

博士論文

論文題目 同位体地球化学の手法を用いた古代律令制における

馬飼育の復元

(Reconstruction of Horse Breeding in Asuka/Fujiwara Period

Using Isotope Geochemistry)

氏 名 覺張 隆史

目次

第一章 研究背景および研究目的	1
第一節 序文.....	1
1.1. ウマの系統.....	1
1.2. ウマの家畜化.....	2
1.3. ウマの軍事利用	3
第二節 日本列島におけるウマの利用形態の復元	4
2.1. 日本列島におけるウマ利用の歴史	4
2.2. 古代におけるウマの飼育形態	8
2.3. 同位体地球化学による動物の生態復元	9
2.4. 古代におけるウマの利用形態の復元.....	11
第二章 日本列島における現生ウマを用いたストロンチウム同位体分析	13
第一節 方法の原理と背景	13
1.1. 哺乳動物の産地復元	13
1.2. ストロンチウム同位体分析.....	14
1.3. 日本列島におけるストロンチウム同位体分析の課題	16
第二節 分析試料.....	17
2.1. 日本列島の現生ウマおよび生息地における環境試料	17
第三節 分析方法.....	19
3.1. 歯エナメル質および植物からのサンプリング	19
3.2. ストロンチウム精製	19
3.3. ストロンチウム同位体比測定	20
第四節 結果.....	21
4.1. 日本在来馬のおよび生息地における環境試料のストロンチウム同位体比 ...	21
第五節 考察.....	22

5.1. 半自然草原における在来馬と環境間のストロンチウム同位体比の関連性 ...	22
5.2. ハレム群情報としてのストロンチウム同位体比	24
第六節 結論.....	25
第三章 日本列島における現生ウマを用いた酸素同位体分析.....	26
第一節 方法の原理と背景	26
1.1. 日本列島におけるウマの産地推定の課題.....	26
1.2. 環境中の酸素同位体比.....	26
1.3. 哺乳動物の酸素同位体比	27
1.4. リン酸基の酸素同位体比測定	28
1.5. 日本列島における酸素同位体分析の地理的勾配	29
第二節 分析試料.....	31
2.1. 日本列島の現生ウマ.....	31
2.2. 日本列島における表層水の酸素同位体比.....	31
第三節 分析方法.....	32
3.1. 歯エナメル質からのサンプリング	32
3.2. リン酸銀精製.....	33
3.3. 酸素同位体比測定	34
3.4. 地理情報システムに基づく酸素同位体比の空間補間	34
第四節 分析結果.....	35
4.1. 日本在来馬の酸素同位体比.....	35
4.2. 現生ウマのハイドロキシアパタイトと表層水の酸素同位体比の比較	36
第五節 考察.....	38
5.1. 半自然放牧ウマの酸素同位体比.....	38
5.2. 日本列島における表層水酸素同位体比の地理的勾配	39
5.3. 在来馬の酸素同位体比を用いた産地推定.....	39

第六節 結論.....	40
第四章 中・近世における遺跡出土ウマの産地推定.....	42
第一節 研究背景.....	42
1.1. 同位体分析の遺跡出土ウマへの応用.....	42
1.2. 中世におけるウマの利用形態.....	45
第二節 分析試料.....	49
2.1. 中世遺跡出土ウマ.....	49
第三節 分析方法.....	50
3.1. 歯エナメル質からのサンプリング.....	50
3.2. ストロンチウムおよび酸素同位体比測定.....	50
3.3. ストロンチウムおよび酸素同位体分析に基づくウマの生息地域の推定.....	51
第四節 分析結果.....	51
4.1. 中世遺跡出土動物遺存体のストロンチウム同位体比.....	51
4.2. 遺跡周辺域におけるストロンチウム同位体比.....	52
4.3. 出土動物ウマの酸素同位体比.....	53
第五節 考察.....	55
5.1. ストロンチウム同位体分析に基づく遺跡出動物遺存体への応用.....	55
5.2. 日本列島におけるストロンチウム同位体比の多様性.....	58
5.3. 酸素同位体分析に基づく遺跡出動物遺存体への応用.....	59
第六節 結論.....	62
第五章 藤原宮跡出土ウマの産地推定.....	64
第一節 研究背景と問題提起.....	64
1.1. 藤原京における律令制とウマの利用形態.....	64
1.2. 藤原宮跡遺跡.....	67
1.3. 藤原京造営期の遺跡出土動物遺存体.....	69

第二節 分析試料.....	71
2.1. 藤原宮跡出土動物遺存体および環境試料.....	71
第三節 分析方法.....	71
3.1. 歯エナメル質からのサンプリング	71
3.2. ストロンチウムおよび酸素同位体比測定.....	72
3.3. ストロンチウムおよび酸素同位体分析に基づくウマの生息地域の推定.....	72
第四節 分析結果.....	73
4.1. 藤原宮跡出土ウマのストロンチウム同位体比.....	73
4.2. 藤原宮跡出土動物遺存体のおよび環境試料のストロンチウム同位体比.....	73
4.3. 藤原宮跡出土ウマの酸素同位体比	74
第五節 考察.....	75
5.1. ストロンチウム同位体分析に基づく藤原宮跡出土ウマの利用形態の復元	75
5.2. 酸素同位体比に基づく藤原宮跡出土ウマの産地推定	76
第六節 結論.....	77
第六章 結論	79
謝辞	86
引用文献.....	91
図表	105

第一章 研究背景および研究目的

第一節 序文

1.1. ウマの系統

先史時代から今日に至るまで、世界各地で、人類はウマを家畜として利用し、多くの利益を得てきた。その結果として、世界の各地域において、ウマの毛色や体格は非常に多様性が高いことが知られている。例えば、アメリカンミニチュアホースの約 70 cm からシャイアー種の約 2 m を超える体高の分布を示している (Edwards 2002)。この様に、ウマは多様な表現形を有しているが、現存する全てのウマ類は奇蹄目 (Perissodactyla) ウマ科 (Equidae) ウマ属 (Equus) に分類される。現在、地球上にいるウマ属はウマ亜属 (Equus) ・ロバ亜属 (Asinus) ・シマウマ亜属 (Hippotigris) ・グレビーシマウマ亜属 (Dolichohippus) に分類される。ウマ亜属は家畜ウマであるイエウマ (*Equus caballus* もしくは *Equus ferus*) と、以前はモンゴルのステップ地帯に生息していたが、野生下では絶滅したと考えられ、再野生化したウマであるモウコノウマ (*Equus przewalskii*) がいる。ロバ亜属は家畜ロバであるイエロバ (*Equus asinus*)、中近東から東アジアにかけて分布するアジアノロバ (*Equus hemionus*)、チベットの高原地帯に生息するキャン (*Equus kiang*)、アフリカ大陸に生息するアフリカノロバ (*Equus africanus*) がいる。シマウマ亜属は南アフリカに生息するヤマシマウマ (*Equus zebra*)、サハラ以南の東アフリカに生息サバンナシマウマ (*Equus burchelli*) がいる。グレビーシマウマ亜属は北部および中央アフリカに生息するグレビーシマウマ (*Equus grevyi*)、の 9 種である。ウマの進化、起源、系統、家畜化の研究は、非常に多くの研究者の興味と

関心を引き、特に化石試料における形態進化の研究における多様な視点を提供してきた生物種でもある (Gould 1977、Gould 1984、Huxley 1877、Simpson 1951)。

現在のウマの起源は、北アメリカ大陸で確認されている *Dinohippus* と考えられている (Lindsay *et al.* 1980、MacFadden 1992、Simpson 1951)。北アメリカに生息しているウマ属の多くは、最終氷期における環境変動と、人類の進出と時期を同じくして絶滅している (MacFadden 1992)。過去の絶滅種の系統関係は形態学的な研究を中心に精力的に行われてきた (Ludwig and Eisenmann 1986、MacFadden 1992、Osborn 1918、Simpson 1951)。北アメリカに生息していたウマの一部が、陸続きであったベーリング海峡を經由して、ユーラシア大陸に拡散したとされている (MacFadden 1992)。

1.2. ウマの家畜化

ウマは他の家畜種である、イヌ、ヒツジ、ヤギ、ウシ、ブタ、ネコなどに比べて家畜化された時期が比較的遅かったとされている (野澤・西田 1981)。考古学的な証拠からは、ウマが家畜化されたのは、今から約 5500 年前のカザフスタンの北部ステップ地帯に栄えたボタイ文化まで遡ると考えられている (Anthony 2007、Bennett and Hoffmann 1999、Clutton-Brock 1999)。最古の家畜ウマの証拠は、カザフスタンの *Krasnyi Yar* 遺跡において発見された、ウマを囲い込むために使用したと考えられる柵の溝と土壌の化学分析により、囲いの内側の土壌に含まれる窒素・リン・ナトリウム・カリウムの含有量が柵外と比較して 10 倍もの高

濃度であったことに依拠している (Olsen 2006)。これは、柵内においてウマの排泄物に含まれるリンが蓄積したためと推察されている。また、隣接地帯の Vasilkovka 遺跡においては、同文化期のウマの全身骨格で 5300 calBP という年代が報告されており、最古の家畜ウマの可能性が議論されている。近年まで、この時代において馬具の使用が確認されておらず、また幼獣が多い出土ウマの年齢構成から、初期に家畜化されたウマの利用は、食肉が主目的であった可能性が指摘されてきた (Olsen 2006)。しかし、これらの遺跡から出土する土器の脂肪酸の同位体分析によって、土器に馬乳を入れていたことが示された (Outram *et al.* 2009)。さらに、第 2 前臼歯側面の微小形態学的な分析によって、馬具であるハミを着けた際に生じる摩耗痕が同定され、馬具利用の可能性も示唆された (Outram *et al.* 2009)。これらのことから、すでに銅器時代において、ウマの家畜化は食肉だけではなく、乳利用と役畜としての利用形態をとっていたと思われる。

1.3. ウマの軍事利用

食用および使役の両利用形態が共存した後に、ウマは世界各地において使役利用に特化し、高度な移動手段として利用され始める。メソポタミア文明において、およそ紀元前 2000 年には家驢を用いた戦車が利用され始め、その後、ウマにおいても馬車を牽くために利用されはじめた (Anthony 2007)。さらに、乗馬技術の普及により、軍事資源として世界各地で利用されてきた (Mills and McDonnell 2005)。ウマは軍事のおよび政治的に重要な生物資

源となり、ウマの増産および育種改良が精力的に行われてきた。例えば、司馬遷の「史記」によれば、西暦 200 年に漢の武帝は西域のフェルガナに侵出し、体格の良好なウマ 3000 頭を自国に持ち帰り馬産に役立てたと記録されている。

日本列島においても、朝鮮半島の軍事的緊張の波及を受けて、古墳時代後期にウマと馬飼い集団を大量に大陸から受け入れた可能性が示唆されている（白石 2001）。この様に、ウマの飼育および移動は軍事的および政治的な理由で生じる場合が多く、世界中の様々な地域において生産されたウマの移動経緯を復元することは、それぞれの社会がどのような地域と交流および支配していたかを示すと期待される。

第二節 日本列島におけるウマの利用形態の復元

2.1. 日本列島におけるウマ利用の歴史

日本列島において、ウマ科哺乳類が生息していたことは古生物学および考古学的研究において確認されている（直良 1984）。日本列島にウマ科哺乳類が生息していた時代は、ユーラシア大陸と接触していた中新世から確認されている。岐阜県可児郡瑞浪層平牧累層のヒラマキ動物化石群から、蹄を 3 つ有する三趾ウマであるヒラマキウマ（*Anchiterium hipohippoides*）が確認されている（Matsumoto 1918）。鮮新世に入る頃にユーラシア大陸に分布していた *Hipparion* や、単蹄馬である *Pliohippus* については、長野県北安曇郡美麻村から出土した *Hipparion* に近い種が知られている（直良 1984）。しかし、出土状況が明確で無く、

日本列島においては物理化学年代が測定された資料は確認されていない。この後に、ウマ科動物の化石は確認できなくなり、日本ではウマが生息していなかった時期が長く存在すると考えられている。

ウマの無生息時代の後、ユーラシア大陸から日本への移入は、縄文時代から始まったことが、20世紀初頭に考古学および人類学の研究から推察されていた（鍵谷 1908、長谷部 1925）。しかし、縄文時代として認識されていた出土ウマの硬組織に含まれるフッ素含有量の測定や、コラーゲンの放射性炭素（ ^{14}C ）年代測定が実施された結果、全ての資料において古墳時代以後に生存していたウマであることが判明した（近藤ら 1991、1992）。近年の発掘調査においても、縄文時代の遺跡からウマは出土しておらず、縄文時代の遺跡から出土したウマは、後世からの攪乱であると判断されている（松浦ら 1994）。

弥生時代の遺跡においては、数は少ないものの、複数の遺跡が確認されており、年代測定による結果が待たれている（西中川 1991）。一方、文献史学の視点に基づけば、3世紀の日本列島の実態を記した「魏志」東夷伝倭人条には、日本列島においてウマが確認されていなかったとされている。しかし、「魏志」に記載された情報は日本列島の一部の地域に限定されているため、弥生時代の日本列島全域においてウマがいなかったことは、いまだに明確な答えを得られていない。

大陸から日本にウマが集団で移入してきたのは、全国の遺跡から多くの馬具が確認される始める古墳中期から古墳後期にかけてである（江上 1967、佐原 1993、末崎 2008、西中川

1991)。古墳前期においては、中期および後期に比べて馬具の出土数は少なく、馬形埴輪が関東において多くなるのも古墳後期からであり、日本における馬文化の全国的な伝播は、この時代からであると考えられている（末崎 2008、西中川 1991）。この時代から、大陸経由で移入してきた理由として、大陸や朝鮮半島への軍事的な政策と交流が生じたためと考えられており、文化だけでなく、大陸から多くの馬飼いや馬産者が日本に渡来してきた可能性が議論されている（江上 1967）。

古墳時代以降の飛鳥・奈良時代においては、律令の制定によってウマの生産管理が全国規模で展開されたと考えられている（山口 1986）。古代の朝廷の馬産体制を記した「養老律令」（757年）およびそれを基に作成された「延喜式」（926年）には、馬牧経営に動員される人員や飼料内容、牧名が記載されている（山口 1986）。古代のウマ生産の多くは、都市部から遠く離れて地域経営された、大規模な馬牧によると考えられている。また、都市部に近い地域に一時的にウマを留める小規模な馬牧を設置し、朝廷が必要に応じて遠方で生産したウマを放していたと考えられている（磯貝 1978、山口 1986）。生産地においては、毎年秋にそれぞれの牧で生産したウマを朝廷に献上する「貢馬」が行われており、様々な地域で生産されたウマが朝廷に集められたと考えられる。

中世になると、この貢馬制度が形骸化し、各地の馬牧は在地の武士によって掌握されてくる。これらの馬牧は「私牧」と呼び、朝廷への貢馬を目的とせずに、経営する武士によって軍事的に利用された（入間田・谷口 2008、山口 1986）。また、私牧で生産されたウマ

のなかで体格が不良なウマは、農用馬として民間に払い下げる場合が増え、多くのウマが庶民に利用されるようになる。

近世は民間利用が中世よりも一般化した時代で、従来のウマを複数乗り継いで物資を輸送する駅伝制とは異なり、1頭で物資を長距離輸送する民間行が発達してくる（古島 1944）。また、徳川幕府は関東圏に大規模な馬牧地帯を設置し、フランスなど海外からのウマを導入するなど、ウマの増産および育種改良を行っていた（青木 2003）。

近代になると、優良な軍馬を生産するために、古墳時代から飼育してきた在来馬は外国産の洋種馬と交配を重ね、雑種化が国策として進められた。特に、明治時代における軍馬補充部の設置、馬匹改良計画の策定および国内法である種馬統制法の施行は、在来馬と洋種馬の交配を推進し、全国規模で在来馬の淘汰が行われる結果となった（岡部 1964、帝国競走馬協会 1928）。

今日、日本列島に古くから飼育されていた品種である日本在来馬が 8 品種存在する。日本馬事協会によって定義された「日本在来馬」は、明治時代における国の育種改良政策から逃れた地域集団を意味し、明治時代以前にいたウマの遺伝的な特徴を保有する貴重な生物資源として保存活動が展開されている。しかし、近年の分子生物学的な研究によれば、日本在来馬品種間の遺伝的な差は少なく、異なる品種間同士で遺伝的なクラスターを形成していることから、種馬統制が実施される以前の家畜ウマも、日本列島規模でダイナミックな移動が生じていたと考えられる（川嶋 2002）。

2.2. 古代におけるウマの飼育形態

日本列島におけるウマの利用形態の中でも、古代において大陸から導入されたウマの利用形態が応用されていたとされる。その利用形態は、居住区となる都市部とは遠方の地域でウマを大規模に飼育し、必要な時に都市部へ供給する「牧制」というシステムである（山口 1986）。このシステムを大陸から導入した時期は、日本の大規模な都市国家の始まりである藤原京設置以前と考えられており、古代においても家畜ウマは外部地域から供給されていた可能性が指摘されている。例えば、8世紀中葉に施行された国家の政治システムを記した「養老律令」において、家畜ウマは厳格な飼育管理によって遠隔地から京に供給されていたと記述されている（山口 1986）。一方、養老律令以前に制定された最古の律令である「近江令」や「飛鳥浄御原令」、「大宝律令」は文献資料が現存しておらず、その内容は「古事記」、「日本書紀」、「続日本紀」や「令集解」などの間接的な文献情報に基づいて解釈されてきた（山口 1986）。そのため、初期の律令体制が実際に遠隔地にまで影響していたかを文献学で実証することは困難な点も多い。

養老律令の記述に基づくと、京から離れた遠隔地から様々な物資が供給されていたと考えられるが、その中でも特に家畜ウマは軍事的な重要性から、朝廷や各地域の駅に配置させる家畜ウマの生産と利用を厳しく管理していた。家畜ウマの組織的な飼育と供給システムが律令体制を維持するために古代国家にとって重要であったことは、家畜ウマの飼育方法の規定が律令内において独立した 1 つの条項になっている点にも表れている。その規定

は「養老律令」の細目を示した「延喜式」の厩牧令に示され、東日本内陸部などの遠隔地において組織的に馬産を行い、儀礼および軍事的な目的で朝廷へ献上していたと記されている。すなわち、京において利用された家畜ウマの産地復元は、日本の古代都市におけるウマの利用形態やヒトと動物の関係だけでなく、律令体制が遠隔地に及ぼした支配力を検証することになり、文献が乏しい初期の律令体制の実態を復元するために重要な基礎情報となり得る。

2.3. 同位体地球化学による動物の生態復元

文献が無い時代の動物の出生地を復元するためには、遺跡から出土する動物遺存体から情報を抽出して、その動物の生存時の生態を復元することが必要である。今日、遺跡出土動物遺存体から動物の生態を復元する様々な手法が開発されており、特に動物遺存体の同位体分析は強力なツールとして、欧米を中心に盛んに研究が行われている (Cerling 1993)。

同位体とは、原子核内の陽子数が同じで、中性子数が異なる原子を指す。同位体は、一般的に放射性同位体と安定同位体に分類される。前者は、原子核が不安定であるため、徐々に放射壊変を伴い、安定同位体へと変化する。例えば、放射性炭素は放射壊変の半減期 (5730年) を応用して、有機物の年代測定などに用いられている (Libby 1955)。後者は、放射壊変が確認できない、より安定的な原子核をもつ物質である。1つの元素には複数の安定同位体が存在するものが多く、物質によって様々な安定同位体の比率をもつ。これは化学反

応時に生じる動的同位体効果による同位体分別により、物質ごとに同位体の比率に偏りが生じるためである (Bigeleisen and Wolfsberg 1958)。物質ごとに同位体比が異なることを利用して、地球における同位体の化学的な挙動を研究する同位体地球化学が近年盛んである (酒井・松久 1996、Hefes 2009)。また、環境学における物質循環の復元、地質学における地質の変動の復元、生態学における物質循環の復元など広範な研究領域に応用されている (Craig 1961)。

近年、この同位体地球化学の手法を用いて、生物の様々な地理情報および生態情報を抽出し、分析データから動物の生態を復元する「同位体生態学」という分野の研究が行われている (Hobson and Norris 2008)。例えば、動物の食性、生息環境および移動範囲を復元する研究などがある。この手法を先史人類学に応用することで、文献情報の無い先史時代における人の食性や出生地、移動などを復元する人類学的な研究も盛んである (Ambrose 1991、Bentley 2006、Evans *et al.* 2006、Knudson *et al.* 2008、Montgomery *et al.* 2002、Price *et al.* 2004、Schoeninger and DeNiro 1984、Schwarcz *et al.* 1985、Shaw *et al.* 2008、Yoneda *et al.* 2002)。また、古生物学の研究対象である化石を用いて、当時の古環境や絶滅動物の食性を復元する試みも多い (Cerling *et al.* 1993、Hoppe *et al.* 2007、Koch *et al.* 1991、Kohn and Cerling 2002)。本研究では、古代から現代までのウマの歯と骨について、複数の元素の同位体を組み合わせた、同位体生態学的なアプローチを実施した。

2.4. 古代におけるウマの利用形態の復元

今日まで、初期の律令制施行時における文献資料の不足が原因で、当時の家畜ウマの供給システムの実態はわかっていない。この研究課題を解決するために、本研究では日本の最初期の律令国家の中心地である藤原京を研究対象として、家畜ウマが外部地域から供給されていたかを検証した。検証方法として、本研究はストロンチウム同位体比および酸素同位体比という同位体地球化学的指標に基づいた分析の有効性について方法論的な検討を行った。この結果に基づいて、本格的な律令制を施行する直前の藤原宮造営期における家畜ウマの供給システムの一部を復元することが本研究の最終的な目的である。

そこで、本研究は律令国家最初期におけるウマの飼育および利用実態を復元するために、同位体比を用いたウマの産地推定法の開発を試みた。本研究では、下記の4つの研究を通して、方法論の確立と考古学資料への応用を試みた。

(第二章) 日本列島における現生ウマを用いたストロンチウム同位体分析

(第三章) 日本列島における現生ウマを用いた酸素同位体分析

(第四章) 中・近世における遺跡出土ウマの産地推定

(第五章) 藤原宮跡出土ウマの産地推定

第二章および第三章は、生息地が既知の現生ウマを用いて、ウマの産地推定法の方法論的研究を実施した。次に、第四章では中世および近世の遺跡出土ウマの分析を実施し、遺跡出土ウマを用いて産地推定を実施する場合の妥当性について評価した。第五章は、古代における最初の大規模都市跡地である藤原宮跡から出土したウマの産地推定を実施し、律令国家体制が始まる直前期におけるウマの利用形態の復元を試みた。また、当時のウマの利用形態の復元像に基づいて、律令制最初期における古代国家の交易および支配域の考察を行い、文献史学では検証が困難であった当時の国家体制の実態に同位体比という新たな視点で再評価を行った。

第二章 日本列島における現生ウマを用いたストロンチウム同位体分析

第一節 方法の原理と背景

1.1. 哺乳動物の産地復元

本研究では、遺跡出土ウマの硬組織（骨および歯）から、ウマの生産地を復元することが求められる。哺乳動物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、哺乳動物の恒常性によって、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）。一方、軽元素の場合、動物の軽元素

の同位体比は食物や飲み水に含まれる軽元素の同位体比とは異なる値をとるものの、一定の相関関係にあるものが多い (Longinelli *et al.* 1984)。そのため、重元素とは異なり、そのままの値で生息地を同定することはできないが、動物の軽元素の同位体比と生息地の軽元素の同位体比間の回帰式を用いて、動物の軽元素の同位体比から生息地の同位体比を算出することが可能である。

1.2. ストロンチウム同位体分析

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つの安定同位体があり (^{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 (加々美ら 2008、Dickin 2005、Faure and Powell 1972)。

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。この様に、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) のため、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するが、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 (Kusaka *et al.* 2009)。また、同位体の指標を用いて家畜ウマの移動および飼育形態を復元する研究は試みられてこなかった。

1.3. 日本列島におけるストロンチウム同位体分析の課題

日本列島において、ストロンチウム同位体分析の考古学的応用の可能性を検証するためには、日本列島におけるストロンチウム同位体比の多様性および地理的分布を把握しなければならない。日本列島におけるストロンチウム同位体比の地理分布に関する研究は、倉沢一らが実施した基盤地質に含まれる岩石のストロンチウム同位体比の研究が知られている (倉沢 1970)。しかし、鉱物に含まれるストロンチウム同位体比は、その土地に生息する動植物のストロンチウム同位体比とは異なる値を示しうるため、岩石の同位体比をそのまま出生地および生息地情報として扱えない (Budd *et al.* 2000、Capo *et al.* 1998)。

一方、植物および動物が吸収可能な可溶性ストロンチウムの同位体比は、その土地に生息している動植物の同位体比と近似した値をとる (Kusaka *et al.* 2009、Price *et al.* 2002)。この様に、産地情報として利用可能なストロンチウム同位体比は、「生物が利用可能なストロンチウム “Biologically Available Sr (BAS) ”」と呼び、欧米を中心に BAS における同位体比の多様性や分布が研究されてきた。一方、日本列島における BAS における同位体の多様

性を評価した先行研究として、主に農作物の産地識別研究が挙げられる (Ariyama *et al.* 2012)。しかし、農作物の産地識別の研究は、特定の地域間および品種間の産地識別には有用なものの、特定の産地間での比較に議論を制約することが難しい考古学的応用には識別能力の空間解像度などについて議論が必要である。北米やヨーロッパのような比較的均質な地質が広がる地域ではなく、火山地帯や付加体など複雑な地質構造をとる日本列島では、風成塵、傾斜、降水などの多くの要因によって、BAS における同位体比の予測が困難な可能性があり、ウマの産地識別におけるストロンチウム同位体の有効性を実証的に評価することが必須である。

そこで、本研究は、生息地が既知の現生家畜ウマおよび生息地の植物・河川水の試料を用いて、家畜ウマと植物・河川水のストロンチウム同位体比を比較し、ストロンチウム同位体比の生息地情報としての利用可能性を検証した。さらに、日本列島における BAS の多様性および地理的分布を求め、動物の産地識別におけるストロンチウム同位体比の識別能力を評価し、産地推定の利用可能性について方法論的な議論を行った。

第二節 分析試料

2.1. 日本列島の現生ウマおよび生息地における環境試料

産地識別の方法論的な検討を実施するために、生息地が既知の現生ウマを試料として選定した。また、遺跡出土ウマへの応用を考慮し、古代の牧制と類似した飼育形態を

とる日本在来馬である御崎馬および与那国馬を分析に供した。

御崎馬は宮崎県串間市都井岬の半草原地帯に囲われて飼育されており、人からの餌葉は与えられておらず、周年放牧の半野生的生態をもつ日本在来馬である (Kaseda *et al.* 1997)。飼育頭数は約 100 頭前後で推移しており、年間に数頭の斃死個体が確認されている。草地は主に扇山および小松ヶ丘の 2 地域があり、本研究では、これら都井岬の草地内で斃死した御崎馬の遺存体 5 個体および草地外の都井岬灯台付近に生息していた遺存体 1 個体 (Misaki06) を分析に供した (表 1、図 1)。

与那国馬は沖縄県与那国町北牧場に囲われて飼育されており、人からの餌葉は与えられておらず、御崎馬と同様に周年放牧の半野生的生態をもつ。飼育頭数は約 60 頭前後で推移しており、年間に数頭の斃死個体が確認されている。本研究では、これら北牧場内で斃死した与那国馬の遺存体 9 個体を分析に供した (表 2、図 1 参照)。

在来馬のストロンチウム同位体比と BAS の同位体比を比較するために、御崎馬および与那国馬の生息地域である植物および飲み水を採取した。都井岬における採取地点は草地内の 12 地点で、各地点でノシバを採取した。また、草地内および草地周辺域の水飲み地点 (ミズクレ場) 6 地点で水を採取した (表 1 参照、図 2)。また、与那国町北牧場における採取地点は牧場内の 6 地点で、各地点でノシバを採取し、牧場内にある 1 地点の水飲み場から水を採取した (表 2 参照)。

第三節 分析方法

3.1. 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、植物の葉を中心に約 10g は電気炉内で 450°C 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。

3.2. 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 1 ml 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 1 ml 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 1 ml で 2 回リンスおよび遠心分離し (2000×g)、乾燥用オーブンにて 60°C 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°C 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 0.5 ml 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°C12 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。

3.3. ストロンチウム同位体比測定

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 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ は、安定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 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 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 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 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。

第四節 結果

4.1. 日本在来馬のおよび生息地における環境試料のストロンチウム同位体比

宮崎県串間市都井岬の小松ヶ丘地区にて白骨化していた御崎馬 5 個体の歯エナメル質は 0.70805～0.70852（平均値±標準偏差；0.70826±0.00012）、都井岬灯台にて白骨化していた御崎馬 1 個体の歯エナメル質は 0.70939 であった（表 1 参照）。

扇山地区および小松ヶ丘地区におけるノシバを各 6 地点採取し、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ を測定した（表 1 参照）。扇山地区は 0.70806～0.70832（平均値±標準偏差；0.70819±0.00011）、小松ヶ丘地区は 0.70769～0.70836（平均値±標準偏差；0.70809±0.00023）を示し、御崎馬のストロンチウム同位体比と近似した値を示した（図 3）。また、都井岬における牧草地帯および隣接する 5 地点の水飲み場の水は 0.71096～0.71203（平均値±標準偏差；0.71160±0.00048）であった。3 群間を Kruskal-Wallis 検定（95%信頼限界にて検定）にて比較した結果、飲み水のみ有意差が確認された（ $P<0.01$ ）。これは、植物のストロンチウム同位体比が御崎馬のストロンチウムに寄与している可能性を示唆している。

沖縄県与那国町北牧場内にて白骨化していた与那国馬 9 個体の歯エナメル質は 0.70924～0.70927（平均値±標準偏差；0.70925±0.00001）であった（表 2 参照）。また、牧場内のノシバ 6 地点を採取し、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ を測定した結果、0.70941～0.71131（平均値±標準偏差；0.71040±0.00076）、飲み水の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ は 0.70922 であった（図 3 参照）。

第五節 考察

5.1. 半自然草原における在来馬と環境間のストロンチウム同位体比の関連性

本研究の研究課題である、ストロンチウム同位体の移動標識としての有用性の検証することは、遺跡出土資料へ応用する上で必要である。また、御崎馬のストロンチウム同位体比の多様性がどのような環境要因に依存しているかを確認することで、環境要因と生物の関係性を復元するための基礎情報を蓄積することを試みた。

都井岬における牧草地帯のストロンチウム同位体比は、扇山地区では 0.70806~0.70832、小松ヶ丘では 0.70769~0.70836 の範囲をとり、都井岬の地質環境である新生代漸新世末期から中新世初期 (PG4) の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (0.708) に近似した値を示している (McArthur *et al.* 2001)。扇山地区と比較して、小松ヶ丘地区ストロンチウム同位体比にばらつきが生じているが、これは扇山地区では砂岩堆積物である宮崎層群が牧草地帯の多くを占めるのに対し、小松ヶ丘地区の牧草地帯では宮崎層群と漸新世末期の日南層群が混在した地質構造のためと考えられる (図 2 参照)。

小松ヶ丘地区の白骨化遺体のうちの 1 個体では、両地区の植物のストロンチウム同位体比よりもわずかに高い値 (0.70852) を示す個体が確認された。この理由には 3 つの可能性がある。1 つ目は御崎馬がストロンチウム同位体比の高い宮崎層群 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.708$) を採食範囲としていたという点、2 つ目は都井岬の牧草地帯は海岸部より近いこと、海水のストレー効果や降水の影響で植物が土壌のストロンチウム同位体比よりも高くなったという

点、3 つ目は御崎馬の飲み水が 0.71096~0.71203 と非常に高い値を示しているため、その影響を受けている可能性である。御崎馬の飲み水は扇山の沢筋の水を溜め、小松ヶ丘まで送っているため、各地点の飲み水は類似した値を示しているが、水源地の地質環境を反映しているため、牧草地の土壌とは異なるストロンチウム同位体比を示している。また、都井岬灯台で斃死した非常に高いストロンチウム同位体比 (0.70939) を示した個体の行動記録については詳細が不明であるが、飲料水などを経由して牧草地以外の土壌成分を得ている可能性を考慮する必要がある。また、小松ヶ丘地区におけるストロンチウム同位体比の多様性は、小松ヶ丘地区の土壌の多様性よりも大きく、これも牧草地の外からストロンチウムがもたらされた可能性を示唆している。しかし、飲み水のストロンチウム同位体比の値を含めて、生息環境のストロンチウム同位体比とすれば、御崎馬集団全体が環境中のストロンチウム同位体比の範囲に収まる (図 4)。このため、半自然放牧地域において周年放牧飼育された集団において、植物および飲み水のストロンチウムを BAS として利用することが、最も誤判別を避ける手法であると考えられる。

一方で、与那国島でも植物だけではなく水も含めて生息地のストロンチウム同位体比を評価すると、与那国馬集団全体の同位体比は植物および飲み水のストロンチウム同位体比の範囲に収まり、御崎馬と同様の結果を得た。すなわち、ウマに反映されるストロンチウム同位体比は、植物だけではなく、水のストロンチウム同位体比も寄与していると考えられる。

5.2. ハレム群情報としてのストロンチウム同位体比

本研究で測定した御崎馬と牧草地帯の植物のストロンチウム同位体比は、平均値に差が無く、周年放牧ウマのストロンチウム同位体比が植物のそれを反映していることが示された。しかし、牧草地帯と類似した地質を示す都井岬灯台の 1 個体は、牧草地帯のウマと大きく異なるストロンチウム同位体比を示していた。また、与那国馬のストロンチウム同位体比は、植物のストロンチウム同位体比とウマとが異なることが示唆され、与那国馬でも植物以外からのストロンチウムが由来しているか、放牧地内の土地利用に偏りがあることを示唆している。近年の BAS の評価に関する研究において、採取行動を肉眼観察された動物種を対象に、その土地に生息するネズミのストロンチウム同位体比を在地の BAS がもつ同位体比と仮定し、大型動物の採食地選択を復元する方法が議論されているが、大型動物が採食した地域のマウスと大型哺乳類でストロンチウム同位体比の値が一致しない場合があり、同一地域内に生息していたとしても各生物種のもつ生態学的・行動学的な違いによって BAS のストロンチウム同位体比が異なる可能性が示唆されている (Radloff *et al.* 2010)。

野生下および半野生下のウマは、主に 1 個体のオスと複数のメスで 1 つの個体群であるハレムを形成し、ハレムごとに特定の地域を縄張りとして移動する (Kaseda *et al.* 1997)。両現生集団で共通してみられる特徴として、同一ハレム群に注目すると植物および飲み水のストロンチウム同位体比の分散よりも、ウマ集団内のストロンチウム同位体比の分散が小さくなる傾向が観察された。この傾向は、自然放牧下におけるウマがハレムを形成するこ

と関連すると考えられるので、牧全体の集団内の分散の大きさは、生息空間の大きさやハレム間の距離によって異なる可能性がある。従って、同一の馬産地では植物と水の同位体比でウマのストロンチウム同位体比は規定されるが、ハレム群の構造によっては、より偏った値を示す可能性がある。遺跡出土ウマ集団を調査する際も、遺跡周辺域で飼育している可能性を議論する際には、遺跡周辺域の植物および飲み水となる河川水のストロンチウム同位体比の両情報の比較が重要になると考えられる。

第六節 結論

日本列島において半野生的に飼育管理されている現生在来馬の歯エナメル質におけるストロンチウム同位体比は、生息地域の植物のストロンチウム同位体比と近似した値を示し、ウマの生息地情報として有用であることが示された。また、半自然草原におけるウマのストロンチウム同位体比は、生息地の植物および飲み水のストロンチウム同位体比の範囲に収まることから、生息地外から移入した個体を検出するためには、植物だけでなく飲み水のストロンチウム同位体比測定し、移入個体の検出の基準とする必要性が示された。一方、移動前の生息地のストロンチウム同位体比が偶然に移動先のストロンチウム同位体比と近似した場合、移入個体と識別されなかったとしても、長距離の移動をした移入者である可能性が残る。このため、ストロンチウム同位体比は一部の移入個体の検出は可能であるが、遠方からの移動個体の産地識別指標としては制限があること示された。

第三章 日本列島における現生ウマを用いた酸素同位体分析

第一節 方法の原理と背景

1.1. 日本列島におけるウマの産地推定の課題

第二章において、ストロンチウム同位体比による産地識別の可能性を議論した。BAS（生物が利用可能なストロンチウム）で同位体比の多様性が低い地域においては、移入者の検出が可能であることが示されたが、一方で、BAS の多様性が高い地域や遠方の地域を含めた産地識別の指標としての限界も示された。それは、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、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ためである（第二章参照）。また、日本列島全域における BAS の同位体比分布は調査されていないため、比較的近距离内の移動ならば産地を検出できるが、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、家畜ウマのように長距離移動をとる動物には別の地理的指標を検討する必要がある。そこで、本研究では、長距離移動の指標として、酸素同位体比に着目した。

1.2. 環境中の酸素同位体比

長距離移動の復元を行う指標で重要な点は、ストロンチウム同位体比のように地域内で多様な値をとらず、かつ日本列島内レベルでは地理的な勾配が存在することである。それらの条件を満たすと期待される情報として、表層水の酸素同位体比が挙げられる。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)。

1.3. 哺乳動物の酸素同位体比

骨や歯の主な成分であるヒ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、ヒ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ヒ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.* 1994、Huertas *et al.* 1995、Longinelli *et al.* 1984)。

ウマ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ウマ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ウマ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、完新世におけるウマ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、日本列島におけるウマ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)。

1.4. リン酸基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、特に、高温で試料を熱分解する TCEA を舞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 年において、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)。

1.5. 日本列島における酸素同位体分析の地理的勾配

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。この様に、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、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）。

特に日本列島では、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。そこで本分析は、生息地域が既知である現生ウマの歯エナメル質のリン酸基で酸素同位体比を測定し、表層水の酸素同位体比における地理的勾配と比較することで、遺跡出土ウマ資料の産地推定が可能か、方法論的な評価を行った。

第二節 分析試料

2.1. 日本列島の現生ウマ

本研究では、宮崎県串間市都井岬の草地内で斃死した御崎馬の遺存体 5 個体、沖縄県与那国島北牧場内で斃死した与那国馬の遺存体 5 個体を分析に供した（表 3、図 1 参照）。

2.2. 日本列島における表層水の酸素同位体比

日本列島および東アジア沿岸部における表層水の酸素同位体比は、Mizota and Kusakabe (1994) が報告した酸素同位体比をデータベース化して用いた。この表層水の酸素同位体比は春季から秋季においてサンプリングした酸素同位体比を採用しており、動物の飲み水として利用される割合の少ない積雪の影響を避けてサンプリングされている。Mizota and Kusakabe (1994) のデータには緯度・経度の情報が無く、町名や地点名のみが記載されているものもあるが、緯度・経度情報が無いデータは町名および地点名の中心地点を代表値

とした（表 4）。また、採取時期が不明な試料は、本分析のデータから除外した。また、沖縄県の酸素同位体比のデータは、Mizota and Kusakabe（1994）では測定地点が少ないため沖縄本島から与那国島までの酸素同位体比の空間補間の精度が十分ではない。そこで、サンプリング地点および日時が明確なデータが得られている田上ら（2013）の沖縄県内（沖縄本島・宮古島・石垣島）のデータと Wang and Peng（2001）の台北（台湾）のデータを加えて比較を行った（表 5）。

第三節 分析方法

3.1. 歯エナメル質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（図 5、表 3）。

降水の酸素同位体比は季節間における変動がみられるため、歯エナメル質が硬質化する季節が異なるエナメル質試料は同一個体でも、異なる値を示す可能性がある。そこで、バルクサンプルとは異なり、成長線に沿って 2mm 間隔で歯冠部から歯根部方向へ連続的にサ

ンプリングする成長線サンプリングによって年平均の近い値を得ることを試みた。御崎馬および与那国馬の切歯から、それぞれ 17 点および 20 点を連続的に採取した。採取量は約 5～10mg を採取し、それぞれを酸素同位体比測定に供した（図 6、表 6）。

3.2. 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阻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 を遠心分離した後に、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°C 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°C 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、0.5φ メッシュで均質化させた。

3.3. 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。

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

（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。

3.4. 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（普遍区リング）を採用してい

る。この方法は、最も分解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）。

第四節 分析結果

4.1. 日本在来馬の酸素同位体比

生息地が既知の日本在来馬 2 集団（御崎馬・与那国馬）を用いて、ハイドロキシアパタイトのリン酸基の酸素同位体比を測定した（表 3）。御崎馬 5 個体のバルクサンプルの酸素同位体比は 17.1～17.9‰（平均値±標準偏差；17.6±0.3‰）であった。また、与那国馬 5 個体のバルクサンプルの酸素同位体比は 18.5～20.3‰（平均値±標準偏差；19.2±0.8‰）であった。

御崎馬と与那国馬の酸素同位体比の等分散性を評価するために、2 群間で F 検定を実施した。その結果、御崎馬の酸素同位体比は、与那国馬の酸素同位体比と等分散であることが示された（ $P=0.125$ ）。次に、御崎馬と与那国馬の間で酸素同位体比の平均値に有意な差があるか検証するために、Mann-Whitney の U 検定を実施した。その結果、御崎馬の酸素同位体比の平均値は、与那国馬の酸素同位体比の平均値よりも有意に低いことが示された（ $P=0.009$ ）（図 7）。

次に、成長線サンプルの酸素同位体比は、御崎馬では 16.9～18.4‰（平均値±標準偏差；17.6±0.4‰）、与那国馬は 18.3～20.3‰（平均値±標準偏差；19.0±0.6‰）を示した（表 6）。両試料における個体内の酸素同位体比の最大差は御崎馬で 1.4‰、与那国馬で 2.0‰であっ

た。サンプリングバイアスの影響を評価するために、集団内の酸素同位体比（バルクサンプル）と個体間の酸素同位体比（成長線サンプル）の間で F 検定および Mann-Whitney の U 検定を行い、2 群間の等分散性と平均値の差を評価した。その結果、御崎馬の集団内の酸素同位体比と個体内の酸素同位体比の間で等分散性が示され、平均値は有意な差は示さなかった（F 検定:P=0.61、U 検定:P=0.72）（図 8）。一方、与那国馬においても集団内の酸素同位体比と個体内の酸素同位体比の間で等分散性が示され、平均値は有意な差は示さなかった（F 検定:P=0.47、U 検定:P=0.66）（図 8 参照）。

4.2. 現生ウマの hidroキシアパタイトと表層水の酸素同位体比の比較

hidroキシアパタイトの酸素同位体比と表層水の酸素同位体比の関係を評価するために、本分析で得られた在来馬のエナメル質の酸素同位体比と、報告されている在来馬の生息地域における表層水の酸素同位体比を比較した。まず、御崎馬 5 個体の hidroキシアパタイトの酸素同位体比と九州南部（宮崎県および鹿児島県）の表層水 17 地点の酸素同位体比を直接比較するために（表 5）、御崎馬の hidro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推定した。hidroキシアパタイトの酸素同位体比から飲み水の酸素同位体比を求める式は、Huertas *et al.*（1995）で示された式を用いた（ $\delta^{18}\text{O}_{\text{phosphate}} = 0.72 \cdot \delta^{18}\text{O}_{\text{water}} + 22.29$ ）。その結果、御崎馬の hidroキシアパタイトから推定された飲み水の酸素同位体比は、-6.2~-7.2‰（平均値±標準偏差；-6.6±0.4‰）と推定された（表 3 参

照)。

次に、推定された摂取した水の酸素同位体比と九州南部の表層水の酸素同位体比 $-5.7\sim-7.9\text{‰}$ (平均値 \pm 標準偏差 ; $-6.7\pm 0.7\text{‰}$) を比較するために、F 検定および Mann-Whitney の U 検定を用いて 2 群間における分散および平均値の差を評価した。その結果、ウマ歯エナメル質の酸素同位体比から推定された摂取した水の酸素同位体比の分散および平均値は、九州南部の表層水の酸素同位体比と有意な差は示されなかった (F 検定 ; $P=0.32$ 、U 検定 ; $P=0.90$) (図 9)。

同様に、与那国馬のヒドロキシアパタイトの酸素同位体比から飲み水の酸素同位体比を算出した。その結果、与那国馬 5 個体の飲み水の酸素同位体比は $-3.1\sim-5.4\text{‰}$ (平均値 \pm 標準偏差 ; $-4.5\pm 0.9\text{‰}$) と推定された (表 3 参照)。次に、算出された飲み水の酸素同位体比と沖縄県および台北の表層水 6 地点 (表 5) の酸素同位体比 $-4.5\sim-5.9\text{‰}$ (平均値 \pm 標準偏差 ; $-5.2\pm 0.6\text{‰}$) を比較するために、2 群間における分散および平均値の差を F 検定および Mann-Whitney の U 検定を行った。その結果、算出された飲み水の酸素同位体比の分散および平均値は、沖縄および台湾の表層水の酸素同位体比と有意な差は示されなかった (F 検定 ; $P=0.29$ 、U 検定 ; $P=0.17$) (図 9 参照)。

第五節 考察

5.1. 半自然放牧ウマの酸素同位体比

ウマ集団の歯エナメル質の酸素同位体比から推定した飲み水の酸素同位体比は、生息地域における表層水の酸素同位体比と有意な差が示されなかった。また、御崎馬の酸素同位体比から推定された飲み水の酸素同位体比および御崎馬の生息する九州南部の表層水の酸素同位体比は、与那国馬の酸素同位体比から推定された飲み水の酸素同位体比および与那国馬が生息する沖縄の表層水の酸素同位体比と有意に異なる値を示した（図9参照）。これらの結果に基づけば、ウマ集団の推定された飲み水の酸素同位体比は、表層水の酸素同位体比と直接比較でき、識別したい地域間において表層水の酸素同位体比が異なれば、産地推定のための土地情報として利用できる可能性がある。

また、バルクサンプルと成長線サンプルの平均値は互いに近似した値を示しており、集団内の酸素同位体比と個体内の酸素同位体比は等分散であることが示された（図8参照）。バルクサンプルとして分析した試料は、異なる年に斃死した個体であるため、個体間変動は降水における年々変動を反映している可能性が考えられる。一方、成長線サンプルは主に季節変動を反映していると考えられる。バルクサンプルが成長線サンプルの平均値と近似しているので、バルクサンプルでは季節変動をキャンセルできていると考えられるが、さらに年々変動をキャンセルするためには、バルクサンプルの平均値を評価することが求められる。したがって、ウマ集団の主要な産地における表層水の酸素同位体比を推定するため

にはバルクサンプルの集団の平均値を求める方法がもっとも確実と言える。また、遺跡出土資料へ応用する場合、成長線サンプルは貴重な資料へのダメージが非常に大きいですが、バルクサンプルは成長線サンプルよりも 1 試料におけるダメージが比較的少ないので、考古資料ではバルクサンプルを複数個体で測定することが適切と考えられる。

5.2. 日本列島における表層水酸素同位体比の地理的勾配

日本列島における表層水の酸素同位体比の多様性や地域分布を評価することは、歯エナメル質の酸素同位体比を用いてウマの産地識別能を評価する上で重要である。日本列島および東アジアにおける酸素同位体比の範囲は-4.6~-14.7‰を示しており 10‰を超える地理的勾配を示し、日本列島に限っても-4.6~-13.7‰の幅を示すことから (Mizota and Kusakabe 1994)、ウマの酸素同位体比も非常に多様な値を示すことが期待される (表 4 参照)。特に、沖縄などの南西諸島、本州、東日本内陸部および東北の間で大きく異なる酸素同位体比を示した。また、西日本および本州沿岸部は比較的近似した値を示す地域が広範囲にわたって分布し、酸素同位体比に基づく産地識別の分解能が低い地域も存在することが示された。

5.3. 在来馬の酸素同位体比を用いた産地推定

最後に、現生在来馬から得られたウマの摂取した水の酸素同位体比および集団内の酸素同位体比の標準偏差に基づいて、各個体の推定産地を示した。その結果、御崎馬の酸素同

位体比から推定された地域は、九州南部（都井岬）と一致することが示された（図 10～図 14）。

また、与那国馬の酸素同位体比から推定された生息地も同様に、すべての個体が与那国島の範囲をとった（図 15～図 19）。本研究では、すべての個体において推定された生息地が既知の生息地と一致したことから、酸素同位体比に基づく産地識別をすることが妥当であると考えられる。

最後に、御崎馬および与那国馬の酸素同位体比の平均値と、九州南部（宮崎および鹿児島）および沖縄の表層水の酸素同位体比の平均値を Huertas *et al.* (1995) の式 7 に加え、日本列島におけるウマの酸素同位体比と飲み水の酸素同位体比の回帰式を算出した。得られた回帰式は $\delta^{18}\text{O}_{\text{water}} = 1.2542 \cdot \delta^{18}\text{O}_{\text{phosphate}} - 28.594$ ($R^2=0.90$ 、2 標準偏差 2.2‰) となり、Huertas *et al.* 1995 と近似した回帰式が得られた。

第六節 結論

日本列島における現生在来馬の歯エナメル質の酸素同位体比は、生息する地域における表層水の酸素同位体比と相関関係があることが示された。また、ウマの酸素同位体比求めた飲み水の酸素同位体比は、表層水の酸素同位体比と一致し、ウマの歯エナメル質と表層水のデータに基づく産地識別が利用できる可能性が示された。日本列島における酸素同位体比に基づく産地推定の分解能を評価するために、GIS に基づく酸素同位体比地図を作成し、酸素同位体比の地理的勾配を確認した。

作成された同位体比地図を用いて、生息地が既知の現生在来馬で産地推定をおこなったところ、推定された生息地域は実際の生息地域と一致し、酸素同位体比に基づく産地推定が有効であることが示唆された。

第四章 中・近世における遺跡出土ウマの産地推定

第一節 研究背景

1.1. 同位体分析の遺跡出土ウマへの応用

現生在来馬のストロンチウム同位体比および酸素同位体比を用いて、ウマの移動および産地に関する情報を抽出する方法について検討した（第二章、第三章参照）。しかし、これらの分析を遺跡出土ウマに応用する際には、考古資料特有の問題を考慮した更なる検証が必須である。そこで、本章では、中世遺跡出土のウマ資料を用いて、現生在来馬で試みた産地識別法の有効性を検証した。

動物のストロンチウム同位体比は、その土地の植物および飲み水のストロンチウム同位体比の範囲に収まることが分かっている（第二章参照）。また、ストロンチウム同位体比は多くの遺跡出土資料に応用されており、生態学的な情報を保持していることが示されており、特に歯エナメル質は土壌に含まれるストロンチウムからの汚染程度が低いことが示されている（Hoppe *et al.* 2003）。この特徴に基づいて、下記の仮説を検証することで日本列島の遺跡への応用可能性を検証できると考えた。

1. 在地性の高い都市部内に生息するイヌやネコなどの中型哺乳類のストロンチウム同位体比は、遺跡周辺域のストロンチウム同位体比の範囲に収まると期待される。

2. 都市部で生産しておらず、地方や郊外で飼育されていた可能性が高いウシやウマなどの大型哺乳類は遺跡周辺域のストロンチウム同位体比の範囲から逸脱する個体が存在する。

これらの結果が得られれば、遺跡に埋没していた考古学資料においても生存時における生態学的な情報が保持されている可能性を示すことができ、移入型動物は在地型動物よりも同位体比の多様性が高く、移入個体の検出が可能であると期待される。

一方、動物の酸素同位体比の場合は、ストロンチウム同位体比のような、在地型動物と移動型動物との対比による検証は困難である。動物の酸素同位体比を用いて産地推定を行う場合、動物の酸素同位体比からその動物が摂取した飲み水の酸素同位体比を算出する必要がある（第三章参照）。飲み水の酸素同位体比を算出する過程で用いる回帰式は、様々な動物種で検証されているが、都市部に生息する可能性が高いイヌやネコなどの肉食哺乳類の酸素同位体比は、飲み水の酸素同位体比と相関関係を示さないからである（Pietsch *et al.* 2011）。また、日本列島の代表的な草食哺乳類であるシカおよびウサギの酸素同位体比は、表層水の酸素同位体比との相関関係は低く、相対湿度に相関関係が示されており、飲み水の酸素同位体比を復元することは困難である（Huertas *et al.* 1995）。また、イノシシの酸素同位体比から飲み水のリン酸の酸素同位体比を算出するための回帰式は報告されていない。この様に、日本列島における遺跡出土動物遺存体の在地型動物（イヌ、ネコ、シカなど）

の酸素同位体比は、表層水の酸素同位体比と直接比較することができないのが現状である。

そこで、本研究はウマの産地および消費地であったと考えられる地域の遺跡出土資料の酸素同位体比を測定し、測定された酸素同位体比から算出された飲み水の酸素同位体比が、文献史学および考古学的な背景と矛盾がないかを検証することで、酸素同位体比による遺跡出土ウマの産地識別法の評価を行った。

中世以降の遺跡では、ウマの産地である地域は外部から持込まれた個体が都市部と比較して相対的に低いと期待される。また、馬産地とは異なり、都市部のウマは外部から持込まれていることが多くの文献に記載されており、長距離移動個体の検出が期待される。この様に、ウマの移動形態が異なる地域間において、ウマの酸素同位体比および推定産地の分布を比較することで、酸素同位体分析の利用可能性を評価できると考えられる。そのため、本分析は下記の 2 つの仮説に基づいて、遺跡出土ウマにおける酸素同位体比に基づく産地推定法の評価を実施した。

3. 外部地域からのウマの出入りが制限されている馬産地の遺跡出土ウマは、現生在来馬の結果と同様に、遺跡周辺域の範囲に産地推定される。

4. 都市部では遠方から持込まれたウマが存在したとされており、酸素同位体比において都市部とは大きく異なる地域に産地推定される個体が検出される。

これらの作業仮説を検証するために、中近世の馬産地である岩手県一戸町の野田遺跡、山梨県南アルプス市の百々遺跡および沖縄県今帰仁村の今帰仁グスク跡、中世都市である神奈川県鎌倉市の由比ヶ浜南遺跡と福岡県福岡市の博多遺跡から出土した動物遺存体のストロンチウム・酸素同位体分析を実施した。

1.2. 中世におけるウマの利用形態

中世においてウマが全国的に大きな移動をしていたことを考慮すると、馬牧において生産されたことが明確な遺跡出土ウマを用いて、安定同位体分析による産地識別および移動復元法を評価することが重要である。なぜなら、遺跡の考古学的・歴史学的な背景が明確でない資料に基づいて安定同位体分析の評価を実施することは、遺跡出土ウマ集団に異なる地域から持込まれた個体を含んでいる可能性があり、結果的に産地識別能を過少評価する可能性があるためである。そのため、遺跡出土ウマを用いた酸素同位体比に基づく産地識別の利用可能性を検証する際は、ウマの利用形態が明確な資料群を第一に分析に供し、現生在来馬と同様の結果が得られるかを検証しなければならない。

中世の馬産地と呼ばれる地域は特に東北および東日本内陸部であったとされている。

「吾妻鏡」によると、東北地方のウマは中世においては評価が高く、源頼朝が東北地方で生産されたウマを掌握しようと圧力をかけていた。これに対し、中世の東北地方を統治していた奥州藤原氏は反発し、東北地方で生産されるウマは移動に制限がかけられていた。

このため、都市部よりも東北地域のウマの移動性は低かったと期待される。

本研究の第三章では、同一地域集団における現生在来馬の産地識別法を検討してきた。

そのため、すでに検討してきた産地識別法の利用可能性を評価するためには、同様に同一地域集団と仮定できる遺跡出土ウマの分析が求められる。東北北部では同一地域において生産されていた可能性が高い遺跡出土ウマが検出されている。岩手県一戸町の野田遺跡(図 20) は中世に埋葬された 5 個体のウマが並べて埋葬されており、体格もそれぞれ類似した特徴を有している(茂原 2008)。出土地域である岩手県北部は中世において、馬産が盛んであった(入間田・谷口 2008)。野田遺跡より出土したウマは、年齢推定からほぼ同齢の老齢ウマであることが確認された(茂原 2008)。よって、極めて類似した環境で飼育されていた個体である可能性が推察される。

一方、東日本内陸部においても、山梨県南アルプス市の百々遺跡からは同一遺構内で並べて埋葬された遺跡出土ウマが確認されており(山梨県教育委員会 2004a、2004b)、同一地域で生産された可能性が高い(図 20 参照)。さらに、百々遺跡に隣接した地域が牧であった可能性を示す遺構空白地帯が確認されている。この遺跡は中世における八田牧が存在していたことが文献史学においても示唆されており、当時のウマ牧におけるウマのストロンチウムおよび酸素同位体比の挙動を良く反映していると期待される。

また、東北および東日本内陸部だけでなく、中世の琉球列島においても多数のウマを飼育していたことが、「明実録」などの文献史料に記載されており、沖縄本島全域において飼

育管理されたウマは明や本州へ交易品として出荷されていた。その頭数は、約 900 頭を一度に大陸へ出荷するほど、馬産体制が確立しており、沖縄本島の中世の遺跡から出土するウマは琉球列島内で飼育管理された個体が多いと期待される。中世における琉球本島では、南・中・北の地域に政治体制が分かれており、各地域において石積みを基礎とするグスクと呼ばれる城が形成された。このグスクの城内からは大量のウマが出土しており、各地域の政治体制が掌握するウマ牧で生産された可能性が高い。中世のグスクの中でも、山北王が築いた沖縄県今帰仁村の今帰仁グスク跡からは（今帰仁村教育委員会 2008）、遺跡から大量のウマが出土している（図 20 参照）。特に、城壁内において、集中的にウマが出土しており、これらの資料は山北王の支配域において育った在地のウマであると考えられ、酸素同位体分析に基づく産地識別法を評価する上で良い遺跡出土試料であると考えられる。

一方、馬産地とは異なり、遺跡周辺地域外から持込まれる可能性が高い都市部として、中世鎌倉の由比ヶ浜南遺跡および中世博多の博多遺跡を本研究ではとりあげた。これらの遺跡から出土するウマのなかで、幾つかの個体で遺跡周辺域の酸素同位体比と一致しない個体が検出されると期待される。神奈川県鎌倉市の由比ヶ浜海岸において（図 20 参照）、由比ヶ浜南遺跡から最小個体数は約 100 頭以上の遺跡出土ウマが同定されている（鶴澤・本郷 2006）。由比ヶ浜南遺跡のウマ骨から抽出されたコラーゲンの放射性炭素年代が測定されており、校正暦年代は 1100 calAD から 1300 年 calAD という結果が報告されている（南ら 2007）。また、他の遺構において人骨および獣骨の暦年代は 10 世紀から 16 世紀後半ま

でにわたり、中世の年代を示している。また、福岡県福岡市の博多遺跡は、古墳から中世を中心とした考古遺物が多数出土しており（図 20 参照）、中世の遺構からも多数の動物遺存体が確認されている（富岡ら 2011）。

従来、由比ヶ浜南遺跡は、新田義貞の鎌倉攻めの際に斃死したウマが埋葬された可能性が考えられていたが、近年の発掘で骨器製品や動物骨の頭蓋から脳を取り出した後が検出されたことから、骨製作や皮なめしをしていた職人集団が、製品には必要でない部分を由比ヶ浜周辺域において集中的に廃棄していた可能性が考察されている（鶴沢・本郷 2006、西本・新美 2010）。さらに、人骨および獣骨を集積して埋葬している遺構も多く、大規模な天災による死者を一括して埋葬した可能性もあるため、由比ヶ浜南遺跡は複合的な要因で形成された遺跡といえる。一方、中世博多はすでに多くの地域が居住区となった都市部として発展しており、博多港などを用いた海上交易などで栄えた地域である。このため、博多遺跡出土動物遺存体も多様な地域から持込まれた可能性が考えられる。

中世鎌倉の幕府における日常を記した「吾妻鏡」によると、鎌倉で利用されていたウマは、関東、東北および西日本からも持ち込まれていたことが記されている。さらに、琉球列島の歴史を記した「おもろそうし」では、鎌倉の記述が散見されており、琉球王朝との交流があったことが分かる。この当時の沖縄本島は、グスク時代という大型城壁をつくる社会が形成され、城壁内からウマが大量に出土しており、鎌倉や博多との交易がおこなわれている。この様に、中世の鎌倉および博多は日本列島の様々な地域からウマが持ち込ま

れていた可能性が高いと考えられ、馬産地とは異なる産地推定結果が得られると期待される。

第二節 分析試料

2.1. 中世遺跡出土ウマ

遺跡出土ウマのストロンチウムおよび酸素同位体分析は、5遺跡で実施した(図20参照)。

ストロンチウム同位体分析を実施するために、由比ヶ浜南遺跡出土ウマの下顎歯および上顎歯6個体のサンプリングを行った(表7)。また、ウマと同様に移動性動物であるウシ2個体を採取した(表7参照)。由比ヶ浜南遺跡周辺域のストロンチウム同位体比を確認するために、在地系家畜と考えられるイヌの下顎歯6個体およびネコの下顎歯2個体を採取した(表8)。また、中世鎌倉の範囲内における植物(5点)および河川水(5点)、中世博多の範囲における植物5点のストロンチウム同位体比を測定した(表9)。都市部における日本列島における植物および河川水に基づくBASの同位体多様性および地理的な分布状況を把握するために、中世の馬産において代表的な生産地である、山梨県北杜市(11地点)において植物をサンプリングした(表9参照)。サンプリングした試料は凍結保存した後に、凍結乾燥させて保存した。分析には凍結乾燥させた試料を供した。

また、酸素同位体分析を実施するために、馬産地におけるウマとして、野田遺跡のウマを5個体を分析に供した。また、東日本内陸部における中世の遺跡である百々遺跡のウマ6個体を分析に供した。琉球列島の中世の遺跡である今帰仁グスク跡のウマ4個体を分析に

供した（表 10）。また、遺跡出土ウマ歯エナメル質の酸素同位体比のサンプリングにおけるばらつきを評価するために、百々遺跡出土ウマ 1 個体は成長線サンプルを採取し、成長線サンプルの分散と同一集団のバルクサンプルの酸素同位体比の分散を比較した（表 11）。都市部におけるウマとして、由比ヶ浜南遺跡のウマを 6 個体、博多遺跡のウマ 9 個体を分析に供した（表 10 参照）。

第三節 分析方法

3.1. 歯エナメル質からのサンプリング

歯エナメル質のサンプリング方法は第二章および第三章と同様にバルクサンプルの手法を実施し、ストロンチウム同位体比および酸素同位体比ともに 5~10mg の歯エナメル質を分析に供した。また、成長線サンプルは、百々遺跡出土ウマ 1 個体（Doudo01）から 23 点を採取した。採取量は約 5~10mg を採取し、酸素同位体比測定に供した（表 11 参照）。

3.2. ストロンチウムおよび酸素同位体比測定

歯エナメル質におけるストロンチウムおよび酸素同位体比の測定は、第二章および第三章と同様の手法を用いた（第二章および第三章の第三節参照）。本研究で測定された国際スタンダード（NBS987）の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ の測定誤差は 0.00002 以内であった。また、歯エナメル質における酸素同位体比の国際スタンダード（NBS120c および NBS127）の測定精度は 0.5‰

以下（標準偏差）であった。

3.3. ストロンチウムおよび酸素同位体分析に基づくウマの生息地域の推定

ストロンチウム同位体分析に基づいて、遺跡周辺地域に生息していた可能性を検証するために、植物および河川水のストロンチウム同位体比の幅を BAS における変動幅と仮定して、この範囲から逸脱したストロンチウム同位体比を示す個体を移入個体と定義した。

また、酸素同位体比に基づく産地推定は、Ordinary Kriging（普通クリギング法）による離散データ間の特性値を空間補完した表層水の酸素同位体比地図に対し、ウマの酸素同位体比から算出した飲み水の酸素同位体比と一致する分布域を抽出した（第三章参照）。

第四節 分析結果

4.1. 中世遺跡出土動物遺存体のストロンチウム同位体比

遺跡出土動物遺存体の歯エナメル質の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ を測定した（表 7、表 8）。その結果、由比ヶ浜南遺跡全体のストロンチウム同位体比は $0.70508\sim 0.70953$ （平均値 \pm 標準偏差； 0.70797 ± 0.00133 ）であった。また、博多遺跡出土馬のストロンチウム同位体比は $0.70635\sim 0.70952$ （平均値 \pm 標準偏差； 0.70738 ± 0.00103 ）であった。在地型動物であるイヌおよびネコのストロンチウム同位体比は、それぞれ、 $0.70683\sim 0.70892$ （平均値 \pm 標準偏差； 0.70833 ± 0.00100 ）、 $0.70847\sim 0.70890$ （平均値 \pm 標準偏差； 0.70874 ± 0.00020 ）であった（表 8 参照）。また、移動型動物であるウマおよびウシのストロンチウム同位体比は、それぞれ

0.70620～0.70953（平均値±標準偏差；0.70753±0.00143）、0.70508～0.70892（平均値±標準偏差；0.70700±0.00272）であった（表 7 参照）。

遺跡出土動物遺存体において生存時における生態学的な情報が保持されているかを検証するために、在地型動物（イヌおよびネコ）と移動型動物（ウマ・ウシ）のストロンチウム同位体比の多様性を F 検定で比較した。その結果、移動型動物のストロンチウム同位体比の分散は在地型動物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（図 21、 $P=0.447$ ）。

4.2. 遺跡周辺域におけるストロンチウム同位体比

中世鎌倉内における植物のストロンチウム同位体比は 0.70701～0.70918（平均値±標準偏差；0.70821±0.00082）であった（表 9 参照）。中世鎌倉の周辺域である鎌倉市および鎌倉市周辺域の植物のストロンチウム同位体比は 0.70501～0.70859（平均値±標準偏差；0.70726±0.00108）であった（表 9 参照）また、鎌倉市周辺域の河川水のストロンチウム同位体比は 0.70593～0.70829（平均値±標準偏差；0.70718±0.00098）であった（表 3）。一方、中世博多内における植物および河川水のストロンチウム同位体比は 0.70588～0.71154（平均値±標準偏差；0.70807±0.00175）であった（表 9 参照）。

由比ヶ浜南遺跡より出土した移動型動物（ウマ・ウシ）が他地域から移入している個体であるかを検証するために、中世の鎌倉の範囲内における植物および河川水のストロンチウム同位体比の範囲と移動性動物のストロンチウム同位体比を比較した。その結果、

ウマの Yuigahama02 (0.70953) およびウシの Yuigahama07 (0.70508) は鎌倉内における植物および飲み水のストロンチウム同位体比の範囲（最小値～最大値）から外れた値を示した。一方、在地型動物であるイヌおよびネコのストロンチウム同位体比は鎌倉内における植物および飲み水のストロンチウム同位体比の範囲から外れた個体は検出されなかった。また、中世鎌倉の周辺域である鎌倉市および鎌倉市周辺域における植物のストロンチウム同位体比を比較したところ、Yuigahama02 のみが鎌倉市周辺域のストロンチウム同位体比の範囲から外れたことが示された（図 22）。

一方、博多遺跡も同様に、遺跡出土馬と遺跡周辺域の植物のストロンチウム同位体比を比較した。その結果、遺跡出土馬のストロンチウム同位体比は遺跡周辺域のストロンチウム同位体比の範囲から外れた個体は検出されなかった（図 23）。

4.3. 出土動物ウマの酸素同位体比

遺跡出土ウマの歯エナメル質の酸素同位体比 ($\delta^{18}\text{O}$) を測定した（表 10）。その結果、由比ヶ浜南遺跡出土ウマの酸素同位体比は 15.4～19.1‰（平均値±標準偏差；16.7±1.4‰）博多遺跡出土ウマの酸素同位体比は 15.9～19.3‰（平均値±標準偏差；18.3±1.1‰）であった（表 10 参照）。また、野田遺跡出土ウマの酸素同位体比は 13.5～14.6‰（平均値±標準偏差；13.9±0.4‰）、百々遺跡出土ウマの酸素同位体比は 13.8～15.5‰（平均値±標準偏差；14.4±0.7‰）、今帰仁グスク跡出土ウマの酸素同位体比は 19.0～20.5‰（平均値±標準偏差；19.7±0.7‰）であった（表 10 参照）。

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、5 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 (図 24)。その結果、5 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 ($P=0.002$)。多重比較の結果、由比ヶ浜南遺跡と野田遺跡、由比ヶ浜南遺跡と百々遺跡、由比ヶ浜南遺跡と今帰仁グスク跡の間で酸素同位体比の平均値に有意な差があり (それぞれ $P=0.001$ 、 0.02 、 0.04)、野田遺跡および百々遺跡出土ウマの酸素同位体比は由比ヶ浜南遺跡出土ウマの酸素同位体比よりも有意に低い平均値を示し、今帰仁グスク跡出土ウマの酸素同位体比は他の 3 遺跡出土ウマよりも有意に高い平均値であることが示された。

また、百々遺跡出土ウマの成長線サンプルの酸素同位体比は $13.6\sim 15.4\text{‰}$ (平均値 \pm 標準偏差 ; $14.6\pm 0.5\text{‰}$) であった。

次に、Huertas *et al.* (1995) に基づいて、遺跡出土ウマの酸素同位体比から飲み水の酸素同位体比を算出した。その結果、由比ヶ浜遺跡および博多遺跡出土ウマの飲み水の酸素同位体比は、それぞれ $-9.5\sim -4.4\text{‰}$ (平均値 \pm 標準偏差 ; $-7.8\pm 1.9\text{‰}$)、 $-8.7\sim -4.4\text{‰}$ (平均値 \pm 標準偏差 ; $-5.6\pm 1.4\text{‰}$)、野田遺跡、百々遺跡および今帰仁グスク跡出土ウマの飲み水の酸素同位体比は、それぞれ $-12.3\sim -10.7\text{‰}$ (平均値 \pm 標準偏差 ; $-11.7\pm 0.6\text{‰}$)、 $-11.9\sim -9.5\text{‰}$ (平均値 \pm 標準偏差 ; $-11.0\pm 0.9\text{‰}$)、 $-4.8\sim -2.9\text{‰}$ (平均値 \pm 標準偏差 ; $-3.90\pm 0.9\text{‰}$) と推定された (表 10 参照)。

また、百々遺跡出土ウマの成長線サンプルから推定した飲み水の酸素同位体比は $-11.6\sim$

-9.3‰（平均値±標準偏差；-10.3±0.6‰）であった（表 11 参照）。百々遺跡出土ウマのバルクサンプルと成長線サンプルの飲み水の酸素同位体比の間で、F 検定および U 検定に基づいて分散および平均値の差を比較した。その結果、バルクサンプルの飲み水の酸素同位体比は、成長線サンプルの飲み水の酸素同位体比と有意な差は示されなかった（図 25）。

第五節 考察

5.1. ストロンチウム同位体分析に基づく遺跡出動物遺存体への応用

遺跡出土ウマにおけるストロンチウム同位体比分析に基づく、遺跡周辺域の植物と河川水の酸素同位体比の範囲から逸脱した個体が検出された。この遺跡出土ウマは、鎌倉市周辺域の植物のストロンチウム同位体比からも異なる値を示しており、鎌倉市周辺域外から持込まれた個体であることが示唆された。しかし、他の 5 個体のストロンチウム同位体比は鎌倉周辺域のストロンチウム同位体比の範囲に収まったために、移入個体として識別できなかった。文献史料において、中世鎌倉内においてウマを生産していた内容を示唆する文章は見つかっておらず、基本的には都市部外の鎌倉周辺域外で生産されたウマが持ち込まれている。この様な背景にもかかわらず、移入個体と識別できなかった個体は、鎌倉周辺域とストロンチウム同位体比の値が近似した範囲を示す遠方の地域で生息していた可能性もある。

また、博多遺跡群を含む福岡平野の植物および河川水のストロンチウム同位体比は 0.707～0.708、博多遺跡群南部の花崗岩の分布が見られる地域は 0.705～0.706、博多遺跡群北東

部の変成岩の分布が見られる地域は 0.711~0.712 を示した (図 26)。博多遺跡群周辺域の表層地質は後期更新世~完新世の堆積岩層で構成されており、福岡市南部地域においては花崗岩地域が点在して分布している。また、福岡市北東部地域の香椎周辺域においては変成岩が分布している。博多遺跡南部地域は低いストロンチウム同位体比を示す傾向にあり、北東部は高いストロンチウム同位体比を示す傾向が見られ、地質の違いを反映していると考えられる。博多遺跡群周辺域における植物および河川水のストロンチウム同位体比の範囲は、ウマのストロンチウム同位体比よりも大きいため、ストロンチウム同位体比のみでは移入は検出されなかった。中世博多内での馬産は行われていないにも関わらず、遺跡周辺域の植物のストロンチウム同位体比の範囲から逸脱する個体が検出されなかった。これは、遺跡周辺域のストロンチウム同位体比が多様な範囲を示し、BAS が示す同位体の幅が広くなることが要因と考えられる。

一方、在地型動物であるイヌおよびネコのストロンチウム同位体比は、鎌倉内のストロンチウム同位体比の範囲にすべての個体が収まり、ウマの様に鎌倉市周辺域外から持ち込まれた個体は検出されなかった (図 27)。ウマと同様に、ストロンチウム同位体比のみでは鎌倉市周辺域外からの持込みの可能性は否定できないものの、在地型動物のストロンチウム同位体比の多様性はウマのストロンチウム同位体比の多様性よりも有意に低く、移動型動物とは生態学的な背景が異なる可能性が高いと考えられる。また、イヌおよびネコは海産物を摂取するために、海起源のストロンチウムの影響も考慮しなければならない。海水

のストロンチウム同位体比は、0.70916~0.70918 を示し (Ando *et al.* 2010)、中世鎌倉の植物のストロンチウム同位体比の範囲内に収まるため、海産物の摂取があつたとしても矛盾がない。したがって、中世鎌倉の植物および河川水、海水のストロンチウム同位体比の値から逸脱した個体が見られないことから、在地型動物および肉食哺乳類の生態学的な特徴を良く表していると考えられる。

先行研究では、遺跡出土動物遺存体における遺跡周辺域の **BAS** を定義する際には、在地型動物のストロンチウム同位体比の範囲で表す場合が多い。これは植物のストロンチウム同位体比は非常に多様な値を示すのに対し、動物は生息圏内における植物および河川水のストロンチウム同位体比を平均化するので、より多様性が低くなるからである (Capo *et al.* 1998)。これらのことを考慮すると、由比ヶ浜南遺跡出土の在地型動物は、植物および河川水のストロンチウム同位体比よりも多様性が低くなる、という在地型動物がもつストロンチウム同位体比の特徴を良く示している。先行研究と同様に、在地型動物のストロンチウム同位体比が遺跡周辺域の平均的な **BAS** の範囲を示すと仮定すれば、遺跡出土ウマの移入個体数はウマ 4 個体、ウシ 1 個体となり、中世鎌倉におけるウマの利用形態の実態を良く表している可能性もある。

そのため、遺跡出土ウマの移入個体の検出には、植物および河川水のストロンチウム同位体比を基準とした **BAS** だけでなく、在地型動物のストロンチウム同位体比を基準とした **BAS** もあわせて議論することで、ウマの移入個体を慎重に評価することが妥当と考えられ

る。

また、同一の動物組織であるウマの歯エナメル質のストロンチウム同位体比においても同様に、生態学的な情報が保持されている可能性が高く、これらの分析が遺跡出土動物遺存体を対象とした外部地域からの持込みの有無の復元において、一定の制限はあるものの利用可能であると考えられる。

5.2. 日本列島におけるストロンチウム同位体比の多様性

日本列島における産地識別において、植物および飲み水のストロンチウム同位体比はウマの生息地情報として利用できる可能性が示された。一方、それらの多様性が日本列島においてどの程度の解像度をもたらすかを評価するために、植物および河川水のストロンチウム同位体比を実際に遺跡が立地する 3 地点と在来馬生息地の 2 地点で比較した。その結果、宮崎県都井岬、沖縄県与那国町北牧場、神奈川県鎌倉市内、山梨県北杜市、福岡県福岡市においてそれぞれ近似したストロンチウム同位体比を示した (図 28)。この結果に基づく、日本列島における **BAS** の同位体比は非常に多様であるものの、異なる地域においても **BAS** が近似した範囲を示すため、ストロンチウム同位体比のみでは特定の産地の識別することが困難であることが示された。一方、沖縄県与那国島北牧場と神奈川県鎌倉市の **BAS** は異なる値を示しており、特定の地域間であれば産地識別が可能である (図 28 参照)。

また、鎌倉市内および福岡市におけるストロンチウム同位体比の多様性を見ると、約 10km

圏内で非常に多様な値を示しているが（図 29、図 26 参照）、山梨県におけるデータでは同様の 10km 圏内であっても北東部において多様性が低い地域があった（図 30）。この結果は、地域によって BAS の多様性が異なり、外部から持込まれたウマの検出感度が地域によって異なると考えられる。その場合、外部からの移入者の検出に使用する際には、BAS の多様性の低い地域では検出感度が高く、BAS の多様異性が高い地域は検出感度が低いことになる。この様に、ストロンチウム同位体比による移入者の識別の際は、生息地の BAS における変動の範囲を設定し、その土地においてウマが外部から持込まれたかを検証し易い地域で適用しなければならない。

5.3. 酸素同位体分析に基づく遺跡出動物遺存体への応用

現生在来馬の酸素同位体分析に基づく産地推定法を遺跡出土ウマに適用した。各遺跡出土ウマの酸素同位体比から飲み水の酸素同位体比を算出し、Mizota and Kusakabe（1994）に基づいて作成された酸素同位体比地図における推定地域を求めた。

第一に、馬産地の遺跡出土ウマとして分析した各遺跡場所が、酸素同位体比に基づくウマの推定産地の範囲に収まるかを検証し、遺跡出土ウマの産地推定が可能かを検証した。岩手県野田遺跡出土ウマの推定産地は、すべての個体が東北地方北部および東日本内陸部を示し、遺跡周辺域の酸素同位体地区にプロットされた（図 31～図 35）。同様に、山梨県百々遺跡出土ウマの推定産地は、すべての個体が東北地方北部および東日本内陸部を示し、遺跡周辺域にプロットされた（図 36～図 40）。しかし、Doudo05 は本州内に類似した値を示

す地域を示したので、推定産地の分布が非常に広範囲になった（図 40 参照）。また、沖縄県今帰仁グスク跡出土ウマの推定産地は、すべての個体が沖縄南部以南にプロットされ、遺跡周辺域の酸素同位体地区を逸脱しなかった（図 41～図 44）。これらの結果に基づくと、遺跡出土ウマを用いた酸素同位体比に基づく産地推定は、現生在来馬で行った産地識別結果と同様に有効であると判断される。

次に、都市部の遺跡である由比ヶ浜南遺跡出土ウマの酸素同位体比から推定された産地は、1 標準偏差で推定された産地は、西日本および関東沿岸部（Yuigahama01、Yuigahama03、Yuigahama04）、東日本（Yuigahama02、Yuigahama06）、南西諸島（Yuigahama05）と多様な地域を示した（図 45～図 50）。一方、2 標準偏差で推定された地域で、鎌倉とは異なる地域に推定された個体は、Yuigahama05 の一個体で、推定産地は紀伊半島南部、四国南部、九州南部および九州西南諸島、琉球列島の広範囲が候補として示される。また、博多遺跡出土ウマの推定産地（図 51～図 59）は、1 個体（Hakata01）が大きな範囲を示しているのに対し、5 個体が九州、中国地方、四国地方にプロットされ、6 個体の推定産地分布は博多遺跡の立地と一致した。残りの 3 個体（Hakata03、Hakata04、Hakata05）の推定産地分布は、博多遺跡の立地と一致せず、九州島嶼部、九州南部および沖縄にプロットされた。これらの結果は、馬産地における遺跡出土ウマの産地推定の結果と異なり、都市部の遺跡出土ウマの推定産地は都市部とは一致しない個体が検出されることが示された。都市部の遺跡出土ウマの個体ごとの酸素同位体比に基づく産地推定では、遺跡周辺域外に産地推定された個体も

おり、中世都市部においては、遠方で生産されたウマも持ち込まれていたと考えられる。

最後に、遺跡出土馬の年々変動を考慮して、集団内の酸素同位体比の平均値に基づいて、遺跡出土馬の主要な産地を推定した。現生在来馬と同様に、遺跡出土ウマの集団の酸素同位体比と一個体内の成長線サンプルの酸素同位体比には分散および平均値に有意な差がないことから、遺跡出土ウマの集団の酸素同位体比の平均値は季節変動および年々変動も含めた集団内の平均値を表す可能性がある。遺跡出土ウマ集団の酸素同位体比に基づく産地推定の結果、野田遺跡出土ウマ集団、百々遺跡出土ウマ集団、今帰仁グスク跡出土ウマ集団の主要な推定産地は遺跡周辺域を示した（図 60～図 62）。一方、由比ヶ浜南遺跡出土ウマ集団の主要な推定産地は遺跡周辺域と一致するものの、本州沿岸部から西日本と広い範囲を示した（図 63）。また、博多遺跡出土ウマ集団の主要な推定産地は九州南部および南西諸島を示した（図 64）。この様に、各地域の遺跡出土ウマの集団の推定産地は、それぞれの遺跡立地の地域に近い傾向を示したことから、中世ではウマの消費地から大きく離れた地域を主に生産地として利用するのではなく、地方ごとに生産および消費をしていたと考えられる。

由比ヶ浜南遺跡出土ウマの酸素同位体分析で都市部外から持込まれた可能性が指摘された Yuigahama05 は、ストロンチウム同位体分析において、鎌倉市周辺域のストロンチウム同位体比の範囲内に収まっており、移入個体として識別されていなかった。Yuigahama05 のストロンチウム同位体比は 0.70852 を示しており、この値は現生在来馬の御崎馬のストロン

チウム同位体比と近似した値を示している。したがって、Yugahama05 は、遠方から持込まれたものの、ストロンチウム同位体比の分解能では識別できなかった個体であると考えられる。この様に、ストロンチウム同位体分析による誤判別の可能性を、酸素同位体分析は補完できる可能性が示唆された。したがって、文献史料の乏しい遺跡における産地推定には、両同位体分析を実施することが過去の動物における移動性の実態をより正確に示すと考えらえる。

第六節 結論

現生在来馬の酸素同位体比で確認した産地推定法を、遺跡出土ウマの酸素同位体比に適用し、産地推定法の利用可能性を評価した。現生在来馬と同様に、同一地域に生息したウマ集団である可能性が高い 3 遺跡（野田遺跡、百々遺跡、今帰仁グスク跡）の遺跡出土ウマの産地推定を実施し、3 遺跡のすべての出土ウマの推定産地には、遺跡周辺域が含まれた。現生在来馬の酸素同位体比に基づく産地推定結果と同様の結果を示したことから、酸素同位体分析による産地推定法は、遺跡出土ウマにも適用できる可能性が示唆された。

一方、馬産地とは異なり、ウマの持込みが期待される都市部における遺跡出土ウマ（由比ヶ浜南遺跡と博多遺跡）の酸素同位体に基づく推定産地では、遺跡周辺域と一致しない個体が検出された。この様に、都市部における酸素同位体比に基づく産地推定結果は、馬産地とは異なる傾向を示す。さらに、酸素同位体分析で都市部外からの持込みと識別された個体のストロンチウム同位体比は、遺跡周辺域における BAS が取り得る範囲に収まって

おり、持込み個体と識別されなかった。したがって、酸素同位体分析で移入個体と識別された個体は、遺跡周辺域のストロンチウム同位体比と近似した地域で飼育されたと考えられる。この様に、酸素同位体分析は、ストロンチウム同位体分析では識別できなかった持込み個体を検出する上で重要な役割を果たすとともに、都市部におけるウマの移動性を議論する際に、Sr 同位体の方法論的な問題に起因するウマの移動性の過小評価を避けることができる可能性が示された。

第五章 藤原宮跡出土ウマの産地推定

第一節 研究背景と問題提起

1.1. 藤原京における律令制とウマの利用形態

藤原京は、奈良県橿原市に所在する日本史上最初の都城である。また、最初の条坊制（じょうぼうせい）を布いた本格的な唐風都城でもあり、その都市構造は中国からの文化的影響を強く示している（林部 2007）。藤原京の名称は近代に作られた学術用語であり、日本国の建国過程を記した「日本書紀」には登場しない。「日本書紀」ではこの都城に対して、都市部の範囲である「新益京（あらましのみやこ）」と、天皇の内裏が設置された「藤原宮」と呼び分けられている。藤原京は 天武 5（西暦 676）年から 持統 4（690）年に着工され、飛鳥浄御原宮から 持統 8（694）年に遷都し、完成は遷都後 10 年経過の 景雲元（704）年と考えられている。和銅 3（710）年に平城京に遷都されるまで 持統・文武・元明の三天皇が居住した 16 年間、日本の首都であった。「扶桑略記」によれば、和銅 4（711）年に宮が焼けたとされている。

藤原京は、日本列島において中央集権国家を築くために、本格的な律令制である「大宝律令」を制定した時代に建築されたと考えられている。「大宝律令」は、日本列島において初めて「日本国」という国号が扱われたと考えられる最初期の律令制で、「大宝律令」の制定前に編纂された可能性が指摘されている「近江令」および「飛鳥浄御原令」とは異なり、「律」と「令」の両方を備えた初の国内法である。すなわち、「大宝律令」における記述は、当時

の藤原京を中心とした日本国が、日本列島をどのように中央集権化し、統制を行ったかを表す重要な情報源となり得る。「大宝律令」の約 60 年後に施行されたと考えられる「養老律令」は、「大宝律令」とほぼ同様の内容が記載され、施行されたと考えられている。そのため、「大宝律令」は日本国における国内法の原点として位置づけられている（西宮 2013）。

しかし、「大宝律令」の原文は現存しておらず、後世に制定された「養老律令」について解説した「令集解」および「令義解」の情報から類推する以外に方法がない。そのため、「大宝律令」前後における、日本列島の中央集権体制の実態を、文献史学に基づいて復元することは困難である。また、考古学的な研究に基づくと、藤原京から出土する考古遺物には、全国から京へ出荷された調・庸の内容を記した荷札となった木簡が出土しており、他地域からの物資の輸送が行われていた可能性が示されている。遺跡から出土した木簡に記載された出荷物として、主に食料品や衣類が記載されている（奈良国立文化財研究所編 1969）。一方、当時の京における、軍事的な情報や中央集権国家としての支配域を示す情報は無く、当時の中央集権化による実質的な支配体制を復元することは、今日の考古学的な情報のみでは復元が困難である。

そこで、私は当時の日本国における政治的、軍事的な情報としてウマの飼育管理に注目した。世界の様々な時代と地域において、ウマは戦争および長距離輸送網の設置に大きな役割をもち、大規模な中央集権国家を築くためには欠かせない重要な戦略的物資である。また、ウマは戦争における軍事力の役割をもつために、ウマの交易範囲はその国家の支配

域および国家間の争いが生じない中立的な関係の地域との間に成り立つ。そのため、ウマの交易範囲を評価することは、当時の国家の政治的および軍事的な支配域を評価することにつながる。

「大宝律令」後の「養老律令」および、「養老律令」に基づいて編纂された「延喜式」には「厩牧令」というウマの飼育管理の制度が記載されており、牧で生産されたウマを「軍団」に送るという軍事態勢を示す内容が記載されている。この「軍団」とは、朝廷直属の軍隊とされており、この軍団にウマを供給していた生産体制の中心は、朝廷直轄で日本各地に設置された馬牧だと考えられている。軍団へのウマの供給において、朝廷直轄の牧の立地を示す内容は「延喜式」において明文化されている。「延喜式」に記載された朝廷直轄の馬牧は、九州南部および中国地方、そして東日本内陸部である。特に、最も馬牧が多い地域として長野県（当時の信濃国）で、16 牧が記載されており、近隣の山梨県（当時の甲斐国）で 3 牧、埼玉県（当時の武蔵国）で 4 牧、群馬県（当時の上野国）で 9 牧あり、東日本内陸部に計 32 牧の一大産地があったと考えられている（早川 1995）。

また、「養老律令」および「延喜式」において、両「厩牧令」に牧の管理に関する条項が記載されていることや、「続日本紀」において 665 年に内厩令を設置し、同文献の 668 年に信濃国牧主当が任命される記述に基づくと、少なくとも「養老律令」施行時（757 年）から信濃国牧主当設置の 668 年の間に、既に東日本内陸部において朝廷の支配のもとでウマが飼育管理されて、京に持ち込まれていた可能性が高い（小林 1992）。「大宝律令」は「養老

律令」と原文が類似しているという文献史学の仮説を考慮すると、藤原京にて施行された「大宝律令」および「大宝律令」直前期における馬産の中央集権体制がすでに東日本にまで及んでいた可能性も考えられる。一方で、「大宝律令」の記載内容は「養老律令」とは大きく異なる可能性も指摘されており、「大宝律令」が制定される前後における中央集権体制の実態はいまだに不明な点が多い（榎本 1993）。

したがって、藤原京から出土する遺跡出土ウマの産地識別を行うことで、当時の馬産地の分布を推定することは、「大宝律令」制定直前における中央集権体制の実態を評価するだけでなく、後に編纂された「養老律令」および「延喜式」の内容との対応を評価する上でも重要な示唆を与え得る。そこで、本研究は奈良県藤原宮跡出土ウマおよび動物遺存体の安定同位体分析を実施し、当時のウマの産地推定の結果に基づいて、「大宝律令」制定直前における当時の国家の中央集権体制の実態を評価することを試みた。

1.2. 藤原宮跡遺跡

考古学的な発掘調査に基づく、藤原宮は約 1km^2 の広さであった。周囲を約 5m の高さの堀で囲み、東西南北の堀にはそれぞれ 3 か所、全部で 12 か所に門が設置されていた。藤原宮は、南北約 600m、東西約 240m におよぶ日本で最大の規模を持つ、当時の行政機関施設である朝堂院の遺構を有し、大極殿などの建物は日本で初めて中国風に瓦葺で造られており、建築技術が中国の影響を強く受けていたことを示している（玉田 2009）。

藤原宮の大極殿院の南側に広がる朝廷部分の発掘調査で、藤原宮造営時に資材を運んだ運河跡が検出されている。幅約 4m、深さ約 2m の大規模な溝で、これまでに大極殿院南門や大極殿の北方、さらに藤原宮北面中門でも確認されており、藤原宮のほぼ中心線を南北 500m 以上貫いていたと考えられている（玉田 2009）。大極殿北方の調査では先行条坊より運河跡の年代は新しいことが示されたので、先行条坊の施工時期が「日本書紀」天武 5（676）年まで遡るため、運河の造営開始時期は天武 5（676）年以降であると考えられる。一方、埋没時期は天武末年の木簡や土器が出土することや、大極殿や大極殿院南門、藤原宮の北面中門である宮城門の造営前に埋め戻されていることを考慮すると、運河の埋没時期は持統 8（694）年の藤原宮遷都以前と考えられる（玉田 2009）。一方、文献記録による大極殿の初出は文武 2（698）年、朝堂院の初出は大宝元（701）年で、藤原京遷都時にはまだ大極殿・朝堂院は完成していなかったと考えられる。朝堂院の東南隅の調査では、大宝 3（703）年の段階でも、朝堂院は完成していなかったことがわかっており、このことから遅くとも大極殿が記録に現れる文武 2（698）年までにはこの運河は埋められていたと考えられる。さらに、最も新しい出土木簡が天武末年のものであるため、いずれにしても、運河は天武 5（676）年以降、持統 8（694）年以前の約 18 年間使用されていたと推察される（玉田 2009）。

上述したように、藤原宮の中央に掘削された運河は、藤原宮造営期の可能性が高いことから、造営資材運搬用の運河と推定されている。また、運河跡からは建築部材や削り屑、ウマ・ウシ・大型イヌの骨など、藤原宮造営の際に生じた遺物が多数検出されている（玉

田 2009)。一方、この運河は、その状況から見て大極殿・朝堂院・北面中門の造営前に埋められたと考えられることも可能なため、運河は直接中枢施設の建築には関係がなかったとも考えられる。しかし、石材・建築部材・瓦が最も必要なのは、掘立柱建築の官衙ではなく、礎石瓦葺建築の大極殿院・朝堂院と宮城門・垣などである。そのため、大極殿院と朝堂院の建築部材を搬入、現場にストックして、運河埋め戻し後に整地と基壇造成・建築を行ったと考えられる。いずれにせよ、藤原宮の中枢に掘られた運河は大極殿院・朝堂院造営のために利用された運河と考えるのが妥当といえる（玉田 2009）。また、この運河に投棄された動物遺存体は、藤原京造営期において利用された可能性が高い。

1.3. 藤原京造営期の遺跡出土動物遺存体

藤原宮跡の藤原京造営期の遺構からは、多数の動物遺存体が検出されており、特に家畜であるウマの出土数が顕著である。藤原宮朝堂院の発掘調査（飛鳥藤原第 153 次）において、藤原宮造営期の動物遺存体が 80 点出土している（玉田 2009、山崎 2012）。これらの動物遺存体は、現場で採集された資料とともに、遺構埋土を水洗選別して回収された微細遺物を含んでいる。同定された分類群は 10 分類群に及び、ウマが 29 点（36.3%）と最も多く出土した。また、主要な遺跡出土動物遺存体は、イヌが 15 点（18.8%）、ニホンジカが 9 点（11.3%）、ウシが 8 点（10.0%）であった（山崎 2012）。

藤原宮跡から出土する個体のウマは、主に運搬などの軍事および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。上述した様に、ウマの利用はしばしば政治的・軍事的な理由によって、生産体制が支配者に一元管理される場合が多く、藤原宮跡出土ウマも藤原京の支配階級によって管理されていたと推察される。

古代律令制において、ウマは日本全国に設置された御牧（官営牧場）で飼育管理され、4歳以降まで飼育した後に都へと移動させていたことが、「養老律令」を解説した「令集解」に詳しく記載がある。しかし、藤原京で施行されていた大宝律令は今日では現存しておらず、文献史学からは大宝律令制定時前後における朝廷のウマの供給源については、養老律令の内容と類似した状況であったと推察するにとどまっていた。

藤原宮跡には最初期の律令である大宝律令施行直前の都城造営期にあたる溝跡も検出されており、この溝や砂利層から多数のウマが見つかっている。これらのウマは大宝律令の草案作成に近い時期に生存していたと考えられることから、大宝律令におけるウマの供給源に関する条文を推察する上で非常に重要な資料として位置づけられる。

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ウマを中心に化学分析を実施し、当時の動物の生活史の復元を通して、藤原京に関わった人々のウマ利用について新たな情報を提示することを目的とした。

第二節 分析試料

2.1. 藤原宮跡出土動物遺存体および環境試料

藤原宮造営期におけるウマの移動形態を復元するために、馬歯エナメル質 15 点、獣骨 14 点を分析した（表 12）。また、ウマ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 点を在り動物の指標として分析した（表 13）。さらに、野生動物が家畜種であるウマ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およびシカ骨を各 1 点分析した（表 12、表 13 参照）。

藤原宮跡出土ウマの産地を推定するために、藤原宮跡周辺域（半径 15 km）の異なる地質上の植物および河川水を分析した（表 14）。

第三節 分析方法

3.1. 歯エナメル質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、獣骨からのサンプリングは、骨の緻密層から約5～10mgの骨粉を採取した。

3.2. ストロンチウムおよび酸素同位体比測定

歯エナメル質におけるストロンチウムおよび酸素同位体比の測定は、第二章および第三章と同様の手法を用いた（第二章および第三章の第三節参照）。本研究で測定された国際スタンダード（NBS987）の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ の測定誤差は0.00002以内であった。また、歯エナメル質における酸素同位体比の国際スタンダード（NBS120c および NBS127）の測定精度は0.5‰以下（標準偏差）であった。

3.3. ストロンチウムおよび酸素同位体分析に基づくウマの生息地域の推定

ストロンチウム同位体分析に基づいて、遺跡周辺地域に生息していた可能性を検証するために、植物および河川水のストロンチウム同位体比をBASのそれと仮定して、この範囲から逸脱したストロンチウム同位体比を示す個体を移入個体とした。

また、酸素同位体比に基づく産地推定は、Ordinary Kriging（普通クリギング法）による離散データ間の特性値を空間補完した表層水の酸素同位体比地図に対し、エナメル質の酸素同位体比から算出したウマが摂取した水の酸素同位体比と一致する分布域を抽出した。

第四節 分析結果

4.1. 藤原宮跡出土ウマのストロンチウム同位体比

藤原宮跡出土ウマ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）、0.707648～0.708976（平均値±標準偏差；0.70822±0.00037）であった（表 12 参照）。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ために、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。ウマ歯とウマ骨の 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（ $P < 0.01$ ）（図 65）。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。

4.2. 藤原宮跡出土動物遺存体のおよび環境試料のストロンチウム同位体比

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 13 参照）。イヌとウマの歯エナメル質の分散を比較するために、イヌとウマの 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（F 検定）。その結果、イヌの歯エナメル質はウマ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（ $P < 0.01$ ）（図 65 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 65 参照、表 14 参照)。

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シカおよびイノシシのストロンチウム同位体比は 0.70928、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 65 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、野生動物であるシカおよび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、藤原宮跡出土ウマ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、ウマ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、藤原宮跡出土ウマのストロンチウム同位体比の分散は奈良県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 (P=0.02)。

4.3. 藤原宮跡出土ウマの酸素同位体比

藤原宮跡出土ウマ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 15)。また、ウマ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 15 参照)。

第五節 考察

5.1. ストロンチウム同位体分析に基づく藤原宮跡出土ウマの利用形態の復元

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ウマ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、藤原宮跡出土ウマはイヌ、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（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、奈良県内における植物および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、予想通り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、居住区である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。この様に、それぞれの動物がもつと期待される生態学的な情報が、藤原宮跡出土動物遺存体でも同様に保持されている可能性が高い。従って、藤原宮跡出土ウマのストロンチウム同位体比が奈良県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、藤原宮跡出土ウマが奈良県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、遺跡周辺域の BAS の範囲と仮定した場合、それから逸脱した藤原宮跡出土ウマは、15 個体中 10 個体であった。この様に、ストロンチウム同位体比において、藤原宮跡出土ウマは約 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 BAS のそれと仮定した場合、その範囲から逸脱した藤原宮跡出土ウマは 13 個体であった。いずれにせよ、藤原宮跡出土ウマは奈良盆地内で生産されていた個体の割合は、多くないと考えられる。

当時の藤原京は奈良盆地南部に大規模な居住区を設置したために、これらの地域ではウマを飼育することは困難であったと考えられる。藤原京後の平城京においても、宮内に比較的小さな厩舎跡があるのみで、牧でウマを生産した証拠は検出されていない。これらの考古学的な背景に基づいたとしても、ウマが藤原京外において生産され、藤原京外から頻繁に持ち込まれていることを示唆している。

5.2. 酸素同位体比に基づく藤原宮跡出土ウマの産地推定

藤原宮跡出土ウマ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。その結果、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（図 66～図 80）。藤原宮跡周辺域外にプロットされたウマの推定産地は、主に東北北部および東日本内陸部であった。また、2 個体（Fujiwra01、Fujiwara13）において日本列島の表層水の酸素同位体比

の分布域から逸脱した個体が検出された。この 2 個体の産地を推定するために、日本列島以外の東アジアにおける表層水の酸素同位体比と比較し、推定産地を求めた (Mizota and Kusakabe 1994)。その結果、この 2 個体は朝鮮半島北部および中国東部にプロットされ、日本列島外からの移入個体である可能性が示唆された (図 66、図 78 参照)。

最後に、藤原宮跡出土ウマ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 81)。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ウマは、居住区であった藤原京内で生産されていた個体はわずかで、藤原京へウマ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る。

第六節 結論

藤原宮跡出土ウマのストロンチウム同位体比は、在地型動物であるイヌや野生動物であるシカ・イノシシのストロンチウム同位体比よりも有意に多様な値を示した。この結果は、藤原宮跡出土ウマが藤原京外および奈良県外からウマを持ち込んでいた可能性を示唆する。ストロンチウム同位体分析によって持込み個体と識別されたウマは 13 個体におよび、大半のウマは居住区である藤原京外で生産されていたと考えられる。これは、「大宝律令」制定以前において、すでに遠方からウマを供給する牧制の存在を示唆している。

次に、藤原宮跡出土ウマの酸素同位体比に基づいて、日本列島内における推定産地を求

めた。その結果、約 6 割の個体が東日本内陸部および東北地方に産地推定された。この結果は、「養老律令」および「延喜式」において記載されている牧および牧の立地の多くは、東日本内陸部であることと一致した内容であることから、後世において記載された東日本における牧の実態は「大宝律令」制定以前から存在し、実質的に機能していたことが示唆された。

さらに、酸素同位体比に基づく産地推定の結果、日本列島の酸素同位体比の分布域から逸脱する 2 個体が検出された。これらの個体を東アジアの酸素同位体比と比較した結果、朝鮮半島北部および中国東部の酸素同位体比と近似したことから、大陸から日本列島に持ち込まれた可能性が考えられる。この様に、日本列島のウマは日本列島内の長距離移動だけでなく、大陸間においても頻繁にウマの移動が生じていた可能性が考えられる。ただし、当時の降水における酸素同位体比の平均値と変動については、在地系動物の分析などによってさらに検討する必要がある。

第六章 結論

本研究では、馬産体制の復元において重要な生産地の情報を抽出するために、ストロンチウムおよび酸素同位体比を指標とし、ウマの生息地推定の方法論的検討を試みた。これを考古学的資料に応用することで、古代の馬産体制を復元する。

第一に、生息地が既知の現生ウマを用いて、ストロンチウムおよび酸素同位体比に基づく産地推定法を検討した。その結果、ウマのストロンチウム同位体比は、生息地の植物および飲み水のストロンチウム同位体比の範囲に収まることが示唆された。すなわち、植物および飲み水のストロンチウム同位体比から逸脱した個体が確認された場合、その個体は移入個体として識別可能である可能性が示された。また、馬歯の酸素同位体比から推定した飲み水の酸素同位体比は、生息地の地域周辺の表層水の酸素同位体比と近似することが示された。さらに、GISを用いて、推定された酸素同位体比に基づく産地推定を試み、推定産地は実際の生息地と一致することが示された。これらの結果は、ウマのストロンチウムおよび酸素同位体比が、ウマの生態学的情報を良く表していることを示唆しており、生態復元において応用可能と期待される。

次に、これらの手法を用いて、遺跡出土ウマの生態情報が復元可能かを、中世の遺跡出土ウマを用いて検証を試みた。遺跡出土の歯エナメル質が、生存時のストロンチウム同位体比の情報を保持しているかを検討するために、在地型動物であるイヌおよびネコと移動型動物であるウマおよびウシのストロンチウム同位体比を比較した。その結果、在地型動物は遺跡周辺域のストロンチウム同位体比と近似するが、移動型動物は遺跡周辺域のスト

ロンチウム同位体比の範囲から逸脱する個体が検出された。また、移動型動物のストロンチウム同位体比の多様性は、在地型動物よりも有意に高く、生態学的な情報を保持している可能性が示唆された。また、遺跡出土ウマの歯エナメル質の酸素同位体比の産地推定の有効性を検討するために、中世のウマの消費地と馬産地に分けて、産地推定を実施した。その結果、馬産地の遺跡出土ウマの推定産地は、全ての個体が遺跡周辺域に推定されたが、消費地の遺跡出土ウマは、複数個体で遺跡周辺域外に推定され、馬産地とは異なる傾向を示した。この結果は、遺跡出土ウマのストロンチウムおよび酸素同位体比が、生存時における同位体比情報を保持しており、生態学的情報が抽出できる可能性を示唆している、

これらの結果を踏まえて、日本の古代律令制制定直前の遺跡である奈良県藤原宮跡出土ウマのストロンチウムおよび酸素同位体分析を実施し、遺跡出土ウマの同位体比から生態情報が復元可能か検証を試みた。在地型動物であるイヌのストロンチウム同位体比は、藤原宮跡の植物および河川水のストロンチウム同位体比の範囲に収まり、中世遺跡と同様に在地型動物に期待される生態が復元された。また、野生動物であるイノシシおよびシカのストロンチウム同位体比は藤原宮跡の植物のストロンチウム同位体比の範囲とは異なり、周辺域の森林地帯のストロンチウム同位体比の範囲と近似した。当時の藤原京は、既に森林地帯の周縁部まで居住区が広がっていたと考えられており、野生動物のストロンチウム同位体比が藤原京内のストロンチウム同位体比と異なる値を示したことは、動物の生態情報を良く表している。これらの結果に基づくと、遺跡出土動物遺存体の歯エナメル質のス

トロンチウム同位体比は、生体時の生態情報を保持していると期待された。

最後に、藤原宮跡出土ウマのストロンチウム同位体比を測定し、藤原宮跡出土ウマが藤原宮跡周辺域外から持込まれている可能性を検証した。その結果、遺跡出土ウマは、遺跡周辺域のストロンチウム同位体比の範囲から逸脱する個体が多数検出され、都市部の移動型動物に期待される結果が得られた。次に、藤原宮跡出土ウマの酸素同位体比に基づいて、個体ごとの産地推定を試みた。推定された産地は、東日本内陸部および東北地方が多く、中でも、日本列島外から持込まれた可能性が示唆された個体も検出され、遺跡周辺域外に産地推定された個体は中世遺跡よりも多い傾向を示した。また、藤原宮跡出土ウマ集団内の酸素同位体比に基づいて、主要な産地の推定を試みた。その結果、主要な産地は東日本内陸部および東北地方と推定された。この結果は、「大宝律令」が制定される直前期の馬産体制が、西日本よりも東日本を主体としていた可能性を示唆している。

「大宝律令」から約 60 年後に施行された「養老律令」における記述として、当時の牧で飼育されたウマは「軍団」に供給され、軍事的な利用が強かったとされる。また、「延喜式」においては、それらの牧が日本列島に広く設置されたと記載されているが、その産地の中心は主に、信濃国（現在の長野県）、甲斐国（現在の山梨県）、上野国（現在の群馬県）で、牧の設置数は全国の約 6～7 割におよぶ（山口 1984）。この文献史学で推測された産地と、本研究で示された推定産地の分布は非常に類似した結果を示した。この結果は、「大宝律令」制定以前における藤原京における馬産体制は、すでに東日本を中心として実質的に機能し

ており、当時の朝廷が東日本内陸部および東北地方において軍事的な影響力を与えていたことをこれらの証拠は示唆する。

「大宝律令」以前にすでに東日本においてウマの生産が朝廷直轄で行われたことは、「大宝律令」以前の「飛鳥浄御原令」および「近江令」の内容を議論する上で、重要な示唆を与える。「養老令」において記された「厩牧令」の項が、これらの令にも存在している可能性が考えられるため、律令の施行内容は 1 世紀以上にわたって大きな変化が生じていなかったと考えられる。最初期に編纂された令の内容の大綱は大きく変化しているかは、文献史学において争点のひとつであり（山口 1986）、本研究は最初期に制定された令の内容が、馬産については機能的には大きく変化していなかったことを示唆している。また、律令における具体的な牧の立地を示す記述は、「延喜式」からみられるが、「日本書紀」および「続日本紀」には、東日本からウマの生産を示唆する記述が散見されており（山口 1986）、当時の馬産体制は非常に安定的であったために朝廷にとっては、あえて馬産地を明記していなかったと考えられる。「延喜式」においては、京にウマを供給していた牧制にほころびが生じたために、それを再認識させるための記述であると考えられており（山口 1984）、これらの牧は「延喜式」のもととなった「養老律令」の「牧」とほぼ同じ地域を意味していると考えられる。したがって、初期律令の編纂から「延喜式」までの約 2 世紀にわたって、ウマの安定的な生産体制が続いていた可能性が高い。この様に、古代律令国家において、馬産体制は安定的なシステムとして存在し、当時のウマは頻繁に日本列島内において長距

離間を移動していたと考えられる。

さらに、本研究において、2 個体が日本列島外からの移入個体である可能性が示唆されたが、これらの個体が現在の朝鮮半島北部および中国東部に位置することは、非常に興味深い。当時のこの地域は、7 世紀後半まで高句麗によって支配されており、その後 7 世紀末には高句麗が滅亡し、渤海国が建国されている（石井 2001）。渤海国は内陸部に農耕牧畜民、沿岸部に農耕漁撈民がいたと考えられており、特にウマの生産で良く知られた国であった。渤海国と日本国が正式に国交を結んだのは 727 年からで、その後 35 回（もしくは 33 回）の渡航を行っている（石井 2001）。このため、高句麗および渤海国からウマが日本に直接的に持ち込まれた可能性も否定できず、日本列島と大陸間における長距離の家畜移動について、さらにデータを増やして検討することが必要である。

日本列島において、ウマが出現した時期は古墳時代後期に入った 5 世紀後半と考えられており、本研究で扱った 7 世紀末からは約 2 世紀が経過している。したがって、古墳時代において日本列島に初めに持ち込まれた初期集団は、その後の大陸からの持込みによる次集団と交雑したと考えられる。これは、日本の家畜ウマの遺伝的な背景を考察する上で重要な示唆を与える。現在の日本在来馬は 8 品種存在するが、異なる品種間において遺伝的距離が近い個体が確認されており、遺伝的多様性は高い（川嶋 2009）。これは、日本列島内におけるウマの長距離移動だけでなく、大陸から継続的に新たな遺伝資源が供給されていた可能性が考えられており、本研究で示された列島外からの馬の移入の可能性はこの遺伝

的傾向を説明することができる。また、核および Y 染色体の STR 解析に基づくと、これらの品種は多くはモンゴル系である可能性が指摘されている (Kakoi *et al.* 2007)。一方、中国におけるウマ品種の遺伝的な研究は実施されておらず、モンゴルからどのルートを通じて日本に持ち込まれたかは不明であった。本分析では当時の渤海国周辺域と日本国とのウマ交易の可能性が示されたことから、モンゴルの草原地帯から朝鮮半島北部および中国東部のルートで日本にウマがもたらされたという新たな仮説が得られた。今後、この仮説を検証するために、異なる時代の京の遺跡出土ウマの分析および渤海国の遺跡出土ウマの分析を実施することで、大陸から日本列島へのウマの供給ルートを実証できると期待される。

本研究は、古代における馬産体制の一端を復元することを目的としてきたが、推定された産地は非常に広い範囲を示すという方法論的な制限も残されている。現在、日本列島におけるストロンチウム同位体比の **BAS** の地理的分布が検証されておらず、今後列島全域の **BAS** のデータを蓄積することで、酸素同位体比で大まかに識別された個体の推定産地をさらに絞り込める可能性がある。また、本研究はストロンチウムおよび酸素の 2 元素の同位体に着目したが、鉛、ネオジム、銅など、他元素の同位体も含めて議論することで、さらに詳細な産地推定が可能になると考えられ、本分析で得られた分析結果をクロスチェックする新たな実験系を確立することが求められる。

また、日本列島におけるウマの地球化学的分析は、今後さらに文献史料が無い古墳時代のウマの移動復元することへ応用が期待される。従来、遺跡から出土する考古遺物に基づ

いて、古墳時代の政治体制や軍事的関係が議論されているが、本研究で実施した馬産体制の復元は、従来の考古学および歴史学へ新たな視点を提示できると思われる。

謝辞

本研究を行なうにあたり、非常に多くの方のご指導、ご配慮を賜りました。また、ウマの研究を行なうにあたり、多くの研究者と接することができ、日々、実りある時間を過ごさせていただきました。特に、修士課程から博士課程の研究のご指導を賜りました、東京大学新領域創成科学研究科先端生命科学専攻同位体生態学分野の米田穰教授に対し、厚く御礼申し上げます。

また、本研究の初めから、由比ヶ浜南遺跡の動物骨について、ご指導していただき、出土獣骨の同定をしていただいた東亜大学の鶴澤和宏教授、総合研究大学院大学の本郷一美准教授には、動物考古学の研究の厳密さを教えていただきました。また、国立歴史民俗学博物館の西本豊弘名誉教授、奈良文化財研究所の松井章名誉研究員、深澤芳樹名誉研究員、山崎健氏、降幡順子氏、石橋茂登氏、菊地大樹氏、丸山真史氏、岡山理科大学富岡直人教授から、試料の提供および研究のご指導を賜り、考古学および人類学のなかでの動物考古学の意義をご教示賜りました。日本ではまだ応用例のない安定同位体比を用いた産地推定研究に対するご支援をしていただき、また考古試料のかけがえの無さを初めてご指導していただきました。深く御礼申し上げます。

本研究において、埋蔵文化財試料を分析させていただきました多くの埋蔵文化財センターおよび博物館の学芸部の方々には、動物考古学を学ぶ上での重要なメッセージを多くいただきました。特に、直接ご指導いただきました岩手県御所野縄文博物館の

高田和徳館長、山梨県立博物館の植月学氏、長野県立歴史館の土屋積氏、群馬県埋蔵文化財事業団の檜崎修一郎氏、福岡市埋蔵文化財センターの屋山洋氏、沖縄県今帰仁村教育委員会の宮城弘樹氏に、厚く御礼申し上げます。貴重な考古試料に対して、分析の許可をいただく上で、多くの方々にご協力いただきました。深く御礼申し上げます。

現生在来馬の試料の提供を快くお許しいただいた、宮崎県串間市教育委員会の秋田優氏、沖縄県与那国島与那国馬保存会の前楚和秀氏には、忙しい中、現地のフィールドワークにご協力頂きました。過去の動物の生態を復元する前に、まず今に生きる動物の生態を学ばなければいけないことを痛感いたしました。実際のウマを24時間観察することで、見えてくるものもありました。

また、分析を行なう上で総合地球環境学研究所および国立科学博物館地学研究部の方々には、遅くまでの実験にもお付き合いしていただきました。また、同位体の研究についてご指導していただきました中野孝教教授には、同位体地図の作成や水環境のモニタリングを行なうことの重要性を教えてくださいました。また、湯本貴和教授より研究のご支援とご指導をいただきました。湯本教授が実施している理学と人文学を融合した研究プロジェクトは、学問とは何かを考える上で非常に参考にさせていただきました。また、釜山大学の安渡敦史氏にはストロンチウム同位体分析の際に、多くの助言をいただきました。研究推進センターの申基徹助教、小林俊則氏、古角恵美氏よりストロンチウム同位体分析の一連の実験を指導していただきました。また、齋藤有氏より、実験のご指導および岩石学に

ついてご教示を賜りました。徳島大学の石丸恵利子助教より、動物考古学の研究を行なう上での資料調査とストロンチウム同位体比のマップ化事業にご協力いただき、また、様々なご指導を賜りました。厚く御礼申し上げます。国立科学博物館の齋藤めぐみ氏、谷村好洋氏からは、酸素同位体比測定の研究室間のクロスチェックをさせていただくことを快諾いただき、様々なご支援を賜りました。

同じ大学院時代を過ごした、総合研究大学院大学先端科学専攻の高橋遼平氏、総合地球環境学研究所の日下宗一郎氏、東京大学総合研究博物館の畑山智史氏よりご助言とご指導を賜りました。深く御礼申し上げます。

また、東京農業大学バイオセラピー学科の川嶋舟講師より、日本在来馬の研究をするうえで、文献調査の重要性をご助言いただきました。放送大学の西中川駿教授より、現生の日本在来馬の同位体分析についてのご助言を賜り、馬の齢推定および体高推定の方法論的限界を指導いただきました。

東京大学大学院先端生命科学専攻人類進化システム分野の方々には、研究を進める上で、多くのご配慮をいただきました。河村正二教授、太田博樹准教授（元東京大学大学院先端生命科学専攻、現北里大学医学部）から、至らぬ一学生に対して、幾度となく研究発表のご指導を賜りました。また、研究員として所属されていた鶴野光氏、中川良平氏、大森貴之氏から、研究を遂行する上で多くのご指導を賜りました。金原京子氏（旧姓：大原京子氏）、坂倉舞氏により、いつも整頓された環境で実験することができました。宮島史子氏に

は会計および生活に関する多くのご高配を賜りました。また、マーク・ディアブ氏には動物考古学の研究についてご教示いただきました。蔦谷巧氏と板橋悠氏からは発表のご指導やこの分野の研究領域の将来を語ることができました。私にとっては、このディスカッションが研究のモチベーション維持する上で、欠かすことのできないもとでした。山崎孔平氏、小玉悠平氏、小山荘太郎氏からは、人類学の新しい研究課題と一緒に議論ができ、自分が持たなかった人類学における新たな好奇心を得る機会を賜りました。また、なにより楽しい大学院生活を過ごすことができました。また、(株)池田理科の西村大成氏より、実験を円滑に行なう上で、多くのご配慮を賜りました。

修士課程でお世話になりました、柿沼由佳理氏、下見光奈氏には研究を始める上で、多くのご助言、ご指導を賜りました。また、大学院時代の同期であった勝村啓史氏、白井祐介氏、瀧上舞氏、内藤裕一氏には、大学院時代を過ごす上で、多くのご配慮を賜りました。また、何よりも楽しい大学院生活を過ごさせていただきました。

お世話になりました皆様に、記して御礼申し上げます。

特に、両親と親族には、人よりも長い大学院時代を費やし、不学であるにもかかわらず、私と私の研究を常に支えていただきました。

最後に、大学院時代に出会えた多くの方々のおかげで、現代科学哲学における「現代科学とは何か?」「新領域とは何か?」を6年間常に他者と自分に問うことができました。そしてそれができたのは、既存の学問から新たな学問の芽を出すための時間、挑戦をさせて

いただいた多くの方々の寛容さ、そして新領域創成科学研究科の存在を得たことにあると思います。そしてなにより、学融合という思考の自由さと楽しさを与えていただいた方々と、記すことのできない全ての事象に、この場を借りて厚くお礼申し上げます。

引用文献

S. H. Ambrose 1991. Effects of Diet, Climate and Physiology on Nitrogen Isotope Abundances in Terrestrial Foodwebs. *Journal of Archaeological Science*. 18. pp. 293-317.

A. Ando, T. Nakano, H. Kawahata, Y. Yokoyama and B. Khim 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.

D. W. Anthony 2007. *The Horse, the Wheel, and Language: How Bronze-Age Riders from the Eurasian Steppes Shaped the Modern World*. Society for American Archaeology. Princeton University Press. Princeton.

K. Ariyama, M. Shinozaki and A. Kawasaki 2012. Determination of the geographic origin of rice by chemometrics with strontium and lead isotope ratios and multielement concentrations. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*. 60. pp. 1628-1634.

D. Bennett and R. S. Hoffmann 1999. Equus caballus. *Mammalian Species*. 628. pp. 1-14.

R. A. Bentley 2006. Strontium Isotope from the Earth to the Archaeological Skeleton: A Review. *Journal of Archaeological Method and Theory*. 13. No.3.

J. Bigeleisen and M. Wolfsberg 1958. Theoretical and experimental aspects of isotope effects in chemical kinetics. *Advances in Chemical Physics*. 15. pp. 261-267.

J. D. Blum, E. H. Taliaferro, M. T. Weisse, R. T. Holmes 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.

W. A. Brand, T. B. Coplen, A. T. Aerts-Bijma, J. K. Bohlke, M. Gehre, H. Geilmann, M.

Groning, H. G. Jansen, H. A. J. Meijer, S. J. Mroczkowski, H. Qi, K. Soergel, H.

Stuart-Williams, S. M. Weise and R. A. Werner 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.

J. D. Bryant, P. L. Koch, P. N. Froelich, W. J. Showers and B. J. Genna 1996. Oxygen isotope

partitioning between phosphate and carbonate in mammalian apatite. *Geochimica et Cosmochimica*

Acta. 60. pp. 5145-5148

P. J. Budd, Montgomery, B. Barreiro, and R.G. Thomas 2000. Differential diagenesis of

strontium in archaeological human tissues. *Applied Geochemistry*. 15. pp. 687-694.

R.C. Capo, B. W. Stewart and O.A. Chadwick 1998. Strontium isotopes as tracers of ecosystem

processes: theory and methods. *Geoderma*. 82. pp. 197-225.

T. E. Cerling, Y. Wang and J. Quade 1993. Expansion of C4 ecosystems as an indicator of global

ecological change in the late Miocene. *Nature*. 361. pp. 344-345.

J. Clutton-Brock 1999. *A Natural History of Domesticated Mammals*. Cambridge University Press.

Cambridge.

H. Craig 1961. Isotopic variations in meteoric waters. *Science*. 133. pp. 1702-1703.

W. Dansgaard, S. J. Johnsen, J. Moller and C. C. Langway Jr. 1969. One thousand centuries of climatic record from camp century on the Greenland ice sheet. *Science*. 166. pp. 377-380.

A. P. Dickin 2005. *Radiogenic Isotope Geology – second edition-*. Cambridge University Press. Cambridge.

E. H. Edwards 2002. *Ultimate Horse Revised*. Dorling Kindersley. London.

R. W. Elias, Y. Hirao and C. C. Patterson 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.

J. R. Ehleringer, A. H. Thompson, D. W. Podlesak, G. J. Bowen, L. A. Chesson, T. E. Cerling,

T. Park, P. Dostie and H. Schwarcz 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.

J. Evans, N. Stoodley and C. Chenery 2006. A strontium and oxygen isotope assessment of a possible fourth century immigrant population in a Hampshire cemetery, southern England. *Journal of Archaeological Science*. 33. pp. 265-272.

G. Faure and T. M. Mensing 2005. The Rb-Sr Method. *Isotope Principles and Applications Third*

Edition. pp. 75-112. John Wiley & Sons, New Jersey.

G. Faure and J. L. Powell 1972. *Strontium Isotope Geology*. Springer-Verlag. Berlin.

S. J. Gould 1984. Smooth curve of evolutionary rate: a psychological and mathematical artifact.

Science. 226. p. 994.

S. J. Gould 1977. Punctuated equilibria: the tempo and mode of evolution reconsidered.

Paleobiology. 3. pp.115-151.

S. Halas, G. Skrzypek, W. Meier-Augenstein, A. Pelc and H. Kemp 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.

K. A. Hobson and D. R. Norris 2008. Animal Migration: A Context for Using New Techniques

and Approaches. *In Tracking Animal Migration with Stable Isotopes* ed. K. A. Hobson and L. I.

Wassenaar. Academic Press. London. pp.1-19.

J. Hoefs 2009. *Stable Isotope Geochemistry 6th edition*. Springer. Berlin.

K. A. Hoppe, P. L. Koch and T. T. Furutani 2003. Assessing the Preservation of Biogenic

Strontium in Fossil Bones and Tooth Enamel. *International Journal of Osteoarchaeology*. 13. pp.

20-28.

K. A. Hoppe and P. L. Koch 2007. Reconstructing the migration patterns of late Pleistocene

mammals from northern Florida. USA. *Quaternary Research*. 68. pp. 347-352.

A. D. Huertas, P. Lacumin, B. Stenni, B. S. Chillan and A. Longinelli 1995. Oxygen isotope variations of phosphate in mammalian bone and tooth enamel. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 59. pp.4299-4305

T. H. Huxley 1877. Professor Huxley's Lectures III. *Popular Science Monthly*. 10.

H. Kakoi, T. Tozaki and H. Gawahara 2007. Molecular analysis using mitochondrial DNA and microsatellites to infer the formation process of Japanese native horse populations. *Biochemical Genetics*. 45. pp. 375-395.

Y. Kaseda, H. Ogawa and A. M. Khalil 1997. Causes of natal dispersal and emigration and their effects on harem formation in Misaki feral horses. *Equine Veterinary Journal*. 29. pp. 262-266.

K. J. Knudson, S. R. Williams, R. Osborn, K. Forgey and P. R. Williams 2008. The geographic origins of Nasca trophy heads using strontium, oxygen, and carbon isotope data. *Journal of Anthropological Archaeology*. 28. pp. 244-257.

P. L. Koch, A. K. Behrensmeyer, N. Tuross and M. L. Fogel 1991. Isotopic fidelity during bone weathering and burial. *Carnegie Institution, Annual Report of The Director, Geophysical Laboratory 1989-1990*. pp. 105-110.

M. J. Kohn and T. E. Cerling 2002. Stable isotope compositions of biological apatite. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. 48. pp. 455-488.

M. J. Kohn, M. J. Schoeninger and J. W. Valley 1996. Herbivore tooth oxygen isotope

compositions: Effects of diet and physiology. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 60. pp. 3889-3896.

S. Kusaka, A. Ando, T. Nakano, T. Yumoto, E. Ishimaru, M. Yoneda, F. Hyodo and K.

Katayama 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.

J. A. Lee Thorp and N. J. van der Merwe 1991. Aspects of the chemistry of modern and fossil biological apatite. *Journal of Archaeological Science*. 18. pp. 343-354.

W. F. Libby 1955. *Radiocarbon Dating- 2nd Edition*. Chicago University Press. Chicago.

E. H. Lindsay 1980. Pliocene dispersal of the horse *Equus* and late Cenozoic mammalism dispersal events. *Nature*. 287. p. 138.

A. Longinelli 1984. Oxygen isotopes in mammal bone phosphate: A new tool for paleohydrological and paleoclimatological research? *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 48. pp. 385-390

R. V. Ludwig and V. Eisenmann 1986. Comparative osteology of modern and fossil horses, half-asses, and asses. *In Equids in the Ancient World*. ed. R. H. Meadow and H. P. Uerpman. Dr Ludwig Reichert Verlag. Berlin. pp. 67-116.

J. M. McArthur, R. J. Howarth and T. R. Bailey 2001. Strontium isotope stratigraphy: LOWESS Version 3: best fit to the marine Sr-isotope curve for 0–509 Ma and accompanying look-up table for deriving numerical age. *The Journal of Geology*. 109. pp. 155–170.

B. Macfadden 1992. *Fossil Horses – Systematics, Paleobiology and Evolution of the Family*

Equidae. Cambridge University Press. Cambridge.

H. Matsumoto 1921. Description of some new fossil mammals from Kani District, Prov. of Mino, with revisions of some asiatic fossil rhinoceroids. *Science Reports of the Tohoku Imperial University*. 2nd series. *Geology*. 5. pp. 75-A14.

D. S. Mills and S. M. McDonnell 2005. *Domestic Horse –Origins, Development and Management of Its Behaviour*. Cambridge University Press. Cambridge.

C. Mizota and M. Kusakabe 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.

J. Montgomery 2002. Lead and strontium isotope compositions of human dental tissues as an indicator of ancient exposure and population dynamics. Ph.D. Thesis. University of Bradford. UK.

T. Motohashi, T. Sato and S. Yamada 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.

M. A. Oliver 1990. Kriging: A Method of Interpolation for Geographical Information Systems. *International Journal of Geographic Information Systems*. 4 pp. 313-332.

S. L. Olsen 2006. Early Horse Domestication: Weighing the Evidence. *In Horse and Humans: The Evolution of Human-Equine Relationships*. ed. S. L. Olsen, S. Grant, A. M. Choyke and L.

Bartosiewicz. Archaeopress. Oxford. pp.81-113.

H. F. Osborn 1918. Equidae of the Oligocene, Miocene, and Pliocene of North America. Icolonographic type revision. *The American Museum of Natural History. N. 2.* pp. 1-326.

A. K. Outram 2009. The earliest horse harnessing and milking. *Science.* 323. pp. 1332-1335.

B. H. Passey, T. E. Cerling and N. E. Levin 2007. Temperature dependence of oxygen isotope acid fractionation for modern and fossil tooth enamels. *Rapid Communications in Mass Spectrometry.* 21. pp. 2853-2859.

S. J. Pietsch, K. A. Hobson, L. I. Wassenaar and T. Tütken 2011. Tracking cats: problems with placing feline carnivores on $\delta^{18}\text{O}$, δD isoscapes. *PLoS One.* 6. e24601.

T. D. Price, J. H. Burton and R. A. Bentley 2002. The characterization of biologically available strontium isotope ratios for the study of prehistoric migration. *Archaeometry.* 44. pp. 117-135.

T. D. Price, C. Knipper, G. Grupe and V. Smrcka 2004. Strontium isotopes and prehistoric migration: the Bell Beaker Period in Central Europe. *European Journal of Archaeology.* 7. pp. 9-40.

F. G. T. Radloff, L. Mucina, W. J. Bond and P. J. le Roux 2010. Strontium isotope analyses of large herbivore habitat use in the Cape Fynbos region of South Africa. *Oecologia.* 164. pp. 567-578.

M. J. Schoeninger and M. DeNiro 1984. Nitrogen and carbon isotopic composition of bone collagen from marine and terrestrial animals. *Geochimica et Cosmochimica Acta.* 48. pp. 625-639.

I. Schrooten, G. J. S. Behets, W. E. Cabrera, S. R. Vercauteren, L. V. Lamberts, S. C.

Verberckmoes, A. J. Bervoets, G. Dams. W. G. Goodman, M. E. De Broe and P. D'Haese

2003. Dose-dependent effects of strontium on bone of chronic renal failure rats. *Kidney International*. 63. pp 927–935.

H. P. Schwarc, J. Melbye, M. A. Katzenberg and M. Knyf 1985. Stable isotopes in human akeletons of southern Ontario: reconstruction of palaeodiet. *Journal of Archaeological Science*. 12. pp. 187-206.

G. G. Simpson 1951. *Horses: The Story of the Horse Family in the Modern World and through Sixty Million Years of History*. Oxford University Press. Oxford.

G. Skrzypek 2013. Normalization procedures and reference material selection in stable HCNOs isotope analyses. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 405. pp. 2815-2823.

B. J. Shaw, G. R. Summerhayes, H. R. Buckley and J. A. Baker 2008. The use of strontium isotopes as an indicator of migration in human and pig Lapita populations in the Bismarck Archipelago, Papua New Guinea. *Journal of Archaeological Science*. 36. pp. 1079-1091.

A.P. Tudge 1960. A method of analysis of oxygen isotopes in orthophosphates-its use in measurements of paleotemperatures. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 18. pp. 81-93.

E. J. Underwood 1977. *Trace Elements in Human and Animal Nutrition 4th edition*. Academic Press. New York.

N. J. van der Merwe, J. A. Lee-Thorp, J. F. Thackeray, A. Hall-Martin, F. J. Kruger, H.

Coetzee, R. H. V. Bell and M. Lindeque 1990. Source-area determination of elephant ivory by isotopic analysis. *Nature*. 346. pp. 744-746

T. W. Vennemann, H. C.Fricke, R. E.Blake, J. R. O'Neil and A. Colman 2002. Oxygen isotope analysis of phosphates: a comparison of techniques for analysis of Ag_3PO_4 . *Chemical Geology*. 185. pp. 321-336.

B. Vincent 2004. Allometric constraints on Sr/Ca and Ba/Ca partitioning in terrestrial mammalian trophic chains. *Oecologia*. 139. pp. 83-88.

C. Wang and T. Peng 2001. Hydrogen and oxygen isotopic compositions of Taipei precipitation: 1990 to 1998. *Western Pacific Earth Sciences*. 11. pp. 429-442.

F.B. Wiedemann-Bidlack, A.S. Colman and M.L. Fogel 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.

M. Yoneda, A. Tanaka, Y. Shibata, M. Morita, K. Uzawa, M. Hirota and M. Uchida 2002. Radiocarbon marine reservoir effect in human remains from the Kitakogane site, Hokkaido, Japan. *Journal of Archaeological Science*. 29. pp. 529-536.

N. Yoshida and N. Miyazaki 1991. Oxygen isotope correlation of cetacean bone phosphate with environmental water. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 96. pp. 815-820.

青木更吉 2003. 『小金牧を歩く』. 崙書房出版. 千葉.

- 石井正敏 2001. 『日本渤海関係史の研究』. 吉川弘文館. 東京.
- 磯貝正義 1978. 『古代官牧制の研究-甲斐の御牧を中心に』. 吉川弘文館. 東京.
- 入間田宣夫・谷口一夫 2008. 『牧の考古学』. 高志書院. 東京
- 鶴沢和宏・本郷一美 2006. 由比ヶ浜南遺跡出土ウマ (Equus caballus) の形態. 『考古学
と自然科学』. 53. pp. 57-67.
- 江上波夫 1967. 『騎馬民族国家』. 中公新書. 東京.
- 榎本淳一 1993. 養老律令試論. 『笹山晴生先生還暦記念会編 日本律令制論集』. 吉川弘文
館. 東京
- 岡部利雄 1953. 『日本在来馬に関する研究—特に北海道和種、木曾馬及び御崎馬について』.
丸善. 東京.
- 加々美寛雄・周藤賢治・長尾隆志 2008. 『同位体岩石学』. 共立出版. 東京
- 鍵谷徳三郎 1908. 尾張熱田高倉貝塚実査. 『東京人類学会雑誌』. 23. p. 266.
- 川嶋舟 2002. 日本在来8馬種の近縁関係に関する研究. 東京大学大学院生命科学研究科獣
医学専攻 博士論文.
- 倉沢一 1970. 『同位体地質学』. ラティス丸善. 東京.
- 小林幹男 1996. 古代・中世における牧制度の変遷と貢馬. 『長野女子短期大学研究紀要』. 4.
pp. 20-38.
- 近藤恵・松浦秀治・松井章・金山喜昭 1991. 野田市大崎貝塚縄文後期貝層出土ウマ遺残体

のフッ素年代測定. 『人類学雑誌』. 99. pp. 93-99 .

近藤恵・松浦秀治・中井信之・中村俊夫・松井章 1992. 出水貝塚縄文後期貝層出土ウマ遺
存体の年代学研究. 『考古学と自然科学』. 26. pp. 61-71.

酒井均・松久幸敬 1996. 『安定同位体地球化学』. 東京大学出版. 東京

佐倉真 1993. 『騎馬民族は来なかった』. 日本放送出版協会. 東京

茂原信生 2008. 野田 I 遺跡出土の中世人骨と馬骨. 『一戸町文化財調査報告書 58 集

野田 I 遺跡—野田宝篋印塔中世墳墓』. 一戸町教育委員会. 岩手. pp. 21-28.

白石太一郎 2001. 『古墳とその時代』. 山川出版社. 東京.

末崎真澄 2008. ウマと日本人. 『人と動物の日本史 I —動物考古学—』. 西本豊弘編. pp.
192-214. 吉川弘文館. 東京.

田上雅浩・一柳錦平・嶋田純 2013. 日本における降水の安定同位体比の季節変動と空間分
布. 『日本水文科学会誌』. 43. pp. 73-91.

玉田芳英 2009. 朝堂院の調査—第 153 次—. 『奈良文化財研究所紀要』. 30. pp. 50-61.

帝国競馬協会(編) 1928. 『日本馬政史』. 帝国競馬協会. 東京.

富岡直人・屋山洋・松井章・丸山真史 2011. 動物考古学からみた博多と動物の歴史. 『新
修福岡市史資料編 考古③ 遺物からみた福岡の歴史』. 福岡市. 福岡. pp. 221-295.

直良信夫 1984. 『日本馬の考古学的研究』. 朝倉書房. 東京.

今帰仁村教育委員会 2008. 『今帰仁村文化財調査報告書第 25 集 今帰仁城跡発掘調査報告

III』. 今帰仁村教育委員会. 沖縄.

奈良国立文化財研究所(編) 1969. 平城宮木簡 I 解説. 『平城宮発掘調査報告 V』. 奈良国立文化財研究所. 奈良.

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. 『平成2 年度. 文部科学省研究費補助金 (一般研究B) 研究成果報告書』. 西中川駿. 鹿児島.

西宮秀紀 2013. 『奈良の都と天平文化』. 吉川弘文館. 東京.

西本豊弘・新美倫子 2010. 『人と動物の考古学』. 吉川弘文館. 東京.

野澤謙・西田隆雄 1981. 『家畜と人間』. 出光科学選書18. pp. 269-306. 出光書店. 東京.

長谷部言人 1925. 石器時代の馬に関して. 『人類学雑誌』. 40. p.131.

早川康夫 1995. 古代馬牧—河内、信濃 16 牧の立地と馬産供用限定地への発展. *Grassland Science*. 41. pp. 169-175.

林部均 2007. 藤原京の条坊制 - その実像と意義 -. 『都城制研究 (1) 奈良女子大学 21 世紀 COE プログラム報告集 16』. pp. 37-66. 奈良女子大学. 奈良.

古島敏雄 1944. 『信州中馬の研究—近世日本陸上運輸史の一齣』. 伊藤書店. 東京

松浦秀治・近藤恵・中村俊夫・中井信之・松井章 1994. "縄文馬" はいたか. 『名古屋大学加速器質量分析計業績報告書』. 5. pp. 49-53.

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. pp. 217-222.

南雅代・中村俊夫・平田和明・長岡朋人・鶴澤和宏 2007. 鎌倉由比ヶ浜埋葬人骨および獣骨の地球化学的研究 『名古屋大学加速器質量分析計業績報告書』. 18. pp. 134-142.

山崎健 2012. 藤原宮造営期における動物利用:使役と食を中心として. 『文化財論叢』. 4. pp. 345-365.

山梨県教育委員会 2004a. 『山梨県埋蔵文化財センター調査報告書第213集 百々遺跡2・4』.

山梨県教育委員会. 山梨.

山梨県教育委員会 2004b. 『山梨県埋蔵文化財センター調査報告書第213集 百々遺跡3・

5.』. 山梨県教育委員会. 山梨.

山口英男 1986. 8・9紀の牧について. 『史学雑誌』. 95. pp. 1-37.

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. pp. 83-91.

图表

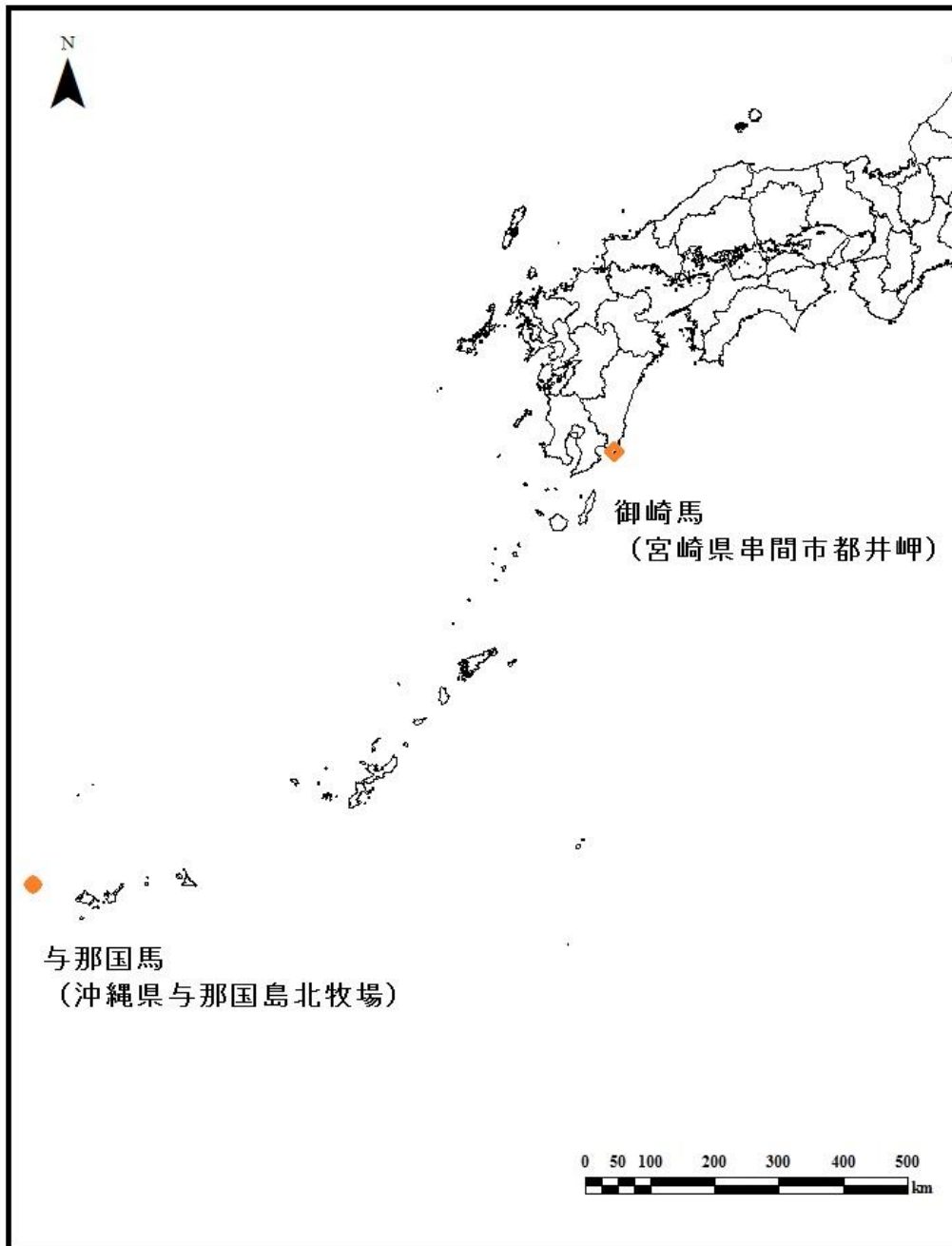


図 1. 分析に供した現生在来馬の生息地

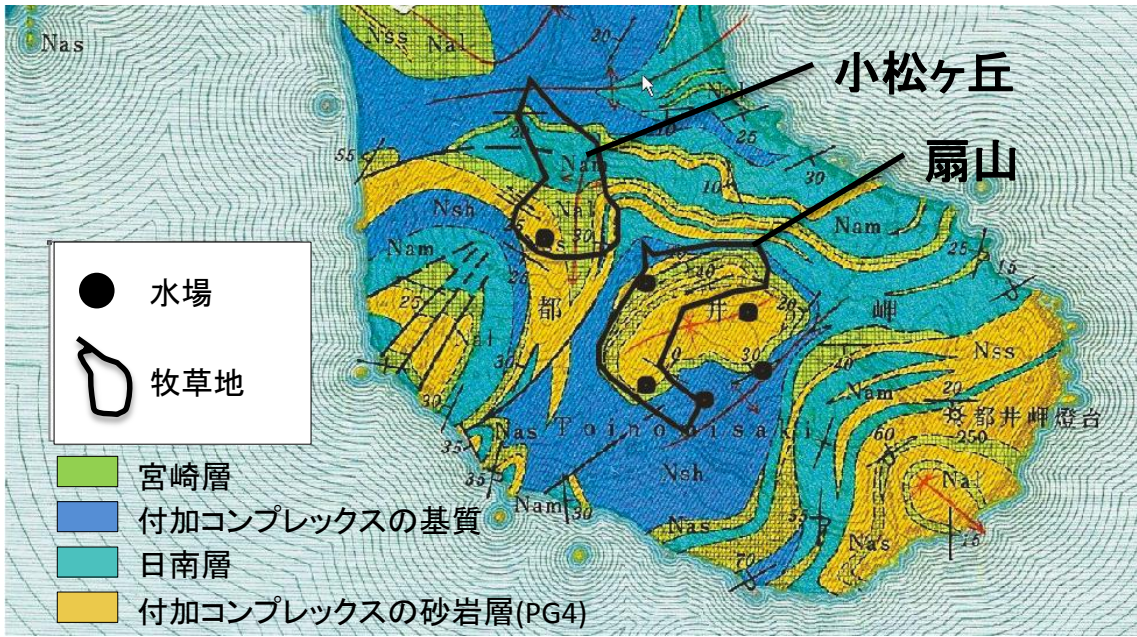


図2. 宮崎県串間市都井岬における地質図および馬飼育地域

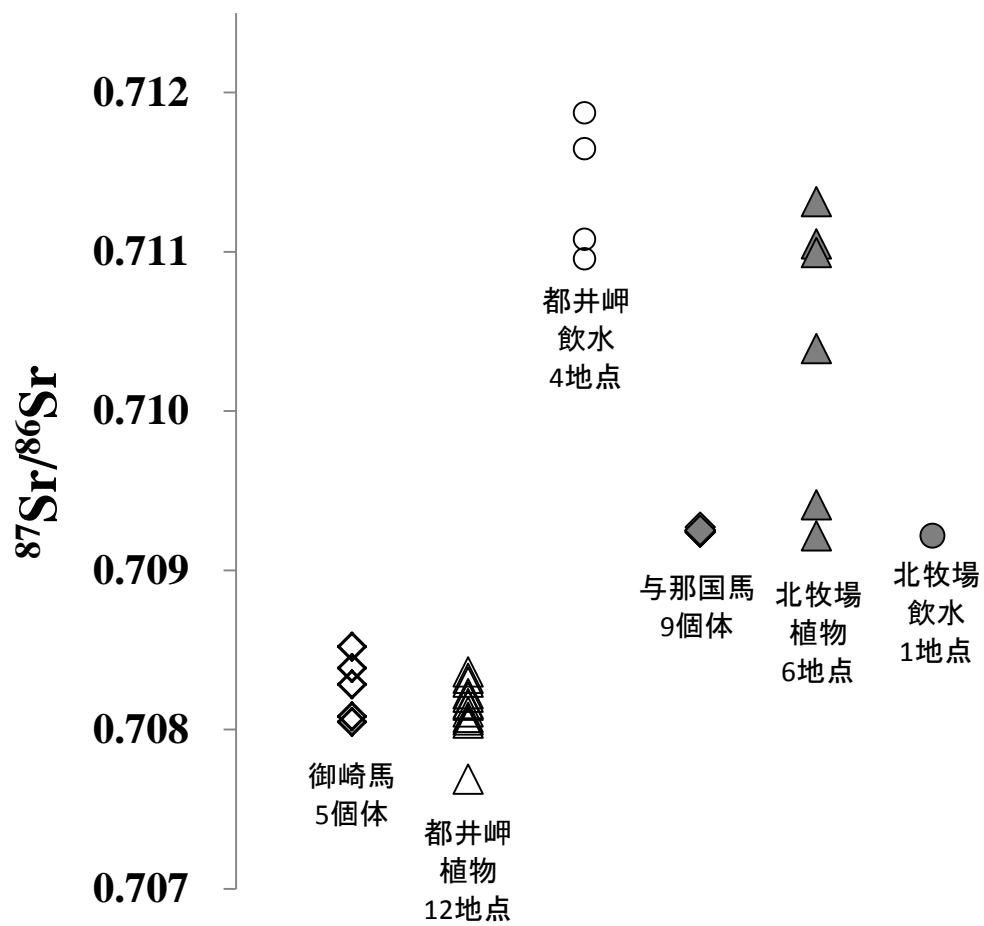


図3. 現生在来馬および植物のストロンチウム同位体比

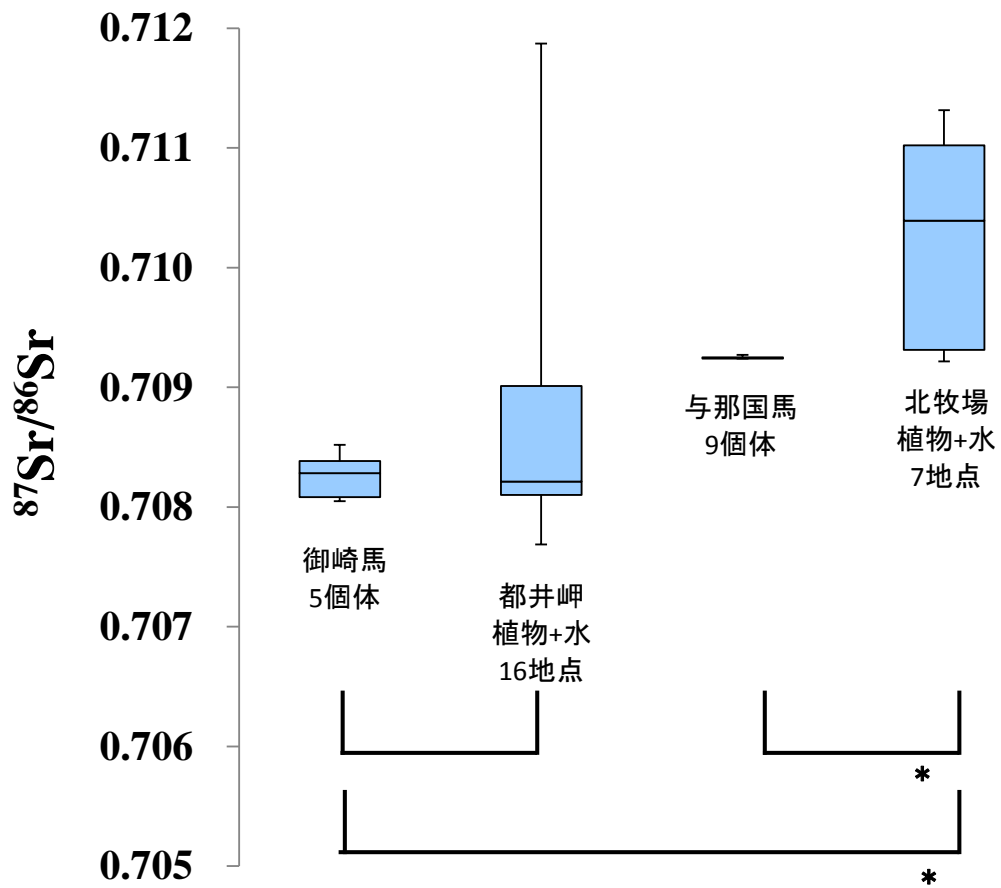


図 4. 現生在来馬および植物・飲み水のストロンチウム同位体比

*: 平均値の 95% 有意水準、 $P < 0.05$



図 5. 馬歯の酸素同位体分析におけるバルクサンプリング

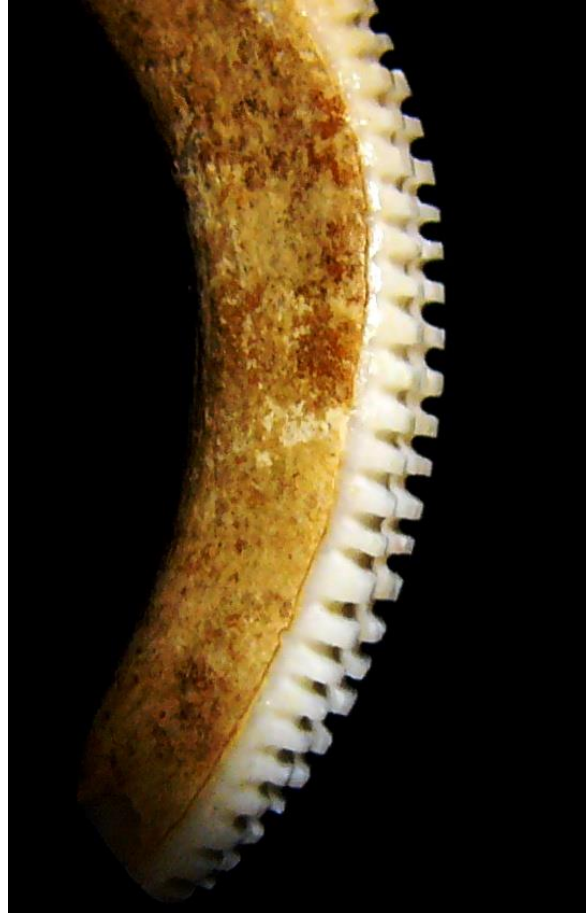


図 6. 馬歯の酸素同位体分析における成長線サンプリング

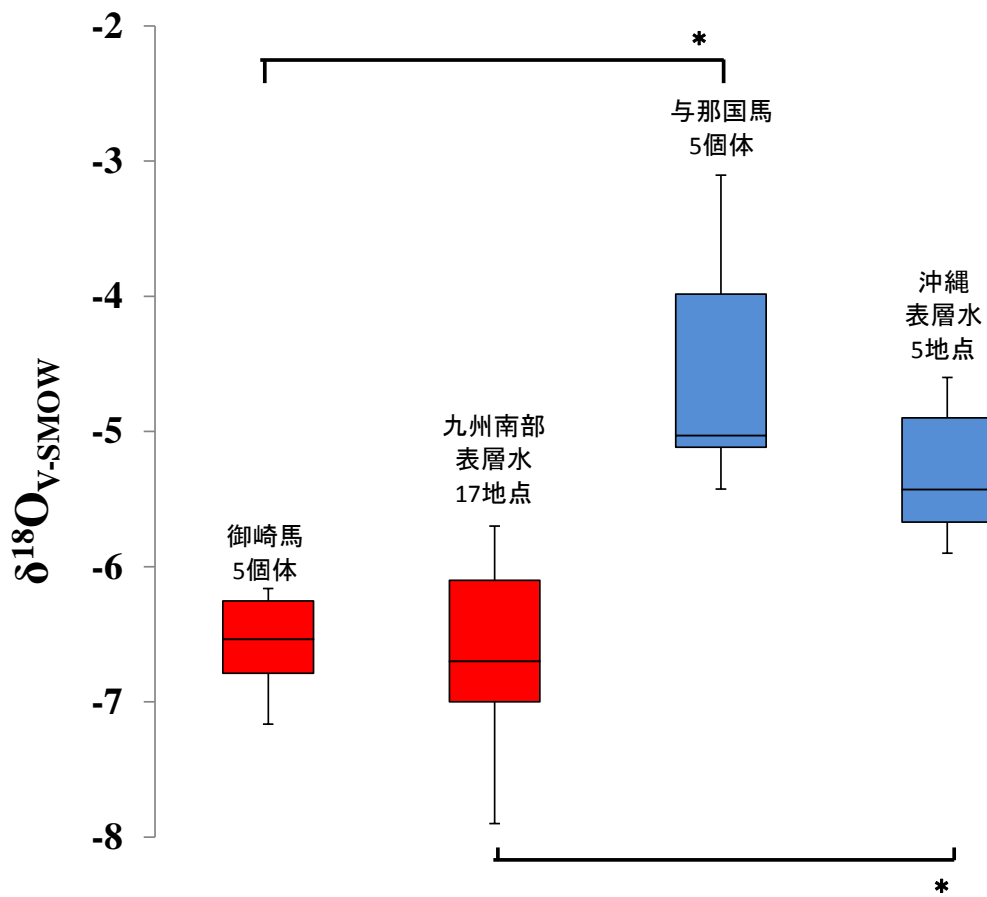


図7. 現生在来馬及び表層水の酸素同位体比

*: 平均値の95%有意水準、 $P < 0.05$

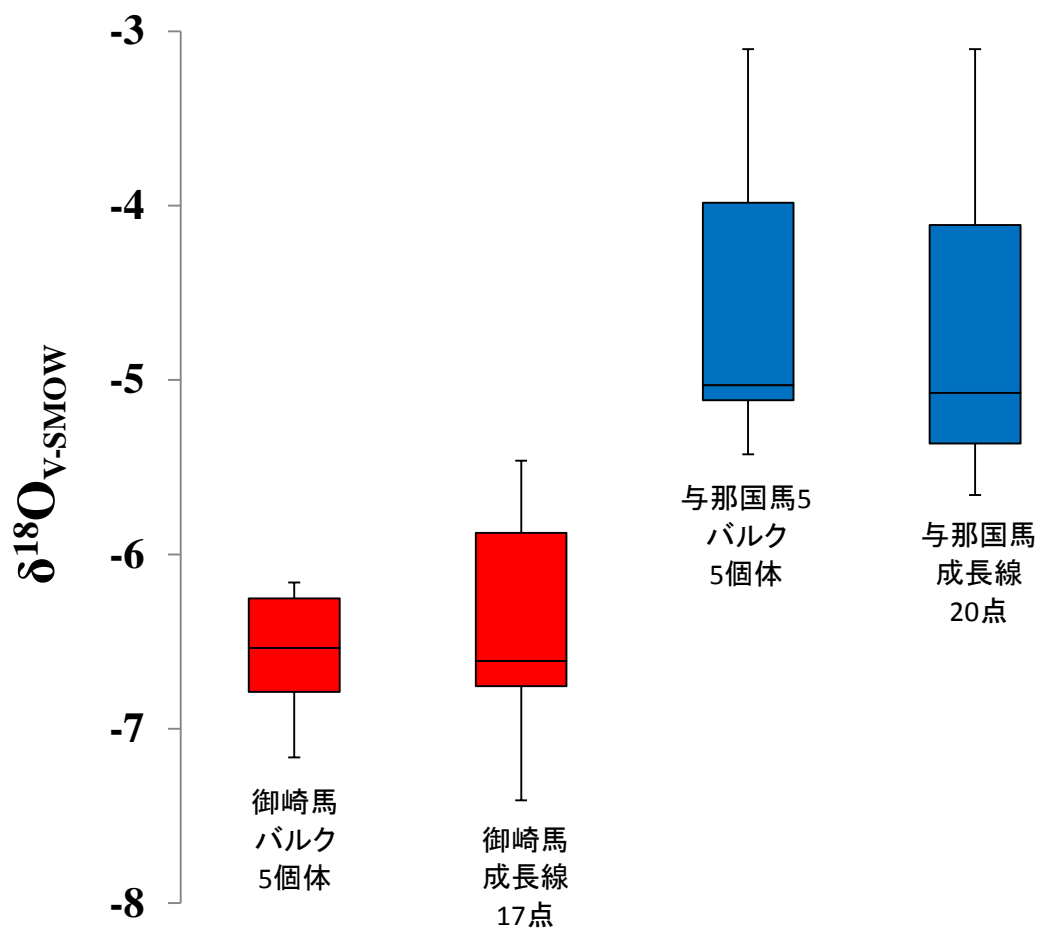


図 8. 現生在来馬のバルクサンプルおよび成長線サンプルの酸素同位体比

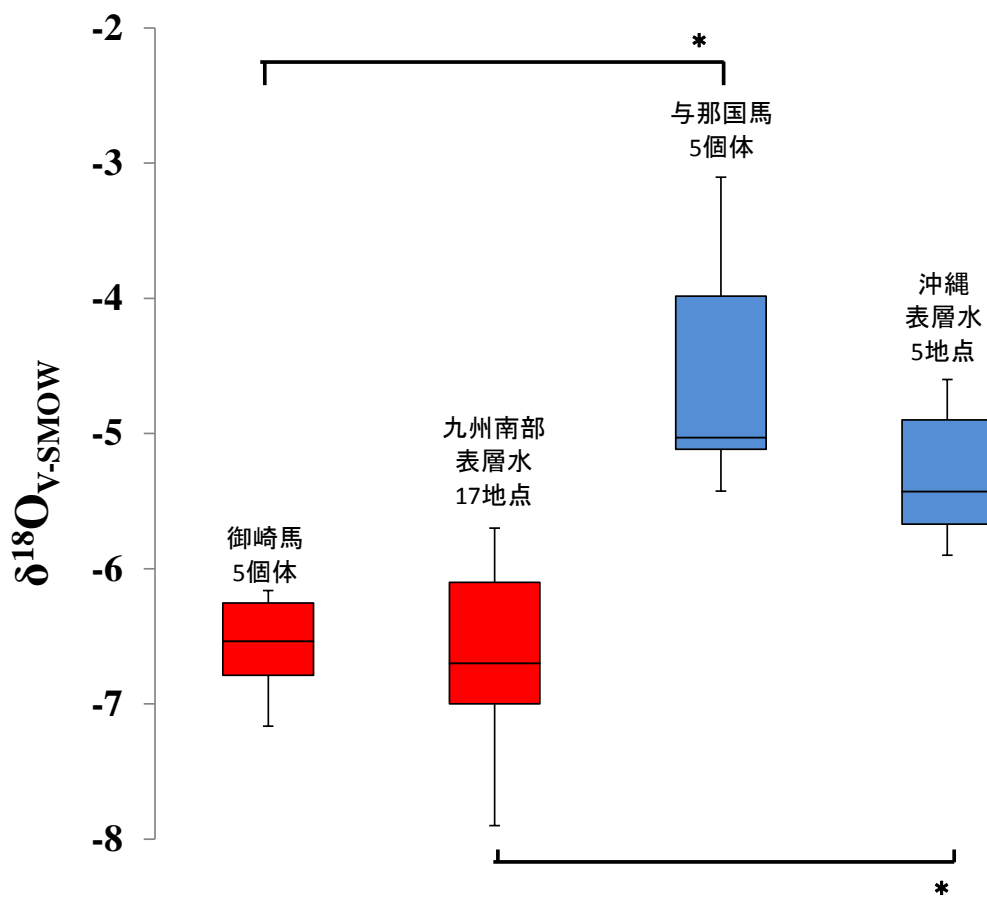


図9. 現生在来馬から推定した飲水の酸素同位体比

*: 平均値の95%有意水準、 $P < 0.05$

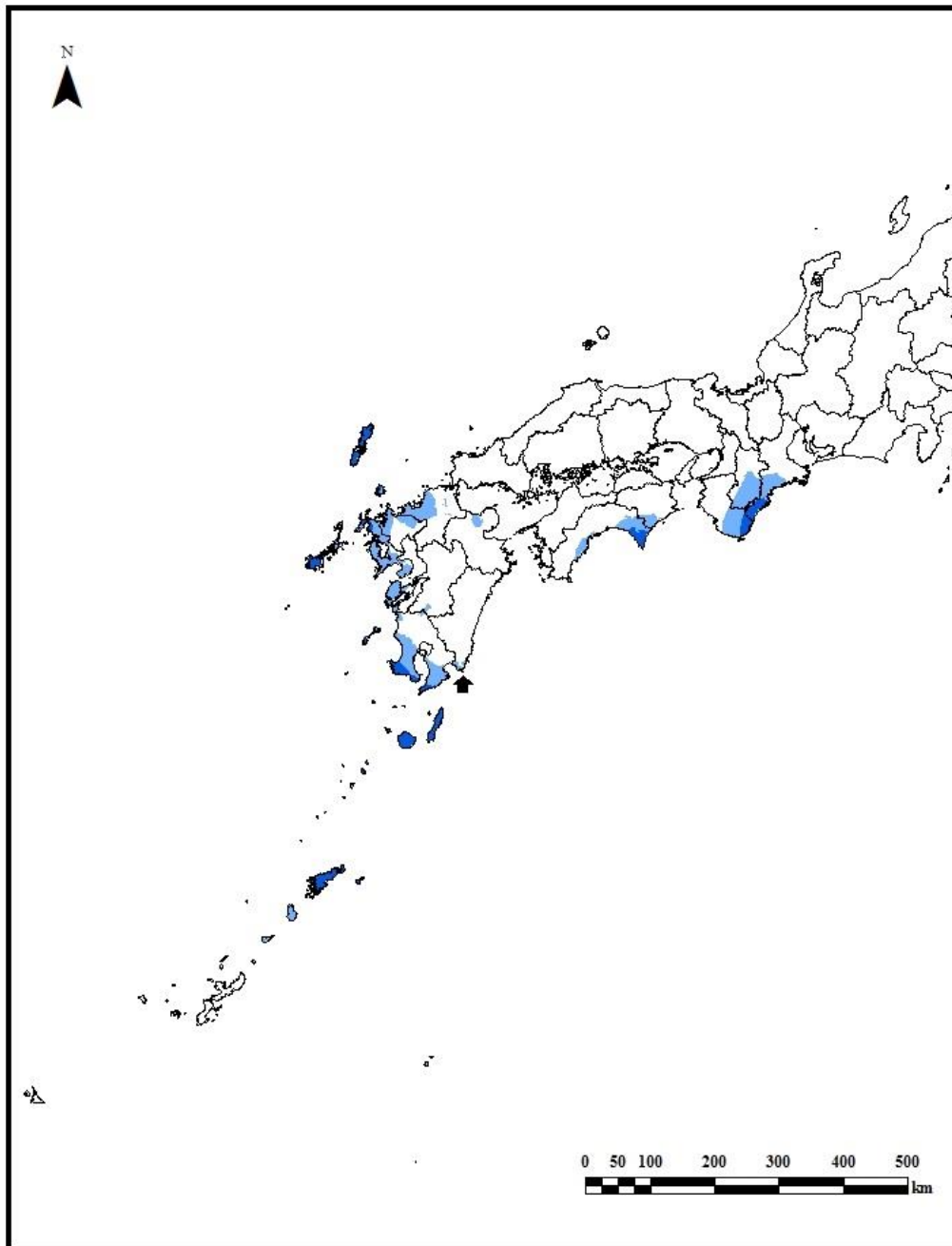


図 10. 酸素同位体比に基づく Misaki01 の推定産地
濃色：1 標準偏差、淡色：2 標準偏差. 矢印はサンプリング地点

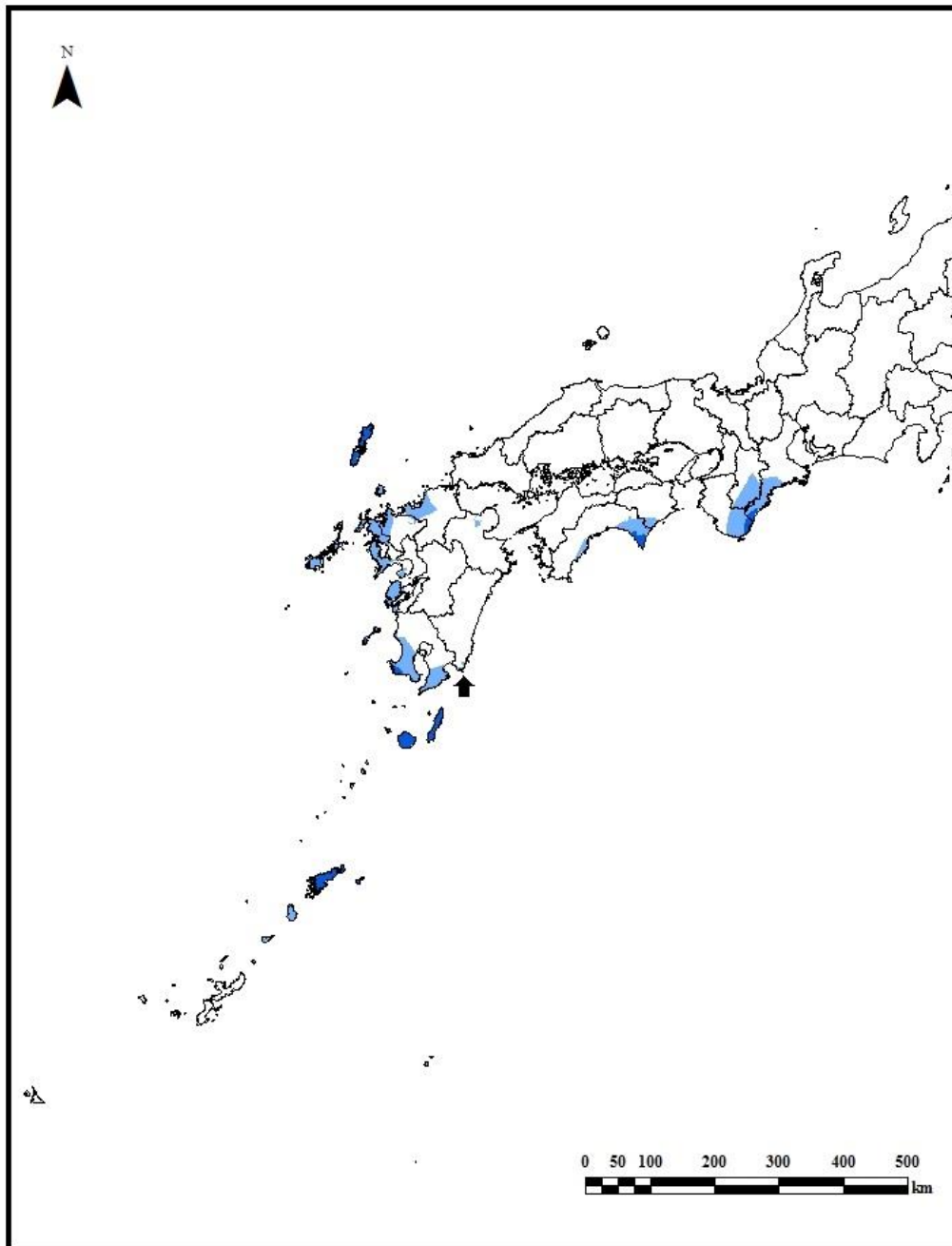


図 11. 酸素同位体比に基づく Misaki02 の推定産地
濃色：1 標準偏差、淡色：2 標準偏差. 矢印はサンプリング地点

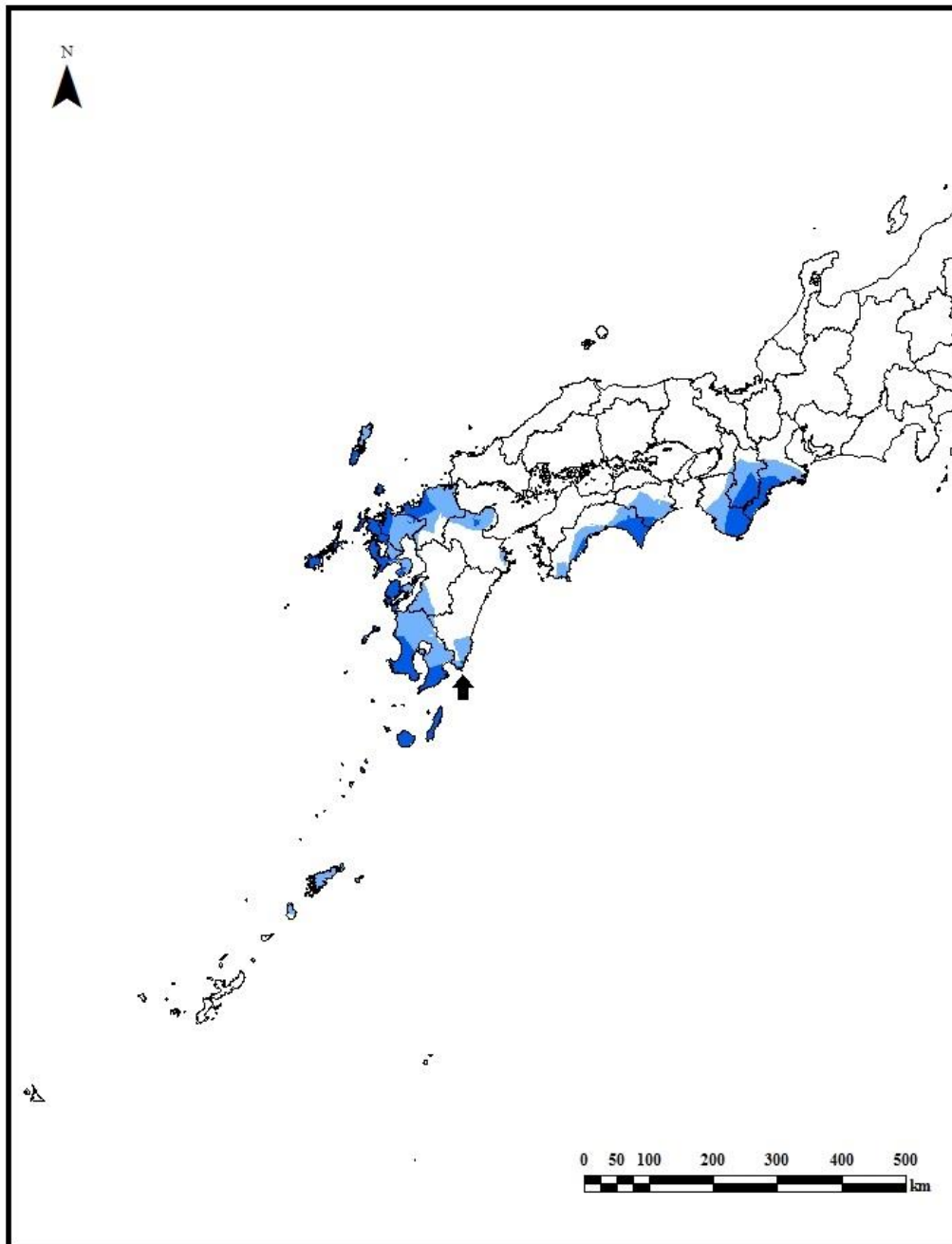


図 12. 酸素同位体比に基づく Misaki03 の推定産地
濃色：1 標準偏差、淡色：2 標準偏差. 矢印はサンプリング地点

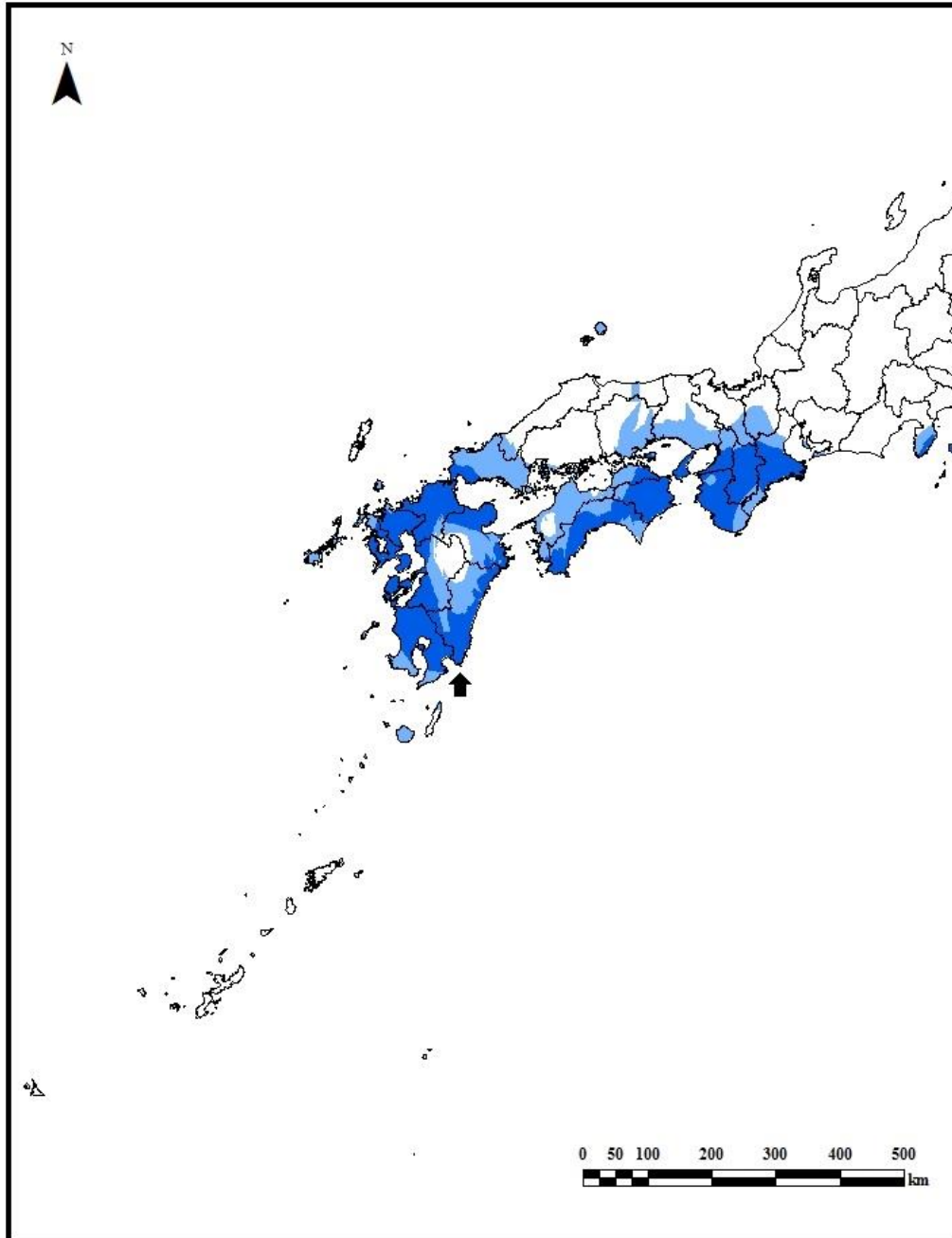


図 13. 酸素同位体比に基づく Misaki04 の推定産地
濃色：1 標準偏差、淡色：2 標準偏差. 矢印はサンプリング地点

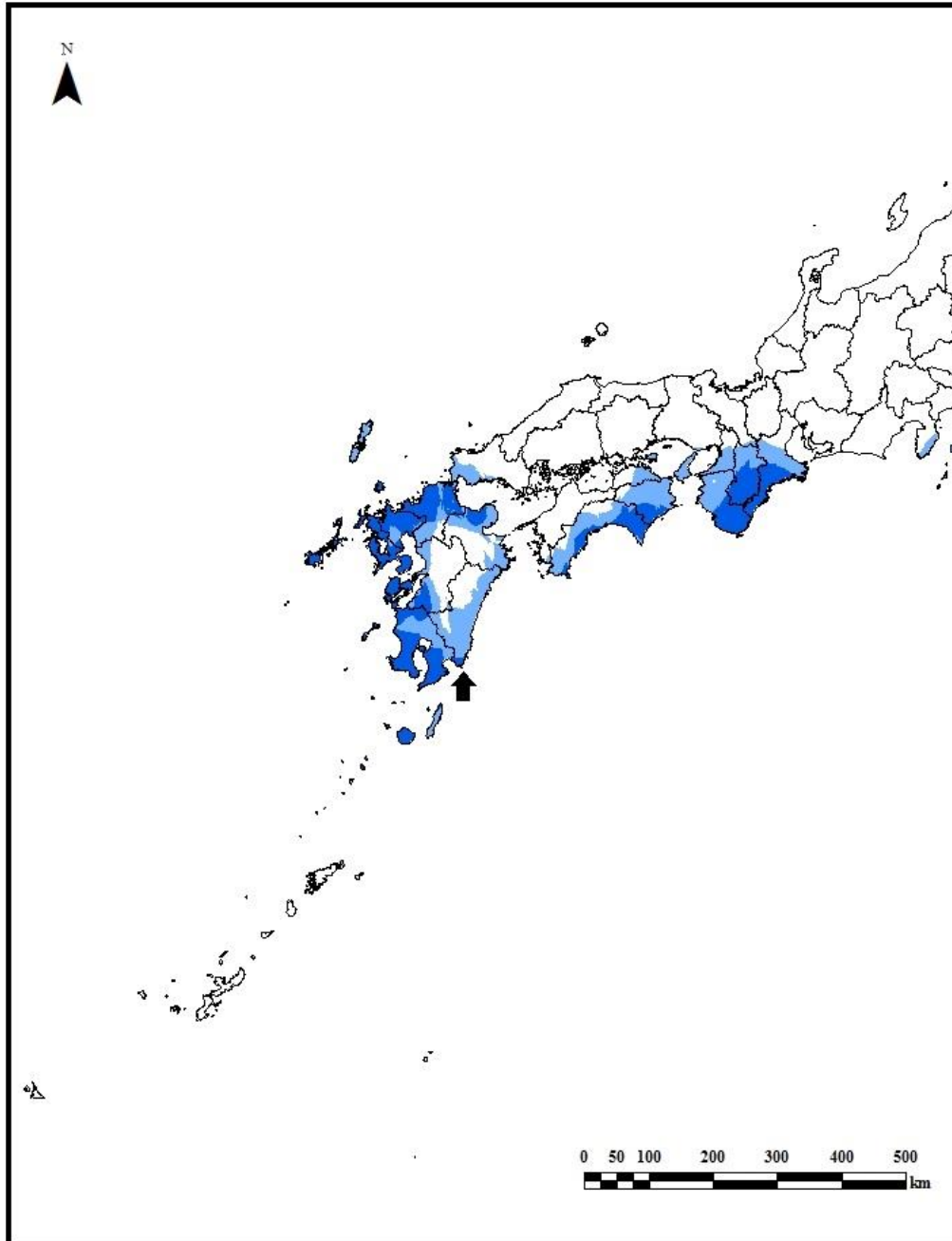


図 14. 酸素同位体比に基づく Misaki05 の推定産地
濃色：1 標準偏差、淡色：2 標準偏差. 矢印はサンプリング地点

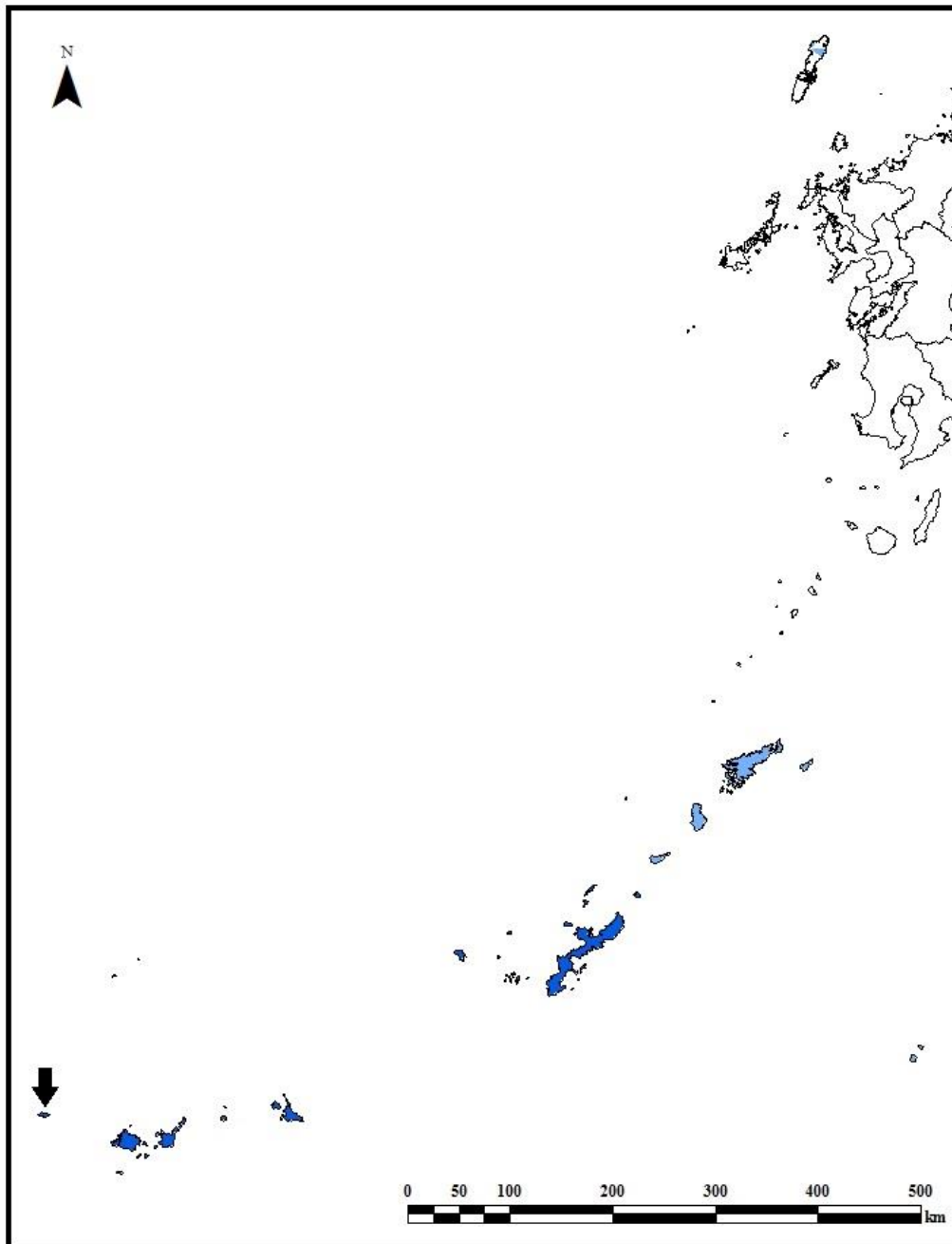


図 15. 酸素同位体比に基づく Yonaguni01 の推定産地
濃色：1 標準偏差、淡色：2 標準偏差. 矢印はサンプリング地点

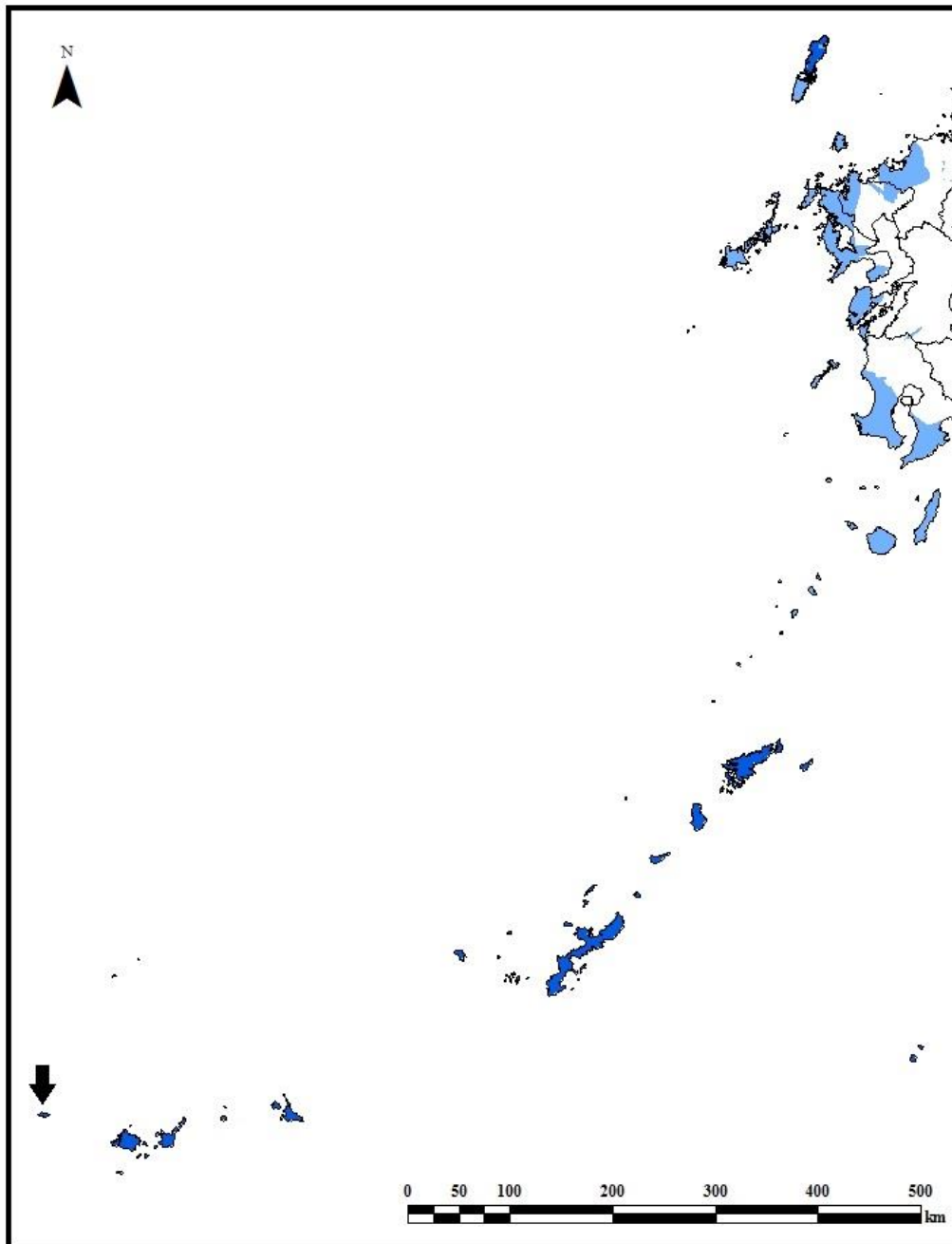


図 16. 酸素同位体比に基づく Yonaguni02 の推定産地
濃色：1 標準偏差、淡色：2 標準偏差. 矢印はサンプリング地点

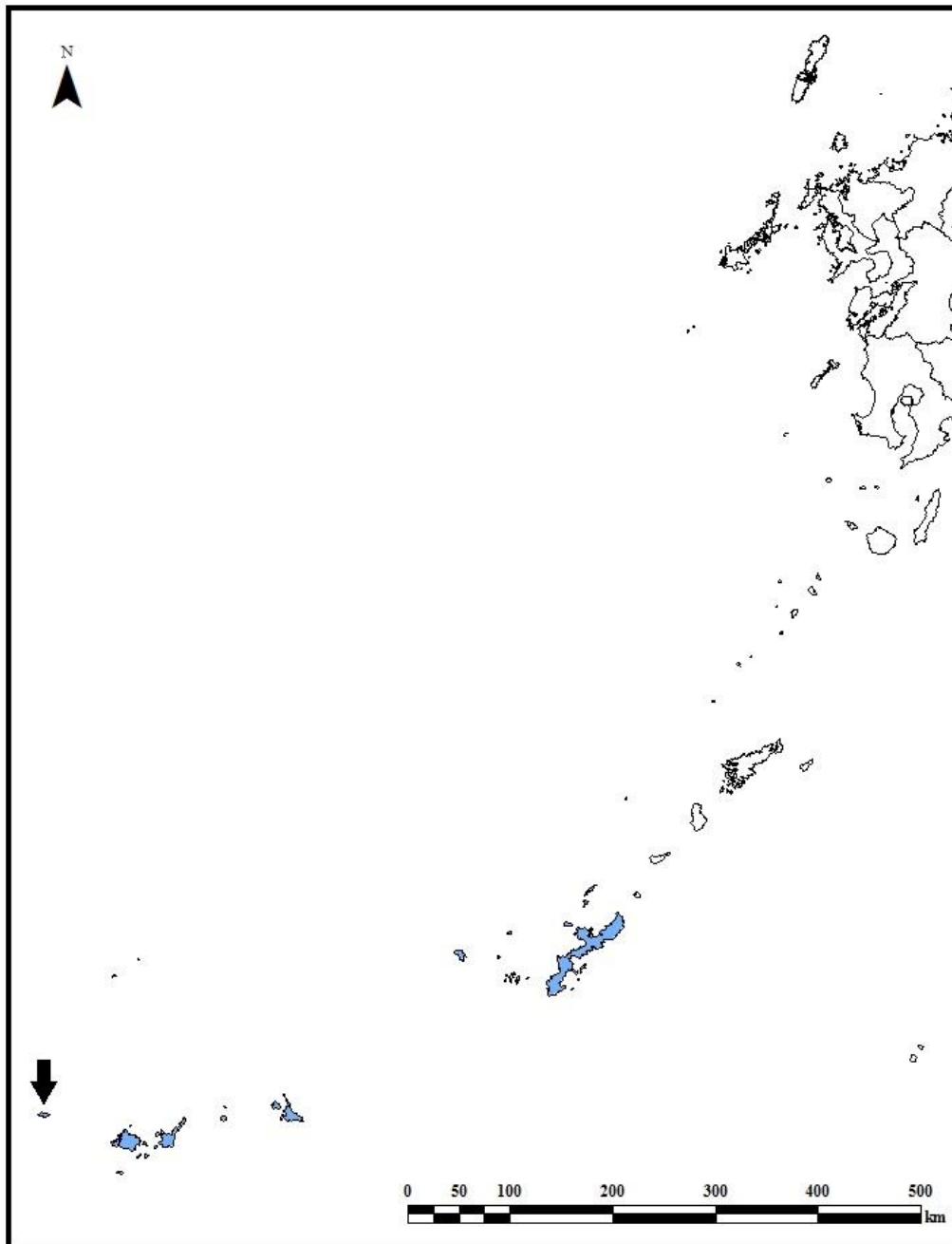


図 17. 酸素同位体比に基づく Yonaguni03 の推定産地
濃色：1 標準偏差、淡色：2 標準偏差. 矢印はサンプリング地点

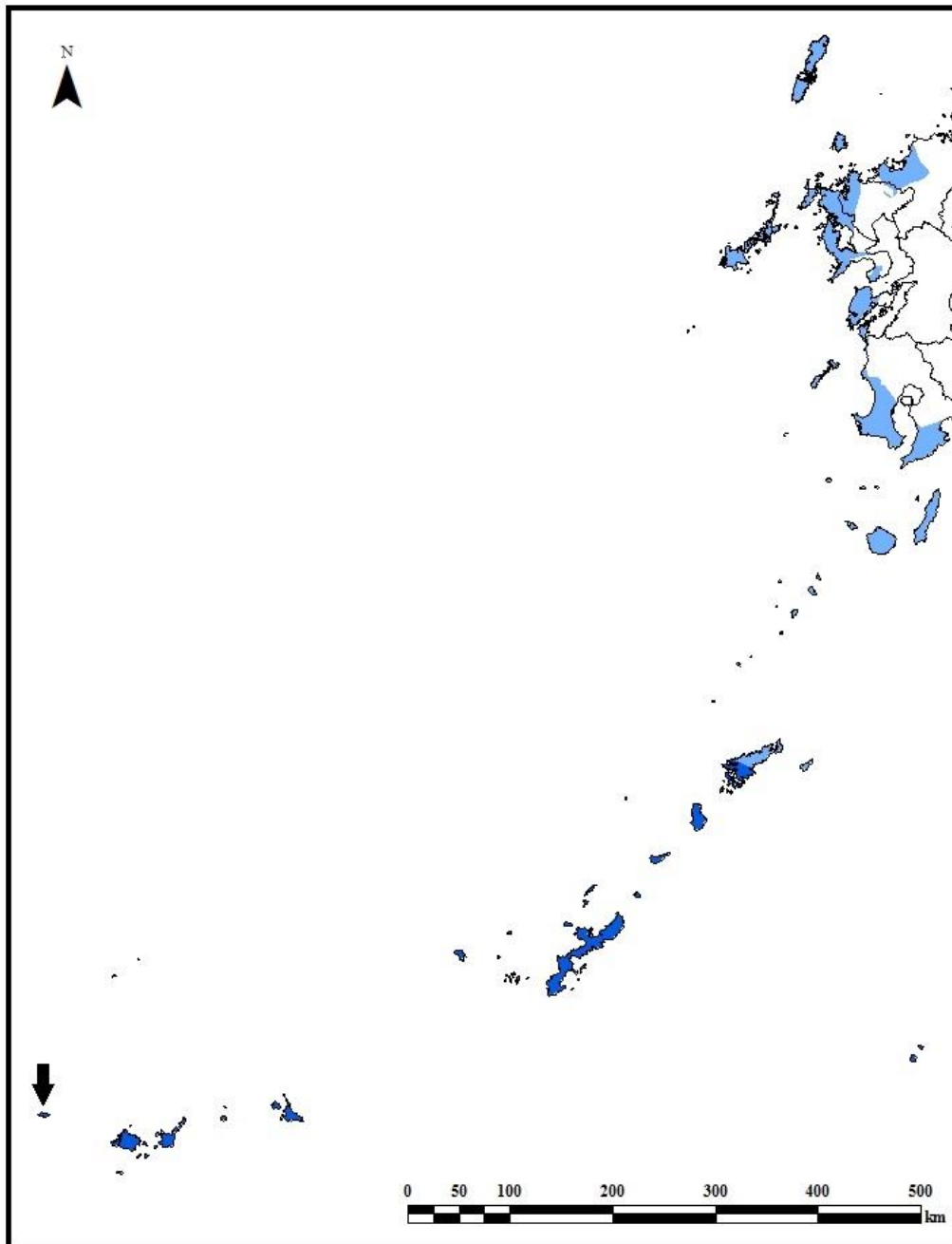


図 18. 酸素同位体比に基づく Yonaguni04 の推定産地
濃色：1 標準偏差、淡色：2 標準偏差. 矢印はサンプリング地点

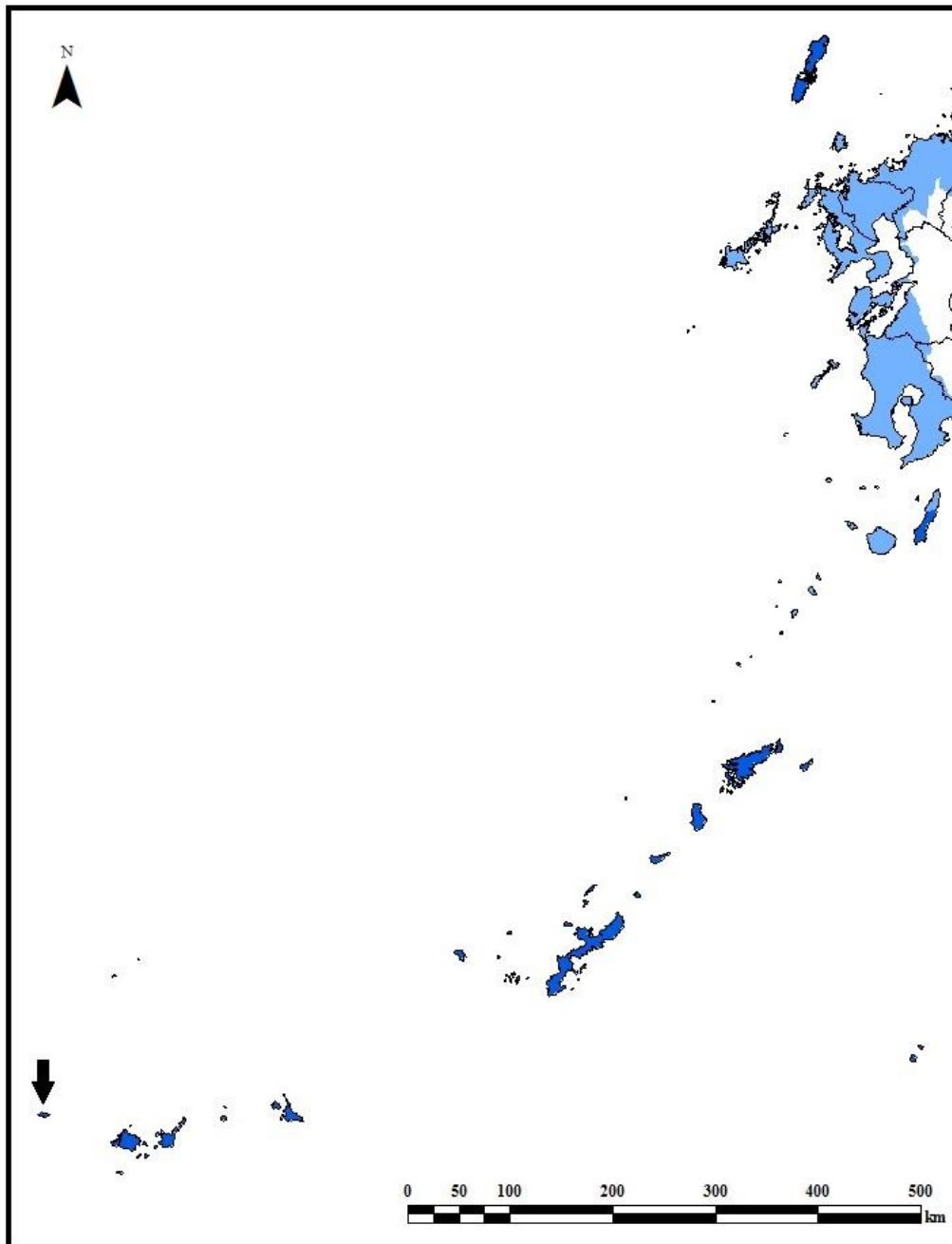


図 19. 酸素同位体比に基づく Yonaguni05 の推定産地
濃色：1 標準偏差、淡色：2 標準偏差. 矢印はサンプリング地点

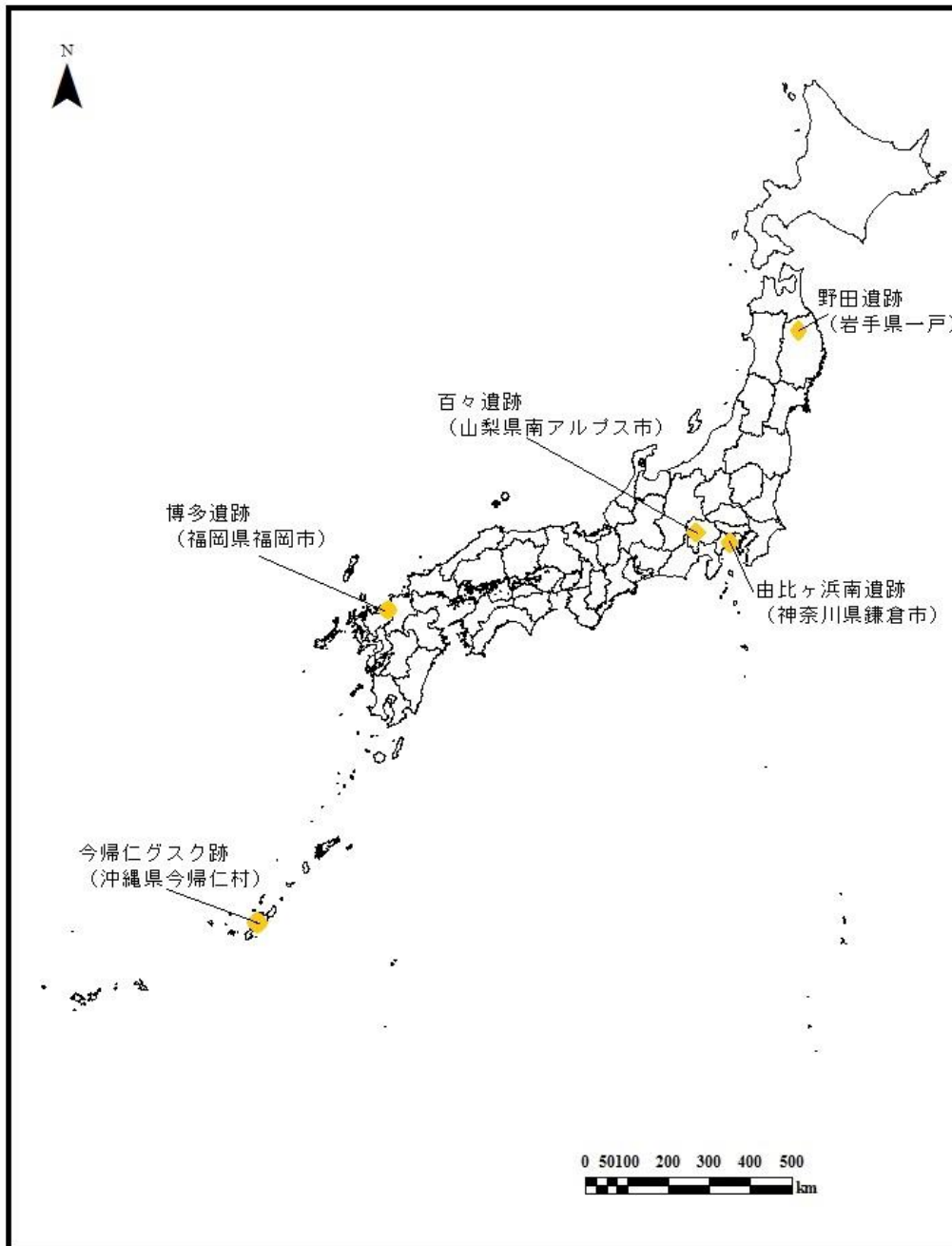


図 20. 分析に供した中近世遺跡の立地

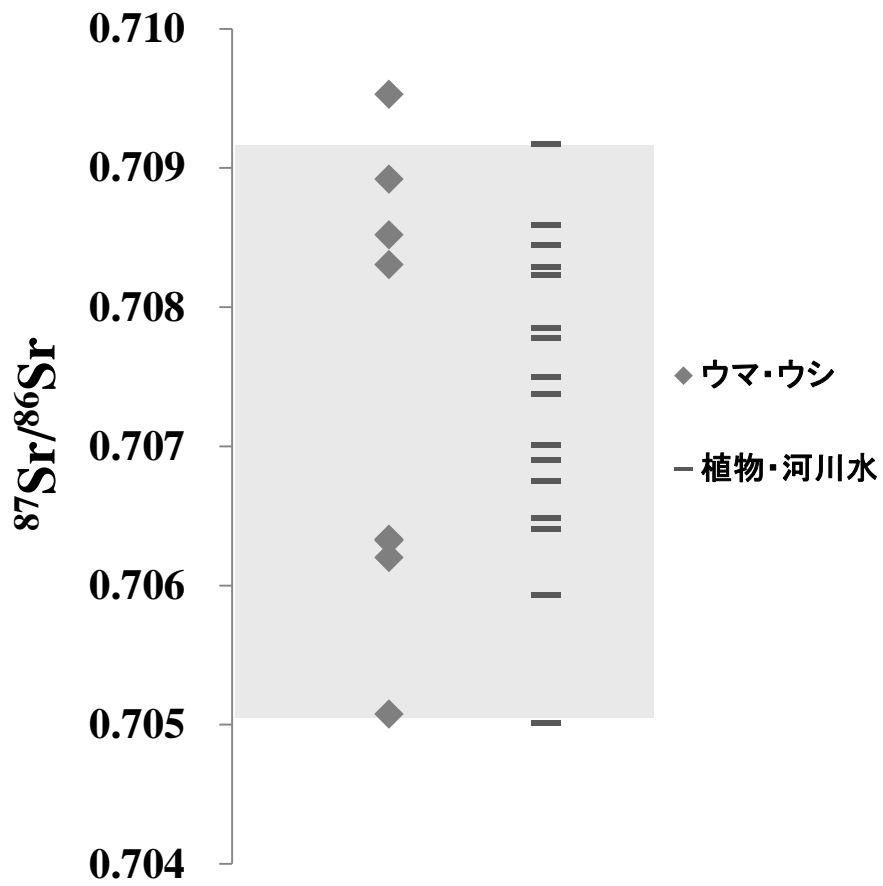


図 22. 由比ヶ浜南遺跡出土馬と鎌倉市周辺域の植物・河川水のストロンチウム同位体比

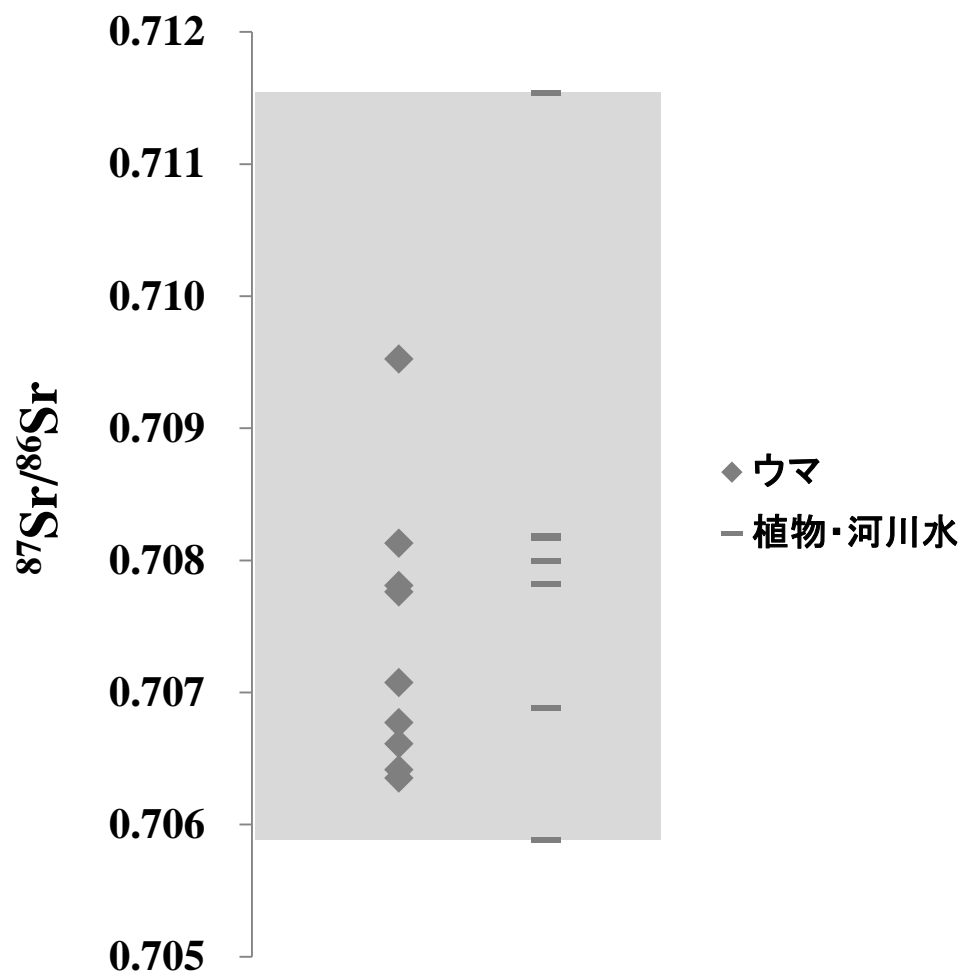


図 23. 博多遺跡出土馬と鎌倉市周辺域の植物・河川水のストロンチウム同位体比

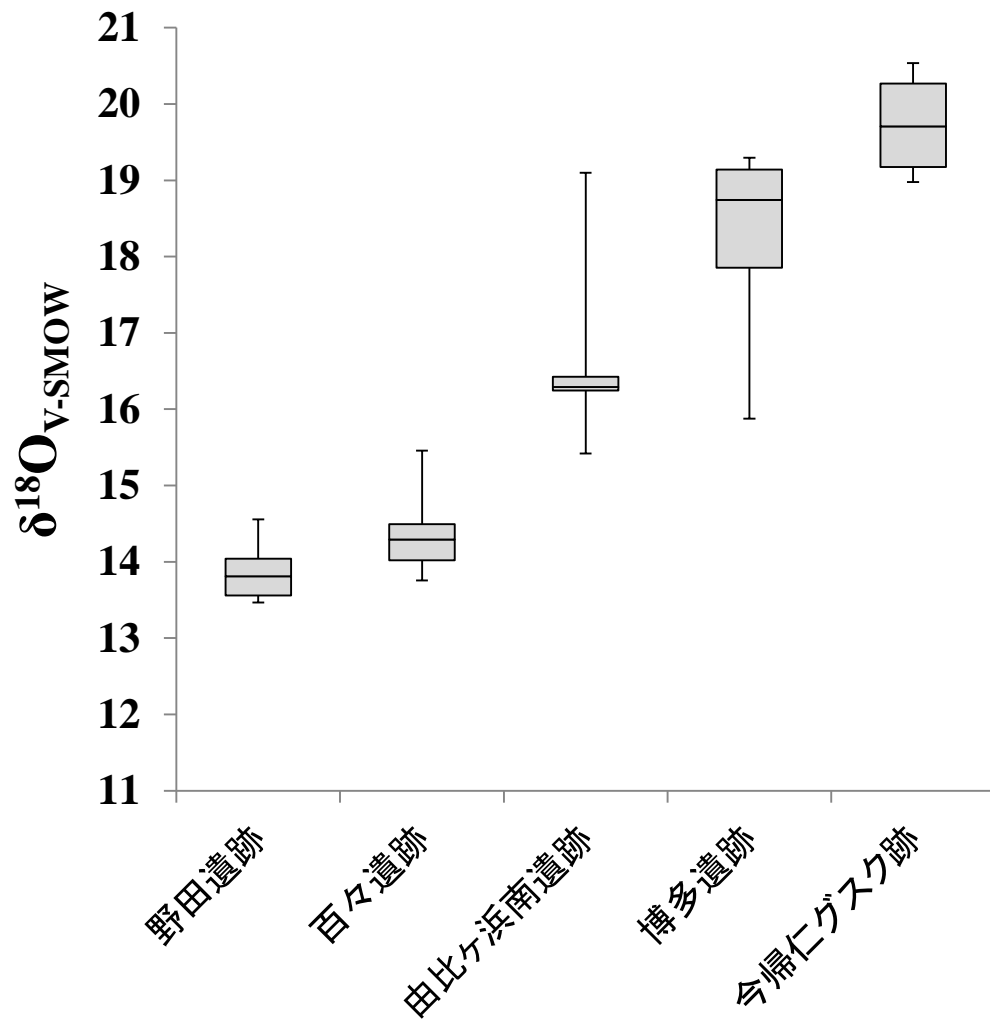


図 24. 日本列島における遺跡出土馬の酸素同位体比

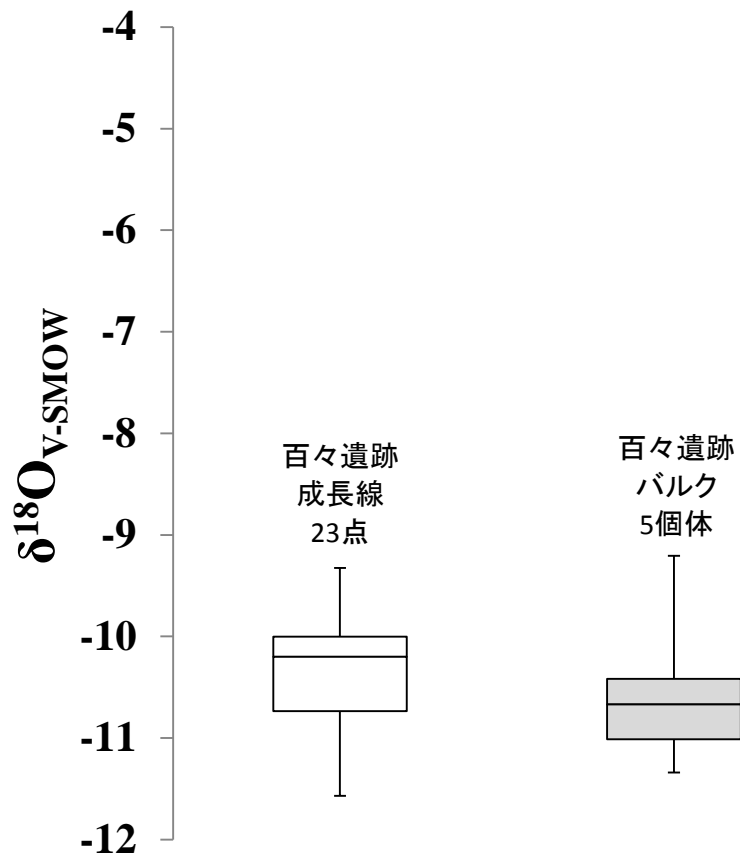


図 25. 百々遺跡出土ウマの成長線サンプルおよびバルクサンプルの酸素同位体比

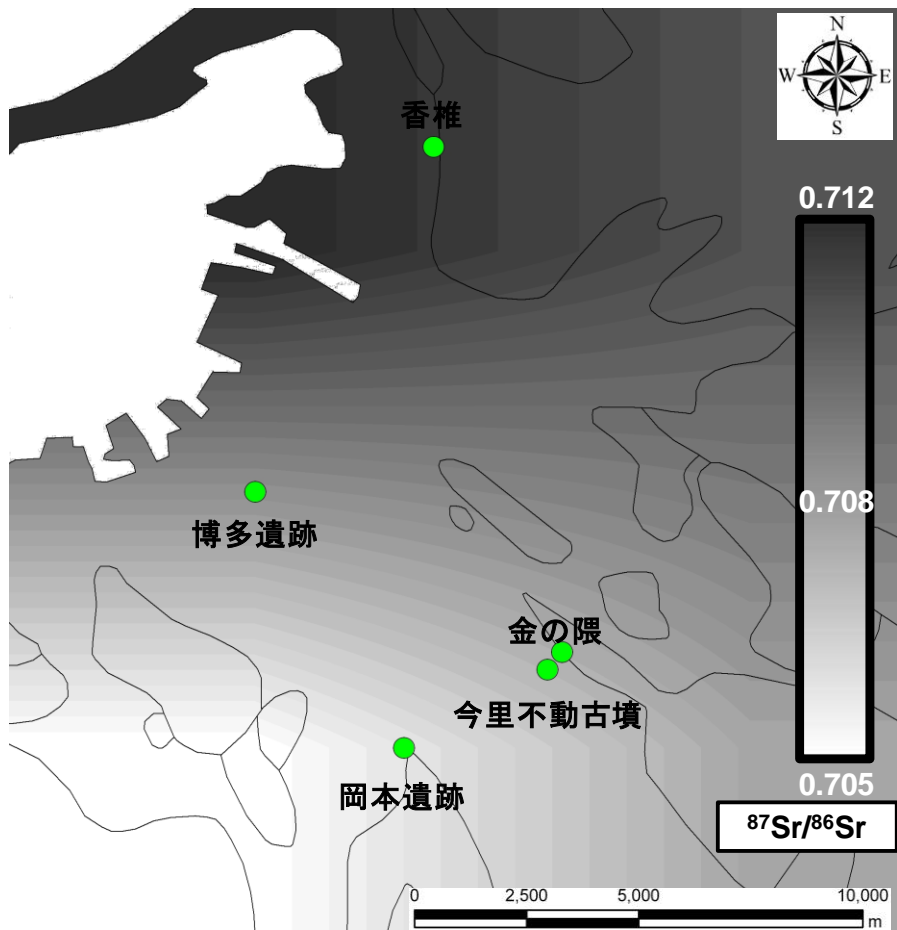


図 26. 現生植物から推定された博多遺跡群周辺のストロンチウム同位体比の分布

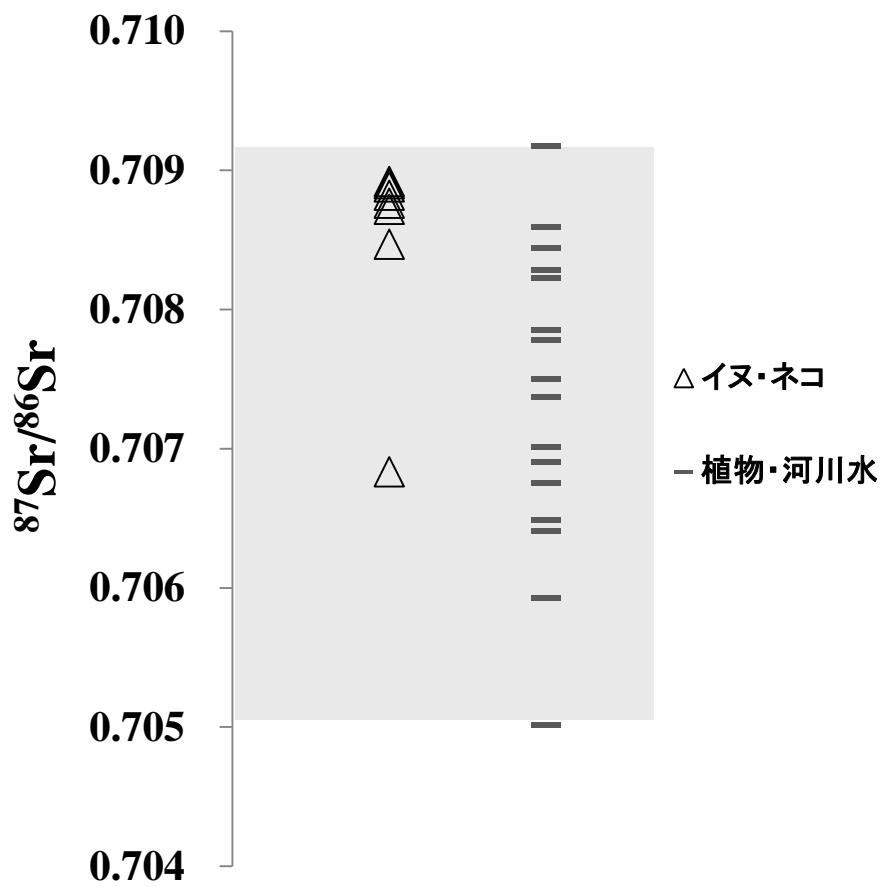


図 27. 由比ヶ浜南遺跡出土の在地型動物と鎌倉市周辺域の植物・河川水のストロンチウム同位体比

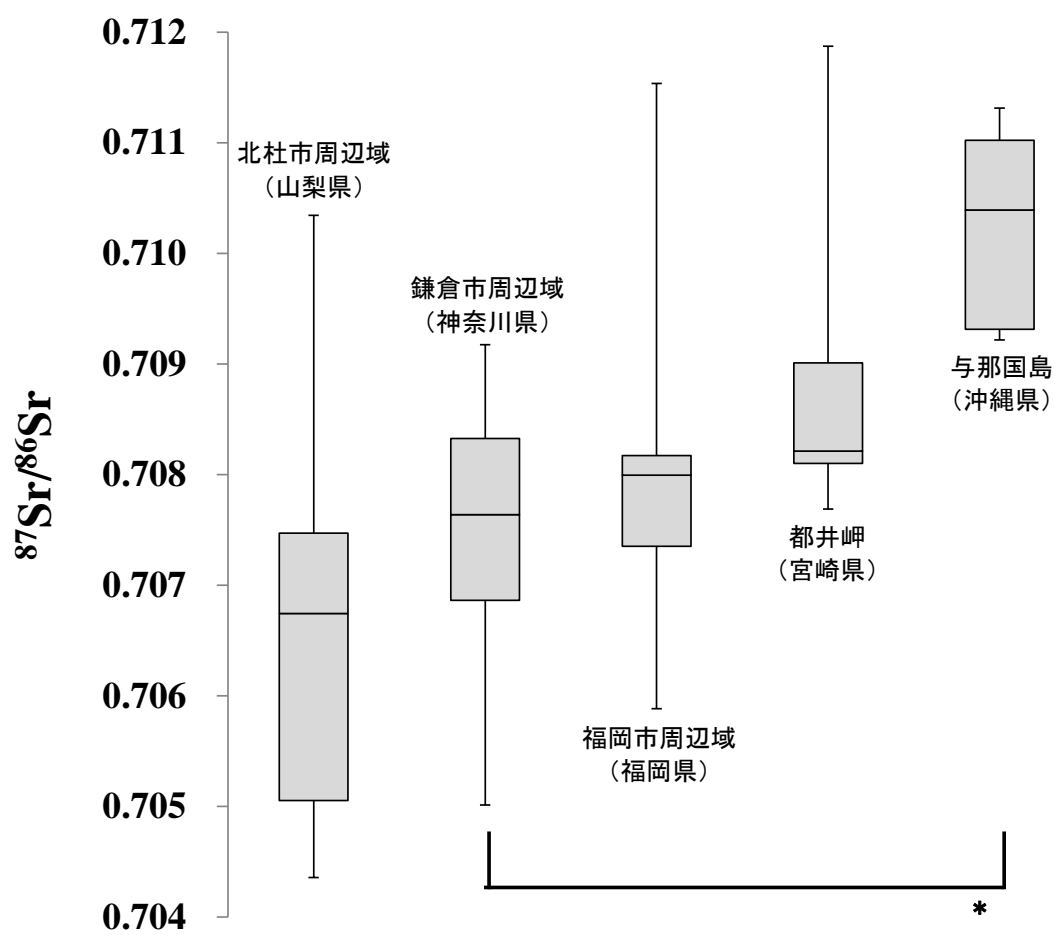


図 28. 日本列島における植物および水のストロンチウム同位体比

*: 平均値の 95% 有意水準、 $P < 0.05$

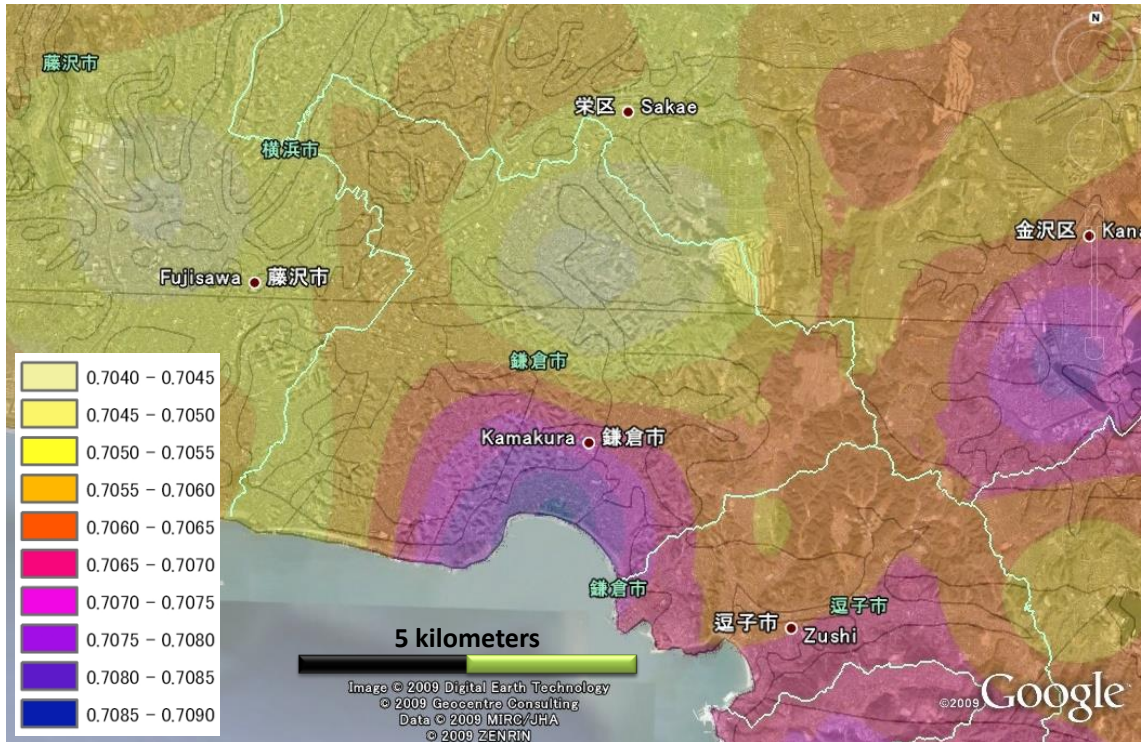


図 29. 鎌倉市周辺域における植物のストロンチウム同位体比地図

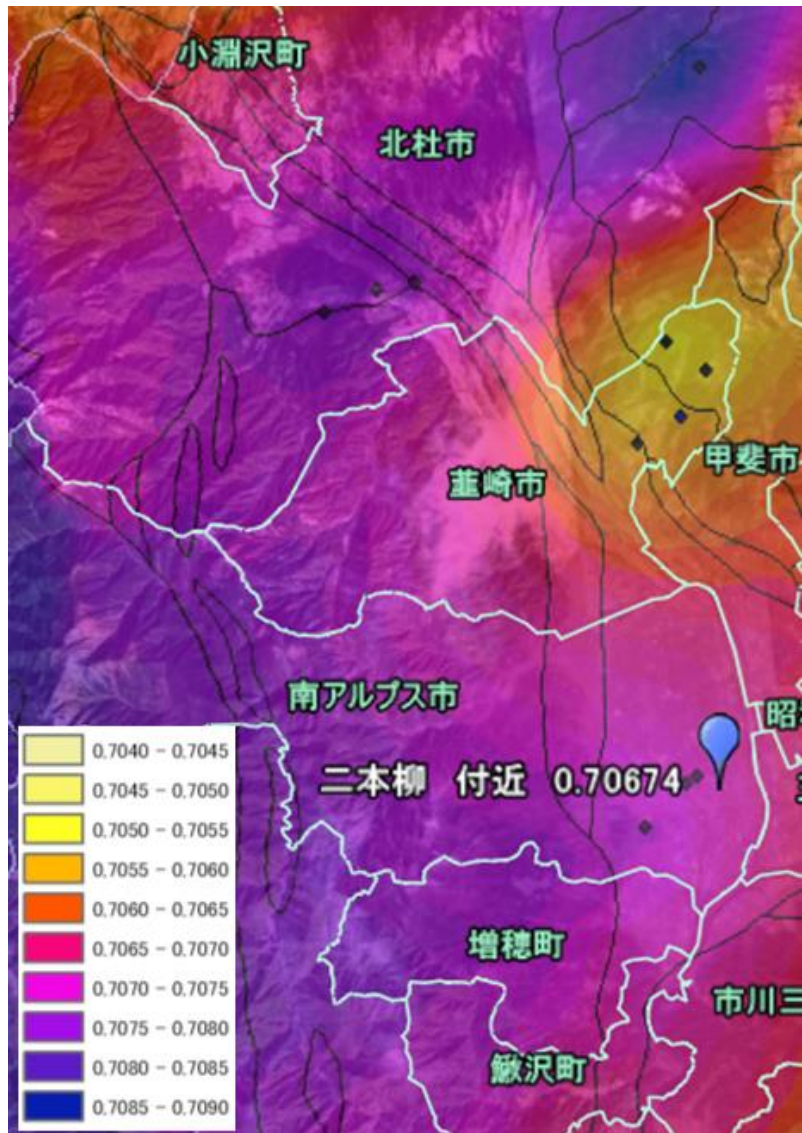


図 30. 北杜市周辺域における植物のストロンチウム同位体比地図

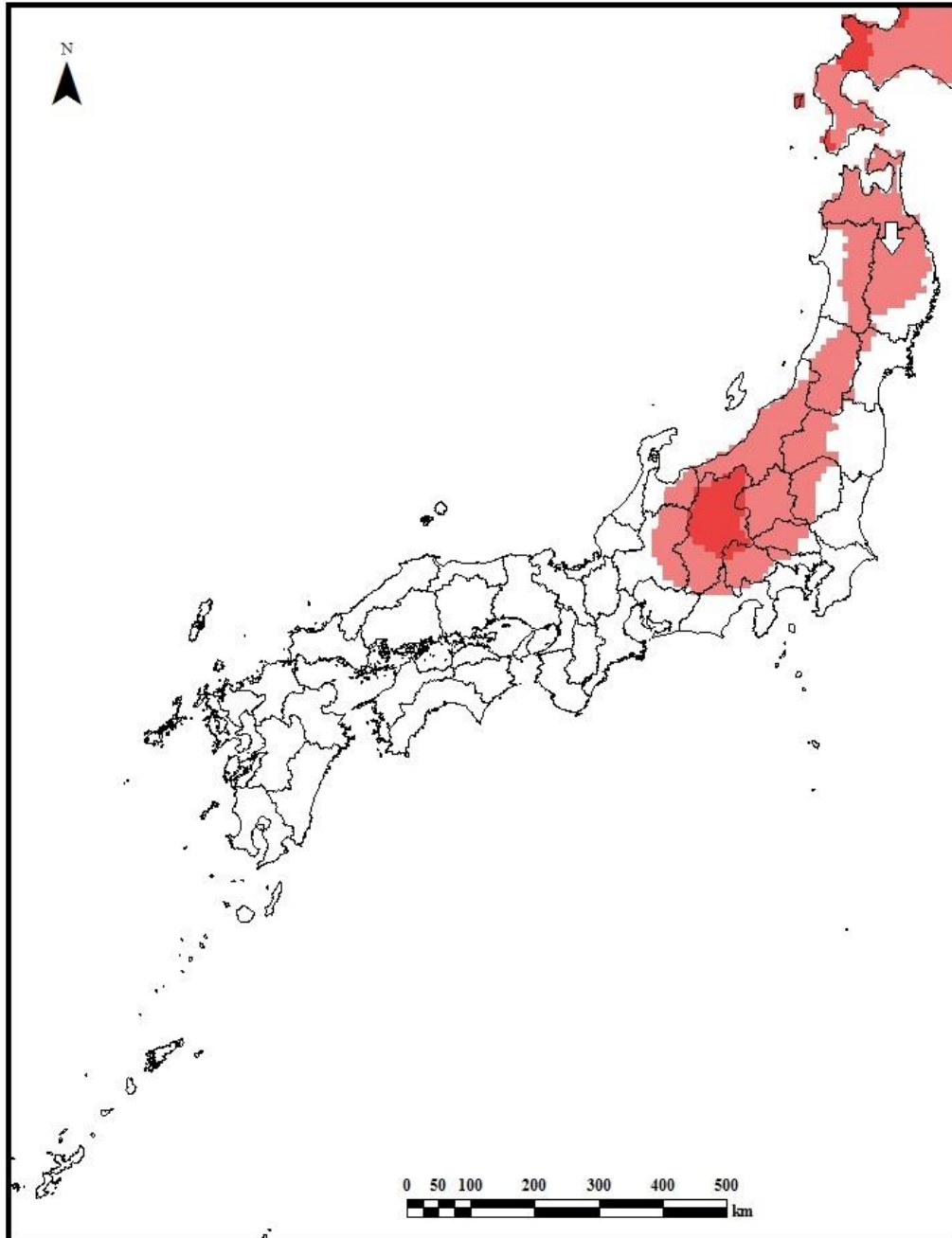


図 31. 酸素同位体比に基づく Noda01 の推定産地
濃色：1 標準偏差、淡色：2 標準偏差. 矢印はサンプリング地点

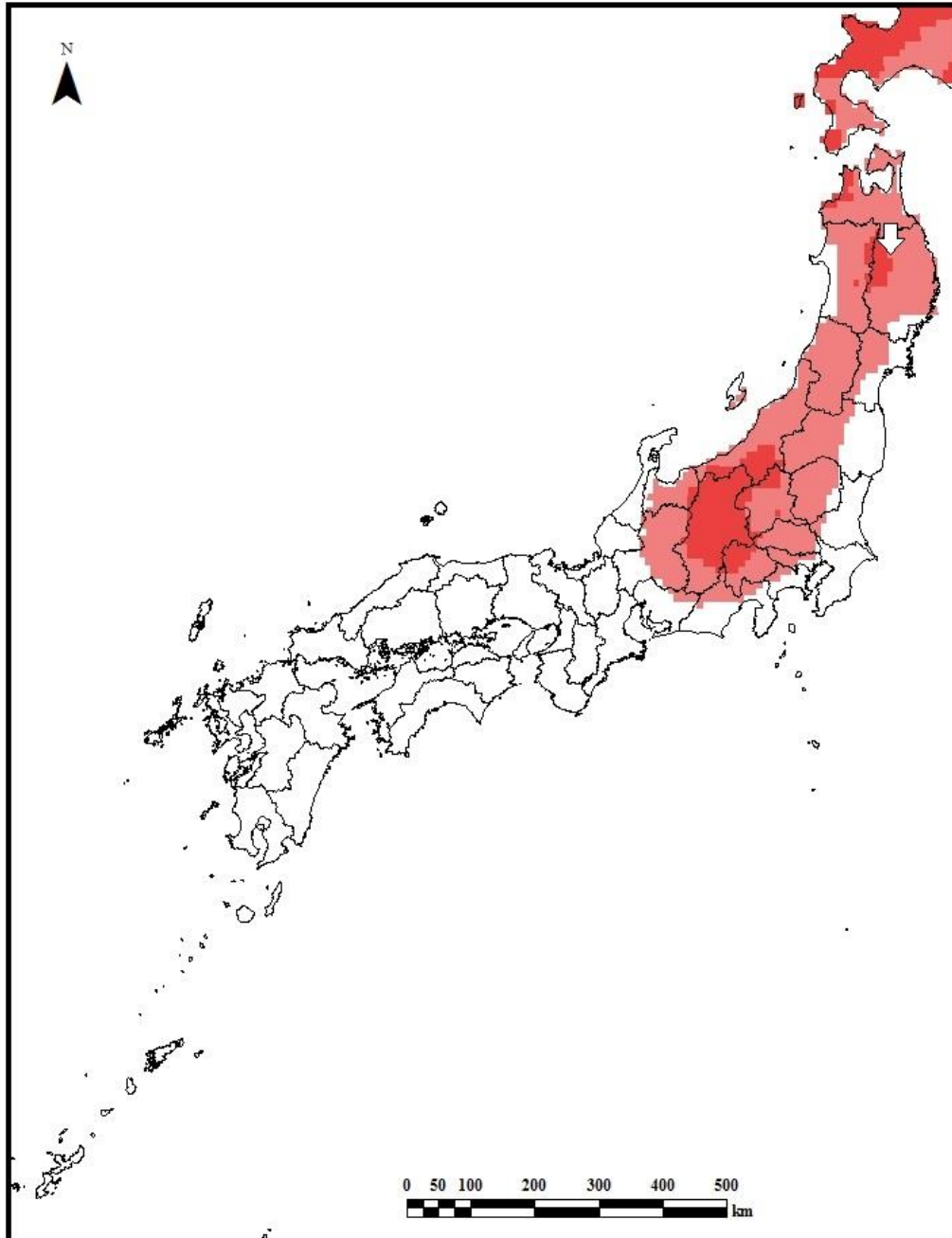


図 32. 酸素同位体比に基づく Noda02 の推定産地
濃色：1 標準偏差、淡色：2 標準偏差. 矢印はサンプリング地点

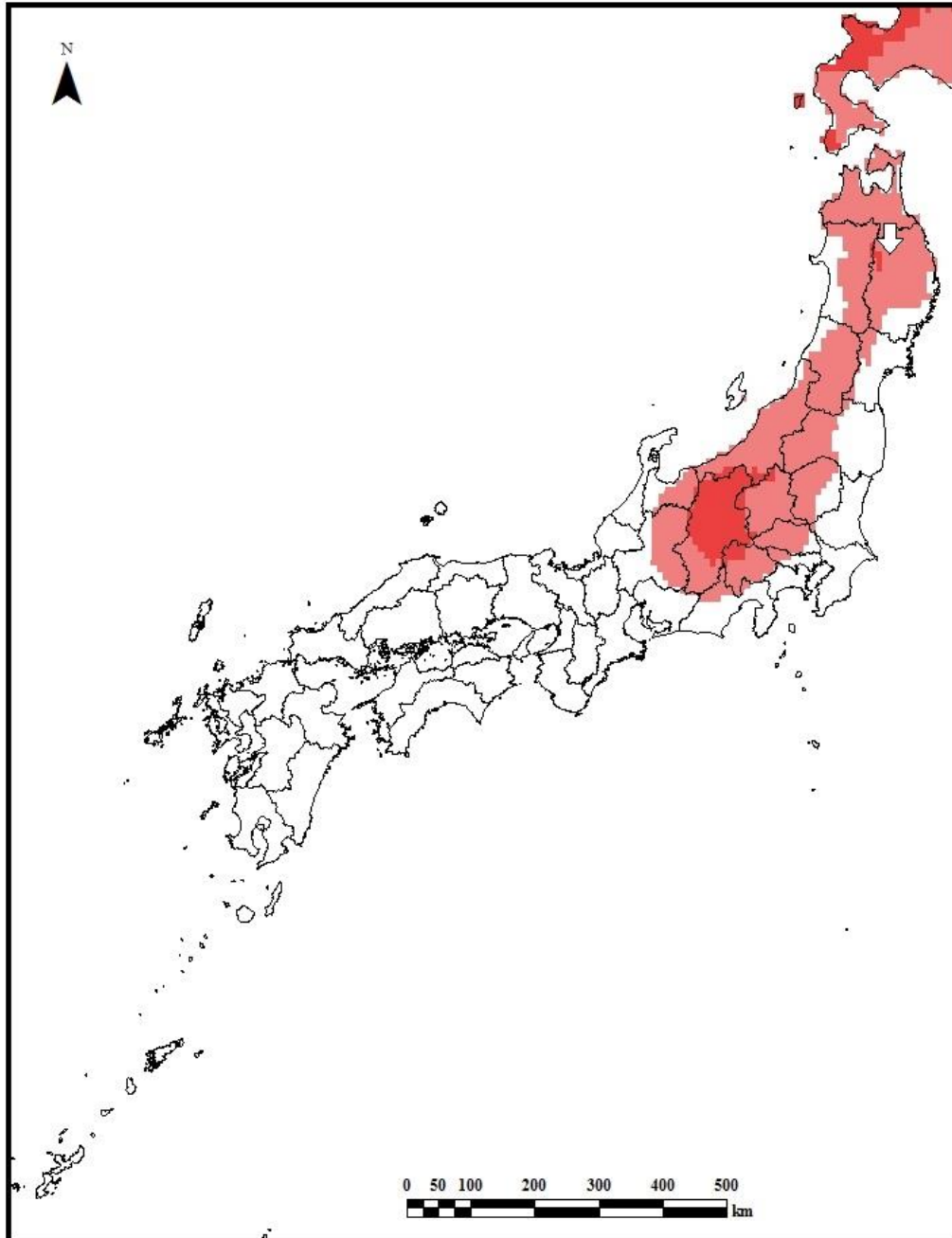


図 33. 酸素同位体比に基づく Noda03 の推定産地
濃色：1 標準偏差、淡色：2 標準偏差. 矢印はサンプリング地点

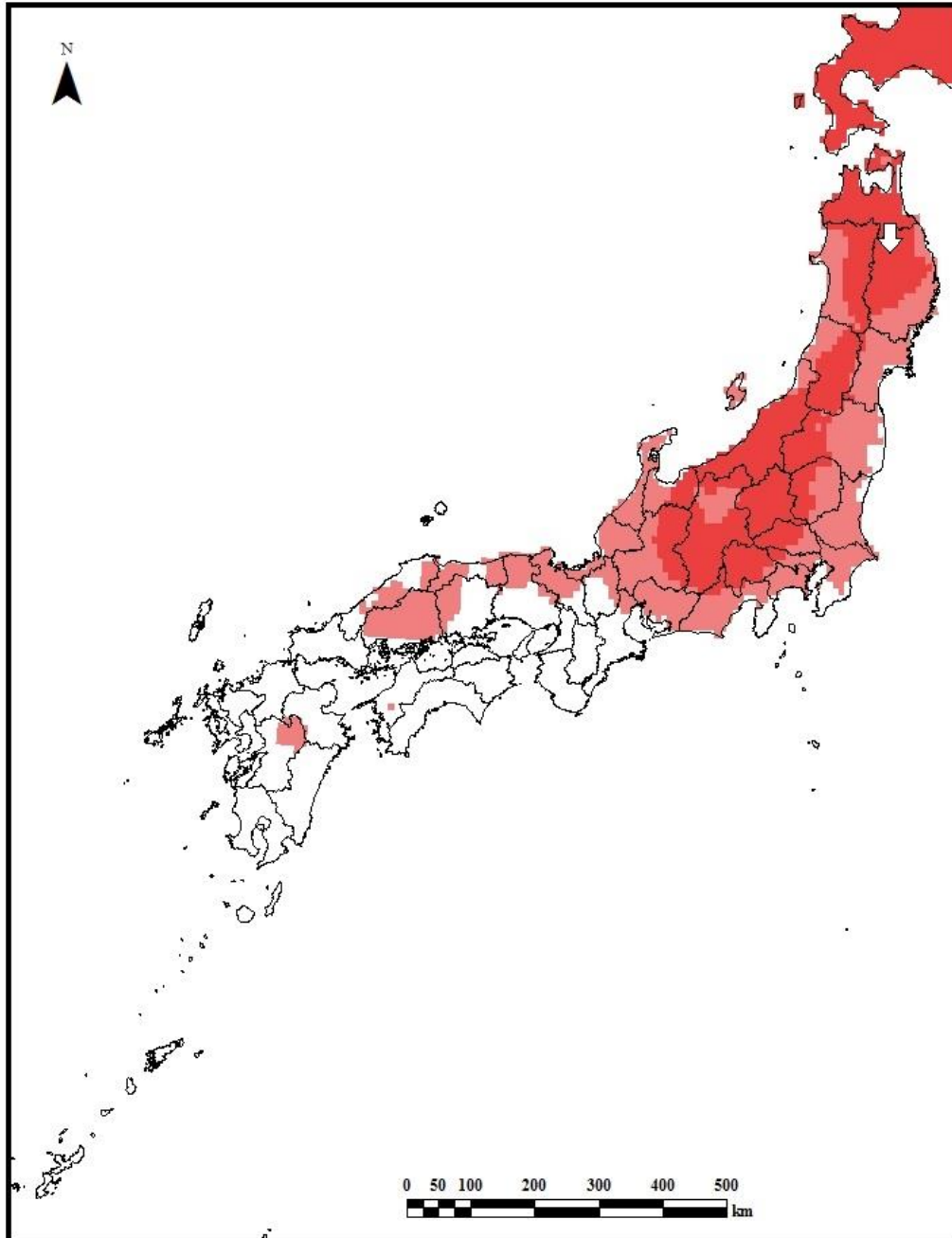


図 34. 酸素同位体比に基づく Noda04 の推定産地
濃色：1 標準偏差、淡色：2 標準偏差. 矢印はサンプリング地点

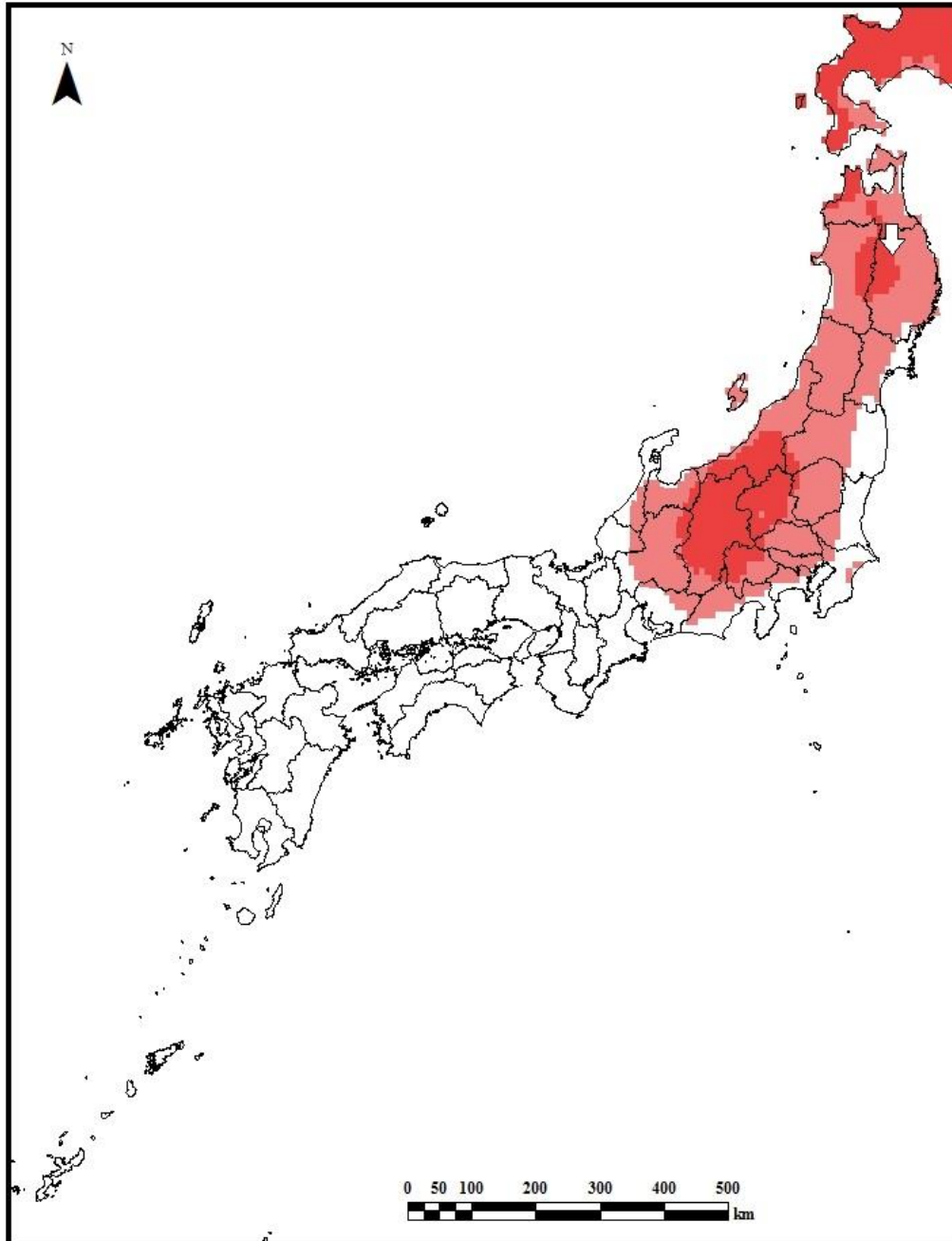


図 35. 酸素同位体比に基づく Noda05 の推定産地
濃色：1 標準偏差、淡色：2 標準偏差. 矢印はサンプリング地点

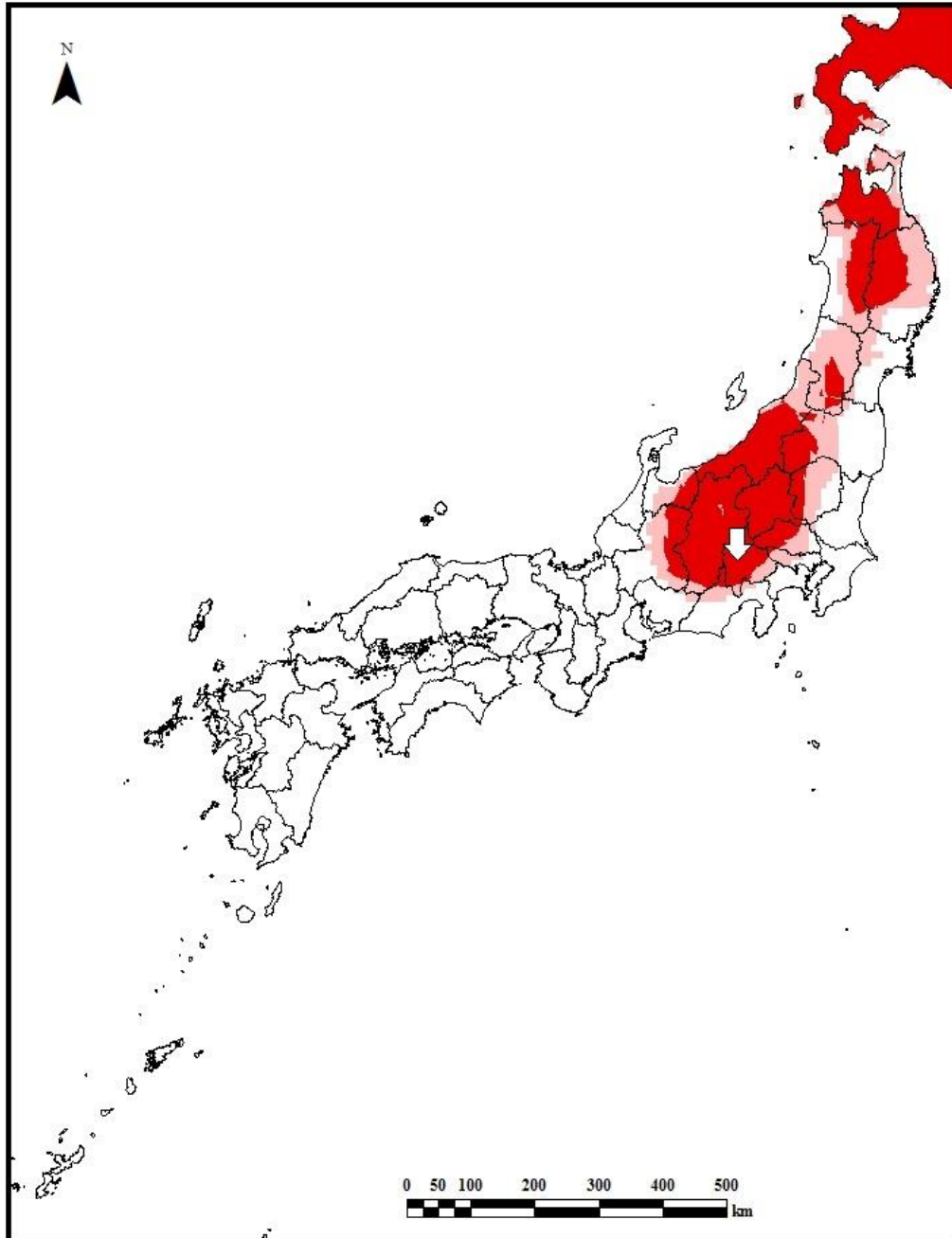


図 36. 酸素同位体比に基づく Doudo01 の推定産地
濃色：1 標準偏差、淡色：2 標準偏差. 矢印はサンプリング地点

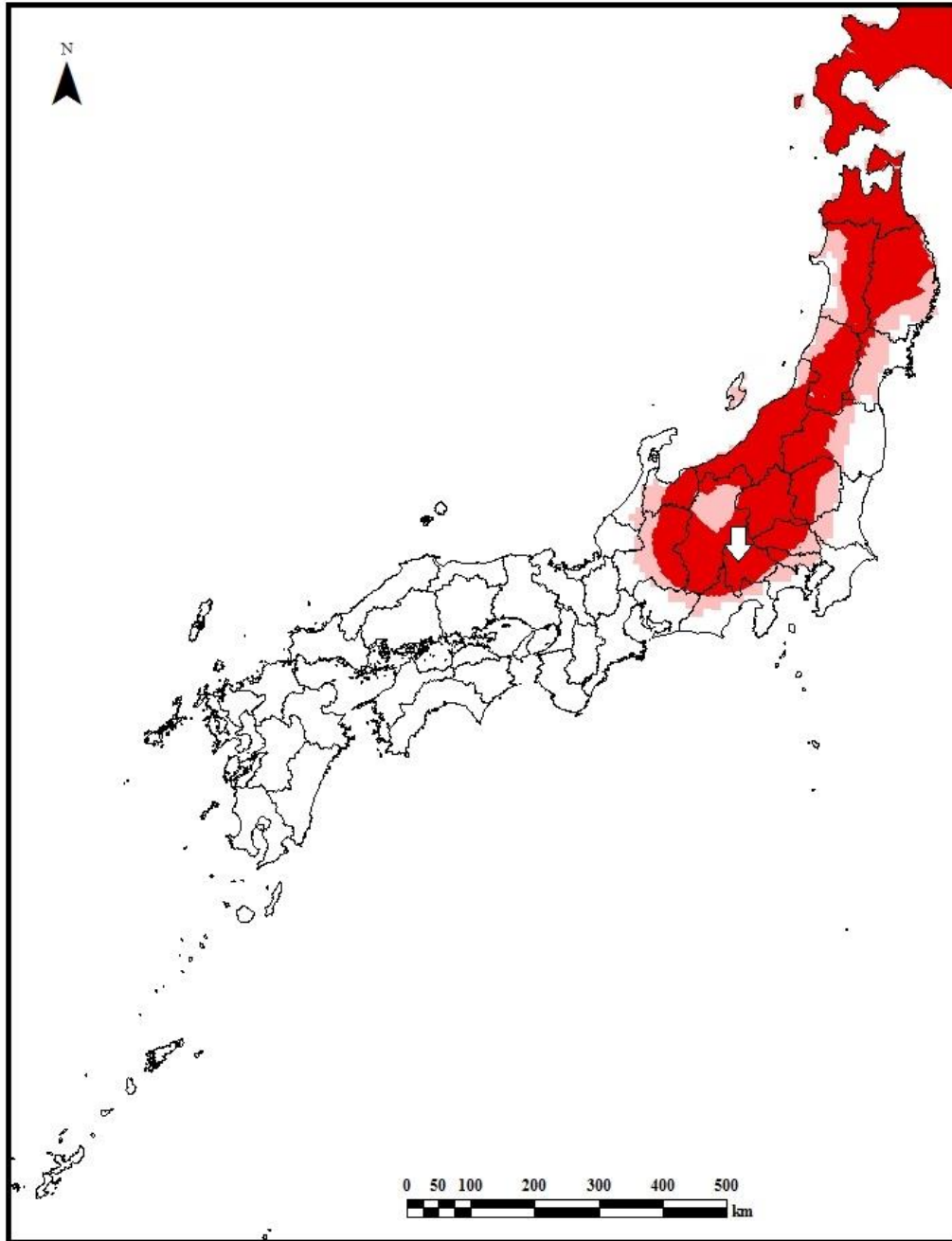


図 37. 酸素同位体比に基づく Doudo02 の推定産地
濃色：1 標準偏差、淡色：2 標準偏差. 矢印はサンプリング地点

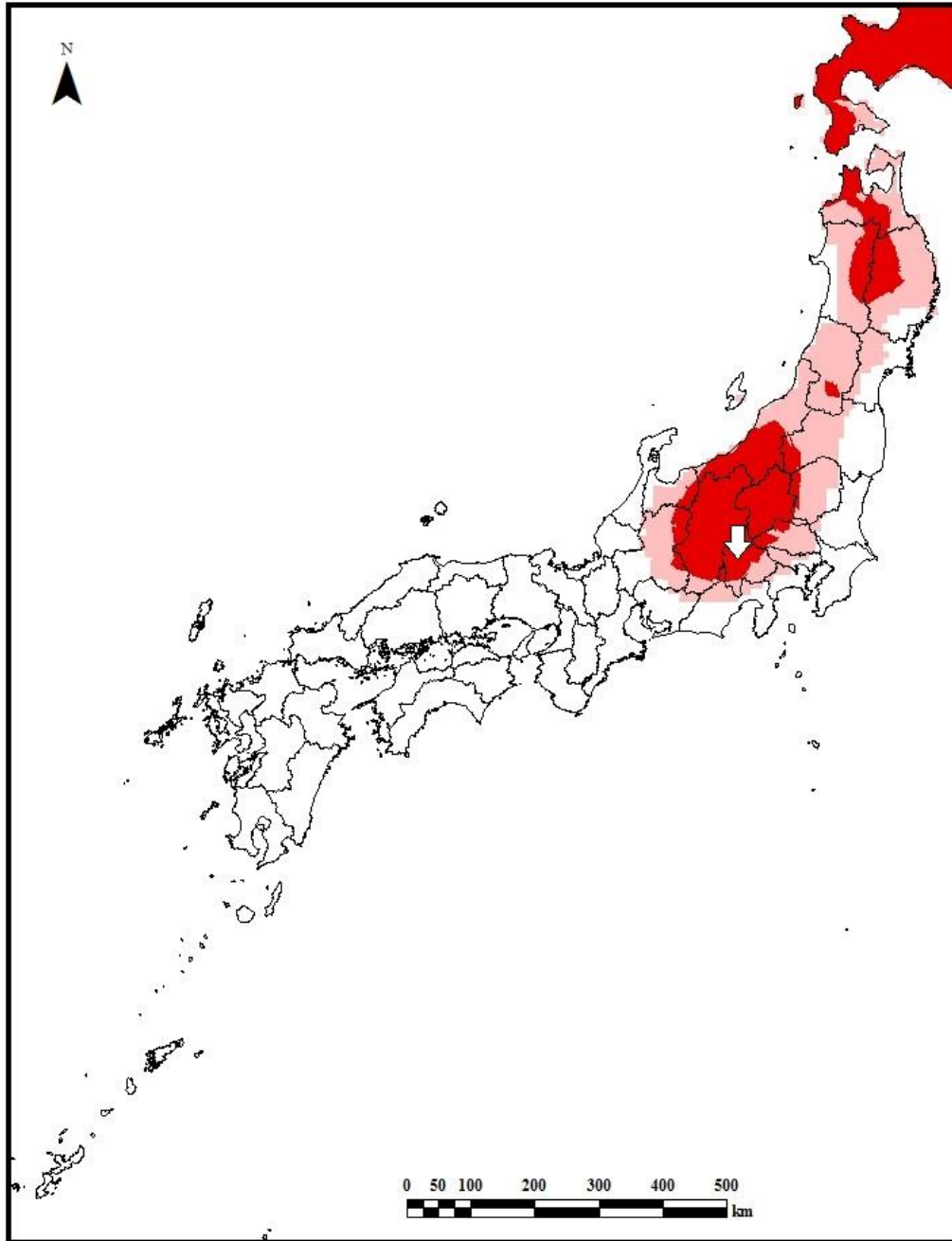


図 38. 酸素同位体比に基づく Doudo03 の推定産地
濃色：1 標準偏差、淡色：2 標準偏差. 矢印はサンプリング地点

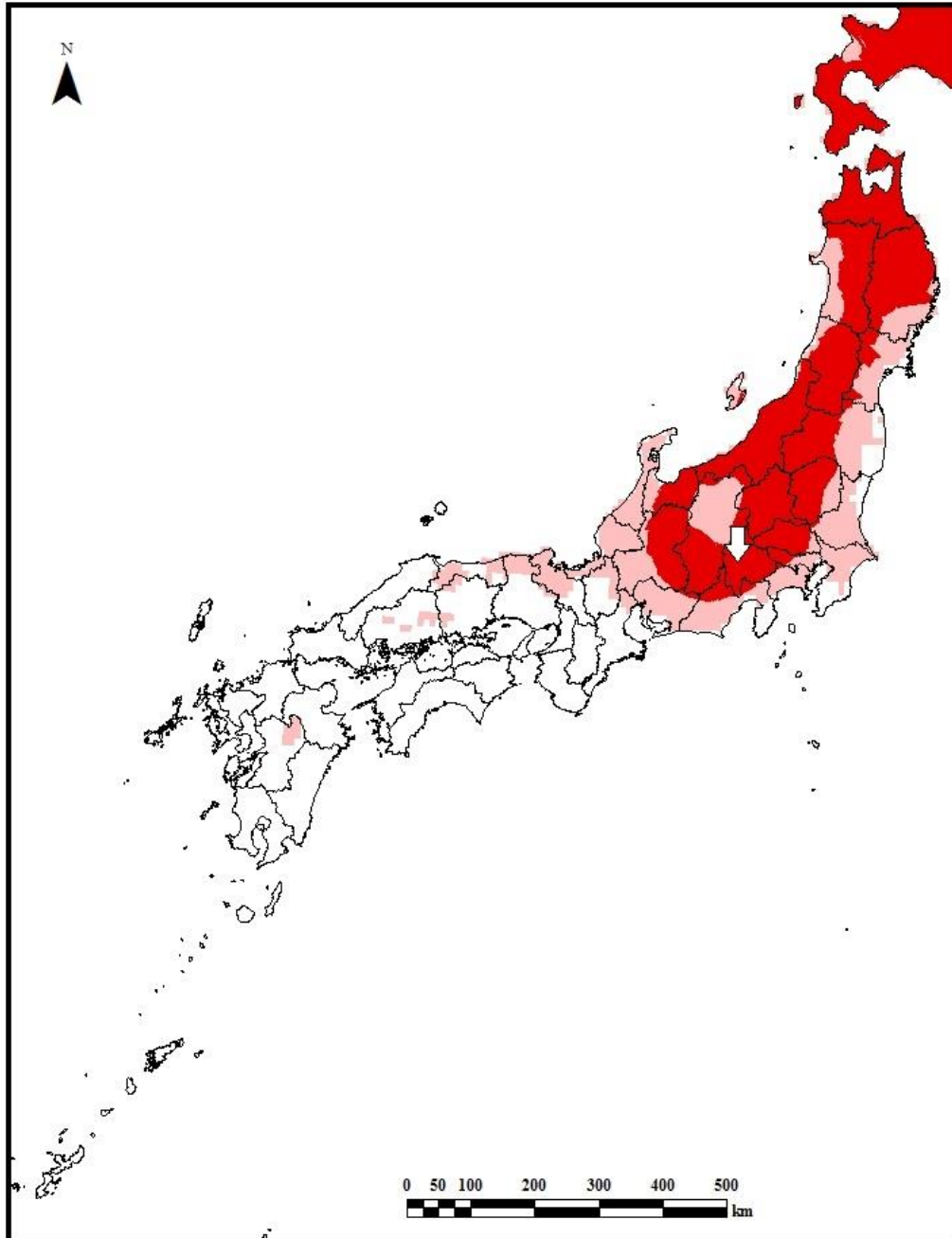


図 39. 酸素同位体比に基づく Doudo04 の推定産地
濃色：1 標準偏差、淡色：2 標準偏差. 矢印はサンプリング地点

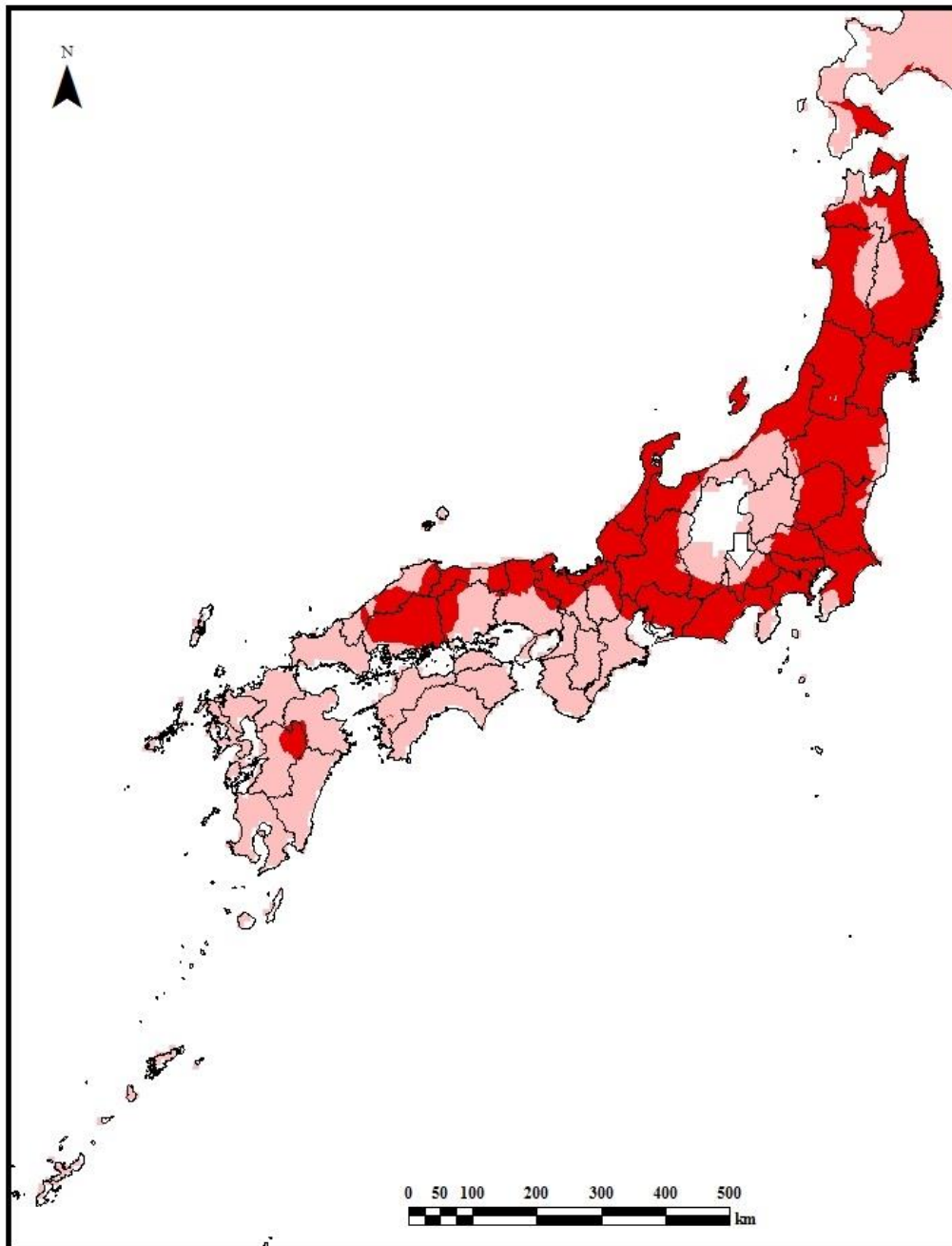


図 40. 酸素同位体比に基づく Doudo05 の推定産地
濃色：1 標準偏差、淡色：2 標準偏差. 矢印はサンプリング地点

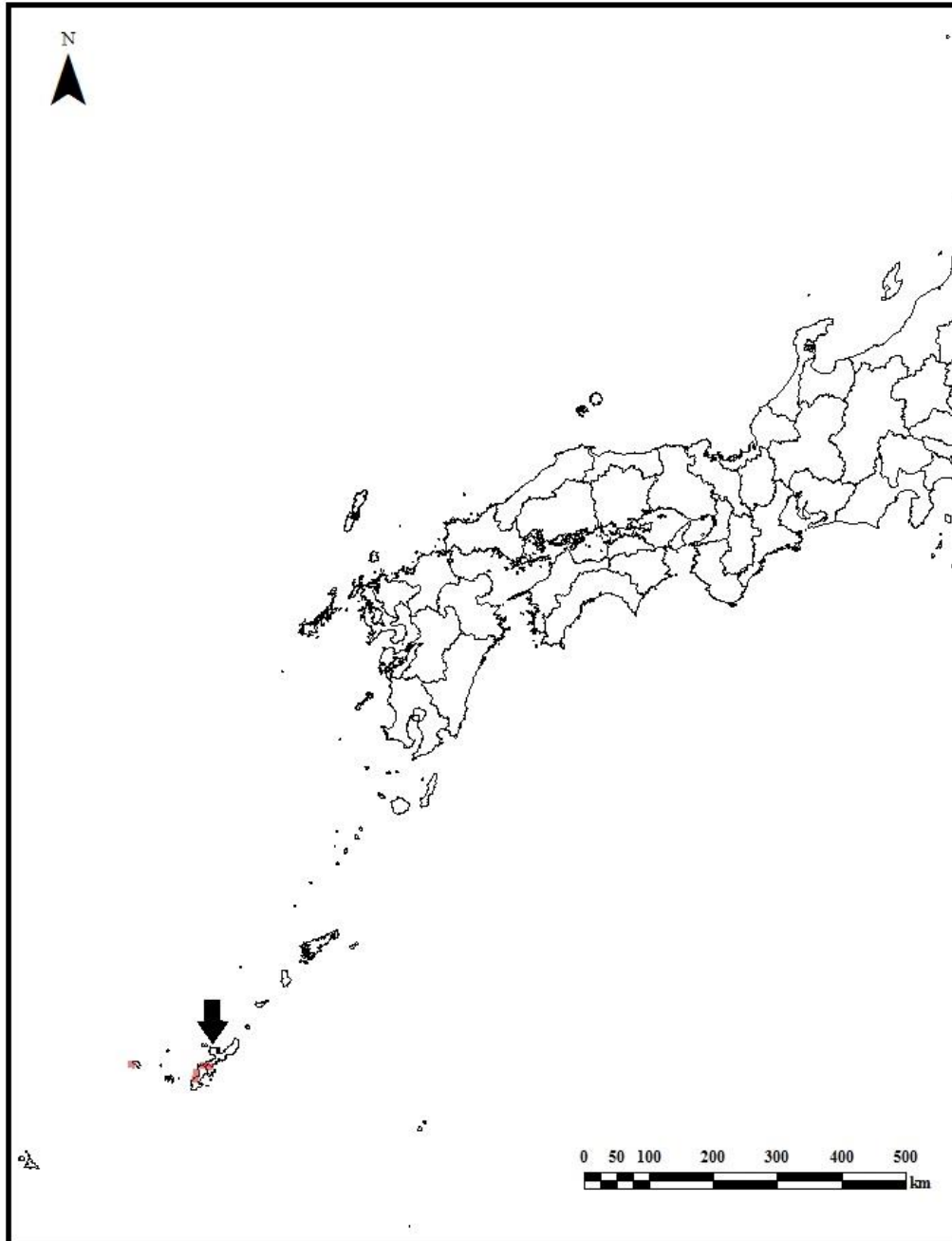


図 41. 酸素同位体比に基づく Nakijin01 の推定産地
濃色：1 標準偏差、淡色：2 標準偏差. 矢印はサンプリング地点

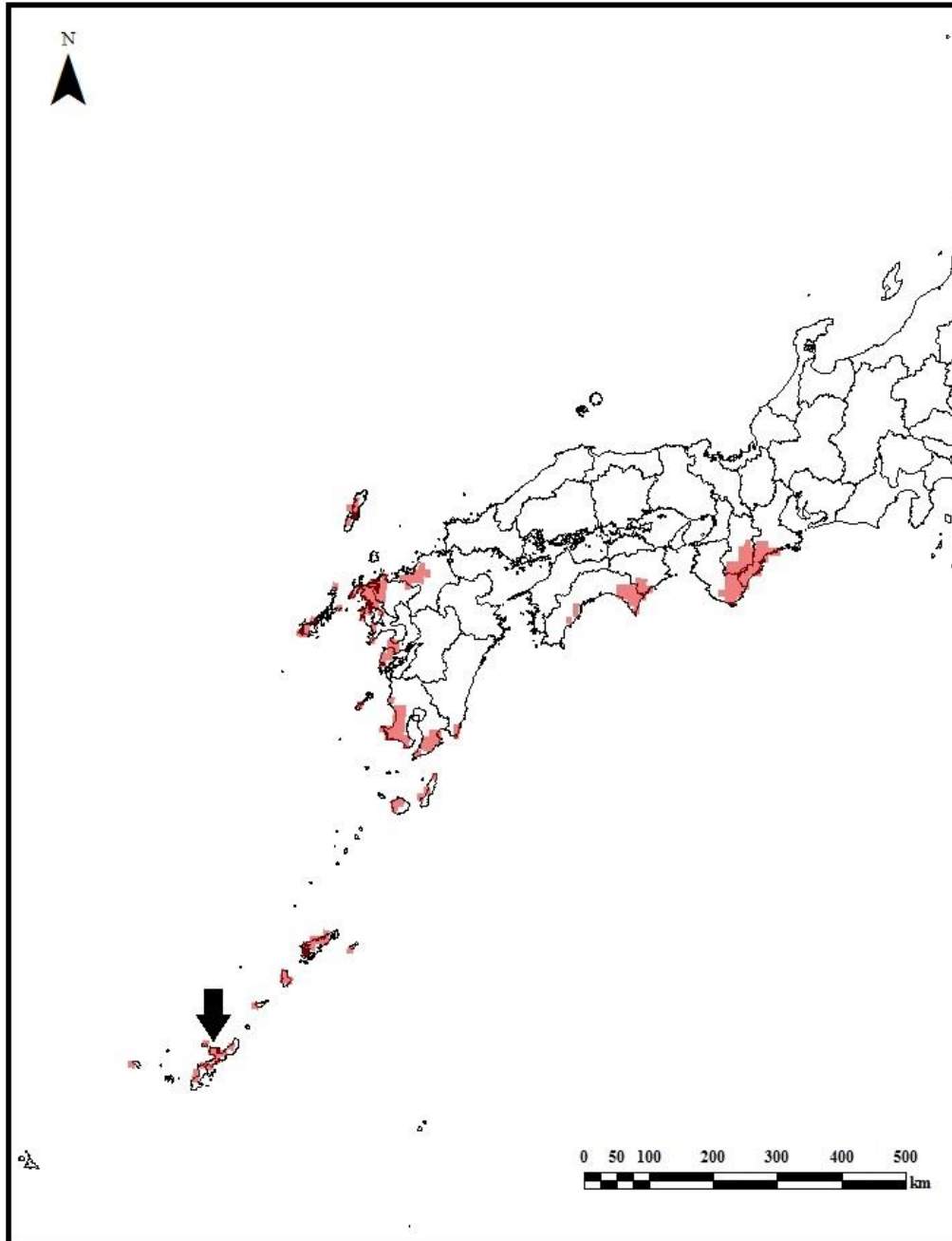


図 42. 酸素同位体比に基づく Nakijin02 の推定産地
濃色：1 標準偏差、淡色：2 標準偏差. 矢印はサンプリング地点

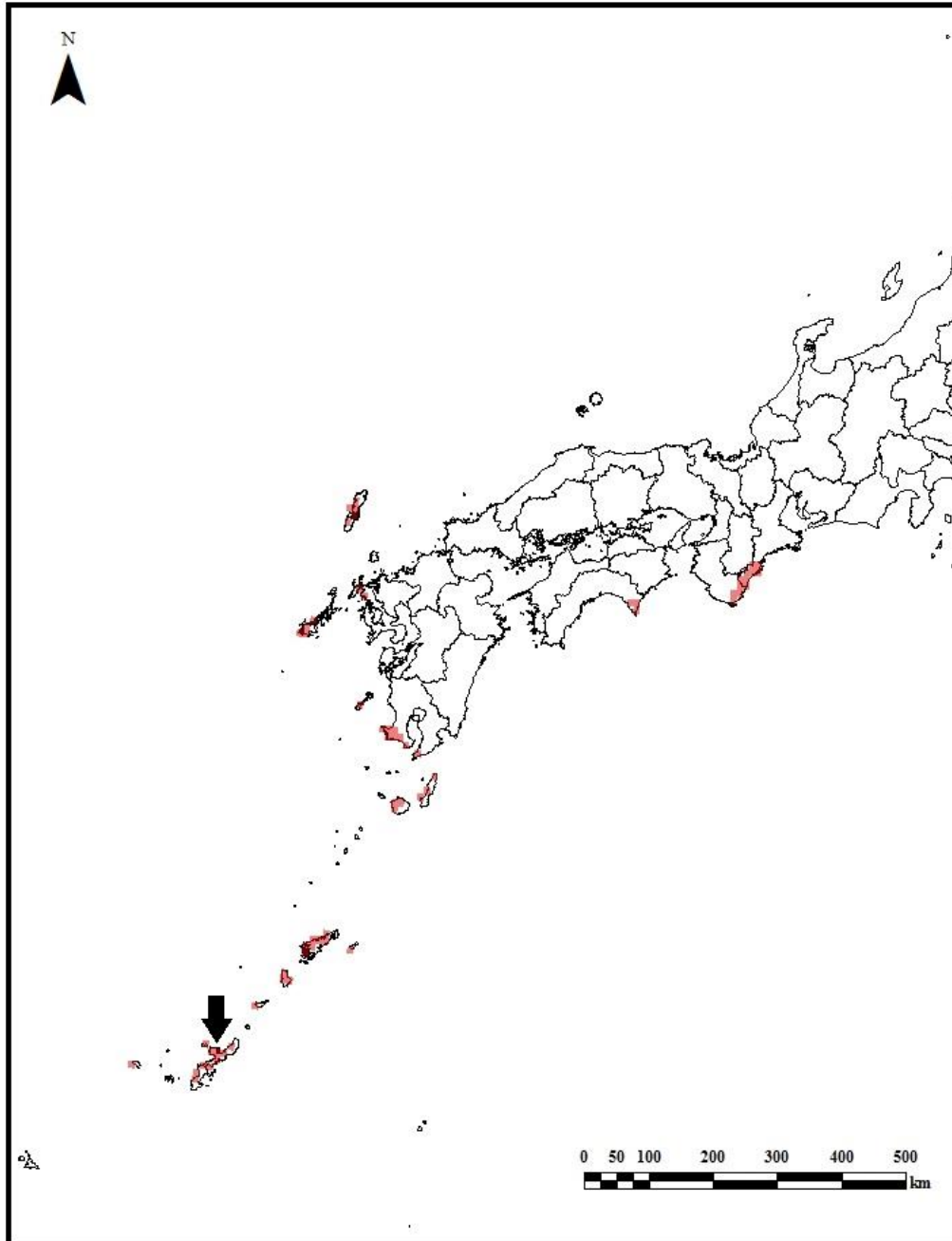


図 43. 酸素同位体比に基づく Nakijin03 の推定産地
濃色：1 標準偏差、淡色：2 標準偏差. 矢印はサンプリング地点

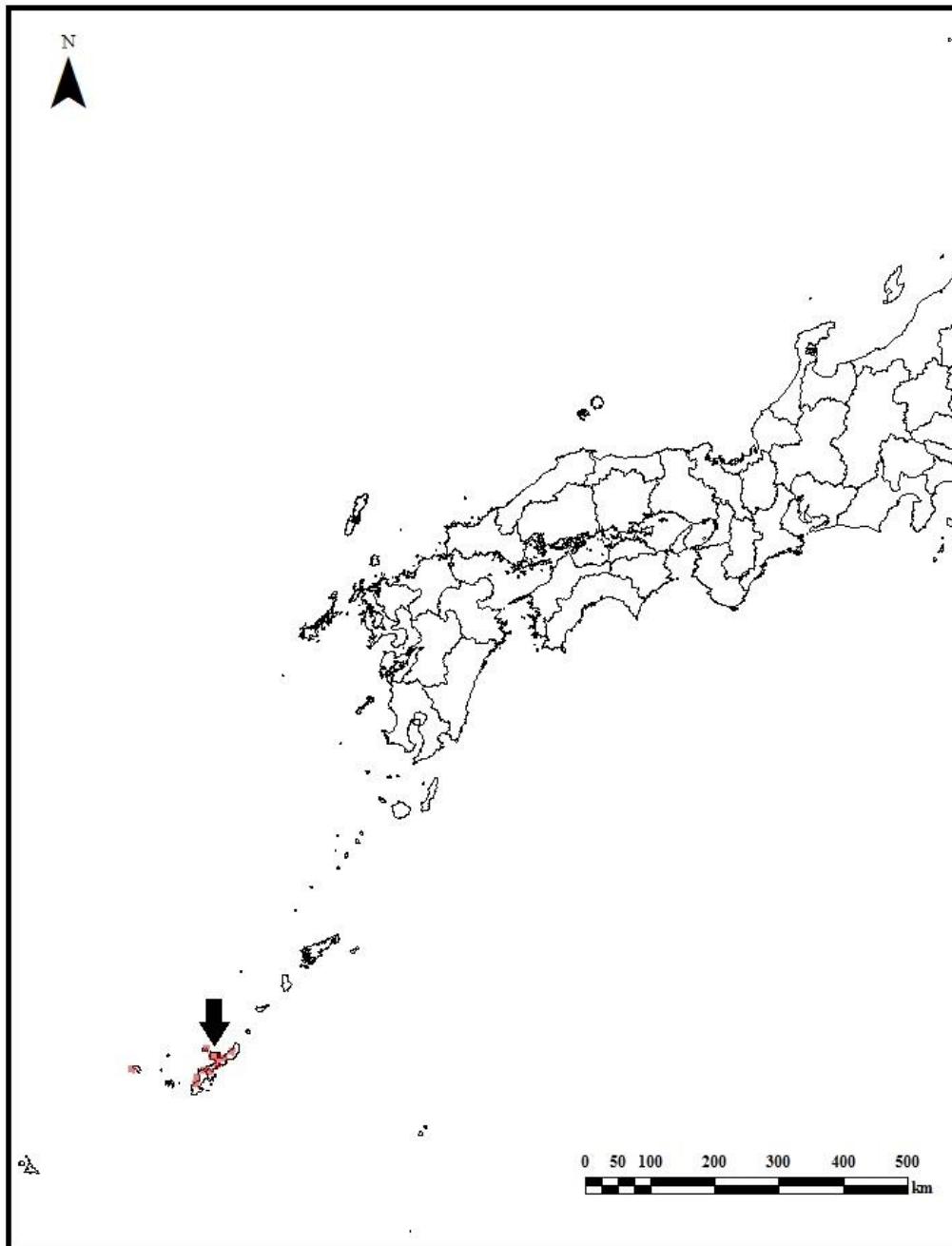


図 44. 酸素同位体比に基づく Nakijin04 の推定産地
濃色：1 標準偏差、淡色：2 標準偏差. 矢印はサンプリング地点

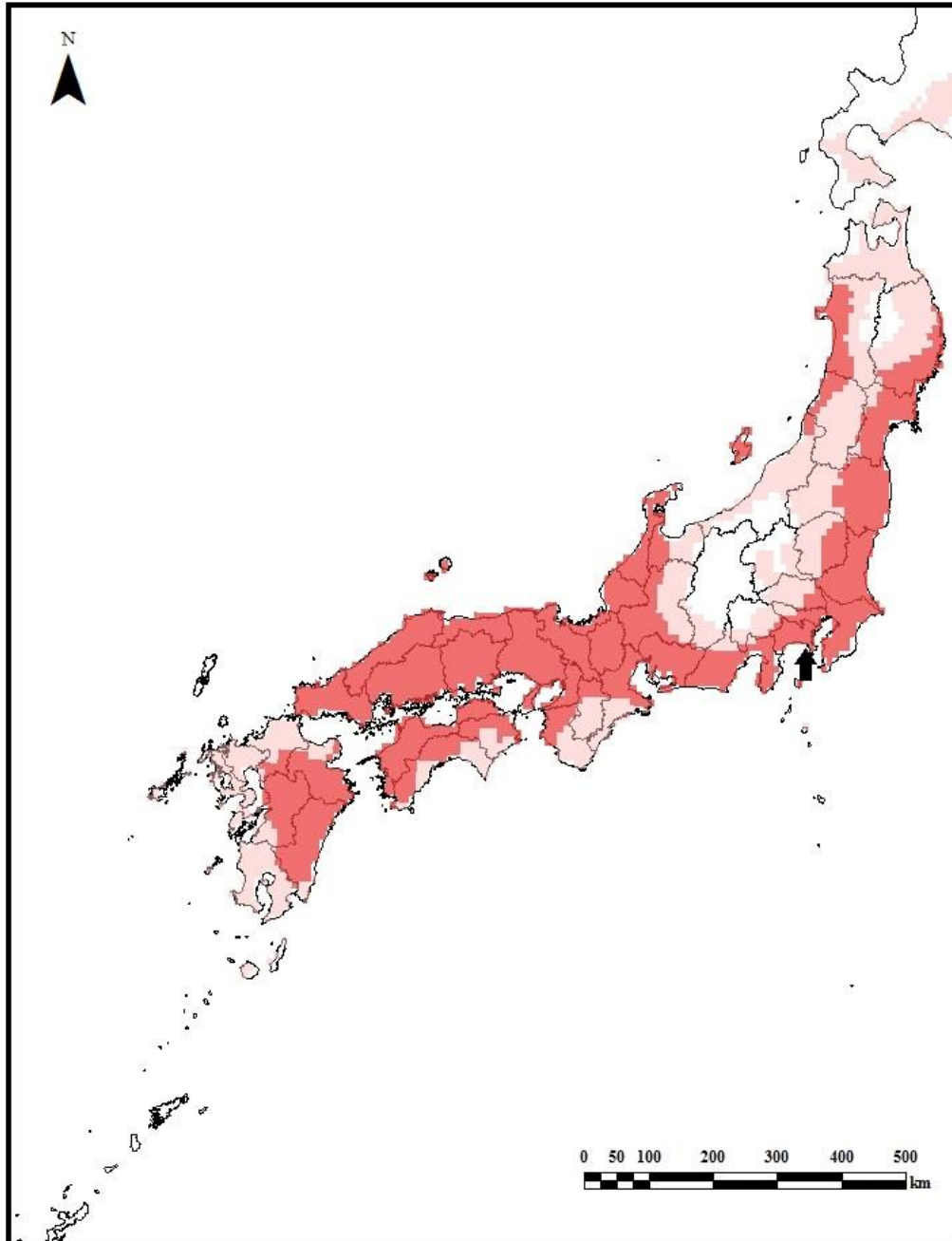


図 45. 酸素同位体比に基づく Yuigahama01 の推定産地
濃色：1 標準偏差、淡色：2 標準偏差. 矢印はサンプリング地点

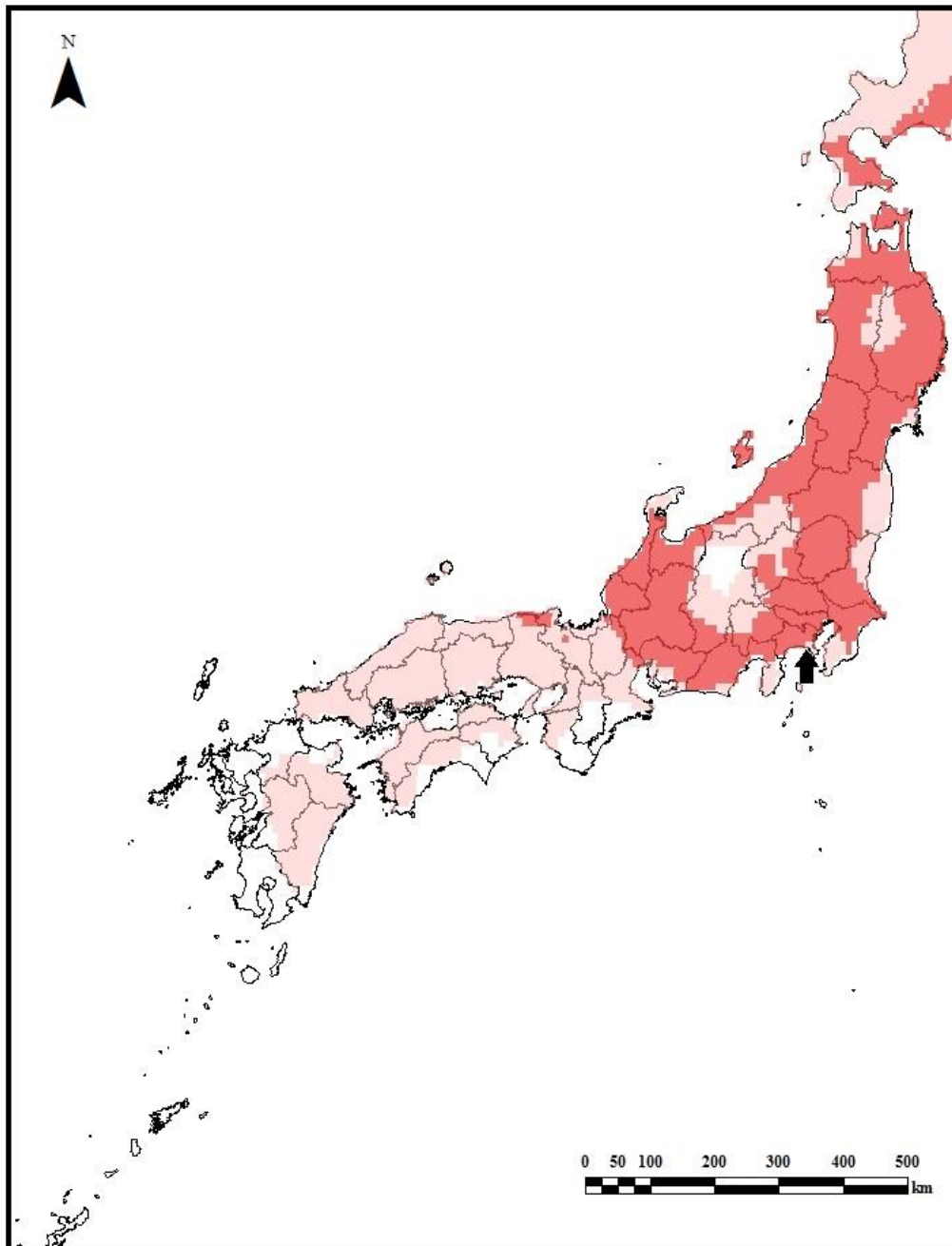


図 46. 酸素同位体比に基づく Yuigahama02 の推定産地
濃色：1 標準偏差、淡色：2 標準偏差. 矢印はサンプリング地点

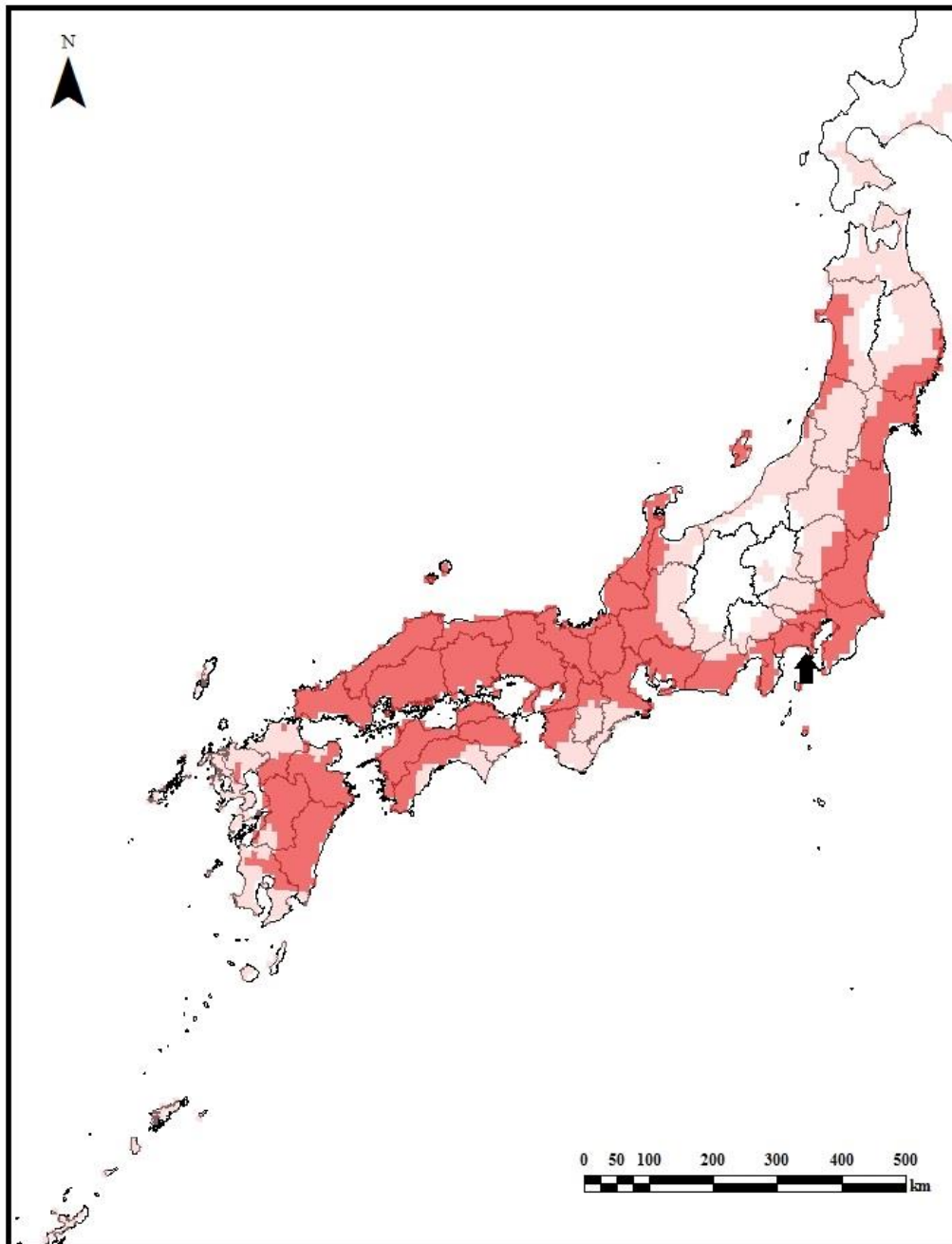


図 47. 酸素同位体比に基づく Yuigahama03 の推定産地
濃色：1 標準偏差、淡色：2 標準偏差. 矢印はサンプリング地点

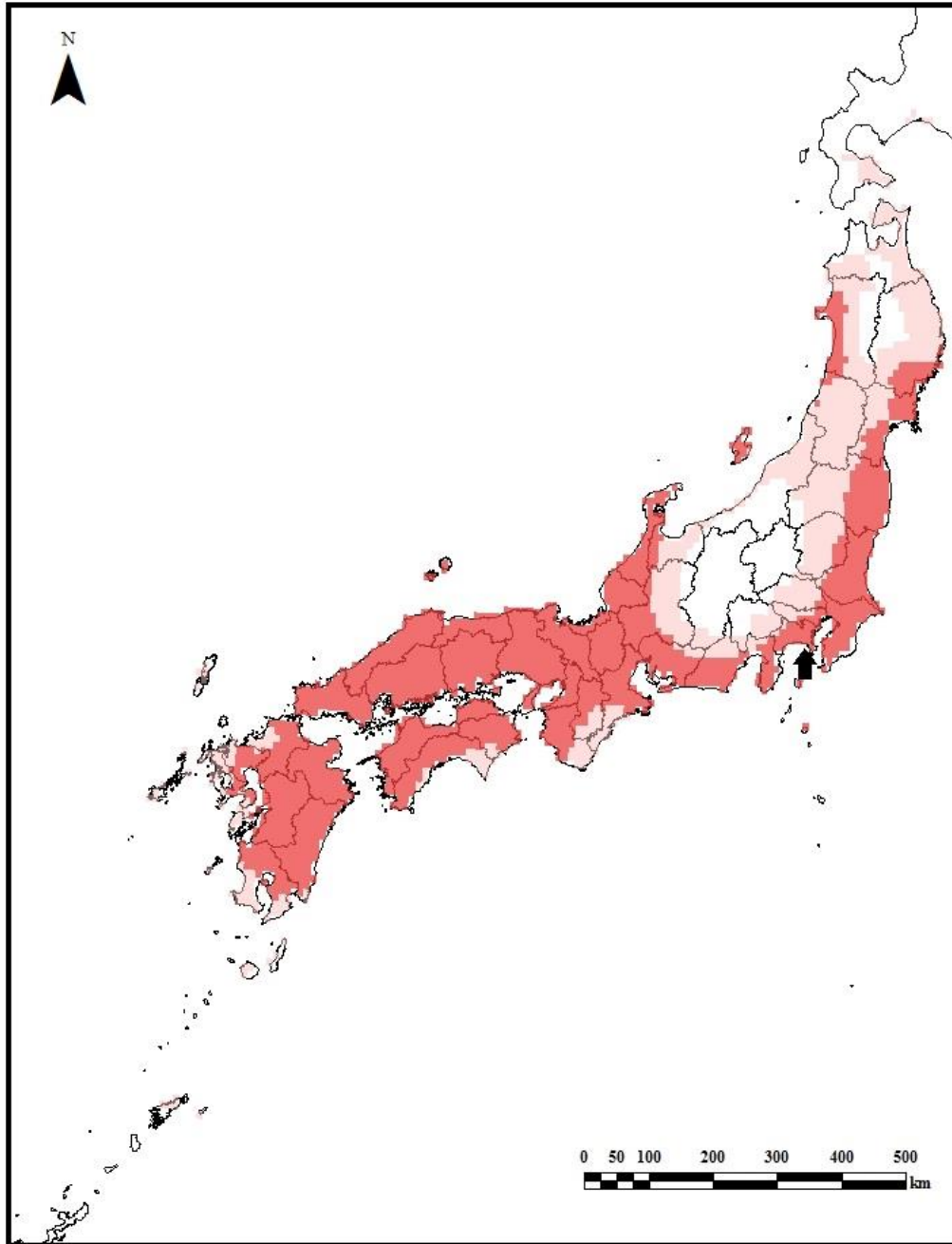


図 48. 酸素同位体比に基づく Yuigahama04 の推定産地
濃色：1 標準偏差、淡色：2 標準偏差. 矢印はサンプリング地点

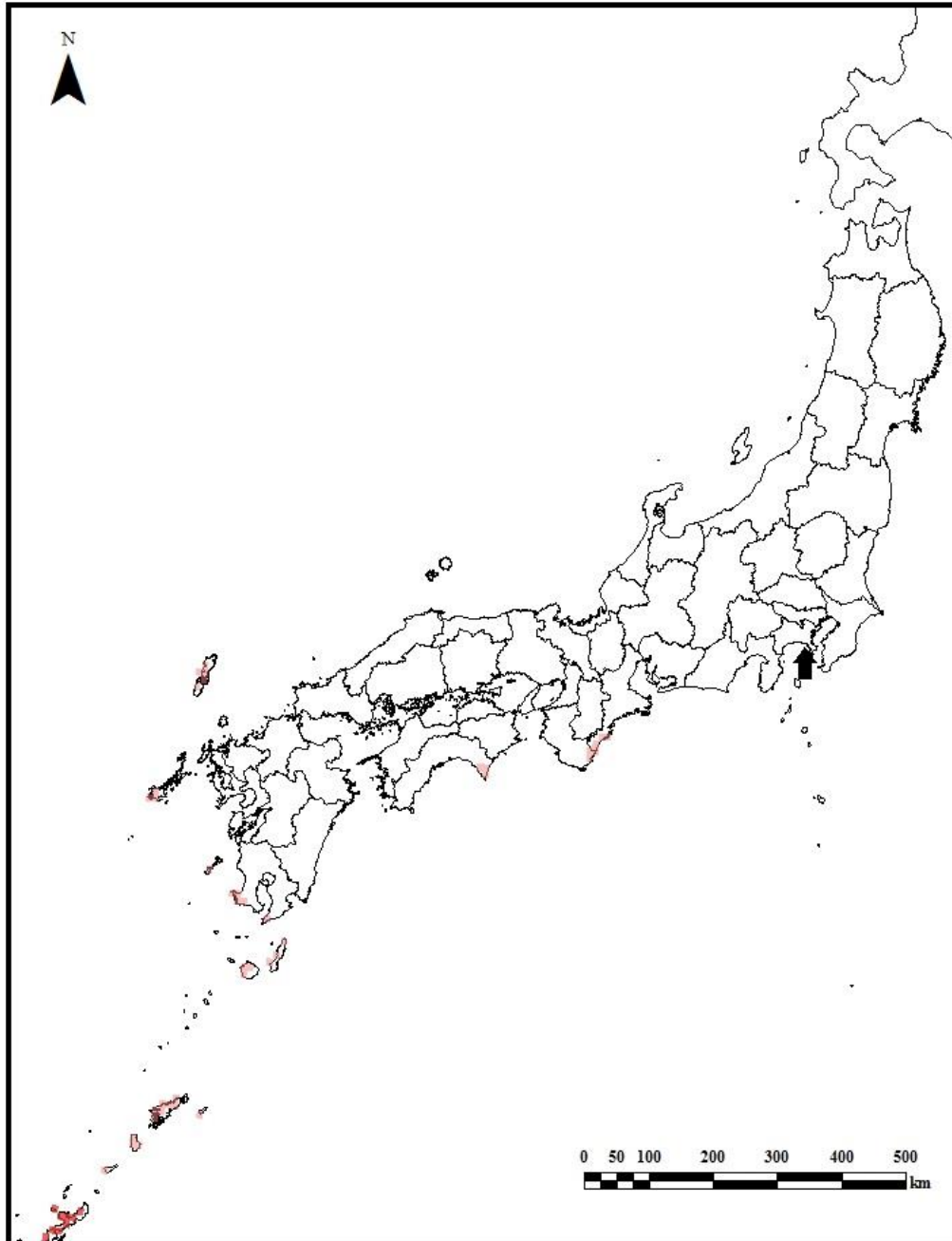


図 49. 酸素同位体比に基づく Yuigahama05 の推定産地
濃色：1 標準偏差、淡色：2 標準偏差. 矢印はサンプリング地点

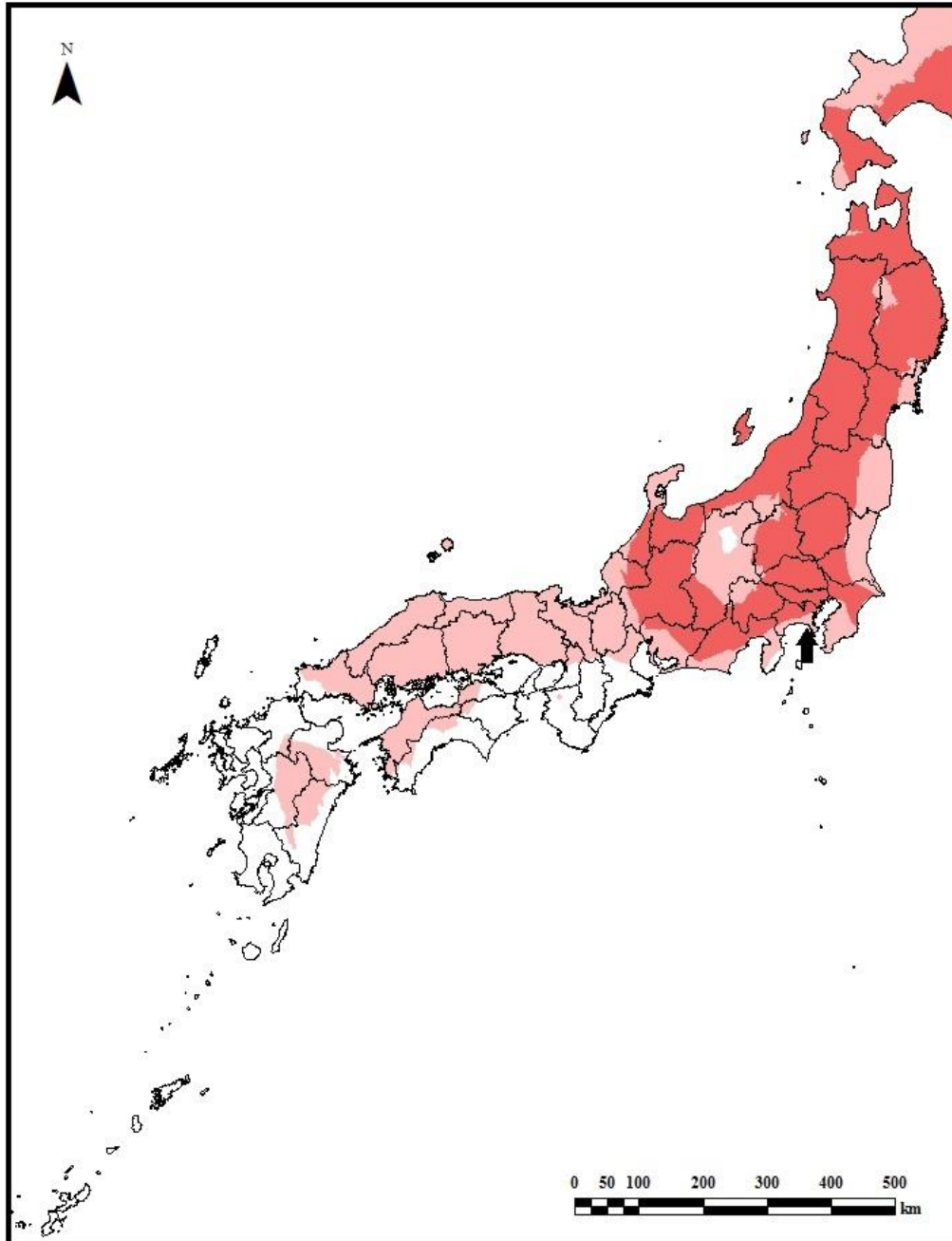


図 50. 酸素同位体比に基づく Yuigahama06 の推定産地
濃色：1 標準偏差、淡色：2 標準偏差. 矢印はサンプリング地点

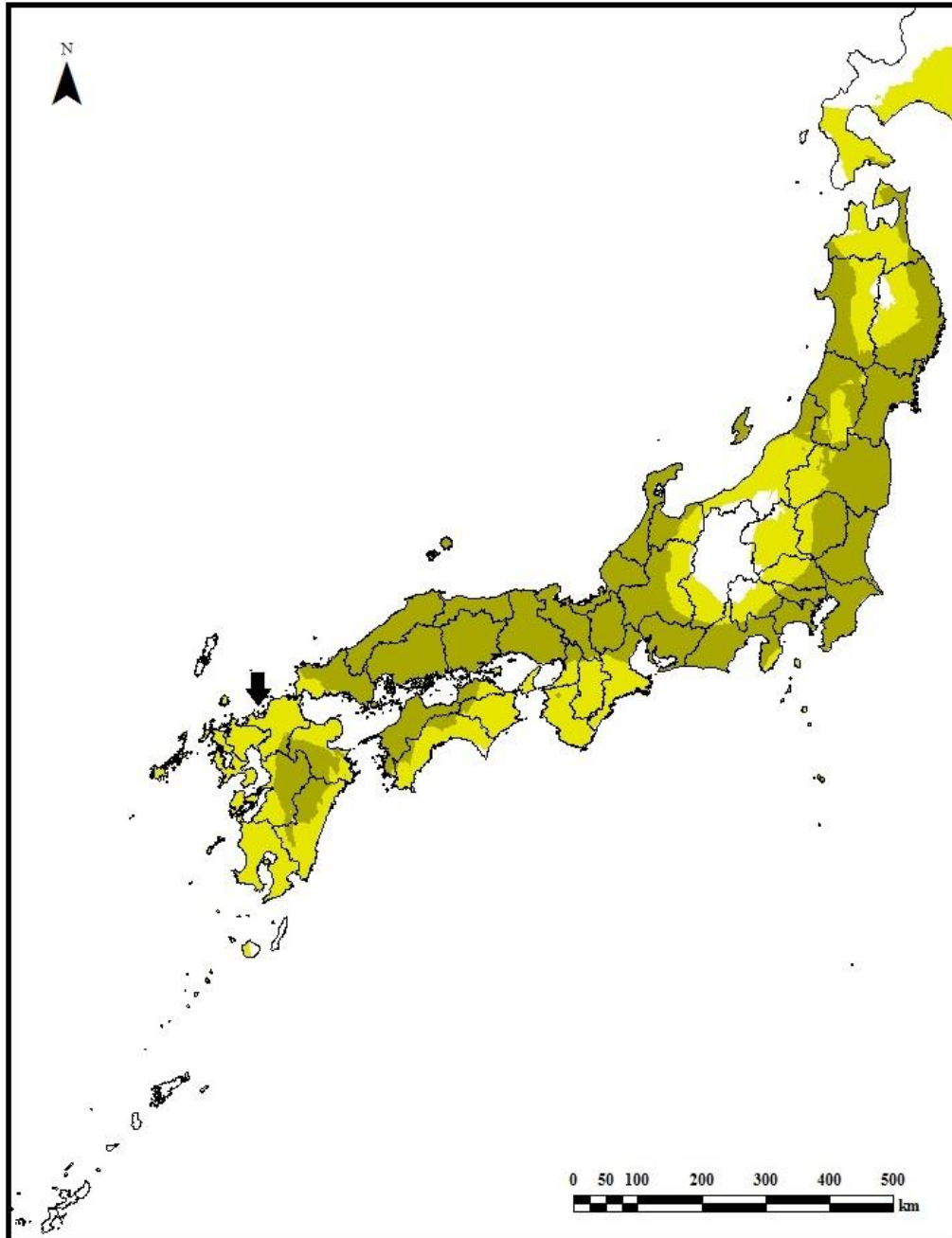


図 51. 酸素同位体比に基づく Hakata01 の推定産地
濃色：1 標準偏差、淡色：2 標準偏差. 矢印はサンプリング地点

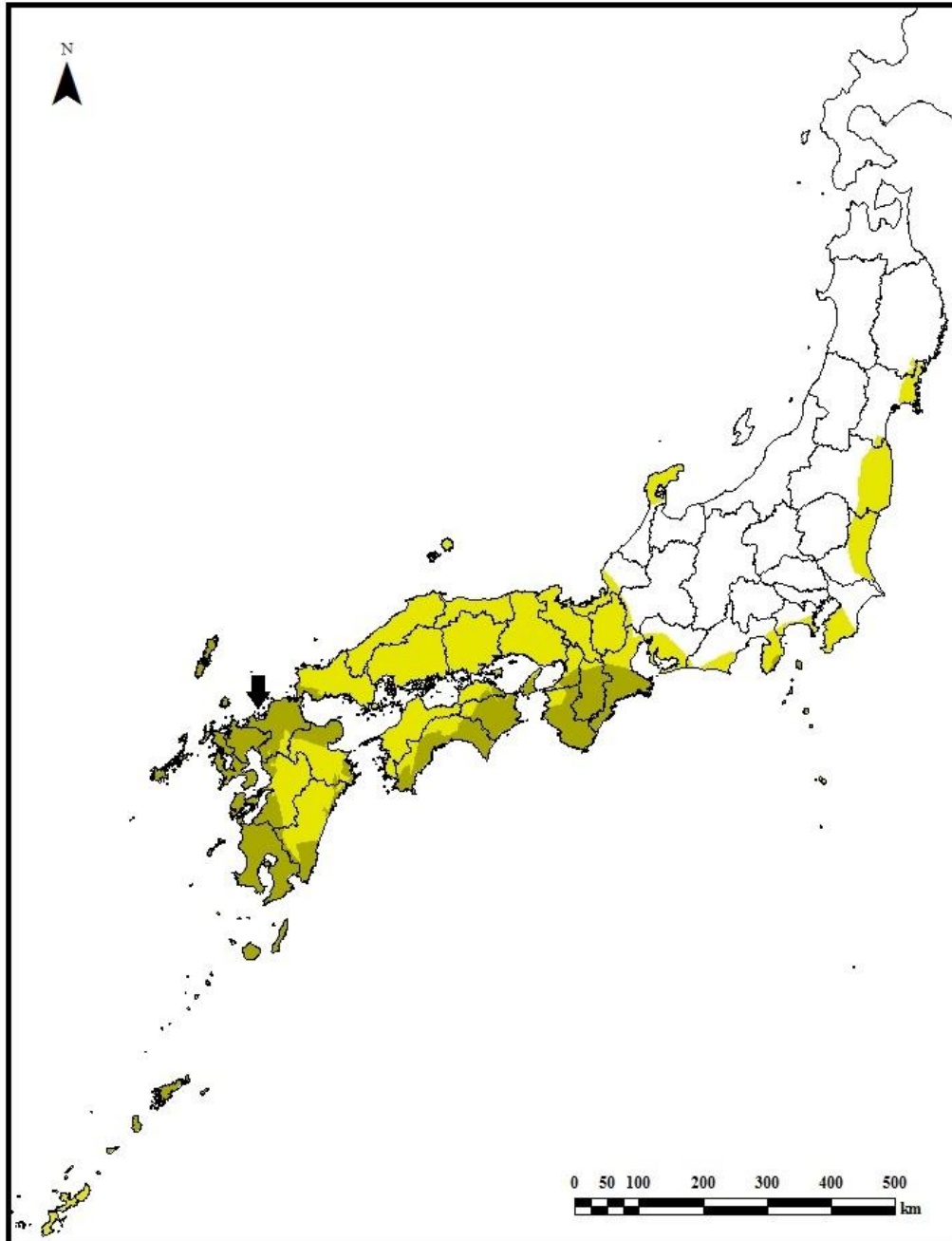


図 52. 酸素同位体比に基づく Hakata02 の推定産地
濃色：1 標準偏差、淡色：2 標準偏差. 矢印はサンプリング地点

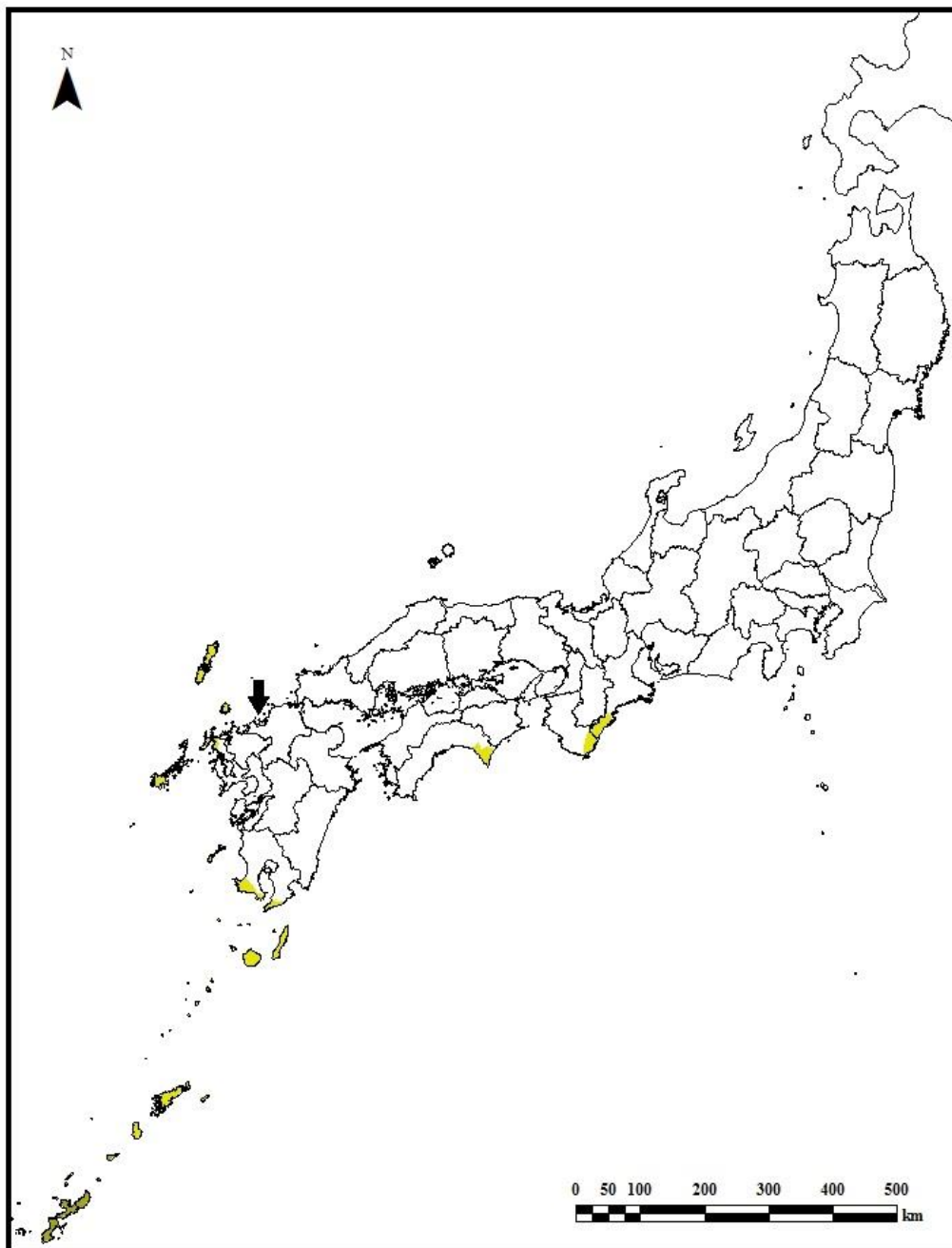


図 53. 酸素同位体比に基づく Hakata03 の推定産地
濃色：1 標準偏差、淡色：2 標準偏差. 矢印はサンプリング地点

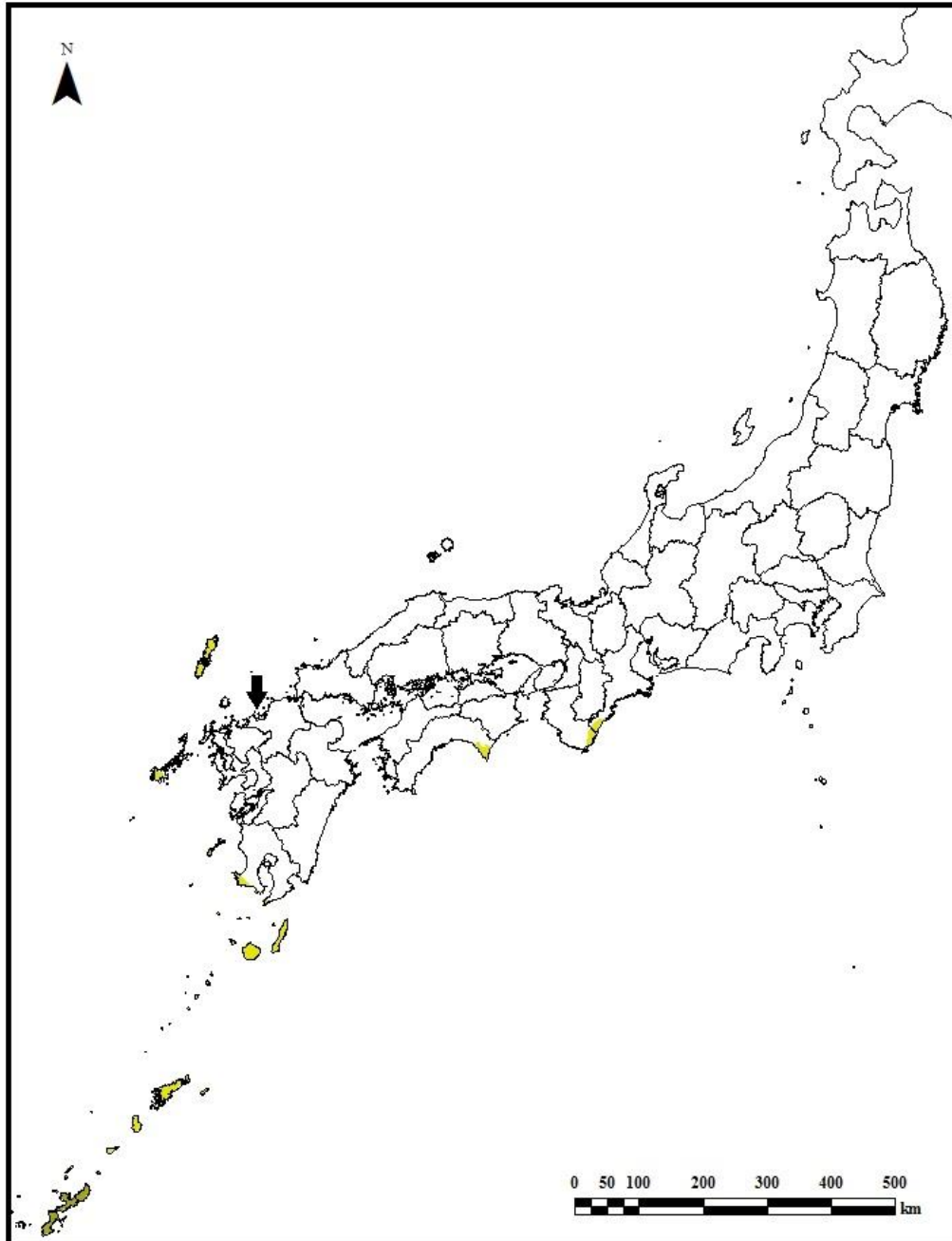


図 54. 酸素同位体比に基づく Hakata04 の推定産地
濃色：1 標準偏差、淡色：2 標準偏差. 矢印はサンプリング地点

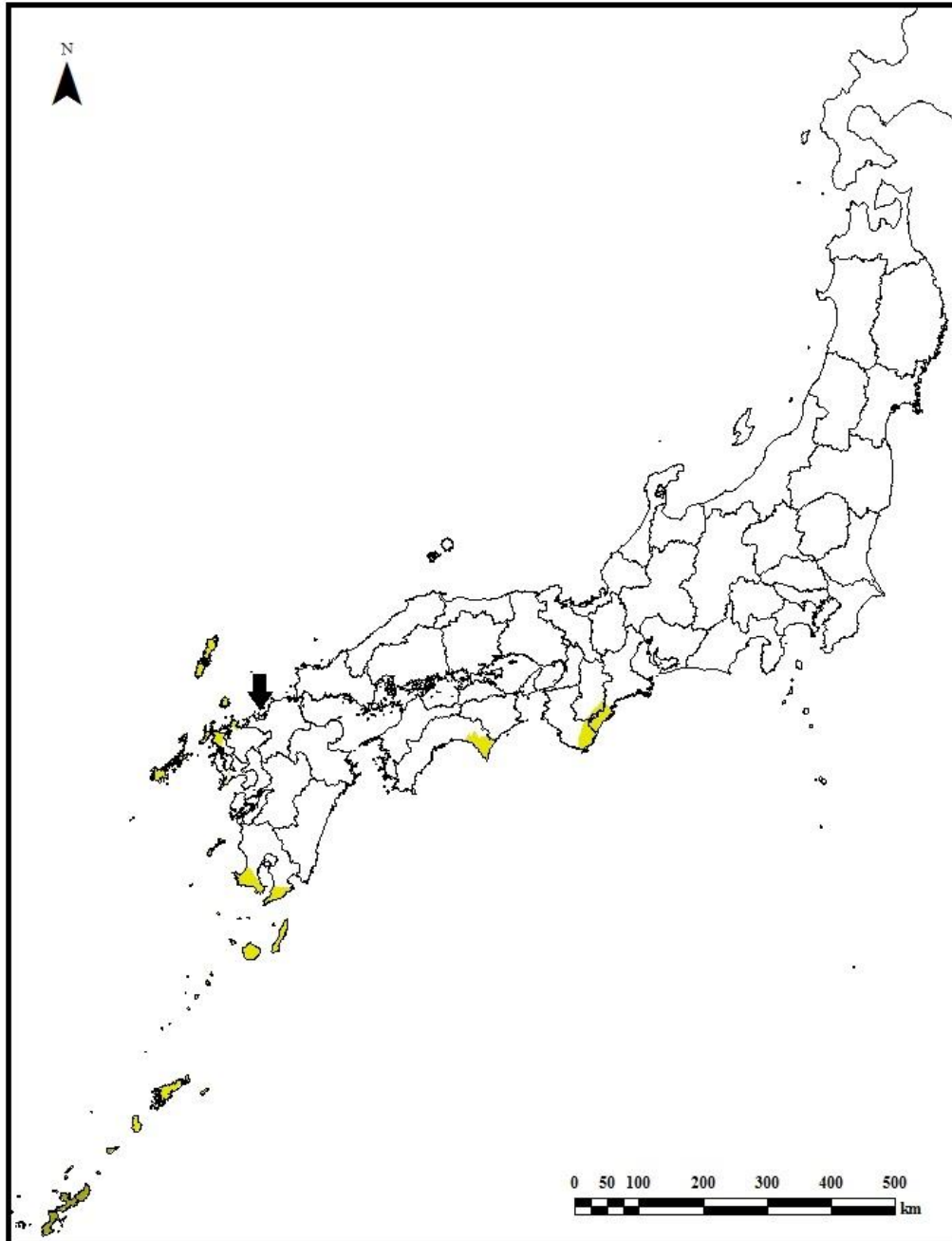


図 55. 酸素同位体比に基づく Hakata05 の推定産地
濃色：1 標準偏差、淡色：2 標準偏差. 矢印はサンプリング地点

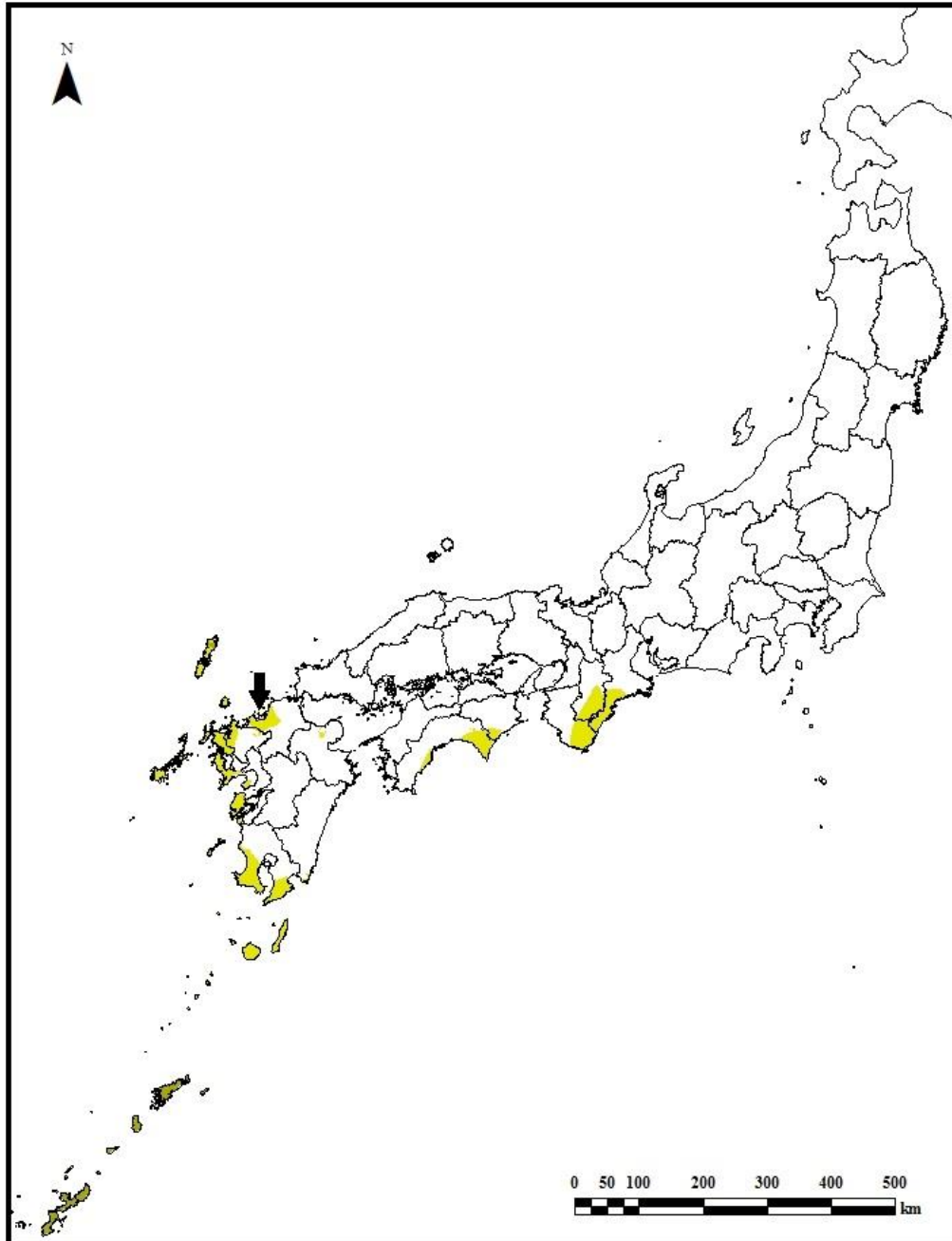


図 56. 酸素同位体比に基づく Hakata06 の推定産地
濃色：1 標準偏差、淡色：2 標準偏差. 矢印はサンプリング地点

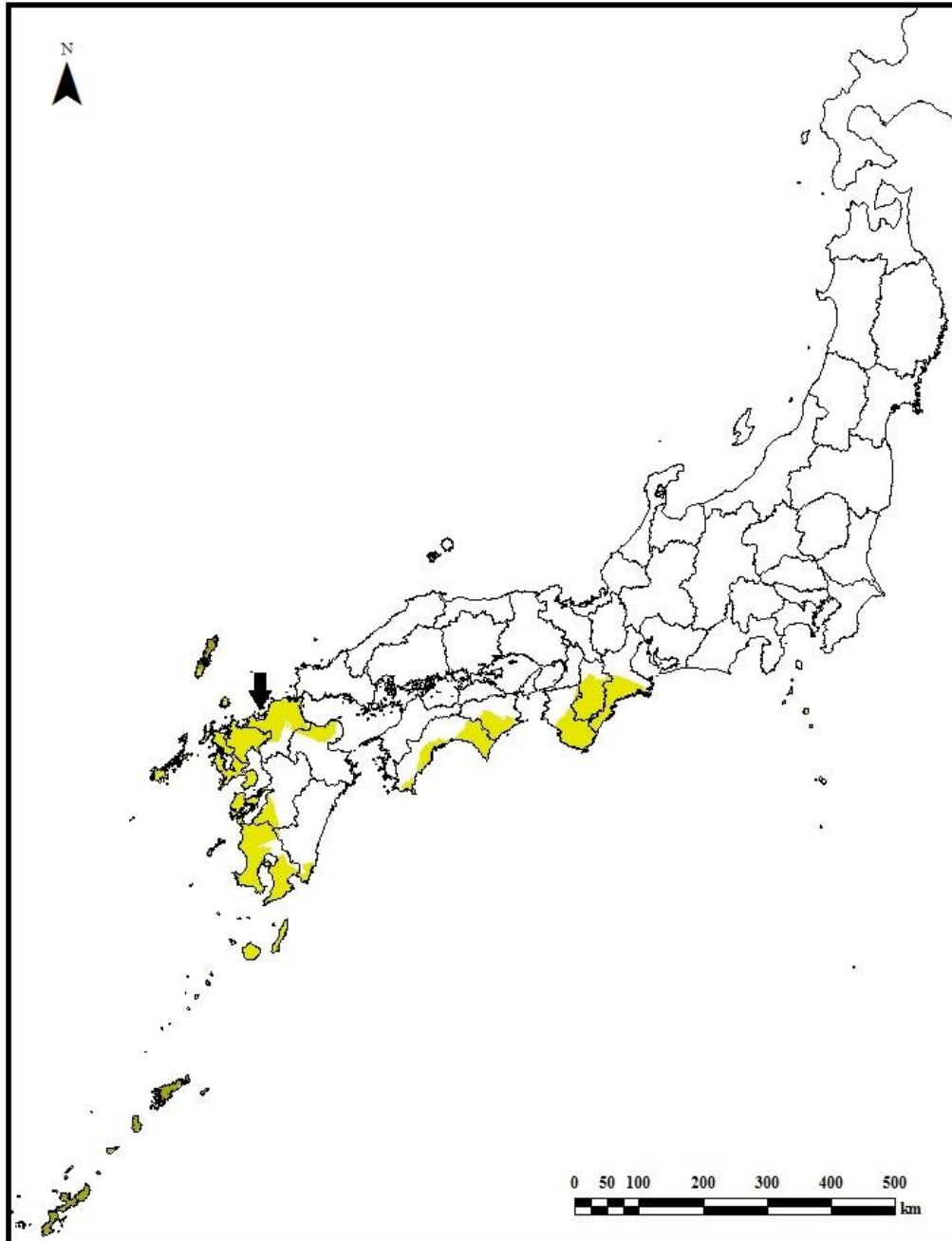


図 57. 酸素同位体比に基づく Hakata07 の推定産地
濃色：1 標準偏差、淡色：2 標準偏差. 矢印はサンプリング地点

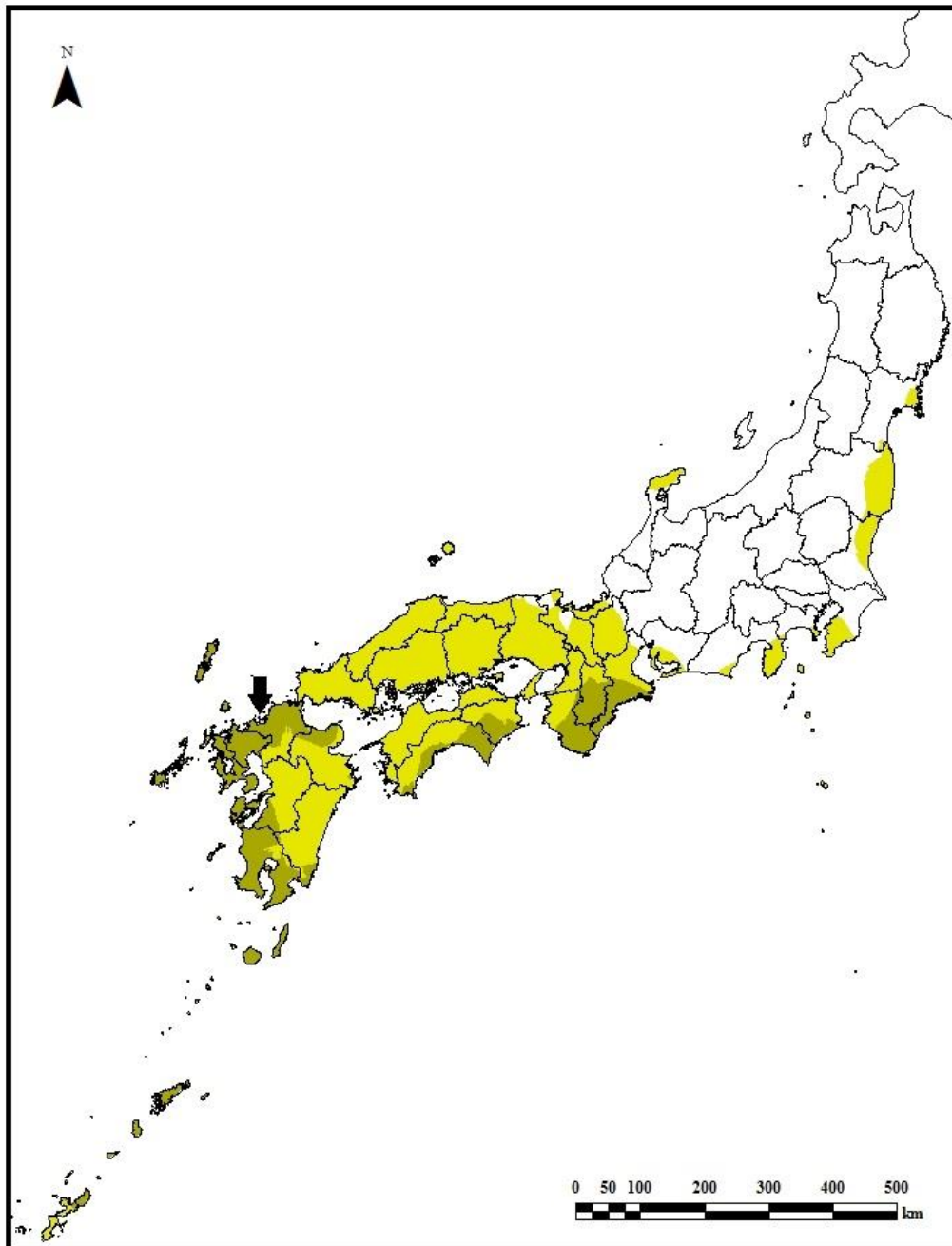


図 58. 酸素同位体比に基づく Hakata08 の推定産地
濃色：1 標準偏差、淡色：2 標準偏差. 矢印はサンプリング地点

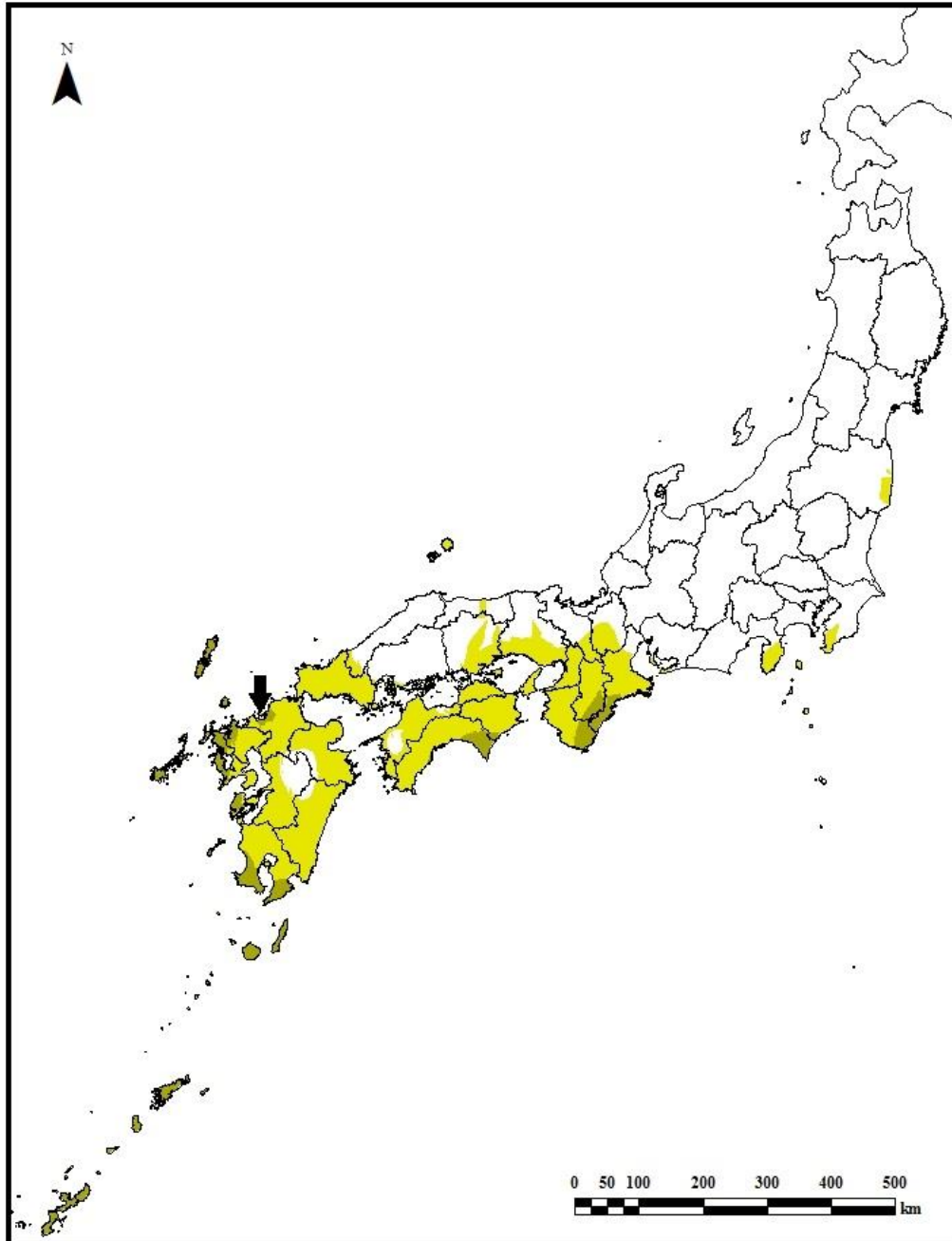


図 59. 酸素同位体比に基づく Hakata09 の推定産地
濃色：1 標準偏差、淡色：2 標準偏差. 矢印はサンプリング地点

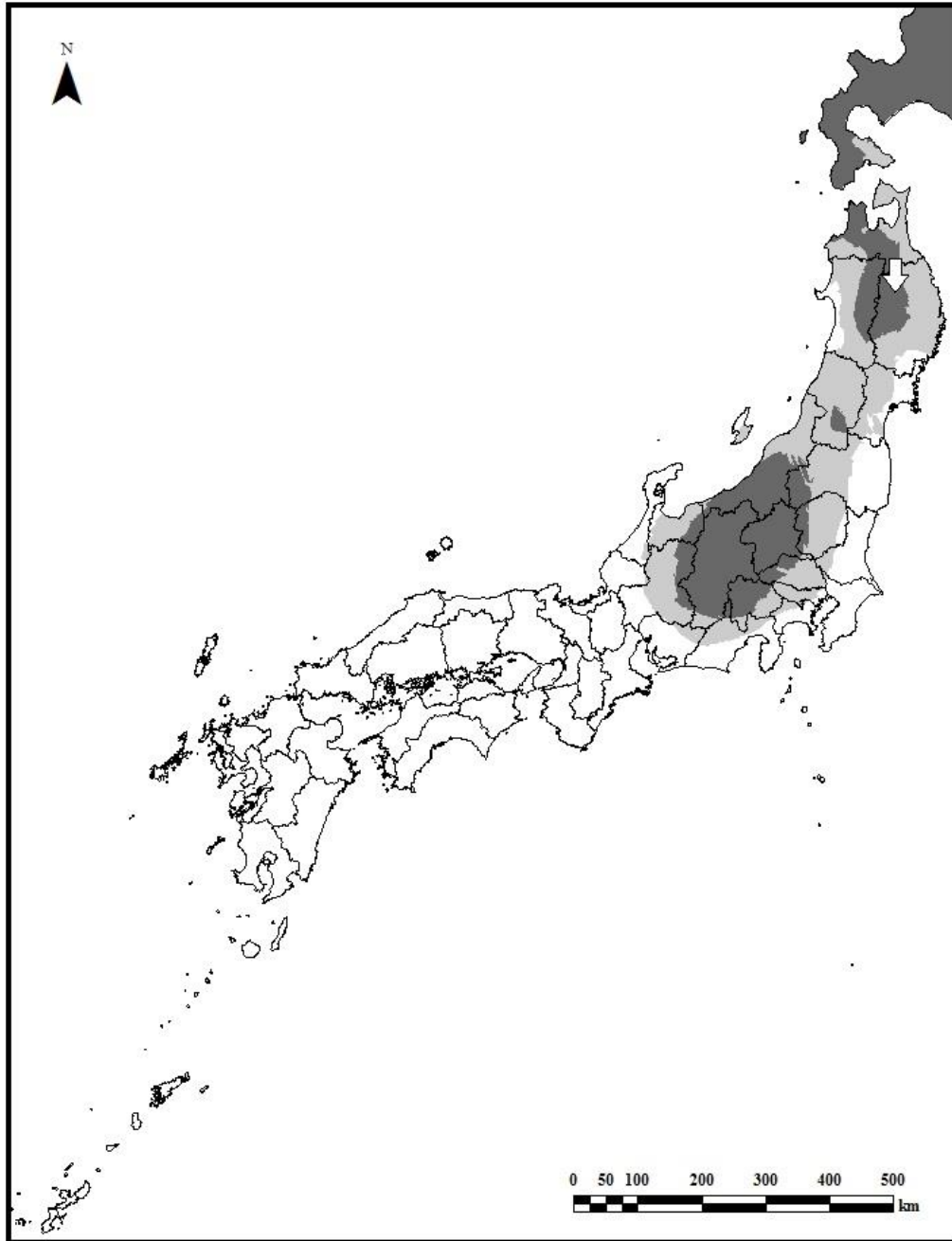


図 60. 酸素同位体比に基づく野田遺跡出土ウマ集団の推定産地
濃色：1 標準偏差、淡色：2 標準偏差. 矢印はサンプリング地点

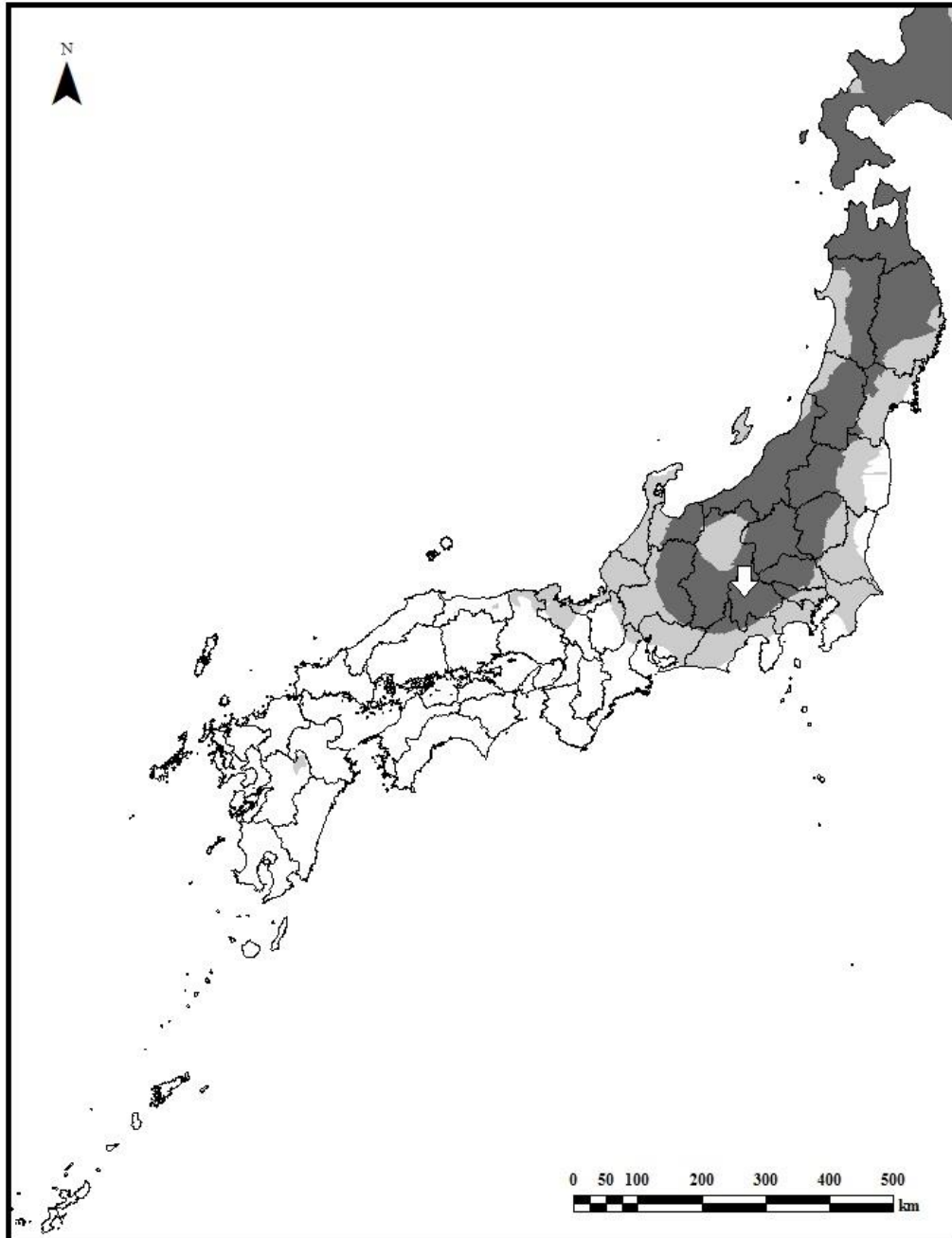


図 61. 酸素同位体比に基づく百々遺跡出土ウマ集団の推定産地
 濃色：1 標準偏差、淡色：2 標準偏差. 矢印はサンプリング地点

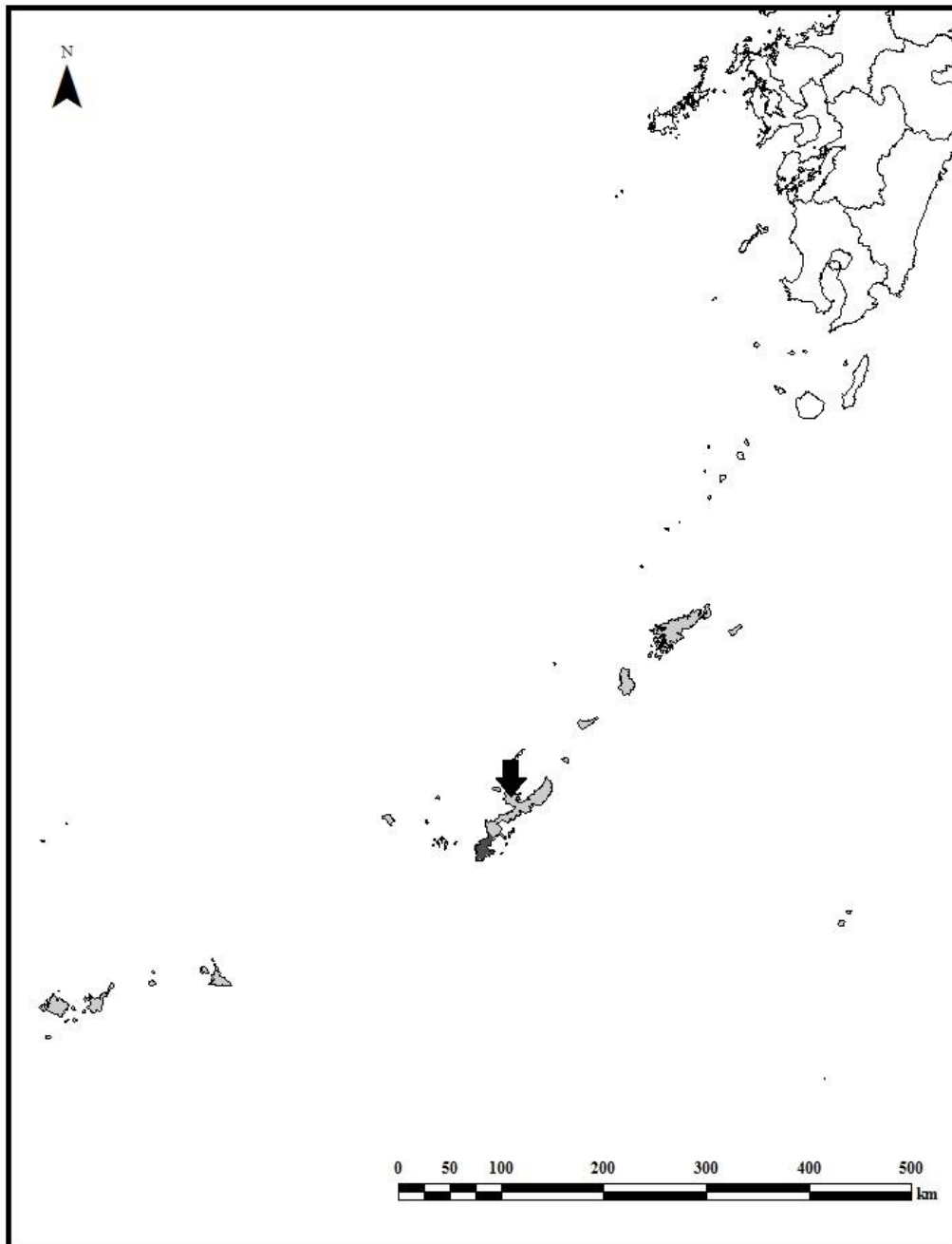


図 62. 酸素同位体比に基づく今帰仁グスク跡出土ウマ集団の推定産地
 濃色：1 標準偏差、淡色：2 標準偏差. 矢印はサンプリング地点

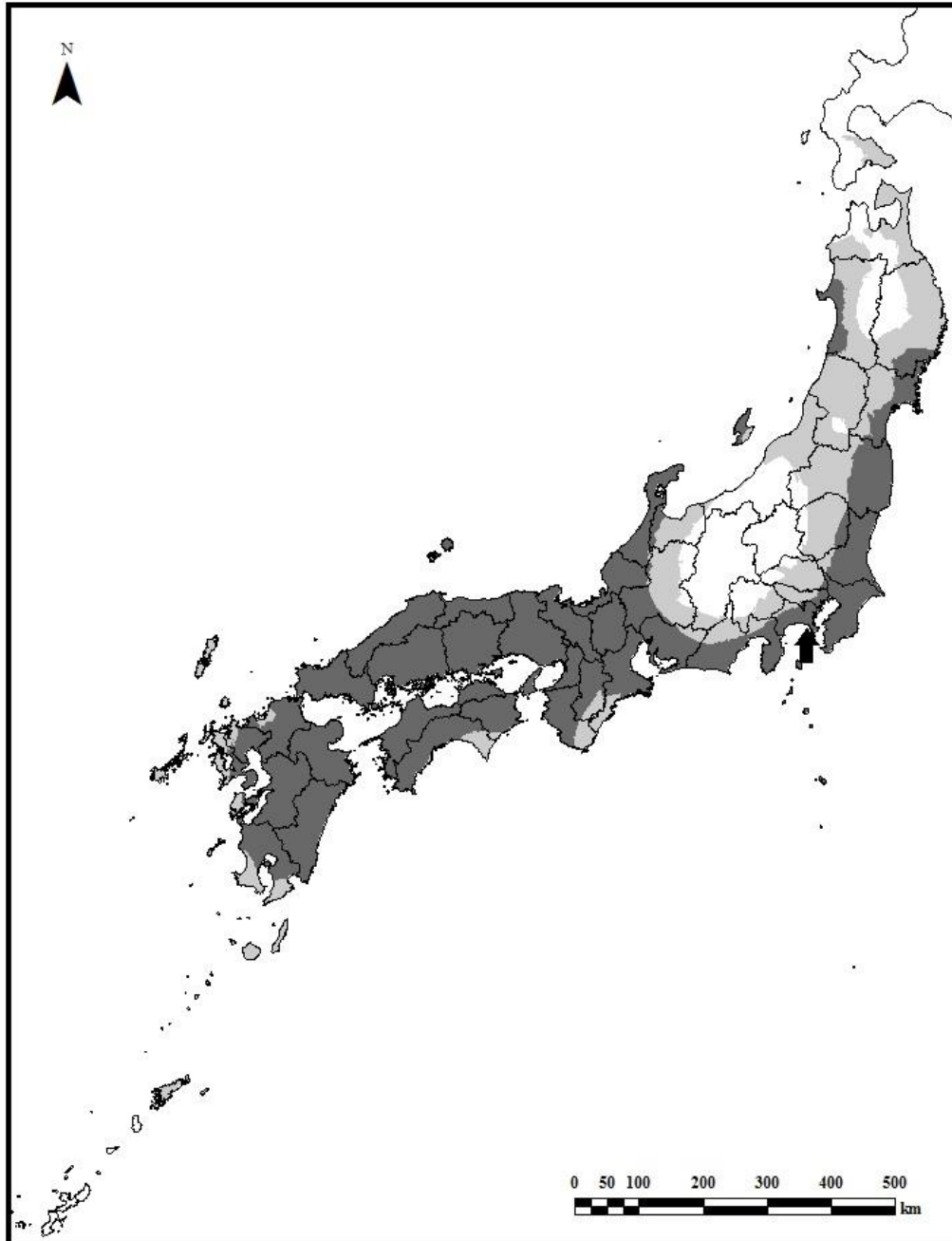


図 63. 酸素同位体比に基づく由比ヶ浜南遺跡出土ウマ集団の推定産地
 濃色：1 標準偏差、淡色：2 標準偏差. 矢印はサンプリング地点

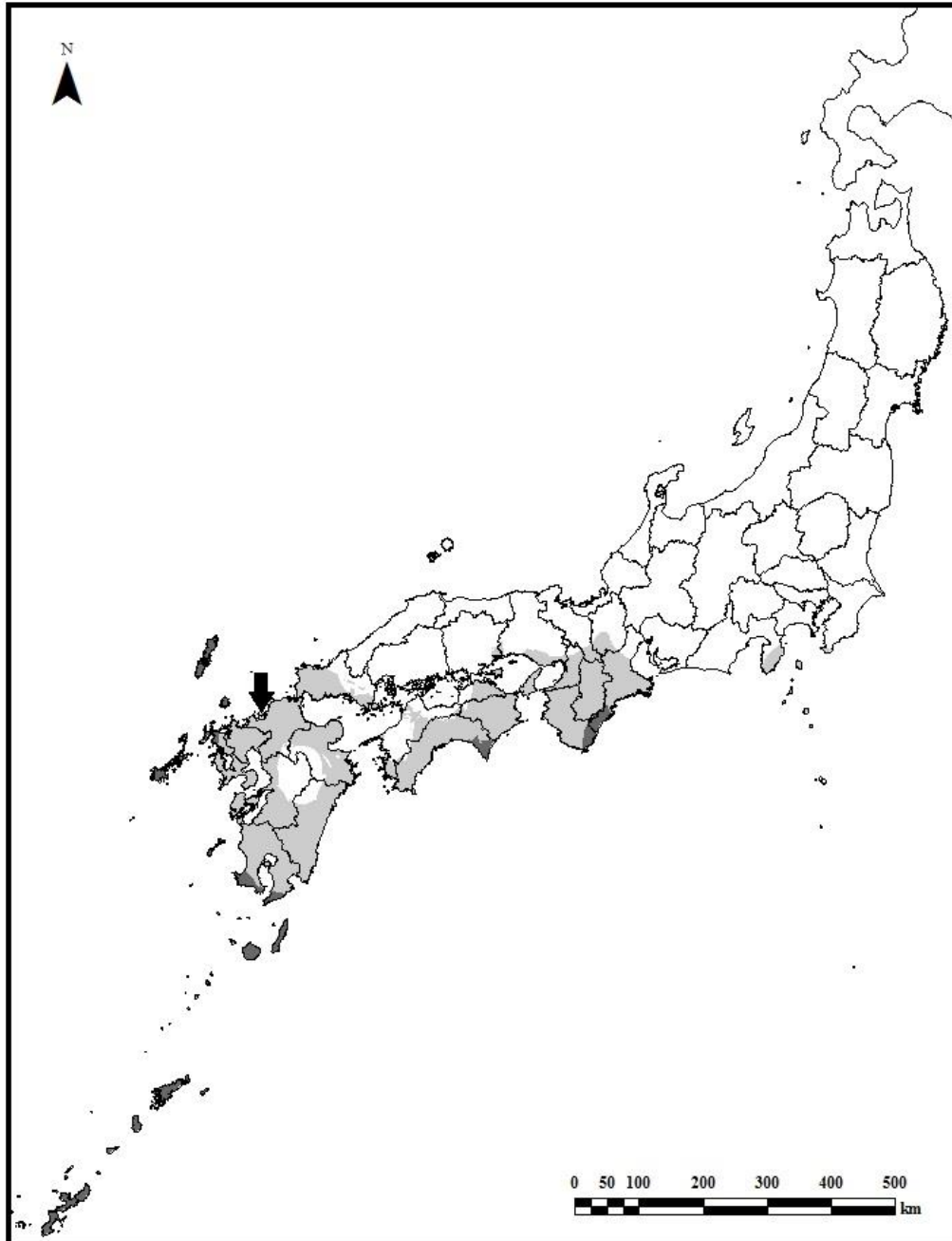


図 64. 酸素同位体比に基づく博多遺跡出土ウマ集団の推定産地
濃色：1 標準偏差、淡色：2 標準偏差. 矢印はサンプリング地点

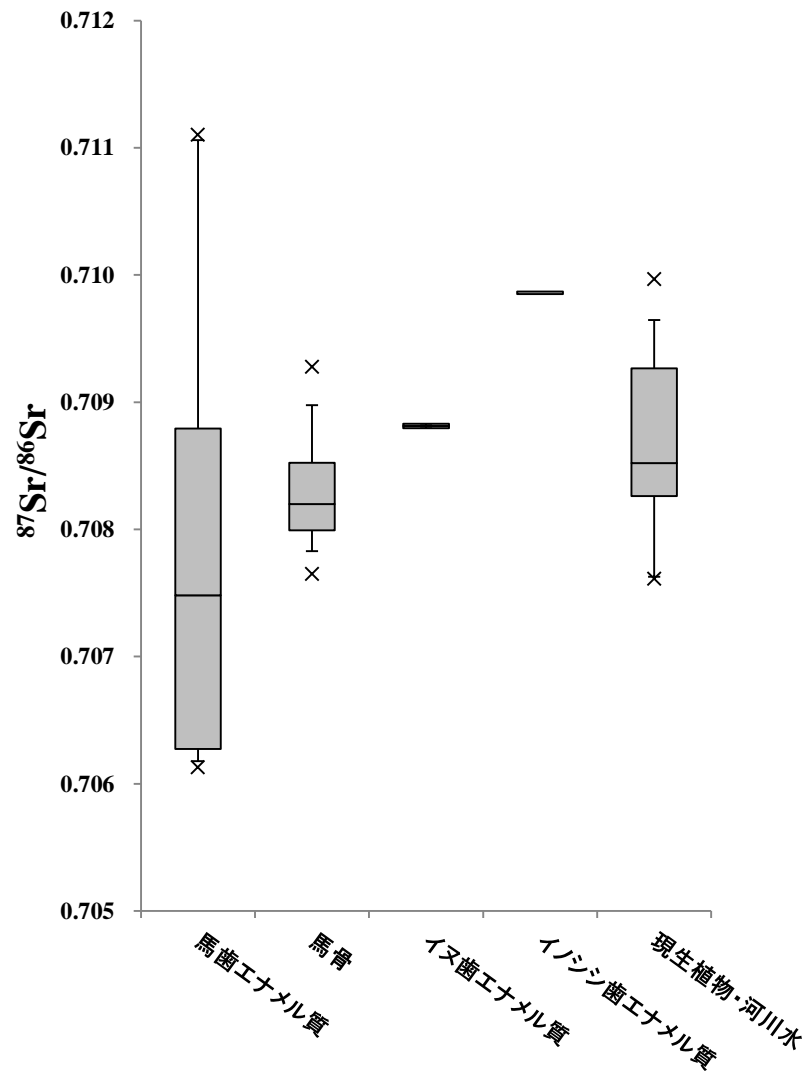


図 65. 藤原宮跡出土動物遺存体および奈良県内における植物および河川水のストロンチウム同位体

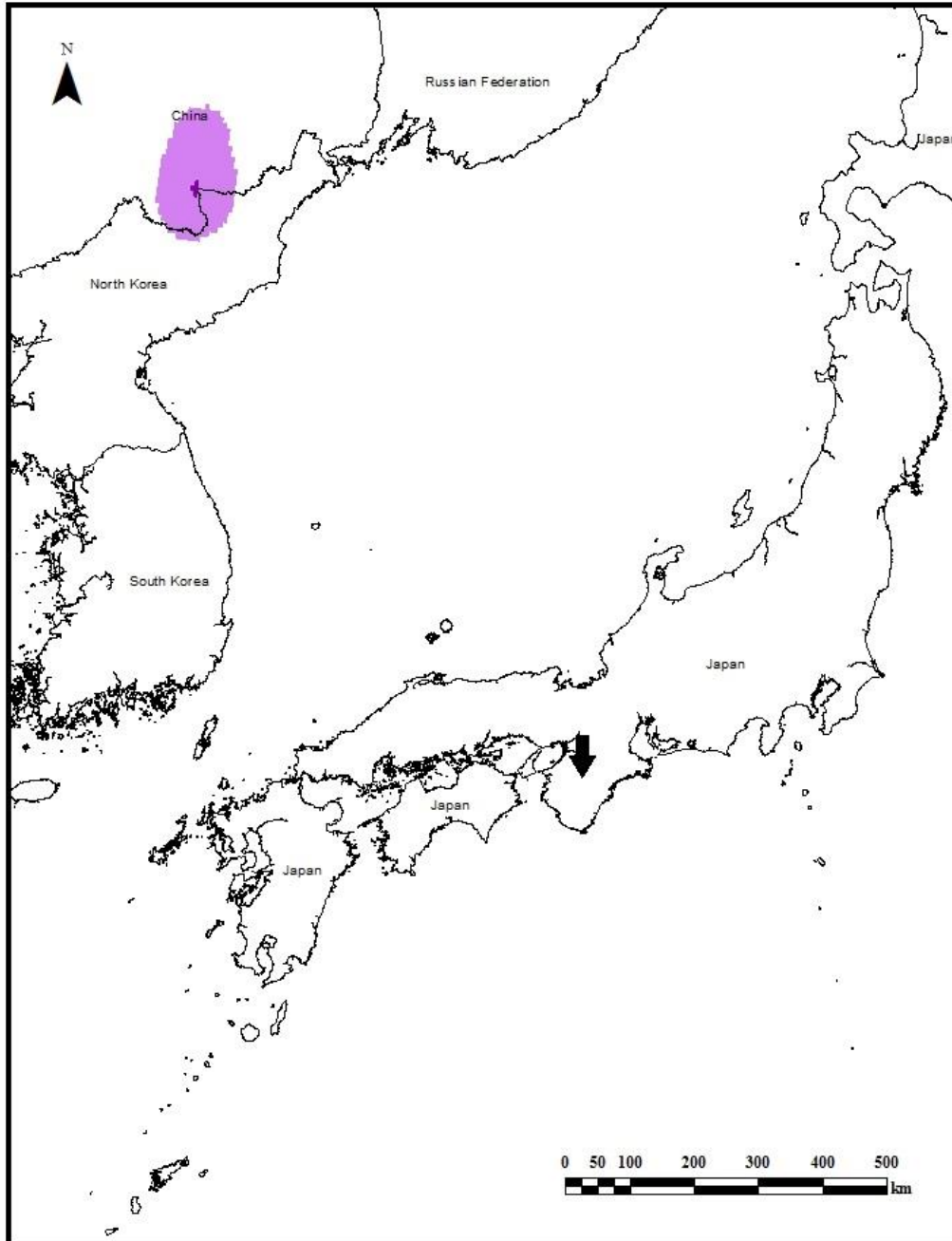


図 66. 酸素同位体比に基づく Fujiwara01 の推定産地
 濃色：1 標準偏差、淡色：2 標準偏差. 矢印はサンプリング地点

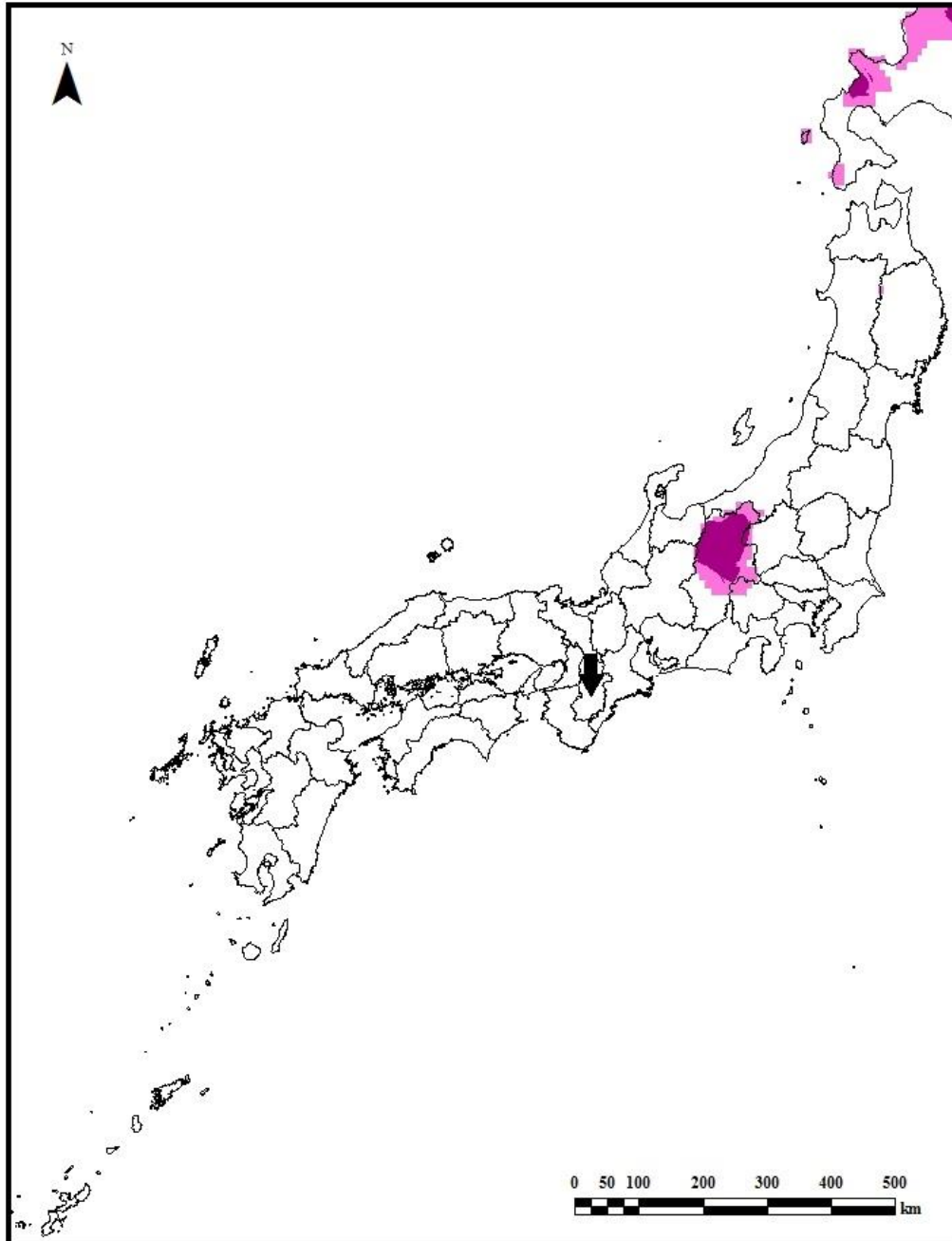


図 67. 酸素同位体比に基づく Fujiwara02 の推定産地
濃色：1 標準偏差、淡色：2 標準偏差. 矢印はサンプリング地点

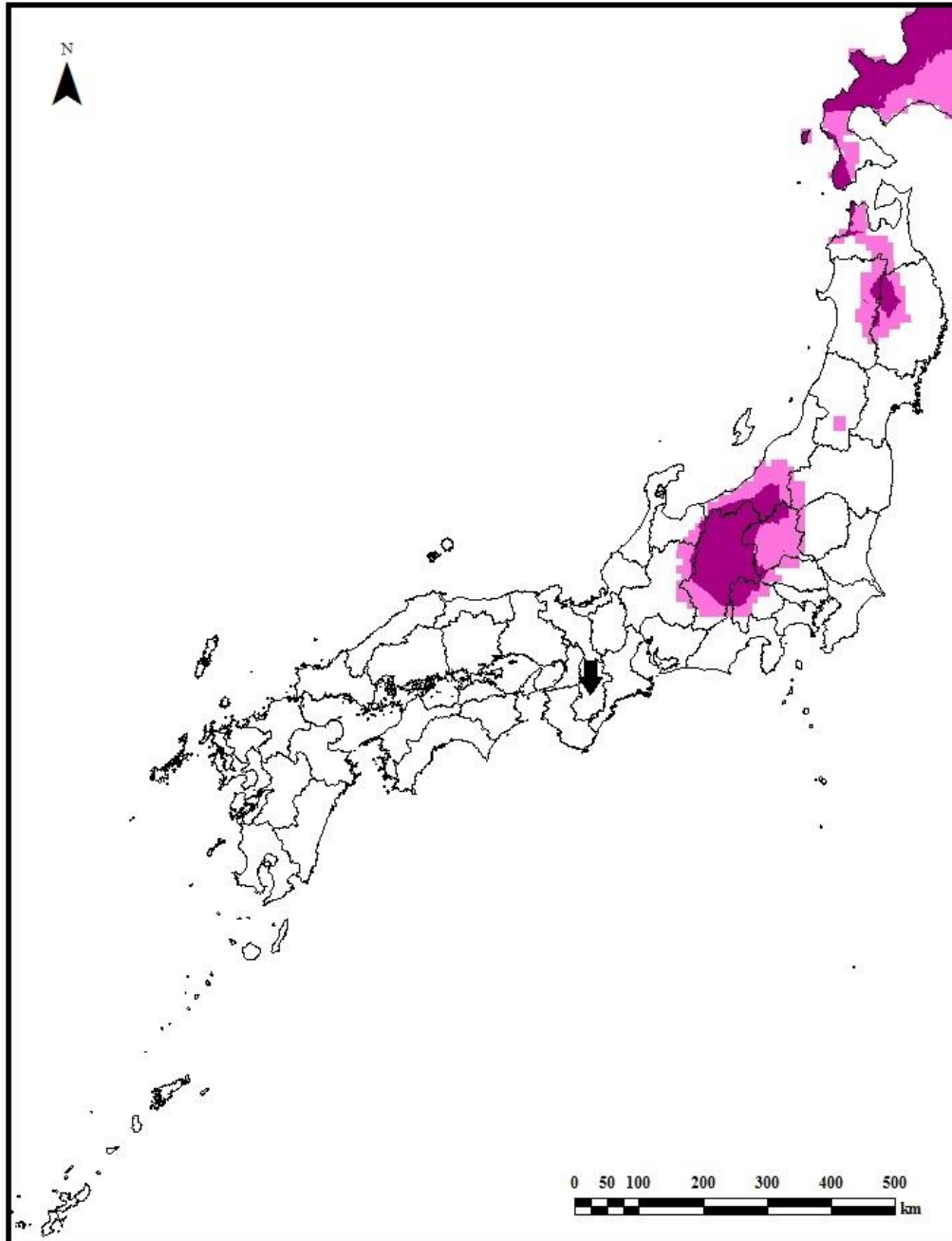


図 68. 酸素同位体比に基づく Fujiwara03 の推定産地
濃色：1 標準偏差、淡色：2 標準偏差. 矢印はサンプリング地点

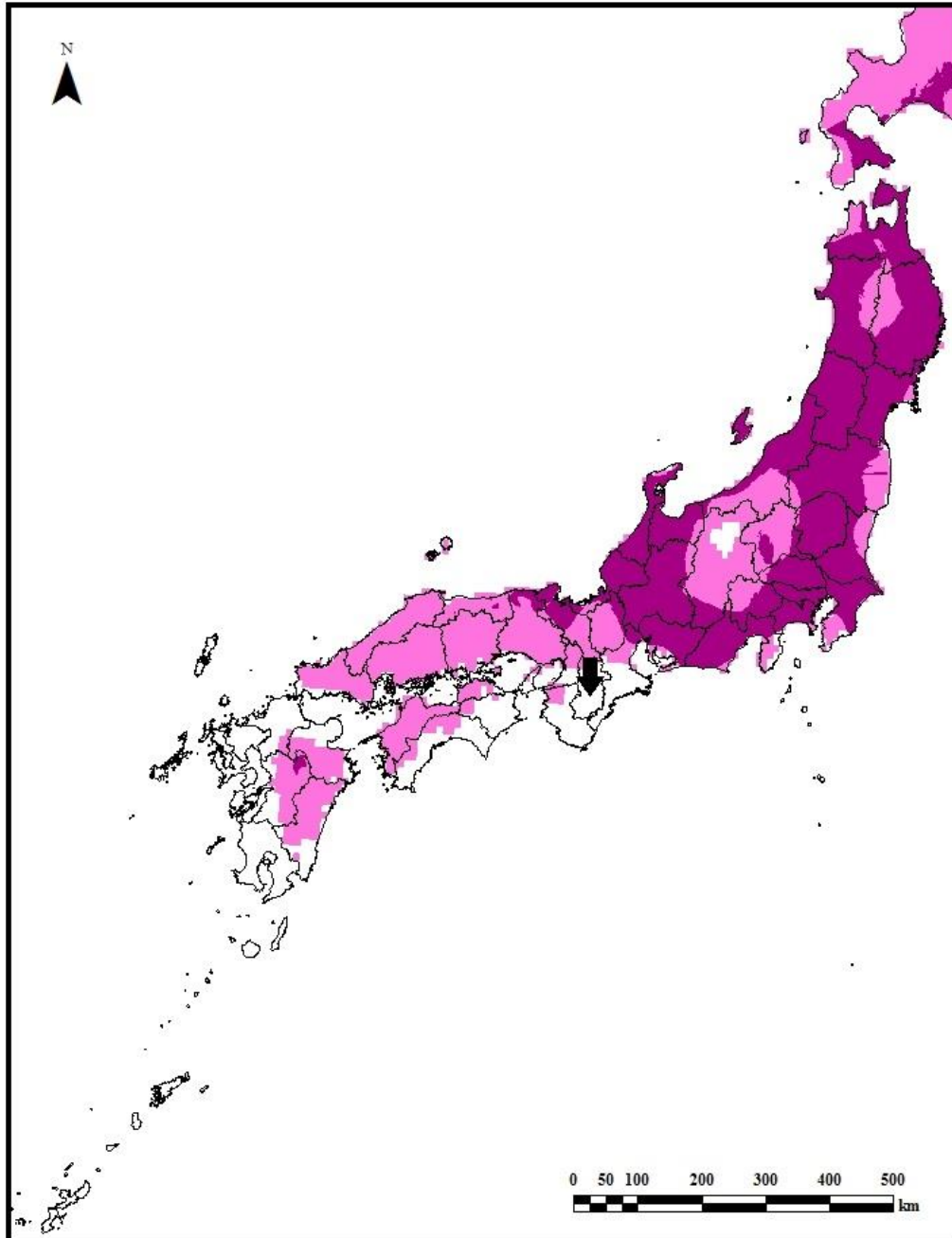


図 69. 酸素同位体比に基づく Fujiwara04 の推定産地
濃色：1 標準偏差、淡色：2 標準偏差. 矢印はサンプリング地点

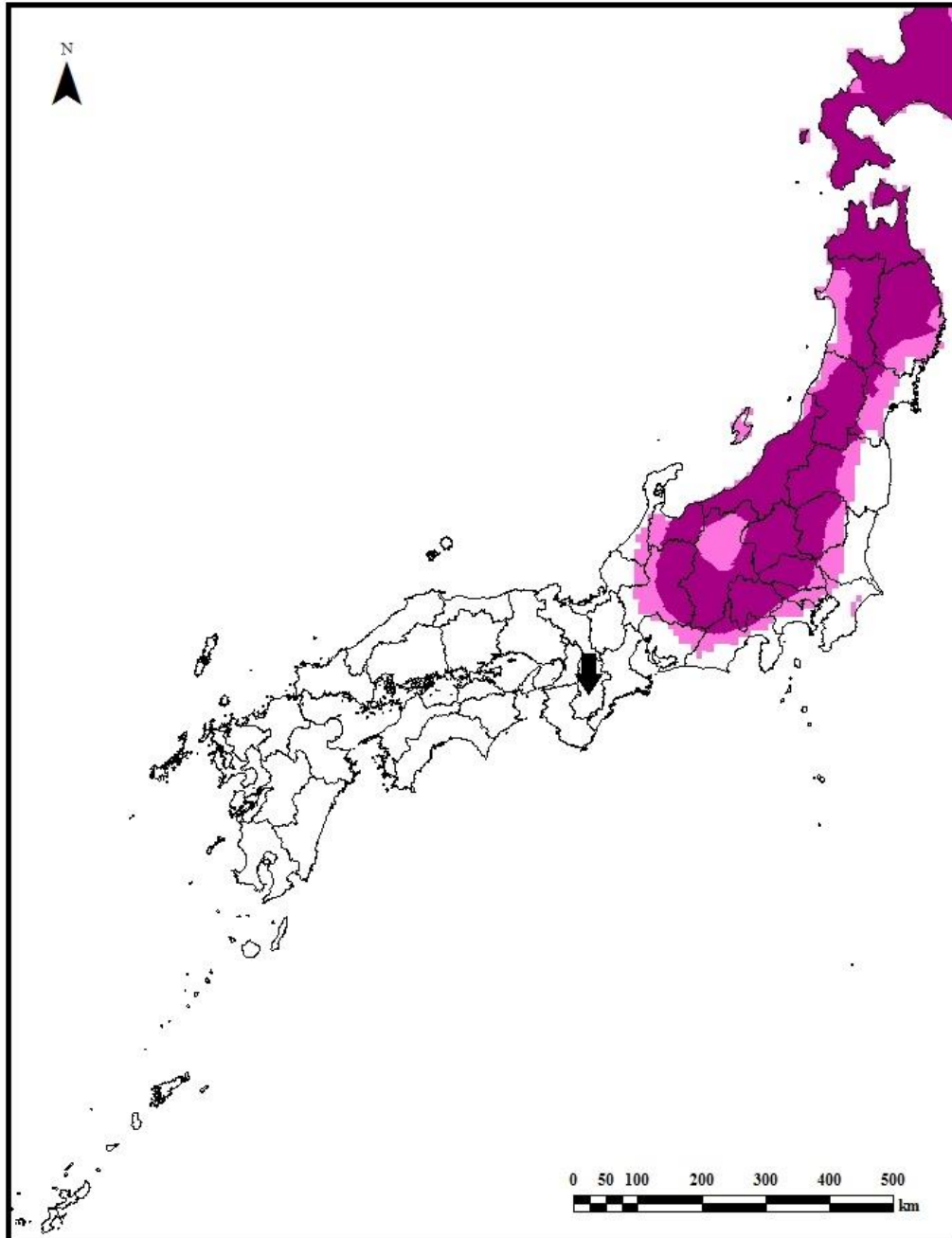


図 70. 酸素同位体比に基づく Fujiwara05 の推定産地
 濃色：1 標準偏差、淡色：2 標準偏差. 矢印はサンプリング地点

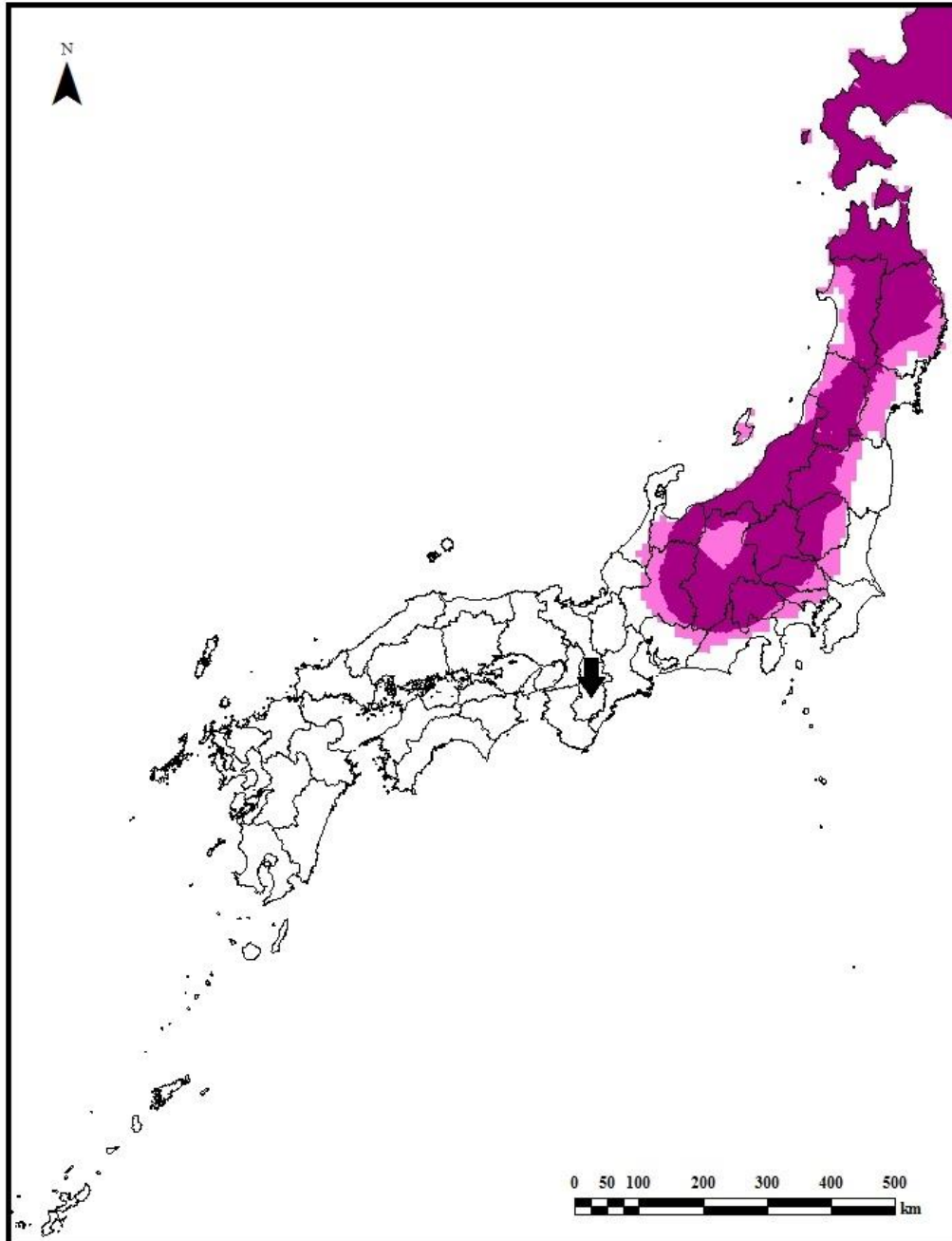


図 71. 酸素同位体比に基づく Fujiwara06 の推定産地
濃色：1 標準偏差、淡色：2 標準偏差. 矢印はサンプリング地点

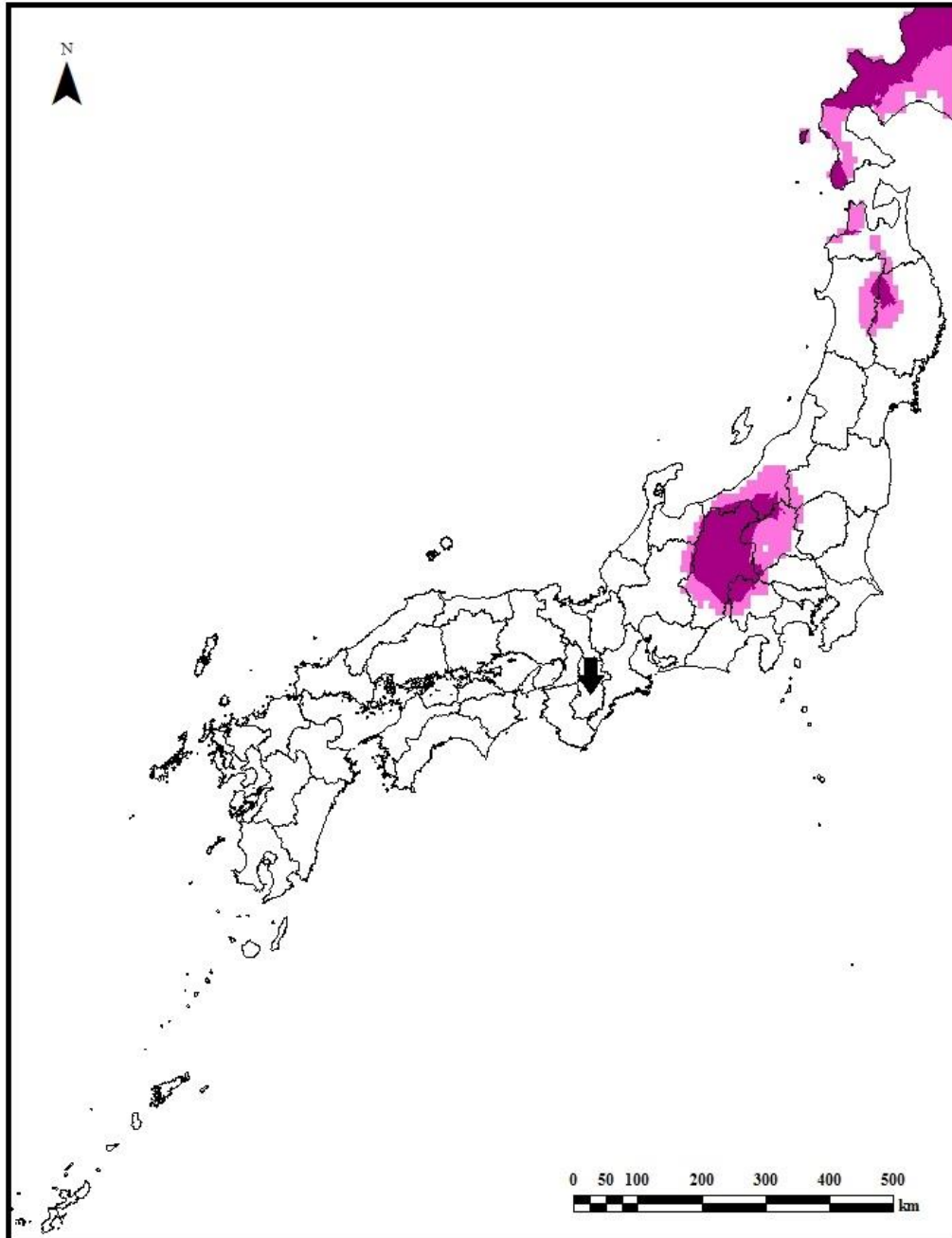


図 72. 酸素同位体比に基づく Fujiwara07 の推定産地
濃色：1 標準偏差、淡色：2 標準偏差. 矢印はサンプリング地点

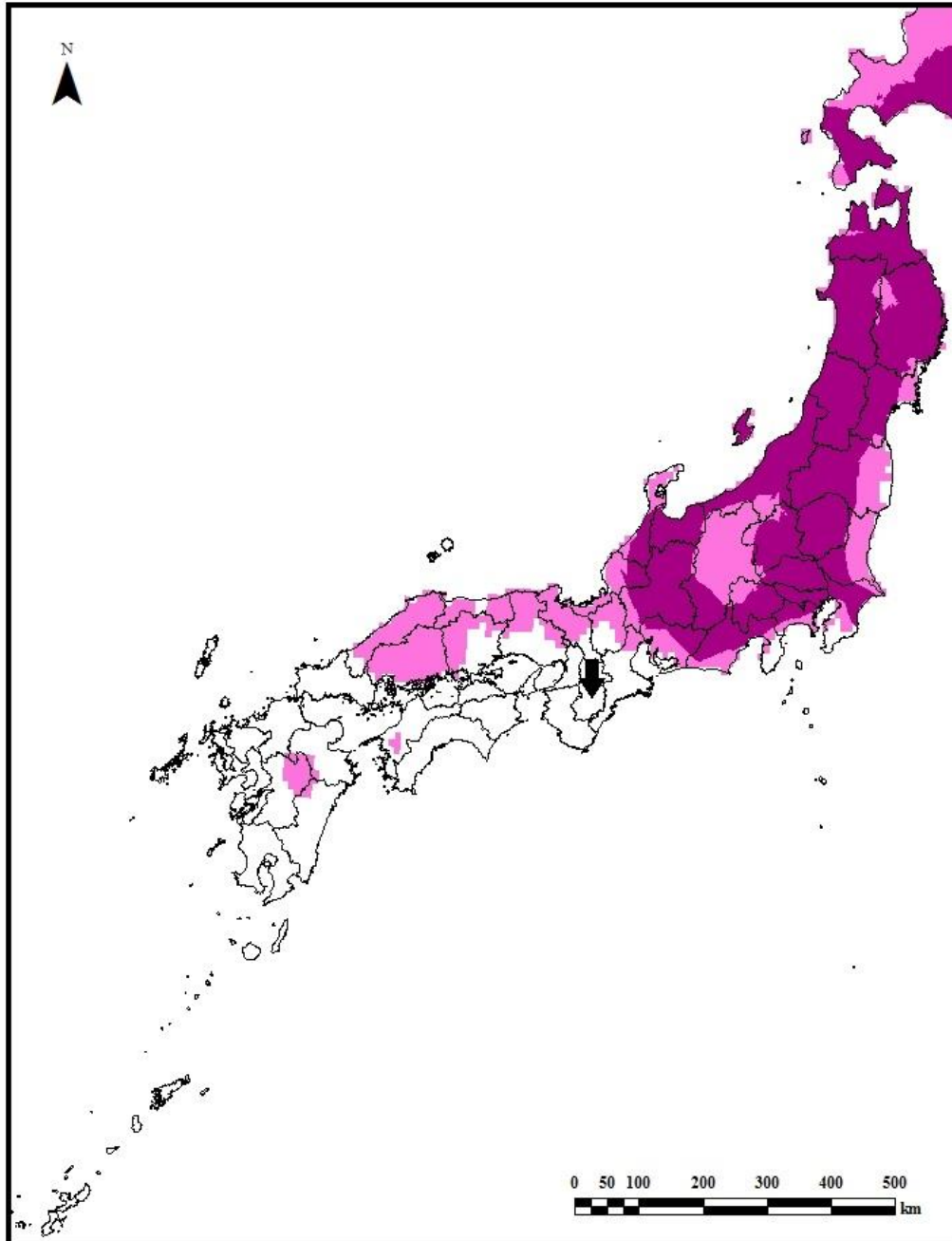


図 73. 酸素同位体比に基づく Fujiwara08 の推定産地
濃色：1 標準偏差、淡色：2 標準偏差. 矢印はサンプリング地点

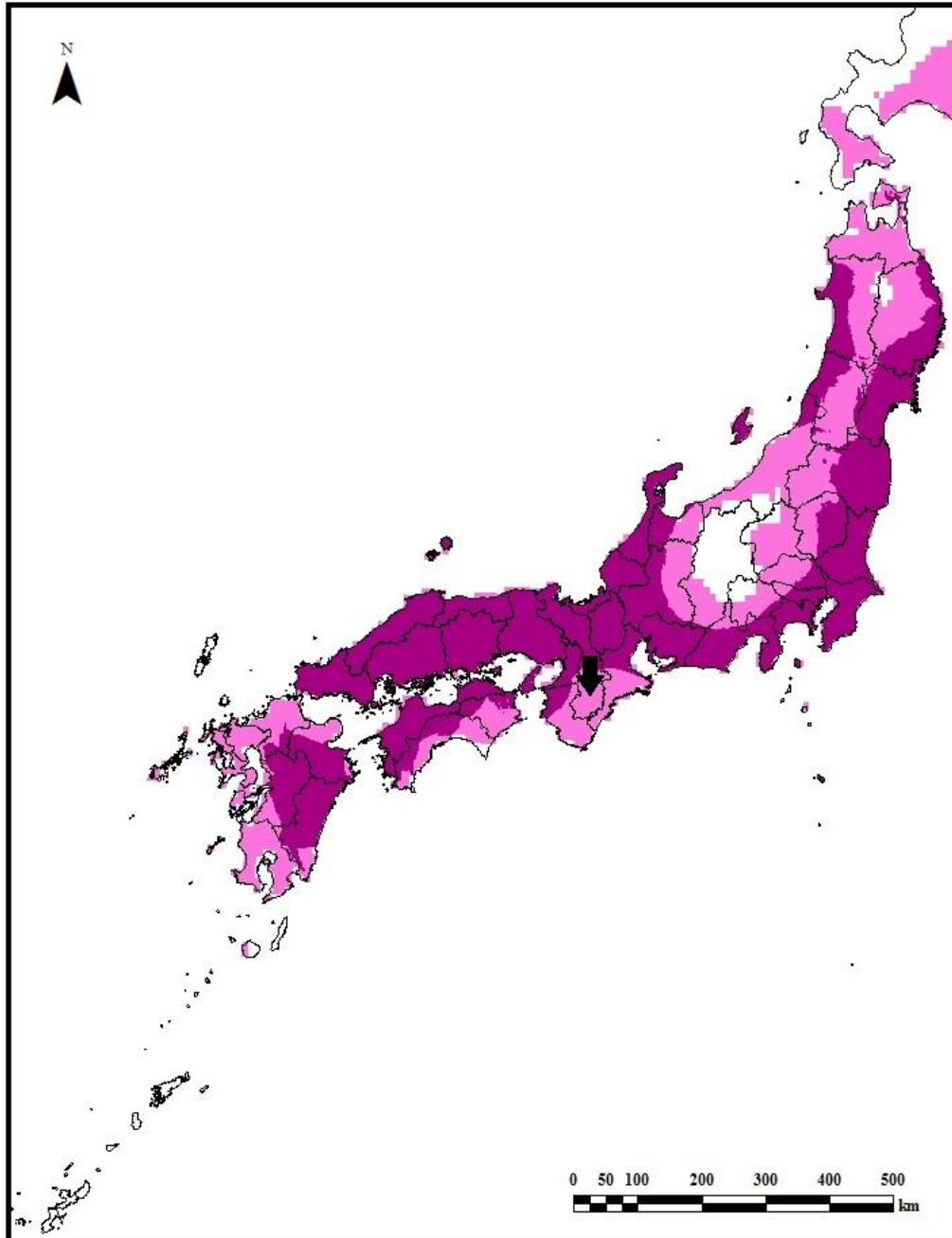


図 74. 酸素同位体比に基づく Fujiwara09 の推定産地
濃色：1 標準偏差、淡色：2 標準偏差. 矢印はサンプリング地点

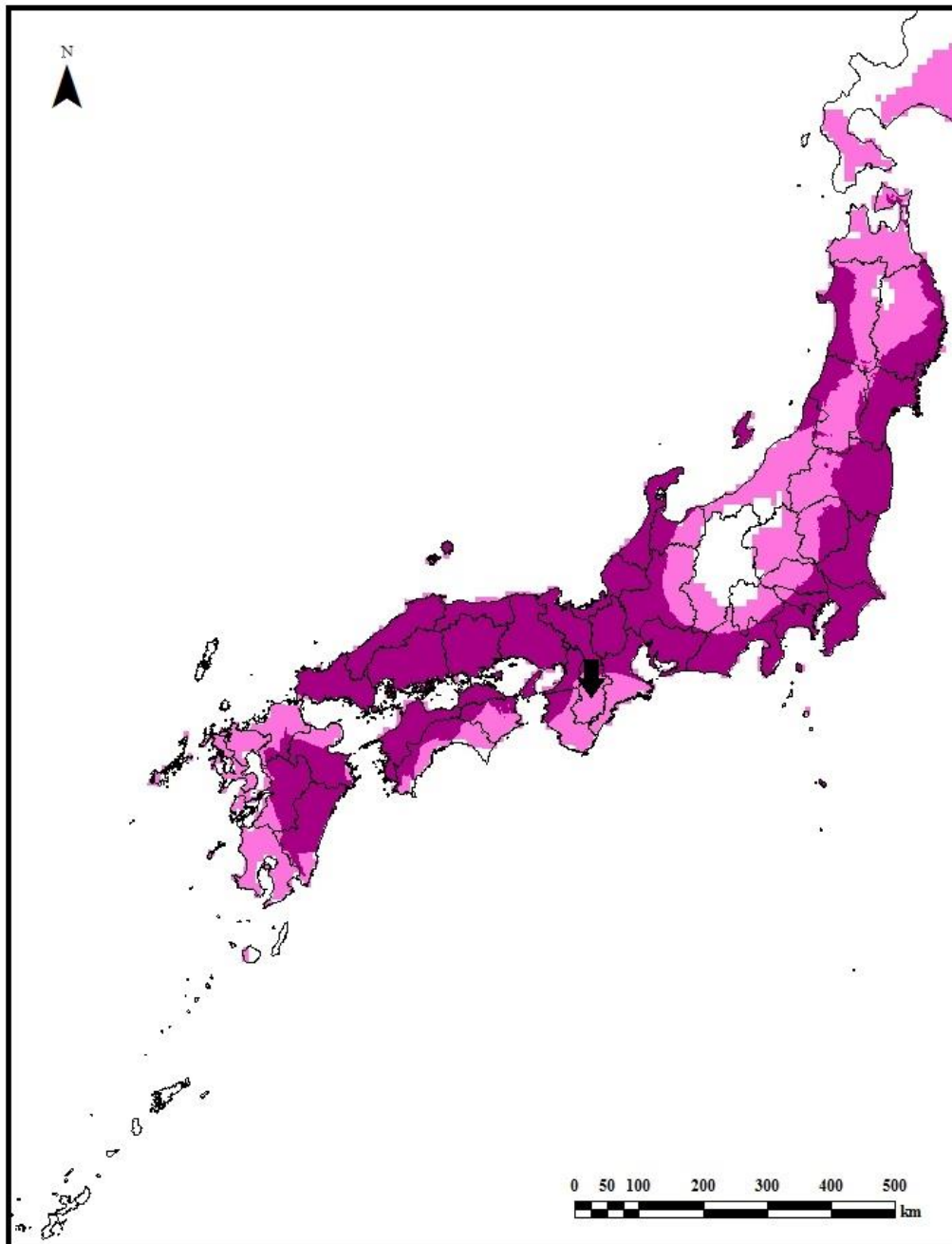


図 75. 酸素同位体比に基づく Fujiwara10 の推定産地
 濃色：1 標準偏差、淡色：2 標準偏差. 矢印はサンプリング地点

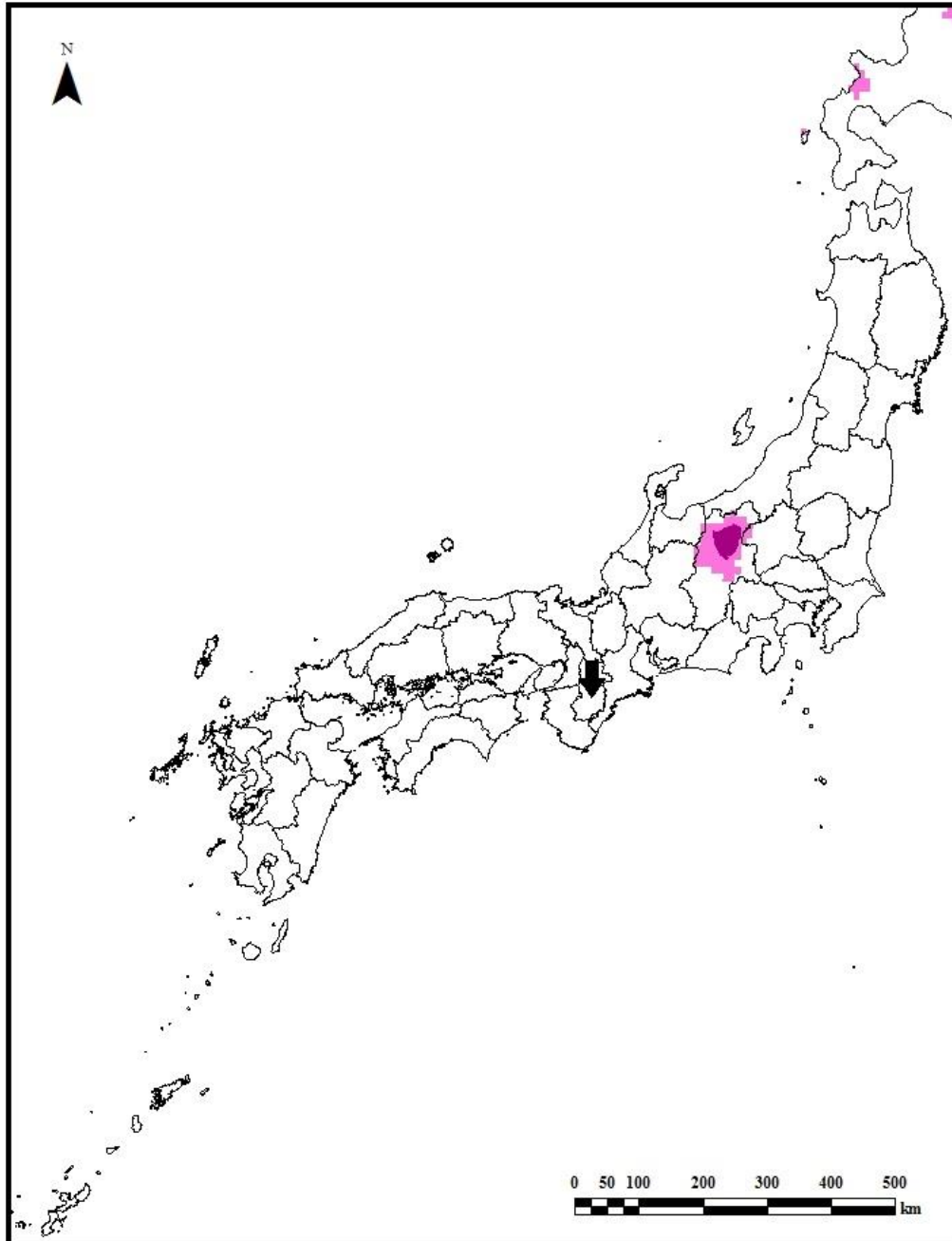


図 76. 酸素同位体比に基づく Fujiwara11 の推定産地
濃色：1 標準偏差、淡色：2 標準偏差. 矢印はサンプリング地点

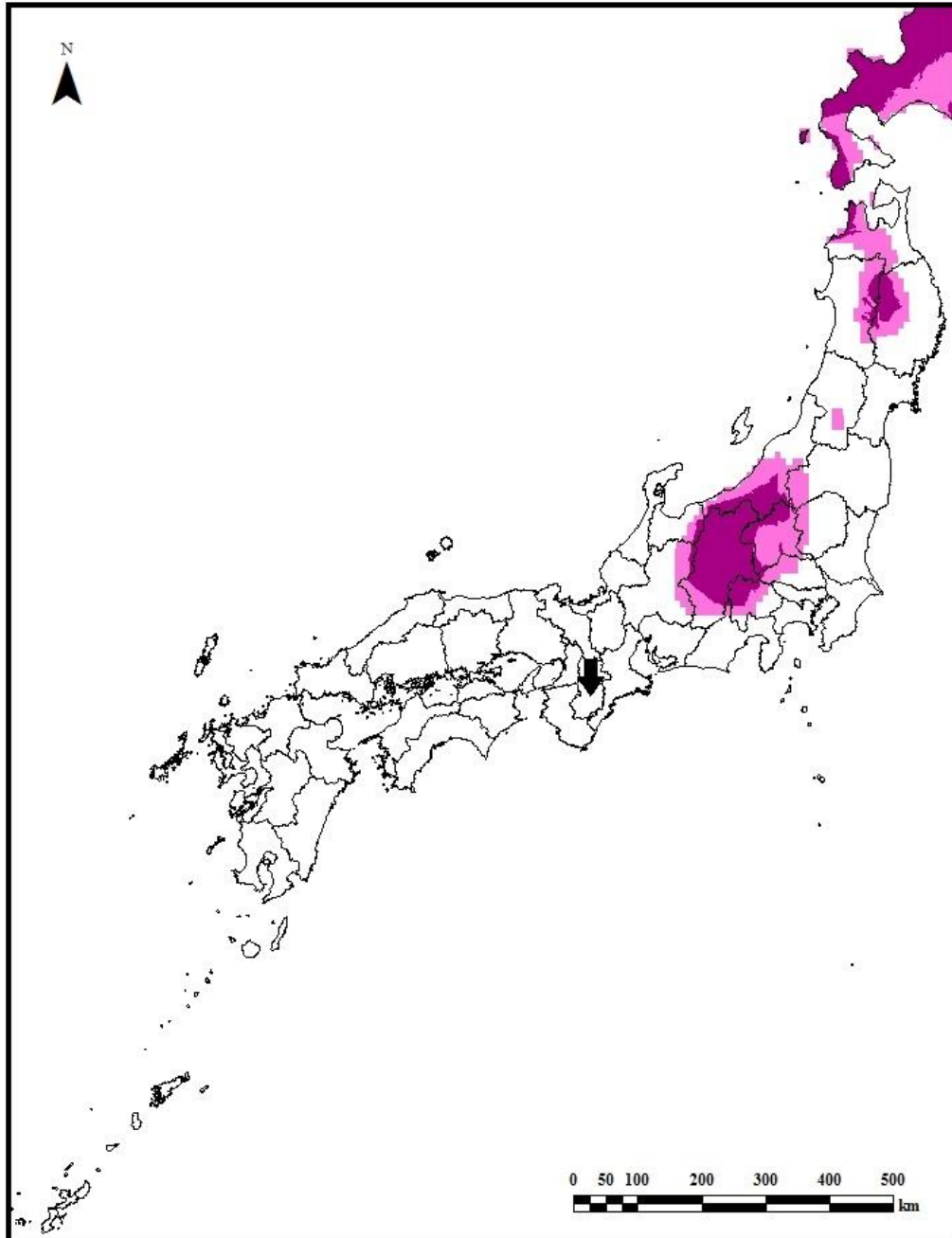


図 77. 酸素同位体比に基づく Fujiwara12 の推定産地
濃色：1 標準偏差、淡色：2 標準偏差. 矢印はサンプリング地点

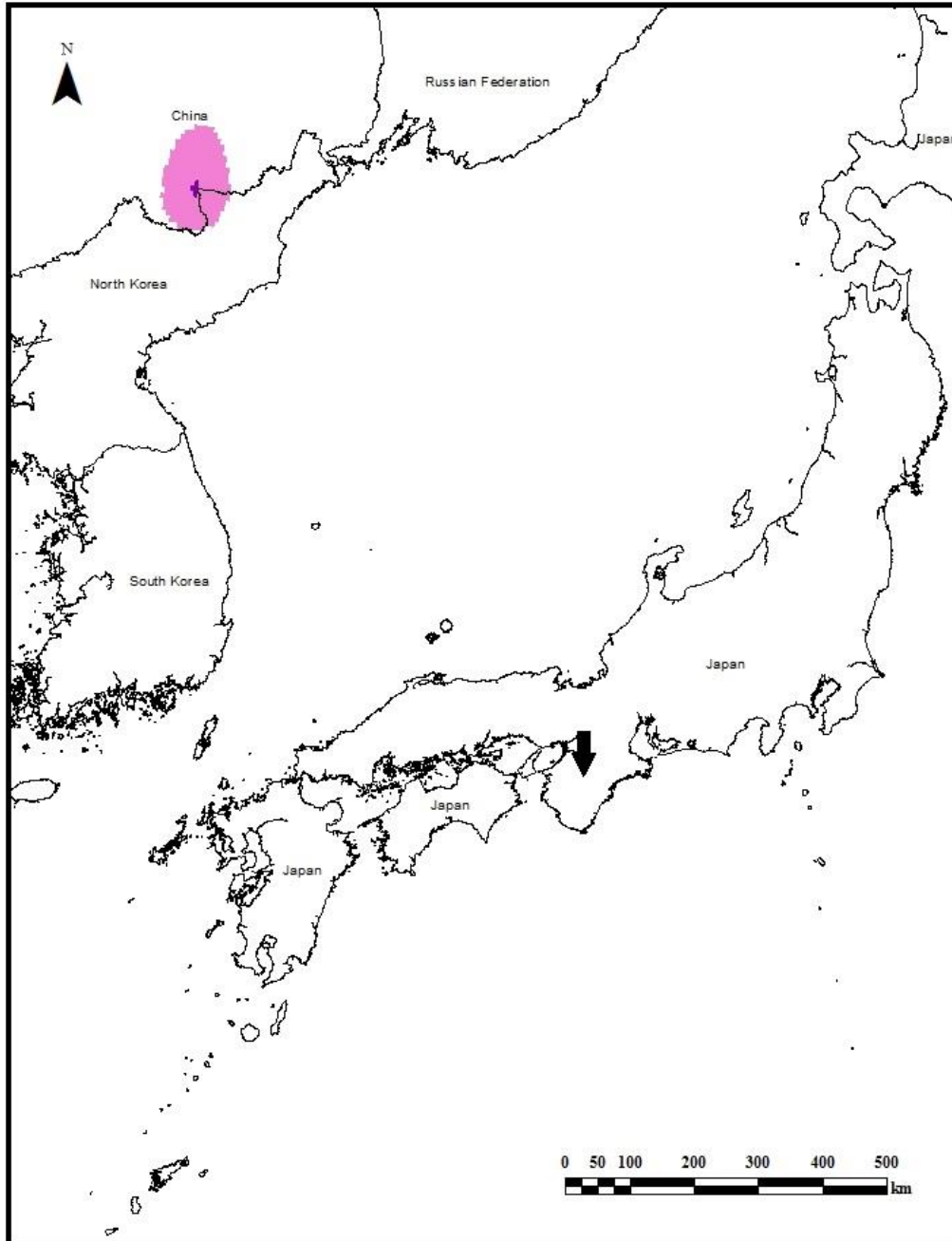


図 78. 酸素同位体比に基づく Fujiwara13 の推定産地
 濃色：1 標準偏差、淡色：2 標準偏差. 矢印はサンプリング地点

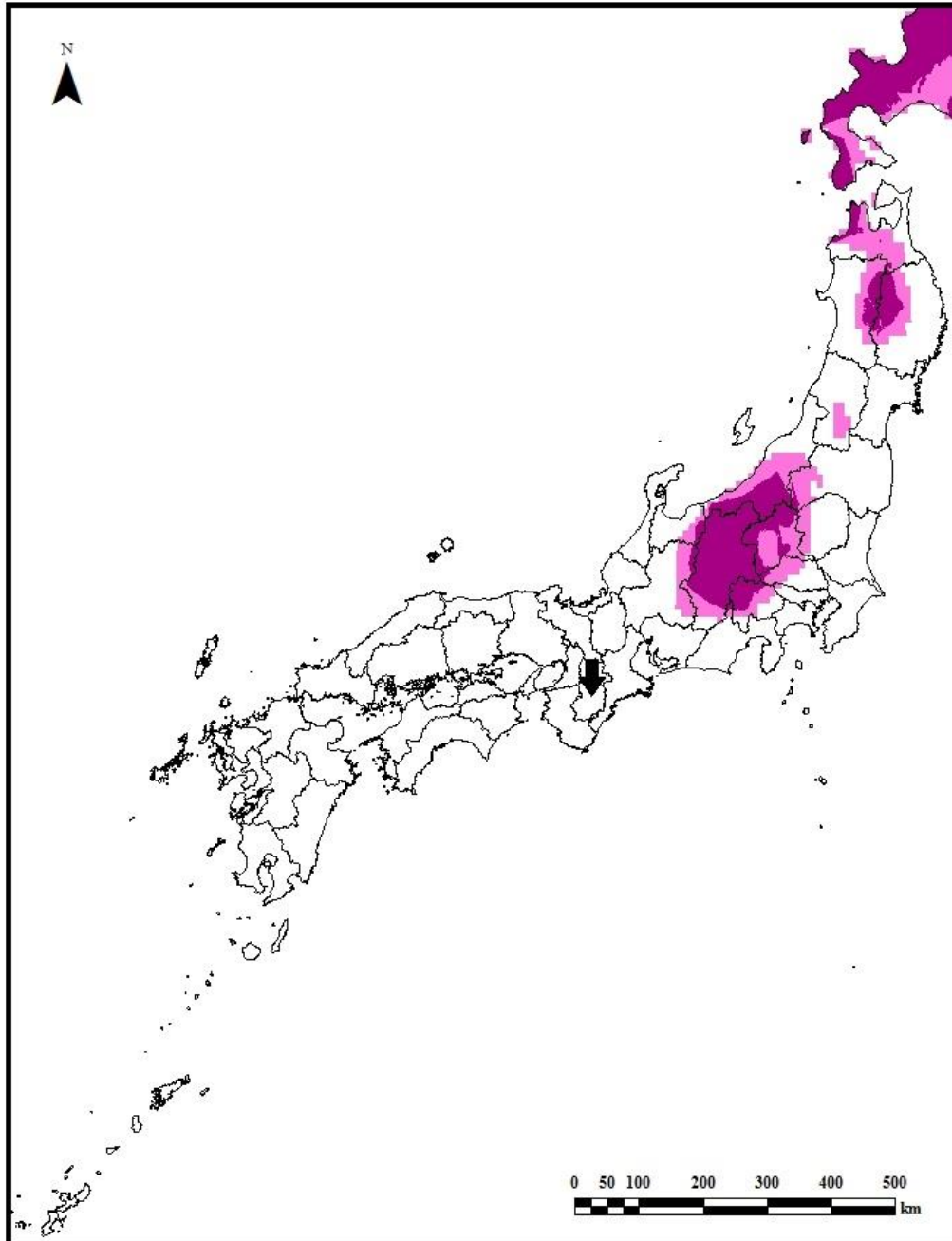


図 79. 酸素同位体比に基づく Fujiwara14 の推定産地
 濃色：1 標準偏差、淡色：2 標準偏差. 矢印はサンプリング地点

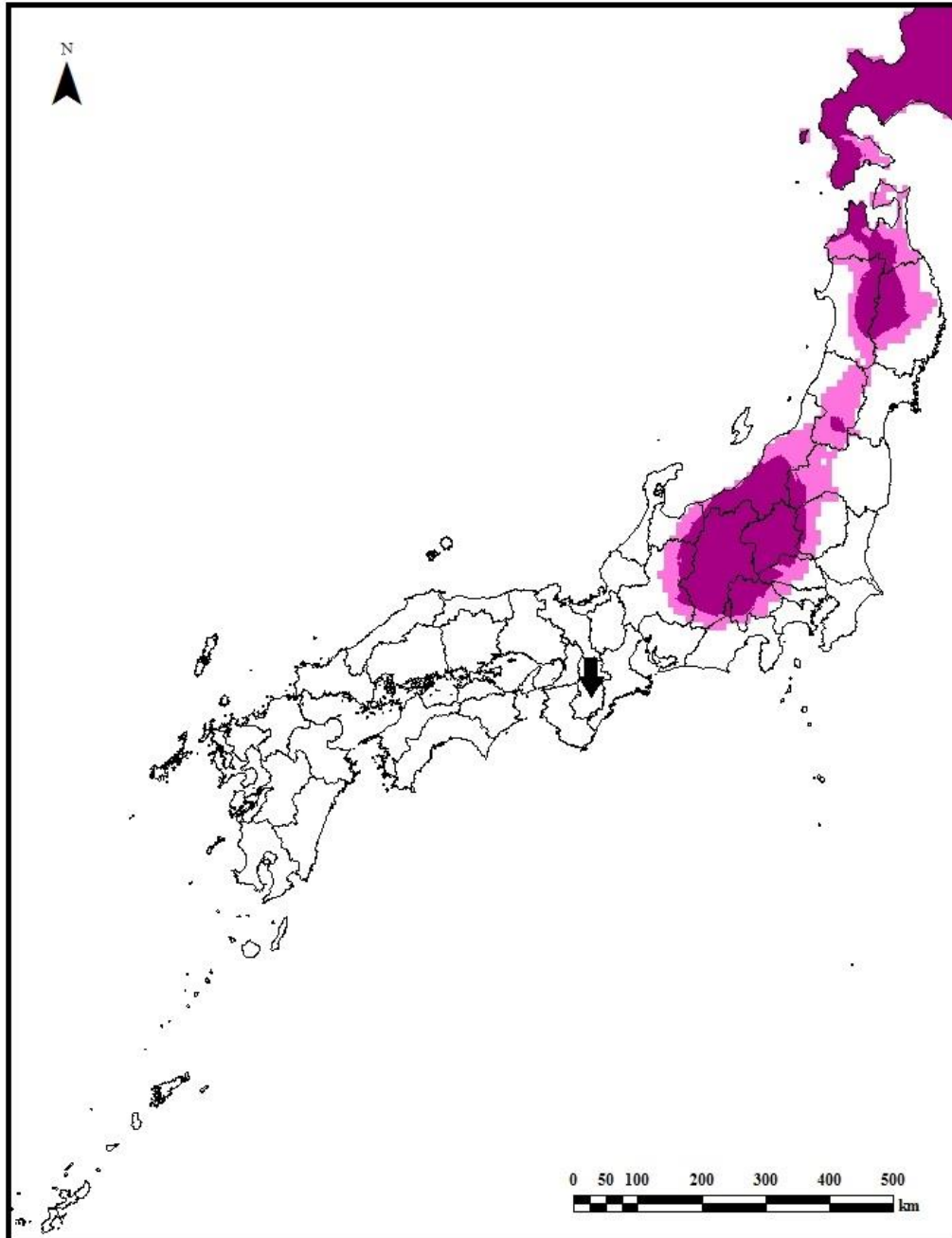


図 80. 酸素同位体比に基づく Fujiwara15 の推定産地
濃色：1 標準偏差、淡色：2 標準偏差. 矢印はサンプリング地点

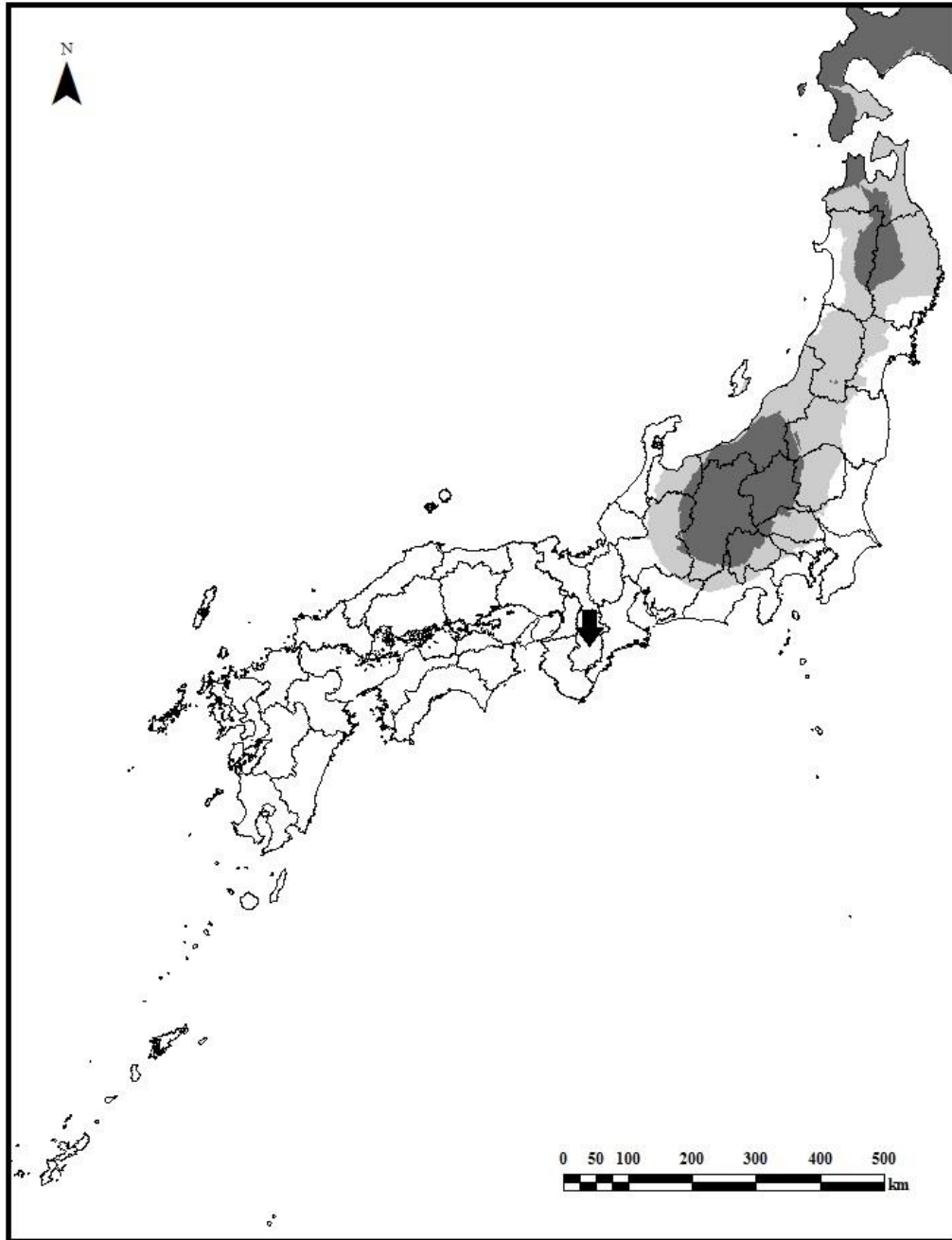


図 81. 酸素同位体比に基づく藤原宮跡出土ウマ集団の推定産地
 濃色：1 標準偏差、淡色：2 標準偏差. 矢印はサンプリング地点

表 1. 宮崎県都井岬におけるストロンチウム同位体比

分析内容	試料名	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
御崎馬歯エナメル質 (都井岬草地)	Misaki01	0.70839
御崎馬歯エナメル質 (都井岬草地)	Misaki02	0.70852
御崎馬歯エナメル質 (都井岬草地)	Misaki03	0.70808
御崎馬歯エナメル質 (都井岬草地)	Misaki04	0.70805
御崎馬歯エナメル質 (都井岬草地)	Misaki05	0.70828
御崎馬歯エナメル質 (都井岬灯台)	Misaki06	0.70939
植物 (都井岬扇山草地)	TP01	0.70806
植物 (都井岬扇山草地)	TP02	0.70830
植物 (都井岬扇山草地)	TP03	0.70822
植物 (都井岬扇山草地)	TP04	0.70832
植物 (都井岬扇山草地)	TP05	0.70808
植物 (都井岬扇山草地)	TP06	0.70815
植物 (都井岬小松ヶ丘草地)	TP07	0.70820
植物 (都井岬小松ヶ丘草地)	TP08	0.70836
植物 (都井岬小松ヶ丘草地)	TP09	0.70811
植物 (都井岬小松ヶ丘草地)	TP10	0.70816
植物 (都井岬小松ヶ丘草地)	TP11	0.70769
植物 (都井岬小松ヶ丘草地)	TP12	0.70804
飲水 (都井岬草地)	TW01	0.71203
飲水 (都井岬草地)	TW02	0.71203
飲水 (都井岬草地)	TW03	0.71165
飲水 (都井岬草地)	TW04	0.71096
飲水 (都井岬草地)	TW05	0.71108
飲水 (都井岬草地)	TW06	0.71187

表 2. 沖縄県与那国島北牧場におけるストロンチウム同位体比

分析内容	試料名	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
与那国馬歯エナメル質 (北牧場)	Yonaguni01	0.70924
与那国馬歯エナメル質 (北牧場)	Yonaguni02	0.70925
与那国馬歯エナメル質 (北牧場)	Yonaguni03	0.70925
与那国馬歯エナメル質 (北牧場)	Yonaguni04	0.70924
与那国馬歯エナメル質 (北牧場)	Yonaguni05	0.70927
与那国馬歯エナメル質 (北牧場)	Yonaguni06	0.70924
与那国馬歯エナメル質 (北牧場)	Yonaguni07	0.70924
与那国馬歯エナメル質 (北牧場)	Yonaguni08	0.70925
与那国馬歯エナメル質 (北牧場)	Yonaguni09	0.70925
植物 (北牧場草地)	YP01	0.70941
植物 (北牧場草地)	YP02	0.71105
植物 (北牧場草地)	YP03	0.71039
植物 (北牧場草地)	YP04	0.71131
植物 (北牧場草地)	YP05	0.71099
植物 (北牧場草地)	YP06	0.70922
飲水 (北牧場草地)	YW01	0.70921

表 3. 現生馬歯エナメル質における酸素同位体比

分析内容	試料名	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{Estimated drinking water}}$
御崎馬歯エナメル質 (都井岬草地)	Misaki01	17.8	-6.3
御崎馬歯エナメル質 (都井岬草地)	Misaki02	17.9	-6.2
御崎馬歯エナメル質 (都井岬草地)	Misaki03	17.6	-6.5
御崎馬歯エナメル質 (都井岬草地)	Misaki04	17.1	-7.2
御崎馬歯エナメル質 (都井岬草地)	Misaki05	17.4	-6.8
与那国馬歯エナメル質 (北牧場)	Yonaguni01	19.6	-4.0
与那国馬歯エナメル質 (北牧場)	Yonaguni02	18.7	-5.1
与那国馬歯エナメル質 (北牧場)	Yonaguni03	20.3	-3.1
与那国馬歯エナメル質 (北牧場)	Yonaguni04	18.8	-5.0
与那国馬歯エナメル質 (北牧場)	Yonaguni05	18.5	-5.4

表 4. 現代における表層水の酸素同位体比 (1)

ID	緯度(北緯)	経度(東経)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$	ID	緯度(北緯)	経度(東経)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$	ID	緯度(北緯)	経度(東経)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$
1	45.29	141.54	-10.5	51	42.69	140.37	-12.7	101	40.20	141.27	-9.7
2	45.25	141.42	-10.5	52	42.42	141.10	-9.8	102	40.11	141.11	-10.5
3	45.19	142.01	-9.4	53	43.84	142.40	-12.3	103	40.11	141.14	-10.3
4	45.17	141.55	-10.6	54	42.89	140.72	-12.0	104	40.09	141.47	-9.0
5	45.16	141.37	-10.8	55	42.41	141.11	-11.5	105	40.09	141.08	-11.4
6	45.07	142.23	-10.6	56	44.18	142.39	-11.6	106	40.06	141.04	-10.4
7	44.21	142.28	-10.8	57	42.13	140.45	-9.6	107	40.05	141.09	-11.2
8	44.09	143.35	-12.2	58	43.89	142.76	-13.4	108	39.59	141.08	-10.8
9	44.01	144.17	-10.5	59	40.49	140.46	-9.7	109	39.59	141.01	-11.4
10	43.57	141.40	-11.0	60	40.39	140.38	-11.3	110	39.58	140.52	-9.8
11	43.29	141.25	-10.7	61	41.29	141.06	-9.0	111	39.58	140.56	-12.1
12	43.22	142.24	-9.7	62	40.28	141.22	-10.2	112	39.58	140.55	-11.9
13	43.21	141.52	-12.4	63	40.53	140.57	-9.2	113	39.55	141.07	-11.5
14	43.21	141.27	-12.3	64	40.59	140.56	-10.8	114	39.54	141.39	-10.2
15	43.17	142.24	-10.4	65	40.48	140.62	-9.5	115	39.52	141.08	-10.7
16	43.17	143.36	-12.9	66	40.53	141.49	-9.2	116	39.52	141.08	-11.1
17	43.15	143.35	-10.4	67	40.68	140.89	-11.3	117	39.51	141.14	-10.1
18	43.11	141.01	-9.8	68	40.68	140.89	-11.5	118	39.51	141.13	-10.4
19	43.09	145.07	-11.3	69	39.45	140.09	-8.2	119	39.44	140.56	-10.9
20	43.07	141.33	-11.0	70	39.44	140.09	-8.9	120	39.42	141.10	-9.4
21	43.06	143.32	-12.9	71	39.43	140.08	-8.5	121	39.39	141.54	-9.8
22	43.04	143.09	-10.0	72	39.37	140.13	-8.9	122	39.38	141.40	-9.5
23	43.04	143.09	-12.4	73	39.27	140.20	-8.2	123	39.26	140.45	-9.6
24	43.02	144.23	-10.7	74	40.19	140.60	-9.2	124	39.18	141.09	-10.2
25	43.01	142.51	-9.8	75	39.90	140.64	-11.0	125	39.18	141.49	-9.6
26	42.58	142.54	-11.3	76	39.96	140.11	-9.1	126	39.17	140.47	-9.9
27	42.57	143.28	-9.8	77	40.24	140.03	-9.2	127	39.15	140.58	-10.3
28	42.56	141.53	-9.1	78	39.96	140.11	-7.7	128	39.10	141.25	-9.9
29	42.53	140.49	-10.4	79	40.02	140.79	-11.5	129	39.09	141.30	-9.4
30	42.53	140.32	-10.4	80	39.72	140.66	-9.7	130	39.09	141.38	-8.3
31	42.53	142.27	-12.0	81	39.43	140.28	-9.1	131	39.09	141.10	-8.5
32	42.52	140.52	-11.2	82	40.24	140.78	-10.2	132	39.06	141.41	-8.1
33	42.46	142.09	-8.9	83	40.22	140.59	-9.6	133	39.02	141.44	-7.9
34	42.44	140.54	-10.0	84	39.75	140.31	-10.0	134	39.02	141.07	-8.8
35	42.39	141.33	-9.6	85	40.07	140.58	-10.5	135	38.57	141.07	-10.0
36	42.39	141.31	-12.2	86	40.30	140.26	-8.9	136	39.97	140.98	-11.1
37	42.34	141.21	-11.2	87	40.21	140.24	-8.7	137	39.74	140.94	-10.8
38	42.31	140.47	-10.9	88	40.09	140.09	-8.0	138	39.79	140.99	-11.1
39	42.28	141.11	-8.3	89	39.96	140.16	-8.3	139	38.56	140.13	-9.8
40	42.10	142.47	-11.3	90	39.72	140.25	-8.9	140	38.47	140.19	-10.2
41	41.48	140.44	-9.3	91	40.15	140.83	-11.4	141	38.47	140.19	-10.9
42	41.37	140.18	-13.7	92	39.98	140.80	-11.7	142	38.45	139.52	-9.2
43	41.89	140.96	-10.1	93	39.96	140.80	-11.8	143	38.17	140.22	-10.6
44	42.12	140.41	-10.4	94	40.28	140.09	-10.6	144	38.62	140.09	-9.6
45	42.32	140.28	-9.9	95	39.97	140.72	-11.1	145	38.62	140.09	-10.0
46	42.81	140.23	-11.3	96	39.89	140.69	-9.7	146	38.59	141.06	-9.6
47	42.88	140.53	-12.0	97	39.80	140.78	-10.6	147	38.58	141.19	-7.8
48	42.82	140.53	-11.6	98	39.77	140.76	-10.8	148	38.49	141.02	-10.1
49	42.80	140.60	-11.9	99	39.80	140.80	-10.3	149	38.48	141.06	-9.1
50	42.81	140.69	-11.8	100	39.33	140.56	-9.6	150	38.46	141.04	-9.6

表 4. 現代における表層水の酸素同位体比 (2)

ID	緯度(北緯)	経度(東経)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$	ID	緯度(北緯)	経度(東経)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$	ID	緯度(北緯)	経度(東経)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$
151	38.45	140.42	-9.9	201	36.30	138.77	-8.9	251	35.25	133.20	-8.5
152	38.43	141.31	-7.4	202	35.51	137.42	-10.9	252	35.19	133.41	-8.2
153	38.38	140.57	-9.0	203	36.32	138.20	-13.0	253	36.01	133.02	-7.6
154	38.34	141.03	-7.9	204	35.64	138.04	-11.3	254	35.24	133.09	-8.1
155	38.31	140.55	-10.0	205	35.64	138.04	-11.1	255	35.19	133.05	-7.8
156	38.25	140.53	-9.9	206	36.04	138.11	-11.6	256	34.41	131.50	-7.8
157	38.21	140.53	-8.8	207	36.04	138.11	-12.3	257	35.04	133.56	-7.7
158	38.17	140.54	-8.2	208	36.10	138.21	-11.6	258	34.59	133.27	-8.3
159	38.15	140.52	-8.4	209	36.75	138.44	-11.5	259	34.36	133.47	-8.6
160	38.13	140.49	-8.6	210	36.93	138.45	-12.2	260	34.32	133.50	-8.3
161	38.03	140.39	-10.8	211	36.58	138.28	-11.8	261	34.52	133.01	-8.5
162	38.02	140.35	-9.1	212	36.57	138.20	-11.8	262	34.47	132.51	-8.5
163	38.00	140.25	-11.3	213	35.64	138.04	-11.6	263	34.43	132.41	-7.9
164	37.48	139.08	-10.6	214	35.84	137.95	-10.6	264	34.34	132.28	-8.5
165	37.45	139.01	-10.7	215	36.53	136.53	-8.8	265	34.29	133.22	-7.9
166	37.41	138.16	-8.2	216	36.57	136.49	-8.5	266	34.27	132.50	-7.6
167	37.26	138.53	-10.8	217	37.10	136.51	-8.6	267	34.26	132.45	-8.4
168	37.22	138.36	-9.4	218	37.16	136.53	-8.6	268	34.24	133.05	-7.8
169	38.22	139.45	-8.2	219	37.05	137.02	-8.2	269	33.58	130.56	-6.5
170	38.22	139.45	-9.0	220	37.47	137.24	-7.9	270	34.15	131.18	-7.3
171	37.92	139.35	-10.2	221	36.58	136.67	-8.7	271	34.10	132.13	-7.7
172	37.46	140.25	-7.3	222	36.03	136.14	-8.8	272	33.58	132.09	-6.9
173	37.46	140.28	-10.9	223	35.22	137.16	-7.9	273	34.04	131.48	-7.8
174	37.43	140.57	-7.3	224	34.46	137.23	-7.2	274	34.14	131.49	-7.8
175	37.43	140.58	-7.6	225	34.57	137.11	-6.9	275	34.08	131.02	-7.6
176	36.56	140.49	-8.1	226	35.09	136.58	-9.9	276	34.22	131.11	-8.0
177	36.54	140.48	-6.9	227	35.09	138.23	-8.4	277	34.16	134.09	-6.8
178	37.02	140.12	-11.1	228	34.43	137.59	-9.9	278	34.07	133.48	-7.8
179	36.83	139.71	-8.6	229	34.58	138.28	-7.4	279	33.55	133.46	-8.5
180	36.13	140.07	-8.9	230	35.10	139.07	-7.9	280	34.02	133.53	-8.2
181	35.54	138.48	-12.4	231	35.10	139.07	-7.9	281	34.00	133.47	-8.2
182	35.55	139.39	-9.3	232	34.97	139.10	-7.4	282	33.55	134.40	-6.7
183	36.05	139.42	-10.3	233	34.82	139.07	-6.9	283	34.00	134.44	-8.2
184	35.42	139.46	-9.1	234	34.82	139.07	-6.8	284	34.02	132.50	-7.1
185	35.41	139.28	-8.4	235	35.06	136.04	-7.2	285	34.02	132.59	-7.9
186	35.29	140.08	-6.2	236	35.19	136.17	-7.3	286	33.58	133.02	-7.1
187	35.46	140.23	-8.9	237	34.29	136.44	-6.6	287	33.56	132.41	-7.1
188	35.39	140.38	-10.4	238	34.22	135.11	-7.6	288	33.56	133.03	-8.5
189	36.33	139.17	-11.9	239	34.19	135.37	-8.5	289	33.53	132.53	-8.2
190	36.64	138.51	-13.0	240	33.74	135.99	-6.1	290	33.52	132.52	-8.3
191	36.25	137.98	-12.0	241	33.68	135.37	-6.1	291	33.52	132.52	-8.3
192	36.84	139.18	-12.3	242	33.64	135.93	-6.1	292	33.51	132.02	-8.5
193	36.80	138.95	-10.6	243	33.57	135.33	-8.7	293	33.49	132.59	-7.8
194	36.63	139.04	-9.7	244	35.18	135.42	-9.1	294	33.42	132.53	-8.9
195	36.69	138.78	-10.9	245	34.47	135.57	-7.4	295	33.35	132.59	-8.6
196	36.69	138.78	-10.4	246	34.47	135.57	-7.9	296	33.37	132.55	-8.2
197	36.47	138.40	-12.5	247	34.44	135.16	-6.7	297	33.33	132.39	-7.4
198	36.46	138.47	-11.9	248	34.49	135.21	-7.1	298	33.31	132.33	-7.2
199	36.51	138.74	-10.0	249	34.80	135.24	-8.0	299	33.27	132.26	-7.8
200	36.58	138.73	-9.6	250	35.28	133.51	-8.8	300	33.27	132.26	-8.1

表 4. 現代における表層水の酸素同位体比 (3)

ID	緯度(北緯)	経度(東経)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$	ID	緯度(北緯)	経度(東経)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$	ID	緯度(北緯)	経度(東経)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$
301	33.14	132.35	-6.8	351	33.17	130.54	-8.3	401	35.09	126.57	-7.2
302	33.14	132.35	-6.6	352	33.13	131.12	-8.6	402	34.58	127.39	-6.5
303	33.50	133.47	-7.8	353	33.02	131.18	-8.6	403	37.58	126.98	-8.7
304	33.47	133.42	-7.2	354	32.58	131.23	-8.6	404	36.50	129.44	-9.0
305	33.39	133.38	-6.5	355	32.58	131.54	-6.7	405	36.02	128.38	-10.1
306	33.34	133.08	-7.9	356	33.28	131.48	-8.5	406	37.47	126.71	-7.0
307	33.33	133.28	-6.4	357	33.28	131.48	-8.5	407	36.86	127.96	-7.7
308	33.33	133.13	-6.9	358	33.10	131.23	-7.0	408	35.12	129.05	-6.1
309	33.33	133.26	-7.0	359	33.10	131.23	-9.8	409	37.49	127.04	-6.1
310	33.31	134.17	-6.0	360	33.14	131.20	-9.8	410	36.84	126.91	-5.5
311	33.31	133.17	-6.9	361	32.58	130.36	-6.8	411	36.39	127.38	-6.9
312	33.31	133.46	-5.9	362	32.59	130.46	-7.6	412	36.02	129.35	-7.7
313	33.31	133.52	-6.1	363	32.58	131.08	-8.3	413	35.49	128.59	-5.6
314	33.27	133.57	-6.5	364	32.48	130.48	-7.2	414	35.31	128.62	-6.1
315	33.27	134.14	-6.2	365	32.43	130.46	-6.9	415	35.16	129.16	-5.5
316	33.26	134.00	-6.3	366	32.33	130.41	-7.8	416	35.22	129.09	-5.2
317	33.24	134.03	-6.0	367	32.31	130.31	-6.4	417	35.85	128.64	-8.7
318	33.22	134.12	-6.3	368	32.27	130.40	-7.3	418	33.50	126.53	-6.8
319	33.52	130.50	-7.3	369	32.20	130.44	-7.6	419	37.75	128.87	-7.6
320	33.51	130.41	-6.4	370	32.18	130.30	-6.7	420	37.52	128.22	-7.7
321	33.44	130.58	-7.0	371	32.17	130.33	-7.0	421	37.58	127.14	-9.2
322	33.34	130.23	-7.2	372	32.16	130.37	-7.5	422	37.58	126.98	-7.5
323	33.29	130.29	-7.0	373	32.14	130.46	-7.6	423	37.49	126.72	-7.5
324	33.29	130.32	-6.9	374	32.14	130.42	-7.3	424	37.17	128.11	-6.3
325	33.29	130.32	-7.4	375	32.47	131.16	-7.9	425	37.29	127.62	-6.5
326	33.21	130.41	-7.5	376	31.27	130.31	-6.5	426	37.11	128.41	-9.4
327	33.20	130.46	-7.6	377	31.23	130.51	-6.3	427	33.50	126.53	-6.8
328	33.17	130.31	-7.0	378	31.22	130.26	-6.1	428	37.58	126.93	-7.5
329	33.13	130.30	-6.7	379	30.42	131.04	-5.8	429	37.47	126.74	-7.9
330	33.12	130.32	-6.7	380	30.33	131.02	-6.0	430	45.48	126.37	-11.5
331	33.11	130.31	-7.4	381	30.19	130.39	-6.7	431	45.31	124.16	-10.4
332	33.07	130.31	-7.1	382	30.18	130.32	-6.9	432	43.53	126.32	-11.9
333	33.02	130.27	-7.0	383	27.40	128.57	-5.7	433	43.33	123.29	-9.3
334	33.21	129.59	-5.4	384	31.26	130.62	-7.0	434	42.59	126.42	-10.5
335	33.21	130.26	-6.7	385	31.76	130.75	-7.4	435	42.55	129.31	-10.1
336	33.17	130.18	-7.5	386	31.26	130.62	-6.9	436	42.46	129.26	-12.5
337	33.16	129.53	-7.0	387	31.76	130.75	-7.5	437	42.29	128.02	-13.0
338	33.16	129.58	-6.8	388	31.75	130.76	-7.9	438	42.00	128.01	-14.7
339	33.16	130.01	-7.1	389	31.75	130.76	-7.3	439	41.49	123.25	-8.5
340	33.13	130.10	-7.7	390	32.06	130.62	-6.3				
341	33.22	129.34	-6.7	391	26.35	127.58	-4.9				
342	33.16	129.35	-6.8	392	26.21	127.68	-4.6				
343	33.15	129.37	-6.8	393	37.53	127.45	-10.3				
344	33.09	129.41	-7.1	394	37.17	127.40	-9.2				
345	32.51	130.02	-6.6	395	37.16	127.02	-8.1				
346	32.69	128.83	-6.5	396	36.43	126.19	-7.1				
347	33.43	131.40	-4.9	397	36.36	127.32	-7.6				
348	33.41	131.36	-6.0	398	36.19	127.28	-7.7				
349	33.33	131.21	-7.6	399	35.56	126.59	-6.4				
350	33.19	131.29	-8.7	400	35.35	128.38	-7.3				

表 5. 現代における表層水（九州南部以南）の酸素同位体比

採集地点	緯度（北緯）	経度（東経）	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$
九州南部（椎葉）	32.1	130.4	-7.9
九州南部（延岡）	32.5	131.2	-7.8
九州南部（宮崎）	31.3	130.3	-6.9
九州南部（平川）	31.2	130.5	-6.5
九州南部（鹿屋）	31.2	130.3	-6.3
九州南部（知覧）	30.4	131.0	-6.1
九州南部（種子島）	30.3	131.0	-5.8
九州南部（種子島）	30.2	130.4	-6.0
九州南部（屋久島）	30.2	130.3	-6.7
九州南部（屋久島）	27.4	128.6	-6.9
九州南部（徳之島）	31.3	130.6	-5.7
九州南部（指宿）	31.8	130.8	-7.0
九州南部（薩摩硫黄島）	31.3	130.6	-6.0
九州南部（霧島）	31.8	130.8	-7.4
九州南部（指宿）	31.7	130.8	-6.9
九州南部（霧島）	31.7	130.8	-7.5
九州南部（川内）	32.1	130.6	-6.2
沖縄（名護）	26.4	127.6	-4.9
沖縄（那覇）	26.2	127.7	-4.6
沖縄（沖縄本島）	26.1	127.5	-5.7
沖縄（宮古島）	24.5	125.2	-5.9
沖縄（石垣島）	24.2	124.1	-5.4
台湾（台北）	25.0	121.3	-4.5

表 6. 現生馬歯エナメル質の成長線サンプルの酸素同位体比

分析内容	試料名	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{Estimated drinking water}}$
御崎馬歯エナメル質 (都井岬草地)	Misaki01_1	18.4	-5.5
御崎馬歯エナメル質 (都井岬草地)	Misaki01_2	18.2	-5.8
御崎馬歯エナメル質 (都井岬草地)	Misaki01_3	17.6	-6.6
御崎馬歯エナメル質 (都井岬草地)	Misaki01_4	18.1	-5.9
御崎馬歯エナメル質 (都井岬草地)	Misaki01_5	18.3	-5.7
御崎馬歯エナメル質 (都井岬草地)	Misaki01_6	17.6	-6.5
御崎馬歯エナメル質 (都井岬草地)	Misaki01_7	17.5	-6.7
御崎馬歯エナメル質 (都井岬草地)	Misaki01_8	17.5	-6.6
御崎馬歯エナメル質 (都井岬草地)	Misaki01_9	16.9	-7.4
御崎馬歯エナメル質 (都井岬草地)	Misaki01_10	17.3	-6.9
御崎馬歯エナメル質 (都井岬草地)	Misaki01_11	17.4	-6.8
御崎馬歯エナメル質 (都井岬草地)	Misaki01_12	17.3	-7.0
御崎馬歯エナメル質 (都井岬草地)	Misaki01_13	17.8	-6.3
御崎馬歯エナメル質 (都井岬草地)	Misaki01_14	17.4	-6.8
御崎馬歯エナメル質 (都井岬草地)	Misaki01_15	17.5	-6.7
御崎馬歯エナメル質 (都井岬草地)	Misaki01_16	18.3	-5.6
御崎馬歯エナメル質 (都井岬草地)	Misaki01_17	17.5	-6.6
与那国馬歯エナメル質 (北牧場)	Yonaguni01_1	19.6	-4.0
与那国馬歯エナメル質 (北牧場)	Yonaguni01_2	18.7	-5.1
与那国馬歯エナメル質 (北牧場)	Yonaguni01_3	20.3	-3.1
与那国馬歯エナメル質 (北牧場)	Yonaguni01_4	18.8	-5.0
与那国馬歯エナメル質 (北牧場)	Yonaguni01_5	18.5	-5.4
与那国馬歯エナメル質 (北牧場)	Yonaguni01_6	18.5	-5.4
与那国馬歯エナメル質 (北牧場)	Yonaguni01_7	18.5	-5.3
与那国馬歯エナメル質 (北牧場)	Yonaguni01_8	18.7	-5.2
与那国馬歯エナメル質 (北牧場)	Yonaguni01_9	18.8	-5.0
与那国馬歯エナメル質 (北牧場)	Yonaguni01_10	18.3	-5.7
与那国馬歯エナメル質 (北牧場)	Yonaguni01_11	18.6	-5.3
与那国馬歯エナメル質 (北牧場)	Yonaguni01_12	19.1	-4.7
与那国馬歯エナメル質 (北牧場)	Yonaguni01_13	19.5	-4.2
与那国馬歯エナメル質 (北牧場)	Yonaguni01_14	20.0	-3.5
与那国馬歯エナメル質 (北牧場)	Yonaguni01_15	19.8	-3.8
与那国馬歯エナメル質 (北牧場)	Yonaguni01_16	19.9	-3.7
与那国馬歯エナメル質 (北牧場)	Yonaguni01_17	19.3	-4.4
与那国馬歯エナメル質 (北牧場)	Yonaguni01_18	18.5	-5.4
与那国馬歯エナメル質 (北牧場)	Yonaguni01_19	18.5	-5.4
与那国馬歯エナメル質 (北牧場)	Yonaguni01_20	18.5	-5.3

表 7. 由比ヶ浜南遺跡および博多遺跡出土馬牛歯エナメル質のストロンチウム同位体比

分析内容	試料名	遺物番号	採取部位	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
由比ヶ浜南遺跡出土馬歯エナメル質	Yuigahama01	43-2	UP ₂	0.70633
由比ヶ浜南遺跡出土馬歯エナメル質	Yuigahama02	129c	LI ₂	0.70953
由比ヶ浜南遺跡出土馬歯エナメル質	Yuigahama03	5113	UP _{3or4} , UM _{1or2}	0.70620
由比ヶ浜南遺跡出土馬歯エナメル質	Yuigahama04	5296	UI ₁	0.70632
由比ヶ浜南遺跡出土馬歯エナメル質	Yuigahama05	5133	UP _{3or4} , UM _{1or2}	0.70852
由比ヶ浜南遺跡出土馬歯エナメル質	Yuigahama06	5385	UM _{1or2}	0.70831
由比ヶ浜南遺跡出土牛歯エナメル質	Yuigahama07	65	LM _{1or2}	0.70508
由比ヶ浜南遺跡出土牛歯エナメル質	Yuigahama08	5121	UM _{1or2}	0.70892
博多遺跡出土馬歯エナメル質	Hakata01	005840001	UP ₂	0.70813
博多遺跡出土馬歯エナメル質	Hakata02	005840007	LM _{1or2}	0.70781
博多遺跡出土馬歯エナメル質	Hakata03	861800831-1 1	LM _{1or2}	0.70776
博多遺跡出土馬歯エナメル質	Hakata04	880610426	UP _{3or4}	0.70635
博多遺跡出土馬歯エナメル質	Hakata05	880610407	UM _{1or2}	0.70708
博多遺跡出土馬歯エナメル質	Hakata06	955981023-2 1	UP _{3or4}	0.70677
博多遺跡出土馬歯エナメル質	Hakata07	86488313-008	LM _{1or2}	0.70642
博多遺跡出土馬歯エナメル質	Hakata08	86488307-013	LM _{1or2}	0.70952
博多遺跡出土馬歯エナメル質	Hakata09	86488307-014	UP ₂	0.70661

表 8. 由比ヶ浜南遺跡出土馬犬猫歯エナメル質のストロンチウム同位体比

分析内容	試料名	遺物番号	採取部位	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
由比ヶ浜南遺跡出土犬歯エナメル質	Yuigahama09	270	LM ₁	0.70890
由比ヶ浜南遺跡出土犬歯エナメル質	Yuigahama10	29	LM ₁	0.70872
由比ヶ浜南遺跡出土犬歯エナメル質	Yuigahama11	5738	LM ₁	0.70847
由比ヶ浜南遺跡出土犬歯エナメル質	Yuigahama12	5112	LM ₁	0.70683
由比ヶ浜南遺跡出土犬歯エナメル質	Yuigahama13	10807	LM ₁	0.70876
由比ヶ浜南遺跡出土犬歯エナメル質	Yuigahama14	番号なし	LM ₁	0.70892
由比ヶ浜南遺跡出土猫歯エナメル質	Yuigahama15	10433	LM ₁	0.70888
由比ヶ浜南遺跡出土猫歯エナメル質	Yuigahama16	番号なし	LM ₁	0.70882

表 9. 日本列島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

分析内容	試料名	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
植物 (中世鎌倉内、大塔宮)	KMP01	0.70785
植物 (中世鎌倉内、鶴岡八幡宮)	KMP02	0.70701
植物 (中世鎌倉内、稲村ヶ崎)	KMP03	0.70844
植物 (中世鎌倉内、七里ヶ浜)	KMP04	0.70859
植物 (中世鎌倉内、由比ヶ浜)	KMP05	0.70918
植物 (鎌倉市周辺域、朝日奈)	KMP06	0.70823
植物 (鎌倉市周辺域、鎌倉霊園)	KMP07	0.70501
植物 (鎌倉市周辺域、十二所)	KMP08	0.70675
植物 (鎌倉市周辺域、建長寺)	KMP09	0.70648
植物 (鎌倉市周辺域、雪ノ下)	KMP10	0.70690
植物 (鎌倉市周辺域、極楽寺)	KMP11	0.70737
河川水 (鎌倉市周辺域、滑川系)	KMW01	0.70641
河川水 (鎌倉市周辺域、滑川系)	KMW02	0.70593
河川水 (鎌倉市周辺域、滑川系)	KMW03	0.70778
河川水 (鎌倉市周辺域、極楽寺系)	KMW04	0.70829
河川水 (鎌倉市周辺域、神戸川系)	KMW05	0.70750
植物 (福岡市博多遺跡周辺)	HKP01	0.70818
植物 (福岡市博多遺跡周辺)	HKP02	0.70800
植物 (福岡市、今里不動)	HKP03	0.70782
植物 (福岡市、香椎)	HKP04	0.71154
植物 (福岡市、岡本)	HKP05	0.70588
植物 (福岡市、金隈)	HKP06	0.70817
河川水 (福岡市、御笠川)	HKW01	0.70688
植物 (山梨県柳平)	YMP01	0.70450
植物 (山梨県三ツ沢)	YMP02	0.70555
植物 (山梨県宮久保)	YMP03	0.70456
植物 (山梨県真原)	YMP04	0.70755
植物 (山梨県神代桜)	YMP05	0.70746
植物 (山梨県牧原)	YMP06	0.70748
植物 (山梨県法善寺)	YMP07	0.70673
植物 (山梨県法善寺)	YMP08	0.70675
植物 (山梨県天神社)	YMP09	0.70734
植物 (山梨県檜山)	YMP10	0.70436
植物 (山梨県塩川)	YMP11	0.71034

表 10. 遺跡出土馬歯エナメル質の酸素同位体比

試料名	遺物番号	採取部位	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{Estimated drinking water}}$
Noda01	No.1	LM ₃	13.5	-11.7
Noda02	No.2	LM ₃	13.8	-11.3
Noda03	No.3	LM ₃	13.6	-11.6
Noda04	No.4	LM ₃	14.6	-10.3
Noda05	No.5	LM ₃	14.0	-11.0
Doudo01	N-98-H203	UM _{1or2}	14.0	-11.0
Doudo02	SK16-1-H202	LP _{3or4}	14.3	-10.7
Doudo03	SK18-2-H204	UM ₂	13.8	-11.3
Doudo04	SK18-3-H209	UM ₂	14.5	-10.4
Doudo05	SK18-4-H207	UP _{3or4}	15.5	-9.2
Yuigahama01	43-2	UP ₂	16.2	-8.2
Yuigahama02	129c	LI ₂	15.4	-9.3
Yuigahama03	5113	UP _{3or4} , UM _{1or2}	16.3	-8.2
Yuigahama04	5296	UI1	16.4	-8.0
Yuigahama05	5133	UP _{3or4} , UM _{1or2}	19.1	-4.6
Yuigahama06	5385	UM _{1or2}	15.0	-9.8
Hakata01	005840001	UP ₂	15.9	-8.7
Hakata02	005840007	LM _{1or2}	17.7	-6.4
Hakata03	861800831-1 1	LM _{1or2}	19.2	-4.5
Hakata04	880610426	UP _{3or4}	19.3	-4.4
Hakata05	880610407	UM _{1or2}	19.1	-4.6
Hakata06	955981023-2 1	UP _{3or4}	19.0	-4.8
Hakata07	86488313-008	LM _{1or2}	18.7	-5.1
Hakata08	86488307-013	LM _{1or2}	17.9	-6.2
Hakata09	86488307-014	UP ₂	18.2	-5.8
Nakijin01	No.47	LM ₃	20.5	-2.8
Nakijin02	No.48	LM ₃	19.0	-4.8
Nakijin03	No.10-15	UP _{3or4} , UM _{1or2}	19.2	-4.5
Nakijin04	No.10-20	UP _{3or4} , UM _{1or2}	20.2	-3.3

表 11. 遺跡出土馬における成長線サンプルの酸素同位体比

分析内容	試料名	遺物番号	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{Estimated drinking water}}$
百々遺跡出土馬歯エナメル質成長線サンプル	Doudo01-1	N-98-H203	15.4	-9.3
百々遺跡出土馬歯エナメル質成長線サンプル	Doudo01-2	N-98-H203	14.9	-10.0
百々遺跡出土馬歯エナメル質成長線サンプル	Doudo01-3	N-98-H203	14.7	-10.2
百々遺跡出土馬歯エナメル質成長線サンプル	Doudo01-4	N-98-H203	14.6	-10.2
百々遺跡出土馬歯エナメル質成長線サンプル	Doudo01-5	N-98-H203	15.1	-9.7
百々遺跡出土馬歯エナメル質成長線サンプル	Doudo01-6	N-98-H203	15.0	-9.8
百々遺跡出土馬歯エナメル質成長線サンプル	Doudo01-7	N-98-H203	14.5	-10.4
百々遺跡出土馬歯エナメル質成長線サンプル	Doudo01-8	N-98-H203	14.6	-10.2
百々遺跡出土馬歯エナメル質成長線サンプル	Doudo01-9	N-98-H203	15.1	-9.6
百々遺跡出土馬歯エナメル質成長線サンプル	Doudo01-10	N-98-H203	13.9	-11.1
百々遺跡出土馬歯エナメル質成長線サンプル	Doudo01-11	N-98-H203	14.2	-10.7
百々遺跡出土馬歯エナメル質成長線サンプル	Doudo01-12	N-98-H203	14.8	-10.0
百々遺跡出土馬歯エナメル質成長線サンプル	Doudo01-13	N-98-H203	15.1	-9.7
百々遺跡出土馬歯エナメル質成長線サンプル	Doudo01-14	N-98-H203	14.7	-10.2
百々遺跡出土馬歯エナメル質成長線サンプル	Doudo01-15	N-98-H203	14.8	-10.1
百々遺跡出土馬歯エナメル質成長線サンプル	Doudo01-16	N-98-H203	14.7	-10.2
百々遺跡出土馬歯エナメル質成長線サンプル	Doudo01-17	N-98-H203	14.4	-10.5
百々遺跡出土馬歯エナメル質成長線サンプル	Doudo01-18	N-98-H203	14.1	-10.9
百々遺跡出土馬歯エナメル質成長線サンプル	Doudo01-19	N-98-H203	14.2	-10.7
百々遺跡出土馬歯エナメル質成長線サンプル	Doudo01-20	N-98-H203	13.6	-11.6
百々遺跡出土馬歯エナメル質成長線サンプル	Doudo01-21	N-98-H203	14.1	-10.9
百々遺跡出土馬歯エナメル質成長線サンプル	Doudo01-22	N-98-H203	14.7	-10.1
百々遺跡出土馬歯エナメル質成長線サンプル	Doudo01-23	N-98-H203	13.8	-11.3

表 12. 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

分析内容	試料名	遺物番号	採取部位	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
藤原宮跡出土馬歯エナメル質	Fujiwara01	153-042	LP _{3or4} , LM _{1or2}	0.70840
藤原宮跡出土馬歯エナメル質	Fujiwara02	153-005	LP _{3or4} , LM _{1or2}	0.71106
藤原宮跡出土馬歯エナメル質	Fujiwara03	153-053	UM ₃	0.70730
藤原宮跡出土馬歯エナメル質	Fujiwara04	153-054	UP ₂	0.70881
藤原宮跡出土馬歯エナメル質	Fujiwara05	153-094	UP _{3or4} , UM _{1or2}	0.70877
藤原宮跡出土馬歯エナメル質	Fujiwara06	153-075	UP _{3or4} , UM _{1or2}	0.70763
藤原宮跡出土馬歯エナメル質	Fujiwara07	153-055	LP _{3or4} , LM _{1or2}	0.70742
藤原宮跡出土馬歯エナメル質	Fujiwara08	153-078	LP _{3or4} , LM _{1or2}	0.70748
藤原宮跡出土馬歯エナメル質	Fujiwara09	153-004	LP _{3or4} , LM _{1or2}	0.71110
藤原宮跡出土馬歯エナメル質	Fujiwara10	6AJFKJ 771215-1	LP _{3or4} , LM _{1or2}	0.70618
藤原宮跡出土馬歯エナメル質	Fujiwara11	6AJFKJ 771215-2	LP _{3or4} , LM _{1or2}	0.70613
藤原宮跡出土馬歯エナメル質	Fujiwara12	6AJFKJ 771215-3	LP _{3or4} , LM _{1or2}	0.70627
藤原宮跡出土馬歯エナメル質	Fujiwara13	6AJFKJ 771215-4	LP _{3or4} , LM _{1or2}	0.70628
藤原宮跡出土馬歯エナメル質	Fujiwara14	6AJFKJ 771215-5	LP ₂	0.70619
藤原宮跡出土馬歯エナメル質	Fujiwara15	163 5AJF NB25	UP _{3or4} , UM _{1or2}	0.70922
藤原宮跡出土馬骨	Fujiwara16	153-029	Ulna	0.70898
藤原宮跡出土鹿骨	Fujiwara17	153-028	Scapula	0.70928
藤原宮跡出土馬骨	Fujiwara18	153-010	Humerus	0.70801
藤原宮跡出土馬骨	Fujiwara19	6AJF KJ33 771212	Ulna	0.70794
藤原宮跡出土馬骨	Fujiwara20	6AJF KJ33 771212	Mandible?	0.70765
藤原宮跡出土馬骨	Fujiwara21	6AJF CH31 830208	Femur	0.70799
藤原宮跡出土馬骨	Fujiwara22	153-021	Pelvis	0.70861
藤原宮跡出土馬骨	Fujiwara23	153-045	Phalanx	0.70819
藤原宮跡出土馬骨	Fujiwara24	153-089	Scapula?	0.70820
藤原宮跡出土馬骨	Fujiwara25	153-070	Vertebra	0.70876
藤原宮跡出土馬骨	Fujiwara26	153-069	Scapula	0.70826
藤原宮跡出土馬骨	Fujiwara27	153-076	Vertebra	0.70783
藤原宮跡出土馬骨	Fujiwara28	153-052	Tibia	0.70820
藤原宮跡出土猪骨	Fujiwara29	153-050	Atlas	0.70824

表 13. 藤原宮跡出土犬および猪のストロンチウム同位体比

分析内容	試料名	遺物番号	採取部位	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
藤原宮跡出土犬歯エナメル質	Fujiwara30	153-079	LM ₂	0.70882
藤原宮跡出土犬歯エナメル質	Fujiwara31	153-014	LP ₄	0.70888
藤原宮跡出土犬歯エナメル質	Fujiwara32	153-015	LP ₂	0.70876
藤原宮跡出土犬歯エナメル質	Fujiwara33	153-040	LP ₃	0.70881
藤原宮跡出土猪歯エナメル質	Fujiwara34	153-085	C	0.70985

表 14. 奈良県内における植物および河川水のストロンチウム同位体比

分析内容	試料名	採取場所	緯度	経度	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
奈良県内植物	NAR1001P	藤原宮跡 ① (朝堂院)	135.807	34.502	0.70819
奈良県内植物	NAR1002P	藤原宮跡 ② (宮内)	135.808	34.500	0.70881
奈良県内植物	NAR1003P	藤原宮跡 ③ (宮外)	135.807	34.500	0.70834
奈良県内植物	NAR1004P	吉野山 ①	135.855	34.374	0.70997
奈良県内植物	NAR1005P	吉野山 ②	135.860	34.373	0.70965
奈良県内植物	NAR1006P	吉野山 ③	135.858	34.375	0.70959
奈良県内植物	NAR1007P	西峠 南部	135.946	34.532	0.70761
奈良県内植物	NAR1008P	寺山 山地	135.650	34.556	0.70763
奈良県内植物	NAR1009P	橿原	135.790	34.490	0.70840
奈良県内植物	NAR1010P	虚空蔵町	135.854	34.630	0.70894
奈良県内河川水	NAR1001W	吉野山	135.855	34.375	0.70852

表 15. 藤原宮跡出土馬歯エナメル質の酸素同位体比

分析内容	試料名	遺物番号	採取部位	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{Estimated drinking water}}$
藤原宮跡出土馬歯エナメル質	Fujiwara01	153-042	LP _{3or4} , LM _{1or2}	11.2	-14.5
藤原宮跡出土馬歯エナメル質	Fujiwara02	153-005	LP _{3or4} , LM _{1or2}	12.7	-12.6
藤原宮跡出土馬歯エナメル質	Fujiwara03	153-053	UM ₃	13.3	-11.9
藤原宮跡出土馬歯エナメル質	Fujiwara04	153-054	UP ₂	15.3	-9.4
藤原宮跡出土馬歯エナメル質	Fujiwara05	153-094	UP _{3or4} , UM _{1or2}	14.4	-10.5
藤原宮跡出土馬歯エナメル質	Fujiwara06	153-075	UP _{3or4} , UM _{1or2}	14.3	-10.6
藤原宮跡出土馬歯エナメル質	Fujiwara07	153-055	LP _{3or4} , LM _{1or2}	13.2	-12.0
藤原宮跡出土馬歯エナメル質	Fujiwara08	153-078	LP _{3or4} , LM _{1or2}	15.0	-9.8
藤原宮跡出土馬歯エナメル質	Fujiwara09	153-004	LP _{3or4} , LM _{1or2}	16.0	-8.5
藤原宮跡出土馬歯エナメル質	Fujiwara10	6AJFKJ 771215-1	LP _{3or4} , LM _{1or2}	15.9	-8.7
藤原宮跡出土馬歯エナメル質	Fujiwara11	6AJFKJ 771215-2	LP _{3or4} , LM _{1or2}	12.4	-13.0
藤原宮跡出土馬歯エナメル質	Fujiwara12	6AJFKJ 771215-3	LP _{3or4} , LM _{1or2}	13.4	-11.8
藤原宮跡出土馬歯エナメル質	Fujiwara13	6AJFKJ 771215-4	LP _{3or4} , LM _{1or2}	11.1	-14.7
藤原宮跡出土馬歯エナメル質	Fujiwara14	6AJFKJ 771215-5	LP ₂	13.5	-11.7
藤原宮跡出土馬歯エナメル質	Fujiwara15	163 5AJF NB25	UP _{3or4} , UM _{1or2}	13.8	-11.3