

モササウルス発掘最前線

一和歌山県有田川町の鳥屋城層より発見された モササウルス類化石の発掘と標本処理一

小原正顕*・小西卓哉**・御前明洋***・松岡廣繁****

The frontiers of Mosasaur research in Wakayama Prefecture, Japan

OHARA, Masaaki*, KONISHI, Takuya**, MISAKI, Akihiro*** and MATSUOKA, Hiroshige****

要旨

モササウルス類は白亜紀後期の海に生息していた有鱗目に属する爬虫類の一種で、そのほとんどが鱗状に進化した四肢を持っていた。その化石は世界の様々な地域から発見されている。本邦でも40例近くの報告があるが断片的なものが多く、ある程度骨格をなしているものは少ない。

そんな状況の中、筆者らは和歌山県有田川町の鳥屋城山においてモササウルス類の化石を発見し、発掘調査によって同一個体由来と思われる多量の骨化石を得た。現在までに20個以上連続した状態の椎骨や肋骨、前・後肢骨、下顎骨などを確認しており、上半身のほとんどが保存されていると思われる。この標本のクリーニングは未だ完了しておらず、詳細な分類学的検討は今後の課題であるが、精度の高い全身骨格復元が可能となる日本で唯一の標本となるだろう。また、北米やヨーロッパ等のモササウルス類との系統関係やモササウルス類の時空分布の変遷を解明していく上で重要な鍵になるものと思われる。

キーワード：モササウルス類，有田川町，鳥屋城層，カンパニアン期

1. はじめに

本稿は、2012年11月24日に岸和田市立きしわだ自然資料館にて開催された化石研究会第138回例会において小原が講演した同タイトルの内容に加筆・修正を加えたものである。

モササウルス類は白亜紀後期の海に生息していた爬虫類の一種で、トカゲやヘビと同じ有鱗目に属するが、その多くが水生適応の過程で鱗状に進化した四肢を持っていた (e.g., Bell and Polcyn, 2005)。なかには大型種もあり、体長が15m 近くになる種も存在し

2013年3月1日受付，2013年7月2日受理

* 〒642-0001 海南市船尾370-1 和歌山県立自然博物館

Wakayama Prefectural Museum of Natural History

Email: ohara_m0002@pref.wakayama.lg.jp

** アルバータ州立大学理学部生物科学科

Department of Biological Sciences, Faculty of Science, University of Alberta

Email: tkonishi@ualberta.ca

*** 〒805-0071 北九州市八幡東区東田2-4-1 北九州市立自然史・歴史博物館

Kitakyushu Museum of Natural History & Human History

Email: misaki_a@kmnh.jp

**** 〒606-8502 京都市左京区北白川追分町 京都大学理学研究科地質鉱物学教室部

Department of Geology and Mineralogy, Graduate School of Science, Kyoto University

Email: maca@kueps.kyoto-u.ac.jp

たと考えられている (Russell, 1967). モササウルス類のほとんどは鋭く尖った歯と頑強な顎を持つ活発な捕食者で、白亜紀後期における食物連鎖の頂点に立っていたことがうかがえる。モササウルス類の生態は、従来オオトカゲの四肢を鱗に変えたような姿で復元されることが多かった (e.g., Williston, 1898:pl. 71) が、Lindgren *et al.* (2010) によってモササウルス類が三日月形の尾鱗を持っていた可能性が示唆されて以降、その復元は劇的に変化している。

モササウルス類の化石は北半球・南半球を問わず世界中から産出しており、特に北米や西ヨーロッパ、北アフリカでは関節状態を保つ保存の良い化石が多産している。一方、日本国内では40例近くの産出報告があるが、そのほとんどは断片的なもので、ある程度骨格を成すようなものは少ない (Sato *et al.*, 2012)。日本産標本でこれまで最も保存部位数が多いとされていたのは、北海道勇払郡むかわ町穂別の函淵層 (上部白亜系マーストリヒチアン階) から産出した *Mosasaurus hobetsuensis* Suzuki, 1985の模式標本 (むかわ町立穂別博物館収蔵標本 HMG-12) で、右前肢骨と10点の椎骨、23点の肋骨、1点の歯などから成る (鈴木, 1985)。

しかし最近になって、これを大幅に上回る保存部位数を誇ると思われるモササウルス類の化石が和歌山県有田郡有田川町の鳥屋城山で発見された。この化石のクリーニングは未だ完了しておらず、詳細な分類学的検討は今後の課題であるが、本稿ではこの標本の発見と発掘の経過を報告し、現時点でわかっているこの化石の重要性について述べることにする。

2. 最初の発見

有田川町には上部白亜系外和泉層群が東西に広く分布しているが、分布地域の中部 (旧金屋町) にある鳥屋城山及びその周辺には本層最上部層を構成すると考えられる鳥屋城層が分布している。鳥屋城層の大型化石については古くから多くの研究 (例えば、Yabe, 1915; 平山・田中, 1956など) がなされており、産出化石から鳥屋城層はカンパニアン階に対比されている。最近では Misaki and Maeda (2009) によって、鳥屋城層は下位より中井原シルト岩部層 (カンパニアン階下部)、長谷川泥質砂岩部層 (カンパニアン階上部) 及び伏羊砂岩部層 (マーストリヒチアン階?) の3部層に区分されている。

2006年2月、有田川町長谷川の鳥屋城山南斜面において、当時京都大学大学院に在籍していた御前が骨化石を発見した。化石は同地域に分布する長谷川泥質砂岩部層に含まれていた。その後、御前から連絡を受けた和歌山県立自然博物館と京都大学理学部地質学鉱物

学教室が数回にわたり現地調査を行って、さらに多数の骨化石を採集した。クリーニングを行った結果、それらがモササウルス類の椎骨と左後肢骨であることが明らかとなった。左後肢骨は保存良好で、大腿骨から中足骨付近までほぼ関節状態を保持していた。

なお、このときの調査においてアンモナイトの *Pachydiscus awajiensis* Morozumi, 1985が得られたので、モササウルス類化石の産出層準はカンパニアン階最上部に対比される (Morozumi, 1985)。

3. 発掘調査

産状からこの化石は同一個体由来のものであることが明らかである。現場には他の骨がまだ埋没している可能性が高いと考えて、和歌山県立自然博物館は2010年12月に重機を使った大がかりな発掘調査に踏み切った。現場が山奥の谷であったことから、作業道の整備や岩盤を覆っている土砂の除去作業なども行わなければならない。本格的な発掘調査に入れたのは12月下旬になってからであった。岩盤の掘削は油圧ショベルに装着した油圧ブレードを使用して行った。岩が割れるたびに化石の有無を確認したのであるが、掘削で生じた粉塵がすぐに岩の表面を覆ってしまうため、たびたび高压洗浄機にて洗浄する必要があった。

大型脊椎動物化石の発掘では、現場である程度化石のクリーニングを行って各化石骨の形や並び方を把握してから、プラスタージャケット等を作成して表面を保護し、丸ごと取り出すのが理想的である。しかし、今回の発掘現場の岩盤は非常に硬くて塊状に割れる (層理面で割れにくい) 性質な上に化石とその周りの石との分離が悪いので、とてもこのような方法での発掘は無理であった。結局のところ、化石の断面の分布状況からおおよそ3m×1mほどの範囲に化石が埋没していると推定し、その範囲内の岩石を全て回収するという手段を採った。

幸いだったのは、化石を含む層と上位の層との層理面に沿って割れ目ができていたことで、上盤は除去しやすく、うまい具合に化石包含層を上面から露出させることができた。あとは化石を含む岩塊をそっくりそのまま取り出すことができれば良かったのであるが、岩盤に無数の節理が発達していたために大小の破片に分裂してしまった。さらには部分的に非常に脆い箇所があって重機で岩盤を叩くとポロポロと崩れ出すような場面もあった。何かと苦労が絶えなかったが、2011年3月には全ての含化石岩塊の回収に成功し、発掘は終了した。

破片化した岩石を回収する際、苦肉の策で岩が割れるたびに通し番号を付けていったのであるが、数センチ大の岩片にも全て通し番号を付けたので、重機によ

掘削はたびたび中断せざるを得なかった。しかし、この通し番号は後のクリーニングで立体ジグソーパズルをする際に大いに役に立ち、このような地道な作業が大切であるということを実感した。



図1. 発掘調査の様子。化石骨は主に矢印の先の黒線で囲った領域内から産出した。



図2. コンテナ（長径44cm）内に収容された含化石片。

4. クリーニング

2011年5月より5人体制で週5～6日ペースでクリーニングを行っているが、発掘によって得られた化石は大量にあり、未だクリーニングは完了していない。あと2～3年はかかるであろう。クリーニングのおおまかな手順は次のA～Cのとおりである。

- A 石の破片を接着してつなぎ合わせる。
- B ダイヤモンドカッターで削るなどして、化石の表面ギリギリまで余分な石を取り除く。
- C エアーチゼルを使って少しずつ化石の表面を削出していく。

接着に際しては、主に瞬間接着剤（シアノアクリレート系接着剤）を使用した。接着面の隙間が大き

い場合等にはエポキシ樹脂系の接着剤を使用した。最初の頃はとにかく破片をつなぎ合わせて大きな岩塊を復元するようにしていたが、その結果、重くなりすぎて扱いが不便になった上、化石の断面が全く見えないのでその位置がイメージしにくくなった。最近では大きくても40cm四方程度のサイズにとどめ、化石の断面を確認しながらクリーニングするようにしている。

クリーニングの対象となる岩塊は非常に硬いが、節理面の周辺は風化作用の影響で極端に脆くなっていることがある。そういう場合は瞬間接着剤やパラロイド樹脂のアセトン溶液（5%前後）を注入することで対処している。ときには骨そのものがほとんど溶脱して空洞化していることもあったが、そういう場合はウレタン樹脂または歯科用レジン樹脂で空洞を充填した。

なお、闇雲にクリーニングして化石を完全に削出してしまうと、化石の産状の情報が失われてしまうので、基本的には化石の上半分のみをクリーニングしている。ただ、肋骨の多くは前肢骨の上に重なっていたので取り外さなければならず、故意に折って根元付近を母岩に残す手段をとったこともあった。

上半分のクリーニングが完了した含化石岩塊については、順次レプリカを作成することにより産状を保存している。レプリカについては、各岩塊の表面をシリコン印象材で覆うことによって内型を作成し、この内型にウレタン樹脂等を注入することによって作成している（業者委託による）。これらを全て合体すれば3m×1mの産状レプリカが完成する予定で、現在のところ半分程度まで出来上がっている。レプリカ作成の終了した岩塊については、必要に応じてさらなる割出を進める予定である。

5. 発掘の成果

現在までに20個以上連続した状態の椎骨や肋骨、前・後肢骨、下顎骨などを確認しており、上半身のほとんどの骨が保存されていることがわかってきた。前肢骨は左右両方産出し、とりわけ右前肢骨の骨格は第5指のみ失われているもののそれ以外はほぼ指先まで関節状態を保っている。モササウルス類の化石が豊富



図3. 右前肢骨の化石。第1～3指はほぼ指先まで保存されている。

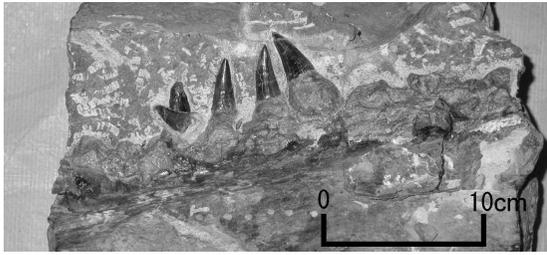


図4. 右下顎骨（歯骨）の化石。歯が植立している。

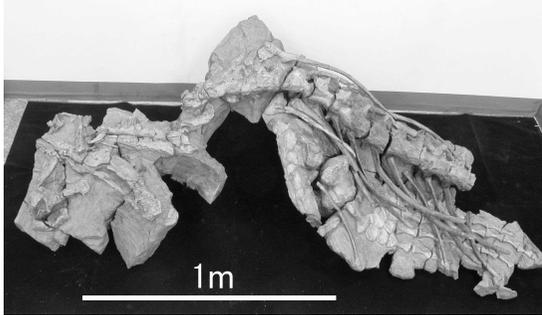
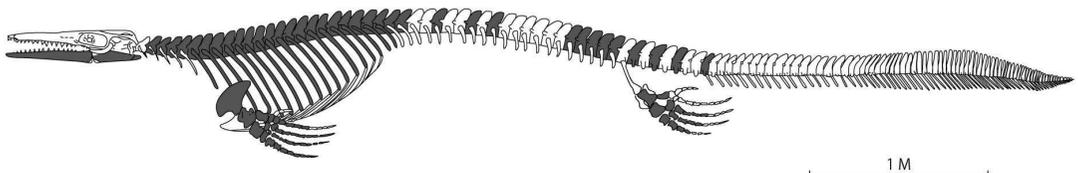


図5. 産状レプリカ（日本財団助成物件）。左にあるのが左右の下顎骨で、そこから右方向へ連続した椎骨が続く。右下にあるのが右前肢骨で、その上には肋骨が重なっている。

に産出する北米や西ヨーロッパでも鱗がほぼ完全に化石化していることは稀で、異例の保存状態と言って良い。さらに、椎骨と四肢骨ともに関節状態を保つモササウルス類化石としては国内初めての発見である（鈴木, 1985; Tanimoto, 2005）。下顎骨も左右両方産出しており、どちらにも数本の歯が植立した状態で保存されている。

この標本の詳細な分類的位置については剖出作業完了後の研究を待つこととなるが、全長についてはモササウルス亜科の *Clidastes liodontus* における頭長と全長比より約6.5mと推定される（Russell, 1967; Konishi *et al.*, 2013）。



注：椎骨と肋骨の位置は暫定的なものである。また、産出部位の左右の区別はしていない。

現在までに産出を確認した部位

図6. モササウルス類の骨格図。谷本（1997）を改変。鳥屋城標本の産出部位を灰色で示す。なお、尾は後方3分の1付近で下方に湾曲していた（Lindgren *et al.*, 2010; Konishi unpublished data）

6. 鳥屋城標本の意義

本邦は現在までのところ東アジアにおける唯一のモササウルス類化石の産出地であり、日本で発見された化石はどれも高い学術的価値を持つ。最近では日本産の化石を用いて、東アジアのモササウルス類が、太平洋をはさんで位置する北米やニュージーランド等のモササウルス類とどのような類縁関係にあるのかについての研究もなされ始めている（Tanimoto, 2005; Caldwell *et al.*, 2008; Sato *et al.*, 2012）。鳥屋城標本はその中でも、精度の高い全身骨格復元が可能となり得る日本で唯一の標本であり、世界的に見ても研究価値の高い貴重なものである。北米やヨーロッパ等のモササウルス類との系統関係やモササウルス類の時空分布の変遷を解明していく上で、鳥屋城標本は重要な鍵になるものと思われる。

また、化石骨の周りからは少なくとも30点以上のツノザメ類の脱落歯化石が産出している。これまでモササウルス類とツノザメ類の歯化石の共産例は一点しかなく、後者によるスカベンジングの可能性を検討する上で貴重な発見である（Martin and Fox, 2007）。松岡ほか（2013）は含化石岩片の顕微鏡観察結果からバクテリアによる骨の分解が起こっていたという考察を行っているが、骨格の分解に先行して微細領域での分解が生じるという事例が判明したことは重要である。鳥屋城標本はタフオノミーの観点からも興味深い。

引用文献

- Bell, G. L. Jr. and Polcyn, M. J. (2005) *Dallasaurus turneri*, a new primitive mosasauroid from the Middle Turonian of Texas and comments on the phylogeny of Mosasauridae (Squamata). *Netherlands Journal of Geosciences* **84**, 177-194.
- Caldwell, M.W., Konishi, T., Obata, I. and Muramoto, K. (2008) A new species of *Taniwasaurus* (Mosasauridae, Tylosaurinae) from the Upper Santonian-Lower Campanian (Upper Cretaceous) of Hokkaido, Japan. *Journal of Vertebrate Paleontology* **28**, 339-348.

- 平山 健・田中啓策 (1956) 動木の地質。地域地質研究報告 (5万分の1地質図幅), 37頁。
- Konishi, T., Ohara, M., Misaki, A. and Matsuoka, H. (2013) A new mosasaurine (Squamata: Mosasauridae) with large flippers from the latest Campanian Hasegawa Muddy Sandstone Member, Wakayama Prefecture, western Japan: a preliminary report. *4th Triennial International Mosasaur Meeting, Program and Abstracts*, 26-27.
- Lindgren, J., Caldwell, M.W., Konishi, T. and Chiappe, L.M. (2010) Convergent evolution in aquatic tetrapods: insights from an exceptional fossil mosasaur. *PLoS ONE*, **5** (8): e11998. doi: 10.1371/journal.pone.0011998.
- Martin, J. E. and Fox, J. E. (2007) Stomach contents of *Globidens*, a shell-crushing mosasaur (Squamata), from the Late Cretaceous Pierre Shale Group, Big Bend area of the Missouri River, central South Dakota. In: Martin, J. E. and Parris, D. C. (eds) *The Geology and Paleontology of the Late Cretaceous Marine Deposits of the Dakotas*, pp.167-176, Geological Society of America, Special Paper 427.
- 松岡廣繁・平澤 聡・大貫 巧・丸山啓志・小原正顕・小西卓哉・御前明洋 (2013) 和歌山県有田川町鳥屋城層産モササウルス類化石のタフオノミー。日本古生物学会第162回例会講演予稿集, 33.
- Misaki, A. and Maeda, H. (2009) Lithostratigraphy and Biostratigraphy of the Campanian-Maastrichtian Toyajo Formation in Wakayama, Southwestern Japan. *Cretaceous Research* **30**, 1-17.
- Morozumi, Y. (1985) Cretaceous (Campanian and Maastrichtian) ammonites from Awaji Island, southwest Japan. *Bulletin of the Osaka Museum of Natural History* **39**, 1-58.
- Russell, D. A. (1967) Systematics and morphology of American mosasaurs. *Peabody Museum of Natural History Bulletin* **23**, 1-241.
- Sato, T., Konishi, T., Hirayama, R. and Caldwell, M.W. (2012) A review of the Upper Cretaceous marine reptiles from Japan. *Cretaceous Research* **37**, 319-340.
- 鈴木 茂 (1985) 北海道穂別町の上部白亜系函淵層群産海棲トカゲ *Mosasaurus* の一新種。海生脊椎動物の進化と適応, 地団研専報 **30**, 45-66.
- 谷本正浩 (1997) 上部白亜系和泉層群産の海生トカゲ・モササウルス cf. コノドンの骨格復元の試み。地学研究 **46**(2), 87-91.
- Tanimoto, M. (2005) Mosasaur remains from the Upper Cretaceous Izumi Group of southwest Japan. *Netherlands Journal of Geosciences - Geologie en Mijnbouw* **84**, 373-378.
- Williston, S. W. (1898) Mosasaurs. *University Geological Survey of Kansas* **4**, 81-221.
- Yabe, H. (1915) Notes on Some Cretaceous Fossils from Anaga on the Island of Awaji and Toyajo in the Province of Kii. *Science Reports of Tohoku Imperial University, Second Series* **4**(1), 13-24.