

チクソモールディングにおける溶融現象の理論的考察

Theoretical Consideration of Melting Phenomenon in Thixomolding™



中川 一馬*
Kazuma Nakagawa



川邊 主税**
Chikara Kawabe



博士(工学) 尾崎 公一***
Dr. Koichi Ozaki

要 旨

チクソモールディングとは、マグネシウム合金の射出成形である。チクソモールディング機において、マグネシウム合金の溶融現象を考察した。マグネシウム合金の溶融はシリンダ内の伝熱現象として熱流束で表現できる。しかし、マグネシウム合金のシリンダ内での溶融現象については、プラスチックにおける Tadmor の理論のような考え方がほとんど示されていない。そこで、本報告ではこのマグネシウムの溶融現象を考察し、Tadmor の理論と比較することで、シリンダ内における現象の理論化を図った。

— Synopsis —

Thixomolding is injection molding of magnesium alloys. We considered about melting phenomenon of magnesium alloys in injection molding machine. It showed by heat flux in the barrel. But this phenomenon was not showed in a theory such as plasticating extrusion by Z.Tadmor. In this report we suggested a theoretical consideration about melting phenomenon of magnesium alloys and compered Tadmor's theory and this consideration.

1. 緒 言

チクソモールディングとは、マグネシウム合金の射出成形である。本報告では、チクソモールディングとプラスチックの射出成形を比較し、両者のスクリュの考え方の共通点と相違点から、シリンダ内の物理現象を考察する。

両者はともにインライン式の射出成形機でチップもしくはペレットをホッパ口から投入する方法は同じである。また、金型に溶融体を射出して冷却し、製品取り出す工程も同じである。しかし、マグネシウム合金とプラスチックは溶融物性に差があるので、チクソモールディングとプラスチックの射出成形ではシリンダ内の物理現象が異なる。このため、成形条件も異なり、計量方法について、チクソモールディングではサックバック(スクリュを強制的に後退)しながら計量するが、プラスチックの射出成形機は背圧をかけて計量する。また、シリン

ダ温度もマグネシウム合金では 600℃ 以上となるがプラスチックは 250℃ 程度のものが多い点でも違いがある。

スクリュの考え方に焦点を当てると、チクソモールディングには代表的な理論はないが、プラスチックでは Tadmor⁽¹⁾ の理論に代表されるようにスクリュでの樹脂溶融現象に対して理論的な考察がなされている。したがって、チクソモールディングにおいても、マグネシウム合金の溶融輸送理論を構築することは重要であると考えた。マグネシウムの溶融輸送現象を示した先例として、尾崎⁽²⁾ は Darnell と Mol が示したプラスチックプラグの固体輸送理論を円筒座標系で書き換え、移流を計算し、同時に伝熱も計算する方法を示した。本報告では、この移流と伝熱を計算する方法を踏襲しながら、Darnell と Mol の固体輸送理論はオリジナルに近いものを使用し、計算の簡便化と共に基礎理論の構築を行った。

*: 広島製作所 技術開発部
Technical Development Department,
Hiroshima Plant

** : 広島製作所 MG 技術部
Magnesium Injection Molding Machinery Engineering Department,
Hiroshima Plant

***: 岡山県立大学 情報工学部
Faculty of Computer Science and Systems Engineering,
Okayama Prefectural University

2. 射出成形機のスクリュ形状

チクソモールディング機のスクリュはフルフライトスクリュであり、プラスチックの射出成形機のスクリュは一般的にフルフライトスクリュとバリアフライトスクリュである。

チクソモールディングのスクリュ（図1）に求められる機能としては、固体輸送でマグネシウム合金が輸送できることが重要となる。このため、Darnell と Mol の固体輸送理論に示されている通り、シリンダー-マグネシウム合金間のまさつ力とスクリュ-マグネシウム合金間のまさつ力のバランスが理論的な考え方の基礎となる。

一方、プラスチックのスクリュ（図2）では溝付きシリンダを使う場合など固体輸送になる場合もあると考えられるが、一般的に樹脂には粘性があるため、Tadmor のスクリュ式に見られるように、計量部でのけん引流で送り能力が決まることが多いと考えられる。このとき、計量部の樹脂の流れは背圧の影響を受けるので、計量部はけん引流と圧力流の2つの流れのバランスをとる必要がある。また、樹脂の溶融、昇温もシリンダからの伝熱だけでなくスクリュ回転によるせん断発熱があるため、流れだけでなく、温度に関わるせん断発熱とのバランスも考えて設計する必要がある。上記のようなプラスチックの設計要素を満足させつつ、さらに混練や均温化、溶融促進などを向上させるためにバリアフライトスクリュも使用される。

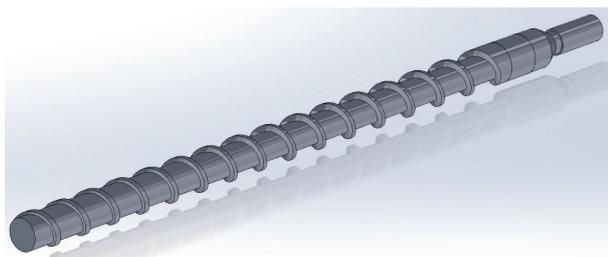


図1 スクリュ (チクソモールディング)

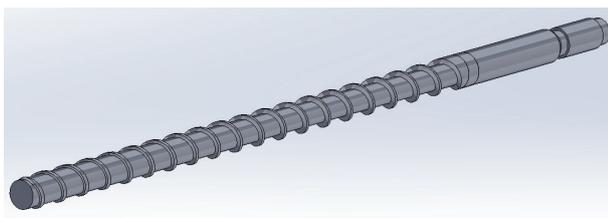


図2 スクリュ (プラスチック射出成形)

しかし、チクソモールディングでは、後述するマグネシウム合金の溶融物性を考えると溶融時のせん断発熱が期待できないので、バリアフライトスクリュは効果を発揮しない可能性もある。そこで、今回の考察では、スクリュをフルフライトスクリュに限定した。

3. 成形材料の比較

3.1 熱伝導率

マグネシウム合金の熱伝導率は $50 [W/(m \cdot K)]$ のオーダーである。一方、プラスチックの熱伝導率は $0.2 [W/(m \cdot K)]$ 程度⁽³⁾のことが多い。よって、チクソモールディングでは、プラスチックの射出成形と比較して、伝熱が支配的になると考えられる。

表1 熱伝導率 $[W/(m \cdot K)]$

	種類	$[W/(m \cdot K)]$
マグネシウム合金	AZ91D	51
	AM50A	65
プラスチック	PC	0.20
	PA6	0.24
	PS	0.13
	PP	0.15
	LDPE	0.33
	HDPE	0.50

3.2 溶融体の粘度

マグネシウム合金の溶融粘度は $10^{-3} [Pa \cdot s]$ ^{(4) (5)} のオーダーであると考えられるので、粘度はせん断発熱への影響は小さいとみなして、一定として取り扱うこととした。一方、プラスチックは粘度が $100 [Pa \cdot s]$ のオーダーであることが多く、温度とせん断速度に依存性がある。以上から、チクソモールディングではスクリュでの可塑化計算のとき、せん断発熱は計算しないモデルを使用することとした。

3.3 エンタルピー

マグネシウム合金では、液相線温度 T_l [°C] と固相線温度 T_s [°C] の間で融解潜熱を割り振る形でエンタルピー E [J/kg] を決定する計算方法をとることとした (図3)。本来、マグネシウム合金の温度-エンタルピーカーブは直線を描くものとは考えにくいですが、融解潜熱を含めたエネルギーバランスをとった計算の容易さから、線形近似させた。この近似を行ったことで、マグネシウム合金の半溶融状態を計算で表現することができた。

一方、プラスチックでは結晶性樹脂なら基本的には比熱は測定カーブに沿わせるが、固体比熱と溶融比熱に分けたうえで、融解潜熱のピークは融点の1点と近似できる。このため、 T_s と T_l がイコールの形となる。非晶性樹脂では、固体比熱と溶融比熱に分けることで結晶性樹脂と同様の計算が可能である。

以上から、チクソモーディングでは、エンタルピーのカーブを線形近似の方法でモデル化し、スクリュウでのマグネシウム合金の溶融計算を実施した。

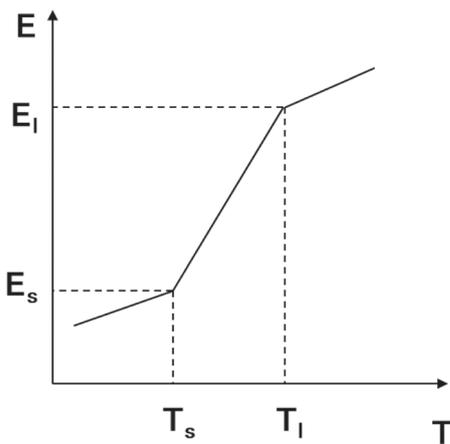


図3 マグネシウム合金のエンタルピーと温度のモデル

4. チクソモーディングの伝熱と輸送理論

4.1 シリンダ内での物理現象

マグネシウム合金の移動現象を考えると、スクリュウ先端に溜まっている溶融したマグネシウム合金は粘度が低く、送りに影響しないと考えた。さらに、プラスチックで使われている Tadmor のスクリュウ式は流体に粘性があることが前提のため、マグネシウム合金には適さないと考えた。マグネシウム合金の移動現象には、マグネシウム合金チップとシリンダ並びにスクリュウとの摩擦力が重要と考え、Darnell と Mol が示した固体輸送理論を用いた。

4.2 スクリュによるマグネシウム合金の送り能力

チクソモーディングにおけるスクリュウでの送り能力は固体輸送能力で説明できると考えられる。スクリュウの固体輸送理論は Darnell と Mol がプラスチックの固体をプラグと考え、輸送することを想定した理論である。ここで、チクソモーディングにおいて、チップをホッパ口から投入する点は、プラスチックの射出成形機において、ペレットをホッパ口から投入する点が原料の投入方法として同じである点は先に述べた。また、スクリュウのフルフライト部分で原料を送る機能を考えたとき、両者は同じである。Darnell と Mol の固体輸送理論において、固体圧力上昇は以下の式であらわされる。

$$P_{n+1} = P_n \exp\left(\frac{(B_1 - A_1 K)}{(A_2 K + B_2)} dz\right) \quad (1)$$

ここで、圧力 $P_{n+1} = P_n$ となるように、スクリュウ軸方向の力のつり合いとスクリュウ軸まわりのトルクのつり合いを考え、チップの移動角 θ を取束計算で求めることで、プラグの固体輸送量 Q を求めることができる。A、B、K はトルクと力のつり合いから決まる (図4)。dz[m] はスクリュウ軸方向距離である。

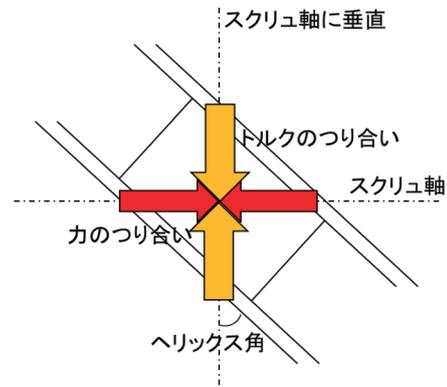


図4 固体輸送理論模式図

また、プラグの体積輸送量 Q [m³/s] は以下の式であらわされる。

$$Q = \pi^2 D h (D - h) \tan\theta \tan\phi / (\tan\theta + \tan\phi) N / 60 \quad (2)$$

ここで、 N [min⁻¹] はスクリュウ回転数、 θ [rad] はチップの移動角、 ϕ [rad] はヘリックス角、 D [m] はスクリュウ径、 h [m] はスクリュウ溝深さである。

また、チクソモールディングではサックバックしながら計量するが、サックバック速度よりも速く溶融マグネシウム合金を送る必要があると考えた。そうでなければ、計量した溶融マグネシウム合金に空間ができてしまい、成形不安定の要因となると考えられるためである。このため、実際には、サックバックで空間ができないよう、固体輸送で充填可能なスクリュ回転数の設定をしていると考えられる。

4.3 マグネシウム合金の溶融モデル

マグネシウム合金はシリンダに取り付けられたヒータからの伝熱によって溶融する。エンタルピーが固相線温度を超えたところから溶融開始し、液相線温度を超えると完全溶融する。マグネシウム合金については、3.3節で記述したとおり、溶解潜熱を割り振る形でエンタルピーを決定する計算方法をとることで半溶融状態を表現するモデルとした。

一方、プラスチックの溶融形態は Tadmor の3ゾーンモデル(図5)で一般的にあらわされる。Tadmorの3ゾーンモデルとはスクリュ溝内で引き側にソリッドベッド、押し側にメルトプールが存在し、ソリッドベッドとシリンダの間にメルトフィルムが存在するというモデルである。樹脂は基本的にメルトフィルムのせん断発熱とシリンダからの伝熱でメルトフィルムとソリッドベッドの界面から溶融すると考える。このため、融解潜熱と温度変化分のエネルギーが樹脂にかかり、わずかな時間で少量

の樹脂が溶融するモデルとなる。

マグネシウム合金の場合のシリンダからの伝熱は熱流束を用いて表現した。このとき、スクリュとマグネシウム合金の境界は断熱、シリンダとマグネシウム合金の境界では熱伝導率 $k[W/(m \cdot K)]$ は調和平均を用いるモデルとした。熱の流れ $Q_{mg}[J]$ は、節点間長さ $dl[m]$ 、熱の通過面積を $A[m^2]$ 、節点間温度差を $dT[^\circ C]$ として、以下であらわせる。

$$Q_{mg} = k (dT/dl) A dt \quad (3)$$

チクソモールディングでの一般的な溶融モデルはないが、マグネシウム合金の固体密度が溶融密度に比べて大きいこと、溶融粘度が小さいことを考えると、スクリュが回転していない時間は重力の影響を受け、固体が地面側へスクリュ溝内で移動していると考えられる。しかし、スクリュが回転している時間は、スクリュ溝内のマグネシウム合金について、固液は均一に混合されると仮定する。図6にシリンダからマグネシウム合金に伝熱するモデルを示す。このとき、座標はスクリュ軸を中心とした軸対称2次元とした。伝熱の計算ではシリンダの温度制御も含め、熱伝導方程式を解くことで各接点の温度を求めた。

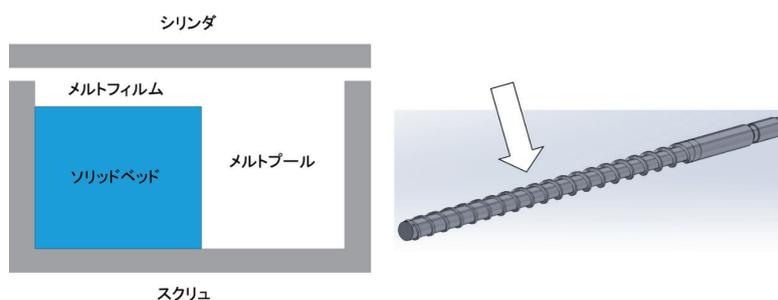


図5 Tadmorの3ゾーンモデル

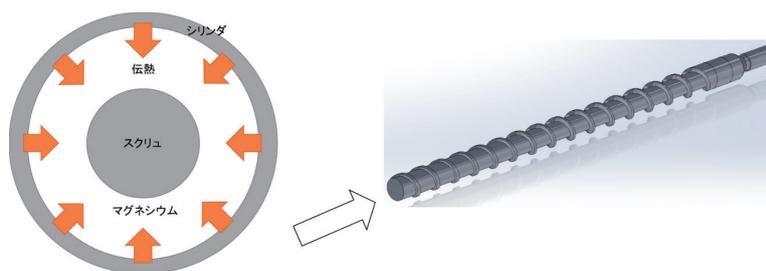


図6 マグネシウム合金の伝熱モデル

温度の計算は以下の手順を採用した。マグネシウム温度をエンタルピーに換算する。シリンダからの伝熱による熱流束を計算し、熱流束からエンタルピーの移動量を計算する。エンタルピーからマグネシウム温度に換算する。この手順を採用した理由は、マグネシウム合金はその溶融過程で相変化を伴うため、エンタルピーで処理すると計算が実施しやすいためである。固相線温度を基準にとり、物性値のエンタルピーの項での記述に沿って、マグネシウム合金では液相線温度と固相線温度の間で融解潜熱を割り振る形でエンタルピー E [J/kg] を決定する。また、以下にエンタルピーの計算式を示す。

$T_{emp} < T_s$ のとき

$$E = C_{ps} (T_{emp} - T_s) \quad (4)$$

$T_s < T_{emp} < T_l$ のとき

$$E = H_f (T_{emp} - T_s) / (T_l - T_s) \quad (5)$$

$T_l < T_{emp}$ のとき

$$E = C_{pm} (T_{emp} - T_l) + H_f \quad (6)$$

ここで、 T_{emp} [°C] はマグネシウム合金の温度、 T_s [°C] は固相線温度、 T_l [°C] は液相線温度、 C_{ps} [J/(kg·K)] は固体比熱、 C_{pm} [J/(kg·K)] は溶融体比熱、 H_f [J/kg] は融解潜熱である。

また、エンタルピーの移動現象は以下であらわす。

$$Q_h = k (dT/dl) A dt / \rho / V \quad (7)$$

$$E = E + \sum Q_h \quad (8)$$

ここで、 k [W/(m·K)] はマグネシウム合金の熱伝導率、 dT/dl [°C/m] はマグネシウム合金中の温度勾配、 A [m²] は熱が通過する断面積、 dt [s] は時間、 ρ [kg/m³] は密度、 V [m³] は体積である。以上のようにエンタルピーを更新し、エンタルピーを決定したときと逆の計算をして温度を算出する。

移流には一般的な流動解析に倣い、風上法を用いた。移流が発生するときはスクリュが回転しているため、固液は均一に混合されると仮定し、1次元の移流方程式を解くこととした。スクリュ軸方向のマグネシウム合金の移流速度に関しては、固体輸送理論から求めたプラグの固体輸送量にかき密度を乗じたものとした。さらに、スクリュ全域において流量は一定とした。ある物理量 x について、移流の式を以下に示す。

$$x = (xV + dx_{im} - dx) / V \quad (9)$$

$$dx_{im} = x_{im} u_{im} A dt \quad (10)$$

$$dx = x u A dt \quad (11)$$

$$u = Q / A \quad (12)$$

ここで、 x は移流⁽⁶⁾する物理量、 V [m³] は体積、 u [m/s] は流速、 A [m²] は断面積、 dt [s] は時間刻み、 Q [m³/s] 流量である。添え字の im は1メッシュ前を表す。図7に移流の模式図を示す。

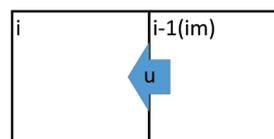


図7 移流の模式図

以上から、チクソモールディングとプラスチックの射出成形機では原料を溶かす、流す、固めるという工程は同じだが、シリンダ内の物理現象を考えたとき、固体輸送理論と Tadmor の理論という2つの異なる理論で表現される。

5. モデルを基にした数値計算

5.1 計算フローチャート

チクソモールディングにおけるマグネシウムの輸送及び溶融の理論を前述のモデルを用いて構築した。マグネシウムの射出成形機において、マグネシウムの溶融に着目したフローチャートを図8に示す。ただし、スクリュでマグネシウム合金を搬送する工程が入るので、計量動作の場合には固体輸送量をはじめに求めている。溶融過程ではヒータによって加熱されたシリンダからの熱伝導により、エンタルピーの変化が発生する。このエンタルピーから温度が決まり、熱伝導へつながるループをまわることによってマグネシウム合金の温度が上昇し、溶融が進行する。

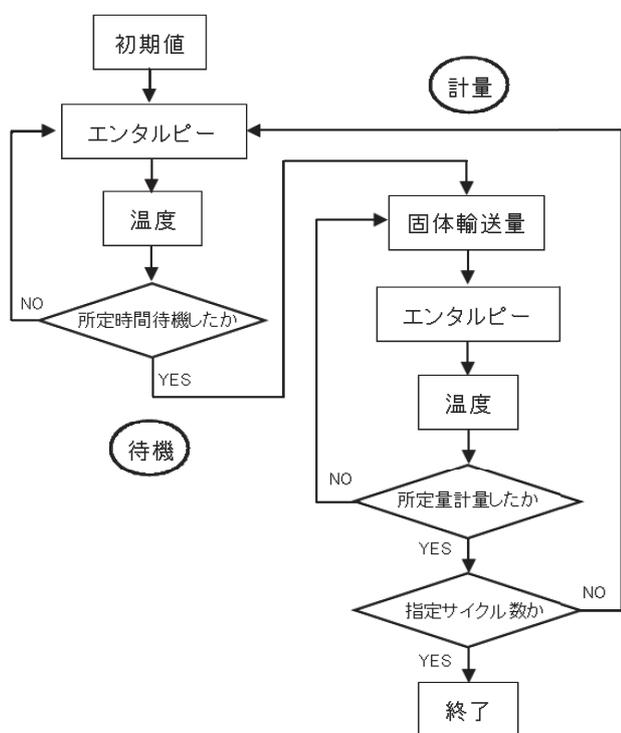


図8 フローチャート (チクソモールディング)

一方、プラスチックの射出成形機では、図9のフローチャートに示すように、シリンダからの伝熱のほかに、スクリュが回転しているときには溶融樹脂の粘性が高いため、せん断発熱が発生する。このため、温度の伝熱計算において、せん断発熱を考慮することが必要になる。

以上より、チクソモールディングの計算モデルは固体輸送理論とエンタルピーの計算方法に特徴づけられると考えられる。

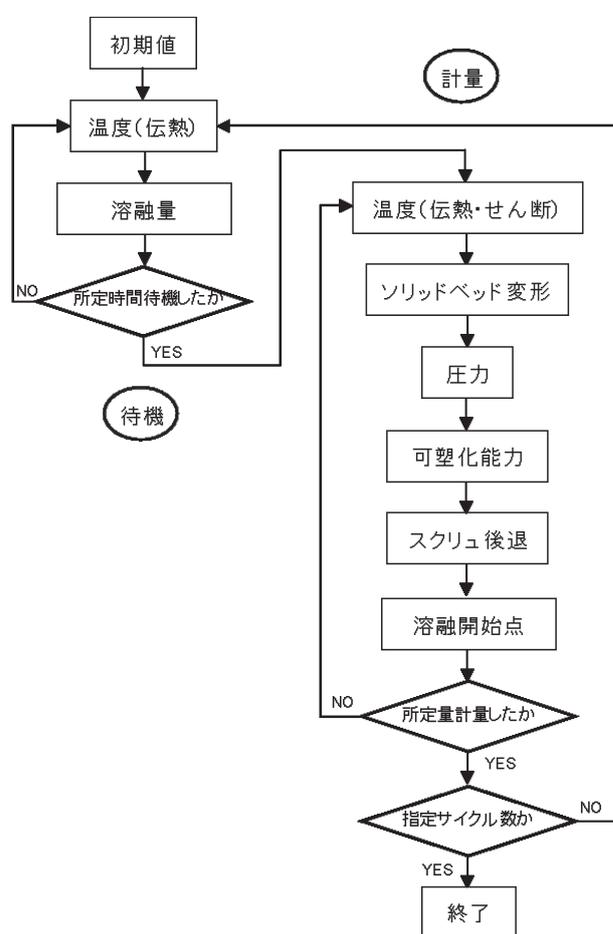


図9 フローチャート (プラスチック射出成形)

5.2 計算結果

実成形条件を想定した表2の条件で、マグネシウム合金の輸送及び溶融状態を数値計算した結果を図10から図13に示す。ここで、図10、図11はシリンダ先端に計量された溶融マグネシウム合金のショット間変化であり、図12、図13はシリンダヒータゾーンH1～H4までの各熱電対位置におけるシリンダ温度の時間変化である。サイクルが45sのときに比べて、サイクルが60sではシリンダ温度、計量したマグネシウム合金の温度共に安定している結果となった。この結果は伝熱現象を考えたとき、マグネシウム合金がシリンダから熱を奪う頻度はサイクルが45sのときに比べて、サイクルが60sのときのほうが少ないので、傾向としては、妥当な結果が得られたと考えられる。

表2 計算条件

スクリュ径	φ100mm
サイクル	45s、60s
成形品重量	750g
チップ	AM50A
シリンダ温度	H1:590°C、H2~:630°C

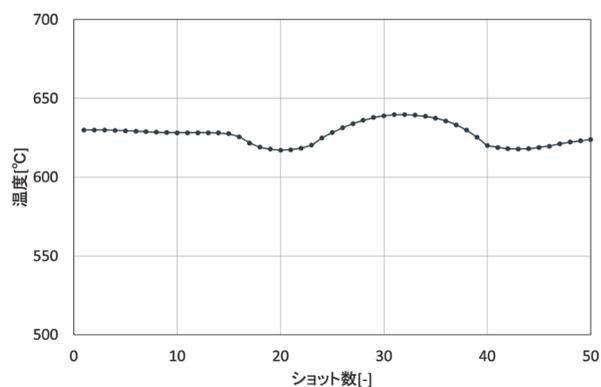


図10 マグネシウム温度 サイクル45s

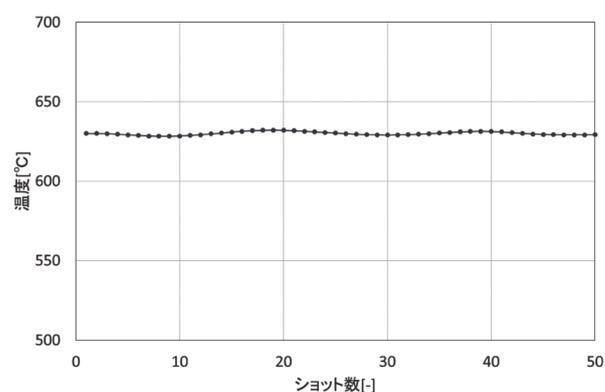


図11 マグネシウム温度 サイクル60s

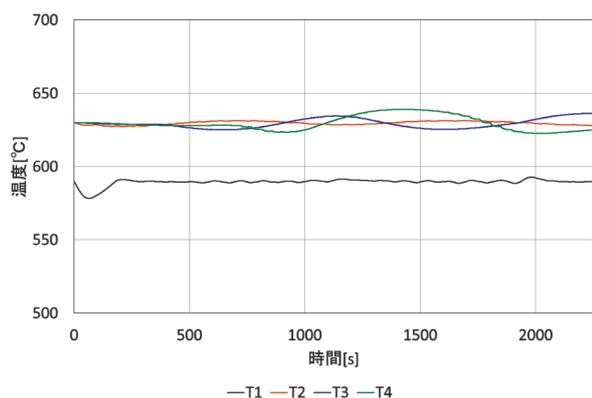


図12 シリンダ温度 サイクル45s

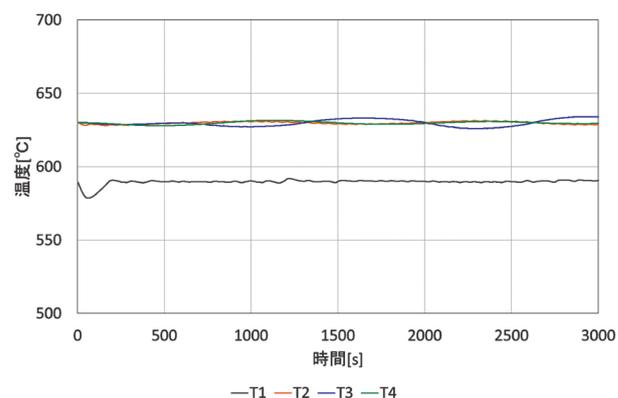


図13 シリンダ温度 サイクル60s

6. 結 言

成形工程において、チップもしくはペレットをホッパから投入し、溶かす、流す、固めるという点ではチクソモールディングとプラスチックの射出成形には類似性がある。しかし、チクソモールディングにおいては、計量のモデルはTadmorの理論ではなく、DarnellとMolが示した固体輸送理論が適用できると考えられる。また、溶融のモデルには、ヒータからの伝熱が主体の熱伝導にせん断発熱を加味しないモデルが適用できると考えられる。これらは、プラスチックの射出成形との違いであり、チクソモールディング機のスクリュは、この違いを考慮して設計されている。

今後も、成形材料に応じたスクリュ設計が実施できるよう、成形材料の輸送と溶融の理論構築を進めていく所存である。

参 考 文 献

- (1) Z.Tadmor and I.Klein : "Engineering Principles of Plasticating Extrusion", VAN NOSTRAND REINHOLD COMPANY (1970)
- (2) 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, 73, (2007-3) 727号
- (3) 旭化成アミダス株式会社, 「プラスチック」編集部 : "プラスチック・データブック", 工業調査会 (1999)
- (4) 恵良秀則, 高瀬剛二, 細田恭弘, 大坪文隆 : "難燃性マグネシウム合金溶湯の粘性の測定", Technical Article J.JFS, Vol.83, (2011) No.10, pp.569-573
- (5) 平居正純 : "溶融合金の粘度推定式", 鉄と鋼 第78, (1992) 第3号
- (6) S.V.Patankar : "コンピュータによる熱移動と流れの数値解析", 森北出版 (1985)