電子部品用構成材料の熱残留応力と反り変形挙動に及ぼす熱負荷条件の熱粘弾性解析

中村 省三*, 後藤 雅彦**, 串崎 義幸**, 木戸 光夫*

Thermo-Viscoelastic Analysis of Thermal Residual Stress and Deformation Influenced by Loaded Temperature for Constitutive Materials in Electronic Devices

Shozo NAKAMURA*, Masahiko GOTO**, Yoshiyuki KUSHIZAKI** and Mitsuo KIDO*

*広島工業大学工学部（〒731-5193 広島県広島市佐伯区三宅2-1-1）

**広島工業大学大学院（〒731-5193 広島県広島市佐伯区三宅2-1-1）

*Faculty of Engineering, Hiroshima Institute of Technology (2-1-1 Miyake, Saeki-ku, Hiroshima-shi, Hiroshima 731-5193)

**Graduate Student of Engineering, Hiroshima Institute of Technology (2-1-1 Miyake, Saeki-ku, Hiroshima-shi, Hiroshima 731-5193)

概要 携帯情報機器に用いられる電子部品の構成材料であるLSIチップ、接着剤、ならびにFR-4基板からなる2層積層体を対象として、その強度信頼性に影響を及ぼす熱負荷条件を理論的に検討した。すなわち、熱粘弾性解析によって積層体に生じる熱残留応力や反り変形挙動を材料物性と負荷する温度プロファイルの両面から定量的に解明した。その結果、積層体に生じる層間熱応力と反り変形量は、LSIチップと接着剤の組み合わせの方がLSIチップとFR-4基板の組み合わせの場合より大きくなる。また、積層体の熱残留応力や反り変形量は材料の貯蔵弾性率や線膨張係数の値に大きく影響され、界面はく離の原因となる層間熱残留応力が最大となる温度プロファイル条件が存在することを明らかにした。

Abstract

Thermal residual stress and warp deformation behavior generate in an electronic device composed of LSI chip and adhesive, FR-4 substrate were analyzed, using the numerical simulation method based on the linear viscoelastic theory. The interfacial thermal stress and warp deformation of laminated beam composed of LSI chip and adhesive are larger than that of LSI chip and FR-4 substrate. It was clarified that thermal residual stress and warp deformation generate in an electronic device are strongly influenced by the loaded temperature conditions as well as material properties.

Key Words: Viscoelastic Analysis, Thermal Residual Stress, Warp Deformation, Semiconductor Device, Laminated Beam, Composite Material

1. 緒言

電子部品に用いる接着剤やLSIチップ、プリント配線板等の接着界面には、接着剤の硬化収縮や構成材料の熱膨張差などによって大きな熱残留応力が発生する。近年、電子機器の軽薄短小化により電子部品の小型・薄形化とともに高密度・高信頼化が強く求められ、電子部品内部の熱残留応力や熱変形の低減が重要な課題となっている^{1)~3)}。電子部品は一般に、金属、LSIチップ、はんだボール、および接着剤やアンダーフィルなどの有機材料の異種材料で構成され、これが実装時のはんだ付け工程や温度サイクル試験などで熱負荷を受けると、その内部に大きな熱残留応力や反り変形が生じ、これが原因で接着界面の層間はく離や材料亀裂、さらには搭載不良などが発生することがある。したがって、発生する熱残留応力や反り変形量を事前に定量的かつ高精度で予測・評価することは、複合構造体の材料・プロセス・構造の最適設計のみならず、高信頼設計技術の構築の上からも極めて重要である。

特に、接着剤やアンダーフィル、プリント配線板などの

有機材料は、その熱的・力学的性質が時間と温度によって著しく変化するいわゆる熱粘弾性挙動を示すことから、発生する熱残留応力や反り変形量を精確に予測・評価するためには、既存の弾塑性解析では実態を表現しないという問題があり、熱粘弾性の数値解析法の導入が不可欠となる^{4)~12)}。

そこで、これまでに金属と樹脂などからなる積層体について、熱粘弾性解析結果と実験結果を比較対比し、その妥当性・有効性を検証し、±5%程度の精度で予測できることを明らかにしている^{6),10),12)}。

本報告では、上記の技術的課題を背景に、電子部品が製造工程や信頼性試験などで受ける各種の熱負荷によって生じる熱残留応力や反り変形挙動を評価する目的で、その最も基本となる2層積層体を取り上げた。すなわち、電子部品の基本的な2層積層体の構成材料としてLSIチップと接着剤およびLSIチップとプリント配線板（以下FR-4基板と略）からなる2種類の積層体を対象として、これに各種の熱負荷を与えた場合に発生する界面部の層間熱残留応力と反り変形挙動を熱粘弾性数値解析によって求めた。そして、これらの結果から電子部品の接着強度信頼性の評価尺度と

なる層間熱応力や反り変形挙動と構成材料，ならびに熱負荷条件の影響を定量的に解明した。

2. 熱粘弾性基礎式の誘導

各種材料から構成される n 層からなる矩形断面をもつ多層積層体に発生する積層体内部の熱応力と曲率を求める基礎式を線形粘弾性理論から誘導した。すなわち，積層体の厚さ方向の座標 x と時間 t の関数となり，これを $\sigma(x, t)$ とする。そして $\sigma(x, t)$ は，構成材料が線形粘弾性体であり，かつ時間－温度換算則¹³⁾が成立すれば，次式で表現できる^{14),15)}。

$$\sigma(x, t) = \int_0^t E_n(t' - \tau', T_0) \frac{d}{d\tau} \left\{ \varepsilon(\tau) + \kappa(\tau) \cdot x - \int_{T_h}^{T(x, \tau)} \alpha_i(T) dT \right\} d\tau \quad i = 1 \sim n \quad (1)$$

ここで， $E_n(t', T_0)$ は i 層の基準温度 T_0 における貯蔵弾性率である。 $\varepsilon(t)$ は長手方向の伸縮， $\kappa(t)$ は曲率， T_h は保持温度， $T(x, t)$ は時々刻々変化する温度分布で，構成材料の熱伝導率が温度によって変化せず一定として，1次元非定常熱伝導の式¹⁶⁾から求められ，厚さ方向の座標 x および時間 t の関数となる。 $\alpha_i(T)$ は i 層の温度 T における材料の線膨張係数である。また，式(1)の t' ， τ' は換算時間であり，これは i 層の時間－温度移動因子を $a_{i,T_0}(T)$ とすれば次式から求められる。

$$t' = \int_0^t \frac{du}{a_{i,T_0}\{T(x, u)\}} \quad i = 1 \sim n \quad (2)$$

さて，この積層体は冷却過程を通して外部からの拘束がないことより，力の釣合い式ならびにモーメントの釣合い式が成立する。

そこで，これらの釣合い式と式(1)，(2)の関係から，次式の微分積分方程式が得られる。

$$\sum_{i=1}^n \int_{x_{i-1}}^{x_i} \int_0^t E_n(t' - \tau', T_0) \frac{d}{d\tau} \left\{ \varepsilon(\tau) + \kappa(\tau) \cdot x - \int_{T_h}^{T(x, \tau)} \alpha_i(T) dT \right\} \cdot d\tau \cdot dx = 0 \quad i = 1 \sim n \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n \int_{x_{i-1}}^{x_i} \int_0^t E_n(t' - \tau', T_0) \frac{d}{d\tau} \left\{ \varepsilon(\tau) + \kappa(\tau) \cdot x - \int_{T_h}^{T(x, \tau)} \alpha_i(T) dT \right\} \cdot x \cdot d\tau \cdot dx = 0 \quad i = 1 \sim n \quad (4)$$

式(3)，(4)は，積層体を徐冷，急冷を問わず冷却した場合に生ずる熱応力を求める基礎式である。すなわち，式(3)，(4)を満足する $\varepsilon(t)$ ， $\kappa(t)$ を求めることができれば，式(1)から時々刻々変化する熱応力分布 $\sigma(x, t)$ を求めることができる。そして $\sigma(x, t)$ ， $\varepsilon(t)$ ， $\kappa(t)$ は冷却後に時間が十分経過し，積層体全体が冷却温度に一樣になった状態においてもなお残留する場合に，これらは残留応力 $\sigma_r(x)$ ，残留伸縮 ε_r ，残留曲率 κ_r となる。

3. 積層体の熱粘弾性解析

3.1 積層体の形状

今回，解析の対象とした2層積層体は実用性を考えてLSIチップと接着剤，およびLSIチップとFR-4基板の2種類で，それらの形状をFig.1に示す。

ここでは，特に，積層体の熱残留応力および反り変形挙動に大きく影響を及ぼし，かつその熱的・力学的性質が温度と時間に著しく依存し，実際の電子部品の構成材料となる接着剤とFR-4基板をLSIチップの相手材として取り上げた。また，積層体の厚さはLSIチップが0.3mm，接着剤およびFR-4基板を0.2mmとした。

3.2 解析に用いた材料物性値

Fig.1に示す積層体を構成する各種材料の熱的・機械的性質をTable1に示す。ここで，接着剤とFR-4基板は有機材料であり，その物性値は温度と時間の影響を大きく受ける熱粘弾性挙動を示す材料である。

そこで，この接着剤ならびにFR-4基板について低温から高温までの広い温度範囲で0.1，1，10，および100Hzの4種類の周波数を変化させて動的粘弾性特性を測定した。測定にはユービーエム製のRheogel-E4000を用いた。この

Fig.1 Shape and coordinate of two layers laminated beams

Table 1. Thermal and mechanical characteristics of constructive materials

Properties	Thermal conductivity	Specific heat	Density	Glass transition temperature Tg	Thermal expansion coefficient		Relaxation modulus	
					(10 ⁻⁶ /K)		(GPa)	
					T ≤ Tg Tg < T		T ≤ Tg Tg < T	
Matierials	(W/mK)	(kJ/kgK)	(kg/m ³)	(°C)				
LSI Chip	147.7	0.799	2328	—	3.6		192	
Adhesive	0.186	1.424	1220	89	88	217	3.4	0.03
FR-4 Substrate	0.372	1.256	1810	140	12.9	4.8	18.0	3.7

Fig.2 Master curve of relaxation modulus for adhesive

Fig.3 Master curve of relaxation modulus for FR-4 substrate

測定結果を基準温度 T_0 の下で換算対数時間軸上にプロットし、貯蔵弾性率のマスタ曲線¹⁷⁾を作成した。それらの結果をそれぞれFig. 2, Fig. 3に示す。これらの図からわかるように、接着剤およびFR-4基板の貯蔵弾性率は極短時間から極長時間にわたって1本の滑らかなマスタ曲線が得られる。

また、このマスタ曲線を作成する際の接着剤およびFR-4基板の時間-温度移動因子はFig. 4およびFig. 5に示すように、高温部と低温部とで活性化エネルギー ΔH の異なる2本のアレニウス式で近似することができた。このことから、ここで取り上げた接着剤およびFR-4基板はともに著しい熱粘弾性挙動を示し、かつ、時間-温度換算則が成立する材料であることがわかった。

3.3 熱粘弾性解析の方法

解析に当たっては、積層体を構成する片方の材料の熱的・機械的性質が温度と時間の影響を大きく受ける熱粘弾性挙動を示す有機材料であることから、特に熱負荷としては広範な温度プロファイルを与えた。すなわち、解析に用いた温度プロファイルとしては、はんだ付け温度やその後の信頼性評価試験に用いられる各種の温度条件を想定して、幅広い範囲を取り上げた。ここで、温度プロファイルとしては初期温度 T_i を種々変化させて、終了温度 T_e との温度範囲($\Delta T = T_i - T_e$)は160℃一定とした。具体的には、初期温度を低温の70℃から高温の330℃までの27パタ

Fig.4 Time-temperature shift factor $a_{T_0}(T)$ for adhesive Fig.5 Time-temperature shift factor $a_{T_0}(T)$ for FR-4 substrate

ーンについて熱残留応力と反り変形量を解析した。熱粘弾性解析に用いた接着剤とFR-4基板の熱的・機械的性質をTable 1に、またFig. 2, 3に示す貯蔵弾性率のマスタ曲線を次式のプロニ級数で近似した値を用いた。

$$E_r(t') = E_0 + \sum_{i=1}^n E_i \exp\left(-\frac{t'}{\tau_i}\right) \quad (5)$$

ここで、 $E_i(t')$ は貯蔵弾性率、 E_i はプロニ級数の係数で常に正の値、 τ_i は緩和時間($\tau_i > \tau_{i+1}$)、 n はプロニ級数の項数である。さらにFig. 4, 5に示す時間-温度移動因子を高温部と低温部とで活性化エネルギー ΔH の異なる2本のアレニウス式で近似した値を用いた。一方、LSIチップについてはTable 1の物性値を用いた。また2層積層体を空気冷却する際の熱伝達率は予備実験の結果から46W/m²Kの値を採用した。

4. 結果と考察

4.1 熱残留応力分布に及ぼす構成材料の影響

Fig.1に示すLSIチップと接着剤、およびLSIチップとFR-4基板の2層積層体を対象に、ここでは各種温度プロファイルの一例として、一般に製造プロセスで用いられる

Fig. 6 Thermal residual stress distribution of laminated beams for constitutive materials

接着温度の180℃から20℃まで冷却した場合を取り上げ、解析で求めた積層体内部に生ずる熱残留応力分布の一例をFig. 6に示す。これは、接着温度の180℃から冷却されるにつれて積層体内部に生ずる熱応力の分布を20℃に冷却された最終状態の熱応力分布、いわゆる熱残留応力分布を示したものである。ここで、熱残留応力は2層積層体の長手方向（y方向）に発生し、かつ厚さ方向（x方向）に分布する。Fig. 6より、接着剤およびFR-4基板ともにその内部では引張の熱残留応力が、またLSIチップ内部では表面（ $x=0$ ）近傍の引張の熱残留応力から界面（ $x=0.3\text{mm}$ ）近傍の圧縮の熱残留応力へと直線的に分布している。

また、LSIチップと接着剤、ならびにFR-4基板の接着界面において、LSIチップ側に生ずる熱応力と接着剤、ならびにFR-4基板側に生ずる熱応力との差を層間熱応力と表示し、これが界面接着剥離の原因となる剪断応力に相当するものである。この図から、冷却が終了した最終状態におけるいわゆる層間熱残留応力はLSIチップと接着剤の組み合わせの方が、LSIチップとFR-4基板の組み合わせより大きいことがわかる。

4.2 冷却過程の層間熱応力と反り変形挙動

Fig. 1に示すLSIチップと接着剤、およびLSIチップとFR-4基板の2層積層体を、前節と同様に一般に製造プロセスで用いる接着温度の180℃から20℃まで冷却した際の冷却過程における層間熱応力、曲率ならびに反り変形の変化をそれぞれFig. 7, Fig. 8に示す。

なお、反り変形量 d は曲率 κ から次式で算出できる。

$$d = \frac{s}{2} \tan \left\{ \frac{1}{2} \arcsin \left(\frac{1}{2} \kappa \cdot s \right) \right\} \quad (6)$$

ここで、 s は積層体の長さで、 $s=10\text{mm}$ とした場合の反り変形量を示している。

これらの図から、LSIチップと接着剤、およびLSIチップとFR-4基板の積層体の層間熱応力と反り変形量は冷却時間の経過とともに増加することがわかる。ここで、LSIチップとFR-4基板の積層体についてみると、冷却時間が極短時間では層間熱応力および反り変形量は小さいが、冷却されて積層体の温度がFR-4基板のガラス転移温度の

Fig. 7 Interfacial thermal stress changes of laminated beams by cooling

Fig. 8 Warp deformation changes of laminated beams by cooling

140℃以下になると、FR-4基板の線膨張係数と貯蔵弾性率の値が大きくなるため層間熱応力と反り変形量が急激に大きくなる。次いで、積層体の温度が室温近くになると層間熱応力と反り変形量は一定値に収束し、最終的な層間熱残留応力は約65MPa、残留曲率は $1.5 \times 10^{-3}/\text{mm}$ 、および残留反り変形量は20 μm 程度となる。

一方、LSIチップと接着剤からなる積層体の場合では、冷却時間が経過して積層体の温度が140℃以下になるとFig. 2からわかるように接着剤の貯蔵弾性率の値が大きくなりはじめ、これに伴って層間熱応力および反り変形量は急激に大きくなる。次いで、積層体の温度が接着剤のガラス転移温度の90℃以下になると、接着剤の線膨張係数の値が小さくなるため両者の値はともに微増しながら室温近傍で一定値に収束する。そして最終的に層間熱残留応力、残留曲率ならびに残留反り変形量はそれぞれ約230MPa、約 $5.0 \times 10^{-3}/\text{mm}$ 、約65 μm となる。

また、積層体の層間熱応力ならびに反り変形量はLSIチップと接着剤の組み合わせの方が、LSIチップとFR-4基板の組み合わせの場合より70%程度大きくなる。これは、接着剤とFR-4基板の貯蔵弾性率ならびに線膨張係数と相手材であるLSIチップのそれらが相互に複雑に影響を及ぼした結果で、LSIチップと接着剤の組み合わせの方が層間熱応力と反り変形量がともに大きくなったものと考えられる。また、Fig. 7とFig. 8からわかるように、層間熱応力と反り変形挙動は密接な対応関係が認められる。

以上のことから、最終的な層間熱残留応力ならびに残留反り変形量は接着剤の方が大きくなり、FR-4基板に比べて界面接着はく離の点で心配があるが、今後界面の接着強度との関係で定量的に検討する必要がある。

4.3 接着界面の熱残留応力と残留反り変形に及ぼす熱負荷条件の影響

ここでは、前節で述べた時間的に変化する最終状態のいわゆる層間熱残留応力、残留曲率ならびに残留反り変形量の値を、種々の熱負荷条件、すなわち各種の温度プロファイルの下で解析した結果について述べる。Fig. 9, Fig. 10は、前述の27パターンの温度プロファイルの条件下で解析した2種類の積層体の層間熱残留応力と残留曲率、ならびに残留反り変形量を示したものである。

これらの図から、積層体の層間熱残留応力、残留曲率ならびに残留反り変形量は、いずれもLSIチップと接着剤の組み合わせの方がLSIチップとFR-4基板の組み合わせより2～3倍程度大きいことがわかる。

ここで、LSIチップとFR-4基板についてみると、層間熱残留応力と残留反り変形量はともに初期温度が140℃以下では大きい、140℃以上から減少傾向となり、300℃以上で最低値に収束することがわかる。これは、FR-4基板の貯蔵弾性率と線膨張係数の値がガラス転移温度の

Fig. 9 Relationship between loaded heat conditions and interfacial thermal residual stress for laminated beams

Fig. 10 Relationship between of loaded heat conditions and residual curvature and warp deformation for laminated beams

140℃以下では大きく、ガラス転移温度以上では小さくなるためである。

一方、LSIチップと接着剤からなる積層体の場合の層間熱残留応力、残留曲率ならびに残留反り変形量は、初期温度が90℃以下では一定値を示すが、90℃から増加して140℃で最大値となり、その後減少するという興味ある結果を得た。

このように積層体に与える温度プロファイルの違いによって層間熱残留応力、残留曲率ならびに残留反り変形量の値が複雑に変化するの、接着剤の貯蔵弾性率と線膨張係数が温度によって大きく変動し、これが相手材であるLSIチップの物性と密接に関係した結果である。すなわち、接着剤のガラス転移温度以下では貯蔵弾性率の値は大きい、逆に線膨張係数は小さい値を示す。また、Fig. 2に示すマスタ曲線からわかるように、接着剤の貯蔵弾性率は90℃程度から減少をはじめ、140℃以上では0.03GPaになる。これから、初期温度90℃から140℃の範囲では接着剤の貯蔵弾性率より線膨張係数の影響が支配的であると考えられる。次いで、ガラス転移温度よりも十分高い温度の140℃以上では、接着剤の線膨張係数は大きい値を示すが、逆に貯蔵弾性率は小さい値となり、その結果としてこの温度範囲では接着剤の貯蔵弾性率が支配的となり、層間熱残留応力や残留曲率、ならびに残留反り変形量が減少することになる。

このように、積層体の接着界面に生ずる層間熱残留応力や残留曲率、ならびに残留反り変形量の大きさや挙動は、前節で述べたように材料間の貯蔵弾性率と線膨張係数に影響されることがわかる。

また、電子部品の破壊の原因となる層間熱残留応力や残留反り変形量が最大となる温度プロファイルの存在が明らかにできたことから、製造過程においてはこの危険温度領域を避けた条件設定が可能となる。さらに、現在の信頼性試験では温度とサイクル数の妥当性が不明確で、信頼性試験を行う条件設定に関する明確な根拠が乏しい。そこで、本論文で明らかにした危険温度条件を信頼性試験に適用できれば、試験サイクル数の減少につながり、時間とコストの削減の面からも有益で工業的有用性があるものと考えられる。

今後さらに、より実際のパッケージに近い構造・形状での解析が必要である。

5. 結 言

LSIチップと接着剤およびLSIチップとFR-4基板からなる2層積層体を対象に、各種の熱負荷を与えた場合に発生する熱残留応力と反り変形挙動を熱粘弾性解析で求め、以下の結論を得た。

- (1) 積層体の熱残留応力分布はLSIチップ内部では、表面近傍の引張応力から界面近傍の圧縮応力へと直線的

に分布するのに対し、接着剤とFR-4基板内部では引張の残留応力分布となる。

- (2) 界面の熱残留応力はLSIチップと接着剤の組み合わせの方がLSIチップとFR-4基板の組み合わせの場合より大きい。
- (3) 接着界面に生ずる層間熱応力や反り変形挙動は冷却時間の経過とともに増加し、それらの値はLSIチップと接着剤の組み合わせの方がLSIチップとFR-4基板の組み合わせより70%程度大きい。
- (4) 層間熱残留応力と残留反り変形量の値は与える温度プロファイルに大きく依存し、LSIチップと接着剤の組み合わせの方がLSIチップとFR-4基板の組み合わせの場合より2～3倍程度大きい。
- (5) 積層体の破壊の原因となる層間熱残留応力を最大にする危険温度領域が存在することから、信頼性試験や製造プロセスの適正条件設定の指針が得られる。

(2001.11.26-受理)

文 献

- 1) N.Taketani, K.Hatano, H.Sugimoto, O.Yoshioka, G.Murakami : "CSP with LOC Technology", ISHM, 1996, Proceeding, p.594, 1996
- 2) 村上 元 : "半導体パッケージ実装技術と今後の動向", エレクトロニクス実装学会誌, Vol.1, No.1, p.19, 1998
- 3) 村上 元 : "熱粘弾性解析によるエリアアレイ型LSIパッケージの材料および構造の最適化に関する研究", 学位論文, 2000
- 4) 村上 元, 中村省三, 御田 護, 宮野 靖 : "熱粘弾性解析によるCSP- μ BGAのエラストマ構造の最適化設計", エレクトロニクス実装学会誌, Vol.3, No.1, p.34, 2000
- 5) G.Murakami, M.Mita, S.Nakamura, K.Ueno, K.Nakamura : "Achieving an Optimum Structural Package Design with Thermo-Viscoelastic Analysis", Chip Scale Review, Vol.2, No.5, p.55, 1998
- 6) 中村省三, 村上 元, 井坂和博, 上野恵尉, 中村敬一 : "FCA方式による半導体デバイスの熱粘弾性解析による反り変形挙動の予測", エレクトロニクス実装学会誌, Vol.2, No.4, p.291, 1999
- 7) 河田裕志, 池上皓三 : "ICパッケージ用樹脂の粘弾性特性と残留応力", 日本機械学会論文集, Vol.56A, p.2471, 1990
- 8) 大堀雅志, 佐藤千明, 池上皓三 : "熱硬化性樹脂の硬化過程における粘弾性特性と内部応力", 材料, Vol.43, p.18, 1994
- 9) 中村省三, 篠田忠夫, 金田愛三, 宮野 靖 : "熱硬化性樹脂と金属から成る積層はりを急冷した場合に生じる熱応力の粘弾性解析", 日本機械学会講演論文集, No.864(2), p.28, 1986
- 10) 中村省三, 宮野 靖, 杉森 勝, 金田愛三 : "熱硬化性樹脂と金属から成る積層はりを冷却した場合に生じる残留応力の粘弾性解析", 日本機械学会論文集, Vol.53, No.493, p.1813, 1987
- 11) S.Nakamura, Y.Miyano, S.Sugimori and A.Kaneda : "Thermoviscoelastic Analysis of Residual Stresses in a Thermosetting Resin/Metal Laminated Beam Caused by Cooling", JSME International Journal, Vol.3, No.1, p.126, 1988
- 12) 中村省三, 長谷部昭雄, 芹沢弘二, 高坂 崇, 春田 亮 : "金属と樹脂からなる二層積層体の反り変形量と残留応力", 高分子論文集, Vol.51, No.12, p.806, 1994
- 13) M.L.Williams, R.F.Landl and J.D.Ferry : "The Temperature Dependence of Relaxation Mechanisms in Amorphous Polymers and Other Glass-Forming Liquids", J.Am. Chem.Soc, Vol.77, p.3701, 1955
- 14) 牟岐鹿桜 : "線形粘弾性理論の最近の進歩", 日本機械学会誌, Vol.64, p.34, 1961
- 15) 國尾 武 : "固体力学の基礎", 培風館, 東京, p.24, 1983
- 16) 川下研介 : "熱伝導論", オーム社, 東京, p.96, 1966
- 17) 中川鶴太郎 : "レオロジー", 岩波全書, 東京, p.220, 1983