

980MPa級溶接継ぎ手の残留応力測定

利用者 ○石川信行、末吉 仁

所属 JFEスチール（株）スチール研究所

1. はじめに（拝啓、目的等）

溶接構造物の大型化とともに高強度鋼材への要求が高まっているが、高強度鋼は水素による遅れ破壊感受性が増すため、980MPa級の鋼材の適用は限定されている。遅れ破壊は、水素、材料そして応力状態が密接に関連した現象であり、各因子の影響を正しく理解することが遅れ破壊現象解明のために必要である。特に、980MPa級の溶接金属は従来材に比べ合金元素量が多く大きな残留応力の発生が予想される。そのため、980MPa級溶接継ぎ手の遅れ破壊抑制のためには、溶接時に発生し溶接継ぎ手内部で複雑に変化する残留応力に対する正確な理解が不可欠である。

2. 実験方法

供試材は図1に示した溶接継ぎ手であり、溶接金属の硬さはHV340程度で、1000MPaを超える引張強度を有している。この継ぎ手の溶接金属を中心に図2の位置について板厚方向(N)、幅方向(T)、溶接線方向(L)の3方向についてそれぞれ回折を行った。図3に溶接継ぎ手の中性子線回折装置へのセッティング状況を示す。利用した回折はN方向が(110)反射、T方向が(110)透過、そしてL方向が(211)透過である。また、基準となる無ひずみ(D0)サンプルは、同じ継ぎ手の溶接部を切り出し、ワイヤカットにより3mmピッチでスリットを導入したものをを用いた。



図1 980MPa級溶接継ぎ手

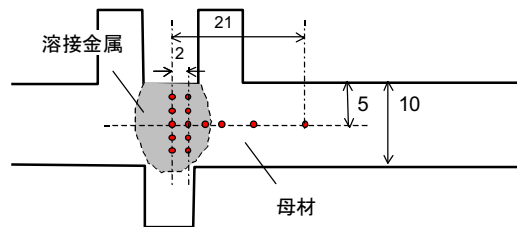


図2 残留応力の測定位置



図3 中性子線回折状況（L方向）

3. 実験結果(図表を含めて)

図4に溶接金属中心部の板厚方向の残留応力分布を示す。基準となる無歪みでの格子間隔は、スリットを導入したD0サンプルのT方向の格子間隔で溶接金属2カ所、母材1カ所の平均値を用いた ($d_0=2.8686\text{\AA}$)。表層から2mmの位置ではT方向及びN方向に引張の残留応力を示しているが、3.5mmより深くなると圧縮に変わっている。一方溶接金属中心から2mmの位置についての板厚方向分布は図5に示すようにすべて圧縮になっており、

引張残留応力は溶接金属中心部で表層2mm付近までの範囲に限られている事がわかる。一方、板厚中央部の板幅方向の分布を図6に示す。溶接金属中心部では圧縮であるが母材では引張側に变化している。

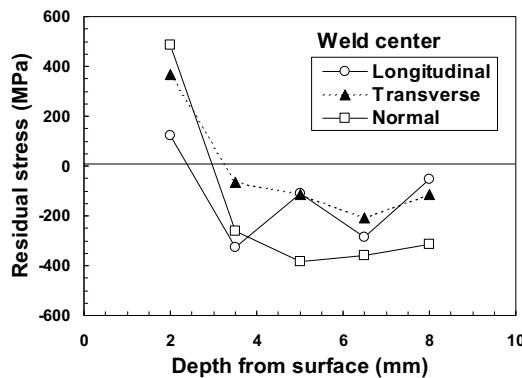


図4 溶接金属中心での板厚方向残留応力

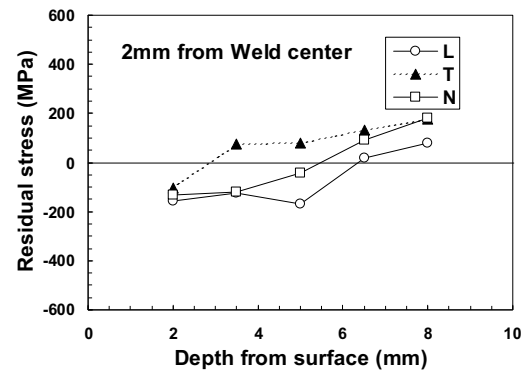


図5 溶接金属中心から2mmの位置での板厚方向残留応力分布

4. まとめ

RESA-IIを用いた中性子線回折により980MPa級溶接金属の残留応力分布を測定した。溶接金属中心部の表層部において大きな引張残留応力が見られたが、それ以外の溶接金属では圧縮に変化していることがわかった。このような狭い範囲で残留応力分布の大きな変化が生じる原因についてさらに検討が必要と考えられる。

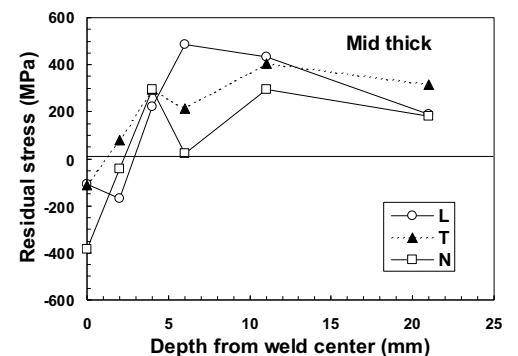


図6 板厚中心部での板幅方向残留応力分布

980MPa級厚肉多層溶接金属の 残留応力分布解析

利用者 ○石川 信行、末吉 仁

所属 JFEスチール株式会社 スチール研究所

1. はじめに

高強度溶接継手の低温割れ限界条件の解明のため、980MPa級鋼Y型溶接継手の残留応力分布を測定した。溶接金属内部において最大で1000MPaを超える引張残留応力があることが判明し、高強度溶接継手の割れの原因になっていると考えられる。

2. 実験目的

高強度溶接金属の低温割れは溶接時の水素侵入による脆化と凝固収縮による引張残留応力が原因とされており、低温割れ現象の解明のためには割れ発生時の水素量と応力状態を把握することが重要である。残留応力の測定には歪みゲージを用いた切断法やX線回折によって評価される場合が多いが、いずれも表層部の応力状態の情報しか得られず、低温割れが発生するような溶接金属内部の応力測定は困難である。一方、中性子線回折は数cmオーダーの物質内部の応力状態を非接触・非破壊で測定できる唯一の手段である。そこで、高強度溶接継手の低温割れ限界条件の解明を目的に、980MPa級鋼の拘束溶接継手の内部応力状態を中性子回折により解析した。

3. 実験方法

残留応力測定に供した試験体は、図1に示すような、板厚25mmの980MPa級鋼板による溶接試験体であり、中央のY型のスリット部に1パスのMIG溶接を行ったものである。溶接入熱は16~17kJ/cmであり、市販の980MPa級鋼用の溶接材料を用いた。同一条件の溶接試験体を、溶接後48時間以上経過した後に溶接部を切断し、低温割れが発生していない事を確認している。図4 無歪(DO)サンプル中性子回折装置は日本原子力研究開発機構の残留応力解析用装置RESAを用いた。図2に試験体のセッティング状況を示す。利用した中性子線の波長は1.590Åであり、回折はN方向が(211)反射、T方向とL方向が(211)透過で行った。溶接継手の中央部断面について、図3に示す位置で測定を行った。T方向は図中に示す全点において測定し、溶接金属中心部の板厚方向のみ応力分布を解析するためN方向とL方向も測定した。また基準となる無歪(DO)サンプルは、図4のように、溶接部を切り出し、ワイヤカットにより3mmピッチでスリットを導入したものをを用いた。

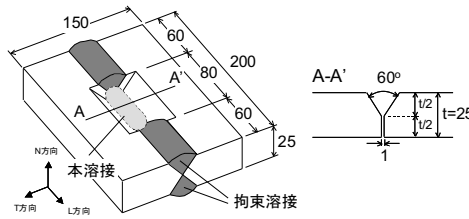


図1 溶接継ぎ手試験体形状



図2 中性子線回折状況

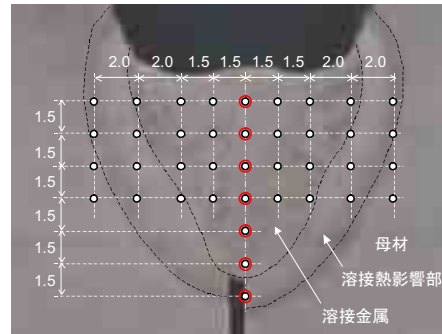


図3 残留応力測定位置

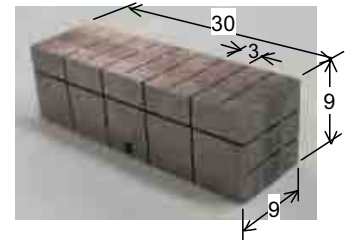


図4 無歪(DO)サンプル

4. 研究成果

図5に溶接金属表面近傍と溶接金属の下端部(Root部)近傍(図3中の(a)及び(b)の位置)でのT方向の回折曲線を示す。無歪状態のDOサンプルに対して、表層近傍の回折角度はDOよりわずかに低下しているが、Root部近傍ではピーク角が低角度側へ大きくシフトしており、格子間隔が広がっていることがわかる。このような回折角度の変化からT方向の格子歪を求めマップにしたものを図6に示す。Root部で0.3%以上の引張歪を示しており、表層部または熱影響部(HAZ部)で歪が小さく、HAZ部の一部では圧縮に変化している。溶接金属中心線の7点についてはT、L、Nの3方向の回折を行い、各方向の格子歪から残留応力を求めた。図7に溶接金属中心線での残留応力分布を示す。溶接金属表層部については、歪みゲージにより測定した残留応力も示したが、中性子回折と歪みゲージの測定値はほぼ等しい。表層部においても引張の残留応力が見られ、Root部近傍に近づくに伴い引張残留応力が增大している。T方向の残留応力が最も高く、Root部で1000MPaを超える値を示している。また、Root部近傍では、L方向及びN方向でも引張応力であり、溶接金属内部が高い三軸応力状態となっていることがわかった。

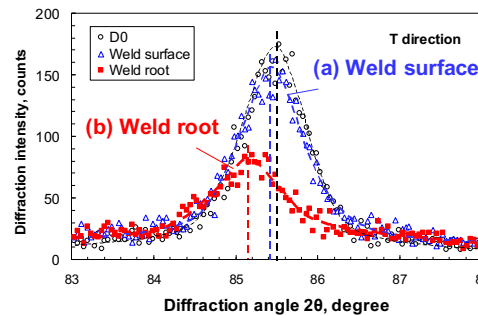


図5 溶接金属表層部とRoot部の回折曲線

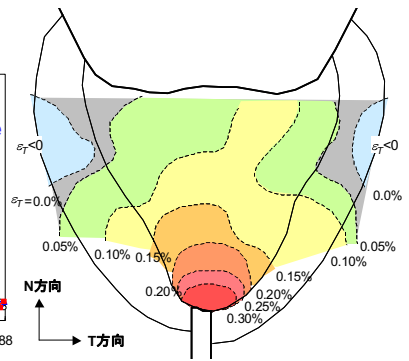


図6 溶接継手部のT方向格子歪分布

5. 結論・考察

今回用いた980MPa級鋼の溶接継手は低温割れの発生はないが、MIG溶接時にシールドガスから少量の水素を混入させると溶接金属で割れが発生することを確認している。割れ発生位置は溶接金属のRoot部であり、中性子回折で最も残留応力が高い部分と一致している。このことから、Root部での高い引張残留応力が低温割れ発生の大要因になっていると考えられる。また、Root部の高い多軸応力状態が、溶接時に混入する水素の拡散集積を促進することも予想されることから、低温割れの解明には、応力と水素の相互作用に関する検討が今後必要になると考えられる。

6. 引用(参照)文献等

なし

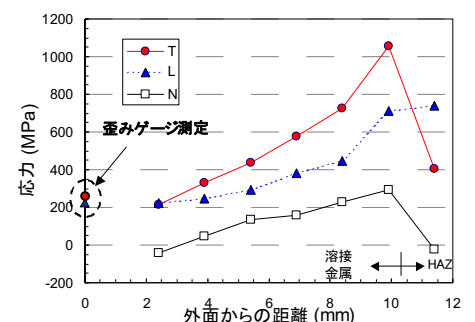


図7 溶接金属中心部の残留応力分布

Ni-Cr系厚肉高強度溶接金属の 残留応力分布解析

利用者 ○石川 信行、末吉 仁

所属 JFEスチール株式会社 スチール研究所

1. はじめに

高強度溶接金属の低温割れ限界条件の解明のため、低温変態を呈するNi-Cr系高強度溶接継手の残留応力分布を測定した。溶接金属内部の残留応力は低い引張残留応力または圧縮残留応力であることが明らかになり、Ni-Cr系溶接金属が残留応力低減に有効であることが確認できた。

2. 実験目的

溶接構造物の高強度化に伴い溶接方法の高性能化や高強度溶接材料の開発が進められているが、高強度溶接金属では低温割れの発生が懸念される。高強度溶接金属の低温割れは溶接時の水素侵入による脆化と凝固収縮による引張残留応力が原因とされており、低温割れ現象の解明のためには割れ発生時の水素量とともに溶接金属内部の応力状態を把握することが重要である。前回、RESA-1で共金系の980MPa級厚肉溶接継手の残留応力分布測定を行い、溶接金属内部で1000MPaを超える高い引張残留応力が発生していることを明らかにすることができ、非接触・非破壊で物質内部の残留応力を測定できる中性子回折法の有効性を確認した。今回、低温割れ抑制のために開発が進められている、低温変態を呈するNi-Cr系高強度溶接金属の内部応力状態を中性子回折により解析した。

3. 実験方法

残留応力測定に供した試験体は、板厚25mmの980MPa級鋼板による溶接試験体であり、中央のY型のスリット部に1パスのMIG溶接を行ったものである。溶接入熱は20kJ/cmであり、低温変態を呈するNi-Cr系の溶接材料を用いた。同一条件の溶接試験体を、溶接後48時間以上経過した後に溶接部を切断し、低温割れが発生していない事を確認している。中性子回折装置は日本原子力研究開発機構の残留応力解析用装置RESA-1を用いた。図1に試験体の設置状況を示す。利用した中性子線の波長は1.594Åであり、N方向が(211)反射、T方向とL方向が(211)透過の回折線を用いた。溶接継手の中央部断面において、図2に示す位置で測定を行った。T方向は図中に示す全点において測定し、溶接金属中心部の板厚方向と板幅方向のみ応力分布を解析するためN方向とL方向も測定した。また、基準となる無歪(DO)サンプルは、溶接部を切り出し、ワイヤカットにより3mmピッチでスリットを導入したものをを用いた。

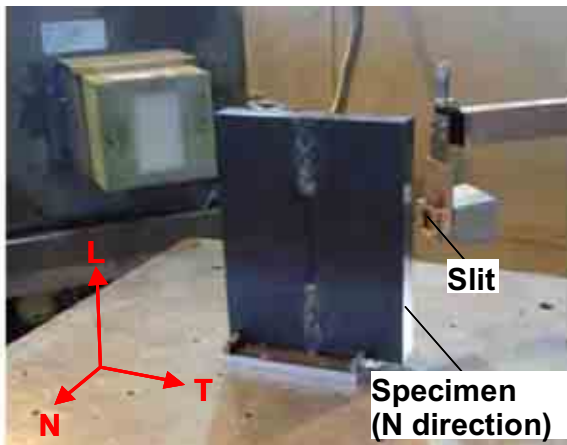


図1 中性子線回折状況

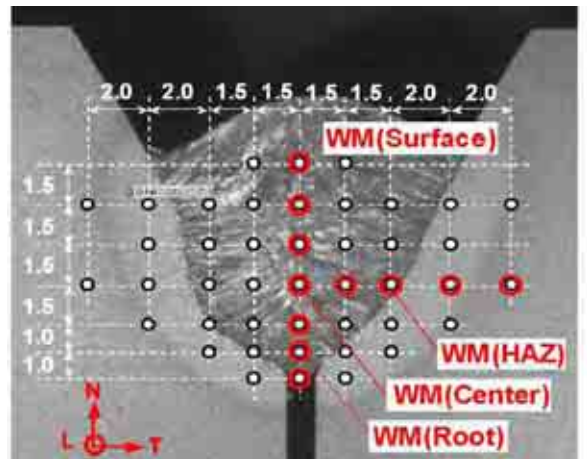


図2 残留応力測定位置

4. 研究成果

図3(a)に溶接金属の表層部と下端部(Root部)近傍および図3(b)に溶接金属の幅方向中央部と溶接熱影響部(HAZ)側でのT方向の回折曲線を示す。無歪状態のDOサンプルに対して、表層近傍とRoot部近傍ともに回折角が低角度側へシフトして格子間隔が広がっているが、表層部とRoot部でそれほど大きな差は見られない。一方、溶接金属の幅方向中央部の回折角は低角度側に変化し、HAZ側では高角度側に変化している。このような回折角度の変化からT方向の格子歪を求めマップにしたものを図4に示す。Root部近傍が最も歪が大きく、0.2%以上の引張歪を示している。HAZ近傍の一部では圧縮を示している。ただし、溶接金属形状が非対称である影響もあり、残留応力分布に左右に不均一性が見られる。溶接金属中央部の板厚方向および板幅方向については、T、L、Nの3方向の回折を測定し、各方向の格子歪から残留応力を求めた。図5に溶接金属中央部の板厚方向および板幅方向での残留応力分布を示す。板厚方向では、T方向の残留応力が最も高いが、表層部からRoot部近傍にかけて大きな残留応力分布は生じておらず、最大でもRoot部の342MPaであり総じて残留応力は低い。また、L方向およびN方向では圧縮残留応力が発生している。一方、板幅方向では、溶接金属はいずれの方向もHAZ側近傍で圧縮残留応力が発生している。

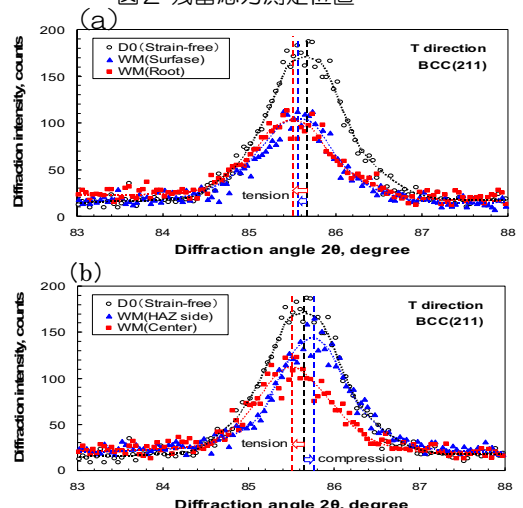


図3 (a)溶接金属表層部とRoot部および (b)溶接金属中央部とHAZ側における回折曲線

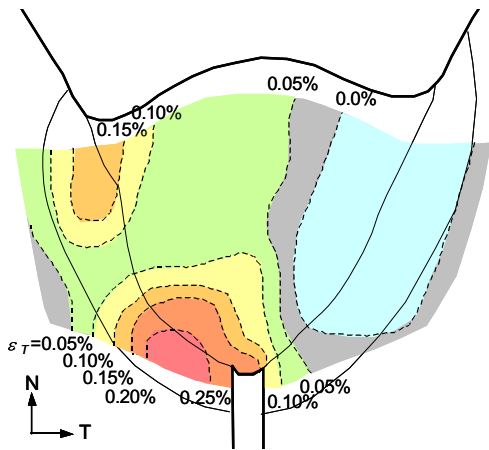


図4 溶接継手部のT方向格子歪分布

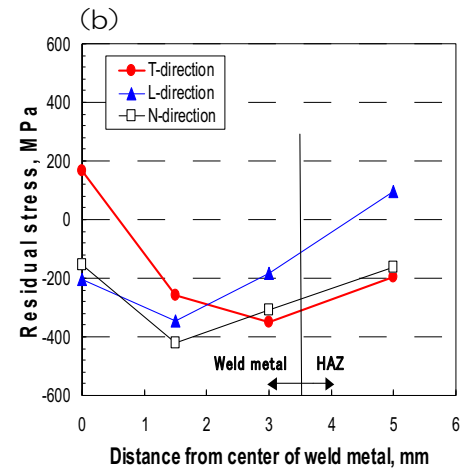
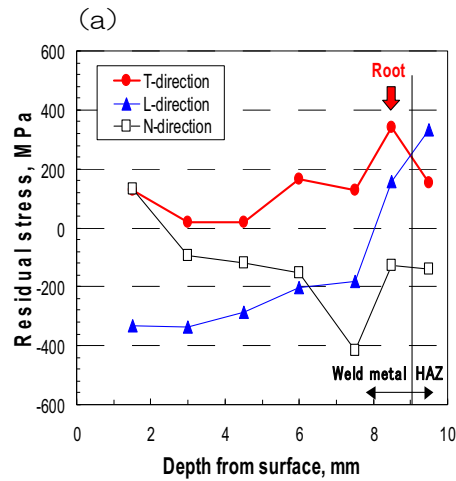


図5 溶接金属中央部の板厚方向(a)および板幅方向(b)での残留応力分布

5. 結論・考察

中性子回折によりNi-Cr系高強度溶接金属内部の残留応力状態を測定することができた。今回用いたNi-Cr系高強度溶接継手は低い引張残留応力または圧縮残留応力を呈していた。Root部近傍でも残留応力は低く、低温割れ抑制に効果的であると考えられる。これはNi-Cr系溶接金属が低温でマルテンサイト変態することで圧縮残留応力が導入されたことによると考えられ、Ni-Cr系溶接金属が残留応力の低減に有効であることが確認された。低温割れの解明には、残留応力分布とともにそれに伴う水素の拡散集積の解析が重要であり、応力と水素の相互作用に関する検討が今後必要である。また、低温割れに及ぼすNi-Cr系溶接金属中の残留 γ の影響解明も今後の課題である。

6. 引用(参照)文献等

なし

液体ロケット再生冷却燃焼器の 残留応力評価

利用者 ○吉田誠、森谷信一、佐藤正喜、升岡正
所属 宇宙航空研究開発機構

1. はじめに

再生冷却構造を有する液体ロケット燃焼器内壁は、片面が高温燃焼ガス（約3000℃）に、もう片面が液体水素（約-253℃）に曝され、極めて大きな温度勾配に耐えなければならない。繰り返し燃焼試験を実施すると大きな温度勾配に起因する熱ひずみにより変形を生じ、損傷が発生する。本試験では、繰り返し燃焼試験を行った燃焼器を対象に、研究用原子炉実験施設（JRR-3 RESA）において中性子回折法による残留ひずみ分布の計測と解析結果との比較を試みた。

2. 試験方法および装置

本試験では、繰り返し燃焼試験が実施された後、内面観察のために切断された燃焼器を用いて残留ひずみの計測を実施した。試験の様子を図1に示す。供試体は3軸方向可動テーブルおよび回転テーブル上に設置され、任意の検査領域の位置決めが可能な構造となっている。中性子の波長はNi粉末による回折測定から、無ひずみ状態の格子面間隔 d_0 は別途試験片により計測し、残留ひずみを得た。

3. 試験結果

図2に半径方向ひずみ分布及び周方向ひずみ分布の測定例を示す。半径方向ひずみについては、内表面近傍は小さい引張り、外周側は圧縮ひずみという結果が得られた。周方向ひずみについては、内表面近傍は引張り、外筒側は圧縮ひずみとなった。これらの結果はFEM解析の傾向と概ね一致している。一方、計測領域内の結晶粒の数が少ないことによる計測値のばらつきや、解析において機械加工等による初期残留ひずみの影響を考慮すること等、精度向上について検討する必要がある。

4. まとめ

今回の試験により、中性子による残留応力評価のロケット再生冷却燃焼器への適用性が確認された。今後の予定として、未切断の燃焼器を対象にした残留ひずみ分布の評価を検討している。

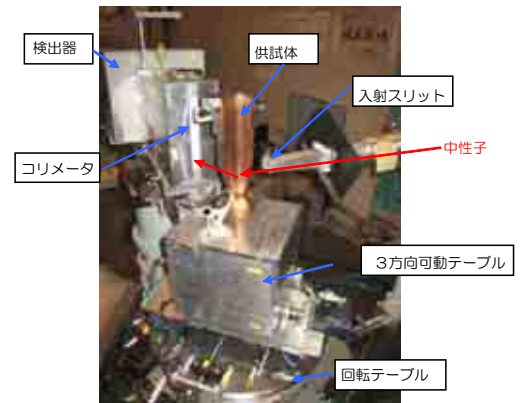


図1 試験の様子

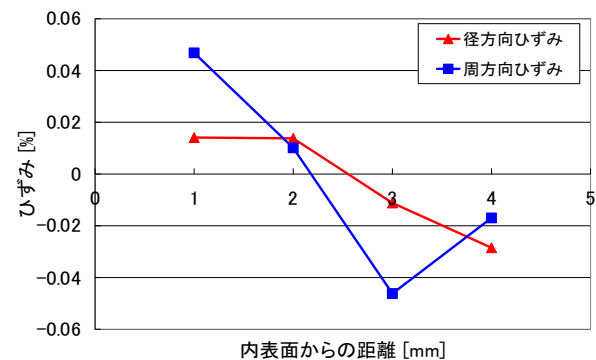


図2 半径方向ひずみ分布

液体ロケット再生冷却燃焼器の 残留応力評価試験

利用者 ○吉田誠、森谷信一、佐藤正喜、升岡正
所属 宇宙航空研究開発機構

1. はじめに

再生冷却構造を有する液体ロケット燃焼器内壁は、片面が高温燃焼ガス（約3000℃）に、その反対側が液体水素（約-253℃）に曝されるため、極めて大きな温度勾配に起因する熱ひずみが発生する。また、繰り返し燃焼試験を実施すると熱ひずみが蓄積され、損傷に至ることが報告されており、ロケット再生冷却燃焼器の信頼性を確保するためには、寿命予測技術の確立が必要である。本試験では、ロケット再生冷却燃焼器の寿命予測技術の確立に資するため、残留応力解析用中性子回折装置（RESA）を用いてロケット再生冷却燃焼器内部の残留ひずみ分布の評価を試みた。平成19年度上期に実施した試験では、繰り返し燃焼試験を実施済みの切断された燃焼器を対象に残留ひずみ分布の計測を実施し（図1）、中性子回折法のロケット再生冷却燃焼器への適用性の検討を行った。その結果に基づき、本試験では未切断の全銅製ロケット再生冷却燃焼器を対象にした残留ひずみ分布の計測を実施し、検討を行った。



図1. 上期試験の様子

2. 試験方法および装置

本試験で用いた供試体は、繰り返し燃焼試験が実施される前の燃焼器である（図2）。供試体は3軸方向可動テーブルおよび回転テーブル上に設置され、任意の検査領域の位置決めが可能な構造となっている。燃焼器内部は図3の燃焼器断面模式図に示すように、内筒の銅合金に対して軸方向に冷却溝が機械加工されており、電気鋳造による銅で覆った構造となっている。外側から冷却溝の位置が目視できず、冷却溝の中や間隔はおよそ1~2mm程度であることから、高精度のひずみ計測を実施するためには中性子照射による計測位置と供試体内部の冷却溝の位置関係を正確に把握する必要がある。上期の試験結果から、回折強度分布計測による溝位置判定をあらかじめ実施することにより、計測部の正確な位置決め可能であることが明らかとなった。これを踏まえ下期においても、ひずみ計測前に供試体内部の溝位置確認試験を実施した。中性子の波長はNi粉末による回折測定から、無ひずみ状態の格子面間隔 d_0 は別途試験片により計測し、プラグの式から燃焼器内部の残留ひずみの計算を実施した。



図2. 下期試験の様子

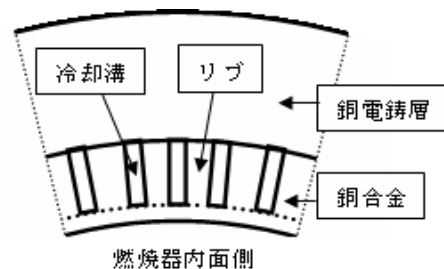


図3. 再生冷却燃焼器の断面模式図

3. 試験結果

ひずみ計測前に燃焼器内部の溝位置確認試験を実施した。図4に燃焼器内部における計測点の位置を示す。回折強度分布計測は確実にリブと溝を通過するよう、外面側から深さ10mmの円周線上について、回転テーブルにより角度 ω を変化させることにより実施した。図5に試験から得られた計測位置と回折強度の関係を示す。グラフから、規則正しく回折強度の増減を繰り返しており、リブ部と溝部の判別が可能であることが分かる。これらの結果を元に燃焼器内部のリブと冷却溝の位置を判断し、ひずみ計測位置を決定した。

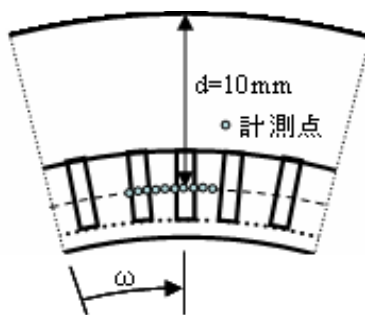


図4. 溝位置確認試験計測位置

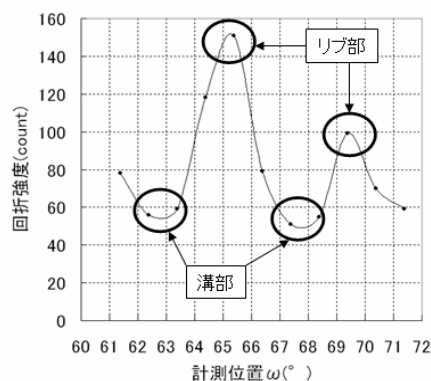


図5. 回折強度と計測位置の関係

図6に、溝位置確認試験により決定したひずみ計測位置を示す。計測間隔は電鍍層では2mm、銅合金層では1mmとし、周方向ひずみおよび半径方向ひずみの2種類を計測した（現在、得られたデータについてJAEA側と評価・検討中である）。

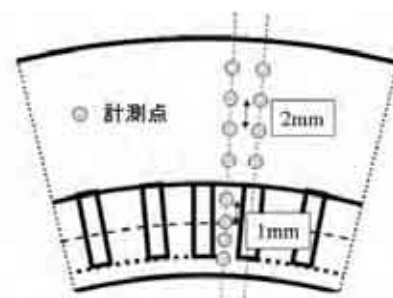


図6. ひずみ計測位置

4. まとめ

今回の試験により、ロケット再生冷却燃焼器に対する中性子回折法による残留ひずみ計測の適用性が確認された。今後は、今回用いた供試体についてより詳細な残留ひずみ分布評価の実施と、燃焼試験に供した後の残留ひずみ分布の評価を実施する予定である。

超耐熱合金の切削加工面の残留応力測定

利用者 ○磯部 錦平、石川 淳、相田 収平、田村 信、須藤 貴裕

所属 新潟県工業技術研究所

1. はじめに

超耐熱合金のひとつであるインコネル718について、切削による内部ひずみ等の加工影響を明らかにするために中性子回折装置を利用して、応力測定をおこなった。本報における切削条件の範囲では、加工面から0.5mm以上の深さにおいて、切削加工の影響はないことが明らかになった。

2. 実験目的

新潟県工業技術総合研究所では、新潟県内に多数ある機械加工メーカ等の競争力強化や航空機産業、エネルギー産業等の新分野進出を目的に、インコネル718をはじめとした超耐熱合金等の難削材に対する、新たな切削加工技術の開発をおこなっている。航空機やエネルギー分野においては安全性が最重要視されることから、加工技術の開発の中で被削材の残留応力の評価が必要項目となる。ところで、当研究所ではX線残留応力測定装置を保有しているが、X線回折による測定では表面直下約10 μ mでの応力評価のみとなり、さらに内部の応力評価には電解研磨などにより表面を除去する必要があるが、対象とする超耐熱合金は耐食性が高く電解研磨が困難である。そこで、中性子回折装置RESA-2により、切削加工面内部の応力評価をおこなうこととした。

3. 実験方法

超耐熱合金のひとつであるインコネル718（時効処理材）を測定対象とする。大きさ25 \times 25mm、厚さ20mmのインコネル718ブロックについて、25 \times 25mmの面に切削加工をおこない、この加工面についてRESA-2により回折角の測定をおこない、図1に示すように内部法線方向のひずみを算出し、応力分布を求めた。測定は表1に示す切削条件の異なるもの、ならびに未切削加工の計4サンプルについておこなった。サンプル1は切削速度がゼロとなるボールエンドミルの中心刃を使用した加工であり、サンプル2は加工面に対して工具を35deg傾斜させて、中心刃をはずしたものである。また、サンプル3はサンプル1、2に比較して、切削負荷の大きな条件である。これら切削加工条件の異なる測定サンプルの仕様を表1に、RESA-2による測定条件を表2に示す。

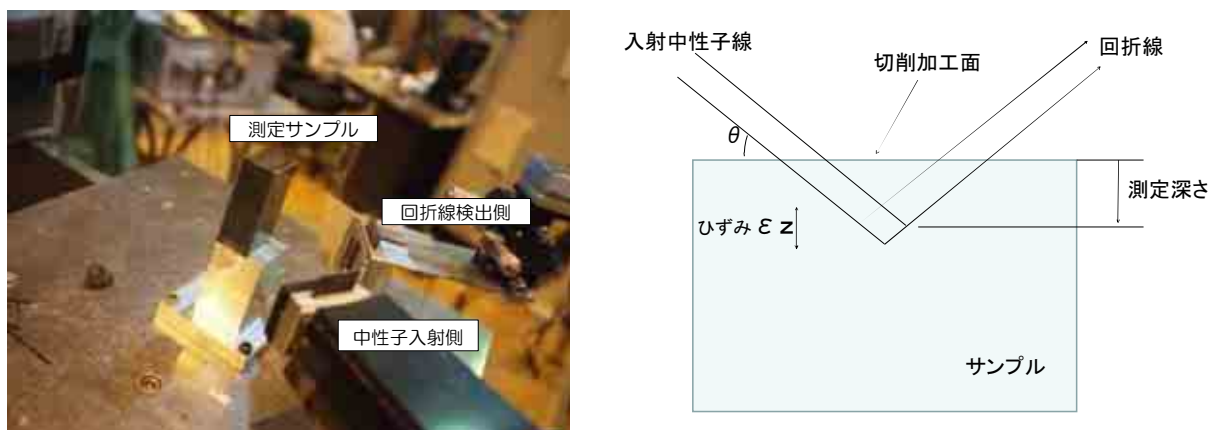


図1 測定の概略

表1 測定サンプルの仕様

サンプルNo.	1	2	3	4
切削使用工具	R3mmボールエンドミル	R3mmボールエンドミル	ϕ 32mmフェイスミル	
切削速度Vc m/min	60	60	30	
一刃あたり送り量 mm/tooth	0.15	0.15	0.024	
軸方向切込量 mm	0.3	0.3	1.0	ブランク (未切削加工)
径方向切込量 mm	0.1	0.1	3.0	
切削方向	ダウン	ダウン	ダウン	
加工液	ミスト	ミスト	ミスト	
工具傾斜角 deg	0	35	—	

表2 測定条件

測定装置	残留応力測定中性子回折装置 RESA-2
波長 nm	0.18
ビームサイズ mm	1 \times 15
回折面	Ni220
回折角 deg	66
測定時間 min	60

4. 研究成果

各サンプルについて、切削加工面より内部0.5mmから1.5mmまでの間を0.1mmステップでそれぞれ回折角 2θ を測定した。測定した回折角から式(1)よりひずみ ϵ_z を算出し¹⁾、図2にプロットした。なお、ひずみ算出にあたり、 $2\theta_0$ はブランクであるサンプル4の深さ1.4mmでの回折角($2\theta_0=64.49$)とした。

$$\epsilon_z = (\theta_0 - \theta) / \tan \theta_0 * \pi / 180 \quad (1)$$

全体的には4.0E-4ひずみ、すなわち400 μ ϵ 程度の幅に収まっており、ばらつきの範囲にあると考えられる。さらにこの法線方向ひずみ ϵ_z をもとに各サンプルが、等二軸平面応力状態であると仮定し、式(2)より平面応力を算出し、図3にプロットした。

$$\sigma = -E / (2 * \nu) * \epsilon_z \quad (2)$$

ここで、Eはヤング率、 ν はポアソン比である。

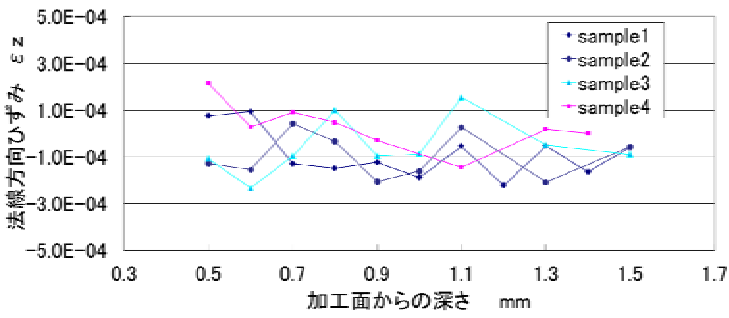


図2 加工面からの深さとひずみの関係

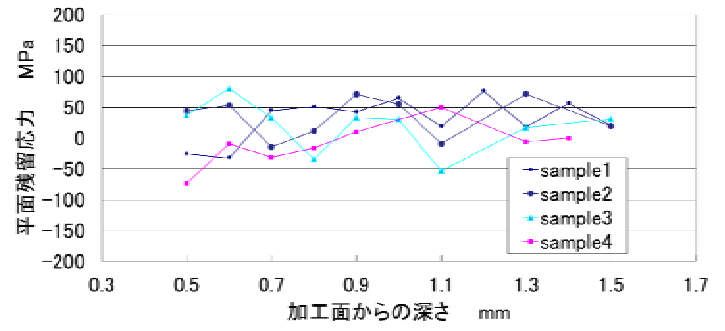


図3 加工面からの深さと平面残留応力の関係 (ただし、等二軸平面応力状態を仮定)

平面応力に換算しても、各切削加工サンプルとブランクとの差は±50MPa程度の範囲に収まっている。さらに図4に測定した回折線の半価幅を示す。一般的に回折線の半価幅は塑性変形すると広がる傾向にあるが、本測定サンプルにおいては加工面からの深さやサンプルにかかわらず、ほぼ一定となった。このことから、切削加工面から0.5mmより深い領域では切削加工の影響はないと判断できる。

5. 結論・考察

中性子回折装置RESA-2による、切削加工面内部のひずみ測定結果から、加工面から0.5mmより深い領域では切削加工による応力等の影響はないことが明らかになった。さらに、放射光X線、および、当研究所所有のX線回折装置を用いて、切削加工面表層部の応力測定データを補完することにより、開発中の切削加工方法の有効性の有無を結論づける予定である。

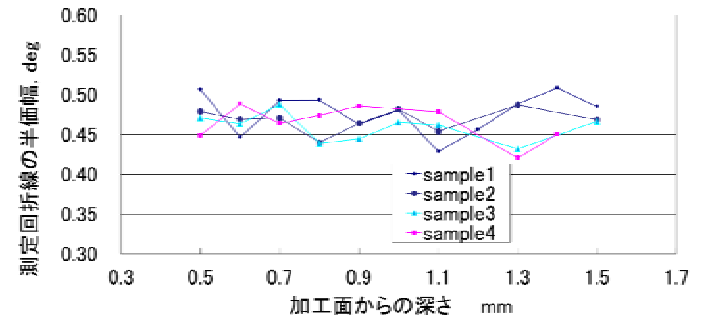


図4 加工面からの深さと測定回折線の半地価幅の関係

6. 引用(参照)文献等

- (1) 鈴木, 秋田, “回折法による材料評価の新しい展開”, 材料, Vol.58, No.12, 2009, p.1051-1057

マグネシウム合金板材のプレス成形後の 残留応力と集合組織の関係

利用者 ○根岸 繁夫¹、行武 栄太郎²

所属 1山野井精機(株)、2茨城県工業技術センター

1. 要旨

マグネシウム合金の加工プロセスの最適化のため、温間（150～350℃）で深絞り成形を行ったマグネシウム合金板材の各変形部の集合組織及び残留応力を測定しプレス加工時のひずみと集合組織の関係を調べる。

2. 実験目的

マグネシウム合金は実用金属中最も軽量で比剛性が高いため、高速車輛、自動車等の軽量化を実現できる材料として注目を浴びている。しかし、展伸材に強く発達する底面集合組織によりプレス成形性は他の軽金属に比べ劣り、常温での加工が非常に困難である。よって、一般的にマグネシウム合金板材のプレス成形は温間（約300℃）で行われている。そこで、マグネシウム合金板材の底面集合組織をプレス成形前後で観察し集合組織のプレス成形加工への影響を調べることを目的とする。また、プレス成形前後の残留応力を測定し集合組織と残留応力のプレス成形性に及ぼす影響を調べマグネシウム加工プレスの最適化を目指す。

3. 実験方法

- ・ 供試材：マグネシウム合金板材（AZ31：Al3mass%,Zn1mass%）130mm×200mm，板厚2mm
- ・ プレス製品：70mm×100mm×15mm
- ・ 加工条件：加工温度300℃，潤滑材テフロンシーブレス 速度100mm/min
- ・ 測定箇所：集合組織（底部，側部，を切出し測定：図1）
残留応力（断面方向：図2）
- ・ 測定方法：集合組織（MUSASI-L），残留応力（RISA-2）



図1 集合組織測定(MUSASI)



図2 残留応力測定(RESA-2)

4. 研究成果

・ 集合組織測定

プレス成形前の極点図を図3に示す。板面に対して底面(001)が平行に並んでいる強い底面集合組織が観察された。次に、プレス成形後の底部(図4)、側部(図5)の極点図を示す。プレス成形前後で各箇所の集合組織の形態に大きな変化は観察されず、強い底面集合を有する。しかし、その強度異なり側部の測定強度はプレス成形前に比べ強い。底部はプレス成形前に比べ弱い。

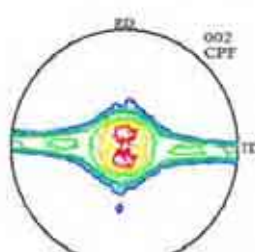


図3 プレス成型前

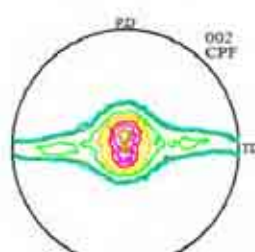


図4 プレス成型後(側部)

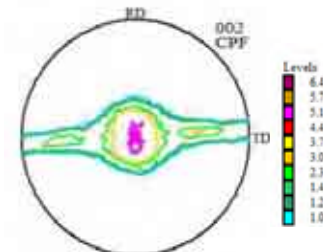


図5 プレス成型後(側部)

・ 残留応力

残留応力測定範囲を図6に示す。ビーム照射範囲は幅1mm，高さ10mm，深さ1.5mmとした。プレス成形後の断面の残留応力を測定した結果を図6に示す。側部のひずみが底部と比べ高い。底部はパンチによる拘束のため変形が少なくひずみの変化が小さい。しかし、側部はパンチとダイとで絞られるためダイ肩部でくり返し曲げ変形が加わるため高いひずみを示す。

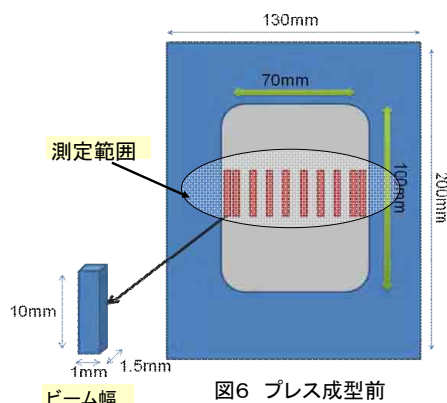


図6 プレス成型前

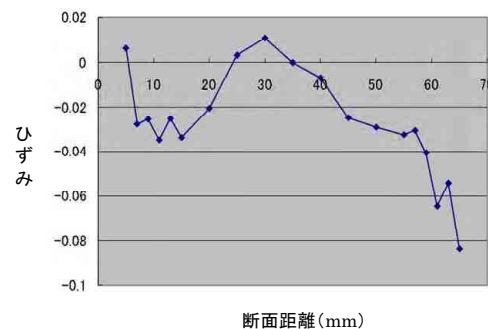


図7 断面のひずみ量

5. 結論・考察

マグネシウム合金圧延板には強い底面集合組織¹⁾が形成される。それが、室温でのプレス成形性を低下させている。しかし、300℃程度の温間でプレス加工することですべり系が増え成形性が向上する。しかし、強い底面集合組織は室温で高い耐凹み性²⁾を示す。そこで、プレス成形後の集合組織の変化と残留応力の関係を観察した。底面集合組織は成形後においても存在し大きな変化はない。加工度の高い側部に関しては底面集合組織の低下が確認されるが、底面集合組織を有しており、底部においてはほとんど変化がない。よって、温間加工により集合組織の変化はしない。一方、残留応力については、側部において加工度の高い繰り返し曲げによりひずみが残留している。しかし、加工強度に比べ残留ひずみが小さい。これは、温間加工によりひずみが解放されているためであり、マグネシウム合金の再結晶温度が約300℃程度であるため、加工時に動的な再結晶及び回復によりひずみが解放されていると思われる。マグネシウム合金において300℃での温間加工は、集合組織に大きな変化を与えず、かつ残留ひずみが小さいためプレス加工を行うには有利である。また、大きな底面集合組織の変化がないため温間成形後においても高い耐凹み性を示すため、マグネシウム合金圧延材の温間プレス加工は有効である。

6. 引用(参照)文献等

- 1) 行武栄太郎, 金子純一, 菅又信: 塑性と加工, Vol44, p276 (2003)
- 2) 行武栄太郎, 金子純一, 菅又信, 久保田正広: 軽金属, 56, p277 (2006)

アルミ合金溶接部の残留応力の解析

利用者 ○黒田 明浩

所属 スズキ株式会社

1. はじめに

複雑形状の二輪車アルミフレームに対して、中性子の高い透過力により、溶接部内部の残留応力測定が可能であることが実証できた。ただし、a0分布が凝固組織の影響を大きく受けているため、測定信頼性について今後検討する必要がある。

2. 実験目的

二輪車のスポーツモデルでは、多くの機種においてアルミ合金製の車体を採用している。この車体は、溶接を施したフレーム構造を採用することにより、軽量、高剛性を図ると共に、高い運動性能を実現している。更なる軽量化、開発期間短縮を目指し、フレーム構造の設計技術を上向きさせるには、CAEによる強度、剛性、耐久性について精度の高い評価が不可欠である。しかし、溶接部の残留応力については、歪みゲージ法やX線回折法では内部の残留応力を正確に把握することは困難であり、解析結果との検証も進んでいない。そこで、透過力の高い中性子による溶接部内部の残留応力測定を試みた。複雑形状の二輪車アルミフレームに対して、中性子の高い透過力により、溶接部内部の残留応力測定が可能であることが実証できた。ただし、a0分布が凝固組織の影響を大きく受けているため、測定信頼性について今後検討する必要がある。

3. 実験方法

実験には、図1に示すように、アルミ鋳造部品およびプレス部品を溶接により組み立てたフレーム実体を用い、波長0.173nm、回折面(311)、ビームサイズ2mm×2mmの条件にて測定を行った。測定位置は、表面から深さ2mm、溶接ビード直交方向に5mmピッチで13点とし、各点について溶接ビードとの平行方向L、直交方向T、法線方向Nの測定をおこなった。さらに、粗大結晶粒による回折強度のバラツキを抑えるため、各測定点にて±10°の揺動を加えた。また、基準となる無歪みd0サンプルは、同一条件で作製したフレーム実体から溶接部を切り出し、ワイヤカットにより3mmピッチでスリットを導入したものをを用いた。なおd0サンプルについては、マシンタイムの都合で直交方向Tのみを測定した。

4. 研究成果

測定結果の代表例として、図2に回折強度を、図3に各測定点における3方向の格子間距離を示す。回折強度については、±10°の揺動を加えることにより、結晶粒の影響を受けずに安定したデータを得ることであった。また、溶接ビードの幅は約18mmであるが、LD方向およびTD方向において、溶接部で大きく格子間距離が変化していることが分かる。無歪みd0サンプルTD方向についての格子間距離測定例を図4に示す。溶接ビード中央で格子間距離が最大となるデータが得られたが、凝固組織の影響を受けて特定の結晶粒からの回折のみを検出している疑いがある。そこで、残留応力の検討については、測定値そのままのa0分布①と中央から±5mmの位置での格子間距離の平均値をとったa0分布②の2パターンを用いた。a0分布①を用いた場合の残留応力分布を図5に、a0分布②を用いた場合を図6に示す。a0分布①を用いた場合には溶接部に圧縮の残留応力が、a0分布②の場合には引張の残留応力が生じているという解析結果が得られた。

5. 結論・考察

二輪アルミフレームという複雑形状においても、中性子の高い透過力により、溶接部の残留応力測定が可能であることが実証できた。ただし、溶接部については凝固組織の影響を大きく受けている疑いがあり、無歪みサンプルにおけるa0分布の取り方により、残留応力値が反転してしまう。なお、今回の結果は暫定的なものであり、今後a0分布を正確に測定する必要がある。また、全体的にはばらつきが大きい分布であり、組織の影響など測定信頼性についても今後検討する必要がある。

6. 引用(参照)文献等

なし



図1 フレーム残留応力測定状況

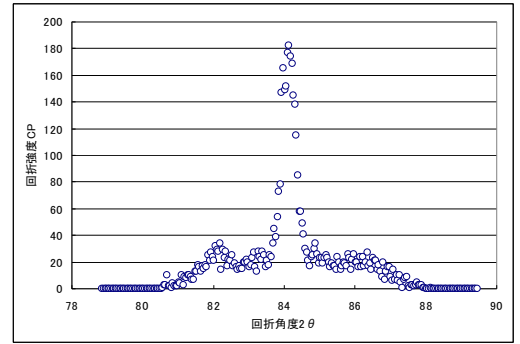


図2 回折強度測定例

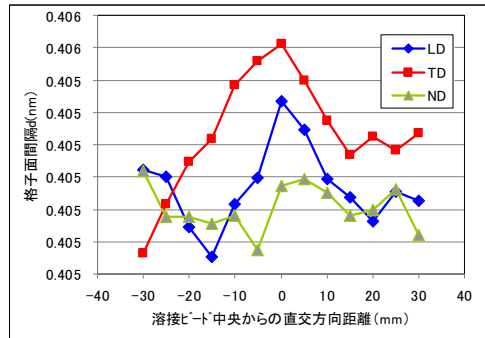


図3 各測定点における3方向格子間距離

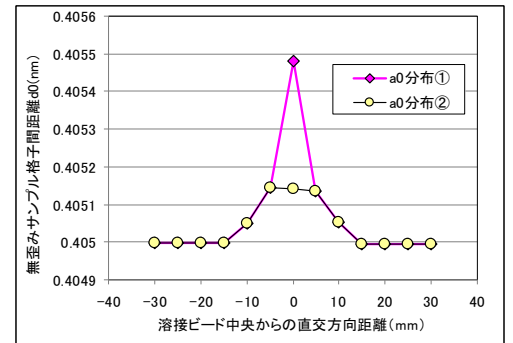


図4 無歪みサンプルのTD方向格子間距離

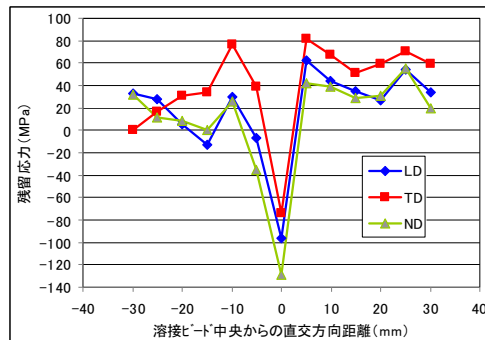


図5 a0分布①を用いた残留応力計算結果

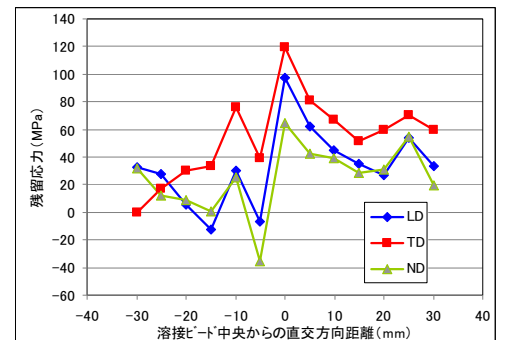


図6 a0分布②を用いた残留応力計算結果

アルミ合金溶接部の残留応力の解析

利用者 ○石塚 哲、黒田 明浩

所属 スズキ株式会社

1. はじめに

中性子を用いた二輪車アルミフレーム溶接部の残留歪み測定結果に対し、無歪みd0サンプルの格子間距離分布を求めることで、溶接部に生じている残留応力を解析することができた。ただし、溶接ビード内部に圧縮残留応力が生じているという結果については引き続き検証が必要である。

2. 実験目的

二輪車のスポーツモデルでは、多くの機種においてアルミ合金製部品を溶接で組み立てたフレーム構造を採用している。更なる軽量化、開発期間短縮を目指し、フレーム構造の設計技術を向上させるには、溶接部の残留応力を正確に把握することで、CAEによる強度、剛性、耐久性の予測精度を高める必要がある。前回のRESA-1を用いた測定では、複雑形状の二輪車アルミフレームに対して、中性子の高い透過力により、溶接部内部の残留ひずみ測定が可能であることを実証したが、a0分布について凝固組織の影響を十分検証できなかった。今回は、RESA-2にてa0分布を詳細に測定し、凝固組織が測定信頼性に及ぼす影響について検討をおこなった。

3. 実験方法

RESA-2での実験状況および測定サンプルを図1、2に示す。同一条件で作製したフレーム実体から溶接部を切り出し、ワイヤカットにより3mmピッチでスリットを導入したものを無歪みd0サンプルとして用いた。測定条件は、波長0.184nm、回折面(311)、ビームサイズ3mm×4mm、揺動±15°とし、広範囲の平均的なデータを収集することで回折強度の安定化を図った。測定位置は、表面から深さ2mm、溶接ビード直交方向に5mmピッチで9点とし、各点について溶接ビードとの平行方向L、直交方向Tでの測定をおこなった。さらに、(220)、(200)、(111)面についてもT方向のみであるが格子間距離を測定し、凝固組織の影響を受けて特定の結晶粒からの回折のみを検出していないか、精度検証をおこなった。

4. 研究成果

無歪みd0サンプルにおける、各回折面での格子間距離測定結果を図3に示す。溶接ビード部で格子間距離が最大となる傾向は、(311)面のL方向、T方向で同じであった。また、(311)、(220)、(200)、(111)面のT方向においても、溶接ビード部で格子間距離が最大となる傾向は同様であることから、格子間距離の変化は、凝固組織の影響や測定精度の問題ではなく、溶接ビード部固有の現象であることが判明した。図4にRESA-1で測定した無歪みd0サンプルでの格子間距離測定結果を示すが、今回のRESA-2での測定と同じ傾向を示している。従って、RESA-1で測定したa0分布の精度に問題ないことも確認できた。以上より、RESA-1での残留ひずみ測定データに基づき計算した溶接部の残留応力分布は図5のようになり、溶接ビード内に圧縮の残留応力が生じているという解析結果が得られた。

5. 結論・考察

今回の測定結果から、無歪みd0サンプルは回折面や測定方向で同じ格子間距離データが測定できることから、残留応力が十分開放されたものである。このa0分布を基としたアルミフレーム溶接部の残留応力は、溶接ビード止端付近の引張残留応力が最も高く、逆に溶接ビード内は圧縮の残留応力が生じていることとなる。この要因として、母材はAl-Si-Mg系合金、溶接ワイヤーはAl-Mg系合金のため、溶接部での化合物の析出状態が影響を及ぼしているものと推測するが、引き続き検証が必要である。



図1 無歪みd0サンプル残留歪み測定状況

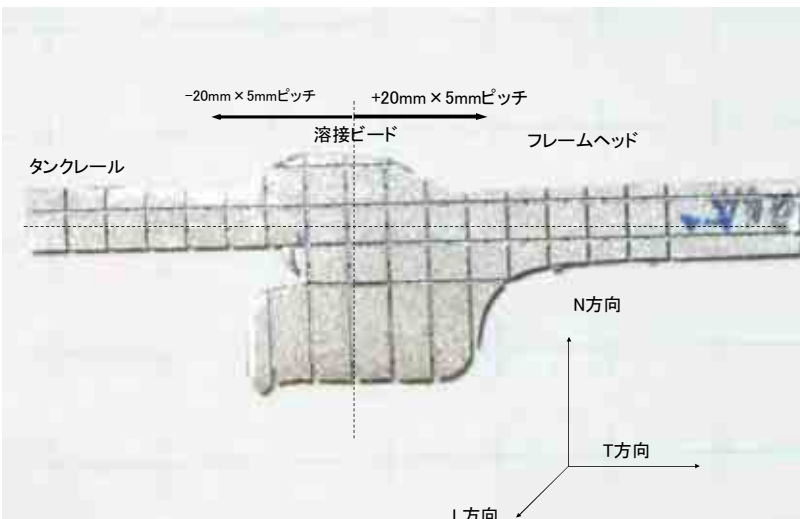


図2 無歪みd0サンプル

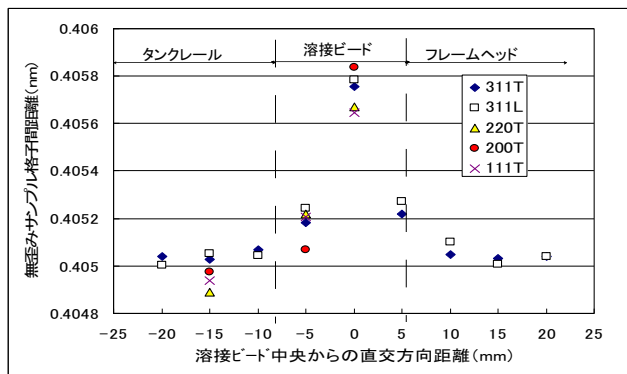


図3 各回折面での格子間距離測定結果 (RESA-2)

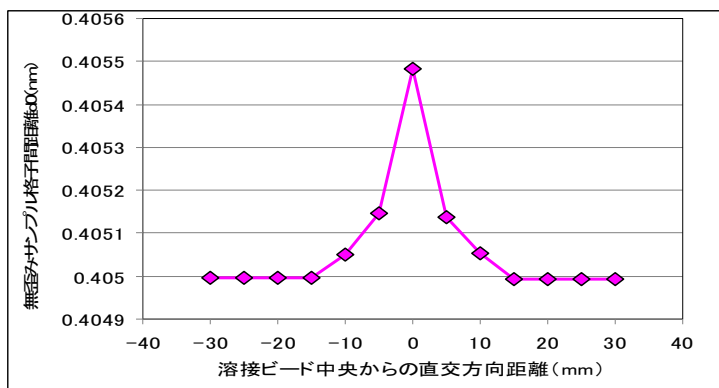


図4 無歪みd0サンプルのT方向格子面間隔 (RESA-1)

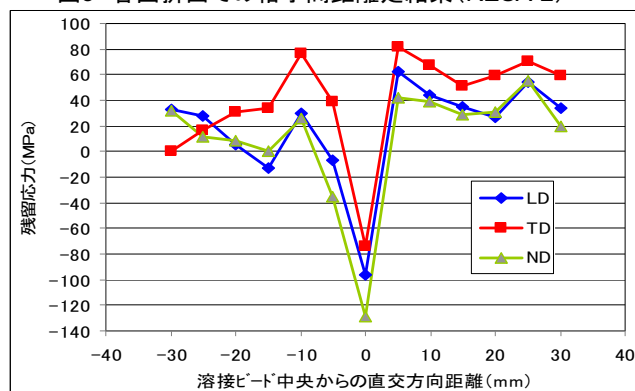


図5 アルミフレーム溶接部残留応力計算結果

コールドスプレー皮膜の残留応力測定

利用者 ○潮田 裕之¹、桑嶋 孝幸²、齋藤 貴²、
 所属 ¹関東自動車工業（株）、²(地独)岩手県工業技術センター

1. はじめに

金属粉末を固体状態で積層するコールドスプレー法にて作製した皮膜の性状は明らかになっていない点が多いため、今回、中性子回折法により皮膜内部の残留応力分布を測定した。

2. 実験目的

コールドスプレー法は、粉末を音速以上に加速し基材に衝突させてコーティングを行う表面改質技術の1つである。原料粉末は固体状態で積層するため酸化や分解等がほとんどないコーティングが可能であり、加工速度も速く、大気中で容易に加工ができるなどの優れた特徴を有しているため多くの業界から注目される技術であるが、その成膜メカニズムや皮膜性状は明らかになっていない点が多い。前回の実験では、SUS304ステンレス基材上に5mm積層したニッケル皮膜の中心部、端部において、厚さ方向の残留応力分布が存在することを明らかにした。今回、当初の開発目的に沿い、基材の影響を調べるためにFC250上に厚さを変えて積層したニッケル皮膜の残留応力を測定し、コールドスプレー皮膜の厚さと残留応力の関係を把握する。

3. 実験方法

試験片は、40×50×5mmのFC250铸铁基材上にコールドスプレー法にてニッケル粉末をそれぞれ2、5、10mm積層した皮膜を用いた。また、ニッケル皮膜を基材からはく離させた後、焼鈍したものを無ひずみの回折角測定用(d₀サンプル)として用いた(図1)。図中に表した様に、スプレーノズルの走査方向をx、成膜方向をy、膜厚方向をzとした。本実験で使用した中性子回折応力測定条件を表1に示す。膜厚2mmの試験片も考慮すると1×15mm²スリットを使用することが必要となるが、回折強度が小さくなるため、皮膜10mmおよび基材5mm厚の試験片を透過で測定することを考え、回折格子面として(311)回折、(111)回折で比較測定した結果、回折強度と測定時間の点からニッケルの(111)回折を利用することとした。残留応力は、ニッケル皮膜の中心部において、基材と皮膜の界面を基準(0mm)として皮膜内部に向かい、それぞれの試験片で下記に示す位置で測定を行い、(1)~(3)式により算出した。

- ①サンプルNo.1 (膜厚2mm) : 0, 0.4, 0.8, 1.2, 1.5mm
- ②サンプルNo.2 (膜厚5mm) : 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2, 3, 4
- ③サンプルNo.15 (膜厚10mm) : 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2, 4, 6, 8, 9mm

・ 3方向ひずみを測定した場合

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= E/(1+\nu) \times \{ \epsilon_x + \nu(\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z)/(1-2\nu) \} \\ \sigma_y &= E/(1+\nu) \times \{ \epsilon_y + \nu(\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z)/(1-2\nu) \} \\ \sigma_z &= E/(1+\nu) \times \{ \epsilon_z + \nu(\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z)/(1-2\nu) \} \end{aligned} \right\} (1)$$

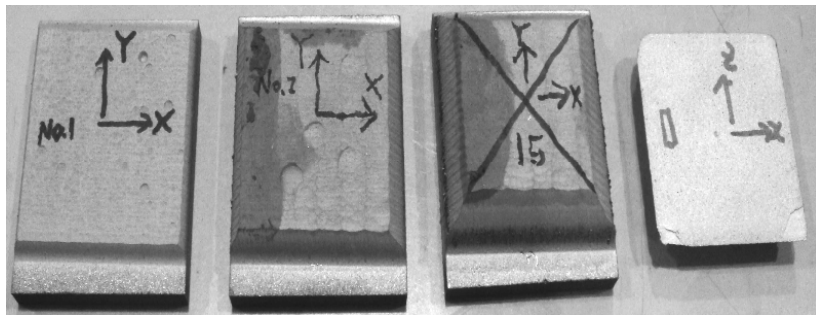
・ 2方向ひずみを測定し、平面応力状態(σ_z=0)を仮定した場合

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= E/(1-\nu^2) \times (\epsilon_x + \nu \cdot \epsilon_y) \\ \sigma_y &= E/(1-\nu^2) \times (\epsilon_y + \nu \cdot \epsilon_x) \end{aligned} \right\} (2)$$

・ 2方向ひずみを測定し、平面ひずみ状態を仮定した場合

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= E/(1+\nu) \times \{ \epsilon_x + \nu \cdot \epsilon_y / (1-2\nu) \} \\ \sigma_y &= E/(1+\nu) \times \{ \epsilon_y + \nu \cdot \epsilon_x / (1-2\nu) \} \\ \sigma_z &= E/(1+\nu)(1-2\nu) \times (\epsilon_x + \epsilon_y) \end{aligned} \right\} (3)$$

表1. 中性子回折応力測定条件



①サンプルNo.1(2mm) ②サンプルNo.2(5mm) ③サンプルNo.15(10mm) ④d₀サンプル

図1. コールドスプレー試験片

波長	2.21537Å
MCA	256ch, 0.055151° /ch
スリットサイズ	1×15mm
回折格子面	Ni (111)
回折角 2θ ₀	65.9023°
格子定数 a ₀	3.52727Å
回折弾性定数	E ₁₁₁ = 261.33 Gpa ν ₁₁₁ = 0.2627

4. 研究成果

1) d_0 サンプル測定結果

無ひずみの格子面間隔を求めるため、 d_0 サンプルの回折角を膜厚方向に測定した結果を図2に示す。界面付近ではゲージ体積と界面の効果によって回折角が変化し、深さ1.5mm以降でほぼ安定した。皮膜（厚さ5mm）の表面に近い4mmのデータがシフトしているのは、皮膜表面の粗さによる影響と考えられるため、1.5、2.0、3.0mm深さの3点の平均により $2\theta_0$ とした。また、界面の効果については、0~1.5mmのデータを直線近似した回帰式 $y = -0.01036x + 65.919$ を用いて補正することとした。

2) 残留応力分布測定結果

皮膜厚さ2mm、5mm、および10mmサンプルの残留応力測定結果を、それぞれ図3、4、5に示す。図3に示す皮膜厚さ2mmについては、面内方向の応力 σ_x および σ_y が等2軸応力状態になっており、皮膜表面側で大きな引張残留応力を持ち、界面に向かい急激な減少傾向を示す結果となった。しかし、未溶融の金属粉末を吐出、積層するコールドスプレー法の特徴から推察できる圧縮応力がみられず、また、皮膜表面の粗さや界面の影響を少なからず受ける事を考えると、今回の厚さ2mmのサンプルについては、正しく残留応力が測定できているか判断しにくい。皮膜厚5mm（図4）については、表面側の深さ4mmの位置で引張の残留応力が測定されているが、皮膜表面にはスプレーのうねりやクレーター状の欠陥による表面効果があることを考えると、4mm位置では正確な回折角が得られていない可能性が高いと思われる。また、界面の問題を考えると、図中の0.5mmから3mmの範囲のデータが応力の分布を正確に表していると考えられ、表面層下で-100MPa前後の圧縮残留応力を持ち、界面に近づくにつれ引張り側に变化する傾向を示した。皮膜厚さ10mmの測定では、それぞれ波長を変えて(311)回折および(111)回折を試したが、面外方向(z方向)の回折を得ることが困難だったため、面内方向(x, y方向)のひずみ測定を行った。そのため、平面応力および平面ひずみ状態をそれぞれ仮定して、応力を算出した結果を合わせて図5に示す。面内応力については、平面応力と平面ひずみでやや違いはあるものの、表面層下で圧縮応力を持ち、界面に向かって引張に変化する皮膜厚さ5mmのサンプルと同様の残留応力分布の傾向を示した。しかし、皮膜厚さ10mmのサンプルでは、厚さ5mmに比べて残留応力のレベルが大きくなっていた。一方、面外応力についても、皮膜厚さ5mmの測定結果では、大きな σ_z 成分は認められず、面外応力が存在しないようにも見受けられるが、平面ひずみを仮定した皮膜厚さ10mmのサンプルでは、界面側に有意な引張り残留応力が見られた。

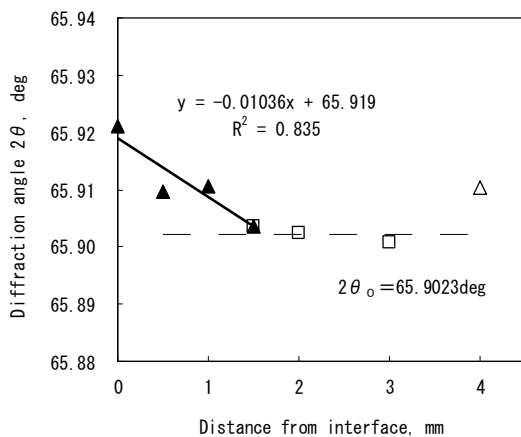


図2. d_0 サンプル測定結果

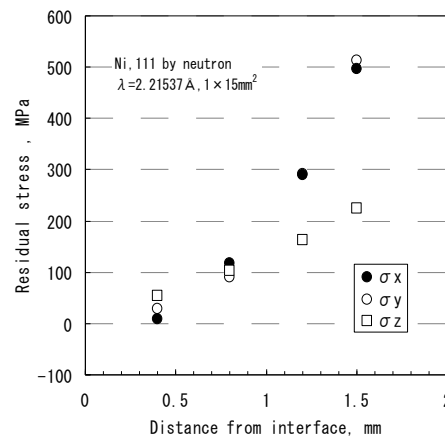


図3. 厚さ2mmの残留応力分布

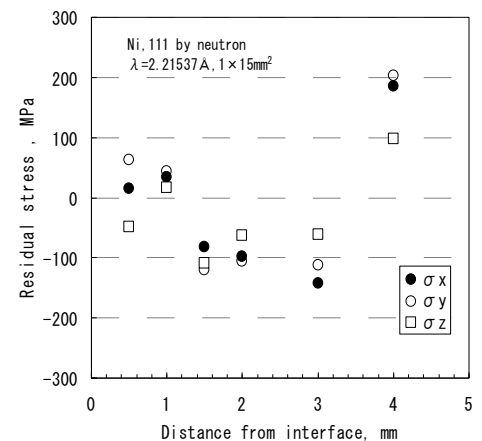


図4. 厚さ5mmの残留応力分布

5. 結論・考察

- 1) 皮膜厚さ5mmおよび10mmのサンプルにおいて、2010A期のSUS304基材での測定結果と同様に、表面層下で面内圧縮の残留応力が、界面に近づくに従い引張り側に变化する傾向が確認できた。
- 2) 厚さ5mmの皮膜より、厚さ10mmの皮膜の方が面内圧縮および引張りとも応力が大きい傾向があり、膜厚が厚くなるにつれて基材からはく離しやすくなる実態と符合する結果が得られた。

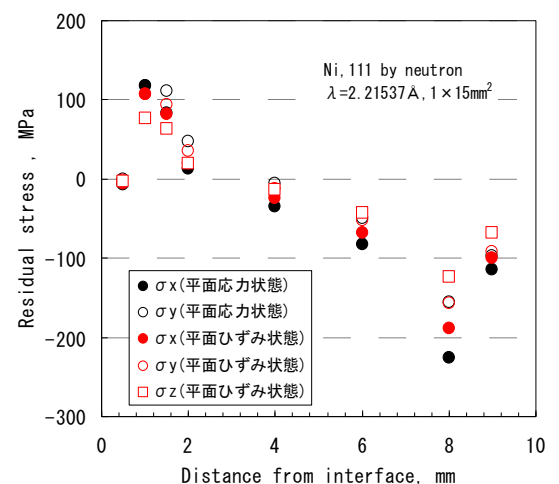


図5. 厚さ10mmの残留応力分布

コールドスプレー皮膜の残留応力測定

利用者 ○潮田 裕之¹、桑嶋 孝幸²、齋藤 貴²、鈴木 賢治³

所属 ¹関東自動車工業(株)、²(地独)岩手県工業技術センター、³新潟大学

1. はじめに

金属粉末を固体状態で積層するコールドスプレー法にて作製した皮膜の性状は明らかになっていない点が多いため、今回、中性子回折法により皮膜内部の残留応力分布を測定した。

2. 実験目的

コールドスプレー法は、粉末を音速以上に加速し基材に衝突させてコーティングを行う表面改質技術の1つである。原料粉末は固体状態で積層するため酸化や分解等がほとんどないコーティングが可能であり、加工速度も速く、大気中で容易に加工ができるなどの優れた特徴を有しているため多くの業界から注目される技術であるが、その成膜メカニズムや皮膜性状は明らかになっていない点が多い。機械的性質は同成分のバルク体と全く異なる特性を示し、その原因は、成膜時に皮膜内部に発生する残留応力が主原因であると考えられるが、コールドスプレーで形成した皮膜の残留応力を非破壊で測定した研究はほとんど見られない。コーティング構造のデザインの最適化、皮膜形成の効率化、皮膜の寿命予測等の応用化に必要な評価に資するため、中性子線によって皮膜内部の残留応力分布を測定する。

3. 実験方法

試験片は40×50×t5mmのSUS304ステンレス基材上にニッケル粉末をコールドスプレー法にて5mm積層した皮膜を用いた。測定状況を図1に示す。残留応力は、ニッケル皮膜の中心部、及び端部において、基材と皮膜の界面から皮膜表面に向かって0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0mmの位置で、それぞれ面内方向(x, y)、面外方向(z)の測定を行った。(図2)



図1 測定状況

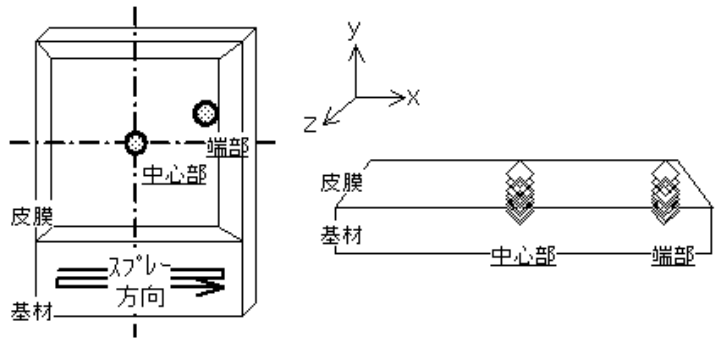


図2 測定部位概略

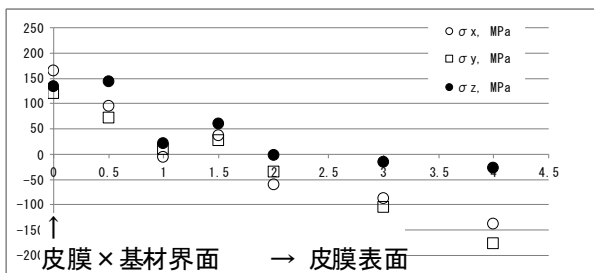


図3 皮膜中心部

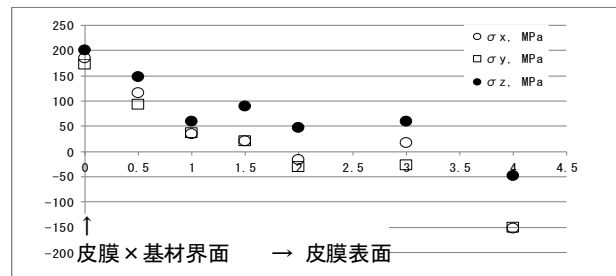


図4 皮膜端部

4. 研究成果

図3、4に示すように、中性子回折によりコールドスプレー材の残留応力分布が測定できた。コールドスプレーは溶融しないニッケル粉末が基材に付着するために、コーティング表面部はピーニング同様に、面内方向に圧縮残留応力が形成される。このことが本測定により裏付けられる。また、面外方向の残留応力は、コーティング表面付近において存在せず、理にかなっている。しかし、面外方向の残留応力は、界面付近で引張りを示した。また、中央と端部の比較をするとやや端部の応力が大きな値を示すが、分布形態に大きな差異は認められなかった。

5. 結論・考察

図3、4に示すように、面内方向の残留応力がコーティング表面で圧縮を示すが、界面に向かい引張りへと変化する。このことから、コーティングと基材が一体となり、力とモーメントがそれぞれ釣り合っている。そのため、コーティングが厚くなるに従い、界面付近の面内方向の残留応力が引張りになることが予測される。また、界面付近が平面ひずみ状態を仮定するならば、 $\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y)$ の関係により、はく離応力が生じることが考えられる。面外方向の残留応力が界面で引張りを示したことは、コーティングのはく離を起こす原因でもあり、成膜プロセスにおいて問題となる。今後、膜厚を変えた試料の比較・検討により、面外方向の発生原因を確かめ、その対策をはかる必要がある。そのほか、成膜プロセスの条件を変えることで、界面の残留応力をどのように低減できるかを検討する必要がある。いずれにしても、今後も中性子線を利用しての、より詳細な研究が不可欠である。

6. 引用(参照)文献等

なし

金属材料にコーティングした厚膜 (厚さ5mm) の内部ひずみ分布

利用者 ○江幡 吉美¹、桑嶋 孝幸²、齋藤 貴²、潮田 裕之³

所属 ¹茨城県企画部、²(地独)岩手県工業技術センター、³関東自動車工業(株)

1. はじめに

金属粉末を固体状態で積層するコールドスプレー法にて作製した皮膜を熱処理して、その残留応力緩和効果について、中性子回折法により皮膜内部の残留応力分布を測定して評価した。

2. 実験目的

近年、新しいコーティング方法であるコールドスプレー法が非常に注目されている。この方法は音速以上に加速された粉末を基材に衝突させてコーティングを行う表面改質技術の1つである。原料粉末は固体状態で積層するため酸化や分解等がほとんどないコーティングが可能であり、加工速度も速く、大気中で容易に加工ができるなどの優れた特徴を有している。この方法では粉末粒子が基材衝突時に変形して扁平化して積層して形成されるため皮膜内には非常に大きな残留応力が発生していると考えられる。この残留応力は皮膜剥離の原因となるため、残留応力緩和と処理が必要であり、そのためには非破壊で内部の残留力変化を測定することが重要である。残留応力の緩和方法としては、軟質材料等をインサートする方法等いくつかの方法が考えられる。本研究では、残留応力緩和効果と皮膜と基材間に冶金的な結合が期待できる熱処理による緩和方法について検討するため、FC250基材上に成膜したコールドスプレー皮膜の熱処理を行った。その皮膜の残留応力を測定し、熱処理による残留応力緩和効果について明らかにすることを目的として実施した。

3. 実験方法

金属基材は電気炉で応力除去焼鈍を行ったFC250鋳鉄基材 (W40mm×L50mm×t5mm) を使用した。原料粉末は平均粒径7.8μmのNi粉末を使用した。Fig.1に原料粉末外観のSEM写真を示す。粉末は球形をしている。コールドスプレー装置は、米国イノバティ社製の低圧型コールドスプレー装置Kinetic Metallization System (KM-CDS) である。Fig.2に装置構成の概略図を示す。この装置は、粉末供給装置、ガス調整装置、スプレーガン、制御装置から構成されている。コーティングは、スプレーガンを6軸多関節ロボットに取り付けプログラムによる自動方式で、皮膜厚さ5mmになるようにパス数を調節した。これ以降、スプレーノズルの走査方向をx、それと直交する方向をy、膜厚方向をzとして説明する。成膜した試験片は電気炉を用いて真空中で熱処理を行った。所定の温度まで昇温速度10K/minで昇温し、保持温度673K、1073Kの2水準で1h保持した。冷却は炉冷である。熱処理した試験片を中性子回折法によって残留応力測定した。測定時のスリットサイズは1×15mmで、回折格子面としてNi(111)回折を利用した。残留応力は、皮膜の中心部で測定した。基材と皮膜の界面を基準(0mm)として皮膜内部に向かい、それぞれの試験片で0、0.5、1.0、1.5、2.0、3.0、4.0mmの位置でx、y、zの3方向について測定を行い、(1)式により残留応力を計算した。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= E/(1+\nu) \times \{ \epsilon_x + \nu(\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z)/(1-2\nu) \} \\ \sigma_y &= E/(1+\nu) \times \{ \epsilon_y + \nu(\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z)/(1-2\nu) \} \\ \sigma_z &= E/(1+\nu) \times \{ \epsilon_z + \nu(\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z)/(1-2\nu) \} \end{aligned} \right\} (1)$$

4. 研究成果

1) as sprayed 皮膜の残留応力測定結果

熱処理していない皮膜の残留応力測定結果をFig.3に示す。表面側の深さ4mmの位置で引張の残留応力が測定されているが、皮膜表面にはスプレーのうねりやクレーター状の欠陥による表面効果があることを考えると、4mmの位置では正確な回折角が得られていない可能性が高いと思われる。また、界面の問題を考えると、途中の0.5mmから3mm範囲のデータが応力の分布を正確に表していると考えられ、表面層下で-100MPa前後の圧縮残留応力を持ち、界面に近づくにつれ引張り側に変化する傾向を示した。

2) 熱処理による残留応力緩和効果

次に成膜後に熱処理を行った皮膜の測定結果をFig.4、Fig.5に示す。前述したように皮膜表面の粗さの影響や界面効果などの影響から信頼性の高い区間は0.5mmから3mmの範囲のデータが応力の分布を正確に表していると考えられる。そのためこの区間の応力測定結果について比較することとする。全体的な傾向は、基材界面に近づくにつれて圧縮から引張に応力方向が変化して、これはas sprayed皮膜の結果と同じような傾向を示している。0.5mmから3mmの範囲での測定結果を比較すると-100MPaの圧縮残留応力は0～-50MPa程度まで低下している。処理温度の違いでは、1073Kで処理した皮膜の残留応力がより低い傾向を示しているが、界面に近い領域ではas sprayed皮膜よりも高い引張応力を示している。より正確な考察には鋳鉄基材内部の残留応力測定による試験片全体のバランスを考慮することや皮膜内部の組織観察など皮膜性状を詳細に観察して考察する必要があると思われる。

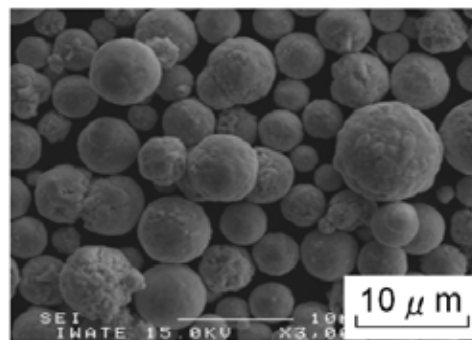


Fig.1 SEM photograph of used powder.

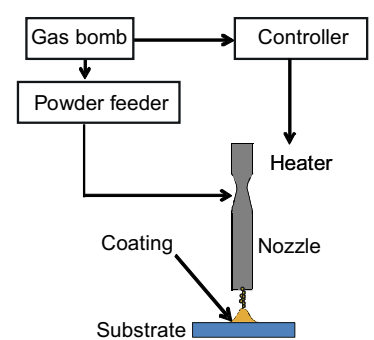


Fig.2 Schematic diagram of Kinetic Metallization System.

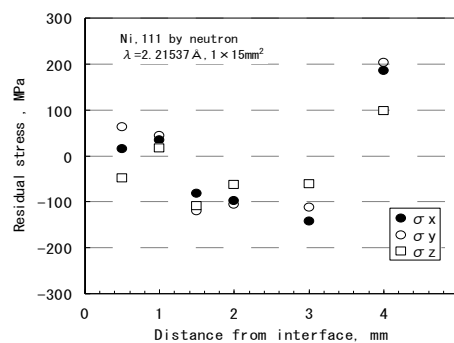


Fig.3 Result of residual stress of as sprayed Ni coating.

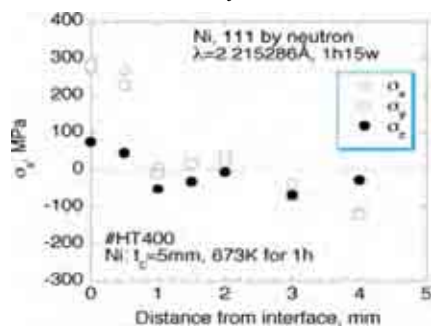


Fig.4 Result of residual stress of heat treated Ni coating (673K).

5. 結論・考察

- 1) コールドスプレー皮膜の残留応力緩和を目的とした熱処理について検討した。熱処理温度673Kでも皮膜中の残留応力は低下することが確認できた。
- 2) 1073Kで熱処理した皮膜の残留応力は673Kで処理したもののよりも低くなる傾向を示した。
- 3) 1073Kで処理した試験片の基材に近い領域はas sprayed皮膜よりも応力が高くなる結果となったが、これには基材内部の残留応力測定などより詳細な実験による考察が必要である。

6. 引用(参照)文献等

なし

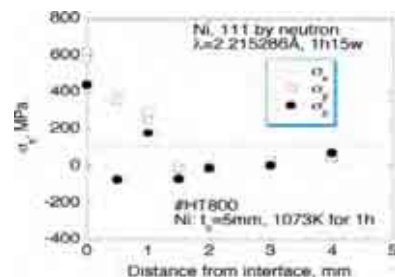


Fig.5 Result of residual stress of heat treated Ni coating (1073K).

球状黒鉛鑄鉄の強度及び切削性と ミクロ組織因子の関係の解明

利用者 ○山口 祥司¹、窪田 哲¹、中谷 伸也¹、平出 博司¹、内藤 大幹²
所属 ¹日立建機株式会社、²茨城大学

1. はじめに

RESA-II を使いバルク平均情報が得られる中性子回折を利用して、引張圧縮 (疲労) 変形前後の格子面間隔を測定し、残留格子ひずみを求めることで力学的特性とミクロ組織との関係を検討した。

2. 実験目的

建設機械の主要部品である油圧機器のケース類は形状が複雑であることから鑄物が多く用いられており、高い圧力のかかる部材には球状黒鉛鑄鉄が多用される。最近ではエネルギー伝達効率向上の観点から、油圧機器の高圧化、油路拡大が求められており、素材である球状黒鉛鑄鉄の高強度化、耐久性向上が望まれている。そこで、バルク平均情報が得られる中性子回折を利用して、引張圧縮 (疲労) 変形前後の格子面間隔を測定し、残留格子ひずみを求めることで力学的特性とミクロ組織との関係を検討した。

3. 実験方法

3.1 試料

本実験は同一の溶湯(Fe-3.71C-2.70Si-0.31Mn-0.02P-0.008S(mass%)) を用い冷却速度を変えることにより黒鉛および基地組織の異なるa、c、ah、chの球状黒鉛鑄鉄を作製した。a、cは鑄出し状態、ah、chは焼鈍して基地組織をフェライト化した素材である。引張(ひずみ2%)–除荷–圧縮(2%)–除荷を10サイクル繰り返し、圧縮後に除荷した状態の試料(疲労材)を用意した。各素材をFig.1に示し、Table1にミクロ組織の特徴を示す。さらにFig.2に測定点であるS(Start)、C10(Compression cycle at 10)を示す。

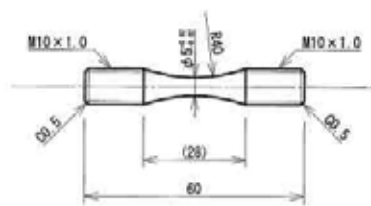


Fig.1 Shape and dimension of specimen

Table 1 Tensile properties and microstructures

	黒鉛粒径 μm	黒鉛粒数 個/mm ²	黒鉛面積率 %	フェライト面積率 %	パーライト面積率 %
a	23.6	245	11.3	82.3	6.5
c	38.9	77	10.1	70.3	19.6
ah	27.6	194	12.7	84.2	3.1
ch	38.0	106	13.1	84.5	2.4

3.2 測定方法

中性子回折装置(RESA-II)を用い、疲労試験前の試料(S)と疲労材(C10)の格子面間隔を測定し、両者の差から変形による残留ひずみを求めた。Fig.3に試料の設置状況を示す。本実験ではフェライト相について引張圧縮方向に垂直な面からの回折(Axial方向)を検出した。

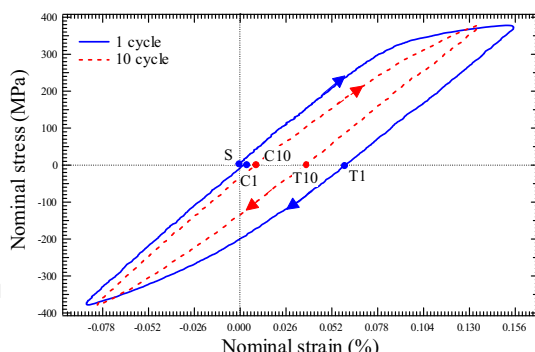


Fig.2 Nominal stress-strain curves .



Fig.3 Outlook of neutron diffracton by RESA-II

4. 研究成果

4.1 半価幅

半価幅の変化には転位密度変化の効果が含まれる。よって、粒径が変化しないと仮定すると、半価幅の増加は転位密度の増加を意味する(1)。Fig.4に本実験で得られた半価幅の変化を示す。(200)の半価幅はahの(200)を除けば減少する傾向にあり、(110)と(211)の半価幅は増加傾向にある。これらの結果には組織による差異はなく、10サイクルした後の試料の半価幅は、基準材に比べて収束する傾向にある。一般に引張変形後の半価幅は増加する傾向にあるので、引張圧縮試験特有の結果が得られた。

4.2 残留格子歪み

残留格子ひずみは、荷重を除荷した後に残る弾性ひずみであり、内部応力情報を得ることができる。強い粒(硬質粒)と弱い粒(軟質粒)が混在する組織を有する材料において、引張変形後の残留格子ひずみは、引張(Axial)方向では硬質粒に引張、軟質相に圧縮ひずみが残る。Fig.5に本実験で得られた残留格子ひずみを示す。フェライト相のみを有するah、chについては、(110)、(211)は引張方向、(200)は圧縮方向に残留格子ひずみが残った。引張変形によって得られるAxial方向の残留格子ひずみは、硬質粒である(200)は引張、軟質粒である(110)は圧縮の残留格子ひずみが残るといった報告がある。本実験は、圧縮からの残留格子ひずみであるので、同様な傾向が得られた。a、cについては、パーライトを含み結果が複雑となり、さらなる実験が必要である

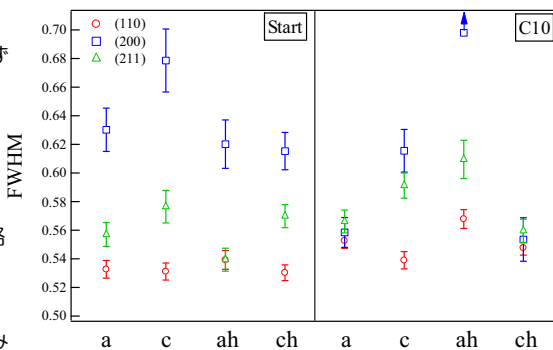


Fig.4 Change in FWHM

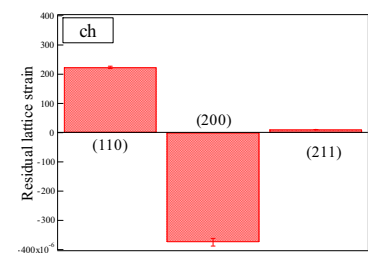
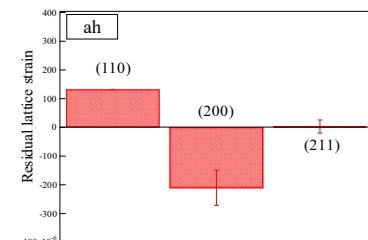


Fig.5 Residual(hkl) lattice strains after tension-compression cyclic deformation

5. 結論・考察

基地組織と黒鉛粒径が異なる4種類の球状黒鉛鑄鉄について、引張圧縮変形前後の試料で中性子回折実験を行い、フェライトの応力分配を追った。得られた主な結論を以下に示す。1. 組織による差異はなく、10サイクルした後の試料の半価幅は、基準材に比べて収束する傾向にある。2. 基地組織をフェライトのみとした場合、硬質粒である(200)は圧縮、軟質粒である(110)は引張ひずみが残った。今回の実験では測定時間の都合上、多くの水準の試料についての測定はできなかったが、今後測定を増やすことで、各ミクロ組織の違いが残留格子ひずみに及ぼす影響を調査し、各ミクロ組織因子のパラメータと機械的特性とを定量的に評価できる実験式を得ることを目標としたい。

6. 引用(参照)文献等

(1) B.D.Cullity,新版カリティ X線回折要論P261 (FWHM)