

切欠きをもつ溶射皮膜材の界面および表面の応力分布

著者	塚本 光夫, 橋本 徳一郎
雑誌名	熊本大学教育学部紀要 自然科学
巻	44
ページ	159-166
発行年	1995-12-15
その他の言語のタイトル	Stress Distributions on Interface and Surface of Sprayed Coating Material with Notch
URL	http://hdl.handle.net/2298/2307

切欠きをもつ溶射皮膜材の界面および表面の応力分布

塚本光夫・橋本徳一郎*

Stress Distributions on Interface and Surface of Sprayed Coating Material with Notch

Mitsuo TSUKAMOTO and Tokuichiro HASHIMOTO*

(Received September 4, 1995)

A three-point bending test with a notch provides an evaluation of the strength of material sprayed on base metal by plasma arc; its specimen has a notch perpendicular to the surface of the sprayed coat. This test, however, gives an interesting result: interface cracks, in thick coating, initiate from the notch tip of the specimen without surface cracks, while surface cracks, in a thin coating, initiate before interface crack initiation in the notch of the specimen. This investigation has conducted to clarify this difference in fracture appearances, and to obtain stress distributions in the interface between sprayed material and base-metal in the notched material subjected to three-point loading. A two-dimensional elastic finite element method(FEM) has been carried out for the model of sprayed material with thin and thick coating: 0.2mm and 0.8mm coating thickness. High stress concentration is applied near the notch tip in the vicinity of the interface of base metal and sprayed coat. The stress perpendicular to the line of the interface in thick coating is smaller than in thin coating. The stress parallel to the line of the surface at the surface of the sprayed coat is almost zero near the surface of the notch, gradually increases, and is constant at a certain distance far from the notch. In thick coating, the stress perpendicular to the interface near the notch is greater than the stress of parallel to the surface at the surface. In thin coating, on the other hand, the stress parallel to the surface of the sprayed coat is greater than the stress perpendicular to the interface. Therefore, it is clear that the differences in the amounts of the stresses near the notch and at the surface cause the difference in the location of crack initiation as above mentioned.

Key words : sprayed coating, stress distribution, FEM, notch

1. 緒 言

表面処理・加工法は材料の表面に何らかの表面処理・加工を施す手法であり, 従来から用いられてきた材料・製品のもつ欠点を補いつつ, その特性を十分に発揮あるいはそれ以上の良好な特性を持たせることが可能である. その中の一つとして溶射がある. 溶射は熔融状態あるいはそれに近い状態に加熱した液体粒子または粉末を素材面に高速度で衝突させて, 皮膜を形成する手法¹⁾²⁾で, 幅広い産業の分野で使用されている. その利点としては, 膜の形成が非常に速く, 母材の形状・寸法に左右されないことなどがある. しかし, 皮膜が不均質なため皮膜強度が比較的小さいこと, 界面端部に高応力が発生し, そこからき裂発生および剥離といった界面破壊を起こしやすいことなどの欠点がある³⁾.

界面剥離強度を知るために皮膜強度や皮膜の靱性あるいは接合強さを知る試験⁴⁾が規定されている

* 医療法人芳和会くわみず病院

が、母材と皮膜の界面部に着目し、皮膜の剥がれにくさを表す破壊指標を求めるものはない。そこで、皮膜破壊の指標を求めるために考えられたものが切欠き付き三点曲げ試験法である。切欠き付き三点曲げ試験は溶射皮膜に垂直に切欠きを入れ、その切欠き底部に発生する高応力を用いて界面剥離を発生させ、破壊時の荷重や破壊靱性値を求めるものである。しかし、従来の結果⁵⁾によれば、皮膜厚さが十分厚い場合には切欠きから界面剥離が進行していくのに対して、皮膜が薄い場合には切欠きからある程度離れた位置の溶射皮膜表面に多数のき裂が優先して発生する現象が観察されている。

一般に溶射皮膜のような脆性材料の破壊発生は応力支配であることが多く、破壊には溶射皮膜材の界面近傍での応力分布が大きな要因となると考えられる。特に切欠きを有する材では破壊力学的観点から切欠き効果や端部効果などがあり、皮膜厚さによって界面や表面の応力分布が異なることが十分予想される。このような切欠き端部や界面および表面の応力分布におよぼす溶射皮膜の厚さの影響が明らかになれば、上述したような破壊形態の違いも解明できることが推察される。

そこで、本研究では溶射皮膜材に切欠きを設けた三点曲げ試験片において二次元弾性有限要素法を用いて解析を実施し、

1) 溶射皮膜界面及び表面近傍の応力分布

2) 三点曲げ試験において表面き裂が界面き裂に先行して発生する原因

を明らかにすることを目的とする。

2. 解 析

本研究では鋼材 SS41 を母材とし、80Ni-20Cr を溶射皮膜としたものを対象とし、Fig. 1 に示すように溶射皮膜中央にあらかじめ切欠きを設けた試験片に三点曲げ負荷を与える。切欠きは母材と溶射皮膜の界面まで入れる。そのため切欠き深さは溶射皮膜厚さと同じになる。溶射皮膜厚さは従来の試験結果⁵⁾を参考にして、0.2mm と 0.8mm とし、その他の寸法は同一とする。溶射皮膜と母材とは界面で剛に接合されているものとし、界面で変位連続の条件を満足するものとする。

なお、本研究での座標系は Fig.1 に示すように切欠き底部中央を原点とし、界面に沿った方向を x 方向とし、それと直角な方向を y 方向と定義する。境界条件は Fig.1 に示すように三点曲げスパンの位置に y 方向拘束とし、負荷条件として Fig. 1 に示す位置に単位板幅 (Fig. 1 の紙面方向の厚み) あたり 1N の荷重負荷を与える。また、母材と溶射皮膜のヤング率 E とポアソン比 ν は Table 1 に示すように設定する。

Table 1 Mechanical properties

	Young's modulus, E (MPa)	Poisson's ratio, ν
Base metal	2.0×10^5	0.3
Sprayed coat	1.2×10^5	0.3

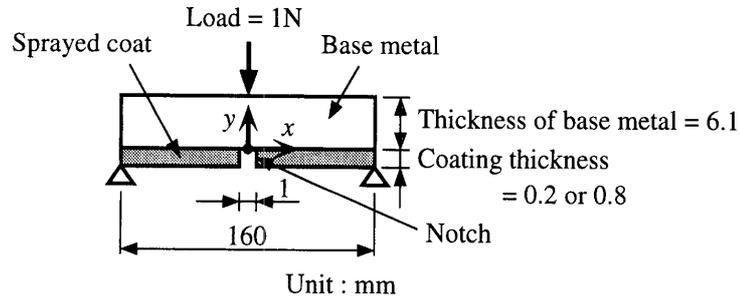


Fig. 1 Analysis model

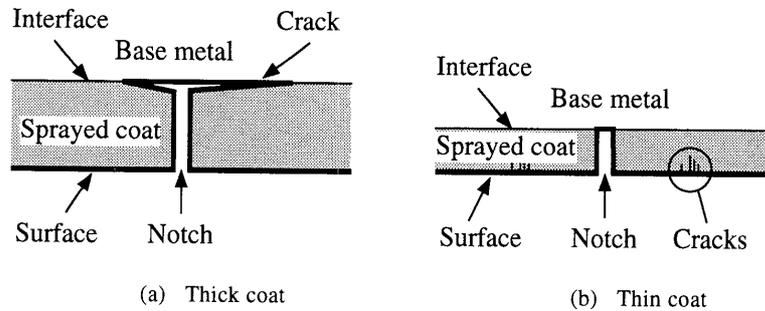


Fig. 2 Comparison of crack initiation in thick and thin coat

解析対象は Fig.1 に示すように切欠き中央を通る軸に対して左右対称であることから、有限要素モデルは 1/2 モデルを取り上げる。実際には板幅方向（紙面方向）にも応力分布が生じるが、板幅が十分大きければ板幅中央付近では応力分布はほぼ一定になるものと考え、平面ひずみ状態で二次元有限要素解析を実施する。4点ガウス積分点をもつ4節点四角形要素を用い、要素分割における最小要素の一辺の長さを 0.05mm とし、その最小要素を切欠き付近ならびに溶射皮膜の切欠き中央から 2.7mm 離れた位置まで用いた。なお、用いた有限要素解析ソフトウェアは MARC である。

界面近傍の応力として母材と皮膜の界面に接する要素の応力を取り上げ、表面近傍の応力として溶射皮膜表面に接する要素の応力を取り上げる。なお、4点あるガウス積分点の応力を単純平均したものを各要素の重心位置での応力とみなす。

3. 界面近傍の応力分布

従来⁹⁾の結果によれば、切欠きをもつ溶射材に三点曲げ負荷を与えると、皮膜厚さによって破壊形態が異なる。それを模式的に示したものが Fig. 2 である。Fig. 2 (a) に示すように皮膜厚さが厚い場合には切欠き底の界面部からき裂が進展し、皮膜剥離が進行する。このとき皮膜表面にはき裂は認められない。一方、Fig. 2 (b) に示すように、皮膜厚さが薄い場合には切欠き底からのき裂発生よりも

先に切欠きから離れた位置の皮膜表面にき裂が発生する。その後、その表面き裂が板厚方向 (Fig. 2 (b) では上方向) に進展して、界面まで到達する。以後、到達した表面き裂先端を起点として界面に沿ってき裂が発生・伝播して界面剥離が生じる。

このような破壊形態の相違には切欠き付近の応力分布が大きく関与していることが予想される。そこで、ここでは界面近傍での応力分布を求め、応力分布に及ぼす皮膜厚さの影響について明らかにする。なお、界面上で生じている応力は有限要素法では厳密に求めることができないために、ここでは界面近傍母材側と界面近傍皮膜側の応力分布を示すこととする。

まず、皮膜厚さが薄い場合について注目する。Fig. 3 は皮膜厚さ 0.2mm の溶射皮膜材の界面近傍母材側の x 方向応力 σ_x 、 y 方向応力 σ_y ならびに相当応力 σ_{eq} の界面方向に沿った分布を示したものである。各応力ともに $x = 0.5\text{mm}$ すなわち切欠き端部で応力集中が生じて大きな引張応力が発生し、応力集中が生じている。しかし、その端部から 0.3mm 程度離れると応力はほぼ一定の値を示す。 x 方向応力は y 方向応力に比べて大きな値を示しているが、これは三点曲げによる曲げ応力が付加されたもので、切欠きから十分離れた位置での x 方向応力は単純支持梁の曲げ応力に等しくなる。また、 y 方向応力が x 方向応力に比べて小さいため、相当応力は x 方向応力とほぼ等しくなる。一方、 y 方向応力に注目すると、切欠き効果によって切欠き端部に応力集中が生じるが、 y 方向応力は平衡条件を満足しなければならないため、引張応力と平衡を保つために切欠き端部より少し離れた位置に圧縮応力が生じ、切欠き端部付近を除いてほぼ零になる。

Fig. 4 は皮膜厚さ 0.2mm の溶射皮膜材の界面近傍溶射皮膜側の界面に沿った応力分布を示したものである。皮膜の場合 $0 \leq x \leq 0.5\text{mm}$ には切欠きがあるため値は存在しない。皮膜の場合には切欠きの自由表面の効果のため x 方向応力の切欠き端部付近での応力集中はなく、むしろ自由表面近傍では小さくなる。切欠きより十分離れた位置で一定となる x 方向応力は、梁理論より母材と皮膜のヤング率の差の分だけ小さくなる。しかし、切欠き端部付近の y 方向応力に Fig. 3 とほぼ同程度の応力集中が認められる。

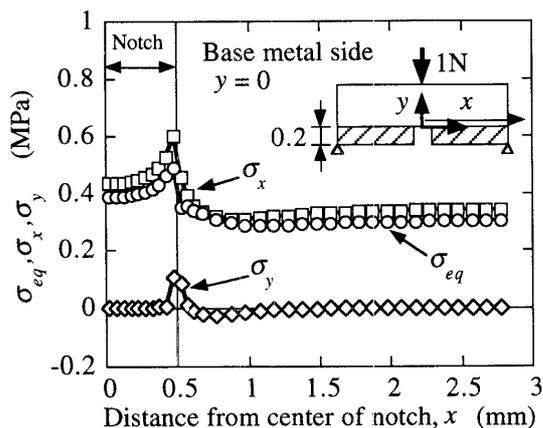


Fig. 3 Stress distribution along interface line on base metal side for 0.2mm coating thickness

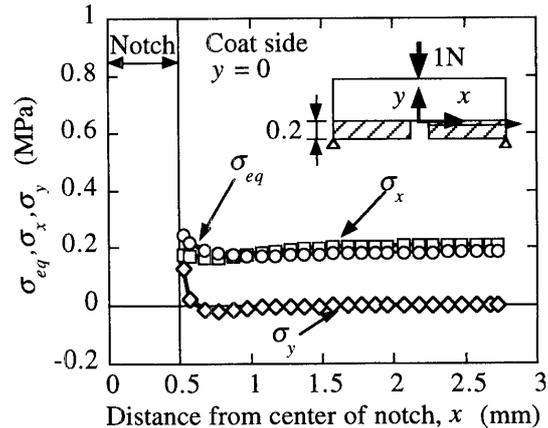


Fig. 4 Stress distribution along interface line on coat side for 0.2mm coating thickness

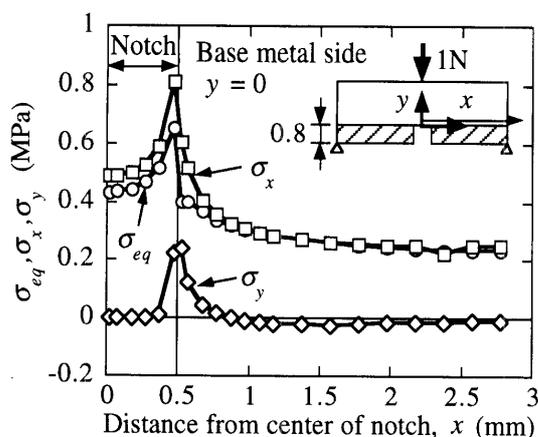


Fig. 5 Stress distribution along interface line on base metal side for 0.8mm coating thickness

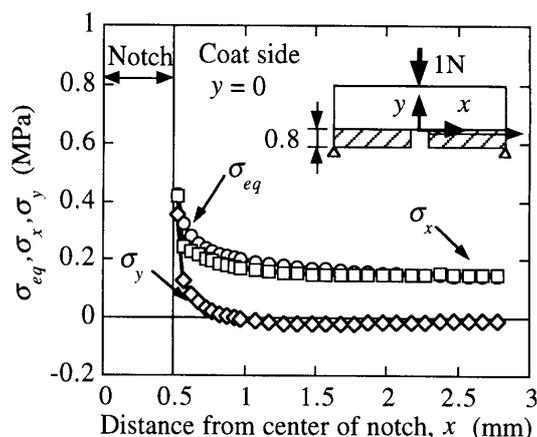


Fig. 6 Stress distribution along interface line on coat side for 0.8mm coating thickness

次に、皮膜厚さが厚い場合の応力分布に着目する。Fig. 5は皮膜厚さ0.8mmのもの界面近傍母材側の応力分布を示したものである。応力分布の傾向はFig. 3の皮膜厚さ0.2mmの場合の応力分布とほぼ同じであるが、切欠き端部付近での応力集中は0.2mm皮膜厚さの場合よりも大きくなっている。それにとまって切欠き端部より離れた位置での応力は徐々に曲げ応力の値まで緩やかに減少する。したがって、皮膜厚さが厚くなると切欠き端部での高い応力集中により応力集中の影響を受ける範囲が広がる。

Fig. 6は皮膜厚さ0.8mmのもの界面近傍皮膜側の応力分布を示したものである。Fig. 4に示す0.2mm皮膜厚さのもの皮膜側応力分布と異なり、切欠き端部での x 方向応力に応力集中が見られる。また、切欠き端部での y 方向応力の応力集中は極めて大きくなっている。

一般に切欠き先端や接合部は応力特異点となり、弾性状態ではその点で応力は無限大に発散する。このような特異応力場では K 値等の破壊靱性指標を用いるのが常であるが、本研究の要素分割では破壊靱性値を精度良く評価し得るに十分でなかった。しかし、皮膜厚さによらず切欠き端部からある一定の距離離れた位置で破壊が生じるのならば、その位置での応力の大きさの大小が破壊靱性値の大小と対応する。皮膜剥離に寄与する応力は切欠き端部付近の y 方向応力で、Fig. 4とFig. 6から皮膜厚さの増加にともない大きく増大することがわかる。

4. 皮膜表面の応力分布

Fig. 2の模式図で示したように皮膜厚さが薄い場合には皮膜表面でき裂が発生する。そこで、ここでは皮膜表面の応力分布に着目し、皮膜厚さによってどのように表面応力が分布するかについて述べることにする。なお、表面上の応力は有限要素法で厳密に求めることができないため、ここでは皮膜表面近傍の応力分布を示すことにする。

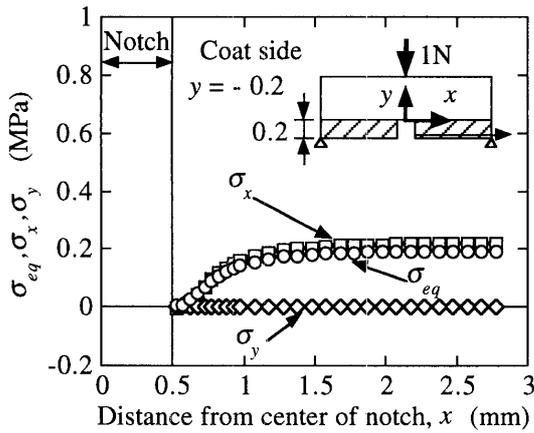


Fig. 7 Stress distribution along surface line for 0.2mm coating thickness

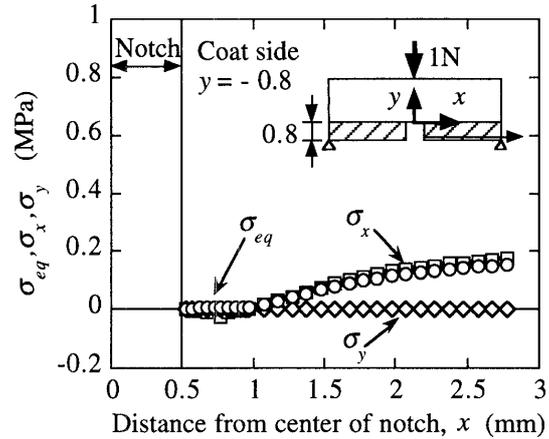


Fig. 8 Stress distribution along surface line for 0.8mm coating thickness

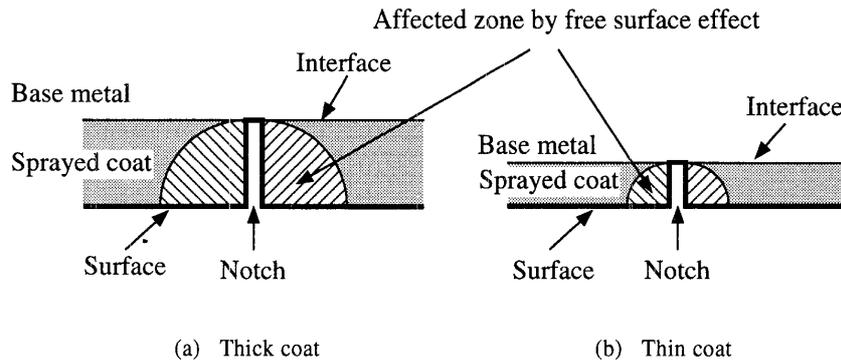


Fig. 9 Comparison of affected zone by free surface effect in thin coat and thick coat

皮膜厚さ 0.2mm の材の溶射皮膜表面近傍の応力分布を示したものが Fig.7 である. x 方向応力は $x=0.5\text{mm}$ すなわち切欠き端部ではほぼ零であるが, $x=1.5\text{mm}$ 付近まで徐々に増加し, ほぼ一定の値となる. この一定値は三点曲げによって生じる曲げ応力に相当する. 一方, y 方向応力は自由表面で零になることから全面にわたって零になる. したがって, 皮膜表面応力は端部付近では自由表面の効果で零になるものの, 切欠き端部から 1.5mm 程度離れば一様な曲げ応力を示し, 切欠き効果はほとんどなくなる.

一方, 皮膜厚さ 0.8mm の材の溶射皮膜表面近傍の応力分布を示したものが Fig. 8 である. x 方向応力および相当応力は切欠き端部から 1mm 離れた位置まではほぼ零のまま, そこから徐々に増加し, $x=2.5\text{mm}$ 付近でほぼ一定となる. 一定となる x 方向応力の値は皮膜厚さ 0.2mm の場合よりも小さくなる. y 方向応力は皮膜厚さ 0.2mm の場合と同様に自由表面の効果により零になる.

Fig. 7 と Fig. 8 を比較すると, 皮膜厚さが厚くなると表面の x 方向応力がほぼ零となる範囲は大きくなる. これは Fig. 9 に示す模式図のように切欠き長さが大きくなると自由表面効果の影響を受ける範囲が広くなることによるものと考えられる.

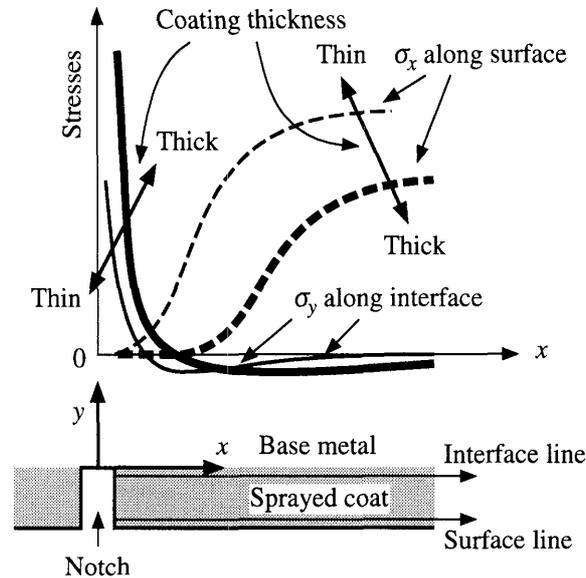


Fig. 10 Effect of coating thickness on stress distributions along interface and surface

5. 界面剥離と表面き裂の発生要因に関する考察

前述の内容から界面ならびに表面での応力分布に及ぼす皮膜厚さの影響をまとめると Fig. 10 に示す模式図のようになる。界面剥離に寄与する界面に垂直な応力、すなわち溶射皮膜界面近傍の y 方向応力は切欠き端部付近で応力集中を生じる。皮膜厚さが厚くなるとこの応力集中は増大する。したがって、皮膜厚さが大きいほど切欠き端部からの皮膜剥離が生じやすくなる。

一方、皮膜表面でき裂発生に寄与する表面の表面に平行な方向の応力、すなわち表面での x 方向応力は切欠き端部付近ではほぼ零になるが、切欠きから離れると次第に大きくなり、ほぼ一定の値を示す。皮膜厚さが厚くなると、切欠き端部付近で応力が零となる領域は拡大し、一定となる値も小さくなる。皮膜厚さが厚い場合には切欠き端部近傍の y 方向応力は表面での x 方向応力よりも大きくなるため表面のき裂発生よりも優先して切欠き底部からの剥離が生じる。一方、皮膜厚さが薄い場合には、表面の y 方向応力が界面の x 方向応力よりも大きくなり、界面剥離に先行して切欠きより離れた位置の溶射皮膜表面にき裂が発生する。

6. 結 言

本研究では切欠きをもつ溶射皮膜材に三点曲げ負荷を与えた場合、皮膜厚さが薄いと表面き裂が界面き裂に先行して生じる原因を探るため、二次元弾性有限要素法を用いて解析を行い、溶射皮膜界面および表面近傍の応力分布を明らかにした。

以下に本研究で得られた結果を示す。

- 1) 母材と溶射皮膜の界面近傍では切欠き先端付近に応力集中が見られる。皮膜厚さが大きくなると、切欠き先端近傍の応力は大きくなる。
- 2) 溶射材の皮膜表面近傍の表面と平行な方向の応力は切欠き付近ではほぼ零であり、切欠きから離れると徐々に増加し、ほぼ一定の値となる。
- 3) 皮膜厚さが厚い場合には切欠き端部近傍の界面に直角方向の応力は皮膜表面での表面と平行な方向の応力よりも大きくなるため表面き裂発生よりも優先して切欠き底部からの剥離が生じる。一方、皮膜厚さが薄い場合には、皮膜表面の表面と平行な方向の応力が切欠き端部近傍の界面に直角方向の応力よりも大きくなり、界面剥離に先行して溶射皮膜表面にき裂が発生する。

謝 辞

本研究の遂行に関して長崎総合科学大学機械工学科教授佐藤進博士に協力を得た。ここに感謝する。

参 考 文 献

- 1) 蓮井淳：最近の溶射技術，溶接技術，**11**，19-84，1984.
- 2) 多湖幹夫：プラズマ溶射による機能的に効果的なコーティング，溶接技術，**11**，65-68，1987.
- 3) 豊田政男：インターフェイスメカニクス—異種材接合界面の力学—，理工学社，1991.
- 4) 日本工業規格 JIS Z 3121, Z 3192, Z 3891.
- 5) 妹尾健一朗，中村仁人，光畑匡史：基材／溶射皮膜界面の破壊現象と破壊のクライテリオン，長崎総合科学大学機械工学科平成4年度卒業論文概要，1993.