

わが国の微量元素にみられる土-草-動物の関係

川 島 良 治

(京都大学農学部*)

Incidence of trace element disorders in livestock in relation to soil-plant-animal interaction in Japan

Ryoji KAWASHIMA

Department of Animal Science, Faculty of Agriculture, Kyoto University

The soil and its parent materials are the primary sources of trace elements for plant and animal. However, the relationships among soil, plant and animal are not so simple because the absorption rate of trace elements from soil to plant and the utilization of trace elements in plant by animal is influenced by various factors. This review describes the trace element disorders which occur under the practical conditions in Japan; cobalt deficiency, molybdenum toxicity and complicated copper deficiency. The recent advances on the trace element research in animal nutrition are also reviewed.

ある特定の地域で家畜を飼うと、ある種の障害、いわゆる地方病の発生が見られる地帯のあ
ることが世界の各地でかなり古くから知られている。このように家畜に発生する地方病の多く
が、その地域の土壌のタイプに起因し、土-草-動物の関係を通して、動物に微量元素につい
ての栄養的欠陥を生じた結果であることが次第に明らかにされてきた¹⁾。

土や草の影響を大きく受けるのは、動物の中でも草を主食とするウシ、メンヨウなどの草食
家畜である。わが国のウシやメンヨウは欧米諸国のように広大な牧野に放牧されることは比較

*所在地：京都市左京区北白川追分町(〒606)

本稿は第1回微量栄養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。

的少ないが、それでも飼料として与える草の大部分を、動物が飼われている地域で栽培して得ていることが多く、やはりその地域の土壌の性質に影響を受けることが少なくない。

本稿ではわが国でとくに土-草-動物の関係を通してみられる家畜における微量元素栄養の異常を中心として微量元素の栄養に関する研究の最近の動向を紹介してみたい。

1. 家畜に必要な微量元素の種類と要求量ならびに中毒限界

現在家畜の栄養上必要と考えられている微量元素の種類は表1に示すようである。近年、特に1970年以降、次々と新しい元素の必須性が明らかにされてきた。しかし最近必須性が認められた元素の多く（例えばCr以下）は、ウシやメンヨウなどの家畜においてはほとんど欠乏することがなく、またその作用機構も十分に解明されていないこともあって、必須元素

Table 1. Discovery of trace element requirement

Element	Date	Reference
Fe	17th Century	
I	1850	Chatin
Cu	1928	Hart et al.
Mn	1931	Kemmerer, Todd
Zn	1934	Todd, Elvehjem, Hart
Co	1935	Underwood, Filmer Marston Lines
Mo	1953	deRenzo et al. Rechert, Westerfelt
Se	1957	Schwarz, Foltz
Cr	1959	Schwarz, Mertz
Sn	1970	Schwarz, Milne, Vinyard
V	1971	Schwarz, Milne Hopkins, Mohr
F	1972	Schwarz, Milne Messer, Armstrong, Singer
Si	1972	Schwarz, Milne Carlisle
Ni	1973	Nielsen
Al	1974	Sorenson et al
Pb	1974	Schwarz
As	1977	Nielsen, Myron, Ulthus
Cd	1978	Achwarz, Spallholz

Source: from reference 2~5

(essential elements)とは区別して、準必須元素(probably essential elements)あるいは有効元素(beneficial elements)などといわれることが多い。

家畜に対する微量元素の要求量を明らかにするのは容易でなく、現在も要求量を求めるための研究が活発に行われている⁶⁾。このうちアメリカの National Research Council (NRC) が発表している数値は比較的良好に検討されていると思われる(表2)。

Table 2. Requirement for growth in domestic animals

Element	Cattle	Swine	Poultry	Rat
- mg / kg of dry diet -				
Fe	10	80	40	39.0
Cu	4	6	3	5.6
Co	0.1	-	-	-
Zn	30	50	35	13
Mn	10	20	25	5.6
Se	0.1	0.1	0.1	0.04
I	0.08	0.2	0.35	0.17

Source: Selected data from the N.R.C. Requirements of Domestic Animals

表2に示された数値は requirement (必要量あるいは要求量)と表現されているが、最少必要量というよりも推奨量(allowance)と考える方がよいと思われる。なぜならば微量元素の要求量は飼料中の各種成分や他の無機物によって影響を受け易く、また各個体の遺伝的要因によっても変化する⁶⁾。そのため通常の給餌条件下で一応安全と見なされる水準が requirement として示されていると考えてよい。そのため、ここに示された水準以下になると必ず欠乏症が

Table 3. Maximum tolerable level for domestic animals

Element	Cattle	Horse	Swine	Poultry
- mg / kg of dry diet -				
Mo	10	5	20	100
F	40	40	150	200
Se	2	2	2	2
Cu	100	800	250	300
Pb	30	30	30	30
Cd	0.5	0.5	0.5	0.5
Hg	2	2	2	2

Source: From reference 7

表われるというものではない。

一方、動物はある水準以上微量元素を摂取すると中毒症状を呈する。比較的中毒発生の多いものの中毒限界を示すと表3のとおりである。このうちわが国で実際に問題になっているのはMoとFの中毒症のみである。

2. わが国の牧草中の微量元素含量と欠乏症の発生

わが国の代表的な牧草であるオーチャードグラスとシロクロバを、国内の各地から集めて微量元素含量を測定した結果を表4に示す。牧草中の微量元素含量を、ウシの成長に対する要

Table 4. Trace element levels in pasture plant grown on various areas of Japan (ppm in DM)

Element	Orchardgrass		White clover	
Fe	106 ^{a)}	(52 - 352 ^{b)}	152	(73 - 530)
Cu	6.9	(1.3 - 33.1)	6.5	(2.0 - 12.5)
Co	0.12	(0.01 - 0.51)	0.20	(0.02 - 0.75)
Zn	28	(12 - 57)	34	(16 - 68)
Mn	127	(20 - 330)	89	(15 - 436)
Se	0.02	(0.01 - 0.10)	0.04	(0.01 - 0.29)

a: mean b: range
Source: from reference 8

求量と比較してみると、FeとMnは大部分要求量を上廻っているが、他のCo, Cu, Zn, Seは要求量を下廻るものが多い。このうちCoはわが国でウシに欠乏症の発生することが知られている。Cuは単独の欠乏症の発生はあまり知られていないが、Moとの相互作用の結果、Cuの複合型欠乏症 (complicated copper deficiency) というべきものの発生が知られている。

牧草中のSe含量は牛の要求量を大きく下廻っているが、これまで北海道のウマおよびメンヨウにSe欠乏症らしい筋肉異常がみられたという報告があるのみで、ウシにおける明らかなSe欠乏症の発生は報告されていない。

牧草中のZn含量も要求量を下廻るものが多い。しかしわが国のウシにはZn欠乏症の発生は知られていない。世界的にみてもウシにおけるZn欠乏症の自然発生例の報告は極めて少ない。¹⁾ このことはZnの要求量に影響する要因が多いため、Zn要求量を30ppmと比較的高い水準に定めていることに起因すると考えられる。

3. ウシのコバルト欠乏症

1) わが国におけるウシの Co 欠乏症の発生

西日本、とくに中国山脈にそった各地で、ウシに原因不明の奇病が発生することが古くから知られていた。その地域は愛知、滋賀、兵庫、島根、広島、山口、香川の諸県にまたがっている。この地域で飼われたウシは、次第に食欲を失い、やせ衰えて、ついに斃死する。この病気を俗に“くわず症”とよんでいる。

1950年頃から、京都大学や神戸大学を中心とする研究グループがこの病気の原因究明に着手した。研究の結果、この病気が発生する地域の飼料中の Co 含量が明らかに低いこと、また Co 化合物の水溶液を牛に飲ませることによって、症状、とくに食欲不振が急速に改善されることが明らかになり、これらの事実から“くわず症”が飼料の Co 欠乏に起因することが確証された⁹⁻¹²⁾。“くわず症”発生地帯の土壌は、いずれも花崗岩、石英粗面岩、石英斑岩などの酸性岩系の母岩に由来するものである。これらの土壌には Co が少なく、それが草を通してウシに影響を及ぼすと考えられる⁹⁾。

なお最近、北海道の根釧地方や、東北地方の八甲田山、岩手山麓の黒ぼく土壌の地帯でも牧草中の Co が少ないことが報告されている¹³⁾。

2) ウシの Co 欠乏症とビタミン B_{12} 欠乏症

Co はビタミン B_{12} (B_{12}) の構成元素である。“くわず症”発生牛の肝臓中の B_{12} 含量は著しく低くなっており、また B_{12} を静脈内に注射することにより、症状の改善のみられることから“くわず症”は Co 欠乏症であるとともに B_{12} 欠乏症であると考えてよい。

Co 欠乏飼料を給与しているメンヨウに Co を経口投与すると、消化管内容物および組織中の B_{12} 含量は上昇する¹⁴⁾。このことは飼料中の Co が反芻胃内の微生物による B_{12} 合成に利用され、合成された B_{12} が体組織 B_{12} に供給されること、また飼料中に Co が欠乏すると、反芻胃内での B_{12} 合成が抑制されることを示している。

一方ニワトリのような単胃動物に Co を給与すると、盲腸内の B_{12} 含量は増加するが、体組織中の B_{12} 含量は増加しないので、盲腸内で合成された B_{12} はほとんど吸収、利用されないと考えられる¹⁴⁾。

3) Co 欠乏による食欲減退の機構

“くわず症”発生牛の最も主要な症状は食欲の低下である。これはブタ、ニワトリなどの B_{12} 欠乏症状とは著しく異った点である。

ウシにおける食欲低下の機構としては、現在のところ Marston の説¹⁵⁾ が広く受け入れられ

ている。MarstonらはCo欠乏のメンヨウにプロピオン酸を静注したところ、正常メンヨウに比べて血液中のプロピオン酸濃度の低下の割合が著しくおくれることを認めた。

ウシやメンヨウなどの反芻動物では、飼料中の炭水化物を反芻胃内の微生物の働きによって低級脂肪酸にまで分解して吸収し、これを糖質合成、脂質合成ならびにエネルギー源として利用する。プロピオン酸は反芻動物においては重要なエネルギー源であるが、Co欠乏またはB₁₂欠乏時には、このプロピオン酸の体内での代謝が阻害され、血液中にこれが蓄積することにより食欲の低下がおこる。そのためCo欠乏による食欲の低下は、反芻動物に特有の症状であるというのがMarstonの説である。

さらにB₁₂欠乏時には、尿中のメチルマロン酸(MMA)濃度が上昇することから、プロピオン酸代謝のうち、とくにMMA代謝の過程が阻害されるとしている。ただCo欠乏時に食欲の低下が現われるのと、尿MMA濃度の上昇との間にはいくらか時間的にずれのあることが認められており¹⁶⁾、食欲低下の機構、ひいては反芻動物におけるCoの作用機構についてはさらに検討すべき問題が残されている。

4. ウシのモリブデン中毒症と銅の複合型欠乏症

1) ウシのMo中毒症

わが国ではこれまで二つの地域でウシのMo中毒症の発生が報告されている。一つは島根県大東町の斐川の流域地帯で、この地帯の草やイナワラのMo含量は一般に高く、最高161ppmに達する。斐川の上流にはすでに廃坑になっているがMo鉱山があり、それが流域の草のMo含量を高めていると考えられる¹⁷⁻¹⁹⁾。もう一つは兵庫県赤穂市の郊外の一地域で、草のMo含量は最高484ppmに達していた²⁰⁾。この地域にはMoを取扱う工場があり、そこから排出されるMoによってこの地域が汚染されたものと考えられる。

これら両地域に飼われているウシには、強度の下痢、発育や乳量の減少、繁殖障害、毛色の異常(黒毛の白色化)などがみられる。またこのような症状のウシを屠殺してしらべると、各組織中のMo含量が著しく高く、Cu含量が低い。Moの中毒限界は10ppmといわれていることからみても、この両地域のウシの症状は、展型的なMo中毒症と考えてよいであろう。これに対しCuを投与すると効果がある。

2) ウシにみられる複合型Cu欠乏症

岡山県新見町の一部に、黒毛のウシの毛が白くなる地域があった。²¹⁾ 毛色の異常以外には、とくに栄養状態や繁殖成績には異常は認められない。

毛色の白色化現象は、Cu欠乏の最も初期にあらわれる症状の一つといわれているが、¹⁾

この地帯の草やイナワラのCu含量は6~9ppmで、とくに低くはない。しかしCu代謝に関係があるといわれているMoは1~4ppm, SO₄は0.6~1.2%と一般の地域とくらべてやや多い。

しかしこのMoも中毒をおこすほどの含量ではない。毛色の異常のみられるウシにCu塩の水溶液を与えると、徐々にではあるが回復する。これよりみて、新見市にみられるウシの毛色の異常は、MoやSO₄が関係したCuの複合型欠乏症 (complicated copper deficiency) の1例ではないかと考えられる。

この地帯の母岩は石灰岩が主体であり、また付近にセメント工場があり、そこからのダストの飛散も多いために、土壌が一般にアルカリ性である。このために土壌から草へのCu吸収が抑えられ、Moの吸収が多くなったものと考えられる。

3) Cu-Mo-SO₄の相互関係

微量元素間には、動物体内の代謝において相互作用の認められるものが少なくないが、Cu-Mo-SO₄の関係もその展型的な1例である。しかも、この三者の関係は反芻動物にのみ認めら

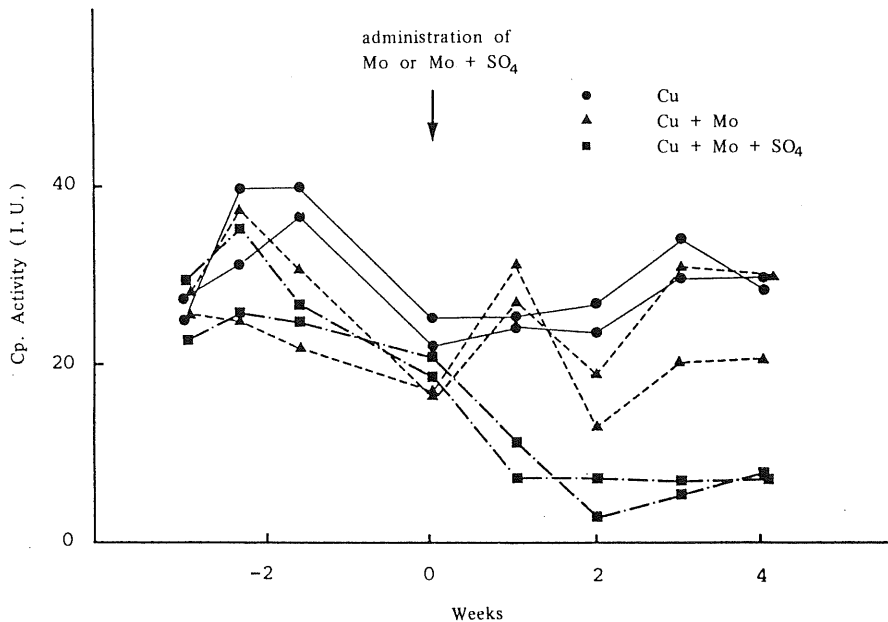


Fig. 1. Effect of oral administration of Mo or Mo+SO₄ on plasma ceruloplasmin activity in sheep

Source: from reference 23

れる。

この相互作用の機構については、従来からいくつかの説が提唱されてきているが、最近では Dickらのチオモリブデート説²²⁾が最も広く受け入れられている。すなわち飼料中のSは大部分硫酸塩(SO_4^{2-})の形で存在するが、これが反芻動物に摂取されると、反芻胃内で還元されて硫化物となり、それがMoと結合してチオモリブデン酸をつくる。このチオモリブデン酸がCuと結合してCuを吸収されにくい形とする。またチオモリブデン酸の一部は吸収されるが、これも血液中でCuと結合して、Cuを不活性な形とする。そのために飼料中にMoと SO_4^{2-} が多いとCuの供給が十分であってもCu欠乏を招くという。

われわれはメンヨウを用いてその点を確認するために、図1のごときMoおよび SO_4^{2-} の投与試験を行った²³⁾。その結果同じCu量を与えていても、Moと SO_4^{2-} を経口的に投与すると血液中の含銅酵素の一つであるセルロプラスミン(Cp)が減少することを認めた。またMoと SO_4^{2-} を静脈内に注射した場合はCpの減少はほとんど認められない。

Table 5. Effect of addition of sulfate, sulfide with Mo or thiomolybdate to diet on Cu status in rat

Item	nil	Mo+ SO_4	Mo+S	Mo S_4
Amount of Addition				
Mo, mg/kg of diet	0	20	20	12
S, mg/kg of diet	0	3000	3000	16
Plasma Cp (OD)	0.58	0.62	0.01**	0.00**
Liver Cu (mg/kg in DM)	12.6	13.7	3.7 **	2.8 **
Body weight gain (g)	36	55	-185 **	-85 **

Source: from unpublished data by N. Ishida and R. Kawashima
 Significantly different from control(nil): ** P < 0.01
 Experimental period is 74 days

さらにラットを用いて、表5のような試験を実施した。反芻動物でないラットでは、Moと SO_4^{2-} を添加しても、体内のCu蓄積には影響はないが、MoとSあるいはチオモリブデン酸塩を投与すると、Cu蓄積は明らかに低下することを認めた。これらの結果はDickのチオモリブデン酸説を支持するものと考えられる。

6. ウシの栄養とセレンとの関係

1) わが国の牧草中のSe含量

表4において、わが国の牧草中のSe含量が一般に極めて低いことを示した。この調査とは別にわれわれもわが国の各地から各種の牧草を集めてSe含量を測定したが、その平均含量は表4に示されたものと大差なく、草種による差や地域差もほとんどなかった²⁴⁾。すなわちわが国の牧草は、地域や種類のいかんを問わず、一般にウシが必要とするといわれている0.1ppm水準よりはるかに低い値であると考えられる。

高橋⁸⁾はわが国の土壌の中のSe含量は諸外国と比較してとくに低くはなく、牧草中のSe含量が低いのは土から草への吸収が抑えられているためとしている。一般にアルカリ性で乾燥した土壌ではSeは selenate の形で存在し、植物に吸収され易いが、一方酸性で湿潤な土壌では、selenide または selenite のような植物に吸収されにくい形となるといわれている。わが国の土壌は一般に酸性で、しかも湿潤な土壌が多く、これが結果的に牧草中のSe含量を低くしているものと考えられる。

ただウシに給与されている濃厚飼料中にはSe含量が比較的多く含まれ、穀類で0.06-0.09 ppm, 油かす類, むか類で0.6~2.0 ppm, 魚粉には2.5 ppmも含まれている²⁴⁾。

2) 放牧牛におけるSeの栄養状態

わが国でも、ウシを夏期放牧することが多くなってきている。そこでSe含量の低い牧草地にウシを放牧した場合の、血液や毛のSe含量を調査した結果を表6に示す^{25, 26)}。

このうち青森と福島牧場では夏期放牧し、冬期は舎飼いして若干の濃厚飼料を与えた例で、四国の牧場では年中放牧しており、濃厚飼料は全く与えていない。

Table 6. Se levels in blood and hair from cows pastured in summer or year-round

Grazing period	Sampling site	No. of cows	Sampling time	Se concentration		
				Grass (ppm)	Blood (µg/ml)	Hair (ppm)
Summer season	Aomori	19	Spring	0.032	0.077	0.33
			Autumn	0.025	0.049**	0.19**
Summer season	Fukushima	16	Spring	0.022	0.080	0.21
			Autumn	0.019	0.033**	0.18*
year-round	Shikoku	42	Spring	0.015	0.017	0.12
			Autumn	0.018	0.019	0.16**

Significantly different from spring (P < *0.05, **0.01)

Source: from reference 25, 26

青森と福島とでは血液、毛とも Se 含量は春は高く、秋に低い。これは放牧期間に Se の栄養状態が低下し、冬期の濃厚飼料給与期にこれが回復していることを示している。

一方四国の牧場では、春秋とも Se の栄養状態は極めて低くなっている。血液中の Se 含量は、通常 Se 欠乏の限界とされている $0.02\mu\text{g/ml}$ をやや下まわっている。

さらに四国の牧場で子牛のときから約2年間飼われたためす牛3頭を屠殺して、臓器中の Se 含量を測定したが、いずれも著しく低いものであった(表7)²⁶⁾。

Table 7. Se, Glutathione Peroxidase (GSH-Px) and α -Tocopherol (α -Toc) levels in blood and fresh tissues of cows pastures year- round

Item	Liver	Renal cortex	Cardiac muscle	Skeletal muscle	Blood	Plasma
Se concentration, $\mu\text{g/g}$ or ml	0.06	0.63	0.04	0.02	0.02	—
GSH-Px activity, unit/10mg protein	0.40	3.31	5.56	7.30	—	0.16
α -Toc concentration, $\mu\text{g/g}$ or ml	24.3	9.4	20.8	7.2	—	3.4

Source: from reference 26

しかし、青森・福島の牧場の場合はもちろん、四国の牧場においても、外見的に特に Se 欠乏とみられる症状は見られていない。また Se が欠乏すると筋肉の変化(いわゆる白筋症)をおこすことが報告されているが屠殺したウシについて調査した結果では、剖見によってもまた組織学的な検査によってもほとんど異常は認められてなかった。

牧草中の Se 含量が低く、しかも血液や臓器中の Se 含量も極度に低くなっているにもかかわらず、なぜウシに Se 欠乏症状が発生しないかについては現在のところ不明である。

表7に示した調査では、四国の牧場でのウシの血液や臓器中の α -トコフェロール含量が、諸外国で報告されている数値よりもかなり高い²⁶⁾。比較的高濃度のこのビタミン E が Se 欠乏症状の発生を抑えているのかもしれない。これらの点については今後さらに検討を加える必要があろう。

6. む す び

以上とくにわが国のウシの栄養上問題になった微量元素について、土—草—動物の関係からのべてきた。しかしこれらのうち Co, Cu などについては、現在では微量元素を補給するなどの対策がとられているため、外見上ははっきり認められるような欠乏症はほとんど発生しなくなってきた。

しかし、これで家畜の栄養上、微量元素の問題がなくなったというわけではない。家畜の生産能力は遺伝的な改良や飼養技術の改善によって、著しく高くなってきている。このような高い生産能力を発揮するためには、微量元素の栄養状態を適当に保つことが極めて重要な問題となっている。しかも微量元素の栄養が、外見的にも判別しうる欠乏症や中毒症といったレベルではなくて、外見的に判別しにくい発育や繁殖性などの低下を問題にする段階に来ている。このためには微量元素の栄養状態を的確に判定するための手法の開発も要求されるようになる。また微量元素の要求量とそれに影響する各種要因の解明もさらに必要となってくるであろう。さらに微量元素の動物の体内における代謝の様相についての基礎的な研究も要求されてくると思われる。

以上のように家畜の栄養という立場からみても、微量元素はなお今後研究すべき多くの問題が残されているということができよう。

文 献

- 1 UNDERWOOD, E. J. (1977) Trace Elements in Human and Animal Nutrition, Academic Press, New York
2. SCHWARZ, K. (1974) In *Trace Element Metabolism in Animal-2*, ed. W. G. Hoekstra et al, University Park Press, Baltimore
3. SORENSON, J. R. J., I. R. CAMPBELL, L. B. TEPPER and R. D. LINGG (1974) Environ. Health Perspective 8 : 3
4. NIELSEN, F. H., D. R. MYRON and E. O. ULTHUS (1977) In *Trace Element Metabolism in Man and Animal-3*, ed. M. Kirchgessner, Technical Univ., Munich, W. Germany
5. SCHWARZ, K. and L. E. SPALLHORTZ (1978) In *Cadmium 77*, First International Cadmium Conf. Med. Bull, P105, London
6. SUTTLE, N. F., R. G. GUNN, W. M. ALLEN, K. A. LINKLATER and G. WIENER (1983) Trace Elements in Animal Production and Veterinary Practice, British Society of Animal Production, Edinburgh
7. NATIONAL RESEARCH COUNCIL (1980) Mineral Tolerance of Domestic Animals, National Academy Press, Washington, D. C.
8. 高橋達児 (1980) 土肥誌 5 : 61
9. 上坂章次, 張子儀 (1953) 京大食研報告 11 : 102
10. 上坂章次, 川島良治, 橋本芳信, 犬塚澄雄, 福島豊一, 勝川周郎 (1956) 京大食研報告 18 : 31
11. 上坂章次, 川島良治, 犬塚澄雄, 橋本芳信, 並河 澄, 西野武蔵, 中西 登 (1957) 京大食研報告 19 : 1

12. 福島豊一, 井上 良, 勝川周郎(1959) 兵庫農大報告 4 : 1
13. 小林義之(1981) 土肥誌 52 : 392
14. 川島良治, 上坂章次, 角 嘉人, 伊庭治三夫(1967) 京大食研報告 30 : 28
15. MARSTON, H. R., S. H. ALLEN and R. M. SMITH(1961) Nature (London) 190 : 1085
16. MILL, C. F. (1981) In *Recent Advances in Animal Nutrition-1981*, ed. W. Haresign, Butterworth, London
17. 林 英夫(1955) 農林省中国農試報告 2 : 109
18. 林 英夫(1956) 農林省中国農試報告 3 : 89
19. 林 英夫, 八幡策郎(1957) 農林省中国農試報告 3 : 556
20. 小倉幸子(1965) 農林省家衛試報告 50 : 24
21. 上坂章次, 川島良治, 入谷 明, 並河 澄, 中西 登, 西野武蔵(1960) 京大食研報告 24 : 1
22. DICK, A. T., D. W. DEWEY and J. M. GAWTHRONE(1975) J. Agric. Sci., 85 : 567
23. ISHIDA, N., T. YOSHIKAWA and R. KAWASHIMA(1982) Memoirs of College of Agric., Kyoto Univ., No119 : 23
24. 須崎 尚, 石田直彦, 川島良治(1980) 日畜会報 51 : 806
25. ISHIDA, N., H. SUSAKI and R. KAWASHIMA(1983) Jap. J. Zootech. Sci., 54 : 275
26. ISHIDA, N., J. JACHJA, R. KAWASHIMA, K. OTSUKI and F. HOSOYAMADA(1983) Proceedings of the 5th WCAP, Vol. 2 : 387