

平成22年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「次世代コーティングプロセス（ウォームスプレー技術）の開発」

（関東1006791）

研究開発成果等報告書

平成23年9月

委託者 関東経済産業局

委託先 財団法人 埼玉県産業振興公社

目 次

第1章 研究開発の概要

1-1	研究開発の背景・研究目的及び目標	・・・	2
1-2	研究体制	・・・	3
1-3	成果概要	・・・	7
1-4	当該研究開発の連絡窓口	・・・	8

第2章 本論

2-1	①数値シミュレーションに基づいた トーチ設計指針の構築及び検証	・・・	9
2-1-1	①-1 トーチ，ノズル形状の設計指針の構築	・・・	9
2-1-2	①-2 模擬実験	・・・	11
2-1-3	①-3 設計の改良及び検証	・・・	11
2-1-4	①-4 作業条件によるノズル内の気体流れのシミュレーション	・・・	11
2-2	②新ウォームスプレー装置の開発，製作	・・・	13
2-2-1	②-1 新ウォームスプレー制御装置設計・製作	・・・	13
2-2-2	②-2 新ウォームスプレートーチの設計・製作	・・・	14
2-3	③新ウォームスプレー装置の評価	・・・	18
2-3-1	③-1 粒子速度計測	・・・	18
2-3-2	③-2 溶射皮膜観察	・・・	20

第3章 全体総括

3-1	全体総括	・・・	21
3-2	目標に対する成果	・・・	21
3-3	今後の計画	・・・	22

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

1) 研究開発の背景と目的

従来技術である高速フレイム溶射は、燃料と酸素による火炎の熱および燃焼ガスの速度によって、材料粒子を加熱・加速し基材に衝突させることにより成膜する技術である。高速フレイム溶射は、燃料と酸素の混合比にて燃焼炎の温度コントロールを行うことができるが、酸化炎または還元炎になるため、材料粒子の酸化・皮膜中に炭化物の不純物が混入してしまう欠点がある。他方コールドスプレー法は、高圧ガスをヒーターにより加熱しラバルノズルを通すことにより超高速噴流を作り、噴流中に材料粒子を投入することにより材料粒子を加速し、固相状態のまま基材に衝突させることにより成膜する方法である。しかし、ヒーターの能力に限界があり1,000℃以上の高温超高速流を作り出すことは難しい。

現在、市販の高速フレイム溶射機を改造し、燃焼室内に不活性ガスを導入することにより燃焼ガス温度を下げ材料粒子速度を上げる試作ウォームスプレー法の研究がなされている。

本研究開発の目的は、これまでの取組から得られた知見やデータを基に、ウォームスプレー装置を更に高度化し、ガス温度500℃～粒子温度1,000℃、速度1,000m/sを同時に達成し、軟化固相粒子を高速度で基材に衝突させ、気孔率0.5%以下の皮膜を大気中で形成可能な次世代コーティングプロセス（新ウォームスプレー技術）を開発することである。

2) 研究項目(テーマ)と技術目標値 (H22年度)

本研究の目標は、試作ウォームスプレー装置のコンセプトを受け継ぎながら燃焼ガス圧を高圧化し、流体力学により計算されたラバルノズルを有するトーチの設計・開発を行うことにより、高速フレイム溶射以上の粒子速度であり、かつコールドスプレー法以上の粒子温度を達成する装置を目標とする。目標達成のための課題は、燃焼室圧を高圧化する為の制御装置の開発、安定した高圧燃焼を実現するトーチの開発、高圧燃焼ガスを超音速ガス流にする為のノズルの設計、製作した新ウォームスプレー装置の評価を行なう。

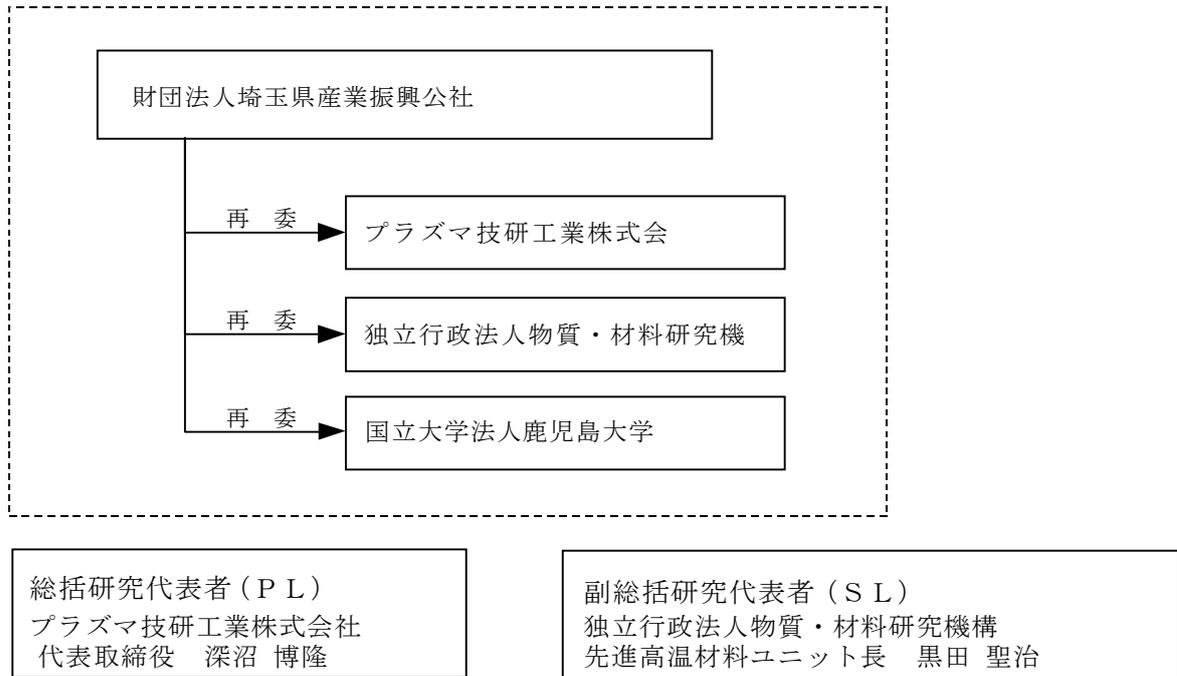
表1. 本委託業務における研究項目(テーマ)と技術目標値(H22年度)

項目	本研究技術	従来技術	
	新ウォームスプレー	高速フレイム溶射	コールドスプレー
粒子温度	400～2000℃	800～2500℃	室温～400℃
粒子速度	400～1200m/s	400～800m/s	10～1200m/s
作動ガス	燃焼ガス+N ₂ , He	燃焼ガス	N ₂ , He
温度制御	N ₂ , He のガス量	燃焼比	ヒーター出力

1-2 研究体制

1) 研究組織及び管理体制

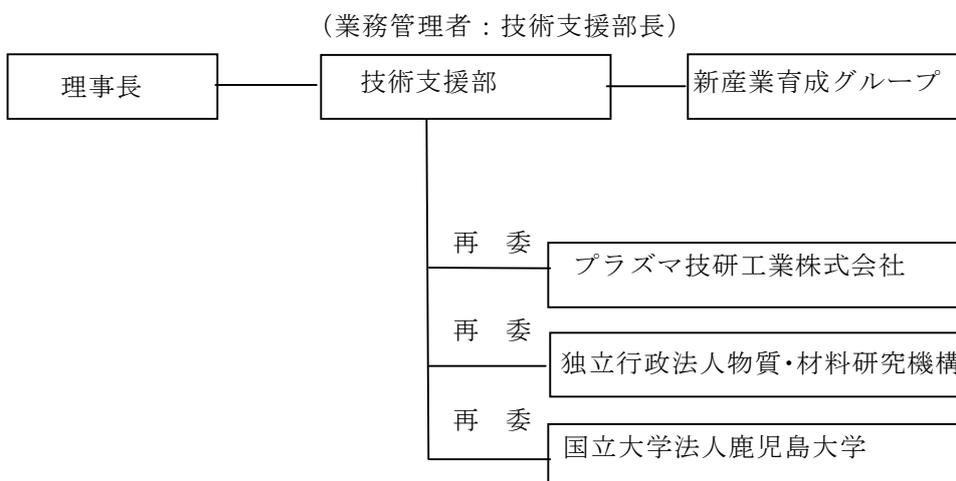
(1) 研究組織(全体)



2) 管理体制

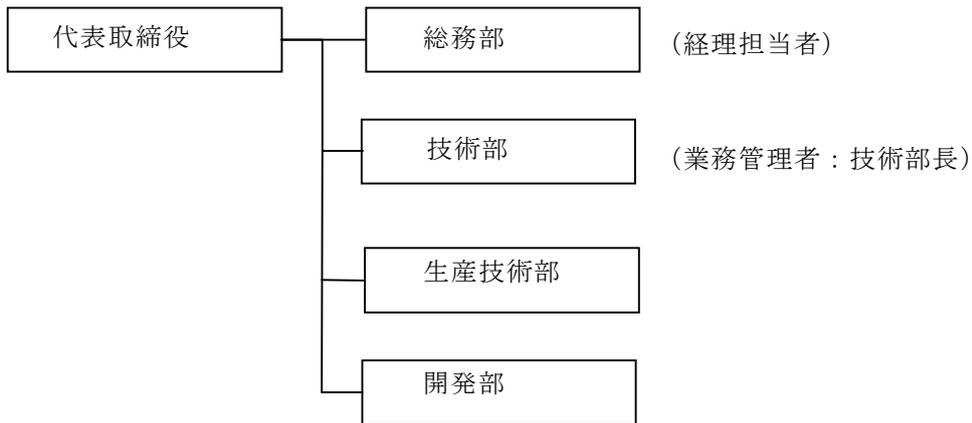
(1) 事業管理者

財団法人埼玉県産業振興公社

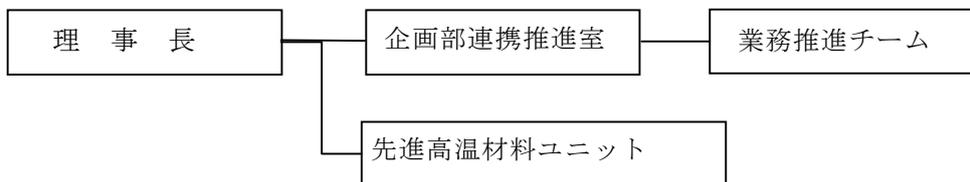


2) (再委託先)

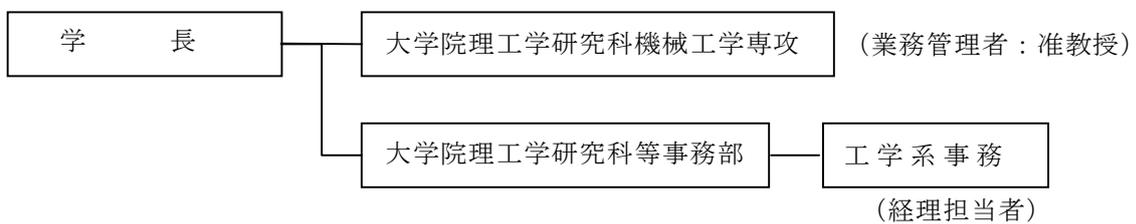
プラズマ技研工業株式会社



独立行政法人物質・材料研究機構



国立大学法人鹿児島大学



3) 管理員及び研究員

【事業管理者】

財団法人埼玉県産業振興公社

(1) 管理員

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
関根 一宣	技術支援部 新産業育成グループ グループリーダー	④
中島 和広	技術支援部 新産業育成グループ 主査	④

【再委託先】※研究員のみ

株式会社プラズマ技研工業

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
大野 直行	技術部長	②-2
成毛 基泰	生産技術部 部長代行	②-1
孫 波	開発部 開発1課員	③
黄 仁忠	開発部 開発1課員	①-4

独立行政法人物質・材料研究機構

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
黒田 聖治	先進高温材料ユニット長	③
渡邊 誠	主任研究員	③
大橋 修	研究業務員	③
荒木 弘	主幹エンジニア	③

国立大学法人鹿児島大学

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
片野田 洋	理工学研究科 准教授	①-1, ①-2 ①-3, ①-4

(3) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

(事業管理者)

財団法人埼玉県産業振興公社

(経理担当者) 技術支援部 新産業育成グループ 主査 中島 和広
(業務管理者) 技術支援部 部長 中島 規之

(再委託先)

プラズマ技研工業株式会社

(経理担当者) 総務部 山崎 育子
(業務管理者) 技術部長 大野 直行

独立行政法人物質・材料研究機構

(経理担当者) 企画部連携推進室 業務推進チーム長 飯島 東江
(業務管理者) 先進高温材料ユニット ユニット長 黒田 聖治

国立大学法人鹿児島大学

(経理担当者) 大学院理工学研究科等事務部工学系事務課 会計係長 若松 重之
(業務管理者) 大学院理工学研究科機械工学専攻 准教授 片野田 洋

(4)他からの指導・協力者名及び指導・協力事項

研究開発推進委員会 委員

氏名	所属・役職	備考
深沼 博隆	プラズマ技研工業株式会社 代表取締役	PL
黒田 聖治	独立行政法人物質・材料研究機構 先進高温材料ユニット長	SL
片野田 洋	国立大学法人鹿児島大学 大学院理工学研究科機械工学専攻 准教授	
大野 直行	プラズマ技研工業株式会社 技術部長	
孫 波	プラズマ技研工業株式会社 開発部 開発1課員	
渡邊 誠	独立行政法人物質・材料研究機構 主任研究員	
関根 一宣	財団法人埼玉県産業振興公社 技術支援部 新産業育成グループリーダー	
石井 博之	財団法人埼玉県産業振興公社 産学連携コーディネータ	

(5)知的財産権の帰属

知的財産権は全て当方に帰属することを希望。

(6)その他

“なし”

1-3 成果概要

① 数値シミュレーションに基づいたトーチ設計指針の構築及び検証

研究項目「①-1 トーチ，ノズル形状の設計指針の構築」，「①-2 模擬実験」，「①-3 設計の改良及び検証」，「①-4 作業条件によるノズル内の気体流れのシミュレーション」における技術的目標値として，「直径 30 μm のチタン粒子で速度 1000m/s，温度 1000 $^{\circ}\text{C}$ （約 1300K）以下を達成することのできるトーチの設計指針の構築」とし，一次元解析と常温のヘリウムと窒素ガスを用いた模擬実験結果から検討した．その結果，混合室のノズルスロート断面積に対する燃焼室のスロート断面積および窒素噴射室の出口断面積の比は，WS1 号機の場合と同等にするのがよいといえる．このとき，窒素ガス流量 1500slm 以下の条件で粒子速度と粒子温度の条件を満足できることが分かった．加えて，直径 10，20 μm のチタン粒子であれば窒素ガス流量 1000slm 以上のときに粒子速度と粒子温度の条件を満足できることが分かった．ただし，上記の設計指針は WS2 号機の粒子速度の測定結果に基づいて修正する必要がある．その実験は今回，スケジュールの都合で行うことができなかったが，本研究開発終了後に継続実施する計画である．

② 新ウォームスプレー装置の開発・設計

研究項目「②-1 新ウォームスプレー制御装置設計・製作」における技術的目標として，「使用圧力 4.5MPa 以上の制御装置の開発（高压ガス保安協会の認定を取得する）」とし，NIMS 向け新ウォームスプレー評価装置において 設計圧力 7.0MPa，常用圧力 5.0MPa の配管設計を行い，高压ガス設備試験を受験し認定を受けることができた．

研究項目「②-2 新ウォームスプレートーチの設計・製作」における技術的目標として，「実生産での使用に耐える耐久性を保持していること 連続運転：2 時間以上 部品寿命：10 時間以上」としたが，現在，トーチ部品の検証中で部品の耐久試験を行うに至っていない．しかし，装置評価として粒子速度の計測などに数時間の連続運転を実施しているが，部品の破損等は，確認されていない．本研究期間以降に本装置を用いた皮膜の試作を行なう計画となっており，部品の寿命確認は，その際に確認する計画である．

③ 新ウォームスプレー装置の評価

研究項目「③-1 粒子速度計測」における技術的目標として，「現状高速フレーム溶射に対し，粒子速度が十分速いこと，粒子温度が低いこと．粒子速度 1200m/s 以上 粒子温度 400 \sim 2000 $^{\circ}\text{C}$ の範囲で温度コントロール可能」としている．粒子速度は，PIV 装置を用いて測定した結果，1300m/s 以上の速度が出ていることが確認された．粒子温度は，400 $^{\circ}\text{C}$ \sim 2000 $^{\circ}\text{C}$ の範囲で温度測定をする技術が確立されていないことから実際の金属材料を溶射することにより検証する必要がある．スケジュールの都合により様々な溶射材料を溶射，断面観察することができなかったため，本研究機関以降に皮膜の試作を行なう予定となっているので，その際に確認を行なう予定である．

1-4 当該研究開発の連絡窓口

(1) 管理法人

財団法人 埼玉県産業振興公社

技術支援部 新産業育成グループリーダー 関根 一宣

〒338-0001 埼玉県さいたま市中央区上落合2丁目3番2号

新都心ビジネス交流プラザ 3F

(2) 総括研究代表者

プラズマ技研工業株式会社

代表取締役 深沼 博隆

〒369-1214 埼玉県大里郡寄居町大字今市4-1

第 2 章 本論

2-1 数値シミュレーションに基づいたトーチ設計指針の構築及び検証

担当：鹿児島大学大学院理工学研究科 准教授 片野田 洋

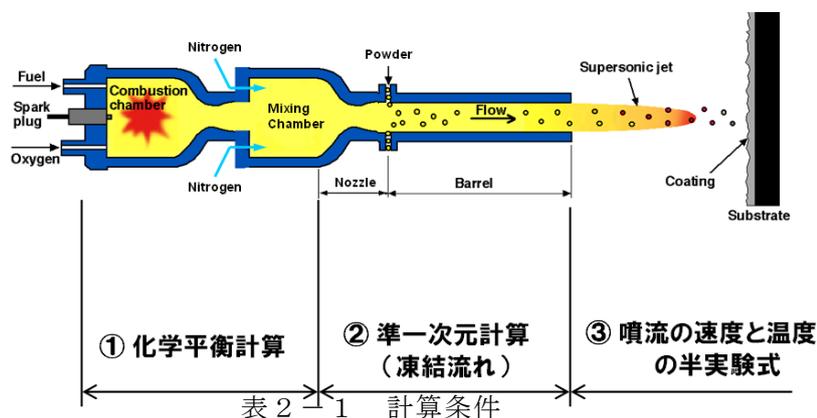
【概要】

従来のウォームスプレー（Warm Spray, 以下 WS）ガンの燃焼室圧，混合室圧は 1MPa 程度である．これを 4MPa 程度まで高めることにより，直径 $30\mu\text{m}$ のチタン粒子で速度 1000m/s，温度 1000°C （約 1300K）以下を達成することが本研究開発の技術目標である．4MPa の高圧の燃焼ガスを用いる溶射ガンは市販品でも見あたらないため，トーチの適切な設計指針が必要である

2-1-1 ①-1 トーチ，ノズル形状の設計指針の構築

【数値シミュレーション法】

WS ガン各部の計算手法の概要を図 2-1 に示す．燃焼室と混合室は化学平衡状態にあると仮定し，NASA が公開している化学平衡計算プログラム CEA（Chemical Equilibrium with Applications）⁽¹⁾ を用いて計算した．燃焼室のガス組成は CO_2 ， CO ， H_2O ， OH ， O_2 ， O ， H とし，混合室ではこれらに N_2 を加えた⁽²⁾．混合室下流の先細末広ノズルとバレルでの流れは，準一次元定常⁽³⁾の凍結流れであると仮定した．バレル出口からの超音速噴流の中心軸上の速度と温度は，半実験式を用いて求めた⁽⁴⁾．溶射粒子は直径 $30\mu\text{m}$ の球形のチタンとし，1 個のチタン粒子が中心軸上を飛行するとした．溶射粒子の速度と温度は，それぞれニュートンの運動方程式とエネルギー式を Runge-Kutta 法で解いて求めた．数値シミュレーションを行った WS ガン各部の圧力と各部の流路直径を図 2-2 に，計算条件を表 2-1 に示す．灯油，酸素，および窒素ガスの初期温度は 300K とした．



バレル長さ	250 mm
燃料/酸化剤	灯油/酸素
当量比	1.0
窒素ガス流量	500, 1000, 1500, 2000 slm

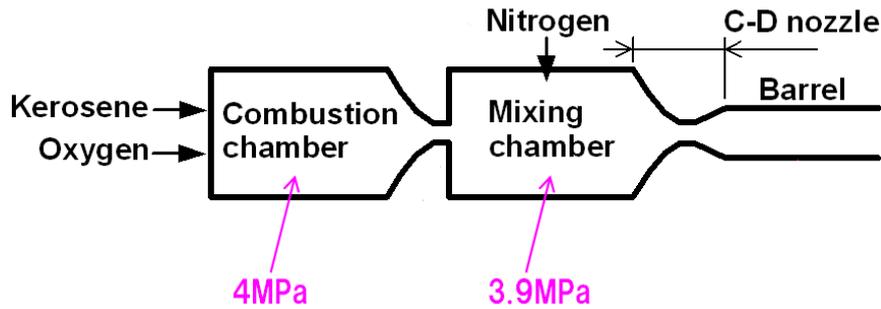


図 2 - 2 WS ガン各部の圧力

【数値シミュレーション結果】

数値シミュレーションにより得られたガスと粒子の速度を図 2 - 3 に示す。ガス速度の一般的な傾向として、ノズルの末広部でガス速度は急激に増加し、バレル内では管摩擦により減速する。バレル出口からガス速度はポテンシャルコア内で一定値を保ち、その後しだいに減衰する。粒子の速度は、窒素ガス流量 1500slm 以下の条件ではバレル出口で 1000m/s に達する。粒子速度はその後も増加し、 $x = 150\text{mm}$ 付近で最大値をとる。窒素ガス流量 2000slm では、粒子速度 1000m/s を得ることはできない。

ガスと粒子の温度を図 2 - 4 に示す。ガス温度の一般的な傾向として、ノズルの末広部でガス温度は急激に減少し、バレル内では窒素ガス流量 2000slm 以外では温度が低下する。窒素ガス流量 2000slm では冷却の効果よりも減速による温度上昇のほうが勝ってガス温度は下流方向へ増加する。バレル出口からガス温度はポテンシャルコア内で一定値を保ち、その後しだいに減衰する。粒子温度は、噴射位置から $x = 300\text{mm}$ まで 1300K 以下に保たれる。

したがって、窒素ガス流量を 500~1500slm とすることで直径 $30\mu\text{m}$ の球形のチタン粒子で速度 1000m/s、温度 1000°C 以下を達成することができると考えられる。

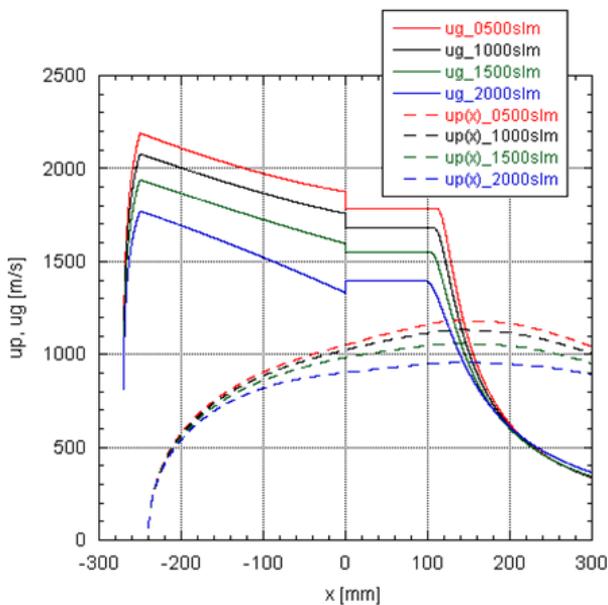


図 2 - 3 ガスと粒子の速度

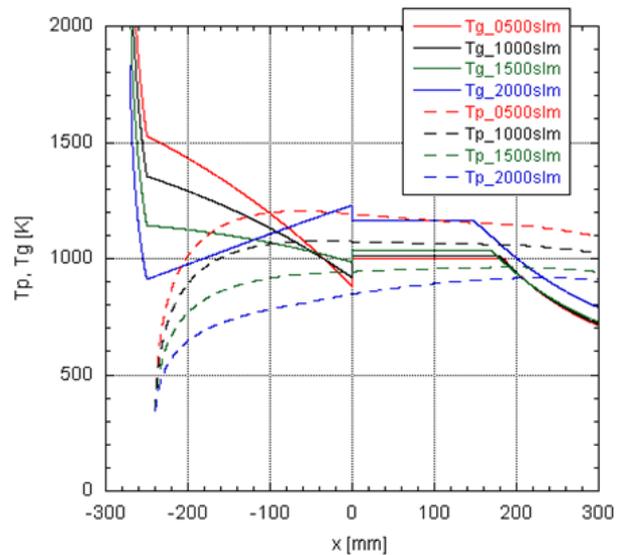


図 2 - 4 ガスと粒子の温度

2-1-2 ①-2 模擬実験

【実験装置】

前節の数値シミュレーション結果を補完する目的で、燃焼ガスの代わりに常温のヘリウムガスを用いた模擬実験を行った。燃焼ガスの模擬ガスとしてヘリウムを用いたのは、燃焼ガスと同様に密度が小さいためである。混合ガスは実機と同じで常温の窒素ガスとした。模擬実験装置の模式図を図2-5に、模擬実験装置の外観を図2-6に示す。

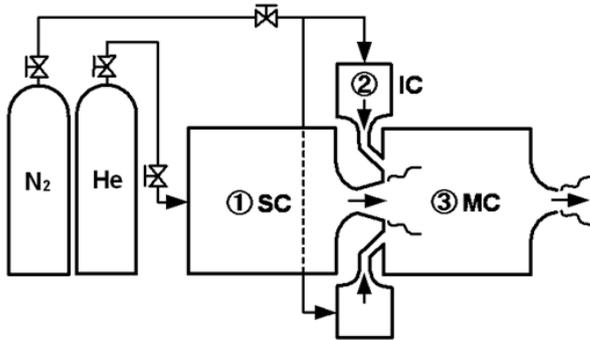


図2-5 模擬実験装置

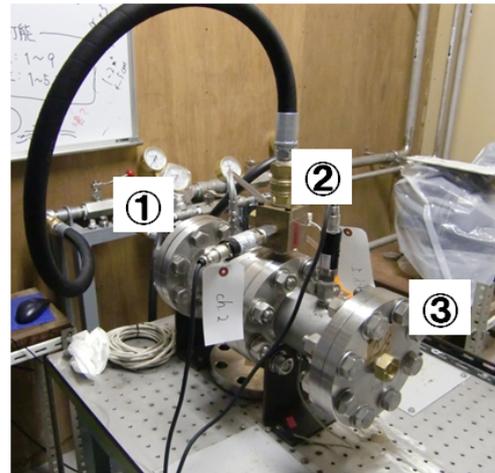


図2-6 模擬実験装置の外観

【実験結果】

模擬実験の結果から、混合室のノズルスロート断面積に対する燃焼室のスロート断面積および窒素噴射室の出口断面積の比は、WS1号機の場合と同等にするのがよいと考えられる。

2-1-3 ①-3 設計の改良及び検証

2-3節の模擬実験結果を受けて、2-2節で示したWS2号機の混合室のノズルスロート断面積に対する燃焼室のスロート断面積および窒素噴射室の出口断面積の比は、WS1号機の場合と同等にする。この改良の検証は研究期間の都合により成果報告書の提出前に実施することができなかったが、研究期間終了後に検証実験を行う計画である。

2-1-4 ①-4 作業条件によるノズル内の気体流れのシミュレーション

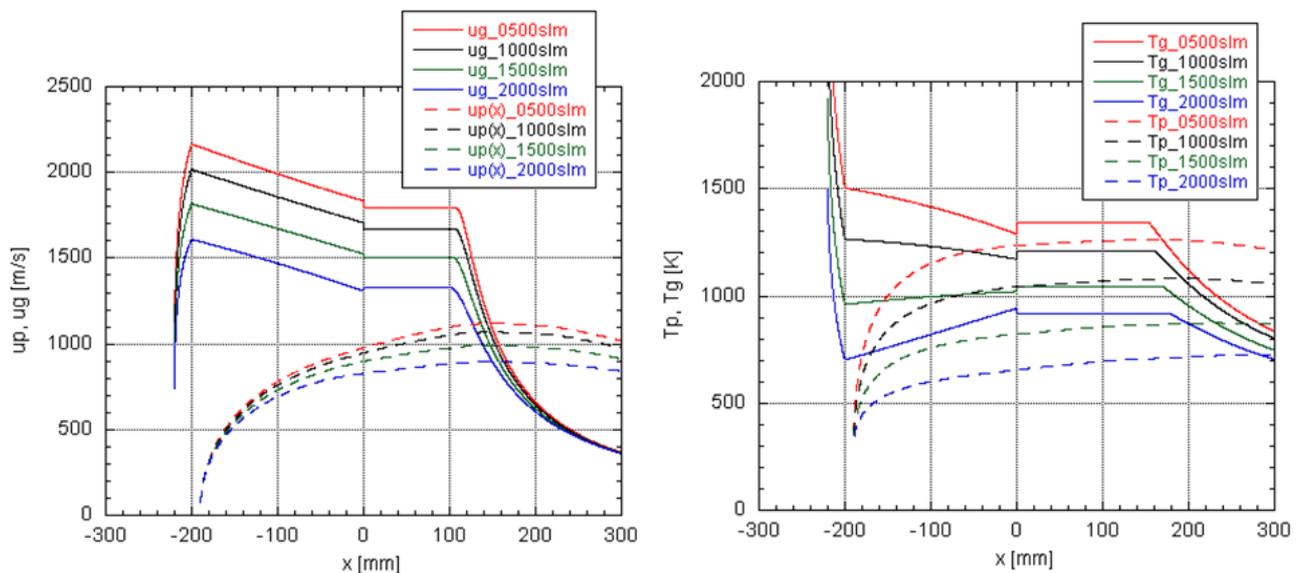
2-4節で得られた各流路直径を採用してWS2号機の試作機を製作した。WS2号機の試作機の作業条件で数値シミュレーションを行うための計算条件を表2-2に示す。バレルの長さは200mmとした。

表2-2 計算条件

窒素 slm	500	1000	1500	2000
灯油 slm	0.48	0.38	0.29	0.23
酸素 slm	980	780	590	470
混合室圧力MPa	4.0	4.0	4.0	4.0
混合室温度 K (°C)	2940 (2670)	2620 (2350)	2170 (1900)	1700 (1430)

【数値シミュレーション結果】

直径 $30\mu\text{m}$ のチタン粒子の速度と温度の数値シミュレーション結果を図 2-7 に示す。図 2-7 (a) より、ガス速度は図 2-3 と同様の傾向を示す。粒子速度は全ての窒素ガス流量についてバレルを出た後も増加し、およそ $x = 150\text{mm}$ で最大となる。その最大粒子速度は窒素ガス流量 1500slm 以下では 1000m/s 以上であるが、 2000slm では 1900m/s 未満である。図 2-7 (b) より、チタン粒子の最大温度は 1300K 以下であり、本研究開発の技術目標を満足している。したがって、窒素ガス流量 1500slm 以下のときに粒子速度 1000m/s 以上、粒子温度 1000°C 以下という技術目標を満足する。



(a) ガスと粒子の速度

(b) ガスと粒子の温度

図 2-7 直径 $30\mu\text{m}$ のチタン粒子の結果

2-7 参考文献・引用文献

- (1) S. Gordon and B. J. McBride, Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions and Applications, I Analysis, NASA Reference Publications 1311, Lewis Research Center, 1994, 55 pages.
- (2) H. Katanoda, H. Morita, M. Komatsu and S. Kuroda, Experimental and Numerical Evaluation of the Performance of Supersonic Two-Stage High-Velocity Oxy-Fuel Thermal Spray (Warm Spray) Gun, J. Thermal Science, Vol.20, No.1, 2011, pp.88-92
- (3) 松尾一泰, 圧縮性流体力学, 理工学社, 1994, p. 114
- (4) 片野田, 福原, 飯野, 松尾, 超音速自由噴流の半実験式を用いた高速フレイム溶射の粒子挙動の理論解析, 溶射, 第 44 巻, 第 1 号, 2007 年, pp. 108-114.

2-2 ②新ウォームスプレー装置の開発，製作

担当：プラズマ技研工業株式会社 技術部 大野直行
生産技術部 成毛基恭

【概要】

本研究では，従来型ウォームスプレー（以降ウォームスプレー1号機）の燃焼室圧力が1MPa程度であったのに対し，燃焼室圧力を4MPaにすることを目標にしている．従来の高速フレイム溶射及びウォームスプレー1号機では，高圧燃焼運転を想定した制御装置設計がなされていないため，制御装置に使用されている部品が高圧対応しおらず，高圧燃焼運転をすることは不可能であった．そのため，本研究では，高圧燃焼運転に対応した制御装置を設計・製作し，高圧燃焼運転を可能とした．

2-2-1 ②-1新ウォームスプレー制御装置設計・製作

【新ウォームスプレー制御装置の設計】

新ウォームスプレー装置は，燃焼圧を4MPaまで高めることを目標としており，この燃焼圧に耐えられる部品の選定を行なわなければならない．また，取り扱いガス圧が1MPaを超えることから高圧ガス保安法に準じた部品を選定及び制御装置の配管設計する必要がある．本制御装置では，燃焼圧力4MPaを実現する為に制御装置からトーチへの出口圧力を設計圧力7.0MPa，常用圧力5.0MPaとし，部品の選定を行なった．制御装置本体が高圧ガス設備となる為に高圧ガス保安協会での「高圧ガス設備試験」を受験し，法に準じた市販レベルの安全を備えた装置となる様に設計を行なった．

各部品の制御には，PLC（programmable logic controller：シーケンサー）を用い全ての機器を一括制御することとした．機器の操作は，タッチパネルとし，スイッチ操作，数値表示，数値入力，アラーム表示等をタッチパネルで行なえる様に設計を行なった．

【新ウォームスプレー制御装置の製作】

今回製作した新ウォームスプレー制御装置の外観及び内部を図2-8に示す．

物質・材料研究機構にて装置評価を行う新ウォームスプレー評価用制御装置として製作した制御装置は，高圧ガス保安協会の「高圧ガス設備試験」を受験し，合格することができた．



図2-8 新ウォームスプレー制御盤外観写真

2-2-2 ②-2新ウォームスプレートーチの設計・製作

【新ウォームスプレートーチの設計】

新ウォームスプレートーチの設計は、2-1-1節にて鹿児島大学にて構築されたトーチ、ノズル形状の指針を基に以下の事項を目標に設計を行なった。

- ・ 燃焼室圧力 4.0MPa に耐えられること。
- ・ 粒子速度 1200m/s 以上であること。
- ・ 実生産に耐えうる耐久性を保持していること。

連続運転：2時間以上、部品寿命：10時間以上

- ・ 現行高速フレーム溶射（JP-5000：PRAXAIR社製）、ウォームスプレー1号機の消耗部品が一部流用可能なこと。
- ・ 市販化を目指し、トーチデザインも考慮に入れて設計を行なう。

2-2-2-A イジェクションの開発

【1.インジェクション形式の検討】

燃料と酸素を高圧で燃焼させる為には、燃焼室内への酸素と灯油を供給する際の噴霧状態が最も大切である。そこで、本研究では、新規にトーチを設計することからトーチに用いるインジェクションの形式から検討を行った。燃料、酸化剤を混合し噴射する技術は、液体ロケットの噴射器が酷似しており、液体ロケットの噴射器を参考にインジェクションの形式の検討を行なった。

インジェクションの形式を決定する上で運転状態での噴霧の状態を考えることは、重要であるが、それと同等に過渡状態（点火始動時、消火時）の制御方法を考えることが重要なポイントである。衝突式噴霧装置、スプレー式噴霧装置は、定常運転状態では、最も安定した噴霧が得られると考えられるが、点火時では、少ない酸素流量で灯油を噴霧することは、難しいと思われる。また、燃焼圧力を高圧にした場合、灯油流量は非圧縮性流体であるので圧力変動による体積変化がなく噴射されるが、酸素は圧力変動により体積が変化する為、燃料と酸素の衝突位置が変化し、噴霧状態が変化してしまうことが考えられる。このことから衝突式噴霧装置、スプレー式噴霧装置は、圧力変動の大きい高圧フレーム溶射、ウォームスプレートーチには適さないと考えられる。

予備混合式噴射器は、あらかじめ燃料と酸化剤を予備混合室で混合し、燃焼室に噴霧することができるので比較的燃焼圧が変動しても影響が少ないと考えられるが、消火の際に予備混合室に火が入り逆火を起こす恐れが考えられる。

以上のことから、溶射トーチ用インジェクションの形式は、従来通り管式噴射式で設計を行なうこととした。

【2.インジェクション噴霧観察】

前項インジェクションの検討でも述べた通り、灯油は非圧縮性流体であり、酸素は圧縮性流体である。つまり、灯油は圧力が変動しても同じモル数の燃料を投入するに体積変化がないのに対し、酸素は同じモル数の酸素を投入するのに体積は、圧力に反比例して小さくなる。よって、燃焼圧力が変わると同じモル数の酸素、灯油をトーチに供給してもトーチ内の噴霧状態は、変化すると考えられる。

本研究では、燃焼室圧力による酸素、燃料の噴霧状態の観察を行い、また、模擬インジェクション試験装置を製作し、インジェクション形状による噴霧状態がどのように変化するのかを観察した。

【A-1. チャンバー内圧力による噴霧試験】

噴霧試験機チャンバー内の圧力を 1.0, 2.0, 3.0, 4.0MPa と変化させた際のノズルからの噴霧状態を観察した。この際のノズル形状は、ウォームスプレー1号機と同様な形状とした。

【結果】

チャンバー圧力による噴霧状態の差は、あまり観られなかった。

【B-1. インジェクションノズル形状による噴霧試験】

インジェクション形状による噴霧の影響を試験観察した。

チャンバー圧力 1.0MPa 時の噴霧観察写真を図 2-9, チャンバー圧力 4.0MPa 時の噴霧観察写真を図 2-10 に示す。

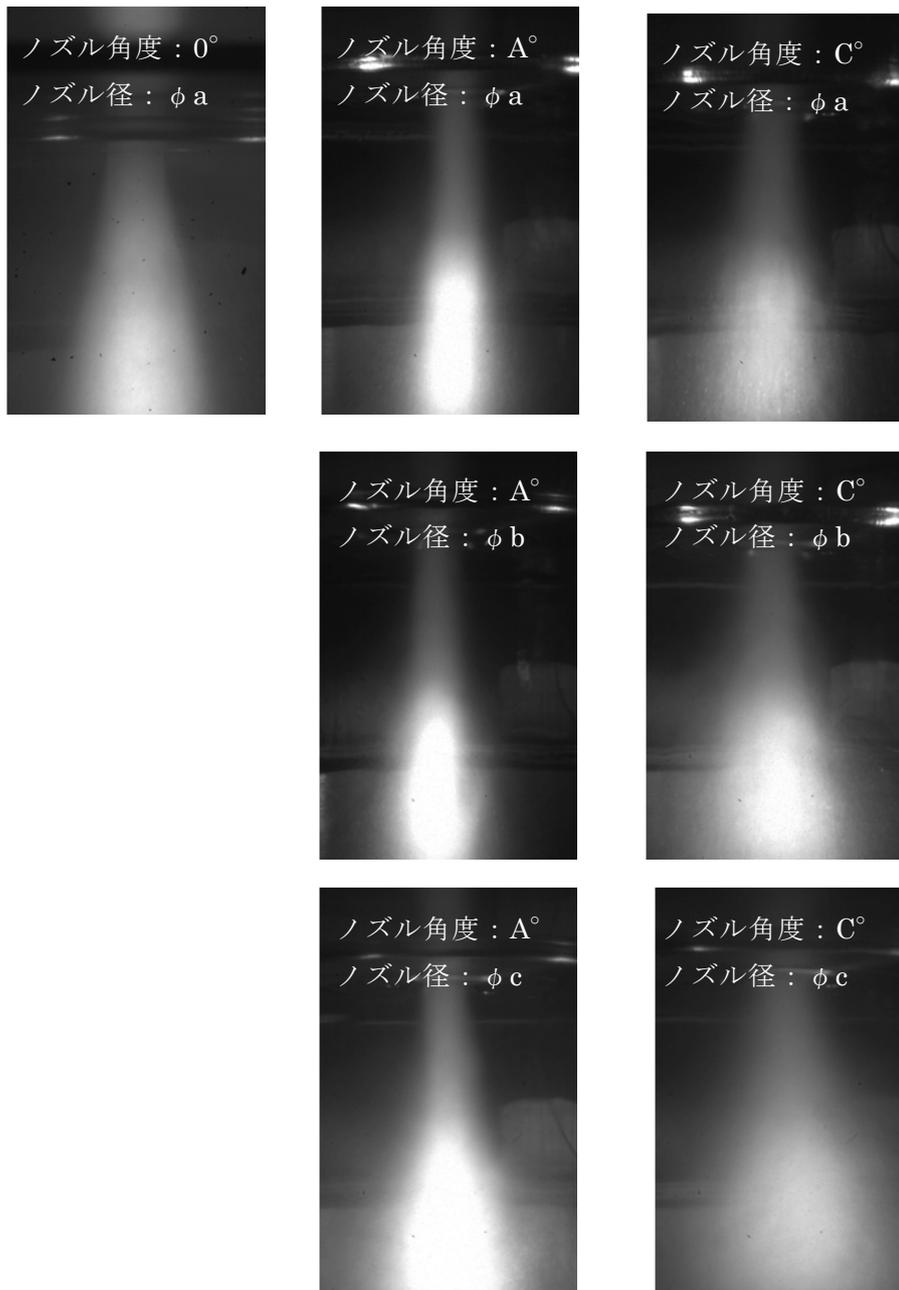


図 2-9 チャンバー圧力 4.0MPa : ノズル形状による噴霧観察写真

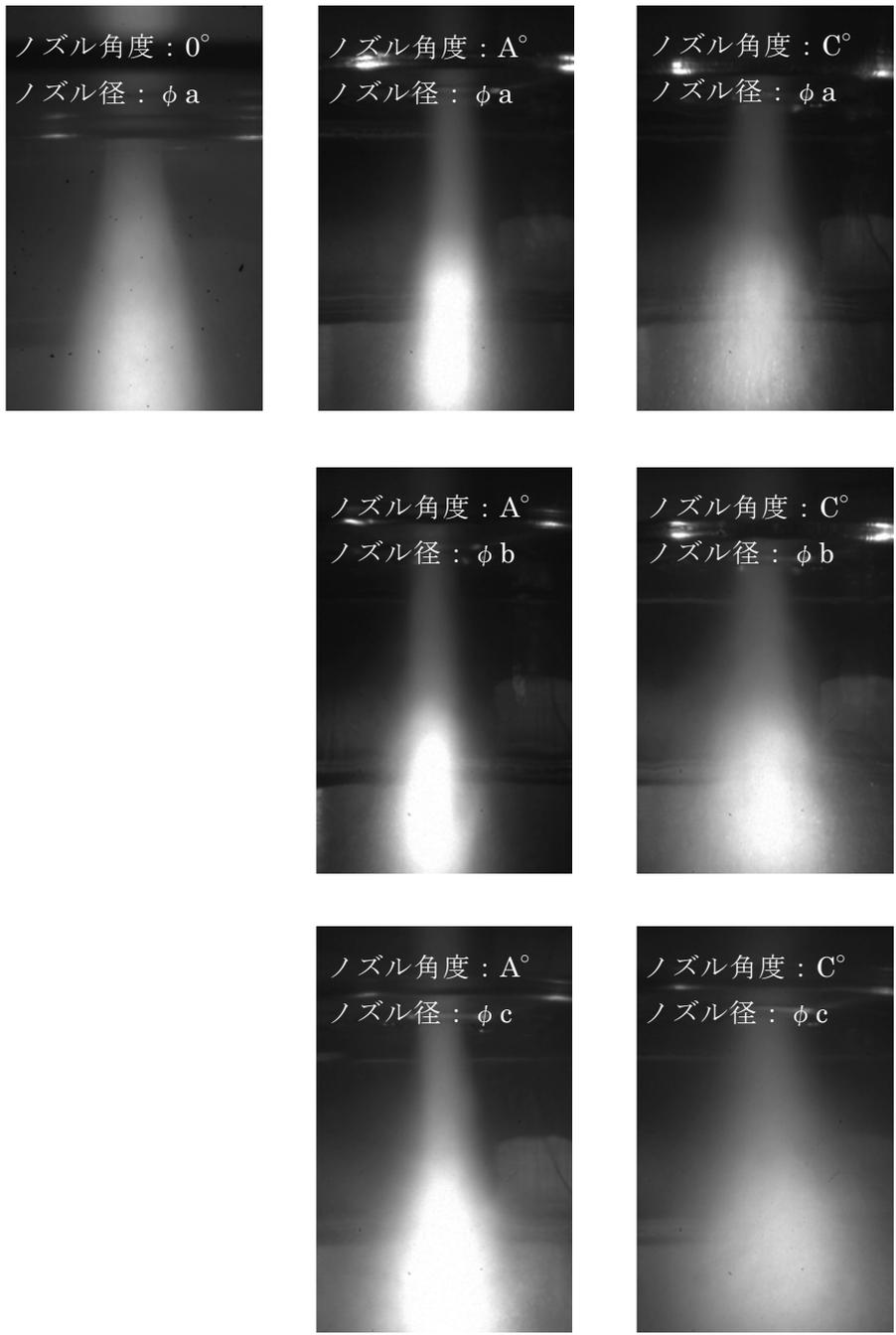


図 2-10 チャンバー圧力 4.0MPa : ノズル形状による噴霧観察写真

図2-9 チャンバー圧力 1.0MPa 時では，開口部角度 $\alpha = C^\circ$ が $\alpha = A^\circ$ より噴霧が細かく広がっていた．また，ノズル内径が細くなるほど噴霧が広がった．ノズル角度 $\alpha = C^\circ$ ノズル内径 ϕc の条件では，噴霧の濃淡はあるものの全ての観察写真においてノズル出口が噴霧の粒子によって，観察することができなかった．図2-10 チャンバー圧力 4.0MPa 時でも開口部角度 $\alpha = C^\circ$ のときのほうが $\alpha = A^\circ$ のときよりも噴霧が広がった．ノズル内径の影響もチャンバー圧力 1.0MPa 時と同様に細かい方が噴霧を広げる傾向が得られた．以上よりインジェクションノズル形状は，開口部角度 $\alpha = C^\circ$ の方が $\alpha = 0^\circ$ ， A° の方よりも微細に広がり，ノズル内径が細くなるに従って微細に広がることが確認された．

また，前項【A-1. チャンバー内圧力による噴霧試験】では，チャンバー内圧による噴霧状態の違いは，観られなかったが，本項の試験では，チャンバー圧力 4.0MPa の方が噴霧の広がりが少なかった．とくに，ノズル角度 $\alpha = C^\circ$ ノズル内径 ϕa の条件では，噴霧粒子中に液滴が観られた．

本実験から，新ウォームスプレートのインジェクションノズル形状は，ノズル内径 ϕc ，開口部角度 C° が適していると考えられる．

2-3 ③新ウォームスプレー装置の評価

担当：独立行政法人 物質・材料研究機構 渡邊 誠
荒木 弘
プラズマ技研工業株式会社 技術部 大野直行
開発1課 孫 波

2-3-1 ③-1 粒子速度計測

新ウォームスプレー法での飛行粒子速度の測定には、PIV (Particle Image Velocimetry) 法を用いた。PIV 法とは、流れ場の中に粒子を混入し、粒子を可視化することによって流れの解析を行なう方法である。一般的にダブルパルスレーザー（微小時間間隔に2回のレーザーパルスを同一面に照射する）を用いて、各パルスの照射された2枚の記録画像から粒子の動きを解析し、速度ベクトルを算出する方法である。今回使用したPIV装置は、カメラ(PCO1600：PCO社製)、ダブルパルスレーザー (Solo I-15：New Wave Research :esi社製) の組み合わせにより解析ソフト (Koncerto：西華産業) にて解析を行なった。

本研究では、飛行粒子速度測定にTi粉末 (TILOP-45：大阪チタニウムテクノロジーズ社製) を用いた。飛行粒子の速度測定位置は、鹿児島大学より提供された、2-1-4項のシュミレーション結果よりバレル出口より150mm付近で最高速度が得られることから、バレル出口より100, 150, 200mmの位置が測定範囲の中心となる様にトーチの位置を変化させ、測定を行なった。今回の飛行粒子速度の測定では、基本設計指針で計算されたバレル長さ250mm (10inch) に加え、100mm (4inch), 150mm (6inch), 200mm (8inch) のバレルの長さによる粒子速度の変化に付いても測定を行なった。測定時の溶射条件は、2-1-4項の計算条件で使用された窒素、酸素、灯油量に従って表2-3に示す条件で行なった。表中、燃焼室圧は、実際の測定時の燃焼室圧である。

表2-3 飛行粒子測定条件

条件	酸素流量 (NL/min)	灯油流量(mL/min)	窒素流量 (NL/min)	燃焼室圧力 (MPa)
①	980	480	500	4.1
②	780	380	1000	3.9
③	590	290	1500	3.4
④	470	230	2000	3.3

解析結果より以下のことが確認された。

- ・ 各バレル長さにおいても条件①, ②において粒子速度 1000m/s を超えている。
- ・ どのバレルの長さでも, シュミレーションの結果の通り①>②>③>④の順に速度が落ちた。
- ・ バレル長さ 100mm (4inch), 150mm (6inch) では, 条件①において粒子速度が 1300m/s を超えていた。
- ・ 200mm (8inch) バレルは, 4inch, 6inch バレルよりも粒子速度が遅くなっていた。
条件①でのバレル長さ 4inch, 6inch, 8inch の比較グラフを図 2-1 1 に示す。
- ・ 250mm (10inch) バレルでは, 粒子速度が測れていない部分が観られた。

今回測定した新ウォームスプレー (WS2) とウォームスプレー1号機 (WS1) との速度比較を行った。結果グラフを図 2-1 2 に示す。WS 2 は, WS 1 より測定位置 150mm において 100m/s 以上速度が速くなっている。逆に測定位置が 200mm を超えると WS 2 と WS 1 の速度が逆転し, WS 1 の方が速くなる。

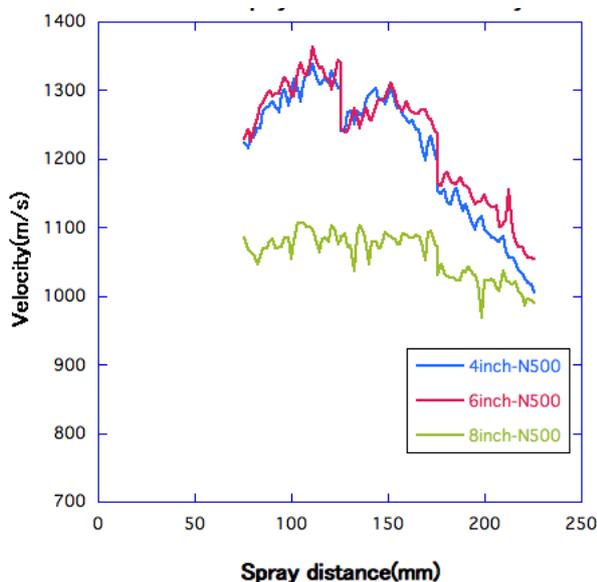


図 2-1 1 バレル長さによる粒子速度

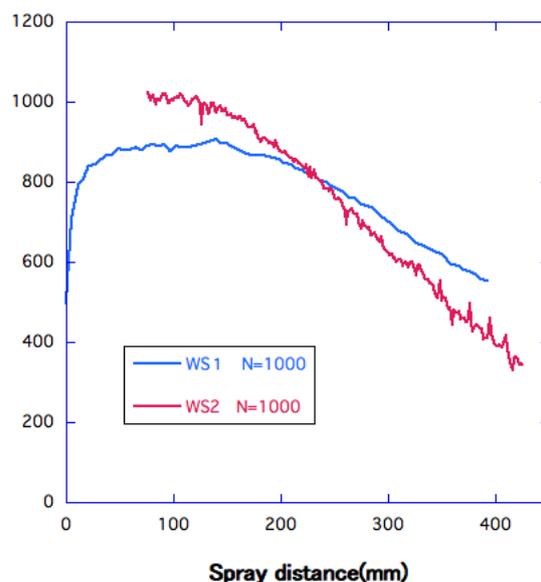


図 2-1 2 ウォームスプレー1, 2号機粒子速度

測定結果中バレル長さ 10inch でデータが撮れていない部分が生じた。これは, バレル内部, 出口付近に Ti が付着し (閉塞) したために速度が極めて遅い, 飛行粒子の角度が変わった, または, 粒子が出ていないためにデータが取れていないものである。この閉塞現象は, 高速フレーム溶射, コールドスプレー法でも発生する現象で, 粒子温度が高く, 粒子速度が速くなると発生する現象である。閉塞したバレルの写真を図 2-1 3 に示す。



図 2-1 3 10inch バレル閉塞現象 (材料: Ti)

2-3-2 ③-2 溶射皮膜観察

新ウォームスプレー装置の評価として、皮膜作成を試みた。詳細な膜の特性、溶射条件の検討については、研究期間の都合により研究期間終了後におこなうものとして、まず、装置の評価としての成膜を試みた。

溶射材料には、タービンプレードの下地コート材料として用いられる、CoNiCrAlY 材 (AMDRY9951 : Sulzer Metco 社製) を使用した。皮膜の組織比較として、従来ウォームスプレー (WS1)、減圧プラズマ溶射 (LPPS)、コールドスプレー (Cold Spray) の断面組織写真を図 2-14 に示す。

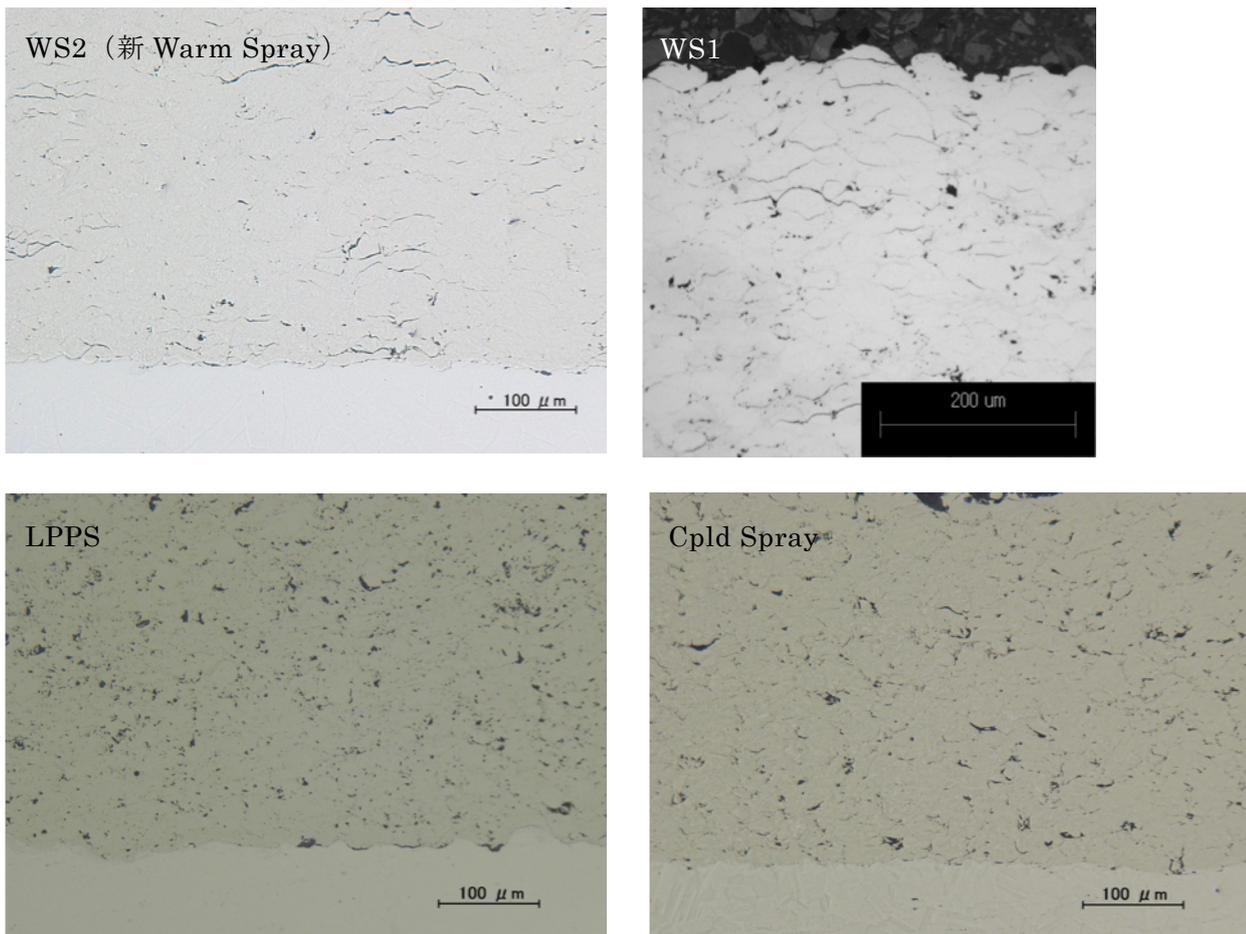


図 2-14 各溶射法による CoNiCrAlY 断面組織

新ウォームスプレー装置で成膜した断面組織は、ウォームスプレー1号機や Cold Spray で成膜した膜よりも緻密で、粒子の変形が大きかった。これは、新ウォームスプレーが高温での温度コントロールが容易で、高圧燃焼を行なうことにより粒子速度が上げられる為であると言える。

第3章 全体総括

3-1 全体総括

「次世代コーティングプロセス（ウォームスプレー技術）の開発」を遂行にあたり、数値シミュレーションによるトーチ設計及び高圧燃焼を可能とする制御装置の開発を進めてきた。一部研究期間の関係で未達成の部分があるが、研究期間内にその方向性について確認することができた。現状では、一部未達成の部分もあるが引き続き改良を重ねることにより早期事業化できることを確信している。

3-2 目標に対する成果

以下、各研究課題に対する成果を要約する。

① 数値シミュレーションに基づいたトーチ設計指針の構築及び検証

- ①-1 トーチ，ノズル形状の設計指針の構築
- ①-2 模擬実験
- ①-3 設計の改良及び検証
- ①-4 作業条件によるノズル内の気体流れのシミュレーション

技術的目標値：粒子速度 1200m/s 以上のトーチ設計

→ 混合室圧力 4.0MPa 以上で達成

技術的目標値：粒子温度 400～2000℃の範囲で温度コントロール可能なトーチ設計

→Ti 直径 10 μ m, 窒素混合量 500slm で 1500K 達成

燃焼室温度 3365K であるので粒子径を小さくすれば達成可能

技術的目標値：粒子速度 1000m/s, 粒子温度 1000℃同時達成のトーチ設計

→直径 10～30 μ m の Ti 粒子, 混合室圧力 3.9MPa,

窒素混合量 1000～1500slm の範囲で達成

② 新ウォームスプレー装置の開発・設計

- ②-1 新ウォームスプレー制御装置設計・製作

技術的目標値：使用圧力 4.5MPa 以上の制御装置の開発（高圧ガス保安協会の認定を取得）

→常用圧力 5.0MPa で高圧ガス保安協会 高圧ガス設備試験合格 達成

- ②-2 新ウォームスプレートーチの設計・製作

技術的目標値：実生産での使用に耐えうる耐久性を保持していること

連続運転：2時間以上 部品寿命：10時間以上

→トーチ耐久試験未完 未達

③ 新ウォームスプレー装置の評価

- ③-1 粒子速度計測

技術的目標値：粒子速度 1200m/s 以上

→Ti 粉末 粒子径-45 μ m 混合室圧 4.0MPa 窒素混合量 500slm

バレル長さ 4, 6 インチにて 1300m/s 以上（PIV 装置にて実測）達成

粒子温度 400～2000℃の範囲で温度コントロール可能

→飛行粒子の温度測定未測定 未達

3-3 今後の計画

上述のように、平成22年度において、次世代コーティングプロセス（ウォームスプレー技術）の開発に挑戦し、一部未達の領域があり、これらを達成するために、

1. 製作トーチの検証
2. 制御プログラムの検証

について、補完研究を進めていき、「ウォームスプレー装置による皮膜の試作」、「ウォームスプレー装置販売計画」に基づき、平成24年度からの事業化を目指す。