

研究論文

銅合金鋳物の機械的特性に関する鋳造 CAE による考察

津本宏樹^{*1}、廣澤考司^{*1}、永縄勇人^{*1}、藤波駿一朗^{*1}

Study on Mechanical Property of Copper Alloy Casting Applying CAE

Hiroki TSUMOTO^{*1}, Kouji HIROSAWA^{*1}, Hayato NAGANAWA^{*1}
and Shunichiro FUJINAMI^{*1}Industrial Research Center^{*1}

同一溶湯、同一型内で作製された銅合金鋳物(CAC406)の引張試験片について、その機械的特性(引張強さ、伸び)の傾向が部位によって異なる要因を検討した。顕微鏡観察によると、部位によって凝固組織が異なっており、これが鋳造欠陥の発生状況や負荷時の亀裂生成、進展に影響したものと考えられる。鋳造 CAE 解析を実施したところ、局所的な溶湯の滞留が見られ、これが凝固組織相違の要因となった可能性が示唆された。

1. はじめに

鋳造は金属材料の成形や加工法の中でも、精密で複雑な形状への適用が可能であり、製品サイズや重量の制約も少ないといった優れた特徴を持っている¹⁾。鋳造は、溶けた金属を型に注入し、冷やすことで目的の形状を得る加工法であるが、液体から固体への相変態を伴いながら素材と形状を同時に作るプロセスであるため、現象が複雑で多数の影響因子が存在する²⁾。このため、鋳物製品の品質向上や欠陥対策を進めるにあたっては、これまでの経験に頼る場面が多くあった³⁾。

その一方で、計算機の性能向上や低価格化を背景に、パーソナルコンピュータ上でプロセスの可視化ができる鋳造 CAE が普及しつつある。直接的には観察できない型内部の溶湯の流れや凝固プロセスの予測が可能のため、型設計や不良対策などの目的で活用が進められている⁴⁾。

本研究では、銅合金鋳物を対象に、同一溶湯、同一型内で作製された引張試験片の機械的特性に差異が生じる要因について、実サンプルの評価と鋳造 CAE 両面から検討を行った。

2. 実験方法

2.1 引張試験片の作製

鋳物材質は CAC406 とした。約 1200℃で管理された溶解炉から溶湯を取鍋に移し、手作業で砂型内に注湯した。これを常温となるまで十分に放置した後、砂型をばらして素材を取り出し、機械加工を行うことで、2本の引張試験片(JIS Z 2241 4号試験片)を作製した。この2

本の引張試験片について、湯口、堰から遠い側の試験片を A、近い側を B と識別する。鋳込み後の素材と引張試験片の位置関係を図 1 に、加工後の引張試験片を図 2 に示す。なお、鋳込み素材の大きさは L317×W76×H107mm(湯口、堰部分を除く)であり、引張試験片の平行部に相当する部位における機械加工前の素材径はφ20.5mm となっている。

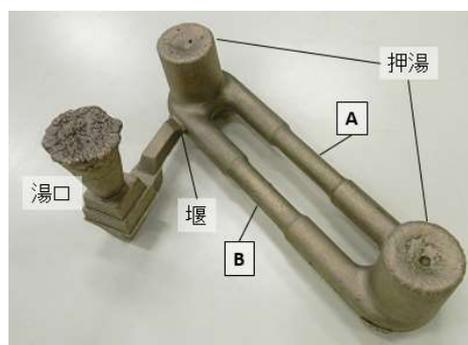


図 1 素材と引張試験片位置



図 2 加工後の引張試験片

2.2 サンプル評価

作製した引張試験片 A、B について、JIS Z 2241 による引張試験を行い、引張強さと伸びを算出した(試験本数 A:47 本、B:46 本)。引張試験には万能試験機((株)島津製作所製 AG-100kNIS)を用い、引張速度は 5mm/min

*1 産業技術センター 金属材料室

とした。また、破断後の引張試験片について、表面及び破断部近傍の断面観察をデジタル顕微鏡((株)キーエンス製 VHX-8000)、電子顕微鏡(日本電子(株)製 JSM-6510A)により行った。また、機械加工前の素材の凝固組織の観察も行った。組織観察には、硝酸-塩化第二鉄水溶液をエッチング液として用いた。

2.3 鋳造 CAE 解析

図 1 の鋳造方案を 3D モデル化し、鋳造 CAE 解析を行った。解析ソフトとして、ADSTEFAN((株)日立産業制御ソリューションズ製)を使用した。解析モデルと主な解析条件を図 3 と表 1 に示す。

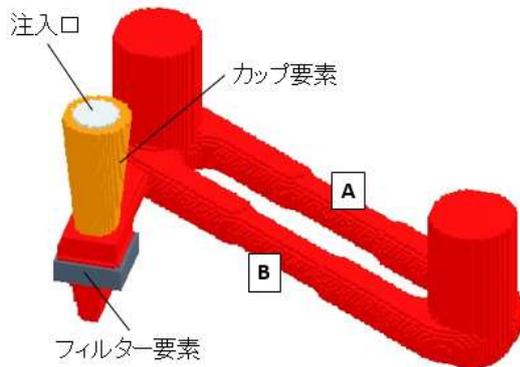


図 3 鋳造 CAE モデル

表 1 解析条件

材料	鋳物：CAC406 鋳型：生砂(green sand)
初期温度	鋳物：1150℃ 鋳型：20℃
熱抵抗値 (鋳物-鋳型)	50cm ² ・sec・deg/cal
メッシュサイズ	2mm (メッシュ数：約 200 万)
ソルバ	高精度湯流れ (MARS 法)
注湯速度	110cm ³ /sec (注湯所要時間より逆算)
フィルター 透過要素	0.001

図 3 の鋳造 CAE モデルにおいて、カップ要素を設定することで、設定の注湯速度を超えない範囲で、溶湯が注入口から溢れないよう自動的に流量が調整される。また、フィルター要素は実際の注湯工程において異物等を除去する目的で使用されるセラミックフィルターを模擬した要素である。材料の各物性値についてはソフトウェア推奨値を使用した。

これらのモデルと解析条件により湯流れ、凝固解析を行った。また CAE 解析モデルにおいて、引張試験片 A、B 平行部の長手方向中央部の断面内に各 5 箇所計測点を設定した(図 4)。

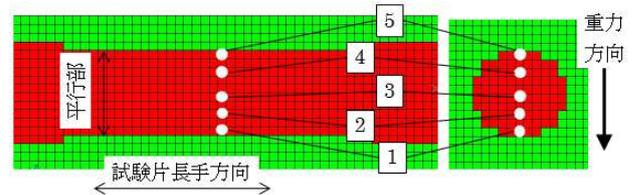


図 4 計測点

3. 実験結果及び考察

3.1 引張試験結果

作製した引張試験片の伸びと引張強さの分布を図 5 に示す。1 回の注湯で、同一の溶湯、同一の鋳型から引張試験片が A、B 各 1 本ずつ作製されるが、図 5 よりその物性値に傾向が見られることが分かる。引張強さ、伸びともに A の方が良好な結果となっていた。

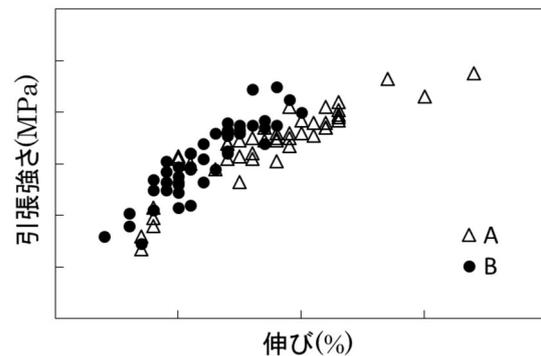


図 5 引張試験結果

3.2 顕微鏡観察結果

引張試験後の試験片 A、B の平行部について、デジタル顕微鏡による表面観察を行った結果を図 6 に示す。A に比べて B の方が試験片表面の凹凸が細かく、拡大すると B の方に多数の微小亀裂が見られた。

次に、引張試験後の試験片 A、B について、破断部の近傍で平行部を切断した後、その切断面を研磨し、電子顕微鏡で観察した結果を図 7 に示す。A では切断面中央部に比較的大きな引け巣が見られたのに対し、B では全体に微小な欠陥が分布していた。図 7 の素材部における切断面の拡大像を図 8 に示す。白い部分は主として材料に含まれる鉛成分が凝固したものである。この部分が A では丸みを帯びた形状をしているのに対し、B では細長く伸びたような伸長状となっていた。

機械加工前の素材の凝固組織を図 9 に示す。観察面は、引張試験片 A、B の平行部において、長手方向に対してほぼ中央位置を切断面とした。これによると、A、B で

凝固組織が明らかに異なっており、Aは柱状晶、Bは等軸晶を主体とする組織となっていた。

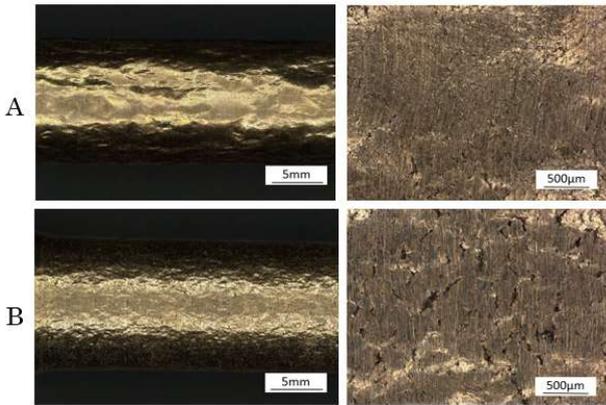


図6 引張試験後の試験片表面のデジタル顕微鏡像

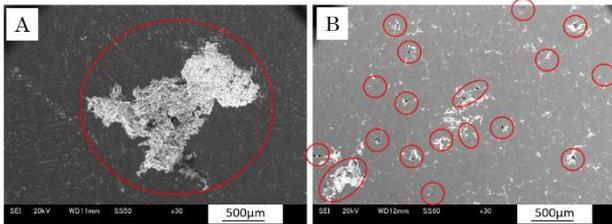


図7 破断部近傍断面の電子顕微鏡像 (囲みは確認された欠陥部)

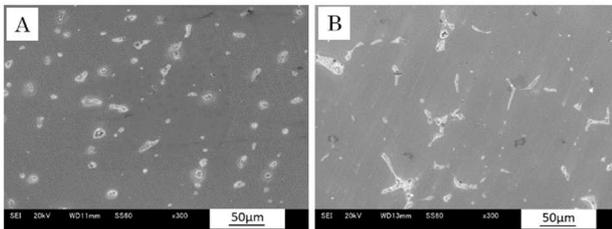


図8 破断部近傍断面の電子顕微鏡像(素材部)

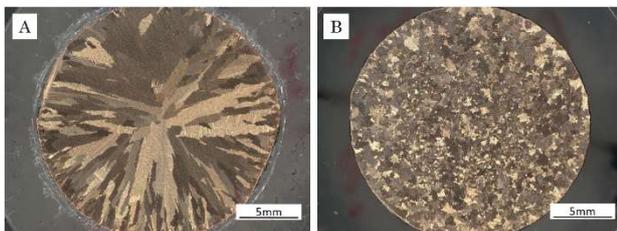


図9 凝固組織のデジタル顕微鏡像

図6~図9の顕微鏡観察結果から、Aの方が引張強さ、伸びが共に高い傾向となった要因は、次のように推定される。Bは内部欠陥が断面全体に分布し、母材に比べて強度が低い鉛組織が伸長状に分布していることから、Aに比べて負荷時の亀裂発生、進展がしやすくなり、結果として引張強さ、伸びの値が低くなったものと考えられる。Bの表面に多くの微小亀裂が発生していたのもこの影響だと考えられる。また、Bの凝固組織は微小欠陥が

断面内に生じやすいとされる等軸晶となっていた⁵⁾ことから、AとBの凝固組織の違いに起因して、このような機械的特性の傾向が生じたと考えられる。

3.3 鋳造 CAE 解析結果

湯流れ解析による注湯完了時点(t=7.62s)での溶湯温度分布を図10に、凝固解析による各計測点での流動限界固相率温度時の温度勾配と冷却速度をそれぞれ図11、図12に示す。図10より、注湯完了時点での溶湯温度はBの方が低くなっていたが、温度勾配や冷却速度については、同一断面内での差はみられるものの、A、B間での差はあまり見られなかった。

次に計測点断面における凝固組織予測結果を図13に示す。図13では、A、Bともに柱状晶が形成される結果となった。図9と比較すると、Aに関しては凝固組織の特徴をよく再現していたが、Bに関しては一致しない結果となった。

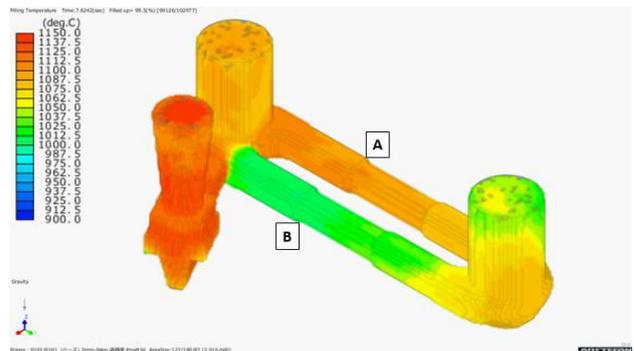


図10 溶湯温度(t=7.62s)

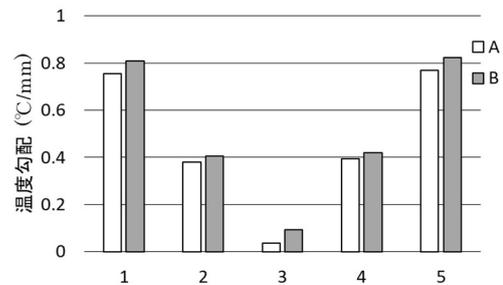


図11 各計測点の温度勾配

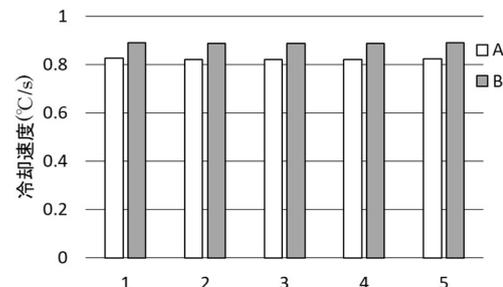


図12 各計測点の冷却速度

凝固組織の形成には凝固時の温度勾配や冷却速度が影響する⁶⁾が、A、B間の差があまり見られず、CAEによ

る凝固組織予測でも共に柱状晶を示したことから、Bの等軸晶形成には CAE 解析上では考慮されていない別の要因が作用していると考えられる。

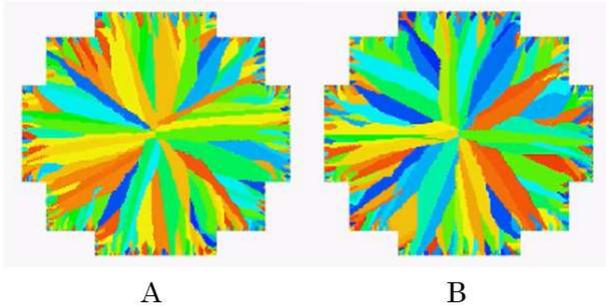


図 13 CAE による凝固組織予測

等軸晶の形成については、過去に様々な研究がなされている。例えば、冷えた鋳型に溶湯が接触した際に結晶核が生成し、溶湯の流れによって運ばれた先で結晶が成長する説(自由チル晶説)や、鋳型壁上で生成した結晶が離脱し、成長する説(結晶遊離説)などが報告されており、これらは鋳込み時の湯流れや溶湯内の温度差による対流が影響していると考えられている⁷⁾。一方、今回 CAE 解析にて用いた組織予測手法では、二次元断面内における熱流のみを考慮したモデルとなっており⁸⁾、鋳型内の三次元的な溶湯の流れの影響は考慮されていない。

ここで、Bにおける等軸晶形成の要因について検討するため、鋳型内の溶湯の流れに関連する CAE 解析結果に着目する。まず、各計測点における溶湯の存在時間を図 14 に示す。どの計測点においても、その値は B の方が大きくなっていった。このことから、B 側には A 側と比較して注湯初期の溶湯が主に存在していると考えられる。次に計測点 3(試験片平行部の中心)を通る水平断面内における溶湯速度($t=7.18s$)を図 15 に示す。堰から溶湯が流入する影響で、B 側の溶湯の流れが遮られ、溶湯が B 側に滞留する様子が観察された。

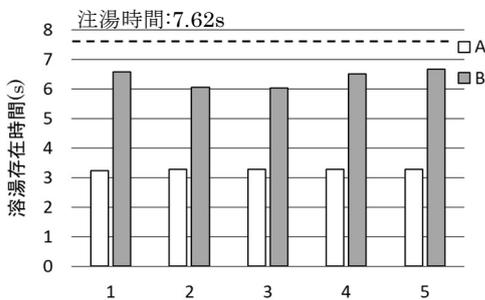


図 14 溶湯存在時間

図 14 の結果も踏まえると、B 側には常温の鋳型に接触しながら運ばれてきた注湯初期の溶湯が集積されており、ここには多数の結晶核や鋳型から遊離した結晶が含まれていることが考えられる。よって、このような状態

で凝固が進行することで、BにはAの柱状晶とは異なる等軸晶が生成した可能性が考えられる。

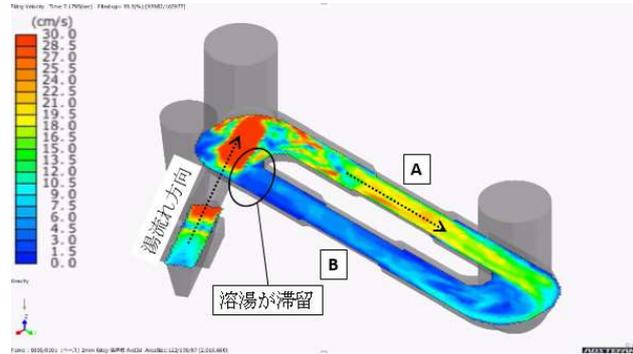


図 15 溶湯速度($t=7.18s$)

4. 結び

本研究の結果を以下にまとめる。

- (1) 引張強さ、伸びは A の方が高い傾向であった。
- (2) 引張試験後のサンプルにおいて、B の表面に多くの亀裂が見られた。また B の断面全体に鋳造欠陥と伸長状の鉛組織が見られた。
- (3) 凝固組織は A が柱状晶、B が等軸晶となっていた。
- (4) 鋳造 CAE の結果、B 側に注湯初期の溶湯が滞留していた。これが凝固組織や物性値の差に影響した可能性が考えられる。

謝辞

本研究にあたり、引張試験片の作製、実験にご協力いただいた有限会社富士製作所に深く感謝いたします。

文献

- 1) 平塚貞人: 精密工学会誌, **84**(5), 427(2018)
- 2) 公益社団法人日本鋳造工学会編集委員会: 基礎から学ぶ鋳造工学, **318**(2015), 公益社団法人日本鋳造工学会
- 3) 梶山正孝: 鋳造技術の基礎, 序文(1978), 財団法人総合鋳物センター
- 4) 尾崎公一: アルトピア, **48**(6), 9(2018)
- 5) 公益社団法人日本鋳造工学会編集委員会: 基礎から学ぶ鋳造工学, **113**(2015), 公益社団法人日本鋳造工学会
- 6) W.Kurz and D.J.Fisher: *Fundamentals of Solidification*, **88**(1986), Trans Tech Publications
- 7) 岡本平, 村上健児: 日本金属学会会報, **25**(1), 42(1986)
- 8) 株式会社日立産業制御ソリューションズ: ADSTEFAN Ver.2021 ヘルプ