

(4) 機械部品等の非破壊健全性評価



残留応力解析用中性子回折装置 (RESA)

RESAは、中性子の高透過性を利用して、機械部品の内部に留まる残留応力を非破壊で調べる装置です。材料の溶接部分での残留応力を知ることは、製品の健全性に直接関係します。これは我々の生活の安全性に関わることでありますので重要です。

材料強度とミクロ組織因子の定量的関係の解明

利用者 ○今瀬 肇¹、龍福 進²、鈴木徹也³、友田 陽³
 所属 1茨城県企画部、2(株)VIC、3茨城大学

背景

材料の機械的性質はミクロ組織に敏感に依存する。したがって、組織制御による高強度化をめざす材料製造メーカーや使用時の予期せぬ破壊事故を防止したい各種企業にとっては、材料のミクロ組織を定量的に把握することがきわめて重要な技術課題である。現在は、顕微鏡観察やX線回折法が利用されているが、サンプリング数を増やし多大な時間と労力をかけてデータを採取し代表的値を推定する必要がある。中性子ビーム実験でセンチメートル・オーダーの試料もしくは実製品を対象にして回折プロファイルを取得し、適切なプロファイル解析を行うことができれば、転位密度、結晶粒サイズ、集合組織等のミクロ組織因子について定量的な測定ができる。現在、そのようなプロファイル解析技術は我が国の中性子回折実験装置に対して開発されていない。そこで、茨城県中性子利用促進研究会・環境調和型材料開発研究会では、種々なニーズを有する企業から測定試料を提供してもらい、主として原子力研究機構・茨城大学メンバーで測定を行い、民間ソフト会社においてユーザーフレンドリーな解析ソフトを開発するという3者による共同研究を進めている。図1にプロファイル解析によるミクロ組織因子定量化法の概要を示す。

解析方法の理論的検討と並行して、これに適した中性子測定手法を確立する必要がある。本トライアルユース実験においては、基本的解析指針を(株)ヴィジブルインフォメーションセンターと茨城大学で考え、生産現場のニーズとして住友金属工業(株)に超高強度伸線ワイヤーの試料を準備してもらい、解析ソフトの開発に必要なデータを実験によって取得した。

実験試料および方法

実験には超高強度鋼線を用いた。現在、自動車用タイヤに使われるスチールコードは車体軽量化のための高強度化が企業間で激烈な競争の下に進められ、4GPaクラスが市販されるようになった。実験室的には5GPaを超える工業材料のチャンピオン強度を示すワイヤが得られているが、使用にあたってのねじり変形に対する縦割れ(デラミネーション)が高強度化の阻害要因となっている。ここでは、中性子回折によって得られる伸線加工に伴うミクロ組織因子の定量測定や結晶粒単位の内部応力測定は新材料開発のブレークスルーをもたらす可能性が高いと期待されている。実験には原子力研究開発機構の残留応力測定装置RESAを用いて、図2に示すように角度分散法で行った。1.5mmの線径のパーライト鋼を0.2mmまで伸線加工した(真ひずみ4.0)。化学組成は0.82C,0.23Si,0.72Mn,0.008P,0.009S(mass%)の過共析鋼である。この伸線材を直径5mm程度に束ね、測定面が伸線方向と垂直となるように中性子回折測定を行った。

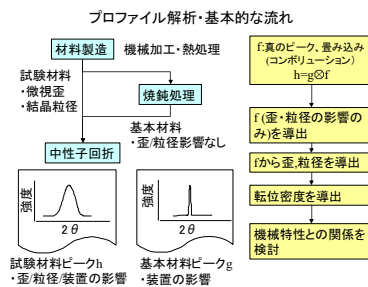


図1 プロファイル解析の概要と手順

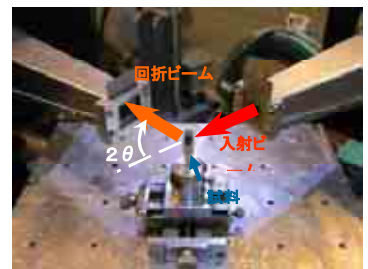


図2 高強度ワイヤ束の中性子回折測定の様子



図3 開発ソフトによるプロファイル解析例

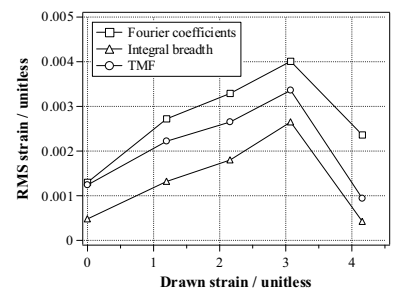


図4 プロファイル解析による転位密度変化

結果および考察

回折プロファイルの解析例を図3に示す。図1で説明したように、基本プロファイルと被試験試料のプロファイルをそれぞれフィッティングした結果である。(1)積分幅法、(2)フーリエ係数法、および最近提案されている(3)Transformed model fitting法により解析した。伸線加工の進行に伴う転位密度と粒径(セルサイズ)の変化は図4のようになった。

ここで注目される点は、加工ひずみが増加するに伴い、粒径は減少するが転位密度は最初増加した後で若干低下することである。これは、先にチェコ核物理研究所で行った結果の再確認であり、解析手法によって傾向は同じであるが、値が異なる点を今後検討する必要がある。このような定量的なデータは透過電子顕微鏡観察などでは得ることができない。この結果によれば、強化機構が変化している可能性があり、材料開発指針に大きな影響を与える。精を高めるために解析過程を調べたところ、バックグラウンドの決定に人為的操作が入ることなく自動的に妥当な処理がされるべきであると考えられた。そのために従来より広い角度範囲で測定して検したところ、図5に示すように、問題があることがわかり、計算ルーチンを変更してさらに妥当と思われるプログラムに改訂した。すなわち、従来はピーク関数と直線バックグラウンドを足し合わせたモデル式で測定値を最小二乗法フィッティングして、ピークとバックグラウンドの決定を同時に行っていた。図3に示すように本実験により取得した測定データを基に従来の手法でバックグラウンドを決定するとピンクの線となり、明らかに測定値より下回っている。今後、この測定解析ツールが企業における材料研究に利用されることが望まれる。

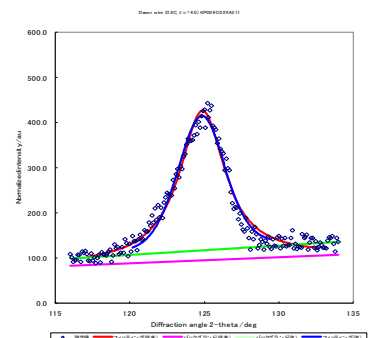


図5 バックグラウンド決定法の検討

工業用鑄造製品の残留応力測定法の開発

(粗大結晶粒組織A1合金鍛造部品T6処理材の中性子残留応力測定法の検討)

利用者 ○今瀬 肇¹、寺門一佳²、友田 陽³

所属 ¹茨城県企画部、²(株)日立製作所、³茨城大学

背景

結晶粒の粗大な組織を有する鑄造製品や熱処理製品の残留応力を測定したいという要求が産業界には多いが、通常の方法では精確な測定が困難である。応力主軸が予想できる場合には、3つの主軸方向の線ひずみを測定し、巨視的応力に換算する適当な弾性係数(回折弾性係数)が与えられれば、次の式より応力状態を同定することができる。

$$\sigma_{xx} = \frac{E}{(1-2\nu)(1+\nu)} \{ (1-\nu)\epsilon_{xx} + \nu(\epsilon_{yy} + \epsilon_{zz}) \}$$

しかし、測定空間(ゲージ体積)内に十分な数の結晶粒が存在しないと、希望する方向の回折強度がえられないことが起こる。このような場合の対応策として、測定方向からある角度範囲で試料を傾けること(揺動法)が考えられる。揺動角度を大きくするほど回折の対象となる結晶粒が増えるのでプロファイルの統計精度が上がる反面、線ひずみが真の主ひずみの値から変化する(揺動角度が小さければ変化は無視できる程度であり、またある程度補正することも可能である)。揺動角度と結晶粒の大きさおよびゲージ体積の間には相互関係があると予想されるので、結晶粒径が数100μmのT6処理自動車用Al-Si合金部品を用いて実験を行って検討した。

実験試料および方法

先の報告⁽¹⁾では420~430℃の温間鍛造で製造したAHS2材エンジン用小型部品中心部の近くの残留応力を中性子回折法で測定し、引張静水圧が存在することを示した、この試料を495℃で2時間保持後60℃温水中焼入れの溶体化処理後、180℃で8時間時効後空冷(T6処理)した。中性子残留応力測定方法も先の報告とほぼ同じである。熱間鍛造状態の測定では問題は生じなかったが、T6処理材の場合は通常法では測定できなかった。これは溶体化処理によって結晶粒が成長したためと予想された。そこで本来の測定方向(主軸と推定される3方向)から最大5.0度まで両方向に試料を揺動し0.5度おきに4つの回折面について測定した。

実験結果および考察

最大回折強度の揺動角依存性を図1に示す。図から明らかなように回折の得られる方向が不規則に現れ、4つの面でも異なる角度依存性が見られる。顕微鏡観察の結果から測定体積内に存在する結晶粒は数10個に過ぎないと推定されるので、測定する方向によってはゲージ体積内に結晶粒が存在しないと考えられる。

そこで、±0.5度から±5.0度まで順次、回折プロファイルを重ねて集めたプロファイルの中心角度を求めると図2のようになった。図をみると±3.0度以降で一定値に収束する傾向がみられた。

図2でみられる傾向は3つの測定方向の4種類の測定面でほぼ同じ傾向がみられた。径方向に関する例を図4に示す。線ひずみの測定方向に伴う変化を考えると揺動角度はできるだけ小さいほうが好ましいので、全体を眺めて本実験試料の粒径の場合には±3.0度でほぼ安定した値が得られ、適当と思われる。

揺動なしで回折強度が低い状態のプロファイルから面間隔を求めると当然ながらバラツキが大きい。図4は揺動法で収束した(hkl)面間隔から形式的な格子定数に換算して測定方向および測定面の影響を比べた図である。3つの測定方向に関してKronerモデルから予想される回折ヤング率の大きい順番に並べてあるので、理想的には右上がりの傾向が期待される。図をみるとaxial方向を除いてそのような傾向がみられる。格子面間隔の変化から線ひずみを求め、前出のフックの式に代入すると図5の結果が得られた。この結果は、先の報告のような熱応力状態を示しているので妥当な結果と考えられる。試みに揺動法なしの場合の結果から応力を計算すると図6のようになり、測定方法に問題があることがわかる。

結論

粗大結晶粒を有する部品の残留応力測定には揺動法が有用であった。
必要な揺動角度はゲージ(照射)体積内の結晶粒数がある値以上にすることがある。

文献：(1) 寺門一佳ほか：材料学会第54期学術講演会論文集(仙台)2005年, pp.165-166

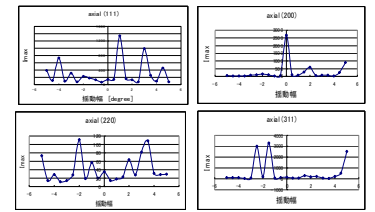


図1 回折強度の揺動角による変化

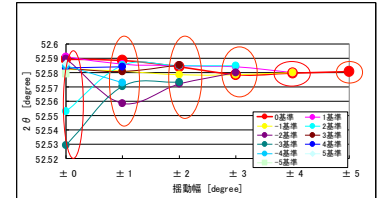


図2 回折プロファイルを重ねあわせた後に求めた回折角度の変化(軸方向(111))

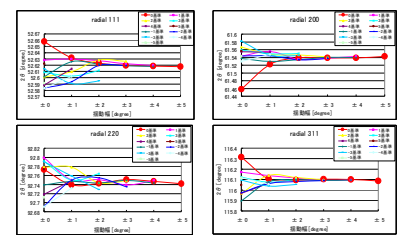


図3 軸方向における3種類の回折面における揺動角増加に伴う収束状況

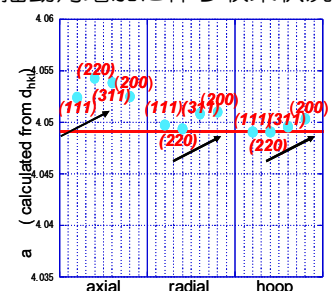


図4 格子面間隔から換算した格子定数の測定方向と格子面依存性

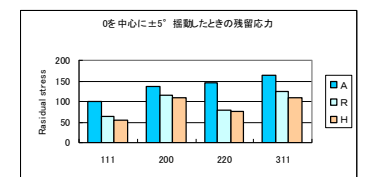


図5 揺動法を用いた場合の残留応力の結果

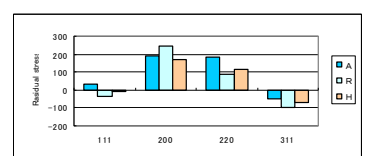


図6 従来法で測定した残留応力の結果

建設機械における溶接構造物の 溶接内部歪み分布評価

利用者 ○田村和久¹，高田龍二²，下平貴之²，星暁生¹，斎藤泰¹，佐藤暁子¹

所属 ¹日立建機株式会社建設システム事業部開発設計センタ，²同技術開発センタ

1. はじめに

建設機械の主要構造物のほとんどが溶接構造物であり，市場における不具合は溶接内部からの疲労破壊が多い．油圧ショベルのフロント部のような箱型構造物では箱内部の溶接未溶着部からの亀裂の進展が多く，当部位は歪み測定が困難なため負荷が掛かった時の溶接内部の歪み分布等は明確に把握出来ていない．そこで近年，弊社設計部ではFEMを用いて溶接未溶着部を实物相応にモデル化し，溶接未溶着付近の応力分布を予測して設計段階における事前評価を行っている．しかし算出される応力分布の妥当性は測定不可能なため検証されていない．そこで，当FEMによる歪み分布の妥当性を検証するとともに疲労寿命設計指針を作成することが目的である．

2. 実験材料と方法

残留応力測定用中性子回折装置 (RESA) を用いて，負荷状態と無負荷状態における格子面間隔を測定し，両者の差を取る事で負荷による歪を得る．図1に実験装置を，図2に試験片形状を示す．この試験片長手方向に図2の Strain gauge #4 にて約 $500 \mu\text{strain}$ になるよう引張力付加を加えた．中性子検出器には1次元検出器を使用し，入射側，反射側共に $0.5 \times 15 [\text{mm}]$ のスリットを使用した．



図1 実験装置

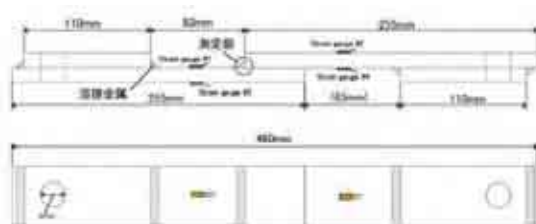


図2 試験片

3. 実験結果

図3.1に無負荷時の格子面間隔分布図を示す．なお，今回の測定においてはマシンタイムの都合により波長測定を行っていないため，相対的な格子面間隔の分布図となる．引張負荷時の格子面間隔分布図を図3.2に示す．切欠き近傍において格子面間隔は著しく変化している．測定領域全体的には引張負荷により格子面間隔は増大傾向だが，切欠き近傍下部においては縮小傾向となった．

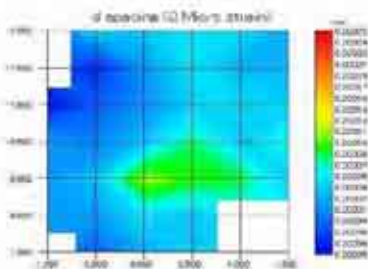


図3.1 無負荷時格子間隔

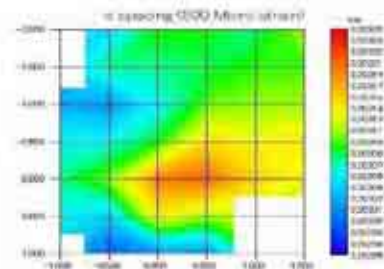


図3.2 引張負荷時格子間隔

4. 考察

図4.1に無負荷状態から引張負荷を付したときの相対的な歪変化の分布図を示す．切欠き近傍の下部方向に $100 \mu\text{strain}$ 前後の圧縮歪が，また上部方向には最大で $600 \mu\text{strain}$ 前後の引張歪が得られた．この傾向は図5.1に示す最大主歪FEM結果での切欠き近傍上部の引張歪，図5.2に示す最小主歪FEM結果での切欠き近傍下部の圧縮歪と同様な傾向を示している．ここで， $X=-0.5$ ， $Y=-1.5$ 近傍に強い引張ひずみの特異点が見られた．この点に関する詳細は不明であるが，溶接部凝固に伴って発生する気孔，溶込み不良，融合不良等の欠陥の存在が考えられる．また，図4.2に相対的な半価幅変化の分布図を示す．図4.2において，切欠き近傍と思われる部位での半価幅の増大が著しく，応力集中による塑性域が生じているものと推察される．応力集中部と塑性域による半価幅の増大位置を考慮すると $X=0.5$ ， $Y=0.5$ の座標位置近傍が切欠き先端部であると思われる．

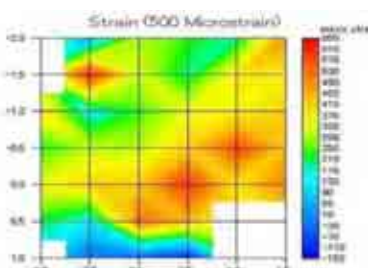


図4.1 歪分布図

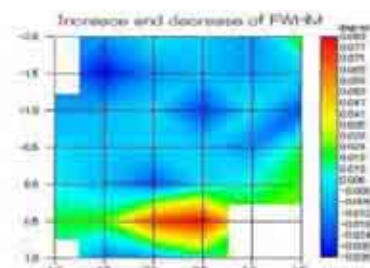


図4.2 半価幅変化分布図

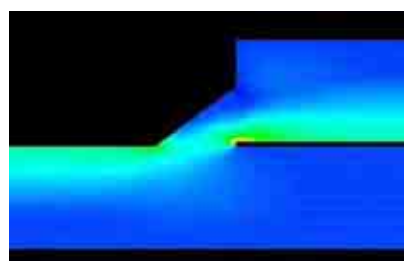


図5.1 FEMでの最大主歪

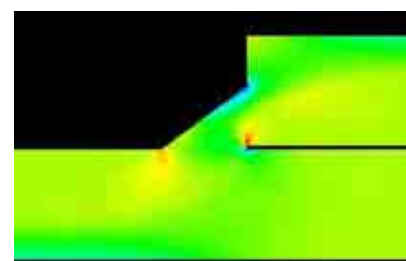


図5.2 FEMでの最小主歪

5. まとめ

以上のことから，今回の引張試験による測定結果において切欠き近傍上部に強い引張歪，下部側に圧縮歪が生じており，FEM 結果と同様な傾向を示した．今後はFEMの出力結果との詳細な比較を行い，FEMの歪分布の妥当性を検証し，モデルを改良する予定である．さらに，今回測定した長手方向と90度垂直方向の歪についても測定し，より詳細に検討し，疲労寿命設計指針を作成する．

建設機械における溶接構造物の 溶接内部歪み分布評価

利用者 ○田村和久¹, 高田龍二², 下平貴之², 星暁生¹, 斎藤泰¹, 佐藤暁子¹

所属 ¹日立建機株式会社建設システム事業部開発設計センタ, ²同技術開発センタ

1. はじめに

建設機械の主要構造物のほとんどが溶接構造物であり、市場における不具合は溶接内部からの疲労破壊が多い。油圧ショベルのフロント部のような箱型構造物では箱内部の溶接未溶着部からの亀裂の進展が多く、当部位は歪み測定が困難なため負荷が掛かった時の溶接内部の歪み分布等は明確に把握出来ていない。そこで近年、弊社設計部ではFEMを用いて溶接未溶着部を実物相応にモデル化し、溶接未溶着付近の応力分布を予測して設計段階における事前評価を行っている。しかし算出される応力分布の妥当性は測定不可能なため検証されていない。そこで、当FEMによる歪み分布の妥当性を検証するとともに疲労寿命設計指針を作成することが目的である。

2. 実験方法

残留応力測定用中性子回折装置(RESA)を用いて、負荷状態と無負荷状態における格子面間隔を測定し、両者の差を取る事で負荷による歪を得る。図2.1に実験装置を、図2.2に試験片形状を示す。この試験片長手方向に図2.2のStrain gauge #1にて約500 μ strainになるよう引張り力付加を加えた。中性子検出器には1次元検出器を使用し、入射側、反射側共に0.5 \times 15[mm]のスリットを使用した。



図2.1 実験装置

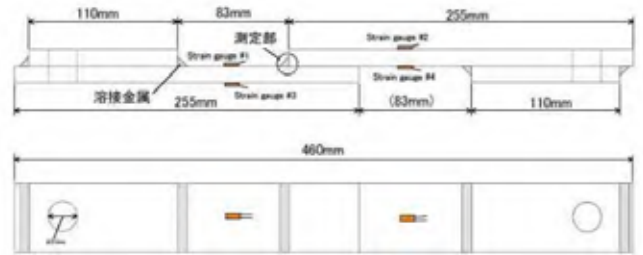


図2.2 試験片

3. 実験結果

図3.1に無負荷時の格子面間隔分布図を、引張負荷時の格子面間隔分布図を図3.2に示す。切欠き近傍において格子面間隔は著しく変化している。測定領域全体的には引張負荷により格子面間隔は増大傾向だが、切欠き近傍左部においては縮小傾向となった。また、表3.1は引張負荷時のStrain gauge #1直下、ビード（溶接端部）下における歪である。

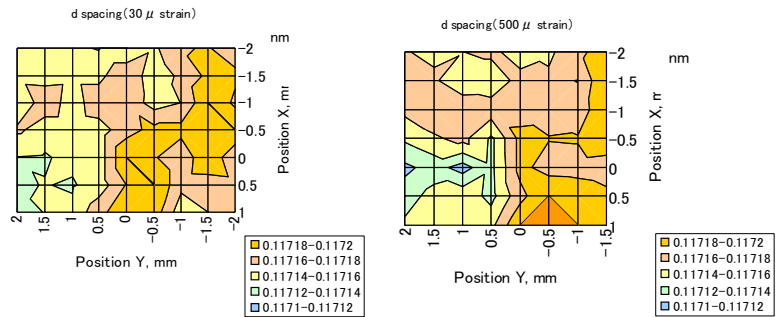


図3.1 無負荷時格子間隔

図3.2 引張負荷時格子間隔

表3.1 ゲージ下, ビード下歪

負荷90° 方向	ゲージ	μ strain
負荷方向	ゲージ	-48.44
負荷90° 方向	ビード	-61.83
負荷方向	ビード	-178.59

4. 考察

図4.1に無負荷状態から引張負荷を荷したときの相対的な歪変化の分布図を示す。切欠き近傍に最大で400 μ strain 前後の引張歪が、左部方向に200 μ strain 前後の圧縮歪が得られた。この傾向は図4.2に示すY軸方向のFEM結果での切欠き近傍の引張歪、切欠き近傍左部の圧縮歪と同様な傾向を示している。図3.3の負荷方向ゲージは406 μ strainであり実測より低い値となっているが、測定位置が図2.2のStrain Gauge #1の下0.5mmの位置であるので妥当な値といえる。また、負荷方向ビードは圧縮歪が生じている。これは、引張歪が発生しているFEMの結果とは異なるため、更なる考察が必要である。

5. まとめ

以上のことから、今回の引張試験による測定結果において切欠き近傍に強い引張歪、切欠き左部側に圧縮歪、またゲージ下負荷方向に引張歪が生じFEM結果と同様な傾向を示した。しかし、ビード下負荷方向に生じた圧縮歪においてはFEM結果と異なる傾向となった。

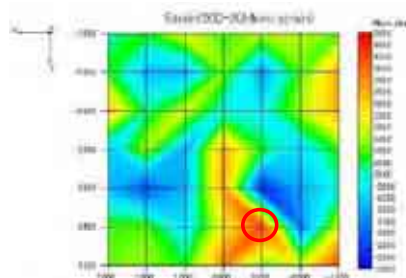


図4.1 歪分布図

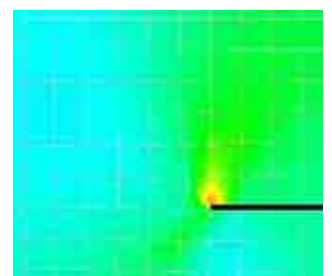


図4.2 FEMでのY軸方向歪

浸炭材の深さ方向残留応力分布測定

利用者 ○下岸隆幸¹、鈴木賢治²

所属 ¹新潟原動機(株)、²新潟大学

はじめに

転動疲労現象が問題となる機械部品においては、転動現象により発生するせん断応力の表面から深さ方向の分布に対し、材料の深さ方向の強度を適切に設計しなければならない。このような要求に対し、表面硬化処理、特に浸炭硬化処理が一般的に用いられ、耐久性の向上が図られている。しかしながら、この浸炭硬化処理は、処理深さを深くするには長時間の浸炭処理が必要であり、コストアップ要因となるため、出来る限り短時間の処理が望ましい。そのため、限界設計が要求されるが、その際、浸炭処理材の深さ方向の強度分布を精度よく推定することが要求され、浸炭処理材特有の残留応力の深さ方向の分布測定が必要不可欠となる。

この深さ方向の残留応力測定は、X線応力測定法での表面除去法に依るのが一般的であるが、電解研磨に時間が掛かるため、他の測定方法が望まれている。そこで、今回深い透過力を有する中性子による残留応力測定を試みた。

供試材

測定に用いた試験片は、直径26mm、長さ28mmの円筒状試験片で、円筒部外周にのみ浸炭処理が施されている。有効硬化層深さは、2mmおよび4mmを目標とした(実測値は2.0mmおよび3.7mm)2種類で、全硬化層深さは各々、有効硬化層深さより2mm深い位置となっている。

また、浸炭材は表面から内部に向かって炭素濃度の変化があるため格子定数も変化することから、試験片と同一ロットの試料から2mm角に放電加工した格子定数測定のための d_0 クーポンを用意した。 d_0 クーポンの切り出し位置は、その中心が表面から1、3、5、7、9.5mmのものを用意した。

測定結果および考察

有効硬化層深さ4mmの試料から切り出した d_0 クーポンの格子定数の測定結果を、図1に示す。表面からの深さが同一の場合でも、半径、円周、軸方向の格子定数に差異が見られる。このことは今回製作した d_0 クーポンに残留応力が存在しており真の無ひずみ格子定数が得られていないことが考えられ、他の手法による検討が必要である。ここでは、 d_0 クーポンは半径方向応力0の平面応力状態であると仮定し、無ひずみ格子定数を計算し、図2のような深さ方向の分布を得た。この結果を元に211回折および110回折の格子面間隔 d_0 を求め、有効硬化層深さ4mmの試料の残留応力分布を計算した結果を図3に示す。浸炭層の圧縮残留応力のピークは有効硬化層深さ付近に発生すること、および圧縮残留応力から引張残留応力へと転換する浸炭境界部では、引張残留応力は鋭いピークを持たずなだらかに変化している。

今後の課題

本試験の目的は、有効硬化層深さの違いにより浸炭境界層付近に発生する圧縮残留応力から引張残留応力への転換に相違点がないかを調べることであるが、今回時間の都合で有効硬化層深さ2mmの試料については測定が軸方向および d_0 クーポンの測定が実施できなかったため、18年下期に実施したいと考える。また、 d_0 クーポンの半径、円周、軸方向の格子定数に差異についても更なる検証が必要と考える。

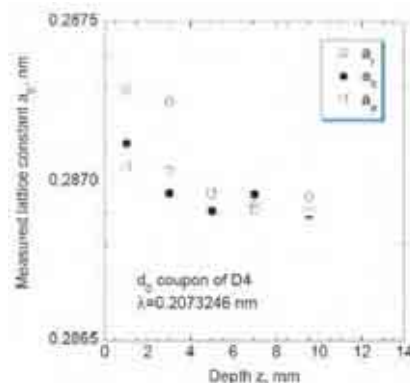


Fig.1 Measured lattice constant, a , from d_0 coupon of D4 sample

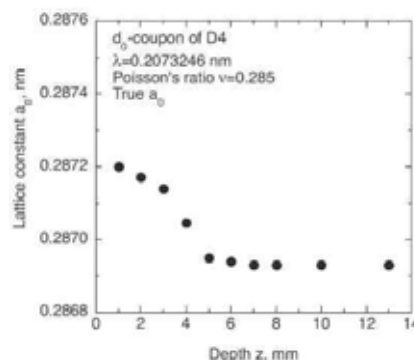


Fig.2 Calculated lattice constant, a_0

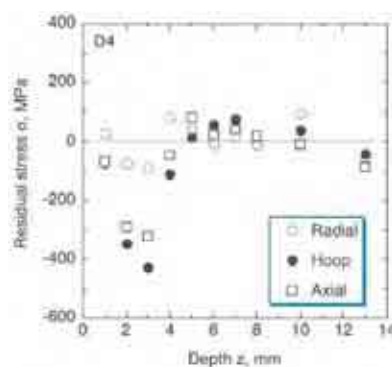


Fig.3 Stress distribution of D4 sample

浸炭炭素鋼の格子定数と残留歪み変化の測定

中性子回折による浸炭炭素鋼の残留ひずみ測定

利用者 ○社山下道哉¹、中村和昭¹、秋吉祐和¹、磯部恒雄¹、坂井田喜久²、柏木章吾²

所属 1ヤマハ発動機(株)、2静岡大学

1. 緒言

バイクや自動車などのシャフトや歯車などの炭素鋼部品には、表面硬度と疲労強度を向上させる目的で浸炭処理を施す場合が多い。しかし、浸炭処理を施すと、残留応力が発生して部品形状が大きく変形し、後加工を施さなければならない。一方、近年の製品コスト競争の激化に伴い、製造コストの低減は製造メーカの最重要課題であり、後加工を行わない浸炭処理法の実現が急務であるが、浸炭による残留応力発生や変形挙動を把握するには至っていない。

本研究では、浸炭部品の代表として歯車に注目し、浸炭処理後の歯車に中性子線を照射することにより、歯車内部の格子面間隔を実測するとともに、歯車内部の残留ひずみ分布について検討した。

2. 実験方法

供試材は、SCM420Hである。実験には、Fig.1に示す表面を浸炭処理した歯車と、歯車の内部から一辺2mmの立方体形状に切り出したクーボン試験片を用いた。本研究では、Fig.2に示す歯車内部の残留ひずみ分布を実測するために、中性子によるひずみスキャンニング法を用いた。Fig.1に測定の概略を示す。実験に用いた中性子線の波長は、Niパウダーの3つの回折線を実測し、計算により求めた。また、入射側と反射側に取り付けた $2 \times 2 \text{ mm}^2$ のコリメータを用いて、測定箇所のゲージボリュームを特定した。本研究では、歯車の半径方向、主軸方向、ピッチ円周方向を回折面法線とする3方向の格子面間隔の変化から歯車内部の残留ひずみを評価するために、測定箇所のゲージボリュームが同じとなるように供試材に含まれるFeの回折中性子から特定の回折線を選択し、Fig.3とFig.4に示すように、ピーク強度が200カウント程度になる測定条件を検討した。ついで、Fig.2に示すように、歯車の内歯近傍の主軸方向に沿って中性子線を走査し、歯車内部の残留ひずみ分布を測定した。また、測定箇所 (Fig.2参照) から切り出したクーボン試験片を用い、2方向の無ひずみの格子面間隔 d_0 を実測した。

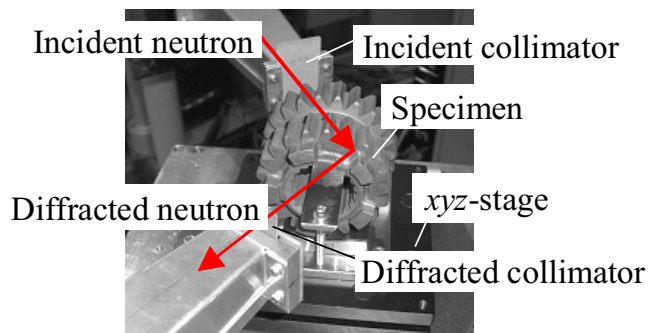


Fig.1 測定の概略

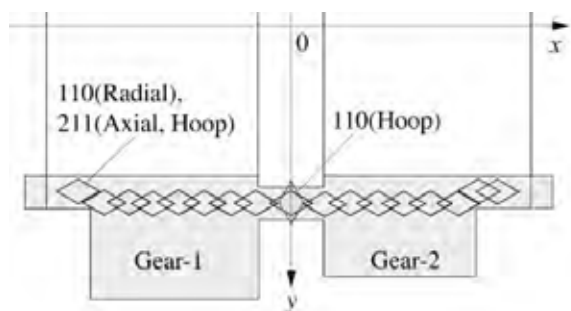


Fig.2 中性子線による残留ひずみ測定位置

3. 実験結果および考察

歯車の内歯近傍内部に発生した残留ひずみ分布を実測するための光学系を決定し、実験条件における中性子線の波長を実測した結果、照射条件の波長は 2.0732 \AA であった。また、測定箇所のゲージボリュームが同じ領域となるような回折面としては、歯車半径方向では110回折を、主軸方向では211回折を、ピッチ円周方向では211回折を選択すればよいことがわかった。そこで、歯車の内歯近傍内部から十分な回折線強度が得られる検討した。その結果、半径方向の110回折、主軸方向の211回折については歯車の内歯近傍内部から十分な回折線強度が得られるが、ピッチ円周方向の211回折では侵入経路が長いので歯部での減衰が激しく、十分な強度が得られないことがわかった。そこで、ピッチ円周方向では、ゲージボリュームは若干異なるが、110回折を用いて格子面間隔を測定することとした。なお、ピッチ円周方向のゲージボリュームを同一とする測定方法については今後の検討課題である。

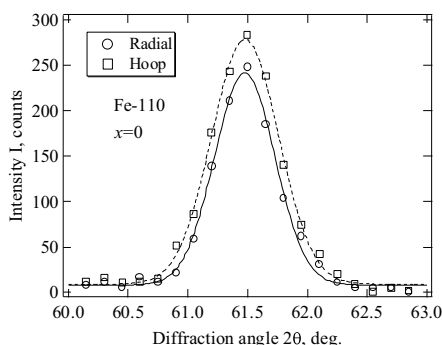


Fig.3 RadialとHoop方向の110回折線強度分布

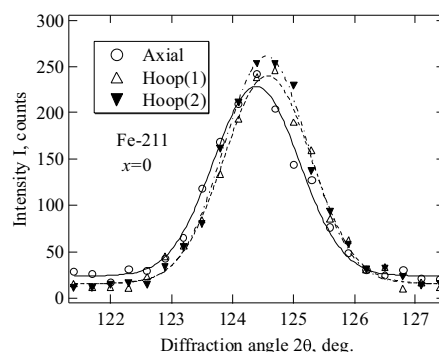


Fig.4 AxialとHoop方向の211回折線強度分布

次に、歯車から切り出したクーボン試験片を用いて、半径方向とピッチ円周方向の格子面間隔 d_0 を測定した。なお、主軸方向の格子面間隔は測定するには至らなかった。実験結果をFig.5に示す。クーボン試験片から測定される格子面間隔 d_0 は測定箇所によって変化し、測定箇所の組織や浸炭状態によって d_0 は異なり、残留ひずみの評価には十分注意する必要があることがわかった。また、本供試材では、はじめピーク強度が約200カウントとなる条件で測定条件を決定したが、再現性のよい結果を得るためには、ピーク強度が少なくとも500カウント以上必要であることがわかった。

Fig.6は、浸炭した歯車の内歯近傍の3方向の格子面間隔 d を測定した結果を示す。図より、半径方向と主軸方向では、ゲージボリューム近傍に浸炭層がある中央部と端部の格子面間隔は歯部より若干高い傾向を示した。一方、ピッチ円周方向では、他の2方向とは逆の傾向を示し、かつ、その変化が大きいことがわかった。そこで、Fig.5の d_0 の実測値から歯車半径方向とピッチ円周方向の残留ひずみ分布を求めた結果をFig.7に示す。図より、2つの歯車の内歯近傍では円周方向に引張残留ひずみが存在することが明らかとなった。今後、クーボン試験片を用いて、主軸方向の格子面間隔 d_0 の測定やゲージボリュームを同一にした測定等により、歯車内部の残留応力を実測し、浸炭処理による残留応力発生や変形挙動を解明して製造工程にフィードバックしたいと考えている。

4. 中性子利用実験への期待

今回の中性子回折実験により、浸炭部品内部の残留ひずみ状態をはじめて実測することができた。これにより、浸炭部品の工程管理をひずみという観点で評価することができると期待しており、測定精度の問題は残されているが、実測データを得ることができた意義は非常に大きい。今後の実験継続により、残留応力状態を正しく評価し、量産部品の信頼性確保と問題克服に繋げたいと考えている。

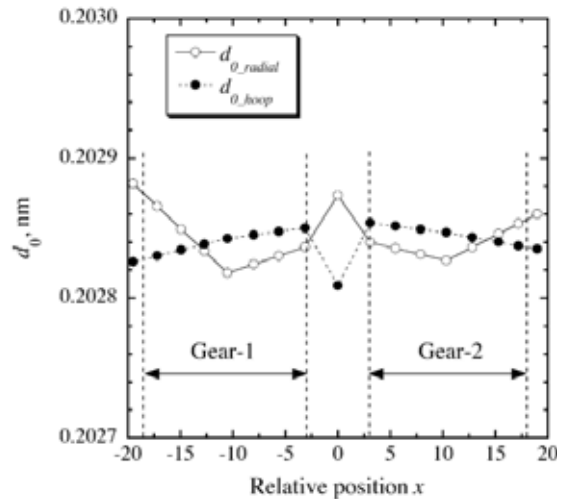


Fig.5 クーボン試験片の格子面間隔の変化

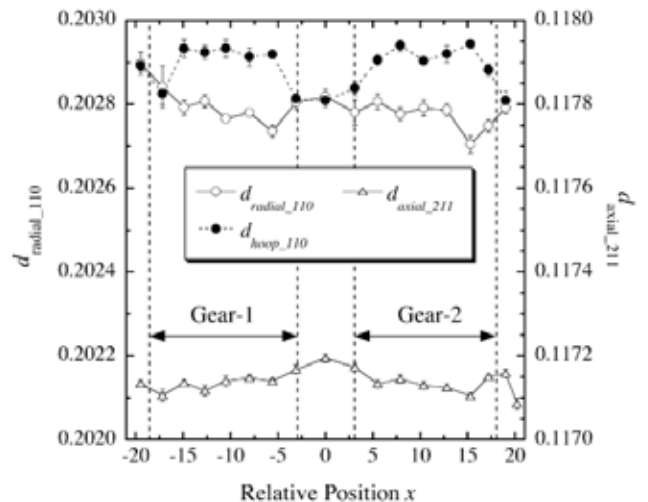


Fig.6 歯車内部の格子面間隔の変化

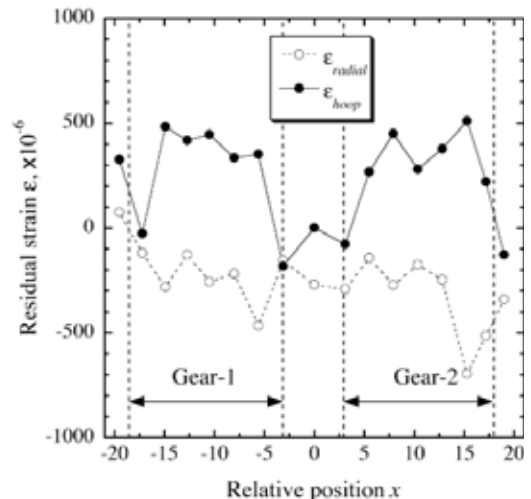


Fig.7 歯車内部の残留ひずみ分布

浸炭材の深さ方向残留応力分布測定

利用者 ○下岸隆幸¹、鈴木賢治²

所属 ¹新潟原動機(株)、²新潟大学

1. はじめに

転動疲労現象が問題となる機械部品においては、転動現象により発生するせん断応力の表面から深さ方向の分布に対し、材料の深さ方向の強度を適切に設計しなければならない。このような要求に対し、表面硬化処理、特に浸炭硬化処理が一般的に用いられ、耐久性の向上が図られている。しかしながら、この浸炭硬化処理は、処理深さを深くするには長時間の浸炭処理が必要であり、コストアップ要因となるため、出来る限り短時間の処理が望ましい。そのため、限界設計が要求されるが、その際、浸炭処理材の深さ方向の強度分布を精度よく推定することが要求され、浸炭処理材特有の残留応力の深さ方向の分布測定が必要不可欠となる。

この深さ方向の残留応力測定は、X線応力測定法での表面除去法に依るのが一般的であるが、電解研磨に時間が掛かるため、他の測定方法が望まれている。そこで、深い透過力を有する中性子による残留応力測定を試みた。H18 上期は有効硬化層深さ4mm の試験片について測定を実施したが、H18 下期は有効硬化層深さ2mm のものについて実施した。

2. 実験方法

測定に用いた試験片は、直径26mm、長さ28mm の円筒状試験片で、円筒部外周にのみ浸炭処理が施されている。有効硬化層深さは、2mm で、全硬化層深さは有効硬化層深さより2mm 深い位置となっている。

また、浸炭材は表面から内部に向かって炭素濃度の変化があるため格子定数も変化することから、試験片と同一ロットの試料から1mm 角に放電加工した格子定数測定のための d_0 クーポンを用意した。 d_0 クーポンの切り出し位置は、その中心が表面から1、2、3、4、5、6、7、8、10、13mm のものを用意した。

3. 測定結果および考察

今回の試験は効率の良い検出器をPSD(Position Sensitive Detector)に変更した。また、前回使用した α -Fe211 回折は回折線幅が広く、回折プロファイルをすべて測定することは困難だったので、 α -Fe110 回折を用いた。有効硬化層深さ2mm の試料から切り出した d_0 クーポンの格子定数の測定結果を、図1 に示す。内部から表面に向かう炭素濃度勾配に対応した格子定数の増加は見られず、回折ピーク測定の精度が得られていない。また、前回の4mm 浸炭試験片の a_0 に比較して浸炭層に相当する1mm の位置の格子定数が小さ過ぎる。浸炭層の残留応力測定においては参考深さにおける d_0 の値が測定精度を左右するので、本測定方法の問題点を解決することが必要である。図2 に本測定で得られた各クーポンのそれぞれの方向の無ひずみの格子定数から計算された残留応力分布を示す。深さ1mm の無ひずみの格子定数が上手く測定されていないために、表面の残留応力が引張を示す結果となっている。この結果は d_0 クーポンの残留応力を補正しても特に変化は無かった。

4. 今後の課題

本試験の目的は、有効硬化層深さの違いにより浸炭境界層付近に発生する圧縮残留応力から引張残留応力への転換に相違点がないかを調べることであるが、今回測定した有効硬化層深さ2mm の試料については測定精度上の改善すべき点があり満足できる結果とはならなかった。今後の課題として下記の改善が必要と考える。

1. 有効硬化層深さ2mm の浸炭では寸法1mm の d_0 クーポンでは大き過ぎ、クーポンの寸法、ゲージ体積などをより小さくする必要がある。
2. 測定精度の高い211 回折を利用する。

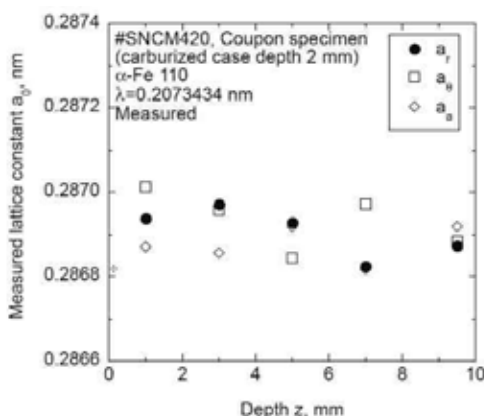


図1 Measured lattice constane, a_0 , of D2 coupon.

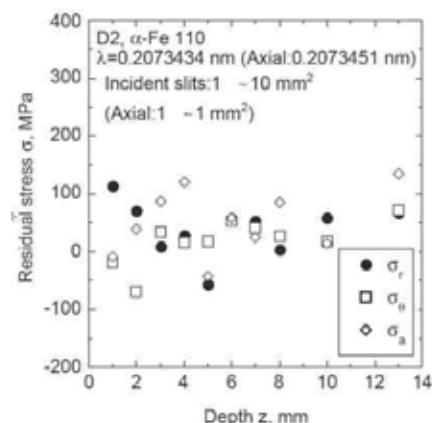


図2 Measured distributions of residual stress of D2 Specimen

浸炭炭素鋼の格子定数と残留歪み変化の測定

中性子回折による浸炭炭素鋼の残留ひずみ測定

利用者 ○山山下道哉¹、中村和昭¹、秋吉祐和¹、磯部恒雄¹、坂井田喜久²、柏木章吾²
 所属 ¹ヤマハ発動機(株)、²静岡大学

1. はじめに

バイク用の鉄鋼部品は、表面の硬度と疲労強度を向上させる目的で浸炭処理を施すが、浸炭残留応力により部品形状が歪み、問題を起こす場合がある。しかし、浸炭による歪発生や変形挙動についてはほとんどわかっていない。

本研究では、H18年度上期の実験において、中性子線回折を用いて浸炭した炭素鋼歯車の内部ひずみを実測する手法を検討するとともに、半径方向、軸方向の内部ひずみ分布を測定した。下期は、ピッチ円周方向の内部ひずみの測定方法を検討するとともに、小歯車の内部ひずみ分布を実測した。

2. 実験方法

供試材は、SCM420Hである。実験には、大小歯車を持つ浸炭歯車を用い、Fig.1またはFig.2に示すように、 $2 \times 2 \text{ mm}^2$ に整形した中性子線を小歯車の内歯近傍に照射し、菱形のgage volumeを軸方向に走査することにより、歯車のピッチ円周(Hoop)方向の内部ひずみ分布を測定した。なお、測定回折面は、Fe-211とした。上期実験では、歯部でHoop方向の211回折は十分な強度が得られず、gage volumeに浸炭層を含んだ110回折からHoop方向のひずみ分布を求めた。下期では、歯先部をワイヤー切断して光路を短くし、211回折による評価を行った。

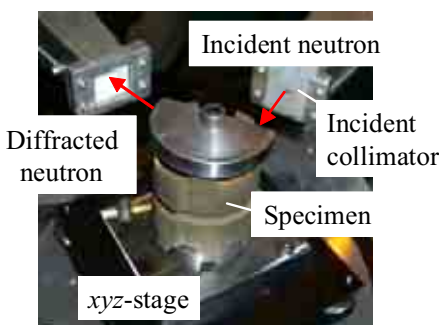


Fig.1 内部ひずみ測定の概略

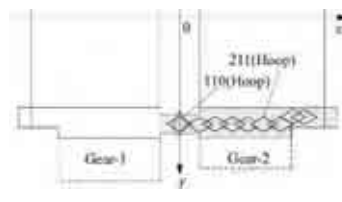


Fig.2 Gage volumeの形状と測定位置

3. 実験結果および考察

Fig.3は、中央部および歯部から測定したFe-211の中性子線回折強度分布を示す。中央部と小歯部ともに、回折線強度分布はガウス分布で近似でき、小歯部の回折角 2θ は、中央部よりも高角側にシフトしていることがわかる。なお、中性子線の波長は、 2.0732 \AA であった。

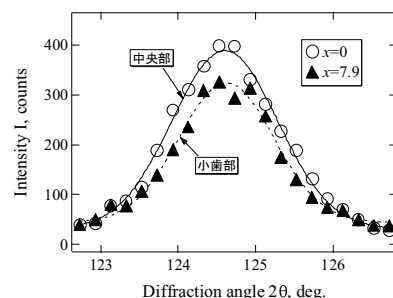


Fig.3 Hoop方向の211回折強度分布

Fig.4は、小歯車の211回折の強度分布から求めた回折面間隔 d_{211} の変化を示す。なお、図には、測定点と同じ場所から切出した小片(クーポン)の211回折の回折面間隔 $d_{0,211}$ もあわせて示した。小歯車歯部のクーポンから測定した回折面間隔 $d_{0,211}$ に対する回折面間隔 d_{211} の変化は、中央部の変化に比べて増加幅が大きく、Fig.5に示すように、歯部のHoop方向に大きな引張の残留ひずみが発生していることがわかる。なお、図には、上期実験の110回折から得られたHoop方向の残留ひずみ分布をあわせて示した。図より、小歯部での残留ひずみは211回折、110回折ともに引張の残留ひずみ分布を示し、中央部に対する変化の傾向はほぼ一致した。ただし、歯部での内部ひずみ分布そのものはわずかに異なった。歯部での内部ひずみ分布が異なる原因には測定のばらつきも含まれるが、測定領域と歯車と寸法関係から考えると、110回折と211回折ではgage volumeが異なり、しかも、110回折では、gage volumeに浸炭層が含まれていることによる影響が大きいと考えられる。その点は今後十分に再検討する必要がある。

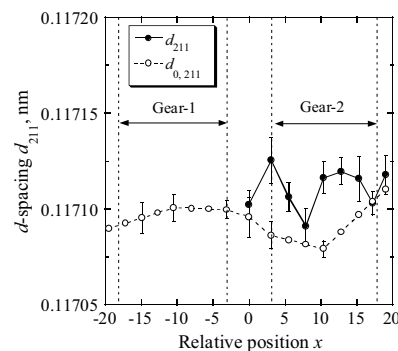


Fig.4 小歯部のHoop方向の回折面間隔

なお、Fig.4に示したように、クーポンのHoop方向に対して測定した回折面間隔 $d_{0,211}$ は、測定位置によって変化した。また、同じgage volumeとなるように歯車の半径(radial)方向に測定したFe-110の回折面間隔 $d_{0,110}$ についても測定位置により変化する結果となった。一方、実験で用いた浸炭歯車を切断し、測定箇所の断面組織観察を行った結果、中央部のクーポンに浸炭層が含まれていることが明らかとなった。中性子線回折による残留ひずみ ϵ は、

$$\epsilon = (d - d_0) / d_0$$

で表され、特定の回折面における無ひずみの回折面間隔 d_0 と実際の回折面間隔 d から計算される。浸炭処理鋼では、場所によって有効浸炭深さが異なることも十分考えられるので、今後クーポンの切出し条件や無ひずみの回折面間隔を測定する方法についても再検討する必要があることがわかった。

また、残る大歯部のHoop方向の残留ひずみ分布と歯車主軸(axial)方向の d_0 は未測定であり、今後研究を継続し、歯車の残留応力評価に結びつけたいと考えている。

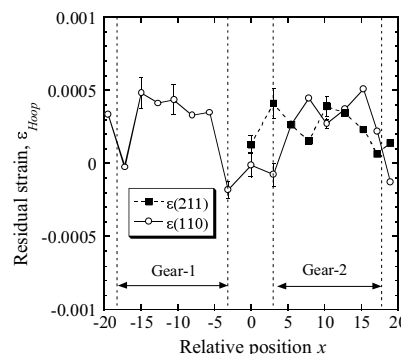


Fig.5 小歯部のHoop方向の残留ひずみ

浸炭した炭素鋼部品内部の 残留ひずみ分布の測定

利用者 坂井田喜久¹、川内基範¹、○丸山下道哉²、秋吉裕和²、磯部恒雄²
 所属 ¹静岡大学、²ヤマハ発動機

1. はじめに

バイク用の鉄鋼部品は、表面の硬度と疲労強度を向上させる目的で浸炭処理を施すが、浸炭残留応力により部品形状が歪み、問題を起こす場合がある。しかし、浸炭による歪発生や変形挙動についてはほとんどわかっていない。本研究では、H18年度の実験で中性子線回折により浸炭歯車内部の残留ひずみを非破壊測定する手法を開発し、内歯近傍の残留ひずみ分布を一部測定した。H19年度は、歯部を切落とした歯車を用い、ピッチ円周方向の残留ひずみ分布と、残留応力解析に必要な歯車主軸方向の回折面間隔を測定した。

2. 実験方法

供試材は、SCM420Hで、実験には、大小歯車を持つ変速ギアを浸炭処理した後、Fig.1に示すように歯部を切落とした歯車を用いた。歯車内部の残留ひずみは、 $2 \times 2 \text{ mm}^2$ に整形した中性子線を内歯近傍に照射し、Fig.2に菱形領域で示すGauge volumeを主軸方向に走査することにより、歯車のピッチ円周(Hoop)方向の内部ひずみ分布を測定した。なお、測定回折面は、Fe-211とし、回折中性子線は2次元検出器により測定した。

また、内部ひずみ測定箇所と同じ位置からクーボン試験片($2 \times 2 \times 2 \text{ mm}^3$)を切出し、同じ光学系で歯車主軸方向のFe-110と211回折の回折面間隔を測定した。

3. 実験結果 および考察

Fig.3は、歯車試験片の歯部とクーボン試験片から測定したFe-211の中性子線回折強度分布を示す。H18年度の実験では0次元検出器を用いたため、図の回折強度分布とは回折線幅が若干異なるが、回折線強度分布はガウス分布で近似でき、大歯車の歯部Fig.3は、歯車試験片の歯部とクーボン試験片から測定したFe-211の中性子線回折強度分布を示す。H18年度の実験では0次元検出器を用いたため、図の回折強度分布とは回折線幅が若干異なるが、回折線強度分布はガウス分布で近似でき、大歯車の歯部の回折角 2θ は、クーボン試験片の回折角よりも若干高角側にシフトしていることがわかる。なお、実験に用いた入射中性子線の波長は、 0.20736 nm であった。

Fig.4は、歯部を切落とした歯車から測定したピッチ円周方向の211回折の回折角度変化と回折面間隔 d_{211} の変化を示す。H18年度に測定した同じサンプルの実験結果と比較すると全体的に圧縮方向に大きくシフトする結果となった。今回の測定では、検出器を0次元検出器から2次元検出器に変更し、計数効率は向上したが、その反面、回折線にノイズが入るなどの不具合も生じたため、この差については本実験では十分検討するには至らなかった。実験系の再検討も含めて、今後再測定する必要がある。

Fig.5は、クーボン試験片を用いて主軸方向の110および211回折の回折面間隔を測定した結果を示す。なお、今回の測定では、クーボン試験片を切出した際に表面に残留するワイヤー加工による加工変質層を十分除去したものをを用いた。歯部から切出したクーボン試験片の結果に注目すると、110回折及び211回折の回折面間隔はほぼ一定の値を示したといえる。一方、フォーク部やドック部から切出したクーボン試験片は、加工変質層は除去したものの浸炭層がまだ残留しており、この領域の回折面間隔は d_0 値として利用できないこともわかった。

Fig.6は、歯部のクーボン試験片の回折面間隔を d_0 値として残留ひずみを求め、3方向の主ひずみから残留応力を計算した結果を示す。今回の測定では、残留応力分布も全体的に圧縮側にシフトする結果となった。H18年とH19年度の測定結果に再現性がない点は大きな課題であり、今後も研究を継続し、実験系を含めて再現性ある実験法を確立する必要がある。

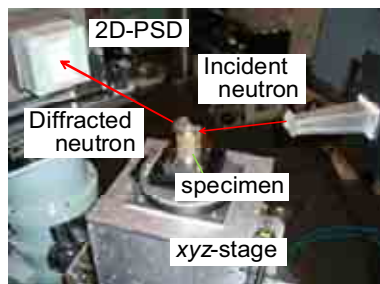


Fig.1 歯車内部の残留ひずみ測定の概略

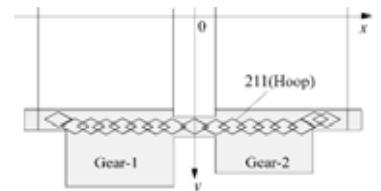


Fig.2 Gauge volumeの形状と測定位置

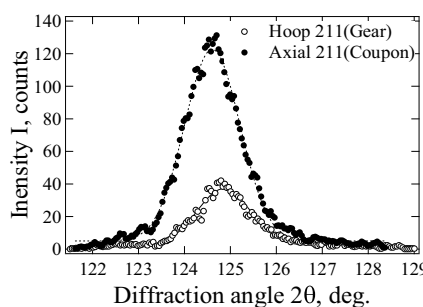


Fig.3 歯部の回折強度分布 (Fe-211)

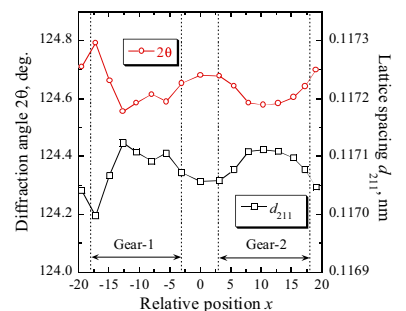


Fig.4 歯部のHoop方向の2θとdの変化

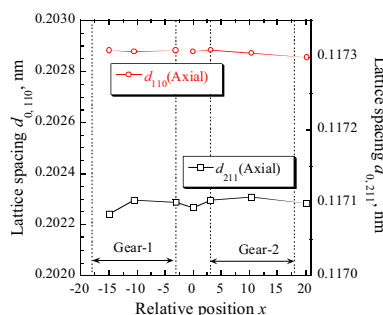


Fig.5 クーボン試験片の d_0 値

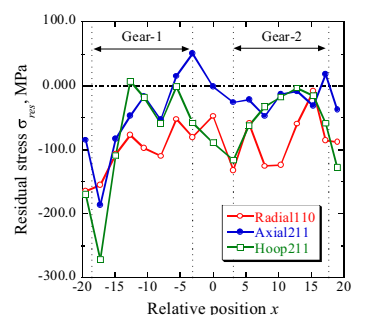


Fig.6 歯車の残留応力分布

ボイラー水管溶接部の残留応力測定

利用者 ○秋山泰輔
所属 三浦工業(株)

1. 目的

弊社製作のボイラーにおいては、溶接の際に発生する残留応力除去のため、ボイラー缶体組み立て後、焼鈍処理（JIS Z 3700）を実施している。

しかしながら、水管や溶接金属の内部（表面から数mm程度）における局所的な残留応力は、金属表面や表面近傍（表面から数十μm程度）のみの測定に限られるひずみゲージ法やX線回析法等の手法では計測が困難であることから、これまで焼鈍効果を定量的に把握するには至っていなかった。

中性子回析法は、数mmから数cmオーダーの物質内部の応力状態を非破壊・非接触で測定することができる唯一の手段である。

ボイラーの安全性追求と、さらなる信頼性向上のため、日本原子力研究開発機構 原子炉JRR-3付設の残留応力測定中性子回析装置（RESA）を用い、焼鈍前後の残留応力を測定することで、焼鈍による効果把握を行う

2. 測定方法

試験体の外観及び計測状況を図1に示す。ボイラーは数十本の水管と、水管端部を拘束するとで構成されており、それぞれが溶接により接合されている。試験体は以下の2サンプルを、それぞれ鋸盤にて1/6の大きさに切り出したものである。

- ・ 組み立て後、焼鈍を実施したボイラー缶体
- ・ 組み立て後、焼鈍未実施のボイラー缶体

測定位置を図2に示す。水管と管寄板の溶接部周辺5箇所における、軸方向、半径方向、周方向の3方向ひずみを、中性子回析法により測定した。

測定条件を表1に示す。中性子照射領域（スリット）の大きさは、3方向とも3mm×3mmとした。

水管の材質は、ボイラー・熱交換器用炭素鋼鋼管STB340（JIS G 3461）である。化学成分、及び機械的性質を表2、表3に示す。



図1 試験体外観形状及び計測状況（写真は周方向応力計測時）

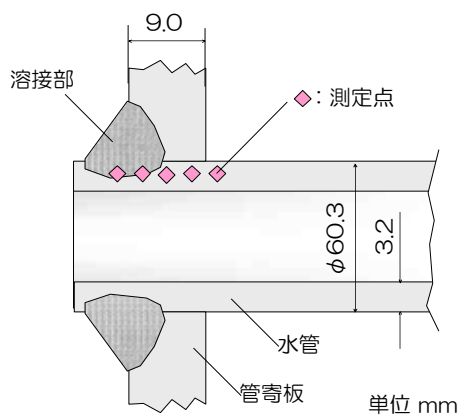


図2 測定位置

表1 測定条件

	軸方向	半径方向	周方向
入射側スリット	3mm×3mm	3mm×3mm	3mm×3mm
回折側スリット	3mm×15mm	3mm×15mm	3mm×15mm
波長検定結果	0.207344 nm	0.207344 nm	0.207351 nm

表2 化学成分

C	Si	Mn	P	S
0.18以下	0.35以下	0.30~0.60	0.035以下	0.035以下

単位 wt%

表3 機械的特性

引張強さ MPa	降伏応力 MPa	ヤング率 GPa	ポアソン比
340以上	175以上	224	0.28

3. 測定結果

中性子回析法より求めた3軸方向のひずみ ε より、以下の換算式にて残留応力を求める。式中のヤング率E及びポアソン比 ν は、表3の値を用いる。

$$\begin{cases} \sigma_{Axial} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [(1-\nu)\varepsilon_{Axial} + \nu(\varepsilon_{Radial} + \varepsilon_{Hoop})] \\ \sigma_{Radial} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [(1-\nu)\varepsilon_{Radial} + \nu(\varepsilon_{Axial} + \varepsilon_{Hoop})] \\ \sigma_{Hoop} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [(1-\nu)\varepsilon_{Hoop} + \nu(\varepsilon_{Axial} + \varepsilon_{Radial})] \end{cases}$$

測定結果の代表例として、軸方向と周方向の残留応力を図3、図4に示す。

焼鈍無しの場合、水管端部に最も近い測定点 (x=6mm) において、軸方向では最大引張応力 (図3)、周方向では最大圧縮応力 (図4) の発生がそれぞれ見られた。

一方、焼鈍有りの場合、焼鈍無しの水管端部近傍に見られたような最大応力の発生は見られず、熱処理により端部の残留応力が低減されていることが分かった。

また、焼鈍無しの場合は、端部近傍 (x=6~10mm) の応力分布にばらつきが見られたものの、焼鈍有りの場合のばらつきは殆ど見られなかった。

4. 考察

測定結果より、水管端部の残留応力低減、応力分布のばらつき低減等、焼鈍による効果が確認できた。このことから、今回のように多くの溶接箇所を有するボイラーにおいて、組み立て後に焼鈍処理を実施することは、安全担保のための重要且つ効果的な手法であることが明らかとなった。

さて、中性子回析法にて測定した残留応力を評価するに当たっては、以下の点について考慮する必要がある。本測定に用いた試験体は、測定器「RESA」の試料台の大きさ、耐荷重等の制限から、既述のようにボイラー本体を1/6に切り出したものである。切断の際に解放される残留応力を測定するため、試験体切断時に実施した「ひずみゲージ法」の測定要領と結果を図5、図6に参考として載せる。焼鈍有無の残留応力を比較すると、その差は顕著であり、且つその値は無視できない大きさであることが分かる。このことから、出来る限り切断箇所を少なくし、製品の原形に近い状態で測定することが望ましいと言える。

また、今回は測定時間の都合上、3mm角のスリットを用いたが、1mm³ゲージ体積程度の微小部の短時間測定が可能であれば、より詳細で正確な残留応力が把握できる。

産業振興にとって非常に有用なこの中性子残留応力測定装置の更なる発展を切に願う次第である。

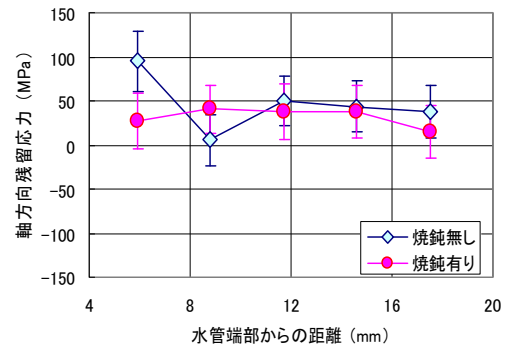


図3 軸方向残留応力測定結果

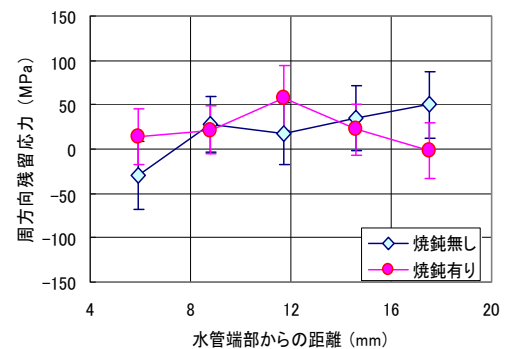


図4 周方向残留応力測定結果

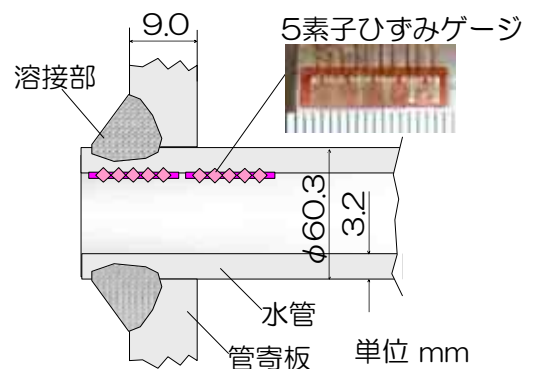


図5 ひずみゲージ法測定要領 (ゲージ貼付位置)

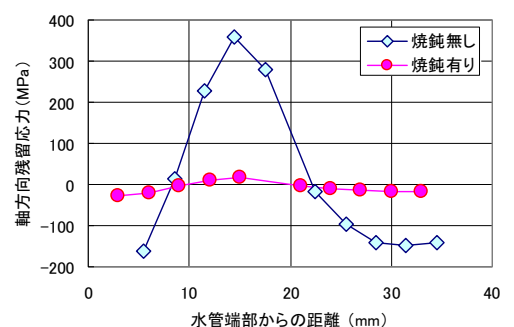


図6 ひずみゲージ法 軸方向残留応力測定結果

ボイラー水管溶接部の残留応力測定

利用者 ○秋山泰輔
所属 三浦工業(株)

1. はじめに

弊社製作のボイラーにおいては、水管端部に絞り加工を施す際に発生する残留応力除去のため、加工後、絞り部の局部焼鈍を実施している。しかしながら、水管や溶接金属の内部（表面から数mm 程度）における局所的な残留応力は、金属表面や表面近傍（表面から数十μm 程度）のみの測定に限られるひずみゲージ法やX線回析法等の手法では計測が困難であることから、これまで焼鈍効果を定量的に把握するには至っていなかった。

中性子回析法は、数mm から数cm オーダーの物質内部の応力状態を非破壊・非接触で測定することが出来る唯一の手段である。ボイラーの安全性追求と、さらなる信頼性向上のため、日本原子力研究開発機構原子炉JRR-3 付設の残留応力測定中性子回析装置（RESA）を用い、焼鈍前後の残留応力を測定することで、焼鈍による効果把握を行う。

2. 実験方法

試験体の外観及び計測状況を図1に示す。試験体は以下の2 サンプルを、それぞれ鋸盤にて水管全長の約1/5 に切り出したものである。

- ・絞り加工後、焼鈍実施の水管
- ・絞り加工後、焼鈍未実施の水管（絞り加工方法：スウェーピング加工）

測定位置を図2に示す。水管絞り部周辺5箇所における、軸方向、半径方向、周方向の3方向ひずみを、中性子回析法により測定した。測定条件を表1に示す。中性子照射領域（スリット）の大きさは、3方向とも2mm×2mmとした。

水管の材質は、ボイラー・熱交換器用炭素鋼鋼管STB340（JIS G 3461）である。化学成分、及び機械的性質を表2、表3に示す

3. 測定結果

中性子回析法より求めた3軸方向のひずみεより、以下の換算式にて残留応力を求める。式中のヤング率E及びポアソン比νは、表3の値を用いる。

$$\begin{cases} \sigma_{Axial} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left[(1-\nu)\epsilon_{Axial} + \nu(\epsilon_{Radial} + \epsilon_{Hoop}) \right] \\ \sigma_{Radial} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left[(1-\nu)\epsilon_{Radial} + \nu(\epsilon_{Axial} + \epsilon_{Hoop}) \right] \\ \sigma_{Hoop} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left[(1-\nu)\epsilon_{Hoop} + \nu(\epsilon_{Axial} + \epsilon_{Radial}) \right] \end{cases}$$

焼鈍無し・有りの測定結果を図3、図4にそれぞれ示す。

焼鈍無し・有り共に圧縮傾向にあったが、焼鈍無しで最大約350MPa、焼鈍有りで最大約150MPaの圧縮応力が発生しており、焼鈍無しの方が圧縮傾向は強いことが分かった。

焼鈍無しにおいては絞り傾斜部（x=53mm）において引張のピークが見られたが、焼鈍有りではこの引張応力が圧縮応力に変化しており、焼鈍の効果があったものと思われる。

また、焼鈍無しの場合は、絞り部周辺において応力分布にばらつきが見られたものの、焼鈍有りの場合、ばらつきは殆ど見られなかった。

4. 考察

図5に示すように、降伏点を超えるような強加工が施された傾斜部のRがきつい部位においては、強加工によるスプリングバックによって水管肉厚部に曲げによる残留応力分布の発生が一般的に知られている。すなわち、片側表面にいくほど圧縮が強くなり（図5）、反対側表面にいくほど引張が強くなる（図5）。

今回の測定においては、ビーム照射範囲（2mm³ゲージ体積）の中心が、肉厚の中心（図5部）となるよう測定しているため、圧縮と引張が相殺されている可能性がある。

ゆえに、焼鈍による応力除去効果をより正確に把握するためには、ゲージ体積をさらに小さくした上で、肉厚方向の応力分布を測定する必要がある。

しかし、焼鈍有りの測定結果より、R部も含めて応力分布のばらつきが焼鈍無しに比べて低減している点からも、焼鈍の効果は有るものと考えられる。

5. まとめ

測定結果より、絞り傾斜部の残留応力低減、応力分布のばらつき低減等、焼鈍による効果が確認できた。このことから、水管に加工を施した後に焼鈍処理を実施することは、安全担保のための重要且つ効果的な手法であることが明らかとなった。

一方、この焼鈍効果をより正確に把握するためには、水管肉厚方向の応力分布の評価も必要であろうと考える。



図1 試験体外観形状及び計測状況（写真は半径方向絞割（1/2寸計測時））

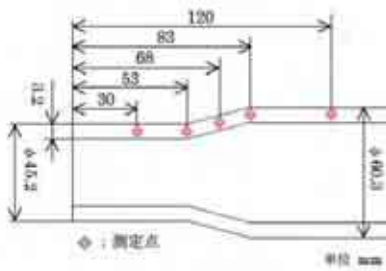


図2 測定位置

表1 測定条件

	軸方向	半径方向	周方向
入射側スリット	2mm×2mm	2mm×2mm	2mm×2mm
照射側スリット	2mm×15mm	2mm×15mm	2mm×15mm
波長検定結果	0.207340 nm	0.207349 nm	0.207349 nm

表2 化学成分

C	Si	Mn	P	S
0.18以下	0.35以下	0.30~0.60	0.035以下	0.035以下

単位 wt%

表3 機械的特性

引張強さ MPa	降伏応力 MPa	ヤング率 GPa	ポアソン比
346以上	175以上	214	0.28

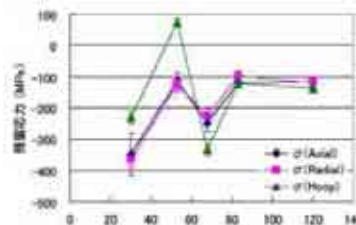


図3 残留応力測定結果（焼鈍無し）

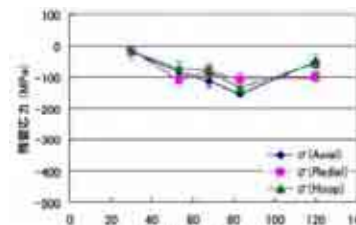


図4 残留応力測定結果（焼鈍有り）

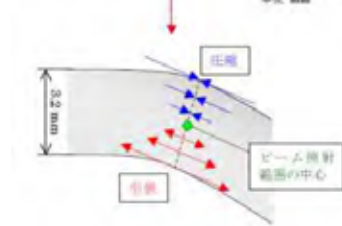
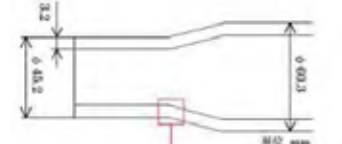


図5 絞り部肉厚方向の応力分布

ボイラーヘッド部の残留応力測定

利用者 ○秋山泰輔

所属 三浦工業(株)

1. はじめに

弊社製作のボイラーにおいては、胴板のプレス加工を施す際に発生する残留応力除去のため、加工後、胴板の焼鈍（JIS Z 3700）を実施している。

しかしながら、胴板の金属内部（表面から数mm程度）における局所的な残留応力は、金属表面や表面近傍（表面から数十μm程度）のみの測定に限られるひずみゲージ法やX線回析法等の手法では計測が困難であることから、これまで焼鈍効果を定量的に把握するには至っていない。

中性子回析法は、数mmから数cmオーダーの物質内部の応力状態を非破壊・非接触で測定することが出来る唯一の手段である。

ボイラーの安全性追求と、さらなる信頼性向上のため、日本原子力研究開発機構 原子炉JRR-3付設の残留応力測定中性子回析装置（MUSASHI）を用い、焼鈍前後の残留応力を測定することで、焼鈍による効果把握を行う。

2. 測定方法

試験体の外観及び計測状況を図1に示す。試験体は下記の2種類とし、試験装置の都合上（耐荷重）それぞれ鋸盤にて胴板全長の約1/25に切り出した。

- プレス加工→焼鈍実施 →管寄板溶接→切断
- プレス加工→焼鈍未実施→管寄板溶接→切断

測定位置を図2に示す。胴板プレス加工による曲げが最も厳しい部位における、板厚方向3点（外表面より3.50、5.75、8.00mm）を測定点とし、それぞれ縦方向、横方向、長手方向の3方向ひずみを、中性子回析法により測定した。

胴板の材質は、一般構造用圧延鋼材 SS400（JIS G 3101）である。化学成分、及び機械的性質を表1、表2に示す。

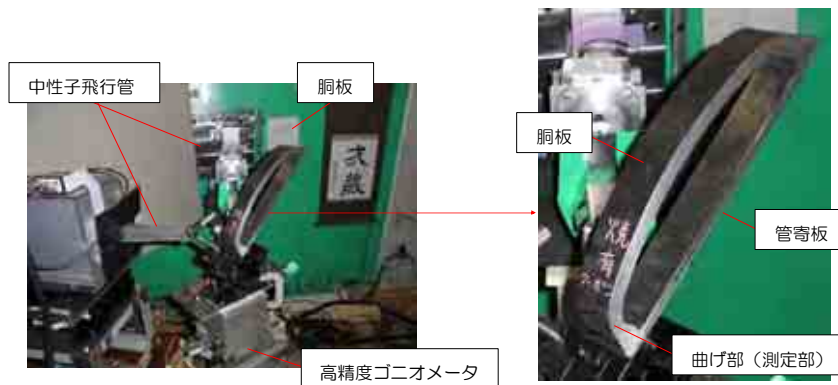


図1 試験体外観形状及び計測状況（写真は溶接長手方向残留ひずみ計測時）

3. 測定結果

中性子回析法より求めた3軸方向のひずみεより、以下の換算式にて残留応力を求める。式中のヤング率E及びポアソン比νは、表2の値を用いる。

$$\begin{cases} \sigma_T = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [(1-\nu)\epsilon_L + \nu(\epsilon_N + \epsilon_L)] \\ \sigma_N = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [(1-\nu)\epsilon_N + \nu(\epsilon_T + \epsilon_L)] \\ \sigma_L = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [(1-\nu)\epsilon_L + \nu(\epsilon_T + \epsilon_N)] \end{cases}$$

焼鈍無し・有りの測定結果を図3、図4にそれぞれ示す。

結果、焼鈍による残留応力への顕著な影響は見られなかった。また、焼鈍の有無に関わらず、引張の残留応力はいずれも100MPaを下回る程度であり、降伏点（284MPa）に至るほどの残留応力は発生していないことが分かった。

4. まとめ

配管周溶接継手について、従来の非破壊法では測定できなかった板厚内部も含めた多数の箇所の残留応力を測定した。測定データは、溶接残留応力の解析予測法の精度検証、従来測定法の精度やバラツキ範囲の検討等に活用する。

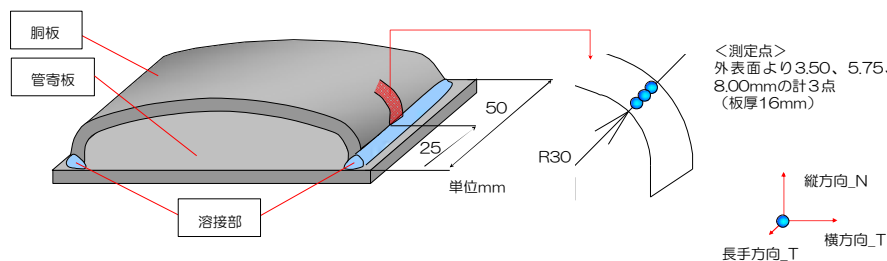


図2 測定位置

表1 化学成分

C	Si	Mn	P	S
0.15	0.15	0.69	0.016	0.005

単位 wt%

表2 機械的特性

引張強さ MPa	降伏応力 MPa	ヤング率 GPa	ポアソン比
428	284	203	0.28

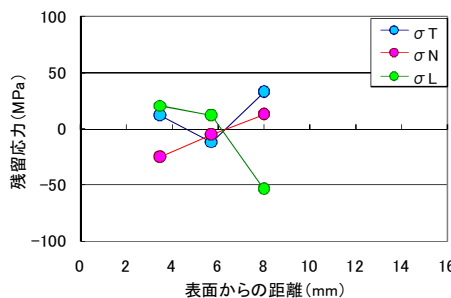


図3 残留応力測定結果（焼鈍無し）

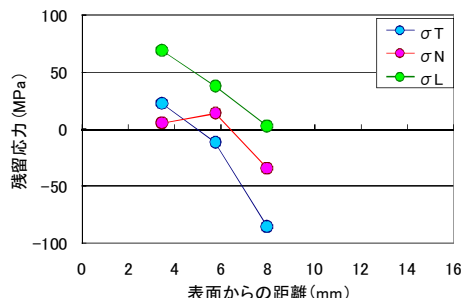


図4 残留応力測定結果（焼鈍有り）

発電機の軸材の残留応力と疲労損傷の評価

利用者 ○近藤泰人¹、松田憲昭¹、細川真人¹、高橋俊一²、柿田大祐²、佐々木敏彦²
 所属 1(株)日立エンジニアリング・アンド・サービス、²金沢大学

1. はじめに

電力系統に繋がるタービン発電機の軸材（合金鋼）には系統事故に伴いねじり振動による大きなトルクが発生する場合があります。そのため、軸材には疲労設計が行われ、また、稼働後には定期点検（磁粉探傷）による管理が行われる。しかし、万が一この点検時に異常が発見されるとその修理のために長期間の運転休止を招く可能性があります。

そこで、定期点検時に軸材の疲労状況を計測し軸材の残存寿命を評価することが出来れば、発電機の疲労状況に合わせた適切な電力系統運用が可能となることが期待できる。

本研究では、中性子回折により軸材内部の回折線プロフィール（半価幅）と疲労損傷の関係について、0次元検出器および2次元検出器(IP)による測定を行い検討した。

2. 実験方法

試験片は発電機用軸材（直径900mm）から、長手方向が軸材の半径方向に一致するように切り出し、最終的に図1に示す形状とした。次に両振り引張圧縮試験により3種類の疲労損傷度を与えた。すなわち、破断した疲労サイクル数 N_f に対し、 N/N_f が0、0.1、0.5および1.0の4種類を作製した。次いで、原研の多目的回折装置MUSASIを使用して中性子回折プロフィールを測定した。測定点は試験片中央部とし、5×5のスリットを使用し試験片半径方向と長手方向の2方向について測定を行なった。回折面は110と200を使用した。初期状態での半価幅を測定するため、未疲労試験片($N/N_f=0.0$)の測定を行なった。また、原研MUSASIに中性子イメージングプレートを取付け、211回折環を背面反射型にて測定した。

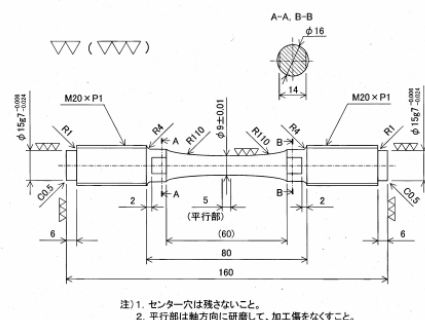


図1. 疲労試験片の形状および寸法

3. 測定結果

図2に0次元検出器によって求められた半価幅の変化を疲労度に対して示す。その結果、試験片半径方向(RD)においては、疲労損傷に対して半価幅が減少する傾向がみられた。試験片軸方向(LD)では、半径方向とは逆に半価幅が増加する傾向がみられた。

図3に、2種類の α に対して半価幅と疲労度の関係を図示したものである。なお、結晶格子面方向を試料表面の法線方向からの傾き ψ で表すと、 $\alpha=0^\circ$ のときは $\psi=10^\circ$ となり、ほぼ試料の半径方向に近づく。 $\alpha=180^\circ$ では同様に、 $\psi=50^\circ$ となり、半径方向と軸方向との中間的な方向である。0次元検出器によるRDおよびLD方向の中性子測定結果（図2）と比較すると、 $\alpha=0^\circ$ の場合は図2のRD方向と、また、 $\alpha=180^\circ$ ではLD方向と傾向が類似している。とくに ψ が近い $\alpha=0^\circ$ とRDはよく一致した傾向を示している。

以上より、IPと0次元検出器の測定結果は互いに類似した傾向を示すことが認められた。IP方式では、 $\alpha=0^\circ$ や 180° またはその付近の平均的な傾向などによって複数の格子面方向の挙動や、データの平滑化などが可能である。この点、ある特定の方向に限られる0次元検出器方式に比べて多角的な評価が可能となり、非常に有利であると考えられる。

4. まとめ

今回の調査結果をまとめると以下の通りである。

- 軸材の中性子回折線半価幅は、荷重方向に格子面法線方向を有する結晶群に対しては疲労損傷に対して減少し、荷重方向と直角な格子面法線方向を有する結晶群に対しては逆に増加する傾向が見られた。
- 中性子イメージングプレートによって測定した疲労損傷による半価幅は、回折環の位置によって異なる傾向を示し、 $\alpha=0^\circ$ では疲労損傷とともに減少し、 $\alpha=180^\circ$ では増加した。また、それらは0次元検出器によるものより大きい変化を示した。

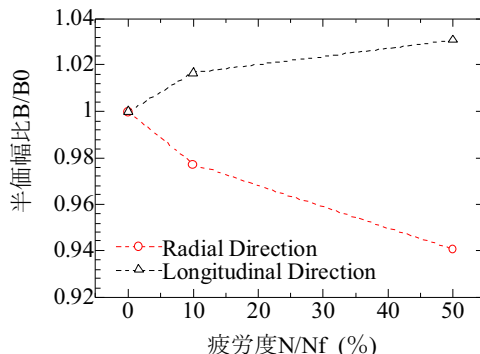


図2. 中性子測定による疲労度と半価幅の関係

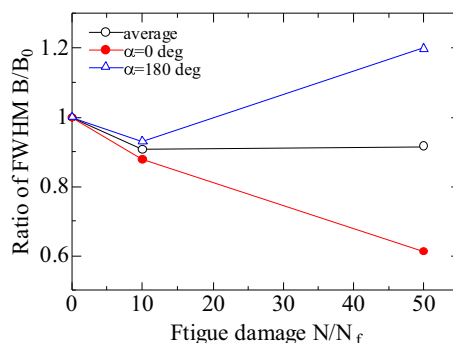


図3. 中性子IPによる測定結果

配管周溶接継手の残留応力測定

利用者 ○高橋 茂、大厩 徹

所属 株式会社 原子力安全システム研究所

1. はじめに

原子力機器・配管の高サイクル疲労やSCC等において残留応力は重要な影響因子の一つであり、損傷評価や余寿命診断には残留応力を把握し適切に考慮する必要がある。

しかし、現状では残留応力の解析的予測や測定技術は十分とは言えず、精度や信頼性について一層の向上が求められている。

本課題は、代表的な残留応力発生部位である配管周溶接継手及び強加工曲がり配管を対象に、解析精度の検証・改良や従来測定法（X線回折法、ひずみゲージ法など）の測定精度の検証等に供することを目的に、板厚内部も含めた詳細な残留応力分布の測定データを取得する。平成19年度（上期）は配管周溶接継手を測定した。強加工曲がり配管については平成19年度（下期）に測定の計画である。

2. 実験方法

(1) 原子力プラントの配管周溶接継手を模擬したモックアップを製作し、長手方向及び板厚方向の溶接残留応力分布を測定した。残留応力の評価に必要な無ひずみの格子面間隔 d_0 は、供試体と同一条件で製作した溶接継手の母材、HAZ部から d_0 クーポンを切り出して測定した。

(2) 供試体を図1に示す。供試体は、全長400のSUS316配管周溶接継手（中央が溶接部）を製作し両端を各々150切断した長さ100の配管である。

測定箇所を図2に示す。供試体の周方向溶接始終端の断面について、長手方向8箇所×板厚方向4箇所で3成分（周方向、半径方向、軸方向）を測定した。

測定状況を図3に示す。

3. 実験結果

測定結果の代表例として、周方向および軸方向応力の長手方向分布を図4に示す。

測定結果は、溶接部から長手方向に沿っての残留応力の減少傾向や、軸方向残留応力の板厚に対する曲げ状態など、配管周溶接継手に見られる特徴的な分布傾向であった。

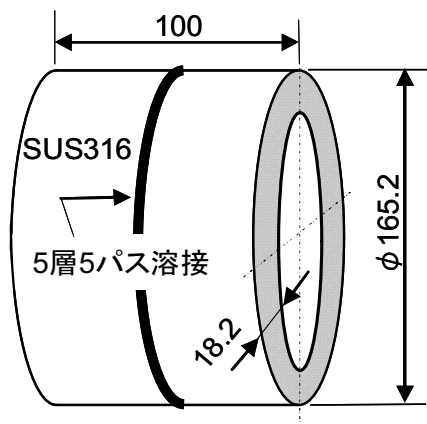


図1 供試体の形状寸法

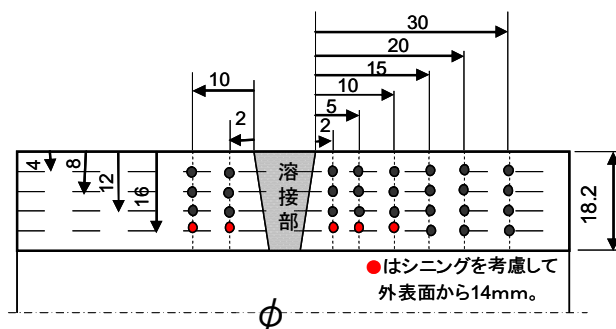
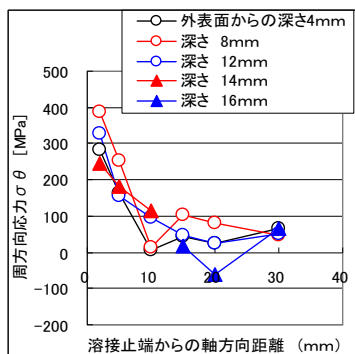


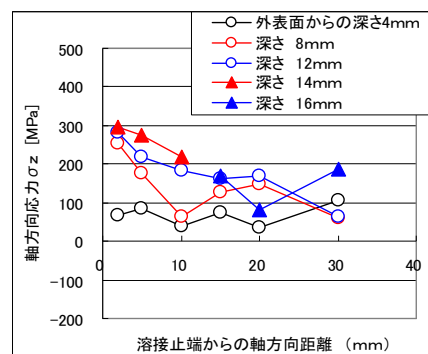
図2 残留応力の測定箇所



図3 RESA装置による残留応力測定の様相



(a) 周方向応力 σ_{θ}



(b) 軸方向応力 σ_Z

図4 残留応力測定結果一周方向及び軸方向残留応力の長手方向分布

4. まとめ

配管周溶接継手について、従来の非破壊法では測定できなかった板厚内部も含めた多数の箇所の残留応力を測定した。測定データは、溶接残留応力の解析予測法の精度検証、従来測定法の精度やバラツキ範囲の検討等に活用する。

強加工曲がり配管の残留応力測定

利用者 ○高橋 茂、大厩 徹
所属 株式会社 原子力安全システム研究所

1. はじめに

原子力機器・配管の高サイクル疲労やSCC等において残留応力は重要な影響因子の一つであり、損傷評価や余寿命診断には残留応力を把握し適切に考慮する必要がある。

しかし、現状では残留応力の解析的予測や測定技術は十分とは言えず、精度や信頼性について一層の向上が求められている。本課題は、代表的な高残留応力部位である配管周溶接継手及び強加工曲がり配管を対象に、解析精度の検証や従来測定法（X線回折法、ひずみゲージ法など）の測定精度の検証等に供することを目的に、板厚内部の残留応力分布を測定する。平成19年度（上期）は配管周溶接継手を測定し、H19年度（下期）は強加工曲がり配管を測定した。

2. 実験方法

(1) 強加工曲がり配管のモックアップを製作し、曲がり角度45°の断面の背側および腹側について残留応力を測定した。測定回折面は311とした。残留応力評価に必要な無ひずみ状態の格子面間隔 d_0 は、素材配管から d_0 クーポンを切り出して測定した。

(2) 供試体を図1に示す。供試体はSUS316TPを引曲げ加工（3DR）した、90°曲げ角度の配管である。残留応力の測定箇所を図2に示す。曲がり45°断面の背側および腹側の板厚内部について半径方向、周方向及び軸方向の3成分の応力を測定した。それぞれの板厚部について、内外表面から1.5mm深さの位置2点、内部等分割の位置3点の合計5点を測定した。測定状況を図3に示す。

3. 実験結果

測定結果の残留応力分布を図4に示す。背側では全体的に板厚の外表面側が引張り、内表面側が圧縮の曲げ応力状態であり、腹側では周方向応力は外表面側の方が内表面側よりも大きな圧縮応力、軸方向応力は板厚方向にほぼ様な分布であった。これらは解析的に予測される残留応力分布と定性的な傾向は類似であった。

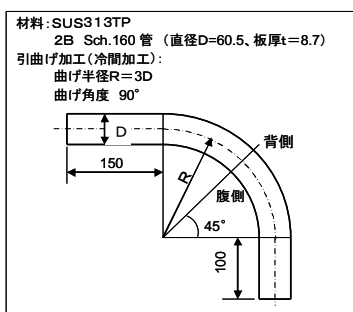


図1 供試体の形状寸法

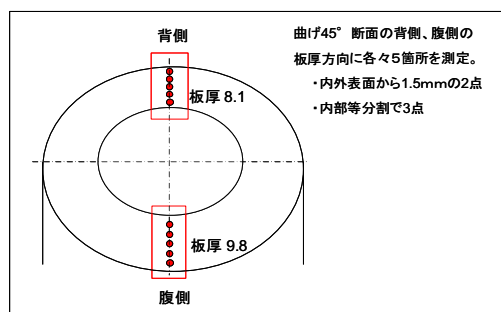


図2 残留応力の測定箇所

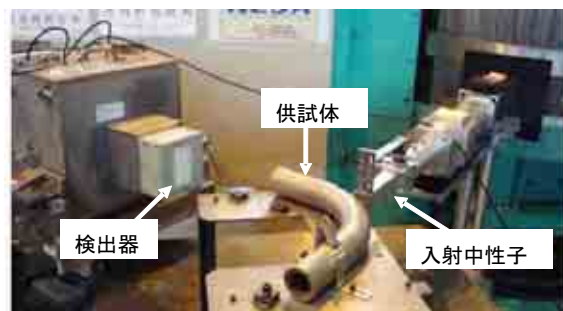
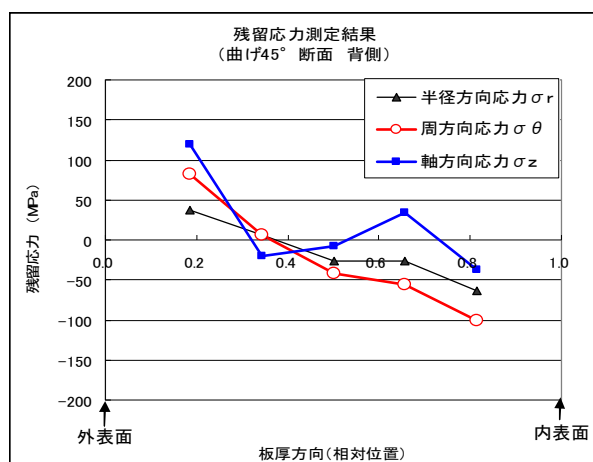
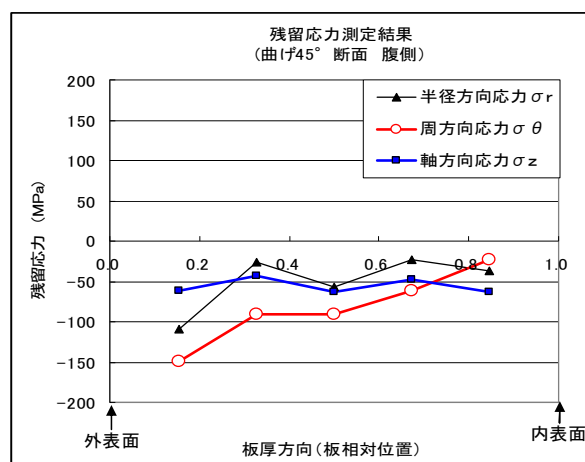


図3 RESA装置による残留応力測定の状況



(a) 背側の板厚内残留応力分布



(b) 腹側の板厚内残留応力分布

図4 強加工曲がり配管の残留応力測定結果

4. まとめ

強加工曲がり配管について、従来の非破壊法では測定できなかった板厚内部の残留応力分布を測定した。測定データは残留応力の解析予測法の精度検証、従来測定法の精度やバラツキ範囲の検討等に活用する。

配管溶接継手・強加工曲がり配管の残留応力 評価に係るd₀値の詳細測定

利用者 ○前川 晃、高橋 茂、野田 満靖
所属 株式会社 原子力安全システム研究所

1. はじめに

原子力機器・配管の高サイクル疲労やSCC等において残留応力は重要な影響因子の一つであり、損傷評価や余寿命診断には残留応力を把握し適切に考慮する必要がある。しかし、現状では残留応力の解析および測定技術は十分とは言えず、精度や信頼性について一層の向上が求められている。本課題は、平成19年度に残留応力測定に供した配管周溶接継手及び強加工曲がり配管の無ひずみ状態のd₀値を詳細に測定し、平成19年度の測定データを再評価して測定精度を高める。このため、本課題で使用するd₀値測定用試料は平成19年度の測定に供したものと異なる作製方法を採用する。

2. 実験方法

- 平成19年度に使用した供試体から、測定部に該当する6×18×48(mm³)の範囲全体を3×3×3(mm³)で裁断した192ピースによりd₀クーポンを作製する。111回折面と311回折面を用いて各部位のd₀分布を把握し、応力換算前の残留ひずみ測定値を再評価する。
- 強加工曲がり配管（配管の背側及び腹側）から直接採取したd₀クーポンを測定し、回折面毎に格子定数を比較する。さらに、311回折面のd₀を用いて測定値を再評価する。

3. 実験結果

- 作製したd₀クーポン及び実験装置を図1に示す。d₀値に軸方向及び板厚方向(径方向)の分布は見られず、平均値は平成19年度の測定値とほとんど同じであった。したがって、d₀クーポンは十分な精度で測定されていることを確認した。d₀の平均値を用いて再評価した周方向、径方向及び軸方向の残留ひずみを図2に示す。図2に示す解析値はFEMコードABAQUSを用いて計算した。径方向及び軸方向の測定値と解析値は一致するが、周方向について差が見られた。周方向の測定精度に影響を与えている要因の存在が示唆された。
- 曲がり配管から採取した塑性加工を受けたd₀クーポン及び直管から採取した塑性加工を受けていないd₀クーポンより求めた各回折面の格子定数を図3に示す。塑性加工により311回折面以外の回折面の値が大きく変動することが確認できた。311面のd₀値は平成19年度の値とほとんど変わらなかった。311回折面のd₀値を用いて測定値を再評価した結果を図4に示す。解析的に予測される残留応力分布と定性的な傾向は類似であった。

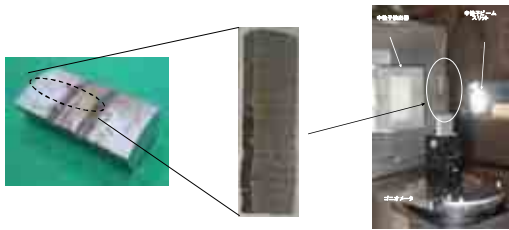


図1 作製したd₀クーポンおよび実験装置

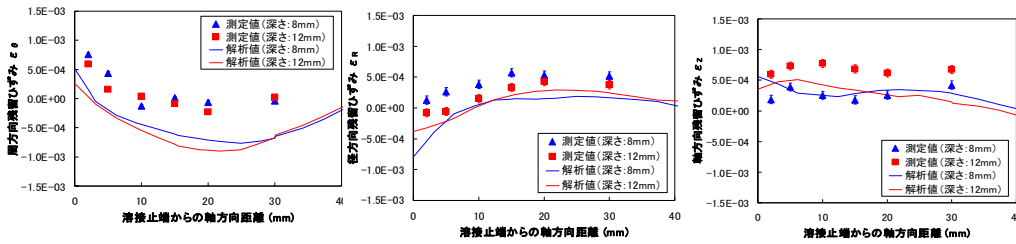
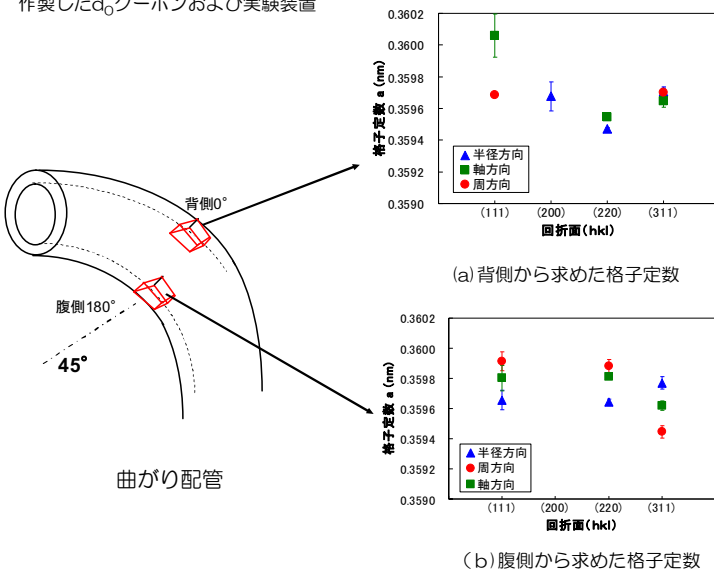
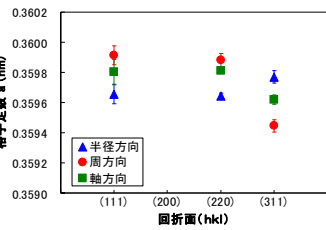


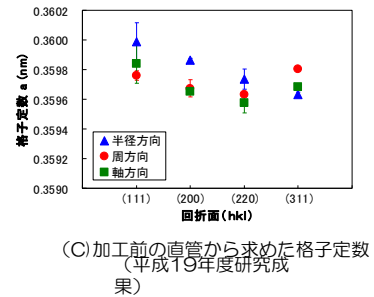
図2 残留ひずみの測定値と解析値との比較



(a) 背側から求めた格子定数

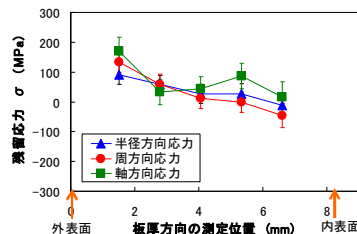


(b) 腹側から求めた格子定数

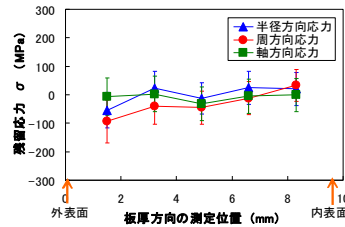


(c) 加工前の直管から求めた格子定数 (平成19年度研究成果)

図3 回折面毎の格子定数の比較



(a) 背側の板厚内の残留応力



(b) 腹側の板厚内の残留応力

図4 板厚内残留応力分布

鉄筋コンクリート中の応力測定に関する研究

利用者 ○安田正雪¹, 荒金直樹¹, 野口貴文²・兼松学³・丸山一平⁴

所属 ¹東洋建設, ²東京大学, ³東京理科大学, ⁴名古屋大学

1. はじめに

鉄筋コンクリート造の特徴は、圧縮に強いコンクリートと引張りに強い鉄筋を相補的に組み合わせた複合材料であるが、これら相補的關係は鉄筋とコンクリートの付着特性によって左右され、ひび割れ挙動や鉄筋コンクリート部材の特性に大きな影響を与える。これまで、鉄筋の応力は鉄筋表面に箔ゲージを離散的に貼付することにより測定されることが一般的であった。しかしながら、ゲージ部の防水処理や配線の取り回しなどが付着特性に及ぼす影響は無視できないものと考えられており、鉄筋表面に溝を切ったり、内側をくり抜いた鉄筋内部にゲージを貼付するなどして、測定系への影響を最小限にとどめる努力が為されてきた。しかしながら、ゲージを用いた測定では、このように配慮したとしても、例えばひび割れ部の近傍など応力を直接測定することは困難であった。

そこで、本研究では、量子ビーム技術の一つである残留応力解析用中性子回折装置(RESA)を用い、鉄筋コンクリート中の鉄筋応力を完全非破壊・非接触測定により測定することを試みた。特に、本年度は本手法の適用可能性の検討を行うとともに、ひび割れ近傍における鉄筋の応力分布を測定し、ひび割れ近傍の付着破壊領域の応力状態を明らかにすることを目的とする。

2. 実験概要

鉄筋コンクリート中の鉄筋応力の非破壊測定技術の開発を目的として、①鉄筋を用いた基礎的物性試験と、②鉄筋コンクリート付着試験体を用いたひび割れ近傍の鉄筋応力測定試験の2つの実験を実施した。

本研究における中性子回折残留応力測定は、全て(独)日本原子力研究開発機構JRR-3のガイドホールに設置されているRESAを用いて実施した。

本装置は、研究炉より得られた中性子線を単一波長の中性子線(約 $\lambda = 0.159\text{nm}$ の固定波長)に制御して照射し、負荷をかける前後の中性子回折角度の差より材料内部の応力を算定するものである。同様の放射線測定技術であるX線を用いた残留応力測定に比べ、中性子の透過性が高いことを利用して、より深い部位の応力の測定が可能である。図-1に装置概要を示す。回折角は、スリットにより制御されたビームを照射し、試料中の格子面で散乱した中性子を、中性子検出器(He-3一次元検出器)により測定し、回折角度および回折強度(中性子検出カウント数)の関係より、ガウス分布を仮定してピーク角度を得た。ゲージボリュームは図-1に示すとおりである。

応力の導入は全て図-2に示す拘束治具を用い、センターホールジャッキを用いて載荷した。

鉄筋は、市販の高張力ねじ込み棒鋼(SD345 D16, 節ピッチ8mm JIS G3112準拠)を用い、コンクリートは水セメント55%の普通強度コンクリートとした。一般に、中性子は水素元素ほか一部核種によって大きく減衰する特徴を有しており、コンクリート中の蒸発性水分およびセメント硬化体中の結合水により大きく減衰することが知られている。そこで、本試験の範囲では中性子の透過性を高めることを目的として、乾燥養生および105度乾燥を実施するなど配慮した。

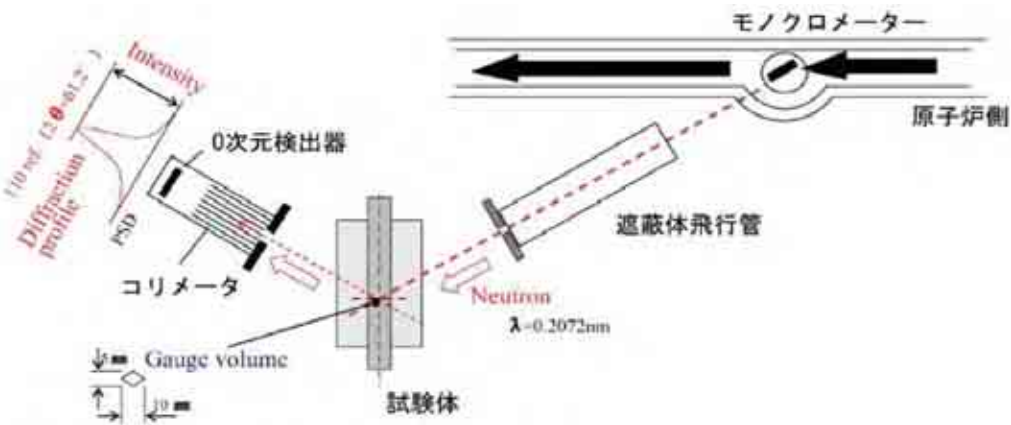


図-1 光学系

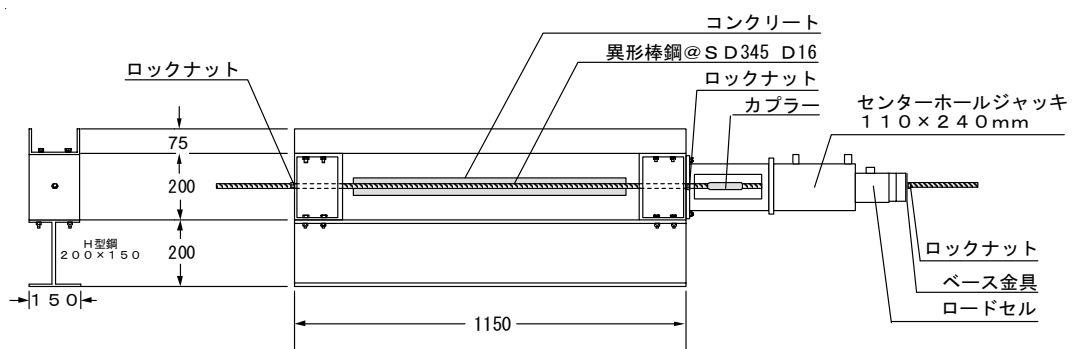


図-2 拘束治具概要

3. 実験結果

3.1 鉄筋を用いた試験 (実験 I)

(1) 試験概要

まず、RESAを用いて一般的な建築用鋼材を測定した場合の挙動を把握することを目的として、D16ねじふし棒鋼を用い、以降のひずみ測定で用いる基礎パラメータとなるを得るとともに、測定誤差などを検討した。さらに、RESAによるコンクリートの鉄筋応力測定の可否および可探深度、必要照射時間などの検討を目的とし、試験体中央に円孔を設けたブロック状のコンクリート中に鉄筋を通し、付着応力の発生しない理想的な状態における鉄筋応力の測定可能性について検討した。そして得られた結果より、所用のピークカウント数(100カウント程度)を得るための照射・測定時間や、コンクリートが鉄筋の応力測定に及ぼす影響などについて検討した。コンクリート試験体は、中央にφ20mmの孔を設け、異形棒鋼を試験体中央に通して、鉄筋にのみ応力がかかる状態でRESAによる応力測定を行った。

(2) 試験結果

D16鉄筋のみのRESA測定結果を図-3に示す。測定点は、ピッチ間隔を考慮し4mmピッチに10点を測定した結果を平均したものである。

また、110回折のひずみ変化に対して鉄のヤング率の文献値を用いた場合を直線で示した。結果より、2はおおよそ 46.213° であり、近似の相関係数が99.3%、標準偏差が 0.0050° と高い精度を有するとともに、文献値とも一致していることが確認された。したがって、回折角から求めた値を用いることでほとんど誤差なく測定できることが確認された。

図-4に、50×50mmおよび70×70mmのコンクリートブロック中に鉄筋を配置した場合の測定結果を示す。尚、50×50mm試験体については、24時間脱形直後より水中養生を施した含水状態の試験体について測定を行った。結果、鉄筋のみの結果に比して若干バラツキが大きくなったものの、変わらず高い線形性を有することが明らかとなり、コンクリートに埋設した場合においても同様にRESAによる応力測定が可能であることが示された。また、所要のピークカウントを得るための測定時間は、3分から5分/1点であった。また、ピークカウント数で100カウント程度測定できていれば、応力-回折角の関係において試験体寸法(かぶり厚さ)および乾燥状態による系統だった傾向は観察されなかった。

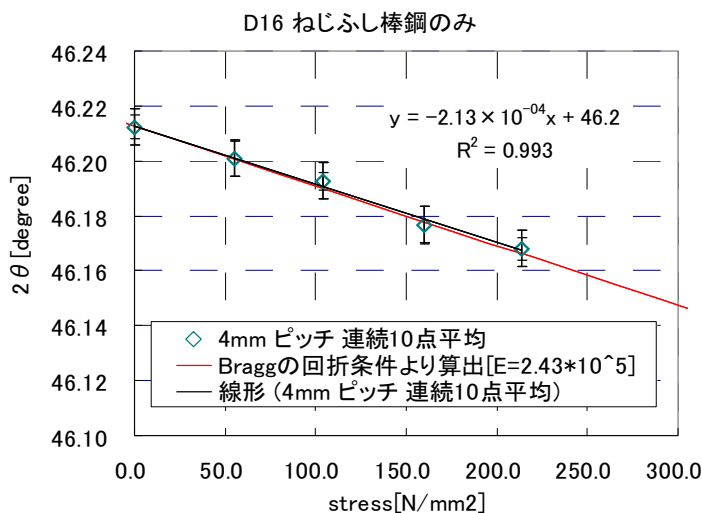


図-3 RESA測定結果 D16鉄筋のみ

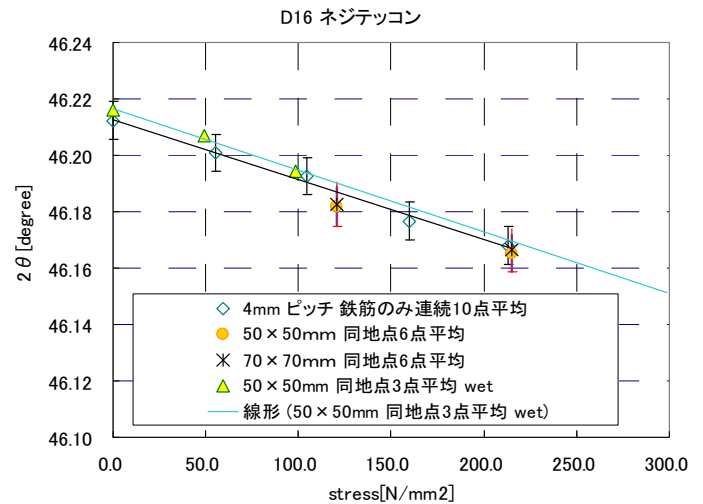


図-4 RESA測定結果 コンクリート中に配置



図-5 付着用試験体概要

3.2 鉄筋コンクリート中の鉄筋応力の測定(実験Ⅱ)

(1) 試験概要

実験ⅠではRESAによりコンクリートを遮蔽物としても精度よく鉄筋応力を測定できることが示されたことから、実験Ⅱでは実際にコンクリートとの鉄筋の付着がある試験体における鉄筋応力の測定を試みた。また、鉄筋両端に異なる応力レベルの引張応力を載荷することで、ひび割れを導入し、ひび割れ近傍における鉄筋の局所的な応力分布の測定を試みた。試験体寸法および形状を図-5に示す。試験は、図-2に示した外部拘束治具に専用ボルトにより拘束し、無載荷、2t、4tを目標として載荷して応力測定を実施した。各点の測定時間はおよそ3分とし、測定箇所は、試験体中央に生じたひび割れ部分近傍の測定ピッチが細くなるよう、0.5mmから5cmピッチとした。

(2) 実験結果

RESAによる付着試験体結果を、図-6に、同様にひび割れ図を図-7に示す。図-7は、面a~dまでをひとつにまとめた図である。また、図中の加圧側鉄筋応力は、応力導入時の目標荷重を公称断面で序した値を示した。結果より、無載荷時の結果からは、コンクリートの乾燥収縮に伴い、圧縮側に応力が導入されていることが確認される一方で、測定応力はほぼ全域において載荷応力を最大値として推移している様子が確認された。その他の多くの箇所では鉄筋は載荷応力の6割から8割程度応力負担している結果となった。測定値が加圧側の鉄筋応力まで到達している箇所は、5mmゲージ近傍にひび割れがはいりその全域にわたって付着が失われている箇所と解釈可能であると考えが、外部からのひび割れ観察状況とは必ずしも一致しなかった。ただし、鉄筋応力が高くひび割れが予測される箇所は、載荷応力が増えるに伴い、似たような概形で推移している傾向が見られる場合が多かった。

一方、無負荷のときの分布と、負荷がかかったときの分布を比較すると、後者の方がばらつきが大きい傾向が観察された。このばらつきの原因としては、鉄筋のリブとコンクリートの機械的相互作用により、リブ部分前後において複雑な応力分布が存在する可能性のあること、また、ひび割れの存在により、リブ近傍での応力分布が存在することなどが挙げられる。この点については、今後、ひずみ感度の良い回折を利用するなど、実験の工夫により精度を上げられる可能性はあると思われる。

以上より、測定された試験結果は十分に想定される傾向を示しており、鉄筋のみの試験結果などを踏まえると、ひび割れ部における局所応力を捕らえることに成功していると考ええる。しかしながら、外部のひび割れ傾向と必ずしも一致するわけではなかったことから、内部の微細ひび割れの状況を確認するなどすることで、測定結果の検証が必要であると考ええる。

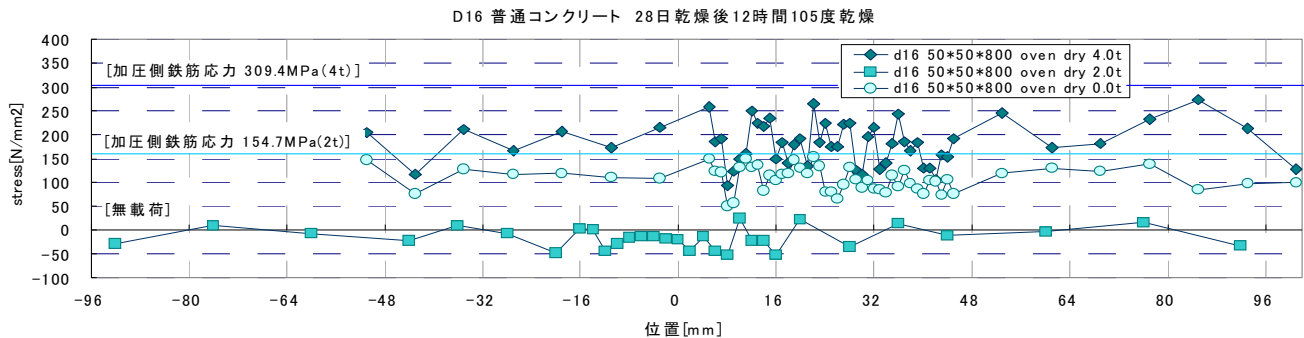


図-6 普通コンクリート測定結果



図-7 普通コンクリートのひび割れ図 (4面を重ねて表示・中央は全体図)

4. まとめ

本研究では、残留応力解析用中性子回折装置(RESA)を用いて鉄筋コンクリート中の鉄筋に生じている応力分布を非破壊的に測定する手法の発を目的として一連の基礎的研究を実施し、以下を知見として得た。

一般的に用いられている異形棒鋼について、応力と回折角の関係を検討しを得た。その結果、高い精度で鉄筋応力を測定可能であることが明らかになるとともに、従来の文献値とも整合する結果が得られた。

コンクリート中に配置した鉄筋の測定を行い、鉄筋単体の結果同様、高い精度で鉄筋応力の測定が可能であることが明らかとなった。また、50mm角試験体、70mm角試験体の場合、3分から5分で1点の測定が可能であることが明らかとなる一方で、所要のピークカウント数が得られていれば鉄筋応力測定には顕著な影響は認められなかった。

鉄筋コンクリート中の鉄筋応力を測定した結果、鉄筋中の応力分布を得ることができ、有意な傾向を得ることができたと考ええる。しかしながら、外部に見られるひび割れなどとの相関は明らかではなく、特に鉄筋近傍の微細ひび割れ状況などの詳細な検討が必要である。

溶接構造物の残留応力分布測定による耐SCC評価

利用者 ○寺門一佳¹、鍵山 新¹、今瀬 肇²
 所属 ¹日立製作所、²茨城県企画部

1. はじめに

地球温暖化防止のための自動車の排気ガス対策の一つにアルコール燃料を用いた燃焼システム開発がある。燃焼システムの燃料配管はステンレス鋼を銅ろう付で組み立てることが考えられている。この部品の技術課題に疲労破壊と応力腐食割れ（SCC）対策がある。SCCは原子カプラントの溶接部などで起こることが良く知られており、残留（引張）応力、材料のマイクロ組織変化、および使用環境（腐食）の3因子が組み合わさって生じる破壊であり、メカニズムが複雑で不明な点が多い。その中でも、残留応力の評価はきわめて重要である。疲労き裂は応力集中部から発生するので、ろう付部近傍の内部を含めた応力分布を測定することが必要で、この測定は中性子応力測定法によってのみ可能である。対象は精密自動車部品であり、ステンレス鋼製のパイプに燃料を噴霧する電子燃料噴射弁を取り付けるポートのろう付部である。ろう付部近傍の応力分布を測定することは、疲労強度や対SCCを考慮した材料設計において大切であり、製品の強度信頼性を向上させることに貢献できる。

2. 実験方法

(1) 試料： SUS304ステンレス鋼配管継手の一部を切り出して図1の赤丸部分を

測定対象とした。

(2) 測定装置： RESA、オイラークレドール、および一次元検出器を使用

(3) 測定条件： 中性子線波長；0.18nm

回折面/回折角；(220)/88.8°

測定ゲージ体積；2×2×2mm³

(4) 測定箇所： 12箇所の測定点を図2に示す。応力主軸と推定される3方向からひずみ分布を測定した。一部の点では7方向から格子ひずみを測定した。

3. 実験結果

図3に示すように、オイラークレドールに測定対象物を取り付けることにより、同一場所を多くの方向から測定することができた。従来は3方向のひずみを測定するために試料の再セットが必要で測定位置が動く可能性があったが、この方法を用いるとその懸念はなくなった。

図4に軸方向の回折角度の測定場所による変化を示す。同様に円周および径方向の角度を求めた結果、測定点4は測定方向によらずほぼ一定の値になったので、この値を無応力状態の格子面間隔(d₀)として、格子ひずみを算出した。次に、回折弾性係数として、ヤング率212.7GPa、ポアソン比0.28を用いて次式より応力を計算すると、軸方向の応力分布は図5のようになった。

$$\sigma_{33} = \frac{E\{(1-\nu)\varepsilon_{33} + \nu(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22})\}}{(1+\nu)(1-2\nu)}$$

測定点2を除くと、いずれも引張応力である。ただし、一部の回折プロファイルには母材のみでなく、ろう(Cu)からの回折が重なるなど問題があり再実験が必要である。一部の測定点では7方向から測定を行い主軸方向の検証を試みたところ、図2の想定した主軸方向で良さそうであった。現在、微小部X線応力測定によって表面の応力分布測定を行っている。

4. まとめ

配管内壁に引張応力が残留すると応力腐食割れを助長する要因になるので慎重な検討が必要である。今回の測定結果に関しては、d₀の値、測定位置決め（ゲージ体積が部材からはみ出す場所がある）、ろう(Cu)と母材からの回折の分離ほか、いくつかの検討すべき点があり、引き続き検討を重ねる必要がある。

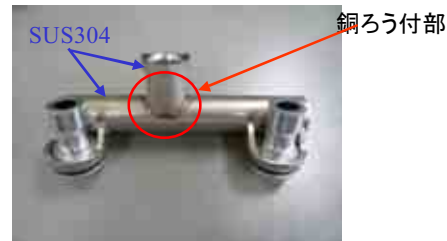


図1 応力測定対象部品

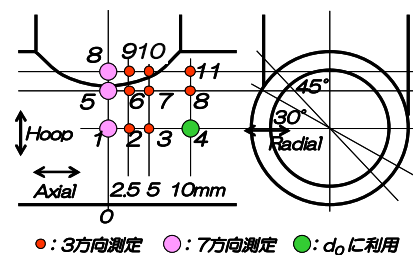


図2 ひずみ測定位置（12箇所）



図3 オイラークレドールを用いた測定

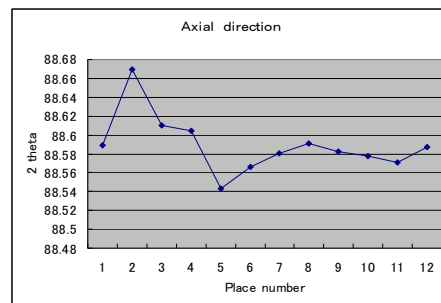


図4 軸方向のブラッグ角度分布

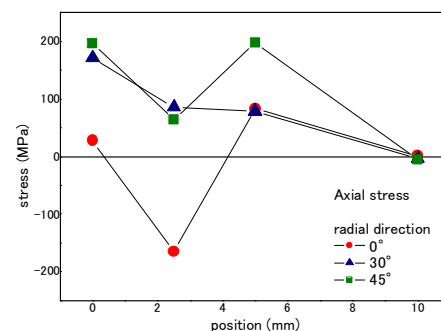


図5 軸方向の応力分布測定結果

溶接部における残留応力の測定

利用者 ○坂根 仁¹、新本真太²

所属 ¹住重試験検査株式会社、²住友重機械工業株式会社

1. はじめに

溶接や加工等によって発生する残留応力は、時として疲労寿命や材料強度といった機械的特性に悪影響を及ぼす。例えば、国内の原子力施設の多くが30年を超える運転を続けており、経年変化事象である応力腐食割れ（SCC）による機器・配管材料の事故やトラブルが報告されている。このSCCの原因として、材料表面に発生する引っ張り応力だけでなく、材料内部に生じる残留応力が影響することがわかっており、構造物の信頼性を評価する上で表面から内部までの残留応力を知ることが重要となっている。

住重試験検査株式会社では、実橋や圧力容器等の調査診断サービスを行っており、その一つとしてひずみゲージ等を用いたオンサイトでの応力測定を行っている。これらが対象としている評価領域に加えて、中性子による残留応力測定技術を取り入れることで、非破壊で、詳細な検査を行うことが可能になり、耐久性の評価能力が向上できると期待する。

本利用課題では、40mm厚の鋼材を溶接した試料を用いて、中性子回折による残留応力測定を実際に体験し、新たな検査事業への展開を行うための検討材料を得ることを目的とする。今回は鋼材の溶接部位周辺の残留応力を測定した。

2. 実験方法

実験は中性子応力測定装置RESA-IIを用いて行った。実験体系と試験体の外観を図1に示す。試料サイズは約100×100×40mmである。異なる溶接方法を用いた2種類の試験体（typeA,typeB）を準備した。試験体と測定位置の関係を図2に示す。溶接方向に対して垂直な面を測定領域とし、溶接方向に対して直交方向T、法線方向N、平行方向Lに対する回折測定を行った。



図1 実験体系図と試験体

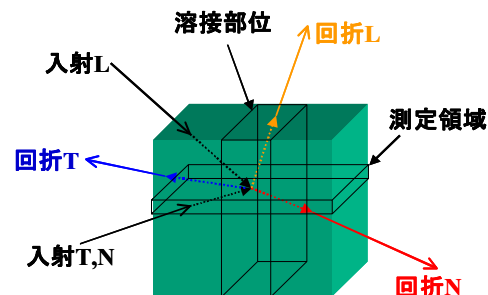


図2 試験体における測定位置と方向の概略図

測定条件を表1に示す。平行方向Lに関しては、測定領域の曖昧さを抑えるため入射側のスリットを1/3に変更した。法線方向Nに関しては試験体と測定系との兼ね合いから、異なる回折角度で行った。入射中性子の波長は標準試料Niを測定する事で、2.204Åである事を確認した。

表1 測定条件

	直交方向T	法線方向N	平行方向L
入射側スリット (mm)	5×15	5×15	5×5
回折側スリット (mm)	5×15	5×15	5×15
回折角2θ (度)	65.8	140.5	65.8

3. 実験結果

二つの試験体ともに直交方向Tと法線方向Nに関しては測定可能であったが、平行方向Lに関するデータは統計量が悪く、データのばらつきが大きかった為、回折ピークの導出は行えなかった。

各試験体に関する直交方向のひずみの結果を図3、4に示す。基準面間隔d0は同様の材質を測定した結果から決定した格子定数a=2.8686Åを用いて導出した。

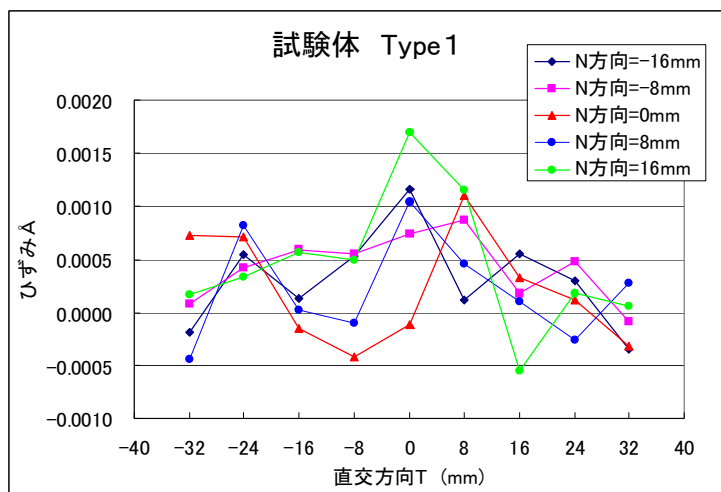


図3 試験体Type1のひずみ分布

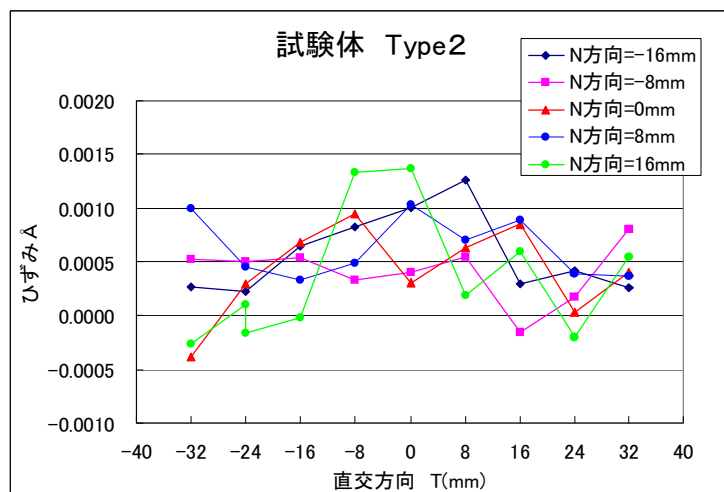


図4 試験体Type2のひずみ分布

4. まとめ

また今回はデータを得ることはできなかったが、中性子量を増やせば40mm厚の鋼材でも測定できる事を確認した。来年度はRESA IIよりも測定効率が良いRESAを用いた測定を予定している。

溶接部における残留応力の測定

利用者 ○上野 斌、中谷光良、山崎洋輔

所属 日立造船株式会社

1. はじめに

厚板機械構造用鋼においては、残留応力除去に関する焼鈍効果を定量的に評価された例はない。機械構造用鋼（SCM440材）はC量が0.4%程度と高く、直接部材を溶接することができない。このため、まず軟鋼材を肉盛溶接し、肉盛部に部材を溶接している。しかしながら、肉盛溶接による残留応力を十分除去できていないと低温割れの恐れがある。残留応力除去には焼鈍が用いられている。その効果を確認するため、焼鈍の有無の材料に対して、中性子により肉盛溶接材の残留応力分布を測定した。

2. 実験方法

極厚板（SCM440、板厚215mm幅530mm長さ800mm）に、幅80mm高さ20mmとなる5層50パスの肉盛溶接を施工した。溶接方法は炭酸ガスアーク溶接で溶接材料は軟鋼用のものを用いた。次に、熱が部材に入らないように水冷しながら機械的に長さ50mmに2体切断した。2体の内、1体は550℃×10hrの熱処理（焼鈍）を施した。2体の試験体を図1に示す。

さらに、本試験体をRESA2で設置できるサイズに水冷しながら機械切断し、表面下5mmの溶接横割れの原因となる溶接線方向のひずみを算出した。RESA2での測定状況を図2に示す。

3. 実験結果

残留ひずみ測定結果を図3に示す。溶接のままでは、溶接止端部に応力集中があり、表面下5mm程度まで残留応力が高くなっていることが分かる。また、550℃×10hrの熱処理（焼鈍）により、大幅に応力が低減していることが分かる。

図4は、表面下4mmの位置における溶接線方向の残留ひずみの測定結果である。今回の焼鈍により残留ひずみが1/4程度まで低減できていることが分かる。



(a) 溶接のまま



(b) 熱処理

図1 肉盛溶接試験体

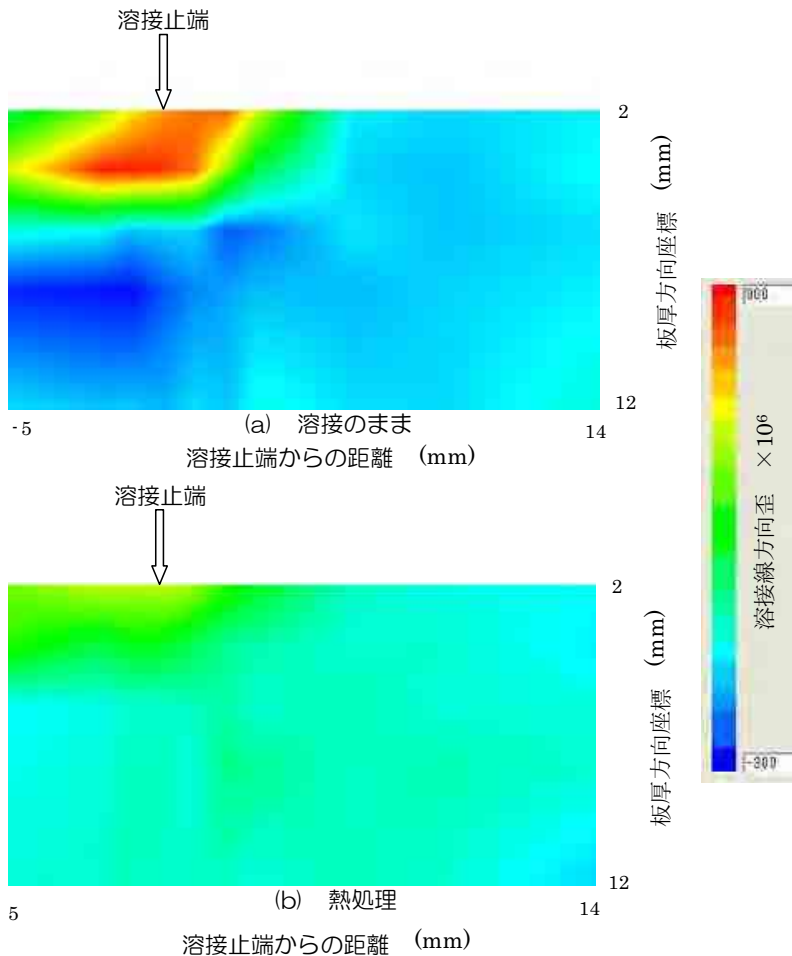


図3 残留ひずみ測定結果



図2 RESA2での測定状況

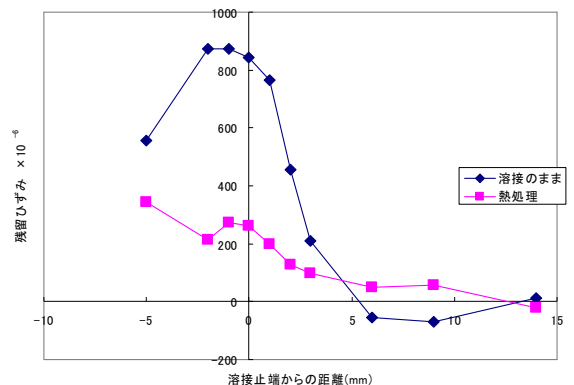


図4 表面下4mmの残留ひずみ分布

4. まとめ

焼鈍による残留応力の低減効果を定量化することができた。今後は、熱弾塑性FEM解析を実施するとともに残留応力測定データを拡充して、焼鈍条件と残留応力低減の効果を明らかにする。

本技術開発により、製品の信頼性をより向上できるだけでなく、生産のコストダウンにも繋がる。

構造物内部のボルトの軸力測定

利用者 ○今瀬 肇¹、浅井 洋光²、伊藤 登史政²、騎馬 英嗣²、村田 慎治²、久保 亮佑²
 所属 ¹茨城県企画部、²株デンソー

1. はじめに (背景, 目的等)

自動車用エアコンプレッサなど自動車部品として用いられる部品の多くは、ボルト締結部を有しているが、ハウジング内部に締結部を有していることが多く、製品外部から直接軸力を測定することができない。そのため、ひずみゲージを用いた間接的な測定手法が用いられるが、歪ゲージ貼付のためには締結形状を変更した模擬形状にせざるを得ないことが多いため、製品との整合性に問題が生じる。また、ねじ部、軸部といったボルト内部の軸力分布などはCAEにより予測可能であるが、実験的な検証は極めて困難である。さらに、ボルトにはMボルト以外にもタッピングスクリューなどがあり、軸力評価が困難な場合も多い。したがって、構造物内部のボルト軸力を直接測定する手法が確立できれば、より高精度な締結構造の設計が可能となると考える。そこで、エアコンプレッサの締結部を模擬した試験片を用いて、ひずみゲージおよび中性子により軸力測定を行い比較検討した。

2. 実験方法

2.1 試験片

コンプレッサに用いられるボルトを模擬するため、アルミ中空円筒にM8ボルトを締結し、中性子により軸力測定を行った。試験片模式図を図1に示す。ボルト材質はSCM435でありボルト径はM8である。また、ひずみゲージをボルト軸部に埋め込み外部負荷軸力を測定可能とした。なお、負荷軸力とひずみゲージ出力間の校正は測定前に引張り試験機で行った。アルミニウム中空円筒は内径9mm、外径19mmのA6061-T6製を用いた。

2.2 試験条件

ボルトの負荷軸力は前述のひずみゲージで制御し、0~1500 $\mu\epsilon$ の範囲で250 $\mu\epsilon$ 刻みの7水準とした。中性子測定条件を表2に示す。回折面は測定時間の関係から後述する(110)面のみを使用し、回折角は得られたプロファイルのガウス関数による近似曲線のピークから決定した。また、測定ひずみ方向は軸方向のみとした。測定位置は図1に示す軸部および完全ねじ部とし、3×3mmのスリットを用いた。高さ位置合わせはボルト頭部およびその反対のねじ外形を各ひずみ負荷後に計測して傾き補正を行った。

2.3 解析条件

中性子測定による応力は、測定から得られた回折角からBraggの式 $d = \lambda / (2 \sin \theta)$ を用いて各条件における格子間隔 d を求め、無負荷の格子間隔 d_0 を基準として格子ひずみ $\epsilon = (d - d_0) / d_0$ を算出、回折弾性係数 $E = 224 \text{ GPa}$ を用いてボルトに負荷されている応力 $\sigma = E \epsilon$ を得た。この得られた応力をゲージにより実測した応力と比較することで測定の妥当性を評価した。ただし、ねじ部応力はおねじの谷径を用いた公称応力を用いた。本実験で用いたM8ボルトの場合、ねじ部公称応力は軸部応力の約1.21倍となる。

3. 測定結果

3.1 予備測定

軸力測定に先立ち、測定回折面を決定するため(200)および(110)面の回折プロファイルを測定した。結果を図2(a), (b)にそれぞれ示す。図から分かるように同程度のピーク強度を得るには(200)面では120min、(110)面では8min要した。この顕著な回折強度の違いはボルトの製造工程すなわち、冷間鍛造によってボルトに生じた集合組織の影響と考えられる。そこで、S/N比に優れた(110)面を軸力測定に用いた。

3.2 軸力測定結果

ひずみゲージ出力と回折角の関係を図3(a), (b)に示す。図中には各ひずみでの測定測定回折角、算術平均値および平均値の最小2乗近似直線を同時に示す。軸部、ねじ部とも軸力が高くなるにつれて回折角が線形的に小さくなり、単調的な引張りひずみの増加が予想される。軸部とねじ部の負荷軸力と中性子測定応力の関係を図4(a), (b)に示す。図中には中性子測定ひずみの最小2乗近似直線および各場所の負荷公称応力も同時に示す。いずれの測定場所も負荷公称応力と中性子測定応力は良く一致した。つまり、ボルトの軸力は中性子応力測定手法により非破壊的に測定可能であると考えられる。

4. まとめ

1. α -Fe(110)面を使用したボルト軸部、ねじ部の中性子測定応力は機械的負荷による公称応力と一致した。
2. 中性子応力測定手法はボルトの軸力を非破壊的に測定することが可能である。

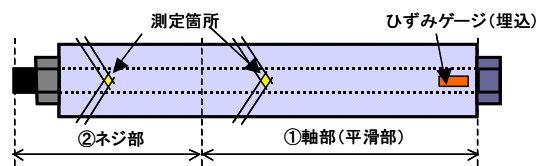


図1. 試験片模式図

表1 測定条件

回折面	(110)
検出器角度	65.8
中性子波長	2.2124 Å
スリットサイズ	3×3mm
測定方向	軸方向
ピーク近似関数	ガウス関数

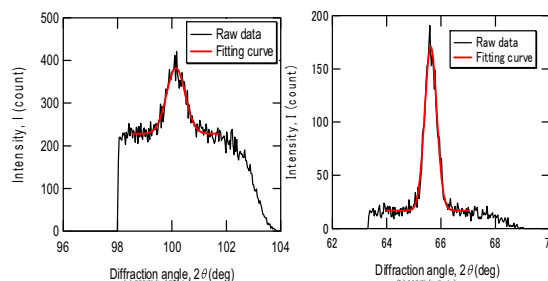


図2. 回折プロファイル

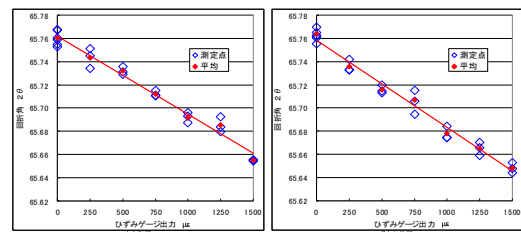


図3. 軸ひずみと回折角の関係

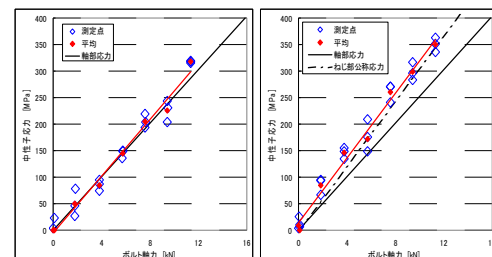


図4. 負荷軸力と中性子測定応力の関係

鉄系焼結部品の内部歪分布の測定

利用者 ○今瀬肇¹、山口浩司²

所属 ¹茨城県企画部、²住友電気工業(株)

1. はじめに

鉄系焼結部品は自動車やエレクトロニクス製品の構造材料として多用されている。寸法や硬度など、種々の特性値の要求精度の高まりに伴い、設計・製造・品質保証の各段階で、経験と試行錯誤から脱した科学的アプローチが求められている。粉末をプレスした成型体やこれを熱処理した焼結体の内部歪は寸法精度やクラックの発生など、品質上極めて重要な結果をもたらす特性値であるが、SPRING-8などの放射光施設を用いた高エネルギーX線回折測定を以っても、歪や応力を測定できるのは、表層からせいぜい2mm程度までである。このため、内部歪に関しては、十分に評価されていなかったのが現状である。そこで、今回、中性子回折を用いた鉄系焼結部品の内部歪の分布測定を実施し、空間分解能や測定精度を把握する。最終的にはプロセス条件による内部歪の制御を行なうための知見を得たいと考えている。

2. 実験方法

測定試料は、図1.に示した形状であり、粉末をプレスしたものと、これと同一ロットでプレスした後に焼結したものの2試料であり、何れも材質はほぼ100%の α -Feである。これらに対し、図1のA~Mに示した各13点を測定した。実験には、残留応力測定用中性子回折装置 (RESA) を使い、中性子線の波長は、0.16443nm (Ni標準粉末の測定より校正した値) とした。入射スリット及びラジアルコリメータは1mm角としている。当初はゲージ体積を最小とするため、回折角が90°に近くなる211回折を用いる予定であったが、強度がとれなかったため、より強度の稼げる110回折を用いることとした。回折ピークの測定には、一点あたり70分~90分の積算を行なっている。上記のようにして得られた回折ピークに対し、ガウス関数をフィッティングし、ピーク位置を決定し、面間隔を計算した。なお、歪を算出するための無歪試料については、今回のマシンタイム内では測定ができず、別途測定する予定である。

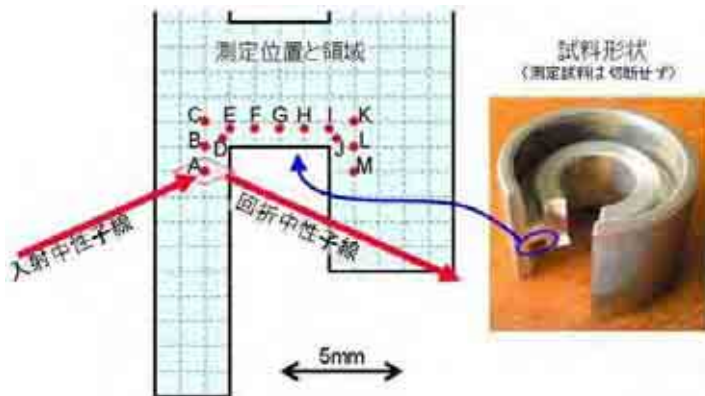


図1 試料形状と測定位置

3. 実験結果

測定した回折ピークの一例を図2に、全26点の110面間隔の計算結果を図3に示す。測定した全26点について、フィッティングの精度を示すR²は0.95以上であり、ピーク位置の誤差は最大でも0.005°であった。この誤差は、面間隔にして10⁻⁵nmのレベルであり、内部歪として、10⁻⁴程度の歪を議論できる精度が得られていると考える。

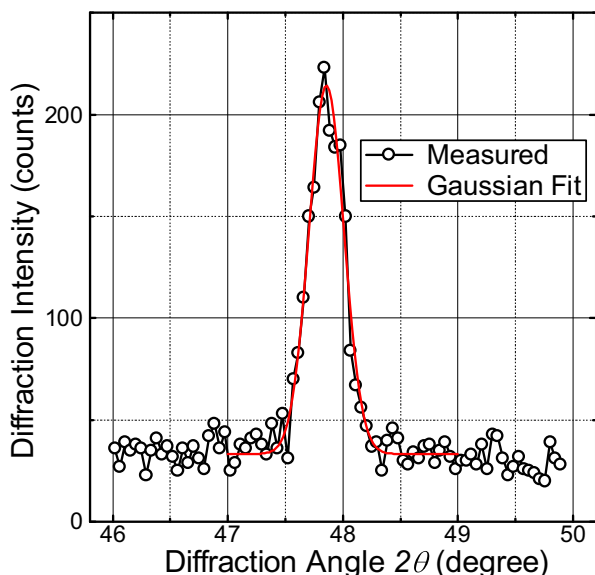


図2 測定した回折ピークの一例

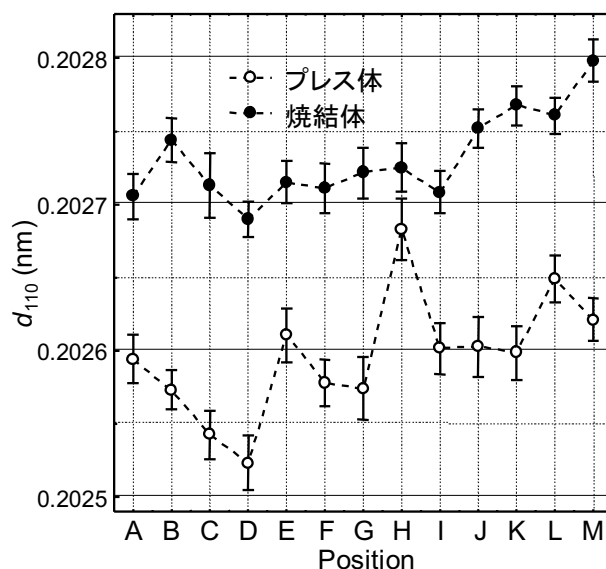


図3 測定結果

4. まとめ

以上、今回の課題の実施により、以下を明らかとした。

- 1) 鉄系焼結部品の内部歪は10⁻⁴レベルで議論が可能である。
- 2) その空間分解能は、約1mmと推定される。

今後は、無歪試料の測定による歪の算出を行なう予定であるが、それ以外にも3軸の歪測定による残留応力測定、より広い範囲での測定、製造条件の異なる試料間の比較等を実施してゆきたい。

圧痕法による残留応力測定法の開発

利用者 : ○小澤則彦、藤田雄三
 所属 : 日立協和インツリアリツグ(株)

1. はじめに

残留応力は、溶接時の熱ひずみの残留や、機械的拘束で発生する。引張の残留応力は、構造強度を低下させ、腐食環境においては応力腐食割れ（SCC）を引起す要因となる。強度部材の余寿命評価には残留応力を正確に把握する必要がある。本研究では、残留応力評価部近傍に鋼球を加圧し局所的な塑性変形を発生させ、評価部に圧縮応力を発生させることで、初期の残留応力に対してひずみ変化の違いを識別することで残留応力を計測する手法を開発することを目的とする。従来、引張および圧縮残留応力とひずみ挙動の変化の相関は得られており、定式化が図られている。今回、より簡便な計測により残留応力と評価を可能とするための検討を行った。本報では、FEMによる降伏状態と中性子回折による実測を行いひずみ発生のおよび Δ の検討を行った。

2. 供試材および初期残留応力負荷法

供試材は構造用炭素鋼（SS400）を用いた。板厚20tの素材を曲げ塑性加工し、その内部から試験体を採取した。最終試験片寸法を30×30×10mmとし評価面表面に引張および圧縮の残留応力を発生させた。図1に試験片形状および応力分布を示す。残留応力は曲げ加工により発生させ、試験片採取加工で再分布する。最終試験体形状における残留応力分布のFEM結果を図1に示す。評価面に深さ約1mmの範囲で引張および圧縮の残留応力が発生している。なお、この応力分布はX線回折法による掘削法で確認した。中性子回折法で用いる試験片については、表面のX線残留応力測定で確認している。結果を同図に示す。

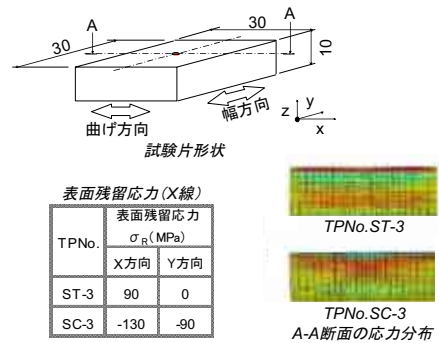


図1 試験片形状と応力分布

3. 圧痕法による表面応力測定

圧痕法とは、残留応力評価部近傍に鋼球を加圧し局所的な塑性変形を発生させ、評価部に圧縮応力を発生させることで、初期の残留応力によるひずみ変化の違いを識別することで残留応力を評価可能とする技術である。図2に試験状況を示す。測定位置に長さ1mmの5連ギヤ型ひずみゲージを貼り付け、その近傍（5mm）を鋼球で加圧する。具体的には、ギヤ機構で鋼球を加圧し荷重計で加圧力を測定した。図3に鋼球荷重と表面の発生応力挙動を示す。なお、横軸は弾性範囲内と仮定し、ひずみにヤング率を乗じて応力としている。鋼球の加圧によりX方向（鋼球の径方向）では圧縮応力が発生し、Y方向（鋼球の周方向）では引張応力は発生していることが解る。X方向の応力変化をみると、残留応力が無い試験体に比べ引張残留応力残留応力を有する試験体は同一荷重で大きな応力が発生し、圧縮残留応力を有する試験体では逆に発生応力が小さい。この挙動はY方向でも同様のことが言える。圧痕法はこの発生応力の挙動を定式化し残留応力を測定する手法である。この発生応力の挙動は非鉄金属でも同様である。しかし、降伏応力および加工硬化が異なるため各素材において残留応力と発生応力の挙動の相関は予め得る必要がある。

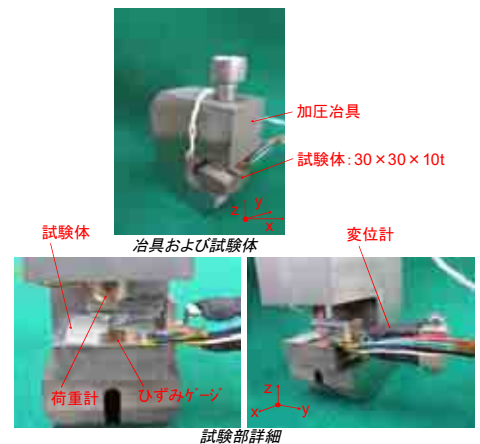


図2 試験状況

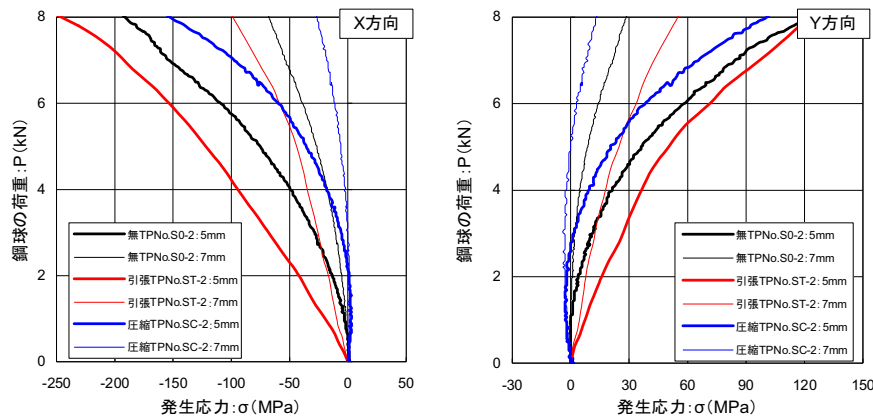


図3 鋼球荷重と表面の応力変化の関係

4. 中性子回折による内部の接触応力

鋼球加圧時の内部に発生する応力を中性子回折装置(RESA)を用いて行った。無負荷状態と鋼球加圧状態における格子面間隔を測定し、両者の差から加圧によるひずみを得る。測定方向は3方向行い、X,Y方向は(2 1 1)、Z方向は(1 1 0)を測定した。3方向のひずみ測定結果から3軸応力の計算式を用いて3方向の応力を算出した。図4に測定状況を示す。衬機構により鋼球荷重を、0,2,7kNとなるように負荷し、このときの内部応力を測定した。測定位置は表面から深さ1.5mmの位置を鋼球中心から0,1,2,3mmの4点について測定した。十分な回折強度を得るため、リレーは入射側2×2mm、反射側2×15mmを使用した。今回、マツタムの都合によりdθ測定は行わず、無負荷状態からの変化を測定してる。図5に鋼球加圧時に発生する表面の応力測定結果を示す。測定位置は鋼球中心から5~13mm(2mmℓ²ツ)である。図5の縦軸の応力変化は鋼球加圧時に発生するひずみにヤング率を乗じている。鋼球荷重7kNのとき引張残留応力を有する試験体は圧縮残留応力を有する試験体に比べ圧縮の発生応力が大きくなっている。これは図3の結果と同様である。図6に中性子回折法の結果である内部の発生応力測定結果を示す。図5の外表面の発生応力と同様、鋼球加圧力の増加にともない圧縮応力は大きくなり、引張残留応力を有する試験体は圧縮残留応力を有する試験体と比べ圧縮応力が大きくなっている。

5. 考察

鋼球による負荷で評価位置(ひずみゲージ部)に圧縮力を発生させ、この時のひずみ挙動から初期の残留応力を測定することは可能である。また、鋼球による外力が大きい場合、圧縮残留応力を有する試験体は引張残留応力を有する試験体に比べ小さな外力で降伏し今回の結果の逆の挙動を示す。外力が小さい場合については、先の現象とは異なり引張残留応力を有する試験体が大きな圧縮応力を発生する。これは、内部に発生している残留応力が異なっていることが原因で圧痕付与で応力が再分布するためと思われる。たとえば、図1の残留応力分布を見ると引張残留応力を有する試験体(ST-3)は表層部で引張の残留応力が発生してるがその直下では圧縮の残留応力が発生してる。この圧縮場に接触応力の圧縮が加わることで内部に大きい圧縮応力が発生したと考えられる。今回、マツタムの都合および回折強度の影響で2×2mmの大きな領域の測定となった。今後、微小領域の発生応力分布、また、降伏応力の異なる試験体で内部の降伏挙動が表面応力に与える影響と内部の応力分布の影響を検討する必要がある。

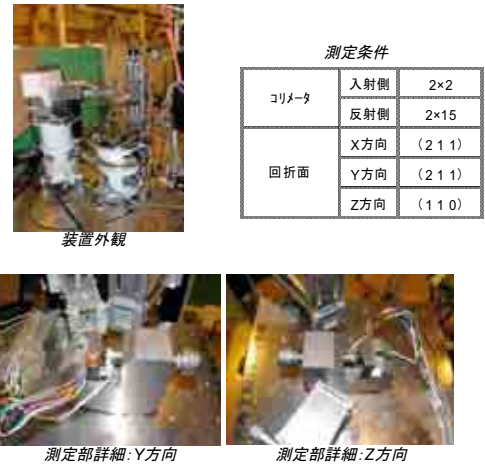


図4 測定状況

6. 今後の課題

今回、マツタムの都合で構造用炭素鋼(SS400)のみ実施した。降伏条件で塑性域の発生状況は変化し、圧痕法における挙動が変化することを明らかにした。今後、明確な降伏点の発生しないオーステナイト系ステンレス鋼(SUS316)および圧延により降伏応力を変化させた素材において測定を実施し接触応力の発生状況を確認し、圧痕法による残留応力測定の高精度化および適用拡大を図りたい。

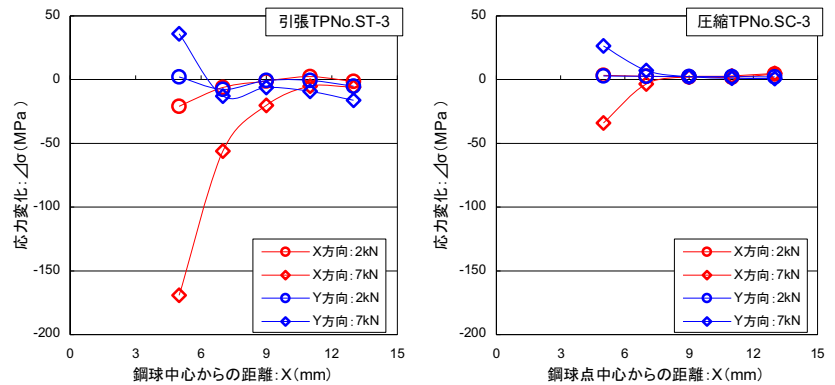


図5 表面の応力変化

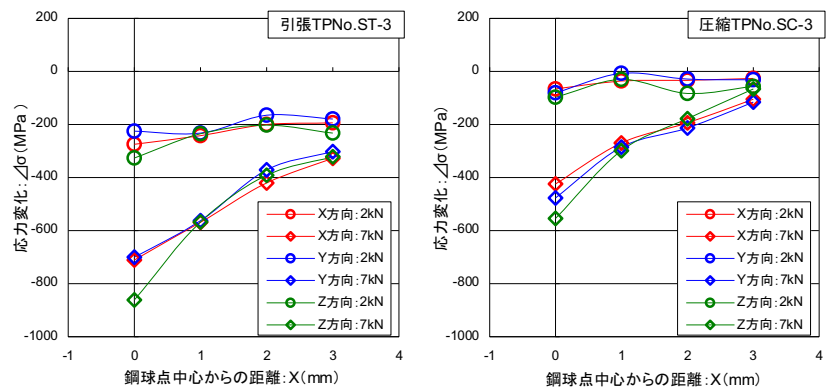


図6 内部の応力変化:表面から1.5mm

極厚板突合せ溶接部の残留応力測定

利用者 ○上野 斌¹、中谷光良¹、三谷欣也²
 所属 ¹日立造船株式会社、²株式会社ニチゾウテック

1. はじめに（背景、目的等）

厚板の溶接において、熱処理が不十分な場合には残留応力が原因となった遅れ割れ（低温割れ）が発生してしまう。厚板溶接部の残留応力（ひずみ）と溶接後熱処理（PWHT）によるその低減効果を定量化することができれば、製品を高信頼化することができ、製品の延命化、寿命予測の高度化を図ることができる。特に、従来非破壊で測定することができなかった厚板内部の残留ひずみ分布を測定できれば、シミュレーション手法の開発、生産性向上等大いに役立つ。本実験では、板厚45mmの極厚板の突合せ溶接部の残留ひずみを測定した。

2. 実験方法

図1に示すX開先の板厚45mmのボイラ用炭素鋼（SB480）に対して、サブマージーク溶接により突合せ溶接試験体を2体作製した。このうち1体は、625±25℃で2時間の溶接後熱処理（PWHT）を実施した。試験体サイズは図2に示す通りである。図2に示す3箇所の位置に対して、中性子により溶接線方向の残留ひずみの板厚方向分布を測定した。用いた測定装置は、RESAである（図3）。測定条件は表1に示す通りである。

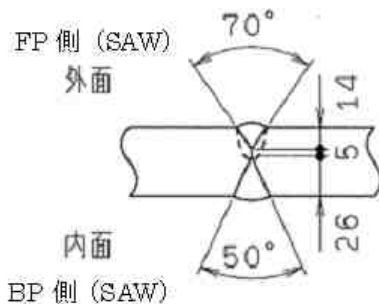


図1 開先形状

表1 測定条件

Diffraction	α -Fe(110)
Wavelength of neutron	1.967 Å
d0 of sample	0.2867

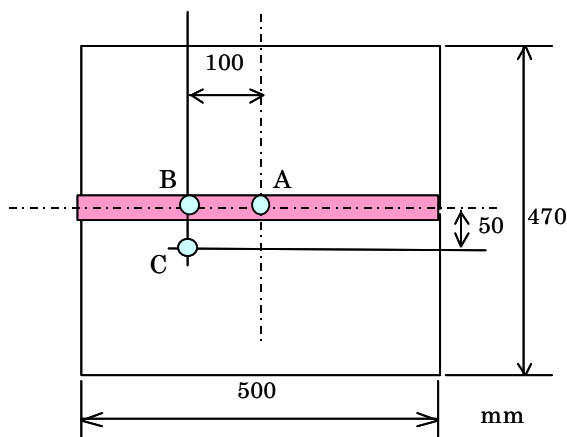


図2 試験体形状及び測定位置



図3 測定状況

3. 実験結果

残留ひずみの測定結果を図4に示す。縦軸は板厚方向座標で原点がBP表面である。通常の溶接残留応力と同様に、溶接のままの状態では、溶接線上（A点、B点）は引張応力で、溶接線から離れた位置（C点）では圧縮応力となっている。溶接線上の応力では、FP側表面で最大応力となる傾向を示している。また、今回実施したPWHTによる引張残留応力の低減効果を確認することができた。

4. まとめ

低温割れの原因となる残留ひずみ分布を測定することができた。45mmもの板厚の板厚方向分布を非破壊で測定した。また、PWHTによる残留応力の低減効果を把握することができた。残留応力分布のシミュレーション技術開発、低温割れの複合原因である拡散性水素の板厚方向分布のシミュレーション技術開発を進めている。本測定結果を基にした技術開発により、製品の信頼性をより向上させるとともに、生産効率化の検討も実施することができる。

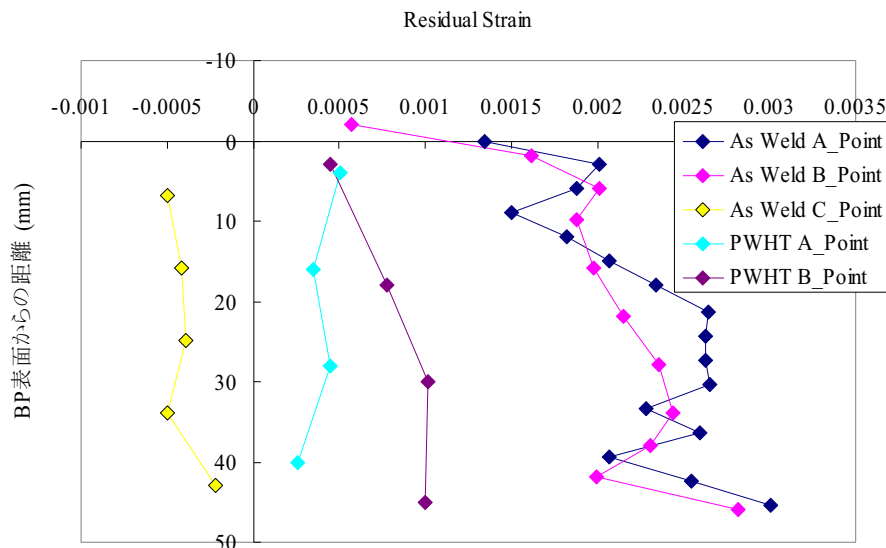


図4 測定結果

残留応力測定用中性子回折装置の 建築分野への適用可能性

利用者 ○向井 智久¹、吉岡 秀樹¹、古田 智基²、中尾 方人³、伊山 潤⁴
所属 ¹(独)建築研究所、²バンドー化学(株)、³横浜国立大学、⁴東京大学

1. はじめに

環境対策のひとつとして建築物の長寿命化が指向されていることを主たる背景として、建築物の性能評価精度向上への要求が高まっている。この要求を実現する上で、構造物内部の応力・ひずみ状態を正確に計測することは、極めて重要な技術である。しかし、建築構造においては、各種の部材が複雑に交錯して内部に隠れてしまう部分も多く、ひずみゲージなどによるこれまでの計測法では内部の細かい応力分布の取得は困難であった。RESA および RESA-II による応力計測は、このようにこれまで不可能とされてきた内部の応力分布を詳細に計測できる可能性がある。また、結晶格子面の間隔分布を知ることができるため、応力分布のみならず、塑性変形に伴う転移量の計測ができる可能性もあり、中性子利用技術の活用により、建築の新しい構造形式、新しい設計法、より効率的なディテールの開発などにつながる事が期待される。現段階では、RESA、RESA-IIによる非破壊計測法の建築分野への適用事例は極めて少なく、測定可否すらも明らかでない状況にある。そこで、本施設利用課題では、RESA-IIを用いて、建築分野への適用のための基礎情報を得るため一連の試行的実験を行う。

2. 実験概要

2.1 木材試験体

木質構造では、接合部に作用する引張力に対して、安定した接合耐力を期待するため、材料強度が一定でない木材での破壊を避けて、釘、木ネジ、ボルトといった接合具での破壊を専攻させるように設計されている。従って、こうした接合具の木材中での挙動を把握することは必要不可欠であるが、例えば、釘や木ネジは、細いうえに下穴なしで施工するので、ひずみゲージ等を利用して応力分布を計測することはきわめて困難である。もし中性子線が木材を透過し、それに埋め込まれた釘などの応力分布が計測できれば、より合理的な設計規範が構築できるものと期待される。ここでは釘を打ち込まれた木材試験体により、その可能性について検討する。木材試験体の形状を図1に示す。幅100mm×厚さ30mm×高さ150mmのスギとバイマツの木片を用意し、高さ100mmの位置に、釘(N90)を水平に打ち込む。そして、釘頭から50mmの位置での回折角を数回測定し、釘打ちからの経過時間と釘の軸方向応力との関係の把握を試みる。なお、所定の位置に正確に釘を打ち込むために、木材には内径2.6mmの下穴を設けている。

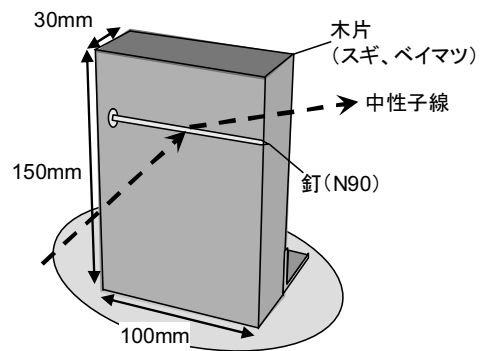


図1: 木材試験体

2.2 鋼材試験体

既存建築物中の鉄骨部材の残存性能評価という観点からは、耐力劣化に直結する塑性変形後の残留ひずみの評価・計測技術が必要となる。そこでここでは様々な塑性変形を与えた鋼材試験片を作り、中性子線回折角分布を調査した。鋼材試験体の形状を図2に示す。材料はSN400(建築構造用圧延鋼材)、試験片形状は、JIS14号引張試験片とし、予め引張試験装置により引張りひずみ(0%, 0.2%, 1%, 2%, 3%, 4%, 5%, 10%, 20%)を加えたのち、除荷したものである。これらの試験片に対し、(110)、(200)、(211)の各結晶格子面について計測を行い、残留ひずみに対しどの面の格子ひずみが敏感であるかの検討を行う。

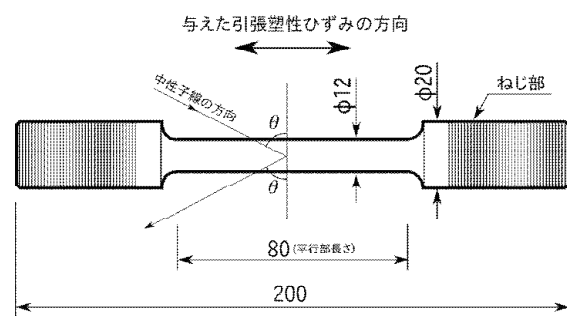
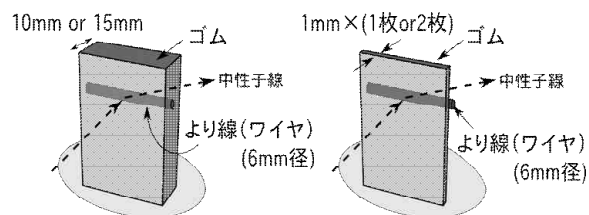


図2: 鋼材試験体

2.3 ゴム試験体

コンベアベルトは、ゴムの中により線の補強鋼材を有している。コンベアベルトを輪状に加工する際に、両端部のより線は重ね継ぎ手により接続される。コンベア作動中は、ベルトの振動や積載荷重等によりさまざまな応力が作用し、結果、この重ね継ぎ手部分から損傷を生じることが多い。そこで、この重ね継ぎ手部のより線の応力を計測することを最終目標とし、本実験では、計測可能なゴム層厚の検討を行った。コンベアベルトを切り出した試験体(図3(a))と、ゴム厚の中性子線透過強度を知るための試験(図3(b))の2種類を行った。



(a) ベルト切り出し試験体 (b) ゴム透過強度計測

図3: ゴム試験体

3. 試験結果

3.1 試験結果の整理

実験は平成20年12月19日から23日にかけて、RESA-IIにより行った。木材試験体および鋼材試験体については、残留応力および残留ひずみと回折角分布との関係を定量的に明らかにするため、得られた回折角分布を以下のガウス関数で回帰分析し、検討を行った。

$$y(2\theta) = \bar{y} + A \exp\left(-\frac{(2\theta - \overline{2\theta})^2}{s^2}\right) \quad (1)$$

ここで \bar{y} 、 A 、 $\overline{2\theta}$ 、 s が回帰定数である。

3.2 木材試験結果

図4に釘打ちから経過した時間と回折角(2θ)との関係を示す。時間0(ゼロ)での回折角は、木材に打ち込む前の釘のみの状態での回折角である。スギ、ベイマツのいずれの場合も釘打ちから2時間程度までは圧縮応力が増加し、その後緩やかに低下していく様子がみられる。釘の弾性係数を200kN/mm²と仮定すると、スギの場合は最大で1.8kN程度、ベイマツの場合は0.3kN程度の圧縮力が釘に生じていたと考えられる。

3.3 鋼材試験結果

特に、回折角分布の高さ(A)および分布の幅(s)について、残留塑性ひずみとの関係がみられた。例として、図5(a)に110面におけるAと残留ひずみの関係を、図5(b)に211面におけるsと残留ひずみの関係を示す。図5(a)では、Aが残留ひずみの増大とともに大きくなる傾向を示しているが、これは塑性変形の進行に伴って、集合組織が発達したことによるものと考えられる。

3.4 ゴム実験結果

図3(a)に示したコンペアベルト実物の切り出し試験体の、無応力負荷状態で110面での透過強度を図6に示す。各回の計測時間はそれぞれ10分である。切り出し試験体試験体では応力がまったく計測できないことを示している。そこで、図3(b)に示したように、むき出しのより鋼線の両側に、1mmおよび2mm厚のゴムを配して、110面での透過強度を計測し、測定可能なゴム層厚を検討した。図7にその結果を示す。実験結果から、ゴム層厚1mmの場合は、30分計測でおよそ350カウントほどの透過強度を得ることが可能であることが分かった。

4. まとめ

中性子利用技術の建築分野への応用をめざし、RESA-IIを用いて木材、鋼材、ゴムについて格子ひずみおよび応力分布を調査した。木材については、釘が打ち込まれてから、時間の経過に伴い応力が緩やかに低下していく様子がみられ、この結果は概ね妥当と判断できる。従って、厚さ30mm程度の木材であれば、打ち込まれた釘の応力の測定は可能であり、測定時間(今回は一点1時間程度)が短縮できれば、釘の軸方向の応力分布やせん断ひずみなど、これまで不明であった新しい知見が得られる可能性が示された。鋼材については、塑性ひずみの非破壊計測を目標に、あらかじめ塑性変形を加えられた丸棒試験体の計測を行った。その結果、回折角分布の高さや幅は、残留塑性ひずみと相関があることがわかった。計測データを増やし、結晶論の観点からの理論的説明により回帰式が導かれれば、定量的な計測の可能性があることが示された。ゴムについては、本実験からは、ゴム層厚1mm程度でも30分近い計測時間が必要であることが分かった。これは、ゴムの透過強度が低いためである。その理由のひとつが、ゴムの劣化を防ぐためにゴム内に含有されている油分の影響である。そこで、ゴムの練り混ぜ時に、可能な限り油分を低減した試験体を作成し、ゴム層厚2mmでの透過強度を今後検討する予定である。

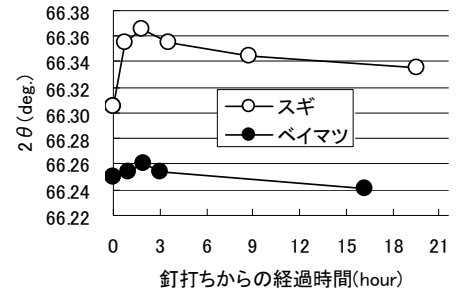


図4： 木片中のくぎの回折角の変化

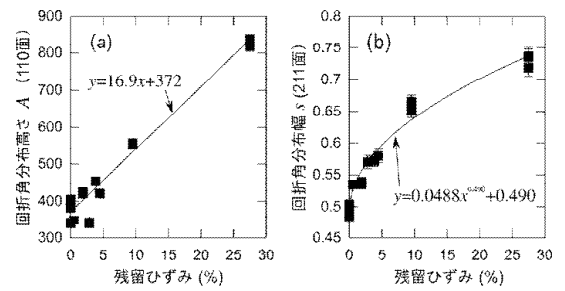


図5： 鋼材塑性ひずみと回折角分布の関係

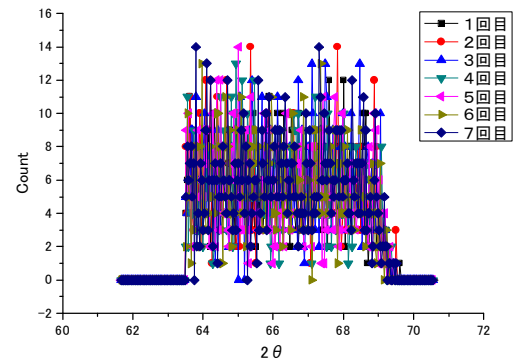


図6： 切り出し試験体の透過強度

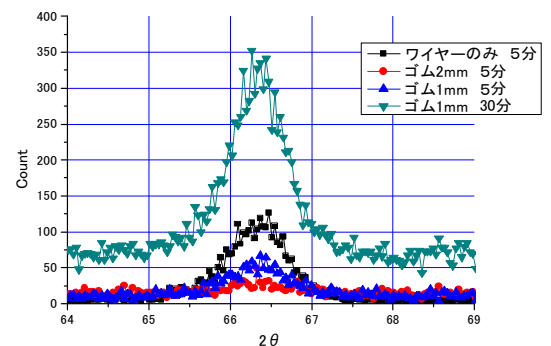


図7： ゴム層厚と透過強度