射出成型用 AZ91D 粒子に関する研究 (第 2 報, 圧密後の有効熱伝導率に与える粒子寸法の影響)

小武内 清貴^{*1}, 福田 忠生^{*2}, 尾崎 公一^{*2}

Study on AZ91D chip for injection molding (2nd Report, Effect of dimension on effective thermal conductivity after consolidation)

Kiyotaka OBUNAI^{*1}, Tadao FUKUTA^{*2} and Koichi OZAKI^{*2}

^{*1} Faculty of Science and Engineering, Department of Mechanical and Systems Engineering, Doshisha University
1-3 Tatara-Miyakodani, Kyotanabe - shi, Kyoto 610-0394, Japan

^{*2} Faculty of Computer Science and Systems Engineering, Department of Systems Engineering, Okayama Prefectural University
111 Kuboki, Soja - shi, Okayama 719-1197, Japan

Received: 26 February 2018; Revised: 3 April 2018; Accepted: 12 June 2018

Abstract

The purpose of this study is to propose an effective model to estimate the effective thermal conductivity of compacts made from magnesium alloy particles, considering the effects of particle size, temperature and pressure. In order to investigate the influence of the particle size, six kinds of particles were prepared in which the cross sectional area was different. The test particles made from AZ91D were poured into a compression vessel and then a given pressure was applied to the piston of vessel for six hours under constant temperature condition. After compression, effective thermal conductivity of compacts were measured by steady state comparative-longitudinal heat flow method. The numerical calculation considering two-dimensional steady heat conduction was also conducted by using the actual cross section of compacts. Test results showed that the effective thermal conductivity of compacts were increased with increase of applied pressure and temperature elevation. Calculation results also revealed that by considering the actual cross section of compacts, the effective thermal conductivity could be well estimated when filling fraction is lower than 0.8. However, when filling fraction is exceed 0.8, the effect of thermal contact resistance between particles on thermal conductivity is not negligible. The experimental equation of effective thermal conductivity of compacts was determined to discuss the effects of cross sectional area of particles.

Keywords : Effective thermal conductivity, Filling fraction, Magnesium alloy, Thixomolding

1. 緒 言

マグネシウム合金 (以下, Mg 合金と略) は, 軽量かつリサイクル性が高く, 省エネルギーや環境負荷低減の観点から近年注目されている素材である. Mg 合金は塑性加工性に乏しいため, 主に鋳造法で成形されるが, ダイカスト法では防燃ガスとして使用される SF₆ (京都議定書対象物質) の温暖化係数が高いことが問題となっている. 一方, 射出成形法 (チクソモールディング法) は粒子状固体原料を成形機内で溶融し, 金型内に射出後, 成形品として取り出す手法である. 溶湯が大気に触れないことから防燃ガスが不要なことや, 成形品の機械的性質がダイカスト法に比べて優れるなどの利点がある (福田他, 2010). しかし, 射出成形機内部における Mg 合金粒子群の輸送・融解現象は高温高压のため実測が困難なことから定量的に解明されておらず, 数値解析による予測技術の構

No.18-00106 [DOI:10.1299/transjsme.18-00106], J-STAGE Advance Publication date : 19 June, 2018

^{*1} 正員, 同志社大学理工学部 (〒610-0394 京都府京田辺市多々羅都谷 1-3) (元岡山県立大学情報工学部)

^{*2} 正員, 岡山県立大学情報工学部 (〒719-1197 岡山県総社市窪木 111)

E-mail of corresponding author: kiobunai@mail.doshisha.ac.jp

築が望まれている．筆者らはこれまでに Mg 合金射出成形機内部の Mg 合金粒子群の輸送・溶解現象の数値シミュレーションを行い(尾崎他, 2007), その中で Mg 合金粒子群の見掛け物性値の定量的評価が重要であるとの知見を得た．粒子群の見掛け物性値は, 粒子の物性値と粒子間に存在する流体の物性値, そして粒子の質量分率から推算できる(日本物性学会, 2008) ことが知られており, 例えば有効熱伝導率については粒子群を分散系混合物と見なして推定する試みが行われている(山田, 1989)．有効熱伝導率の推定には球状粒子を仮定した Maxwell の式(Maxwell, 1904) や, Bruggeman の式(Bruggeman, 1935), 粒子形状を考慮した Hamilton の式(Hamilton and Crosser, 1962) 等が用いられている．しかし, これらの研究で対象としている粒子寸法は, 本研究で対象とする Mg 合金粒子群のそれに比べ小さく, 粒子形状についても差異があることから, 従来の結果を適用できないものと予想される．

そのため, チクソモールドイング射出成形機内の Mg 合金粒子の現象を解明するためには, 粒子充填層の見掛け物性値を測定する必要がある．筆者らは過去に Mg 合金を用いて粒子圧密体を作製し, そのかさ密度に与える温度, 見掛け圧力の影響について調査を行い, 粒子寸法に関する実験整理式にまとめた(小武内他, 2015)．本報では前報と同様に, Mg 合金を用いて作製した粒子圧密体を用い, その有効熱伝導率に与える圧密条件ならびに粒子寸法の影響を調査した．具体的には, チクソモールドイング法で実際に使用されている Mg 合金粒子と, 実際に使用されているものと異なる形状の Mg 合金粒子を用いた加熱・圧縮実験によって, Mg 合金粒子圧密体を作製し, その有効熱伝導率の測定を行った．そして, 圧密体の有効熱伝導率に与える粒子形状および温度, 圧力の影響についてそれぞれの粒子を比較し, 検討を行った．これらを踏まえ, Mg 合金粒子圧密体の有効熱伝導率予測式を提案する．

2. 実験装置及び方法

2.1 供試 Mg 合金粒子

供試材として, Mg 合金粒子 AZ91D ((株) 日本製鋼所 製) を用いた．表 2 に粒子寸法の数量 100 についての平均値 X_m, Y_m, Z_m (長いものより順に X, Y, Z と定義) と標準偏差 $\sigma_X, \sigma_Y, \sigma_Z$ を示す．さらに, Y と Z で形成する断面の面積 S_m と粒子形状も示す．なお, 粒子 C は実際に射出成形機で使われている粒子である．粒子 A ~ E に関しては, 断面積の影響を検討するため, X_m をほぼ等しくし, S_m を変化させている．粒子 C を基準とすると, 粒子 A, B, D, E の S_m はそれぞれ粒子 C の 0.4, 0.7, 1.5, 1.8 倍となっている．また, 粒子 F に関しては, X_m が粒子 C の 1.2 倍, S_m が粒子 C の 4.9 倍となっている．写真から分かるように粒子はいずれも概ね直方体である．

2.2 マグネシウム合金粒子充填層の作製法

前述の粒子を円筒型圧縮容器に 32 g 充填し, 加熱・圧縮し, 多孔質体(以下, 試料と呼ぶ)を作製した．試料の作製条件については, 前報(小武内他, 2015)と同様とした．容器から取り出した試料の直径 d と厚さ h 及び質量 m を測定し, これらの計測値から得たかさ密度 ρ_a と Mg 合金の密度 ρ_s から充填率 ρ_a/ρ_s を算出した．充填率の値は, 空隙に存在する空気の影響を無視し, 次式により求めた．

Table 1 Dimensions of test Mg alloy particles.

Particle	A	B	C	D	E	F
X_m [mm]	4.25	4.28	4.27	4.39	4.42	5.19
Y_m [mm]	1.07	1.40	1.62	2.08	2.34	3.10
Z_m [mm]	0.50	0.69	0.77	1.08	1.19	2.12
σ_X [mm]	0.09	0.13	0.09	0.15	0.17	0.66
σ_Y [mm]	0.12	0.21	0.26	0.16	0.23	0.39
σ_Z [mm]	0.09	0.18	0.30	0.16	0.24	0.38
S_m [mm ²]	0.37	0.57	0.83	1.22	1.42	3.35
Shape

Fig. 1 Measuring apparatus of effective thermal conductivity.

$$\rho_a/\rho_s = \frac{4m}{\rho_s \pi d^2 h} \quad (1)$$

2.3 有効熱伝導率測定概要及び測定方法

本研究では有効熱伝導率の測定方法として、熱容量等を考慮する必要のない定常比較法を採用した。まず、試料の厚さ h を測定し加熱面と冷却面とで挟み込んで試験部に固定した。その際、伝熱面と試料の接触を良くするため試料の表面を研磨し、加熱面と冷却面にシリコンオイルを塗布した。次いで、試験部を断熱材で覆った後に、試料上面を 323 K に加熱、下面を 288 K に冷却した。加熱面と冷却面の温度が十分に安定したことを確認後、加熱面温度と冷却面温度、試料を通過する熱流束を計測し、これらの値から有効熱伝導率を算出した。

試験部の詳細を図 1 に示す。冷熱供給には恒温水槽 (EYELA 製: NCB-3100, 温度制御精度 ± 0.03 K)、熱供給には加熱ヒータ (CHINO 製温度調節器: DB1000) を用いた。加熱面温度および冷却面温度を測定するためにそれぞれ T 型熱電対 (素線直径 0.1 mm) を接続し、試料を通過する熱流束は、冷却面下部に設置した熱流束センサ (Captec 製: 感度 $0.455 [\mu V/(W/m^2)]$) を用い測定した。

測定に際し、熱伝導率が既知であるハウケイ酸ガラス, SUS305, S35C, AZ31 および AZ91D の 5 つ円盤状試料 (直径 50 mm, 厚さ 5, 7, 10, 20 mm) を用いて測定精度を検証したところ、本装置の測定精度は $\pm 15\%$ 程度であった。

2.4 試料断面の観察および数値計算による有効熱伝導率の算出

有効熱伝導率を測定した試料の断面を観察した。各試料を放射状に 4 分割し、その 1 断面のデジタル画像より Mg 合金部分を白色、空隙部を黒色とする二値化画像を得た。この断面画像を用い、数値計算により試料の有効熱伝導率推定を試みた。計算に用いた物理モデルを図 2 に示す。計算領域は $H \times L$ (図 2 の例では、 $12.9 \text{ mm} \times 21.8 \text{ mm}$) の長方形とし、二次元定常熱伝導状態を仮定した。境界条件は左右面を断熱条件 ($\partial T/\partial x = 0$)、上面を等温加熱条件 ($T = T_h$)、下面を等温冷却条件 ($T = T_c$) とした。支配方程式の離散化にはコントロールボリューム法を用い、計算格子には二値化画像のピクセルを用いた。なお、図 2 の例では、画素寸法は $49.5 \mu\text{m} \times 49.5 \mu\text{m}$ であり、計算格子点数は縦 260 $\times$ 横 440 である。

3. 実験結果および考察

3.1 有効熱伝導率の温度および圧力依存性

試料作製時の見掛け圧力 $P_a = 5.0 \text{ MPa}$ について各試料毎の有効熱伝導率 λ_e と試料作製温度 T_m との関係をそれぞれ示す。図中、破線にて AZ91D の熱伝導率 λ_s (ASM International, 1999) を併記している。いずれの試料において

Fig. 2 Physical model for calculation.

も、有効熱伝導率 λ_e は温度 T_m の上昇に伴い大きくなる傾向にあるが、図 3 (b) の $T_m = 573 \text{ K}$ と 623 K のように、 λ_e が逆転している場合が見られる。これは、本実験では高温で圧縮した試料を常温に冷却してから有効熱伝導率を測定しているため、冷却時の熱収縮により粒子同士の接触部にわずかな隙間が生じたためと考えられる。次に、各試料を比較する。図 3 (a) の試料 A ～ 図 3 (e) の試料 E に関しては、 $T_m = 473 \sim 573 \text{ K}$ の温度域で λ_e の増加が大きくなる傾向にあるが、図 3 (f) の試料 F は $T_m = 623 \sim 723 \text{ K}$ での増加が大きくなっている。これは、試料 F のかさ密度が急激に増大する温度域が、試料 A ～ E と異なるためと考えられる。また、試料 A, B は、 $T_m \geq 623$ の温度域において、試料 C ～ F と比較して λ_e が低くなっていることがわかる。次に、試料 A, C および F の見掛け圧力 $P_a = 2.5, 5.0$ および 10 MPa における λ_e と T_m との関係を図 4 に示す。 P_a の影響について観察すると、 T_m が一定の条件では、 λ_e は P_a の増加に伴って増大することが分かる。これは、 P_a の増加に伴い Mg 合金粒子同士の接触面積が増加し、試料内の Mg 合金が成す連続相が増加するためと考えられる。

Fig. 3 Variations of λ_e with T_m . Regardless of type of particles, λ_e was increased with temperature elavation.

Fig. 4 Variations of λ_e with P_a . Regardless of type of particles, λ_e was increased with increase of applied pressure.

Fig. 5 Variations of λ_e/λ_s with ρ_a/ρ_s . By using the numerical calculation, the effective thermal conductivity of compacts were well estimated, while the conventional estimation method shows poor agreement.

3.2 従来法および数値計算による試料の有効熱伝導率推定結果

従来の研究においては、有効熱伝導率は分散相および連続相の熱伝導率、そして充填率の関数として表現されている。これらを参考に本実験結果を λ_e/λ_s 対 ρ_a/ρ_s の座標上にプロットしたものが図5である。なお本研究で用いた Mg 合金粒子の熱伝導率は、インゴットからの切削時に導入された欠陥や、その後の加熱圧縮実験において生じる回復、再結晶や塑性変形の影響を受けるが、実験毎に Mg 合金粒子の熱伝導率を評価するのは困難なため、データ整理にはバルク材の熱伝導率 $\lambda_s = 51 \text{ W/(m·K)}$ (ASM International, 1999) を用いている。また空気については乾燥空気の熱伝導率 $\lambda_{air} = 0.026 \text{ W/(m·K)}$ (日本機械学会, 2000) を用いている。同図中には、分散相の体積率が小さく、充填粒子がそれぞれ独立して存在すると仮定した場合に用いる Maxwell の式 (2) を一点鎖線で、充填粒子間の温度場の干渉を考慮した Bruggeman の式 (3) を破線で併記してある。いずれの式に関しても、Mg 合金を連続相、空気を分散相と考えた場合と、空気を連続相、Mg 合金を分散相と考えた場合の双方を記入している。以下に、Maxwell, Bruggeman の式を示す。

Fig. 6 Variations of λ_e/λ_s with S_m . The dependence of λ_e/λ_s on S_m were significant when ρ_a/ρ_s was high.

Fig. 7 Variations of λ_e/λ_s with P_a . The dependence of λ_e/λ_s on P_a is relatively lower comparing that on ρ_a/ρ_s .

$$\frac{\lambda_e}{\lambda_c} = \frac{2 + \lambda_d/\lambda_c - 2(1 - \varepsilon)(1 - \lambda_d/\lambda_c)}{2 + \lambda_d/\lambda_c + (1 - \varepsilon)(1 - \lambda_d/\lambda_c)} \quad (2)$$

$$\frac{\lambda_e/\lambda_c - \lambda_d/\lambda_c}{1 - \lambda_d/\lambda_c} \left(\frac{\lambda_e}{\lambda_c} \right)^{-1/3} = \varepsilon \quad (3)$$

ここで、 λ_c 、 λ_d および ε はそれぞれ、連続相の熱伝導率、分散相の熱伝導率および空隙率を示す。加えて、同図中には、試料の実断面画像を用い、数値計算により算出した λ_e/λ_s を併記した。

いずれの試料も、 ρ_a/ρ_s の増加に伴い λ_e/λ_s は大きくなる傾向にあり、Mg 合金粒子を分散相と考えた場合の従来の式による予測値よりも大きい値となっていることがわかる。しかし、Mg 合金を連続相と考えた場合の予測値に比べると、 λ_e/λ_s の実験値は小さい値となっていることから、粒子同士の接触点には接触熱抵抗が生じていると考えられる。数値計算によって算出した有効熱伝導率と実験値とを比較した場合、 $\rho_a/\rho_s < 0.8$ の領域においては、計算結果は実験値と良い一致を示した。一方、 $\rho_a/\rho_s > 0.8$ の領域においては、計算結果は実験値よりも大きくなる傾向が見られた。これは、計算において粒子間は連続としてモデル化したため、前述の粒子同士の接触点における接触熱抵抗を考慮していないためである。

また、各試料を比較していくと、図 5 (c) の試料 C ～ 図 5 (f) の試料 F については、 ρ_a/ρ_s の増加に伴う λ_e/λ_s の増加傾向は同様であったが、図 5 (a) の試料 A と図 5 (b) の試料 B については、 $\rho_a/\rho_s > 0.8$ の領域で、試料 C ～ F に比べて λ_e/λ_s が小さくなった。これは、粒子 A、B の体積が小さく、充填層内の粒子数が増したことにより接触熱抵抗の影響が大きくなったためと考えられる。

このことを検討するため、図 6 に粒子の平均断面積 S_m と有効熱伝導率比 λ_e/λ_s との関係について示す。充填率 $\rho_a/\rho_s = 0.6, 0.7$ の結果について見ると、粒子断面積 S_m の違いによる λ_e/λ_s の変化は小さいが、 $\rho_a/\rho_s = 0.8, 0.9$ では $S_m < 0.6 \text{ mm}^2$ における λ_e/λ_s が、 $S_m < 0.8 \text{ mm}^2$ の場合に比べて低くなっている。これより、 $S_m < 0.6 \text{ mm}^2$ の領域では、 ρ_a/ρ_s が増加するにつれて接触熱抵抗の影響が顕著となっていることがわかる。

次に、試料 A, C および F の見掛け圧力 $P_a = 2.5, 5.0$ および 10 MPa における λ_e/λ_s と ρ_a/ρ_s の関係を図 7 に示す。 P_a の影響について観察すると、 λ_e/λ_s は、 P_a の違いによらず概ね同様な傾向となっている。よって、全体的には P_a の影響は小さいと考えられる。

3.3 Mg 合金粒子圧密体の有効熱伝導率推定式の予測式構築

これまでに述べたように、Mg 合金粒子圧密体の有効熱伝導率は、充填状態や粒子同士の接触状態に大きく影響される。圧密体の断面を観察し、数値解析することによって比較的精度良く有効熱伝導率を予測可能であるが、粒子間の接触熱抵抗の影響を考慮し正確な熱流モデルを構築することは、現段階では難しい。そこで本研究では以下の式を用いて有効熱伝導率の結果の整理を試みた。

$$\frac{\lambda_e}{\lambda_s} = \frac{\rho_a/\rho_s}{1+f} + (1 - \rho_a/\rho_s) \frac{\lambda_c}{\lambda_d} \quad (4)$$

ここに、 $f = RA\lambda_s/l$ 、 R は接触熱抵抗、 A は接触面積、 l は熱流方向の接触点間距離である。また、Mg 合金は連続相として取り扱った。 A 、 l は粒子寸法と充填状態に影響され、 R はこれらに加えて流体の熱伝導率にも影響を受けると考えられる。 f は充填率 ρ_a/ρ_s と S_m の関数 $f(\rho_a/\rho_s, S_m)$ と考え、 $\rho_a/\rho_s = 1$ で $\lambda_e/\lambda_s = 1$ となるよう

$$f(\rho_a/\rho_s, S_m) = \sum_{i=1}^4 (-1)^i C_i(S_m)(1 - \rho_a/\rho_s)^i \quad (5)$$

Fig. 8 Variation of C_1 , C_2 , C_3 and C_4 with S_m . By considering the dependence of parameters on S_m , the C_1 , C_2 , C_3 and C_4 was well fitted by eq. (6).

Fig. 9 Fitted results of λ_e/λ_s with ρ_a/ρ_s . The estimation of proposed model showed good agreement between experimental results.

とした．ここに係数項 $C_i(S_m)$ は先に述べた S_m の変化によって生じる R および A の変化を示す項であり，下記の関数形を用いた．

$$C_i(S_m) = \alpha \left(-\frac{\chi}{(\sqrt[4]{S_m} + \delta_s)^2} + \frac{\psi}{(\sqrt[4]{S_m} + \delta_s)^4} \right) + \delta_c \quad (6)$$

ここで右辺括弧内第一および第二項はそれぞれ， S_m の変化に伴う接触点間距離の変化および接触面積の変化を示す項である．よって χ および ψ はそれぞれ，接触点間距離および接触面積の S_m への依存性を表す係数であり， α ， δ_s および δ_c はそれぞれフィッティングパラメータである．

試料 A ～ 試料 F のそれぞれの実験結果に対して最小自乗法を適用し，式 (5) へのフィッティングを行った．こうして $C_i(S_m)$ の近似値 (図 8 中白丸のプロット) を得た．この結果に対し，再度最小自乗法を適用することによって式 (6) へのフィッティングを試みた．なお， δ_s については試行錯誤的に決定し， $\delta_s = -0.5$ とし近似式を求めた．図 8 に C_1 ， C_2 ， C_3 および C_4 の算出結果 (図中白丸) と粒子断面積 S_m との関係を示す．

Table 2 Fitted parameters.

Parameter	χ	ψ	δ_c	α
C_1	10.0	0.800	-12.0	-0.390
C_2	27.0	2.10	-95.0	-1.70
C_3	39.5	2.97	-262	-4.00
C_4	57.0	4.20	-200	-3.2

また図中破線にてフィッティング結果を，表 2 に各係数の近似値をそれぞれ示す．図より本研究で提案する関数形にて，粒子形状の違いが圧密体中での各粒子の接触点間距離および接触面積に及ぼす影響を表現可能であることが見て取れる．また全ての係数項にて接触点間距離への依存性を表す係数である χ が，接触面積への依存性を表す係数である ψ よりも 10 倍程度大きいことから，本研究にて作製した圧密体中での熱伝導においては，接触面

積よりも接触点間距離の影響が大きいと思われる。また、試料 A ～ 試料 F の実験結果と式 (4) ～ (6) で得られた実験整理式との関係を図 9 に示す。この図から、予測結果と本実験結果が比較的一致しており、本研究で提案する実験整理式を用いて、粒子断面積 S_m の違いによる有効熱伝導率の変化様相を概ね予測可能であることが分かった。

4. 結 言

本研究では、形状寸法の異なる射出成形用 AZ91D 粒子を使用し、種々の温度、圧力条件で加熱圧縮を行い、圧密体を作製し、その有効熱伝導率に与える粒子寸法の影響を調査し、以下の結言を得た。

1. 圧密体の有効熱伝導率は成形温度および成形圧力の増加に伴って増加した。これは成形温度および成形圧力の増加に伴って、AZ91D 粒子同士の接触面積が増加し、圧密体内の AZ91D が成す連続相が増加するためと考えられる。
2. 圧密体の有効熱伝導率を、圧密体の断面画像を用いた二次元定常熱伝導より求めたところ、0.8 程度までの充填率の条件においては、計算結果は実験値と良い一致を示した。一方 0.8 以上の充填率の条件においては、計算結果は実験値よりも大きくなった。これは高充填率の条件では、粒子同士の接触点における接触熱抵抗が生じているためと考えられる。
3. 圧密体の有効熱伝導率は、粒子の断面積、充填率の関数として表現でき、有効熱伝導率に関する予測式を得た。

謝 辞

本研究を実施するに際して、各種チップの提供を行っていただいた(株)日本製鋼所に謝意を申し上げる。

文 献

- ASM International, Magnesium and Magnesium Alloys (1999), p.70.
- Bruggeman, D.A.G., Berechnung verschiedener physikalischer konstanten von heterogenen substanzen, Annalen der Physik, Vol.24, No.5(1935), pp.636-664.
- 福田忠生, 尾崎公一, 真角祐樹, 半溶融成形法による比較的厚い AZ91D 合金製平板の相対密度と曲げ強度に及ぼす溶湯温度とゲート流速の影響, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.76, No.761(2010), pp.89-95.
- Hamilton, R.L. and Crosser, O.K., Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems, Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals, Vol.1, No.3(1962), pp.187-191.
- 日本機械学会編, 機械工学便覧: A6 熱工学 (2000), p.172.
- 日本物性学会編, 熱物性ハンドブック (2008), p.190.
- Maxwell, J.C., A treatise on Electricity and Magnetism, Oxford Univ. Press (1904), p.365.
- 小武内清貴, 福田忠生, 尾崎公一, 射出成形用 AZ91D 粒子に関する研究 (第 1 報, 圧密後のかさ密度に与える粒子寸法の影響), 日本機械学会論文集, Vol.81, No.830(2015), DOI:10.1299/transjsme.15-00259.
- 尾崎公一, 藤井俊樹, 福田忠生, 辻和也, 武谷健吾, 早川悌二, マグネシウム合金の射出成形技術に関する基礎研究: 第 3 報, マグネシウム合金粒子群の輸送・融解シミュレーション, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.73, No.727(2007), pp.360-367.
- 山田悦郎, 分散系混合物の有効熱伝導率, 熱物性, Vol.3, No.2(1989), pp.78-83.

References

- ASM International, Magnesium and Magnesium Alloys (1999), p.70.
- Bruggeman, D.A.G., Berechnung verschiedener physikalischer konstanten von heterogenen substanzen, Annalen der Physik, Vol.24, No.5(1935), pp.636-664.
- Fukuta, T., Ozaki, K. and Masumi, Y., Influence of slurry temperature and gate velocity on relative density and bending strength of relatively thick AZ91D plate made by semi-solid molding, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol.76, No.761(2010), pp.89-95 (in Japanese).
- Hamilton, R.L. and Crosser, O.K., Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems, Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals, Vol.1, No.3(1962), pp.187-191.

- Japan Society of Mechanical Engineers ed., JSME Mechanical Engineers' Handbook: A6 Thermal Engineering (2000), p.172 (in Japanese).
- Japan Society of Thermophysical Properties ed., Thermophysical properties handbook (2008), p.190 (in Japanese).
- Maxwell,J.C., A treatise on Electricity and Magnetism, Oxford Univ. Press, (1904), p.365.
- Obunai,K. , Fukuta,T. and Ozaki,K., Study on AZ91D chip for injection molding(1st Report, Effect of dimension on bulk density after consolidation), Transactions of the JSME (in Japanese), Vol.81 , No.830(2015) , DOI:10.1299/transjsme.15-00259.
- Ozaki,K., Fujii,T., Fukuta,T., Tsuji,K., Takeya,K. and Hayakawa,T., Fundamental study on injection molding of magnesium alloy : 3rd Report, Numerical simulation on transport and melting phenomena of Mg alloy particles Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A , Vol.73, No.727(2007), pp.360-367 (in Japanese).
- Yamada, E. , Effective thermal conductivity of dispersed materials, Netsu Bussei , Vol.3, No.2(1989), pp.78-83 (in Japanese).