

第 3 回 アスファルトの粘度

阿 部 頼 政 *

§ 1. はじめに

アスファルトの性質を問題にする場合、よくレオロジー (rheology) とか、レオロジー的性質という言葉がでてくる。一般にはアスファルトの流動特性を云々するときに使われているようであるが、もともとは、「物質の変形 (deformation) と流動 (flow) に関する学問」であり、この定義はレオロジーという言葉と共にBinghamによって初めて与えられたといわれている。この定義からわかるように、レオロジーの中には、変形をあつかう弾性学、塑性学、流動をあつかう流体力学、さらに両者をおかねそなえた粘弾性学など、物質の力学的性質を体系づけようとする学問が、ほとんど全部含まれているわけである。この中でも特に、粘弾性論はレオロジーの中心的存在であり、狭義のレオロジーと言えば、この粘弾性をおつかう分野をさすことが多い。

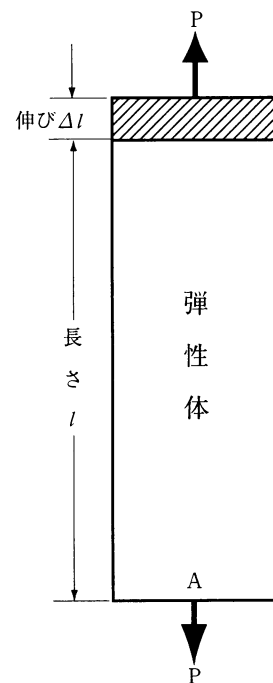
アスファルトは、粘弾性体 (弾性体と粘性体の両方の性質を兼ね備えた物質) の代表的材料であるため、粘弾性論からアスファルトの性質を解明しようとする試みも多く、またレオロジーという言葉も本来の意味は別として気軽に使われているのであろう。

今回は、以上のような学問体系からみても、また、現場でアスファルトを使用する場合においても重要なポイントとなる「粘度」について、基礎的な考察をしようと思う。

§ 2. 粘度とは何か

いま、2種の液体、たとえば水とアスファルト (水飴のような状態をイメージに浮べて欲しい) が、それぞれいっぱい入った2つのバケツを急に傾けた場合を想定してみよう。水の方は瞬間的にこぼれて表面はたちまち水平になる。一方、アスファルトの方は、ドロドロとした感じで少しずつこぼれるが、しばらく時間がたてば水と同じく水平面をたもつようになってくる。水の方は簡単に流れ、アスファルトは流れにくい、この流れにくさがすなわち粘性抵抗と言われるものである。この場合、水

図-1 フックの法則



に粘性抵抗がないのではなく、アスファルトの方が粘性抵抗が大きいのである。そして、この粘性抵抗の大きさを示すものが本稿の目的とする「粘度」である。また、この例でアスファルトの方が時間がかかるということにも注目してほしい。粘度と時間 (流れる速度) とは密接なつながりがあるからである。

以上述べたことで粘度とはどんなものかという感じはつかめてもらえたと思う。次は、この流れにくさを定量的に数値であらわすにはどうすればよいか、ということを考えてみよう。

前に述べたレオロジーにおいて最も基礎となるのは、弾性体におけるフックの法則と、粘性流体におけるニュートンの法則である。そして、粘度は後者によって定義される。道路技術者にとってフックの法則は自明の利であろうが、ニュートンの法則もこれと比較しながら考えるとわかりやすいので、以下簡単に述べることにする。

いま、長さ l 、断面積 A の弾性体を力 P で引張ったと

* 日本大学理工学部 講師

する(図-1)。このときの伸びを Δl とすれば、 Δl の小さいうちは、次のような比例関係が成立する。

$$P/A : \Delta l / l = E \quad \dots\dots\dots(1)$$

応力 σ を P/A 、歪 ε を $\Delta l / l$ であらわせば

$$\sigma = E \varepsilon \quad \dots\dots\dots(2)$$

と書ける。これがフックの法則である。ここで比例定数 E はヤング係数(縦弾性係数、ヤング率)といわれ、各物質についてほぼ一定であるため、固体の力学的性質を表現する最も一般的な指標となっているわけである。

一方液体の場合は、固体のように押したり引っ張ったりするわけにはいかない。液体に外力が加われば、その外力をとり去らない限り変形しつづける。つまり流動が起る。したがって、外力に対する変形の大きさで液体を特徴づけることはできない。前の例でいえば、水もアスファルトも時間がたてば、同じ状態になってしまうからである。しかし、水とアスファルトの大きなちがいは変形が終了するまでの時間のかかり方であった。すなわち変形速度である。次に述べるように、液体の特徴づけは、外力とこの変形速度の関係で表わされるのである。

図-2で2枚の平行板の間に液体が満たされており、下方の板を固定し、上方の板を一定の力 S (dyne)で右方に引っ張る場合を考えよう。2枚の平行板間の距離を一定にし、板と液体が完全にくっついてすべらないとすれば、上の板のそばの液体は板といっしょに動き、下の板のそばの液体は動かないでとまっているから、その間の液体は、図のように、少しずつ動き方がちがうはずである。

液体間には粘性抵抗があるため、上方の板の速度 v (cm/sec)は無制限に大きくなることはなく一定の速度で動き続ける(定常状態という)。この速度 v を平行板間の距離 y (cm)でわった値、すなわち単位距離あたりの流速の変化量 D (1/sec)は一般に速度勾配とか、ずり速度、せん断速度等の名で呼ばれ、粘度を考える上で重要な量となっている。

$$D = v/y \quad \dots\dots\dots(3)$$

この場合、単位面積あたりの力(ずり応力またはせん断応力と呼ばれる)を τ (dyne/cm²)であらわせば

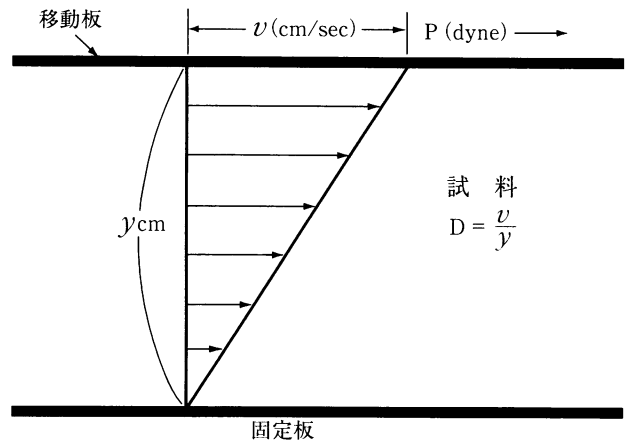
$$\tau = P/A \quad \dots\dots\dots(4)$$

となる。普通の状態の水などでは、この速度勾配 D とずり応力は比例し、次の式で書き表わされる。

$$\tau = \eta D \quad \dots\dots\dots(5)$$

この比例定数 η が粘度と呼ばれているものであり、(5)式で表わされる関係がニュートンの法則である。さらにつけ加えれば、(5)式であらわせる液体はニュートン流体(5)式であらわせない流体は非ニュートン流体と呼ばれている。

図-2 粘性流動



以上のような粘度の定義は多少複雑な感じを受けるかも知れないが、もう一度、最初にあげた水とアスファルトの例にもどって(5)式を考えてみよう。両方のバケツを同じ角度で傾けたとすれば、水とアスファルトにかかる外力(この場合は重力)はほぼ同じであるから、(5)式の左辺は一定であると見なしてよい。バケツを傾けたとき水が早くこぼれ、アスファルトがなかなかこぼれないということは、水の水速度勾配 D は大きく、アスファルトのそれは小さいことを意味する。 D と η をかけたものが、水とアスファルトで同じであるから、必然的に水の粘度 η は小さく、アスファルトの粘度は大きいことになる。すなわち、変形後の状態は同じでも、水が早くながれ、アスファルトは流れにくかったという変形中の現象をとらえて、両者のちがいを、それぞれの材料特性である粘度という数量のちがいであらわせたという点に(5)式の大きな意味があるのである。

粘度 η の単位は、粘性抵抗の研究における先覚者——フランスのPoiseuilleの名をとり、poise(ポアズ)であらわされている。ここで1 poiseの粘度とは、距離1cm($y=1$ cm)についての流速の変化量が1cm/sec($v=1$ cm/sec)であるような速度勾配($D = \frac{v}{y} = 1$ 1/sec)のときに、単位面積1cm²($A=1$ cm²)当りに作用する力が、1dyne($P=1$ dyne)であるような液体の場合をいう。()内の註は本稿の記号をあてはめたものである。(5)式を書きなおすと

$$\eta = \frac{\tau}{D} = \frac{P}{AD} \quad \dots\dots\dots(6)$$

であるからpoiseの次元(dimension)を調べると次のようになる。

$$\text{poise} = \frac{\text{dyne}}{(\text{cm}^2)(\text{sec}^{-1})} = \frac{\text{g}}{\text{cm} \cdot \text{sec}} \quad \dots\dots\dots(7)$$

poiseの1/100をcenti-poise(センチポアズ)という。

このpoiseで書きあらわした粘度がいわゆる絶対粘度 (Absolute Viscosity) といわれるもので、20℃の水の粘度が、1 centi-poiseになることを覚えておくとよい。

これに対し、絶対粘度を密度 ρ (g/cm³) でわった値を動粘度 (ν で表わす) と呼び、C G S系ではstokes (ストークス) が基本単位となる¹⁾。

stokesの次元は

$$\text{stokes} = \frac{\text{poise}}{\text{g/cm}^3} = \frac{\text{cm}^2}{\text{sec}} \dots\dots\dots(8)$$

であり、絶対粘度と同じく1/100をcenti-stokesと呼ぶ。

舗装用石油アスファルトの暫定規格²⁾では、120℃、140℃、160℃、180℃における動粘度をC G S単位で明示しなければならない、とされているが、これはアスファルトの動粘度をstokesで表わせということを意味している。

ここで、フックの法則とニュートンの法則をもう一度比較してみよう。(2)式と(5)式を書き並べてみると、両者は全く同じ形をしていることがわかる。

$$\sigma = E \varepsilon \quad \tau = \eta D \quad \dots(2) \quad \dots(5)$$

σ と ε 、 τ と D の間にはいうまでもなく図-3 a, bのような直線関係が成立し、 E と η はそれぞれの傾きを示している。 σ と τ は外力に抵抗するために、弾性体、粘性流体中に、それぞれ発生した応力であり、 ε と D は外力によっておこされた変形である。そしてさらに E と η は外力による変形を少しでも小さくしようとする物質固有の抵抗係数のようなものである。すなわち一定の外力のもとでは、ヤング率 E が大きければ大きいほど弾性体の歪 ε は小さいように、粘度 η が大きければ大きいほど粘性流体の変形速度は小さくなる。逆にいえば、外力がかかったとき、歪の小さい弾性体はヤング率が大きく、なかなか流れにくい粘性流体は粘度が大きい材料であるということになる。

以上をまとめると(表-1)、弾性体におけるフックの法則と粘性流体におけるニュートンの法則は非常に似通ったものであり、粘度は弾性体のヤング率に相当するものである、ということになる。

固体材料では物質定数としてヤング率はなくならないものである。それと同様にアスファルトのような粘性流体では粘度が基本になることは容易にうなずけることと思う。したがって暫定価格で粘度を重視するようになったということは、当然のことながら非常に望ましい方向であろうと思われる。

図-3 弾性変形と粘性流動

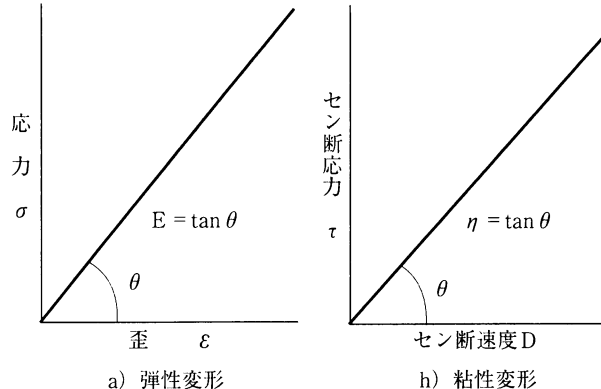
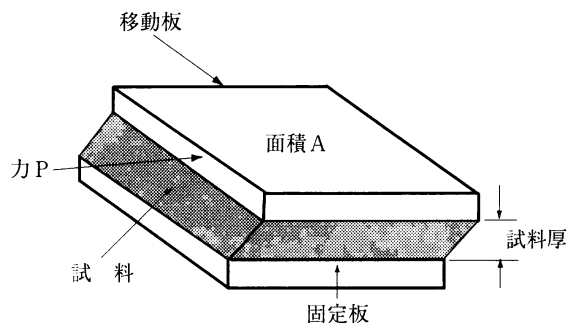


表-1 二つの法則の対応関係

弾性体	粘性流体
フックの法則	ニュートンの法則
$\sigma = E \varepsilon$	$\tau = \eta D$
応力 σ	せん断応力 τ
歪 ε	せん断速度 D
ヤング率 E	粘度 η

図-4 平行板型粘度計



3. 粘度の測定法

液体をとりあつかう者にとって粘度は重要な指標であるため、その測定法は非常に数多く発表されている。しかし、あまり細かいことは興味も薄いと思われるので、ここでは代表的な型と測定原理を紹介することにとどめよう。

(1) 平行板型粘度計 (sliding plate microviscometer)

これは1枚の平行板の間に試料をはさみ、一方を固定し、一方を引っ張ることによって試料にせん断を与え、荷重と変形速度を測定して粘度を求めようとするもので、前節で述べた粘度の原理そのままの試験法である(図-4)。したがって粘度の計算には(5)式がそのまま使える。図では試料の大きさを拡大して書いてあるが、実際の測定では試料の厚さは100 μ (0.1mm) 以下である。

そのため、試料がきわめて少量ですみ、回収したアスファルトの試験等には好適である。また、せん断力を種々

に変えることができるため、非ニュートン液体（後述）の測定にも便利である。しかし、装置が比較的高価なこと、測定に精密さ（試料の厚さ等）を要することなどから一般にはあまり普及されておらず、主に研究用として重宝されている。興味のある方はこのマイクロビスコメーターに関するシンポジウム³⁾を一読されるとよい。

(2) 回転粘度計

これは、同心二重円筒の間に試料をはさみ外筒または内筒を回転させることにより、試料にせん断力を与えて粘度を測定するものである。ちょうど平行板型粘度計の二板の平行板で二重の筒を作ったようなものである。この種の粘度計で最も基本的なものは、外筒を回転させるクエット (Couette) 型の回転粘度計である (図-5)。

この装置では、内筒はスプリングワイヤーでつるされている。いま、外筒を一定速度で回転させると、試料の粘性抵抗のため内筒も回転しようとする。しかし、スプリングのねじれ抵抗があるため、試料の粘性抵抗とスプリングの抵抗がちょうどつり合った位置までしか内筒は回転することができない。したがって、定常状態になったときの内筒の回転角（スプリングのねじれ角）から逆に粘度が計算されることになる。

一方、内筒回転型の代表的なものはストーマー粘度計である。これは図-6に示すように、おもりの落下によって内筒が回転させられる。おもりが一定ならば、内筒の回転速度は試料の粘度によって早くなったり遅くなったりする。したがって、回転速度を測定すれば粘度が求められるわけである。

以上の2種は二重円筒による測定法であるが、アスファルト関係では最もポピュラーなものとして単一円筒を回転させるブルックフィールド粘度計（通常B型粘度計と呼ばれる）がある。これは図-7に示すように円筒（または円板）を回転させるのであるが、この場合、一定速度の回転を与えるモーターと円筒との間に適当なスプリングを入れてある。したがって、試料の粘性抵抗を受ける円筒はモーターと一緒に回転できず、ある角度、すなわち、スプリングのねじれによる抵抗と粘性抵抗がつりあう角度だけおくれで回転するようになる。このねじれ角で測定すれば試料の粘度がわかるという原理である。この粘度計はとりあつかいが比較的簡単で、回転速度や円筒を変えることにより、広範囲の粘度を測定することができるので、アスファルト関係ではほとんどの研究所で使われているようである。

(3) 細管型粘度計

最初に水とアスファルトの例で説明したように、液体の流れ方は粘度によって異なる。したがって液体の流れる速さを測定することによって、逆に粘度を推定するこ

図-5 回転粘度計 (外筒回転)

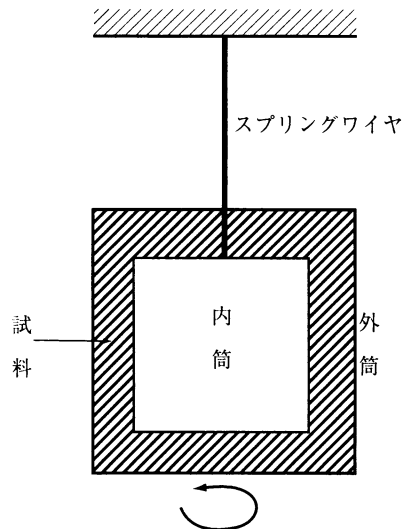


図-6 回転粘度計 (内筒回転)

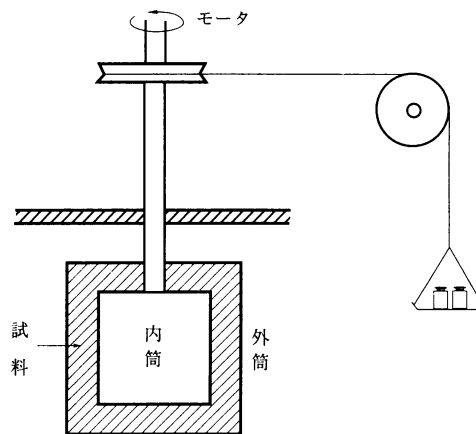
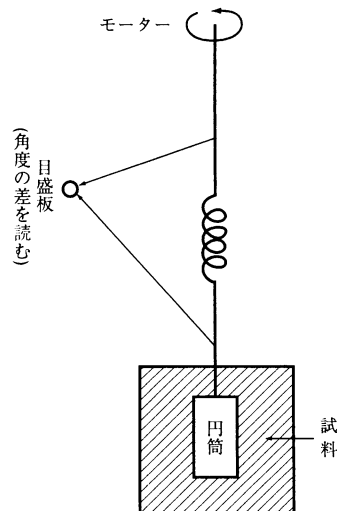


図-7 B型粘度計



とができるわけである。この原理に基づいて毛細管を利用した粘度計が古くから工夫されてきた。ここでは ASTM (American Society for Testing and Materials) の基準でアスファルトの絶対粘度測定法の項¹⁾にあげら

れているキャノン-マニング粘度計 (Connon-Manning Vacuum Viscometer) を例に紹介することにする。

図-8でまず試料を管IのAの線まで入れる。次に管IIを真空装置(水銀柱30cm程度)につなぎ、バルブをあける。すると管Iと管IIの間には圧力差が生じるため、試料は少しずつ管IIを昇っていく。測定はB線からC線まで、またはC線からD線まで試料が通過する時間t(秒)をはかるだけである。換算係数は粘度計のサイズ(11種類ある)に応じて定めてあり(表-2)、絶対粘度η(poise)は次の式で簡単に求められる。

$$\eta = Kt \dots\dots\dots(9)$$

時間tがあまり短いと測定に大きな誤差が入るため、60秒以上になるようにサイズを選定することになっている。なお試験中の温度は135±5.5℃である。

(4) 流出型粘度計

この型の粘度計の原理は毛細管型と同じで細管を試料が流出する時間を測定して粘度を求めようとするものである。したがって、毛細管型と同じ系列に入れられる場合も多いが、あえてここで別にとりあげたのは、わが国のアスファルト舗装要綱で粘度測定法として紹介されているのは、この型のセイボルトフロール粘度計だからである。

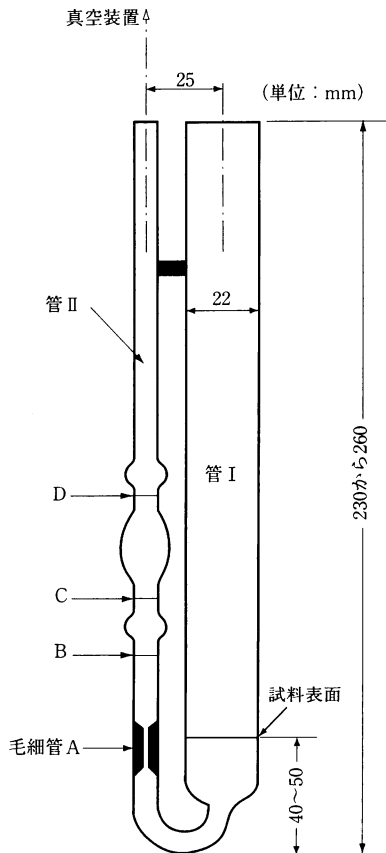
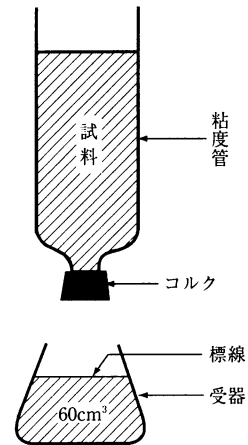


図-8 Canon Manning粘度計

表-2 換算係数 K

粘度計 番号	換算係数 K		粘度範囲 (ポアーズ)	
	B~C	C~D		
4	0.002	0.0006	0.036	to 0.8
5	0.006	0.002	0.12	to 2.4
6	0.02	0.006	0.36	to 8
7	0.06	0.02	1.2	to 24
8	0.2	0.06	3.6	to 80
9	0.6	0.2	12	to 240
10	2.0	0.6	36	to 800
11	6.0	2.0	120	to 2,400
12	20.0	6.0	360	to 8,000
13	60.0	20.0	1,200	to 24,000
14	200.0	60.0	3,600	to 80,000

図-9 セイボルトフロール粘度計



この方法は、まず図-9で粘度管の上部まで試料を満たし、試験温度まで待つ。所定の試験温度になったら、コルクを引きぬき試料を受器に流し込む。受器には、試料が60cm³流出したとき達する標線が入れてあり、コルクを開いてから、この標線に試料が来るまでの時間を秒で読む。普通はこの流出秒数をもってセイボルトフロール度と呼び、動粘度の高低をあらわす指標としている。

たとえば、流出時間が10秒ならば10セイボルトフロール度とするわけである。しかし、これまで動粘度とセイボルトフロール度との関係は数多く実験されてはぼわかっており、アスファルト舗装要綱では次のような簡単な換算式を示している。

$$\text{動粘度 (センチストークス)} \approx 2.12 \times (\text{セイボルトフロール度}) \dots\dots\dots(10)$$

この測定法は非常に簡単でありあまり精密さを要しないため、わが国でも広く使われているが、それだけに、測定値にはかなり誤差が入る。アスファルトの品質がとかく議論の対象にされている折から、粘度測定法も再検討の必要があるように思われる。

以上に述べた4種の他にも、液体中に球を落下させ、その落不速度から粘度を定める落球粘度計や、試料中で振動片を振動させ、そのとき受ける粘性抵抗を測定して粘度を求める振動片粘度計など、種類は数多くあるが、アスファルト関係では、上述の4種が代表的なものである。これまで説明したように測定原理はいずれも簡単であるが、いざ実際に粘度を測定してみるといろいろとむずかしい問題がおきてくる。たとえば、粘度の定義に一番近いマイクロビスコメーターでは、`試料の厚さが一定にならない、` `定常状態になっているとはかぎらない、` `平行に引っ張られているのか、`等、本当の粘度が得られたのかどうか疑問の点がある。そして、アスファルトの場合さらに問題になるのは、温度によって粘度が大きく変ること、したがって粘度計の温度管理には充分注意しなければならないことである。従来のアスファルト舗装要綱では、`粘度温度関係を付記することが望ましい、`とだけ備考欄に記され、粘度の規格が特に設けられていなかったのは、この測定のむずかしさも大きな原因であったと思われる。

4. アスファルトの粘度

アスファルトが液体であることは、高温の場合を考えれば誰も疑問に思う人はないであろうが、低温でのアスファルトを考えると、首をかしげる人が多いかも知れない。アスファルトが低温で固体状を示すのは、粘度が高くて流動しにくくなったからであり、水が氷になるような変化とは本質的に異なる。しかし、全然変化がないのかというところではなく流動のしかたが変わっている場合が多い。この辺にまたアスファルトの粘度を求めるむずかしさがあるのであるが、以下、レオロジー的に考察してみよう。

図-10に示したのはレオロジーダイアグラムと呼ばれるもので、種々の流動特性を調べるときによく使われる図である。図の縦軸はせん断速度D、横軸は τ でちょうど図-3(b)の縦軸と横軸を逆にした形である。したがって、ニュートン流動を示すA直線は(5)式から

$$D = \frac{1}{\eta} \cdot \tau \dots(11) \quad \tan \theta = \frac{1}{\eta} \dots(12)$$

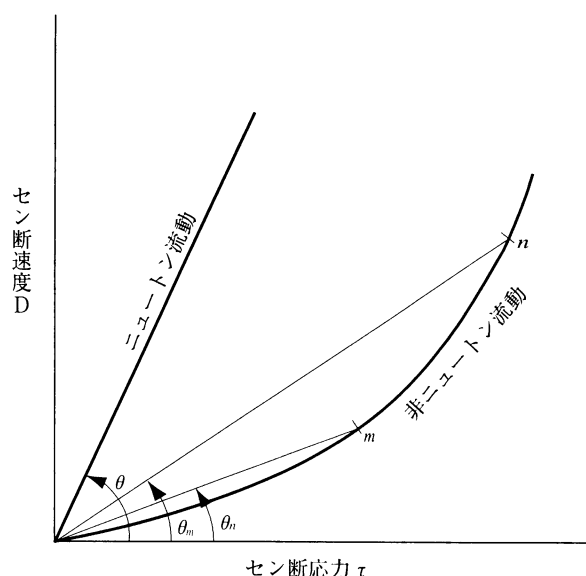
となり、粘度の逆数が直線の傾きを示すことになる。

一方、非ニュートン流動は一般に曲線Bであらわされる。この曲線Bではもはや粘度は一定に定まらない。たとえば、(12)式にしたがって粘度を求めようとするとm点

$$\text{では、} \eta_m = \frac{1}{\tan \theta_m}, \quad n \text{点では} \eta_n = \frac{1}{\tan \theta_n} \text{となり、} \theta_m$$

と θ_n が異なるから η_m と η_n も当然異なる。すなわち、せん断応力(またはせん断速度)の大きさによって粘度

図-10 レオロジーダイアグラム



が異なるのである。ニュートン流動を示す液体ではレオロジー的性質を粘度 η で一義的にあらわすことができるので簡単であるが、非ニュートン流体ではかなり複雑になる。なお、 η_m や η_n は厳密な意味での粘度ではないということで、見かけ粘度(apparent viscosity)と呼ばれている。

さて、アスファルトの場合はこのどちらの流動型に属するであろうか。前回、化学組成の項でアスファルトがゾル型(ニュートン流動)、ゲル型(非ニュートン流動)、ゾルゲルの3型種に分類され、ストレートアスファルトは一般にゾルゲル型に属することを述べた。すなわち、通常の道路舗装に使用されるアスファルトは、ニュートン流動を示す場合もあれば、非ニュートン流動を示す場合もあるわけである。具体的に言えば、高温でニュートン流動を示すものでも、低温になると非ニュートン流動を示し、せん断応力の小さい範囲ではニュートン流動を示しても、せん断応力を大きくすると非ニュートン流動になる場合があるということである。したがって、あるアスファルトが温度や応力をぬきにしてニュートン流動であるとか、ないとかきめてしまうのは問題がある。

またこのことは、温度や応力によってアスファルトの内部構造が変化することを暗示しているとも言える。

非ニュートン流動の場合でも、せん断応力やせん断速度のあまり広い範囲をとらなければ、(5)式に準じた形で

$$\tau = kD^C \dots\dots\dots(13)$$

と書ける場合が多い。この式で $C = 1$ の場合がニュートン流動に相当し、 $k = \eta$ となる。 $C \neq 1$ の場合は非ニュートン流動で、 C の値が1から離れれば離れるほどニュートン流動からはずれることになる。すなわち、 C は

ニュートン流動からのずれの度合を示す指標であり、複合流動度 (degree of complex flow) と呼ばれている。

(13)式で両辺の対数をとると

$$\log \tau = \log k + C \log D \quad \dots\dots\dots(14)$$

となるから、両対数紙でDを τ に対してプロットすれば直線が得られ、その傾きがCを与えることになる。市販のアスファルトで0.95~0.3の値を持つと言われている⁵⁾。

非ニュートン流動の場合、粘度が定まらないというのは取りあつかい上、何ととっても不便である。そこでアスファルトの場合は、Traxler⁶⁾らの実験をもとに、エネルギーが一定 ($10^3 \text{ erg/sec/cm}^2$) の点を便宜的によく使用する。すなわち $\tau \cdot D = 10^3$ のところで τ/D を求め、これを見かけ粘度値とするわけである。何を基準に算出するかによって、見かけ粘度が異なるのはいうまでもない。

4. アスファルトの粘度温度関係

アスファルトの粘度は、これまでたびたび述べたように温度によって著しく変化する。たとえば、アスファルト舗装の表面温度は60℃から-10℃の範囲にあると言われているが、これをアスファルトの粘度で見ると、前者は 10^3 ポアーズ程度、後者は 10^{10} ポアーズ程度になるから俗にいう「けたちがい」の変化になるわけである。アスファルト舗装の強度特性はこのアスファルトの粘度によって決定的と言えるほどの影響を受けるため、道路技術者にとってアスファルトの粘度と温度の関係は常に注意

図-12 粘度温度関係 (R. R. L.)

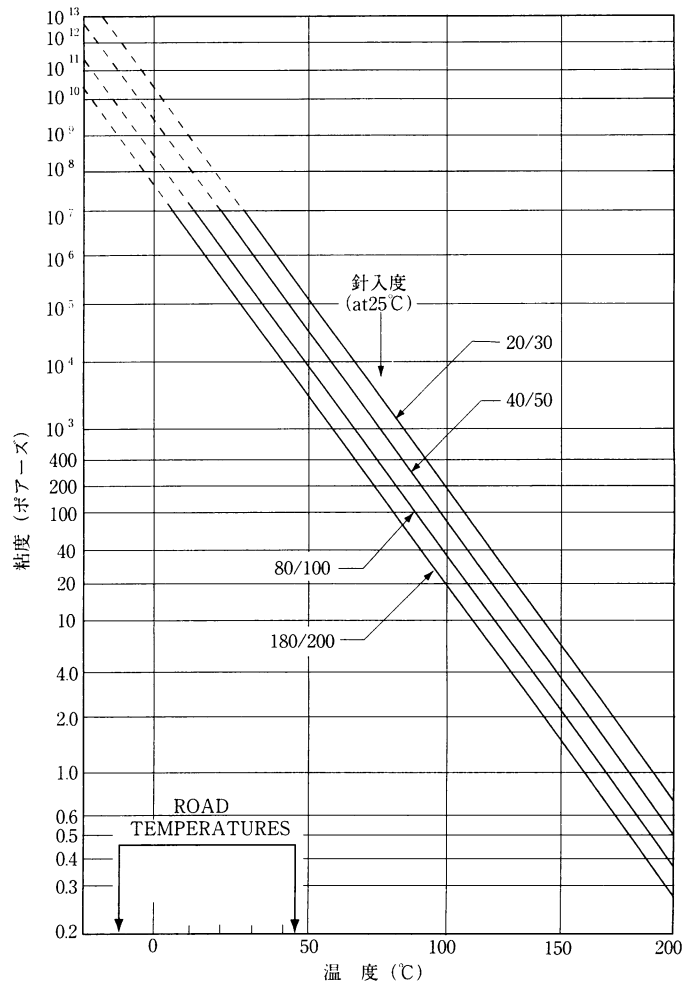


図-13 アスファルトの粘度温度関係 (ASTM)

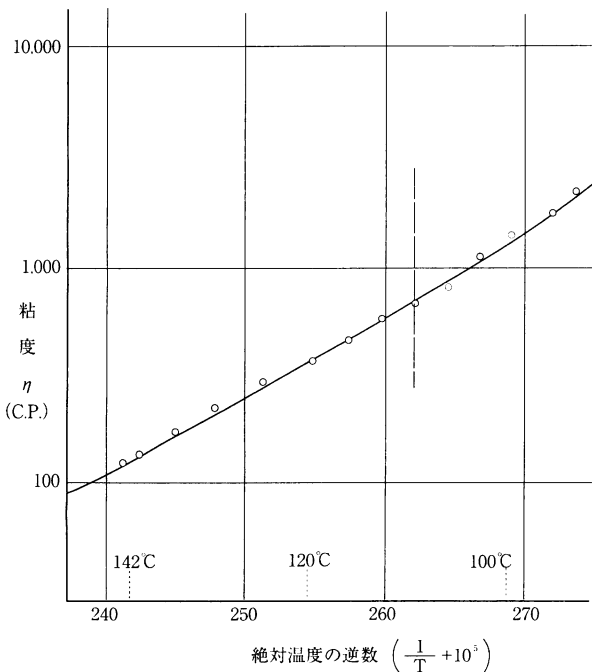
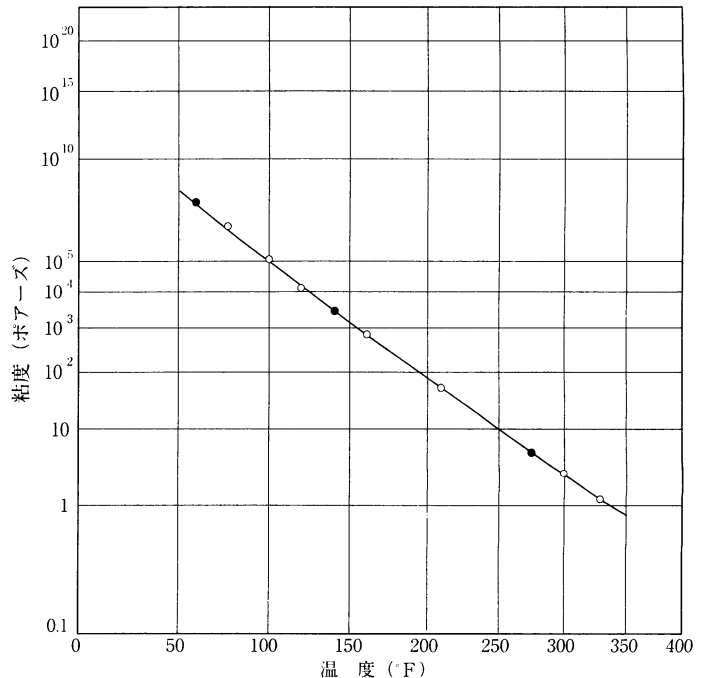


図-11 Andradeの式の検討

すべき重要問題であると言えよう。

アスファルトのような高分子材料の粘度温度関係を数式で表わそうとする試みは古くから行なわれてきた。

最も有名なのはAndradeの式である。これは、粘度 η と絶対温度Tを、次の関係式で示そうとするものである。

$$\eta = Ae^{\frac{B}{T}} \quad (A, B \text{ は液体固有の定数}) \dots(15)$$

両辺の対数をとると

$$\log \eta = \log A + \frac{B}{T} \dots\dots\dots(16)$$

となるから $\log \eta$ と $\frac{1}{T}$ を両軸にとれば直線関係が得られるはずである。図-11に筆者らがB型回転粘度計を使用してこの式を検討した結果を示した。点線で多少折れ曲っているようではあるが、ほぼ直線であらわされている。しかし、この実験は、比較的狭い温度範囲のものでありもっと広い範囲にわたってすべての液体を近似できる式は、現在のところまだ見い出されていないようである。

イギリスやアメリカでは、アスファルトの粘度温度関係を図示して使用者の便宜をはかっている。図-12、図-13にRoad Research Lab.⁷⁾とASTM standard⁸⁾の例を示した。図-13は華氏(°F)で示してあるので見にくいかも知れないが、筆者の試算によれば、図-13の直線は図-12の針入度80/100の直線とはほぼ一致している。

5. あとがき

今回はアスファルトのレオロジー的性質を考察する場合に最も基本となる粘度について述べた。多少、うんざ

りした方もあるかと思うが、基礎の原理を知っておくということは工学にたずさわる者にとって最も強力な武器になると筆者は考えている。しばらく、がまんして読んでいただきたい。

なお、規格試験の中の針入度試験、軟化点試験も一種の粘度試験であることをつけ加えておく。これらについてはいずれ稿を改めて述べてみたい。

参考文献

- 1) "1971 Annual Book of ASTM Standards."
D 2171 Standards Method of Test for Absolute of Asphalt
- 2) 「舗装に関する技術基準の取り扱いについて」
舗装委員会 藤井治芳, 道路 1973-3
- 3) "Symposium on Microviscometry" ASTM Special Technical Publication No. 309 (1961)
- 4) 「アスファルト舗装要綱、付録4-4 石油アスファルトのセイボルトフロール度試験方法
- 5) 「アスファルト舗装用材料、昆布谷竹郎
舗装 Vol. 5, No. 10, 1970
- 6) Romberg, Traxler, Journal of Colloid Science 2, 33 (1947)
- 7) Bituminous Materials in Road Construction, R. R. L P. 102 (Derived from data Supplied by the Shell Internatioal Petroleum Co. Ltd.)
- 8) ASTM Standards, D 2493 "Viscosity-Temperature Charts for Asphalts"

☆

☆

☆

☆

☆

☆