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

Technology development related to quality improvement in continuous casting and multistage drawing of copper alloy round bars

材料技術部　　金属・物性科　西村将志　工藤弘行　佐藤浩樹
電子・機械技術部　　機械・加工科　坂内駿平

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し行う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、非破壊検査、硬さ試験、組織観察を行い、連続鋳造工程と多段引き抜き工程を評価した。その結果、中央部の硬さと組織が不均一になっていること、焼鈍の効果が十分に得られていないことがわかった。また、X 線 CT 観察でシェブロンクラックの発生を定量的に観察することができた。引張試験により追加の変形を加えることで欠陥の成長挙動を把握することができた。

Key words: 連続鋳造、多段引き抜き加工、シェブロンクラック、マクロ偏析、析出硬化

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。

連続鋳造時の温度分布や凝固速度が不均一な場合マクロ偏析が問題となる。引き抜き加工では、典型的な欠陥であるV字割れ（シェブロンクラック）が鋳塊内部に発生し、引き抜き加工時の変形により進展することで、製品の機械的特性を低下させる要因となることが古くから知られている[1)]。

そこで、本事業では、連続鋳造工程ならびに多段引き抜き工程を、非破壊検査、硬さ試験、組織観察を用いて評価した。また、割れの発生要因についての考察も行った。

図１　割れ

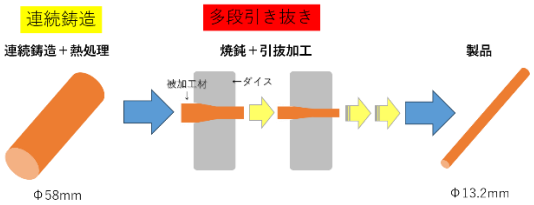


図２　工程フロー

2．実験

2．1．試験サンプル

実際の加工工程では径が 1[㎜]減少するまで引き抜き加工を行い、製品形状に仕上げる。連続鋳造及び多段引き抜き加工工程の評価を行うため、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。本事業では、焼鈍の効果を調べるために、焼鈍回数をサンプル１とサンプル２で変更することとし、焼鈍前後のサンプルを採取した。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

No.	サンプル名						
工程	連続鋳造	多段引き抜き					
	連続鋳造	焼鈍	引抜加工	焼鈍	引抜加工	焼鈍	引抜加工
サンプル１	Φ58 C-58	Φ38 C-38	Φ38 A-38	Φ23 E-23	Φ23 A-23	Φ15 E-15	
サンプル2	Φ58 C-58	Φ38 C-38 焼鈍	Φ38 A-38	Φ28 E-28	Φ28 A-28	Φ20 E-20	Φ20 A-20	Φ15 E-15

事業名「ひとつ、ひとつ、実現するものづくり企業支援事業」（応募企業　北光金属株式会社）

２．２．非破壊検査

中央部の割れについて、シェブロンクラックに代表される欠陥が非破壊検査を用いて観察できるかを検討した。

直径 53[㎜]から 30［㎜]までの試験サンプルは超音波探傷映像化装置（KJTD 製 SDSⅢ6500R)、直径 30[㎜]以下の試験サンプルについては X 線 CT 検査装置（テスコ製 TXS-CT300）を用いて試験を行った。

超音波探傷は、小さめの欠陥（0.3［㎜]以下）の検出を想定し、帯域周波数 10[MHz]の探触子を使用し、図３のとおりピッチ 0.25[㎜]でジグザグに走査して探傷した。X 線 CT は、管電圧 290[kV]、管電流 130[μA]、FOV（撮影領域）40[㎜]、プロジェクション数（一回転の分割数）1800 で図４のとおり試験サンプルの一部分を撮影した。

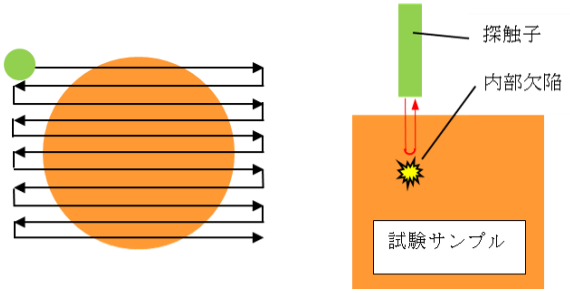


図３　超音波探傷試験概要

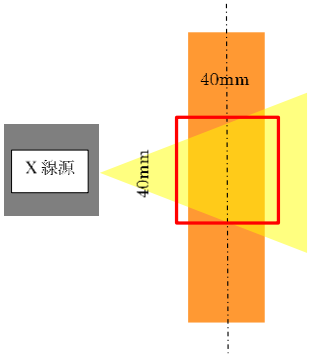


図４　X 線 CT 試験概要

２．３．ビッカース硬さ試験

引き抜き加工時に中央部に割れが発生する問題は、強度や耐久性に深刻な影響を及ぼす。シェブロンクラックの原因は、冷却速度の不均一性や内部応力の集中に起因することが多いため、マイクロビッカース硬度計（島津製作所製 HMV-G31-FA-D）を用いて各工程での硬さ変化を調べることとした。

試験サンプルの横断面を樹脂埋込した後、鏡面状態まで研磨を行い、図５に示す通り、中心部、1/4 位置、外周部での硬さ試験を行った。

測定条件は、試験力 100[gf]とし、測定ピッチ 1[㎜]となるように位置指定した。

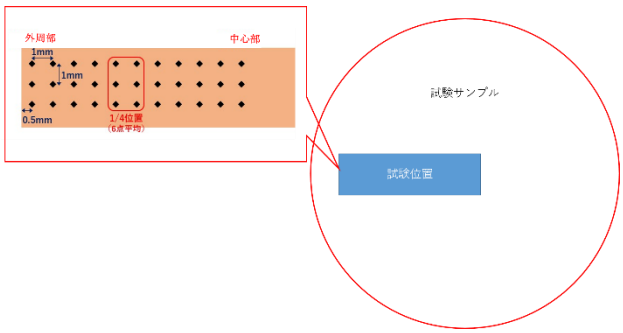


図５　硬さ試験位置

２．４．組織観察

組織観察は、３．１．項の欠陥位置の輪切り断面を鏡面研磨後、10%ペルオキソ二硫酸アンモニウム水溶液中に 20 秒間浸漬させて組織現出を行った。

観察は、オリンパス株式会社製倒立型金属顕微鏡(GX-71)で 1,000 倍、明視野で実施した。

３．結果及び考察

３．1．非破壊試験結果

図６に超音波探傷装置での非破壊試験結果、図７に X 線 CT 装置での非破壊試験結果を示す。

図６に示す超音波探傷では、いずれのサンプルでも一様に青い領域となっていることが確認できた。これは内部に欠陥が検出されなかったことを意味する。一部色が変化している部分は、底面付近からの反射であり、サンプル底面のくぼみを検出しているため、内部の欠陥ではないと考えられる。よって、連続鋳造工程では、いずれのサンプルでも欠陥は発生していないと判断した。

図７に示す X 線 CT 装置での観察結果から、サンプル１では E-15、サンプル２では A-20 で V 字の微小な割れ（シェブロンクラック）が見つかった。割れは、以後引き抜き加工を繰り返すごとに成長し、E-15 では 1[㎜]程度まで成長した。

以上より、連続鋳造工程では非破壊検査で検知できる大きさの欠陥が生じず、多段引き抜き工程においてシェブロンクラックが生じ、成長していくことがわかった。

サンプル１の A-23 については、中央部が色濃く、端部が色が薄いというコントラストが生じた。色が濃い部分は密度が低く、薄い部分は密度が高いということを意味しており、中心部に何らかの異常が発生していることがわかった。

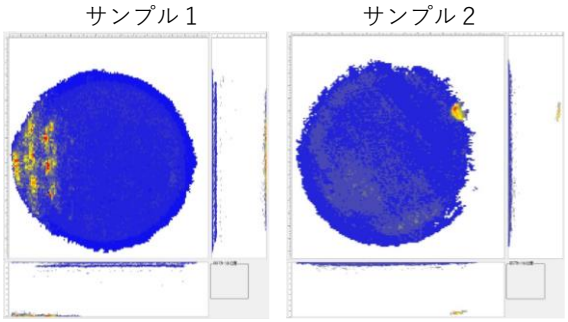


図６　連続鋳造の非破壊試験結果（超音波探傷試験）

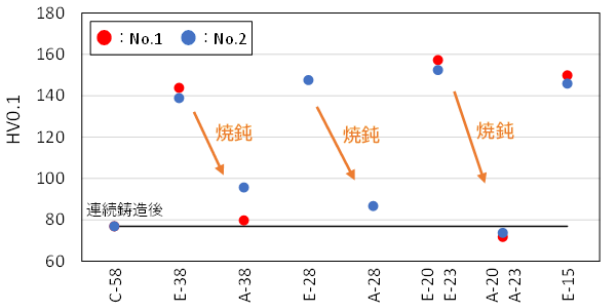


図８　硬さ試験結果

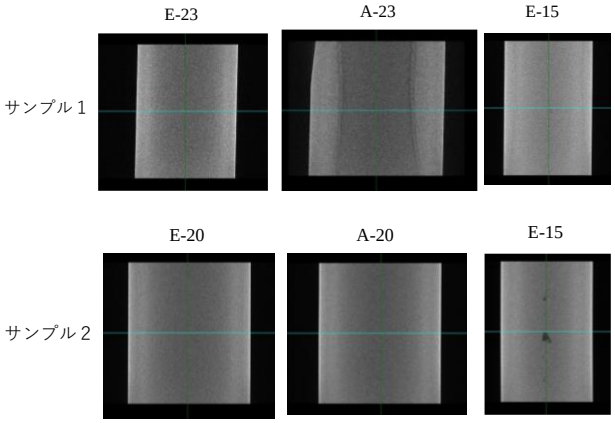


図７　多段引き抜き加工後の非破壊試験結果（X 線 CT）

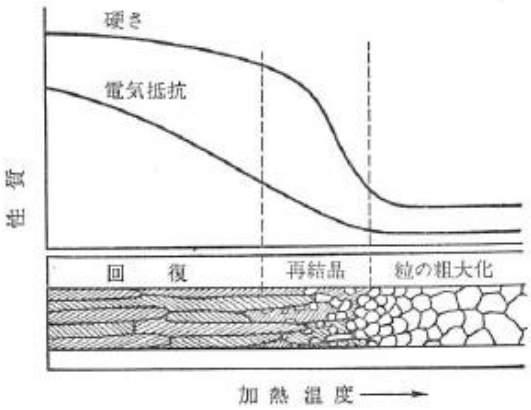


図９　焼鈍による性質の変化 [2)]

３．２．ビッカース硬さ試験結果

図８は各工程における図５の 1/4 位置でのビッカース硬さの平均値をサンプル条件ごとにプロットしたものである。

一般に冷間加工した金属が焼鈍によって軟化する過程は、図９に示すように３段階に分けられる [2)]。

引き抜き加工工程で硬くなり、図９に示す通り焼鈍で硬さが低下することが確認できた。

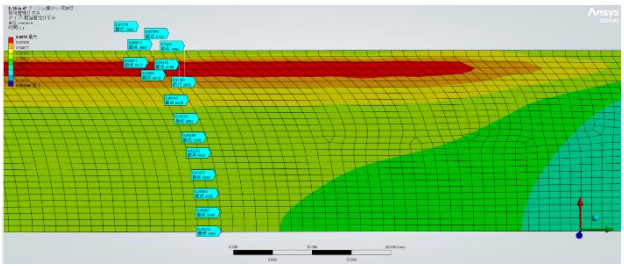
いずれのサンプルにおいても、引き抜き加工を繰り返すごとに硬さの数値が高くなる傾向があった。また、焼鈍後の硬さは、いずれの工程においても連続鋳造後の硬さと比較して１割程度の増減があった。理想的には、図９に示す通り再結晶が完了していれば、焼鈍後の硬さは素材の硬さである連続鋳造後の硬さと一致する。しかし、硬さ試験の結果は連続鋳造後の硬さよりも硬く、焼鈍の効果が工程によっては十分に得られていないことがわかった。後述する組織観察の結果と合わせて、析出硬化の可能性が高い。

図１０に CAE による塑性ひずみ分布を、図１１にサンプル断面の硬さの分布をヒートマップとして示す。

CAE による引き抜き加工のシミュレーション結果からは、ダイスと接触している部分の近傍がひずみが最も高くなる傾向が見られた。

図１１のヒートマップからは、引き抜き加工後の硬さはいずれの工程においても中心部で若干軟らかく、外周部で硬くなる傾向が見られた。これは CAE 解析結果とも一致する。一方で、焼鈍後の硬さは、いずれのサンプルでも中心部が硬く、外周部が若干軟らかくなる傾向が見られた。また、中心部ほど硬さが不均一となっていることもわかった。これは CAE 解析結果とは異なる傾向であり、中心部で特殊なことが起きている可能性がある。

図８から得られた結果と合わせて、硬さ試験においては焼鈍が不十分で特に中心部が焼鈍の効果が十分に得られていないことがわかった。



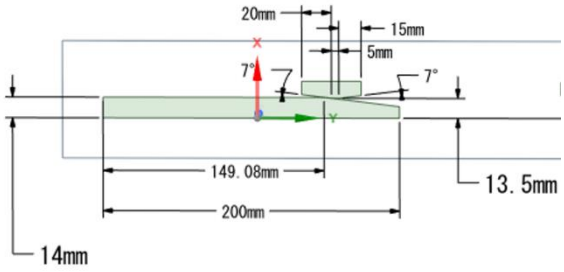


図１０　CAE による多段引き抜き加工シミュレーション
（上：応力の計算結果、下：解析モデル）

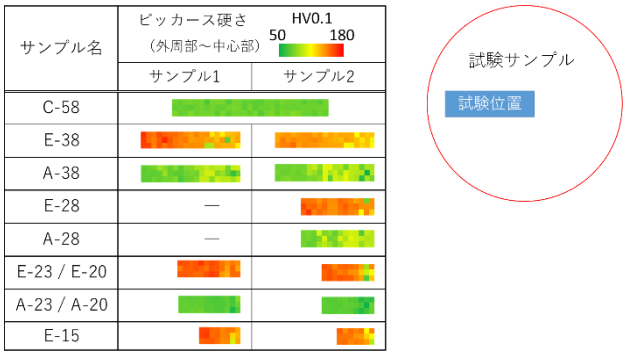


図１１　硬さ試験結果（ヒートマップ）

３．３．組織観察結果

非破壊試験及び硬さ試験において特に異常が見られたサンプル１の E-23、A-23 の金属組織観察結果を図１２に示す。

E-23 の金属組織は、中心部、外周部ともにデンドライト（樹枝状）組織となっていることが観察された。焼鈍後は、図９の模式図のようにデンドライト組織から再結晶が完了した組織へ変化しているはずだが、A-23 の中央部の金属組織は、焼鈍前のデンドライト組織と再結晶化途中の組織が入り混じった状態となっている。析出物も確認できることから、析出物によって再結晶が阻害されているのではないかと考えられる。

すなわち、焼鈍効果が十分に得られていないことが組織観察結果からも確認された。

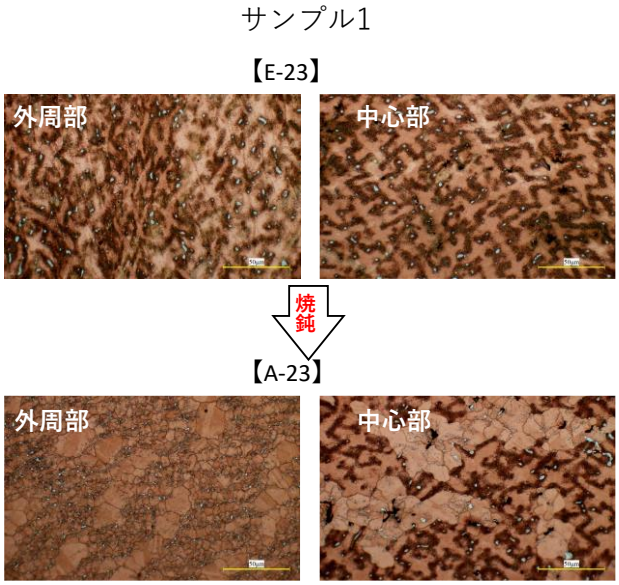


図１２　金属組織写真

４．考察

４．１．連続鋳造の評価

連続鋳造においては、鋳造での欠陥の典型であるマクロ偏析がないかを調べるため、連続鋳造後のサンプルの非破壊検査、組織観察及び硬さ試験を実施した。

超音波探傷による非破壊検査では、いずれのサンプルでも欠陥は確認されなかった。

硬さ試験でも、各サンプルでの有意差は見られなかった。

組織観察では、サンプル１、サンプル２共にいずれの工程でも図１３に示す通りデンドライト組織となっていることが確認できた。デンドライト組織は、マクロ偏析を助長する要因として知られている。そのため、連続鋳造工程においては、検知できる欠陥は確認できなかったが、マクロ偏析がある可能性が確認できた。

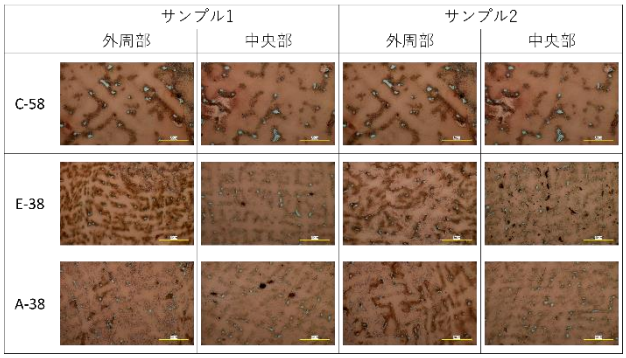


図１３　連続鋳造工程中の断面組織観察結果

４．２．多段引き抜きの評価

４．２．１．実験手法

多段引き抜き工程の妥当性を判断するため、各工程後の組織観察及び硬さ試験を実施した。

X 線 CT 観察では、サンプル１、サンプル２共にシェブロンクラックの発生を観察することができた（図７）。そのため、中央部に発生する割れは、シェブロンクラックが発生し、成長することで引き起こされるものと結論づけた。すなわち、ひずみが蓄積されて延性破壊の発生限界に近付いているものと考えられる。

実際の製造工程で生じる現象を再現するため、ハイテクプラザ所有の万能材料試験機を用いて引張試験を行うことで引き抜き加工を模擬し、シェブロンクラックが変形の追加に応じてどのように進行していくのかを確認することとした。

４．２．２．ひずみ量の評価

延性破壊条件は、累積ひずみを考慮することにより整理できることが報告されている[3)]

事前に、応募企業の加工工程において、サンプルにどの程度の累積ひずみが発生しているのかを計算により求めた。表２にサンプル１とサンプル２の焼鈍直前の累積ひずみ量を示す。

累積ひずみの数値 0.5 を延性破壊の発生限界の一つの判断基準とし、色分けを行った。

その結果、連続鋳造工程においては累積ひずみが 0.5 未満であった。一方で、多段引き抜き工程では、径が細くなることもあり、サンプル１、サンプル２とも焼鈍直前の累積ひずみは 0.5 を超えていることが確認できた。特にサンプル１では１を超えており、連続鋳造工程の２倍以上の累積ひずみが発生している状態であった。すなわち、焼鈍タイミングが不ぞろいであった。

現行では累積ひずみを考慮せずに焼鈍の回数とタイミングを設定しているが、累積ひずみが一定値になった時点で焼鈍を行うようにすると、工程が改善されると思われる。

表２　焼鈍直前の累積ひずみ量

	累積ひずみ						
焼鈍直前のサンプル径	Φ58	E-38	E-28	E-23	E-20	E-15	製品
サンプル１	-	0.425	-	1.004	-	-	1.111
サンプル２	-	0.425	0.611	-	0.673	0.575	0.256

４．２．３．引張試験による欠陥の成長観察

引張試験サンプルは、サンプル２の E-15 で、X 線 CT にてシェブロンクラックが確認されたものを使用した。DIC を併用してひずみ量を測定した。

図１４に引張試験の DIC 解析結果を示す。

引張試験は、ひずみ量 0.008 まで引っ張った時点で試験終了とした。

試験終了直後のサンプルを X 線 CT 検査装置を用いて観察した。引張試験前後の欠陥を Synopsys 社製 Simpleware を用いて、三次元画像解析することで体積を計算した。結果を図１５に示す。

0.008 のひずみ増分により、小さい欠陥は体積比で約２倍、大きい欠陥は約 1.3 倍にまで成長することがわかった。すなわち、多段引き抜き加工時に生じる累積ひずみの 1/100 にも満たないごくわずかなひずみであっても、欠陥が大きく成長することを確認できた。

今後ひずみ量と欠陥サイズの相関を取ることで、シェブロンクラックによる欠陥の成長予測への発展も期待できる。

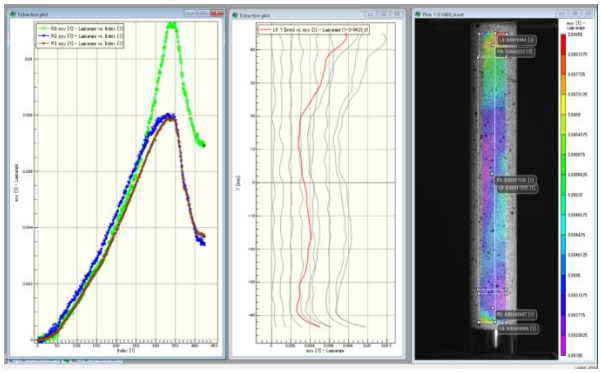


図１４　引張試験の DIC 解析結果

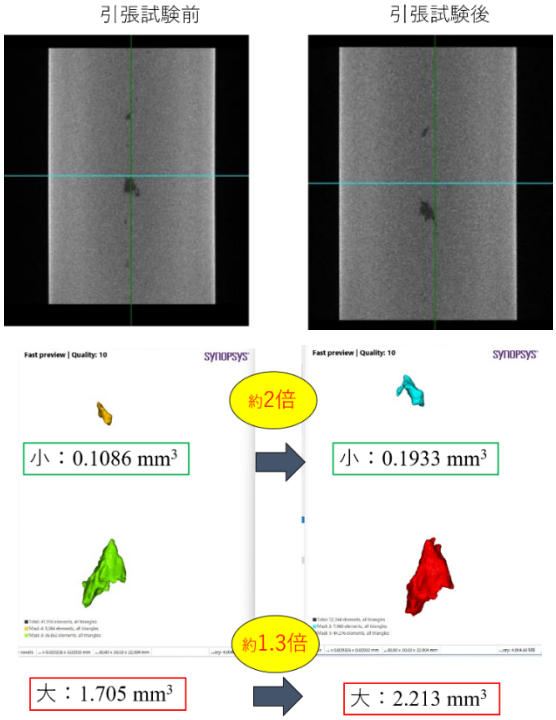


図１５　欠陥の解析結果
（上：X 線 CT、右：Simpleware）

５．結言

連続鋳造工程と多段引き抜き加工工程を評価するため、非破壊検査、硬さ測定、断面組織観察を行った。これらの結果から以下の知見が得られた。

- 連続鋳造においては、欠陥は観察されなかったが、デンドライト組織となっていることが確認できた。
- 多段引き抜き加工工程においてシェブロンクラックの発生を X 線 CT 装置を用いて観察できることがわかった。また、引き抜き加工を繰り返すことで成長していくことを確認した。
- 硬さ測定と金属組織観察から、焼鈍後の組織の再結晶が完了していないことがわかった。
- Simpleware を用いた画像解析と引張試験を組み合わせることにより、シェブロンクラックの成長を観察する手法を提案した。今後サンプル数を増やすことで、ひずみ量と成長度合いの相関が取れ、欠陥の成長を予測するといった発展性も期待される。

参考文献

1) 志賀聡. 多段引き抜き加工時のシェブロンクラック発生予測. pp.13
2) 須藤一. 金属組織学.
3) Ishikawa, T.:J.Jpn.Soc. Technol. Plast., 53-620(2012),790-794