

# 戦没者遺骨収集における同位体分析の 活用に係る検討会報告書

令和3年12月24日

戦没者遺骨収集における同位体分析の活用に係る検討会

## 目次

|                             |   |
|-----------------------------|---|
| 1. 本検討会の背景・目的等について          | 1 |
| 2. 同位体分析について                | 2 |
| 2. 1 同位体分析の基本               |   |
| 2. 2 主な元素の同位体の特徴            |   |
| 3. 同位体分析の応用例について            | 4 |
| 3. 1 放射性炭素年代測定              |   |
| 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分析の応用について | 6 |
| 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

## 1. 本検討会の背景・目的等について

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れ調査等が行われた。

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て」（以下「抜本的な見直し」という。）を報告し、とりまとめた。

そして、同位体分析については、抜本的な見直しにおいて、放射性炭素同位体分析による年代測定（以下「放射性炭素年代測定」という）を必要に応じ実施し活用する、また、所属集団の判定に応用できる可能性があることから安定同位体分析の研究を行っていくとされたところ。

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定に同位体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・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分析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（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）。

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、2において、同位体分析とは何か、また、同位体分析に用いる元素の同位体の特徴について述べ、次に3において、現在実際に同位体分析が応用されている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。

## 2. 同位体分析について

### 2. 1 同位体分析の基本

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。

炭素を例にすると、自然界では<sup>12</sup>C、<sup>13</sup>C、<sup>14</sup>Cの3つの同位体が存在する。この同位体のうち、<sup>12</sup>C、<sup>13</sup>Cは、別の原子に変化しない安定同位体といい、<sup>14</sup>Cは、別の原子の窒素に変化する放射性同位体という。

安定同位体である<sup>12</sup>C、<sup>13</sup>Cは、自然界ではほぼ一定の存在比から構成されているが、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分析法である。

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植物やC4植物など）を反映し、動物の同位体比は、摂取した食物や水の同位体比を反映している。

つまり、同位体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地方などの推定が一定程度可能となる。

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

同位体比は、僅かな変動をわかりやすく表現するため、<sup>13</sup>C/<sup>12</sup>Cを標準物質の同位体の存在比からの差として千分率（‰、パーミル）で表現する。

これ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、その品質は同等であることが求められる。

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

## 2. 2 主な元素の同位体の特徴

### (1) 水素、酸素

水を構成している水素、酸素の同位体比は、僅かな地域差を生じることから、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、生物がどこで育ったかを推定する。

### (2) 炭素

C3 植物 (米、麦、芋等) は、C4 植物 (トウモロコシ、サトウキビ等) 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、生物がどのような食物を摂取してきたかを推定する。

### (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。

### (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利用し、生物がどこで育ったかを推定する。

### (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 ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) の地域多様性が生じる。

土壌から水を通じて生物に吸収されることから、その土地の地質 (岩石) の違いを利用し、生物がどこで育ったかを推定する。

### 3. 同位体分析の応用例について

#### 3. 1 放射性炭素年代測定

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

$^{14}\text{C}$  は生物の食物連鎖を介して環境中を循環している。生物は、その生命活動として日々  $^{14}\text{C}$  を取り込んでいる。

生命活動停止後は、 $^{14}\text{C}$  は新たに取り込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した上で、 $^{14}\text{C}$  の半減期から年代を推定している。

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

#### 3. 2 食品の産地の判定

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応用したものである。

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から、原材料を判別することができる。

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。

#### 3. 3 禁止物質によるドーピングの識別法

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）による識別）は、安定同位体分析を応用し、 $^{13}\text{C}$  の含量から識別を行うものである。

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  $^{13}\text{C}$  含量が異なる。

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。

#### 4. 戦没者遺骨の鑑定分野への同位体分析の応用について

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

##### 4. 1 戦没者遺骨の鑑定プロセスの現状

戦没者遺骨の遺骨鑑定プロセスの現状は以下のとおり。

- (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から DNA 分析の検体を採取。
- (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定会議において議論を行う。  
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、総合的に所属集団を判定。
- (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。

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。

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る。

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、

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。

なお、沖縄には、古墓（沖縄に古来よりある自然壕等を利用した墓）由来の遺骨が存在するが、これと戦没者遺骨を区別することを目的として、試験的に放射性炭素年代測定を用いた分析を行っている。

##### 4. 2 現時点において考えられる課題

同位体分析を戦没者遺骨の鑑定に応用するにあたっては、検討が必要な事項があり、同位体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のような課題があるのかの整理が必要である。

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



心に議論を行った。

(1) 検体処理に関するプロトコル（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

遺骨（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析手順を基に検討した。

① コラーゲン分析（炭素、窒素、硫黄）

ア 前処理（骨、歯象牙質からのコラーゲン抽出）

試料切出し→クリーニング→有機物除去→脱灰→ゼラチン化  
→凍結乾燥→秤量及び梱包

イ 分析

炭素・窒素安定同位体分析 (CN-IRMS)、硫黄安定同位体分析 (S-IRMS)、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、精度管理、計測値補正方法 等）

② ハイドロキシアパタイト分析（炭素、酸素、ストロンチウム）

ア 前処理（骨、歯エナメル質に含まれるアパタイト精製）

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  
鉱物の除去

イ 分析

各種含有元素濃度分析装置 (ICP-MS)、炭素・酸素同位体分析（炭酸塩・リン酸塩-IRMS）、ストロンチウム安定同位体分析 (MC-ICP-MS) 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 等）

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あった。

- 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。なお、試料量が少なくても可能な測定方法を用いることが望ましい。

- 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、純度のグレードを指定する必要があるのではないか。
- 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。当該標準品を使用することで品質が担保できるのではないか。
- ストロンチウム同位体分析法には、TIMS と MC-ICP-MS の2つの方法があるが、測定時間の観点から MC-ICP-MS を標準としてはどうか。

(2) 判定基準の妥当性について

① 年代測定（古墓由来の遺骨の判定）における判定基準

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（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。

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。

ア 放射性炭素年代測定

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、放射性炭素年代測定結果より作成した暫定基準値に基づき判定を行っている。

年代測定の判定基準について、以下の意見があった。

- 古墓由来の遺骨に係る暫定基準値については、信頼度を高めるため、古墓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必要ではないか。

イ 炭素・窒素安定同位体分析（食性分析）

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

同分析については、以下の意見があった。

- 古墓由来の遺骨の判定手順について、暫定基準値より小さい数値

の場合の判定は難しいが、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いという推定ができる可能性があるのではないか。

## ② 所属集団判定における判定基準

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、以下のとおり意見があった。

- 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有効に区別できる可能性があるのではないか。

- 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のではないか。

- 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はどうか。

- 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どの程度活用するか、それをさらに議論する必要があるのではないか。

- 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

検討することが必要ではないか。

- 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とが、現時点の課題ではないか。

- 各種元素の同位体分析についての現状での課題は、応用可能性であり、いか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。

他の方法等の組合せについても考えた上で、実際にどのような方法が有効かを、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、この方法の有効性の検証をまず始めることができるのではないか。

- 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（例えば南方地域）も検討してはどうか。

#### 4. 3 今後の方針

- (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験的に放射性炭素年代測定を用いた分析を行っているが、より精度を高めるために、以下の点に留意して引き続き研究を行う。

また、安定同位体分析の戦没者遺骨の鑑定への応用可能性については、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 分析と組み合わせて安定同位体分析を戦没者遺骨の鑑定プロセスに応用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き続き研究を行う。

##### ① 年代測定

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、試験的に放射性炭素年代測定を用いている。

放射性炭素年代測定は、地球科学や考古学の試料測定などに用いられており、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。

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保する必要がある。

なお、年代測定の参考として実施している炭素・窒素安定同位体分析（食性分析）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・精査することが望ましいとされた。

\* BP : Before Physics の略。300BP は 1950 年（放射性炭素年代測定が考案された年）から 300 年前の意味。

## ② 所属集団判定

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

- 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、応用が可能となっている。

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、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。

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がある。

(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、以下の内容の研究に取り組む。

### ① 分析法に係る標準プロトコルの作成

- 分析法に係る標準プロトコル（標準分析法）（歯・骨）を作成する。

### ② 放射性炭素年代測定における暫定基準値の検証及び基準値の作成

- 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、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。
  - 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から参照データを収集する）。
  - 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。必要に応じ基準値を見直す。
- ③ 安定同位体分析の所属集団判定への応用についての検証
- 歯牙を収集するなどにより、炭素、窒素、酸素、硫黄、ストロンチウム等の同位体比データを収集する。  
日本人についてのデータの精査及び収集を行い、同位体比の分布域図及び基準値を作成し、基準値の有効性を検証する。  
また、パイロットスタディとして海外の地域（例えば南方地域）においても取組を進める。
  - 各国の遺骨に関する安定同位体分析の応用事例を収集する。
  - 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<br>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<br>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<br>染田 英利 | 社会・援護局事業課戦没者遺骨鑑定推進室事業専門官<br>(併) 防衛医科大学校防衛医学研究センター付<br>(兼) 琉球大学非常勤講師 |
| たやす いちろう<br>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<br>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