論文

九十九里地域におけるガス水比およびヨウ素濃度を規制する要因

—特に、海底扇状地堆積物および断層が果たす役割について—

三田 勲*・和気 史典*・国末 彰司**

(Received by June 26, 2002; accepted January 10, 2003)

Control factors on gas-water ratio and iodine concentration around the Kujukuri District in Chiba Prefecture, central Japan—Special reference to the role of submarine-fan deposits and faults in the Kazusa Group—

Isao Mita, Fuminori Waki and Shoji Kunisue

Abstract: We examined control factors of regional variation of gas-water ratio and iodine concentration based on the integrated evaluation of the subsurface submarine-fan distribution of Umegase and Otadai formations, the location and displacement of N-S trending faults developed in the Kujukuri District along the Pacific Coast of Chiba Prefecture, central Japan. The main results are as follows; 1) Umegase and Otadai formations which consist of turbidite successions as main reservoirs are the thickest nearly at the southwestern margin in the study area and have elongated northeastward as far as about 20 kilometers, i.e., the thickness of the formations decrease gradually northeastward, are considered as ancient middle to lower fan deposits formed under channel-lobe system based on the electric logging patterns. 2) Regionally, gas-water ratio increases as well as Umegase and Otadai formations thicken, and the distribution of gas reservoirs with high gas-water ratio, usually known as Mobara-type gas reservoir, are well coincident with that of submarine-fan deposits. Locally, extremely high gas-water ratio tends to be located in the west side of main eastward-dipping normal faults. These facts strongly support the idea that biogenic gas moved the southeastward, i.e., to the depocenter of the submarine-fan deposits and to the up-dip direction, and then it was trapped in the west side of major N-S trending normal faults. 3) The regional change of iodine concentration (I/Cl) is basically concordant with the thickness of the submarine-fan deposits. Iodine concentration tends to be highest near the depocenter of submarine-fan or turbidite deposits in open sea environments. This fact suggests that organic matters both of continental origin such as plant fragments in turbidites as absorption materials and of marine origin such as planktons as original iodine supplier are important to produce high iodine concentration in brine.

Key words: Kujukuri, central Japan, Submarine-fan, gas-water ratio, iodine, Otadai formation, Umegase formation, Mobara-type gas reservoir.

* 平成12年5月25日、平成12年度石油技術協会春季講演会地質・探鉱部門個人講演「茂原ガス田の地質構造について」で講演 This paper was presented at 2000 JAPT Geology and Exploration Personal Session entitled "Study of geological structure in the Mobara gas field" held in Nigata, Japan, May 25, 2000.

* 日本天然ガス㈱ Nihon Tennen Gas Co., Ltd.

** 関東天然瓦斯開発㈱ Kanto Natural Gas Development Co., Ltd.

1. はじめに

千葉県下の茂原を中心とする水溶性ガス田には、これまでに2,000以上にも及ぶ坑井が掘削され、そのほとんどで安価な比抵抗と自然電位の検層が行われてきている。こうした検層記録からは砂岩・泥岩の定性的な区分だけではなく、特徴的な検層記録の曲線形状を利用すると単層毎の対比が可能であり、落差3mほどの断層で

あれば比較的容易に識別することができる。このような条件の良さから、石和田・品田（1957）や石和田ら（1971）は地表の火山灰鍵層に対比できる特徴的な検層曲線の形状を見だし、単層単位で詳細な対比が行えることを指摘している。一方、和気ら（1998）は、石和田ら（1971）が検層記録上で見だした火山灰鍵層の U 8, O7, Kd8 を直接コアおよび CST で採取し、地表火山灰と矛盾のないことを示している。このように、茂原ガス田では安価な物理検層で詳細な地層対比が可能であり、きめ細かな地質構造の解析が可能となっている。

茂原ガス田の主たる胚胎層である上総層群は、水溶性ガス田の開発を目的に地表調査が行われ、三梨ら（1959）で層序学的な枠組みが確立し、その後、層位学的研究や堆積学的研究などが数多くなされてきた（例えば、Oda, 1977；新妻, 1976；佐藤・高山, 1988；渡辺・檀原, 1996など）。本論で対象とする堆積学的研究を振り返ると、1970年以降、海洋堆積物に対する理解が深まる中で、海底地形とそこに埋積した堆積物の岩相との間に、一定の関係が見いだされ、Mutti and Rucci-Lucci (1972) や Walker and Mutti (1973) は、海底扇状地岩相モデルを提唱し、岩相から堆積環境や堆積様式を議論することを可能とした。この成果は、陸上に露出する堆積物の理解にも飛躍的な進歩をもたらすことになる。上総層群でも、こうした海洋地質学の成果を背景にして、堆積学的研究が精力的に行われた（例えば、平山・鈴木, 1965；山本, 1971；平山・中島, 1977；中島, 1978；Ito and Katsura, 1992など）。なかでも、Hirayama and Nakajima (1977) は大田代層の火山灰鍵層 O7 付近の砂岩層を追跡し、堆積環境の相違を論じた。徳橋・八田（1982）は大田代層や下位の安房層群安野層、清澄層のタービダイト層における堆積構造の違いを指摘し、堆積盆形状の相違に原因を求めた。さらに、渡部ら（1987）は上総層群を構成する各累層の岩相の違いから、堆積環境や古地理の復元を提唱している。

このように、上総層群に関する地表露頭での研究は進展してきたものの、地下地質に関しては石和田ら（1971）以降、多くの坑井が掘削されてきたにもかかわらず、研究の対象とはならなかった。従来より、南部の大多喜地区と北部の横芝地区では検層記録での曲線形状の違いが認められ、岩相の不連続性や相違のみが指摘されていた。しかし、これまでにその堆積学的考察が行われていなかったために、地表露頭で想定されている海底扇状地（徳橋・八田, 1982, Katsura, 1984；渡部ら, 1987；徳橋ら, 2001など）が茂原周辺の地下でどのような分布を示すかも明らかにされておらず、さらに、「茂原型」ガス鉱床との関連もこれまでに議論されたことが

なかった。こうしたことから、国末ら（2002）は検層記録の堆積相解析に基づいて、海底扇状地の分布を予察的に示し、ガス水比やヨウ素・塩素比の分布に整合性が深いことを指摘した。

以上のような背景から、本論では梅ヶ瀬層・大田代層の海底扇状地の詳細を明らかにするとともに、断層や海底扇状地の分布範囲といわゆる「茂原型」ガス鉱床と称されてきたガス水比の高い地域との関係について検討する。加えて、ヨウ素の濃集とタービダイトとの関連についても考察する。

2. 研究方法

電気検層記録を用いて、地下の岩相を明らかにするには多種類の検層記録があれば、より精度の高い判定ができる。しかし、本稿で対象とする検層記録は自然電位と比抵抗のみ行われていることが多く、これらの検層記録から砂岩層や泥岩層を区分する必要がある。また、使用されている検層機の種類や泥水の電気伝導度が不明のため、定量的な基準を設けて判断することは難しい。したがって、砂岩層の判定は頁岩基線から自然電位で数十 mV、比抵抗で数 Ω m の変位を基準とし、検層曲線の性状で適宜変更して定性的に岩相区分することにした。

図1 調査地域と代表坑井の位置

OTK-1, MO-1, NRT-1 坑井名（国末ら, 2002に加筆）

図2 上総層群の地質柱状図と坑井地下地質
国末ら (2002) に加筆し、古地磁気層序は新妻 (1976)、石灰質ナノ化石は佐藤ら (1988) をもとに
年代値は Sato and Kameo (1996) を加筆し、底生有孔虫は菊池・富沢 (1964) から引用した。

また、検層記録上でのタービダイト互層の認定および地表層序との対比は、地表露頭の模式地である養老川流域での柱状図を作成し、この流域に近い芝原や佐貫地区での検層記録上の鍵層 U 8, O 7, Kd 8 (石和田ら, 1971; 和気ら, 1998) と柱状図上の火山灰鍵層を対比する。その後、地表と坑井での各タービダイト互層を比較して良い整合性があることを確認した。タービダイト互層の対比に加え、この互層中に挟在する単層ごとの特徴を見だし、その類似性から高精度の対比も行って信頼性を確保した。単層ごとに対比する場合、カーブの形状が変化しない場合は問題ないが、変化したとしても傾向的に把握でき、かつ堆積学的に矛盾のない場合のみ対比できるとした。すなわち、堆積学的な観点から検層カーブの特徴を考えると、タービダイトの砂岩層はチャンネル部から扇状地の末端までの間で、厚さや岩相も変化する (Hirayama and Nakajima, 1977; 徳橋・八田, 1982)。この場合、チャンネル部では厚い粗粒堆積物から構成されるため、比抵抗と自然電位曲線ともに矩形となる。また、中央厚層部では級化構造をもち上方細粒化するため、曲線の特徴はベル型となり、さらに周辺薄層部では細粒砂岩のみとなるので薄いスパイク状の凸型形状が想定できる。したがって、岩相対比から層位位置が明確で、かつ傾向的に上述した岩相の側方変化が認められる場合は対比できるとした。この他にも、タービダイト互層の場合、上方厚層化や上方薄層化のパターンは海底扇状地の中央部～末端部周辺で同様な傾向となることも予測でき、大きな単位での対比の目安となる。以上のような、特徴を踏まえて検層記録の対比を行った。さらに、層相の解釈は自然電位と比抵抗曲線の形状をもとに Pirson (1983), Abbot (1988) を参考にした。

調査範囲は大多喜から北部の横芝に至る広範な地域に及ぶため、岩相の側方変化もあり、検層記録だけでは信頼性の高い対比が難しい。とくに、大網を挟んで南部と北部では著しい岩相の変化があるため、検層記録のみでの対比作業は困難である。このことを補うために、底生有孔虫や石灰質ナノ化石を用いて、概略的な時間面の対比を行った。底生有孔虫は多くの研究者によって本ガス田に適用されてきており (例えば、菊池, 1963; 樋口・菊池, 1964; 樋口・斉藤, 1965; 石和田ら, 1971; Aoki, 1968 など)、石灰質ナノ化石は、佐藤ら (1988) によって、上総層群中に9つの基準面が追跡され、この基準面を坑井に適用することができる (図2)。したがって、大多喜や茂原地区では、CST やコアおよびカッティングス試料の微化石分析により、坑井における石灰質ナノ化石の層序区分が地表と一致することを確認したうえで (OTK-1 号井, MO-1 号井) 対比を進め

た (図3)。また、大網以北の地域については連続的な試料が得られなかったため、代表的な4坑井のスポットコア (間隔約 200 m) を用い、石灰質ナノ化石の産出を確認して、概略的な地質年代を判定するとともに、底生有孔虫の層序区分を参考に対比作業を進めた。

以上の様な対比作業により、タービダイト互層の対比を広域に行って、その分布範囲と層厚変化から海底扇状地の分布と形状を明らかにした。また、地層名は養老川流域で定義された名称を北部の横芝や成東地区にも用いることにより、地層名の混乱を避けた。使用した検層記録は大多喜～成東地域に分布する天然ガス井を 3～5 km 間隔で均等に選択し (合計69坑井)、その他にも「茂原型」ガス鉱床を代表する茂原市南部にある芝原地区の122坑井、さらに、九十九里平野中央部の白子・茂原地区から102坑井を用いて、砂層の連続性や断層など地質構造の詳細を検討した。

3. 地質概要

房総半島中部には本邦を代表する第四系の上総層群が広く分布している。この上総層群は約250万年前から60万年前 (佐藤・高山, 1988; 渡辺・檀原, 1998) に堆積した地層で、全層厚 3,000 m にも達し、とくに茂原周辺地域では良質な天然ガスを胚胎している。上総層群の構造は房総半島東側の茂原から一宮地域で、北東系走向、北西傾斜 5～7° の緩傾斜を示すのに対し、南部の大多喜付近では走向が東西方向へと変化し、傾斜も 10～15° と僅かながら増加している。また、断層は養老川以東に発達し、南北系走向で東傾斜の正断層が多く、落差は 10 m 以下のものが多い。養老川周辺地域の上総層群の層序は下位より、黒滝層、勝浦層、浪花層、大原層、黄和田層、大田代層、梅ヶ瀬層、国本層、柿ノ木台層、長南層、笠森層と呼称される整合一連の地層から構成されている (図2)。このうち、本論で対象とするのは主に、黄和田層から梅ヶ瀬層までの地層であることから、これら天然ガス胚胎層を対象に地表での特徴を記す。

黄和田層、大田代層、梅ヶ瀬層は、茂原市南部から養老川、小櫃川、湊川周辺地域にかけて分布し、茂原市南部から養老川までは北東から南西方向に分布し、養老川以西ではほぼ東西方向に分布する。黄和田層は岬町の東海岸から養老川まで層厚が厚く、養老川以西では薄くなる。層相は上部と下部で若干異なり、下部では比較的砂岩の挟在が少なく、泥岩を主体にするスランプやデブリ-フロー堆積物が発達する。とくに Kd 23 より下位のデブリ-フロー堆積物中の泥岩偽礫は著しく偏平なレンズ状を呈することから、堆積初期に移動があったことが分か

図3 坑井対比図

る。また、中部の Kd8~Kd23 層準ではスランプ堆積物が多く、この砂質部分は未淘汰な砂質シルトから構成され、浸透率が悪いことが推測できる。Kd8 より上位では比較的厚い 1~2m ほどの砂岩が頻繁に挟在する。

大田代層は房総半島東岸の岬町から養老川へと分布し、これ以西では次第に層厚を減じる傾向がある。層相は砂岩優勢~等量砂岩泥岩互層が 4 層準に発達するが、最下部層準はスランプが認められ、連続性も悪い。砂岩の厚さは 20cm~2m 程度を主体とし、上部および下部には 10m~20m ほどのスランプが認められるほか、軽石や貝殻片が普遍的に混入し、20cm ほどの炭化した植物片もよく認められる。

梅ヶ瀬層は大田代層と同様な分布を示すが、養老川以西でも層厚は比較的一定している。層相は厚さ数 m の砂岩を主体にする砂岩優勢互層が発達し、中部で泥岩優勢互層がわずかに発達するに過ぎない。砂岩中には貝殻片や軽石が普遍的に含まれ、砂岩単層の上部には炭質物片が頻繁に濃集する。また、中部の U8 付近では砂岩中に礫が頻繁に混入する。

なお、検層記録上の岩相特徴は国末ら (2002) や和気ら (2000) に述べられているため、ここでは割愛する。

4. 結果

4.1 坑井対比

調査範囲が大多喜から茂原、大網、東金、成東、横芝と広範な地域におよび、岩相の変化も認められるため、ここでは便宜的に大多喜、茂原、成東地区の 3 地区に区分して説明を行う。なお、各地区では代表的な坑井を選んで対比の結果を図 3 に示す。

a. 大多喜地区

本地域は模式地の養老川に近く、地表の岩相変化を基準に地層区分を行い、石灰質ナノ化石基準面の追跡されている坑井を標準にして対比を進めた。本地区周辺では梅ヶ瀬層が地表に露出しており、大田代層以下の地層が天然ガスの貯留層となっている。大田代層以下の地層の区分は OTK-1 号井 (図 3) を代表坑井として対比結果を述べる。OTK-1 号井では深度 92 m に見られる厚い砂岩層の下限が梅ヶ瀬層と大田代層の境界になる。同

様に大田代層の砂岩優勢互層の下限は 580 m、黄和田層の泥岩の下限は 1,255 m にそれぞれ追跡できる。また、石灰質ナンノ化石は深度 800 m 以深を約 20 m 間隔で CST やコアを採取して検討を行った。その結果、黄和田層上部に認められる石灰質ナンノ化石基準面⑨ *Helicospaera sellii* の最終産出 (LO) は深度 783 m に、基準面⑩ *Gephyrocapsa* 属の大型種の初産出 (FO) は 1,043 m、基準面⑪ *Discoaster brouweri* の最終産出は 1,381 m にそれぞれ追跡できる。この結果は佐藤ら (1988) と一致しており、岩相区分とも矛盾しない (図 3)。

各地層の岩相をみると、梅ヶ瀬層は 1 m ほどのタービダイト砂岩が全層準にわたって発達し、北方では最上部に数 m のチャンネル様の砂岩が挟在する。大田代層は数十 cm 単位のタービダイト砂岩の発達する互層部が 3 層準認められ、泥質部は少ない。黄和田層は泥質岩主体の地層で 1~2 m の砂岩を稀に挟在する。ただし、北方に向かって、砂岩の頻度は増加する。

b. 茂原地区

石和田ら (1971) を参考に、茂原地区の MO-1 号井を基準として対比を進めると、梅ヶ瀬層の境界は砂質シルト岩の終わる 430 m で、大田代層は 807 m の砂岩層の下限、黄和田層は 1,055 m の砂岩優勢互層の下限、大原層は 1,550 m の泥岩層の下限に追跡できる。また、50 m 間隔のカッティングスを用いて石灰質ナンノ化石の産出を検討した結果、基準面⑥ *Gephyrocapsa pararella* の初産出は 810 m~850 m、基準面⑧ は 1,150 m~1,200 m、基準面⑨ は 1,300 m~1,350 m、基準面⑩ は 1,400 m~1,450 m に追跡できるが、基準面⑦ は特定することが困難であった。こうした結果は岩相区分とも矛盾しない (図 3)。

検層記録上の層相は大多喜地区に比べて、梅ヶ瀬層が 535 m~567 m、660 m~750 m 間に顕著なタービダイトが頻繁に認められ、全体に砂岩層と泥岩層の割合が約 50% になるのに対し、大田代層は梅ヶ瀬層との境界の泥岩層が薄くなり、上部の 830 m~910 m 間にタービダイトが認められるものの、これ以深では泥岩層が主体となり、下部のタービダイトは頻度が少ない。黄和田層は主に泥岩からなることに変わりはないが、1,180 m~1,215 m 間に上方厚層化・上方薄層化のサイクルが顕著なタービダイトが認められ、1,300 m~1,340 m にも挟在する。したがって、大多喜地区よりは多少タービダイトの頻度が高くなっている。大原層は比較的泥岩の割合が少なく、見掛け上、チャンネル様な自然電位、比抵抗曲線を示しており、大多喜地区と大差はない。

c. 成東地区

先にも述べたように、当地区では南部の茂原地域とは

岩相が異なるため、石灰質ナンノ化石の産出で概略的な地質年代を把握するとともに、菊池 (1963) の成果を参考にして、対比を進めた。本地区では NRT-1 坑井を代表に概略的な地層境界を示すと、国本層と梅ヶ瀬層の境界は 320 m に、梅ヶ瀬層と大田代層の境界は 480 m に、同様に大田代層と黄和田層の境界は 720 m、黄和田層と大原層の境界は 1,245 m、大原層と浪花・勝浦層の境界は 1,540 m に対比できる。また、約 200 m 間隔のスポットコアを用いて石灰質ナンノ化石を検討した結果、養老川の大田代層最上部に追跡される石灰質ナンノ化石基準面⑥は 400 m~650 m の間に、大田代層下部 O22 火山灰層付近に認められる基準面⑦の *Reticulofenestra asanoi* の初産出は 650 m~848 m 間に、さらに、黄和田層上部に認められる基準面⑧は 650 m~848 m に限定される。

本地区の梅ヶ瀬層は泥質層を主体としており、顕著なタービダイトは認められず、わずかに比抵抗の高い単層が挟在するのみである。大田代層は上部の泥質層を除けば、チャンネル様の厚い砂岩層が発達し、タービダイトのリズミカルな互層とは外観を異にする。山武や成東、松尾などではこの層準が急傾斜を示しており、スランプ堆積物であることが判明している。また、黄和田層も所々に厚い砂岩層が発達し、40~50% を占める。大原層もチャンネル様の厚い砂岩層が発達し、ほぼ 90% を砂岩層が占め、泥岩層はわずかし認められない。

4.2 地層の層厚分布

図 4~5 は梅ヶ瀬層・大田代層・黄和田層の厚さを図示しており、これらの図では各坑井から得られた地層厚を、単純に内挿法を用いて 25~50 m 間隔の等値線を描いている。梅ヶ瀬層は茂原南部の長南周辺地域で 450 m を超える最大層厚をもち、北西~南東方向を長軸とする半楕円状をなして大網付近まで漸次層厚が減少している。大網以北では成東まで平坦な層厚分布を示し、横芝では 150 m ほどの層厚となっている。層厚変化の割合は長南から大網、白子まで 450~300 m と減少が大きいのにに対し、それ以北の蓮沼まで減少割合が小さい。岩相を比較すると、南部の長南、茂原周辺ではタービダイト互層を示しているのに対し、東金、成東周辺ではほとんど砂岩層の発達が認められない。したがって、梅ヶ瀬層全体の厚さはタービダイト砂岩の層厚に依存していることが分かる。

大田代層は層厚の極大部が大多喜周辺と大網北西部に 2 つ認められ、このうち大多喜周辺が層厚の最大となつて 400 m を超える。大多喜周辺の最大層厚部は梅ヶ瀬層と同様に、半楕円状をなして北東方向に漸次層厚が減少している。一方、大網北西部に認められる層厚の極大

図4 梅ヶ瀬層・大田代層の層厚分布図

a. 梅ヶ瀬層 b. 大田代層 数字の単位は(m)

図5 黄和田層および梅ヶ瀬層と大田代層の層厚分布図

a. 黄和田層 b. 梅ヶ瀬層・大田代層の合計層厚 数字の単位は(m)

部は検層記録上ではリズムカルなタービダイト互層とは異なり、泥質部をほとんど含まない厚い砂岩層で、成東南部や東金付近にも同様な岩相が認められる。また、横芝付近では層厚が著しく減少し、砂岩層が分布しない。

黄和田層は全体として 500 m ほどの層厚分布で一定しているが、北部の成東周辺で層厚が減少するのに対し、南部の芝原以南の地域で層厚が増加している。層厚 500 m のシート状の形態は南部の長南から北東方向へ茂

図6 検層カーブと岩相、堆積環境の概念図

国末ら (2002) に加筆

原、白子、蓮沼に至る地域に広く分布している。黄和田層は大多喜町付近で最大層厚を示すにもかかわらず、岩相は泥質層を示すのに対し、成東、横芝で泥岩をほとんど含まない砂岩層に変化する。大多喜町付近の養老川流域では Kd6 火山灰層の下位で、スランプ・デブリーフロ-堆積物や偽礫化した泥岩が多く、現地性の半遠洋性泥岩は少ないことから、海底地すべりに伴うスランプ堆積物やデブリーフロ-堆積物が相当量浅海域から供給されたと解釈される。

5. 考察

5.1 海底扇状地の分布

国末ら (2002) では海底扇状地を Walker (1978) のモデルに当てはめ、堆積相の解釈と矛盾の無いことを示したが、本論では梅ヶ瀬層、大田代層、黄和田層の各地層全体から、実際の層厚分布を示し、海底扇状地の形状と堆積環境を明らかにする。

大多喜～成東地域の梅ヶ瀬層～黄和田層の堆積環境は半深海と考えられている (菊池・富沢, 1964) ことから、房総半島東部の堆積環境を把握するため、検層記録上で厚層砂岩、砂岩優勢砂岩泥岩互層、等量砂岩泥岩互層、泥岩優勢砂岩泥岩互層、塊状泥岩に区分し、これらの岩相区分と堆積環境との関係を図6にまとめた。この区分に基づいて作成した南北方向の模式断面を図7に示す。この図と各地層の層厚分布の特徴から、古海底扇状地の分布と堆積様式を考察する。また、海底扇状地の分類はこれまでにいくつも提唱されているが、ここでは徐・徳橋 (1985) が示したチャンネル-ローブ (Channel-lobe) 系とチャンネル-チャンネル間マウンド (Channel-interchannel Mound) 系の2つの区分に従うことにする。

梅ヶ瀬層は全層準にわたって砂岩優勢砂岩泥岩互層の

岩相を示している。とくに、この岩相は火山灰鍵層 U8 より下位の層準で顕著であり、北方へは大網付近まで連続して分布するが、大網以北では塊状泥岩となる。国末ら (2002) で示した本層最下部の砂岩優勢砂岩泥岩互層に含まれる砂岩の積算層厚では、古海底扇状地の形状は不明瞭であったが、本層の全層厚分布から長南・茂原地域を中心に北東方向に漸次減少する傾向が明瞭になり、大網付近まで層厚の等値線が扇型を示している (図4a)。以上から、層厚約 325 m の等値線より厚い地域が古海底扇状地の分布範囲と考えられ、この形状から地下での海底扇状地はチャンネル-ローブ系の middle fan～lower fan 領域に相当すると推定される。この結果は地表の見解 (平山・中島, 1977; 徳橋・八田, 1982) と矛盾しない。堆積物の供給源を考えてみると、層厚は南西方向に増加し、同時に岩相も砂岩優勢となることから、おもな堆積物は現在の房総半島西海岸地域から供給されたと考えるのが自然である。これに対し、成東西部には数十 m の厚い砂岩層が発達する坑井も認められているが、データ数が少ないため現時点では供給源に対する詳細は不明である。

大田代層には大多喜と大網北東部の2地域に層厚の極大部があり、このうち、大多喜地区は上部の砂岩優勢砂岩泥岩互層が広域に発達し、梅ヶ瀬層と同様に大網付近

図7 九十九里周辺地域の砂層発達の概念図

まで連続する。大網以北では塊状泥岩を示す地域と厚層砂岩を示す地域が認められている。層厚分布は大多喜地区の極大部より白子付近まで半楕円状を成すことから、200～250 m の等値線より厚い地域が古海底扇状地の分布範囲と推定できる。また、その形状も梅ヶ瀬層と同様に扇状となることからチャンネル-ロープ系の middle fan～lower fan 領域にあったことが推定できる。国末ら(2002)が本層最上部の砂岩優勢砂岩泥岩互層から導いた等層厚線図とも相似性が強く、地層全体を通して堆積場の移動が小規模であったことが考えられる。さらに、供給源も梅ヶ瀬層と同様に南西方向と推定でき、西方の東日笠海底谷からの一連の供給物であると考えられ、地表露頭の古流向から推定される供給源とも矛盾しない(Hirayama and Nakajima, 1977; 渡部ら, 1987)。

一方、大網北東部に認められる層厚の極大部は厚層砂岩であり、同様な岩相は成東周辺でも認められ、大多喜地区の砂岩優勢砂岩泥岩互層とは岩相を異にする。厚層砂岩の岩相を示す坑井のいくつかでは Dipmeter で走向傾斜を測定しており、50～60°の急傾斜を示すことからスランプ堆積物であることが想定されている。層厚の分布は大網北西部で局所的に存在するのみで、他地域への連続性は認められない。以上から、茂原周辺の海底扇状地とは成因を異にすると考えられる。現段階では大網、東金周辺の坑井が少ないため、明確な層厚分布が不明であるが、岩相が厚層砂岩であり、分布が狭いことやスランプ堆積物がかなりの頻度で認められることから、チャンネル-チャンネル間マウンド系の海底扇状地を形成している可能性がある。

黄和田層は大多喜周辺において、砂岩層の挟在は少ないが、大網付近では頻度が多くなり、成東や横芝地域では砂岩層が卓越している。これに対し、層厚は芝原から成東まで約 500 m と一定しており、成東から横芝地域で層厚がさらに薄くなっている。したがって、黄和田層の場合、砂岩層が卓越しても層厚が増加しないことから、堆積盆地に平坦面を形成しながら堆積した可能性が高い。このような解釈は、堆積環境を岩相上の特徴から堆積盆地とした Katsura (1984) の解釈とも矛盾しない。一方、大多喜東方地域の層厚は 500 m から徐々に増加しているが、この地域に露出する黄和田層はランプ・デブリーフロー堆積物が多く認められることから、海底地形の崩壊に伴って、厚く堆積した可能性がある。

以上をまとめると、大多喜付近を中心とする梅ヶ瀬層、大田代層のタービダイトは南西方向から堆積物が供給され、チャンネル-ロープ系の海底扇状地を形成し、房総半島中部の大網付近まで、約 20 km ほどの広がりを持っていたことが推定される。さらに、大田代層の砂

岩層の発達は大網北西部にも認められ、岩相は厚層砂岩を示し、堆積物がスランプの特徴を有しており、限られた分布を示している。このような特徴から、チャンネル-チャンネル間マウンド系の海底扇状地を形成している可能性がある。また、黄和田層は北部ほど砂岩層が優勢になるにもかかわらず、層厚は逆に減少することから、非扇状地性の堆積盆底で、タービダイトが埋積していったのかもしれない。

5.2 地質構造と海底扇状地およびガス水比の関係

国末ら（2002）では海底扇状地中央部で、かつ断層群の発達する地域が、ガスの生産性が高いことを指摘した。本論では、これらの位置関係の詳細を示すとともに、ガスの生産性に対する断層や海底扇状地の役割について論じる。

現在の水溶性ガス田を考えた場合、ガスの生産性はほぼガス水比 (m^3/KI) と関係していることから、本稿ではガス水比をもって生産性を便宜的に評価し、議論を進める(図8)。

上述したように、「茂原型」貯留層の代表である梅ヶ瀬層、大田代層は茂原周辺地域で海底扇状地を形成して

図8 九十九里周辺地域のガス水比の分布
 ガス水比の値は1998年1月の生産月報
 をもとに集計した。単位は (m^3/kl)

おり、この分布域は大多喜から大網付近までに限定され、これ以北では発達しないことを明らかにした。一方、ガス水比（以下 G/W）も大網付近まで高い値を示すが、大網以北では 1～6 程度と低く、10 を超える地域は今のところ認められない。したがって、海底扇状地の広がり、いわゆる「茂原型」と「通常型」ガス鉱床の分布域の違いを反映していると解釈できる。海底扇状地内でガス水比の高い地域の分布をみると、G/W が 20 を越す地域は芝原周辺、九十九里平野部の茂原北東地域そして大多喜地区である。この中で、特に G/W の高い芝原は上述した海底扇状地の最大層厚部にあたるとともに、落差数 10 m から 100 m を越す南北性の断層が発達している地域でもある。特に、これら断層のうち落差の大きい三ヶ谷-能実断層（石和田ら、1971）の西側地域でガス水比が高い傾向にある。また、九十九里平野部でガス水比の高い茂原北東部では三ヶ谷-能実断層の東側に位置しているが、この地域の東側にも落差 20 m 以上の正断層が認められており、これらの断層群が発達する地域でガス水比が高い結果となっている。断層の分布（三梨ら、1961）をみると、養老川以東で発達し、地層の走向に斜交した南北性の正断層で東傾斜が多い。確認されている断層の中で三ヶ谷-能実断層は落差 100 m 以上と最大級であり、この断層周辺でガス兆が多く認められ（石和田ら、1971）、その西側でガス水比の高いガス田が分布している。

以上のことを地質構造と海底扇状地の分布をもとに考察すると、堆積時の海底扇状地の形状は末端部から中心部にかけて、次第に高まりを形成することから、扇状地の中心部はガスを集積しやすい初生的な構造であったと推定できる。芝原や長南地域は海底扇状地中央の最大層厚部に位置し、もともとガスが集積しやすい地域であったと考えられる。加えて、現在の地層の傾斜は北西方向であることから、南東の向きに遊離ガスの移動が起こりやすいと考えられる。断層は南北性の走向で、三ヶ谷-能実断層の周辺部で発達しており、落差の大きい三ヶ谷-能実断層では砂岩優勢互層と泥岩優勢互層が直接的に接するため岩相の不連続性が著しく、断層破碎帯による断層面の粘土化もあいまって、バリアとしての効果が大きくなることが想定される。つまり、三ヶ谷-能実断層の西側ブロックと東側ブロックでは岩相の連続性が断たれ、断層が遊離ガスの流動に対してバリアの役目を果たすことが考えられる。また、西側ブロックは、断層が発達しない地域が広いことから、東側ブロックより集ガス面積が大きく、ガス生産能力は高いと考えられる。以上から、ガス水比は海底扇状地の分布、断層との位置関係および断層の落差が重要な要素であることが指摘でき

る。加えて、国末ら（2002）でも指摘しているように、鉱床破壊をおこさずに浅い深度に貯留層があることも重要な要因であり、ガス水比の高い地域は表層の国本層分布域でかつ貯留層である梅ヶ瀬層や大田代層の出現深度が 200～500 m である地域となっている。

以上述べてきたように、大多喜を中心とする海底扇状地の分布と断層の存在が「茂原型」ガス鉱床の成立に大きく貢献している可能性が高いと考えられる。特に、チャンネル-ロープ系の海底扇状地の分布は茂原型ガス鉱床の分布を説明する上で、不可欠な要素である。また、これまでに断層の存在が茂原型ガス鉱床の成因に何らかの影響を与えていると指摘されてきたが、かん水やガスの流動に対する一種のバリアと考えることが妥当である。

5.3 ヨウ素濃度/塩素濃度比 (I/Cl) と海底扇状地の分布

水溶性ガス田で生産されるかん水にはヨウ素が 60～145 (mg/l) ほど濃集しており、生産する地域や天水の浸入によって濃度に差があることが分かっている。これに対し、塩素濃度の上限は海水なみで一定していることから、初生的なヨウ素濃度を評価するにはヨウ素濃度を塩素濃度で除した比 (I/Cl) で判定することが合理的である。I/Cl 比をみると、地域によって差があり、3.0～8.2 ($\times 10^{-3}$) 程度の変動幅がある。水溶性ガス田の場合、仕上げ層区間が数百 m にも及ぶため、単一層で広域的な I/Cl 比を比較することは困難である。そのため、これまでにヨウ素濃度と採取深度（地層別）には顕著な相違が認められていない。しかしながら、ヨウ素濃度は地理的な位置に依存し、大多喜を中心に北西、北東方向に減少する傾向が指摘されている（石和田・品田、1957；国末ら、2002）。これまで論じてきたように、海底扇状地の層厚は大多喜周辺を中心に北西、北東方向に減少しており、ヨウ素濃度と海底扇状地の分布は整合性があると考えられることから、各坑井の I/Cl 比の広域的な傾向と海底扇状地の形状との関係を以下に詳細に検討する。

まず、海底扇状地の分布との整合性を考えるため梅ヶ瀬層～大田代層を仕上げた坑井を中心に I/Cl 比の等値線図を作成した（図 9a）。I/Cl 比の分布は房総半島中央部の大多喜付近を中心に北西ないし北東方向に、漸次減少する傾向がある。茂原や白子では局所的に I/Cl 比が減少しているが、こうした地域では周囲に還元井が多く分布しているためであると考えられる。大局的には梅ヶ瀬層、大田代層の層厚分布の傾向と類似し、太平洋側から北西方向に減少する傾向が顕著である。また、勝浦層までを仕上げ層に含めた坑井データをプロットすると（図 9b）、黄和田層の最大層厚部である大多喜町東方

図9 ヨウ素濃度/塩素濃度 (I/Cl) の比

- a. 梅ヶ瀬層・大田代層仕上げの坑井から得られた I/Cl 比の分布
 b. 梅ヶ瀬層・大田代層・黄和田層および大原層以下の地層を含む仕上げ層の I/Cl の分布
 単位は $\times 10^{-3}$

と I/Cl 比の高い地域とが一致するが、I/Cl 比の分布と黄和田層の層厚分布には明瞭な相関性は認められない。I/Cl 比は大田代～黄和田層を仕上げ層とする大多喜周辺地域でもっとも高く (8.2×10^{-3})、梅ヶ瀬層や大田代層を仕上げ層とする長南や芝原付近でも I/Cl 比は大きく 7.0×10^{-3} を超えている。これに対し、北部の横芝や成東地域の I/Cl 比は 5.5×10^{-3} 以下の値であり、ここでは大多喜地域に発達した海底扇状地は分布せず、梅ヶ瀬層相当層は塊状泥岩層に、また大田代層相当層は泥岩をほとんど含まない厚層砂岩に変化している。

したがって、I/Cl 比の高い地域は梅ヶ瀬層や大田代層、黄和田層の最大層厚部の位置とほぼ一致するが、大局的な I/Cl 比の分布は北西方向に減少しており、梅ヶ瀬層や大田代層の海底扇状地の伸長方向と90度直交した形状を示している。つまり、現在の太平洋側かつ海底扇状地の中心部ほど高濃度にヨウ素が濃集していることになる。

このような事実を踏まえると、亀井 (2001) は海洋起源の藻類をヨウ素の起源として有力であると指摘したが、太平洋側に I/Cl 比が高くなることから、藻類でも外洋環境に生息するプランクトンが有力な起源となる可能性がある。また、泥岩中の有機物のみならず (伯ら, 1983)、地表露頭で見られるタービダイト砂岩中にも、植物片などの陸源有機物がもたらされており、Price *et al.* (1971) が現海洋堆積物のヨウ素濃度が有機炭素量と

強い相関があることを示していることも整合的である。したがって、国末ら (2002) ではヨウ素を含む物質がタービダイトやスランプ堆積物にもともと存在していたことを想定したが、海洋性の藻類がヨウ素の根源物質として、またタービダイトやスランプ堆積物中に含まれる有機物はヨウ素の吸着物質として、その濃集に寄与したと考えられる。

6. まとめ

本研究は房総半島東部の水溶性ガス田を対象に、電気検層記録を用いて梅ヶ瀬層、大田代層の海底扇状地の分布を明らかにするとともに、いわゆる「茂原型」と称するガス水比が高い地域との関係を明らかにすることを目的に行った。その結果、次のことが明らかになった。

- (1) 梅ヶ瀬層、大田代層の海底扇状地の分布は大多喜や長南を中心にして半径 20 km ほどの広がりを持ち、大網付近まで分布していた。また、層厚分布の形状からチャンネルローブ系の海底扇状地であることが明らかになった。
- (2) 「茂原型」ガス鉱床の分布と梅ヶ瀬層、大田代層の海底扇状地の分布を比較すると、その分布範囲は良く一致する。また、現在最もガス水比の高い芝原地域は海底扇状地の中心部にあり、同地域に発達する落差の大きい断層がガスの東方への移動を妨げるバリアの役目を果たしたと考えられる。

(3) ヨウ素濃度/塩素濃度比 (I/Cl) は大多喜周辺を中心に千葉や成東方向に漸次減少し、I/Cl 比の高い地域は海底扇状地の堆積中心部と一致するが、大局的な傾向は太平洋側ほど高く、海底扇状地の形状と90度直交した形態を示す。また、陸源有機物はヨウ素の吸着物質として、その濃集に寄与した可能性が考えられる。

謝 辞

本研究をまとめるに当たって、石油公団、日宝化学株式会社、三井化学株式会社、関東天然瓦斯開発株式会社、日本天然ガス株式会社、伊勢化学株式会社、旭硝子株式会社、帝国石油株式会社、合同資源産業株式会社には発表の許可をいただいた。また、産業総合技術研究所地圏資源環境研究部門徳橋秀一博士には粗稿を読んでいただき有益なご意見をいただいた。さらに、査読者2名の方からは適切なご助言をいただいた。以上の方々に改めて感謝の意を表します。

引 用 文 献

- Abbot, W. O., 1988: Outcrop, Subsurface and Seismic exploration stratigraphy Vol. II. Occidental international exploration and production company, Bakersfield, California.
- Aoki, N., 1968: Benthonic foraminiferal zonation of the Kazusa Group, Boso peninsula. *Trans. Proc. Paleont. Soc.*, **70**, 238-266.
- 樋口 雄・菊池良樹, 1964: 上総層群に関する微化石層位学的ならびに鉱床地質学的研究. 石技誌, **29**, 22-28.
- 樋口 雄・斉藤 浩, 1965: 千葉県ガス田地域における微化石相に関する考察. 石技誌, **30**, 26-32.
- 平山次郎・中島輝允, 1977: 地向斜堆積物. 科学, **47**, 82-90.
- 平山次郎・鈴木尉元, 1965: フリッシュ型砂泥互層を構成する単層の形態と組織について. 地調月報, **16**, 79-93.
- Hirayama, J., and Nakajima, T., 1977: Analytical study of turbidites, Otadai Formation, Boso Peninsula, Japan. *Sedimentology*, **24**, 747-779.
- 石和田靖章・三梨 昂・品田芳二郎・牧野登喜男編, 1971: 日本ガス田・油田図10, 「茂原」. 地質調査所.
- 石和田靖章・品田芳二郎, 1957: 房総半島東岸の含コード鹹水の産状について. 地質調査所報告, 171号.
- 伊藤 慎, 1992: 上総層群の堆積シーケンス. 大原隆・井上厚行・伊藤 慎編, 地球環境の復元, 120-133, 朝倉書店.
- Ito, M., Katsura, Y., 1992: Inferred glacio-eustatic control for high-frequency depositional sequence of the Plio-Pleistocene Kazusa Group, offshore basin fill in Boso Peninsula, Japan. *Sedimentary Geology*, **80**, 67-75.
- 亀井玄人, 2001: 茂原ガス田の地下水に含まれるヨウ素の起源と挙動. 資源地質, **51**, 145-151.
- Katsura, Y., 1984: Depositional environments of the Plio-Pleistocene Kazusa Group, Boso Peninsula, Japan. *Sci. Rep., Inst. Geosci., Univ. Tsukuba, Sec. B, Geological Sciences* **5**, 69-104.
- 菊池良樹, 1963: 房総半島における上総層群の微化石層序. 石技誌, **28**, 1-6.
- 菊池良樹・富沢昭文, 1964: 底棲有孔虫による地層の分帯—上総層群を例にとった地層区分の方法—. 石技誌, **29**, 1-7.
- 粕 武・鈴木尉元・小玉喜三郎, 1983: 房総半島における上総層群泥質岩中の硫黄, 炭素, 塩素, 鉄の形態・組成と堆積環境. 地調月報, **34**, 191-206.
- 国末彰司・三田 勲・和気史典, 2002: 千葉県茂原ガス田の地下地質と水溶性天然ガス・ヨウ素の生産性について. 石技誌, **67**, 84-96.
- 三梨 昂・安国 昇・品田芳二郎, 1959: 千葉県養老川・小櫃川の上総層群の層序. 地調月報, **10**, 83-98.
- 三梨 昂・矢崎清貴・景山邦夫・島田忠夫・小野 暎・安国 昇・牧野登喜男・品田芳二郎・藤原清丸・鎌田清吉, 1961: 日本油田・ガス田図5「富津・大多喜」地質調査所.
- Mutti, E., and Ricci-Lucchi, F., 1972: Le trobiditi delji Appenino settentrionale: introduzione all'analisi di facies. *Mem. Soc. Geol. Italy*, **11**, 99-161.
- 中島輝允, 1978: 房総半島におけるフリッシュ堆積物の堆積環境—黄和田層・黒滝層・安野層のフリッシュ相と縁辺相の関係を中心に—. 地質雑, **84**, 645-660.
- 新妻信明, 1976: 房総半島における古地磁気層序. 地質雑, **82**, 163-181.
- Oda, M., 1977: Planktonic foraminifera biostratigraphy of the late Cenozoic sedimentary sequence, Central Honshu, Japan. *Sci. Rep. Tohoku Univ. series 2*, **48**, 1-76.
- Pirson, S., 1983: Geologic Well Log Analysis third ed. Gulf Pub., 1-96.
- Price, N.B., Calvert, S.E., W. Jone, P.G., 1970: The distribution of Iodine and Bromine in the sediments of the Southwestern Barents Sea. *Journal of Marine Research*, **28**, 22-34.
- 佐藤時幸・高山俊昭, 1988: 石灰質ナンノプランクトンによる第四系化石帯区分. 地質学論集, **30**, 181-204.
- 佐藤時幸・高山俊昭・加藤道雄・工藤哲朗・亀尾浩司, 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4 総括—太平洋側および鮮新統一更新統境界の模式地との対比. 石技誌, **53**, 3-29.
- Sato, T., and Kameo, K., 1996: Calcareous nannofossil biostratigraphy of the Arctic Ocean, *ODP Leg 151, Proc. ODP, Sci. Results*, **151**, 39-59.
- 徐 垣・徳橋秀一, 1985: タービダイトの話(7)海底扇状地モデルの現状と問題点—COMFAN計画の総括を踏まえ—. 地質ニュース, **394**, 24-41.

- 徳橋秀一・八田明夫, 1982: タービダイトの話(1)フリッシュ型砂泥互層のタイプと堆積環境. 地質ニュース, **344**, 42-50.
- 徳橋秀一・クリストファー M. アギンギー・宮田雄一郎・石原与四郎・三田 勲, 2001: タービダイト砂岩分布予測のための堆積学的・岩石学的・数理学的研究—新潟及び房総における解析例. 石技誌, **66**, 81-94.
- 和気史典・内田英一・三田 勲・檀原 徹, 1998: 茂原ガス田火砕鍵層のコア分析結果について. 石油技術協会春季講演会要旨集, 68.
- Walker, R. G., 1978: Deep-water sandstone facies and ancient submarine fans. *AAPG Bull.*, **62**, 932-966.
- Walker, R. G., and Mutti, E., 1973: Turbidites facies and facies associations. In: *Turbidites and Deep Water sedimentation. Soc. Econ. Paleont. Mineral. Pacific Section*, Short course, Anaheim.
- 渡部景隆・増田富士雄・桂 雄三・岡崎浩子, 1987: 関東地方の自然環境の移り変わり(2). 地学教育, **40**, 79-90.
- 渡辺真人・檀原 徹, 1996: 房総半島上総層群のフィッシュトラック年代. 地質雑, **102**, 545-556.
- 山本裕彦, 1971: フリッシュ型砂岩層に発達する convolute lamination について. 地質雑, **77**, 23-36.