

厚生労働行政推進調査事業費補助金
(政策科学総合研究事業 (政策科学推進研究事業))
分担研究報告書

パプアニューギニア現代人集団の同位体データベースの構築と有効性の検証

研究代表者 米田 穰 東京大学総合研究博物館・教授

研究要旨：パプアニューギニア現代人集団の各種同位体分析を実施した。歯エナメル質に含まれる炭酸塩の炭素・酸素同位体比およびストロンチウムの同位体比、並びに歯根部から抽出したコラーゲンの炭素・窒素・硫黄同位体比のデータベースを構築し、确实戦没者（日本人）や考古学遺跡のデータと比較して、有効性を確認した。

A. 研究目的

戦没者遺骨における所属集団判定のために、日本人集団および外国人集団の各種同位体比のデータベースを構築することが必要不可欠である。令和6年度は先行研究によって試料採取がすでに実施され、一部の試料について同位体比の測定が行われていたパプアニューギニア（以下 PNG）の現代人の抜去歯牙について、炭素・窒素・硫黄・酸素・ストロンチウム（以下 Sr）の同位体分析を実施し、PNG 現代人集団のデータベースを構築する。また論文で報告されている考古学遺跡から出土した人骨や動物骨に関する同位体データを集成し、PNG 現代人集団を戦没者と同年代あるいは古墓に由来する様々な時代の現地住民の遺骨のリファレンスとして用いることの妥当性を検証する。

B. 研究方法

研究協力者の染田が過去に採取した PNG 現代人集団の歯牙 121 点について、歯冠部からエナメル質の粉末を採取し、歯根部からは残存するタンパク質（コラーゲン）を抽出・精製して同位体分析に供した。採取地点はニューギニア島の南北海岸部および中央高地、ビスマルク諸島のニューブリテン島（ラバウルを含む）、ソロモン諸島のブーゲンビル島を含む、19 地点の出身者（10 才時点の居住地）を含んでいる（図 1）。

歯エナメル質に含まれる炭酸塩の炭素・酸素同位体分析について、令和5年度「戦没者遺骨の年代測定及び所属集団判定における同位体分析の活用に係る研究事業」報告書にて報告した暫定標準プロトコルに従って、粉末試料の作成および前洗浄を行った。すなわち、タングステン・カーバイト製ドリルにて粉末試料を作成し、こちらを超純水で洗浄したのちに次亜塩素酸ナトリウム水溶液および酢酸バッファーと反応させて洗

浄した。前洗浄を行った粉末試料をオープンにて 60 度で一晩乾燥させたのちに回収した。前洗浄を完了した粉末試料について、令和 6 年度「戦没者遺骨の年代測定及び所属集団判定における同位体分析の活用に係る研究事業」報告書にて報告した手法に従って、粉末試料約 1.2 mg をバイアルに秤量後、測定前に 80°Cにて 24 時間乾燥させて、試料に吸着した水分を完全に除去した。乾燥させた粉末試料を、事前に 100°Cで 2 時間の加熱脱水を施したリン酸と常温 (30°C) で 24 時間反応させたのちに、生成した二酸化炭素の炭素および酸素同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$) をオンラインガス調整/導入装置付き安定同位体比質量分析計 (GB-IRMS) にて測定した。

歯エナメル質に含まれる Sr の同位体分析は、令和 6 年度「戦没者遺骨の年代測定及び所属集団判定における同位体分析の活用に係る研究事業」報告書にて報告したプロトコルに従って実施した。すなわち、同報告書第 3 章の湿式灰化処理に従って、3~10 mg の粉末試料を洗浄ののち硝酸溶液へ溶解した。この硝酸溶液について、カラム処理によって Sr を精製したのちに、試料溶液の Sr 濃度を誘導結合プラズマ質量分析 (Inductively coupled plasma - mass spectrometry; ICP-MS) により測定した。試料溶液の Sr 濃度を調整後に、総合地球環境学研究所のマルチコレクター型 ICP-MS (MC-ICP-MS) にて同位体比を測定した。

歯根部のコラーゲンは、令和 4 年度「戦没者遺骨の年代測定及び所属集団判定における同位体分析の活用に係る研究事業」報告書にて報告した暫定標準プロトコルに従って抽出した。すなわち、0.2~0.5g の緻密質

をダイヤモンドカッターで採取後に純水にて洗浄し、セルロース膜に封入して塩酸にて脱灰処理を施した。この後に水酸化ナトリウムで洗浄して中性化後に、弱酸溶液中で加熱してコラーゲンをゼラチン化した。吸引ろ過で残存物を除去後に、溶液を凍結乾燥しコラーゲンをゼラチン試料として回収した。

回収したコラーゲンの炭素および窒素同位体比を、東京大学総合研究博物館に設置された元素分析計/安定同位体比質量分析計 (EA-IRMS) にて測定した。コラーゲン試料約 0.4 mg を錫箔に包み取り、オートサンプラーから約 1000°Cの酸化炉へ導入して、酸化炉内で燃焼させた。生成した二酸化炭素や窒素酸化物などの混合ガスをキャリアガスのヘリウムを用いて還元炉へ導入し、窒素酸化物を窒素分子に還元した。二酸化炭素や窒素などの混合ガスを水トラップに通して水蒸気を除去したのちにガスクロマトグラフィーへ導入し、精製・分離した。精製・分離した窒素および二酸化炭素をこの順に質量分析計へ導入し、同位体比を測定した。

回収したコラーゲンの硫黄同位体比を、EA-IRMS にて測定した。コラーゲン試料約 5~10 mg を錫箔に包み取り、EA のオートサンプラーから約 1000°Cの酸化炉へ導入して、酸化炉内で燃焼させた。生成した二酸化硫黄を含む混合ガスをキャリアガスのヘリウムを用いて水トラップに導入して水蒸気を除去したのちにガスクロマトグラフィーへ導入し、二酸化硫黄を精製・分離した。精製・分離した二酸化硫黄を IRMS へ導入し、同位体比を測定した。

(倫理面への配慮)

現代人の抜去歯牙試料は、防衛医科大学校での倫理審査を経て、現地歯科医師の協力のもとインフォームドコンセントを得たのちに採取された。分析に先立ち分析試料は個人情報に関する匿名化処理がなされている。

C. 研究結果

PNG 現代人集団 121 検体について、各種同位体分析を実施した。この結果、108 検体についてコラーゲンの炭素および窒素同位体比のデータを得た。残りの 13 検体については EA-IRMS の測定に必要な量のコラーゲンが抽出できなかつたり、測定装置のトラブルによりデータが得られていない。また 91 検体についてコラーゲンの硫黄同位体比のデータを得た。硫黄同位体比の測定については、現在約 8mg のコラーゲンを必要としているため、分析に必要な量が得られない試料が存在したが、現在、より微量の試料での測定を可能とする設定条件を検討中であり、来年度以降にデータが追加される見込みである。

歯エナメル質については、82 検体について炭酸塩に含まれる炭素・酸素同位体比データを得た。また 87 検体について、歯エナメル質に含まれる Sr の同位体比データを得た。各種同位体比を別紙 1 の表 1 に示す。

本研究で確立した PNG 現代人集団の同位体データベースについて、戦闘に巻き込まれて死亡した現地住民の遺骨や、古墓に由来する様々な時代の現地住民の遺骨の代表地として用いることができるか、確認するために、遺跡から出土する人骨・動物骨について、学術論文データベース (Web of

Science, Google Scholar, Scopus) を用いて検索した。それによって、次の 5 つの論文が確認された (Kinaston et al. 2013, 2015, Roberts et al. 2023, Shaw et al. 2009, 2010, 2011)。それぞれの論文に含まれる 9 調査地の立地を図 2、同位体データの概要を表 2 にまとめた。

D. 考察

今年度に得た分析データを用いて作成した PNG 現代人集団データベースの有効性を検証するために、令和 4～6 年度「戦没者遺骨の年代測定及び所属集団判定における同位体分析の活用に係る研究事業」において測定した確実戦没者遺骨のデータと比較した。令和 6 年度「戦没者遺骨の年代測定及び所属集団判定における同位体分析の活用に係る研究事業」報告書にて報告した骨コラーゲンの炭素・窒素・硫黄同位体比、歯エナメル質の炭素・酸素同位体比の 95% 確率楕円と比較した (図 3～6)。特に窒素と硫黄の同位体比による比較では、PNG 現代人集団と確実戦没者の確率分布に一部重複があるものの両者の分布は異なる。

確実戦没者の各種同位体について、令和 4～6 年度にかけて実施された「戦没者遺骨の年代測定及び所属集団判定における同位体分析の活用に係る研究事業」において、歯象牙質および骨のコラーゲンにおける炭素・窒素・硫黄の同位体比、歯エナメル質の炭素・酸素同位体比について、データを集成している。Sr 同位体比については、令和 7 年度に測定を予定しているため、現時点で比較可能な、コラーゲンの炭素・窒素・硫黄同位体比と歯エナメル質の炭素・酸素同位体比の 5 項目を説明係数 (モデルを構成するパラメータ) として、所属集団を目的関数

(モデルを最適化するための指標) としてロジスティック回帰分析を実施した。説明係数に欠損がない確実戦没者 (n=45) と PNG 現代人 (n=68) を用いたモデル全体の適合度を示す残差逸脱度 (尤度に基づいて計算されたモデルの当てはまりの悪さ) は 77.55 (自由度 107) であり、説明変数を含まない最も簡易なモデルの帰無逸脱度 151.94 (自由度 112) より小さく、ロジスティック回帰モデルに用いた説明変数 (コラーゲンの炭素・窒素・硫黄同位体比およびエナメル質の炭素・酸素同位体比) は目的関数 (所属集団) の予測に有用であった。モデルの適合度と複雑さを相対的に示す赤池情報量基準 (AIC) は 89.55 であった。逸脱度分析 (モデルの適合度に関する検定) の P 値は 1.249×10^{-14} であり、統計学的に意味のあるモデルといえる。各説明係数の回帰係数、標準誤差、z 値、P 値、95%信頼区間を表 3 に示す。モデルにおける予測値 (所属集団) を実際の所属集団と比較すると判別の中率は 89.4% (95%信頼区間: 82.2~94.4%) であった (表 4)。

Sr 同位体比については、確実戦没者のデータが報告されておらず、PNG 現代人集団との判別に有効であるか、現時点では判断できない。参考までに、市販されている地下水由来のミネラルウォーター中の Sr 同位体比と比較すると (Nakano et al. 2020)、日本列島の地下水よりも分布が小さく (図 7)、ある程度の確率で日本人である確率が高い個体と判別するのに有効だと考えられる。確実戦没者集団と PNG 現代人集団の判別に Sr 同位体比を加えることで、精度の向上が期待される。

PNG の考古学遺跡から出土したヒトお

よび哺乳類の骨と歯から得られた同位体データを、本研究の結果と比較する。主に食物に含まれるタンパク質を反映する骨コラーゲンの炭素・窒素同位体比をみると、ニューギニア島南海岸の Nebira 遺跡から出土した 300~800 年前とされるヒトは炭素同位体比の高い個体が多く (図 8)、食生活に関して C4 植物あるいは C4 植物を摂取したワラビーなどの動物の影響が考えられる (Kinaston et al. 2013)。もしも戦闘に巻き込まれて死亡した現地住民や古墓に由来する様々な時代の現地住民が C4 植物の影響を受けた伝統的な食生活を有していた場合、PNG 現代人集団を戦闘に巻き込まれて死亡した現地住民の比較データとして用いることはできないが、C4 植物の影響を受けた炭素同位体比は、確実戦没者集団の炭素同位体比とは大きく異なるため、日本人戦没者遺骨との判別は可能である。

歯エナメル質の Sr 同位体比は、PNG 現代人集団と比較すると各遺跡で報告されているヒトと動物の値は変動が小さく、PNG 現代人が示した変動を越える値は報告されていなかった (図 9)。この結果は、調査対象の遺跡がビスマルク諸島と PNG 島南海岸の遺跡に偏っていることが原因と考えられる (図 1・2 参照)。PNG 現代人集団には、PNG 島中部高地やソロモン諸島ブーゲンビル島などより広範囲の出身者が含まれているにも関わらず、日本列島の地下水が示す生物利用可能 Sr の同位体比の変動の方がはるかに大きく、Sr 同位体比も日本人戦没者の所属集団判定に資することが期待できる。ただし、主に植物を通じて地質環境の値を反映するが、海産物などを摂取することで、食生活の影響も想定されるので、確実

戦没者遺骨で Sr 同位体比の分布範囲を検証することが必要である。

地質環境に影響を受ける Sr 同位体比と、飲料水を通じて雨水の同位体比の影響を受ける酸素同位体比は、時代によって大きな変化がないと期待され、考古学遺跡で報告された値と PNG 現代人集団の分布に大きな違いは見られなかった(図 10)。このことから、PNG 現代人集団を戦没者と同年代の現地住民あるいは古墓に由来する様々な時代の現地住民の遺骨を代表するデータとして用いることの妥当性を示す。ただし、動物骨の酸素同位体比は、動物種によっては葉内水の酸素同位体比の影響を受け、天水とは大きく異なる可能性がある点には注意が必要である。

E. 結論

PNG 現代人集団 121 検体について各種同位体分析を実施した。同集団の歯エナメル質に含まれる炭酸塩の炭素・酸素同位体比および Sr 同位体比、並びに歯根部から抽出したコラーゲンの炭素・窒素・硫黄同位体比のデータベースを構築した。

令和 4～6 年度「戦没者遺骨の年代測定及び所属集団判定における同位体分析の活用に係る研究事業」において測定したコラーゲンの炭素・窒素・硫黄同位体比およびエナメル質の炭素・窒素同位体比を用いてロジスティック回帰分析を実施したところ、确实戦没者集団と PNG 現代人集団との間では的中率 89.4%で判別が可能であった。PNG 現代人集団の Sr 同位体比は、日本列島の地下水の範囲よりも分布が狭く、Sr 同位体比も日本人戦没者と PNG 現代人集団との判別に有効であると期待される。确实

戦没者集団の Sr 同位体比については令和 7 年度に調査予定であり、Sr 同位体比も説明関数として加えることで、判別精度の向上が期待される。

考古学資料については、Lapita 文化期の人骨は PNG 現代人集団に類似する炭素・窒素・酸素・Sr 同位体比が示されており、これらの同位体比も用いて、日本人集団と区別することができる。また、300～800 年前頃の古人骨では C4 植物の影響が確認され、Lapita 文化期とは顕著に炭素同位体比が異なるが、确实戦没者集団の分布範囲からほとんどの個体はずれており、炭素同位体比を基準に日本人戦没者とは判別可能と考えられる。

引用文献

- Kinaston, R., Buckley, H.R., Gray, A., Shaw, B., Mandui, H., 2013. Exploring subsistence and cultural complexes on the south coast of Papua New Guinea using palaeodietary analyses. *Journal of Archaeological Science* 40: 904–913.
- Kinaston, R.L., Anson, D., Petchey, P., Walter, R., Robb, K., Buckley, H., 2015. Lapita diet and subsistence strategies on Watom Island, Papua New Guinea. *American Journal of Physical Anthropology* 157: 30–41.
- Nakano, T., Yamashita, K., Ando, A., Kusaka, S., Saitoh, Y., 2020. Geographic variation of Sr and S isotope ratios in bottled waters in Japan and sources of Sr and S. *Science of The Total Environment* 704: 135449.
- Roberts, P., Hixon, S., Hamilton, R., Lucas,

M., Ilgner, J., Marzo, S., et al., 2023. Assessing Pleistocene–Holocene climatic and environmental change in insular Near Oceania using stable isotope analysis of archaeological fauna. <i>Journal of Quaternary Science</i> 38: 1267-1278.	該当なし
Shaw, B.J., Summerhayes, G.R., Buckley, H.R., Baker, J.A., 2009. The use of strontium isotopes as an indicator of migration in human and pig Lapita populations in the Bismarck Archipelago, Papua New Guinea. <i>Journal of Archaeological Science</i> 36: 1079–1091.	H. 知的財産権の出願・登録状況
Shaw, B., Buckley, H., Summerhayes, G., Anson, D., Garling, S., Valentin, F., Mandui, H., Stirling, C., Reid, M., 2010. Migration and mobility at the Late Lapita site of Reber–Rakival (SAC), Watom Island using isotope and trace element analysis: a new insight into Lapita interaction in the Bismarck Archipelago. <i>Journal of Archaeological Science</i> 37: 605–613.	1. 特許取得 該当なし
Shaw, B., Buckley, H., Summerhayes, G., Stirling, C., Reid, M., 2011. Prehistoric migration at Nebira, South Coast of Papua New Guinea: New insights into interaction using isotope and trace element concentration analyses <i>Journal of Archaeological Archaeology</i> 30: 344-358.	2. 実用新案登録 該当なし
	3. その他 特になし

G. 研究発表

1. 論文発表
該当なし
2. 学会発表

(資料) 表1～4 および図1～10

表1. PNG 現代人集団の同位体比

ID	PNG ドナー番号	$\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$	$\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$	C/N 比	$\delta^{34}\text{S}_{\text{col}}$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
1	PNG001	-17.9	13.6	3.3	10.7	-11.3	-7.5	0.705622
2	PNG002	-19.3	10.2	3.3	8.2	-13.9	-7.9	0.705410
3	PNG003	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	-12.5	-7.2	0.705464
4	PNG004	-21.0	7.9	3.3	7.5	-14.8	-6.8	0.704165
5	PNG005	-20.4	7.3	3.3	6.6	-13.4	-6.9	0.705361
6	PNG006	-18.9	6.0	3.4	5.5	n.a.	n.a.	n.a.
8	PNG007	-18.6	7.2	3.3	4.9	-13.1	-7.3	0.704845
9	PNG008	-19.3	7.7	3.3	5.2	-12.1	-7.4	0.704875
10	PNG009	-20.9	7.8	3.3	6.4	-13.9	-7.7	0.704392
11	PNG010	-20.8	8.5	3.3	6.3	-14.7	-8.4	0.704698
12	PNG011	-19.3	9.1	3.4	7.4	-13.3	-6.9	0.704143
13	PNG012	-19.7	7.4	3.4	4.8	-14.0	-7.8	0.704261
14	PNG013	-18.9	7.6	3.3	7.6	-12.5	-8.3	0.704363
15	PNG014	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
16	PNG015	-19.3	7.9	3.3	4.6	-12.5	-8.3	0.705924
17	PNG016	-19.0	12.8	3.3	12.3	-13.9	-8.3	0.705295
18	PNG017	-21.3	8.1	3.3	7.5	-14.2	-6.4	0.705257
19	PNG018	-19.6	8.9	3.3	7.9	-13.3	-7.8	0.704218
20	PNG019	-19.4	9.4	3.3	8.7	-13.7	-8.1	0.704198
21	PNG020	-20.4	7.7	3.3	1.4	n.a.	n.a.	n.a.
22	PNG021	-19.7	7.5	3.3	4.6	-13.4	-6.1	0.705464
23	PNG022	-20.1	9.5	3.3	8.1	-13.9	-7.6	0.705757
24	PNG023	-20.9	9.0	3.3	6.7	-13.7	-8.3	0.704697
25	PNG024	-20.0	8.9	3.3	8.1	-13.2	-7.7	0.705495
26	PNG025	-19.1	11.7	3.3	10.7	-12.8	-7.4	0.705074
27	PNG026	-18.8	8.1	3.3	2.6	-12.4	-9.7	0.705050
28	PNG027	-18.4	6.6	3.4	7.4	n.a.	n.a.	n.a.
29	PNG028	-20.1	9.5	3.3	8.3	-13.5	-7.5	0.704945
30	PNG029	-18.6	7.7	3.4	5.7	-12.7	-7.0	n.a.
31	PNG030	-19.7	10.0	3.3	6.5	-13.9	-6.3	0.706132
32	PNG031	-20.0	7.9	3.3	6.1	-14.2	-7.8	0.705531
33	PNG032	-21.1	8.7	3.4	6.6	n.a.	n.a.	n.a.

34	PNG033	-20.0	9.0	3.3	6.2	-14.1	-7.2	0.705197
35	PNG034	-19.4	7.5	3.4	3.4	-13.2	-7.0	0.704923
36	PNG035	-20.2	10.8	3.3	9.8	-12.8	-7.2	n.a.
38	PNG036	-20.1	9.0	3.4	4.8	-13.5	-7.9	0.705277
39	PNG037	-19.7	8.3	3.4	7.2	-13.2	-6.6	0.706505
40	PNG038	-20.8	10.5	3.3	9.8	-14.3	-7.6	0.704515
41	PNG039	-19.3	7.8	3.3	0.7	-12.8	-6.8	0.705974
42	PNG040	-20.0	9.9	3.3	9.0	-13.1	-7.6	0.705706
43	PNG041	-20.3	10.1	3.1	n.a.	n.a.	n.a.	0.706097
44	PNG042	-20.2	8.2	3.1	n.a.	-13.4	-7.6	0.705486
45	PNG043	-20.5	9.4	3.3	8.6	-12.8	-8.4	0.705368
46	PNG044	-19.7	8.1	3.4	0.6	-12.6	-7.5	0.706478
47	PNG045	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0.706343
48	PNG046	-20.5	8.0	3.3	7.3	n.a.	n.a.	0.705639
49	PNG047	-18.4	8.8	3.2	n.a.	n.a.	n.a.	0.704903
50	PNG048	-19.4	8.4	3.2	n.a.	n.a.	n.a.	0.704810
51	PNG049	-19.3	7.7	3.2	n.a.	n.a.	n.a.	0.706551
52	PNG050	-19.9	10.6	3.3	n.a.	-13.5	-9.3	n.a.
53	PNG051	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
54	PNG052	-20.6	8.7	3.3	9.4	-13.8	-6.6	n.a.
55	PNG053	-19.2	7.9	3.3	9.8	-13.8	-6.8	n.a.
56	PNG054	-21.6	8.3	3.1	n.a.	-15.0	-8.5	n.a.
57	PNG055	-20.4	8.5	3.1	n.a.	-14.8	-9.9	n.a.
58	PNG056	-21.8	6.4	3.2	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
59	PNG057	-19.5	10.7	3.2	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
60	PNG058	-19.6	11.6	3.4	10.2	n.a.	n.a.	n.a.
61	PNG059	-18.0	11.8	3.2	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
62	PNG060	-19.3	7.9	3.2	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
63	PNG101	-19.4	11.4	3.3	9.0	-14.4	-4.9	0.704043
64	PNG102	-19.6	11.5	3.3	14.1	-15.5	-5.2	0.707915
65	PNG103	-20.5	9.0	3.3	10.2	-15.1	-5.2	0.704089
66	PNG104	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	-14.0	-4.9	0.704330
67	PNG105	-20.9	9.8	3.3	11.0	n.a.	n.a.	n.a.
68	PNG106	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	-14.8	-5.8	0.707605
69	PNG107	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	-13.5	-5.7	0.707775
72	PNG108	n.a.	n.a.	n.a.	12.7	-14.1	-5.2	0.707910

73	PNG109	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0.707705
74	PNG110	-20.3	11.1	3.3	9.2	n.a.	n.a.	0.708701
75	PNG111	-21.1	8.5	3.3	10.0	n.a.	n.a.	n.a.
76	PNG112	-20.8	8.4	3.2	7.0	-14.7	-5.6	0.704028
77	PNG113	-18.9	12.1	3.3	8.9	-12.7	-5.4	0.707589
78	PNG114	-19.9	12.0	3.3	12.7	-14.5	-6.4	0.707084
80	PNG115	-18.2	12.1	3.3	12.5	-13.4	-5.8	0.705517
81	PNG116	-17.5	12.8	3.3	11.7	-13.6	-5.7	0.705168
82	PNG117	-19.7	9.7	3.3	11.9	n.a.	n.a.	n.a.
83	PNG118	-15.1	18.2	3.3	15.7	-11.8	-3.8	0.709160
84	PNG119	-20.8	10.5	3.3	10.3	-14.4	-4.5	0.708525
85	無番号 1	-21.0	7.9	3.3	8.9	n.a.	n.a.	n.a.
86	無番号 2	-18.2	14.1	3.4	15.2	n.a.	n.a.	n.a.
87	PNG123	-20.8	9.4	3.3	8.3	-13.0	-4.8	0.708505
88	PNG124	-17.1	12.8	3.3	12.9	-13.5	-5.7	0.708489
89	無番号 3	-20.4	10.7	3.3	9.0	n.a.	n.a.	n.a.
90	PNG125	-17.8	12.1	3.4	12.5	n.a.	n.a.	n.a.
91	PNG121	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0.707523
92	PNG120	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0.704679
97	PNG122	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0.708188
98	PNG201	-18.5	11.8	3.3	n.a.	-11.9	-4.6	0.706950
99	PNG202	-18.7	11.1	3.3	11.4	-12.9	-5.3	0.707822
100	PNG203	-18.4	5.8	3.3	8.4	-12.6	-5.9	0.705669
101	PNG204	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
102	PNG205	-18.4	10.3	3.3	n.a.	-12.1	-4.9	0.708193
103	PNG206	-19.1	9.5	3.3	n.a.	-11.4	-5.3	0.708406
104	PNG207	-18.9	5.6	3.3	n.a.	-12.7	-7.0	0.705978
105	PNG208	-17.3	11.9	3.3	n.a.	n.a.	n.a.	0.707539
108	PNG209	-18.1	12.8	3.3	12.7	n.a.	n.a.	n.a.
109	PNG210	-18.9	10.4	3.3	n.a.	-12.4	-7.1	0.704393
111	PNG211	-19.9	10.3	3.3	-8.1	-13.4	-6.2	0.708219
112	PNG212	-18.4	11.0	3.3	9.6	-11.5	-7.0	0.707446
113	PNG213	-21.3	11.8	3.3	10.3	-12.8	-7.2	0.707686
114	PNG214	-18.1	12.1	3.3	10.8	-9.8	-5.8	0.706123
115	PNG215	-18.3	10.9	3.3	2.3	-12.8	-5.1	0.707803
119	PNG216	-19.5	7.7	3.3	9.6	-13.8	-4.4	0.707258

120	PNG217	-18.3	10.3	3.3	10.3	n.a.	n.a.	n.a.
123	PNG218	-19.0	11.0	3.3	11.6	-12.0	-5.8	0.707416
124	PNG219	-18.1	12.3	3.3	13.0	-12.0	-4.8	0.707543
125	PNG220	-21.6	9.3	3.3	8.4	n.a.	n.a.	n.a.
126	PNG221	-19.7	10.4	3.3	10.1	-13.0	-6.0	0.708313
127	PNG222	-18.9	11.9	3.3	12.2	-13.0	-4.6	0.707199
128	PNG223	-16.6	12.2	3.3	13.6	-13.0	-4.3	0.708987
129	PNG224	-18.0	11.6	3.3	13.8	-11.7	-4.0	0.708663
130	PNG225	-18.8	9.4	3.3	11.0	n.a.	n.a.	n.a.
131	PNG226	-20.3	11.3	3.3	10.4	-13.9	-5.5	0.709454
133	PNG227	-19.0	11.9	3.3	12.3	-10.8	-7.3	0.708156
134	PNG228	-18.7	11.7	3.3	12.6	n.a.	n.a.	n.a.
135	PNG229	-20.2	11.5	3.3	10.3	n.a.	n.a.	0.708757
136	PNG230	-18.9	11.2	3.3	10.3	-12.6	-6.5	0.707688
137	PNG231	-17.3	12.4	3.3	10.8	n.a.	n.a.	n.a.
139	PNG232	-18.1	12.1	3.3	12.1	n.a.	n.a.	n.a.
141	PNG233	-18.5	10.4	3.3	9.0	-12.4	-6.1	n.a.

n.a.はデータ欠損を示す。 δ 値に添えられた col はコラーゲン、carb はエナメル質炭酸塩を指す。C/N 比は原子数比でコラーゲンの正常値 (2.9~3.6) から外れた値は異常値である可能性がある。 $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{18}\text{O}$ は VPDB を、 $\delta^{15}\text{N}$ は AIR を $\delta^{34}\text{S}$ は CTD を標準物質として算出した。

表2. PNGの考古学遺跡から出土した人骨および動物骨で報告されている各種同位体データの概要

遺跡名	地域	年代	種名	組織	元素	データ数	出典
Nebira	NG 島南岸 ポートモレスビー 一近郊	800-300 BP	ヒト	コラーゲン	炭素・窒素	28	Kinaston et al., 2013
					硫黄	17	Kinaston et al., 2013
				エナメル質	ストロンチウム	27	Shaw et al., 2011
					酸素	27	Shaw et al., 2011
SAC	ビスマルク諸島 Watom 島	2750-2400 BP	ヒト	コラーゲン	炭素・窒素	8	Kinaston et al., 2015
					ストロンチウム	15	Shaw et al. 2010
				酸素 (炭酸塩)	15	Shaw et al. 2010	
			ブタ	コラーゲン	炭素・窒素	22	Kinaston et al., 2015
					ストロンチウム	6	Shaw et al. 2010
				酸素 (炭酸塩)	4	Shaw et al. 2010	
Balbalankin	ビスマルク諸島 Ambitle isl.	3000/2900-2700 BP	ヒト	エナメル質	ストロンチウム	1	Shaw et al. 2009
			ブタ	エナメル質	ストロンチウム	2	Shaw et al. 2009
Kamgot	ビスマルク諸島 Babase isl.	3300-3000/2900 BP	ヒト	エナメル質	ストロンチウム	1	Shaw et al. 2009
		Modern	ヒト	エナメル質	ストロンチウム	2	Shaw et al. 2009
Lifafaesing	ビスマルク諸島 Tanga 島	2750- BP	ヒト	エナメル質	ストロンチウム	5	Shaw et al. 2010
Buang Merabak	ビスマルク諸島 New Irlkand 島	13.2-7.8 /23.5-19.2 ka	小型哺乳類	エナメル質	炭素・酸素	19	Roberts et al. 2023
Matenbek	ビスマルク諸島 New Irlkand 島	1.9-1.3/8.6-8.1/24.0- 20.7 ka	小型哺乳類	エナメル質	炭素・酸素	25	Roberts et al. 2023
Matenkupkum	ビスマルク諸島 New Irland 島	modern/25.3-23.9 ka	小型哺乳類	エナメル質	炭素・酸素	45	Roberts et al. 2023
Pamwak	ビスマルク諸島 Manus 島	6.7-2.0/29.0-24.0 ka	小型哺乳類	エナメル質	炭素・酸素	59	Roberts et al. 2023

BP は Before Present (年前)、ka は kilo-year ago (千年前) を表す。

表3. ロジスティック回帰モデルの結果

説明係数	回帰係数	Std	z value	オッズ比	95%信頼区間	P 値
$\delta^{13}\text{C}_{\text{col}}$	-1.1848	0.414	-2.862	0.306	0.136 - 0.688	0.00421
$\delta^{15}\text{N}_{\text{col}}$	1.0548	0.2276	4.635	2.87	1.84 - 4.49	0.00000357
$\delta^{34}\text{S}_{\text{col}}$	-0.5414	0.1236	-4.382	0.582	0.457 - 0.741	0.0000118
$\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$	0.4939	0.2653	1.862	1.64	0.974 - 2.76	0.0626
$\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$	1.1884	0.4357	2.728	3.28	1.4 - 7.71	0.00638
(Intercept)	-12.3627	7.741	-1.597	0.00000427	1.1E-12 - 16.6	0.11

表4. ロジスティック回帰モデルによる所属集団の推定結果

		所属集団			
		PNG	日本人	計	精度
推定結果	PNG	60	4	64	93.8%
	日本人	8	41	49	83.7%
	計	68	45	113	
	検出率	88.2%	91.1%		判別的中度(95%信頼区間)
	正当数	60	41	101	89.4%(82.2~94.4%)

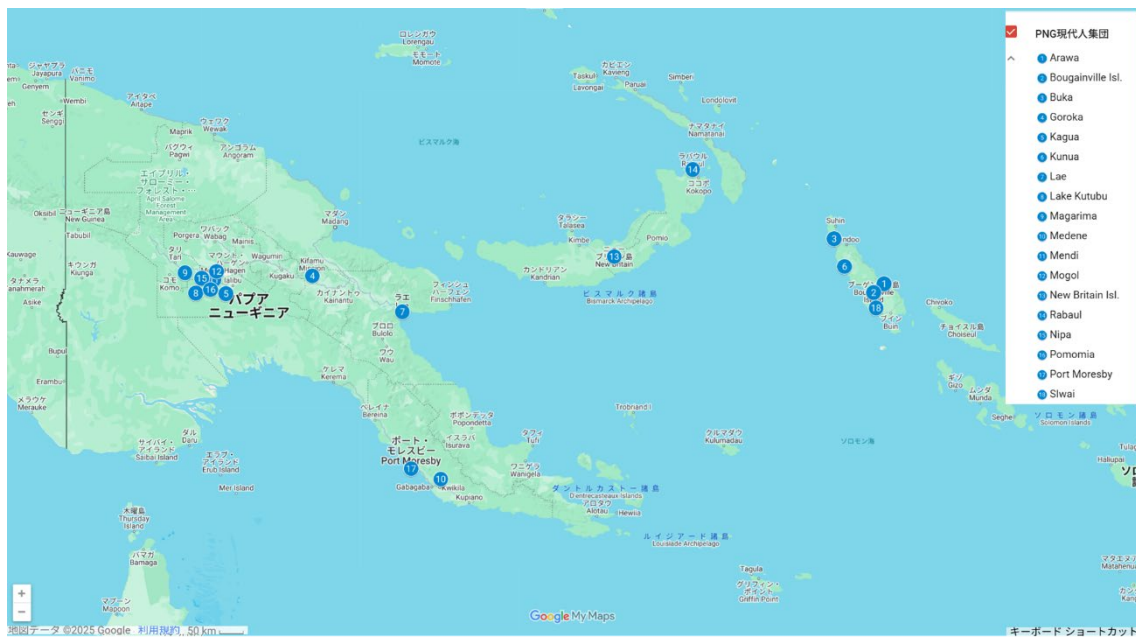


図1. PNG 現代人集団に含まれる個体の出身地 (10才時の居住地) の位置

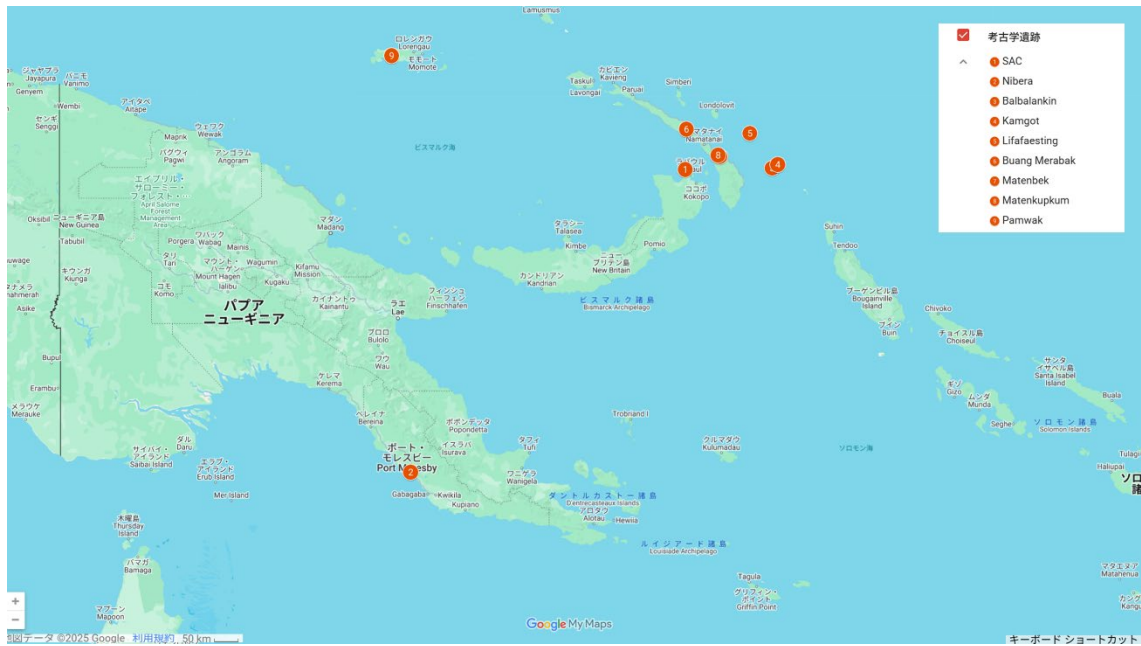


図2. 同位体データが得られた考古学遺跡の位置

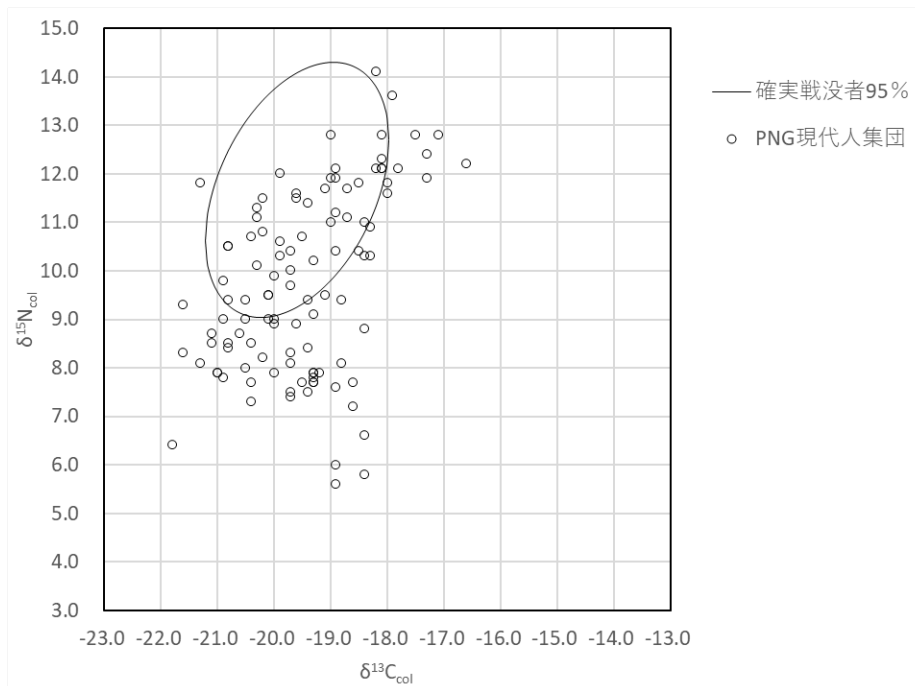


図3. PNG 現代人集団のコラーゲンにおける炭素・窒素同位体比と確実戦没者の95%確率楕円の比較

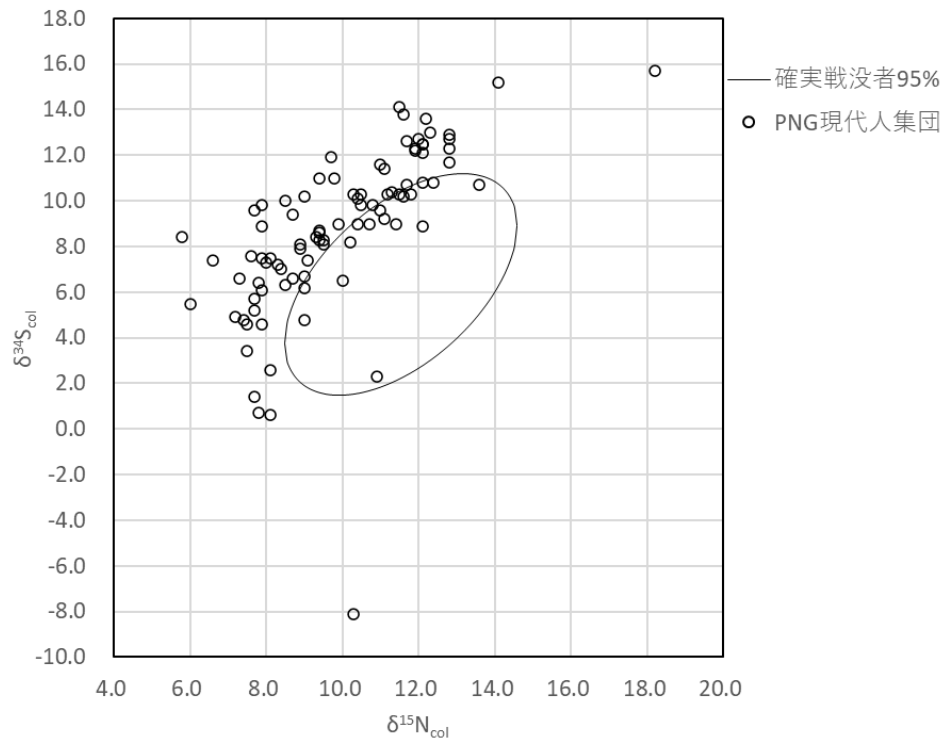


図4. PNG 現代人集団のコラーゲンにおける窒素・硫黄同位体比と确实戦没者の95%確率楕円の比較

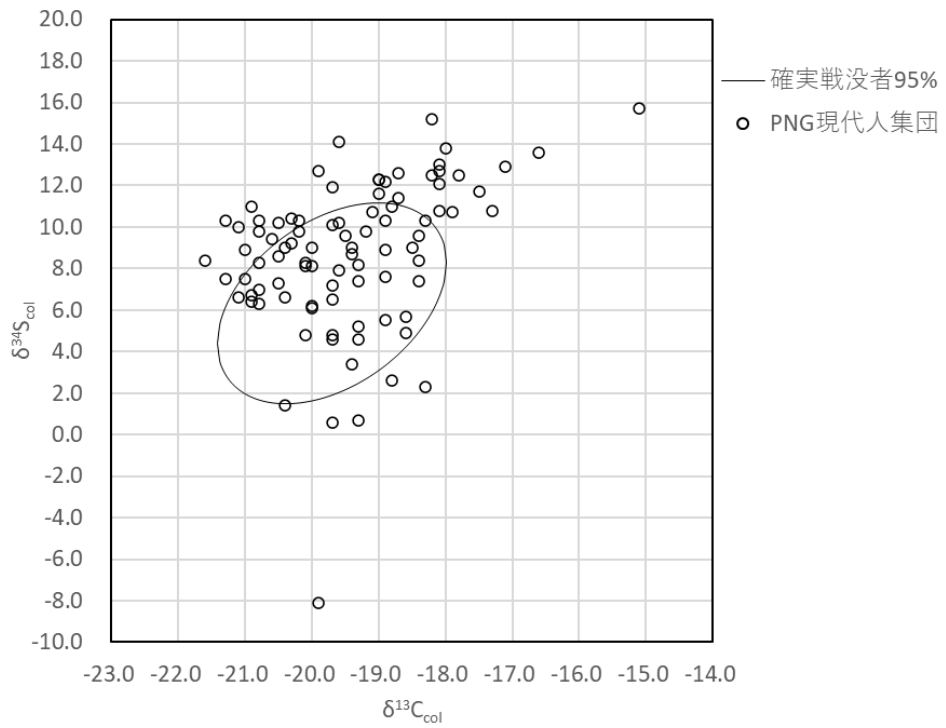


図5. PNG 現代人集団のコラーゲンにおける炭素・硫黄同位体比と确实戦没者の95%確率楕円の比較

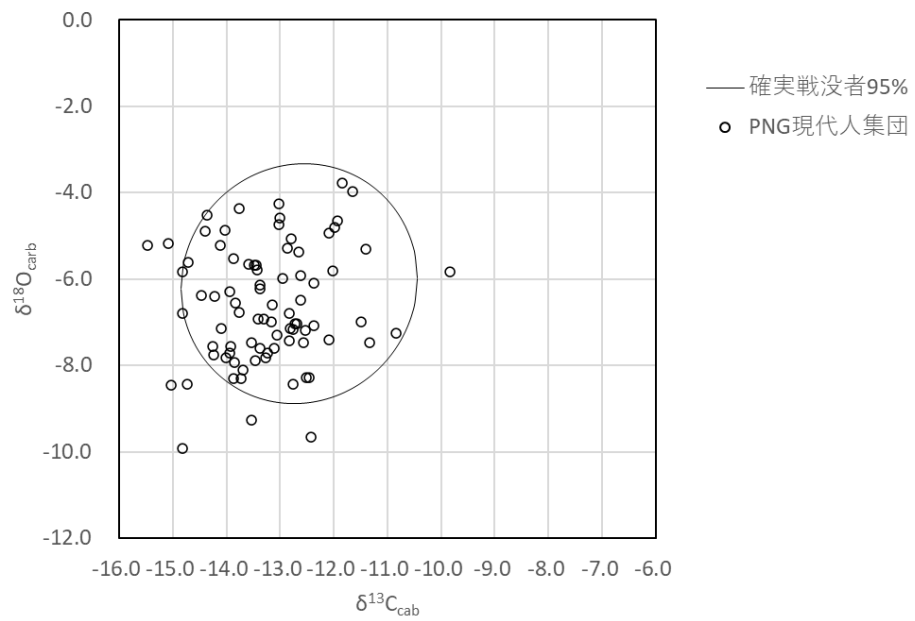


図6. PNG 現代人集団のエナメル質炭酸塩における炭素・酸素同位体比と确实戦没者の95%確率楕円の比較

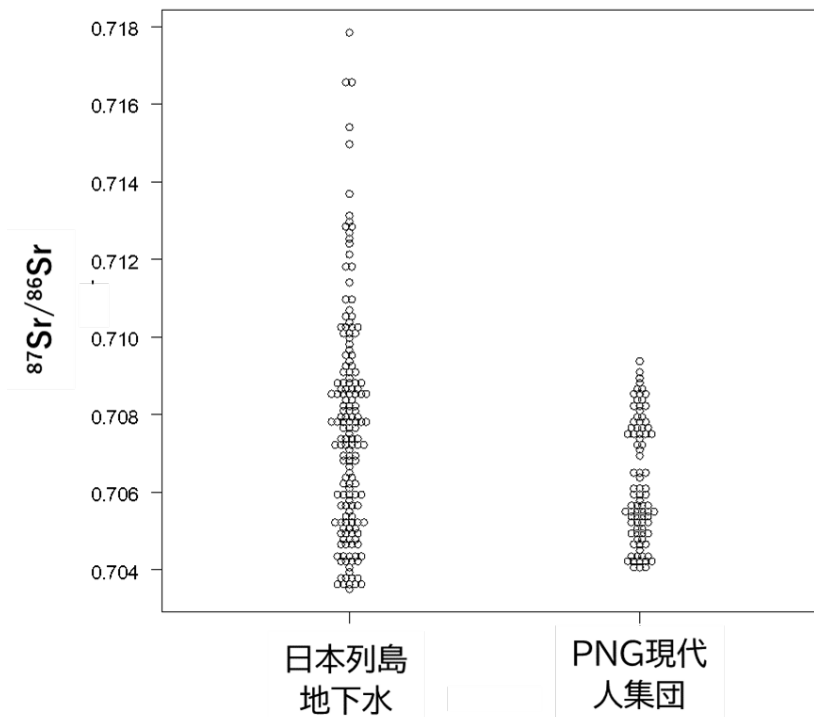


図7. PNG 現代人集団と日本列島の地下水 (Nakano et al. 2020) における Sr 同位体比の比較

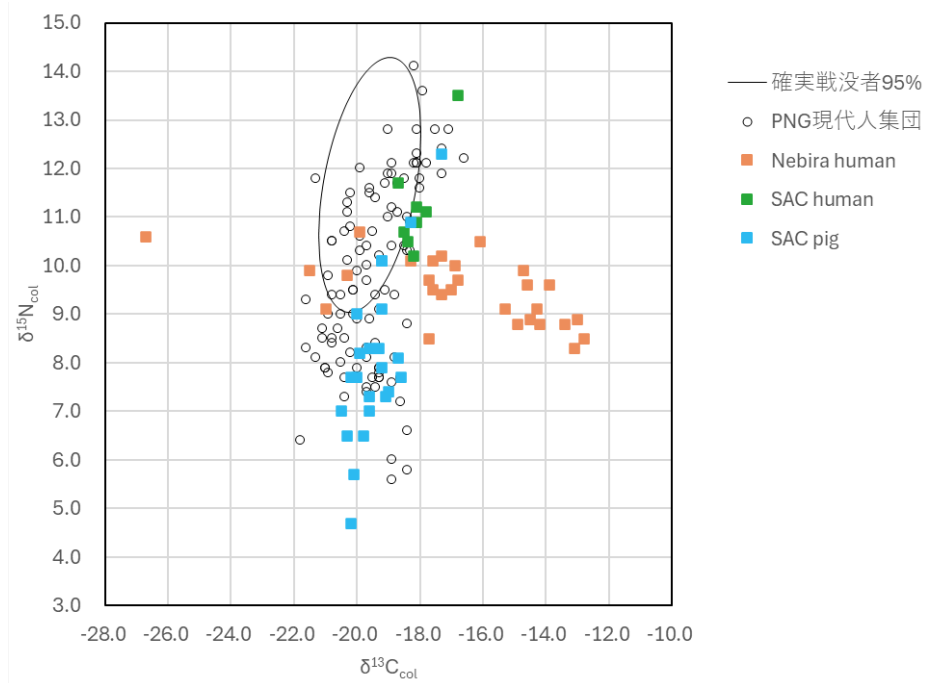


図8. PNG 現代人集団と考古学遺跡のヒトとブタにおけるコラーゲンの炭素・窒素同位体比と日本人確実戦没者の95%確率楕円の比較

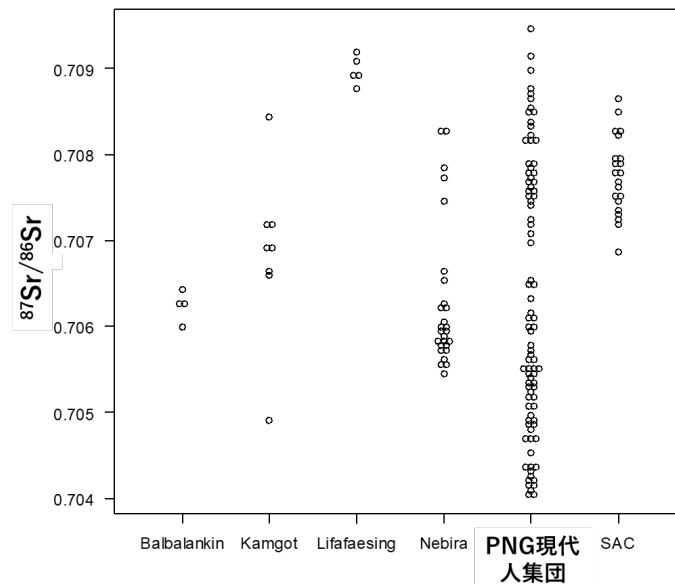


図9. PNG 現代人集団と考古学遺跡のヒトとブタにおける Sr 同位体比の比較 (Sr 同位体比は地質環境を反映するのでヒトとブタは区別しない)

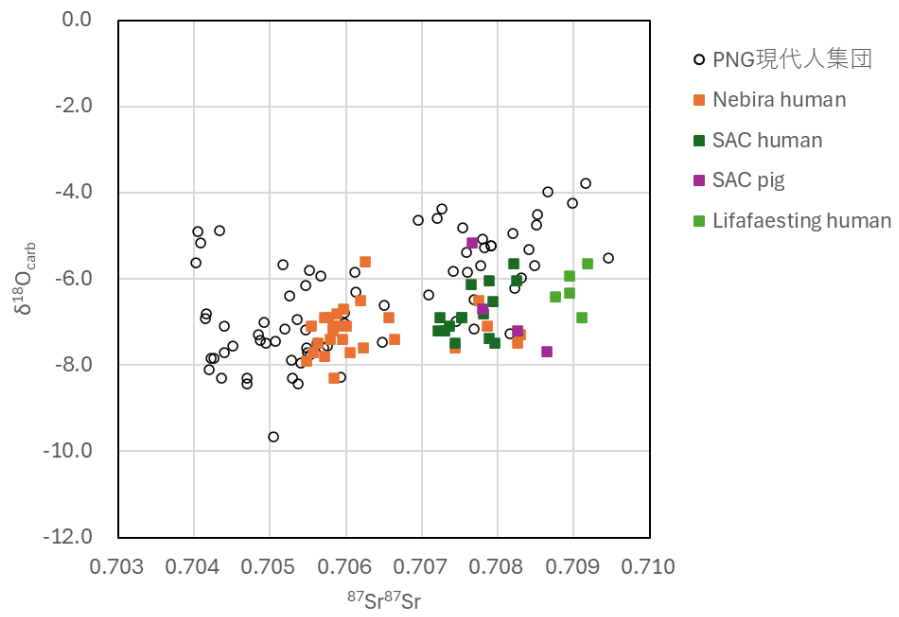


図 10. PNG 現代人集団と考古学遺跡のヒトとブタにおける Sr と酸素の同位体比の比較

厚生労働行政推進調査事業費補助金
(政策科学総合研究事業 (政策科学推進研究事業))
分担研究報告書

インドネシア現代人集団データベースに係る試料採取

研究分担者 橋本 正次 東京歯科大学・歯学部・名誉教授

研究要旨：戦没者遺骨における所属集団判定には、外国人集団の各種同位体比データベースの構築が必要不可欠であるため、インドネシア国内において比較的離れた地域の複数の歯科大学から、インドネシア現代人の抜去歯牙 108 点を採取した。

A. 研究目的

戦没者遺骨における所属集団判定のために、日本人集団および外国人集団の各種同位体比のデータベースを構築することが必要不可欠である。本研究では、このデータベース構築のために外国人集団の各種同位体比のデータベース構築に必要な分析試料の採取を実施する。

B. 研究方法

本年度は、研究協力者の染田とともに、来年度に分析する計画であるインドネシア現代人集団の分析試料を採取した。試料は、インドネシアの4つの地域の大学歯学部等において、歯科診療時に抜去され、かつ所有権放棄された歯牙である。また同時に、患者の性別や年齢、居住地域とその地域での滞在年数などの情報も得た。

(倫理面への配慮)

試料採取に係る倫理審査は、東京歯科大学倫理審査委員会においてなされ、承認を得ている。

C. 研究結果

2024年9月28日から10月10日にかけて、ハサヌディン大学(スラウェシ島マカッサル; 29点)、インドネシア大学(ジャワ島ジャカルタ市; 打ち合わせのみ)、パジャジャラン大学(ジャワ島バンドン市; 33点)、アイルランガ大学(ジャワ島スラバヤ市; 46点)の共同研究者と面会した。各大学で収集された抜去歯牙はいずれも、患者のインフォームドコンセントを得て取得したものであり、計108点の歯牙を採取することができた。

D. 考察

インドネシアは東南アジアの南に位置する、東西に長い島嶼国家である。従って、各地域での生活環境が異なることから、各種同位体比が地域ごとに異なる可能性が考えられる。日本人戦没者遺骨はインドネシアの様々な地域で捜索、収容されることから、複数の地域における現代インドネシア人の

データベースを構築する意義は極めて高い。その上で、今回は南スラウェシ島のマカサル、東ジャワ州のスラバヤ、西ジャワ州のバンドンと比較的離れた地域の歯科大学から抜去歯牙を得られたことは有意義であった。加えて、パプアニューギニアと国境をもつパプア州、マレーシアと国境を持つカリマンタン島、ジャワ島の西に位置するスマトラ島、さらにはジャカルタなどの大学や歯科医師と試料採集に関して打合せをすることができた。今後もさらなる試料が収集できれば、戦没者遺骨の所属集団判定においてより有効なデータベース構築が期待される。

E. 結論

インドネシア現代人集団の各種同位体比のデータベースを構築する上で重要な試料を採取することができた。試料の各種同位体分析は来年度に実施する予定である。

G. 研究発表

1. 論文発表
該当なし
2. 学会発表
該当なし

H. 知的財産権の出願・登録状況

1. 特許取得
該当なし
2. 実用新案登録
該当なし
3. その他
該当なし

厚生労働行政推進調査事業費補助金
(政策科学総合研究事業 (政策科学推進研究事業))
分担研究報告書

歯エナメル質のストロンチウム同位体分析の迅速化の検討

研究分担者 陀安 一郎 総合地球環境学研究所・基盤研究部・教授

研究要旨：歯エナメル質のストロンチウム同位体比の迅速分析法について検討を行った。戦没者遺骨の所属集団を判定するためのストロンチウム同位体分析の迅速化手法を検討した結果、分解法の違いによる同位体比の差がなく、良好な一致を示すことが分かった。

A. 研究目的

戦没者遺骨の所属集団を判定するためには、大量の検体を測定に供する必要がある。本研究では特に、歯のエナメル質に含まれるストロンチウム同位体比の分析を迅速化する方法について検討する。

B. 研究方法

研究協力者の申と協力し、ストロンチウム同位体比の迅速分析法について詳しく検討を行った。当初の計画では、自動濃度希釈装置を活用した迅速化を検討していた。しかし、微量元素濃度測定の手順を変更することで、自動希釈装置を使用する前の段階で発生するミスを減らし、試料の微量成分濃度を確認できるというメリットがあることが分かった。そこで、計画を変更し、マニュアル法による迅速処理の検討を行った。具体的には、化石や考古学試料に用いられるマイクロ波試料分解装置を使用したマイクロ波酸分解法(加圧密閉系)と、大気圧テ

フロンバイアルでの加熱分解について、標準物質の分解を実施した。

2種類の前処理を行い、標準物質を溶解させた硝酸溶液それぞれについて、誘導結合プラズマ質量分析(Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometry; ICP-MS)により微量元素濃度を測定した。濃度確認後、ストロンチウム同位体比測定に必要な500ngの溶液を分取し、精製カラム処理を実施した。カラム精製後の試料溶液のストロンチウム濃度は、導入された量によって決まるため、カラム操作に問題がなければ約Sr 200ppbになる。

ストロンチウム同位体比の測定は、マルチコレクター誘導結合プラズマ質量分析(Multiple Collector Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometry; MC-ICP-MS)を用いて行った。本測定を行う前に、いくつかの測定試料についてストロンチウム濃度(信号強度)の確認を行い、カラム操作での回収率を評価した。カラム処理、試料溶液

の濃度調整、およびストロンチウム同位体比の測定手順は、令和6年度「戦没者遺骨の年代測定及び所属集団判定における同位体分析の活用に係る研究事業」報告書の第3章に記載されたものと同一である。

(倫理面への配慮)

該当しない

C. 研究結果

各種標準物質に関するストロンチウム同位体分析の測定結果を、表1から表3に示す。

分解法 試料名	マイクロ波分解		大気圧加熱分解	
	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	se	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	se
Yonaguni-01	0.709263	0.000010	0.709226	0.000024
Yonaguni-02	0.709236	0.000008	0.709270	0.000015
Yonaguni-03	0.709276	0.000011	0.709277	0.000008
Yonaguni-04	0.709272	0.000008	0.709292	0.000021
Yonaguni-05	0.709263	0.000008	0.709256	0.000012
Yonaguni-06	0.709275	0.000010	0.709275	0.000013
average(n=6) sd	0.709264 0.000015		0.709266 0.000023	

表1. 与那国牛を使った分解法によるストロンチウム同位体比の測定結果

試料名	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	se
Yonaguni-01	0.709269	0.000008
Yonaguni-02	0.709269	0.000019
Yonaguni-03	0.709293	0.000014
Yonaguni-04	0.709256	0.000009
Yonaguni-05	0.709276	0.000007
Yonaguni-06	0.709278	0.000016
average(n=6) sd	0.709274 0.000012	

表2. 表面電離型質量分析装置を用いた与那国牛試料の繰り返し測定結果

試料名	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	se	試料名	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	se
JCp1-1	0.709182	0.000007	SRM1400-1	0.713133	0.000016
JCp1-2	0.709164	0.000007	SRM1400-2	0.713108	0.000008
JCp1-3	0.709154	0.000009	SRM1400-3	0.713131	0.000008
JCp1-4	0.709160	0.000005			
average(n=4) sd	0.709165 0.000012		average(n=3) sd	0.713124 0.000014	
文献値	0.70916~0.70923		文献値	0.71308~0.71313	

表3. 国際標準物質の繰り返し測定結果

D. 考察

表1ではマイクロ波酸分解法および大気圧テフロンバイアルでの加熱分解により、分解した標準物質のストロンチウム同位体比は、誤差範囲内で一致することを確認した。

また、同じ与那国牛試料に対して、MC-ICP-MSより高精度精密分析が可能な表面電離型質量分析(Thermal Ionization Mass Spectrometry; TIMS)を用いストロンチウム同位体比を測定した。その結果(表2)は誤差範囲内で、MC-ICP-MSによる測定結果とよく一致することが分かった。

さらに、主にカルシウムを含む国際標準物質であるBone Ash (NIST SRM 1400)とGSJ CRM ハマサンゴ (JCp-1)に対して、同じ前処理を行い、MC-ICP-MSによる同位体比測定を実施した(表3)。両標準物質ともに、既存の報告値と同じ測定値を示したことから、今回のメリットに問題がないことと評価できる。

E. 結論

戦没者遺骨の所属集団を判定するためのストロンチウム同位体分析の迅速化手法を検討した本研究では、分解法の違いによる同位体比の差がなく、良好な一致を示すことが分かった。また、国際標準物質との比較を通じて、今回検討したメソッドの信頼性に問題がないことも確認できた。

G. 研究発表

1. 論文発表

該当なし

2. 学会発表

該当なし

H. 知的財産権の出願・登録状況

1. 特許取得

該当なし

2. 実用新案登録

該当なし

3. その他

該当なし

厚生労働行政推進調査事業費補助金
(政策科学総合研究事業 (政策科学推進研究事業))
分担研究報告書

歯エナメル質のストロンチウムを処理するための簡易前処理装置の試作

研究分担者 覺張 隆史 金沢大学・古代文明・文化資源学研究所・准教授

研究要旨：戦没者遺骨検体のストロンチウム同位体分析を迅速に行うために、エナメル質からストロンチウムを単離するための可搬式自動前処理装置の試作機を設計・製造した。動作確認を行い設計通りに動作することを確認した。

A. 研究目的

戦没者遺骨における所属集団判定のためには、大量の検体を測定に供する必要がある。このため本研究では、測定に先立つ前処理の迅速化を試みる。

(倫理面への配慮)

該当しない

B. 研究方法

本年度は特に、エナメル質からストロンチウムを単離するための可搬式自動前処理装置の試作機を設計・製造した。

C. 研究結果

エナメル質からストロンチウムを単離するための可搬式自動前処理装置の試作機を設計・製造した(図1)。この装置はペリスタポンプで3種類の溶液(純水、pH4.5酢酸バッファー、3.5M硝酸)を攪拌容器に導入し、順次試料と反応させることができる(図2)。エナメル質粉末を容器に装填した後、純水と酢酸バッファーによる洗浄、硝酸による脱灰を順次行い、硝酸溶液をストロンチウム分離カラムに導入する。

同装置の動作確認を行い、設計通りに動くことを確認した。

D. 考察

本年度作成した可搬式自動前処理装置の試作機では、すべての前処理手順を密封容器内で実行することができるので、クリーンルームなど清浄環境にアクセスできない海外調査でもエナメル質から単離したストロンチウムを得ることができる。植物試料の場合は事前に電気炉で灰化することで利用可能になるので、煩雑な生物試料の輸入手順を省略して現地での前処理が実現可能となる。反応時間などの諸条件は、独自に開発したスマートフォンアプリで変更可能である。

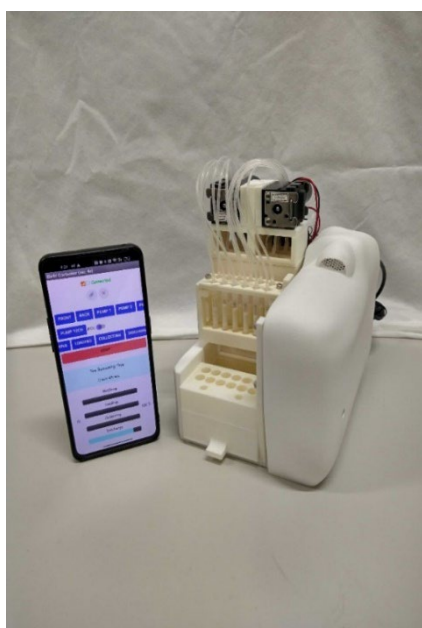


図1. エナメル質用の可搬式自動前処理装置 (Elefit)

E. 結論

次年度はこの装置を使って骨標準物質の前処理を行い、ストロンチウム同位体比が再現できるかについての検討を行う。

G. 研究発表

1. 論文発表

該当なし

2. 学会発表

該当なし

H. 知的財産権の出願・登録状況

(予定を含む。)

1. 特許取得

金沢大学内にて知的財産権の出願申請中

2. 実用新案登録

該当なし

3. その他

該当なし

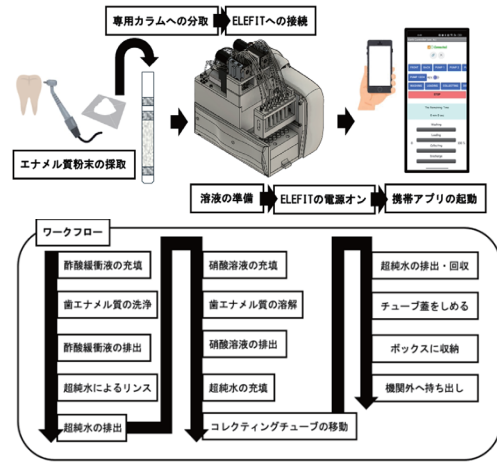


図2. エナメル質用の可搬式自動前処理装置 (Elefit) のワークフロー

厚生労働行政推進調査事業費補助金
(政策科学総合研究事業 (政策科学推進研究事業))
分担研究報告書

複数集団の所属判別に係る統計的手法の検討

研究分担者 澤藤 匠 総合研究大学院大学・統合進化科学研究センター・助教

研究要旨：パプアニューギニア現代人と現代日本人のそれぞれを1集団とみなして、両者の間を分別するモデルについて検討を行った。この結果、Pythonのscikit-learnパッケージを用いるのが最適と考えられることが明らかになった。

A. 研究目的

各種同位体比のデータに基づいて日本人集団と外国人集団とを分別可能なモデルを構築することは、戦没者遺骨における所属集団判定の高精度化に役立つことが期待される。本研究では、このモデル構築のために不可欠な日本人および外国人の集団判別分析に係る統計的手法について検討する。

B. 研究方法

今年度の研究1で得られたパプアニューギニア(以下PNG)現代人集団のデータと、先行研究で報告された考古学遺跡から得られた同位体データの比較を通じ、所属集団判定に有効な統計学的手法を検討する。

また研究データの管理と統計解析ならびにアプリケーション開発に必要なワークステーションの環境を整備する。

(倫理面への配慮)

該当しない

C. 研究結果

研究1で今年度構築したPNG現代人集団データベースと、先行研究で報告された考古学遺跡の人骨・動物骨の同位体データを比較した。後者については、同一個体で複数同位体比を測定している事例が少なく、欠損データについて何らかの補完が必要であることが分かった。PNG現代人集団でも欠損データの割合は無視できず、分析に供した121検体のうち、炭素・窒素・硫黄・酸素・ストロンチウムの5元素全ての同位体比データが得られたものは、現時点では63検体(52.1%)にすぎず、欠損データの補完は極めて重要である。令和4～6年度に厚労省委託研究「戦没者遺骨の年代測定及び所属集団判定における同位体分析の活用に係る研究事業」で報告された確実戦没者についても、炭素・窒素・硫黄・酸素の4元素についてデータがそろっている検体は45検体であり、データの拡充が引き続き必要であると判断された。

各種統計解析ツールを検討した結果、指定した統計量(平均値、中央値、最頻値など)

を用いる方法や、K 近傍法による方法、多重代入法による補完などが可能である Python の scikit-learn パッケージが有望であることを見出した。来年度、確実戦没者のストロンチウム同位体比が追加された時点で、PNG 現代人集団との判別を試みて、有効な補完方法を検討する。

D. 考察

こうしたデータに関して、複数の安定同位体比の変数をもとに所属する出身地を判別するためのロバストかつスケーラブルな枠組みを検討した。その結果、Python の scikit-learn パッケージが有望であることを見出した。収録されているさまざまな機械学習モデルのうち、どれが戦没者のデータに最適かを検討している。

E. 結論

2025 年度は Python の scikit-learn パッケージの検討を終え、予備的な解析に進む予定である。

G. 研究発表

1. 論文発表
該当なし
2. 学会発表
該当なし

H. 知的財産権の出願・登録状況

1. 特許取得
該当なし
2. 実用新案登録
該当なし
3. その他
該当なし