

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32

戦没者遺骨収集における同位体比分析の 活用に係る検討会報告書（案）

令和3年12月●●日
戦没者遺骨収集における同位体比分析の活用に係る検討会

33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53

目次

1. 本検討会の背景・目的等	1
2. 同位体比分析について	2
2. 1 同位体比分析の基本	
2. 2 主な同位体元素の特徴	
3. 同位体比分析の応用例	4
3. 1 ¹⁴ C年代測定	
3. 2 食品の産地の判定	
3. 3 禁止物質によるドーピングの識別法	
4. 戦没者遺骨の鑑定分野への同位体比分析の応用について	5
4. 1 戦没者遺骨の鑑定プロセスの現状	
4. 2 現時点において考えられる課題	
4. 3 今後の方針	
(参考) 構成員名簿	

54 1. 本検討会の背景・目的等

55

56 戦没者遺骨収集事業において、日本人でない遺骨が收容された可能性が指摘
57 されながら、長年に渡り適切な対応が行われてこなかった事例を受け、令和元
58 年10月に、「戦没者遺骨収集推進法に基づく指定法人への指導監督等に関する
59 有識者会議」（以下「有識者会議」という。なお、令和2年4月に「戦没者の
60 遺骨収集に関する有識者会議」に名称が変更された。）の下にチームが設けら
61 れ調査等が行われた。

62 令和2年5月14日に、有識者会議は、当該チームの検討結果の報告をとり
63 まとめた意見を厚生労働省に提出し、同年5月21日に、厚生労働省から、有
64 識者会議に「戦没者遺骨収集事業及び事業実施体制の抜本的な見直しについ
65 て」（以下「抜本的な見直し」という。）を報告し、とりまとめた。

66 そして、同位体比分析については、抜本的な見直しにおいて、放射性同位体
67 比分析による生存年代推定を必要に応じ実施し活用する、また、所属集団の判
68 定に応用できる可能性があることから安定同位体比分析の研究を行っていくと
69 されたところ。

70 それを受けて令和3年4月、戦没者遺骨収集事業において収集した遺骨の鑑
71 定に同位体比分析を応用する具体的方法や、応用にあたっての課題等を議論・
72 検討するため、援護担当審議官の下、「戦没者遺骨収集における同位体比分析
73 の活用に係る検討会」を開催することとし、これまで計4回の議論を行った
74 （令和3年4月12日、同年8月2日、同年10月15日、同年11月22日）。

75 本資料はこれまでの議論の内容をまとめたものであり、本資料の構成は、まず、
76 2において、同位体比分析とは何か、また、同位体比分析に用いる同位体元素の
77 特徴について述べ、次に3において、現在実際に同位体比分析が応用されている
78 事例についていくつか紹介した上で、4において、戦没者遺骨の鑑定プロセスへ
79 の応用についての課題及び方策を述べる構成としている。

80

81 2. 同位体比分析について

82

83 2. 1 同位体比分析の基本

84

85 同位体とは、原子核に含まれる陽子数は同じであるにもかかわらず、中性子数
86 が異なる原子どうしのことをいう。つまり、陽子数は同一であるが中性子数は異
87 なるため、全体の重さ（質量数（陽子数+中性子数））が異なる原子をいう。

88 炭素を例にすると、 ^{12}C 、 ^{13}C 、 ^{14}C の3つの同位体が存在する。この同位体の
89 うち、 ^{12}C 、 ^{13}C は、別の原子に変化しない安定同位体といい、 ^{14}C は、別の原子
90 の窒素に変化する放射性同位体という。

91

92 安定同位体である ^{12}C 、 ^{13}C は、自然界では一定の存在比から構成されている
93 が、生物ではその生物が育った環境や食物の同位体比を反映して僅かに変化す
94 ることが知られている。このため、同位体比をその生物が生息する環境を判別す
95 る指標として用いることができる。この指標を利用した分析法が安定同位体比
96 分析法である。

97 植物の同位体比は、その植物が育った環境の同位体比や光合成のタイプ（C3
98 植物やC4植物など）を反映し、動物の同位体比は、その動物が食べた生物（植
99 物、動物）や摂取した水の同位体比を反映している。

100 つまり、同位体比の構成比を分析することで、例えばその生物の食性や育った
101 地方などの推定が一定程度可能となる。

102

103 また、放射性同位体である ^{14}C の応用例として、年代測定があげられる。年代
104 測定については、後述する。

105

106 同位体比は、僅かな変動をわかりやすく表現するため、 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ を標準物質の
107 同位体の存在比からの差として千分率（単位：‰、パーミル）で表現する。これ
108 は相対的な表現法のため、特定の元素に対し標準物質は原則として同一物質、そ
109 の品質は同等であることが求められる。

110

111
$$\delta^{13}\text{C}_{\text{試料}} = \left[\frac{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{試料}}}{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{標準物質}}} - 1 \right] \times 1000$$

112

113

114 2. 2 主な同位体元素の特徴

115

116 (1) 水素、酸素：水を構成しているH、Oの同位体比について僅かな地域差が
117 生じることから、この水を摂取した生物の水素同位体比(D/H)、酸素同位
118 体比($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$)に各地域の特徴がみられることを利用し、生物がどこで育
119 ったかを推定する。

120

121 (2) 炭素：C3植物(米、麦、芋等)は、C4植物(トウモロコシ、サトウキ
122 び等)よりも炭素同位体比($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$)が小さくなることを利用し、生物が
123 どのような食物を摂取してきたかを推定する。

124

125 (3) 窒素：海産物(魚介類等)を食べると、窒素同位体比($^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$)が高く
126 なる特徴を利用し、生物がどのような食物を摂取してきたかを推定する。

127

128 (4) 硫黄：硫黄同位体比($^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$)は、植物に含まれる硫黄の由来の違いを
129 利用し、生物がどこで育ったかを推定する。

130

131 (5) ストロンチウム：岩石の種類や形成年代により、ストロンチウム同位体比
132 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)の地域多様性が生じる。土壌から水を通じて人体に吸収さ
133 れることから、その土地の地質(岩石)の違いを利用し、生物がどこで育っ
134 たかを推定する。

135

136

137 3. 同位体比分析の応用例

138

139 3. 1 ^{14}C 年代測定

140

141 ^{14}C 年代測定は、放射性同位体である ^{14}C が、大気中において、その存在比が
142 ほぼ一定であることを応用したものである。

143 ^{14}C は動植物の食物連鎖を介して環境中を循環している。動植物は、その生命
144 活動として日々 ^{14}C を取り込んでいる。生命活動停止後は、 ^{14}C は新たに取り込
145 まれることが無くなり、半減期に従い窒素へ変化し減少していく。この減少の割
146 合を利用し、試料の炭素安定同位体比を参照して生前の同位体比のずれを補正
147 した上で、 ^{14}C の半減期から年代を推定している。

148 なお、放射性同位体を用いた年代測定法には、 ^{210}Pb 法など数種類の方法が知
149 られているが、生物遺体の年代測定では ^{14}C 法が一般的である。

150

151 3. 2 食品の産地の判定

152

153 食品の産地の識別法は、植物を構成する炭素、窒素等の安定同位体比の違いを
154 応用したものである。

155 植物は二酸化炭素を吸収し、ブドウ糖や酸素などを生成するための光合成を
156 行っている。この光合成回路は、植物の種類によって異なっているため生成する
157 有機物中の炭素の安定同位体比が異なっている。そのため、炭素の安定同位体比
158 から、原材料を判別することができる。

159 また、生育した水や土壌、肥料などの酸素、窒素等の安定同位体比も、環境に
160 より僅かに異なることから原材料を判別することができる。

161

162 3. 3 禁止物質によるドーピングの識別法

163

164 禁止物質によるドーピングの識別法（尿中のテストステロン（男性ホルモン）
165 による識別）は、安定同位体比分析を応用し、 ^{13}C の含量から識別を行うもので
166 ある。

167 内因性ステロイドは動物性コレステロールを由来としているが、ステロイド
168 薬は主に植物ステロール等を由来としているため、両者の ^{13}C 含量が異なる。

169 つまり、生体内で産生される内因性ステロイドの炭素安定同位体比は年間を
170 通して一定範囲内にあるが、ステロイド薬の服用により内因性ストロイドの炭
171 素安定同位体比と異なる値となる。そのため、ステロイド値の経時的な変動を
172 観察することにより、ドーピングを検出することができる。

173 4. 戦没者遺骨の鑑定分野への同位体比分析の応用について

174
175 戦没者遺骨の鑑定プロセスへの同位体比分析の応用について、現状を把握し
176 た上で課題を整理し、方策案を検討した。

178 4. 1 戦没者遺骨の鑑定プロセスの現状

179
180 戦没者遺骨の遺骨鑑定プロセスの現状は以下のとおり。

181 (1) 遺骨の形質鑑定の結果、日本人の遺骨である蓋然性が高いとされた遺骨
182 から DNA 分析の検体を採取。

183 (2) DNA 分析を実施し、厚生労働省戦没者遺骨鑑定センターの所属集団判
184 定会議において議論を行う。

185 DNA 分析の結果の他、形質鑑定の結果や遺留品情報などに基づき、総
186 合的に所属集団を判定している。

187 (3) 日本人の遺骨であると判断された遺骨を日本に持ち帰る。

188
189 注1：DNA 分析は、主に STR (short tandem repeat) 型を用いている。遺伝子多型の一
190 つである STR 型には、2～5塩基程度の短い塩基配列が繰り返し現れる現象があ
191 り、この短い配列が繰り返される回数に個体差があることを利用した分析法である。
192 また、必要に応じ、次世代シーケンサによる SNP 分析を試験的に実施してい
193 る。

194 注2：厚生労働省戦没者遺骨鑑定センターの身元特定 DNA 鑑定会議において、
195 DNA 分析の結果に基づき、遺骨の身元特定のためのマッチングを行っている。

196
197 なお、沖縄には、古墓（沖縄に古来よりある自然塚等を利用した墓）由来の
198 遺骨が存在するが、これと戦没者遺骨を区別することを目的として、試験的に
199 ¹⁴C年代測定法を用いた分析を行っている。

201 4. 2 現時点において考えられる課題

202
203 同位体比分析を戦没者遺骨の鑑定に応用するにあたっては、検討が必要な事
204 項があり、同位体比分析をどのように応用するのか、また、応用するためにはど
205 のような課題があるのかの整理が必要である。

206 当検討会では、今後検討していくにあたり重要な課題である以下の二点を中
207 心に議論を行った。

208
209 (1) 検体処理に関する標準作業手順書 (SOP : Standard Operating Procedure)

210 (前処理から試料分析に至るプロトコル)の妥当性について

211

212 遺骨である骨や歯の成分は、主にコラーゲン及びハイドロキシアパタイト
213 から構成されているため、これら成分について現在試験的に実施している分
214 析手順を基に検討した。

215

216 ①コラーゲン分析(炭素、窒素、硫黄)

217 ア 前処理(骨、歯象牙質からのコラーゲン抽出)

218 試料の切り出し→クリーニング→有機物除去→脱灰→ゼラチン化→凍結乾
219 燥→秤量及び梱包

220 イ 分析

221 炭素・窒素安定同位体比分析(CN-IRMS)、硫黄安定同位体比分析(S-IRMS)、
222 放射性炭素年代測定(AMS)による分析手順(試料調整、機材設定条件、精
223 度管理、計測値補正方法、等)

224

225 ②ハイドロキシアパタイト分析(ストロンチウム、酸素、炭素)

226 ア 前処理(骨、歯エナメル質に含まれるアパタイトの精製)

227 試料切出し→クリーニング→有機物除去→脂質除去→非アパタイト鉱物の
228 除去

229 イ 分析

230 各種含有元素濃度分析装置(ICP-MS)、ストロンチウム安定同位体比分析
231 (ICP-MS、MC-ICP-MS)、酸素、炭素同位体比分析(炭酸塩・リン酸塩-IRMS)
232 による分析手順(試料調整、機材設定条件、精度管理、計測値補正方法、
233 等)

234

235 コラーゲン及びハイドロキシアパタイト分析について、以下のとおり意見が
236 あった。

237

238 ○基本的には現在のコラーゲン抽出方法で問題ないのではないかと。なお、コラー
239 ゲン前処理工程について、試料量が少なくても硫黄の同位体が測定できる装置
240 が存在する。

241

242 ○ハイドロキシアパタイト前処理工程について、アセトンなどの試薬は、純度の
243 グレードを指定する必要があるのではないかと。

244

245 ○標準品の品質について、NIST(アメリカ国立標準技術研究所)やIAEA(国際
246 原子力機関)などから供給される標準品は国際的に確認されている。当該標準品
247 を使用することで品質が担保できるのではないかと。

248

249 ○ストロンチウム同位体比分析法には、TIMSとMC-ICP-MSの2つの方法があ

250 るが、測定時間の観点から MC-ICP-MS を標準としてはどうか。

251

252

253 (2) 判定基準の妥当性について

254

255 ①年代測定（古墓由来の遺骨の判定）における判定基準

256

257 現状、沖縄で収容された遺骨については古墓由来か否かの判定を、戦史情報
258 (住民証言を含む)、収容場所、収容状況、形質鑑定の結果のほか、試験的に
259 行っている放射性炭素年代測定等の結果を基に実施している。

260 当該取組の判定基準や判定手法について検討を行った結果は以下のとおり。

261

262 ア 放射性炭素年代測定

263 収容状況から戦没者の遺骨であると考えられる遺骨について、¹⁴C
264 年代測定結果より作成した暫定判定基準に基づき判定を行っている。

265 年代測定の判定基準について、以下の意見があった。

266

267 ○古墓由来の遺骨に係る暫定的判定基準については、信頼度を高めるため、古墓
268 由来遺骨の検体及び戦没者遺骨と判断される検体を用いて検証を進めることが
269 必要ではないか。

270

271 イ 炭素・窒素安定同位体比分析（食性分析）

272 文献や考古学的調査等から得られた $\delta^{13}\text{C}$ 及び $\delta^{15}\text{N}$ の分布域とする食
273 性分析を判定の参考としている。

274 同分析については、以下の意見があった。

275

276 ○古墓由来の遺骨の判定手順について、暫定的判定基準より小さい数値の場合
277 の判定は難しいが、時代の変化に伴う食べ物の変化を考えると、炭素窒素同位体
278 比分析による食べ物のデータと埋葬情報から古墓に由来するものの可能性が高
279 いという推定ができる可能性があるのではないか。

280

281

282 ②所属集団判定における判定基準

283

284 日本人の各種元素の安定同位体比の分布域を暫定的な判定基準とし、その分
285 布域に該当するものは日本人遺骨である可能性が高いとする考え方について、
286 以下のとおり意見があった。

287

288 ○日本出身者か否かの基準を考える場合、現地の方ではないと保証するため、日
289 本人データのみならず、現地の方の参照データも必要となるのではないか。現地

290 の方の参照データの入手が困難な場合、伝統的な生活をされていると考えられ
291 る方についての考古学的な研究などの文献情報も集めながら、この対象地域の
292 方の同位体の取り得る範囲というのを推定しながら考えるようなことをすれば
293 有効に区別できる可能性があるのではないか。

294

295 ○幾つかの多元素の同位体を用いて多変量解析を用いることによって、それを
296 用いない場合と比べ、かなり客観的な基準で所属集団を判定できる可能性が高
297 いと考えられる。ただし、それは地域の状況によっては変わり得るため、その調
298 査対象地域の状況をよく把握して判定基準を作るというプロセスが必要になる
299 のではないか。

300

301 ○多変量解析の一つの方法として、公表文献等による判別関数を使用してはど
302 うか。

303

304 ○当検討会では、同位体分析の有効性について、方法としては有効である可能性
305 が示されたが、応用に当たっては同位体分析のみではなく、DNA 分析や収容状
306 況などを踏まえて総合的な判定の中で同位体分析をどのようにどの程度活用す
307 るか、それをさらに議論する必要があるのではないか。

308

309 ○判定基準について、その地域の特徴を踏まえて比較する元素を具体的に検討す
310 ることが必要ではないか。

311

312 ○地域ごとの食生活から当時その地域における同位体比を予測する必要性があ
313 るのではないか。その元素がどこから由来しているかを考える時、食べ物あるい
314 は飲み水を集めて、その元素から人の値を推定することも可能ではないか。その
315 対象地域においてそのデータを集める方法を確立して応用可能性を検証するこ
316 とが、現時点の課題ではないか。

317

318 ○各種元素の同位体比分析についての現状での課題は、応用可能性であり、いか
319 に実用的なプロトコルとフローチャートを作っていくかというところと考える。
320 他の方法等の組合せについても考えた上で、実際的にどのような方法が有効か
321 というのを、何らかの実試料を使ってパイロットスタディ的なものを行うこと
322 が必要ではないか。具体的には、外国の試料を持ってきてそれを判定するという
323 のは容易ではないので、国内で、沖縄の戦没者と考えられている遺骨について、
324 この方法の有効性というのを検証するというをまず初めに始めることができ
325 るのではないか。

326

327 ○パイロットスタディの対象地域については、可能であれば、海外の地域も検討
328 してはどうか。

329

330

331 4. 3 今後の方針

332

333 (1) 現在、沖縄の古墓由来の遺骨と戦没者遺骨を区別することを目的として試
334 験的に¹⁴C年代測定法を用いた分析を行っているが、より精度を高めるため
335 に、以下の点に留意して引き続き研究を行う。

336 また、安定同位体比分析の戦没者遺骨の鑑定への応用可能性については、
337 データ不足などによりまだ検証されていない。今後、検証が行われた後、DNA
338 分析と組み合わせて安定同位体比分析を戦没者遺骨の鑑定プロセスに応用
339 することも必要となる場合があると考えられるため、以下の点に留意して引
340 き続き研究を行う。

341

342

343 ① 年代測定

344 沖縄の古墓由来の遺骨と戦没者遺骨を区別する方法として、試験的に¹⁴C法
345 の年代測定法を用いている。

346 ¹⁴C法を用いた測定は、地球科学や考古学の試料測定などに用いられており、
347 これを遺骨から得た試料に応用することについて検討会では異論はなかった
348 が、暫定基準値 300BP*については更なる信頼性の確保が必要とされた。

349 また、戦没者遺骨を検体としている例が少ないため、再現性など信頼性を確
350 保する必要がある。

351 なお、年代測定の参考として実施している炭素・窒素安定同位体比分析（食
352 性分析）については、戦没者の食習慣を踏まえたデータについて更に収集・精
353 査することが望ましいとされた。

354

355 * BP : Before Present の略。300BP は今から 300 年前の意味。

356

357 ② 所属集団判定

358 所属集団判定への応用については、先に論じた応用例（3. 同位体比分析の
359 応用例）とは以下のとおり相違点があると考えられる。

360 ・ 食品に係る参照データは、植物固有の地域性が変化しないこと、植物種の
361 光合成回路が公知であることなどから収集しやすいため、応用が可能となっ
362 ている。

363 ・ ドーピングの識別については、被験者の経時的な変動比較（普段の状態と

364 の比較)が比較的容易である。

365

366 戦没者遺骨の鑑定への応用については、まず、試行的に特定地域を対象とし、
367 データ収集とともにその応用可能性を検証することが必要と考えられる。

368 その検証結果を踏まえ、所属集団判定に寄与できるかどうかを判断する必要
369 がある。

370

371 (2) 具体的にはこれまでの本検討会での意見を踏まえ、今後、以下の内容の
372 研究に取り組む。

373

374 ① 分析法に係る標準プロトコルの作成

375 ・ 分析法に係る標準プロトコル(標準分析法)を作成する。

376

377 ② 放射性同位体比分析(^{14}C 年代測定)における暫定基準値の検証及び基準
378 値の作成

379 ・ 沖縄の古墓由来の遺骨に関し、現在試験的に実施している取組について、
380 現在の暫定基準値が妥当か、また、この暫定基準値を定めるにあたって使用
381 したデータ(試験条件、生データ、統計処理法など)が妥当か精査を行う。

382 ・ 精査過程で判断した結果、データの品質が十分であれば、既存データから
383 安全域を考慮した基準値を作成する(不十分であれば、新たに実測した結果
384 から参照データを収集する)。

385 ・ 作成した基準値をもって古墓由来の可能性のある遺骨の判定に活用する。
386 必要に応じ基準値を見直す。

387

388

389 ③ 安定同位体比分析の所属集団判定への応用についての検証

390 ・ 戦没者と年齢が近い高齢者の歯牙を収集するなどにより、C・N・O・

391 S・Srの同位体比データを収集する。まずは日本国内の高齢者の歯牙を収
392 集することを進める。将来的には海外において収集することも検討する。

393 ・ データの精査及び基準値の作成を行う。同位体比の分布域を作成し、検証
394 する。

395 ・ 各国の遺骨に関する安定同位体比分析の応用事例を収集する。

396 ・ 対象地域における食物や水由来試料から得られる安定同位体比分布予測モ
397 デルの作成を検討する。

(参考)

戦没者遺骨収集における同位体比分析の活用に係る検討会 構成員

(五十音順、敬称略)

いしだ はじめ 石田 肇	琉球大学大学院医学研究科 人体解剖学講座教授
がくはり たかし 覚張 隆史	金沢大学国際文化資源学研究センター助教
そめだ ひでとし 染田 英利	社会・援護局事業課鑑定調整室事業専門官 (併) 防衛医科大学学校防衛医学研究センター付 (兼) 琉球大学非常勤講師
たやす いちろう 陀安 一郎	総合地球環境学研究所 研究基盤国際センター 教授
よねだ みのる 米田 穰 ○	東京大学 総合研究博物館放射性炭素年代 測定室教授

注) ○は座長