

Contour 法による残留応力測定技術

三上 隆男^{*1} 鈴木 優平^{*2}
Mikami Takao Suzuki Yuhei

Contour 法は 2001 年に米国 Los Alamos 国立研究所で発明された技術で、数ある残留応力測定技術の中では最も新しいものである。この方法は、工業部品内の残留応力分布を 2 次元マッピングできるという大きな特徴を有している。従来法に比べて費用対効果が大きいこともあり、近年、欧米を中心に精力的な研究と実機への適用が併行して進められている。本稿では、Contour 法に関する研究では世界をリードしている上記の研究所や英国の The Open University が公開している論文⁽¹⁾⁽²⁾を参考としてその技術の概要を紹介する。

キーワード：Contour、residual stress、WEDM、CMM、FEM、smoothing

1. はじめに

残留応力は、外力が存在しない物質内に存在する自己平衡した応力と定義される。残留応力は、製造プロセス中に必然的に生成され、供用中は負荷応力と互いに影響し合い、工業部品の構造健全性に影響を与える。残留応力の測定は、構造物の健全性評価、製造工程の最適化および FEM などによる解析結果の妥当性確認のために必要不可欠である。

図 1 に示すように、工業部品の残留応力を把握するために種々の測定技術が利用されている。この図は、測定可能な深さ範囲と測定時の破壊の程度で測定技術を分類している。

Contour 法による測定は、ワイヤ放電加工(WEDM)を用いて切断が可能な金属材料部品に適用するのが一般的である。特別なサイズの制限はないが、測定信号(変位)は試験体のサイズに比例するの

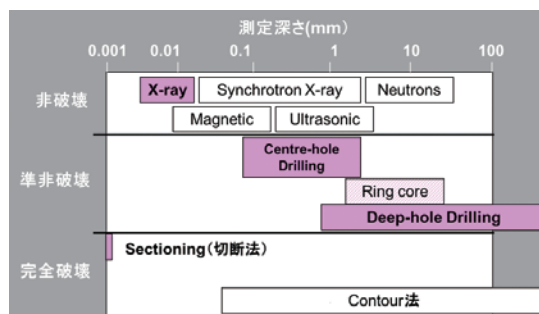


図 1 残留応力測定法

で、断面が 5mm×5mm より小さな部品で測定するためには非常に高い測定精度を必要とする。複雑形状であっても FEM によりモデル化して応力解析できるので、試験体の形状についての制限はないと考えて良い。

Contour 法は 2001 年に米国の Los Alamos 国立研究所で発明され、工業部品内の残留応力分布のマッピングのための強力な技術として、近年、多くの論文が発表されてきているが、図 1 の中で

*1：フェロー 博士（工学）、技術士（機械部門）、環境計量士（騒音・振動関係）、一般計量士、JSNDI ひずみ測定・レベル 3
 *2：計測事業部 計測技術部

は最も新しい方法である。この方法は標準的な機械工場で広く利用できる機器を使用し、工業部品内の注目している断面の垂直方向に作用する残留応力の2次元(2D)マップを描くことができる。

筆者らは本技術について、英国の The Open University および VEQTER Limited を訪問して調査を実施した。本稿では、この調査結果と公開されている論文⁽¹⁾⁽²⁾を参考として技術の概要を紹介する。

2. Contour 法

Contour 法は、数多い残留応力測定技術の中では最も新しく非常に斬新な技術である。なぜなら、この技術は標準的な機械工場が保有している設備を使用して測定でき、注目している断面に垂直な方向に作用する残留応力の2Dマップを与えてくれるからである。この点が、DHD法⁽³⁾や穿孔法のような点測定とは異なる大きなメリットであるが、測定対象物を完全破壊しなければならない点がデメリットである。本技術は、材料の除去による弾性応力解放に基づいており、薄肉および厚肉断面構造物に適用しうる。切断中または応力再配分中に大きな塑性が起きると、誤差を生じやすいが、例えば、溶接温度サイクルの結果として起きるミクロ組織の変化(変態)には敏感ではないというメリットを有する。これらの特徴があるため、Contour 法は原子力や火力発電所、航空宇宙構造

物、エンジン、石油化学および輸送産業などの構成部品の残留応力測定に広く適用されはじめている。

3. 測定原理

Contour 法の理論的な根拠は、Bueckner の重ね合わせの原理⁽⁴⁾である。図2の Step A は中央位置で板厚の全体にわたり z 方向に作用する残留応力分布を示す。Step B では、板は注目している表面に沿って二つに切断されている。この結果、表面に垂直方向に作用している残留応力場の分布が緩和され、二つの切断表面が鏡面对称で弾性変形することになる。この変形した表面の高さ分布(Contour)を測定する。変形した表面を強制的に元の切断されていない形状に戻すのに必要な仮定の応力が Step C で計算される。これは、線形弾性応力解析により、Step B で得られた二つの切断表面の Contour の平均値を、切断部品の FEM モデルの切断面に与えることにより実行される。Step A の応力分布は Step B の応力状態と Step C の線形重ね合わせである。したがって、Contour 法は、試験体切断、表面 Contour 測定とデータ解析(FEM モデリングを含む)の3ステップで構成される。

Contour 法では、初期の切断プロファイルからの切断表面形状のいかなる乖離(すなわち、変形)も切断前の注目している仮定表面に垂直方向に作

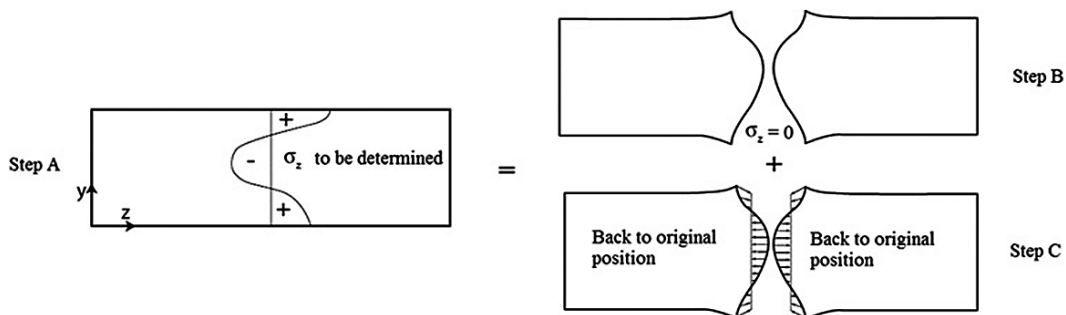


図2 板の深さ方向の残留応力分布 $\sigma_z(y)$ に対する Contour 法の原理を説明する概略図⁽²⁾

用する残留応力の弾性緩和により生じたものと仮定される。そのため、物体を次のような加工技術を用いて切断することが必要である。

- (a) ある定義した表面プロファイルに完全に従う。
- (b) 切断幅はゼロである。
- (c) 付加的な残留応力が生じない。
- (d) 塑性変形を生じない。

Contour 法による残留応力測定において、上記の理想切断条件からのいかなる乖離も誤差を生じうる。物体の初期内部応力状態は、条件 (a)、(b) および (d) からの逸脱によって引き起こされる誤差に影響を与えうる。例えば、物体は切断中にゆがみ、(a) に影響を与えうるので試験部品は堅固なクランプが必要である。条件 (b) を満足しない場合は、切断チップにおける弾性ひずみ場に依存する“ふくらみ誤差”(6章参照)の原因となりうる。(d) の条件はすべての機械的ひずみ解放に基づく残留応力測定技術に共通の要求である。WEDM 切断では、応力が解放されている切断面からの残留応力再配分のため、切断チップ領域で塑性が起きる可能性がある。条件 (d) に対する誤差の程度は応力が負荷された物体内の応力状態、拘束条件および切断方法に大きく依存する。

4. 一般的な測定手順

4.1 固定法

試験体の WEDM 切断中に応力解放によって切断面が動くことがないように拘束する必要がある。通常、切断部の両側を剛性の高い固定具にクランプする方法が採られている。図 3 にクランプの配置例を示す。このクランプ法だけでも多くの研究がなされている。一般に、切断後の二つに分割された部品上の Contour 測定結果は異なるが、これら両部品の測定データを平均化することにより良好な結果が得られている。

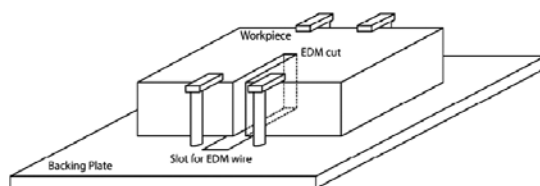


図 3 Contour 法に使用する二重側面クランプのイラスト⁽¹⁾

4.2 部品切断

Contour 法における理想的な切断条件は、真直ぐ(平面)で滑らかな切断、最小限の切断幅(切り口幅)、既に切断された面からそれ以上いかなる材料も取り除かないこと、および、いかなる塑性変形も起こさないことである。これらを満足するために、現時点ではワイヤ放電加工(WEDM)が選択されている。WEDM においては、スパーク浸食により材料の除去を行う。一般的な加工では、局所的な大きい接触力のため、塑性変形を生じるのに対して WEDM 切断は非接触である。部品は切断中に温度制御された脱イオン水に浸され、それにより、温度の影響が最小化される。ワイヤ径は、より小さな直径のものが推奨されるが、小さすぎるとワイヤ破損の原因となるか、切断時間が長くなる原因となる。表 1 に、切断厚さに対する最少ワイヤ径についての一般的な指針を示す。ワイヤの材料としては真ちゅうが広く用いられている。

表 1 ワイヤサイズに対する大まかな指針⁽¹⁾

Specimen thickness	EDM wire diameter
< 15 mm	100 μm
10 mm – 100 mm	150-200 μm
> 50 mm	250 μm

Contour 法による測定結果の品質を決定する最も重要な要素は切断の品質である。適切なワイヤ

サイズと形式を選定することに加えて、前述の理想的切断プロセスの条件にできるだけ近くなるような切断条件を選定することが重要である。そのためには、WEDM マシンの各種切断設定を適切に使用する必要がある。

部品切断に際しては、マシン上に部品を組み付け、部品とクランプが WEDM タンク内の水と温度平衡した後、クランプを固定する。WEDM 切断は一つのパス内ですべての断面を貫通するように計画する。切断が完了したら、部品は切断面の健全性に注意しながらマシンから外し、表面に付着している堆積物を取り除くために洗浄しなければならない。

WEDM 切断には種々のノウハウがあり、長年の経験を積んだ職人の技量に負うところが多々ある。写真 1 に WEDM マシン上にクランプされた平板突合せ溶接試験体の様子を示す。

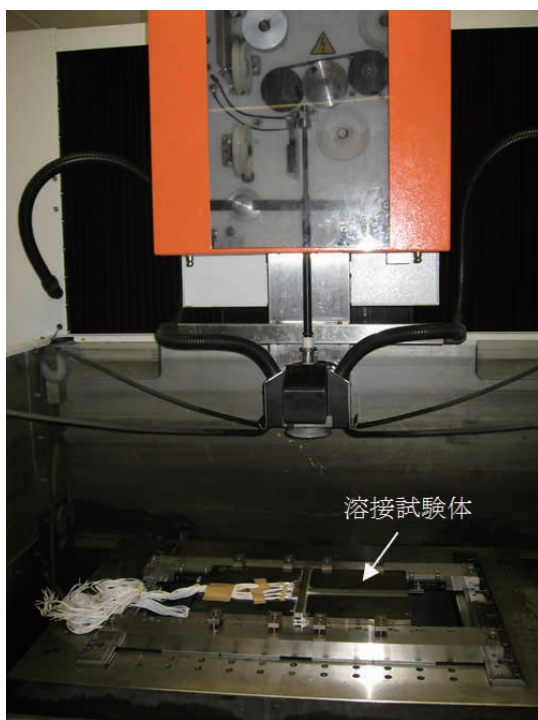


写真 1 WEDM マシン上にクランプされた試験体
(Courtesy of The Open University)

4.3 表面の Contour 測定

切断により生成された二つの切断表面を測定する。一般的に、Contour は山から谷まで $10\mu\text{m}$ ~ $100\mu\text{m}$ のオーダーであり、非常に小さい。このレベルの表面高さの正確な測定には、精密な計量器が必要である。3 次元座標測定器 (CMM) は本目的には有用である。WEDM 切断により二つに分割された部品を、それらの切断面を暴露した状態で CMM 上に置く必要がある。CMM は、変位場の形状を分析するのに十分な測定間隔で全表面にわたり点が取得できるように計画しなければならない。CMM 測定は一般に、約 2 秒に 1 回の頻度で実施されるので、測定には数時間を要する。したがって、CMM 測定中の温度安定性は重要であり、変動がないようにしなければならない。そのため、一定の室温に制御された実験室で測定を実施する必要がある。写真 2 に、ある試験体に対する CMM による切断面周界部の測定の様子を示す。



写真 2 CMM による測定の様子
(Courtesy of The Open University)

他の方法としては、非接触光学スキャナが広く使用されている。光学スキャナは切断面の表面粗さを捉えるため、CMM に比べてノイズが多い (例として図 4 を参照)。したがって、かなり高密度

の測定点数が必要である。しかし、光学スキャナは迅速に測定ができ、温度変動の影響も少ないというメリットがある。

4.4 残留応力評価

一般に、Contour データを処理して応力を計算するためには数ステップを要する。

(1) 座標系のアライメント

二つに切断された部品の表面 Contour は鏡面対称となるので、Contour は z 軸の座標系を反転するなどの操作をして、平均化する。

(2) FEM モデルの構築

二つに切断された部品の片方の形状を FEM モデル化する。要素は立方体が望ましく、要素サイズは強制変位を与える端面付近は細かくする必要がある。

(3) ノイズのフィルタリング

表面 Contour 測定データは、測定誤差と WEDM 切断面の粗さのため、ノイズが含まれている。ランダムノイズと粗さは残留応力が原因ではないが、応力は変位場の曲率に依存し、ノイズの高周波成分は高い曲率を有しているので、これらは計算応力に大きな影響を与える。このため、表面の全体形状（これが残留応力に起因する）を維持しながら、データからノイズを除去することが重要である。最初に、データの中から明らかな異常値を除去する。異常値は、測定中に切断面に沈殿したダストなどの粒子、端部付近の測定時の乱れなどが原因となりうる。異常値はデータ面をプロットし、面の全体形状から大きく離れた点を視覚的に探すことにより検出する。

次に、粗さとノイズを除去しながら表面形状を抽出する手法を適用する必要がある。これは、データを滑らかな表面（例えば、2 変数 spline）にフィットすることで達成可能であり、MATLAB®

などの市販のソフトウェアを利用することができる。

その他のデータスムージング手法も文献で多数報告されている。スムージングの最適量を選択するための客観的で健全な方法は未だ確立されておらず、この方面の研究も欧米で続けられている。

(4) FEM への転送

平均化およびフィルタリング後の最終 Contour（変位）は、FEM 解析の中で変位境界条件として表面に垂直な方向に符号を逆にして節点位置に内／外挿する必要がある。切断面に関して垂直な方向の変位のみを定義する必要があり、切断面上のすべての節点について定義しなければならない。また、剛体運動を拘束するため、3 個の境界条件をモデルに適用する必要がある。この 3 個の境界条件を与えることにより、計算された残留応力は力の釣合いを満足するものとなる。図 5 は、 y と z の移動と x 軸に関する回転を拘束した例である。切断面に垂直な方向の応力計算結果が Contour 測定の結果であり、これが切断前に部品内に存在していた残留応力を表す。

5. 適用事例

Contour 法による測定と他の方法、主として中性子および放射光回折法、さらにいくつかの応力弛緩法との比較についての発表論文は、多数存在する。それによると、非溶接試験体と摩擦溶接試験体については、共通して非常に良い一致を示している。一般的な溶接試験体については、あるときは「良い～非常に良い」の範囲で一致しているが、あるときは顕著な不一致を示している。溶接試験体を回折法で測定する場合、基準となる無応力格子間隔の空間的变化と粒内効果（マイクロ応力とひずみ）のため、誤差が大きくなる可能性が

ある。また、溶接構造物は応力が極めて高く、局部的な降伏応力が温度の影響で下がる。これら両方の効果で塑性誤差が増加するため、溶接構造物の測定はContour法にとっても難しい課題である。以下に三つの測定事例を紹介する。

(1) 鋼製圧子により中心部を圧縮されたステンレス鋼製ディスク

直径60mm、厚さ10mmのステンレス鋼製ディスクを、対向する直径15mmの鋼製圧子により厚さ方向に塑性圧縮した試験体を用いている。このディスクの直径面上の円周方向残留応力をContour法で測定した。ディスクAは直径50 μ mのタングステンワイヤで、ディスクBは直径100 μ mの真ちゅうワイヤで切断し、レーザースキャナでContourを測定した。図4にディスクBのContour測定結果(二面の平均値)を示す。Contourの山から谷までの振幅は約40 μ m程度である。

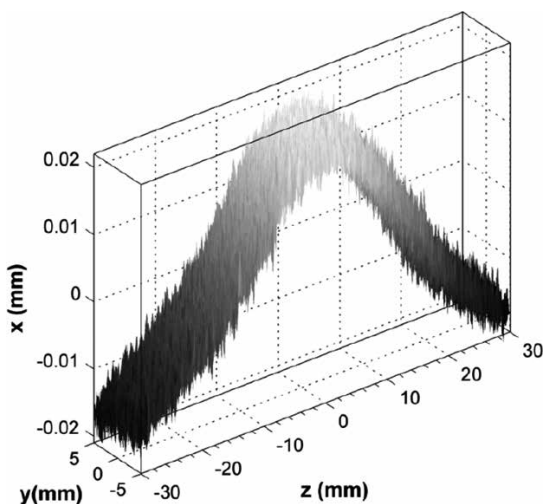


図4 ディスク断面上で測定された表面Contourの平均⁽¹⁾

図5は残留応力計算用のFEMモデルである。ディスクの1/2がモデル化され、メッシュ数は51,920個で立方体8節点要素(C3D8R)を用い

ている。切断面上のすべての節点はx方向以外の自由度は拘束条件が適用されている。

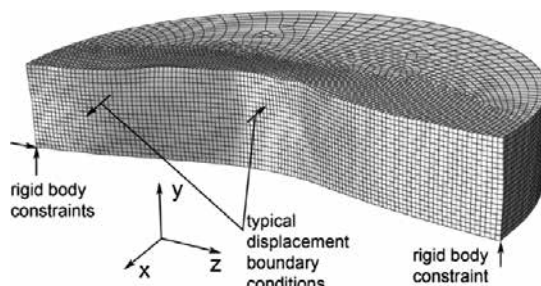


図5 変位境界条件をディスクの1/2 FEMモデルに作用させた後のメッシュ図(変形は200倍に誇張されている)⁽¹⁾

図6は、残留応力の解析結果(2Dマップ)を示す。ディスクA、Bは約20MPa以内で一致している。これらの結果は、中性子回折法による測定結果と非常に良く一致しているとのことである。

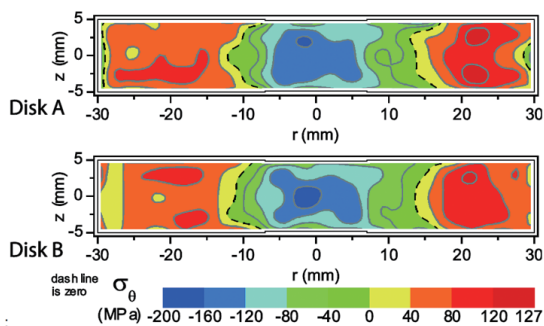


図6 中心部を鋼製圧子により圧縮されたステンレス鋼製ディスクの円周方向応力⁽¹⁾

(2) 摩擦溶接(LFW)試験体

試験体は、Ti-6-Al-4V合金棒から試験ブロックを加工し、LFWで接合されたものである(図7参照)。LFWプロセスは狭い接着領域と熱影響部を生成し、マイクロ組織は元の状態から変化する。LFW試験体の残留応力は、Contour法と中性子回折法により測定した。最初に、図7に

示すように試験体の中心を通るラインに沿う σ_x 、 σ_y および σ_z を測定するために中性子回折法が適用され、次に、面全体の σ_y を測定するために Contour 法が適用された。

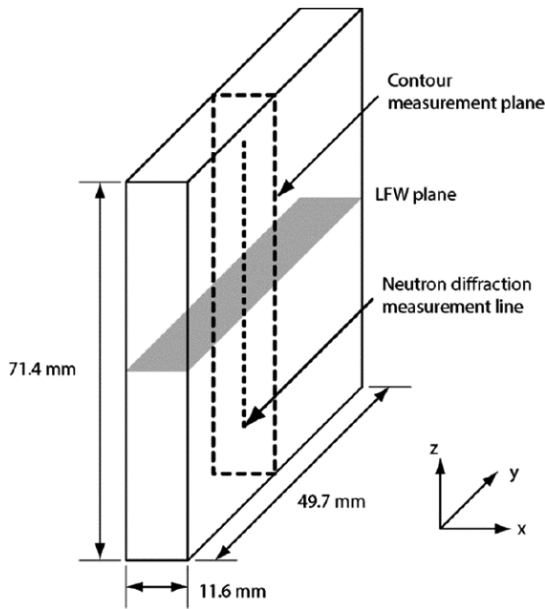


図7 LFW 試験体の形状と測定位置⁽¹⁾

図8は Contour 法により測定された2次元残留応力分布のプロットを示す。LFW 近くに高い引張残留応力の領域が存在する。ピーク応力は約 750MPa であるが、継手から遠ざかるにつれて急激に減少し、小さな圧縮応力となる。

中性子回折法測定が実施されたラインに沿う測定結果と比較したものが図9である。全体的に二つの測定技術の間には非常に良い相関がある。中性子回折法データは溶接中心で若干、高いピーク応力を示す(750MPa に対して 800MPa)。両測定の引張応力の領域幅は非常に似通っている。この LFW の例は、Contour 法は非常に高い応力であっても正確な結果を得ることができることを実証している。

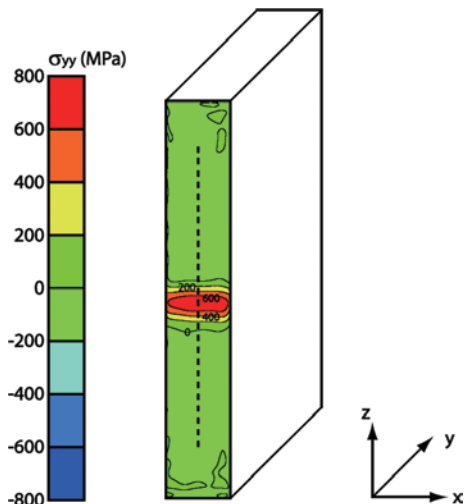


図8 Contour 測定面上で測定された残留応力の2次元マップ⁽¹⁾

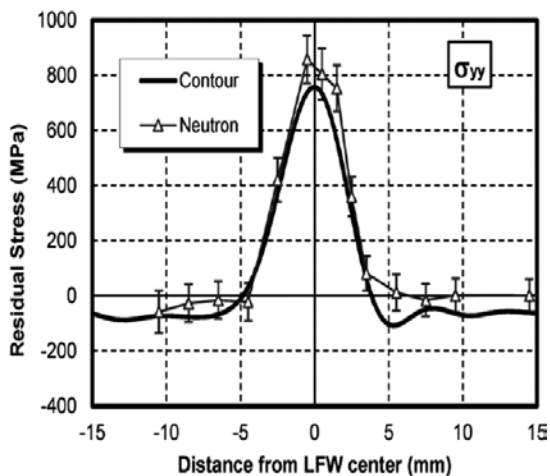


図9 Contour 法と中性子回折法により測定された残留応力を比較するラインプロット⁽¹⁾

(3) 鉄道レール

長さ 76cm のパライト鋼製のレール試験体(新品レールと 23 年間使用されたレール)の軸方向残留応力が測定されている。試験体は、WEDM により直径 0.25mm の真ちゅうワイヤを用いて二つに切断された。切断表面は Keyence 製共焦点プローブでスキャンして Contour を測定した結果、Contour の山から谷の範囲は約 75 μ m であった。応力は、切断面の初期状態を

平面とし、測定された Contour の符号を逆にして 3D 弾性 FEM 解析モデルの切断面に強制的に与えることにより計算された。

図 10 に計算結果を示すが、この応力マップは多くのことを示唆している。新しいレールは、ローラー圧延による永久変形に起因して複雑な応力パターンとなっている。応力は準表層部にピークがあり、レールの頂部と底部で引張応力である。ウェブと底部の横方向領域内に、これらの引張応力とバランスして釣合う圧縮応力が存在している。

23 年間使用されて摩耗したレールの結果は、応力が大きく変化したことを示している。車輪との接触領域部は大きな圧縮応力となっているが、これは、他の測定技術でも観察されていたことである。しかし、Contour 法による測定の結果は、これまで実験的には観察されなかった変化を明らかにしている。頂部の引張応力が増加している。これは、傾斜した車輪の接触による塑性流れに起因しているものと解釈され

ている。また、レール底部の横方向領域で圧縮応力が増大したことも示されている。これは、レールは時間経過とともに高さが減少することが知られており、塑性変形に起因するものと考えられている。

6. Contour 法の性能と制限

Contour 法は、対象物が大きい場合であっても残留応力の 2D マップを測定できる点では唯一のものである。最善の試験条件における測定の不確かさは、発表されたすべての文献を評価した結果、鋼で 30MPa、アルミで 10MPa よりも小さいとされている。

(1) 表面付近（端部）の不確かさ

測定表面の端部付近の応力は、応力場の性質や表面変位測定およびデータ処理の影響により、内部よりも測定不確かさは大きい。不確かな領域は、一般に、表面から深さ方向に約 0.5mm の範囲である。

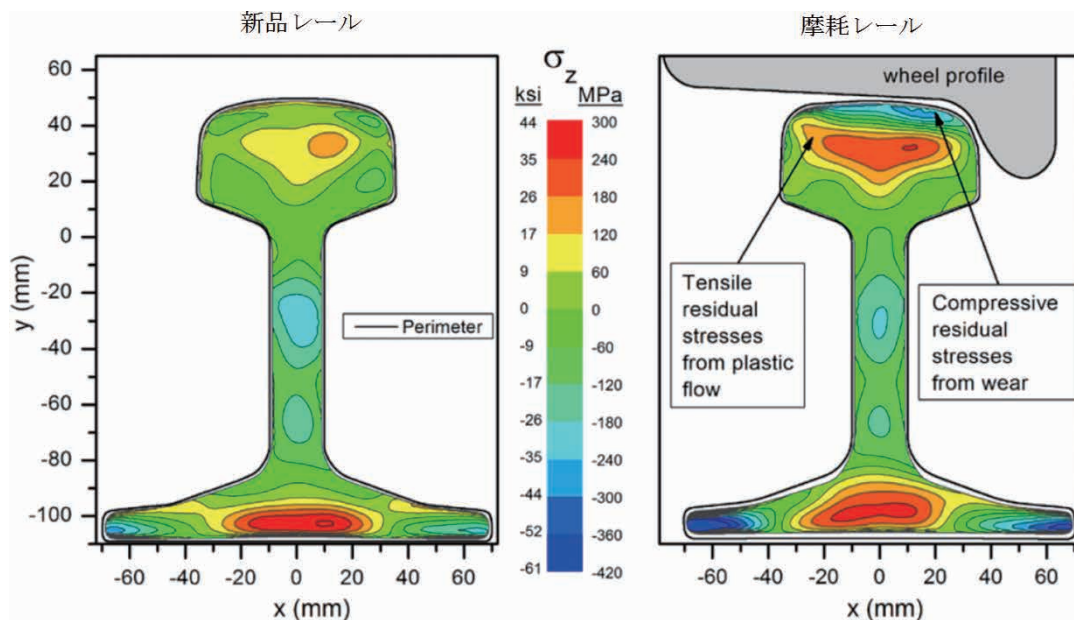


図 10 レールの軸方向残留応力測定結果⁽¹⁾

(2) サイズ依存

Contour 法は一般に大きな部品に適している。Contour 法は、ひずみではなく変位が必要なため、表面形状を測定する。与えられた応力分布に対して、Contour 法の変位は部品サイズに比例する。そのため、大きな部品は他の条件が同じであるときは、小さな部品よりも Contour 測定は容易である。

現在の技術では、合理的な結果が得られる山と谷の間の最少 Contour は 10 ~ 20 μm である。

(3) 解析における平面の仮定

部品の変形形状は、図 2 の Step C ではモデル化されない。工業用材料では変形は極めて小さく、解析は線形なので、この Step の出発点においては、切断面は平面と考えて良いからである。

(4) 部品の対称性

二分割された部品の Contour を平均することは、それらの剛性が同じであるとの仮定に基づいている。均質な材料では、対称な部品が正確に二分割されたときは、この仮定を確かに満足する。実用上は、部品の剛性が切断面の変形に重大な影響を与える領域内で対称であることだけを要求しており、この仮定は切断表面から Saint Venant (サンブナン) の代表長さの 1.5 倍を超えない範囲まで拡張することができる。代表長さは、多くの場合、部品の厚さであり、最大断面寸法を採用することが望ましい。

(5) ふくらみ誤差

切断プロセスでは、一定幅 w で切断加工するが、加工が進むにつれて応力が解放され、切断端部が変形する。これは、除去された材料の幅が、部品の元の状態に対して相対的に測定された場合において減少することを意味する。したがって、図 2 の Step C のように切断面を平面に強制的に戻すことは、部品を元の位置に戻

すことにはならないので、応力計算における誤差要因となる。ふくらみ効果は二つの部品で対称であり、平均化はされない。ふくらみ誤差は部品をしっかりとクランプすることで最小化することができる。

(6) 塑性

すべての応力解放法 (DHD 法、穿孔法など) と同様に、Contour 法は残留応力が解放されたとき、材料は弾性的に除荷するという仮定を必要とする。切断チップでの応力集中は局所的な降伏を引き起こし、それが測定される Contour に影響を及ぼし、誤差の原因となる。塑性誤差はシミュレーションが難しく、わずかに 2 件の塑性効果に関する研究論文が発表されているのみである。簡単な 2D FEM によるパラメータ研究では、Contour 法の塑性誤差は比較的低いことが報告されている。しかし、降伏点を超える残留応力を有する試験体による研究では、大きな塑性誤差を示している。

塑性の可能性を評価するときに、測定残留応力値と降伏強度を比較することになるが、この際に注意すべき点が三つある。一番目に、残留応力を生成するプロセス内では、ひずみ硬化や温度の影響により降伏や誤差に関する特性が大いに変化していることである。二番目に、測定残留応力値は一般に単軸応力成分であるが、Von Mises の等価応力で降伏強度と比較されるべきで、等価応力は個々のピーク応力成分よりも低い。三番目に、切断チップの降伏はすべての解放された残留応力の統合効果によりもたらされ、解放残留応力の累積効果による応力拡大係数によって評価できる。この統合効果は、ピーク応力よりも応力分布に依存し、残留応力は力の釣合いを満足しなければならず、それにより、圧縮領域が引張領域を緩和することになるので応力拡大係数が低くなる可能性がある。

7. おわりに

Contour 法は、標準的な工場設備を使用し、関心のある面に垂直方向に作用する残留応力の 2D マップが得られるので、他の残留応力測定技術にはない優れた特徴を有する魅力的な技術である。本稿では一つの応力成分を測定する方法について紹介したが、複数の応力成分を測定するため、二つの先進的な方法が実施されている。一つは複数切断 (Multi-cut) 法であり、測定の重ね合わせにより複数の応力成分の測定に適用されている。もう一つは、複数切断の代わりに複数の測定法を用いている。Contour 測定後、電解研磨により切断面の WEDM 影響層を除去し、切断面内の応力を X線回折法または穿孔法により測定する。ただし、これらは基本的に点測定であり、応力分布のマッピングは難しい。

Contour 測定では、高品質の切断と、切断中の塑性の制御が高精度の残留応力測定結果を得るために重要である。本稿ではこれらについて概要を述べたのみであり、参考文献 (2) に詳しく記載されているので、参考とされたい。

なお、種々の溶接構造物に対して、Contour 法と DHD 法による測定結果の比較がなされており、両者は非常に良く一致している。

当社では、本技術についても、The Open University や VEQTER Limited に委託することにより対応が可能である。ただし、出張測定はできないので、試験体を英国に送る必要がある。

参考文献

- (1) M. B. Prime and A.T. DeWald : The Contour Method, Chapter 5 in Practical Residual Stress Measurement Methods, G. S. Schajer, (ed.), Wiley-Blackwell, 2013, pp.109-138
- (2) Forough Hosseinzadeh, Jan Kowal, Peter John Bouchard : Towards good practice guidelines for the contour method of residual stress measurement, J Eng., 2014
- (3) VEQTER Limited ホームページ : <http://www.veqter.co.uk/>
- (4) H. Bueckner : Novel principle for the computation of stress intensity factors, Zeitschrift fuer Angewandte Mathematik & Mechanik 50 (9), 1970, pp.529-546



フェロー 博士 (工学)、技術士 (機械部門)、環境計量士 (騒音・振動関係)、一般計量士、JSNDI ひずみ測定・レベル 3

三上 隆男

TEL. 03-6404-6583
FAX. 03-6404-6044



計測事業部
計測技術部
鈴木 優平

TEL. 045-791-3518
FAX. 045-791-3542