

# 銅合金丸棒の連続鋳造における熱間鍛造の有効性の評価に係る技術開発

Technology development related to the evaluation of the effectiveness of hot forging in continuous casting of copper alloy round bars

材料技術部 金属・物性科 西村将志  
分析・化学科 添田友貴 水野千尋

応募企業は、連続鋳造した後、引き抜き加工と熱処理を繰り返すことで所定寸法を得る銅合金丸棒の素材加工を行っている。引き抜き加工の際に断面中央部に割れが発生してしまうことが課題である。そこで、金属組織観察、画像解析、元素マッピングを行い、連続鋳造工程に熱間鍛造を追加することの有効性を評価した。

Key words: 連続鋳造、熱間鍛造、デンドライト、金属組織観察、画像解析、元素マッピング

## 1. 緒言

銅合金丸棒の製造において、連続鋳造と多段引き抜き加工は基幹となる要素技術である。応募企業では、連続鋳造により得られた鋳塊を、複数の異なる径を持つダイスで順次引き抜くことで、高精度な寸法制御を実現しているが、引き抜き加工の際に図1のように断面中央部に割れが発生してしまうことが課題である。

図2に示す通り、製造工程は大きく分けて連続鋳造工程と多段引き抜き工程から成り、各工程の条件設定が最終製品品質に大きな影響を与える。

これまでの研究結果<sup>1)</sup>より、割れの起点は加工中に発生するシェブロンクラックであり、それが引き抜き加工に伴い進展・拡大することが判明した。また、根本原因として焼鈍が不十分であるために、連続鋳造時のデンドライト組織が残存しており、多段引き抜き工程までに解消しておくべき鋳造組織の不均一性が、割れを誘発しているものと結論付けた。

そこで、本事業では、根本原因である連続鋳造工程に着目し、デンドライト組織の解消に有効とされる熱間鍛造工程を付加することとし、デンドライト組織の形態制御が可能かどうかの検証を、金属組織観察、画像解析、元素マッピングを用いて多角的に評価することとした。



図1 割れ

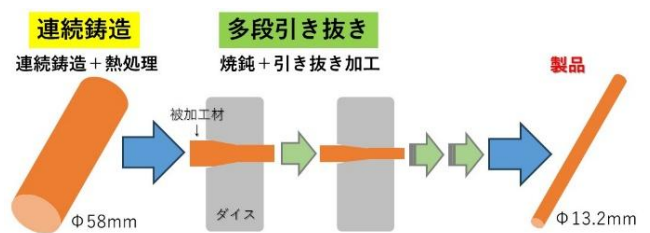


図2 工程フロー

## 2. 実験

### 2. 1. 試験サンプル

熱間鍛造の有無による影響を評価するため、表1に示す2種類の条件で作成した試験サンプルを応募企業より提供いただいた。いずれも連続鋳造およびその後の熱処理までは共通の条件であるが、二次加工として一方は引き抜き加工のみで仕上げた通常工程材、もう一方には熱間鍛造を追加した提案工程材とすることで、加工履歴の差異が最終組織に及ぼす影響を直接比較可能な設計とした。サンプル名は表の通り呼称することとし、引き抜き加工の先端側から採取した。

表1 加工条件

	サンプル名	工程 1	工程 2	工程 3
提案工程	サンプル1	連続鋳造 (Φ58)	熱処理 (Φ58)	熱間鍛造 (Φ40)
従来工程	サンプル2			引き抜き加工 (Φ38)

### 2. 2. 金属組織観察

試験サンプルの金属組織を評価するため、各サンプルの横断面から観察用試験片を切り出し、常温硬化樹脂を用いて埋め込みを行った。研磨工程では、研磨紙による粗研磨の後、ダイヤモンドサスペンションおよびコロイダルシリカを用いて鏡面仕上げを施した。

組織の現出には、10%ペルオキシ二硫酸アンモニウム水溶液を用い、室温で20秒間の浸漬腐食を行った。連続鋳造時の凝固プロセスおよび熱間鍛造による加工プロセスの影響は、丸棒の半径方向で異なると予想されるため、図3に示す通り、外周部、D/6（直径の1/6）位置、D/3位置および中心部の四か所を観察対象とした。

組織観察にはオリンパス株式会社製倒立型金属顕微鏡(GX-71)を用い、倍率200倍の明視野にて、デンドライトの残存状況、結晶粒の形態、および共晶相の分布状態の観察を行った。



図3 観察位置

### 2. 3. 画像解析

熱間鍛造および熱処理による組織の均質化の度合いを定量的に評価するため、図4に示す各観察位置におけるマトリックス中に点在する第二相の面積率を算出することで、径方向におけるマイクロ組織の均一性を評価した。

解析には、金属顕微鏡付属の画像解析ソフトウェア (WinROOF2021) を用い、取得した顕微鏡組織写真に対して図5の通り RGB の色抽出による二値化処理を施すことで、銅合金のマトリックス相と、凝固時に形成された共晶組織を分離・抽出した。図5において、緑色で示される領域が抽出された共晶相中の第二相である。

算出の指標として、観察視野全体に対する共晶組織の「面積比」を求め、これを「デンドライト組織の残存指標」と定義した。

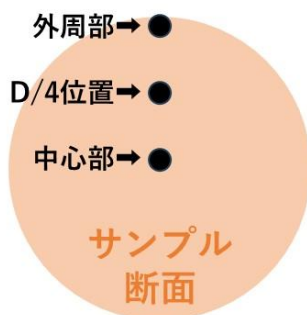


図4 画像解析実施位置

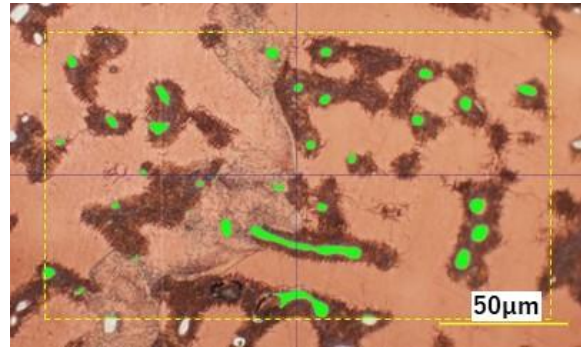


図5 色抽出による二値化処理

### 2. 4. SEM 観察 (元素マッピング)

金属組織観察および画像解析の結果を補完し、添加元素の固溶状態および元素分布の均一性を微視的に評価するため、株式会社日立ハイテクノロジーズ製走査電子顕微鏡 (S-3700N) による観察およびエネルギー分散型 X 線分光法 (EDS) による元素マッピングを実施した。

観察用試料には、鏡面研磨を施した試験片を用いた。SEM の加速電圧は、主相及び添加元素の K 線・L 線を十分に励起可能かつ空間分解能を維持する狙いから 15[kV] に設定した。

まず、反射電子像 (BSE 組成像) により、原子番号の違いに起因する組成コントラストを高真空モードで観察し、共晶相中の元素分布を定性的に把握した。次いで、EDS による元素マッピングを実施し、各観察部 (外周、中心) における主相および添加元素の濃度分布を可視化した。マッピング範囲は、デンドライト組織を十分に包含する約 180[μm] × 140[μm] の領域とし、画素数 128 × 100 にて測定実施した。

このマッピングにより、局所的な元素分布を明らかにし、熱間鍛造工程において凝固時に生じる析出物の解消にどの程度寄与したかを視覚的・定性的に検証した。

## 3. 結果及び考察

### 3. 1. 金属組織観察結果

図6に各サンプルの横断面における金属組織観察結果を示す。

観察の結果、いずれのサンプルでも、連続鋳造特有のデンドライト組織 (樹枝状組織) が明瞭に残存していることが確認された。

デンドライト組織の消失を目的に、熱処理 (工程2) および熱間鍛造 (工程3) を実施したサンプル1においても、予測に反してデンドライトの完全な消失や等軸晶化には至っておらず、鋳造組織のままとなっていた。本来、適切な条件で焼鈍した場合、加工組織や鋳

造組織から等軸な再結晶組織への変化が期待されるが、観察位置にかかわらず残存したデンドライト組織と再結晶組織が混在している。

特筆すべき組織的特徴として、各視野においてデンドライトの成長方向が様ではなく、複数の初晶樹枝状結晶が多方向から複雑に絡み合い、重なり合っているような多方向凝固組織の様相を呈していることが判明した。これは、連続鋳造時の冷却速度や温度勾配の局所的な不均一性に起因するものと推察される。

また、組織内に微細な析出物が点在していることが確認された。これは、本系二元合金における過飽和固溶体からの添加元素の析出、あるいは不純物元素に起因するものと考えられる。これらの析出物が結晶粒界の移動を物理的に抑制する、いわゆる「ピング効果」が作用したと考えられる。

以上の観察結果から、現行の熱処理条件および熱間鍛造による加工エネルギーだけでは、組織を完全に再結晶・均質化させるには不十分であることが明確となった。

一方で、各工程を比較すると、熱間鍛造を施したサンプル1では、通常工程のサンプル2と比較してデンドライト樹間の共晶相が断片化し、わずかにその面積が減少しているような変化が散見された。しかし、肉眼による定性的な観察のみでは、熱間鍛造による均質化効果を明確に判定することは困難であった。



図6 金属組織観察結果

### 3. 2. 画像解析結果

第二相の面積率の算出結果を、径方向の位置ごとに整理して図7に示す。本グラフにおいて、各観察位置の数値が一定であれば、第二相の析出状態に径方向の位置による差異がないことを示す。

工程1（連続鋳造後）において、サンプル1の面積比は共通して外周部で高く中心部にかけて低下する、あるいは不均一な分布を呈する傾向が確認された。これに対し、通常工程であるサンプル2では外周部と中心部の差が小さく、初期の冷却・鋳造条件の差異が第二相の析出に影響を及ぼしていることが示唆された。

次に、工程3（二次加工後）に注目すると、熱間鍛造を施したサンプル1の中心部において、面積比が1.8[%]（工程1）から0.72[%]（工程3）へと大幅に

減少していることが判明した。これは、これは通常工程のサンプル2には見られない変化であり、熱間鍛造が局所的な析出物の解消に寄与することを示した。

また、いずれのサンプルにおいても面積比がゼロになることはなく、金属組織観察の際に確認されたデンドライト組織の残存と整合する結果となった。すなわち、今回の鍛造条件（加工度および温度）では、樹間偏析を完全に拡散・消失させるには至らなかったことが定量的に示された。

なお、本解析においては、光学顕微鏡写真のコントラストに起因して、微細な共晶組織の境界判定に一定の誤差が含まれる。また、単一視野での解析結果は全体を反映するものではなく、各工程・部位における相対的な変化傾向を評価するための目安として用いた。

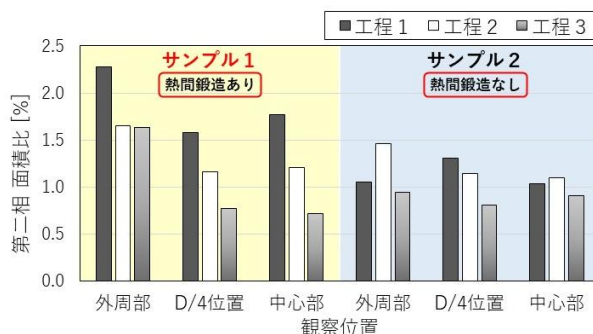


図7 第二相面積比

### 3. 3. SEM 観察結果

図8に、SEM観察及びEDS元素マッピング結果を示す。

BSE組成像において、いずれの工程においてもマトリックス中に点在する5~10[mm]程度の白色の粒状組織が観察された。これに対応するEDSマッピングの結果、当該部位において添加元素（図中赤色）の強い強度が検出された。これにより、3. 2. 節の画像解析で抽出した領域が物理的に独立した第二相であることが裏付けられた。

特筆すべきは、第二相の周囲のマトリックス部分の呈色である。元素分布マッピングにおいて、第二相以外の領域においても一様なベース強度が検出されており、添加元素の相当量がマトリックス中に広範囲にわたって固溶している様子が視認された。

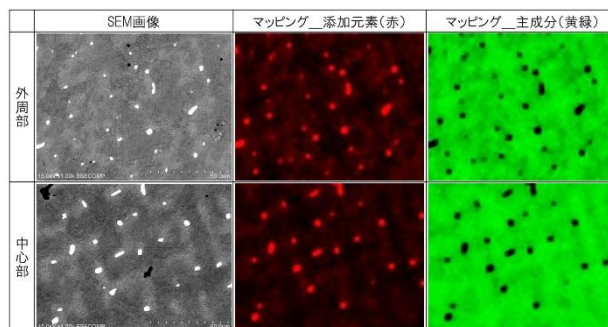


図8 SEM観察およびEDSマッピング結果

## 4. 考察

本研究では、連続鋳造材特有のデンドライト組織を熱間鍛造によって拡散させ、組織の等軸晶化を試みた。しかしながら、金属組織観察の結果、熱間鍛造の有無にかかわらず、いずれの条件においても樹枝状の骨格が維持されており、画像解析による定量評価においても、共晶相の大幅な消失や径方向の均一化は認められなかった。

この要因として、本合金において形成される多方向凝固組織が極めて強固なネットワークを形成しており、今回の鍛造比で与えられた加工エネルギーだけでは、樹間偏析を解消するまでの塑性流動が生じなかったことがあげられる。すなわち、現行の熱間鍛造条件の追加は、プロセス・コストに対する金属組織改善のメリットが限定的であると結論付けられる。

中心部に発生するシェブロンクラックは、加工時の応力集中が、延性に乏しい樹間共晶相に沿って伝播することで生じるのが一般的である。本研究では、熱間鍛造という後工程での対処療法では、この脆性経路を完全に断つことが困難であることが明白となった。

したがって、問題の根源は鋳造後の加工プロセスではなく、連続鋳造段階で形成される初期組織の形態および共晶相の生成を抑制しきれない熱履歴にあると推察される。すなわち、後工程の加工条件に依存せず、上流の鋳造プロセスにおける熱力学的制御を優先すべきであることを強く示唆するものである。

以上より、シェブロンクラックによる割れの問題を解決するための手法として、以下を提案する。

- ・本合金系の冷却速度及び微量元素の影響を考慮した実効的な平衡状態図を作成し、添加元素が完全にマトリックスへ固溶し得る臨界温度領域を正確に特定する。
- ・共晶組織の晶出を熱力学的に抑制する温度管理条件でのサンプル作成を実施する。
- ・本研究で確立した画像解析と SEM マッピングを組み合わせた評価手法を用い、初期段階で偏析を抑え込んだ材料が、その後の加工プロセスにおいて割れを抑制できるかを検証する。

## 5. 結言

本研究では、銅合金丸棒におけるシェブロンクラックの抑制を目的として、熱間鍛造による組織均質化の有効性を評価した。金属組織観察、画像解析および SEM 元素マッピングによる多角的な検証を行った結果、以下の知見が得られた。

- 金属組織観察の結果から、本材料は凝固時に多方向凝固が生じ、複雑に絡み合った初晶樹枝状結晶（デンドライト）を形成していることがわかった。

そのため、通常よりも組織の骨格が強固であり、熱間鍛造や熱処理を加えても等軸晶化を促すに至らず、樹枝共晶相の偏析も解消されなかった。

- 画像解析により抽出された第二相の面積比は、熱間鍛造によって一部減少する傾向を示したものの、径方向の不均一性は解消されなかった。また、SEM マッピングにより、この面積比が光学的に認識可能な添加元素の度合いを正確に反映していることが裏付けられた。
- SEM マッピングの結果、添加元素の大部分はマトリックス中に固溶しており、熱処理や二次加工を経てもマイクロな元素分布状態が維持される極めて高い組織安定性を有していることがわかった。
- 以上より現行条件での熱間鍛造条件の追加は、有効ではない。
- シェブロンクラックの根本的解決には、熱間鍛造のような後工程での対処療法ではなく、平衡状態図に基づいた共晶組織の晶出抑制、すなわち鋳造時の熱処理温度の変更を含む熱履歴管理からの再設計が必要であることを提言した。

## 参考文献

- 1) 西村将志, 工藤弘行, 佐藤浩樹, 坂内駿平. 銅合金丸棒の連続鋳造と多段引き抜きにおける品質向上に係る技術開発. 令和6年度福島県ハイテクプラザ研究報告書, 2025.