

氏 名	さ さ き とし ひと 佐 々 木 敏 彦
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和 62 年 3 月 13 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最 終 学 歴	昭和 55 年 3 月 東北大学大学院工学研究科金属加工学専攻 博士課程前期 2 年の課程修了
学位論文題目	応力こう配を考慮した X 線三軸応力測定法に関する 研究
論文審査委員	東北大学教授 島田 平八 東北大学教授 高橋 裕男 東北大学教授 渡辺 龍三 東北大学助教授 小幡 充男

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 序 論

X線による応力測定は、X線回折を利用して主に多結晶材料の微視的構造変化（格子面間隔の変化）から材料内の巨視的な応力を求めようとする方法である。本法に関する研究は、既に約50年の歴史を有し今日では工学および工業分野へ広く利用されている。その応力計算理論は $\sin^2\psi$ 法と呼ばれ、今日までほぼ一貫して使用されて来ている。この応力計算法は、測定が試料表面の極浅い表面層に限られていることから、(1)平面応力状態、(2)深さ方向の応力変化（応力こう配）が存在しない、などを主な前提条件にして導かれたものであり、多くの場合妥当な結果を与えるとして今日に至っている。しかしながら、1970年代以後 $\sin^2\psi$ 法で前提にしている $2\theta - \sin^2\psi$ 線図の直線性が成り立たず、種々の非線形分布を示す測定結果がとくに表面加工材に多数見られることが報告されるようになり、現在ではその原因として(1)深さ方向に対する急激な応力こう配、(2)X線侵入深さの変化、(3)三軸応力状態、(4)集合組織の形成、などが考えられている。このような場合に従来法を用いて応力計算を行えば誤った応力評価をするとともに、ひいては構造物の重大な事故につながる可能性があり問題である。

本研究は以上のような見地に立ち、等方弾性論の範囲内を対象として非線形な $\sin^2\psi$ 線図が測定される場合にも正確に応力を求められる新しいX線応力測定の理論を開発することを目標に置いて行ったものである。その結果、上記の(1)~(3)の影響を考慮した方法を考案し、有効な方法であるこ

とを確認した。

第2章 応力こう配を考慮したX線応力測定法（厳密法）

2-1には本章の概要を述べた。2-2~2-4では応力こう配の影響を論ずる上で必要となる基礎的問題点を検討した。すなわち、2-2では測定時のX線侵入深さが実質的にどの程度のものであるかを導いた。2-3では応力こう配が存在する場合のX線測定ひずみについて検討し、材料によるX線吸収を考慮した重み付き平均の方法を述べた。2-4では応力こう配を直線的と仮定し、X線測定ひずみと応力との基本関係式を導いた。以上によって得た本法の基本的仮定を要約すると、まず、試料表面に図1の座標軸および角 ϕ 、 ψ を定義して、測定に寄与する実質的なX線侵入深さをTで表すと次式で与えられる（並傾法の場合）。

$$T = \frac{\sin^2 \theta - \sin^2 \psi}{2 \mu \sin \theta \cos \psi} \quad (1)$$

（ θ : Bragg角, ψ : 格子面法線方向, μ : 線吸収係数）

また、応力状態については三軸応力状態を考え、各成分は深さ方向に対して直線的に変化することを仮定し、次式を使用する。

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{12} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{13} & \sigma_{23} & \sigma_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{110} & \sigma_{120} & 0 \\ \sigma_{120} & \sigma_{220} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{12} & A_{22} & A_{23} \\ A_{13} & A_{23} & A_{33} \end{bmatrix} Z \quad (2)$$

（表面応力成分）（応力こう配成分）（深さ）

さらに、X線測定ひずみ $\langle \epsilon_{\phi\psi} \rangle$ は、X線強度を重みとするX線侵入深さ範囲の加重平均と考えて、応力成分によって次式のように表して使用する。

$$\begin{aligned} \langle \epsilon_{\phi\psi} \rangle = & \frac{1+\nu}{E} (\sigma_{110} \cos^2 \phi + \sigma_{120} \sin 2\phi + \sigma_{220} \sin^2 \phi) \sin^2 \psi \\ & - \frac{\nu}{E} (\sigma_{110} + \sigma_{220}) + \left\{ \frac{1+\nu}{E} (A_{11} \cos^2 \phi + A_{12} \sin^2 2\phi \right. \\ & + A_{22} \sin^2 \phi) \sin^2 \psi - \frac{\nu}{E} (A_{11} + A_{22} + A_{33}) \\ & \left. + \frac{1+\nu}{E} A_{33} \cos^2 \phi + \frac{1+\nu}{E} (A_{13} \cos \phi + A_{23} \sin \phi) \sin 2\phi \right\} WT \end{aligned} \quad (3)$$

（E: 縦弾性係数, ν : ポアソン比, W: 重み係数 (W=0.42)）

2-5では本研究で最も重要な応力計算方法に関する具体的な検討結果を述べ、本研究で新しく考案した応力計算法（厳密法）を提案した。表1は本法による応力測定手順をフローチャートに表したものである。ここで $\langle a_1 \rangle$ 、 $\langle a_2 \rangle$ はそれぞれ $\langle \epsilon_{\phi\psi} \rangle$ の ψ 角に関する平均および偏差に相当し次式で与えられる。

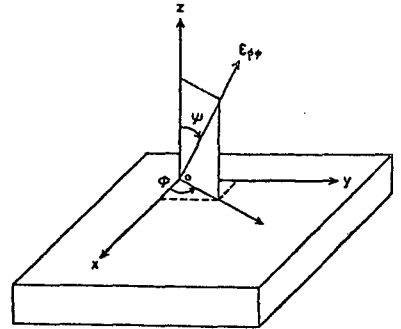


図1 座標軸と角 ϕ 、 ψ の定義

$$\langle a_1 \rangle = \{ \langle \varepsilon_{\phi\psi} \rangle_{\psi > 0} + \langle \varepsilon_{\phi\psi} \rangle_{\psi < 0} \} / 2$$

$$\langle a_2 \rangle = \{ \langle \varepsilon_{\phi\psi} \rangle_{\psi > 0} - \langle \varepsilon_{\phi\psi} \rangle_{\psi < 0} \} / 2 \quad (4)$$

また、 $\langle c_1 \rangle$ 、 $\langle c_2 \rangle$ 、 $\langle c_3 \rangle$ は種々の ϕ 方向の $\langle a_1 \rangle$ の和や差を表し、応力成分に対して次式のように表される。

$$\langle c_1 \rangle = \langle a_1 \rangle(\phi=0) + \langle a_1 \rangle(\phi=\pi/2)$$

$$= (\sigma_{110} - \sigma_{220}) X_1 + (A_{11} + A_{22}) X_2 + A_{33} X_3$$

$$\langle c_2 \rangle = \langle a_1 \rangle(\phi=0) - \langle a_1 \rangle(\phi=\pi/2)$$

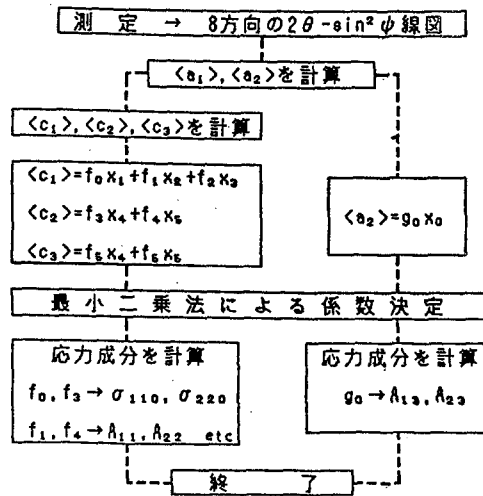
$$= (\sigma_{110} - \sigma_{220}) X_4 + (A_{11} - A_{22}) X_6$$

$$\langle c_3 \rangle = \langle a_1 \rangle(\phi=\pi/4) - \langle a_1 \rangle(\phi=-\pi/4)$$

$$= \sigma_{120} X_4 + A_{12} X_6 \quad (5)$$

($X_1 \sim X_6$: ψ に依存した変数)

表1 厳密法による応力計算法



各応力成分は、こうして最小二乗法による係数決定を経て計算できる。2-6には本法の理論式の検証およびその応力計算精度の検討の目的で行った数値的シミュレーション結果を述べた。その結果、本法は実用上十分な応力計算精度を与えるものであることが確認できた。2-7は本法を使用した残留応力測定の実例であり、研削および研磨を行った構造用炭素鋼の実験結果を示した。図2は研削材に対する測定結果および本応力計算結果であり、両者に良好な一致が見られることが分かる。(6)式に応力計算結果を示す。

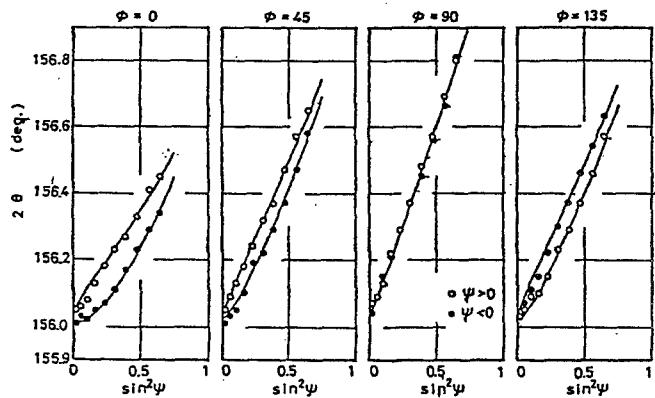


図2 研削材の $\sin^2\psi$ 線図と計算結果(実線)

図2は研削材に対する測定結果および本応力計算結果であり、両者に良好な一致が見られることが分かる。(6)式に応力計算結果を示す。

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} -275 & 0 & 0 \\ 0 & -406 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 69 & -2 & -10 \\ -2 & 38 & 1 \\ -10 & 1 & 12 \end{bmatrix} Z \quad (6)$$

(MPa)

(MPa/ μm)

また、研磨材については電解研磨法を用いて表面層を逐次除去し深さ方向の応力分布について従来法との比較を行った。その結果の一例を図3に示す。同図より、応力こう配がわずかな試料内部で

は両者の差異はほとんど見られないが、応力こう配が著しい最表面では従来法は絶対値にして約100 MPaだけ本法より過小評価していることが分かる。

第3章 積分法を利用したX線 応力測定法(簡便法(1))

本章においては、測定部分の障害物のために厳密法に要する測定データ数が完全に得られない場合、あるいは、測定時間の短縮を図ろうとする場合など、より少ないデータからの応力計算が可能となるような実用性を重視した方法について検討した。そのために、Lodeらが最初に提案した積分法を本研究で導いた基本関係式に適用して応力成分を解いたところ、全応力が解き得ることを判明し、なおかつ、実用可能な計算精度が得られることが判明した。すなわち、本法は(3)式を次式のように整理しその係数($B_0 \sim A_4$)を利用する。

$$\langle \varepsilon_{\phi\phi} \rangle = B_0 + B_2 \cos 2\psi + B_4 \cos 4\psi + A_2 \sin 2\psi + A_4 \sin 4\psi \quad (7)$$

これらの係数値は積分法によって測定データから計算でき、さらに、それらは応力成分によって表すことができるため、6方向の $\sin^2 \psi$ 線図($\psi = 0, \pi/4, \pm\pi/2, \pi, -3\pi/4$)を用いて全応力が計算できる。表2に本法の応力計算手順を要約して示す。各章の概要は次のとおりである。まず、3-1に本章の概要を述べた。3-2には本法の応力計算式の誘導および測定値から応力成分を計算するまでの手順を述べた。3-3は本法に対する数値的シミュレーションによる検討を述べ、実用上十分な応力計算精度が得られることを確認した。3-4は本法による残留応力の実測例を示し、測定データとの対応および算出応力値が厳密法の場合と概ね同等であることを述べた。3-5に本章の結論を述べた。

第4章 $\sin^2 \psi$ の多項式を利用したX線応力測定法(簡便法(2))

本章では、第二の簡便法について検討した。すなわち、積分法を利用する第一の方法は、応力計算精度がやや劣る場合があるため、積分法に代わり一種の微分法である平均ひずみを $\sin^2 \psi$ に関する2次式に表す応力成分の解法を考案し、厳密法および簡便法(1)と比較検討した。その結果、X線侵入深さを1次近似したことに基づく計算誤差のため厳密法より精度が劣る場合があるもの、簡

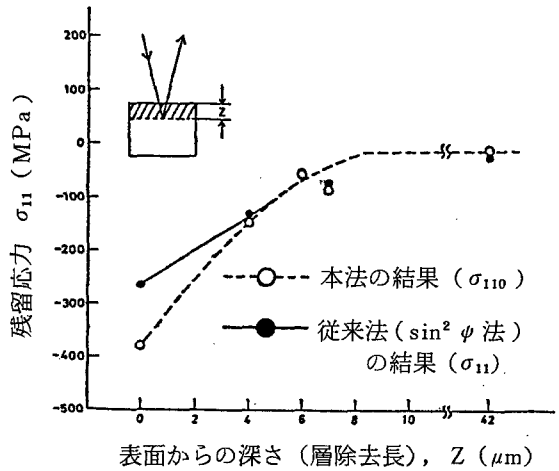
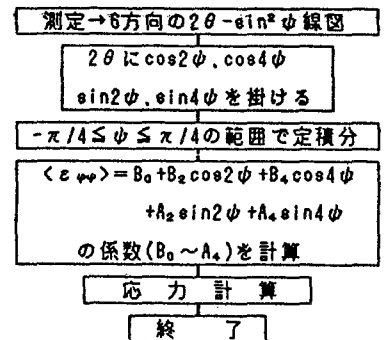


図3 エメリー紙研磨による深さ方向の残留応力分布

表2 応力計算法(簡便法1)



便法(1)よりは精度の向上が期待できる方法であることが明らかになった。本法では $\langle a_1 \rangle$ が次式

$$\langle a_1 \rangle = f_0 + f_1 \sin^2 \psi + f_2 \sin^4 \psi \quad (8)$$

のように2次式に表せることを利用し、その係数($f_0 \sim f_2$)と各応力成分との関係を通して応力計算するものである。応力計算手順の要約を表3に示す。

各章の概要は次のようである。まず、4-1に本章の概要を述べた。4-2では応力計算式を誘導し、測定データから応力成分を算出する手順を示した。

4-3および4-4は前章までと同様に数値的シミュレーションおよび実測例によって本法の検証を行った結果を示した。4-5には研削材および研磨材に対する残留応力測定結果を、厳密法、簡便法(1)、簡便法(2)の場合について比較した。その一例として σ_{11} 成分の場合について図4に示す。最後に4-6に本章の結論を述べた。

表3 応力計算法 (簡便法2)

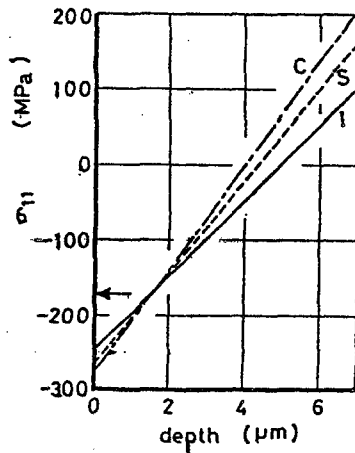
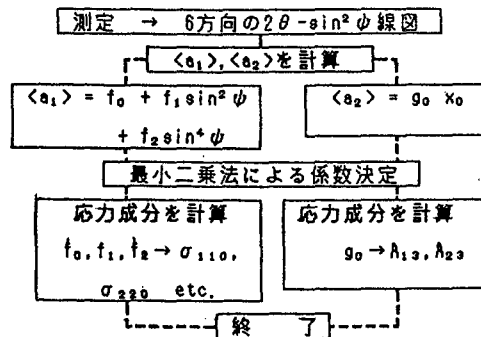


図4 各応力計算法の結果の比較 (C: 厳密法, I: 簡便法(1), S: 簡便法(2), ←: 従来法)

第5章 結論

本研究の総括であり、結論および本研究の結果の持つ意義を記述した。

審 査 結 果 の 要 旨

従来のX線応力測定法はいわゆる $\sin^2\psi$ 法を基礎として発達し、その理論は完成されたかのように思われていた。しかし、近年測定精度の向上と共にこの理論では説明できない $\sin^2\psi$ 線図の湾曲や非対称性のため、応力評価の不可能な例が多数報告された。その原因として従来の理論では無視されていた、X線の表面層への侵入とそれに対する三軸応力およびその勾配の影響が指摘され、これらの影響を全て包括する、一般的理論の確立が望まれていた。しかし、解析が非常に複雑になるため満足のゆくものが提案されていないのが現状である。そこで著者は、従来無視されていた因子を考慮することで、 $\sin^2\psi$ 法の欠陥を克服し、より一般的な応力状態下での残留応力が正確に評価できるX線応力測定法を確立した。本論文は、その間の経緯をまとめたもので、全編5章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では、従来の $\sin^2\psi$ 法を包括した新しいX線応力測定法を確立している。まず、X線の侵入を考慮するため、回折X線強度を“重み”とする加重平均法の考え方を提案し、それに基づきX線侵入深さをX線ひずみの項に導入することに成功し、つづいて、X線ひずみと応力の関係式を三軸応力とその勾配を組込んだ形で完成させた。誘導された式は長大でかつ非線形項を含むため、通常的手法では応力が計算できない場合のあることがわかり、新しい計算法の開発を試みた。その結果、8方向で回折X線を測定し、その対称性を用いることで、表面および厚さ方向の応力成分が全て求まる手法を見出し、新しいX線応力測定法が確立できた。本法の有効性は数値的シミュレーション、実測例を通し実証している。以上の成果はX線応力測定法の精度および信来性を飛躍的に高めるものであり、極めて重要であると言える。

第3～4章では、第2章で確立した方法に若干の近似を導入し、実用性を重視した形に改良した2つの簡便法を提案している。これらの簡便法によれば、測定精度を実用上十分な程度に保ちながら、測定時間を著しく減少できると共に回折X線測定方向が6方向でよく、実用面における応用範囲を拡大させた有効な方法と言える。

第5章は結論である。

以上要するに本論文は、従来のX線応力測定法である $\sin^2\psi$ 法に代り、勾配を有する三軸応力下でも正確に残留応力が評価できる新しいX線応力測定法を開発、確立したもので、金属工学に寄与するところ少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。