論文・報告

北海道天北地域における新第三系珪質岩中の炭化水素トラップ*

辻 隆司**・横井 悟***

(Received January 21, 1994; accepted May 26, 1994)

Hydrocarbon trap in the Neogene siliceous rocks
in northern Hokkaido, Japan

Takashi Tsuji and Satoru Yokoi

Abstract: A possible mechanism of a hydrocarbon trap in the Neogene porcelanites in northern Hokkaido, Japan is discussed through petrographic and pore throat size analyses. In the studied two wells, quartzose porcelanites with lesser amount of clay and located at shallower depth have a higher reservoir quality associated with hydrocarbon shows and gas production. It indicates that matrix pores as well as fractures play an important role in the hydrocarbon trap in siliceous rocks. In the Yurihara Oil and Gas Field in northeastern Honshu, another field with quartzose porcelanites reservoirs in Japan, opaline porcelanites just above the silica mineral opal-CT/quartz transformation boundary act as cap rocks. In this studied area, however, the boundary is too shallow for opaline porcelanites to behave as cap rocks because the confining pressure is insufficient, and hydrocarbon traps are formed in the quartz zone substitutively; porcelanites with much clay minerals and smaller pore throat are cap rocks and those with lesser amount of clay minerals and larger pore throat form hydrocarbon reservoirs.

1. はじめに

環太平洋地域に分布する新第三系海成珪質岩は、珪藻の遺骸を主体とする堆積物で、埋没続成が進行するにつれて、一般に珪藻土からポーセラナイトを経て、チャートへと変化する。このような珪質岩は石油地質学的にも重要で、米国カリフォルニア州に分布するモンテレー層は根源岩および貯留岩として知られる (Isaacs and Petersen, 1987 など)。本邦では、優れた根源岩として秋田県に分布する女川層の珪質岩が良く研究され (田口, 1961; 鹿野, 1986; 早稲田・重川, 1987; Aoyagi and Omokawa, 1992 など)、また炭化水素を胚胎する珪質

岩については、佐藤ら (1979) や佐藤・安中 (1986) の研究がある。最近では、由利原および鮎川油・ガス田の女川層の珪質岩から相次いで商業生産に足る量の産油、産ガスが報告され (加藤, 1992; 佐賀, 1992; 荒木・加藤, 1993; 加藤, 1993)、本邦においても、貯留岩としての珪質岩が注目を集めてきている。

今回、筆者らは北海道天北地域の坑井で得られた珪質岩の各種分析結果をもとに、油・ガス徴や産ガス層準と孔口径との関係について考察した。そして、この孔口径が何に依存して変化するのかについて述べ、本地域の珪質岩中の炭化水素トラップの性質について言及する。

2. 珪質岩貯留岩のマトリックス部
についての研究史

珪質岩貯留岩、とくにフラクチャー貯留岩として代表的なモンテレー層では、一般にフラクチャーが生産レートを左右すると考えられてきた (Crain *et al.*, 1985 など)。しかし、最近 Gotor *et al.*, (1992) は、その生

* 平成 5 年 6 月 10 日、石油技術協会平成 5 年度春季講演会の一部講演

** 石油資源開発株式会社技術研究所 (現在、石油公団石油開発技術センター)

*** 石油資源開発株式会社探鉱部

産データを解析し、生産性にはフラクチャーだけでなくマトリックス孔隙も関与していると推測している。

このような炭化水素を胚胎する珪質岩のマトリックス部の性質については、前述の佐藤ら（1979）が、半自形～自形結晶が部分的に認められる径 $1\sim 2\mu\text{m}$ の石英粒子の集合体からなり、これらの粒子の間には径 $1\mu\text{m}$ 程度の孔隙があると報告した。また、佐藤・安中（1986）はこの孔隙は珪藻質泥岩が続成過程で石英を晶出し、その結晶間に二次孔隙を形成したものと考えた。そして、彼らは粘土鉱物含有量の少ない“クリーン”なものがあれば良好な貯留岩となりうることを示唆した。また、前述のGotor *et al.*（1992）は、貯留層となっているのはシリカ鉱物がオパールCTから石英へ続成変換する面より下位の“クリーン”な珪質岩であるとしている。

本邦での新第三系珪質岩の埋没続成の進行に伴う孔隙性などの岩石物性の変化に関する系統立った研究には、Tada and Iijima（1983）がある。彼らはシリカ鉱物がオパールCTから石英へ埋没続成で変化する間に、孔隙率は圧密作用のみで漸移的に減少するが、孔隙径は石英に変化するのに伴い急激に大きくなることを明らかにした。また、増井・辻（1990）、辻・増井（1990）やTsuji and Masui（1992）の一連の研究は由利原油・ガス田の珪質岩中の炭化水素トラップがオパールCT／石英の続成変換面のほぼ直下に位置することを明らかにし、その原因はこの続成変化に伴う孔隙径の増大と延性の低下との相乗効果に起因する浸透性の違いにあると考えた。

3. 研究対象

北海道天北地域にも、声間層から増幌層にかけて新第三系の珪質岩が発達する（Fig. 1）。本地域で発見されている油・ガス田の貯留層は、一部では珪質岩（従来は泥質岩と呼ばれている：著者注）のフラクチャー部（北海道鉱業振興委員会，1979）、普通は珪質岩中の砂岩・凝灰岩薄層と考えられており、珪質岩主体の層準でありながら、そのマトリックス部の貯留岩能力については注目されていなかった。

前述した由利原油・ガス田などでの珪質岩の埋没続成に関連するトラップの例を考慮すると、天北地域の珪質岩中にも同様のトラップが存在する可能性がある。この可能性を探るため、珪質岩に炭化水素が胚胎すると考えられる2坑井、豊富ガス田に掘削された豊富R-2と、それに隣接する大曲背斜に掘削された大曲R-1を選定し研究対象とした（Fig. 1）。いずれの坑井も稚内層と増幌層を採鉱し、ほぼ全層準でコア掘りを実施している。

Fig. 1 Geological and index map (modified from Nagao, 1960, Hata and Ueda, 1967, 1969, Yamaguchi, 1981 and Masatani *et al.*, 1982).

4. 地質概要

天塩川以北の天北地域では、中部中新統の増幌層を不整合に覆って、稚内層、声間層、勇知層、更別層がそれぞれ整合漸移関係で累重し、“天北油田”地域に広く分布する（福沢，1985）。増幌層の下部は砂岩、泥岩、礫岩を主体とし、上部には一部珪質の泥岩が発達する。その上位の稚内層は珪質の硬質頁岩、硬質泥岩からなる。従来は稚内層の基底には大きな不整合が存在すると考えられていた。しかし、広岡（1962）はこの不整合の上・下位で、構造的に大きなギャップを認めておらず、福沢ら（1992）はこの不整合が湧昇流発達海域の起伏頂部で生じるようなハイエクスに相当すると考えている。すなわち、増幌層と稚内層は一連の堆積物と考えられる。また、岡（1986）と福沢（1987）の天北地域の地史を考え

Fig. 2 Porosity, significant porosity, and median pore throat radius versus depth, and production data of Toyotomi R-2 (a) and Ohmagari R-1 (b). Significant porosity is defined as a pore fraction which is composed of the pore of which throat radius is larger than $0.1\mu\text{m}$ or $0.05\mu\text{m}$. Porosity gradually decreases with the increase of burial depth (broad, dashed line), though the silica mineral transforms from opal-CT to quartz. Median pore throat radius and significant porosity are small and almost constant in the opal-CT zone, however they abruptly become larger at the top of quartz zone. In Ohmagari R-1 (b), they gradually decrease with fluctuation as the burial depth increases in the quartz zone. Note that interval of gas production, hydrocarbon showings and lost circulations correspond to that of larger pore throat size in the quartz zone.

合わせると、ここで扱う2坑井は同じ構造区に位置し、両坑井の増幌層と稚内層は同様の構造発達史、圧密史を経てきたと考えられる。

5. 油・ガス徴、逸泥、産ガス層準の岩相

豊富R-2で探鉱した稚内層と増幌層は珪質岩を主体とし、一部に凝灰岩の薄層を挟む。大曲R-1においてもこれらの層準は同様の岩相を示すが、1,770m以深では頻繁に砂岩を挟む (Fig. 2)。これら両坑井の珪質岩は主として均質なポーセラナイトで light olive grey (5Y6/1-5Y5/2)* または light olive grey-olive grey (5Y5/2-5Y3/2)* を呈し、一部に厚さ数cmのやや暗色の層を挟む。ここでは前者を明色ポーセラナイト (light-colored porcelanite)、これに挟まれるやや暗色の層を暗色ポーセラナイト (dark-colored porcelanite) と呼ぶことにする。ただし、大曲R-1の1,770m以深では、大部分のポーセラナイトは medium grey-medium dark grey (N4-N5)* を呈する。これもここでは明色ポーセラナイトとした。また、一部に厚さ数cmの珪質頁岩 (siliceous shale) を挟むが、出現頻度が低く、しかも軟質のため地下では孔隙が閉じると考えられ、高い浸透性を示す可能性が低いため、研究対象から除外した。シリカ鉱物の続成分帯でのオパールCT帯と石英帯に属するポーセラナイトは見掛け上、ほとんど差はないが、前者は後者に比べ破断面がやや滑らかである。

両坑井とも掘削が昭和20~30年代と古いため蛍光反応の記録はないが、油またはガス臭が多く層準で記録されている (Fig. 2)。逸泥は両坑井とも、いくつかの層準で起こっており、その量は数10kl~数100klに達し、また、ガスの産出は大曲R-1の4層準と豊富R-2の仕上げ層準で認められた (Fig. 2)。

これらの坑井の油・ガス徴、逸泥、産ガス層は、大部分が珪質岩 (ポーセラナイト) であり、凝灰岩や砂岩などではない。

6. 分析試料と手法

珪質岩試料を約50m間隔で、逸泥や油・ガス徴のある層準ではやや密に採集した。試料採集層準に暗色ポーセラナイトが挟在する場合、明色および暗色ポーセラナイトの両方を同深度の試料として採集した。全試料数は76個で、ほぼすべての試料について鉱物組成、化学組成の分析および孔口半径 (以下、孔口径) 分布の測定を行った。ただし、暗色ポーセラナイトのうち、孔口径分布測定を行ったのは豊富R-2の2試料のみである。さらに、

* 米国地質学会の Rock-color chart に基づく乾燥時の色調。

これらの分析結果を考慮して選定した試料について、岩石組織の観察を走査電子顕微鏡 (SEM) を使用し、倍率数1,000倍で行った。鉱物組成はX線回折装置を使用し、粉末X線法で分析した。各鉱物の含有率は各鉱物特有のピークの高さの相対比から求めた。化学組成は蛍光X線分析装置を使用し、ガラスビード法で主要10元素の定量分析を行った。孔口径分布は水銀圧入式細孔分布測定装置 (カルロエルバ社製水銀ポロシメーターP-220) で測定した (内田, 1984)。この方法では、同時に孔隙率も測定できる。また、孔口径分布曲線 (累積孔隙率曲線) で孔隙率のちょうど半分にあたる孔口径を中央孔口径 (median pore throat radius) と呼ぶ (内田, 1984)。

7. 結果と解釈

7.1 鉱物組成

両坑井とも、シリカ鉱物相はオパールCT帯と石英帯に属する (Table 1, Fig. 2)。明色および暗色ポーセラナイトは同様の鉱物組成を示し、オパールCT帯ではオパールCTと石英とで大部分、石英帯では石英が大部分を占め、さらに両帯ともに少量の長石、粘土鉱物、沸石、石膏などを含む。

福沢 (1985) は、地表に分布する稚内層のポーセラナイトはオパールAからなる珪藻を主体とする生物殻が埋没続成でオパールCTとして再沈殿して形成されたと推定している。この稚内層と増幌層の間で鉱物組成に差がないため、増幌層も稚内層と同様の珪質生物殻を含む堆積物と考えられる。したがって、今回のオパールCTのすべても珪藻を主体とする生物起源と考えられる。また、このオパールCTは埋没続成が進みオパールCT/石英の続成変換面近傍になると部分的に石英に変化しはじめ、この変換面より下位ではすべて石英になる。したがって、石英帯と変換面近傍のオパールCT帯の石英には、碎屑性のものと生物起源のものが混合している。すなわち、両坑井のポーセラナイトは生物源シリカと、石英、長石、粘土鉱物などからなる碎屑物との混合物と考えられる。

7.2 化学組成

両坑井とも、明色および暗色ポーセラナイトの化学組成の間に全体としては有意な差は無いが、これらを同深度の試料で比べると明色ポーセラナイトの方がややSiO₂に富み、その他の元素にやや乏しい (Table 1)。

各元素間の相関をみると、SiO₂とAl₂O₃は明瞭な負の相関 (豊富R-2: $r = -0.98$, 大曲R-1: $r = -0.95$) を示し、その回帰直線はSiO₂がほぼ100%, Al₂O₃が0%の点を通る。一方、Al₂O₃とその他の主要元素であ

る TiO_2 , Fe_2O_3 , MnO , MgO , Na_2O , K_2O とは、明瞭ないしは普通程度の正の相関 ($r=0.71\sim0.99$) を示す。このことは前述の鉱物組成を考慮すると、青森県に分布する珪質岩で渡部・多田 (1988) が示したのと同様に、このポーセラナイトも碎屑物と、 SiO_2 はほぼ 100% の物質、すなわち生物源シリカとの混合物であることを示す。したがって、 SiO_2 と負の相関を示す Al_2O_3 などの含有量は、碎屑物の相対含有量を示すことになる。ここでは、これらの元素のうち最も含有量の多い Al_2O_3 をその指標として使用する。

7.3 孔隙率

両坑井とも孔隙率は下位の層準に向かって漸移的に減少する (Fig. 2)。オパール CT/石英の続成変換深度においても不連続的な変化はほとんど認められない。暗色ポーセラナイトは同深度の明色ポーセラナイトと比べるとやや低い孔隙率を示す。

7.4 孔隙径分布

7.4.1 オパール CT 帯

明色ポーセラナイトの孔隙径分布はユニモーダルなものとバイモーダルなものの 2 種類に分類できる (Table

Table 1 Major element composition, pore throat radius distribution pattern, porosity, median pore throat radius, and significant porosity of the porcelanites from Toyotomi R-2 and Ohmagari R-1.

	Sample No.	Depth (m)	Lithology	SiO2	TiO2	Al2O3	Fe2O3	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O	P2O5	IL	Total(%)	Pore throat radius distribution pattern	Total porosity (%)	Median pore throat radius (μm)	Significant porosity (%)	>0.05μm	>0.1μm
Toyotomi R-2	1	149	l-po	75.43	0.42	8.67	3.19	0.03	1.33	0.44	1.54	1.47	0.07	7.96	100.53	bi	36.6	0.0109	2	1	
	2	172	l-po	72.84	0.47	8.67	3.65	0.03	1.42	0.42	1.48	1.65	0.07	8.82	100.52	bi	30.2	0.0124	3	2	
	3	188	l-po	77.37	0.37	7.43	2.84	0.02	1.14	0.39	1.37	1.33	0.07	7.79	100.12	bi	29.4	0.0172	4	2	
	4	199	l-po	77.16	0.36	7.59	2.68	0.02	1.04	0.35	1.43	1.25	0.06	7.90	99.84	bi	40.5	0.0086	3	1	
	5	222	l-po	74.91	0.43	8.92	3.20	0.02	1.29	0.29	1.52	1.53	0.05	8.43	100.59	bi	30.1	0.0116	1	1	
	6	233	l-po	73.02	0.48	9.70	3.84	0.03	1.43	0.33	1.55	1.71	0.06	8.79	100.94	bi	28.8	0.0113	1	1	
	7	252	l-po	79.37	0.33	6.77	2.47	0.02	0.89	0.29	1.26	1.20	0.05	7.64	100.29	bi	34.6	0.0085	3	1	
	8	267	l-po	72.26	0.47	9.47	3.83	0.03	1.32	0.43	1.51	1.71	0.08	8.36	99.47	bi	27.6	0.0110	1	1	
	9	279	l-po	76.05	0.42	8.35	3.30	0.02	1.05	0.37	1.49	1.47	0.06	8.49	101.07	bi	32.3	0.0103	3	2	
	10	315	l-po	75.07	0.45	9.05	3.45	0.02	1.04	0.37	1.60	1.60	0.06	8.41	101.12	bi	28.7	0.0117	1	1	
	11	332	l-po	74.13	0.46	9.68	3.34	0.02	1.23	0.39	1.71	1.63	0.08	8.35	101.02	bi	27.3	0.0109	2	1	
	12	362	l-po	73.37	0.46	9.48	3.44	0.02	1.15	0.38	1.49	1.68	0.06	8.61	100.14	bi	28.0	0.0111	3	2	
	13	413	l-po	78.51	0.37	7.42	2.68	0.03	0.97	0.37	1.47	1.33	0.06	6.90	100.11	bi	41.9	0.0124	2	1	
	14	481	l-po	77.96	0.36	7.52	2.91	0.02	1.05	0.36	1.39	1.31	0.05	8.40	101.33	uni	40.2	0.0115	1	1	
	15	499	l-po	82.62	0.27	5.66	2.07	0.02	0.70	0.31	1.23	1.00	0.04	6.35	100.27	uni	40.1	0.0107	1	1	
	16	512	l-po	74.99	0.39	7.97	3.15	0.03	1.16	0.40	1.39	1.44	0.06	8.21	99.19	uni	34.8	0.0124	2	1	
	17	552	d-po	75.53	0.42	8.41	3.24	0.03	1.12	0.54	1.57	1.58	0.06	7.92	100.42	uni	33.9	0.0145	1	1	
	Ohnagaki R-15	18	552	l-po	78.06	0.33	6.87	2.67	0.02	0.97	0.41	1.34	1.28	0.05	7.10	99.10	uni	38.9	0.0134	0	0
19		564	l-po	71.18	0.52	10.27	3.68	0.03	1.58	0.48	1.69	1.85	0.06	8.10	99.44	uni	33.4	0.0699	20	12	
20		603	l-po	74.16	0.48	9.61	3.65	0.03	1.53	0.61	1.77	1.70	0.08	7.00	100.62	uni	29.1	0.0751	20	10	
21		643	l-po	71.47	0.51	10.21	3.73	0.03	1.40	0.30	1.63	1.84	0.06	8.58	99.76	uni	30.6	0.0597	17	11	
22		670	l-po	73.59	0.48	9.45	3.43	0.03	1.22	0.33	1.49	1.70	0.06	8.87	100.65	uni	22.2	0.0364	9	5	
23		702	l-po	74.09	0.43	8.68	3.23	0.03	1.13	0.30	1.37	1.55	0.06	8.71	99.58	uni	26.1	0.0549	14	7	
24		731	l-po	77.83	0.37	7.16	2.77	0.02	0.85	0.29	1.25	1.23	0.07	9.09	100.93	uni	30.3	0.1094	21	16	
25		753	l-po	67.16	0.59	12.23	4.74	0.04	1.62	0.40	1.67	2.06	0.07	10.31	100.89	uni	25.9	0.0236	4	2	
26		786	d-po	71.88	0.43	10.26	3.57	0.03	1.36	0.28	1.37	1.30	0.05	10.67	101.20	uni	30.3	0.1290	24	18	
27		786	l-po	81.10	0.30	6.41	2.33	0.02	0.73	0.22	0.94	1.03	0.04	7.79	100.91	uni	26.3	0.0952	18	13	
28		800	l-po	79.39	0.36	7.49	2.59	0.02	0.09	0.29	1.02	1.31	0.05	7.81	100.42	uni	24.6	0.0968	18	12	
29		804	d-po	80.07	0.36	7.08	2.62	0.02	0.78	0.32	1.11	1.27	0.05	7.61	101.29	uni	26.3	0.0968	18	12	
30		804	l-po	81.76	0.39	6.25	2.18	0.02	0.72	0.27	1.06	1.06	0.04	6.64	100.23	uni	28.7	0.1361	22	18	
1		247	l-po	70.56	0.54	11.24	3.79	0.03	1.25	0.43	1.56	1.93	0.06	8.55	99.94	uni	30.0	0.0123	2	2	
2		308	l-po	76.70	0.42	8.64	3.05	0.02	0.97	0.37	1.40	1.50	0.05	8.06	101.18	uni	34.6	0.0115	1	1	
3		340	l-po	76.20	0.42	8.82	3.19	0.02	0.98	0.34	1.49	1.53	0.05	8.11	101.15	uni	34.6	0.0115	1	1	
4		372	l-po	72.51	0.44	9.28	3.72	0.03	1.17	0.46	1.35	1.63	0.05	8.97	99.61	uni	43.1	0.0116	1	1	
5		380	l-po	80.79	0.29	6.33	2.60	0.02	0.75	0.31	1.18	1.07	0.04	7.12	100.50	uni	43.1	0.0116	1	1	
6	397	d-po	72.96	0.48	9.93	3.66	0.02	1.11	0.42	1.67	1.77	0.06	9.31	101.39	uni	47.0	0.0157	3	1		
7	397	l-po	79.40	0.33	7.08	2.61	0.02	0.83	0.36	1.26	1.26	0.04	7.24	100.43	bi	47.0	0.0157	3	1		
8	404	l-po	81.95	0.28	5.89	2.32	0.02	0.67	0.30	1.18	1.01	0.04	6.25	99.91	bi	47.0	0.0154	2	1		
9	418	l-po	73.96	0.48	9.74	3.18	0.02	1.10	0.39	1.46	1.68	0.05	8.10	100.28	uni	30.1	0.0185	2	2		
10	447	l-po	73.57	0.49	9.94	3.85	0.03	1.23	0.56	1.52	1.69	0.06	8.25	101.19	uni	30.1	0.0185	2	2		
11	495	l-po	75.61	0.43	8.55	3.29	0.03	1.06	0.44	1.38	1.48	0.06	8.12	100.45	uni	38.9	0.1150	29	22		
12	547	l-po	80.68	0.34	6.92	2.71	0.02	0.79	0.33	1.28	1.21	0.04	7.32	101.64	uni	31.0	0.0901	21	14		
13	588	l-po	78.97	0.34	6.95	2.71	0.02	0.81	0.31	1.16	1.22	0.04	7.27	99.80	uni	26.7	0.0885	19	11		
14	653	l-po	79.16	0.37	7.85	2.57	0.02	0.96	0.33	1.23	1.25	0.04	6.82	100.60	uni	22.1	0.0397	8	1		
15	705	l-po	75.48	0.43	8.74	3.28	0.03	1.13	0.40	1.25	1.56	0.05	7.04	99.39	uni	17.8	0.0219	2	2		
16	754	l-po	77.46	0.46	9.67	3.35	0.03	1.25	0.44	1.64	1.69	0.06	7.28	103.33	uni	23.9	0.0340	8	0		
17	802	l-po	75.95	0.45	8.96	3.28	0.03	1.16	0.40	1.34	1.66	0.05	6.67	99.95	uni	19.5	0.0298	5	1		
18	849	l-po	78.59	0.37	7.50	2.85	0.02	0.90	0.34	1.20	1.34	0.05	7.24	100.40	uni	25.1	0.0508	13	2		
19	896	l-po	81.78	0.33	6.82	2.68	0.02	0.91	0.38	1.08	1.19	0.05	5.26	100.50	uni	24.0	0.0948	17	12		
20	935	l-po	78.76	0.38	7.62	2.80	0.02	1.00	0.40	1.05	1.39	0.05	6.73	100.20	uni	24.1	0.0807	15	9		
21	949	l-po	73.79	0.50	9.84	3.57	0.03	1.27	0.41	1.44	1.82	0.05	7.75	100.47	uni	28.0	0.0752	18	10		
22	956	l-po	78.10	0.39	8.23	2.96	0.02	1.10	0.38	1.21	1.41	0.05	7.27	101.12	uni	25.3	0.0504	13	2		
23	958	l-po	78.25	0.40	8.21	2.88	0.02	1.11	0.40	1.31	1.38	0.04	7.81	101.81	uni	28.0	0.0752	18	10		
24	975	l-po	77.35	0.40	7.89	3.09	0.02	0.93	0.41	1.31	1.48	0.07	7.48	100.43	uni	21.3	0.0593	12	3		
25	997	l-po	78.41	0.38	7.74	2.85	0.02	0.99	0.42	1.24	1.37	0.06	7.30	100.78	uni	22.0	0.0446	10	1		
26	1055	l-po	79.35	0.36	7.69	2.75	0.02	0.95	0.35	1.07	1.31	0.04	8.31	102.20	uni	25.9	0.0484	13	3		
27	1109	l-po	78.69	0.42	8.44	2.88	0.02	1.09	0.35	1.09	1.43	0.04	6.96	101.41	uni	20.6	0.0639	12	2		
28	1153	d-po	77.82	0.40	7.92	2.62	0.02	0.93	0.40	0.97	1.47	0.05	8.54	101.14	uni	25.2	0.0763	17	7		
29	1153	l-po	79.82	0.35	7.02	2.52	0.02	0.84	0.38	0.88	1.28	0.04	8.02	101.17	uni	16.5	0.0328	3	2		
30	1205	l-po	75.29	0.30	6.08	2.14	0.01	0.70	0.37	0.76	1.06	0.03	7.37	101.17	uni	16.7	0.0278	4	4		
31	1253	l-po	78.54	0.34	6.89	2.74	0.01	0.80	0.47	0.81	1.12	0.03	8.61	100.36	uni	28.4	0.1954	24	22		
32	1302	l-po	77.39	0.37	8.08	2.86	0.01	1.02	0.51	0.80	1.26	0.04	9.11	101.45	uni	17.7	0.0369	4	2		
33	1351	l-po	78.38	0.34	6.94	2.62	0.01	0.83	0.45	0.76	1.21	0.04	9.89	101.47	uni	12.0	0.0101	2	2		
34	1404	l-po	88.85	0.16	3.81	1.30	0.01	0.43	0.29	0.47	0.69	0.03	5.30	101.34	uni	16.7	0.0278	4	4		
35	1439	l-po	84.71	0.22	4.87	1.88	0.01	0.58	0.34	0.56	0.86	0.04	6.94	101.01	uni	28.4	0.1954	24	22		
36	1496	d-po	73.82	0.38	8.13	3.24	0.02

Fig. 3 Pore throat radius distribution of selected porecelanite samples from Toyotomi R-2 (a) and Ohmagari R-1 (b).

1, Fig. 3)。前者のモード付近の孔口径は、 $0.006 \sim 0.02 \mu\text{m}$ の間に孔口径分布曲線が急傾斜となって示される淘汰の良い微小なものである（以下、微小孔口）。バイモーダルなものには、この微小孔口に加えて、別のより大きなモードを持つ比較的淘汰の良い孔口の集団が $0.01 \sim 0.04 \mu\text{m}$ の間に存在する。ただし、これらユニモーダルとバイモーダルな分布を示す試料を中央孔口径で比べるとほとんど差がない（Table 1）。これは、バイモーダルな孔口径分布を示す試料でも微小孔口を持つ孔隙が全孔隙の半分以上を占めるからである。このため、オパールCT帯の場合、中央孔口径は微小孔口径に依存する。暗色ポーセラナイトの孔口径分布は明色ポーセラナイトのうちのユニモーダルのものと同様である。

7.4.2 石英帯

孔口径はオパールCT帯から石英帯に入ると急激に大きくなる。いずれの試料も淘汰が比較的良好なユニモーダルな分布を示し、それらのモードの位置は $0.007 \mu\text{m}$ から $0.3 \mu\text{m}$ の間で変化する。また、オパールCT帯でみられた微小孔口を持つ孔隙はほとんど認められなくなっている（Fig. 3）。Tsuji and Masui (1992) は由利原油・ガス田で碎屑物含有量と中央孔口径の間に負の相関関係を認めた。しかし、この関係は埋没の程度の差がほとんどないと考えられる深度 $1,300\text{m}$ 付近の深度差数 10m の間で採集した石英帯のポーセラナイトのものである。これに比べ深度差約 $1,500\text{m}$ の間で試料を採集した大曲 R-1 では、中央孔口径は Al_2O_3 含有量と同時に深度と負の相関を示す（Fig. 4）。すなわち、 Al_2O_3 含有量が $6.82 \sim 7.02\%$ とほぼ同じ6試料（547m, 588m,

Fig. 4 Relationships among median pore throat radius, Al_2O_3 content, and the recovered depth from Ohmagari R-1. In the quartz zone, median pore throat radius decreases with the increase of Al_2O_3 content, and the burial depth, although it is very small and constant in the opal-CT zone.

896m, 1,153m, 1,253m, 1,351m) を孔口径分布曲線と比べると、深度が増すほど、孔口径と孔隙率がともに減少する傾向がある（Fig. 3b の太い矢印）。また、豊富 R-2 において、ほぼ同じ深度で Al_2O_3 含有量 7.49%

の800mの試料と、これより Al_2O_3 含有量が6.41%とやや少ない786mの試料を比べると、前者の孔口径の方が小さい(Fig. 3a)。

暗色ポーセラナイトの分布曲線は同深度の明色ポーセラナイトと比べ、孔口径、孔隙率ともにやや小さい方にシフトしているが、類似した形状を示す(Fig. 3a)。

7.5 SEM像

7.5.1 オパールCT帯

明色ポーセラナイトでバイモーダルな孔口径分布を示す試料の破断面を観察すると径数 $10\mu\text{m}$ の孔隙が散在し、それらは一部で連結している(Fig. 5a)。また、孔隙の内壁にはオパールCT結晶の径約 $1\mu\text{m}$ の球状集合体が一面に成長している。この孔隙は珪藻や放散虫の殻の溶脱孔隙と考えられる(Tada and Iijima, 1983)。研磨面では、この溶脱孔隙は径 $10\mu\text{m}$ 程度で、研磨面全体の10~20%を占め、マトリックス中に比較的一面に分布し(Fig. 5b)、その量と大きさからバイモーダルのうちの大きい方のモード付近の孔口径を持つ孔隙に相当すると考えられる。このように破断面と研磨面で認められる孔隙の大きさと量が違うのは、試料を任意の箇所破断した場合、孔隙に沿って割れ、この面上では孔隙は大きく、その占める割合も多く見えるためと考えられる。

一方、微小孔口のみからなるユニモーダルな孔口径分布を示す試料では、溶脱孔隙は量が少なく孤立して点在している。したがって、微小孔口を持つ孔隙は溶脱孔隙に付随した孔隙ではなく、このような倍率では観察できないが、マトリックス内部に存在すると推測できる。また、マトリックスは比較的均一にみえることから、この微小孔口をもつ孔隙はマトリックス中に一様に分布すると考えられる。このため、マトリックス中に孤立して点

在する溶脱孔隙は、微小孔口を持つことになると考えられる。

暗色ポーセラナイトの性状も明色ポーセラナイトと同様であるが、溶脱孔隙はあまり認められない。

7.5.2 石英帯

まず、今回の試料で碎屑物含有量が最も少ないと考えられる明色ポーセラナイト(Al_2O_3 含有量3.81%)を観察した(Fig. 6)。これは碎屑物含有量が少なく孔隙が良く観察できるからである。破断面では、微小の石英結晶が集まってできた径約 $1\mu\text{m}$ の粒子の集合体から成るように見え、それらの粒子の間には孔隙が認められる(Fig. 6a)。この様子は佐藤・安中(1986)が認めたものと同様である。研磨面では、オパールCT帯で認められたのと同様の径 $10\mu\text{m}$ 程度の大きな孔隙(以下、大孔隙)が点在し、これらの周辺にはオパールCT帯では認められなかった溝状の小さな孔隙(以下、小孔隙)が顕著に発達し、これが大孔隙間を連結して大孔隙の孔口となっている。すなわち、このような倍率で観察できる孔隙の量がオパールCT帯に比べて大きく増加している。このうちの大孔隙はその大きさから、元々はオパールCT帯で認められた溶脱孔隙と考えられる。また、これらの孔隙内には破断面で認められた径約 $1\mu\text{m}$ の石英結晶の粒子が内壁を覆って認められ、それらの間には孔隙が認められる(Fig. 6b)。小孔隙や石英粒子間の孔隙はオパールCTが石英に相変化する際の体積収縮に起因して形成されたものと推測される。オパールCT帯の場合と同様に破断面は孔隙に沿って形成され则认为られるため、破断面のほとんどの部分は大孔隙や小孔隙の内壁にあたると考えられる。

一方、大部分の試料では孔隙が粘土鉱物で多かれ少なかれ埋められている。明色ポーセラナイトで碎屑物含有

Fig. 5 SEM photographs of the fractured (a) and the polished (b) surfaces of light-colored opaline porcelanite in Toyotomi R-2 at depth 413m. At the polished surface (b), pores seem isolated, though they are connected each other at the fractured surface (a).

Fig. 6 SEM photographs of the fractured (a) and the polished (b) surfaces of light-colored quartzose porcelanite in Ohmagari R-1 at depth 1404m. At the fractured surface (a), it comprises crypto- to microcrystalline quartz gathering grains of about 1 μm in diameter, with pore spaces among them. At the polished surface (b), scattered larger pores of which radii range from 2 μm to 5 μm are connected each other through smaller pores.

Fig. 7 SEM photographs of the fractured surface of light-colored quartzose porcelanite in Toyotomi R-2 at depth 786m (a) and depth 800m (b). Al₂O₃ content is higher in the porcelanite at depth 800m (Al₂O₃ = 7.49%) than that at depth 786m (Al₂O₃ = 6.41%). The latter contains more clay minerals which reduce the pore and pore throat sizes.

Fig. 8 SEM photographs of the fractured surface of light-colored quartzose porcelanite in Ohmagari R-1 at depth 896m (a) and depth 1253m (b). They show similar granular appearance and pore size between crypto- to microcrystalline quartz aggregates, although the former has much larger median pore radius.

量が孔隙の大きさに及ぼす影響をみるため、豊富 R-2 のほぼ同じ深度で Al_2O_3 含有量が 6.41% と 7.49% の 2 試料を比べると、観察箇所による不均一性があるものの、後者の孔隙内により多くの粘土鉱物が認められ、孔隙や孔口を小さくしている (Fig. 7)。次に、明色ポーセラナイトで埋没深度が孔隙の大きさに与える影響をみるため、大曲 R-1 で Al_2O_3 の含有量がほぼ同じで深度が大きく異なる 896m と 1,253m の 2 試料を比べると、それぞれの中央孔口径は $0.095\mu\text{m}$ と $0.033\mu\text{m}$ と前者は後者の約 3 倍であるが、両者の大孔隙内の径約 $1\mu\text{m}$ の石英粒子の間の孔隙の様子は同様で、それぞれの中央孔口径が示すような差は認められない (Fig. 8)。

暗色ポーセラナイトは、同深度の明色ポーセラナイトに比べ孔隙内に存在する粘土鉱物の量がやや多い。

8. 考 察

8.1 明色ポーセラナイトと暗色ポーセラナイトの違い

両ポーセラナイトの間には鉱物組成、化学組成に全体として有意な差はない。ただし、同深度のものを比べると、暗色ポーセラナイトの方が SiO_2 にやや乏しく、 Al_2O_3 などのその他の元素にやや富み、特に石英帯においては中央孔口径がやや小さい。すなわち、特に碎屑物含有量と中央孔口径が負の相関を示す石英帯においては暗色ポーセラナイトの性質は、明色ポーセラナイトと一連のものと考えることができる。したがって、今後は両ポーセラナイトを区別しないで扱う。

8.2 有意孔隙率と、油・ガス徴、逸泥、産ガス層準

鮎川油・ガス田では一般に $0.1\mu\text{m}$ 以上、層準によっ

ては $0.05\mu\text{m}$ 以上の孔口径を持つ孔隙が全孔隙の大部分を占めるポーセラナイトに蛍光反応が認められ、貯留岩性状が良好といえる。このため、孔口径が $0.1\mu\text{m}$ または $0.05\mu\text{m}$ 以上の孔隙を有意孔隙と定義し、それぞれに対して有意孔隙率 (significant porosity) を求めた (Table 1)。

Fig. 2 に示すように両坑井とも有意孔隙率はオパール CT 帯では低く一定で、石英帯に入ると急に高くなり、その中で増減を繰り返し、大曲 R-1 では下位ほど低くなる。孔口径の淘汰が比較的良好いため、有意孔隙率は中央孔口径が $0.1\mu\text{m}$ または $0.05\mu\text{m}$ 付近より大きいと、急に高くなる。このため、有意孔隙率の変化は中央孔口径の変化を強調したものとなっている。両坑井とも、有意孔隙率の高い、すなわち、孔口径の大きい層準は石英帯の最上部を除いて、油・ガス徴、逸泥および産ガス層準と良く一致している。

ただし、豊富 R-2 では有意孔隙率の低いオパール CT 帯層準に多数の油・ガス徴が認められる (Fig. 2a)。この理由は後で触れるが、いずれにせよ、この層準では産出テストを行っていないし、逸泥もないことから、これらの油・ガス徴は顕著なものではないと判断した。

8.3 孔口径と碎屑物含有量

オパール CT 帯では、 Al_2O_3 含有量の変化に関わらず、中央孔口径は一定であるが、石英帯ではこれらの間に負の相関が認められる (Fig. 9)。また今回の結果は、由利原油・ガス田などの女川層のポーセラナイトの分析結果とも調和的である (Fig. 9)。このことは、次のような孔隙の性質から説明できる。

Fig. 9 Al_2O_3 content and median pore throat radius of porcelanites from the studied wells, and from the Onnagawa Formation in Akita. Median pore throat radius of quartzose porcelanites is in a negative correlation to Al_2O_3 content, though the radius of opaline porcelanites has no specific relation with Al_2O_3 content. Most of quartzose porcelanites in Ohmagari R-1 show smaller pore throat than those in Toyotomi R-2.

オパールCT帯の場合、マトリックス部は生物源シリカ（オパールCT）と碎屑物が非常に細かく混合して構成されている（Tada and Iijima, 1983）。生物源シリカは微小であるため、その粒子間の孔隙は非常に小さいと考えられる。このため、前述したようにマトリックス内部の孔隙は微小孔口を持つと考えられる。粘土鉱物をはじめとする碎屑粒子はこれらの孔隙に比べると十分に大きいと考えられ、碎屑物含有量の多少は孔口径に影響を及ぼさない。前述したようにオパールCT帯の場合、中央孔口径はこの微小孔口径に依存するため、 Al_2O_3 含有量と中央孔口径の間には相関関係が認められない。

一方、石英帯では微小な生物源シリカ（オパールCT）がある程度集合して石英結晶に変化すると考えられ、オパールCT帯のポーセラナイトのマトリックス内部に存在すると考えられる微小孔口を持つ孔隙はなくなる。しかし、このとき体積収縮を伴うので、別の孔隙が生成する。前述したように、この孔隙が大孔隙を連結する小孔隙や石英粒子間の孔隙と考えられる。そして、これらの孔隙は微小孔口をもつ孔隙より大きい。初生的にポーセラナイトが碎屑物を含んでいるなら、ある程度の碎屑粒子はこれらの孔隙内に分離されるであろう。石英や長石などの碎屑粒子は、孔隙周囲の続成生成物の石英と同様に塊状の形態で、しかも、その大きさがこれらの孔口に比べても大きい。このためこれらの碎屑粒子は孔口径の大きさに影響を及ぼさない。ただし、粘土鉱物粒子は葉片状の形態で、しかも変形しやすいため孔口より小さいときだけでなく、孔口より多少大きくても、孔口を仕切るように小さくする。また、ポーセラナイトのような細粒岩の場合は、碎屑物含有量が増えれば、粘土鉱物含有量も増える。このため Al_2O_3 含有量、特に粘土鉱物含有量と中央孔口径の間に負の相関が生じると考えられる。

8.4 孔口径と圧密

Fig. 9 で両坑井の石英帯のデータが示すトレンドを比べると、大曲 R-1 の方がやや中央孔口径が小さい側にシフトしている。また、これは孔隙率の減少も伴っている（Fig. 3）。このことは、石英帯中を大曲 R-1 でより深く探鉱しているため、この下部の試料は圧密の影響を豊富 R-2 の試料に比べより大きく受けており、孔口径が孔隙率とともに小さくなっているためと考えられる。ただし前述したように、この圧密は大孔隙の内壁に認められる径約 $1\mu m$ の石英粒子間の孔隙の大きさには影響を及ぼしていない（Fig. 8）。このことは、次のように考えることができる。

孔口径分布測定では、水銀を徐々に加圧しながら試料に圧入する。このとき、水銀は大きな孔口をもつ孔隙から順に侵入し、その時の圧力と侵入量が測定される。そ

Fig. 10 Schematic diagram showing a pore geometry, and a pore throat radius distribution curve measured by a mercury injection method.

の圧力から孔口の大きさを換算し、その侵入量はその孔口を持つ孔隙の体積となる。Fig. 10 のように、孔口径 r_A の孔隙 A の中にそれより大きな孔口径 r_B を持つ孔隙 B が存在すると、 r_A の毛管圧力で孔隙 A の孔口から侵入した水銀は、同時にその圧力で孔隙 B の孔口にも侵入できる。このため、両方の孔隙とも孔口径 r_A を持つ孔隙として測定され、孔隙 B の孔口径は測定されない。ここでは孔隙 A が上記の大孔隙、孔隙 B が大孔隙内の石英粒子間の孔隙に対応する。したがって、大孔隙内の石英粒子間の孔隙は、大孔隙を連結する溝状の小孔隙（大孔隙の孔口に当たる）と同じ孔口を持つ孔隙として測定される。このため、この石英粒子間の孔隙は孔口径分布に反映しない。すなわち、ここでの圧密によると考えられる中央孔口径と孔隙率の減少は、大孔隙の孔口に当たる小孔隙が大孔隙とともに小さくなったためと解釈できる（Fig. 11 の左端）。

8.5 フラクチャー存在の可能性とその岩相

豊富ガス田が極めて減退の少ない、特異な生産能力を有するガス田である（天然ガス鉱業会、1969）ことを考慮すると、これまで検討してきたようなマトリックス孔隙が生産性に大きく関与していることが推測される。実際に、逸泥や産ガス層準は珪質岩のうち孔口径の大きい層準とよく一致する（Fig. 2）。しかしながら、ガスや水の生産レートが比較的高いこと、例えば豊富 R-2 で水を 165

Fig. 11 Schematic diagram showing a hydrocarbon trap in siliceous rock around the Toyotomi Gas Field. The right part of the figure shows that the hydrocarbon trap is formed in the quartz zone; porcelanites with much clay minerals and smaller pore throat are cap rocks and those with lesser clay minerals and larger pore throat form hydrocarbon reservoirs. The permeability difference of porcelanites between opal-CT and quartz zones is insufficient to act as a seal, because the silica mineral transformation boundary is shifted to shallower depth due to a tectonic uplift and erosion, whereas the boundary is deep enough and acts as a seal in the Yurihara Oil and Gas Field (Tsuiji and Masui, 1992). The left part of the figure shows the pore texture of each level. In the opal-CT zone, porcelanite has isolated dissolution pores, and in the quartz zone, the larger pores are connected each other through smaller pores. The sizes of smaller and larger pores decrease with the increase of burial depth, while the size of pore between crypto- to microcrystalline quartz aggregates is almost constant with the increase of burial depth.

kl/D, また同じ構造に掘削された豊富 R-1 では 3,600 kl/D 産出していること、さらに両坑井ともに 100kl 以上に達する逸泥をみたことは、マトリックス孔隙のみでは説明がつきにくく、フラクチャーの関与が考えられる。

オパール CT 帯と石英帯のポーセラナイトでは、後者の方が延性が低く (Snyder *et al.*, 1983), 同じ応力条件下においては後者にフラクチャーが発達しやすいと考えられる。ただし、石英帯でも粘土鉱物を多く含有するポーセラナイトは、剪断応力を受けても石英結晶などの間の粘土鉱物に変形して応力を吸収するため、開いたフラクチャーは発達しにくいであろう。したがって、開いたフラクチャーの発達には石英帯で、しかも粘土鉱物含有量が少ないポーセラナイトが都合が良いと考えられる (Fig. 11)。これは、マトリックス部で良好な貯留

岩性状を示すポーセラナイトと一致している。

8.6 ポーセラナイトの浸透性

孔口径の大きさは石英帯のポーセラナイトに比べて、オパール CT 帯の方が全体に小さい。パイモデルの孔口径分布を示すオパール CT 帯のポーセラナイトには、連結した溶脱孔隙が認められるが、この孔口径も普通石英帯のものに比べると小さい。また、前述したように延性が高いことから、フラクチャーの発達は乏しく、さらに封圧下では孔口径や孔隙径がより小さくなり、石英帯のものに比べると浸透性はかなり悪くなると予想される。ただし、石英帯のポーセラナイトでも粘土鉱物含有量が増加すると孔壁の表面がラフになるし、粘土鉱物が孔口や孔隙を仕切って小さくする。さらに、粘土鉱物に変形することによってもフラクチャーの発達を抑制したり、

孔口や孔隙が小さくなったり閉じたりして、浸透性が低下するであろう。

8.7 炭化水素トラップ

これまで考察してきたように、ポーセラナイトはその性状により浸透性が大きく異なる。貯留岩性状の最も優れたものは、石英帯に属し粘土鉱物含有量が少なく、さらに圧密の影響が少ないオパール CT/石英の続成変換面直下に位置するポーセラナイトであろう。

ただし、両坑井とも変換面の直下に比較的 Al_2O_3 が少なく孔口径の大きいポーセラナイトが存在するが、油・ガス徴はほとんどない (Fig. 2)。このことは次のように説明できる。オパール CT 帯と石英帯のポーセラナイトの浸透率の差は封圧の増加とともに大きくなり、由利原油・ガス田ではオパール CT 帯のポーセラナイトが帽岩、石英帯のものが貯留岩となっている (増井・辻, 1990; Tsuji and Masui, 1992)。由利原油・ガス田のオパール CT/石英の続成変換面は深度 1,300m 付近である。これと比べ、本地域の両坑井は逆断層である大曲—豊富断層の上盤側に位置し、この上昇でかなりの削剥が行われたと考えられ、この変換面が深度 500m 前後と浅くなっている。そのためこの変換面付近での封圧が十分ではなく、両ポーセラナイト間で浸透率の差があまりないことが予想される。したがって、炭化水素はこの変換面でシールされず、上方へ散逸した可能性がある。また、この散逸が豊富 R-2 でオパール CT 帯のポーセラナイト中に多くの油・ガス徴をもたらした理由とも考えられる。すなわち、オパール CT 帯のポーセラナイトが帽岩になるためには孔口径が小さいだけでなく、ある程度の封圧が必要と考えられる。そして、この条件が整ったとき、オパール CT 帯のポーセラナイトが、石英帯最上部に期待される貯留岩の帽岩となるといえる。

すなわち、本地域のポーセラナイトは、石英帯内において比較的埋没深度が浅く、かつ、粘土鉱物に乏しいために孔口径が大きくなっている層準が貯留岩に、また、粘土鉱物に富むために孔口径が小さくなっている層準が帽岩となって炭化水素トラップを形成していると考えられる (Fig. 11)。

9. ま と め

(1) 豊富 R-2、大曲 R-1 の両坑井とも、油・ガス徴、逸泥、産ガス層は石英帯のポーセラナイトのマトリックス部での中央孔口径の大きな層準に一致し、この中央孔口径は碎屑物含有量と同時に圧密の程度と負の相関を示す。すなわち、ポーセラナイトの貯留岩性状は石英帯で碎屑物含有量がより少なく、より浅い層準のものが優れている。

(2) 本地域の貯留岩ではマトリックス孔隙が重要であると考えられるが、比較的産出レートが高いことを考慮すると、生産性にはフラクチャーも関与していると推測される。そして、フラクチャーは石英帯の粘土鉱物含有量の少ない層準に発達すると考えられる。この層準はマトリックス部での貯留岩性状の良いものと一致する。

(3) オパール CT/石英の続成変換面が深度 1,300m 付近である由利原油・ガス田ではオパール CT 帯のポーセラナイトが帽岩となっているが、本地域では構造運動によって、この変換面が深度 500m 前後に上昇しており、封圧が不十分のためオパール CT 帯と石英帯のポーセラナイトの浸透性の差が小さい。このため、オパール CT 帯のポーセラナイトが帽岩となりえず、本来貯留岩として最も優秀なはずのオパール CT/石英の変換面直下のポーセラナイトでの炭化水素の徴候が乏しかったものと考えられる。

(4) 本地域では石英帯中にトラップが成立しており、粘土鉱物に富み孔口径の小さなポーセラナイトが帽岩、そしてシリカに富み孔口径の大きなポーセラナイトが貯留岩となっていると考えられる。

謝 辞

豊富ガス田の鉱業権所有者である合同資源産業株式会社、豊富 R-2 および大曲 R-1 を掘削した帝国石油株式会社には本稿に関わるデータの公表を許可していただいた。石油資源開発株式会社の片平忠實専務取締役には本稿の公表を許可していただいた。同社の浅川 忠取締役、猪間明俊取締役探鉱部長、同社秋田鉱業所の老田紘一所長、同社探鉱部の小椋伸幸主査、星 一良氏、同社技術研究所の米谷盛壽郎所長、秋葉文雄主任研究員、柳本裕主任研究員には粗稿を読んでいただき、ご助言をいただいた。同社技術研究所の内田 隆主任研究員、安田善雄氏、大久保進氏、洲崎照夫氏、関口満子氏には分析データの解釈についてご教示していただいたり、分析を担当していただいたりした。また、本稿をまとめるにあたり石油資源開発株式会社探鉱部および技術研究所の関係諸氏には日ごろの討論を通じて多くのご意見をいただいた。以上の方々に厚く感謝いたします。

文 献

- Aoyagi, K. and Omokawa, M., 1992: Importance of Neogene siliceous rocks as the source of petroleum in Japan. *Energy Sources*, 11, 113-132.
 荒木直也・加藤 進, 1993: 鮎川油・ガス田の発見. 石技誌, 58, 119-127.
 Crain, W. E., Mero, W. E. and Patterson, D., 1985: Geology of the Point Arguello Discovery. *AAPG*, 69, 537-545.

- Goter, E. R., Picha, M. G., Sandstorm, M. A. and Schwartz, D. E., 1992: A new geological reservoir model for the Monterey: An alternative to the "fractured shale" model. *Abs, AAPG Annual Meeting*, 47-48.
- 秦 光男・植田芳郎, 1967: 20万分の1地質図幅「稚内」. 地質調査所.
- 秦 光男・植田芳郎, 1969: 20万分の1地質図幅「天塩」. 地質調査所.
- 広岡悦郎, 1962: 北海道天北地方の石油地質学的研究. 石技誌, 27, 113-134.
- 北海道鉱業振興委員会, 1979: 北海道の石油・天然ガス資源—その探査と開発(昭和43—51年)—. 天然ガス鉱業会, 205p.
- 福沢仁之, 1985: 北海道天北—羽幌地域の上部新第三系層序の再検討—特に“稚内層”、“声間層”について—. 地質雑, 91, 833-849.
- 福沢仁之, 1987: 北海道北部, 新第三紀後期の層状珪質岩の堆積場. 地質雑, 93, 37-55.
- 福沢仁之・保柳康一・秋山雅彦, 1992: 北海道中央北部の新第三系の層序と古環境. 小林巖雄・立石雅昭・高安克己・的場保望・秋山雅彦(編): 地質学論集, 37, 1-10.
- Isaacs, C.M. and Petersen, N.F., 1987: Petroleum in the Miocene Monterey Formation, California. In Hein, J. R., ed.: *Siliceous Sedimentary Rock-hosted Ores and Petroleum*, 83-116.
- 鹿野和彦, 1986: 石油根源岩の堆積環境—女川層の場合—. 田口一雄教授退官記念論文集, 161-169.
- 加藤邦弘, 1993: 第I編最近20年に発見された油田・ガス田誌第1章秋田県. 最近の我が国の石油開発—石油技術協会創立60周年記念—, 6-9, 石油技術協会.
- 加藤 進, 1992: 第I編第5次・第6次5カ年計画の策定と総合成果F. 新規発見油・ガス田および有望構造について2. 由利原油・ガス田. 日本の石油と天然ガス資源, 28-29, 天然ガス鉱業会・大陸棚石油開発協会.
- 正谷 清・新保久弥・秋葉文雄, 1982: 第I編北海道編B. 道央(天北—日高)地域2. 層序概要. 日本の石油と天然ガス資源, 11-31. 天然ガス鉱業会・大陸棚石油開発協会.
- 増井泰裕・辻 隆司, 1990: 由利原油・ガス田周辺の女川層珪質頁岩の石油地質(その1)(要旨). 石技誌, 55, 285.
- 長尾捨一, 1960: 5万分の1地質図幅「豊富」. 道立地下資源調査所.
- 岡 孝雄, 1986: 北海道の後期新生代堆積盆の分布とその形成に関わるテクトニクス. 福沢仁之・雁沢好博・保柳康一・君波和雄・木村 学・紀藤典夫・小松正幸・前田仁一郎・宮坂省吾・宮下純夫・新井田清信・岡孝雄・田近 淳(編): 地団専報, 31, 295-320.
- 佐賀 肇, 1992: 第II編B. 各地域の石油地質3. 新潟・長野地域. 日本の石油と天然ガス資源, 53-80, 天然ガス鉱業会・大陸棚石油開発協会.
- 佐藤 修・古川隆治・高井義嗣, 1979: 石英粒子より成る泥岩について(要旨). 石技誌, 44, 40.
- 佐藤 修・安中 斉, 1986: 秋田県新黒川—1号井にみられた火山岩類の貯留岩の検討. 田口一雄教授退官記念論文集, 137-148.
- Snyder, W. S., Brueckner, H. K. and Schweickert, R. A., 1983: Deformational system in the Monterey Formation and other siliceous sedimentary rocks. In Isaacs, C. M. and Garrison, R. E. eds.: *Petroleum Generation and Occurrence in the Miocene Monterey Formation, California. Pacific section S. E. P. M.*, 151-170.
- Tada, R. and Iijima, A., 1983: Petrology and diagenetic changes of Neogene siliceous rocks in northern Japan. *Journal of Sedimentary Petrology*, 53, 911-930.
- 田口一雄, 1961: 女川, 船川層の地化学的研究への序説—女川, 船川層の堆積環境—. 石技誌, 26, 12-23.
- 天然ガス鉱業会, 1969: 日本の石油・天然ガス資源. 283p.
- 辻 隆司・増井泰裕, 1990: 珪質頁岩の続成に関連した石油ガストラップ—秋田県由利原油ガス田の例—. 日本地質学会第97年学術大会講演要旨, 568.
- Tsuji, T. and Masui, Y., 1992: Reservoir quality of siliceous sediments controlled by diagenesis and lithology in the Yurihara Oil and Gas Field, Northern Japan. *29th IGC Abstracts*, 336.
- 内田 隆, 1984: 貯留岩の孔隙性と孔径分布. 石技誌, 49, 29-40.
- 早稲田周・重川 守, 1987: 由利原油・ガス田における炭化水素の生成・移動・集積. 石技誌, 55, 233-244.
- 渡部芳夫・多田隆治, 1988: 青森県鰹ヶ沢, 五所川原, 下北地域新第三系珪質堆積物の化学組成. 第三紀珪質頁岩の総合研究, 129-148.
- 山口昇一, 1981: 20万分の1地質図幅「枝幸」. 地質調査所.