

# 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)

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

種々の工業製品には、その製造プロセス(機械加工、組立、溶接、熱処理など)において製品内部に残留応力が生じ、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ことがある。また、近年さまざまな製品に用いられているプラスチックにおいても残留応力が原因となって割れが生じることが知られており、残留応力の適切な予測が非常に重要となる。

本号では残留応力の発生原因やその影響について触れるとともに、種々の残留応力測定法について簡単に説明する。

キーワード：残留応力、測定法、破壊、非破壊、準非破壊、回折法、応力解放法

### 1. 残留応力の発生原因

残留応力は外力が作用しない状態で部材内部に存在する応力のことであり、部材内部で力が釣り合った状態(平衡状態)となっている。残留応力は以下に示すように、さまざまなプロセスで局所的に生じる塑性変形や相変態に伴う体積変化、あるいは形状差や寸法差が原因となり発生する。

#### (1) 熱加工

溶接のように局所的に加熱・溶融、冷却されるプロセスにおいては、溶接部周辺に生じる急激な温度勾配によって塑性ひずみが生じるほか、溶接部の熱収縮が周辺から拘束されることによって残留応力が発生する。また、鉄鋼部材の焼入れなどの熱処理においては、冷却工程における部材表面と内部の冷却速度の差や相変態に伴って生じる体積変化が残留応力の原因となる。

#### (2) 機械的荷重

角棒の4点曲げ試験で、材料が降伏する荷重を負荷後に除荷する例を考える。角棒に生じる長手方向の応力は、荷重負荷時は上面側が圧縮応力、下面側が引張応力となり、荷重が大きくなると上下面で降伏応力を超え、応力はZ字状の分布となる。荷重除荷時には曲げ角が多少戻る変形(スプリングバック)を起こし、部材内部では力が釣り合うように応力分布が変化する(図1、図2参照)。また、研削や圧延、ショットピーニングなどの機械加工の際には、加工によって生じる塑性ひずみのほか、加工誘起変態に伴って生じる体積変化も残留応力の原因となる。

#### (3) 形状差・寸法差の矯正

図3に示すように切れ目に目違いのあるリング状の部材に外力を加えて目違いを矯正した後で合わせ面を接合したり、図4に示すように円筒状の

\*1：計測事業部 計測技術部 磯子グループ グループ長

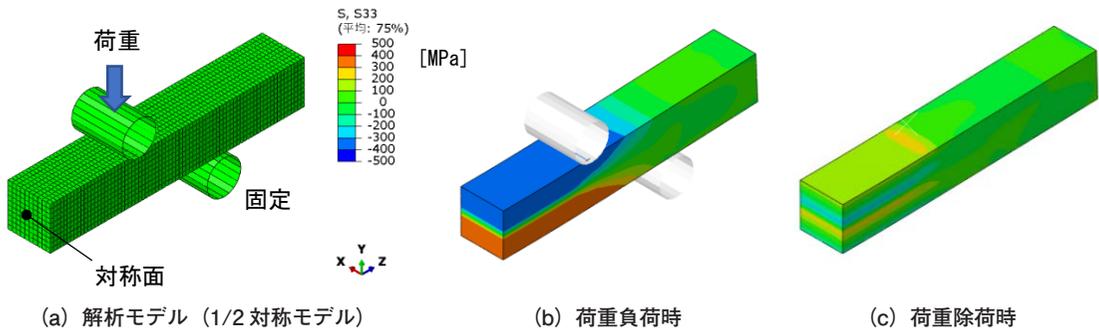


図1 角棒の4点曲げ試験模擬解析 (解析モデル図および長手方向応力分布図)

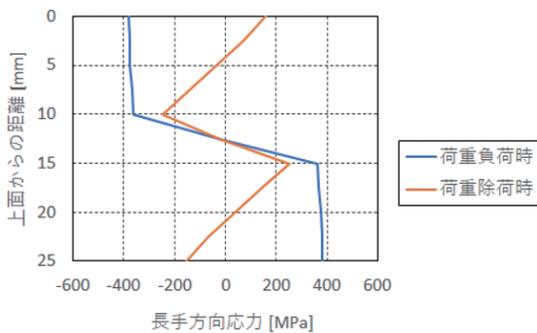


図2 角棒の4点曲げ試験模擬解析結果(対称面における長手方向応力分布)

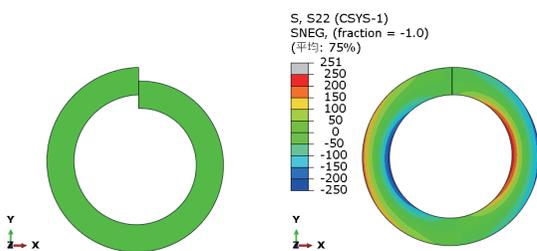


図3 目違いのあるリング

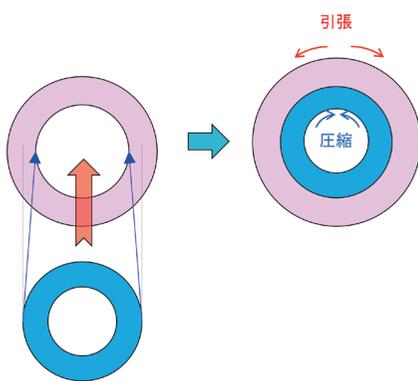


図4 寸法差のある円筒状部材の圧入

部材にその内径よりも一回り大きい外径を持つ円筒を圧入したりする場合、外力を除いた後に部材内部に応力が残留する。

## 2. 残留応力が及ぼす影響

### (1) 疲労寿命

機械構造物はその供用期間中に受ける荷重が変動することで構造物内に生じる応力も変動する。疲労破壊はこのような変動荷重によって生じたき裂が徐々に進展して破壊に至る現象であり、静的な引張強さや降伏応力よりも低い応力でも破壊してしまうことがある。疲労破壊に至る荷重の繰り返し数(サイクル数)は、変動荷重による応力振幅( $\sigma_a$ )だけでなく平均応力( $\sigma_m$ )にも影響を受け、機械構造物の設計においては、平均応力の影響を考慮した疲労限度線図<sup>(1)</sup>が用いられる(図5参照)。疲労評価において残留応力は平均応力に算入して影響を考慮する必要がある、一般に引張残留応力は疲労強度を低下させ、圧縮残留応力は疲労強度を向上させる。材料表面に小さな鉄球を打ち付けるショットピーニング、高周波焼入れや浸炭などの表面処理により部材表面には圧縮残留応力が導入されるため疲労強度が向上する効果を持つ。

### (2) 環境強度

金属材料が荷重を受けた状態で腐食環境下にあると著しく脆化<sup>ぜい</sup>して破壊してしまう。これを応力

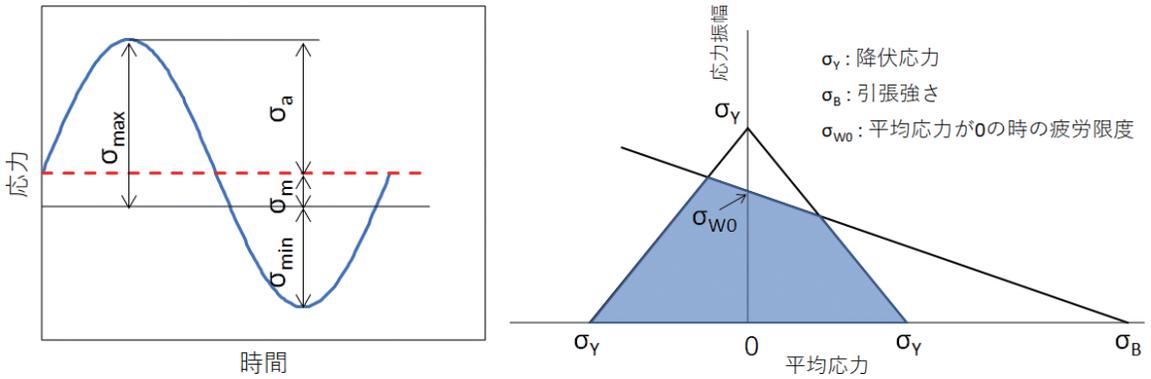


図5 疲労限度線図 (修正 Goodman 線図)

腐食割れ (SCC : Stress Corrosion Cracking) と呼び、炭素鋼だけでなく一般に腐食に強いとされるオーステナイト系ステンレスや Ni 基合金などでも生じることが知られている。

SCC は ① 材料的因子と ② 環境因子 (腐食環境)、③ 力学的因子 (引張応力) の 3 条件がそろったときに生じるため、その予防には ① SCC が生じにくい材料を使用する、② 腐食環境に置かない、③ 応力状態を改善する、ことが有効である。材料の SCC の起こしやすさは、試験片を腐食溶液中に浸漬して割れを観察する SCC 試験によって確認可能である。応力状態の改善については、応力除去焼鈍を行って引張応力の値を小さくする方法や、高周波誘導加熱を用いた残留応力の改善手法 (IHSI : Induction Heating Stress Improvement)<sup>(2)</sup> などがある。

### (3) 部材加工精度

残留応力を持った部材は内部において力が釣り合った状態にある。そのため、残留応力を持った素材を加工して製品や部品を製作する場合、力の釣り合いを保っていた断面の形状が変化するため、部材内部で力の釣り合いがとれるように応力の再配分が起こり部材に変形が生じる。この変形を事前に精度良く予測できていないと形状の修正作業を要することがある。

### 3. 残留応力測定法

以上のように、残留応力は機械構造物の疲労強度や環境強度に大きな影響を与える。したがって、構造物の信頼性を確保するには供用期間中の荷重による発生応力を適正に見積もるだけでなく、残留応力を把握しておくことが重要である。また残留応力は部材の加工精度に大きな影響を与えるため、部材を精度良く加工するためには残留応力分布を正しく把握し、適切な工作法、工作手順を選定する必要がある。

残留応力測定法にはさまざまな手法が存在する。図6に代表的な残留応力測定法を示す。測定法の選定においては、測定に要するコストや期間だけでなく、① 現地で測定するか実験室で測定するか、② 非破壊で測定するか破壊して測定する

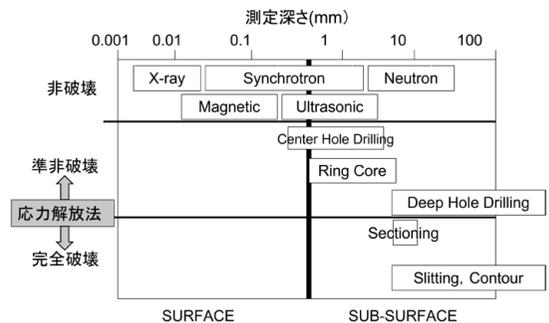


図6 代表的な残留応力測定法

か、③表面のみの測定で良いか内部まで測定するか、などの観点から適切な測定法を選定する必要がある。

### (1) 非破壊法

図6で「非破壊」に分類される X-ray (X線)、Synchrotron (シンクロトロン放射光)、Neutron (中性子) は、いわゆる回折法を測定原理とするもので、原子間距離(結晶格子間距離)を種々の光源を用いて測定する手法(図7)<sup>(3)</sup>であり、用いる光源によって測定深さが大きく変わる。X線は表面の測定にしか対応していないが、可搬装置が販売されているため実験室だけでなく現地測定も可能である。一方、放射光を用いる場合は大型放射光施設(日本では国立研究開発法人理化学研究所が運営する SPring-8)、中性子を用いる場合は大強度陽子加速器施設(日本では国立研究開発法人日本原子力研究開発機構(JAEA)と大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構(KEK)が共同で運営する J-PARC)での測定となるため、施設に測定対象を持ち込む必要があるほか、公募される研究課題に応募するなど利用には制約があるのが現状である(一部有料での一般利用も可能)。X線回折法を用いた残留応力測定は、公益社団法人日本材料学会の X線応力測定標準(鉄鋼編: JSMS-SD-5-02)や日本産業規格のばねのショットピーニング(JIS B2711:2013)の附属書 JB に規格化されている。

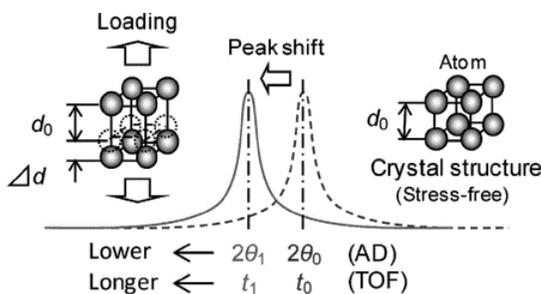


図7 回折法を用いた応力測定<sup>(3)</sup>

同じく「非破壊」に分類される Magnetic (磁気ひずみ法) は、強磁性体に応力が作用すると材料の透磁率が変化する性質(磁気弾性効果)を利用した測定手法、Ultrasonic (超音波法) は、物質内を超音波が伝播するときの音速が応力状態によって変化する性質(音弾性効果)を利用した測定手法<sup>(4)</sup>であり、いずれも可搬装置を用いた現地測定も可能である。

### (2) 完全破壊法

測定対象を完全に破壊、あるいは部分的に破壊する手法、すなわち図6で「完全破壊」および「準非破壊」に分類している手法は、いわゆる応力解放法を測定原理とするもので、測定部周辺の破壊することで解放されるひずみを用いて測定する手法である。Sectioning(切断法)は測定対象に貼ったひずみゲージの周辺をサイコロ状に切り出す手法であるのに対し、Slitting (スリッティング法) は図8に示すように放電加工で測定対象に溝(スリット)を掘ることで解放されるひずみを溝近傍の表裏面に貼ったひずみゲージで測定する手法<sup>(5)</sup>である。

Contour(コンター法)は、Sectioning や Slitting と同じ「完全破壊」法であるが、解放されるひずみをひずみゲージで測定するのではなく、測定対象を切断(通常はワイヤー放電加工)して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から切断前の残留応力を測定する手法<sup>(6)</sup>である(図9)。Contour は切断面の法線方向しか測定できないが、切断面全体の応力分布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。また、測定原理上は測定深さや試験体サイズに制限は無く、切断装置および切断面の計測装置の上限サイズによる。これら Sectioning や Slitting、Contour は測定対象を完全に破壊してしまうため、現地測定には対応しておらず、実験室での測定となる。

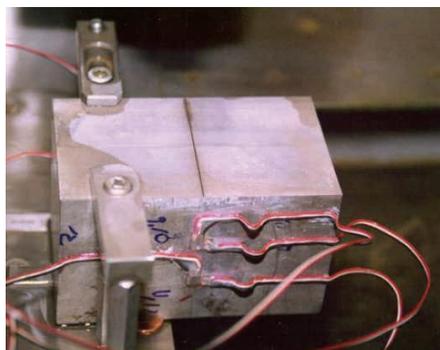
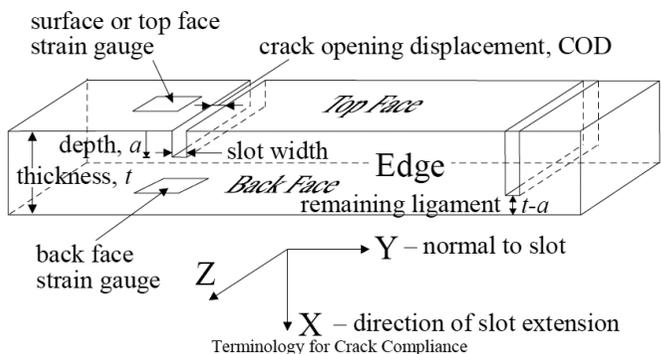
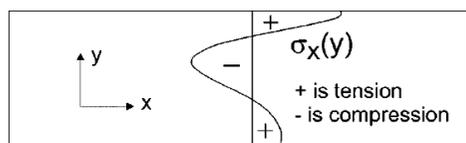


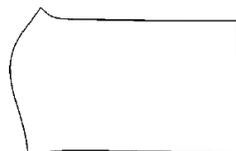
図8 スリッティング法の概念図および測定風景<sup>(5)</sup>



A Original residual stress distribution.

= B

Part cut in half, stresses relieved on face of cut.



+ C

Force cut surface back to original state. All stresses back to original values (A).

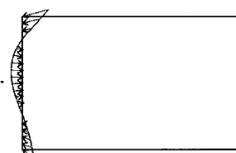


図9 コンター法の測定原理<sup>(6)</sup>

### (3) 準非破壊法

図6で「準非破壊」に分類される Center Hole Drilling(穿孔法)、Ring Core(リングコア法)、Deep

Hole Drilling (DHD 法：深穴穿孔法) は、測定部に穴を開けるなど部分的に破壊する手法であり、可搬装置を用いた現地測定が可能である。

Center Hole Drilling は図10に示すように測定部にロゼットひずみゲージを貼り、ゲージの中心を徐々に穿孔していくことで最大で2mmまで深さ方向の応力分布を測定でき、ASTM E837で規格化されている手法である<sup>(7)(8)</sup>。この手法は、材料物性(弾性率、ポアソン比)がわかれば金属材料だけでなく樹脂材料やガラスなどにも適用できるという特徴を持つ。

Ring Core は、Center Hole Drilling に似た手法であるが、図11に示すようにロゼットひずみゲージの周りをリング状に穿孔していく手法であり、5mm深さまで測定することが可能であるが、Center Hole Drilling と異なり ASTMなどで規格化された手法ではない。

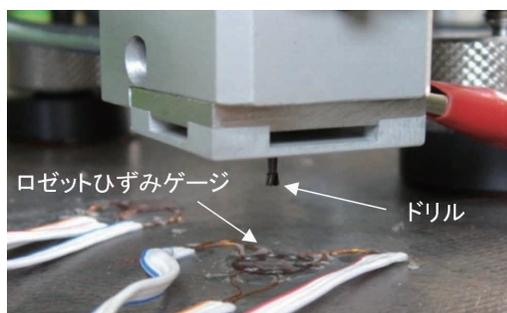


図10 穿孔法による残留応力測定システム

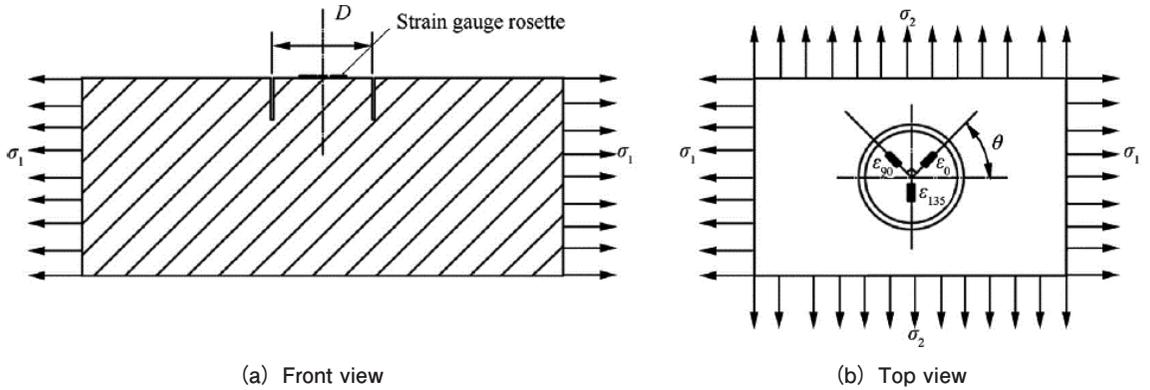


図 11 リングコア法による残留応力測定<sup>(9)</sup>

Deep Hole Drilling は、図 12 に示すように測定箇所にごンドリルで参照穴を開け (Step1)、参照穴径の深さ方向分布をエアプローブを用いて計測 (Step2) した後、参照穴の周辺を放電加工でコア抜き (Step3)、残留応力が解放されることで生じる参照穴径の変化量を再度エアプローブで計測 (Step4) することで残留応力の深さ方向分布を測定する手法である。Deep Hole Drilling も測定原理

上は測定深さに制限は無く、これまでの実績では 750mm 深さまでの計測例が報告されている。応力解放法を用いた高応力部の応力測定においては、応力解放のための切断や穿孔の過程で塑性ひずみが生じ、応力測定精度が低下する懸念があるが、少しずつコア抜きをし、その都度参照穴を計測することで塑性ひずみの影響を考慮できる Incremental Deep Hole Drilling 法 (iDHD 法) が提案されている。

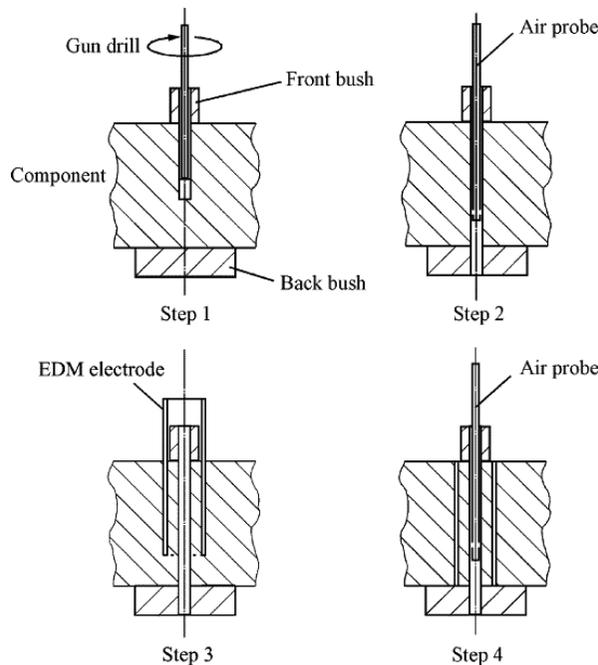


図 12 DHD 法による残留応力測定<sup>(10)</sup>

#### 4. まとめ

残留応力は、機械構造物の製造時の部材加工精度悪化によるコスト増の要因となるほか、製品の損傷原因となり得るため、製品の信頼性に多大な影響を及ぼす場合がある。製品の強度評価にあたっては、残留応力を適切に予測・評価する必要があり、測定対象や目的に合った測定法の選定が重要となる。

次号では、今回が測定法の概要を述べた応力測定法のいくつかを取り上げ、より詳細な説明を加えるとともに、測定事例について紹介する予定である。

#### 参考文献

- (1) 田中：材料強度学、丸善、2008
- (2) 矢川ら：原子炉一次系配管の高周波加熱による残留応力の改善 (IHSI) に関する理論解析と実験、圧力技術、Vol.21、No.4、1983
- (3) 鈴木：中性子回折法による応力測定技術とその応用、Journal of the Vacuum Society of Japan、Vol.53、No.12、2010
- (4) 岩田ら：新しい残留応力測定技術Ⅱ、溶接学会誌、Vol.64、No.7、1995
- (5) M. B. Prime：Experimental Procedure for Crack Compliance (Slitting) Measurements of Residual Stress, LA-UR-03-8629, LANL Report, 2003
- (6) 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
- (7) 三上隆男、松田昌悟、夏井一樹：穿孔法による残留応力測定技術の検証試験（深さ方向に不均一な応力分布の場合）、IIC REVIEW、No.54、2015/10、pp.35-45
- (8) ASTM E837-20：Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method, 2020
- (9) J. Guoら：Recent progress of residual stress measurement methods: A review, Chinese Journal of Aeronautics, Vol.34, No.2, 2021
- (10) A. H. Mahmoudiら：A New Procedure to Measure Near Yield Residual Stresses Using the Deep Hole Drilling Technique, Experimental Mechanics, Vol.49, No.4, 2009



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