

人に優しい環境に優しい次世代医療材料の開発（Ⅱ）

坂之上 悦 典*¹

田 野 俊 昭*²

服 部 悟*³

〔要 旨〕

マグネシウム合金の調整に際し、成分元素の合金中への拡散を狙い溶解炉への振とう機構の付加を行なった。さらに、母材金属および添加元素を粒子群と考え離散要素法に基づきモデルを構築し、Java上でシミュレーションを実施し粒子間の比重差と粘性により粒子分散に相違ができる可能性を得た。

1 はじめに

環境意識の高まりに伴い、身の回りに使用される素材に対し生産の際に発生する環境負荷が少ないものや使用に際し身体への影響が少ないものへの関心が高まりつつある。とりわけ医療・福祉機器の分野においては、人体に密接に触れて使用される機会が多く素材には軽量性や高い安全性が求められる。そのため、人工骨や歯科用インプラントには生体親和性に優れたチタン合金が多く用いられるが、融点が高く機械強度が大きいため、同じ形状がなくかつ複雑な三次元形状である人体へ適合する形に機械加工もしくは鋳造を行うことが、高コストかつ難加工となり普及への障害となっている。一方、義肢などの福祉機器に用いられる素材としてはアルミニウム合金が一般的であるが、高齢化により筋力が低下したユーザに対して、より軽量で加工性に優れた素材の供給が待たれる。

そこで当センターでは、次世代材料として環境

負荷が低く軽量で生態適合性に優れたマグネシウム合金の実用化に取り組んでいるところである。¹⁾ 既報において市販マグネシウム合金を用いての義肢形状への適用や耐食性に優れた新マグネシウム合金の鋳造を実施したが、合金の成分調整に際し添加元素の分散が重要であるとの知見を得た。これに基づき、合金調整・鋳造のための溶解炉の改造と二元素成分系の分散シミュレーションを実施した。

2 実験方法

2. 1 溶解炉の改造

改造前のマグネシウム合金溶解炉の概観を図1に示す。

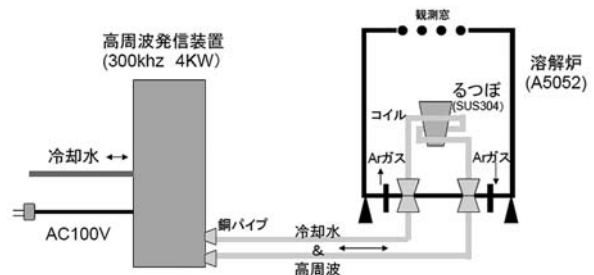


図1 装置の概観（改造前）

* 1 けいはんな分室 主任

* 2 基盤技術室 主任

* 3 基盤技術室 技師

酸素、窒素との反応性が高い合金を溶解させる

ためには、不活性ガスを充填した溶解炉中での加熱が必要である。マグネシウム金属は通電にともなうジュール熱損失が少ないため、マグネシウムと反応性が低い鉄ベースのるつぼを高周波加熱する間接加熱での溶融を行い、加熱は安全性を考慮し、内径300mm高さ300mmのアルミ合金製の溶解炉内で実施している。マグネシウム金属中へ比重の異なる金属元素を添加した場合、添加金属の不均一な拡散が認められ、合金全体の耐食性に悪影響を及ぼすことが前報において確認された。添加元素は総じてマグネシウム金属より重く、熱的な対流での攪拌が期待しにくいいため、物理的に外力により溶湯自体を攪拌する機構が必要となる。そこで、高周波通電用銅パイプにより固定された溶解炉を外力により振とうさせる機構を付加した。

2. 2 合金混合成分の拡散シミュレーションについて

合金調整時に添加される元素成分はマグネシウム金属より比重が大きい場合が多く、マグネシウム金属への溶解度が極めて大きい場合や物理的に溶液が攪拌される場合以外は、成分元素の液中への拡散は、熱による分子運動と考えられる。この場合、効率的な合金形成を行う加熱、分散条件についての知見を得るために、母材金属および添加元素を粒子群と考え、拡散に関し個々の粒子について運動方程式をたて数値計算により軌道を計算するとともに、粒子同士が接触した際のみ相互作用が働くとする離散要素法 (DEM: Distinct Element Method) に基づきモデルを構築した。²⁾

3 実験結果および考察

3. 1 溶解炉の改造状況

図2(a)に装置の全体図、図2(b)に振とうさせるために付加したアダプタの概略図を示す。図

1中の高周波コイルは、通電かつ冷却のため内部に冷却水を通す銅パイプにより構成されているため、溶解炉を振とうさせるといふ移動柔軟性に乏しい。そのため本改造では、高周波発振装置と溶解炉をつなぐ部位において図2(b)に示すアダプタを用いて電流を流す銅線と、冷却水を流す樹脂ホース部分に切り分け、溶解炉の振とうに対する追従性を確保した。

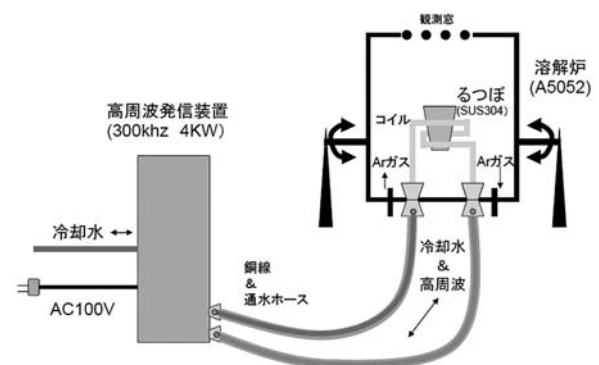


図2(a) 装置の概観 (改造後)

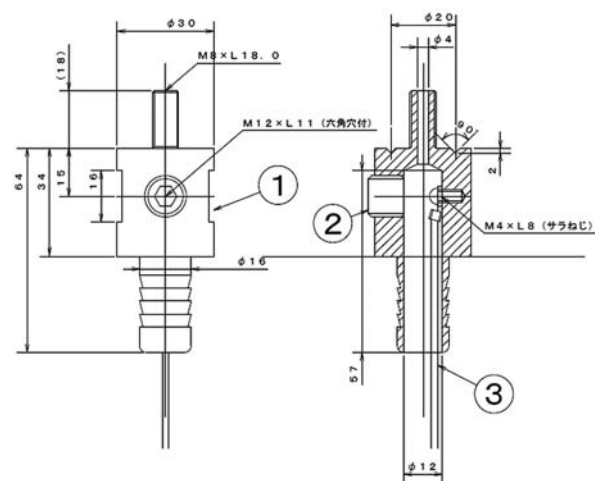


図2(b) 振とう用アダプタの概略図

3. 2 拡散シミュレーション結果および考察

対象とするマグネシウム合金溶解用るつぼは円錐台形状であるので、シミュレーションの次元を二次元とし、長方形内の円粒子の運動について検討を行った。粒子の運動方程式に用いる微分方程式の数値計算には、ルンゲクッタの4次の公式を用い、粒子の運動は並進運動の自由度のみとした。

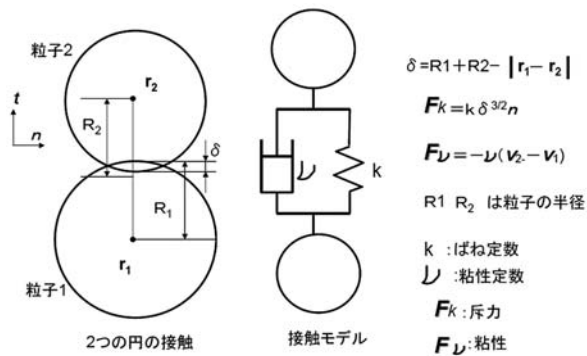


図3 粒子接触モデル

プログラム言語は、シミュレーションの汎用性を考慮してJavaを用いた。^{3) 4)} 図3のような二次元円同士の接触を想定する。この場合に作用する力として斥力 F_k と摩擦力を考えた F_v を用いた。

粒子の分散について影響を与えるものとして、粒子間の ①質量比、②粘性、③初期混合状態を考えた。シミュレーションに使用した総粒子数は252個、うち変化させた粒子は21個である。

表1 変化させる粒子の条件

種類	質量比	粘性	配置
BM1	1.1	0.7	分散
BM2	2	0.7	分散
BM3	4	0.7	分散
BD1	2	0.2	分散
CM1	2	0.7	集中
CM2	4	0.7	集中

基準となる粒子条件は、質量比、粘性係数、混合状態であり、それぞれの計算条件を表1に、得られたシミュレーション結果を経過時間（ここではSTEP数）により分類し表2に示す。表2中のそれぞれの図において、基準となる粒子は薄い丸印、質量などの条件を変えたものが濃い丸印である。構成する粒子間の初期条件について、質量比を変えたものBM1、BM2、BM3、粒子の粘性定数を変え衝突の際のエネルギー損失を少なくしたものがBD1、質量が基準の粒子と異なるものの配置を換え

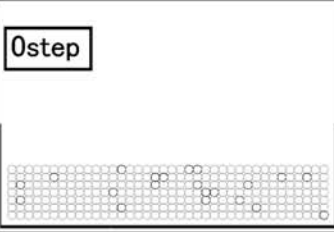
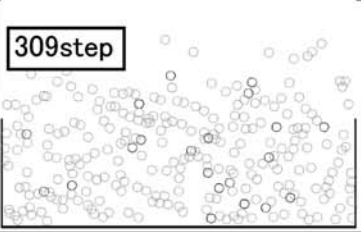

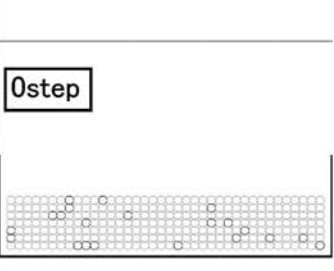
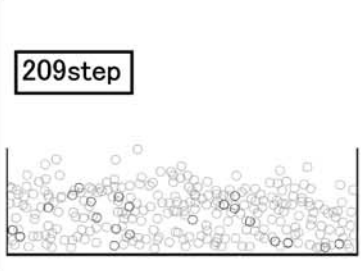
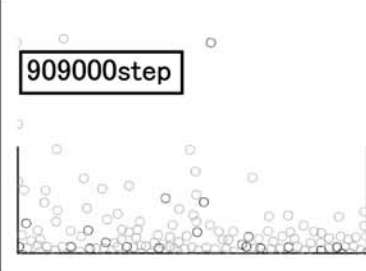
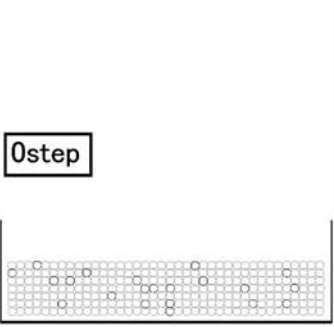
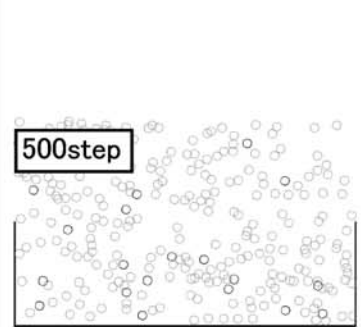
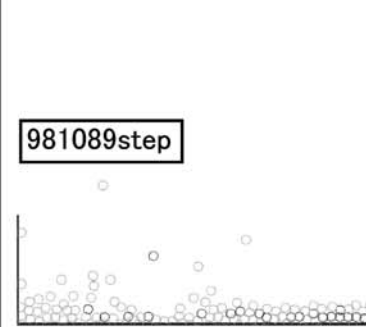
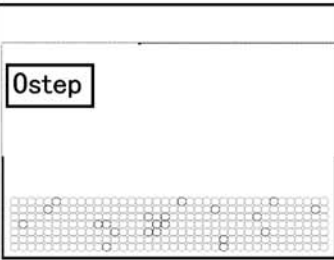
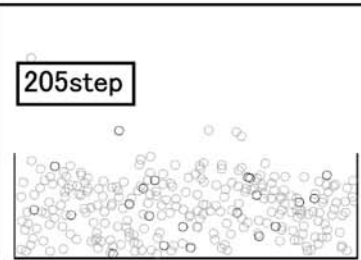




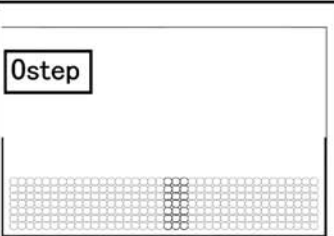
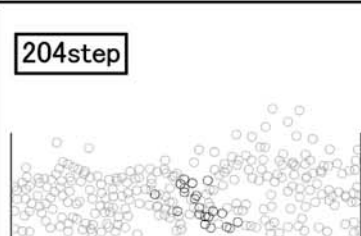
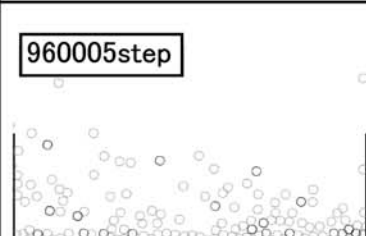
たものCM1、CM2である。粒子は初期状態で整列配置しているが、温度に相当する運動エネルギーをランダムに与えている状態である。表中ではいずれも経過時間が100万STEP程度であるが、1000万STEP程度になると各粒子は運動エネルギーを失い、十分な時間（STEP数）が経つと性状の違う粒子も均一な拡散状態となる。

比重差の影響について検討した。(表2中のBM1、BM2、BM3、CM1、CM2参照) 混合粒子が基準粒子に比して重くなると、拡散が活発な状態では均一な分散状態であるが、運動エネルギーが十分に失われてくると、重い粒子同士が固まる傾向が見られる。運動エネルギーの低下により一個あたりの衝突により動き回る領域が狭くなり、早期に重たい粒子が底部に固まることにより粒子が偏在すると考えられる。

次に、粘性の影響について検討した。(表2中のBD1、BM2参照) 初期における拡散が活発な状態では均一な分散状態であるが十分に時間が経過したときの粒子状態に低粘性のほうが粒子の偏在の相違が見られる。すなわち、粘性の影響が少ない分だけ、軽い粒子がより長い間運動エネルギーの損失が少なく動き回るため、重い粒子のほうがより早く底面に集まり偏析する傾向が見られると考える。

最後に、基準粒子と混合粒子の配置について考える。(表2中のBM2、BM3、CM1、CM2参照) 当然のことながら、拡散初期状態においては、集中配置の場合に粒子の偏析が見られるが、十分に時間が経過すると粒子の配置には顕著な違いが見られない。すなわち、運動エネルギーが十分にあれば、初期配置状態によらず十分に粒子は拡散する。

表2 粒子拡散シミュレーション結果

時間 / 区分	0step	200~500step	100000step近傍
BM1	0step 	309step 	738545step 
BM2	0step 	209step 	909000step 
BM3	0step 	500step 	981089step 
BD1	0step 	205step 	1091614step 
CM1	0step 	205step 	1288504step 
CM2	0step 	204step 	960005step 

4 まとめ

マグネシウム合金の耐食性向上のため、装置の改良および粒子拡散シミュレーションの観点から溶解状態における成分粒子の拡散対策について検討を行った。以下に得られた結論をまとめる。

- 1) 合金溶解炉における添加元素拡散性向上のため、振とう機構を考案し改良を行った。
- 2) 液中での合金添加元素の拡散性を予測するため、DEMに基づくモデルを作成した。
- 3) 作成したモデルに基づくシミュレーションを実施したところ次の3点の知見を得た。

- ① 比重差の影響については混合粒子が基準粒子に比して重くなると、拡散が活発な状態では均一な分散状態であるが、運動エネルギーが十分に失われてくると、重い粒子同士が固まる傾向が見られる。
- ② 粘性の影響については拡散が活発な状態では均一な分散状態であるが、十分に時間が経過したときの粒子状態に低粘性のほうが粒子の偏在の傾向が見られる。
- ③ 基準粒子と混合粒子の配置については十分に時間が経過すると粒子の配置には顕著な違いが見られない。

(参考文献)

- 1) 坂之上、田野、服部：京都府中小企業技術センター技報、No.34、35-38頁（2006）
- 2) 和田浩二：離散要素法（DEM）による粉体層への衝突シミュレーション、博士論文、東京大学（2004/3/25）
- 3) ジョセフ・オニール：独習Java第3版、翔泳社
- 4) 伊知地宏：計算機プログラミング I、東京大学（2001年度冬学期）

