

硬質薄膜を有する鉄鋼部材の信頼性保証に寄与する皮膜密着力推定法

研究代表者 東京都市大学工学部機械工学科 准教授 亀山 雄高

共同研究者 豊田工業大学工学部 助教 南部 紘一郎

共同研究者 富山県立大学工学部機械システム工学科 准教授 宮島 敏郎

1. 緒言

粉体の衝突を受ける鉄鋼部材には、エロージョン損傷（粉体摩耗）が生じる。その対策として、炭化物・窒化物などの硬質薄膜が有効である。産業界では、砥粒を薄膜に対し投射（いわゆるブラスト処理）して摩耗やはく離を生じるまでの時間などを指標に用いて、薄膜の耐エロージョン特性を定性的に計っていることが多いと思われる。しかしながら、薄膜被覆部材の信頼性を担保する上では、基材に対する薄膜の密着強度をより正確に評価しておくことが不可欠であると考えられる。

より定量的に薄膜の密着強度を調べる既存の手法としては、圧子押し込み試験（界面にダイヤモンド圧子を打ち込み、き裂の発生を評価する）、テープはく離試験（薄膜表面にテープを貼付し、基材から引き剥がすのに要する荷重を調べる）などが挙げられるが、粉体衝突とは根本的に異なる負荷様式で密着強度を評価しており、このような方法で評価された密着強度が、エロージョン損傷下での薄膜の健全性を保証するに足りるかは疑問が残る。そこで本研究では、粉体の衝突を模擬しつつ、それによって薄膜のはく離や損傷が生じるメカニズム、ひいては薄膜の密着力を、定量的に評価する手法を提案する。

提案する密着力評価手法の骨子は、コーティングに損傷・はく離を与える実験を行うとともに、皮膜および界面近傍の応力場を解析的に求め、両者の結果を合わせこむことによって、逆問題解析的に界面の強度を推定するというものである。本研究では、かかる評価手法の構築に向けた基礎的段階と位置づけて、①マイクロスラリー・エロージョン(MSE)試験および微粒子ピーニング(FPP)加工を用いたコーティングの微視的強度および損傷メカニズムの解明、②界面を有する部材における応力分布を解析するシミュレーション、③条件を制御した衝撃負荷によってコーティングに損傷・はく離を与えることが可能な落錘実験用プラットフォームの構築および落錘試験の試行、の3項目を実施した。これらの結果を組み合わせることで、種々の皮膜が、粉体の衝撃を受けて損傷していくシナリオについて検討を加えるとともに、密着力推定方法を構築する上での方針を具体化することを目的とした。

2. MSE 試験および FPP 加工を通した皮膜部材の微視的強度評価および損傷メカニズムの解明

2. 1. MSE 試験

2. 1. 1. 実験方法

MSE 試験には、評価する項目に合わせ、2 台試験機を用いた。1 台目は、膜単体の強さ評価試験として、MSE-S 試験機を用いた (図 2-1)。本装置は、平均粒子径 $1.2 \mu\text{m}$ の粒子を含むスラリーを高精度に投射できるように、投射ノズルの断面形状を $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ にし、制御部分を専用に設計されている。投射粒子には、不定形アルミナ粒子 WA#8000 (平均粒子径 $1.2 \mu\text{m}$) を用いた。不定形アルミナ粒子 30 g と純水 968 g 、分散剤 2 g を混合し、スラリー濃度を 3 mass\% とした。投射距離は 4 mm 、投射角度は 90° とした。エア流量を 11 L/min 、スラリー流量が 125 mL/min になるように各圧力を調整して試験を行った。2 台目は、球形粒子を用いた耐衝撃・耐剥離性評価試験として、微粒子エロージョン試験機を用いた (図 2-2)。本装置は MSE-S 試験機の構成を基本に大きな粒子の投射が可能になるように専用設計されている。そのため、投射ノズルの断面形状は $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ である。投射粒子には、球形ジルコン粒子 (粒子径 $10 \sim 30 \mu\text{m}$) を用いた。球形アルミナ粒子 30 g と純水 968 g 、分散剤 2 g を

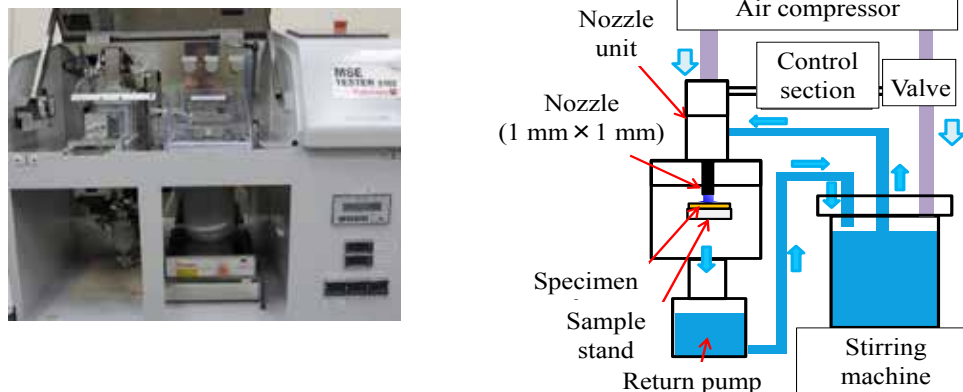


図 2-1 MSE-S 試験機の概観と構造

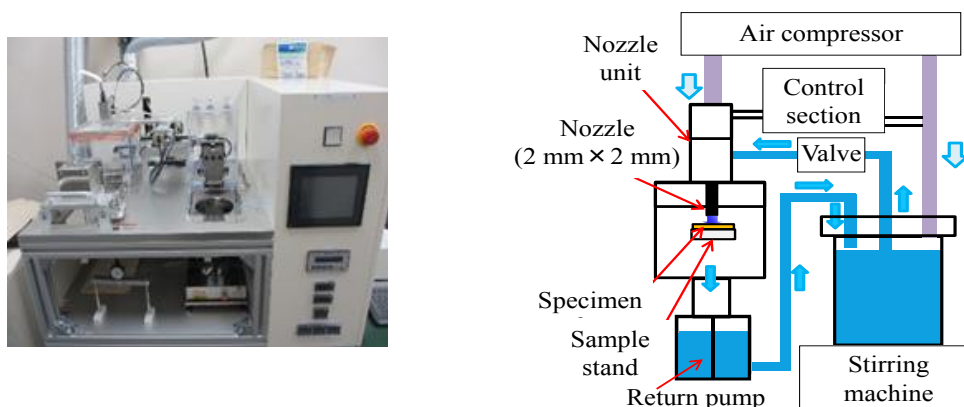


図 2-2 微粒子エロージョン試験機の概観と構造

混合し，スラリー濃度を 3 mass%とした．投射距離は 10 mm，投射角度は 90°，スラリーの投射量は 10 gとした．エア流量を 20 L/min，スラリー流量が 500 mL/min になるように各圧力を調整して試験を行った．

試験片には，硬質薄膜の成膜方法の違いについて評価できるかを見るために，ステンレス鋼 SUS304 を基材に CrN 膜を 3 種類の成膜方法で被覆されたものを用いた．成膜方法は，AIP 法，UBMS 法，FAIP 法の 3 種類を用いた．試験片の大きさは 13 mm × 13 mm × 6 mm である．各試験片表面のレーザー顕微鏡画像，膜厚測定器で測定した膜厚およびナノインデンテーション試験による膜の塑性変形硬さを図 2-3 に示す．各試験片の CrN 膜厚は，約 3 μm で同じである．塑性変形硬さは，AIP 法が軟らかく，UBMS 法と FAIP 法は同じであった．

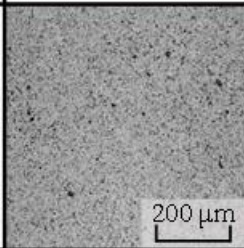


CrN	AIP	UBMS	FAIP
Laser image			
Thickness, μm	3.1	3.0	2.9
Hardness, GPa	25	40	40

図 2-3 供試皮膜の表面の様相，膜厚および硬さ

2. 1. 2. 結果および考察

2. 1. 2. 1. 膜単体の強さ評価試験

投射粒子量 0.5 g ごとのエロージョン痕中心部の断面形状曲線を図 2-4 に示す．各試験片の膜と基材の界面をそれぞれ赤線で示す．各試験片ともに 3 g 投射で基材に到達した．また，AIP 法による試験片では，他の 2 つと比べて未投射面およびエロージョン面の凹凸が大きい．

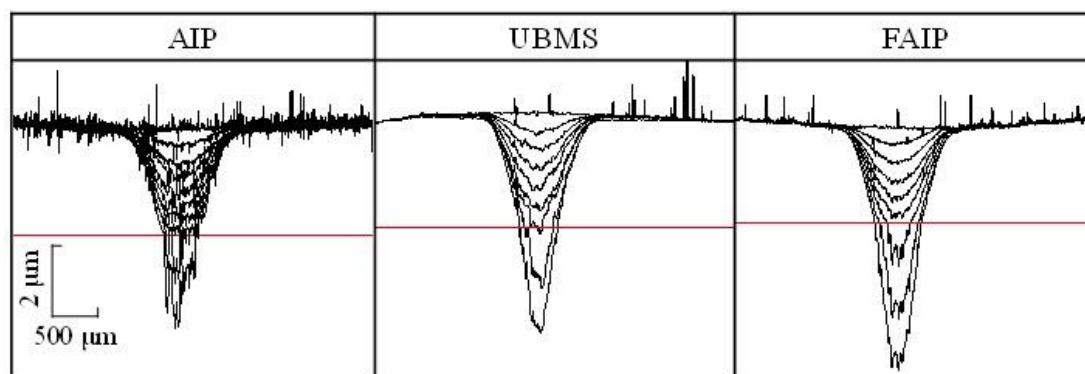


図 2-4 エロージョン痕の断面プロファイル

次に投射粒子量に伴うエロージョン深さの変化を図 2-5 に示す。膜内ではほぼ直線的に推移していることから、表面から内部方向への強さは一定であると考えられる。ここで、各試験片のエロージョン推移曲線の傾きをエロージョン率として算出した。その結果、CrN 膜のエロージョン率は AIP 法では $0.92 \mu\text{m/g}$ 、UBMS 法では $1.03 \mu\text{m/g}$ 、FAIP 法では $0.99 \mu\text{m/g}$ となった。このことから、成膜方法により得られる膜単体の強さに微小であるが差が生じ、強い順に AIP 法、FAIP 法、UBMS 法となることがわかった。

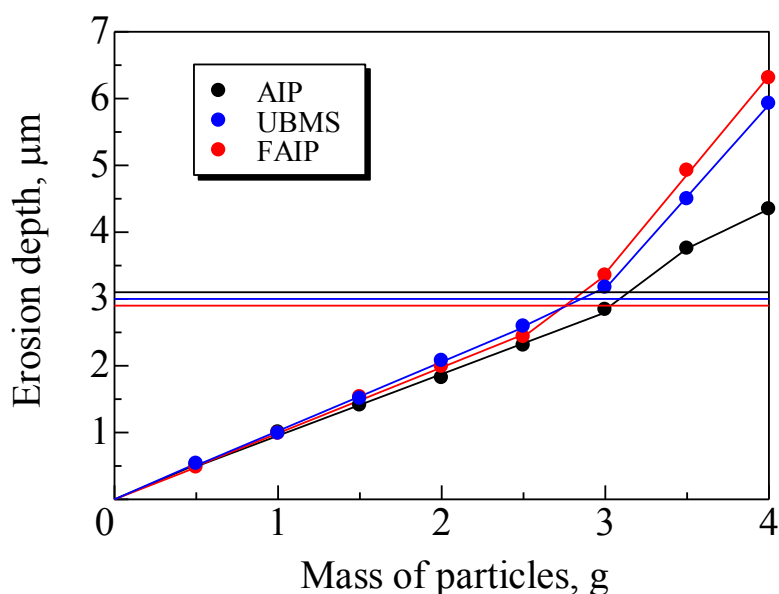


図 2-5 各試験片におけるエロージョン深さの推移

2. 1. 2. 2. 耐衝撃・耐剥離性評価試験

投射粒子量ごとの投射痕のマイクロ스코ープ画像を図 2-6 に示す。なお、一例として各試験片 No.1 のみ載せる。本試験では、投射粒子量の増加に伴い膜の剥離と考えられる損傷部が増加する傾向が見られた。一方で、膜が残存する箇所の最大エロージョン深さは $0.1 \mu\text{m}$ 程度であったことからエロージョンによる膜の摩耗はほとんど生じないことがわかった。

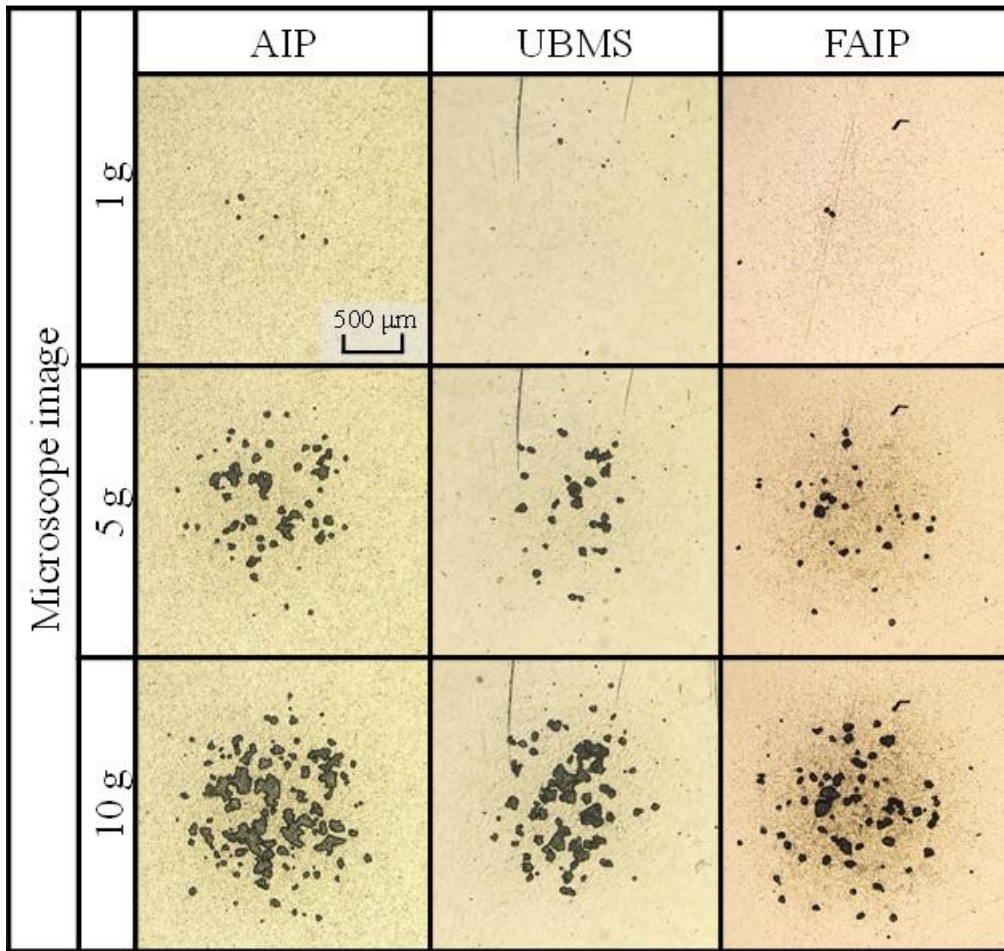


図 2-6 試験片表面からのエロージョン痕観察結果

ここで、画像解析ソフト WinRoof2015 を用いてマイクロスコープ画像から損傷部の面積率を算出し、投射粒子量に伴う損傷部の推移の比較を行った。その結果を図 2-7 に示す。AIP 法は、No.1 が低投射粒子量の段階から高く推移しており、No.2 が UBMS 法と類似した推移であった。UBMS 法は、低投射粒子量の段階では No.2 が高い値を示した。一方、FAIP 法は、No.1、No.2 ともに低い推移であった。

次に、各成膜方法の膜単体の耐衝撃・耐剥離性の違いをより明確にするため、1 g 投射後の粒子投射面のレーザー顕微鏡による観察および膜の損傷部の断面形状の比較を行った。その結果を図 2-8 に示す。AIP 法は、No.1、No.2 ともに 1 g 投射で損傷部の最大深さが約 2.8 μm であり、膜と基材の界面近傍で損傷が生じていた。また、その断面形状は未損傷部との境界でほぼ垂直になっていた。AIP 法は、図 2-3 で示したドロップレットと考えられる箇所が多く観察されたことから、膜内のドロップレットの存在が損傷の起点となり、膜と基材の界面近傍で膜の損傷（剥離）が生じたと考えられる。

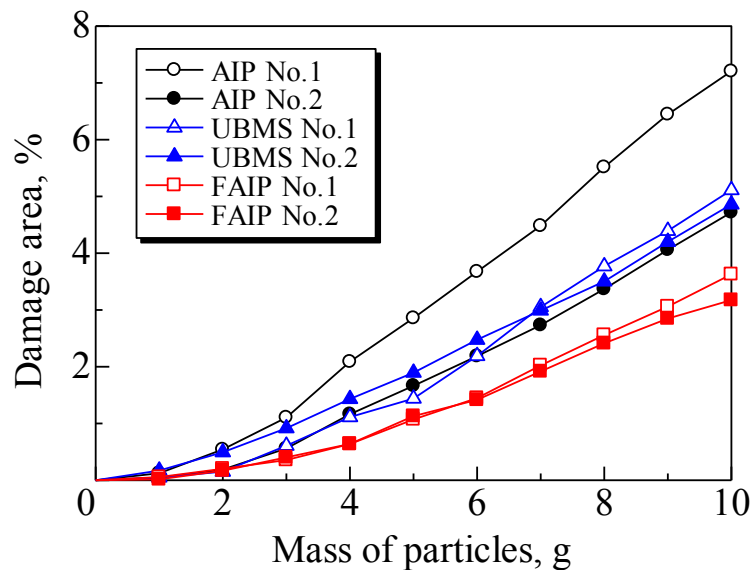


図 2-7 粒子投射質量と損傷面積率の関係 and damage area

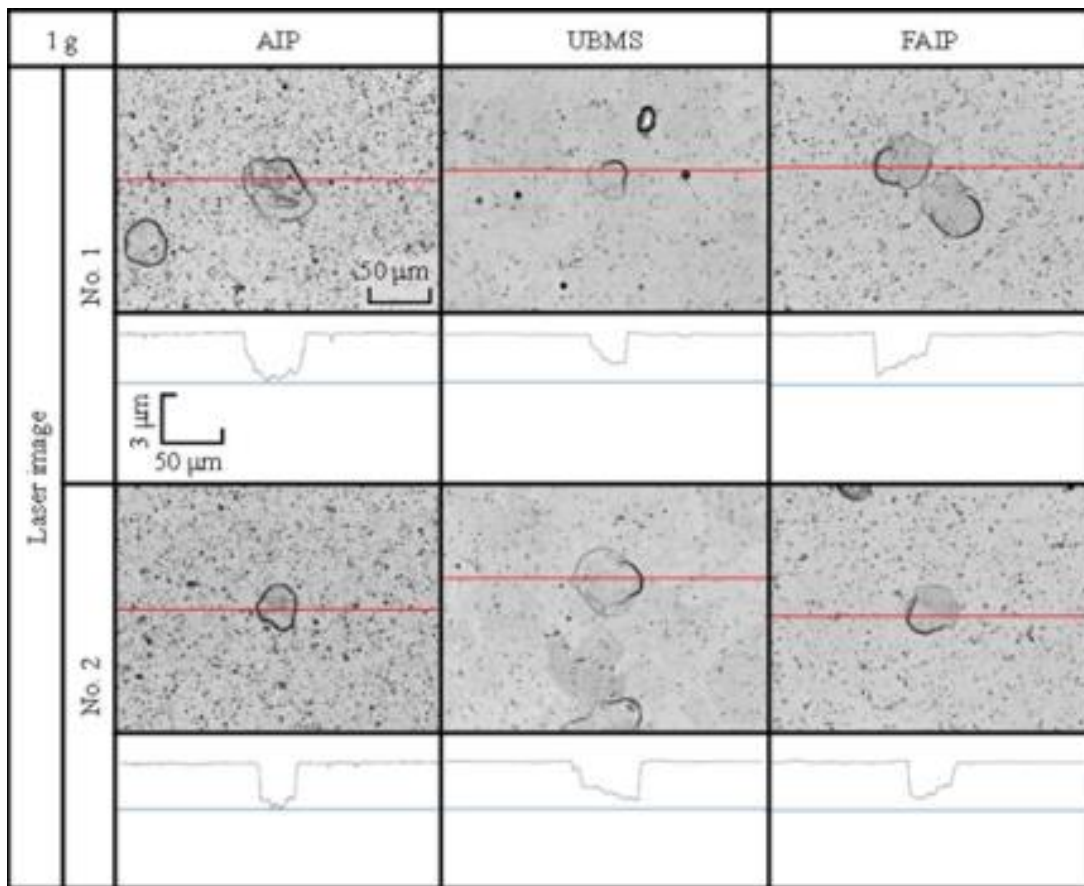


図 2-8 粒子 1g 投射後の各試験片のエロージョン痕のレーザ顕微鏡解析結果

さらに、膜と基材の追従性について、10 g 投射後の粒子投射面から考察した。UBMS 法および FAIP 法は、損傷が生じていない投射箇所、基材の SUS304 の結晶粒界と

考えられる筋状の模様が明瞭に現れた (図 2-6 参照). より詳細に観察するため 10 g 投射後のレーザー顕微鏡による高さ情報画像および断面形状の比較を行った. その結果を図 2-9 に示す. AIP 法は, 損傷が生じていない投射箇所が平滑な断面形状であり, また, UBMS 法も, 筋状模様が現れているが凹凸は小さく AIP 法と同様に平滑な断面形状であった. 一方, FAIP 法は, 筋状模様上に高低差が約 $0.5 \mu\text{m}$ の凹凸が形成されていた. このことから FAIP 法は, 粒子の衝突に対して追従性を有することで, 損傷部の面積率が低く推移したと考えられる.

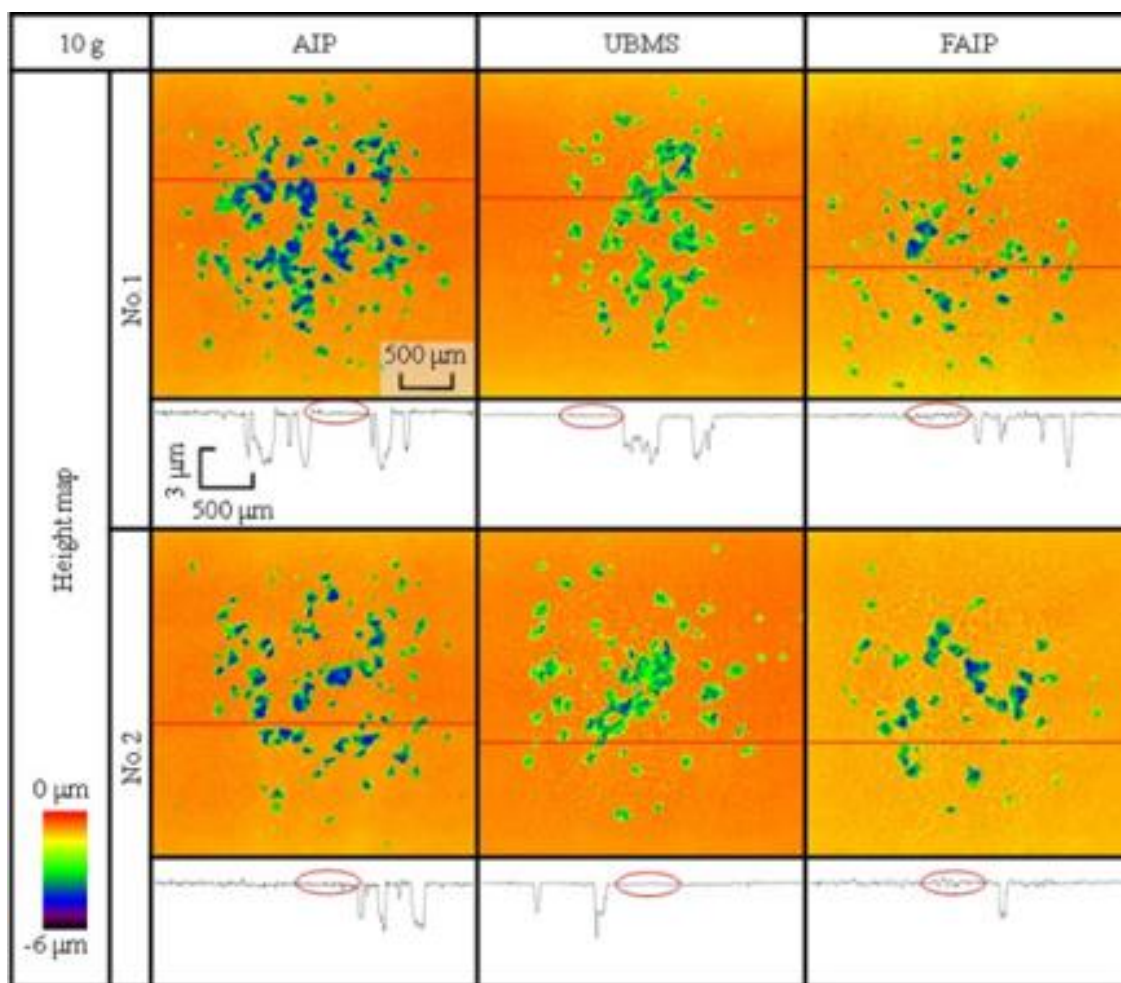


図 2-9 粒子 10g 投射後のエロージョン痕の凹凸解析結果

2. 2. FPP 加工

2. 2. 1. 実験方法

FPP 加工は, 一般に粒径 $200\mu\text{m}$ 以下の微粒子を投射する噴射加工技術で, 通常は機械構造材料の強度向上を目的とした表面改質として用いられる. 本研究では, 粒子

の衝突によって比較的厚い皮膜に対してエロージョンがどのように生じるかを調べるために利用した。実験には、空気式ショットピーニング装置（吸引投射式、ノズル径 6mm）を用い、平均粒径 200 μ m の球状炭素鋼粒子（硬さおよそ HV 800）を、投射圧力 0.3MPa、粒子供給レート 1g/s、ノズル距離 100mm、ノズル角度 90° の条件のもと投射した。投射時間は系統的に変化させ、FPP 加工を受けた際の皮膜の変化を時系列的に比較した。

試験片には、S45C 鋼の円盤(ϕ 15, t4)の片側表面にクロムめっきを施したものをを用いた。めっきは一般的な硬質クロムめっき浴であるサージェント浴を用いて行い、電流密度と電析時間を調節することで皮膜の硬さと厚さを変化させた。具体的には、電流密度 40A/dm²、電析時間 120s の条件によって硬さ HV930、膜厚 5 μ m の皮膜、電流密度 40A/dm²、電析時間 3600s の条件によって硬さ約 HV930、膜厚 20 μ m の皮膜、電流密度 30A/dm²、電析時間 5400s の条件によって硬さ約 HV830、膜厚 20 μ m の皮膜を、それぞれ得た。FPP 加工を行った後のめっき試験片に対して、表面および縦断面を SEM によって観察するとともに同一箇所をエネルギー分散型 X 線分光法(EDS)によって面分析した。その結果をもとに、めっき皮膜のはく離や損傷の有無について検討を加えた。

2. 2. 2. 結果および考察

まず、膜厚が 20 μ m で、硬さが HV930 あるいは HV830 であるめっき皮膜に対して FPP 加工を行った場合の結果を図 2-10、2-11 にそれぞれ示す。めっき表面には、粒子の衝突を受けたことによってき裂が生じており、試験片表面の Cr 元素、Fe 元素分布を対比するとクロムめっきが局所的に喪失し基材が露出していることがうかがわれた。ただし、投射時間による基材露出面積の変化は、表面からの分析結果を見る限り不明瞭であった。一方、断面観察結果を詳しく検討したところ、投射時間が比較的短い条件では皮膜内部が脱落する損傷様式が主に観察されたのに対し、投射時間が長くなるにつれて界面で皮膜のはく離している部位も存在するようになっていたことが判明した。界面ではく離が発生するようになる投射時間は、皮膜の硬さが低い場合に長かった。この事実は、FPP 加工を受けた際のクロムめっきの損傷が脆性的なメカニズムによってもたらされていたことを示唆するものである。実際に、断面観察を行ったところ、皮膜中にき裂が発生している例も認められ、投射時間が短い場合に観察された皮膜内部での損傷は、これらのき裂が連結して皮膜表層部が薄片状に脱落したことによって生じていたものと推察される。

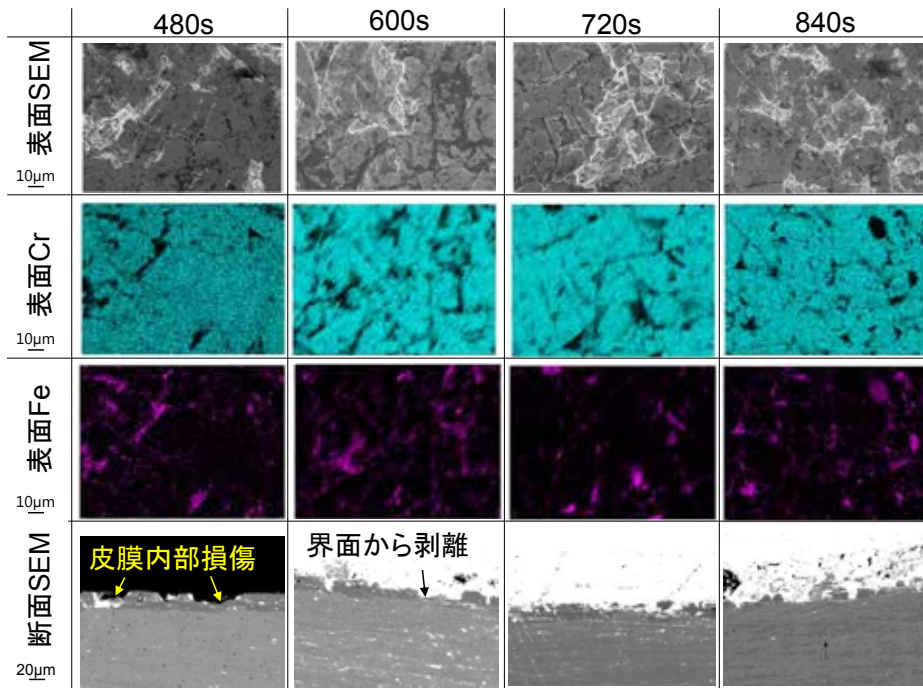


図 2-10 FPP(投射材粒径：200 μ m)加工を施したクロムめっき試験片(HV930，膜厚 20 μ m)表面の SEM 観察および EDS 分析結果

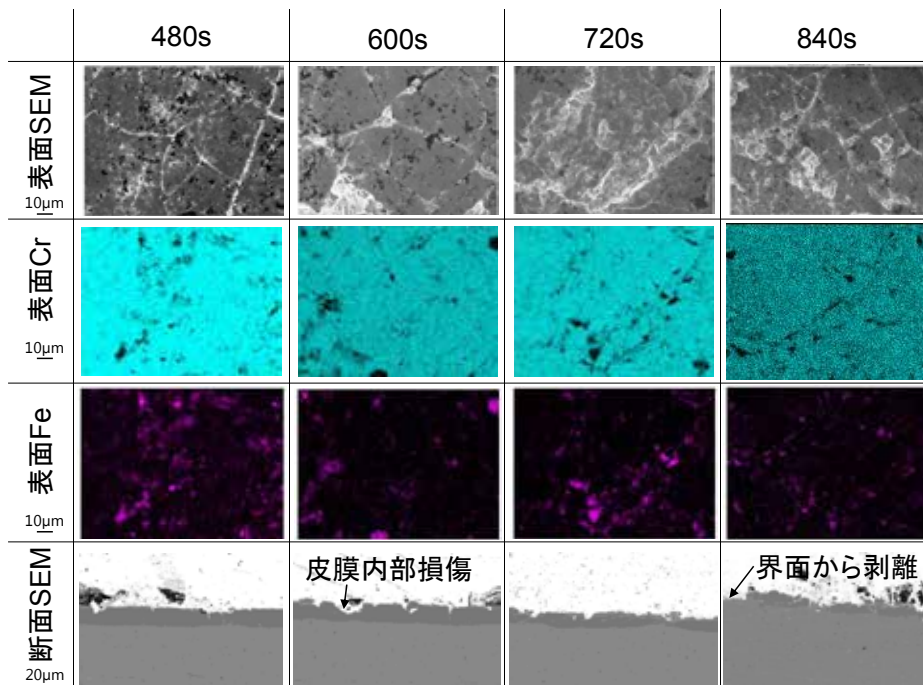
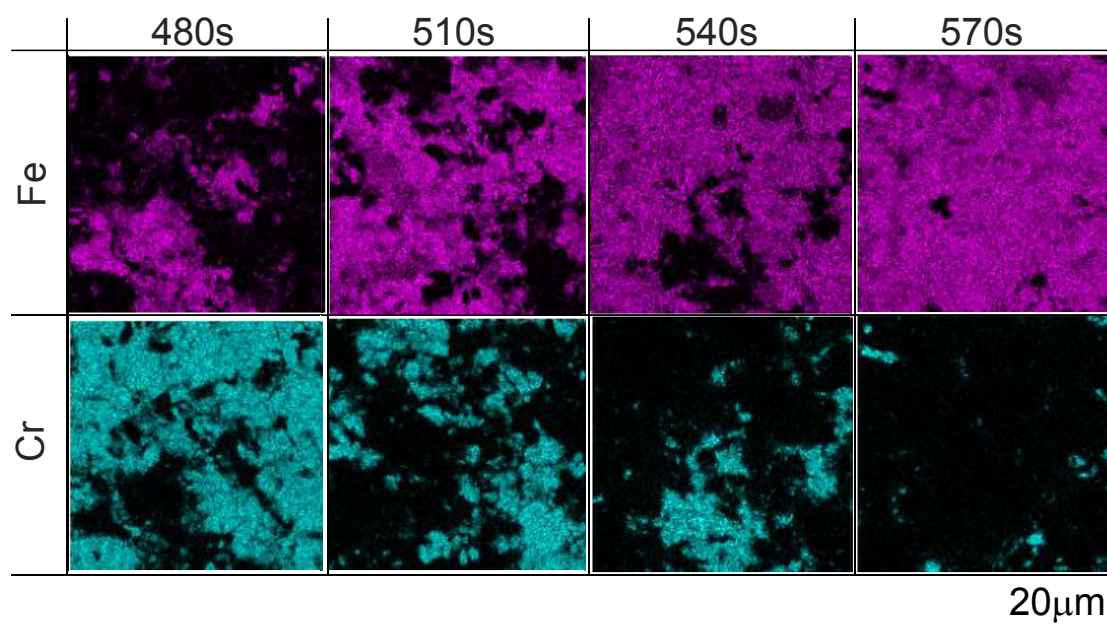


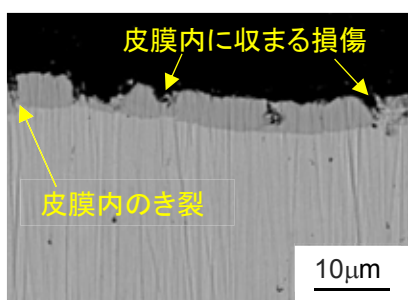
図 2-11 FPP(投射材粒径：200 μ m)加工を施したクロムめっき試験片(HV830，膜厚 20 μ m)表面の SEM 観察および EDS 分析結果

次に、硬さ HV 930，膜厚 5 μ m のクロムめっき試験片に対して FPP 加工を行った

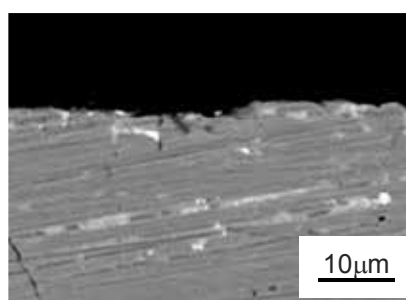
場合の結果を図 2-12 に示す。同図(a)は加工後の表面を面分析して得られた Cr 元素と Fe 元素の分布であり、480s 投射を行った段階で、クロムめっきが局所的に喪失して基材が露出していること、その後投射時間の増加に伴い基材が露出している範囲は急速に拡大し、570s 投射を行った時点ではほぼ完全にクロムめっき皮膜が喪失していたことが明らかになった。同図(b), (c)は、480s, 570s 各時点での試験片断面の観察結果である。この試験片は前述 (図 2-10) の結果と比べてめっき膜厚が小さいものであり、480s の時点で一部の損傷は界面まで到達している様子が見受けられた。また、570s の時点では断面観察結果からもめっき皮膜がほとんど喪失していることが見て取れ、表面観察結果に基づく考察と合致した。



(a) 表面の面分析結果



(b) 投射時間480sでの断面



(c) 投射時間570sでの断面

図2-12 FPP(投射材粒径：200μm)加工を施したクロムめっき試験片 (HV930, 膜厚5μm)のSEM観察およびEDS分析結果

2. 3. まとめ

MSE 試験および FPP 加工では、いずれも粒子の衝突による皮膜の損傷がもたらさ

れる。MSE 試験では、粒径や皮膜の成膜方法を変えて実験したところ、小さな粒子を用いると界面近傍であっても極めてローカルな皮膜の特性を評価していることになる。粒子の大きさによっては、皮膜内での損傷だけではなく界面にまたがった損傷も認められた。FPP 加工の場合でも同様に、膜厚が大きい時には損傷は皮膜の内部にとどまっていたが、膜厚が減じる、あるいは当初から膜厚が小さい条件では界面での損傷が生じていた。つまり両者の結果とも、衝突する粒子に対して皮膜が十分な厚さを有している場合には、皮膜の内部において損傷が起き、残存膜厚が小さくなるにつれて、界面にまたがった損傷が生じることが示された。すなわち、膜厚があるしきい値を下回ったことを契機として、損傷メカニズムが皮膜内部での損傷から界面におけるはく離へと遷移することが推察された。

3. シミュレーションによる皮膜部材の応力分布解析

3. 1. 解析モデル

衝突解析は ANSYS ver18.0 を用いて行った。解析モデルを図 3-1 に示す。図に示すように解析は 1/4 カットモデルとし、静的押し込みとした。投射材を模擬した球は直径 3mm とし、弾塑性要素、アルミニウム合金の機械的特性を用いた。コーティング層は 0.1~0.5mm とし、構造用鋼、弾塑性要素を用いた。母材は 5mm とし、アルミニウム合金、弾塑性要素とした。

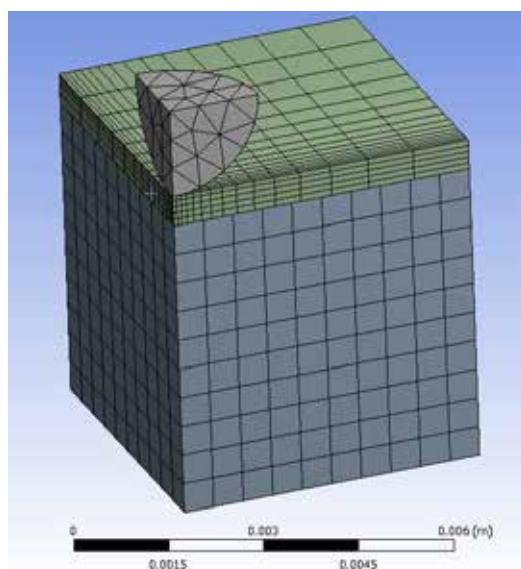


図 3-1 解析モデル

本来であれば、球および母材を構造用鋼とし、コーティング層を前章で扱った各種皮膜とするべきではあるが、それら皮膜の詳細な機械的特性（降伏応力など）を調査するのは難しいため ANSYS ver18.0 の材料データベースから機械的特性の異なる材料を選定し、上記の設定とした。これに加え、扱う皮膜が硬質膜である点を加味し、

モデルの構造用鋼の降伏強さを 2.8GPa とし，降伏しない条件で実施した．

押し込み荷重を 1N とし，各コーティング厚さにおける最大せん断応力について検討を行った．

3. 2. 解析結果

解析結果を図 3-2 に示す．図よりコーティング層が 0.1mm の場合にはコーティング層と母材の界面に最大せん断応力が生じていることがわかる．また，0.3mm および 0.5mm の場合にはコーティング層内部で最大せん断応力が生じていることがわかる．この結果から，コーティング層が薄い場合には界面からき裂が発生する可能性が高いことが示唆された．この結果は，前項で示された膜厚があるしきい値を下回った場合に，皮膜の損傷が内部から界面に遷移する傾向と一致している．

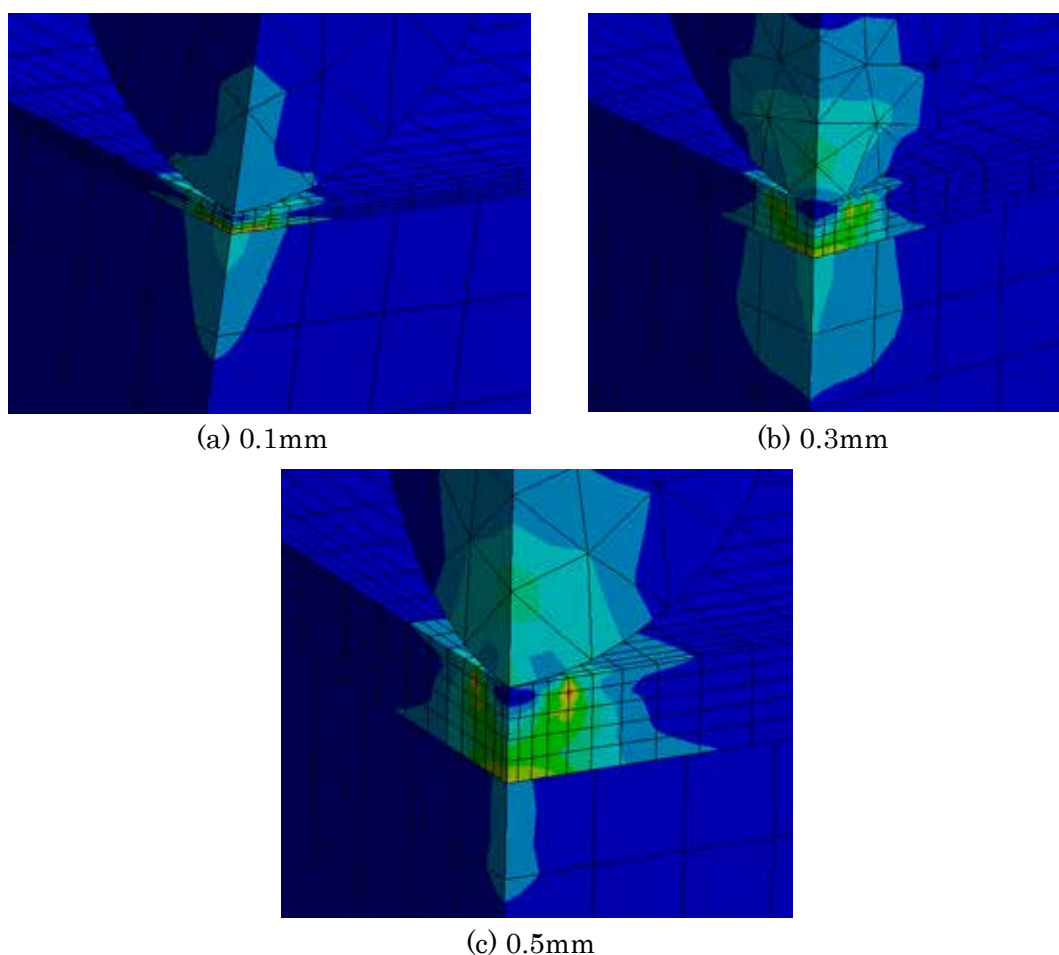


図 3-2 解析結果(せん断応力分布)

3. 3. まとめ

界面をモデル化して，粒子衝突を静的押し込みによって模擬し，解析を行った．その結果，衝突面における定性的な応力分布の傾向を明らかにすることができた．コー

ティング層の厚さが薄くなるにつれて、最大せん断応力の発生位置が界面近傍へと遷移していくことが示唆され、この知見は MSE 試験および FPP 加工を通して得られた、残存膜厚の現象に伴い損傷発生部位が皮膜内から界面へと遷移していくという傾向を定性的に裏付けた。すなわち、適切な厚さを持つ皮膜部材に対して、適切な衝突条件で粒子を衝突させた場合に、皮膜内部ではなく界面での離が発生する可能性が、解析的アプローチからも裏付けられた。このような界面はく離が支配的に生じる条件でエロージョン負荷を皮膜部材へ与え、その際の界面の強度を逆問題的に解くことができれば、皮膜密着強度を定量的に推定可能になるものと考えられる。

この点を踏まえ、次章ではエロージョンをもたらす粒子衝突を、より制御された条件によって模擬的に生じさせることに主眼を置いた落錘試験用プラットフォームの開発について述べる。

4. 落錘実験による皮膜部材の損傷挙動

4. 1. 試験装置の構築

エロージョン損傷は、流体中を飛翔する無数の粒子が衝突したことによって生じる損傷である。それらの粒子はその寸法、形状、飛翔速度にばらつきがあり、個々の粒子がどのような条件で衝突した結果、エロージョンが生じているのかということ定量的に取り扱うことは現実的に難しい。そこで、エロージョン損傷をもたらす粒子衝突を、任意のエネルギーが与えられた落錘の衝突によって模擬することを考え、その試験のためのプラットフォームを設計・構築した。

作製した試験装置の概観を図 4-1 に、落錘機構の構造を図 4-2 に示す。この試験装置は、先端に軸受球($\phi 0.8\text{mm}$)が取り付けられた落錘軸を試験片(皮膜部材)に対して所定の高さより自由落下させることによって、皮膜へ衝撃負荷を与えることができる。落錘軸の上部には、L 字形の切り欠きを有する跳ね上げ板が取り付けられている。この跳ね上げ板は、その下面に接触して回転するクランク機構によって持ち上げられる。クランクピンが最上部に到達したときに跳ね上げ板の切り欠き部に差し掛かり、落錘軸が自由落下する仕組みである。落錘軸やクランク機構は同一のステージ上に設置され、このステージの高さは送りねじによって調整可能となっている。これによって、落錘の落下高さがある範囲内で任意に設定することができる。落錘実験を施した際に、皮膜や界面の損傷をその場で検出することを狙いとして、本試験装置には、落錘衝撃を受けた際の皮膜の損傷を検出するためのアコースティックエミッションセンサを皮膜試験片の裏側(皮膜を有さない表面)へ設置可能な構造とした。

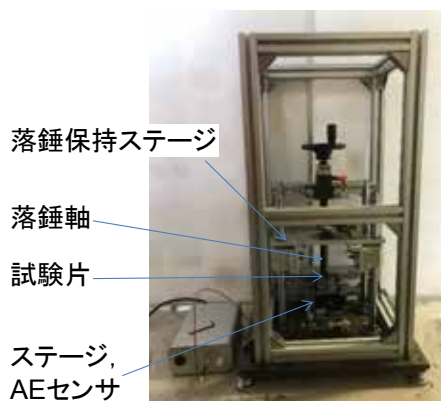


図 4-1 落錘衝撃試験機の概観

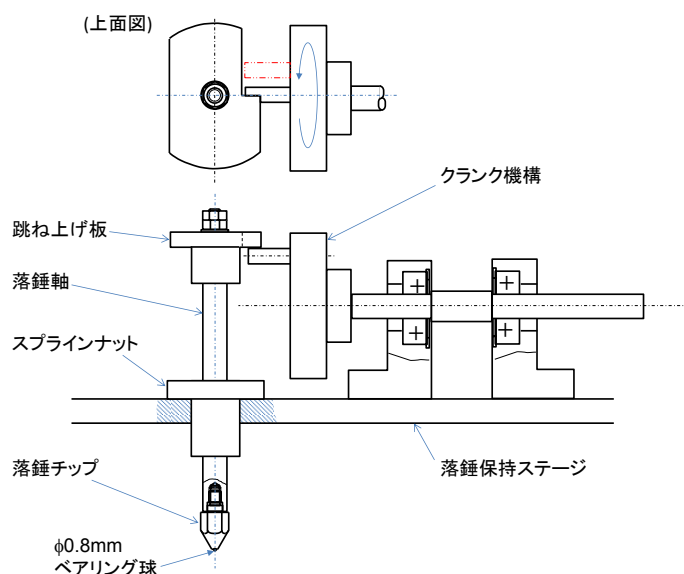


図 4-2 落錘機構の構造

本試験装置の落錘軸の自重は約 1N であり，さらに追加ウェイトを搭載することも可能である．落錘の最大落下高さは 30mm として設計した．皮膜表面から 1mm の高さから，落錘軸の自重のみによって自由落下させた場合，落錘が持つ位置エネルギーは約 1mJ となる．一方，エロージョンが生じる条件の一例として，粒径約 200 μm の鋼微粒子が 30m/s の条件で飛翔し衝突するという場合（なお，この条件は，2 章で述べた FPP 加工による粒子の衝突条件に概ね合致する）を仮定すると，このとき粉体のもつ運動エネルギーはおよそ 0.1mJ となる．つまり，本試験装置では，仮定したエロージョンの発生条件の約 10 倍（ないしはそれ以上）の大きさのエネルギーを落錘に与えての実験が行われる．

4. 2. 落錘実験

作成した落錘衝撃試験機を用いた落錘試験を行った．対象とした皮膜試験片は，S45C の円盤($\phi 15$, t4)の片側表面を鏡面状に研磨し，その表面へクロムめっき（めっき浴：サージェント浴，膜厚：5 μm ）または DLC 薄膜（成膜方法：イオン化蒸着法，膜厚：0.3 μm ，Si 中間層膜厚 0.05 μm のものおよび中間層無しのもの二種類）を成膜することで準備した．以下，各試験片をめっき試験片，Si-DLC 試験片，単層 DLC 試験片と称する．

落錘試験の条件としては，落下高さ，落錘の重量（追加ウェイトの有無で調整），および衝撃を繰返し与える回数をパラメータとした．本研究の段階では落錘試験の実施条件を探索することを課題に据え，密着性評価に適した条件を模索した．

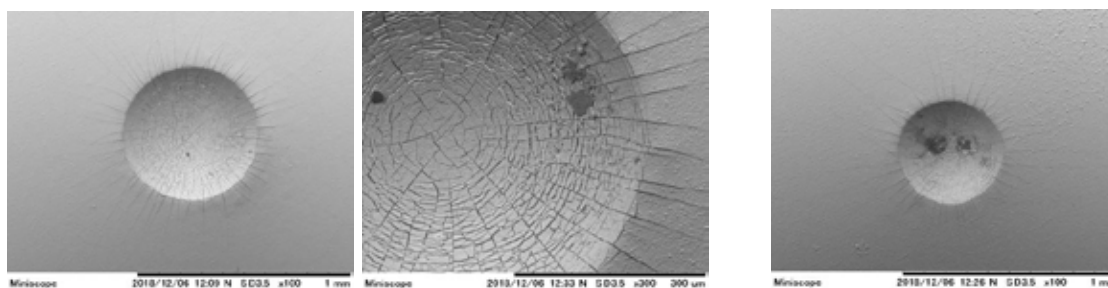
図 4-3 に，落錘試験によって形成された打痕を走査型電子顕微鏡（SEM）によって観察した結果を示す．落錘試験の条件は図中に記載している．同図(a)，(b)はめっき試

験片についての結果であり、打痕内部では円周上のき裂と放射状のき裂が、打痕外周部では放射状き裂が発生している様子が観察された。皮膜は、はく離を生じることなく、き裂によって分断された状態で基材の塑性変形に追従しているように見受けられる。

次に、同図(c)~(f)に示す Si-DLC 試験片と単層 DLC 試験片の結果に着目する。まず、落下高さが小さい(1mm)条件の場合には、単層 DLC 試験片において打痕内部に部分的な皮膜はく離が観察された。同じ条件で Si-DLC 試験片に落錘を衝突させた場合には、はく離が生じていなかった。中間層を有する条件では単層のそれと比べて密着性が高い。すなわち、密着性に乏しい単層試験片では、同じ条件での衝撃によって皮膜がはく離に至ったものと理解される。打痕部におけるはく離の有無を通して、定性的な密着性の良否を判定可能であることを示唆する結果といえる。

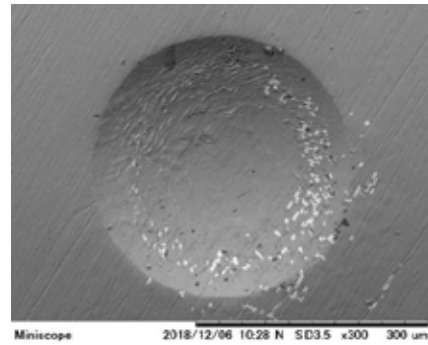
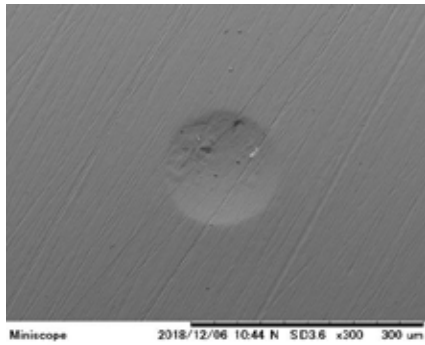
一方、これらの試験片を落下高さ 25mm から落下させた場合には、打痕の内部および外縁部において皮膜のはく離が認められた。なお、はく離の発生は打痕内部よりも外縁部(この部位では、打痕部がくぼみ変形をしたのに伴って基材が隆起する変形を生じていると考えられる)の方に、むしろ多く発生していることがわかった。この条件の場合も、単層 DLC 試験片の方がはく離は広範囲であることが定性的にはあるが視認された。この結果は、密着性の良否とはく離発生の度合いとの間に相関性があるという先述の考察とも合致する。

今回実験を行った範囲では、いずれの条件も落錘の打痕は基材まで到達していた。とくに、与えたエネルギーが大きい条件においては、基材の変形に追従できずに皮膜が分断されている様子が見受けられた。これらの結果は、落錘の衝突に伴って生じる変形領域が、皮膜の寸法に対して過大であったことを意味する。皮膜のスケールや落錘の衝突条件、接触面圧に影響する圧子先端形状を適切に設定していくことが課題として見出された。



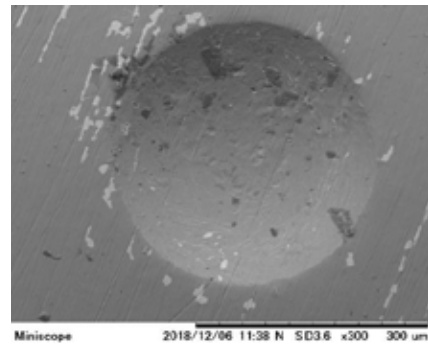
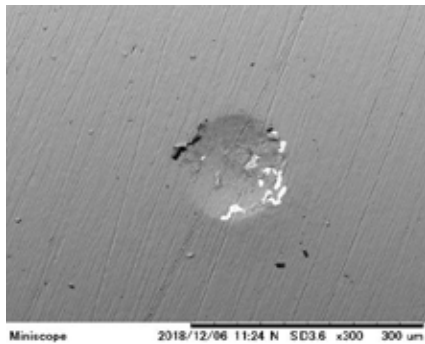
(a) めっき試験片，落下高さ 25mm，落錘重量 4.5N
(落錘のエネルギー：100mJ)

(b) めっき試験片，
落下高さ 25mm，落錘重量 1N
(落錘のエネルギー：25mJ)



(c) Si-DLC 試験片, 落下高さ 1mm
落錘重量 1N (落錘のエネルギー : 1mJ)

(d) Si-DLC 試験片, 落下高さ 25mm
落錘重量 1N (落錘のエネルギー : 25mJ)



(e) 単層 DLC 試験片, 落下高さ 1mm
落錘重量 1N (落錘のエネルギー : 1mJ)

(f) 単層 DLC 試験片, 落下高さ 25mm
落錘重量 1N (落錘のエネルギー : 25mJ)

図 4-3 各種試験片への落錘実験によって形成された打痕の SEM 観察結果

4. 3. まとめ

エロージョン損傷を模擬するための落錘実験プラットフォームを構築した。作製した試験機を用いた落錘実験では、打痕部で皮膜はく離が認められた面積の大小は密着性の良否と対応していた。はく離の生じ方が、密着性の定性的な評価指標となる可能性が示唆された。一方、当初狙いとしていた、皮膜・基材界面でのはく離を生じさせるには落錘が皮膜へ与えるエネルギーが過剰であったと判断され、衝突部近傍の塑性変形領域の大きさと皮膜の厚さとの相対的な関係を、MSE 試験や FPP 加工と同等程度になるように、落錘実験の条件を調節する、すなわち衝突エネルギーを小さくするか、皮膜を厚くする必要があると考えられた。

5. 結言

本研究では、エロージョン損傷を受ける皮膜部材の界面密着力を、実験と解析とを組み合わせ推定する新たな手法の提案を目指して、種々の硬質膜へのエロージョン実験、エロージョンを受ける皮膜部材における応力場の解析、ならびにコントロール

された衝撃負荷によってエロージョンを模擬した損傷を与えるための落錘試験装置の構築を行った。

まず、二種類のエロージョン試験，すなわち MSE 試験，FPP 加工の結果から，粒子の大きさや形状，皮膜の残存膜厚によっては，皮膜内での損傷から界面での損傷へのエロージョンの現象が遷移することがわかった．この実験結果は，シミュレーションを通して求めた，皮膜厚さの現象に伴って最大応力の発生部位が界面付近へ近づくという傾向によって，合理的に説明できた．

落錘試験については，密着性が低いと考えられる皮膜ほど，打痕部およびその近傍における皮膜の部分的脱落が顕著に認められ，このような観点から密着性の良否を定性的には評価できる可能性がある．界面近傍での損傷が起きるような条件で落錘実験が行えれば，解析結果との合わせ込みによって，本研究で最終的に目指す密着力評価が行える可能性があるものと考えている．

6. 謝辞

本研究は，JFE21 世紀財団からの研究助成によって行われた．関係各位に深謝の意を表します．

7. 参考文献

- 1) 松原ら：硬質薄膜の摩耗特性評価のためのマイクロスラリージェットエロージョン (MSE) 試験方法とその装置の開発，日本機械学会論文集 C 編，74，739 (2008-3) 218-224.
- 2) 大冢尾・宮島ら：2 種類の投射粒子を用いた MSE 法によるバナジウムカーバイド膜の表面強度評価，トライボロジー会議 2014 秋 盛岡予稿集 (2014) B24
- 3) 清水・宮島ら：冷間工具鋼に被覆された TiAlCrSiN/CrN 膜の摩耗特性，日本機械学会 2016 年度年次大会 (2016) S1170303
- 4) 宮島・富田ら：微粒子エロージョンによる硬質薄膜の耐衝撃・剥離性評価方法，トライボロジー会議 2017 春 東京 予稿集 (2017)，A30