

令和元年5月30日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04275

研究課題名(和文) 吸着蓄熱による未利用熱の時空間濃縮とプラスチック射出成形金型温度制御への適用

研究課題名(英文) Space-time concentration of unused thermal energy by using adsorption heat storage and its application to temperature control of mold in polymer injection molding process

研究代表者

佐藤 勲 (SATO, Isao)

東京工業大学・その他・理事・副学長

研究者番号：10170721

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、プラスチック射出成形における金型温度動的制御に要するエネルギーを削減するため、未利用熱エネルギーを蓄えたデシカントを金型に輸送し、これを金型昇温に利用するシステムを提示するとともに、生産性への影響を踏まえた実用性を検討することを目的とする。急速発熱機構を内包する金型、未利用熱によるデシカント再生器を試作し、これらの性能をもとに、実成形プロセスに合致した条件で金型温度動的制御に要するエネルギー削減効果を評価した。その結果、本研究の条件下では、金型を電力で加熱する場合に比べ、少なくとも24%のエネルギーを削減できることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の社会的意義は、加工産業におけるエネルギー消費量の削減を、加工産業の至上命題である生産性を阻害することなく、未利用熱エネルギーを有効活用することによって実現する可能性を示した点にある。一方、本研究の学術的意義は、デシカントを用いた吸着蓄熱現象を利用して、一般にエネルギー密度の低い未利用熱エネルギーを型外でデシカントに「ゆっくり」蓄積し、これを型内に移動して「急速に」発熱させる「時空間濃縮」の概念を提示し実証したことにあるといえる。

研究成果の概要(英文)：This research project aims to reduce energy consumption in the rapid temperature control of molds used in the polymer injection molding process. The investigators proposed a novel system in which a desiccant regenerated by unused thermal energy is transported to and used for rapid heating of the mold, and the effectiveness of this system was examined under the practical condition. Test molds which include rapid heating mechanism based on the adsorption heating of a desiccant and desorption chambers in which the desiccant is regenerated by unused thermal energy at low temperature were prototyped, and, based on the fundamental characteristics of these components, we discussed the reduction efficiency of energy consumption in the rapid mold temperature control under the practical molding conditions. The results showed that the proposed system can reduce at least 24 % of energy consumption compared with the case of heating the mold directly with electric power.

研究分野：熱工学

キーワード：エネルギー工学 吸着蓄熱 プラスチック射出成形 金型温度制御

1. 研究開始当初の背景

我が国の製造業のエネルギー消費量は、2009年度には1973年度比で約89%に減少しているのにも関わらず、非素材（加工組立）系の産業の消費エネルギーは、量・割合共に増加している[1]。一方で、工場排熱棟の未利用熱エネルギーは、我が国だけでも年間1兆kWh以上存在するといわれている[2]。したがって、製造業におけるさらなる省エネルギーを推進するためには、加工産業での未利用熱エネルギー利用を促進する方策が必須の状況となっている。

加工産業の中で熱エネルギーを直接使用する熔融加工のひとつであるプラスチック射出成形は、冷たい金型に高温の熔融樹脂を充填する際の急速冷却による高い生産性を特長とするが、成形後の材料の冷却を急ぎすぎると製品の品位が低下することが問題となっている。これに対応するため、高品位な成形品を製造する際には、熔融樹脂を充填する段階で高温の伝熱媒体を用いて金型温度を材料の固化温度近傍まで高め、急激な冷却に伴う品位低下を抑制した上で、充填完了後に金型を低温伝熱媒体で急速に冷却して生産性への影響を最小限に抑えることが行われている。しかし、プラスチック射出成形金型は成形品に比べて格段に大きな熱容量を有しており、金型温度の動的制御には多量のエネルギーが必要で、昨今の省エネルギー化の進んだ成形システムでは全消費エネルギーの50%を超えるとの報告[3]もある。したがって、加工産業の消費エネルギー削減のためには、金型温度制御に要するエネルギーを削減する手段あるいは未利用熱エネルギーを活用する手段を、射出成形の特色である高い生産性と相反しない形で確立することが強く求められる。

研究代表者らは、プラスチック射出成形金型の動的溫度制御手法として、気液相変化伝熱を利用したシステムを提案・検討してきた[4~6]。また、高温状態の金型が持つ熱エネルギーを次成形工程の低温状態の金型の加熱に利用する方策として、金型内に吸着蓄熱材（デシカント）を内包させ、動的溫度制御の冷却段階で金型が持つ熱エネルギーを一旦蓄え、次成形工程での金型昇温に利用するシステムを提案・検討している[7]。その結果、これらの概念は金型昇温に要するエネルギーを削減する上で有効であることが確認された一方、デシカントの再生による金型冷却には比較的長い時間を要し、生産性への影響が無視し得ないことが明らかとなった。この課題を解決できるか否かが、吸着蓄熱を実際のプラスチック射出成形プロセスにおける金型温度動的制御の消費エネルギー削減に応用する上での鍵を握っている状況にある。

2. 研究の目的

本研究は、上記のような背景を踏まえて、未利用熱エネルギーを蓄えたデシカントを金型に輸送し、これを金型昇温に利用するシステムを提示するとともに、生産性への影響を踏まえた実用性を検討することを目的とする。一般に未利用熱エネルギーのうち金型昇温に適した温度域（100°C近傍）のものはエネルギー密度が低いため、これをそのまま金型昇温に適用すると昇温時間の延長（生産性の低下）を招く。一方、1回の成形サイクルに比して金型昇温時間は短く、この時間差を利用して型外で未利用熱エネルギーをデシカントに「ゆっくり」蓄熱し、金型内での吸湿によって「急速に」放出させれば、生産性への影響を最小限に抑えることができる。すなわち本研究の学術的な鍵は、成形サイクルと金型昇温時間との違いを利用した未利用熱エネルギーの「時空間濃縮」の適用可能性を探究することにあるといえる。

本研究の目的を達成するために、デシカントに吸湿させることで急速発熱させる機構を内包した金型、未利用熱エネルギーを用いてデシカントを再生するための蓄熱部、デシカントを金型と蓄熱部の間で輸送するシステムの三者を構築し、それらをプラスチック射出成形プロセスに合致した時間的制約、加熱する金型と未利用熱エネルギー源の特質に合わせた熱量的制約の下で制御する手法を確立する。デシカントによる金型の急速加熱の可能性は[7]の検討で明確になりつつあるが、デシカントの金型への高密度な充填が必須であることから、デシカント輸送システムとの整合性の高い構造を考案・実証する。また、デシカント輸送手法については、過去に実施した固気二相流伝熱の検討[8]による知見に基づき粉体デシカントの気体搬送システムを想定するが、湿分移動による蓄熱損失を抑止する方法を考案し、所要エネルギーの観点を含めた性能評価を実施する。さらに、これらのシステムの制御系については、現有する成形機を用いて実際に射出成形加工を行い、未利用熱エネルギー利用率と成形品品位向上効果の関係を明らかにする。

3. 研究の方法

本研究では、エネルギー密度の低い未利用熱エネルギーを、デシカントの吸着発熱と脱湿再生に要する時間差を積極的に利用して「時空間濃縮」し、プラスチック射出成形加工の至上命題である生産性を阻害せずに、金型温度動的制御に利用する方法を確立することを目的に、デシカントに吸湿させることで急速発熱させる機構を内包した金型、未利用熱エネルギーを用いてデシカントを再生するための蓄熱部、デシカントを金型と蓄熱部の間で輸送するシステムの三者を構築し、それらをプラスチック射出成形プロセスに合致した時間的制約、加熱する金型と未利用熱エネルギー源の特質に合わせた熱量的制約の下で制御する手法を確立する。デシカントによる急速加熱には、デシカントの金型への高密度充填が必須であることから、デシカント輸送システムとの整合性の高い構造を考案・実証する。また、デシカント輸送手法については、粉体デシカントの各種輸送システムを想定し、所要エネルギーの観点を含めた性能評価を実施する。さらに、これらのシステムの制御系については、実プロセスにおける生産性への影

響を考慮しながら、未利用熱エネルギー利用効率と成形品品位向上効果の関係を明らかにする。それぞれの要素に関する具体的な研究方法は以下の通りである。

(1) 急速発熱機構内包金型

交換可能なデシカントに吸湿させることで急速加熱する機構を内包した金型の試作を行い、その温度制御性を実験的に評価する。試作する金型の基本構造は、キャビティ（成形樹脂が充填される空隙）表面に近い部分に設けたデシカント室、デシカントを発熱させるための蒸気供給流路、ならびに樹脂充填後に金型を冷却するための冷却水路からなる。

これまでの検討で、デシカントの吸着発熱により金型キャビティ面を急速加熱するためには、デシカントをデシカント室に高密度に充填して金型面との接触面の熱抵抗を減ずるとともに、デシカント内部での発熱をキャビティ表面に導くためのフィンデシカント内に挿入する必要があることが分かっている。また、キャビティ表面を急速に加熱するためデシカント室はキャビティ表面に沿った平坦な形状とすることが望ましいが、こうしたデシカントに端部から蒸気を供給し吸着させると発熱量に分布が生じやすいこと、発熱分布を抑制するため蒸気供給速度を高めると蒸気への対流伝熱によって金型加熱熱量が減少することがこれまでの検討で明らかとなっている。これらの知見をもとに各種構造の金型を試作し、その性能を評価した。さらに、蒸気吸着後のデシカントの排出・再生済みデシカントの充填方法については、粉体デシカントを直接移動させる方法と、デシカントを封止したカセットを交換する方法を検討した。

(2) デシカント再生蓄熱部

デシカント再生を行う蓄熱部は、利用する未利用熱エネルギーの形態や温度レベルによって最適な構成が異なるが、本研究においては低温廃熱（温度 100~200°C程度）を想定して試作を行った。金型を急速加熱するためには吸湿量がほぼ 0 となるまでデシカントを再生することが求められるが、温度レベルの低い廃熱を用いて、限られた時間内にデシカントを完全に脱湿させるためには、高い熱・物質伝達率を実現する系が望ましい。そこで本研究では、粉体であるデシカントを流動物質とする循環流動層による再生蓄熱部を構築し、その性能を評価した。また、流動層による再生蓄熱には、粉体デシカントを流動化させるための流動化気体駆動動力が大きくなる懸念があることから、粉体デシカントを流動化させない固定床型の再生器についても性能評価を行った。

(3) デシカント輸送方法を含めた制御系

急速発熱機構を内包する金型と、未利用低温廃熱を用いた再生部間のデシカントの輸送系には、粉体デシカントの気体搬送もしくはコンベアー等を用いた直接輸送を想定して、これら 3 要素を組み合わせ、実際のプラスチック射出成形プロセスの条件下で未利用廃熱による金型温度動的制御を実現するための制御方法と消費エネルギー削減効果を検討した。すなわち、実成形プロセスでは、一定の射出成形工程サイクルの中で、材料樹脂の熔融、金型への充填、型内での冷却、型開きによる成形品取り出しが繰り返されている。成形品品位向上のために金型温度を上昇させるのは、このうち、型開き後、金型への熔融樹脂充填までの間で、典型的には数 10 数秒程度の間である。デシカントへの蒸気吸着によってこの程度の時間内に金型温度を上昇させることができたとしても、低温廃熱によるデシカントの再生にはより長い時間を要するため、金型温度上昇に用いたものと等量のデシカントを都度再生しては、生産性に影響が及ぶ。そこで、金型・再生部間のデシカント質量輸送量は維持しつつ、複数成形サイクルに必要なデシカントをまとめて再生する（＝「時空間濃縮」の概念）ことを想定し、それに必要なデシカント輸送バランスと必要な輸送動力、ならびにシステム全体としての消費エネルギー削減効果の評価した。

4. 研究成果

(1) デシカントを内包した急速発熱機構による金型昇温特性

金型内にデシカントを封入し湿分を吸着させることで金型温度を上昇させる動的温度制御の効果を評価するため、図 1 に示す模擬金型を作成し、デシカント室内にデシカントとしてゼオライト（モレキュラーシーブ 13X）を充填して、吸湿による加熱特性を評価した。デシカント室には、従来の知見から、ピンフィンを設置し、デシカントの吸湿による発熱を金型転写面に誘導することで、温度上昇の効率化を図った。代表的な結果を図 2 と図 3 に示す。図 2 は湿度 100%の湿り空気を供給した場合、図 3 は液水を直接デシカントに供給した場合の結果である。

これらのグラフからわかるとおり、いずれの湿分供給方法によっても湿分吸着に伴って金型転写面温度は顕著に上昇し、特にデシカント内にフィンを設置した場合には高い温度上昇が見られる。また、湿り空気湿分を供給した場合に比べ液水を直接投入した場合の方が温度上昇が顕著であり、かつ急速に金型温度を上昇させられることがわかる。さらに、実用的な観点からは、湿り空気による発熱時には、吸着速度の制限により湿り空気供給側から発熱が始まり、転写面上に温度分布ができやすいのに対し、液水を供給した場合にはほぼ様な温度上を得ることができた。これらの結果から、金型内に設置したピンフィンをもつデシカント室にデシカントを充填し液水を供給することによって、本実験条件では最大 27.4 K の転写面温度上昇を 14 s 程度の時間で実現できることが示された。

この方法による金型温度の動的制御が実際の成形品品位（転写性）に与える効果を確認するため、図 1 の模擬金型の転写面に幅 100 μm、深さ 15 μm の溝を掘り、これを実際の射出成形機に取り付けて成形加工を行った。型内デシカント室にはピンフィンを設置し、湿分供給は液水

の直接投入とした。成形材料はポリスチレン、射出温度は 200℃、射出速度は 54 mm/s である。金型温度を電気ヒーターによって変化させた場合と、初期温度 200℃の金型に対してデシカントの吸着発熱で転写面を加熱した場合の成形品への転写率（転写面の溝深さに対する成形品突起高さの比）の比較を図 4 に示す。この図から、吸着発熱によって加熱した金型を用いると、温度を 50℃に設定した金型を用いた場合とほぼ同等の転写率が得られることがわかる。このことは、図 3 の条件下で転写面温度上昇が約 27 K であることと符合する。すなわち、本方法によって金型温度を制御しても、電気ヒーター等による温度制御と同等の成形品品位向上効果が得られることが示された。

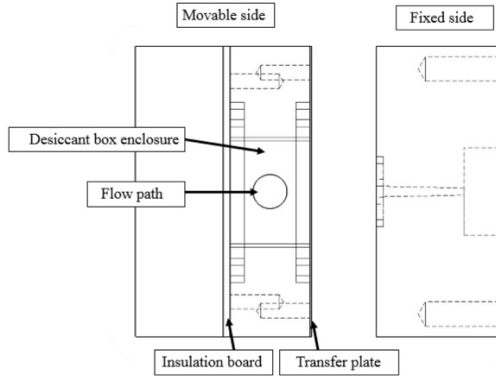


図 1 急速加熱機構内包模擬金型

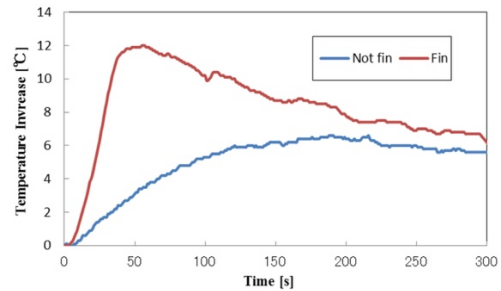


図 2 湿り空気による吸着加熱特性

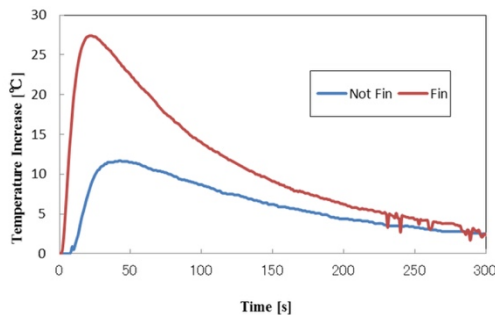


図 3 液水直接投入による吸着加熱特性

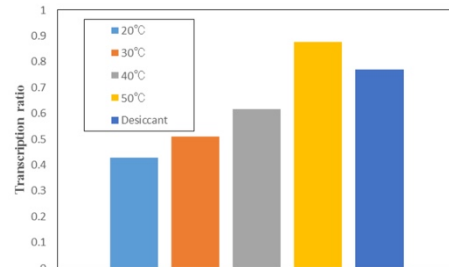


図 4 型加熱による転写性の変化

(2) 未利用廃熱を用いたデシカント再生・蓄熱特性

一方、吸湿したデシカントを未利用廃熱を利用して再生・蓄熱する方法については、まず図 1 に示した模擬金型のデシカント室をそのまま使用し、吸着発熱後のデシカントを 200℃の乾燥空気によって再生してみた。このときのデシカント質量の時間変化を図 5 に示す。このグラフからわかるとおり、約 60 分間の乾燥によってデシカント質量は湿分吸着前の値にほぼ等しくなる。この状態のデシカントを用いて再度吸着発熱を繰り返した時の転写面温度上昇を図 6 に示すが、この再生条件では、転写面温度の上昇速度はほぼ一定であるものの、温度上昇の絶対値は完全乾燥状態の 27.4 K に比べて小さく約 18.3 K に留まっている。これは、200℃、60 分の再生条件では完全乾燥状態が得られないことを示している。さらに、60 分という再生時間は実成形における成形サイクルからすればきわめて長い時間であり、一つのデシカント室を型と再生器の間で往復させるプロセスは生産性への影響の観点から成立しないことがわかる。

この問題を解決するため、より効率的にデシカントを再生する方法として図 7 に示す流動層型の再生器を試作し、この流動層に完全湿潤状態のデシカントを投入して、流動層出入口間の温度変化から内部のデシカントの再生状況を把握した。実験条件は、再生空気温度を 170～200℃、流動化気体流速を流動化開始速度 (u_m) の 1.7～2.3 倍とし、投入デシカント質量は流動層単位断面あたり 17.8～44.4 (dry kg)/m² で変化させた。本実験条件におけるデシカント再生状況の一例を図 8 に示す。このグラフに見られるように、流動層型の再生器によれば 170～200℃の加熱空気温度において約 600 s でデシカントを再生できることがわかる。これは、図 5 に示したデシカント室内に封じた状態での再生の 1/6 の時間であり、流動層の高い熱・物質伝達特性が表れているといえる。この再生器における最適蓄熱条件は、加熱空気温度 190℃、流動化気体流速 2.15 u_m 、投入デシカント質量 26.7 (dry kg)/m² であった。

この結果から、流動層によるデシカントの再生・蓄熱の効率は高いことが示されたが、流動化気体駆動動力が大きく、未利用廃熱として 200℃近傍の空気流が大量に得られる場合以外は、トータルでの消費エネルギー削減効果に影響が及ぶことが懸念される。そこで、デシカントを流動化させずに固定床のまま再生させる方法についても検討を行った。すなわち、図 9 のように、断熱材で囲われた再生室底部のメッシュ上に粉体デシカントを約 80 mm の高さまで充填し、下部から加熱空気を吹き込んで、デシカントが流動化しない状態での再生特性を評価した。その結果の一例を図 10 に示す。この結果に見られるように、固定床でのデシカントの再生速度は図 8 に示した流動層によるものよりは遅く、1800 s 程度の時間を要するが、図 5 の金型に設置

するデシカント室に封止したままの状態よりは高速化でき、かつ再生室底面積を増やせば一度に再生できるデシカント量を増大できることから、未利用廃熱の時空間圧縮を少ない加熱空気駆動動力で実現するには好適である。

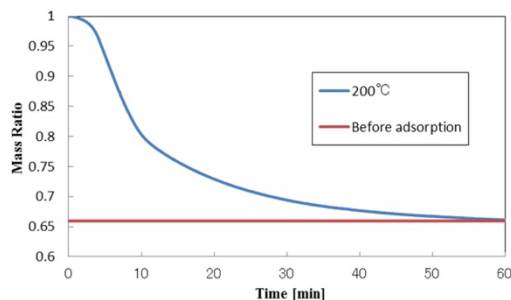


図5 チャンバー内封止状態での再生特性

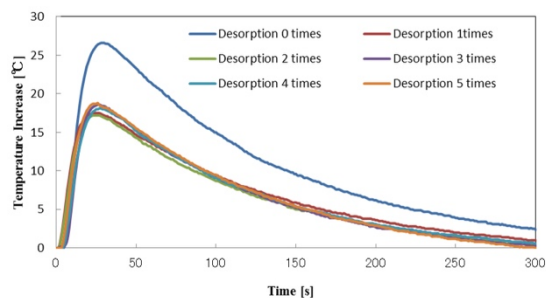


図6 60分再生後のデシカントによる加熱特性

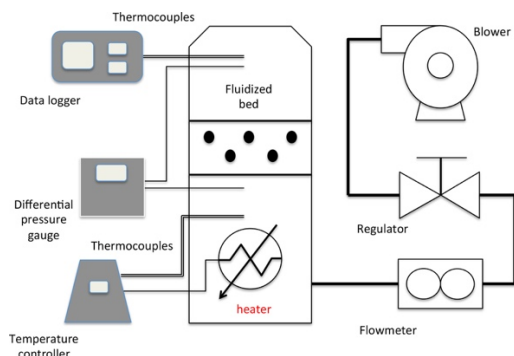


図7 流動層による再生器

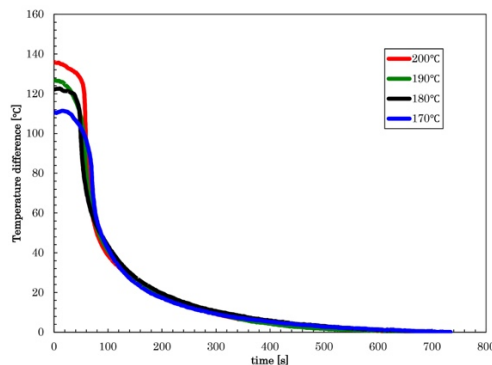


図8 流動層による再生特性

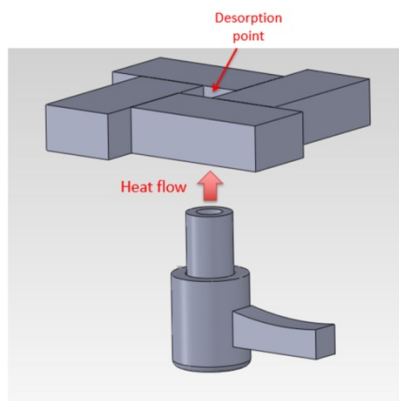


図9 固定床による再生器

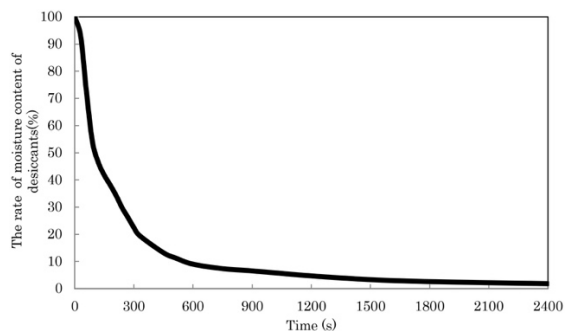


図10 固定床による再生特性

(3) 実成形プロセスへの適用を想定したシステム性能評価

上記の知見をもとに、実用的な観点から、本研究課題のコンセプトを実現し得るデシカント輸送方法を含めた制御手法を検討した。具体的には、急速発熱機構を内包した金型にはフィンを持つチャンパーに封止したデシカントに液水を直接散布する方法を、デシカント再生蓄熱部には加熱気体駆動動力の小さい固定床型再生器を用い、金型と再生器間のデシカント輸送は機械的なコンベアーが担うシステムを想定し、生産性への影響が生じない条件、すなわち成形サイクル内にデシカント再生・輸送にかかる「むだ時間」が生じない条件で運転したときの消費エネルギーを算出した。

この算出を行うに当たり、まず決定すべきは、どのレベルまでデシカントを再生するかである。デシカント再生に用いる未利用廃熱の量は十分にあり、そのコストは無視できるとしても、高温空気流駆動のための動力は再生時間に比例して増加していく。図10に示した結果を得る際に使用したブローアの消費電力から高温空気駆動動力を単位通過面積あたり4.5 kWと仮定し、固定床厚さを80 mmとして、デシカントに蓄えられる熱量(=時々刻々の含水率のデシカントを完全吸水させることによって得られる発熱量) $Q_{\text{蓄}}$ と所用空気駆動エネルギー $Q_{\text{空}}$ の比をグラフ化したものが図11である。この図から、再生時間を90 sとしたときにもっとも効率よく再生が行われることがわかるが、図10からこのときの含水率は54%程度であり、型内に投入して吸湿させても発熱量が十分でないことが想定される。そこで、十分な発熱が期待できる含水率として例えば10%以下となる再生時間を図11から求めると約600 sとなることから、この時間まで再生を継続することを想定する。このときのデシカントの単位質量あたりの発熱量(=デシカント蓄熱量 $Q_{\text{蓄}}$) は約160 kJ/(dry kg)である。4. (1)の検討結果によると、この発熱量のう

ち金型転写面加熱に直接寄与するものは50%程度であることから、射出成形プロセスの1サイクルに要する時間平均で1 kWの金型転写面加熱熱流を得るために必要なデシカント質量流量は0.0125 (dry kg)/sとなる。この質量流量のデシカントを図10の測定結果と同様、厚さ80 mmの固定床で600 s間再生するために必要な固定床底面積 (=高温空気通過面積) は約0.153 m²、これに必要な高温空気駆動動力は0.69 kWと算定される。

この条件におけるデシカントの流れを模式的に図12に示す。この図では射出成形プロセスのサイクル時間を70 sとしてある。すなわちこの条件では、急速発熱機構を有する金型転写面を70 kJの熱量で加熱できるだけのデシカントが充填されるが、発熱速度はデシカントへの吸湿速度で決まり、液水を直接散布する方法によれば、図3に示したとおり14 s程度の時間で生じるため、約5 kWに相当する発熱速度が得られることになる。このときの投入エネルギー量は、デシカント再生エネルギーと高温空気駆動動力、コンベアー駆動動力の和であるが、デシカントの再生は未利用廃熱で賄われエネルギーコストが0であることから、金型を時間平均1 kWで加熱するに要する外部エネルギーは、コンベアーを駆動する電力を70 Wと仮定すると、0.76 kWである。すなわち、この条件では、電力により金型を昇温させる場合に比して少なくとも24%の消費エネルギーを削減できることがわかる。このように、適切な運転条件を設定すれば、吸着蓄熱を利用した未利用廃熱の時空間濃縮によってプラスチック射出成形金型加熱を行うことで消費エネルギー削減効果が得られることが明らかにできた。

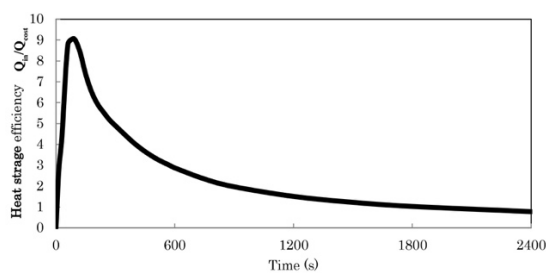


図11 再生蓄熱効率

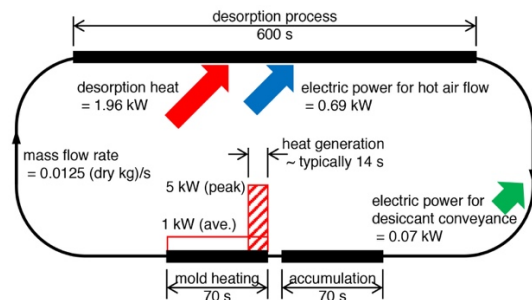


図12 実プロセスを想定したデシカントフロー

参考文献

- [1] 平成22年度エネルギーに関する年次報告：資源エネルギー庁
- [2] 未利用熱エネルギーの革新的活用技術研究開発事前評価報告書、経済産業省
- [3] 谷口：特開2008-012895
- [4] 佐藤・齊藤・古田・川口：特開2007-290279
- [5] 佐藤：科学研究費補助金（基盤研究(B)）、課題番号21360093
- [6] 佐藤：プラスチック金型と熱移動：樹脂の流れと制御法、日刊工業新聞社（2011）
- [7] 佐藤：科学研究費補助金（基盤研究(B)）、課題番号25289038
- [8] 佐藤・黒崎・高瀬：日本機械学会論文集, 63-610B (1997) pp. 2133-2141 など

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕（計1件）

- ① 佐藤 勲、齊藤卓志：エネルギー工学の観点から見た成形加工と金型温度制御（基調講演）、プラスチック成形加工学会第29回年次大会、2018年6月22日

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名： 齊藤 卓志
 ローマ字氏名： SAITO, Takushi
 所属研究機関名： 東京工業大学
 部局名： 工学院
 職名： 准教授
 研究者番号（8桁）： 20302937

研究分担者氏名： 川口 達也
 ローマ字氏名： KAWAGUCHI, Tatsuya
 所属研究機関名： 東京工業大学
 部局名： 工学院
 職名： 助教
 研究者番号（8桁）： 40376942

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。