

溶射技術白書*

ASM インターナショナル溶射部会
日本語訳監修：日本溶射学会国際交流委員会

Thermal Spray Technology White Paper (Japanese Translation) **

Thermal Spray Society, Affiliate of ASM International
Editorial Supervision for Japanese Translation: International Exchange Committee,
Japan Thermal Spray Society

Mission

This document is to better educate government, industry and academia as to the benefits of Thermal Spray Technology. Critical aspects of this document are to highlight the importance of education, training and internships of students, research in applied science/ engineering/ fundamental science and in collaboration efforts between academia, government and universities to advance technology from theory to practice. It is anticipated that greater understanding and appreciation of the value of thermal spray for improved sustainability will lead to government and public funding for additional growth.

ミッション

この白書は、政府、産業界、アカデミアが溶射技術の利点を理解する一助となるよう意図したものである。特に、学生の教育、訓練、及び、インターンシップ、応用科学/工学/基礎科学における研究、そして、技術を理論から実践へと進めるための産学官連携の重要性を強調することに力点を置いた。溶射の持続的発展に寄与する価値が正しく理解、評価されることで、さらなる成長に向けた国や公的資金につながることを期待する。

溶射技術の価値

溶射技術は、省エネルギー、環境改善、生活環境の快適性の実現と資源の節約により、人びとの生活を支える助けになる。

溶射とは何か？

溶射は、エンジニアリング部材の表面処理及び表面再処理のための確立された産業技術である^{1, 2)}。金属、合金、金属

酸化物、金属/セラミック混合物^{*1}、カーバイド(炭化物)、線材、棒材、そして様々な複合材料を多様な基板材料に堆積させることで、特殊なコーティング微細組織やニアネットシェイプ部材の形成が可能である。溶射コーティングによって、基材・部材の保護もしくは特性改質のための機能性表面が供される。世界中の数多くの産業において、多くの必須アプリケーションに溶射技術が利用されている²⁾。主要なアプリケーション機能として、修復・補修、防食やアブレシブ、エロージョン、そして、スカuffingなど各種耐摩耗、断熱または熱伝導、酸化および高温腐食防止、電気伝導または絶縁、ニアネットシェイプ加工、封止、放射率設計、快削性コーティング、装飾用途などが挙げられる。

溶射プロセスは、施工が容易で、作業コストが比較的安く、ほぼ全ての産業アプリケーションにおいて有益である。この環境に優しいプロセスによって、低コスト化、工学的性能の向上や部材の長寿命化が見込まれる(図1)。

溶射のメカニズム

図2aおよび2bに、特に熱・エネルギー源および溶射材料の観点から整理した溶射プロセスの要件を示す²⁾。材料を溶

* 本溶射技術白書は、ASM インターナショナル溶射部会によって作成された原文を和文に翻訳したものを日本溶射学会国際交流委員会において監修、一部注釈を加えたものである。全ての内容はオープンソースで、溶射関係者は、図表を含め無料で使うことが可能で、どのような形式にも使用・改変して構わない。

** This thermal spray technology white paper was originally translated into Japanese by Thermal Spray Society/ASM International, followed by correction and annotation by the International Exchange Committee of the Japan Thermal Spray Society. For use by anyone in the community without charge. All content is open source, and can be used or revised for any format.

*1一部は、サーメットと呼ばれる。

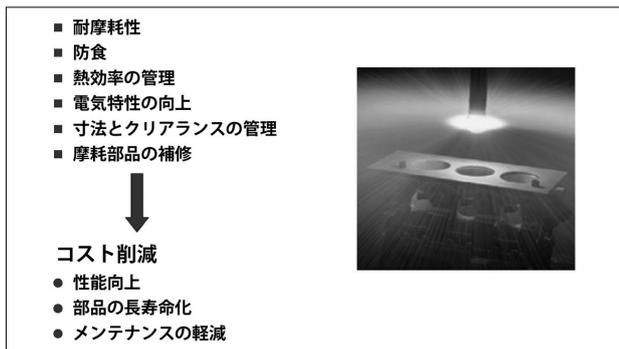


図1 性能向上, 部品の長寿命化, メンテナンスの軽減につながる溶射技術のメリット

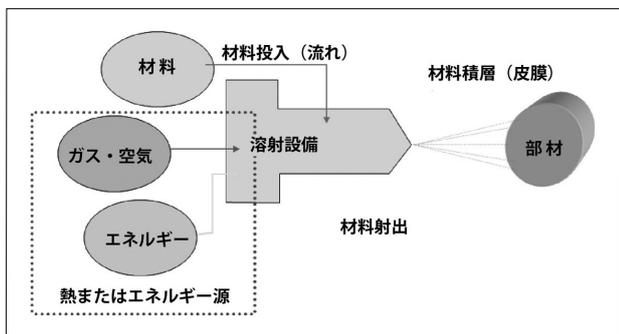


図2a 溶射における熱・エネルギー源の要件



図2b 溶射皮膜形成の原理

射ガン又はトーチに投入するため、また材料の溶融に必要な熱を発生させるために、ガス(時には空気と共に)が必要となる。溶射プロセスでは高速度のガスにより溶射材を微小な溶融粒子として加速し、基材に衝突、凝固、附着させる。密着のメカニズムは主に機械的なものであるが、冶金的結合による場合もある。こうして、各層は下の層に頑丈に接着し、“パンケーキのような^{*2}”積み重なったスプラット構造を形成する。よって、コーティング特性は、溶融粒子の運動エネルギーと熱エネルギーに強く依存することになる。

図3に現在実際に用いられている各溶射法を示す。また、図4aと4bには、各溶射法、および溶射材料における粒子温度と速度についてそれぞれ示した。なお、追補1には^{*3}、各溶射プロセスについてより詳細な情報を記載してある。

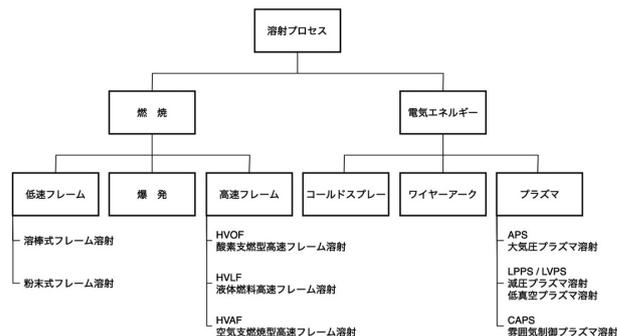


図3 溶射プロセスの種類 (HVOF: 酸素支燃型高速フレーム溶射, HVLV: 液体燃料高速フレーム溶射, HVAF: 空気支燃型高速フレーム溶射, APS: 大気圧プラズマ溶射, LPPS/LVPS: 減圧プラズマ溶射/低真空プラズマ溶射, CAPS: Controlled Atmospheric Plasma Spray (雰囲気制御プラズマ溶射))

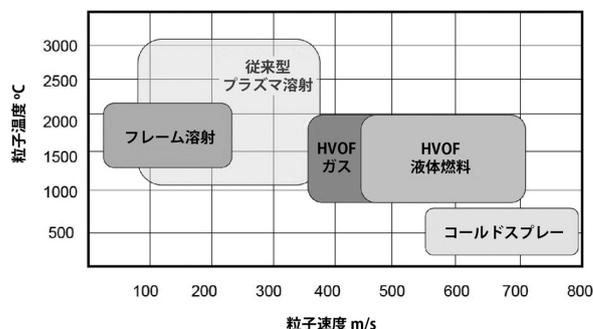


図4a 溶射プロセスにおける粒子温度と粒子速度の関係

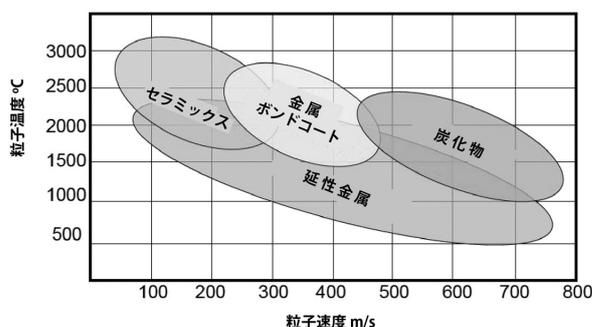


図4b 異なる材料系における粒子温度と粒子速度の関係

図3の内5つのプロセスが商業的に利用されており、残り1つの新プロセスはまだ開発段階である。フレーム溶射法(粉末/ワイヤー)、爆発溶射法、高速フレーム溶射(HVOF)の3プロセスは、燃焼を利用した手法である。残りの2プロセス、プラズマ溶射法とアーク溶射法は、溶射材料の溶融に電気エネルギーを用いている。これら5つの溶射法の中のうち、

^{*2} pancake に対する訳語。日本語ではホットケーキと訳されてきたが、近年では、パンケーキという用語も定着し、厚みのあるものをホットケーキ、薄いものをパンケーキと呼ぶことが慣例となってきたことから、薄い溶射スプラットに対応してパンケーキの表現を採用した。

^{*3} ASM Internationalの Thermal Spray White Paper のウェブページ (<https://www.asminternational.org/web/tss/technical/white-paper>) にて原文や追補 (Addenda) について確認できる。

HVOFと爆発溶射法は高い付着強度を示し、非常に緻密な微細構造を有するコーティングが得られる。減圧プラズマ溶射法(LPPS)や真空プラズマ溶射法(VPS)など^{*4}によるプラズマ溶射コーティングにおいても、比較的高密度で酸化物を含まないコーティングが得られる。「コールドスプレー」は熱エネルギーを抑え、高速で高い運動エネルギーを利用する新しいプロセスである。実際には、いわゆる成膜中に粒子が溶融しない、固相状態での製膜プロセスである。HVOFに比べて、粒子温度は低いが高速度は高く、そのためコーティング構造は非常に緻密なバルク鍛造材に近いものとなる。

図4bは、様々な溶射材料において粒子速度と温度の関係を概観したものである。本図は、各溶射プロセスと材料の組み合わせにおいて溶射パラメータの最適化を図る上で重要な知見を与えてくれる。例えば、高融点で低熱伝導率を示す金属酸化物セラミックス材料には、適切な性能と製造コストの観点から、一般にエンタルピーが高く粒子温度は高くなるが粒子速度は低い熱源が要求される。対して、炭化物サーメットでは真逆のパラメータ、すなわち低い粒子温度と高い粒子速度が要求される。その結果、脱炭を抑えて脆性相の形成を抑制し、耐摩耗性の最適化が可能となる。図4bに見られるように、他の材料は金属酸化物セラミックスと炭化物サーメットの中間に位置している。

市場規模と成長分野

溶射の市場規模は推定65億ドルである³⁾。重要な市場セグメントは、航空宇宙、及び、発電用ガスタービン産業である。収益の60%はこれらの産業に関わるものと推定される⁴⁾。溶射装置及び材料サプライヤが市場の約20%を占め、残りはジョブショップと仕上げ加工業者である。歴史的に見ると、溶射技術が特に盛んな地域は北米と欧州であった。しかしながら近年の動向として、アジアと南米での市場成長率が高い。例えば、中国では毎年多くの専門技術者を養成・輩出し、また国全体としても大きな経済発展を遂げているため、大きな市場成長を見せている。航空宇宙のような従来市場においても成長しているが、代替エネルギー分野、半導体・電子機器、鉄鋼、紙・パルプにおいても、更なる成長が見込まれている⁵⁾。

溶射技術の価値： 一般的なアプリケーションの成功例

省エネに寄与し、環境改善に役立ち、生活環境をサポートし、廃棄物削減によって我々の生活を持続可能にしている溶射技術の事例を以下に示す。ASMハンドブック5A巻：溶射技術ハンドブックにおいて成功例をさらに確認することができる⁶⁾。このハンドブックでは、タービン関連、海洋性及び大気腐食関連、再生可能エネルギー、オイルサンド、自動車、

電子機器と半導体、バイオメディカル、ランディングギア(溶射による硬質クロムめっきの代替品)、主要な金属/鉄鋼、紙、印刷、原子力、石油化学、繊維産業における例から、溶射が社会にもたらす価値や恩恵について言及している。追補2は、このハンドブックで強調された多数の適用例を要約したものである。溶射とその市場の成長に深く関わる適用例をいくつか下記にまとめる。

- a. **航空宇宙及び産業用ガスタービン**^{6,7)}：航空宇宙及び産業用ガスタービン市場は、溶射技術とその信頼性が高まるにつれて拡大し続けると考えられる。重要な成長分野は、最先端断熱材(熱遮蔽)、耐摩耗性コーティング、クリアランス制御コーティング、耐酸化・耐高温腐食合金材料である。これらのコーティングの長所は、エンジン効率向上につながるより高温での運転、省エネ運転、温室効果ガス削減につながる二酸化炭素排出量の低減、メンテナンス回数の削減による材料廃棄物削減にある。
- b. **エネルギー・代替エネルギー**^{6,7)}：世界の人口が70億人から増え続けている現在^{*5}、先進国と同様に新興国でも、エネルギー問題への新たな改善への解決策が必要とされている。既存の化石燃料である石炭・ガス、石油に加え、水力発電、風力、燃料電池、バイオ燃料、バイオマス、太陽光発電は、再生可能エネルギーにおいて溶射技術が役に立ついくつかの事例である。タービンメーカーと電力会社は、これらのエネルギー源に関心を寄せており、コストが見合うものについては、複合システム化を開始している。
- c. **バイオメディカル**⁶⁾：医療技術が人の寿命を延ばすにつれ、医療用インプラントはますます一般的となり、溶射技術は大きな役割を担うことが予想される。その一つに、骨や生体組織が成長する不活性表面の形成が挙げられる。溶射皮膚膜は膝や腰のインプラントの進歩にひと役買っている。
- d. **自動車**⁶⁾：政府が車の燃費に関して新しい環境規制を設けることにより、自動車メーカーは、車両重量を減らしエンジン効率を改善する代替策の探索を余儀なくされている。成長領域の一つは、アルミ製エンジンブロックのシリンダ内径コーティングである。アルミ製エンジンブロックにより車両重量が軽減され、コーティングに気孔があることからシリンダとピストンリング間の摩擦低減に役立っている。
- e. **付加製造(コールドスプレー応用)**^{6,8)}：従来溶射プロセスの改良に加え、コールドスプレーにおいても成長が見られる。これは重要で高価な部品の再生や補修用途での成長である。米軍は重要部材向けに仕様書を整え、実装してきている。研究されている重要な材料としては、アルミニウム、亜鉛-アルミニウム、アルミニウム-マグネシウム、銅、チタン、NiFeCrなど各種合金がある。コールドスプレーにおいて成長の可能性がある分野は、材料開発と材料製造工程である。

*4 原文に倣ったが、LPPS、VPS、また図3a中のVLPSは、いずれも商品商標にもなっているため、国内では、LPSと略されることも多い。

*5 2016年時点

f. 環境衛生と安全^{6, 9)}：溶射は、環境に優しく、持続可能な技術であることが示されてきた。現在、航空機のランディングギアや産業用油圧ロッドにおいて、HVOF 溶射した炭化物系皮膜が硬質クロムめっきの代替として使用されている。このように環境に配慮し、持続可能な製造プロセスであることは、市場の成長を支える上で望ましいものである。

溶射技術の応用と技術の成長に向けた産官学の取り組み

追補3の「溶射技術のリソースとリンク」には、主要な専門的業界団体、研究機関、国際会議、環境・健康・安全 (EH&S)、および溶射産業に関わる実務的な文書が紹介されている。この追補の要点は以下のとおりである。

1. 専門的な業界団体^{*6}：ASMインターナショナル溶射部会 (TSS)、ドイツ溶接協会 (DVS)、日本溶射学会 (JTSS)、欧州溶射協会 (ETSA)、中国表面技術協会溶射委員会 (TSCC)、日本溶射工業会 (JTSA)、韓国溶射協会 (KTSA)、国際溶射工業会 (ITSA)、ドイツ溶射工業会 (GTS) を始めとして、その他多数の協会と学会が溶射技術の拡大、技術の改善、産業の促進に貢献している。この目的のために、ASM関連団体である TSS と DVS が主催する国際溶射会議 (ITSC) をはじめとした国際会議や専門学会が毎年開催されている。ITSC は、アジア、欧州、北米で毎年順番に開催される。さらに、TSS は論文誌「Journal of Thermal Spray Technology」と溶射技術ハンドブックを発行している。これらの刊行物と ITSC などの国際会議や不定期に開催される小規模イベントは、新技術やアプリケーションの成長と促進に役立っている。

日本、中国、韓国、インド、シンガポールなどの国を結ぶアジア溶射会議 (ATSC) など、アジアの他の組織も会議を推進している。

欧州溶射協会、中国溶射協会、日本溶射学会、韓国溶射協会は、それぞれ独自の活動やイベントを主催している。また、ドイツ溶射工業会 (GTS)、国際溶射工業会 (ITSA)、日本溶射工業会 (JTSA) などの業界団体も独自のイベントを開催し、市場の成長を支えている。

世界の主要な専門的業界団体は、以下のウェブサイトを確認できる。

- a) ASMインターナショナル溶射部会 (Thermal Spray Society (TSS)) : www.asminternational.org/tss
- b) ドイツ溶接協会 (The German Welding Society (DVS)) : www.dvs-ev.de/en
- c) ドイツ溶射工業会 (German Association of Thermal

Sprayers (GTS)) : www.gts-ev.de

- d) 欧州溶射協会 (European Thermal Spray Association (ETSA)) : www.etsa-thermal-spray.org
- e) 国際溶射工業会 (International Thermal Spray Association (ITSA)) : www.thermalspray.org
- f) 日本溶射学会 (Japan Thermal Spray Society (JTSS)) : www.jtss.or.jp
- g) 中国表面工学協会溶射委員会 (Thermal Spraying Committee of China Surface Engineering Association (TSCC)) : www.chinatheramspray.org
- h) 中国溶射協会 (Chinese Thermal Spray Association (CTSA)) : www.chinaspraying.com
- i) 韓国溶射協会 (Korea Thermal Spray Association (KTSA)) : www.thermalspray.or.kr
- j) 溶射・表面工学工業会 (Thermal Spraying and Surface Engineering Association (TSSEA)) : www.tssea.org
- k) アジア溶射学会 (Asian Thermal Spray Society (ATSC)) : ウェブページアップデート中。日本溶射学会を通じてコンタクト可能)

2. 業界がサポートする研究、トレーニング、アプリケーション開発：最も重要な目的は、市場への技術移転を促進するために、研究と商用化のギャップを埋めることである。第2の目的は、実際の問題に対する技術的な解決策を実証することである。第3の目的は、各種産業における学生の教育とトレーニングである。世界には様々なレベルで支援があるため、各国の産業支援プログラムの詳細については、上記ウェブサイトや追補3といった様々な専門的業界団体に関する情報を確認することを推奨する。

3. 政府出資の組織/産業^{*7}：追補3では、溶射技術の発展を支える多くの研究機関を紹介している。溶射が重要な表面工学として世界的に実際に認知されていることを強調するために、世界のいくつかの主要な研究機関を以下に示す。また、溶射の研究を行っている学術・研究機関の詳細なリストは、<http://tss.asminternational.org/portal/site/tss/> で参照可能である^{*8}。

- a) カナダ国立研究所 (National Research Council of Canada (NRC)) : www.nrc.gc.ca
- b) 国立研究開発法人物質・材料研究機構 (National Institute for Materials Science (NIMS)) : www.nims.go.jp
- c) ユーリッヒ研究所 (Forschungszentrum Juelich GmbH, IEK-1, Germany) : www.fz-juelich.de

^{*6} 英語版においても団体名に表記の揺らぎが見られたため、各言語版、また、該当ウェブサイトを参照することにより表記の統一に努めた。和訳にあたり、各団体の構成をウェブサイト等で確認し、学術主体の団体を学会、学術・産業共同体を協会、学協会の関連団体を部会、業界団体を工業会とした。ウェブサイトは2021年10月1日現在アクセス可能なものにアップデートした。また、重複箇所は削除した。

^{*7} リストは、一部加筆修正。

^{*8} 日本国内の大学、公的研究機関などの関連団体は日本溶射学会のリンクページにおいて確認することが可能である (<http://www.jtss.or.jp/link.htm>)。

- d) NASA グレン 研究センター (NASA Glenn Research Center) : www.nasa.gov/centers/glenn/
- e) 韓国 科学 技術 院 (Korea Institute of Science and Technology (KIST)) : https://eng.kist.re.kr/kist_eng/main
- f) BGRIMM 技術 グループ (Beijing General Research Institute of Mining and Metallurgy (BGRIMM)) : <http://english.bgrimm.com/>
- g) 粉末冶金新材料国際先端研究センター (International Advanced Research Center for Powder Metallurgy & New Materials, Hyderabad, India (ARCI)) : <https://arci.res.in/>
- h) オーストラリア連邦科学産業研究機構 (Commonwealth Scientific & Industrial Research Organization (CSIRO)) : <https://www.csiro.au/>
- i) ウラル溶接研究所 (URAL Welding Institute) : アドレス確認できず
- j) フランス国立科学研究センター (Centre national de la recherche scientifique (CNRS)) : <http://www.cnrs.fr/en>
- k) 原子力・代替エネルギー庁 (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA)) : <https://www.cea.fr/english/>
- l) NY州立ストーニーブルック大学溶射研究センター (Center for Thermal Spray Research, Stony Brook University (CTSR)) : <https://www.ctr-sunysb.org/>
- m) アーヘン工科大学 (RWTH Aachen University) : <https://www.rwth-aachen.de/>
- n) リモージュ大学 (Université de Limoges) : <https://www.unilim.fr/>
- o) 国立研究開発法人産業技術総合研究所 (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)) : <https://www.aist.go.jp/>

重要な研究分野

五大陸にあるこれらの研究機関や大学の多くは、溶射技術によって人々の生活を向上させる新たな方法を模索している。主な研究分野には、プロセスの信頼性及び堅牢性の向上、材料と装置技術の拡大、エネルギーと輸送分野での適用推進などがあるが、これに限定されるものではない。液相前駆体やサスペンション溶射、コールドスプレー、および診断とモデリングは革新的な研究分野の例である。溶射工学・技術の発展を促すために取り組むべき重要な課題と解決策の概要を追補4に示す。

文 献^{*9}

- 1) H. Herman, S. Sampath and R. McCune: Thermal Spray: Current Status and Future Trends, MRS Bulletin, **25**, 7 (2000), 17-25.
- 2) M. Kutz: Handbook of Environmental Degradation of Materials, Oxford: William Andrew/Elsevier (2012).
- 3) M. Dorfman and A. Sharma: Challenges and Strategy for Growth of Thermal Spray Markets: The Six-Pillar Plan, J. Therm. Spray Technol., **22**, 5 (2013), 559-563.
- 4) P. Hanneforth: The Global Thermal Spray Industry-100 years of Success: So What's Next?, Adv. Mater. Process., **164**, 5 (2006), 14-16.
- 5) M. Fukumoto: The Current Status of Thermal Spray in Asia, J. Therm. Spray Technol., **17**, 1 (2008), 5-13.
- 6) R. C. Tucker: ASM Handbook, Volume 5A: Thermal Spray Technology, ASM International (2013).
- 7) C. Handwicke and Y. C. Lau: Advanced in Thermal Spray Coatings for Gas Turbines and Energy Generation: A Review, J. Therm. Spray Technol., **22**, 5 (2013), 564-576.
- 8) M. Oakham: Direct Manufacturing Comes of Age, Australian Manuf. Technol., August, (2010), 38-39.
- 9) N. Krishnan, A. Vardelle, and J. G. Legoux: A Life Cycle Comparison of Hard Chrome and Thermal Spray Coatings: Case Example of Aircraft Landing Gears, Proc. Int. Therm. Spray Conf. 2008: Cross Borders, DVS-ASM, Hamburg, (2008), 212-216.

*9 一部、整合性とするための修正あり。