

温度と速度の等価換算則による高分子材料の塑性変形特性の予測

東北大学 大学院 情報科学研究科

教授 伊藤 耿一

(平成4年度研究開発助成 AF-92012)

1. 研究の背景

制振鋼板は、厚さのきわめて薄い樹脂を2枚の鋼板の間に積層した材料であり、コア樹脂の変形抵抗はスキン鋼板のそれに比べて小さい値をとる。このため、制振鋼板のプレス成形において、両側鋼板がおなじひずみを受ける場合の変形特性は、スキン鋼板単体の特性と同じと考えてよい、しかし、曲げを伴う変形やくびれの発生など、両側鋼板が異なる変形を受ける場合には、コア樹脂のせん断変形抵抗による抑制作用が成形性に影響を与えることになる¹⁾²⁾³⁾。それゆえ、制振鋼板の成形性を評価する上で、コア樹脂のせん断変形特性を定めることは重要な課題となる。

一方、高分子材料の変形特性は、温度とひずみ速度に敏感であり、統一的な変形モデルを確立する上でこのことが大きな傷害となっている。そこで、温度と速度を制御した樹脂のねじり試験システムを試作開発し、それによる試験データから、樹脂特性に与える温度 t をひずみ速度との影響について検討し、さらにひずみ速度-温度等価換算則による樹脂の構成モデルを提案し、実験条件下でのせん断応力-せん断ひずみ曲線を再現することによって、その妥当性を考察する。

2. ねじり試験

制振鋼板の成形性を評価するための樹脂特性として、図1に示したように改良された試験片は、制振鋼板のコア部と同じ0.05mm厚の樹脂をステンレス鋼によって円筒状にサンドイッチしたものである。

固定側には2本のピン穴が開けられており、駆動側には幅7mm、深さ6mmの溝が2ヶ所切られている。固定側は2本のネジ付ピンにより確実に固定し、駆動側は溝を介して駆動軸に結合してトルクを伝達し、試験片樹脂部にせん断変

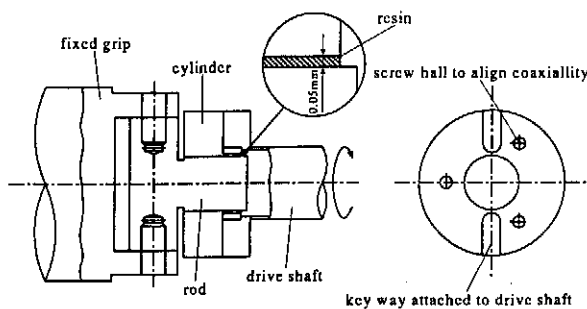


図1 ねじり試験片

形を与える。固定側、駆動側のステンレス鋼は樹脂と比べるとねじり剛性が非常に大きいので、両側の相対回転は純粋に樹脂層のせん断変形のみによって生ずると見なせる。温度制御は、加熱器により温められた空気を、試験片周辺部に設けた銅板製の恒温カバーに送り込むことによって行なった。その際、カバー表面には耐火断熱繊維を貼りつけ、熱損失を極力小さくする工夫をした。せん断ひずみは、試験片駆動部に取り付けられた電気マイクロメーターの出力より、せん断応力は駆動軸に設けられた自作のロードセルからの出力トルクより計算した。

3. 実験結果及び考察

試験はポリエステルウレタン系の高温用樹脂HPと常温樹脂RPについて行なった。例としてRPの結果を示す。

図2に一定温度25°Cにおけるひずみ速度を変化させた場合のせん断応力-せん断ひずみ曲線を示す。図から分かるように、ひずみ速度上昇による樹脂剛性の上昇が観察された。ひずみ速度が $0.0019s^{-1}$ から $0.95s^{-1}$ まで変化するにつれ、樹脂層のせん断応力は絶えず上昇する。この現象はその他の温度においても確認できた。

また図3に一定ひずみ速度 $0.019s^{-1}$ におけるひずみ速度を変化させた場合のせん断応力-せん断ひずみ曲線を示す。この図からは、温度上昇による樹脂剛性の低下が観察された。温度が20°Cから60°Cに上昇するにつれせん断応力は低下する。この現象はその他のひずみ速度においても、確認できた。

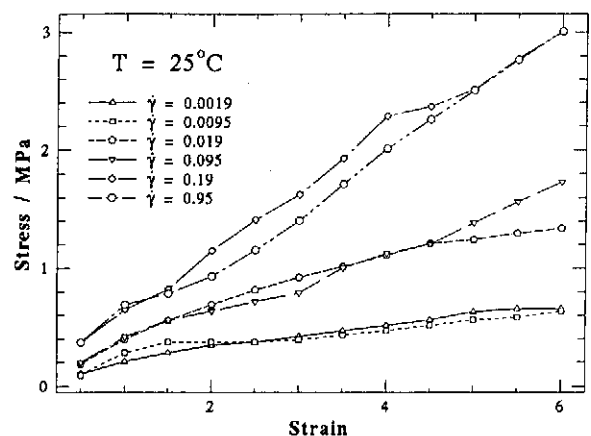


図2 温度一定のせん断応力-せん断ひずみ曲線 (RP)

この結果より樹脂特性のひずみ速度依存性、温度依存性が存在することが確認された。また、温度上昇につれ各ひずみ速度別のせん断応力の変化率の分布に違いが見られた。常温（温度20℃）においては各ひずみ速度ともにそれぞれの変化率で上昇しているが、温度が上昇するにつれ、ひずみ速度が低速であるものは、高速側に比べ変化率の低下が著しい。さらに、ひずみ速度の上昇に関しては温度の低下と同様の減少が観察される。

4. ひずみ速度-温度等価換算則

前節の実験結果より樹脂のせん断降伏応力はひずみ速度や温度によって、大きく変化することが確認された。しかしこのままではひずみ速度と温度は別々に扱われており、見通しが良くない。どちらかひとつのパラメータにより整理できれば、データ整理の上でもまた結果考察の上でも非常に都合がいい。そのため、ひずみ速度と温度の読み換えが必要となる。そこで、実験より得られた樹脂特性データを使用し、有効数のせん断ひずみに適用できるひずみ速度と温度との読み換え（換算則）の提案を試みた。

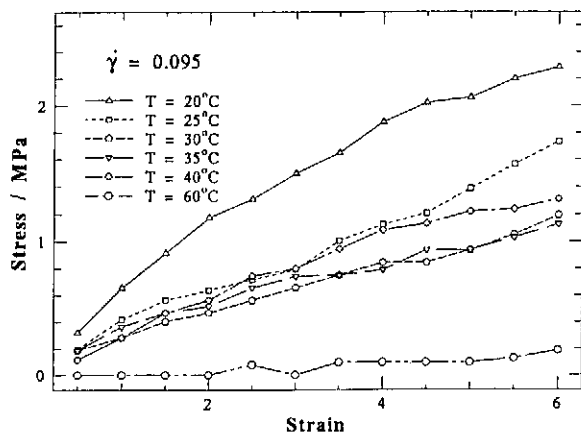


図3 ひずみ速度一定のせん断応力-せん断ひずみ曲線 (RP)

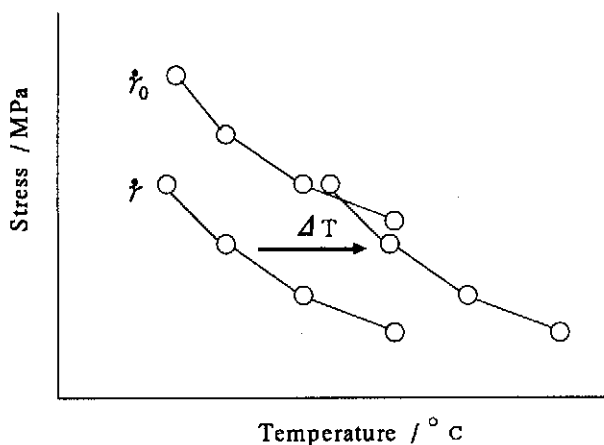


図4 応力-温度の関係の例

5. WLF理論

使用するひずみ速度-温度換算則はWLF理論を基にして作成した。

WLF (Williams, Landel and Ferry) 理論とは、振動解析を行うために用いられる樹脂の横弾性係数Gを温度と周波数により評価する場合の温度-周波数換算則のことである。

この考え方は、降伏応力の温度依存性を表わす図4において、適当なひずみ速度を基準ひずみ速度 $\dot{\gamma}_0$ として選択し、 $\dot{\gamma}_0$ より低いひずみ速度の曲線は右方へ、高い温度の曲線は左方へ、横軸に沿って ΔT だけ平行移動すれば全ての曲線が重なり合っ、マスターカーブといわれる一本の曲線となる。平行移動量 ΔT はひずみ速度のみの関数であり、そのひずみ速度依存性を次の式(1)で表わしてみる。

$$\Delta T = -\frac{C_1(\dot{\gamma} - \dot{\gamma}_0)}{C_2 + \dot{\gamma} - \dot{\gamma}_0} \quad (1)$$

ここで C_1, C_2 は樹脂・ひずみ固有の定数である。この C_1, C_2 を定めることで、式(1)を樹脂・ひずみ固有のひずみ速度-温度換算式とすることができる。

6. 測定データによる換算則

6.1 マスターカーブの作成

WLF理論によりシフトされた各ひずみ速度におけるせん断応力-温度曲線を使用しマスターカーブを作成した。マスターカーブは全ての曲線が重なって一本の曲線となったものであるため、得られたシフト後の応力-温度曲線をそのままの形で使用するにはデータ数が多く、WLF理論によりグラフを再生させる際に非常に労力を要する。そこで、シフト後の応力-温度曲線を最小自乗法により

$$\tau = A[2] \times T^2 + A[1] \times T + A[0] \quad (2)$$

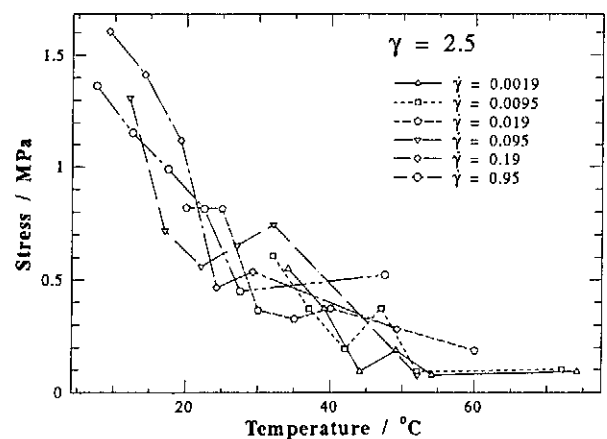


図5 $\dot{\gamma} = 2.5$ の場合のWLF後の応力-温度曲線 (RP)

なる2次曲線に近似した。図6にせん断ひずみ2.5の場合の測定データとマスターカーブを示す。

6.2 相関図の作成

式(1)を変形した次式より各ひずみ値における C_1, C_2 を求めた。

$$-\frac{\Delta\dot{\gamma}}{\Delta T} = \frac{\Delta\dot{\gamma}}{C_1} + \frac{C_2}{C_1}$$

$$\Delta\dot{\gamma} = \dot{\gamma} - \dot{\gamma}_0$$

$\Delta\dot{\gamma}$ は6種類のひずみ速度から基準ひずみ速度 $\dot{\gamma}_0 = 0.019$ を引いたものである。また $-\Delta\dot{\gamma}/\Delta T$ は、前述のWLF理論によるシフト量 ΔT を使用し、プロットされた相関点を最小自乗法を用いて、1次曲線に近似した。その際WLF理論によるせん断応力-せん断ひずみ曲線の再現性を向上させるために、切片は固定した。図7にせん断ひずみ2.5における $\Delta\dot{\gamma}$ と $-\Delta\dot{\gamma}/\Delta T$ との相関を示す。

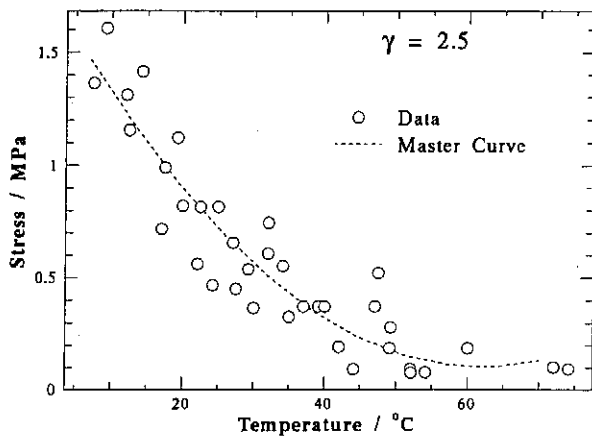


図6 $\gamma = 2.5$ の場合のマスターカーブ (RP)

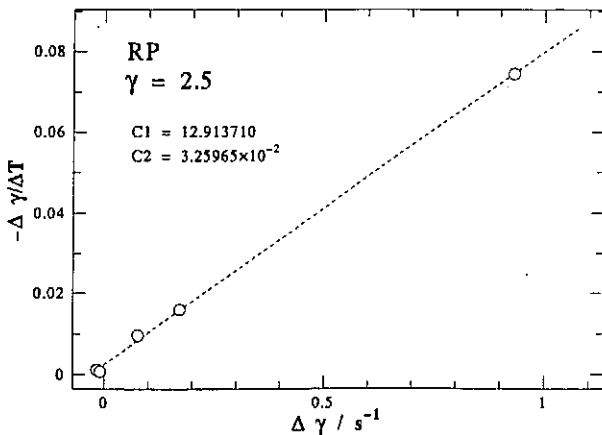


図7 $\gamma = 2.5$ の場合の $\Delta\dot{\gamma}$ と $-\Delta\dot{\gamma}/\Delta T$ との相関 (RP)

7. 硬化則を使用したひずみ速度-温度等価換算則の簡略化

前節でWLF理論を適用したひずみ速度-温度等価換算則を提唱した。しかし、0.5から6.0までの0.5おきの各せん断ひずみにおいてしか適用できず、任意のせん断ひずみでの使用は不可能である。しかもそれを使用し、任意の温度・ひずみ速度下でのせん断応力-せん断ひずみ曲線を再現するには、マスターカーブの各項の係数36点とWLF理論に代入する C_1, C_2 を24点保持する必要があるため、計算機での使用を前提にしているとはいえ、再現には手間を要する。上記の問題点を考慮した結果、WLF理論により再現されたせん断応力-せん断ひずみ曲線を

$$\tau = F\dot{\gamma}^n \quad (3)$$

なるRamberg-Osgood型の硬化則で近似し、そのF値・N値をもって樹脂特性を表現することにより、パラメータ数の減少と再現の簡略化をはかることにした。

図8、9にF値-せん断ひずみ速度曲線、N値-せん断ひずみ速度曲線を示す。なおこの近似に使用した樹脂はRPのみである。

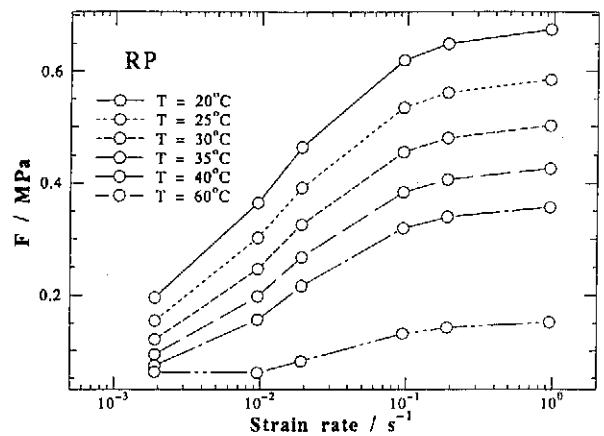


図8 換算則より再現した曲線のF値-せん断ひずみ速度曲線(RP)

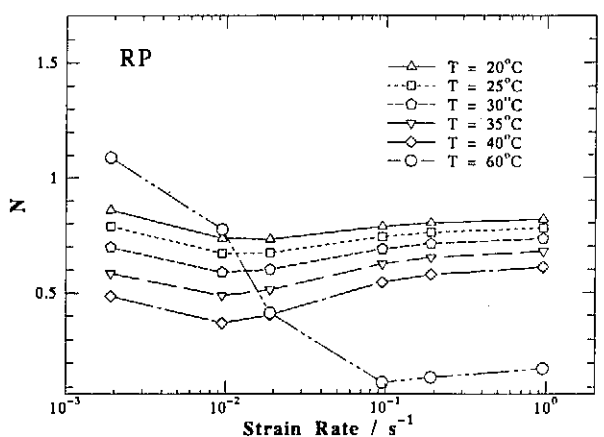


図9 換算則より再現した曲線のN値-せん断ひずみ速度曲線(RP)

7.1 近似値による換算則の提案

換算則より再現したせん断応力-せん断ひずみ曲線のF値・N値をとることにより、任意のひずみにおいても応力値を再現することができるように試みた。しかし、ここでさらにパラメータを減少させるべく得られたF値-せん断ひずみ速度曲線をWLF理論を用いて近似した。また使用したWLF理論は式(4)となる。

$$\log a_{\dot{\gamma}} = -\frac{C_1(T - T_0)}{C_2 + T - T_0} \quad T_0: \text{基準温度} \quad (4)$$

7.1.1 マスターカーブの作成

マスターカーブはその測定点の分布状況から3次式を使用した。表1に3次曲線の係数を示す。また図10に測定データの分布とマスターカーブを示す。

ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ は以下の変換をしてマスターカーブに用いられ、目的のF値を導出する。

$$\dot{\gamma}_m = \log \dot{\gamma} + 4$$

$$F = A[3] \times \dot{\gamma}_m^2 + A[2] \times \dot{\gamma}_m + A[1]$$

表1 マスターカーブの係数

A [3]	A [2]	A [1]	A [0]
-7.28×10^{-3}	5.83×10^{-2}	1.72×10^{-2}	4.66×10^{-2}

7.1.2 相関図の作成

各温度における ΔT と $-\Delta T / \log a_{\dot{\gamma}}$ の相関をとった。その結果を表2に示す。

表2 マスターカーブの係数

C_1	C_2
-2.27×10^1	-3.51×10^2

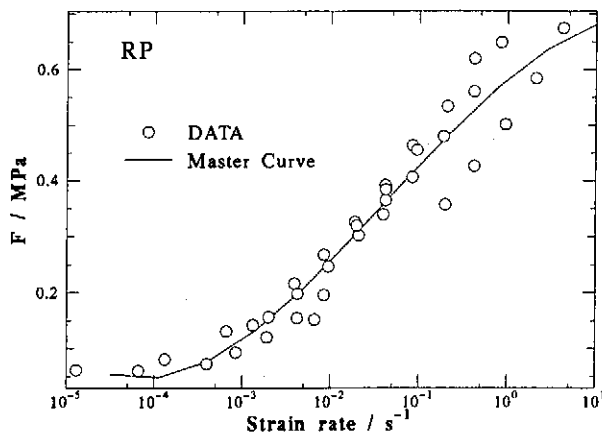


図10 F値-せん断ひずみ速度曲線のマスターカーブ (RP)

8. 任意の温度・ひずみ速度におけるせん断応力-せん断ひずみ曲線の作成

前節にひずみ速度-温度等価換算則、硬化則を使用した簡略換算則を示したが、それらを使用してせん断応力-せん断ひずみ曲線を作成し、実験結果と比較する。例として温度20°C、ひずみ速度 0.0019 s^{-1} の場合を試みる。

8.1 ひずみ速度-温度等価換算則を使用した場合

ひずみ速度-温度等価換算則を使用して作成される曲線のひずみ値は0.5-6.0まで0.5おきの値である。ここでは例として $\gamma = 0.5$ の場合を示す。

まず与えられたひずみ速度、 C_1, C_2 をWLF理論に代入し、ひずみ速度を温度に換算した後、与えられた温度に加算する。

$$\begin{aligned} \Delta T &= -\frac{C_1(\dot{\gamma} - \dot{\gamma}_0)}{C_2 + \dot{\gamma} - \dot{\gamma}_0} \\ &= -\frac{10.8580 \times (0.0019 - 0.019)}{2.2963 \times 10^{-2} + 0.0019 - 0.019} \\ &= -31.668 [^\circ\text{C}] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_{fix} &= T + \Delta T \\ &= 20 - 31.668 \\ &= -11.668 \end{aligned}$$

得られた温度 T_{fix} を式(2)に代入し、せん断応力値を得る。これを各ひずみにおいて実行し、せん断応力-せん断ひずみ曲線を作成する。

8.2 硬化則を使用した簡略換算則

まず与えられた温度、 C_1, C_2 を簡略換算則に代入する。

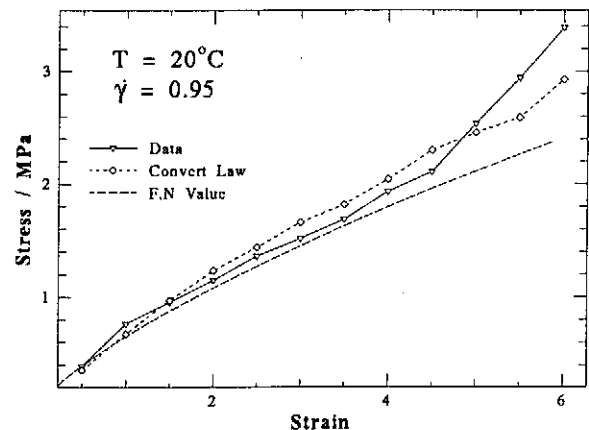


図11 温度20°C、ひずみ速度 0.95 s^{-1} におけるせん断応力-せん断ひずみ曲線の比較

$$\begin{aligned} \log a_{\dot{\gamma}} &= -\frac{C_1(T - T_0)}{C_2 + T - T_0} \\ &= -\frac{-2.2748 \times 10^1 \times (20 - 30)}{-3.5102 \times 10^2 + 20 - 30} \\ &= 6.3010 \times 10^{-1} \end{aligned}$$

これより、 $a_{\dot{\gamma}} = 4.2668$ と求められる。温度をひずみ速度に変換した後、与えられたひずみ速度にそれを加算する。

$$\begin{aligned} \dot{\gamma} &= 0.0019 \times 4.2668 \\ &= 8.1069 \times 10^{-3} \end{aligned}$$

得られたひずみ速度 $\dot{\gamma}$ により、F値を求める。

$$\begin{aligned} \dot{\gamma}_m &= \log \dot{\gamma} + 4 \\ &= 1.9089 \\ F &= A[3] \times \dot{\gamma}_m^3 + A[2] \times \dot{\gamma}_m^2 + A[1] \times \dot{\gamma}_m + A[0] \\ &= 6.5193 \times 10^1 \end{aligned}$$

またN値は図9を参照し、0.73と決定した。図11に比較した結果を示す。

3種のせん断応力-せん断ひずみ曲線を比較してみると、非常に良好な再現が行なわれていることがわかる。ひずみ速度-温度等価換算則はそのパラメータの導出過程の中で数々の近似を行なっているため、再現した曲線は低ひずみ速度・高温度においては近似の誤差が一番大きくなると考えられる。また硬化則を使用した簡略式換算則では硬化則を使用しているため曲線変化にその特徴が反映されるくらいはあるが、それらの条件が影響を及ぼさない状況であれば良好な結果を得ることが確認された。

9. 結論

本研究では以下のことが明らかとなった。

1. 制振鋼板に用いられる樹脂部分のみを使用し、ねじり試験を行なった。その中で樹脂温度とひずみ速度を変化させることにより、樹脂特性を変化させることが可能であることが確認された。さらに樹脂温度の上昇とひずみ速度の低下、または樹脂温度の低下をひずみ速度の上昇に樹脂特性の共通性を確認した。
2. ねじり試験の結果を使用し、有効数のひずみにおけるひずみ速度-温度等価換算則を提案した。
3. ひずみ速度-温度等価換算則を簡略化するため、Ramberg-Osgoodの硬化則を用いたひずみ速度-温度等価簡略換算則を提案した。
4. 2種の換算則の妥当性を確認するためせん断応力-せん断ひずみ曲線を作成し、比較した。その結果、低温・高ひずみ速度においては、ほぼ一致した。

10. 謝辞

本研究は天田金属加工機械技術振興財団の1992年度研究助成金によって行われたものであることを記し深甚なる謝意を同財団に捧げるものであります。