

令和 5 年 6 月 23 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14619

研究課題名（和文）Electron beam additive manufacturing of Ti-6Al-4V alloy using plasma rotating electrode process powder

研究課題名（英文）Electron beam additive manufacturing of Ti-6Al-4V alloy using plasma rotating electrode process powder

研究代表者

崔 玉傑 (CUI, YUJIE)

東北大学・金属材料研究所・助教

研究者番号：30796214

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,500,000円

研究成果の概要（和文）：プラズマ回転電極プロセス（PREP）を用いて粉末の表面にサテライトおよび孔が無く、真球に近い形状のTi-6Al-4V合金粉末を製造した。電極の直径や回転速度、プラズマ電流を制御することは、適切な粒径のPREP粉末を製造するのに有効な方法である。また、統計モデルを適用することにより、PREPパラメータと平均粉末直径との関係が評価可能になり、評価範囲における平均粉末粒径の予測も可能であることがわかった。PREP粉末を用いて、電子ビーム積層造形により優れた機械特性を有するTi-6Al-4V合金を製造した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

PREP粉末形成におけるPREPパラメータの影響を調査した研究は不足している。さらにはPREP粉末を用いたTi-6Al-4V合金の積層造形に関する研究も少ない。本研究はPREPパラメータが粉末の形成に与える影響を明らかにし、粉末積層造形技術におけるPREP粉末の応用促進を図る。また、本研究で構築された統計モデルは、材料科学におけるデータ科学の応用に新しい方法を示唆している。

研究成果の概要（英文）：Ti-6Al-4V alloy powder with high sphericity, fewer satellites and fewer pores was obtained by plasma rotating electrode process (PREP). Controlling the electrode diameter, rotation speed, and plasma current is an effective method to produce PREP powder with appropriate powder size. The limitations of increasing the rotational speed to reduce the powder size were clarified by combining numerical simulation and experiments. A statistical model was established to clarify the relationships between PREP parameters and average powder size. In addition, the average powder size in the evaluated range could be predicted by this statistical model. Ti-6Al-4V alloy with excellent mechanical properties was fabricated by electron beam additive manufacturing using PREP powder.

研究分野：Additive manufacturing

キーワード：Additive manufacturing Ti alloy

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

Ti-6Al-4V 合金粉末の特性は積層造形のプロセスウィンドウと機械的性質に顕著な影響を与える。ガスアトマイズ粉末は通常粉末床溶融結合積層造形用粉末として用いられるが、多くのガス孔を含む。これらのポアの存在は、積層造形した Ti-6Al-4V の応用を制限し、ひいては機械的特性、特に疲労耐性に有害である。

プラズマ回転電極プロセス（plasma rotating electrode process, PREP）では、高速回転する被溶解材の電極棒先端部にプラズマアークを照射し、電極端面を溶解することで、遠心力により端面から液滴を生成する。電極端面から離脱した液滴は、チャンバー内を飛行中に凝固することで粉末となる。PREP 粉末はガスアトマイズ粉末よりも欠陥が少なく、球形度が高く、粉末の表面にサテライトが少ない。しかし、PREP 粉末形成における PREP パラメータの影響を調査した研究は不足している。さらには PREP 粉末を用いた Ti-6Al-4V 合金の積層造形に関する研究も少ない。

### 2. 研究の目的

Ti-6Al-4V 合金の粉末特性に対する PREP パラメータの影響を調べる。また、PREP パラメータと粉末性能の間の統計モデルも構築する。適切な PREP 粉末を用いて、電子ビーム積層造形により優れた機械特性を有する Ti-6Al-4V 合金を製造する。

### 3. 研究の方法

図 1 に示すように、富士電波工機製の PREP 装置を用いて、Ti-6Al-4V 合金粉末を作製した。レーザ回折・散乱法を利用した LS230 粒度分布測定器を用いて、金属粉末の平均粒径および累積体積粒度分布を測定した。

PREP の造粒挙動を調査するために、FLOW-3D ソフトウェアを適用して計算熱流体力学モデルを確立した。

従来の実験方法では、大量の時間とコストが必要となるため、多くの要素の影響を同時に明らかにすることは難しい。そのためには、Principal component analysis および Monte Carlo 法に基づいて、統計モデルを構築した。

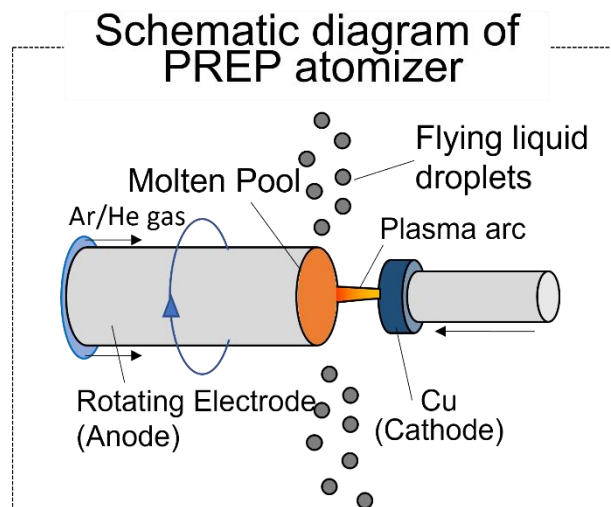
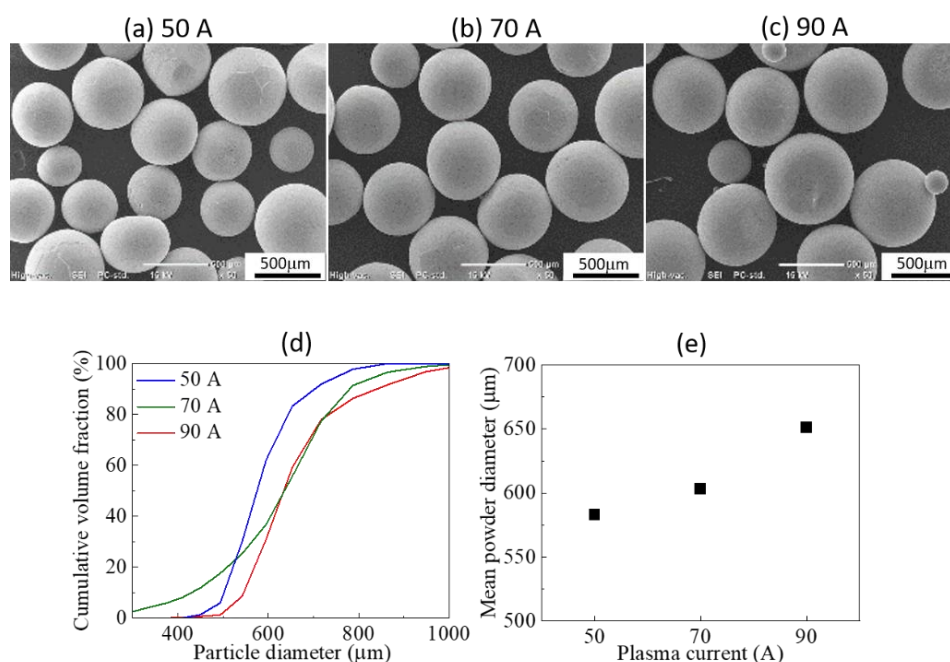


Fig. 1. Schematic figure showing the PREP atomizer with additional gas flowing.

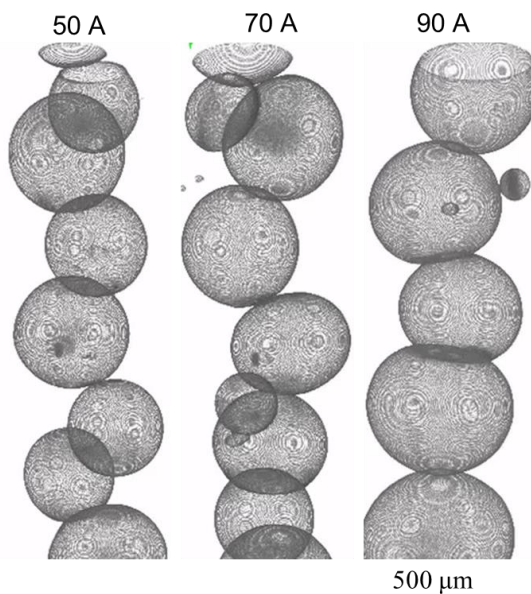
#### 4. 研究成果

図2は、直径15 mm、回転速度7000 rpm、電流50 A、70 A、および90 AのTi-6Al-4V合金電極を使用して製造された粉末を示す。粉末の表面にサテライトが無く、真球に近い形状のTi-6Al-4V合金粉末が確認された。図3は、異なるプラズマアーク電流で生成された粉末のX線CT画像を示す。すべての条件下で調製した粉末には孔は検出されなかった。

Ti-6Al-4V合金の平均粉末粒径はプラズマアーク電流の増加とともに増加した。プラズマ電流が融解速度を決定する。溶融速度の増加に伴い、流体リガメントの厚さと空間密度が増加した。その結果、流体リガメントは分裂して比較的大きなサイズの液滴になったと考えられる。流体リガメント間の距離が小さいため、形成された液滴がチャンバー内で飛行中に再結合する可能性が高まった。したがって、プラズマ電流の増加に伴い平均粉末粒径が大きくなる。



**Fig. 2.** (a, b, c) SEM images, (d) cumulative volume fraction of particle diameter, and (e) mean powder diameter of Ti-6Al-4V alloy powder fabricated at different plasma currents (electrode diameter: 15 mm, rotating speed: 7000 rpm).



**Fig. 3.** X-ray CT images of Ti-6Al-4V alloy powder fabricated at different plasma currents (electrode diameter: 15 mm, rotating speed: 7000 rpm).

図4に示すように、回転電極の回転速度また直径を増加させることにより、Ti-6Al-4V合金の平均粉末粒径が低下することがわかった。さらに、回転速度を10000rpmに上げると、粉末粒径を小さくするのが難しくなくなることがわかった。

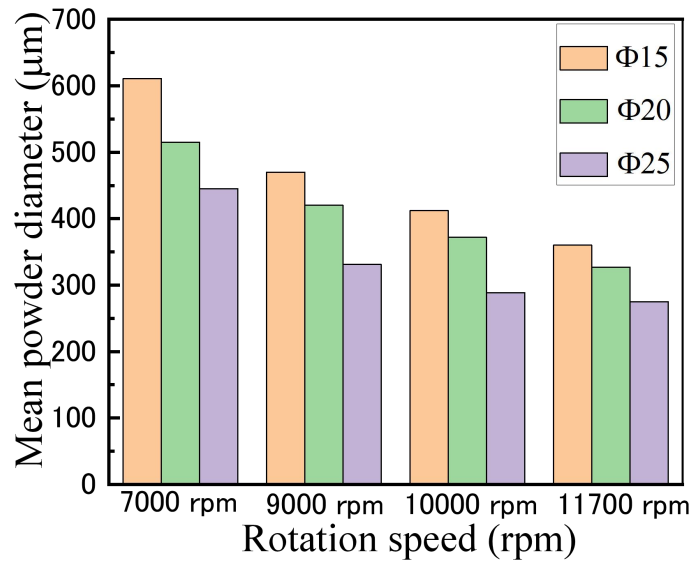


Fig. 4. Mean diameter of Ti-6Al-4V alloy powder fabricated at different electrode diameters and rotating speeds (plasma current: 80 A).

粉末粒径に及ぼす回転速度の影響の限界を解明するために、シミュレーションを実行して、PREPの造粒挙動を調査した。シミュレーション結果から得られた平均粉末粒径を図5に示す。回転数を7000から11700rpmに上げると平均粉末粒径が減少し、回転数を11700から15000rpmに上げるとわずかに増加する。回転速度が上がって一定速度を超えると、粉末粒径を小さくするには限界がある。この現象には2つの理由が考えられる。1つは、回転速度が上がると、液体突起の数が増えるため、液体の軌道が互いに干渉し、飛び出す速度が遅くなり、液滴が互いに結合する可能性が高くなる。また、回転速度が上がると液膜の厚みが薄くなるため、Ekman数が減り、遠心慣性力と粘性力の比率が小さくなることである。回転速度の増加に伴い、粒化の傾向が抑えられる。

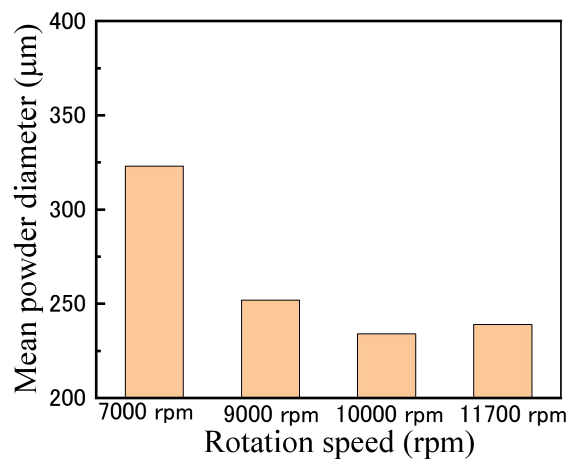
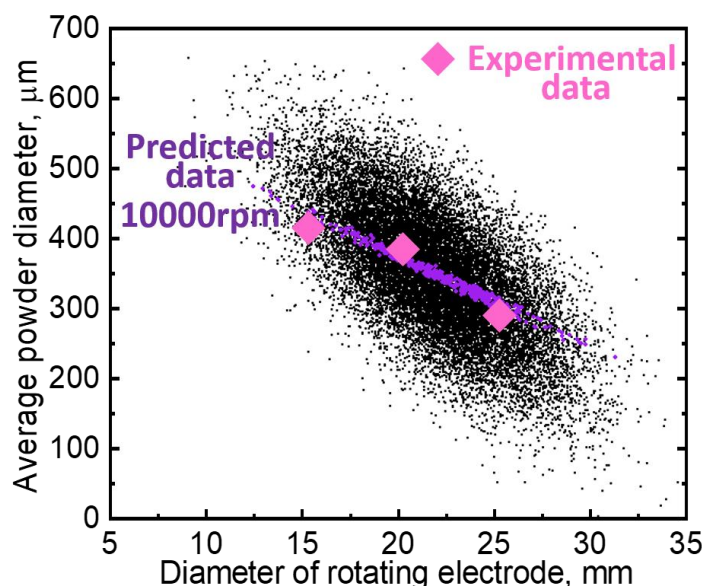


Fig. 5. Simulated mean powder diameter of Ti-6Al-4V alloy fabricated at different rotational speeds.

これまで平均粒径には多くの要因が影響することがわかっている。全ての実験条件を実施することは困難であり、統計分析手法を確立することが有効である。図6に示すように、統計モデルでは実験より多くの条件で計算できた。回転電極の直径15、20、25 mmにおいて、回転速度7000、9000、11700rpmの条件下で実験データを得た。これらの実験データに基づいて、Principal component analysis および Monte Carlo の方法に基づいた統計モデルを使って、元の空間にランダムに20000データを生成し、黒点でプロットした。この統計モデルによって、評価された範囲での平均粉末粒径を得ることができた。紫点は、10,000 rpm 回転速度で生成されたデータを示した。回転電極直径の増加に伴い、平均粒径は小さくなる。PREP パラメータと平均粉末粒径の関係は統計モデルを適用することにより評価できることがわかった。

さらに、回転速度10000rpm条件下での実験を行い、予測の正確性を検証した。桃色点は回転数が10000 rpm の場合の補足実験データを示す。その結果、実験データと予測データの間には小さな誤差しか存在しないことが分かった。



**Fig. 6.** Experimental verification of predicted data based on the statistical model. Black points indicate all generated data; purple points indicate the generated data at the rotational speed of 10,000 rpm; and pink points indicate the supplemental experimental data at the rotational speed of 10,000 rpm.

粉末の表面にサテライトが無く、孔が無く、真球に近い形状の Ti-6Al-4V 合金の PREP 粉末が確認された。電極の直径、回転速度、プラズマ電流を制御することは、適切な粒径の PREP 粉末を製造する有効な方法である。また、統計モデルを適用することにより、PREP パラメーターと平均粉末直径との関係が評価可能になり、評価範囲における平均粉末粒径の予測も可能であることがわかった。PREP 粉末を用いて、電子ビーム積層造形により優れた機械特性を有する Ti-6Al-4V 合金を製造した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件／うち国際共著 1件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yufan Zhao, Kenta Aoyagi, Yujie Cui, Kenta Yamanaka, and Akihiko Chiba	4. 巻 421
2. 論文標題 Multiscale heat transfer affected by powder characteristics during electron beam powder-bed fusion	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Powder Technology	6. 最初と最後の頁 118438
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.powtec.2023.118438	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Yujie Cui, Yufan Zhao, Haruko Numata, Kenta Yamanaka, Huakang Bian, Kenta Aoyagi, Akihiko Chiba	4. 巻 393
2. 論文標題 Effects of process parameters and cooling gas on powder formation during the plasma rotating electrode process	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Powder Technology	6. 最初と最後の頁 301-311
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.powtec.2021.07.062	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yufan Zhao, Yujie Cui, Yusaku Hasebe, Huakang Bian, Kenta Yamanaka, Kenta Aoyagi, Takehito Hagiwara, Akihiko Chiba	4. 巻 393
2. 論文標題 Controlling factors determining flowability of powders for additive manufacturing: A combined experimental and simulation study	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Powder Technology	6. 最初と最後の頁 482-493
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.powtec.2021.08.006	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yujie Cui, Yufan Zhao, Haruko Numata, Huakang Bian, Kimio Wako, Kenta Yamanaka, Kenta Aoyagi, Chen Zhang, Akihiko Chiba	4. 巻 376
2. 論文標題 Effects of plasma rotating electrode process parameters on the particle size distribution and microstructure of Ti-6Al-4V alloy powder	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Powder Technology	6. 最初と最後の頁 363 ~ 372
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.powtec.2020.08.027	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yufan Zhao, Yujie Cui, Haruko Numata, Huakang Bian, Kimio Wako, Kenta Yamanaka, Kenta Aoyagi, Akihiko Chiba	4. 巻 10
2. 論文標題 Centrifugal granulation behavior in metallic powder fabrication by plasma rotating electrode process	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 18446
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-020-75503-w	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 Yujie Cui, Kenta Aoyagi, Kenta Yamanaka, Tadashi Fujieda, Akihiko Chiba
2. 発表標題 Precipitation strengthening mechanism of a Ti-based alloy manufactured by electron beam melting
3. 学会等名 TMS2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 崔 玉傑, 沼田 春子, 趙 宇凡, 山中 謙太, 卞 華康, 青柳 健大, 千葉 晶彦
2. 発表標題 プラズマ回転電極法における粉末形成に及ぼす電極回転速度と冷却ガスの影響
3. 学会等名 粉体粉末冶金協会2021年度秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 崔 玉傑, 沼田 春子, 趙 宇凡, 山中 謙太, 千葉 晶彦
2. 発表標題 プラズマ回転電極法におけるプロセス条件とTi - 6Al - 4V合金の粉末形成との関係
3. 学会等名 第9回チタン研究者・技術者 研究交流会/第1回日本チタン学会 講演大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 崔 玉傑, 沼田 春子, 趙 宇凡, 山中 謙太, 卞 華康, 青柳 健大, 千葉 晶彦
2. 発表標題 Effects of plasma and atmospheric gases on powder formation during the plasma rotating electrode process (PREP)
3. 学会等名 日本金属学会2021年度秋期講演大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 崔 玉傑, 沼田 春子, 趙 宇凡, 若生 公郎, 卞 華康, 山中 謙太, 青柳 健大, 千葉 晶彦
2. 発表標題 The effects of process parameters on the powder characteristics in plasma rotating electrode process (PREP)
3. 学会等名 日本金属学会2021年春期講演大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 崔 玉傑, 趙 宇凡, 沼田 春子, 若生 公郎, 卞 華康, 山中 謙太, 青柳 健大, 千葉 晶彦
2. 発表標題 Influences of plasma rotating electrode process parameters on powder formation by numerical simulation and statistical analysis
3. 学会等名 日本金属学会 2020年秋期講演大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 崔 玉傑, 趙 宇凡, 沼田 春子, 若生 公郎, 卞 華康, 青柳 健大, 山中 謙太, 千葉 晶彦
2. 発表標題 プラズマ回転電極法における粉末形成に及ぼすプロセス条件の影響
3. 学会等名 粉体粉末冶金協会2021年度春季大会
4. 発表年 2021年



〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------