

令和 5 年 5 月 2 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04223

研究課題名（和文）三次元水管を用いたRHCMにおけるプロセスパラメータの多目的ロバスト最適設計

研究課題名（英文）Multi-objective robust design of process parameters in rapid heat cycle molding using conformal cooling channel

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） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、金型を加熱・冷却する型温加熱冷却成形（RHCM）を対象に、品質と生産性向上を目的としたプロセスパラメータの最適設計を行った。品質向上として溶融樹脂が合流することで形成させるウェルドラインの抑制と、生産性向上としてサイクルタイムの短縮を目的とした多目的最適設計に取り組んだ。また、ウェルドラインの発生位置が事前に判明しているため、金型全体を加熱する内部加熱冷却方式よりも、ウェルドラインの発生位置付近を局所的に加熱する外部加熱冷却方式を採用し、ウェルドラインを完全に削除することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

品質向上と生産性向上を目的とした型温加熱冷却成形の実用化に向けて、シミュレーションを用いて最適なプロセスパラメータを機械学習を活用した最適設計法によって決定できることを示した。また、シミュレーションの結果を検証するため、射出成形機による実験を行い、良好な結果が得られた。型温加熱冷却成形の有用性を広く検証できた点、また機械学習を活用した最適設計法が生産技術分野に活用できることを実証した点は学術的意義が高く、産業応用が可能な点を示したことは実用的にも有意義である。

研究成果の概要（英文）：In this research, rapid heat cycle molding (RHCM) that the mold is heated up and cooled down for high product quality and high productivity is adopted, and the process parameters are optimized using design optimization. Weld lines are minimized for high product quality, whereas the cycle time is also minimized for high productivity. Therefore, the multi-objective design optimization is performed. To shorten the cycle time as well as weldline reduction, the RHCM using a heater called the heater-assisted RHCM is developed. Through the numerical simulation, the optimal process parameters are determined. Based on the numerical result, the experiment is also carried out to examine the validity of the proposed approach.

研究分野：最適設計

キーワード：最適設計 多目的最適化 プラスチック射出成形 機械学習

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品の品質と生産性を劇的に改善するため、本研究では、三次元冷却水管経路を内包する金型を用い、射出成形中に金型温度を制御する型温加熱冷却成形 (Rapid Heat Cycle Molding: RHCM) を対象にしたプロセスパラメータの最適化を実施する。射出成形シミュレーションと機械学習を活用した最適設計法を用いて、効率的にプロセスパラメータの最適値を決定する。シミュレーション結果の妥当性を検証するため、射出成形機による実験も行い、本研究の妥当性を実証し、既存の射出成形技術の抜本的刷新を狙う。

2. 研究の目的

2つ以上の熔融樹脂の流れが会合したときに生じるウェルドラインは、外観不良や強度低下につながるため、その抑制が強く望まれる。ウェルドラインの抑制には、金型を加熱・冷却する RHCM は有効な方法として注目されているが、金型の加熱や冷却に時間を要するため、結果的にサイクルタイムが長くなるという課題がある。プラスチック部品の製造には生産性の向上も求められるため、ウェルドラインの発生位置が事前に分かれば、金型全体を加熱する内部加熱冷却方式よりも、ウェルドラインの発生位置付近を局部的に加熱する外部加熱冷却方式を用いるほうが、サイクルタイムの短縮が期待できる。特に、外部加熱方式の一つであるヒーター加熱方式は、赤外線や誘導加熱よりも局所加熱ができるため、ウェルドラインの抑制とサイクルタイムの短縮に関しては、特に有効な手法である。本研究では、RHCM の特性を考慮したウェルドラインを抑制する新たな評価方法を提案し、ヒーター加熱方式の RHCM の金型温度プロファイルを含むプロセスパラメータの最適化を行う。

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左に示す箱型形状の部品を対象とする。部品の高さは 25.0 mm、幅、奥行きは 29.7 mm であり、側壁の厚さは 1.50 mm と 1.00 mm である。シミュレーションを行ったときの熔融樹脂の流れとウェルドラインの様子を同図右に示す。

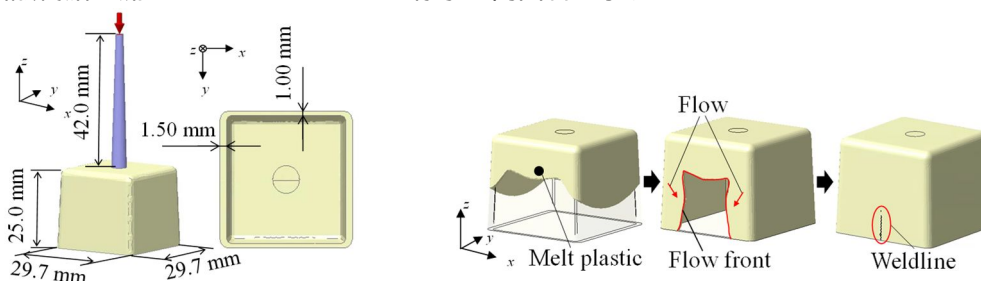


図1 対象部品の外観とウェルドラインの様子

3.2 ヒーター加熱による RHCM のシミュレーション

本研究では、ヒーター加熱による RHCM を採用する。加熱用ヒーターと冷却に用いる三次元冷却水管経路を図2左に示す。ウェルドラインの発生付近を加熱するために、ヒーターは薄肉部の面に設置した。加熱工程では加熱時間だけ金型をヒーター加熱し、充填・保圧工程でヒーター加熱を止める。冷却工程では、冷却温度に設定した水を冷却時間だけ流して金型を冷却し、熔融樹脂を冷却・固化させ、シミュレーションは終了する。

本研究で用いるヒーターによる金型の温度上昇を図2右に示す。金型温度は約5秒の加熱で86 から125 まで加熱でき、30秒後には165 になる。ヒーターの特性を表4に示す

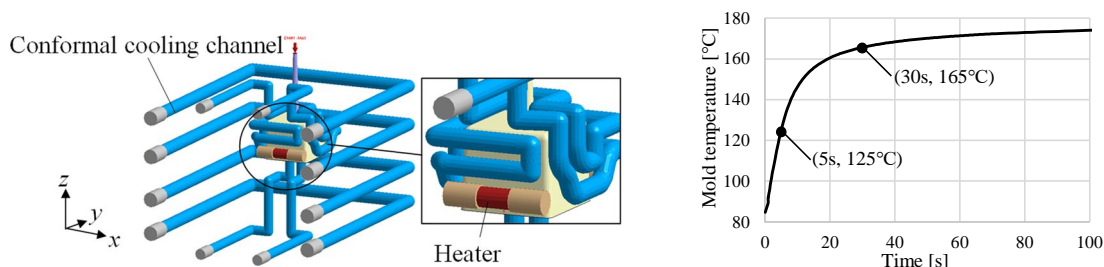


図2 三次元冷却水管経路とヒーターの特性

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)

RHCM の金型温度プロファイルについては、図3に示すように、加熱時間(t_h)、射出時間(t_{inj})、保圧時間(t_p)、冷却時間(t_c)、冷却温度(T_c)が設計変数となるが、それに加え、熔融温度(T_{melt})、保

持圧力(P)も設計変数とした．すなわち，本研究で考える設計変数は $\mathbf{x} = (t_h, T_{melt}, t_{inj}, P, t_p, T_c, t_c)^T$ となる．また，各設計変数の上下限値は式(1)のように決定した．

$$\left. \begin{aligned} 5 \leq t_h \leq 30[\text{s}] \quad 180 \leq T_{melt} \leq 210[\quad] \quad 0.5 \leq t_{inj} \leq 3.0[\text{s}] \\ 10 \leq P \leq 70[\text{MPa}] \quad 1.0 \leq t_p \leq 10[\text{s}] \quad 60 \leq T_c \leq 80[\quad] \quad 1.0 \leq t_c \leq 30[\text{s}] \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

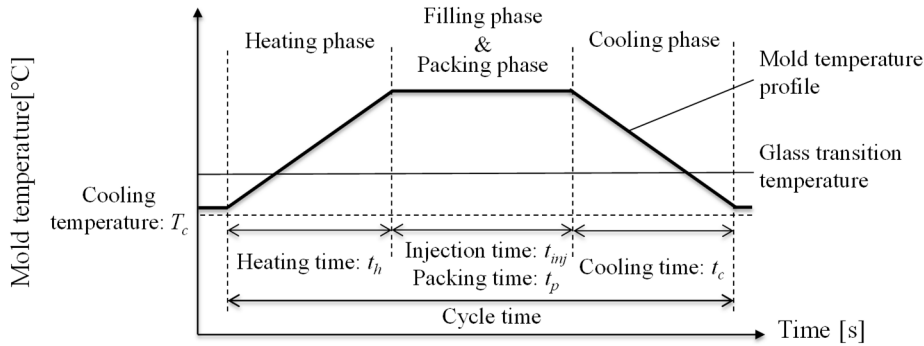


図3 RHCMにおける金型温度プロフィール

(b) 目的関数

ウェルドラインを抑制しつつサイクルタイムを短くするような多目的最適化問題を考える．はじめにウェルドラインを抑制するための目的関数について説明する．RHCM が金型温度を高くすることで熔融樹脂の流動性を高めてウェルドラインを抑制する PIM であることに着目する．加熱工程終了時の金型温度(T_{mold})の相違によるウェルドラインの違いを図 4 に示す．同図(a)では，ヒーターで 5 秒加熱した結果，129 に達しており，同図(b)では，30 秒加熱した結果 163 に達している．その結果，ウェルドラインは同図(b)のほうが短くなっている．このことから，加熱終了時の金型温度が高いほどウェルドラインの抑制ができていることがわかる．また，射出時間(t_{inj})を短くすることで熔融樹脂の流動性が向上し，ウェルドラインの抑制に効果的であるという研究結果を考慮すると，加熱終了時の金型温度(T_{mold})を高くし，射出時間(t_{inj})を短くすることがウェルドラインの抑制に有効であると考えられる．これらの知見を統合し，本研究では式(2)で表される目的関数 $f_1(\mathbf{x})$ を最大化してウェルドラインの抑制を図る．

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

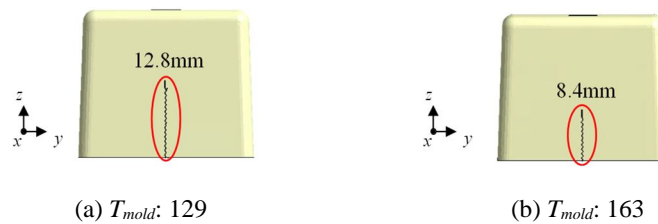


図4 金型温度の違いによるウェルドラインの様子

次に，生産性の指標として，サイクルタイムを目的関数 $f_2(\mathbf{x})$ として考える．サイクルタイムは，加熱時間(t_h)と射出時間(t_{inj})，保圧時間(t_p)，冷却時間(t_c)の総和と定義し，式(3)で表される．

$$f_2(\mathbf{x}) = t_h + t_{inj} + t_p + t_c \rightarrow \min \quad (3)$$

(c) 機械学習を活用した最適設計法によるパレートフロント同定の流れ

Radial basis function (RBF)ネットワークを用いた以下のような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)により初期サンプル点(設計変数の組合せ点)を生成する．

STEP2: 各サンプル点においてシミュレーションを行い，目的関数値を算出する．

STEP3: RBF ネットワークを用いて各目的関数を応答曲面近似し，重み付き l_p 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集合を新たなサンプル点として追加し，STEP2 へ戻る．終了条件として，STEP3 のパレート

最適解におけるシミュレーション値と応答曲面値の差の絶対値をシミュレーション値で割った値が5%以下となったときに終了するものとした。

4. 研究成果

4.1 ヒーター加熱による RHCM のシミュレーション結果

LHD によって 20 点の初期サンプル点を生成し、3.2 節(c)に記載した流れに従ってパレートフロントを同定した結果を図 5 の黒丸で示す。また比較のため、初期条件によって得られた結果を白三角(Point X)で示す。パレートフロントにおいて、ウェルドラインを最も抑制した点を Point A、サイクルタイムを最も短くした点を Point B とし、それぞれの点におけるウェルドラインの様子も併せて同図に示す。

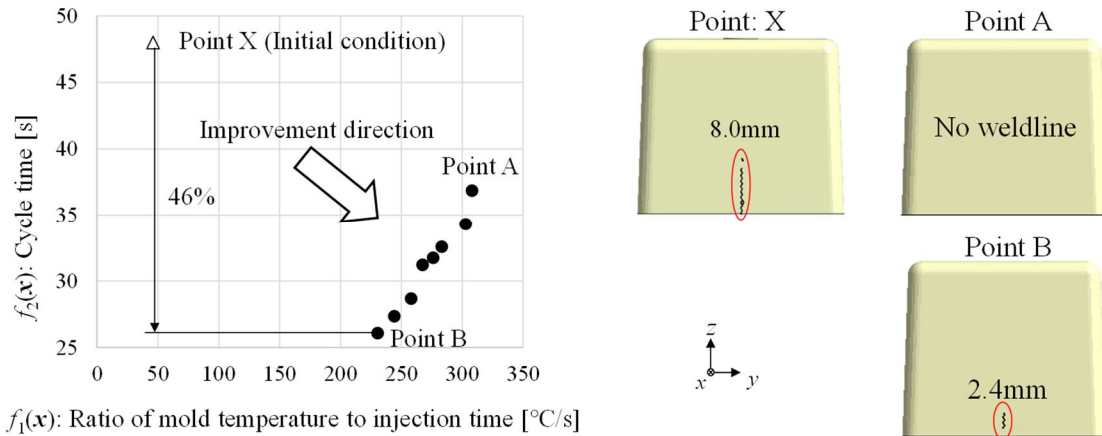


図5 パレートフロントとウェルドラインの様子

次に、図 5 中の Point A と Point B における加熱工程と冷却工程終了時の金型温度分布（図 8 左と右）、熔融樹脂の流れの様子を図 6 に示す。図 6 左に示すように、Point A と Point B ではウェルドラインの発生付近をヒーターで局所的に加熱できていることがわかる。特に Point A では、金型を高温に加熱したため、フローフロントが会合することなく中央まで流動し、ウェルドラインを解消できている。一方、Point B では、Point A と比較して、ウェルドラインの発生付近の金型温度が低いため、フローフロントが中央で会合して若干ではあるがウェルドラインが生成されている。この結果から、ウェルドライン発生付近を高温にヒーター加熱することで、熔融樹脂の流れを変化させることができ、結果的にウェルドラインを完全になくす、もしくは大幅に抑制できることがわかる。また、図 6 右に示すように、三次元冷却水管経路を用いているため、ほぼ一様に冷却できている。

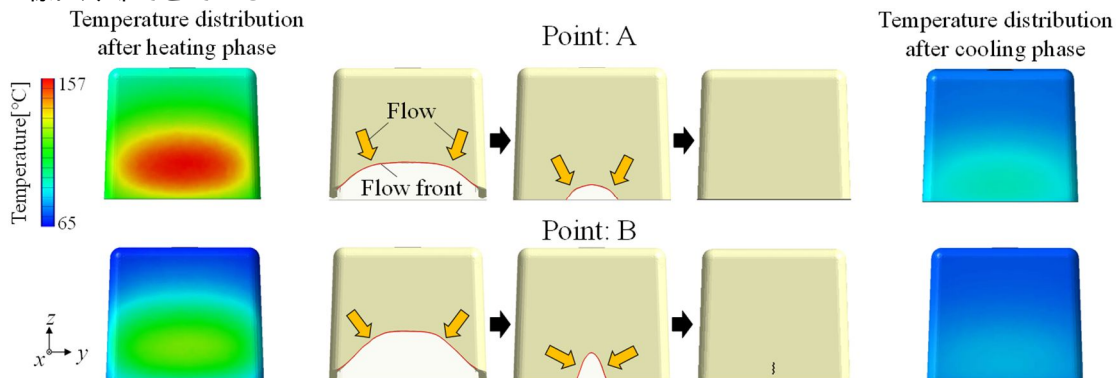


図6 温度分布とメルトフロントの様子

図 5 中の 3 点(Point A, Point B および Point X)におけるプロセスパラメータと金型温度プロファイルを図 7 と表 1 に示す。同図において、実線が Point A、破線が Point B、点線が Point X の金型温度プロファイルを示している。各点における加熱工程終了時の金型温度 T_A , T_B , T_X は、それぞれ 157, 128, 149 に達している。

図 6 において Point A のウェルドラインは解消しているが、これは図 7 に示すように、Point A における金型温度(T_A)が最も高いことに加えて、表 1 灰色部で示す射出時間(t_{inj})が 0.51 秒と他の点に比べて短くなっていることも影響している。次に、Point B における金型温度(T_B)は、Point X における金型温度(T_X)より低くなっているが、図 6 に示すようにウェルドラインは Point X より短くなっている。これは、Point A と同様、Point B の射出時間(t_{inj})が 0.55 秒になっているためである。これらの結果を踏まえると、金型温度(T_{mold})を高くしつつ射出時間(t_{inj})を短くすることがウェルドラインの抑制に有効であることがわかる。

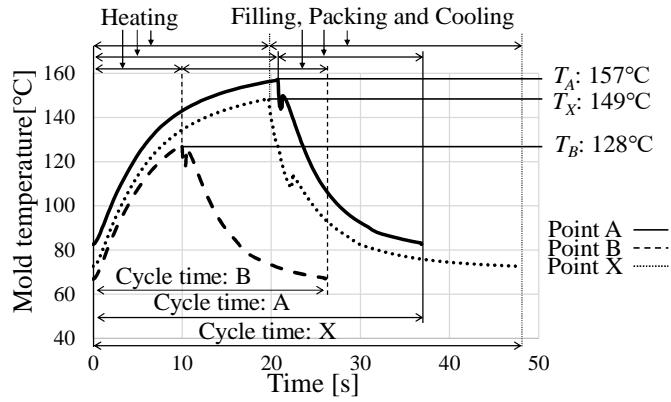


図7 金型温度プロファイルの様子

表1 プロセスパラメータの値

	t_h [s]	T_{melt} [°C]	t_{inj} [s]	P [MPa]	t_p [s]	T_c [°C]	t_c [s]	Cycle time [s]
Point X	20.0	190	3.00	50.0	5.00	60.0	20.0	48.0
Point A	20.8	205	0.51	12.2	8.54	75.8	7.03	36.9
Point B	10.0	192	0.55	29.2	4.80	62.3	10.8	26.1

4.2 検証実験結果

射出成形機を用いて実験を行った。図8は、金型が開いた状態におけるキャビティ表面の写真である。検証実験ではヒーターを金型内に挿入してRHCMを実現している。

検証実験で得られたウェルドラインの様子をシミュレーション結果と併せて図8に示す。実験結果においても、Point Aではウェルドラインがなくなっており、シミュレーション結果と実験結果は良好な一致を見せている。

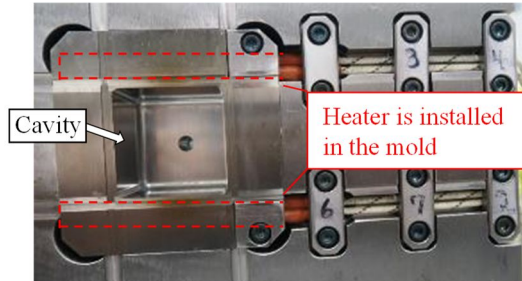


図8 キャビティ表面の様子

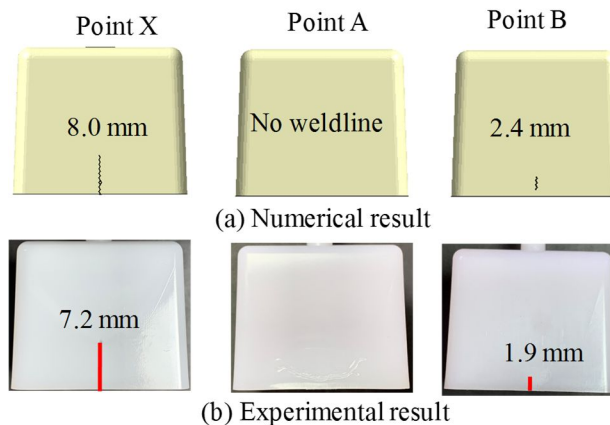


図9 シミュレーション結果と実験結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8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 4件）

1. 著者名 釣田祥吾, 北山哲士, 高野昌宏, 山崎祐亮, 久保義和, 合葉修司	4. 巻 89
2. 論文標題 ヒーター加熱による型温加熱冷却成形の開発とプロセスパラメータの最適化	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.22-00311	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 釣田祥吾, 北山哲士, 高野昌宏, 山崎祐亮, 久保義和, 合葉修司	4. 巻 88
2. 論文標題 可変保圧力プロファイルを用いた型温加熱冷却成形によるウェルドラインとサイクルタイムの多目的最適設計	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.22-00048	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Kitayama, S., Matsubayashi, A., Takano, M., Yamazaki, Y., Kubo, Y., Aiba, S.	4. 巻 33
2. 論文標題 Numerical optimization of multistage packing pressure profile in plastic injection molding and experimental validation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Polymers Advanved Technologies	6. 最初と最後の頁 3002-3012
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/pat.5735	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.	4. 巻 121
2. 論文標題 Process parameters optimization in plastic injection molding using metamodel-based optimization: a comprehensive review	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Advanced Manufacturing Technology	6. 最初と最後の頁 7117-7145
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00170-022-09858-x	査読の有無 無
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., Tsurita, S., Takano, M., Yamazaki, Y., Kubo, Y., Aiba, S.	4. 巻 120
2. 論文標題 Multi-objective process parameters optimization in rapid heat cycle molding incorporating variable packing pressure profile for improving weldline, clamping force, and cycle time	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Advanced Manufacturing Technology	6. 最初と最後の頁 3669-3681
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00170-022-08994-8	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., Hashimoto, S., Takano, M., Yamazaki, Y., Kubo, Y., Aiba, S.	4. 巻 107
2. 論文標題 Multi-objective optimization for minimizing weldline and cycle time using variable injection velocity and variable pressure profile in plastic injection molding	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Advanced Manufacturing Technology	6. 最初と最後の頁 3351-3361
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00170-020-05235-8	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 北山哲士, 石附亮人, 高野昌宏, 久保義和, 合葉修司	4. 巻 55
2. 論文標題 型温加熱冷却成形におけるプロセスパラメータの最適化	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 設計工学	6. 最初と最後の頁 559-568
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14953/jjsde.2020.2887	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 北山哲士, 橋本咲良, 高野昌宏, 山崎祐亮, 久保義和, 合葉修司	4. 巻 86-891
2. 論文標題 プラスチック射出成形における可変射出速度と可変保圧力を用いたウェルドラインとサイクルタイムの二目的最適設計	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.20-00161	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Tsurita, S., Kitayama, S., Takano, M., Yamazaki, Y., Kubo, Y., Aiba, S.
2. 発表標題 Multi-objective optimization for minimizing weldline and cycle time using rapid heating cycle molding with heater system
3. 学会等名 8th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kitayama, S., Matsubayashi, A., Takano, M., Yamazaki, Y., Kubo, Y., Aiba, S.
2. 発表標題 Optimization of multi-stage packing pressure profile in plastic injection molding
3. 学会等名 Asian Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tsurita, S., Kitayama, S., Takano, M., Yamazaki, Y., Kubo, Y., Aiba, S.
2. 発表標題 Process parameters optimization for minimizing weldline and cycle time in rapid heat cycle molding using variable packing pressure profile
3. 学会等名 International Conference on Design and Concurrent Engineering 2021 & Manufacturing Systems Conference 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021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
研究分担者	伊藤 誠 (Makoto Ito) (30845160)	金沢大学・機械工学系・助教 (13301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------