

技術解説

高速フレイム溶射における 超音速ジェットのパターン

Diamond Patterns of Supersonic Jet Flow
discharged from HVOF Thermal Spray Gun

鹿児島大学大学院
理工学研究科
教授

博士（工学） 片野田 洋
Hiroshi Katanoda



1. はじめに

1980年代に米国で高速フレイム（High Velocity Oxy-Fuel ; HVOF）溶射¹⁾が考案されて以来、コールドスプレー²⁾、エアロゾルデポジション法³⁾など、超音速流れを用いる新しいコーティング法が考案されている。超音速噴流は、ノズル出口から下流側に向かって特徴的な衝撃波パターンを形成する。高温の噴流の場合、特別な可視化手法を用いなくても、この衝撃波パターンを温度変化として視認することができる。

溶射皮膜の特性は、基材に衝突するときの溶射粒子の速度、温度に強く依存する。これらを決定づけるのは燃焼ガスの流動パターンである。燃焼ガス流は温度が高いため、速度や温度を測定するのは容易ではないが、衝撃波パターンから有用な情報を得ることができる。本技術解説では、ノズル内に超音速流れが生じる原理と、超音速噴流中に形成される衝撃波パターンについて解説を行う。

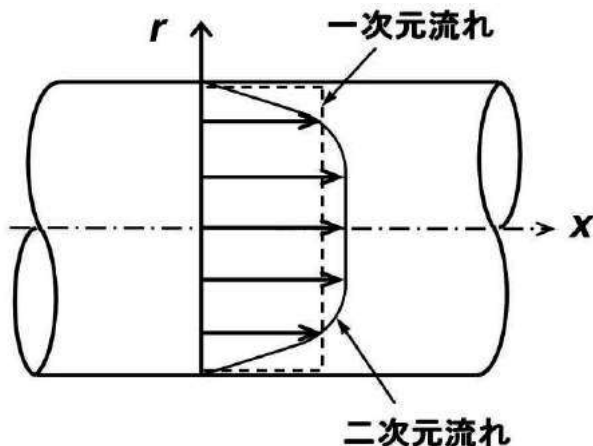


図1 管内の流れ

2. ノズル内における垂直衝撃波の生成

管内を流れる流体の断面にわたる速度分布を図1に実線で示す。流体の速度は中心軸で最も速く、壁面では粘性によりゼロである。これを、破線で示すように一様な断面平均速度に置き換えて考える。これを一次元流れという。圧力、密度、温度についても断面平均の値を考える。断面積が流れ方向に変化する場合は、準一次元流れと呼ばれる。本解説では、準一次元流れを想定する。

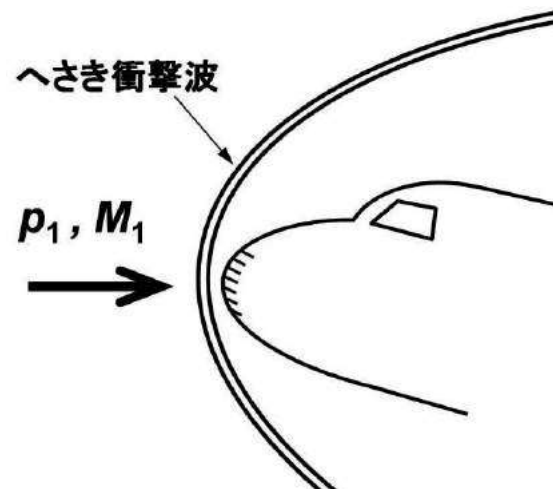


図2 航空機前方のへさき衝撃波

音速の何倍の速度であるかを表す無次元数をマッハ数という。静止した大気中を、マッハ数 $M_1 > 1$ で飛行する航空機先端部の模式図を図2に示す。このとき、航空機の前面には弓形の不連続面（衝撃波）が形成される。“不連続面”とは、流れの物理量が不連続的に変化する境界面を指す。機体先端に衝突する流れのマッハ数は1未満に低下し、速度も低下する。圧力、密度、温度は上昇する。衝撃波の厚さ

は、常温常圧程度の空気で $1\mu\text{m}$ 程度のオーダーであるため、厚みのない境界面とみてよい。航空機の先端近傍では、衝撃波は局所的に流れに垂直である。そのような衝撃波を垂直衝撃波という。本解説では、ノズル内に発生する衝撃波を垂直衝撃波と近似する。

ノズル内に発生する衝撃波について説明するにあたり、図3に示すような実験装置を考える。ボンベ内の高圧空気が弁を通して貯気室に供給され、先細末広の超音速ノズルを通して大気に噴出する。衝撃波の形成過程は圧力に依存し、温度に依存しない。定性的にはガスの種類にも依存しない。そのため、HVOF 溶射ガンにおける衝撃波の形成過程も定性的には常温の空気に置き換えて考えることができる。

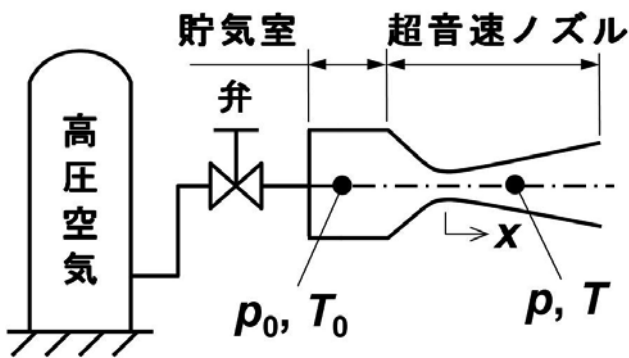


図3 超音速噴流の実験装置

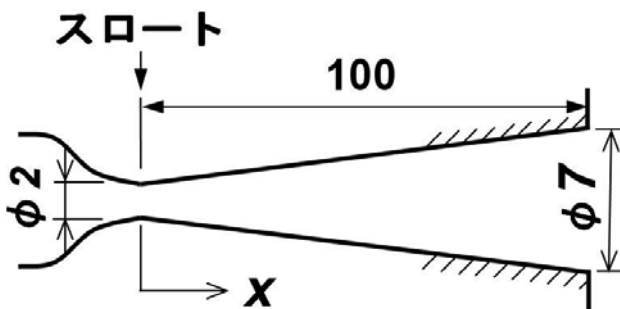


図4 ノズル形状

本章では、図3の実験装置においてノズル内に超音速流れが形成される過程について述べる。例として、図4に示すノズル形状を考える。スロートを原点として中心軸に沿って下流方向へ x 軸をとる。図3において弁が全閉の状態ではノズル内に流れはなく、ノズル内の圧力は大気圧 p_b に等しい。

弁を少しずつ開けていくと、ノズル内の任意の位置における気流の速度は次第に大きくなる。気体の速度が最も大きい位置はスロートである。ある貯気圧に達したとき、まずスロートで音速に達する。その下流の末広部では亜音速の減速流れとなる。このときの圧力比 p_0/p_b を計算すると、 $p_0/p_b=1.002$ である。すなわち、貯気圧を大気圧よりも 0.2% 大きくするだけでスロートの流れは音速になる。垂直衝撃波が弱くなった極限は音波であるが、スロートで流れが音速 (マッハ数 $M=1$) になったということは、スロートに弱い垂直衝撃波が発生したことと同じである。

弁を再びゆっくり開けていく (p_0/p_b を 1.002 よりも大きくする) と、スロートでのマッハ数は1のままで、スロートから垂直衝撃波が下流側に移動する。このとき、垂直衝撃波は次第に「強く」なる。「強く」なるとは、垂直衝撃波直前の流れのマッハ数が大きくなることを指す。その結果、図5に示すようにスロートから垂直衝撃波の位置 $x=x_s$ までは超音速の加速流れ、それより下流は亜音速の減速流れとなる。図5においてマッハ数は、 $M_e < M_2 < 1$ である。

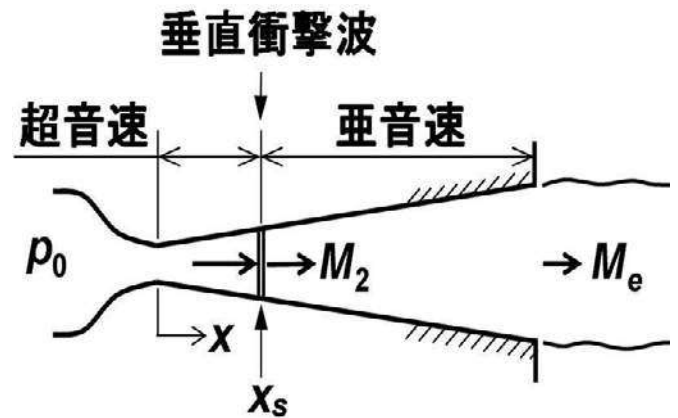


図5 垂直衝撃波を含むノズル内の流れ

弁をさらに開けていくと垂直衝撃波はさらに下流側へ移動し、 $p_0/p_b=9.30$ のときノズル出口に達する。このとき、ノズル出口における垂直衝撃波直前の圧力は、大気圧よりも低い。大気圧よりも膨張し過ぎているという意味で、このような状態を過膨張状態という。次に述べるように、 p_0/p_b を 9.30 よりも大きくするとノズル出口の衝撃波はしだいに弱くなっていく。

3. 噴流中に形成される衝撃波

弁をさらに開いていくと、ノズル出口にあった垂直衝撃波は、図6に示す「斜め衝撃波」(ノズル出口にあった垂直衝撃波よりも弱い)に移行する。これに対応して、ノズル出口直後での噴流境界は中心軸側を向く。したがって、ノズル出口直後の噴流境界が内側を向いていれば過膨張状態であると判断することができる。

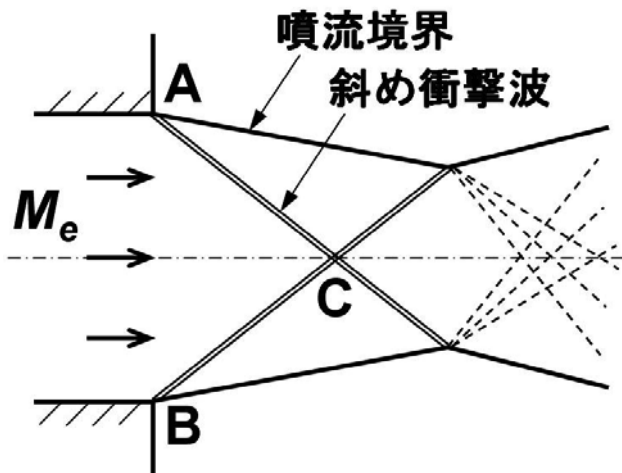


図6 ノズル出口の斜め衝撃波

引き続き弁を開いていくと斜め衝撃波はさらに弱くなるとともにノズル出口の圧力は上昇し、ある p_0/p_b のときにノズル出口の圧力は大気圧に等しくなる。これは適正膨張状態と呼ばれ、このとき、斜め衝撃波は衝撃波の最も弱い極限である音波になる。図4のノズル形状で適正膨張状態が得られるのは、 $p_0/p_b=185$ のときである。

圧力比が $9.30 < p_0/p_b < 185$ では、ノズル内は超音速で出口の静圧は大気圧よりも小さい(過膨張状態)。 $p_0/p_b > 185$ では、ノズル内は超音速でノズル出口の静圧は大気圧よりも大きい。すなわち、膨張が足りないため、不足膨張状態と呼ばれる。

不足膨張状態でのノズル出口直後の流れについて述べる。この場合、流れはノズル出口から大気へ膨張することになる。これは、図7に示すようにノズル出口の角から生じる扇状の膨張波によって行われる。このとき、噴流境界の流れは外側へ曲げられる。したがって、ノズル出口直後の噴流境界が外側を向いていれば、不足膨張状態であると判断することができる。

過膨張状態、不足膨張状態の場合、ノズル出口直後の流れはそれぞれ内側、外側を向く。しかし、これは下流方向へいつまでも続かない。不足膨張状態の場合について、ノズル出口下流の噴流構造を図7を用いて説明する。点Aから生じた膨張波の AB_1 を波頭、 AB_2 を波尾という。図7には波頭と波尾の間に1本の膨張波しか描いていないが、実際にはこの間に無数の膨張波が存在する。膨張波の波頭 AB_1 は、点 B_1 で噴流境界と交わる(入射する)。このとき、膨張波は噴流境界で圧縮波となって中心軸側へ反射し、圧縮波 B_1A' を形成する。同じことが波頭と波尾の間の全ての膨張波で起こり、圧縮波は点 A' に収束する。点 A' に入射した圧縮波は、今度は膨張波となって中心軸側へ反射する。すなわち、点Aを始点として生じた膨張波が点 A' から再び始まる。これが下流方向へ繰返されることにより、噴流はダイヤモンド型のセル構造となる。

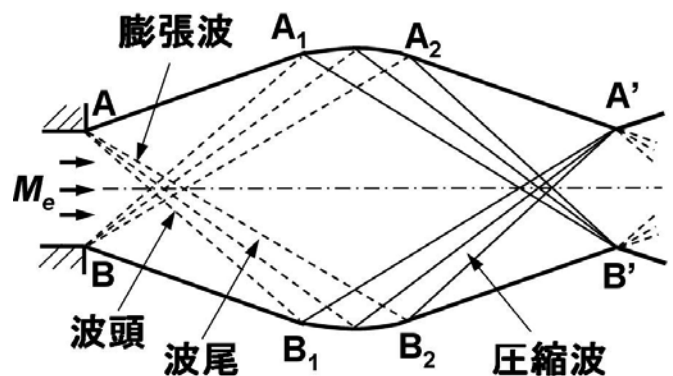


図7 噴流中の膨張波と圧縮波

4. 衝撃波パターンの解説

HVOF 溶射ガンにおけるフレーム中の衝撃波の例⁴⁾を図8に示す。この超音速フレームは、ノズル出口において噴流境界が外側に膨らんでいるため、不足膨張状態である。ノズル出口下流に生じている流れに垂直な面はマッハディスクと呼ばれる円形の垂直衝撃波である。これは、図7に示した圧縮波が密集して衝撃波となったものが中心軸上で交差することで発生する。マッハディスクはノズル出口に1つしか発生しない。マッハディスクの外周からは、反射衝撃波が斜め下流方向に生じる。マッハディスクや反射衝撃波を通過した流れは速度が減少することで温度が上昇するため、視覚的に明るい領

域になる。反射衝撃波が噴流境界に入射すると、膨張波として中心軸側に反射する。これは、図7における点A、Bから生じる膨張波と同じである。このようにして、衝撃波パターンが下流方向に繰り返される。ただし、流れの粘性により衝撃波パターンは下流にいくほど不鮮明になる。



図8 HVOF 溶射ガンのフレーム中の衝撃波

5. おわりに

HVOF 溶射ガン内に超音速流れが形成される過程と、超音速噴流中に現れるダイヤモンドパターンについて解説を行った。溶射技術者にとって何らかの参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) J. Browning, J., U.S. Patent, No. 4,568,019, 1986.
- 2) A. Papyrin, Advanced Materials & Processes, Vol. 159, No. 9, 2001, pp. 49-51.
- 3) J. Akedo and M. Lebedev, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 33, 1999, pp. 5397-5401.
- 4) <https://www.kfjc.co.jp/business/spraying.php>