特集

粒子積層プロセスの新しいトレンド

コールドスプレーの概要と 研究・開発の動向*

榊 和彦**

Overview of Cold Spray Technology and Trend of Its Research and Development*

by SAKAKI Kazuhiko**

キーワード コールドスプレー, 溶射, 超音速流, 粒子積層, 低温プロセス

1. はじめに

溶射技術が開発されてちょうど100年の節目を迎え、今年5月に米国シアトルで行われた国際溶射会議(ITSC 2006)は“Celebrating the 100th year of thermal spray technology”として行われた。ここで紹介するコールドスプレー¹⁾は、このITSC 2006においても最新の溶射法として取り上げられ、最も注目されたセッションの一つであった。

溶射は、粒子の加速・加熱に火炎、プラズマなどを使用するが、コールドスプレーは高速微粒子衝突による表面改質技術で常温から高々500℃程度のガスにより加速することが大きな違いであり、ある意味で粒子が溶けていないので溶射には分類されないかもしれない。

本報では、最近、特に溶射の分野で新しい技術として注目され、経済産業省の部材分野の技術戦略マップなどにも記載された²⁾コールドスプレーの原理、最近の動向などについて概説する³⁻⁶⁾。

2. コールドスプレー技術の開発の経緯

コールドスプレーは、図1に示すように材料粉末の融点または軟化温度よりも低い温度のガス(作動ガス)を先細末広形のラバルノズルによる超音速流にして、その流れ中に材料粒子を投入して加速させ、固相状態のまま基材に高速で衝突させて皮膜を形成する技術である。また、皮膜や基材に溶射法ほどの熱が加わらずかつ皮膜は圧縮性の残留応力を帯びているため、数μmから数十mm程度の厚膜が作製可能で、造形技術としても期待されている。

コールドスプレーは、1980年代に入りロシア科学アカデミーの西シベリアの拠点であるNovosibirsk研究所にてA. N. Papyrin博士、A. P. Alkimov博士らが研究開発を行った。彼らは、この間の研究でコールドスプレーにとって大変重要な臨界速度、すなわち粒子を基材に衝突させた際に粒子が皮膜を形成しはじめる衝突速度があることを報告している⁷⁾。この報告で図2に示すように銅、鉄、ニッケル、アルミニウムの粒子を銅基材に衝突させた際、

図1 コールドスプレーの概念図

図2 銅基材への粒子衝突速度と付着率の関係
ならびに臨界速度⁷⁾

*原稿受付 平成18年9月5日

** 信州大学工学部 Faculty of Engineering, Shinshu University

衝突速度が550~600 m/s 以上になると成膜しはじめ、銅粒子においては約800 m/s の衝突速度で70% 程度の付着率（供給した粉末のうち成膜する割合）が得られることを示している。これらの知見をもとに、彼らは特許を出願し、1990年にロシア、1994年にアメリカ合衆国⁹⁾で、1995年にヨーロッパで認可された。

その後、コールドスプレーは、ロシアのほかアメリカとドイツを中心に研究開発がされた。さらに、国際溶射会議 ITSC 2000（モントリオール）前後から活発に研究されるようになり、日本、カナダ、英国、韓国、中国、オーストラリアなどでも研究が行なわれている。

3. コールドスプレーの原理

成膜のメカニズムについては、まだ十分に明らかになっていないが、精力的に研究が行われている。前掲の図2にA. N. Papyrin 博士らの特許¹⁾を基に筆者の考えている概略図を示した。この特許のクレームの中では、コールドスプレーを以下のように定義して、装置、ノズル形状など具体的な記載はしておらず、いわゆる原理特許である。

「ガスと1~50 μm の金属、合金、ポリマーまたはそれらの混合物をジェットとして300~1200 m/s の高速で吹き付ける」

このコールドスプレーの原理を理解するために、次のプロセスに分けて考えるのが理解しやすいと思われるので、以後これらに沿って簡単に説明する。

- (1) 作動ガスの超音速プロセス
- (2) 粒子の加速プロセス
- (3) 粒子の基材との衝突・変形・密着プロセス
- (4) 粒子の堆積・成膜プロセス

3.1 作動ガスの超音速プロセス、粒子の加速プロセスとノズル形状

粒子を高速化するには、まず作動ガス自体が高速、すなわち超音速化しなければならない。ガスを超音速にするには、図1に示すようにノズル入口部に所定の圧力と流路に細い部分（スロート）をもつ先細末広ノズル（または、ラバルノズルともいう）が必要である。

ガス速度 U_g は、ノズル入口部のガスの温度、圧力を高くすることにより大きくなり、さらに、ガス定数 R が大きいガスを使用すればより高速になる。

さらに、ノズル内のガス状態である圧力 P 、温度 T_g 、速度 U_g は、ノズル形状により一意的に決まり、ノズル形状が重要となる。

粒子の高速化には、ガス速度 U_g を高くし、粒子としては密度と粒子径が小さいほうが有利である。しかし、後述するようにコールドスプレーの場合、基材直前に衝撃波（Bow Shock）があり、粒子径が数 μm 以下であるとその衝突速度は急激に低下する^{8, 9)}。

また、上述のヘリウムガスは密度 ρ_g が小さいために粒子の加速には不利であるが、それを補うだけの速度 U_g が大きいため、結果的に粒子の加速にはヘリウムガスが有利である^{3, 9)}。ただし、ヘリウムガスは高価であり、分子量が小さい分消費流量もかなり大きい。

図3に筆者が作動ガスを準一次元等エントロピー流れと仮定して、コールドスプレーのノズル内における作動ガスと粒子の状態に及ぼす作動ガス種の影響についての数値シミュレーション結果を示す^{3, 10)}。同図よりヘリウムガスは100 mm の喉部以降の末広部で急激にガス速度 $U_{g-\text{He}}$ を上げる一方で温度 $T_{g-\text{He}}$ を急激に下げ、ノズル出口部ではそれぞれ約2200 m/s, 140 K（静温度）となる。しかし、ヘリウムガスの密度が小さいため、粒子速度 $U_{p-\text{He}}$ はガス速度に比べ急激には加速しないが、ノズル出口部では約1200 m/s に達する。

一方、空気は組成の78%が窒素であるため、それらの結果はほとんど差がないが、ヘリウムに比べガスと粒子の速度はともにかなり低いものの、この条件で粒子速度はノズル出口で臨界速度以上の640 m/s が得られる。

ところで、ガス種によらずガス温度がのど部以降の膨張で氷点以下まで低下するのに比べ、粒子の温度はノズル内でガスより高くなっているが、これは粒子が固体で熱容量があるためで、他の溶射法にないコールドスプレーの特徴といえる。ノズル中心部のガス温度は膨張のため低温になっていると思われる。ただし、実際のガス温度では、ノズル入口部のガス温度にも依存するが管壁付近は摩擦のため高温になっており、通常のスプレー条件ではノズル表面温度は200℃を超えている。

ノズル形状については図1に示す先細末広形が通常使

図3 コールドスプレーにおける作動ガス種（窒素、空気、ヘリウム）の影響²⁾
a) ガスと溶射粒子の温度、b) ガスと溶射粒子の速度、
＜初期条件＞

ノズル形状寸法：先細末広（ラバル）形（全長300 mm、のど径3 mm、出口径はノズル出口部にて大気圧になるようにガス種によって変えている）、
ガス：圧力 2.2 MPa [abs]、温度 600 K、速度 15 m/s、

粒子：Ni-Al 青銅（10 μm ）、温度 300 K、速度 5 m/s

図4 数値計算結果による粒子径の異なる粒子の速度に及ぼす基材近傍の衝撃波の影響 [基材は $x = 10$ mm に設置, 銅粒子, 作動ガス (空気, 27°C , 2.1 MPa)]⁽⁸⁾

図5 銅粒子の付着率及ぼす粒子径の影響 (窒素ガス 3 MPa, 400°C)⁽¹³⁾
(粒子速度は, ノズル出口部の計算結果)

用されているが, 先細末広円筒形や先細円筒形などもそれぞれの特徴があり, 一部で研究されている^{11, 12)}。

3.2 粒子の基材との衝突・変形・密着プロセス

(1) 粒子の衝突速度 コールドスプレーは, 粒子が高速で基材に衝突して, 密着して皮膜を形成する。ここで, ノズルから噴出したガスは, 大気中への拡散と摩擦のため速度を下げってしまうので, これを防ぐためにコールドスプレーではノズル出口部と基材とが通常 20 mm 程度とかなり近い位置にある。これは, コールドスプレーのガス温度が比較的低いので基材の加熱が少ないために可能なことであり, コールドスプレーの特徴である。しかし, 基材が近いために, 600 m/s 以上の超音速ガスジェットが急激にかつ不連続に減速 (基材上のよどみ点で速度 0 m/s) し, 基材付近に衝撃波が生じる^{8, 9)}。よって, ノズル内でガスによって加速された粒子は, 必ずしもその速度のまま衝突せずに, 粒子の慣性力が小さい場合には, この衝撃波により著しく減速される。図4には, 基材付近における粒子の減速状況を示す。同図から, ノズル出口部では, 粒径 $1\mu\text{m}$ が 600 m/s と最速であるが基材直前 1 mm 付近で急激に減速し, 衝突時には 200 m/s 以下にまで下がっているのに対し, 粒径 $25\mu\text{m}$ では, 質量が大

図6 20 mm 銅粒子の鉄鋼基材への衝突状況 (衝突速度 350 m/s, ハンブルグ国防大の実験結果)
(a)衝突速度 600 m/s の斜め上部から, (b)衝突速度 350 m/s の斜め上部から, (c)真横から見た切断面の状態

きいためにノズル内での加速もあまりよくないが, 衝撃波による影響も少ない。図5は, 銅粒子の付着率に対する実験結果である。銅の粒径が小さくなるにつれて, 粒子の衝突速度が高くなるため付着率も上がり平均粒径 $5\mu\text{m}$ でピークの 75% に達し, $1\mu\text{m}$ では急激に低下している¹³⁾。よって, 大気中でコールドスプレーを行うには, 使用する粒径には下限があり, 粒子の密度にもよるが, 数 μm 以下の微粉では不適正であることが報告されている¹⁴⁾。

(2) 密着, 臨界速度 前掲の図2に示したようにある粒子の衝突速度 (臨界速度) 以上になると粒子が付着・堆積しはじめる。この臨界速度の理解として, いくつかの研究グループが報告している。

図6にコールドスプレーの粒子の衝突状態を確認するため, 20 mm の銅粒子を機関砲でステンレス鋼板に衝突させた様子を示す。粒子の端部にはともに Material jet と呼ばれるひだ状に広がる粒子の一部が観察される。これは, 数 $10\mu\text{m}$ のコールドスプレーの場合でも確認されている。粒子の変形は, 基材との界面付近でせん断変形しているのがわかる。

M. F. Smith 博士らの研究グループは, 粒子と基材が金属同士の場合, 以下の因子があると報告しているが, 臨界速度の十分な理解には至っていない²⁰⁻²³⁾。

- (a) 粒子と基材の密度, 弾性率, 音速
(爆着モデルの場合・・・臨界接触圧)
- (b) 粒子と基材の強度, 延性, 硬さ
- (c) 粒子と基材の酸化物形成と密着
- (d) 粒子径
- (e) 基材表面の前処理

M. F. Smith 博士らが報告したコールドスプレーにおける銅粒子がステンレス基材上に衝突した瞬間の計算と実験の結果を簡単に説明する。 400 m/s の衝突では, 基材に小さなクレーター状のくぼみしかできないが, 500 , 600 , 700 m/s と速度を上げると, クレーターと粒子の偏

平度合いも大きくなる。そして、600 m/s の衝突には、基材との界面で高速で摩擦し、せん断力が生じるために発熱 (Impact Heating) して、粒子と基材界面付近は融点以下ではあるが、最大 1280 K 近くまで計算上は達し、かつ基材と粒子の界面部分はマテリアルジェットが発生していると報告している。よって、界面は酸化などのない新生面どうしで接触し、その接触圧も高くなるからことからかなり強い密着力が得られるとの報告している^{15, 16)}。また、粒子と基材の界面において、上述のように界面温度の急激な上昇により界面近傍の材料が軟化し、互いに塑性流動となり容易に変形する現象であるせん断不安定 (Shear instability) が断熱的に生じて接合が生じているとの考えもある^{14, 18)}。

一方、ドイツのハンブルグ国防大の H. Kreye 教授らも、計算と実験を行いながらコールドスプレー粒子の密着機構や臨界速度の解釈を同様にやっている^{14, 17)}。また、彼らは銅に対する結果に偏微分によるパラメーターの近似から、臨界速度をシンプルな次式にまとめている¹⁷⁾。

$$V_{cr} = 667 - 14\rho_p + 0.08T_{MP} + 0.1\sigma_u - 0.4T_{pi} \cdots (1)$$

ここで、 ρ_p は粒子密度 (g/cm³)、 T_{MP} は粒子材料の融点 (°C)、 σ_u は粒子材料の極限強さ (MPa)、 T_{pi} は粒子初期温度 (°C) である。

式 (1) より臨界速度は粒子の融点、極限強さにより大きくなり、密度および粒子初期温度が高いほど低下することになる。銅、アルミニウムに対しておおむね良い一致を示している。よって、他の材料に対して臨界速度を推定するとチタンは約 680 m/s と高く、亜鉛は約 530 m/s 低く、一方、アルミニウムは密度が低いため約 620 m/s と高くなる¹⁷⁾。

しかし、上述のようにこれら以外も基材側の材料特性や温度、ガンのトラバース速度、基材の表面状態¹⁹⁾、粒子材料の酸素含有量²⁰⁾、化学組成などにも依存することが示唆されており、さらなる臨界速度の解明が求められている。

また、式 (1) の右項の粒子初期温度 T_{pi} を高くすることは臨界速度が低くなり成膜しやすくなる。つまり、コールドスプレーといっても、ガス温度を高くしたり、ノズル先端部を長くしたりして¹⁰⁾ 粒子をより加熱した方がより付着率が上がることがわかる。

T. Schmidt らは、図 7 のコールドスプレーにおける衝突時の粒子の挙動に及ぼす粒子の温度と速度の関係と図 8 の粒子径の依存性を示した¹⁴⁾。すなわち、衝突時の粒子の速度、温度ともに高すぎても低すぎても付着せず、適する条件があることを示されている。また、臨界速度には、上述の粒子のせん断変形に伴い粒径依存性が認められ、粒径が小さくなるにつれて臨界速度が高くなる。よって、衝撃波による粒子衝突速度の低下も含め、コールドスプレーには、材料によって最適な粒子範囲が存在することが示唆している。

さらに、衝突時の粒子と基材の弾性エネルギー E_{EL} と密着エネルギー E_{ad} との大小により、密着したり、跳ね返る (Rebound) ことの数式化^{21, 22)} も報告されている。

以上のように、密着・臨界速度の理解について、かなり基礎的な研究は進んでいるものの、十分には明らかに

なっていない。基材-粒子間、粒子-粒子間の密着が、単なるアンカー効果のみなのか、金属結合しているかなどの機構は、材料、衝突速度、雰囲気などによっても異なるため、結合のメカニズムも不明確で今後の研究が期待される。なお、基材と皮膜の密着力は、基材と皮膜の材料や施工条件により異なるが、概ね 30~60 MPa 程度である。

その他にも、粒子と基材の衝突角度も影響し、垂直から 60° までが付着の限度である^{8, 23)}。

4. コールドスプレーの特徴

コールドスプレーは、粒子を噴射することから、溶射技術と比較する場合が多く、主たる溶射材料である金属の融点は、500°C から 1800°C 付近に近いため、溶射法では程度の差はあるが、溶射粒子の熱変質は避けられなかった。一方、コールドスプレーは、上述のようにノズル入口部において高々 500°C 程度であり、ノズル末広部では膨張するため、ガスの静温度は室温以下に下がる。

また、図 1 に示したように使用する粒子径が、加速と衝撃波による減速のため、比較的小さな 5~50 μm 程度であることも特徴である。

よって、前述した原理により、各研究者が述べている

図 7 コールドスプレーにおける衝突時の粒子の挙動に及ぼす粒子の温度と速度の関係¹⁴⁾
WS: Window of Sprayability, PIC: Particle Impact Conditions

図 8 粒子径に対する粒子の衝突速度と臨界速度の関係¹⁴⁾

ことをまとめるとコールドスプレーの特徴は以下のようになる。

- ① 溶融や液体から固体への変化の回避；熱応力の除去，酸化，熱変質の抑制（未成膜粉末の再利用），相と組成の安定性，結晶粒の成長がなく，微小結晶構造の残存が可能
- ② ち密な皮膜
- ③ 密度，熱および電気伝導率が高い皮膜
- ④ 圧縮性残留応力の皮膜，厚膜が作製可能
- ⑤ 高い付着率（ただし，粉末材料に依存）
- ⑥ 基材への入熱量が抑制
- ⑦ 従来の皮膜より硬度が高い（加工硬化による）
- ⑧ 必要最小限のマスキング（小さな堆積パターン）
- ⑨ 小さい面積にもコーティングが可能（形状に依存するが3mm以下も可能）
- ⑩ 基材の形状に依存する
- ⑪ 優れた表面仕上げ加工性
- ⑫ ノズル先端と基材間距離（スプレー距離）が短い（5-30mm）
- ⑬ 装置が比較的シンプルである。

M. F. Smith 博士は，特徴のはじめに「従来の溶射法における溶融と固化に伴う問題が回避できる」と掲げ²⁴⁾，新しい溶射法であり，優れていることを強調している。

上記したようにこのプロセスにより作製された皮膜の最大の特徴は①酸化，熱変質がほとんどないことである。さらに，粒子速度が臨界速度以上になるように粒度管理と作動ガス条件の設定をすれば，80%以上の⑤高い付着率が得られる場合もあり，ほとんどの報告では粉末材料にもよるが60%以上の付着率を達成している。また，低温の不活性な窒素などのガス中を数msの短い滞留時間で基材に衝突・堆積するため，熱変質しやすい材料粉末などでも成膜することが可能である。さらに，あまり加熱できない基材上にも成膜ができる。

一方，欠点としては以下が挙げられる。

- (a) 基礎的な成膜のメカニズムの理解が不十分
- (b) 皮膜特性の解明とそのデータベースが少ない

- (c) 粉末材料とその施工パラメーターのデータベースや経験が不十分
- (d) 消費ガス量が多い
- (e) ノズル内への粒子の堆積（粒子が溶融していないのにノズル内に堆積，特に，アルミニウムなど低熔点金属）
- (f) 使用できる粒子径が比較的細かい（ $5\mu\text{m}$ ～ $25\mu\text{m}$ 程度）
- (g) 基材上での超音速ガスジェットによる衝撃波の影響により数 μm 以下の微細粒子が成膜しない
- (h) ノズル形状の最適化とノズル形状に依存するため装置間で差異が生じる
- (i) 衝突速度による粒子間の接合状態に差異があり皮膜特性が異なる（熱処理により膜質の改善が可能。また，ヘリウムガスを使用して高速で衝突させた場合は，良質な膜質が作製可能）
- (j) $\phi 1\text{mm}$ 程度以下の微細孔内に堆積しにくいなどガス流のよどみの影響などを受ける
- (k) 1MPa以上の高圧ガスを使用する場合は，国内においては高圧ガス保安法の適用対象となり，法規制対象内容（機器，維持管理項目など）の明確化とその対策

近年，研究開発が盛んになりつつあり，上記の欠点も克服されつつある。

図9に銅とチタンの皮膜断面組織の一例を示す。銅皮膜は基材側も表面側もち密である。しかし純チタン皮膜は基材側が幾分かち密であるが表面側に気孔が多い。チタンは，結晶構造が最密六方晶構造で変形しにくく，粒子径もコールドスプレーにとっては大きく加速が不十分のため気孔が多い。また，コールドスプレーは高速の粒子が衝突して成膜していくため，下層の粒子の方がより偏平する傾向にある。

コールドスプレー皮膜は，高速で衝突・変形による加工硬化のため材料粉末に比べ硬く，かつばらつきも小さい。また，コールドスプレーによる銅皮膜の電気伝導率は純銅の90%となり，フレイム溶射やHVOFの銅皮膜は

銅皮膜

チタン皮膜

図9 コールドスプレーによる銅皮膜とチタン皮膜：（純銅 $8.2\mu\text{m}$ ，純チタン $25\mu\text{m}$ ，窒素ガス， 350°C ，3MPa，(a)，(d) は表面側，(b)，(e) は基材側，(c) は銅皮膜をエッチング）

50%以下との報告もある²⁵⁾。また、⑥基材はガス温度、ガントラバース速度、基材の熱容量などにもよるが、超音速ガスジェットによる加熱もあり冷却をしない場合は200℃程度まで上昇する場合もある。しかし、管理をうまくすれば、基材への入熱量を抑えて施工できる。

特徴の④に示すように、皮膜に圧縮性の応力が残り、皮膜・基材への入熱量が少ないので図10に示すように、材料にもよるが数 cm オーダーの厚膜が容易に作製可能である。

5. コールドスプレーの使用材料

開発の初期のころは銅、鉄、ニッケル、アルミニウムなどの純金属を主体にしていたが、ステンレス鋼、チタン、モリブデン、Ni-Cr, MCrAlY, タンタルなどの金属や合金のほかに、ポリマーならびに $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ や WC-Co などのサーメットまでも成膜可能と報告している²⁵⁾。最近では、一部、チタニアやアルミナなどのセラミックスなども試みられている。また、熱伝導特性などが良い金属皮膜が作製できることから、さらなる特性向上を狙いダイヤモンド、AlN, SiC, タングステンなどを含んだアル

図10 コールドスプレー・スプレーによる成形体の検討事例：

- (a) チタンの厚膜（約2分で成形）（信州大）
- (b) ITSC2003にて Kteck 社ブースの展示品

図11 Cold Spray 2004 ワークショップ（2004年9月、アメリカオハイオ州）の展示会におけるコールドスプレーの適用検討事例：(a) コンピューター用 CPU ヒートシンクへの銅皮膜の適用事例、(b) ディスクブレーキへの補修用被覆、(c) プラスチック材上へのアルミニウムスプレー、(d) 板材接合のためのブレイジング材のスプレー

ミニウム複合皮膜や銅とタングステン、アルミとアルミナ、銅と鉛と錫などの複合皮膜も検討されている。

6. コールドスプレーのアプリケーション検討事例

図11に最近のコールドスプレーワークショップの展示会における適用検討事例を示す。コールドスプレーの商用レベルでの適用例は少なかったが、2003年あたりから同図 (a) のコンピューター用 CPU のアルミニウム製ヒートシンク裏側への銅コーティングが採用され、実用化一号となった。

公開されたアプリケーションの検討事例まとめると以下になる⁶⁾。

- (a) 自動車用鋼板への亜鉛コーティング
- (b) スパッターのターゲット
- (c) 大強度加速器施設 中性子線吸収部品への適用（カドミウム板へのアルミニウムコーティング）
- (d) 金属ニアネットシェイプ部材の作製（Kteck, NASA, ケンブリッジ大など）
- (e) コンピューター用 CPU のヒートシンクへの銅皮（ドイツ OBZ Dresel & Grasme GmbH²⁶⁾）
- (f) 配線保護金属管接続部への電磁波遮へい用銅皮膜
- (g) 溶接部への腐食防止亜鉛皮膜
- (h) 各種機械部品の補修
- (i) 高温耐食用コーティング（MCrAlY の検討）
- (j) ブレイジング材の塗布
- (k) 医療機器部材への適用（純チタンなど）
- (l) マグネシウムの防食用アルミニウム合金皮膜

上述のような優れた特徴をもったコーティング技術であり、市販装置も販売され、今後多くのが学者や企業が研究することにより施工条件のデータベースの整理が進めば、その優れた皮膜特性を望むユーザーから手を伸ばしてくると思う。

国内においては、(財)機械システム振興協会により平成16年度に調査研究²⁷⁾、平成17, 18年度にフィージビリティスタディビリティスタディ²⁸⁾が産学共同で行われている。

7. コールドスプレーの開発動向

コールドスプレーの基礎的な研究分野では、上述のように粒子の加速や成膜のメカニズム、臨界速度の理解などが行われ、応用分野ではさまざまなアプリケーションの開発が行われている。

また、コールドスプレー装置としては、コールドスプレーで使用する粒径が凡そ5~50 μm 程度であり、従来の溶射用の粉末の粒度分布より細かいので市販溶射粉末が利用できない場合が多い。この欠点を改善した装置がDELPHI社のキネティックスプレー（Kinetic Spray[®]）^{29), 30)}がある。一方、ヘリウムによる低圧（0.5 MPa程度）でガス速度を音速程度に止めるガスの消費量が少ないキネティックメタライゼーション（Kinetic Metallization[®]）³¹⁾などもある。

一方、1 MPa 以下の圧縮空気をハンディタイプのガンで施工できるコールドスプレー装置も開発・市販され、ロシア TWIN TC 社の DYMET[®](32)，と同装置にコンプレッサーやタッチパネルなどをつけて操作しやすくしたカナダ CenterLine (Windsor) Limited 社の Supersonic Spray Technologies (SST[®])(33)がある。空気圧が低圧のため粒子速度が制限される分を、アルミニウム、銅、亜鉛、ニッケルなどの金属粉末にアルミナ砥粒などを加えて、臨界速度以下でも成膜するように供給粒子に工夫を行っている。

8. ま と め

ロシアでの発見から約20年が経とうとしている現在、90年代から米国、ドイツ、ロシアを中心に研究・開発が進められてきたため、かなりの開発は進んできた。そのため、最近は多くの方々に注目されるようになってきたが、今後さらなる発展のためには、成膜のメカニズムの解明を含め、材料科学や圧縮性流体力学などの学際的な研究を進める必要がある。

参考文献

- 1) A. P. Alkimov, A. N. Papyrin, V. F. Kosarev, M. M. Shushpanav: Gas Dynamic Spraying Method for Applying a Coating, U. S. Patent 5, 302, 414, (1994).
- 2) 例えば、経済産業省 HP
<http://www.meti.go.jp/press/20050330012/20050330012.html>
- 3) 榊：新しい溶射プロセス Cold Spray, 溶射技術, 20-2 (2000), 32-41.
- 4) 榊：コールドスプレーテクノロジー, 溶射技術, 21-3 (2002), 29-38.
- 5) 榊：最新のコーティング技術 コールドスプレー, 溶接技術, 53-10 (2005), 64-71.
- 6) 榊：コールドスプレーの概要ならびにその軽合金皮膜, 56-7 (2006) 376-385.
- 7) A. N. Papyrin: Cold Spray Technology, Advanced Materials & Processes, 159-9 (2001) 49-51.
- 8) R. C. Dykhuizen, M. F. Smith, D. L. Gilmore, R. A. Neiser, X. Jiang, S. Sampath: Impact of High Velocity Cold Spray Particle, J. of Thermal Spray Technology, 8-4 (1999), 559-564.
- 9) B. Jodin: Cold Spray Nozzle Mach Number Limitation, J. of Thermal Spray Technology, 11-4 (2002), 496-507.
- 10) K. Sakaki, Y. Shimizu: Effect of Increase in Entrance Length of Gun Nozzle on HVOF and Cold Spray Process, J. of Thermal Spray Technology, 10-3 (2001), 487-496.
- 11) K. Sakaki, N. Huruhashi, K. Tamaki and Y. Shimizu: Effect of nozzle geometry on cold spray process, Proc. of ITSC2002 (2002), 385-389.
- 12) H. Liao, W. Y. Li, C. Coddet, et al: Optimal Design of a Convergent-Barrel Cold Spray Nozzle by Numerical Method, Proc. CD-ROM of ITSC2006, (2006).
- 13) 新海, 榊ほか: Cold Spray による銅皮膜特性に及ぼす粉末粒径の影響, 日本溶射協会第80回全国講演大会講演 215 (2004), 61-62.
- 14) T. Schmidt, et al, Development of a generalized parameter window for cold spray deposition, Acta Matelia, 54 (2006), 729-742.
- 15) R. C. Dykhuizen, M. F. Smith: Gas Dynamic Principles of Cold Gas, J. of Thermal Spray Technology, 7-2 (1998) 205-212.
- 16) D. L. Gilmore, R. C. Dykhuizen, R. A. Neiser, T. J. Romer, M. F. Smith: Particle Velocity and deposition Efficiency in Cold Spray Process, J. Thermal Spray Technology, 8-4 (1999) 576-582.
- 17) H. Assadi, F. Gartner, T. Stoltenhoff, H. Kreye: Bonding Mechanism in Cold Gas Spraying, Acta Matelia, 51 (2003), 4379-4394.
- 18) V. K. Chamagne, et al: Interface Material Mixing Formed by the Deposition of Copper on Aluminium by Means of the Cold Spray Process, J. Thermal Spray Tech. 14-3 (2005), 330-334.
- 19) K. Sakaki, T. Tajima, et al: Influence of Substrate Conditions and Traverse Speed on Cold Sprayed Coatings, Proc. CD-ROM of ITSC2004, (2004).
- 20) C. -J. Li and W. -Y. Li, Xi'an/PRC: Examination of the critical velocity for deposition of particles in cold spraying, Proc. CD-ROM of ITSC2005 (2005).
- 21) A. Papyrin, S. V. Klinkov, V. F. Kosarev: Modeling of Particle-Substrate Adhesive Interaction Under the Cold Spray Process, Proc. of ITSC2003, (2003), 27-35.
- 22) Jingwei Wu, et al: Rebound Phenomenon in Al alloy Kinetic Spraying, Proc. of 20th Thermal Spray Workshop in Korea Thermal Spray Society, (2004), 107-126.
- 23) C. -J. Li, W. -Y. Li, Y. -Y. Wang, H. Fukunuma: Effect of Spray Angle on Deposition Characteristics in Cold Spraying, Proc. of ITSC2003, (2003), 91-96.
- 24) http://www.sandia.gov/ColdSpray/presentations/cs_overview_mfs_90714.pdf.
- 25) News from Institutes and Research Center around the World, GTS Advances on Cold Spray Technology, J. of Thermal Spray Technology, 10-3 (2001), 434-436.
- 26) ドイツOBZ Dresel & Grasmе GmbH カタログまたは <http://www.obz-gmbh.de/>
- 27) システム技術開発調査研究 16-R-17 高速粒子衝突を利用した革新的部材創生に関する調査研究報告, 機械システム振興協会, (2005).
- 28) システム技術開発調査研究 17-F-11 コールドスプレーによる革新的部材創生に関するフィージビリティスタディビリティスタディ報告書, 機械システム振興協会, (2006).
- 29) T. Van Steenkiste and D. W. Gorkiewicz, Evauation of Coating Produceed via Kinetic and Cold Spray Process: J. of Thermal Spray Technology, 13-2 (2004), 274-282.
- 30) Van Steenkiste, T. H., Smith, J. R., and R. E. Teets, " Aluminum coatings via kinetic spray with relatively large powder particles, Surface & coatings technology, 111 (1999), 62-71.
- 31) Kinetic Metallization <http://www.inovati.com/pages/products/cds-equip/cds.html>
- 32) TWIN TC 社カタログ DYMET[®] : <http://www.amazonit.ru/ocpn/eindex.html>
- 33) カナダ Centerline LTD. SST カタログまたは <http://www.supersonicspray.com/>