原 著 論 文

新潟県東頸城郡北部地域の椎谷期—西山期の
砂岩の発達およびその石油地質学的考察*

その 2. 砂岩の貯留岩としての性質

本 座 栄 一**

(昭和 40 年 1 月 12 日受理)

**Sedimentological and Oil-Geological Considerations on the Sandstones
of the Shiiya and the Nishiyama Stages in the Northern Part of
Higashikubiki, Niigata Prefecture**

Part 2, Characters of the Sandstones as Reservoir Rocks

By

Eiichi HONZA

Abstract: The writer reported that the sandstones in this area were composed of material supplied from the topographical high place by mass flows such as turbidity currents, and that thick sandstone developed in WNW-ESE and -SE directions decreasing thickness and turbulence from the central to the marginal (remote) area (Part 1, *Jour. Jap. Assoc. Petrol. Techn.*, Vol. 30, No. 2, 1965).

Porosity of the sandstone decreases with increasing median diameter and standard deviation of grains, and with increasing bed thickness. Therefore sandstones in the marginal area are more porous than in the central area, but their capacity as oil reservoir is large in both the central and the middle areas, and small in the marginal area.

Permeability of the sandstone decreases with decreasing porosity and increasing standard deviation of grain size, but has no relation to the median diameter. Permeability of the sandstone decreases when bed thickness increases, and the sandstones in the marginal area are more permeable than those in the central area.

Thus the sandstones in the middle area as well as in the central area are suitable for reservoirs, while those in the marginal area are more porous and permeable in spite of their thinness.

The sandstone fabrics control the directional permeability. Permeability of the sandstone is maximum in the direction parallel to the current flow which carried sand grains at the time of deposition and minimum in the direction perpendicular to bedding plane.

It is concluded that these characters should be taken into consideration in petroleum exploration and exploitation works.

* 一部は石油技術協会総会個人講演で発表 (1964)

** 東京大学海洋研究所

1 緒 言

筆者は本論文の“その1”（石技誌, 30 巻, 2 号, 1965）で新潟県東頸城郡北部一帯に発達する椎谷期西山期の砂岩の geometry・堆積機構・成因などについて述べ、本地域の砂岩が地形的に高所より低所に turbidity current などの一種の mass flow により供給され、西北西—東南東ないし南東方向に厚く堆積し、その流れの主流において砂の堆積は厚く、かつ大きく乱れ、その拡がりとして周辺部においては比較的穏やかに堆積したことを明らかにした。

本論文ではこのような砂岩が貯留岩となった時いかなる性質（孔隙率・浸透率）をもつかという問題をとりあげ、採集した試料を種々の地質学的要因と照らし合せて調べた結果を述べ、地下における貯留岩の性質を判断する上での基礎的資料を提供してみたいと思う。

人為的に各種の径の砂粒を配合し、それを基にして孔隙率・浸透率に影響を与える要素を検討した報告は従来かなりあるが、自然の砂岩の孔隙率・浸透率を調べ、それと地質学的要因を結びつけて検討した報告は少ない。したがって今日まで報告されている人為的モデル実験における結果を基にして、実際の砂岩における地質学的諸要素と貯留岩としての性質との関連性を検討してみたいと思う。

2 孔隙率からみた本地域の砂岩

ここで取り扱った試料は本論文の“その1”で使用したものと同一の試料から取った。孔隙率の測定には Ruska high-pressure porosimeter を使用し、120 気圧のもとで水銀圧入を行ない測定した。孔隙率の測定値と砂岩のもつ諸性質との相互関係を以下に検討してみよう。

2・1 孔隙率と中央粒径, sorting および細粒部含有量との関係

自然の岩石において孔隙率に影響を与える要素は粒径、粒度分布、粒の形、内部構造（粒子の配列状態）、compaction, cementation などである。粒径は理論的には孔隙率に影響を与えない。しかしながら、実際の砂岩においては粒径が変化すると粒子の shape が異なり、packing 状態が変化して、孔隙率に影響を与える⁵⁾。また種々の粒径の粒子があると孔隙部分がうめられ、packing 状態も変化し、孔隙率は減少する^{3), 10)}。砂岩の内部構造は粒子の shape、堆積課程の相違などに支配される。また compaction, cementation をうけることにより孔隙率は減少する⁴⁾。本地域の砂岩においては、粒径および粒度分布が孔隙率に与える影響について述べてみよう。

一般に中央粒径が大きくなると孔隙率は減少する傾向にある（第1図）。これは砂岩の粒子の sphericity が粒径の増大にともない大きくなる傾向にあり、それにより砂粒の packing 状態が密になり、孔隙率の減少をきたすためと考えられる⁵⁾。また、中央粒径が 0.2 mm を越えるあたりから孔隙率が大きく変化する様子がみられるが、これは粒径が大きくなったため packing 状態が変化をきたしたためと考えられる。また、第2図のごとく、sorting が悪くなると孔隙率が減少する傾向がある。silt 以下の粒径の含有量をもって細粒部の割合とすると、これは孔隙率とあまり明らかな相関関係を示さないが、細粒部含有量が多くなると幾分孔隙率も大きくなる傾向もみられる（第3図）。これは中央粒径が小さくなると孔隙率が増加する傾向と、細粒部が増加すると sorting が悪くなる傾向との、孔隙率へのつの相反する影響が複合した現われであると思われる。

Fig. 1 Relation between porosity and median diameter of grains.

Fig. 2 Relation between porosity and phi standard deviation (σ_ϕ) of grains

Fig. 3 Relation between porosity and fine grain contents (smaller than 4ϕ).

2・2 孔隙率と層厚との関係

一般に砂岩単層が厚くなると孔隙率は減少する傾向がある（第4図）。本論文の“その1”で砂岩単層が厚くなると中央粒径が大きくなり、sortingが悪くなる傾向があると述べた。中央粒径が大きくなり、sortingが悪くなると孔隙率は減少することからも以上のことは予測できる。また“その1”で砂岩体の中心部の砂岩と述べたものは一般に低い孔隙率であり、中間部、周辺部といくにしたがい、高い孔隙率となる傾向がある。

今、砂岩の貯留岩としての大きさを相対的に知るために第4図において、砂岩体の中心部、中間部、周辺部の砂岩群がそれぞれ、A・B・C直線上の孔隙率をもつものと仮定し、野外において1地点の砂岩単層の厚さをできるかぎり連続的に測定した結果より、貯留岩としての大きさを検討してみよう。

Fig. 4 Relation between porosity and bed thickness.

砂岩単層の層厚を h 、孔隙率を ϕ 、厚さを測定した砂岩単層の数を n 、1つの砂岩部層の砂岩全体の厚さと測定した部分の厚さとの比率を $C_r:1$ として、

$$N = \sum_{i=1}^n h_i \phi_i \times C_r$$

なる N を、貯留岩としての容量の相対的の大きさを知るための値とみなすことにして、11地点の N の値を計算したのが第1表である。

第1表をみると、一般に貯留岩としての容量は中心部の砂岩群が最も大きい傾向があるが、中間部の砂岩群もそれに劣らない位の大きさがある。周辺部の砂岩群は幾分劣る傾向がみられるが、これは砂岩が周辺部で薄くなっていることが大きく影響している結果である。

3 浸透率からみた本地域の砂岩

以上において、貯留岩としての容量の面から検討して

第1表 Calculations of relative values of capacity as reservoirs.

Depositional area	Locality	Member	n	$\sum_{i=1}^n h_i \cdot \phi_i$	C_r	N
Central area	Koyajima ¹⁾	D	39	571	60/44	786
	Miyanotsubo ²⁾	H	30	411	1	411
	Miyanotsubo	D	27	396	40/32	494
	Iriyama ³⁾	D	32	318	60/23	816
Middle area	Nyūba ⁴⁾	D	61	297	35/14	744
	Ishidani ⁵⁾	H	26	413	30/25	502
	Ishidani	D	26	292	25/10	452
Marginal area	Fujio ⁶⁾	H	18	223	1	223
	Fujio	D	16	124	17/5	418
	Ishiguro ⁷⁾	H	31	174	1	174
	Ishiguro	D	33	224	1	224

1) 小谷島. 2) 宮ノ坪. 3) 入山. 4) 入場. 5) 石谷. 6) 藤尾. 7) 石黒

きたが、次に浸透率について述べよう。

浸透率は、真鍮円筒管中に試料をパラフィンで固定し、地層に水平な方向に流体が流れるようにとのえて測定した。流体は一部食塩水を使った（後述）ほかは空気を使用した。測定誤差は最大 20% であり、これはパラフィンと試料との接着部分におけるものおよび試料作成時における表面の孔隙部分の変化が大きな原因となっている。以下に浸透率と砂岩のもつ諸性質との相互関係を検討してみよう。

3・1 浸透率と孔隙率、中央粒径、sorting との関係

砂の浸透率は Kozeny などにより孔隙率と tortuosity と比表面積（あるいは粒径）との関数として単純に表わされているが⁹⁾、自然の岩石においては粒度分布、内部構造、compaction, cementation などの要素があり、それらが孔隙率を支配するとともに、浸透率へ影響を与え、実際にはきわめて複雑である。本地域の砂岩についてこれらの要素の幾つかが浸透率へ及ぼす影響を述べてみよう。

孔隙率の増加にともない、浸透率の対数は比例的に増加する傾向がある（第5図）。これは他の油砂について認められる一般的傾向と一致している。次に、浸透率と中央粒径との関係は、第6図に示すように、全く相関関係が認められない。人工砂について実験を行なった Krumbein 等の報告⁶⁾によると、浸透率は中央粒径の増加にともない、その2乗に比例して増加すると述べている。これは粒径だけに着目し、そのほかの条件を一定とした時に得られたものであり、実際の砂岩においては前述の諸要素が複雑にからみ合い、粒径との相互関係を打

Fig. 5 Relation between porosity and air permeability.

ち消しているためとみられる。また第7図のごとく、浸透率は sorting が悪くなると減少する傾向がある。

3・2 浸透率と層厚の関係

一般に砂岩単層が厚くなると、明瞭ではないが、浸透率は減少する傾向がある（第8図）。孔隙率の場合と同様に、堆積の中心部の砂岩ほど浸透率の値は低く、周辺部の砂岩ほど大きい値となる傾向がある。したがって第1表に掲げた貯留岩としての相対的容量と第8図の浸透率の傾向とから、中心部の砂岩群に劣らず、あるいはそれ以上に中間部の砂岩群が貯留岩として大きな価値をも

Fig. 6 Relation between air permeability and median diameter of grains.

Fig. 7 Relation between air permeability and phi standard deviation of grains.

Fig. 8 Relation between air permeability and bed thickness.

っているといえる。周辺部の砂岩群が全体として、貯留岩としての容量が小さいのは砂岩群全体の厚さが薄いためであり、このことを除けば、周辺部の砂岩の方が貯留岩として良好な性質をそなえている。

3・3 浸透率の方位性

本論文の“その1”において本地域の砂岩は一種の mass flow により堆積したものであり、一般に砂粒の配列状態に規則性がみられると述べた。このような砂岩では浸透率にも方位性があることが予想される^{7),8),11)}。第2表に本論文の“その1”で掲げた6コの試料について current marking に示された堆積時の流れに平行方向(x)、成層面に平行で流れに直角方向(y)、成層面に直角方向(z)の3方向で測定した浸透率の値を示してある。

第2表 Directional permeability (md.)

Sample number	K_x	K_y	K_z
I	10	6	3
II	61	45	27
III	18	29	13
IV	16	12	7
V	30	15	7
VI	29	13	12

試料Ⅲを除いて他はすべて、 x 方向、つまり流れに平行方向で浸透率は最大となり、 z 方向つまり成層面に直角方向で最小となる。試料Ⅲは砂粒の配列状態が大きく乱れているものであり、それが浸透率の方位性に強く反映している。今、流れの方向を基準とした時の砂粒の長軸方向の標準偏差値と、 $x \cdot y$ 方向の浸透率の値の比をとった時の関係をみると、第9図のごとく、標準偏差値

Fig. 9 Relation between directional permeability ratio (K_x/K_y) and standard deviation of grain orientations.

の小さいほど、つまり同一方向への配列の規則性がはつきりみられる砂岩ほど、 x 方向の浸透率が y 方向のそれにくらべ、大きい値を示す傾向がある。これは砂粒の長軸が砂を運んだ流れの方向に平行に近く配列し、そのため孔隙網の tortuosity がその方向に最も小さくなっているためと考えられる。

以上のことからわかるように、砂粒の配列状態にみられる規則性と浸透率の間には密接な関係があり、砂の堆積時における流れの存在が砂粒の配列状態に方位性を与え、それが浸透率に方位性を与えている。

3・4 塩水浸透率

以上空気浸透率について述べてきたが、塩水の場合の性質を一部について行なった実験から述べてみよう。

測定には食塩水を使用し、7日間連続的に流した時大体一定の浸透率の値となったので、その時の値を採用した。それと細粒部含有量との関係を求めてみると、第10図のごとく、細粒部含有量が多くなると一般に浸透率の対数は反比例的に減少する傾向がみられる。また塩水浸透率と空気浸透率の比も同様に細粒部含有量が多くなると減少する傾向がある(第11図)。したがって液体による浸透率を組織的にみれば、以上述べてきたことと多少異った結果も現われると思われるが、空気浸透率測定でえられた各種の関係は、塩水浸透率を用いても定性的には大体成り立つと思われる。

4 要約および結論

本論文の“その1”で述べたように、本地域の砂岩は地形的に高所から低所へ一種の mass flow により供給され、西北西—東南東ないし南東方向に厚く堆積し、その

Fig. 10 Relation between salt water permeability and fine grain contents (smaller than 4ϕ).

Fig. 11 Relation between salt water permeability-air permeability ratio (K_x/K_a) and fine grain contents (smaller than 4ϕ).

流れの主流において砂の堆積は厚く、かつ大きく乱れ、その拡がりとして周辺部においては比較的穏やかに堆積した。そして砂岩の単層が厚くなると砂粒は粗く、sorting が悪くなる傾向がある。また本論文で述べたように、中央粒径が大きくなり、sorting が悪くなると孔隙率は減少する。以上のことから予想されるように、砂岩単層が厚くなると孔隙率は減少する。そして流れの主流である中心部の砂岩ほど孔隙率は低く、周辺部の砂岩ほど孔隙率が高い傾向がある（第4図）。中心部・中間部・周辺部の砂岩群が貯留岩となった時の容量は中心部・中間部で大きく、周辺部では小さいが（第1表）、これは層厚が大きく影響しているためであり、一定容積の砂岩をとれば、周辺部の砂岩の容量が最も大きい。

浸透率は孔隙率が減少し、sorting が悪くなると減少するが本地域の砂岩に関しては中央粒径との関連性はみられない。また孔隙率の場合と同様に層厚が大きくなると浸透率は減少し、中心部の砂岩ほど浸透率は低く、周辺部の砂岩ほど浸透率が高い（第8図）。したがって中心部に劣らず、中間部の砂岩群は貯留岩としての価値が大きい。また周辺部の砂岩群は容積が小さいということを除けば、貯留岩として最もよい性質をもっている。

“その1”で述べたように、砂粒の配列状態には規則性がみられ、堆積時の流れの方向に砂粒の長軸が平行になる傾向がある。浸透率もそれにしたがって、流れに平行方向で最大となり、成層面に平行で流れに直角方向がそれに次ぎ、成層面に直角方向で最小になる傾向がある（第2表）。また同一方向への配列の規則性がはっきりみられる砂岩ほど、流れに平行方向と直角方向の浸透率の比が大きい。つまり砂粒の配列状態にみられる規則性が浸透率に方位性を与えている。

本邦の油・ガス田では、ここで対象としたような砂岩が油層、ガス層をなす場合が少なくないと思われるが、以上述べたことは、油・ガス鉱床の探鉱および開発（たとえば油・ガス井の坑井間隔）に際しても考慮すべきことと思われる。

今後の問題点として実際の油田・ガス田の貯留岩においてどのような結果を以上の結果を基にして検討してみる必要がある。Carrigy^{1),2)} は Athabasca の油砂において、粘土の含有量が油の含有量に大きく影響しており、砂粒の粗いところが幾分油の含有量が多いと報告しているが、実際に油層・ガス層を形成している貯留岩については、2相または3相流体の存在を考えねばならないので相対浸透率・毛管圧その他 petrophysical な諸測定も試みる必要があろう。

引用文献

- 1) Carrigy, M.A. (1959): The significance of a grain size classification of the sand of the McMurray Formation, Alberta, *Proc. 5th World Petrol. Congress*, Sect. 1, paper 31, pp. 1-14
- 2) ——— (1962): Effect of texture on the distribution of oil in the Athabasca oil sands, Alberta, Canada, *Jour. Sed. Pet.*, Vol. 32, No. 2, pp. 312-325
- 3) Engelhard, W.H. (1960): Über die Zusammenhänge zwischen Porosität, Permeabilität und Korngrösse. *Heidelberger Beiträge zur Mineralogie und Petrographie*, Bd. 2, pp. 477-491
- 4) ——— (1960): Der Porenraum der Sedimente, Springer-Verlag, Berlin
- 5) Fraser, H.J. (1935): Experimental study of the porosity and permeability of clastic sediments, *Jour. Geol.*, Vol. 43, No. 8, pp. 910-1010
- 6) Krumbein, W.C. and G.D. Monk (1943): Permeability as a function of the size parameter of unconsolidated sand, *A.I.M.E. Trans., Petrol. Div.*, Vol. 151, pp. 153-163
- 7) Mast, P.F. and P.E. Potter (1963): Sedimentary structure, sand shape fabrics and permeability, Part I, *Jour. Geol.*, Vol. 71, No. 4, pp. 441-471
- 8) ——— (1963): ——— Part II, *Jour. Geol.*, Vol. 71, No. 5, pp. 548-565
- 9) Pirson, S.J. (1958): Oil reservoir engineering, McGraw-Hill Book Co. Inc., New York
- 10) Rogers, J.J.W. and W.B. Head (1961): Relationships between porosity, median size and sorting coefficients of synthetic sand, *Jour. Sed. Pet.*, Vol. 31, No. 3, pp. 467-470
- 11) Scheidegger, A.E. (1954): Directional permeability of porous media to homogeneous fluids, *Geofisica Pure e Applicata-Milano*, Vol. 28, pp. 65-90