論文・報告

三軸圧縮試験による多孔質岩石の
変形と空隙率、浸透率の変化について*

正 会 員 山 崎 豊 彦**

The Effect of Stress on Porosity and Permeability
in Porous Rock under Triaxial Compression

Toyohiko YAMASAKI

Domengine sandstone, Boise sandstone have been subjected to triaxial Compression in which strain, porosity and permeability are measured simultaneously. The experimental apparatus are assembled with testing machine, triaxial vessel, high pressure pump and two measuring appliances which are strain meter and mercury burette to measure the permeability and pore volume. Domengine sandstone is porous and brittle material. When confining pressure has been varied between 50 to 250 [psig], the elastic moduli are increased depend upon the raising of pressure.

On the Boise sandstone, the porosity does not so much change that the permeability does under triaxial tests. Porosities changed between 26.8% and 25.7%, but otherwise permeabilities varied from 1,080 to 536 millidarcy.

1. 結 言

前に筆者らは石灰石の三軸圧縮試験について報告¹⁾した。また本研究の一部を講演発表した²⁾がその内容について報告する。

この種の研究は現在米国において、広範囲な分野で行なわれているが、とくに Griggs³⁾, Handin⁴⁾らの研究成果は著しいものがある。本邦でも堀部・小林⁵⁾の研究に引続いて、西原・平松⁶⁾の研究により高封圧下での大理石の塑性変形について実験が行なわれた。また本邦の代表的岩種について茂木⁷⁾はその変形と強度に関して同様な実験を行なつて、その特徴をまとめられた。しかしこれらの研究のほとんどすべてが、岩石の力学的性質について行なわれたもので、この方法の応用面はまだ将来に残されていると思われる。J. Handinの最近の報告で⁸⁾筆者はこの応用として岩石の空隙率との関係が論議されていることを知つた。前述の茂木⁷⁾の研究でも空隙測定の重要性が指摘されている。このように三軸圧縮下における空隙の変化は岩石の破壊に関しても大切な問題であるが、筆者らのように岩石または石炭中のガス貯留状況、およびその開発を目的とするものにとつては、岩石の空隙率および浸透率の測定は非常に重要な課題である。従来この方面の研究の多くは静水圧下で行なわれてきた⁹⁾。しかし最近この方面の研究が、米国鉱山局でも取り上げられているように聞いているがまだその詳細

な報告に接していない。そこで筆者は I. Fatt¹⁰⁾の地圧による空隙率、浸透率の変化に三軸圧縮の方法を採用した。これらについて以下のように報告する。

2. 実験方法および装置

実験装置については前に報告したようにプレスとして最大圧縮荷重 160,000lbs の材料試験機を用い、これにより、高圧容器上面のフランジ部に軸圧を加え、これが試料に伝わるようにした。圧力の発生は高圧定量ポンプを使用したもので、圧力の調整はニードルバルブ式の調整括栓を開閉して行なつた。高圧容器の耐圧は7,000[psi]したがつて砂岩、頁岩のような軟質の岩石について試験しうる程度のものであつた。高圧容器とポンプからの油配管はゴム管で接続できるようになつており、手軽に高圧容器の移動ができる。また高圧容器のフランジ部には8本のリード線が内部から取出され、外部のリード線と接続できるようになつている。またフランジの中心部に約3/64inφの細孔があり、これがフランジ下部のラムを通して高圧容器内部と連絡される。この容器の内径は約3.874in、ラムの試料端は約2 1/8in、したがつて試料としては直径2inφ、長さ4inのものを使用した。ラムの高圧シールはV型皮製パッキングを使つて行ない、試料の下面には半球面ブロックを付け、この中央の試料接触部に上部ラムのものと同じ径の細孔があり、ブロックの側面から細い円管を通してベッセル外に連絡される。したがつて、流体を試料中に流すことができる。もちろんこの場合高圧容器と試料は、ある種の被覆を行なつて

* 昭和40年8月31日受理

** 工博早稲田大学理工学部教授 資源工学科

A: ビュレット, B: 水準ビン, G: 3 方コック, C₁: 2 方コック1, C₂: 2 方コック2, M₁: マノメータ1, M₂: マノメータ2, V_G: 真空計, V_P: 真空ポンプ, F: 流量計

←第1図(a) 三軸圧縮下の空隙率、浸透率測定装置模式図

第1図(b) 試料取付部および高圧容器

高圧の油が試料内に浸入しないようにする。筆者はプラスチック・チューブを用いた。この実験装置と高圧容器内のフランジおよび試料の取付け状態は第1図(a)(b)にその模式図と写真を掲げておく。

試料は Boise, Bandera, Berea, Domengine 砂岩を用いたが、空隙率、浸透率の測定には空隙の大きい Boise 砂岩を用いた。これらの物理的性質および力学的性質に関しては Mann, Fatt¹⁰⁾ の発表がある。

空隙率、浸透率の測定装置は第1図(a)に示したように、まず試料内を真空ポンプで 100~120 マイクロン Hg 程度まで真空にし、高圧容器内の油がプラスチックチューブの上下より浸入しないことを確かめ、しかる後高圧ポンプを動かし所定の圧力に容器内を保つ。しかる後軸圧を加える。この場合ラムの下降で油圧が上昇するので、これを防ぐため、油圧ポンプの調整弁、停止弁を動かし常に容器内を定圧を保つ。空隙の容積はビュレット A の中に常圧 (ほぼ 14.7 [psia] だがマノメータ M₂ で確かめることができる。) の空気を溜め、これを真空にした試料の中に送り込み、B と A の水銀面を等しくして、空気の送分量を読み取る。試料に至る導管等のデッドスペースは前もって内容積が試料の空隙に等しい程度の中空円筒テストピースを用いて測定しておく。

浸透率測定の場合は真空ポンプを動かしながら試料の両端に付けられたマノメータ M₁, M₂ で圧力差を、また流量計 F で流量の測定を行なった。この場合 M₁, M₂ の圧力差は試料の抵抗によるものと導管の抵抗によるものの合計だから、空隙率測定のととき使用した中空円筒のテストピースを用いて導管の抵抗と流量の関係を前もって調べ、その抵抗を差し引き試料の流出抵抗にもとづく真の圧力差 ΔP を求め、次式によつて浸透率を計算した。

第2図 浸透率測定用毛細管の抵抗

$$K = \frac{\bar{Q} \mu L}{A \Delta P} \times 7.324 \times 10^{-5}$$

ここで A は試料の断面 [ft²], L は長さ [ft]

μ は空気の粘性係数 (測定温度における) [cp]

$\bar{Q}$ は試料両端の平均圧力に対応する流量 [ft³/sec]

ΔP は真の圧力差 [psi], K は浸透率 [darcy]

この装置の導管の抵抗と流量の関係は第2図に示すようになり高い。この図で横軸は毛細管の両端における圧力差を示し、縦軸は毛管をこの圧力差で流れる流量および単位流量を流すに要する時間を示す。

また、岩石の変形は抵抗線歪計を利用して軸方向と円周方向の歪測定を行なつて体積変形量を計算した。

3. 空隙を持つ岩石の応力と歪の関係

一般にガスの貯留岩は 20% 前後の空隙率を持つている。しかもこれらの岩石は異方性のものも多く、力学的性質についても、これを考慮しなければならない。使用した岩石の引張試験の結果 Bandera, Berea は異方性の岩石であつたが、Boise 砂岩はほぼ均質、等方性と判断することができた。また Domengine 砂岩は 1/32 in の直径をもつ石英質粒子で構成された粗粒砂岩で、その 98% がシリカよりなつており、また完全に固結していな

第1表 Boise 砂岩の物理的性質

構成粒子 (石英と長石) 56%*	
マトリックス (シリカ, 粘土, 絹雲母) 44%*	
見掛け容積密度 [g/cc] 1.91*	
構成粒子の密度 [g/cc] 2.60*	
空隙率 ϕ [%] 26.5 (Mann, Fatt)* 26.8 (山崎)	
浸透率 K [md] 1,200~1,600 (Mann, Fatt)* 1080 (山崎)	
ヤング率 E [psi] 2.85 $\times 10^6$ (Mann, Fatt)*	
ポアソン比 ν 0.25 $\times 10^6$ (山崎)	
圧縮率 C_b [psi ⁻¹] 0.264 (Mann, Fatt)* 0.325 (山崎)	
0~500 [psig] 0.1 $\times 10^{-6}$	
500~1,000 0.24 $\times 10^{-6}$	
1,000~1,500 0.44 $\times 10^{-6}$	
1,500~1,750 0.56 $\times 10^{-6}$	
6,000 以上で一定 0.723 $\times 10^{-6}$ (Mann, Fatt)*	

注: Mann, Fatt は圧縮試験によつたもの, 筆者は引張試験による。
 C_b の測定は Mann, Fatt はジャケット内の溶液変化量測定による。筆者は縦, 横歪より(2)式より算定した。

* 文献 10) 参照

い, ややルーズな砂岩である。しかしこれもほぼ均質等方性と判断されたが, Goodman* より提供されたものであり, その詳細は不明である。Boise 砂岩については前記の Mann, Fatt によるもの, および筆者の測定結果から, その物理的性質を第1表に示しておく。

三軸試験に用いるような円筒形の岩石試料について応力と歪の関係を弾性論に考えて見る。いま試料の体積歪を Δ とすれば Δ は x, y, z 方向の歪 $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ によつて次のように表わされる。

$$\Delta = 3\varepsilon_m = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z \quad \dots\dots\dots (1)$$

また円筒形試料の軸方向の歪を ε_z , 半径方向の歪を ε_r とすれば上式は

$$\Delta = 2\varepsilon_r + \varepsilon_z \quad \dots\dots\dots (2)$$

となる。ここで ε_m は平均歪を示す。

この円筒形試料の応力と歪の関係を極座標を用いて示せば次のようである。

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_z &= \frac{\partial w}{\partial z}, \quad \varepsilon_r = \frac{\partial u}{\partial r}, \quad \varepsilon_\theta = \frac{u}{r} \\ \gamma_{rz} &= \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_z &= 2G \frac{\partial w}{\partial z} + \lambda \Delta \\ \sigma_r &= 2G \frac{\partial u}{\partial r} + \lambda \Delta \\ \sigma_\theta &= 2G \frac{u}{r} + \lambda \Delta \\ \tau_{rz} &= G \left(\frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで w, u は点 (z, r, θ) の z 軸, 動径に平行な弾性変位とし, γ_{rz} は z 軸に直角で動径に平行な剪断歪, τ_{rz} はこの方向の剪断応力, G および λ はそれぞれ弾性常数を示す。このとき

$$\Delta = \varepsilon_z + \varepsilon_r + \varepsilon_\theta = \varepsilon_z + 2\varepsilon_r \quad \dots\dots\dots (5)$$

(4), (5) 式から軸圧と封圧の差による差応力 σ_d は

$$\begin{aligned} \sigma_d &= \sigma_z - \sigma_r = 2G \left(\frac{\partial w}{\partial z} - \frac{\partial u}{\partial r} \right) \\ &= \frac{mE}{m+1} (\varepsilon_z - \varepsilon_r) \quad \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

$$\text{また } \sigma_z + \sigma_r + \sigma_\theta = (2G + 3\lambda) \cdot \Delta \quad \dots\dots\dots (7)$$

実際の岩石は粒子また碎片と基質または膠結物質で核質部を作り, その間に空隙が存在する。Boise 砂岩では粒子部分は長石, 石英からなりマトリックスはシリカ, 粘土, セリサイトで, 粒子部分56%, マトリックス部分44%からなっている。その間に包れる空隙は全体の26.5%であるから核質部は73.5%である。弾性範囲内での岩石の変形はこの核質部の弾性に左右される。この核物質の弾性はこれを構成する岩石の弾性ではなく, スプリングのバネ常数のようなものである。したがってこれに応じる各弾性常数を G', λ' として示す。この他岩石内の空隙が密閉されていて内部の流体が移動しえない場合は, 核質部の変形は空隙内の圧力にも左右される。空隙の変形量は空隙周辺の応力と空隙内圧力の差に比例し, 空隙変形と核物質の変形の合計が全変形となるので (4) 式は次のように示される。以上に示される諸弾性常数は粒子相互間の位置の移動などのような大きな変位が起らない範囲で適用されるもので, その範囲は岩石の固結程度等で異なってくる。筆者の行なつた実験では上記のことを満足しうることが, その結果より明らかである。ここで V_p は空隙容積を示す。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_z &= 2G' \varepsilon_z + \lambda' \Delta + \lambda'' \cdot \Delta V_p / V_p \\ \sigma_r &= 2G' \varepsilon_r + \lambda' \Delta + \lambda'' \cdot \Delta V_p / V_p \\ \sigma_\theta &= 2G' \varepsilon_\theta + \lambda' \Delta + \lambda'' \cdot \Delta V_p / V_p \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\therefore \sigma_z + \sigma_r + \sigma_\theta = (2G' + 3\lambda') \cdot \Delta + 3\lambda'' \cdot \Delta V_p / V_p \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここで Carpenter, Spencer²⁰⁾によつて示された実験から

$$C_p = \frac{1}{V_p} \left(\frac{\partial V_p}{\partial P_e} \right) p_i \quad \dots\dots\dots (10)$$

(10)式で C_p は空隙の圧縮率と呼ばれるもので, $1/\lambda''$ に対応する。また P_e は空隙周辺の核質部に働く応力とし, いずれの方向にも等しい値で, P_i は空隙内部圧力である。ここで λ'' は空隙の変形に関する常数である。したがって (8), (9) 式で

$$\lambda'' \Delta V_p / V_p = 1/C_p \cdot (dP_e - dP_i)$$

(8)式から(6)式になら

$$\sigma_d = 2G' (\varepsilon_z - \varepsilon_r) = \frac{m' \cdot E'}{m' + 1} (\varepsilon_z - \varepsilon_r) \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$\sigma_z + \sigma_r + \sigma_\theta = (2G' + 3\lambda') \cdot \Delta + \frac{3}{C_p} (dP_e - dP_i) \quad \dots\dots\dots (12)$$

* Assistant Prof. California University の応用地質

(3)(4)(5) 式から試料周辺の応力として $\sigma_z, \sigma_r, \sigma_\theta$ を考えると $\sigma_z + \sigma_r + \sigma_\theta = \sigma_z + 2\sigma_r = 3\sigma_m$ とすれば(12)式は次のようになる。

$$\sigma_m = \left(\frac{2}{3} G' + \lambda' \right) \Delta + \frac{1}{C_p} (dP_e - dP_i) \dots (13)$$

この実験では軸方向の応力と封圧の差を差応力と定めたので $\sigma_d = \sigma_z - \sigma_r$ すなわち(11)式の関係が成立する。

4. 封圧下における多孔質岩石の 応力と歪の測定結果

岩石とくに堆積岩の力学的性質はその堆積環境によってもまた著しく異なってくる。したがって多孔質物質として岩石を利用し、その特性を論じる場合はまず岩石が均質であること、次に等方性であることを主眼として岩石を選ばなければならない。前に掲げた Boise 砂岩, Do-

mingine 砂岩は二つの条件を満たしている。Boise 砂岩はすでに完全に固結した砂岩であるが、Domengine 砂岩はややルーズな砂岩である。したがって Domengine 砂岩は封圧の影響が容易に現われてくる。第3図は封圧 500[psig] のもとにおける破壊試験の結果である。第4図、第5図は封圧 200[psig] における繰返し試験の場合の縦歪、横歪と軸応力の関係を示す。第6図は封圧変化にもとづく弾性率の変化を示した。これらの結果から Domengine 砂岩は軸方向の差応力 1,000[psi] まではほぼ弾性変形を示すものと考えられ、この範囲内での弾性率は封圧が大きくなるに従って増大するような傾向を示す。これは前に述べた(8),(13)式より空隙の変形にもとづく、見掛け上の弾性率変化と理解される。したがって空隙の小さな岩石、また空隙内の圧力と空隙外の圧力が一定で平衡を保っている場合(封圧により空隙を形成する核構造の変位が起らない場合)は弾性範囲内では弾性率

第3図 封圧 500[psig] における Domengine 砂岩の破壊試験における歪と応力の関係

第4図 封圧 200[psig] のもとにおける Domengine 砂岩の繰返し圧縮試験における歪-応力曲線

第5図 封圧 200[psig] のもとにおける差応力と横歪

第6図 封圧変化による弾性率の変化(差応力、歪曲線)

第7図 Boise 砂岩の差応力、歪曲線

の変化はほとんど起らないものと考えて良い。その例証として Boise砂岩の場合を掲げて見る。この砂岩は Domengine 砂岩とほぼ同様な粒径の石英または長石よりなり、空隙率もほぼ等しい。この岩石の応力、歪曲線は第7図に示すようである。この図から、封圧を加えた試料に軸圧をかけた場合、試料中に油が浸入しても、しなくてもほとんどその弾性率に変化が現われず、また封圧の影響も少ない。したがって Domengine 砂岩のように封圧による弾性率の変化は空隙を形成する核構造が圧密によつて空隙容積を変化させると同時にその弾性を変化させるものと考えて良い。また第6図では軸方向、円周方向の歪を示したが、これによれば封圧50[psig]で0.23, 250[psig]で0.18のポアソン比を示し、封圧の増加でポアソン比は小さくなる。また第4図、第5図の繰返試験結果で、第5図のように、円周方向の機械的仕事が、軸方向のそれに比較して著しく大きい場合、試料は破壊に至らなくとも、粒子間の解膠が行なわれているものと考えられる。

5. 封圧下における空隙率と浸透率の変化について

封圧下における空隙率の変化については Van der Knaap¹¹⁾, Dobrynin¹²⁾らの研究がある。しかし地下の岩石については軸力(重力)による変形を考慮しなければならない。その関係については(8),(13)式に述べたようである。いま空隙内の流体の圧力を p とすれば

$$p = k\Delta + k' \frac{\Delta V_p}{V_p} \quad (14)$$

(9)式に(14)式の Δ を代入し

$$3\sigma_m = \sigma'_z + \sigma_r + \sigma_\theta = (2G' + 3\lambda') \cdot$$

$$\frac{(p - k' \cdot \Delta V_p / V_p)}{k} + 3\lambda'' \cdot \Delta V_p / V_p \quad (15)$$

$$\therefore [(2G' + 3\lambda')k' - 3k \cdot \lambda''] \Delta V_p / V_p = (2G' + 3\lambda') \cdot p - 3k \cdot \sigma_m \quad (16)$$

ここで $k = \lambda''$ だから(16)式は

$$[(2G' + 3\lambda')k' - 3k^2] \cdot \Delta V_p / V_p = (2G' + 3\lambda') \cdot p - 3k \cdot \sigma_m \quad (16')$$

一般に定常流動はダルシーの法則に従うので x 方向の流速を v_x とすれば

$$v_x = -\frac{\kappa}{\mu} \frac{dp}{dx} \quad (17)$$

この式をガスのような流体に適用すれば前提の計算式を導くことができる。また非定常流動では流体の流れの割合は岩石の空隙率増加の割合に等しいと考えられるから非圧縮性流体について

$$\frac{\partial(\Delta V_p / V_p)}{\partial t} = \frac{\kappa}{\mu} V^2 p \quad (18)$$

一定の深度で σ_m が一定とすれば(16)',(18)式から

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\kappa}{\mu} \cdot \frac{(2G' + 3\lambda')k' - 3k^2}{2G' + 3\lambda'} V^2 p \quad (19)$$

ここで V はラプラス変換子。圧縮性流体についても平均流量を定めれば上式が用いられる。(19)式を用いて岩石の見掛けの弾性常数と空隙の変形に関する常数を用いて非定常、定常の場合の流体の運動方程式を解くことができる。

実験では岩石の変形、空隙率の変化、浸透率の変化を測定した。その結果は第8図に封圧のみを変化させた場合、第9図に封圧500[psig]をかけ軸力4,500[lbs]ま

第8図 封圧による空隙、浸透率、歪の変化

第9図 封圧500[psig]のもとにおける空隙、浸透率、歪の変化

第2表 封圧、軸応力の変化による空隙率、浸透率の変化

封 圧 (psig)	軸 応 力 (psi)	空隙率 ϕ (%)	$\Delta\phi/\phi$ (%)	浸 透 率 r (md)	$\frac{dr}{r}$ (%)
0	0	26.8		1,080	
500	0	26.2	2.2	990	8.3
1,000	0	26.0	3.1	790	28.8
1,500	0	25.9	3.3	737	31.6
2,000	0	25.2	4.0	718	32.4
500	0	26.4		990	
500	1,000	25.9	1.1	845	14.6
500	1,500	25.9	1.1	815	17.7
500	2,500	25.8	1.5	762	23.0
500	3,500	25.8	1.5	677	29.6
500	4,500	25.7	1.7	670	32.3
1,500	0	25.9		737	
1,500	500	25.9	0	563	16.8
1,500	1,500	25.8	0.56	558	24.3
1,500	2,500	25.8	0.56	543	26.3
1,500	3,500	25.7	0.93	536	27.2

で変化させた時の空隙容積と浸透率、歪の変化を図示した。また第2表に封圧、差応力と空隙変化率、浸透率変化率を表示した。これらの結果について見ると空隙率の変化はほぼ軸応力に比例して変化するが、封圧による変化の方が大きく、一定値以上の封圧が加われば、もはや空隙の変化が軸力によつては現れない限界値がある。もちろんこの場合、軸力と封圧は岩石が流動もしくは破壊を起さないような平衡を保っている場合である。このような場合、前記のように空隙圧が問題になるが、ここでは1気圧に保たれているとする。しかしこのような場合でも浸透率は割合大きな変化を遂げる。とくに軸力に応じて変化する。この実験では空隙容積に対する測定精度が、これらのことを定量的に論ずるまでに至っていない。そこで、測定の範囲では、周辺の封圧、軸圧のいずれにもほぼ比例するような結果をえた。

6. 結 び

以上の結果を経括して、一定の粒子群よりなる堆積岩はその深度に応ずる封圧を受け一定限界まで粒子間の結合状態を変化させないで変形する。この範囲での変形は岩石を形成する物質の弾性または塑性変形、空隙の変形の和として表わされる。後者は空隙を形成する核構造の変形によるので、空隙内の圧力と空隙周辺の圧力差によ

る。これら空隙がある限界まで圧密され、その上に軸力が働く時、これは岩石の変形のみが起り空隙率の減少は余り起らない。しかしこの段階で浸透率はかなり変化する。筆者らの実験は大体弾性範囲内で行なわれたものであるから地質学的な興味は少ない。したがって今後地殻変動などを考慮に入れ、堆積岩の質的变化をこの方面から追求することは価値があると思う。

謝 辞

本研究は Berkeley におけるカリフォルニア大学石油工学科研究室で行なつたもので、本教室の I. Fatt 教授、W. H. Somerton 教授の指導と協力に深謝するとともに実験の協力をいただいた大学院学生 E. Durrer、W. Bernhard 君に感謝する。

文 献

- 1) 林, 山崎, 中野: 岩石の三軸圧縮試験について, 鉱業会誌, 79巻, 906号, 昭和38年12月, 1012~1015頁
- 2) 山崎豊彦: 鉱業会誌 81巻, 922号, 昭和40年3月増刊, 141~142頁
- 3) Griggs, D. T.: Deformation of Rocks under High Confining Pressure. Jour. Geol., Vol. 44, 1936, pp. 541~577.
- 4) Higgs, D. V., Handin, J.: Experimental Deformation of Dolomite Single Crystals, Bull. Geol. Soc. Amer., Vol. 70, 1959, pp. 245~278
- 5) 堀部・小林: 三軸圧縮下における夾炭層岩石の物理的性質, 鉱業会誌, 74巻, 837号, 昭和33年3月, 142~146頁
- 6) 西原・平松: 岩石の三軸試験, 鉱業会誌, 80巻, 908号, 昭和39年2月, 90~94頁
- 7) K. Mogi: Deformation and Fracture of Rock under Confining Pressure(1). Compression Tests on Dry Rock Sample, Bull. Earthquake Research. Inst. Vol. 42, 1964, pp. 491~514.
- 8) Handin, J., Hager, R. V., Friedman, J. M., and Feather, J. N.: Experimental Deformation of Sedimentary Rock under Confining Pressure: Pore Pressure Tests, Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol., Vol. 47, No. 5, 1963, 717~755
- 9) Gray, H., Fatt, I., Bergamini G.: The Effect of Stress on Permeability of Sandstone Cores, Soc. Petrol. Eng. Jour. June, 1963, pp. 95~100
- 10) Mann, R. L. and Fatt, I.: Effect of Pore Fluids on the Elastic Properties of Sandstone, Geophysics, Vol. 25, No. 2, April, 1960, pp. 433~444
- 11) W. van der Knaap: Petroleum Trans. AIME, Vol. 216 p. 129, 1959
- 12) V. M. Dobrynin: Soc. Petroleum Engi. Jour. Dec. 1962

EEC (欧州経済委員会) のエネルギー消費傾向

現在の EEC におけるエネルギー消費量の増加は、ほとんど石油と天然ガスに依存している。1965年の消費市場で原油が石炭に取って替ると予想され、石油と天然ガスの総計消費量が石炭と褐炭のそれよりも上回るものと思われる。1963年の予想では1965年のエネルギー消費量は5億7,000万t(石炭換算)、1970年は7億tであつたが、実際にはこれを上回っており、このままの傾向で欧州経済が伸びて行けば1970年以前に7億tに達するとと思われる。

	1963	1964	1965
	(石炭換算百万t)		
石 炭	254 (45%)	243 (42%)	235 (39%)
褐 炭	37 (7)	38 (7)	39 (7)
石 油	207 (37)	238 (41)	264 (43)
天然ガス	19 (3)	20 (3)	23 (4)
電 力	44 (8)	40 (7)	45 (7)
計	561 (100)	580 (100)	607 (100)

(注 1964年は確定量, 1965年は予想)

提供 European Community]

(P. D. LAVILLEON: World Oil, Vol 36 No. 6 1965, p. 30~31 より)

(松尾弘貴)