赤外線サーモグラフィによる熱弾性 応力測定*

阪上 隆 英**

Thermoelastic Stress Measurement by Infrared Thermography*

by SAKAGAMI Takahide**

キーワード 応力測定, 熱弾性効果, 温度場計測, 赤外線サーモグラフィ

1. はじめに

有限要素法 (FEM) や境界要素法 (BEM) などの数値解析手法の進歩, および大規模数値計算を可能にするコンピュータの進歩と普及により, 構造部材が複雑な形状をしていても, それらの応力およびひずみの分布を的確に評価することが可能となった。しかしながら実際には, 実構造においては, 接触問題や締結問題に代表されるように, 構造部材に作用している荷重条件, 境界条件が容易に決定できないため, 数値解析では応力・ひずみ分布を正しく評価できない場合も少なくない。このような場合においては, 実験力学的な応力計測技術が効果的に用いられる。本稿で解説する赤外線応力計測技術は, 実構造物の応力分布計測に対して効果的に用いられている, 応力の全視野計測手法のひとつである。

赤外線サーモグラフィは, 物体表面から放射される赤外線エネルギー分布を赤外線センサにより計測し, これを温度分布に換算・画像化して表示する装置である。近年, 赤外線センサおよびセンサからの出力信号処理技術の進歩により, 温度計測の分解能, 精度および空間分解能に優れ, しかも温度変動の過渡的現象を高速に計測できるサーモグラフィが開発されてきた。このような赤外線画像計測技術の進歩を背景に, 弾性変形の際に生じる物体の微小な温度変動すなわち熱弾性温度変動の計測をもとに, 物体に作用している応力の変動を計測する赤外線応力測定技術も進歩を遂げてきている¹⁻³⁾。以下では, 熱弾性効果に基づく赤外線応力測定法の原理, 測定装置および測定事例を示すとともに, 赤外線応力測定技術に関する最近の話題について述べる。

2. 赤外線応力測定の方法

2.1 熱弾性効果

気体を断熱膨張させれば温度が降下し, 断熱圧縮すれば温度が上昇する。固体に応力が急激に作用し, 変形が断熱的に行われる場合には, このような温度変化は固体にも同様に見られる。すなわち, 固体に引張応力を作用させればその応力変動に比例した温度降下⁴⁾が, 逆に圧縮応力を作用させれば応力変動に比例した温度上昇が生じる。この現象は, 熱弾性効果 (Thermoelastic Effect) と呼ばれる。可逆的熱弾性効果の理論は, 1853年に Kelvin⁵⁾によって定式化され, 熱弾性効果に基づく応力測定技術の基礎となっている。

Kelvinの理論によれば, 熱弾性効果による温度変動 ΔT は, 等方均質な線形弾性体に対して次式で与えられる。

$$\Delta T = -kT\Delta\sigma \quad (1)$$

ただし, k は熱弾性係数, T は材料の絶対温度, $\Delta\sigma$ は主応力の変化量である。熱弾性係数 k は, 定圧比熱 C_p , 線膨張係数 α および密度 ρ を用いて次式で与えられる。

$$k = \frac{\alpha}{\rho C_p} \quad (2)$$

したがって, 作用応力の変動に伴う熱弾性効果により物体に生じる温度変化 ΔT を, 赤外線サーモグラフィを用いて計測することにより, 主応力の変動 $\Delta\sigma$ を計測することができる。

2.2 赤外線応力測定装置

前節において, 熱弾性温度変動 ΔT から主応力の変化 $\Delta\sigma$ が求められることを示した。しかしながら, k の値は, 軟鋼の場合で 3.5×10^{-12} (m²/N), アルミニウムの場合で 8.8×10^{-12} (m²/N) 程度と非常に小さな値である。したがって, 主応力の変動値を仮に 10 (MPa) とした場合の ΔT の値は, 室温で軟鋼の場合約 0.01 (K), アルミニウムの

*原稿受付 平成15年7月3日

** 大阪大学大学院 Osaka University

場合 0.026 (K) となり、非常に高い分解能および精度での温度計測が要求される。

これに対して、赤外線サーモグラフィによる温度測定における NETD (ノイズ等価温度差) は、最新の赤外線センサを搭載したサーモグラフィを用いた場合でも、0.02 (K) 程度の値であり、赤外線センサで計測された信号をそのまま温度に換算しただけでは、熱弾性応力測定に十分な分解能・精度を得ることができない。

そこで、赤外線サーモグラフィを用いた応力測定においては、図 1 に示すように、被測定物への負荷荷重として繰返し変動荷重を与え、荷重信号に同期して変動する温度変動だけを赤外線センサの出力から取り出し、さらにこれを荷重サイクルごとに積算し平均化することにより、高分解能・高精度な温度計測を可能にしている。荷重信号に同期する温度変動を抽出する方式は、デジタルロックイン方式、荷重変動のピークに同期させる方式などがある。

赤外線応力測定装置の開発は 1974 年に英国で開始された。製品化された赤外線応力測定装置としては、単素子の赤外線検出器と走査光学系により、一点一点の赤外線計測信号をロックイン処理しながら走査して行くことで、2 次元の応力分布画像を構成する機種が 1978 年に英国で開発された。これまで、実機の応力計測において応力分布を可視化する技術がなかったこと、当時は FEM あるいは BEM 等のコンピュータによる数値解析が現在ほど進展普及していなかったことから、この装置は重工業や自動車製造業における研究開発分野で広く普及し、実機における応力集中部の評価など多くの成果を挙げた。その後、赤外線検出器は単素子ながら、ライン走査の技術を取り入れた機種がわが国で開発され、応力分布計測の速度が向上した。

1980 年代後半、赤外線検出器をマトリックス状に配置したアレイセンサを搭載した赤外線サーモグラフィが開発され、1990 年代に入るとこれらが民間需要向きに普及を始めた。アレイセンサの長所を活かして、画像内の各画素における計測値の同時性を維持しながら、ミリ秒オーダーでの高速デジタル計測が可能となった。赤外線検出器の性能も向上し、温度分解能が飛躍的に向上した。このことは、赤外線サーモグラフィによる熱弾性応力測定装置の発展にも大きく貢献した。赤外線アレイセンサを搭載した赤外線サーモグラフィをデジタルロックイン信号処理装置と組合せた赤外線応力測定装置が、1994 年に

図1 赤外線応力測定装置

米国で開発され、これにより応力分布の計測精度および速度が飛躍的に向上した。現在では、赤外線応力測定装置のための赤外線サーモグラフィは、アレイセンサを搭載したものが標準となっている。市販されている機種はいくつかあり、搭載されている赤外線センサ、画像構成方法、信号処理方法など、各装置でそれぞれの特徴があるが、熱弾性温度変動計測に関しては、いずれも温度分解能で 1 (mK)、軟鋼の応力測定の分解能に換算して約 1 (MPa) 程度を達成している。

3. 応力計測の事例

円孔を有する平板試験片に繰返し引張り応力を加えた場合に、円孔まわりの主応力値の変動値分布を計測した結果を図 2 に示す。円孔の周りの応力は遠方で作用する応力に比べ大きな値となっており、円孔周辺に応力集中が生じている状態が観察される。さらに円孔の上下で圧縮、左右で引張りの応力集中が生じていることが分かる。次にき裂による特異応力場の計測結果を示す⁹⁾。長さの異

図2 赤外線応力測定例 (円孔まわりの主応力分布)

(a) $a/W=0.225$ (b) $a/W=0.33$
(W: 板幅, a: き裂長さ)

図3 赤外線応力測定例 (き裂周りの応力分布)

図4 赤外線応力測定例 (実構造物への適応例, エンジンマウント)

なる片側き裂を有する試験片に、同じ大きさのモード I 変動荷重を負荷した場合の、き裂周りの応力分布の測定結果を図 3 に示す。図より、き裂が長くなるほど、き裂先端近傍の特異応力場の強度が大きくなっていることがわかる。

実構造物への適用例としては、主に機械部品に生じる応力集中のその場計測に関するものが多く紹介されている⁷⁾。一例としてエンジンマウントの一部の応力分布をその場計測した例を図 4 に示す⁸⁾。

4. 赤外線応力測定技術の進歩

4.1 負荷荷重の多様化

赤外線応力測定においては、一般には周波数一定、振幅一定の正弦波荷重が負荷され、荷重信号に同期した信号変動の振幅および位相が計測される。赤外線応力測定法を実機に適用する場合、実機の稼動状態では構造物に負荷される荷重は、周波数一定、振幅一定の理想的なものではなく、ランダム荷重あるいは衝撃荷重が負荷されている場合がほとんどである。このような場合にも、赤外線応力測定装置により、負荷応力の分布形が可視化計測できれば、実機の応力集中部の解析等、設計現場で有用な場合が多い。Lesniak ら⁹⁾は、ランダム負荷および衝撃負荷が作用する場合に、これらの荷重信号に同期する赤外線計測信号成分を最小自乗法により求め、応力の相対的分布を可視化表示する機能を開発し、赤外線応力装置に組み入れている。

4.2 位置補正技術

赤外線応力測定装置による応力測定では、変動荷重負荷時の変位に注意が必要である。測定視野内における被測定物の剛体変位あるいは変形が大きく、しかも応力が局所的に大きく変化している場合には、各画素における熱弾性温度変動の計測値には誤差が生じる。拡大光学系を用いて小さな領域の応力分布を測定する際には、測定視野内の変位の影響はより大きくなる。

被測定物が変動荷重により、図 5 に示すように (a) の状態から (b) の状態に変位している場合を考える。赤外線サーモグラフィの計測画素の中には、画素 (b, 2), (c, 2), (b, 4) および (c, 4) のように、変位のため被測定物表面の赤外線放射量と背景放射との差を計測してしまう画素が存在する。このような現象は、測定対象物の輪郭部において顕著に見られ、輪郭部分の応力値の計測誤差は大きくなる。これは、エッジ効果と呼ばれている。

被測定物の変位による計測誤差は、可能な限り負荷荷

重を小さくすることで軽減される場合もあるが、根本的に解決するためには、変位による計測位置のずれを何らかの手段で補正する必要がある。赤外線応力測定装置の中には、計測位置のずれを計測視野が変位に追従するように光学的に補正する機能、あるいは計測後の応力分布をもとに被測定物の変位を解析し、ソフトウェアにより位置を補正する機能を有するものがある。

4.3 熱伝導・熱伝達の影響

熱弾性応力計測においては、変動荷重による熱弾性温度変動が断熱状態で準可逆的に生じる場合に、式 (1) により主応力成分の変動成分の計測が可能となる。しかし、実際には被測定物内には高温部から低温部への熱移動が生じ、被測定物表面からは熱伝達も生じるため、被測定物の熱物性値、被測定物周囲の環境および負荷荷重の周波数によっては、熱弾性応力計測を十分な精度で行うことができない場合があるので注意が必要である。また、拡大視野で小さな領域の応力分布を計測する際には、熱伝導の影響には特に注意する必要がある。

被測定物に生じる熱伝導および熱伝達が熱弾性応力計測の精度に及ぼす影響に関しては、これまでにいくつかの検討結果が報告されている。熱弾性応力計測において、熱伝導が測定精度に影響を及ぼさない荷重周波数については、清水¹⁰⁾、本田ら¹¹⁾による検討結果が報告されている。清水¹⁰⁾は、熱弾性応力測定における熱伝導の影響が、フーリエ数により評価できることを示している。被測定物表面からの熱伝達が熱弾性応力計測の精度に及ぼす影響については、Byrd ら¹²⁾による検討結果が報告されている。

赤外線応力測定においても、赤外線温度測定の場合と同様に、被測定物表面の放射率の影響に注意する必要がある。通常は、つや消し黒色塗料を被測定物の表面に塗布し、表面の放射率を均一にするとともに黒体放射率に近づけている。この塗膜の熱伝導への影響については、Mackenzie¹³⁾、Decker¹⁴⁾らが検討を行っている。

5. 赤外線応力測定の話

5.1 応力成分の分離

前述のように、赤外線応力測定装置により計測される力学量は、応力の第 1 不変量である主応力成分の変動量である。したがって、各応力成分を分離して直接計測できないことは、赤外線応力測定法の最大の短所であるとされてきた。この問題を克服するために、多くの研究者が様々なアプローチで応力成分の分離法の開発に取り組んでいる。

最近、逆問題解析に基づく応力分離手法が積極的に提案されている¹⁵⁻¹⁸⁾。これらの手法では、まず主応力成分に関する計測データに基づいて解析領域に作用する負荷等の未知境界値を逆問題的に同定し、次に求められた境界値に基づき順解析を行うことにより各応力成分を分離計測している。一般に境界値逆問題は、解の安定性に欠く不適切問題である場合が多く、特に主応力成分の計測データに誤差が含まれる場合などには逆問題解析はさらに悪条件化する。そこで、主応力成分に関する計測データから未

図5 エッジ効果による測定誤差

図6 熱弾性・光弾性ハイブリッド法による円孔まわりの応力分布の分離計測結果

知境界値を同定する境界値逆問題の数理構造を検討することにより、逆解析の高精度化を行っている¹⁶⁻¹⁸⁾。また、逆解析における補助情報の利用による解の高精度化についても検討を行っている。

さらに、井上¹⁹⁾は、弾性係数の温度依存性を考慮した基礎式を利用した、数値解析を要しない新しい主応力分離手法を提案し、その有用性を実験的に検討している。

実験的な応力分離手法としては、光弾性応力測定法とのハイブリッド化による手法が検討されている²⁰⁻²²⁾。熱弾性計測による主応力と光弾性計測による主応力差から、主応力の分離を行うことができる。さらに、光弾性計測において、主応力方向が求められれば、全応力成分の分離計測が可能となる²¹⁾。しかしながら、双方の計測が精度良く行われ、比較される測定領域および測定点が一致しなければ、応力値には誤差が生じるので注意が必要である。

熱弾性・光弾性ハイブリッド計測の一例として、円孔を有する帯版に引張り負荷を与えたときの円孔周りの応力分布を分離計測した結果²³⁾を図6に示す。赤外線応力計測および被膜光弾性計測により得られた、主応力和、主応力差および主応力方向の計測データをもとに、円孔周りの全応力成分 σ_x 、 σ_y および τ_{xy} を分離計測した。図より、実験および境界要素解析により求められた応力分布は、相互によく一致しており、本応力分離計測法が有効であることが分かる。

5.2 破壊力学への適用

き裂を有する実構造物に対する応力分布さらには破壊力学パラメータの高精度な評価を行う場合に、FEMや

BEMなどの数値解析手法は有効な手段の一つである。しかしながら、前述のように数値解析では境界条件や負荷条件の設定が難しく、応力分布を精度良く求められないこともある。また、き裂を有する構造物に対して応力拡大係数を求める場合には、き裂の形状寸法を求め負荷荷重をもとに応力拡大係数を評価するよりも、き裂周りの応力分布の直接計測に基づき応力拡大係数を評価するほうが有効な場合もある。このような理由により、赤外線応力測定装置によるき裂周辺の応力場の計測結果から、応力拡大係数などの破壊力学パラメータを評価した検討結果がこれまでに数多く報告されている^{6, 23-26)}。多くの場合、き裂先端近傍の特異応力場あるいはその周辺までを含む応力場と応力拡大係数の関係を表す式と、赤外線応力測定により得られた主応力とデータをもとに、応力拡大係数を決定している。著者ら²⁷⁾は、前述の熱弾性計測・光弾性計測併用による全応力分離手法を用いたき裂まわりの応力分布計測結果をもとに、応力拡大係数および J 積分の評価を行っている。また、精度が悪化するき裂先端近傍の計測データを用いずに領域積分により J 積分の評価を行うことができるき裂先端除外領域積分法の提案を行い、破壊力学パラメータの的確な実験的評価を可能にしている。

5.3 接触問題への適用

トライボロジに関する現象およびその力学状態の解明において、接触応力の正確な評価は重要なプロセスの一つである。著者ら²⁸⁾は、赤外線応力測定装置を用いた、接触応力分布のその場可視化計測法の開発を行っている。接触状態にある二つの物体の一方に赤外線透過材料を用いた場合に、接触面の温度分布が赤外線サーモグラフィにより透過材料越しに計測できる。この手法を接触応力に起因する熱弾性発熱による温度分布計測に適用することにより、接触応力分布の計測が可能となる。手法の有用性は、平面接触およびHertz接触における接触応力分布計測により示されている。

さらに著者ら²⁹⁾は、赤外線温度計測および赤外線応力計測を、フレットング問題に適用している。フレットング疲労き裂が発生する条件下において接触部近傍の温度分布を詳細に計測することにより、接触面の固着・部分すべり状態の解明や摩擦係数の推定、熱弾性温度変動に基づく接触部近傍の応力分布の推定が可能となった。さらに、前述の赤外線透明材料越しの計測法を適用することにより、フレットング条件下における接触の三次元性についても検討を行っている。

接触が関与する問題として、ボルトやリベットで締結された継手構造の応力解析がある。寺田ら³⁰⁾は、赤外線応力測定法を用いて、航空機のリベット接合ラップジョイントの応力分布を解析している。著者ら³¹⁾は、ラップジョイントの応力分布解析において、有限要素解析で与える種々の境界条件の正当性を赤外線応力測定結果から検証するとともに、これに基づきラップジョイントのフレットング疲労き裂発生評価を行っている。

5.4 平均応力効果

熱弾性応力測定において、被測定物に負荷される平均応力が、熱弾性温度変動に及ぼす影響すなわち平均応力

効果については、Wong ら^{32, 33)}により示されている。しかしながら、この平均応力効果による温度変化は非常に小さく、従来の赤外線応力測定法においては無視できるものあるいは測定できないものとして取り扱ってきた。最近になって、赤外線応力測定装置が高性能化され、熱弾性温度変動を高精度に計測できるようになったことから、平均応力が熱弾性温度変動に及ぼす影響を利用した新しい計測法が注目されている。平均応力効果に基づき、被測定物の残留応力を評価する手法や、5.1 節の応力分離で示したような弾性係数の温度依存性を考慮した応力分離法などが検討されている。

5.5 散逸エネルギーの計測

最近、赤外線応力計測装置を用いて、熱弾性温度変動よりもさらに微小な温度変動である散逸エネルギーによる温度変化を計測する試みがある。サンプルに負荷する荷重を段階的に上げながら、散逸エネルギーによる発熱を計測し、発熱が顕著に変化するところから疲労限を予測することが試みられている³⁴⁾。この問題については、今後の詳細な実験データの蓄積と理論的な裏づけが進展することを期待したい。

参 考 文 献

- 1) P. Stanley: Thermographic Stress Analysis: Progress and Prospects, Proc. of 9th Int. Conf. Exp. Mech., pp. 728-747, 1990.
- 2) N. Harwood and W.M. Cummings: Thermoelastic Stress Analysis, 1991, Adam Hilger.
- 3) B. R. Boyce: Steps to Modern Thermoelastic Stress Analysis, 日本機械学会講演論文集, No. 99-1 (III), pp. 477-478, 1999.
- 4) W. Thomson (Lord Kelvin): On the Dynamical Theory of Heat, Trans. Roy. Soc., Vol. 20, pp. 261-283, 1853.
- 5) W. Thomson (Lord Kelvin): On the Thermoelastic, Thermomagnetic and Pyro-electric Properties of Matter, Phil. Mag., Vol. 5, pp. 4-27, 1878.
- 6) J.R. Lesniak, D. J. Bazile, B. B. Boyce, M. J. Zickel, K. E. Cramer and C. S. Welch: Stress Intensity Measurement via Infrared Focal Plane Array, Proc. of ASTM conference, pp., 1996.
- 7) 例えば、増喜彰久、森下侑一：非破壊検査，45-11, pp. 798-805, 1996.
- 8) J. R. Lesniak and B. R. Boyce: Application Note by Stress Photonics, 1999.
- 9) J. R. Lesniak, B. R. Boyce and G. Howenwater: Thermoelastic Measurement under Random Loading, Proc. of SEM Spring Conf., pp. 504-507, 1998.
- 10) 清水卓：熱弾性応力測定における熱伝導の影響に関する研究，平成12年度東京工業大学修士論文，2001.
- 11) 本田尚，佐々木哲也，大塚輝人，橘内良雄：日本機械学会論文集 (A 編)，67-659, pp. 1248-1254, 2001.
- 12) L.W. Byrd and M.A. Haney: Thermoelastic Stress Analysis Applied to Fully Reversed Bending Fatigue, Experimental Mechanics, 37, pp. 409-413, 1997.
- 13) A. K. Mackenzie: Effects of Surface Coatings on Infra-red Measurements of Thermoelastic Responses, Stress and Vibration, Recent Developments in Industrial Measurements and Analysis, SPIE, Vol. 1084, pp. 59-71, 1989.
- 14) C. A. Decker and T. J. Mackin: Use of Thermoelastic Stress Analysis to Measure Paint Thickness, Proc. of SEM Annual Conf., pp. 748-750, 2001.
- 15) 村上敬宜，吉村正昭：赤外線応力画像解析法による全応力分離解析システムの確立，日本機械学会論文集 (A 編)，61-591, pp. 2482-2488, 1995.
- 16) 岸本喜久雄，井上裕嗣，新保英男，渋谷壽一：熱弾性応力測定における主応力分離に関する逆問題解析，日本機械学会論文集 (A 編)，62-597, pp. 1204-1211, 1999.
- 17) 早房敬祐，井上裕嗣，岸本喜久雄，渋谷壽一：熱弾性応力測定における主応力分離のための境界要素逆解析 (ひずみゲージによる補助情報を用いた適切化)，境界要素法論文集，13, pp. 101-106, 1996.
- 18) 早房敬祐，井上裕嗣，清水卓，岸本喜久雄，渋谷壽一：熱弾性応力測定における主応力分離逆解析の高精度化，日本機械学会論文集 (A 編)，65-639, pp. 2325-2332, 1999.
- 19) 井上裕嗣，廣川幹浩，早房敬祐，岸本喜久雄，渋谷壽一：赤外線サーモグラフィによる応力測定における応力分離の新手法，日本非破壊検査協会平成12年度秋季大会講演概要集，pp. 89-92, 2000.
- 20) S. Barone and E. A. Patterson: Full-field Separation of Principal Stresses by Combined Thermo- and Photoelasticity, Experimental Mechanics, 36, pp. 318-324, 1996.
- 21) 阪上隆英，藤浪康行，久保司郎：熱弾性・光弾性ハイブリッド型応力分離計測法の実験的検討，日本材料科学第50期学術講演会講演論文集，pp. 127-128, 2001.
- 22) R. J. Greene and E. A. Patterson: The Automation of Simultaneous Thermo-photoelasticity, Proc. of the SEM Annual Conf., pp. 592-595, 2001.
- 23) 白鳥正樹，三好俊郎，丸山明久，中西孝：赤外線映像装置を用いたき裂部材の応力拡大係数とJ積分の測定，日本機械学会論文集 (A 編)，53-492, pp. 1699-1705, 1986.
- 24) S. H. Ju, J. R. Lesniak and B. I. Sandor: Numerical Simulation of Stress Intensity Factors via the Thermoelastic Technique, Experimental Mechanics, 37, pp. 278-284, 1997.
- 25) R. A. Tomlinson, A. D. Nurse and E. A. Patterson: On Determining Stress Intensity Factors for Mixed Mode Cracks from Thermoelastic Data, Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 20-2, pp. 217-226, 1997.
- 26) 橘内良雄，本田尚，佐々木哲也：日本機械学会論文集 (A 編)，64-627, pp. 2782-2787, 1998.
- 27) 阪上隆英，久保司郎，藤浪康行，小島陽介：熱弾性・光弾性ハイブリッド応力計測の破壊力学への応用，日本機械学会講演論文集，No.03-06, pp. 86-89, 2003.
- 28) T. Sakagami, K. Ogura, S. Kubo, J. R. Lesniak, B. R. Boyce and B. I. Sandor: Visualization of Contact Stress Distribution Using Infrared Stress Measurement System, SPIE Proceedings Series Volume 3056, pp. 250-259, 1997.
- 29) M. P. Szolwinski, G. Harish, T. N. Farris and T. Sakagami: In-Situ Measurement of Near-Surface Fretting Contact Temperatures in an Aluminum Alloy, ASME Trans. Journal of Tribology, Vol. 121, No. 1, pp. 11-19, 1999.
- 30) 寺田博之，岡田孝雄：熱弾性効果を利用した重ね継手構造の応力解析，日本非破壊検査協会第1回サーモグラフィによる非破壊評価技術シンポジウム講演論文集，pp.135-140, 1995.
- 31) T. Sakagami, G. Harish, T. N. Farris, M. P. Szolwinski: Observing and Modeling the Onset of Widespread Fatigue Damage in Riveted Aircraft Structures: Proc. of the SEM Annual Conference, pp. 686-689, 1999.
- 32) A. K. Wong, R. Jones and J. G. Sparrow: Thermoelastic Constant or Thermoelastic Parameter?, J. Phys. Chem. Solids, 48, pp. 749-753, 1987.
- 33) A. K. Wong, J. G. Sparrow and S. A. Dunn: On the Revised Theory of the Thermoelastic Effect, J. Phys. Chem. Solids, 49, pp. 395-400, 1988.
- 34) 矢尾板達也：赤外線応力画像と散逸エネルギー測定による疲労限界点予測，日本非破壊検査協会表面探傷・サーモグラフィ合同シンポジウム講演論文集，pp. 1-4, 2001.