

令和 3 年 5 月 25 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K14859

研究課題名(和文)成形接合メカニズム解明のための状態制御金型による樹脂特性コントロール

研究課題名(英文)Advanced mold condition control to elucidate the mechanism of injection molded direct joining

研究代表者

木村 文信(Kimura, Fuminobu)

東京大学・生産技術研究所・助教

研究者番号：10739311

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):表面微細構造を形成した金属と射出成形樹脂を、樹脂成形と同時に型内で直接接合させる技術において、接合特性に対して金型の状態制御と射出成形条件の相互作用がどのように生じるかを調査した。金型温度分布を動的に制御できる金型を開発し、それを用いて実験を進めた。温度の動的制御によって、最高強度の更新やプロセスの高効率化を実現できた。また、分布制御を用いることで、プロセスを高効率化できることを示すと同時に、接合発現に重要なのは金属/樹脂の界面の局所的な温度であることを示唆することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で取り扱った直接接合技術は、比較的新しい技術であり、厳密な接合メカニズムは未解明という問題はあるが、生産性の高さや自由度の高さから産業応用および将来の基盤技術となることが非常に期待されている。本研究で得られた成果は、接合特性の向上や生産プロセスの高効率化の指針となり、本接合技術の社会実装を進める上で必要不可欠なものになると考えられる。また、接合を発現する上で重要な要素を示唆できたことから、本研究で開発した技術は接合現象の解明を進める上で必要なツールになると考えられる。

研究成果の概要(英文):A surface fine-structured metal workpiece can be joined with an injection molded polymer component. The joining is formed in a mold during an injection molding process. This study investigated effects of an advanced control of a mold condition on a joining performance. First, the mold that can dynamically control temperature distribution was developed. Then the experiments were carried out by using the developed mold. The results showed; (1) dynamic temperature control can enhance joining strength and process efficiency; (2) temperature distribution control can enhance process efficiency; (3) the local temperature at the metal/polymer interface can be significantly important for the joining occurrence, which was derived from the distribution control.

研究分野：異材接合

キーワード：異材接合 金属樹脂直接接合 射出成形 表面処理 接合メカニズム

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

表面にナノ～マイクロメートルオーダーの微細構造を形成した金属部材と射出成形樹脂を接合させる成形接合という技術がある（図1）。金属部材を射出成形金型内に設置した状態で溶融樹脂が射出され、樹脂の硬化後に、微細構造を有する表面を介して両材が接合される。樹脂部の成形と直接接合が単一プロセスで行われるため、高い構造形状自由度と高い生産性を有している。しかし、厳密な接合メカニズムが未解明であるため十分な信頼性が得られていなかった。

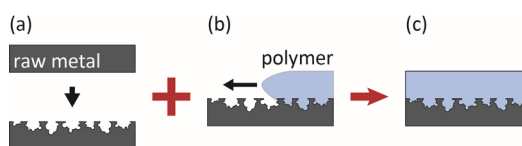


図1 成形接合の概要

これまで様々な研究グループで接合メカニズム解明が取り組まれている。基本的なアプローチは、多様な条件下で作製した接合サンプルの特性評価であるが、条件と特性の関係を十分に説明できない現象も見られている。これは、従来手法で設定された条件では、接合が生じるときの接合界面の物理状態（主に流動する溶融樹脂の状態）を完全にハンドリングできていなかったことが原因の1つだと考えられる。

これまでの様々な研究グループで接合メカニズム解明が取り組まれている。基本的なアプローチは、多様な条件下で作製した接合サンプルの特性評価であるが、条件と特性の関係を十分に説明できない現象も見られている。これは、従来手法で設定された条件では、接合が生じるときの接合界面の物理状態（主に流動する溶融樹脂の状態）を完全にハンドリングできていなかったことが原因の1つだと考えられる。

2. 研究の目的

本研究では成形接合のメカニズム解明を進めるため、射出成形中に流動する溶融樹脂の特性をコントロールする手法を検討した。射出成形機で調整できるパラメータ（射出速度など）に加えて温度状態を制御できる金型を用いることで流動樹脂特性を変化させる。具体的な温度状態としては金型内の動的な温度分布を対象とし、温度分布を動的に変化させることが接合強度にどのような影響を与えるかを調査することを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 動的な温度分布制御可能な金型の開発

温度制御に関して良い動特性が得られるよう、高速に昇温・降温ができる温度制御機構（ヒータおよび冷却回路）を検討した。また、型内温度の空間分布を制御するため、ヒータには小型のものを選定し、温度制御点を複数配置する構成を検討した。金型設計にあたり、過去の知見や経験を活用できるようにこれまでの研究[1]で用いてきた成形接合用金型を踏襲し、溶融樹脂の流動部（スプル、ランナ、ゲート等）の寸法・形状や型内状態モニタリング用センサの配置が同等になるようにした。そして設計を基に温度の動的な分布制御が可能な金型を開発した。

(2) 温度分布の静的／動的制御の影響調査

開発した金型を用いて様々な条件下で金属・樹脂直接接合サンプルを作製し、その接合特性の評価を行った。金型全体もしくは一部のみを温度変化させる方法（動的制御）や金型の一部のみを高温もしくは低温にして時間変化はさせない方法（分布制御）を検討した。また、射出成形条件としては、射出速度を複数水準用意して実験を行った。接合特性の評価には、引張せん断試験を行い、各条件での接合強度を調査した。

4. 研究成果

(1) 動的な温度分布制御可能な金型

図2に開発した金型の模式図を示す。接合させる金属片を挿入するポケット部分と射出成形樹脂が流動する部分（スプル、ランナ、ゲート、キャビティ）を示している。接合サンプルは、成形樹脂から不要部分（ランナ等）を取り除くとIS019095に従う重ね継手構造になるよう設計されている。また、成形中の溶融樹脂の圧力を計測できるよう、圧力センサが接合部近傍に配置されている。以上の、形状やセンサ配置に関しては従来研究[1]と同様である。

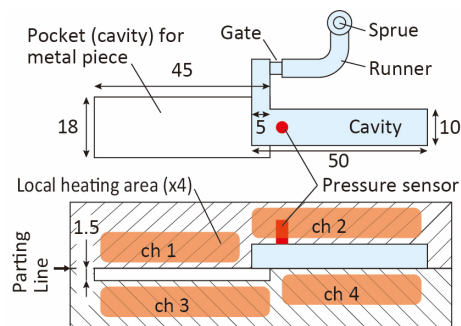


図2 開発した金型（内部）の模式図

従来と比べて新規点である動的な温度分布制御機能に関しては、小型ヒータを複数用いることで比較的高い動的性能（高速に温度変化させる性能）を持たせ、空間分布を制御できる構成を実現した。本研究では、金型の固定側と可動側それぞれにおいて、重ね継手の金属部と樹脂部に分かれるよう、温度制御範囲を4か所に設定した（図2）。この4か所がそれぞれ独立して温度制御できる構成になっている。

本研究では、金型の固定側と可動側それぞれにおいて、重ね継手の金属部と樹脂部に分かれるよう、温度制御範囲を4か所に設定した（図2）。この4か所がそれぞれ独立して温度制御できる構成になっている。

(2) 動的制御の効果

開発した金型による温度制御が接合特性に与える影響の調査として、最初に全部位（4か所）を同時に動的に制御する方法の影響を調査した。

熔融樹脂の温度が高くなると流動性が高くなり、樹脂流動中（図1(b)）に金属表面の微細構造へ樹脂が侵入しやすくなる。金属微細構造への樹脂の侵入度合いが大きくなるほど金属-樹脂間のアンカー効果が大きくなり強固な接合が得られると考えられるため、樹脂温度を高くすることは接合に対して良い方向に働く。従って、金型の温度は可能な限り高くすることが良いと考えられるが、「型温を高く保つにはエネルギーが多く必要になる」「型温を高くすると樹脂の冷却・硬化が遅くなり生産性が低下する」といった問題がある。つまり単純に型温を高くすることが良いわけではないことが分かる。

以上の型温に関するトレードオフを解消するため、接合が発現すると考えられる樹脂が流動・充填するタイミングのみ型温を高くし、それ以外の時は低温にするという動的制御方策を検討した。ベースの温度（低温値）を従来研究と同等の140℃にし、一時的な高温値を変化させてその影響を調査した。また射出成形パラメータとの相互作用を調査するため、従来研究で最も影響の大きかった射出速度も変化させた。作製した接合サンプルを評価するため、重ね継手の長手方向に荷重をかけて破断させ、破断までの最大荷重を接合面積で除した引張せん断強度を求めた。

図5に、異なる射出速度条件（ $v=10$ mm/s および 100 mm/s）における高温値と引張せん断強度の関係を示す。型温が高くなるほど接合強度が高くなっていることが分かる。ただし温度が高すぎると強度が低下している。これは冷却・硬化のための時間が不十分であることや、熱分解によって母材強度が低下したことが原因と考えられる。また、動的制御を行わない場合（140℃条件）は射出速度が高いほど強度が高いが、動的制御によって温度を高くするにつれ速度の影響がなくなっていることが分かる。低射出速度でも高強度が得られていることから、動的制御を行うことで強度が向上するだけでなく効率向上も実現できることが分かった。

(3) 分布制御の効果

次に型温を不均一にした際の影響を調査した。独立して制御可能な4か所のうち、金属片を挿入する部分（図2のch1およびch3）と重ね継手の樹脂部を形成する部分（図2のch2およびch4）をそれぞれまとめ、金属部温度 T_{13} と樹脂部温度 T_{24} を独立して制御する2自由度制御を行った。その他の射出成形条件や接合サンプルの評価方法は(2)と全く同様にした。

図6に $T_{13} > T_{24}$ の条件において金属部温度 T_{13} と射出速度 v が接合強度に与える影響を示す。 T_{24} は120℃と140℃の2通りの場合になる。 T_{13} が高くなるほど接合強度が高くなり、射出速度の影響がなくなっていることが分かる。これは動的制御の結果

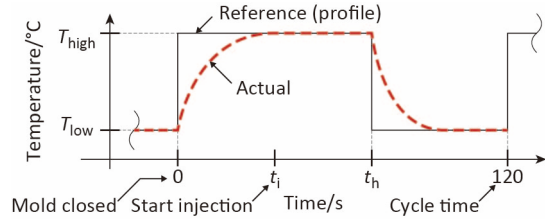


図3 型温動的制御のプロファイル

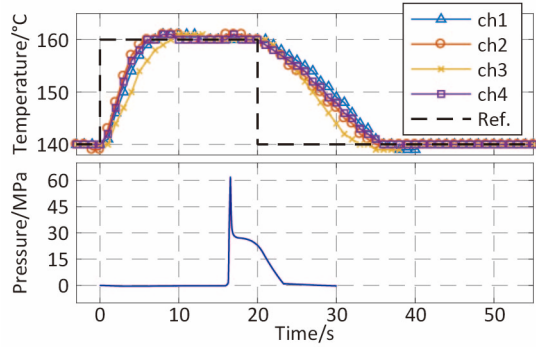


図4 型温と型内圧の実測値の時間変化

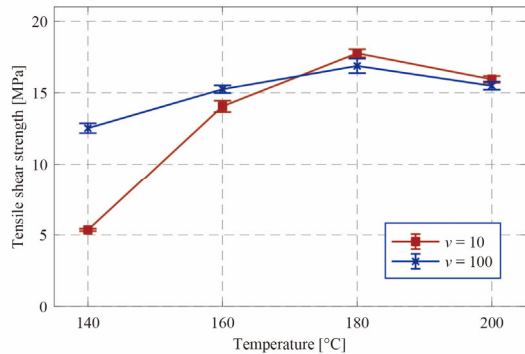


図5 異なる射出速度条件における高温値と引張せん断強度の関係

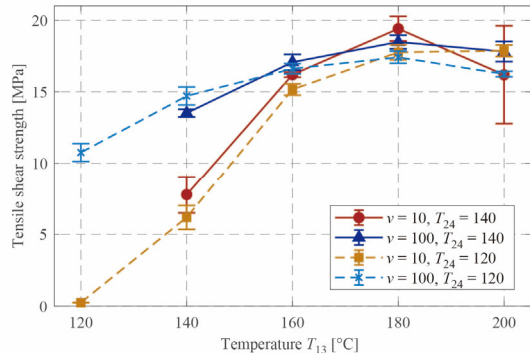


図6 金属部温度と射出速度が引張せん断強度に与える影響

と同様の傾向であり、高温にすることで効率が増していると言える。

図7に $T_{13} < T_{24}$ の条件における樹脂部温度 T_{24} と射出速度 v が接合強度に与える影響を示す。図から分かる通り、樹脂部温度は全く接合強度に影響を与えていないことが分かる。射出速度との相互作用も見られなかった。

重ね継手構造を成形する場合、金属片を挿入する部分の温度は接合強度に大きく影響を及ぼすが、樹脂が流動する部分の温度は全く影響を及ぼさなかった。このことから、接合が発現する際、樹脂全体の温度ではなく金属-樹脂の界面の温度が重要であるのだと考えられる。

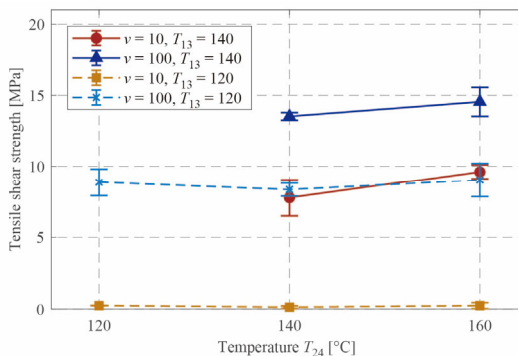


図7 樹脂部温度と射出速度が接合強度に与える影響

(4) 知見のまとめ

型温の動的分布制御の影響を調査した結果得られた知見をまとめる。

- 樹脂流動中のみ高温にすることで、接合強度向上および効率向上が実現できる
- 型内の樹脂部の温度よりも金属片部の温度が大きな影響を与える

これらの知見から、接合部近傍を局部的に急加熱・急冷却できるような機構が成形接合にとって望ましいことが分かる。これらは、成形接合の将来的な実用化を進める上で重要なものになると考えられる。

<引用文献>

[1] Fuminobu Kimura, Shotaro Kadoya, Yusuke Kajihara “Effects of molding conditions on injection molded direct joining using a metal with nano-structured surface”, Precision Engineering, Vol. 45, pp. 203-208, 2016

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4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 Fuminobu Kimura, Eiji Yamaguchi, Nayuta Horie, Gota Suzuki, and Yusuke Kajihara	4. 巻 260
2. 論文標題 Formation of boehmite crystals on microblasted aluminum surface to enhance performance of metal-polymer direct joining	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Materials Letters	6. 最初と最後の頁 126963
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.matlet.2019.126963	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 Shuaijie Zhao, Fuminobu Kimura, Shotaro Kadoya, and Yusuke Kajihara	4. 巻 61
2. 論文標題 Experimental analysis on mechanical interlocking of metal-polymer direct joining	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Precision Engineering	6. 最初と最後の頁 120-125
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.precisioneng.2019.10.009	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 Shuaijie Zhao, Fuminobu Kimura, Eiji Yamaguchi, Nayuta Horie, Yusuke Kajihara	4. 巻 107
2. 論文標題 Manufacturing aluminum/polybutylene terephthalate direct joints by using hot water-treated aluminum via injection molding	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The International Journal of Advanced Manufacturing Technology	6. 最初と最後の頁 4637 ~ 4644
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00170-020-05364-0	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 Shotaro Kadoya, Fuminobu Kimura, Takashi Yanagishita, Yusuke Kajihara	4. 巻 67
2. 論文標題 Structure size effect on polymer infiltration in injection molded direct joining	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Precision Engineering	6. 最初と最後の頁 100 ~ 109
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.precisioneng.2020.09.017	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 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Fuminobu Kimura and Yusuke Kajihara
2. 発表標題 Dynamic control of mold temperature for metal-plastics direct joining using injection molding
3. 学会等名 The 8th International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Fuminobu Kimura and Yusuke Kajihara
2. 発表標題 Efficiency improvement for injection molded direct joining by dynamic control of mold temperature
3. 学会等名 euspen's 20th International Conference & Exhibition (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 木村文信, 梶原優介
2. 発表標題 急加熱・急冷却金型が成形接合の接合強度および効率に与える影響
3. 学会等名 プラスチック成形加工学会第31回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 木村文信, 梶原優介
2. 発表標題 成形接合における型温分布が接合強度に与える影響
3. 学会等名 プラスチック成形加工学会第32回年次大会
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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------