

# 白亜紀国際標準年代モデルを日本の地層から樹立する

高嶋 礼詩  
Takashima Reishi

## 1. 地質年代とは何か

ティラノサウルスをインターネットで検索すると、その生息時期について、「白亜紀マーストリヒチアン期の7270万年～6600万年前」と表記されている。ここで示されている「白亜紀」や「マーストリヒチアン期」が地質年代、「7270万年前～6600万年前」が数値年代とよばれる。地質年代とは、地球の歴史をいくつかの時代に区分したもので、その区分にも5つの階層があり、最も大きな区分は「累代」、次いで「代」、「紀」、「世」があり、最も基本的な（最小単位の）区分として「期」がある（図1<sup>1)</sup>）。本論の対象とする白亜紀という時代は、中生代に属し、12の期から構成される（図1右）。地質年代表における年代区分は、基本的に化石種の入れ替わりで伝統的に区分されており、階層の上位の区分境界ほど、大規模な生物の入れ替わり（絶滅事変）を伴っている。

このような地質年代の区分の原理は、例えば江戸時代と明治時代のように、統治システムの違いで歴史年表の時代が区分されていることと類似する。ただし、歴史年表は国・地域ごとに異なる時代区分であるのに対して、地質年代は世界共通の時代区分である。そのため、国際的な取り決めと合意を基に統一されており、合意の際に、各年代（最小単位である「期」）の境界（厳密にはある年代の下限）の基準となる地層がそれぞれ世界で1つだけ選定され、これをGSSP(Global Boundary Stratotype Section and Point：国際標準模式断面及び地点)とよぶ。日本の地層では、千葉県養老川流域の地層が、第四紀チバニアン期のGSSPとして2020年に採択されている。

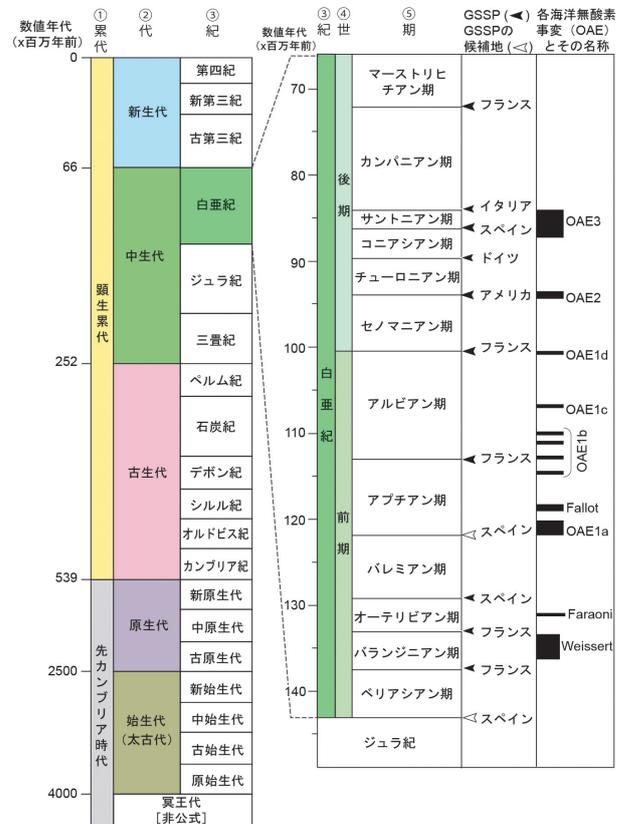


図1 地質年代表（左）と白亜紀の地質年代表及びGSSPの所在地と海洋無酸素事変の発生時期（右）

①～⑤は各階層の地質年代区分

地質年代表のそれぞれの年代境界には、現在（厳密には西暦2000年）から何年前なのかという数値による年代（数値年代）が決められている。ちょうど、江戸時代が「徳川家康の征夷大将軍への任命から明治改元の詔まで」と定義される場合、江戸時代の開始と終焉の数値年代はそれぞれ「西暦1603年3月24日」及び「西暦1868年10月23日」となる。

地質年代の場合、前述したように基本的には地層中における化石を基に境界が決められるが、化石そのもので数値年代を決めることはできない。そこで、化石で決められた地層中の年代境界面に対して、様々な年代測定方法を用いて数値年代を求める研究が盛んに行われてきた。地層の数値年代を求める手法の代表的なものとして、原子核崩壊による核種変化を利用する放射年代測定法が挙げられる。数百万年前～数十億年前という時間を対象とした場合、放射年代の測定は、火山噴出物に含まれる結晶中の元素を分析対象とすることが多い。そのため、化石によって年代境界が決定された地層において、火山噴出物も挟まれることが必要とされる。

## 2. 白亜紀の重要性と白亜紀の年代モデルの問題点

ここで、白亜紀という年代の重要性を解説する。白亜紀は地球史の中でも最も温暖化した時代の1つである。とりわけ、白亜紀には巨大な火山噴火が何度か発生しており、この火山噴火によって、大量の二酸化炭素が放出され、急激な温暖化が起こった。急激な温暖化は海洋の深層循環を弱めると共に、湿潤化による陸から海への栄養塩流出の急増を引き起こした。その結果、世界各地の海洋底で無酸素環境が拡大し、海洋生物の大量絶滅が起こった。この事件は「海洋無酸素事変」と名付けられており、白亜紀には、規模の大小はあるものの、10回近く発生した(図1)<sup>2)</sup>。また、生物の大量絶滅を伴うことから、「期」の境界ともおおむね一致する。海洋無酸素事変は、急激な温暖化に伴われるため、現在進行している地球温暖化が引き起こす可能性のある環境変動として盛んに研究されてきた。しかし、白亜紀の数値年代モデルが不十分なことから、火山噴火と海洋無酸素事変の同時性や、海洋における無酸素水塊の発達から海洋生物の絶滅に至る時間的なプロセスを十分に議論できなかった。

前述したように白亜紀は12の期から構成されるが、これらの「期」の境界認定の基準となるGSSPはほとんどがヨーロッパの地層である(図1右)。その理由は伝統的にヨーロッパで白亜紀の地層・化石の研究が盛んに行われてきたことと、これらの地域では化石が豊富に産出することに由来する。しかし、ヨーロッパ周辺は、白亜紀に火山活動がほとんどな

かったために、各年代境界を含む地層には、放射年代を測定することが可能な火山噴出物が挟まらない。このため、ヨーロッパ各地の地層では、各年代の境界は厳密に決定されているが、その境界の数値年代の確度や精度には大きな問題点が残されている<sup>3)</sup>。

## 3. 北海道の白亜紀の地層の重要性

北海道には蝦夷層群と名付けられた厚さ10000mにも達する地層が露出する。この地層は、白亜紀当時、アジア大陸の東縁の太平洋北西部の海底で泥や砂が堆積してできたと考えられ、アンモナイト、イノセラムス等の海洋生物の化石が多産する。また、アジア大陸東縁に沿った火山弧から頻繁に火山灰が飛来したために、この地層は火山灰層を数多く挟む。ただし、この地層から産出する化石に関しては、地理的な違いにより、ヨーロッパと共通の化石種が豊富に産出するというわけではなく、化石を用いた対比だけでは各年代の境界を高い精度で決めることができなかった。しかし近年、化石層序に加えて化学層序という手法によって、離れた地域間の地層の対比が高解像度で可能となった。化学層序とは、堆積岩(主に泥岩、石灰岩、泥灰岩)に含まれる元素の含有量あるいは元素の同位体比に基づいて、異なる地域の地層を対比する方法で、白亜紀の地層では安定炭素同位体比( $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ )<sup>注1</sup>やオスミウム同位体比( $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ )<sup>注2</sup>がよく使われる。これらは、大気-海洋の安定炭素の同位体比や海洋のオスミウム同位体比が時代によって大きく変動してきたをこと利用し、堆積岩中に記録された過去の同位体比の変動パターンを比較することによって、各地域の地層の同

注1 安定炭素同位体比：炭素12と炭素13の比で、堆積物中の有機物や炭酸塩化石等に当時の地球表層の安定炭素同位体比の変動が記録されているため、地層の対比にも利用される。海洋無酸素事変で大量の有機炭素が堆積物中に埋没すると、地層に記録された炭素同位体比( $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ )は大きくなるため、海洋無酸素事変の指標となる。OAE1a層は炭素同位体比の大規模な増加によって特徴づけられる。

注2 オスミウム同位体比：マントル由来の火噴出物が海底での火山噴火によって大量に放出されると、全海洋の海水のオスミウム同位体比( $^{188}\text{Os}/^{187}\text{Os}$ )が大きく減少する。このような変動は地層の中にも記録され、世界各地の海で形成された地層の対比だけでなく、過去の火山活動の変化を復元することが可能である。OAE1a層の最下部は、オスミウム同位体比の急激な減少によって特徴づけられることから、大規模な火山活動の存在が示唆される。

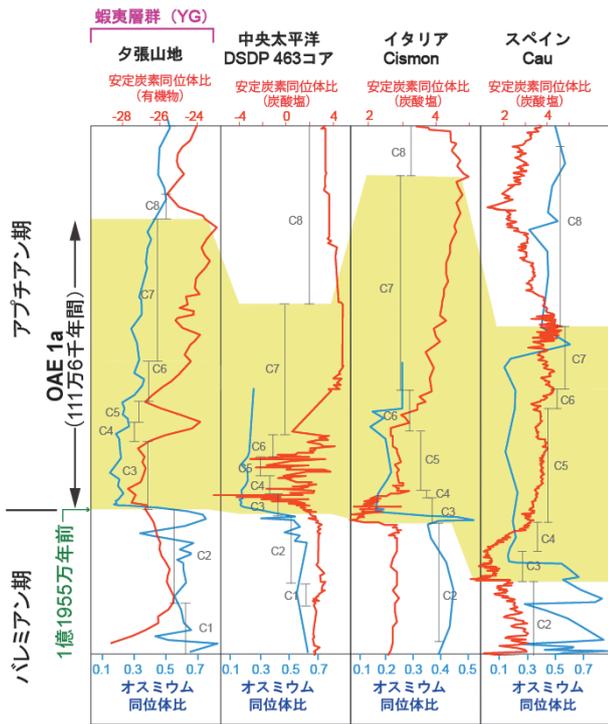


図2 安定炭素同位体比とオスミウム同位体比に基づく白亜紀アプチアン前期の地層の対比

日本、中央太平洋、ヨーロッパで類似した変動曲線を示す(参考文献5)を改変)

時間面を対比する方法である。化石層序の場合、地層から年代決定に有効な化石種が必ずしも連続的に出てくるとは限らない。一方で、化学層序の場合、化石の有無に関係なく堆積岩の場合はほぼ連続した記録を得ることができる。そこで、従来の化石による対比に加えて、このような同位体比の変動に基づく地層の対比を行うことにより、日本の地層においてもヨーロッパで決められた年代の境界を正確に決定できるようになった(図2)。そして、蝦夷層群には白亜紀の多くの「期」の境界の地層に火山灰層が挟まっていることが明らかになった(図3)<sup>4)</sup>。

#### 4. 北海道の地層から明らかになった白亜紀の数値年代モデル

2018年にアメリカのWisconsin大学Madison校のBradley Singer教授と著者を中心とした研究チームが結成され、米国National Science Foundation及び日本学術振興会の助成を受けて、白亜紀のパレミアン期／アプチアン期境界時期に発生した海洋無酸素事変OAE1aと、白亜紀の前期と後期の境界である、

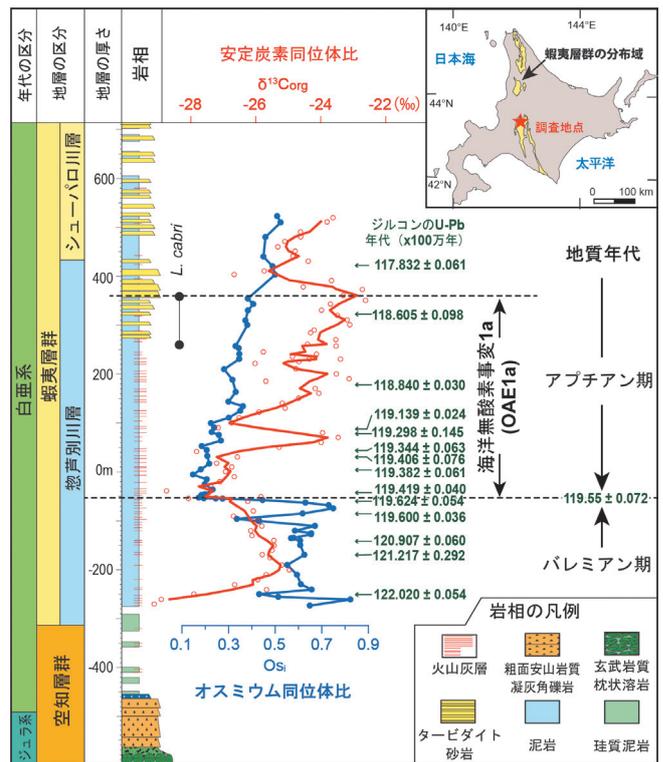


図3 北海道夕張山地西斜面に露出する蝦夷層群下部の安定炭素・オスミウム同位体比層序とパレミアン／アプチアン期の境界及び海洋無酸素事変OAE1a層の層序学的位置

火山灰層のジルコンのウラン-鉛放射年代から、OAE1aの開始年代(=パレミアン期／アプチアン期境界の年代)とOAE1aの終了年代が算出された(参考文献5)を改変)

アルビアン期／セノマニアン期の境界の数値年代の決定を行うプロジェクトを立ち上げた。このプロジェクトでは、北海道夕張山地と天塩山地に露出する蝦夷層群の下部と中部を対象に、泥岩及び火山灰層の試料採集を実施した。しかし当プロジェクトの予算が承認された2019年には新型コロナウイルスのパンデミックが始まったため、試料採集の大部分は日本側のチームによって行われた。2020年より日本側のチームで野外調査と試料採集が開始され、2023年8月により海外研究者の来日と共同野外調査が実現した。夕張山地の調査は特に山が深く、ヒグマが多数生息する山中で、連続する滝を乗り越えての過酷な調査であるが、全員無事、調査を終えることができた(図4)。採取された泥岩試料は安定炭素同位体比とオスミウム同位体比の測定及び微化石の検討に用いられ、火山灰層からはジルコン<sup>注3)</sup>

注3 ジルコン:  $ZrSiO_4$ で表されるケイ酸塩鉱物。ウラン、トリウムを豊富に含み、鉛に乏しいため、ウラン-鉛放射年代測定の対象となる鉱物。

及びサニディン<sup>注4</sup>が抽出され、ジルコンに対しては Boise State University (米) の Mark Schmitz 教授によりウラン-鉛 (U-Pb) 放射年代測定<sup>注5</sup>, サニディンに対しては Wisconsin 大学 Madison 校の Bradley Singer 教授によりアルゴン-アルゴン (<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar) 放射年代測定<sup>注6</sup>が実施された。一方、オスミウム同位体比は英国 Durham 大学の David Selby 教授, 炭素同位体比と微化石については筆者を中心とした日本のチームにより検討された。

バレミアン期/アプチアン期の境界については、近年、アプチアン期初期に起こった海洋無酸素事変「OAE1a」の開始時期に設定することが国際層序委員会のアプチアンのワーキンググループによって提案されている(図1)。このOAE1aの開始時期については、1億2550万年前とする考えと、1億2100万年前とする2つの見解があり、450万年もの相違があった<sup>3)</sup>。一方で、この事変の発生期間(海洋に広く無酸素環境が発達した時期)はおおよそ100万年間という点では一致していた。しかし、本研究の結果、OAE1aは1億1955万年前に発生し、111.6万年間継続した後、終了したことが判明した(図3)<sup>3)</sup>。今回の結果は、論争が続いてきたOAE1a(=バレミアン期/アプチアン期境界)の年代を解決しただけでなく、その継続期間の精度を大幅に向上させることができた。

白亜紀の前期/後期の境界であるアルビアン期/セノマニアン期の境界期には、アフリカと南米大陸が分裂し、南北大西洋がつながって1つの巨大な海洋(大西洋)が出現したことが知られている<sup>2)</sup>。この変動によって、地球全体の海洋の表層・深層循環に大きな変革が起きたと考えられるため、この時期の正確な年代モデルの構築は重要である。この境界期に形成された地層の中で、火山灰層を挟む地層は現在のところ北米大陸内陸部と北海道でしか知られ



図4 北海道夕張山地西斜面に露出する蝦夷層群における日米合同チームの調査風景

地殻変動により地層が垂直に立っているため、垂直の滝が連続する

ていない<sup>6)</sup>。しかし、北米大陸ではセノマニアン期の地層からしか火山灰層が見つかっておらず、アルビアン期からセノマニアン期にまたがる区間で複数の火山灰層を挟むのは北海道の蝦夷層群のみである。本研究プロジェクトにより、北海道幌加内町の天塩山地の奥地に分布する火山灰層の分析結果と化石や安定炭素同位体比層序によって、この境界の年代は、1億63万年前であることが明らかになった。これは、最新の国際地質年代尺度で示されていた1億50万年前より<sup>1)</sup>、わずかに古いことが判明した<sup>7)</sup>。

## 5. おわりに

地球史の歴史年表である地質年代尺度は、1816年のウィリアム・スミスによる化石を用いた地層の対比方法の発見以来、先人たちが長い年月をかけて化石の詳細な分類と比較を基に作成されてきた。一方、放射性同位体による年代決定法により、地質年代尺度に放射年代による数値年代軸を入れることが可能になったのは1950年代以降と、比較的最近である<sup>8)</sup>。近年、放射年代測定に使用する質量分析計の測定精度が著しく進展し、同時に、国際的な枠組みで地質年代の境界の定義がより厳密に決定されるようになってきた。このような背景から、火山灰層を多く挟むという日本の地層は、白亜紀のみならず他の地質年代の数値年代の決定に大きな役割を果たすことが期待される。

注4 サニディン：(K,Na)AlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>で表される長石グループのケイ酸塩鉱物。アルゴン-アルゴン放射年代測定の対象となる鉱物。

注5 U-Pb放射年代測定法：放射性物質であるウラン(U)の原子核が崩壊し、最終的に鉛(Pb)の原子核に変化することを利用して、年代を測定する方法。特に<sup>238</sup>Uと<sup>206</sup>Pb、<sup>235</sup>Uと<sup>207</sup>Pbの2組の同位体比が利用される。

注6 アルゴン-アルゴン放射年代測定法：原子炉内で試料に中性子を照射することで試料中のKの一部を<sup>39</sup>Arに変換し、鉱物内部のK起源の<sup>39</sup>Arと放射壊変起源<sup>40</sup>Arとの同位体比から年代を求める。

---

## 参考文献

---

- 1) Gradstein, *et al.*, *Geologic Time Scale 2020* (2020)
- 2) 高嶋礼詩・安藤寿男編, 恐竜の時代 中生代 (2025)
- 3) Erba, *et al.*, *Geological Society of America* **511** (2015)
- 4) Takashima, *et al.*, *Newsletters on stratigraphy*, **52/3**, 341-376 (2019)
- 5) Li, *et al.*, *Science Advances* **10**, eadn8365 (2024)
- 6) Singer, *et al.*, *Geological Society of America Bulletin*, **133**, 1665-1678 (2021)
- 7) Singer, *et al.*, *Geological Society of America Bulletin*, in press
- 8) 兼岡一郎, 年代測定概論 (1998)

(東北大学総合学術博物館)