

## 報 文

# 超音波によるプラズマ溶射皮膜の剝離の検出

福山職業訓練短期大学校 佐野 公 則

Detection of Exfoliation of Plasmasprayed Coatings by Ultrasonic Testing

Kiminori Sano

**要 約** 昨今、セラミックスの高機能性が見直され、各方面に利用されつつある。なかでもプラズマ溶射により数mm程度の薄板基材に、数100 $\mu$ mのセラミック皮膜を形成し、セラミックスの高機能を利用する方法が多く用いられている。

この報告は、これらの高機能性溶射皮膜の剝離を、汎用の超音波探傷器と、音波特性がはっきりしているアクリル樹脂をクサビとして用いる事により簡便に検出する方法について検討したものである。

検討した方法は、2触子による油浸法、1触子による水浸法、山形・三角アクリルクサビを用いた3法、基材の角部を利用する1スキップ斜角法の7法である。

方法により、基材表面、基材と溶射皮膜との境界、溶射皮膜間の境界での散乱反射、モード変換による減衰等の影響が大きく感度の高い測定が困難なものもあったが、屈折角45°三角アクリルクサビ法において安定した剝離の検出特性が得られた。

## I はじめに

先端工業の急速な発展に伴い、各種材料に要求される性能がますます厳しくなる中で、耐熱性、耐摩耗性、耐腐食性、高機能性等、優れた性能を持つセラミックスの用途が次第に拡大されつつある。しかしセラミックスは安定化材料であるため、加工性が悪く、加工技術が確立されていないのが現状である。そこで当面は従来材料にセラミックをコーティングする等の表面処理を施し、全く異なった材料性能を付与する、表面改質技術が注目されている。

多くの表面改質技術の中でもプラズマ溶射によるセラミックコーティングは、基材の温度上昇が大きい、空气中で容易に施工出来る、複雑な形状の製品に施工できる、製品の寸法に制限がない、施工が比較的簡単である等の理由にあわせ、セラミック自身の高機能性を有効に発揮出来るため各方面で多く用いられている。これらのセ

ラミック溶射皮膜が製品に適用されるとき、各種の負荷にたいして皮膜の耐久性（密着強度、密着度）を評価するための試験が行われるのが一般である。皮膜の諸性能を評価する方法については多くの報告がなされているが、本報告では密着強度を評価する為の一段階として、汎用の超音波探傷器を用いて密着度（剝離）を判定する方法について検討を加えたので報告する。

## II 実験方法及び供試材

### 1. 原 理

溶射層の健全な供試材の基材側より入射した音波の挙動は、基材とNi-Cr層との境界Aと、Ni-Cr層とセラミック層との境界B、ならびにセラミック層の底面Cの3ヶ所が大きく関与すると考えられる（図1）。境界Aでの反射、屈折は両層の密着度が高いと、基材（SS41）と溶射層の主成分である素材、Niとの音響インピーダンスに大きな差がない事により、反射と共に屈折、入射が起きると考えられる。

Ni-Cr層へ入射した音波は、高い気孔率、厚さ方向に積層された組織や、面粗度の大きい境界層B、底面Cで複雑

な散乱、反射、屈折、を繰り返して大きく減衰し、受信子への反射波は微弱であると考えられる。これに比べ溶射層が剥離状態にある場合には、境界に空気層が存在するため強い音波が反射され、健全な溶射層の場合に比べ、反射波の強度に差が生じると考えられる。この差を測定することにより、溶射層の剥離を検出するものである。図1に測定の実験原理図を示す。この報告は、無溶射材が剥離材と同等の超音波反射をするものと仮定して、予備実験を行ったものである。

2. 測定方法

一般にセラミックスのコティングは薄板に施工され使用する場合が多い事を考慮して、測定は以下の7法を用いた。又アクリルを用いた方法では、境界層でモード変換された音波による探傷精度の低下を考慮して横波を用いた。まとめたものを表1に示す。

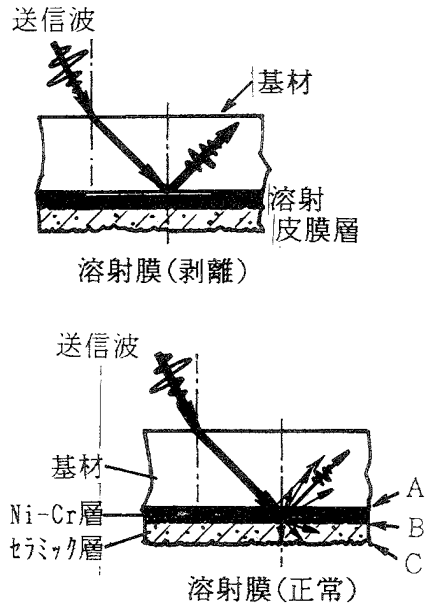
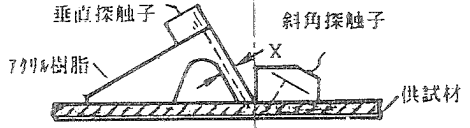
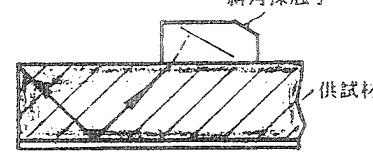


図1 測定の実験原理図

表1 深傷法の種類

探傷法	具体的事項											
油浸法 ①	斜角法 (2触子法) 探触子 垂直探触子 MB5F(5MHz) ② (集束型)2個	$(10^\circ)$ 集束型探触子 セパレーター 垂直探触子 入射角と屈折角 oilL 油 鋼 sθL $(oil: 10^\circ)$ $(s\theta L: 47^\circ)$										
水浸法 ③	垂直法 探触子 集束型 1個	集束型探触子 水 供試材 水距離										
山形アクリルカセ法 ④	斜角法 (2触子法) 探触子 垂直探触子 2個	$45^\circ$ $60^\circ$ $70^\circ$ $(19^\circ)$ 垂直探触子 垂直探触子 アクリル樹脂 供試材										
3角アクリルカセ法 ⑤	斜角法 (2触子法)	$45^\circ$ $60^\circ$ $70^\circ$ 垂直探触子 斜角探触子 アクリル樹脂 供試材 <table border="1" style="float: right;"> <thead> <tr> <th>入射角</th> <th>屈折角</th> </tr> <tr> <th>aiL</th> <th>sθS</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>36.2°</td> <td>45.0°</td> </tr> <tr> <td>46.4°</td> <td>60.0°</td> </tr> <tr> <td>51.8°</td> <td>70.0°</td> </tr> </tbody> </table>	入射角	屈折角	aiL	sθS	36.2°	45.0°	46.4°	60.0°	51.8°	70.0°
入射角	屈折角											
aiL	sθS											
36.2°	45.0°											
46.4°	60.0°											
51.8°	70.0°											

SA三角 アクリルサビ法 ⑥	探触子 垂直・斜角 各1個	45°  X = (10、9、2.4、1.1、0.65、0.5)
斜角法 ⑦	1スキップ法 (1触子法) 探触子 斜角探傷子 1個	45° 60° 70° 

1) 油浸法 (①②法) 油中において、入射角10°で供試材表面より入射した音波の境界層での反射を測定するものである。特に表面からの反射波を同時に受信するとSN比が悪くなるので表面からの反射波の遮蔽に注意した。この反射波の遮蔽は、供試材に垂直に密着したセパレーターを用いた。①法は2ヶの垂直探触子を用い、②法は発信子に集束型探触子を用いるものである。

2) 水浸法 (③法) 水中で集束型探触子により垂直探傷したものである。

3) 山形アクリルサビ法 (④法) 薄板内での複雑な屈折、散乱、干渉の影響を単純化するため、山形をしたアクリルサビを用い、屈折角45°、60°、70°で横波を用いて測定するものである。表面からの反射波はアクリル中央のスリットでカットした。垂直探触子を2ヶ使用。

4) 三角アクリルサビ法 (⑤法) 感度良く測定するため送信側に三角アクリルサビを受信側に斜角探触子を用いたものである。屈折角は45°、60°、70°を用い、測定波は横波とした。

5) SA三角アクリルサビ法 (⑥法) ⑤法の三角アクリルサビの音波通過有効面積を細く絞ることにより、複雑な干渉の影響を小さくするものである。X値は音波

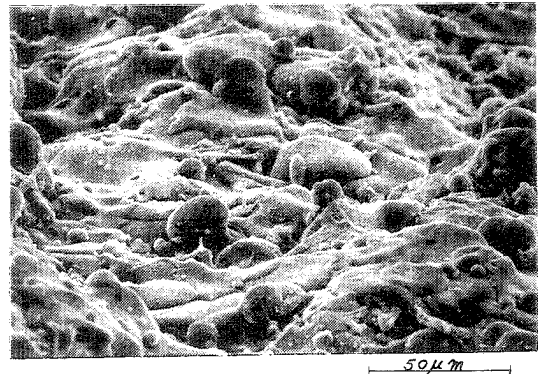


図2 溶射皮膜の表面 (SEM写真)

の進行方向に対し垂直方向のアクリルの厚さ (mm) である。

6) 斜角法 (⑦法) 供試材の端面と表面との角部を利用して、反射波を測定するものである。材厚が6mm以上の場合測定可能。

### 3. 供試材

3種類の厚さ(1.6t, 3.2t, 12t)のSS41の基材に、一般的な溶射条件によりプラズマ溶射を実施したもの6種類と、各基材3種類を用いた。具体的な事項については、表2に示す。溶射皮膜の表面状態を図2に示す。

表2 供試材

種類	a	b	c	d	e	f	g	h	i
基材	SS41	SS41	SS41	SS41	SS41	SS41	SS41	SS41	SS41
厚さ	1.6	1.6	1.6	1.6	3.2	3.2	12	12	12
第1 皮膜層		Ni-Cr 50μm	Ni-Cr 50μm	Ni-Cr 50μm		Ni-Cr 50μm		Ni-Cr 50μm	Ni-Cr 50μm
第2 皮膜層		MgO-SiO <sub>2</sub> 350μm	MgO-SiO <sub>2</sub> 200μm	FeO-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 200μm		SUS304 300μm		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 400μm	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 400μm
第3 被膜層									メタル系 200μm
その他		油浸							

4. 使用機器

超音波探傷器はクラウトクレイマーK/K製SONOR-AY303Bを使用した。探触子は垂直探触子(MB 5 F)、集束型探触子(5C10IF30)、斜角探触子(5Z10×10A45・60・70)を使用。周波数はすべて5MHzを用いた。

III 結果・考察

各々の方法で各供試材について、5回繰り返し測定した結果の中で、最も検出感度が良くなかったデータについて、それぞれの基材における値を0dbとして表したのが、表3である。図3は、3種類の材厚について測定データが得られた、山形アクリルクサビ法・45°、3角アクリルクサビ法・45°、SA3角アクリルクサビ法・X=0.5(④-45°法、⑤-45°法、⑥X=0.5法)について、溶射材と基材との反射音波を強度比としてグラフにしたものである。

1) コーティング層がメタル系の場合は、コーティング層への散乱、拡散による減衰が大きく、全体にdB値の差が大きい。

2) 油浸法(2触子法)では大きな強度差が得られた、理由は油中で超音波が大きく減衰し、境界層に達した音波は微弱な為、面粗度の影響を大きく受けたためと考えられる。

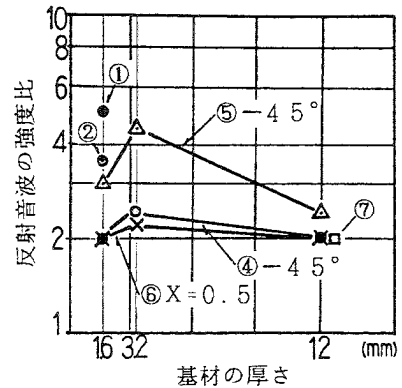


図3 各探傷法と反射音波の強度比

3) 屈折角・45°の両アクリルクサビ法では6dB程度の差が安定的に得られた。

4) 厚板においては斜角法(1スキップ法)45°、60°、70°共に6dB以上の差が得られた、70°に於いて特に大きな差が得られた理由は、70°が45°に比べ指向性が悪くビームが広がること、ビーム路程が長いこと、入射角が大きいため各境界層の面粗度が大きく影響した事等が複雑に影響した為と考えられる。

5) 60°を用いた方法では、データが安定しなかった。

表3 各種探傷法におけるdB値の差

探触法	使用探触子	探傷角度	供試材の種類								
			a	b	c	d	e	f	g	h	i
油浸法	① 垂直探触子 2個	(10°)	0	14							
	② 垂直・集束型探触子	(10°)	0	11							
水浸法	③ 集束型探触子	垂直	0	2							
山形アクリルクサビ法	垂直探触子 2個	45°	0	6	4	10	0	8	0	6	5
		60°	0	1	3	7	0	9	0	6	4
		70°	0	5	5	5	0	9	0	6	5
3角アクリルクサビ法	垂直探触子 斜角探触子	45°	0	9	8	17	0	13	0	7	5
		60°	0	0	3	7	0	11	0	6	4
		70°	0	3	8	11	0	10	0	6	5
SA 3角アクリルクサビ法	垂直探触子(10mm) 斜角探触子(9.0mm) ( )はX値 (2.4mm) (1.1mm) (0.65mm) (0.5mm)	45°	0	10							
		45°	0	9	9	9	0	11	0	6	4
		45°	0	6						0	4
		45°	0	6						0	4
		45°	0	8						0	4
		45°	0	6	7	7	0	7	0	6	4
斜角法	⑦ 1スキップ法 斜角探触子	45°							0	6	4
		60°							0	6	8
		70°							0	10	16

注1、それぞれの基材において、エコー高さが80%となるdB値を0dBとしたばい値である。

注2、接触媒質は、ソニコートBS(日合アセレンK/K製)を使用。

#### IV まとめ

溶射材と基材のみの場合において、反射音波の強度比が2～4倍の差が認められた。強度比2倍を判定基準とすることにより基材が、1.6mm～3.2mm程度と薄い場合は、屈折角45°の三角アクリルクサビ法又はSA三角アクリルクサビ法が、厚板の場合は屈折角45°の山形アクリルクサビ法、70°斜角法（1スキップ法）が剥離の確認として利用出来る。全体的には屈折角45°の三角アクリルクサビ法が有効である。今後は、現実に剥離状態にあるフィールドサンプルを試験することにより本方法の有効性を確認する必要がある。

#### 参考文献

日本非破壊検査協会編

：「非破壊検査便覧」日刊工業新聞社

石井勇五郎：「非破壊検査工学」産報

丹羽 登：「超音波計測」昭晃堂