

氏名・(本籍)	あん ど あつ し 安 渡 敦 史
学位の種類	博 士 (理 学)
学位記番号	理博第2041号
学位授与年月日	平成15年3月24日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科, 専攻	東北大学大学院理学研究科 (博士課程) 地学専攻
学位論文題目	Aptian-Albian (mid-Cretaceous) carbon isotope records of terrestrial organic matter and carbonates from Pacific regions: Chronostratigraphic and paleoenvironmental significance (白亜紀中期 (アプチアン-アルビアン期) 太平洋地域の炭酸塩と陸源性有機物の炭素同位体比変動に基づく編年層序学的・古環境学的研究)
論文審査委員	(主査) 教授 海保邦夫 教授 大槻憲四郎, 箕浦幸治 助教授 井龍康文

論 文 目 次

Abstract

1. Introduction
2. Significance of stable carbon isotope studies in the context of the ocean-atmosphere-terrestrial biosphere system
3. Geology, stratigraphy and depositional setting of the Lower Cretaceous System in the Ashibetsu-Oyubari area, Hokkaido, Japan
 - 3.1. Introduction
 - 3.2. Lithostratigraphy and chronostratigraphy
 - 3.3. Sedimentary geology of the Yezo Group (lower part)
 - 3.3.1. General descriptions of lithofacies and sedimentary facies
 - 3.3.2. Remarkable change in the thickness of the Refureppu trough-fill turbidites
 - 3.3.3. Role of synsedimentary fault activities in the stepwise shift of depositional centers
 - 3.4. Depositional history and tectonic evolution: A comparative study with the Jurassic-Cretaceous arc-trench system in the California Coast Range
4. Aptian-Albian carbon isotope stratigraphy of terrestrial organic matter in the Ashibetsu area, Hokkaido, Japan
 - 4.1. Introduction
 - 4.2. Samples and Analytical Methods
 - 4.3. Biostratigraphy
 - 4.4. Results
 - 4.4.1. Description of sedimentary organic matter
 - 4.4.2. Degree of thermal maturation

- 4.4.3. Stratigraphic variations of TOC contents and $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ values
- 4.5. Discussion
 - 4.5.1. Predominance of detrital woody materials in SOM
 - 4.5.2. Effect of diagenetic alteration on the $\delta^{13}\text{C}$ composition of SOM
 - 4.5.3. Correlation to $\delta^{13}\text{C}$ profiles of coeval marine carbonates
 - 4.5.4. Implications for other $\delta^{13}\text{C}_{\text{wood}}$ records
- 5. Stable isotope records of Aptian-Albian deep-sea carbonates from the Mid-Pacific Mountains, Deep Sea Drilling Project Site 463
 - 5.1. Introduction
 - 5.2. Deep Sea Drilling Project Site 463
 - 5.3. Analytical Methods
 - 5.4. Chronostratigraphy
 - 5.5. Results
 - 5.5.1. Stable carbon and oxygen isotope records
 - 5.5.2. Sr/Ca ratios
 - 5.6. Discussion
 - 5.6.1. A new chronostratigraphic framework based on carbon isotope data
 - 5.6.2. Modeling burial diagenetic processes
 - 5.6.3. Correction for primary $\delta^{18}\text{O}$ variations: Semi-quantitative approach using Sr/Ca ratios
 - 5.6.4. Implications for Aptian-Albian evolution of Pacific sea surface temperatures at low latitudes
- 6. Implications: Case studies of multidisciplinary paleoenvironmental analyses based on Aptian-Albian terrestrial and marine $\delta^{13}\text{C}$ records
 - 6.1. Significance of $\delta^{13}\text{C}_{\text{wood}}$ records for Aptian-Albian paleoenvironmental analysis
 - 6.2. Identification of time-equivalent horizons of Tethyan OAEs and stage boundaries in Pacific region
 - 6.3. Reconciliation of large $\Delta \delta^{13}\text{C}_{\text{carbonate} - \text{wood}}$ values in the Late Aptian: A possible $\delta^{13}\text{C}$ paleothermometer?
 - 6.4. Late Aptian occurrence of platform carbonates in Hokkaido and its bearing on a comparative paleoceanography between the Pacific and Tethys-Atlantic oceans
- 7. Summary
- Acknowledgements
- References

論 文 内 容 要 旨

はじめに

白亜紀中期のAptian期～Albian期は、火山活動の極大化に伴う大気 CO_2 濃度の増加により、著しく温暖化した時代とする見解が一般的である。この時期は広域にわたる黒色頁岩の堆積や、海洋・陸上生物の衰退・進化的出現・急速な多様化など、古環境・生物進化の上でも特異な時代である。これら火成活動と古環境・生物イベントの対応関係を明らかにし、温室地球期の生物地球化学サイクルを統一的に理解すべく、国際的に総合研究が進められている。

Aptian-Albian期の古環境研究は、その中心が地中海テチス-大西洋地域に偏っており、太平洋地域に

おける包括的なケーススタディに乏しく、未だ全球的な地球環境のモデル化が適切に行われていないのが現状である。太平洋地域の研究を妨げてきた要因は、編年層序の構築の困難さによる所が大きく、例えば白亜紀のsuperchronによる古地磁気層序の不成立・生層準の異時性やendemism（固有種の優占）による化石層序の解像度の低下・続成作用による化石の保存効率の低下・深海堆積物の回収率の低下などが挙げられる。

近年、炭酸塩と陸源性有機物の炭素同位体比（ $\delta^{13}\text{C}$ ）変動に高度な同調性が存在することが、様々な地質時代から報告されてきた。これは、海洋の溶存無機炭酸と陸上植物の $\delta^{13}\text{C}$ 組成が大気 CO_2 を介してリンクしており、かつ両者の同位体的な差は温度変化に影響されないことによる。陸源性有機物の炭素同位体組成による化学層序は、過去の大気-海洋システムの $\delta^{13}\text{C}$ 変動を確立する上で、また非石灰質堆積物の高解像度な層序対比を実現する上で、極めて有効であると考えられている。

このような背景に基づき、本研究では北海道芦別-大夕張地域（夕張山地北西部）の空知層群-蝦夷層群の陸源性有機物、および中央太平洋（DSDP Site 463）の遠洋性石灰岩について同位体分析を行い、炭素同位体層序により太平洋地域のAptian-Albian階について地中海テチス地域と同等の編年層序の枠組みを確立することを主な目的とした。さらに、炭素同位体層序に基づいて異なる堆積環境の様々な古環境情報を同一の時系列に総合する“多分野統合古環境解析”を試み、その結果として導かれる白亜紀古環境研究の新展開について議論した。

陸源性有機物に基づく北海道のAptian-Albian階の炭素同位体層序

堆積有機物の $\delta^{13}\text{C}$ 分析は、Aptian-Albian階に相当する空知層群惣芦別川層~蝦夷層群日陰の沢層の下部から採取した計230の泥岩試料について行った。同位体分析のほか、堆積場の復元・浮遊性有孔虫化石年代・堆積有機物組成と熟成度も併せて検討した。

酸処理により抽出した有機質残渣について透過光・蛍光・反射光下で堆積有機物組成を検討した結果、陸上高等植物の材組織に由来する半透明~不透明構造性有機物が卓越し、少量の表皮組織、孢子・花粉、渦鞭毛藻シストが含まれるが、植物プランクトンに由来する不定形有機物は認められないことが対象層序区間の全般において確認された。有機質残渣の水素/炭素原子比から推定した熟成度から、埋没続成作用による有機物の変質は顕著ではなく、本来の $\delta^{13}\text{C}$ 組成が保持されていると判断された。

$\delta^{13}\text{C}$ 曲線には、Aptian期前期に変動幅 $\sim 3.6\%$ （ $-25.4 \rightarrow -21.8\%$ ）の顕著な同位体異常をはじめ、Aptian期最後期（ $\sim 1.1\%$ ： $-24.2 \rightarrow -23.1\%$ ）、Albian-Cenomanian境界付近（ $\sim 1.1\%$ ： $-24.9 \rightarrow -23.8\%$ ）において正のexcursionが認められたほか、重複する7つの変動幅 $0.5 \sim 1\%$ の小規模なピークが認められた。これら $\delta^{13}\text{C}$ 変動は、異なるセクションで再現性があることから、Aptian-Albian期の後背地における陸上高等植生の平均的 $\delta^{13}\text{C}$ 組成の経時変動が反映されていると考えられる。

Aptian-Albian期の炭酸塩の $\delta^{13}\text{C}$ 変動に関する研究は、イタリア・フランスを中心とする地中海テチス地域の遠洋性石灰岩を用いて進められており、特定の時代に顕著な正のexcursionを持つ標準的な曲線が確立されている。この同位体異常は、“海洋無酸素事変”により軽い ^{12}C に富む植物プランクトンの有機物が有機炭素濃集層として固定された結果、海洋の溶存無機炭酸の ^{13}C 濃度が相対的に上昇したことで説明されている。

今回北海道の陸源性有機物の分析により得られた $\delta^{13}\text{C}$ 曲線は、地中海テチス地域の遠洋性石灰岩のカーブに非常に類似しており、両者の同調性は浮遊性有孔虫化石との複合層序から強く支持される。また、中央太平洋Resolution Guyot（ODP Site 866）の浅海性炭酸塩の $\delta^{13}\text{C}$ 曲線とも高い類似性が認められる。このような炭酸塩のカーブとの高い同調性から、過去の大気-海洋システムの $\delta^{13}\text{C}$ 変動を精度良く追跡する上での陸源性有機物分析の重要性が、Aptian-Albian期についても実証された。これにより、これまで

化石層序の解像度が低く曖昧であった空知層群上部～蝦夷層群下部の年代を、北海道の白亜系の中では異例の高精度で決定した。

中央太平洋の深海掘削試料によるAptian-Albian期の炭酸塩の安定同位体記録

中央太平洋 (Mid-Pacific Mountains) のDSDP Site 463における上部Barremian階～中部Albian階 (掘削深度: 471.1–699.5 mbsf; 古緯度: ~10–15°S) の計74の遠洋性石灰岩試料について安定同位体分析を行い、炭素同位体比による化学層序・酸素同位体比 ($\delta^{18}\text{O}$) による古水温変動について検討を行った。浮遊性有孔虫化石年代・Sr/Ca比に基づく埋没続成作用の安定同位体組成に及ぼした影響の評価も併せて行った。

分析の結果、 $\delta^{13}\text{C}$ 比に関しては最大で4.8%に達する顕著な正の同位体異常がAptian期前期と後期にそれぞれ認められ、これまで他の地域において報告されている炭酸塩・有機物の結果と調和的なカーブが得られた。 $\delta^{18}\text{O}$ 比は-4.8‰から-0.8‰の間で変動し、(1) Barremian期後期–Aptian期前期の-2–3‰のplateau interval, (2) Aptian期後期の変動幅~2.4‰のプラス方向へのシフト, (3) Aptian期最後期～Albian期中期の変動幅~1.5–2‰のマイナス方向へのシフトからなる長期変動傾向が認められ、Aptian期後期の寒冷化を示唆する結果が得られた。埋没続成作用の過程において、chalkからlimestoneの領域への移行に伴うcementation calciteの獲得による酸素同位体組成の変化を、Sr/Ca比を用いて補正した。その結果、得られた $\delta^{18}\text{O}$ 曲線は初生的な水温変動傾向を反映していると結論され、Aptian期後期の低緯度太平洋地域における海水温が前後の時代と比較して10℃以上低下したことが示唆された。

Aptian–Albian期の古水温変動の復元は、これまで地中海テチス–大西洋地域の石灰質微化石・遠洋性石灰岩の $\delta^{18}\text{O}$ 組成に基づいてきた。しかしながら、厳密な“open ocean record”が存在せず、かつ続成作用・ハイエイタスにより信頼できるカーブが確立されていなかったため、この時代のまとまった酸素同位体のデータセットが提示されたのは本研究が初めてである。従来、Aptian–Albian期は海洋地殻生産量の復元から著しい温室地球環境が想定されてきたが、そのような見解の再検討の必要性が明らかになった。

考察：炭素同位体層序に基づく白亜紀中期太平洋地域の多分野統合古環境解析

炭素同位体層序を応用したAptian–Albian期太平洋地域の“多分野統合古環境解析”のケーススタディとして、以下の3つの項目について議論した。

- (1) 北海道におけるAptian–Albian期の陸源性有機物の $\delta^{13}\text{C}$ 曲線は、3つの顕著な正のexcursionに加え、変動幅0.5–1‰の小規模な変動についても炭酸塩のカーブと対比が可能であると認定された。その結果、地中海テチス地域の海洋無酸素事変 (OAE 1a・1b・1d) および階の境界の層準を精度良く特定され、今後の白亜紀中期の北西太平洋地域における高度な古環境解析を行う上での編年層序の枠組みを確立した。
- (2) この時代の陸源性有機物の $\delta^{13}\text{C}$ 曲線は炭酸塩の $\delta^{13}\text{C}$ 変動を忠実に反映する一方、両者の差 ($\Delta\delta^{13}\text{C}_{\text{carbonate-wood}}$) は後期Aptian期において例外的に~1.3‰拡大することが確認された。これはSite 463の $\delta^{18}\text{O}$ データに基づく寒冷化の時期とほぼ一致することから、その原因を著しい温度低下により HCO_3^- - CO_2 系の同位体分別が変化したことと求め、 $\Delta\delta^{13}\text{C}_{\text{carbonate-wood}}$ 値が温度計として使える可能性を指摘した。
- (3) 炭素同位体層序に基づき、北海道において礁性石灰岩 (*Orbitolina*石灰岩) が出現した時代を後期Aptian期の前半に限定した。Aptian期のグローバルな炭酸塩堆積記録を化学層序・化石層序に基づきコンパイルした結果、*Orbitolina*石灰岩の出現はテチス海–大西洋地域で広範囲に炭酸塩プラットフォームが衰退・沈水した時期、およびSite 463の $\delta^{18}\text{O}$ データによる寒冷期に相当することから、その特殊性を明らかにした。このことから、白亜紀における生物地球化学サイクルの複雑性・太平洋地域の重要

性を指摘し、今後当時の物質循環像を適切に復元する上で、太平洋とテチス海—大西洋の比較古海洋学的視点の必要性を提案した。

論文審査の結果の要旨

地質時代の温室地球環境の成立に関する研究は、CO₂増加による中・長期温暖化の予測に対する今日的な課題との関連から、その進展が強く望まれている。中でも白亜紀中期のAptian期～Albian期は、火成活動の加速度的進行に伴うCO₂の放出により、急激な温暖化と炭素循環の変動が起きた、いわば極限地球環境のモデルケースとして重視されている。しかしながら、この時代の研究は当時の地中海・大西洋の欧米諸地域に偏っており、太平洋地域の研究の蓄積に乏しく、未だ全球的視野に立った古環境復元がなされていない。

安渡敦史提出の論文は、Aptian期～Albian期の太平洋北西部と中央部における陸源性有機物と遠洋性炭酸塩の炭素同位体比の同調的変動に基づき、高解像度な国際対比を完成し、白亜紀中期のグローバルな地球環境像の復元を行う上での基礎を確立したものである。はじめに、北海道の空知層群～蝦夷層群から採取した陸源性有機物の炭素同位体曲線が、この時代の大気-海洋システムの炭素同位体比変動を忠実に反映していることを、浮遊性有孔虫との複合層序から確立し、北海道の白亜系における高解像度な編年層序を実現した。次に、中央太平洋の深海掘削による遠洋性石灰岩セクションについて、同様に炭素同位体比による化学層序を設定したほか、酸素同位体組成からAptian期後期が有意に寒冷化したことを明らかにした。最終的に、今回得られた新たな古環境データと欧米・太平洋諸地域から得られている従来の知見とを、炭素同位体曲線に基づいて同一の時系列に総合し、炭素同位体層序の白亜紀古環境復元における有効性を示し、太平洋地域の重要性と今後の展望について述べた。

本研究は、これまで欧米諸地域の成果に追随しがちであった白亜紀古環境研究に客観的視点を導入し、従来のモデルが確定的ではないことを示唆する結果を得ている点で重要である。これを契機に、今後は炭素同位体層序を軸として、白亜紀中期の古生物学的・地球化学的な時系列データの評価を適切に行うことで、この時代の地球環境像が格段に明確になるであろう。

以上、本論文は炭素同位体比変動に基づく高解像度な編年層序と古環境解析の重要な進歩であり、著者が自立して研究活動を行うに必要な高度な研究能力と学識を有することを示している。よって、安渡敦史提出の論文は博士（理学）の学位論文として合格と認める。