

# 残留応力測定概論

## (その2：コンター法による残留応力測定)

高倉 大典<sup>\*1</sup>  
Takakura Daisuke

前号<sup>(1)</sup>で述べたように、部材内部の残留応力は部材加工における形状精度や製品寿命に大きく影響を及ぼす。そのため残留応力の適切な予測が非常に重要となっており、特に近年は部材内部の応力測定ニーズが高まっている。本号では、厚板の電子ビーム溶接試験体の残留応力測定を例に挙げ、コンター法について説明する。

キーワード：残留応力測定、コンター法、DHD法、破壊、応力解放法、厚板

### 1. コンター法の残留応力測定原理および特徴

残留応力測定には図1に示すようにさまざまな手法が用いられており、測定の目的など種々の条件から適切な測定法を選定する必要がある。今回説明するコンター法は、図2に示すように対象を測定位置で切断することで生じる切断面の微小な面外変形形状を詳細に計測し、計測した切断面形

状を平面に戻す計算によって切断前の残留応力を測定する手法<sup>(2)</sup>であり、切断面の法線方向応力が二次元マップとして得られるという大きな特徴を持つ。

### 2. コンター法による厚板の残留応力測定事例

#### 2.1 測定対象

検討対象は図3に示す厚板の円筒容器（外径

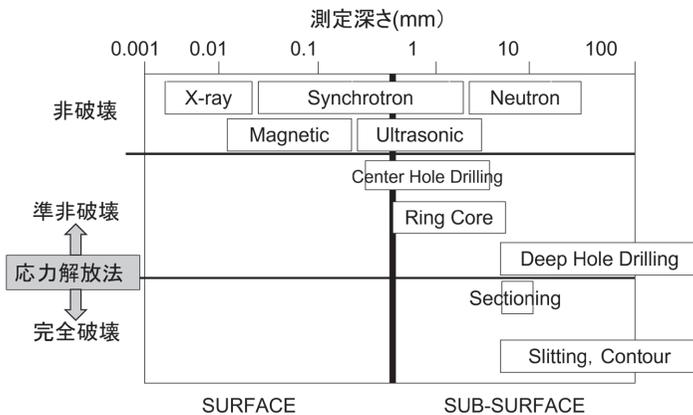


図1 代表的な残留応力測定手法

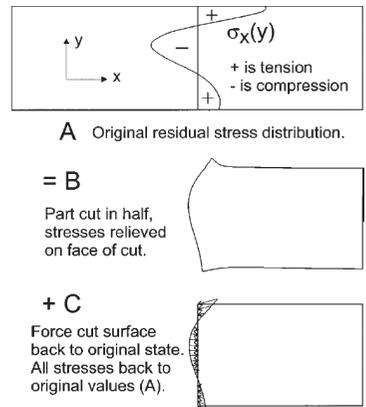


図2 コンター法の測定原理<sup>(2)</sup>

\*1：計測事業部 計測技術部 磯子グループ グループ長

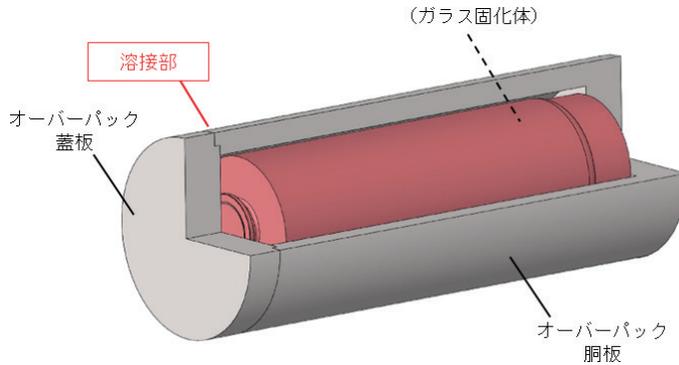


図3 検討対象（高レベル放射性廃棄物の地層処分容器：オーバーパック）

590mm、高さ 1555mm) で、厚さ 65mm の円筒胴と厚さ 100mm の蓋を溶接する構造となっている。本容器は高レベル放射性廃棄物(ガラス固化体)の地層処分に供する容器として検討されているものであり、容器の応力腐食割れに対する長期健全性確保のため、溶接部の残留応力予測および残留応力を低減する溶接施工法の選定が重要な課題となっている。

本検討では、溶接施工性等の観点から電子ビー

ム溶接を用いることとし、図4に示す蓋部模擬溶接試験体を用いて入熱条件や溶接深さを変えた7ケースについて溶接試験を行った。また、有限要素法を用いてそれぞれの試験条件を模擬した溶接残留応力解析を実施し、溶接部表面および表面近傍の試験体内部の残留応力が低くなる条件を選定して、残留応力測定に供する試験体とした。表1に選定した溶接試験条件を、図5に溶接部の断面マクロ写真を示す。

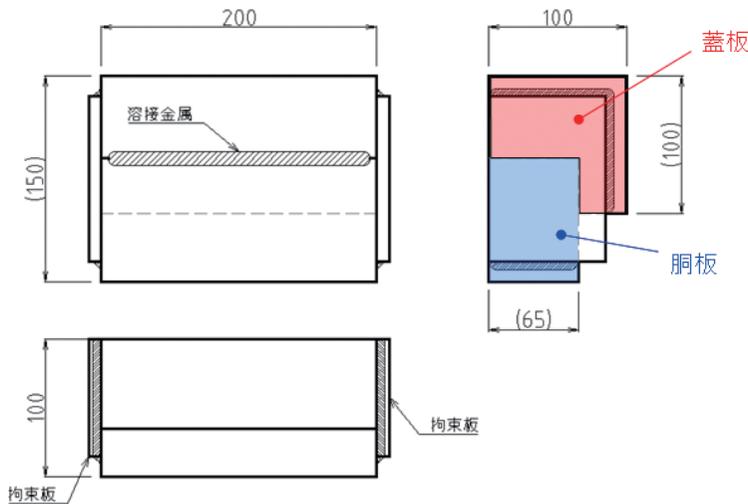


図4 蓋部模擬溶接試験体

表1 残留応力測定に供する溶接試験体の溶接条件

溶接深さ [mm]	ビーム電流 [mA]	加速電圧 [kV]	ビーム出力 [kW]	溶接速度 [mm/min]
65	190	150	28.5	400

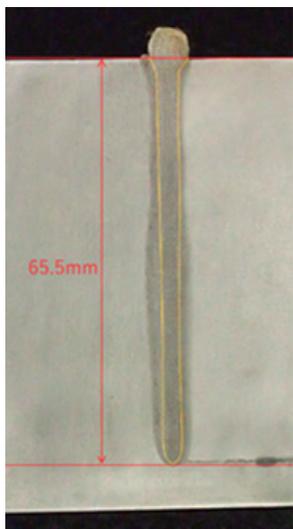


図5 残留応力測定に供する溶接試験体  
溶接部の断面マクロ写真

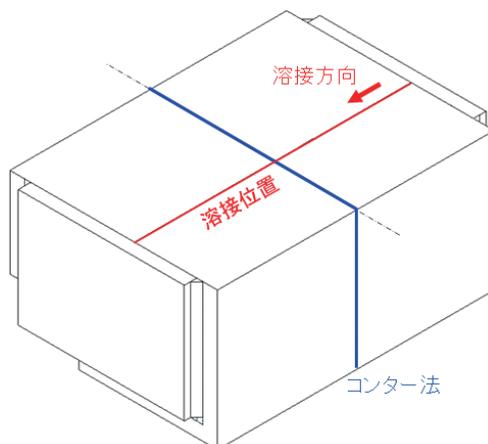
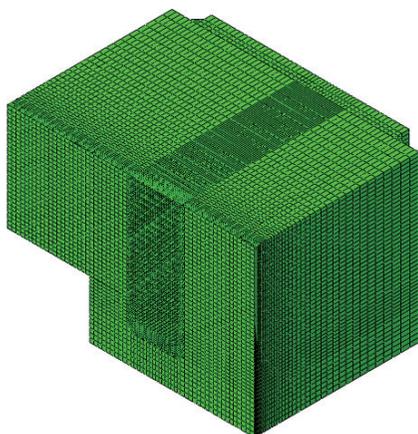


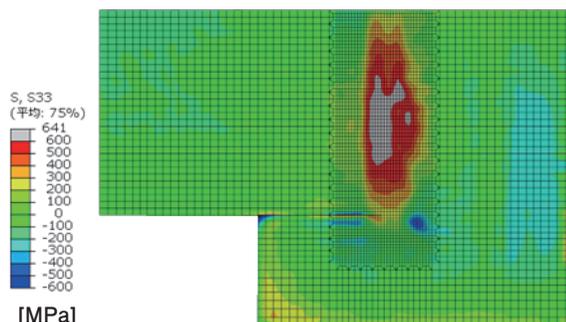
図6 コンター法による残留応力測定位置

## 2.2 コンター法による残留応力測定

コンター法による残留応力測定位置は、図6に示すように試験体の溶接方向中央断面とした。測定位置をワイヤー放電加工で切断し、三次元座標測定器で測定した切断面形状を元に、有限要素法を用いた弾性解析により溶接線方向応力分布を同定した。図7に弾性解析に用いた解析モデルと測定の結果得られた溶接線方向応力分布を示す。



(a) 解析モデル (切断後形状)



(b) 残留応力測定結果 (溶接線方向応力)

図7 コンター法による残留応力測定

## 3. 残留応力測定結果の検証

### 3.1 iDHD 法による残留応力測定

コンター法による残留応力測定結果の妥当性検証のため、コンター法による残留応力測定に供する試験体と同条件で製作した別試験体を用いて iDHD 法を用いた残留応力測定を行った。DHD 法 (Deep Hole Drilling 法: 深穴穿孔法) は前号で説明したように、応力測定位置に空けた小さな参照穴の周辺を放電加工でコア抜きし、コア抜き前後の参照穴径の変化量から残留応力の深さ方向分布を測定す

る手法(図8参照)であり、iDHD法(incremental DHD法)は溶接部のような高応力部の測定のために改良された手法である。

iDHD法による残留応力測定位置は図9に示すように溶接方向中央断面から15mmないし25mm離れた断面で溶接線中心から0mm(iDHD①)、10mm(iDHD②)、20mm(iDHD③)の3箇所とした。iDHD法による測定結果は後述する残留応力

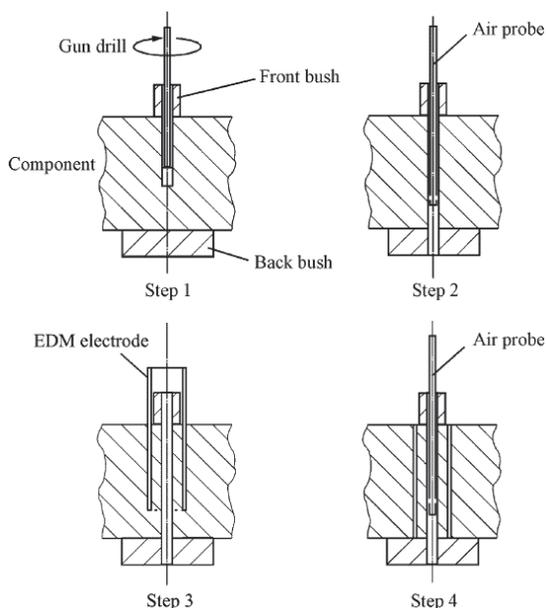


図8 DHD法による残留応力測定<sup>(3)</sup>

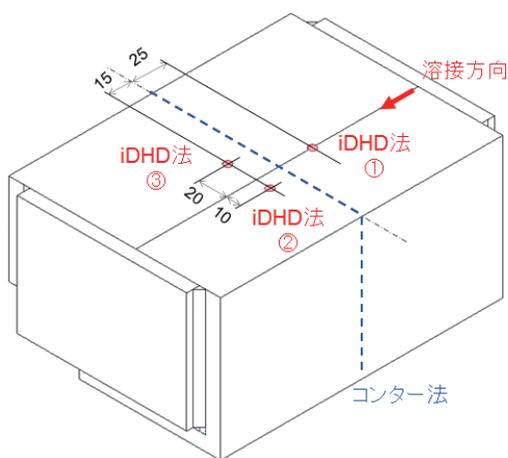


図9 iDHD法による残留応力測定位置

解析結果と併せて示す。

### 3.2 有限要素法(FEM)による残留応力解析

本検討では残留応力測定を行う試験体選定のため、それぞれの試験体を対象に溶接残留応力を解析した。ここでは当該試験体の残留応力解析について説明する。

残留応力解析は、図10に示すように試験体の拘束板も含め、溶接試験体全体をモデル化対象とした。解析には汎用FEMコードABAQUS 2019を用い、溶接入熱による非定常熱伝導解析、および熱伝導解析の結果得られる解析モデル全体の温度時刻歴データを熱荷重として与える熱弾塑性解析により溶接試験体全体の残留応力分布を計算した。ここで熱伝導解析では図5に示した断面マクロの溶け込み領域に入熱し、溶接熱源の移動とともに入熱部を移動させる非定常解析を用いた。解析モデルに与える入熱量は、図11に示す位置に設置した熱電対で測定した温度時刻歴データと、温度計測位置に該当する節点の温度解析結果が合うように調整した。図12に熱伝導解析結果(温度計測位置における温度データの比較)、図13に残留応力解析結果を示す。

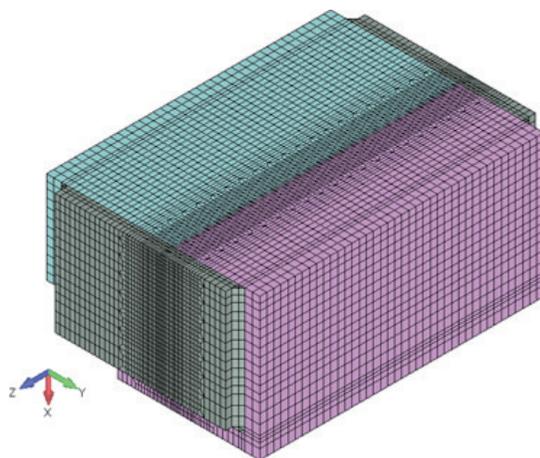
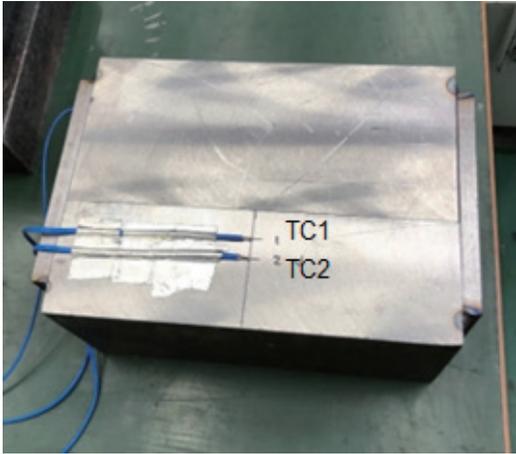
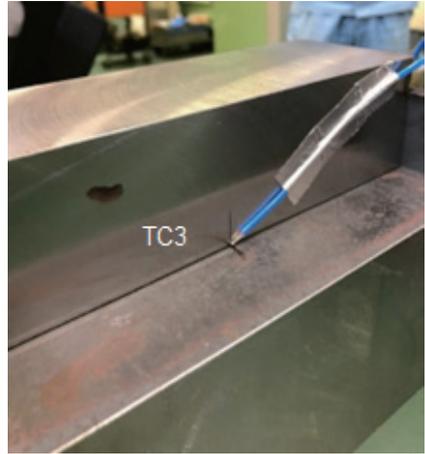


図10 残留応力解析モデル



(a) 試験体表面 (円筒容器外面側)



(b) 試験体裏面 (円筒容器内面側)

図 11 溶接試験における温度計測位置

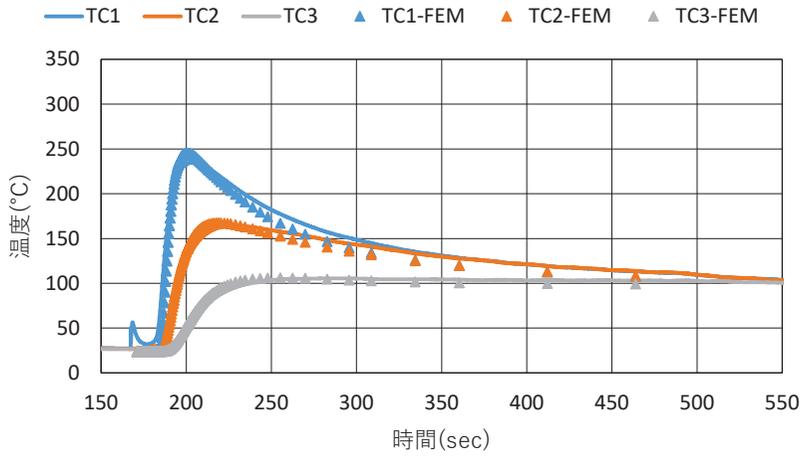
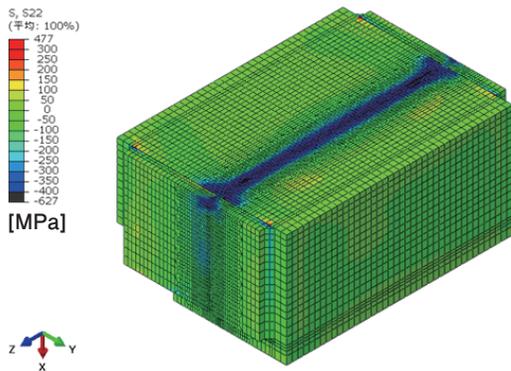
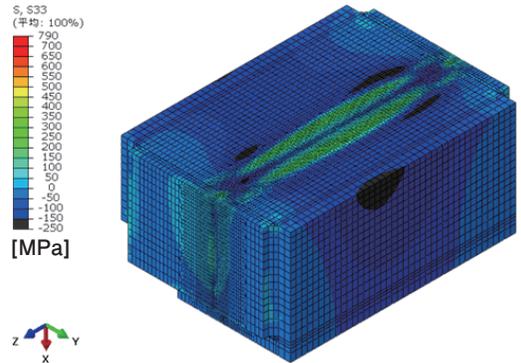


図 12 温度計測位置における温度測定結果および FEM 解析結果



(a) 溶接線直交方向応力 (Y 方向)



(b) 溶接線方向応力 (Z 方向)

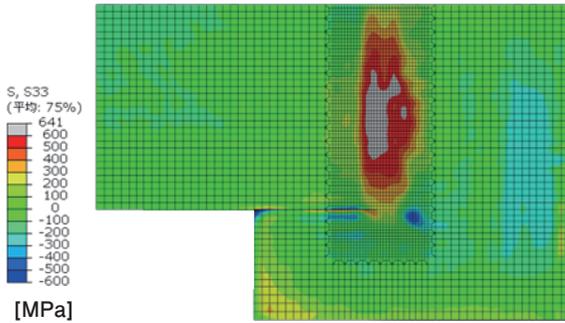
図 13 残留応力解析結果

### 3.3 残留応力解析結果および測定結果

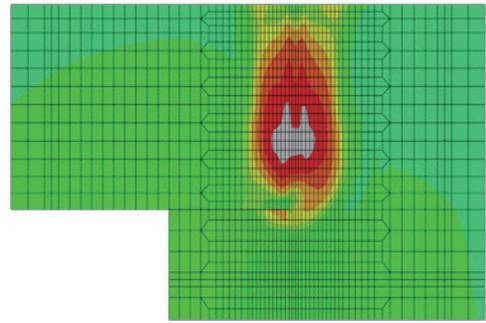
#### (コンター法、iDHD 法)の比較

コンター法で測定した試験体の溶接方向中央断面における溶接線方向応力分布、および同じ断面

での FEM 解析結果の比較を図 14 に示す。また、3 箇所での iDHD 法での残留応力測定位置における結果の比較を図 15 に示す。

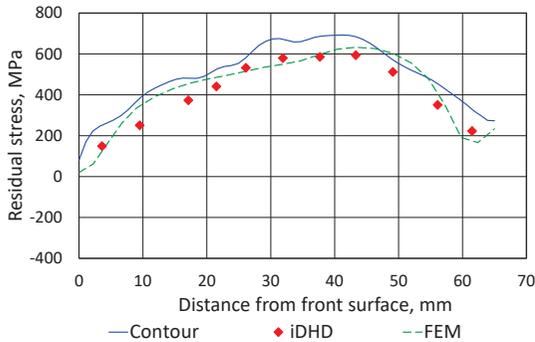


(a) コンター法

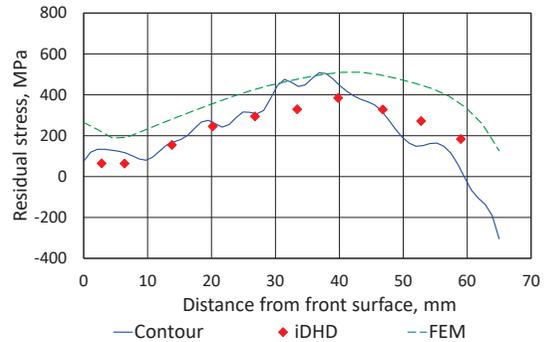


(b) FEM

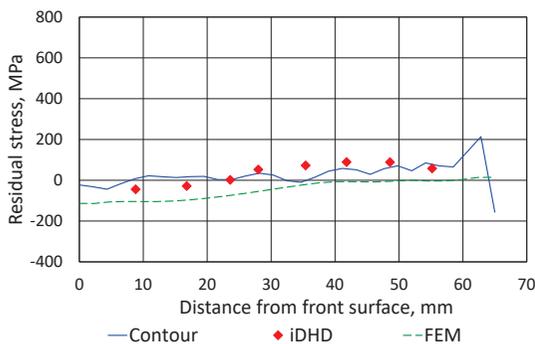
図 14 コンター法での残留応力測定結果と FEM による残留応力解析結果



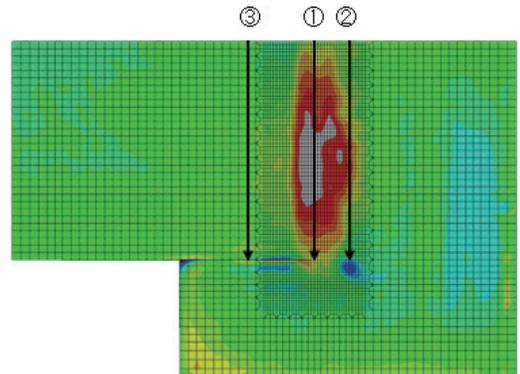
(a) iDHD ①位置



(b) iDHD ②位置



(c) iDHD ③位置



(d) iDHD 測定位置

図 15 iDHD 位置における残留応力の深さ方向分布の比較

#### 4. まとめ

厚板の電子ビーム溶接を対象にコンター法による残留応力測定を実施し、iDHD法による残留応力測定結果およびFEM残留応力解析結果と比較した。以下にその結果をまとめる。

- ①コンター法で得られた残留応力はFEM残留応力解析結果とよく似た分布となっており、溶接線中心の両脇で応力のピークが生じるという分布形状もよく一致している。
- ②iDHD法での測定箇所と比較した残留応力の深さ方向分布形状についても、コンター法とiDHD法の応力分布はよく一致している。

以上より、コンター法の残留応力測定結果は妥当であり、応力の二次元マップが得られるという意味で残留応力測定の強力なツールであると言える。

この成果は、原子力発電環境整備機構の委託により2022年度に実施したオーバーパックの溶接技術の開発の成果の一部<sup>(4)(5)</sup>である。

#### 参考文献

- (1) 高倉大典：残留応力測定概論(その1：残留応力の発生原因と種々の測定法)、IIC REVIEW、No.70、2023/10、pp.2-8
- (2) 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, 2001
- (3) A. H. Mahmoudi, S. Hossain, C. E. Truman, D. J. Smith, M. J. Paview：A New Procedure to Measure Near Yield Residual Stresses Using the Deep Hole Drilling Technique、Experimental Mechanics, Vol.49, No.4, 2009
- (4) 高倉、藤社、本間、小川、鈴木、根本：コンター法を用いたオーバーパック蓋部模擬溶接試験体の残留応力測定、溶接学会全国大会講演概要、Vol.113、2023、pp.264-265
- (5) 小川、鈴木、根本、藤社、本間、田辺、高倉：炭素鋼オーバーパックの電子ビーム溶接部における残留応力の溶接条件依存性、溶接学会全国大会講演概要、Vol.113、2023、pp.254-255



計測事業部 計測技術部  
磯子グループ  
グループ長  
高倉 大典

TEL. 045-759-2085  
FAX. 045-759-2119