

熱応力解析技術の高度化に関する基礎検討

林和・三ツ木寛尚*・青柳大志**

岩沢知幸***・狩野幹大**

Basic Study on The Advancement of Thermal Stress Analysis Technology

HAYASHI Yawara, MITSUGI Hironao, AOYAGI Hiroshi,

IWASAWA Tomoyuki, KANO Motohiro

群馬産業技術センターでは熱応力に関する解析と実際の挙動の比較検討を詳細に行った事例が少なく、解析結果の精度の把握が不十分である。そこで熱応力解析において解析精度の定量的な把握を目的とし、熱応力測定とそれに対する熱応力解析を実施した。その結果、熱応力に関する問題において傾向予測ができるようになったことで机上での様々な設計検討を行えるようになった。

キーワード：熱応力、CAE、ひずみゲージ

At Gunma Industrial Technology Center, there are few cases in which detailed comparative studies of thermal stress analysis and actual behavior have been conducted, and the accuracy of the analysis results is not fully understood. Therefore, with the aim of quantitatively understanding the analysis accuracy in thermal stress analysis, we conducted thermal stress measurement and thermal stress analysis. As a result, it has become possible to predict trends in problems related to thermal stress, making it possible to conduct various design studies on a desk.

Keywords : Thermal stress, CAE, Strain gauge

1 まえがき

自動車においてエンジンやバッテリーなどの発熱や外気温の変化により周辺部品には熱サイクルが付加される¹⁾。熱サイクルにより周辺部品には熱応力が付加され、機能や信頼性の低下を招くことが問題となる。また、開発期間の短縮やコストダウンの要求によりシミュレーション (CAE、Computer Aided Engineering) による事前検討のニーズが高まっている²⁾。このような熱問題への対策は自動車部品の開発現場だけでなく、金型の熱変形による加工品質への影響の検討³⁾など製造現場においてもニーズが高くなっている。群馬産業技術センターではこれまでに熱応力

を評価する CAE (以下、解析) の実績はあるものの、解析と実測の比較検討を行った事例は少ない。そのため解析の精度把握が不十分であり、センター利用企業に対して精度を含めた解析活用の提案ができていない。そこで本研究では熱応力解析において解析精度の定量的な把握を目的とする。

2 研究課題

本研究では熱応力解析技術の構築を行った。まず、熱応力について参考文献⁴⁾より説明する。熱応力は式(1)にて表される。 σ は熱応力、 E はヤング率、 ε はひずみである。物体が何も拘束されていないとき、温度が変化すると物体に熱ひずみが生じる。物体に生じるひずみは弾性ひずみと熱ひずみの和となり式(2)で表される。 ε_1

応用機械係

* 電子機械係

** 生産システム係

*** 材料解析係

は弾性ひずみ、 ε_2 は熱ひずみである。弾性ひずみと熱応力の間にはフックの法則が成り立つため、式(1)と式(2)より式(3)が導かれる。さらに熱ひずみは式(4)で表される。 α は線膨張係数、 T_1 は初期温度、 T_2 は目標温度である。ここで対象の物体が固定されているとすると、ひずみの和は 0 となることから式(3)に式(4)を代入すると熱応力は式(5)で表すことができる。ここで、ヤング率及び線膨張係数は材質に固有の値である。よって熱応力は温度差に比例する。以上より熱ひずみによる弾性変形を測定するには弾性ひずみを測定する必要がある。

$$\sigma = E\varepsilon \quad (1)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \quad (2)$$

$$\sigma = E\varepsilon_1 = E(\varepsilon - \varepsilon_2) \quad (3)$$

$$\varepsilon_2 = \alpha(T_2 - T_1) \quad (4)$$

$$\sigma = -E\alpha(T_2 - T_1) \quad (5)$$

本研究ではひずみゲージを用いて弾性ひずみ測定を行った。ひずみゲージは設置した長手の方向のひずみの大きさを測定する。そのため設置する向きと位置が重要となる。さらにひずみゲージは製品ごとに測定可能な温度範囲及び温度補償範囲が設定されている。ばらつきの少ないデータを取得するためには適切なひずみゲージを選択する必要がある。また、熱応力解析においては物性値、接触やメッシュなどの解析パラメータを検討することによって実測に近い挙動を再現することが求められる。以上の理由から解析精度の定量的把握を行うためには以下の 3 つ課題がある。

- A. ひずみゲージ設置位置および方向の決定
- B. 低温・高温環境下での測定技術
- C. 予測技術の構築

3 熱応力解析技術の確立

3.1 ひずみゲージ設置位置および方向の決定

本研究では産業製品で広く使用され、入手が容易である SS400 と A5052 の線膨張係数の差で生じる熱ひずみ測定を行う。図 1 に本研究で使用した試験片を示す。試験片の温度を変化させると SS400 と A5052 の線膨張係数の差に応じた熱ひずみが生じ、さらに弾性ひずみが生じる。表 1 に各材質の線膨張係数⁵⁾を示す。初めに文献⁶⁻⁷⁾の物性値を用いて事前解析を実施した。解析には ANSYS Mechanical 2022 R2 を使用した。本研究ではボルト締結にて接触面が固着している想定にて解析を実施した。解析の結果から弾性ひずみが生じやすい位置と方向に 10 か所ひずみゲージを設置した。ひずみゲージ設置位置を図 2 に示す。

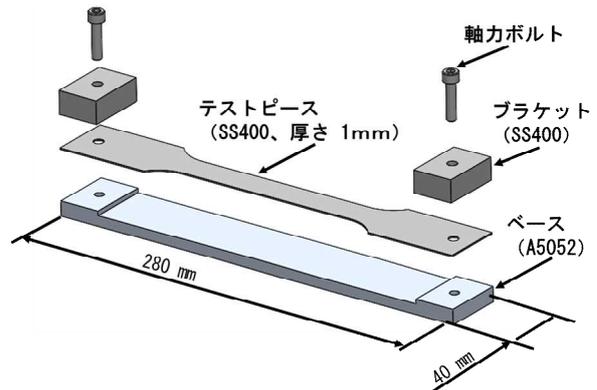


図 1 試験片構成

表 1 各材質の線膨張係数

材質	線膨張係数 (10 ⁻⁶ /°C)
SS400 (一般構造用圧延鋼材)	11.7
A5052 (アルミ合金)	23.8

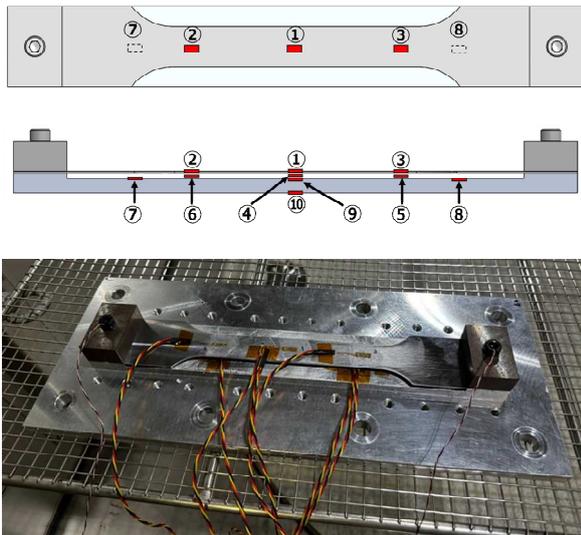


図2 ひずみゲージ設置位置

3. 2 低温・高温環境下での測定技術

3. 2. 1 温度プロファイル

恒温槽 (IMV 製、Syn-4HW-70-VH) にて保持温度 -40°C 、 120°C の2条件にてひずみ測定を行った。なお、降温、昇温はともに4時間とし、 23°C のひずみを0とした。図3に各温度条件における温度プロファイルを示す。試験片の温度測定はテストピースとベースの中央部の計2か所に白金測温抵抗体を設置して行った。

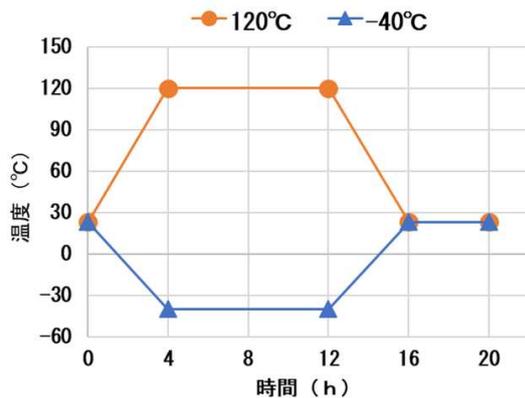


図3 温度プロファイル

3. 2. 2 ひずみ測定結果

図4に -40°C における熱ひずみ測定結果を示す。まず汎用ひずみゲージにて測定を実施した。汎用ひずみゲージは使用可能範囲が $-196^{\circ}\text{C} \sim 150^{\circ}\text{C}$ 、温度補償範囲は 10°C

$\sim 100^{\circ}\text{C}$ である。本研究では測定範囲が温度補償範囲外であったため、各測定点でのばらつきが大きいデータとなった。(エラーバーは標準偏差の範囲を示す。)そこで、使用可能温度が $-269^{\circ}\text{C} \sim 200^{\circ}\text{C}$ 、温度補償範囲が $-196^{\circ}\text{C} \sim 80^{\circ}\text{C}$ の広温度範囲ひずみゲージを使用して測定した。すると各測定点のばらつきが小さく、安定したデータが測定できた。 120°C においても -40°C と同様の傾向がみられており、広温度範囲ひずみゲージで測定した結果を実験値とした。

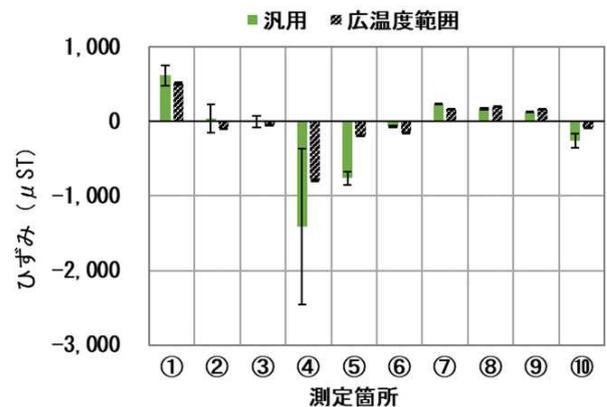


図4 熱ひずみ測定結果 (-40°C)

3. 3 予測技術の構築

3. 3. 1 解析に関わるパラメータ

実験値と事前解析結果の比較について図5に示す。これらの結果を比較すると、最小の解析誤差は測定箇所⑤で22%、最大の解析誤差は測定箇所④で213%となった。そこで、さらなる解析パラメータの検討を行った。解析パラメータの一覧を表2に示す。解析で検討する主なパラメータとしては物性値、接触、メッシュである。このうち、物性値についてはSS400およびA5052の温度依存性弾性率を引張試験にて事前に取得した値を使用した。線膨張係数は表1の値を使用した。ボルト軸力はひずみゲージをボルト内部にした軸力ボルト⁸⁾にて測定した。温度荷重については3.2.1で示したとおり、測温抵抗体で測定した値を用いてモデル全体に一樣温度荷重として負荷した。本研究では残るパラメータである接触条件を中心に解析パラメータを変更し、計23条件を実施した。

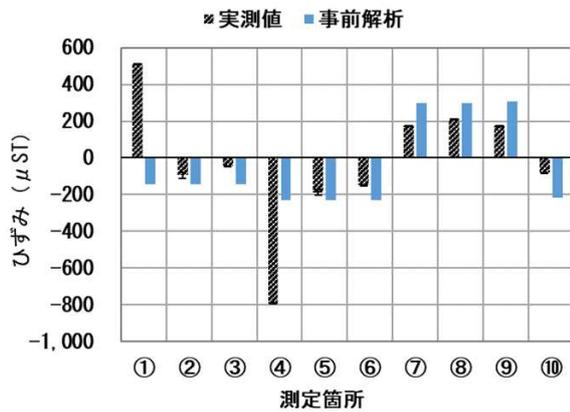


図5 実験値と事前解析比較 (-40°C)

表2 解析パラメータ

大項目	小項目
物性値	弾性率
	線膨張係数
荷重	ボルト軸力
	温度荷重
接触	接触タイプ
	接触面積
メッシュ	要素サイズ

3.3.2 解析結果

前節にて検討した解析パラメータのうち、接触タイプが最も解析結果に影響を及ぼすことが分かった。ここでは最も実験値との一致がみられた条件の結果を示す。図6は-40°Cにおける各測定箇所のひずみの方向を加味した解析結果である。-40°Cでの最小の解析誤差は測定箇所①で3%、最大の解析誤差は測定箇所⑤で49%となった。この解析条件を条件1とする。事前解析と条件1の挙動を図7に示す。また、接触部の拡大図を図8に示す。実測に近づいた要因としては次の点が考えられる。事前解析では接触面は固着した接触面（滑りも分離も許容しない）としたため、ベースとテストピースは互いに拘束されている。一方で条件1では接触面に滑りおよび分離を考慮したことによりテストピースの挙動に自由度が生まれた。また、ベース中央部寄りのベースとテストピースの接触面では微小なクリアランスが発生した。その結果、テストピースはZ方向に大きく凸形状に変形する挙動となった。このことで実験値に近

い値となったと考えられる。120°Cにおいても接触面に滑りおよび分離を考慮した条件が最も実験値に近い結果となり、最小の解析誤差は測定箇所②で0.5%、最大の解析誤差は測定箇所⑦で79%となった。120°Cにおける各測定箇所のひずみ方向を加味した解析結果を図9に示す。このように部分的に誤差は大きいもの、設計検討において傾向予測できる程度の予測技術を構築できたと考える。

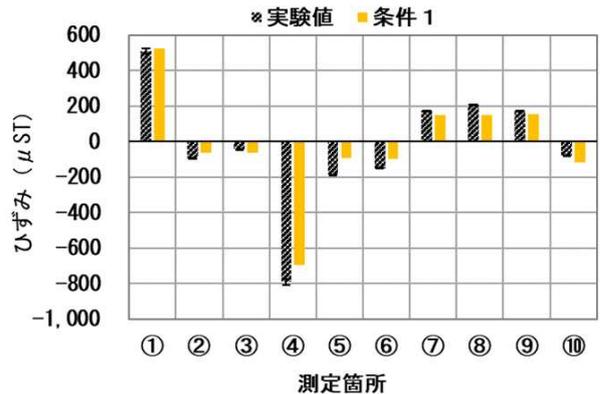


図6 実験値と解析結果の比較 (-40°C)

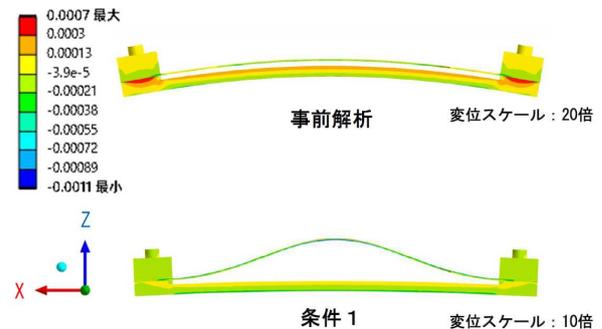


図7 各解析条件における挙動 (X方向垂直弾性ひずみ)

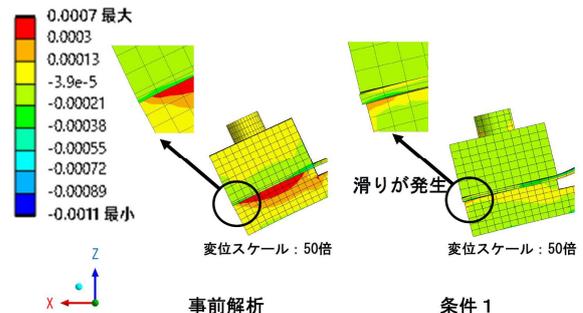


図8 結合部拡大図 (X方向垂直弾性ひずみ)

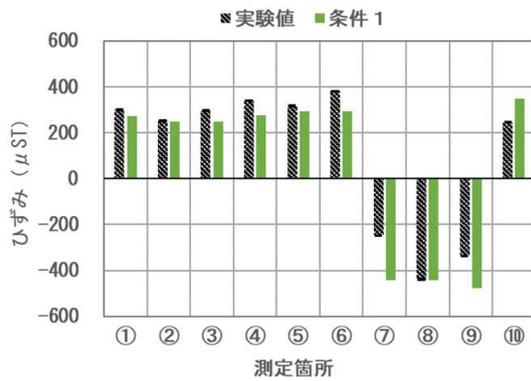


図9 実験値と解析結果の比較 (120°C)

3. 3. 3 解析の誤差要因

条件1の解析結果では実験値と近い値の箇所もあったが、大きく外れている箇所もあった。その要因について検討する。前節にて接触タイプが解析結果に大きな影響を及ぼすことが分かった。本研究において接触面の状態について確認すると、ボルト締結方法、ブラケットの錆の発生や熱変形によって接触状態が変化したと考えられる。また、測温箇所が少ないため、温度分布が不均一であった可能性がある。また、線膨張係数を文献値の値を使用して解析を行っていたことが挙げられる。今後は錆の発生など管理できる条件については可能な限り管理した上で、温度分布の影響を検討することで精度を向上させる可能性がある。

4 まとめ

本研究では熱応力解析において解析精度の定量的な把握を目的として課題A~Cに取り組んだ。その結果、熱応力問題において傾向予測が可能な予測技術を構築した。本研究の成果をもとに熱応力に関する問題において机上で様々な設計検討を行い、試作の手間を少なくできるように企業支援を行いたい。

今後はさらなる解析の高精度化のため、接触状態、摩擦係数の把握を行いたい。さらに温度分布を再現するために伝熱解析や流体解析との連成解析技術の構築を視野に

検討を進める。

参考文献

- 1) 今川ほか：日本製鉄技報、416、89、(2020)
- 2) 于強ほか：日本機械学会論文集(A編)、75、758、(2009)
- 3) 西澤和毅：精密工学会誌、3、67、(2001)
- 4) 日本機械学会誌 第3回 熱応力・熱ひずみ、<https://www.jsme.or.jp/kaisi/1204-36/>
- 5) TDC、線膨張係数とは？、https://mirror-polish.com/material_knowledge/the_rmal-expansion-coefficient/
- 6) 添野ほか：日立評論、15、669、(1964)
- 7) 日本アルミニウム協会標準化委員会：アルミニウムハンドブック、7、43、(2007)
- 8) 東京測器研究所、ボルトゲージ埋込・校正サービス、<https://tml.jp/product/service/bolt-service.html>