

## 微量元素要求量の推定をめぐる諸問題

川 島 良 治

(京都大学名誉教授)

### Problems in the Determination of Trace Element Requirements of Animals

Ryoji KAWASHIMA

*Professor Emeritus, Kyoto University*

#### 1. はじめに

ヒトも家畜も健康を維持するためには、各栄養素の要求量を正確に把握することが重要な課題である。最近では世界的にみて微量元素の極端な欠乏症や中毒症の発生はあまり見られなくなった。これは微量元素を補給する技術や、中毒に対処する技術が進んできたことによると考えられる。しかし、微量元素がヒトや家畜の健康のために完全に適当な水準で給与されているとは必ずしもいえない。すなわち、マージナルやレベルでの要求量をより正確に把握することが必要となってきている。とくに家畜は、高い生産力を発揮することが要求されるとともに、それに要する栄養分を人為的に供給される場合が多いので、正確な養分要求量の推定がより重要となる。家畜についてみると、微量元素要求量は、アメリカの国立研究機構 (NRC)、英国の農業・食糧研究機構 (ARC) をはじめ、世界の各国で多くの研究者によって測定が試みられているが、それらの測定値の間には相互にかなりの差がみられる<sup>1)</sup>(Table 1)。このように研究者によって微量元素の要求量に大きいひらきが見られる理由としては、微量元素の要求量が一般にごく少なく、要求量の測定にあたって誤差を生じやすいこと、微量元素の代謝過程が複雑なために、要求量の決定方法に困難な面があることなどがあげられるが、さらに微量元素が動物に利用される効率、すなわち bioavailability が、種々の要因によって大きく変化することもあげられる。そこで、ここでは主として家畜を対象として、微量元素の最小要求量をめぐる最近の研究の動向と問題点について考えてみたいと思う。

---

住所:京都市左京区下鴨松ノ木町70

本稿は第8回微量栄養素研究会シンポジウムにおいて行われた特別講演の内容をとりまとめたものである。

**Table 1.** Recommended dietary requirements of Zn and Se for sheep<sup>a</sup>

Reference	Zn (ppm)	Se (ppb)
ARC(1980)	20-51	> 80
Suttle (1983)	8-21	50
Grace (1983)	25	30
NRC (1985)	20-33	100-200
Hoesking et al. (1986)		30

<sup>a</sup>From White (1989)<sup>1)</sup>

## 2. 要求量推定の方法

微量元素の要求量はつぎのいずれかの方法によって求められる<sup>2)</sup>。

- a) 微量元素の摂取量と動物の発育およびその他の生体反応との関係
- b) 平衡試験による出納
- c) 野外条件での欠乏症の発生と微量元素摂取量との関係
- d) からだの維持や各種の生体機能ごとの要求量を集積することによる方法

これらの測定法にはそれぞれ得失がある。すなわち、a) は異なった微量元素量を動物に給与し、それに伴って生じる動物の発育の変化などから要求量を求めようとするもので、各種の栄養素の要求量を求めるにあたって広く用いられてきた方法である。この方法では対象とする微量元素含量の低い飼料を与える必要があるが、そのためには、精製飼料や半精製飼料などの特殊な飼料を用いることになり、通常の飼料条件下での要求量とは異なった結果がえられる恐れがある。

b) の平衡試験による方法は、対象とする微量元素の摂取量を変化させて、糞と尿への排出量を測定し、出納がゼロになった時点の摂取量をからだの維持に必要な量として求める方法である。出納がゼロになる点は、外挿法によっても求めることができるため、極端な欠乏飼料を給与する必要がない。ただ、飼料、糞、尿などの微量元素濃度のわずかな測定誤差が要求量の推定に大きく影響する恐れがあり、また汗や呼気などに多量に排出される元素ではその分が誤差となるという問題がある<sup>3)</sup>。

c) は実際に欠乏症が発生する地帯の飼料中の微量元素含量を測定し、その調査結果から要求量を推定する方法である。この方法を実施するには、多くの労力を必要とするし、さらに元素間の相互関係によって欠乏症が発生しているような場合には、正確に要求量を求めることができない。

以上の a), b), c) の方法は、いずれも飼料として摂取するレベルでの要求量を求めるものである。この場合用いる飼料の内容によって、元素の利用率が異なるために、試験によって結果にかなりの差が現れるのが問題である。

d) は一般的に要因法または要因集積法 (factorial method) とよばれる方法である。この方法では、動物の維持、成長、妊娠、泌乳などそれぞれの機能について要求量を求め、それらを集積して微量元素の正味要求量を求める。さらに飼料中の微量元素が動物に吸収・利用される効率を推定し、正味要求量をそれで割ることによって、飼料として摂取すべき要求量を求めようとするものである<sup>4)</sup> (Fig. 1)。すなわち、正味の要求量と利用率とを分けて考えているのがこの方法の特徴である。

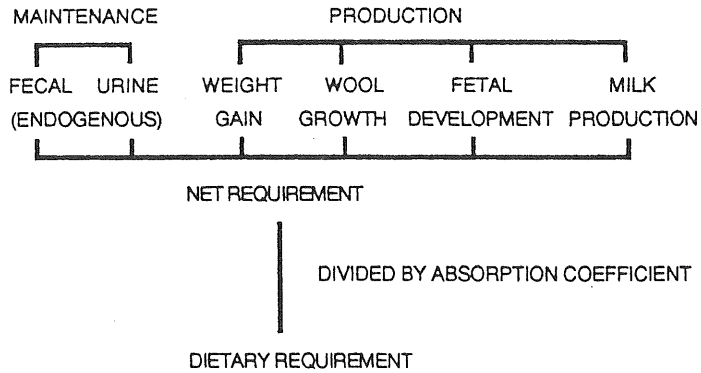


Fig. 1. An outline of the quantitative factorial method

要因法は、当初ウシ、ヒツジなど比較的大きい動物を対象として研究が試みられはじめたが、最近ではニワトリのような小動物をも含めてひろく検討されはじめています。この方法において、各機能別に要求量を求めるためのデータは、これまでに得られている多くの研究結果をシミュレーションすることによって求められるが、その例を示すと、Table 2～6 のようである<sup>5)</sup>。ただこれらの値はなお検討過程にするものが多く、今後さらにデータの集積が進むにしたがって、より正確な数値が示されるようになるであろう。とくに維持に要する要求量は、糞および尿への内因性の排出量を測定することによって求められるが、この測定は容易でなく、現在も新しい測定方法の検討が続けられている段階である。

Table 2. The endogenous loss of trace elements in sheep and cattle<sup>a</sup>

Element	$\mu\text{g} / \text{kg}$ live weight
Cu	4 (sheep), 7 (cattle)
Fe	14
Mn	15
Se	0.25
Zn	100

<sup>a</sup>From Grace and Clark (1991)<sup>5)</sup>

Table 3. Mean quantities of trace elements associated with weight gains<sup>a</sup>

Element	Sheep	Cattle
	(mg / kg liveweight)	
Cu	0.77	—
Fe	55.0	55.0
Mn	0.47	0.85
Se	0.052	—
Zn	24.0	24.0

<sup>a</sup>From Grace and Clark (1991)<sup>5)</sup>

**Table 4.** Mean daily accumulation of trace elements by the conceptus<sup>a</sup>

Element (mg / day)	Ewe		Cow
	Single	Twin	
Cu	0.63	0.74	—
Fe	9.23	10.1	28.6
Mn	0.08	0.12	—
Se	0.010	0.012	—
Zn	3.6	4.2	7.6

<sup>a</sup>From Grace and Clark (1991)<sup>5)</sup>

**Table 5.** Trace elements concentration in milk<sup>a</sup>

Element	Ewe		Cow	
	Mean ( $\mu\text{g} / \text{kg}$ )	Range	Mean ( $\mu\text{g} / \text{kg}$ )	Range
Co	0.7	0.36-1.1	0.8	0.1-2
Cu	200	190-500	120	100-700
Fe	900	290-1390	530	60-1000
I	104	10-136	75	5-400
Mn	55	32-86	50	10-280
Se	6	2-20	25	2-70
Zn	7400	7200-7500	3600	1500-7000

<sup>a</sup>From Grace and Clark (1991)<sup>5)</sup>

**Table 6.** Trace elements contents of clean wool<sup>a</sup>

Element	Mean (mg / kg)	Range
Cu	5	3.1-7.0
Fe	30	13.6-44.0
Mn	2.5	0.3-7.0
Se	0.07	0.027-0.57
Zn	110	82.0-119.0

<sup>a</sup>From Grace and Clark (1991)<sup>5)</sup>

### 3. 微量元素の利用効率

飼料中の微量元素が動物に利用される効率の推定は、いずれの測定法を用いる場合においても重要であるが、とくに要因法によって要求量を推定するにあたっては、利用率を正確に把握することが必須条件になる。微量元素の利用効率は、飼料に含まれる微量元素の化学的形態、飼料に含まれる他のミネラルとの相互作用、飼料に含まれる各種栄養成分など各種の要因によって影響を受けることが知られている<sup>6)</sup>。これらの関係は相互に作用しあうために、極めて複雑なものであり、動物が実際の飼育条件下におかれている場合について微量元素の利用率を推定することは極めて難しい。また微量元素は動物に吸収されたのち、相当量がふたたび消化管内に排出されるために、見かけの消化率と真の吸収率との間に

は大きいひらきがある。そのため、見かけの消化率ではあまり意味がなく、真の吸収率を求めることが必要である。

微量元素の吸収率の測定方法については、これまでにいろいろの方法が試みられてきているが、現在に至るもなお完全と思われる方法は確立されていない。微量元素の補給のために用いられるような、微量元素の各種化合物の吸収率は、平衡試験や放射性同位元素を用いた方法などによって測定することができる<sup>7,8)</sup>。しかし実際に飼料に含有されているような形態の微量元素の吸収率を測定するには、この方法はあまり適当ではない。また摘出腸管を用いた *in vitro* 法または *in situ* 法は吸収の程度を比較するには役立つが、通常の生理的条件での吸収率を測定するには適しない。

最近では、動物を対象とする微量元素についてある程度欠乏状態にしておき、それに微量元素を含む飼料を給与して、動物の各種臓器中に蓄積する微量元素量を測定し、標準物質と比較することによって吸収率を測定する方法が開発されてきている<sup>9-12)</sup>。この方法はかなり複雑な方法ではあるが、現時点ではもっとも信頼のおける測定法ということができよう。

また飼料中の微量元素は、おもな吸収部位である小腸上部までの間で消化作用をうけ、可溶化されて吸収される。すなわち通常主として微量元素が吸収される小腸上位に達するまでに消化管内で可溶化される程度と、可溶化された元素が腸管壁から吸収される割合によって、飼料中の微量元素の利用率が決定される。そのため、消化管での微量元素の可溶化の程度を測定する方法についての検討が進められている<sup>13,14)</sup>。

なお可溶性の微量元素が、動物の腸管から吸収される割合は、ヨード90%以上、セレン、亜鉛10～50%、銅、マンガン、コバルト10%以下の範囲にあるとされている<sup>5)</sup>。さらに、飼料中の銅がヒツジに利用される効率を求めた結果の1例を示すと Table 7のごとくである<sup>13)</sup>。

**Table 7.** Total and absorbable copper concentration in crops and forages fed to sheep<sup>a</sup>

	Total Cu (mg / kg)	Absorption Coefficient (%)	Absorbable Cu (mg / kg)
Summer pasture	6.5	2.5	0.16
Autumn pasture	8.5	1.2	0.10
Silage	8.2	4.9	0.40
Hay	5.5	7.3	0.40
Roots	2.5	6.8	0.17
Kale / rape	3.9	13.2	0.51
Cereals	3.0	10.0	0.30

<sup>a</sup>From Suttle (1981)<sup>12)</sup>

#### 4. 微量元素の要求量と家畜の栄養との問題

わが国で比較的問題になっている銅とセレンについて述べてみたい。

##### (a) 銅

わが国の牧草中の銅含量は、通常家畜が要求するとされている水準より低いものがあるが、極

端な銅欠乏症の発生はそれほど多くはない。鳥根県、兵庫県の一部には飼料中にモリブデンが異常に高濃度に含まれるところがあり、これらの地帯ではウシに銅欠乏症類似の症状の発生することが報告されている<sup>16)</sup>。これは、モリブデンおよびイオウとの相互関係によって発生した銅欠乏によることが知られており、複合的銅欠乏症とよばれるものである。このような地帯では、飼料に含まれる銅含量だけでは、家畜の銅の栄養状態を推定することは不可能であり、飼料のモリブデンまたはイオウ濃度との総合的な観点から銅の栄養状態を判定する必要がある<sup>12)</sup>。

しかし、銅の要求量はモリブデンおよびイオウ以外にも複雑に影響する要因があるようである。熊谷らは西日本の各地における牧場に放牧されているウシの血液中の銅濃度について広く調査し、岡山県下のある牧場のウシの血液銅濃度が異常に低いことを認めた<sup>17)</sup>。そこに生育している牧草の銅含量はとくに少なくはなく、またモリブデンやイオウ含量も多くはないので、それ以外の要因が関与しているものと目下その検索を進めている。

また最近、沖縄県の本島および離島の各地で、比較的大規模で飼育されている肉用種のウシに外見的に銅欠乏と思われる症状が発生していることが報告されている<sup>18)</sup>。これらのウシの血液銅濃度はかなり低い、牧草の銅含量はそれほど低くはない。しかも、牧草をサイレージにしてウシに給与しているものに欠乏症状の発生が多い。仲宗根らはサイレージ中の銅含量を調査し、全銅含量はとくに低くはないが、1規定の塩酸溶液によって抽出される銅分画の割合が、生草よりもサイレージにおいて著しく低いことから、サイレージに含まれる銅が利用されにくい形になっているものと推察している<sup>19)</sup> (Table 8)。最近気密サイロとよばれる大型のサイロがひろく普及するようになってきているが、このサイロでは空気を遮断して発酵をすすめる方法がとられており、内容物をサイロから取り出した段階で、外気に触れて一時的に温度が急速に上昇することが知られている。このような温度の上昇が、銅の存在形態を変化させ、利用率を低下させるものと考えられる。

**Table 8.** Effective of heat treatment on total and extractive copper of forages<sup>a</sup>

	Treatment	Total (mg / kg)		Extractive (%) <sup>c</sup>	
		Cu	Zn	Cu	Zn
Alfalfa	No	9.7	21.6	89.7	83.8
	Heat <sup>b</sup>	9.4	20.7	34.0	83.1
Italian ryegrass	No	9.9	31.2	97.0	99.7
	Heat <sup>b</sup>	10.0	30.5	17.0	95.4

<sup>a</sup>From Nakasone (1989)<sup>19)</sup>

<sup>b</sup>Heated 70°C for 48 hours

<sup>c</sup>Extracted with 1 N HCl solution

(b) セレン

セレンも要求量がはっきりしない元素のひとつである。Table 1 に示したように研究者によって、ヒツジのセレン要求量には大きいひらきがある。ウシのセレン要求量についてみると、米国の NRC 標準では0.3ppm<sup>20)</sup>、わが国の飼養標準は0.1ppm<sup>21)</sup>、英国の ARC 標準は0.05ppm<sup>7)</sup>であるとしている。

わが国の牧草中のセレン含量は、全国平均ではほぼ0.02ppmであり、0.1ppm以上を含有する牧草の割合はごく僅かしかない<sup>22)</sup>。上に述べた要求量と比較すれば、わが国は全国的にセレン欠乏地帯ということになる。しかし実際には北海道の一部をのぞいて、ウシにセレン欠乏症状が発生したという報告はほとんどない。同様なことはオーストラリアの研究者も認めており、牧草のセレン含量が0.05ppm以下の地域でも、ヒツジやウシにセレン欠乏症が発生するのはごくまれであると報告している<sup>1)</sup>。

飼料中のセレン含量と欠乏症状の発生との間に、はっきりとした関係が認められないことは、セレンの要求量に影響する要因が存在することを推測させる。たとえばビタミンE、イオウ、多価不飽和脂肪などがセレンの代謝に影響することが知られているが、家畜の飼養されている条件下でこれらの要因がどのように関係しているかについて、今後さらに研究を進める必要があると思われる。

また、筆者らが香川県下の牧場で調査した結果では、ウシにセレン含量の低い牧草を長期間にわたり給与し続けても、母ウシにはとくに欠乏症状は現れない。しかしそれから生まれた子ウシの発育はあまり良くなく、それらにセレンを給与すると、発育が有意に改善されることを認めている<sup>23)</sup>。これよりみて、わが国の条件下では、家畜にセレンの欠乏症状はあまり発生しないとしても、マージナルなレベルでのセレン不足の影響は無視できないように思われる。

さらに、鶏の日本飼養標準<sup>24)</sup>においては、セレンの要求量は、産卵鶏、ブロイラーともに0.06ppmとされているが、最近、大石らが実際の養鶏場が行っているような条件で飼養試験を実施し、最大の発育や産卵を期待するには、産卵鶏では0.3ppm<sup>25)</sup>、ブロイラーでは0.4ppm<sup>26)</sup>のセレンを必要とすることを認めている。実際の養鶏家の飼育条件は、試験場などのように整備されたものでなく、多数羽が密飼されるために、ストレスが多く、病原菌に汚染される機会も多い。そのような条件では、セレンの要求量が高まることが考えられる。

## 5. むすび

微量元素の要求量は、その他にも動物の種類、遺伝的特質、年齢、生理的条件などによっても影響を受ける。残念ながら現在の時点では、これらの複雑な条件に対応できるだけの情報は得られていない。一般に栄養素の要求量は、従来は推奨値として示されることが多かったが、最近では栄養学の進展に伴って、最小要求量として示されることが多くなってきている。しかし、微量元素の要求量に関しては、なお不確定な問題が多く残されており、最小要求量というよりも、推奨値の域を脱していない現状である。今後、この方面の研究がさらに進展することを希望したい。

## 文 献

1. WHITE, C. L. (1989) Evaluating critical requirement for trace elements in ruminants : A production model for selenium and zinc. In Proc. Symposium on Recent Progress on Mineral Nutrition and Mineral Requirements in Ruminants, Kyoto, Japan. ed. by Kawashima, R : pp. 79-86
2. KAWASHIMA, R. and H. YANO (1985) Recent advances in mineral nutrition and mineral requirements of beef cattle. In Proc. Symposium on Feeding Systems of Animals in Temperate Areas, Seoul, Korea,

- ed. by Han, In K. : pp. 167-176
3. KELSAY, J. L. (1985) Interpretation of mineral balance data in estimating requirement. In. Trace Elements in Man and Animals. ed. by Mills, C. F., I. Bremner and J. K. Chesters, Commonwealth Agricultural Bureaux, Farnham Royal, Slough, England : pp. 879-881
  4. SUTTLE, N. F. (1985) Estimation of requirements by factorial analysis : potential and limitation.. In. Trace Elements in Man and Animals. ed. by Mills, C. F., I. Bremner and J. K. Chesters, Commonwealth Agricultural Bureaux, Farnham Royal, Slough England : pp. 881-884
  5. GRACE, N. D. and R. G. CLARK (1991) Trace element requirements, diagnosis and prevention of deficiencies in sheep and cattle. In. Physiological Aspect of Digestion and Metabolism in Ruminants. ed. by Tsuda, T., Y. Sasaki and R. Kawashima, Academic Press, Inc., San Diego, USA : pp. 321-346
  6. MILLS, C.F. (1985) Annu. Rev. Nutr. 5 : 173
  7. AGRICULTURAL RESEARCH COUNCIL (1980) The nutrient requirement of ruminant livestock, Commonwealth Agricultural Bureaux, Farnham Royal, Slough, England
  8. SUTTLE, N. F. (1983) Assessment of the mineral and trace element status of feeds. In. Feeds Information and Animal Production. ed. by Richard, G. E. and R. G. Packham, Commonwealth Agricultural Bureaux, Farnham Royal, Slough, England : pp. 211-237
  9. HENRY, P. R., M. G. ECHEVARRIA, C. B. AMMERMAN and P. V. RAO (1988) J. Anim. Sci. 66 : 2306
  10. WONG-VALLE, J., P. R. HENRY, C. B. AMMERMAN and P. V. RAO (1989) J. Anim. Sci. 67 : 2409
  11. WEDEKIND, K. J. and D. H. BAKER (1990) J. Anim. Sci. 68 : 684
  12. SUTTLE, N. F. (1981) Predicting the effects of molybdenum and sulphur concentrations on the absorbability of copper in grass and forage crops to ruminants. In. Trace Element Metabolism in Man and Animals. ed. by Howell, J. MacC., J. M. Gawthorn and C. L. White, Australian Academy of Science, Canberra, Australia : pp. 545-548
  13. SUTTLE, N. F. (1983) The nutritional basis for trace element deficiencies in ruminant livestock. In. Trace Elements in Animal Production and Veterinary Practice. ed. by Suttle, N. F., R. G. Gunn, W. M. Allen, K. A. Linklater and G. Wiener, Occasional Publication No. 7-British Society of Animal Production : pp. 19-25
  14. EMANUELE, S. M. and C. R. STAPLES (1990) J. Anim. Sci. 68 : 2052
  15. IBRAHIM, M. N. M., A. van der KAMP, G. ZEMMELINK and S. TAMMINGA (1990) J. Agri. Sci. Camb. 114 : 265
  16. 川島良治 (1984) 微量栄養素研究 No. 1 : 1
  17. KUMAGAI, H., N. ISHIDA and R. KAWASHIMA (1990) J. Japan. Grassl. Sci. 36 : 138
  18. 仲宗根一哉, 安里左千子, 千葉好夫, 平安名盛己 (1989) 沖縄県畜産試験場試験研究報告, No. 27 : 147
  19. 仲宗根一哉 (1989) 沖縄県畜産試験場試験研究報告, No. 27 : 143



20. NATIONAL RESEARCH COUNCIL (1987) Nutrient requirements of dairy cattle, National Academy Press, Washington, D. C., USA
21. 農林水産技術会議事務局 (1987) 日本飼養標準—乳用牛
22. 須崎尚, 石田直彦, 川島良治 (1980) 日本畜産学会報 51:806
23. KAWASHIMA, R., N. ISHIDA and J. JACHJA (1988) Trace Nutrient Research No. 4:23
24. 農林水産技術会議事務局 (1984) 日本飼養標準—家禽
25. 大石武士, 犬塚澄雄, 青木晋平 (1987) 近畿大学農学部紀要 20:39
26. 大石武士 (1991) 日本家禽学会誌 28:117