夾炭層岩石の滲透性と膠結物質の膨潤性について*

正 会 員 中 野 実**
 正 会 員 遠 藤 源 助***
 正 会 員 鞠 子 正***

Hydraulic and Mechanical Properties of Rocks in Coal Measures
 (Permeability of Rocks in Coal Measures and Swelling Effects of Clay Minerals as Binding Materials of These Rocks.)

Minoru NAKANO, Gensuke ENDO and Tadashi MARIKO

The permeability of rocks has a decisive effect on the productivity and safety in coal mines such as application of hydraulic mining or gas drainage.

In this experiments, void ratio and grain size characteristics of various sedimentary rocks which will be controlling factors of permeability are investigated. Also, mineralogical composition of binding materials of sedimentary rocks are affirmed by aid of X-ray analysis and multiple differential thermal analysis.

From the results of this experiments following facts are found;

- (1) Permeability depends to a large extent on the void ratio.
- (2) Swelling rate changes by the amount of montmorillonite content in clay minerals which will, also, affect the permeability.

1. 緒 言

夾炭層岩石に対する流体滲透性の大小は、炭鉱におけるガス抜き、防排水対策等に影響するところが少なくないと考えられ、これに関しは、昭和34年秋日本鉱業会熊本大会における東大伊木教授の発表のほか、いくつかの実験結果が報告されている。筆者らもかねてから粒度分布と孔隙率、滲透率との関係、岩石中の膠結物質の鉱物組成と膨潤性との関係等について実験を進めてきたので、今回は主として太平洋夾炭層岩石、宇部夾炭層岩石試料について行つた結果を報告する。

夾炭層岩石に対する流体の滲透率は、岩石の有効孔隙率に密接に関連し、したがって滲透率を支配する物理的な要素としては、粒径、充填物の性状、粒子形状、粒度分布、岩石の固結度等が考えられる。しかしこれらのすべてについての数量的な表現ははなはだ困難であるので、まず試料の粒度分布と孔隙率の測定を行い、これらと滲透率との関係を検討した。つぎに膠結物質については、その膨潤性を支配するものが粘土鉱物の種類、含有量にあることがほぼ予察されたので、試料について X 線回折、示差熱分析を行うとともに膨潤性との関係を確かめた。

2. 試料の粒度分布と孔隙率

2.1 無衝撃破砕法

岩石の粒度分布を測定する場合には、これを構成している各粒子を破壊することなく、なるべく粒子の原形のまま分離することが望ましい。この目的に沿うために筆者らはつぎの方法により、岩石構成粒子を互いに分離させることができた。この方法は、試料を径 0.5~2.0cm の大きさに小割し、第1図のように密閉容器に入れ、真空ポンプを長時間運転して、岩石の空隙内の空気を排出し、これに気激に水を注入した後、水中に漬けたまま放置し、この操作を数回繰返すことにより、頁岩を除いたすべての試料は崩れ易い状態となり、ことに砂岩脈を完全に崩壊した。これは空隙内に圧入された水が岩石の結合力を弱め、また空隙中に充たされた水が膠結物質中に滲透し、凝結している膠結物質を膨潤させ、水溶性化学

第1図 岩石真空破砕装置

* 昭和35年4月18日受理

** 工博 早稲田大学教授 鉱山学教室

*** 早稲田大学助手 同上

第2図 無衝撃破砕法により完全分離した粒子（試料 No. 3 天寧礫岩 28~48mesh）写真中のスケールは 0.5mm

沈殿物を溶解させる結果と考えられる。第2,3図にこの方法により分離したものと、鉄乳鉢によつて破砕したものとは比較して示した。上述の方法のほかに 高压注入法、また場合によっては、酸またはアルカリ溶液を注入する方法を試み好結果を得た。このほか、含水試料の冷凍法も利用し得るものと考えられる。

2.2 粒度分布

無衝撃破砕法によつて得た試料の粒度分析の結果を第1表に示す。この粒度分布は、岩石試料に対する肉眼的特徴および顕微鏡観察の結果とよく一致した。この場合—200mesh の粒子は、主として粘土物質からなり、粗粒子の間に充填し、岩石を膠結させていた成分である。（この組成については後述する。）

第1表 粒度分布（重量百分率）と孔隙率（容量百分率）

試料 mesh	No. 1 本層下10m 粗粒砂岩	No. 2 本層下 細粒砂岩	No. 3 天寧 礫岩	No. 4 上層上 礫岩	No. 5 砂岩脈
+2	—	—	4.06	—	—
2~10	—	—	31.37	—	—
10~28	2.20	—	30.36	—	—
28~65	32.11	3.89	11.73	—	—
65~100	31.68	23.57	5.60	—	2.34
100~150	8.88	30.29	2.99	—	22.71
150~200	7.89	11.94	2.04	—	7.16
—200	14.87	27.64	7.15	94.81	61.84
溶解分と フイル損失	2.38	2.67	4.36	5.19	5.95
孔隙率 (水)	8.1	14.3~ 19.8	—	1.4	—
孔隙率 (人工海水)	8.7	15.2~ 20.1	—	2.2	—

2.3 孔隙率

岩石の有効孔隙率は、岩石の外部まで互いに連結している孔隙体積の全体積に対する比と考えられるが、これをつぎのような方法で測定した。すなわち試料を長方形に切り、体積・重量を測定したのち、密閉容器中において真空ポンプにより孔隙中の空気を充分除去し、つぎに徐々に水を注ぎ、孔隙中に水が滲透しおわたつた時とり出して重量の増加分を測定する。この含水量（体積）を岩石の体積で除して孔隙率を求めた。また水のかわりに人工海水*

* 水溶液 1kg 中に NaCl 23.447g, MgCl₂ 4.98g, Na₂SO₄ 3.917g, CaCl₂ 1.102g, KCl 0.664g を含む。

第3図 鉄乳鉢によりなるべく力を強くせずに碎いて分離した粒子（試料 No. 3 天寧礫岩 28~48mesh）

を用いて滲透率を求めた。実験によつて求めた孔隙率を第1表に併記した。このうち No. 3, No. 5 に対する孔隙率は本実験方法では試料にしばしば亀裂を生じその値にバラツキが甚だしかつたため除外した。

3. 滲透率の測定

3.1 滲透率について

堆積岩には一般にある程度の孔隙が存在し、水压を加えることによつて水は透過する。この透過の程度を表わすために滲透率を用いている。流体の滲透率 K は、Darcy の法則によれば

$$K = \frac{\eta L Q}{A P} \dots \dots \dots (1)$$

ただし、 Q ：単位時間の流量 L ：試料の長さ η ：流体粘性係数 A ：試料断面積 P ：試料の両端の圧力差（ $P_1 - P_2$ ）

一般に岩石の気体滲透率は液体のそれに比較して大きな値となることが考えられ、この主なる原因は粘性係数の相異に基づくものである。また、その他の原因としては、流体の迂り現象も考えられる。これは水及び海水などと比較して、空気のように極めて粘性の低い流体では、毛細管の中心部における流動速度は、理論式により導き出される速度より早いものになり、管壁と管壁に近い所の流れとの間に迂り現象を生じ、流量が大となる結果を生じる。気体滲透率 K_a と液体滲透率 K_l との間には次の関係があることが福田、河添²⁾によつて報告されている。

$$K_a = K_l \left(1 + \frac{4c\lambda_m^2}{r} \right)$$

ただし λ_m ： P_m なる測定圧における気体の平均自由行路 r ：平均毛細管半径 c ：常数

滲透率の計算には以上を参考として行つた。

3.2 測定方法と結果

試料はボール盤によつて直径 3.5cm、厚さ 2cm の円筒型に切り、これを 1/4in の鉄管に空隙のないようにア

第2表 滲透率測定結果(単位 Darcy)

試料番号	流体	圧力 kg/cm ²	No. 1 粗粒砂岩		No. 2 細粒砂岩		No. 3 礫 岩		No. 4 頁 岩		No. 5 砂岩脈	
			平 行	垂 直	平 行	垂 直	平 行	垂 直	平 行	垂 直	平 行	垂 直
窒 素	1	1.21×10 ⁻³	—	—	3.30×10 ⁻²	1.54×10 ⁻²	—	3.57×10 ⁻⁴	—	—	3.58×10 ⁻⁵	—
	2	1.40×10 ⁻³	—	—	2.83×10 ⁻²	1.99×10 ⁻²	—	3.08×10 ⁻⁴	—	—	4.69×10 ⁻⁵	0.94×10 ⁻⁵
	3	1.45×10 ⁻³	3.4×10 ⁻⁴	—	—	1.90×10 ⁻²	—	3.36×10 ⁻⁴	0.78×10 ⁻⁵	0.7×10 ⁻⁶	3.86×10 ⁻⁵	1.43×10 ⁻⁵
	4	1.70×10 ⁻³	5.4×10 ⁻⁴	—	—	2.00×10 ⁻²	—	3.95×10 ⁻⁴	—	—	3.83×10 ⁻⁵	1.11×10 ⁻⁵
	5	1.62×10 ⁻³	5.6×10 ⁻⁴	—	—	2.03×10 ⁻²	—	3.29×10 ⁻⁴	0.82×10 ⁻⁵	0.9×10 ⁻⁶	3.40×10 ⁻⁵	0.97×10 ⁻⁵
水	5	2.2×10 ⁻⁵	1.6×10 ⁻⁵	—	2.52×10 ⁻³	0.98×10 ⁻³	—	—	—	—	—	—
	10	7.7×10 ⁻⁵	1.1×10 ⁻⁵	—	2.42×10 ⁻³	0.94×10 ⁻³	—	—	—	—	—	—
	15	0.8×10 ⁻⁵	0.9×10 ⁻⁵	—	2.35×10 ⁻³	1.05×10 ⁻³	—	2.4×10 ⁻⁵	0.87×10 ⁻⁷	—	9.73×10 ⁻⁷	3.34×10 ⁻⁷
	20	0.8×10 ⁻⁵	0.8×10 ⁻⁵	—	2.40×10 ⁻³	0.81×10 ⁻³	—	8.3×10 ⁻⁵	0.90×10 ⁻⁷	0.7×10 ⁻⁸	7.75×10 ⁻⁷	3.08×10 ⁻⁷
人 工 海 水	5	1.14×10 ⁻⁴	1.8×10 ⁻⁵	—	2.38×10 ⁻³	0.69×10 ⁻³	—	—	—	—	—	—
	10	0.83×10 ⁻⁴	0.8×10 ⁻⁵	—	2.26×10 ⁻³	0.65×10 ⁻³	—	—	—	—	—	—
	15	0.82×10 ⁻⁴	1.8×10 ⁻⁵	—	2.44×10 ⁻³	0.68×10 ⁻³	—	4.4×10 ⁻⁵	3.9×10 ⁻⁷	1.2×10 ⁻⁷	1.10×10 ⁻⁶	5.20×10 ⁻⁷
	20	0.76×10 ⁻⁴	2.8×10 ⁻⁵	—	2.29×10 ⁻³	0.65×10 ⁻³	—	7.0×10 ⁻⁵	3.9×10 ⁻⁷	1.1×10 ⁻⁷	1.21×10 ⁻⁶	—

第4図
滲透率測定装置

ラルダイト(接着剤)を使用して密着させた*。これを第4図に示す透過試験機に取付けて実験を行なった。滲透流体が異なる場合に、試料の滲透率に如何に変化があるかを見るために窒素ガス、水、人工海水の3種について、また層理面に平行方向と垂直方向との両者についての相異を見るためそれぞれの測定を行なった。この場合、窒素ガスについては、1,2,3,4,5kg/cm²の各圧力についての流量を水置換法によって求め、水及び人工海水については、5,10,15,20kg/cm²のおおのについて求めた。

3.3 滲透率の方向性

第2表によると、滲透流体および試料のいずれにおいても、堆積面に平行方向の滲透率は、直角方向に対するものよりも大きく、1.2倍から13倍の値を示している。これは岩石の堆積面に沿って層理が発達し、孔隙の連続性もその方向に大きいことによるものと考えられる。この傾向は、とくに層理面の発達する頁岩において顕著であることが注目されるところである。

3.4 滲透流体の相違が滲透率に及ぼす影響

各試料について、窒素ガス、水、人工海水による測定

* 密着の程度を検するため、あらかじめ金属試料を用いてアラダイト接着を行ない透過の有無を試験した。これにより試験気圧及び水圧においては完全な密着を示した。

結果を見ると、窒素ガスに対する滲透率が極めて大きく、水が最も小さい。この比率は、頁岩、砂岩脈などのように膠結物質を多量に含む試料の場合とくに大きく、また同一試料でも層理面に対する方向によって異なる場合がある。

水と人工海水とについて滲透率を比較すると、一般に後者の滲透率は大きく、とくに窒素ガスと水に対する滲透率の差の大きいものほどこの傾向が強い。この理由は岩石の一部を構成している粘土鉱物その他の膠結物質の膨潤または収縮に基づく孔隙の変化の程度の異なるためと考えられる。

3.5 粒度分布および孔隙率と滲透率との関係

第1表および第2表から明かなように、試料の粒度分布と滲透率とは必ずしも対応関係にない。たとえば粗粒砂岩よりも、粒度の細かい細粒砂岩の方が滲透率が10倍も大きく表われている。これは、滲透率を決定する他の要素の影響が大きいため、実験結果によれば、粒度分布のみでは岩石の滲透率を考えることができないことを示していると見られる。これに対して孔隙率と滲透率との関係は明らかであつて、孔隙率が大となれば滲透率は増加する傾向が認められる。ただし、No. 5の試料は孔隙率が14.9%と相当大きいにもかかわらず、滲透率が小さい。この理由は、測定に際し水を使用したので膨潤の影響が現われたのではないかと考えられる。

4. 膠結物質の鉱物組成

4.1 試料調整

膨潤の原因追求の手がかりを得るために、岩石の膠結物質についてその鉱物組成を吟味してみた。方法はX線分析と示差熱分析を採用し、試料は前述の太平洋炭鉱の春採炭層中の岩石および宇部炭層中の岩石計12試料とした。なお、ここにいる膠結物質とは、便宜上原試料を無衝撃破砕法によって破砕した後、蒸留水中でフルイ分けした—200meshのもの、あるいは水簸法または遠心分離法によって非粘土鉱物を除去したもので、これを低

温乾溜し、デシケータに保存したものを測定試料とした。

試料調整法及び実験項目を第3表に示した。

第3表 試料表

試料番号	原試料	試料調整法	実験項目
No. 1	宇部四紀層	原試料を真空破砕 -200mesh にフルイ分け	X線, 示差熱, 吸水率
No. 1'	同上	No. 1 を 6(NaPO ₃) ₃ % 溶液中に分散, 遠心分離 (2,000rpm 3min.) した懸濁物	X線, 吸水率
No. 2	宇部夾炭層中粒砂岩 (A)	No. 1 と同様処理	X線, 示差熱, 吸水率
No. 2'	同上	No. 2 を 6(NaPO ₃) ₃ % 溶液中に分散, 水鏡分離, これを No. 1' と同様に処理した際の沈降物	X線, 吸水率
No. 2''	同上	No. 2' の際の懸濁物	同上
No. 3	宇部夾炭層中粒砂岩 (B)	原試料を No. 1 と同様に処理	X線, 示差熱, 吸水率
No. 4	宇部夾炭層頁岩 (A)	同上	同上
No. 5	宇部夾炭層砂岩 (A)	同上	同上
No. 5'	同上	No. 5 を No. 2' と同様に処理	X線, 吸水率
No. 5''	同上	No. 5 を No. 2' と同様に処理した際の懸濁物	同上
No. 6	宇部夾炭層粗粒砂岩 (B)	原試料を No. 1 と同様処理	X線, 示差熱, 吸水率
No. 7	宇部夾炭層頁岩 (B)	同上	同上
No. 8	同上 (C)	同上	同上
No. 8'	同上	原試料を No. 2' と同様処理	X線, 吸水率
No. 8''	同上	No. 8 を No. 2' と同様処理した際の懸濁物	同上
No. 9	宇部夾炭層頁岩 (D)	原試料を No. 1 と同様処理	X線, 示差熱, 吸水率
No. 10	太平洋本層砂岩	同上	同上
No. 11	太平洋本層下細粒砂岩	同上	同上
No. 12	太平洋上層上頁岩	同上	同上

* モンモリロナイト ● イライト
○ ハロイサイト ● 石英
● カオリナイト ▲ 長石類

第5図 X線回折線図

4.2 X線分析

第3表に示した全試料のX線回折線図* を第5図に示した。試料の回折線は No. 10 を除いて、何れも幅広く不鮮明で強度も小である。これは坂本等²⁾の研究においても認められたことで、これらの粘土鉱物の結晶度が低いことを示している。No. 10 は太平洋の砂岩脈より分離した試料で、カオリナイト、モンモリロナイトよりな

第4表 試料の鉱物組成と吸水率 (カッコは少量存在 No.13,14,15は比較試料)

試料番号	粘土鉱物	非粘土鉱物	吸水率 (蒸溜水)	吸水率 (人工海水)
No. 1	{ハロイサイト イライト	石英, 長石類	45.0%	12.0%
No. 1'	{ハロイサイト モンモリロナイト	(石英)	49.0	—
No. 2	{イライト モンモリロナイト	石英, 長石類	38.5	29.0
No. 2'	{モンモリロナイト モンモリロナイト	石英, 長石類	43.5	—
No. 2''	{モンモリロナイト イライト	石英, 長石類	76.5	—
No. 3	{ハロイサイト モンモリロナイト	石英, 長石類	26.0	22.5
No. 4	{ハロイサイト モンモリロナイト	石英, 長石類, 褐鉄鉱	38.4	9.3
No. 5	{モンモリロナイト モンモリロナイト	石英, 長石類, 褐鉄鉱	32.6	12.7
No. 5'	{モンモリロナイト モンモリロナイト	石英, 長石類, 褐鉄鉱	59.0	—
No. 5''	{モンモリロナイト モンモリロナイト	(石英) (長石類) (褐鉄鉱)	66.3	—
No. 6	{モンモリロナイト イライト	石英, 長石類, 褐鉄鉱	20.1	3.3
No. 7	{モンモリロナイト ハロイサイト	石英, 長石類	39.8	12.3
No. 8	{イライト モンモリロナイト	石英, 長石類	29.5	19.0
No. 8'	{モンモリロナイト イライト	石英, 長石類	41.5	—
No. 8''	{モンモリロナイト イライト	(石英)	69.5	—
No. 9	{ハロイサイト モンモリロナイト	石英, 長石類	34.4	15.5
No. 10	{カオリナイト モンモリロナイト	石英, 長石類	38.4	15.8
No. 11	{ハロイサイト モンモリロナイト	石英, 長石類	28.9	7.7
No. 12	{ハロイサイト モンモリロナイト	石英, 長石類	32.9	15.2
No. 13	モンモリロナイト	—	83.0	60.0
No. 14	イライト	—	29.0	7.0
No. 15	—	石英	26.0	—

Q 100 200 300 400 500 600 700 800 900 1000

第7図 吸水率測定装置

第6図 示差熱分析曲線

* 実験はすべて理化学電機ガイガーフレックスを使用し、実験条件は次の通り。Cu K α , 30kV, 15mA, Div. Slit=1°, Rec. Slit=1.0 $\approx$ 0.4mm, Scan. speed=2°/min, Ratemeter 8, Multiplier 1, Timeconst. 1.

り、その結晶度は比較的よい。X線回折より粘土鉱物としてモンモリロナイト、ハロイサイト、イライト、カオリナイト等が認められ、非粘土鉱物としては石英および長石類が固定された。石英および長石類は水簸により一部除去され、さらに遠心分離機によつてほとんど除去されている。

4.3 示差熱分析

—200mesh 試料のうち、白色の No. 1, 2, 9 は水簸により沈降物を除去したのち示差熱分析を行つたが、他の試料は灰〜灰黒色を呈し、有機物の混在が考えられたため、あらかじめ過酸化水素にて処理したのち示差熱分析の試料とした。測定結果は第6図のようである。示差熱曲線を観察するに、200° から 450° に亘る緩やかな発熱反応を示すものがあり、これは、なお、有機物の存在を示すものであると考えられるが、粘土鉱物の鑑定には大きな支障はない。示差熱分析によつて、X線分析から同定された鉱物のほかに褐鉄鉱を含むものがあることが確かめられた。X線分析、示差熱分析の結果を総合する⁹⁾と各試料の鉱物組成は第4表のようになる。

5. 吸収率の測定

5.1 実験方法

前述のように、膠結物質中には粘土鉱物のほかに石英、長石等の碎屑鉱物が含まれている。これらの鉱物の種類と含有量および滲透液中の無機質イオンが、膠結物質の膨潤性* におよぼす影響を知るため、第3表に示した12試料とモンモリロナイト、イライト、石英の各単一鉱物からなる試料について、蒸溜水、人工海水に対する吸水率の測定を行なつた。

粘土鉱物の膨潤性を測定する方法としては(1)吸水量を秤量する重量法、(2)整形した試料を水中に投入したときの容量変化を測定する容量法、(3) Freundlich 法⁴⁾がある。本実験においては吸水速度、膨潤状態を簡単に観察し得る利点を持つ(3)の方法を採用した。

装置の概要は第7図に示すようなU字管の一端にガラスフィルタを有する器を連結し、他端はガラスフィルタと同一水平面に目盛付毛細管を取付けたものである。測定方法は、蒸溜水または食塩水をガラスフィルタの下面に接するまで注入し、このときの毛細管内の水柱の先端の位置を目盛で読み取る。つぎにガラスフィルタ上に試料 0.1g を散布し、このときからの時間および水柱の先端の移動量を測定する。測定結果から次式によつて吸水率を求めた。

* 粘土鉱物の膨潤は水または無機イオン、有機化合物等が毛細管現象で鉱物粒子の間に侵入し、更に粘土鉱物の強い結合力により結晶格子の間にまで侵入するためと推定されている。

** 石英の吸水は表面吸着によるものであると考えられ、その他の粘土鉱物の場合は本質的に異なるものと考えられる。

第8図 吸水曲線(蒸溜水)

第9図 吸水曲線(人工海水)

$$M = \frac{W}{S+W} \times 100$$

ただし、M: 吸水率、S: 試料重量、W: 吸水重量

5.2 蒸溜水に対する吸水率

蒸溜水に対する吸水率の測定結果から得られた吸水曲線の代表的な例を第8図に示す。図中の No. 15 は比較のために行つた石英の吸水曲線**で、始めの1min以内に急激に増大し、その後は一定値を示し、その値も他の試料に比較して最小である。

No. 13, No. 2' はモンモリロナイト、No. 1' はハロイサイト、No. 14 はイライトそれぞれほとんど単一の粘土鉱物からなる試料の吸水曲線を示すが、何れも吸水率は初めの5~10minの間に急激に増大し、その後は徐々に飽和値に達する。この場合、モンモリロナイト、ハロイサイトはイライトに比較して飽和に達する速度が遅い。吸水率はモンモリロナイトが最大で、ハロイサイト、イライトの順に低くなっている。モンモリロナイトは、その交換性塩基の種類によつて吸水性が異なると云われているが、この点について今回は確めることができなかった。

No. 1, No. 2, No. 8 は粘土鉱物のほかに石英、長石などの碎屑鉱物が混入しているため、吸水曲線の形にもその影響が示されて、純粋なものより曲線が急上昇する傾向を示し、飽和に達したときの吸水率も低下している。

吸水率が飽和値に達する速さは、各試料によつて異なるが、測定開始後30~40min 後には、いずれの場合も吸水率は、ほぼ一定値を示すので、40min 後の吸水率を飽

和吸水率として第4表に示した。

5.3 無機質イオンが吸水率に及ぼす影響

膨潤性の著しい粘土は、水中において一般に安定な懸濁液を作り、これに電解質を加えると凝固現象を起すことは、すでに知られているところである。滲透流体中のイオンの作用によつて、岩石中の膠結物質が凝固するか否かを検するため人工海水によつて、吸水率の測定を行った。第9図に代表的な測定結果を示す。また40min 後における吸水率を飽和吸水率として第2表に示した。この結果によると、人工海水に対する吸水率は蒸留水の場合に比較しいずれも減少し、吸水曲線の形も変化している。

5.4 膠結物質中のモンモリロナイトの量と吸水率

前述のようにモンモリロナイトの吸水率は他の組成鉱物に比較して、きわめて大きい。したがつてモンモリロナイトの含む膠結物質の吸水率はモンモリロナイトの量によつてほとんど決定されるのではないかと考えられる。

膠結物質中のモンモリロナイトを正確に定量することは困難であるが、X線回折線図から次のようにモンモリロナイトの相対的な量を数値で示し得る。すなわち、モンモリロナイトの(001)面の回折線強度を I_m 、石英の最強線である(101)面の回折線強度を I_q としたとき、 I_m/I_q をもつてモンモリロナイトの相対量を示す値とした。

I_m/I_q と吸水率との関係は第10図に示すように、 I_m/I_q の増加とともに吸水率も直線的に増加することが判る。

6. 実験結果の総括

- (1) 真空無衝撃破砕法によると、各粒子をほとんど原形のまま分離することが可能である。したがつて本法によれば岩石の本質的な組成を測定することができる。
- (2) 粒度分布と滲透率とは必ずしも対応関係がなく、したがつて粒度分布のみで岩石の滲透率を考えることはできない。

(3) 一部の例外を除いて、孔隙率が大となるにしたがい滲透率は増加する傾向にある。

(4) 試料の滲透率は窒素ガスによる場合最大 3.3×10^{-2} darcy, 最小 0.7×10^{-6} darcy, 水による場合最大 2.52×10^{-3} darcy, 最小 0.7×10^{-8} darcy, 人工海水による場合最大 2.38×10^{-3} darcy, 最小 1.1×10^{-7} darcy の値を示した。

(5) 岩石の層理面に平行な方向の滲透率は、直角な方向の滲透率よりも大きく1.2~13倍の値を示した。

(6) 窒素ガスによる滲透率は、水、人工海水による滲透率より極めて大きく、数倍乃至数十倍に達する。また人工海水の滲透率は、水の場合より、やや大きくなる傾向にある。

(7) 膠結物質中には、ハロイサイト、イライト、モンモリロナイト、カオリナイトなどの粘土鉱物と、石英、長石類などの碎屑鉱物および褐鉄鉱、有機物質が認められた。

(8) 砂岩脈中の粘土鉱物を除いて、膠結物質中の粘土鉱物の結晶度は低い。

(9) 蒸留水に対する吸水率は、モンモリロナイトが最大でハロイサイト、イライトの順で小となる。モンモリロナイトは、その層格子間隙に多量の結晶水と結合水を保有することが出来て、著しい膨潤性を示すものと考えられる。

(10) 人工海水に対する膠結物質の吸水率は、蒸留水に対する場合より低下し、吸水曲線も変化する。これは溶液中の陽イオンが陰性膠質と見做される膠結物質粒子の電荷を中和し、凝固される結果、水の吸着量が小となることと、粘土鉱物とくにモンモリロナイトの層格子間隙が小となつて、これに保有される水量が減少するためではないかと考えられる。

(11) 膠結物質中の粘土鉱物は、温度の上昇に伴つて種々変化する性質を有するから、夾炭層岩石の滲透率も、これに対応して当然変化することが予想される。

以上のように、堆積岩の滲透率及び膨潤性については、影響する因子が複雑多岐であり、また対象とする岩石が地域的な環境によつて何れも異なり、成分、鉱物組成等が同一のものは存在しないと考えられるから、普遍的、定量的な結論を求めることは困難である。しかし上記各論の基礎となつているのは、堆積岩中の礫岩、砂岩、頁岩等のほぼ代表的な試料に基づき実測値であるから、特殊な場合を除き定性的には他の地域の岩石に対してもあてはめることが可能と思われる。

この研究に当つては、本学機械工学科の難波教授、応用化学科の宇野教授、大坪教授、また東京教育大学の須藤教授、太平洋炭鉱の吉田恕、永淵正敏、豊島経世、佐藤進の諸氏、宇部興産の岩沢栄氏、ブリヂストンの岡田

正氏等より多大の御助言と御援助を戴いた。ここに厚く御礼申し上げる次第である。なお、本研究に必要な研究費は昭和31年度、昭和33年度及び昭和34年度の文部省科学研究費によつた。

参 考 文 献

- 1) 藤井清光・松本仙一：滲透率に対する 膠結物質の影響（石油技協誌 Vol. 19, No. 6）; NOWAK, T. J., KRUEGER, R. F.: The Effect of Mud Filtrates and Mud Particles upon the Permeabilities of Cores (World Oil, July 1 1951); 中野実・遠藤源助：地層又は

水を通ず断層、裂乎中の水の流動に関する研究（学振研究報告 1954, 1955）; 中野実・遠藤源助：水成岩々石の透水性（早大鉱山学研報 Vol. 16 No. 68~69）

- 2) 福田義民・阿添邦太郎：粘性流体のじり現象について（東大技研報 Vol. 6 No. 6）

- 3) 坂本陸泰・白水晴雄・阿部良之助：夾炭層の構成鉱物について（日本鉱業誌 Vol. 74 No. 12）

- 4) FREUNDLICH, H., SCHMIDT, O., LINDAU, G.: Kolloid Berhefte (1932)その他は GRIM, R. E.: Clay Mineralogy (1953); MACKENZIE, R. C., Differential Thermal Investigation of Clays (1957)を参考とした。

ソ連の慣性コーンクラッシャ

ソ連のメカノープル研究所（Институт Механобр）は“慣性コーンクラッシャ”（Инерционная Бро-бчлка）という新しい破碎機をつくり出した。

このクラッシャの構造は第1図に示すように、コーンが普通のコーンクラッシャのように、偏心軸によつて運動するのではなく、不平衡錘振動機によつて動かされる点に特色がある。クラッシャのフレーム2は、上部の梁7からスプリングおよびロッドを介して、吊下げてある。一方クラッシング・ヘッド（コーン）1は、フレーム2の上部にある玉継手（ball-and-socket joint）によつて、フレーム内に懸垂した形になっている。それによつてクラッシング・ヘッドはフレームに対して、自由に回転することもできるし、設定されたセットの範囲内で、フレームに対して旋回振動することもできる。

クラッシャのシャフト4は、中空のクラッシング・ヘッドを貫通して垂直に通っており、2つのカルダン継手（Cardan joint）を介して、豎形モーター5により駆動される。シャフトの下端には不平衡錘6がついており、その回転によつて著しい慣性力が生じ、その結果フレームの内面に沿つて、クラッシング・ヘッドが旋回運動をする。クラッシャの垂直軸と、クラッシング・ヘッドの中心軸との間に若干の偏差があり、これがさらに付加的な慣性力を生じ、

上記の不平衡錘による慣性力と組合わさつて、大きな破碎力を生ずるのである。

このクラッシャの製作に当つて、遭遇した最大の困難は、非常に苛酷な条件下で運転される不平衡錘の軸受に、いかなる型式のものを選ぶべきかという問題であつた。この課題は、水潤滑の液体摩擦・ゴム・軸受の応用によつて解決された。潤滑用の圧力水は、特殊な導管によつて、モーターの軸およびクラッシング・ヘッド内部のシャフトへ供給されるのである。

クラッシャのフレームを吊下げてあるロッドの上端には、軟かいスプリングがついており、クラッシャの振動を少なくする働きをしている。このような吊下構造をとつているため、バランスがよくとれて、大がかりな基礎を必要としない。この点もこの慣性コーンクラッシャの長所と云えよう。

1957年にコトリヤコフ工場で製作された試作機は、コーンの直径 600 mm のもので、トウィルヌイアウスズキー・コンビナートで実用化試験が行われた。その結果このクラッシャは、最大 120mm までの塊鉱を処理し得ることがわかつた。硬いスカルン鉱物を -3mm 90% の粒度にまで破碎したときの処理量は、20~25 t/h に達した。粉碎比は従来のコーンクラッシャの6~8倍、すなわち30~40という驚くべき値を示した。

最近メカノープル研究所は、ウラルマンシュヴォドと共同で、コーン直径1,650mmの慣性コーンクラッシャ実用機の製作を企画し、すでにその技術的設計を完了した。その特性値を掲げると：

コーン底面の直径	1,650mm
フィードの最大粒度	250~300mm
不平衡錘の回転数	730rpm
モーターの出力	630kW
セットを64mmにした場合の処理能力	160t/h
破碎産物の粒度	-5mm 95%

この型のコーンクラッシャは上述の利点の外に、水をかけながら運転できるという長所もある。このクラッシャの完成によつて、破碎技術は根本的に改善され、破碎工場の建設費の大幅切下げと、労働条件の改善が可能になつたと云われる。（今泉）

Б. Ю. БРАНД, Н. Д. МАКОВСКИЙ: ВЫСОКОПРОИЗДИТЕЛЬНОЕ ДРОБИЛЬНО-РАЗМОЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ. Горный Журнал 5, (1959), 37~44
粉体工学研究会資料—文献紹介 No. 99より。

第1図 慣性コーンクラッシャの構造