

超音波を用いた溶射皮膜およびその密着性評価

慶應義塾大学 理工学部
教授 菅 泰雄

(平成5年度研究開発助成 AF-93018)

キーワード： 溶射、皮膜、密着性、超音波

1. 緒 言

溶射皮膜は過酷な条件の下で使用されることが多く、皮膜そのものの性能および皮膜の素材に対する密着性の確保ならびにその評価は製品の信頼性を確保する上で極めて重要と考えられる。このため、一般には、最適な溶射条件を実験室レベルで選定し、これを製品の加工に適用して高品質の製品を製造する努力がなされている。このため、溶射装置およびその施工条件は厳しく管理されているが、現場の施工では、予期せぬ原因によってしばしば不良品が発生する。したがって、重要な部材に対する溶射法の適用に際しては、個々の製品に対する管理が極めて重要であり、溶射皮膜に対する非破壊検査法の開発が切望されている。このような背景の下に、著者らは、超音波を用いた溶射皮膜性能の非破壊的評価法について検討している¹⁻⁴⁾。本報では、超音波による皮膜の音響インピーダンスの測定から気孔率を推定する手法および皮膜の音響特性を考慮した密着性評価法について検討した結果について報告する。

2. 実験装置の構成

Fig.1 は、超音波試験システムの構成の概略を示したものである。試験システムは、主として超音波探傷器、水浸式集束探触子（超音波周波数5 MHz、焦点距離50mm）、探触子走査装置、その駆動制御および超音波データ処理用のパーソナルコンピュータ（CPU:i486）等から構成されている。走査装置は、ヘッド部をx・y方向に駆動するx軸及びy軸、試料を上下駆動するz軸ならびに探触子の保持角度を変化させる α 軸から構成されている。したがって、本システムを用いれば2次元平面走査、水距離の変更、探触子の保持角度の調整など種々の測定条件の変動に対応することができる。使用した探触子は、セラミック振動子直径6mm、公称焦点距離50mmの垂直水浸式の集束探触子（Karl Deutsch製、TS6PB4-20P50）である。また、探傷器として汎用超音波探傷器（三菱電機製FD-700）を用い、

周波数5MHzで実験を行った。

超音波試験は、水中に試験片および探触子を設置して測定を行ういわゆる水浸法を用いている。探触子は、走査装置によりFig.2 に示す経路に沿って測定ピッチ P_m および走査ピッチ P_s にて移動し、試験片の試験領域全面にわたって測定が行われる。超音波探触子より放射された超音波は、水中を伝播して試験片表面に到達する。この界面では、それぞれの物質の密度 ρ および音速 C で定まる音響インピーダンス（ $Z = \rho C$ ）の差に従ってその一部は反射され、一部は試験片内に伝播する。このように、音波は異なる物質の界面にて反射と侵入を繰り返しつつ複雑に分岐・伝播する。本研究では、皮膜の表面にて反射して探触子に戻ってくる表面エコーおよび基材の底面にて反射し探触子に戻ってきた底面エコーを検出することにより、皮膜の性能および密着性を評価する。探触子で検出された超音波エコー高さは、探傷器、A/D コンバータを経てパーソナルコンピュータに取り込まれる。走査結果は、コ

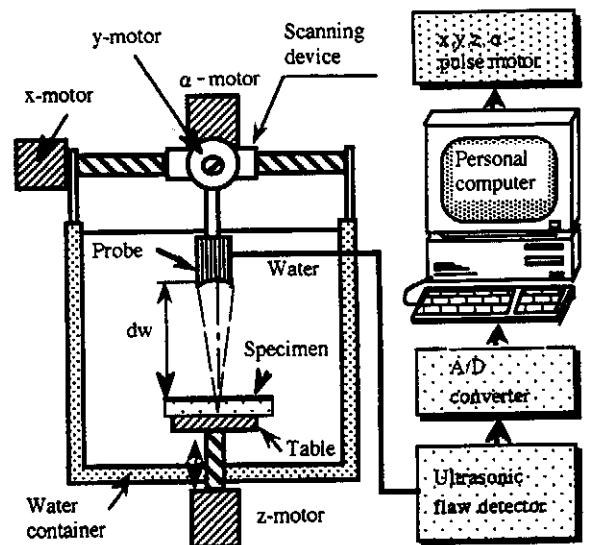


図1 超音波試験装置

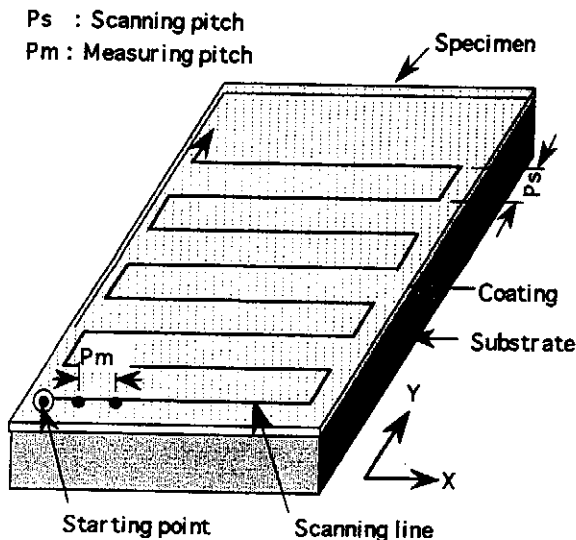


図2 超音波試験における超音波探触子の走査法

コンピュータにてデータ処理後、その分布が3次元走査グラフまたはカラー表示でCRTに画像表示される。

3. 溶射皮膜の音響インピーダンスの測定

3.1 音響インピーダンスの測定原理

溶射皮膜は溶融した金属あるいはセラミックスを素材に吹き付けたポーラスな素材であり、その性能は皮膜の密度すなわち気孔率に大きく依存している。したがって、皮膜のマクロ的な評価の極めて重要な指標の一つとして気孔率が注目されており、種々の測定方法が提案され実用されている。しかし、いずれの方法も破壊的手法あるいは小型試験片による実験室的測定法であり、完成品に対して直接適用できないという問題を有していた。

一方、超音波の伝播特性は媒質である素材の音響的特性に依存することは広く知られている。特に、材料の密度 ρ と材料中における音速 c との積は音響インピーダンス z と称され、材料の音響特性を表す重要なパラメータとして広く用いられている。以上の事実は、溶射皮膜の音響特性を測定することにより皮膜の性能を評価できる可能性を示唆している。すなわち、皮膜の特性はその密度（言い換えれば気孔率）に依存している。同時に、皮膜中の音速も皮膜の密度に依存していると言われている。したがって、皮膜の密度と音速の積は、当然、皮膜の密度あるいは性能と一対一で対応していると考えられる。とすれば、皮膜の音響インピーダンスを精密に測定することによって、皮膜の密度あるいはその性能の評価が可能と推察される。そこで、以下、皮膜の音響インピーダンスの非破壊的測定原理について検討した。

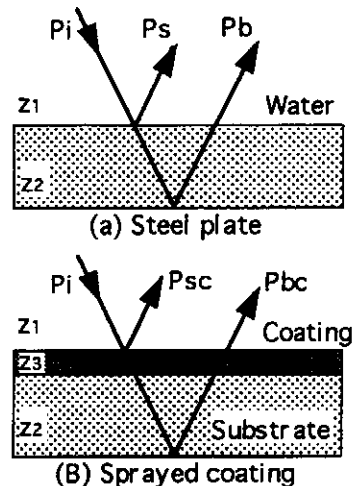


図3 超音波の反射と通過

Fig. 3 は、皮膜のインピーダンスの測定原理を模式的に示したものである。いま、(a) 図に示すように、超音波パルスを基材に向けて発射し、それがその表面で反射する場合を考える。ここで、基材に入射する超音波エコー高さを P_i 、その表面で反射した表面反射エコーを P_s 、超音波伝達媒体（本研究では水を使用）の音響インピーダンスを z_1 、基材の音響インピーダンスを z_2 とすると、基材表面における超音波の反射率 r_s ($=P_s/P_i$) は(1)式で与えられる。

$$r_s = \frac{P_s}{P_i} = \frac{z_2 - z_1}{z_1 + z_2} \quad (1)$$

いま、(1) 式より、入射エコー高さ P_i および水の音響インピーダンスが既知であれば、反射エコー高さ P_s を測定することにより、容易に基材の音響インピーダンスを求めることができる。ところが、一般の超音波探傷器の出力目盛りは必ずしも精確ではなく、何らかの手法で測定時の P_i を精密に測定しておく必要がある。そこで、あらかじめ音響インピーダンスが既知の材料を用意し、その反射エコーの精密な測定を行う。この場合、 z_1 および z_2 が既知であるから、このときの入射エコー P_i は、 P_s を測定することによって次の(2) 式から求めることができる。

$$P_i = \frac{z_1 + z_2}{z_2 - z_1} P_s \quad (2)$$

Fig. 3(b)は、溶射材に対する超音波の伝播状態を模式的に示したものである。図中 z_3 は、溶射皮膜の音響インピーダンスを示している。ここで、溶射皮膜表

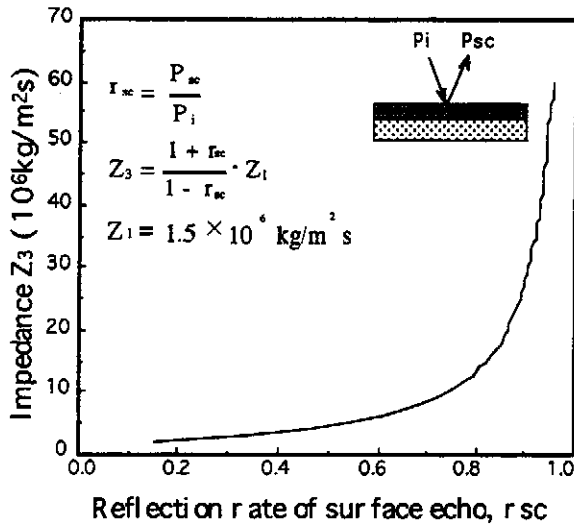


図4 超音波の表面反射率と皮膚の音響インピーダンスとの関係

面における超音波エコー反射率 $r_{sc} (= P_{sc}/P_i)$ は、(3)式で与えられる。

$$r_{sc} = \frac{P_{sc}}{P_i} = \frac{Z_3 - Z_1}{Z_1 + Z_3} \quad (3)$$

溶射皮膚における反射率 r_{sc} は、(2)および(3)式から(4)式のようにも表現できる。

$$r_{sc} = \frac{P_{sc}}{P_i} = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \right) \quad (4)$$

結局、溶射皮膚の音響インピーダンス z_3 は、(3)式を変形して(5)式で与えられる。すなわち、本式に上記の測定データおよび既知の音響インピーダンスの値を代入することによって z_3 は容易に計算することができる。

$$Z_3 = \frac{1+r_{sc}}{1-r_{sc}} Z_1 \quad (5)$$

Fig. 4 は、(3)式より求めた音響インピーダンス z_3 と皮膚表面における超音波反射率 r_{sc} との関係をもとに、反射率の減少と共に音響インピーダンスが低下していることが確認される。すなわち、溶射皮膚の気孔率が增大して密度が減少し、その結果音響インピーダンスが低下すると、超音波の皮膚表面における反射が減少する。その結果として、超音波の皮膚内への入射量が増加することになる。

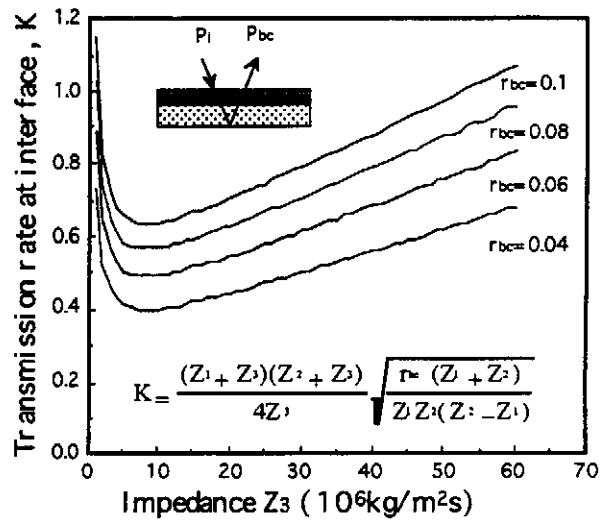


図5 音響インピーダンス、底面エコーおよび通過係数Kとの関係

3.2 超音波通過係数の測定

前節の結果より、溶射皮膚の気孔率が增大して密度が減少すると、音響インピーダンスが低下すること、また、その結果超音波の皮膚表面における反射が減少し、逆に、超音波の皮膚内への入射量が増加することが示された。すなわち、超音波の皮膚内への入射量は、皮膚の性能によって変化しうることを示した。

このことは、溶射皮膚の基材への密着性の評価に用いられている底面エコー法における測定精度に対して影響を及ぼすことになる。そこで、溶射皮膚の密着性の測定精度を向上するために、皮膚内に入射した超音波が皮膚-基材界面を通過する割合、すなわち超音波通過係数 K を計算によって求め、これにより密着性を評価する手法を提案する。

超音波底面エコー法は、入射エコー高さ P_i に対する底面エコー高さ P_{bc} の比 r_{bc} で皮膚の密着性を評価する手法であり、あくまでも皮膚の性能、状態によって皮膚内への超音波の入射量は一定と仮定していた。この過程が成立すれば、皮膚-基材界面における超音波の通過率は、底面エコー高さ P_{bc} と入射エコー高さ P_i の比 P_{bc}/P_i に一致する。しかし、皮膚の性能が変化しうる場合の P_{bc}/P_i は、密着性のみで決まるのではなく、水から皮膚、皮膚から基材に超音波が通過する場合の通過率をも考慮する必要がある。いま、皮膚と基材との接合界面における実際の超音波の通過量と完全に密着していると仮定したときの理論的な通過量との比を通過係数 K とすると、底面エコー高さ比 r_{bc} は、(6)式で与えられる。

$$r_{bc} = \frac{P_{ic}}{P_i} = \frac{16z_1 z_2 z_3^2 (z_2 - z_1)}{(z_1 + z_2)^2 (z_2 + z_3)^2 (z_1 + z_2)} K^2 \quad (6)$$

(6) 式を変形することにより、通過係数Kは(7)式で与えられる。

$$K = \frac{(z_1 + z_2)(z_2 + z_3)}{4z_2} \sqrt{\frac{r_{bc}(z_1 + z_2)}{z_1 z_2 (z_2 - z_1)}} \quad (7)$$

底面エコー法を用いて底面エコー高さ比 r_{bc} ($= P_{ic} / P_i$) を実験的に測定し、これと既知の水、基材および溶射皮膜の音響インピーダンス、 z_1, z_2, z_3 を(7)式に代入すれば、皮膜の接合界面における超音波通過係数Kが求まる。

いま、底面エコー高さ比 r_{bc} 、溶射皮膜のインピーダンス z_3 および通過係数Kとの関係を(7)式を用いて計算するとFig. 5 が得られる。ここに、超音波媒体

表1 溶射条件

Powder	80%Ni-20%Cr
Particle size (μm)	10 - 44
Plasma gas, Ar (l/min)	40
Powder feed gas, Ar (l/min)	3
Substrate	SS400
Thickness of substrate (mm)	5.6
Thickness of coating (μm)	400 - 500
Spraying voltage (V)	26 - 28
Spraying current (A)	600 - 900
Spraying distance (mm)	120 - 240

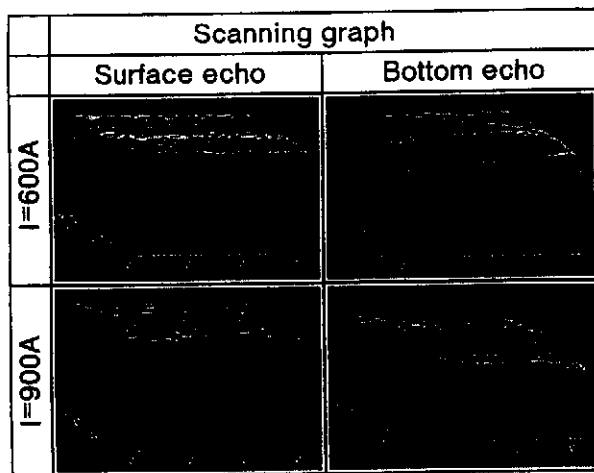


図6 溶射皮膜の表面エコーおよび底面エコー分布に及ぼす溶射電流の影響

を水、基材を鋼と仮定して計算を行っている。図より、音響インピーダンス z_3 が一定とすれば、高い r_{bc} が測定されれば通過係数K

が高くなり、この場合の皮膜の密着性が良好であることがわかる。一方、音響インピーダンス z_3 が溶射条件等により異なる場合、底面エコーの反射率 r_{bc} が高く測定されても、その時の皮膜のインピーダンスが低ければ、通過係数は低く計算され、結果として密着性が必ずしも良好でない場合があり得る。以上に述べたように、皮膜の密着性評価に対しては、単に底面エコー高さの測定のみでは不十分であり、皮膜の音響インピーダンスを測定し、これを考慮に入れて評価すべきことが確認できる。ここで提案した手法は、これを表現できる新しい手法であり、皮膜及びその密着性評価に極めて有効であるものと考えられる。

4. 実験結果

4.1 音響インピーダンス及び気孔率の測定

Table 1 はプラズマ溶射法を用いてNiCr合金粉末を溶射する場合の溶射条件をまとめて示したものである。なお、様々な性能を有する皮膜を作成するために、溶射距離を120~240mm、溶射電流を600~900Aの条件範囲内で種々に変化させて溶射を行っている。溶射材料には80%Ni-20%Crを用い、素材には板厚5.6mmのSS41鋼板を用いた。作成した溶射材について各試験片6×6mmの範囲を0.2mmの測定ピッチで超音波試験を行い、

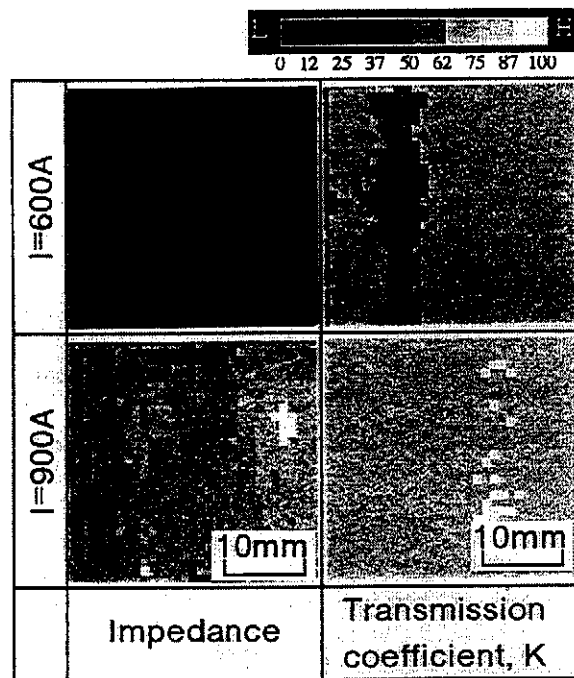


図7 皮膜・素材界面における超音波の通過係数分布に及ぼす溶射電流の影響

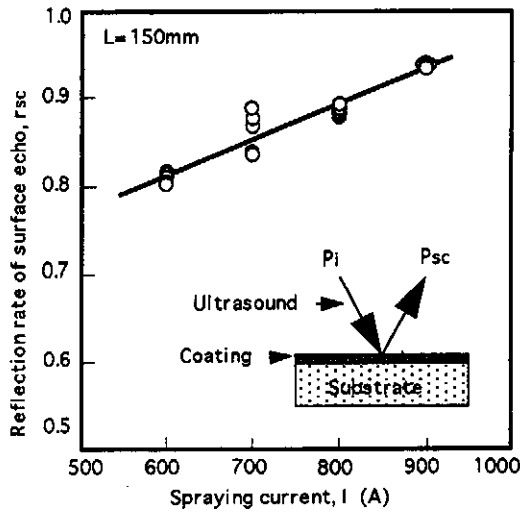


図8 皮膜の表面エコー反射率に及ぼす溶射電流の影響

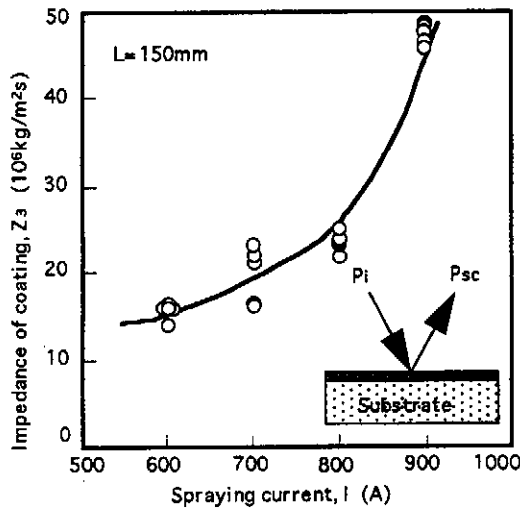


図9 皮膜の音響インピーダンスに及ぼす溶射電流の影響

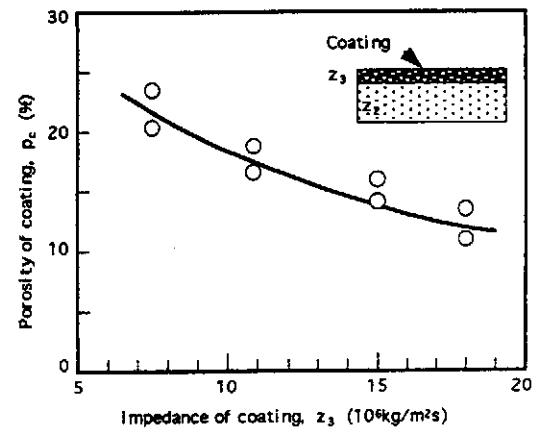


図10 皮膜の音響インピーダンスと気孔率との関係

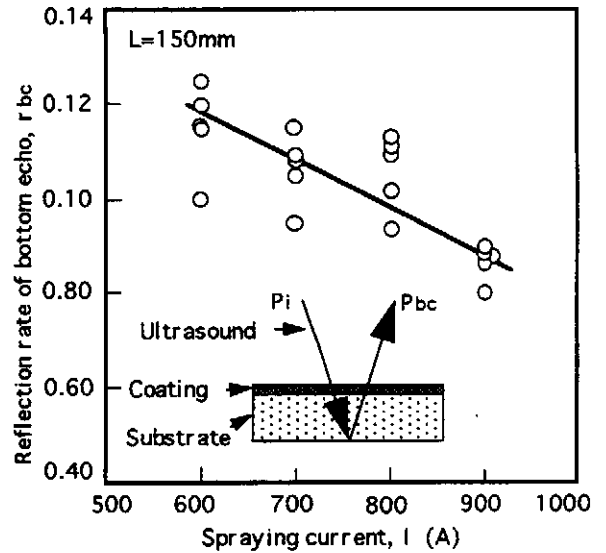


図11 底面エコー反射率に及ぼす溶射電流の影響

計900点の表面エコーと底面エコーを測定した。その結果をもとに、(2)、(4)、(5)および(7)を用いて各点の音響インピーダンス z_3 と通過係数 K を求めた。Fig.6およびFig.7は、その結果の一例を示したもので、前者は皮膜の表面エコーと底面エコー分布をワイヤフレーム表示で、また、後者は計算により求めた z_3 と通過係数 K の分布をカラー表示で示したものである。

Fig.8は、溶射電流を種々に変化させて溶射皮膜を作成し、その表面エコー反射率の測定結果を示したものである。なお、図中の値は、各試験片における測定値の平均値で示している。図より溶射電流の増加に伴って皮膜表面における反射率 r_{sc} がほぼ比例的に増加する傾向が見られる。Fig.9は、これらのデータを(5)

式代入して z_3 を求めた結果を示しているが、溶射電流の増加に伴って z_3 が急激に増大していることが確認される。

材料の音響インピーダンス z_3 は、材料の密度 ρ と音速 C の積、すなわち $z_3 = \rho C$ で与えられる。したがって、 z_3 は皮膜の気孔率と密接に関連しているものと考えられる。そこで、溶射皮膜の気孔率を実験的に測定し、音響インピーダンスと気孔率の関係を求めた。Fig.10はその結果であり、各皮膜の音響インピーダンス z_3 と気孔率 P_c との関係を示したものである。図より両者の間に高い相関性が認められる。すなわち、音響インピーダンスの増加に伴い気孔率が低下している。以上の結果より、超音波を用いて非破壊的に皮膜の性能を推定できる可能性が示された。

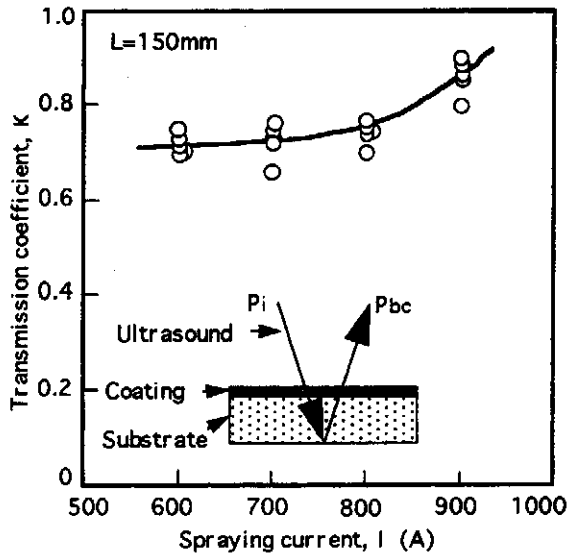


図12 皮膜・素材界面における超音波の通過係数Kに及ぼす溶射電流の影響

4.2 通過係数および密着強さの測定

Fig. 11は、溶射電流と溶射皮膜の底面エコー反射率の測定結果との関係を示したものである。なお、図中の値は、各試験片における測定値の平均値で示している。図より、溶射電流の増加に伴って底面エコー反射率 r_{bc} は低下する傾向が見られる。この結果は、電流の増加に伴う密着性が低下することを示唆しており、従来の知見とは異なる。一方、Fig. 12は、これらのデータを(7)式に代入して通過係数Kを求めた結果を示したもので、溶射電流の増加に伴ってKが増大しており、このことより電流の増大と共に密着性が向上していることが確認される。

さらに、通過係数と皮膜の基材に対する密着強さとの関係を求めるために、超音波試験片と引張試験片を同時に作成し、それぞれ試験を行って試験結果を対応させた。Fig. 13は、その結果を示したもので、図より皮膜の通過係数Kと密着強さとの間に強い相関性が認められる。

以上の結果より、超音波を用いた本手法を用いて、溶射皮膜の性能ならびに皮膜と基材との密着性を高い精度で推定できることが明らかとなった。

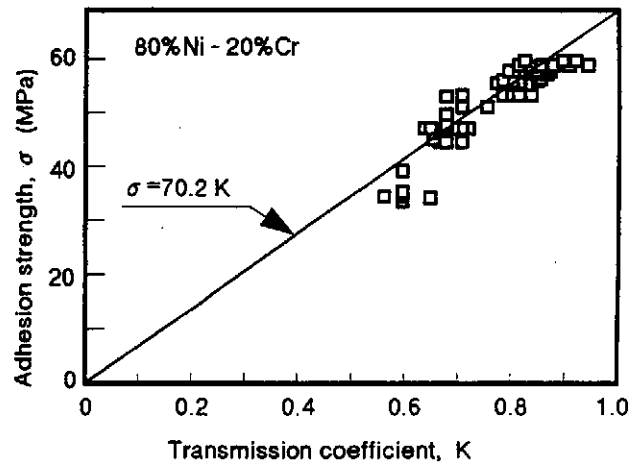


図13 通過係数Kと皮膜の密着強さとの関係

5. 結 言

本研究で得られた結果は、以下の様にまとめられる。

- 1) 超音波試験で測定される表面エコーおよび底面エコーから、溶射皮膜の音響インピーダンスと、皮膜と母材との密着度を表す通過係数を求める方法を提案した。
- 2) 異なる溶射電流で作成した溶射材について超音波試験をした結果、電流の増加と共に音響インピーダンスおよび通過係数のいずれも上昇した。
- 3) 音響インピーダンスと皮膜の気孔率との間に相関性が認められた。
- 4) 皮膜-基材間の密着強さと通過係数との間に高い相関性が認められた。
- 5) 以上の実験結果より、本法によって皮膜の性能と密着性を同時に評価できる可能性が示された。

参考文献

- 1) 菅泰雄, 高橋潤: 溶接学会論文集, 10巻 1号, (1992) P. 132
- 2) Y. Suga, J. Takahashi, Harjanto: Proc. ITSC'92, (1992) P. 247
- 3) Y. Suga, G. Shou, S. Kurihara, S. Fukami: Proc. Therm. Spray. Soc., 31-2 (1994) P. 79
- 4) 連得銘, 寿剛, 栗原秀輔, 菅泰雄: 日本機械学会論文集, 62-596-C (1996) P. 1626