

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 20 日現在

機関番号：1 2 6 0 8

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2009～2011

課題番号：2 1 3 6 0 0 9 3

研究課題名（和文） プラスチック射出成形工程の排熱を利用した金型温度制御消費エネルギーの革新的削減

研究課題名（英文） Study on Progressive Reduction Method of Energy Consumption for Mold-Temperature Control by Utilizing Waste Heat from the Polymer Injection-Molding Process

研究代表者

佐藤 勲 (SATOHI 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

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、複数の射出成形機の温度の異なる金型間で熱授受を行うバッチ型ヒートパイプシステムを考案し、その性能を主にエネルギー消費削減効果と加熱・冷却速度の観点から検討した。その結果、高温金型の持つ熱エネルギーを低温金型に移送することで金型温度制御に要する熱エネルギーを最大約 41%減じられること、その際の加熱・冷却速度は通常の電気ヒーター・冷却水によるものとほぼ同等かやや速いことが示された。

研究成果の概要（英文）：

In this study, a novel heat transport system was developed in order to reduce energy consumption for dynamic temperature control of the molds used in the polymer injection molding process. The heat transport system, which is a batch-type heat pipe, connects two molds of different temperature, and the heat accumulated in the high-temperature mold is transported to the low-temperature mold. Effectiveness of the heat transport system was experimentally examined from the viewpoints of the reduction of energy consumption and of the rate of temperature change of the molds. From the results, it was shown that the energy consumption can be reduced up to 41 % by the heat exchange, and that the rate of mold temperature change is equivalent to or rather higher than the conventional method, i.e. electric heater and coolant.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	5,100,000	1,530,000	6,630,000
2010 年度	4,100,000	1,230,000	5,330,000
2011 年度	5,300,000	1,590,000	6,890,000
年度			
年度			
総計	14,500,000	4,350,000	18,850,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：プラスチック射出成形、金型温度制御、排熱利用、消費エネルギー削減、生産性、ヒートパイプシステム

1. 研究開始当初の背景

我が国の製造業の生産額は 2006 年には 1970 年比で約 2 倍になっているのにも関わらず、エネルギー消費は 1970 年比の 1.26 倍に留まっている。これは、製造分野における省エネルギーが進んだことに加えて、素材産業から加工組立型産業へのシフトといった製造業の産業構造の変化があったためと言われる。これに伴い、製造業における加工産業等（非素材系）のエネルギー消費の占める割合は、1970 年の 20 %から 2006 年には 28 %に高まっており、地球温暖化を背景とす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。

加工産業のなかで熱エネルギーを直接使用する溶融加工では、加工性を向上させ加工抵抗を減ずる目的で材料の温度を上昇させるために加熱を行い、その後、新たに付与した機能や形状を固定化するために材料を冷却している。これらの工程で加熱に要する熱エネルギーと冷却時に材料から放出される熱エネルギーは、原理的には等量・等質であり、循環利用が可能はずであるが、実際にはこのような有効利用は行われていない。これは、熱移動に要する時間を短縮し生産性を確保するために、材料の冷却がほぼ一定温度の低温熱源への熱移動によって行われ、それに伴い回収された熱エネルギーにエクセルギー損失が生じるためである。

一方、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、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を削減するためには、こうした工程内でのエネルギー消費を画期的に減じる手段、それも生産性への影響が少なく実際の製造工程への普及が期待される手段を確立することが強く求められている。

2. 研究の目的

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。このシステムは、気液相変化伝熱の高い熱伝達率を活かして、大きな熱容量を有する金型の動的溫度制御を伝熱媒体の沸騰・凝縮伝熱によって高速に、すなわち生産性への影響を抑制して行うことを目指したものであり、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る。この検討では、実際に従来の高温・低温伝熱媒体の対流熱伝達によるものより高速な金型温調システムが構築できることを示すと同時に、並行して運転される複数の成形機間で、加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、部分的にはあるが溫度制御に要するエネルギーを循環使用できる可能性を示唆している。

本研究では、この概念をさらに拡張し、工程内あるいは他工程の排熱を有効利用することで、プラスチック射出成形工程における金型温度の動的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。

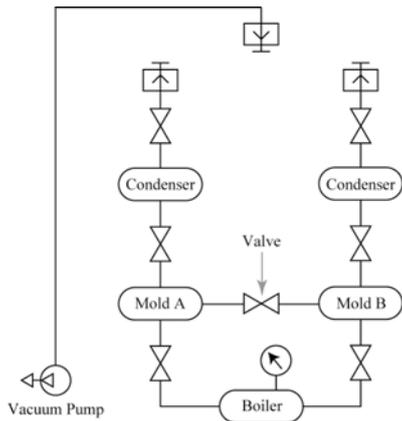
3. 研究の方法

(1) 実験装置

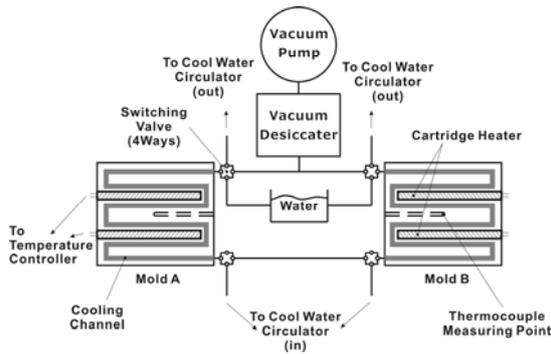
本研究で検討する金型溫度制御のための熱輸送システムは、基本的に水を作動媒体とするヒートパイプであるが、熱を授受する金型は高温・低温状態を繰り返すことから、一般的なヒートパイプのように凝縮液を蒸発部に戻すウィック等を設ける必要はない。研究に使用した実験系の概念図を図 1 に示す。

実験系は大きく分けて 2 種類用意した。一つは図 1(a) に示す溫度制御される一対の金型の他に蒸気供給源（ボイラ）と凝縮部（コンデンサ）を設置したシステムであり、もう一つは図 1(b) のように、基本的に一対の金型のみで構成され、金型に付加加熱・冷却を行う電気ヒーター・冷却水路を設けたシステムである。前者では、システムの基本動作を検討するとともに、2 金型間の熱融通だけでなく、プラスチック射出成形工程における周辺機器の排熱を金型の溫度制御に再利用する際の性能を評価する。一方、後者では、より単純な構成で、実用条件に近い状態でのエネルギー消費量削減効果と溫度制御速度を検討した。

実際のプラスチック射出成形に用いられる金型には様々な大きさのものがあるが、本研究では、研究代表者らが有する小型射出成形機の金型のキャビティ部分を想定して、 $100 \times 100 \times 10 \text{ mm}^3$ 程度の金属ブロックを用いた。この金属ブロックを、作動媒体である水の凝縮・蒸発によって加熱・冷却するため、



(a) 外部にボイラとコンデンサを有する実験系



(b) 電気ヒーターを内蔵する金型による実験系
図1 実験系の概略

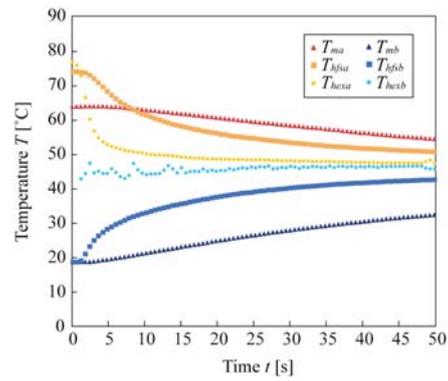
図1(a)に示したシステムでは蒸気チャンバーを、図1(b)のシステムではブロック内に蒸気配管を設けた。ただし、蒸気チャンバーを用いる場合は相変化伝熱を生じる面積を拡大するため、チャンバー内に金属ブロックに接するフィンを設置した。

いずれの実験系においても、不凝縮ガスの影響を除くため、実験開始前に真空ポンプを用いて系内の空気・溶存ガスを十分に排気した。

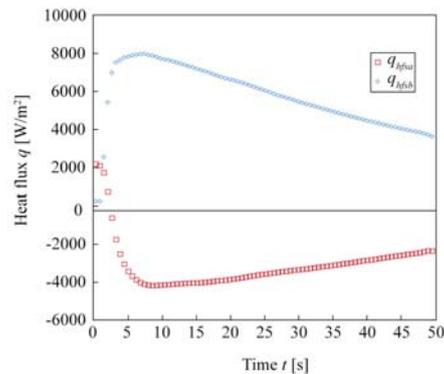
(2) 実験方法と実験条件

実験方法は、図1に示した2つの実験系とも、基本的には、高温側の金型に液を供給し、沸騰伝熱による冷却を行うとともに、生じた蒸気を飽和圧力の違いを利用して低温側金型に移送し、凝縮伝熱によって加熱するものである。このときの金型各部の温度変化を計測することで、移送熱量や温度制御速度を評価する。

ただし、実験手順は金型部にヒーターを持つ図1(b)の実験系とそれのない図1(a)の実験系とで若干異なる。すなわち、金型部にヒーターを持たず、外部にボイラ・コンデンサを有する実験系(図1(a))では、まず両金型をボイラからの蒸気の凝縮伝熱で所定の温度(高温状態)まで加熱した後、一方の金型をコンデンサに接続して、沸騰伝熱によって所定の温度(低温状態)まで冷却する。然る後



(a) 両金型の温度変化(T_m :キャビティ表面、 T_{hfs} :熱流束センサー部、 T_{hex} :フィン基部、添字 a:高温側、添字 b:低温側)



(b) 両金型の加熱・冷却熱流束
図2 金型間熱融通の基礎特性

に、ボイラ・コンデンサを金型系から切り離し、両金型を接続して、金型間の移送熱量を計測する。一方、金型にヒーターを持つ実験系(図1(b))では、一方の金型を電気ヒーターによって所定の温度(高温状態)に加熱した後、両金型を接続した状態で高温金型に液を供給して、高温金型を沸騰伝熱によって冷却するとともに、生じた蒸気で低温金型を凝縮伝熱により加熱する。これらの実験操作は基本的にすべて、構成要素間を接続する配管のバルブ操作のみで行えるようになっている。

本研究では、高温状態における金型温度は、図1(a)の実験系ではボイラの耐圧の都合上、80 程度、図1(b)の実験系ではより実際の成形条件に近い 120 程度とし、低温状態の金型温度は常温~30 程度とした。

4. 研究成果

(1) 金型温度制御の基本動作と外部熱源による制御特性

まず、図1(a)の実験系を用いて、ヒートパイプシステムによる金型温度制御の基本特性を評価した。図2は、高温金型と低温金型間を接続して、両者の間で熱融通を行ったときの金型の温度変化(図2(a))とそれぞれの金型の加熱・冷却熱流束(図2(b))の時間変

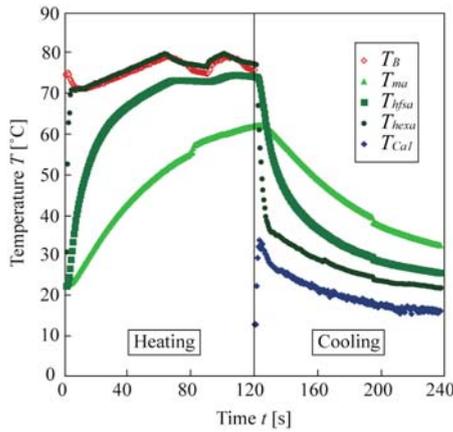


図3 ボイラ・コンデンサによる金型の加熱・冷却特性
(T_B : ボイラ内水温、 T_{cot} : コンデンサ冷却水温)

化を示したものである。これらのグラフからわかるとおり、本実験系では、金型本体と拡大伝熱面の間に熱流束センサーを配しており、その熱抵抗が大きいと、相変化伝熱面と金型の間に温度差が生じているが、高温金型は液の沸騰伝熱によって冷却され、低温金型は蒸気の凝縮伝熱により加熱されて、最終的には両金型初期温度の平均値に近い温度に漸近する様子が見てとれる。このときの熱流束は最大 8 kW/m^2 程度であり、単純な系でも比較的高速な熱輸送が行えていることがわかる。

一方、図3は外部のボイラとコンデンサを用いて金型を加熱・冷却したときの温度変化を示した結果である。金型内相変化伝熱面温度はボイラ・コンデンサ温度に10s程度の遅れでほぼ追従して変化しており、本システムが金型間熱融通だけでなく、外部熱源による金型の加熱・冷却にも高い適応性を有していることがわかる。プラスチック射出成形工程には、成形前の樹脂材料(ペレット)の乾燥や可塑化筒ホッパー下部の冷却など、金型制御温度より高い温度の未利用排熱が大量に存在することから、本システムによってこれらを有効に利用すれば、プラスチック射出成形工程の熱エネルギー消費を減じることにつながる結論できる。

(2) 2金型間の熱融通による繰り返し温度制御

続いて、図1(b)の実験系を用いて、より実際の成形に近い条件における金型温度制御特性を評価した。この実験系では金型内に電気ヒーターを内蔵しているため、高温金型・低温金型間の熱融通後、昇温中の金型の高温状態までの加熱には電気ヒーターを用い、冷却中の金型の低温状態までの冷却には、相変化媒体流路中に冷却水を流すことで、温度制御を完結させた。

図4は、このような手順で2つの金型を交互に高温・低温状態に繰り返し制御を行ったときの、金型温度の時間変化を示したもので

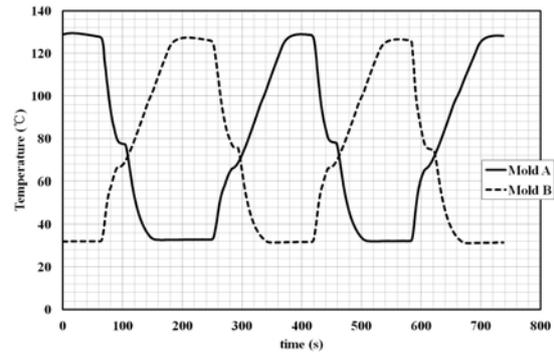


図4 熱融通と電気ヒーター・冷却水を用いた金型温度の繰り返し制御特性

ある。この実験では、高温状態の金型温度を128、低温状態を32としている。また、このグラフ上で、高温金型の冷却、低温金型の昇温の初期(変曲点までの時間)はヒートパイプシステムによる熱融通による温度制御に相当し、それ以降は電気ヒーター、冷却水による温度制御に相当する。この図から、ヒートパイプによる熱融通と電気ヒーター・冷却水による加熱・冷却を組み合わせたシステムによって、2つの金型の温度制御が繰り返し実現できることがわかる。

このときの温度制御に要する時間(低温金型が高温状態になるまでの時間)は約120sで、実用成形システムとしてはまだ長い。本実験金型に設置できる大きさの電気ヒーターによる加熱(昇温過程の後半)に比して、熱融通による加熱(昇温過程の前半)の昇温速度は同等かやや大きいことから、限定されたスペースに設置できる熱制御デバイスとしては、電気ヒーターを用いた場合と同等の温度制御性を発現できる可能性があるといえる。

一方、熱融通と電気ヒーター・冷却水による温度制御の切り替え時の金型温度に注目すると、温度制御ごとに若干の変化があるが、概ね70であることがわかる。この実験では2つの金型の熱容量は同一であるから、高温金型が有する熱エネルギーの約40%が熱融通によって低温金型に移送されている。このことは、低温金型を電気ヒーターのみによって加熱する場合に比較して約40%の電力を削減できることを意味する。

(3) 蒸気配管の熱損失と圧力損失

上述の通り、2つの金型間の熱融通によって高温金型の持つ熱エネルギーの約40%を低温金型の昇温に使用できることが示された。しかし、この研究で使用した2つの金型の熱容量が同一であることから、理想的には高温金型の持つ熱エネルギーの半分が低温金型の昇温に再利用できるはずであり、再利用できたエネルギーがこれより少ないのは蒸気配管からの熱損失によるものと考えら

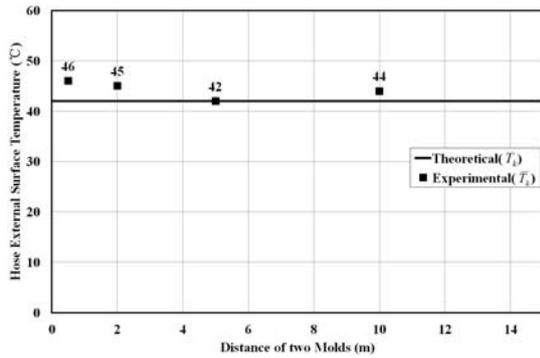


図5 蒸気配管表面温度の予測値と実測値の比較

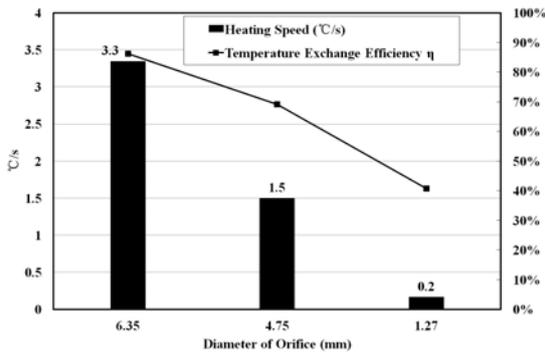


図6 蒸気配管の圧力損失による金型昇温速度の変化

れる。そこで、図1(b)に示した実験系によって計測された蒸気配管表面温度を、配管内面を内部蒸気の飽和温度と仮定し、配管壁内熱伝導と表面の自然対流熱伝達から予測したものと比較してみた。結果を図5に示す。この図では配管長をパラメータとして結果を示してあるが、予測値は配管長に影響されずに一定である。図中に示した実測値も配管長によらずほぼ一定で、定量的にも予測値とよく一致している。このことから、熱輸送中の蒸気配管内面はそのときの蒸気圧力に基づく飽和温度であることが確認できる。本研究で提案するシステムの蒸気飽和温度は、望ましい品位の成形品を得るための高温・低温金型温度によって決まり、これを低下させることはできないから、熱損失を抑制し、金型温度制御の消費エネルギー削減効果を向上させるためには、配管表面の断熱と配管長の短縮が必要であるといえる。

一方、蒸気配管の圧力損失は金型の昇温・冷却速度に影響を及ぼす。図6は蒸気配管途中に直径の異なるオリフィスを挿入したときの金型加熱速度の変化を示したものである。この図に見られるように、直径の小さなオリフィスによって配管の圧力損失を増加させると、蒸気の凝縮による金型昇温速度が極端に低下する。また、同図中には熱融通による高温金型の温度低下 ΔT_h に対する低温金型の温度上昇 ΔT_c の比(温度交換効率 η)=

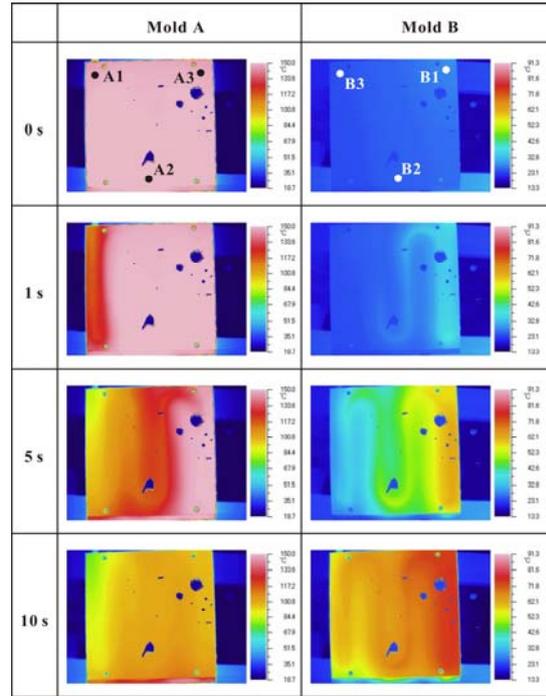


図7 加熱・冷却中の金型キャビティ表面温度分布

$\Delta T_c / \Delta T_h$)も示してあるが、オリフィス径を小さくするとこの値も低下することがわかる。これは配管系の圧力損失によって、高温金型蒸発部と低温金型凝縮部の飽和温度差が大きくなるためである。これらのことから、本手法によって2金型間で効果的に熱融通を行うためには、できる限り両金型間を短い蒸気配管で接続することが実用上重要であるといえる。

(4) 金型キャビティ面内の温度分布

実際のプラスチック射出成形金型に本研究で提案する熱移送システムを適用する際には、消費エネルギー削減効果、金型昇温・冷却速度、すなわち生産性への影響に加えて、キャビティ表面の温度分布の均一性も良好な成形品を得る観点から重要である。できるだけ高速な温度制御を実現するため、金型の熱容量を減じた場合には、型内の熱伝導による温度均一化は期待しにくくなるから、加熱冷却時の温度分布は特に注意を払う必要がある。

図7は、図1(b)の実験系で金型を加熱冷却した際の金型キャビティ表面の温度分布を赤外線サーモグラフィで観察した結果の一例である。この実験で使用した金型内には蛇行した蒸気配管が穿たれているが、この図に見られるように、加熱・冷却とも蒸気配管上流から始まり、全体がほぼ均等な温度になるには10s以上の時間を要する。これは、高温金型の冷却では沸騰伝熱に必要な液の供給が発生した蒸気によって阻害されること、低温金型の昇温では凝縮伝熱によって生じた液が蒸気の流動を妨げることによる。した

がって、本熱輸送システムを実用成形に適用する際には、金型の加熱冷却に伴う液の取り扱いに十分注意する必要があるといえる。これについては二相流伝熱の分野で数多くの研究事例があり、こうした知見を援用すれば適切な温度分布を得るための流路構造の開発はさほど難しくないと予想される。

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3件)

ヨウシイ、佐藤 勲、齊藤卓志、川口達也：水の相変化を伴う熱移動を利用した金型加熱/冷却に関する研究、プラスチック成形加工学会 2012 年度年次大会、2012 年 6 月 13 日、タワーホール船堀(東京都江戸川区)

齊藤卓志、楊 子璋、川口達也、佐藤 勲：ヒートパイプによる効率的な成形金型温度コントロール、型技術ワークショップ 2011、2011 年 11 月 21 日、じゅうろくプラザ(岐阜県岐阜市)

中城啓太、齊藤卓志、川口達也、佐藤 勲：ヒートパイプによる成形金型の加熱・冷却システムの研究、日本機械学会 2011 年度年次大会、2011 年 9 月 12 日、東京工業大学(東京都目黒区)

[図書](計1件)

佐藤 勲：日刊工業新聞社、プラスチック金型と熱移動-樹脂の流れと制御法、2011、147 ページ

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐藤 勲 (SATOH ISA0)

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：10170721

(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：20302937

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：40376942

(3) 連携研究者

なし