

第5章 ストロンチウム同位体分析に基づく移入馬の推定

1. 背景

(1) 同位体を用いた動物の移動復元

哺乳類の移入復元は分析試料に残された産地情報および生息地情報を復元することを意味する。哺乳類の産地情報を抽出するために、硬組織に含まれる各種元素の同位体比が用いられてきた (Bentley *et al.* 2006)。硬組織に含まれる各元素の濃度は、哺乳類の恒常性によって生体内ではある一定の範囲に保たれており、産地の情報は比較的乏しい。一方、同位体比は恒常性による制限がなく、元素濃度に比べて生息地に関する多様性をより直接的に反映する。

1990年代から、同位体比は動物の産地情報の指標として精力的に応用され始めた (van der Merwe *et al.* 1990)。産地情報として応用されている元素は大別して、重元素と軽元素に分けられる。重元素にはストロンチウムや鉛などが含まれ、軽元素では炭素・酸素・水素・窒素などが用いられている。これら重元素と軽元素の同位体に基づく産地推定は、それぞれの元素が異なる同位体化学的挙動を示すために、元素によって評価法がそれぞれ異なる。

重元素の場合、動物体内における重元素の同位体比は生息地にある食物や飲み水に含まれる重元素の同位体比と近似した値をとるものが多い。そのため、重元素の同位体比から生息地を同定する際には、その動物のもつ重元素と同じ同位体比と候補となる生息地の同位体比はそのままの値で照合する (Capo *et al.* 1998)。

ある土地に棲息する動物に地理的な情報を付加し、移動を復元する指標としてストロンチウム同位体比を用いた研究が挙げられる。ストロンチウムはカルシウムとイオン半径が近似しており、その化学的な挙動は類似しているため体内の硬組織に取り込まれる (Faure and Mensing 2005)。ストロンチウムには4つの同位体があり (^{84}Sr 、 ^{86}Sr 、 ^{87}Sr 、 ^{88}Sr)、 ^{87}Sr は放射性同位体である ^{87}Rb がベータ崩壊することで生じる。地質学的には ^{87}Sr と自然存在比に近い ^{86}Sr の比率 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) を測定し、ストロンチウム同位体比とすることが多く、このストロンチウム同位体比は地質の古さ、ルビジウムの含有率および岩石内の閉鎖温度などにより様々な値を示す (倉沢 1970、加々美ほか 2008、Dickin 2005、Faure and Powell 1972)。例えば、火山性地質に含まれる岩石の多くは、0.703～0.706と低いストロンチウム同位体比を示すのに対し、変成岩などで構成される非常に古い地質では0.710～0.730と高い値を示す。一方、石灰岩地帯などのストロンチウム同位体比は当時の海のストロンチウム同位体比の兆候を表し、0.707～0.709の範囲を示す。

生態系に取り込まれるストロンチウムは、土壤中に様々な濃度で含まれており (0～約2000ppm; Bentley 2006、Capo *et al.* 1998)、植物のストロンチウム含有量は、植物の種類および土壤に含まれる土壤水に溶存しているストロンチウム含有量によって多様な濃度を示す (Bentley 2006)。また、草食哺乳類では、植物および飲み水由来のストロンチウムを生体内で恒常的な量に制限する生理機構が存在することが示唆されている (Schrooten *et al.* 2003)。ラットにおいてストロンチウムの過剰摂取は骨の低密度化を引き起こし (Schrooten *et al.* 2003)、欠乏すると骨組織の成長障害などの影響が生

じると報告されている (Motohashi 1994、Underwood 1977)。

また、生物ではカルシウムを消化管で吸収する際に、選択的にバリウムやストロンチウムを吸収しない分別があると報告されている (Elias *et al.* 1982)。肉食哺乳類の餌となる草食哺乳類の可食部 (筋組織) ではストロンチウム含有量が比較的少なく、さらに分別が生じるために、肉食哺乳類では草食哺乳類よりもストロンチウムが低濃度になる。このように、栄養段階が上昇するにつれてストロンチウム濃度が減少する生物浄化作用 (Biopurification) によって、生態系間および生態系内で生物は多様な濃度を持つことが知られている (Elias *et al.* 1982、Vincent 2004)。

ストロンチウム同位体比は、 ^{86}Sr と ^{87}Sr の質量数および存在比が近似した値をとるために、化学反応における動的同位体効果の影響が少ない。そのため、同位体分別が動物の生体内ではほとんど生じ無いことがわかっている。よって、軽元素の同位体比とは異なり、同一の地質において生息する生物であれば、栄養段階によらず全ての生物が近似した値をとる (Blum *et al.* 2000)。この性質を利用し、生物に生息地の情報を付加し、動物の移動の復元を目的とした研究が行われてきた (Capo *et al.* 1998)。ストロンチウム同位体比の応用は、北アメリカ、南アメリカ、ユーラシア、アフリカ大陸においては様々な研究が存在し、今日でも世界各地の研究例が蓄積されている。

(2) 日本列島における Sr 同位体分析

日本列島の哺乳類に対するストロンチウム同位体比の研究はまだほとんど行われていない。先行して行われた研究として、縄文時代人骨のストロンチウム同位体分析が研究例に挙げられる (Kusaka *et al.* 2009)。この研究は、愛知県渥美半島の吉胡貝塚から出土した人骨コレクションを用いて、ストロンチウム同位体分析を試みており、渥美半島の縄文時代人骨に見られる抜歯形式に関する考古学的な仮説を検証することが目的であった。抜歯する歯種は遺跡によって異なるパターンがあることから、各地域の人々を識別するための目印としても利用されていたと考えられている (春成 2002)。とくに春成は、渥美半島縄文時代人骨を 4I 型と 2C 型などの抜歯形式に分類し、供伴する遺物などに基づいて、4I 型を在地生まれの人、2C 型を遠方からの移入者と評価した。この仮説を自然科学的に評価するために、日下らは人骨の歯エナメル質のストロンチウム同位体比と、渥美半島および愛知県南東部の植物のストロンチウム同位体比を比較し、4I 型の個体の中に渥美半島外から移入してきた個体がいるか検証した。その結果、在地型と考えられていた 4I 型の抜歯形式をもつ個体の中に、渥美半島の植物のストロンチウム同位体比と一致しない個体が検出された。このことから、4I が必ずしも在地型の指標とならない可能性を示唆するとともに、縄文時代における複雑な社会性を復元した研究例となった。しかし、ヒトのストロンチウム同位体分析は、土器などの調理器具を利用しているため、土器から溶出されたストロンチウムを多量に摂取している可能性が高い。例えば、4I 型の個体が在地で生活していたとしても、外部から持ち込まれた土器を使用することで、在地にいながら外部のストロンチウムを摂取することになる。このため、現時点では、在地で生活する人とストロンチウム同位体比が、水や植物のストロンチウム同位体比と一致するという仮定の上で成り立っていることを意識しなければならない。よって、今後さらなる精査が求められる。

動物遺存体を用いた研究例では、従来のシカ・イノシシだけでなく、多様な動物種を分析する例が挙げられる。覚張は、ヒトのような調理器具などを使用しない動物を指標として、過去の人の移動や交易関係を客観的に評価できるか検証を試みている。検証に用いた遺跡は、神奈川県鎌倉市にある由

比ヶ浜南遺跡（鎌倉～室町時代）である。覚張らは日下らと同様に、植物・水・土壌などのストロンチウム同位体比と、遺跡出土馬・牛・犬・猫のストロンチウム同位体比を比較した。その結果、馬・牛は鎌倉周辺域のストロンチウム同位体比の範囲から逸脱した個体が検出されたが、犬・猫のストロンチウム同位体比は逸脱した個体が検出されなかった。当時の鎌倉市は都市部であり、大型家畜である馬・牛の生産地は鎌倉外であった可能性が高いが、犬・猫は外部であえて飼育されていたとは考えにくい。また、当時の鎌倉内でウマが飼育されていた文献上の証拠がないことや、鎌倉外に多数の馬産地があったことから、本分析結果は当時の都市部における馬・牛の利用形態を良く反映していると考えられる（Gakuhari *et al.* 2010）。このように、遺跡周辺域の植物だけではなく、同じ遺跡から出土する馬・牛とは異なる動物と比較することで、分析結果の妥当性を評価することが重要である。この妥当性は、大阪府大阪市に位置する長原遺跡（古墳～飛鳥時代）においても同様の結果が得られており、都市部における馬が異なる地域から持ち込まれていることが示されている（日下・覚張 2014）。一方、由比ヶ浜南遺跡と長原遺跡から出土した人骨のストロンチウム同位体比は、馬のストロンチウム同位体比の多様性よりも低く、馬が最も多様なストロンチウム同位体比を示している。これは、人が外部から都市部へ移動してくるよりも、馬が遠方の馬産地から頻繁に都市部へ持ち込まれていた可能性を強く示唆している。本章では、当時の都市部と考えられている藤原宮出土馬のストロンチウム同位体比を実施し、都市造営期における馬の移動復元を試みた。

2. 目的

藤原宮跡から出土する馬は、主に運搬などの物資運搬としての使役動物として利用されていたと考えられており、藤原京で生活していた人々にとっても比較的身近な動物であったと考えられる。そこで本研究では、これら藤原宮跡の造営期相当の堆積層から出土する馬歯を中心にストロンチウム同位体分析を実施し、藤原宮跡出土馬が遺跡外から持ち込まれていた可能性を評価した。

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、馬歯エナメル質15点、獣骨7点を分析した。また、馬が外部地域から搬入されたことを実証的に検証するために、藤原宮跡周辺域で飼育されていたと考えられるイヌの歯エナメル質4点を在地動物の指標として分析した（表5-3）。さらに、野生動物が家畜種である馬やイヌと異なる地域から移入されているかを検証するために、藤原宮跡出土イノシシの歯エナメル質1点を分析した。

藤原宮跡出土馬の産地を推定するために、藤原宮跡周辺域（半径15km）の異なる地質上の植物および河川水を分析した。

4. 方法

(1) 歯エナメル質および植物からのサンプリング

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。

また、植物の葉を中心に約10gは電気炉内で450℃に加熱することで、灰化処理を行い、得られた灰化粉末を実験に供した。

(2) ストロンチウム精製

二次的に沈着した炭酸塩を除去するために、採取したエナメル質粉末に0.1M酢酸バッファーを1ml加え、攪拌した後に15分間静置した。次に、5分間遠心分離し(2000×g)、上精を新しいマイクロチューブに移した。さらに0.1M酢酸バッファーを1ml加え同じ作業を行った。2回のリーチングが終わった後、超純水1mlで2回リンスおよび遠心分離し(2000×g)、乾燥用オープンにて60℃で一晩乾燥させた。ストロンチウムを精製するため、灰化した植物および乾燥させた試料に6M HClを加え、約150℃のホットプレート上で一晩再乾固させ、エナメル質粉末を完全に溶解させた。乾固した試料を2M HClで再溶解し、5分間遠心分離し(2000×g)、上精0.5mlをカラム精製の溶液とした。試料溶液は陽イオン交換樹脂を充填したSr精製用カラム(AG 50W-X8; 200-400mesh)、ムロマチテクノス)を用いてストロンチウム以外の重元素を除去した(Ando *et al.* 2010)。精製したストロンチウム溶液は、70℃12時間で蒸発乾固させた。これらの前処理は、汚染をさけるために総合地球環境学研究所に設置されたクリーンルーム内で実施した。

(3) ストロンチウム同位体比測定

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (ストロンチウム同位体比) の測定は、総合地球環境学研究所が所有する表面電離型質量分析計 (Thermal Ionization Mass Spectrometer: Finnigan TORITON, Thermo Fisher Scientific) を使用した。乾固させた試料は、1M硝酸で再溶解させ、TIMSのタングステンフィラメントに全量塗布した。試料溶液を塗布したフィラメントを用いて、ストロンチウム同位体比を測定した。分析試料の測定で得られたストロンチウム同位体比は、同位体比の自然存在比である8.375209で規格化した。また、規格化されたストロンチウム同位体比は国際スタンダードであるSRM987の0.710250で補正し、未知試料のストロンチウム同位体比を求めた。本研究で測定された全ての試料の測定誤差は0.00002以内であった。

5. 結果

藤原宮跡出土馬歯エナメル質および獣骨のストロンチウム同位体比は、それぞれ0.70613～0.71110 (平均値±標準偏差; 0.70788 ± 0.00167)、0.70783～0.70861 (平均値±標準偏差; 0.70822 ± 0.00021)

表5-1 歯エナメル質のストロンチウム同位体比

資料番号	分析番号	遺構	時期	動物種	歯種	左右	ストロンチウム同位体比
153-86	TG102201	SH10800	藤原宮期	ウマ	歯種不明	不明	計測不可
153-42	TG102202	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	下顎歯 (P4/M1/M2)	右	0.70840
153-5	TG102203	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	下顎歯 (P4/M1/M2)	右	0.71106
153-53	TG102204	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	上顎歯 (M3)	右	0.70730
153-54	TG102205	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	上顎歯 (P2)	右	0.70881
153-94	TG111001	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	上顎歯 (P3/P4/M1/M2)	左	0.70877
153-75	TG111002	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	上顎歯 (P3/P4/M1/M2)	右	0.70763
153-55	TG111003	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	上顎歯 (P3/P4/M1/M2)	左	0.70742
153-78	TG111004	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	下顎歯 (P3/P4)	左	0.70748
153-4	TG111005	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	下顎歯 (P4/M1/M2)	右	0.71110
20-3	TG111006	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	下顎歯 (P4/M1/M2)	左	0.70618
20-4	TG111007	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	下顎歯 (P4/M1/M2)	左	0.70613
20-5	TG111008	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	下顎歯 (P3/P4)	左	0.70627
20-6	TG111009	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	下顎歯 (P4/M1/M2)	右	0.70628
20-7	TG111010	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	下顎歯 (P2)	右	0.70619
163-1	TG111011	163次	藤原宮造営期	ウマ	上顎歯 (P3/P4/M1/M2/M3)	不明	0.70922

表5-2 獣骨のストロンチウム同位体比

資料番号	分析番号	遺構	時期	動物種	部位	左右	ストロンチウム同位体比
153-21	TG111013	SD10801B	藤原宮造営期	ニホンジカ	尺骨	左	0.70861
153-45	TG111014	SD1901A	藤原宮造営期	ウシ	中手・中足骨	不明	0.70819
153-89	TG111015	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	尺骨	右	0.70820
153-69	TG111017	SD1901A	藤原宮造営期	イヌ	肩甲骨	左	0.70826
153-76	TG111018	SD1901A	藤原宮造営期	ウシ	頸椎	-	0.70783
153-52	TG111019	SD1901A	藤原宮造営期	イヌ	大腿骨	左	0.70820
153-50	TG111020	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	後頭骨	-	0.70824

表5-3 イヌおよびイノシシの歯エナメル質のストロンチウム同位体比

資料番号	分析番号	遺構	時期	動物種	部位	左右	採取部位	ストロンチウム同位体比
153-79	TG111021	SD1901A	藤原宮造営期	イヌ	下顎骨	左	下顎M2	0.70882
153-14	TG111022	SD1901A	藤原宮造営期	イヌ	下顎骨	左	下顎M1	0.70888
153-15	TG111023	SD1901A	藤原宮造営期	イヌ	下顎骨	右	下顎P2	0.70876
153-40	TG111024	SD1901A	藤原宮造営期	イヌ	遊離歯	右	上顎P3	0.70881
153-85	TG111025	SX10820	藤原宮造営期	イノシシ	遊離歯	右	下顎C	0.70985

であった (表 5-1、表 5-2)。骨は藤原周辺域の動物が取り得るストロンチウム同位体比を示す可能性があるので、歯エナメル質が骨よりもストロンチウム同位体比の分散が大きい場合、藤原宮周辺域とは異なる地域に生息していた可能性を示すと期待される。馬歯と骨の2群に分けてストロンチウム同位体比の等分散性を検定するためにF検定を行った。その結果、歯エナメル質の分散は骨よりも有意に高かった (F検定、 $P < 0.01$) (図 5-1)。ただし、骨は歯エナメル質よりも続成作用の影響を受けやすい点に注意が必要である。

表5-4 奈良県域における現生植物および河川水のストロンチウム同位体比

分析番号	採取場所	分析試料	緯度	経度	ストロンチウム同位体比
NAR1001P	藤原宮跡周辺	植物	135.8074	34.5022	0.708188
NAR1002P	藤原宮跡周辺	植物	135.8075	34.5004	0.708808
NAR1003P	藤原宮跡周辺	植物	135.8067	34.4998	0.708335
NAR1004P	奈良県吉野郡	植物	135.8550	34.3744	0.709966
NAR1005P	奈良県吉野郡	植物	135.8595	34.3725	0.709647
NAR1006P	奈良県吉野郡	植物	135.8584	34.3753	0.709594
NAR1007P	奈良県宇陀市	植物	135.9462	34.5324	0.707611
NAR1008P	奈良県奈良市	植物	135.6501	34.5563	0.707626
NAR1009P	奈良県橿原市	植物	135.7895	34.4903	0.708401
NAR1010P	奈良県奈良市	植物	135.8540	34.6302	0.708937
NAR1001W	奈良県吉野郡	河川水	135.8551	34.3747	0.708521

遺跡出土犬の歯エナメル質のストロンチウム同位体比は 0.70876 ~ 0.70888 (平均値 ± 標準偏差 ; 0.70881 ± 0.00005) であった (表 5-3)。イヌと馬の歯エナメル質の分散を比較するために、イヌと馬の 2 群に分けてストロンチウム同位体比の等分散性を検定した。その結果、イヌの歯エナメル質は馬の歯エナメル質よりも有意に分散が小さいことが示された (F 検定、 $P < 0.01$) (図 5-1 参照)。

奈良盆地および奈良盆地周辺域の植物および河川水のストロンチウム同位体比は 0.70761 ~ 0.70997 (平均値 ± 標準偏差 ; 0.70869 ± 0.00079) であった (図 5-1 参照、表 5-4)。藤原宮跡周辺域で採取した植物のストロンチウム同位体比は 0.708 ~ 0.709 を示しており、在地型動物である出土イヌのストロンチウム同位体比の範囲と一致した。また、イヌ以外の動物として測定したイノシシのストロンチウム同位体比は 0.70985 を示しており、奈良盆地を取り囲む高地におけるストロンチウム同位体比の範囲内におさまった (図 5-1 参照)。すなわち、在地型動物であるイヌは、藤原京がある奈良盆地内のストロンチウム同位体比と近似し、野生動物であるイノシシは都市部である奈良盆地以外に、森林地帯である奈良盆地を取り囲む高地の値と近似した値を示している。

また、藤原宮跡出土馬が藤原京周辺域から移入されていたかを評価するために、馬歯エナメル質と植物および河川水のストロンチウム同位体比の分散を 2 群に分けて F 検定した。その結果、藤原宮跡出土馬のストロンチウム同位体比の分散は奈良県域内の植物および河川水のストロンチウム同位体比の分散よりも有意に高い値を示した (F 検定、 $P=0.02$)。

6. 考察

藤原宮跡出土動物遺存体が生存時における生態学的な情報を保持している可能性を検証するために、F 検定を用いて藤原宮跡出土馬のストロンチウム同位体比の分散を、在地型動物のイヌ、植物および河川水のストロンチウム同位体比の分散と比較した。その結果、藤原宮跡出土馬はイヌ、植物および河川水のストロンチウム同位体比の分散よりも有意に大きい値を示した (パートレット検定、イヌ ; $P=0.001$ 、植物および河川水 ; $P=0.02$)。また、藤原宮周辺域に生息していたと考えられる在地型動物であるイヌのストロンチウム同位体比の分散は、植物および河川水のストロンチウム同位体比の分散よりも有意に小さく、全てのイヌのストロンチウム同位体比は、奈良県域内における植物および

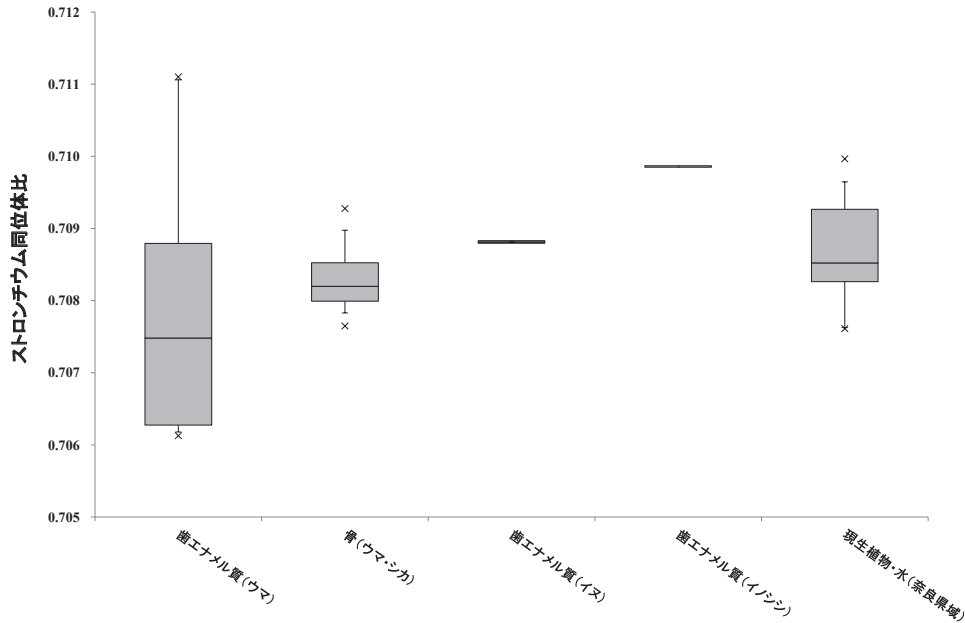


図5-1 藤原宮跡出土動物遺存体・現生植物・河川水のSr同位体比

河川水のストロンチウム同位体比の範囲から逸脱しなかった。これらの結果に基づくと、在地型動物であるイヌの方が移動型動物であるウマよりも移動性が低かったことが示唆される。さらに、イヌのストロンチウム同位体比は藤原京内における植物のストロンチウム同位体比と近似しており、都市部で飼育されていたイヌである可能性が考えられる。

一方で、野生動物であるイノシシの歯エナメル質のストロンチウム同位体比は、藤原京内の値とは近似せず、藤原京の南部である吉野などの野生動物が多く生息する森林地帯と近似した値を示す個体が検出された。このように、それぞれの動物がもつと期待される生態学的な情報が、藤原宮跡から出土する動物遺存体でも同様に保持されている可能性が高い。馬以外の動物種のストロンチウム同位体比の値は、それぞれの動物種の生態から期待される値を示しており、遺跡出土馬においても生存時における馬の生息域の情報を保持している可能性が高い。藤原宮跡出土馬のストロンチウム同位体比が奈良県域内の植物のストロンチウム同位体比の範囲から逸脱したことは、藤原宮跡出土馬が奈良県域外から移入させられた可能性を示唆している。

植物および河川水のストロンチウム同位体比の範囲を、遺跡周辺域で生息した動物がとり得る範囲と仮定した場合、それから逸脱した藤原宮跡出土馬は、15点中10点であった。このように、ストロンチウム同位体比において、藤原宮跡出土馬は約7割が外部からの移入個体である可能性が示唆された。また、イヌのストロンチウム同位体比を藤原宮跡周辺域がとりうるストロンチウム同位体比の範囲と仮定した場合、その範囲から逸脱した藤原宮跡出土馬は13点であった。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、本分析で得られたストロンチウム同位体比は、4歳以前に生息していた地域のストロンチウム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

表5-5 歯エナメル質の推定形成時期とストロンチウム同位体比

資料番号	分析番号	遺構	時期	動物種	歯種	左右	最短形成時期 (Months)	最長形成時期 (Months)	ストロンチウム 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	0.708395
153-5	TG102203	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	下顎歯(P4/M1/M2)	右	4.0	18.0	0.711061
153-53	TG102204	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	上顎歯(M3)	右	23.9	23.9	0.707301
153-54	TG102205	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	上顎歯(P2)	右	20.8	20.8	0.708810
153-94	TG111001	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	上顎歯 (P3/P4/M1/M2)	左	11.4	34.6	0.708775
153-75	TG111002	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	上顎歯 (P3/P4/M1/M2)	右	0.7	19.6	0.707628
153-55	TG111003	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	上顎歯 (P3/P4/M1/M2)	左	0.7	19.6	0.707425
153-78	TG111004	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	下顎歯(P3/P4)	左	18.0	19.1	0.707482
153-4	TG111005	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	下顎歯(P4/M1/M2)	右	5.2	20.1	0.711102
20-3	TG111006	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	下顎歯(P4/M1/M2)	左	2.8	16.0	0.706178
20-4	TG111007	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	下顎歯(P4/M1/M2)	左	2.5	15.4	0.706128
20-5	TG111008	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	下顎歯(P3/P4)	左	13.9	15.1	0.706266
20-6	TG111009	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	下顎歯(P4/M1/M2)	右	1.6	13.9	0.706281
20-7	TG111010	SD1901A	藤原宮造営期	ウマ	下顎歯(P2)	右	15.8	15.8	0.706186
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	0.709221

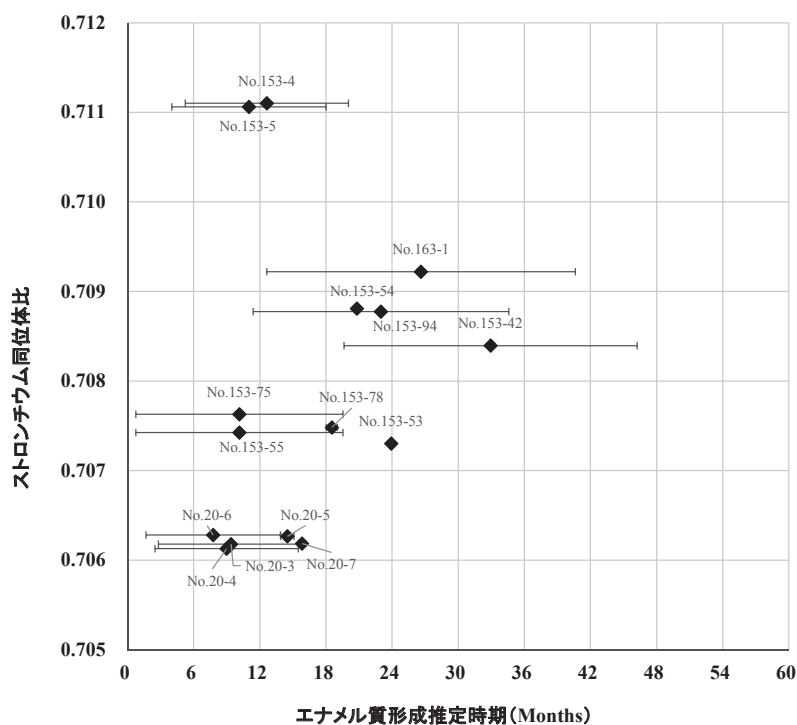


図5-2 歯エナメル質のSr同位体比変動

歳齡前後と推定された No.153-54 (TG102205) および No.153-94 (TG111001) の個体のストロンチウム同位体比は、0.7087 および 0.7088 を示しており、藤原宮跡出土イヌのストロンチウム同位体比の範囲に収まっている。藤原宮跡周辺域のストロンチウム同位体比が他の遠方の地域と近似することもあるため、これらの個体が必ずしも在地で飼育された馬であるかは断定できない。しかし、仮にこれら

の個体が在地で飼育されていた場合、持ち込まれた個体はすぐに斃死するが、持ち込まれていない在地の個体はすぐに斃死しないという、ストロンチウム同位体比と年齢構成との関連性があるかもしれない。今後、分析試料数を増やすことでこれらの仮説を検証することが重要である。

最後に、第3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5-5）、変動を可視化した（図5-2）。その結果、形成時期が近い部位ごとで類似した値を示す傾向にあった。具体的には、10ヶ月齢以前に中央値を持つNo.20-3（TG111006）、No.20-4（TG111007）、No.20-6（TG111009）はともにストロンチウム同位体比が他の形成部位の中でも最も低い値に集中している（図5-2参照）。次に、10ヶ月齢～20ヶ月齢を見てみると、非常に多様性に富んでいることが分かる。ストロンチウム同位体比が0.7011と高いNo.153-54（TG111005）及びNo.153-5（TG102203）、ストロンチウム同位体比が0.707～0.708を示すNo.153-75（TG111002）、No.153-55（TG111003）、No.153-78（TG111004）、そしてストロンチウム同位体比が0.706と低いNo.20-5（TG111008）及びNo.20-7（TG111010）と、大きく3つに分かれて分布する傾向にあった。最後に、20ヶ月齢以降を見ると、No.153-53（TG102204）の1点を除いて、0.708～0.709に収まった。20ヶ月齢以前に形成された地点のストロンチウム同位体比は、藤原宮跡周辺域のストロンチウム同位体比の範囲（植物、馬骨および在地型動物であるイヌ）から全ての個体が逸脱していたが、一方で、20ヶ月齢以降に形成された個体の多く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る。このように、歯エナメル質の形成時期ごとに変動傾向に変化が生じており、形成時期が遅くなるにつれて藤原宮跡周辺域のストロンチウム同位体比の範囲に収束していくようにも見える。20ヶ月齢以降の分析試料がやや少ないために、現状では統計的な議論は困難であるが、今後、20ヶ月齢以降に形成された歯エナメル質の部位を同様に分析することで、この仮説を検証することが可能である。仮に、この傾向が確かだった場合、①20ヶ月齢以前は藤原宮跡周辺域外の多様な地域で飼育され、②20ヶ月齢以降は藤原宮跡周辺域で飼育され始める、ということになる。今後さらなる分析地点を増やし、これらの仮説を検証することが求められる。

本分析は、ストロンチウム同位体比に基づいて馬の移入の有無について検証を試みた。しかし、本分析はどの地域から馬が持ち込まれたかといった産地の議論は困難である。なぜなら、日本列島におけるストロンチウム同位体比の分布は、長距離に離れていたとし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るためである（覚張2009、日下・覚張2014）。このため、ストロンチウム同位体比以外の指標に基づいて、馬の産地を復元することが求められる。

（覚張隆史・米田穰）

引用文献

- 加々美寛雄・周藤賢治・長尾隆志（2008）『同位体岩石学』共立出版
 覚張隆史（2009）「在来馬と人間のかかわり」『BIOSTORY』11、27-35頁
 日下宗一郎・覚張隆史（2014）「長原遺跡（NG12-3次調査）出土の人骨および動物骨の安定同位体分析」『長原遺跡発掘調査報告第28冊』大阪文化財研究所、125-128頁
 倉沢一（1970）『同位体地質学』ラティス丸善

春成秀爾 (2002) 『縄文社会論究』 塙書房

- Ando, A., Nakano, T., Kawahata, H., Yokoyama, Y., Khim, B. (2010) Testing seawater Sr isotopic variability on a glacial-interglacial timescale: An application of latest high-precision thermal ionization mass spectrometry. *Geochemical Journal*. 44. pp. 347-357.
- Bentley, R. A. (2006) Strontium Isotopes from the Earth to the Archaeological Skeleton: A Review. *Journal of Archaeological Method and Theory*. 13. 3. pp. 135-187
- Blum, J. D., Taliaferro, E. H., Weisse, M. T., Holmes, R. T. (2000) Changes in Sr/Ca, Ba/Ca and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios between trophic levels in two forest ecosystems in the northeastern U.S.A. *Biogeochemistry*. 49. pp. 87-101.
- Capo, R. C., Stewart, B. W., Chadwick, O. A. (1998) Strontium isotopes as tracers of ecosystem processes: theory and methods. *Geoderma*. 82. pp. 197-225.
- Dickin, A. P. (2005) *Radiogenic Isotope Geology - second edition*-. Cambridge University Press. Cambridge.
- Elias, R. W., Hirao, Y., Patterson, C. C. (1982) The circumvention of the natural biopurification of calcium along nutrient pathways by atmospheric inputs of industrial lead. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 46. pp. 2561-2580.
- Faure, G. and Mensing, T. M. (2005) The Rb-Sr Method. *Isotope Principles and Applications Third Edition*. pp. 75-112. John Wiley & Sons, New Jersey.
- Faure, G. and Powell, J. L. (1972) *Strontium Isotope Geology*. Springer-Verlag, Berlin.
- Gakahari, T., Uetsuki, M., Uzawa, K., Hongo, H., Mukai, H., Nakano, T., Yumoto, T., Yoneda, M. (2010) Reconstructing horse and cattle transport systems during the Middle Ages in Japan using multiple isotope analyses. *The International Council for Archaeozoology (ICAZ) Proceedings*. p. 135
- Kusaka, S., Ando, A., Nakano, T., Yumoto, T., Ishimaru, E., Yoneda, M., Hyodo, F., Katayama, K. (2009) A strontium isotope analysis on the relationship between ritual tooth ablation and migration among the Jomon people in Japan. *Journal of Archaeological Science*. 36. pp. 2289-2297.
- Motohashi, T., Sato, T., Yamada, S. (1994) Effects of strontium on calcium metabolism in rats. I . A distinction between the pharmacological and toxic doses. *Japanese Journal of Pharmacology*. 64. pp. 155-162.
- Schrooten, I., Behets, G. J. S., Cabrera, W. E., Vercauteren, S. R., Lamberts, L. V., Verberckmoes, S. C., Bervoets, A. J., Dams, G., Goodman, W. G., De Broe, M. E., D'Haese, P. (2003) Dose-dependent effects of strontium on bone of chronic renal failure rats. *Kidney International*. 63. pp 927-935.
- Underwood, E. J. (1977) *Trace Elements in Human and Animal Nutrition 4th edition*. Academic Press. New York.
- van der Merwe, N. J., Lee-Thorp, J. A., Thackeray, J. F., Hall-Martin, A., Kruger, F. J., Coetzee, H., Bell, R. H. V., Lindeque, M. (1990) Source-area determination of elephant ivory by isotopic analysis. *Nature*. 346. pp. 744-746
- Vincent, B. (2004) Allometric constraints on Sr/Ca and Ba/Ca partitioning in terrestrial mammalian trophic chains. *Oecologia*. 139. pp. 83-88.