外気の変動によるはくひずみゲージの温度変化*

小 島 之 夫**

Temperature Variation of Foil Strain Gage by Ambient Air Condition

Yukio KOJIMA

The temperature variations of strain gages, caused by the power dissipated in the gage are calculated by the three-dimensional finite element method. When gages are bonded to materials with lower thermal diffusivities, such as plastic, the rise in the temperature of the gages depends not only upon the area of the grid of the gage, which is often used to characterize the heat-dissipation characteristics of a strain gage, but upon the length and the width of the filament, and the number of filaments. When gages are bonded to materials with higher thermal diffusivities such as steel or aluminum alloy, most of the temperature rise is produced in the base of the gage, so as to depend upon the heat flux per unit area of filament and the thickness of the base. Temperature variations of strain gages caused by ambient-temperature variations with time are also calculated using an axis-symmetrical model. In various conditions of a gage installation, the effective factors which govern temperature variation were clarified.

Key Words: Measurement, Experimental Stress Analysis, Strain Gage, Plastic, Heat Dissipation, Temperature Variation

1. ま え が き

はくひずみゲージ(以下ゲージと記す)の温度変化は、ゲージの出力を変化させ、測定誤差の原因となる⁽¹⁾。特に、プラスチックなど熱伝導のわるい材料にゲージを接着した場合、ゲージ電流による温度上昇が10~30°Cにもなる。この場合、測定中に外気の状態が変動すると、ゲージの温度変化によって、大きな測定誤差を生ずる。さらに、温度上昇による材料自体の特性変化も問題となる。このため、プラスチックにゲージを接着した場合については、これまでにも検討が行われている。竹中らは、簡単なモデルを用いて解析を行い、ゲージの温度上昇はゲージの単位面積当たりの発熱量に比例することを示した⁽²⁾。この場合、ゲージの電気抵抗、ブリッジ電流が同じであれば、温度上昇は、ゲージの表面積に反比例することになる。また、各種のゲージに対して、許容ブリッジ電流も、単位面積当たりの発熱量に反比例するとして規定されている⁽¹⁾。以上の結果は、定性的には、実験結果と一致する。しかし、実験結果によれば、ゲージの表面積が

1/100 以下になっても、温度上昇は10倍程度にしかならず⁽³⁾⁽⁴⁾、定量的には一致しない。これは、温度上昇がゲージの単位面積当たりの発熱量だけでなく、他の因子によっても支配されているためと考えられる。このため、本報では、有限要素法を用い、ゲージを実際に近い構造にモデル化して解析を行う。そして、温度上昇に影響を与える因子を明らかにする。

一方、外気自体の温度変化もゲージの温度に影響を与える。特に、最近では、商用の計量器の荷重変換素子として、ゲージを用いたビーム形ロードセルが使用されている。このロードセルでは、ゲージ接着位置におけるビームの厚さが小さいほど、偏置荷重誤差が減少する⁽⁵⁾⁽⁶⁾。しかし、ビーム厚さを小さくした場合、この部分の熱容量が低下するため、ゲージの温度すなわち出力は、外気温度の影響をうけやすくなる。この場合、外気の変動に対するゲージの温度変化は、ロードセルの性能を規定する重要な因子となる。しかし、この点については、これまで、ほとんど検討が行われていない。このため、本報では、有限要素法を用い、外気温度の変動状態をモデル化して、解析を行った。そして、外気温度の変動とゲージの温度変化との関係を調べた。

本報の結果によって、各種の測定条件に対して、許容ブリッジ電流が推定できる。さらに、ゲージの温度

* 昭和61年11月25日 第941回講演会において講演、原稿受付 昭和61年1月10日。

** 正員、名古屋工業大学(〒466 名古屋市昭和区御器所町)。

変化を小さくするための効果的な方法、および温度変化の小さいゲージの構造がわかる。

2. ゲージ電流による温度変化

2.1 解析モデル 解析に用いたモデルを図1に示す。ゲージのフィラメントの1本のみを解析する。フィラメントの幅、長さを w, l とし、単位面積当たりの発熱量を $q \text{ W/m}^2$ とする。試験片は、厚さが t_s 、一片の長さが 100 mm の正方形板とする。外気温度は零として、外気と試験片両表面との熱伝達率を $\alpha \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ とする。また、実際の試験片では、熱容量の大きい物体に接触していることを考慮して、試験片周囲で温度を零と規定する。なお、試験片周囲の温度を規定しない場合、熱伝達率 α が零のとき、フィラメントの温度は無限大になる。フィラメントの厚さは、 $6 \mu\text{m}$ とし、熱伝導率 λ_f を次式のように仮定した。

$$\lambda_f = 20.0 \text{ W/m} \cdot \text{K} \dots\dots\dots (1)$$

ベースおよびコーティングの材料は、プラスチックであるとし、これらの熱伝導率 λ_p を、

$$\lambda_p = 0.2 \text{ W/m} \cdot \text{K} \dots\dots\dots (2)$$

とした。試験片の材料としては、プラスチック、鋼、アルミニウムを想定した。プラスチックの熱伝導率は、ベースおよびコーティングと同じ〔式(2)〕とした。また、鋼、アルミニウムの熱伝導率は次式とした。

$$\lambda_s = 45.4 \text{ W/m} \cdot \text{K} \dots\dots\dots (3)$$

$$\lambda_a = 164.0 \text{ W/m} \cdot \text{K} \dots\dots\dots (4)$$

有限要素法を用い、定常状態における試験片およびゲージの温度分布を計算した。この際、8 接点直方体要素を用い、図1のように、全体の1/4の部分要素分

図1 解析モデル

割した。試験片の x, y, z 方向の分割数は、それぞれ約 19, 15, 10 であり、特にフィラメント近傍において、分割を細かくした。

2.2 フィラメントの長さ l 、幅 w の影響

外気と試験片との熱伝達率 α を零とする。また、ベースおよびコーティングの厚さ t_b, t_c を $20 \mu\text{m}$ 、試験片の厚さ t_s を 10 mm とする。この状態において、フィラメントの長さ l および幅 w を変化させた。フィラメント中央の温度 T_g/q の計算結果を図2に示す。試験片がプラスチックの場合、フィラメントの温度 T_g は、フィラメントの幅 w にほぼ比例して増加する。さらに、 T_g は、フィラメントの長さ l によっても変化する。もし、ゲージにコーティング、ベースがなく、試験片の幅、厚さが無限大であれば、フィラメントの温度分布は、フィラメントの幅 w およびフィラメントの長さ、幅の比 l/w によって決まる。したがって、 l/w が同じフィラメントでは、温度 T_g/q が w に比例する。図2において、 $l=1 \text{ mm}$ 、 $w=10 \mu\text{m}$ と $l=5 \text{ mm}$ 、 $w=50 \mu\text{m}$ とで比較した場合、 $w=50 \mu\text{m}$ の T_g/q は、 $w=10 \mu\text{m}$ の T_g/q の 6.3 倍である。これは、2.4 節および 2.5 節で示すように、フィラメントの温度がゲージのコーティング、試験片厚さの影響を受けるためと考えられる。以上のように、温度 T_g は、フィラメントの単位面積当たりの発熱量 q だけでは決まらない。試験片がプラスチックの場合について、フィラメントおよび試験片表面に沿う温度分布を図3(a), (b)に示す。フィラメントの温度変化は、主に、フィラメント近傍数 mm の範囲で生ずる。また、フィラメントと試験片表面との温度差、すなわちベース中における温度変化は、フィラメントの幅 w が同じであれば、長さ l によらず一定であることがわかる。

試験片が鋼およびアルミニウムの場合、フィラメン

図2 フィラメントの長さ l 、幅 w の影響

トの温度は等しく、かつプラスチックの場合に比較して非常に小さい。これは、フィラメントの温度上昇のほとんどがベース中においてのみ生ずるためである。したがって、フィラメントの温度 T_g は、図 3 (a) におけるフィラメントと試験片表面との温度差にほぼ等しくなる。この場合、フィラメントの熱量がすべてその直下のベースに伝導すると考えれば、温度上昇の最大値は、 $T_g/q = t_b/\lambda_p = 20 \times 10^{-6}/0.2 = 1 \times 10^{-4}$ として推定できる。

2.3 フィラメントの本数 N の影響 実際のゲージのように、フィラメントが複数ある場合については、図 3 (b) を用いて、温度が推定できる。すなわち、図 3 (b) の温度分布を、 y 方向にフィラメントのピッチ間隔で平行移動して、加えていけばよい。ここでは、フィラメントのピッチが幅 w の 2 倍の場合について、計算結果を図 4 に示す。フィラメントの本数 N が少ない場合、温度は、ほぼ N に比例して増加する。そして、 N が大きくなるに伴い、温度の増加する程度が小さくなる。この傾向は、ゲージ長が小さいほど顕著である。

図 4 から、実際のゲージにおけるフィラメントの温

(a) x 方向

(b) y 方向

図 3 フィラメント近傍における温度変化

度上昇が比較できる。ゲージ電流により発生する熱量 P は、ブリッジ電圧を V 、電気抵抗を R とすれば、 $P = V^2/4R(W)$ である。したがって、フィラメント単位面積当たりの発熱量は、 $q = P/(w \cdot l \cdot N)$ となる。ゲージ長が $l = 1 \text{ mm}$ 、フィラメント幅が $w = 10 \text{ μm}$ の場合、 $N = 15$ であれば、ゲージの電気抵抗 R が 120 Ω になる ($q/P = 6.67 \times 10^6$)。このとき、図 4 によれば、 $T_g/q = 6.4 \times 10^{-4}$ であり、 $T_g/P = 4300$ となる。一方、フィラメントの厚さを同じにして、 xy 面の形状を相似に拡大しても、ゲージの電気抵抗は変化しない。形状を 5 倍に拡大した場合 ($l = 5 \text{ mm}$, $w = 50 \text{ μm}$, $N = 15$, $q/P = 0.267 \times 10^6$, $T_g/q = 35 \times 10^{-4}$)、ゲージの面積は 25 倍になる。しかし、フィラメントの温度は、図 4 によれば、 $T_g/P = 935$ であり、 $l = 1 \text{ mm}$ のゲージに比べて $1/5.5$ である。この値は、前節で述べた理由により、形状の拡大比 5 にほぼ対応する。したがって、従来のように、ゲージの許容ブリッジ電圧を、フィラメントの表面積のみに基づいて決めることは妥当でないといえる。

鋼あるいはアルミニウムのように、ベースに比べて、熱伝導率が、非常に大きい試験片の場合、フィラメントの温度上昇は、ベース中においてのみ生ずる。さらに、フィラメントの幅 w および長さ l によって、ほとんど変化しない(図 2)。したがって、この場合には、フィラメントの温度上昇 T_g が、主に、フィラメントの単位面積当たりの発熱量 q によって決まる。

2.4 試験片の厚さ t_s の影響 この場合について、温度上昇 T_g/q の計算結果を図 5 に示す。試験片の材料がプラスチックの場合、フィラメントの温度 T_g は、熱伝達率 α によって変化する。これは、測定中に外気の状態が変わり、熱伝達率 α が変化した場合、フ

図 4 フィラメントの本数 N の影響

フィラメントの温度変化に伴って、測定誤差を生ずることを意味している。熱伝達率 α に対するフィラメントの温度変化は、試験片の厚さ t_s が小さくなるに伴い、増加する。特に、 t_s が 1 mm 以下のとき、十分厚い試験片に比べて、温度変化は 2 倍以上になることがわかる。しかし、 t_s が 5 mm 以上であれば、温度変化に対して影響しない。なお、図 3 からわかるように、フィラメントの幅 w 、長さ l が大きいほど、試験片中において、温度変化の範囲が広い。このため、 w, l が大きいフィラメントほど、温度に影響しない試験片厚さが大きくなる。

試験片が鋼およびアルミニウムの場合には、試験片の厚さ t_s がフィラメントの温度に影響しない。さらに、熱伝達率 α によっても変化しない。これは、フィラメントで発生した熱のほとんどすべてが、ベースを通り試験片中に伝導するためである。したがって、外

気変動しても、測定誤差がほとんど生じない。

2.5 コーティング厚さ t_c の影響 この場合の計算結果を図 6 に示す。試験片がプラスチックの場合、コーティング厚さ t_c が減少すると、フィラメントの温度 T_g が熱伝達率 α によって大きく変化するようになる。逆に、ゲージのコーティングを厚くすることによって、外気の変動に対してフィラメントの温度変化を小さくできる。このために必要なコーティングの厚さは、約 1 mm である。また、この厚さは、前節の場合と同じ理由で、フィラメントの幅 w 、長さ l が大きいほど、大きくなる。この際、コーティングの材料として、そのヤング係数が試験片と同程度の材料を用いる場合、コーティングによる補強効果を考慮する必要がある。また、図 6 において、熱伝達率が $\alpha = 10^4$ のとき、コーティング厚さ t_c の減少に伴い、温度 T_g が減少する。これは、フィラメントから外気中に伝達する熱量が増加するためである。試験片が鋼およびアルミニウムの場合には、前節と同じ理由で、コーティング厚さはフィラメントの温度上昇に影響しない。

2.6 ベース厚さ t_b の影響 この場合の計算結果を図 7 に示す。試験片材料がプラスチックの場合、熱伝達率 α によって、フィラメントの温度が変化する。しかし、ベースと試験片が同じ材料であり、かつベースの厚さが試験片の厚さに比べて非常に小さいため、フィラメントの温度変化は、ベースの厚さ t_b によって変化しない。一方、試験片材料が鋼およびアルミニウムの場合には、フィラメントの温度上昇のほとんどがベース中で生ずる。このため、ベース厚さ t_b の増加に伴い、フィラメントの温度が増加する。さらに、熱伝達率 α によっても温度が変化するようになる。すなわち、フィラメントの温度変化を考えた場合、ベース

図 5 試験片の厚さ t_s の影響

図 6 ゲージのコーティング厚さ t_c の影響

図 7 ゲージのベース厚さ t_b の影響

厚さはできるだけ薄いほうがよい。

3. 外気温度の変動に対する ゲージの温度変化

3.1 解析モデル 解析に用いたモデルを図8に示す。試験片と外気との熱伝達率を α として、時間 t に対する外気温度の変化を、 $T_0 \sin(\omega t)$ と仮定する。さらに、定常状態におけるフィラメントの温度を $T_g \sin(\omega t + \phi)$ とおく。そして、有限要素法を用いて、温度の絶対値 T_g を計算する⁽⁷⁾。この場合、各節点において、温度の絶対値 T_g と位相差 ϕ とが未知数になる。さらに、連立方程式の係数も対称でなくなり、前章のように三次元解析を行うことが困難となる。このため、本章では、ゲージも含めて試験片を軸対称体として解析を行う。二次の8接点アイソパラメトリック要素を用い、前章の図1より細かく分割した。特に、外気と接触するコーティング上面および試験片両表面近傍において分割を細かくした。

以上のモデルでは、一般的に、外気温度変化の周波数 ω が大きい場合、温度変化がコーティング上面および試験片下面近傍において生ずる。また、周波数 ω が小さくなるほど、試験片全体の温度が均一になる傾向を示す。もし、温度変化がコーティング上面近傍のみで生ずる場合には、コーティングを厚さ方向に一次元の半無限板と仮定して、フィラメントの位置における温度が推定できる。この場合、フィラメントの温度 T_g は、次式⁽⁸⁾で計算できる。

$$\frac{T_g}{T_0} = \frac{\alpha \cdot \exp\left(-\sqrt{\frac{\omega C_p \rho_p}{2\lambda_p}} \cdot t_c\right)}{\sqrt{\left(\alpha + \sqrt{\frac{\omega C_p \rho_p \lambda_p}{2}}\right)^2 + \frac{\omega C_p \rho_p \lambda_p}{2}}} \quad \dots\dots\dots (5)$$

式(5)中、 λ_p 、 C_p 、 ρ_p は、コーティング材料であるプラスチックの熱伝導率、および比熱、密度である。ここで、比熱・密度の積を次式のように仮定した。

$$C_p \cdot \rho_p = 2000 \text{ kJ/m}^3 \cdot \text{K} \quad \dots\dots\dots (6)$$

一方ゲージも含めて試験片全体の温度が均一になる場合には、コーティングおよびベースを無視して、試験

図8 解析モデル

片全体の温度 T_g が、次式によって推定できる。

$$\frac{T_g}{T_0} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega C_p \rho_t}{2\alpha}\right)^2}} \quad \dots\dots\dots (7)$$

式(7)中、 $C_p \cdot \rho$ は、試験片の比熱・密度の積である。試験片がアルミニウムの場合、比熱・密度の積を次式のように仮定した。

$$C_a \cdot \rho_a = 2300 \text{ kJ/m}^3 \cdot \text{K} \quad \dots\dots\dots (8)$$

また、フィラメントの比熱・密度の積を次式とした。

$$C_f \cdot \rho_f = 3660 \text{ kJ/m}^3 \cdot \text{K} \quad \dots\dots\dots (9)$$

3.2 試験片の厚さ t_s の影響 フィラメントの温度 T_g/T_0 の計算結果を図9(a)、(b)に示す。はじめに、試験片がプラスチックの場合について考察する。外気と試験片との熱伝達率が極めて大きい場合($\alpha = 10^4$)、有限要素法の結果(図中、実線)は、式(5)によって計算される値(図中、一点鎖線)にほぼ等しい。これは、温度の変化がコーティングの上面近傍においてのみ生ずるためである。この場合、温度は試験片の厚さ t_s によって変化しない。熱伝達率 α が非常に小さい場合($\alpha = 1$)、有限要素法の結果は、式(7)の結果(図中、破線)にほとんど等しい。これは、試験片全体の温度が

(a) プラスチック

(b) アルミニウム

図9 試験片の厚さ t_s の影響

ほとんど均一になるためである。この場合には、フィラメントの温度が、試験片厚さ t_s の減少に伴って増加する。一方、熱伝達率が $\alpha=10^2$ の場合には、外気の温度変化の周波数 ω が小さいとき、式(5)で近似でき、大きいとき、式(7)で近似できる。

試験片の材料がアルミニウムの場合〔図9(b)〕、フィラメントの温度は、全般的に式(7)で近似できる。このため、温度が試験片の厚さ t_s によって変化する。熱伝達率 α が非常に大きく、かつ外気の周波数 ω が高い場合、試験片の温度は非常に小さい。しかし、ゲージのコーティングおよびベース中において、温度上昇が生ずるため、フィラメントの温度は式(5)に従う。

なお、以上の場合、主に、温度変化は試験片の板厚方向においてのみ生じ、半径方向にはほとんど生じていない。したがって、有限要素法を用いた場合でも、試験片およびゲージを板厚方向に一次元と仮定して解析を行っても十分であると考えられる。

3.3 コーティングの厚さ t_c の影響 結果を図10(a), (b)に示す。試験片の材料がプラスチックの場合、熱伝達率 α が極めて大きいとき ($\alpha=10^4$)、温度

(a) プラスチック

(b) アルミニウム

図10 ゲージのコーティング厚さ t_c の影響

変化は、コーティングの上面近傍において生ずる。したがって、コーティングの厚さ t_c 、すなわちコーティング上面からフィラメントまでの距離が大きくなるほど、フィラメントの温度は減少する。そして、この場合、温度は式(5)によってほぼ推定できる。しかし、熱伝達率 α が小さい場合には ($\alpha=1$)、試験片の温度が均一になるため、コーティング厚さの影響がなくなり、温度が式(7)に従う。

試験片材料がアルミニウムの場合、フィラメントの温度は、全般的に、式(7)に従う。しかし、熱伝達率 α が大きく、かつ外気の周波数 ω が大きい範囲では、コーティング厚さ t_c の減少に伴い、温度が増加する。

3.4 ベース厚さ t_b の影響 プラスチックとアルミニウムの結果をまとめて図11に示す。試験片がプラスチックの場合、ベースは試験片と同じ材料であり、その厚さが試験片の厚さに比べて小さいため、ベースは、フィラメントの温度に対してほとんど影響しない。しかし、試験片がアルミニウムの場合には、熱伝達率 α が大きく、かつ外気の周波数 ω が大きいとき、フィラメントの温度上昇がコーティングおよびベース中で生ずる。このため、ベースが厚くなるに伴い、フィラメントの温度が増加する。

4. 結 言

ゲージ電流によって生ずるフィラメントの温度上昇を、有限要素法によって計算した。試験片がプラスチックの場合、フィラメントの温度は、フィラメントの表面積に反比例して変化するのではなく、ゲージ長、フィラメント幅、フィラメントの本数によって変化することを示した。この場合、外気と試験片との熱伝達率の変化によるフィラメントの温度変化、すなわち外気の変動による測定誤差は、試験片の厚さ、およびゲージのコーティング厚さが小さくなるほど、増加する。また、試験片が鋼およびアルミニウムのように、熱

図11 ゲージのベース厚さ t_b の影響

伝導のよい材料では、フィラメントの温度上昇のほとんどが、ベース中で生ずる。このため、フィラメントの温度は、主に、単位面積当たりの発熱量およびベース厚さによって決まる。

外気の温度が時間に対して、正弦波状に変化する場合について、有限要素法によりフィラメントの温度を計算した。さらに、温度変化がコーティングの上面近傍においてのみ生ずる場合と、試験片全体の温度が一樣になる場合について、一次元モデルによる解析解を示し、有限要素法の結果と比較した。試験片がプラスチックの場合、外気と試験片との熱伝達率が極めて大きいとき、温度変化はコーティングの上面近傍で生ずる。このため、フィラメントの温度は、ゲージのコーティング厚さの影響を大きく受ける。一方、熱伝達率が小さい場合には、試験片全体の温度が均一になる。この場合、フィラメントの温度は、試験片の厚さが小さくなるほど、増加する。試験片がアルミニウムの場合には、全般的に、試験片全体の温度が均一であるとして、フィラメントの温度が推定できる。しかし、熱伝達

率 α が極めて大きく、かつ外気の温度変化の周波数 ω が大きい場合には、温度上昇がコーティングおよびベース中において生ずる。したがって、この範囲では、ゲージのコーティング厚さが小さいほど、ベース厚さが大きいほど、温度が増加する。

以上の結果により、フィラメントの温度変化に影響を与える主な因子が明らかとなった。このため、ゲージおよび試験片をさらに単純にモデル化して、温度変化を予測することができると思われる。

文 献

- (1) Dally, J. W. and Riley, W. F., *Experimental Stress Analysis*, (1965), 182, McGraw-Hill.
- (2) 竹中・ほか2名, 非破壊検査, 17-9 (昭43), 373.
- (3) Wilson, J. D., *Strain*, 8-4 (1972), 74.
- (4) Prokopec, M., *Strain*, 10-1 (1974), 17.
- (5) 小島, 機論, 51-471, C (昭60), 2860.
- (6) 文献(5)の3082ページ.
- (7) Zienkiewicz, O. C. (吉識・山田監訳), マトリックス有限要素法, (昭59), 551, 培風館.
- (8) Carslaw, H. S. and Jaeger, J. C., *Conduction of Heat in Solids*, Oxford, (1947), 73, Clarendon Press.

討 論

〔質問〕 森田 喜保

〔住友金属工業(株)総合技術研究所〕

FRPなど新素材が実用化されていく状況下で、ひずみ測定の必要度も増し、その精度上の問題として本研究を行われたことにまず敬意を表す。

(1) 定常問題として扱われているゲージ電流による温度上昇について、最近のデジタルひずみ測定器では瞬間的な電流しか流れないので、あまり問題にならないと思う。連続した動ひずみ計測の場合を対象とした研究と考えてよろしいか。

(2) 外気温度の変化の影響について、高サイクル領域 ($\gg 10^{-3} \text{s}^{-1}$) まで検討されているが、具体的にどのような現象を想定されているのか。

(3) ゲージ接着面の表面粗さや接着剤の影響についてどのように考えればよいかご見解を伺いたい。

〔回答〕 ご質問およびご意見に感謝する。以下、各ご質問に対して回答する。

(1) ご質問のとおりである。ゲージ電流による温度上昇に関しては、ゲージに電流を流し続け、ひずみを連続的に測定する場合を想定している。また、瞬間的にしか電流を流さない場合においても、許容電圧あ

るいは電流を流す時間などは、ゲージ電流による温度上昇およびそれによる誤差を考慮して、設定すべきであると考えている。ただし、この場合について検討するためには、電流を流した直後における、温度変化(時間に関して非定常)の計算が必要になると考えられる。

(2) 実際の測定環境において、外気温度が変化する場合、どの程度の周波数で変化するのかについて、著者は十分なデータを持っていない。このため、本報では、特に具体的な現象は想定せずに、外気の温度変化がゲージの温度変化に対して、影響を与えないような (T_g/T_0 が零になる) 高周波領域の範囲まで計算を行った。

(3) 接着剤層は、その材質から考えて、近似的にベースの一部とみなすことができると考えている。すなわち、接着剤が厚い場合には、ベースの厚さがやや大きくなったとして、温度変化の影響が考察できると考えている。また、接着面の粗さが大きい場合にも、粗さの分だけ接着層が厚くなると考えればよいと思われる。