

アルミ合金製造におけるベテラン社員知識の形式化と 生産効率化に向けた計量指標の探索

- Wasserstein 距離に基づくアルミ合金の類似度評価-

Formalization of experienced employees' knowledge in Al alloy manufacturing and search for metrics index for production efficiency: Evaluation of similarity of Al alloys based on Wasserstein distance

野々村 真誉[†] 磯田 祐世[†]
Minorori Nonomura Yusei Isoda

山本 佑樹[†] 浅田 勝義[†]
Yuki Yamamoto Asada Katsuyoshi

1. はじめに

アルミニウム合金の製造を生業とする当社では、顧客要求品質に対応すべく複数の合金種を少量多品種で製造している。こういった少量多品種製造では製造する合金種ごとに最適な製造方法を適用する必要があり、製造プロセスが複雑化しやすいという特徴がある[1]。製造プロセスが複雑化することで、製造現場においては高度な判断を逐次要求されることとなる。このような製造の複雑性に起因する課題を当社ではベテラン社員の培った経験則により長年克服してきた。そのため製造に関する知見やノウハウはベテラン社員に属人化しており、ベテラン社員の引退と同時にそのような知見やノウハウが消失し、製造現場における高度な判断が困難となる恐れがある。そこで経験則を定量化し、後継者への継承とより効率的な製造プロセスの設計を目指した。

製造における複雑性は、少量多品種製造そのものと、合金種ごとの組成の違いに起因する。このような複雑性を克服するためには、既存のアルミニウム合金群における合金組成の類似性を客観的に評価するための計量(metric)の確立が必要である。そこで本研究では、Wasserstein 距離[2, 3]を適用した合金組成の類似度評価手法を提案する。この計量を用いることで、合金間の類似性を適切に評価し、類似の製造品種を集約することで製造プロセス設計を効率化することが期待される。また報告時には、Wasserstein 距離による合金組成の類似度評価手法が COS 類似度[4]や KL ダイバージェンス[5]といった他の類似度評価手法と比べ、アルミニウム合金組成の類似度評価に適していることも比較検討する。

2. Wasserstein 距離による類似度評価手法

2.1 Wasserstein 距離による合金組成の類似度評価

各合金は微量の不純物元素まで含めて 28 元素で構成される。そこで製造された合金の各成分の実績をヒストグラムとして表現し、類似度を評価したい 2 合金の各成分のヒストグラム間の類似度を Wasserstein 距離により評価した(図 1)。ここで Wasserstein 距離は 2 つの 1 次元の確率分布 μ, ν について確率分布に対応する累積分布関数を用いて、以下の式(1)のように表される。

$$W(\mu, \nu) = \int_{-\infty}^{\infty} dx |F_{\mu}(x) - F_{\nu}(x)| \quad (1)$$

式(1)で表される Wasserstein 距離は 2 つの確率分布間の輸送コストに基づいて定義され、分布の位置や、広がり、形

の差異を総合的に捉えることのできる指標であり、平均値や分散といった統計量だけでは捉えきれない分布の形状の差異を評価することが可能である。今回は 2 合金の成分実績のヒストグラム間の差異を評価する必要があるため、Wasserstein 距離を採用した。類似度を評価したい 2 合金の全成分について Wasserstein 距離を計量した後、2 合金間の類似度評価指標としては全成分の Wasserstein 距離の総和を代表値として採用した。

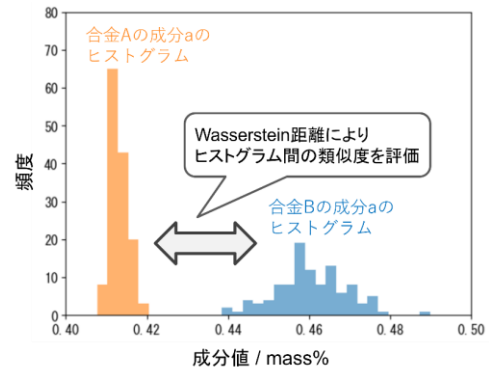
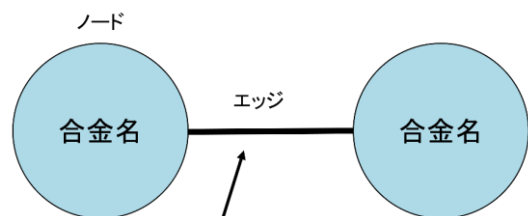


図 1 Wasserstein 距離によるヒストグラム間の類似度評価の模式図

2.2 合金間類似度指標を用いたネットワーク図

2.1 項で述べた手法が、合金間の類似度評価手法として妥当な評価手法であるかを視覚的に検討するにあたり、合金間の類似度をエッジの重みとしてもつネットワーク図の作成を行った。図 2 に示すようにネットワーク図は、合金をノードとし、ノード間を合金間の類似度が高いほど線が太くなるようなエッジで接続することで表現した。



Wasserstein 距離に基づく合金間の類似度を用いて重み付け合金が類似しているほど線が太くなる

図 2 合金間の類似度に基づくネットワーク図の模式図

[†] 株式会社 UACJ UACJ Corporation

3. Wasserstein 距離による類似度評価結果

3.1 Wasserstein 距離による合金類似度評価結果

合金 A と合金 B の成分実績値を図 3 の(a)に、評価された Wasserstein 距離を図 3 の(b)に示した。図 3 の(a)の点線は合金 A, B の成分実績値の平均値を、ハッチングは成分値のヒストグラムの最大値から最小値までの値の範囲を表している。また、図 3 の(b)に示すように Wasserstein 距離は値が大きいほど分布が異なっており、値が小さいほど分布が類似していることを示している。

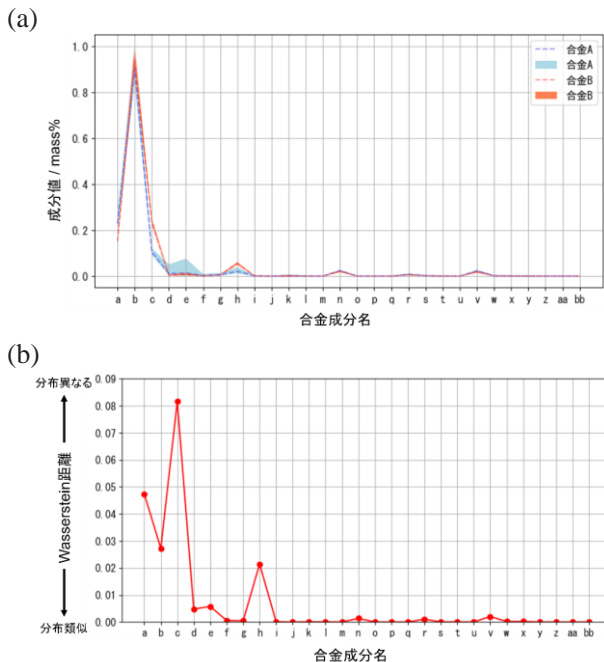


図 3 成分実績値と Wasserstein 距離
(a) 成分実績値、(b) Wasserstein 距離

図 3 の(a)を見ると元素 c については、バラつきに差はないものの平均が大きく異なっており、それに対応する Wasserstein 距離は全成分中で最大の値を示しており、分布が異なっていることを適切に捉えている。最大を示す理由は Wasserstein 距離が輸送コストを考慮するために、平均の違いに強く影響される特性があるためである。また図 3 の(a)で元素 d, e については、平均は類似しているがバラつきが異なっている。対応する Wasserstein 距離を見ると元素 d, e どちらも 0.01 未満ではあるが、0 より大きい値を示している。これは Wasserstein 距離がヒストグラムのバラつきの違いまで含めて評価できていることを表している。

3.2 合金間類似度指標を用いたネットワーク図

3.1 項で Wasserstein 距離が各成分のヒストグラムの類似性を適切に表現できていることを確認した。そこで、2.2 項で述べた手法に基づき合金間類似度指標を用いたネットワーク図を作成した(図 4)。ネットワーク図は純アルミニウムに相当する 1000 系アルミニウムのネットワーク図である。尚、エッジの重みは 1~5 に規格化され(1 が類似度低、5 が類似度高)、視認性向上のため重みが 3.5 以上のエッジのみを表現している。

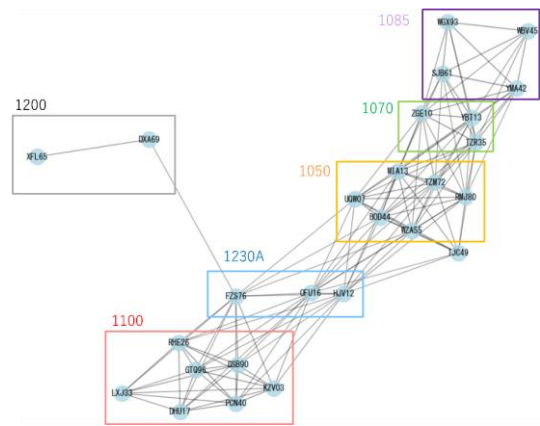


図 4 1000 系アルミニウムのネットワーク図

図 4 の各四角枠はアルミニウムの国際規格である AA 規格ごとに合金を囲っている。AA 規格が同一であるということは、成分について言えば同一の成分規格を有している合金であるということである。図 4 の 1000 系アルミニウムについては Wasserstein 距離による合金間の類似度を用いてエッジを表現すると、意図せずとも自然と AA 規格ごとに合金ノードがクラスタを形成した。また AA 規格では 1085 → 1070 → 1050 → 1230A の順にアルミニウムの純度は低下していくが、図 4 のネットワーク図ではこのアルミニウム純度の高いものから低いものへの変化がエッジの接続により自然に表現されている。以上のことから Wasserstein 距離を用いることで合金間の類似度を適切に評価できる可能性があると言える。報告時には当該内容に加え、他の類似度評価指標との比較検討も行う予定である。

4. おわりに

合金の成分実績値のヒストグラムに対して Wasserstein 距離による計量を適用することで、合金間の類似度を計る新たな指標を開発した。それにより以下の知見を得た。

- Wasserstein 距離により合金成分の平均、バラつきを共に考慮して分布間の類似性を計量可能である
- Wasserstein 距離に基づく合金間類似度をエッジの重みに持つ 1000 系アルミニウムのネットワーク図では自然と AA 規格ごとに合金のクラスタが形成された
- Wasserstein 距離に基づく合金間類似度をエッジの重みに持つ 1000 系アルミニウムのネットワーク図ではアルミニウム純度の高いものから低いものへ徐々に変化するようなエッジの接続が自然と形成された

参考文献

- [1] 児玉公信, 水野忠則. “少量多品種生産管理システムの一般モデル CHARM の提案”. 情報処理学会論文誌. Vol. 49, No. 2, pp. 902-909(2008).
- [2] Panaretos, V.M., Zemel, Y. “Statistical Aspects of Wasserstein Distances”. Annu. Rev. Stat. Its Appl. 6, pp. 405-431(2019).
- [3] Irpino A, Verde R, Francisco de A.T, Carvalho. “Dynamic clustering of histogram data based on adaptive squared Wasserstein distances”. Expert Systems with Applications. 41, pp. 3351-3366(2014).
- [4] Nguyen, H.V.; Bai, L. “Cosine similarity metric learning for face verification”. In Proceedings of the 10th Asian Conference on Computer Vision, pp. 709-720(2010).
- [5] Mathiassen, J.R., Skavhaug, A, Bo, K. “Texture similarity measure using kullbackleibler divergence between gamma distributions”. Computer Vision ECCV 2002. pp. 19-49(2002).