

## 5 章 動物の栄養

動物の体はタンパク質, 炭水化物, 脂質, ビタミンなどの有機物およびカルシウム, リンなどのミネラルから構成されている. 体成分は固定的なものではなく, 合成 (あるいは同化) と分解 (異化) からなる代謝を常に繰り返している. これを動的状態とよび, 同化と異化が平衡している場合を定常状態にあるという. 成長を終えた動物の筋肉や骨の量は変化しないが, やはり動的状態にあり, 絶えず繰り返される同じ速度の同化と異化によって定常状態が保たれている. 動的な定常状態を保つため動物は, 飼料摂取により常に外界から様々な物質を栄養素として取り込み, 不要なものを糞, 尿あるいは呼気として体外に排出しながら体成分や生命維持に必要なエネルギーを体内で生産するとともに, 肉, 乳, 卵などを生産する活動を営んでいる. 動物栄養学とは, 飼料の中の成分である栄養素がどのように利用され, 機能しているかを研究する学問である.

### 5.1 栄養素

栄養素は体の総ての基本的な機能, すなわち 1) 体の構成成分として働く, 2) 代謝の化学反応に加わり, または促進する, 3) 物質の体内への取り込み, 体内輸送, 排泄を行う, 4) 体温を維持する, 5) エネルギーを供給する, などに必須である.

基本的な栄養素にはどのような物質があるかは, 1950 年代にほぼ解明された. 栄養素は, タンパク質, 炭水化物, 脂質, ミネラル, ビタミンの 5 種に大別され, これらを五大栄養素とよんできた. これに水を加えて六大栄養素ということもある.

エネルギー源として重要な炭水化物や脂質以外に, 少なくとも約 40 種の栄養素が必須であると考えられている (表 3.5.1). これらの個々の栄養素摂取量が, 必要な量を満たすか超えていれば栄養学的に「十分」と見なされる. また, 必須栄養素でもその過剰摂取による中毒が問題となる場合がある. 加えて, 栄養素の代謝には相互作用があり, ある栄養素の過剰が他の栄養素の不足を生じることもある.

表 5.1 動物の必須栄養素

アミノ酸
アルギニン <sup>a</sup> , イソロイシン, トリプトファン, スレオニン, メチオニン, バリン, ヒスチジン, フェニルアラニン, リジン, ロイシン
必須脂肪酸
リノール酸, $\alpha$ -リノレン酸
ビタミン
ビタミン A, D, E, K, B <sub>1</sub> , B <sub>2</sub> , B <sub>6</sub> , B <sub>12</sub> , ビオチン, パントテン酸, 葉酸, ナイアシン, ビタミン C <sup>b</sup> , コリン <sup>a</sup>
無機元素
ナトリウム, カリウム, 塩素, イオウ, カルシウム, マグネシウム, リン, 鉄, 亜鉛, 銅, マンガン, セレン, モリブデン, クロム, ニッケル, バナジウム, ヒ素, ヨウ素, ケイ素, スズ

<sup>a</sup>一般的に成人では必須ではないとされている.

<sup>b</sup>霊長目, モルモット, 一部のコウモリなどを除き必須ではないとされている.

「要求量」は, 「ある動物集団において必要とされる栄養素の量」として定義されるが, 個体差がある. 欠乏試験や出納試験 (摂取量と糞・尿に排泄される量の差を検討する試験) によって, 栄養素の要求量を求めることができる. 半数の個体が必要な量を満たすことができる (不足しない) 値を平均推定要求量とし, この値にある安全率を乗じて, 栄養素の推奨量

が定められる。また、過剰摂取に由来する健康障害のリスクが高まらない最大摂取量は上限量または最大許容量として示される。

## 5.2 栄養素の必須性

ある成分が特異的で必須な機能を有し、体内で合成できない、または十分な量のその成分を体内で合成できない場合、疾患(欠乏症)を予防するためにはその成分を摂取することが不可欠となる。栄養素欠乏症の予防効果をもとに栄養素の必須性が定義され、飼料中の栄養素要求量が定められてきた。実際に、臨床的な疾患と特定の栄養素の欠乏との間に明確な関連がなければ、その栄養素は「必須」であると考えられてはいなかった。

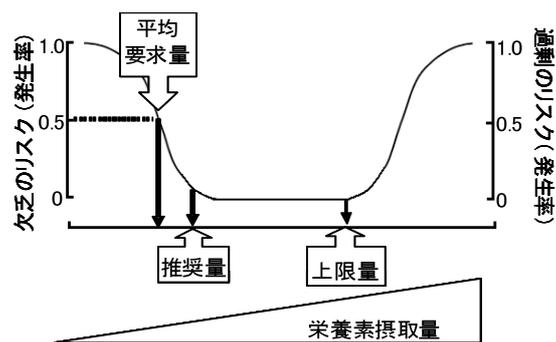


図 5.1 必須栄養素の要求量と推奨量

## 5.3 必須栄養素の動物種間差

動物栄養学では様々な動物種、草食性の前胃発酵動物であるウシやヒツジ、ヤギなどの反芻動物、草食性の後腸発酵動物であるウマやウサギ、雑食性の動物であるブタ、ニワトリやイヌ、肉食性動物であるネコやフェレットなどが対象になる。動物種間でその食性の相違により、消化機構や代謝機構が大きく異なるため、必須栄養素やその要求量も異なってくる。特に反芻動物では、摂取した飼料が栄養素の消化前に、反芻胃内で発酵されるため、栄養素の必須性や必要量は他の動物種と大きく異なっている。

### 1) タンパク質

多くの動物では、摂取した飼料に含まれるタンパク質は消化され、アミノ酸や小さなペプチドとして吸収され、利用される。反芻動物のような前胃発酵動物では、摂取した飼料中タンパク質は前胃(反芻胃内)で微生物発酵を受け、アミノ酸、次いでアンモニアに代謝され、さらにアンモニアは微生物によるアミノ酸合成に用いられ、微生物態タンパク質に再構成される。前胃発酵動物はこの微生物態タンパク質を消化・吸収し、タンパク質源として利用しているので、多くの場合、他種の動物では必須となるようなアミノ酸を摂取する必要はない。また、他種の動物ではタンパク質源として利用できない核酸や尿素などの非タンパク態窒素も反芻胃における発酵により微生物態タンパク質となるので、反芻動物ではタンパク質源として利用される。一般的には、体内でアミノ酸が代謝されると、アミノ酸を構成していた窒素は尿素として排泄される。しかし、反芻動物では、体内で産生された尿素は唾液などを介して反芻胃内に入り、微生物態タンパク質としてリサイクルされる。したがって、反芻動物における飼料中の必須アミノ酸の種類

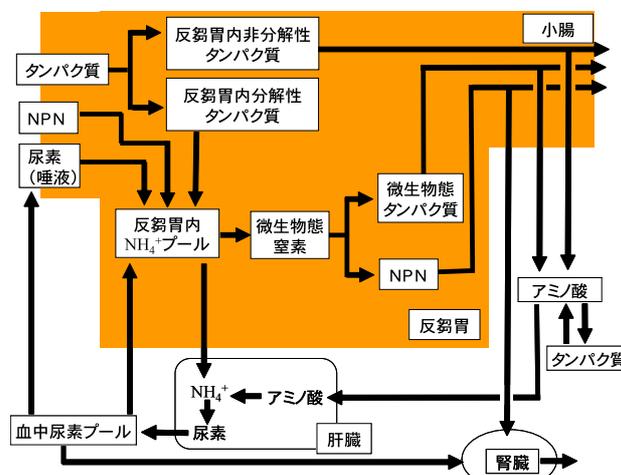


図 5.2 反芻動物のタンパク質代謝  
(NPN, 非タンパク態窒素)

は必須となるようなアミノ酸を摂取する必要はない。また、他種の動物ではタンパク質源として利用できない核酸や尿素などの非タンパク態窒素も反芻胃における発酵により微生物態タンパク質となるので、反芻動物ではタンパク質源として利用される。一般的には、体内でアミノ酸が代謝されると、アミノ酸を構成していた窒素は尿素として排泄される。しかし、反芻動物では、体内で産生された尿素は唾液などを介して反芻胃内に入り、微生物態タンパク質としてリサイクルされる。したがって、反芻動物における飼料中の必須アミノ酸の種類

やタンパク質の要求量は他種の動物と大きく異なっている。

肉食性であるネコは、アミノ酸(特にセリン)からグルコースを合成するので、タンパク質の要求量が高い。哺乳動物は小腸でグルタミン酸から尿素回路の構成物質であるシトルリンを合成できるが、ネコはこの能力が低い。アルギニンも尿素回路の構成物質である。ネコでは小腸から供給されるシトルリンが少ないので、アルギニンの要求量が高い。アルギニンを含まない飼料を成猫に1回与えただけで、アンモニア中毒となり、嘔吐・痙攣・呼吸障害を生じて死に至ることもある。

## 2) 炭水化物

炭水化物には、動物の有する酵素による消化後に単糖として吸収されるいわゆる「糖質」と繊維(食物繊維)がある。糖質は多くの動物において重要なエネルギー源であり、様々な物質の前駆物質ともなる。しかし、完全な肉食動物であるネコでは、糖質は必須栄養素ではない。ネコでは主なエネルギー源は脂肪とタンパク質であり、アミノ酸から合成されるグルコースが様々な物質の前駆体として利用される。

繊維は、反芻動物では反芻胃、後腸発酵動物では大腸で微生物発酵の基質となり、その発酵産物である短鎖脂肪酸(酢酸、プロピオン酸、酪酸など)は吸収され、エネルギー源となる。雑食動物の大腸でも同様に発酵産物である短鎖脂肪酸が吸収されるが、その量はわずかである。

## 3) 脂質

脂質はエネルギー源として用いられる。エネルギー源としては糖質やタンパク質も用いられし、細胞膜などを構成する多くの脂肪酸も糖質やタンパク質から合成できる。これらの点から脂質は必須栄養素ではない。しかし、動物は、多価不飽和脂肪酸(分子内に複数の二重結合を有する脂肪酸)であるリノール酸や $\alpha$ -リノレン酸を合成できない。これらは体内で鎖長が伸びると共にさらに二重結合が付加されて生理活性物質の前駆体となるため、必須脂肪酸とされている。かつてこれらの必須脂肪酸はビタミンFと呼ばれていた。リノール酸はアラキドン酸を介してプロスタグランジン  $E_2$  などの生理活性物質になる。 $\alpha$ -リノレン酸はエイコサペンタエン酸(EPA)を介してプロスタグランジン  $E_4$  などの生理活性物質になる。EPAは神経機能に重要なドコサヘキサエン酸(DHA)になる。アラキドン酸、EPA、DHAの合成能が低い場合は、リノール酸や $\alpha$ -リノレン酸ではなく、アラキドン酸、EPA、DHA自体の摂取が必要となる。ネコはリノール酸からアラキドン酸を合成する能力が低いので、妊娠期や成長期にはアラキドン酸摂取が必要となる。また、イヌやネコではEPAからのDHA合成能が低いので、DHA自体も妊娠期や成長期には不足する可能性がある。多くの魚類、特に海産の魚類は $\alpha$ -リノレン酸からEPAやDHAを合成する能力が低いため、これらを摂取する必要がある。リノール酸からアラキドン酸への代謝と $\alpha$ -リノレン酸からEPAやDHAへの代謝には同じ酵素が用いられる。そのため、リノール酸が過剰の場合は、EPAやDHAの合成能が低下するのでこれらを摂取する必要がある。

## 4) ビタミン

反芻動物では、反芻胃内微生物が多量のビタミンK、ビタミン  $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_6$ 、 $B_{12}$ 、ビオチン、パントテン酸、葉酸、ナイアシン、コリンを合成しており、これらが吸収されるので、一般的には摂取する必要はない。

肉食性のネコや雑食性であるが肉食性の強いイヌでは、一部のビタミンの要求性が他の動物と異なる場合がある。一般的に、飼料中に含まれる $\beta$ -カロテンは体内でビタミンA

に変換されるが、ネコは変換に必要な酵素を持っていないので、ビタミンA自体を摂取しなければならない。

ビタミンDには植物由来のビタミンD<sub>2</sub>と動物が合成するビタミンD<sub>3</sub>がある。動物は皮膚に照射される紫外線によってビタミンD<sub>3</sub>を合成している。しかし、イヌやネコでは他の動物種と比較して皮膚におけるビタミンD<sub>3</sub>合成量が少ないので、ビタミンD要求量は多くなる。一般的に、ビタミンD<sub>2</sub>とビタミンD<sub>3</sub>の作用は同程度であるが、ニワトリではビタミンD<sub>2</sub>は体内で速やかに代謝されてしまうので、ニワトリの飼料にはビタミンD<sub>3</sub>を摂取する必要がある。新世界猿類は、ビタミンD要求量が高く、人工照明下では他の霊長類よりもクル病を発症しやすくなる。新世界猿類では遺伝子上のビタミンD反応領域に結合するタンパク質が過剰に発現しており、その結果ビタミンD受容体の作用が抑制されるためである。ヒトにおいても、皮膚におけるビタミンD<sub>3</sub>合成は重要なビタミンDの給源であるが、白色人種のビタミンD<sub>3</sub>合成量は有色人種よりも高いとされている。カルシウム摂取が低い場合には、白色人種より黒色人種の方が効率的にカルシウムを吸収できる。この一因としてビタミンD受容体遺伝子の多型が示唆されている。このように、同一動物種内でも、遺伝子の多様性によって栄養素の要求量に差が生じる。

一般的に、ナイアシンの一部は動物体内でトリプトファンから合成されている。ネコやアヒルではナイアシンの合成量が少ないので、その要求量は高い。また、ネコではメチオニンやシステインからのタウリン合成能が低いため、タウリンの不足が生じやすく、タウリンを摂取する必要がある。タウリンはネコにおけるビタミンであると言える。

myo-イノシトールは健康な哺乳動物では必須栄養素ではないが、多くの魚類ではビタミンである。

ビタミンCは多くの動物では体内で十分な量が合成されているので必須栄養素ではないが、ヒトを含む霊長類、モルモット、果物食性コウモリ、魚類では合成されないので、必須栄養素となる。ビタミンCは作用をその酸化還元に依存しており、特に抗酸化物質として重要である。古生代石炭紀には水棲の魚類から陸上で生活できる両生類が進化し栄えた。この時代は森林の繁栄により、大気中の酸素濃度が上昇し、二酸化炭素濃度は減少した。その結果、地表に照射される紫外線量が多かったとされている。水棲動物は紫外線の影響を受けにくい

が、陸上では多量の紫外線が動物体表面に照射されるため、紫外線に起因する過酸化から体を守る必要がある。その結果、腎臓でビタミンCを合成できる両生類が陸上では栄えたと考えられている。以降、両生類から進化した爬虫類も腎臓でビタミンCを合成していた。引き続き恒温動物への進化に伴って、酸素消費量が増大した。原始的な鳥類や哺乳類(単孔類)も腎臓でビタミンCを合成しており、有袋類では腎臓に加え肝臓で合成するようになり、さらに進化した高等な鳥類(スズメ目)や哺乳類では、肝臓で合成するようになった。これは、酸素消費量の増大に伴う過酸化物質産生から身を守るため、より多くのビタミンC合成を行う必要がある、ビタミンC合成部位が腎臓よりも大きな肝臓に移行したと推察されている。一方、ヒトを含めた霊長類はビタミンCを合成できない。これはビ

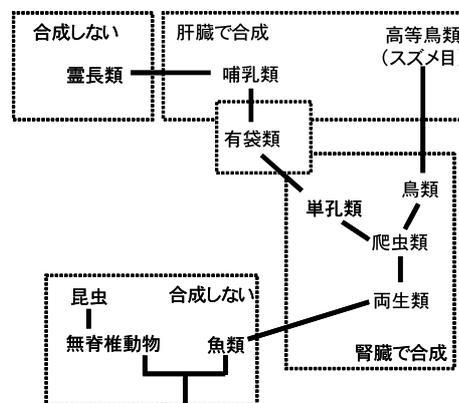


図 5.3 ビタミンC合成の進化

タミンC合成酵素遺伝子の突然変異のためである。ビタミンC合成酵素に突然変異が生じた時代の霊長類の食性ではビタミンCを十分摂取でき、その合成不全は生存に影響しなかったと考えられている。

#### 5) ミネラル

必須ミネラルの種類は動物種間で差はない。基本的に飼料には総ての必須ミネラルが含まれている。しかし、植物と動物の必須ミネラルは大きく異なっており、植物性の原料を主体とする飼料を用いる場合には、注意を要する。例えば、ナトリウムは植物では必須ミネラルではなく、植物性の飼料原料に含まれるナトリウムはわずかである。そのため、食塩を飼料に添加したり、食塩として直接与えたりする必要がある。また、植物性の原料にはミネラル吸収を抑制する繊維やフィチン酸などが含まれている。したがって、動物の食性は必須ミネラルの要求量に大きな影響を及ぼす。

### 5.4 条件付き必須性

動物の健康状態や生産性は必要とされる栄養素の量に大きな影響を及ぼす。すなわち、通常では「非必須」とされる栄養素の供給が、妊娠や成長期には必要となる場合がある。

ビタミンとは認識されていないが、ビタミンのように機能する物質として準ビタミン(ビタミン様物質)がある。コリンはヒト以外の多くの動物においてビタミンである。コリンは成人において必須栄養素ではないが、脂肪摂取過剰時にコリン不足によって脂肪肝が発生しやすくなり、新生児の脳の発達にはコリン摂取が必要であることが示唆されている。カルニチンはチャイロコメノゴミムシダマシの幼虫の成長因子として見いだされた。カルニチンは動物体内でリジンやメチオニンから合成されるが、これらのアミノ酸が不足するとカルニチン合成量が低下し、カルニチン自体を摂取しないと欠乏症として、脂肪肝や成長抑制を生じる。また、ある種の腎疾患時にはカルニチンの尿中排泄が増加するので、カルニチン摂取が必要となる。myo-イノシトールはヒトでも高脂肪食や運動時に不足する可能性がある。グルタミンは骨髄移植患者において窒素の損失や感染症の発症率を減少させる。アルギニンは動物体内で尿素サイクルならびにピルビン酸などから合成されている。そのため成人では必須栄養素ではないが、幼児や成長の速い動物では体内合成によって必要量が充足されないため摂取する必要が生じる。

暑熱時には酸化ストレスが生じる。その結果、ビタミンC要求量が高まる。このような状況下では、ビタミンCを合成できる動物でもビタミンCが不足し、ビタミンC補給によって成長が回復する。

前述のように、反芻動物は反芻胃内で合成されるビタミンや必須アミノ酸を利用しているので、一般的にこれら栄養素を摂取する必要はない。一方、泌乳牛など生産性の高いウシでは、反芻胃内で合成されるビオチン、ビタミンB<sub>12</sub>、コリンなどのビタミンやリジン、メチオニンなどのアミノ酸が不足する場合があります。これらの補給により生産性が向上する。

### 5.5 健康向上に関与する非栄養素

六大栄養素に含まれない飼料中の成分は非栄養素に分類されるが、動物の健康上有益な物質がある。これらを「機能性」を有する物質と呼ぶことがある。機能性物質としては、消化管内で働くものと、吸収されて働くものがある。

飼料中の「繊維」の定義は「動物自体の消化酵素で消化されない飼料中の難消化性成分

の総称」であり、加工した繊維や動物性の繊維を含む場合と、植物自体の繊維を示す場合がある。

飼料中の繊維には、保水能、イオン交換能、吸着能、ゲル形成能などを有するものがある。多くの繊維は大腸の運動性を高め、便通を促進する。また、そのゲル形成能によって、腸管における内容物の拡散や通過を遅延させ、グルコース吸収を緩慢にし、その結果、食後の血中グルコース濃度上昇を抑える。繊維はその吸着能によって有害物質を補足する。また、摂取されたコレステロールや消化管に分泌されたコレステロール代謝産物の吸収抑制を介して、血中コレステロール濃度を低下する。飼料においてカビ毒は大きな問題であるが、酵母細胞壁はカビ毒を吸着し中毒を予防するとされている。

一部の繊維は大腸で乳酸産生菌の基質となり、プレバイオティクスと呼ばれている。プレバイオティクスは腸内微生物叢の健全性を保ち、ニトロソアミン、インドールなど発癌に関連する有害物質産生を抑制し大腸癌の発生を抑え、下痢を予防する。また、プレバイオティクスは腸管免疫機能を向上することも知られている。ヒトの疫学研究によって、繊維に富む食事が、癌、冠動脈疾患、糖尿病、憩室症、高血圧、胆石の形成のリスク減少と関連していることが明らかになっている。加えて、大腸内で発酵する繊維は、有機酸産生による大腸内容物の pH 低下などによって、カルシウム、マグネシウム、亜鉛の吸収を促進する。腸内微生物叢の健全性を保つために、乳酸菌などの生菌剤も用いられており、プロバイオティクスと呼ばれている。

植物に含まれるカロテノイドやフラボノイドは抗酸化能を有することも知られており、抗酸化能を有する栄養素であるビタミンCやE、動物体内で合成される抗酸化物質とともに、酸化ストレスを低減している。

天然物質には薬理作用を示すものがある。マメ科植物に含まれるイソフラボンエストロゲン様作用を有し、ウシが過剰摂取すると繁殖障害を生じるが、閉経後の女性の骨粗鬆症の予防に有益である。トウガラシに含まれるカプシエイトは神経系を介して、アドレナリン作用を生じる。銅や亜鉛は必須元素であるが、過剰摂取時には薬理作用を呈する。子ブタでは、中毒水準を下回る過剰な銅や亜鉛を給与することによって、下痢を予防でき、体重増加が促進される。この作用は銅や亜鉛の抗菌作用に起因すると考えられている。すなわち、過剰の銅や亜鉛は、成長促進の目的で用いられている抗菌剤(抗生物質)を代替できる。しかし、これらの過剰摂取に伴って糞中の銅・亜鉛濃度は著しく増加し、その施肥によって、耕地がこれら重金属で汚染されることが問題となった。そのため、現在では市販の配合飼料に添加される銅や亜鉛量は規制されている。

(松井徹)

【参考図書】石橋 晃・板橋久雄・祐森誠司・松井 徹・森田哲夫(編)：動物飼養学，養賢堂，東京，2011