

コンター法による部材内部の残留応力測定技術

高倉 大典^{*1} 深澤 大志^{*2}
 Takakura Daisuke Fukazawa Hiroshi

部材内部の残留応力を測定する場合、ひずみゲージを用いた切断法や DHD 法、あるいは中性子回折法といった限られた手法しか適用できず、また、これらの手法で測定するにしても、測定に要する手間やコストが実施の障害となっている。2000 年頃に米国ロスアラモス国立研究所で考案されたコンター法と呼ばれる残留応力測定技術は、部材内部の残留応力分布を 2 次元マップとして測定できる手法であり、特殊な装置を必要としないため比較的容易に部材内部の残留応力分布が測定可能な手法として注目されている。本稿では、測定原理や測定事例を中心にコンター法を用いた残留応力測定手法の概要について紹介する。

キーワード：コンター法、内部、残留応力、2 次元マップ、溶接、表面処理

1. はじめに

構造物の疲労強度評価やき裂進展解析による余寿命診断など、構造健全性を評価するためには、構造物に生じている残留応力を精度良く把握することが必要である。残留応力の計測には図 1 に示すような種々の手法⁽¹⁾が用いられるが、それぞれの手法には計測深さ (Penetration) や空間解像度 (Spatial Resolution) に違いがあり、また、計測に要

するコストにも大きな差があるため、目的に合わせて適切な手法を選定する必要がある。この図からわかるように、残留応力計測で広く用いられる X 線回折法 (X-ray) は表面から深さ数十 μm 程度、穿孔法 (Hole drilling) でも深さ 2mm までしか計測できず、深さ数 cm 以上の内部応力を計測する場合、切断法 (Sectioning) や DHD 法 (Deep Hole Drilling)、中性子回折法 (Neutron diffraction) や今回紹介するコンター法 (Contour Method) といった限られた手法を用いることが多い。

切断法はひずみゲージ周辺をサイコロ状に切断したときの解放応力の平均値を計測する手法であるため、内部残留応力の詳細な分布の計測には適さないほか、切断に手間を要するためコスト面で不利である。一方、中性子回折法には中性子源として原子炉が必要となるほか、DHD 法も計測に特殊な装置を必要とするため、コストが高くなる課題がある。本稿では、計測に特殊な装置を必要

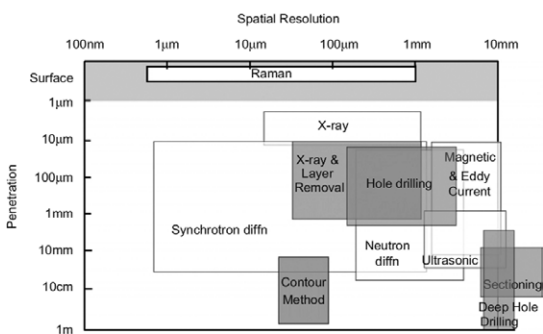


図 1 残留応力計測法の比較⁽¹⁾

*1：計測事業部 計測技術部 福浦グループ 次長
 *2：計測事業部 計測技術部 福浦グループ

とせず、また材料内部の残留応力の2次元分布が計測可能な手法として近年関心を集めているコンター法について紹介する。

2. コンター法の原理

コンター法は、2000年頃に米国ロスアラモス国立研究所のPrimeら⁽²⁾⁽³⁾によって考案された比較的新しい残留応力計測手法であり、対象を計測位置で切断することで、切断面法線方向の残留応力の2次元マップが得られる手法である。図2にコンター法の計測原理を示す。図中のAは、部材に残留応力が生じている計測前の状態であり、X軸方向中央の縦線位置が残留応力を測定しようとしている位置を示している。Bは測定位置で切断を行い、X方向の残留応力が解放されることで切断面に変形が生じている様子を示している。Cは切断で生じた変形形状を持つ部材の切断面を元の平面に戻す操作を示しており、Aの状態はBとCの重ね合わせで表すことができる、というのがコンター法の原理である。

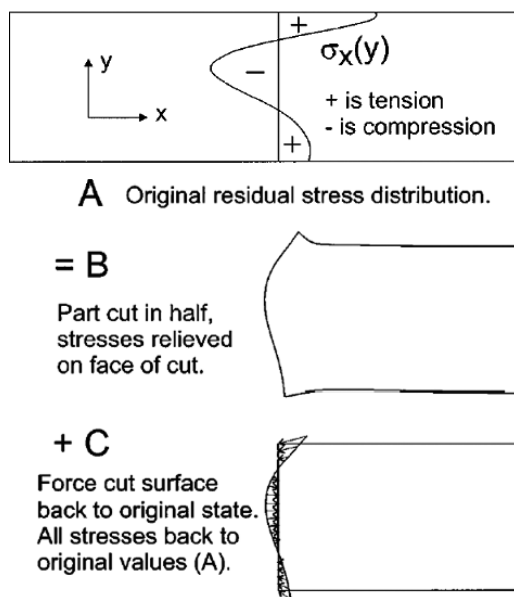


図2 コンター法の原理⁽³⁾

3. コンター法による残留応力計測手順

コンター法による残留応力の具体的手順は、①部材の切断、②切断面の変形形状計測、③切断面形状を平面に戻すFEM(有限要素法)解析の3ステップから成る。コンター法では、切断プロセスで除去される層の厚さは均一であることが仮定されている。また、切断によって部材の切断面に塑性ひずみが導入されないことを前提としており、最も適した手法としてワイヤー放電加工が用いられている。切断面は残留応力が解放されることで圧縮応力状態にあった部位は元の位置より膨らみ、引張応力状態にあった部位は元の位置よりへこむ変形を示す。この切断面に生じる山谷状の変形の高低差は10 μ mから100 μ m程度しかなく、切断面の変形計測には高精度な計測機が必要であるため、3次元座標測定器(Coordinate Measuring Machine : CMM)が用いられることが多いが、レーザ変位測定器が用いられている例も見られる。切断前の部材の残留応力分布は、計測した変形形状を有するFEMモデルを用いて切断面が平面になるように強制変位を付与する解析を行うことで算出される。

4. コンター法の妥当性検証

Primeらは、FEMを用いた解析的手法および実験的手法でコンター法による残留応力計測の妥当性を検証している。解析的検討⁽²⁾では、梁のFEMモデルに二次関数状の初期応力分布(図3のKnown stress)を与えたうえで、①梁の右半分のFEM要素を削除する切断模擬ステップ、および②切断面上の節点を元の平面に強制変位させる残留応力同定ステップにてコンター法の計測をFEM解析で模擬している。②で得られる切断面の法線方向応力分布は、図3に示すように初期応力分布ときれいに一致する結果となることから、コンター法が残留応力計測手法として妥当であることを示してい

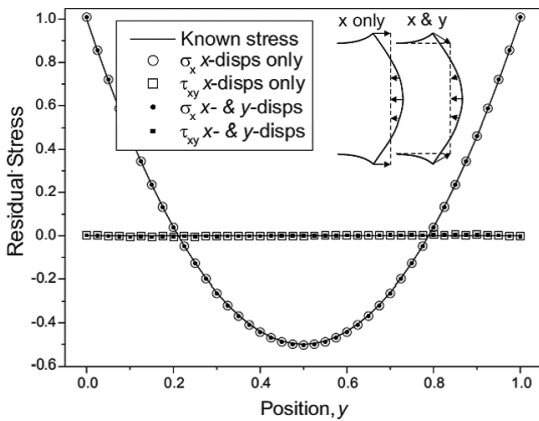


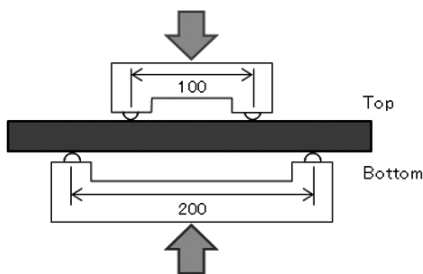
図3 コンター法の解析的検証⁽²⁾

る。また実験的検討⁽²⁾⁽⁴⁾では、オーステナイト系ステンレス鋼の4点曲げ試験体を対象に、4点曲げ試験の模擬解析結果や中性子回折法などの他の残留応力計測結果と比較して、コンター法の計測結果が同等の結果となることを確認している。

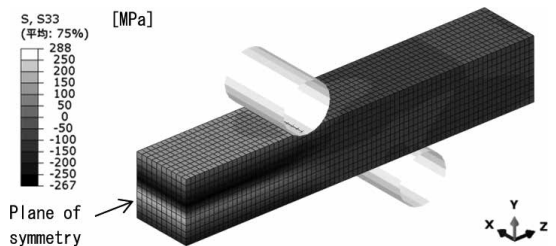
筆者らも図4に示すようにSM490の角棒(25×25×300mm)を用いて4点曲げ試験とその試験を模擬したFEM解析を行い、コンター法による残留応力計測結果をFEM解析結果と比較するとともに、X線(XRD)や穿孔法(Incremental Center Hole Drilling: ICHD)でも残留応力計測を行って、それらとの比較によりコンター法の妥当性を確認した⁽⁵⁾。図5にコンター法を用いた残留応力計測結果とFEM解析およびその他の手法を用いた残留応力計測結果との比較を示す。図より、試験体のBottom側でコンター法の計測結果が他の結果と異なる傾

向となっているが、これはワイヤー放電加工時にワイヤーの出口側でバリが生じた影響でコンター法の残留応力計測結果に局所的な乱れが生じたことが原因と考えられ、当該部以外の場所ではFEM解析結果やその他の計測手法で得られた残留応力値とおおむね一致する結果が得られたことから、コンター法による残留応力計測結果は妥当であることが確認できた。

コンター法は切断面に対して法線方向の残留応力を計測する手法であるが、切断した部材をさらに切断面に垂直な面で切断するマルチプルカットと呼ばれる手法を用いることで、切断面の交線上的については2方向の残留応力成分の計測が可能となる。図6に板厚40mmの板のSEDAR-TIG溶接試験体を対象にマルチプルカットを適用した事例⁽⁶⁾を示す。本事例では、試験体を図6(a)に示すCut plane 1の位置で切断した後、片側をCut plane 2の位置で切断してコンター法で計測した。図6(b)にCut plane 1とCut plane 2の交線位置における、溶接線方向残留応力(Longitudinal)と溶接線直交方向残留応力(Transverse)の板厚方向分布をコンター法とDHD法で計測した結果の比較を示す。図より、コンター法とDHD法とで100MPa程度差が見られる箇所はあるが、両者はおおむね一致しており、マルチプルカットを用いたコンター法は妥当であると考えられる。

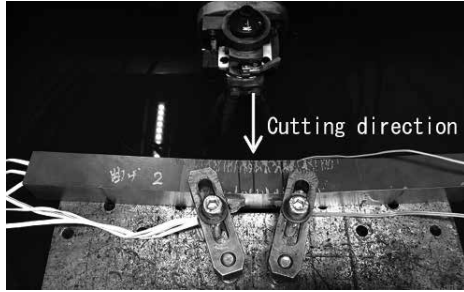


(a) 4点曲げ試験概要図

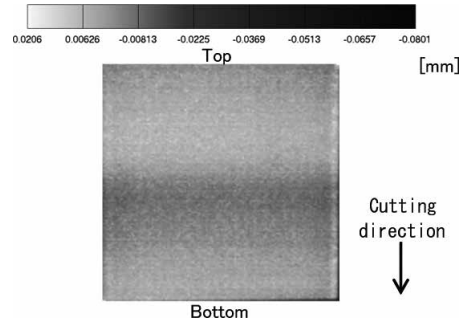


(b) 4点曲げ試験模擬解析(1/2対称モデル)

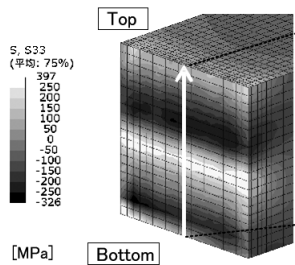
図4 SM490角棒の4点曲げ試験とその模擬解析結果



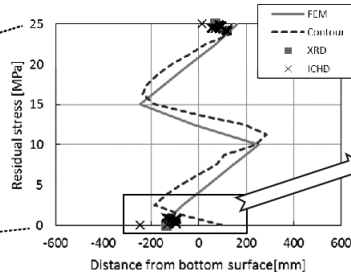
(a) 4点曲げ試験体のワイヤー放電加工による切断



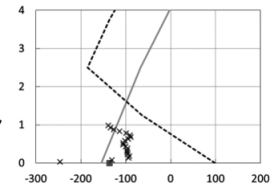
(b) 切断面のCMM計測結果(面外変位分布)



(c) 長手方向残留応力計測結果

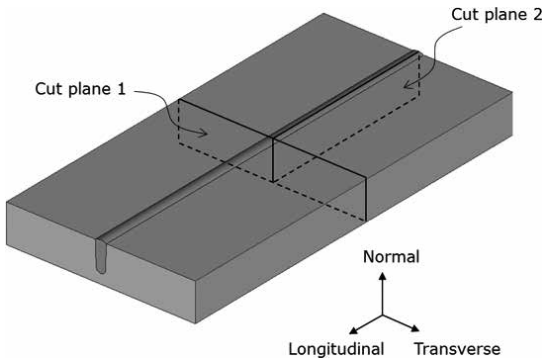


(d) 残留応力解析と計測結果の比較

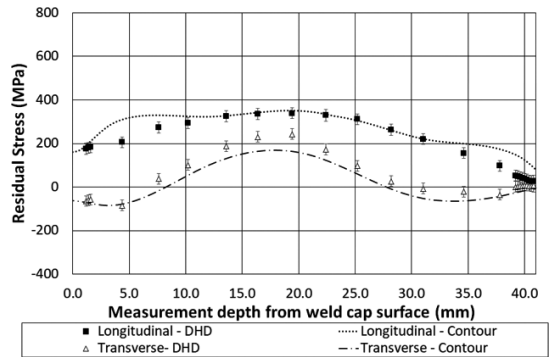


(e) (d)の底面近傍拡大図

図5 4点曲げ試験体のコンター法による残留応力計測



(a) 溶接試験体のコンター法計測位置



(b) 溶接線中央での残留応力の板厚分布比較

図6 SEDAR-TIG 溶接試験体のコンター法とDHD法の計測結果の比較

5. コンター法による残留応力計測事例

コンター法は、部材内部の残留応力分布を計測する手法であることから、溶接部近傍の残留応力計測に多く用いられている。Primeら⁽⁷⁾は、板厚12.5mmの鋼材のTIG溶接部や板厚37mmの压力容器用鋼板のサブマージアーク溶接部、φ12.7mmのSUS316LとA1100のイナージャ溶接部(図7参照)

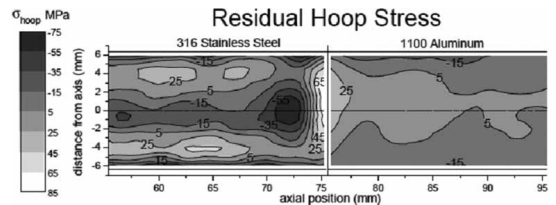


図7 SUS316LとA1100の溶接部の残留応力計測結果⁽⁷⁾

など、種々の溶接部の残留応力計測にコンター法を適用している。また、Xieら⁽⁸⁾は、溶接部の残留応力分布が後熱処理によってどのように応力緩和していくかの確認にコンター法を用いている。

コンター法を用いた残留応力計測は、ワイヤー放電加工機で切断できるサイズであれば基本的に板厚の制限は無いが、前述したように切断によって部材の切断面に塑性ひずみが導入されないことを前提とした手法であるため、切断時に塑性ひずみが生じると計測結果の誤差要因となる。Wooら⁽⁹⁾は、80mmの板厚の低炭素鋼のフラックスコールドアーク溶接部の残留応力計測にコンター法と中性子回折法を適用し、両者の結果を比較している(図8参照)。それによれば、コンター法により得られた残留応力は、中性子回折法に近い分布が得られているが、中性子回折法に比べ最大で

200MPa程度残留応力が低めに出る結果となっており、その原因としてワイヤー放電加工を用いて板を切断する際に切断面近傍で局所的に塑性ひずみが生じた可能性を指摘している。一方、Traoreら⁽¹⁰⁾は、コンター法の計測精度悪化の要因となる切断時の塑性ひずみ生成を抑制する手法として、計測対象を端から切断するのではなく、先行孔を開けてそこから切断を開始する手法を提案した。ビードオンプレート溶接した板厚20mmの鋼板に先行孔を開けて切断する手法を用いることで生じる塑性ひずみの大きさが抑制され、コンター法で計測した残留応力分布が中性子回折法で計測した結果と近い分布が得られることを示している。筆者ら⁽¹¹⁾もビードオンプレート溶接を施した板厚25mmの鋼板を対象に先行孔を開けて、板を2回に分けて切断し、切断時の塑性ひずみの影響を抑

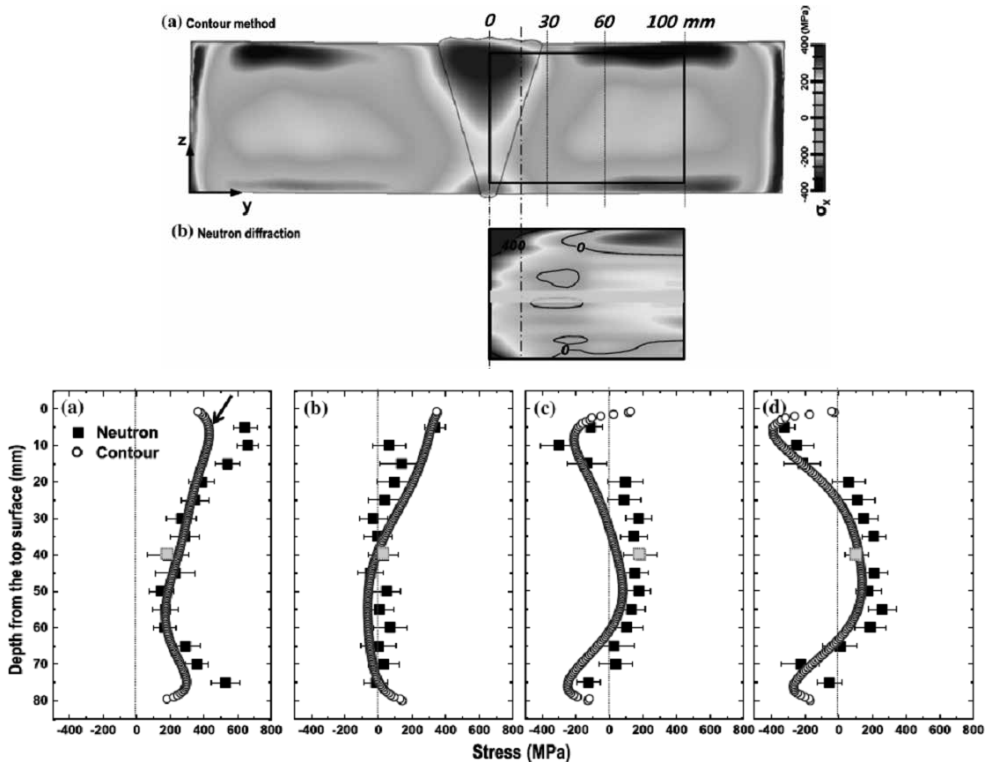


図8 コンター法と中性子回折法の溶接線方向応力計測の比較⁽⁹⁾
(上：2次元マップ、下：左から溶接線中心から0、30、60、100mm位置での板厚方向分布)

制する先行孔の位置を検討した。先行孔の位置を板の端部付近にした場合 (case1) と溶接部の近く (case2) の2通りとし、図に示した順序で板を切断して残留応力計測結果を比較した。その結果、**図9**に示す通り case2のほうがFEM解析結果に近くなり、また、溶接線中心を挟んで対称に近い分布となることが確認できた。

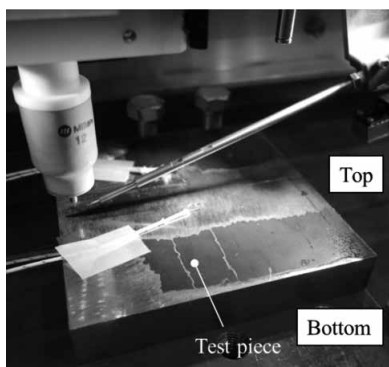
Zhangら⁽¹²⁾は、航空機部品を機械加工する際に生じる変形をFEMにより計算している。解析では、コンター法を用いて計測した部材の初期残留応力を部材のFEMモデルに与え、機械加工の模擬解析を行って変形を計算することで、変形が小さくなる機械加工方法について検討している。

このほか、コンター法を用いた残留応力計測は、焼き入れなどの熱処理や、ピーニングといった表面処理後の部材内部の残留応力分布計測にも用いられている。また、厚板だけでなく薄板や小さな部品

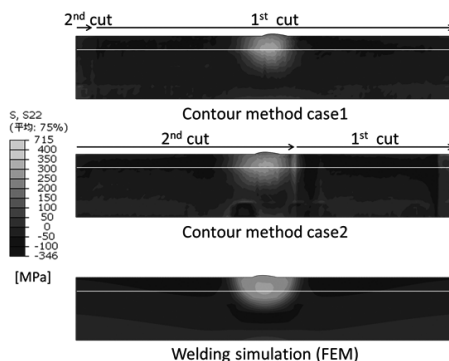
への適用も進められており、今後コンター法の適用可能な範囲はますます広がっていくと思われる。

6. まとめ

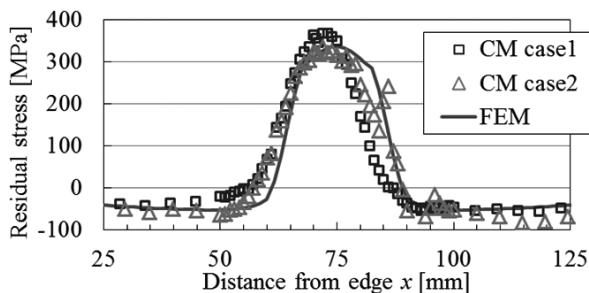
コンター法は、これまで計測できなかったような表面から深い場所における残留応力分布の計測手法として欧米を中心に広く使われており、主に溶接部の残留応力計測に適用されてきた。近年は、熱処理やピーニングなどの表面処理部の計測や薄板の計測など、表面近傍の応力測定にも用いられてきており、加工によって生じる残留応力を計測することで、より適切な加工条件の検討が可能となってきている。また、2次元マップとして残留応力分布計測結果が得られることから、溶接シミュレーションをはじめとした残留応力解析の妥当性確認のための比較対象としてコンター法が期待されており、今後適用が進むものと思われる。



(a) 溶接試験体



(b) 溶接線方向残留応力分布の比較



(c) 溶接線方向応力の板幅方向分布の比較 ((a)の白線位置)

図9 先行孔の位置による計測結果の違い

参考文献

- (1) P. J. Withers, M. Turski, L. Edwards, P. J. Bouchard, D. J. Buttle : Recent advances in residual stress measurement, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 85 (3) , 2008, pp.118-127
- (2) M. B. Prime and A. R. Gonzalez : The Contour Method: Simple 2-D Mapping of Residual Stresses, Proceedings of the 6th International Conference on Residual Stresses, Vol.1, 2000, pp.617-624
- (3) M. B. Prime : Cross-Sectional Mapping of Residual Stresses by Measuring the Surface Contour after a Cut, Journal of Engineering Materials and Technology, Vol.123 (2) , 2001, pp.162-168
- (4) M. B. Prime, P. Rangaswamy, M. R. Daymond, T. G. Abeln : Several Methods Applied to Measuring Residual Stress in a Known Specimen, Proceedings of the SEM Spring Conference on Experimental and Applied Mechanics, 1998, pp.497-499
- (5) 高倉、深澤 : コンタ法による曲げ試験体の残留応力計測、溶接学会全国大会講演概要、平成 30 年度秋季全国大会、2018、pp.308-309
- (6) 高倉 : 多層溶接解析とコンター法による残留応力の検証、溶接学会全国大会講演概要、平成 28 年度秋季全国大会、2016、pp.354-355
- (7) M. B. Prime, M. R. Hill, A. T. DeWald, R. J. Sebring, V. R. Dave, M. J. Cola : Residual Stress Mapping in Welds Using the Contour Methods, Trends in Welding Research, Proceedings of the 6th International Conference, 2003, pp.891-896
- (8) P. Xie, H. Zhao, B. Wu, S. Gong : Evaluation of Residual Stresses Relaxation by Post Weld Heat Treatment Using Contour Method and X-ray Diffraction Method, Experimental Mechanics, Vol.55 (7) , 2015, pp.1329-1337
- (9) W. Woo, G. B. An, V. T. Em, A. T. DeWald, M. R. Hill : Through-thickness distributions of residual stresses in an 80mm thick weld using neutron diffraction and contour method, Journal of Materials Science, Vol.50 (2) , 2015, Issue 2, pp.784-793
- (10) Y. Traore, F. Hosseinzadeh, P. J. Bouchard : Plasticity in the contour method of residual stress measurement, Advanced Materials Research, Vol.996, 2014, pp.337-342
- (11) 深澤、高倉 : コンタ法による残留応力の高精度計測、溶接学会全国大会講演概要、平成 30 年度秋季全国大会、2018、pp.310-311
- (12) Z. Zhang, L. Li, Y. Yang, N. He, W. Zhao : Machining distortion minimization for the manufacturing of aeronautical structure, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol.73 (9) , 2014, pp.1765-1773



計測事業部 計測技術部
福浦グループ
次長
高倉 大典
TEL. 045-791-3518
FAX. 045-791-3542



計測事業部 計測技術部
福浦グループ
深澤 大志
TEL. 045-791-3518
FAX. 045-791-3542