

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 15 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24405015

研究課題名(和文) モンゴルにおけるジュラ紀～白亜紀の被子植物の初期起源群の解明

研究課題名(英文) Early evolution of primitive angiosperms during Jurassic and Cretaceous in Mongolia

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：この研究の目的は、モンゴルの前期白亜紀の地層から植物化石を発見し、前期白亜紀のユーラシア中央部における古植生を明らかにし、被子植物の初期進化を解明することである。そのために、花、果実、球果、種子などの立体構造を有する小型化石Mesofossilsに注目して、研究を進めた。2012年から2014年の期間、日米蒙のプロジェクトチームを構成し、モンゴルのゴビ砂漠で、野外調査を実施した。その結果、モンゴルの前期白亜紀に生育していた植物の葉、茎、材、根および球果、種子、殻斗などの生殖器官の植物化石を数多く発見した。今後、これらの研究成果をまとめていく予定である。

研究成果の概要(英文)：The purpose of research purpose is to recover Early Cretaceous age fossil plants from Mongolia. The focus is on mesofossils, small dispersed fossil flowers, fruits, cones, and seeds. Mesofossils are new type of plant fossils that have well preserved three dimensional structure. We have performed field trips in Tévshiin Govi, Tugrug, Shivee-Ovoo and Shine Khudag localities during 2012-2013. The fossiliferous layers belong to the Tévshiin Govi Formation, a sequence of conglomerates, sandstones, and siltstones, as well as thick coal and lignite seams, that were deposited in a terrestrial and fluvio-lacustrine system. They also contain a varied assemblage of plant remains, including copious leaves, stems, wood, roots, and reproductive structures such as cones, seeds, cupules. The goal of the research is to document seed plant diversity in central Mongolia during the Early Cretaceous.

研究分野：植物系統分類学

キーワード：白亜紀 モンゴル Mesofossil 植物化石 裸子植物 被子植物 初期進化 ゴビ砂漠

1. 研究開始当初の背景

近年、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は、急速に進展しつつあった。白亜紀の植物組織が急激な炭化作用を受けた後に、非常に安定した堆積条件下におかれた植物化石は3次元構造を残していることが明らかにされた。これらの新しいタイプの植物化石は、小型植物化石(Mesofossils)と呼ばれ、その中から良好に保存された白亜紀の被子植物初期進化群の花、果実、種子などの炭化石が発見されることを明らかにし、被子植物の起源と初期進化の研究を革新的に進展しつつある。

2. 研究の目的

モンゴルおよび周辺アジア地域の前期白亜紀の地層から、被子植物の起源と関係のある小型炭化植物化石を発見し、被子植物の起源を解明する有力な手がかりを得ることが目的である。モンゴルの白亜紀の地層は陸成層であり、著しい湿潤化が起こった可能性があり、植物の小型炭化石が保存されている可能性が非常に高い。

これらの研究に必要な、インドシナ半島における中生代の構造発達史を解明し、小型植物炭化石の遊離態バイオマーカーおよび結合態脂質の分析を行い、その未固結炭質物濃集層の成因を明らかにする。

3. 研究の方法

モンゴルでの野外調査を行い、シネフダク地域、テブシン地域および南部ゴビ地域のツグルグ地域を調査対象とした。さらに、マレーシアなどのインドシナ半島での中生代の地層の野外調査を行った。堆積岩をフッ化水素水で処理し、花化石および果実化石や種子化石などの植物化石をBulk Sieving法によってとりだし、種類別に類型化し、得られた小型植物化石の走査型電子顕微鏡による観察で微細形質を明らかにし、現生植物との比較をした。さらに、これらの内部構造を解明するために、大型放射光施設(APS)にて、マイクロCT断層像を撮影した。採取された堆積岩の中から、白亜紀の陸上植物に由来するバイオマーカー

を用いて、溶媒抽出、アルカリ加水分解によって得られたアルキル脂質組成を分析した。

4. 研究成果

モンゴルは、ユーラシア大陸の中央部に位置しており、白亜紀には非常に湿潤で植物が豊富に生育していたところである。特に、南東部に位置するフレンドホを含むゴビ砂漠地域には、前期白亜紀(アプチアン期~アルビアン期、1億2500万年前~9960万年前)の地層が露出している。

また、被子植物の初期始原群の進化の解明には、東南アジア地域のジュラ紀~白亜紀が重要な地域である。平成24年度~26年度にかけて、4度にわたるモンゴルのゴビ砂漠北東地域の白亜紀に関する野外調査とマレーシアでの海外調査を実施した。

その結果、モンゴルのフレンドホ、テブシンゴビおよびツグルグ地域から、多くの炭化植物化石を発見した。東アジアでは、日本に次いで2番目の小型植物化石の研究成果である。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「球果」「葉」「種子」「材」をシルト層から発見した。これらの植物化石と現生植物との比較および大型シンクロトロンによるマイクロCTによって、内部構造を明らかにし、白亜紀の裸子植物の3種の新属新種の化石として発表した。被子植物に類似した「花」化石も数種を発見しているが、現在、詳細に検討中である。

なお、平成21年度から、科研費の海外調査プロジェクトとして日米蒙のチームで遂行されてきた本研究は、平成27年度以降、アメリカのNSFプロジェクトとして、引き続き、米日蒙の共同研究として推進されることになった。

筑波大学研究チームは、東南アジアで白亜紀の植物小型化石の研究を展開するために、中生代の東南アジアの地質、とくにインドシナ半島における構造発達について検討してきた。インドシナ半島はインドシナ地塊とシブマス地塊が中生代前期に衝突合体し、その後これらを覆うコラート層群が堆積したことが知られている。地塊群の衝突合体後はこの地域が現在のように安

定大陸的となり、後造山期の堆積物であるコラート堆積物が広く覆った。このコラート層群が、ジュラ紀～白亜紀の被子植物の初期起源群の産地として期待されているところである。この合体プロセスを岩石中に残している地帯が縫合帯であるが、タイ北東部の縫合帯(ナン縫合帯)について、その構成物である超マフィック岩を中心に調査を行ってきた。その結果、

1) 縫合帯を構成するオフィオライトには、超マフィック岩のほかに、斑レイ岩が随伴していることを確認した。これはインドシナ地塊とシブマス地塊の間にあった古海洋を考察するうえで重要な知見である。

2) 衝突合体直後の三畳紀海洋性堆積物から、超マフィック岩起源の碎屑性クロムスピネル粒子を多数検出した。これは、衝突による古海洋物質の“絞り出し”プロセスの時空的広がりによる束縛条件を与えることになる。このほかに、縫合帯周辺についても調査を行い、ナン縫合帯のタイ南東部への延長部(サーケオ縫合帯)やタイ北東部のインドシナ地塊浅海性古生代後期堆積物(蒸発岩)についても予察的検討を進めている。

北海道大学研究チームは、これまで、双葉層群芦沢層の炭質物濃集層には、ほとんどの植物化石や形態のはっきりしない炭質物は黒色で炭化されているがその中に褐色を呈する非炭化の植物片や褐炭(リグナイト)も含まれていることに注目し、異なる種類の植物化石・植物片炭質物の共存について、その理由を明らかにすることを試みた。そのために、芦沢層の未固結の炭質物濃集堆積物そのものとそこに含まれる小型化石、表皮組織の遊離態バイオマーカーおよび結合態脂質の分析を行い、その未固結炭質物濃集層の成因について考察した。堆積物や化石試料中に普遍的に含まれる植物由来のステランやバクテリア膜脂質由来のホパンの構造変化に基づく熟成度指標から、芦沢層の未固結堆積物が埋没や地殻変動による続成作用をほとんど受けなかったことが推察され、褐色を呈する小型化石は褐炭であると考えられる。褐炭の葉化石の表皮組織は、蛍光顕微鏡観察において強い蛍光を発生し、青白色の波長を示した一方で、cuticle は黄色～褐色の蛍光色を呈した。表皮組織の蛍光色の波長は有機物の熟成に伴い長波長側へと変化していくことが知られており、

褐炭の葉化石がより未熟成であることが示された。炭質物濃集堆積物と褐炭の葉化石から、植物の生体分子であり、熟成の初期に失われる β -シトステロールが検出された。褐炭試料の有機物は白亜紀の堆積物や植物化石の中で、特異に未熟成であることが明らかになった。加水分解性アルキル脂質成分としてヒドロキシ酸が検出された。これらのアルキル脂質成分はクチンやスベリンなどの生体ポリエステルが脱重合したモノマーであるといえる。白亜紀の堆積物からクチン酸を検出した例は他になく、条件がそろえば古い地質時代の堆積物においても生々しいクチン構造が保存され得ることが示された。植物化石の炭化過程は、1) 堆積後の熱や圧力により進行する石炭化(coalification)と、2) 堆積前の燃焼による炭化作用(charcoalification)が考えられる。炭化小型化石の遊離態バイオマーカー分析の結果から、それらが高温を経験した可能性を示唆した。双葉層群芦沢層の小型化石は主に燃焼による炭化作用を経験したものが黒色の植物片として保存され、同時期に燃焼を経ずに堆積したものが褐炭として含まれることが推察される。実際、芦沢層から産出する小型炭化植物化石のほとんどが堆積前に炭化したものが河川の氾濫原などに堆積したものと推定されている。一方、その中の褐炭について、堆積後に現生などの植物が未固結堆積物に混入したとは考えにくい。それは堆積物試料からクチンに由来するヒドロキシ酸が検出されたことで、褐炭が自生の植物化石であることを示すと言える。このような燃焼によるcharcoalificationが炭質物濃集層を形成し、ある種の石炭層として植物化石やその炭質物を保存することが化石燃料資源等にも重要であることを指摘した。

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16件)

Takahashi, M., P. S. Herendeen, X. Xiao and Peter R, Crane. 2014. Lauraceous fossil flowers from the Kamikitaba assemblage (Coniacian, Late Cretaceous) of Northeastern Japan. *Syst. Bot.* 39: 715-724. (査読有)
Leslie, A. B., Glasspool, I., Herendeen P. S., Ichinnorov, N., Knopf, P., Takahashi, M.

- Crane, P. R. 2013. Pinaceae-like reproductive morphology in *Schizolepidopsis canicularis* sp. nov. from the Early Cretaceous (Aptian-Albian) of Mongolia. *Amer. J. Bot.* 100: 2426-2436. (査読有)
- Jürg Schönenberger, Maria von Balthazar, M. Takahashi, Xianghui Xiao, Peter R. Crane and Patrick S. Herendeen. 2012. *Glandulocalyx upatoiensis* gen. et sp. nov., a fossil flower of Ericales (Actinidiaceae /Clethraceae) from the Late Cretaceous (Santonian) of Georgia, U.S.A. *Ann. Bot.* 109: 921-36 (査読有).
- Shi, G., Leslie, A., Herendeen, P., Ichinnorov N., Takahashi, M., Knop and Crane P. 2014. Whole plant reconstruction and phylogenetic relationship of *Elatides zhuoi* sp. Nov. (Cupressaceae) from the early Cretaceous of Mongolia. *Int. J. Plant Sci.* 175: 911-930. (査読有)
- Kamata, Y., Shirouzu, A., Ueno, K., Sardud, A., Chareontitirat, T., Charusiri, P., Koike, T. and Hisada, K., 2014. Late Permian and Early to Middle Triassic radiolarians from the Hat Yai area, southern peninsular Thailand: Implications for the tectonic setting of the eastern margin of the Sibumasu Continental Block and closure timing of the Paleo-Tethys. *Marine Micropaleontology*, vol. 110, 8-24. (査読有)
- Wiwegwin W., Hisada K., Charusiri P., Kosuwan S., Pailoplee S. and Saithong P., 2014. Paleoearthquake Investigations of the Mae Hong Son Fault, Mae Hong Son Region, Northern Thailand. *Journal of Earthquake and Tsunami* Vol. 8, No. 2 (2014) 1450007 (35 pages) World Scientific Publishing Company (査読有)
- Kamata, Y., Shirouzu, A., Ueno, K., Sardud, A., Chareontitirat, T., Charusiri, P., Koike, T. and Hisada, K., 2014. Late Permian and Early to Middle Triassic radiolarians from the Hat Yai area, southern peninsular Thailand: Implications for the tectonic setting of the eastern margin of the Sibumasu Continental Block and closure timing of the Paleo-Tethys. *Marine Micropaleontology*, 110: 8-24. (査読有)
- Furota, S., Sawada, K., Kawakami, G. 2014. Evaluation of sedimentary processes of plant particles by gravity flow using biomarkers in plant fragment-concentrated sediments of a turbiditic sequence in the Miocene Kawabata Formation distributed along the Higashiyama-gawa River, Yubari, Hokkaido, Japan. *Researches in Organic Geochemistry*, 30, 9-21. (査読有)
- Yamamoto, S., Sawada, K., Nakamura, H., Kobayashi, M., Kawamura, K. 2014. Stable carbon isotopic variation of long chain n-alkanoic acids in the equatorial Pacific sediments over the last 40 Ma: Implications for expansion of C₄ grassland in South America. *Organic Geochemistry*, 76, 62-71. (査読有)
- Hara, H., Kon, Y., Usuki, T., Lan, C-Y., Kamata, Y., Hisada, K., Ueno, K., Charoentitirat, T. and Charusiri, P. 2013. U-Pb ages of detrital zircons within the Inthanon Zone of the Paleo-Tethyan subduction zone, northern Thailand: New constraints on accretionary age and arc activity. *Journal of Asian Earth Sciences*, 74: 50-61. (査読有)
- Ogata, S., Miyata, Y., Sawada, K., 2013. Compositions of n-alkanes and n-alkanoic acids released by thermochemolysis with tetramethylammonium and trimethylsulfonium hydroxides of a type II kerogen. *Researches in Organic Geochemistry*, 29, 37-47. (査読有)
- Sawada, K., Nakamura, H., Arai, T., Tsukagoshi, M. 2013. Evaluation of paleoenvironment using terpenoid biomarkers in lignites and plant fossils from the Miocene Tokiguchi Porcelain Clay Formation at the Onada mine, Tajimi, central Japan. *International Journal of Coal Geology*, 107, 78-89. (査読有)
- Kamata Y., Maezawa A., Hara H., Ueno K., Hisada K., Sardud A., Charoentitirat T. and Charusiri P. 2012. Basaltic activity preserved in an Upper Permian radiolarian chert from the Paleo-Tethys in the Inthanon Zone, northern Thailand. *Journal of Asian Earth Sciences*, 61, 51-61. (査読有)
- Horiuchi Y., Charusiri P. and Hisada K., 2012. Identification of an anastomosing river system in the Early Cretaceous Khorat Basin, northeastern Thailand, using stratigraphy and paleosols. *Journal of Asian Earth Sciences*, 61, 62-77. (査読有)
- Ladachart, R., Sutthirat, C., Hisada, K. and Charusiri, P. 2012. Soil erosion and heavy metal contamination in the middle part of the Songkhla Lake coastal area, southern Thailand: In Coastal Environments: Focus on Asian Coastal Regions, Subbranian, V. (ed.), Capital Publishing Company. Ching-Ying 2012, pp 106-129. (査読有)
- Sawada, K., Kaiho, K., Okano, K. 2012.

Kerogen morphology and geochemistry at the Permian - Triassic transition in the Meishan section, South China: implication for paleoecological variation. *Journal of Asian Earth Sciences*, 54-55, 78-90.. (査読有)

[学会発表](計 15 件)

Y. Miyake & K. Hisada. 2015. Provenance shift based on occurrence of detrital chromian spinels in the Lower Cretaceous of Chichibu Belt, Kyushu, SW Japan. The Third International Symposium of the International Geological Correlation Programme 589; Development of the Asian Tethyan Realm: Genesis, Process and Outcomes Amirkabir Technical University, Tehran Iran 2015年2月15日

Yoshihito Kamata, Katsumi Ueno, Akira Miyahigashi, Ken-ichiro Hisada, Hidetoshi Hara, Koji Uno, Thasinee Charoentitirat, Punya Charusiri, Subin Kongthiphavong, Khamseng Vilaykham & Keo Khamphavong.

2015. Middle Triassic acidic tuff in the Oudomxai area, Northern Laos and its geological correlation with Northern Thailand. The Third International Symposium of the International Geological Correlation Programme 589; Development of the Asian Tethyan Realm: Genesis, Process and Outcomes Amirkabir Technical University, Tehran Iran 2015年2月15日

K. Tominaga, K. Hisada, K. Ueno, H. Taniguchi, K. Yasukawa, S. Machida and Y. Kato. 2015. Depositional facies analysis and petrology of accreted oceanic seamount rocks: implications for accretion tectonics of seamount Crust-Mantle Evolution in Active Arcs 2015 Sequoia Hotel, Metro Manila, Philippines, 15 Feb. 2015

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 国際生物学賞記念シンポジウム(東京)(招聘講演)2014年12月3日

久田健一郎・鎌田祥仁・荒井章司・Moni reh Poshtkoohi 南イラン, ザグロス山脈ネイリズオフィオライトのオブダクション, 日本地質学会第121年学術大会 鹿児島大学 2014年10月21日

Katsumi Ueno, Akira Miyahigashi,, Yoshihito Kamata, Ken-ichiro Hisada, Hidetoshi Hara, Koji Uno, Thasinee Charoentitirat, Punya Charusiri, Subin, Kongthiphavong, Khamseng Vilaykham and

Keo Khamphavong. 2014. Permian and Triassic carbonates in the Oudom Xai Luang Namtha area, Northern Laos: Stratigraphical and paleontological constraints for connecting Northern Laos with Northern Thailand. The Third International Symposium of the International Geological Correlation Programme 589; Development of the Asian Tethyan Realm: Genesis, Process and Outcomes Amirkabir Technical University, Tehran Iran 2014年10月21日

Yuma Miyata, Ken Sawada, Hideto Nakamura, Reishi Takashima, Masamichi Takahashi, Paleovegetation changes recorded by *n*-alkyl lipids bound in macromolecules of plant fossils and kerogens from the Cretaceous sediments in Japan. American Geophysical Union Fall Meeting 2014, Moscone, San Francisco (USA), 15-20 December, 2014.

宮田遊磨, 沢田健, 中村英人, 高橋正道, 白亜系双葉層群の炭質物濃集層から産出した炭化および非炭化植物化石の抵抗性高分子分析: 植物化石の化学分類. 日本地球化学会第61回年会, 富山大学(富山), 2014年9月17日.

Yuma Miyata, Hideto Nakamura, Ken Sawada, 2014 *n*-Alkyl compounds released from terrestrial plant-derived kerogens as new potential paleovegetation proxies, Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 11th Annual Meeting, Royton Sapporo Hotel, Sapporo, 1 August, 2014.

Takaaki Mori, Ken Sawada, Satoshi Furota, Gentaro Kawakami, 2014 Paleoenvironmental change reconstructed by thermos-chemolysis of kerogens in middle Miocene turbidite sediments of the Kawabata Formation, central Hokkaido, Japan. Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 11th Annual Meeting, Royton Sapporo Hotel, Sapporo, 1 August, 2014.

Miyata, Y., Nakamura, H., Sawada, K., 2014. Paleovegetation changes reconstructed by new proxies for *n*-alkyl lipids released from terrestrial plant-derived kerogens by hydrolysis in Cretaceous sediments, Hokkaido, Japan. Bremen University, National Taiwan University, Vietnam National University Hanoi University of Science and Hokkaido University Joint Workshop Recent developments in Paleoenvironmental studies', Hokkaido University (Sapporo), Japan, 14-17 February 2014.

宮田遊磨, 沢田健, 中村英人, 池田慧, 2013. 北海道白亜系堆積物中の陸上植物

由来ケロジェンの加水分解性脂肪酸・アルカノール組成比による古環境変動の復元．日本地球化学会第 60 回年会，筑波大学（つくば），2013 年 9 月 11 日．

宮田遊磨，沢田健，中村英人，池田慧．
2012. 北海道中部，白亜系堆積物中の陸上植物由来ケロジェンの抵抗性高分子分析：新しい古植生指標の提案．日本地球化学会第 59 回年会，九州大学（福岡），2012 年 9 月 13 日

中村英人・沢田健・池田 慧・高橋正道．
2012. 双葉層群芦沢層より産出した植物小型化石のテルペン類組成からみた化石化初期過程．日本古生物学会 2012 年年会，名古屋大学（名古屋）2012 年 6 月 30 日．

宮田遊磨，沢田健，中村英人，池田慧．
2012 北海道白亜系堆積物中の陸上植物由来ケロジェンの結合態分子組成：陸域古環境指標の検討．日本地球惑星科学連合大会，幕張メッセ（千葉），2012 年 5 月 23 日．

〔その他〕

ホームページ等

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

<http://www.geol.tsukuba.ac.jp/strati/hisadaHP/hisada.html>

<http://www.ep.sci.hokudai.ac.jp/~sawada/k/>

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

(2)研究分担者

久田 健一郎 (HISADA Ken-ichiro)

筑波大学・生命環境科学研究科(系)・
教授

研究者番号： 50156585

(3) 研究分担者

沢田 健 (SAWADA Ken)

北海道大学・理学(系)研究科(研究院)・
准教授

研究者番号 20333594