

令和 2 年 5 月 15 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06114

研究課題名(和文) 複雑水管経路設計法と金型温度制御による射出成形プロセスパラメータの多目的最適設計

研究課題名(英文) Multi-objective design optimization of process parameters in plastic injection molding using mold temperature control

研究代表者

北山 哲士 (Kitayama, Satoshi)

金沢大学・設計製造技術研究所・教授

研究者番号：90339698

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、プラスチック射出成形における代表的な成形不良である反りとウェルドラインを抑制しつつ、同時にサイクルタイムを改善するため、プロセスパラメータの多目的最適設計を行った。反りの抑制には可変圧力プロファイルを用い、ウェルドラインに抑制は可変射出速度プロファイルによる成形法が有効であることをシミュレーションと実験により実証した。また、複雑水管を用いれば部品を一様に加熱・冷却でき、サイクルタイムも飛躍的に改善できることも明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

機械学習を活用した最適設計法を用いて、射出成形におけるいくつかの課題を解決できた。特に、プロセスパラメータの最適値の決定は試行錯誤的に行われていたものを、最適化技術を用いて決定できるようになったことの意義は大きく、可変圧力プロファイルによる成形法や可変射出速度プロファイルによる成形法が成形不良に効果的であることがわかり、また検証実験を行うことができ、実用性ある方法であることを示すことができた。一連の研究では、複雑水管と直線水管を同時に用いており、複雑水管を用いれば部品を一様に加熱・冷却できることがシミュレーションを通じて明らかとなり、今後の研究指針を得ることができた。

研究成果の概要(英文)：This research project has performed a multi-objective optimization of process parameters in plastic injection molding using conformal cooling channel, in which variable packing pressure profile was adopted for warpage reduction and variable injection velocity was adopted for weldline reduction. Numerical simulation in plastic injection molding is so intensive that sequential approximate optimization using computational intelligence is used to optimize the process parameters. The optimal process parameters were determined through the numerical simulation. The experiment was also carried out to examine the validity. Through numerical and experimental result, the validity of this research project has been confirmed.

研究分野：プラスチック射出成形

キーワード：最適設計 プラスチック射出成形 多目的最適化 逐次近似最適化

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

プラスチック射出成形(Plastic injection molding: PIM)の成形プロセスは、溶融樹脂を金型に流し込む充填工程、圧力をかけて所望の形にする保圧工程、溶融樹脂を冷却・固化する冷却工程に分けることができる。各工程のプロセスパラメータは生産性や品質に大きな影響を与えるが、近年では Computer aided engineering (CAE)と最適化を組み合わせる研究が行われている。

二つ以上のフローフロントが衝突してできるウェルドラインは、部品の強度低下にもつながるため、その抑制は重要な課題である。ショートショットを発生させることなくウェルドラインを抑制するためには、成形中に射出速度を変化させる可変射出速度が有効である。

2. 研究の目的

ウェルドラインは外観や強度に影響を与えるため、高い品質の部品を成形するためにはその抑制が望まれる。同時に高いも求められるため、以下の点に焦点を絞り研究に取り組んだ。

- (1) ウェルドラインを最小化することで品質向上と考える。また、ショートショットを発生させることなくウェルドラインを抑制する可変射出速度による PIM 法を開発する。
- (2) 可変射出速度のプロファイルは無数に存在する。そのため本研究では、最適設計問題として有元に落とし込むことで、問題の解決を図る。
- (3) ウェルドラインの抑制やサイクルタイムの短縮には、可変射出速度プロファイルや他のプロセスパラメータが影響しているため、これらを設計変数とする。
- (4) シミュレーションによって、ウェルドラインとサイクルタイムを最小とするプロセスパラメータの最適値を決定し、実験も行い、提案する PIM 法の有効性を検証する。

3. 研究の方法

3.1 対象部品とシミュレーションモデル

本研究では、図1に示す部品を対象とする。外形寸法は縦 20.6 mm、横 33.1 mm、高さ 30.7 mm であり、破線部で示す側壁の厚さは 0.35 mm である。図2は溶融樹脂の流動を示しており、両側からフローフロントが側壁部中央付近で会合し、ウェルドラインができる。図3に本研究で用いた冷却水管の外観と部品付近の拡大図を併せてしめす。水管の直径は 8.00 mm であり、成形材料には液晶ポリマー(Liquid Crystal Polymer: LCP)樹脂を用いた。その材料特性を表1に示す。

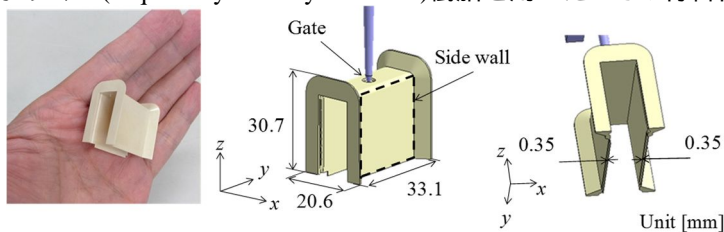


図1 対象部品の外観

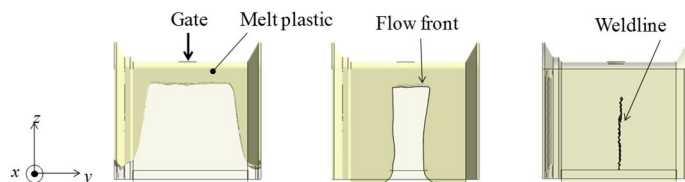


図2 溶融樹脂の流れとウェルドラインの様子

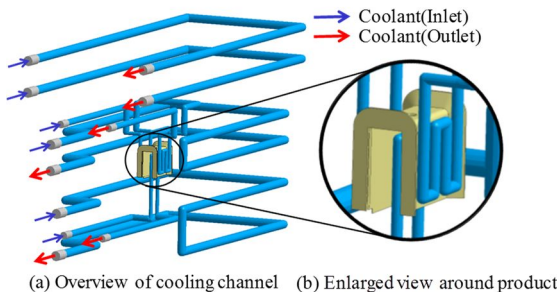


図3 複雑水管と部品周辺の拡大図

表1 液晶ポリマーの材料特性

Density [g/cm ³]	Eject temperature []	Elastic module [GPa]	Poisson ratio	Material characteristics	Glass transition temperature []	Recommended mold temperature []	Recommended melt temperature []
1.61	247	15	0.3	Crystalline	105	80-120	325-360

3.2 ウェルドラインとサイクルタイムの多目的最適設計

(a) 設計変数 (プロセスパラメータ)

本研究では、図4に示すような可変射出速度を想定し、その設計変数として第一射出速度(v_1^{inj})と第二射出速度(v_2^{inj})、可変位置(L)を考える。はじめに高い射出速度を用いてウェルドライン抑制を狙い、その後、射出速度を低くすることショートショットを防ぐ。図4に示すように、プランジャー位置が0から可変位置 L までは第一射出速度(v_1^{inj})で溶融樹脂を充填し、それ以降はプランジャーが最大位置(L_{max})に到達するまでに第二射出速度(v_2^{inj})まで減速させて、可変射出速度によるPIMを実現する。また、溶融温度(T_{melt})、保圧力(P)、保圧時間(t_{pack})、冷却温度(T_{cool})、冷却時間(t_{cool})も設計変数として考え、それらの側面制約条件は式(1)で与えた。

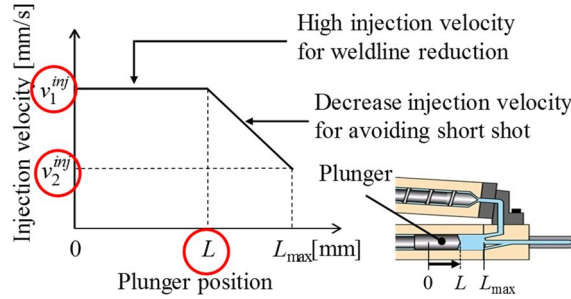


図4 可変射出速度とその設計変数の取り方

$$\left. \begin{array}{l} 325 \leq T_{melt} \leq 360 \quad 50 \leq P \leq 80 \quad 1.0 \leq t_{pack} \leq 10 \quad 80 \leq T_{cool} \leq 120 \\ 3.0 \leq t_{cool} \leq 20 \quad 1.5 \leq L \leq 6.5 \quad 100 \leq v_1^{inj} \leq 250 \quad 10 \leq v_2^{inj} \leq 100 \end{array} \right\} \quad (1)$$

(b) 目的関数

本研究ではウェルドラインとサイクルタイムを同時に最小にすることを考えるため、二つの目的関数がある。ウェルドラインの評価法として、著者らが提案したウェルドライン温度によって間接的に評価する方法があり、本研究ではこれを発展させた方法を提案する。間接的な評価法では、ウェルドラインの最小温度を最大化することでウェルドラインを短くする方法である。この研究結果を活用し、射出時間を考慮した新たなウェルドラインの間接的な評価法を提案する。いくつかのシミュレーションの結果から、射出時間(t_{inj})が短いほうが、ウェルドラインが短くなることが判明した。この結果を踏まえ、ウェルドラインの最小温度(T_{weld})を高くし、さらに射出時間(t_{inj})を短くすることがウェルドライン抑制に効果的であると考え、本研究で対象とする部品においては、式(2)で定義される目的関数 $f_1(x)$ を最大化することでウェルドラインを抑制する。

$$f_1(x) = \frac{T_{weld}}{t_{inj}} \rightarrow \max \quad (2)$$

式(2)において、射出時間(t_{inj})は式(3)で求めることになる。

$$t_{inj} = \frac{L}{v_1^{inj}} + \frac{2(L_{max} - L)}{v_1^{inj} + v_2^{inj}} \quad (3)$$

サイクルタイム $f_2(x)$ は、射出時間と保圧時間、冷却時間の総和として以下のように評価する。

$$f_2(x) = t_{inj} + t_{pack} + t_{cool} \rightarrow \min \quad (4)$$

(c) 制約条件

溶融樹脂がキャビティに充填しないショートショットは、制約条件 $g_1(x)$ として扱う。本研究では、式(6)によりショートショットを定量的に評価する。

$$g_1(x) = \begin{cases} V_s & V_s > 0 \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad \text{where } V_s = 1 - \frac{V}{V_c} \quad (5)$$

式(5)において V はキャビティ内に充填された溶融樹脂の体積、 V_c はキャビティの体積である。 V/V_c はキャビティ内に充填された溶融樹脂の割合のため、 V_s が正值の場合はショートショットが発生していることを意味する。

(d) 逐次近似最適化を用いたパレートフロント同定の流れ

RBFネットワークを用いた逐次近似最適化システムを用いてパレートフロントを同定する。具体的な計算の流れを以下にまとめる。

(STEP1) Latin Hypercube design (LHD)により、複数の初期サンプル点を決定。
 (STEP2) Moldex3D で、シミュレーションを行い、目的関数値と制約条件値を算出。
 (STEP3) RBF ネットワークを用い、目的関数と制約条件の応答曲面を作成。重み付き lp ノルム法を用いてパレート最適解集合を求める。
 (STEP4) 終了条件を満足していれば終了する。そうでなければ、STEP3 で得られたパレート最適解を新たなサンプル点として追加し、STEP2 へ戻る。
 本研究では、パレート最適解における目的関数の誤差が 5%以下となったとき、逐次近似最適化を終了するものとした。

4. 研究成果

4.1 シミュレーションによる結果

20 点の初期サンプル点を LHD で生成し、式(3)と(5)の間のパレートフロントを逐次近似最適化を用いて同定した結果を、ウェルドラインの様子と共に図 5 に示す。同図において、 $f_2(x)$ は可変射出速度を用いた結果であり、 $f_1(x)$ は一定の射出速度を用いた際の結果である。

図 5 に示したパレートフロントの中から、比較のため、3 点(A 点, B 点, X 点)を抽出したが、可変射出速度を用いた PIM 法のほうが、一定射出速度を用いるよりもウェルドラインを抑制できていることがわかる。図 6 に、A 点と B 点の最適射出速度プロファイルを示す。また、3 点のプロセスパラメータの最適値を表 2 に示す。同表から、本研究で提案した方法による射出時間は非常に短く、溶融温度も高いことがわかる。また、冷却時間は 3 点とも大きな相違はなかった。ほぼ同程度の冷却時間の下、溶融温度が高ければ、ウェルドライ温度はより高くなり、式(3)から明らかのように、ウェルドラインは抑制される。

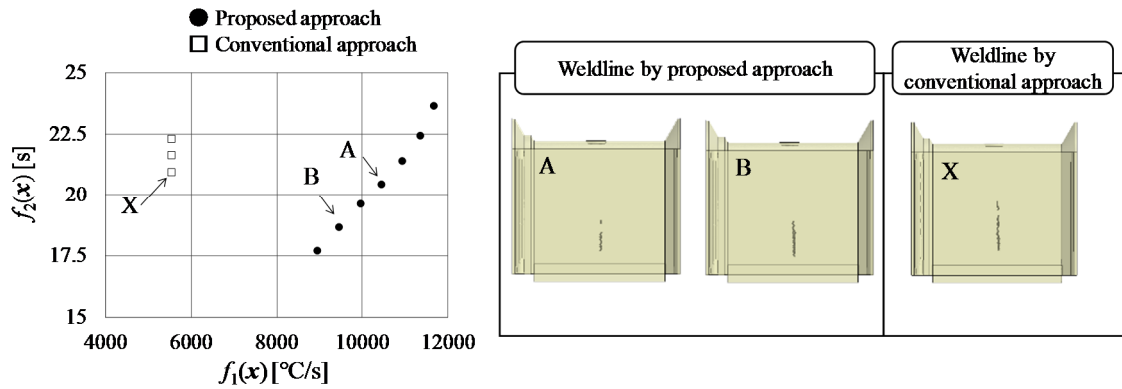


図 5 パレートフロントとウェルドラインの様子

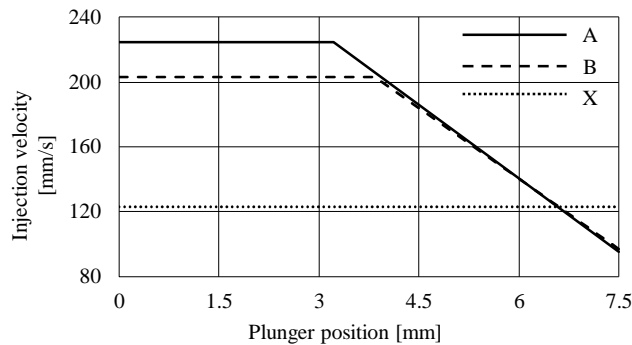


図 6 代表的な点における最適可変射出速度

表 2 3 点 (A 点, B 点, X 点) におけるプロセスパラメータの最適値

	v^{inj}_1 [mm/s]	v^{inj}_2 [mm/s]	L [mm]	T_{melt} [°C]	P [MPa]	t_{pack} [s]	T_{cool} [°C]	t_{cool} [s]	t_{inj} [s]
A	225.3	95.2	3.22	353	51.8	4.9	89.5	15.2	0.032
B	203.2	97.5	3.84	355	55.2	4.7	91.5	13.5	0.039
X	122.9		-	339	76.6	6.5	93.8	15.0	0.061

対象部品の温度分布を検証した結果を図 10 に示す。同図から明らかのように、複雑水管を用い

ているため、一様な温度分布をしていることがわかるが、本研究で提案した可変射出速度による成形のほうが、温度は低くなっている。このことは、複雑水管を用いれば、反りなどの品質改善にも役立つことを示唆している。

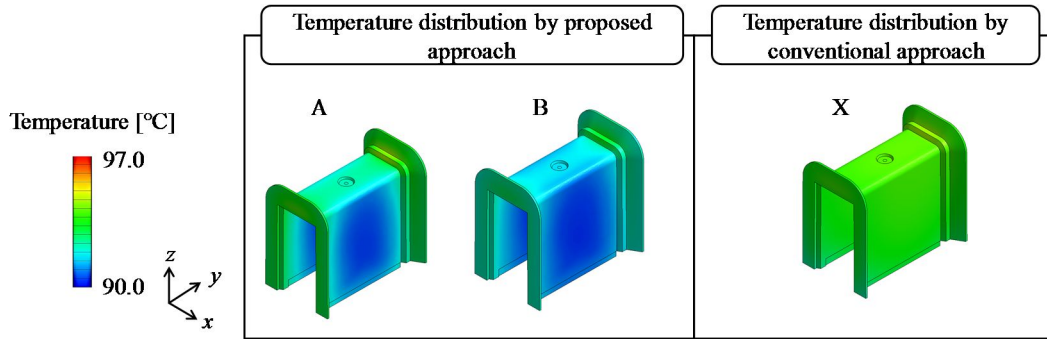


図 10 代表的な点における最適可変射出速度

4.2 検証実験の結果

提案手法の有用性を検証するために、射出成型機を用いた実験を行った。なお、ウェルドライン温度は実験では直接的に計測できないため、目的関数値の正確な評価はできないことに注意が必要である。実験は表 3 に示したプロセスパラメータの最適値を用いて行い、その結果を図 11 に示す。同図において赤線がウェルドラインを示している。ウェルドライン温度が測定できないため、ウェルドラインの長さを測定した結果を表 4 に示す。同表から、実験におけるウェルドラインの長さはシミュレーション結果と一致しなかったが、A 点のウェルドラインの長さが最も短く、X 点が長くなったという点は同じであった。図 12 に A 点と B 点における可変射出速度の実験結果を示す。射出速度が短くなればなるほど、射出速度を正確に制御することが困難であることがわかるが、本研究で提案した可変射出速度による方法でウェルドラインが抑制できていることがシミュレーションおよび実験からも確認できた。

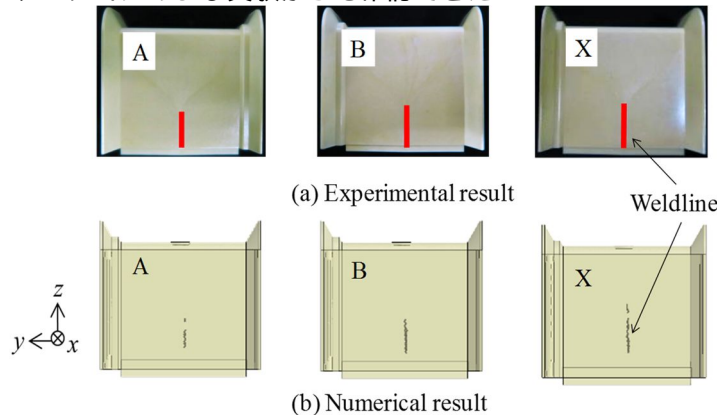


図 11 実験(a)とシミュレーション(b)のウェルドラインの様子

図 11 実験とシミュレーションにおけるウェルドライン長さの比較

	Numerical result [mm]	Experimental result [mm]	Error [%]
Point A	4.4	8.8	50.0
Point B	7.4	10.3	28.5
Point X	10.0	10.5	4.76

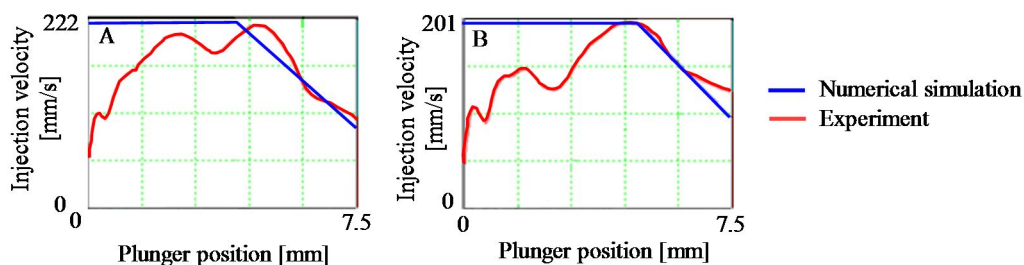


図 12 実験とシミュレーションの可変射出速度の様子

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Hashimoto, S., Kitayama, S., Takano, M., Kubo, Y., Aiba, S.	4. 巻 14
2. 論文標題 Simultaneous optimization of variable injection velocity profile and process parameters in plastic injection molding for minimizing weldline and cycle time	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1299/jamdsm.2020jamdsm0029	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kitayama, S., Tamada, K., Takano, M., Aiba, S.	4. 巻 32
2. 論文標題 Numerical optimization of process parameters in plastic injection molding for minimizing weldlines and clamping force using conformal cooling channel	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Manufacturing Processes	6. 最初と最後の頁 782-790
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.04.007	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kitayama, S., Yamazaki, Y., Takano, M., Aiba, S.	4. 巻 85
2. 論文標題 Numerical and experimental investigation of process parameters optimization in plastic injection molding using multi-criteria decision making	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Simulation Modelling Practice and Theory	6. 最初と最後の頁 95-105
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1016/j.simpat.2018.04.004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 山崎祐亮, 北山哲士, 高野昌宏, 合葉修司	4. 巻 51-11
2. 論文標題 三次元水管を用いたプラスチック射出成形における反りとサイクルタイムの多目的最適化	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 設計工学	6. 最初と最後の頁 819-828
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.14953/jjsde.2017.2784	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 横山 眞樹, 北山 哲士, 高野 昌宏, 合葉 修司	4. 巻 83-850
2. 論文標題 プラスチック射出成形における可変圧力プロファイルとプロセスパラメータの多目的最適設計	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 17-00067
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.17-00067	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 玉田 可南子, 北山 哲士, 高野 昌宏, 合葉 修司	4. 巻 83-852
2. 論文標題 プラスチック射出成形におけるウェルドライン温度と型締力の同時最適設計	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 17-00209
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.17-00209	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kitayama, S., Yokoyama, M., Takano, M., Aiba, S.	4. 巻 92
2. 論文標題 Multi-objective optimization of variable packing pressure profile and process parameters in plastic injection molding for minimizing warpage and cycle time	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 International Journal of Advanced Manufacturing Technology	6. 最初と最後の頁 3991-3999
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00170-017-0456-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 Hashimoto, S., Kitayama, S., Takano, M., Kubo, Y., Aiba, S.
2. 発表標題 Optimization of variable injection velocity for weldline reduction in plastic injection molding
3. 学会等名 8th International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 北山哲士
2. 発表標題 機械学習を活用した最適設計法とその応用
3. 学会等名 第328回塑性加工シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yokoyama, M., Kitayama, S., Takano, M., Aiba, S.
2. 発表標題 Determination of optimal variable pressure profile and process parameters in plastic injection molding
3. 学会等名 The 36th JSST Annual Conference International Conference on Simulation Technology (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Tamada, K., Kitayama, S., Takano, M., Aiba, S.
2. 発表標題 Simultaneous optimization of process parameters in plastic injection molding for weldlines and clamping force minimization
3. 学会等名 The 36th JSST Annual Conference International Conference on Simulation Technology (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考