

東京大学大学院新領域創成科学研究科
先端生命科学専攻

平成 30 年度

修士論文

コラーゲンとアパタイトの同位体比を用いた
マクロ栄養素モデルの構築と
日本先史時代人による雑穀摂取の検出

A macronutrient-based model using
isotope ratios in collagen and enamel
reveals millet consumption
by prehistoric Japanese populations

2019 年 1 月 15 日提出
指導教員 米田 穰 教授

山口晴香

目次

I. 序論

1. 炭素・窒素安定同位体比による食性分析と古人骨コラーゲン..... 1
2. アパタイト安定同位体比測定による古人骨食性分析..... 2
3. 縄文時代晩期から弥生時代にかけての農耕の伝播と雑穀栽培..... 4
4. 弥生人・縄文人の人骨同位体比測定による食性分析..... 7
5. 雑穀摂取の検出に向けたマクロ栄養素モデルの構築..... 9
6. 本研究の目的..... 10

II. 材料と方法

1. マクロ栄養素モデル..... 13
2. 人歯・人骨・動物骨資料とその出土遺跡..... 16
3. 歯根象牙質・骨コラーゲンの炭素窒素安定同位体比測定..... 19
4. 歯冠エナメル質アパタイトの炭素安定同位体比測定..... 20
5. 放射性炭素年代測定..... 20

III. 結果

1. マクロ栄養素モデルの検証..... 23
2. 放射性炭素年代..... 25
3. コラーゲン炭素窒素安定同位体比..... 26
4. アパタイト炭素安定同位体比..... 27
5. 結果のまとめ..... 28

IV. 考察

1. マクロ栄養素モデルを用いた縄文～弥生時代の食性変化の評価..... 30
2. 縄文～弥生時代の雑穀寄与率の時代変化..... 32
3. 本研究における課題と今後の展望..... 33

V. 結語..... 36

謝辞

引用文献

図表

I. 序論

1. 炭素・窒素安定同位体比による食性分析と古人骨コラーゲン

食物連鎖の研究において、摂取された食料源の同定と動物の栄養段階の推定に炭素や窒素の安定同位体比の測定が盛んに行われている(Kelly, 2000; Peterson & Fry, 1987)。炭素・窒素の安定同位体比($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ および $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$)は標準物質におけるそれとの偏差である「デルタ値」で表現する。偏差はごく僅かであるため、単位には千分率 (‰: パーミル) を用いる。炭素・窒素のデルタ値は、それぞれ以下のように計算される。

$$\delta^{13}\text{C} (\text{‰}) = ({}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}_{\text{sample}} - {}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}_{\text{PDB}}) / ({}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}_{\text{PDB}}) \times 1000$$

$$\delta^{15}\text{N} (\text{‰}) = ({}^{15}\text{N}/{}^{14}\text{N}_{\text{sample}} - {}^{15}\text{N}/{}^{14}\text{N}_{\text{AIR}}) / ({}^{15}\text{N}/{}^{14}\text{N}_{\text{AIR}}) \times 1000$$

PDB は炭素同位体比の標準物質として使われる、米国サウスカロライナ州 Pee Dee 層より産出するペレムナイトという軟体動物の化石であり、AIR は窒素同位体比の標準物質として使われる大気中の窒素を指す。

$\delta^{13}\text{C}$ は、一次生産者を構成する植物間で光合成経路や生息場所により大きく異なる。また、動物の $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ が動物と餌との間でほぼ一定の割合で高くなることが経験的に知られており、特に $\delta^{15}\text{N}$ は栄養段階が異なる生物間で値が大きく変動するため、栄養段階の推定に多く用いられる(DeNiro & Epstein, 1978, 1981; Minagawa & Wada, 1984)。

陸上植物が示す $\delta^{13}\text{C}$ 値は光合成経路により大きく異なる。C3 植物は気孔から取り込んだ二酸化炭素を葉肉細胞内の葉緑体でリブローズ 1,5-ビスリン酸 (RuBP) と組み合わせフォスフォグリセリン酸 (PGA) を生成する。この反応はリブローズ 1,5 ビスフォスフェート・カルボキシラーゼ・オキシゲナーゼ (Rubisco) によって触媒されるが、Rubisco は炭素の同位体分別が著しい酵素で $^{13}\text{CO}_2$ よりも $^{12}\text{CO}_2$ との親和性が高く、 $\sim -25\text{‰}$ の同位体分別が起きる。この際に生じる同位体分別は、葉肉細胞内外の二酸化炭素が比較的自由に交換されるため、生成される PGA や炭水化物の同位体比に直接影響する。一方、C4 植物は葉肉細胞内で炭素の同位体分別をほとんどしないフォスフォエノールピルビン酸カルボキシラーゼ (PEPCase) により二酸化炭素中の炭素がフォスフォエノールピルビン酸 (PEP) との反応でオキサロ酢酸としていったん固定される。固定された炭素は維管束鞘細胞にて脱炭酸され再び二酸化炭素となり、Rubisco で再固

定されるが、維管束鞘細胞は細胞外との二酸化炭素の交換が少ない構造になっており、脱炭酸で生じた二酸化炭素のほぼすべてが同化されるため、経路全体として炭素の同位体分別が少ない。その結果、C3 植物は $\delta^{13}\text{C}$ がおよそ -37~-22‰ の範囲の値をとるのに対し、C4 植物は -15~-9‰ という比較的高い $\delta^{13}\text{C}$ 値を示す(Codron et al., 2005; Farquhar et al., 1989; Kohn & Cerling, 2002; O'Leary, 1988; 寺島, 2013)。C3 植物と C4 植物の中間的な $\delta^{13}\text{C}$ 値をとる植物としてサボテンなどの多肉植物を含む CAM 植物が挙げられるが、夜温が低く温度日較差の大きい高温乾燥地帯に多く分布し、先史時代の日本における食用例は報告されていないため、本論文では取り扱わない(O'Leary, 1988; 長谷川, 1979)。

食物連鎖にしたがって高次消費者ほど重い同位体が一定の割合で動物組織に濃縮する現象は、動物の体外に排出される窒素に軽い同位体が多いことからもたらされる(南川 & 吉岡, 2006)。窒素代謝系の異なるさまざまな動物について餌と動物組織の $\delta^{15}\text{N}$ を比較した研究で、餌と動物の間の同位体効果が脊椎動物・無脊椎動物を問わず平均 3.3‰ であることが示された(Minagawa & Wada, 1984)。この同位体分別は動物の体内での脱アミノ反応などの代謝に起因していると考えられている。

炭素・窒素安定同位体比を用いた食性分析の古人骨への応用として、代表的なものに人骨コラーゲンが挙げられる(Makarewicz & Sealy, 2015)。乾燥骨におよそ 30%含まれる有機成分のうち、85-90%がコラーゲンである。骨コラーゲンは周りの無機成分との密接な構造関係により数千年保存される場合があり、質量の 35%が炭素、11-16%が窒素であるため、古人骨では炭素・窒素の同位体比が測定可能であり、それに基づき過去の食性が復元されている(Katzenberg & Saunders, 2007; Van Klinken, 1999)。

古人骨に対する初の炭素・窒素安定同位体比測定による食性分析は、北米の人骨コラーゲンに対して行われ、C3 植物を一次生産者とする生態系 (C3 生態系) に暮らす集団が C4 植物であるトウモロコシの導入・摂取を始めたことが $\delta^{13}\text{C}$ の上昇により検出された(Vogel & Van Der Merwe, 1977)。Vogel らの研究を皮切りに窒素同位体比も含め骨コラーゲンによる古人骨の食性分析が進んだ(Ambrose, 1990; Katzenberg & Harrison, 1997; Larsen, et al., 1992)。

2. アパタイト安定同位体比測定による古人骨食性分析

コラーゲンは埋没環境により経時劣化しやすいため、生物が生前に摂取した炭

素を反映する別の組織の分析が模索され、骨やエナメルが無機成分の大半を占めるヒドロキシアパタイトに対する炭素安定同位体比測定を行うことが提案された(Krueger & Sullivan, 1984)。ヒドロキシアパタイトは $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{OH}_2$ の化学式で表され、バイオアパタイト (生物由来のヒドロキシアパタイト) ではリン酸塩 (PO_4^{3-}) の 2-5%が炭酸塩 (CO_3^{2-}) に置換されているため、炭酸塩に含まれる炭素の安定同位体比測定が可能である(Lee-Thorp, 1989)。放射性炭素年代測定の研究ではバイオアパタイト中の炭酸塩について続成作用が指摘されており議論が続いたが、生体外から取り込まれバイオアパタイトの結晶表面などに吸着した炭酸塩(「吸着炭酸塩」)を除去し、バイオアパタイトの結晶構造の内部に存在する「構造炭酸塩」を取り出せば、安定同位体比は食性分析の対象として使用できる可能性が示唆された(Krueger, 1991; Lee-Thorp & van der Merwe, 1991; Schoeninger & DeNiro, 1982)。バイオアパタイトから炭酸塩分画を分離する方法は Lee-Thorp らによって確立された(Lee-Thorp, Sealy, & van der Merwe, 1989; Lee-Thorp, 1989)。この方法では、骨・エナメル試料を粉末状にした後、有機物による汚染を除去するために次亜塩素酸ナトリウムに浸け、さらに埋蔵環境中から取り込まれた炭酸塩を酢酸によって除去する。リン酸と反応させ結晶構造中の炭酸塩を二酸化炭素として回収し、炭素(および酸素)の安定同位体比を測定することができるとしている。

Krueger and Sullivan, Lee-Thorp らは陸生草食・肉食・雑食動物のコラーゲンおよびバイオアパタイトの $\delta^{13}\text{C}$ (それぞれ $\delta^{13}\text{C}_{\text{collagen}}$ 、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{apatite}}$ と表す) を分析し、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{collagen}}$ と $\delta^{13}\text{C}_{\text{apatite}}$ 、およびこれらの値の差 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{apatite}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{collagen}}$) である $\Delta^{13}\text{C}_{\text{apatite-collagen}}$ が食性および栄養段階によって異なることを示した(Krueger & Sullivan, 1984; Lee-Thorp et al., 1989)。 $\Delta^{13}\text{C}_{\text{apatite-collagen}}$ は草食動物と比べて肉食動物において小さく、その背景にある原理のモデルは研究によって細かい違いはあるものの、食料源を構成する栄養素とそれらの同位体比の違いによる影響で説明しているという点においては一致している。例えば、Krueger & Sullivan (1984)では $\delta^{13}\text{C}_{\text{collagen}}$ は食料中のタンパク質の同位体比を主に反映し、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{apatite}}$ は「エネルギー成分」である炭水化物と脂質の同位体比を反映すると提唱した。草食動物肉の脂質の $\delta^{13}\text{C}$ はタンパク質のそれよりもおよそ 6‰小さく、肉食動物は草食動物経由で脂質を摂取するため、脂質を反映する $\delta^{13}\text{C}_{\text{apatite}}$ と、主にタンパク質を反映する $\delta^{13}\text{C}_{\text{collagen}}$ の差である $\Delta^{13}\text{C}_{\text{apatite-collagen}}$ が肉食動物では小さくなるとされている(Ambrose & Norr, 1993; DeNiro & Epstein, 1978; Piasentier et al.,

2003)。

これらの研究に触発され、餌に含まれる各栄養素の $\delta^{13}\text{C}$ 値と割合をコントロールしたラットなどに対する複数の給餌実験が行われた(Ambrose & Norr, 1993; Tieszen & Fagre, 1993)。給餌実験において、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{collagen}}$ は食料中のタンパク質の同位体比によって変化するということが改めて示されたが、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{apatite}}$ については、エネルギー成分よりも食事全体の炭素同位体比を直接的に反映するということが分かってきた。

こうした知見を活かし、古人骨のコラーゲンとアパタイト両方の炭素同位体比を用いて人類集団による C4 植物の利用に関する研究が行われるようになった。例えば、オンタリオ湖南部で骨のコラーゲンとアパタイトを両方分析した結果、コラーゲンと比べアパタイトの炭素同位体比にはトウモロコシの摂取の影響がより早い時期から現れることが示された(Harrison & Katzenberg, 2003)。このように、アパタイトの炭素同位体比を測定することによって、摂取が少ない段階においても C3 生態系から構成された食性への C4 植物の導入の検出が期待できる。

3. 縄文時代晩期から弥生時代にかけての農耕の伝播と雑穀栽培

本研究では、狩猟採集から農耕という大きな生業の転換が起きた縄文時代晩期から弥生時代にかけて、アワなどの C4 植物に含まれる雑穀（以下「C4 雑穀」とする）が利用されていたという考古学の仮説を人骨の同位体分析により検証し、その摂取量を定量的に評価する。

以下、放射性炭素年代測定によって得られた較正年代については、数値の後に cal BP と表記する。較正年代とは放射性炭素 (^{14}C) の大気中の濃度を一定と仮定して計算した放射性炭素年代を、過去の ^{14}C 濃度の変化を考慮して補正したもので、年代の数値の後に cal (calibrated years の略) をつける。BP(Before Present ないし Before Physics の略)は、西暦 1950 年を基準としてそれより何年前という意味である。放射性炭素年代測定の原理については「II-6. 放射性炭素年代測定」で後に詳述する。

縄文時代は沖縄を除いた日本列島の各地における 16,000-2800 cal BP ごろの時代を指し、この頃日本列島に居住していた人々のことを縄文人と呼ぶ(Nakamura et al., 2001; 大貫, 2017; 藤尾, 2013)。縄文人は文化的には縄文式土器の利用で特徴づけられ、主に狩猟採集で天然の動物・植物を得ていたことが分かっている(石川, 2010)。弥生時代は、地域ごとにその開始と終焉について時期差があるが、

北海道・沖縄を除いた日本列島の各地における 2800-1700 cal BP ごろの時代を指す(石川, 2010; 藤尾, 2013)。縄文時代晩期から弥生時代にかけては、「渡来系弥生人」と呼ばれる集団がユーラシア大陸から日本列島に移住し、穀物栽培や金属器をもたらした。他方で弥生時代の日本列島には縄文人の子孫である「縄文系(在来系)弥生人」も暮らしていた。埴原らは人骨の形態解析から現代日本人の起源を縄文系と渡来系の2集団の混血で説明し(「二重構造説」)、この説は近年のゲノム研究によって集団の起源地については部分的に改変されつつも広く受け入れられている(Hanihara, 1991; Jinam et al., 2015; Omoto & Saitou, 1997)。渡来系弥生人の集団の起源地に関しては、現代の本土日本人は朝鮮半島集団、ついで他の東・北東アジア集団の影響が最も強いなどの研究がある(Jinam et al., 2012; Nakaoka et al., 2013)。

渡来系弥生人が持ち込んだ文化がどのように受け入れられ、伝播していったかについては様々な研究が行われている。その一つが食料資源の利用戦略に関する研究で、特に「渡来系の人々が持ち込んだ穀物栽培がどのように拡散したか」は主要なテーマである。本研究では、水田稲作に先行して拡散した可能性が考古学的証拠から指摘されている C4 雑穀に注目した。

弥生時代開始の指標として、多くの研究者が水田稲作を挙げてきたが、植物遺存体や土器圧痕などの研究により、弥生時代早期から水田稲作と同時にアワやキビといった C4 雑穀の栽培も行われていたことが指摘されている(藤尾, 1988)。具体的な植物遺存体や耕作遺構の検出例としては、佐賀県唐津市菜畑遺跡で縄文時代晩期後半・弥生時代前期初頭と推定された地層からアワの炭化種実が確認されている(笠原, 1982)。また、徳島県庄・蔵本遺跡では弥生時代前期の水田遺構と畠遺構が検出されており、畠遺構では雑穀種子類の出土量がイネを凌駕していたため、灌漑水田稲作が本格化する弥生前期であっても相当の雑穀類を生産していたとされている(中村豊, 2009, 2010)。炭化種実の検出例としては、大阪府東大阪市鬼虎川遺跡で弥生時代中期の層から炭化した稲穂や炭化米とともにアワの炭化種実が出土しており、神奈川県大井町中屋敷遺跡の土坑からもイネの他に 2540-2350 cal BP ごろのアワやキビ類の炭化種実が出土している(笠原, 1984; 佐々木, 2008)。

日本には弥生時代に伝播した雑穀栽培は、黄河流域で新石器時代に始まり、黄河中流域東部低地で約 7670-7610 cal BP の栽培キビやアワの種子が出土している(Zhao, 2011)。7000-4000 年前の中国黄河・淮河流域の人骨コラーゲン・アパタ

イトの同位体分析した研究では、C4 雑穀主体の食性を示す高い $\delta^{13}\text{C}$ 値が得られている(Pechenkina et al., 2005)。

一方、イネの利用は 10000-7000 cal BP に長江流域で開始され、水田による稲作は中国の長江中下流域で 6300-6000 cal BP には既に行われていた(Cohen, 2011)。水田稲作と雑穀の畝作を複合的に行う農業形態は、最古のもの(5800 cal BP)が中国・湖南省城頭山遺跡で見られ(Nasu et al., 2007)、3400 cal BP には朝鮮半島にも伝播しており(Lee, 2011)、これらの地域から日本に伝わったと考えられる。

しかし、日本の弥生時代遺跡から検出される穀類の植物遺存体ではコメが圧倒的多数を占める(安藤, 2009)。土壌に含まれるアワやキビといった細かい雑穀を検出するのは、0.2mm のメッシュ篩を用いたフロス・フローテーションが有効であるが、このような処置が取られた発掘調査は少なく、粒径の小さい雑穀では取りこぼしの危険性がある(Zhao, 2011)。また、遺物の地層間での移動がしばしばみられるため、植物遺存体を用いた研究には、直接の年代測定が行われた場合、あるいは遺構等との関係性が明らかでない場合を除き、常に混入を疑わなければならないという問題がある(安藤, 2009)。

近年、土器に残された種実圧痕をシリコンで型取りし、走査型電子顕微鏡(SEM)で確認・同定していくレプリカ法が急速に普及し、縄文時代晩期から弥生時代にかけての雑穀利用について確度の高い情報が飛躍的に増加している(工藤, 2018)。レプリカ法を用いた研究では、縄文時代晩期に朝鮮半島から北九州や山陰地方に 2800-2700 cal BP に伝わったイネの水田栽培とアワ、キビの畝栽培は、その後近畿地方、中部地方、関東地方、東北地方へと東に伝わり、各地で環境条件に合わせて選択的に受容されたという仮説が唱えられている(中沢, 2014)。西関東地方の 14 遺跡で 115 のレプリカを SEM 観察した調査では、イネ籾は 4 標本に限られたのに対し、6 つの遺跡の土器からアワの果実・種子の圧痕が 17 標本、キビの種子・果実の圧痕が 32 標本から検出された(設楽・高瀬, 2014)。中部日本では縄文時代晩期後葉において稲作に先行してアワ・キビ栽培が開始されていたという推定があり、山梨県中道遺跡(縄文時代晩期末葉)では検出された植物種子圧痕のうち 74%がアワ・キビもしくはその近似種とされた(遠藤・高瀬, 2011; 中山・関間, 2012)。長野県で実施された土器の種実圧痕調査からも、縄文晩期末に雑穀栽培が選択的に受容され、のちにイネと複合的に栽培されるようになったとされている(馬場・遠藤, 2017)。

さらに、土器付着炭化物の同位体分析を行った研究では、長野県

松原遺跡から出土した栗林式土器 1 個体から C4 植物の存在を示す炭素・窒素安定同位体比が得られている(西本 編, 2009)。土器付着物は、内面についているものは調理に際して付着したおこげと考えられており、調理・加工された食材の同位体比の特徴を反映するといわれている(Hastorf & DeNiro, 1985)。ただしこの研究では試料数がわずか 1 点であったことが課題として指摘された。西日本では、滋賀県竜ヶ崎 A 遺跡にて形態からキビと同定された長原式土器(縄文晩期～弥生早期)の土器付着炭化物から安定同位体分析でも C4 植物の炭素・窒素安定同位体比が得られている(宮田ら, 2007)。

以上のように日本の初期農耕における C4 雑穀の存在は実証されつつあるが、実際に C4 雑穀が縄文晩期～弥生時代の人々によってどの程度摂取されていたかについては評価が難しく、未だ明らかになっていない。

4. 弥生人・縄文人の人骨同位体比測定による食性分析

人骨のコラーゲンで測定された炭素・窒素同位体比によれば、弥生人の食性には遺跡間で差が見られる。弥生人の食性の集団差は、遺跡に住む集団の文化の違いと、遺跡が位置する地域の生態系の違いに由来すると考えられる。例として、先行研究の炭素・窒素安定同位体比測定による食性分析結果を挙げると、長崎県深堀遺跡出土人骨からは高い海産物の利用が示唆される一方、同じく沿岸地域にある山口県土井ヶ浜遺跡出土人骨からは海産物・淡水資源だけでなく、 $\delta^{13}\text{C}$ が低く $\delta^{15}\text{N}$ が高い食糧源の利用も示唆され、この食糧源の候補として水稻が挙げられている(米田, 2004, 2014)。内陸に位置する岩手県アバクチ洞穴遺跡出土人骨からは、C3 植物、あるいは C3 植物を摂取した陸獣がタンパク資源として重要であった可能性が高い(米田, 1999)。鹿児島県南種子町の広田遺跡では、弥生～古墳時代の人骨 5 体についてやや $\delta^{13}\text{C}$ が高い傾向が見られたため、C4 植物もしくは海生貝類を食べていた可能性が指摘されている(米田, 2007)。上記に挙げた先行研究の弥生人骨のコラーゲン炭素・窒素安定同位体比を【図 1】に示す。

土器圧痕や植物遺存体から指摘されているような縄文晩期～弥生時代の人々による C4 雑穀の利用は、食事中的タンパク質を主に反映する人骨コラーゲンの炭素・窒素安定同位体比からは未だ明らかになっていない。また、日本では江戸時代以降に帰化した植物を除き 165 種の C4 植物が確認されているが、C4 雑穀を除いて縄文晩期～弥生時代に植物遺存体から摂取が指摘されているものはない(奥田・古川, 1990)。C4 雑穀が利用されていた場合、人が飼っていた動物に与

えた可能性も考えられるが、例えば縄文時代晩期の土器からアワ・キビの土器圧痕が検出されている徳島県三谷遺跡のイヌの動物骨コラーゲンの同位体比は C3 生態系の食料源を利用する動物の範囲に収まり、C4 雑穀食の傾向は見られなかった(遠部慎, 私信; 中沢ら, 2012)。C4 雑穀は C3 植物と炭素同位体比で区別できる。縄文時代に食料資源として利用されていたことが植物遺存体の研究から指摘されている堅果類(ドングリ類・クルミ・クリ・トチノキなど)や球根類(ヤマノイモなど)、弥生時代に伝わったイネはすべて C3 植物に属し $\delta^{13}\text{C}$ はおよそ -22~-37‰の範囲にある。これに対し、C4 植物の $\delta^{13}\text{C}$ はおよそ -15~-9‰の範囲である(Codron et al., 2005; 工藤・国立歴史民俗博物館, 2014)。したがって、C4 雑穀の摂取が増加した場合、人骨では $\delta^{13}\text{C}$ の上昇が期待できる。ただし、コラーゲンの同位体比は主に食事中的タンパク質を反映するため、タンパク質の含有量が他の栄養素と比べ少ない植物の摂取を評価するには問題がある。また、上述の広田遺跡の例のように、C4 雑穀の摂取は海産物の摂取との区別が難しい。日本の先史時代人の食性復元にコラーゲンだけでなく、全栄養素を反映するアパタイトの同位体比を両方用いた研究例は未だに数少ない。東海地方と山陽地方の沿岸地域にある遺跡から出土した縄文時代人の骨コラーゲンと歯エナメル質の炭素同位体比を用いた食性推定では、骨コラーゲンでは海産物の食性への寄与率が 51%と推定された集団で、エナメルからの海産物推定寄与率がわずか 14.3%となり、高い C3 生態系の陸上植物・動物利用が示唆された(Kusaka et al., 2015)。ただし、各食料源の食性への寄与推定率を計算する上で C3 草食動物と海生魚類の線形混合を用いており、これは縄文人が C3 植物と海生魚類を直接食べていたことを仮定した食性評価となっているため、C3 植物を直接食べずに、C3 草食動物を食べた場合の栄養素含有率の違いによるコラーゲン・アパタイト同位体比への影響までは考慮していない。また、コラーゲンとアパタイトの同位体比測定試料として骨と歯という別の器官を利用しているため、高齢の個体では反映されている食性の時期が数十年ずれている点には注意が必要である。歯冠エナメル質と歯根象牙質はほとんど代謝が起きないため、食性は組織形成当時のものを示す(Beaumont et al., 2013; Dean, 2017)。Kusaka et al. (2015)で用いられた第三大臼歯は現代人においては 9 歳~13 歳の間に形成される。これに対し、骨は最期の 10-25 年の食性を示す(Hedges et al., 2007)。

5. 雑穀摂取の検出に向けたマクロ栄養素モデルの構築

食事中の全栄養素を反映するアパタイトの炭素同位体比を測定することによって、摂取が少ない段階においても C3 生態系から構成された食性への C4 植物の導入の検出が期待できる。しかし、C4 植物だけでなく海産物も利用できる環境にあった人類集団の食性を評価する場合、海産物は C4 植物と同様に高い $\delta^{13}\text{C}$ を有するため、両者の影響を何らかの方法で区別する必要がある。一般的に海産物は $\delta^{15}\text{N}$ が高いことで識別できるが、魚類と比べ $\delta^{15}\text{N}$ が低い海生貝類が摂取されていた場合や、C4 植物・海産物の寄与が少量の場合には区別が容易ではない。C3 植物の $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ はおよそ $-37\sim-22\text{‰}$ 、 $-2.2\sim10.6\text{‰}$ の範囲を取る。一方、C4 植物の $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ はおよそ $-15\sim-9\text{‰}$ 、 $-1.3\sim3.6\text{‰}$ の範囲を取り、海生貝類は $-17.7\sim-12.5\text{‰}$ 、 $5.5\sim12.9\text{‰}$ の範囲を取る (Codron et al., 2005; 下条, 1989)。このように、C4 植物と海生貝類は「 $\delta^{13}\text{C}$ は C3 植物よりも高いが、 $\delta^{15}\text{N}$ は C3 植物の分布範囲と重なる」という同位体比の特徴が共通しているため、C3 生態系に C4 植物が少量導入された場合、少量の海生貝類の摂取と区別するのは困難である。

Kellner と Schoeninger は給餌実験および野生の陸生動物に対して行われた研究を参照し、タンパク質源が C3 生態系・C4 生態系・海洋生態系の食料源で構成された食性別に、エネルギー源として C4 植物が導入された場合の $\delta^{13}\text{C}_{\text{collagen}}$ と $\delta^{13}\text{C}_{\text{apatite}}$ の変化を線形モデルで示し、人骨の食性評価に応用した(【図 2】、Kellner & Schoeninger, 2007)。しかし、C3 生態系と C4 生態系の線形モデルの間に海洋生態系の線形モデルが存在するため、主な食料源の由来が C3 生態系から C4 生態系へと移行する過程の初期段階では、海洋生態系の食料源の導入との区別が難しい。Kellner & Schoeninger (2007)では、C3 生態系と C4 生態系の線形モデルからのずれが見られた場合、その要因について海生魚類・淡水魚類・雑穀を与えられた家畜など、同位体比そのものではなく、分析した人骨が出土した遺跡の地理的環境や考古遺物を参照して説明を変えている。C4 植物とその他の食料源の摂取を区別するためには、 $\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{collagen}}$ や $\delta^{13}\text{C}_{\text{apatite}}$ だけでなく、 $\Delta^{13}\text{C}_{\text{apatite-collagen}}$ など他の指標を用いたモデルの構築とその有効性の検討が必要である。

本研究では、C4 雑穀と海生貝類の両方を利用できる環境にあった人類集団における C4 雑穀摂取の検出に向けて、C4 雑穀と海生貝類のマクロ栄養素（炭水化物・脂質・タンパク質）の組成に大きな違いがあることに注目した。カラー

ゲンは主に食事中のタンパク質を反映するのに対し、アパタイトは炭水化物や脂質を含む全栄養素を反映する。したがって、C4 雑穀と海生貝類に含まれるマクロ栄養素の含有率の違いがある場合、同じ摂取量でもアパタイトの炭素同位体比とコラーゲンの炭素・窒素同位体比への影響の及ぼし方は異なると期待される。【表 1】に食品成分データベース(文部科学省)を参照した C4 雑穀と海生貝類のマクロ栄養素の含有率を示す。C4 雑穀の例として、複数の縄文晩期～弥生時代の遺跡から出土した植物遺存体ならびに土器圧痕において報告されているアワを挙げた。海生貝類の例としては、関東の縄文時代後期の貝塚遺跡でその殻が多く出土しているハマグリを選んだ(樋泉, 2014)。乾燥重量中の質量%をみるとアワは圧倒的に炭水化物の割合が高い(82%)のに対し、ハマグリはタンパク質が主要な栄養素である(72%)。よって、C4 雑穀は全栄養素を反映するアパタイト、海生貝類はコラーゲンを主に反映するコラーゲンにより大きな影響をもたらすことが予想される。

Fernandes らは、先行研究でマウス・ラット・豚に対して行われた給餌実験の結果をまとめ、コラーゲン・アパタイトと各動物に与えられた餌の炭素同位体比の間に以下の線形な関係式が成り立つことを示した(Fernandes et al., 2012)。

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{collagen}} = 0.74 \times \delta^{13}\text{C}_{\text{protein}} + 0.26 \times \delta^{13}\text{C}_{\text{energy}} + 4.8$$

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{apatite}} = \delta^{13}\text{C}_{\text{diet}} + 10.1$$

$\delta^{13}\text{C}_{\text{diet}}$ 、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{protein}}$ 、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{energy}}$ はそれぞれ食事全体、タンパク質、エネルギー成分(炭水化物と脂質)の炭素同位体比である。この関係式は野生動物の実測データでもよく適合する結果を得られた。これらの式に基づけば、例えば主に C3 植物から構成される食性に C4 雑穀あるいは海生貝類が少量導入された場合、炭水化物の含有率が大きい C4 雑穀では先に $\delta^{13}\text{C}_{\text{collagen}}$ と比べ $\delta^{13}\text{C}_{\text{apatite}}$ がより大きく上昇する一方、タンパク質の割合が大きい海生貝類では $\delta^{13}\text{C}_{\text{collagen}}$ がより大きく上昇すると考えられる。

6. 本研究の目的

本研究では、マクロ栄養素の組成に大きな違いがある C4 雑穀と海生貝類が C3 生態系ベースの食性に導入された場合、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{collagen}}$ 、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{apatite}}$ 、 $\Delta^{13}\text{C}_{\text{collagen-apatite}}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ といった同位体指標にどのような変動をもたらすかを Fernandes ら(2012)の関係式に基づき計算し「マクロ栄養素モデル」を構築することで、C4 雑穀と海生貝類の摂取の区別が可能かを理論的に検討する。

次に、縄文時代～弥生時代の遺跡から出土した人歯資料の歯根象牙質コラーゲンの炭素・窒素同位体比および歯冠エナメル質アパタイトの炭素同位体比を測定し、上記のマクロ栄養素モデルを用いてC4雑穀の摂取を評価することで、考古学的証拠に基づき推定された縄文・弥生移行期におけるC4雑穀の利用を人歯の同位体比から検証する。歯根象牙質のコラーゲンは主にタンパク質を反映するのに対し、歯冠エナメル質のアパタイトは炭水化物や脂質を含む全栄養素を反映するため、これらの同位体比を比較することでC4雑穀の食性に対する寄与を評価できると考えられる。 $\delta^{13}\text{C}$ の上昇が確認された場合、それがC4雑穀によるものなのか、海生貝類によるものなのか、観測されたコラーゲンとアパタイトの同位体比をマクロ栄養素モデルによって得られた結果と比較し考察する。さらに、C4雑穀の摂取量についても定量的な評価を試みる。

また、遺物は地層間を移動した可能性があるため、コラーゲンの放射性炭素年代測定を行うことによって各資料の正確な年代を求め、時代による食性の変化を定量的に議論する。

分析対象には、関東地方内陸部（群馬県）および中部高地（長野県）における縄文時代～弥生時代の遺跡から出土した人歯ならびに人骨を用いた。これらの地域はレプリカ法を用いた研究で雑穀の検出報告数が多く、選択的に雑穀が受容された可能性が指摘されている(設楽・高瀬, 2014; 馬場・遠藤, 2017)。C4雑穀はC3植物およびそれを食す動物より $\delta^{13}\text{C}$ が高いため、縄文晩期から弥生時代にかけてC4雑穀の摂取量が増えた場合は古人骨資料において $\delta^{13}\text{C}$ の上昇が期待される。遺跡はすべて内陸にあり、海産物の食性への影響は少ないと考えられるが、装飾品としては群馬県岩津保洞窟遺跡にて海生貝類（オオツタノハガイ）の貝輪が弥生時代の人骨と共伴して出土している(岩津保洞窟遺跡調査団, 2015)。また、縄文時代の遺跡では当時の海岸線付近に位置する東京都中里遺跡から「干し貝加工場」と推定される木枠付土坑が検出されており、海岸から離れた台地上にある東京都七社神社前遺跡からも同時期に貝層が検出されている(阿部, 2014)。したがって、沿岸の遺跡で採取・加工された海産物が内陸まで輸送されていた可能性がある。

関東地方と中部高地を含む中部地方は、縄文時代の人口密度が最も高かった地域で、弥生時代にかけて人口がさらに増加したと推定されている(Koyama, 1978)。これらの地域では、狩猟採集を主業とする縄文人の子孫集団による農耕の受容が想定され、狩猟採集から農耕に完全に移行するのか、部分的に農耕を

取り入れるにとどめるかなどの選択肢があったと考えられる。ゆえに関東地方と中部高地における弥生人の食性を調べることは、「狩猟採集民が多く住む地域に移住民の農耕文化がどう伝播したか」という、新石器時代のヨーロッパなど世界中の多くの地域で起こった現象を理解する上で重要な手がかりとなる。しかし、これらの地域の弥生人骨は出土数が少なく、さらに資料の状態が良好であることは希で、同位体分析の報告自体が非常に少なかった。弥生時代の人骨・歯に対してコラーゲンと炭酸塩両方の同位体分析を行うのは本研究が初めてである。

II. 材料と方法

1. マクロ栄養素モデル

本研究では縄文～弥生時代の関東内陸部および中部高地における C4 雑穀摂取の検出に向けたマクロ栄養素モデルを構築するにあたり、当時の食性として可能性のある以下の 6 通りの 2 食料源間混合を計算した。

- ①C3 植物-C4 雑穀
- ②C3 植物-海生貝類
- ③C3 植物-C4 草食動物
- ④C3 草食動物-C4 雑穀
- ⑤C3 草食動物-海生貝類
- ⑥C3 草食動物- C4 草食動物

本研究において C3 草食動物・C4 草食動物とは、それぞれ食料源がすべて C3 植物・C4 雑穀である動物を指す。前者は C3 生態系における野生動物、後者は家畜化され人間より C4 雑穀を与えられた動物を想定している。加えて、本研究で扱った中国の新石器時代の資料、およびマクロ栄養素モデルの検証に用いる先行研究の人骨の食性として推定される以下の 2 通りの 2 食料源間混合を計算した。

- ⑦C3 植物-海生魚類
- ⑧C4 植物-C4 草食動物

食性への各食料源の寄与率は食事全体で乾燥重量にて占める割合で表される。マクロ栄養素モデルでは食料源の寄与率を 20%ごとに変化させた。

【表 2】に、マクロ栄養素モデルの計算に用いた食料源における各マクロ栄養素の含有率と同位体比を示す。C3 植物、海生貝類、海生魚類の炭素・窒素の全体同位体比およびコラーゲン同位体比の代表値はすべて下条(1989)の測定結果を参照しており、関東地方縄文遺跡で出土し同定された C3 植物の現生種の平均、千葉県古作貝塚から出土したマダイの骨コラーゲン、関東の縄文時代後期の貝塚遺跡でその殻が多く出土しているハマグリの現生種の可食部の同位体比の平均を採用した。C3 草食動物については本研究で分析したシカの歯根象牙質コラーゲンを参照した。C4 雑穀の炭素・窒素の全体同位体比は神奈川県中屋敷遺跡から出土した炭化アワの同位体比を参照した(米田穰, 私信)。動物コラーゲンから筋肉の同位体比を推定する際に、ラットおよびマウスに対して

給餌実験を行った先行研究を参照し、以下の関係式を用いた(Ambrose, 2000; Tieszen & Fagre, 1993)。

$$\Delta^{13}\text{C}_{\text{collagen-muscle}} = 2.4\text{‰}$$

$$\Delta^{15}\text{N}_{\text{collagen-muscle}} = 0.8\text{‰}$$

各マクロ栄養素の含有質量比は、植物・草食動物・海生貝類・海生魚類についてはそれぞれ文部科学省食品成分データベースのアワ・シカ・ハマグリ・マダいのデータを参照し、全重量から水分と灰分（カルシウム・鉄・ナトリウムなどのミネラル）の重量を取り除いた重量中の割合を計算した。各マクロ栄養素の炭素含有質量比はタンパク質・炭水化物・脂質でそれぞれ 0.524, 0.444, 0.768 とした(Morrison et al., 2000)。食料源に含まれる栄養素の含有質量比と炭素含有質量比の積を、全栄養素のそれで除し、食料源におけるその栄養素の「C 質量比」とした。窒素は Fernandes et al. (2012) に従いすべてタンパク質に由来するとした。参照資料の同位体比データは【表 1】に記載している。

植物における全体 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}$) とタンパク質 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{protein}}$)、脂質 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{lipid}}$)、炭水化物 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{carbohydrates}}$) の炭素同位体比のオフセットはイネ科の植物について栄養素ごとに同位体比を測定した先行研究を参照し、以下のオフセットを設けた(Tieszen, 1991)。

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{protein}} = 2\text{‰}$$

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{lipid}} = 4\text{‰}$$

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{carbohydrates}} = -0.5\text{‰}$$

哺乳類のコラーゲンとタンパク質の $\delta^{13}\text{C}$ ($\delta^{13}\text{C}_{\text{collagen}} \cdot \delta^{13}\text{C}_{\text{protein}}$) および筋肉と脂質の $\delta^{13}\text{C}$ ($\delta^{13}\text{C}_{\text{muscle}} \cdot \delta^{13}\text{C}_{\text{lipid}}$) のオフセットは、ヒツジおよびマウスに対して給餌実験を行った先行研究に基づき、以下のように定めた(Piasentier et al., 2003; Tieszen & Fagre, 1993)。

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{collagen}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{protein}} = 2.5\text{‰}$$

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{protein}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{lipid}} = 6.0\text{‰}$$

海生貝類、海生魚類においては、これらのオフセットについて適切なデータが現在ないため、哺乳類に倣って値を定めた。また、海生貝類に質量%で 20%ほど含まれる炭水化物の同位体比に関しては、全体の炭素同位体比とのオフセットが不明のため、全体の炭素同位体比をそのまま採用した。

コラーゲンとアパタイトの $\delta^{13}\text{C}$ ($\delta^{13}\text{C}_{\text{collagen}}$ 、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{apatite}}$)、コラーゲンとタンパク質の $\delta^{15}\text{N}$ ($\delta^{15}\text{N}_{\text{collagen}} \cdot \delta^{15}\text{N}_{\text{protein}}$) は以下に示した関係式を用いて算出した

(Ambrose, 2000; Fernandes et al., 2012)。

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{collagen}} = 0.74 \times \delta^{13}\text{C}_{\text{protein}} + 0.26 \times \delta^{13}\text{C}_{\text{energy}} + 4.8$$

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{apatite}} = \delta^{13}\text{C}_{\text{diet}} + 10.1$$

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{energy}} = \{(\text{炭水化物の C 質量比}) \times \delta^{13}\text{C}_{\text{carbohydrates}} \\ + (\text{脂質の C 質量比}) \times \delta^{13}\text{C}_{\text{lipid}}\} \\ / \{(\text{炭水化物の C 質量比}) + (\text{脂質の C 質量比})\}$$

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{diet}} = (\text{炭水化物の C 質量比}) \times \delta^{13}\text{C}_{\text{carbohydrates}} \\ + (\text{脂質の C 質量比}) \times \delta^{13}\text{C}_{\text{lipid}} \\ + (\text{タンパク質の C 質量比}) \times \delta^{13}\text{C}_{\text{protein}}$$

$$\delta^{15}\text{N}_{\text{collagen}} = \delta^{15}\text{N}_{\text{protein}} + 3.3\text{‰}$$

マクロ栄養素モデルが適切に食性の違いを検出できるかを検証するため、先行研究における人骨の実測値と比較をした。【表 3】に用いた先行研究のデータとその出典を示した。以下、それぞれの集団の食性について詳述する。

C3 生態系の食料源で構成された食性に C4 植物（トウモロコシ）が取り入れられた食性として、北米の遺跡から出土したネイティブアメリカン集団である Cahokia の人骨コラーゲン・アパタイトの同位体比を参照した(Ambrose et al., 2003)。Cahokia 集団では、トウモロコシの農耕が始まってからもタンパク質源として C3 生態系の食料源の利用が続いたこと、低い地位の人は C4 植物を多く摂取、高い地位の人は C3 生態系の動物肉を多く摂取していたことが考古学的証拠と同位体比より指摘されている(Ambrose et al., 2003)。

C4 植物と、それを与えられた家畜を食べていた集団として、中国・新石器時代の仰韶文化期の集団（Yangshao）の人骨コラーゲン・アパタイトの同位体比を採用した。この集団を扱った研究では人々が雑穀を摂取していたことが植物考古学と同位体生態学の両分野から指摘されているほか、同文化期の豚や犬も同位体分析されており、コラーゲンの炭素・窒素安定同位体比から家畜に雑穀が与えられていたことが示唆されている(Pechenkina et al., 2005)。

C3 生態系と海産物が両方利用されている集団として、東海地方と山陽地方の沿岸地域にある遺跡から出土した縄文時代人の骨コラーゲンと歯エナメル質の同位体比データを参照した(Kusaka et al., 2015)。この研究では、同位体比のデータから C3 生態系の食料源と海産物の摂取が示唆されている。

2. 人歯・人骨・動物骨資料とその出土遺跡

古人骨の食性復元の多くはコラーゲン、アパタイトともに人骨資料から試料を採取しているが、アパタイトの $\delta^{13}\text{C}$ を陸上動物の同一個体の骨と歯冠エナメル質について分析したところ、歯冠エナメル質の方が信頼できる値を示したという研究が複数ある(Lee-Thorp & van der Merwe, 1991; Lee-Thorp, 1989; Zazzo et al., 2004)。歯冠エナメル質は特に構造が密であり、孔が少なく、有機成分が質量%にして2%のみである。結晶性が高く安定であるため、死後新たな結晶成長が起きたり、溶出することも少ない。これらの特性により、骨と比べて続成作用を受けづらい(Lee-Thorp, 1989)。そこで本研究では、続成作用が少ないことが指摘されている歯冠エナメル質を選択した。また、反映する食性の時期がコラーゲンとアパタイトで大きく異なるのを避けるため、コラーゲンの値は可能な限り同じ歯の歯根象牙質から採取した。骨は最期の10-25年の食性を示す(Hedges et al., 2007)。一方、永久歯の歯冠エナメル質形成開始と歯根象牙質完成の時期差は、各歯種での平均が6.3-10.4年である(【表4】を参照)。したがって、骨コラーゲンではなく歯根象牙質コラーゲンを用いることで、歯冠エナメル質のアパタイト成分が反映する時期との差を最小限に抑えられると考えられる。本研究で用いた歯種はほとんどが永久歯であり、0才~18才時の食性を示す(Nanci, 2018; White & Folkens, 2005)。

同位体食性分析に用いる食料源データは、食性分析対象の生物と可能な限り同時代・同地域の資料を用いることが求められる(Phillips et al., 2014a)。本研究では、分析した人歯・人骨資料の大部分を占める岩津保洞窟遺跡で出土した動物骨からコラーゲンを抽出し、炭素・窒素同位体比を測定した。マクロ栄養素モデルにおいて用いたC3草食動物のデータは、岩津保洞窟遺跡で出土したシカ象牙質コラーゲンから推定したものである。また、弥生時代にC4植物が動物により摂取されたことを示唆する先行研究の事例は未だにないが、本研究でも動物によるC4植物の摂取がないかを確認するために同時代の動物骨を分析した。

同位体分析に供する試料を採取した人歯・人骨資料については、形態情報の保存のため写真撮影をし、さらに人歯資料については歯科用ゴム質弾性印象材と付加型精密シリコン印象材で雌型を取った後、石膏で模型を作成した。脆くっており型の作成が困難であった資料については東京大学総合研究博物館にてCT撮影を行った。

分析した人歯・人骨・動物骨資料の点数を遺跡別に【表5】に示す。また、各遺跡の所在地を【図3】で示す。以下、各遺跡についてその背景と性質、用いた資料の出土状況とサンプリング方針を説明する。

i) 群馬県岩津保洞窟遺跡

群馬県多野郡神流町に所在する。伊豆諸島産の可能性が高い多数のオオツタノハ製貝輪を含む多くの海生貝類製の装飾品、東北地方南部にも関連する型式の土器が出土したことにより、広い地域との活発な交流が示唆されている。1980年から1982年にかけて行われた3次にわたる発掘調査で合計8体の人骨と、74点の遊離人歯（歯槽骨から抜け落ちた状態で見つかる歯）が出土した。

出土した人骨のうち、6体の人骨（1-3、5-7号）については、2、5-7号と伴出した野沢式の土器から弥生時代中期前葉のものと推定された(岩津保洞窟遺跡調査団, 2015)。5-7号は合葬であった。4号人骨と8号人骨は出土状況より縄文早期に属するとされている。弥生時代中期前葉のものと推定された6体の人骨（1-3、5-7号）については、①加熱痕が見られる（6体全て）、②下肢を強く折り曲げた屈葬である（1-3、5、7号）、③オオツタノハの貝輪が出土している（1、2、5-7号）などの特徴を共有している(岩津保洞窟遺跡調査団, 2015)。また、1号人骨と2号人骨については、形態学的特徴に縄文人的形質が色濃く見られる(海部, 1992)。

遊離人歯は、弥生時代に属すると推定された人骨の30-60cm上に8割の歯が集中していたことから、出土地点は弥生時代の地表面付近であり、弥生時代に由来すると推定された(岩津保洞窟遺跡調査団, 2015)。遊離歯の他に15点以上の遊離人骨も出土しており、洞窟は遺体を骨化させる場所として用いられ、別の場所に再葬する際に遺体から歯や人骨が外されて撒かれたのではないかと考えられている。

遊離人歯74点の歯種を藤田(1962)の基準に基づいて同定した。この際、本研究の試料を既に同定していた先行研究（岩津保洞窟遺跡調査団, 2015；海部陽介同定）および佐宗亜衣子の私信を参考にした。同歯種の歯は1個体につき1点のみ存在すること、今回同定された永久歯と乳歯の形成年齢から推定される個体年齢の領域が重ならないため、歯種同定から判定した最小個体数は7個体となった。同位体分析に供する資料には、最小個体数を判定する根拠となった歯種を中心に26点の歯を選んだ。これに加え、出土状況より縄文早期に属するとされている4号人骨と8号人骨の人骨2点、4号人骨に付随した歯を1点分析した。

同位体分析を行った資料の歯種同定結果は、【表 6】の「歯種・骨種」に記載した。

動物骨資料として、縄文時代の地層から出土したとされ、武蔵野美術大学民俗資料室に保管されていたものを借用した。種同定は明治大学黒耀石研究センターの樋泉岳二氏が形態学的特徴に基づき行った。これらの資料のうち、ニホンジカ、イノシシ、ツキノワグマ、ニホンノウサギ、カモシカと同定された骨のコラーゲンを同位体分析した。

ii) 長野県石神遺跡

長野県小諸市の遺跡で、縄文・平安時代の住居遺構が検出されている(小諸市教育委員会, 1994)。出土した人骨は、それぞれ石棺 (SX02・03・07)と土坑墓 (SK55・102・181・520)に埋葬されており、SX07の2個体の合葬を含めて計8個体分あった。石棺、土坑墓ともに遺跡内の一地点にやや集中的に位置し、その年代は堀之内2式期を中心とする縄文時代後期に属するものが大半であると推定された。埋葬の様式としては、上肢とともに下肢を強く屈曲させた屈葬位が多い。第3号土坑墓 (SK181)、第5号土坑墓 (SK520)出土の人骨には縄文時代中期末から弥生時代中期末にかけて各地で行われた抜歯の痕跡が認められている。本研究では石棺に埋葬された1個体 (SX02)、土坑墓に埋葬された4個体 (SK55・102・181・520)の歯を1点ずつ、合わせて5点の歯を分析した。コラーゲンが抽出できない、もしくは得られたコラーゲンの質が悪かった個体については、人骨から抽出したコラーゲンのデータを参照した。

iii) 長野県生仁遺跡

長野県千曲市(発掘時は更埴市)の遺跡で、縄文晩期終末、弥生時代～近世の遺構・遺物が出土した。縄文晩期終末の遺物としては氷式土器が出土している(長野県更埴市教育委員会, 1969)。弥生時代の遺構としては、集落跡があり、住居跡からト骨が出土している。また、弥生式の土器片(栗林式・吉田式・箱清水式)が出土している。千曲川の自然堤防上にあり、弥生時代～平安時代の自然流路、平安時代～近世の水田跡が検出されている(更埴市教育委員会, 2001)。昭和44年に行われた発掘において弥生時代後期(箱清水式期)の土器群と共に抜歯の行われた上顎・下顎骨が検出されており、歯冠と上下顎骨の形態分析の結果、渡来系弥生人の可能性が高いという所見が得られている(西沢, 1982; 近藤修, 私信)。本研究ではこの頭骨の右上顎第三大臼歯からエナメルをサンプリングした。コラーゲンの炭素・窒素安定同位体比と放射性炭素年代は頭骨か

ら抽出されたコラーゲンのデータを参照した。

iv) 中国河北省・姜家梁 (Jiangjialiang) 遺跡

中国新石器時代後期 (小河沿文化) のおよそ 5300-5000 cal BP の遺跡である。人骨コラーゲンに対して行われた先行研究では $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ がそれぞれ平均 $-7.0\pm 0.3\%$ 、 $8.8\pm 0.4\%$ であり、雑穀・雑穀食動物の摂取が示唆されている (Liu, et al., 2017)。本研究では、雑穀を食べていた集団の人歯の参照データとして、3 個体の歯をそれぞれ 1 点ずつ分析した。

3. 歯根象牙質・骨コラーゲン炭素窒素安定同位体比測定

歯根象牙質・緻密骨をディスクカッターで $40\text{-}500\ \mu\text{g}$ 切り出し、氷冷しながら純水中で超音波洗浄した後、 0.2M 水酸化ナトリウム溶液に一晩漬けて土壤有機物 (植物由来のフミン酸、フルボ酸など) を除去した。純水で中性に戻した後、凍結乾燥してから粉碎した。粉末状になった試料をセルロースチューブに入れ、 1.2M 塩酸に一晩漬けて無機成分であるヒドロキシアパタイトを溶解した (脱灰)。その後純水で中性に戻し、セルロースチューブの内容物を遠心分離して、上澄みを取り除いた。沈殿した試料を凍結乾燥した後、 90°C で 12 時間加熱し、ゼラチンのみを熱変性によって可溶化し (ゼラチン化)、再び遠心分離をかけてその他の成分と分離した。その後、ゼラチンが溶けた溶液をガラスフィルターで吸引ろ過し、凍結乾燥した試料をコラーゲン分析試料とした。

一部試料については、純水中で超音波洗浄後、以下の別プロトコルでコラーゲンを抽出した。 $0.4\ \text{M}$ 塩酸で 2 晩脱灰後、中性に戻して上澄みを遠心分離で除去した。 0.1M 水酸化ナトリウムを入れ、中性に戻した。 $\text{pH}4(0.0001\text{M})$ 塩酸を加え 90°C で 2 晩加熱し吸引ろ過でゼラチン分画を回収した。この方法では前述の方法と比べ弱酸で長時間脱灰し、ゼラチン化にもより時間をかけており、本研究室で行われた予備的実験にてコラーゲン回収率の向上と、前述の方法との同位体分析値の互換性が保証されている。

ゼラチン約 0.4mg を錫箔に包み、元素分析-同位体比質量分析計 (EA-IRMS, 元素分析計 Thermo Scientific FLASH 2000 と同位体比質量分析計 Thermo Scientific DELTA V Advantage を連続フローインターフェース Thermo Scientific ConFloIV で繋いだもの) を用いて $\delta^{13}\text{C}$ 値と $\delta^{15}\text{N}$ 値を測定した。標準試料には昭光サイエンス株式会社によって配布されたアラニンとヒスチジンをを用いた。アラニン (保証値 $\delta^{13}\text{C}$: $-19.6\pm 0.2\%$) の測定結果から計算した $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{15}\text{N}$

の測定における標準偏差はそれぞれ 0.01-0.16%、0.05-0.24%だった。元素分析計では炭素・窒素の存在比が測定できるので、これをもとにコラーゲンの保存状態の評価指標となる%C と%N (ともに質量%)、C/N 比 (%C と%N より計算した原子比) を求めた。

4. 歯冠エナメル質アパタイトの炭素安定同位体比測定

歯冠エナメル質試料は、タングステン・カーバイド製ドリルにて歯冠の表面の汚れ・セメント質・エナメル質表層を除去した後、20mg を粉末状に採取・秤量した。試料を 2ml マイクロチューブに移した後、1ml 超純水を加え転倒攪拌することで粉末の表面を洗った。遠心分離をし、上清を除去した後、有機物を除去するために 1ml 2.5%次亜塩素酸ナトリウムに浸け 1 晩反応させ、1ml 超純水で 3 回洗った。さらに埋蔵環境中から取り込まれた炭酸塩を除去するため、1ml 0.1M 酢酸バッファー(pH 4.4)を加え懸濁させ、4 時間反応させた。再度超純水にて 3 回洗浄し、上清除去後、60 °C 乾熱オーブンで一晩乾燥させた。

以上のような前処理が施された歯冠エナメル質アパタイトの炭素安定同位体比は国立科学博物館地学研究部の自動炭酸塩前処理装置-同位体比質量分析計 (自動炭酸塩前処理装置は Thermo Scientific KIEL IV、同位体比質量分析計は Thermo Scientific MAT253)、および 総合地球環境学研究所のガスベンチ-同位体比質量分析計 (GasBench-IRMS, 同位体比質量分析計は Thermo Scientific DELTA V Plus) で測定した。いずれの装置を用いた測定でも、歯冠エナメル質アパタイト 700-900 μg をリン酸と反応させアパタイト結晶構造中の炭酸塩を二酸化炭素として回収し、炭素 (および酸素) の安定同位体比を測定している。標準試料として、NBS19 (白大理石), NBS18 (火成炭酸塩岩), JLS-1 (石灰岩), JCp-1 (サンゴ) を用いた。2つの質量分析計において、NBS19 (保証値 $\delta^{13}\text{C}$: 1.95‰) の測定結果から計算した $\delta^{13}\text{C}$ の測定における標準偏差はともに 0.02‰であった。

5. 放射性炭素年代測定

まず、放射性炭素年代測定の原理について説明する。炭素の放射性同位体である ^{14}C は、宇宙線の作用でつくられた中性子が大気中の ^{14}N と核反応を起こすことによって生じる。天然の ^{14}C は約 5730 年の半減期でベータ壊変して ^{14}N に戻るため、宇宙線の照射の条件が一定であれば、大気中の ^{14}C は生成量と壊変量が等しくなるところで一定値をとる。大気中の ^{14}C は植物によって同化さ

れ、生態系の炭素循環に取り込まれる。生物は生存中、大気との炭素の交換を繰り返すため、 ^{14}C の割合は大気のそれと平衡が保たれる。一方、死後は外界との炭素交換が行われなため、生体中の ^{14}C の割合は死後時間が経過するとともに減少する。大気中の ^{14}C 濃度がほぼ一定であることと、 ^{14}C の半減期が既知であることを利用して、死後に閉鎖系となった生体に残存する ^{14}C の割合から生物が死んだ年代値を計算するのが、放射性炭素年代測定の原理である(兼岡, 2008)。

^{14}C は 1947 年に Libby らによってその存在が確認され、その直後から生物体試料を対象とする年代測定に利用されるようになった(Anderson et al., 1947; Libby, 1954)。放射性炭素年代測定は年代測定範囲として現在から 5~6 万年前の試料に対して適用でき、1970 年代半ばに加速器質量分析計を用いた測定法が開発されることによって測定精度が相対誤差として 0.5%まで高まった(Muller, 1977)。

未校正の放射性炭素年代 (^{14}C 年代) は、原水爆実験や化石燃料の使用のため ^{14}C 量が激変した 1950 年以前の大気中 ^{14}C 濃度を基準とし、半減期は Libby によって測定法が開発された当時に定められた 5568 年を用いて計算される。1950 年を基準として放射性炭素年代を表記する際は数値の後に BP と表記する。しかし、後続の研究にて ^{14}C 半減期の平均値は 5730 年となった。また、大気中の ^{14}C 濃度は経年変化することが分かってきた(Suess, 1967)。そこで、暦年代(実際の年代)に近づける努力として、暦年代が判っている樹木年輪等の資料を放射性炭素年代測定法で測定し、既知の暦年代と放射性炭素年代測定で計算された年代を軸にした校正曲線 IntCal が作成された(Beck et al., 1998)。校正曲線を用いて校正された年代は数値の後に cal と付記する。さらに、測定の対象となる生物が大気中の二酸化炭素から炭素を取り込む際の同位体分別を補正する必要があるため、測定試料の $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ の測定値から $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ の同位体分別の程度を推定し、補正が行われる。

炭素・窒素安定同位体比測定で C/N 比より生体由来のコラーゲンが抽出できたことが確認され、1mg 以上のコラーゲンが確保できた資料については、放射性炭素年代測定のためにグラフアイト化を進めた。コラーゲンを約 2.5mg 分取し、真空にした二重石英ガラス封管内で酸化銅、サルフィックスとともに 850°C に加熱し、二酸化炭素を得た(Minagawa et al., 1984)。これを真空ラインで精製した後、水素と鉄粉を入れた石英ガラス製反応容器に封入し、650°C でグラフアイト

トに還元した(Kitagawa et al., 1993)。

グラファイト試料 (300-500 μg) の放射性炭素存在比を東京大学総合研究博物館放射性炭素年代測定室の加速器質量分析計 (AMS, National Electrostatics Corporation 製 CAMS 500) で測定した。標準試料として、アメリカ国立標準技術研究所配布のシュウ酸標準物質である SRM4990C、和光純薬工業株式会社の特級シュウ酸二水和物 159-00425、IAEA-C4 (半化石化木材)、IAEA-C6 (スクロース)、IAEA-C8 (シュウ酸)を用いた。測定結果は OxCal4.2 にて IntCal13 を用いて暦年較正を行った(Ramsey, 2009; Reimer et al., 2013)。

III. 結果

1. マクロ栄養素モデルの検証

【図4】に、マクロ栄養素モデルで想定した各食性における $\delta^{13}\text{C}_{\text{collagen}}$, $\delta^{15}\text{N}$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{apatite}}$, $\Delta^{13}\text{C}_{\text{apatite-collagen}}$ の関係性を示した。左には今回計算したすべての食性を表示し、右には本研究で主に検討する、C3 植物もしくは C3 草食動物と合わせて C4 雑穀・海生貝類が 0-60% 摂取された場合の食性のみ表示した。図(4-a)で、C3 草食動物-C4 雑穀の混合を示した曲線が C4 雑穀の寄与率が 20-80% で $\delta^{13}\text{C}_{\text{apatite}}$ が $\Delta^{13}\text{C}_{\text{apatite-collagen}}$ と正の相関を持っている。図(4-b) の $\delta^{13}\text{C}_{\text{collagen}}$ と $\Delta^{13}\text{C}_{\text{apatite-collagen}}$ の関係性でも同様の現象が見られた。他の食性ではこのような傾向が見られず、狩猟活動をする集団による少量の雑穀摂取を検出するには大変有効な指標だと考えられる。

図(4-a)、図(4-b)では、マクロ栄養素の組成が類似する C3 植物-C4 雑穀、C3 草食動物-海生貝類、C3 草食動物-C4 草食動物の混合においては、 $\Delta^{13}\text{C}_{\text{apatite-collagen}}$ がほぼ一定であるのに対し、コラーゲンとアパタイトの $\delta^{13}\text{C}$ のみがそれぞれ C4 雑穀、海生貝類、C4 草食動物の寄与率とともに増加した。一方、マクロ栄養素の構成が大きく異なる C3 植物-海生貝類、C3 植物-海生魚類、C3 植物-C4 草食動物の混合では、海生貝類、海生魚類、C4 草食動物の寄与率が 0-40% の場合 $\Delta^{13}\text{C}_{\text{apatite-collagen}}$ は減少し、40-100% と多く摂取されるようになると増加した。マクロ栄養素の組成は異なるが、炭素同位体比が異なる C4 雑穀-C4 草食動物の混合では $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\Delta^{13}\text{C}_{\text{apatite-collagen}}$ ともに変動が 1.2‰ 以内に収まった。

$\delta^{15}\text{N}$ と $\Delta^{13}\text{C}_{\text{apatite-collagen}}$ の関係性を示した図(4-c)では、C3 草食動物-C4 雑穀の混合においては C4 雑穀 0-80% の範囲で C4 雑穀の寄与率とともに $\delta^{15}\text{N}$ が 1.1‰ 減少するのに対し $\Delta^{13}\text{C}_{\text{apatite-collagen}}$ が 3.5‰ 増加し、C4 雑穀 80-100% の範囲ではほぼ変動しない。一方、C3 植物-海生貝類の混合では海生貝類 0-60% の範囲で海生貝類の寄与率とともに $\delta^{15}\text{N}$ が 4.2‰ 増加するのに対し $\Delta^{13}\text{C}_{\text{apatite-collagen}}$ は 2.5‰ 減少し、海生貝類 60-100% の範囲では $\delta^{15}\text{N}$ は 1.4‰、 $\Delta^{13}\text{C}_{\text{apatite-collagen}}$ は 1.5‰ 増加する。C3 植物-C4 草食動物の混合では C4 草食動物 0-40% で $\delta^{15}\text{N}$ が 2.1‰ 増加するのに対し $\Delta^{13}\text{C}_{\text{apatite-collagen}}$ が 4.8‰ 減少し、C4 草食動物 40-100% で $\delta^{15}\text{N}$ が 0.8‰ 増加するのに対し $\Delta^{13}\text{C}_{\text{apatite-collagen}}$ が 3.6‰ 増加する。C3 植物-C4 雑穀、C3 草食動物-C4 草食動物の混合では $\Delta^{13}\text{C}_{\text{apatite-collagen}}$ は一定で、 $\delta^{15}\text{N}$ の変動も 0.6‰ と少ない。C3 草食動物-海生貝類、C4 雑穀-C4 草食動物の混合では、それ

ぞれ海生貝類、C4 草食動物の寄与率ともに $\delta^{15}\text{N}$ が 2.3‰、3.3‰増加するのに対し、 $\Delta^{13}\text{C}_{\text{apatite-collagen}}$ の変動は 0.5‰、1.6‰に収まる。C3 植物-海生魚類の混合では $\delta^{15}\text{N}$ の変動が全食性中で最も著しく、海生魚類の寄与に伴って 10.5‰変動する。 $\Delta^{13}\text{C}_{\text{apatite-collagen}}$ は海生貝類の寄与率が 0-40%の範囲で 3.9‰減少し、それ以上の寄与率では 2.4‰増加する。

図(4-d)、(4-e)の $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{15}\text{N}$ の関係においては、C3 草食動物-C4 草食動物の混合のみ負の相関がみられた。C3 植物-海生貝類、C3 植物-海生魚類の混合では $\delta^{13}\text{C}$ が増加するとともに $\delta^{15}\text{N}$ が全体でそれぞれ 7.6‰、10.5‰と大幅に増加する正の相関がみられた。C3 草食動物-海生貝類、C3 植物-C4 草食動物の混合においては $\delta^{13}\text{C}$ が増加するとともに $\delta^{15}\text{N}$ がともに全体でそれぞれ 2.3‰、3.9‰増加する。C3 植物-C4 雑穀、C3 草食動物-C4 草食動物の混合では $\delta^{15}\text{N}$ はほぼ一定のまま $\delta^{13}\text{C}$ のみ C4 雑穀、C4 草食動物の摂取とともに 15.8‰変動する。C4 雑穀-C4 草食動物の混合では $\delta^{13}\text{C}_{\text{collagen}}$ 、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{apatite}}$ の変動が全体で 1.5‰、0.4‰以内であるのに対し $\delta^{15}\text{N}$ は C4 草食動物の摂取とともに全体で約 3.3‰増加する。

$\delta^{13}\text{C}_{\text{collagen}}$ と $\delta^{13}\text{C}_{\text{apatite}}$ の関係を示した図(3-f)では、C4 雑穀-C4 草食動物以外のすべての食性において正の相関が得られた。海生貝類・海生魚類に比べ、C4 雑穀・C4 草食動物が混合された食性の方が $\delta^{13}\text{C}_{\text{collagen}}$ 、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{apatite}}$ ともに上昇幅が大きかった。

【図5】ではマクロ栄養素モデルと同じグラフ上に先行研究の同位体比データをプロットした。 $\delta^{13}\text{C}_{\text{apatite}}$ と $\Delta^{13}\text{C}_{\text{apatite-collagen}}$ の関係を示した図(5-a)で、C3 植物由来のタンパク源と C4 雑穀であるトウモロコシの摂取割合が個体ごとに変わっていたと考えられる Cahokia 集団の近似直線は正の傾きを持っており、C4 雑穀の寄与率が 20-80%の場合の C3 草食動物-C4 雑穀の混合モデルと整合的であった。

$\delta^{13}\text{C}_{\text{collagen}}$ と $\Delta^{13}\text{C}_{\text{apatite-collagen}}$ の関係を示した図(5-b)では、Cahokia 集団のみ近似直線にて顕著な正の傾きが得られ、C3 草食動物-C4 雑穀の混合モデルを示した曲線が C4 雑穀の寄与率 20-80%の範囲で $\delta^{13}\text{C}_{\text{collagen}}$ が $\Delta^{13}\text{C}_{\text{apatite-collagen}}$ と正の相関を持っているという特徴に合致した。タンパク質源としても C4 雑穀が摂取されている Yangshao 集団の近似直線（傾き：-0.54、 $R^2 = 0.35$ ）、海産物が C3 植物とともに摂取されている沿岸縄文集団の近似直線（傾き：-0.60、 $R^2 = 0.51$ ）では負の傾きが得られた。

$\delta^{15}\text{N}$ と $\Delta^{13}\text{C}_{\text{apatite-collagen}}$ の関係を示した図(5-c)では Cahokia 集団、沿岸縄文集団について近似直線が負の傾きを持っていた。C3 草食動物-C4 雑穀の混合モデルで C4 雑穀の寄与率が 20-80% のとき、C3 植物-海生魚類の混合モデルで海生魚類の寄与率が 0-60% のとき、モデルでも負の相関関係が見られている。Yangshao 集団では C4 雑穀-C4 草食動物の混合モデルの C4 雑穀が 0-80% 占める場合と整合的であった。

図(5-d)、(5-e)で示した $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{15}\text{N}$ の関係では、海産物が C3 植物とともに摂取されている沿岸縄文集団の近似直線において正の傾きが得られ、C3 植物-海生魚類の混合モデルと整合的であった。他の集団の近似直線は負の傾きを持っていた。

$\delta^{13}\text{C}_{\text{collagen}}$ と $\delta^{13}\text{C}_{\text{apatite}}$ の関係を示した図(4-f)では、Cahokia 集団にて高い正の相関が得られた。他の集団の近似直線も正の傾きを持っていた。

各集団について考古学および同位体分析の先行研究より推定された食性を計算したマクロ栄養素モデルは、同位体比指標間の相関関係において実測値と概ね一致していた。ただし、Cahokia 集団の $\Delta^{13}\text{C}_{\text{apatite-collagen}}$ がモデルよりも $\sim 6\%$ 大きい傾向があるなど、実測値とモデルの絶対値とが乖離するケースが多く見られた。その原因としては、今回マクロ栄養素モデルを構築するにあたり想定した食料源は日本産の食品データを参照しており、各地で実際に摂取された食料源の同位体比と差があったことや、マクロ栄養素モデルでは 2 つの食料源の混合のみを計算しているが、実際には 3 つ以上の食料源が摂取されていたことが考えられる。

2. 放射性炭素年代

【表 6】に各試料の年代を示した。暦年較正前の放射性炭素年代 (^{14}C 年代) に付随して表示した誤差の主要部は、 ^{14}C の計数が n の場合に \sqrt{n} で与えられる計数誤差の相対誤差 ($1/\sqrt{n}$) のガウス分布 1 標準偏差分である(中村, 2001)。時代区分は、較正年代の確率密度分布の最頻値の時代を採用し、先史時代については石川(2010)、藤尾(2013) 工藤・国立歴史民俗博物館(2014)、歴史時代については日本史年表(早稲田大学図書館)に基づいて区分した。以下、遺跡別に結果の説明をする。

i) 岩津保洞窟遺跡

人骨・人歯資料は、放射性炭素年代測定を行った試料 27 点のうち最も多い 18

点が弥生時代に比定された。うち 14 点が弥生中期の年代を示し、残りは弥生後期であった。また、縄文時代の資料が 2 点あり、縄文早期と縄文前期末に比定された。他に古墳時代 (1 点)、古代の飛鳥～奈良時代 (2 点)、平安時代 (2 点)、室町時代 (2 点) に属する歯も検出され、縄文、弥生時代以外の遺物もあるということが新たに判明した。すべて弥生時代に属するとされた遊離歯の一部が縄文時代や古墳時代以降の時代に比定され、縄文早期に属するとされた 8 号人骨が弥生時代中期に比定されるなど、出土状況から推定された年代と異なる放射性炭素年代を示す資料が多く、先行研究で指摘されているより広い範囲で地層の攪乱が起きていたと考えられる(岩津保洞窟遺跡調査団, 2015)。歯種同定、人骨からの年齢推定の結果と照らし合わせると、最小個体数で縄文時代に 2 個体、弥生時代に 4 個体、古墳時代に 1 個体、飛鳥～奈良時代に 2 個体、平安時代に 2 個体、室町時代に 1 個体、すなわち異なる時代の個体の資料が 12 個体以上分あることが分かった。同じ遺跡から出土した動物骨資料は縄文早期 (6 点)、縄文晩期 (2 点)、古墳 (1 点) の年代を示した。動物骨資料は、放射性炭素年代測定を行った試料 9 点中、6 点が縄文早期、2 点が縄文晩期、1 点が古墳時代に比定された。

ii) 生仁遺跡

人骨は縄文晩期終末の年代を示した。先行研究では共に出土した土器の型式より弥生時代後期とされていたが、より古い年代の人骨であることが確認された。同じ遺跡の別地点からは縄文晩期終末の型式の土器が出土しているため、遺跡全体の遺物出土状況とは矛盾しない。

iii) 石神遺跡

人骨は 2 点中 1 点が土器型式から推定された通り縄文後期に比定された。発掘調査書で所産期が明確でないとされた第一土坑墓から出土した SK55 は鎌倉時代の値を示した。

iv) 姜家梁遺跡

資料は 3 点とも較正年代が -5000-4500 cal BP の範囲に収まり、考古学的所見の通り新石器時代中期に属することが確認された。

3. コラーゲン炭素・窒素安定同位体比

【表 6】に各試料のコラーゲンの収率と C/N (原子比) を示した。コラーゲン抽出を行なった試料 54 点のうち 50 点から EA-IRMS で炭素・窒素安定同位体

比を測定可能な分量(0.4mg)のゼラチンが得られ、うち48点はC/N比が生体由来コラーゲンの正常値の範囲(2.9-3.6)に収まったため、コラーゲンの変性あるいは外部有機物の混入の可能性は少ない(DeNiro, 1985)。正常値の範囲を超えた試料2点については、今後の議論の対象から除外する。

各試料のコラーゲン炭素・窒素安定同位体比測定結果($\delta^{13}\text{C}_{\text{collagen}}$, $\delta^{15}\text{N}$)の数値を【表7】示し、【図6】にプロットした。今回の測定試料はすべて内陸遺跡の資料に由来しており、 $\delta^{15}\text{N}$ は陸上資源寄りの低い値を示した($8.0 \pm 1.1\%$)。岩津保洞窟遺跡・生仁遺跡・石神遺跡の人骨・人歯における $\delta^{15}\text{N}$ は、年代測定で縄文早期～後期に比定された試料では $7.6 \pm 1.2\%$ 、縄文晩期～弥生後期に比定された試料では $7.6\% \pm 0.7\%$ であり、平均値は等しかった。また、Mann-WhitneyのU検定で、棄却限界値を $p=0.05$ に設定し縄文早期～後期、縄文晩期～弥生後期の試料間で $\delta^{15}\text{N}$ を比較したところ、 $p=0.79$ となり有意差は見られなかった。

一方、 $\delta^{13}\text{C}$ については時代・遺跡別に大きな差が見られた。岩津保洞窟遺跡・生仁遺跡・石神遺跡の人骨・人歯における $\delta^{13}\text{C}$ は、年代測定で縄文早期～後期に比定された試料($-19.9 \pm 0.2\%$)と比べ、縄文晩期～弥生後期に比定された試料($-16.0\% \pm 0.9\%$)では平均値の差で 3.9% の上昇が見られた。Mann-WhitneyのU検定で、棄却限界値を $p=0.05$ に設定し縄文早期～後期、縄文晩期～弥生後期の試料間で $\delta^{13}\text{C}$ を比較したところ、 $p=0.0013$ となり有意差が見られた。雑穀・雑穀食動物の摂取が先行研究で指摘されている中国・姜家梁遺跡の新石器時代人歯では、さらに高い $\delta^{13}\text{C}$ ($-7.0 \pm 0.5\%$)が観測された。

岩津保洞窟遺跡の動物骨は $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ がともにC3生態系の食料源を利用する動物の範囲に収まった($\delta^{13}\text{C}$: $-21.4 \pm 1.5\%$, $\delta^{15}\text{N}$: $-3.1 \pm 0.8\%$)。

4. アパタイト炭素安定同位体比

各試料のアパタイト炭素安定同位体比測定結果は【表6】の $\delta^{13}\text{C}_{\text{apatite}}$ に示した。また、【図7】にコラーゲン(黒)・アパタイト(赤)の炭素安定同位体比を未校正の放射性炭素年代(^{14}C 年代)に対してプロットした。歯の象牙質から生体由来のコラーゲンが抽出できなかった個体については、同じ個体の骨から抽出したコラーゲンの炭素安定同位体比・放射性炭素年代を採用している。

岩津保洞窟遺跡・生仁遺跡・石神遺跡の人歯エナメル質においてアパタイトの $\delta^{13}\text{C}$ は、年代測定で縄文早期～後期に比定された試料($-14.1 \pm 0.6\%$)と比

べ、縄文晩期～弥生後期に比定された試料 ($-9.4 \pm 1.2\text{‰}$) では平均値の差で 4.6‰ の上昇が見られた。特に縄文晩期終末の生仁遺跡では高い $\delta^{13}\text{C}$ (-6.9‰) が確認された。Mann-Whitney の U 検定で、棄却限界値を $p=0.05$ に設定し縄文早期～後期、縄文晩期～弥生後期の試料間で $\delta^{13}\text{C}$ を比較したところ、 $p=0.0015$ となり有意差が見られた。中国・姜家梁遺跡の新石器時代人歯では、さらに高い $\delta^{13}\text{C}$ ($0.03 \pm 0.4\text{‰}$) が観測された。

アパタイトとコラーゲンの炭素同位体比の差 ($\Delta^{13}\text{C}_{\text{apatite-collagen}}$) は草食動物において肉食動物より大きい値が報告されており、植物食の度合いの目安とされている (Ambrose & Norr, 1993; Krueger & Sullivan, 1984; Lee-Thorp et al., 1989)。 $\Delta^{13}\text{C}_{\text{apatite-collagen}}$ は縄文早期～後期に比定された試料で $5.9 \pm 0.5\text{‰}$ 、縄文晩期～弥生に比定された試料で $6.4 \pm 1.2\text{‰}$ であった。中国・姜家梁遺跡の新石器時代人歯では $7.1 \pm 0.3\text{‰}$ であった。

5. 結果のまとめ

マクロ栄養素モデルの計算結果より、C4 雑穀あるいは海生貝類が C3 植物・C3 草食動物と合わせて少量摂取された場合、同位体比の指標は異なる挙動を示すことが分かった。また、マクロ栄養素モデルを先行研究の実測値と比較すると、同位体比指標間の相関関係について概ね両者は整合的であった。特に C3 生態系の食料源が食料の大部分を占めているときに $\delta^{13}\text{C}_{\text{apatite}}$ 、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{collagen}}$ が $\Delta^{13}\text{C}_{\text{apatite-collagen}}$ と正の相関を持つのは C3 草食動物と C4 雑穀の混合の場合のみであり、狩猟活動をする集団による少量の雑穀摂取を検出するには大変有効な指標だと考えられる。

【図 8】に、岩津保洞窟遺跡の縄文早期～弥生後期の試料、石神遺跡の縄文後期の資料、生仁遺跡の縄文晩期の資料、姜家梁遺跡の新石器中期の資料について安定同位体比測定結果の箱ひげ図を示した。コラーゲンとアパタイト両方の $\delta^{13}\text{C}$ において、放射性炭素年代測定で縄文早期～後期に比定された試料と比べ縄文晩期～弥生後期に比定された試料では有意な上昇が確認された。上昇幅はアパタイトの方が平均で 0.7‰ 高かった。 $\delta^{15}\text{N}$ では縄文早期～後期と縄文晩期～弥生後期の試料間に有意差はなかった。岩津保洞窟遺跡の動物骨は $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ がともに C3 生態系の食料源を利用する動物の範囲に収まったので、時代間の食性変化をもたらした食料源には $\delta^{13}\text{C}$ が高く、 $\delta^{15}\text{N}$ が低い別の食料源が考えられる。考察では、 $\delta^{13}\text{C}$ の上昇が C4 雑穀によるものなのか、マクロ栄養

素モデルとの比較にて検討する。

IV. 考察

1. マクロ栄養素モデルを用いた縄文～弥生時代の食性変化の評価

【表 8】に、岩津保洞窟遺跡の試料で測定された同位体比指標間の相関関係を評価するため行った、2つの連続変数間の線形関係を評価するピアソンの積率相関検定の結果を示した。棄却値を $\alpha=0.05$ としたとき、岩津保洞窟遺跡（縄文早期～弥生後期）の $\delta^{13}\text{C}_{\text{collagen}}-\delta^{13}\text{C}_{\text{apatite}}$ 間、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{apatite}}-\Delta^{13}\text{C}_{\text{apatite-collagen}}$ 間、岩津保洞窟遺跡（弥生時代のみ）の $\delta^{13}\text{C}_{\text{apatite}}-\Delta^{13}\text{C}_{\text{apatite-collagen}}$ 間に有意な相関関係が検出された。【図 9】において、岩津保洞窟遺跡の縄文早期～弥生後期、石神遺跡の縄文後期、生仁遺跡の縄文晩期、姜家梁遺跡の新石器中期の試料で実際に観測された同位体比を、マクロ栄養素モデルに対してプロットした。

最も多い試料数を分析した岩津保洞窟遺跡の試料についてまず考察する。岩津保洞窟遺跡の試料では、縄文～弥生時代の試料全体の近似直線と、弥生時代の試料のみの近似直線を示しており、前者は時代間の食性の変化、後者は弥生時代における食性の分布の観察を目的としている。ピアソンの積率相関検定で有意な相関関係が得られた $\delta^{13}\text{C}_{\text{apatite}}$ 、 $\Delta^{13}\text{C}_{\text{apatite-collagen}}$ を示した図(9-a)を見ると、岩津保洞窟遺跡の試料は C3 草食動物の寄与率が 20-100%のときの C3 草食動物と C4 雑穀の混合モデルに沿うような正の近似直線を描いた。縄文～弥生時代の試料全体の近似直線は傾きが 0.32、 R^2 値が 0.28、弥生時代の試料のみの近似直線は傾きが 0.66、 R^2 値が 0.39 であった。モデルと比較すると、縄文早期～前期末の試料は C4 雑穀が 0-20%、弥生中期～後期の試料は 20-60%摂取された場合の領域と類似する。

また、岩津保洞窟遺跡の縄文早期～弥生後期をまとめた試料群で有意な相関関係が検出された $\delta^{13}\text{C}_{\text{collagen}}$ 、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{apatite}}$ をプロットした図(9-f)を見ると、縄文～弥生時代の試料全体では傾きが 0.93、 R^2 値が 0.63 の近似直線が示された。これは、縄文時代から弥生時代の試料での $\delta^{13}\text{C}$ の変化がコラーゲンよりアパタイトで大きかったことを示す。弥生時代の試料群の実測値を C3 草食動物と C4 雑穀の混合モデルのそれと比較すると、縄文早期～前期末の試料は C4 雑穀が 0-20%、弥生中期～後期の試料は 20-60%摂取された場合の領域に存在した。

以上のように、統計検定で有意な線形の相関関係が見られた $\delta^{13}\text{C}_{\text{collagen}}$ と $\delta^{13}\text{C}_{\text{apatite}}$ 、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{apatite}}$ と $\Delta^{13}\text{C}_{\text{apatite-collagen}}$ のプロットをマクロ栄養素モデルと比較すると、岩津保洞窟遺跡の弥生集団が C3 草食動物と C4 雑穀を主に摂取し、C4

雑穀の寄与率がおよそ 20-60%であったことが示唆された。

次に、統計検定では有意な線形の相関関係が得られなかった岩津保洞窟遺跡試料の同位体比指標間の関係についても図を考察する。 $\delta^{15}\text{N}$ と $\delta^{13}\text{C}$ との関係プロットした図 (9-c)、(9-d)、(9-e) では、C3 草食動物と C4 雑穀の混合モデルが示した曲線の傾向と大きくずれることはなかった。ただし、岩津保洞窟試料のプロットの分布領域は、モデルに対して $\delta^{15}\text{N}$ がおよそ 2‰ 上にずれる現象が観察された。【図 10】にて岩津保洞窟遺跡の弥生中期～後期試料群の $\delta^{15}\text{N}$ の歯種別平均を、各歯種の歯根形成開始年齢に対して示した。第一乳臼歯については歯根の形成開始年齢のデータがないため、歯冠形成が完了する年齢を参照した。近似直線を引いたところ、傾きが -0.19、 R^2 値が 0.87 となり、若い年齢で形成される歯種ほど $\delta^{15}\text{N}$ が高い傾向にあることが分かった。出生後、乳児の組織の同位体比は授乳者のそれに対し、2-3‰ 増加する現象が先行研究で指摘されている (Tsutaya & Yoneda, 2015)。また、歯根象牙質コラーゲンは組織形成時の食性を反映する (Beaumont et al., 2013; Dean, 2017)。したがって、若い年齢で形成される歯種ほど $\delta^{15}\text{N}$ が高くなる傾向は授乳の影響であると考えられ、C3 草食動物・C4 雑穀の混合モデルと実測値との間にある $\delta^{15}\text{N}$ のずれにもこの影響があると推察される。

$\delta^{13}\text{C}_{\text{collagen}}$ 、 $\Delta^{13}\text{C}_{\text{apatite-collagen}}$ の関係を示した図(9-b)のみ、C3 草食動物と C4 雑穀の混合モデルとは異なる傾向が観察された。統計的に有意ではないものの、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{collagen}}$ と $\Delta^{13}\text{C}_{\text{apatite-collagen}}$ との間に負の相関が見られた。ただし、C3 マクロ栄養素モデルにて同じような $\delta^{13}\text{C}$ の領域で負の相関を示すような食性は、C3 植物と合わせて C4 草食動物、もしくは少量の海産物が摂取されていた場合である。後者の場合、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{collagen}}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ の関係を示した図(9-d)と $\delta^{13}\text{C}_{\text{apatite}}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ の関係を示した図(9-e)でモデルにて観察された強い正の相関に倣って少なくとも統計的に有意な正の相関が得られると考えられるので、その可能性は低い。C4 草食動物が少量摂取されていたケースは否定できないが、動物骨で C4 雑穀の摂取が確認された例は本研究ではなかった。もう一つの可能性として、今回マクロ栄養素モデルでは 2 つの食料源の混合のみを考えたが、同じ計算方法にて C4 雑穀の寄与率を固定して C3 草食動物と C3 植物の寄与率を変化させた場合、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{collagen}}$ と $\Delta^{13}\text{C}_{\text{apatite-collagen}}$ の間に負の相関が見られる (【図 11】)。よって、実際には C3 草食動物と C4 雑穀だけでなく、C3 植物も合わせて食されていたことが考えられる。

次に、岩津保洞窟遺跡以外の縄文～弥生時代・新石器時代の試料について考察する。生仁遺跡の試料では、本研究で分析した試料のうち最も高い $\delta^{13}\text{C}_{\text{apatite}}$ と $\Delta^{13}\text{C}_{\text{apatite-collagen}}$ が観察された。 $\delta^{13}\text{C}_{\text{apatite}}$ 、 $\Delta^{13}\text{C}_{\text{apatite-collagen}}$ を示した図(9-a)にてマクロ栄養素モデルと比較すると、このような値を取り得るのはC4雑穀とC3植物の混合のみであり、60%に近いC4雑穀の寄与が考えられる。中国・新石器時代中期の姜家梁遺跡の試料は炭素同位体比ではモデル上の100%C4植物の領域付近に常に位置し、高いC4植物の摂取が示唆された。石神遺跡は岩津保洞窟遺跡の縄文時代試料と同様の傾向を示した。いずれの遺跡の試料でも、岩津保洞窟遺跡の試料と同じく、授乳の影響と考えられる $\delta^{15}\text{N}$ のモデル値に対する正のずれが見られた。ただし、これらの遺跡では分析可能な資料数が少なかったため、集団における同位体比指標の変動から食性を推定することはできなかった。

2. 縄文～弥生時代の雑穀寄与率の時代変化

本研究で分析した関東地方内陸部および中部高地の縄文～弥生時代の資料について、マクロ栄養素モデルと実測値を比較したところ、主にC3草食動物とC4雑穀、C3植物の混合からなる食性が示唆された。そこで、食料源としてC3草食動物・C4雑穀・C3植物を想定し、縄文～弥生時代の資料についてマクロ栄養素モデルで用いた計算方法にて $\delta^{13}\text{C}_{\text{collagen}}$ 、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{apatite}}$ からそれぞれの食料源の寄与率を算出した。 $\delta^{15}\text{N}$ はマクロ栄養素モデルとの比較において、試料によっては授乳の影響を顕著に受けており食料源自体の混合だけでは説明できないと考えられるため、今回は $\delta^{13}\text{C}$ を計算に用いた。

計算結果を放射性炭素年代に対してプロットしたものを【図12】に示す。C3草食動物とC3植物の寄与率はまとめて「C3植物+草食動物」として表示した。縄文早期～後期の資料から算出されたC4植物・C3草食動物・C3植物の寄与率はそれぞれ9.8%、77.8%、12.4%であった。これに対し、縄文晩期～弥生後期の試料から算出されたC4植物・C3草食動物・C3植物の寄与率はそれぞれ37.7%、25.5%、36.9%であった。

したがって、本研究では縄文晩期～弥生後期には食事全体のおよそ40%を雑穀が乾燥重量にて占めていた可能性が示唆され、考古学的証拠に基づいて立てられた仮説が同位体分析でも支持される結果となった。さらに興味深いのは、この時期における雑穀寄与率を見ると、縄文晩期の試料(生仁遺跡)では寄与率が高く、岩津保洞窟遺跡の弥生時代試料では時代経過とともに寄与率が減少する可

能性が示唆されたことである（図(12-a)参照）。¹⁴C年代とC3植物の寄与率については、単調な増加傾向は認められなかったが、縄文早期～後期の試料と比べて縄文晩期～弥生後期の試料ではC3植物の平均寄与率が12.4%から36.9%に増加している。長野県で実施された土器の種実圧痕調査からは、縄文晩期末に雑穀栽培が選択的に受容され、のちにイネと複合的に栽培されるようになったとされている(馬場・遠藤, 2017)。イネはC3植物であるため、先に雑穀が摂取されるようになり、稲作が開始するとともに雑穀の寄与率が減少し、代わりにイネの寄与率が増加した可能性がある。しかし、C4雑穀の寄与率が縄文晩期～弥生後期にかけて統計的に有意な減少をするかどうかは、今回は分析していない弥生前期の資料を含め、さらなる資料の分析と時系列分析が必要である。

生仁遺跡の資料では歯冠と上下顎骨の形態分析の結果、渡来系弥生人の可能性が高いという所見が得られた(近藤修, 私信)。一方、岩津保洞窟遺跡の弥生人骨では形態的特徴に縄文人的形質が色濃く見られた(海部, 1992)。本研究で得られた同位体分析の結果を先行研究の知見と組み合わせると、雑穀栽培は縄文晩期末に渡来系弥生人によって中部高地まで伝えられ、弥生時代には縄文系弥生人が住む周辺地域まで拡散し、イネと複合的に栽培されるようになったことが考えられる。

3. 本研究における課題と今後の展望

本研究ではマクロ栄養素モデルを構築する際に、各栄養素の含有率については文部科学省の食品成分データベースを参照した。また、海産物における組織やマクロ栄養素間の同位体比のオフセットについては研究が十分に為されていなかったため、哺乳類の給餌実験等のデータをもとに推定を行った。よって、今後マクロ栄養素モデルの精度を高めるにあたり、食料源の各栄養素を抽出しその同位体比を測定することで、参照し得る食料源のデータを拡充することが必要である。特に品種改良等により栄養素の含有率が変化したと考えられる食料源については、可能な限り考古遺物の同位体比を測定する。また、本研究では各食料源の平均値のみを用いて計算を行なったが、各食料源の栄養素含有率と同位体比を複数試料測定し、計算に取り入れることによって、モデルの不確かさを評価することが求められる。近年、不確かさを取り入れた同位体比による食性の評価についてはSIARやFRUITSといったベイズ統計に則ったモデルが多数開発されており、こうしたモデルを用いて不確かさを評価することも可

能である(Fernandes et al., 2014; Parnell et al., 2010; Phillips et al., 2014)。ただし、これらのモデルでは食料源のデータの平均と分散に基づき不確かさが評価されているため、食料源のデータの拡充が必須となる。

マクロ栄養素モデルで算出された同位体比と古人骨資料における実測値との比較では、同位体比指標間の相関関係は整合的である場合が多かったが、モデルの検証に用いた日本以外の遺跡から出土した古人骨資料では同位体比指標自体の実測値がモデルと乖離するケースが多く見られた。また、マクロ栄養素モデルに基づき計算した縄文早期～後期の試料群における C4 植物寄与率の平均は 9.8% となり、0% ではなかった。しかしながら、今回扱った資料が出土した地域では、同時期における C4 植物の利用を示す植物遺存体や土器圧痕はない。その原因として、今回マクロ栄養素モデルを構築するにあたり想定した食料源の同位体比と実際に摂取された食料源の同位体比に差があることや、マクロ栄養素モデルでは 2 つの食料源の混合のみを計算しているが、実際には 3 つ以上の食料源が摂取されていたことが考えられる。そのため、より正確なマクロ栄養素モデルを構築するには、遺跡ごとに出土した食料源になり得る遺物の同位体比を測定し計算式に代入すること、2 つの食料源の混合モデルとの比較で主に摂取されていた食料源が同定できたら、3 つ以上の食料源の混合も想定し計算することが求められる。

本研究では関東地方内陸部および中部高地で出土した縄文～弥生時代の人歯資料を中心に分析したが、縄文晩期から弥生時代における農耕の伝播は地域に応じて異なる様相を呈する可能性があるため、同時期の他地域の遺跡から出土した資料の分析を進める。

本研究で主に分析した器官である歯は、その一部が授乳期間に形成され、授乳の影響と考えられる $\delta^{15}\text{N}$ のモデル値に対する正のずれが見られた。授乳の影響を完全に排除した食性を評価するためには、分析試料として 9 歳ごろから形成が開始される第三大臼歯、もしくは成人人骨を選ぶのが望ましい(Hedges et al., 2007; White & Folkens, 2005)。また、分析可能な資料数が少なかった遺跡では、集団における同位体比指標の変動をマクロ栄養素モデルと比較して食性を推定することはできなかった。授乳の影響を正しく評価するため、および資料数が確保できない場合に同じ資料内での同位体比の変動を利用して食性を推定するためには、組織の形成方向に連続的に試料を採取する方法が考えられる（「連続的サンプリング」）。授乳の影響を評価するには、若い年齢で形成される試料におい

てどれほど高い $\delta^{15}\text{N}$ が観察されるかを分析することが望ましい。また、季節単位などで摂取する食料源が変化していた場合、同位体比指標が時系列に変動し、マクロ栄養素モデルの各食性における同位体比指標の挙動と比較できる可能性がある。

V. 結語

マクロ栄養素モデルを用いた検討により、C4 雑穀と海生貝類といった同位体比が類似している食料源でも、各栄養素の含有率の違いにより摂取した生物のコラーゲンとアパタイトの同位体比に与える影響が異なることが示された。特に、 $\Delta^{13}\text{C}_{\text{collagen-apatite}}$ の変化パターンに着目することで、C3 生態系で狩猟活動を行う集団による少量の C4 雑穀摂取が理論的に検出可能であることが示唆された。

縄文～弥生時代の関東地方内陸部と中部高地の遺跡から出土した資料の歯根象牙質コラーゲンの炭素・窒素同位体比および歯冠エナメル質のアパタイトの炭素同位体比を測定したところ、放射性炭素年代測定にて縄文早期～後期に比定された試料と比べ、縄文晩期～弥生に比定された試料でコラーゲンとアパタイト両方の $\delta^{13}\text{C}$ の上昇が確認された。マクロ栄養素モデルにて検証した結果、縄文晩期～弥生に比定された試料で C4 雑穀の摂取が検出され、その寄与率は約 40% と推定された。

本研究で行われた人骨の同位体分析と新たな食性評価モデルの構築によって、狩猟採集から農耕という大きな生業の転換が起きたとされる縄文時代晩期から弥生時代にかけて、関東内陸部および中部高地において C4 雑穀が食事の 40% を占めるほど重要な食料源として摂取されていたということが初めて示された。C4 雑穀の寄与率は縄文晩期の資料で最も高く、弥生中期～後期と時代を経るにつれて減少する傾向が示唆された。これは土器の種実圧痕調査から提唱された、縄文晩期末に雑穀栽培が選択的に受容され、のちにイネと複合的に栽培されるようになったという仮説を支持する。ただし、縄文晩期から弥生時代における農耕の伝播は地域に応じて異なる様相を呈する可能性があるため、同時期の他地域の遺跡から出土した資料の分析を進める。

今後はマクロ栄養素モデルの精度を高めるにあたり、食料源の各栄養素の同位体比と含有率を測定すること、および可能な限り考古遺物の同位体比を測定することで参照し得る食料源のデータを拡充することが必要である。また、同じ試料内で組織の形成方向に連続的に試料を採取し、授乳の影響の評価や少ない資料数での食性推定を可能にすることを目指す。

謝辞

本研究で分析させていただいた数々の貴重な考古資料は、以下の方々のご協力・ご提供にてその分析が実現しました。

岩津保洞窟遺跡：東京大学総合研究博物館館長 諏訪元教授、東京大学大学院理学系研究科 近藤修准教授、東京大学総合研究博物館 佐宗亜衣子氏、帝京大学文学部 今村啓爾教授、武蔵野美術大学民俗資料室 沖田憲氏、武蔵野美術大学民俗資料室 亀山沙希氏、武蔵野美術大学民俗資料室 松本美虹氏

石神遺跡：小諸市郷土博物館 高橋陽一氏、明治大学日本先史文化研究所 中沢道彦氏

生仁遺跡：東京大学大学院人文社会系研究科 設楽博己教授

姜家梁遺跡：鳥取大学 岡崎健治助教

岩津保洞窟遺跡から出土した動物骨の種同定は、明治大学黒耀石研究センターの樋泉岳二氏、北海道大学総合博物館の江田真毅氏にご協力いただきました。

東京大学総合研究博物館で行なった試料の前処理、同位体比測定、放射性炭素年代測定に関しては年代測定室においてに特任研究員の板橋悠氏、尾嵯大真氏、大森貴之氏、学術支援職員の宮島史子氏、金澤礼雄氏、山崎孔平氏、上原加津維氏、内田啓子氏、関根紀子氏、前・学術支援職員の畑山智史氏、山口絢子氏にご指導・ご協力賜りました。

総合地球環境学研究所の GasBench-IRMS の使用に際しては総合地球環境学研究所の陀安一郎教授、申基澈准教授、由水千景研究推進支援員、原口岳研究推進支援員、および金沢大学の覚張隆史特任助教にご指導・ご協力いただきました。

また、米田研究室、東京大学総合研究博物館において次の方々から本研究に関し様々なアドバイスをいただきました。ふじのくに地球環境史ミュージアム 日下宗一郎准教授、国立歴史民俗博物館 山田康弘教授、国立歴史民俗博物館 工藤雄一郎准教授、国立歴史民俗博物館 坂本稔教授、Chinese Academy of Sciences Professor Yaowu Hu、Lithuanian Institute of History Dr. Giedre Motuzaitė Matuzeviciute、米田研究室 OG (山形大学) 瀧上舞氏、米田研究室 OB (JAMSTEC) 蔦谷匠氏、米田研究室 OB 椛澤貴行氏、米田研究室博士課程生 Farnaz Khatibi 氏、米田研究室修士課程生 松本眞明氏、米田研究室修士課程生

鵜野愛美氏、近藤研究室学部生 本村航介氏、近藤研究室博士課程生 石井理子氏、近藤研究室修士課程生 Katherine Hampson 氏、神流町恐竜センター学芸員 青塚圭一氏、遠藤研究室特任研究員 工藤光平氏、遠藤研究室博士課程生 吉田将崇氏、遠藤研究室修士課程生 上本真里亜氏、遠藤研究室修士課程生 武田精一郎氏、遠藤研究室修士課程 谷尾崇氏

両親をはじめとした家族には勉学をあらゆる面で支えていただきました。

最後に指導教員である米田穰教授には本研究を行うにあたって熱心なご指導をいただき、多くの場面でお世話になりました。

以上の方々に謹んで感謝の意を記し、御礼申し上げます。

引用文献

- Ambrose, S. H. (1990). Preparation and characterization of bone and tooth collagen for isotopic analysis. *Journal of Archaeological Science*, 17(4), 431–451.
- Ambrose, S. H. (2000). Controlled diet and climate experiments on nitrogen isotope ratios of rats. In S. H. Ambrose & M. A. Katzenberg (Eds.), *Biochemical Approaches to Paleodietary Analysis* (pp. 243–259). Kluwer Academic/Plenum Publishers New York.
- Ambrose, S. H., Buikstra, J., & Krueger, H. W. (2003). Status and gender differences in diet at Mound 72, Cahokia, revealed by isotopic analysis of bone. *Journal of Anthropological Archaeology*, 22(3), 217–226.
- Ambrose, S. H., & Norr, L. (1993). Experimental Evidence for the Relationship of the Carbon Isotope Ratios of Whole Diet and Dietary Protein to Those of Bone Collagen and Carbonate. In J. B. Lambert & G. Grupe (Eds.), *Prehistoric Human Bone: Archaeology at the Molecular Level* (pp. 1–37). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Anderson, E. C., Libby, W. F., Weinhouse, S., Reid, A. F., Kirshenbaum, A. D., & Grosse, A. V. (1947). Natural radiocarbon from cosmic radiation. *Physical Review*, 72(10), 931–936.
- Beaumont, J., Gledhill, A., Lee-Thorp, J., & Montgomery, J. (2013). Childhood diet: A closer examination of the evidence from dental tissues using stable isotope analysis of incremental human dentine*. *Archaeometry*, 55(2), 277–295.
- Beck, W., Spurk, M., Burr, G. S., Reimer, P. J., Stuiver, M., van der Plicht, J., ... Spurk, M. (1998). INTCAL98 radiocarbon age calibration 24,000-0 cal BP. *Radiocarbon*, 40(3), 1041–1083.
- Codron, J., Codron, D., Lee-Thorp, J. A., Sponheimer, M., Bond, W. J., de Ruiter, D., & Grant, R. (2005). Taxonomic, anatomical, and spatio-temporal variations in the stable carbon and nitrogen isotopic compositions of plants from an African savanna. *Journal of Archaeological Science*, 32(12), 1757–1772.
- Cohen, D. J. (2011). The Beginnings of Agriculture in China. *Current Anthropology*, 52(S4), S273–S293.
- Dean, C. (2017). How the microstructure of dentine can contribute to reconstructing developing dentitions and the lives of hominoids and hominins. *Comptes Rendus - Palevol*, 16(5–6), 557–571.

- DeNiro, M. J. (1985). Postmortem preservation and alteration of in vivo bone collagen isotope ratios in relation to palaeodietary reconstruction. *Nature*, 317(6040), 806–809.
- DeNiro, M. J., & Epstein, S. (1978). Influence of diet on the distribution of carbon isotopes in animals. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 42(5), 495–506.
- DeNiro, M. J., & Epstein, S. (1981). Influence of diet on the distribution of nitrogen isotopes in animal. *Geochimica and Cosmochimica Acta*, 45, 341–351.
- Farquhar, G., Ehleringer, J. R., & Hubick, K. T. (1989). Discrimination and Photosynthesis. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 40, 503–537.
- Fernandes, R., Millard, A. R., Brabec, M., Nadeau, M. J., & Grootes, P. (2014). Food reconstruction using isotopic transferred signals (FRUITS): A bayesian model for diet reconstruction. *PLoS ONE*, 9(2), 1–9.
- Fernandes, R., Nadeau, M. J., & Grootes, P. M. (2012). Macronutrient-based model for dietary carbon routing in bone collagen and bioapatite. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 4(4), 291–301.
- Hanihara, K. (1991). Dual structure model for the population history of the Japanese. *Japan Review*, 2, 1–33.
- Harrison, R. G., & Katzenberg, M. A. (2003). Paleodiet studies using stable carbon isotopes from bone apatite and collagen: Examples from Southern Ontario and San Nicolas Island, California. *Journal of Anthropological Archaeology*, 22(3), 227–244.
- Hastorf, C. A., & DeNiro, M. J. (1985). Reconstruction of prehistoric plant production and cooking practices by a new isotopic method. *Nature*, 315(6019), 489–491.
- Hedges, R. E. M., Clement, J. G., Thomas, C. D. L., & O’Connell, T. C. (2007). Collagen turnover in the adult femoral mid-shaft: Modeled from anthropogenic radiocarbon tracer measurements. *American Journal of Physical Anthropology*, 133, 808–816.
- Jinam, T. A., Kanzawa-Kiriyama, H., & Saitou, N. (2015). Human genetic diversity in the Japanese Archipelago: dual structure and beyond. *Genes & Genetic Systems*, 90(3), 147–152.
- Jinam, T., Nishida, N., Hirai, M., Kawamura, S., Oota, H., Umetsu, K., ... Saitou, N. (2012). The history of human populations in the Japanese Archipelago inferred

- from genome-wide SNP data with a special reference to the Ainu and the Ryukyuan populations. *Journal of Human Genetics*, 57(12), 787–795.
- Katzenberg, M. A., & Harrison, R. G. (1997). What's in a bone? Recent advances in archaeological bone chemistry. *Journal of Archaeological Research*, 5(3), 265–293.
- Katzenberg, M. A., & Saunders, S. R. (2007). *Biological anthropology of the human skeleton*. John Wiley & Sons.
- Kellner, C. M., & Schoeninger, M. J. (2007). A simple carbon isotope model for reconstructing prehistoric human diet. *American Journal of Physical Anthropology*, 133, 1112–1127.
- Kelly, J. F. (2000). Stable isotopes of carbon and nitrogen in the study of avian and mammalian trophic ecology. *Canadian Journal of Zoology*, 78(1), 1–27.
- Kitagawa, H., Masuzawa, T., Makamura, T., & Matsumoto, E. (1993). A batch preparation method for graphite targets with low background for AMS ¹⁴C measurements. *Radiocarbon*, 35(2), 295–300.
- Kohn, M. J., & Cerling, T. E. (2002). Stable isotope compositions of biological apatite. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 48(1), 455–488.
- Koyama, S. (1978). Jomon subsistence and population. *Senri Ethnological Studies*, 2, 1–65.
- Krueger, H. W. (1991). Exchange of carbon with biological apatite. *Journal of Archaeological Science*, 18(3), 355–361.
- Krueger, H. W., & Sullivan, C. H. (1984). Models for carbon isotope fractionation between diet and bone. *Stable isotopes in nutrition*. American Chemical Society Symposium Series 258. Washington, DC: American Chemical Society.
- Kusaka, S., Uno, K. T., Nakano, T., Nakatsukasa, M., & Cerling, T. E. (2015). Carbon isotope ratios of human tooth enamel record the evidence of terrestrial resource consumption during the Jomon period, Japan. *American Journal of Physical Anthropology*, 158(2), 300–311.
- Larsen, C. S., Schoeninger, M. J., van der Merwe, N. J., Moore, K. M., & Lee-Thorp, J. A. (1992). Carbon and nitrogen stable isotopic signatures of human dietary change in the Georgia Bight. *American Journal of Physical Anthropology*, 89(2), 197–214.
- Lee-Thorp, J. A. (1989). *Stable carbon isotopes in deep time: the diets of fossil fauna and hominids*. University of Cape Town.
- Lee-Thorp, J. A., Sealy, J. C., & Van Der Merwe, N. J. (1989). Stable carbon isotope

- ratio differences between bone collagen and bone apatite, and their relationship to diet. *Journal of Archaeological Science*, 16, 585–599.
- Lee-Thorp, J. A., & van der Merwe, N. J. (1991). Aspects of the chemistry of modern and fossil biological apatites. *Journal of Archaeological Science*, 18(3), 343–354.
- Lee, G.-A. (2011). The transition from foraging to farming in prehistoric Korea. *Current Anthropology*, 52(S4), S307–S329.
- Libby, W. F. (1954). *Chicago Radiocarbon Dates V*. Science. American Association for the Advancement of Science.
- Liu, X., Wang, T., Wei, D., & Hu, Y. (2017). Preliminary exploitation on human lifestyles during Xiaohayuan Culture Period: A case study of the Jiangjialiang site. *Acta Anthropologica Sinica*, 36(2), 280–288.
- Makarewicz, C. A., & Sealy, J. (2015). Dietary reconstruction, mobility, and the analysis of ancient skeletal tissues: Expanding the prospects of stable isotope research in archaeology. *Journal of Archaeological Science*, 56, 146–158.
- Minagawa, M., & Wada, E. (1984). Stepwise enrichment of ^{15}N along food chains: Further evidence and the relation between $\delta^{15}\text{N}$ and animal age. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48(5), 1135–1140.
- Minagawa, M., Winter, D. A., & Kaplan, I. R. (1984). Comparison of Kjeldahl and combustion methods for measurement of nitrogen isotope ratios in organic matter. *Analytical Chemistry*, 56(11), 1859–1861.
- Minami, H. (1995). *The migration pattern of shearwater in the Pacific*. Hokkaido University.
- Morrison, D. J., Dodson, B., Slater, C., & Preston, T. (2000). ^{13}C natural abundance in the British diet: implications for ^{13}C breath tests. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 14(15), 1321–1324.
- Muller, R. A. (1977). Radioisotope dating with a cyclotron. *Science*, 196(4289), 489–494.
- Nakamura, T., Taniguchi, Y., Oda, H., & Tsuji, S. (2001). Radiocarbon dating of charred residues on the earliest pottery in Japan. *Radiocarbon*, 43(2B), 1129–1138.
- Nakaoka, H., Mitsunaga, S., Hosomichi, K., Shyh-Yuh, L., Sawamoto, T., Fujiwara, T., ... Inoue, I. (2013). Detection of Ancestry Informative HLA Alleles Confirms the Admixed Origins of Japanese Population. *PLoS ONE*, 8(4).
- Nanci, A. (2018). Ten Cate's oral histology: development, structure, and function (9th

- editio). Elsevier.
- Nasu, H., Momohara, A., Yasuda, Y., & He, J. (2007). The occurrence and identification of *Setaria italica* (L.) P. Beauv. (foxtail millet) grains from the Chengtoushan site (ca. 5800 cal B.P.) in central China, with reference to the domestication centre in Asia. *Vegetation History and Archaeobotany*, 16(6), 481–494.
- O’Leary, M. H. (1988). Carbon isotopes in photosynthesis. *Bioscience*, 38(5), 328–336.
- Omoto, K., & Saitou, N. (1997). Genetic origins of the Japanese : A partial support for the dual structure hypothesis, 446(November 1995), 437–446.
- Parnell, A. C., Inger, R., Bearhop, S., & Jackson, A. L. (2010). Source partitioning using stable isotopes: Coping with too much variation. *PLoS ONE*, 5(3), 1–5.
- Pechenkina, E. A., Ambrose, S. H., Xiaolin, M., & Benfer, R. A. (2005). Reconstructing northern Chinese Neolithic subsistence practices by isotopic analysis. *Journal of Archaeological Science*, 32(8), 1176–1189.
- Peterson, B. J., & Fry, B. (1987). Stable isotopes in ecosystem studies. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 18(1), 293–320.
- Phillips, D. L., Inger, R., Bearhop, S., Jackson, A. L., Moore, J. W., Parnell, A. C., ... Ward, E. J. (2014a). Best practices for use of stable isotope mixing models in. *Canadian Journal of Zoology*, 835(August), 823–835.
- Phillips, D. L., Inger, R., Bearhop, S., Jackson, A. L., Moore, J. W., Parnell, A. C., ... Ward, E. J. (2014b). Best practices for use of stable isotope mixing models in food-web studies, 835(August), 823–835.
- Piasentier, E., Valusso, R., Camin, F., & Versini, G. (2003). Stable isotope ratio analysis for authentication of lamb meat. *Meat Science*, 64(3), 239–247.
- Ramsey, C. B. (2009). Bayesian Analysis of Radiocarbon Dates. *Radiocarbon*, 51(01), 337–360.
- Reimer, P. J., Bard, E., Bayliss, A., Beck, J. W., Blackwell, P. G., Ramsey, C. B., ... van der Plicht, J. (2013). IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves 0–50,000 years cal BP. *Radiocarbon*, 55(04), 1869–1887.
- Schoeninger, M. J., & DeNiro, M. J. (1982). Carbon isotope ratios of apatite from fossil bone cannot be used to reconstruct diets of animals. *Nature*. 297(5867), 577.

- Suess, H. E. (1967). Bristlecone pine calibration of the radiocarbon time scale from 4100 B.C. to 1500 B.C. Radioactive dating and methods of low-level counting. Proceedings of a Symposium, Monaco, 2-10 March 1967 Held by the IAEA in cooperation with the ICSU, 143–151.
- Tieszen, L. L. (1991). Natural variations in the carbon isotope values of plants: implications for archaeology, ecology, and paleoecology. *Journal of Archaeological Science*, 18, 227–248.
- Tieszen, L. L., & Fagre, T. (1993). Effect of diet quality and composition on the isotopic composition of respiratory CO₂, bone collagen, bioapatite, and soft tissues. In *Prehistoric Human Bone* (pp. 121–155). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Tsutaya, T., & Yoneda, M. (2015). Reconstruction of breastfeeding and weaning practices using stable isotope and trace element analyses: A review. *American Journal of Physical Anthropology*, 156(S59), 2–21.
- Van Klinken, G. J. (1999). Bone collagen quality indicators for palaeodietary and radiocarbon measurements. *Journal of Archaeological Science*, 26(6), 687–695.
- Vogel, J. C., & Van Der Merwe, N. J. (1977). Isotopic Evidence for Early Maize Cultivation in New York State. *American Antiquity*, 42(02), 238–242.
- Welch, D. W., & Parsons, T. R. (1993). $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{15}\text{N}$ values as indicators of trophic position and competitive overlap for Pacific salmon (*Oncorhynchus* spp.). *Fisheries Oceanography*, 2(1), 11–23.
- White, T. D., & Folkens, P. A. (2005). *The Human Bone Manual*. Elsevier.
- Yoneda, M., Hirota, M., Uchida, M., Uzawa, K., Tanaka, A., Shibata, Y., & Morita, M. (2001). Marine Radiocarbon Reservoir Effect in the Western North. *Radiocarbon*, 43(2), 465–471.
- Yoneda, M., Shibata, Y., Morita, M., Hirota, M., Suzuki, R., Uzawa, K., ... Dodo, Y. (n.d., submitted). Radiocarbon marine reservoir effect on human remains and prehistoric dietary habit: Interspecies comparison of apparent radiocarbon ages. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*.
- Yoneda, M., Suzuki, R., Shibata, Y., Morita, M., Sukegawa, T., Shigehara, N., & Akazawa, T. (2004). Isotopic evidence of inland-water fishing by a Jomon population excavated from the Boji site, Nagano, Japan. *Journal of Archaeological Science*, 31(8), 97–107.

- Zazzo, A., Lécuyer, C., & Mariotti, A. (2004). Experimentally-controlled carbon and oxygen isotope exchange between bioapatites and water under inorganic and microbially-mediated conditions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(1), 1–12.
- Zhao, Z. (2011). New Archaeobotanic Data for the Study of the Origins of Agriculture in China. *Current Anthropology*, 52(S4), S295–S306.
- 阿部芳郎. (2014). 水産資源の利用形態と生業活動. 『講座日本の考古学4 縄文時代(下)』 (pp. 87–108).
- 安藤広道. (2009). 弥生農耕の特質. 設楽博己・藤尾慎一郎・松本武彦編, 『弥生時代の考古学5 食糧の獲得と生産』 同成社.
- 石川日出志. (2010). 『農耕社会の成立』 岩波書店.
- 岩津保洞窟遺跡調査団. (2015). 『群馬県多野郡神流町 岩津保洞窟遺跡の弥生時代埋葬』 今村啓爾編. 帝京大学文学部史学科.
- 遠藤英子・高瀬克範. (2011). 伊那盆地における縄文時代晩期の雑穀. *考古学研究*, 58(2), 74–85.
- 大貫静夫. (2017). 弥生開始年代論. *季刊考古学*, 138, 30–33.
- 奥田敏統・古川昭雄. (1990). C4植物のフロラとその日本国内における分布. *日本生態学会誌*, 40, 91–121.
- 遠部慎・中沢道彦・中村豊. (2012). レプリカ法による徳島県三谷遺跡出土土器の種実圧痕の研究. *雑穀研究*, 27, 10–15.
- 海部陽介. (1992). 群馬県岩津保洞窟遺跡出土の弥生人人骨. *人類学雑誌*, 100(No.4), 449–483.
- 笠原安夫. (1982). 菜畑遺跡の埋蔵種実の分析・同定研究－古代農耕と植生の復元. 『菜畑遺跡』, 唐津市文化財調査報告(第5集), 354–379.
- 笠原安夫. (1984). 鬼虎川遺跡の第7次発掘における植物種実の検出と炭化アワ、カブ種子の出土について. 『鬼虎川遺跡第7次発掘調査報告3－遺構編－』
- 兼岡一郎. (2008). 『年代測定概論』 東京大学出版会.
- 工藤雄一郎. (2018). 動植物・資源. 『日本考古学・最前線』 (pp. 239–253).
- 工藤雄一郎・国立歴史民俗博物館. (2014). 『ここまでわかった! 縄文人の植物利用』. 新泉社.
- 小諸市教育委員会. (1994). 『石神遺跡群 石神－長野県小諸市石神遺跡発掘調査書－』

- 更埴市教育委員会. (2001). 『長野県更埴市屋代遺跡群 生仁遺跡Ⅳ - 県営ため池等整備事業に伴う発掘調査報告書 -』
- 佐々木由香. (2008). 中屋敷遺跡の植物利用. 昭和女子大学人間文化学部歴史文化学科中屋敷遺跡発掘調査団編, 『南西関東における初期弥生時代遺跡の調査』
- 設楽博己・高瀬克範. (2014). 西関東地方における穀物栽培の開始. 国立歴史民俗博物館研究報告, 第185集, 511-530.
- 下条晴義. (1989). 炭素・窒素安定同位体比に基づく陸平貝塚人の食性復原のための基礎的研究. 東京大学大学院.
- 寺島一郎. (2013). 『植物の生態 -生理機能を中心に-』 裳華房.
- 樋泉岳二. (2014). 海洋資源の利用と縄文文化 -縄文後期東京湾岸・印旛沼周辺貝塚の魚貝類利用にみる資源認識の多様性-. 季刊考古学, 別冊21.
- 中山誠二・関間俊明. (2012). 縄文時代晩期終末期のアワ・キビ圧痕：山梨県中道遺跡の事例. 山梨県立博物館研究紀要, 6, 1-26.
- 中村俊夫. (2001). 放射性炭素年代とその高精度化. 第四紀研究, 40(6), 445-459.
- 中村豊. (2009). 西病棟建設に伴う埋蔵文化財発掘調査の成果. 国立大学法人徳島大学埋蔵文化財調査室年報, 1, 11-28.
- 中村豊. (2010). 徳島市庄・蔵本遺跡における弥生時代前期の雑穀資料. 雑穀研究, 25, 1-8.
- 中沢道彦. (2014). 先史時代の初期農耕を考える：レプリカ法の実践から. 日本海学研究叢書.
- 西沢寿晃. (1982). 中部高地諸遺跡出土の抜歯人骨. 『中部高地の考古学 II』, 33-46.
- 西本豊弘. (2009). 弥生農耕の起源と東アジア—炭素年代測定による高精度編年体系の構築—. 平成16～20年度科学研究費補助金学術創成研究費研究成果報告書, 294-295.
- 長野県更埴市教育委員会. (1969). 生仁 -更埴市生仁遺跡第一次（昭和43年度）緊急発掘調査報告-. 長野県考古学会研究報告書, 7.
- 長谷川史郎. (1979). C3,C4植物の分類と地理的分布. 農業気象, 34(4), 195-200.
- 馬場伸一郎・遠藤英子. (2017). 弥生時代中期の栗林式土器分布圏における栽培穀物. 資源環境と人類：明治大学黒耀石研究センター紀要, (7), 1-22.
- 藤田恒太郎. (1962). 歯の解剖学.

- 藤尾慎一郎. (1988). 縄文から弥生へ—水田稲作の開始か定着か—. 『日本民族・文化の生成』 (pp. 437–452).
- 藤尾慎一郎. (2013). 弥生文化の輪郭 灌漑式水田稲作は弥生文化の指標なのか. 国立歴史民俗博物館研究報告, 第178集, 85–120.
- 南川雅男・吉岡崇仁. (2006). 『生物地球化学』. 培風館.
- 宮田佳樹・小島孝修・松谷暁子・遠部慎・西本豊弘. (2007). 西日本最古のキビ：滋賀県竜ヶ崎A遺跡の土器付着炭化物. 国立歴史民俗博物館研究報告, 137.
- 文部科学省. 食品成分データベース. <https://fooddb.mext.go.jp/>
- 米田穰. (1999). アバクチ洞穴遺出土人骨試料の放射性炭素年代と同位体食性分析. 奈良貴史・阿部祥人・中村良幸・百々幸雄編, 『アバクチ洞穴・風穴洞穴遺跡発掘調査略報—1998年の発掘—』 (pp. 32–36). アバクチ洞穴・風穴洞穴遺跡発掘調査団.
- 米田穰. (2004). 深堀遺跡出土人骨の同位体食性分析と放射性炭素年代測定. 『深堀遺跡：長崎市深堀5丁目地内下水道管敷設事業並びに深堀第一排水区雨水梁敷設工事に伴う埋蔵文化財発掘調査報告書』 (pp. 36–41). 長崎市教育委員会.
- 米田穰. (2007). 広田遺跡から出土した人骨の同位体分析. 『広田遺跡』 (pp. 192–198). 南種子町教育委員会.
- 米田穰. (2014). 土井ヶ浜遺跡から出土した弥生人骨の炭素・窒素同位体分析. 土井ヶ浜遺跡・人類学ミュージアム編『土井ヶ浜遺跡：第1次～第12次発掘調査報告書』 (pp. 207–214).
- 早稲田大学図書館. 古典籍総合データベース.
http://www.wul.waseda.ac.jp/kotenseki/ga_jhistory/history.html

図表

【表 1】 各食料源のマクロ栄養素含有率と炭素・窒素安定同位体比

各マクロ栄養素の含有率は文部科学省食品成分データベースを参照し、全重量から水分と灰分の重量を取り除いた重量中の割合を示す。

	代表例	タンパク質 (%)	炭水化物 (%)	脂質 (%)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)	$\delta^{13}\text{C}_{\text{collagen}}$ (‰)	$\delta^{15}\text{N}_{\text{collagen}}$ (‰)	同位体比参考食品 文献
C4 植物	アワ	13.1	81.7	5.2	-9.6	1.8			神奈川県中屋敷遺跡炭化アワ 米田(未発表)
海生貝類	ハマグリ	71.8	21.2	7.1	-17.5	6.8			勝浦産現生ハマグリ 下条(1989)
C3 植物	コメ	7.2	91.7	1.1	-25.4	2.1			無肥料栽培された水稻 山崎(2013)
					-25.4	1.2			関東地方縄文遺跡で報告されている C3 植物の現生種の平均 下条(1989)
C3 草食動物	シカ	84.8	1.1	14.2	-24.3*	4.1*	-21.9	4.9	岩津保洞窟遺跡シカ象牙質コラーゲン 本研究
海生魚類	マダイ	77.7	0.4	21.9	-13.2*	12.7*	-10.7	13.5	千葉県古作貝塚マダイ骨コラーゲン 下条(1989)

*コラーゲンから可食部（筋肉）の同位体比の推定を行った。その際に使用した計算式は以下のものである

(Ambrose, 2000; Tieszen & Fagre, 1993)

$$\Delta^{13}\text{C}_{\text{collagen-muscle}} = 2.4\text{‰}$$

$$\Delta^{15}\text{N}_{\text{collagen-muscle}} = 0.8\text{‰}$$

【表 2】 マクロ栄養素モデルに使用した食料源のマクロ栄養素含有率と栄養素別同位体比

	C3 植物			C3 草食動物		
	質量比	C 質量比	$\delta^{13}\text{C}$	質量比	C 質量比	$\delta^{13}\text{C}$
全体			-25.4			-25.8
タンパク質	0.15	0.17	-27.4	0.85	0.79	-24.6
脂質	0.05	0.08	-29.4	0.15	0.21	-30.6
炭水化物	0.8	0.75	-24.9	0	0	
$\delta^{13}\text{C}_{\text{energy}}$	0.85	0.83	-25.3	0.15	0.21	-30.6
$\delta^{13}\text{C}_{\text{collagen}}$						-22.1
$\delta^{13}\text{C}_{\text{apatite}}$						-15.3
$\delta^{15}\text{N}$			1.2			4.5

	C4 植物			C4 草食動物		
	質量比	C 質量比	$\delta^{13}\text{C}$	質量比	C 質量比	$\delta^{13}\text{C}$
全体			-9.6			-10.0
タンパク質	0.15	0.17	-11.6	0.85	0.79	-8.8
脂質	0.05	0.08	-13.6	0.15	0.21	-14.8
炭水化物	0.8	0.75	-9.1	0	0	
$\delta^{13}\text{C}_{\text{energy}}$	0.85	0.83	-9.5	0.15	0.21	-14.8
$\delta^{13}\text{C}_{\text{collagen}}$						-6.3
$\delta^{13}\text{C}_{\text{apatite}}$						0.5
$\delta^{15}\text{N}$			1.8			5.1

	海生貝類			海生魚類		
	質量比	C 質量比	$\delta^{13}\text{C}$	質量比	C 質量比	$\delta^{13}\text{C}$
全体			-17.5			-14.8
タンパク質	0.7	0.69	-17.6	0.8	0.73	-13.2
脂質	0.1	0.14	-23.6	0.2	0.27	-19.2
炭水化物	0.2	0.17	-17.5	0	0	
$\delta^{13}\text{C}_{\text{energy}}$	0.1	0.31	-10.3	0.3	0.27	-19.2
$\delta^{13}\text{C}_{\text{collagen}}$			-15.1			-10.7
$\delta^{13}\text{C}_{\text{apatite}}$						
$\delta^{15}\text{N}$			6.8			12.7

【表 3】 マクロ栄養素モデルの検証に用いた人類集団の同位体比データ

集団名	主な食性	出典
Cahokia	低い位の集団では C4 植物を多く 摂取、高い位の集団では C3 生態 系の肉を多く摂取	Ambrose et al., 2003
Yangshao	C4 農耕と C4 植物食家畜	Pechenkina et al., 2005
沿岸縄文	C3 植物と海生魚類の利用	Kusaka et al., 2015

【表 4】 本研究で分析した歯種の形成期間

White & Folkens (2005)、Nanci (2018)に基づき作成した。dm1：第一乳臼歯、C：犬歯、P1：第一小臼歯、P2：第二小臼歯、M1：第一大臼歯、M2：第二大臼歯、M3：第三大臼歯

(4-a) 男性

	dm1	C	P1	P2	M1	M2	M3
歯冠形成開始(ci) 在胎12.5-15.5週		0.6	2.1	3.2	0.1	3.8	9.5
歯冠形成完了	0.4	4.4	5.6	6.6	2.5	6.8	12.4
歯根形成開始	N.D.	5.2	6.4	7.3	3.2	7.6	13.2
歯根形成完了(rc)	2	11.0	11.2	12.2	7.0	12.3	17.5
ci~rcの期間	1.7	10.4	8.9	9.0	6.9	8.5	8.0

(4-b) 女性

	dm1	C	P1	P2	M1	M2	M3
歯冠形成開始(ci) 在胎12.5-15.5週		0.6	2.0	3.3	0.2	3.6	9.9
歯冠形成完了	0.15	4.3	5.4	6.5	2.4	6.6	12.6
歯根形成開始	N.D.	5.0	6.1	7.2	3.1	7.3	13.2
歯根形成完了(rc)	1.8	9.4	10.5	11.3	6.5	11.8	17.7
ci~rcの期間	1.5	8.8	8.5	8.0	6.3	8.2	7.8

【表 5】 分析資料リスト

MNI は最小個体数 (Minimum number of individuals) を指し、形態学的情報 (歯種同定や動物種同定の結果) から判定したものである。時代は、発掘報告書等で出土状況から判定されたものである。

遺跡名	所在地	時代	人歯資料		人骨資料		動物骨資料		注釈
			試料数	MNI	試料数	MNI	試料数	MNI	
岩津保洞窟	群馬県神流町	弥生時代中期	27	7	2	2	13	9	人歯資料の 26 点は遊離歯、1 点は分析した人骨資料に植立していたもの
石神	長野県小諸市	縄文時代後期	4	4	4	4			4 個体から人骨・人歯をそれぞれ 1 点ずつ採取
生仁	長野県千曲市	弥生時代後期	1	1	1	1			1 個体から人骨・人歯を採取
姜家梁	中国河北省	新石器時代中期	3	3					
合計			35	15	7	7	13	9	

【表 6】放射性炭素年代測定結果。時代区分は、較正年代の確率密度分布の最頻値の時代を採用
人歯・人骨資料

遺跡	資料番号	歯種・骨種	¹⁴ C年代 (BP)	時代区分	較正年代 (1SD, cal BP)	較正年代 (2SD, cal BP)	Lab-code (TKA-)
岩津保洞窟	4号人骨	右肋骨 (推定年齢 6ヶ月)	7231 ± 22	縄文時代早期	8148(1.7%)8144	8156(21.8%)8087	20191
					8105(4.2%)8095	8069(73.6%)7977	
					8053(62.3%)7997		
岩津保洞窟	1874	右上顎 M3	4730 ± 20	縄文時代前期末	5578(44.2%)5534	5581(49.6%)5510	17264
					5480(13.4%)5465	5486(19.5%)5452	
					5347(10.5%)5334	5378(26.3%)5329	
岩津保洞窟	72	左下顎 P2	2271 ± 22	弥生時代中期	2342(57.9%)2308	2348(62.2%)2302	17260
					2221(10.3%)2210	2241(33.2%)2180	
岩津保洞窟	2010	右上顎 M3	2194 ± 23	弥生時代中期	2303(47.3%)2240	2310(95.4%)2144	17263
					2181(20.9%)2152		
岩津保洞窟	2876	右下顎 P1	2193 ± 17	弥生時代中期	2302(50.5%)2243	2308(61.1%)2225	17270
					2179(9.2%)2168	2209(34.3%)2146	
					2163(8.5%)2153		

(表 6 続き)

(表 6 続く)

遺跡	資料番号	歯種・骨種	¹⁴ C年代 (BP)	時代区分	較正年代 (1SD, cal BP)	較正年代 (2SD, cal BP)	Lab-code (TKA-)
岩津保洞窟	2143	右上顎 M3	2169 ± 41	弥生時代中期	2305(36.2%)2235 2183(32.0%)2116	2314(95.4%)2051	17263
岩津保洞窟	2294	右下顎 P2	2168 ± 24	弥生時代中期	2300(40.9%)2253 2159(27.3%)2125	2307(50.7%)2228 2208(43.7%)2111 2078(1.1%)2069	17256
岩津保洞窟	1869	右上顎 P1	2133 ± 17	弥生時代中期	2149(55.4%)2109 2081(12.8%)2067	2292(3.9%)2275 2154(91.5%)2047	17269
岩津保洞窟	1918	左下顎 P1	2132 ± 24	弥生時代中期	2150(48.7%)2100 2088(19.5%)2062	2297(8.1%)2267 2157(84.3%)2037 2025(3.0%)2007	17255
岩津保洞窟	2788	右下顎 P2	2114 ± 20	弥生時代中期	2129(68.2%)2055	2148(88.3%)2036 2027(7.1%)2006	17258
岩津保洞窟	1911	左下顎 P2	2110 ± 16	弥生時代中期	2122(68.2%)2057	2143(89.1%)2037 2025(6.3%)2007	17259
岩津保洞窟	8号人骨	右肋骨 (胎児)	2109 ± 16	弥生時代中期	2121(68.2%)2056	2142(88.6%)2037 2025(6.8%)2007	20192
岩津保洞窟	1047	右上顎 M2	2103 ± 21	弥生時代中期	2120(68.2%)2042	2135(95.4%)2002	17262

(表 6 続く)

(表 6 続き)

遺跡	資料番号	歯種・骨種	¹⁴ C年代 (BP)	時代区分	較正年代 (1SD, cal BP)	較正年代 (2SD, cal BP)	Lab-code (TKA-)
岩津保洞窟	1047	右上顎 M2	2103 ± 21	弥生時代中期	2120(68.2%)2042	2135(95.4%)2002	17262
岩津保洞窟	344	右上顎 dm1	2080 ± 18	弥生時代中期	2100(9.6%)2088 2062(58.6%)2002	2115(95.4%)1996	17748
岩津保洞窟	1743	左下顎 P1	2080 ± 17	弥生時代中期	2099(8.1%)2089 2062(60.1%)2002	2115(95.4%)1996	17254
岩津保洞窟	1967	右下顎 M2	2054 ± 17	弥生時代中期	2044(68.2%)1989	2106(5.6%)2085 2063(89.8%)1949	17272
岩津保洞窟	2170	左下顎 M2	2018 ± 16	弥生時代後期	1990(68.2%)1949	2000(95.4%)1925	17266
岩津保洞窟	1968	右下顎 P2	1969 ± 18	弥生時代後期	1934(68.2%)1889	1971(3.4%)1960 1951(92.0%)1876	17257
岩津保洞窟	1083	右上顎 M2	1957 ± 18	弥生時代後期	1926(68.2%)1883	1967(0.4%)1964 1950(95.0%)1866	17261
岩津保洞窟	試掘 2	左下顎 M2	1910 ± 20	弥生時代後期	1880(31.3%)1859 1852(36.9%)1826	1896(95.4%)1820	17445
岩津保洞窟	221	右上顎 dm1	1738 ± 20	古墳時代	1696 (48.7%)1649 1634(19.5%)1615	1708(91.5%)1594 1584(3.9%)1571	17252
岩津保洞窟	2900	右上顎 dm1	1443 ± 19	飛鳥～奈良時代	1345(68.2%)1311	1370(95.4%)1301	17253

(表 6 続く)

(表 6 続き)

遺跡	資料番号	歯種・骨種	¹⁴ C年代 (BP)	時代区分	較正年代 (1SD, cal BP)	較正年代 (2SD, cal BP)	Lab-code (TKA-)
岩津保洞窟	2477	左下顎 M2	1308 ± 16	飛鳥～奈良時代	1284(52.8%)1260 1200(15.4%)1190	1289(71.5%)1236 1207(23.9%)1185	17265
岩津保洞窟	2126	左下顎 P1	1176 ± 17	平安時代	1173(14.1%)1159 1146(27.5%)1109 1090(26.6%)1062	1176(95.4%)1057	17750
岩津保洞窟	1626	右下顎 P2	1087 ± 18	平安時代	1049(23.7%)1030 996(44.5%)961	1055(31.7%)1021 1012(61.9%)952 945(1.8%)938	17749
岩津保洞窟	2177	右下顎 C	506 ± 17	室町時代	535(68.2%)519	542(95.4%)512	17268
岩津保洞窟	2280	右上顎 M2	450 ± 35	室町時代	526(68.2%)493	540(94.0%)459 348(1.4%)340	17271
石神	SK102	骨	3338 ± 17	縄文時代後期	3608(68.2%)3562	3636(85.6%)3556 3533(9.8%)3496	20203
石神	SK55	骨	711 ± 16	鎌倉時代	675(68.2%)664	683(95.4%)657	20202

(表 6 続く)

(表 6 続き)

遺跡	資料番号	歯種・骨種	¹⁴ C年代 (BP)	時代区分	較正年代 (1SD, cal BP)	較正年代 (2SD, cal BP)	Lab-code (TKA-)
生仁	-	頭骨	2439 ± 22	縄文晩期終末	2679(17.5%)2641 2608(3.4%)2600 2492(35.6%)2420 2415(5.3%)2401 2395(6.4%)2379	2697(23.7%)2634 2616(7.4%)2590 2537(0.9%)2528 2509(63.4%)2358	18262
姜家梁	M16	左下顎 P1	4156 ± 20	新石器時代中期	4817(10.9%)4797 4762(5.6%)4752 4726(51.8%)4628	4824(18.9%)4783 4767(74.7%)4612 4596(1.8%)4587	20206
姜家梁	M9	左下顎 P1	4112 ± 19	新石器時代中期	4799(21.6%)4762 4689(3.9%)4680 4642(2.6%)4636 4629(40.2%)4569	4808(25.6%)4758 4700(9.9%)4671 4650(59.9%)4529	20204
姜家梁	M13	左上顎 M3	4112 ± 22	新石器時代中期	4799(21.2%)4762 4690(5.0%)4679 4643(3.3%)4635 4630(38.7%)4569	4808 (25.1%)4758 4702(11.1%)4670 4651(59.1%)4528	20205

(表 6 続く)

(表 6 続き)

動物骨資料

遺跡	資料番号	動物種	¹⁴ C年代 (BP)	時代区分	較正年代 (1SD, cal BP)	較正年代 (2SD, cal BP)	Lab-code (TKA-)
岩津保洞窟	899	ツキノワグマ	9481 ± 25	縄文時代早期	10757(68.2%)10691	11060(2.9%)11034 10999(2.5%)10975 10789(88.4%)10654 10620(1.6%)10605	
岩津保洞窟	1154	イノシシ	9306 ± 25	縄文時代早期	10565(65.2%)10496 10449(3.0%)10445	10580(77.9%)10477 10470(17.5%)10423	20198
岩津保洞窟	924	イノシシ	8797 ± 24	縄文時代早期	9892(68.2%)9764	9913(95.4%)9697	20194
岩津保洞窟	944	ウサギ	8759 ± 26	縄文時代早期	9885(2.6%)9877 9865(5.3%)9848 9815(1.4%)9810 9792(58.8%)9681	9896(93.2%)9654 9647(2.2%)9630	20195
岩津保洞窟	1061	ウサギ	8740 ± 26	縄文時代早期	9765(61.4%)9654 9648(6.8%)9630	9887(1.9%)9873 9868(3.2%)9846 9823(89.6%)9585 9571(0.8%)9564	20196

(表 6 続く)

(表 6 続き)

遺跡	資料番号	動物種	¹⁴ C年代 (BP)	時代区分	較正年代 (1SD, cal BP)	較正年代 (2SD, cal BP)	Lab-code (TKA-)
岩津保洞窟	1152	シカ	8685 ± 24	縄文時代早期	9656(8.8%)9645 9632(59.4%)9559	9689(95.4%)9551	20197
岩津保洞窟	2928	タヌキ	2492 ± 24	縄文時代晩期	2707(8.6%)2690 2636(4.6%)2627 2622(4.3%)2613 2595(50.7%)2499	2720(95.4%)2489	20201
岩津保洞窟	2590	イノシシ	2427 ± 19	縄文時代晩期	2485(68.2%)2377	2680(12.3%)2640 2609(2.3%)2600 2493(80.9%)2358	20200
岩津保洞窟	2069	カモシカ	1701 ± 18	古墳時代	1616(68.2%)1565	1693(13.9%)1666 1629(81.5%)1553	20199

【表 7】炭素・窒素安定同位体比測定結果 C/N 比が正常範囲 (2.9-3.6) から外れたものは下線付ボールド体で示した。
 時代区分において?と表記した資料は放射性炭素年代測定を行えなかったため、考古学的所見から推定された時代を記した。
 人歯・人骨資料

遺跡	資料番号	歯種・骨種	収率	%C	%N	C/N	$\delta^{13}\text{C}_{\text{collagen}}$	$\delta^{15}\text{N}$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{apatite}}$	$\Delta^{13}\text{C}$	時代区分
岩津保洞窟	4号人骨	右肋骨	15.9%	41.6	14.8	3.3	-19.7	9.0		5.6	縄文時代早期
		左上顎 dm1							-14.1		
岩津保洞窟	1874	右上顎 M3	10.3 %	44.3	16.2	3.2	-20.2	6.8	-14.6	5.5	縄文時代前期末
岩津保洞窟	72	左下顎 P2	9.3 %	44.0	16.3	3.2	-13.9	7.3	-8.8	5.1	弥生時代中期
岩津保洞窟	2010	右上顎 M3	9.6 %	43.4	16.0	3.2	-16.3	7.0	-8.8	7.5	弥生時代中期
岩津保洞窟	2876	右下顎 P1	5.8 %	43.3	15.9	3.2	-15.1	7.9	-9.2	5.9	弥生時代中期
岩津保洞窟	2143	右上顎 M3	9.5 %	43.1	15.8	3.2	-16.5	6.7	-10.6	6.0	弥生時代中期
岩津保洞窟	2294	右下顎 P2	4.1 %	44.3	16.3	3.2	-14.6	7.1	-8.5	6.2	弥生時代中期
岩津保洞窟	1869	右上顎 P1	5.9 %	43.6	16.1	3.2	-16.1	7.8	-10.9	5.3	弥生時代中期
岩津保洞窟	1918	左下顎 P1	7.2 %	43.7	16.1	3.2	-16.5	7.6	-9.5	7.0	弥生時代中期
岩津保洞窟	2788	右下顎 P2	7.9 %	43.9	16.2	3.2	-16.2	7.3	-8.8	7.3	弥生時代中期
岩津保洞窟	1911	左下顎 P2	9.5 %	43.2	16.1	3.1	-15.7	6.7	-12.2	3.5	弥生時代中期
岩津保洞窟	8号人骨	右肋骨	12.4%	40.2	14.4	3.3	-16.6	7.1			弥生時代中期
岩津保洞窟	1047	右上顎 M2	8.0 %	43.3	15.9	3.2	-14.1	7.4	-8.7	5.4	弥生時代中期
岩津保洞窟	344	右上顎 dm1	6.0%	44.1	16.2	3.2	-16.0	9.2	-9.1	7.0	弥生時代中期
岩津保洞窟	1743	左下顎 P1	5.8 %	43.6	15.9	3.2	-16.1	9.3	-9.2	6.9	弥生時代中期

(表 7 続く)

(表 7 続き)

遺跡	資料番号	歯種・骨種	収率	%C	%N	C/N	$\delta^{13}\text{C}_{\text{collagen}}$	$\delta^{15}\text{N}$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{apatite}}$	$\Delta^{13}\text{C}$	時代区分
岩津保洞窟	1967	右下顎 M2	6.0 %	41.9	15.4	3.2	-17.4	8.3	-11.5	5.9	弥生時代中期
岩津保洞窟	1967	右下顎 M2	6.0 %	41.9	15.4	3.2	-17.4	8.3	-11.5	5.9	弥生時代中期
岩津保洞窟	2170	左下顎 M2	7.8 %	43.4	16.0	3.2	-17.1	7.8	-8.6	8.5	弥生時代後期
岩津保洞窟	1968	右下顎 P2	6.0 %	44.1	16.2	3.2	-16.1	7.7	-8.8	7.4	弥生時代後期
岩津保洞窟	1083	右上顎 M2	8.8 %	43.2	16.0	3.2	-16.5	7.1	-9.9	6.6	弥生時代後期
岩津保洞窟	試掘 2	左下顎 M2	10.0 %	43.4	16.0	3.2	-16.6	6.8	-9.7	6.9	弥生時代後期
岩津保洞窟	221	右上顎 dm1	4.4 %	43.6	16.0	3.2	-16.5	8.1	-10.2	6.3	古墳時代
岩津保洞窟	2900	右上顎 dm1	4.2 %	43.2	15.8	3.2	-14.8	8.1	-8.6	6.2	飛鳥～奈良時代
岩津保洞窟	2477	左下顎 M2	5.7 %	42.4	15.7	3.2	-16.6	7.7	-9.8	6.8	飛鳥～奈良時代
岩津保洞窟	2126	左下顎 P1	3.9 %	41.5	15.3	3.2	-16.7	8.1	-9.8	6.9	平安時代
岩津保洞窟	1626	右下顎 P2	3.2 %	42.3	15.2	3.2	-17.5	7.8	-9.2	8.3	平安時代
岩津保洞窟	2177	右下顎 C	6.9 %	44.1	16.4	3.1	-18.7	7.1	-9.8	8.9	室町時代
岩津保洞窟	2280	右上顎 M2	5.5 %	43.2	15.8	3.2	-17.9	7.1	-10.3	7.6	室町時代
岩津保洞窟	2165	右上顎 M2	0.0 %								
石神	SK102	骨	4.0%	42.8	14.8	3.4	-19.9	7.1		6.5	縄文時代後期
		左下顎 P1							-13.5		
石神	SK181	骨	0.3%	34.8	9.6	<u>4.2</u>	-20.6	7.4		8.0	縄文時代後期?
		左上顎 M3							-12.6		

(表 7 続く)

(表7 続き)

遺跡	資料番号	歯種・骨種	収率	%C	%N	C/N	$\delta^{13}\text{C}_{\text{collagen}}$	$\delta^{15}\text{N}$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{apatite}}$	$\Delta^{13}\text{C}$	時代区分
石神	SK520	骨 左下顎 M3	0.6%	33.4	11.5	3.4	-18.1	9.9		6.0	縄文時代後期?
石神	SX02	左下顎 M1	0.3%						-12.1		縄文時代後期?
石神	SK55	骨 左下顎 M2	3.2% 7.8%	44.1 29.3	15.4 9.3	3.4 <u>3.7</u>	-19.9 -19.6	10.9 10.5	-13.4 -13.4	6.5	鎌倉時代
生仁	-	頭骨 右上顎 M3	1.3%	41.5	13.9	3.5	-16.2	7.5		9.3	縄文晩期終末
姜家梁	M13	左上顎 M3	13.9%	29.3	10.1	3.4	-7.5	10.3	-0.1	7.4	新石器時代中期
姜家梁	M9	左下顎 P1	20.3%	30.5	10.1	3.5	-6.5	9.9	0.4	6.9	新石器時代中期
姜家梁	M16	左下顎 P1	13.4%	40.7	14.5	3.3	-7.2	9.5	-0.3	6.9	新石器時代中期

(表7 続く)

(表 7 続き)

動物骨資料

遺跡	資料番号	動物種・組織	収率	%C	%N	C/N	$\delta^{13}\text{C}_{\text{collagen}}$	$\delta^{15}\text{N}$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{apatite}}$	$\Delta^{13}\text{C}$	時代区分
岩津保洞窟	899	ツキノワグマ骨	3.3%	41.3	14.5	3.3	-19.8	2.8			縄文時代早期
岩津保洞窟	1154	イノシシ骨	10.8%	39.9	14.4	3.2	-21.4	2.7			縄文時代早期
		イノシシ象牙質	7.4%	39.4	14.2	3.2	-21.2	3.7			
岩津保洞窟	924	イノシシ骨	2.2%	39.5	14.2	3.3	-21.2	3.1			縄文時代早期
		イノシシ象牙質	3.7%	37.2	13.2	3.3	-21.7	3.2			
岩津保洞窟	944	ウサギ骨	9.1%	39.7	14.0	3.3	-22.9	1.5			縄文時代早期
岩津保洞窟	1061	ウサギ骨	11.7%	40.5	14.5	3.3	-23.4	2.1			縄文時代早期
岩津保洞窟	1152	シカ骨	6.2%	37.6	13.1	3.4	-21.2	2.6			縄文時代早期
		シカ象牙質	2.0%	39.4	14.0	3.3	-21.9	4.9			
岩津保洞窟	2928	タヌキ象牙質	13.9%	41.4	14.4	3.4	-18.0	3.4			縄文時代晩期
岩津保洞窟	2590	イノシシ骨	2.5%	37.7	12.7	3.5	-20.8	3.5			縄文時代晩期
岩津保洞窟	2069	カモシカ象牙質	12.7%	39.6	13.6	3.4	-23.6	3.4			古墳時代

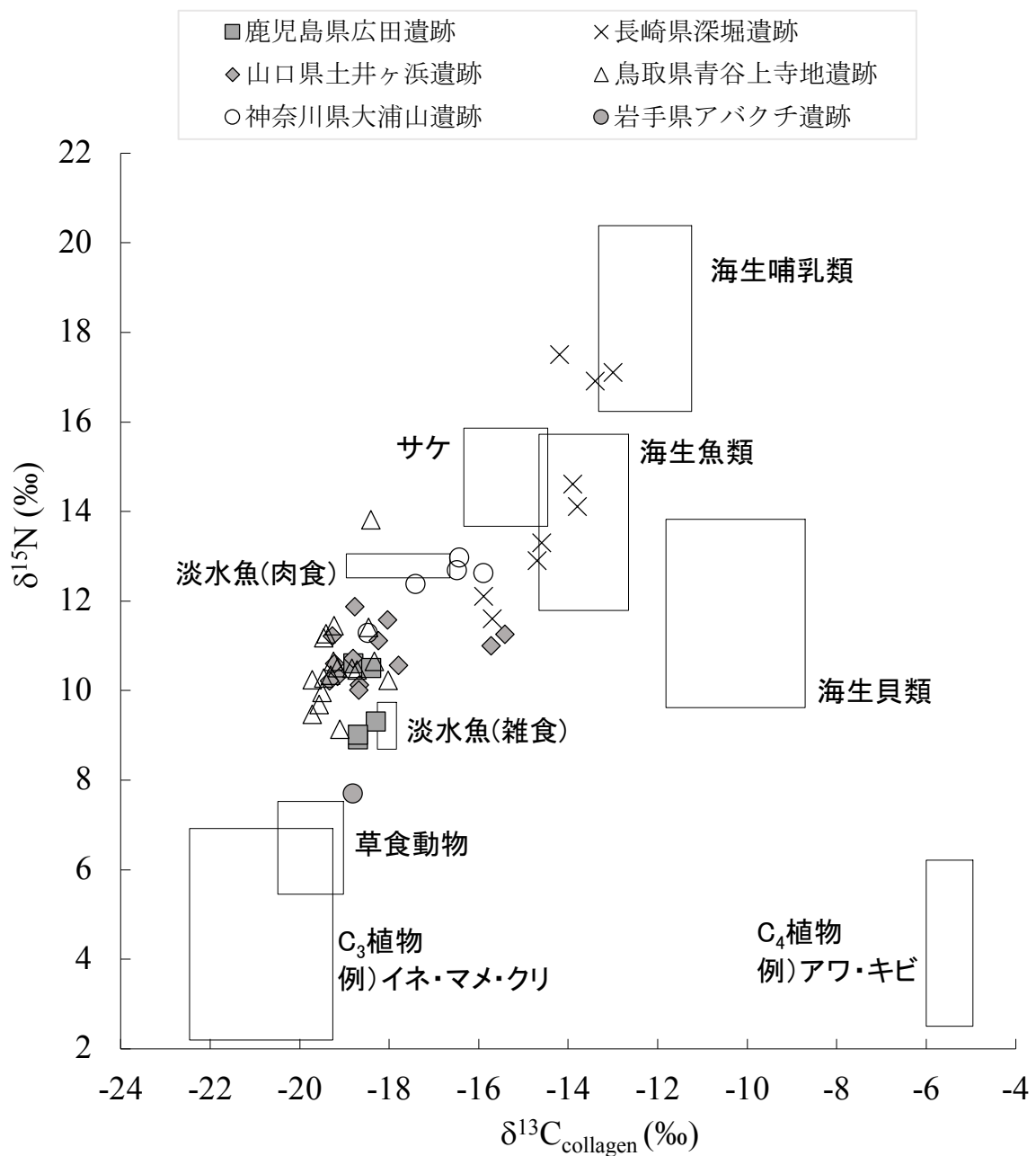
【表 8】 岩津保洞窟遺跡から出土した縄文～弥生時代人骨・人歯試料の
 同位体比指標間で行なったピアソンの積率相関検定の p 値
 p 値が棄却値 ($\alpha=0.05$) 以下の場合はボールド体で示した。

(8-a) 岩津保洞窟遺跡 (縄文早期～弥生後期)

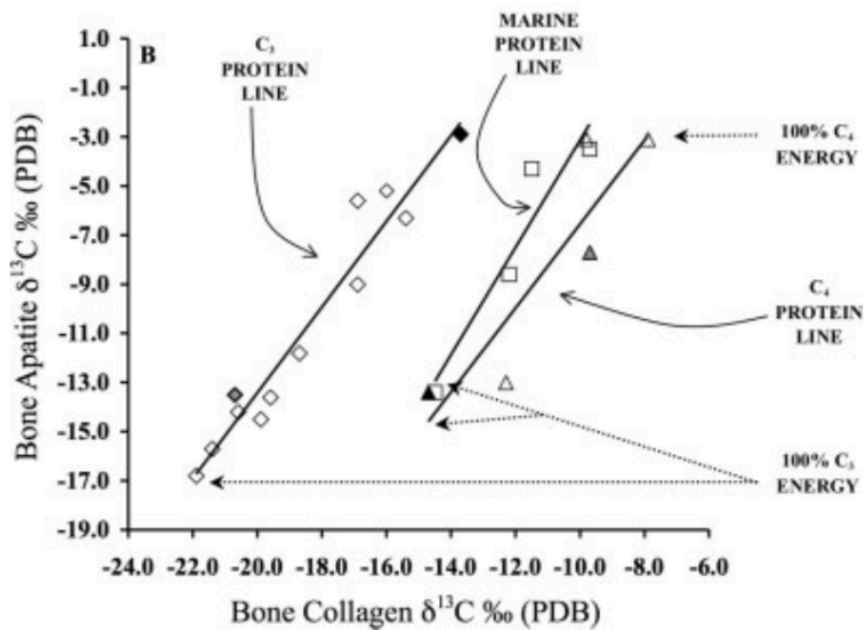
	$\delta^{13}\text{C}_{\text{collagen}}$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{apatite}}$	$\delta^{15}\text{N}$	$\Delta^{13}\text{C}$
$\delta^{13}\text{C}_{\text{collagen}}$				
$\delta^{13}\text{C}_{\text{apatite}}$	4.7E-05			
$\delta^{15}\text{N}$	0.55	0.98		
$\Delta^{13}\text{C}$	0.69	0.021	0.38	

(8-b) 岩津保洞窟遺跡 (弥生時代のみ)

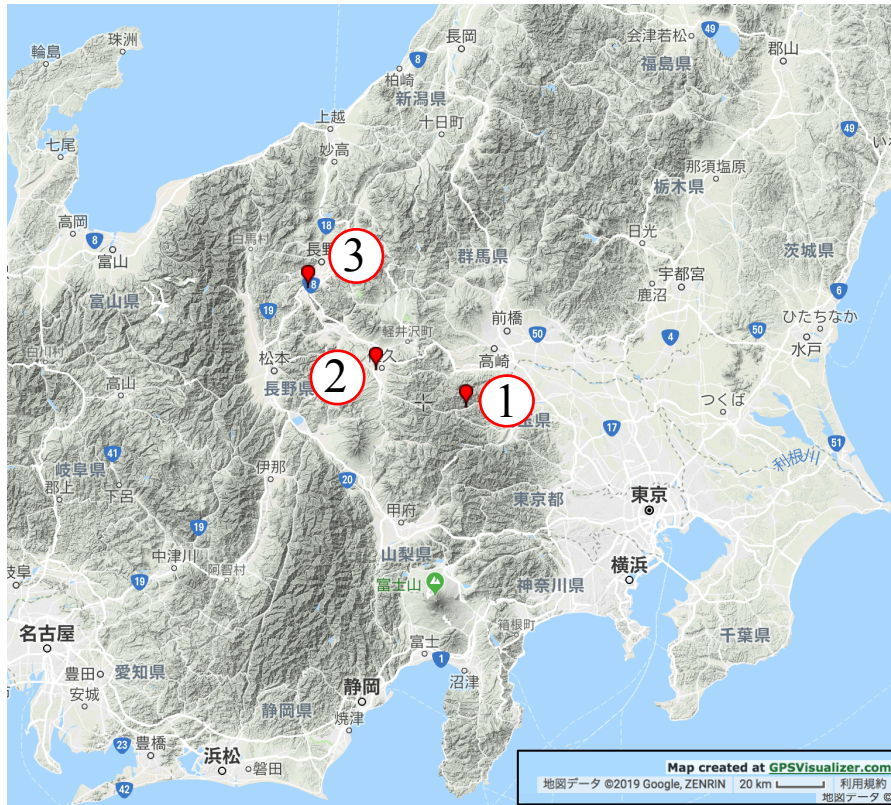
	$\delta^{13}\text{C}_{\text{collagen}}$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{apatite}}$	$\delta^{15}\text{N}$	$\Delta^{13}\text{C}$
$\delta^{13}\text{C}_{\text{collagen}}$				
$\delta^{13}\text{C}_{\text{apatite}}$	0.13			
$\delta^{15}\text{N}$	0.59	0.52		
$\Delta^{13}\text{C}$	0.051	0.0070	0.29	



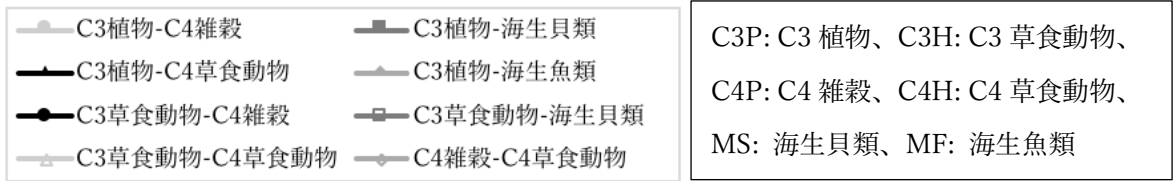
【図1】 先行研究で分析された弥生人骨のコラーゲン炭素・窒素安定同位体比黒枠は、それぞれの食料源が食性の100%を占める人骨コラーゲンの同位体比を推定した枠である。C₃植物・C₄植物・海生貝類は下條(1988)、草食動物は下條(1988), Yoneda et al. (2001), Yoneda et al. (n.d., submitted)、淡水魚は Yoneda et al.(2004)、サケは Welch & Parsons (1993)、海生魚類は Minami (1995)、海生哺乳類は Yoneda et al. (2001), Yoneda et al. (n.d., submitted)のデータを参照した。



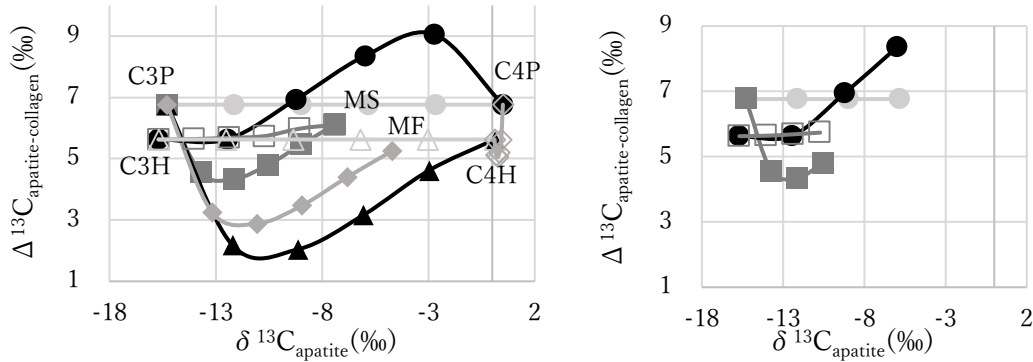
【図 2】 Kellner & Schoeninger (2007)で提唱された生態系別の線形モデル
 Kellner & Schoeninger (2007)の Fig. 2 を転載した。”C₃ protein line”, “C₄ protein line”, “Marine protein line” はそれぞれタンパク質を C₃ 生態系・C₄ 生態系・海洋生態系の食料源から摂取した動物の炭素同位体比の回帰直線。δ¹³C_{apatite} が最も低い点はエネルギー源をすべて C₃ 植物から摂取した場合、最も高い点はエネルギー源をすべて C₄ 植物から摂取した場合を想定している。



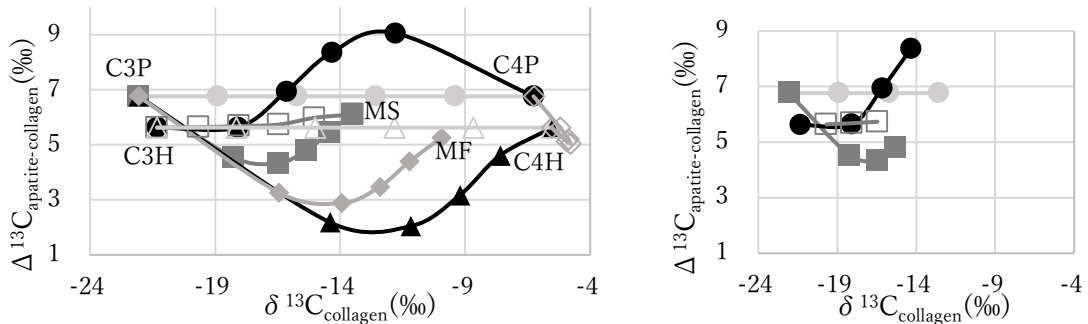
【図3】本研究で分析した資料が出土した遺跡の位置。地図は Google Terrain Map のデータを用いて GPSVisualizer で作成
 ①群馬県多野郡神流町岩津保洞窟遺跡、②長野県小諸市石神遺跡、③長野県千曲市生仁遺跡、④中国河北省姜家梁 (Jiangjialiàng) 遺跡



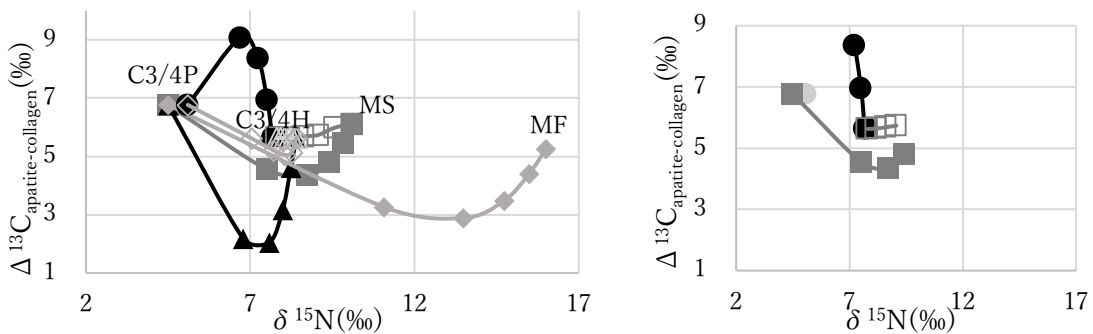
(4-a) $\delta^{13}\text{C}_{\text{apatite}} - \Delta^{13}\text{C}_{\text{apatite-collagen}}$ C3 植物/C3 草食動物-C4 雑穀/海生貝類 0-60%の比較



(4-b) $\delta^{13}\text{C}_{\text{collagen}} - \Delta^{13}\text{C}_{\text{apatite-collagen}}$ C3 植物/C3 草食動物-C4 雑穀/海生貝類 0-60%の比較

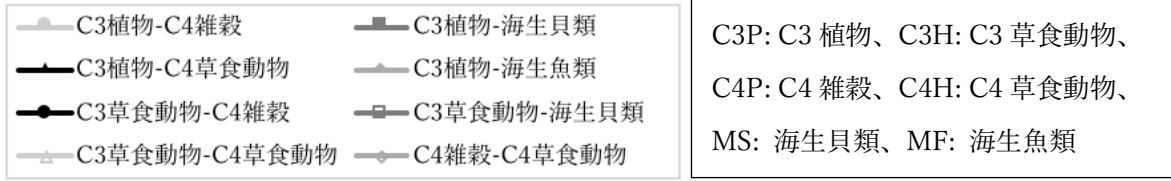


(4-c) $\delta^{15}\text{N} - \Delta^{13}\text{C}_{\text{apatite-collagen}}$ C3 植物/C3 草食動物-C4 雑穀/海生貝類 0-60%の比較

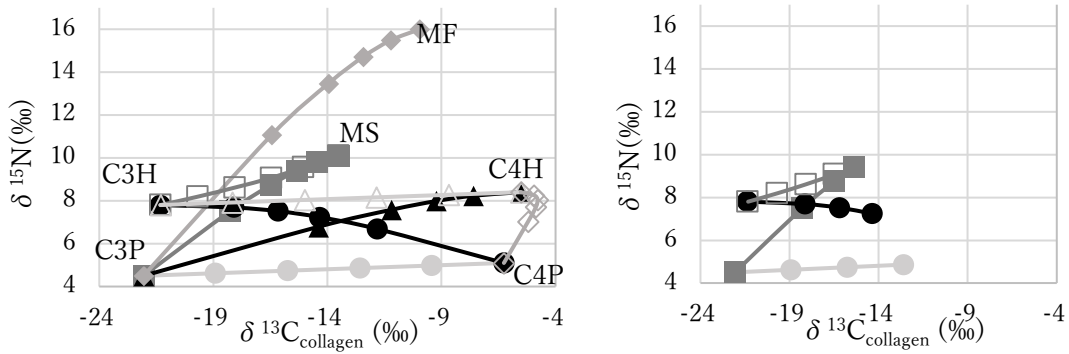


【図4】 マクロ栄養素モデルの食性別結果 (次ページに続く)

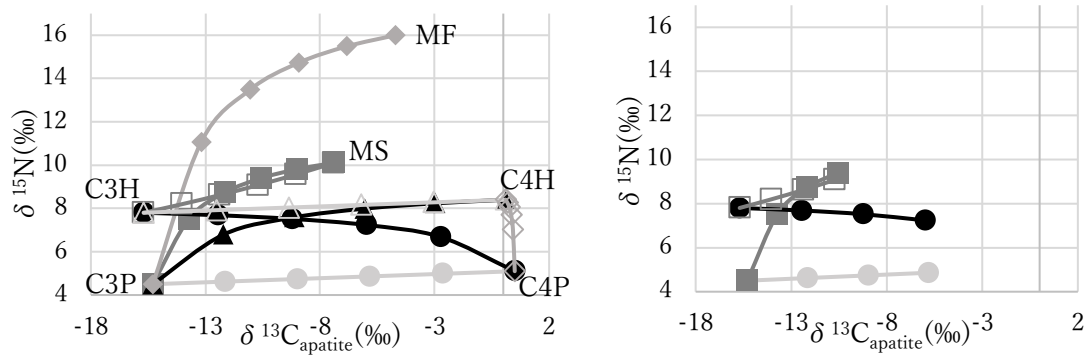
各食料源の略称に最も近い点が、その食料源の寄与率が 100%の値である。



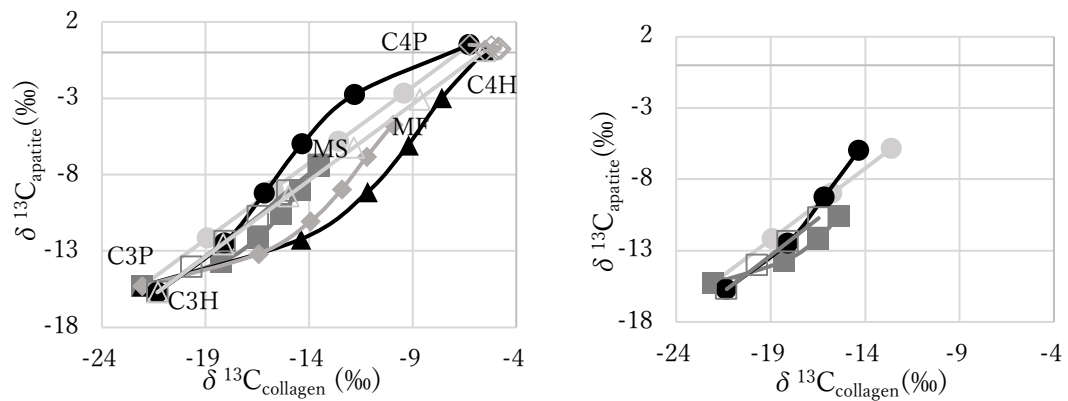
(4-d) $\delta^{13}\text{C}_{\text{collagen}} - \delta^{15}\text{N}$ C3 植物/C3 草食動物-C4 雑穀/海生貝類 0-60%の比較



(4-e) $\delta^{13}\text{C}_{\text{apatite}} - \delta^{15}\text{N}$ C3 植物/C3 草食動物-C4 雑穀/海生貝類 0-60%の比較

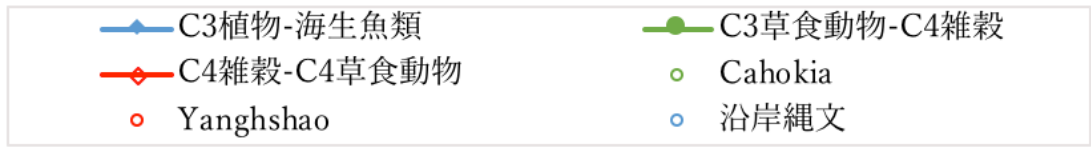


(4-f) $\delta^{13}\text{C}_{\text{collagen}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{apatite}}$ C3 植物/C3 草食動物-C4 雑穀/海生貝類 0-60%の比較

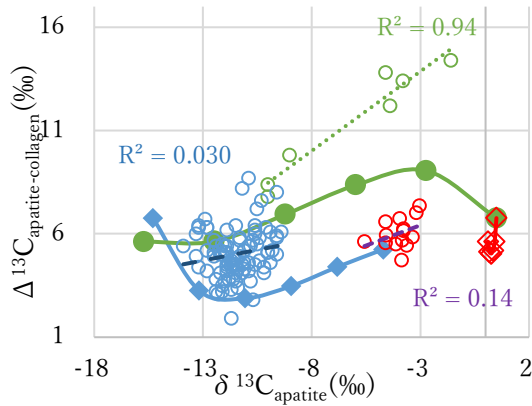


【図4】 マクロ栄養素モデルの食性別結果 (続き)

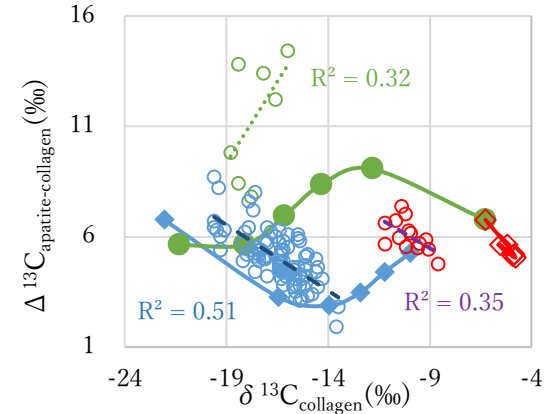
各食料源の略称に最も近い点が、その食料源の寄与率が 100%の値である。



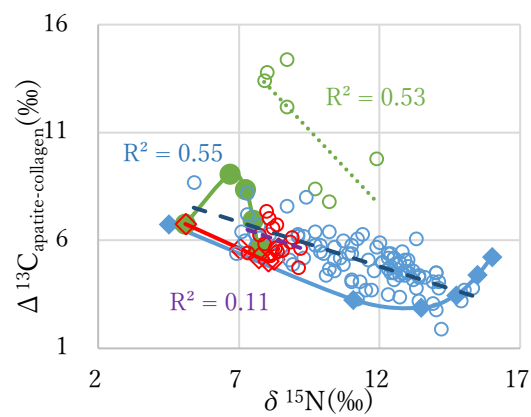
(5-a) $\delta^{13}\text{C}_{\text{apatite}} - \Delta^{13}\text{C}_{\text{apatite-collagen}}$



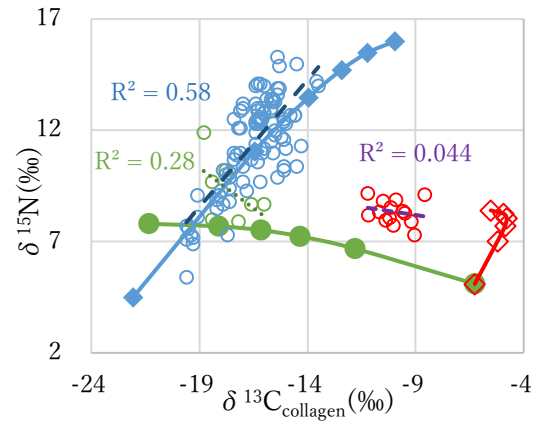
(5-b) $\delta^{13}\text{C}_{\text{collagen}} - \Delta^{13}\text{C}_{\text{apatite-collagen}}$



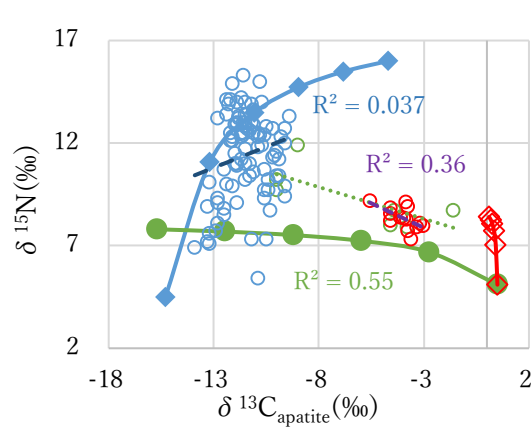
(5-c) $\delta^{15}\text{N} - \Delta^{13}\text{C}_{\text{apatite-collagen}}$



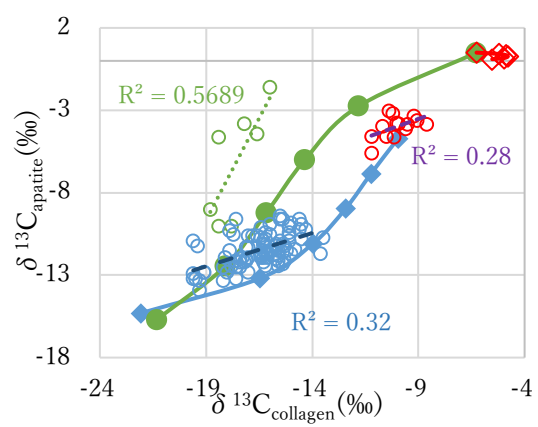
(5-d) $\delta^{13}\text{C}_{\text{collagen}} - \delta^{15}\text{N}$



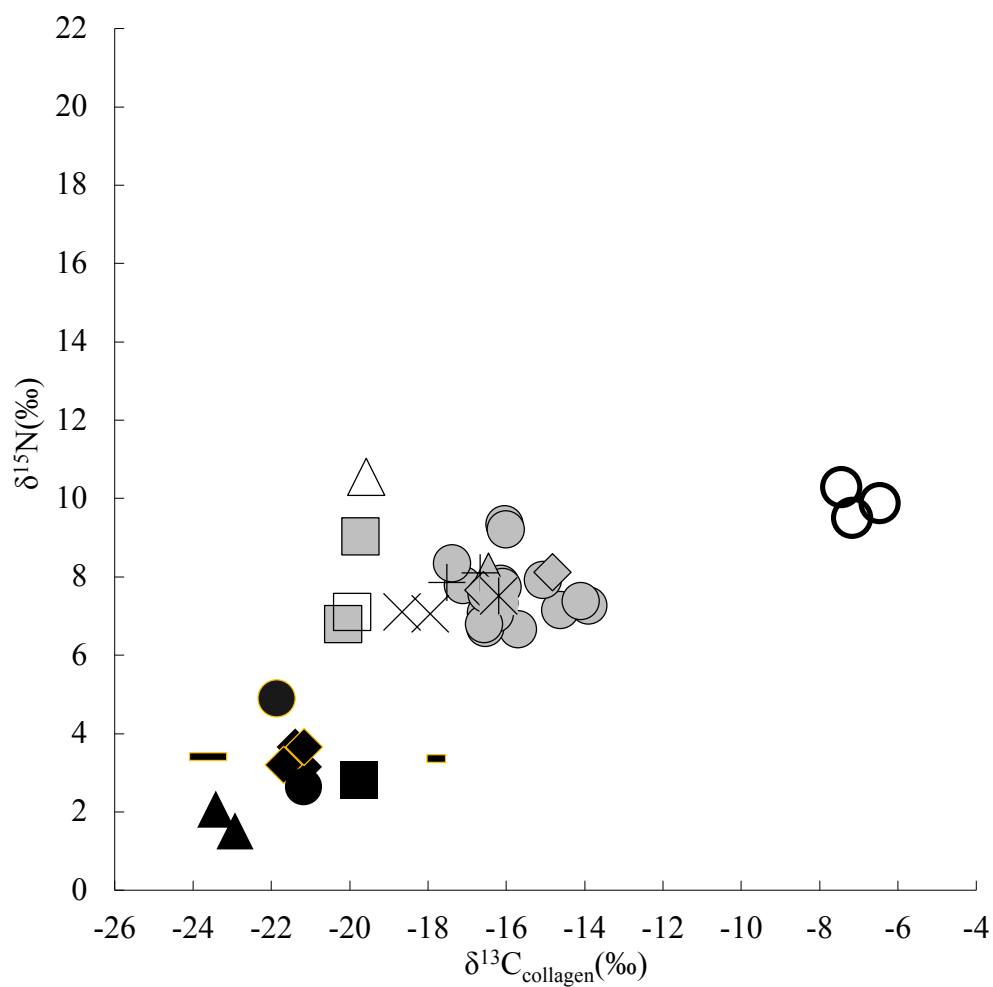
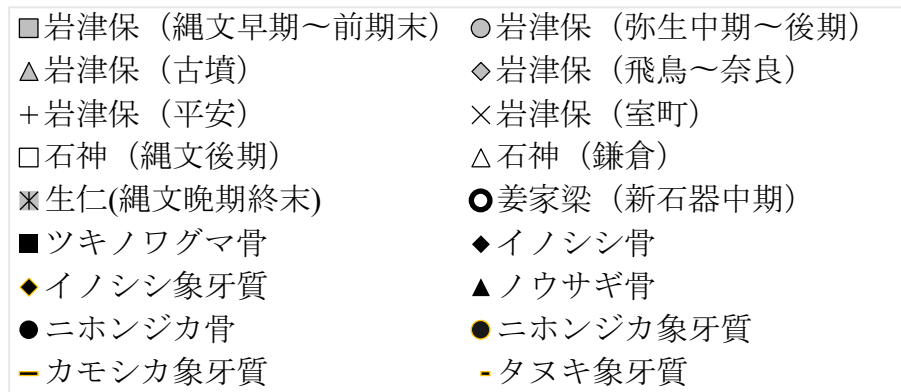
(5-e) $\delta^{13}\text{C}_{\text{apatite}} - \delta^{15}\text{N}$



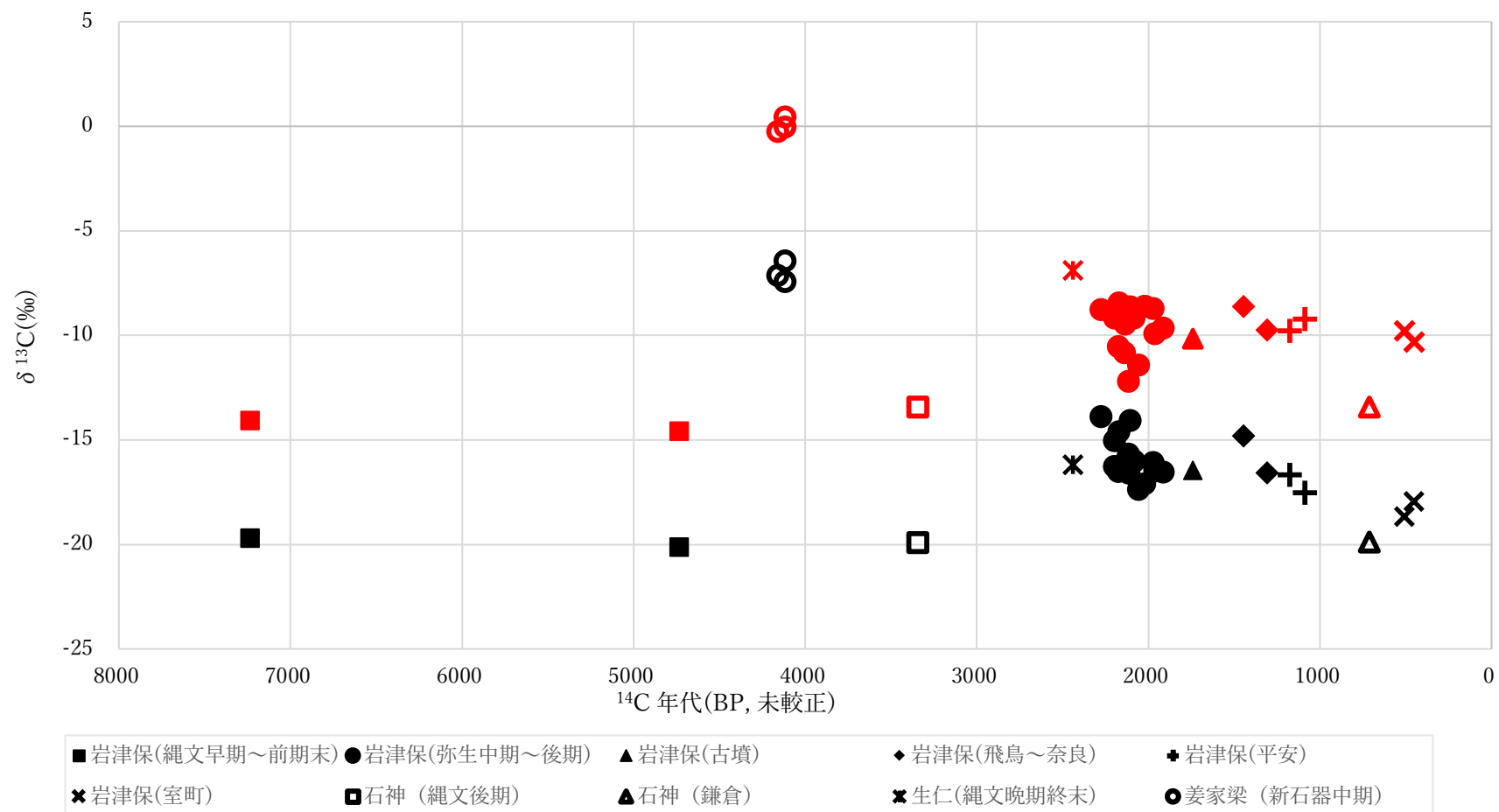
(5-f) $\delta^{13}\text{C}_{\text{collagen}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{apatite}}$



【図5】 マクロ栄養素モデルの結果と先行研究の人骨同位体比との比較

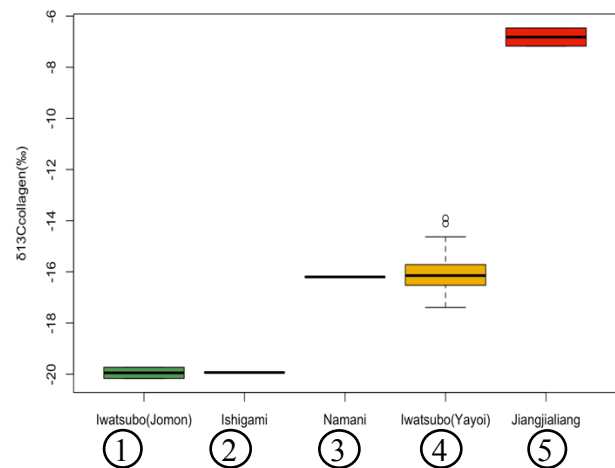


【図6】 本研究で分析された人歯・人骨・動物骨資料のコラーゲン炭素・窒素安定同位体比

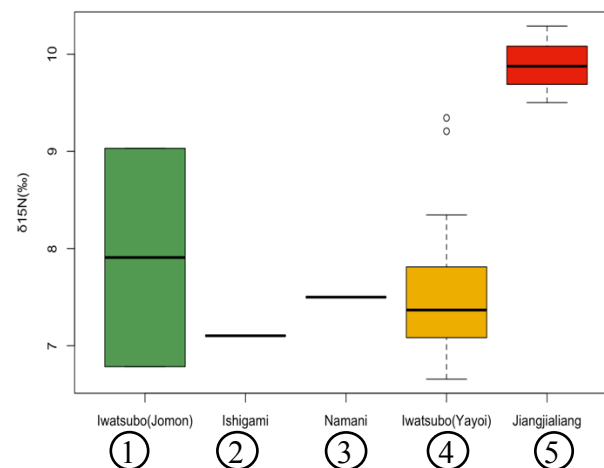


【図7】 本研究で分析された人歯・人骨資料のコラーゲン・アパタイト炭素比
 黒がコラーゲン ($\delta^{13}\text{C}_{\text{collagen}}$)、赤がアパタイト ($\delta^{13}\text{C}_{\text{apatite}}$)

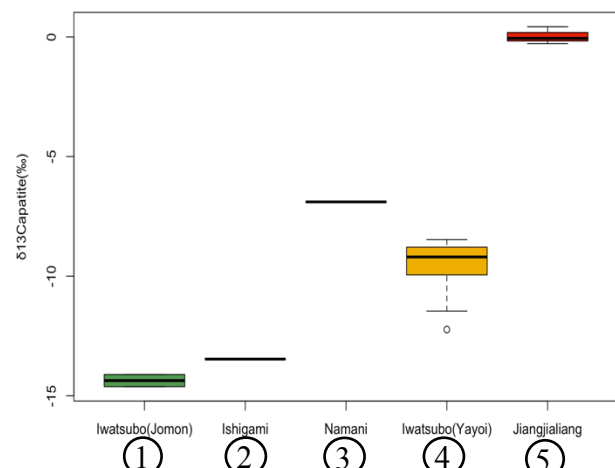
(8-a) $\delta^{13}\text{C}_{\text{collagen}}$



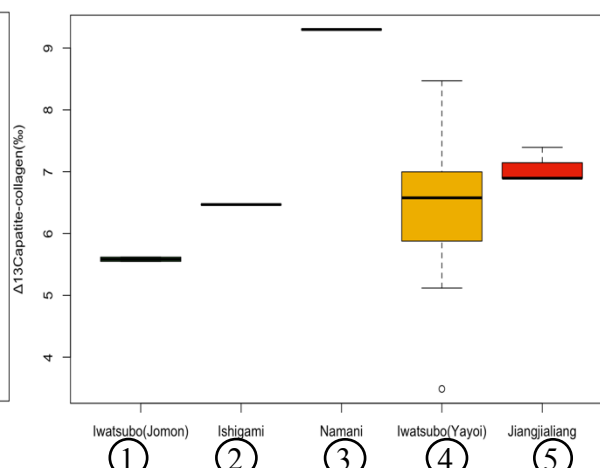
(8-b) $\delta^{15}\text{N}$



(8-c) $\delta^{13}\text{C}_{\text{apatite}}$

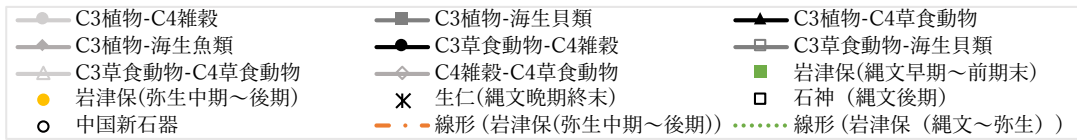


(8-d) $\Delta^{13}\text{C}_{\text{apatite-collagen}}$



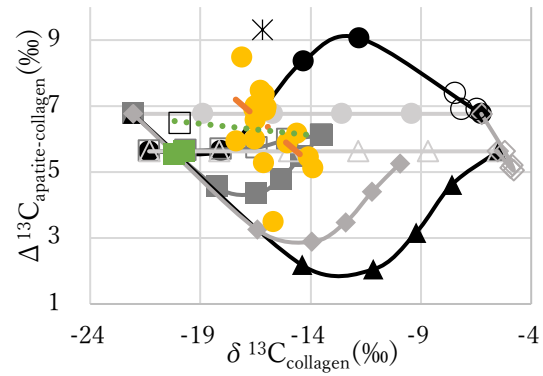
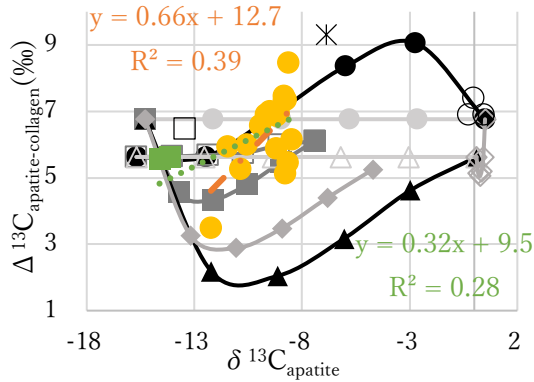
- ① Iwatsubo(Jomon):岩津保洞窟遺跡(縄文早期～前期末)
 - ② Ishigami:石神遺跡(縄文後期)
 - ③ Namani: 生仁遺跡(縄文晩期終末)
 - ④ Iwatsubo(Yayoi):岩津保洞窟遺跡(弥生中期～後期)
 - ⑤ Jiangjialiang:姜家梁遺跡(中国新石器時代中期)
- 箱の色 緑：縄文早期～縄文後期
 黄：縄文晩期～弥生後期
 赤：中国新石器時代

【図8】 遺跡・時代別のコラーゲン炭素・窒素安定同位体比、アパタイト炭素安定同位体比、 $\Delta^{13}\text{C}_{\text{apatite-collagen}}$ の箱ひげ図



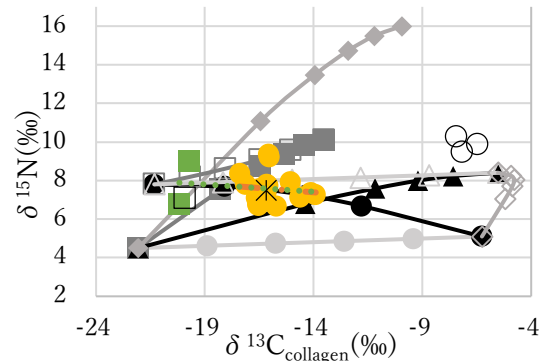
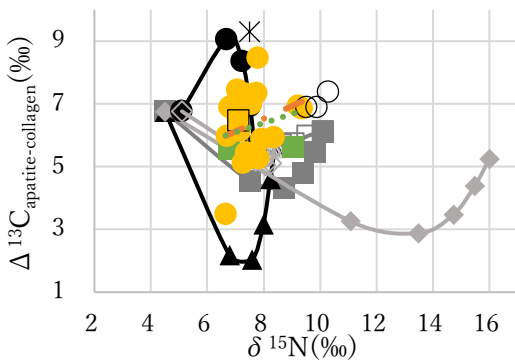
(9-a) $\delta^{13}\text{C}_{\text{apatite}} - \Delta^{13}\text{C}_{\text{apatite-collagen}}$

(9-b) $\delta^{13}\text{C}_{\text{collagen}} - \Delta^{13}\text{C}_{\text{apatite-collagen}}$



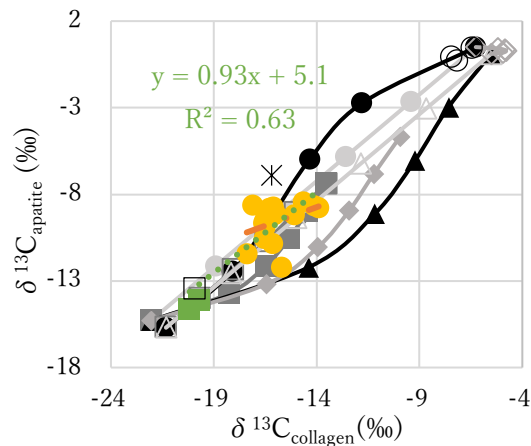
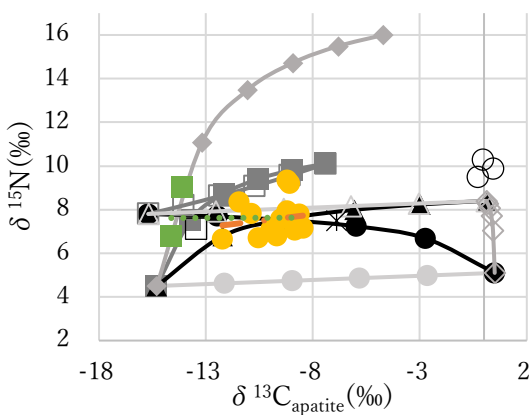
(9-c) $\delta^{15}\text{N} - \Delta^{13}\text{C}_{\text{apatite-collagen}}$

(9-d) $\delta^{13}\text{C}_{\text{collagen}} - \delta^{15}\text{N}$

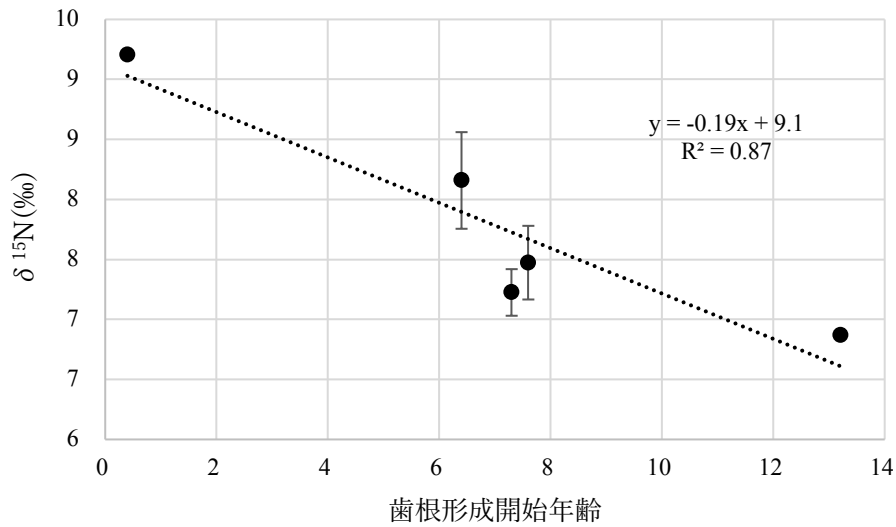


(9-e) $\delta^{13}\text{C}_{\text{apatite}} - \delta^{15}\text{N}$

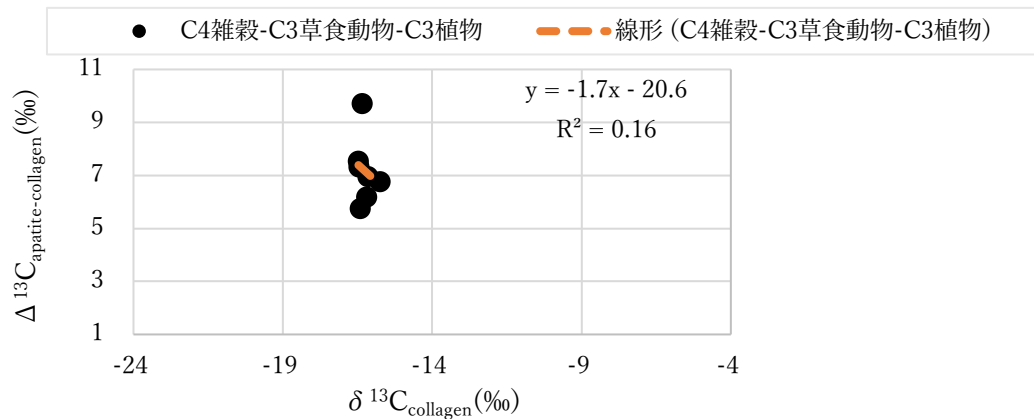
(9-f) $\delta^{13}\text{C}_{\text{collagen}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{apatite}}$



【図9】 本研究で分析した人歯・人骨試料とマクロ栄養素モデルとの比較

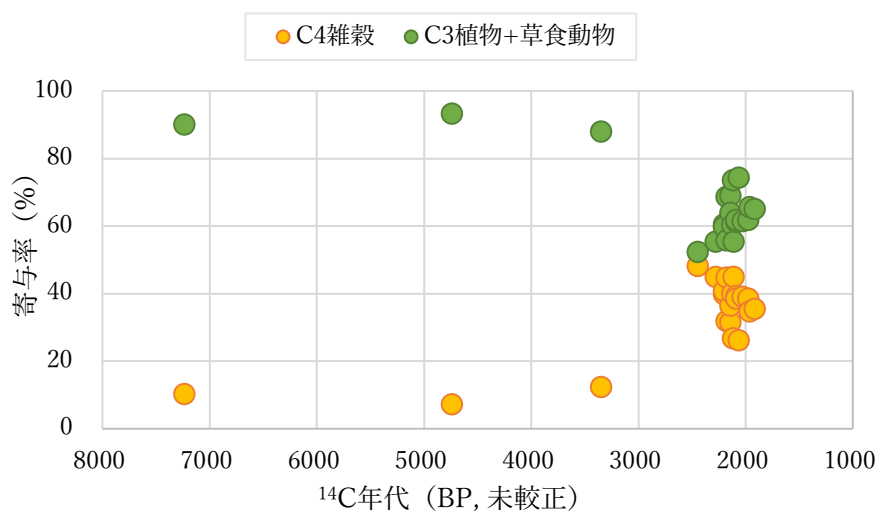


【図 10】 岩津保洞窟遺跡の弥生時代歯根象牙質コラーゲン試料の
歯種別窒素同位体比
エラーバーは各歯種群の 1 標準偏差を表す。

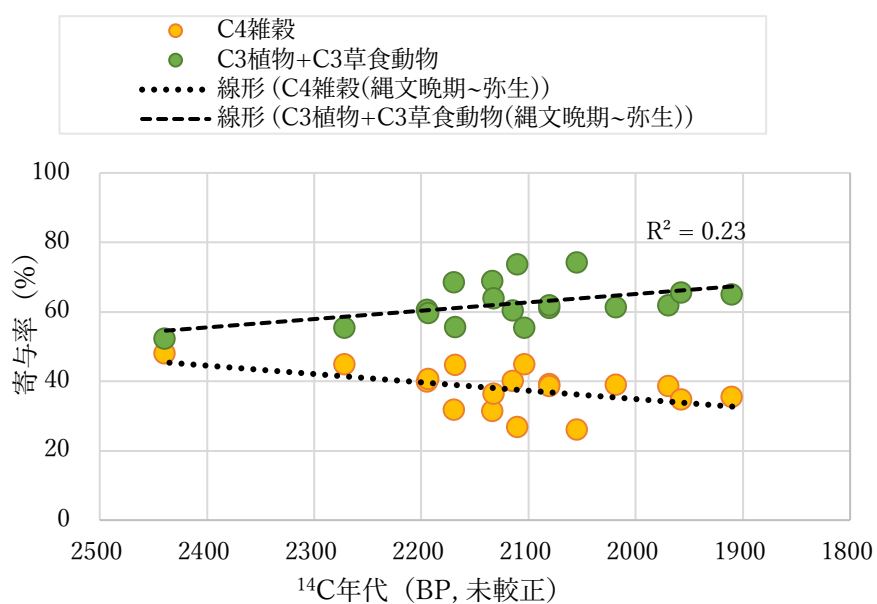


【図 11】 C4 雑穀の寄与率を 40%に固定して C3 草食動物と C3 植物の寄与率を
10%ごとに変動させた場合のマクロ栄養素モデル

(12-a) 縄文早期～弥生後期



(12-b) 縄文晩期～弥生後期の拡大図



【図 12】 縄文～弥生時代人における C4 雑穀寄与率の推定

本研究で分析した縄文～弥生時代人歯試料において、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{collagen}}$ 、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{apatite}}$ から C4 雑穀と C3 生態系食料源 (C3 植物+C3 草食動物) の寄与率を算出した結果を、各試料の放射性炭素年代に対して示した。