



Title	WC-Ni超合金の溶接残留応力に関する研究
Author(s)	落合, 宏
Description	平成18年3月授与
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	乙第6430号
Issue Date	2006-03-24
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.r6430
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/14706
Type	doctoral thesis
File Information	WC-Ni.pdf



WC-Ni 超硬合金の
溶接残留応力に関する研究

平成 17 年 10 月

落 合 宏

目 次

1. 序論	
1. 1 はじめに	1
1. 2 研究背景 (超硬合金に関するこれまでの研究)	2
1. 3 研究目的	5
2. 固有ひずみ法を用いた溶接残留応力測定	11
2. 1 緒言	11
2. 2 固有ひずみ法の理論	11
2. 3 突合せ溶接された軟鋼板の溶接残留応力測定	13
2.3.1 中央断面 (x 軸上) の残留応力分布	13
2.3.2 板全体の応力分布	14
2. 4 測定結果および考察	14
2. 5 本章の結論	15
3. WC-Ni 超硬合金の焼結残留応力測定	22
3. 1 緒言	22
3. 2 X線多軸ひずみ・応力測定理論	23
3. 3 焼結残留応力測定方法	25
3. 4 測定結果および考察	26
3.4.1 測定方法に関する考察	26
3.4.2 測定結果に関する考察	26
3. 5 本章の結論	27
4. WC-Ni 超硬合金の溶接残留応力測定	34
4. 1 緒言	34
4. 2 試料の製作および溶接実験	34
4. 3 溶接残留応力測定方法	35

4. 4	測定結果および考察	36
4. 5	本章の結論	38
5.	超硬合金の溶接残留応力解析	48
5. 1	緒言	48
5. 2	超硬合金の材料定数	49
5.2.1	縦弾性係数およびポアソン比	49
5.2.2	密度	50
5.2.3	線膨張係数	50
5.2.4	熱伝導率	51
5.2.5	比熱	51
5. 3	材料定数測定実験	52
5. 4	溶接残留応力解析	52
5. 5	解析結果および考察	53
5. 6	本章の結論	55
6.	WC-Ni 超硬合金のすみ肉溶接残留応力解析	70
6. 1	緒言	70
6. 2	解析モデルおよび温度分布解析	71
6. 3	すみ肉溶接の残留応力解析	71
6. 4	解析結果および考察	72
6. 5	本章の結論	73
7.	結論	85
	参考文献	87
	主要記号一覧	95
	図表一覧	97
	謝辞	101

第1章 序 論

1. 1 はじめに

超合金の代表としてタングステンの炭化物である WC が最も有名である。WC は特に硬さに優れているので、切削工具用として開発され現在に至っている。WC は融点が高く、鋳造することが困難であり、できたとしても脆弱な製品しかできない。そこで、タングステンと黒鉛との混合粉末を 1500°C 程度で加熱して WC 粉末を得る。この粉末をわずかの Co や Ni 金属粉末を添加して焼結すると、硬度とともに強度にも優れた超合金チップが得られる。任意の大きな形状は不可能であるため、当初は焼結した超合金チップを工具先端に機械的に固定して用いた。焼結方法の改良とともに、形状も小型ではあるが種々の形状の超合金ができるようになり、ダイスやロールなどの耐摩耗工具に応用されるようになった。

用途が拡大して、広い摺動面に強度、耐摩耗性ともに優れる超合金を採用しようとする要望が生じてきた。そのようなときには、多数の超合金チップを摺動面に接合する必要がある。接合には、ろう付けが現在でも一般的であるが、強度の面では溶接のほうが優れている。しかし、結合金属割合の低いままの超合金チップを鋼の部材に直接溶接しようとする、溶接割れが生じ、うまく接合できない。

超合金の溶接性を向上させるには、結合金属割合を増加させる方法がある。しかし、この場合、超合金が本来有していた硬度を低下させてしまう。そこで、表面は従来の硬さおよび強度を持ち、接合部は溶接性が保たれるように、結合金属割合を連続的に変化させた傾斜組成材料を開発することが期待されている。

溶接割れの要因のひとつに溶接による熱応力がある。溶接時に限界以上の熱応力が加わると溶接割れとなってしまう。溶接後完全に冷却されたときに存在する応力分布が残留応力であり、残留応力を測定すると、溶接熱応力を

推定することができる。溶接残留応力測定は、溶接割れの対策に結びつく重要な測定方法であると言える。結合金属割合と残留応力の関係を明らかにすることが、傾斜組成超硬合金開発のために不可欠な研究となる。

また、超硬合金の結合金属としては、Co が代表的であるが、非磁性体として要求される場合 Ni を用いる。近年経済的理由から Co の代替としても、Ni が注目されるようになって来た。そこで、研究対象を WC-Ni 超硬合金とし、超硬合金の結合金属割合と溶接性の関係を明らかにする研究を目的とする。

Ni 結合金属が低い割合の超硬合金から高い割合の試験片を焼結によって製作し、超硬合金と鋼試験片との溶接試験を行い、溶接割れが生ずるかどうかと共に、溶接残留応力の測定を行う。超硬合金の残留応力測定には、非破壊測定として、X線による測定が最も適している。

つぎに、熱弾塑性による残留応力解析を行う。解析結果が妥当であれば、今後非常に時間と手間のかかる実験を行わずに、残留応力の分布が推定できるようになる。解析には有限要素法 (FEM) による数値計算を用いる。

また、今後の数値解析に必要な、種々の結合金属割合におけるデータを得ることも併せて行う。

1. 2 研究背景 (超硬合金に関するこれまでの研究)

超硬合金に関するこれまでの研究は、鈴木壽編著「超硬合金と焼結硬質材料」(1986)に、それまでの研究のまとめとして発表されている[1]。これによると「超硬合金 (cemented carbide alloy, hard metals) とは、周期表第IVa, Va, VIa 族に属する9種類の金属の炭化物を対象とし、これら炭化物粉末を鉄、コバルト、ニッケルなどの鉄族金属を用いて焼結結合した合金を総称している。いずれの合金も低温硬さはもちろん、高温硬さが優れ、高強度で諸物性が安定であることを特徴としている。」と超硬合金の定義がされている。

表 1.1 に周期表を、表 1.2 に超硬合金用炭化物の諸性質を示す。なお、表 1.2 の数値は再調査し、最新のデータに置き換えている。この表からわかるように、WC だけが六方晶であるのに対しその他の合金のほとんどは NaCl 型と呼ばれる面心立方晶である。WC と TiC の結晶構造を図 1.1 に示す。

このように超硬合金には多くの種類があるが、「WC の機械的性質が最も優れ、その中で最も利用されている WC-Co 合金を指して超硬合金という。」と紹介されている。

また、粉末からの製造法として、真空焼結法、熱間静水圧プレス (hot isostatic pressing ; HIP) およびホットプレス法が紹介されている。

また、WC-Co 超硬合金の強度として抗折力および圧縮強さが結合金属 Co 割合との関係として報告されているが、Co 割合は最大でも質量割合 30%以下である。機械的性質としては硬度、縦弾性係数、熱伝導率などが結合金属 Co 割合との関係として述べられている。また、種々の Co 割合に対して引張試験を行い、得られた応力-ひずみ線図を超硬合金の塑性変形として報告している。さらに、WC-Co 超硬合金の高温機械的性質としては縦弾性係数、高温強度としては抗折力および圧縮強さそれぞれが温度によって変化する程度が示されている。

当時の超硬合金の傾向として、高硬度で耐摩耗性向上のため超微粒子を用いた超微粒超硬合金が有用視されてきている。普通の WC 粒度は 1~4 μm に対して約 0.6 μm 程度以下を意味している。さらに、非強磁性超硬合金として結合相を Co の代わりに Ni とした合金または Co-Ni とした合金が新しい型の超硬合金として登場し、超硬合金の用途拡大を担っているとの報告がある。ここでは、結合相 Ni は非強磁性という特殊な用途目的であり、WC-Co の代替という位置づけではない。

使用例としては切削工具が最も代表的であり、耐摩耗工具としてダイス、ロールなどに応用例があるが、ボールペン用ボールとしても良く知られている。また、最近まで非常によく使用されていたタイヤスパイク、ドットプリンタ用印字ピンもそうである。

1986 年以降の超硬合金に関する研究として、超硬合金の材料特性に関するものでは、超硬合金の強度に関する研究 [9-13] や機械的性質に関する研究 [14-16] がある。また、切削工具の伝熱特性を改良するために、傾斜組成超硬合金の開発が報告されている [17]。次に注目されるのが超硬合金の新しい焼結法として、真空炉内で高圧大電流を用いた放電プラズマ焼結 (spark plasma sintering ; SPS) 法 [7, 8] が開発されたことである。この方法によって種々

の形状の傾斜組成超硬合金が容易に製作されるようになり、これに関する研究[18, 19]が報告されている。しかし、ここで対象となった超硬合金は、切削工具として代表的な WC-Co 系超硬合金であった[2-6]。耐食・非強磁性体として用いられていた Ni を、経済的な理由から Co の代替として扱えないかという研究が進められた。Co の代替として、Co 以外の鉄系金属では Ni が最も有力な候補となる。しかし、現在のところ、WC-Ni 超硬合金に関する研究は極端に少ない[21, 22]。

従来、切削工具用超硬合金チップはホルダーに焼ばめ、圧入やねじ止めなど機械的方法で取り付けられていた。使い易さや形状をコンパクトにする目的でろう付けが採用されるようになり、ろう付けやはんだ付けに関する研究が報告されている[23, 24]。その後、超硬合金と鋼との接合技術が次々と開発され、まず、拡散接合に関する研究報告では[25-28]がある。また、摩擦圧接法[29, 30]やレーザービームによる溶接の報告[31, 32]がある。

拡散接合は真空ホットプレスなどの装置内で行うものであり、摩擦圧接法も圧接のための装置が必要となる。レーザ溶接法は高エネルギーレーザ発生装置が必要であるが、現在普及するまでには至っていない。そこで、一般的に用いられているアーク溶接を超硬合金と鋼の溶接に採用できないかという研究が始められ、TIG 溶接を用いた超硬合金と鋼の溶接の報告[33]がある。

超硬合金の溶接でもっとも問題となるのは、溶接割れが生ずることである。溶接割れに対する研究は古くから続けられており、溶接による残留応力の発生がもっとも大きな要因とされる報告[71]がある。溶接残留応力の測定では非破壊測定法である X 線応力測定法が最も一般的である[37]。しかし、超硬合金は複合材料であり、その X 線応力測定には困難が伴う。超硬合金の X 線応力測定の報告[40]があるが、すべて WC-Co 超硬合金であり、Ni などその他の結合金属に関する X 線応力測定報告はない。

接合された界面付近の応力解析に関する研究[47]が報告されており、FEM を用いた解析が一般的となっている。さらに、超硬合金の亀裂先端の破壊を遮蔽する研究報告[11]もあるが、超硬合金の溶接残留応力解析の報告はない。

溶接残留応力測定に関する論文は非常に沢山報告されている。残留応力測定法としては、薄層を除去しながらその層に存在した応力を決定する Sachs

法[51-53]と、非破壊測定として代表的なX線法[41-45]とに分類される。さらに新しい方法として、固有ひずみを用いる測定法も報告されている[54-57]が、3次元分布を求めるための Sachs 法による測定であり、X線による非破壊測定の場合には、適用できない。X線を用いた2次元溶接残留応力測定を行う場合、より簡便で実用的な方法が必要となる。

FEMに関する文献は非常に多く[78-83]、FEM汎用ソフトもANSYSなどパーソナルコンピュータで利用でき、必要に応じてFORTRANによるプログラミング[93]も可能な環境となっている。

1. 3 研究目的

超硬合金は低温硬さ、高温硬さに優れ、また強度にも優れる材料である。その用途として代表的なものに切削工具があるが、近年その用途が拡大され耐磨耗性の要求されるダイス、ロールなどの工具や機械の摺動面に使用されるようになった。超硬合金は粉末から焼結で製造されるため、チップ状の製品しかできず、その大きさに制限がある。最新の装置（ホットプレスやSPSなど）を使用しても直径50mm程度の円板しかできない。従って、広い摺動面に採用しようとするとき超硬合金を接合して用いることになる。

接合にはいろいろな方法が現在可能である。ろう付け、はんだ付けが古くから採用されているが、強度の点で問題がある。拡散接合は接合境界面の欠点が少ない点で現在最も優れた接合法と考えられるが、真空炉内で行う必要があり、形状に制限があることなど一般的ではない。溶接方法にはレーザー溶接、TIG溶接などが超硬合金の溶接に適切と考えられるが、強力レーザー発生装置が一般的に使用できるまで普及していない。従って、TIG溶接で超硬合金を鋼の本体に溶接できれば、超硬合金を摺動面に採用することが飛躍的に増大するはずである。

超硬合金を鋼にTIG溶接しようとするとき、まず問題になるのが溶接割れである。切削工具に用いるような、結合金属割合が低く硬さが優れている超硬合金をそのまま溶接しようすると、溶接割れが生じ、超硬金属が鋼から剥離してしまう。結合金属割合を多くした超硬合金では溶接割れが生じなく

なるが、硬さおよび強度は低下してしまう。

溶接割れの要因のひとつに溶接残留応力がある。溶接割れと結合金属の割合との関係を明らかにし、溶接割れの生じない対策を講じたい。それには、表面は切削工具に用いるような硬さおよび強度を持ったまま、溶接部の近傍では結合金属割合を大きくして、溶接性を良くすることが望まれる。このように、結合金属割合を連続的に変化させた傾斜組成超硬合金を採用することが、ひとつの解決方法となる。

本論文では、超硬合金を溶接するとき生ずる残留応力と超硬合金の結合金属割合との関係を明らかにし、溶接性の良い傾斜組成超硬合金の設計資料を得ることを目的とする。超硬合金としては最も代表的な WC を基材とし、結合相には最近経済的な理由から Co の代替材料として注目されている Ni を取り上げる。結合金属 Ni の割合を工具として利用している低 Ni 割合の超硬合金から超硬合金としての限度を大きく超えた結合金属割合までを対象として取り扱う。結合金属割合が変化した場合の WC-Ni 超硬合金の機械的性質など、材料特性がほとんど報告されていないため、設計資料として解析用データを確立することが必要である。

溶接方法としては最も一般的な TIG 溶接を採用し、溶接実験および残留応力測定を行う。また、同時に FEM を用いて残留応力発生メカニズムを明らかにする。論文は 7 章で構成されており、以下に各章の概略を述べる。

第 1 章は超硬合金の溶接に関するこれまでの研究の調査結果を述べ、本論文の研究目的を明確にする。

第 2 章では、固有ひずみを用いた溶接残留応力測定法について述べる。溶接残留応力は溶接部に存在する固有ひずみ(不適合ひずみ)によって決定される。従って、残留応力の測定値から固有ひずみが求められることができると、測定部のみではなく、系全体の残留応力分布も得られることになる。溶接部および熱影響部は組織が均質ではなく、X線応力測定では非常に困難な測定となる。このように、測定精度の良否を重み係数の大小に置き換え、全体の測定結果から最も妥当な固有ひずみの大きさを決定する方法を求める。なお、溶接一般に適用できる手段であるため、材料は標準的な軟鋼板としている。

第 3 章では超硬合金の残留応力測定で生ずる問題点について、その解決法

を述べる。複合材料では基材 WC と結合相 Ni の両方を測定し、両方の測定値から平均応力を決定する必要がある。結合金属割合が低いときや溶接熱影響部などでは材料が均質であるとは限らず、このようなとき、溶接線方向やその直角方向さらにもうひとつの方向を測定する場合、すべての方向とも信頼性のある測定をすることが困難となる。このような場合にも、多数の測定方向結果から主応力およびその方向を決定する方法を新たに開発し、今後の残留応力測定に採用する。

試験片として、結合金属 Ni の質量割合を 10%から 60%まで 10%毎に 6 種類の超硬円板を SPS で製作し、初期残留応力測定を行った結果を報告する。さらに、焼鈍試験片と残留応力の大きさの比較を行う。

第 4 章では半円状の WC-Ni 超硬合金と鋼との TIG 突合せ溶接を行い、溶接によって生じた残留応力を X 線を用いて測定する。その後、前々章の固有ひずみ法を用いて連続的な残留応力分布を求める。試験片は前章で用いたものと同じで、SPS 製作後、焼鈍したものをを用いる。

第 5 章では前章で行った溶接実験のシミュレーションとして、熱弾塑性を用いた溶接残留応力解析を行う。解析には FEM 汎用ソフト ANSYS を用いる。解析に必要な超硬合金の材料定数は、すでに報告されている WC および Ni の数値から補間して求めている。補間に用いた並列・直列複合ばねモデルについて、章のはじめに述べる。章の最後に実験結果との比較を行っている。

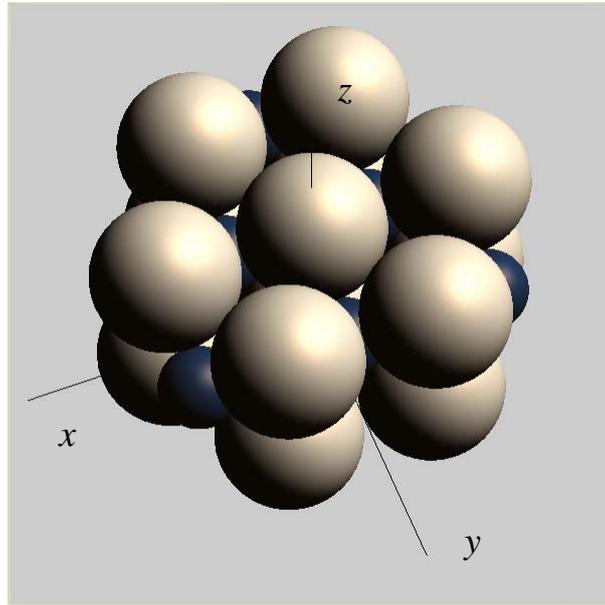
第 6 章は、超硬合金の溶接として一般的であるのは、鋼の母材に超硬合金チップをすみ肉 TIG 溶接することである。そこで、超硬合金円板を大きめの鋼母材に TIG 突合せ溶接を行った場合の溶接残留応力解析を行う。次に、傾斜組成超硬合金を想定し、2 層とした円板を対象とし、表面は結合金属割合の低いまま、2 層目は溶接性を向上するため結合金属割合を多くした種々の組合せの超硬合金の中から、最適な組合せを決定する。

第 7 章は結論であり、本論文をまとめて論ずる。

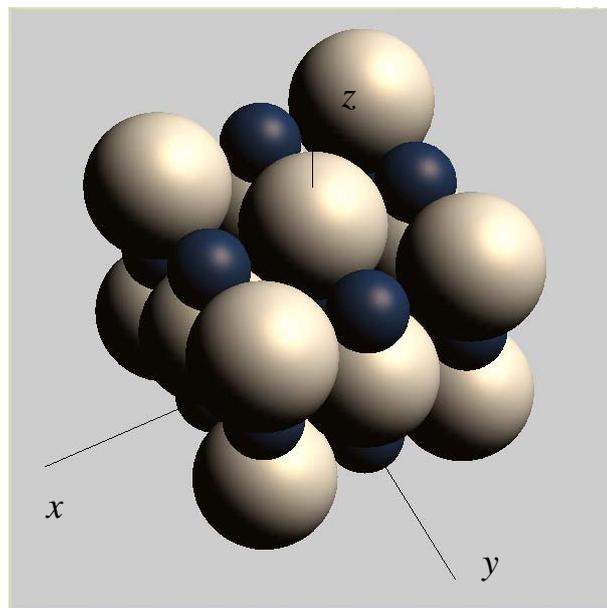
以上の実験および解析から、結合金属割合と溶接残留応力の関係を明らかにし、超硬合金の溶接性を改良するための指針を示し、実際に用いる超硬合金の形状に従って解析する場合に、材料定数などのさまざまなデータを提供することを目的とする。

炭化物性質	TiC	V ₈ C ₇	CrC	ZrC	NbC	Mo ₂ C	HfC	TaC	WC
分子量	59.89	491.60	64.01	103.23	104.92	203.89	190.50	192.96	195.85
結晶形	fcc	cubic	fcc	fcc	fcc	fcc	fcc	fcc	hex
格子定数 [nm]	0.43274	0.83341	0.403	0.46930	0.44698	0.414	0.46376	0.44547	a ₀ =0.291 c ₀ =0.284
理論比重	4.91	5.64	6.50	6.63	7.80	9.18	12.68	14.50	15.67
備考	NaCl 型		NaCl 型	NaCl 型	NaCl 型		NaCl 型	NaCl 型	六方晶

Table 1.2 Material properties of cemented carbide



(a) WC



(b) TiC

Fig.1.1 Crystal structure of cemented carbide
(a) WC, (b)TiC (W or Ti : large ball, C : small ball)

第 2 章 固有ひずみ法を用いた溶接残留応力測定

2. 1. 緒 言

溶接残留応力測定には、Sachs 法に代表される薄層除去法と、X線を用いる非破壊測定法とに分類される。どちらの方法もかなり多くの研究が報告され、すでに確立されているように思える。溶接残留応力測定には、非破壊測定であるX線を用いる方が便利であり、一般的に採用されている方法である。

しかし、超硬合金などの複合材料では、それぞれの材料に適した波長のX線が必要となるので度々の管球交換が必要となる。さらに、溶接構造物全体の応力分布を得るには数多くの測定点が必要となり、1 点の応力値を求める時間がどうしても長くなるX線応力測定では、測定点を増加させることは避けたい。

そこで、数少ない測定点からでも有意義な応力分布が決定できる固有ひずみ法による溶接残留応力測定を採用する。固有ひずみ法とは溶接部に存在する固有ひずみ(不適合ひずみ)を残留応力などの測定値から決定する方法で、固有ひずみが決定されると全体の応力分布が決定される。すでに報告されている固有ひずみ法は、Sachs 法を用いた薄層除去による測定値から 3 次元応力分布を求める方法[54-57]であるため、X線を用いた非破壊溶接残留応力測定には適用できない。本章では、新たにX線溶接残留応力測定に用いる固有ひずみ法を求める。

2. 2. 固有ひずみ法の理論

固有ひずみ法は座標系にかかわらず、2 次元および 3 次元の一般的な問題に適用されるが、ここでは図 2.1 に示すような突合せ溶接された平板の 2 次元残留応力測定例を考える。

溶接残留応力分布は外力のない状態で存在するものであるから、溶接部に

存在する固有ひずみの大きさおよび分布が決定されると、系全体の残留応力は有限要素法による表示を用いて一般に次式で表すことができる。

$$\{s\} = [H_0] \{\varepsilon^*\} \dots\dots\dots (2.1)$$

ただし、 $\{s\}$ ：各要素、節点の弾性応力ベクトル、
 $\{\varepsilon^*\}$ ：固有ひずみベクトル、
 $[H_0]$ ：全体の影響係数マトリックス。

この系全体の一部を取り出し、

$$\{m s\} = [H] \{\varepsilon^*\} \dots\dots\dots (2.2)$$

ただし、 $\{m s\} = \{m s_1, m s_2, \dots, m s_\ell\}^T$ ： ℓ 次測定応力ベクトル、
 $\{\varepsilon^*\} = \{\varepsilon_1^*, \varepsilon_2^*, \dots, \varepsilon_n^*\}^T$ ： n 次固有ひずみベクトル、
 $[H]$ ：影響係数(部分)マトリックス、 h_{ij} ： $[H]$ の要素。

ここに、未知数を $\{\varepsilon^*\}$ として、式(2.2)を満足する解を求める。

$\ell = n$ のときは、式(2.2)を連立方程式として $\{\varepsilon^*\}$ を求めることができ、以下のように表すことができる。

$$\{\varepsilon^*\} = [H]^{-1} \{m s\} \dots\dots\dots (2.3)$$

$\ell > n$ のとき、最適値を $\{o \varepsilon^*\}$ 、それに対する応力を $\{o s\}$ として式(2.2)を表すと、

$$\{o s\} = [H] \{o \varepsilon^*\} \dots\dots\dots (2.4)$$

式(2.2)と式(2.4)で表された $o s_k, m s_k$ ($k = 1 \sim \ell$)の差の二乗の和を L とし、測定値 $m s_k$ に対する重み係数を w_k とする。

式(2.4)から $o s_k = \sum_{j=1}^n h_{kj} o \varepsilon_j^*$ ($k = 1 \sim \ell$)と表されるので、

$$L = \sum_{k=1}^{\ell} w_k (o s_k - m s_k)^2 \\ = \sum_{k=1}^{\ell} w_k \left\{ \sum_{j=1}^n (h_{kj} o \varepsilon_j^*) - m s_k \right\}^2 \dots\dots\dots (2.5)$$

L を最小とする $\{o \varepsilon^*\}$ は、条件式 $\partial L / \partial o \varepsilon_i^* = 0$ ($i = 1 \sim n$)を用いて決定することができる。

$$\frac{\partial L}{\partial {}_o\varepsilon_i^*} = 2 \sum_{k=1}^{\ell} w_k h_{ki} \left\{ \sum_{j=1}^n (h_{kj} {}_o\varepsilon_j^*) - {}_m s_k \right\} = 0 \quad (i=1 \sim n) \quad \dots\dots (2.6)$$

${}_o\varepsilon_j^*$ に関して並び替えると,

$$\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{\ell} w_k h_{ki} h_{kj} {}_o\varepsilon_j^* = \sum_{k=1}^{\ell} w_k h_{ki} {}_m s_k \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

式(2.7)を整理すると

$$[A] \{ {}_o\varepsilon^* \} = \{ r \} \quad \dots\dots\dots (2.8)$$

ただし, $a_{ij} = \sum_{k=1}^{\ell} w_k h_{ki} h_{kj}$, $r_i = \sum_{k=1}^{\ell} w_k h_{ki} {}_m s_k$ $(i, j=1 \sim n)$

a_{ij} は $[A]$ の要素であり, r_i は $\{ r \}$ の成分である. $\{ {}_o\varepsilon^* \}$ は式(2.8)を連立方程式として解くことから得られ, 次式で表される.

$$\{ {}_o\varepsilon^* \} = [A]^{-1} \{ r \} \quad \dots\dots\dots (2.9)$$

2. 3. 突合せ溶接された軟鋼板の残留応力測定

2.3.1 中央断面 (x 軸上) の残留応力分布

試験片は図 2.2 の軟鋼板 SS400 を TIG(Tungsten Inert Gas)突合せ溶接したもので, 溶接条件を表 2.1 に示す. 残留応力測定では, y 軸に関して対称とみなし, 片側の板のみ行った. そのときの X 線測定条件を表 2.2 に示す. 表の $2\theta_0$ は無ひずみブラッグ角, ψ_0 は X 線入射角度である. 並傾法を用いているので, 測定角 $\psi = \psi_0 + 9.07^\circ$ となる. また, 同一点の x, y 位置を精度よく測定するために, 試料をターンテーブル上に載せて行った. 使用した X 線装置と試験片を図 2.3 の写真に示す.

X 線残留応力測定結果として, x 軸上の 5 地点の測定値 σ_x, σ_y を図 2.4 中の ○, ● で示す. 次に, 固有ひずみ法を用いて残留応力分布を求める. ここでは, 固有ひずみが熱影響部にのみ分布し, y 軸方向には一定と仮定した. その固有ひずみの大きさを測定箇所 5 地点の σ_x, σ_y から求めた. 熱影響部 $x=0 \sim 15 \text{ mm}$ を 3 分割し, その範囲の要素に分布する固有ひずみの値を ε_{yi}^* ($i=1 \sim 3$) とおく. 式(2.2)の影響係数の計算には, アイソパラメトリック要素を用いた 2 次元弾性有限要素法を使用している. 合計 10 個の測定値を測定

応力ベクトルとして式(2.8)の右辺に代入し,連立方程式を解くことによって最も妥当な固有ひずみが決定される. 重み係数 w_k はすべて1とした. 次に, この固有ひずみを入力として, 同じ有限要素法プログラムを用いて計算された溶接残留応力分布(実線)を同図に示す. ○, ●の測定点をほぼ通る曲線が得られた. 次に, 5mm 間隔で測定した応力値 σ_x を図中の*, σ_y を×として固有ひずみによる応力分布と比較を行った.

2.3.2 板全体の応力分布

式(2.2)に表す測定応力ベクトルの要素は必ずしも応力値である必要はなく, ひずみ値でも構わない. ここでは測定応力の代わりにひずみ値を用いて板全体の残留応力分布を求めた例を示す.

図2.2に示す前項の測定に用いた6点(図2.2中の●)に加えて, 24点(図中の○)合計30点の測定値 $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ を表2.3に示す. 溶接部をy方向に5分割し, 未知数の固有ひずみ $\varepsilon_{xi}^*, \varepsilon_{yi}^* (i=1\sim 5)$ を表2.3の60個の値から求めた結果をcase 1として表2.5に示す. 表2.5の数字①~⑤は図2.2の溶接部①~⑤に対応している. さらに, 測定値が ε_z のみであった場合を例にとり, 表2.4に示す30個のデータ数から得られた結果をcase 2として表2.6に示す. さらに, 結果を比較するために, x,y方向残留応力分布の計算結果を図2.5, 2.6に3次元表示する.

2.4. 測定結果および考察

固有ひずみ法では, 測定値の信頼性の大小を, 重み係数の大小と置くことができる. 極端な場合, 溶接部の測定値がない場合でも, 溶接部を含む全体の応力分布が計算できるので, 測定精度を考慮した有意義な残留応力分布が得られる.

図2.4の固有ひずみによる残留応力分布と, 実際に計測した応力値との比較を行った結果, 5地点の測定値から得られた応力分布が, 16地点測定した結果と良い一致を見ることができ, 固有ひずみを用いた残留応力測定は, 非常に有効であることがわかる.

次に、図 2.5, 6 両方の固有ひずみ計算結果および残留応力分布の差はほとんどないといえるので、測定値が半数になったにもかかわらず、 ε_z の結果を用いることで十分満足できる結果が得られた。X線回折において ε_z の測定には測定角 $\psi = 0$ の点だけでも決定できるので、測定回数を従来の半分以下にしても同様な結果が得られることになる。広範囲の残留応力分布を測定する場合に非常に有効な方法である。

さらに、表 2.5, 2.6 において、固有ひずみ ε_x^* の y 軸方向の変化から、溶接開始部分⑤の x 方向に大きな正の固有ひずみが存在していることがわかった。最初に溶接された部分は冷却され、次に溶接する部分への大きな拘束となることから、溶接開始点には特に大きな熱応力が加わるためと説明される。

固有ひずみ法による残留応力測定は、X線ひずみ測定法と併用することによって、非常に高い信頼性を有する応力分布を得ることができる。

2. 5. 本章の結論

本章では、X線による固有ひずみ法を用いた残留応力測定法について述べ、次の結論を得た。

- (1) 有限要素法に基づいた固有ひずみ法は、残留応力測定に極めて有効な手段である。特に、溶接残留応力測定では、溶接線だけに固有ひずみが存在するので、非常に精度の高い応力分布が得られる。
- (2) 溶接線中央断面 (x 軸上) の分布を求めるとき、本章で採用したように、全体の固有ひずみを正確に定義する必要がない。中央断面のように固有ひずみの分布が部分的に仮定できる場合にも、応力分布を決定することができる。
- (3) X線測定において、測定角 $\psi = 0$ のとき (今回の並傾法による測定では入射角 $\psi_0 = -9.07^\circ$) 一度のスキャンで得られる測定値から ε_z が測定できる。この測定と固有ひずみ法を併用すると、大幅な時間短縮が可能となる。

Table 2.1 Conditions of tungsten inert gas (TIG) welding

Welding voltage	12 V
Welding current	100 A
Welding speed	4.8 cm/min
Welding input	13 kJ/cm
Inert gas	Ar
Gas flow	0.01 m ³ /min

Table 2.2 Conditions of X-ray measurement

Specimen	SS400
X-ray tube	Co (K α)
Voltage, Current	30 kV, 8 mA
Irradiation area	4 \times 7 mm ²
Scanning speed	1 deg/min
Diffraction plane	(3 1 0)
$2\theta_0$	161.86 $^\circ$

Table 2.3 Measured strains $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ [μstrain]

$y \backslash x$		x					
		0	5 (10*)	15	30	55	75
ε_x	50	37	-290	-52	-21	56	-19
	25	-142	-48	-21	-20	-122	-112
	0	-146	-255*	94	122	-81	-27
	-25	261	-68	396	198	8	-57
	-50	164	-438	-78	-118	58	-66
ε_y	50	124	373	155	-104	70	5
	25	434	1034	366	-376	-148	137
	0	776	1217*	232	-545	-198	21
	-25	612	1347	21	-589	-178	136
	-50	326	616	-151	-186	-26	68

* : the value at $x = (\quad)$

Table 2.4 Measured strains ε_z [μstrain]

$y \backslash x$		x					
		0	5 (10*)	15	30	55	75
ε_z	50	-63	-32	-40	49	-49	6
	25	-114	-383	-134	154	105	-9
	0	-245	-374*	-127	164	109	3
	-25	-340	-497	-162	152	66	-31
	-50	-191	-69	89	118	-13	-1

* : the value at $x = (\quad)$

Table 2.5 Inherent strains in case 1

i	ϵ_{xi}^*	ϵ_{yi}^*
①	0×10^{-6}	-365×10^{-6}
②	-410	-500
③	-380	-1507
④	-1006	-1316
⑤	221	-1532

Table 2.6 Inherent strains in case 2

i	ϵ_{xi}^*	ϵ_{yi}^*
①	0×10^{-6}	-161×10^{-6}
②	-647	-723
③	-216	-1257
④	-702	-1455
⑤	545	-1535

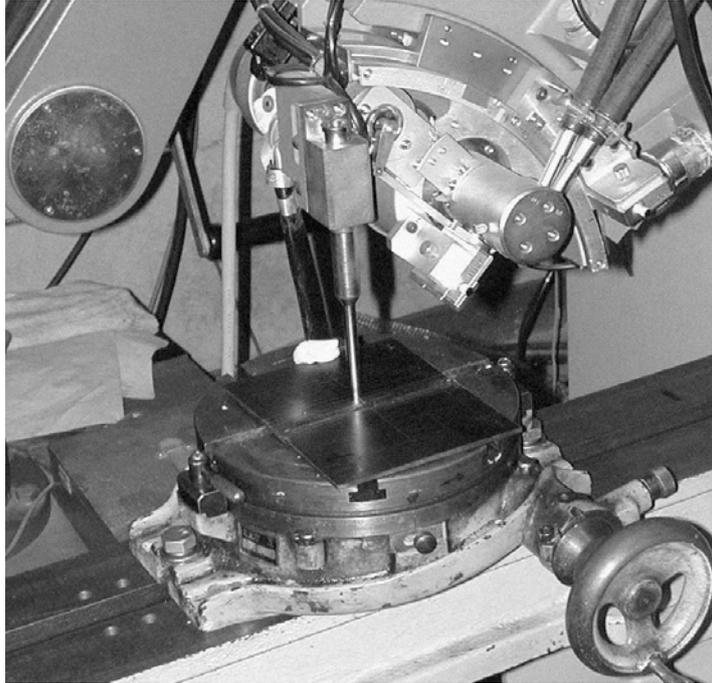


Fig.2.3 X-ray diffraction system and specimen for residual stress measurement

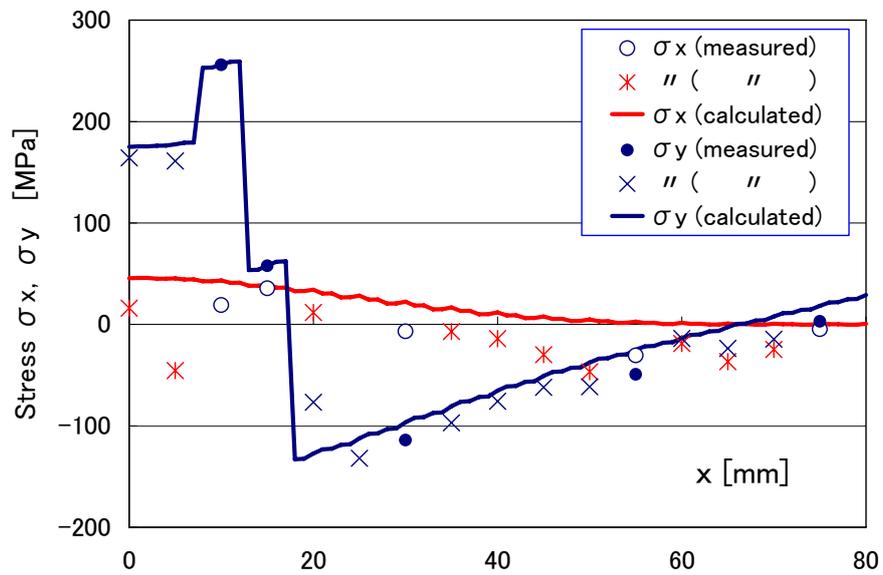


Fig.2.4 Residual stresses on the x axis of the specimen

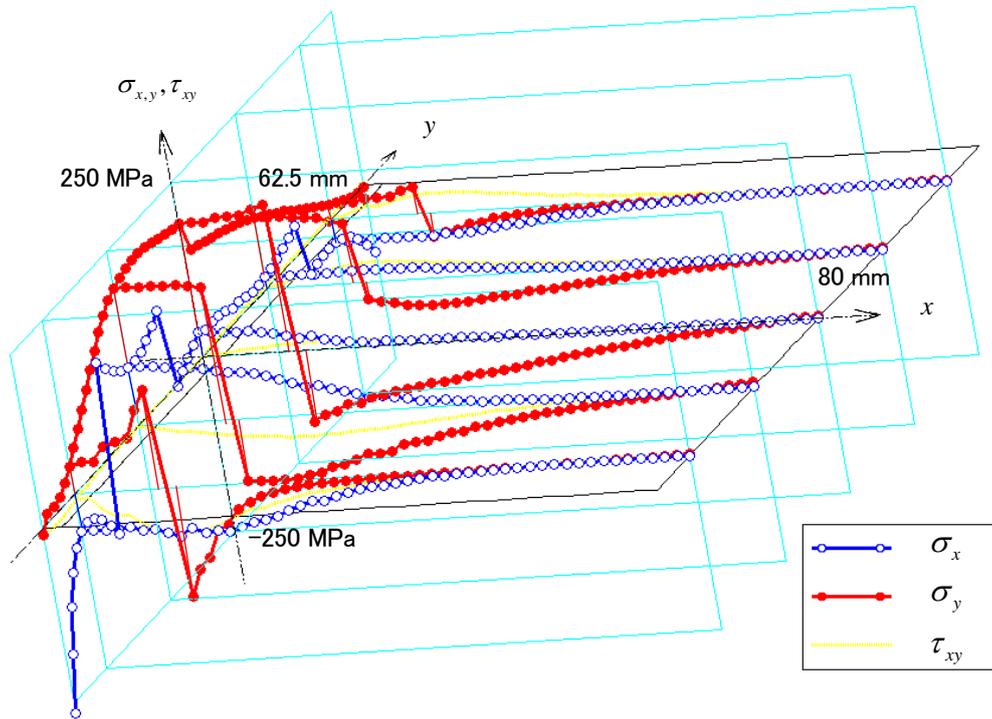


Fig.2.5 Residual stress distribution in case 1

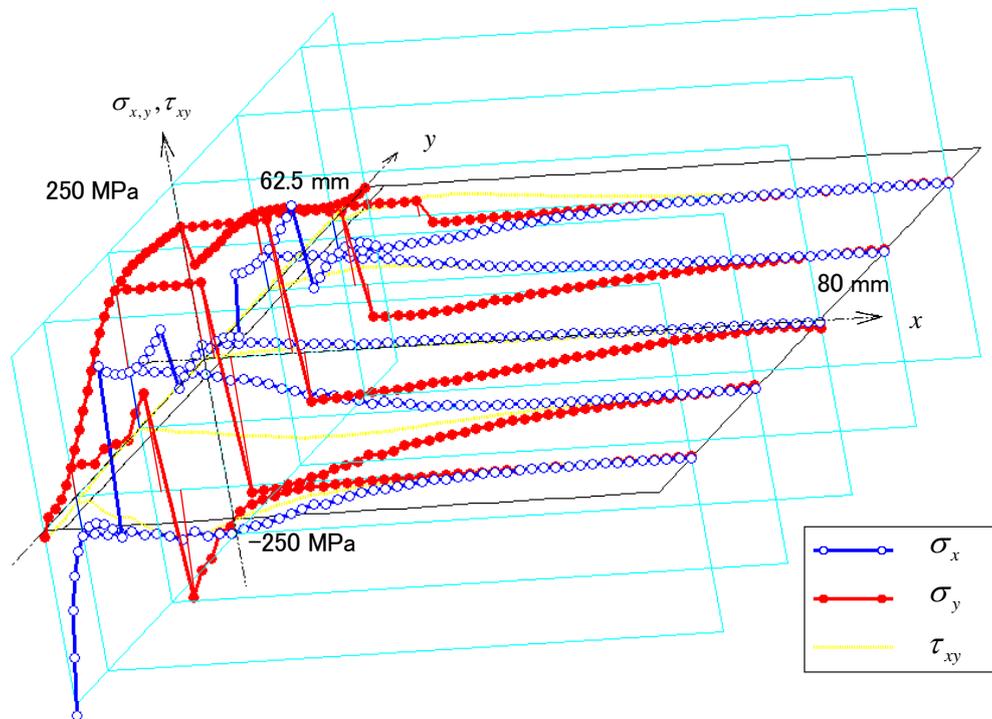


Fig.2.6 Residual stress distribution in case 2

第3章 WC-Ni 超合金の焼結残留応力測定

3. 1. 緒 言

超合金は硬度および強度に優れ、広く利用されている。代表的なものに、WC を基材として Co, Ni を結合金属に用いる超合金がある。通常、これらの合金は粉末から焼結されるが、焼結では大きな部材を製作することが困難である。そのため、面積の大きな摺動面に利用するには、チップ状の超合金を鋼などの母材と接合する必要がある。接合には、ろう付が一般的だが接合強度に難点のある場合が多い。溶接による接合も試みられているが、結合金属割合が低い高硬度の超合金を鋼に直接溶接すると、溶接割れが生じ易い。超合金の溶接性を向上させるために、表面は超合金のまま硬度が高く、溶接部は結合金属の割合を高めた材料の開発が望まれている。結合金属割合を連続的に変化させた傾斜組成材料によって、溶接性が改善される可能性は高い。溶接割れの要因のひとつに残留応力がある。焼結材の持つ残留応力に溶接熱応力が加わる。溶接割れ対策のための残留応力推定は非常に複雑となる。溶接時に生ずる超合金の残留応力を精度よく推定するには、焼結時の残留応力を測定することが重要である。超合金の残留応力測定に関する論文としては、田中らによる WC-Co 系超合金の報告[40]がある。結合金属としては Ni が Co より耐食性に優れること、低磁性体であることおよび経済的な理由から最近注目されているが、WC-Ni 超合金に関する残留応力測定例はほとんどない。

そのため本章では、WC-Ni 超合金の焼結時残留応力測定について述べる。基材 WC と結合相 Ni の割合と残留応力の関係を明らかにするため、結合金属 Ni の質量割合を 10%~60%まで 10%毎変えた試験片を放電プラズマ焼結装置 (SPS) で製作した。焼結時に生じた残留応力を X線により WC, Ni の両相とも測定した。さらに熱処理 (焼鈍) による残留応力値の低減効果も検討した。

3. 2. X線多軸ひずみ・応力測定理論

X線による測定座標系を図 3.1 に示す. 原点Oおよびx,y軸を試料表面上にとり, 法線方向をz軸とする. x軸から角度 φ にあるOQとz軸を含む面をX線測定面とする. この面内でz軸との角度 ψ_0 の方向からX線を入射し, 回折X線の強度を測定する. Braggの条件を満たすピーク回折角が 2θ となる. 2θ の値から, z軸と角度 ψ のOP方向のひずみ $\varepsilon_{\psi,\varphi}$ が決定される. なお, 図 3.1 では主応力(主ひずみ)方向とx軸のなす角を α としておく.

従来の残留応力測定方法[74]では, ψ を変数として 2θ を測定する. 得られた関係($\sin^2\psi, 2\theta$)を直線で近似することで応力が決定される. すなわち $\varphi=0^\circ, 90^\circ$ の近似直線の傾きから σ_x, σ_y が求まる. また, $\varphi=45^\circ$ などの測定によって主応力方向 α が決定される. 図 3.2 に本実験で得られた測定結果の一例と従来の解析方法を示す. これはSPSで成形されたWC-20%NiのNi相の試験片の場合である(実験方法などの詳細は後述). 図より, $\varphi=0^\circ, 90^\circ$ それぞれに対し $\sin^2\psi$ を変えた実験値を直線近似すると, $\sigma_x=-318$ MPa, $\sigma_y=-413$ MPaとなった. この試験片は軸対象と考えられるので, 厳密には $\sigma_x=\sigma_y$ となるはずであるが, 測定誤差を含むため, 一致していない. 軸対象に関わらず, 理論的には $\sin^2\psi=0$ で $\varphi=0^\circ, 90^\circ$ の両直線が一致する. そこで, 本論文ではこの条件を組み込んだひずみ, 応力算出手法を検討する.

表面上のひずみ $\varepsilon_{\psi,\varphi}$ を主ひずみ成分で表示すると次式となる[74].

$$\varepsilon_{\psi,\varphi} = \varepsilon_1 \cos^2(\varphi + \alpha) \sin^2\psi + \varepsilon_2 \sin^2(\varphi + \alpha) \sin^2\psi + \varepsilon_3 \cos^2\psi \dots\dots\dots (3.1)$$

測定対象試料は均質等方性材料とし, 表層は平面応力と仮定すると, 表層には式(3.2)の関係がある.

$$\varepsilon_3 = -\frac{\nu}{1+\nu}(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \dots\dots\dots (3.2)$$

ここで, ν はポアソン比である. 式(3.2)を式(3.1)に代入すると, $\varepsilon_{\psi,\varphi}$ は

$$\varepsilon_{\psi,\varphi} = a(\alpha)\varepsilon_1 + b(\alpha)\varepsilon_2 \dots\dots\dots (3.3)$$

となる. ただし, 上式の各係数は次式で表される.

$$\left. \begin{aligned} a(\alpha) &= \cos^2(\varphi + \alpha) \sin^2 \psi - \nu_1 \cos^2 \psi \\ b(\alpha) &= \sin^2(\varphi + \alpha) \sin^2 \psi - \nu_1 \cos^2 \psi \\ \nu_1 &= \nu / (1 - \nu) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.4)$$

ここでは、 $\psi = \psi_1, \psi_2, \dots, \psi_i$, $\varphi = 0^\circ, \dots, 90^\circ, \dots, \varphi_i \dots$, ($i = 1 \sim n$) と、 ψ, φ を変化させて測定したひずみを f_{ψ_i, φ_i} とする。 ψ_i, φ_i による式(3.3)の値 $\varepsilon_{\psi_i, \varphi_i}$ と f_{ψ_i, φ_i} の差を誤差とする。この誤差の二乗を最小とする $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \alpha$ を求める。

$$\left. \begin{aligned} L_1 &= \sum_{i=1}^n (f_{\psi_i, \varphi_i} - \varepsilon_{\psi_i, \varphi_i})^2 \\ \frac{\partial L_1}{\partial \varepsilon_1} &= 0, \quad \frac{\partial L_1}{\partial \varepsilon_2} = 0, \quad \frac{\partial L_1}{\partial \alpha} = 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.5)$$

α に関し、 L_1 は非線形であるため、数値解法を用いる。 $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ の範囲で α を式(3.6)にとる。

$$\alpha_k = k\Delta\alpha, \quad \Delta\alpha = 90/m \quad (k = 0 \sim m) \dots\dots\dots (3.6)$$

このとき、 $\varepsilon_{\psi_i, \varphi_i}$ は次式の $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ に関し線形となる。

$$\varepsilon_{\psi_i, \varphi_i} = a_{ik} \varepsilon_{1k} + b_{ik} \varepsilon_{2k} \quad (i = 1 \sim n) \dots\dots\dots (3.7)$$

式(3.7)を式(3.5)に代入すると、次の連立方程式が得られる。

$$\left[\begin{array}{cc} \sum a_{ik}^2 & \sum a_{ik} b_{ik} \\ \sum a_{ik} b_{ik} & \sum b_{ik}^2 \end{array} \right] \left\{ \begin{array}{c} \varepsilon_{1k} \\ \varepsilon_{2k} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} \sum a_{ik} f_{\psi_i, \varphi_i} \\ \sum b_{ik} f_{\psi_i, \varphi_i} \end{array} \right\} \dots\dots\dots (3.8)$$

この場合 $\varepsilon_{1k}, \varepsilon_{2k}$ は、次式(3.9)となる。

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{1k} &= (\sum b_{ik}^2 \sum a_{ik} f_{\psi_i, \varphi_i} - \sum a_{ik} b_{ik} \sum b_{ik} f_{\psi_i, \varphi_i}) / \Delta \\ \varepsilon_{2k} &= (\sum a_{ik}^2 \sum b_{ik} f_{\psi_i, \varphi_i} - \sum a_{ik} b_{ik} \sum a_{ik} f_{\psi_i, \varphi_i}) / \Delta \\ \Delta &= (\sum a_{ik}^2)(\sum b_{ik}^2) - (\sum a_{ik} b_{ik})^2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.9)$$

式(3.7)から式(3.9)までの計算を α_k ($k = 0 \sim m$) で繰り返し、それぞれ得られた $\varepsilon_{1k}, \varepsilon_{2k}$ から式(3.5)の L_1 を最小とする $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \alpha$ を解とする。

また、主ひずみから主応力の算出は次式を用いる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= \lambda \varepsilon_v + 2\mu \varepsilon_1 \\ \sigma_2 &= \lambda \varepsilon_v + 2\mu \varepsilon_2 \\ \varepsilon_v &= \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.10)$$

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \dots\dots\dots (3.11)$$

ここで、 λ, μ はラーメの定数である。なお、 σ_1, σ_2 と $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ の関係は次式を用いる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2\alpha \\ \sigma_y &= \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) - \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2\alpha \\ \tau_{xy} &= -\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2) \sin 2\alpha \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.12)$$

試験片が対称形の場合、主ひずみ方向は x, y 軸に一致することが多い。このようなとき、主ひずみ方向 $\alpha = 0^\circ$ として式(3.7)～(3.9)を計算し $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ および σ_1, σ_2 を比較的容易に求めることができる。

図 3.2 の測定値を用いて本手法による応力の計算結果を図 3.3 に表す。図 3.2 の従来の方法と比較するために $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \alpha$ から式(3.1)を用いて $\varepsilon_{\psi_i, \phi_i} = \varepsilon_{\psi_i, \phi_i}(\sin^2 \psi)$ を計算し、以下の式に代入して求めた曲線 ($\sin^2 \psi, 2\theta$) を書き加えた。

$$2\theta = 2 \sin^{-1} \left(\frac{\sin \theta_0}{1 + \varepsilon_{\psi_i, \phi_i}} \right) \dots\dots\dots (3.13)$$

ただし、 $2\theta_0$ は無ひずみ基準回折角である。今回の測定条件範囲内では、式(3.13)はほとんど直線とみなすことができる。

3. 3. 焼結残留応力測定方法

実験に用いた試験片の形状を図 3.4 に示す。また、SPS 装置の概略を図 3.5 に示す。焼結型と電極を黒鉛で製作し、その中に 1 枚分の WC と Ni の混合粉末を入れた。混合には遠心分離機を用い、直径約 10mm の超硬合金ボールとともに 30 分攪拌した。SPS 装置での放電時間は約 10 分間、放電中の最高温度は電極表面で 1200℃であった。結合金属 Ni の重量割合が 10, 20, 30, 40, 50, 60%の試験片を 1 枚ずつ製作した。焼結された試験片表面の状態は、鑄肌状である。一般には SPS 製作後、研磨加工するが、今回は SPS で製作されたままの状態の残留応力を測定した。

用いた X線応力測定装置を図 3.6 に、その測定条件を表 3.1 に示す。同一

点上を測定角の分だけ回転させる治具を製作し、使用した。試験片中央部の測定角を $\varphi = 0, 30, 60, 90^\circ$ とした。次に、各試料の残留応力軽減を目的に、 700°C で0.5h保持した後、炉内で徐冷する熱処理（焼鈍）を行った。

また、WCとNiの物性値は参考文献[1]から、縦弾性係数をそれぞれ、710, 210 GPa, ポアソン比を0.22, 0.27とした。

3. 4. 測定結果および考察

3. 4. 1 測定方法に関する考察

本手法を用いた測定結果は図3.3の場合、 $\sigma_x = -365$, $\sigma_y = -395$ MPaとなった。図3.2の従来法と比較すると、 σ_y は σ_x に対する差が30%から10%以内と減少した。 σ_x と σ_y の差の減少は本実験のほとんどの測定で認められた。

さらに、 σ_x, σ_y を決定するには $\varphi = 0^\circ$ で2個、 $\varphi = 90^\circ$ で2個と、最低4個の回折角ピーク測定が必要であった。今回の手法では $\alpha = 0$ とすると、式(3.7)の未知数 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ を理論的には最低2個の測定値から決定することができる。

以上のことから、本手法では種々の ψ, φ に対する測定値を同時に満足するひずみ、応力値を決定することができた。測定方位角に対して直線の勾配決定が困難となる場合にも、応力値が決定可能である。

3. 4. 2 測定結果に関する考察

残留応力測定結果を表3.2に示す。SPS製作後をSPS、熱処理後の測定応力をAnnealedとして表した。今回の測定点は円形試料の中央としたため、SPSおよび焼鈍による残留応力分布は軸対称と考えられる。SPS材の残留応力と結合金属割合との関係を図3.7に示す。試験片中央の測定応力のうち基相WC、結合相Niそれぞれを $\sigma_{\text{WC}}, \sigma_{\text{Ni}}$ 、平均残留応力を σ_m と表した。なお、応力 σ_m は結合金属Niの体積割合を ζ とし、次式で求めた。

$$\sigma_m = \sigma_{\text{WC}}(1 - \zeta) + \sigma_{\text{Ni}}\zeta \dots\dots\dots (3.14)$$

図3.7からわかるように、SPS材では大きな圧縮残留応力が測定された。圧縮応力 σ_{WC} はNi量とともに増加し、40%以降ではほぼ一定となった。 σ_{Ni} は

20%Ni 量で最大となり、その後減少した。 σ_m は 20%Ni 量でピークとなり、その後 Ni 量とともに徐々に減少した。

次に、焼鈍後の応力値を図 3.8 に示す。 Ni の割合に関わらず、焼鈍による残留応力低減効果が見られた。 各相の応力を見ると、 σ_{wc} はすべて圧縮であり、 30%Ni まで急激に増加し、その後減少した。 30%Ni でピークとなった理由は不明である。 σ_{Ni} は低 Ni の場合、引張応力となり、 10%で最大となった。 その後減少し、 30%以上ではほとんどゼロとなった。 σ_m は 10%Ni 量ではゼロであるが、その後圧縮応力として増加し、 30%で最大 400MPa の圧縮残留応力が測定された。 30%以上では Ni 割合の増加に伴い、減少した。

表 3.3 に SPS 材と焼鈍材の平均応力値を示す。 SPS 材では圧縮応力として 430 から 570 MPa の残留応力が存在しているが、焼鈍後は大きくても 250 MPa の圧縮応力へと減少していることがわかった。

SPS 材および焼鈍材とも 30%Ni 量以下の Ni 相の測定では直線 ($\sin^2 \psi$, 2θ) の勾配を決定できない場合があったが、このような場合も含めて、超硬合金の残留応力測定には本手法が非常に有効であった。

SPS 材の残留応力はすべて圧縮応力である。これは SPS 装置の真空中で冷却される時、試験片は焼結型に接触しているため、試験片内部との温度差が原因と考えられる。今回の測定は中央部のみであるため、SPS 材および焼鈍後の残留応力発生機構は検討することができなかった。

3. 5. 本章の結論

SPS 製作後の超硬合金と、さらに焼鈍処理後の超硬合金との残留応力測定を行った結果、以上の結論が得られた。

- (1) X線残留応力測定において、 $\varphi = 0^\circ \sim 90^\circ$ それぞれの直線が $\sin^2 \psi = 0$ で交わる条件を組み込んだ多軸ひずみ・応力測定法を提案し、その妥当性を確認した。
- (2) SPS 材には大きな圧縮残留応力が存在している。その値は 430 から 570 MPa であり、結合金属 Ni の割合に依存せず、ほぼ一定の値といえる。

- (3) SPS 材の残留応力は圧縮応力であるため、このままでは有害であるとはいえない。しかし、このあと溶接して用いる場合など、使用目的に応じては焼鈍して残留応力を低減する必要がある。
- (4) SPS 材を焼鈍すると、WC, Ni 相の残留応力はすべて減少した。

Table 3.1 Conditions of X-ray measurement

Material	WC	Ni
X-ray target	Co (K α)	
Voltage, Current	40 kV, 30 mA	
Irradiation area	5 \times 5 mm ²	
Scanning speed	1 deg / min	
Diffraction plane	(1 1 2)	(3 1 1)
$2\theta_0$	123.70°	114.81°
ψ	0, \pm 10, \pm 20, \pm 30, \pm 35°	

Table 3.2 Measured residual stresses

Stress Material		SPS [MPa]		Annealed [MPa]	
		σ_x	σ_y	σ_x	σ_y
WC-10%Ni	WC	-420	-437	-26	-48
	Ni	-429	-455	168	190
WC-20%Ni	WC	-595	-579	-179	-188
	Ni	-523	-529	148	135
WC-30%Ni	WC	-590	-652	-379	-446
	Ni	-459	-507	-56	-51
WC-40%Ni	WC	-707	-719	-262	-316
	Ni	-316	-372	-54	-23
WC-50%Ni	WC	-691	-754	-196	-221
	Ni	-392	-416	-5	13
WC-60%Ni	WC	-709	-742	-187	-209
	Ni	-330	-411	-22	-36

Table 3.3 Average residual stresses

Material	SPS [MPa]	Annealed [MPa]
WC-10%Ni	-431	3
WC-20%Ni	-566	-75
WC-30%Ni	-557	-246
WC-40%Ni	-501	-146
WC-50%Ni	-510	-67
WC-60%Ni	-459	-71

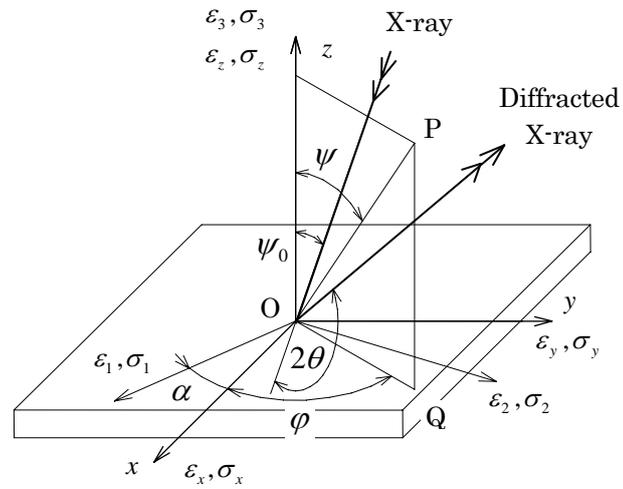


Fig.3.1 Coordinates for the X-ray measurement

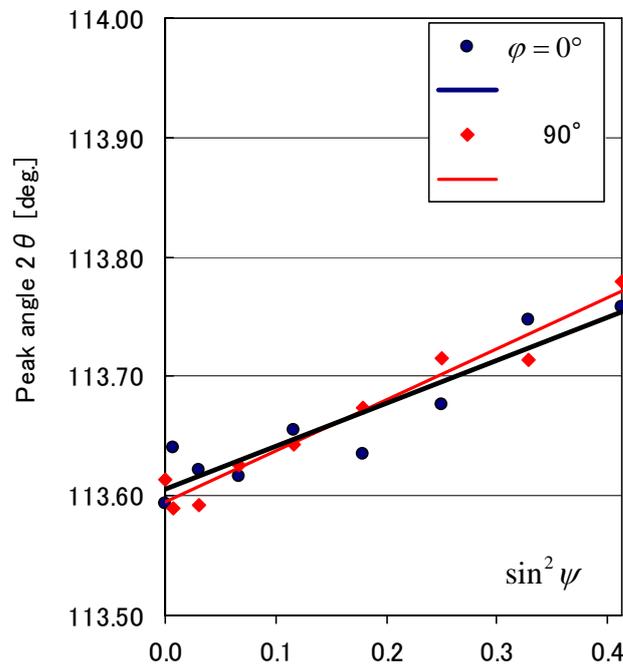


Fig.3.2 Measured data and fitting lines by previous method
 $(\sigma_x = -318, \sigma_y = -413 \text{ MPa})$

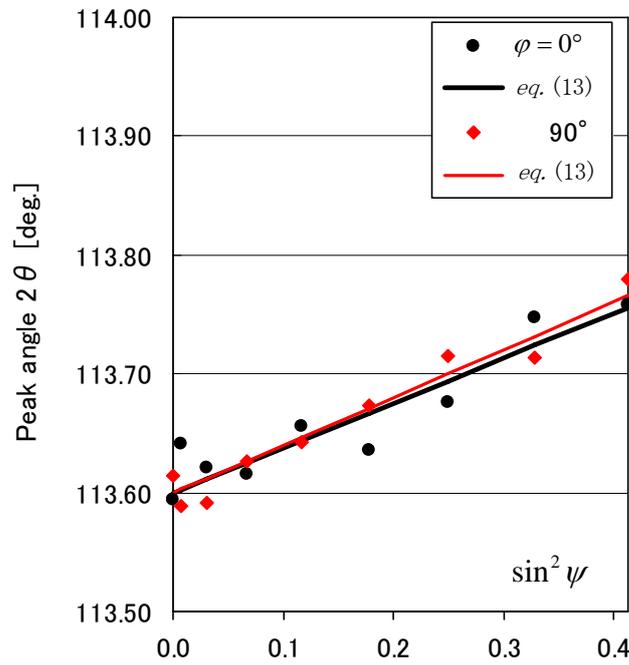


Fig.3.3 Measured data and fitting lines by this method
($\sigma_x = -365$, $\sigma_y = -395$ MPa)

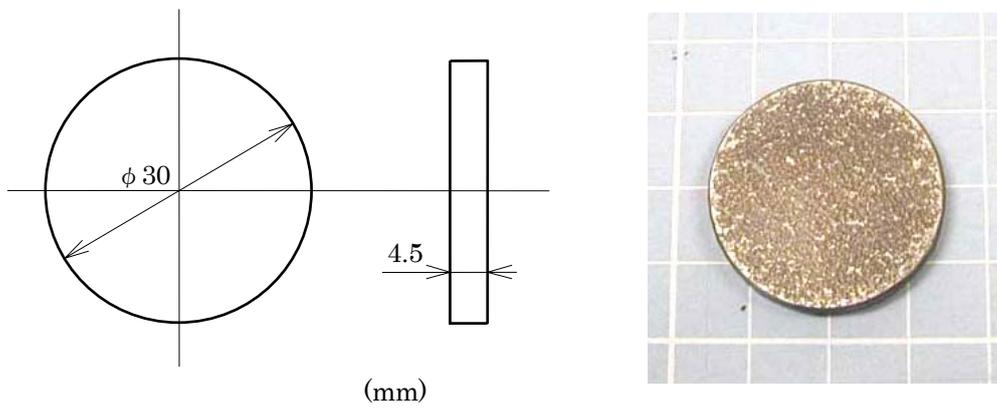


Fig.3.4 Geometry and outward appearance of the specimen

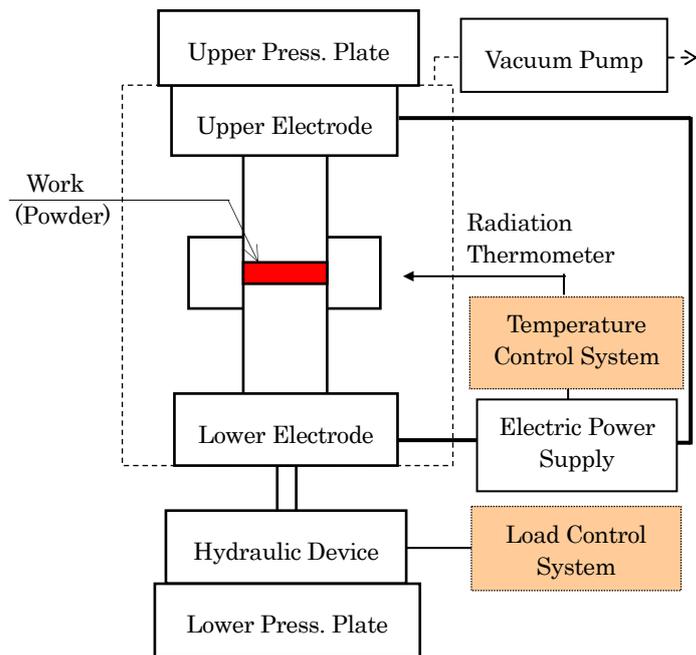


Fig.3.5 Schematic outline of the spark plasma sintering system (SPS)

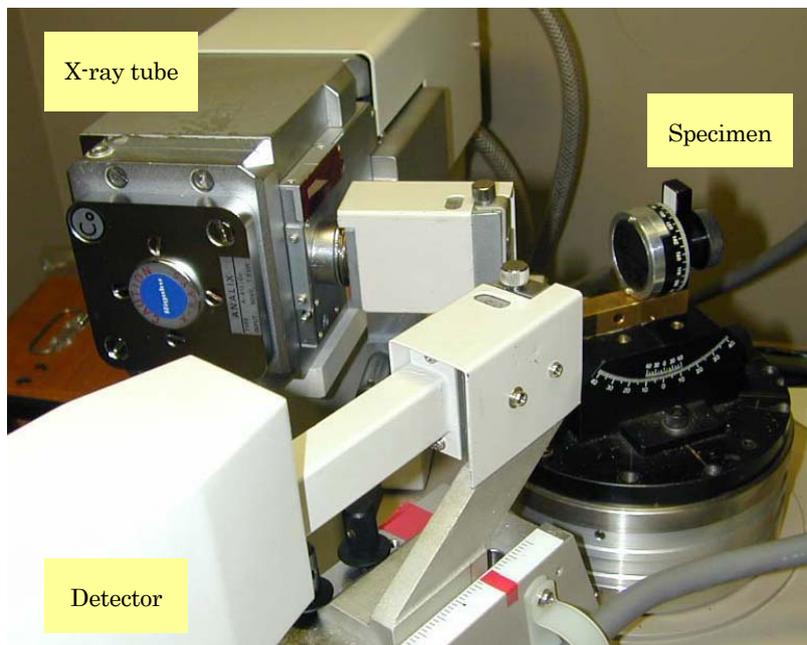


Fig.3.6 X-ray diffraction system for residual stress measurement

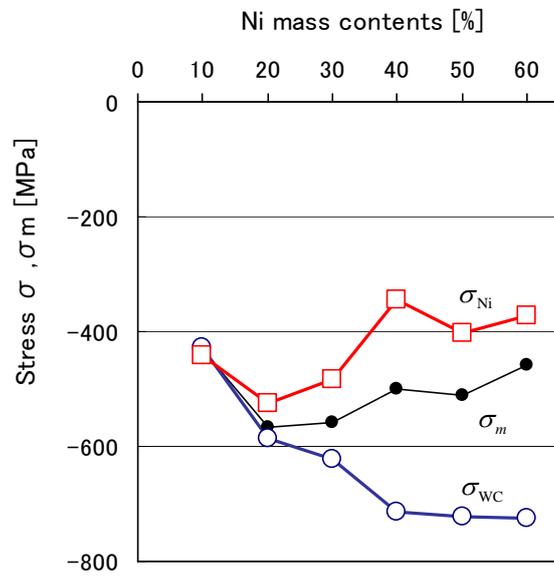


Fig.3.7 Residual stresses vs. Ni contents (SPS)

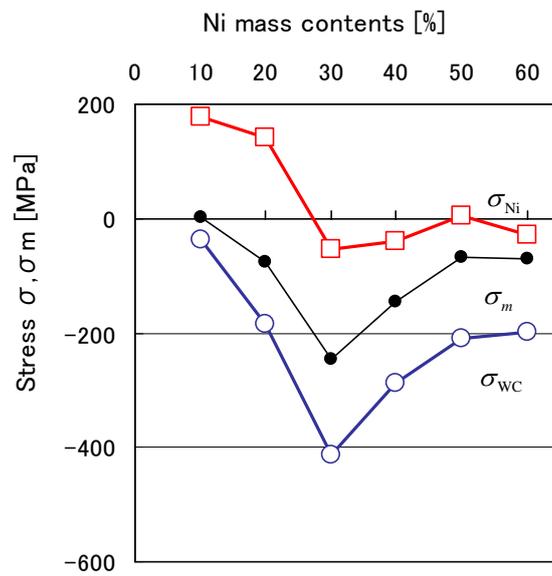


Fig3.8 Residual stresses vs. Ni contents (Annealed)

第4章 WC-Ni 超硬合金の溶接残留応力測定

4. 1. 緒言

焼結では大きな部材が製造困難であるため、摺動面など広い面積を必要とする場合にはチップ状の超硬合金を接合して用いることになる。接合にはろう付けが一般的であるが、強度の面では溶接のほうが優れている。超硬合金を鋼などの母材に溶接して使用するとき、最も問題となるのが溶接割れである。結合金属割合を大きくすると溶接割れは改善されるが、硬さおよび強度が不足する。そこで、表面は従来の超硬合金の硬さを有し、接合部は溶接性が保たれるように結合金属割合を連続的に変化させた傾斜組成材料を開発することが期待されている。

溶接割れの要因のひとつに残留応力がある。残留応力の大きさと結合金属割合との関係を明らかにし、傾斜組成超硬合金の設計資料を得ることが望まれる。

本章では、結合金属割合の異なる WC-Ni 超硬合金試験片を SPS で作製し、鋼との溶接実験を行う。溶接割れを生じない溶接条件の中から、実際に適用できる条件を求め、溶接された試験片の残留応力測定を行う。

残留応力測定には、非破壊法の代表である X線応力測定を用いる。超硬合金は複合材料であるため、WC, Ni 両方の応力測定を行う必要がある。溶接部などの熱影響部の測定は、非常に困難を伴うので、前章で述べた多軸ひずみ測定による応力測定法を適用する。また、試験片は SPS で製作した後に焼鈍を行い、残留応力を低減したものを使用する。

さらに、第2章で述べた固有ひずみ法を用いて、残留応力測定値から応力分布を決定する。

4. 2. 試料の製作および溶接実験

超硬合金の溶接性を確認するために溶接試験片の製作を行った。試験片の形状を図 4.1 に示す。半円状としたのは材料を有効に使用することと、残留応力測定をし易い形状としたためである。WC 超硬合金の結合金属 Ni が質量割合 10%から 60%まで 10%毎に異なる円板試料を放電プラズマ焼結 (SPS) 装置で各々1 個ずつ製作した。溶接対象の鋼に S45C 材を使用した。円板試料をファインカッタで 2 分割した後、溶接を施工する前に残留応力を除去する目的で焼鈍を行った。熱処理条件として真空中で超硬合金は 700°C、鋼は 800°C にそれぞれ 30 分保持し、その後除冷した。

溶接は表 4.1 に示す条件で突合せ溶接を行った。超硬合金円板 1 枚から半円状の試験片 2 枚得られるので、2 回溶接実験を行うことができた。溶接がより均一にできたと考えられる方 (すべて 2 回目) を測定対象とした。溶接された超硬合金と鋼の試験片を図 4.2 に示す。10%Ni の場合には超硬合金と溶着ビード部との境界付近に溶接線方向に平行な数 mm の割れが生じたが、部分的であり欠け落ちる状態ではないためこのまま残留応力測定をすることにした。

4. 3. 溶接残留応力測定方法

残留応力測定には非破壊測定として代表的な X 線による応力測定を採用した。装置は図 4.3(a), (b) 示す汎用ディフракトメータを応力測定用に改良したものである。また、試料を $\varphi = 0 \sim 90^\circ$ の間 30° 毎の方位で応力を測定した。用いた測定試料台を図 4.3(c) に示す。測定は鋼と超硬合金の基材 WC と結合相 Ni およびビード部 Ni と測定点によって材料が異なるため、測定条件を表 4.2 に従って行う必要があった。なお、 E, ν は縦弾性係数およびポアソン比である。X 線測定における回折角 2θ 、方位角 φ, ψ の定義を図 4.4 に図示する。

測定点は図 4.5 に示すように溶接方向を y 軸とし、x 軸上に 2.5mm 間隔で合計 9 点の測定を行った。測定角 $\psi = -35 \sim 35^\circ$ の間 10 点の回折角 2θ を測定した結果を図 4.6(a) ~ (d) に示す。この $2\theta - \sin^2 \psi$ 線図上の測定点に対する近似直線の傾きからそれぞれ σ_x, σ_y を計算するのが従来の方法である。今回

は前章で述べたように、 φ を変化させた測定点すべてに対して最適な $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ を決定する方法を採用した。図 4.6(a)では、 $\varphi = 0^\circ$ の近似直線の傾きが正であるので σ_x は圧縮、 $\varphi = 90^\circ$ の傾きは負であるため σ_y は引張の応力であることがわかる。図中の直線は今回の解法とは直接関係ないが、決定された $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ から $2\theta, \sin^2\psi$ を計算して、解の妥当性を目で確認するために書き加えたものである。

図 4.6(a)では回折角 2θ の測定点が直線から大きく外れることがないのに比べ、図 4.6(b)ではばらつきが極端に大きい。これは、ビード部組織が均質でなく、組織の方向に特異性があるものと考えられ、従来の方法では測定不可能と判定される場合である。

図 4.6(c), (d)は超硬合金の基材 WC と結合相 Ni であり、それぞれ別々に測定する必要がある。(c)の WC 測定データは直線となり、今回の測定の中では測定しやすい材料であった。直線の傾きが小さい割には大きな応力となったのは、縦弾性係数が大きいためである。(d)の Ni は溶接熱影響部に近づくほど、ビード部と同様に直線から離れる度合いが大きくなり、従来の方法では測定が難しい場合である。

4. 4. 測定結果および考察

固有ひずみ法を用いた溶接残留応力測定法について述べる。溶接ビード部に存在する固有ひずみ(不適合ひずみ)の分布を仮定し、測定応力からひずみの大きさを決定する方法である。今回の解析で使用した弾性 2次元平面応力問題の有限要素法の要素分割を図 4.7 に示す。中央ビード部を図のように 5 分割し、①～③に存在する x 軸に対称な固有ひずみ $\varepsilon_x^*, \varepsilon_y^*$ を未知数とするが、①の $\varepsilon_x^* = 0$ としても等価であるため合計 5 個の固有ひずみを未知数とした。左半分が鋼、右半分が超硬合金と残留応力分布が y 軸に関して対称とならないことを想定してビード内の分割を考慮したものである。

溶接前の超硬合金試験片には SPS 製作時の残留応力が存在するので、焼鈍によって残留応力の除去を試みたが、完全に除去することはできなかった。溶接前の超硬合金の残留応力測定結果を表 4.3 に示す。測定値の残留応力が

試験片全体にわたって均一に分布していると考え、この値と溶接後の測定値の差を溶接残留応力とした。なお、鋼 S45C 試験片は焼鈍後 0~50 MPa 程度の残留応力値であったので、溶接前残留応力は無視している。

なお、ここでは複合材料である超硬合金の応力を、基材 WC の測定応力 σ_{WC} と結合相 Ni の測定応力 σ_{Ni} から次に示す平均応力として求めている。ただし、 ζ は結合金属体積割合である [40]。

$$\sigma = \sigma_{WC}(1 - \zeta) + \sigma_{Ni}\zeta \dots\dots\dots (4.1)$$

結合金属 Ni の割合が 20% の超硬合金と鋼の溶接試験片の残留応力測定結果を図 4.8 に示す。X 線応力測定で求められた各点の応力 σ_x, σ_y を○, ●で表している。さらに、固有ひずみ法を用いて計算される x 軸上の残留応力分布曲線を重ねて表示している。x 軸に関し対称であるため $\tau_{xy} = 0$ である。ビード部では固有ひずみが存在するので応力が不連続となっている。

次に、結合金属 Ni 割合が 10% から 60% までの測定結果を図 4.9 (a) ~ (f) に示す。結合金属割合の低い 20% ~ 30% Ni に非常に大きい残留応力が生じている。10% Ni の場合、溶接時に溶接割れが生じているので、そのとき応力が緩和されたものと思われる。40% 以上では残留応力の値が非常に減少している。この応力分布によると x 軸上の最大引張応力はビード部境界の σ_y である。最大引張応力と結合金属 Ni 質量割合との関係を表 4.4 および図 4.10 に示す。最大引張応力で比較すると結合金属の Ni 割合が大きくなるほど残留応力値が小さくなることが明らかである。

WC-Ni 超硬合金は代表的な脆性材料であり、溶接残留応力として最大主応力値 σ_{max} に注目するのが一般的である。しかし、溶着金属および超硬合金結合相の Ni は、延性材料として扱われるため、最大相当応力 $(\sigma_{eq})_{max}$ の計算も併せて行った。最大主応力値、最大相当応力値どちらで比較しても同様な結果となる。

以上のように、固有ひずみ法を用いた残留応力測定は、測定点の応力値だけでなく、妥当性のある応力分布を求めることができる特徴を有する。特に重要なビード部の最大引張応力は、組織の特異性から信頼性の低い測定値しか得られない。しかし、固有ひずみ法では、ビード部と他の測定値すべて

を総合してもっとも適切な固有ひずみ値を決定するので、極端な例としてビード部の測定値が得られない場合にも採用できる。

一般的に、固有ひずみ法は試験片全体に比べるとビード部の幅は十分狭く、線上に分布すると仮定できるときに有効な方法と考えられた。今回の試料はビード部に比べ試験片全体の寸法は決して大きくない場合であり、溶接線上に分布する固有ひずみの仮定が成立するかどうか危ぶまれた。しかし、結果から見ると十分妥当性のある分布が得られたので、このように小さな試験片の溶接残留応力分布にも適用できることを確認した。

4. 5. 本章の結論

本章では、結合金属 Ni 質量割合 10%から 60%まで 10%毎の超硬合金と鋼との TIG 溶接を行った。X線による残留応力測定結果から、次の結論が得られた。

- (1) WC-Ni 超硬合金は、結合金属 Ni 質量割合を大きくすると鋼と溶接が可能となる。
- (2) X線残留応力測定において、 $\varphi = 0 \sim 90^\circ$ のデータ全体から一組の $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ を求める多軸ひずみ測定法を用いると、従来では測定困難であった溶接ビード部や溶接熱影響部からも信頼性のある結果が得られる。
- (3) 固有ひずみ法を用いた溶接残留応力測定法によって妥当な溶接残留応力分布を得ることができる。さらに、溶接熱影響部の最大主応力値や相当応力値の大きさの比較が可能となった。
- (4) 結合金属 Ni の割合が低く硬度の高い超硬合金ほど溶接残留応力が大きくなり、溶接割れとの関係が明確となった。
- (5) 結合金属 Ni 割合が 40% 以上の超硬合金を用いると溶接残留応力の低減が可能となる。

Table 4.1 Conditions of tungsten inert gas (TIG) welding

Welding Current	100 A
Welding Voltage	10 V
Inert Gas	Ar 0.01 m ³ /min
Welding Speed	60 mm/min
Welding Rod	TGNi (Ni 96%) ϕ 1.2

Table 4.2 Conditions of X-ray measurements and material properties

Material	Steel (S45C)	Welded Metal	Cemented Carbide	
	Fe	Ni	WC	Ni
X-ray Tube	Co ($K\alpha$)			
Voltage	40 KV			
Current	40 mA			
Scanning Speed	2 deg/min			
Irradiation Area	2×2 mm ²			
Diffraction Plane	(220)	(311)	(112)	(311)
$2\theta_0$ (deg)	124.07	114.81	123.70	114.81
ψ (deg)	$\pm 0, \pm 10, \pm 20, \pm 30, \pm 35$			
E (GPa)	206	209	706	209
ν	0.28	0.27	0.20	0.27

Table 4.3 Residual stresses before welding

Material	σ_0 MPa
WC-10%Ni	3
WC-20%Ni	-82
WC-30%Ni	-134
WC-40%Ni	-46
WC-50%Ni	15
WC-60%Ni	3

Table 4.4 Maximum tensile stresses and maximum equivalent stresses on the x axes of the specimens

Material	σ_{\max} MPa	$(\sigma_{eq})_{\max}$ MPa
WC-10%Ni	213	192
WC-20%Ni	298	322
WC-30%Ni	272	267
WC-40%Ni	87	138
WC-50%Ni	86	103
WC-60%Ni	127	134

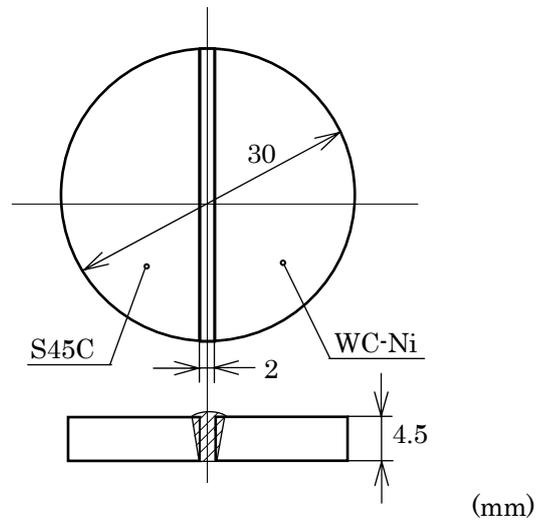


Fig.4.1 Specimen geometry

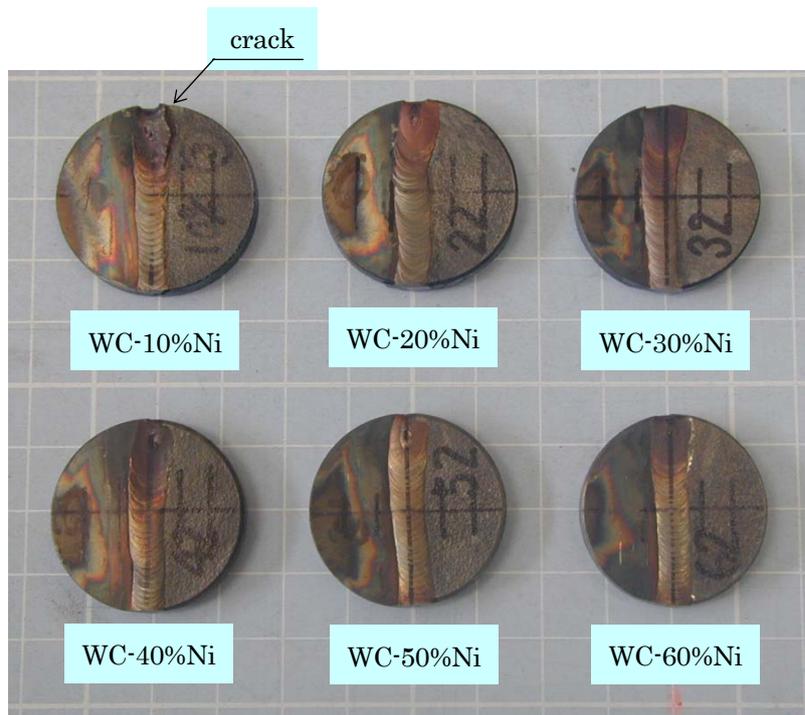


Fig.4.2 Outward appearance of the welded specimens

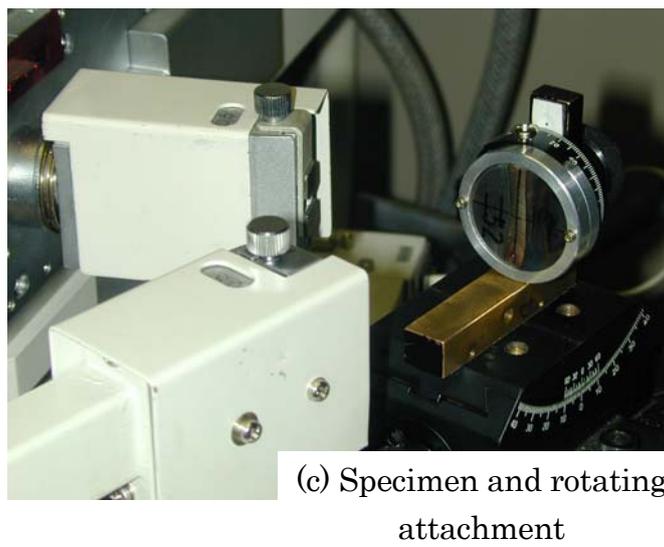
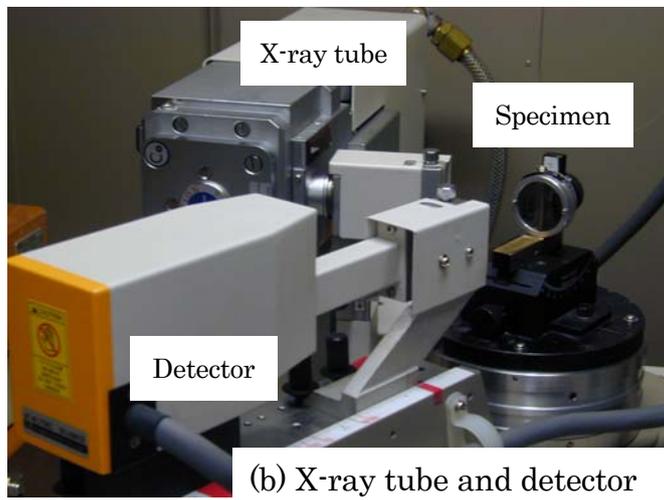


Fig.4.3 X-ray diffraction system for residual stress measurement

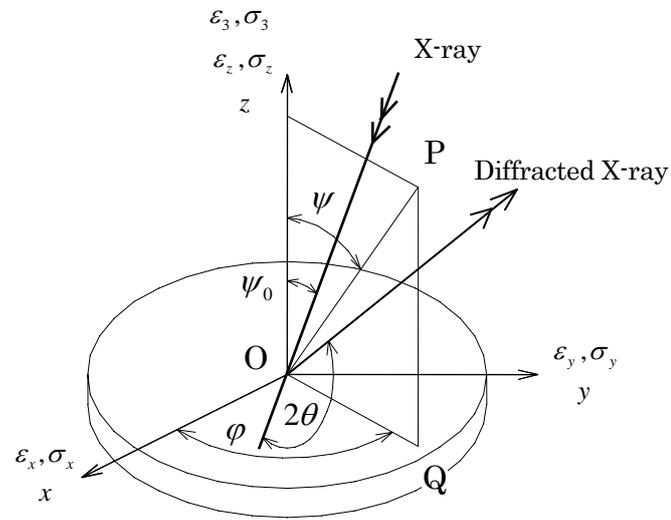


Fig.4.4 Coordinates for the X-ray measurement

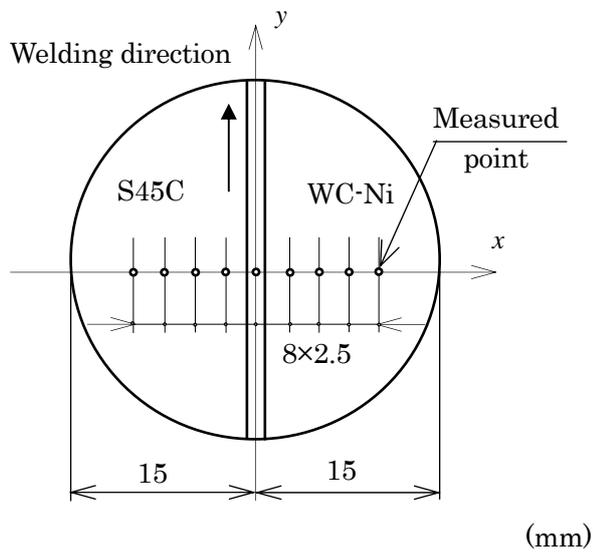
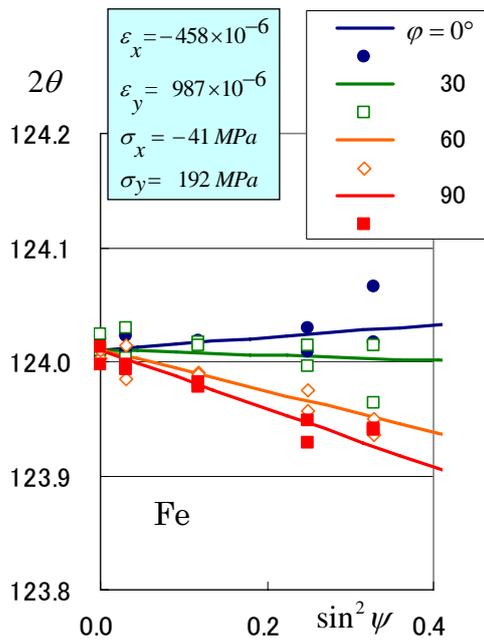
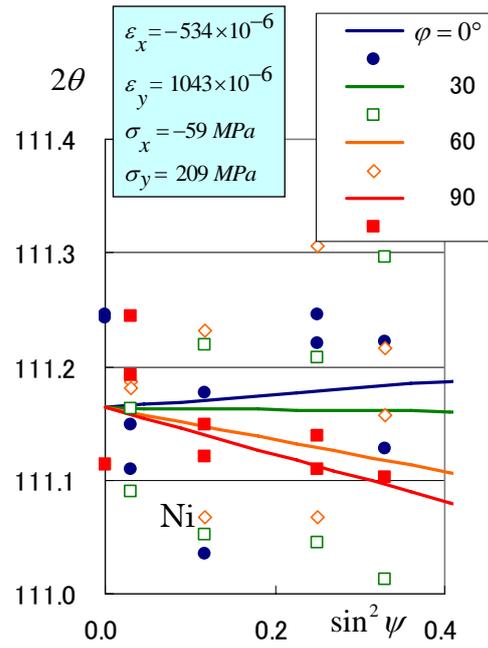


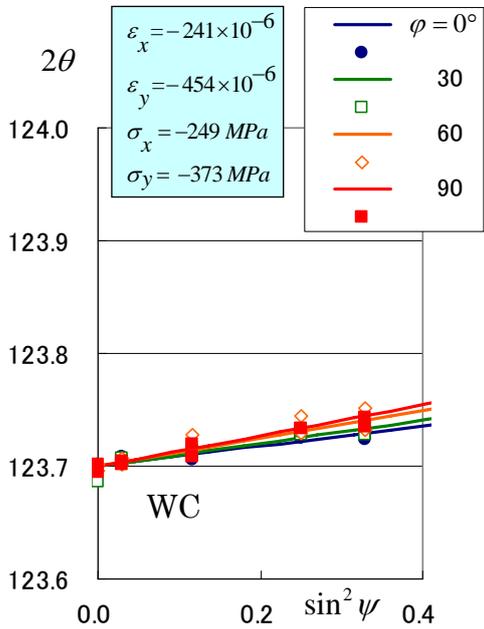
Fig.4.5 Positions of the measurement on the specimens



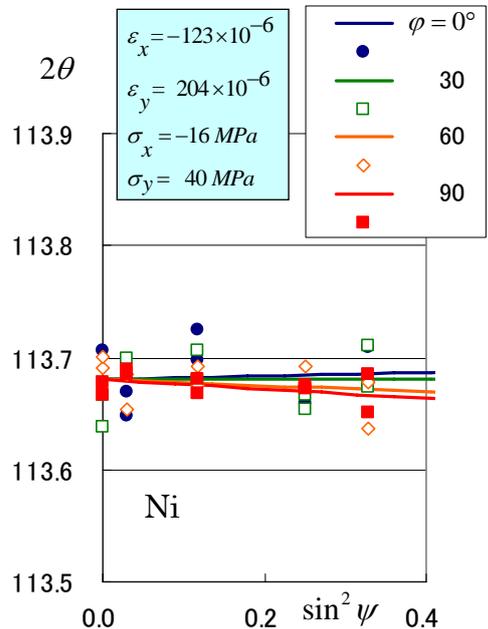
(a) 2θ vs. $\sin^2 \psi$ plots for the Fe in the Steel ($x = -5, y = 0$)



(b) 2θ vs. $\sin^2 \psi$ plots for the Ni in the welded zone ($x = 0, y = 0$)



(c) 2θ vs. $\sin^2 \psi$ plots for the WC in the cemented carbide ($x = 0, y = 0$)



(d) 2θ vs. $\sin^2 \psi$ plots for the Ni in the cemented carbide ($x = 0, y = 0$)

Fig.4.6 2θ vs. $\sin^2 \psi$ plots for the materials

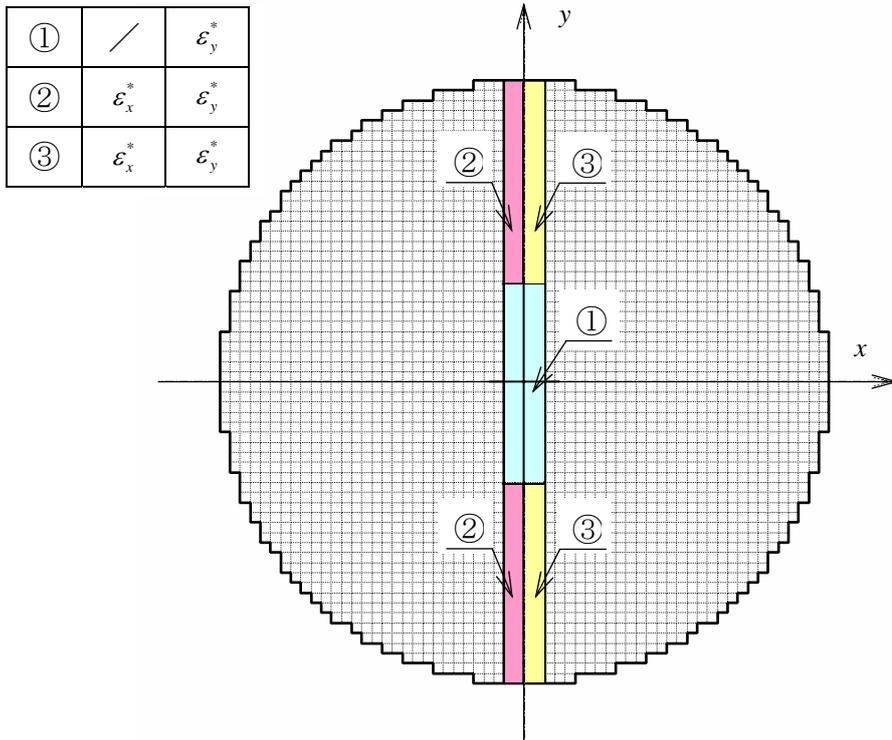


Fig.4.7 Unknowns of inherent strains in the welded zone

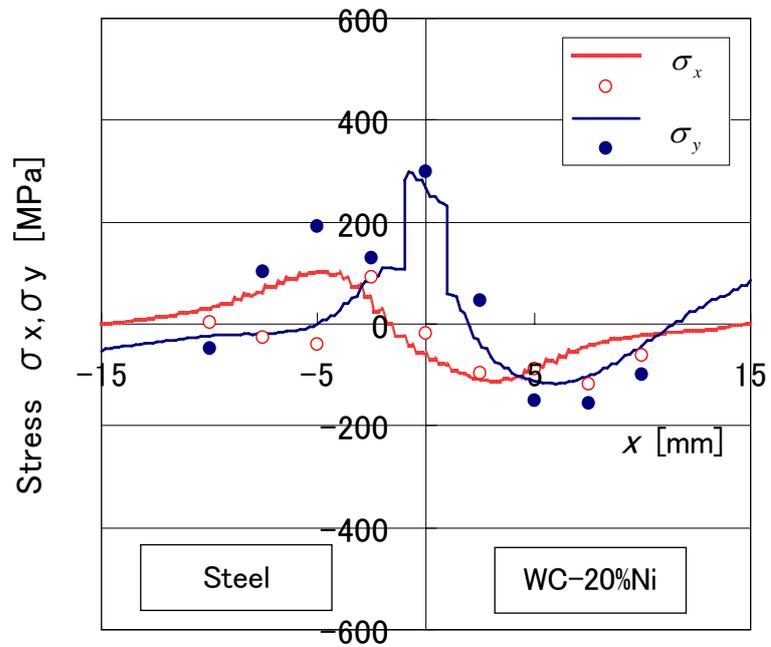
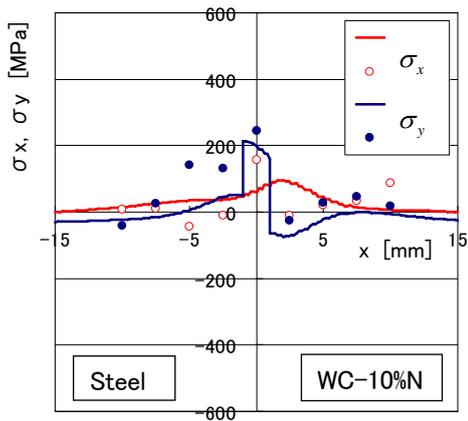
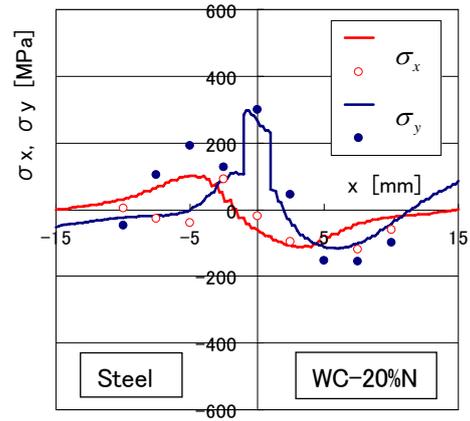


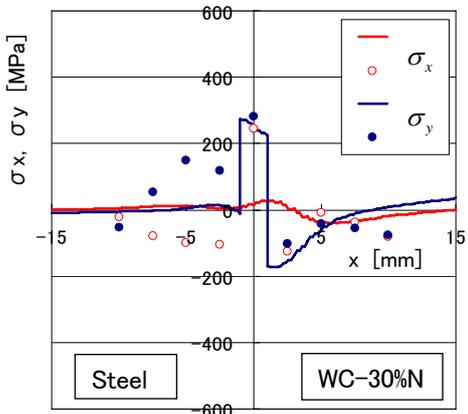
Fig.4.8 Residual stresses on the x axis of the WC-20%Ni specimen welded to steel



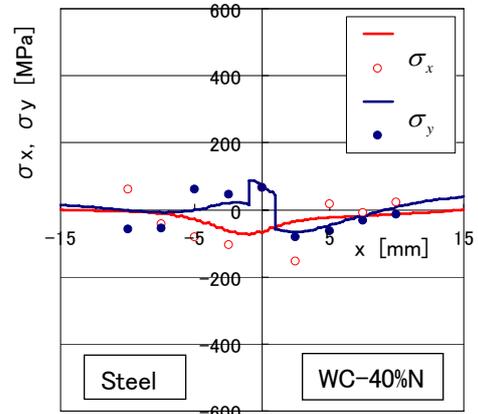
(a) WC-10%Ni



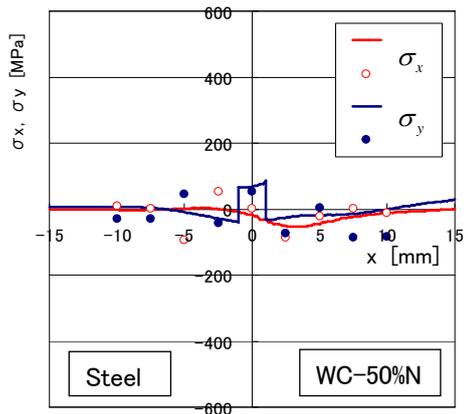
(b) WC-20%Ni



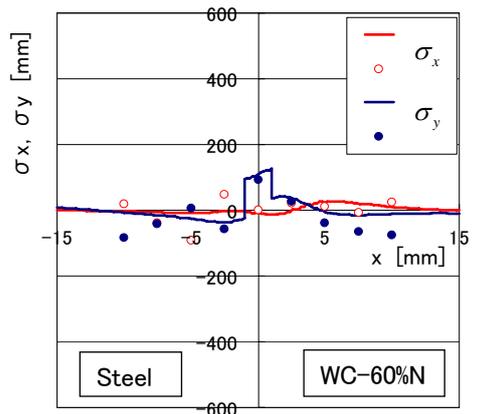
(c) WC-30%Ni



(d) WC-40%Ni



(e) WC-50%Ni



(f) WC-60%Ni

Fig.4.9 Residual stresses distributions vs. Ni mass contents of the cemented carbide

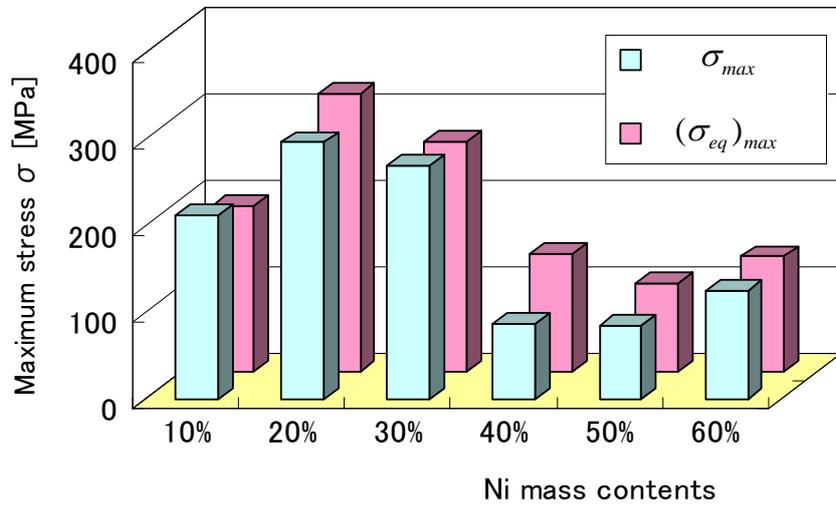


Fig.4.10 Maximum tensile stresses and maximum equivalent stresses on the x axis of the specimen

第5章 熱弾塑性を用いた WC-Ni 超硬合金の 溶接残留応力解析

5. 1. 緒 言

前章では、残留応力を測定する上で、最も容易な形状である突合せ溶接を採用したが、それでも超硬合金の溶接熱影響部の残留応力測定は、困難で手間のかかる問題であることがわかった。得られた残留応力測定結果の有意性を確認するとともに、測定できなかった超硬合金円板全体の残留応力分布を推定するために、本章では、熱弾塑性を用いて鋼と溶接したときに生ずる残留応力の解析を行った。前章と同様、対象とする超硬合金は WC-Ni 超硬合金であり、試験片形状や溶接条件なども可能な限り、実験と同一条件となるように設定した。

解析に必要な超硬合金の材料定数について調査すると、WC-Co 超硬合金ではすでにいくつかの文献で報告されている[14-16]が、WC-Ni の場合、ほとんど報告された例がない。解析に先立ち、WC-Ni 超硬合金の材料特性を決定するためのモデルについて検討した。従来、材料定数を結合金属割合に対して線形として扱うことが一般であったが、今回行った材料定数測定実験から、必ずしも線形ではない結果が示されたので、新たな複合材料モデルを採用した。その結果、解析に用いるすべての材料定数を結合金属割合の関数として表示することができた。

材料定数の測定実験として、放電プラズマ焼結装置 (SPS) で製作された超硬円板から切り出した試験片で4点曲げ試験を行った。測定項目は縦弾性係数、ポアソン比および密度である。測定できなかったその他の材料定数については、3次元有限要素法(3D-FEM)を用いて、複合材料の材料定数を決定するモデルの妥当性を確認している。

残留応力解析には、熱弾塑性を用いた FEM ソフト ANSYS5.7 を使用した。溶接後、自然冷却される試験片の温度変化を解析し、得られた各時間毎の温度

分布から熱弾塑性解析を用いて応力分布を FEM で計算した。温度分布がほとんど室温となる時間の応力を残留応力とみなしている。

5. 2. 超硬合金の材料定数

超硬合金のような複合材料の材料定数は、結合金属割合に対し線形になるとは限らない。線形となる場合は図 5.1(a)に示す並列ばねのときである。本論文では並列以外に直列および並列・直列複合ばねとした図 5.1 のモデル 0 から 2 の場合を比較検討した。それぞれの材料定数を結合金属割合の関数として以下に示す。

さらに、これらの材料定数が妥当な値であることを FEM によって確認した。採用した 2D-FEM, 3D-FEM モデルを図 5.2 に示す。超硬合金の球状の WC を結晶構造の原子配列とみなし、面心立方格子状に WC の粉末が分布し、その空間を結合金属 Ni が埋めていると仮定したモデルが、より現実の複合材料に近いと考えられる。しかし、結合金属割合が低い場合、計算不可能となるので 2D-FEM モデルの計算結果も併用した。

5.2.1 縦弾性係数およびポアソン比

計算に先立ち次の変数を定義する。 F :外力, σ :応力, $\varepsilon_x, \varepsilon_y$:縦, 横ひずみ, x, y :縦, 横方向変位。なお, 変数の添え字 0, 1 は図 5.1 の A_0, A_1 に対応する変数を示し, 添え字なしは全体の変数を表す。また, ζ :Ni の体積割合であり単位長さ, 単位面積について考える。それぞれのモデルに対して変位 x を与えたときの外力を計算する。

モデル 0: 外力 $F = F_0 + F_1$ であるので応力で表すと $\sigma = \sigma_0(1 - \zeta) + \sigma_1\zeta$ となり, 見掛けの縦弾性係数 E が求められる。また, 横方向変位を $y = y_0 + y_1$ と仮定すると, ポアソン比 ν も ζ に関して線形となる。以上の関係から次式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} E &= E_0(1 - \zeta) + E_1\zeta \\ \nu &= \nu_0(1 - \zeta) + \nu_1\zeta \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5.1)$$

モデル 1: 変位 $x = x_0 + x_1$ をひずみで表すと $\varepsilon_x = \varepsilon_{x0}(1 - \zeta) + \varepsilon_{x1}\zeta$ となり, 直列

ばねの縦弾性係数の関係が求められる。また、全体の横変位はそれぞれの横変位の平均値と仮定すると $y = y_0(1-\zeta) + y_1\zeta$ と表される。この関係からポアソン比が決定される。

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{E} &= \frac{1-\zeta}{E_0} + \frac{\zeta}{E_1} \\ \frac{\nu}{E} &= \frac{\nu_0}{E_0}(1-\zeta) + \frac{\nu_1}{E_1}\zeta \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5.2)$$

モデル 2：モデル 0, 1 を組合せて縦弾性係数とポアソン比の結合金属割合に関する式が決定される。なお、 E_{10}, ν_{10} ：相当縦弾性係数，ポアソン比であり，体積割合の代わりに $\zeta_l = \sqrt{\zeta}$ を用いる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{E_{10}} &= \frac{1-\zeta_l}{E_0} + \frac{\zeta_l}{E_1} \\ \frac{\nu_{10}}{E_{10}} &= \frac{\nu_0}{E_0}(1-\zeta_l) + \frac{\nu_1}{E_1}\zeta_l \\ E &= E_0(1-\zeta_l) + E_{10}\zeta_l \\ \nu &= \nu_0(1-\zeta_l) + \nu_{10}\zeta_l \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5.3)$$

それぞれの式に $E_0 = 706, E_1 = 209$ [GPa]， $\nu_0 = 0.20, \nu_1 = 0.27$ を代入したときの縦弾性係数を図 5.3 に，ポアソン比の結果を図 5.4 に示す。

5.2.2 密度

モデル 0, 1, 2 にかかわらず，密度 ρ は Ni の体積割合に対して線形であると考えられる。

$$\rho = \rho_0(1-\zeta) + \rho_1\zeta \dots\dots\dots (5.4)$$

WC および Ni の密度は，X線構造解析の格子定数から計算される値 $\rho_0 = 15.6 \times 10^3, \rho_1 = 8.9 \times 10^3$ [kg/m³] を採用した。なお，WC は六方晶，Ni は面心立方構造である。密度 ρ の Ni 体積割合との関係を図 5.5 に示す。

5.2.3 線膨張係数

モデル 0：線膨張係数 α は両端固定したまま温度 T に上昇したとき，拘束する外力 $F = F_0 + F_1$ および圧縮ひずみ $\varepsilon = \alpha T$ から計算でき，式(1)の縦弾性係数 E を用いて次式で表される。

$$E\alpha = E_0\alpha_0(1-\zeta) + E_1\alpha_1\zeta \dots\dots\dots (5.5)$$

モデル1：温度 T のとき、拘束するための圧縮変位は $x = x_0 + x_1$ であり、体積割合に対し直線となる。

$$\alpha = \alpha_0(1-\zeta) + \alpha_1\zeta \dots\dots\dots (5.6)$$

モデル2：式(3), (5), (6)を組合せて、次式を得る。

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{10} &= \alpha_0(1-\zeta_l) + \alpha_1\zeta_l \\ E\alpha &= E_0\alpha_0(1-\zeta_l) + E_{10}\alpha_{10}\zeta_l \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5.7)$$

線膨張係数 $\alpha_0 = 4.4 \times 10^{-6}$ ， $\alpha_1 = 13.3 \times 10^{-6}$ [1/K]のとき、各モデルの計算結果を図5.6に示す。

5.2.4 熱伝導率

温度差 T のときの熱流から各モデルに対する熱伝導率 κ を求める。図5.1の F を熱量[W]に置換える。

モデル0：熱量 $F = F_0 + F_1$, $F = \kappa T$ から

$$\kappa = \kappa_0(1-\zeta) + \kappa_1\zeta \dots\dots\dots (5.8)$$

モデル1： A_0, A_1 の境界温度 T_{10} としたとき $F_0 = \kappa_0(T - T_{10})/(1-\zeta)$, $F_1 = \kappa_1 T_{10}/\zeta$, $F_0 = F_1$ の関係を用いて次式が得られる。

$$\frac{1}{\kappa} = \frac{1-\zeta}{\kappa_0} + \frac{\zeta}{\kappa_1} \dots\dots\dots (5.9)$$

モデル2：式(8), (9)を組合せて次式を得る。

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{\kappa_{10}} &= \frac{1-\zeta_l}{\kappa_0} + \frac{\zeta_l}{\kappa_1} \\ \kappa &= \kappa_0(1-\zeta_l) + \kappa_{10}\zeta_l \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5.10)$$

熱伝導率 $\kappa_0 = 197.0$, $\kappa_1 = 88.5$ [W/(m·K)]としたときの計算結果を図5.7に示す。

5.2.5 比熱

比熱 c はNi 質量割合に対して線形と考えられる。比熱の式および体積割合 ζ と質量割合 ζ_m との関係を併せて次式に示す。

$$\left. \begin{aligned} c &= c_0(1-\zeta_m) + c_1\zeta_m \\ \frac{1}{\zeta_m} &= 1 + \left(\frac{1}{\zeta} - 1\right) \frac{\rho_0}{\rho_1} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5.11)$$

$c_0 = 163$, $c_1 = 471$ [J/(kg·K)] のとき、計算結果を図 5.8 に示す。

5. 3. 材料定数測定実験

超硬合金の Ni 質量割合が 10%から 60%まで 10%毎に、6 種類の円板素材を SPS で製作した。なお、超硬合金を焼結して製作するとき、質量割合を決定するためには、天秤などを用いて基材および結合金属粉末を測定するので、質量割合で表すほうが便利である。5. 3 節以降、結合金属割合にはすべて質量割合を用いる。

この円板を両面研磨し、図 5.9 の曲げ試験片を切り出して 4 点曲げ試験による縦弾性係数、ポアソン比の測定を行った。さらに、試験片の質量を精密天秤で測定し、密度を求めた。測定結果を図 5.3 から図 5.5 の計算結果に書き加えて示している。

5. 4. 溶接残留応力解析

残留応力解析および測定に使用した試験片形状を図 5.10 に示す。また、試験片の溶接条件を表 5.1 に表す。

溶接消費電力を溶接線全体に 10s 間入熱し、溶接線に直角な x 軸に関し 2 次元対称問題として温度分布を求めた。温度分布解析に必要な材料定数は密度、熱伝導率、比熱であり、Ni 質量割合の関数とし、式(5.4), (5.10), (5.11) を用いて計算した。その値を表 5.2 に表す。解析には汎用 FEM ソフトである ANSYS5.7 を使用した。自然冷却される試験片上の 2 点を、熱電対を用いて温度測定し、求めた冷却曲線から熱伝達係数を $23 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ としている。この値は材料、温度に関わらず一定とした。なお、FEM 解析には 4 節点アイソ

パラメトリック要素を用い、総節点数 916、要素数 865 である。

熱弾塑性解析に用いる材料定数として、縦弾性係数、ポアソン比、線膨張係数を式(5.3)、(5.7)で計算し、結果を表 5.2 に併せて示す。なお、 $\sigma-\varepsilon$ 線図の決定には、WC を弾性体、Ni を弾完全塑性材料として、複合材料のモデル 2 を用いて計算している。採用した $\sigma-\varepsilon$ 線図を図 5.11 に示す。

また、材料定数の温度依存性に関しては縦弾性係数、線膨張係数のみを温度の関数とし、その関数形を図 5.12 に示す。それ以外の材料定数はすべて温度に依存せず一定値であると仮定した。

熱弾塑性解析に用いた要素は、温度分布解析と同じである。境界条件は x 軸の移動、回転を拘束するため原点を固定し、 x 軸端点 $x = 15\text{mm}$ の y 方向変位を 0 としている。

計算例として、WC-20%Ni 超硬合金と鋼の溶接例を取り上げる。溶接終了時 ($t = 10\text{s}$) の温度分布解析結果を図 5.13 に示す。また、試験片が十分冷え切ったときに存在する塑性ひずみを相当ひずみの等高線として図 5.14 に示す。この図では節点変位の大きさを 50 倍に拡大して表している。図 5.15 に残留応力を等高線で (a) σ_x , (b) σ_y , (c) 最大主応力 σ_1 , (d) 相当応力 σ_{eq} の順に示す。

全体の応力分布を求めることと同時に、残留応力測定結果との比較が本論文のもうひとつの目的であり、解析された x 軸上の σ_x, σ_y 分布を図 5.16 に示す。さらに、WC-20%Ni の残留応力測定結果を図 5.17 に示す。本図は第 4 節図 4.8 と同じ図である。図では測定値を点で示し、さらに固有ひずみ法を用いて残留応力分布を決定し、得られた応力を連続線で示している。

さらに、図 5.18(a)～(f) に結合金属 Ni の質量割合を変化させたときの残留応力分布の状態を並べて比較している。

5. 5. 解析結果および考察

まず、解析に用いた材料定数に関して述べる。図 5.3 の縦弾性係数および図 5.4 のポアソン比のグラフによれば、今回採用した複合材料モデル(モデル 2) と実験結果はよく一致した。ひとつの簡単なモデルを用いて、すべての材料定数を結合金属割合の関数として表すことができ、超硬合金の残留応力解

析には有効であった。

次に、図 5. 14 の塑性ひずみは溶接部およびその近傍の鋼部にのみ存在している。超硬合金部は全体が y 方向に圧縮され、鋼部は逆に引き伸ばされている。図 5. 15 (a) の溶接端の超硬合金部 ($y = 15\text{mm}$) に大きな引張応力 σ_x が存在している。また、図 5. 15 (b) からは、一般の鋼同士の溶接に見られるように、溶接部全体に大きな引張応力 σ_y が存在している。図 5. 15 (c) の主応力では、溶接端部にある最大引張応力は (a) σ_x の最大値の位置であるが、 y 軸に沿って 400MPa 程度の大きな主応力も存在する。図 5. 15 (d) の相当応力でも、(c) の主応力と同様な分布が得られた。

溶接割れに最も影響があると考えられるのが溶接部近傍の引張応力であり、結合金属 Ni の割合が低い場合に大きな値となっている。溶接部は脆性材料としての挙動を示すことから図 5. 15 (c) 主応力 σ_1 が大となる部分が溶接割れの起点となる可能性が高い。しかし、超硬合金の結合相 Ni は延性材料として扱われることが一般的であるため図 5. 15 (d) に示す相当応力で判断しなければならないことも考えられる。

ここでは最大主応力に注目し、結合金属 Ni 質量割合と最大主応力の値との関係を表 5. 3 に示す。表から結合金属割合が増大すると、残留応力値はかなり低減していることがわかる。また、図 5. 15 (c) の主応力 σ_1 で示したように、最大主応力の位置は溶接始端または終端部でかつ超硬合金円周部である。これは、溶接実験で生じた WC-10%Ni の溶接割れ発生個所と一致する。以上のことから、本章の残留応力解析は、溶接割れと残留応力の関係を十分に説明していると言える。

また、鋼同士の溶接と異なる点は、超硬合金（右半分）と鋼（左半分）との線膨張係数の差が大きいことから、図 5. 16 に示されたように、 x 軸上の応力分布が y 軸に関して、左右非対称の応力分布となっているのが大きな特徴である。図 5. 17 の測定結果と解析結果を比較すると、溶接部の大きな引張応力 σ_y の存在すること、および σ_x, σ_y の分布が非対称であることなど同様な傾向がみられる。 x 軸上の残留応力分布では、解析は測定結果の傾向を充分表していると考えられる。

図 5. 18 の結合金属割合との関係を見ると、Ni 質量割合が低い間は大きな

残留応力が生じているが 40%以上となると極端に残留応力値が減少している。さらに、 x 軸上の応力の最大値に注目し、Ni 質量割合の異なる他の解析結果と比較してみると、表 5.4 および図 5.19 に示す結果となった。これも、実験結果と比較すると、互いにほぼ一致する傾向が見られる。ただ、10% Ni の場合、実験測定値がかなり低い値であったのは、溶接線に沿ってクラックが生じたのをそのまま測定したためである。

以上のことから、本章の解析は溶接残留応力解析に非常に有効であり、前章で測定されたすべての試験片の残留応力と比較して、おおよそ満足できる分布が得られた。

5. 6. 本章の結論

本章では、超合金と鋼の突合せ溶接による残留応力解析を行った。超合金の結合金属 Ni の割合が残留応力の大きさに与える影響を求めている。試験片形状、溶接条件などは、前章の溶接実験と同じ条件を、可能な限り取り込んでいる。以上の解析結果から、次の項目が結論として得られた。

- (1) 本論文の解析は、汎用ソフトを用いてかなり単純化した応力解析にもかかわらず、的確な溶接残留応力分布を得ることができた。
- (2) 超合金の材料定数を結合金属割合から決定することができ、超合金の残留応力解析に非常に有効であった。
- (3) 超合金と鋼の溶接では主に線膨張係数の違いから大きな残留応力が生じ、その分布も超合金部と鋼部では、かなり異なる分布となることがわかった。
- (4) 超合金の溶接では、結合金属 Ni の割合が大きくなればなるほど残留応力値は低減される。
- (5) 解析結果で残留応力値が最大となる位置と、実験で生じた溶接割れの発生位置が一致した。
- (6) 解析結果で得られた x 軸上の応力分布と実験で得られた応力分布との間に良い一致が見られた。
- (7) 本章の解析方法および結果は溶接残留応力解析に非常に有効である。

- (8) 本章の解析は WC-Ni 超硬合金を対象としているが、本章の解析法によると、WC-Co や WC-Fe 超硬合金でも材料定数の推定することができ、残留応力解析が可能となる。

Table 5.1 Conditions of TIG welding

Welding Current	100 A
Welding Voltage	10 V
Welding Speed	60 mm/min
Inert Gas	Ar 0.01 m ³ /min
Welding Rod	TGNi ϕ 1.2

Table 5.2 Material properties used in the residual stress simulations

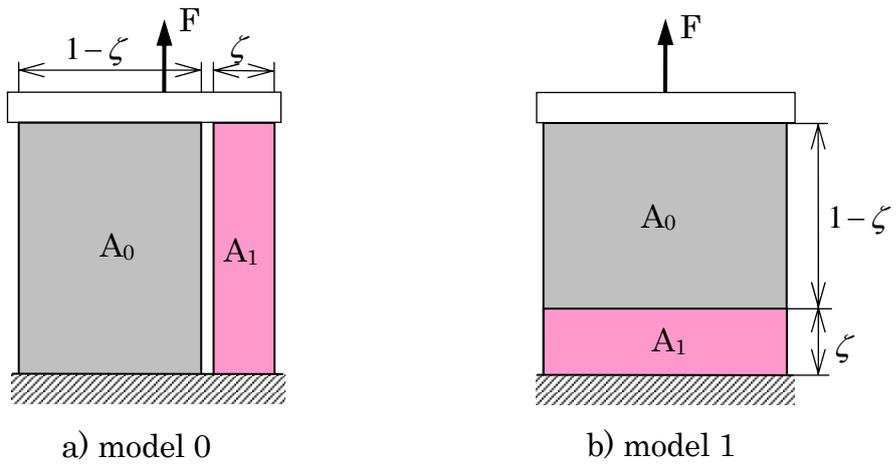
Material	ζ Volume contents	ρ kg/m ³	c J/(kg·K)	κ W/(m·K)	α 1/K	E GPa	ν
WC	0.0%	15.60×10 ³	163.0	197.0	4.40×10 ⁻⁶	706	0.200
WC-10%Ni	16.3	14.51	193.8	170.7	5.32	566	0.220
WC-20%Ni	30.5	13.56	224.6	153.1	6.11	485	0.231
WC-30%Ni	42.9	12.73	255.4	139.5	6.88	424	0.240
WC-40%Ni	53.9	11.99	286.2	128.5	7.67	377	0.246
WC-50%Ni	63.7	11.33	317.0	119.3	8.50	337	0.252
WC-60%Ni	72.4	10.75	348.7	113.4	9.35	304	0.257
100%Ni	100.0	8.90	471.0	88.5	13.30	209	0.270
Steel	—	7.85	465.0	43.0	10.70	206	0.280

Table 5.3 Maximum stresses in the specimens

Material	Maximum stress MPa
WC-10%Ni	631
WC-20%Ni	521
WC-30%Ni	371
WC-40%Ni	271
WC-50%Ni	200
WC-60%Ni	132

**Table 5.4 Measured and calculated maximum tensile stresses
on the x axes of the specimens**

	Measurement MPa	Calculation MPa
WC-10%Ni	213	382
WC-20%Ni	298	386
WC-30%Ni	272	297
WC-40%Ni	87	203
WC-50%Ni	86	125
WC-60%Ni	127	70



A_0, A_1 : base and binding metal properties

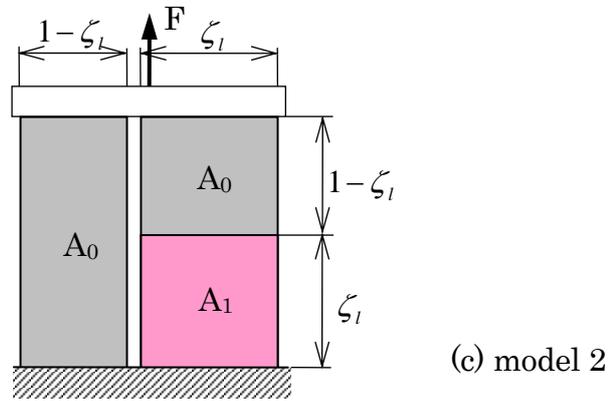


Fig.5.1 Models for calculating the material properties

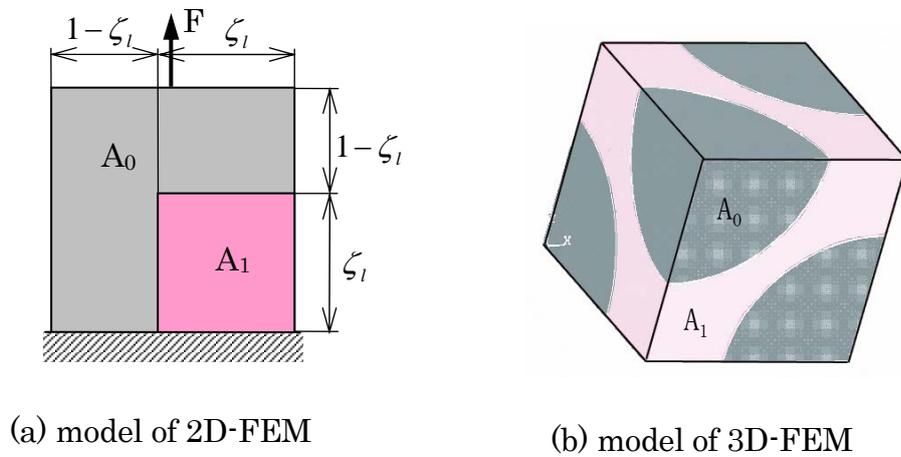


Fig.5.2 FEM Models for calculating the material properties

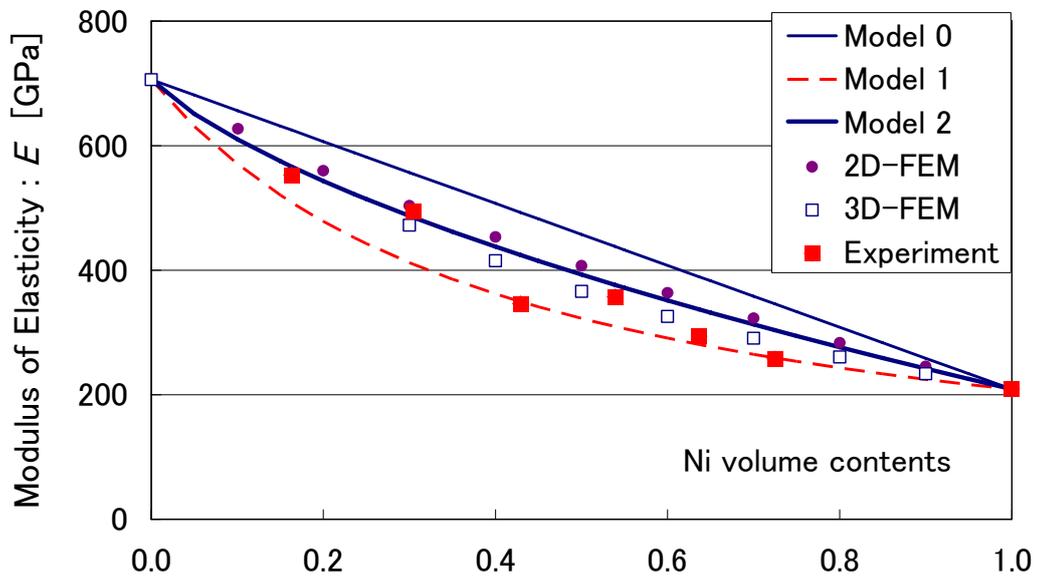


Fig.5.3 Modulus of elasticity of WC-Ni cemented carbide

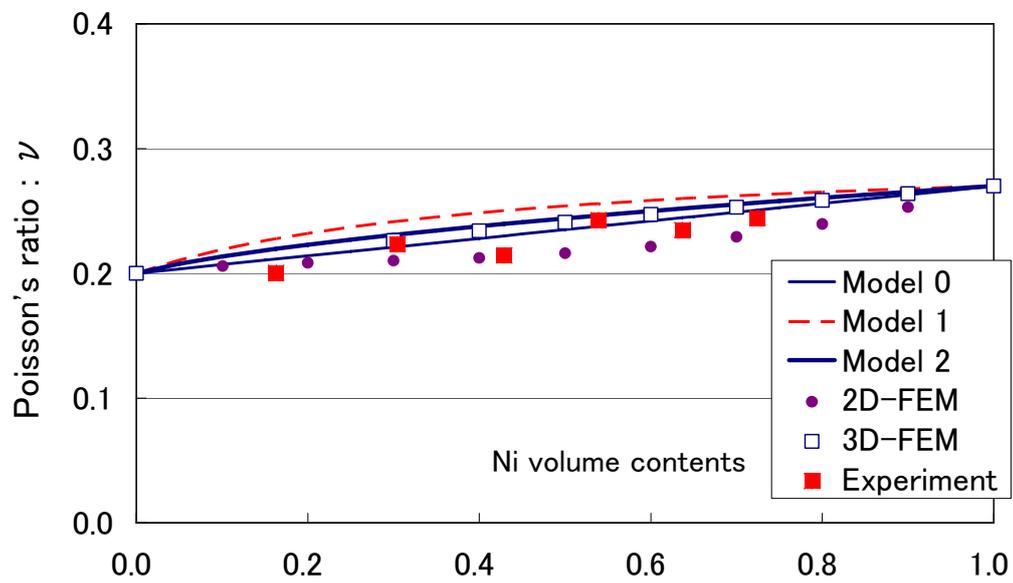


Fig.5.4 Poisson's ratio of WC-Ni cemented carbide

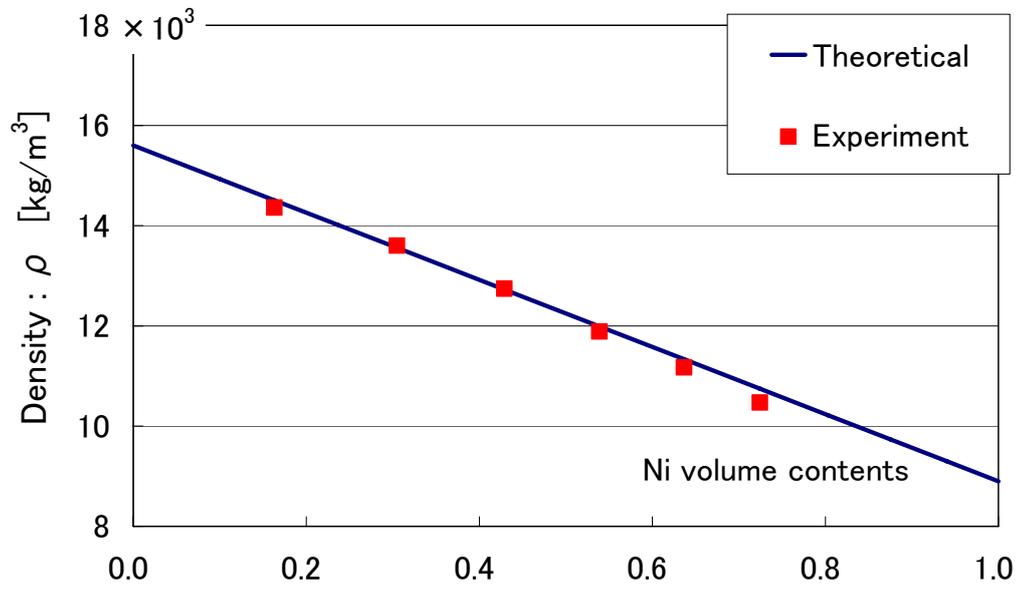


Fig.5.5 Density of WC-Ni cemented carbide

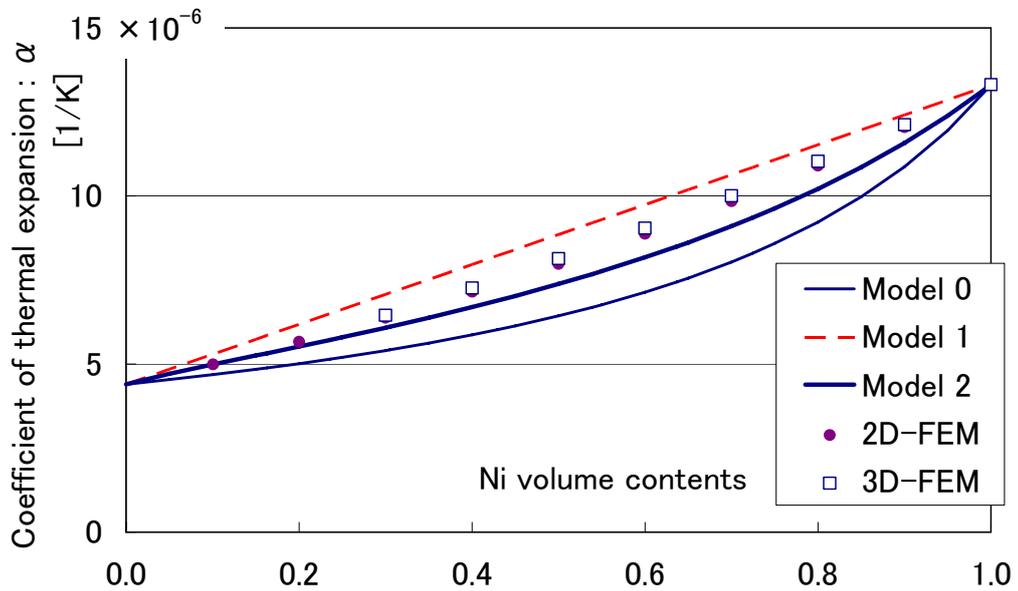


Fig.5.6 Coefficient of thermal expansion of WC-Ni cemented carbide

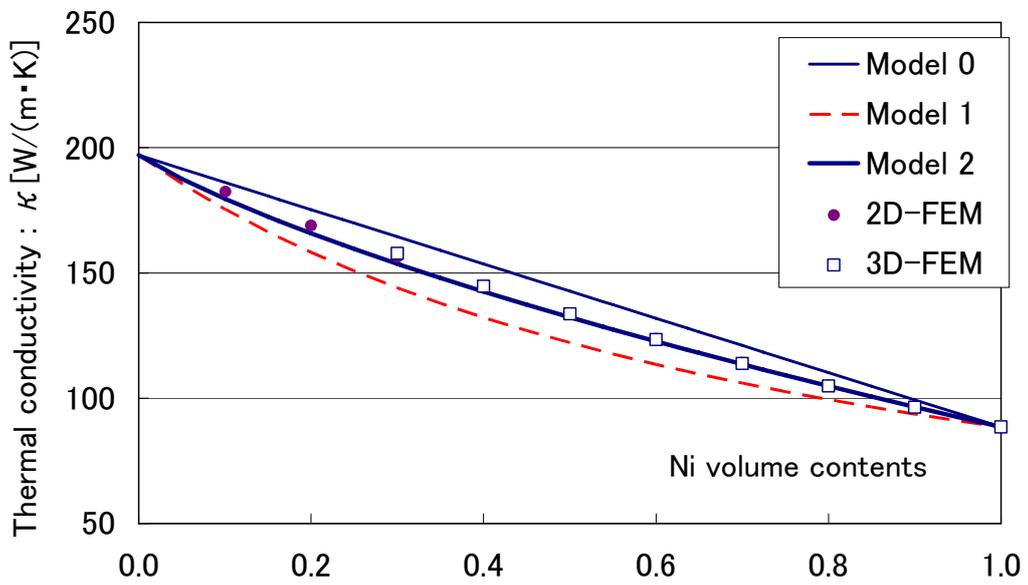


Fig.5.7 Thermal conductivity of WC-Ni cemented carbide

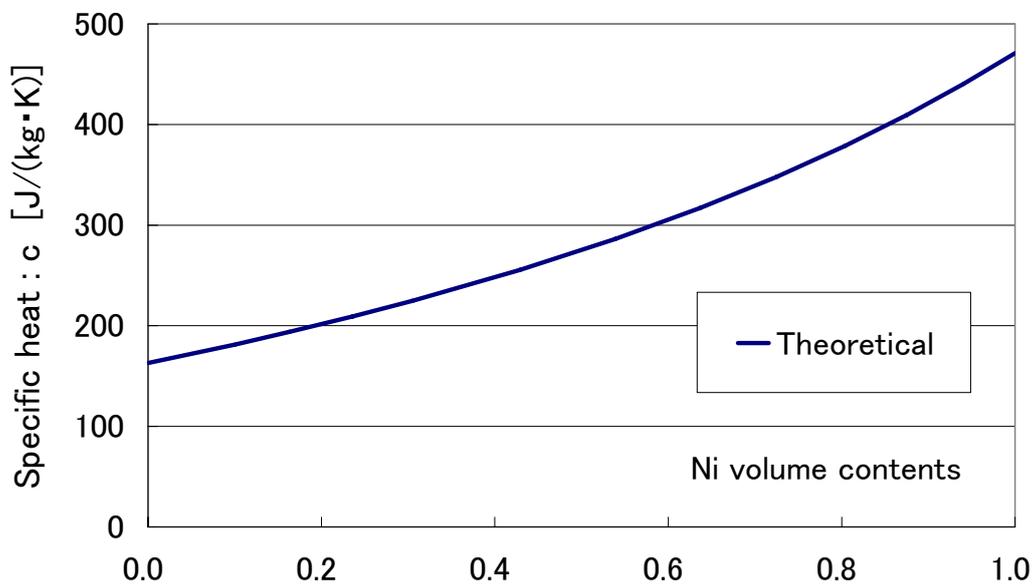


Fig.5.8 Specific heat of WC-Ni cemented carbide

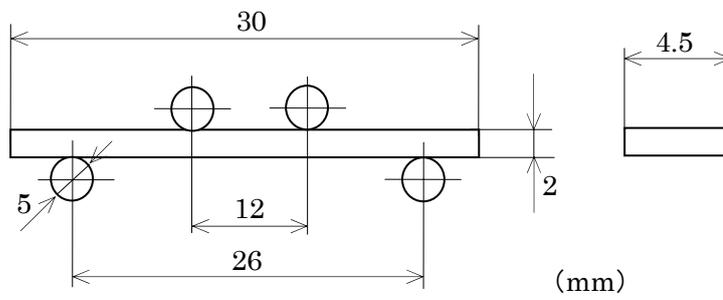
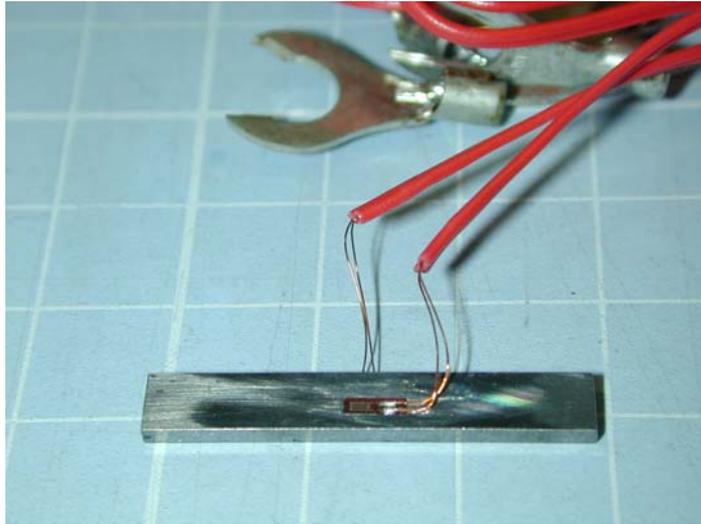


Fig.5.9 Specimen for 4-point bending

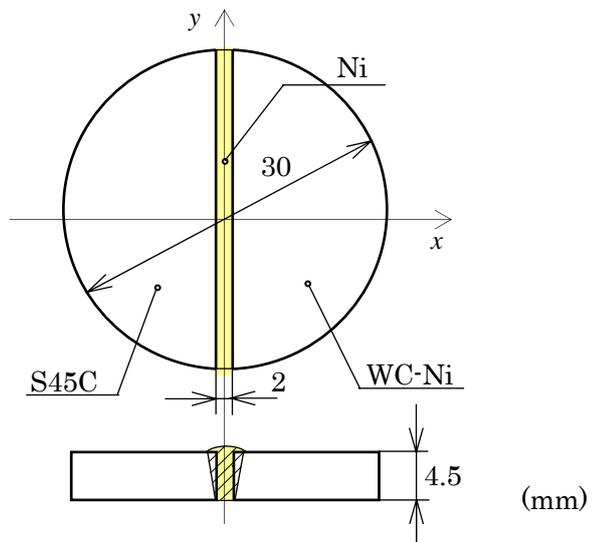


Fig.5.10 Specimen geometry

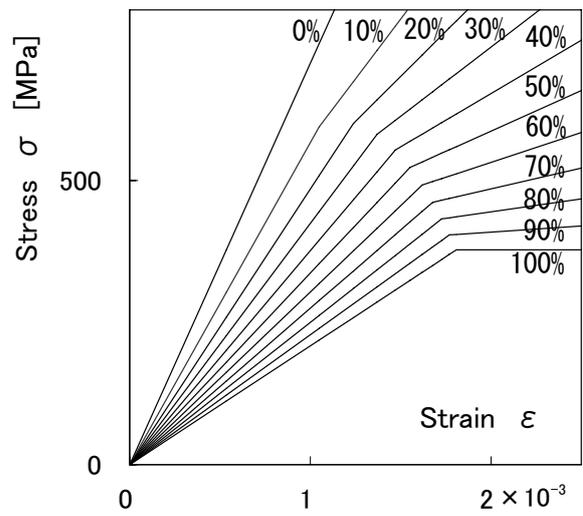
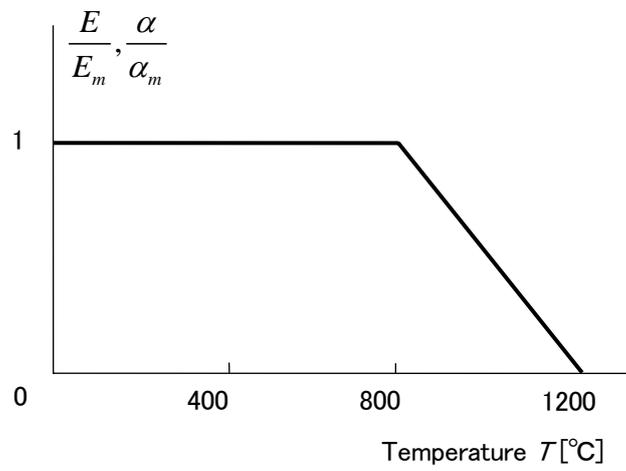


Fig.5.11 $\sigma - \epsilon$ diagram of the WC-Ni vs. Ni mass contents (%)



E_m, α_m : Constants in table 2

Fig.5.12 Functions $E(T), \alpha(T)$

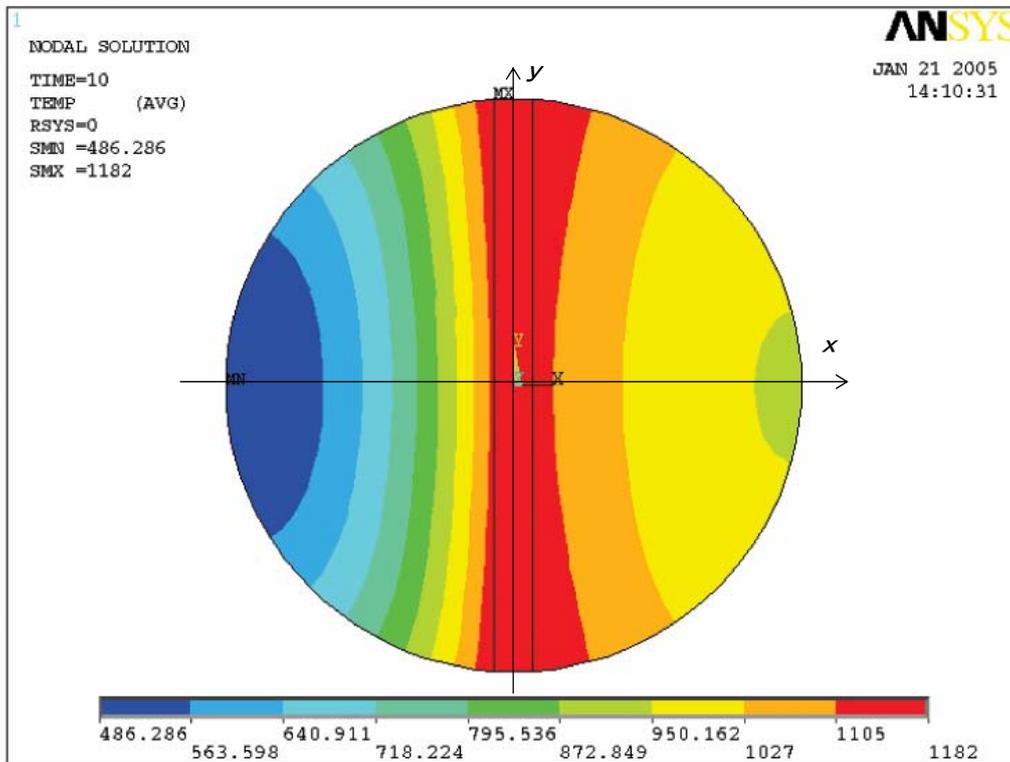


Fig.5.13 Temperature of the WC-20%Ni and steel specimen just after the welding

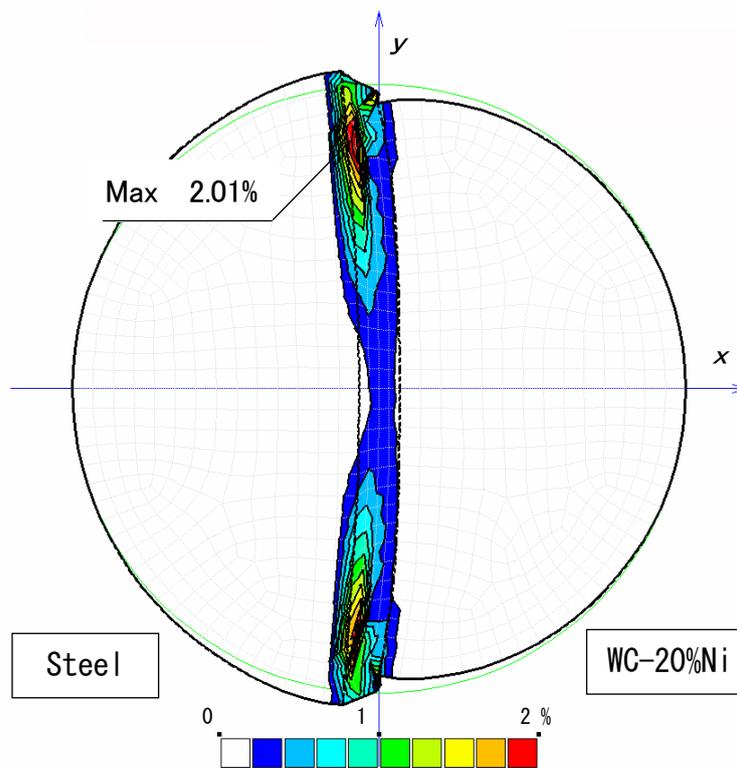


Fig.5.14 Equivalent plastic strain and displacement ($\times 50$)

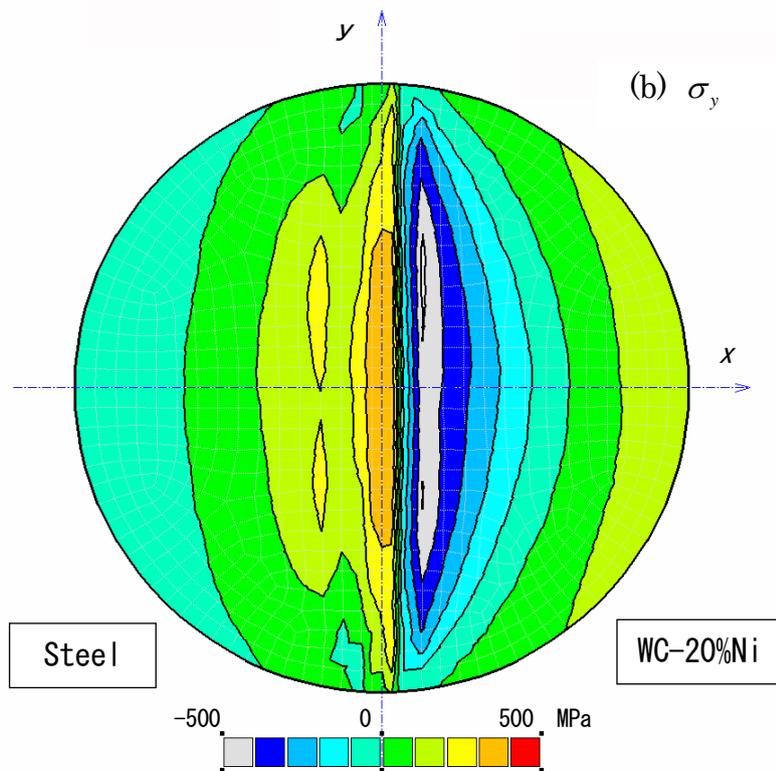
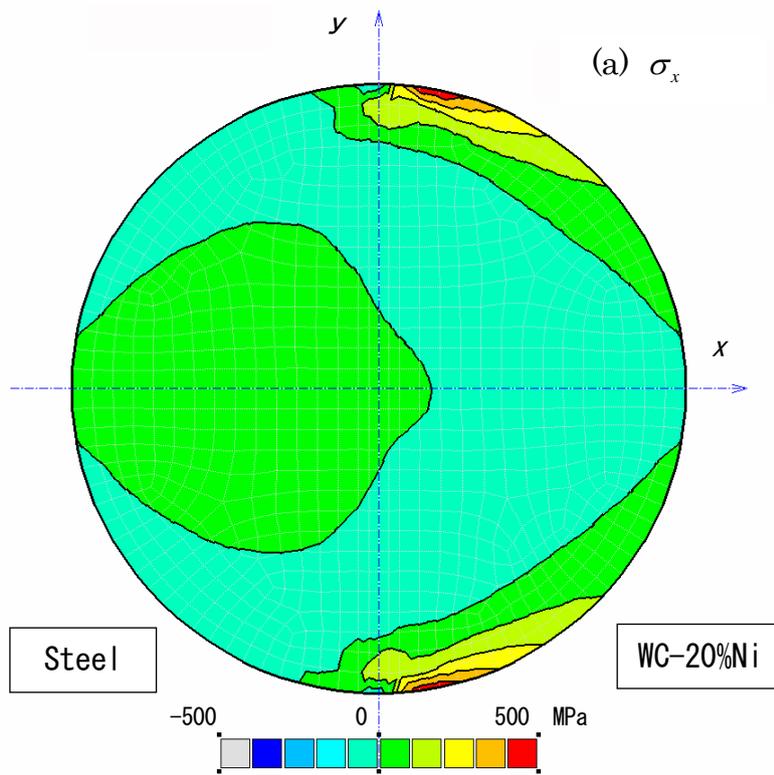


Fig.5.15 Stress distribution (a) σ_x , (b) σ_y

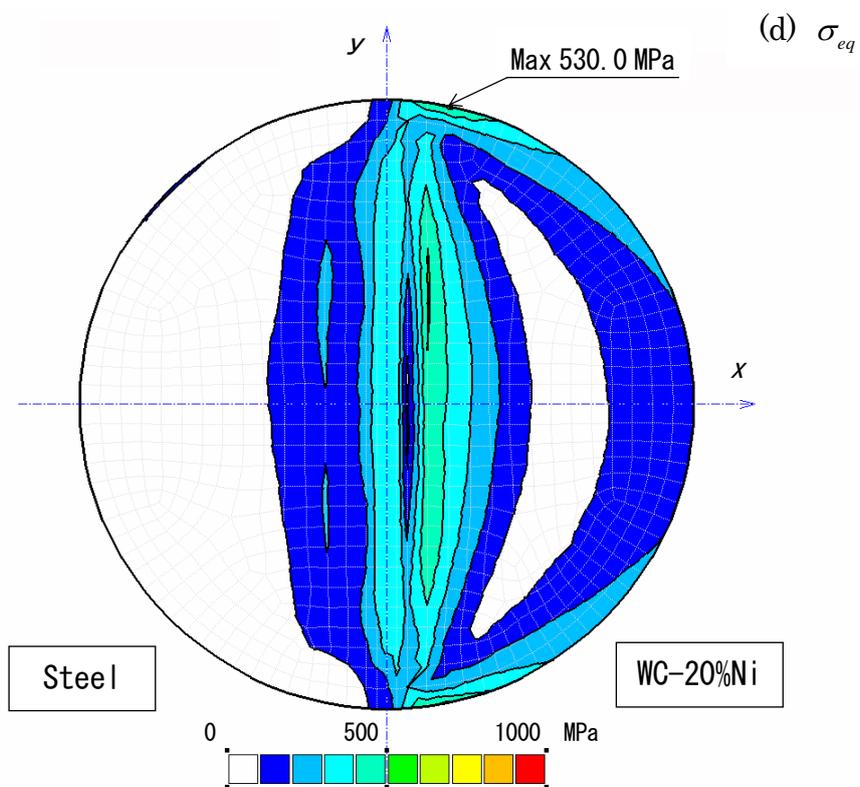
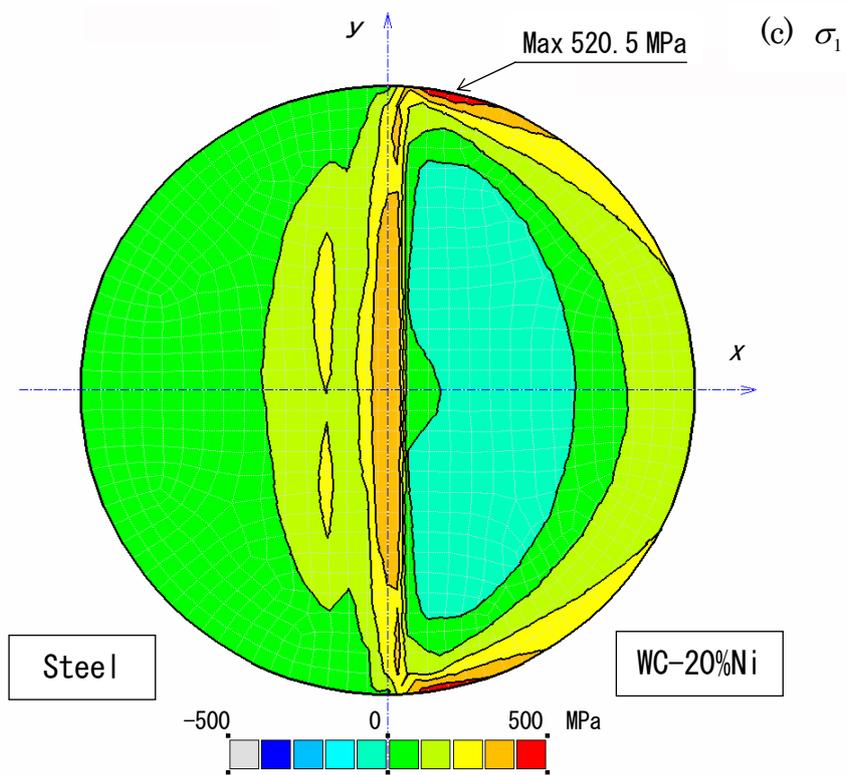


Fig.5.15 Stress distribution (c) σ_1 , (d) σ_{eq}

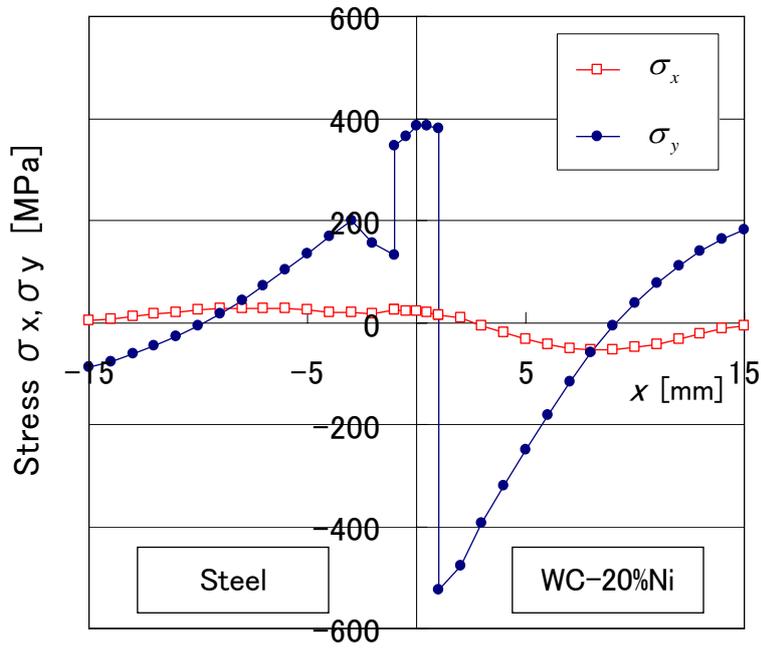


Fig.5.16 Residual stresses on the x axis of the specimen by FEM simulation

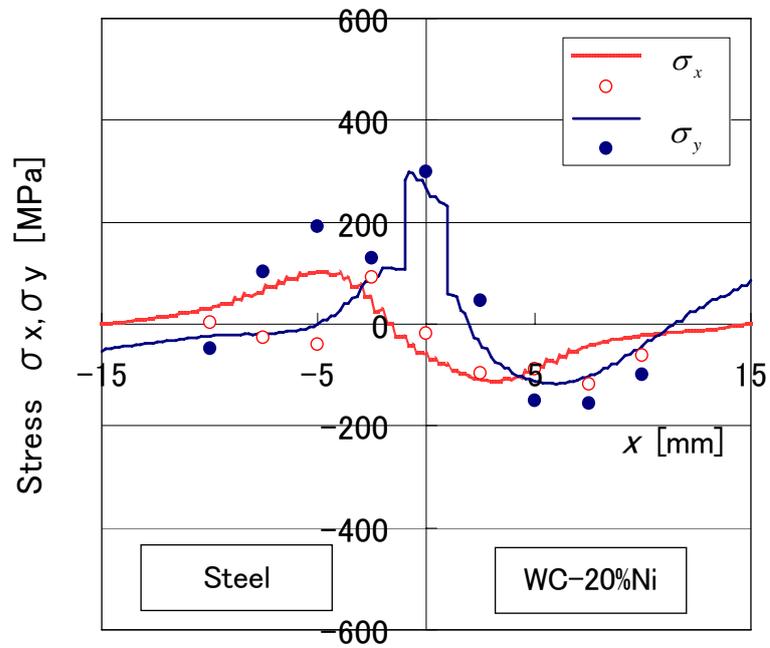
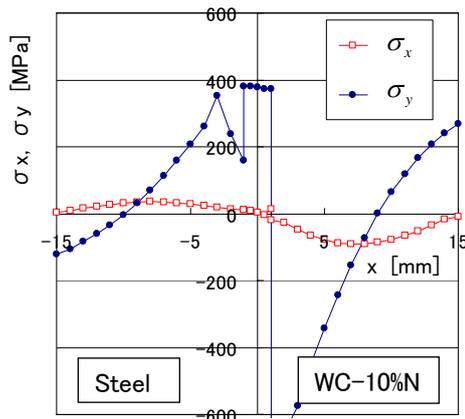
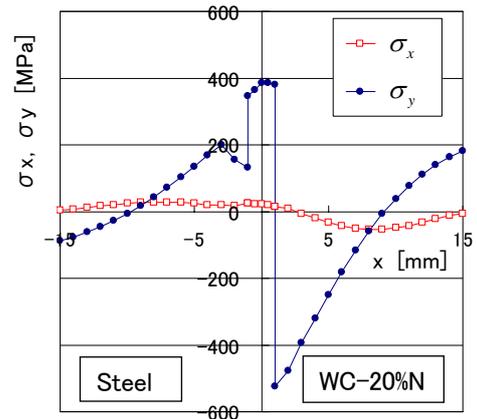


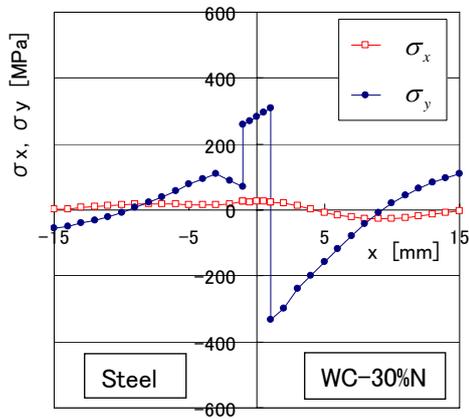
Fig.5.17 Residual stresses on the x axis of the specimen by the experiments



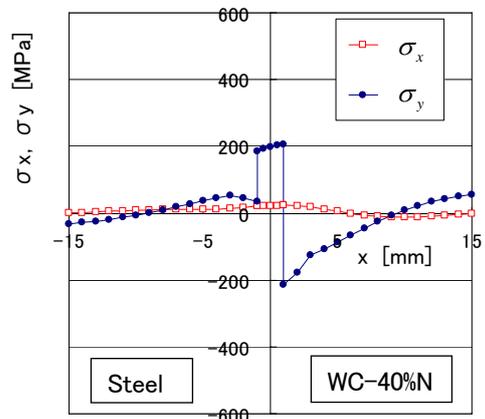
(a) WC-10%Ni



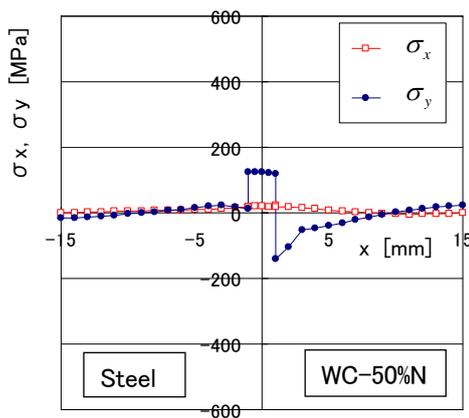
(b) WC-20%Ni



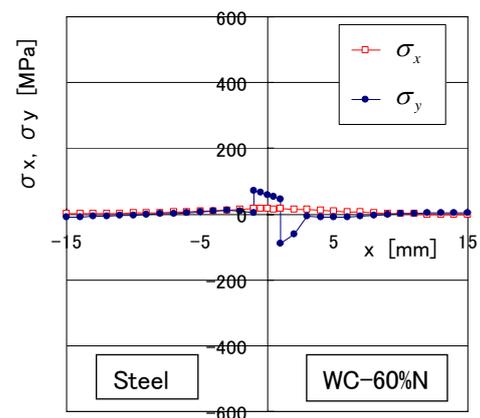
(c) WC-30%Ni



(d) WC-40%Ni



(e) WC-50%Ni



(f) WC-60%Ni

Fig.5.18 Residual stresses vs. Ni binder contents by the calculations

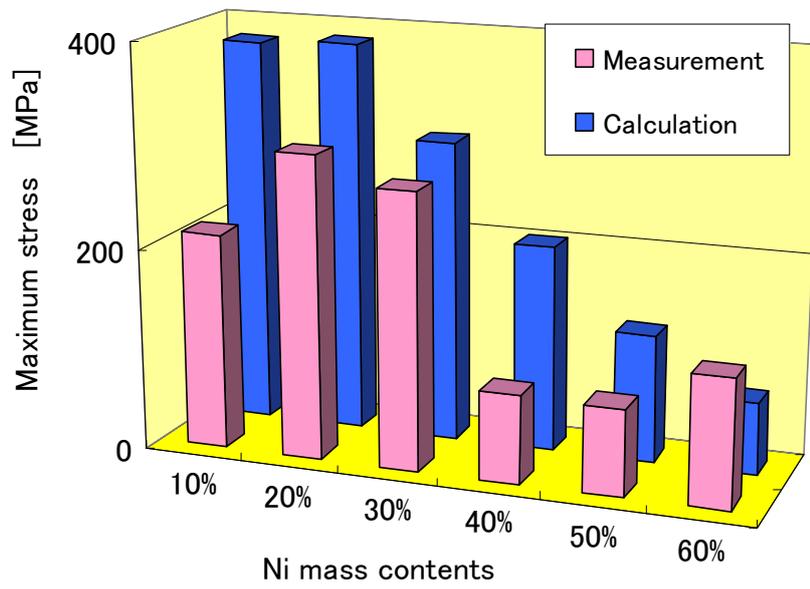


Fig.5.19 Measured and calculated maximum stresses on the x axes of the specimens

第6章 WC-Ni 超硬合金のすみ肉溶接による 残留応力解析

6. 1. 緒 言

前章では、半円板状の超硬合金を鋼の半円板と突合せ溶接する場合の応力解析を行った。これは、溶接実験による残留応力測定と解析結果を比較する上で測定しやすい形状としたものであり、必ずしも実用的な溶接方法ではない。超硬合金は粉末から焼結して円板または矩形板として製作されるので、鋼のブロックに全周すみ肉溶接して使用するのが一般的である。

本章では WC-Ni 超硬合金の円板を、さらに大きい鋼円板上にすみ肉溶接した場合の温度分布および残留応力を解析する。まず、鋼円板同士の溶接の場合を解析し、超硬合金円板の溶接と比較する際の基準とする。次に、結合相 Ni 割合（質量）を 10%から 60%まで 10%毎に 6 種類の試験片を鋼の上に溶接する場合を解析する。低 Ni 割合の円板をそのまま溶接した場合、溶接割れが生ずる経験があり、そのときの応力分布を説明するためである。

最後に、表面は硬く、溶接部は溶接性の良い超硬合金を開発するために、超硬合金を 2 層とした場合の解析を行う。表面は従来から用いられている低結合相割合の超硬合金とし、残りの部分は結合金属割合を高くして溶接性を高めた 2 層構造とする。溶接法として最も一般的に採用されているすみ肉溶接で鋼の上に溶接した場合の残留応力を解析する。熱弾塑性解析を用いた有限要素法 (FEM) 解析を行い、残留応力を低減できる 2 層構造超硬合金を決定する。

なお、モデル形状は軸対称であり、解析を容易にするために、全周同時加熱し、2 次元軸対称問題として取扱う。また、解析には、前章と同様に汎用 FEM ソフトである ANSYS5.7 を使用し、それぞれの材料定数も前章の値をそのまま用いている。

6. 2. 解析モデルおよび温度分布解析

解析に用いたモデルの形状を、図 6.1 に示す。表層は円板厚さの 1/3、1.5mm までが WC-10%Ni で、残りの厚さ 2/3 を WC-10%Ni から WC-60%Ni まで 10%毎変化させた 2 層の超硬合金円板を考える。

温度分布解析は溶接入熱として 3.2KW を 20s 間、溶接部表面に与え、その後自然冷却したときの全体の温度分布を求めた。解析には 4 節点 2 次元伝熱ソリッド要素を用い、総節点数 1914、要素数 1797 である。解析の 1 例として WC-10%Ni 単層の場合、加熱終了直後の解析結果を図 6.2 に示す。加熱終了後からは自然冷却とし、超硬合金表面および鋼円板表面から放熱する。超硬合金円板と鋼円板と接する境界面は断熱と仮定している。溶接入熱は熱伝導率の大小から、最初超硬合金円板が高熱となるが、鋼円板の方が熱容量は大きく冷却しづらいため、やがて、超硬合金円板の温度が鋼よりも低くなる。

6. 3. すみ肉溶接の残留応力解析

前節で求めた温度分布をもとに、4 節点構造ソリッド要素を用い、温度分布解析と同じ要素分割で熱弾塑性解析を行った。境界条件として、原点において鋼円板上面の変位を固定している。まず、鋼円板同士のすみ肉溶接例と、超硬合金溶接例とを比較してみる。鋼円板同士では溶接棒も鋼とし、一般の鋼材の溶接例を想定している。また、超硬合金としては最も残留応力が大きく顕著となる WC-10%Ni の残留応力解析を行った。溶接によって生ずる変形と塑性ひずみの解析結果を鋼と超硬合金の場合を並べて図 6.3 に示す。塑性ひずみとしては相当ひずみ($\epsilon_{pl})_{eq}$ の等高線を、また、変形は倍率 50 に拡大して示している。

残留応力分布として相当応力 σ_{eq} 、主応力 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ の等高線として、鋼の場合を図 6.4 に、超硬合金 WC-10%Ni の場合を図 6.5 にそれぞれ示している。2 次元軸対称応力分布で存在する応力は $\sigma_r, \sigma_z, \sigma_\theta, \tau_{rz}$ であり、ここでは、 $\sigma_r, \sigma_z, \tau_{rz}$ から決定される面内応力の主応力を σ_1, σ_3 とし、また、 $\sigma_2 = \sigma_\theta$ と定

義するので、必ずしも、 $\sigma_1 > \sigma_2$ や $\sigma_2 > \sigma_3$ が成立するとは限らない。

単層の超硬合金溶接のもうひとつの例として、溶接性が良く、残留応力が低くなる高Niの中から、WC-50%Niの解析結果を図6.6(a) σ_{eq} , (b) σ_1 に示す。

さらに、結合相Ni割合を変えた場合の溶接残留応力の値を表6.1に示す。

次に、表層厚さ1.5mmをWC-10%Niとし、残り厚さ3mmの層をWC-10%NiからWC-60%Niまで変化させた2層の超硬合金円板とした場合の残留応力解析結果を、表6.1と比較するため同じ仕様で表6.2に示した。

6. 4. 解析結果および考察

図6.2の最高温度は約1200°Cとなり、その他の単層または2層の解析でも、超硬合金のNi割合に関わらずほとんど同様な分布となった。

図6.3では鋼の場合の変形は下に凸であるのに比べ、超硬合金WC-10%Niの場合は上に凸となっている。また、塑性ひずみ分布はほとんど溶接部およびその近傍に限られているのは両者とも共通するが、WC-10%Niの塑性ひずみは鋼同士の場合に比べて、かなり大きな値となっている。なお、変形によって下部の鋼円板に上部の鋼または超硬合金が食い込んで干渉している図形となっているが、これは変形を極端に大きく表したことで、実際には溶接される円板間には必ず小さな隙間が存在することを考え、この解析では適合対策を考慮せず、そのまま表示している。

図6.4と図6.5の応力分布を比較すると、まず、(a)の相当応力では、応力値が塑性ひずみに比例する大きさとなっているが、(b)から(d)の応力分布を参照すると、単純に塑性ひずみの大きさでは説明できない。(c) $\sigma_2 (= \sigma_\theta)$ では溶接部にそれぞれほとんど同じ大きさの引張応力が、たが応力 (hoop stress) として存在する。しかし、溶接部以外および σ_1, σ_3 では応力分布は大きく異なる。超硬合金の単層円板すみ肉溶接の場合には、超硬円板の変形は最終的に上に凸となるので超硬円板下部の σ_2, σ_3 は圧縮応力となる。低Ni超硬円板では σ_1 として大きな引張応力が溶接部近傍に存在し、さらに超硬円板下部の σ_2, σ_3 の圧縮応力のため、超硬円板下部と溶接部の境目に特に大きな

σ_{eq} が存在することが大きな特徴である。この相当応力および最大引張応力が超硬円板の溶接割れに大きく影響していると考えられる。

表 6.1 から σ_{eq} , σ_1 も結合相 Ni 割合の増大とともに急激に減少しているが、 σ_2 はほとんど変わらないことがわかった。図 6.6 の WC-50%Ni の σ_{eq} , σ_1 の分布を見ると、WC-10%Ni に比べて溶接残留応力が低減している。

2層超硬合金とした表 6.2 の結果では、2層の WC-10%Ni と、1層の WC-10%Ni の計算結果における差は、同じ条件にもかかわらず生じているので、 $\pm 10\text{MPa}$ 位の計算誤差があると考えられる。WC-50%Ni では残留応力がかなり低く、1層の WC-50%Ni や鋼同士の場合と同じレベルの残留応力値となっている。最も σ_{eq} が低い値となった WC-50%Ni の場合の σ_{eq} , σ_1 を図 6.7 に示す。2層の場合の変形形状と Ni 割合との関係を図 6.8 に示すと、WC-50%Ni の場合が最も小さく、このことが σ_{eq} を極小としている大きな要因と考えられる。

6. 5. 本章の結言

本章では、超硬合金を摺動面などに溶接する場合、最も一般的に行われるすみ肉溶接を想定して、溶接残留応力解析を行った。傾斜組成材料を多層とみなす解析はよく行われるが、最も簡略化した2層の解析結果と単層との比較を行い、以下の結論が得られた。

- (1) 単層の超硬合金円板をさらに大きな鋼円板にすみ肉溶接した場合、前章と同様に、結合金属 Ni 割合が大きくなるほど残留応力の大きさは低減する。
- (2) 残留応力のもっとも大きな要因は、超硬合金と鋼の線膨張係数の差が大きいことである。
- (3) すみ肉溶接では超硬合金円板の変形が拘束されるので、複雑な応力分布となり、実験では測定ができない部分に最大主応力が存在する。
- (4) 超硬合金円板の変形が小さいほど、残留応力値も小さくなるので、変形が小さくなるような組合せがもっとも望ましい。
- (5) 2層の超硬合金円板のすみ肉溶接では、表層 WC-10%Ni と WC-50%Ni の組合せが最適である

- (6) 従来考えられていた Ni 質量割合はせいぜい 40%であるので, さらに大きな Ni 割合を考えて計画する必要がある.
- (7) 2 層間の残留応力の不連続な分布はほとんど生じなかった. 従って, さらに多層の解析を行っても 2 層の結果とそれ程大きな差はないと考えられる.

実用されるチップ形状はより複雑となるので, 3 次元解析を行うなど, さらに具体的な解析が必要となる. 本解析はその方針を示す有効な手段である.

Table 6.1 Maximum stresses vs. Ni mass contents
(single layered plate)

Material	σ_{eq}	σ_1	$\sigma_2 (\sigma_\theta)$	$\sigma_{3, \min}$
WC-10%Ni	1124	624	510	-1414
WC-20%Ni	880	544	497	-1112
WC-30%Ni	621	514	454	-797
WC-40%Ni	423	381	411	-505
WC-50%Ni	376	245	382	-270
WC-60%Ni	375	184	450	-215

Table 6.2 Maximum stresses vs. Ni mass contents
(double layered plate)

Material	σ_{eq}	σ_1	$\sigma_2 (\sigma_\theta)$	$\sigma_{3, \min}$
WC-10%Ni	1111	623	510	-1407
WC-20%Ni	910	552	509	-1131
WC-30%Ni	663	525	453	-825
WC-40%Ni	457	431	434	-496
WC-50%Ni	375	411	482	-392
WC-60%Ni	376	391	538	-399

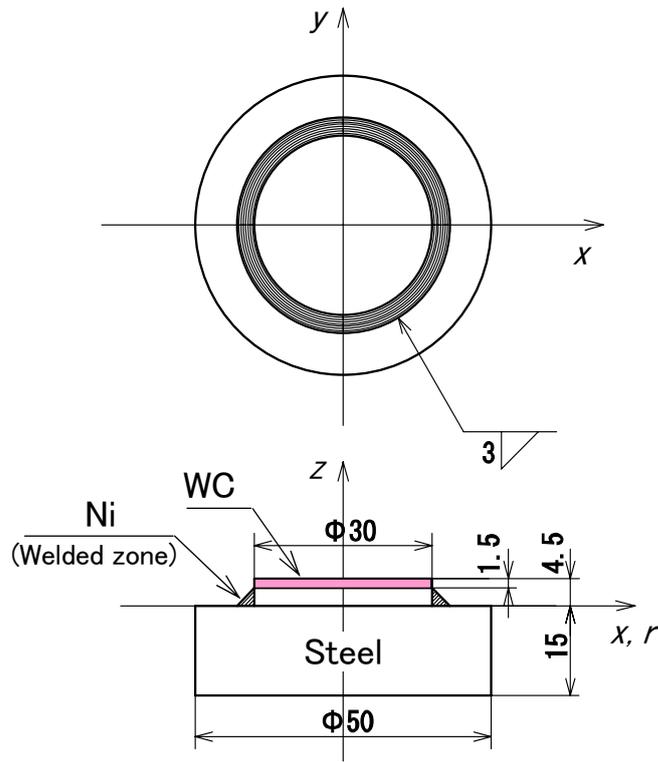


Fig.6.1 Model for the FEM simulation of the fillet welding

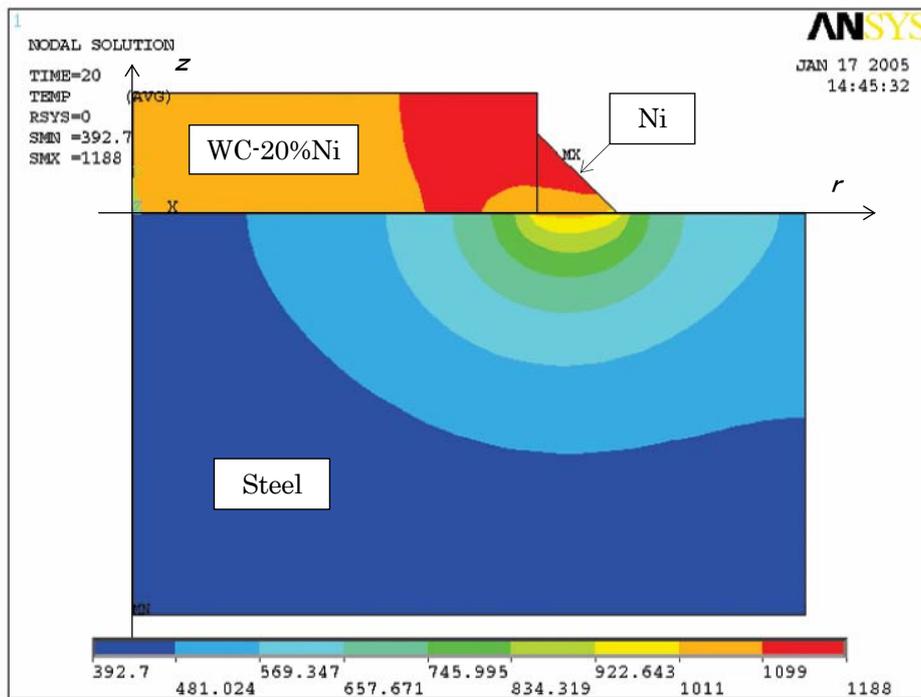
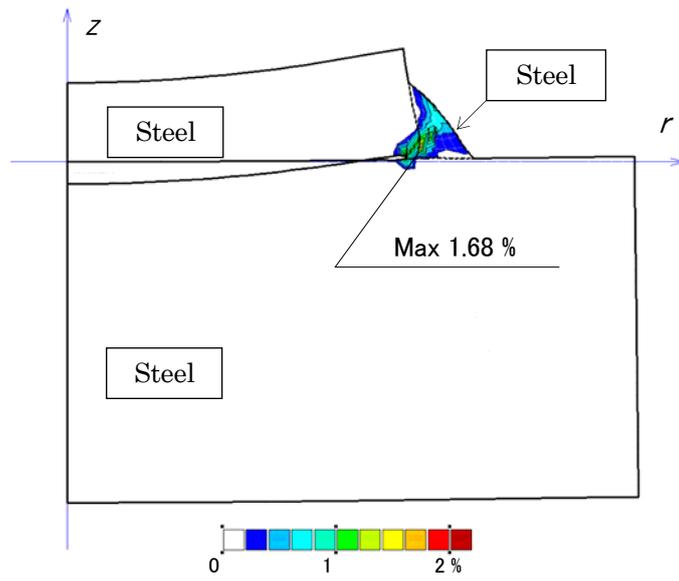
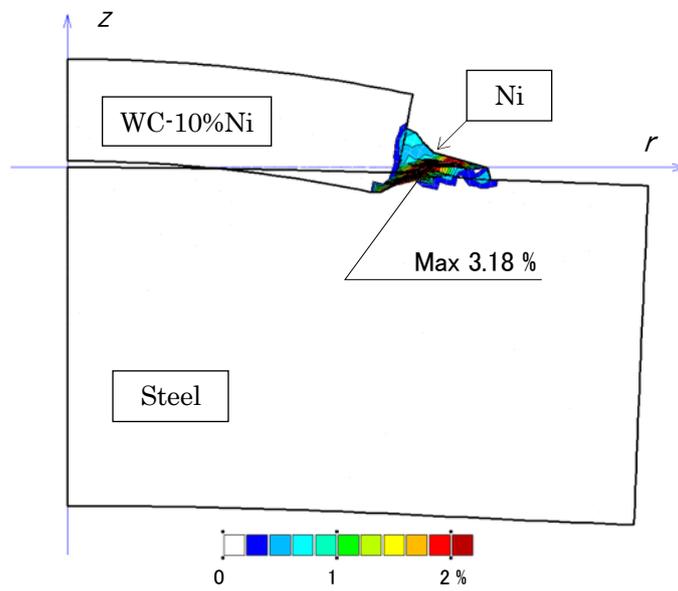


Fig.6.2 Temperature of the WC-10%Ni disk just after welding



(a) Steel



(b) WC-10%Ni

Fig. 6.3 Displacement and $(\epsilon_{pl})_{eq}$

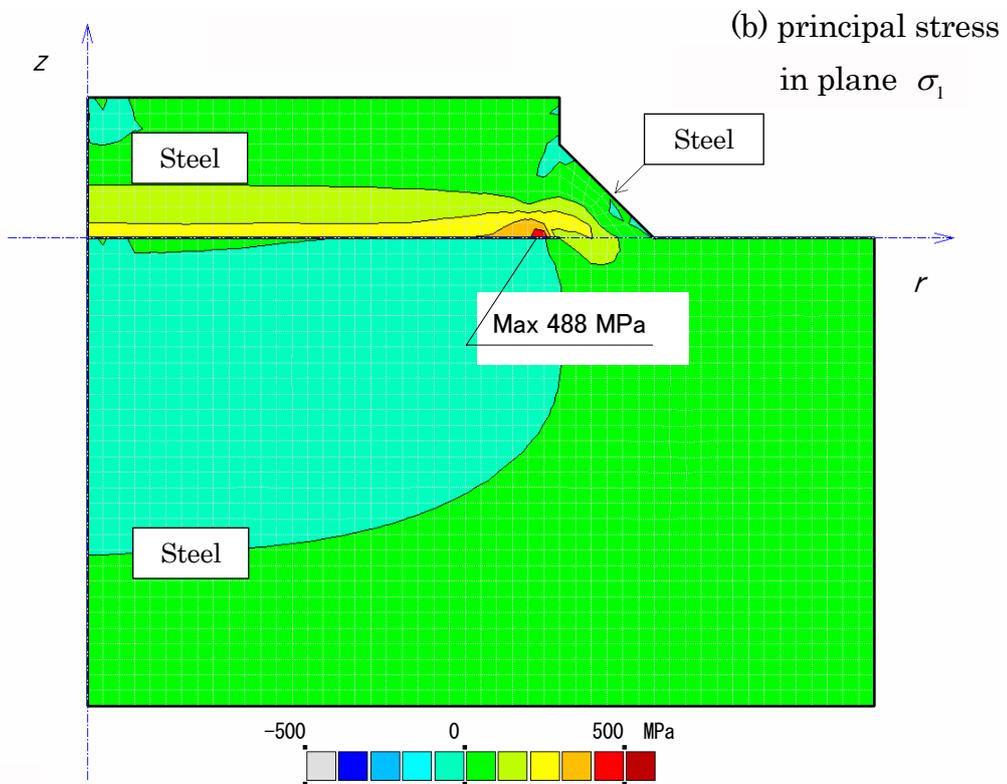
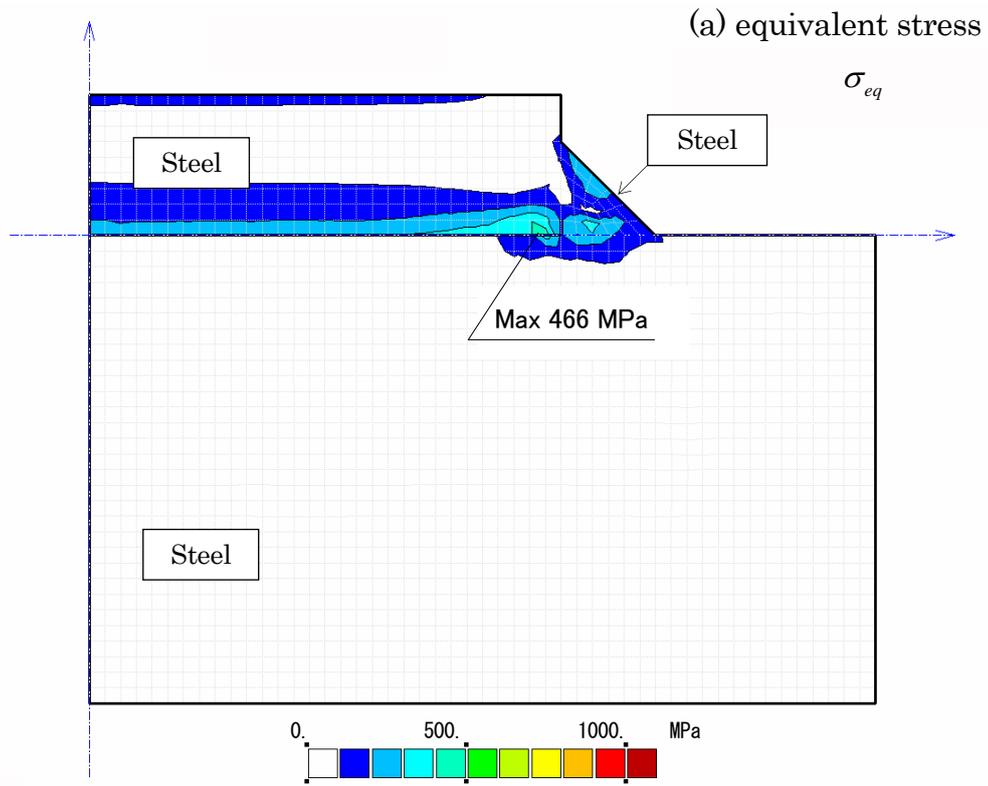


Fig.6.4(a)(b) Residual stress of steel disk by fillet welding

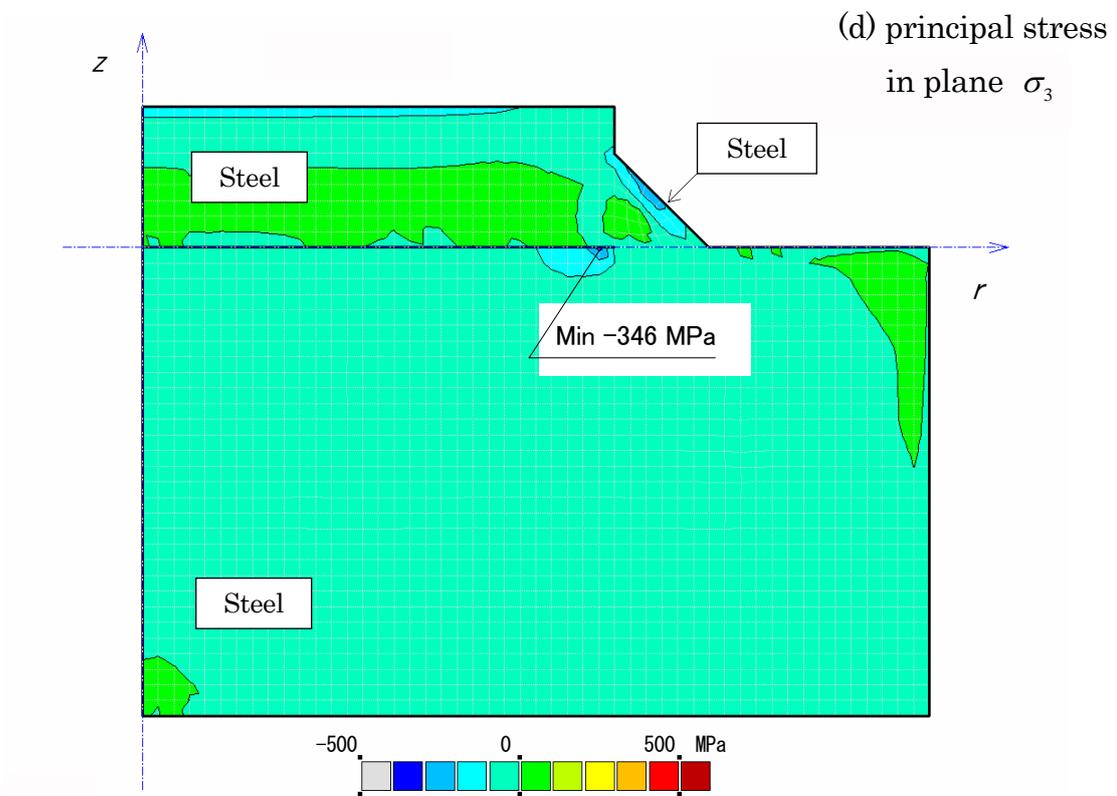
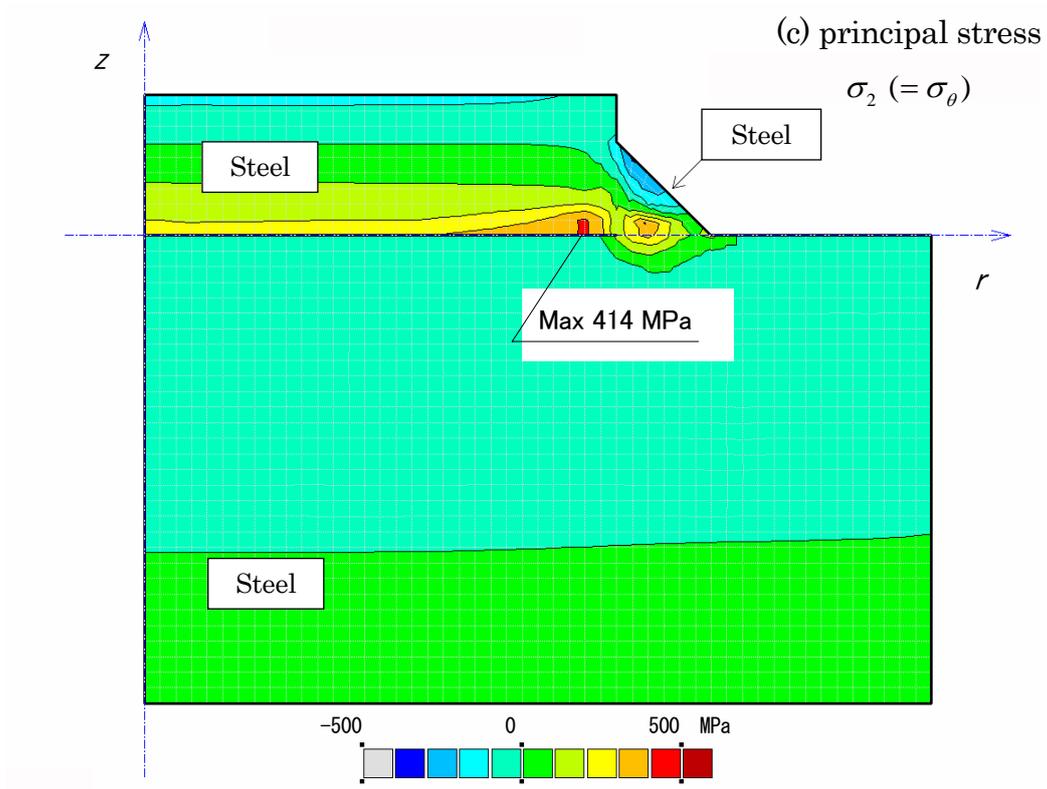


Fig.6.4(c)(d) Residual stress of steel disk by fillet welding

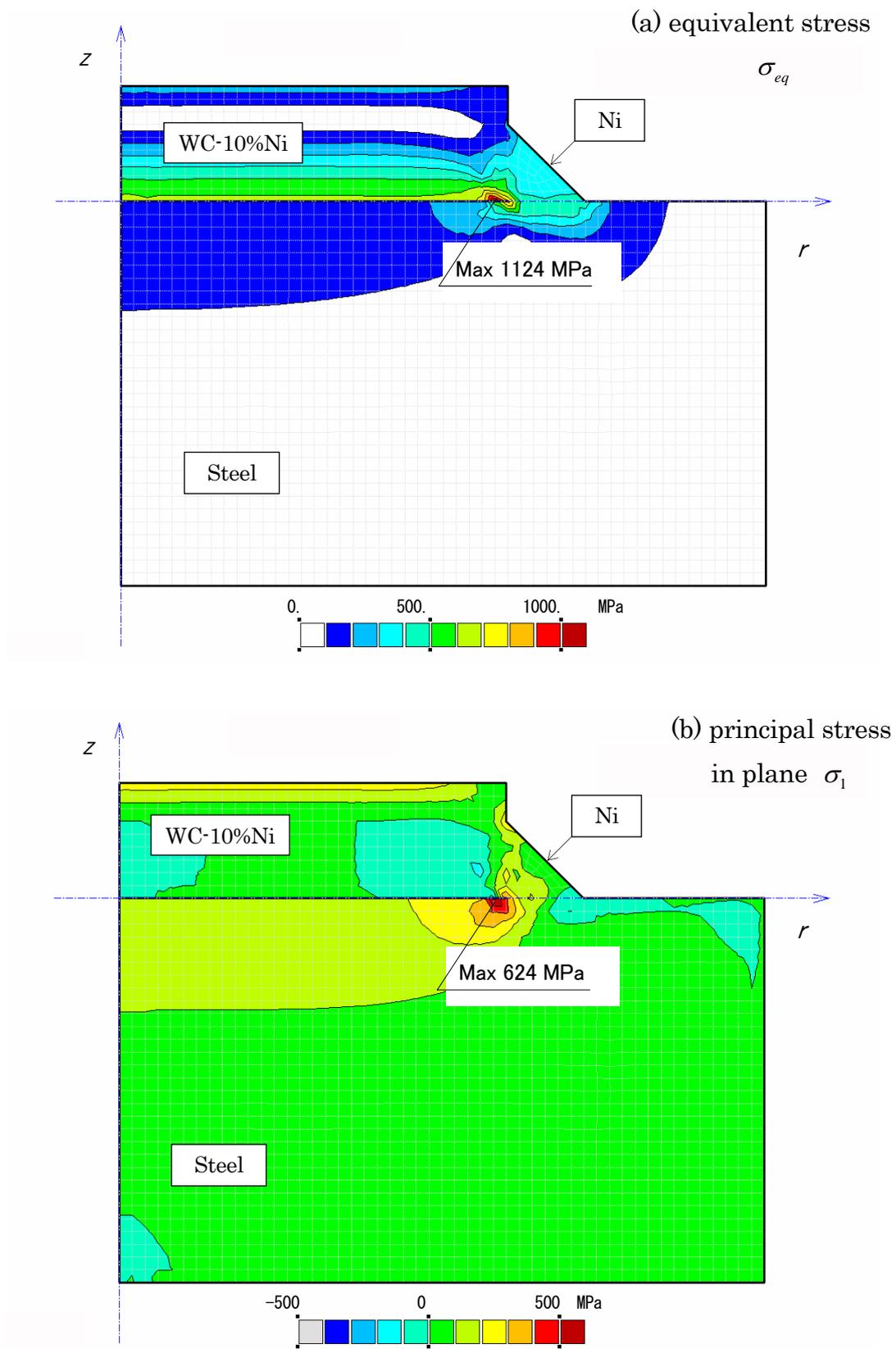


Fig.6.5(a)(b) Residual stress of WC-10%Ni disk by fillet welding

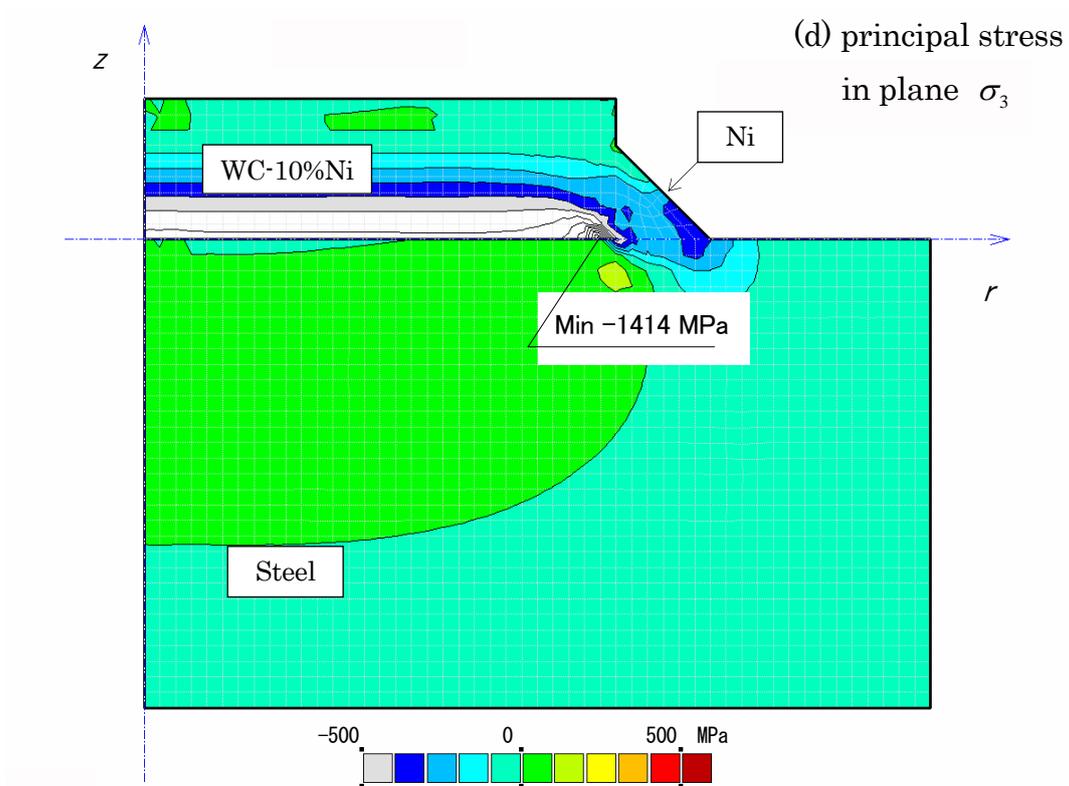
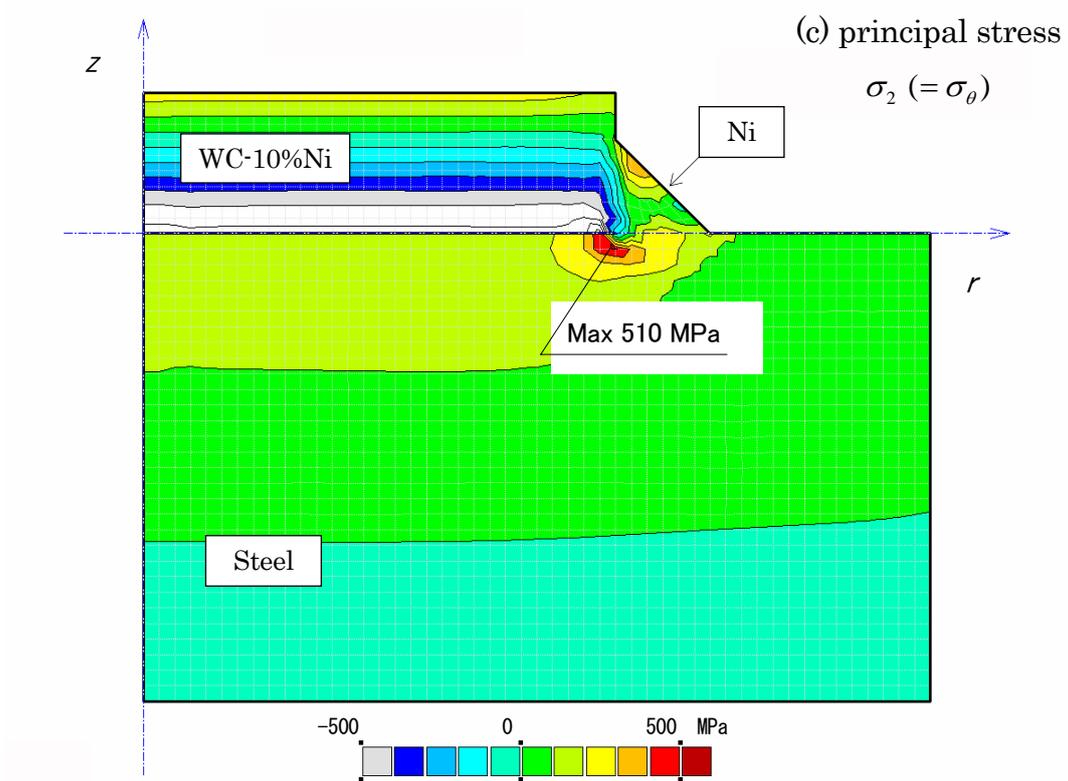


Fig.6.5(c)(d) Residual stress of WC-10%Ni disk by fillet welding

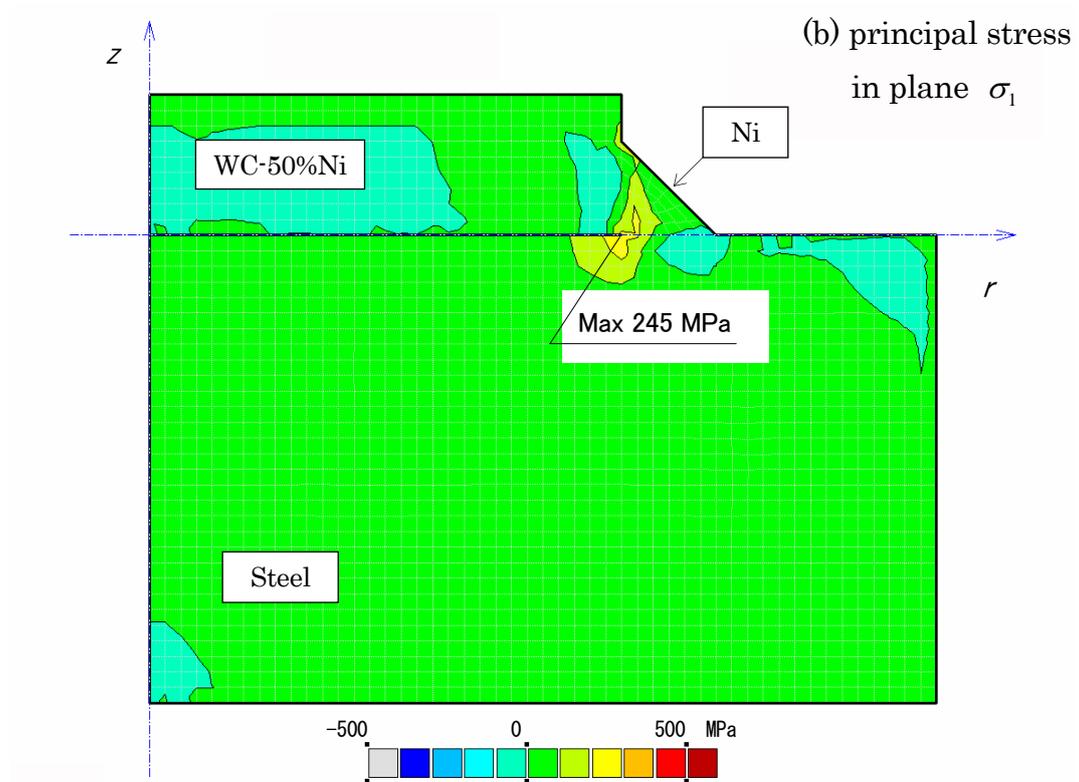
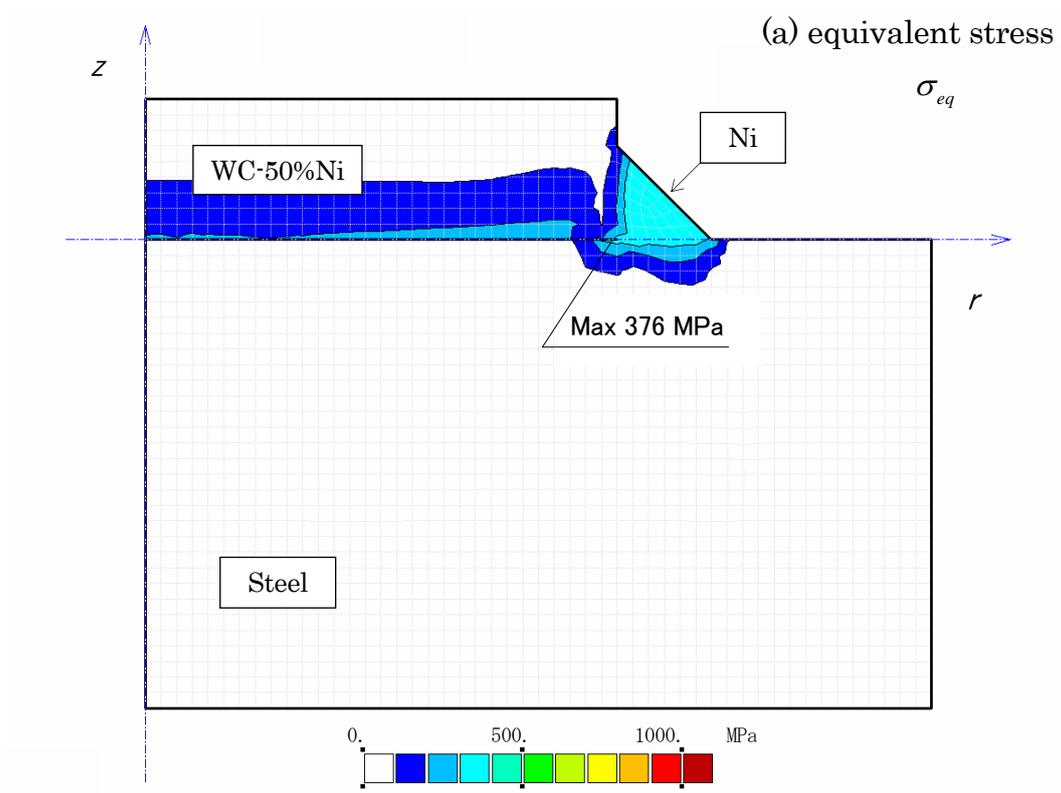


Fig.6.6 Residual stress of single-layered WC-50Ni plate

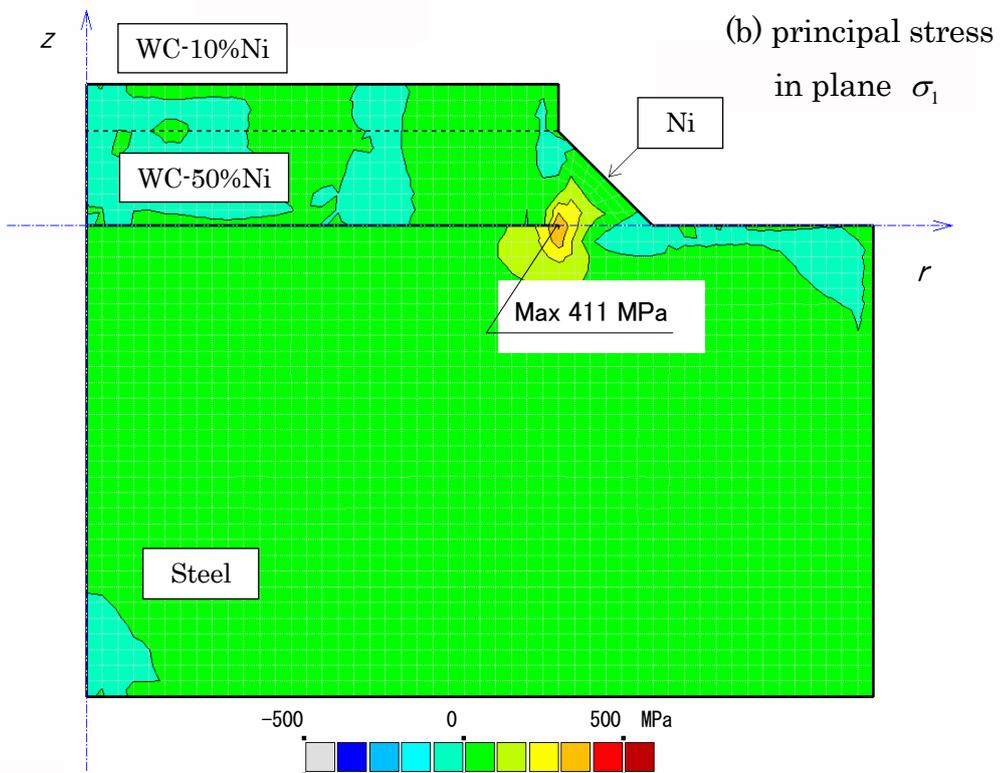
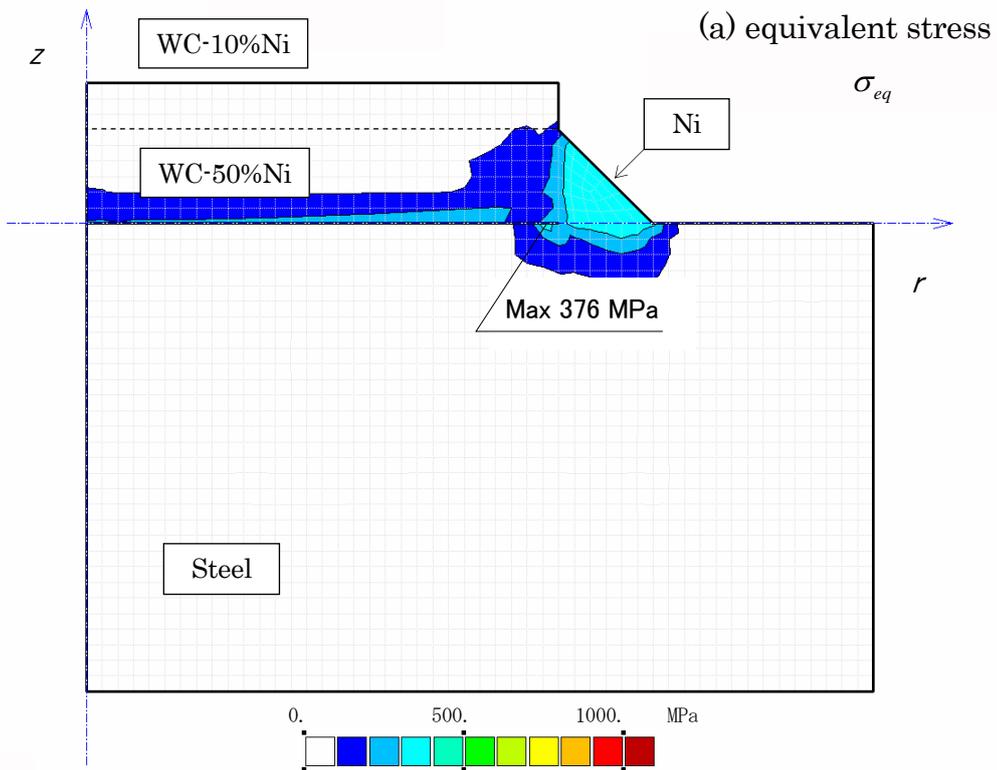


Fig.6.7 Residual stress of WC-10%Ni+WC-50Ni plate
(double-layered plate)

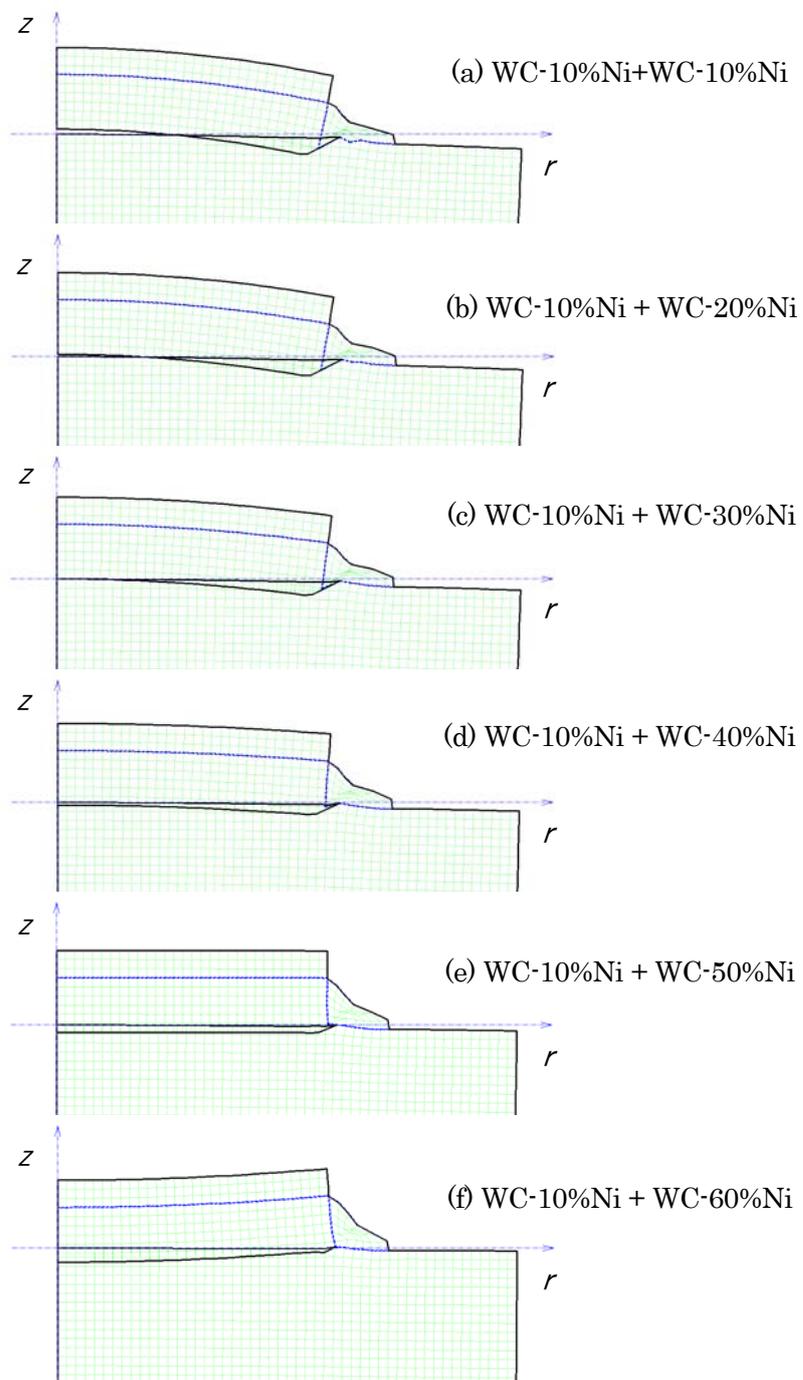


Fig.6.8 Displacements of double layered plate vs. Ni mass contents

第7章 結 論

WC-Ni 超硬合金は、経済的な理由から WC-Co 超硬合金の代替品として利用されるばかりではなく、非磁性体であること、耐食性に優れていることなどの特徴を有する。超硬合金を溶接して用いたい場合、WC-Co と同様に用途に応じて溶接割れ対策を施せば、非常に優れた超硬合金であることがわかった。超硬合金を溶接して用いたい場合、どうしても溶接割れに対する対策が必要となる。溶接割れの要因のひとつが残留応力である。残留応力測定によってその材料の溶接性が確認できる。

溶接残留応力測定には、非破壊測定である X 線を用いるのが最も適している。X 線を用いる場合、低 Ni 結合金属割合の超硬合金や、溶接熱影響部では、材料組織が不均質であるため測定が困難となる。しかし、本論文で提唱した多軸ひずみ測定を用いると、信頼性のあるひずみや応力が決定できる。超硬合金の溶接残留応力測定以外の一般の応力測定にも適用できる手段である。

また、固有ひずみ法を用いた残留応力測定は、X 線を用いた溶接残留応力測定には必要不可欠な測定法である。溶接線にのみ存在する固有ひずみの仮定が成立するような条件の元では、非常に簡便に固有ひずみが決定でき、非常に精度の高い応力分布が系全体にわたって求められる。従来は溶接される板の面内応力分布を得るためには、面内ひずみ $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ または応力 σ_x, σ_y を測定する必要があった。しかし、固有ひずみ法を用いると ε_z の測定からも求められるので、X 線をスキャンする回数を減少し、測定時間を短縮することができる。

超硬合金の溶接のように、小さな試験片では、溶接線上に一定の固有ひずみが分布しているという仮定が必ずしも成立しない。従来の方法ではこのような場合、固有ひずみの分布を正確に与えることが必要であり、適用が困難であった。本論文で述べた固有ひずみ法では、溶接線中央垂直断面と限定された範囲ではあるが、固有ひずみ法を適用できることがわかった。

溶接された超硬合金の寸法は小さく、しかもその溶接部には大きな引張応

力と大きな圧縮応力が境界をはさんで存在するので、残留応力測定は非常に困難を伴う。しかし、本論文のように測定結果と解析結果とを併用した結果、残留応力と結合金属割合との関係を明らかにすることができ、十分当初の目的を達したといえる。

超硬合金と鋼の溶接はNi 割合を増大させると十分可能となる。溶接残留応力の測定から、Ni 質量割合 40%以上では、残留応力が低減されていることがわかった。また、熱弾塑性を用いた溶接残留応力解析からもこの結果が裏付けられている。解析結果からは溶接残留応力の最大の要因は、超硬合金と鋼の線膨張係数の違いによることがわかった。しかし、残留応力の発生メカニズムは複雑であるため、設計の段階で超硬合金の形状に従って、残留応力解析をしなければならない。

表面は硬く結合金属割合の低い超硬合金を溶接して用いるには、溶接部の結合金属割合は高く、その間の割合を徐々に変化させた傾斜組成材料とする必要がある。この傾斜組成材料モデルを簡略化して2層の超硬合金円板を考えた。それらの溶接残留応力解析結果では、10%と50%の組合せが最適であることがわかった。本論文の解析で傾斜組成超硬合金の可能性を確認することができた。

本論文では超硬合金の残留応力解析に必要なデータを示している。WC-Ni 超硬合金のみならず、その他の結合金属 Co, Fe でも解析が可能である。この解析を用いると、超硬合金を溶接して用いることが十分可能となり、超硬合金の応用範囲がさらに増大する。

参 考 文 献

1. 超硬合金・材料関係, 製造法

- [1] 鈴木壽, 超硬合金と焼結硬質材料, 丸善, (1986), 570
- [2] 岡本伸吾ほか4名, WC-Co系超硬合金の材料特性に及ぼすWC粒径およびCoの質量含有率の影響, 材料, Vol. 54, No. 4, (2005), 447-452
- [3] Bhaumik S. K., Upadhyaya G. S., Vaidya M. L., Alloy design of WC-10Co hard metals with modifications in carbide and binder phase, Refractory metals & hard materials, No. 11 (1992), 9-22
- [4] Arenas F., de Arenas I. B., Ochoa J., Cho S. A., Influence of VC on the microstructure and mechanical properties of WC-Co sintered cemented carbides, Refractory metals & hard materials, No. 17 (1999), 91-97
- [5] Shing T. L., et al, The effect of ruthenium additions on the hardness, toughness and grain size of WC-Co, Refractory metals & hard materials, No. 19 (2001), 41-44
- [6] Cwajna J., Roskosz S., Effect of microstructure on properties of sintered carbides, Materials characterization, 46 (2001), 197-201
- [7] 川原正和, 鴫田正雄, 放電プラズマ焼結(SPS)技術の新しい展開, 材料と環境, Vol. 50, No. 2, (2001), 45-48
- [8] 鴫田正雄, 放電プラズマ焼結(SPS)技術の現状, 素形材, Vol. 41, No. 9, (2000), 8-13

2. 超硬合金の強度, 変形

- [9] 山本英司, 中垣博司, 丸山正男, 対摩耗用超硬新材質の強度, 住友電気テクニカルレビュー, Vol. 139, No. 9, (1991), 122-126
- [10] Lisovsky A. F., Some speculations on an increase of WC-Co cemented carbide service life under dynamic loads, Refractory metals & hard materials, No. 21 (2003), 63-67
- [11] 広瀬幸雄ほか3名, WC-Co超硬合金の疲労き裂進展特性の評価, 材料,

Vol. 46, No. 7, (1997), 726-731

- [12] 鈴木壽, 林宏爾, 谷口券朗, 松原秀彰, WC-Co 超硬合金の高温曲げ変形挙動と抗折力, 日本金属学会誌, Vol. 44, No. 11, (1980), 1210-1216
- [13] Petersson A., Agren J., Constitutive behaviour of WC-Co materials with different grain size sintered under load, Acta Materialia, No. 52 (2004), 1847-1858

3. 超硬合金の機械的性質

- [14] Laugier M. T., Comparison of toughness in WC-Co determined by a compact tensile technique with model predictions, J. materials science, No. 6 (1987), 779-780
- [15] Guilemany J. M. et al., Mechanical-property relationships of Co/WC and Co-Ni-Fe/WC hard metal alloys, Int. J. of refractory metals & hard materials, No. 12 (1993), 199-206
- [16] 篠原耕治, 植田文洋, 棚瀬照義, WC 基超硬合金の熱膨張係数および熱伝導度, 粉体および粉末冶金, Vol. 40, No. 1, (1993), 29-32

4. 超硬合金と傾斜組成材料

- [17] 中村憲和ほか4名, 金属系傾斜機能性複合材料の開発, 福岡県工業技術センター研究報告, No. 7, (1996), 98-101
- [18] 内野克哉ほか4名, 放電プラズマ焼結を用いた傾斜組成超硬合金/鋼複合材料の検討, 粉体および粉末冶金, Vol. 43, No. 4, (1996), 472-476
- [19] 内野克哉ほか3名, 放電プラズマ焼結によって作製した傾斜組成超硬合金/鋼複合材料の特性評価(第2報), 粉体および粉末冶金, Vol. 44, No. 3, (1996), 269-274

5. 超硬合金の結合金属

- [20] GREWE H. et al., Cobalt-Substitution in technischen Hartmetallen, Metal, Vol. 40, No. 2 (1986), 133-140
- [21] 関敦, 丸山正男, 湊嘉洋, 坂田利光, 耐食・非磁性超硬合金の特性, 住

友電気テクニカルレビュー, No. 132, (1988), 123-128

- [22] 宮腰康樹ほか4名, WC-37mass%Fe合金の機械的性質に及ぼす炭化水素の影響, 粉体および粉末冶金, Vol. 49, No. 3, (2002), 183-188

6. 超硬合金の接合

- [23] 蜂須賀武治, 焼結合金の接合, 金属, No. 4, (1986), 21-27
- [24] Northrop I. T., The joining of tungsten carbide hard metal to steel, J. of the South African institute of mining & metallurgy, Vol. 87, No. 5 (1987), 125-135
- [25] 河野颯臣ほか3名, 超硬合金と工具鋼の拡散接合, 溶接学会論文集, Vol. 3, No. 1, (1985), 104-109
- [26] 中島義行ほか3名, 超硬合金と炭素工具鋼の拡散接合, 日本金属学会誌, Vol. 51, No. 3, (1987), 228-233
- [27] Surzenkov G., Hoebemaegi A., Laengere Standzeiten durch Diffusionsschweissen, Werkstatt und Betrieb, No. 126 (1993), 349-351
- [28] 益本広久ほか4名, タングステンあるいはWC超硬合金とステンレス鋼の拡散接合, 溶接学会全国大会講演概要, No. 74, (2004), 144, 145
- [29] Horn H. et al., Untersuchungen zum Bindemechanismus reibgeschweisster Wolframhartmetall-Stahl-Verbindungen, Schweißen und Schneiden, No. 39 (1987), 513-516
- [30] Horn H., et al., Investigation concerning mechanism of friction-welded tungsten hard metal/steel joints, Welding & cutting, No. 10 (1987), 171-172
- [31] Costa A. P., Quintino L., Greitmann M., Laser beam welding hard metals to steel, J. of Materials Processing Technology, No. 141 (2003), 163-173
- [32] Usov S. V., Minaev I. V., High-power impulse YAG laser system for cutting, welding and perforating of super hard materials, J. of Materials Processing Technology, No. 149 (2004), 541-545

- [33] 鴨田秀一, 宮腰康樹, 高橋英徳, 鋼とのティグ溶接に及ぼす超硬合金中 Co 量の影響, 道立工業試験場報告, No. 299, (2000), 19-23
- [34] 趙秀娟ほか 6 名, WC-Co 系超硬合金と炭素鋼との TIG 溶接組織における複炭化物の形成, 日本金属学会誌, Vol. 68, No. 2, (2004), 98-101
- [35] 福本昌宏ほか 3 名, 摩擦攪拌作用による ADC12/SS400 材料間の接合, 溶接学会論文集, Vol. 22, No. 2, (2004), 309-314

7. X線残留応力測定

- [36] 田中啓介, 松井英治, 栗村隆之, 秋庭義明, 焼結アルミナの X 線の弾性係数, 材料, Vol. 36, No. 407, (1987), 792-798
- [37] 西澤英和, 田中啓介, 最近の X 線応力測定技術-X 線応力測定法の応用-, 材料, Vol. 37, No. 418, (1988), 123-129
- [38] 田中啓介, 峰典明, 鈴木賢治, ジルコニア・アルミナ複合セラミックスの弾性変形の X 線的研究, 材料, Vol. 39, No. 444, (1990), 1235-1241
- [39] 田中啓介, 峰典明, 鈴木賢治, 川瀬良一, 爆発溶射アルミナ皮膜の X 線残留応力測定, 材料, Vol. 40, No. 448, (1991), 96-101
- [40] 田中啓介, 松井元康, 田中拓, 超硬合金(WC-Co)の X 線応力測定, 材料, Vol. 42, No. 472 (1993), 96-102
- [41] 秋山哲也, 吉田大輔, 寺崎俊夫, 薄板溶接材の X 線残留応力測定, 九州工業大学研究報告(工学), No. 70, (1998), 53-59
- [42] 岩田光正, 小川潤一郎, 計測シリーズ-新しい残留応力測定技術 I -, 溶接学会誌, Vol. 64, No. 6, (1995), 432-436
- [43] 岩田光正, 小川潤一郎, 計測シリーズ-新しい残留応力測定技術 II -, 溶接学会誌, Vol. 64, No. 7, (1995), 496-500
- [44] 金多潔, 西澤英和, X 線回折法による溶接組立材の残留応力測定 (I), 日本建築学会論文報告集, No. 316, (1982), 65-71
- [45] 金多潔, 西澤英和, X 線回折法による溶接組立材の残留応力測定 (II), 日本建築学会論文報告集, No. 321, (1982), 82-87

8. 超硬合金の応力解析, FEM 解析

- [46] Almond E. A., Irani R. S., Roebuck B., A square indentation test for tool materials, *Material Science & Engineering*, No.44 (1980), 173-183
- [47] 溝口孝遠, 小林真人, 井上隆夫, 異材接合体の応力解析と強度評価, 神戸製鋼技報, Vol. 39, No. 2, 77-80
- [48] C.M. Weisbrook, A.D. Krawitz, Thermal residual stress distribution in WC-Ni composites, *Materials science & engineering*, A209, (1996), 318-328
- [49] Kotoul M., Shielding model of fracture in WC-Co, *Materials science & engineering*, A234, No. 236 (1997), 119-122
- [50] Connolly P., McHugh P., Fracture modeling of WC-Co hardmetals using crystal plasticity theory and Gurson model, *Fatigue fracture engineering matter struct*, No. 22 (1999), 77-86

9. 残留応力測定法, 固有ひずみ法ほか

- [51] 土肥修, 主応力が未知の場合の平板の残留主応力測定法, 機論集, Vo. 30, No. 215, (1964), 808-817
- [52] 土肥修, 鶴飼隆好, 曲率法による多層板残留応力測定, 機論集, Vo. 36, No. 285, (1970), 697-705
- [53] 土肥修, 鶴飼隆好, ひずみゲージ法による多層板残留応力測定, 機論集, Vo. 37, No. 295, (1971), 471-480
- [54] Ueda Y., et al., New measuring method of axisymmetric three dimensional residual stresses using inherent strains as parameters, *trans. of JWRI*, Vol. 13, No. 1 (1984), 105-114
- [55] Ueda Y., Fukuda K., New measuring method of three-dimensional residual stresses in long welded joints using inherent strains as parameters-Lz method, *J. of engineering materials and technology*, Vol. 111 (1989), 1-8
- [56] Ueda Y., Kim Y. C., Yuan M. G., A predicting method of welding residual stress using source of residual stress (Report I), *Trans. of*

JWRI, Vol. 18, No. 1 (1989), 135-141

- [57] Ma N. X., Ueda Y., Measuring method for three dimensional residual stresses with the aid of distribution functions of inherent strain (Report II), Trans. of JWRI, Vol. 23, No. 2 (1994), 239-247
- [58] Cheng W., Measurement of the axial residual stresses using the initial strain approach, J. of engineering materials and technology, Vol. 122 (2000), 135-140
- [59] 上田幸雄, 福田敬二, 福田稔, 長い溶接継手の3次元残留応力測定理論, 溶接学会誌, Vol. 49, No. 12, (1980), 845-853
- [60] 上田幸雄, 金裕哲, 梅国章, 電子ビーム溶接継手の3次元溶接残留応力分布の実測, 溶接学会論文集, Vol. 4, No. 1, (1986), 138-142
- [61] 岩井健治, 高橋英司, 厚肉円筒の新しい軸対称残留応力測定法, 溶接学会論文集, Vol. 4, No. 1, (1986), 143-147
- [62] 太田省三郎ほか3名, すみ肉溶接継手の疲労強度に及ぼす溶接部の形状および残留応力の影響, 溶接学会論文集, Vol. 4, No. 4, (1986), 723-728
- [63] 山田俊宏, 河野顕臣, 熱応力の緩和, 日本金属学会会報, Vol. 25, No. 5, (1986), 424-427
- [64] 陳俊, 寺崎俊夫, 秋山哲也, 岸武勝彦, 固有ひずみ法による残留応力推定値に及ぼす切削加工ひずみの影響, 溶接学会論文集, Vol. 14, No. 4, (1996), 762-767.

10. 材料一般 (X線構造解析など)

- [65] 早稻田嘉夫, 松原英一郎, X線構造解析, 内田老鶴圃, (1998), 294
- [66] 角戸正夫, 笹田義夫, X線解析入門第3版, 東京化学同人, (1965), 178
- [67] 加藤誠軌, X線で何がわかるか, 内田老鶴圃, (1990), 147
- [68] C. Kittel, 固体物理学入門上・下, 丸善, (1998), 386
- [69] N. W. Ashcroft, N. D. Mermin, 固体物理の基礎(上・下), 吉岡書店, (1982)
- [70] 技術資料金属材料の弾性係数, 日本機械学会, (1980)

11. 溶接・接合，ろう付一般

- [71] 黄地尚義，溶接・接合プロセスの基礎，産報出版(1996)，262
- [72] 溶接学会編，溶接技術の基礎，産報出版，(1996)，256
- [73] 溶接学会編，溶接学会用語辞典，溶接学会，(1971)，504

12. X線残留応力測定，固有ひずみ法

- [74] 日本材料学会編，X線応力測定法，養賢堂(1966)，382.
- [75] 理学電機，X線回折の手引(第4版)，(1989)
- [76] 米谷茂，残留応力の発生と対策，養賢堂，(1975)，310
- [77] International center for diffraction data, Inorganic phase, Sets 1-54

13. FEM解析

- [78] O. C. Zienkiewicz, 基礎工学におけるマトリックス有限要素法，培風館(1975)，575
- [79] 田中喜久昭，長岐滋，井上達雄，弾性力学と有限要素法，大河出版，(1995)，223
- [80] 井上達雄，田中喜久昭，長岐滋，固体力学と相変態の解析，大河出版，(1995)，175
- [81] 日本塑性加工学会編，非線形有限要素法，コロナ社(1994)，248.
- [82] Nath, B. , マトリックス有限要素法，ブレイン図書出版，(1978)，268
- [83] Martin, H. C. , Carey, G. F. , 有限要素法の基礎と応用，培風館，(1979)

14. 材料力学・塑性学

- [84] 鵜戸口英善，応用力学講座，弾性学，共立出版，(1957)，248
- [85] 石川博將，弾性と塑性の力学，養賢堂，(1999)，188
- [86] Timoshenko, Goodier, Theory of Elasticity, McGraw-Hill, (1951), 506
- [87] 中原一郎，材料力学上巻，下巻，養賢堂，(1965)，416
- [88] 竹内洋一郎，熱応力，日新出版(1971)，346

15. その他

- [89] 相原利雄, 機械工学選書伝熱工学, 裳華房(1994), 280
- [90] 竹内敬人, 化学入門コース 1, 化学の基礎, 岩波書店, (1996), 139
- [91] E. Kreyszig, 確立・統計入門, 培風館, (1970), 119
- [92] 山内二郎, 森口繁一, 一松信, 電子計算機のための数値計算法 I, II, III, 培風館, (1967)
- [93] 富田博之, FORTRAN90 プログラミング, 培風館, (1999), 165
- [94] 蔡暖姝, 多層超硬材料の溶接応力に関する研究, 北海道大学大学院工学研究科機械工学専攻修士論文, (1998)
- [95] 本間象二, 超硬材の溶接技法と溶接残留応力の数値解析, 北海道大学大学院工学研究科機械工学専攻修士論文, (2000)
- [96] 藤崎和也, WC-Ni 系超硬材の溶接性に関する研究, 北海道大学工学部機械工学科卒業論文, (2001)
- [97] 落合宏, 鵜飼隆好, 固有ひずみ法を用いた溶接残留応力の測定, 設計工学, Vol. 37, No. 7, (2002), 44-49
- [98] 落合宏, 鵜飼隆好, 高田寿明, 但野茂, WC-Ni 超硬合金の焼結残留応力, 機械学会論文集A編, Vol. 71, No. 701, (2005), 165-169
- [99] 落合宏, 鵜飼隆好, WC-Ni 超硬合金の溶接残留応力測定, 設計工学, Vol. 39, No. 6, (2004), 40-45.
- [100] 落合宏, 鵜飼隆好, 熱弾塑性を用いた WC-Ni 超硬合金の溶接残留応力解析, 設計工学, Vol. 40, No. 8, (2005), (掲載予定)

主要記号一覧

第2章

- L : 誤差関数
- w_k : 重み係数
- $\{r\}, r_i$: 係数ベクトルおよびその成分
- $\{s\}, s_i$: 応力ベクトルおよびその成分
- $\{m s\}, m s_i$: 測定応力ベクトルおよびその成分
- $\{o s\}, o s_i$: 最適応力ベクトルおよびその成分
- $\{\varepsilon^*\}, \varepsilon_i^*$: 固有ひずみ応力ベクトルおよびその成分
- $\{o \varepsilon^*\}, o \varepsilon_i^*$: 最適固有ひずみ応力ベクトルおよびその成分
- $[H_0]$: 系全体の影響係数マトリックス
- $[H], h_{ij}$: 応力-ひずみ影響係数マトリックスおよびその要素
- $[A], a_{ij}$: 係数マトリックスおよびその要素

第3,4章

- a, b : 係数
- L_1 : 誤差関数
- $f_{\psi i, \varphi i}$: 測定ひずみ
- $\varepsilon_{\psi i, \varphi i}$: 式(3.3)の値
- $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$: 主ひずみ
- $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$: 主応力
- $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$: x 軸応力, y 軸応力, せん断応力
- $\sigma_m, \sigma_{WC}, \sigma_{Ni}$: 平均応力, WC内応力, Ni内応力
- σ_{eq} : 相当応力 (von Misesの応力)
- α : 主応力 σ_1 と x 軸のなす角
- φ : 測定角
- ψ : X線入射角
- 2θ : 回折角
- $2\theta_0$: 無ひずみ基準回折角

- E : 縦弾性係数
- ν : ポアソン比
- λ, μ : ラーメの定数
- ζ : 超硬合金結合金属 Ni 体積割合

第 5, 6 章

- x, y : x 方向変位, y 方向変位
- ζ : 超硬合金結合金属 Ni 体積割合
- $\zeta_l = \sqrt{\zeta}$
- ζ_m : 結合金属 Ni 質量割合
- E : 縦弾性係数
- E_{10} : 相当縦弾性係数
- E_0, E_1 : 基相および結合相の縦弾性係数
- ν : 相当ポアソン比
- ν_{10} : ポアソン比
- ν_0, ν_1 : 基相および結合相のポアソン比
- ρ : 密度
- ρ_0, ρ_1 : 基相および結合相の密度
- α : 線膨張係数
- α_{10} : 相当線膨張係数
- α_0, α_1 : 基相および結合相の線膨張係数
- κ : 熱伝導率
- κ_{10} : 相当熱伝導率
- κ_0, κ_1 : 基相および結合相の熱伝導率
- c : 比熱
- c_0, c_1 : 基相および結合相の比熱
- $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$: 主応力
- $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$: x 軸応力, y 軸応力, せん断応力
- σ_{eq} : 相当応力
- ε_{eq} : 相当ひずみ

図表一覧

第1章

- Table 1.1 The periodic table and the melting points
Table 1.2 Material properties of cemented carbide
Fig.1.1 Crystal structure of cemented carbide (a) WC, (b)TiC

第2章

- Table 2.1 Conditions of TIG welding
Table 2.2 Conditions of X-ray measurement
Table 2.3 Measured strains $\varepsilon_x, \varepsilon_y$
Table 2.4 Measured strains ε_z
Table 2.5 Inherent strains in case 1
Table 2.6 Inherent strains in case 2
Fig.2.1 Inherent strains in welded plate
Fig.2.2 Specimen geometry and the positions of measurement
Fig.2.3 X-ray diffraction system for residual stress measurement
Fig.2.4 Residual stresses on the x axis of the specimen
Fig.2.5 Residual stress distribution in case 1
Fig.2.6 Residual stress distribution in case 2

第3章

- Table 3.1 Conditions of X-ray measurements
Table 3.2 Measured residual stresses
Table 3.3 Average residual stresses
Fig.3.1 Coordinates for the X-ray measurement
Fig.3.2 Measured data and fitting lines by previous method
Fig.3.3 Measured data and fitting lines by this method
Fig.3.4 Geometry and outward appearance of the specimen
Fig.3.5 Schematic outline of the spark plasma sintering system
Fig.3.6 X-ray diffraction system for residual stress measurement
Fig.3.7 Residual stresses vs. Ni contents (SPS)

Fig. 3.8 Residual stresses vs. Ni contents (Annealed)

第4章

Table 4.1 Conditions of tungsten inert gas (TIG) welding

Table 4.2 Conditions of X-ray measurements and material properties

Table 4.3 Residual stresses before welding

Table 4.4 Maximum tensile stresses and maximum equivalent stresses on the x axes of the specimens

Fig. 4.1 Specimen geometry

Fig. 4.2 Outward appearance of the welded specimens

Fig. 4.3 X-ray diffraction system for residual stress measurement
(a) Whole appearance, (b) X-ray tube and detector,
(c) Specimen and rotating attachment

Fig. 4.4 Coordinates for the X-ray measurements

Fig. 4.5 Positions of the measurement on the specimen

Fig. 4.6 2θ vs. $\sin^2\psi$ plots for
(a) the Fe in the steel ($x = -5, y = 0$)
(b) the Ni in the welded zone ($x = 0, y = 0$)
(c) the WC in the cemented carbide ($x = 5, y = 0$)
(d) the Ni in the cemented carbide ($x = 5, y = 0$)

Fig. 4.7 Unknowns of inherent strains in the welded zone

Fig. 4.8 Residual stresses on the x axis of the WC-20%Ni specimen welded to steel

Fig. 4.9 Residual stress distributions vs. Ni mass contents of the cemented carbide

(a) WC-10%Ni, (b) WC-20%Ni, (c) WC-30%Ni
(d) WC-40%Ni, (e) WC-50%Ni, (f) WC-60%Ni

Fig. 4.10 Maximum tensile stresses and maximum equivalent stresses on the x axes of the specimens

第5章

Table 5.1 Conditions of TIG welding

Table 5.2	Material properties used in the residual stress simulations
Table 5.3	Maximum stresses in the specimen
Table 5.4	Measured and calculated maximum tensile stresses on the x axes of the specimens
Fig. 5.1	Models for calculating the material properties (a) model 0, (b) model 1, (c) model 2
Fig. 5.2	FEM models for calculating the material properties (a) model of 2D-FEM, (b) model of 3D-FEM
Fig. 5.3	Modulus of elasticity of WC-Ni cemented carbide
Fig. 5.4	Poisson' s ratio of WC-Ni cemented carbide
Fig. 5.5	Density of WC-Ni cemented carbide
Fig. 5.6	Thermal expansion coefficient of WC-Ni cemented carbide
Fig. 5.7	Thermal conductivity of WC-Ni cemented carbide
Fig. 5.8	Specific heat of WC-Ni cemented carbide
Fig. 5.9	Specimen for 4-point bending
Fig. 5.10	Specimen geometry
Fig. 5.11	σ - ε diagram of the WC-Ni vs. Ni mass contents
Fig. 5.12	Functions $E(T)$, $\alpha(T)$
Fig. 5.13	Temperature of the WC-20%Ni and steel specimen just after the welding
Fig. 5.14	Equivalent plastic strain and displacements of nodes
Fig. 5.15	Stress distribution (a) σ_x , (b) σ_y
Fig. 5.15	Stress distribution (c) σ_1 , (d) σ_{eq}
Fig. 5.16	Residual stresses on the x axis of the specimen by FEM simulations
Fig. 5.17	Residual stresses on the x axis of the specimen by the experiments
Fig. 5.18	Residual stresses vs. Ni binder contents
Fig. 5.19	Measured and calculated maximum tensile stresses

on the x axes of the specimens

第6章

- Table 6.1 Maximum stresses vs. Ni mass contents
(single layered plate)
- Table 6.2 Maximum stresses vs. Ni mass contents
(double layered plate)
- Fig. 6.1 Model for the FEM simulation of the fillet welding
- Fig. 6.2 Temperature of the WC-10%Ni disk just after welding
- Fig. 6.3 Displacement and $(\varepsilon_{pl})_{eq}$ (a) Steel, (b) WC-10%Ni
- Fig. 6.4 Residual stress of the steel disk by fillet welding
(a) equivalent stress σ_{eq}
(b) principal stress in plane σ_1
(c) principal stress $\sigma_2 (= \sigma_\theta)$
(d) principal stress in plane σ_3
- Fig. 6.5 Residual stress of the WC-10%Ni disk by fillet welding
(a) equivalent stress σ_{eq}
(b) principal stress in plane σ_1
(c) principal stress $\sigma_2 (= \sigma_\theta)$
(d) principal stress in plane σ_3
- Fig. 6.6 Residual stress of single-layered WC-50Ni plate
(a) equivalent stress σ_{eq}
(b) principal stress in plane σ_1
- Fig. 6.7 Residual stress of double-layered WC-10%Ni+WC-50Ni plate
(a) equivalent stress σ_{eq}
(b) principal stress in plane σ_1
- Fig. 6.8 Displacements of double layered plate vs. Ni mass contents
(a) WC-10%Ni + WC-10%Ni, (b) WC-20%Ni + WC-10%Ni,
(c) WC-30%Ni + WC-10%Ni, (d) WC-40%Ni + WC-10%Ni,
(e) WC-50%Ni + WC-10%Ni, (f) WC-60%Ni + WC-10%Ni

謝 辞

私は、昭和40年(1965)4月に土肥修教授(現在は名誉教授)の機械設計学講座に移行して以来、機械要素その中でも特に残留応力測定を主テーマに研究を続けてきました。講座はその後、鵜飼隆好教授に引き継がれ、現在は但野茂教授のもとバイオメカニカルデザイン研究室と組織も大きく変化しましたが、研究室のご理解、ご協力のおかげで40余年間研究を続けることができ、ようやく論文としてまとめ上げることができました。

ひとえに研究室の皆様のご協力があった成果だと感謝しています。特に、技官の高田寿明さんには実験の計画段階から製作までの協力、また溶接の実施、測定の協力と枚挙できないほどの項目でお世話になりました。また、現在、大学院博士課程の藤崎和弘さんはじめ当研究室の大学院生の皆様には、SPSを用いて試験片製作など、ずいぶんご協力いただきました。ここに厚くお礼を申し上げます。

最後になりましたが、北海道立工業試験場の鴨田秀一研究参事には、超硬合金の研究をスタートするときからの指導、助言をはじめ、試験片製作のためSPS装置を使用させていただき、ここに感謝申し上げます。

平成17年9月22日