

サーモグラフィによる回転軸の応力分布測定

早 房 敬 祐* 工 藤 大**
 岸 本 喜久雄** 足 立 忠 晴**

Measurement of Stress Distribution for Rotating Shaft Using Thermography

by Keisuke HAYABUSA, Dai KUDO, Kikuo KISHIMOTO, & Tadaharu ADACHI

A rotating shaft is designed by comparing calculated stress for expected load with material strength. Because unexpected force is often applied to the shaft in an actual machine, the generated stress can be larger than the calculated one. Strain gauge method is generally applied rotating shafts by using a slip ring or telemetry. However measurement accuracy is decreased by electrical noise generated from motors in the machine. In the paper, the method of two-dimensional thermoelastic stress measurement was developed to determine fluctuating distribution of stress in the rotating shaft. Bending stress in the rotating shaft could be accurately identified by using inverse analysis with images taken from multiple positions of a thermographic camera. Validity and efficiency of the method were confirmed on the basis of numerical and the experimental results and the accuracy of the stress was also found to depend on reference temperature in the measurement.

Keywords: Stress analysis, Nondestructive inspection, Shaft, Inverse problem, Thermography, Rotary bending, Temperature change

1. 緒 言

ポンプなど、回転機械の主要部品である軸の設計を行う場合、軸の応力を求めることは必要不可欠であり、その負荷荷重を把握することは極めて重要である。負荷荷重の形態はその機械の特性によって異なるが、**図1**に示すように曲げ、引張・圧縮及びねじりがあり、それぞれについては理論等を用いて**図2**に示す曲げ応力、引張・圧縮応力、ねじり応力が求められる。軸の設計においては

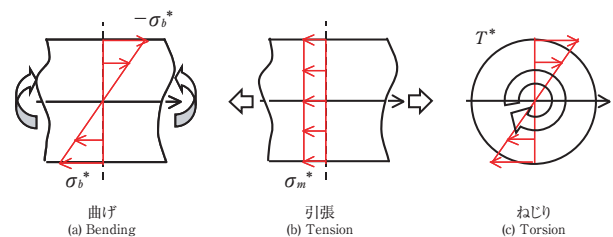


図2 回転軸に生じる応力成分
Fig. 2 Stress components initiated in the rotating shaft

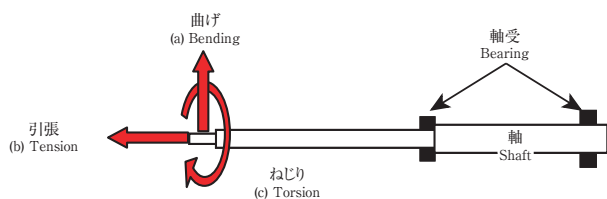


図1 回転軸
Fig. 1 Rotating shaft

これらの応力と材料の強度を比較し、応力の方が小さくなるように軸径をはじめとする寸法を決定する。ところが、実働荷重下の軸については想定外の外力が作用することが多く、発生する応力も事前予測と大きく異なることがあるため、実験による応力測定が併せて行われることが多い。その中で最もよく用いられるひずみゲージ法¹⁾は電気抵抗の変化からひずみ値を得る方法であるが、回転軸に適用する場合には、ひずみゲージの測定信号を静止側の計測機器に転送するスリップリングやテレメータ等の機器を用いる必要がある。スリップリングは回転側と静止側の接点にブラシを用い、テレメータは回転側に小型の発信機を設けて静止側で信号の受信を行うが、回転機械の多くは駆動機としてモータを使用しており、電気的なノイズが測定精度の低下を引き起こすことが多

* 風水力機械カンパニー 技術生産統括 開発統括部 機械・材料技術室
 ** 同 カスタムポンプ事業統括 企画管理統括部 製品開発室
 ** 東京工業大学大学院 理工学研究科
 ** 豊橋技術科学大学大学院 工学研究科

日本機械学会論文集80巻815号(2014年)に掲載した内容を一部加筆・修正して転載した。

い。一方、著者らはサーモグラフィを使った熱弾性応力測定によって2次元的な応力成分の分布を求めるとともに^{2)~5)}、ヤング率の温度依存性を考慮した式に基づいて変動応力及び平均応力を求める検討を行った^{6)~8)}。サーモグラフィによる方法は電気的なノイズの影響がない上に非接触的な測定が可能であるから、回転軸に適用すれば実機稼働下の曲げ応力や引張・圧縮応力（平均応力）を測定できる可能性がある^{9), 10)}。そこで本研究では、サーモグラフィを使った熱弾性応力測定によって実機稼働中の回転軸に対する応力分布の測定法を提案し、シミュレーション及び実験データに基づいて図2 (a) に示す曲げ応力の測定を行うとともに、提案した手法の妥当性を検証する。

2. 回転軸における熱弾性応力測定の基礎式

2-1 基礎式

図3に示すように回転曲げを受ける軸は1回転ごとに1周期の応力変動 $\Delta\sigma_{ii}$ が生じる。また、熱弾性応力測定によれば、引張応力負荷時は温度低下、圧縮応力負荷時は温度上昇が生じるから、試験片表面の温度分布も応力同様に周期的に変動していると考えられる（図4）。次式

は熱弾性応力測定の基礎式であり、 ρ は密度、 C_e は比熱、 α は線膨張係数、 K_m は熱弾性定数、 T_r は測定対象の絶対温度、 ΔT は T_r を基準とした温度変化、 $\Delta\sigma_{ii}$ は初期応力を基準とした主応力和の変化を表している。

$$\Delta T = -\frac{T_r}{\rho C_e} a \Delta\sigma_{ii} = -K_m T_r \Delta\sigma_{ii} \dots\dots\dots (1)$$

図3は回転曲げを受ける軸に対して断面及び水平方向から見た温度分布を表しており、赤い領域では温度上昇、青い領域では温度降下が生じている。静止場から見た場合、温度分布は定常的な分布として得られるが、実際は図4に示す注目点Aのように位置、応力、及び温度は回転とともに変化する。通常、熱弾性応力測定における荷重周波数は数Hz以上であるから、それに対応する温度変動も同じ周波数となり、サーモグラフィには多くのフレームレート（1秒間当たりの画像のコマ数）が要求される。しかしながら、前記ケースにおいて静止場からの観察では応力・温度分布は静止しており、定常的な温度分布として測定されるため、フレームレートが少ない低価格のサーモグラフィでも適用可能である。また、ロックインサーモグラフィのような荷重と温度計測の同期操作も不要となり¹¹⁾、静止画として測定された温度分布から式（1）で直接応力を求めることができる。

一方、図5は回転曲げを受ける軸の断面とサーモグラ

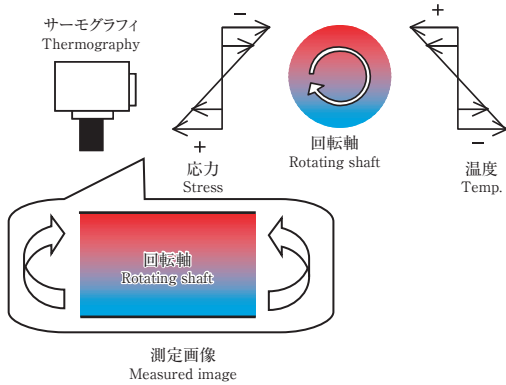


図3 測定画像
Fig. 3 Measured image

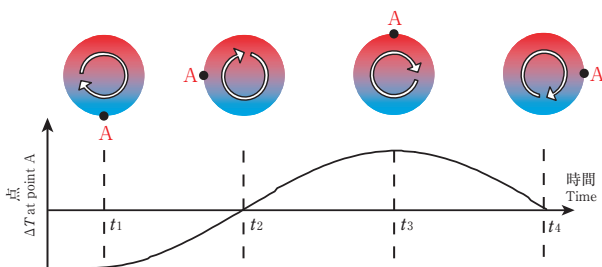
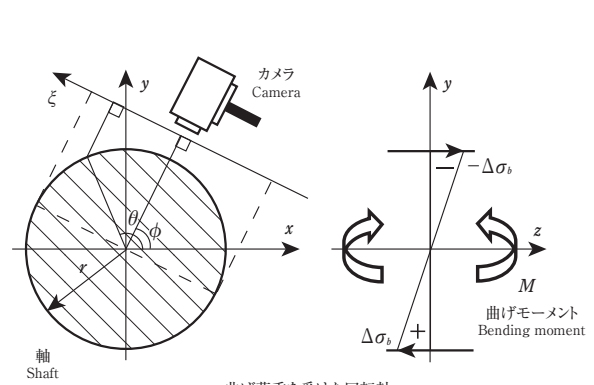
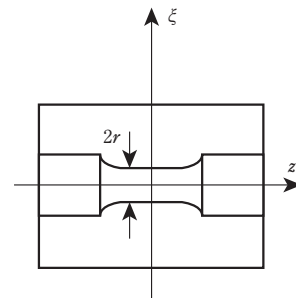


図4 サーモグラフィを用いた回転曲げ試験
Fig. 4 Rotary bending test with thermography



(a) Rotating shaft with bending



(b) Measured image

図5 測定系
Fig. 5 Measurement system

フィの位置関係を表しており、 r は回転軸半径、 x 軸は測定対象である回転軸の中立面の位置、 $x-y$ 断面に曲げモーメント M (図5 (a) の矢印で示した方向を正とする) が作用している。 θ は x 軸を基準とした軸表面の位置、 ϕ は中立面 x 軸を基準としたカメラの位置 (以下、カメラ位置) を示している。中立面の位置が明らかでカメラを x 軸上に設置した場合、 $\phi = 0$ となり y 軸と ξ 軸の方向は一致する。ここで、図5 (a) に示した断面における主応力 σ_b (y/r) であり、 σ_b は最大曲げ応力に等しい。位置 θ における軸表面の温度変化 ΔT は次式で表される。

$$\Delta T = K_m T_r \sigma_b \sin \theta = K_m T_r \sigma_b \left(\frac{y}{r} \right) \dots \dots \dots (2)$$

式 (2) から、曲げ応力 σ_b は軸表面の温度変化 ΔT から求められ、温度変化 ΔT は y に比例した直線的な分布となる。

2-2 任意方向から撮影した画像の温度分布

実際の問題では曲げ方向が不明な場合やサーモグラフィの設置位置の制限によって $\phi = 0$ とならないケースがあるため、任意の ϕ 方向から撮影した場合の定式化を行う。図5 (a) のカメラによって測定される温度分布は ξ 軸上に投影した分布として測定され、熱画像である図5 (b) が得られる。ここで、投影画像と回転軸上の分布を関係づけるために、次式で示した θ と ξ 及び ϕ の関係を用いる。

$$\theta = \sin^{-1} (\xi/r) + \phi \dots \dots \dots (3)$$

式 (3) を式 (2) に代入するとカメラで撮影した画像上の座標 ξ における温度変化 ΔT は次式となる。

$$\Delta T = K_m T_r \sigma_b \left\{ (\xi/r) \cos \phi + \sqrt{1 - (\xi/r)^2} \sin \phi \right\} \dots \dots (4)$$

2-3 曲げ応力、カメラ位置の推定

サーモグラフィによる熱画像について式 (4) を適用して曲げ応力 σ_b 及びカメラ位置 ϕ の推定を行う。ここで、サーモグラフィによる測定温度 T には熱弾性効果による温度変化 ΔT のほか、回転軸の平均温度 (以下、参照温度) T_r を含んでいるため、次式を考慮する必要がある。

$$T = \Delta T + T_r \dots \dots \dots (5)$$

式 (5) に式 (4) を適用すると次式が得られる。

$$T = K_m T_r \sigma_b \left\{ (\xi/r) \cos \phi + \sqrt{1 - (\xi/r)^2} \sin \phi \right\} + T_r \dots (6)$$

式 (2) の場合は ΔT とその測定位置 y が決まれば一意に σ_b を求めることができるが、式 (6) の場合は σ_b と同時に ϕ も推定することになり、単一データでは求められない。また、実機測定では測定ノイズ等による推定精度の低下が懸念されることから、本研究では多数の温度データを考慮して未知パラメータ σ_b 、 ϕ 、及び T_r を推定

する方法を提案する。 T_r は多数の温度測定データからなる温度ベクトル、 T は σ_b 、 ϕ 、 T_r を式 (6) に代入することによって得られる温度ベクトルとすると、次式の汎関数が得られる。

$$\Pi = \| T(\sigma_b, \phi, T_r) - T_r \|^2 \dots \dots \dots (7)$$

前述のように測定データを増やすことは未知パラメータの推定精度向上に有効であるが、サーモグラフィから得られる測定データは空間的な解像度の制約によって測定データ点数は限られる。よって、本研究では図6に示すように複数の測定方向から得られたデータを同時に推定に用いる次式の汎関数を考慮し、更なる精度向上を図る。

$$\Pi = \left\| \sum_{i=1}^n \{ T(\sigma_b, \phi^i, T_r) - T_r^i \} \right\|^2 \dots \dots \dots (8)$$

式 (8) は式 (7) における各測定方向のデータを足し合わせた式となっており、測定方向 i に対し、 n は測定方向の数、 T_r^i は各方向 i で測定された温度データ、 ϕ^i は各方向から撮影するカメラ位置を示す。式 (7) 及び式 (8) を最小化する未知パラメータが正解となり、制約条件付き多変数関数最小化ルーチンを適用して解を求める¹²⁾。

2-4 参照温度 T_r の推定

式 (7) 及び式 (8) は曲げ応力 σ_b やカメラ位置 ϕ だけでなく、参照温度 T_r の推定も同時に行うことを想定しており、ここではその意義について述べる。図7は図5 (b) に示した ξ 軸で測定された温度分布を示している。 $\phi = 0^\circ$ の場合は測定データ T の平均温度と参照温度 T_r は一致しているが、本研究で提案している任意の ϕ の場合ではこれらは一致しないばかりか、 $\phi = 90^\circ$ の場合のように測定データ範囲に T_r が含まれないような場合もある。また、繰り返し負荷を受ける試験片には発熱が生じてその平均温度は徐々に上昇することから、周囲の室温を参照温度とすることも適当ではない¹³⁾。以上のことから本研究では参照温度 T_r についても同時に推定することを検討する。

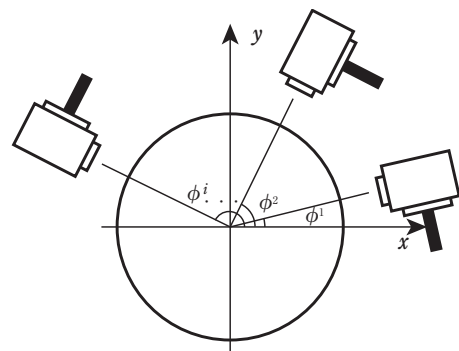


図6 多方向からの測定
Fig. 6 Measurement of multi directions

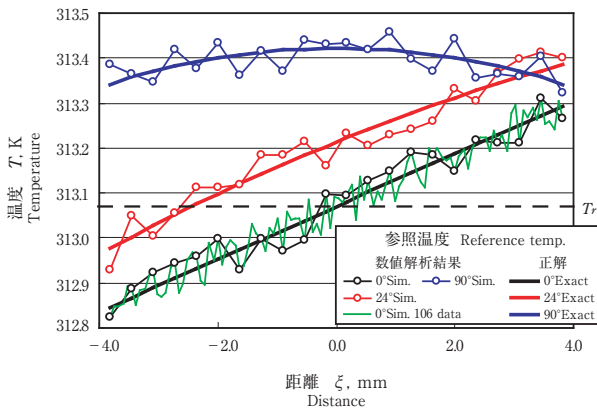


図7 シミュレーションデータ
Fig. 7 Simulation data

3. 応力分布推定の数値シミュレーション

3-1 解析条件

2-1, 2-2節に示した方法の妥当性を確認するため、数値シミュレーションを行った。解析モデルは図8に示す平行部が直径12 mmの回転曲げ試験片とし、試験片材料はアルミニウム合金A2024-T351とした。想定する基本条件としてカメラ位置 ϕ は 0.0° 、最大曲げ応力 $\sigma_b = 118.0$ MPa、熱弾性定数 $K_m = 9.52 \times 10^{-6}$ 1/MPa¹⁴、参照温度 $T_r = 313.07$ Kとし、式(6)を用いて温度データを生成した。図7上で太線で示した黒線、赤線、青線は図8の ζ 軸上の温度分布であり、それぞれ $\phi = 0^\circ, 24^\circ, 90^\circ$ の正解の分布を示している。これらに対して最大幅0.1 K、平均値0の一様乱数を誤差として加えて細線で示したシミュレーションデータを作成した。この誤差はサーモグラフィの温度分解能である0.05 Kに基づいて若干多めに設定している。

一般的な熱弾性応力測定において試験片縁近傍の測定精度は低下するが、回転軸のような曲面をもつ場合その程度は更に顕著であると考えられるため、この領域のデータは応力の推定には使用しない¹⁵⁾。そのため、図5 (b)の ζ 軸における測定範囲は $-6 < \zeta < 6$ mmであるのに対し、推定に用いるデータの範囲は $-4 < \zeta < 4$ mmとし、この範囲について等間隔に採取した22点を標準のデータ

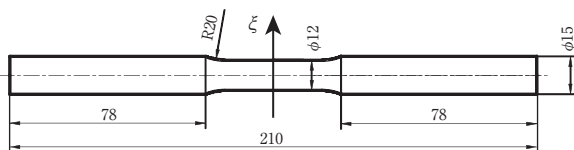


図8 回転曲げ試験片
Fig. 8 Rotary bending specimen

とした。この範囲は理論式である式(6)と後述の実験データの差に基いて経験的に決定した。また、式(7)及び式(8)に対する未知パラメータの範囲に関する制約条件について、応力の範囲は弾性域内として $0 \leq \sigma_b \leq 250$ MPa、カメラ位置は $-180 \leq \phi \leq 180^\circ$ 、参照温度は周囲温度も含めた熱画像全体の温度範囲内であると考え、その最大値と最小値の範囲を含んだ $300 \leq T_r \leq 320$ Kとした。未知パラメータの初期値はそれぞれの制約条件の範囲を100分割し、 $100 \times 100 \times 100$ とおり変化させて式(7)及び式(8)の最小化を行った。全てのケースの中で残差が最小となるときの未知パラメータを正解とした。

3-2 解析結果

それぞれのケースに対し、推定するパラメータを表1に示す。表1中の曲げ応力 σ_b 、カメラ位置 ϕ 、参照温度 T_r それぞれについてKは既知、Uは未知のパラメータであることを示しており、括弧中の値は正解、通常サイズの数字は独立変数、小さい数字は従属変数を示している。また、 n は測定方向の数、 n_t は総データ数を表す。図7の温度データと表1の既知の値に基づいて式(6)によって未知パラメータを推定した。これから求められた曲げ応力 σ_b 、カメラ位置 ϕ 、参照温度 T_r の推定結果を表2に示す。Case 1は σ_b だけ、Case 2は σ_b, ϕ 、Case 3以降は3パラメータ σ_b, ϕ, T_r を同時に推定した結果である。Case 1, Case 2はいずれも精度よく推定されているが、Case 3は若干カメラ位置の推定精度が低下していた。さらに、カメラ位置 ϕ を $24^\circ, 90^\circ$ として推定を行った結果をそれぞれCase 4, 5に示すが、推定はできたもののCase 3と同様に若干の精度低下が見られた。続いてCase 3と同条件

表1 数値解析の条件 [K: 既知, U: 未知]

Table 1 Conditions of the numerical analysis [K: known, U: unknown]

	n	n_t	ϕ°	σ_b MPa	T_r K
ケース Case 1	1	22	K (0.0)	U (118.0)	K (313.07)
ケース Case 2	1	22	U (0.0)	U (118.0)	K (313.07)
ケース Case 3	1	22	U (0.0)	U (118.0)	U (313.07)
ケース Case 4	1	22	U (24.0)	U (118.0)	U (313.07)
ケース Case 5	1	22	U (90.0)	U (118.0)	U (313.07)
ケース Case 6	1	106	U (0.0)	U (118.0)	U (313.07)
ケース Case 7	2	44	U (0.0, 24.0)	U (118.0)	U (313.07)
ケース Case 8	3	66	U (0.0, 24.0, 90.0)	U (118.0)	U (313.07)

表2 数値シミュレーションに対する推定結果
Table 2 Estimated results for numerical

	Estimated ϕ °	Estimated σ_s MPa	Estimated T_s K
ケース 1 Case 1	–	113.3	–
ケース 2 Case 2	0.0	112.5	–
ケース 3 Case 3	7.6	115.0	313.03
ケース 4 Case 4	8.2	110.0	313.16
ケース 5 Case 5	70.0	92.5	313.20
ケース 6 Case 6	1.2	115.9	313.06
ケース 7 Case 7	– 5.9, 18.1	114.4	313.11
ケース 8 Case 8	0.1, 24.1, 90.1	116.2	313.07

で温度変化 ΔT のデータ点数を106に増加させたデータ(図7の緑線)に基づいた推定結果をCase 6に示すが、精度は大幅に向上しており、測定点数を増やすことは精度向上に対して有効であることがわかった。

続いて、前述のカメラ位置を $\phi_1 = 0^\circ$ 、 $\phi_2 = 24^\circ$ 、 $\phi_3 = 90^\circ$ として測定方向を複数として解の精度向上を試みた。 ϕ_1 を未知パラメータとすると、 $\phi_2 = \phi_1 + 24^\circ$ 、 $\phi_3 = \phi_1 + 90^\circ$ となり、複数の測定方向のデータを使った場合でも未知パラメータは ϕ_1 だけである。以上に基づき、 0° と 24° のデータを組み合わせたCase 7及び 0° 、 24° 、 90° のデータを組み合わせたCase 8の解析を行った。これから、曲げ応力及びカメラ位置の推定精度はいずれも

単一方向データの結果よりも向上していた。特にCase 8はデータ点数の合計が66点であったにもかかわらず、データ点数が106のCase 6よりも高精度な結果が得られており、本手法が有効であることが確認できた。

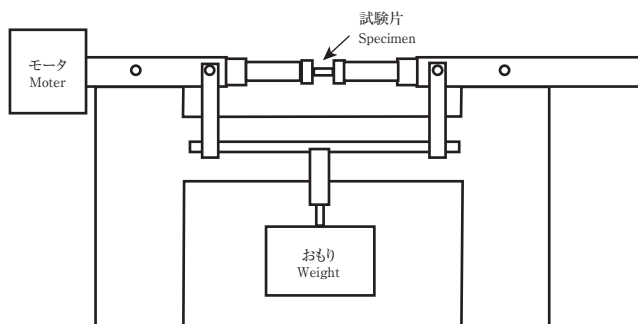
4. 実験データに基づく応力分布測定

4-1 回転曲げを受ける軸の熱弾性応力測定

2-1節に示した回転曲げを受ける軸の熱弾性応力測定法について実験データを適用してその妥当性を確認する。試験条件について基本的には前節と同様とし、JIS Z 2274「金属材料の回転曲げ疲労試験方法」に準拠して、図8で示されるA2024-T351の試験片について、島津小野式回転曲げ疲労試験機(図9)によって試験を行った。応力レベルは0~236 MPaまで9段階(0, 29, 58, 88, 118, 147, 177, 206, 236)変化させ、回転速度は 1000 min^{-1} とした。サーモグラフィによる温度分布測定はNEC/avio製のTH7800Nを用い、16回分の測定データを時間平均した値を測定値とした。このときの温度分解能は0.05 Kである。また、撮影時に試験片上で生じる反射の影響を小さくするため、試験片表面に黒色のつや消し塗料を塗布するとともに、試験片後方に黒色の板を設置した。図10(a)は得られた熱画像、図10(b)はその拡大写真であり、これから試験片上の測定データには、

- ① 全体的な温度の上昇、
- ② 縁近傍における測定信号の低下、
- ③ 中立面付近における測定信号の上昇、

の3つの特徴が観察された。ここで、提案手法を適用するために取り込んだデータに対して空間的な座標を設定



回転曲げ試験機
(a) Rotary bending testing machine



サーモグラフィ測定
(b) Measurement with the thermography

図9 実験装置
Fig. 9 Experimental equipment

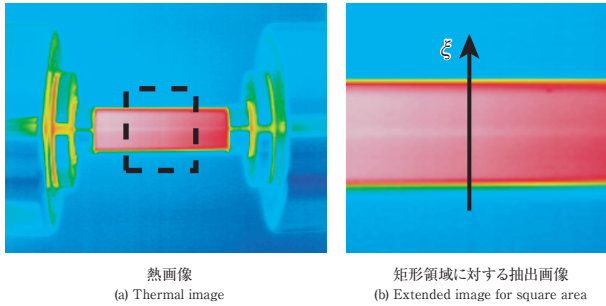


図10 サーモグラフィによる測定データ
Fig. 10 Measured data with thermography

した。撮影された図10 (b) について ξ 軸上の温度上昇領域は試験片直径12 mmと一致するため、この範囲を $-6 < \xi < 6$ mmとして図11 (a) に示す温度分布が得られた。これからも前記①~③の特徴が観察されるため、信号が低下している縁近傍の領域は除外し、おおむね直線的に分布している図11 (b) に示す $-4 < \xi < 4$ mmの範囲のデータを推定に用いた。図12の黒線は温度分布を直線近似して得られた傾きと荷重応力の関係を示しており、赤線はその最小自乗近似した直線である。応力の増加に対して温度分布 ΔT の傾きも増加しており、荷重応力と温度分布の傾きはほぼ比例の関係にあることがわかる。基礎式である式(2)は次式のように書き換えられることから、実験の測定結果が基礎式を満たしていることが確認できる。

$$\frac{\Delta T}{\xi} = \frac{K_m T_r}{r} \sigma_b \dots\dots\dots (9)$$

また、この式は ΔT , σ_b , K_m 及び T_r の中で一つのパラメータが未知である場合、他の既知パラメータから推定可能

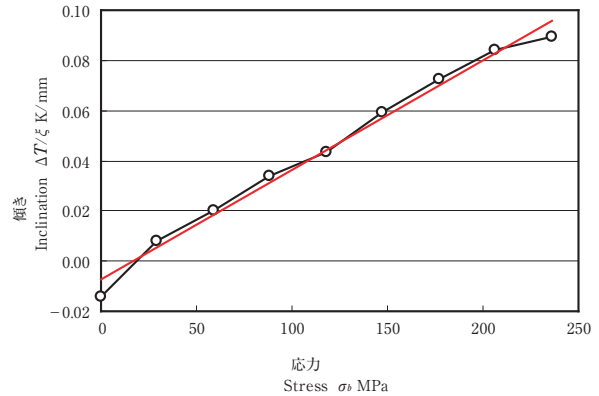


図12 応力レベルに対する応力分布の傾き
Fig. 12 Gradient of the stress distribution for stress level

であることを意味している。図11 (b) において応力 $\sigma_b = 206$ MPaの温度分布データから式(9)を使って熱弾性定数 K_m を求めると、参照温度は $T_r = 313.83$ K、温度分布の傾きは $\Delta T/\xi = 8.44 \times 10^{-2}$ K/mmから 7.82×10^{-6} 1/MPaが得られた。これは文献値 9.52×10^{-6} 1/MPa (Brammer and Percival, 1970) より18%小さい値となった。後述の図13に対しても同様に K_m の算出を行ったところ、 10.4×10^{-6} 1/MPaとなり、求められる値はかなりばらつきがあった。したがって、この手法で K_m を求めることは適切ではないと考え、本研究では文献値 9.52×10^{-6} 1/MPaを用いて推定を行った。

4-2 曲げ応力、カメラ位置の推定

2-2節で示した方法について、実験データを用いた曲げ応力、カメラ位置及び参照温度の推定を行い、提案した手法の妥当性を検証した。実験データの測定条件は図7のシミュレーションと比較できるように同条件とし、最

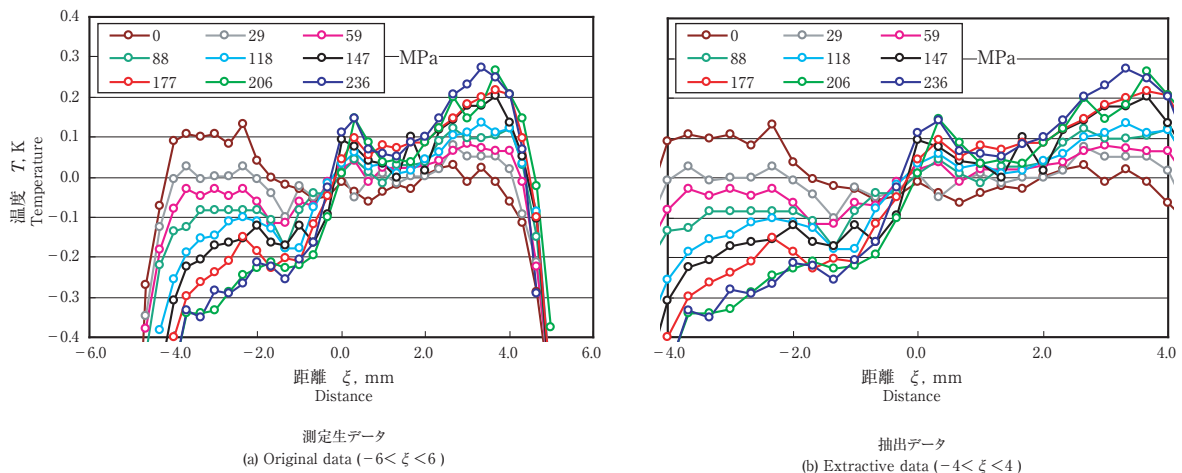


図11 回転曲げ試験下の温度変化分布
Fig. 11 Temperature change distribution under the rotary bending test

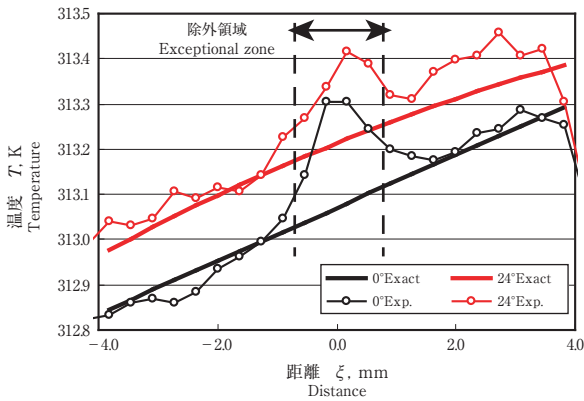


図13 推定に用いる温度分布
Fig. 13 Temperature distribution for estimation

大曲げ応力を $\sigma_b = 118 \text{ MPa}$ として図13に示す温度分布が得られた。中立面に対して 0° 方向から撮影されたデータを黒線、 24° 方向から撮影されたデータを赤線、実験データを細線、理論解を太線で示している。これから、実験データでは前節の③で言及した中立面付近における測定信号の上昇が確認できる。この現象は試験片とカメラの距離を離すことによって解消する傾向にあることから、カメラ本体の像が試験片表面に投影されたものと考えられる。試験片とカメラの距離を離せば上記信号の上昇は低減できるが、同時に熱画像サイズが縮小して測定データ点数の減少も招く。ここでは距離は変えずに精度の低い信号を直接取り除いて精度の確保を図った。

図11や図13から、前記の信号の上昇範囲は応力やカメラ方向によらずおおむね一定であるから、理論解と明らかに傾向が異なる $-0.6 < \xi < 0.6 \text{ mm}$ の範囲のデータを除外し、 $-4 < \xi < -0.6$ 、 $0.6 < \xi < 4 \text{ mm}$ のデータを推定に用いるものとした。一方、試験片上の参照温度 T_r の正解について、理論的には図7に示すように $\phi = 0$ における中立面上の温度と一致するが、前節③の理由からこの範囲の測定データは精度が低下している。ここでは $\phi = 0$ の温度分布に対して前記範囲を除外したデータの平均値を求め、 $T_r = 313.07 \text{ K}$ を参照温度の正解とした。

数値シミュレーションと同様にそれぞれのケースに対して推定するパラメータを表3に、これに基づいた推定結果を表4に示す。ここでは表1、表2と同様、通常サイズの数字は独立変数、小さい数字は従属変数を示している。Case 9は σ_b だけ、Case 10は σ_b 、 ϕ 、Case 11は3パラメータ σ_b 、 ϕ 、 T_r を同時に推定した結果であるが、いずれも数値シミュレーションより精度は大きく低下しており、特にCase 11についてその程度が顕著であった。また、Case 12はカメラ位置 ϕ を 24° としたときの推定結

表3 実験データに基づく解析の条件 [K: 既知, U: 未知]
Table 3 Conditions of the experimental analysis [K: known, U: unknown]

	n	n_t	ϕ°	$\sigma_b \text{ MPa}$	$T_r \text{ K}$
ケース Case 9	1	18	K (0.0)	U (118.0)	K (313.07)
ケース Case 10	1	18	U (0.0)	U (118.0)	K (313.07)
ケース Case 11	1	18	U (0.0)	U (118.0)	U (313.07)
ケース Case 12	1	18	U (24.0)	U (118.0)	U (313.07)
ケース Case 13	2	36	U (0.0, 24.0)	U (118.0)	U (313.07)

表4 実験データに対する推定結果

Table 4 Estimated results for experimental data

	Estimated ϕ°	Estimated $\sigma_b \text{ MPa}$	Estimated $T_r \text{ K}$
ケース Case 9	-	128.6	-
ケース Case 10	0.2	127.5	-
ケース Case 11	35.9	159.8	312.82
ケース Case 12	37.1	140.0	313.01
ケース Case 13	10.6, 34.6	137.5	313.02

果であるが、Case 11と同様に推定精度の低い結果となった。一方、Case 13は測定方向を2方向として 0° 、 24° の測定データを組み合わせた結果であるが、推定精度はCase 11、12より向上しており、特にカメラ位置の推定精度は大幅に改善された。表4の参照温度 T_r に着目すると、 T_r が既知若しくは T_r の推定結果が正解に近いケースでは比較的精度の良い推定結果が得られており、参照温度 T_r が全体の推定結果に影響を及ぼしていることがわかる。すなわち、参照温度データが既知若しくは推定しやすい状況では精度の高い結果が得られると考えられ、広範囲の測定データを用いたCase 13の精度向上はこの理由によるものと考えられる。以上から、応力分布の推定に複数方向からの測定データを用いる方法は実験データのような誤差を含んだ場合に対しても有効であり、本手法の妥当性が確認された。

5. 結 言

本研究では実機稼働中の回転軸に対してサーモグラフィを使った熱弾性応力測定を行い、荷重と測定信号を同期させることなく非接触的に応力分布を測定する手法

について検討を行った。測定対象は回転曲げ疲労試験下の試験片とし、数値シミュレーション及び実験データに基づいて曲げ応力、カメラ位置（曲げ方向）及び参照温度の推定を行い、手法が妥当であることを確認した。得られた結論は以下のとおりである。

- (1) 回転曲げを受けた回転軸に対してサーモグラフィによる熱弾性応力測定を行ったところ、曲げ応力分布とサーモグラフィで測定される温度変化の分布は比例関係にあることが確認され、本手法によって荷重と測定信号を同期させずに応力分布が推定できることを示した。
- (2) 任意の方向から測定された回転軸上の温度分布について定式化を行うとともに、その式に基づいて曲げ応力、カメラ位置（曲げ方向）、参照温度を推定する逆問題解析を行い、数値シミュレーション及び実験データともに推定可能であることを示した。
- (3) 複数の測定方向から得られた温度分布に基づいて前記の推定を行い、1方向だけの測定データで推定した場合よりも精度が向上できることを示した。
- (4) 断面が円形の回転軸において軸の中心から2/3より外側の領域及び軸の中心付近は測定信号の精度は低下しており、この領域のデータを除外すれば精度良く推定できることを示した。
- (5) 既知の参照温度データ若しくは複数方向の測定データを用いた場合、未知パラメータの推定結果は向上しており、参照温度の推定精度が全体の推定精度に大きく影響を及ぼしていることが明らかになった。

参考文献

- 1) 菅野昭, 高橋賞, 吉野利男, 応力ひずみ解析 (1986), pp.25-58, 朝倉書房.
- 2) Ryall, T. G., Cox, P. M. and Enke, N. F., On the determination of dynamic and static stress components from experimental thermoelastic data, *Mechanics of Materials*, Vol.14 (1992), pp.47-57.
- 3) 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*, Vol.61, No.591 (1995), pp.154-160.
- 4) 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*, Vol.62, No.597 (1996), pp.88-95.
- 5) 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度化, *日本機械学会論文集A編*, Vol.65, No.639 (1999), pp.2325-2332.
- 6) Wong, A. K., Jones, R. and Sparrow, J. G., Thermoelastic constant or thermoelastic parameter?, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, Vol.48 (1987), pp.749-753.
- 7) Wong, A. K., Sparrow, J. G. and Dunn, S. A., On the revised theory of the thermoelastic effect, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, Vol.49 (1988), pp.395-400.
- 8) 井上裕嗣, 早房敬祐, 廣川幹浩, 岸本喜久雄, 熱弾性効果の非線形性を利用した熱弾性応力測定のための主応力分離法, *非破壊検査*, Vol.52, No.4 (2003), pp.201-207.
- 9) 早房敬祐, 工藤大, 足立忠晴, 岸本喜久雄, サーモグラフィによる回転曲げ疲労試験片の応力分布測定, *日本機械学会M&M2008材料力学カンファレンスCD-ROM論文集* (2008), OS0125.
- 10) 早房敬祐, 工藤大, 足立忠晴, 岸本喜久雄, サーモグラフィによる回転軸の曲げ・平均応力の測定, *日本機械学会年次大会講演論文集*, Vol.1 (2009), pp.151-152.
- 11) 和泉遊以, 阪上隆英, 久保司郎, 玉越隆史, 自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法による鋼床版デッキ貫通型疲労き裂の検出, *日本機械学会論文集A編*, Vol.76, No.766 (2010), pp.723-729.
- 12) 久保司郎, 逆問題 (1992), pp.41-45, 培風館.
- 13) 早房敬祐, 中本浩章, 池田隼人, サーモグラフィによる疲労限度推定に及ぼす荷重履歴の影響, *日本機械学会M&M2012材料力学カンファレンスCD-ROM論文集* (2012), OS0722.
- 14) Brammer, J. A. and Percival, C. M., Elevated temperature elastic moduli of 2024 aluminum obtained by a laser-pulse technique, *Experimental Mechanics*, Vol.10, No.245 (1970), pp.245-250.
- 15) Rauch, B. J. and Rowlands, R. E., Determining reliable edge isopachic data from interior thermoelastic measurements, *experimental mechanics*, Vol.37, No.4 (1997), p.178.