

第三系堆積岩の強度・延性度の年代・地域による差異について*

小出 仁**・星野一男**・井波和夫**・岩村茂男***・三井 忍****

1. はじめに

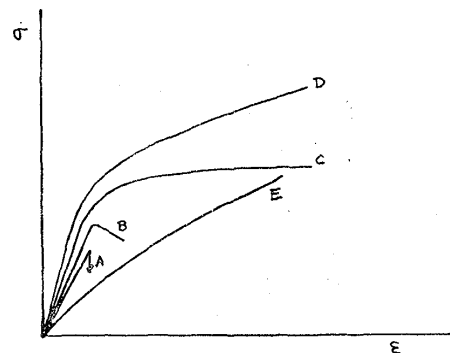
岩石力学は最近目ざましい進歩をつづけているが、地質学に実際に応用されている例はまだ少ない。地質現象と実験との条件の差が大きすぎるのが障害になっている。一般に、岩石は常圧下で変形させると非常にぜい性的である。いいかえれば、ほとんど流動的な変形をしない。高圧下での岩石変形実験の結果、高圧・高温下では岩石は流動的な変形をするようになることが知られている。しかし、実際のしゅう曲や造山運動における変形のしかたは、圧力・温度だけでは説明できないように思われる。地質現象は実験で実現できるよりはるかに長い時間にわたり、大規模で複雑な造構造運動の結果であることがその主な原因であろう。あまり高圧・高温下におかれたことが考えられないような若い堆積岩でも、しばしば、非常に流動的な変形をした形跡がある。あまり変形していないように見える岩体のごく近くで、その岩石と現在はあまり性質が異ならないと思われる岩層が、非常にはげしいしゅう曲をうけていることもある。岩体の力学的性質自体が続成作用や造構造運動によって変化することも考慮しなければ、これらの異常な現象を理解することはできないであろう。特に若い堆積岩は、続成作用による硬化の影響が大きいと思われる。続成作用は、応力の大きさと持続時間にもっとも関係するので、堆積岩の性質が年代と地域によって異なることが予想される。

地質調査所では最近数年間にわたって、各種の岩石の高圧下での力学的挙動を研究してきた。特に第三系堆積岩については、北九州・三浦・常磐・新潟・秋田・釧路等の各堆積盆地でいろいろな時代の約 100 種の岩石試料を系統的に採集し、その変形特性の年代や地域による相異をしらべた。数名の研究者により各人各様の研究目的のもとに実験がおこなわれたが、試験機と試験方法は同じなので、その結果を比較することは十分に意味がある

と思われる。その基礎的なデータはまとめて発表される予定である (HOSHINO ら, 印刷中)。ここではこのデータをまとめる過程で気づいた結果をもとに、若干の私見をのべてみたい。実験の方法や試料についてはすでに解説されているので (星野, 1966; 星野ら, 1970), ここでは省略する。実験の要項のみを簡略的にのべると、試料はすべて直径 19.5 mm, 高さ 39 mm の円柱で、地層面にほぼ垂直になるように整形した。肉眼的に試料の大きさの範囲では均質な、また、なるべくその地層を代表する所で採取した。異方性の影響については実験していない。試料は銅シールでカバーし、油によって銅シールの外側から側圧をくわえる。軸圧や変形は、圧力容器の外側でピストンにかかる荷重とその変位から間接的にもとめる外部測定である。この方法は精度はやや悪いが、現在の研究にはこの精度で十分であり、多数の実験をすることができる利点がある。実験の大部分は軸圧の方が側圧よりも大きい二軸圧縮実験 (慣用的には三軸圧縮試験ともよばれる) である。試料の断面積は、差応力による体積変化はないと仮定して補正した。

2. ぜい性-延性転移

側圧が高くなると、一般に岩石の強度が増す。それと同時に高圧下では岩石は延性的になる。第 1 図に、側圧



第 1 図 応力-歪線図のパターン

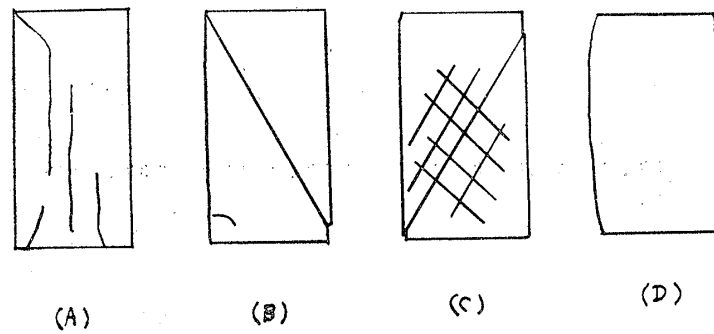
σ は差応力, ϵ は歪。通常、側圧をあげると A → E のように応力-歪曲線が変化する。E はすべての場合に出現するとはかぎらない。

* 1970年10月4日 日本地質学会 77 年学術大会討論会「岩石・地層変形の現象と機構」で講演。

** 地質調査所

*** 東京教育大学

**** 東北大学



第2図 変形後の試料の外観

が高くなるにつれて応力-歪線図がどのように変わるかを、模式的に示した。多くの岩石は常圧付近では、第1図のAのように、ほとんど塑性変形を示さず、急に破断する。やや延性的になると、第1図のBのように、破断直前に若干塑性的な変形をする。常圧では、破壊後の岩石試料は第2図のAのようにくさび形に割れる。試料の中央部では、引張りによって割れ目ができる。やや側圧を与えると、第2図のBのように1本の剪断割れ目(断層)が生じる。破断時に差応力は0まで急げきに下がる。側圧を大きくしていくと、破壊前の塑性変形がしだいに大きくなり、応力-歪線図が丸みをおびてくる。破壊後は、差応力が直ちに0まで下がらなくなる。試料を切るような巨視的な割れ目が、直には生じないことを示している。応力降下がおきた直後に除荷して、岩石試料をみると試料を切るような割れ目は生じていない。しかし、試料を斜めに切って細い帯状の白いゾーンが出来ていて、その白いゾーンにそって一部巨視的な割れ目が生じている。この白いゾーンには、微小な割れ目が密集していると考えられる(小出・星野, 1967, 小出・星野・南雲, 1967, HOSHINO and KOIDE, 1970)。このゾーンを、“微小割れ目帯”あるいは“変形帯”とよぶ。さらに側圧が大きくなると、急げきな応力降下は起こらない(第1図のC)。巨視的な剪断割れ目が生じている段階でも、それともなって網目状に変形帯が生じていることが多い(第2図のC)が、この段階では網目状の変形帯のみが現われる。さらに側圧が高くなると、応力降下はまったく見られなくなる(第1図のD)。網目状の変形帯は、側圧が高くなるとさらに密になり、岩石試料はビヤダル型に変形する。

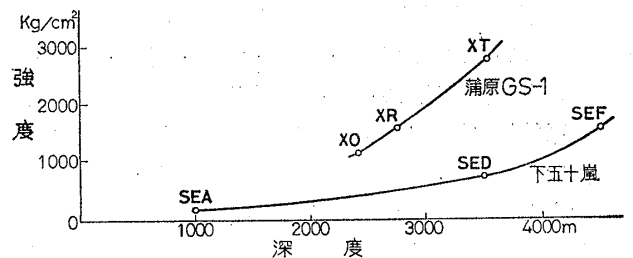
このようなぜい性から延性への転移のパターンは、ほとんどの岩石で同一である。しかし、転移する側圧の大きさは岩石によってまったく異なる。花崗岩のように強固な岩石では、数千気圧の側圧下でもぜい性的であるが、やわらかい堆積岩では、たった数十気圧の側圧によ

っても延性的になる。

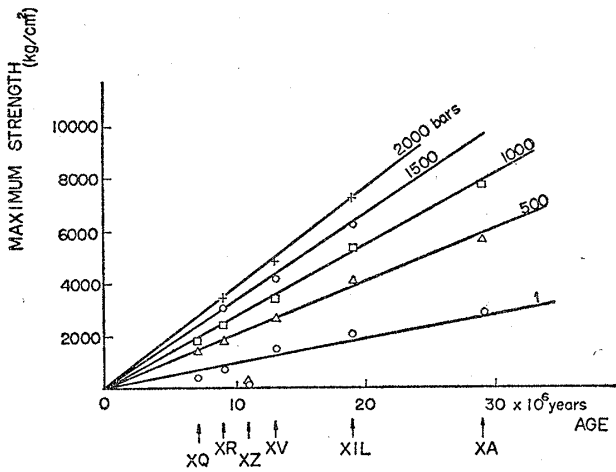
今回のデータから、比較的若くてやわらかい堆積岩では、側圧を大きくしていくと降伏(差応力がある程度以上大きくなると応力-歪線図の傾斜がゆるくなる現象)を示さなくなり、最初から流動的になることが見出された(第1図のD)。このような変形を、仮りに“粘延性”とよぶ。

3. 深度・年代と強度との関係

試錐コアからの試料によって、採取深度と強度との間に相関関係があることがわかる(第3図)。同一の坑井では一般に深度とともに強度が増すが、他の坑井の間では必ずしも比較できないことがわかる。深度が深くなると強度が増すのは圧緊作用のためであろう。年代と強度との間にも深度と強度との場合と同様に相関関係がある(第4図)。年代の古い岩石は深い深度に埋もれていて、大きい地圧をうけた可能性が大きい。また、圧緊作用を長時間うけていたはずである。造構造運動による圧力をうける機会もそれだけ大きい。したがって、古い岩石ほど強度が大きく、固化しているのは当然である。年代が古い堆積岩は、一般に孔げき率が小さい(第5図)。第三系の堆積岩では圧緊作用による固化がなお進行して

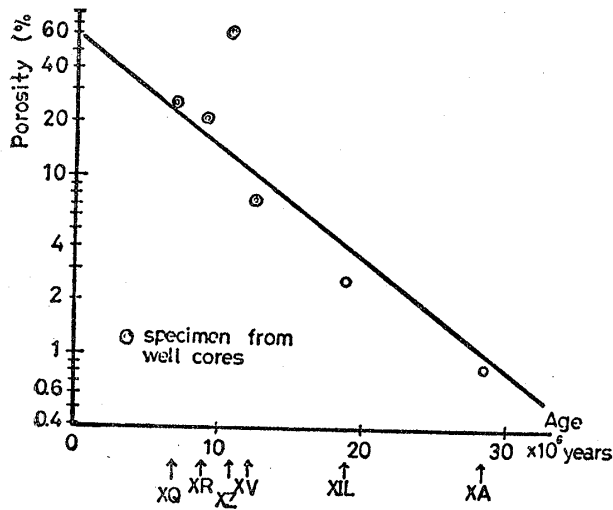


第3図 基礎試錐下五十嵐および浦原GS-1から採取した泥質岩の深度対強度関係図。XQ, SEA等は地質調査所岩石物性実験室で便宜的に岩石試料につけてある記号である。当実験室関係の論文はすべて同一の記号を用いている(星野ら, 1970参照)。



第4図 泥質岩の年代対強度関係図

図中の数字は側圧の大きさ(気圧). 年代は鎮西(1967)をもとにしている.

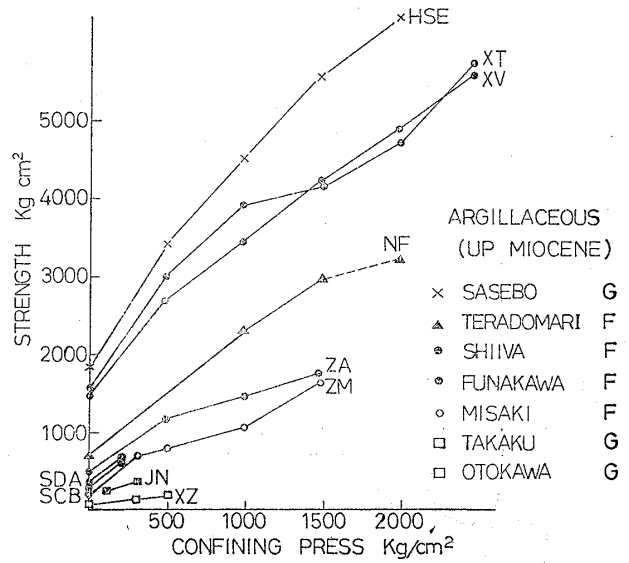


第5図 泥質岩の年代対孔げき率関係図

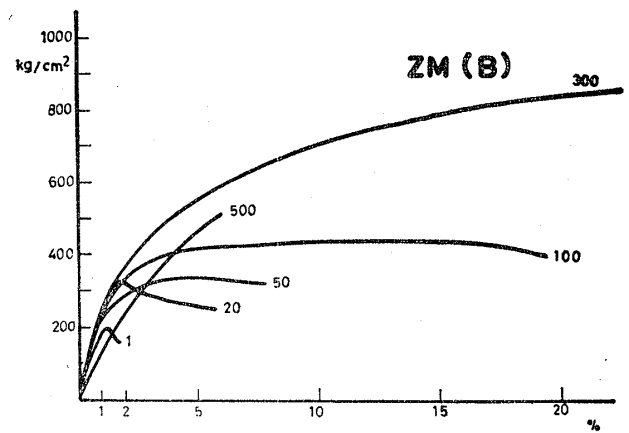
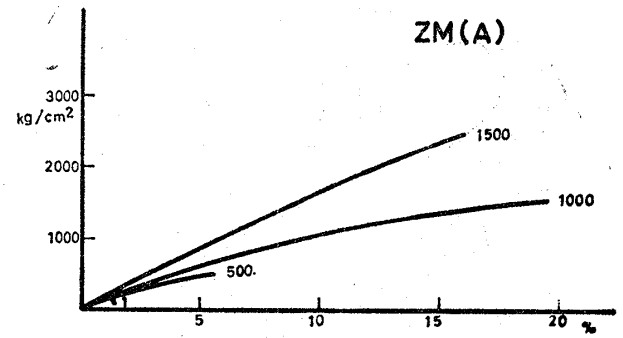
孔げき率は対数(%) .

いることがわかる. もちろん, 上記の結果はごく大まかな傾向としていえることであって, こまかくデータを見ると堆積岩の性質は非常に多様である. 同一時代の同一種の岩石をくらべてみると, いろいろな性質のものが共存している(第6図). その中でも, 地域ごとに堆積岩の性質に差があることが注目される. 特に常磐および三浦地方の堆積岩は, 同一年代の他の地域の岩石とくらべて, 一般に強度が低く, また延性的である.

岩質を泥質岩・砂質岩・凝灰岩・火山岩と分けると, 泥質岩が年代や深度による圧緊作用をもっとも鋭敏に反映する. 実験例はやや少ないが, 凝灰岩や火山岩は年代や深度の影響が小さい.



第6図 上部中新統泥質岩の側圧と強度との関係



第7図 三崎層(三浦半島)泥岩の応力-歪線図

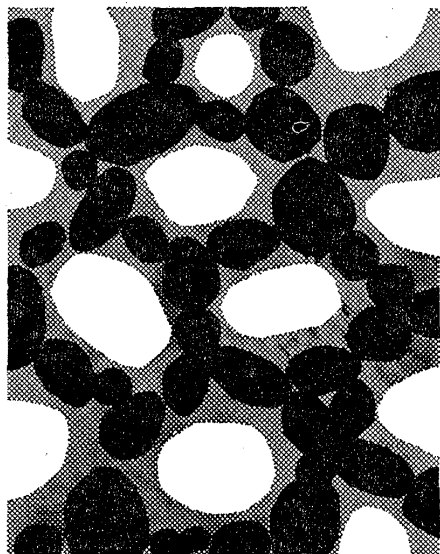
図中の数字は側圧(気圧).

4. 粘 延 性

やわらかい堆積岩では, ある程度以上の側圧を加えると, 最初から流動的な変形をする. 第7図に示した応力

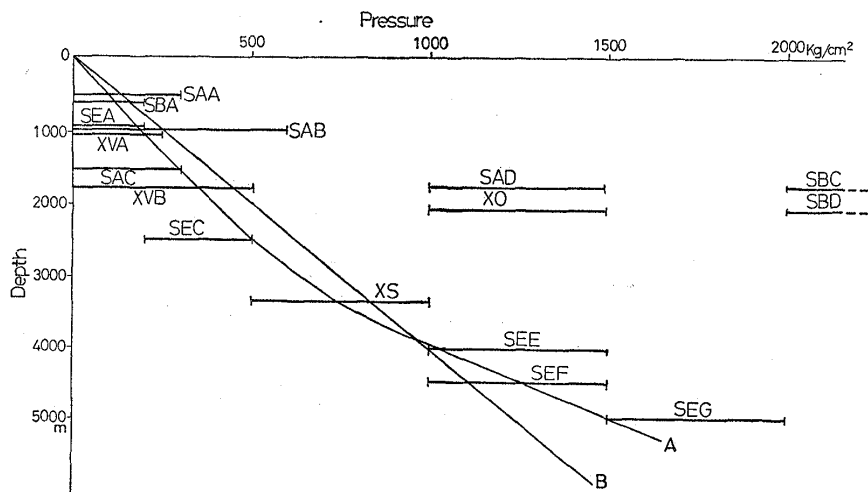
-歪線図をみると、この岩石は（三崎層，三浦半島）20気圧までは一応ぜい性的で、50気圧・100気圧ではぜい性から延性への中間的な挙動をすることがわかる。そして、300気圧の側圧では延性的になる。しかし、500気圧以上の側圧を加えた場合の応力-歪線図はかなり様子が異なってくる。おもな違いは最初から応力-歪曲線が寝ていて、はっきりした屈曲点（降伏点）が見られないことである。差応力が小さいはんいでは、500気圧以上の場合の方が、300気圧以下の場合の応力-歪曲線よりかえって寝ている。この岩石は、500気圧以上では最初

から流動的な変形をすると思われる。粘延性にうつる側圧の大きさは岩石によって異なる。粘延性になる機構を考えてみよう。やわらかい堆積岩は、第8図のように粒子と膠結物質がやや固い骨組をつくり、その間の空間はさらにやわらかい粘土や水・空気等がみだしているのであろう。堆積直後は空げきが多く、骨組もごく弱い。その後の圧緊作用によって空げきが少なくなり、骨組もしだいに強固になってくる。地下のある深さに埋まっている堆積岩は常に地圧をうけているから、その地圧と同じ程度の静水圧に耐えうるような構造をもっているはずである。しかし、もしその堆積岩が経験したことのないような大きさの静水圧を加えると、第8図のようなゆるい構造は一時的に破壊されるであろう。構造が破壊されると、堆積岩はわずかの差応力のもとでも流動的な変形をするのではないかと考えられる。これは土などに見られるチクソトロピーの現象に似ている。しかし、ふつういわれるチクソトロピーは、振動などによって構造が破壊されたために流動的になる現象である。粘延性は静水圧によって構造が破壊されると考えられる点が異なっている。もしその静水圧が長時間持続されれば、その静水圧に耐えうるような構造がしだいに形づくられる。このことから、粘延性に変わる側圧の大きさは、その堆積岩が過去にうけた有効静水圧の大きさを示すと考えられる。非常に固く圧緊された堆積岩や、火成岩などでは、構造が強固で空げきも少ないため、静水圧だけでは構造が破壊されて粘延性を示すことはないと考えられる。



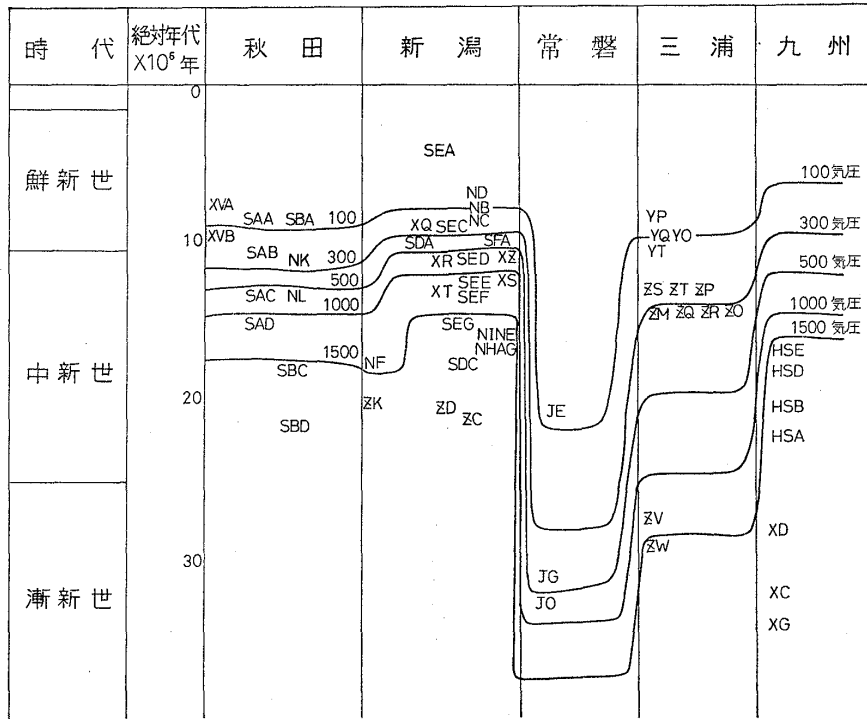
第8図 やわらかい堆積岩の構造の想像図
 黒色部はかたい粒子，網目部は膠結物質，白ぬきは空げきを示す。

第9図に、試錐井のコアからの岩石試料の採取深度と粘延性に変わった側圧の大きさとの関係を示した。直線



第9図 試錐コアの採取深度（たて軸）対粘延性に転移する側圧（よこ軸）関係図

図中の太線の側圧内で粘延性に転移した。直線Bは密度を2.5とした場合の地圧予想線。曲線Aは転移側圧から想定される地圧。



第 10 図 粘延性に転移する側圧から各地域の各時代の堆積岩が過去にうけた最大有効圧力を推定した図。

図内の太線は最大有効圧 (気圧)。記号は推定のもとにした岩石試料名。

Bは岩石の密度を2.5とした場合の、地圧の大きさである。粘延性に変わる側圧の大きさがその堆積岩のうけた静水圧の大きさを示すと考えてみよう。それから推定される静水圧の大きさは曲線Aのようなものになるだろう。曲線Aは直線Bに非常に近いが、浅部ではBより圧力が小さく、深部では大きくなる。浅部の堆積岩は圧緊がすすんでいないので、密度が小さく、深部では密度が一般に大きくなる。したがって、曲線Aは地圧の大きさをほぼ示していると思われる。新潟地域について、さらに泥質岩・砂質岩ごとに検討すると、粘延性に転移する圧力はある深度で急げきに増大し、その深度はある年代(浜忠層下部から椎谷層にかけて)に関係するようになる(星野, 1970)。

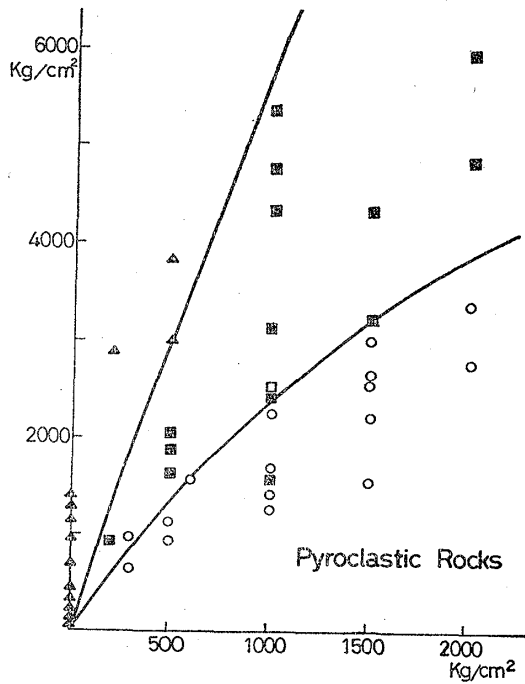
粘延性に転移する側圧の大きさから、各地域の各時代の岩石が、どのくらいの静水圧を過去に経験したかを推定してみた(第10図)。このような推定を試みるにはまだデータも少なく、側圧の測定間隔も大きいので十分ではないが、一応の目安として利用することはできるであろう。常磐地方の堆積岩は、他の地域の同時代の堆積岩とくらべると、ずっと低い圧力しか経験していない。常磐地方につづいて三浦半島でもやや圧力が小さい。まず第一に過去の埋没深度と関係があるだろう。しかし、地域ごとに特性があることから造構造応力の大きさとも関

係があるように思われる。造構造応力の大きさを推定するためには、地質的に埋没深度が推定される堆積岩の変形特性をさらにくわしく調べてみる必要がある。

5. 剪断面角

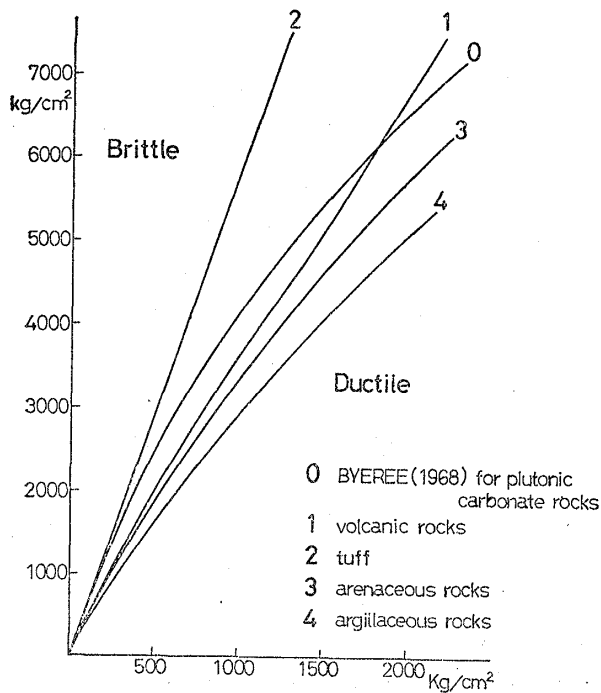
側圧と強度との関係でぜい性領域と延性領域とに分けられることが指摘されている(Mogi, 1966)。第三系堆積岩についても、強度によってぜい性・延性・粘延性の3領域に分けられる(第11図)。堆積岩の場合、境界が岩種によって異なるようである(第12図)。

モーアの限界曲線の傾斜から剪断面角を推定する方法が行なわれているが、試料に生じた割れ目の剪断面角と必ずしも一致しない。しかし、割れ目や変形帯の剪断面角と、それにかかる垂直応力と剪断応力の間には一定の関係があるように見える(第13図)。第13図では、左上方では剪断面角は小さく、右下方では剪断面角が大きい。これはまさつ角の考え方から予想される傾向と定性的には一致している。変形帯は破壊より前に形成されているため、必ずしもモーアの限界曲線から求められるようなもっともすべりやすい角度に割れ目が生じるとはかぎらない。しかし、若干の補正をすれば、まさつ角と剪断面角とを関係づけられるかもしれない。



第 11 図 側圧・強度と延性ととの関係図

三角はぜい性. 四角は延性. 白丸は粘延性であったことを示す. 横軸は側圧, たて軸は強度.

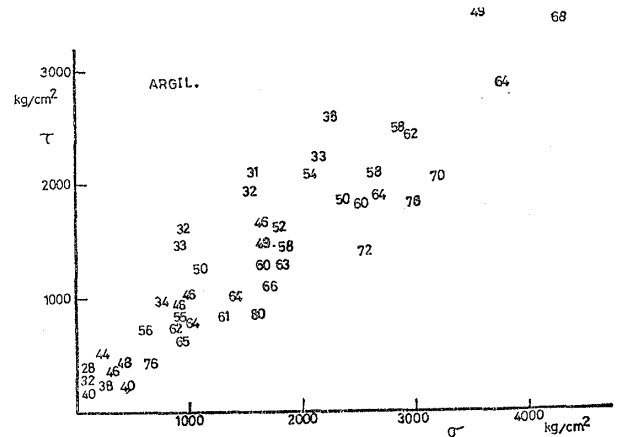


第 12 図 岩種ごとのぜい性—延性領域境界

横軸は側圧. たて軸は強度.

6. 考 察

第三系堆積岩では, 圧緊作用によってその力学的性質が変化していることが明らかにされた. 圧緊作用には上



第 13 図 泥質岩の割れ目・変形帯の剪断面角 (共役な割れ目の間の角度) とその割れ目にかかる垂直応力 σ ・剪断応力 τ との関係図

図中の数字は剪断面角 (度). 数字の位置でその割れ目・変形帯にかかった垂直応力と剪断応力をしめす.

載する岩圧の他に造構造応力の影響もある. 堆積岩の力学的性質に地域差があるのは, それ以前の地質的な歴史を反映していると思われる. また, 同一地域内でも, 造構造運動の中でその岩石がおかれていた位置によって, 埋没深度や造構造応力の加わり方も異なってくるであろう. これら地質的要因によって生じた力学的性質の差は, その後の造構造運動のあり方にも影響を与えると思われる. 岩質によって圧緊作用による固化のしかたが異なっている. 堆積後の時間によって, 岩石の相対的な力学的性質の差が変化することが予想される. たとえば堆積直後に, 火山岩や凝灰岩のあるものは, 同時代の泥質岩よりずっとかたいであろうが, 時代がたつとその差は小さくなるだろう. このような力学的性質の相対的な変化によって, 変形様式, たとえばしゅう曲などの様式, が変わる可能性がある. 粘延性は特に注目すべき現象である. 堆積岩に加わった応力を, 粘延性になる側圧の大きさから推定できる可能性がある. 地下においては水などが介在しているので, さらに粘延性は起こりやすいであろう. 何らかの原因でやわらかい堆積岩に急に高い圧力が加わった場合, その堆積岩は粘延性現象をおこすであろう. 乱堆積のように, 堆積岩があまり高い圧力や温度をうけた形跡がないのに非常に流動的な変形を行なっている場合などは, 粘延性によっておこされた可能性が多い.

ぜい性から延性への転移は, 側圧とともに漸移的に起こる. 断層としゅう曲のあるものは漸移的に移行する可能性がある. 断層は 1 本の線ないし面として生じるので

はなく、最初は微小割れ目の集まった変形帯が生じることが、実験で観察された。地質的な断層も、多くは「破碎」帯をともなっている。変形帯によって、両盤の地層が切られるのではなく、巨視的には連続して曲げられている例が実験でも見られる。このようなう曲は、バックリングによるしゅう曲とは生成機構がまったく異なる。微小な割れ目が生じたために変形帯の部分が弱くなって、選択的な変形をしたものである。しゅう曲軸面や波長は、変形帯の方向や幅に規制される。

以上のように、岩石の力学的性質は造構造運動の歴史によって影響され、また逆にその変化が造構造運動にも影響を与える。“石も進化する”ことを考慮する必要がある。

謝 辞

実験にあたって、東京大学の今井秀喜教授、東北大学の北村信助教授、東京教育大学の藤田至則助教授およびそれらの研究室の諸先生・諸兄に直接、間接の御助力をいただいた。また、東京大学の木村敏雄教授、地震研究所の南雲昭三郎教授はじめ地質調査所内外の諸先生の御援助に厚く感謝する。試料については通産省、石油資源、帝石、石油開発公団の御援助に感謝する。

文 献

- 鎮西清高 (1967), 日本新第三系対比表に“絶対年代”を入れる試み. 地質雑, vol. 73, p. 220—221.
- 星野一男 (1966), 岩石変形の基礎理論と地質構造要素. 地質雑, vol. 72, p. 105—116.
- 星野一男 (1970), 石油地質学と岩石物性学—堆積盆地の静岩圧分布について—石油技協誌, vol. 35, p. 179—186.
- ・井波和夫・小出 仁・三井 忍・岩村茂男 (1970), 本邦産第三系堆積岩の高封圧下における変形挙動 (1). 地質ニュース, no. 192, p. 2—12.
- HOSHINO, K. and KOIDE, H. (1970), Process of deformation of the sedimentary rocks. Proceedings of 2nd Congress of International Society for Rock Mechanics, Beograd, p. 2—13.
- HOSHINO, K., KOIDE, H., INAMI, K., IWAMURA, S. and MITSUI, S. Mechanical properties of Japanese Tertiary sedimentary rocks under high confining pressure (印刷中).
- 小出 仁・星野一男 (1967), 三軸変形下の岩石中の微小割れ目の発達について, 序報. 地震, ser. 2, vol. 20, p. 85—97.
- , ———, 南雲昭三郎 (1970), 三軸実験による岩石破壊の進行について, 第2回岩の力学シンポジウム講演集, p. 51—56.
- MOGI, K. (1966), Pressure dependence of rock strength and transition from brittle fracture to ductile flow. *Bull. Earthq. Res. Inst.*, vol. 44, p. 215—232.

Variation of mechanical properties of Tertiary sedimentary rocks in Japan

Hitoshi KOIDE, Kazuo HOSHINO, Kazuo INAMI, Shigeo IWAMURA and Shinobu MITSUI

(Abstract)

About 100 samples of Tertiary sedimentary rocks were experimentally deformed under high confining pressures. The rocks of various ages were sampled systematically in 6 districts (Northern Kyushu, Miura, Joban, Niigata, Akita and Kushiro) of Japan. The rocks sampled from deeper places or from strata of older ages have a larger strength and are more brittle. The Tertiary sedimentary rocks are strengthened by the diagenesis. The rocks in the Joban and Miura districts are weaker than the rocks of the same ages in the other districts.

The rocks become gradually ductile with in-

creasing confining pressure. Soft sedimentary rocks flow with small differential stress (this mode of deformation is called “visco-ductile” in this paper) under confining pressure higher than the critical pressures. The soft sedimentary rocks become visco-ductile because the pressure higher than the formerly experienced maximum pressure has crushed the frame of the loose rocks. The critical pressures of ductile→visco-ductile transition indicate that the rocks in the Joban and Miura districts experienced lower pressures than those in the other districts.

The overburden pressure and tectonic stress

change the mechanical properties of rocks gradually. The variation is the largest in argillaceous rocks, fairly large in arenaceous rocks, and the least in pyroclastic rocks and volcanic rocks. The

absolute or relative variation of the mechanical properties of rocks affects the mode of tectonic deformation such as faulting and folding.

.....

質 疑・討 論

星野（北海道開発局土木試）：ひずみの計測法について、全体ひずみであるか否か。

小出：全体ひずみである。

星野：試料の含水状態はどうか。含水状態は中立応力に与える影響は大きいと思うし、フィールドでは大抵含

水していると思うが。

小出：とくにコントロールしておらず、すべて自然乾燥状態で行なっている。含水の影響は大切だが、一方強制乾燥するとわるい試料や、逆に水びたしにするとわるい試料があるから、結局現段階では自然乾燥でやっている。