アーク熱源を用いたノズル加熱型金属3Dプリンタ

金沢大学　設計製造技術研究所
准教授　山口　貢

2026年7月30日

AM(Additive Manufacturing)の歴史

1981　小玉氏論文発表

1982　Herbert氏論文発表

1984　Hull氏特許取得

1986　Deckard氏特許取得
3Dシステムズ社設立

1987　DTM社設立

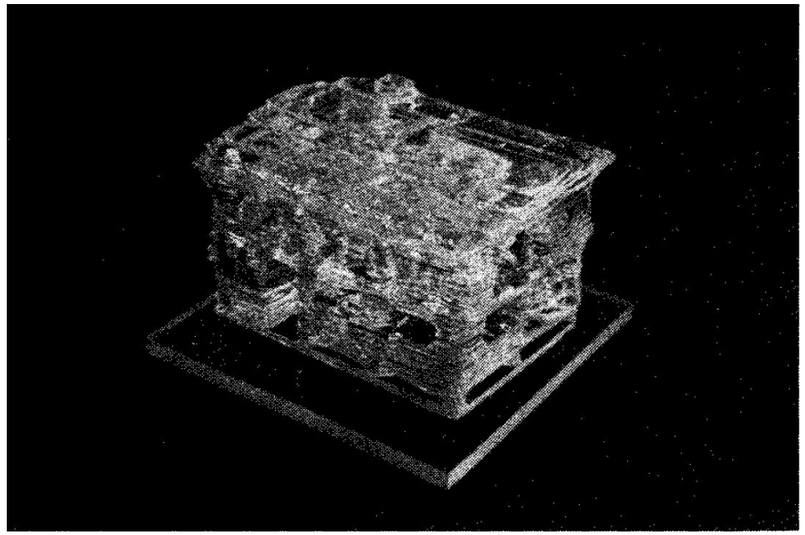
1988　3Dシステムズ社初号機発売 ― 光造形方式
シーメット設立
ストラタシス社設立 ― FDM(溶融物堆積)方式

1989　EOS社設立

1992　DTM社初号機発売 ― PBF(粉末床溶融結合)方式

1994　EOS社初号機発売 ― PBF(粉末床溶融結合)方式

1981年　小玉秀男博士@名古屋市工業技術研究所
「3次元情報の表示法としての立体形状自動作成法」
⇒紫外線硬化樹脂を利用した光造形法



世界初の3Dプリンタによる立体家屋[1)]

AMは，開発からおよそ40年の新しい加工技術である.

1) H. Kodama, “Automatic method for fabricating a three-dimensional plastic model with photo-hardening polymer,” Rev. Sci. Instrum., 52, 11 (1981) 1770-1773.

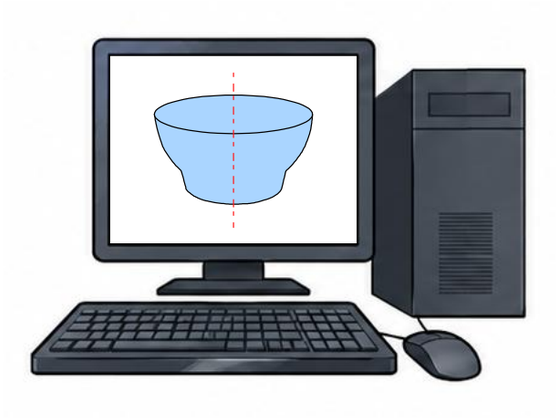
AM名称の変遷

時　期	名　称	背　景
1990年代前半～	ラピッドプロトタイピング （Rapid Prototyping: RP）	造形部品の強度や精度が低いことが課題であり，試作品（プロトタイプ）の製造に適用された.
1990年代後半～	ラピッドマニュファクチャリング （Rapid Manufacturing: RM）	材料や装置の改良により，最終製品レベルの性能を実現できるようになった.
2009年1月～	アディティブマニュファクチャリング （Additive Manufacturing: AM）	ASTM F42委員会で標準化され，試作から量産までを包括する製造技術として位置づけられた.

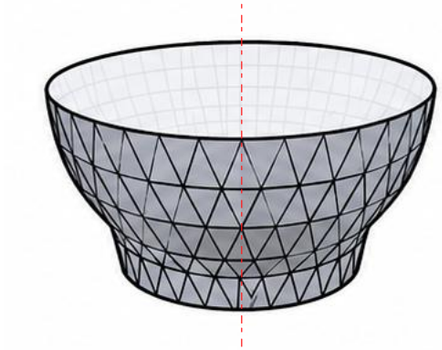
a process of joining materials to make objects from three-dimensional model data, usually layer upon layer, as opposed to subtractive manufacturing methodologies. (ASTM F2792-12a)

材料を付着することによって物体を3次元形状の数値表現から作成するプロセス．多くの場合，層の上に層を積むことによって実現され，除去的な製造方法と対照的なもの.

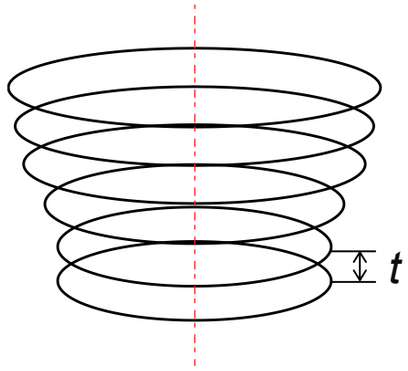
一般的なAMプロセス



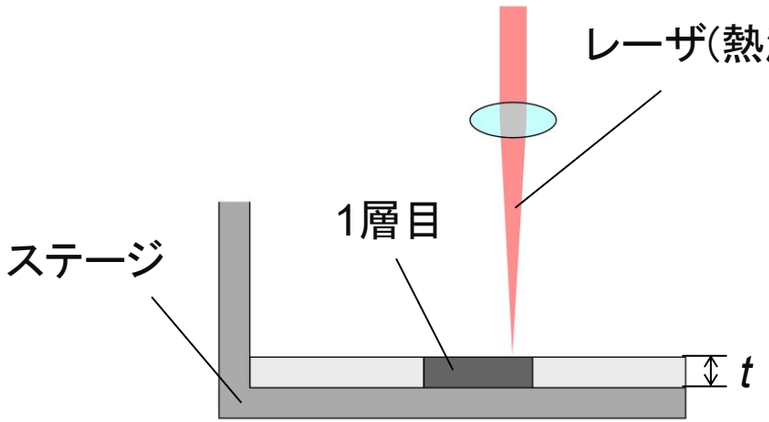
CADデータ



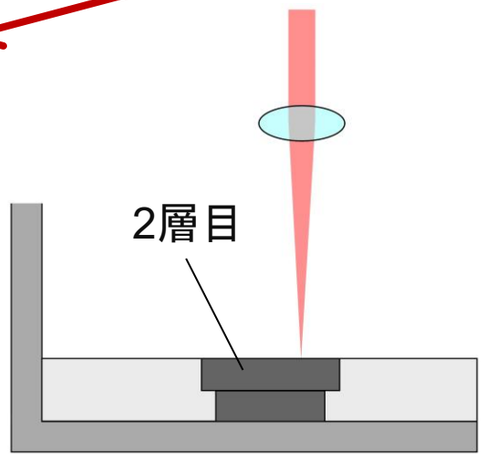
STL変換



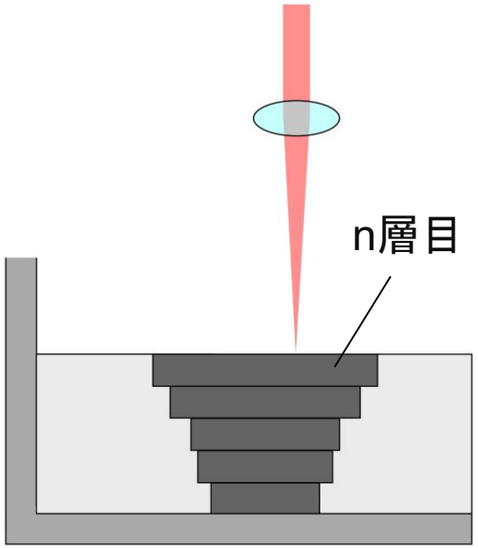
スライスデータの作成



1層目の積層



積層の繰り返し



部品の完成

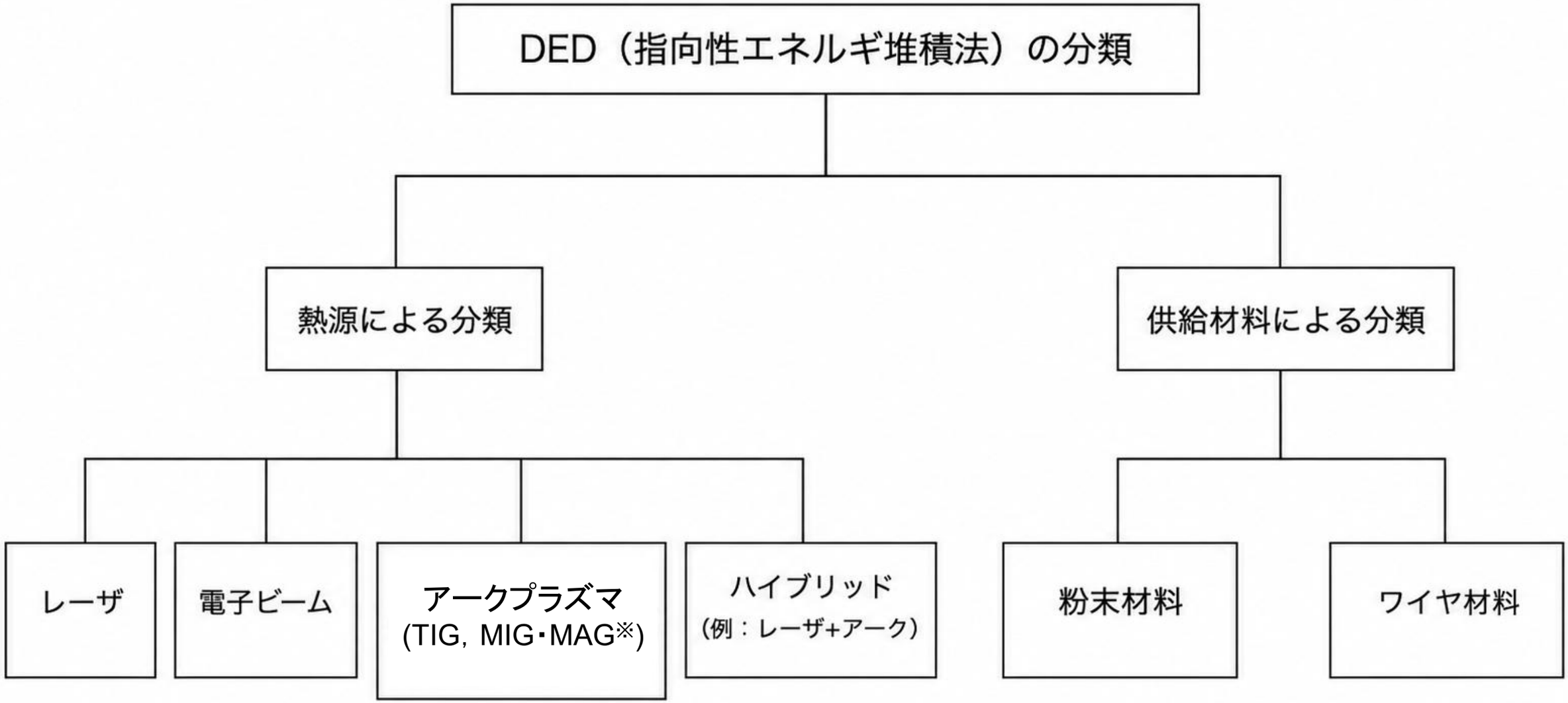
AMの分類

ISO/ASTM国際規格では，AMは7方式に分類される.

（1）粉末床溶融結合法（Powder Bed Fusion: PBF）
（2）指向性エネルギ堆積法（Directed Energy Deposition: DED）
（3）結合剤噴射法（Binder Jetting: BJT）
（4）材料押出法（Material Extrusion: MEX）
（5）材料噴射法（Material Jetting: MJT）
（6）シート積層法（Sheet Lamination: SHL）
（7）光造形法（VAT PhotoPolymerization: VPP）

本技術は，指向性エネルギ堆積法(DED)を対象とする.

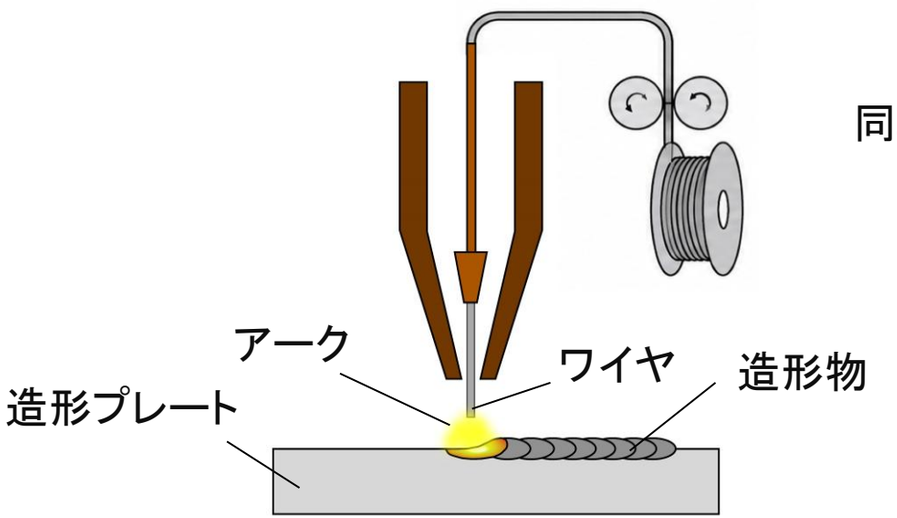
指向性エネルギ堆積法の分類



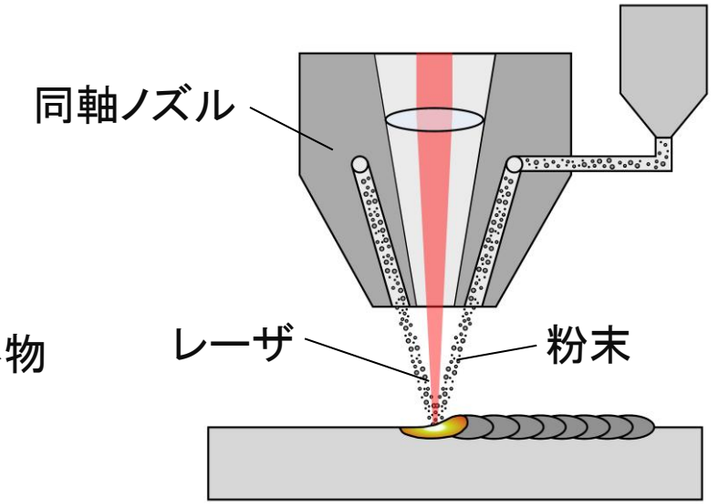
※TIG: Tungsten Inert Gas, MIG: Metal Inert Gas, MAG: Metal Active Gas

指向性エネルギ堆積法の分類

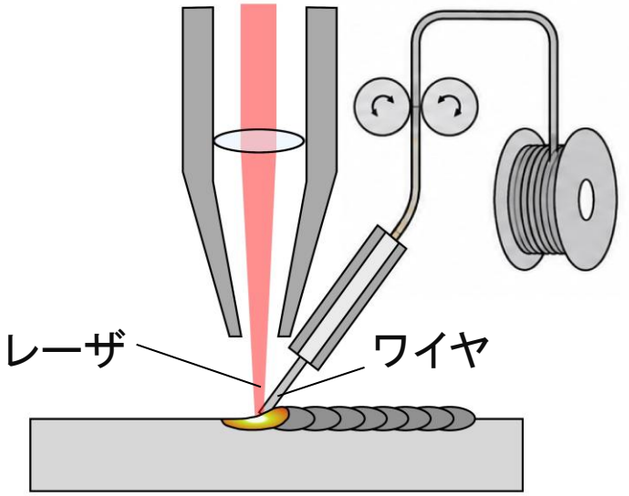
指向性エネルギ堆積法(DED)は使用する熱源と供給材料により，主に以下のプロセスに分類される.



アーク+金属ワイヤ (ワイヤアークAM)



レーザ+金属粉末



レーザ+金属ワイヤ

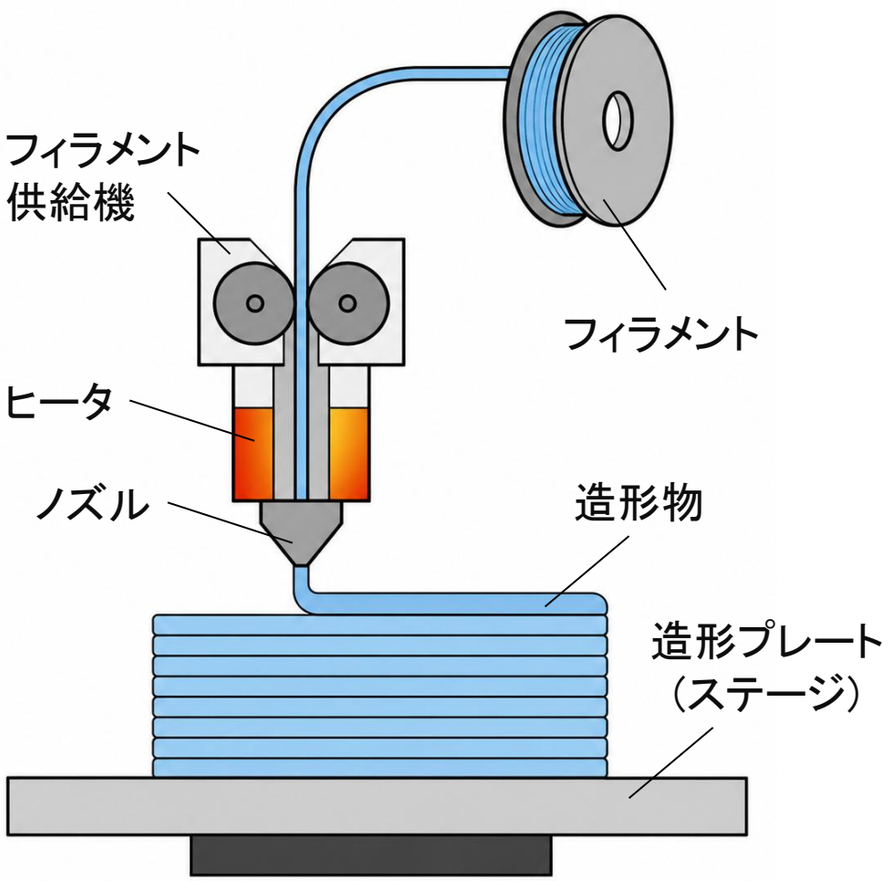
	アーク＋ワイヤ	レーザ＋粉末	レーザ＋ワイヤ
設備コスト	安価	高価	高価
材料コスト	安価	高価	安価
造形精度	低	中	中
造形効率	高	中	中
入熱の制御	難	易	中

従来技術とその問題点

- 従来の金属3Dプリンタは，造形パラメータが多く，造形モデルごとに最適条件が異なるため，条件設定と品質評価を繰り返す必要があり，前準備に多大な時間を要する.
- 高額な設備費用や高度な知識・ノウハウも普及の障壁である.

　設備費用が安価，かつ少ない造形パラメータで造形特性を制御可能な造形プロセスを確立できれば，金属AMの一般普及に寄与できるのでは？

着目した汎用的なAMプロセス



材料押出法（MEX）※溶融物堆積法（FDM）

① フィラメントを加熱ノズル内に連続供給する.
② ノズル内で材料を加熱・溶融し，半溶融状態で押し出す.
③ 溶融材料をノズルから押し出し，造形プレート上に所定のパスで堆積する.
④ 堆積した材料を冷却・固化し，1層ずつ積み重ねることで三次元形状を得る.

材料押出法は，ノズル温度やノズル形状，送り速度，積層ピッチなど少ない造形パラメータで制御が可能である.

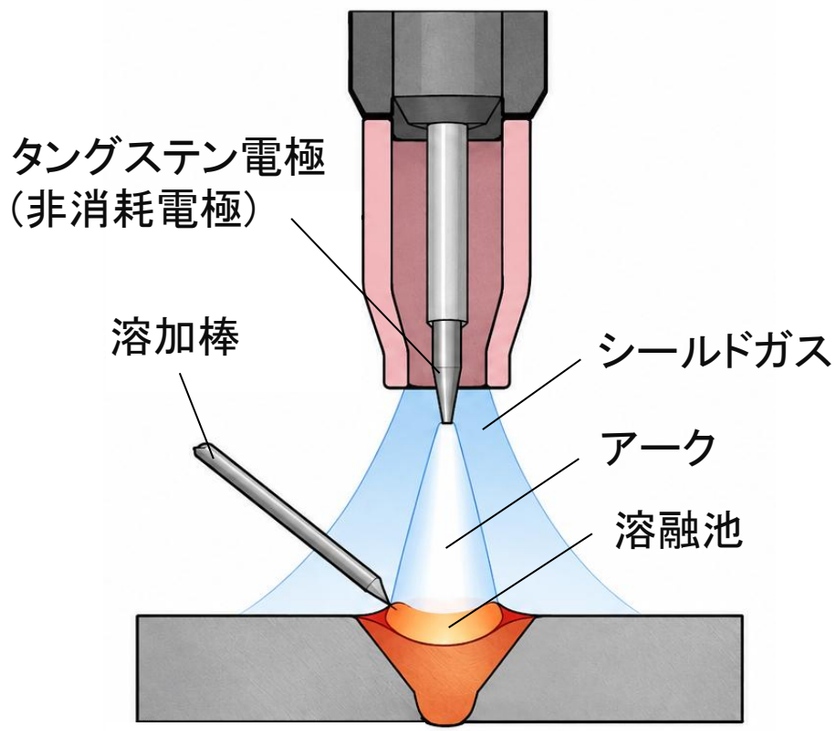
本技術の着想に至った経緯

樹脂材料を使用した汎用的なAMプロセスである材料押出法のように溶融させた材料をノズル内部に充填し，先端から吐出させることでプロセス管理の簡易化やプロセスに依存した入熱制御の問題を解決できるのでは？

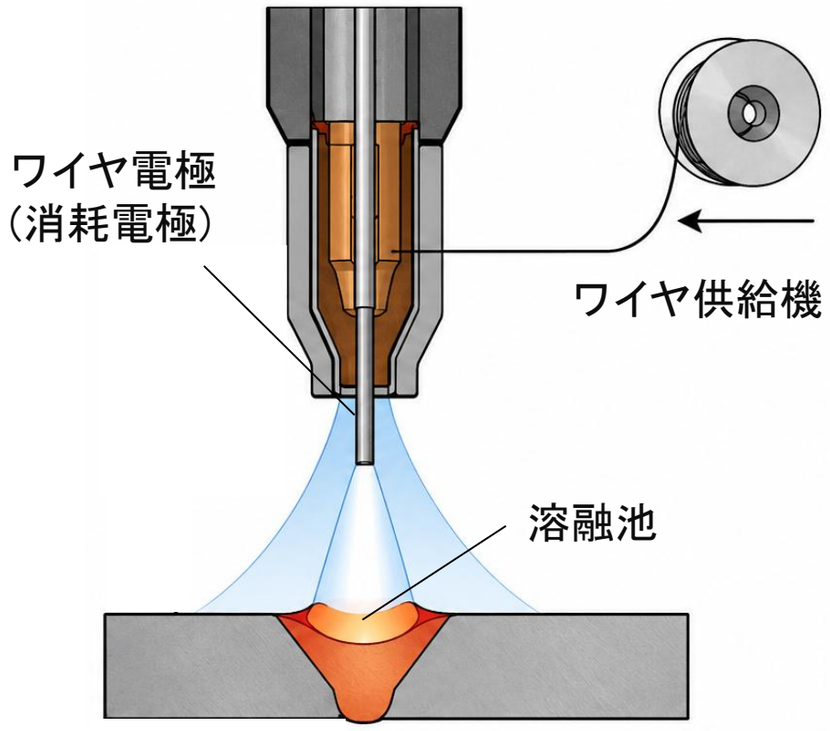
しかしながら，従来のカートリッジヒータや高周波加熱などの方式で金属材料を局所的に融点以上に加熱することは可能だろうか？

⇒適用可能性があるのは，レーザ or アーク熱源？

アーク熱源を利用したワイヤアークAM



TIG溶接

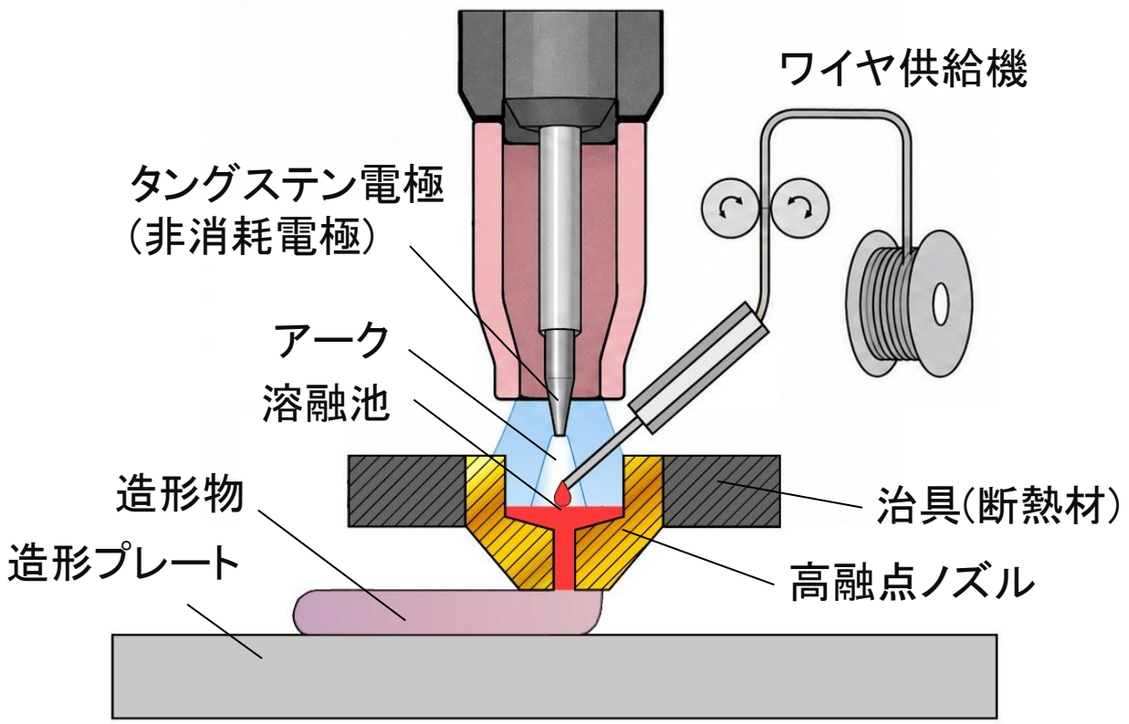


MIG・MAG溶接

TIGやMIG・MAG溶接を適用したワイヤアークAMは，アーク放電を利用して供給材を局所的に加熱して溶滴を形成させ，造形プレート上に積層させることで3次元形状を得るプロセスである.

これらの経緯から，ワイヤアークAMを利用したノズル加熱型金属3Dプリンタを考案した.

新技術の特徴･従来技術との比較



提案する造形プロセスの概要

① アーク放電を利用して供給する金属ワイヤを加熱して溶融池を形成させ，ノズルの流入口に蓄積させる.

② アーク放電で発生する熱エネルギ(15,000 K以上[3])を利用してノズルを加熱することで溶融池の表面張力を低下させるとともに，重力やプラズマ発生に伴うジェット気流(アーク圧)を溶融池に作用させることでノズル内部に流入させる.

③ その後，押し出された溶融池を母材上に積層させることで三次元形状を得る.

本技術により，設備費用が安価かつ少ない造形パラメータで造形特性を制御可能な造形プロセスを確立できるとともに，金属AMの一般への普及に寄与できる.

3) 小川洋司, “溶接現象の可視化技術”, 高温学会誌, 37, 3 (2011) 99-107.

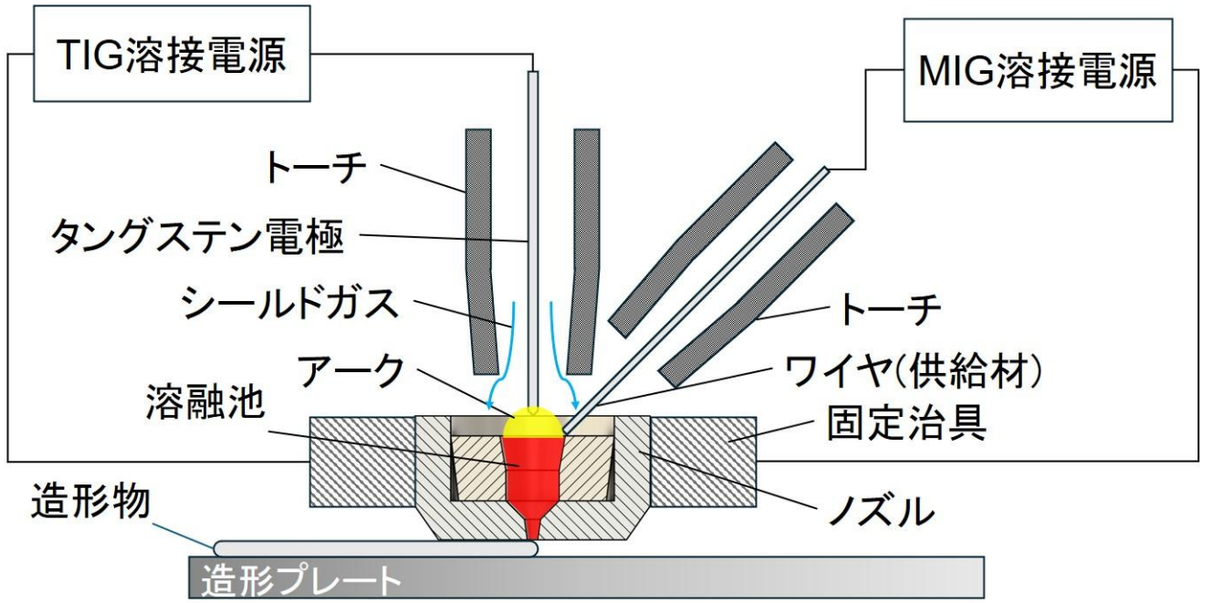
今年度の研究スケジュール

【評価項目】

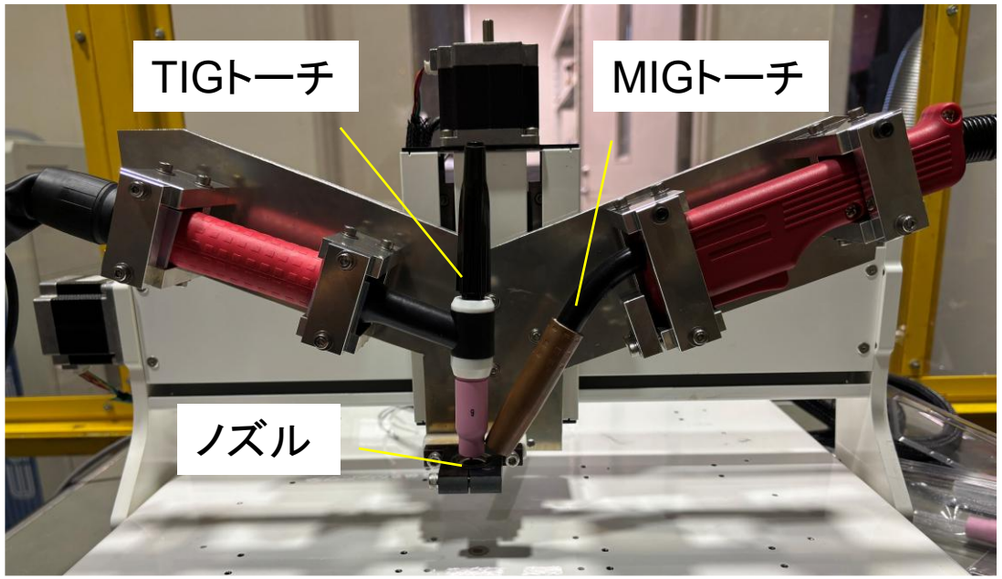
- TIG電源によりノズル温度を供給ワイヤの融点以上に加熱することは可能か？
- ノズル温度を供給ワイヤの融点以上に加熱し，ワイヤを供給したときに溶融材料が吐出されるか？
- アーク熱源と供給ワイヤが同軸であるMIG電源でも適用可能か？

項目	2025年度				2026年度			
	4～6月	7～9月	10～12月	1~3月	4～6月	7～9月	10～12月	1~3月
造形装置の設計・製作	→							
ノズル形状の設計・製作		→						
TIG電源による造形特性の評価			→	→				
MIG電源による造形特性の評価					→	→		
TIG-MIG電源による造形特性の評価				本日の発表内容		→	→	
ノズルから吐出された造形物特性の評価							→	→

装置，治具の設計･組立



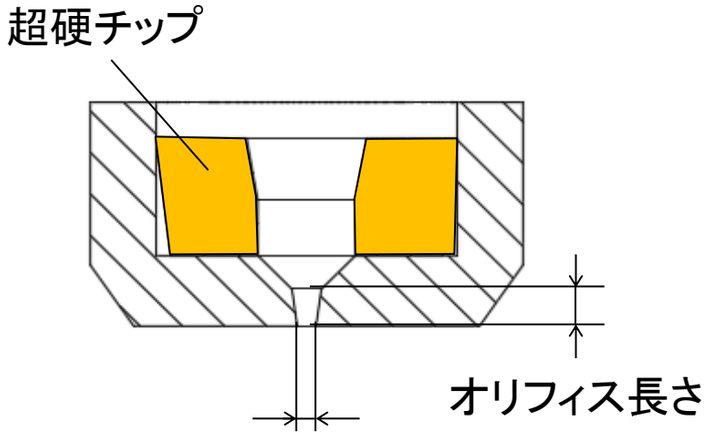
提案する造形装置の概要



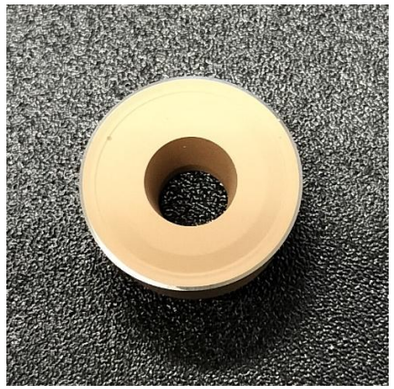
試作した卓上型金属3Dプリンタ

造形装置を設計･製作した．装置の主な構成は卓上CNC装置，溶接機器(電源，トーチ)，トーチ固定治具，タングステン製ノズル，ノズル固定治具，断熱材である．溶接電源は，TIG，MIG電源の両方を採用した．

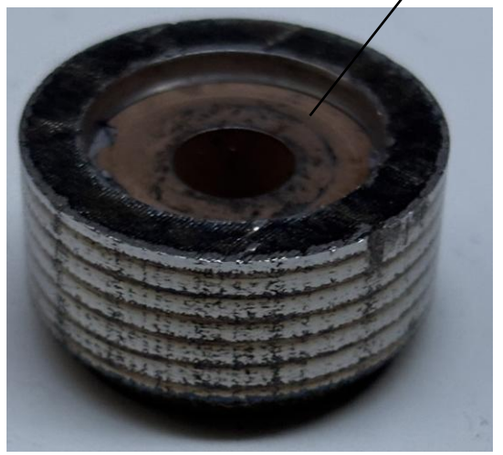
ノズルの設計



ノズルの断面図



超硬チップ



ノズル

- アルミニウム合金ワイヤ(JIS Z3232 A5356 WY，融点約635 ℃)への適用を検討し，ノズルを融点以上に加熱するときに必要な熱量の関係からノズル体積を約2,500 mm^3 とした.
- ノズル全体をタングステン(融点：3,422 ℃)など高融点材料で構成したときにコスト高となることと，断熱性の向上(超硬合金の熱伝導率：71 W/m･K[4])のため，超硬チップ(炭化タングステンの融点：約2,800 ℃)を挿入する入れ子構造を採用した.
- 基礎的検討として流入口やオリフィスの直径や長さなどの形状パラメータを変化させた.

4) 超硬工具協会: 超硬工具ハンドブック, 1988.

装置製作に要した費用

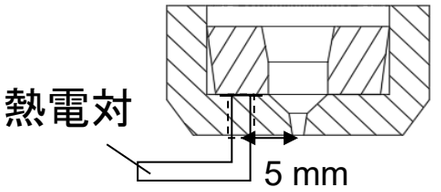
区　分	数　量	単　価(円)	金　額(円)
【物品費】			
卓上CNC装置	1	270,000	270,000
TIG溶接機	1	240,000	240,000
MIG溶接機	1	220,000	220,000
溶接ワゴン	2	40,000	80,000
アルミ合金ワイヤ(1巻5 kg)	1	15,000	15,000
超硬チップ(10個)	1	23,000	23,000
造形用プレート	10	1,500	15,000
シールドガス(Ar 47L型ボンベ)	1	13,000	13,000
【その他】			
固定治具製作費	1	20,000	20,000
断熱材	1	18,500	18,500
合　計			914,500

設備や物品に関する初期費用の概算であり，ノズルの製作費や人件費などは含まれていないが，100万円以下で製作できた.

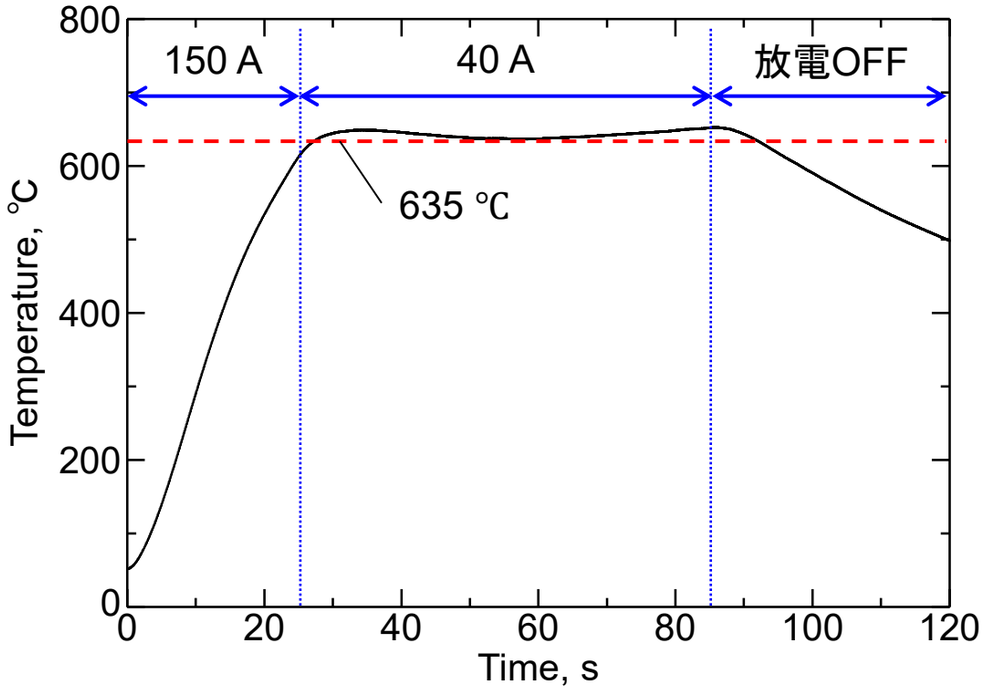
TIG電源による加熱実験

【目的】: TIG電源によりタングステン電極とノズル内部の超硬チップ間にアーク放電を発生させ，所定の電流と放電持続時間を設定してアルミワイヤの融点635 ℃まで加熱後，電流値を下げて635℃以上に保持可能な条件を調べた.

【方法】: 電流をスイッチとタイマにより制御し，ノズル底部に固定した熱電対で温度を測定した.



温度測定位置

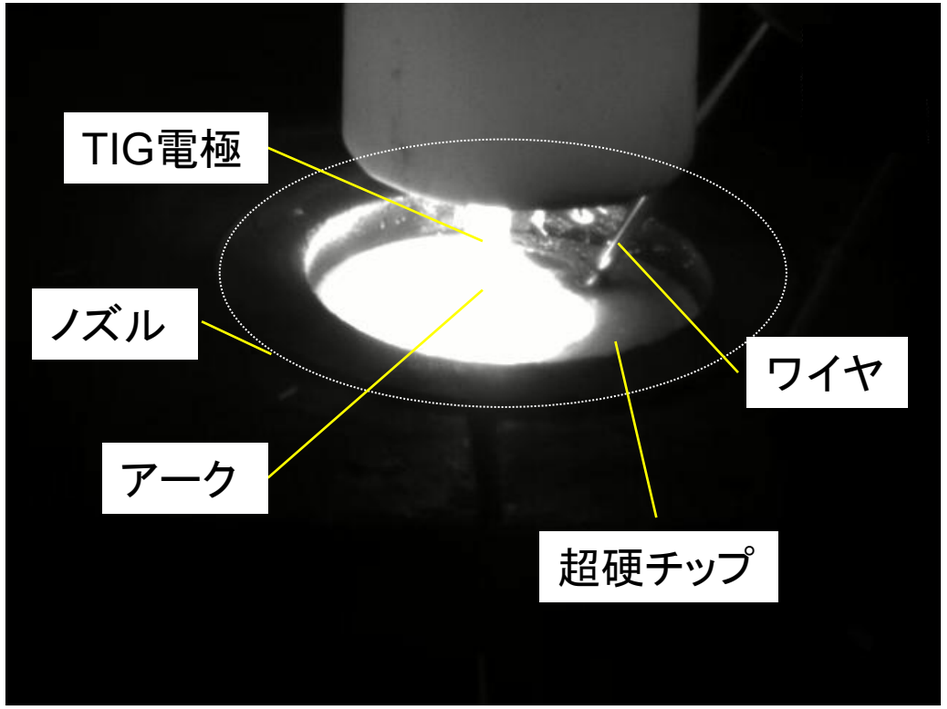


適切な電流と放電持続時間の選定により，ノズルの温度をアルミニウム合金の融点である635 ℃以上に維持管理できることが明らかとなった.

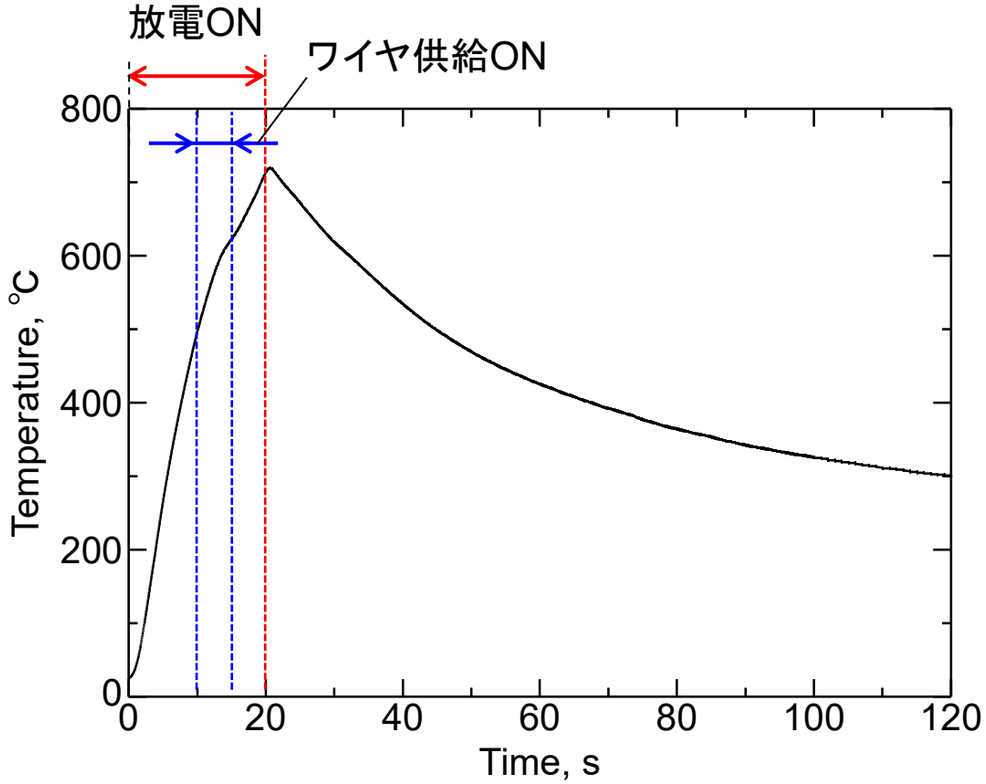
⇒アーク放電を局所加熱のための熱源として利用できる.

TIG電源による造形実験

【目的】: TIG電源によりノズルを加熱しながら，ワイヤを供給したときのノズル温度と溶融材料の吐出の可否を調べた.



造形様相の観察

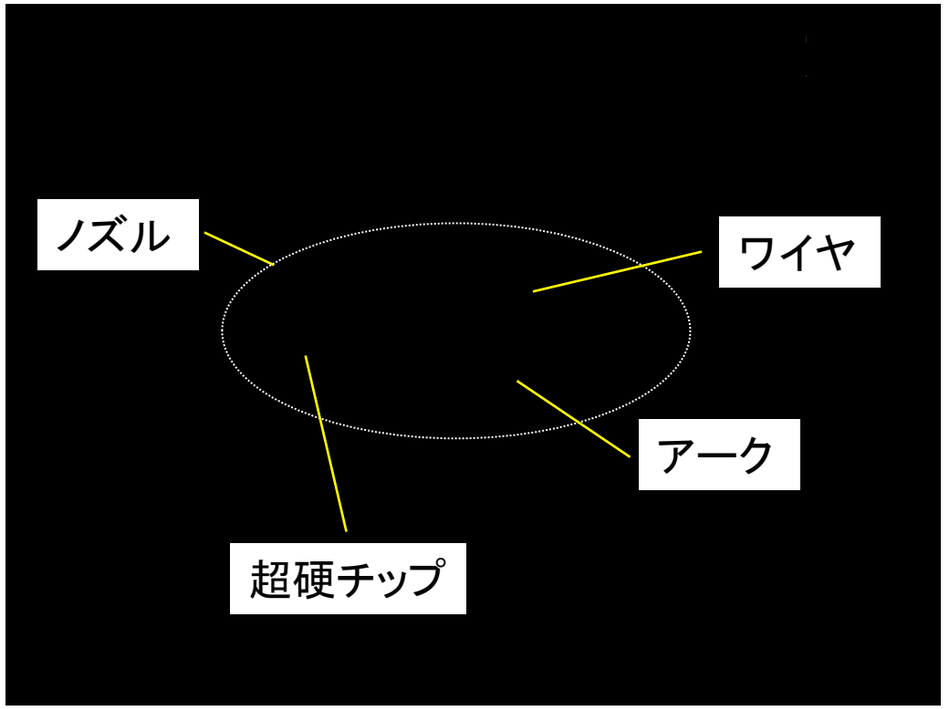


ノズルの温度変化

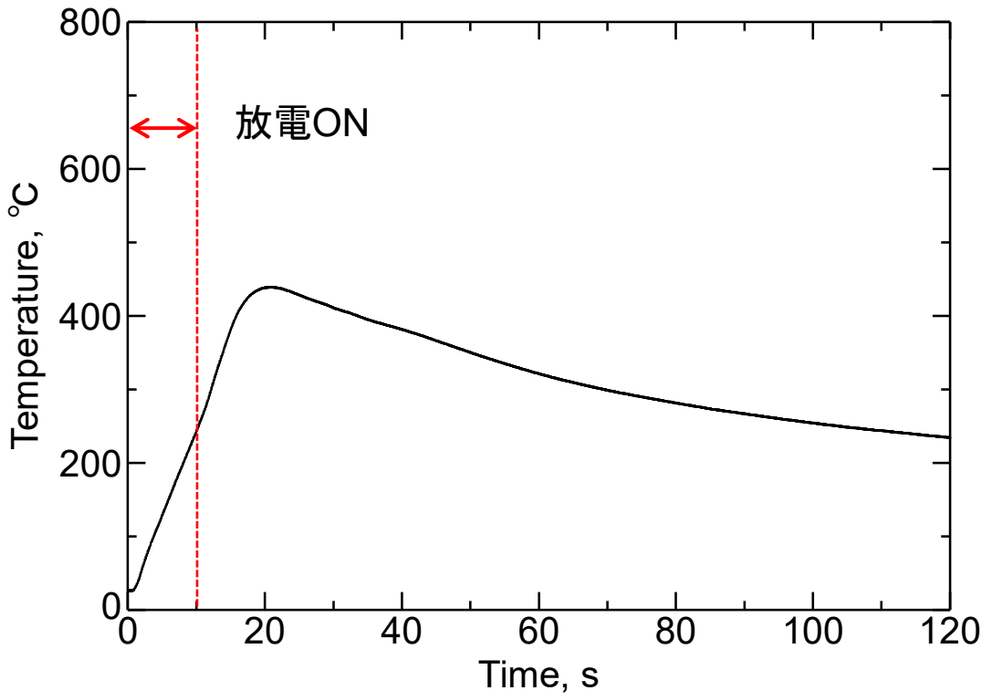
造形様相の観察では安定してワイヤが供給されており，ワイヤの融点である635 ℃以上に加熱できているが，ノズル先端からの吐出は確認できなかったため，要因を調査している.

MIG電源による造形実験

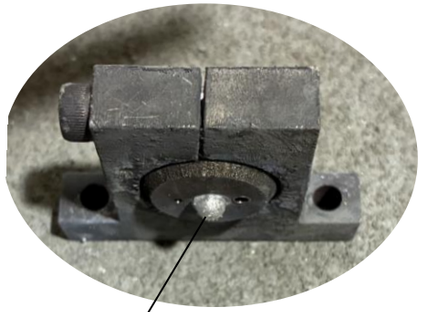
【目的】:アーク熱源と供給ワイヤが同軸であるMIG電源を用いたときの溶融材料の吐出の可否を調査した.



造形様相の観察



ノズルの温度変化



ノズルから吐出された溶融金属

造形様相の観察ではノズル内部に溶融池が形成されており，造形開始時のみノズル先端から吐出が確認できた．溶融池の熱エネルギの一部がノズルの加熱に消費されるため，溶融池の温度が低下した結果，表面張力が増加し，ノズル先端からの吐出を抑制したと考えられる.

想定される用途

- 金属材料を用いた試作部品･カスタム部品の製作
- 航空･宇宙，自動車，電子部品などの製造
- アルミダイカスト製品の代替
- ろう付け，溶接，局所溶接，異種金属接合
- 肉盛り補修，クラッディング
- 現場補修を目的とした可搬型金属3Dプリンタへの応用

実用化に向けた課題

- 現在，ワイヤアークAMを利用してノズルをアルミニウム合金ワイヤの融点(約635 ℃)以上に加熱できる条件範囲は特定できている．しかし，溶融金属のノズルからの安定した吐出が未解決である．
- 今後，TIG-MIGを組み合わせた造形実験を実施し，造形様相やノズル温度との関係を調査するとともに，吐出された造形物の形態変化を評価する．
- 実用化に向けて，適切なノズルの材質やオリフィスのサイズなどを調査する．
- 積層パスに合わせて，溶融金属のノズルからの吐出のON／OFFを高精度に制御するためのシステム構築が必要である．

社会実装への道筋

時期	取り組む課題や明らかにしたい原理等	社会実装への取り組みについて
基礎研究	・試作機の設計・製作が完了	
現在	・ワイヤアークAMを利用したノズル加熱プロセスの構築	
1年後	・溶融金属の安定吐出が可能なノズル形状と温度の把握	デモンストレーションの実施 外部資金に応募し，研究資金獲得
2年後	・得られた造形部品の品質・性能評価	サンプル提供の実施 試験サービスの実施
3年後	・造形部品の品質向上 ・造形チャンバを用いた環境因子の管理手法の構築	サンプル提供の実施 試験サービスの実現

企業への期待

- 現在の造形プロセスでは，溶融金属の表面に作用する駆動力は重力，ジェット気流(アーク圧)，反跳圧力のみであるため，溶融金属の吐出安定性の向上に課題がある.
- ノズル設計の技術を持つ装置メーカーとの共同研究を希望.
- 超硬チップでは，結合剤であるコバルト(融点：1,495 ℃)がアーク放電により溶融し，ノズルの性能を低下させる可能性がある.
- 材料開発(高融点材料)の技術を持つ材料メーカーとの共同研究を希望.

企業への貢献，PRポイント

- 樹脂材料を使用した3Dプリンタによる試作では，造形部品の強度の低さに課題があるため，本技術への置き換えにより造形部品の強度向上が見込める.
- アルミニウム合金による造形部品は様々な産業への適用が期待されているが，熱源にレーザや供給材に粉末を使用するAMプロセスでは，アルミニウム合金の高い反射率のために高出力レーザが必要となることに加え，粉塵爆発への対策が必須である．本技術により，AMによるアルミニウム合金部品の適用拡大が見込める.
- 本技術の導入にあたり必要な追加実験を行うことで，科学的な裏付けを行うことが可能である.
- 本格導入にあたっての技術指導や造形レシピの共有が可能である.

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称　：溶融金属材料供給装置及びそれを用いた造形装置並びに溶融金属材料供給方法及びそれを用いた造形方法
- 出願番号　　：特願2026-090006
- 出願人　　：金沢大学
- 発明者　　：山口　貢，古本達明，阿部　諭

お問い合わせ先

株式会社 金沢大学TLO

TEL　　076-264-6115

e-mail　　info@kutlo.co.jp