石灰質ナンノ化石からみた秋田地域の新第三紀末～第四紀古環境変動 Late Neogene to Quaternary paleoenvironmental changes in the Akita area, Northeast Japan

Abstract

佐藤時幸* 佐藤伸明** 山崎 誠*
小川由梨子* 金子光好**

Tokiyuki Sato, Nobuaki Sato*,
Makoto Yamasaki*, Yuriko Ogawa* and
Mitsuyoshi Kaneko***

2010年10月8日受付.

2011年2月13日受理.

* 秋田大学大学院工学資源学研究所応用地球科学
教室

Institute of Applied Earth Sciences, Faculty
of Engineering and Resource Science Akita
University, Tegata Gakuencho, Akita
010-8502, Japan

** JX 日鉱日石開発株式会社

JX Nippon Oil & Gas Exploration Corpora-
tion, 6-3 Otemachi 2-chome, Chiyoda-ku,
Tokyo, 100-8163 Japan

† 現所属: 三井石油開発株式会社

Present address: Mitsui Oil Exploration Co.,
Ltd, Hibiya Central Bldg. Nishi-Shimbashi,
Minato-ku, Tokyo 105-0003, Japan

Corresponding author; T. Sato,
toki@keigo.mine.akita-u.ac.jp

We studied in detail the calcareous nannofossil biostratigraphy of the upper Pliocene to Quaternary sequences in the Osugozawa route of Gojome area, Aikawa and Komagugawa routes of the Oga peninsula, and two oil exploration wells of NKH-1 and 3 located in Honjo area, Akita Prefecture, Japan. The Pliocene/Pleistocene boundary re-defined at the base of Gelasian Stage was identified in the lower part of the Sasaoka Formation in the Osugozawa route. The base of Calabrian stage, formerly considered as the Pliocene/Pleistocene boundary, was also identified in the lower part of the Kitaura Formation in the Oga Peninsula, based on magneto- and nannofossil bio-stratigraphy. Pliocene to Quaternary formations in the Akita area were correlated to those in the Japan Sea side area.

We also revealed the tectonic movements along the southern coast of Akita Prefecture on the basis of the nannofossils obtained from drill cuttings and the subsurface geology of the area. The results clarified that the Kita-Yuri thrust faults were active between 3.85 and 1.71 Ma. Paleodepth of western Akita Prefecture were also changed from bathyal to shallow marine environments in 2.75 Ma, a consequence of both fault activity and the climate crash associated with drastic latest Pliocene cooling.

Keywords: calcareous nannofossil, Neogene/Quaternary boundary, Gelasian, Calabrian, Akita, paleoenvironment

はじめに

秋田地域には新第三系から第四系が良好に分布することから、金属鉱床や石油鉱床の探査などとも関連して古くから微化石層位学の検討が行われて来ている。とくに男鹿半島は上部新生界の露出が良く、日本海側地域の最上部新生界の標準層序として数多くの研究が行われて来た(例えば北里, 1977)。一方、秋田平野部、油田地域の地下に分布する上部新生界は、浮遊性有孔虫化石から坑井独自の地下層序が組み立てられ(Maiya et al., 1976; 米谷, 1978 など)、その層序区分に岩相層序で組み立てられた地表層序の地層名を使用して来た。この結果、本来の岩相層序で組み立てられた地表層序/地層名が、有孔虫化石で区分された坑井の地質層序および地層名に対しても同じ名称で使われたため、層位学的に大きな混乱を招いていた。しかし、その後の石灰質ナンノ化石研究の飛躍的な進展は、男鹿半島から秋田油田地域を含む詳細な地質年代の決定と対比を可能にしたほか(佐藤ら, 1988a)、地表層序と坑井層序との微化石層位学に基づく対比および整理によって、秋田地域の古海洋環境変動の詳細についても明らかになってきた(佐藤ら, 2003a など)。しかし

ながら、このような成果を年代層序学の点からみた場合、各地層の地質年代の詳細と対比は明らかにされたものの、標準時階とのより詳細な対比と時階境界の位置は必ずしも明確に指摘されておらず、年代層序区分の観点から問題が残されていた。

このような中、2009年6月、国際地質科学連合執行委員会は新第三紀/第四紀境界をカラブリアン階基底からジェラシアン階基底、すなわちイタリアのモンテサンニコラ GSSP(Global Stratotype Section and Point)で定義することを批准した。この改定は、極めて詳細な岩相層序、微化石層序、地磁気層序と汎世界的な寒冷化に基づいて決定された。この決定を受けて、日本学術会議、日本地質学会、日本第四紀学会はこの改定を批准することとしたが、このことは、新しく改訂された新第三紀/第四紀境界、およびヨーロッパ標準時階と、秋田地域を含めた本邦の最上部新生界層序との詳細な関係を明確にする必要があることを改めて示した。このような背景から、本研究は石灰質ナンノ化石層序および古地磁気層序に基づいて、新しい新第三紀/第四紀境界とピアセンジアン階、ジェラシアン階、およびカラブリアン階の各ヨーロッパ標準時階を秋田油田地域および男鹿半島に

Fig. 1. Map of the study area.

追跡し、秋田油田地域の地質年代層序の詳細について明らかにすることを目的として行った。さらに、秋田油田地下層序の対比で混乱を招いていた岩相層位学に基づく地表地質層序と浮遊性有孔虫化石層序に基づいた坑井地質層序との対比を石灰質ナノ化石から新たに得られた資料に基づいて整理し、秋田油田構造の形成時期と構造発達史および新生代後期の古環境変動についても検討を行った。

調査地域

本論で調査の対象としたのは、ピアセンジアン階からジェラシアン階にかけての地層が良好に露出し、残留磁気の測定結果が報告されている秋田県中部に位置する井川町井内の東方、大菅生沢ルートの天徳寺層と笹岡層と、男鹿半島北岸で、ジェラシアン階からカラブリアン階がほぼ連続で露出する相川漁港の相川ルートおよび小増川ルートの船川層と北浦層である (Fig. 1)。また、本論では秋田油田地下構造解明のため、秋田県南部本荘市で掘削された NKH-1 号井と 3 号井の石灰質ナノ化石調査もあわせて行った (Fig. 1)

1. 大菅生沢ルート

本調査地域の石灰質ナノ化石層序は Sato and Kameo (1996) によって概略が報告された。彼らの報告は、独自に試料を採取し検討した結果を、Noritomi et al. (1980) の残留磁気測定結果へ対比したものである。今回、筆者らは Noritomi et al. が残留磁気の測定に用いた試料を入手したことから、それら試料を調査試料として再検討し、残留磁気測定結果と直接比較検討した。調査ルートは、井川町井内から東へ約 500 m の菅生沢堤から東へ延びるルートで、暗緑

青灰色の塊状泥岩よりなる船川層、淡緑青灰色の塊状シルト岩を主体とする天徳寺層、および極細粒砂岩から細粒砂岩、シルト質砂岩よりなる笹岡層が分布する。天徳寺層は上部がやや砂質で淘汰が悪い。笹岡層は貝化石を豊富に含み、細礫サイズの円礫も一部認められる。調査試料は、10 m から 20 m の層位間隔で採取された船川層上部から笹岡層までの合計 50 試料である。なお、試料採取地点は Noritomi et al. (1980) に詳細が示してあるため、ここでは省略するが、Fig. 3 に示した OS-1 などのサンプル番号は、Noritomi et al. と同一である。

2. 相川ルートおよび小増川ルート

男鹿半島北岸の相川漁港を河口とする相川ルート (AIW コードのサンプリングポイント) とその東方の海岸線 (KTU コードのサンプリングポイント)、および、相川河口の東約 1 km に河口が位置する小増川ルート (KMS コードのサンプリングポイント) で、船川層最上部から北浦層下部までの間を対象に調査と試料の採取を行った (Fig. 2)。船川層最上部は 1 cm から 5 cm 前後の凝灰質砂岩を頻りに挟む青緑灰色塊状シルト岩からなる。砂岩層の多くは平行葉理やカレントリップルなどのタービダイト砂岩の特徴を有する他、薄い砂岩層の多くは生物擾乱によって堆積構造が乱されている。その上位の北浦層下部になると淡緑青灰色シルト岩と凝灰質砂岩のシルト岩優勢な砂岩／シルト岩互層へ変化する。砂岩層は 10 cm から 40 cm 程度の厚さで、船川層と同様に平行葉理やカレントリップルが特徴的に認められる。凝灰岩鍵層は、船川層で Nm3, Nm2, Ai1 の 3 枚が、北浦層で Ak3 と Ak1 が認められる。このうち Ak3 は船川層／北浦層境界に位置する。鍵層 Ak3 の層厚は 41 cm で、軽石質凝灰岩から灰白色細粒凝灰岩へ上方細粒化するユニット (20 cm) と、カレントリップルを伴う暗青灰色極細粒砂岩 (5~7 cm) および白色細粒凝灰岩 (15 cm) の各ユニットからなる。生物擾乱が顕著で、径が 2~3 cm の比較的大型の巣穴化石も認められる。試料の採取はタービダイト砂岩を除いたシルト岩～シルト質砂岩を対象に層位間隔約 1~4 m で採取した。

3. NKH-1 号井, 3 号井

NKH-1, -3 号井は、ジャパンエナジー石油開発(株)によって秋田県南部、本荘市の中心部よりやや南西の水林地帯に掘削された (Fig. 1)。両坑井は直線距離で約 1.5 km しか離れていないにも関わらず、その岩相層序には大きな違いがある。

NKH-1 号井は笹岡層から深度 2010 m までを掘削した。深度 400 m 付近までは砂岩ないし砂質シルト岩を主体とする。それ以深はシルト岩～泥岩を主体とするが、深度 800 m 付近で福山安山岩 (大沢ら, 1977) に対比される安山岩類、その下位 1250 m までが泥岩、深度 1000 m 付近に粗粒玄武岩が認められる。1250 m 以深掘り止めの 2010 m までは青沢層 (大沢ら, 1988) に対比される西黒沢階の玄武岩類である。

一方、NKH-3 号井は西目層 (大沢ら, 1977) から深度 2600 m までを掘削した。岩相は、深度 200 m までが西目層に対比される細粒砂岩、それ以深 1650 m までが砂質シ

Fig. 2. Locality map of calcareous nannofossil samples collected on the Oga peninsula.

ルト岩, シルト岩および泥岩よりなるが, それ以深掘り止めの2600 mまではシルト岩と砂岩, もしくは凝灰岩との互層である。

石灰質ナノ化石調査は10 mから20 mの深度間隔のカッティングス試料を用い, NKH-1号井は深度1190 mまで, 3号井は2220 mまでを調査対象とした。なお試料がカッティングス試料であることから, プレパラートの作成では掘削坑内での上位層準からの落ち込みと考えられるサイズの大きな泥岩チップを篩で除外し, 処理した。

調査結果

プレパラートは, 高山(1978)が紹介した沈降法で作成した。検鏡に際しては偏光装置を備えた双眼生物顕微鏡, 倍率1250倍および1600倍で200個体を無作為に鑑定, 各種の相対頻度を求めたほか, それとは別に定量外で産出する種の有無も調査した。なお, 本論では石灰質ナノ化石対比基準面とその年代値をSato et al.(2009), Sato and Kameo(1996)およびLourens et al.(2004)に基づいて議論する。

1. 大菅生況：鮮新世／更新世境界

調査した50試料のうち, Fig. 3に示した15試料から石灰質ナノ化石が産出した。石灰質ナノ化石の保存状態は良く, いずれも産出個体数は多かったが, 最下部の2試料

では産出がまれて200個体の定量鑑定はできなかった。

産出した石灰質ナノ化石種は天徳寺層と笹岡層で優占種が大きく異なる。すなわちOS24以下の天徳寺層では小型の*Reticulofenestra* spp. が殆どの試料で80%以上を占め, 10%前後の*Coccolithus pelagicus*を伴う。小型の*Gephyrocapsa* spp. や, *Braarudosphaera bigelowii*も認められるものの, その産出個体数は少ない。一方, OS23以上の笹岡層では, 現在のグリーンランド周辺などの高緯度海域を特徴づける*C. pelagicus*が50%から80%程度で最優占種となる。また浅海域に多い*B. bigelowii*も5%前後産する他, *Helicosphaera sellii*も層準によっては30%近くに達する。

産出した石灰質ナノ化石種の層位分布から本調査層準の地質年代を考察すると次のようになる。鮮新世に出現し, 1.22 Maに絶滅する*H. sellii*が産出するものの, 前期鮮新世の3.85 Maに絶滅する*Sphenolithus abies*や*Reticulofenestra pseudoumbilicus*は産出しない。また, カラブリアン期以降の特徴種で, その出現が1.76 Ma, 1.71 Maにある*Gephyrocapsa caribbeanica*と*G. oceanica*が全く産しないことからすると, 本調査層準は, 後期鮮新世—更新世初めで, 3.85 Maから1.76 Ma間のピアセンジャン期からジェラシアン期に対比される。また, 天徳寺層／笹岡層

Fig. 3. Calcareous nannofossil biostratigraphy of the Tentokuji and Sasaoka Formations in the Osugozawa route.

境界で認められる *Reticulofenestra* spp. (small) の多産から *C. pelagicus* 多産への急激な変化層準は Sato and Kameo (1996) や Sato et al. (2002, 2004) など指摘したガウスクロン後期の基準面 A (2.75 Ma) に対比される。このことは、Noritomi et al. (1980) の残留磁気測定結果で笹岡層下部か

ら天徳寺層にかけての正磁極帯がガウスクロンに対比されることを示唆し、したがってピアセンジアン階／ジェラシアン階境界、すなわち新しく再定義された鮮新統／更新統境界は笹岡層下部の正磁極帯上限に引かれる (Fig. 3)。

Fig. 4. Calcareous nannofossil biostratigraphy of the upper Funakawa to lower Kitaura Formations in the Oga peninsula.

2. 男鹿半島北岸：ジェラシアン階／カラブリアン階境界

船川層上部から北浦層下部にかけての 227 試料を調査した (Fig. 4)。調査セクション下部で船川層の試料 AIW01 から 65 までの間は石灰質ナノ化石が全く産しないが、それより上位の北浦層最下部までの間では産出層準と無産出層準をくり返し、それより上位ではほぼ連続産出ようになる。産出した石灰質ナノ化石群集は、いずれの試料でも高緯度海域を特徴づけ、基準面 A (2.75 Ma) 以上で多産する *C. pelagicus* が最優占種で、次いで小型の *R. spp.* が多い。そのほか *Calcidiscus leptoporus* や小型の *Gephyrocapsa spp.*, *H. sellii* もほぼ連続で産出する。

地質年代の決定で重要な種に注目すると、前期鮮新世の 3.85 Ma に絶滅する *Sphenolithus abies* や *Reticulofenestra pseudoumbilicus* が産出しないものの、鍵層 AK3 の上位 200 m の北浦層下部の試料、KMS01 と KTU02 の間および KMS18 と KMS19 の間 (Figs. 2, 4) を境に、カラブリアン期の指標種で基準面 12 (1.76 Ma) と基準面 11 (1.71 Ma) をそれぞれ定義する *Gephyrocapsa caribbeanica* と *Gephyrocapsa oceanica* が産出し始める。全層準を通じて 6 μ m を越える大型の *Gephyrocapsa* が産出しないことからすると、本調査層準は基準面 A (2.75 Ma) より上位で基準面 10 (1.39 Ma) より下位の層準に対比され、北浦層下部

Fig. 5. Calcareous nanofossil biostartigraphy of the NKH-1 well located in Honjo city.

で基準面 12 の層準にジェラシアン階／カラブリアン階境界が位置する (Fig. 4)。

また、本ルートでは詳細は投稿準備中であるが、残留磁気の測定を行っている。全体的に逆磁極優勢の中で船川層から北浦層にかけての層準に正磁極帯が 130 m 程度の厚さで認められる。この正磁極層準は、上述の石灰質ナノ化石基準面 11 と 12 の直下に位置することからすると、マツヤマクロンのオルドヴァイサブクロンに確実に対比される。

3. 坑井層序：NKH-1, 3 号井

(1) NKH-1 号井

深度 500 m 以浅のシルト岩試料 4 試料から比較的多くの石灰質ナノ化石が産出したが、それ以深では坑内の落ち込みと考えられる個体を除いて石灰質ナノ化石は全く産しなかった (Fig. 5)。産出した石灰質ナノ化石は、400 m から 500 m の間で小型の *Reticulofenestra* spp. が多いのに対し、深度 165 m の試料では寒流系種の *C. pelagicus* が多産する。地質時代の決定に重要な種に注目すると、カラブリアン期の指標種でそれぞれ 1.76 Ma と 1.71 Ma に出現する *G. caribbeanica* と *G. oceanica* が深度 165 m の試料に認められるが、それより下位には全く産しない (Fig. 5)。このことからすると、小型の *Reticulofenestra* spp. 多産上限で規定される基準面 A (2.75 Ma) は深度 420 m 付近に、基準面 11 と 12 (1.76 Ma, 1.71 Ma) が深度 165 m 付近に引かれる (Fig. 5)。

Fig. 6. Calcareous nanofossil biostartigraphy of the NKH-3 well located in Honjo city.

(2) NKH-3 号井

石灰質ナノ化石産出層準は 700 m より上位および 1490 m から 1570 m の間で多産したが、それより下位の試料では、上位からの落ち込みと考えられる個体が僅かに産出するのみであった (Fig. 6)。産出した石灰質ナノ化石群集は、下位の 1490 m から 1570 m では基準面 A (2.75 Ma) より下位を特徴づける小型の *Reticulofenestra* spp. が多産するが、それより上位の 700 m までの間は、基準面 A より上位の特徴 (Sato and Kameo, 1996) と共通して、石灰質ナノ化石が産しなくなる。700 m より上位では寒流系の *C. pelagicus* が最優占種となっている。時代決定に重要な種を見てみると、カラブリアン階基底でその産出が基準面 12 (1.76 Ma) と 11 (1.71 Ma) を規定する *G. caribbeanica* と *G. oceanica* が、630 m と 610 m 以浅でそれぞれ産出する。その産出下限と上限が基準面 10 (1.39 Ma) と 8 (1.18 Ma) を規定する 6 μ m より大きい大型の *Gephyrocapsa* spp. は、深度 510 m から 350 m の間で産出する。鮮新世に出現し、その産出上限が基準面 9 (1.22 Ma) を規定する *H. sellii* は 430 m 以深ではほぼ連続に認められる。産出下限と上限が基準面 7 (1.13 Ma) と 5 (0.85 Ma) を規定する *R. asanoi* は 270 m に、産出下限が基準面 6 (0.99 Ma) を規定する *Ge-*

phyrocapa parallela は深度 270 m 以浅に産出した。以上の結果、基準面 A は深度 630 m と 1490 m の間に引かれる。ただし、一般に基準面 A より上位で石灰質ナノ化石が減少するか産出しなくなる特徴からすると、基準面 A は 1470 m/1490 m に引かれると考えられる。また基準面 12, 11, 10, 9, 8 は 630 m~650 m, 610 m~630 m, 510 m~530 m, 410 m~430 m, 330 m~350 m にそれぞれ追跡され、基準面 6 と 7 は、いずれも 270 m~310 m に、基準面 5 は 250 m~270 m に引かれる。

日本海側地域に分布する最上部新生界の 地質年代と構造発達

1. 対比

五城目地域東方、大菅生沢の天徳寺層と笹岡層は、ピアセンジャン階からジェラシアン階に対比され、天徳寺層から笹岡層への砂質岩への岩相変化層準が石灰質ナノ化石基準面 A (2.75 Ma; Sato and Kameo, 1996) で、北半球の急激な寒冷化 (Climate Crash; Bartoli et al., 2005) に対比される。しかし、カラブリアン階の指標種で基準面 11 と 12 を規定する *G. caribbeanica* と *G. oceanica* が産出しないことから、笹岡層はカラブリアン階までには至っていない。一方、男鹿半島の船川層と北浦層は、すでに佐藤ら (1988a) によって報告されたごとく、北浦層下部にカラブリアン階基底を示唆する基準面 12 と 11 が引かれることが明らかになっている。しかしながら、彼らの調査は 20 m から 40 m の層位間隔であり、時階境界の明確な設定の点からすると精度に問題が残されていた。本論での基準面 11, 12 付近、すなわち、ジェラシアン階／カラブリアン階境界付近での高精度の調査結果は、凝灰岩鍵層 Ak3 の上位 200 m で、小増川河口から直線距離で 500 m ほど上流地点に基準面 12 と 11 が正確に追跡されることを示す。

以上の調査結果に、これまで石灰質ナノ化石の調査結果が報告されてきた秋田県北部の征山沢、峰浜、秋田県中部の五城目、太平、笹岡、男鹿半島、および秋田県南部の万願寺、新潟県出雲崎の西山層、灰爪層、石川県金沢市の大桑層、藪田層の調査結果 (佐藤ら, 1987, 1988a, b, 1999; Sato et al., 2001; 高山ら, 1988) を加えて相互に対比すると Fig. 7 のようになる (秋田県内の調査地点については Fig. 9 参照)。すなわち、秋田県の海岸線平野部の油田系列に分布する天徳寺層のほとんどは基準面 A (2.75 Ma) の Climate Crash 前で 2.75 Ma より古いピアセンジャン階に対比される。その上位で笹岡層は Climate Crash 後の寒冷化に対応するジェラシアン階で、五城目や峰浜の笹岡層最上部がカラブリアン階最下部に対比され、殆どの地域で基準面 A (2.75 Ma) の Climate Crash が天徳寺層／笹岡層境界に位置する。ただし、白亜系花崗岩などの基盤岩上昇地域である太平洋山南縁部、太平洋地域では浅海成相の笹岡層が他地域よりやや古いピアセンジャン階に対比され、他地域より早く浅海化していたことを示唆している。これに対し、西方の男鹿半島北岸では、北浦層の下位の船川層が秋田油田地域の船川層より若く、その最上部はジェラシアン階／カラブリアン階境

界のすぐ下位に位置する (小泉・金谷, 1977; 佐藤ら, 1988a)。したがって、北浦層以上はカラブリアン階以上に対比され、秋田平野部では殆ど分布しないカラブリアン階以上の地層が男鹿半島に厚く分布することを示している (Fig. 7)。

2. 大桑—万願寺動物群の地質年代

秋田油田地域の天徳寺層、笹岡層から産出する貝化石群は“大桑・万願寺動物群”と呼ばれ、長らく地層の対比と時代決定、および古環境解析の指標として用いられて来た。“大桑・万願寺動物群”は、Otuka (1939) によって日本海側の鮮新世を特徴づける寒冷海の貝類化石群集として命名されたもので、金沢市大桑および秋田県本荘市万願寺をはじめとして、秋田地域の天徳寺層、笹岡層、新潟地域の西山層、灰爪層、北陸の大桑層などから産出する (小笠原, 1996)。しかし、石灰質ナノ化石層序の進展により、これら個々の地層の地質年代が明らかにされるにつれ、これら地層群が様々な地質年代に対比されることが明らかになった (佐藤ら, 1988b)。このことから、小笠原 (1996) は大桑・万願寺動物群を「主として日本海側から産出する鮮新世から初期更新世の貝化石群」とし、その古環境的特徴を「主として温帯的な海洋気候下で繁栄したもので、地域的・空間的に温暖や冷温種が混在する」として総括した。

ここで、改めて石灰質ナノ化石層序に基づいて“大桑—万願寺動物群”の産出層準の地質年代をみってみる。その年代は天徳寺層や藪田層の大部分が基準面 A (2.75 Ma) の Climate Crash 前で、平均気温が現在より 4℃ 高かった (Raymo et al., 1996) と言われる汎世界的温暖期の mid-Pliocene Golden age (または Mid-Pliocene warmth) に、本荘市万願寺の笹岡層や秋田油田地域の殆どの笹岡層は Climate Crash 以後で、北極域での急激な氷床拡大時期による汎世界的な寒冷化時期のジェラシアン期に対比される。また、新潟県出雲崎の西山層や金沢の大桑層はカラブリアン期で北極海域に再び石灰質ナノプランクトンが生息し始めた時期に対比され、とくに大桑層最上部は、さらに若い mid-Pleistocene climate transition に対比される (Fig. 7)。このように、“大桑・万願寺動物群”の産出層準は、汎世界的にも大きな環境変動が発生した様々な重要な時期にまたがり、地質年代から見ても、古環境 (古海洋) 学的に見ても全く異なった背景をもつ化石群を一括した化石群である。

このような大桑・万願寺動物群の生層序学的混乱から、天野ら (2000)、および天野 (2001, 2007) は日本海側地域の鮮新世—更新世貝類化石群を石灰質ナノ化石層序に基づいて比較整理し、大桑・万願寺動物群の時空分布についての再検討を行った。すなわち、日本海側地域では基準面 A (2.75 Ma) の Climate Crash を境に中新世型の残存貝化石種が消滅し、新たな北方系寒流系貝化石種が本州中部まで南下したこと、mid-Pleistocene climate transition に対応する 0.9~0.8 Ma 前後に多くの大桑・万願寺動物群の特徴種が絶滅したことなどを明らかにし、新たな貝化石層序の枠組みと貝化石群集からの古海洋環境変動を明らかにした。今後、貝化石などの深度分布に特徴を持つ底棲化石群の層位分布とプランクトン化石の石灰質ナノ化石などとの比較検討

を行うことによって、新第三紀末から第四紀の詳細な古海洋構造がより具体的に明らかになることが期待される。

3. 地下層序からみた秋田油田地域の新第三紀末–第四紀構造運動

秋田油田構造発達史の復元では、石油探査で得られた地下資料が大きな役割を果たして来た。これまで石油坑井層序などで用いる地下層序では、本来は岩相層序で決定されるべき地層名を、地質年代を重視することから、独自の有孔虫化石層序から定義して来た経緯がある。例えば秋田地域坑井の天徳寺層／船川層境界はいわゆる No. 3 *Globorotalia inflata bed* の基底に設定されている(佐賀, 1992)。このような石油坑井層序の微化石による地層区分は坑井間対比のみならず、本来の岩相層序で定義された地表の地質層序にまで直接対比されてきた。このように異なった定義で命名された地下と地表の地層群を同じ地層名ということで対比された結果、申川油田などの第四系が厚く堆積する地域の地下坑井層序では、“上部天徳寺層”や“笹岡層”はカラブリアン階以上の層準に対して命名されてきた(Fig. 7)。しかし、これまで述べたごとく、模式地周辺の本来の岩相層序で言う天徳寺層、笹岡層は、カラブリアン階より下位のピアセンジアン階からジェラシアン階であり、石油鉱業で設定された坑井地層区分は地表地質層序と地質年代的にも岩相層序学的にも大きく異なるカテゴリーで決定されてきていることを示している。このような層位学の混乱から、油田地域の地下地質断面や構造発達史復元では岩相層序と微化石層序が混在する層序が用いられることとなり、多くの混乱を招いていた。佐藤ら(2003b)は、このような矛盾と混乱を避けるため、坑井地下層序を微化石年代層序から組み立て、微化石年代の基準面を中心とした追跡から地下地質構造の詳細について検討を行った。

ここで、本論で詳細を明らかにした NKH-1 号井と 3 号井の石灰質ナノ化石調査結果を佐藤ら(2003b)の地下断面に改めて反映させ、同地域の構造発達について考察する(Fig. 8)。NKH-1 号井と 3 号井が掘削された水林周辺の地表では、西目層と笹岡層が西へ 8° から 15° 前後の緩傾斜で分布する。NKH-3 号井で実施されたディップメーターでは、深度 1500 m までが 10° から 20° の西傾斜で地表の構造と極めて整合的であるが、1500 m より下位では背斜軸頂部よりやや東翼で、15° 前後の東傾斜へ変化する。すでに述べたごとく NKH-1 号井と 3 号井の間には北由利衝上断層群があり、この点に注目して改めて断面図を見つめる(Fig. 8)。対比に利用した基準面は、西黒沢階上限で石灰質ナノ化石 *Cyclicargolithus floridanus* 産出上限(13.3 Ma : Lourens et al., 2004)、底生有孔虫化石 *Spirosigmoinella compressa* の産出上限(5.4 Ma : 花方ら, 2001)、最上部新生界の石灰質ナノ化石対比基準面(Sato et al., 2009, 佐藤ら, 2011)で基準面 21(3.85 Ma)、基準面 A(2.75 Ma)、基準面 11(1.71 Ma)、基準面 8(1.18 Ma)、基準面 6(0.99 Ma)である。NKH-1 号井と 3 号井の間をみると、1 号井の基準面 11 で 1.71 Ma 層準は緩傾斜で 3 号井に直接追跡され、地表や坑井の地層傾斜角度と極めて整合的に対比される(Fig. 8)。しかし、2.75 Ma 層準は、二つの坑井間で深度に

1000 m の差が存在する。さらに 1 号井では深度 1250 m で 13.3 Ma の西黒沢階に達するのに対し、3 号井では堀止深度の 2600 m でも 3.85 Ma 層準には到達せず、1 号井では認められない、天徳寺層下部の桂根相と呼ばれる砂岩泥岩互層の中で堀止められている(Fig. 8)。このような構造差は、すでに佐藤時幸ほか(2003b)や佐藤比呂志ほか(2004)が指摘したように、北由利衝上断層群の存在と活動時期を反映している。すなわち、北由利衝上断層群は日本海形成時に発生した正断層群がインバージョンテクトニクスで衝上断層群として再活動した(佐藤比呂志ほか, 2004)もので、その活動年代の詳細は明確にはされてきていなかった。この観点から改めて断面図を見ると、NKH-3 号井の桂根相に対比される 2000 m を超すタービダイト砂岩の堆積は、断層群の活動がタービダイト砂岩層の堆積時である 3.85 Ma に開始したことを示す。しかし、北由利衝上断層群が 1.71 Ma に対比される層準には影響を及ぼさない(Fig. 8)ことからすると、1.71 Ma には確実にその活動が終了する。一方、このような現在の海岸線に位置する北由利衝上断層群の活動停止は、西方沖合の基礎試錐「子吉川沖」付近に新たな逆断層を形成する。そこでは、試錐を通る二つの断層によって 99 万年前の基準面の層準は 1000 m 近く変位し、試錐位置の西方に新たな堆積盆地を形成したことを示している(Fig. 8)。

4. 古環境の変遷

佐藤ら(2003b)が指摘したように、秋田地域における 3.85 Ma 以降の地層の分布は西部が主体となる。県北中央に位置する藤里–鷹巣地域は 3.85 Ma から 2.75 Ma 間で砂岩相へ変化するとともに植物化石が産するようになり、浅海～陸化の変化を示す。その西方で素波里安山岩分布地域に近接する常磐地域や、秋田県中央部の太平山南縁の太平では砂岩相で貝化石を豊富に含み、3.85 Ma から 2.75 Ma 間での浅海環境が示唆される。しかし、海岸線に沿った大部分の地域は、2.75 Ma までは半深海性のシルト岩相よりなり、半深海の海の広がりを見せている(Fig. 9)。しかし、2.75 Ma を境に北由利衝上断層群を西縁とする現在の平野部の多くは、半深海性のシルト岩相から貝化石を多数含む浅海性砂岩相へ急変、同時にそれまで浅海域であった藤里、常磐、太平地域は陸域となる。1.71 Ma 以降のカラブリアン期ではそれまでの浅海域のほとんどが陸域へ変化し、堆積盆地は沖合へ移動した(Fig. 9)。

このように秋田地域の古環境は 3.85 Ma での北由利衝上断層群の活動に伴うタービダイト砂岩(桂根相)の堆積以後、2.75 Ma と 1.71 Ma で浅海化が進んだ。中でも 2.75 Ma を境に秋田平野部の多くの地域が同時かつ急激に岩相変化し浅海化する急激な変化は、北由利衝上断層群の活動のみでは説明できず、本論で述べてきたパナマ地峡の成立に伴う汎世界的な大規模な寒冷化とそれによるユースタシーの低下の影響を強く受けたと考えられる。

おわりに

新第三紀／第四紀境界がジェラシアン階上限からジェラシアン階下限に改定されたことから、本論ではこれら層準を石

Fig. 7. Correlations of the Pliocene to Quaternary formations distributed in the Kanazawa, Himi, Niigata, and Akita area (LR04: Lisiecki and Raymo, 2005).

Fig. 8. Geological section of the Honjo area based on calcareous nannofossil datum.

1: Takanosu, 2: Fujisato, 3: Masayamazawa, 4: Minehama, 5: Gojome, 6: Osugozawa, 7: Sasaoka, 8: Taihei, 9: Manganji, 10: Oga

Fig. 9. Paleogeography of the Akita area from 3.85 Ma to 1.45 Ma.

灰質ナノ化石層序から秋田地域の大菅生沢および男鹿半島に詳細に追跡した。また、石灰質ナノ化石対比基準面に基づいて、日本海側地域の鮮新統-更新統を対比し、日本海側地域の代表的貝化石群の“大桑・万願寺動物群”の問題点を述

べ、2.75 Ma に発生した北極域の大規模な寒冷化の日本海側地域への影響について整理した。あわせて、これまで問題が指摘されてきた秋田油田地域の新生代後期の構造運動について、地下断面に微化石年代層序を適用させ、秋田平野部の

古環境の変遷が北由利衝上断層群の活動と 2.75 Ma での汎地球的な寒冷化の影響を強く受けていることを明らかにした。

本論では、秋田地域のピアセンジアン階／ジェラシアン階／カラブリアン階境界について詳述したが、本邦の最上部新生界の地質年代の決定や古海洋環境の復元には、汎世界的に発生した短期間でかつ大規模な環境変動を、詳細な微化石年代層序などから確実に区分し検討することが重要であることを示唆している。

謝 辞

本稿をまとめるにあたり、JX 日鉱日石開発(株)には坑井試料の提供と調査結果公表の許可を頂いた。査読者の JOGMEC の馬場 敬博士と匿名査読者、および編集を担当された山路 敦教授には貴重な御助言を頂き原稿を改善することが出来た。ここに記して感謝する。

文 献

- 天野和孝・佐藤時幸・小池高司(Amano, K., Sato, T. and Koike, T.), 2000, 日本海中部沿岸域における鮮新世中期の古海況：新潟県新発田市の鍬江層産軟体動物群。地質雑(Jour. Geol. Soc. Japan), **106**, 883–894.
- 天野和孝(Amano, K.), 2001, 日本海側における鮮新世の軟体動物群と古海況。生物科学(Biol. Sci.), **53**, 178–184.
- 天野和孝(Amano, K.), 2007, 大桑-万願寺動物群とその変遷過程。化石(Fossils), **82**, 6–12.
- Bartoli, G., Sarnthein, M., Weinelt, M., Erlenkeuser, H., Garbe-Schonberg, D. and Lea, D. W., 2005, Final closure of Panama and the onset of northern hemisphere glaciation. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **237**, 33–44.
- 花方 聡・本山 功・平松 力・渡邊和恵・辻 隆司(Hanagata, S., Motoyama, I., Hitamatsu, C., Watanabe, K. and Tsuji, T.), 2001, 新潟県上越～中越地域における中新統・鮮新統境界部の微化石層序。地質雑(Jour. Geol. Soc. Japan), **107**, 565–584.
- 北里 洋(Kitazato, H.), 1977, 男鹿半島上部新生界の地質および年代。東北大地質古生物邦文報(Contrib. Tohoku Univ., Inst. Geol. Paleont.), 75 号, 17–49.
- 小泉 格・金谷太朗(Koizumi, I. and Kanaya, T.), 1977, 男鹿半島と秋田市北方丘陵における新第三系の対比。藤岡一男退官記念論文集(Prof. K. Huzioka Memorial Vol.), 401–412.
- Lisiecki, L. E. and Raymo, M. E., 2005, A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records. *Paleoceanogr.*, **20**, PA1003.
- Lourens, L., Hilgen, F., Shackleton, N. J., Laskar, J. and Wilson, J., 2004, Orbital tuning calibrations and conversions for the Neogene Period. In Gradstein, F. M., Ogg, J. G. and Smith, A. G., eds., *A Geologic Time Scale 2004*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, 169–484.
- 米谷盛寿朗(Maiya, S.), 1978, 東北に本油田地域における上部新生界の浮遊性有孔虫層序。池辺展生教授記念論文集(Cenozoic Geology of Japan, Prof. N. Ikebe Memorial Vol.), 35–60.
- Maiya, S., Saito, T. and Sato, T., 1976, Late Cenozoic planktonic foraminiferal biostratigraphy of northwest Pacific sedimentary sequences. In Takayanagi, Y. and Saito, T., eds., *Progress in Micropaleontology*, Micropaleontology Press, New York, 395–422.
- Noritomi, K., Nakamura, R. and Matoba, Y., 1980, Paleomagnetic study of late Cenozoic sediments in Akita Prefecture, Japan. *Jour. Mining Coll., Akita Univ.*, A5, 1–13.
- 小笠原憲四郎(Ogasawara, K.), 1996, 大桑・万願寺動物群の古生物地理学的意義。北陸地質研報(Hokuriku Geol. Inst. Rep.), **5**, 245–262.
- 大沢 穠・高安泰助・池辺 穠・藤岡一男(Ozawa, A., Takayasu, T., Ikebe, Y. and Huzioka, K.), 1977, 本荘地域の地質。地域地質研究報告(5 万分の 1 地質図幅) (*Geology of the Honjo Districts. Quadrangle Ser. Scale 1: 50,000*), 地質調査所(Geol. Surv. Japan), 52p.
- 大沢 穠・片平忠実・中野 俊・土谷信之・栗田泰夫(Ozawa, A., Katahira, T., Nakano, S., Tsuchiya, N. and Awata, Y.), 1977, 矢島地域の地質。地域地質研究報告(5 万分の 1 地質図幅) (*Geology of the Yashima Districts. Quadrangle Ser. Scale 1: 50,000*), 地質調査所(Geol. Surv. Japan), 52p.
- Otuka, Y., 1939, Tertiary crustal deformations in Japan (with short remarks on Tertiary paleogeography). *Jubilee Publication in the Commemoration of Prof. H. Yabe's Sixtieth Birthday*, 481–519.
- Raymo, M. E., Grant, B., Horowitz, M. and Rau, G. H., 1996, Mid-Pliocene warmth: stronger greenhouse and stronger conveyor. *Mar. Micropaleontol.*, **27**, 313–326.
- 佐賀 肇(Saga, H.), 1992, 秋田・山形地域。天然ガス鉱業会・大陸棚石油開発協会編(Japan Natural Gas Assoc. and Japan offshore petroleum development association eds.), 改訂版日本の石油・天然ガス資源(*Petroleum and Natural Gas Resources in Japan*), 53–80.
- 佐藤比呂志・吉田武義・岩崎貴哉・佐藤時幸・池田安隆・海野徳仁(Sato, H., Yoshida, T., Iwasaki, T., Sato, T., Ikeda, Y. and Umino, N.), 2004, 後期新生代における東北日本中部背弧域の地殻構造発達：最近の地殻構造探索を中心として。石技誌(Jour. Japan. Assoc. Petrol. Tech.), **69**, 145–154.
- 佐藤時幸・千代延 俊・Farida, M. (Sato, T., Chiyonobu, S. and Farida, M.), 2012, グローバル気候変動と新第三紀の終わり／第四紀の始まり：石灰質ナノ化石層序から。地質雑(Jour. Geol. Soc. Japan), **118**, 87–96.
- Sato, T., Chiyonobu, S. and Hodell, D. A., 2009, Quaternary calcareous nannofossil datums and biochronology in the North Atlantic Ocean, IODP Site U1308. *Proc. IODP*, **303/306**: College Station, TX.
- 佐藤時幸・樋口武志・石井崇暁・湯口志穂・天野和孝・亀尾浩司(Sato, T., Higuchi, T., Ishii, T., Yuguchi, S., Amano, K. and Kameo, K.), 2003a, 秋田県北部に分布する上部鮮新統～最下部更新統の石灰質ナノ化石層序：後期鮮新世古海洋変動と関連して。地質雑(Jour. Geol. Soc. Japan), **109**, 280–292.
- Sato, T. and Kameo, K., 1996, Pliocene to Quaternary calcareous nannofossil biostratigraphy of the Arctic Ocean, with reference to late Pliocene glaciation. In Thiede, J., Myhre, A. M., Firth, J. V. et al. eds., 1996. *Proc. ODP, Sci. Results*, **151**, 39–59.
- 佐藤時幸・亀尾浩司・三田 勲(Sato, T., Kameo, K. and Mita, I.), 1999, 石灰質ナノ化石による後期新生代地質年代の決定精度とテフラ層序。地球科学(Earth Sci.), **53**, 265–274.
- 佐藤時幸・小川由梨子・金子光好(Sato, T., Ogawa, Y. and Kaneko, M.), 2003b, 石灰質ナノ化石からみた秋田県沿岸部北由利衝上断層群の活動時期。地質学会第 110 年会要旨(*Abstr. of the 110th Ann. Meet. Geol. Soc. Japan*), 67.
- Sato, T., Saito, T., Takahashi, H. and Higuchi, T., 2001, Calcareous nannofossil biostratigraphy of the Sasaoka and Tentokuji Formations, central Akita area, northern Japan. *Jour. Min. Coll. Akita Univ.*, Ser. A, Vol. VIII, no. 4, 151–172.
- Sato, T., Saito, T., Yuguchi, S., Nakagawa, H., Kameo, K. and Takayama, T., 2002, Late Pliocene calcareous nannofossil paleobiogeography of the Pacific Ocean: Evidence for glaciation at 2.75 Ma. *Rev. Mex. Cienc. Geol.*, **19**, 175–189.
- 佐藤時幸・高山俊昭・加藤道雄・工藤哲朗(Sato, T., Takayama, T., Kato, M. and Kudo, T.), 1987, 日本海側に発達する最上部新生界の石灰質微化石層序，その 1：新潟地域。石技誌(Jour. Japan. Assoc. Petrol. Tech.), **52**, 231–242.
- 佐藤時幸・高山俊昭・加藤道雄・工藤哲朗(Sato, T., Takayama, T., Kato, M. and Kudo, T.), 1988a, 日本海側に発達する最上部新生界の石灰質微化石層序，その 3：秋田地域および男鹿半島。石技誌(Jour. Japan. Assoc. Petrol. Tech.), **53**, 199–212.

- 佐藤時幸・高山俊昭・加藤道雄・工藤哲朗・亀尾浩司(Sato, T., Takayama, T., Kato, M., Kudo, T. and Kameo, K.), 1988b, 日本海側に発達する最上部新生界の石灰質微化石層序, その4: 総括—太平洋側および鮮新統/更新統境界の模式地との対比. 石技誌(*Jour. Japan. Assoc. Petrol. Tech.*), **53**, 475–491.
- Sato, T., Yuguchi, S., Takayama, T. and Kameo, K., 2004, Drastic change of the geographical distribution of the cold water nannofossil *Coccolithus pelagicus* (Wallich) Schiller during the late Pliocene: with special reference to increase of ice sheet in the Arctic Ocean. *Mar. Micropaleontol.*, **52**, 181–193.
- 高山俊昭(Takayama, T.), 1978, 石灰質ナノプランクトン. 高柳洋吉編, 微化石研究マニュアル(*Manual of Micropaleontological Study*), 朝倉書店(Asakura Publ.), 51–59.
- 高山俊昭・加藤道雄・工藤哲朗・佐藤時幸・亀尾浩司(Takayama, T., Kato, M., Kudo, T., Sato, T. and Kameo, K.), 1988, 日本海側に発達する最上部新生界の石灰質微化石層序, その2: 北陸堆積盆地. 石技誌(*Jour. Japan. Assoc. Petrol. Tech.*), **53**, 9–27.

(要 旨)

佐藤時幸・佐藤伸明・山崎 誠・小川由梨子・金子光好, 2012, 石灰質ナノ化石からみた秋田地域の新第三紀末～第四紀古環境変動. 地質雑, **118**, 62–73. (Sato, T., Sato, N., Yamasaki, M., Ogawa, Y. and Kaneko, M., 2012, Late Neogene to Quaternary paleoenvironmental changes in the Akita area, Northeast Japan. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **118**, 62–73.)

新しく定義された新第三紀/第四紀境界を, 石灰質ナノ化石層序に基づいて秋田地域の菅生沢および男鹿半島に詳細に追跡した. その結果, ピアセンジアン階/ジェラシアン階境界は菅生沢ルートの笹岡層下部に, ジェラシアン階/カラブリアン階境界は, 男鹿半島北浦層下部に位置することを明らかにした. 石灰質ナノ化石対比基準面に基づいて, 日本海側地域の金沢, 新潟, 秋田地域の鮮新統–更新統を対比した上で, 日本海側地域の代表的貝化石群の“大桑・万願寺動物群”産出層準の問題点を述べ, “Climate Crash”と呼ばれる 2.75 Ma に発生した北極域の大規模な寒冷化の日本海側地域への影響について整理した. さらに, 地下断面に微化石年代層序を適用させ, 北由利衝上断層群の活動が 3.85 Ma から 1.71 Ma 間であること, および秋田平野部の浅海化が北由利衝上断層群の活動と 2.75 Ma での汎地球的な寒冷化(Climatic Crash)の影響を強く受けていることを明らかにした.