ロック メカニックスのすすめ

榎 山 次 郎*

岩盤力学の提唱と題しようかと思つたが、やはり時代の流れにのつて、表題のようにした。ロック メカニックスはコロラド鉱山大学を中心として、戦後にアメリカで、創制の動きがあり、ヨーロッパでもドイツやイギリスで、このテーマを調べている人が少しずつ現われた。

土質力学はソイル メカニックスといい、すでに大成した体系をもっているが、土の性質を広汎に研究し、また著書を出版した Terzaghi の功績は大きい。この分科は本来地質学所属であつたが、応力の面から、土木工学との結びつきが多く、今では分離して、専門化した。土木工学に関連して、土だけでは片づかない、いろいろ面倒な事故がある。必然岩盤の地質学上の条件だけでは不十分で、さらにその力学が要求せられつつある。

鉱山では坑道切羽において厄介な問題をかかえている。石油鉱業では作井技術に連なり、岩盤の性質をもつと深く調べなければならなくなっている。そればかりか探鉱においても褶曲断層の習性を、よく知る必要がある。ここに提出される問題は土質力学だけでは割りきれないものがある。

ロック メカニックスは応用が発達を要求しているが、それだけが使命ではなく、純学術上のテーマを大量に含み、その成果は地学上の見解に、あるいは、大きい変革をもたらすものであるとも考えられる。すなわち、この分科は岩石工学ではなく、完全に地質学、とくに構造地質学の新分野でなければならない。

ロック メカニックスを岩石力学と訳さないわけは、岩石標本を調べるだけの狭い意味をもたせないためである。ソイルに対するロックであるから岩盤というのが正しい。とくに *in situ* の岩石の性状をつきとめるのが主目標である。故にその研究は、十分なる地質学的経験を基本としなければならない。

しからば、岩盤とは何ぞやとの疑問に答えなければならぬ。常知の岩盤に他ならず、表土すなわち、風化生成物である連結のない粒体、または冲積粒体を土とする。土でない地殻の表面を構成する、*in situ* の岩石集合体を岩盤とする。新第三系や更新統の砂泥等は、一応は土のようでもあるが、地質学者は岩石とみなしている。事実いゆる土といえども、水によつて粒間の連結が保たれている。土は常に完全な粒体ではないといえる。新第三系の岩層は圧緊(土質学では圧密といつている)のため、粒間接触が大きく、ソイルよりも連結が進んでいるといえる。

レオロジー(流動学)と称する分科において得たる知見は、また岩盤に適用できる。レオロジーは現象論を本筋とし、あらゆる物材のもつ性質を、数個の基本的モデルで代理させ、その組み合わせが、どのように働くかによつて、流動の模様をつかみとろうとする。たとえば弾性はバネで代理させ、粘性はダッシュポットで示し、塑性にはスライダーを用いて説明しようとする。ターザーギは粘土の圧緊を説明するのにダッシュポットのピストンにバネをつけたようなモデルを立案した。要は土の粘弾性を本として圧緊を考えたのである。

世人に岩石は堅いが脆いという通念がある。このような岩盤が褶曲山脈を作るのは、岩石のクリープによるものと考えられる。クリープは弱い力でも与えるに長時間をもつてすれば、岩石が流体のように流れる現象をいうのである。クリープ理論によれば2,000年前のローマ時代堅坑の径は、今日半分に縮まつている。また氷河が消えたスカンデナヴィア半島の撓み上りもクリープで説明される。熊谷直一博士は花崗岩の材料を数年間観測して、クリープの一面を見出そうとしている。

* 京都大学名誉教授

いま仮に日本列島のうち本州を百万分の一に縮めた模型を造るに、どんな材料を用いたらよいか、スケールモデルの規則にしたがい調べると、粘土で十分であることがわかる。粘土モデルの一端をもつて、持ちあげると、本州はへなへなに屈がるであろう。クリープは構造地質学上の問題に解答を与える要素を沢山にはらむものであるが、工学応用面は、まだ認識されない。地下洞穴内の建設物の保持限度が検討を必要とするのは近い将来であろう。

岩盤内の応力を直接に測定することは困難である。トンネル周辺や坑内の壁付近の弾性歪みを知り、それによって応力状態を求める方法は、よく行われている。この方面の研究は鉱山工学者によつて、かなり綿密にすすめられている。光弾性を利用した手法は、京都大学工学部の平松教授を中心とするグループによつて、立派な業績をあげつつある。

岩盤の弾性歪みは特殊金属線を張りめぐらして測る方法が、佐々憲三博士を中心とする人々によつて試みられている。歪みの蓄積から地震の予知への可能性が望まれないでもない。佐々教授等は、三角点の關係的な位置の移動から、大きい範囲の地表面変状を求めることをした。これらは地球物理学上のテーマであるが、岩盤力学を樹立するためには、貴重な資料となるに相違ない。

岩盤はたいがい異方性物体である。等方均質とみなした古典土質力学との、ちがいは、このようなところにある。もつとも、成層した土についての応力歪み関係はソコロフスキ博士などの解明があるし、他方岩盤を等方性とみなした弾性波探査法が、広く実施されてはいる。不均質な媒を通る弾性波の検討や、異方性の媒質内の弾性波面の形状を調べる研究など、理論上むずかしいテーマが次々に解かれつつある。岩盤の異方性は、結構解析の手段によつて明らかになってきている。われわれは、この場合統計上の異方性に注意しなければならない。岩石成分の布置がランダムの中にも、ある整頓への傾向が見えるからである。弾性波探査では地層面など地質境界面においての反射屈折に依存するが、岩層内部の異方結構を、無視すべきでない。顕著な地質学的面的位置推定に現われる誤差をなくするのが急務である。震源の深さの推定も、かくして修正しなければならないようになるだろう。

土の圧緊には弾性要因を無視しなかつたのであるが、普通の凝固不完全な水成岩の大きい変形については、微小な弾性歪みを無視することが許される。ここにおいて岩盤は剛塑性として扱うものになる。すなわち von Mises の塑性降伏条件を適用することが可能となる。レオロジーの見解では粘土をビンガム体の一種とする。塑性理論では新第三系地層岩は、たいがい完全塑性体であるか、またはそれに近似する。完全塑性体では弾性限界以上降伏点を越すと応力は一定になる。歪みは、ただその速さについてののみ荷重と関係する。しばしば歪み速度という用語を見受けるが、歪みは6成分のベクトル（またはテンソル）で示す量であるから、“歪みの速さ”と改むべきである。

未凝固水成岩が完全塑性体で、降伏点以上に応力が上らないか、または上つても僅かである事実は、粒間連結が水によるためである。この結合では歪み硬化がおこらない。凝固水成岩をはじめ、結晶性の岩石では硬化がおこるので、降伏点を越えて、塑性歪みが増大するとともに多少応力も上昇する。この行状は金属の塑性と似ている。しかし、常温常圧下の標品圧縮試験では、結晶性岩石が脆く、降伏点を越える荷重を与えると、間もなく破断する。

最近高封圧の実験が発展しつつある。東京、仙台、京都の各大学では、この実験装置の完備したところできた。さらに高熱を加えた高圧実験も可能である。高封圧下の岩石は金属材料によく似た行状をする。変成岩の屈曲した構造は、このような行状の結果であろう。この場合結晶性岩石はよく伸びる性質をもつといえる。

結晶質の岩石については、固体状態の物性論による知見が応用できる。統計的異方体である岩石も、その組成要素である結晶個々にまで掘り下げて調べることにより、変形の機構が、もつと明確に解き明かされるようになるであろう。結晶のクリープ破損、疲労による破損、硬化などの機構について実験による成

果は、近年急速に増加して、われわれの参考に値するものは少ない。スケールを大きくすると、結晶のような格子構造をもたない岩石についても、成分粒個々の結合が、ランダムであつても、なおかつ、原理は一つであることに思いつくであろう。かくして顕微的にも、巨視的にも、近い将来メカニズムの解明が期待できる。

巨視的には岩盤の塑性流動は、その破損をひきおこさずに始まらない。破損 (failure) による損傷は、岩塊の割れ口となつてあらわれる。そこで、地質学上の節理をもつと調べなければならない。地表に近い岩層は脆いので、静力学的な割れ方をする。理論上いわれる互に直角な一組のシア方向は、そのまま岩盤の節理系になつている。岩盤の割れ方に二通りある。一つはシア割れである。理論上の最大シア面に近接して発生する。この割れめに沿うて両側が反対向きに動く。滑りの跡は明確に残存する。その二は、引張割断である。地表近くでの引張り断面には、羽毛状断口と介殻状断口がある。いずれも緻密な岩石に発生し、弾性波の反射波による効果と判断される。この場合は、弾性破断であり、塑性引張の効果とは全く性質をことにする。深層封圧の高いところでも塑性引張割断は発生する。なぜならば、塑性条件下では圧縮状態でも、偏差応力に引張があり得るからである。

岩盤の割断系をつきとめることが、応用上きわめて重要である。いま温泉の上昇路を求めようとするとき、あるいは普通の地下水を探るとき、断層を含めた割れめの総ての系を正しく把握することが何より大事であるは論をまたない。そのためには地表露頭においての割れめの系を、ある線に沿い、ある面積に境界をおき、あるいは、ある体積ごとに、統計学上の量を調べなければならない。割れめの面は単位垂線ベクトルで表現できる。これを球面投影で表現するのは空間における点を標準とするから、統計論としては要素が大きいき、意味ないものになつてしまう。ベクトルの統計はもつと深く検討を必要とするが、なかなか困難な作業であると思われる。

トンネルや道路の工事、用地造成などで、崩れ易い崖や壁をさけるためにも、断層破碎部だけを注意するだけにとどまらず、割断系を調べ、その細部まで察知しておくことが必要である。害を防ぐための工事は土木工学の範囲であるが、処置を適正ならしめるためには、岩盤の割断状態を詳しく知るべきであろう。

このように、ロック メカニックスの分野は、なかなか広い。この学門はやがて立派な分科として発達すべき運命になうものであることは自明である。くりかえしになるが、ただ材料力学、地震学、レオロジーなどの適用ではなく、地質学との直結はもつとも大きい。岩石学、結晶学、鉱物学の知見も利用しなければならないが、構造地質学のすべてを基礎として、その前進をひきうける役目がある。

天然現象は不規則複雑で、数学上の扱いができないものがあると考えられがちである。古典地質学は岩盤を構成する岩種別の幾何学的定量以上は求めていなかった。地質学が幼稚なるためではない。力学が単純であつたためであり、物理学が制約下でなければ法則をたてられなかつたためである。今では基礎学も進歩したから、応用学である地質学も内容を改むべき機会に近づいたといわねばならない。

ロック メカニックスの実験研究も、これからどしどし着手すべきである。筆者は野外地質家として現役をつとめ、いま老後の事業として岩盤力学を提唱しているので、今からでは実験研究は経験が浅くて、うまくはできない。立派な研究機関に属する若干学者のテーマである。筆者のような自由人にはただ理論と野外観察と簡易実験だけが可能な手段である。

ロック メカニックスで使用する数学はベクトルかテンソル解析である。ベクトルのギブス記号法は、それ自体に約束が多く、特別な定義や証明などの必要な厄介ものである。なるべくギブス式のベクトル記号を用いない方がよい。これに代る脚標記号方式がある。一つのベクトルは直角座標系についてその成分がある。もし座標軸を xyz とせずに $x_1 x_2 x_3$ とするならば、これを一つにまとめて x_i と記号できる。そこで x 系によるベクトルは a_i と書いてよい。 a_i を x 系について偏微分するときは $a_{i,j}$ とかく、こ

れは $\frac{\partial a_1}{\partial x_1}$ など数個の項をただ一つにまとめたのである。もし $a_{i,i}$ とかくときは総和をとる。すなわち繰り返しの脚標は和をとる約束ときめてある。スカラー量 b を x 偏微分することは $b_{,i}$ と書く。ギブス式の微分式に、よく使う ∇ や grad, div, curl など是不用である。

時間 t での微分は Da と書き、偏微分は $\dot{a}$ とかく。移動ベクトル u_i について、 $\dot{u}_i$ は粒子速度成分 v_i を示し、 $\ddot{u}_i$ は近似的に加速度を示すことになる。

一般論をいうならば、ベクトルは3成分に限る要はなく、行列表で示すような数多の成分をもつてよい。このような量はマトリックスである。まとめたマトリックス A は A_{ij} の成分をもつ。この場合 i は行番を、 j は列番を示す。 i は1から m までの整数、 j は1から n までの整数である。

$$A_{ij} \equiv \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & \cdots & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} & \cdots & A_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{m1} & A_{m2} & \cdots & A_{mn} \end{pmatrix}$$

一般論から三次元問題にもどると、 a_{ij} の行列成分は、それぞれ行も列も3ずつ、計9ある。行列ともに3で、行列表は 3×3 である。それゆえ、このような正方形のマトリックスを、他の約束はともかくとして、一応テンソルと呼んでもよい。

普遍的なテンソル記号法では行数を肩標に、列数を脚標におく。たとえば a_j^i のように書く。もし x 系を曲線座標系とすると、このような書き方が、便利になるからである。ベクトルに a^i のものと、 a_j のものがある。行ベクトル、列ベクトルではあるが、 x 系を用いて、他の系へ変換するときに区別があるので、それぞれ反変ベクトル、共変ベクトル（余変ベクトルというべきであるが）といっている。

初めから直線の直角座標を用いるならば、普遍ベクトル記号は無駄である。そこで肩標を用いない、カルテジアン・テンソル記号を使用すると楽である。これはマトリックス記号と同じになり、ただ i と j は1, 2, 3 を代表することになる。二次元問題では3を省略する。したがって x_1 軸を水平に、 x_2 を垂直にとると都合がよい。 y や z は他のカルテジアン座標のために、とっておきにしよう。普遍テンソル方式では x は普遍座標系とし、曲線座標等を含める。 y 系は直角座標系、とくに主軸座標系（主応力軸などを座標に用いること）に用いる。曲面上の二次座標系は θ とし、指標は α, β などギリシア字を用いる慣しとなっている。

地下のある点において、応力の成分が σ_{ij} であるならば、 $\frac{1}{3} \sigma_{kk} \delta_{ij}$ を平均応力といい p と記号する。これは σ の9成分のうち $\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}$ の $\frac{1}{3}$ であることを意味する。 δ_{ij} は、行列表で示すと、次のような値をもつテンソルであり、これをクロネッカーのデルタといっている。

$$\delta_{ij} \equiv \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

p は静水圧である。しかし、岩盤について水圧は、おかしいから静地圧といたい。多孔質の岩層ならば、 p は静水圧と静岩圧に分かれる。静水圧は飽和する孔水の静圧であり、静岩圧は粒から粒へ伝わる圧力である。合せて静地圧となる。静地圧は、また封圧 confined pressure といつてもよい。

いま地下ある深度の多孔質未凝固層が、上積み層の重みを受けながら釣合を保っているとする。もし孔水をとり除くことができれば、孔比は小さくなる。孔比が小さくなることは、その地層の収縮を意味する。したがって地表面は原位置よりも低下する。すなわち、いわゆる地盤沈下となるわけであるが、初めに釣合ついているときの p のうち静水圧の部が低下すると、岩圧の受けもつ部分が增大する。そのうち静岩圧は弾性体積縮少の他に効果をもたらさない。塑性積成岩では偏差応力だけが大事である。偏差応力 s_{ij} は $\sigma_{ij} - p$ である。偏差応力があると粒と粒の間のズレを起こし、そのために粒々はそれぞれ、より安定な

姿勢をとろうとし、したがって、孔隙が縮小するわけである。故に地下の水圧を加圧すれば、粒間の負担が少くなり、地盤沈下が止まる。もつとも簡便な方法は坑井に加圧注水することである。

シアル基盤の褶曲は、結晶性岩石のクリープで、その速さは遅い。基盤褶曲は被覆成層物の塑性褶曲をひきおこし、その速さは早い。造山帯では、基盤褶曲も塑性であることが考えられる。基盤の変状は、被覆層（ネブトン）へ影響し、側方短縮を伴う著しい褶曲系が発達する。この段階は褶曲解析について、よく知っていなければならないが、その詳細は、またロック メカニックスのアカデミックなテーマではあるが、石油探鉱の参考になるから応用の面でも重要である。その故に、大石油会社の研究所で、この問題を扱っているところが少なくないようである。

塑性褶曲は剛性運動を伴う塑性非相似変形のセットである。塑性変形に関する限りは塑性波面の進行が考えられる。塑性波理論はむずかしいが、大きいスケールのロック メカニックス（構造地質学に直結）では、きわめて大事である。塑性波面がある。塑性前面の形と進行を正しくつきとめ、地質構造の発達を究明する理論では、普遍テンソル記号を用いる数学解析を必要とする。面上の点位置は、曲面上の点座標で示され、それと基本 x 系および刻々に変わる主軸直角座標 y 系との相互の関係を、はつきりさせなければならない。その上に立つて、面を通しての函数の飛躍を考える。一回二回の偏微分函数の不連続性まで調べなければならぬ。

変形テンソルは有限大の歪みを表わすものであるが、微小変形については、歪みテンソル $\mathcal{E}_{ij}$ を用いる。応力テンソルも、歪みテンソルも、行列表は 3×3 で、どの成分も σ また $\mathcal{E}$ を用いることができる。古典論では垂線応力 σ とし、接線応力を τ とした。また歪み成分も、シアは γ を使い、行列表に示すと $1/2$ を付けたものである。われわれの記号法では、応力成分はすべて σ_{ij} 、歪み成分は、すべて $\mathcal{E}_{ij}$ で代理できるように整理されている。 xyz を、それぞれ別の座標系に使うのと同様に、 τ は主応力、 γ は主歪みをあらわすように転用する。

微小な歪みテンソル $\mathcal{E}_{ij}$ は $1/2(u_{i,j} + u_{j,i})$ に等しい。これを歪みの定義とする。変形テンソルは $1/2(u_{i,j} + u_{j,i} - u_{k,i}u_{k,j})$ であることが証明できる。今までの書き方だと、沢山の偏微分項があり、長たらしい式になる。平均応力を定義したと同様に、平均歪みが定義でき、したがって歪み偏差が決められる。歪み偏差は“ゆがみ”テンソルともいう。これがゼロならば、小さい歪みは形状のゆがみを伴わない。

断層は探鉱、探鉱、土木工事、温泉試掘などに、いつでも見逃せない因縁をもつものである。地質技術者は断層の追跡に、やつきになつていたものである。ところが断層そのものについては、力学上の解釈が十分に行われたと思えない。一口に断層といつても、すべてが同格ではなく、その種々相は、たいへんなものである。種々相はそれ自体が、それぞれメカニズムとキネマティックスの経歴を示現するものであるに相違ない。しかし、それを調べるのは構造地質学の本命であるが、新しい岩盤力学の進歩につれて躍進した展開をとげるであろう。

褶曲に伴う断層は、二次元問題における滑り線の按配によつて解けるものがある。最大シア応力の作用する一対の面は、 x_1 x_2 断面では互に直角に発生する。これは理論上の特性線に一致している。特性線の網目模様を、地質学上の資料を本として作図することは困難ではない。一対の特性線族をそれぞれ α 群 β 群と呼ぶ。 α の特性線が包絡する限界線が求められる。 β 線は、この限界線に直角に終るものである。このような限界線が、褶曲に伴う断層（正逆をとわず）に一致する。したがって断層の位置を予想することは困難でない。火成岩のマス内部にある断層も、準静定問題として、予想が可能である。しかし、この場合予想よりも、断層系の説明に役立つ。系がつかめれば、露頭のない断層を見出すことが容易である。断層はなお多くの問題を提起する。ここでは、その概観すらも述べることができない。

以上ロック メカニックスは、なにを研究すべきかを述べただけで、それをまとめた一貫した体系は、まだまだ先にならないと、できうべくもない。それでも、気のきいた実験と、鋭敏な実状観察と、そして綿

密な解析によつて、遠からず、すつきりした学問の体制がととのうものと信ずるものである。その高遠な真理を追求するには、若いスタミナのある学徒の勉強によるところが大きいは、いうまでもないことである。

幸にして、筆者の動きに賛同し、やつてみようという青年学者と二三話合う機はあつたが、地学界一般の協力は、ぜひ願いたいと考えている。

関西では、一応ロック メカニクスまたはロック レオロジーに興味をもつ人たちが、ときどき集会して談話する会ができた。もう2年ほどになるが、同志は、まだ多くはない。東京方面にも、すでに有志がよりより話あつているかも知れない。とにかく、いまはまだ larual stage である。少しでも世に出て、全日本の同学が連絡できるようになれば、少年期に入れる。そしていつの日にか成熟した立派な科学として、文明に貢献し、貴い人命を救い、経済を計かり、はかりしれない利益をもたらすようになろう。

地下岩盤内の貯蔵庫、工場、交通路、ばかりか、都会の発達にまで貢献するに相違ない。岩盤の科学、それはロック メカニクスであり、地学の大目標であらねばならぬ。

Rock Mechanics in a Blueprint

By

Jiro MAKIYAMA

Abstract

Rock mechanics is a branch of science put forward very recently by several researchers. It shows good promise of benefit to economization and security of various ground engineering projects such as works for roads, tunnels, dams, mines, drills, reclamations, etc. In these connections, rock mechanics is a younger sister of soil mechanics. Indeed there is no apparent boundary between them. The sediments of young geological ages may be treated as soils, but in view of subconsolidation due to grain to grain bond by water, they appear as aelotropic plastic solids. Experiments prove almost perfectly plastic behaviour of these materials. This nature may be ascertained by the fact that the bond cannot be hardened under the due deviatoric stress.

The crystallogenic rocks to the contrary have been supposed to be brittle rigid substances, but for that those under high geostatic pressure act as plastic body like metals. All the rocks are creepable subjects. Although the rate of flow in creep is very slow, it seems to be the principal process that makes folded structures. Therefore, the rock creep is a phenomenon of paramount interest in pure scientific aspect of rock mechanics. The knowledge will be useful in oil and gas exploration.

Rock mechanics is more intimately connected with geology than with the other related sections of science, for not only the rock masses are heterogeneous and aelotropic, but they have complex fracture systems including clefts with crushed and pulverized substances. The precise analysis of the system may be helpful in prospective work for the underground resources.

In the mathematical analysis, we will adopt the generalized tensor notation for convenience

sake instead of classical formalities. Also application of Cartesian tensor analysis may be appreciated. Outdoor observation and model testing are *pari passu* important approaches to the larger objects in geological scale, but executions of laboratory experiments by means of extensive modern scientific equipments are very desirable.