

プレスリリース

令和7年12月12日

各報道機関 御中

山梨大学
広島大学
国立遺伝学研究所
国立科学博物館

ナウマンゾウの古代DNA解析に成功

～ユーラシア最古のパレオロクソドンの系統であることが判明～

山梨大学総合分析実験センターの瀬川高弘講師、秋好歩美技能補佐員、広島大学大学院統合生命科学研究科の米澤隆弘教授、国立遺伝学研究所の森宙史准教授、国立科学博物館生命史研究部の甲能直樹部長らによる国際研究チームは、日本列島に生息していた絶滅ゾウ「ナウマンゾウ」(*Palaeoloxodon naumanni*)の化石から、世界で初めて古代DNA解析に成功しました。

ナウマンゾウは、約2万2千年前に絶滅したと考えられており、日本全国約300ヶ所から2千点を超える化石が発見されている、日本で最も豊富に見つかる絶滅大型哺乳類の一つです。ナウマンゾウが属するパレオロクソドン属（直牙象）は、更新世にユーラシア全域に広がった絶滅ゾウ類です。しかし、これまでアジアからの古代DNA解析は成功しておらず、ユーラシア全域でのパレオロクソドンゾウの進化史には大きな空白がありました。特にナウマンゾウはどのような系統に属するのか、全く分かっていませんでした。

本研究では、青森県で発見されたナウマンゾウの臼歯化石2点（約4万9千年前と約3万4千年前）からミトコンドリアゲノムの解析に成功しました。これは日本国内最古の化石標本からの古代DNA研究となります。



図1：ナウマンゾウの生体復元図

今回の研究成果を踏まえて復元された最新のナウマンゾウの生体復元。頭部はオスの頭骨化石、体の骨格は複数個体の化石標本を参考に描かれている。背景には当時日本列島に共存していた巨大なシカ（ヤベオオツノジカ）も描かれている。（復元画制作：府高航平氏）

その結果、ナウマンゾウは約105万年前に分岐したユーラシアで最も古い直牙象の系統であり、原始的な「シュトゥットガルト型」の頭骨の特徴を保ったまま日本列島で長期間生き延びたことが明らかになりました。大陸では派生的な「ナマディクス型」の頭骨を持つゾウに置き換わりましたが、日本列島では地理的隔離により原始的な形態が保持され、日本列島がレフュジア（古い系統が生き残る特別な環境）として機能していたことが改めて実証されました。

■ 研究の背景

パレオロクソドン（直牙象）とは

パレオロクソドン属のゾウは、更新世のユーラシアで最も繁栄した大型植物食哺乳類の一つでした。アフリカで生まれた後、（遅くとも）約78万年前にユーラシアに進出し、ヨーロッパから東アジアまで広く分布しました。

近年の古代DNA研究により、パレオロクソドンは複雑な起源を持つことが明らかになってきました。遺伝情報の解析から、パレオロクソドンは主にアフリカゾウ属を祖先とし、そこにマルミミゾウやマンモスとの交雑（異なる種が交配すること）が加わって成立したことが示されています。また、母系で伝わるミトコンドリアDNAは完全にマルミミゾウ由来のものに置き換わっており、パレオロクソドンは、この中でNNグループ（ノイマルク・ノルト・グループ）とWEグループ（ワイマー・エーリングスドルフ・グループ）という2つの主要な母系系統が確認されています。しかし、これまでDNA情報が得られていたのはヨーロッパの標本が中心で、アジアからは中国河北省の（アジアゾウのものと思われていた）歯の化石から得られた配列のみでした。そのためアジアのパレオロクソドン、特に日本のナウマンゾウの進化系統上の位置づけは全く不明でした。

2つの頭骨形態：「シュトゥットガルト型」と「ナマディクス型」

形態学的な研究から、パレオロクソドンには原始的な「シュトゥットガルト型」（頭の骨の隆起が弱い）と、派生的な「ナマディクス型」（頭の骨の隆起が強い）という2つの頭骨形態があり、その関係について長年論争が続いていました（図2）。

「シュトゥットガルト型」（原始的）：頭の後ろの骨の隆起（頭頂後頭稜）の発達が弱く、頭骨が高い形。ナウマンゾウと中央アジアの*P. turkmenicus*がこのタイプ。

「ナマディクス型」（派生的）：頭頂後頭稜が強く発達し前方に張り出す形。ヨーロッパの*P. antiquus*とインドの*P. namadicus*がこのタイプ。

これらの形の違いが別の種を表すのか、成長段階や個体差なのかについては議論が続いていましたが、「シュトゥットガルト型」を示す標本からのDNA情報が全く得られていなかったため、遺伝学的な検証ができませんでした。ナウマンゾウは「シュトゥットガルト型」を示すアジアのパレオロクソドンでしたが、DNA情報がないため進化系統上の位置づけは不明でした。

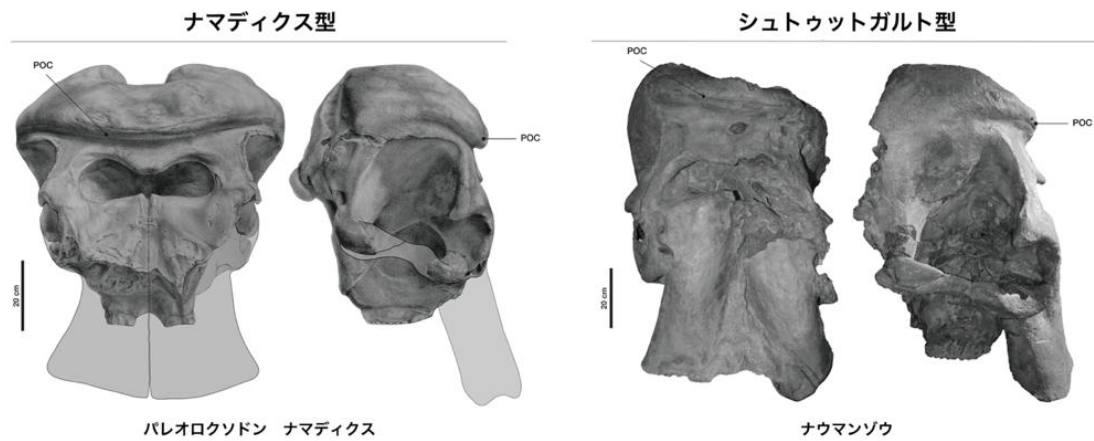


図2：パレオロクソドンの2つの頭骨形態。右：原始的な「シュトゥットガルト型」（ナウマンゾウ）、左：派生的な「ナマディクス型」（ヨーロッパの*P. antiquus*に相当）。頭頂後頭稜の発達の違いが明瞭である。

■ 研究の成果

（1）日本の厳しい環境下での古代DNA解析成功

本研究では、青森県立郷土館などが所蔵するナウマンゾウ化石4個体を対象に古代DNA抽出を試みました。日本は高温多湿でDNAの保存に極めて不利な環境であるため、技術的に非常に困難でしたが、そのうち特に保存の良かった2個体の臼歯の象牙質からミトコンドリアDNA配列を検出することに成功しました。解析に成功した2個体の年代は、約4万9千年前と約3万4千年前であり、日本国内最古の化石標本からの古代DNA研究となりました。特に約4万9千年前の標本からのDNA抽出は、日本の高温多湿という保存に極めて不利な環境を考えると、技術的に画期的な成果です。通常の方法だけでは十分な量のDNA情報が得られなかったため、特定のDNA領域を集中的に増やす「myBaitsキャプチャ法」という最新技術を使用しました。その結果、両個体のミトコンドリアゲノムのドラフト配列を再構築することに成功しました。

（2）ナウマンゾウは最も古い系統だった

2個体のナウマンゾウのミトコンドリアゲノムのドラフト配列を用いて、他のゾウ類との系統的な関係を解析しました。その結果、2個体のナウマンゾウは一つのまとまった系統を形成し、さらにドイツや中国のパレオロクソドンとともにユーラシア全域に広がるWEグループを形成することが示されました。しかしナウマンゾウのDNAは、非常に厳しい環境下で数万年間埋蔵されていたためDNAの損傷が激しく、このドラフト配列そのものから分岐年代を推定することは困難でした。そこで本研究では、まず2個体のナウマンゾウの共通祖先のDNA配列を再構築し、この共通祖先配列を用いて分岐年代推定を行うという新規の解析手法を提案しました。これにより、損傷の激しいDNA配列からも信頼性の高い分岐年代を推定できるようになりました。

重要な発見：ナウマンゾウはこのWEグループの中で最も早く分かれた系統であることが明らかになりました。詳細な年代推定から、ナウマンゾウ系統がWEグループの他の系統から分岐した時期は約105万年前と推定されました（図3）。この発見は、従来の理解を大きく覆すものです。これまでナウマンゾウは、パレオロクソドンの中で比較的新しい時期に分岐した系統であり、日本列島に隔離された後、島嶼化の影響で小型化したと考えられていました。しかし今回のDNA解析により、ナウマンゾウは実際には最初期に分岐した原始的な系統であり、約105万年前という非常に早い段階で既に東アジアの縁辺にまで到達していたことが判明したのです。

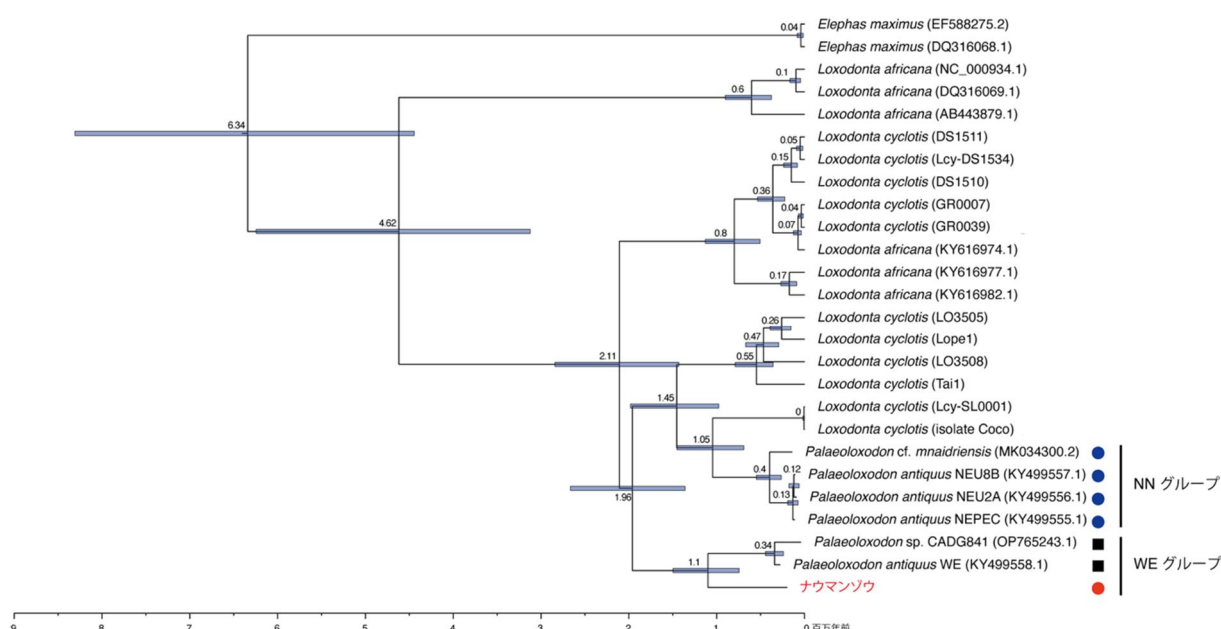


図3：パレオロクソドンの系統樹と分岐年代。色は頭骨の形態を示す：赤＝原始的なシュトゥットガルト型、青＝ナマディクス型、黒＝形態型不明。ナウマンゾウ（赤）はWEグループに属し、約105万年前に分岐した最古の系統である。

(3) 「シュトゥットガルト型」を遺伝学的に初めて確認

一方、これまでDNA情報が得られていた派生的な「ナマディクス型」の標本（シチリア島やドイツのもの）は、すべてNNグループに属していました。NNグループの共通祖先は約39万年前と推定されています。

「ナマディクス型」の最古の確実な化石記録は、ギリシャから見つかった約48万～42万年前のものです。これらの年代から、派生的な「ナマディクス型」は中期更新世（約77万～13万年前）のヨーロッパで出現し、その後にアジアにも広がったことが分かります。

(4) 時系列で見るナウマンゾウの進化

今回の研究結果から推定されるナウマンゾウの進化史は次のようになります：

約105万年前：パレオロクソドンがアフリカからユーラシアに進出後まもなく、東アジアを含む広い範囲に拡散しました。この初期の拡散集団から、日本列島に入った系統（ナウマンゾウの祖先）と、大陸に残った系統が分かれました。

約105万年前～2万2千年前：日本列島に入ったゾウは、島の環境で大陸から地理的に隔離され、独自の進化を遂げました。原始的な「シュトゥットガルト型」の頭骨を保ったまま、古い系統の生き残り（遺存固有種）として後期更新世まで生存しました。

約48万年前以降：ユーラシア大陸では、派生的な「ナマディクス型」がヨーロッパで出現し、その後東アジアにも広がりました。中国の後期更新世の地層から見つかった頭骨も「ナマディクス型」です。

約2万2千年前：ナウマンゾウが絶滅しました。地理的な隔離により、大陸の派生的な「ナマディクス型」集団による置き換えを免れ、絶滅するまで変わらず原始的な形を保ち続けていました。

このように、ナウマンゾウは東アジアへの原始的な「シュトゥットガルト型」の早期拡散を示す証拠であり、その後大陸では派生的な「ナマディクス型」集団に置き換わっていったと考えられます。

・本研究の意義

(1) 日本列島がレフュジア（古い系統が残る特別な環境）であったことを実証

日本列島は、基本的にユーラシア大陸から隔離された島弧でありながら、氷期の海水準低下期に断続的に陸続きになるという特殊な地理的環境です。この「半隔離状態」が、古い系統の保存や独自の進化を促進してきたことが、ナウマンゾウの例からも実証されました。ナウマンゾウは約105万年前以降に日本列島に到達した後、地理的隔離により大陸集団とは独立した進化を遂げ、大陸では失われた原始的な特徴を保ち続けた「生きた化石」だったのです。

こうした環境であったからこそ、今回の成果は大陸集団では検出できない時間軸を伴った生物地理学的な挙動まで解明できたと言えます。後期更新世まで（約1万2千年前以前）の日本列島には、更新世オオカミ、ヒグマ、バイソン、オオツノジカ、ヘラジカ、トラといった様々な大型哺乳類が生息していました。それらは大陸から断続的に渡来した結果、「重層的」に集団の置き換えが起こった歴史を持つ可能性があり、今後の古代DNA研究の最も重要なテーマの一つになると考えられます。

(2) ユーラシア全域のゾウ進化史の空白を埋めた

これまでアジアのパレオロクソドンのDNA情報はほとんどありませんでした。今回のナウマンゾウのDNA解析により、ユーラシア全域でのゾウの進化の流れが初めて明らかになりました。

(3) 形態の違いの意味を遺伝学的に解明

長年議論されてきた「シュトゥットガルト型」と「ナマディクス型」の関係について、遺伝学的な証拠を初めて提供しました。これらは単なる成長段階の違いではなく、進化の異なる段階を表していることが示されました。今回のDNA解析により、ナウマンゾウがWEグループの最古の系統であることが判明したことで、近縁種との比較から最新の生体復元が可能になりました。DNA情報から推定される系統関係に基づき、牙の形状、背中の輪郭といった従来の化石証拠だけではなく、これまで不確定だった耳の大きさや形状についても、より科学的根拠のある復元が実現しました。これにより、ナウマンゾウの生きていた姿をより正確に再現できるようになりました。

・今後の展開

本研究により、ナウマンゾウがユーラシアのパレオロクソドン進化史における重要な位置を占めることが明らかになりました。しかし、今回解析したのは母親から受け継がれるミトコンドリアDNAのみです。今後、核ゲノムDNA（両親から受け継がれる全ての遺伝情報）の解析が実現すれば、以下の重要な疑問に答えることができると期待されます：

- ・ユーラシアのパレオロクソドンは一度の交雑で成立したのか、それとも複数回の独立した交雑があったのか
- ・NNグループとWEグループは核ゲノムレベルでどのような関係にあるのか
- ・ナウマンゾウはなぜ絶滅したのか、その遺伝学的な要因は何か

今後、DNA抽出技術の向上や堆積物に含まれるDNAを分析する新技術の発展により、より多くのナウマンゾウ標本や他の日本の更新世哺乳類からの古代DNA解析が進むことが期待されます。これにより、日本列島における哺乳類相の成立史がさらに詳しく解明されるでしょう。

・用語説明

(1) **パレオロクソドン (*Palaeoloxodon*)**：更新世にアフリカとユーラシアに広く分布した絶滅ゾウ類の仲間。直牙象（ちょくがぞう）とも呼ばれます。まっすぐな牙を持つことが特徴です。ヨーロッパの*P. antiquus*、インドの*P. namadicus*、日本の*P. naumanni*（ナウマンゾウ）などが含まれます。

(2) **更新世**：地質時代の区分の一つで、約258万年前～約1万2千年前までの期間。氷期（氷河期）と間氷期（温暖期）が繰り返された時代です。マンモスやナウマン

ゾウなどの大型哺乳類が栄えました。

(3) **古代DNA解析**：化石など古い時代の生物に残された微量のDNA配列を解析する手法。近年の技術発展により、様々な絶滅生物の進化を明らかにできるようになりました。

(4) **ミトコンドリアDNA**：細胞の中のエネルギーを作る小器官（ミトコンドリア）に含まれるDNA。母親からのみ受け継がれ、核DNAより多くのコピーが存在するため、古代DNA研究に適しています。母系の進化の歴史を知ることができます。

(5) **WEグループ (WEクレード)**：ドイツのワイマール・エーリングスドルフで見つかった標本を基準に定義されたパレオロクソドンのミトコンドリアDNA系統群。ヨーロッパから中国、日本まで広く分布します。

(6) **NNグループ (NNクレード)**：ドイツのノイマルク・ノルトで見つかった標本を基準に定義されたパレオロクソドンのもう一つのミトコンドリアDNA系統群。主にヨーロッパで見つかっています。

(7) **頭頂後頭稜 (とうちょうこうとうりょう、POC)**：頭骨の後ろの部分にある骨の隆起。パレオロクソドンでは「シュトゥットガルト型」で弱く、「ナマディクス型」で強く発達します。この違いが頭骨の形の大きな特徴となっています。

(8) **myBaitsキャプチャ法**：目的とするDNA領域だけを選択的に集める技術。保存状態の悪い試料から効率的にDNA配列を回収できます。釣り針 (bait) で目的の魚を釣るイメージです。

(9) **系統樹解析**：DNA配列などの情報から生物の間の系統的な関係（どの生物とどの生物が近い親戚か）を推定し、その進化史を樹形図で表す解析方法。

(10) **遺存種 (レリック)**：過去に広く分布していた生物の生き残りで、限られた地域にのみ生存している種。「生きた化石」とも呼ばれます。ナウマンゾウは、大陸では失われた原始的な特徴を保った遺存種でした。

公表論文

雑誌名：iScience

論文名：Ancient DNA from *Palaeoloxodon naumanni* in Japan reveals early evolution of Eurasian *Palaeoloxodon*

論文名 (日本語)：日本のナウマンゾウの古代DNAがユーラシアのパレオロクソドンの初期進化を明らかにする

著者：Takahiro Segawa, Takahiro Yonezawa, Hiroshi Mori, Ayumi Akiyoshi, Asier Larramendi, Naoki Kohno

著者 (日本語)：瀬川高弘、米澤隆弘、森宙史、秋好歩美、アシエル・ララメンディ、甲能直樹

DOI：10.1016/j.isci.2025.114156

URL：<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589004225024174>

オンライン公開日：2025年12月8日

研究サポート

本研究は、日本学術振興会科研費（課題番号: 20K20942, 23KK0062, 25K01110 and JP221S0002）の支援を受けました。

<研究についての問い合わせ先>

山梨大学総合分析実験センター 瀬川 高弘

E-mail : tsegawa@yamanashi.ac.jp

TEL : 055-273-9439

広島大学大学院統合生命科学研究科 米澤 隆弘

E-mail : tyonezaw@hiroshima-u.ac.jp

TEL : 082-424-7950

国立科学博物館生命史研究部 甲能 直樹

TEL : 029-853-8984

<広報についての問い合わせ先>

山梨大学 総務企画部総務課広報・渉外室

E-mail : koho@yamanashi.ac.jp

TEL : 055-220-8005, 8006

広島大学 広報室

E-mail : koho@office.hiroshima-u.ac.jp

TEL : 082-424-6762

情報・システム研究機構国立遺伝学研究所 広報室

E-mail : prkoho@nig.ac.jp

TEL : 055-981-5873

国立科学博物館 経営管理部 研究推進・管理課 研究活動広報担当

E-mail : t-shuzai @kahaku.go.jp

TEL : 029-853-8984

※Zoom 会議での取材にも対応できますので、Zoom 会議をご希望の場合には、その旨お知らせください。