

(論文)

赤外線サーモグラフィによる応力評価に対する面外曲げ変形の影響

Effect of Out-of-plane Bending on Evaluation of Stress Distribution Using Infrared Thermography



田村栄一*(工博)
Dr. Eiichi Tamura



杵淵雅男*
Masao Kinefuchi



十代田哲夫**
Tetsuo Soshiroda

Infrared thermography was applied to measure the stress distribution of a material surface during out-of-plane bending deformation. At high loading frequencies, the stress distribution could be evaluated with sufficient precision. However, in test conditions where the specimen became thinner and the loading frequency lower, the measured values were degraded by the effect of heat transfer. It was found that the Fourier number (Fo) correlates with the precision of the measurement.

まえばき = 自動車部品をはじめとする機械部品の設計においては、十分な品質を実現させるため、試作品に対する品質評価・設計改善が繰返し行われている。その中でも、疲労強度評価に際しては、部品に発生する応力を測定することが不可欠となっている。応力測定にあたっては、従来はひずみゲージ法によって測定される場合が多かった。しかし、同法では応力分布を点情報としてしか測定できないため、高応力部を見逃す危険性があり、安全性向上における課題のひとつであった。この課題を解決するためには、応力分布を面情報として評価できる技術が必要であり、赤外線サーモグラフィによる計測技術が有効な手法として注目されている。

同手法は熱弾性効果を利用した手法である。熱弾性効果とは、材料に断熱的に変形を加えた際に、材料の体積変化によって微小な温度変動が発生する現象であり、本手法は微小な温度変動から変形時の応力変動を求める手法である。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、温度計測の精度および空間分解能に優れ、かつ高速計測が可能な赤外線サーモグラフィが開発されたため、赤外線サーモグラフィを用いた応力測定技術は実部材の応力測定に対し積極的に適用され始めている¹⁾²⁾。一方、実部材は複雑な形状を有していることから、変形形態も単純ではない。特に、自動車部品は軽量化の観点から薄肉化が進められており、面外方向の曲げ変形が加わることが多い。このような自動車部品を赤外線サーモグラフィで応力測定すると、精度が著しく低下することが多い。精度低下要因としては構造不連続等による応力集中部の影響が知られており、これまでも多くの検討がなされている³⁾⁴⁾。しかし、部品の応力測定では応力集中部以外の測定領域においても、

測定精度が低下することがあり、応力集中部以外の精度低下要因が考えられる。前述のとおり、部品には面外曲げ変形が加わることが多いが、面外曲げ変形時の応力測定精度に関して実験的に検討された例は見られない。赤外線サーモグラフィを自動車部品の応力を定量的に評価する上で、面外曲げ変形の測定精度への影響把握はきわめて重要と考えられる。

そこで、本研究では数種の板厚の鋼板に対し四点曲げ試験を行い、赤外線サーモグラフィによる応力測定を行い、板厚・荷重周波数など試験条件と測定精度の関係について検討を行った。

1. 赤外線サーモグラフィによる応力測定の概要

物体が弾性変形し、体積変化することによって温度が変化する現象は熱弾性効果と呼ばれている。可逆的熱弾性効果の理論は Kelvin⁵⁾⁶⁾ により定式化されており、熱弾性効果に基づく温度変動 T は、等方均質な線形弾性体に対して次式で表される。

$$T = \frac{\sigma_{\text{sum}}}{\rho \cdot C_p} \cdot T \quad \text{.....(1)}$$

ここで、 α は線膨張係数、 ρ は密度、 C_p は定圧比熱、 T は絶対温度、 σ_{sum} は主応力和 (3 方向の主応力の和) の変化量を表す。式(1)より赤外線サーモグラフィを用いて T を測定することにより、 σ_{sum} を求めることができる。

測定システムの概要を図1に示す。試験片に繰返し荷重を負荷し、荷重に同期した温度変動 T を測定する。本研究では、赤外線サーモグラフィとロックイン信号処理装置から構成される CEDIP 社製赤外線画像解析システムを使用した。

*技術開発本部 材料研究所 **鉄鋼部門 加古川製鉄所 技術研究センター (現 神鋼リサーチ開発 知的財産情報センター)

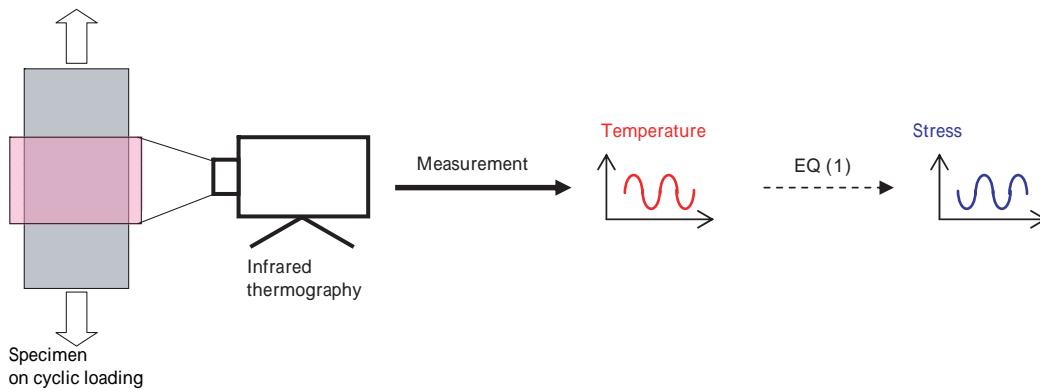


図1 赤外線応力測定システムの概要

Fig. 1 Schematic of stress measurement system using infrared thermography

2. 測定条件

2.1 材料および試験片形状

試験片は、材料SS490を用い、板厚を10mmおよび3mmとした。試験片の形状を図2に示す。

2.2 負荷および測定条件

試験片に対しては、荷重比 $R=0.2$ の繰返し四点曲げ荷重を負荷した。試験概要を図3に示す。測定では治具の都合上試験片板表面を斜め上方向から測定した。また、測定結果の精度を検証するため、板表面にひずみゲージを貼付し測定を行った。ここでは、試験片の板厚 t を10mmおよび3mm、荷重周波数 f を1~20Hzとしそれぞれの影響を調べた。なお、板表面の応力変動が全条件において同等(190MPa)となるように荷重設定した。

3. 赤外線サーモグラフィ測定結果

板厚10mmの試験片に対し、荷重周波数を1Hz、3Hz

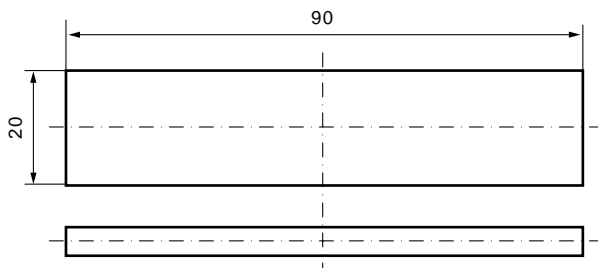


図2 試験片形状(板厚は3mmおよび10mm)

Fig. 2 Geometry of specimen (3mm and 10mm in thickness)

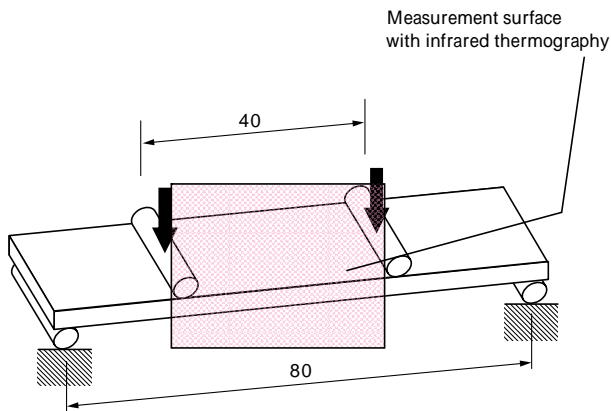
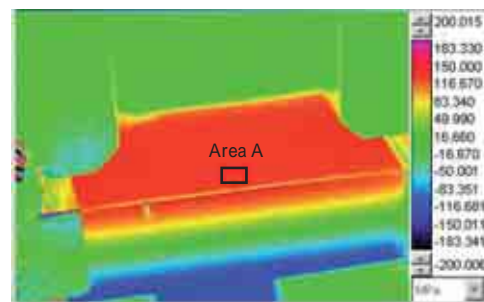


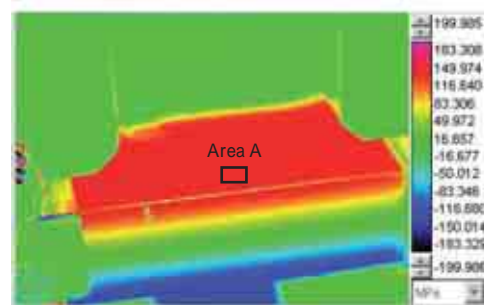
図3 負荷状況の概略

Fig. 3 Schematic of loading condition

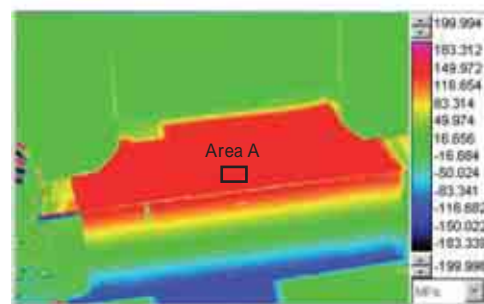
および5Hzとしたときの \sum の分布画像をそれぞれ図4(a)(b)および(c)に示す。同様に、板厚3mmの試験片に対する結果を図5の(a)~(c)に示す。なお、ここでは試験片の上表面の測定結果が正となるように、 $\sum = (\text{最小荷重時の } \sum) - (\text{最大荷重時の } \sum)$ として測定結果を表示させた。図より、低い荷重周波数条件においては測定応力が低くなり、特に図5(板厚3mm)において低い荷重周波数条件での測定値の低下が著しいことがわかる。



(a) $f=1\text{Hz}$



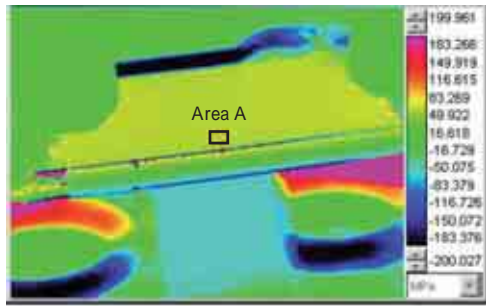
(b) $f=3\text{Hz}$



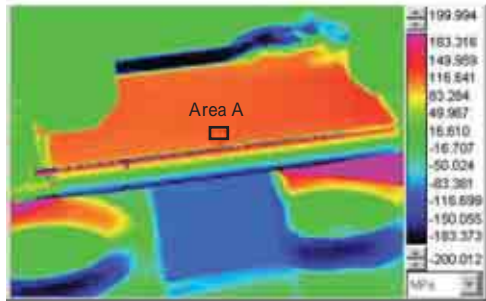
(c) $f=5\text{Hz}$

図4 板厚10mmの試験片における応力分布測定結果

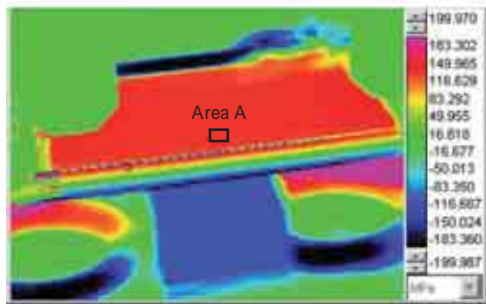
Fig. 4 Measured distribution of \sum on specimen of 10mm in thickness



(a) $f=1\text{Hz}$



(b) $f=3\text{Hz}$



(c) $f=5\text{Hz}$

図5 板厚3mmの試験片における応力分布測定結果

Fig. 5 Measured distribution of σ_{sum} on specimen of 3mm in thickness

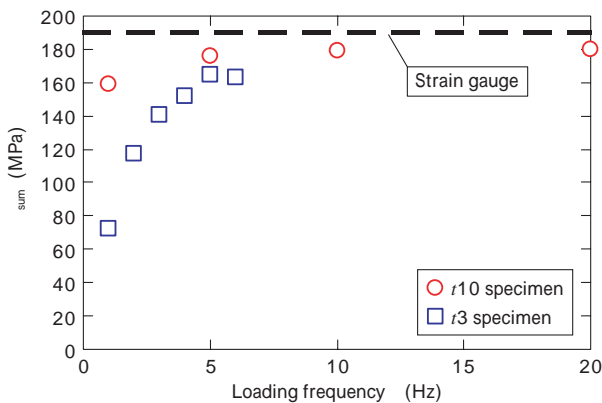


図6 赤外線測定による応力測定値と荷重周波数の関係

Fig. 6 Relationship between σ_{sum} and loading frequency

図6に荷重周波数と応力測定値の関係を示す。なお、ここでの応力測定値は、図4および図5中の四角領域内(A領域内)の平均値である。また、同測定領域におけるひずみゲージ測定値をあわせて図中に示す。図より、板厚10mmの試験片では荷重周波数が高い条件において赤外線応力測定値とひずみゲージ測定値の差異は10%以下となり、高精度な応力評価が実現できることがわかる。また、板厚3mmの試験片においても荷重周波数が高くなるにしたがって赤外線応力測定値はひずみゲージ

測定値に近づく傾向が見られ、さらに高い荷重周波数条件ではより精度の高い測定が可能と考えられる。一方、低い荷重周波数および薄い板厚条件では、赤外線応力測定値が低下し、ひずみゲージ値(190MPa)との差異が大きくなる傾向が見られる。

4. 考察と今後の展望

本測定では、高い荷重周波数条件にすることにより高精度の応力評価が可能になることが確認できた。面外曲げ変形を受ける部材に対しても、繰返し周波数を高く設定することにより、高精度の応力評価を面情報として獲得できると考えられる。

一方、低い荷重周波数・薄い板厚条件では測定値が低下する傾向が見られた。従来の検討では、円孔縁等の応力集中部の熱弾性応力測定精度に対し、熱伝導現象^{3)A)}が強く影響を及ぼすことが指摘されている。面外曲げ変形においても、板厚方向に応力勾配が発生するため、円孔縁の応力集中と同様に高応力部となる板表面の測定精度に対して熱伝導現象が悪影響を及ぼしたと考えられる。面外曲げ変形時の熱伝導の影響メカニズムの概略を図7に示す。面外曲げ変形時には図7に示すような応力分布が得られ、熱弾性効果により板厚方向に勾配を持つ温度分布が生じる。温度分布に勾配が発生した場合、熱伝導の影響を受け、温度計測に悪影響を及ぼす。特に、板表層の温度は熱伝導により図7のように変化すると考えられ、測定値が低下する原因となる。本測定では、低荷重周波数・薄い板厚条件下で測定値の低下が顕著となったが、低荷重周波数条件では時間依存の因子である熱伝導の影響が大きくなったため、薄い板厚条件では板厚方向の応力勾配(温度勾配に対応)が大きくなったため、それぞれ測定値の低下が著しくなったと考えられる。

円孔縁応力集中部の赤外線応力測定精度に対しては、熱伝導現象の起こりやすさを表す無次元パラメータであるフーリエ数 F_0 を用いた検討が散見される⁷⁾。井上⁷⁾によれば、繰返し負荷により物体の温度が繰返し変化すると熱伝導現象も発生し、その時のフーリエ数 F_0 は次式のように表される。

$$F_0 = \frac{k}{f \cdot L^2 \cdot C_p} \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 k は材料の熱伝導率、 f は温度変化の周波数(この場合応力周波数と同等である)、 L は熱伝導が発生する領域の代表寸法を表す。面外曲げ条件の場合、熱伝導現象は板厚方向に顕著に発生することから、代表寸法としては板厚 t が適当と考えられ、式(2)は式(3)のように書き換えられる。

$$F_0 = \frac{k}{f \cdot t^2 \cdot C_p} \dots\dots\dots(3)$$

以下では、異なる板厚条件にて得られた赤外線応力測定結果(図6に示した結果)を式(3)で計算されるフーリエ数 F_0 により整理を行う。ここで、計算に用いる材料定数としては表1に示す炭素鋼の材料定数を用いる。

赤外線応力測定値($\sigma_{sum,i}$)とひずみゲージ測定値($\sigma_{sum,g}$)の比($\sigma_{sum,i} / \sigma_{sum,g}$)を F_0 で整理した結

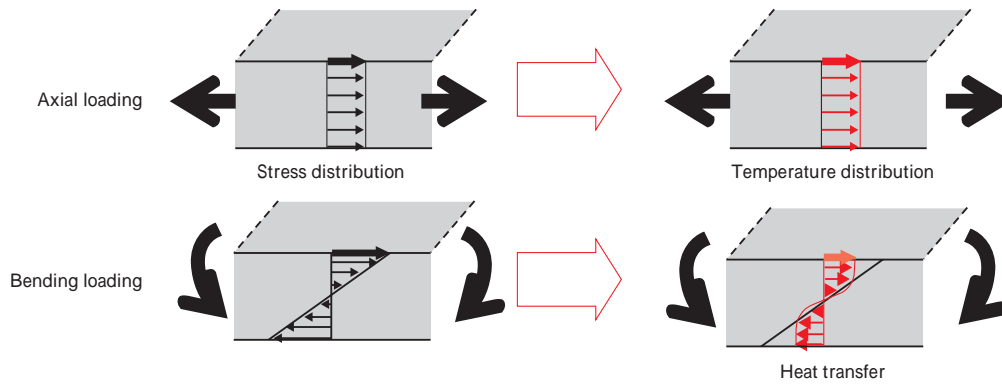


図7 面外曲げ変形時の赤外線応力測定における熱伝導の影響に関する概略
 Fig. 7 Schematics of effect of heat transfer on measurement precision in bending deformation

表1 炭素鋼の材料定数
 Table 1 Material properties for carbon steel

Thermal conductivity, k (W/mK)	Density, ρ (kg/m ³)	Specific heat, C_p (kJ/kgK)
44.2	7,800	0.49

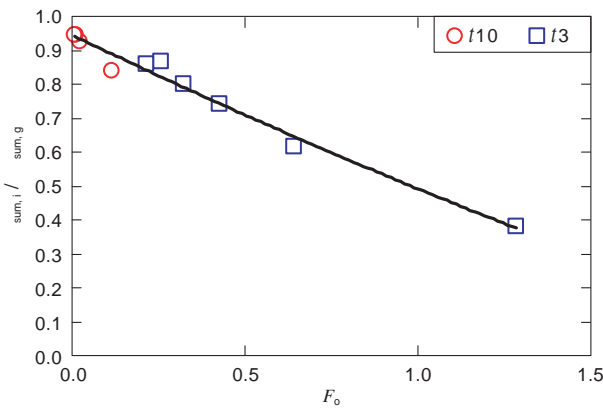


図8 赤外線応力測定精度 $\frac{\text{sum}_i}{\text{sum}_g}$ とフーリエ数 F_0 との関係
 Fig. 8 Relationship between $\frac{\text{sum}_i}{\text{sum}_g}$ and F_0

果を図8に示す。図より、 F_0 が小さいほど赤外線応力測定値とひずみゲージ測定値の比は1に近づく傾向が見られ、板厚条件に限らず図中の実線で近似されることがわかる。 F_0 には材料定数、荷重周波数、板厚が考慮されていることから、材料・荷重周波数・板厚に限らず、図8の実線で示されるような測定精度 - F_0 関係が得られると考えられる。以上より、四点曲げ条件にて表層部の赤外線応力測定を行う場合、下記の手順により高精度の応力評価が可能になると考えられる。

- ・手順1：材料定数、荷重周波数、板厚条件から F_0 を計算する。
- ・手順2：図8の実線から F_0 に対応する測定精度 ($\frac{\text{sum}_i}{\text{sum}_g}$) を評価する。
- ・手順3：赤外線応力測定を行う。
- ・手順4：赤外線応力測定値に、手順3の測定精度を除することにより、ひずみゲージ測定値と同等の精度による応力値を評価できる。

以上の手順により繰返し四点曲げ荷重負荷時における赤外線応力測定を精度良く実施できると考えられる。今後は、さらに多くの材料・荷重条件にて検証を行う必要がある。また、実際の部品は繰返し四点曲げ荷重条件ではなく面外曲げ・軸力等の複合応力状態であることが多いことから、複合応力下においても測定精度向上技術を検討する必要があると考えられる。

むすび=本研究では、繰返し四点曲げ荷重変形下の材料に対し、赤外線サーモグラフィを用いて応力分布測定を行った。その結果、面外曲げ変形を受ける場合においても荷重周波数を高く設定することにより高精度の応力評価が可能になることが確認でき、部品・部材の応力分布を面情報として評価できることがわかった。一方、板厚が薄く、荷重周波数が小さいほど板表面の応力測定精度は悪化する傾向が確認され、板厚方向の応力勾配と熱伝導が大きく影響を及ぼしていると考えられた。さらに、熱伝導パラメータであるフーリエ数を活用することにより、繰返し四点曲げ荷重負荷時の測定精度を事前に評価でき、赤外線応力測定値を高精度に補正できると考えられた。

本研究の実施に当たり、熱伝導の影響メカニズムに関して貴重なご助言をいただいた東京工業大学工学部 機械知能システム学科 井上裕嗣助教授に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 阪上隆英：非破壊検査, 51-6 (2002) p.320.
- 2) 本田 尚：防錆管理, 2002-3 (2002) p.17.
- 3) 本田 尚ほか：日本機械学会論文集, 67-659, A (2001), p.1248.
- 4) 井上裕嗣ほか：日本機械学会講演論文集, No.03-1 (2003) p.97.
- 5) W. Thomson (Lord Kelvin): Trans. Roy. Soc., Vol.20 (1853) p.261.
- 6) W. Thomson (Lord Kelvin): Phil. Mag., Vol.5 (1878) p.4.
- 7) 井上裕嗣ほか：日本機械学会講演論文集, No.01-10 (2000) p.211.