

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月 29日現在

機関番号：32689

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22740332

研究課題名（和文） 気候による化学風化作用の定量と古気候解析の新指標の提示

研究課題名（英文） Quantitative evaluation of chemical weathering effect and development of paleoclimate index

研究代表者

太田 亨（OHTA TOHRU）

早稲田大学・教育・総合科学学術院・准教授

研究者番号：40409610

研究成果の概要（和文）：本研究では、土壌の化学組成と土壌生成場の気候との関係性を多変量統計学によって明らかにした。この結果、寒冷・寒冷湿潤・ステップ・温暖湿潤・乾燥・半乾燥・熱帯雨林気候帯の土壌を識別するスキーム（W 値）を開発した。さらに、このスキームを古土壌の化学組成に適応することによって古気候を解析する新たな指標を提示した。北海道と中国大陸の白亜系に対して、本手法を適用したところ、酸素同位体による既存の古気温データと相関する W 値の時系列データを得られた。したがって、W 値を利用した古気候解析方法は有効であることを確かめた。

研究成果の概要（英文）：The present study aims to unravel the relationship between geochemical changes during soil formation and relevant climatic conditions that induce geochemical modification. As a result, newly invented geochemical index successfully discriminated soils developed on boreal, boreal humid, steppe, temperate humid, arid, semi-arid and tropical rainforest climates. This geochemical index could be applied to paleosols to evaluate climatic conditions of the past. Applications to the Cretaceous strata in Hokkaido and Northern China revealed that geochemical paleoweathering W index are concordant with paleoclimatic changes, and verified that the W index would serve as a new paleoclimate proxy.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2012年度	700,000	210,000	910,000
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・地質学

キーワード：風化作用，土壌組成

### 1. 研究開始当初の背景

岩石の化学風化作用は、気候条件によって左右される。この関係を利用して、風化岩石の化学組成から気候を判別する研究が多く進められてきた。しかしながら、風化岩石の組成は、気候と共に、源岩の初生的な化学組成をも反映しているという問題点があった。例えば、図1（左）のように、従来の化学風

化指標（CIA）で角閃岩と珪質火砕岩の風化過程を評価すると、強度に風化した角閃岩ならびに未風化な珪質火砕岩はともに 50 程度の値を示してしまう。したがって、従来の風化指標は、源岩組成を是正していないために、化学組成から気候を判別できない状況にあった。本研究の位置づけと動機は、このような問題点の新たな打開策を提唱することに

あった。

研究代表者は、“源岩の種類による化学組成変化”と“風化作用による化学組成変化”の両情報を独立化することに成功し、化学風化作用のみに起因する W 値を開発した。図 1 (右) の例では、角閃岩も珪質火砕岩も未風化な源岩では W 値は一定でゼロになる。この指標を風化作用の最終産物である土壌と古土壌に利用すれば、化学組成からよりの確に気候を判別できるのではないかとという作業仮説の着想に至った。

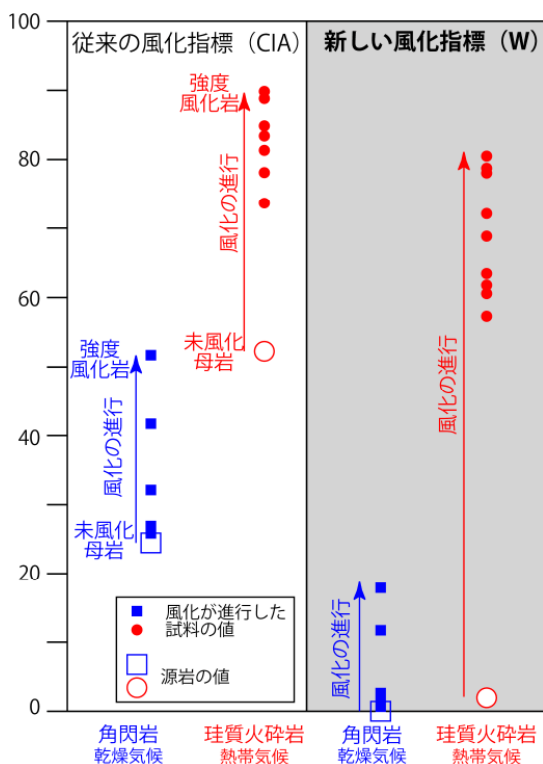


図 1：従来の指標と新しい指標による角閃岩と火砕岩の風化過程の比較。CIA は風化の進行だけではなく源岩の種類によっても値が変化するが、W は源岩組成に依存しない。

## 2. 研究の目的

(1) 気候が既知である現世土壌を分析して、気候を判別する W 値の閾値を明らかにすることを研究の第 1 の目的とした。図 1 (右) の角閃岩は乾燥気候、珪質火砕岩は熱帯雨林気候における岩石風化過程を示しているが、結滞雨林気候における風化作用の方が明らかに高い W 値を示しており、温暖・湿潤化と、W 値に明らかな相関がみとれる。この相関関係により定性的に尺度を与えて、W 値から気候帯を判別できるようにすることが第 1 の目標である。

(2) 上記を踏まえて、W 値から風化作用の最終産物である古土壌、ないしは、泥岩の化学組成から地質時代における古気候の復元

への利用を模索・提唱する。

## 3. 研究の方法

(1) の目標達成のために、全世界の現世土壌の化学組成を網羅的に集めて、土壌組成と化学組成の因果関係を解明することを目指した。このために、極域から赤道直下まで、全世界の土壌化学組成を約 1500 データ収集して、W 値によって解析した。

(2) の為の手法として、古気候に関する知見が豊富に蓄積している中国の白亜系熱河層群相当層 (遼寧省、河北省、黒竜江省) ならびに、北海道の白亜系蝦夷層群を研究地域として選び、蛍光 X 線分析によって W 値を測定した。また、(1) の気候が既知である現世土壌での解析結果を古気候解析にフィードバックできるのかを検証した。

## 4. 研究成果

(1) 化学量論などに基づいた風化指標は以前にも存在していたが、本研究では多変量統計学に基づく風化指標を初めて提唱した。多変量統計学に基づいて、源岩による組成変化を相殺した後の W 値は、現世土壌では、気候帯によって明らかに異なる値を示した。この結果、源岩の種類に依存した化学組成変化に左右されない古気候の指標を初めて提唱できた。約 1500 の現世土壌データを解析した現在の所、W 値を用いることで中央値の 95% 信用領域で、寒冷・寒冷湿潤・ステップ・温暖湿潤・乾燥・半乾燥・熱帯雨林気候帯の土壌を識別できることがわかった (Ohta et al., 2011)。この成果の今後展望として、まず、土壌の化学組成のみから気候を判別できることがあげられる。また、気候と土壌化作用の関係解明だけでなく、近年、食物生産量の低下が危惧されている土壌劣化の指針として、W 値が活用できることが期待される。

(2) の成果として、土壌や泥岩の化学組成から古気候変動を分析する際に、国内外のどの論文も、後背地の源岩が変化していなかったという暗黙の了解にのっていた。これは、古土壌の化学組成データの場合、源岩が何であったか不明な場合が多いからである。本研究結果が提唱する方法は源岩組成に依存しないので、このような不確実な前提条件が不要になった上で、どのような種類の源岩であっても解析が可能となった。

河北省の下部白亜系の解析結果では、Berriashian 期から Aptian 期に向けて、後背地風化度の増加 (W 値の上昇) が検知された (図 2)。この期間は、全球的に古気温が上昇していた時期に当たり、後背地風化度はこの上昇と正相関を示している。気温の上昇と大気二酸化炭素濃度の上昇は、大陸地殻の風化作用を促進するので、W 値は直接的に温暖化を

検知したと考えられる。従来は、古気候の復元に、有孔虫化石やカルクリートの同位体分析が必要であった。したがって、有孔虫化石やカルクリートが産出しない地層に対しては古気候の復元が不可能であった。本論提示の方法であれば、泥岩試料さえ入手できれば解析可能なので汎用性の高い古気候解析ツールであると言える。

河北省の下部白亜系で検知した温暖化の程度は、現世土壌の生成環境に換算すると、ステップ気候から温暖湿潤気候へのシフトに相当する(図2)。また、この温暖化を示唆するデータは、生物多様性ならびに生物進化の時期との対応も認められた。W値でステップ気候から温暖気候への変化を検出した時期は、北中国では鳥類の前身である羽毛恐竜や世界最古の部類に属する被子植物が誕生した時期に合致している。この結果から、気候変化による動植物群にとって適した環境改善が古生態に影響し、新たな進化への足がかりになった可能性が示唆される(Ohta et al., 2011)。

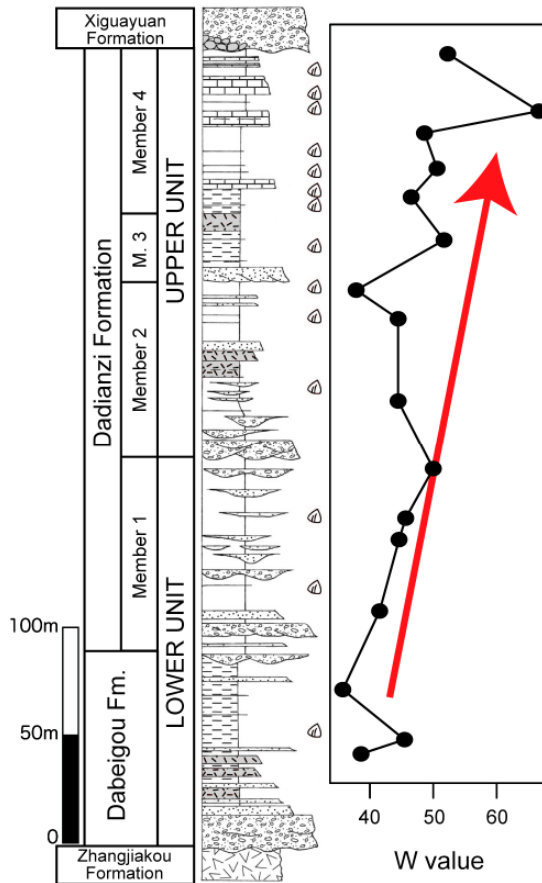


図2：河北省の下部白亜系のW値変遷。W値が上昇していることから、古環境が温暖・湿潤化したと考えられる。羽毛恐竜と花化石初出層準は、Dadianzi層のMember 1とMember 2の境界付近。

河北省の白亜系と同時期の黒竜江省の白亜系は、古緯度としては、さらに北部に位置しているにもかかわらず、河北省よりも、より温暖、なしは、湿潤であった可能性を示す結果が得られた。この関係性は、当時の地形的な要素をW値が検知したものと考えられる。当時の河北省の白亜系は陸弧山脈より内陸側に位置していたが、黒竜江省の白亜系は陸弧より海側に位置していた。したがって、黒竜江省では古太平洋からもたらされる湿気によって湿潤な環境におかれていたが、陸弧より背後の河北省では山脈に遮られて乾燥化が進んでいたと考えられる。そのために、南部の河北省より、北部の黒竜江省の方がより高い後背地風化度を経験したと考えられる。岩相的にも、黒竜江省の白亜系は、採掘可能な石炭層を多産し、湿潤な森林環境を備えていたことがわかっている。一見、北部の黒竜江省ほど大陸地殻が風化していたという矛盾する結果が得られたように見えるが、古地形を鑑みると、W値は古気候に関する有用な情報を提供したと考えられる。したがって、W値を利用した考察は、古緯度のみならず、古地形に関する推察も可能にすることができることが判明した。

蝦夷層群に関する研究では、Aptian期からMaastrichtian期にかけての後背地風過程の復元をおこなった。後背地風化度の変遷は、酸素同位体によって復元されている白亜紀の古気温プロファイルに類似した変動パターンを示した。この結果は、W値が古気候の復元に有用であることを示している。また、このことは東アジア大陸縁辺では、気温変化が大陸地殻の風化作用を制御していたことも示唆している。

蝦夷層群においては、Cenomanian/Turonian境界における高解像度解析も小平地域で実施し、海洋無酸素事変(OAE2)と大陸地殻風化作用との関連性を探った(図3)。小平地域では、C/T境界に明瞭な炭素同位体の正シフトが存在し、このシフト期間がOAE2に相当することが解明されている。後背地風化度は、OAE2インターバルで大きく増加していることが判明した(図3)。OAE2下位層準のW値はステップ気候帯に発達する土壌と同程度の値であるが、OAE2層準では、温暖湿潤気候の現世土壌と同程度の値に上昇している。つまり、OAE2時には、気候帯が変わるほど重大な温暖化が起っていたことが判明した。この風化作用の増大に伴って、大量の栄養塩が海洋に流入したこともマスバランス演算で示された。さらに、後背地風化は、OAE2層準よりやや下位層準から上昇している。したがって、温暖化、風化作用の増大は海洋無酸素事変に先行するイベントであったことがわかる。

多くの数値シミュレーション研究では、海洋無酸素事変の発生機構として以下のシナリオを提唱している。(1) 温暖化と、オン通ジャワ海台の火山活動によって大気中二酸化炭素濃度が上昇する。(2) 大陸地殻の風化作用が促進する。(3) 風化作用で流失した栄養塩が海洋に流入する。(4) 富栄養化に伴い一次生産者が大量発生した。(5) 過剰に増えた一次生産者が溶存酸素を消費しきり、海洋無酸素化した。

今回得られた知見は、上記の数値シミュレーションによる提唱と調和的な結果を示している。特に、海洋無酸素事変には風化作用増大が必要としている点、風化作用増大が海洋無酸素事変に先行する点を実証している。

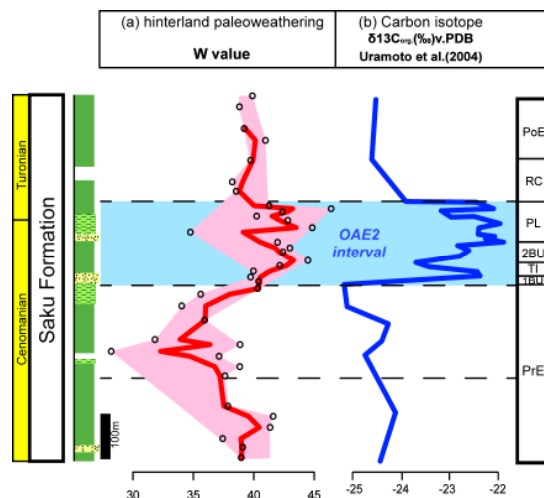


図3：小平地域における後背地風化度の変遷(左)と炭素同位体曲線(右)

まとめると、現世土壌の化学組成を参照値として利用し、W値がどの程度の値だと、どのような気候帯に属するのかを定性的に判別する指標を提示した。

上記の指標を利用して、本研究ではW値が古気候解析のツールとして有効であることを示した。特に、この指標によって以下の問題解決に活用できることを示した。(1) 古気候解析、(2) 古地理解析、(3) 海洋栄養塩の供給様式。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

Ohta T., Li G., Hirano H., Sakai T., Kozai T., Yoshikawa T., Kaneko A. (2011) Early Cretaceous Terrestrial Weathering in Northern China: Relationship between

Paleoclimate Change and the Phased Evolution of the Jehol Biota. *Journal of Geology*, **119**, 81-96.

Ohta T., Arai H. and Noda A. (2011) Identification of the unchanging reference component of compositional data from the properties of the coefficient of variation. *Mathematical Geosciences*, **43**, 421-434.

〔学会発表〕(計20件)

長谷川ほか(2010)モンゴルのジュラ系-白亜系湖成層を対象とした陸域古環境変遷の高解像度復元。日本地球惑星科学連合2010年大会。

Hasegawa et. al. (2010) Reconstruction of terrestrial paleoenvironmental changes during the intervals of Oceanic Anoxic Events (OAEs) from Jurassic-Cretaceous lacustrine deposits in SE Mongolia. *117th Ann. Mt. Geol. Soc. Japan*.

Hasegawa et. al. (2010) Reconstruction of terrestrial paleoenvironmental changes during the intervals of Oceanic Anoxic Events (OAEs) from the Jurassic-Cretaceous lacustrine deposits in Southeast Mongolia. 5th Int. Symp. IGCP507.

安藤ほか(2010)モンゴル南東部のジュラ系-白亜系湖成頁岩層から復元する海洋無酸素事変期の陸域古環境(概報)。日本古生物学会第160回例会。

Hasegawa et. al. (2011) Paleoenvironmental and paleoclimatic reconstruction of the Jurassic-Lower Cretaceous lacustrine deposits in the eastern Gobi Basin, southeast Mongolia. 6th Int. Symp. IGCP507.

Hirano et. al. (2011) Toward the international correlation of the Jehol Group-technical problems of stable carbon isotope stratigraphy. 6th Int. Symp. IGCP507.

Ohta et. al. (2011) Early Cretaceous terrestrial weathering in NE China: Relationship between paleoclimate change and the phased evolution of the Jehol Biota. 6th Int. Symp. IGCP507.

Li et. al. (2011) Conchostracans from lacustrine deposits in the Eastern Gobi Basin, southeastern Mongolia. 6th Int. Symp. IGCP507.

上形ほか(2011)北海道天塩中川地域の蝦夷層群における白亜系OAE”風化仮説”の検証。日本地質学会第118年学術大会。  
安藤ほか(2011)モンゴル南東部、ゴビ砂漠における湖成堆積物中のジュラ系-下部白亜系カイエビの古生物学的研究。日本地質学会第118年学術大会。



- 長谷川ほか (2011) モンゴルの白亜系湖成層中に見られる堆積リズムの起源：白亜紀海洋無酸素事変期の陸域環境変動解明に向けて。日本堆積学会 2011。
- 太田ほか (2012) 北中国における下部白亜系の古気候解析と熱河動植物群進化の関係。日本地質学会第 118 年学術大会。
- 長谷川ほか (2012) モンゴル南東部のジュラ系—白亜系湖成頁岩層から復元する海洋無酸素事変期の陸域古環境。日本堆積学会 2011。
- 新谷ほか (2012) モンゴル南東部白亜系湖成層の鉱物・全岩化学組成を用いた湖水面変動の解読。日本堆積学会 2012。
- 太田ほか (2012) 北中国における下部白亜系の古気候解析と熱河動植物群進化の関係。日本堆積学会 2012。
- 田中ほか (2012) 中国北部、遼寧省・黒竜江省における前期白亜紀の後背地風化過程と古地理・古気候の関係。日本堆積学会 2012。
- 新垣ほか (2012) ニュージーランド沖における IODP 第 329 次掘削試料の岩相層序、地球化学組成、鉱物組成：南太平洋における白亜紀-第三紀の古環境変遷。日本堆積学会 2012。
- 安藤ほか (2012) モンゴル南東部ゴビ砂漠シネフダグ地域の湖成相（下部白亜系）におけるカイエビ化石とその有律的産状。日本古生物学会第 161 回例会。
- Ohta et. al. (2012) New rigorous provenance discrimination diagrams restoring original source rock compositions by adjusting the effects of source area weathering and hydraulic sorting processes. Int. Ass. Sediment.
- Kamigata et. al. (2012) Examination of weathering hypothesis as a cause of the Cretaceous OAEs: A case study from the Yezo Group, northern Japan. Int. Ass. Sediment.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

太田 亨 (Ohta Tohru)

早稲田大学・教育・総合科学学術院・准教授

研究者番号：40409