

# アスファルト混合物のマスターカーブの 計算機による作成

上 島 壯

正会員 北海道大学助手 大学院工学研究科(〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

アスファルト混合物の曲げ試験の応力-ひずみ曲線群を統合し、粘弾性特性マスターカーブを逆解析手法で求める方法について論じた。時間-温度重ね合せの基本モデルとして Arrhenius 式と WLF 式を用いた。

計算に用いた試料配合は、アスファルト（およびタールピッチ）5種、砂混合物16配合、碎石入り混合物の試験速度変化試料17配合と試験速度一定の試料グループ55配合である。解析結果について、サンプリング方法による誤差と、得られた時間-温度換算係数の定数について論じた。

*Key Words : asphalt mixture, rheological property, master curve*

## 1. はじめに

アスファルト混合物の粘弾性特性は、低温における温度応力や常温以上の温度域における流動などを理論的に研究するための基本的特性である。

バインダーのアスファルトの粘弾性がレオロジーの分子理論に適合することから、混合物についても同じ理論に適合することが期待され、1960年代から1970年代にかけて精力的に混合物のレオロジーの研究が行われた。それらについては TRB 刊行の NCHRP レポートに概括されている<sup>1)</sup>。しかし、当時の力学的性質の研究目的が舗装構造の応答の基礎データを求めることにあったので、一応その目的を達したということで、それ以降粘弾性研究は下火になっていた。

近年、SHRP にバインダーの粘弾性が取り入れられ、材料関連論文これに関する記述が多く見られるようになったことから<sup>2)</sup>、物理的な性状とのつながりについて混合物のレオロジー特性に関心が向けられることも想像される。

レオロジーの解析作業は、異なった時間、温度の試験の応答の重ね合せ作業を行ってマスターカーブを作成することを最終段階とする。この作業は、トレーシングペーパーなどに描いたグラフを目で見ながら手作業で行うものであった。本論文は、曲げ試験結果について、マスターカーブの作成を、一種の逆解析処理により行う方法を提示し、その適用性を論じる。

## 2. 解析の方法

レオロジーには、一般化マクスウェルモデルを用いる緩和弾性率体系とフォークトモデルを用いクリープコンプライアンスにもとづく体系があり、それぞれの特性関数を相互に変換することができる。

時間・温度の換算関係については、式(1)の Arrhenius 式と式(2)の WLF 式が古典的な式である。

$$\log(a_T) = c\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right) \quad (1)$$

$$\log(a_T) = -\frac{8.86(T - T_s)}{101.6 + T - T_s} \quad (2)$$

絶対温度  $T$  と適当な基準温度  $T_0$  の逆数の差を用いる Arrhenius 式は高温側の特性に適し、WLF 式はより低温側のガラス転移点  $T_g$  に近い温度領域に適するといわれる。 $T_s$  は、 $T_g+50^\circ\text{C}$  程度の温度とされている。

曲げ試験などの等速試験の応力-ひずみ曲線の微係数から緩和弾性率を求めることができる。そして、得られた緩和弾性率を基準温度に対してシフトすることによりマスターカーブを求めることは原理的に可能である。

しかし、各試料の応力-ひずみ曲線を直接数値微分することは、種々の誤差と混合物の非線型特性の影響を直接的に受けることが予想され、結果の安定性などに危惧がある。

本研究は T.L.Smith<sup>3)</sup>の方法を用い、式(3)の関係を

対数プロットし、回帰式に対して式(4)を適用して緩和弾性率を求めることとした。

$$S_r = \sigma T_0 / R T a_T = f(\varepsilon / R a_T) = f(\varepsilon_r) \quad (3)$$

$\sigma$  : 応力,  $\varepsilon$  : ひずみ,  $R$  : ひずみ速度

$$E_r = (S_r / \varepsilon_r) (d \log S_r / d \log \varepsilon_r) \quad (4)$$

ただし、本報告は、緩和弾性率を求める前段階の  $S_r$  の回帰誤差の解析を行うことを目的とする。

なお、既報<sup>4)</sup>では Arrhenius モデルについて計算手法を提起し、ひずみ依存性の非線形性について検討を行っている。

この手順の枠組みは次のとおりである。

- ① 曲げ試験の応力/ひずみ速度-時間関係を両対数グラフでプロットすると図-1 のようになる。
- ② 曲線上の指定のひずみ値で解析用データをサンプリングする。
- ③ 基準温度を定め、Arrhenius モデルまたは WLF モデルから得られた各試料の換算係数を用いて、サンプリングした点群を図-1 の両対数グラフ上でシフトさせる。

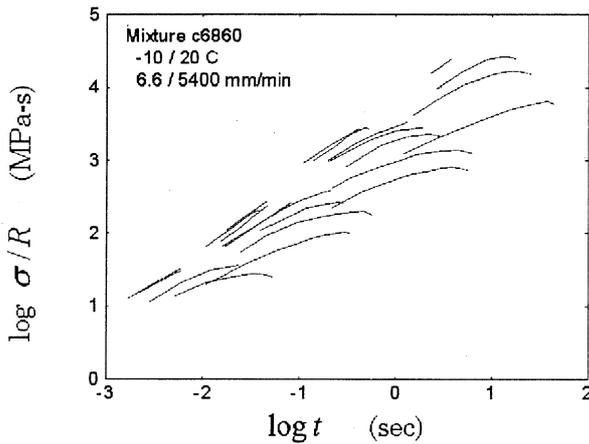


図-1 シフト前の換算応力-時間曲線の例

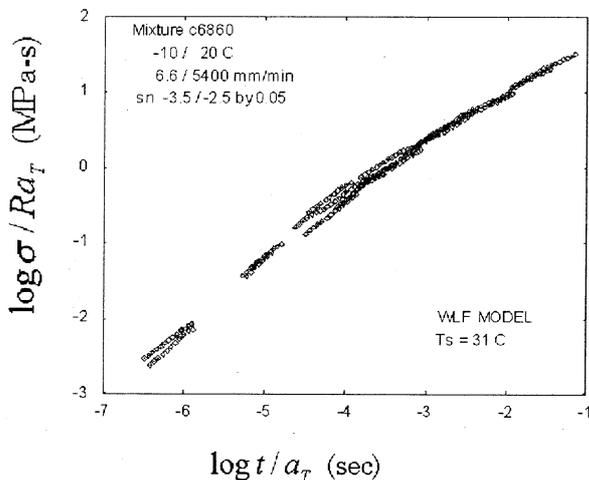


図-2 図-1 配合の WLF 式によるシフト

トさせる。

- ④ 両対数グラフ上に多項式マスターカーブを想定し、回帰式との標準偏差が最小になる点を探索する。そして最終的には図-2 の曲線群が得られる。
- ⑤ 図-3 は Arrhenius モデルの場合の標準偏差の挙動である。基準温度は 0°C(273K)とした。
- ⑥ 図-4 は図 2 を得るために用いた WLF モデルの場合で標準偏差が極小になる  $T_g$  を求める。
- ⑦ 誤差最小のパラメータの探索は、誤差曲線の尖度を把握するため、定まった区間を一定の刻みで分割し、その精度で値を求めた。パラメータ  $C$  は 10000/14000, パラメータ  $T_g$  は -20/80 の範囲を 100 等分した。
- ⑧ 図-3, 図-4 の  $\delta SD$  は誤差曲線の感度の指標に用いるために次式で定義した指標である。
- ⑨ 絶対温度比  $T_0/T$  項に関しては、補正の有効性が不明であったので補正を行わなかった。

$$\delta SD = SD_{i \min - 10} - SD_{i \min}$$

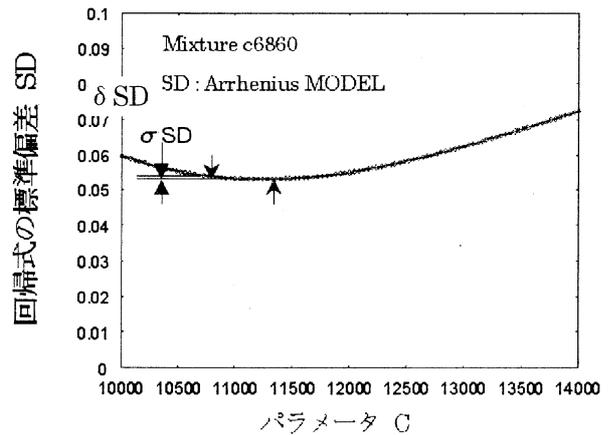


図-3 Arrhenius モデル: C と SD の関係

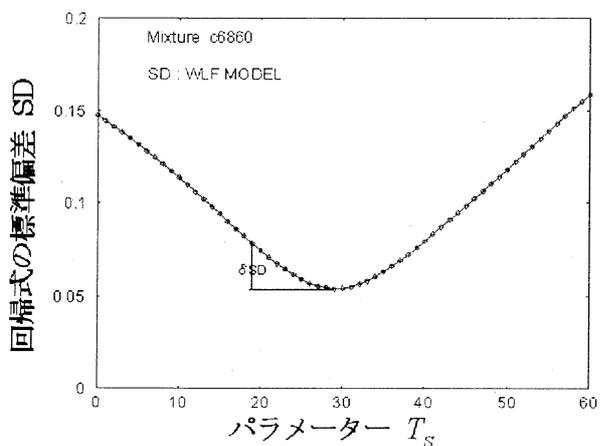


図-4 WLF モデル:  $T_g$  と SD の関係

### 3. 試料混合物

解析に用いた混合物（アスファルト単体を含む）を表-1に示す。配合名の a-は単体のアスファルト（タールピッチを含む）、b-は砂混合物、c-は砕石入り混合物、J-はアスコンなど砕石入り混合物に対して行った変形速度一定の曲げ試験データである。

As 記号の 80x は 80/100 級舗装用アスファルト、60 は 60/80 級、LXn はラテックス 5%混入アスファルト、CBn は触媒系、TP はコールターとピッチの混合バインダーである。x,n に相当する記号、数字は異なる製品を区別するものである。

データはおおむね 1970 年代に北海道大学の実験室

で作成試験されたものである。

試料の製作工程には流し込みと転圧の 2 系統がある。転圧供試体の多くはホイールトラッキング試験の後に、カッターで切断されたものである。曲げ試験供試体は、厚さ 20mm と 25mm の 2 種類がある。試験は高速曲げ試験機、インストロン型万能試験機などを用いた。高速試験で最高速度が一定していないのは、試験機の駆動部に工業用の油圧装置を用いていたためである。

データの収録は、電磁オシログラフ、ペンレコーダーなどへの記録を手作業で読み取って行った。荷重-時間曲線のサンプリングの方法は、補間処理を想定して大きな誤差なく曲線を再現できると思われる範囲で行った。

表-1 試料混合物（アスファルト単体を含む）の材料特性と試験条件

配合名	最大粒径 mm	砕石量 %	F/A	As 量 %	As 記号	平均空隙 率 %	温度範囲 ℃	速度範囲 mm/min	試料数
a69CL	0.0	0	0.0	100.0	80B	.	-20/10	7/5640	26
a69LX	0.0	0	0.0	100.0	LX2	.	-20/10	7/6480	22
a69MX	0.0	0	0.0	100.0	80A	.	-20/10	7/7075	23
a69SP	0.0	0	0.0	100.0	CB2	.	-20/10	7/7075	24
a69TP	0.0	0	0.0	100.0	TP	.	-10/10	7/7075	13
b68CB	0.3	0	1.0	25.0	CB1	.	-24/20	7/8640	37
b68LX	0.3	0	1.0	25.0	LX1	5.9	-20/16	7/8580	27
b68MX	0.3	0	1.0	25.0	80A	3.2	-24/20	7/8640	44
b68TP	0.3	0	1.0	25.0	TP	2.6	-24/16	7/8640	50
b69CL	0.3	0	1.0	25.0	80B	0	-20/10	7/5640	25
b69LX	0.3	0	1.0	24.9	LX2	6.1	-20/10	7/6000	26
b69MX	0.3	0	1.0	25.0	80A	1.0	-20/10	7/6000	27
b69SP	0.3	0	1.0	25.1	CB2	1.3	-20/10	7/6000	24
b70FS	2.5	0	1.9	8.5	60	4.4	-20/40	2/8040	98
b70M1	0.3	0	1.9	15.0	80A	7.8	-20/23	7/7800	71
b70M2	0.3	0	1.0	25.0	80A	0.1	-20/23	6/7800	45
b74A	1.2	0	3.0	7.0	80A	11.0	-15/25	10/3315	55
b74B	1.2	0	2.4	8.5	80A	6.4	-15/25	10/3315	55
b74C	1.2	0	2.0	10.0	80A	5.3	-15/25	10/3315	54
b74D	1.2	0	1.7	11.5	80A	5.9	-15/25	10/3315	54
b74E	1.2	0	1.5	13.0	80A	9.4	-15/25	10/3315	55
c6855	10.0	48	1.8	5.5	80A	4.3	-10/20	7/5400	24
c6860	10.0	48	1.7	6.0	80A	3.2	-10/20	7/5400	24
c6865	10.0	48	1.5	6.5	80A	2.8	-10/20	7/5400	24
c6870	10.0	48	1.4	7.0	80A	1.7	-10/20	7/5400	24
c6875	10.0	48	1.3	7.5	80A	1.4	-10/20	7/5400	24
c70AC	13.0	57	1.2	5.7	80A	2.4	-20/40	3/7800	148
c70RL	15.0	48	1.4	7.2	60	3.1	-20/35	2/7800	151
c734	13.0	57	1.7	4.0	80A	9.8	-15/25	10/2916	54
c735	13.0	57	1.4	5.0	80A	7.0	-15/25	10/2916	54
c736	13.0	57	1.1	6.0	80A	3.7	-15/25	10/2916	54
c737	13.0	57	1.0	7.0	80A	1.7	-15/25	10/2916	54
c738	13.0	57	0.8	8.0	80A	0.8	-15/25	10/2916	56
c742	5.0	26	2.0	8.1	80A	4.4	-15/25	10/3333	55
c743	5.0	38	2.0	7.2	80A	4.0	-15/25	10/3333	55
c744	5.0	49	1.9	6.3	80A	4.8	-15/25	10/3333	55
c745	5.0	59	1.9	5.3	80A	7.1	-15/25	10/3333	55
c746	5.0	68	1.8	4.4	80A	12.6	-15/25	10/3700	56
J3A0	13.0	30	1.0	9.9	80A	2.4	-20/25	10	10
J3A7	13.0	30	1.0	7.4	80A	6.9	-20/25	10	12
J3A8	13.0	30	1.0	8.3	80A	3.2	-20/25	10	11
J3A9	13.0	30	1.0	9.1	80A	2.6	-20/25	10	13
J3B0	13.0	30	1.5	8.6	80A	1.9	-20/25	10	11

J3B7	13.0	30	1.5	6.4	80A	7.5	-20/25	10	11
J3B8	13.0	30	1.5	7.2	80A	4.5	-20/25	10	12
J3B9	13.0	30	1.5	7.9	80A	2.6	-20/25	10	12
J3C0	13.0	30	2.0	7.5	80A	2.1	-20/25	10	10
J3C7	13.0	30	2.0	5.7	80A	7.5	-20/25	10	12
J3C8	13.0	30	2.0	6.3	80A	5.6	-20/25	10	11
J3C9	13.0	30	2.0	6.9	80A	3.4	-20/25	10	11
J4A0	13.0	40	1.0	9.0	80A	2.2	-20/25	10	10
J4A7	13.0	40	1.0	6.7	80A	6.8	-20/25	10	11
J4A8	13.0	40	1.0	7.5	80A	3.7	-20/25	10	11
J4A9	13.0	40	1.0	8.3	80A	2.2	-20/25	10	11
J4B0	13.0	40	1.5	7.8	80A	1.6	-20/25	10	11
J4B1	13.0	40	1.5	8.4	80A	1.5	-20/25	10	10
J4B7	13.0	40	1.5	5.8	80A	7.5	-20/25	10	10
J4B8	13.0	40	1.5	6.5	80A	4.4	-20/25	10	11
J4B9	13.0	40	1.5	7.1	80A	2.7	-20/25	10	11
J4C0	13.0	40	2.0	6.8	80A	2.0	-20/25	10	10
J4C1	13.0	40	2.0	7.4	80A	1.4	-20/25	10	11
J4C7	13.0	40	2.0	5.1	80A	8.8	-20/25	10	11
J4C8	13.0	40	2.0	5.7	80A	6.1	-20/25	10	12
J4C9	13.0	40	2.0	6.3	80A	3.3	-20/25	10	11
J5A0	13.0	50	1.0	8.1	80A	1.5	-20/25	10	11
J5A7	13.0	50	1.0	6.0	80A	5.9	-20/25	10	12
J5A8	13.0	50	1.0	6.7	80A	3.5	-20/25	10	11
J5A9	13.0	50	1.0	7.4	80A	2.0	-20/25	10	11
J5B0	13.0	50	1.5	7.0	80A	1.3	-20/25	10	11
J5B1	13.0	50	1.5	7.6	80A	1.5	-20/25	10	11
J5B7	13.0	50	1.5	5.2	80A	6.2	-20/25	10	11
J5B8	13.0	50	1.5	5.8	80A	4.7	-20/25	10	12
J5B9	13.0	50	1.5	6.4	80A	2.1	-20/25	10	11
J5C0	13.0	50	2.0	6.2	80A	1.6	-20/25	10	10
J5C1	13.0	50	2.0	6.7	80A	1.5	-20/25	10	10
J5C7	13.0	50	2.0	4.6	80A	6.4	-20/25	10	10
J5C8	13.0	50	2.0	5.2	80A	5.4	-20/25	10	10
J5C9	13.0	50	2.0	5.7	80A	3.4	-20/25	10	10
J6A0	13.0	60	1.0	7.6	80A	1.3	-20/25	10	11
J6A1	13.0	60	1.0	8.2	80A	1.6	-20/25	10	11
J6A7	13.0	60	1.0	5.6	80A	5.6	-20/25	10	12
J6A8	13.0	60	1.0	6.3	80A	3.3	-20/25	10	10
J6A9	13.0	60	1.0	6.9	80A	1.7	-20/25	10	10
J6B0	13.0	60	1.5	6.6	80A	1.2	-20/25	10	11
J6B1	13.0	60	1.5	7.1	80A	1.5	-20/25	10	11
J6B7	13.0	60	1.5	4.8	80A	6.6	-20/25	10	12
J6B8	13.0	60	1.5	5.5	80A	4.1	-20/25	10	12
J6B9	13.0	60	1.5	6.0	80A	1.9	-20/25	10	10
J6C0	13.0	60	2.0	5.8	80A	1.2	-20/25	10	11
J6C1	13.0	60	2.0	6.3	80A	1.6	-20/25	10	11
J6C7	13.0	60	2.0	4.3	80A	7.5	-20/25	10	12
J6C8	13.0	60	2.0	4.8	80A	4.5	-20/25	10	11
J6C9	13.0	60	2.0	5.3	80A	3.0	-20/25	10	11

#### 4. 計算条件の検討

データのサンプリングは、不等間隔の測定データ点について、ラグランジュの補間法（3点補間）を用いて行った。

座標のサンプリング条件の設定はひずみ量基準として、a) サンプリング最小ひずみの設定、b) ひずみ採取領域の設定、c) 採取ひずみ間隔の設定、によって行った。ひずみが大きいくほど測定精度は高くなるが非線形性が発現することが考えられる。

サンプリング条件を次の3桁の数値(p1, p2, p3)で定め、すべてについて計算を行った。

p1 : サンプリング最小ひずみの対数

表-2 データのサンプリング条件と得られたパラメータ値平均値の大小傾向

○ Arrhenius 式の係数の大小傾向

(-) mean C<11000 (+) mean C>11800

		p1			
		1	2	3	4
		p3		p3	
		1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4
p2	1	++++	++++	○○○○	-----
	2	++++	○○○○	○○○○	-----
	3	○+○+	○○○○	○○○○	-----

○ WLF 式の  $T_g$  の大小傾向

(-) mean  $T_g$ <32.5 (+) mean  $T_g$ >36

p2	1	++++	++++	○○○○	-----
	2	++++	○○○○	-○○○	○-----
	3	○○○○	○○○○	○○○○	○-----

- 1: -4.0 2: -3.5 3: -3.0 4: -2.5  
 p2 : サンプリング全幅 (対数ひずみ幅)  
 1: 1.0 2: 1.5 3: 2.0  
 p3 : サンプリング間隔 (対数ひずみの増分)  
 1: 0.05 2: 0.1 3: 0.15 4: 0.20

入力した第1データが設定の範囲を超える場合は第1データを計算に組み入れた。

また、マスターカーブは5次多項式近似とした。

表-2 は計算で得られた特性値の全平均を基準として、各サンプリング条件別の平均値が基準より大きいか小さいかの記号を記入したものである。

ここに示した閾値の設定では、Arrhenius モデルの係数と WLF 式の  $T_s$  値の傾向がよく似ていることがわかる。また、サンプリング間隔 (データ数) はあまり関係がないことが示されている。本計算の p1, p2, p3 の組合せ条件は、この表の中間領域の○の範囲を用いることとした。

## 5. 計算結果

### (1) 材料特性値間の関係

前項の予備的計算を参考に、サンプリング条件として(p1,p2)の組合せが(2,2) (2,3) (3,1) (3,2) (3,3)である20条件を採用し、それらから得られた特性値の平均値

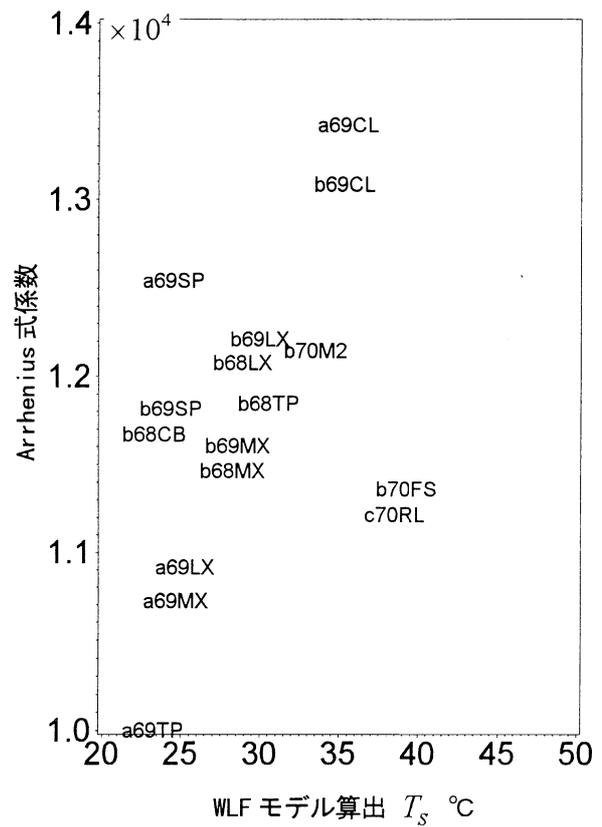


図-5 バインダー研究系列の出力結果

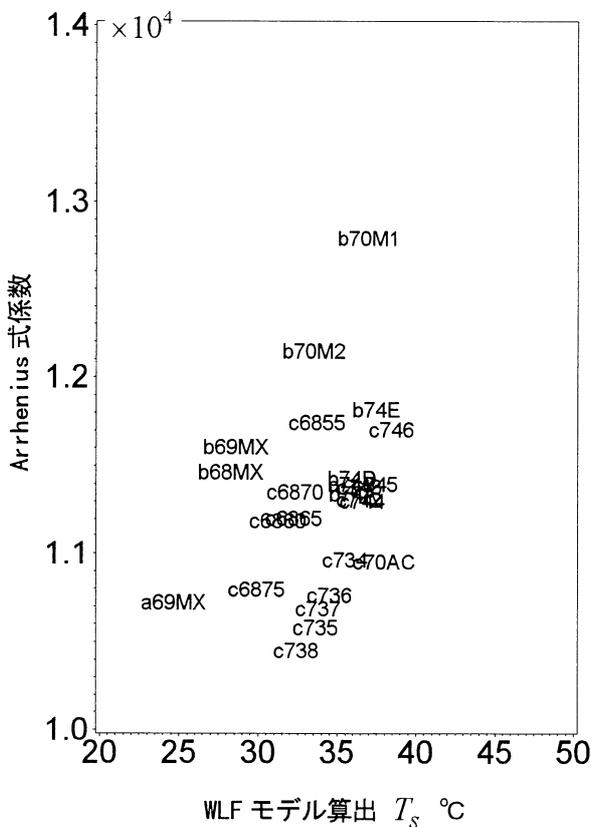


図-7 力学応答研究系列の出力結果

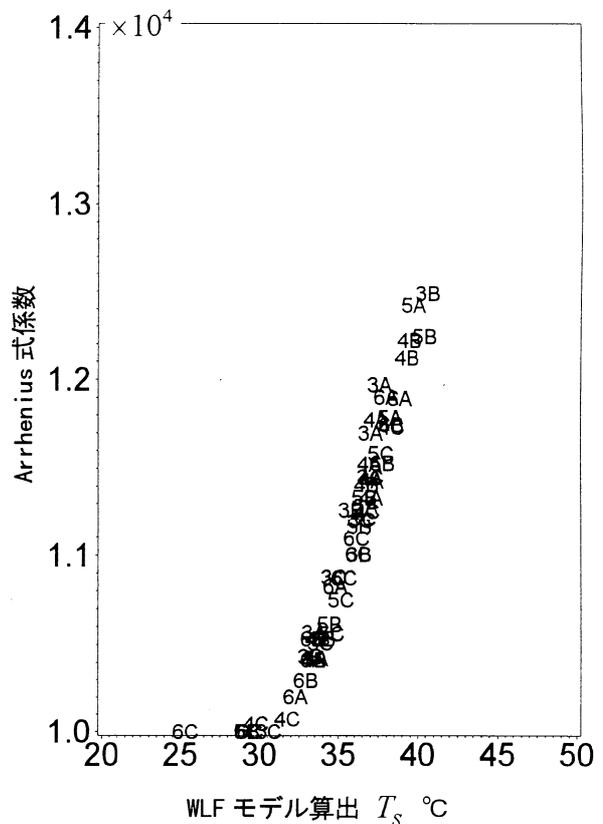


図-6 配合研究系列の出力結果

を用いた。

計算結果は、図-5のバインダー研究系列、図-6の変形速度一定の配合研究系列(配合記号 J)、図-7のアスファルト 80A を用いた速度・温度範囲が広い力学応答研究系列、にグループ化して示した。

図-5, 6, 7 から共通した傾向は、WLF 式の  $T_g$  と Arrhenius 式係数の関係は右上がりの傾向があることである。

図-5 をこの傾向で見ると、図の左側の触媒系アスファルトの系列と、右のアスファルト量の少ないグループ、そしてその中央の、タールピッチ、ゴム入りアスファルトを含むピッチェン単体とマスチック系のアスファルト混合物の系列よりなる。

図-6 は同じアスファルトと骨材を用いて系統的に配合を変化させた混合物であるが、粘弾性特性も系統的に変化している。これよりアスファルト混合物の時間・温度換算特性がバインダーのみの性質に支配されるのではなく、混合物は混合物の性質を持つことがうかがえる。なお、図には表-1 の配合名の第 2-3 字をプロットした。

図-7 はバインダー-80A を用いた混合物系列である。全体として規則性は薄くみえるが同じプロジェクトの混合物群はクラスターを形成している。

## (2) 誤差項目間の関係

各配合についてサンプリング条件 20 種を平均すると Arrhenius の式の係数のばらつき(標準偏差)は 262,  $T_g$  は  $0.97^\circ\text{C}$  であった。表-3 に関連した誤差項目

表-3 誤差項目間の相関係数

	SD (Arrh)	SD (WLF)	$\delta$ SD (Arrh)	$\delta$ SD (WLF)
SD Arrh	1.00	.	.	.
SD WLF	0.92	1.00	.	.
$\delta$ SD Arrh	0.22	0.10	1.00	.
$\delta$ SD WLF	0.45	0.28	0.84	1.00

間の相関係数を示す。SD と  $\delta$  SD は図 3, 4 に示すものである。SD,  $\delta$  SD の同種間の相関は高い。

## 6. 結論

得られた結果を要約すると次のとおりである。

- ① アスファルト混合物の粘弾性特性に Arrhenius 型または WLF 式の温度-時間換算関係を仮定することにより、等速度曲げ試験の実験データから計算機でマスターカーブを作成できることを示した。
- ② 種々のアスファルト、およびアスファルト混合物についてこの方法を適用し、時間-温度換算特性に材料学的な法則性があることを示した。
- ③ 入力データの編成条件によって  $T_g$  や Arrhenius 式の係数など、得られる特性値が変動すること、その変動の大きさについて示した。

## 参考文献

- (1) Factors Involved in the Design of Asphaltic Pavement Surfaces, National Cooperative Highway Research Program Report 39, Chapter 2, Stiffness or Rheological Characteristics, Highway Research Board, pp6-24, 1967
- (2) Mihai Marateanu and David Anderson, Time-Temperature Dependency of Asphalt Binders -- An Improved Model, AAPT, Vol. 65, pp408-448, 1996
- (3) Thor. L. Smith, Viscoelastic Behavior of Polyisobutylene under Constant Rates of Elongation, Journal of Polymer Science, Vol. XX, pp89-100(1956)
- (4) 上島壯, 菅原照雄, アスファルトコンクリートの低温における粘弾性について, 第 2 1 回レオロジー討論会, 14, 1973

# COMPUTATIONAL METHOD FOR OBTAINING THE MASTER CURVE OF ASPHALT-AGGREGATE MIXTURES

Tsuyoshi KAMIJIMA

This paper introduces a backcalculation-like technique for obtaining rheological master curves from constant rate bending test data of asphalt-aggregate mixtures which covers wide range time and temperature conditions.

Arrhenius or WLF equation for the time-temperature relationship is assumed.

Applying twenty sampling conditions to the data of each ninety three types of bitumens and their mixtures, significance of appropriate sampling procedure is stressed.