

粘土の流動機構に関する研究*

PLASTIC FLOW MECHANISM OF CLAYS

伊藤 富雄**・松井 保***

By Tomio ITO and Tamotsu MATSUI

1. ま え が き

粘土・水系においては、一般に time-dependent な変形が生じ、広範なコンシステンシー状態において種々の流動現象が見られる。この多様な流動現象を系統的に取扱うアプローチの一つに力学モデルがある。ある現象を現象論的に把握する場合、力学モデルは非常に有力な手法である。いままでこの立場から多くの研究が行われ、すでに多数の成果が得られている。しかし、本来力学モデルは現象そのものの本質的な機構を追求するものではない。したがって、力学モデル的な研究のみからは広範なコンシステンシー状態の粘土・水系の流動機構に関する統一された概念は得られない。このことは、液体状から固体状に至る粘土・水系全体が数個の力学モデルによって表現されねばならない¹⁾ことからも証明される。

Rosenqvist²⁾ などの研究によって粘土構造の実在性が確認されて以来、粘土の微視的構造に基づいた概念によって土の本質的な力学的挙動を説明しようとする努力がなされている。土の微視的な研究は、ある一つの普遍的概念を抽出しうる可能性を内蔵していると考えられる。なぜなら、ある領域内の土に外部から巨視的に応力の系が作用したとき、その応答を土の微視的な状態から理解し、またその微視的な粒子内相互作用を統計的に処理できるからである。粘土の微視的な研究のなかで、粘土粒子の幾何学的な構造に関する研究は電子顕微鏡の発達にともなって近年急速に進展している。しかし、粘土粒子間の構造、すなわち粘土・水系の粒子干渉のメカニズムは現在十分解明されたとはいいがたい。コロイド科学に基礎をもつ拡散 2 重層の概念は粘土の膨潤、塑性あるいは水分の保持特性などを定性的に説明するのに有用であ

る。しかし、理論的表現としての陽イオンの分布 (Gouy-Chapman 理論) の誘導においてなされた仮定には、粘土・水系に適合しない点が多い³⁾。特に、せん断応力下における粘土粒子間の相互作用を定量的に表現することは不可能であると考えられる。

一方、粘土の粒子間構造に着目した微視的立場からのアプローチとして、Eyring ら⁴⁾によって提案された rate process 理論に基づくものがある。村山・柴田⁵⁾は、rate process 理論より導かれる構造粘性を導入した力学モデルを提案し、粘土の種々の力学的挙動を明らかにした。この研究の特徴は、従来現象論的にのみ取扱われてきた粘土のレオロジー的研究に微視的な立場からの粘土物性の本質的な要素を組み入れようとした点にあると考えられる。しかし、力学モデルの一部に微視的な立場からの要素を組み入れても、力学モデル全体の微視的機構と粘土物性の本質的な機構との対応は不明確である。したがって、粘土のレオロジー特性の現象論的記述の域から完全に脱皮することができず、粘土物性の本質的な機構の追求が不可能になっている。Christensen・Wu⁶⁾は土粒子間結合の降伏強度の分布関数という概念を導入し、より微視的な立場から粘土のクリープ挙動を解析しようとした。しかし、村山・柴田と同様力学モデルで表現することを基本としているので、厳密に考えようとするればすほど力学モデルがより複雑になり、結局その意図に反して現象論的記述の域から完全に脱皮できないもどかしさが感じられる。Mitchell・Singh・Campanella^{7),8)}および Andersland・Douglas⁹⁾は圧密粘土のクリープあるいは粘土サスペンションの粘性流動といった現象の本質的な機構を解明しようとした。その際、ほぼ同じ考え方によって rate process 理論を適用している。すなわち、本来 rate process 理論で仮定される微視的な機構と土の流動機構との対応において、流動時の土粒子接合点付近の構造を明確にしようとするものである。その結果、両者とも、圧密粘土の土粒子間結合は土粒子周辺の水に

* 第 7 回土質工学研究発表会および第 29 回土木学会年次学術講演会にて一部発表済

** 正会員 工博 大阪大学教授 工学部土木工学科

*** 正会員 大阪大学講師 工学部土木工学科

は関係せず土粒子接合点での原子の一次結合であり、固体間の直接接触であると推論している。しかし、現状においてこの推論を断定するのに十分な証拠が整っていない。特に、粘土・水系の本質的な機構を検討しているにもかかわらず、粘土・水系の広範なコンシステンシー状態に対して統一的に取扱われていない。わずかに、Andersland・Douglas によって粘土サスペンションの粘性流動について別個に検討されているにすぎない。

以上の観点から、著者らは、広範なコンシステンシーをもつ粘土・水系の塑性流動状態における粘土粒子間の相互作用の機構に rate process 理論を適用し、粘土粒子接合点の物理化学的な機構を検討する。その際、rate process 理論で仮定される微視的な流動機構を粘土粒子間の微視的構造と対応させる。本論文は、粘土・水系の本質的な流動機構が粘土・水系全体としての種々の流動現象の機構となりうる特性を具備すべきであるという考えに立脚している。そこで、粘土サスペンションのニュートン流動および正規圧密粘土の定常クリープのみならず、それらの中間的なコンシステンシー状態をもつ粘土ペーストの定常流動も取上げる。それぞれの流動現象に対応して粘度試験、三軸クリープ試験およびベーン試験を行う。以上の結果に rate process 理論を適用し、これらの代表的な粘土・水系の流動機構を明確にする。さらに、広範なコンシステンシー状態の粘土・水系の流動機構について検討を加える。

2. rate process としての粘土の流動

粘土・水系の多様な流動現象の本質的な機構を微視的に解明するための理論的根拠として、rate process 理論が用いられる。この理論で仮定される微視的機構と粘土粒子間の微視的構造を対応させるという立場から出発する。したがって、粘土粒子間の相互作用を定量的に評価するために、流動に関与する最小単位として流動単位 (flow unit) を仮定する。rate process 理論においては、本来流動単位として原子・分子を考えている。著者らの立場が rate process 理論と実際の機構を対応させることを前提にしているかぎり、粘土粒子間の微視的な構造を表現する流動単位もまた、当然原子・分子のオーダーであると考えねばならない。さらに、rate process 理論は熱活性化過程の理論であるので、厳密には当然定常状態の現象を取扱っていることになる。したがって、粘土・水系の流動現象に rate process 理論を適用する場合には、できるかぎり定常的な流動現象を取扱うように努める必要がある。なぜなら、rate process 理論に課せられた条件をできるかぎり実際の現象において保持することによって、理論と実際の機構が互いに円滑に対応し、

比較し得ると考えられるからである。

一般に、粘土のせん断抵抗力は、巨視的には3個の成分に分けて考えることができる。すなわち、粘着成分、摩擦成分およびダイラタント成分である。粘土のせん断においてダイラタント成分は他の2成分と比較して無視できるものではない。しかし、粘土・水系の定常的な流動現象においては、このダイラタント成分は比較的小さく、無視してもよいのではないかと考えられる。なぜなら、ひずみが増大するにしたがってダイラタント成分が小さくなり¹⁰⁾、また定常的な流動現象を取扱っているかぎりにおいてはその間の土の構造における変化が少ない¹¹⁾と考えられるからである。また、ダイラタント成分は土粒子あるいはそのアグリゲートのせん断方向に垂直な方向への幾何学的な相対移動によって発生するものである。したがって、本質的な粘土粒子間の相互作用について物理化学的にのみ検討する場合には、ダイラタント成分の無視できる状態を取扱うことが好都合である。ダイラタント以外のせん断成分を微視的にみたととき、これを粘着成分と摩擦成分に分ける理由はなく、両成分とも粘土粒子の吸着水、カチオンの拡散層および粘土粒子間の直接接触によって生ずると考えられる。

rate process 理論により導かれる粘土の変形挙動を表現する方程式は付録に示す。rate process 理論においては、流動現象をせん断応力による微視的な流動単位の位置交換の過程と定義している。すなわち、流動単位の一回の運動距離は粘土の変形の最小量と考えることができる。また、活性化エネルギーは流動現象が生ずるために必要なエネルギーであり、流動単位のもつ結合力の表現である。

微視的なすべり面に水平および垂直な方向の流動単位の平衡位置間の距離をそれぞれ λ および λ_1 とすれば、frequency factor X は λ/λ_1 となる。Herrin・Jones¹²⁾ はアスファルトの挙動に rate process 理論を適用し、 λ と λ_1 はともに流動単位の大きさとほぼ同じオーダーであるとしている。したがって、 X は 1 に近い値であるということになる。定性的に議論すれば、流動単位の微視的な変形挙動を対象とする場合には $X \approx 1$ の近似は成立すると考えられる。しかし、粘土の巨視的な変形挙動を対象とする場合にも $X \approx 1$ の近似が成立するという保証はない。この frequency factor は、Mitchellら^{7), 8)} によれば、変形方向の流動単位数とエネルギー障壁を乗り越えることによって生ずる平均変位成分の関数で、応力と時間の関数と考えられている。また、Andersland・Akili¹³⁾ によれば、応力、温度および粘土構造の関数と考えられている。いずれにしても、frequency factor X は複雑でその関数関係を明確にできない現状である。そこで、実際には $X \approx 1$ として近似されることが多い。し

かし、これは重要な factor であるので、この点に関し
のちに再び検討を加える。

3. 粘土の流動実験

(1) 実験試料

実験に用いられた粘土試料は5種類であり、それぞれの試験に対してこのなかから適宜用いる。これらの粘土の名称およびその物性は表-1に示すとおりである。名称には採取地名あるいは粘土鉱物名を用いており、梅田粘土および千里粘土は自然粘土、カオリン（福島県産）およびベントナイト（群馬県産）は市販の粘土である。すべての粘土試料は、水道水を加えミキサで一度スラリー状態にしてから用いられる。千里粘土Aと千里粘土Bは同一地点で採取された粘土であるが、前者は後者の状態に乾燥過程が加わる点で異なっている。なお、梅田粘土は貝がらがまじっているので、840 μ ふるいを通過させたものを用いる。

表-1 粘土試料

物性	名称	カオリン	梅田粘土	千里粘土A	千里粘土B	ベントナイト
liquid limit (%)		52.8	57.2	92.6	118.5	325.0
fineness number (%)		52.1	—	76.9	98.0	274.5
plastic limit (%)		32.7	29.3	37.7	32.4	29.0
plasticity index (%)		20.1	27.9	54.9	86.1	296.0
specific gravity		2.69	2.68	2.68	2.68	2.68
clay fraction(<2 μ) (%)		60.0	4.6	43.0	56.9	73.0

(2) 粘度試験

a) 実験装置および方法

粘度試験では粘土サスペンションを対象としている。実験装置としては Brookfield 型粘度計を用いる。粘度の測定はまず試料を攪拌機で1分間攪拌し、粘度計のローターを浸した状態で数分間静置する。これは粘度計による温度変化の影響を避けることおよび粘度測定中の粗大粒子の沈降に伴う濃度変化をできるだけ少なくするためである。そのうち、粘度の測定を開始する。粘度の測定時間は土粒子沈降の影響を少なくするため、できるだけ短くする。粘度計の示度が安定するのに、カオリンでは30秒以内であるが、その他の粘土では1~2分間必要である。濃度測定は試料を約100gとり、これから水分を蒸発させて行う。

実験は次の2ケースについて行う。

実験I：種々の濃度をもつカオリン、千里粘土Aおよびベントナイトのサスペンションに対して、一定温度（約15°C）のもとで、粘度とせん断速度の関係を得るための実験。この実験の目的は粘土サスペンションのニュ

ートン流動を示す限界濃度を求めることにある。

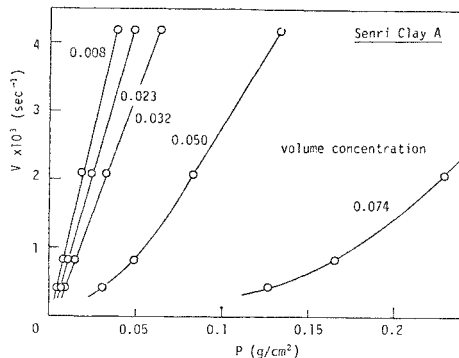
実験II：種々の濃度をもつ千里粘土Bおよびベントナイトの粘土サスペンションに対して、一定せん断速度（内筒表面で2.1 $\times 10^3$ sec⁻¹）のもとで、粘度と温度の関係を得るための実験。ただし、温度は約15~50°Cの範囲で変化させる。この実験の目的は粘土サスペンションの活性化エネルギーおよび結合数の決定にある。

b) 実験結果

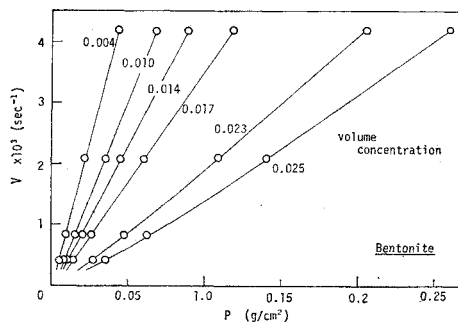
実験Iの結果より、千里粘土Aおよびベントナイトの場合の粘性率変数 P , V の関係を例示すれば、それぞれ図-1(a), (b) のようになる。これらの図からわかるように、粘土サスペンションは厳密には相当低濃度までニュートン流動を示さない。しかるに、ニュートン粘性をもつ溶媒（粘性係数 η_0 ）に相互作用のない剛体粒子が分散したサスペンションの粘性係数 η は、理論的に Einstein の式によって表わされる¹⁴⁾。すなわち、

$$\eta_{sp} = a^* \cdot \phi \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 η_{sp} は比粘度で、 $(\eta/\eta_0 - 1)$ によって表わされる。 ϕ は容積濃度、 a^* は粒子形状に関する定数である。したがって、粒子間の相互作用のない粘土サスペンションでは η_{sp} と ϕ は比例関係にあることを意味する。図-2 は η_{sp} と ϕ の関係を両対数紙にプロットしたものである。この図より、 η_{sp} と ϕ の比例関係が成立する



(a) 千里粘土 A



(b) ベントナイト

図-1 粘土サスペンションの P-V 曲線

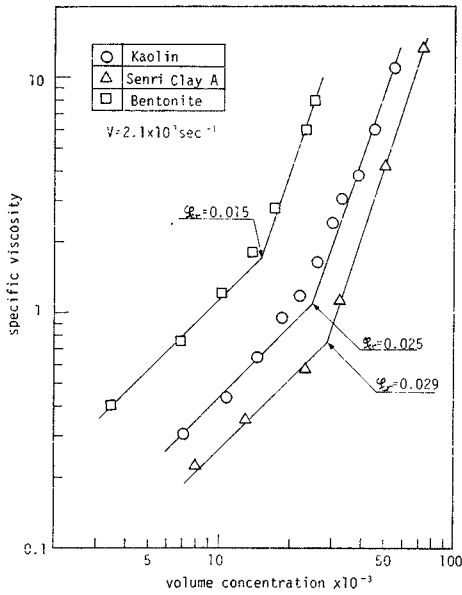


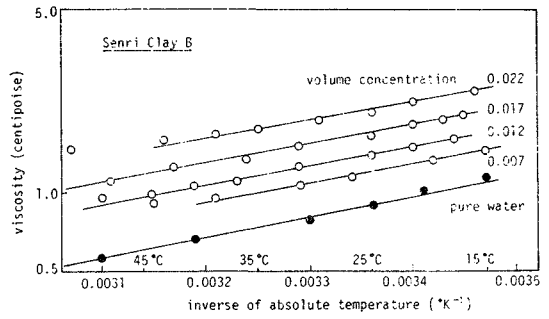
図-2 粘土サスペンションの比粘度と容積濃度の関係

限界濃度 ϕ_{cr} は、カオリン、千里粘土 A およびベントナイトのサスペンションに対して、それぞれ $\phi_{cr}=0.025$, 0.029 および 0.015 程度であることがわかる。普通、この限界濃度は 0.02 程度であるといわれている¹⁴⁾ので、これらの値はほぼ妥当な値と思われる。以上のごとく得られた限界濃度 ϕ_{cr} は溶液中に分散した剛体粒子の相互作用のない濃度の限界を意味する。したがって、この濃度が厳密な意味でのニュートン流動を示す濃度の限界と考えてもよいと思われる。

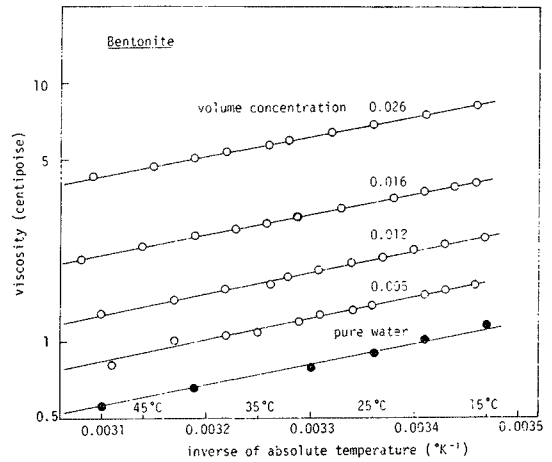
粘土サスペンションの流動を rate process と考えれば、粘度の対数 $\ln \eta$ と絶対温度の逆数 ($1/T$) の間に線形関係が存在するはずである。なぜなら、式 (A.5) において両辺の対数をとれば、次式が成立するからである。

$$\ln \eta = \ln \frac{h \cdot S}{X \cdot \lambda} + \frac{\Delta F}{R} \left(\frac{1}{T} \right) \dots \dots \dots (2)$$

図-3 (a) および (b) は実験 II の結果として得られた粘土サスペンションの粘度と絶対温度の関係を半対数紙に図示したものである。それぞれ千里粘土 B およびベントナイトの粘土サスペンションに対する関係を示している。また、同時に純水に対する結果も示されている。千里粘土 B のニュートン流動の限界濃度は、千里粘土 A のそれと大きく違わないと思われるので、 0.029 前後の値をとるとと思われる。一方、ベントナイトのニュートン流動の限界濃度は 0.015 であるが、図-1 (b) からわかるように ϕ が 0.025 付近になっても $P-V$ 関係が近似的に比例関係にあり、その流動がニュートン流動に近似しているとして取扱うことができるとと思われる。以上の観点から 図-3 を見れば、 $\log \eta$ と $(1/T)$ の線形関



(a) 千里粘土 B



(b) ベントナイト

図-3 粘土サスペンションの粘度と温度の関係

表-2 粘土サスペンションの活性化エネルギーおよび結合数

粘土試料	容積濃度 ϕ	活性化エネルギー ΔF (kcal/mol)	結合数 S (cm ⁻²)
千里粘土 B	0.022	3.24	3.46×10^{14}
	0.017	3.33	2.43×10^{14}
	0.012	3.37	1.86×10^{14}
	0.007	3.27	1.90×10^{14}
ベントナイト	0.026	3.55	6.69×10^{14}
	0.016	3.54	3.42×10^{14}
	0.012	3.72	1.55×10^{14}
	0.005	3.72	1.01×10^{14}
純水	—	4.02	0.40×10^{14}

係が近似的にニュートン流動を示す濃度の範囲において成立することがわかる。結局、巨視的にはニュートン流動を示す濃度の粘土サスペンションの流動を rate process であると判断してもよいと考えられる。また、粘土サスペンションの粘度は濃度とともに増加している。 $\log \eta \sim (1/T)$ 関係の直線の傾きおよび切片から活性化エネルギーおよび結合数を求めることができる。その結果を表-2 に示す。この際、 λ として 2.7 \AA を用いているが、この点に関してはのちに議論される。

(3) ベーン試験

a) 実験装置および方法

ベーン試験では粘土ペーストを対象としている。ここで、粘土ペーストとは液性限界付近あるいはそれ以上の含水比を有するペースト状の練り返された粘土のことをさしている。実験装置としては室内ベーン試験機が用いられる。この試験機は試料置台が回転する形式のもので、モーター、変速機およびギアの組合せにより 1.5~0.002 deg/sec の範囲の回転角速度が得られる。トルクの計測はベーン回転軸に固定されたアーム（アーム長可変）とUゲージ（非接着型ひずみゲージ、容量 1 kg, 最大変位量 0.4 mm）によって行う。Uゲージの変位量が非常に小さいので、ベーン羽根の回転変位がほとんど無視できる状態でトルクを計測することができる。したがって、試験中常に一定の回転角速度を試料に加えることができる。ベーン軸は軸受によって支えられており、その微小回転により摩擦力が働くが、この摩擦力はたかだか 0.05 g/cm² 程度で無視しうると考えられる。ベーン羽根の寸法は $D \times H$ (直径×高さ) = 20×40 mm で 4 枚羽根のものを使用した。

粘土試料は一定の含水比を保持するために密閉容器中に保存され、チキソトロピーによる強度増加の影響を除くために実験ごとに練り返される。この練り返し時間はあらかじめ予備実験で求められるものである。実験の手順は、試料にベーンを挿入し、そのちベーン挿入による乱れの影響を除いて試料の均一性を高めるために一定時間(約 30 分) 放置養生する。そして、一定回転速度でベーン試験を行う。含水比測定は試験の前後で 2 回行う。粘土試料は梅田粘土、千里粘土 A、千里粘土 B およびベントナイトの 4 種類を使用する。なお、実験は 20°C の恒温室で行う。

b) 実験結果

せん断応力の算定には次式で表わされる Cadling の式¹⁵⁾を用いる。

$$\tau = \frac{M}{\pi D^2 \left(\frac{H}{2} + \frac{D}{6} \right)} \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここに、 τ は円筒面に作用するせん断応力、 M はトルク、 D および H はそれぞれベーンの直径および高さである。式 (3) において、ベーン上下端面のせん断応力分布は矩形分布とし、円筒側面および上下端面に作用する応力はほぼ等しいと考えている。

図-4 は梅田粘土のベーン回転角 θ とせん断応力 τ の関係をベーン回転角速度 ω をパラメーターとして例示したものである。この図から判断すれば、一定の回転角速度に対応するせん断応力はチキソトロピーなどの影響により厳密には必ずしも一定にならない。しかし、軟

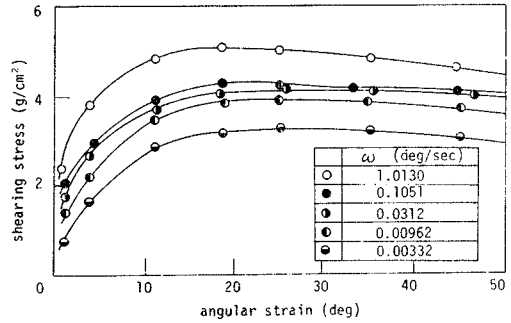


図-4 粘土ペーストのせん断応力とベーン回転角の関係

弱な粘土は当然塑性的な性質が強く、せん断応力のピークは非常にゆるやかなので、近似的にピーク値をこれに対応させてもほとんど誤差を伴わないと考えられる。図-5 (a), (b), (c) および (d) はそれぞれ梅田粘土、千里粘土 A、千里粘土 B およびベントナイトのペーストに対する回転角速度とせん断応力（ピーク値）の関係を含水比をパラメーターとして示している。これらの図から明らかなように、回転角速度とせん断応力の間には半対数紙上で直線関係が存在していることがわかる。Karls-son¹⁶⁾ は種々の粘土に対して 1~1×10² deg/sec の回転角速度の範囲で同様の直線性を確認している。したがって、粘土ペーストの流動特性、すなわち回転角速度とせん断応力の関係が次式で表現できる。

$$\log \omega = a\tau - b \quad \dots\dots\dots(4)$$

ここに、 a および b は定数である。式 (4) は、ベーン回転角速度の対数とせん断応力の間直線関係があり、したがって粘土ペーストの流動特性を 2 個の定数（流動パラメーター）により決定できることを意味している。

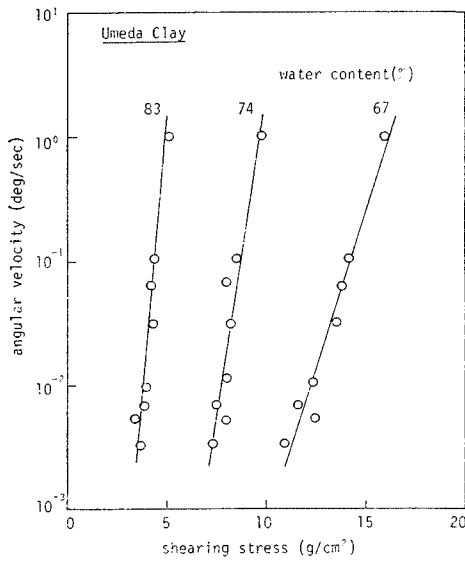
式 (A.6) において、せん断パラメーターとしてひずみ速度 $\dot{\gamma}$ の代わりに回転角速度 ω をとると、

$$\omega = X' \frac{kT}{h} \exp\left(-\frac{\Delta F}{RT}\right) \exp\left(\frac{\lambda\tau}{2kST}\right) \quad \dots\dots(5)$$

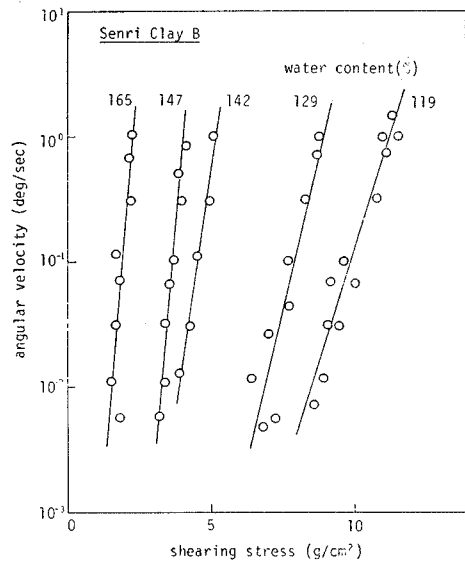
ここに、 X' はせん断パラメーターとして回転角速度をとる場合の frequency factor である。 X' は X からの類推よりほぼ 1 と仮定されるが、重要な factor であるのちにさらに検討を加える。式 (5) の両辺の対数を取り、常用対数に変換すると、

$$\log \omega = \left(\frac{\lambda}{4.606 kST} \right) \tau - \left[\frac{\Delta F}{2.303 RT} - \log \left(X' \frac{kT}{h} \right) \right] \quad \dots\dots(6)$$

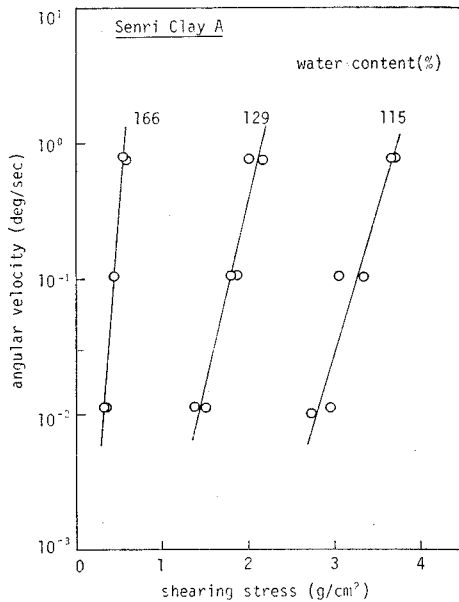
式 (4) および式 (6) を比較すると、両式は同一の形で表現されている。これは粘土ペーストの流動が式 (6) で表現できることを示している。したがって、粘土ペーストの流動が rate process であると解釈してもよいことになる。式 (6) は式 (4) の流動パラメーター a および b の内容を具体的に表現している。すなわち、



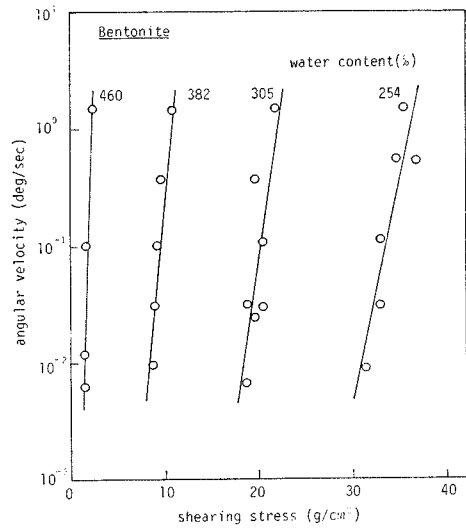
(a) 梅田粘土



(c) 千里粘土 B



(b) 千里粘土 A



(d) ベントナイト

図-5 粘土ペーストのせん断応力と回転角速度の関係

$$a = \frac{\lambda}{4.606 kST} \dots\dots\dots (7)$$

$$b = \left[\frac{\Delta F}{2.303 RT} - \log \left(X' \frac{kT}{h} \right) \right] \dots\dots\dots (8)$$

したがって、流動パラメーター a は λ の値が既知とすれば微視的すべり面単位面積当りの結合数 S を表現し、流動パラメーター b は活性化エネルギー ΔF を表現していると考えられる。表-3 は、式 (7) および (8) を用いて得られた含水比と活性化エネルギーおよび結合数の関係を表示したものである。この際、 λ としては 2.8

Å を用いているが、このことについてはのちに議論される。

(4) 三軸クリープ試験

a) 実験装置および方法

三軸クリープ試験では非排水状態の正規圧密粘土を対象としている。実験装置としては Geonor 製の三軸試験機を用いる。実験試料はカオリンおよび千里粘土 A を用い、液性限界以上の含水比で十分練り返され、大型圧密装置により圧密圧力約 0.7 kg/cm² で再圧密される。こ

表-3 粘土ペーストの活性化エネルギーおよび結合数

粘土試料	含水比 w (%)	w / F	活性化エネルギー ΔF(kcal/mol)	結合数 S (cm ⁻²)	せん断強さ τ _r (g/cm ²)
梅田粘土	67	1.17	28.3	2.88×10 ⁸	1.42×10 ¹
	74	1.29	30.6	1.42×10 ⁸	8.66×10 ⁰
	83	1.45	29.6	0.75×10 ⁸	4.38×10 ⁰
千里粘土 A	115	1.50	27.5	0.71×10 ⁸	3.25×10 ⁰
	129	1.68	24.9	0.56×10 ⁸	1.80×10 ⁰
	166	2.16	23.3	0.18×10 ⁸	4.25×10 ⁻¹
千里粘土 B	119	1.21	28.2	2.04×10 ⁸	9.88×10 ⁰
	129	1.31	29.0	1.48×10 ⁸	7.80×10 ⁰
	142	1.44	27.7	0.96×10 ⁸	4.43×10 ⁰
	147	1.49	30.0	0.63×10 ⁸	3.60×10 ⁰
	165	1.68	24.6	0.60×10 ⁸	1.82×10 ⁰
ベントナイト	254	0.93	36.0	3.79×10 ⁸	3.35×10 ¹
	305	1.11	33.2	2.73×10 ⁸	2.02×10 ¹
	382	1.39	30.5	1.54×10 ⁸	9.50×10 ⁰
	460	1.67	24.1	0.64×10 ⁸	1.75×10 ⁰

の試料から直径 3.85 cm, 高さ 8 cm の円柱形供試体を作製し, 一定温度(約 20°C)で圧密非排水三軸クリープ試験を行う。圧密圧力は 1, 2 および 3 kg/cm² で, 圧密時間は 24 時間である。クリープ試験の方法は Andersland ら⁹⁾が行ったと同様の方法である。すなわち, 初期クリープ荷重を載荷し, ほぼ定常クリープに移行したのち一定増分荷重を付加する。荷重増分は約 30 分の間隔で載荷される。実験は 2 種類で, 一つは初期クリープ荷重を載荷し, そののち 1 段階の荷重増分を載荷する実験である。他は, 応力レベルによる影響を検討するため, 応力レベルの小さい初期クリープ荷重を載荷し, そののち何段階にもわたって荷重増分を載荷する実験である。前者は圧密終了後 2 回荷重を増加させるので Double Increment 試験 (DI-Test), 後者は圧密終了後数回荷重を増加させるので Multi-Increment 試験 (MI-Test) とよぶことにする。千里粘土 A に対して等方圧密圧 1, 2, 3 kg/cm² の DI-Test および MI-Test の両方の試験を行い, カオリンに対して等方圧密圧 2, 3 kg/cm² の DI-Test のみを行う。

b) 実験結果

式 (A.6) において両辺の対数をとれば,

$$\ln \dot{\epsilon} = \ln \left(X \cdot \frac{kT}{h} \right) - \frac{\Delta F}{RT} + \frac{\lambda \tau}{2kST} \dots\dots\dots (9)$$

式 (9) は $\sinh(f\lambda/2kT) \approx (1/2) \exp(f\lambda/2kT)$ の近似のもとに成立する。Mitchell ら⁹⁾によれば, この近似は応力レベルが強度の約 25% 以上

の場合に満足される。また, 応力レベルが強度の 80% を越えると破壊に近くなり, ひずみ速度が急速に加速されるので, 式 (9) で示される $\ln \dot{\epsilon} \sim \tau$ の直線関係が成立しなくなる。応力増加によりひずみ速度が変化するならば, 式(9) より次式が成立する⁹⁾。

$$\ln \left(\frac{\dot{\epsilon}_1}{\dot{\epsilon}_2} \right) = (\tau_1 - \tau_2) \cdot \frac{\lambda}{2kST} \dots\dots (10)$$

ここに, τ₁ および τ₂ はそれぞれ応力増加前後のせん断応力, $\dot{\epsilon}_1$ および $\dot{\epsilon}_2$ はそれぞれ応力増加前後のひずみ速度である。応力増分載荷前後のひずみ速度が得られれば, 式 (10) より結合数が求められる。また,

その結果および式 (9) より活性化エネルギー ΔF が決定される。

図-6 は千里粘土 A の MI-Test におけるひずみ速度の対数とひずみの関係を一例として図示したものである。各荷重段階において両者の間に明らかに直線関係が認められる。この直線性を利用して応力増分載荷前後のひずみ速度が外挿される。以上の方法により得られた結果を表-4 に示す。この際, λ としては 2.8 Å を用いているが, このことについてはのちに議論される。

4. 粘土の流動機構の検討および考察

(1) 粘土サスペンションの流動機構

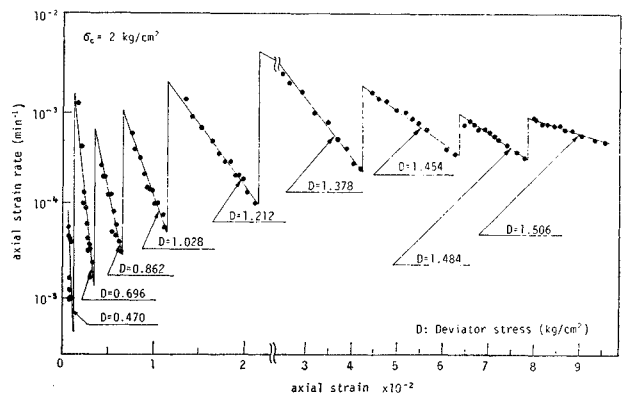


図-6 正規圧密粘土のひずみ速度とひずみの関係 (MI 試験, 千里粘土 A)

ニュートン流動領域の濃度をもつ粘土サスペンションおよび純水に対して得られた活性化エネルギーと容積濃度の関係を図-7 に示す。この図からわかるように、活性化エネルギーはニュートン流動領域においてほぼ一定

で濃度に関係しないようである。また、この値は純水の活性化エネルギーの値 (4.02 kcal/mol) と比べるとやや小さいがほぼ同じ値と考えてもよいと思われる。この事実は、ニュートン流動領域における粘土サスペンション

表-4 正規圧密粘土の活性化エネルギーおよび結合数

	圧密圧力	含水比	w/F	せん断強さ τ_f (kg/cm ²)	クリープ応力 (平均値)	クリープ応力 レベル	活性化 エネルギー	結合数 S (cm ⁻²)	結合数 レベル S/S_m
	σ_c (kg/cm ²)	w (%)			τ_c (kg/cm ²)	τ_c / τ_f	ΔF (kcal/mol)		
M 千 里 I 粘 土 A 試 験	1	62.9	0.82	0.485	0.139	0.29	28.2	3.34×10^9	0.79
					0.203	0.42	29.9	4.12×10^9	0.98
					0.260	0.54	31.2	4.49×10^9	1.07
					0.297	0.61	34.9	3.91×10^9	0.93
					0.321	0.66	33.1	4.74×10^9	1.13
					0.338	0.70	34.2	4.63×10^9	1.10
					τ_c / τ_f 0.25~0.80 の平均		$\Delta F_m = 31.9$	$S_m = 4.21 \times 10^9$	—
	2	56.1	0.73	0.869	0.292	0.34	29.0	6.69×10^9	0.84
					0.390	0.45	31.3	6.90×10^9	0.86
					0.473	0.54	31.3	8.21×10^9	1.03
					0.560	0.64	31.7	9.15×10^9	1.14
					0.648	0.75	33.5	9.03×10^9	1.13
					0.708	0.81	34.7	9.09×10^9	1.14
					0.735	0.85	35.2	9.17×10^9	1.15
τ_c / τ_f 0.25~0.80 の平均		$\Delta F_m = 31.4$	$S_m = 8.00 \times 10^9$	—					
3	52.5	0.68	1.290	0.401	0.31	27.2	1.26×10^{10}	0.91	
				0.521	0.40	28.6	1.26×10^{10}	0.91	
				0.655	0.51	29.1	1.41×10^{10}	1.02	
				0.780	0.60	29.7	1.58×10^{10}	1.14	
				0.879	0.68	32.0	1.42×10^{10}	1.03	
				0.961	0.74	33.1	1.43×10^{10}	1.04	
				1.019	0.79	35.1	1.31×10^{10}	0.95	
				1.068	0.83	36.4	1.25×10^{10}	0.91	
				1.108	0.86	34.8	1.45×10^{10}	1.05	
				1.140	0.88	35.9	1.39×10^{10}	1.01	
τ_c / τ_f 0.25~0.80 の平均		$\Delta F_m = 30.7$	$S_m = 1.38 \times 10^{10}$	—					
D I 粘 土 A 試 験	1	61.3	0.80	0.485	0.249	0.51	31.2	4.32×10^9	—
		63.9	0.83		0.289	0.60	28.8	6.27×10^9	—
	2	55.6	0.72	0.869	0.308	0.35	29.6	6.72×10^9	—
		55.9	0.73		0.647	0.74	33.2	9.28×10^9	—
	3	51.8	0.67	1.290	0.441	0.34	29.0	1.01×10^{10}	—
		52.9	0.69		0.775	0.60	28.3	1.77×10^{10}	—
カ オ リ ン	2	39.1	0.75	0.919	0.338	0.37	32.4	4.99×10^9	—
	3	38.1	0.73	1.150	0.509	0.44	29.5	9.16×10^9	—
37.4		0.72	0.517		0.45	29.2	9.64×10^9	—	

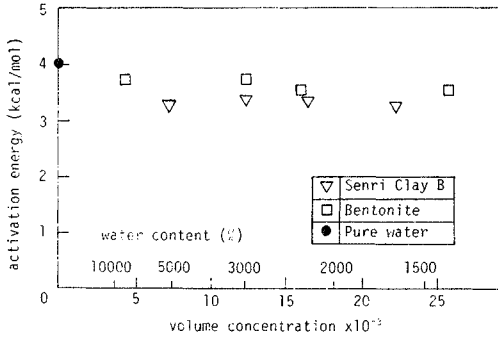


図-7 粘土サスペンションの活性化エネルギーと容積濃度の関係

の流動機構が純水（自由水）の流動機構とほぼ同一であることを明確に示している。すなわち、個々の粘土粒子は活性化エネルギーには関与しないと考えられる。これは Andersland ら⁹⁾によって得られた結果と一致するものである。以上の結果から、ニュートン流動領域における粘土サスペンションの流動の基本機構として、純水（自由水）と同様水素結合を考慮してもよいと思われる。次に、この場合の流動単位の平衡位置間の距離について検討する。水分子による水素結合を分子の大きさを考慮して模式的に示せば 図-8 のごとくなる¹⁷⁾。すなわち、一つの水分子の水素原子と他の水分子の酸素原子とが結合する。しかるに、流動単位は互いにその位置を交換し合えるものでなければならない。図-8 から明らかのように、流動単位の平衡位置として酸素原子の位置が考えられる。この場合の酸素原子間の距離は 2.7 Å である。したがって、水素結合により結合力が生ずる場合には、流動単位間の距離 λ として近似的に 2.7 Å を考えてもよいと思われる。いままでに粘土サスペンションにおいて、流動単位の平衡位置間の距離 λ を 2.7 Å として結合数を計算した根拠はこの理由によるのである。

しかるに、3. (2) で述べたように、活性化エネルギーおよび結合数はそれぞれ $\ln \eta$ と $1/T$ の線形関係の勾配および切片から式 (2) を用いて求められた。その際、frequency factor X は 1 としている。しかし、すでに指摘したように粘土サスペンションでは 1 に近い値であろうがその保証はない。そこで、frequency factor X の活性化エネルギー ΔF および結合数 S への影響につ

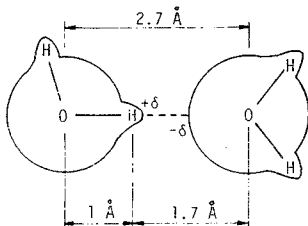


図-8 水素結合の模式図

いて検討する。活性化エネルギー ΔF は $\ln \eta$ と $1/T$ の線形関係の勾配から求められたので、式 (2) を参照すれば、 ΔF は X の影響を全く受けていないと考えられる。したがって、粘土サスペンションの活性化エネルギーに関する議論は X の不明確さにかかわらず成立する。一方、結合数 S は $\ln \eta$ と $1/T$ の線形関係の切片から求められたので、式 (2) を参照すれば、 S は X と比例関係にあることがわかる。したがって、 $X < 1$ の場合に $X=1$ とおけば、 S は $1/X$ に大きく見積られることになる。3. (2) b) で述べたように、ニュートン流動を示す限界濃度は粘土粒子の相互作用のない濃度の限界である。また、純水では土粒子の影響が全くないので、 $X=1$ としてもよいと考えられる。以上のことから、ニュートン流動領域の粘土サスペンションの X は 1 とオーダー的に異なることはないと推察される。

図-9 は粘土サスペンションの結合数と容積濃度の関係を示している。この図からわかるように、結合数は容積濃度が高くなるにつれて増加している。前述のごとく、frequency factor X が 1 よりも小さいがオーダー的には変わらない場合に $X=1$ とおけば、結合数 S は全体的に数倍程度に大きく見積られていることになる。したがって、ここに得られた結合数の値は少し大きく見積られている可能性はある。また、粘土サスペンションの粘

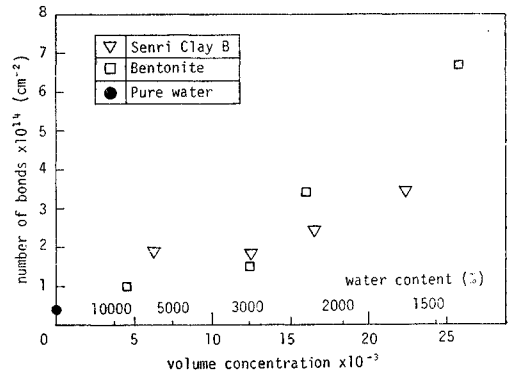


図-9 粘土サスペンションの結合数と容積濃度の関係

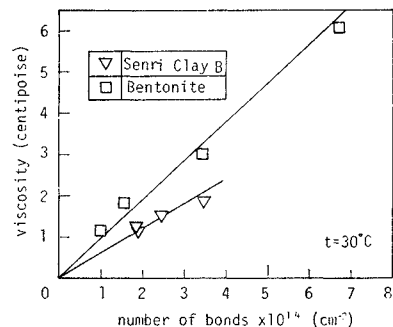


図-10 粘土サスペンションの粘度と結合数の関係

度は濃度が高くなるにつれて増加し、活性化エネルギーは濃度によらず一定である。したがって、粘度の違いは結合数が異なることに起因すると考えられる。図-10は粘土サスペンションの粘度と結合数の関係を示す。千里粘土 B およびベントナイトのサスペンションに対して、粘度と結合数の間に比例関係が認められる。しかし、両粘土間ではこの比例関係に差異がある。この理由としては、前述の frequency factor が粘土の種類や吸着イオンによって多少異なり、結合数の粘度への影響の程度が多少異なることが考えられる。

(2) 粘土ペーストの流動機構

粘土ペーストの活性化エネルギー ΔF と含水比 w の関係を図-11 に図示する。ただし、含水比はファイネスナンバー F で除した値 w/F で示されている(梅田粘土の F 値は液性限界で代用)。図からわかるように、梅田粘土、千里粘土 A および千里粘土 B の活性化エネルギーは、 w/F が 1.15~1.5 の範囲で、約 30 kcal/mol 前後でほぼ一定値をとる。さらに w/F が大きくなると、活性化エネルギーが次第に減少する傾向が認められる。一方、ベントナイトの活性化エネルギーは含水比の増加に伴ってほぼ直線的に減少している。これについては、ベントナイトの流動機構が他の粘土のそれと $w/F=1$ 付近で若干異なっている可能性のあることを示唆しているように思われる。しかし、この差異は重大なものではないと思われるので、粘土ペーストの活性化エネルギーは $w/F=1.4$ 付近を境として変化していると考えることができる。活性化エネルギーは流動単位の結合力を表現するものである。したがって、 w/F が 1.4 程度以上になると粘土ペーストの流動機構に変化が生じ、流動単位の結合力に何んらかの変化が生ずると推察される。

一方、結合数 S と w/F の関係は図-12 に示されている。この図より結合数の対数と w/F の関係は、 w/F が 1~2 の範囲で、線形関係であることが認められる。これは、状態量のパラメーターとして w/F を選ぶこと

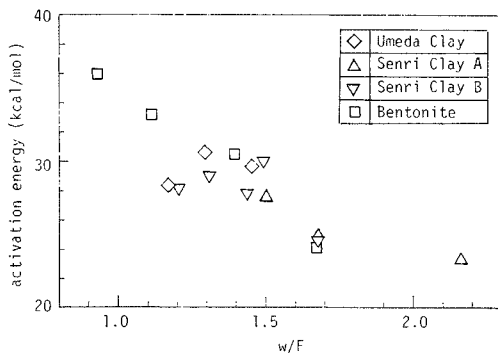


図-11 粘土ペーストの活性化エネルギーと含水比の関係

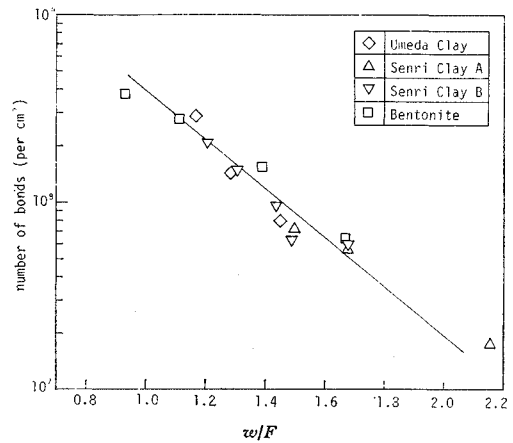


図-12 粘土ペーストの結合数と含水比の関係

により、粘土ペーストの $\log S \sim w/F$ 関係を粘土の種類にかかわらず一義的に表現できることを意味する。ただし、この一義性は粘土の応力履歴、結合数を求める際の試験のひずみ速度などが同一の場合に限られると思われる。粘土ペーストの結合数が粘土サスペンションの結合数より数オーダー低い値が得られている(図-9 参照)のは、おもにペーン試験と粘度試験のひずみ速度が大幅に異なることに起因すると思われる。図-12 からわかるように、一般に、粘土ペーストの含水比が F 値すなわち $w/F=1$ のときの結合数は約 $4 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ 、粘土ペーストの流動機構に変化が予想される $w/F=1.4$ のときの結合数は約 $1.2 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ であるということができる。

次に、frequency factor X' の活性化エネルギーおよび結合数への影響について検討する。結合数および活性化エネルギーはそれぞれ式(7)および式(8)を用いて求められた。両式からわかるように、結合数 S は X' の影響を受けないが、活性化エネルギー ΔF は $X' < 1$ の場合に $X'=1$ とすることにより、 $2.303 RT \log X'$ だけ大きく見積られる可能性がある。しかし、温度が 20°C のとき、 X' が 1 ではなく $10^{-1} \sim 10^{-2}$ 程度にオーダーが異なる場合でも、 ΔF は 1.3~2.6 kcal/mol 程度大きく見積られているにすぎない。一方、 X' はせん断パラメーターとして回転角速度 ω をとる場合の frequency factor である。この X' とせん断パラメーターとしてひずみ速度 $\dot{\gamma}$ をとる場合の frequency factor X との相違について検討する。用いたペーン試験機のペーン羽根の直径および高さはそれぞれ 2 cm および 4 cm であるので、半径 1 cm の円筒面が角速度 ω で回転していることになる。観察によれば、この際に塑性流動の生ずる粘土ペーストの層厚は半径方向に 2~3 mm である。すなわち、半径 12~13 mm の位置では $\omega=0$ である。これらの値からひずみ速度 $\dot{\gamma}$ と回転角速度 ω の関係を概算すると、 $\dot{\gamma}$

の方が ω より数倍大きい。したがって、 X' は X の数分の1になる。この場合に、 $X'=X$ とおいて得られる活性化エネルギー $4F$ については、せん断パラメーターとして ω を用いた方が $\dot{\gamma}$ を用いるよりもせいぜい 1 kcal/mol 程度大きく見積られている可能性がある。しかし、 $4F$ の絶対値に比して大きな誤差を生じない。

図-13 はせん断強さの対数 $\log \tau_f$ と w/F の関係を示す。ここで、せん断強さは、ペーン試験に用いた回転角速度 (約 $10^{-2} \sim 10^0$ deg/sec) の平均的な値として、 $\omega = 10^{-1}$ deg/sec における値を用いている。この図から、一般に圧密粘土において認められていると同様 $\log \tau_f$ と w/F の直線関係が存在することがわかり、また状態量のパラメーターとして w/F を選ぶことによる一義性が再び確認できる。図-12 において $\log S$ と w/F の間に直線関係が存在することを考え合わせると、 S と τ_f

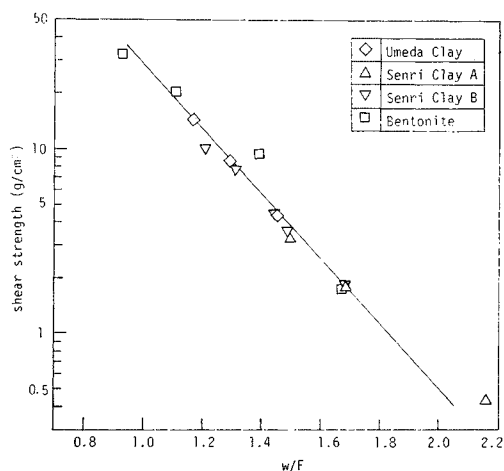


図-13 粘土ペーストのせん断強さと含水比の関係

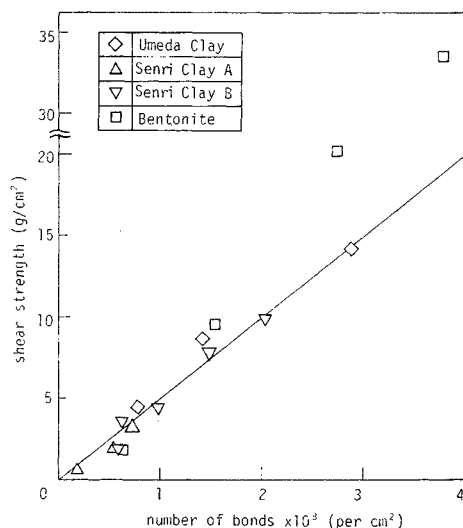


図-14 粘土ペーストのせん断強さと結合数の関係

の間に比例関係が存在することが推察される。また、式 (6) において $4F$ および ω を一定とすれば、 S と τ_f の間には比例関係が存在するはずである。図-14 は粘土ペーストの S と τ_f の関係を示したものである。ベントナイトについてはやはりはずれるが、種々の粘土ペーストに対して $S \sim \tau_f$ の間の比例関係が確認できる。

(3) 正規圧密粘土の流動機構

活性化エネルギーおよび結合数への応力レベルの影響を検討する。図-15 および図-16 は三軸クリープ試験の MI-Test の結果から得られた応力レベルと活性化エネルギーおよび結合数の関係をそれぞれ図示したものである。この場合の結合数は、応力レベルが強度の 0.25 ~ 0.80 の間の平均の結合数 S_m で除して、結合数レベ

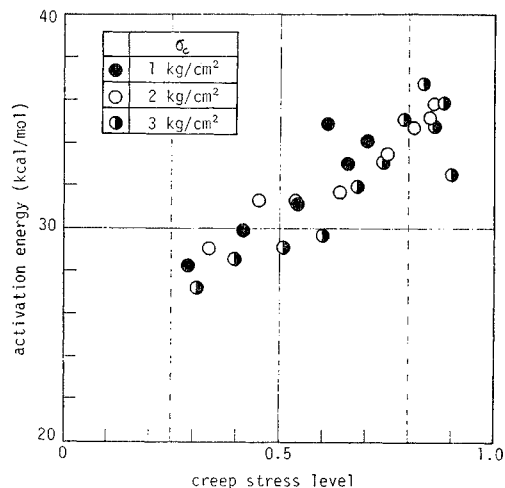


図-15 正規圧密粘土の活性化エネルギーと応力レベルの関係

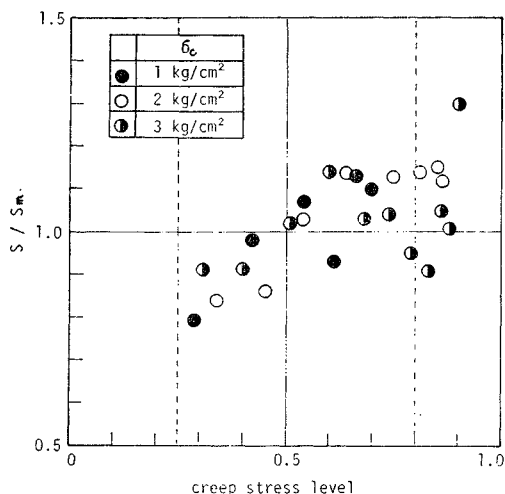
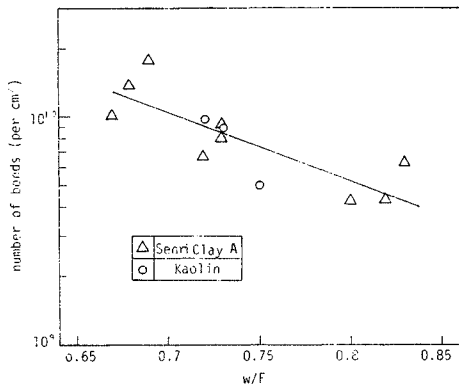


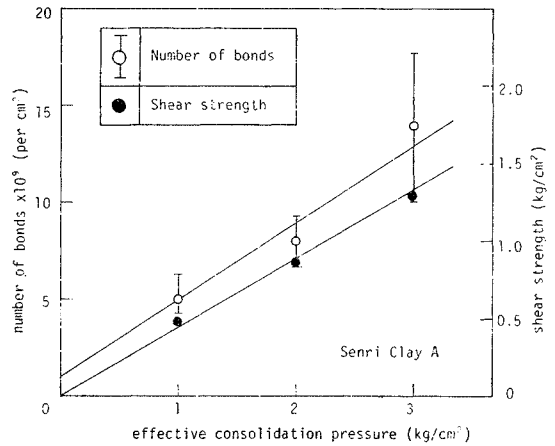
図-16 正規圧密粘土の結合数と応力レベルの関係

ル S/S_m として示している。これらの図から、活性化エネルギーおよび結合数がどちらも応力レベルの増加とともにやや増加する傾向が認められる。しかし、この増加は急激なものではない。前述のごとく、応力レベルの小さい領域および大きい領域では rate process 理論による基本式、すなわち式 (A.6) が厳密には成立しなくなる。そこで、応力レベルが 0.25~0.80 の領域についてみると、活性化エネルギーは $4F=28\sim35$ kcal/mol、結合数は $S/S_m=0.79\sim1.14$ である。前者は平均値の $\pm 10\%$ 、後者は $\pm 20\%$ 程度の範囲にあり、それぞれ近似的に一定とみなすことができる。また、応力レベルが高い場合、特に応力レベルが 0.90 程度になっても活性化エネルギーや結合数が大きく変化しないことは興味深い。

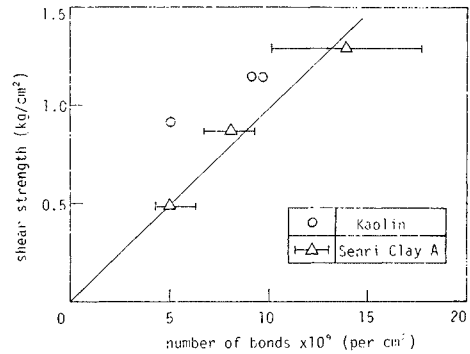
活性化エネルギーおよび結合数がクリープ応力レベルによりあまり影響を受けないことが近似的に確認された。そこで、以下の議論は MI-Test の応力レベル 0.25~0.80 の間の平均値および DI-Test の結果として得られた活性化エネルギーおよび結合数に対して行う。表 4 からわかるように、2 種類の正規圧密粘土に対して、活性化エネルギーは圧密圧力によらず約 28~33 kcal/mol の範囲でほぼ一定 (平均値 30.6 kcal/mol) である。Mitchell ら⁹⁾ および Andersland ら⁹⁾ も種々の圧密粘土の活性化エネルギーとして 30 kcal/mol 前後の値を得ているので、一般に圧密粘土の活性化エネルギーは圧密圧力および粘土の種類にかかわらずほぼ一定であると考えられる。また、結合数 S と含水比 w の関係は図 17 に示されている。ただし、含水比はファイネスナンバー F で除した値 w/F で示されている。図からわかるように、 $\log S$ と w/F の間にはほぼ直線関係が認められる。粘土の種類は少ないが、状態量のパラメーターとして w/F をとることにより、正規圧密粘土の $\log S \sim w/F$ 関係を一義的に表現することができると思われる。この正規圧密粘土の $\log S \sim w/F$ 関係は、当然のことながら、粘土ペーストのそれと定量的に接続しない。



図一七 正規圧密粘土の結合数と含水比の関係



図一八 正規圧密粘土の結合数およびせん断強さと圧密圧力の関係



図一九 正規圧密粘土のせん断強さと結合数の関係

なぜなら、三軸クリープ試験とベーン試験のひずみ速度は極端には違わないが、両者の粘土の応力履歴が異なるからである。図 18 は結合数およびせん断強さと圧密圧力の関係を示す。ともにほぼ直線関係があり、Mitchell ら⁹⁾ によって得られた結果がさらに裏づけられている。図 19 は結合数 S とせん断強さ τ_f の関係を図示したものであるが、 $S \sim \tau_f$ の比例関係が近似的に確認される。

次に、frequency factor X の活性化エネルギーおよび結合数への影響について検討する。これは、4. (2) で検討したベーン試験の frequency factor X' と同様に結合数 S には全く影響はない。また、活性化エネルギー $4F$ については、 $X=1$ ではなく $10^{-1}\sim 10^{-2}$ 程度にオーダーが異なる場合でも、1.3~2.6 kcal/mol 程度大きく見積られているにすぎず、 $4F$ の絶対値に比して大きな誤差を生じない。したがって、すでに行った正規圧密粘土の活性化エネルギーおよび結合数に関する議論は frequency factor の不明確さによってくつがえされることはないと考えられる。

(4) 粘土・水系の流動機構

以上のごとく得られた代表的な粘土・水系の流動機構を総合的に検討する。正規圧密粘土および w/F が 1.4 程度より小さい粘土ペーストの活性化エネルギーは、frequency factor およびせん断パラメーターの相違による誤差を考慮しても、ともに約 30 kcal/mol 前後の値をとりほぼ一定と考えることができる。すなわち、両者の流動単位の結合力はほぼ同じ値であると考えられる。いままでに得られた結合数 S とせん断強さ τ_f の関係を Mitchell ら⁹⁾ のデータも含めて 図-20 に示す。図中の実線は両対数紙上で 45° の傾きをもつ直線であるので、 $S \sim \tau_f$ の間に近似的に比例関係が存在することが確認される。これは、せん断強さと結合数の比 τ_f/S 、すなわち破壊時の流動単位 1 個当りに作用するせん断力 f_f が一定であることを意味する。言い換えれば、せん断強さの発生機構が同一であることを意味する。次に、この比例関係の妥当性について検討する。4.(2) ですでに得られているように、 $w/F=1$ すなわち含水比が F 値に等しいときの結合数は、約 $4 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ である。このときのせん断強さは、図-20 より約 20 g/cm² である。しかるに、Karlsson¹⁸⁾ によれば、 $w/F=1$ におけるせん断強さは粘土の種類にかかわらず 15~21 g/cm² でほぼ一定であることがすでに確かめられている。したがって、図-20 における直線の妥当性が定量的にも裏づけられたことになる。以上の事実より、正規圧密粘土および w/F が 1.4 程度より小さい粘土ペーストの流動機構の類似性が指摘される。

一方、ニュートン流動を示す粘土サスペンションの活性化エネルギーは純水（自由水）のそれに等しく（約 4

kcal/mol）、正規圧密粘土 および 粘土ペーストに比し小さい値である。また、粘土ペーストの活性化エネルギーは、 w/F が 1.4 より大きくなるにつれて小さくなる傾向を示す。これらの事実を考え合わせると、粘土ペーストと粘土サスペンションの間に過渡領域が存在し、その領域では複数の流動機構が関与している可能性がある。すなわち、粘土・水系の流動機構は本質的には homogeneous process ではなく、heterogeneous process であると考えられることによって、統一的に取扱いうることを示唆しているように思われる。

(5) 粘土粒子接合点の構造

Mitchell ら⁹⁾ は正規および過圧密粘土、乾燥粘土および乾燥砂に対して、Andersland ら⁹⁾ は吸着イオンを種々に変化させたり、吸着水を取り除いて四塩化炭素を加え無極性化した正規圧密粘土に対して、著者らは正規圧密粘土および w/F が 1.4 程度より小さい粘土ペーストに対して、それぞれ活性化エネルギーを求めた。その結果、いずれも 30 kcal/mol 前後の値で、ほぼ一定であることが確認された。これらの実験結果は、吸着水の有無、吸着層の厚さあるいは吸着層の性質が活性化エネルギーの値に関係しないことを示している。すなわち、せん断応力下における粘土粒子間の結合力には水分子が関与している様子はみられない。そこで、著者らは、Mitchell ら⁹⁾ および Andersland ら⁹⁾ によって考察されているのと同様に、これらの土の土粒子接合点の構造として吸着水は関与せず、おもに土粒子固体間の直接接触によって生ずると考える。これは、Rosenqvist によって提案されたクリープ挙動の説明、すなわち粘土のクリープ現象は微視的には土粒子接合点の酸素イオンの緩慢な拡散過程であるという説明と一致する⁹⁾。シリカ鉱物中の酸素イオンの拡散において測定される活性化エネルギーが 30~40 kcal/mol であることは Rosenqvist の考えを支持するものである。

したがって、rate process 理論の立場から粘土粒子接合点の構造を推察すれば次のようになると思われる。一般に、粘土鉱物の構造にはシリカシートと八面体シートの 2 個の基本的な型がある。これらは Si, Al, Fe, Mg などの化合物であり、それぞれの原子が酸素原子あるいは水酸基に取り囲まれている。粘土粒子の表面にはこのような酸素イオンが露出している。これらの酸素イオンは他の粘土粒子表面の原子と結合したり、吸着層を形成している水分子と結合すると考えられる。しかし、ここで考えている状態の粘土では、前述のように水分子はせん断応力下の流動単位の結合力に関与していないと考えられる。すなわち粘土粒子接合点の結合力は Si, Al, Fe, Mg などの原子に拘束されている酸素イオンによる

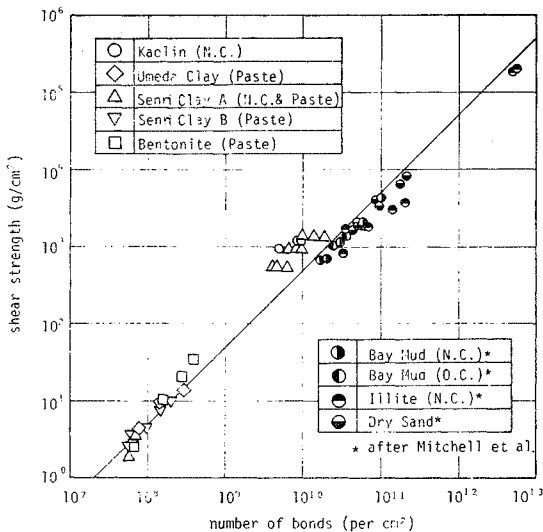


図-20 種々の土のせん断強さと結合数の関係

結合によって生ずると考えられる。厳密には、粘土粒子接合点の結合力に関与するこれ以外の要素として、ファンデルワールス力あるいは粘土粒子表面の凹凸による微視的なインターロッキングなどが考えられる。しかし、粘土サスペンションおよび高含水比の粘土ペースト以外の種々の粘土・水系に対してはほぼ一定の活性化エネルギー (30 kcal/mol 前後) が得られているので、これらの要素による影響は比較的小さいと思われる。少なくとも、ファンデルワールス力による結合エネルギー (0.5~5 kcal/mol) は酸素による一次結合エネルギーより相当小さく、また水素結合より一般に小さいので、この影響は比較的小さいと思われる。以上の考察により、この場合の流動の基本機構として、主として酸素による一次結合が考えられることになる。この場合、水分子がせん断応力下の結合力に関与しないことに関しては、以下の説明が可能であるかもしれない。すなわち、Martin¹⁹⁾によれば、吸着水は2次元的な液体であって、水分子は粘土粒子表面に平行な方向へは容易に移動するが垂直な方向にはほとんど移動しない。

次に、酸素による一次結合によって結合力が生ずる場合の流動単位の平衡位置間の距離 λ について検討する。この場合、 λ は近似的に粘土鉱物表面の酸素原子の平衡位置間の距離と仮定してもよいと考えられる。酸素イオンの直径は 2.8 Å であるので、近似的に $\lambda \approx 2.8 \text{ \AA}$ と考えてもよいと思われる。いままでに正規圧密粘土および粘土ペーストの結合数を求める際に $\lambda = 2.8 \text{ \AA}$ を用いた根拠はこの理由によるのである。

5. む す び

本論文においては、広範なコンシステンシー状態をもつ粘土・水系の本質的な流動機構が粘土・水系全体としての種々の流動現象の機構となりうる特性を具備すべきであるという考えに立脚し、粘土サスペンション、粘土ペーストおよび正規圧密粘土の定常的な流動現象を取り上げた。その結果、これらの流動現象が現象的に rate process 理論によって説明できることを裏付けた。さらに、この理論で仮定される微視的な流動機構を粘土粒子間の微視的構造と対応させることによって、代表的な粘土・水系の流動機構を明確にした。その結果、粘土・水系の流動に関与する基本機構として、水素結合および酸素による一次結合が考えられる。代表的には、前者は粘土サスペンションの流動の基本機構、後者は圧密粘土の流動の基本機構として考えることができる。一方、粘土サスペンションと圧密粘土の中間的なコンシステンシーをもつ粘土ペーストの流動の基本機構は、状態量を表わすパラメーター w/F が 1.4 程度より小さい場合、酸素の一

次結合であると考えられる。しかし、 w/F が 1.4 程度より大きい場合には活性化エネルギーが小さくなり、流動の基本機構が変化する傾向がある。以上のことから、粘土・水系の流動機構は本質的には homogeneous process ではなく、heterogeneous process と考えることによって、広範なコンシステンシー状態における粘土・水系の流動現象を統一的に取扱いうる可能性が示唆された。

この heterogeneous process としての統一的な流動機構については現在研究を進めているので^{20), 21), 22)}、稿を改めて追って詳細に報告したい。

最後に、本研究の遂行にあたり多大の協力を頂いた元本学大学院生 阿倍信晴君 (現在大阪市土木局)、長瀬恵一郎君 (現在建設省九州地建) に深謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 須藤・東山・山崎：土のレオロジカルな構造，土と基礎，Vol. 13, 9, pp. 29~37, 1965.
- 2) Rosenqvist, I. Th. : Physico-chemical properties of soils : soil-water systems, Proc. ASCE, Vol. 85, No. SM. 2, pp. 31~53, 1959.
- 3) Yong, R.N. and Warkentin, B.P. : Introduction to soil behavior, Macmillan, New York, 1966. (山崎・山内訳)
- 4) Glasstone, S., Laidler, K. and Eyring, H. : The theory of rate process, McGraw-Hill, New York, 1941.
- 5) 村山朔郎・柴田 徹：粘土のレオロジー的特性について，土木学会論文集，第 40 号，pp. 1~31, 1956-12.
- 6) Christensen, R.W. and Wu, P.L. : Analysis of clay deformation as a rate process, Proc. ASCE, Vol. 90, No. SM. 6, pp. 125~157, 1964.
- 7) Mitchell, J.K., Campanella, R.G. and Singh, A. : Soil creep as a rate process, Proc. ASCE, Vol. 94, No. SM. 1, pp. 231~253, 1968.
- 8) Mitchell, J.K., Singh, A. and Campanella, R.G. : Bonding, effective stresses and strength of soils, Proc. ASCE, Vol. 95, No. SM. 5, pp. 1219~1246, 1969.
- 9) Andersland, O.B. and Douglas, A.G. : Soil deformation rates and activation energies, Géotechnique, Vol. 20, No. 1, pp. 1~16, 1970.
- 10) Lambe, T.W. : A mechanistic picture of shear strength in clay, Res. Conf. on Shear Strength of Cohesive Soils, ASCE, pp. 555~580, June 1960.
- 11) Mitchell, J.K. : Shearing resistance of soils as a rate process, Proc. ASCE, Vol. 90, No. SM. 1, pp. 29~61, 1964.
- 12) Herrin, M. and Jones, G.E. : The behavior of bituminous materials from the viewpoint of the absolute rate theory, Proc. Ass. Asph. Pav. Technol., Vol. 32, pp. 82~105, 1963.
- 13) Andersland, O.B. and Akili, W. : Stress effect on creep of a frozen clay soil, Géotechnique, Vol. 17, pp. 27~39, 1967.
- 14) 後藤・平井・花井：レオロジーとその応用，共立出版，pp. 207~221, 1962.
- 15) Cadling, L. and Odenstad, S. : The vane borer, an apparatus for determining shear strength of clay soils directly in the ground, Proc. R.S.G.I., No. 2, 1950.
- 16) Karlsson, R. : On cohesive soil and their flow proper-

- ties, S.G.I. Reports, No. 5, pp. 25~49, 1963.
- 17) Barrow, G.M. : Physical chemistry, McGraw Hill, New York, 1966. (藤代訳)
- 18) Karlsson, R. : Suggested improvements in the liquid limit test with reference to flow properties of remoulded clays, Proc. 5th I.C.S.M.F.E., Vol. I, pp. 171~184, 1961.
- 19) Martin, R.T. : Absorbed water on clay, a review, Proc. 9th National Conf. Clays and Clay Minerals, London, Pergman Press, 1960.
- 20) 伊藤・松井・阿倍 : 粘土の流動機構に関する考察, 土木学会第 27 回年次学術講演概要集Ⅲ, pp. 139~140, 1972.
- 21) 伊藤・松井・長瀬 : 粘土の流動機構に関する研究, 土木学会第 28 回年次学術講演概要集Ⅲ, pp. 20~22, 1973.
- 22) 伊藤富雄・松井 保 : 系統的な粘土・水系の流動機構について, 土木学会第 29 回年次学術講演概要集Ⅲ, pp. 71~72, 1974.

【付 録】

rate process 理論の粘土の変形挙動への適用

rate process 理論において流動単位の挙動を統計学的に評価するため, 図-A1 に示すようなエネルギー障壁が仮定される。せん断力の作用していない平衡状態を表わす曲線Aの状態では, 流動単位が移動する確率は0である。しかし, せん断力が作用している状態を表わす曲線Bの状態では, せん断力作用方向の実質的な活性化確率 \bar{v} , すなわち流動単位がせん断力作用方向に移動する確率は次式で表わされる。

$$\bar{v} = \bar{v} - \bar{v} = 2 \frac{kT}{h} \exp\left(-\frac{\Delta F}{RT}\right) \sinh\left(\frac{f\lambda}{2kT}\right) \dots\dots\dots (A.1)$$

ここに, k はボルツマン定数 (1.3805×10^{-16} erg/deg·mol), T は絶対温度, h はプランク定数 (6.624×10^{-27} erg·sec), ΔF は活性化エネルギー, R はガス定数 (1.987 cal/deg·mol), f は流動単位に作用するせん断力, λ は流動単位の平衡位置間の距離である。

次に, 粘土の変形を巨視的に表現するために, 式(A.1) で表わされるせん断力作用方向への実質的な活性化確率としての微視的な量と巨視的な粘土のせん断パラメーターとの接続を考える。いま, 活性化確率 \bar{v} とひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ を関係づけるパラメーターを frequency factor とよび, X とすれば,

$$\dot{\epsilon} = X\bar{v} = 2 X \frac{kT}{h} \exp\left(-\frac{\Delta F}{RT}\right) \sinh\left(\frac{f\lambda}{2kT}\right) \dots\dots\dots (A.2)$$

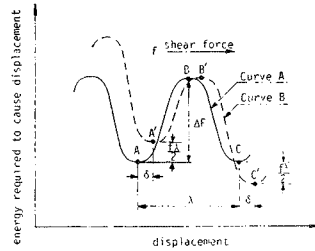


図-A1 エネルギー障壁の模式図

また, 複数の結合が同時に破壊しないと仮定されるならば,

$$f = \tau/S \dots\dots\dots (A.3)$$

ここに, τ は粘土に作用するせん断応力, S は微視的すべり面単位面積当りの流動単位数(結合数)である。式(A.2) および (A.3) は定常流動時の粘土のひずみ速度とせん断応力を関連づける最も基本的な方程式である。

せん断力の作用によって供給されるエネルギーが熱エネルギーに比して小さいとき, $\sinh(f\lambda/2kT) \approx f\lambda/2kT$ なる近似が可能であるので, 式(A.2) および (A.3) より

$$\dot{\epsilon} = \tau \frac{X\lambda}{hS} \exp\left(-\frac{\Delta F}{RT}\right) \dots\dots\dots (A.4)$$

式(A.4) はひずみ速度とせん断応力の比例関係を与えているのでニュートン流動であり, 粘性係数 η は次式で与えられる。

$$\eta = \frac{hS}{X\lambda} \exp\left(\frac{\Delta F}{RT}\right) \dots\dots\dots (A.5)$$

一方, 粘土の流動に対しては, 一般にせん断力の作用によって供給されるエネルギーが熱エネルギーよりも大きいと考えられる。したがって, $\sinh(f\lambda/2kT) \approx (1/2) \exp(f\lambda/2kT)$ なる近似が可能であるので, 式(A.2) および (A.3) より

$$\dot{\epsilon} = X \frac{kT}{h} \exp\left(-\frac{\Delta F}{RT}\right) \exp\left(\frac{\lambda\tau}{2kST}\right) \dots\dots\dots (A.6)$$

λ/S は, 体積と同じ次元をもつことから流動体積 (flow volume) V_f とよばれることがある。しかし, その定義から明らかなごとく, 流動単位の体積を表現するものではない。ただし, $\lambda \approx \lambda_1$ (λ_1 は微視的なすべり面に垂直な方向の流動単位の平衡位置間の距離) の場合には近似的に流動単位の占める体積を表現することになる。