帯広畜産大学　畜産フィールド科学センター　川島　千帆

β-カロテンと繁殖との関係

はじめに

おそらくほとんどの方は「β-カロテン」を耳にしたことがあると思います。しかし、そのβ-カロテンの役割は？作用は？と問われると良くわからない方が多いのではないかと思います。本稿では、馴染みがありそうでよくわからない「β-カロテン」について、乳牛にとっての役割、特に繁殖機能への作用を中心にご紹介します。

１．β-カロテンとは？

β-カロテンはカロテノイドと呼ばれる色素の１つで、β-カロテン・ジオキシゲナーゼという酵素の働きによって、ビタミンA（レチナール）に変換されます。このようにビタミンAの前駆物質であることから、プロビタミンAと呼ばれることもあります。その役割の多くはビタミンAと同様で、粘膜保護作用、免疫機能向上、抗酸化作用などがあります。しかし、作用は似ていてもβ-カロテンは植物由来の物質、ビタミンAは動物由来の物質ですから、牛のような草食動物にとっては、ビタミンAではなく、β-カロテンを粗飼料から摂取する方がより自然であるといえます。

一般的にβ-カロテンは、ニンジンやほうれん草、カボチャなどの緑黄色野菜に多く含まれていることが有名ですが、牛の餌となる牧草にも多く含まれています。日本標準飼料成分表（2001）では、生草の場合、乾物１kg中にイネ科牧草（チモシー）には210mg、マメ科牧草のアカクローバには270mg、アルファルファには330mg含まれていると記されています（**図１**）。また、牧草の部位でもβ-カロテン含量は異なります。出穂期のチモシーでは、全体で乾物１kg中に92mg、茎部で38mg、葉鞘部で85mg、葉身部で272mgと、葉の柔らかい部分に多く含まれ、硬い茎には少ないのが特徴です（**図２**）。そして、β-カロテンは光に弱く、これらの牧草が

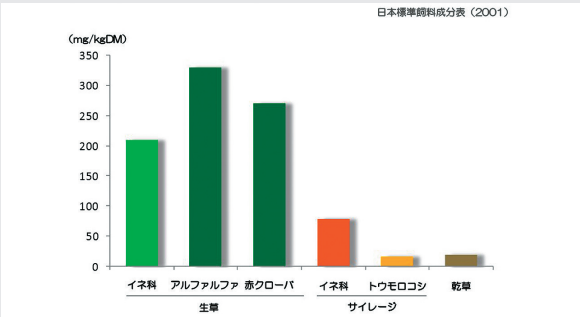

図１　粗飼料中のカロテン濃度

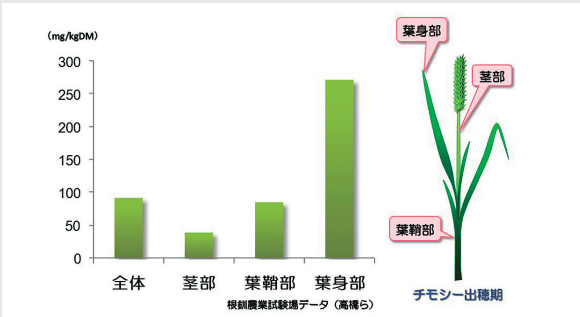

図２　牧草中の部位別β-カロテン濃度

第62巻第４号（通巻658号）

牧草と園芸/平成26年(2014) ７月　夏季号　目次

□ホライズン……表２
□β-カロテンと繁殖との関係 ……[川島　千帆]…１
□「東北向け　雪印種苗育成牧草優良品種のご紹介」=チモシー極早生新品種「ユウセイ」が青森県で奨励品種に認定=…[谷津　英樹]…６
□<府県向>雪印種苗育成イタリアンライグラスと飼料用ムギ類のお勧め品種と上手な使い方…[近藤　聡]…10
□東北地方における簡易更新の事例紹介……[龍前　直紀]…17
□生稲わらサイレージの調製方法……[髙平　寧子]…22
□トウモロコシサイレージにおける乳酸菌の役割と二次発酵抑制資材のご紹介…[北村　亨]…26
□水田裏作緑肥：ヘアリーベッチ導入の効果と栽培ポイント ……30
□〈府県向き〉秋播き牧草・ムギ類品種特性一覧表……32
□府県向き　イタリアンライグラス／ムギ類……表３
□サイレージ二次発酵抑制商品：サイロ３兄弟シリーズ……表４

極早生エンバク韋駄天
ますます好評

サイレージ調製のために予乾されると、乾物１kg中に79mgと一気に減少し、乾草になるとさらに低下し20mg程度になります。したがって、β-カロテン含量の高い牧草サイレージや乾草を調製しようとすると、穂孕期に刈るのが一番と考えられますが、それでは収量の確保が難しくなるため、生草以外の粗飼料で十分なβ-カロテンを摂取するのは難しいといえます。一方、飼料用トウモロコシは、もともとβ-カロテン含量が低く、トウモロコシサイレージには乾物１kg中に16mg程度しか含まれません。そうなると濃厚飼料中にほとんど含まれていないことは、想像に難くないと思います。

２．乳牛にとってのβ-カロテン

牛にとって、β-カロテンはビタミンAの前駆物質としてだけでなく、β-カロテンだからこその特別な役割を持っています。

その１つは「β-カロテンの吸収」にあります（**図３**）。摂取したβ-カロテンは小腸から吸収されますが、過剰な分は糞へと排泄されます。小腸で吸収されたβ-カロテンの一部は、小腸の上皮細胞で酵素の作用により、１mgのβ-カロテンから400IUのビタミンAに変換されます。簡単に言うと、１つのβ-カロテンから２つのビタミンAが作られるということになります。この時、ビタミンAに変換されなかった残りのβ-カロテンは、β-カロテンのまま吸収されます。このようにβ-カロテンのまま吸収できるということが、特別なことなのです。ちなみに同じ反芻家畜であるヤギやヒツジは、他のカロテノイドは吸収できますが、β-カロテンはそのまま吸収できないといわれています。つまり、牛にとってのβ-カロテンの作用や給与効果は、他の反芻動物を用いて検証することは出来ず、他の動物で効果があったとしても、牛で同じことが期待できるかどうかはわからないということになります。

特別な役割の２つ目は「β-カロテンの体内蓄積と輸送」です。そのままの形で吸収されたβ-カロテンは、余った分を体内に蓄積できます。主な蓄積場所は、肝臓、脂肪、血液、黄体といわれています。そして、必要な時に必要な器官に運ばれ、そこでビタミンAとなって働きます（**図３**）。この体内に蓄積されたβ-カロテンの輸送は、脂質と蛋白質の結合したリポタンパクが行います。そして牛において、体内で主にβ-カロテンを含むカロテノイドを運ぶのは「高密度リポタンパク（HDL）」です。一方、他の動物種は「低密度リポタンパク（LDL）」でカロテノイドを運びます。なぜ、牛と他の動物で、β-カロテンを輸送するリポタンパクが異なるのでしょうか？それは、他の動物種より牛のHDLにはサイズの大きいものが存在するためです。そして、このHDLはリポタンパクの８割以上を占めています。従って、牛は体内でβ-カロテンを運びやすく、利用しやすい動物であるといえます。

３．高泌乳牛が抱える問題

ここまで、牛にとってβ-カロテンが特別な役割を持つ理由について述べてきましたが、牛本来の餌である牧草（特に生草）を十分に採食できる環境にあれば、牛は必要なβ-カロテンを餌から摂取できます。しかし、高泌乳化により飼養管理が変わったことで、現在の乳牛のβ-カロテン不足が懸念されます。

過去数十年の間、乳牛１頭当たりの乳量は育種改良や飼養管理技術の発展に伴い、飛躍的に増加し、北海道では1975年に5,900kgだった305日乳量は、2012年には9,200kgとなり、3,000kg以上も増えています。当然ながら、乳牛の体も次第に大きくなっていますが、増えた乳量を賄えるほどの餌を摂取できる体格にはなっていません。これに加えて、乳量のピークが分娩後４～５週目であることに対し、採食量は分娩後10週目頃にならないと最大に到達しないため、乳量と採食量の釣り合いが取れない期間出てきます。したがって、この高い乳量に見合うエネル

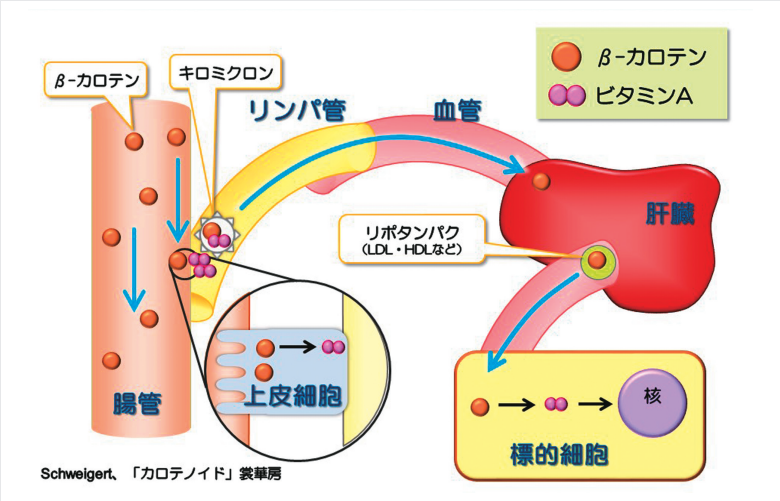

図３　β-カロテンの体内への輸送

ギーを餌で賄うとなると、給与飼料中の濃厚飼料の割合は必然的に増えていき、現在の北海道における濃厚飼料給与量は、1975年の2.5倍にもなっています。それでも多くの高泌乳牛は、分娩後の乳生産に必要なエネルギーに対して、餌から摂取したエネルギーが不足する負のエネルギーバランスに陥っています。そして、この負のエネルギーバランスが過度になると、疾病の発生や繁殖成績の低下につながるといわれています。そのため、エネルギー重視の飼養管理が主流となるのは必然的であると言えます。しかしながら、前述したように高エネルギーの濃厚飼料やトウモロコシサイレージにはあまりβ-カロテンが含まれていません。そのため、β-カロテン不足が引き起こす問題も出てくると考えられます。

4．乳牛の繁殖とβ-カロテン

牛において、ビタミンAは発情や排卵に必要なホルモンであるエストラジオールや、妊娠維持に必要なホルモンであるプロジェステロン産生を促進させる役割があります。しかし、ビタミンAは体内で運ばれる時にタンパクと結合しており、細胞内には取り込めないといわれています。一方、β-カロテンを輸送するHDLは細胞内に入ることができます（**図4**）。そのため、これらのホルモン分泌は細胞内に輸送されたβ-カロテンが担っているといえます。また、前述したように黄体はβ-カロテンの主要な蓄積器官の一つでもあります。そのため、β-カロテンの卵巣機能への役割は大きいと考えられます。

しかし、β-カロテン給与で血液中のプロジェステロン濃度の増加や受胎率が向上したという研究報告もあれば、β-カロテンを給与しても繁殖成績を改善できなかったという研究報告もあります。このように効果が明確ではない理由として、まずβ-カロテンに関する多くの研究が、20～30年前に行われており、乳牛の遺伝的能力も飼養管理方法も現在とは異なる部分が多いことが挙げられます。そして、古い研究報告には給与飼料に関する記載が不十分、またはないものが多くあります。そのため、研究対象の牛がβ-カロテン不足による問題を抱えていたのかはわからず、中にはエネルギー充足などの他の要因が問題となっていたケースもあったのではないかと推察されます。そうなると、情報が明確な近年の研究を参考にすれば良いということになりますが、β-カロテンの研究自体少ないのが現状です。そこで、「現在の乳牛にβ-カロテンは効果があるのか？」について、筆者がこれまでに調査した結果をご紹介します。

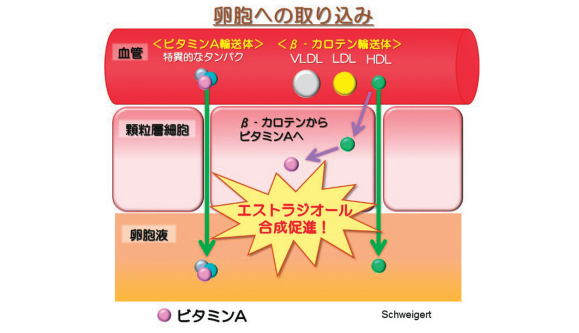

図4　HDLで輸送されたβ-カロテンは細胞内へ取り込み可！

5．分娩後の卵巣機能回復とβ-カロテン

妊娠末期の乳牛は、胎子の成長や餌・飼育環境の変化から、病気でなくとも採食量が低下するため、それに伴うβ-カロテン不足が懸念されます。そこで、分娩後の早期受胎につながる初回排卵が早い牛、つまり卵巣機能回復が早い牛と遅い牛で、分娩前後の血液中のβ-カロテン濃度を測定しました。この調査は冬に行い、牛にはトウモロコシサイレージと牧草サイレージ主体の餌が給与されていました。その結果、分娩前3週間の血中β-カロテン濃度は、卵巣機能回復が遅い牛の方が早い牛よりも低く推移していました（**図5**）。一方、分娩後では卵巣機能回復の早さによる血中濃度の違いはありませんでした（**図5**）。今回の調査では、卵巣機能回復の早さは、季節による偏りがありませんでした。そのため、同じ飼育管理下で血中β-カロテン濃度が異なった理由として、卵巣機能回復が遅かった牛では、①採食量が少なかったこと、②体内でのβ-カロテン消費が多かったことが考えられます。しかし、この調査結果だけではその理由は分かりません。唯一、確実に言えることは、「分娩前にβ-カロテン濃度が低かった牛は卵巣機能回復が遅れた」ということだけです。

そこで次に、分娩前の3週間、β-カロテンを給与しました。この試験は夏に行いましたが、放牧はせず、分娩予定1カ月前から、トウモロコシサイレージと牧草サイレージ主体の餌を給与しました。そして、給与するβ-カロテン量を1日2,000mgとしました。この給与量は、乾乳牛が放牧草を飽食した場合に摂取すると想定されるβ-カロテン量であり、自然条件下でありえる最大量に近いものです。コストを考えると多すぎると感じる方もおられると思いますが、効果の有無を明確にするため、このよ

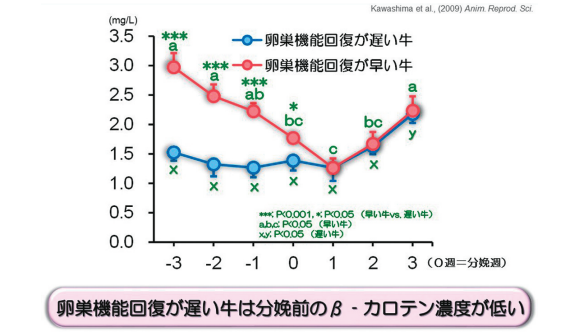

図５　舎飼い期（冬）の血中β-カロテン濃度の変動

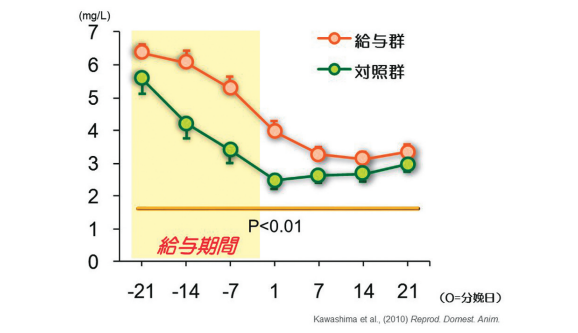

図６　β-カロテン給与による血中β-カロテン濃度

うに設定しました。その結果、**図６**に示したように給与群では、対照群に比べて、給与期間中の血中β-カロテン濃度が高くなりましたが、分娩後すぐにその差は小さくなりました。これまでの研究でも、放牧を終了すると血中濃度が著しく低下することや、１日300～500mg程度の少量のβ-カロテン給与では、血中濃度に反映されないことが確認されています。β-カロテンは体内にいくつか貯蔵場所がありますが、どこに優先的に蓄積されるのかは不明です。そのため、この血中濃度変化にどれだけの意味があるのかはわかりません。しかし、分娩後の卵巣機能回復が早い牛の割合は、β-カロテンを給与しなかった牛で28.5％（４/14頭）、給与した牛で75.0％（９/12頭）となりました。この時の血液検査結果から、β-カロテン給与の有無でエネルギー状態に違いはないと考えられ、また、乳量も同程度だったため、β-カロテンが分娩後の卵巣機能回復に効果的であるといえます。しかし、β-カロテンを給与した牛でも卵巣機能回復が遅い牛もおり、一方で、給与しなくても卵巣機能回復が早い牛がいたのも事実です。その原因を解析すると、次のようなことがわかりました。まず、β-カロテンを給与しても卵巣機能回復が遅かった要因についてです。そのような牛では、血中ビタミンＡ濃度が低かったことが示されました。試験期間中に疾病を発生していなかったため、病気ではないものの、体内のどこかでβ-カロテン（ビタミンＡ）を消費する状況だったのではないかと考えられます（**図７**）。次に、給与しなかった牛で卵巣機能回復に違いが起きた要因についてです。給与しなかった牛で卵巣機能回復が遅かった牛は、肝臓に含まれ障害が起きた時に血液中に放出される酵素であるGGT値が高く、肝機能障害であったことが考えられます(**図８**)。しかし、β-カロテンを給与した牛では、これらの牛と同程度GGT値でも卵巣機能回復が早かったため、β-カロテンは肝機能障害を持つ牛に、より効果的なのかもしれません。

６．黄体機能とβ-カロテン

β-カロテンは黄体細胞でのプロジェステロン分泌を亢進する作用が知られていますが、生産現場で血中や乳中のプロジェステロン濃度を測定することは困難です。そこで、血中プロジェステロン濃度と合わせて、黄体サイズにもβ-カロテン給与の効果は見込めるのか検証しました。この実験には、正常な発情周期を伴う非搾乳のホルスタイン種を用い、排卵から７日間のβ-カロテン給与、つまり排卵後の黄体形成時期に給与効果があるのか検討しまし

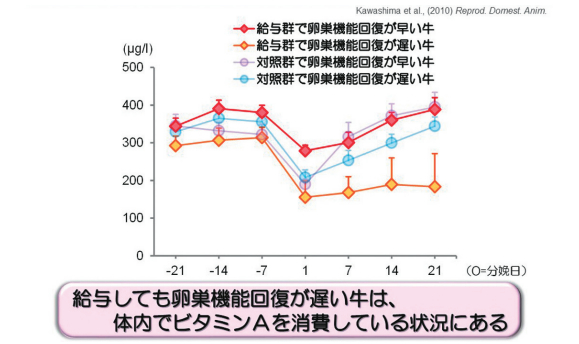

図７　β-カロテン給与の有無と卵巣機能回復の早さの違いによる血中ビタミンA濃度

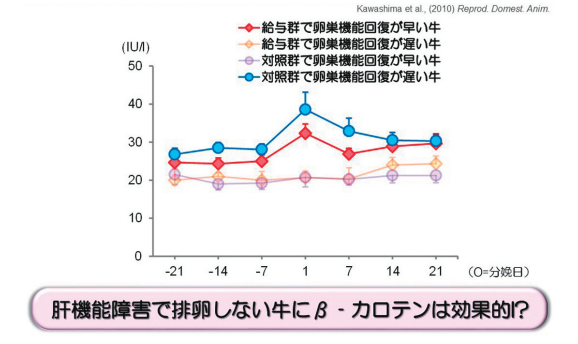

図８　β-カロテン給与の有無と卵巣機能回復の早さの違いによる血中GGT値

た。給与量は１日2,000mgまたは300mg、無給与（対照区）としました。その結果、給与量に関わらず、排卵後７日目の黄体サイズが大きくなりました（**図９**）。また有意差はないものの、黄体が機能している指標といえる１ng/ml以上の血中プロジェステロン濃度に到達した日は、2,000mgと300mgのβ-カロテンを給与した牛の方が、対照区よりも１日早くなりました（**図９**）。この違いは数字としては小さいかもしれませんが、排卵後の血中プロジェステロン濃度の増加の早さが、受胎と関連するという研究報告もあります。そして、黄体サイズも明らかに大きくなっていたことから、人工授精だけでなく、受精卵移植にも活用できる方法ではないかと期待されます。

	2000mg区	300mg区	対照区
D7の血中β-カロテン濃度 (mg/dl)	5.6[a]	4.9[b]	4.9[b]
D7黄体直径(mm)	23.1[a]	24.9[a]	17.1[b]
機能的黄体形成日※	5.3	5.0	6.7

a,b：P<0.05
※血中プロジェステロン濃度が1ng/ml以上になった日

図９　β-カロテン給与による黄体への影響

７．受胎とβ-カロテン

黄体機能とβ-カロテンの関係を調査した研究結果から、受胎への効果が期待されたため、その検証を行いました。給与量は、黄体サイズに効果があり、現実的に生産現場で利用できる300mgに設定しました。そして給与群10頭に対し、分娩後の初回授精翌日の排卵確認から７日間、β-カロテンを毎日給与し、他の10頭は無給与の対照群としました。その結果、給与群では血中プロジェステロン濃度や黄体サイズの増加が若干促進されました。前述の黄体機能への調査のような明確な違いがみられなかったのは、泌乳の影響かもしれません。それでも、授精後25日目の発情回帰は給与群が２/10頭、対照群は５/10頭となり、給与群の方が多く胚認識、つまり受胎への最初の過程が上手くいったことが考えられます。しかし、授精後60日目の妊娠鑑定結果による受胎は、給与群では５/10頭、対照群では４/10頭となり、有意な差はありませんでした。この理由として、実験頭数が不十分であることはもちろんですが、給与量が少ないこと、給与期間が短いこと、そして、そもそもβ-カロテンは受胎に効果がないということが考えられます。これまでの研究結果から、乳牛に推奨されている給与量は１日当たり300～500mgですが、飼料の種類によってトータルのβ-カロテン摂取量が変動するので、本当に適正な量はどのくらいなのか、その給与期間も含めて、給与飼料毎に設定する必要があるといえます。そして受胎効果に関しては、これまでの他の研究においても、まだ不明な点が多いのですが、給与期間が長い研究では効果が出ている場合が多くみられます。少し安易かもしれませんが、生産現場で受胎率が10%違うことは、とても大きな差であると筆者は感じており、この効果に期待しながら、今後も実験を継続していきたいと考えています。

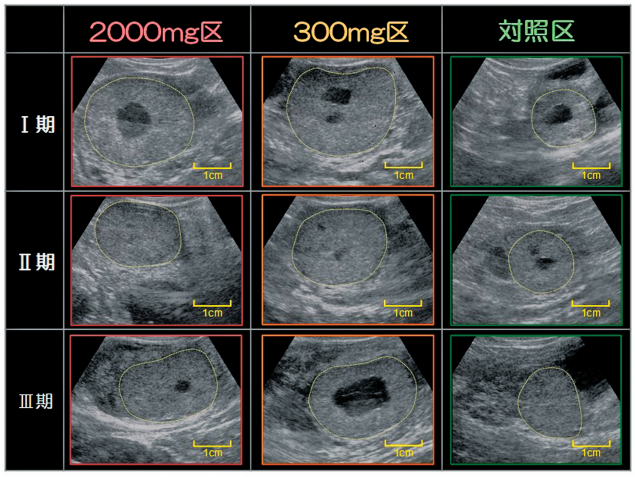

図10　エコーで観察した黄体

おわりに

β-カロテンは20～30年前、特にヨーロッパで多く研究されてきたことから、一時的なブームがあったと推察されます。しかし、そこから現在まで継続利用されていません。このように一時的に流行り、その後着目されなくなったものはβ-カロテン以外にもあります。そして、その理由の多くは、本当に必要な牛だけでなく、必要ない牛にも与えており、効果が薄れ、実感できなかったためだと思われます。そのような事にならないように本稿が少しでもお役に立てたら幸いです。最後に本稿で紹介した研究の遂行にあたり、多大なるご支援を頂きました関係者の皆様に深く感謝申し上げます。