放電加工面の改質に関する研究（第一報）*

— 混入粉末の加工面性状に与える影響 —

佐野正明** 日原政彦*** 八代浩二** 毛利尚武****

Study of Surface Modification by Electrical Discharge Machining (1st Report)
— Effect of Mixing Powder into Working Fluid for Working Surface —

Masaaki SANO, Masahiko HIHARA, Koji YATSUSHIRO and Naotake MOHRI

Abstract

The purpose of this report is to produce a high-quality surface by electrical discharge machining. In this experiment, a hard layer could be generated on die steels by mixing Ti powder into the working fluid. The layers modified by electrical discharge machining were evaluated based on surface roughness, X-ray residual stress measurement and SEM observation. The results of the experiment are as follows: 1) A hardened layer was formed by mixing Ti powder into the working fluid. The layer contained TiC and Fe, in which, the Ti content is higher at the part closer to the machined surface. The hardness increases with Ti powder concentration. 2) The residual stress on the working surface by mixing Ti powder into the working fluid was tensile stress. The residual stress was released by heat treatment at temperatures over 600°C. At that time, while the hardness of the surface decreased, the toughness increased.

1 はじめに

放電加工は液中でのアーク現象による溶融・除去機構を用いることから、放電面の変質層や加工欠陥の存在は、加工面品質に大きな影響を与える¹⁾²⁾。

近年、放電加工面の改善手法としてガス窒化処理やショットピーニング処理等の表面処理が適用され、その有効性が報告されている³⁾⁴⁾。

また、金型製作の工程短縮化・省力化を目的として、放電加工表面の改質が冷間パンチ面の耐摩耗性や耐食性の向上等、様々な方面から検討が行われている⁵⁾⁶⁾⁷⁾⁸⁾。金型製作において、これらの改質手法が広い分野に適用可能となれば、加工面性状の向上や磨き工程の短縮にとって有効な手段となる。しかし、これらの改質層の諸性質や特性変化（硬さ、残留応力、形成層の組成等）についてはいまだ明確にされていない。

そこで、本研究では形彫り放電加工面の高品質な表面創成を目的として、加工液（EDF-K）中に Ti 粉末を混入し、熱間金型用合金工具鋼（SKD61）表面

に放電加工を行い、得られた加工面の硬さ、表面あらさ、残留応力および成分分析等から改質層の諸特性について解明を試みた。

また、改質層中に存在したひずみの除去を目的として加工面に熱処理を施し、その改質層の変化についても併せて行った。

2 実験方法

実験は三菱電機株製、放電加工機（V25F/G35）を用い、Fig.1 に示す簡易加工槽中（試作装置）に濃度の異なる金属粉末を混入して行った。本実験に供した素材は SKD61 であり、試験片は、焼入れ（1030°C - 80min, ガス冷却）・焼戻し（600°C - 240min, 空冷, 600°C - 240min, 空冷, 2 段階）処理を行い、表面硬さを 48HRC(490HV)とした。電極は直径 10mm の銅を

Fig.1 Schematic view of testing apparatus

* 電気加工学会全国大会(1999)(2000)にて発表

** 山梨県工業技術センター(甲府市大津町 2094)

*** ウグヱコム(株) (東京都港区西新橋 3-16-11)

**** 東京大学 (東京都文京区本郷 7-3-1)

用いた。また、加工液中に混入したTi粉末は粒径 ϕ 10~20 μ mであり、加工液中に一定量(20,40,60g/l)を混入した。粉末混入放電加工は加工液濃度を均一にするため、スターラーにより液を循環・攪拌させた。加工条件は電極極性をマイナス(正極性)とし、 i_c : 2A、 t_c : 4 μ s、 t_b : 4 μ s(実測値)の条件により15分間行った。

加工面の評価は表面あらさ測定、硬さ測定、および粉末成分の試験片への移行に伴う表面組成変化について、X線回折装置により分析を行った。

また、粉末混入放電加工面の安定化を目的として、真空熱処理により、各温度(200, 300, 400, 500, 600, 700 $^{\circ}$ C)、で焼戻し(1時間保持、炉冷)処理を行った。

3 結果および考察

3.1 粉末混入濃度の影響

Fig.2 は粉末混入濃度が異なる各試験片の放電加工面におけるX線回折図形を示す。なお、今回の分析条件におけるX線透過深さは、15 μ m程度である。加工液中にTi粉末を混入しない場合は、 α Fe、 γ Feおよび Fe_3C の各回折線が認められるが、Ti粉末を20g/lおよび60g/l混入した場合にはTiCの回折線が新たに明確に認められた。

次に各試験片における硬さ測定の結果を**Fig.3**に示す。薄膜の硬さ測定では測定荷重の違いにより、母材硬さの影響を受けることから、予備実験により、測定荷重は母材の影響が比較的小さい10gf(0.098N)

Fig.2 X-ray diffraction profiles for EDMed surface with Ti powder concentration

とした。通常放電加工の(加工液中に粉末を混入しない)場合の表面硬さは約800HVを示した。この試験片素材の硬さは490HV程度であることから、この硬さの増加(上昇)は最表面に浸炭された Fe_3C が形成(放電加工変質層)したためと考えられる。**(Fig.2)**

加工液中にTi粉末を20g/l混入した場合、通常の灯油中での加工に比べ、硬さは1600HV程度に増加した。更に、Ti粉末混入量を40g/lおよび60g/lに増加すると、各々の硬さは前者が2300HV、後者が2600HV程度に高くなる傾向を示した。よって、通常の放電加工面に形成した Fe_3C 以外の形成層が存在するものと考えられ、**Fig.2**に示したTiCの形成が大きく寄与している。Ti粉末の混入により、表面硬さが上昇するメカニズムとして、加工液中のTi粉末が放電時の熱エネルギーにより溶解して、加工物内に移行し、加工液の燃焼生成炭素とTiが結合してTiCが形成したものと考えられる。なお、純チタンが素材に単独で移行したと考えると純チタンの硬さは260HV程度であることから、加工液中に混入したTi成分が加工液中のC成分と結合し、表面近傍にチタン炭化物を形成したものと考えられる。加工液中にTi粉末を混入した試験片における放電加工後の硬さの増加は、この結果および後藤ら⁹⁾の報告からもTiCの形成に起因していることが明らかとなった。なお、PVD等により得られたTiC膜の硬さは、3200HV程度¹⁰⁾であるが、放電加工により得られた加工面は2600HVとやや低下している。これは放電加工変質層内には、**Fig.2**に示した回折図形からも明らかのように Fe_3C 、TiC、 α Feおよび γ Feの混在層が存在しているために低下しているものと思われる。

Fig.3 Effect of Ti powder concentration on Vickers hardness of EDMed surface

Fig.4 は各試験片表面におけるエネルギー分散型 X 線分析装置(EDS)による C, Ti, Fe 元素の定量分析結果を示す。なお、今回の分析条件での X 線透過深さは $2\mu\text{m}$ 程度であるため、得られた成分の分析領域は変質層の範囲内である。

加工液中に Ti 粉末を混入しない場合、分析結果は C 成分と Fe 成分が主成分として検出された。Fe 成分は鋼中に含まれる成分によるものであるが、C 成分は鋼中には微量(SKD61 は 0.4wt%)であることから、加工液から供給されたものと考えられ、表面には Fe_3C が形成されていると推察される。

また加工液中に Ti 粉末を混入した場合、表面には新たに Ti 成分が検出されたが、これは加工液中に混入した Ti 成分が放電加工時の熱エネルギーにより、試験片側に移行したものと考えられる。C 成分は Ti 粉末を混入しない場合と比べると同程度(60at%)であるが、Fe 成分は Ti 成分の増加分だけ減少した。Fe と Ti の構成比は $\text{Fe}:\text{Ti}=18:20$ 程度であった。この割合は Ti 粉末混入量の増加とともに(40g/l, 60g/l)24:14 および 26:12 と変化し、Ti 粉末の混入量の増加に伴い試験片表面に移行する Ti 成分量は増加し、Fe 成分量が逆に減少する傾向が認められた。

すなわち Ti 粉末を混入することにより、表層部に存在した Fe_3C の一部が放電による溶融時にチタン炭化物 TiC に置換したものと考えられる。よって Ti 粉末混入量の増加に伴い TiC 濃度が増加する結果と考える。

Fig.5 は各試験片の断面における最表面から深さ方向への EDS による C, Ti, Fe 元素の線分析結果を示す。(a)に見られるように加工液中に Ti 粉末を混入しない場合は、Fe 成分が多く検出されている。また、灯油の熱分解によって形成した炭素の存在が明確に

Fig.4 Element analysis by EDS of EDMed surface with Ti powder

認められた。しかし Ti 成分の存在は認められなかった。一方、Ti 粉末を 20g/l 混入した結果(b)では、最表面近傍に Ti 成分が Fe 成分よりも強く検出された。Fe 成分は逆に減少した。

Ti 粉末混入量の増加に伴い(c), (d)は、Fe 成分に対する Ti 成分の割合が著しく増加し、Ti 成分の存在する深さ領域も増加することが観察される。よって、本結果から放電加工過程において形成される加工変質層内の成分濃度は表面から、傾斜合金的な組成分布をとることが明らかで毛呂¹⁾らの結果ともよく一致した。

3.2 組織観察

Fig.6 は SEM による断面観察結果を示す。(a)は通常の加工油中での放電加工、(b)は同一加工条件において Ti 粉末を混入した試験片について各々示す。(a)の通常の場合では、最表面にはマイクロクラックを伴う変質層が比較的均一な厚さで $8\mu\text{m}$ 程度形成されている。

一方、(b)に示す Ti 粉末混入の場合は、最表面に不均一な厚さ($8\sim 12\mu\text{m}$ 程度)の変質層が形成され、同時にピンホールやクラックの形成も認められた。なお、(b)の試験片表面には TiC の化合物層が形成されており、加工の進行に伴い TiC 形成量は増大した。また形成層内にはピンホールやクラックの存在割合が多くなる傾向を示した。ピンホールの発生は加工油の気化・爆発時に生成した CO_2 と H_2 と考えられる

Fig.5 Line analysis by EDS of EDMed surface with Ti powder

ガスが変質層内に固溶した後、溶解度の減少からガス成分となり表面近傍に認められたと考えられる。

クラックの発生は表面に形成されるTiCの熱膨張率($7.61 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}^{12}$)とFeの熱膨張率($11.0 \sim 16.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}^{12}$)の差が放電の熱衝撃により、温度勾配の高い最表面で、クラックの発生を誘発させること、ならびにガス成分の凝固時の内圧増加によるものと両者の影響が考えられる。

Fig.7はTi粉末混入により放電加工した加工面における研磨深さとX線回折による成分分析の結果を示す。また、 $\alpha\text{Fe}(211)$ 回折格子面による残留応力分布をFig.8に示す。表面からの深さ方向の分析および残留応力測定は電解研磨(過塩素酸:酢酸=1:4)により、表面を除去しながらその都度行った。

X線回折による分析において、最表面には加工油中の熱分解による燃焼生成物であるカーボンと溶融Tiの反応によるTiCの回折線、 αFe およびわずかな γFe の回折線が観察された。研磨量の増加に伴い、TiCの回折線は減少し、逆に αFe 回折線は増加する傾向を示した。研磨深さが $7.6\mu\text{m}$ を越えた領域でTiCの回折線および γFe の回折線は消失した。更に研磨量が増大すると、 αFe 回折線は増加する傾向を示した。この $7.6\mu\text{m}$ 程度までのTiCの存在深さはSEMによる変質層厚さおよびEDSによるTiの存在領域とほぼ一致する。この時の残留応力は最表面で 350MPa 程度の引張応力が存在し、内部ではやや不連続な形態を示すが、これは膜厚の不均一さが残留応力に影響を与えているものと思われる。

また、最表面での引張応力の低下はマイクロクラックの発生に伴う応力開放であると考えられる。最表面から $8\mu\text{m}$ 程度までは引張応力として推移するが、研磨量の増加に伴い、引張応力は減少し、約 $10\mu\text{m}$ からはゼロになった。この時の研磨深さは前述のX線回折図形の観察におけるTiCの回折線の存在深さと一致しており、不均一な変質層内では、TiC

(a) No powder

(b) Ti powder

Fig.6 SEM observation for cross-section of EDMed surface

およびFeが混在し、内部においては傾斜合金組成となっている事が明らかとなった。

これに対し通常の加工油中では変質層内部の不連続な部分は認められず、やや高い値で推移した。

3.3 加工時間の影響

加工時間による影響を調べるため、加工液中に混入する粉末割合を 40g/l 一定とし、前述の加工条件で実験を行った。Fig.9に各試験片表面のEDSによる分析結果を示す。加工開始5分後においてTi成分は $20\text{at}\%$ 以上検出された。加工時間の増加に伴い表面のTi成分は多くなるが、加工時間30分以降は一定の値に収れんする傾向となった。

Fig.10は前述と同様な各試験片における表面あらさの変化を示す。加工開始5分後の表面あらさは $1.0\mu\text{mRa}$ 程度であったのに対し加工時間の増加に伴い、表面あらさは増加し、加工開始20分後で $2.0\mu\text{mRa}$ と初期に比べ、約2倍増加した。

更に、加工時間30分では表面あらさは $2.7\mu\text{mRa}$ 程度となったが、それ以上の加工時間においては、

Fig.7 Changes in X-ray diffraction profile

Fig.8 Distribution of residual stress on cross section

表面あらさの変化はほとんど認められなかった。

Fig.11 は **Fig.10** における表面 SEM 観察結果を示す。加工開始 5 分後の加工面は滑らかな表面状態を呈していたが、クラックおよびピンホールの存在が認められた。20 分後の加工面では、クラックおよびピンホールの存在が多く、放電時の再付着物が認められ著しい段差が存在した。

更に、50 分後の加工面では 5 分後の加工面に比べ、ピンホールが放電痕の周辺に集中し、その領域にはクラックの進展が著しいことが観察された。

Fig.12 は加工液中に Ti 粉末を混入した時の単発放電加工後の放電痕の走査型電子顕微鏡(SEM)およびレーザ顕微鏡の観察結果を示す。(a)および(c)は通常加工油中での加工、(b)および(d)は Ti 粉末混入での結果を各々示す。両者を比較すると、通常放電加工の場合、単発放電痕は直径 35 μm 程度の均一な円錐状を呈しており、周囲に盛り上がり部を形成し、その最大高さは 2 μm 程度であった。

これに対し Ti 粉末を混入した場合、直径 35~45

Fig.9 Influence of working time on Ti element

Fig.10 Influence of working time on surface roughness

μm 程度の楕円形状を呈し、中心部にわずかなくぼみが見られるが、全体的に 5 μm 程度隆起した放電痕が観察された。Ti 粉末を介した放電の発生は、母材の溶融除去現象よりも加工液中の Ti 粉末の溶融付着現象が強く影響し、盛り上がり部が形成される。この作用が表面あらさを増加させる要因になるものと考えられる。

3.4 熱処理の効果

粉末混入放電加工面には前述したように TiC の形成により非常に硬さの高い硬化層が形成されているが、放電加工時の急熱-急冷に伴うひずみの内在した不安定な層であるため、改質層の安定な表面の形成を目的として熱処理を行った。

Fig.13 は Ti 粉末混入加工後、各温度で熱処理を行った試験片表面における X 線回折図形の変化を示す。処理前の回折線プロファイルは 500°C までの温度域ではほとんど変化がないが、それ以上の温度域では γFe 回折線は消滅し、相対的に αFe 回折線が増大する傾向を示した。この温度域は素材の焼戻し温度と一致し、放電加工時に残留したオーステナイト組織が焼戻し効果により、マルテンサイト組織に変態したことを示している。よって焼戻し温度域での熱処理は不安定な組織を安定なマルテンサイト組織に変

(a) 5min (b) 20min (c) 50min
Fig.11 SEM observation of EDMed surface

(a) No powder (b) Ti powder
(c) No powder (d) Ti powder
Fig.12 Observation of Single pulse EDMed surface

Fig.13 Changes of X-ray diffraction profile

化させる有効な手法と考えられる。また、TiC の回折線は各温度域においてほとんど変化が見られなかった。しかし、700°Cではやや減少する傾向を示した。このように700°C以下の温度域において α -Feは組織変態が起こるのに対し、TiCは変化が見られず初期の状態を保っていた。

この熱処理における α -Fe(211)格子面における残留応力の変化をFig.14に示す。熱処理温度200°Cでは、熱処理前とほとんど変化が見られないが、300°C

Fig.14 Effect of heat treatment

以上の温度域では減少する傾向となった。更に600°C以上では残留応力はゼロになり、加工時に発生したひずみは開放される傾向を示した。これらの結果から、各皮膜（変質層）は熱処理により安定な状態になることを示唆している。

Fig.15はTi粉末混入加工後、熱処理を行った試験片のSEMによる断面観察結果を示す。熱処理温度300°Cおよび500°Cでは、最表面には変質層が存在し、その直下ではマルテンサイト組織が観察され、熱処理前の試験片とほとんど変化が認められなかった。更に、熱処理温度700°Cでは表面直下の組織は微細組織に変化した。なお変質層内では明確な変化が認められなかった。

Fig.16は各熱処理後の試験片のビッカース硬さ測定の結果を示す。熱処理前には1800HV程度の硬さであり、200°Cの熱処理温度では硬さの変化はほとんど認められなかった。しかし、熱処理温度が300°Cおよび400°Cではやや減少し、500°C以上の温度からは徐々に低下し、700°Cの熱処理温度で1300HV程度の値となった。これは変質層中の成分の軟化とSKD61金型鋼の焼戻し効果による硬さの減少と考

Fig.15 SEM image cross section of EDMed surface by heat treatment

えられる。この傾向は残留応力と良い一致を示した。

なお、**Fig.17** は各熱処理後のピッカース硬さ測定により得られた圧痕の状態を示す。この圧痕を観察すると処理前および熱処理温度 200℃では圧痕の周辺にクラックが多数存在しており、熱処理温度 400℃においては、クラックの存在が少なくなった。しかし、熱処理温度 600℃では明確なクラックが認められなかった。このことから熱処理を施すと生地 の靱性と組織の変化に伴い、硬さは低下するが、圧痕周辺のクラックの発生が抑止され、耐衝撃強度の向上が得られた。

また、改質層内部の TiC の状態を熱処理温度の違いによる格子定数の変化についてX線学的に調べた結果を **Fig.18** に示し、X線による測定条件を **Table1** に示す。また、応力の算出式を(1)に示す。残留応力は処理前で 1000MPa 程度の引張応力が認められた。

Fig. 16 Influence of heat treatment on Vickers hardness

Fig. 17 Observation of marks for tested Vickers hardness

この試験片に熱処理を行うと残留応力は低下し、処理温度の増加とともに更に低下し、600℃以上の温度域では残留応力はゼロに収められた。

熱処理による残留応力の変化は α -Fe(211)格子面で測定した **Fig.14** の結果とほぼ一致する傾向が認められたが、応力レベルは約2倍の高い値を示した。なお、TiC 層は最表面に存在することから、 α -Fe が TiC の形成により高い拘束力が作用するために残留応力値は高い値となったものと考えられる。

Fig.19 に残留応力の結果から求めた TiC の格子定数を示す。計算方法は残留応力を求めた $2\theta - \sin^2\psi$ 線図の傾きから算出した $\psi=0$ 時に得られる 2θ 値から求めた。なお、この値はX線のひずみゼロ ($\epsilon_\psi=0$) となる $\sin^2\psi = \nu/(1+\nu)$ を採用し¹³⁾、残留応力の影響を除いた値である。

Fig. 18 Changes in residual stress

Table1 Conditions of X-ray residual stress measurement of TiC film

Target - Filter	Cr - V
Diffraction plane	TiC(222)
Diffraction angle (2θ)	132.823
ψ angle	0,8,18,22,27,30,33,36,39,42,45,51
Tube voltage	40 kV
Filament Current	30 mA
Scanning step	0.1 deg
Scanning speed	1.0 deg/min
X-ray Young's module (E_x)	433 GPa
X-ray Poisson's ratio (ν_x)	0.202
Stress constant (M)	-1373 MPa/deg

$$\langle 2\theta - \sin^2\psi \rangle$$

$$\sigma_x = -\cot\theta_0 \cdot E_x / \{2(1 + \nu_x)\} \cdot \pi / 180 \cdot M$$

$$= -K \cdot M \quad \text{----- (1)}$$

Fig.19 Changes of TiC lattice parameter

処理前には 4.3003 Å と JCPDS による値の 4.3274 に比べ 0.8% 程度、収縮した値であった。しかし、熱処理の実施により TiC の安定な結晶になり、TiC の JCPDS の格子定数と比較して、4.3140 と 0.3% 収縮程度の大きさとなり、著しく回復した。

このように熱処理を施すことにより硬さの低下は認められるが、安定な TiC が形成されることが明らかとなり靱性が向上する結果、皮膜のクラックやカケ等の発生を抑制させることが期待される。

4. おわりに

形彫り放電加工面における高品質な表面創成を目的とし、加工液（灯油）中に Ti 粉末を混入し、放電加工を行い、得られた加工面について、表面あらさ、表面の成分分析および硬さ等について各種の検討を行った。得られた結果を要約すると、以下のことが明らかとなった。

- 1) Ti 粉末混入放電加工後の最表面には通常の灯油中では得られなかった極めて硬い層の形成が確認された。また、粉末混入量の増加に伴いその硬さは上昇した。
- 2) 表面の EDS による分析結果において Ti 粉末を混入すると、通常の灯油中での加工に認められる、Fe, C の他に Ti 成分の存在が明らかとなり、その存在割合は粉末混入量の増加に伴い増加した。また、X線回折による分析から最表面には TiC 化合物の形成が確認された。
- 3) X線回折による分析において、放電改質層内は TiC および Fe が混在し、内部領域では TiC 回折線は徐々に減少し、研磨深さ 8 μm 程度で消失した。また、改質層中には引張残留応力が存在し、内

部 (6 μm) においてこの応力は最大値となり、やがて 0 へと収められた。この領域は TiC の存在領域と一致した。

- 4) Ti 粉末混入加工後に真空中で熱処理を行った場合、600 °C 以上の温度域で残留応力は開放する傾向を示した。また、この高温域において硬さは低下するが、耐衝撃強度は向上する傾向を示した。
- 5) TiC(222)格子面による残留応力の測定結果は α Fe(211)格子面による測定結果に対し、応力値は 2 倍程度大きい値となったが、両者の分布形態はほぼ同様な傾向が得られた。

参考文献

- 1) 日原政彦, 藤原和徳, 向山芳世, 緒方勲; ダイカスト金型鋼に関する研究 (第一報), 精密工学会誌, Vol.55, No.10 (1989) 1869.
- 2) 向山芳世, 日原政彦, 熱疲労に基因する放電加工面品質の研究 (第一報), 電気加工学会誌, Vol.24, No.48 (1992) 24.
- 3) 佐野正明, 日原政彦, 八代浩二, 萩原茂, 萩原義人, 向山芳世; 金型鋼における仕上げ放電加工面の熱疲労特性 (第四報), 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 (1995) 971.
- 4) 佐野正明, 日原政彦, 八代浩二, 向山芳世; 複合処理した放電加工面の熱疲労挙動, 電気加工学会誌, Vol.31, No.68 (1997) 1.
- 5) 毛利尚武, 齋藤長男, 成宮久喜, 河津秀俊, 尾崎好雄, 小林和彦, 恒川好樹; 粉末混入加工液による放電仕上げ加工, 電気加工学会誌, Vol.25, No.49 (1990) 47.
- 6) 毛利尚武, 齋藤長男, 恒川好樹, 粉山英教, 宮川昭彦; 放電加工による表面処理-複合構造体電極法-, 精密工学会誌, Vol.59, No.4 (1993) 625.
- 7) 薩田寿隆, 平井清人, 吉澤宗晴; 粉末混入放電加工法を用いた表面改質, 電気加工学会誌, Vol.34, No.75 (2000) 22.
- 8) 岡田晃, 宇野義幸, 平尾和久, 高木俊; チタン電極を用いた炭素粉末混入放電による表面改質, 電気加工学会誌, Vol.33, No.73 (1999) 31.
- 9) 後藤昭弘, 真柄卓司, 今井祥人, 三宅英孝, 齋藤長男, 毛利尚武; 放電加工による硬質被膜の形成, 電気加工学会誌, Vol.31, No.68 (1997) 31.
- 10) セラミックコーティング, 竹田博光編 (1988) 67.
- 11) 毛呂俊夫, 後藤昭弘, 毛利尚武, 齋藤長男, 三宅英孝, 秋吉雅夫; TiH₂ 圧粉体電極による放電表面改質の研究, 電気加工学会誌, Vol.35, No.78 (2001) 26.
- 12) 熱物性ハンドブック, 日本熱物性学会編 (1990) 22~25.
- 13) X線応力測定法, 日本材料学会編 (1981) 60~61.

(2001 年 9 月 21 日受付)