

第6章 酸素同位体分析に基づく馬の産地推定

1. 背景

(1) 酸素同位体を用いた動物の移動復元

前章では、藤原宮跡出土馬のストロンチウム同位体分析から奈良県域外からの馬の持込みの可能性が示唆された。しかしながら、ストロンチウム同位体比は、遺跡出土馬がどの地域で生産されていたかを評価することは困難な場合が多い。なぜなら、日本国内におけるストロンチウム同位体比の分布が地域内で多様な値を示すために、非常に遠方の異なる地域においても近似したストロンチウム同位体比を示す可能性があり、両者の地域間で識別ができないという分析上の制約がある。また、日本列島全域におけるストロンチウム同位体比分布は調査されておらず、前章で扱ったような比較的近距离内の移動ならば検出できるが、遠隔地に存在する類似のストロンチウム同位体比を持つ地質上に生息する動物の間では識別ができず、馬のように長距離移動をとまなう動物には別の地理的指標を検討する必要がある。そこで本章では、長距離移動の指標として、酸素同位体比に着目した。

酸素同位体比は ^{16}O 、 ^{17}O および ^{18}O で構成されており、それぞれの自然存在比は ^{16}O が99.7630 %、 ^{17}O が0.0375 %、 ^{18}O が0.1995 %である。水の酸素同位体比は、主に自然存在比に近い ^{16}O と ^{18}O の比で表記され、酸素同位体比は国際スタンダードであるV-SMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water; 世界の海水標準値) を基準として、千分率(%)で表記し、 $\delta^{18}\text{O}$ と表す(酒井・松久1996)。酸素同位体比は、全球での気候変動を評価する上で利用されており、グリーンランドのアイスコアの分析では、古気温のプロキシとして扱われている(Dansgaard *et al.* 1969)。

これらの分析はアイスコアなどの無生物資料に限らず、動物のハイドロキシアパタイトの酸素同位体比からも環境中の酸素同位体比を復元する研究が盛んに行われてきた。骨や歯の主な成分であるハイドロキシアパタイトは、リン酸基および炭酸基に酸素を含んでいる。リン酸基と炭酸基の酸素は、主に飲み水および食物に含まれる水から合成されている(Kohn *et al.* 1996)。摂取した水は血中で均質化し、骨形成および歯形成の際に血管系から供給されている。哺乳類は恒温動物であるため、ハイドロキシアパタイトの硬質化の代謝反応速度は、代謝系がほぼ一定である同一種内においては近似しており、動的同位体効果はほぼ一定と仮定できる(Yoshida and Miyazaki 1991)。そのため、形成過程で取り込まれたハイドロキシアパタイトの酸素同位体比は、摂取した水の酸素同位体比と高い相関関係がある(Bryant *et al.* 1996、Huertas *et al.* 1995、Longinelli *et al.* 1984)。

馬が飲み水として利用する河川、湖、沼、ため池などの水は、雨水(降水)の総称である表層水に由来しているため、表層水の酸素同位体比が高い地域に生息していた馬の歯のエナメル質の酸素同位体比は高くなり、表層水の酸素同位体比が低い地域に生息していた馬の歯のエナメル質の同位体比は低くなると期待される。また、ハイドロキシアパタイトの酸素同位体比から摂取した水の酸素同位体比を算出する際には、完新世における馬資料に基づいて作成された回帰式($\delta^{18}\text{O}_{\text{phosphate}} = 0.72 \cdot \delta^{18}\text{O}_{\text{water}} + 22.29$; $R^2=0.90$)が利用可能であり、日本列島における馬の歯エナメル質の酸素同位体比から摂取した水の酸素同位体比を算出できると期待される(Huertas *et al.* 1995)。

(2) リン酸塩の酸素同位体比測定

ハイドロキシアパタイトの酸素同位体分析にはリン酸基と炭酸基に含まれる異なる2つの分子における酸素原子が分析可能である。炭酸塩の酸素同位体比は測定条件となるリン酸の温度や遺跡埋没時における続成作用によって、酸素同位体比が変動する可能性があり、遺跡出土試料に応用する際には注意が必要である (Passey *et al.* 2007)。一方、リン酸基の酸素同位体比は続成作用 (土壌からの汚染やハイドロキシアパタイト自体の分子構造の変化) の影響が低いことが報告されており、現生資料から化石標本まで幅広く応用可能である (Lee Thorp and van der Merwe 1991)。リン酸基の酸素同位体比測定は、1980年代から精力的に研究されており、五フッ化臭素 (BrF_5) 法が前処理として用いられてきた (Tudge 1960、Wiedemann-Bidlack 2008)。近年では、爆発の危険性があり、レーザーなどの特殊な装置を必要とする五フッ化臭素法を用いた研究は少なくなり、とくに高温で試料を熱分解する TCEA を前処理装置として用いる TCEA-IRMS が市販されてからは、より簡便で安全性の高いリン酸銀法 (Ag_3PO_4) が主流となっている (Vennemann *et al.* 2002)。

リン酸銀法に基づく酸素同位体比測定には、前処理の影響によって酸素同位体比の値に約1%の変動がみられていたため、前処理工程を含めた国際スタンダードの作製が求められてきた (Vennemann *et al.* 2002)。2012年に NBS120c を用いることで前処理工程を加味した補正の妥当性が確認され、V-SMOW を基準としたリン酸銀の酸素同位体比測定が可能となった (Halas *et al.* 2011)。現在では、前処理過程におけるスタンダードとして NBS120c を測定し、合わせて同位体比測定のスタンダードとして NBS127などを測定して測定値の確度を保証している (Brand *et al.* 2009、Skrzypek 2013)。

(3) 表層水の酸素同位体比の多様性と産地識別への応用

日本列島における表層水の酸素同位体比は、Mizota and Kusakabe (1994) によって全国規模で調査が実施されており、酸素同位体比の地理的勾配が示されている。日本列島および東アジアにおける表層水の酸素同位体比は -14.7‰ ~ -4.6‰ の範囲をとり、約10%の地理的変動が確認されている。また、これらの酸素同位体比は採取地点の気温および緯度と相関することが示されている (Mizota and Kusakabe 1994)。

水の酸素同位体比が多様な値を示す理由は、 ^{16}O と ^{18}O の同位体の間で質量が異なることで、同位体ごとに反応速度が異なるためである。地表にある水は、気温が高い地域では早く蒸発し、気温が低い地域では蒸発は緩やかである。この反応の違いは、酸素同位体比にも表れる。軽い酸素同位体である ^{16}O は、重い酸素同位体である ^{18}O よりも蒸発における反応速度が早い。その結果、気温が高い地域は軽い ^{16}O が地表水から早く蒸発し、地表に残された水である表層水は重い ^{18}O の比率が高くなる。一方、気温が低い地域はその逆で、 ^{16}O の蒸散速度が相対的に遅く、軽い ^{16}O が残るため、気温が高い地域の表層水に比べて相対的に ^{18}O の比率が低くなるのである。このように、気候条件や気団によって、酸素同位体比は地域ごとに多様な値を示す (酒井・松久 1996)。

また、本州東日本内陸部である長野・群馬・山梨において非常に低い酸素同位体比を示しており、沿岸部から内陸部の間で酸素同位体比の地理的勾配が確認されている (早稲田・中井 1983、Mizota and Kusakabe 1994)。このような酸素同位体比の分布傾向は「高度効果」と呼ばれている。水蒸気に含まれる質量数の高い酸素および水素を含む水分子は、質量数の低い酸素および水素を含む水分子よ

りも相対的に降下しやすい。海上で生じる水蒸気は、天水として沿岸部から標高の高い内陸方向へ降下し、高度上昇とともに気温低下が生じるために、内陸部まで残った水蒸気由来の天水は質量数の高い酸素および水素の比率が低下し、沿岸部よりも相対的に低い同位体比を示す。また、日本海側で発生する水蒸気と太平洋側で生じる水蒸気は、酸素同位体比の値が異なり、天水の起源によって多様な値を示すことが知られている（酒井・松久1996）。

とくに日本列島では、古代の馬産地として知られる本州東日本内陸部において高度効果および内陸効果が顕著にみられることから、ストロンチウム同位体比よりも長距離間の産地識別に応用できると期待される。

2. 目的

藤原宮跡から出土した馬のストロンチウム同位体分析は、奈良盆地および奈良県域外から馬が持ち込まれた可能性を示唆した。しかし、ストロンチウム同位体比のみでは、方法論的な制約から、識別が困難であった。そこで、新たに指標として酸素同位体比を用いて、馬の産地識別を試みた。

日本列島における酸素同位体比分布は、東日本内陸部や東北地方において非常に低い酸素同位体比を示すため、これらの地域で飼育された馬は低い酸素同位体比を示すと期待される。延喜式に記された御牧の多くが東日本内陸部である甲斐・信濃・上野であり、これらの地域の酸素同位体比は、藤原宮跡が立地する中部以南とは大きく異なる酸素同位体比を示す。したがって、酸素同位体比に基づいた産地識別を実施することで、後代の律令に記された東日本内陸部からの馬の持込みを検証することが可能であると考えた。そこで、本分析では、酸素同位体比に基づく産地識別手法の妥当性の検討と、藤原宮跡出土ウマの酸素同位体分析に基づいた産地推定の結果に基づいて、馬の飼育形態の評価を試みた。

3. 試料

藤原宮造営期における馬推定産地を復元するために、馬歯エナメル質 15 点を分析した。この試料は、ストロンチウム同位体分析に供した資料と同一である。また、比較データとして、山梨県の平安遺跡である百々遺跡出土馬 5 個体（平安時代～鎌倉時代）（山梨県教育委員会 2002、山梨県教育委員会 2004）を測定した。また、既に報告されている福岡県福岡市の中世遺跡である博多遺跡群出土馬 9 個体（古代～中世を含む）（米田2010）を比較データとして使用した。

4. 方法

（1）歯エナメル質からのサンプリング

サンプリングは歯科用ドリルにてタングステン・カーバイトのドリル（JET CARBIDE BURS：SHOFU）を装着して、目標の歯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、エナメル質タテ 10mm～15mm × ヨコ 10mm～15mm 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、個体の代表値（バルクサンプル）として扱った。また、獣骨からのサンプルリングは、骨の緻密層から約 5～10mg の骨粉を採取した。

(2) リン酸銀精製

酸素同位体比測定のためのリン酸銀精製は、Vennemann *et al.* (2002) に基づいて実施した。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、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。

リン酸銀を析出させる際に障害となるカルシウムを除去するために、洗浄した粉末試料は、2M フッ化水素水溶液 1ml 加え、室温で 24 時間反応させ、 CaF_2 としてカルシウムを沈殿させた。 CaF_2 を遠心分離した後、リン酸銀を析出させるため、上清に 10% アンモニア水溶液 2ml、1M 硝酸銀 1ml を加え 1 分間攪拌し、ブロックヒーターにて 70℃ で 16 時間反応させた。リン酸銀（黄緑色の結晶）が析出してきたことを確認した後に、超純水にて沈殿を 7 回洗浄した。洗浄した試料は 70℃ で 24 時間乾燥させ、乾燥させたリン酸銀を乳鉢で細かく粉末化させ、0.5 φ メッシュで均質化させた。

(3) 酸素同位体比測定

リン酸銀の酸素同位体比測定は、総合地球環境学研究所および国立科学博物館に設置された熱分解型元素分析計・安定同位体比質量分析計（TCEA-IRMS, Thermo Fisher Scientific, Finnigan TC/EA および Finnigan MAT 253, DELTA V Plus）を用いた。測定値は国際標準である V-SMOW に対する差の千分率（‰）で以下の式（1）で表記される。

$$\delta^{18}\text{O} = \left[\left(\frac{{}^{18}\text{O}}{{}^{16}\text{O}} \right)_{\text{sample}} / \left(\frac{{}^{18}\text{O}}{{}^{16}\text{O}} \right)_{\text{standard}} - 1 \right] \times 1000 \text{ (‰)} \cdots \text{(式1)}$$

未知試料の分析結果の補正は、国際スタンダードの NBS127（9.4‰）、NBS120c（21.7‰）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 0.5‰ 以下であった。

(4) 地理情報システムに基づく酸素同位体比の空間補間

酸素同位体比に基づく産地推定結果を表現するために、地理情報システム（GIS）に基づく空間補間の手法を用いた。GIS の空間補間法は、IDW 法、スプライン法などがあるが、各地域の平均的な値を推定するうえで最も精度の高い Kriging 法を採用した。表層水の酸素同位体比の地図化を行うために、Kriging 法に基づく離散集合内における空間補間を実施した（Oliver 1990）。本分析では、Kriging 法のなかでも、近接した地域ごとに区分けして経験バリオグラムを用いて空間補間をする Ordinary Kriging（普通クリギング）を採用している。この方法は、最も空間補間能が高い手法であり、土壌学、地質学および水文学（真野・中山 2008）、同位体生態学においても応用されている（Ehleringer *et al.* 2009）。

5. 結果

藤原宮跡出土馬の歯エナメル質の酸素同位体比は11.1～16.0‰（平均値±標準偏差；13.7±1.5‰）であった（表6-1）。また、馬の酸素同位体比から飲み水の酸素同位体比を求めた結果、-14.7～-8.5‰（平均値±標準偏差；-11.4±1.9‰）を示した（表6-1参照）。一方、百々遺跡出土馬の酸素同位体比は13.8～15.5‰（平均値±標準偏差；14.4±0.7‰）で、飲み水の酸素同位体比は百々遺跡で-11.9～-9.5‰（平均値±標準偏差；-11.0±0.9‰）、博多遺跡出土馬の酸素同位体比は15.9～19.3‰（平均値±標準偏差；18.3±1.0‰）で、飲み水の酸素同位体比は博多遺跡で-8.7～-4.4‰（平均値±標準偏差；-5.6±1.3‰）であった（表6-2・6-3）。

各地域において酸素同位体比の平均値に有意な差があるかを評価するために、3遺跡におけるウマの酸素同位体比の平均値の差をKruskal-Wallis検定およびSteelの多重比較で比較した。その結果、3遺跡間においてウマの酸素同位体比に有意な差があることが示された（Kruskal-Wallis検定、 $P<0.01$ ）。多重比較の結果、藤原宮跡出土馬と博多遺跡群出土馬、百々遺跡出土馬と博多遺跡群出土馬の間で酸素同位体比の平均値に有意な差があり、博多遺跡群出土馬は藤原宮跡出土馬および百々遺跡出土馬よりも酸素同位体比が有意に高いことが示された（Steel検定、 $P<0.05$ ）（図6-1）。

表6-1 藤原宮跡出土馬の酸素同位体比

資料番号	分析番号	遺構	時期	分類群	歯種	左右	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{Estimated drinking water}}$
153-42	TG102202	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	下顎歯 (P4/M1/M2)	右	11.2	-16.0
153-5	TG102203	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	下顎歯 (P4/M1/M2)	右	12.7	-13.9
153-53	TG102204	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	上顎歯 (M3)	右	13.3	-13.0
153-54	TG102205	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	上顎歯 (P2)	右	15.3	-10.3
153-94	TG111001	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	上顎歯 (P3/P4/M1/M2)	左	14.4	-11.6
153-75	TG111002	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	上顎歯 (P3/P4/M1/M2)	右	14.3	-11.7
153-55	TG111003	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	上顎歯 (P3/P4/M1/M2)	左	13.2	-13.2
153-78	TG111004	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	下顎歯 (P3/P4)	左	15.0	-10.7
153-4	TG111005	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	下顎歯 (P4/M1/M2)	右	16.0	-9.2
20-3	TG111006	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	下顎歯 (P4/M1/M2)	左	15.9	-9.4
20-4	TG111007	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	下顎歯 (P4/M1/M2)	左	12.4	-14.4
20-5	TG111008	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	下顎歯 (P3/P4)	左	13.4	-12.9
20-6	TG111009	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	下顎歯 (P4/M1/M2)	右	11.1	-16.2
20-7	TG111010	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	下顎歯 (P2)	右	13.5	-12.8
163-1	TG111011	SX10820	藤原宮造営期	ウマ	上顎歯 (P3/P4/M1/M2/M3)	右	13.8	-12.4

6. 考察

藤原宮跡出土馬と地理的に離れた2遺跡間で酸素同位体比に差が生じた結果は、馬の飲み水である表層水の酸素同位体比が地理的に大きく異なっていたと考えられる。日本列島における表層水の酸素同位体比の分布と、本分析で得られた馬の酸素同位体比を照らし合わせると、百々遺跡出土馬集団は、山梨県域を含む東日本内陸部の範囲に収まり（図6-2）、博多遺跡出土馬集団も同様に福岡県域を含む九州地方の範囲に収まった（図6-3）。

百々遺跡の周辺域では馬牧の存在を示唆する空閑地があり、馬産地である可能性が指摘されており、百々遺跡出土馬が遺跡周辺域で飼育されていた可能性は高い。本分析で得られた結果は、これらの考古学的背景と矛盾しない。また博多遺跡出土馬については、もともと大宰府に馬を供給する体制が九州で独立していたことが指摘されており、本州や東日本内陸部などから多くの馬を持ち込んでいたとは考えにくい。これらの背景に基づくと、酸素同位体比は、各遺跡出土馬の歴史学的背景と矛盾していない。これは遺跡出土馬の酸素同位体比が、当時の馬の産地に関する情報を保持している可能性を示唆している。

2遺跡の結果と藤原宮跡出土馬の結果を比較した結果、博多遺跡出土馬とは明確に異なり、百々遺跡の酸素同位体比が一致している。藤原宮跡出土馬の酸素同位体比にも2遺跡同様に生存時における産地情報を保持していると仮定するならば、藤原宮跡出土馬は博多遺跡出土馬とは産地が明確に異なり、百々遺跡出土馬と産地が類似していた可能性を示唆する。ただし、百々遺跡及び博多遺跡出土馬

表6-2 百々遺跡出土馬の酸素同位体比

試料名	遺物番号	個体番号	遺構	時期	採取部位	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{Estimated drinking water}}$	文献
Doudo01	N-98-H203		11号溝	平安～鎌倉時代	上顎歯 (M1/M2)	14.0	-11.0	山梨県埋蔵文化財センター (2004)
Doudo02	SK16-1-H202		16号土坑	平安～鎌倉時代	下顎歯 (P3/P4)	14.3	-10.7	山梨県埋蔵文化財センター (2002)
Doudo03	SK18-2-H204	2-③	18号土坑	平安～鎌倉時代	上顎歯 M2	13.8	-11.3	山梨県埋蔵文化財センター (2002)
Doudo04	SK18-3-H209	3-①	18号土坑	平安～鎌倉時代	上顎歯 M2	14.5	-10.4	山梨県埋蔵文化財センター (2002)
Doudo05	SK18-4-H207	4-③	18号土坑	平安～鎌倉時代	上顎歯 (P3/P4)	15.5	-9.2	山梨県埋蔵文化財センター (2002)

表6-3 博多遺跡群出土馬の酸素同位体比

試料名	遺物番号	時期	採取部位	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{Estimated drinking water}}$	文献
Hakata01	005840001	中世	上顎臼歯	15.9	-8.7	米田ほか (2010)
Hakata02	005840007	中世	下顎歯 M1	17.7	-6.4	米田ほか (2010)
Hakata03	861800831-1 1	12世紀後半～末	下顎歯 M1	19.2	-4.5	米田ほか (2010)
Hakata04	880610426	8～12世紀	上顎歯 P4	19.3	-4.4	米田ほか (2010)
Hakata05	880610407	8～12世紀	上顎歯 M2	19.1	-4.6	米田ほか (2010)
Hakata06	955981023-2 1	15～16世紀末	上顎歯 M1	19.0	-4.8	米田ほか (2010)
Hakata07	86488313-008	平安時代後期	下顎歯 M1	18.7	-5.1	米田ほか (2010)
Hakata08	86488307-013	鎌倉時代	下顎歯 M1	17.9	-6.2	米田ほか (2010)
Hakata09	86488307-014	鎌倉時代	上顎歯 P2	18.2	-5.8	米田ほか (2010)

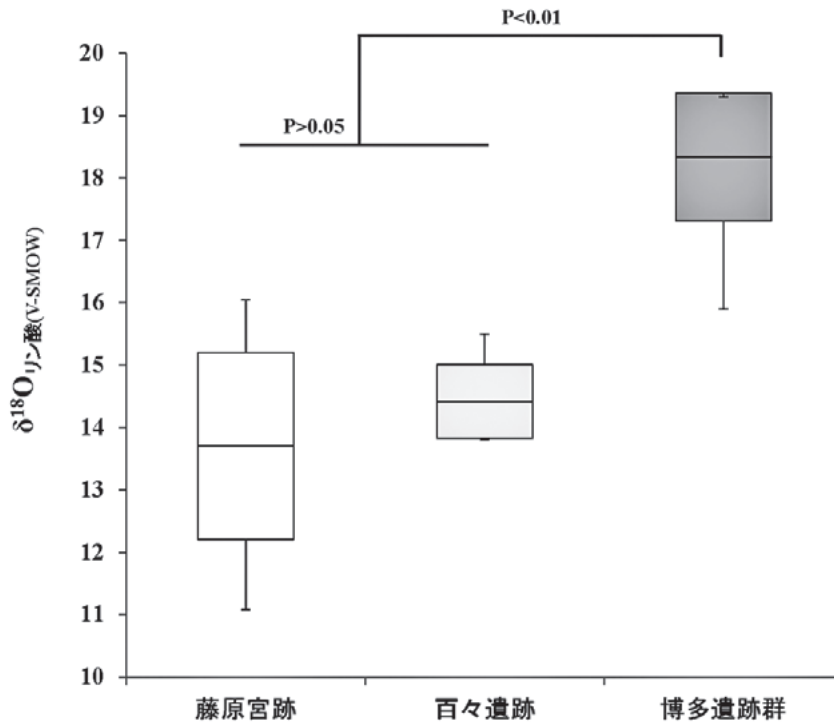


図6-1 歯エナメル質の酸素同位体比 遺跡間比較

は、藤原宮跡出土馬とは時代が異なるため、同時代性を保証した実証的評価はできていない。しかしながら、完新世以降の酸素同位体比の最大変動幅である2‰の差が、例えそれぞれの遺跡の時代間で生じたと仮定したとしても（Dansgaard 1969）、藤原宮跡出土馬の酸素同位体比が博多遺跡出土馬の酸素同位体比とは近似せず、産地が類似していた可能性は極めて低いと考えられる。

次に、藤原宮跡出土馬各個体の産地を推定するために、酸素同位体比に基づく推定産地の分布を求めた。Kriging 法に基づく酸素同位体比分布を用いた産地推定を実施した結果、15 個体中に 3 個体は藤原宮跡周辺域を含む範囲が示されたものの、他の 12 個体は遺跡周辺域とは異なる地域に推定産地がプロットされた。藤原宮跡周辺域外にプロットされた馬の推定産地は、主に東北北部および東日本内陸部であった（表 6-4）。具体的には、No.153-5（TG102203）、No.153-53（TG102204）、No.153-94（TG111001）、No.153-74（TG111002）、No.153-55（TG111003）、No.20-4（TG111007）、No.20-5（TG111008）、No.20-7（TG111010）、No.163-1（TG111011）の 9 個体が東日本内陸部に産地推定された。また、これら 9 個体以外の No.153-54（TG102205）、No.153-78（TG111004）、No.153-4（TG111005）、No.20-3（TG111006）の 4 個体は、東日本沿岸部および西日本の沿岸部および内陸部の広い範囲に産地が推定された。この 4 個体の推定産地の地域が広い原因は、日本列島の表層水の酸素同位体比が、これらの広い地域で近似した値をとることから、酸素同位体比では識別できないためであると考えられる。また、No.153-42（TG102202）と No.20-6（TG111009）の 2 個体は、日本列島の表層水の酸素同位体比の分布範囲にマッピングされず、日本列島の表層水の酸素同位体比分布から逸脱した非常に低い酸素同位体比をもつ個体が検出された。これらの個体は日本列島外から持込まれたウマである可能性もあり、慎重に議論していく必要がある。

日本列島において酸素同位体比がとくに低い地域は、主に北海道内陸部と東日本内陸部が挙げられ

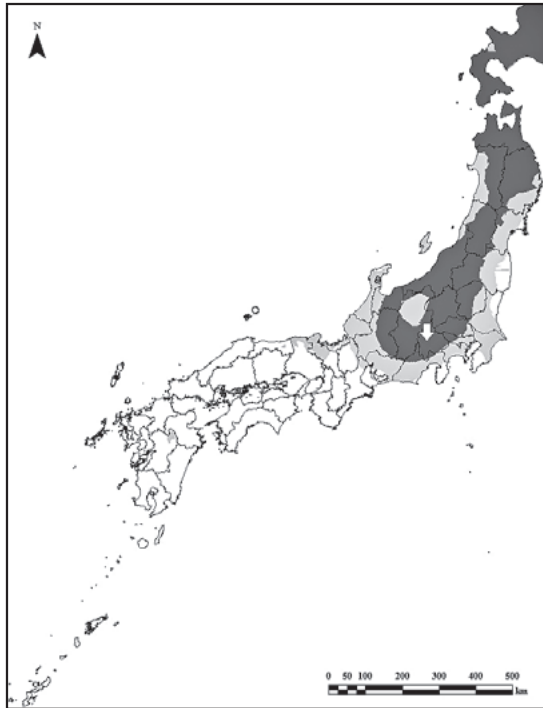


図6-2 百々遺跡出土馬集団の推定産地



図6-3 博多遺跡群出土馬集団の推定産地

る。藤原宮造営期の北海道ではウマの存在が確認されておらず、産地であった可能性は低いと思われる。一方、東日本内陸部では、同時代における遺跡出土馬が多数確認されており、これらの馬と藤原宮跡出土馬の関連性を議論していく必要がある。東日本内陸部における表層水の酸素同位体比データは西日本に比べて明確に低い酸素同位体比を示すが、他の地域と比べてデータ数が相対的にまだ少なく、Kriging 法による空間補間の精度が十分でない可能性も残されている（図6-4）。今後、東日本内陸部における表層水の酸素同位体比データを蓄積することで、これらの2個体の産地が正確に評価されると期待される。一方、本章では、日本国内に限定して酸素同位体比に基づく産地推定を試みたものの、日本国外にも今回の分析で得られた酸素同位体比と近似する場所は様々な地域に分布している。また日本国外の地域で、韓半島、中国、ロシアなどの東アジア諸国における酸素同位体比データはほとんど公表されておらず、本分析法を適用することはまだ困難であった。しかし、今後これらの地域で表層水の酸素同位体比のデータが蓄積され公開されれば、日本国外も視野に入れた推定産地地図が描けると期待される。

最後に、藤原宮跡出土馬集団の酸素同位体比に基づく産地推定を行ったところ、東日本内陸部および東北地方に推定された（図6-5）。本研究で分析した歯種および歯エナメル質の部位はP2～M3の歯冠部を分析しており、これらの部位は4歳以前に形成されていることから、本分析で得られた酸素同位体比は2歳齢以前に生息していた地域の酸素同位体比を反映している。これらの結果に基づくと、藤原宮跡出土馬の多くは4歳以前に現在の奈良県域外で飼育され、4歳以降に藤原宮に持ち込まれたといえる。また、歯の年齢推定結果では、多くの個体が3～5歳齢であり、持ち込まれてすぐに斃死した可能性が考えられる。一方、9歳齢前後と推定されたNo.153-54（TG102205）およびNo.153-94（TG111001）の個体の酸素同位体比は、No.153-94（TG111001）のみ東日本産である可能性が示された。この個体は、ストロンチウム同位体比では現在の奈良県内の範囲に収まっていたが、酸素同位体

表6-4 藤原宮跡出土馬の推定産地

資料番号	分析番号	遺構	時期	分類群	歯種	左右	推定産地
153-42	TG102202	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	下顎歯 (P4/M1/M2)	右	不明
153-5	TG102203	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	下顎歯 (P4/M1/M2)	右	東日本内陸部 (中部)
153-53	TG102204	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	上顎歯 (M3)	右	東日本内陸部
153-54	TG102205	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	上顎歯 (P2)	右	北海道・本州・四国・九州
153-94	TG111001	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	上顎歯 (P3/P4/M1/M2)	左	東日本内陸部
153-75	TG111002	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	上顎歯 (P3/P4/M1/M2)	右	東日本内陸部
153-55	TG111003	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	上顎歯 (P3/P4/M1/M2)	左	東日本内陸部
153-78	TG111004	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	下顎歯 (P3/P4)	左	東日本・西日本 (日本海沿岸部)
153-4	TG111005	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	下顎歯 (P4/M1/M2)	右	東日本沿岸部・西日本
20-3	TG111006	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	下顎歯 (P4/M1/M2)	左	東日本沿岸部・西日本
20-4	TG111007	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	下顎歯 (P4/M1/M2)	左	東日本内陸部 (関東・中部)
20-5	TG111008	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	下顎歯 (P3/P4)	左	東日本内陸部
20-6	TG111009	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	下顎歯 (P4/M1/M2)	右	不明
20-7	TG111010	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	下顎歯 (P2)	右	東日本内陸部
163-1	TG111011	SX10820	藤原宮造営期	ウマ	上顎歯 (P3/P4/M1/M2/M3)	右	東日本内陸部

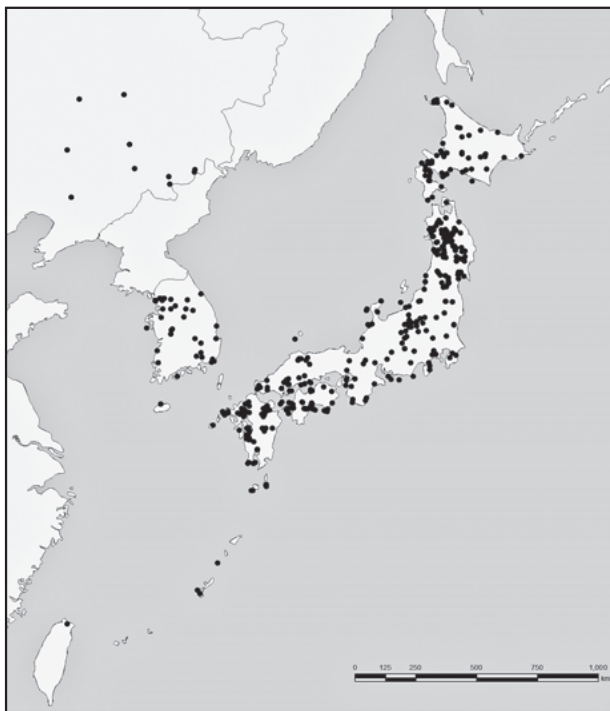


図6-4 表層水の酸素同位体比データ地点

比では奈良県外にプロットされている。これは、No.153-94 (TG111001) の個体が藤原宮跡周辺域のストロンチウム同位体比と偶然に近似する遠方の地域で飼育されていたためと思われる。ストロンチウム同位体分析および酸素同位体分析に基づくと、藤原宮跡から出土した馬は、奈良盆地内で産まれた個体はわずかで、藤原京へ馬を供給した生産地は主に東日本内陸部および東北地方の可能性が考えられ、両分析結果の整合性が示される結果となった。前述したように、これらの馬がすべて日本国外から来た馬であったかという可能性は今日の方法論的な限界があるために評価はできないが、少なくとも藤原宮跡出土馬の多くが遺跡周辺域ではな

い遠方から持ち込まれている可能性だけは高いと考えられる。

また、第4章及び第5章で実施した手法と同様に、本分析で採取した歯エナメル質の各地点に基づいて、形成時期を算出し、形成時期 (中央値及び不確かさ) とストロンチウム同位体比を対応させた後に (表6-5)、変動を可視化した (図6-6)。その結果、形成時期中に特徴的な変動傾向は見られなかった。例えば、最も低い酸素同位体比を示したNo.153-42 (TG102202) 及びNo.20-6 (TG111009)

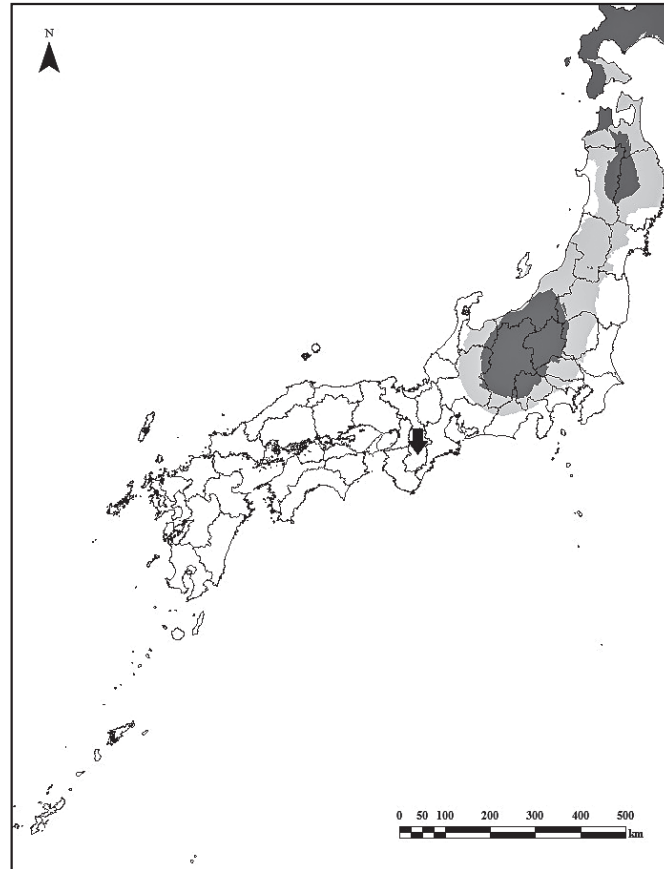


図6-5 藤原宮出土馬集団の推定産地

はそれぞれ 33 ヶ月齢以前と 15 ヶ月齢以前であり、形成時期が異なったとしても極めて低い酸素同位体比を持つ。次に、他の同位体比と関連性を見ると、No.153-42 (TG102202) はストロンチウム同位体比が藤原宮跡周辺域のストロンチウム同位体比の範囲に収まっていたが、酸素同位体比が極めて低いことから、偶然に酸素同位体比が大きく異なる地域で近似した値を示す地質帯で飼育されていたと考えられる。他にも、炭素・ストロンチウム同位体比がともに高い値を示した No.153-4 (TG111005) は、酸素同位体比も高い値を示しており、興味深い。No.153-4 (TG111005) は、酸素同位体比による産地推定の方法論的制約のため、西日本を含めた広い範囲で産地が推定されているが、主要産地と推定された東日本内陸部でない可能性が高い。また、藤原宮出土馬は琉球列島のグスク時代以降の遺跡出土馬や中国北部の西周時代以降の遺跡出土馬でみられる C4 植物を極端に多く摂取した場合に示すと期待されるような -10 ‰ 付近の炭素同位体比を示す個体は検出されていない（長崎県教育委員会 1998、菊地 2014）。これらの結果は、東日本内陸部および琉球列島以外において、C4 給餌割合が上昇する地域があった可能性を示唆し、必ずしも異なる産地から供給された個体がすべて同様な給餌形態をとっていなかった可能性を示していると考えられる。

（覚張隆史・米田穰）

表6-5 歯エナメル質の推定形成時期と酸素同位体比

資料番号	分析番号	遺構	時期	分類群	歯種	左右	最短形成時期 (Months)	最長形成時期 (Months)	酸素 同位体比
153-42	TG102202	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	下顎歯 (P4/M1/M2)	右	20.0	45.8	11.2
153-5	TG102203	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	下顎歯 (P4/M1/M2)	右	4.0	18.0	12.7
153-53	TG102204	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	上顎歯 (M3)	右	23.9	23.9	13.3
153-54	TG102205	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	上顎歯 (P2)	右	20.8	20.8	15.3
153-94	TG111001	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	上顎歯 (P3/P4/M1/M2)	左	11.4	34.6	14.4
153-75	TG111002	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	上顎歯 (P3/P4/M1/M2)	右	0.7	19.6	14.3
153-55	TG111003	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	上顎歯 (P3/P4/M1/M2)	左	0.7	19.6	13.2
153-78	TG111004	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	下顎歯 (P3/P4)	左	18.0	19.1	15.0
153-4	TG111005	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	下顎歯 (P4/M1/M2)	右	5.2	20.1	16.0
20-3	TG111006	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	下顎歯 (P4/M1/M2)	左	2.8	16.0	15.9
20-4	TG111007	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	下顎歯 (P4/M1/M2)	左	2.5	15.4	12.4
20-5	TG111008	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	下顎歯 (P3/P4)	左	13.9	15.1	13.4
20-6	TG111009	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	下顎歯 (P4/M1/M2)	右	1.6	13.9	11.1
20-7	TG111010	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	下顎歯 (P2)	右	15.8	15.8	13.5
163-1	TG111011	SX10820	藤原宮造営期	ウマ	上顎歯 (P3/P4/M1/M2/M3)	右	12.7	40.6	13.8

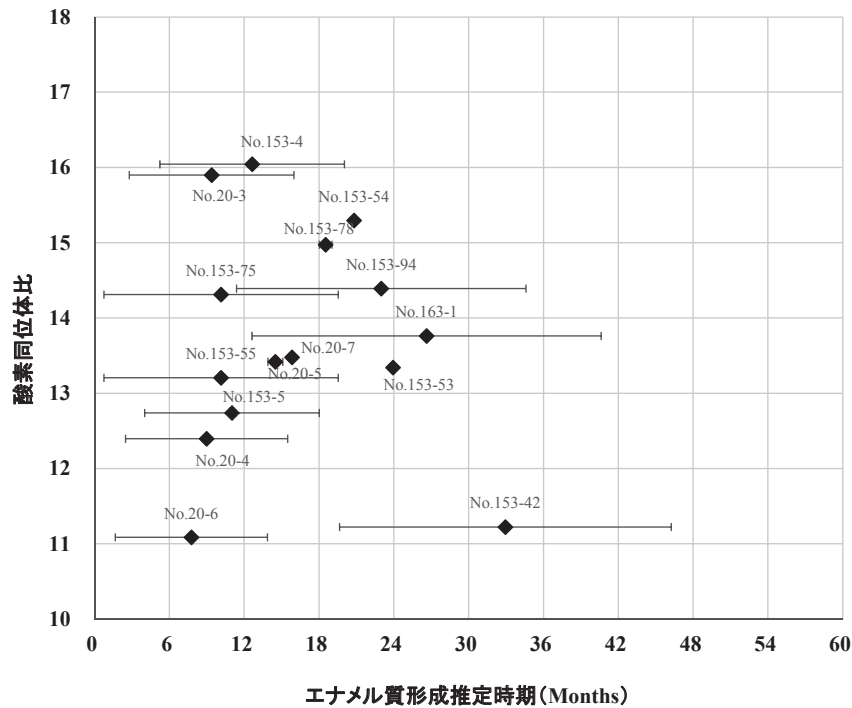


図6-6 歯エナメル質の酸素同位体比変動

引用文献

- 菊地大樹・覚張隆史・劉杲運（2014）「西周王朝の牧経営」『中国考古学』14、83-100頁
- 酒井均・松久幸敬（1996）『安定同位体地球化学』東京大学出版会
- 長崎県教育委員会（1998）『大浜遺跡』長崎県文化財調査報告書第141集
- 真野明・中山亮二（2008）「地域総合化による確率雨量の空間分布の推定」『水文工学論文集』52、217-222頁
- 山梨県埋蔵文化財センター（2002）『百々遺跡1』山梨県埋蔵文化財センター調査報告書第201集
- 山梨県埋蔵文化財センター（2004）『百々遺跡2・4』山梨県埋蔵文化財センター調査報告書第212集
- 米田穰・覚張隆史・石丸恵理子・富岡直人（2010）「骨の安定同位体分析から中世博多の人々の生活に迫る」『市史研究ふくおか』5、86-101頁
- 早稲田周・中井信之（1983）「中部日本・東北日本における天然水の同位体組成」『地球化学』17、83-91頁
- Brand, W. A., Coplen, T. B., Aerts-Bijma, A. T., Bohlke, J. K., Gehre, M., Geilmann, H., Groning, M., Jansen, H. G., Meijer, H. A. J., Mroczkowski, S. J., Qi, H., Soergel, K., Stuart-Williams, H., Weise, S. M., Werner, R. A. (2009) Comprehensive inter-laboratory calibration of reference materials for $\delta^{18}\text{O}$ versus VSMOW using various on-line high-temperature conversion techniques. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*. 23, pp. 999-1019.
- Bryant, J. D., Koch, P. L., Froelich, P. N., Showers, W. J., Genna, B. J. (1996) Oxygen isotope partitioning between phosphate and carbonate in mammalian apatite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 60, pp. 5145-5148
- Dansgaard, W., Johnsen, S. J., Moller, J. Langway Jr, C.C. (1969) One thousand centuries of climatic record from camp century on the Greenland ice sheet. *Science*. 166, pp. 377-380.
- Ehleringer, J. R., Thompson, A. H., Podlesak, D. W., Bowen, G. J., Chesson, L. A., Cerling, T. E., Park, T., Dostie, P., Schwarcz, H. (2009) A framework for the incorporation of isotopes and isoscapes in geospatial forensic investigations. In *Isoscapes: Understanding movement, pattern, and process on Earth through isotope mapping*. ed. J. B. West, G. J. Bowen, T. E. Dawson and K. P. Tu. Springer. Dordrecht Heidelberg London New York. pp. 357-387.
- Halas, S., Skrzypek, G., Meier-Augenstein, W., Pelc, A., Kemp, H. (2011) Inter-laboratory calibration of new silver orthophosphate comparison materials for the stable oxygen isotope analysis of phosphates. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*. 25, pp. 579-584.
- Huertas, A. D., Lacumin, P., Stenni, B., Chillon, B. S., Longinelli, A. (1995) Oxygen isotope variations of phosphate in mammalian bone and tooth enamel. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 59, pp.4299-4305
- Kohn, M. J., Schoeninger, M. J., Valley, J. W. (1996) Herbivore tooth oxygen isotope compositions: Effects of diet and physiology. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 60, pp. 3889-3896.
- Lee Thorp, J. A. and van der Merwe, N. J. (1991) Aspects of the chemistry of modern and fossil biological apatite. *Journal of Archaeological Science*. 18, pp. 343-354.

- Longinelli, A. (1984) Oxygen isotopes in mammal bone phosphate: A new tool for paleohydrological and paleoclimatological research? *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 48. pp. 385-390
- Mizota and Kusakabe, M. (1994) Spatial distribution of δD - $\delta^{18}O$ values of surface and shallow groundwaters from Japan, South Korea and east China. *Geochemical Journal*. 28. pp. 387-410.
- Oliver, M. A. (1990) Kriging: A Method of Interpolation for Geographical Information Systems. *International Journal of Geographic Information Systems*. 4 pp. 313-332.
- Passey, B. H., Cerling, T. E., Levin, N. E. (2007) Temperature dependence of oxygen isotope acid fractionation for modern and fossil tooth enamels. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*. 21. pp. 2853-2859.
- Skrzypek, G. (2013) Normalization procedures and reference material selection in stable HCNOS isotope analyses. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 405. pp. 2815-2823.
- Tudge, A. P. (1960) A method of analysis of oxygen isotopes in orthophosphates-its use in measurements of paleotemperatures. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 18. pp. 81-93.
- Vennemann, T. W., Fricke, H. C., Blake, R. E., O'Neil, J. R., Colman, A. (2002) Oxygen isotope analysis of phosphates: a comparison of techniques for analysis of Ag_3PO_4 . *Chemical Geology*. 185. pp. 321-336.
- Wiedemann-Bidlack, F. B., Colman, A. S., Fogel, M. L. (2008) Phosphate oxygen isotope analysis on microsamples of bioapatite: removal of organic contamination and minimization of sample size. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*. 22. pp. 1807-1816.
- Yoshida, N. and Miyazaki, N. (1991) Oxygen isotope correlation of cetacean bone phosphate with environmental water. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 96. pp. 815-820.