

## 鑄鉄を基材としたプラスチック溶射

高橋 幾久雄\*、米倉 勇雄\*、桑嶋 孝幸\*  
亀田 和夫\*\*

鑄鉄基材にプラスチック及びプラスチックとセラミックスの複合溶射皮膜を形成して、耐食性と耐摩耗性を調べた。5%濃度塩水噴霧試験で、耐食性を評価すると、比較材の鑄鉄は12分、ポリエステル溶射材は424時間で発錆するが、アクリルとナイロンは2000時間経過しても発錆は認められなかった。

スガ式摩耗試験機による耐摩耗性はナイロンに比べ、アクリル皮膜は摩耗減量が多いが、セラミックスを混合すると、少なくなる。

キーワード：溶射、耐食性、耐摩耗性、アクリル、ナイロン、ポリエステル

## Thermal Spraying of Plastics on Cast Iron

TAKAHASHI Ikuo, YONEKURA Isao, KUWASHIMA Takayuki  
and KAMETA Kazuo

Plastic powder and compound powder of plastics and ceramics were thermal sprayed on cast iron substrate. Corrosion resistance of the sprayed coatings were examined by a 5% neutral salt spray test. Exposure time to appearance of rust for each sample was as follows; 12minutes for cast iron as a basis of comparison, 424hours for polyester coating, more than 2000hours for acrylic resin coating and polyamide coating. Abrasion resistance of the coatings was examined with a SUGA-type abrasion tester. Weight loss on abrasion for acrylic resin coating was bigger than that for polyamide coating and reduced by compounding with ceramic powder.

key words : thermal spraying, corrosion resistance, abrasion resistance, acrylic resin, polyamide, polyester

### 1 緒 言

複雑形状品の製造を容易にし、防振性能が高いなどすぐれた特徴をもつ鑄鉄は錆びやすいという欠点をもっている。この欠点を克服するためには、鑄鉄の表面改質が必要である。溶射はメッキや CVD、PVD など他の表面改質法に比べて、短時間に厚膜被覆できる特徴を有している。

本研究は鑄鉄の耐食性向上を図ることを目的に、鑄鉄基材にプラスチック溶射皮膜及びプラスチックとセラミックスの複合溶射皮膜を形成した。また併せて、プラスチック溶射皮膜の物性経時変化と耐摩耗性について調べた。

チック溶射皮膜の物性経時変化と耐摩耗性について調べた。

### 2 実験方法

#### 2-1 基材と溶射材料及び溶射方法

試供鑄鉄基材は、FC200 で、その化学組成を表1に

表1 鑄鉄基材(FC200)の化学組成 (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Fe
3.80	1.92	0.46	0.082	0.134	残

\* 金属材料部

\*\* 岩手大学工学部

示す。形状は、直径 25mm × 長さ 36mm の円柱状試験片と厚さ 4mm × 長さ 100mm × 幅 75mm の板状試験片とした。円柱状試験片は片端面に M16 のねじ切り加工を施し、他端面に溶射して、溶射皮膜の密着力測定に用いた。また、板状試験片は溶射する面を機械加工で平滑にし、その他の評価試験に用いた。これらの基材はアセトン洗浄及び#20 のアルミナグリットでブラスト処理を行い、清浄・粗面化して、溶射に供した。

試供溶射材料はポリエステル、アクリル、ナイロンの 3 種類で、ポリエステルとアクリルは表 2 に示すように、セラミックスを混合したものも用いた。セラミックスはアルミナにチタニアを 2.5wt% 含有したグレイアルミナである。

図 1 にアクリル溶射材料の熱分析結果を示す。示差熱分析 (DTA) から融点は約 350K、熱重量分析 (TG) から約 500K で重量が減少し始めることが分かる。同様に熱分析した結果、ナイロンの融点は約 450K、重量減少開始温度は約 680K、ポリエステルの融点は約 760K、重量減少開始温度は約 720K となることが分かった。

アクリルとナイロンは米国スルザーメテコ社製ダイヤモンドジェット溶射装置を使用し、ガス溶射で、ポリエステルは同メーカー製の最大出力 80kW のプラズマ溶射装置で、それぞれ溶射ロボットを用いて溶射した。ガス溶射はプロパンと酸素の燃焼炎で、表 3 のガス溶射条件に示す予熱温度まで基材を加熱した後に、窒素ガス気流でプラスチック溶射材料をこの燃焼炎に供給して行った。溶射皮膜の厚さは、アクリルで 400 ~ 500 μm、ナイロンが 500 ~ 600 μm になるようにパス数を調節して行った。また、プラズマ溶射はプラズマジェットで基材を 1 パス予熱し、表 4 に示すプラズマ溶射条件で溶射皮膜の厚さを 100 ~ 150 μm になるようにパス数を調節して行った。ポリエステルの皮膜厚さが薄い理由は、溶射材料の溶射ガンへの搬送がスムーズでなく、しかも一定に供給することが困難で、皮膜形成にかなりのパス数を必要としたためである。

表 2 溶射材料の種類と溶射方法

溶射材料		溶射方法
アクリル	100%	ガス溶射
	+ 20%セラミック	
	+ 40%セラミック	
ナイロン	100%	プラズマ溶射
ポリエステル	100%	
	+ 20%セラミック	

※セラミックスの混合比は wt%

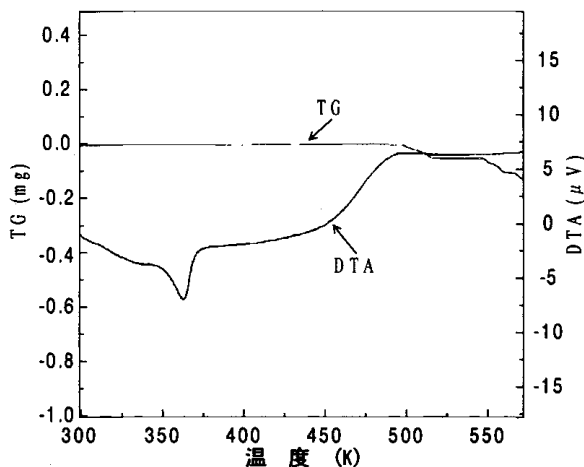


図 1 アクリル溶射材料の熱分析結果

表 3 ガス溶射条件

溶射材料	アクリル	ナイロン
基材予熱温度 (K)	323 ~ 343	413 ~ 433
プロパン圧力 (kg/cm <sup>2</sup> )	3.8	3.8
プロパン流量 (l/min)	22	22
酸素圧力 (kg/cm <sup>2</sup> )	3.8	3.8
酸素流量 (l/min)	56	56
粉末供給量 (g/min)	50 ~ 60	50 ~ 65
溶射距離 (mm)	350	350
トーチ移動速度 (m/min)	32	32
ピッチ (mm)	5	5

表 4 プラズマ溶射条件

溶射材料	ポリエステル
基材予熱温度 (K)	340 ~ 350
粉末供給量 (kPa)	20 ~ 25
一次ガス流量[Ar] (l/min)	110
二次ガス流量[H <sub>2</sub> ] (l/min)	13
作動電流 (A)	500
作動電圧 (V)	65 ~ 75
溶射距離 (mm)	100
ガン移動速度 (m/min)	45
ピッチ (mm)	3

## 2-2 溶射皮膜の評価方法

プラスチック溶射皮膜の評価は溶射皮膜断面の SEM 像の観察後、溶射皮膜と基材の密着力測定、耐食性として塩水噴霧試験、迅速耐候性試験及び熱疲労試験の 3 種類、耐摩耗性としてスガ式摩耗試験とブラストエロージョン試験の 2 種類で実施した。

### 2-2-1 密着力試験方法

溶射後の基材と皮膜の密着力の測定は二つの円柱状試験片の端面に、皮膜厚さ約 200 μm 溶射した後、この皮膜を重ねて、アクリルは 413K、ナイロンは 463K に電気炉で加熱溶解し、接合させ、材料試験機で引っ張って求めた。なお、ポリエステルは熱硬化型のため、再溶解できず、密着力測定試験はできなかった。

### 2-2-2 塩水噴霧試験方法

塩水噴霧試験は、溶射した試験片の端部と裏面を可離性防錆塗料でマスキングし、中心部分約 25cm<sup>2</sup> を評価対象として、5%濃度で行った。「メッキの耐食性試験方法」(JISH8502)で定められているレイトングナンバ標準図表による判定法で、皮膜表面に基材からの発錆が肉眼で確認できるまで(レイトングナンバ 9.8 程度)の時間で評価した。比較のために溶射していない鋳鉄基材とステンレス鋼板(SUS304)も同じ条件で試験した。また、試験中一定時間経過毎に試験槽から取り出して、衝撃試験、クロスカット法による密着力、色差、表面光沢度、ヌーブ硬さを測定した。

衝撃試験は荷重 9.8N で、直径 1.3cm の鋼球を 30cm の高さから溶射皮膜に落下させ、皮膜に生じた窪み部分の亀裂発生の有無で評価した。

クロスカット法による密着力の測定は、溶射皮膜にカッターナイフで、縦横に 1mm 間隔の切れ込みを入れ、計 100 個の正方形のますを作り、セロファンテープをそのますに張った後、引き離し、ますの剥離の有無と剥離した場合は剥離した数で評価した。

ポリエステル皮膜は皮膜内粒子間の結合が低く、しかも光沢がなく、硬いために、これらの試験はできなかった。また、ナイロン溶射皮膜は硬いため、カッターの切り込みができず、クロスカット試験はできなかった。

### 2-2-3 迅速耐候性試験方法

迅速耐候性試験は太陽光のエネルギーと温度、湿度、降雨を人工的に発生させ、屋外暴露試験を短時間に再現する方法で、1時間を1サイクルとして、全時間キセノンランプによる紫外線照射、1サイクルに12分間は水シャワー噴射をした。試験槽内の温度は 313K、湿度は 90%以上に保たれている。一定時間経過後の溶射皮膜の劣化度合を調べるため、皮膜剥離の有無の他に、塩水噴霧試験と同様に衝撃試験、クロスカット法による密着力測定、色差、表面光沢度、ヌーブ硬さを測定した。

### 2-2-4 熱疲労試験方法

溶射皮膜の熱疲労試験は図2に示す熱サイクルで行った。アクリル溶射皮膜は凍結～融解、結露～乾燥などの作用が再現できる温度差劣化試験装置を用いて、263K

～343Kの繰り返し試験をした。273K以上の試験槽内湿度は95%に設定している。ナイロン及びポリエステル溶射皮膜は電気炉を用いて、毎日それぞれ R.T.～423K、R.T.～523Kの熱サイクルで加熱冷却を行った。一定時間経過後の溶射皮膜の劣化の度合を調べるために、皮膜剥離の有無の他、衝撃試験、クロスカット法による密着力測定、色差、表面光沢度、ヌーブ硬さを測定した。

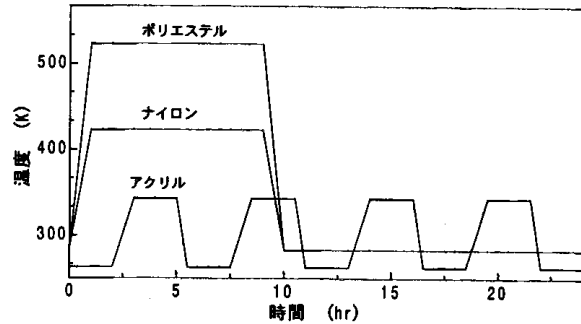


図2 熱疲労試験の熱サイクル

### 2-2-5 スガ式摩耗試験方法

スガ式摩耗試験は、溶射した試験片が往復運動し、摩耗輪は、溶射試験片が400往復すると1回転する構造になっている。摩耗輪が1回転するごとに溶射試験片の重量減を電子天秤で測定した。研磨紙を取り替えて、これを8回繰り返し、合計3200往復の試験を行った。試験条件は研磨紙の粒度が#320、荷重は1.6Nである。

### 2-2-6 プラストエロージョン試験方法

プラストエロージョン試験は荒田式溶射皮膜評価試験機を用いて、溶射皮膜に粒度#30のコランダムを設定圧力490kPa、噴射圧力304kPa、噴射加速流量340l/min、噴射量70gの条件で、4回繰り返し、皮膜の摩耗減量を測定した。噴射角度は溶射皮膜の垂線に対して30度と40度の2種類である。

## 3 実験結果及び考察

### 3-1 溶射皮膜のSEM像

溶射皮膜断面のSEM像を観察した結果、ポリエステル皮膜内には気孔が多く認められた。これはポリエステルの熱分析結果から熔融温度と気化温度がほとんど同じために、溶射皮膜形成中にガスがとじ込まれたと考えられる。アクリルとナイロン皮膜に気孔の発生はほとんど認められない。セラミックスを配合した溶射皮膜にはセラミックスが分散していることを確認した。

### 3-2 溶射皮膜と基材の密着力

密着力測定結果は、同一条件で接合した3個の平均

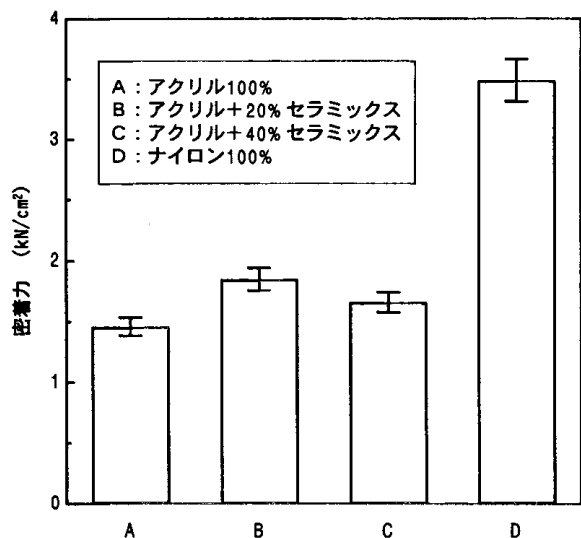


図3 溶射皮膜と鋳鉄基材の密着力

値とばらつき範囲で図3に示す。アクリル皮膜は皮膜自体の変形能が高く、引っ張った時に皮膜が伸びて、皮膜と基材の界面で破断する。セラミックスを混合した皮膜では僅かに密着力は高くなる。ナイロン皮膜は密着力が高く、アクリル皮膜の倍以上になっている。硬くて、変形能が小さいために、皮膜内で破断している。

### 3-3 溶射皮膜の耐食性

#### 3-3-1 塩水噴霧試験

溶射皮膜の塩水噴霧試験結果を図4に示す。鋳鉄基材は12分で発錆が認められるが、ポリエステル100%溶射皮膜は25440分で発錆が認められた。セラミックスを配合すると発錆時間は少し低下するが、アクリル及びナイロン溶射皮膜と比較材のステンレス鋼は2000時間経過後も発錆は認められず、耐食性が高いことが判明した。また、溶射皮膜の剥離も認められなかった。

アクリル溶射皮膜のクロスカット法による密着力の測定は試験時間約250時間毎に1000時間まで行ったが、いずれもまたの剥離は認められなかった。また、色差と光沢度も試験時間1000時間まで変化は認められなかった。

#### 3-3-2 迅速耐候性試験

迅速耐候性試験は試験時間1000時間行ったが、いずれの溶射皮膜にも錆の発生や皮膜の剥離は認められなかった。試験時間による色差の変化を図5に示す。色差は変色の度合いを数値化して表していて、値が高いほど変色の度合いは大きい。アクリルは時間が経過すると色があせていくことが分かる。また、ナイロンは時間が経過してもほとんど変色しない。同様に試験時間による光沢度の変化を図6に示す。アクリル、ナイロンともに試験

時間の経過とともに光沢が失われていく傾向を示している。これは紫外線照射によるもので、皮膜劣化の原因となる。アクリル溶射皮膜のクロスカット法による密着力の測定は試験時間1000時間まで行ったが、いずれもまたの剥離は認められなかった。

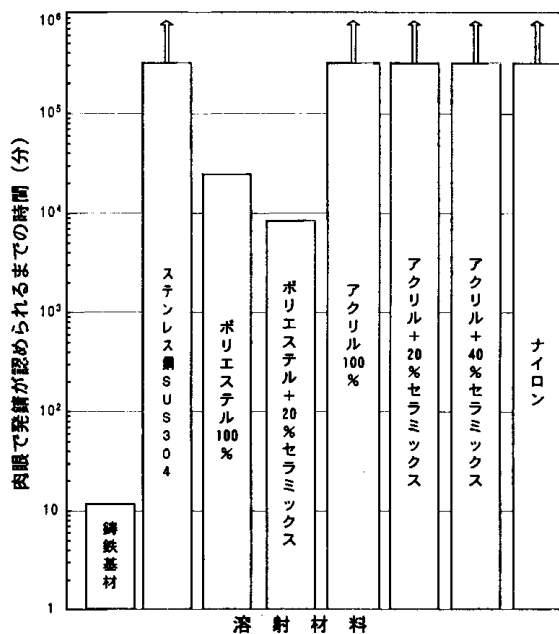


図4 塩水噴霧試験により発錆が認められるまでの時間

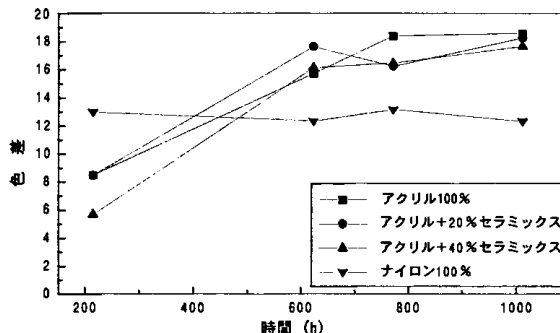


図5 迅速耐候性試験における色差の変化

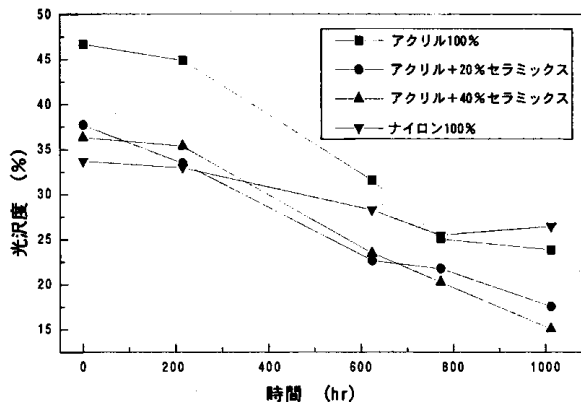


図6 迅速耐候性試験における光沢度の変化

### 3-3-3 熱疲労試験

ポリエステルは 40 サイクル (40 日)、ナイロンは 42 サイクル (42 日)、アクリルは 190 サイクル (47.5 日) 行った熱疲労試験結果を図 7 に示す。矢印は皮膜の剥離や亀裂の発生は認められず、これ以上の回数に耐えることを示している。

熱疲労試験後のアクリル 100%皮膜のクロスカット法による密着力測定結果を図 8 に示す。約 620 時間 (試験回数は 142 サイクル) まで、ますの剥離は認められないが、それ以上の試験時間では一部剥離する現象がみられ、試験時間が長くなると、剥離するますの数が多くなる。繰り返し加熱により皮膜が劣化していることが想像される。アクリルにセラミックスを混合した溶射皮膜のますの剥離は認められなかった。

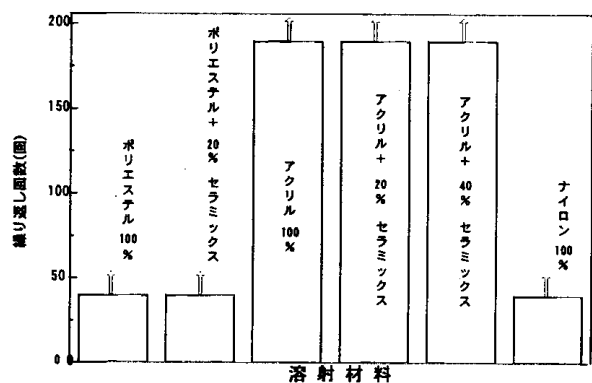


図 7 熱疲労試験結果

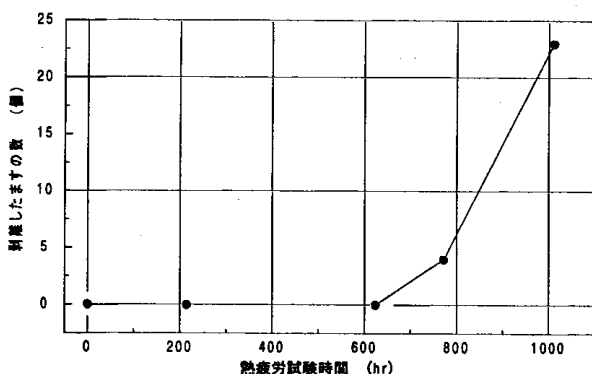


図 8 アクリル溶射皮膜のクロスカット法による密着力測定結果

### 3-3-4 衝撃試験

塩水噴霧、迅速耐候性及び熱疲労の各試験を行った溶射皮膜の衝撃試験結果は、試験時間 1000 時間経過したアクリル溶射皮膜に亀裂の発生は認められず、変形能が高いことを示している。ナイロン溶射皮膜の各条件 2 枚の試験片の衝撃試験結果を表 5 に示す。亀裂の発生は熱疲労試験によるものが早く、迅速耐候性試験、塩水噴霧試験の順になっている。図 9 にアクリル及びナイロン溶

射皮膜のヌーブ硬さ測定結果を示すが、ナイロン溶射皮膜は試験時間の経過とともに皮膜が硬化していることが明らかで、硬さの増加は熱疲労試験と迅速耐候性試験で顕著である。アクリル溶射皮膜は試験方法、試験時間に影響を受けず、一定の硬さになっている。このことから変形能が劣化することで、亀裂が発生しやすくなったと考えられる。

表 5 ナイロン溶射皮膜の衝撃試験結果

試験名 \ 時間(h)	0	215	624	772	1012
塩水噴霧試験	◎◎	◎△	◎△	◎△	××
迅速耐候性試験	◎◎	△△	△×	××	××
熱疲労試験	◎◎	△×	××	××	××

評価方法：◎；亀裂の発生なし

△；亀裂が 1～10 個発生

×；亀裂が 11 個以上発生

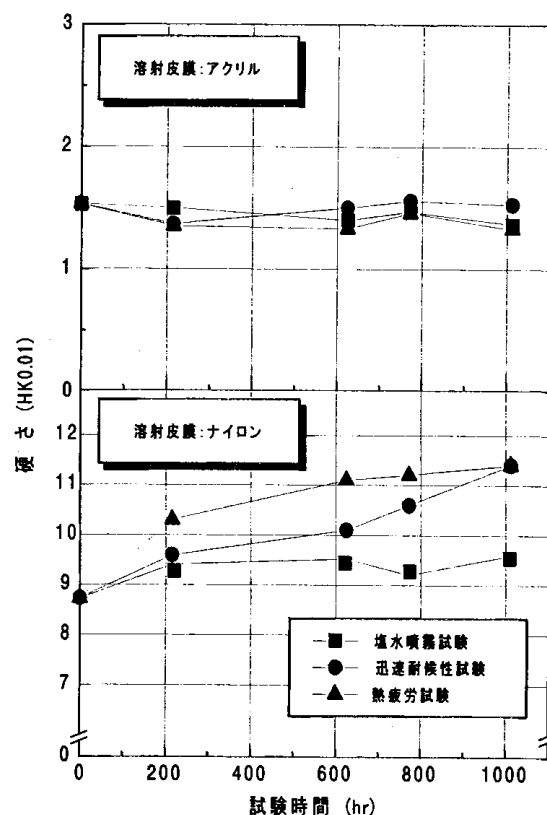


図 9 アクリル及びナイロン溶射皮膜のヌーブ硬さ

### 3-4 溶射皮膜の耐摩耗性

#### 3-4-1 スガ式摩耗試験

溶射皮膜表面のスガ式摩耗試験結果を図 10 に示す。スガ式摩耗試験は「平面ひっかけ摩耗試験」とも称し<sup>(1)</sup>、溶射皮膜を研磨紙でひっかけ取る方法なので、硬

さよりも粒子間結合度に左右される。ポリエステル100%溶射皮膜の摩耗減量が多いが、これはポリエステルの溶射は前述の理由により、皮膜内気孔が多く、粒子間結合度が低いことに起因していると思われる。ポリエステル、アクリル共に溶射皮膜にセラミックスを分散することにより耐摩耗性は向上する。

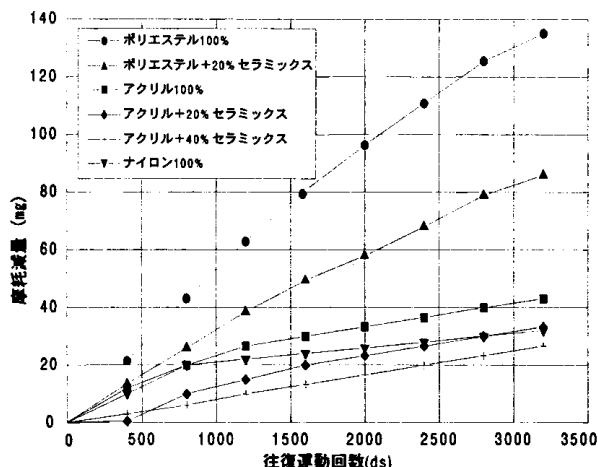


図10 溶射皮膜のスガ式摩耗試験結果

### 3-4-2 プラストエロージョン試験

プラストエロージョン試験による摩耗体積減量を図11に示す。この摩耗試験でもセラミックスを配合すると耐摩耗性が向上している。スガ式摩耗試験ではアクリルに比べナイロンの耐摩耗性が高かったが、この摩耗試験ではナイロンよりもアクリルの耐摩耗性が高くなっている。これは、ナイロンに比べアクリルは弾性が高く、プラスト材の衝突エネルギーを吸収するためと思われる。照射角度は溶射皮膜垂線に対して、30度と比べ、40度の摩耗減量が少なくなっている。これは角度の大きい方がプラスト材を跳ね返すことができるからである。ポリエステル溶射皮膜はコランダムを70g噴射する前に皮膜がすべて削り取られ、この方法での耐摩耗性がかなり劣ることが判明した。

## 4 結 言

鋳鉄を基材に、アクリル及びナイロンをガス溶射、ポリエステルをプラズマ溶射し、それぞれの皮膜の性状を評価した。

1) 基材と溶射皮膜の密着力は、ナイロンがアクリルの倍以上で、約  $3.5 \text{ kN/cm}^2$  である。

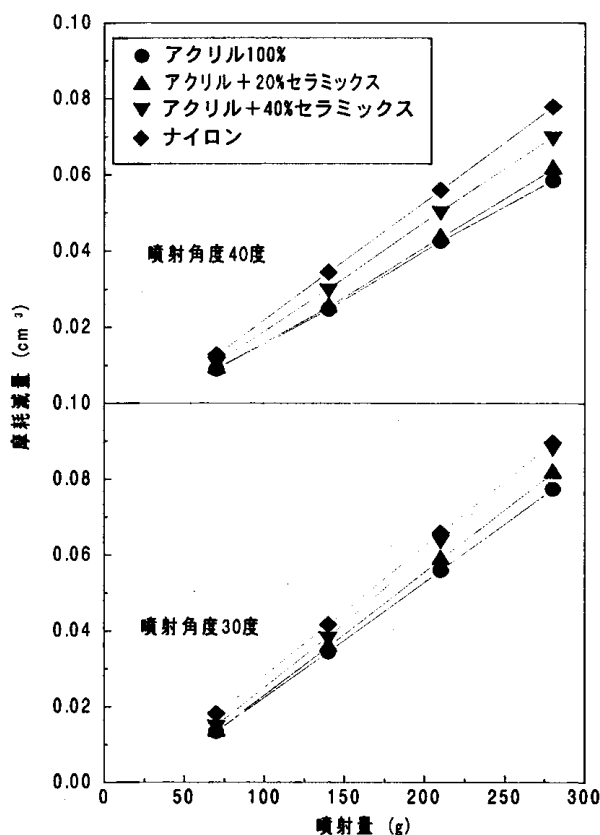


図11 プラストエロージョン試験結果

- 2) 溶射材の耐食性は、プラスチック溶射することにより大幅に向上する。特にアクリルとナイロン溶射材は2000時間の塩水噴霧試験を行っても発錆が認められない。ポリエステル溶射材は約424時間で、アクリルとナイロン溶射材に比べて早く発錆する。
- 3) 熱疲労試験及び衝撃試験、硬さ試験などの結果、加熱と冷却の繰り返しは、皮膜の劣化を早める。
- 4) アクリルとナイロンの溶射皮膜の耐摩耗性は高いが、ポリエステル溶射皮膜は皮膜内粒子が剥離して、早く摩耗する。プラスチックにセラミックスを混合して溶射すると、耐摩耗性は向上する。

本研究の遂行に協力をいただいた当時岩手大学学生市井仁君に感謝します。

## 文 献

- 1) 井藤三千寿、武田絃一：溶射協会学術講演大会論文集 31(988)48