

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2016

課題番号：24570097

研究課題名(和文)大型シンクロトロンによる後期白亜紀の被子植物初期進化群の花化石の構造解明

研究課題名(英文)Early diversification of Angiosperms and Cretaceous fossil flowers using synchrotron radiation X-ray tomographic microscopy (SRXTM)

研究代表者

高橋 正道 (Takahashi, Masamichi)

新潟大学・自然科学系・フェロー

研究者番号：00154865

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,400,000円

研究成果の概要(和文)：被子植物の初期進化を明らかにするために、白亜紀の地層から3次元構造が保存されている植物小型化石の発見に努めた。これまでに、初めて、被子植物の小型化石を福島県双葉層群およびモンゴルのテブシンゴビから発見した。これらの小型化石をシカゴの大型シンクロトロンでマイクロCT解析を行った。その結果、3種類の花化石が新属新種であることを明らかにした。その一つは、両性花の放射相称花で、多数の心皮が輪生しており、柱頭の先端が特殊なU字型構造でありことが分かった。心皮の周囲には、多数の雄しべと花弁が輪生しており、これらの特徴から、白亜紀に分化したヤマゲルマ科の新属新種の花化石であることが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：The Kamikitaba assemblage is the first record of mesofossil preservation from eastern Asia. Several fossil flowers and seeds are described from the Futaba Group in northeastern Japan and Tevshiiin Govi in Mongolia. These mesofossils were analyzed using synchrotron-radiation X-ray microtomography (SRXTM) at the Advanced Photon Source. The fossil flowers are small, actinomorphic, bisexual, semi-inferior, and multicarpellate. The floral receptacle is cup shaped with a perigynous perianth consisting of several tepals inserted around the rim. The styles are short, becoming recurved with a ventrally decurrent stigma. The fruit type is a follicle. Seeds are ca. 10 per carpel, marginal, pendulous from the broad, oblique summit of the locule. The morphological features of these fossils indicate a possible relationship to Trochodendraceae. The recovery of these fossil suggests that the basal eudicot families in eastern Eurasia area during the Late Cretaceous.

研究分野：古植物学

キーワード：被子植物 初期進化 小型化石 白亜紀 双葉層群 大型シンクロトロン 真正双子葉類 花化石

## 1. 研究開始当初の背景

分岐分類学の発展や分子系統学および小型植物化石の新発見などによる研究成果により、被子植物の起源と初期進化に関する研究が発展してきている。従来、動物化石に比べて、被子植物の初期進化の解明につながる植物化石は少ないとされてきた。ところが、白亜紀に急激な炭化作用を受け、その後、特殊な堆積条件下におかれることによって、白亜紀の保存性の良い被子植物群の果実、種子、花の小型植物化石が保存されていることが分かってきた。

この結果、被子植物の起源と初期進化に関する研究は飛躍的な発展段階に入った。これらの小型炭化植物化石の研究により、約1億3千万年前に出現した被子植物が、後期白亜紀に初期進化をとげて、被子植物の基幹分類群が出現したことが具体的に明らかにされつつある。

高橋らの研究によって、白亜紀の小型化石が福島県双葉層群に8900万年前の地層に保存状態が良好な花化石が多量に含まれていることを明らかにしてきた。

これらの日本における白亜紀の小型植物化石の研究によって、白亜紀の年代に地球上の陸上植生を構成していた被子植物基幹群の具体的な姿が明らかにし、被子植物基幹群の初期進化のプロセスを解明する先駆的で研究として進展している。

## 2. 研究の目的

これまでは、炭化石ということで、その内部構造を非破壊的に明らかにすることは不可能であった。仮に、連続切片法や急速凍結切断などをやったとしても、植物化石を破壊せざるを得ない状態である。ところが、白亜紀の花化石や果実化石は、極めて稀にしか発見できず、炭化石の連続切片を作製することは極めて困難であった。しかも、ほとんどの炭化石はタイプ標本として永久保存をする必要がある貴重な標本である。そのために福島県いわき市の後期白亜紀の地層から発見された花や果実の小型化石がその内部構造が解明できないままになっていた。

本研究では、大型シンクروتロン(シカゴ)の高分解能マイクロCTによって、これらの植物化石の3次元的な内部構造を非破壊的に解明することで、白亜紀に出現した被子植物の初期基幹群を明らかにしていくことである。これまでに双葉層群などから発見されてきた多くの花化石の精度のよい3次元構造を明らかにしていく。さらに、東南アジアにおける白亜紀の地層から、被子植物の小型化石の探索を目指した。

## 3. 研究の方法

本研究では、大型シンクروتロン(シカゴ)の高分解能マイクロCTによる3Dレンダリング法によって、これらの植物化石の3次元的な内部構造を非破壊的に解明することで、白亜紀に出現した被子植物の初期基幹群を明らかにしていくことである。

双葉層群は、いわき市から広野町まで、福島県の沿岸地域に広く分布している地層である。すでに、従来の調査・採掘によって、双葉層群から被子植物の「花粉」「果実」「種子」「花」「材」等の保存性の良い植物化石を発見し、「上北迫植物化石群」と命名している。双葉層群は、コニアシアン期からサントニアン期に到る後期白亜紀の地質年代の地層を含んでいる。これらの炭化石の中から、被子植物初期基幹群の保存性の良い「果実」「種子」「花」の小型化石を探索する。

これまでに、発見された多くの被子植物の「果実」「種子」「花」の小形化石の内部構造を解明するために、大型シンクروتロンのビームライン2-BM-Bにて、マイクロCT断層像を撮影した。シカゴの大型シンクروتロンでは、マルチチャンネル方式が採用されているために、短時間で高輝度撮影が可能であり、0.75 $\mu$ mと言う高分解能で高コントラストなCTデータを得ることができる。しかも、同一ビームラインで、広いサイズ幅の試料への対応が可能である。シカゴへの約1週間前後の滞在によって、約50個以上の小型炭化石のマイクロCT像のデータを得ることができる。

## 4. 研究成果

白亜紀における小型植物化石と言う新しいタイプの植物化石によって、被子植物の起源と初期進化に関する研究を推進してきた。これらの新しいタイプの植物小型化石は、1億3000万年前から6500万年前の白亜紀の年代に生育していた被子植物の初期進化群の果実および種子と花の構造を解明することにより、被子植物の進化のプロセスを形態学的に明らかにすることをめざしてきた。白亜紀の被子植物の花化石は、複数の堆積条件がそろっている特殊な地層に限って保存されており、このような地層は、これまでに、世界的にもわずかの地点に限られている。

福島県双葉層群(後期白亜紀)からすでにサンプリングしている堆積岩の試料を過酸化水素水で処理し、クリーニングした炭化石から、新たな花化石を発見に努めた。その結果、コニアシアン期(後期白亜紀)から、新たな花化石を発見した。この花化石は、直径はわずかに1mm前後であり、数枚の心皮が輪生状に配列しており、その周囲を多くの雄蕊が取り囲んでいる状態である。柱頭が特徴的に反転した。雄蕊は、葯と花糸に分化しており、三溝型花粉をつけていたことにより、真正双子葉類に含まれると推定された。

白亜紀の炭化した状態で発見される花化石の内部構造を明らかにすることは容易なことではない。そのために、大型シンクロトロン2-BM-Bのビームラインで1800枚のX線透過データを撮影し、2000枚のCT断層像を作成した。さらに、トモグラフィ法により、3次元画像データに再構築した。その結果、APSによって、広視野・高分解能撮影が可能であり、サイズや形状も多様な白亜紀の花化石の構造解明が可能となった。

その結果、従来は解明できなかった、白亜紀の微小な花や果実の内部の情報を高分解能で明らかにすることができるようになった。これらの化石の一種類は、花化石の特徴から、白亜紀に生育していたヤマグルマ科の新属であることを明らかにした。もう一つは、現在、マダガスカル島に生育しているディディメレス科の新属の化石種であることを明らかにした。これらの2つの新属は、いずれも、真正双子葉類の原始的な植物群であり、北半球のローレシア東側に、これらの植物群が生育したことを解明した。

さらに、白亜紀のクスノキ科の花化石の内部構造を明らかにした結果、これまでに発見されていない新種であることが分かり、論文をまとめて、投稿中である。モンゴルの前期白亜紀から発見した炭化石については、新種のシダ種子植物のものであることが明らかにしてきた。また、福島県の上北迫植物化石群から発見された後期白亜紀のクスノキ科の花化石は、腺体が外側の雄蕊の基部についており、外花被片が内花被片よりも小さいことなど、現生のクスノキ科植物には見られない特徴をもつことが明らかになり、*Microlaurus* という新属新種の花化石として発表した。

さらに、モンゴルのテブシンゴビの前期白亜紀の地層から、球果類の化石とシダ種子植物の椀状体のある種子化石を発見した。この椀状体のある種子化石を大型シンクロトロン2-BM-BのマイクロCTで画像解析をして3次元内部構造を明らかにした。その結果、この種子化石は、被子植物の祖先群と関連のある *Corystosperm* の新種の化石であることが明らかになった。これまで、*Corystosperm* の種子は葉が変形した椀状体の向軸側についていると解釈されていたが、この化石の種子は、軸についていることを明らかにした。これらの研究成果を論文として発表した。

これまでに、被子植物の起源とされる熱帯地域から発見されることがない。このような地層は、白亜紀に氾濫原であった地域で、炭化した「花」「果実」「種子」がシルト層の中に保存され、その後、高温や高圧の影響を受けてなく、しかも固結していない柔らかい状態であることが必要である。

熱帯地方で、これらの条件が整っている白亜紀の地層を探することは容易なことではないが、25～28年度には、マレーシアおよ

びタイにおいて炭化した小型化石を含んでいるジュラ紀～白亜紀の地層の探索を行った。さらに、タイのコンケン大学の協力を得て、タイ東北部に位置している Sang Kae, Phu Noi, Khok Sanam, Phy Nam jun, Kham Phok で白亜紀のコラート層群に関する野外調査を実施した。これらの地域の地層には、非固結性の柔らかい堆積岩を含むことが明らかになったが、まだ、炭化石を含んでいる地層の発見にはいたっていない。今後、この地層およびその周辺で詳細な調査を行う予定である。

今後、新たな、小型化石を含む地層を求めて、早稲田大学の研究グループと共同で久慈層群での調査研究を進めている。特に、久慈市北西部に位置している夏井川上流の玉川層と沢山層に注目し、引き続き、久慈層群に関する調査を継続する予定である。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

(雑誌論文)(計 14 件)

Masamichi Takahashi, Patrick S. Herendeen, Xianghui Xiao. 2017. Two early eudicot fossil flowers from the Kamikitaba assemblage (Coniacian, Late Cretaceous) in northeastern Japan. *Journal of Plant Research* 130:(on line first)  
doi:10.1007/s10265-017-0945-1 .  
(査読有)

Fabiany Herrera, Gongle Shi , Niiden Ichinnorov, Masamichi Takahashi , Eugenia V. Bugdaevae , Patrick S. Herendeen and Peter R. Crane. 2017. The presumed ginkgophyte *Umaltolepis* has seed-bearing structures resembling those of *Peltaspermales* and *Umkomasiales*. *PNAS* 114:E2385-E2391.  
(査読有)

Gongle Shi, Fabiany Herrera, Patrick S. Herendeen, Andrew B. Leslie, Niiden Ichinnorov, Masamichi Takahashi and Peter R. Crane. 2017. Leaves of *Podozamites* and *Pseudotorellia* from the Early Cretaceous of Mongolia: stomatal patterns and implications for relationships. *Journal of Systematic Palaeontology* 16: 1-27. (査読有)

Fabiany Herrera, Gongle Shi, Patrick Knopf, Andrew B. Leslie, Niiden Ichinnorov, Masamichi Takahashi,

Peter R. Crane, and Patrick S. Herendeen 2017. Cupressaceae conifers from the early Cretaceous of Mongolia Int. J. Plant Sci. 178:19–41. (査読有)

Patrick S. Herendeen, James A. Doyle, Peter K. Endress and Masamichi Takahashi. 2016. *Cecilanthus polymerus*, a novel multiparted flower from the mid-Cretaceous Rocky Point locality, Maryland. Botany 94: 787–803. (査読有)

Fabiany Herrera, Andrew B. Leslie, Gongle Shi, Patrick Knopf, Niiden Ichinnorov, Masamichi Takahashi, Peter R. Crane, and Patrick S. Herendeen. 2016. New fossil Pinaceae from the Early Cretaceous of Mongolia. Botany 94: 885–915. (査読有)

Gongle Shi, Andrew B. Leslie, Patrick S. Herendeen, Fabiany Herrera, Niiden Ichinnorov, Masamichi Takahashi, Patrick Knopf, Peter R. Crane. 2016. Early Cretaceous *Umkomasia* from Mongolia: implications for homology of corystosperm cupules. New Phytologist. 210: 1418-1429. (査読有)

Fabiany Herrera, Gongle Shi, Andrew B. Leslie, Patrick Knopf, Niiden Ichinnorov, Masamichi Takahashi, Peter R. Crane and Herendeen, P.S. 2015. A new voltzian seed cone from the Early Cretaceous of Mongolia and its implications for the evolution of ancient conifers. Int. J. Plant Sci. 176: 791–809. (査読有)

Heidi Anderson, David J. Batten, David J. Cantrill, Christopher Cleal, Susanne Feist-Burkhardt, Robert A. Fensome, Martin J. Head, Patrick S. Herendeen, Carlos Jaramillo, Jiří Kvaček, Stephen McLoughlin, Judith E. Skog, Masamichi Takahashi and Reed Wicander 2015. Proposal to treat the use of a hyphen in the name of a fossil-genus as an orthographical error. Taxon 64: 863. (査読有)

Gongle Shi, Andrew B. Leslie, Patrick S. Herendeen, Niiden Ichinnorov, Masamichi Takahashi, Patrick Knopf and Peter R. Crane. 2014. Whole-plant reconstruction and phylogenetic relationships of *Elatides zhoui* sp. nov. (Cupressaceae) from the Early Cretaceous of Mongolia. Int. J. Plant Sci. 175: 911–930. (査読有)

Masamichi Takahashi, Patrick S. Herendeen,

Xianghui Xiao and Peter R. Crane. 2014. Lauraceous fossil flowers from the Kamikitaba assemblage (Coniacian, Late Cretaceous) of Northeastern Japan (Lauraceae). Systematic Botany 39: 715-724. (査読有)

Andrew B. Leslie, Ian Glasspool, Patrick S. Herendeen, Niiden Ichinnorov, Patrick Knopf, Masamichi Takahashi and Peter R. Crane. 2013. Pinaceae-like reproductive morphology in *Schizolepidopsis canicularis* sp. Nov. from the early Cretaceous (Aptian-Albian) of Mongolia. American Journal of Botany 100: 2426–2436. (査読有)

Stephen Blackmore, Masamichi Takahashi, Koichi Uehara & Alexandra H. Wortley. 2012. Development of megaspores and microspores in *Isoetes japonica* A. Br. (Lycopodiophyta: Isoetaceae. Grana 51: 84-96. (査読有)

Jürg Schönenberger, Maria von Balthazar, Masamichi Takahashi, Xianghui Xiao, Peter R. Crane and Patrick S. Herendeen. 2012. *Glandulocalyx upatoiensis*, a fossil flower of Ericales (Actinidiaceae/Clethraceae) from the Late Cretaceous (Santonian) of Georgia, USA. Annals of Botany 109: 921-936. (査読有)

[学会発表](計 4 件)

Fabiany Herrera, Gongle, Patrick Knopf, Andrew B. Leslie, Niiden Ichinnorov, Masamichi Takahashi, M., Peter R. Crane, and Patrick S. Herendeen 2016. Diversity of taxodiaceous Cupressaceae seed cones from the Early Cretaceous of Mongolia. アメリカ植物学会 July 30-Aug 3th, 2016, Savannah, Georgia, USA.

高橋正道. 福島県広野町に咲いていた白亜紀の花々(上北迫植物化石群). 日本植物分類学会(招待講演)2015年03月06日~2015年03月07日. 福島県福島市 福島大学.

高橋正道. 第30回 国際生物学賞 受賞者ピーター・クレイン博士 ~花の起源と初期進化への挑戦者~. 第30回 国際生物学賞記念シンポジウム(招待講演). 2014年12月02日~2014年12月03日. 東京都台東区上野公園 国立科学博物館.

高橋正道, Patrick S. Herendeen, Xianghui Xiao and Peter Crane. 上北迫植物化石群から発見されたクスノキ科の新属・新種の花化石 - 大型加速器

APSによるSRXTM解析 - . 第78回日本植物学会 2014年09月12日~2014年09月14日 神奈川県川崎市多摩区東三田 明治大学.

〔図書〕(計 1 件)

高橋正道 花のルーツを探る - 植物化石の話 シリーズ・生命の神秘と不思議. 裳華房 2017年 182ページ.

〔その他〕

ホームページ等

<http://env.sc.niigata-u.ac.jp/~masa/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

高橋 正道 (TAKAHASHI Masamichi)

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号 : 00154865