論 説
 Original Article

島根県隠岐諸島島後の国立公園に分布する中新統の珪藻化石層序

平松 力^{*,†}・高橋 利宏^{*}・東 将士^{*}・倉富 隆^{*}・入月 俊明^{**}・林 広樹^{**}

(Received August 31, 2016 ; accepted March 17, 2017)

Diatom biostratigraphy of the Miocene sequence in the national park in Dogo, Oki Islands, Shimane Prefecture, Japan

Chikara Hiramatsu, Toshihiro Takahashi, Masashi Higashi, Takashi Kuratomi
 Toshiaki Irizuki and Hiroki Hayashi

Abstract : The western offshore area of the Oki Islands is evaluated as one of promising area for oil and gas exploration, because of the thick accumulation of sedimentary rock based on the results of seismic surveys. To establish the chronostratigraphic framework with high resolution in the area, the biostratigraphic study of fossil diatoms was carried out for the samples collected from the Miocene Kumi and Tsuma Formations mainly exposed in the national park in Dogo, Oki Islands, Shimane Prefecture.

The *Crucidentacula kanayae* Zone (16.6–17.0 Ma) was recognized from the samples about 10 m above the lowermost lacustrine Kumi Formation in the Kumi River, which indicates that the geologic evidence of the first marine invasion related to the Japan Sea spreading was recorded in the northern part of Dogo. The Zone including the biohorizon D33, the last occurrence of *C. kanayae* (16.7 Ma), was found in the Nogoshi section exposed in the northwestern part of the island. The stratigraphic change of diatom assemblage suggests a gentle transgressive trend through the *C. kanayae* Zone. The specimens of *C. kanayae* yielded from the Kumi Formation are identified as *C. kanayae* var. *kanayae* showing a wide range of morphological variation. The shallow marine sandstone is expected to be a good reservoir rock distributed in the lowstand systems tract correlated with the layer just above the *C. kanayae* zone.

The *Crucidentacula nicobarica*, *Denticulopsis praedimorpha* and *Denticulopsis dimorpha* Zones were recognized from the Kumi Formation in an about 10 m thick section in the Nagu Peninsula area of the southwestern part of the island. This suggests a condensed sequence developed from late Middle to early Late Miocene in the area. The sequence which is correlative with the black mudstone, the Utagi Mudstone Member, seems to have the highest source rock potential in the area. The lower *Neodenticula kamschatica* Zone was recognized from the Igo Mudstone Member along the Nakanoura shore of the northern part of the Island. The Tsuma Formation showing lateral lithofacies changes in Dogo indicates low possibility of the cap rock existence for the unconformity play of the uppermost Kumi Formation.

Keywords : Diatom, biostratigraphy, Miocene, *Crucidentacula kanayae*, Kumi Formation, Tsuma Formation, Dogo, Oki Islands, Shimane Prefecture

1. はじめに

隠岐諸島周辺海域は前期中新世より発達した地質区であり、グリーンタフ地域と同様の地史をたどったと考えられ、しかも隠岐西方には地震探査断面の往復走時で最大 4 秒の堆積量が推定されている (天然ガス鉱業会・大陸棚石油開発協会, 1992b)。したがって、本海域においても東北地方日本海側地域と同様な石油システムが成立している可能

性があり、国内で残された石油天然ガス探鉱有望地域の 1 つといえる。しかし、東北地方と比較して山陰沖海域で掘削された坑井数は少なく、生層序に関するデータの蓄積が十分整っていないのが現状である。そこで本海域に分布する中新統の一部が陸域で露出している島根県隠岐諸島の島後における地質層序の調査を実施し、本海域の石油システム考察の一助とすることを目的として微化石分析を進めてきた。

平松ほか (2015) は島根県隠岐諸島島後に分布する中新統、久見層および都万層を対象に珪藻化石分析を実施し、以下のことを明らかにした。すなわち、久見層最下部から前期中新世の淡水生珪藻化石群集を初めて確認し、そ

* 石油資源開発株式会社 Japan Petroleum Exploration Co. Ltd.

** 島根大学大学院総合理工学研究科地球資源環境学領域 Department of Geoscience, Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Shimane University

† Corresponding author : E-Mail : chikara.hiramatsu@japex.co.jp

図1 調査地域位置図（図中のA～Dは図3の試料採取地域を示すA～Dに対応する）

の淡水成層を覆う海成層の珪藻化石帯は下部中新統上部の *Crucidenticula kanayae* 帯 (NPD3A; 16.6–17.0 Ma) あるいはそれより下位帯に相当することを示した。また、珪藻化石群集の層位的変化に基づき、久見層から都万層の環境変化を推定し、島後の北部と南部に分布する久見層の対比を試みた。さらに、島後において *Neodenticula kamtschatica* を初めて検出し、都万層の珪藻化石帯を明らかにするとともに、本種の日本海沿岸地域における生物地理区南西限の広がりを確認した。

ただし、これらの成果は島後に点在して分布する久見層と都万層のうち、内陸部に分布している試料のみを対象にしたものであった。今回、久見層が分布する島後海岸地域のうち大山隠岐国立公園内に分布する中新統の層序を明らかにする目的で、平成28年2月23日付けで土砂採取許可書（環国地国許第1602232号）を得て調査および試料採取を行った（図1）。また、久見川周辺からも追加して珪藻化石分析用試料を採取し、新たに久見層の放射年代測定も行った。

本調査では島後に分布する中新統久見層および都万層の珪藻化石帯を明らかにし、精度の高い地質年代を得ることを目的としている。とくに根源岩、帽岩となる珪質岩や泥質岩の地質年代とその広がりを確認するために、島後における各珪藻化石帯の地理的分布を明らかにすることを試みた。本調査を進める過程で、現時点で確認されている日本海沿岸地域の新第三系最下部の海生珪藻化石帯である *Crucidenticula kanayae* 帯の群集が複数地点で確認された。久見層下部から産出するこの珪藻化石群集に基づき、本地域における前期中新世後期の相対的海水準変動について考察し、貯留岩層準との関係を調べた。さらに、検出された *C. kanayae* の形態変化の時空分布は、前期中新世後期の古海洋環境復元あるいは珪藻化石層序区分のさらなる分解能向上に利用できる可能性があるため、久見層下部から産出する本種の形態的多様性を明らかにすることも本論の目的

図2 島後における久見層・都万層の模式層序

の1つとした。

2. 地質概要

島後に分布する中新統のうち珪藻化石を産出した久見層およびその上位の都万層のみを以下に記述する（図2）。なお、島後における地質概説、各層の層序関係については山内ほか（2009）に基づいている。久見層は不整合関係で下位の郡層に累重する。久見層最下部の淡水成層は久見川枝沢にわずかに分布する（平松ほか，2015）。岩相は主にシルト岩からなり、淡水生珪藻化石や植物化石を豊富に産出する。久見層下部は泥岩および砂岩・泥岩の互層からなり、久見層上部は珪藻土、珪藻質泥岩あるいは黒色泥岩からなる。島後南部に分布する珪藻土は飯山珪藻土層、歌木周辺に分布する黒色泥岩は歌木泥岩層と呼ばれている（山内ほか，2009）。久見層の堆積年代は前期中新世から中期中新世が主体で、一部後期中新世にまで及ぶ（林ほか，2011）。本層は点在して分布しており、その下限から上限まで連続して認められないため、全体の層厚は不明である。山内ほか（2009）によると、北部の久見川周辺で200 m以上、歌木周辺で500 m以上と見積もられている。久見層は不整合関係で都万層に覆われる。都万層は島後南部でもおもに砂質シルト岩、砂岩からなり、海生貝化石や生痕化石を産出し、上部中新統と考えられている（山内ほか，2009）。島後北部では南部より細粒となり、おもにシルト岩、泥岩からなる。流紋岩および同質火砕岩からなる上位の重栖層とは整合関係にあり、一部で指交関係にある。これらの地層の岩相・層厚は地域により大きく変化する。

3. 珪藻化石分析結果

3.1 処理方法

Akiba (1986) の方法に従って unprocessed strewn slide を作成し、倍率500倍で珪藻化石分析を行った。珪藻殻の算定は100個体を目安に実施した。分析時に検出された稀

表 1 珪藻化石產出表

[illegible]

図3 試料採取位置図; 国土地理院2万5千分の1地形図「隠岐北方」「西村」「都万」使用(図中のA~Dは図1の調査地域位置図A~Dに対応する)

産種および破片で認められた種は“+”印(present)で記録した。珪藻殻算定中に検出された *Chaetoceros* 属の休眠孢子(resting spores)の総個体数も同時に記録した。

珪藻化石産出表(表1)の産出頻度および保存状態に関する略語は以下の内容で用いた。すなわち、産出頻度についてはスライド中に検出された個体数に基づき、VR (very rare), R (rare), C (common), A (Abundant), VA (very abundant) の5段階で評価した。化石の保存状態については、VP (very poor), P (poor), M (moderate), G (good), VG (very good) の5段階で評価した。貧化石試料(Poor Diatom)はPD, 無化石試料(No Diatom)はNDとそれぞれ表記した。ある程度の産出個体が認められたにもかかわらず、化石帯認定ができなかった試料はNot Zoned(NZ)と記した(表1, 図3)。

本論において、珪藻化石帯の定義はYanagisawa and Akiba (1998)に、珪藻化石層序と年代層序の関係については柳沢・渡辺(2011)にそれぞれ従った。珪藻化石帯区分はNPD (Neogene North Pacific Diatom)コード、生層準はDコードを用いた。

3.2 珪藻化石群集

珪藻化石帯が認定された試料を中心に29試料の珪藻化石分析結果を表1に示した。試料採取位置は図3に示したので併せて参照されたい。平松ほか(2015)で判明した珪藻化石帯の情報も図3にNPDコードで示した。以下に図1に示した地域ごとに珪藻化石群集および珪藻化石帯について記す。なお、平松ほか(2015)が記載した *C. kanayae* 帯から特徴的に産出する *Triecratium* sp. Aは *Cymatogonia*

ablyoceras Hannaであることが判明したので、ここに記載し訂正する。

3.2.1 久見川(図3-A)

1) 久見川左岸枝沢(開削)

本地域には久見層が模式的に分布している(図4)。平松ほか(2015)で淡水生浮遊性珪藻化石群集の産出が確認されたKm-01地点(図3-AではLacustrineと記載)の北側にあたり、本ルートから採取されたKm-08~12の5試料から珪藻化石が検出された。

上記Km-01の3試料(Km-08~10)からは海生浮遊性珪藻化石群集が検出される。試料Km-11の直上の石灰質~凝灰質砂岩中には浅海を示唆する大型有孔虫化石 *Miogyopsina* が観察される。さらに上位には白灰色軽石質凝灰岩が累重し、試料Km-12はこの泥質な部分から採取した。さらに上位の白灰色で平行葉理の認められる粗粒軽石凝灰岩から放射年代値測定用試料(Km-B)を採取した。なお、南の沢でこの凝灰岩層に相当すると考えられる凝灰岩も併せて放射年代値測定用として試料採取を実施した(図3-AのKm-A)。

Km-08, 09からは *Crucidentricula kanayae*, *Thalassionema nitzschioides* を優占種とする海生浮遊性珪藻化石群集が認められた。珪藻化石層序の指標種である *C. kanayae*, *Crucidentricula ikebei* を産出することから、本試料は下部中新統上部の *C. kanayae* 帯(NPD3A; 16.6~17.0 Ma)に認定される。その上位のKm-10, 11の群集内容はKm-08, 09で検出された群集と類似し、*C. kanayae*, *C. ikebei* が認められない点を除くと共通点が多い(表1)。したがって、

試料採取地点の層位関係と指標種の *C. kanayae* が検出されないことを考慮すると、Km-10, 11 は *C. kanayae* 帯上部 (NPD3A; 16.6–16.7 Ma) であると考えられる。以上の珪藻化石帯認定に基づくと、Km-09 から Km-11 は下部中新統上部と考えられ、*C. kanayae* の消滅 (D33, 16.7 Ma) 層準に相当する生層準 D33 は試料 Km-09 と Km-10 の間に位置づけられる (図 4)。

本ルート最上位に分布する凝灰岩層から採取された試料 Km-12 からは淡水生珪藻化石群集が確認され、海生珪藻化石はまったく検出されない。浮遊性の *Auracoseira* 属が 26% を占め、随伴種は *Navicula* 属や小型の羽状目など底生種あるいは附着性種を主体とする。この群集内容は流水域を示唆する。海生・汽水生珪藻化石がまったく検出されないことから、河川成堆積物中の化石群集である可能性が高い。

地質年代の決定に有効な化石種の検出には至らないが、本群集からは *Cyclotella* 属や *Stephanodiscus* 属など鮮新世以降に出現した淡水生化石種が認められない。淡水～汽水生珪藻化石の層位学的活用として柳沢・工藤 (2011) は、*Auracoseira* 属は前期中新世より現世まで一貫して産出するのにに対し、*Cyclotella* 属は珪藻化石帯 NPD7Ba の中部 (約 6 Ma) より新しい層準のみに産出すると述べている。これに基づくと、本群集は 6 Ma より古い群集であると推察されるが、群集内における淡水生指標種の不在を根拠にした層位学判断は慎重に行う必要がある。後述する通り、本試料近傍の凝灰岩からは年代測定用試料 (Km-B) も採取されており、その測定結果によると本試料も下部中新統に含まれると判断される。

図 4 久見川左岸枝沢 (開削) ルート, Km-08～12, B 地点の柱状図および試料採取位置

2) 久見川右岸走向沢

上部中新統下部の *Thalassiosira yabei* 帯 (NPD5C; 10.0–11.4 Ma) が認定されている平松ほか (2015) の Km-04 と同等またはやや上位の Km-13, 14, PD の 3 試料を採取した (図 3-A)。

Km-14 地点では、珪藻質泥岩の上位に海緑石砂岩 (約 10 cm) が直接累重している関係が観察される。Km-13, 14 の両試料ともに上部中新統下部の *T. yabei* 帯 (NPD5C; 10.0–11.4 Ma) に認定される。したがって、本ルートの沢の入り口 (Km-04) から海緑石砂岩直下の珪藻質泥岩まで同一化石帯の *T. yabei* 帯に相当する。

3) 久見川右岸走向沢の南枝沢 (図 3-A)

本ルートからは 3 試料 (Km-15, 16, 17) を採取した。Km-17 地点では海緑石砂岩が認められ、さらに直上には重栖層の流紋岩が累重する。

3 試料から認められる群集内容は Km-13, 14 と同様で (表 1), 珪藻化石帯もすべて上部中新統下部の *T. yabei* 帯 (NPD5C; 10.0–11.4 Ma) に認定される。

3.2.2 伊後中の浦海岸 (図 3-B)

島後北部に位置する伊後中の浦海岸には灰色のシルト岩～泥岩を主体とする堆積岩が重栖層の流紋岩に囲まれるように分布している。岩相は全体的に泥質で風化すると小片状に割れやすい。層理面は明瞭ではないが、葉理が観察されることがある。貝化石や生痕化石を含む。上田・杉山 (1984) は伊後中の浦海岸の塊状泥岩から約 60 個体のオウナガイを採集し、詳細に記載した。

伊後中の浦海岸から採取した 6 試料のうち Nak-01 のみから珪藻化石の産出が確認され、本試料は上部中新統最上部の *Neodenticula kamtschatica*–*Nitzschia rolandii* 帯 (NPD7Ba) に認定される。*N. kamtschatica*, *Thalassiosira temperei* 両種の共産出から、地質年代は 5.4–6.5 Ma (D77.5-D75) と考えられる。

3.2.3 野越 (図 3-C)

本地域には久見層と考えられる地層が、他の分布域から離れて島後北西部海岸域に分布している。峠下の崖の露頭から試料間隔約 1 メートルごとに 11 試料 (Nog-03-0～10) を採取した (図 5)。野越の本地点から産出する珪藻化石分析結果は横田 (1984) で報告されており、その結果と整合的な結果が得られた。林道沿いの Nog-01 地点から検出される群集内容は *T. nitzschioides* を優占種とし、*Actinocyclus curvatus*, *Actinocyclus senarius* を伴う。指標種としては *C. kanayae* がわずかに検出されるので、下部中新統上部の *C. kanayae* 帯 (NPD3A; 16.6–17.0 Ma) に認定される。ただし、本地点は都万層分布域と考えられているので (山内ほか, 2009), 検出された珪藻化石群集は直下に分布する久見層由来の二次化石であると考えられる。Nog-02 からは *C. kanayae* は検出されないが、*C. ikebei* が認められるので *C. kanayae* 帯に認定される。

Nog-03 からは連続的に試料を採取したので、その採取位置と珪藻化石群集を図 5 に示した。珪藻種の生息水域・生活型の違いに基づき、淡水生種、海生底生種、海

図5 野越 Nog-03 地点の柱状図，試料採取位置および珪藻化石群集と *Chaetoceros* 属の休眠胞子個体数の層位的変化

生浮遊性種に3区分し、その層位的変化を示した。また、*Chaetoceros* 属の休眠胞子の個体数の変化も併せて図示した。Nog-03-0 から上位へ向け Nog-03-10 までは塊状の珪藻質シルト岩からなり、各試料からは産出頻度、保存状態ともに比較的良好な珪藻化石群集が連続的に検出された。群集内容は試料ごとに大きく変化するが、共通した特徴は海生浮遊性種の *T. nitzschioides* を主体とすることである。珪藻化石帯認定に有効な種としては、*C. kanayae* の産出が Nog-03-0～03-5 で連続的に認められる。したがって、これらの試料は下部中新統上部の *C. kanayae* 帯 (NPD3A; 16.6–17.0 Ma) に認定される。*C. kanayae* 帯の上位帯である *Denticulopsis praelauta* 帯を規定する *D. praelauta* は本セクションからはまったく検出されないで、Nog-03-6～03-10 は *C. kanayae* 帯上部 (NPD3A; 16.6–16.7 Ma) に認定される可能性が高い。*C. kanayae* の消滅層準である D33 (16.7 Ma) が Nog-03-5 と Nog-03-6 の間に位置づけられる (図5)。

3.2.4 那久～寺山林道 (図3-D)

那久岬から北方の油井の池に至る旧道沿いにわずかに分布する久見層から4試料 (Nag-01, 02, 03, 04) を珪藻化石分析用として採取した。試料 Nag-02 は転石試料である。

Nag-01 は中部中新統上部の *Denticulopsis praedimorpha* 帯 (NPD5B; 11.4–12.7 Ma) に認定される。Nag-02 (転石) および Nag-03 からは指標種である *Denticulopsis dimorpha* を産出することから、上部中新統下部の *D. dimorpha* 帯 (NPD5D; 9.3–10.0 Ma) に認定される。さらに北方の Nag-04 からは *D. dimorpha* および *D. praedimorpha* は検出されない一方、*Denticulopsis hustedtii* s.l. が検出されるほか、*Crucidenticula nicobarica* を特徴的に伴うことから、本試料は中部中新統の *C. nicobarica* 帯 (NPD5A; 12.7–13.1 Ma) に認定される。なお、*D. praedimorpha* 帯と *D. dimorpha* 帯の間に位置する上部中新統下部の *Thalassiosira yabei* 帯

(NPD5C; 10.0–11.4 Ma) は那久において確認されなかった。

以上の結果に基づく、塊状珪藻質泥岩からなる露頭の高さから判断して見かけ上 10 m 程度の薄い層厚の久見層は、少なくとも3つの珪藻化石帯から構成され、中期中新世から後期中新世初期の 300～400 万年間に非常に堆積速度の遅い環境下で堆積したと考えられる。

寺山東側中腹の標高 180 m 付近をほぼ水平に走る寺山林道に沿って、珪藻質泥岩が途切れ途切れに露出する。珪藻質泥岩は重栖層の流紋岩の分布域の中に点在するように分布しているので、大きなブロックであると考えられている (山内ほか, 2009)。本ルートから1試料 (Ty-01) を珪藻化石分析用試料として採取した。

Ty-01 からは指標種としては *D. hustedtii* s.l. が検出されるほか、*C. nicobarica* を特徴的に伴うので、本試料は中部中新統の *C. nicobarica* 帯 (NPD5A; 12.7–13.1 Ma) に認定される。

4. 放射年代測定結果

島後の中新統から得られた珪藻化石年代の結果を補強する目的で、放射年代測定を並行して実施した。前処理・測定はフィッシュントラック年代 (以下 FT 年代) と U-Pb 法年代の測定を(株)京都フィッシュン・トラック社に依頼して行った。

測定結果を表2にまとめた。なお、FT 法と U-Pb 法の結果の精度については、自発トラック密度が FT 法に比べて、U-Pb 法の方が多いことから、U-Pb 法の年代に信頼性があるという結果が得られた。

Mn-02 は飯山珪藻土層から採取した試料で、中部中新統中部の *Denticulopsis hyalina* 帯下部 (NPD4Ba; 14.1–14.5 Ma) に認定された (平松ほか, 2015)。同一地点に挟在する凝灰岩の U-Pb 年代は 14.3 ± 0.4 Ma で、珪藻化石年代と一致する年代結果が得られた。

表 2 放射年代測定結果一覧表

試料番号	層 準	採取場所	岩石名	FT 年代 (Ma)	U-Pb 年代 (Ma)
Mn-02 平松ほか (2015) の図 3-F	久見層(飯山珪藻土)	箕浦珪藻採土場	白色砂質凝灰岩	16.9 ± 0.9	14.3 ± 0.4
Km-A 図 3-A	久見層下部	久見川左岸枝沢二股	灰白色砂質凝灰岩	16.2 ± 1.7	17.1 ± 0.9
Km-B 図 3-A 図 4	久見層下部	久見川左岸枝沢(開削)	軽石質火山礫凝灰岩	21.1 ± 3.9 参考値	17.6 ± 0.6
Nog-03-11 図 5	久見層下部	野越 (崖)	白色細粒凝灰岩	17.4 ± 3.0	17.7 ± 0.4

久見川から採取した 2 試料からはほぼ同じ U-Pb 年代が得られ、下部中新統の久見層下部に対比される凝灰岩である可能性が高い。Km-B は同一ルートの下位層準で下部中新統上部の *C. kanayae* 帯 (NPD3A; 16.6–17.0 Ma) が認められている。得られた年代値 (17.6±0.6 Ma) は、誤差を含めて考慮すると珪藻化石年代と整合的である。

野越 (崖) においても測定された凝灰岩の直下に下部中新統の *C. kanayae* 帯が確認されている (図 5)。こちらも珪藻化石年代と比較してやや古い年代が得られたが、ほぼ整合的であり、全体的に U-Pb 年代と珪藻化石年代は調和的な結果である。

5. 考 察

5.1 珪藻化石帯の地理的分布

本論および平松ほか (2015) の珪藻化石結果に基づき久見層・都万層の時空分布を図 6 にまとめ実線の柱状図で示した。横田 (1984)、高安ほか (1989)、山崎ほか (1991)

を追加データとして破線の柱状図で表した。なお、島後南部に分布する都万層に関しては、これまでに珪藻化石帯が認定されていないので、図 6 の柱状図には都万層を表現していない。

以下では珪藻化石結果に基づき、隠岐島後における各珪藻化石帯の地理的分布についてまとめ、根源岩、貯留岩、帽岩の地質年代とその広がりを考察する一助とした。

5.1.1 久見層最下部の淡水生浮遊性珪藻化石群集

本群集は久見川左岸枝沢入り口付近の露頭 (平松ほか (2015) の Km-01) のみで確認される。淡水生浮遊性種を主体とする群集内容に基づき、本群集を産出する地層は湖沼成層と解釈されている (平松ほか, 2015)。本地点以外では、本群集は島前中ノ島の海士町で掘削されたボーリングの深度 717.8–835.8 m 間で認められる *Auracoseira* 属を優占とする群集が相当し (鹿野ほか, 2014)、美田層に対比されている層準から産出する。この群集の産出層準の見かけの層厚は、本ボーリング地点では、120 m 以上に及ん

図 6 珪藻化石層序に基づく久見層から都万層の地域対比図

図中の上段 A~G は平松ほか (2015) の図 1 と図 3 の調査地域位置図の A~G に対応する。下段 A~D は本論の図 1 と図 3 の調査地域位置図の A~D に対応する。

でいる。本層上位の暗灰色泥岩を主体とする大津層には深度 676 m 付近に海緑石砂岩層が挟在し、深度 623 m からは *Actinocyclus ingens* f. *nodus* が検出され、*Denticulopsis lauta* 帯 (NPD4A) と解釈されている。

横田 (1984) により野越の *C. kanayae* 帯下位の凝灰岩から検出された *Auracoseira granulata* が 90% 以上を占める群集も久見層最下部の群集と類似する。

本群集は日本海が形成される前の淡水域に生息していた群集であると考えられる。岩相層序区分から判断して、本群集を産出する層準を下位の郡層には含めず、久見層最下部と認定したが、郡層との層序関係は今後の課題として残る。

本層準は淡水成根源岩としての候補とも考えられるが、分布域が狭く散点的であるため、その分布予測が困難である。島後の地表で確認できる層厚は数メートル程度と薄く (平松ほか, 2015)、量的にも根源岩としてのポテンシャルは高くないと判断される。日本海形成初期のリフト期に形成された、より水深の深い還元的な湖底環境において堆積した厚い湖成層を、震探断面図上で抽出することが課題である。

5.1.2 *Crucidentacula kanayae* 帯 (NPD3A)

本化石帯は島後北部の久見層模式地周辺の久見川流域、および北西部の野越において確認される。久見川周辺については林ほか (2011) および平松ほか (2015) の産出地点に加え、本論の久見川左岸枝沢 (開削) の地点が新たなデータとなった。本化石帯は島後南部地域からは未確認であり、島後における南北での新第三系海成層の堆積開始時期の違いが示唆される。南北での堆積様式の違いは、日本海形成に伴うリフト期に発達した東西方向の正断層による古地形の違いにより影響を受けた可能性が示唆される。

本化石帯を含む久見層下部には、久見川で認められるとおり、浅海成砂岩を挟在し、本地域における貯留岩層準の 1 つであると考えられる。

5.1.3 *Denticulopsis praelauta* 帯 (NPD3B)

本化石帯は島後において確認されていない。久見川で認められる下位帯の *C. kanayae* 帯の上位に位置する大型有孔虫化石を産する石灰質～凝灰質砂岩層準に相当する可能性がある。*C. kanayae* 帯の緩やかな海進に引き続き、本化石帯堆積時に島後が一時浅海化し、海生浮遊性珪藻が生息できない環境が出現したと考えられる。後述するとおり、本層準における浅海化は汎世界的な寒冷化と一致すると推察される。

5.1.4 *Denticulopsis lauta* 帯～*Crucidentacula nicobarica* 帯 (NPD4A-5A)

3 化石帯を合わせてほぼ飯山珪藻土層に相当し、最も珪藻化石を豊富に産出する層準である。本論および平松ほか (2015) の表 1 に基づくと、珪藻化石帯 NPD4A, 4B, 5A 帯の群集が産出頻度の高い A (Abundant) と評価されている。飯山珪藻土層は島後南部の飯ノ山から箕浦、加茂にかけて広く分布している。平松ほか (2015) でも飯ノ山からあいランドパークに至る広い範囲でこれらの化石帯を確認して

いる。寺山林道の重栖層に含まれる久見層ブロックは飯山珪藻土層に相当する層準であると考えられる。島後北部の久見川周辺からは確認されていない。

本論および平松ほか (2015) の特記すべき結果の 1 つは、島後で珪藻土として稼行されており、珪藻化石の産出量が高い層準の時代が、*D. lauta* 帯～*C. nicobarica* 帯に相当する中期中新世前期～中期であり、当時生息していた珪藻類の生産性が高く、しかもそれが堆積物中に保存されたと考えられるという点である。本邦における主要な油ガス田分布域が東北地方の日本海側沿岸地域であるため、油ガスの根源岩となる珪質堆積物が発達し始めるのは秋田標準坑井層序の女川階からであると考えられる傾向がある (天然ガス鉱業会・大陸棚石油開発協会, 1992a)。しかし、飯山珪藻土層準は比較的温暖であったとされる (小泉・的場, 1989) 西黒沢階の中部に相当する。珪藻化石群集内容は温暖種群の *Crucidentacula* 属と寒冷種群の *Denticulopsis* 属の混合群集からなり、本層準より上位の寒冷種を主体とする群集とは異なる (表 1)。このことは珪質堆積物の発達が必ずしも気候の寒冷化や、それに起因する海洋水の鉛直循環活発化と深海域からの栄養塩類の供給増加のみと関連するのではなく、当時の海域の古地形に伴う湧昇流の発達、陸域からの碎屑物や栄養塩類の供給などとも関連した可能性を示している。堆積盆スケールの広域な珪質堆積物の発達には気候の寒冷化が大きな影響を及ぼすのに対し、地域的な発達にはさまざまな局所的要素が影響を与えると考えられる。

5.1.5 *Denticulopsis praedimorpha* 帯～

Denticulopsis dimorpha 帯 (NPD5B-5D)

久見川の久見層模式地周辺、島後北西部の北方～重栖間にわずかに分布する久見層上部からこれらの化石帯が認められた (平松ほか, 2015)。南西部の那久からも本区間の化石帯が確認された。都万周辺に分布する都万層中の粗粒堆積物中に挟在する泥岩層から *D. praedimorpha* 帯が確認され、再堆積群集であると解釈された (平松ほか, 2015)。このことは、本化石帯が都万層碎屑物の供給源として都万周辺に分布していたことを示唆する。

本層準は黒色泥岩の歌木泥岩層に対比され (平松ほか, 2015)、那久では非常に堆積速度の遅い環境で堆積した塊状珪藻質泥岩からなる。暫定的な結果ではあるが、本調査で採取された試料の地化学分析結果に基づく、本層準は島後における根源岩として最も重要な層準の 1 つであると筆者らは考えている。

5.1.6 *Denticulopsis katayamae* 帯～

Thalassionema schraderi 帯 (NPD6A-6B)

両化石帯は島後において確認されていない。久見層と上位の都万層との間の後期中新世における不整合により削剥された堆積物に相当すると考えられる。山内ほか (2009) により、後期中新世の本不整合の存在はすでに指摘されているが、この不整合の時間間隔が約 200 万年に及ぶことが珪藻化石年代から明らかとなった。

5.1.7 *Rouxia californica* 帯 ~ *Neodenticula kamtschatica* – *Nitzschia rolandii* 帯 (NPD7A-7Ba)

島後北西部の北方～重栖間に分布する都万層から両化石帯が認められた(平松ほか, 2015)。本研究により、伊後中の浦海岸から採取された Nak-01 から上部中新統最上部の *N. kamtschatica*–*Nitzschia rolandii* 帯 (NPD7Ba) が認められた。したがって、岩相層序区分に基づき久見層に対比されていた伊後泥岩層(高安ほか, 1989; 山内ほか, 2009)は、珪藻化石層序に基づく、北方～重栖間に分布する都万層と同時異相の関係にあるという結果となる。平松ほか(2015)は空峰山東方の国道485号沿いの Sm-01, 02, 03 から同様の NPD7Ba 帯を確認し、北方～重栖間の都万層と同時代の堆積物であるとした。島後南部の模式地周辺に分布している都万層が砂岩主体の粗粒碎屑岩であるのに対し、島後北部の上部中新統上部はシルト岩・泥岩主体である。中新世最後期において島後の南北で堆積環境が異なっており、大局的には北部ほど水深が深くなり、岩相が細粒となる古環境が復元される。多井(1956)は伊後地点から *Uvigerina* 属を主体とする有孔虫化石群集を報告し、都万地点から産出する *Cibicides* 属を優占とする群集組成の相違について論じ、前者が後者より深い海域で形成された可能性を指摘した。本論の結果は多井(1956)の指摘を支持する結果である。

本層準は久見層最上部の不整合トラップをターゲットとした場合、帽岩として想定される層準である。島後に分布する上部中新統上部は側方方向の岩相変化が激しく、帽岩としての泥質岩の分布に地質リスクを有する。島後南北での岩相変化に基づく、帽岩の存在確率は北方ほど高くなると判断される。

重栖層を含めそれより上位の火山岩類に覆われるため、NPD7Ba 帯より上位の珪藻化石帯は島後に認められない。

以上のように、島後に分布する久見層および都万層の珪藻化石帯を明らかにすることで、高分解能で地質年代を得ることができ、石油システムの地質要素として想定される根源岩、貯留岩、帽岩の時空分布を推定することができた。

5.2 久見層下部における淡水生珪藻化石群集から海生珪藻化石群集への変化と相対的海水準変動

久見川の Km-01 から淡水生浮遊性種の *Auracoseira granulata* s.l. を主体とする珪藻化石群集が確認され、さらに上位の海生珪藻化石群集への変遷が明らかとなった(平松ほか, 2015)。ただし、淡水成層直上の海成層から産出する珪藻化石帯は不明であった。本論の追加調査により久見川左岸枝沢(開削)ルートにおいて淡水生珪藻化石を産出する層準の10数m上位において *C. kanayae* 帯が確認された(図4)。後述するように、本化石帯は現時点において日本海沿岸地域で確認される新第三系珪藻化石帯の最も下位の記録であり、さらに下位の *Crucidenticula sawamurae* 帯は同地域の新第三系からは未確認である。このことから、隠岐島後における日本海形成の伴う最初の海進が及んだ年代は本化石帯から求められる珪藻化石年代

の16.7～17.0 Maであることが示唆され、淡水成層直上の海成層から *C. sawamurae* 帯が確認される可能性は低くなった。

野越における *C. kanayae* 帯の群集変化を図5に示した。検出される淡水生珪藻は当時の陸域から運搬されて再堆積した二次化石であると考えられ、産出頻度は3%以下と極めて低い。珪藻は光合成を行うため、底生・浮遊性を問わず太陽光の届く水深100～200 m以浅の範囲に生息している。したがって、海生底生種は水深の浅い陸棚に生息域に限られる(柳沢, 1996)。生活史の中で一時的に休眠胞子を作って生活をする種も、一般的に大陸棚に生活することが多い(柳沢, 1996)。休眠胞子を形成する *Chaetoceros* 属は沿岸湧昇流域で多産する傾向がある(須藤, 2012)。一方、海生浮遊性種は水深により群集組成は異なるが、一般的に外側陸棚から外洋域の表層水中に生息する(柳沢, 1996)。野越における珪藻化石群集内容の層位的変化をみると、海生浮遊性種を主体とし海生底生種を随伴する全体的特徴は大きく変化しない(図5)。このことから野越の久見層堆積時における海水準は安定していたと推察される。加えて、下位から上位の Nog-03-8 付近まで、海生浮遊性種の頻度が変動を繰り返しながら全体として微増し、休眠胞子の個体数も全体的に減少する傾向が認められる。この比率の変化が相対的海水準の反映であるとすれば、緩やかな海進傾向が珪藻化石群集の変化として記録されている可能性が示唆される。

C. kanayae 帯の珪藻化石群集内容は海生浮遊性種を主体とすることから、ある程度の水深を有する外洋環境であったと推定され、しかも上述したように野越において海進環境にあった可能性がある。しかし、久見川においてはさらに上位には石灰質砂岩層が発達し、浅海を示唆する大型有孔虫化石を産出する(図4)。したがって、海進を示唆する珪藻質泥岩が堆積する環境から石灰質砂岩が堆積する浅海環境へと、すなわち、久見層下部堆積時期に海進から海退へと変化した可能性がある。本ルートの最上部に位置する凝灰岩を主体とする層準からは久見層下部を示唆する放射年代値(Km-B, 17.6 ± 0.6 Ma)が得られ、同層準からは淡水生珪藻化石群集が検出される(Km-12)。以上の珪藻化石群集内容の層位的変化に基づく、さらに海退が進行したと示唆される。

さて、このような久見層下部で推定される相対的海水準変動は、柳沢(2011)の検討による常磐地域の下部中新統湯長谷層群の古気候変化の一部と良い一致を示す。柳沢(2011)は湯長谷層群では *C. kanayae* 帯は温暖期に相当し、そのピークは南白土層下部の門ノ沢型貝類群の産出層準であり、その年代は16.7～16.8 Ma前後としている。その上位の高久層群最上部の下高久層上部から多賀層群の時期で冷涼な気候が推定されている。この変化を酸素同位体比変化と対比することで、常磐地域の動植物化石群集から復元された前期中新世後半の気候変動が、グローバルな気候変動に対応している可能性を指摘している。図4に示した久見川左岸枝沢(開削)ルートで推定される前期中新世後期

図7 珪藻化石写真

1-16. *Crucidentricula kanayae*, 1. Valve view (C: Nog-03-3), 2. Deck of valve (C: Nog-03-3), 3ab. Broken specimen (C: Nog-03-4), 4. Valve view (A: Km-09), 5. Frustule specimen (A: Km-09), 6. Girdle view (A: Km-09), 7. Deck of valve (C: Nog-03-4), 8. Valve and girdle views (C: Nog-03-3), 9. Deck of valve partially broken (A: Km-09), 10ab. Valve view (A: Km-09), 11. Deck of valve partially broken (C: Nog-03-3), 12ab. Valve view (C: Nog-03-3), 13ab. Valve view (A: Km-09), 14. Valve view (A: Km-09), 15ab. Valve view (C: Nog-03-4), 16ab. Valve view (A: Km-09), 17-18. *Crucidentricula ikebei*, 17. Broken specimen (C: Nog-03-4), 18. Broken deck of valve (C: Nog-03-4), 19. *Cymatogonia ablyoceras* (A: Km-09), Scale Bar equals 10 μ m for all figures.

の海進から海退への変化も湯長谷層群の古気候変化と同様な結果を示す。このことから、久見川で推定される相対的海水準変動は、汎世界的な気候変動の影響を受けた結果である可能性が指摘される。

久見層下部は浅海成砂岩を挟在し、砂岩泥岩互層からなり、本地域における貯留岩層準の1つであると考えられる。この層準は低海水準期と一致すると考えられるので、シーケンス層序解析で低海水準期堆積体の分布を追跡することで貯留岩分布予測の精度が高まる。

5.3 *Crucidenticula kanayae* の形態的多様性

日本海沿岸地域に分布する新第三系のうち海成層から現時点で確認されている珪藻化石帯で最も下位の化石帯は上述のとおり *C. kanayae* 帯 (NPD3A; 16.6–17.0 Ma) である。本化石帯は北海道奥尻島の釣懸層 (秦・長谷川, 1970)、金沢市南部に分布する七曲層、富山県八尾地域の東別所層、石川県能登半島珠洲地域の東印内層法住寺珪藻質泥岩部層 (柳沢, 1999a, 1999b, 1999c)、および島根県隠岐諸島島後の久見層 (横田, 1984; 林ほか, 2011; 平松ほか, 2015, 本論) から報告されている。このうち柳沢による北陸地域から産出する本化石帯の群集はすべて *C. kanayae* の産出を欠き、*D. praelauta* も産出しなことから *C. kanayae* 帯上部 (16.6–16.7 Ma) と考えられている。したがって、日本海側沿岸地域において *C. kanayae* を産出する本帯主部が認められるのは現時点で奥尻島および隠岐島後からのみである。太平洋側地域の下部中新統上部も含め、両地域での *C. kanayae* 帯の層位的群集変化および *C. kanayae* の変種の時空分布を比較することで、日本海形成初期の海流系復元に役立つ情報を得られる可能性がある。

C. kanayae には2つの地域的な変種 (variety) が記載されている。それらは *C. kanayae* var. *kanayae* と *C. kanayae* var. *pacifica* である (Yanagisawa and Akiba, 1990)。*C. kanayae* var. *kanayae* は Akiba and Yanagisawa (1986) により北海道奥尻島の釣懸層から *Denticulopsis nicobarica* として認められた個体を *Crucidenticula kanayae* として新種記載した種である。一方、*C. kanayae* var. *pacifica* は低緯度に分布域が限られた変種として Yanagisawa and Akiba (1990) により記載された。本邦において *C. kanayae* var. *pacifica* が検出されたのは、常磐地域の湯長谷層群三沢層のみからである (柳沢, 2011)。

島後で認められる *C. kanayae* 帯の試料からは点紋のある接殻帯片 (copula) がまったく検出されないことおよび殻面の点紋列の密度から、産出する *C. kanayae* は *C. kanayae* var. *kanayae* であると同定される。島後の *C. kanayae* 帯の珪藻化石群集は *C. ikebei* も随伴し、低緯度種を伴わない。

図7に示したように、島後から産出する *C. kanayae* の殻面観の形態的多様性は非常に高い。また、島後以外で確認されている形態として、芳賀ほか (1999) が北海道中央部の上杵臼層から示した個体のように、典型的な *C. kanayae* に比べて点紋や条線の密度の高い形態も報告されている。本邦に分布する *C. kanayae* 帯から産出する *C. kanayae* var. *kanayae* および *C. kanayae* var. *pacifica* の時空

分布や群集組成変化を明らかにすることで、前期中新世後期の古海洋環境復元あるいは珪藻化石層序区分のさらなる分解能の向上に利用できる可能性がある。

日本海沿岸地域において下部中新統上部の海成層を厚く堆積させた地域は、日本海形成期にいち早く沈降域となった可能性があり、石油根源岩のキッチンエリアとして有望地域の1つと考えられる。下部中新統上部の高分解能での対比は、構造発達史や古環境変遷に関する新たな地質情報を提供することもあり得る。*C. kanayae* 帯の珪藻化石群集の研究は、日本海沿岸地域における下部中新統を根源岩とする油ガス田の発見につながる検討課題であると考えられる。ここでは、その一助となる可能性のある *C. kanayae* の形態的多様性について指摘したい。

6. ま と め

島根県隠岐諸島島後に分布する中新統、久見層および都万層を対象に国立公園から新たに採取された試料を中心に珪藻化石分析を実施した結果、27試料について Yanagisawa and Akiba (1998) の珪藻化石帯の認定が可能であった。その結果に基づき久見層および都万層の珪藻化石年代を明らかにし、石油システムの地質要素である根源岩・貯留岩・帽岩との関連について考察した。

根源岩としては生物生産量が高かったと推定される *Denticulopsis lauta* 帯～*Crucidenticula nicobarica* 帯 (NPD4A-5A) および堆積速度が低い環境で堆積したと考えられる *Denticulopsis praedimorpha* 帯～*Denticulopsis dimorpha* 帯 (NPD5B-5D) の中部中新統～上部中新統下部が有望層準である。久見層に相当するこの層準から保存状態の良好な珪藻化石を豊富に産出するという結果は、地表の久見層が十分な続成作用を受けていなく、根源岩として未熟成であることを示している。したがって、隠岐周辺海域の石油システム評価には、埋没が進んでいると想定されるキッチンエリアにおける、根源岩ポテンシャルを有する堆積物の発達様式の予測が重要となる。

貯留岩層準としては、低海水準期に相当する下部中新統上部の浅海性砂岩層が探鉱目的層準の1つである。島後の中部～上部中新統の久見層には厚い粗粒碎屑物の発達を確認されないが、*Denticulopsis katayamae* 帯～*Thalassionema schraderi* 帯 (NPD6A-6B) に相当する、後期中新世の不整合を生じさせた構造運動と関連する堆積体の追跡は、隠岐周辺海域での探鉱にとって重要なテーマであると考えられる。

都万層に相当する層準は、島後において側方への岩相変化が激しく、南部で粗粒であるのに対し、北部で細粒となる傾向が確認された。久見層最上部の不整合トラップを想定した場合、帽岩としての役割を有する層準であるが、粗粒碎屑物が分布する可能性があるためセーリリスクが高い。最上部以外の久見層内部の粗粒碎屑物を貯留層と想定したプレイには、久見層の泥岩が帽岩の役割を果たすと考えられる。

謝 辞

島根大学山内靖喜名誉教授には未公表資料を提供していただいた。栃木県立博物館の河野重範学芸員には試料採取に協力していただいた。(有)珪藻ミニラボの秋葉文雄氏および産業技術総合研究所地質情報研究部門の柳沢幸夫博士には *Crucidenticula* 属の分類に関し有益なコメントをいただいた。石油資源開発株式会社の三輪美智子氏には底生有孔虫化石群集に関し貴重なご意見をいただいた。同社洲崎照夫氏には放射年代測定用試料の選定・準備にご協力いただいた。元石油資源開発株式会社の小布施明子氏には渦鞭毛藻化石層序に関しご教示いただいた。環境省中国四国地方環境事務所には試料採取に際し、便宜を図っていただいた。石油資源開発株式会社には本論の公表を許可していただいた。匿名の査読者からいただいた有益なコメントは原稿の改善に大いに役立った。以上の方々に深謝の意を表します。

引 用 文 献

- Akiba, F., 1986 : Middle Miocene to Quaternary diatom biostratigraphy in the Nankai Trough and Japan Trench, and modified Lower Miocene through Quaternary diatom zones for middle-to-high latitudes of the North Pacific. *Init. Repts. D.S.D.P.*, **87**, 393–481.
- Akiba, F. and Yanagisawa Y., 1986 : Taxonomy, morphology and phylogeny of the Neogene diatom zonal marker species in the middle-to-high latitudes of the North Pacific. *Init. Repts. D.S.D.P.*, **87**, 483–554.
- 芳賀正和・黒田智子・浅野裕史・金川久一・伊藤谷生, 1999: 北海道中央部, 中新統上杵臼層の珪藻化石年代 (前期中新世末期) とその意義. 地質雑, **105** (8), 589–592.
- 秦 光男・長谷川康雄, 1970 : 北海道奥尻南部新第三系の地質と化石系層群. 地球科学, **24** (3), 93–104.
- 林 広樹・井原広一・渡辺真人・田中裕一郎, 2011 : 島根県隠岐の島町の模式地における中新統久見層の複合微化石層序. 島根大学地球資源環境学研報, **30**, 47–56.
- 平松 力・高橋利宏・東 将士・入月俊明・林 広樹, 2015 : 島根県隠岐諸島島後の中新統久見層および都万層の珪藻化石層序. 石油技術協会誌, **80** (5), 375–384.
- 鹿野和彦・金子信行・石塚 治・千葉とき子・柳沢幸夫, 2014 : 隠岐諸島, 島前火山の始まりと活動期間. 火山, **59** (2), 77–88.
- 小泉 格・的場保望, 1989 : 西黒沢階の上限について. 地質学論集, **32**, 187–195.
- 須藤 斎, 2012 : 珪藻休眠胞子化石の分類学的研究から見てきた生物進化. 微化石 – 顕微鏡で見るプランクトン化石の世界 –, 谷村好洋・辻彰洋編著, 東海大学出版, 226–239.
- 多井義郎, 1956 : 隠岐群島島後の中新世小型有孔虫化石群集. 地質雑, **62**, 212–213.
- 高安克己・下末 恵・角館正勝・山崎博史, 1989 : 隠岐島後第三系の層序の再検討. 古日本海, **2**, 73–77.
- 天然ガス鉱業会・大陸棚石油開発協会, 1992a : 改訂版, 日本の石油・天然ガス資源, 53–80.
- 天然ガス鉱業会・大陸棚石油開発協会, 1992b : 改訂版, 日本の石油・天然ガス資源, 219–225.
- 上田哲郎・杉山政広, 1984 : 隠岐・島後のオウナガイ化石について. 広島大学地質学研究報告, **3**, 145–154.
- 山内靖喜・沢田順弘・高須 晃・小室裕明・村上 明・小林伸治・田山良一, 2009 : 西郷地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 産総研地質調査総合センター, 121p.
- 山崎博史・下末 恵・高安克己, 1991 : 隠岐島後中新統郡累層と久見層の層位関係の再検討. 地球科学, **45**, 177–190.
- 柳沢幸夫, 1996 : 水深指標としての珪藻群集. 堆積学研究, **43**, 59–67.
- 柳沢幸夫, 1999a : 金沢市南部地域に分布する中新統の珪藻化石層序. 地調月報, **50**, 49–65.
- 柳沢幸夫, 1999b : 富山県八尾地域の下部 - 中部中新統の珪藻化石層序. 地調月報, **50**, 139–165.
- 柳沢幸夫, 1999c : 能登半島珠洲地域の中新統の珪藻化石層序. 地調月報, **50**, 167–213.
- 柳沢幸夫, 2011 : 常磐地域の下部中新統湯長谷層群の珪藻化石層序. *Diatom*, **27**, 33–45.
- Yanagisawa, Y. and Akiba, F., 1990 : Taxonomy and phylogeny of the three marine diatom genera, *Crucidenticula*, *Denticulopsis* and *Neodenticula*. *Bull. Geol. Surv. Japan*, **41** (5), 197–301.
- Yanagisawa, Y. and Akiba, F., 1998 : Refined Neogene diatom biostratigraphy for the northwest Pacific around Japan, with an introduction of code numbers for selected diatom biohorizons. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **104**, 395–414.
- 柳沢幸夫・工藤 崇, 2011 : 5 万分の 1 地質図幅「加茂」地域 (新潟県) の新第三紀及び第四紀の珪藻化石層序資料. 地質調査総合センター研究資料集, **537**, 1–59.
- 柳沢幸夫・渡辺真人, 2011 : 5 万分の 1 地質図幅「戸賀及び船川」地域 (男鹿半島) の新第三紀及び第四紀の珪藻化石層序資料. 地質調査総合センター研究資料集, **533**, 1–17.
- 横田正浩, 1984 : 隠岐島後の珪藻土について. 島根大学地質学研報告, **3**, 139–144.