

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 23 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289038

研究課題名(和文) 吸着蓄熱材内包金型によるプラスチック射出成形の金型温度制御消費エネルギーの削減

研究課題名(英文) Study on Reduction of Energy Consumption for Mold-Temperature Control Using an Adsorption Heat Storage Material Inclusion Mold

研究代表者

佐藤 勲 (SATO, ISAO)

東京工業大学・理工学研究科・教授

研究者番号：10170721

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,200,000円

研究成果の概要(和文)：プラスチック射出成形金型の動的温度制御に必要なエネルギー消費を削減することを目的に、金型内包吸着蓄熱材に水蒸気を吸脱着させることで金型温度を変化させる概念を提示し、その実現可能性をエネルギー消費削減効果と生産性への影響の観点から検討した。その結果、吸着蓄熱材に水蒸気を吸着させることで金型を所要の温度上昇させ、成形品品位を向上させられること、それによって金型昇温に必要な電力を削減できることが示された。一方で、効率的な温度制御を実現するためには、吸着蓄熱材の発熱を金型キャビティ表面に誘導する工夫が必要なこと、蓄熱材の再生には時間が必要で生産性への影響が無視し得ないことも明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：In order to reduce energy consumption necessary for dynamic temperature control of molds of plastic injection molding, we proposed a novel concept to change the mold temperature by adsorption/desorption of water vapor to/from a adsorption heat storage material included in the mold, and the feasibility was examined from the viewpoints of energy reduction and influence on the productivity. As the results, it was shown that the mold temperature can be definitely risen by the heat generation due to adsorption of water vapor to the heat storage material, and that quality of the molded is improved and thus the energy consumption is reduced to that extent. On the other hand, this study also revealed that effective mold heating requires some devices that guide the heat generated in the heat storage material to the cavity surface, and that regeneration of the heat storage material after heat generation takes relatively long time and thus deterioration of productivity is not negligible.

研究分野：工学

キーワード：エネルギー工学 プラスチック射出成形 金型温度制御 吸着蓄熱 消費エネルギー削減 生産性

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。したがって、地球温暖化を背景として、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、加工産業でのエネルギー消費を削減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溶融加工のうち、生産性への要求が最も高いプラスチック射出成形においては、附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射出成形プロセスでは、溶融材料を金型キャビティ内に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で用いられる金型は成形品に比べて格段に大きな熱容量を有しているため、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消費を画期的に減じる手段、それも実際の製造工程への普及が期待できる手段を確立することが強く求められる。

2. 研究の目的

申請者らは、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。このシステムは、加熱・冷却熱源と金型とを切り替え可能なヒートパイプで接続したものであり、気液相変化伝熱の高い熱伝達率を活かして熱容量の大きな金型の動的溫度制御を高速に行うとともに、図1に示すように、並行して運転される複数の成形機の間で、加

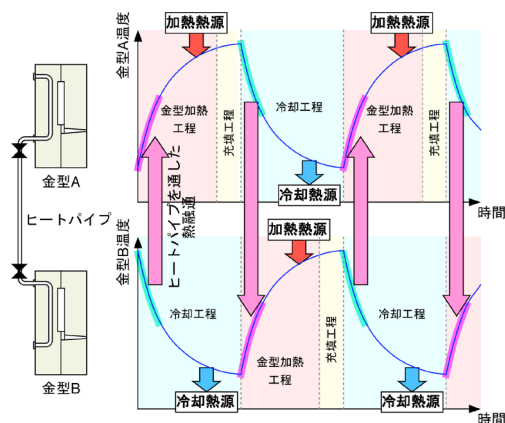


図1 金型間で熱融通を行うシステム

熱中の金型をコンデンサ（冷熱源）として、冷却中の金型をボイラー（加熱源）として適用することで、部分的にはあるが温度制御に要するエネルギーを削減することを目指している。その結果、相変化伝熱によって従来の方法より速い加熱・冷却が実現できること、温度制御に要するエネルギーを金型間熱融通により削減できること、その際には凝縮液のハンドリングが性能に強く影響すること等を明らかにした。

これらの検討で明らかになった金型間熱融通による消費エネルギー削減効果は魅力的であるが、この原理は成形サイクルの位相を揃えた複数の成形機を有する成形工場、言い替えると比較的大規模な成形工場にしか適用できない。我が国のプラスチック成形加工産業は小規模な成形工場が主体であり、この分野での消費エネルギー削減のためには、1台の成形機（金型）でも効果が得られるシステムを構築することが強く求められる。

熱融通による消費エネルギー削減効果を1台の金型で実現するには、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ため、時間的な熱貯蔵が必須である。申請者らは、これらの成形加工分野の研究とは独立に、デシカントへの吸脱着を利用して、空調気中の湿分の除去と同時にCO2等の気質を低下させるガスを分離・排気するシステムを検討してきた。この検討を通して、デシカントへの湿分の吸脱着に伴う熱授受がきわめて大きいことを体得したことから、この吸着蓄熱を金型の動的溫度制御に際する熱エネルギー貯蔵に適用することを着想した。

本研究は、こうした実績を踏まえて、吸着蓄熱材を内包した金型によって、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有効利用して、プラスチック射出成形工程における金型溫度制御に要するエネルギーを画期的に削減するシステムを提示するとともに、その実用性や効果を生産性への影響を踏まえて検討することを目的とする。

3. 研究の方法

高品位成形のための射出成形金型の溫度制御は、図1に示したように、樹脂充填段階での高温モード（120℃程度）と、充填終了後、成形された溶融樹脂の冷却を行うための低温モード（30℃程度）の2つを周期的に繰り返す。このような動的溫度制御を、吸着蓄熱材を内包した金型で実現し、溫度制御性や消費エネルギー削減効果を実験的に評価する。

本研究で想定する吸着蓄熱材内包金型の基本構造は、図2に示す通り、金型本体に、通常の型溫度動的制御に用いられる電気ヒーターと冷却水路に加えて、成形用キャビティ表面近傍に空隙を設け、内部に蒸気流路を確保しつつ吸着蓄熱材（デシカント）を充填

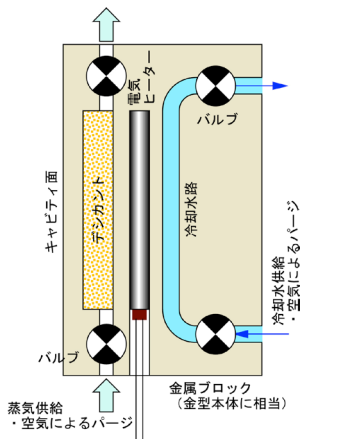


図2 吸着蓄熱材内包金型の基本構造

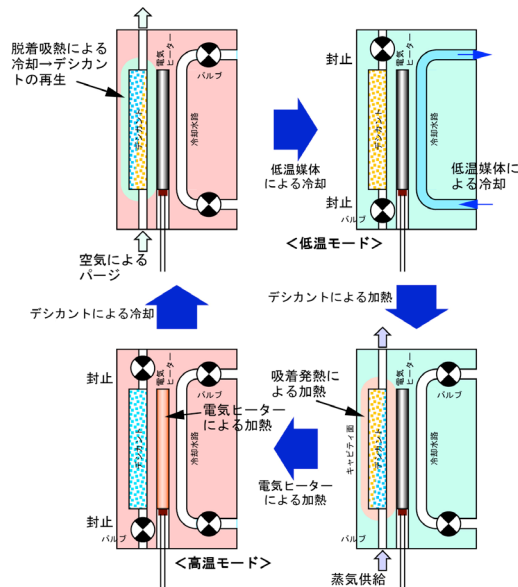


図3 動的温度制御の基本動作

したものである。この金型の温度を、高温モードと低温モードの間で周期的に変化させる際の蓄熱材の放熱と再生（蓄熱）動作は、図3に示す通りである。

本研究では、吸着蓄熱材による型温度制御の基本特性の把握と、それを利用した成形品品位の向上ならびに生産性への影響の評価の2つの段階で検討を進めた。

(1) 吸着蓄熱材による型温度制御の基本特性の把握

吸着蓄熱材への水蒸気の吸着による発熱と脱着による冷却の基本特性を把握するため、図2に相当する模擬金型を製作し、内包したデシカント（13Xゼオライト）に圧力を調整した純水蒸気を供給し、あるいは排気によって水蒸気を脱着した際の温度挙動を実験的に検討した。温度挙動の計測には、デシカント室の水蒸気流れ方向に配置した熱電対を用い、模擬金型の熱容量と温度変化からデシカントの発熱・吸熱量を把握した。

(2) 吸着蓄熱材内包金型による成形品品位向上の評価

吸着蓄熱材の発熱・吸熱を利用した金型温

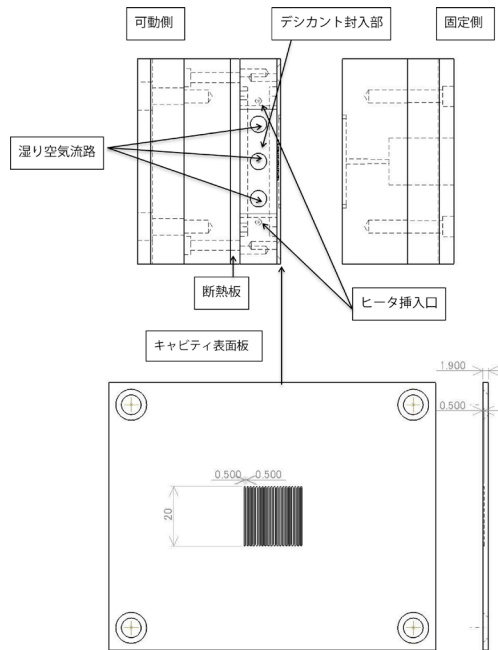


図4 射出整形用金型

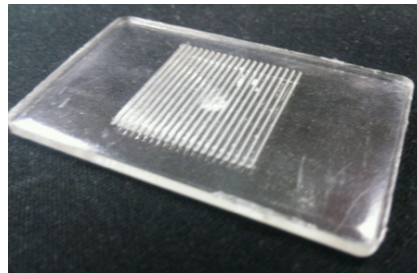


図5 成形品

度制御による成形品品位の向上の効果と生産性への影響を把握するため、図2に示す構造の金型を製作し、実際に射出成形機に搭載して射出成形を行った。金型キャビティ表面にはテクスチャーを彫り込み、それを転写して形成される成形品表面形状とテクスチャー形状とを比較することによって、主に転写性への効果を評価した。

図4に金型の詳細を、図5に成形品の写真を示す。この金型によって得られる成形品は、幅30 mm×高さ50 mm×厚さ2 mmであり、そのデシカント温調側には、幅500 μm、深さ500 μmの溝をピッチ1 mmで20本施した表面を転写してできる突起が形成される。成形材料はポリエチレンおよびポリスチレンを用いた。成形条件は、樹脂射出温度200℃、射出圧力22.8 MPa、射出速度54 mm/s、型締力2.1 tfとした。また、型にはゼオライト13Xを20.8 g内包させ、後に述べる(1)での検討結果をもとに、アルミニウムプレートフィンを挿入してある。デシカントには、温度23℃、流量16 l/minの飽和湿り空気を供給した。また、金型には電気ヒーターが挿入されており、成形前の金型初期温度を任意に設定できるようにした。

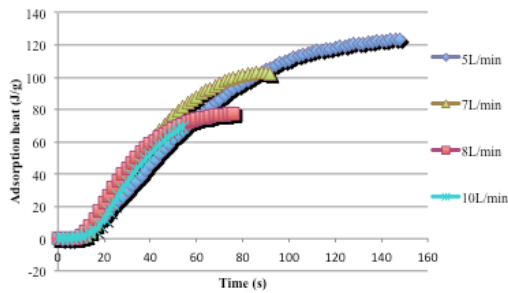


図6 デシカントの吸着発熱挙動

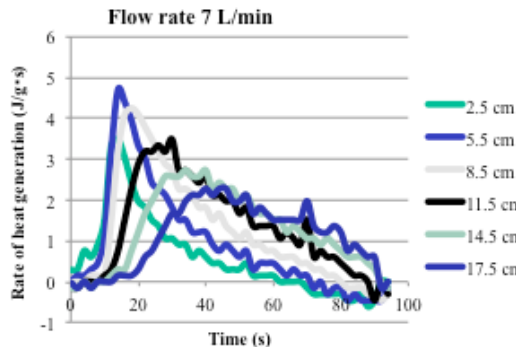


図7 各位置における発熱速度

4. 研究成果

(1) 吸着蓄熱材による型温度制御の基本特性の把握

吸着蓄熱材の水蒸気の吸着・脱着による発熱・吸熱の基礎特性を把握するため、図2に示した模擬金型に充填した完全乾燥状態のデシカント(13Xゼオライト)に、温度35℃もしくは85℃の飽和蒸気圧に調整した水蒸気を流入させた際の吸着発熱挙動と、吸着飽和後のデシカントを真空ポンプにより排気することによる脱着吸熱挙動を評価した。

図6は、35℃の飽和水蒸気を流入させた際のバルク吸着発熱の経時変化を示したものである。この実験では、水蒸気の流入速度(流量)を3~10 l/minで変化させたが、水蒸気流量によって吸着発熱挙動が異なることが分かる。すなわち、水蒸気流量が極端に小さいと、デシカントへの水蒸気吸着に水蒸気の供給が追いつかず十分な発熱が見られないが、ある程度の水蒸気供給量(この場合は4 l/min)以上になると、水蒸気供給量の増加に伴ってより早期に顕著な発熱が生じる。ただし、水蒸気供給量が多すぎると、特に吸着後半で発熱量は逆に減少する傾向が見て取れる。これは、水蒸気対流伝熱によって、デシカントからの発熱が型外へ持ちさらられるためである。この実験条件では、より高速に高発熱を得るためには、水蒸気流量は7 l/min程度が適切である。この結果から、本概念によって金型を加熱するためには、最適な水蒸気供給量(流速)が存在することが分かった。

このときのデシカント各位置における発熱速度を詳細に調べた。結果の一例を図7に

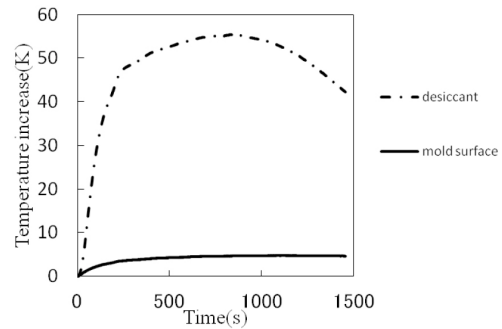


図8 デシカントと金型表面温度(フィン無し)

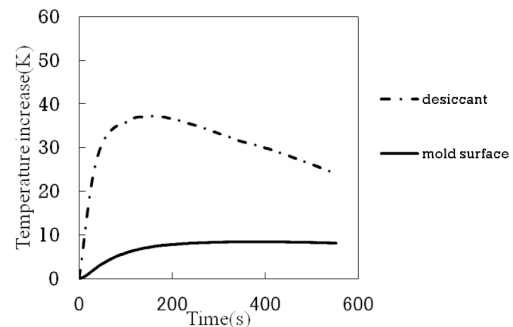


図9 デシカントと金型表面温度(フィン有り)

示す。この図から分かるように、デシカントの発熱は水蒸気流入方向に一樣ではなく、流入孔近傍で早く発熱し、発熱ピークが徐々に下流に向けて移動していく。これは、流入部に近いデシカントがまず水蒸気を吸着し、それが飽和した後に下流部へ水蒸気が移動するためである。このことから、表面温度の均一性が求められる金型温度制御にデシカントの吸着発熱を利用する場合には、蒸気供給方法に配慮する必要があることが示唆された。

図8は吸着発熱による模擬金型表面(キャビティ面)とデシカントそのものの温度変化を示したものである。この結果に見られるように、この実験条件では水蒸気の吸収によってデシカントは最大55 Kの温度上昇を見せるのに対し、キャビティ面の温度上昇は約5 Kに留まっている。これは、粉体であるデシカントと金型本体との間の熱抵抗が大きいためである。水蒸気供給のため、デシカントを多孔体状態としておくことは必須であるので、金型をより高効率に加熱するには両者の接触面積を拡大する必要がある。そこで金型内に充填したデシカントに金属製のフィンを挿入して、同様に金型とデシカントの温度変化を調べた。結果の一例を図9に示す。デシカントの発熱をフィンを通して金型キャビティ面に誘導することで、方表面の温度上昇は約9 Kに増加し、それに伴いデシカントそのものの最大温度上昇は約40 Kに低下した。このことから、固体デシカントの吸着発熱を利用して金型を効率的に加熱するためには、デシカント内部で生じる吸着発熱を型表面に導くための工夫が必要であること

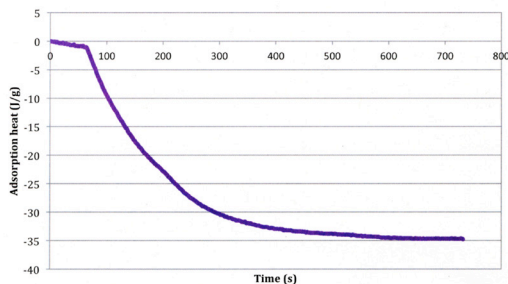


図 10 デシカントの脱着吸熱挙動

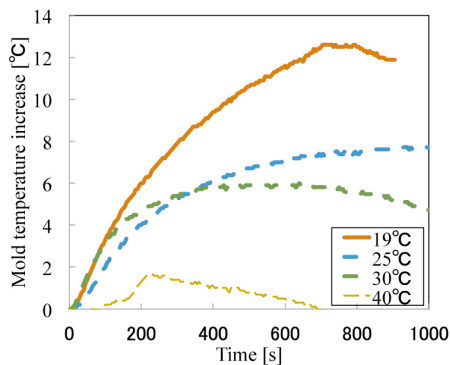


図 11 金型加熱に与える金型初期温度の影響

が明らかとなった。

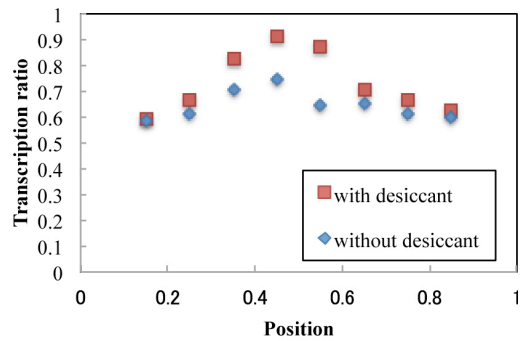
一方、吸着を終えたデシカントを真空ポンプによって排気した際の水分の脱着による吸熱（冷却）挙動の一例を図 10 に示す。この結果に見られる通り、デシカントの脱着によって吸熱が生じ、金型を冷却できる。ただし、それに要する時間は図 6 に示す吸着加熱に比較して概ね一桁長いことがわかる。すなわち、図 3 に示した金型の加熱冷却サイクルを実現することは可能であるが、生産性維持の観点からはデシカントの脱着再生に要する時間を短縮する工夫が不可欠であるといえる。

(2) 吸着蓄熱材内包金型による成形品品位向上の評価

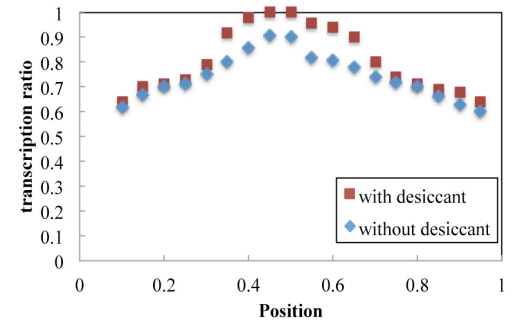
デシカントの吸着発熱・脱着冷却によって金型温度を制御することが可能であることが明らかになったので、この原理に基づく金型を製作して、射出成形機に搭載して実際に成形実験を行い、成形品表面に附形される突起の転写性の変化から、デシカント加熱による効果を検討した。

図 11 は、型初期温度を変化させたときのデシカント吸着発熱による金型キャビティ面における温度上昇の経時変化を示したものである。この図から分かる通り、金型初期温度が高くなると、吸着発熱による温度上昇は減少する。これは、型初期温度（デシカント初期温度）の上昇に伴い供給される湿り空気の相対湿度が低下し、デシカントの吸着能が減少するためである。

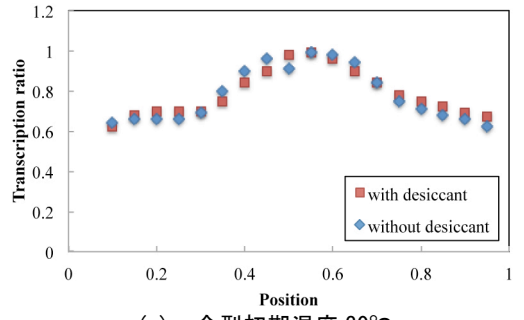
こうした発熱により金型温度を変化させたときの成形品表面の転写性の変化を図 12 に示す。図 12 は型表面に刻まれた幅 500 μm 、深さ 500 μm の溝を転写してできる突起の形



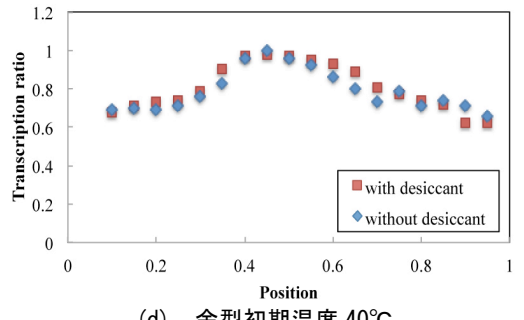
(a) 金型初期温度 19°C



(b) 金型初期温度 25°C



(c) 金型初期温度 30°C



(d) 金型初期温度 40°C

図 12 転写性に対するデシカント加熱の効果

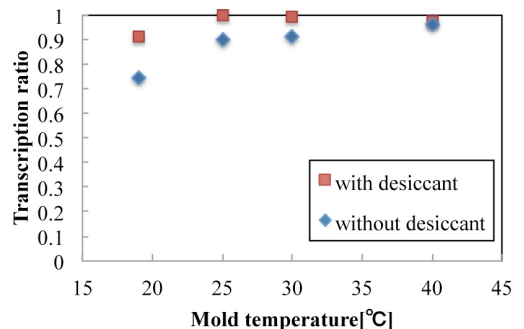


図 13 転写性向上に対する金型初期温度の影響

状であり、金型初期温度を 19°C から 40°C まで変化させたときの結果をまとめて示して

ある。これらの図中のデシカント発熱を利用した場合としなかった場合とを比較すると、金型初期温度が低い場合にデシカント発熱による転写性向上が見られることが分かる。

この効果を、最大転写率と金型初期温度の関係としてまとめたものが図 13 である。この図から分かる通り、本実験条件では、デシカント発熱を利用しないと 90%の転写率を得るためには金型初期温度を 30℃以上に高める必要があるが、デシカント発熱を利用することによって 19℃程度の初期温度で同等の転写性が得られる。この初期温度の違いを電気ヒーターによって補填するために必要な消費エネルギーは約 7 kJ であり、デシカント内包金型による温度制御によって 1 サイクルあたりにこれだけの消費エネルギーを削減できることが分かる。

なお、(1)の結果から、発熱後のデシカントを再生するために必要な時間が吸着発熱時間に比べて約一桁長いことが分かっていることから、こうした概念を実際のプラスチック射出成形に適用するためには、デシカント再生を高速化する工夫、それも電気エネルギー等の有効なエネルギーを使用せずに再生する方法が必要であるといえる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 1 件)

- ① ストジャリットタムジャルチャイ、佐藤 勲、齊藤卓志、川口達也：デシカント材を利用した急速加熱/冷却システムの研究、日本機械学会 2014 年度年次大会、2014 年 9 月 8 日、東京電機大学 (東京都足立区)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐藤 勲 (SATO H ISAO)
東京工業大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号：1 0 1 7 0 7 2 1

(2) 研究分担者

齊藤 卓志 (SAITO TAKUSHI)
東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号：2 0 3 0 2 9 3 7

川口 達也 (KAWAGUCHI TATSUYA)
東京工業大学・大学院理工学研究科・助教
研究者番号：4 0 3 7 6 9 4 2