

TODAY

標準化になぜ経営判断が必要なのか



東京工業大学
名誉教授 田辺 孝二

企業にとって標準化は、自社事業の競争力を高めて、販売拡大と収益向上を同時に実現するための戦略的ツールです。筆者は、東工大で社会人向け標準化戦略コースを担当しており、多くの企業において標準化が重要視されてきていると実感しています。しかし、依然として経営者マターになっていないようです。

国際標準化は国際的なビジネスルールを決めるものですから、経営者は自社が有利になるビジネスルールを決める意識で、率先して標準化に取り組む必要があります。

特に、デジタル化が進む中でビジネスのモジュール化・レイヤー化が進展し、国際分業によるエコシステム構築が競争力の鍵となっています。モジュール間の接続ルールやレイヤーのプロトコルを自社に有利な標準化にできれば、自社優位のエコシステムを構築することができます。このエコシステム構築において、経営者には、どのようなビジネスルールが自社に有利なのか、なにを標準化し(協調領域)、なにを標準化しないか(競争領域)、などの判断が求められます。

「知的財産推進計画 2022」は、あらゆるものが繋がる DX やグリーンの潮流の中で、国際標準がますます重要になっており、「産業間を跨いだレイヤーの中で何を収益の核とし、そのために何を国際標準化するのかといったより広範なアーキテクチャ設計に基づく国際標準化戦略を事業戦略と一体で策定・推進し、社会実装に繋げることが求められる」と指摘しています。

自社優位のエコシステム構築には、①「自社優位のモジュール化と接続ルールの設計」と②「自

社ルールのグローバルルール化」があります。前者は、自社のモジュールは標準化せずブラックボックスとし、隣接モジュールとの接続ルールを主導し標準化(オープンモジュール化)することで、市場支配・販売拡大や低コスト調達等を実現します。インテルのMPUが有名な事例です。後者は、自社が国内でビジネス展開している製品やサービスの基本ルールを国際標準としてグローバルルールにするものです。これにより、国内と同じビジネスをグローバル展開することができ、世界市場をリードできます。

自社のビジネスルールを国際標準化したものには、「ダイキン工業の空調機冷媒」、「ヤマト運輸のクール宅急便」などがあります。

ダイキン工業は、自社空調機に使用していた安全性が高く温暖化影響が小さい冷媒(R32)がISO冷媒安全分類規格で可燃と分類され普及の障害になっていたものを、新たに「微燃」の分類規格を追加し、微燃性冷媒の適切な取扱要求事項も標準化しました。同社はこの国際標準を各国の規制に採用するよう働きかけ、インド等で自社製空調機の販売を大幅に拡大しています。

ヤマト運輸は、同社のクール宅急便の方式を基に、2020年に小口保冷配送サービスの提供及び運用のための要求事項をISO標準にしました(今年2月にJISとして制定)。同社はフランスの同業者DPDを始めとする各国の同業者と、ISO規格に基づいて保冷輸送の管理方式を共通化し、安全で高品質の生鮮輸送ビジネスを共同で市場開拓するビジネスプラットフォーム(FRESH PASS)を形成し、グローバルなビジネス展開のためのエコシステムを構築しています。

本稿によって、「標準をつくる」とは、グローバルビジネスにおける「ルールをつくる」ことであり、世界において「自社優位のエコシステムをつくる」ことであるとの認識を深めていただくことができましたら幸いです。

NEDO 航空機エンジン向け材料開発・評価システム基盤整備事業
研究開発項目2 「革新的合金探索手法の開発」
ハイエントロピー合金に関する基盤技術検討および調査（文献調査）について
（一財）金属系材料研究開発センター 環境・プロセス研究部 主席研究員 宮前 収

JRCMは、2021年度、2022年度にて標記の調査を実施しましたので、概要を次のとおりご報告いたします。この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務の結果得られたものです。

標記の「航空機エンジン向け材料開発・評価システム基盤整備事業」は、2015年度の経済産業省「電子ビーム三次元金属積造形技術の周辺技術等」に関する技術動向調査と、これに続く2017年度NEDOエネルギー・環境新技術先導プログラム「三次元金属積層造形における新合金開発の合金設計シミュレーション技術の研究開発」を経て行っている事業です。2015年度の調査結果は、JRCM News No.357に、2017年度先導プログラムのJRCM担当分の調査結果は、JRCM News No.383に概要を載せています。

本事業は、我が国の航空機エンジン向け材料及び部品製造における競争力向上に資するため、(1)量産化を志向した航空機エンジン部品の設計・製造プロセス（特に鍛造プロセス）の効率化、(2)人工知能(AI)、マテリアルズ・インフォマティクス(MI)等の計算機科学を利用した国産材料の開発、(3)航空当局の認証取得に向けた、航空機エンジンの材料特性及び実環境下における性能等のデータ収集、整備、蓄積を実施していくものです。この中でJRCMは、以下の調査研究を行っています。
 2021年度：ハイエントロピー合金の論文・特許調査
 2022年度：マテリアルズ・インフォマティクスの論文・特許調査及びコンビナトリアル手法の論文調査

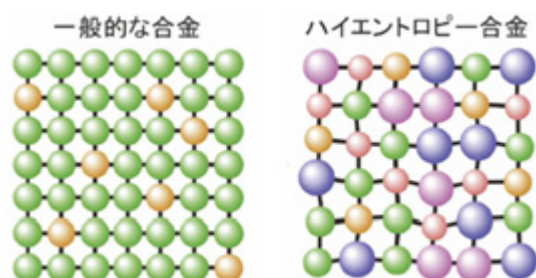
1. ハイエントロピー合金の論文・特許調査

2005年頃からハイエントロピー合金（High Entropy alloys; HEAs）と呼ばれる新しい合金概念が提唱され大きな注目を集め、論文数も増加しています。特に最近7年間ほどは増加傾向に拍車がかかっています。

一般的に、ハイエントロピー合金は5成分以上の多成分元素からなり、かつその組成が等原子組成であり、固溶体が形成される合金とされています。単に多成分合金というだけではなく、著し

く高い力学特性などの特異な物性を示す合金と認識されています。ハイエントロピー合金の定義は様々に提案されていますが、多く用いられる定義として以下の2つに集約されます。

- (A) 構成元素の数と組成に基づく定義
- (B) 混合のエントロピーに基づく定義



出典：當代・永瀬，中野，軽金属元素を含むハイエントロピー合金とBCC型生体用ハイエントロピー合金の開発と展望，軽金属 第70巻 第1号（2020）

図1 ハイエントロピー合金の原子構造模式図

ただし、特に直近は、これらの定義に限定されず、多成分系のMPEAs（multi-principal element alloys）、多成分で少なくとも2つの相を含むCCAs（complex concentrated alloys）もHEAsと並んで研究対象になることが多くなってきています。

本調査は、航空機エンジン向け材料として従来にはない特性を持つハイエントロピー合金の提案又は開発のヒントになる情報を探索することが目的です。HEAsだけでなくCCAs、MPEAsも調査対象にしています。

1-1. ハイエントロピー合金の論文調査

2017年から2021年11月までの523件の論文からを母集合として航空機エンジンへの適用が考えられる103件を抽出し、動向を整理しました。

合金の種類別では、早くから研究されているCantor合金（CoCrFeMnNi）が最も多くみられます（図2）。次に軽量化で研究対象になることが多いAl系合金、Ti系合金が続いています。超耐熱合金として米国空軍研究所などで研究されている高融点元素を組み合わせたNbMoTaW合金、NbMoTaVW合金も一画を占めています。

温度別の論文数では、600～1000℃が多く、1200℃超はまだ少ないことがわかりました（図3）。

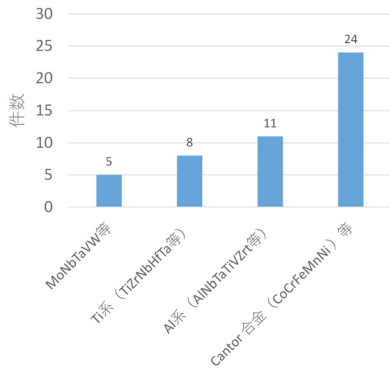


図2 合金の種類別論文数

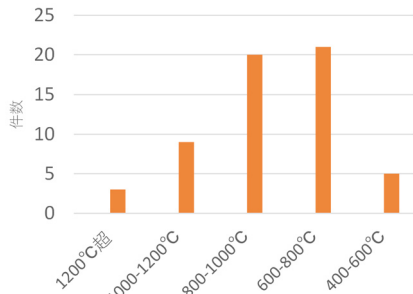


図3 合金の温度別論文数

次に、研究の多い論文例として、Cantor 合金に軽量化のため Al を添加した合金、1200°C 超の耐熱性を狙った NbMoTaW 合金、NbMoTaVW 合金の例を示します。

図4は、Cantor 合金に Al を添加した合金の例です。Al を添加すると硬度が高くなります。高延性の FCC 相に対して高強度の BCC 相の比率が増加するためとされています。FCC 相、BCC 相とも Al による固溶強化とナノサイズの析出強化があります。Al 添加することで軽量化にもなるので、高強度と低密度を両立する合金としては注目されます。

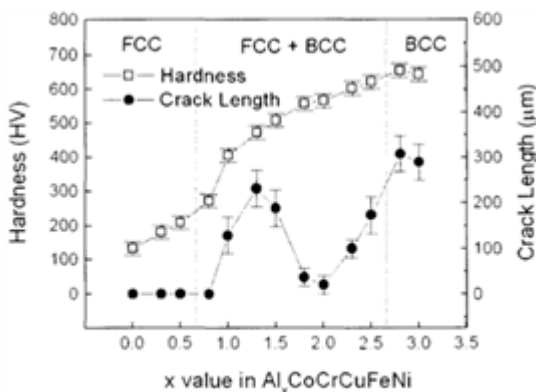


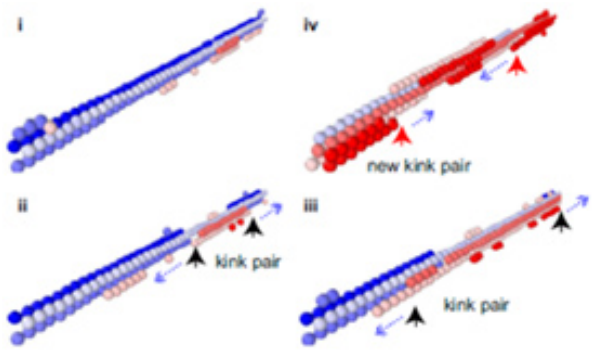
Fig. 1—Vickers hardness and total crack lengths of the Al_xCoCrCuFeNi alloy system with different aluminum contents (x values in molar ratio).

出典：Tong, C.J.; Chen, M.R.; Chen, S.K.; Yeh, J.W.; Shun, T.T.; Lin, S.J.; Chang, S.Y. Mechanical performance of the Al_xCoCrCuFeNi high-entropy alloy system with multiprincipal elements. Metall. Mater. Trans. A 2005, 36A

図4 Al_xCoCrCuFeNi 合金のアルミニウム添加量と硬度、亀裂長さとの関係

NbMoTaW 合金、NbMoTaVW 合金は、1400°C、1600°C もの高温で高い強度を示すことがわかってきており、強度だけではなく、組織、結晶構造などの調査が盛んに行われており、高温強度が高くなるメカニズムの解明が多く行われています。

図5は、機械学習原子間ポテンシャルに基づく広範な分子動力学 (MD) シミュレーションを使用して、広い温度範囲にわたる MoNbTaW 合金のらせん転位と刃状転位の可動性のメカニズムを調査する中で、らせん転位がキンクを介して移動する状況を示したものです。



出典：Yin S., Zuo Y., Abu-Odeh A., et-al., Atomistic simulations of dislocation mobility in refractory high-entropy alloys and the effect of chemical short-range order, Nature Communications (2021)

図5 キンクを介したらせん転位の移動

1-2. ハイエントロピー合金の特許調査

2012年から2021年11月公開の特許を検索、抽出し、動向を整理したものが図6です。2018年から出願公開件数の増加が加速しており、中国への出願が圧倒的に多いことがわかります。

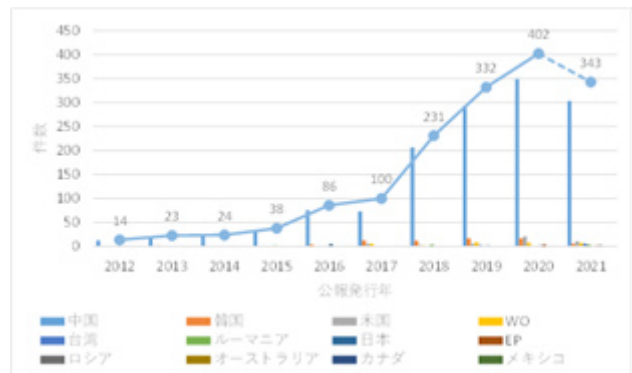


図6 ハイエントロピー合金の出願先国別の特許出願公開件数の推移

内容では、中国の国立防衛技術大学と中国人民解放軍軍事科学研究所からの出願には、米国空軍研究所開発中の NbMoTaW と比較したもの、NbMoTaW マトリクスを酸化物で分散強化したものが計4件あることが特筆されます。

2. マテリアルズ・インフォマティクスの論文・特許調査 2-1 マテリアルズ・インフォマティクスの論文調査

2002年から2022年6月までに公表された222件の論文を抽出し、動向を整理しました。マテリアルズ・インフォマティクスは、機械学習を使用しているのでハイエントロピー合金に機械学習を適用した論文を検索、抽出しています。件数が加速的に増加していることがわかります。中国(66件)、米国(52件)、インド(36件)の研究機関から多く公表されています。

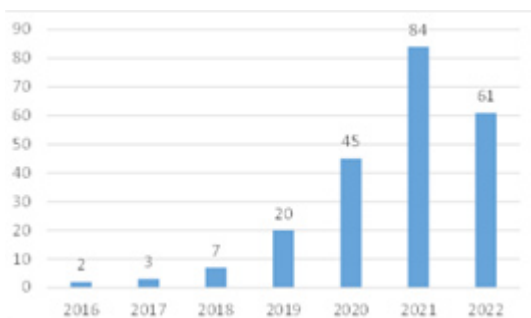


図7 ハイエントロピー合金に機械学習を適用した論文件数推移

抽出した222件を機械学習の5つの種類(ニューラルネットワーク、深層学習、遺伝的アルゴリズム、逆問題解析、その他機械学習)に分類し、それぞれの機械学習の種類でタイトルと要約を見て幅広い手法をカバーするように20件の注目論文を選定しました。被引用回数も選定の参考にしました。この20件の注目論文を分類したところ、機械学習の種類では、ニューラルネットワークが多いこと、機械学習の手法では様々な手法が用いられ、計算科学との併用も多いことがわかりました。

表1 機械学習の種類

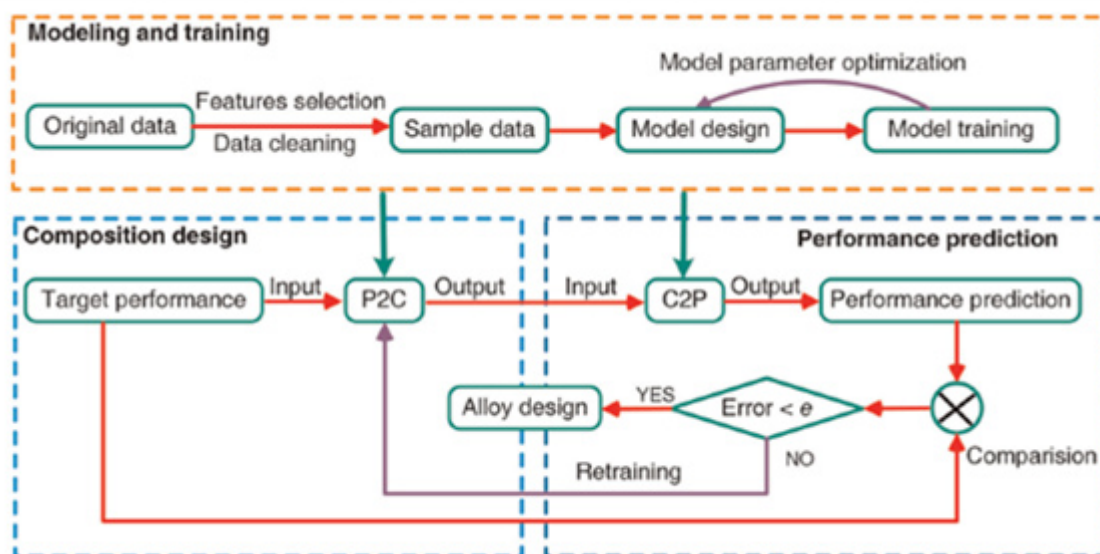
転移学習 (Transfer Learning)	1
距離学習 (Metric Learning)	0
ニューラルネットワーク (Neural Network)	8
深層学習 (Deep Learning)	2
ブースティング (Boosting)	0
勾配ブースティング (Gradient Boosting)	0
教師あり学習 (Supervised Learning)	3
教師なし学習 (Unsupervised Learning)	1

表2 機械学習に用いられる手法

サポートベクターマシン (Support-Vector Machine)	2
k近傍法 (k-Nearest Neighbor Algorithm)	2
ベイズ最適化 (Bayesian Optimization)	1
遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm)	3
決定木 (Decision Tree)	0
ランダムフォレスト (Random Forests)	1
逆問題 (Inverse Problem)	3
能動的学習 (Active Learning)	2
敵対的生成ネットワーク (Generative Adversarial Network)	0
条件付き敵対的生成ネットワーク (Conditional GAN)	1
サロゲートモデル (Surrogate Model)	1
計算科学 熱力学計算 (Thermodynamic Calculation)	2
密度汎関数法 (Density Functional Theory)	4
統計的手法 正準相関分析 (Canonical Correlation Analysis)	1
重回帰分析 (Multiple Regression Analysis)	1
ガウス過程 (Gaussian Process)	1
モンテカルロ法 (Monte Carlo Method)	0

学習データの数が多ければ予測精度が向上することが知られています。注目論文を見ると、最低でも数百、多いものになると数十万のデータセットから学習しています。ハイエントロピー合金のマテリアルズ・インフォマティクスでも学習データを容易に取得できるデータベースの構築が重要といえます。

注目論文には、 casting、加工、熱処理といったプロセスデータを学習したものはほとんど見当たらず、組成から相構造を予測するものがほとんどでした。1件だけ特性から組成候補を求める論文がありましたが、プロセスデータは取り込まれていませんでした(図8)。



出典: Changsheng Wang, Huadong Fu, et-al., A property-oriented design strategy for high performance copper alloys via machine learning, nature partner journals (2019)

図8 バックプロパゲーションによる特性指向合金設計

プロセスデータを取り込んで所望の特性の材料設計を行うことは今後の課題といえます。

2-2. マテリアルズ・インフォマティクスの特許調査

ハイエントロピー合金に限定せず、2022年6月までに公開された金属分野でのマテリアルズ・インフォマティクスと人工知能などの特許を国際特許分類とキーワードを組み合わせて検索、抽出しました。

マテリアルズ・インフォマティクスに関する特許出願では、日本国籍の出願人の特許出願が4件ありました。実験データをデータベースに追加し、統計処理によって推奨される実験条件を出力して実験とデータベースへの追加を繰り返し、物質情報を最適化する手法です。最適化手法としてベイズ最適化を使用することを示していますが、一般的な手法、試験の工夫を示しているに過ぎず、実際に適用するには最適化手法の選定、具体的な手法を検討することが必要になります。文献情報からのデータベース構築するものもありました。しかし、図表データは対象外であること、製造プロセスと物質特性を関連付けて取得するには、文章の幅広い範囲を理解してデータを取得する必要がありますが、この技術では、データ前後の限られた範囲を理解してカテゴリ分けをするに留まっているので、さらなる検討が必要です。

2-2. マテリアルズ・インフォマティクスの特許調査

ハイエントロピー合金に限定せず、2022年6月までに公開された金属分野でのマテリアルズ・インフォマティクスと人工知能などの特許を国際特許分類とキーワードを組み合わせて検索、抽出しました。

マテリアルズ・インフォマティクスに関する特許出願では、日本国籍の出願人の特許出願が4件ありました。実験データをデータベースに追加し、統計処理によって推奨される実験条件を出力して実験とデータベースへの追加を繰り返し、物質情報を最適化する手法です。最適化手法としてベイズ最適化を使用することを示していますが、一般的な手法、試験の工夫を示しているに過ぎず、実際に適用するには最適化手法の選定、具体的な手法を検討することが必要になります。文献情報からのデータベース構築するものもありました。しかし、図表データは対象外であること、製造プロセスと物質特性を関連付けて取得するには、文章の幅広い範囲を理解してデータを取得する必要がありますが、この技術では、データ前後の限られ

た範囲を理解してカテゴリ分けをするに留まっているので、さらなる検討が必要です。

人工知能に関する特許出願では、対象材料は鋼が3件、ハイエントロピー合金が2件、軟磁性アモルファス合金が2件、アルミニウム合金と銅合金(導電材)が各1件ありました。ほとんどが中国からの出願です。組成から機械学習により相構造を予測するものがありました。教師データには文献データと熱力学計算結果を使用しているが、精度をあげるには数多くの教師データを揃える必要があることが課題です。また、US2020257933 (Machine Learning to Accelerate Alloy Design) は、ハイエントロピー合金が対象で論文のような明細書であり、ユーザーインターフェイス、データベースシステム、予測ロジック、予測エンジン、結果の検証などが網羅的に記載されており、実施例では積層造形への適用が記載されている点は、参考文献として有用ではあります。しかし、金属の特性に影響する要因の選定、物理学に基づくモデリングで何を採用するかによって結果が大きく異なることが予想されますが、結局はやってみないとわからないといえます。その他、熱処理などのプロセスデータを取り込んだものもいくつかあります。

3. コンビナトリアル手法の論文調査

材料の探索を高速化するには、サンプル作製と評価の高速化によるデータ取得サイクルの高速化とマテリアルズ・インフォマティクスを組み合わせることが必要です。サンプル作製と評価を高速化する手法、すなわちコンビナトリアル手法の論文調査を行いました。

ハイエントロピー合金に限定せず、2014年から2022年6月までに公開された791件の金属分野でのコンビナトリアル手法の論文を検索、抽出しました。図9に論文件数推移を示します。年々増加傾向にあります。図10に研究機関国籍別論文件数を示します。米国と中国が圧倒的に多いことがわかります。

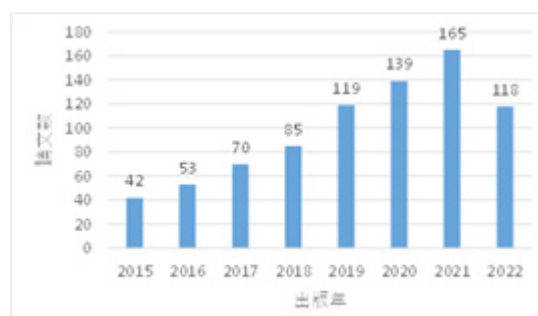


図9 コンビナトリアル手法の論文件数推移

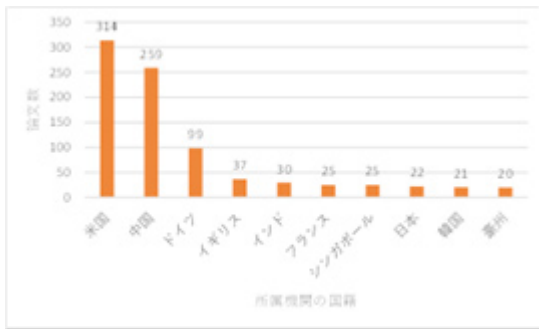
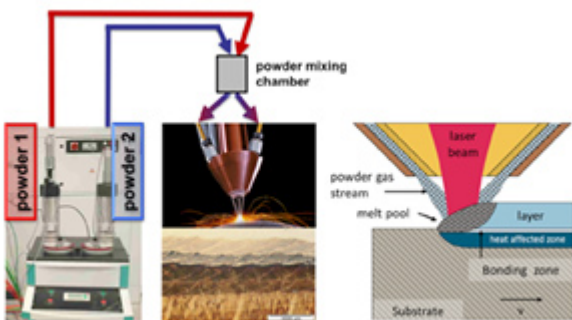


図 10 コンビナトリアル手法の研究機関国籍別論文数

検索、抽出した 791 件の論文のうち、被引用回数の多いもので金属分野での汎用性が高いと思われるもの 10 件を選定して概要を整理し、今後の活用における課題を考察してみました。

大きく分けると、(1) サンプル作製方法に特徴のあるもの、(2) サンプル評価方法に特徴のあるもの及び (3) 材料選定の絞り込みに特徴のあるものの 3 つになります。

まず、(1) サンプル作製方法に特徴のあるものについては、最も多かったのはレーザー DED (Direct Energy Deposition) によるもので 3 件ありました。同じ積層造形の SLM (Selective Laser Melting) に比べると高価な金属パウダーの使用量が圧倒的に少なく、造形速度が圧倒的に速いです。また、粉末の切り替えにより組成を自在に変更可能な点が有利です。このうちの一つは、2 種類のパウダーを混合してからターゲットに噴射しレーザーで溶融するものです。組成の迅速切り替えの面では不利ですが、パウダーの均一混合を重視する場合は、噴射



出典: Knoll H., Ocylok S., et-al., Combinatorial Alloy Design by Laser Additive Manufacturing, Steel Research International (2017)

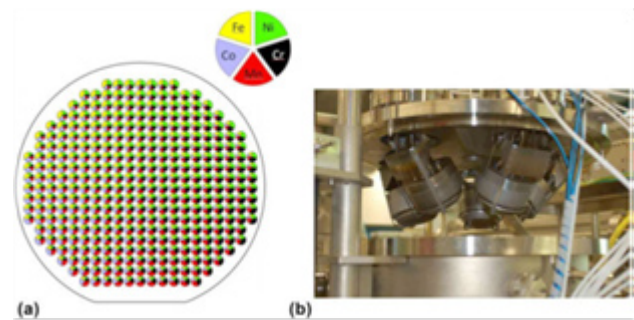
図 11 レーザー金属蒸着 (LMD) プロセス

前に混合しておくのは有効な手段と考えられます。

積層造形以外では、マグネトロンスパッタリングとラピッドアロイプロトタイピング (RAP) がありました。マグネトロンスパッタリングは、100nm 厚の膜を形成するもので、構造材料に不可欠な機械特性の評価は難しいですが、組織、機能などの評価には有効です。レーザー DED に比べると合成の制御はやり易いと考えられます。したがって、機能材料の探索には有効な可能性があります (図 12)。

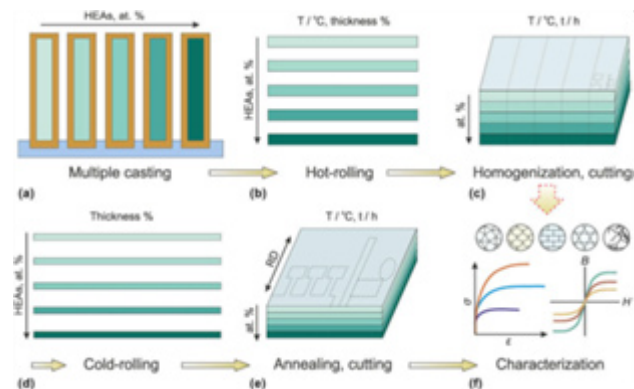
ラピッドアロイプロトタイピング (RAP) は、鋳造、熱間圧延、均質化、冷間圧延、再結晶焼鈍を効率的に組み合わせる方法ですが、組成の自由度ではレーザー DED のほうが有利と考えられます。同じ組成のサイズの大きなサンプルを大量に作製するのには向いていると考えられます (図 13)。

今後は、目的によってレーザー DED、マグネトロンスパッタリング、ラピッドアロイプロトタイピング (RAP) を使い分けることが得策と考えられます。



出典: Li Z., Ludwig A., Savan A., et-al., Combinatorial metallurgical synthesis and processing of high-entropy alloys, Journal of Materials Research (2018)

図 12 マグネトロンスパッタリングの例



出典: Li Z., Ludwig A., Savan A., et-al., Combinatorial metallurgical synthesis and processing of high-entropy alloys, Journal of Materials Research (2018)

図 13 HEAs のコンビナトリアル合成・加工のための RAP 法

The Japan Research and Development Center for Metals
JRCM NEWS / 第 439 号

内容に関するご意見、ご質問は JRCM 総務企画部までお寄せください。
 本書の内容を無断で複写・複製・転載することを禁じます。

発行 2023 年 8 月 1 日
 発行人 小紫 正樹
 発行所 一般財団法人 金属系材料研究開発センター
 〒 105-0003 東京都港区西新橋一丁目 5 番 11 号 第 11 東洋海事ビル 6 階
 T E L (03)3592-1282 (代) / FAX (03)3592-1285
 URL <http://www.jrcm.or.jp/> E-mail jrcm@oak.ocn.ne.jp
 ※送付先の変更・中止等は上記 E-mail に御連絡をお願いいたします。