

第4章 歯エナメル質の炭素同位体分析に基づく馬の食性復元

1. 背景

(1) 歯エナメル質の組成

遺跡から出土する動物遺存体の同位体分析は、骨だけでなく、歯などの他部位（組織）についても可能である。同位体分析において骨以外の組織で良く用いられている例として、歯エナメル質が挙げられる。歯エナメル質はヒドロキシアパタイトを主な構成分子としており、約96%がヒドロキシアパタイトで占められている。ヒドロキシアパタイトの構成元素は、主にカルシウム、酸素、水素、炭素などであるが、同じヒドロキシアパタイトの中でもカルシウムがストロンチウムに置換されていたり、水酸基が炭酸基に置換されていたりしており、複数の兄弟分子が存在する。とくに生体中のヒドロキシアパタイトは形成過程が複雑なために、多様な元素が混在する。このように、元素が不均質性であることから、生体のヒドロキシアパタイトは均質な結晶ではない非晶質アパタイトと呼ばれている。この非晶質アパタイトは、生息環境などによって結晶の性質が異なる。例えば、フッ素含有率が高い水を飲んでたヒトは、フッ素含有率が低い水を飲んでたヒトよりも結晶の性質が異なる。

ヒドロキシアパタイトの形成環境によって多様な兄弟分子が存在するものの、生体のヒドロキシアパタイトにも一定の組成を持つことも知られている。例えば、歯エナメル質のヒドロキシアパタイトには、水酸基にかわって炭酸塩が約3%含まれている。これは、歯エナメル質形成過程において、体液中に溶解する炭酸イオンがOHイオンと置き換わったためである。体液中の炭酸イオンの濃度は、哺乳類がもつ代謝の恒常性に支配されており、歯エナメル質の形成環境中の分圧はほぼ一定である。このため、疾病などの代謝異常がある場合を除いて、炭酸塩は一定の割合でヒドロキシアパタイトに含まれている。

(2) ヒドロキシアパタイトの炭素同位体比

ヒドロキシアパタイトに含まれる炭酸塩の取り込みは、代謝の恒常性に支配されていることから、一定の代謝反応速度をとることが分かっている（岡崎 1992）。一定の代謝反応速度をもつ場合、体液中の炭酸イオンの炭素同位体比と、それを取り込んで形成された歯エナメル質のヒドロキシアパタイトの炭酸塩の炭素同位体比は常に一定の関係性を示すことが期待される。体液中の炭酸イオンは、呼吸で二酸化炭素として体液中に取り込まれた炭素以外に、摂取食物から取り込まれた炭素に大きく依存することが実験的に証明されている（Jim *et al.* 2004）。つまり、歯エナメル質の炭素同位体比を調べることで、摂取食物の炭素同位体比を算出することが可能となる。前章のコラーゲンの炭素同位体分析で取りあげたように、植物はC3植物とC4植物など光合成回路が異なる種類が存在しており、歯エナメル質の炭素同位体比を分析することでC3植物とC4植物の摂取傾向が評価できる。

骨コラーゲンの炭素同位体分析と歯エナメル質の炭素同位体分析で大きく異なる点として、2つの要素が挙げられる。一つ目は、骨コラーゲンの炭素と歯エナメル質の炭素の供給源の違いである。骨

コラーゲンの炭素は摂取食物のアミノ酸に含まれる炭素に由来するが、一方、歯エナメル質の炭素は摂取食物に含まれる全炭素に由来する。これは炭素同位体比にも反映しており、骨コラーゲンの炭素同位体比は摂取食物のアミノ酸の炭素同位体比と相関し、全炭素の同位体比との相関が相対的に低い。一方、歯エナメル質の炭素同位体比は摂取食物のアミノ酸の炭素同位体比との相関は低いものの、全炭素の炭素同位体比とは極めて高い相関を示す。ここで重要な点は、歯エナメル質がアミノ酸といった特定の栄養素に依存しない炭素同位体比を反映していることである。

そもそも骨コラーゲンの食性分析は歯エナメル質の炭素同位体分析とは異なり、ある仮定に基づいて食性を評価しており、人が実際に観察して見られる摂取量と一致しないことが多い。例えば、同じ植物の中でも C3 植物（イネなど）の葉の部分のように繊維質が多くアミノ酸含有率が低い餌と、C4 植物（アワ・ヒエなど）の実の部分のようにアミノ酸含有率が C3 植物よりも 2 倍ほど高い餌があったとする。もし、骨コラーゲンの炭素同位体比が C4 植物摂取の兆候を示したとしても、それは C4 植物の餌に 2 倍のアミノ酸が含まれていることが要因で得られた兆候であり、C3 植物の餌の摂取割合を過小評価している可能性を残すことになる。よって、文献上でみられる給餌量と比較するためには、各摂取食物のアミノ酸含有率を考慮した補正が必須となる。残念なことに、遺跡から出土する馬にどのような摂取植物が与えられたかというメニューがないため、アミノ酸含有率を加味した補正ができない。また、文献上で記載された給餌内容があったとしても、あくまで文献上で記載されている給餌内容を仮定した食性復元にとどまる。このため、馬が実際に摂取した C3 植物と C4 植物の摂取割合は、その実態とずれる潜在的なリスクがある。

一方、歯エナメル質の炭素同位体比は、前述したように特定の栄養素に大きく依存せず、C3 植物と C4 植物の摂取量割合を良く反映する。つまり、当時の人が与えた馬の給餌内容の実態に近い食性の復元が可能となる。南米の C4 植物であるトウモロコシ利用に関する研究や、日本の古墳時代における馬の飼育過程における C4 植物の利用形態に関する研究など、分析上の利点を考慮した先行研究は多数ある（Tykot & Staller 2002、覚張 2015）。

二つ目の重要な点として、歯は骨とは代謝の仕組みが異なり、かつ、形成される時期が異なることが挙げられる。骨に含まれているコラーゲン、ハイドロキシアパタイト、脂肪酸などは、骨芽細胞と破骨細胞という主に 2 種類の細胞によって常に溶解と合成を繰り返している（骨のリモデリング）。骨のリモデリングは、生存中は常に生じており、既に合成されていた骨中の各分子を徐々に新生の分子に置き換えていく。また、新生された各分子の炭素原子は、合成される直前に摂取した食物中の炭素原子に由来する。つまり、歳を重ねるごとに若いころに形成された各分子は消失し、新たに摂取した食物から作られた各分子の情報が蓄積されていくこととなる。この置き換わりの時間は、放射性炭素の半減期を利用して推定されており、10 年以上かかり骨中の各分子は完全に新生の各分子へと置き換わるとされている（Hedges *et al.* 2007）。つまり、骨コラーゲンの同位体情報は、ここ 10 年間の食性の平均値を反映する。一方、歯エナメル質の場合、骨とは異なり骨芽細胞と破骨細胞がそもそも存在せずに主要成分であるハイドロキシアパタイトが形成される。このため、一度形成されたハイドロキシアパタイトは後から形成されたハイドロキシアパタイトに置き換わることは無い。このため、歯エナメル質の炭素原子は、歯エナメル質が形成された比較的若い時期に摂取した食物由来の炭素原子をそのまま保持している。

また、歯エナメル質には形成過程で生じる年輪のような縞状構造（成長線）があり、全ての歯種に

において成長線がみられる。この成長線は、ほぼ一日単位で形成されており、各成長線は形成された時期に摂取した食物および飲み水の成分に含まれた原子に由来する成分で構成されている。例えば、馬では60ヶ月分（5年分）の成長線があり（Hoppe *et al.* 2004）、ヒトではおよそ15年分の成長線がある（ヒトの場合、第三大臼歯の形成時期が個人間で大きく異なるため、形成時期には幅がある）。成長線ごとにハイドロキシアパタイトの炭素同位体比を分析することで、馬歯から5年間にわたる歯エナメル質の炭素同位体比の履歴が復元可能となる。このように、歯エナメル質は骨とは異なり、より解像度の高い時間軸を付加した食性復元ができる利点がある。

2. 目的

そこで本章では、前章で示された骨コラーゲンに基づく食性復元について、全く異なる分析手法を用いて再検証することを目的とした。とくに、藤原宮跡出土馬の骨コラーゲンの炭素同位体分析の結果で、1個体の馬がC4植物由来のアミノ酸にやや依存していた傾向を示しているが、前述したように、摂取したC4植物に含まれるアミノ酸含有率が高かったために、C4植物摂取割合を過大評価していた可能性もある。また、骨コラーゲンの分析は歯の分析と異なり、形成時期が明確でなかった。このため、歯エナメル質の炭素同位体分析によって、形成時期ごとのC3植物・C4植物摂取割合を評価することも合わせて試みた。これらの結果に基づいて、炭素同位体比の形成時期別の変動を可視化し、藤原宮跡出土馬の給餌形態について考察することを目的とした。

3. 試料

藤原宮造営期における馬の移動形態を復元するために、ウマ歯エナメル質15点、イヌ歯エナメル質3点、イノシシ歯エナメル質1点を分析した。なお、第2章の事前調査において、飛鳥藤原第20次調査資料も同位体分析に適していることが示されたため、分析資料に加えている（表4-1）。

表4-1 同位体分析に用いた飛鳥藤原第20次の歯エナメル質資料

資料番号	分析番号	遺構	時期	分類群	歯種	左右	歯冠高 (mm)	推定年齢 (西中川ほか2015)
20-3	TG111006	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	下顎歯 (P4/M1/M2)	左	69.52	4-5歳
20-4	TG111007	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	下顎歯 (P4/M1/M2)	左	74.08	4歳
20-5	TG111008	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	下顎歯 (P3/P4)	左	81.03	4歳
20-6	TG111009	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	下顎歯 (P4/M1/M2)	右	80.08	3-4歳
20-7	TG111010	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	下顎歯 (P2)	右	49.78	3歳

4. 方法

(1) 歯エナメル質のサンプリング

サンプリングは動物遺存体の歯エナメル質を歯科用ドリルにてタングステン・カーバイドのドリル (JET CARBIDE BURS : SHOFU) を装着して、目標のエナメル質の部位からサンプリングした。まず、

ドリルで表面に付着したセメント質を除去し、エナメル質を露出させた。さらに約0.1mm以上の深さで表面のエナメル質表層を除去した後に、新しいドリルに変えて約5～10mgのエナメル質粉末を採取した。また、獣骨からのサンプリングは、骨の緻密層から約5～10mgの骨粉を採取した。

(2) エナメル質粉末の前洗浄

歯エナメル質に含まれる微量の有機物を除去するために、2.5%次亜塩素酸ナトリウムを用いて24時間反応させ、超純水で洗浄した。次に、生存時に沈着した歯石由来の炭酸塩や埋没時における土壌水由来の二次的な炭酸塩の沈着を除去するために、0.1M酢酸バッファーに15分間で2回反応させ、超純水で洗浄した。洗浄した試料は70℃で24時間乾燥させ、乾燥させた試料をアルミナ乳鉢で細かく粉末化させ、粒度を均質化させた。

(3) 歯エナメル質の炭素同位体比測定

歯エナメル質の炭素同位体比測定は、国立科学博物館に設置されたキールデバイス型・同位体比質量分析計（Kiel Device及びMAT 253（Thermo Fisher Scientific））を用いた。測定値は国際標準であるPDBに対する差の千分率（‰）で以下の式（1）で表記される。

$$\delta^{13}\text{C} = \left[\left\{ \left(\frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}} \right)_{\text{sample}} / \left(\frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}} \right)_{\text{standard}} \right\} - 1 \right] \times 1000 \text{ (‰)} \dots \text{(式1)}$$

未知試料の分析結果の補正は、国際スタンダードのNBS19、NBS18およびJCP-1の測定値を用いて内挿補正を行った。内部標準による測定精度は標準偏差で0.1‰以下であった。

5. 結果

歯エナメル質の炭素同位体比測定の結果、藤原宮跡出土馬の炭素同位体比は $\delta^{13}\text{C} = -10.8 \sim -5.8 \%$ （Mean = -8.8% 、SD = 1.4% ）、遺跡出土イヌの炭素同位体比は $\delta^{13}\text{C} = -14.0 \sim -13.2 \%$ （Mean = -13.7% 、SD = 0.4% ）、遺跡出土イノシシの炭素同位体比は $\delta^{13}\text{C} = -13.0 \%$ 、遺跡出土馬の炭素同位体比は $\delta^{13}\text{C} = -12.1 \%$ であった（表4-2）。藤原宮跡出土馬と他の動物種との間で炭素同位体比の分散および平均値に差があるか評価するため、F検定およびU検定を実施した。その結果、出土馬と出土イヌの間では分散に有意な差は無く（ $P=0.08$ ）、平均値に有意な差があった（ $P<0.01$ ）。次に、出土馬とその他の生物種（イヌおよびイノシシ）との間で炭素同位体比の分散および平均値の差を検証した。その結果、出土馬とその他の生物種（イヌおよびイノシシ）の間では分散に有意な差があり（ $P=0.05$ ）、平均値にも有意な差があった（ $P<0.01$ ）。

6. 考察

(1) 藤原宮跡出土動物遺存体の食生態復元

本分析で得られた同位体比が、実際にその動物の食生態を反映しているか評価するために、ハイド

表4-2 藤原宮跡出土動物遺存体の歯エナメル質の炭素同位体比

資料番号	分析番号	遺構	時期	動物種	部位	左右	部分	炭素同位体比 (エナメル質)‰	炭素同位体比 (摂取植物)‰
153-86	TG102201	SH10800	藤原宮期	ウマ	遊離歯	不明	歯種不明	計測不可	-
153-42	TG102202	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	遊離歯	右	下顎歯 (P4/M1/M2)	-7.9	-22.0
153-5	TG102203	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	遊離歯	右	下顎歯 (P4/M1/M2)	-8.2	-22.3
153-53	TG102204	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	遊離歯	右	上顎歯 (M3)	-8.2	-22.3
153-54	TG102205	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	遊離歯	右	上顎歯 (P2)	-7.4	-21.5
153-94	TG111001	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	遊離歯	左	上顎歯 (P3/P4/M1/M2)	-7.5	-21.6
153-75	TG111002	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	遊離歯	右	上顎歯 (P3/P4/M1/M2)	-9.8	-23.9
153-55	TG111003	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	遊離歯	左	上顎歯 (P3/P4/M1/M2)	-8.0	-22.1
153-78	TG111004	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	遊離歯	左	下顎歯 (P3/P4)	計測不可	-
153-4	TG111005	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	遊離歯	右	下顎歯 (P4/M1/M2)	-5.8	-19.9
20-3	TG111006	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	遊離歯	左	下顎歯 (P4/M1/M2)	-9.7	-23.8
20-4	TG111007	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	遊離歯	左	下顎歯 (P4/M1/M2)	-10.8	-24.9
20-5	TG111008	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	遊離歯	左	下顎歯 (P3/P4)	-10.6	-24.7
20-6	TG111009	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	遊離歯	右	下顎歯 (P4/M1/M2)	-10.2	-24.3
20-7	TG111010	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	遊離歯	右	下顎歯 (P2)	-8.5	-22.6
163-1	TG111011	SX10820	藤原宮造営期	ウマ	遊離歯	右	上顎歯 (P3/P4/M1/M2/M3)	-10.4	-24.5
153-79	TG111021	SD1901A	藤原宮造営期	イヌ	下顎骨	左	採取部位:下顎M2	-	-
153-14	TG111022	SD1901A	藤原宮造営期	イヌ	下顎骨	左	採取部位:下顎M1	-14.0	-28.1
153-15	TG111023	SD1901A	藤原宮造営期	イヌ	下顎骨	右	採取部位:下顎P2	-13.8	-27.9
153-40	TG111024	SD1901A	藤原宮造営期	イヌ	遊離歯	右	上顎P3	-13.2	-27.3
153-85	TG111025	SX10820	藤原宮造営期	イノシシ	遊離歯	右	下顎C	-13.0	-27.1

ロキシアパタイトの炭素同位体比から摂取食物の炭素同位体比へ変換する式に当てはめ、遺跡出土動物が生存時に摂取した摂取食物の炭素同位体比を推定した。Cerling & Harris (1999) の変換式 (式2) を用いて、本分析で得られた歯エナメル質の炭素同位体比 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{Enamel}}$) から、摂取食物の炭素同位体比 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{Diet}}$) を算出した (表4-2参照)。

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{Diet}} = \delta^{13}\text{C}_{\text{Enamel}} - 14.1 (\text{‰}) \cdot \cdot \cdot (\text{式2})$$

算出の結果、遺跡出土馬の摂取食物の炭素同位体比は、 $\delta^{13}\text{C} = -24.9 \sim -19.9 \text{‰}$ (Mean = -22.9‰ , SD = 1.4‰)、遺跡出土イヌの摂取食物の炭素同位体比は $\delta^{13}\text{C} = -28.1 \sim -27.3 \text{‰}$ (Mean = -27.8‰ , SD = 0.4‰)、遺跡出土イノシシの摂取食物の同位体比は $\delta^{13}\text{C} = -27.1 \text{‰}$ 、遺跡出土馬の摂取食物の炭素同位体比は $\delta^{13}\text{C} = -26.2 \text{‰}$ であった (表4-2参照)。一般的なC3植物は $-28 \sim -25 \text{‰}$ の範囲を示すことが知られているが (Cerling & Harris 1999 参照)、遺跡出土動物遺存体のうち、これらの範囲に遺跡出土のイヌおよびイノシシが収まり、遺跡出土馬はC3植物の範囲外の値を示した。日本列島の野生イノシシは森林に生息しており、その炭素同位体比も森林生態系において摂取した食物の炭素同位体比の範囲に収まると期待される。本分析結果は、本来の野生イノシシが示しうる炭素同位体比の範囲に収まっており、生態学的な背景と矛盾しない。一方、ウマはイノシシと生態が異なり、下草食者 (グレーザー) であるために、森林以外で下草として自生するC4植物の摂取植物割合がイノシシよりも相対的に高くなる傾向にある。遺跡出土馬の摂取食物の炭素同位体比がC3植物の範囲から外れて

いるのも、このような食生態における動物種間の違いを良く反映している。

また、家畜であるイヌは、人の食物残渣や周囲の環境によって多様な食物を得る可能性がある。例えば、イヌは人の食物残渣のなかで海産物や狩猟で得られた獣肉などを摂取する可能性もある。とくに、海生魚介類や淡水生魚介類の炭素同位体比は -18% よりも高い値を示す場合が多い (Richards *et al.* 2005)。しかし、本分析で得られた遺跡出土イヌの摂取食物の炭素同位体比は、C3植物の炭素同位体比の範囲に取まっていることから、海産物や淡水産の摂取割合が低かったと考えられる。この結果は、藤原宮跡出土イヌが魚介類に依存していなかったことを示唆する。また、C3植物を摂取したシカ・イノシシの可食部(肉・骨)の炭素同位体比は、C3植物の炭素同位体比の範囲とほぼ変わらない。このため、藤原宮跡出土イヌがC3植物に依存していたか、シカ・イノシシなどの陸生哺乳類に依存していたかは、方法論的に区別することができない。近年、アミノ酸の炭素・窒素同位体分やマグネシウム同位体分析で肉食の程度を評価することが可能になってきた。今後、これらの手法を組み合わせることで、藤原宮跡出土イヌの食性が植物に依存していたか、陸生哺乳類に依存していたのかを検証することが求められる。

(2) 藤原宮跡出土馬の食生態の分類

従来の歯エナメル質の炭素同位体分析では、Cerling & Harris (1999) で提唱された定義に基づいて、大きく3つの食性の分類がなされてきた。まず、哺乳動物の歯エナメル質の炭素同位体比が $\leq -8\%$ であった個体はC3植物を主に摂取するC3植物食者(約70%以上C3植物を摂取)とし、炭素同位体比は $\geq -2\%$ であった個体はC4植物を主に摂取するC4植物食者(約70%以上C4植物を摂取)と、またその中間($-8\% \sim -2\%$)に収まる個体をC3/C4中間食者と定義している (Cerling & Harris 1999, Uno *et al.* 2011)。本分析で得られた歯エナメル質の炭素同位体比に基づいて、これら3つに分類した結果、15点中10点がC3植物食者に、4点がC3/C4中間食者に分類された。とくに、No.153-4 (TG111005)の炭素同位体比は高い値を示しており、骨コラーゲンで得られた結果と同様に、C4植物に大きく依存していた個体が存在していると考えられる。

(3) 藤原宮跡出土馬のC3・C4植物摂取割合の時間変動

最後に、本分析で採取した歯エナメル質の採取地点から、形成時期を推定し、形成時期と炭素同位体比の変動を可視化することを試みた。歯エナメル質の各採取地点から求めた推定形成時期 (T_e) は下記の式3で求めた (覚張 2015)。

$$T_e = T_{\min} + [(L_m - L_s) / L_m \times T_p] \text{ (Months)} \dots \text{(式3)}$$

西中川ら (1991) で報告されている各歯種の最大歯冠高 (L_m , mm) を基準とし、歯根部最下部 (エナメル質最下部) からサンプリング地点 (サンプリング箇所最下部) までの距離 (L_s , mm) を求め、Hoppe *et al.* 2004 で示された各歯種の形成期間 (T_p , Months) および形成開始時期 (T_{\min} , Months) と対応させた。得られた形成時期は炭素同位体比と対応させ (表4-3)、2次元プロットで可視化した。なお、本分析で使用した馬歯は遊離歯であるため、歯種同定が困難であったものも多かった。このため、歯種同定結果で複数の歯種に同定された場合、歯エナメル質の形成時期幅は同定された歯種内で

最も長い形成時期範囲を示すように記載し（表4-4）、歯種同定における不確かさを図示し考察を試みた（図4-1）。

作成された2次元プロットを見ると、比較的若い時期に形成された歯エナメル質の炭素同位体比

表4-3 歯エナメル質の推定形成時期の算出

資料番号 (分析番号)	遺構 (時期)	動物種	歯種	候補歯種	Ls (mm)	Lm (mm)	Tmin (Months)	Tp (Months)	Te (Months)	炭素 同位体比
153-42 (TG102202)	SD1901A (藤原宮造営期)	ウマ	下顎歯 (P4/M1/M2)	下顎P4	10	62.1	19.0	32.0	45.8	-7.9
				下顎M1	10	75.8	0.5	22.5	20.0	
				下顎M2	10	84.4	7.0	30.0	33.4	
153-5 (TG102203)	SD1901A (藤原宮造営期)	ウマ	下顎歯 (P4/M1/M2)	下顎P4	64	62.1	19.0	32.0	18.0	-8.2
				下顎M1	64	75.8	0.5	22.5	4.0	
				下顎M2	64	84.4	7.0	30.0	14.3	
153-53 (TG102204)	SD1901A (藤原宮造営期)	ウマ	上顎歯 (M3)	上顎M3	69	75.5	21.0	34.0	23.9	-8.2
153-54 (TG102205)	SD1901A (藤原宮造営期)	ウマ	上顎歯 (P2)	上顎P2	32	56.5	13.0	18.0	20.8	-7.4
153-94 (TG111001)	SD1901A (藤原宮造営期)	ウマ	上顎歯 (P3/P4/M1/M2)	上顎P3	36	71.7	14.0	22.0	25.0	-7.5
				上顎P4	36	70.3	19.0	32.0	34.6	
				上顎M1	36	69.6	0.5	22.5	11.4	
153-75 (TG111002)	SD1901A (藤原宮造営期)	ウマ	上顎歯 (P3/P4/M1/M2)	上顎M2	36	85.2	7.0	30.0	24.3	-9.8
				上顎P3	69	71.7	14.0	22.0	14.8	
				上顎P4	69	70.3	19.0	32.0	19.6	
153-55 (TG111003)	SD1901A (藤原宮造営期)	ウマ	上顎歯 (P3/P4/M1/M2)	上顎M1	69	69.6	0.5	22.5	0.7	-8.0
				上顎M2	69	85.2	7.0	30.0	12.7	
				上顎P3	69	71.7	14.0	22.0	14.8	
153-78 (TG111004)	SD1901A (藤原宮造営期)	ウマ	下顎歯 (P3/P4)	下顎P3	62	75.8	14.0	22.0	18.0	計測不可
153-4 (TG111005)	SD1901A (藤原宮造営期)	ウマ	下顎歯 (P4/M1/M2)	下顎P4	62	62.1	19.0	32.0	19.1	-5.8
				下顎M1	60	75.8	0.5	22.5	5.2	
				下顎M2	60	84.4	7.0	30.0	15.7	
20-3 (TG111006)	SD1901A (藤原宮造営期)	ウマ	下顎歯 (P4/M1/M2)	下顎P4	68	62.1	19.0	32.0	16.0	-9.7
				下顎M1	68	75.8	0.5	22.5	2.8	
				下顎M2	68	84.4	7.0	30.0	12.8	
20-4 (TG111007)	SD1901A (藤原宮造営期)	ウマ	下顎歯 (P4/M1/M2)	下顎P4	69	62.1	19.0	32.0	15.4	-10.8
				下顎M1	69	75.8	0.5	22.5	2.5	
				下顎M2	69	84.4	7.0	30.0	12.5	
20-5 (TG111008)	SD1901A (藤原宮造営期)	ウマ	下顎歯 (P3/P4)	下顎P3	72	75.8	14.0	22.0	15.1	-10.6
				下顎P4	72	62.1	19.0	32.0	13.9	
20-6 (TG111009)	SD1901A (藤原宮造営期)	ウマ	下顎歯 (P4/M1/M2)	下顎P4	72	62.1	19.0	32.0	13.9	-10.2
				下顎M1	72	75.8	0.5	22.5	1.6	
				下顎M2	72	84.4	7.0	30.0	11.4	
20-7 (TG111010)	SD1901A (藤原宮造営期)	ウマ	下顎歯 (P2)	下顎P2	45	53.4	13.0	18.0	15.8	-8.5
163-1 (TG111011)	SX10820 (藤原宮造営期)	ウマ	上顎歯 (P3/P4/M1/M2/ M3)	上顎P3	32	71.7	14.0	22.0	26.2	-10.4
				上顎P4	32	70.3	19.0	32.0	36.4	
				上顎M1	32	69.6	0.5	22.5	12.7	
				上顎M2	32	85.2	7.0	30.0	25.7	
				上顎M3	32	75.5	21.0	34.0	40.6	

表4-4 歯エナメル質の推定形成時期と炭素同位体比

資料番号 (分析番号)	遺構 (時期)	動物種	歯種	炭素 同位体比	最短形成 時期 (Months)	最長形成 時期 (Months)	形成時期の 中央値 (Months)	形成時期の 不確かさ (Months)
153-42 (TG102202)	SD1901A (藤原宮造営期)	ウマ	下顎歯 (P4/M1/M2)	-7.9	20.0	45.8	32.9	12.9
153-5 (TG102203)	SD1901A (藤原宮造営期)	ウマ	下顎歯 (P4/M1/M2)	-8.2	4.0	18.0	11.0	7.0
153-53 (TG102204)	SD1901A (藤原宮造営期)	ウマ	上顎歯 (M3)	-8.2	23.9	23.9	23.9	0.0
153-54 (TG102205)	SD1901A (藤原宮造営期)	ウマ	上顎歯 (P2)	-7.4	20.8	20.8	20.8	0.0
153-94 (TG111001)	SD1901A (藤原宮造営期)	ウマ	上顎歯 (P3/P4/M1/M2)	-7.5	11.4	34.6	23.0	11.6
153-75 (TG111002)	SD1901A (藤原宮造営期)	ウマ	上顎歯 (P3/P4/M1/M2)	-9.8	0.7	19.6	10.1	9.4
153-55 (TG111003)	SD1901A (藤原宮造営期)	ウマ	上顎歯 (P3/P4/M1/M2)	-8.0	0.7	19.6	10.1	9.4
153-78 (TG111004)	SD1901A (藤原宮造営期)	ウマ	下顎歯 (P3/P4)	計測不可	18.0	19.1	18.5	0.5
153-4 (TG111005)	SD1901A (藤原宮造営期)	ウマ	下顎歯 (P4/M1/M2)	-5.8	5.2	20.1	12.6	7.4
20-3 (TG111006)	SD1901A (藤原宮造営期)	ウマ	下顎歯 (P4/M1/M2)	-9.7	2.8	16.0	9.4	6.6
20-4 (TG111007)	SD1901A (藤原宮造営期)	ウマ	下顎歯 (P4/M1/M2)	-10.8	2.5	15.4	9.0	6.5
20-5 (TG111008)	SD1901A (藤原宮造営期)	ウマ	下顎歯 (P3/P4)	-10.6	13.9	15.1	14.5	0.6
20-6 (TG111009)	SD1901A (藤原宮造営期)	ウマ	下顎歯 (P4/M1/M2)	-10.2	1.6	13.9	7.8	6.1
20-7 (TG111010)	SD1901A (藤原宮造営期)	ウマ	下顎歯 (P2)	-8.5	15.8	15.8	15.8	0.0
163-1 (TG111011)	SX10820 (藤原宮造営期)	ウマ	上顎歯 (P3/P4/M1/M2/M3)	-10.4	12.7	40.6	26.6	14.0

は低い傾向があり、20ヶ月齢以降になると炭素同位体比が安定する傾向を示した（図4-1参照）。具体的に見ると、10ヶ月齢以前に形成された歯エナメル質の炭素同位体比が低い傾向にある。この要因として、授乳の影響が考えられる（Sharp & Cerling 1998）。母乳には母個体が摂取する植物よりも相対的に低い酸素同位体比をもつ。このため、離乳が完了していない時期の炭素同位体比は、離乳が完了した時期と比べて約1%低い値を示しうる。本分析では、これらの影響が見られることから、生存時における同位体的特徴を良く保持していたと考えられる。一方、No.153-4（TG111005）のように炭素同位体比が高くなる個体なども現れており、授乳効果だけでは説明が困難な個体も存在する。これらの結果は、藤原宮跡出土馬が若齢時において個体ごとに多様な飼育形態をとっていた馬が混在していた可能性を示唆している。

若い時期に形成された歯エナメル質の炭素同位体比が低い傾向にある同様の例として、群馬県高崎市の三ツ寺Ⅰ・Ⅱ遺跡から出土した馬歯エナメル質の炭素同位体分析が挙げられる（覚張 2015）。ただし、藤原宮跡出土馬の炭素同位体比は15ヶ月齢に炭素同位体比がC3/C4中間食者の範囲に入り、-5%と高い炭素同位体比を持つ個体（No.153-4）が出現するのに対し、三ツ寺Ⅰ・Ⅱ遺跡では、36ヶ月齢以降にC3/C4中間食者の範囲に収まり、C3/C4中間食者の出現時期が異なるという違いが認められる。

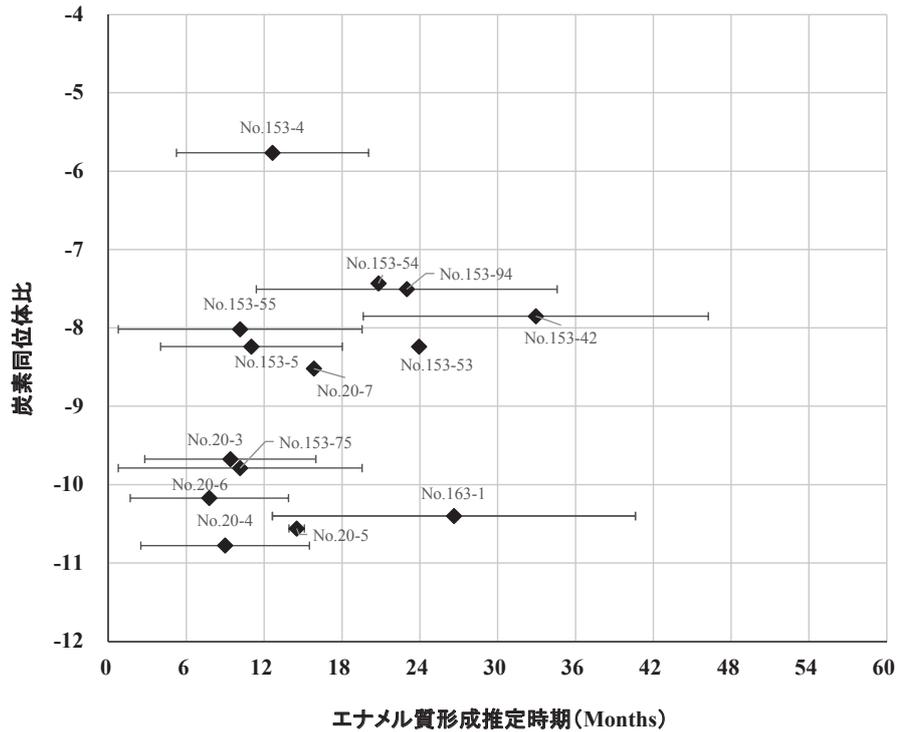


図4-1 歯エナメル質の炭素同位体比変動

今後の課題として、No.153-4 (TG111005) のように食性が他の個体と異なる要因を、他の生態学的な指標に基づいて検証することが求められる。例えば、藤原宮跡出土馬は、食性が異なる馬が混在するものの、他の C3 植物食者および C3/C4 中間食者と同じ馬牧で生産されていたかどうかはまだ不明である。出土馬の出生地を評価することによって、給餌形態と産地情報が組み合わさり、当時の複雑な馬飼育形態の復元につながると期待される。第5章と第6章では、これらの馬がどのような地域から持ち込まれたか、複数の同位体指標を用いて検討を行う。

(覚張隆史)

引用文献

- 岡崎正之 (1992) 『歯と骨をつくるアパタイトの化学』 東海大学出版会
- 覚張隆史 (2015) 「歯エナメル質の炭素安定同位体比に基づく三ツ寺 I・II 遺跡出土馬の食性復元」 『動物考古学』 32、25-37 頁
- 西中川駿 (1991) 『古代遺跡出土骨からみたわが国の牛、馬の渡来時期とその経路に関する研究』 科学研究費補助金 (一般研究 (B)) 研究成果報告書 平成2年
- 西中川駿・幸村真由美・吉野文彦・塗木千穂子・松元光春 (2015) 「ウマの臼歯の計測値から体高および年齢の推定法」 『動物考古学』 32、pp.1-9
- Cerling, T. E. and Harris, J. M. (1999) Carbon isotope fractionation between diet and bioapatite in ungulate mammals and implications for ecological and paleoecological studies. *Oecologia*. 120 pp. 347-363.

- Jim, S., Ambrose, S. H., Evershed, R. P. (2004) Stable carbon isotopic evidence for differences in the dietary origin of bone cholesterol, collagen and apatite: implications for their use in palaeodietary reconstruction. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 68. pp. 61-72
- Hedges, R., Clement, J. G., Thomas, C. D., O'connell, T. C. (2007) Collagen turnover in the adult femoral mid-shaft: modeled from anthropogenic radiocarbon tracer measurements. *American Journal of Physical Anthropology*. 133. pp. 808-816
- Hoppe, K., Stover, A., Pascoe, S. M., Amundson, J. R. (2004) Tooth enamel biomineralization in extant horses: implications for isotopic microsampling. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 206. pp. 355-365.
- Uno, K. T., Cerling, T. E., Harris, J. M., Kunimatsu, Y., Leakey, M. G., Nakatsukasa, M., Nakaya, H. (2011) Late Miocene to Pliocene carbon isotope record of differential diet change among East African herbivores. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 108 pp. 6509-6514.
- Tykot, R. H. and Staller, J. E. (2002) The Importance of Early Maize Agriculture in Coastal Ecuador: New Data from La Emerenciana. *Current Anthropology*. 43. pp. 666-677
- Richards, M. P., Jacobi, R., Cook, J., Pettitt, P. B., Stringer, C. B. (2005) Isotope evidence for the intensive use of marine foods by Late Upper Palaeolithic humans. *Journal of Human Evolution*. 49. pp. 390-394
- Sharp, Z. D. and Cerling, T. E. (1998) Fossil isotope records of seasonal climate and ecology: Straight from the horse's mouth. *Geology*. 26. pp. 219-222.