尿由来)があげられ、これらの発生量の推定と抑制法の開発に関する研究が進んでいる。わが国のメタン発生量に占める家畜生産の割合は約32%(反芻家畜由来24%、糞尿由来8%)、亜酸化窒素では約6%と報告されている(ただし、これらの数値は研究が進むにつれて精度が高まり、値も変動するものである)。また、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(約6-7%)を、IPCCではメタン発生量の推定に利用している。

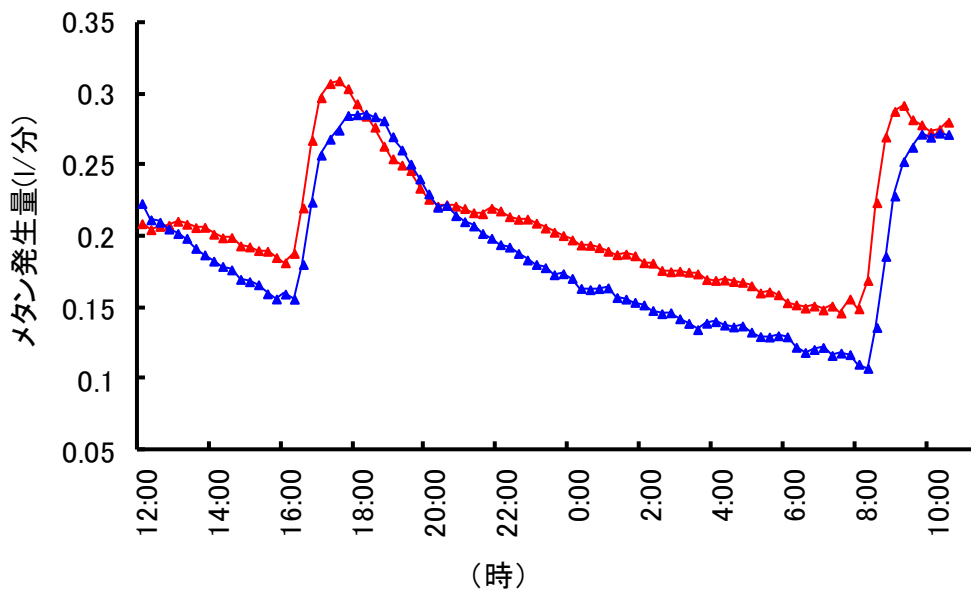


図3 グラス給与(▲)およびアルファルファ+グラス(▲)給与牛のメタン発生量(16:00と8:00に飼料給与)

牛では第一胃(ルーメン)に生息している多数の繊維分解菌が繊維をエネルギー源に変換して乳や肉生産に利用するが、その際に有毒な水素を発生する。ルーメンに生息しているメタン菌の役割は、微生物の活性を阻害する水素をメタンに変換することであり、メタン菌がいないと反芻動物は生存することが厳しくなる。したがって、ヒトの利用できない繊維を栄養源にする反芻動物にとってメタン菌は生存のために必須な微生物といえるが、逆にメタン低減のためにはメタン菌を減らすことによる効果大きい。牛のメタン発生量は300~600l/日と幅が大きいが、イネ科牧草を給与するとメタン発生量が増加するものの、アルファルファを加えるとメタン発生量が減少している(図3)。現在、メタン発生量は脂肪酸カルシウム、イオノフォアなどの投与で低減も可能であるが、もっとも効果の高い方法は乳牛や肉牛の生産性を向上することである。

## 2) 暑熱ストレスと家畜の生理・生産機能

動物のホメオスタシスのなかで、恒温を保つことはもっとも重要な機能の一つである。家畜が摂取したエネルギーと体内に蓄積されたエネルギーは、生命の維持や生産に利用される。しかし、能力の高い家畜は、気温、湿度、風力など、外部からの環境要因による影響を受けやすく、これらは家畜に対して環境ストレスとなる。なかでも、わが国では夏季の暑熱ストレスによる影響が大きく、地球温暖化に伴って気温が上昇すると家畜生産に及ぼす悪影響は莫大なものになると予想されている。家畜はメタンの発生などにより地球温

暖化の一因になることを前述したが、皮肉なことに家畜の生産性低下に家畜自体も影響していることになる。

動物は環境温度が低くなると熱発生量を増加し、また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機構が働く。動物体内では栄養素の酸化（燃焼）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・卵生産、胎児の成長など）が活発になると熱発生量は増加する。

家畜の熱平衡は熱生産と熱放散のバランスで決まるが、家畜の熱平衡が乱れる原因の多くは暑熱ストレスによるものである。高温環境下では、家畜は放射・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になる。潜熱放散の一つに発汗があり、皮膚表面から1gの水が蒸発するときに約0.58kcalの熱が失われる。しかし、ヒトに比較すると動物の発汗機能は劣っていて、家畜のなかではウマ、ウシ、ヒツジ、ブタの順に発汗機能が低い。そのため、高温環境下では家畜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ことになる。家畜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、熱平衡を維持できなくなり、体温が上昇する。

家畜の適温域と生産限界温度は、家畜の生理状態などによって異なっているが、能力の高い家畜では高温側の生産限界温度が低くなっている。例えば、高泌乳牛では気温が20℃を超えると乳生産の減少がみられるが、これは乳生産の増加に伴って熱発生量の増加したことが主な原因である。また、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家畜の生産性低下に拍車をかけている。

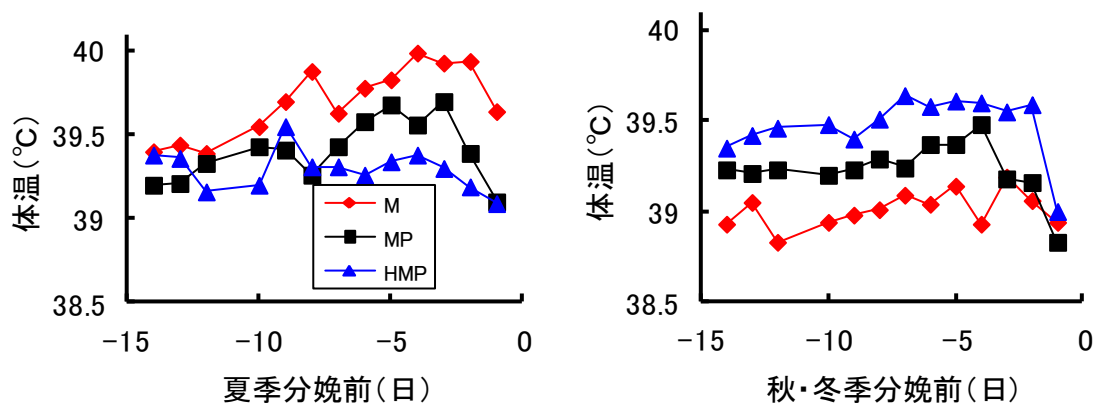


図4 夏季および秋・冬季分娩牛の15:30の体温の変動  
(分娩前の乾物摂取量, M区:6.0kg, MP区:8.5kg, HMP区:10.3kg)

家畜の防暑管理の基本は体温上昇の抑制にあるが、その一例として図4には分娩前の乳牛の体温の変化を示した。冷涼な秋・冬季分娩牛では栄養摂取量の増加とともに熱発生量が増加するため、体温が上昇している。一方、暑熱ストレスの影響をうける夏季分娩牛では全体として体温は上昇しているが、逆に栄養摂取量の少ないM区の体温がもっとも高くなった。この結果は、栄養不足により体脂肪を体内で熱エネルギーに変換して利用しているものの、過剰に発生した熱を効率よく放散できなかったことが影響している。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2、3日前に



は体温は危険域の 40℃にも達していたが、このようなことは農家でもよくみられ、夏季に熱中症などで致死となる事例も多い。

環境温度の上昇に適応する過程は、神経性調節、内分泌性調節、形態的調節の順であり、体温調節中枢は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温度情報を受け取ると汗腺や呼吸器系に指示し、熱放散機構が活発化する。また、内分泌機構では生産と関係する成長ホルモンや副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生じるが、これらは代謝過程において発生する熱産生を抑制する反応であり、乳生産などを減少する方向に働く。したがって、地球温暖化に伴う気温の上昇に対しては、家畜のホメオスタシスを維持しながら生産性の低下を防ぐことが大きな課題として残されている。

### 3) 環境汚染と家畜の生体機能

地球温暖化は世界的な環境問題であるが、地域的な環境問題としては環境汚染があげられる。このなかには、家畜自身が原因となる家畜糞尿による環境汚染やダイオキシン、トリハロメタン、農薬などの有毒物質の摂取による家畜並びに畜産物への環境汚染などが含まれる。消費者の安全性に対する関心の高まりとともに、これらの問題も避けて通れない研究課題であり、家畜の生体機能に及ぼす影響を解明することが必要になっている。

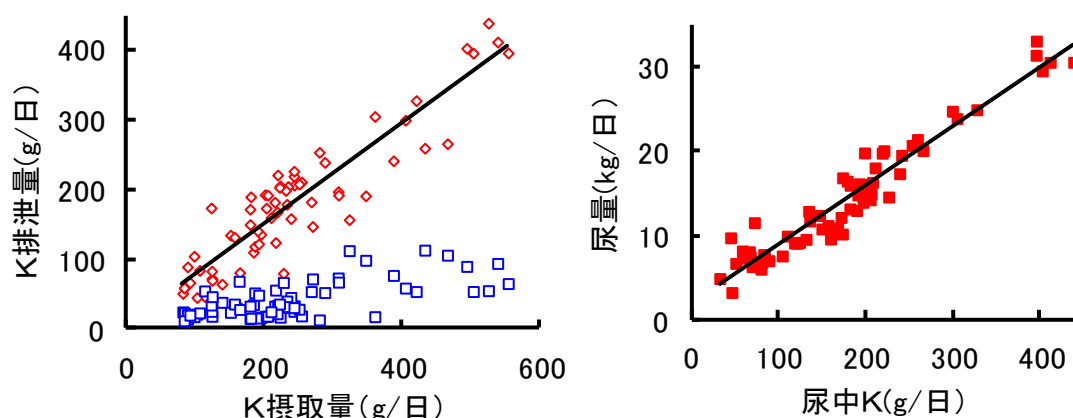


図5 乳牛のカリウム (K) 摂取量と糞 (□) および尿 (○) 中K排泄量と尿中K排泄量と尿量の関係

わが国では「家畜排せつ物法」が制定され、家畜糞尿の管理は厳しくなっているが、平成16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たため、さらに厳密化されている。しかし、糞尿中への低減が求められている窒素、リン、カリウム、銅、亜鉛などの成分は、農家で過剰給与している事例も多いため、まだ低減化には達していない。これらの成分を過剰給与すると、家畜の生体機能にもさまざまな悪影響を及ぼす。図5には乳牛のカリウム摂取量とカリウム排泄量の関係を示したが、カリウム摂取量が増加すると尿中へのカリウム排泄量が増加し、それとともに尿量も増加した。尿は腎臓で生成するが、大量の尿を長期間にわたって生成することは腎機能に過大の負荷を及ぼし、腎障害の発生が懸念される。実際に、カリウムの過剰摂取は乳熱などの疾病発生要因になること、あるいは窒素過剰給与は肝機能への負担が大きいことなどから、栄養素と家畜の肝機能、腎機能などとの関係解明が今後重要といえる。

#### 4) 植物成分と家畜の生理・免疫機能

牧草中にはクメステロールなどの植物エストロゲン、 $\beta$ -カロテンなどのカロテノイドなど、さまざまな有益成分が含有されているため、家畜の生理機能や免疫機能を高めるためにこれらの成分を活用することが求められている。

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  $17\beta$ -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。分娩直前の動物は血中エストロゲンが急激に上昇するが、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、妊娠マウスでは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、カルシウム代謝を阻害することが認められた (図6)。

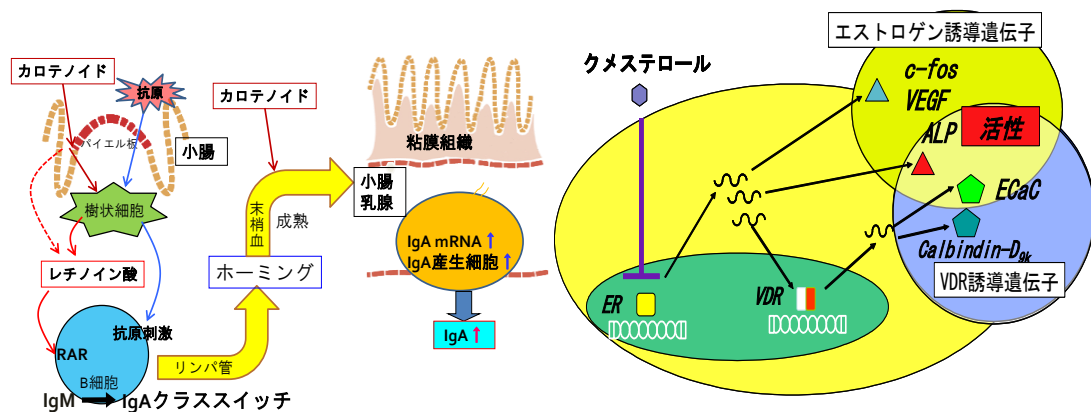


図6 カロテノイド給与で期待される IgA 産生効果 (左図;Nishiyama ら、2011) およびクメステロールと核内受容体の関係 (右図;Kirihata ら、2011)

新生子牛の下痢発生にはさまざまな要因が関与しているが、免疫グロブリン A (IgA) は子牛の小腸粘膜を保護し、病原菌の体内への侵入を防ぐことで新生子牛の下痢を予防している。特に、出生直後の新生子牛は腸管で IgA を産生すること (能動免疫) ができないため、能動免疫が十分なレベルに達するまでは母乳から IgA を得ること (受動免疫) で下痢を予防している。しかし、受動免疫から能動免疫への移行期には新生子牛の免疫能が低下しやすく、下痢などの疾病発生のリスクが高まる。したがって、新生子牛の下痢予防では母乳から移行する IgA 量を増やし、受動免疫を高水準に保つとともに、新生子牛による IgA の産生を促進し、新生子牛の能動免疫を早期に高めることが重要である。 $\beta$ -カロテンなどのカロテノイドによる免疫賦活効果にはレチノイン酸を介した効果と抗酸化作用による効果が報告されているが、泌乳マウスに  $\beta$ -カロテンを投与したところ、乳腺の IgA 産生細胞数の増加と初乳を介した IgA の増加が認められた (図6)。

#### 4. 家畜福祉と家畜の生体機能

育種改良の進展、受精卵移植や体細胞クローンなどの新技術開発によって家畜の急激な

生産性向上が進み、現在では畜産物の効率的な生産が可能になっている。家畜の生体機能も遺伝的改良や新技術開発によって大きく変わったが、家畜の生理・生産機能に関する研究も基礎的な研究成果だけでなく、畜産業の発展にも多大な貢献をしている。しかし、食料危機が高まるなかでは、効率的な生産と畜産物の安定供給を求めて、能力の高い家畜の生理・生産機能の解明については今まで以上の研究成果が必要になっている。

それに対して、生産効率を中心に進めてきた従来の家畜生産について、安全・安心の観点から疑問の声もだされている。特に、BSE、口蹄疫、鳥インフルエンザなどの発生により、安全・安心につながりやすい資源循環型畜産や有機畜産などへの消費者の関心が高まっている。家畜の健康と福祉に配慮したアニマルウェルフェア（家畜福祉）もその流れのなかにあるが、家畜福祉の盛んなEUでは採卵鶏のケージ飼いや雌豚の繋ぎ飼い・ストール飼いなどが禁止される方向にある。また有機畜産もEUを中心にして注目されているが、その基本になるのは食の安全、家畜福祉、環境保全である。しかし、資源循環型畜産や有機畜産では放牧がキーワードの一つになるが、食の安全、家畜福祉、環境保全のどれをとっても放牧が舎飼いより優れているかは、まだわかっていない（図7）。家畜福祉の観点にたてば、健康・福祉に重点をおいた家畜の生体機能の研究が必要になる。



図7 舎飼農家と放牧農家の乳牛の行動

今後、グローバル化が急速に進むなかではさまざまな観点から畜産の研究を進める必要があり、動物の生体と機能の研究についてもその例外ではありえない。能力の高い家畜では生産と健康は相反する生理機能を必要とするかもしれないが、21世紀の重要問題である環境汚染や食料危機の解決には生産と健康の調和を図ることがもっとも重要と考えられる。

(久米新一)

【参考図書】

久米新一：スーパーカウとそれを取りまく環境—牛乳生産の未来、「家畜生産の新たな挑戦（今井 裕編）」、京都大学学術出版会、京都、2007。