

## 飼料学(112)

誌名	畜産の研究 = Animal-husbandry
ISSN	00093874
著者	松井, 徹 石橋, 晃
巻/号	68巻7号
掲載ページ	p. 747-752
発行年月	2014年7月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター  
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council  
Secretariat



## 飼料学(112)

## —IV ミネラル (mineral, 無機物, 無機塩類 inorganic salt) —

松井 徹<sup>1</sup>・石橋 晃<sup>2</sup>

## 4. 栄養素としてのミネラル

先史時代から、食塩は重要な交易品であり、放牧家畜への補給や食事の味付けに用いられてきたと考えられている。帝政ローマ時代の Plutarch は家畜に食塩を与えていることを記述し、同時代の Virgil と Pliny は乳生産のための食塩補給を推奨した。Mitchell (1805) は、土壌中の塩分が少ない米国内陸部で、野生動物が塩湖に集まることから、動物は食塩を摂取する必要があると提唱した。Forster (1873) は、イヌに食塩を含まない飼料を与えると、神経や筋肉に障害が生じることを示し、Bunge (1873) は、K の多量摂取が尿への Na 排泄を促進すること、植物性食品は K を豊富に含んでいることを示した。

Ringel (1882) は塩化ナトリウム、塩化カリウム、塩化カルシウムの混合液が、カエルの心臓還流実験で組織を維持するために有効であることを発見した(表 3)。この液はヒト血清中のミネラル濃度と類似しており、リングル液と命名され、現在でも広く使われている。Locke (1900) は、この混合液を改良して、食塩濃度を 0.9% とした生理的食塩水を開発し、次いで、生理的食塩水に、微量の K, Ca, Mg やグルコースを加えたリングル・ロック液が用いられるようになった。Dahl (1954) は、疫学的研究から、Na 摂取が多いと高血圧を引き起こすことを示唆し、Sapirstein ら (1958) はラットに 1.5~2.5% の食塩水を飲ませることにより

高血圧症が生じることを明らかにした。Boussingault (1874) はウシへの食塩の補給は有益であることを示すとともに、植物中ミネラル濃度が土壌や生長ステージによって変化することを提唱し、この変動は家畜に大きな影響を及ぼすことを示唆した。Babcock (1905) は、泌乳牛に食塩を数週間与えないと食欲が減少することを示し、泌乳牛における食塩の要求量を提唱した。1959 年に Smith と Aines は、食塩の補給効果は、Na によることを提唱した。その後 Fettman ら (1984) が、Na だけではなく Cl も泌乳牛に必要であることを明らかにした。

Brand (1669) は、尿から P を単離し、Gahn (1748) は Ca と P が骨の主成分であることを見いだした。Chossat (1842) は、主に穀類を与えられているハトに対する Ca 補給が骨の発達のため必須であることを明らかにした。また、Arthus と Page (1890) は Ca イオンが血液凝固に必須であることを報告している。McCullum (1909) は、無機リン酸をラットに給与すると、体内で有機リン酸化合物が合成されることを見いだした。Osborn と Mendel (1918) はラットを P 欠乏飼料で飼育すると、成長が抑制されることを見つけた。Shermann (1921) は、P 欠乏ラットは骨疾患を引き起こすこと、また、Ca : P 比が重要であり、この比が適切でない場合でも骨の異常が生じることを明らかにした。McCullum (1922) も Ca : P 比が重要であることを示した。現在、ミネラルプレミックスを飼料の原料に用いることが一般的に行われているが、ミネラルプレミックスを初めて使用したのは McCullum である。南アフリカの Theiler (1924) は、乾草中 P 含量が低いと放牧牛は死体の骨を嚼むようになるが、P 補給により骨の摂取は止まり、成長や繁殖が著しく改善することを報告した。これ以降、放牧牛における P 欠乏ならびに P 補給の効果が各国から報告された。その後、テキサスで Creeps と呼ば

表3 リンゲル液とヒト血清中のミネラル含量(%)

	リングル液	血清
Ca	0.007	0.009~0.012
K	0.01	0.014~0.023
Na	0.335	0.300~0.340
Cl	0.538	0.355~0.376

<sup>1</sup> 京都大学 (Tohru Matsui)

<sup>2</sup> (一社) 日本科学飼料協会 (Teru Ishibashi)

れていた牛の致死性疾患や、フロリダで Stiffs や Sweeney と呼ばれていた疾患が P 欠乏であることが明らかになった。

元素としての Mg の発見は比較的早かったが、その栄養学的・生理学的意義は研究されておらず、リンゲル液に Mg は添加されていなかった。Denis(1920)は血液中に Mg が存在していることを明らかにし、Leroy(1926)は Mg 補給がマウスの成長を改善すること示した。McCollum ら(1931)は Mg 欠乏ラットでテタニーが発生することを見いだした。Sjollema(1930)は、放牧牛に発生していたグラススタニーが低 Mg 血症と関連があることを示した。また、ミルクのみを与えられている子牛でも同様のテタニーが生じることが明らかになった(Duncan と Huffman, 1935)。

古代ギリシャでは、剣を浸漬して錆びさせた水により貧血の治療を行っており、古代ギリシャの医師 Hippocrates は、皮膚炎、痔、痛風、浮腫などの治療に鉄を用いていた。Sydenham(1680)は鉄くずを浸漬したワインを貧血の治療に用いた。Menghini(1747)は血液中に Fe を見だし、Engelhart(1825)は Fe と血色素の関係を明らかにした。翌年、Tiedemann と Gmelin によりヘムが単離された。Boussingault(1831)は多くの動物や食品中の鉄含量を報告した。McGowan と Chrichton(1923)は新生子豚の貧血と鉄欠乏の関係を明らかにし、酸化鉄による貧血治療を行った。

1230 年頃、Arnold は焼いた海綿を甲状腺肥大症の治療に使い、Courtois(1811)は海藻から I を分離し、その 10 年後に I を甲状腺肥大症治療のために処方した。Humbolt(1824)は、甲状腺肥大症が発生していたコロンビアで、ネイティブアメリカンが民間療法として特別な塩を摂取していることを記述し、Boussingault(1825)は、この特別な塩が I を含んでいることを明らかにした。

Hart と Elvehjem(1928)は、ミルクのみを与えたラットにおける貧血の発生を研究していたが、Fe 補給では貧血が生じるが、野菜や肝臓の灰化物がその防止に有効であることを見だし、Cu が Fe の利用とヘム合成に必須であることを解明した。その後、多くの Cu 欠乏に関する研究が行われ、Neal ら(1933)は反芻動物において Cu が必須であることを報告し、Sjollema(1933)はウシとヒツジ

の Cu 欠乏を報告した。また、風土病として知られていた新生子羊の運動失調は Cu 欠乏が原因であることが報告された(Bennetts と Chapman, 1937)。1938 年には、Mo がウシの下痢を引き起こすことが知られていたが、1950 年初頭に Ferguson らは、反芻家畜では Cu, Mo, S の代謝に関連があり、多量の Mo が Cu 欠乏を生じさせることを示した。

Co 欠乏は、ウシやヒツジに消耗性疾患と貧血を生じさせることが 1935 年に Filmer と Underwood, Marstone と Lines から同時に報告された。

Kemmerer ら(1931)は、Mn 補給が雌マウスの成長と繁殖を改善することを明らかにした。同年に McCollum は Mn 欠乏で飼育した雌ラットでは、哺乳ができなくなり、雄ラットでは睾丸が萎縮することを見いだした。1937 年には Mn 欠乏がニワトリの雛で脚弱症(Wilgus ら)や軟骨ジストロフィー(Lyons と Insko)を生じることが示された。反芻家畜での Mn の重要性は 1950 年代になって明らかになった。

古代ローマの博物学者である Plinius は、傷薬に Zn 化合物を用いていたことを記述している。Bertland(1922)は Zn がマウスの生存率を高めることを示唆した。Elvehjem と Hart(1934)は Zn がマウスの成長と被毛の発達に必須であることを明らかにした。Keilin(1939)は、炭酸脱水素酵素に Zn が含まれていることを見いだした。ブタにおける必須性が示されたのは 1955 年であり、子牛における必須性は 1957 年に、放牧牛における必須性は 1960 年になって明らかになった。

Marco Polo は東方見聞録で、13 世紀の中国における Se 過剰症の症状を記している。Franke と Potter(1933)は Se 過剰が放牧牛でアルカリ病(alkali disease)を引き起こすことを明らかにした。一方、Schwarz(1957)は Se 欠乏が肝臓の壊死を引き起こすことを示し、Se 補給によるニワトリの滲出性素質や若齢の反芻家畜の白筋症の予防効果が明らかになった。

1970 年代からは、Li, B, F, Al, Si, V, Ni, As, Br, Rb, Cd, Sn, Pb の動物における必須性が示唆されるようになった。これらの多くは有害元素として知られていたものである。これらの「新しい」微量元素の発見には、高度に精製された

表4 主要ミネラルの機能と欠乏症

Ca	機能	硬組織構成成分, 血液凝固, 酵素活性, 筋収縮, 神経伝達, 細胞内情報伝達
	欠乏	くる病(成長期), 骨軟化症(成熟期), 骨折, (牛)乳熱, 関節部腫脹, 成長遅延, 食欲低下, 乳量・産卵率低下
P	機能	硬組織構成成分, リン脂質・核酸構成成分, pH・浸透圧調節, エネルギー代謝, 細胞内情報伝達, 反芻胃内発酵
	欠乏	くる病(成長期), 骨軟化症(成熟期), 骨折, 被毛粗化, (牛)異食症, 食欲低下, 繁殖性率低下
Mg	機能	硬組織構成成分, 神経過剰興奮抑制, 酵素活性, エネルギー代謝
	欠乏	過敏症, テタニー(グラステタニー, 牛・羊・馬), 運動失調, (馬)多汗, 軟組織石灰化, インスリン抵抗性, 鬱, 食欲低下
K	機能	細胞内液主要陽イオン, pH・浸透圧調節, 筋収縮, 神経興奮
	欠乏	筋麻痺, 成長遅延, 下痢
Na	機能	細胞外液主要陽イオン, pH・浸透圧調節, 物質吸収, 神経興奮
	欠乏	痙攣, 食欲低下, 成長遅延, 産卵率低下, (馬)発汗低下
Cl	機能	細胞外液中主要陰イオン, pH・浸透圧調節, 胃酸成分(ペプシン活性化)
	欠乏	食欲低下, 成長遅延, 産卵率低下, 筋脆弱化, 脱水, (鶏雛)羽喰・尻つつき

飼料と目的の元素の汚染がないクリーンな環境下での試験が必要であった。また、数世代にわたり欠乏飼料を給与しなければ欠乏症が生じない場合もあった。これらの新しい微量元素は通常の飼料を摂取している動物では欠乏しないと考えられている。

## 5. 主要ミネラル (major mineral, 多量ミネラル macro mineral)

動物体内に多量に存在するミネラルは主要(多量)ミネラルと呼ばれ、必須である。Ca, P, Mg, K, Na, Cl, S の7つで%で表示される。これらは、体内の総ミネラルの60~70%を占め、飼料中に多く含まれるミネラルでもある。

### 1) カルシウム (calcium Ca)

原子番号20, 原子量40.01, 周期表では2族に属するアルカリ土類金属元素である。地殻中元素では5番目に多く、地殻中の存在率は約3.6%である。

(1) 工業的利用 炭酸カルシウム( $\text{CaCO}_3$ )を主成分とする石灰岩や大理石は古代エジプトやギリシャの建造物の石材として利用されていた。工業的に利用される形態としては無機塩として生石灰( $\text{CaO}$ ), 消石灰( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), フッ化カルシウム(蛍石の主成分,  $\text{CaF}_2$ ), 塩化カルシウム( $\text{CaCl}_2$ ), その他 Br や I のカルシウム塩,  $\text{CaCO}_3$ , 硝酸カルシ

ウム( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ), 硫酸カルシウム(石膏,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), 亜硫酸カルシウム( $\text{CaSO}_3$ ), リン酸カルシウム( $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ ), 次亜塩素酸カルシウム(さらし粉,  $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ ), ヨウ素酸カルシウム( $\text{Ca}(\text{IO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ), グルコン酸, 乳酸, 安息香酸, ステアリン酸との有機酸塩など多岐にわたる。利用分野は製鉄, (日本の生石灰生産量の半分を消費), 非鉄金属鋳業, 酸化物陰極, 合金添加剤, るつば, 耐ラス製造, 建設, 建築用資材, 石材, 窓材, モルタルと断熱材, 保温材, 排水処理, 排ガス処理, 食品工業, 食品添加物, 乾燥剤, 発熱剤, 融雪剤, 研磨剤, 農薬, 無機肥料, 飼料である。セメントの主成分はCaOとケイ石であり, コンクリートはセメント, 水, 細骨材, 粗骨材, 混和材料から構成されている。

(2) 生物の利用 Caは動植物にとって必須な元素である。植物にとってCaは、肥料の三要素に次ぐ必須な要素となっている。Caは主にペクチンとの複合体,  $\text{CaCO}_3$ , シュウ酸カルシウムとして植物体中に存在している。植物細胞ではCaは有機酸の対イオンとして働くなど物質代謝に関わっている。また、生体膜の構造と機能の維持にも必須であり、欠乏すると、地上部や根の分裂組織に変化が表れやすく、褐変壊死する。酸性土壌では、Caが溶出するため植物に利用可能なCaが減少するとともに、植物のCa吸収能自体も減少する。

動物では胃酸により吸収が促進され、主に小腸

で吸収される。シュウ酸やフィチンなどは不溶性の Ca 塩を作り吸収を阻害する。一方、プレバイオティクスなどにより大腸での発酵が促進され、内容物の pH が低下すると、大腸内での Ca 溶解性が高まるため吸収が促進される。

動物体内では、除脂肪体重 1kg 当り 12~18g の Ca が存在している。体内の Ca の 99% は骨や歯の成分であるヒドロキシアパタイト ( $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$ ) として存在する。血漿中濃度は 100~120mg/L であり、その約半分はイオン化しており、残りの多くはアルブミンなどと結合している。細胞内では、Ca イオンは小胞体とミトコンドリアに多く、細胞内液の Ca イオン濃度は血漿中濃度の約 1/10000 と極端に低いが(表 5)、Ca イオンは細胞内情報伝達を行っている。Ca は、血液凝固、酵素活性にも重要である。

表 5 体液のイオン濃度 (mM)

	血漿	組織液	細胞内液
Na <sup>+</sup>	144	137	10
K <sup>+</sup>	5	4.7	141
Ca <sup>2+</sup>	1.8	1.8	<0.0002
Mg <sup>2+</sup>	1.5	1.54	0.8
Cl <sup>-</sup>	107	113	4
$\text{HPO}_4^{2-} \cdot \text{H}_2\text{PO}_4^-$	2	2	11

Georgievskii, 1982 を改変

血液中の Ca イオン濃度は、副甲状腺ホルモン(上皮小体ホルモン)とカルシトニンにより恒常性が保たれている。骨には、骨を形成することで Ca 蓄積を増加させる骨芽細胞と、骨の分解(骨吸収により)骨からの Ca 放出を促進する破骨細胞がある。副甲状腺ホルモンは、血漿中 Ca イオン濃度が低下すると分泌が促進され、骨芽細胞に作用し、その細胞膜表面に破骨細胞分化因子(RANKL)を発現させる。破骨細胞前駆細胞はその細胞膜の表面で発現している破骨細胞分化因子受容体(RANK)が RANKL と結合することにより破骨細胞へ分化し、骨吸収による Ca 放出が増加する。また、副甲状腺ホルモンは腎臓尿細管での Ca の再吸収を促進することにより尿中への Ca 排泄を減少させる。カルシトニンは血漿中 Ca イオン濃度が上昇すると分泌が促進される。カルシトニンは破骨細胞の活性を抑制させることにより、骨からの Ca 放出を低下させる。また、尿への Ca 排泄を促進

する作用も有する。腎臓におけるビタミン D 活性化を副甲状腺ホルモンは促進、カルシトニンは抑制する。活性型ビタミン D(1,25-ジヒドロキシVD)は小腸上皮細胞で転写調節因子であるビタミン D 受容体と結合し、小腸細胞の微絨毛上の Ca 輸送担体、Ca が細胞内を通過するために必要な Ca 結合タンパク質(カルビンディン)や側底膜上の Ca ポンプの発現を促進することにより、Ca 吸収を増加させるとともに、ほぼ同じ機作によって尿細管における Ca 再吸収を促進し、尿から Ca が損失するのを抑制する。近年になり、腸管細胞間隙を通過することにより吸収される Ca も多いことが明らかになった。

硬組織は Ca の貯蔵庫として働くが、Ca は硬組織の構成成分としてその強度に重要である。吸収される Ca が少ないと硬組織からの Ca の放出が増加し、その結果、硬組織の Ca は減少し、骨に異常が生じる。幼動物で Ca が欠乏すると、類骨(石灰化していない骨の有機基質)の石灰化が抑制され、骨の形態が異常なくなる病 ricket になる。成熟動物では骨の形態異常は生じないが、骨強度が低下する骨軟化症 osteomalacia になる。関節部腫脹、成長遅延、食欲低下、乳量・産卵率低下なども Ca 欠乏症として知られている。特に、出産直後の乳牛では、採食量の減少による Ca 吸収の低下や乳腺への急激な Ca の供給により、麻痺を伴う低 Ca 血症が生じる場合があり、乳熱(産褥麻痺)と呼ばれている。予後が悪いと産後起立不能症へと進展する。乳熱の予防法としては後述の飼料中酸塩基差(Dietary Cation-Anion Difference, DCAD)制御がある。

Ca の過剰は P, Mg, Fe, I, Mn, Zn, Cu などの吸収を抑制するので、これらの要求量が増える。また、Ca 過剰症として、腎臓障害、軟組織石灰化、ヒトではアルカローシス、慢性化すると、記憶低下、嗜眠、昏迷などを引き起こすミルク・アルカリ症候群が知られている。

(3)飼料中含量 一般的に、飼料原料中の Ca 含量は少ないので、補給が必要となる。濃厚飼料や粗飼料の Ca 含量は大きく変動する。穀類やヌカ類の Ca 含量は一般的に粗飼料より低い。一方、アルファルファのようなマメ科植物の Ca 含量は高い。また大豆のようなマメ科植物の種子も Ca を多く含み、マメ科植物種子由来の油粕類の Ca 含量も高くなる。

カニ殻ミール、エビ殻ミール、魚粉、ポークミール、フェザーミール、チキンミール、脱脂粉乳、ホエー、骨粉など動物性飼料の Ca 含量は高い。ただし、ウシ牛由来の骨粉は牛海綿状脳症との関係から使用が禁止されている。貝殻類なども Ca 源として用いられている。

## 2) リン(磷 phosphorus P)

原子番号 15, 原子量 30.97 の元素であり, 周期表では 15 族(窒素族)に属する元素である。古くから数種類の同素体が知られている。白リン以外の同素体は安定でほぼ無毒である。

(1) 工業的利用 工業原料としてはリン鉱石が用いられ, その 9 割は古生物が起源である化石鉱床または海鳥の糞の堆積鉱床から採掘されたものである。リン鉱床は海洋では浅い地域に多く, 元素の中では局在性が高い。メキシコ, コンゴ, 南米付近の海底には大規模な鉱床がある。日本には大規模なリン鉱床がなく, 全量を輸入に依存している。世界の埋蔵量は約 180 億 t と推定されている。リン酸の年間生産量は  $P_2O_5$  換算で約 4000 万 t であり, 約 1 億 4000 万 t のリン鉱石に相当する。今後, 新規の大規模な鉱床が発見されない場合は 130 年以内に, リン鉱石が枯渇するといわれている。また, 世界的な穀物需要の増加やバイオエタノールの生産によりリン肥料の需要が増大し, リン鉱石の価格が急騰しており, 2060 年代で資源が枯渇する最悪のシナリオも示されている。リン鉱石が少なくなると, 採掘コストが上昇するとともに, 重金属や放射性元素などの不純物を多く含むリン鉱石を使わざるを得ず, その処理にもコストがかかる。

リン鉱石の枯渇を遅らせるためには, 生活排水処理の活性汚泥から P を回収するといった P 資源利用技術の開発や, 家畜排泄物の P 源としての利用, P 施肥の低減などが対策として重要となる。また, 鉄鋼業では鉄鋼特性を低下させる P を製鋼過程で除去するので, 製鋼スラグ中では除去された P が濃縮されている。製鋼スラグは年間約 1 千万 t が排出されており, これを再利用できれば, 現在わが国が輸入しているリン鉱石分にほぼ匹敵する P 量を賄うことができる。

リン鉱石の世界全体の用途の 90% は肥料用, 10% 程度が飼料用と工業用である。日本では約

80% が肥料に用いられている。近年では, 肥料としての過リン酸石灰の生産が低下しているのに加え, 重過リン酸石灰の生産量も減少し, 代わりにリン酸アンモニウム肥料がその重要性を増している。リン鉱石中の P が F と結合したフッ素アパタイトはそのままでは水に溶けず, 飼料添加物や肥料としては利用できない。そのため主に硫酸による酸分解で F を除いた後に, 利用される。工業的にも, リン鉱石を主に硫酸で反応させ, 製造されるリン酸を出発原料としている。リン酸 ( $H_3PO_4$ ) の次にオキシ塩化リン ( $POCl_3$ ) や三塩化リン ( $PCl_3$ ), 次いでリン酸カルシウム ( $Ca_3(PO_4)_2$ ) やリン酸ナトリウム ( $Na_nH_{3-n}PO_4$ ) などのオルトリン酸塩の生産量が多い。リン酸およびこれらリン酸二次製品は, 金属表面処理液, 医薬, 農薬, 繊維染色, 食品, 汚泥処理, 樹脂の可塑剤や安定剤, 難燃剤, 洗剤等多方面に用いられる。

(2) 生体内利用 P は動植物にとって必須な元素であり, 動植物中ではリン酸またはその複合体として存在している。植物では, P は無機リン酸として吸収され, そのまま有機化合物となる。P が欠乏すると, 細胞分裂が低下し生長が抑制されるが, 葉の黄化は起こらず, 暗緑色となる。P は植物体内で移動しやすく, 下位の葉など古い組織に症状が表れやすい。

動物では P の吸収は主に小腸で行われる。多くが無機リン酸として吸収されるが, リゾレシチンなどリン酸化合物であるリン脂質消化物としても吸収される。動物体内では, その約 80% が硬組織に含まれ, Ca とともに骨に不可欠な成分である。また, ATP など高エネルギーリン酸エステル結合を有する物質や NAD, NADP の構成成分としてエネルギー代謝に関与する。水溶液中でリン酸はイオン化し  $PO_4^{3-}$ ,  $HPO_4^{2-}$ ,  $H_2PO_4^-$  になる。動物体内の主なリン酸イオンは  $HPO_4^{2-}$ ,  $H_2PO_4^-$  であり(表 5), この割合の変化が血液の酸塩基平衡維持に役立つ。リン酸は生体膜を構成するリン脂質の構成成分でもあり, 核酸にも含まれる。また, イノシトール三リン酸の構成成分として細胞内情報伝達に関与する。いくつかのタンパク質では, プロテインキナーゼにより特定部位のセリン, スレオニン, ヒスチジン, チロシン残基がリン酸化され, リン酸化されたアミノ酸残基はプロテインホス

ファターゼにより脱リン酸化される。このようなタンパク質のリン酸化や脱リン酸化によって、その活性が調節され、細胞内情報伝達に用いられる。

血漿中でPは、リン酸またはリン脂質として存在している。Caほど厳密ではないが、血漿中リン酸濃度も恒常性が保たれている。硬組織はリン酸の主要な貯蔵庫であり、骨と体液間でCaおよびリン酸の交換は常に行われる。これらの交換は、骨芽細胞による骨形成と破骨細胞による骨吸収によるものであり、Caとリン酸は同方向に同時に移動する。副甲状腺ホルモン、カルシトニン、活性型ビタミンDによる骨代謝調節により、リン酸の恒常性が維持される。副甲状腺ホルモンとカルシトニンは腎臓の尿管でリン酸の再吸収を抑制させることにより、尿中へのリン酸の排泄を増加させる。活性型ビタミンDは消化管からのリン酸の吸収を促進する。リン酸代謝調節ホルモンとして、線維芽細胞増殖因子23(FGF23)が見いだされた。FGF23は、血漿中リン酸濃度あるいは活性型ビタミンD濃度の上昇に応じて骨から分泌され、腎臓でのリン酸輸送担体の発現を低下させることによってリン酸の再吸収を強力に抑制し、尿中へのリン酸の排泄を促進するとともに、ビタミンD活性化を抑制し、血漿中活性型ビタミンD濃度とリン酸濃度を低下させる。

幼動物でPが欠乏すると石灰化していない骨の有機基質(類骨)の石灰化が低下し、骨の形態が異常となり、くる病になる。成熟動物では骨の形態異常は生じないが、骨強度が低下し、骨軟化症になる。高Ca低P状態でビタミンDが欠乏すると、さらにくる病や骨軟化症を発症しやすくなり、骨折のリスクが増加する。P欠乏は食欲を減退させ、反芻動物やウマでは毛や土などの異物を頻繁に舐める異嗜(pica)を呈する。その他、被毛粗化、成長抑制、飼料効率低下、泌乳量低下、発情停止、受胎率低下などが生じる。特に、反芻動物では

飼料中P含量が低いと、反芻胃内微生物のP欠乏のため繊維の分解やアミノ酸の合成が低下する。これらがP欠乏時の反芻動物での採食量低下の一因となる。PとCa代謝は深く関わっており、飼料中のCa:Pは1.5~2:1が適切である。

P過剰時には、二次性副甲状腺亢進症が生じ、骨量が減少し、成長や産卵率・卵殻質が低下する。P過剰により腎臓など軟組織における石灰化が生じることもある。

(3)飼料中含量 濃厚飼料や粗飼料のP含量は大きく変動する。牧草中のP含量は成熟に伴って著しく低下する。放牧草中のP含量は低い場合が多く、放牧牛ではPが欠乏しやすい。子実中のP濃度は粗飼料より高く、子実加工の副産物であるヌカ類や油粕類は特にP含量が高い。穀類や油粕類中のPの50~70%はフィチン(イノシトール六リン酸塩)として存在する。単胃動物ではフィチン態Pの利用性は低い。飼料に微生物由来のフィチン分解酵素(フィターゼ)を添加すると、主に胃でフィチンが分解されるため、フィチン態Pの利用性が高まる。また、遺伝子組換えを用いたフィチンが少ない作物も創生されている。油粕類など加熱処理をした飼料を除き、一般的にフィチン含量の高い穀類などはフィターゼ活性を有しているが、植物に含まれるフィターゼは消化管内で安定ではなく、同時に摂取されたフィチンをあまり分解できない。飼料給与前に浸漬処理を行うことによって、穀類に含まれる内因性フィターゼで共存するフィチンを部分的に分解できる。

動物性飼料には多くのPが含まれている。これらの生体利用性は高く、トウモロコシに含まれるP利用性が最大30%程度であるのに対して、魚粉や血粉中のPはほぼ完全に利用される。家禽排泄物も反芻動物には良いP源である。その他、骨粉類もP源として使われるが、牛由来の骨粉は牛海綿状脳症の関係から使用が禁止されている。