



## 機械学習により超合金粉末の製造コスト削減に成功

～数回の試行で複雑な製造条件を最適化 航空機エンジン部品製造の低コスト化に期待～

2020年11月30日

国立研究開発法人 物質・材料研究機構 (NIMS)

国立研究開発法人 科学技術振興機構 (JST)

### 概要

1. NIMS は、機械学習を適用することで、航空機エンジン用材料として有望な Ni-Co 基超合金の高性能・高品質な粉末を、高い収率で生産可能な条件を高速探索することに成功しました。さらに、その条件にて高圧タービンディスク作製に適した粉末を低コストに製造できることを実証しました。本技術を活用することで、大型装置を用いる実際の粉末製造現場において、粉末単価、試行回数・時間の大幅な軽減が可能となり、高性能・高品質・低コストな超合金粉末のいち早い製品化が期待できます。
2. 航空宇宙エンジン分野において金属 3D プリンティングの活用が急速に進んでおり、原料となる合金粉末の低コストな製造・供給が必要不可欠になっています。特にエンジンの心臓部である高圧タービンディスク用には、耐用温度や塑性加工性に優れるとともに、真球度を高く、組織も均一にした品質の高い超合金粉末を、高収率で低コストに製造することが求められます。その多くはガスアトマイズ法<sup>1</sup>により製造されていますが、製造現場で使用される大型装置を用いて目的の粉末を製造するためには、金属の溶解温度や使用するガスの圧力といった複数のプロセス条件を最適化することが必要です。これには専門家が持つ長年のノウハウをもってしても、膨大なコスト、時間、経験、人的資源が必要となっていました。
3. 今回、研究チームは、高圧タービンディスク用 Ni-Co 基超合金の粉末製造を対象に、機械学習を利用し、専門家のノウハウ無しに、ガスアトマイズプロセスの最適化を実施しました。その結果、過去のデータを使用することなくわずか6回の試行で、通常は 10~30%程度の収率であるタービンディスクの作製に適した微細で真球度の高い高品質な粉末を、収率約 78%で得られるプロセス条件を発見することに成功しました。原料単価から見積もとると、本研究で製造した粉末は、市販の粉末に比べて約 72%ものコストダウンに成功しています。
4. NIMS には長年の開発で培った、耐用温度など超合金の特性を制御する合金設計技術があり、今回の手法と組み合わせることで、用途に応じた機能を持った超合金の粉末を安価に供給することが可能になります。さらに、機械学習はデータ蓄積により進化を遂げるため、本技術を企業の製造現場に実装し、これまで活用が不十分であったプロセスデータを蓄積・再利用することで、さらなる品質向上・コスト削減が期待されます。
5. 本研究は、NIMS 国際ナノアーキテクトニクス研究拠点(WPI-MANA) 量子物性シミュレーショングループの田村亮 主任研究員、構造材料研究拠点(RCSM) 超耐熱材料グループの長田俊郎 主幹研究員、統合型材料開発・情報基盤部門(MaDIS) SIP-MI ラボの皆川和己 NIMS 特別研究員、RCSM 超耐熱材料グループの小幡卓真 NIMS エンジニア、廣澤正志 NIMS エンジニア、MaDIS 津田宏治 NIMS 招聘研究員、RCSM 超耐熱材料グループの川岸京子グループリーダーによって実施されました。また、本研究は内閣府 戦略的イノベーション創造プログラム(SIP) 「統合型材料開発システムによるマテリアル革命」(管理法人：JST) の一環として行われました。
6. 本研究成果は、Materials & Design 誌オンライン版に 2020 年 12 月 1 日 (日本時間) に掲載される予定です。

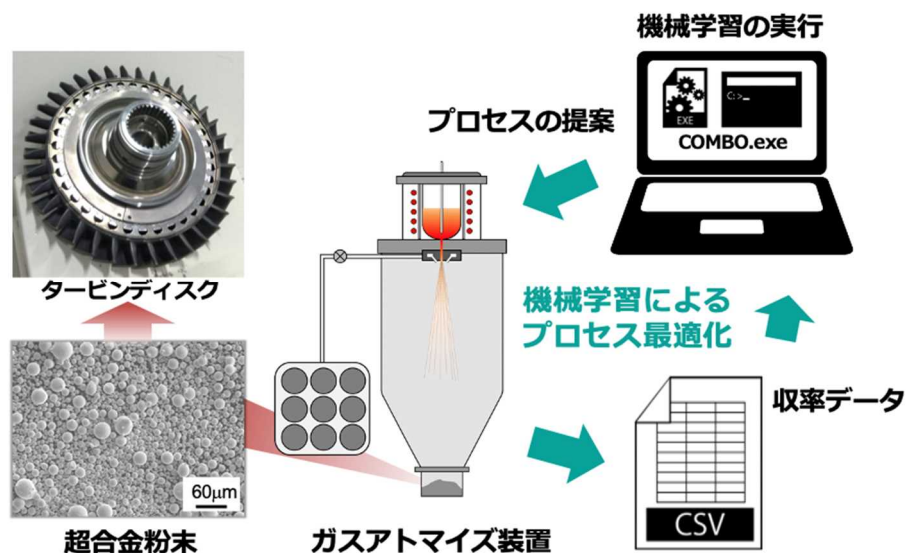


図1 機械学習を用いた超合金粉末製造プロセスの最適化

## 研究の背景

粉末冶金の最近の進歩は、航空宇宙エンジン分野での高温構造部品の設計と製造サイクルの加速を実現し、エンジンの燃料効率向上に大きく貢献しています。特に、最新の航空機エンジン高温部においては、Ni基超合金を対象に、燃料ノズルや排気ノズル等の静止部材への三次元造形部材の適用が進むほか、高度な信頼性が求められる **Life-limited parts** (寿命制限部品)<sup>2</sup>である高圧タービンディスクにおいても、粉末冶金法を活用した性能向上が進んでいます。さらに、近年急速な発展を遂げている金属3Dプリンター技術の原料製造としても粉末冶金は重要な技術となっています。これらに共通して高性能・高品質・低コストな超合金原料粉末の製造・供給が必要不可欠であり、その多くがガスアトマイズ法により製造されています。例えば、求められる性能として、耐用温度や塑性加工性に優れ、品質としては高真球度や均一な組織などが挙げられます。

しかしながら、使用用途に応じた高性能・高品質・低コストな原料粉末を製造するためには、ガスアトマイズ法における様々なプロセスの最適化が必要であり、これは専門家の長年のノウハウを利用した試行錯誤の繰り返しにより実現されています。このとき、対象とする超合金の種類、ガスアトマイズ装置、さらには環境によって最適なガスアトマイズプロセスは異なるため、各使用用途に応じたプロセス条件最適化が必要となります。この最適化には、専門家の長年のノウハウを用いたとしても、膨大なコスト、時間、人的資源が費やされています。そのため、超合金粉末製造コストを削減するために、このガスアトマイズプロセスの最適化を効率よく行う手法開発が急務となっていました。

## 研究内容と成果

本研究では、専門家のノウハウや過去のデータを使わずに、ガスアトマイズプロセスの最適化を実現するために、機械学習を利用した最適化を実行しました(図1)。ここでは、ブラックボックス最適化<sup>3</sup>(ベイズ最適化)と呼ばれる手法を利用し、耐熱性に優れた、高圧タービンディスク用Ni-Co基超合金であるTMP-5002の粉末製造を対象としたプロセス最適化を行いました。目的とする粉末は、タービンディスク作製に適した53µm以下の微細な粉末とし、これを最大とするプロセスの探索を行いました(図2)。ここでは、種々のガスアトマイズプロセスの内、金属の溶解温度、ガス圧力に着目した最適化を行いました。

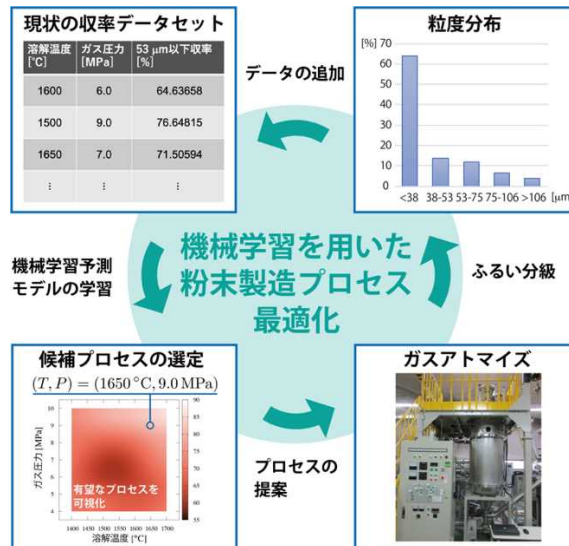


図2 機械学習を利用したプロセス最適化の流れ。すでに得られている収率データを用いて学習した機械学習予測モデルによる有望プロセスの提案、提案を受けたガスアトマイズによる粉末製造、ふるい分級による目的粉末の収率評価、新しい収率データを加えた機械学習予測モデルの再学習を繰り返すことで、最適化が実行されます。

まず、初期データとして、異なる3つのプロセスに対して粉末を製造し、ふるい分級<sup>4</sup>により53 μm以下の粉末収率を評価しました。これを学習データとして機械学習予測モデルを学習し、候補となるプロセスに対する収率の予測およびその誤差を見積もりました。この予測結果を利用し、収率が最も大きくなると期待できるプロセスを選定、そのプロセスにおける粉末製造を行いました。これにより、対象とする収率のデータが1つ増えます。この最適化ループを3回繰り返すことで、通常は10~30%程度の収率である53 μm以下の微細な目的粉末を収率約78%で得られるプロセス条件を発見することに成功しました。

この6回の試行によって得られた収率及び、原料単価を図3に示しました。このように機械学習を用いたブラックボックス最適化を繰り返すと、収率は向上し、それに伴って原料単価が安価になっていることがわかります。そして、原料単価から見積もると、本研究で製造した粉末は、ある企業の製品粉末に比べて約72%ものコストダウンに成功していることがわかりました。

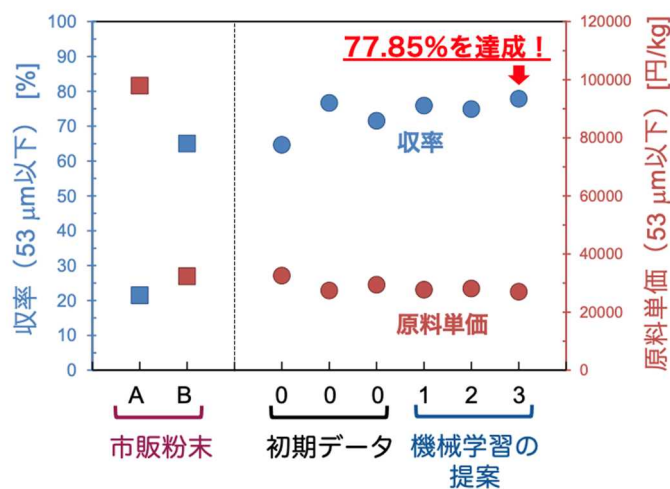


図3 タービンディスク作製に適した53 μm以下の粉末収率および原料単価結果。機械学習の提案によって、収率は向上し、原料単価は減少していることがわかります。また、AおよびBは、市販の製品粉末であるA社のAlloy720LiおよびB社のInconel 718の結果をそれぞれ示しました。



さらに製造された粉末の品質を評価するために、粉末の SEM 写真を図4に示しました。38  $\mu\text{m}$  以下および 38-53  $\mu\text{m}$  の粉末は、真球度が非常に高いことが SEM 写真から評価できました。また、組織解析から均一な組織を有していることも確認されました。さらに、38  $\mu\text{m}$  以下の粉末には 20  $\mu\text{m}$  以下の極めて微細な粉末が多量に生成していることが確認され、製造粉末の品質は非常に高いことが示されています。

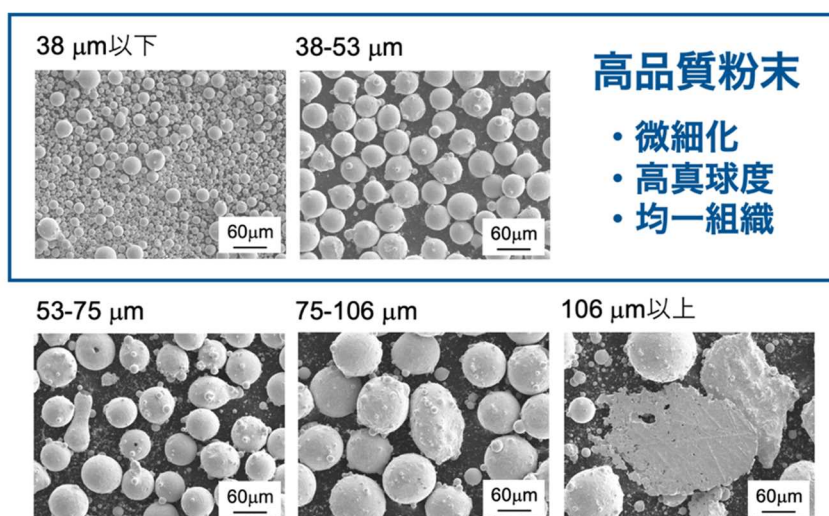


図4 ふるい分級された粉末の SEM 画像。53  $\mu\text{m}$  以下の粉末は非常に品質が高いのに対し、53  $\mu\text{m}$  以上の粉末では真球度が低く品質は悪くなっていることが確認できます。

機械学習を用いることで各サイズの収率とプロセス条件の関係性を抽出することができます。例えば、得られた6個のデータのみを利用し、平均粒径のプロセス依存性を機械学習で予測しました。その結果、平均粒径を減少させるには、高溶解温度・高圧ガスが望ましいことがわかりました。この事実は、ガスアトマイズの経験式として頻繁に利用されるルバンスカの式<sup>5</sup>から得られる知見と一致していました。機械学習は経験式が報告されていない場合でも適用できるため、粒度分布とプロセス条件の関係性を抽出することもできました。これら機械学習による抽出情報を用いることで、専門家がいなくてもガスアトマイズの理解を深めることができ、これが機械学習を利用するもう一つの利点となります。

### 今後の展開

今回の研究で使用した機械学習手法は、あらゆる対象用途、超合金の種類、ガスアトマイズ装置に対しても使用できる汎用的手法です。本研究により、汎用的な機械学習手法が粉末冶金において効力を発揮することを示すことができました。そのため機械学習を利用した最適化手法は、粉末冶金技術における様々な最適化問題を高速で解くことができると期待しています。また、本研究で実証した技術を、NIMS が長年培った耐熱性に優れた超合金を設計する技術と併用することで、用途に適した安価な粉末を効率よく供給することが可能となると考えています。また、機械学習は学習データ数の増加により真価を発揮します。そのため本技術を企業製造現場に早期実装し、これまで活用が不十分であったプロセスデータを蓄積・再利用することで更なる品質向上・コスト削減が期待されます。そして、これを実現するために、戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「統合型材料開発システムによるマテリアル革命」に参画する企業との連携をスタートさせています。

### 事業詳細

本研究は内閣府 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) の一環として実施されました。

課題： 統合型材料開発システムによるマテリアル革命

研究開発課題名： 先端的構造材料・プロセスに対応した逆問題 MI 基盤の構築

研究責任者： 出村 雅彦 (物質・材料研究機構 統合型材料開発・情報基盤部門 部門長)

## 掲載論文

題目：Machine learning-driven optimization in powder manufacturing of Ni-Co based superalloy  
著者：Ryo Tamura, Toshio Osada, Kazumi Minagawa, Takuma Kohata, Masashi Hirose,  
Koji Tsuda, Kyoko Kawagishi  
雑誌：Materials & Design (2020)  
DOI：10.1016/j.matdes.2020.109290.  
掲載日時：2020年12月1日（日本時間）掲載予定

## 用語解説

### (1) ガスアトマイズ法

金属を溶解炉で溶解し、溶湯を高圧ガスを利用し粉碎し、液滴として凝固させることで粉末を得る粉末製造手法。

### (2) Life-limited parts（寿命制限部品）

航空機エンジン部品の中でも、タービンディスク等の回転体は、その破損が重大な事故につながるため、高度な信頼性が要求される、設計難易度の極めて高い部品です。これら部品は、Life-limited parts（寿命制限部品）と呼ばれ、一定の使用時間での交換が義務づけられ、設計・製造・運用の多岐にわたる厳しい認証・運用が求められます。

### (3) ブラックボックス最適化

できるだけ少ない実験回数でより良い目的関数値（材料特性など）を持つ説明変数（材料の組成、構造、プロセスなど）を見つけ出すための機械学習手法。回帰手法による予測を利用し、目的関数が良くなると期待できる候補を選択しながら最適化を行う手法です。今回は、ガウス過程回帰を利用したベイズ最適化手法を利用しました。また、現場で最適化を実施するために、Windows コンピュータ用のベイズ最適化ツール COMBO.exe を利用しました。

### (4) ふるい分級

ふるいを利用して、製造粉末のサイズにより分類する手法。

### (5) ルバンスカの式

平均粒径とガスアトマイズの各種パラメタの間の経験式。企業現場で利用されていますが、これを利用するためには、個々のガスアトマイズ装置における各種パラメタを見積もる必要があり、これに多くの実験が必要となります。

## 本件に関するお問い合わせ先

（研究内容に関すること）

国立研究開発法人物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクトゥクス研究拠点(WPI-MANA) ナノセオリー分野 量子物性シミュレーショングループ

主任研究員 田村亮（たむらりょう）

E-mail: TAMURA.Ryo[at]nims.go.jp

TEL: 029-860-4948

国立研究開発法人物質・材料研究機構 構造材料研究拠点(RCSM) 設計・創造分野 超耐熱材料グループ  
主幹研究員 長田俊郎（おさだとしお）

E-mail: OSADA.Toshio[at]nims.go.jp

TEL: 029-859-2208

国立研究開発法人物質・材料研究機構 構造材料研究拠点(RCSM) 設計・創造分野 超耐熱材料グループ  
グループリーダー 川岸京子 (かわぎしきょうこ)  
E-mail: KAWAGISHI.Kyoko[at]nims.go.jp  
TEL: 029-859-2314

(SIP「統合型材料開発システムによるマテリアル革命」に関すること)  
国立研究開発法人科学技術振興機構 イノベーション拠点推進部 SIP グループ  
高橋勝彦 (たかはしかつひこ)  
〒102-0076 東京都千代田区五番町7 K's 五番町  
TEL:03-6261-0013, FAX:03-5214-8496  
E-mail: sip-material[at]jst.go.jp

(報道・広報に関すること)  
国立研究開発法人 物質・材料研究機構 経営企画部門 広報室  
〒305-0047 茨城県つくば市千現 1-2-1  
TEL: 029-859-2026, FAX: 029-859-2017  
E-mail: pressrelease[at]ml.nims.go.jp

国立研究開発法人 科学技術振興機構 広報課  
〒102-8666 東京都千代田区四番町5番地3  
TEL: 03-5214-8404, FAX: 03-5214-8432  
E-mail: jstkoho[at]jst.go.jp