

学 位 論 文 題 名

白色X線による残留応力測定法に関する研究

学位論文内容の要旨

機械設計の立場から、部材に作用する荷重、応力の見積りを正確にすることは第一に必要なことである。機械工学におけるこれら応力の見積りは様々な解析手法や実験の積み重ねによりかなりの正確さをもってできるようになってきたが、部材の製造工程において付与される残留応力の正確な把握がなされなければ、部材の真の応力状態を理解することはできず、信頼ある設計は不可能である。部材が経る加工履歴については加工に伴う残留応力の分布がいくつか測定され、おおよその分布状態が推定できるようにはなっているが、最近における製品ならびに部材の著しい軽量・微小化、あるいは材料特性の複合化をねらった多層化や表面改質膜の形成等々の新しい展開に対する応力評価手法の対応は十分とは言えない。

これまで行われてきた残留応力の定量的評価法の一つは、残留応力が存在する部材を破壊的に細かく切り出したり、穿孔したり、あるいは薄層を逐次除去しながら、生じた変形量から原状の応力分布を求める方法で、一般には機械的方法と名付けられている。一方、非破壊的に残留応力を測定する方法も研究されてきた。これらは材料の物理的な特性を利用するので一般に物理的方法として分類されているが、主なものとして、特性X線を用いて材料の結晶格子面間隔を測定して応力を求めるもの、あるいは、中性子線、超音波や磁気ひずみなどの変化から応力を算定する方法がある。しかし、これらはいずれも表面の応力値を求めるものである。

製品あるいは部材について、存在する残留応力とその分布を非破壊的に、正確に、かつ簡便に測定することは実用上是非とも必要である。中でも現在早急にその測定および評価が要求される対象として、i) 残留応力が材料表層で急勾配の分布をしている場合、ii) 表層部分で三次元残留応力が存在する場合、iii) 材料特性の複合化あるいは異材による材料表面の改質加工に伴って生じる層境界の応力などが指摘されているが、現在の方法ではこれらはいずれも適用が不可能であり、評価が可能となるような測定システムならびに測定方法について新しい理論の構築が必要である。

本研究は、現在確立している特性X線による応力測定理論に代って、連続波長からなる白色X線を利用した残留応力の新しい測定理論の確立を目指したものである。X線は波長により侵入深さが異なる。連続した波長のX線を使えば、1回の測定で深さ数ミクロンから数十ミクロンに達する多くの格子面の面間隔情報が同時に得られるという最大の利点があり、これを用いて残留応力の深さ分布の測定が可能となる。

本論文は7章より構成されている。以下に各章の要旨を示す。

第1章は序論であり、本研究の背景と目的を明らかにするとともに、X線の性質に関

する基礎事項、特性X線および白色X線応力測定における基礎事項について述べた。

第2章では、2種類の特性X線を用いて、表層の残留応力の深さに沿った分布を非破壊的に測定する方法を提示した。通常、特性X線による測定応力は材料表面の応力として評価されている。しかし、残留応力分布が深さに沿って変化している場合、測定に使用する特性X線によって、得られる残留応力値とそれに対応する深さは異なる。そこで、2種類の特性X線を用いて得られる残留応力値とその深さから、直線的な応力こう配と表面の残留応力値を非破壊的に評価する方法を示した。この方法は、複数の波長のX線を利用する点で白色X線によるエネルギー分散法と共通している。適用例として、研削加工を施された製材用帯鋸材（JIS SKS51）の残留応力を測定し、表層の応力こう配を評価した。

第3章では、白色X線によるエネルギー分散法を利用した残留応力の深さ分布測定理論を提唱した。深さ方向に応力こう配がある場合、得られるひずみは深さ全体にわたる平均値であり、表面からある深さにおける値となる。その深さは回折面によって異なる。そこで、まず、ひずみ分布が深さに沿って変化している場合に得られる平均のひずみとその深さの関係を、X線が材料内部に侵入する際に生じる強度減衰を考慮して求めた。そして、2面以上の回折面のひずみとその深さ情報を使って、応力の深さ分布を求める方法を示した。適用例として、研削加工したアルミナセラミックス Al_2O_3 の残留応力、ラッピング処理したオーステナイト系ステンレス鋼 SUS316 の残留応力の深さ分布をそれぞれ評価した。

第4章では、エネルギー分散法を利用した三次元残留応力測定理論を提唱した。材料加工層では、かねてより、三次元応力状態を考慮すべきことが指摘されていた。そこで、6方向のひずみの深さ分布を第3章で示した方法で求め、それらより三次元残留応力分布を計算する方法を示した。適用例として、研削加工を施した炭素鋼 S50C を測定し、三次元残留応力分布を評価した。

第5章では、エネルギー分散法を利用したコーティング界面近傍の残留応力測定理論を提唱した。まず、第3章で示した方法を利用して、コーティング層と基材それぞれの平均のひずみとその深さの関係を、コーティング層の厚さを考慮して求めた。そして、2面以上の回折面のひずみと深さ情報を使って、コーティング界面近傍の残留応力の深さ分布を求める方法を示した。適用例として、窒化チタン TiN を PVD 法でオーステナイト系ステンレス鋼 SUS316 にコーティングした試料を測定し、基材とコーティング層の残留応力の深さ分布を同時に評価した。

第6章では、白色X線の回折線プロファイルがひずみの深さ分布によって変化する現象を利用した残留応力測定理論を提唱した。まず、白色X線の回折線プロファイルに影響を及ぼすであろうパラメータとして、X線の強度、線吸収係数、X線検出装置の特性とひずみの深さ分布を考慮し、回折X線プロファイルを定式化した。得られた式を用いて数値シミュレーションを行い、回折線プロファイルに影響を及ぼすパラメータを明らかにした。そのパラメータを利用して、複数の格子面の回折線ピークから応力こう配と表面応力を評価する方法を示した。適用例として、円筒形に成型された SK4 鋼板を平板に拘束した場合の応力分布の測定を行い、本法の有効性を検証した。

第7章では、本研究で得られた結果の総括を行うとともに、白色X線法の今後の発展について述べた。

学位論文審査の要旨

主 査	教 授	鵜 飼 隆 好
副 査	教 授	石 川 博 將
副 査	教 授	野 口 徹
副 査	教 授	丸 川 健三郎

学 位 論 文 題 名

白色X線による残留応力測定法に関する研究

構造機能設計の立場から製品あるいは部材について存在する残留応力とその分布を非破壊的に、正確に、かつ簡便に測定することは実用上是非とも必要である。特に、最近における著しい軽量・微小化、あるいは材料特性の複合化をねらった多層構造や表面改質膜の形成等々の新しい展開に対する応力評価手法の対応は十分とは言えない。中でも、現在早急にその測定および評価が必要な対象として、残留応力が材料表層で急こう配の分布をしている場合、表層部分で三次元残留応力が存在する場合、材料特性の複合化あるいは異材による材料表面の改質に伴って生じる層境界の応力などが指摘されているが、現在の方法ではいずれも適用が困難である。

本研究は、現在確立している特性X線による応力測定理論に代って、連続波長からなる白色X線を利用した残留応力の新しい測定理論の確立を目指したものである。X線は波長により侵入深さが異なるから、連続した波長のX線を使えば1回の測定で深さ数ミクロンから数十ミクロンに達する多くの格子面の面間隔情報が同時に得られるという最大の利点があり、これを利用した残留応力の深さ分布の測定理論の提唱である。

本論文は7章より構成されている。

第1章は序論であり、本研究の背景と目的を明らかにしている。

第2章では、白色X線による残留応力の深さ分布測定の可能性を検証するため、2種類の特性X線を用いて、表層の残留応力の深さに沿った分布を非破壊的に測定する方法を提案している。残留応力分布が深さに沿って変化している場合、使用する特性X線によって得られる応力値と対応する深さは異なる。そこで、2種類の特性X線を用いて得られる残留応力値とその深さから、直線的な応力こう配と表面の残留応力値を非破壊的に評価する方法を提案しており、実測例を示している。

第3章では、白色X線によるエネルギー分散法を利用した残留応力の深さ分布測定理論を提唱している。深さ方向に応力こう配がある場合、深さに沿って変化しているひずみの平均とその深さの関係を、X線が材料内部に侵入する際に生じる強度減衰を考慮して求め、いくつかの回折面のひずみとその深さ情報を使って応力の深さ分布を求める方法としている。あわせて適用例を示している。

第4章では、エネルギー分散法を利用した三次元残留応力測定理論を提唱している。

材料加工層では、かねてより三次元応力状態を考慮すべきことが指摘されていた。ここでは6方向のひずみの深さ分布から三次元残留応力分布を計算する方法を示しており、適用例として炭素鋼の研削加工層の三次元残留応力分布を評価している。

第5章では、エネルギー分散法を利用したコーティング層界面近傍の残留応力測定理論を提唱している。コーティング層と基材それぞれの平均のひずみとその深さの関係を、コーティング層の厚さを考慮して求め、複数の回折面のひずみと深さ情報を使って、コーティング界面近傍の残留応力の深さ分布を求める方法を提案している。適用例として、窒化チタン TiN を PVD 法でオーステナイト系ステンレス鋼 SUS316 にコーティングした試料を測定し、基材とコーティング層の残留応力の深さ分布を同時に評価している。

第6章では、白色X線の回折線プロファイルがひずみの深さ分布によって変化する現象を利用した残留応力測定理論を提唱している。まず、白色X線の回折線プロファイルに關与するパラメータとして、X線の強度、線吸収係数、X線検出装置の特性とひずみの深さ分布を考慮して回折X線プロファイルを定式化し、この式を用いた数値シミュレーションから回折線プロファイルに影響を及ぼすパラメータを明らかにした。そのパラメータを利用して、複数の格子面の回折線ピークから応力こう配と表面応力を評価する方法を示している。適用例を示し、本法の有効性を検証している。

第7章では、本研究で得られた結果の総括を行っている。

以上のように、本論文は、白色X線による新しい残留応力評価手法を確立し、従来困難であった条件に対しても測定および評価が可能としたものであり、これらの新しい提案は応力評価法ならびに機械設計学の進歩に寄与するところ大である。

よって、著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。