

令和 2 年 9 月 16 日現在

機関番号：33401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06319

研究課題名(和文)超高速・超高精度な液温制御を実現する内部翼加熱型電磁誘導加熱攪拌装置の開発

研究課題名(英文)Development of Internal Induction Heating Mixing System for realizing Solution Temperature Control with Ultra high speed and high precision

研究代表者

中尾 一成 (Nakao, Kazushige)

福井工業大学・工学部・教授

研究者番号：50586469

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：水、60wt%及び80wt%グリセリン水溶液を用いて電磁誘導加熱攪拌翼の熱特性を調べた。この攪拌翼は、150mm×3mmで4つの矩形開口部をもつステンレス製翼板と平板状銅コイルから構成された半密閉型となっている。攪拌翼と溶液間の熱伝達率 h は $W=hA(T)$ (W :発熱量, A :伝熱面積, T :翼と溶液の平均温度の差)から計算され、ヌセルト数 $Nu=hd/k$ (d :翼径, k :溶液の熱伝導率)の形で相関され、さらに j 因子で整理された。攪拌翼の j 因子は、攪拌槽壁の値の2倍以上と優れた伝熱特性を示した。また、時定数は6～25sであり、 h に反比例し、現行の外部槽壁加熱と比較して1ケタ小さいと見積もられた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

攪拌槽は工業的バッチ生産の汎用装置であり、熱的制御は主に外部ジャケットからの熱媒体の加熱により行われている。ゆえに、熱容量が大で遅速な制御しか行えないため、現状では、応答性に優れた精密制御は行われていない。本提案の誘導加熱攪拌翼は内部加熱であり、過去、その翼伝熱特性について論じられたことはない。また、伝熱特性や熱応答に優れた誘導加熱型攪拌方式であるため従来のバッチ式では実現しえない高応答性と大容量化が可能となる。結果、dynamicに加熱制御しうるインテリジェントな攪拌反応システムを構築でき、高収率化と高品質化が実現すると考えられ、本成果は現行のバッチ式の革新につながる。

研究成果の概要(英文)： We investigated thermal characteristics about internal induction heating typed mixing system with water, 60wt% and 80wt% glycerol solution. The impeller is semi-sealed typed impeller which consists of coil and 2 sheets of mixing impeller plate. Induction heating coil is planar coil made of copper, and mixing impeller plate is made of stainless steel of 150mm×3mm with 4 rectangular holes. Heat transfer coefficient between this impeller and solution is calculated with equation $W=hA(T)$ (W : heat rate, A : heat transfer area, T : average temperature difference between impeller and solution). Next, h is and correlated by empirical formula and finally rearranged by the form of j factor.

j -factor of induction heating mixing impeller is 2.0 more times as much as that of vessel wall. The time variation of T was well approximated by a primary delay system. Its time constant is 6～25s, its value is about 1/10 times as the conventional outer heating wall type and is proportional to $1/h$.

研究分野：パワーエレクトロニクス

キーワード：誘導加熱 攪拌翼 熱伝達特性 熱応答性

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

本研究の狙いは、内部翼電磁誘導加熱攪拌という新概念(図1右図)を産業機器に適用することにある。一般的な攪拌・加熱操作においては、容器内部の攪拌翼で攪拌しながら、容器外部から溶液を加熱する外部加熱が通常であり(図1左図)、特に化学プロセスの攪拌操作では容器内部にて回転している翼を直接加熱する”内部翼加熱”という発想がない。

産業用途としての加熱処理は蒸発、高分子製造、固体溶解、食品加熱などのプロセスにおいて適用されている。外部加熱源としては蒸気、温水による熱媒体加熱やヒータ加熱、誘導加熱などの電熱方式が採用されている。

電磁誘導加熱は①面内均一加熱、②加熱量可変制御性、③高応答性、④非接触加熱、⑤高温加熱など優れた特長を有する。現行の熱媒体による外部加熱の最大の課題は容器外壁に加熱媒体を流すため、溶液間の伝熱特性が悪く、熱容量大であり、高速・高精度な液温制御ができないことである。誘導加熱技術はこれを打破しうる可能性がある。

2. 研究の目的

本研究の目的は、電磁誘導加熱攪拌のコンセプトの実現、実用化に向けて、①内部翼加熱に適した最適な攪拌翼形状と電磁誘導コイル形状・配置の探索、②電磁誘導加熱攪拌翼の伝熱特性・制御特性の把握、③高出力、高効率非接触給電方式の検討、④電磁誘導加熱攪拌の適用研究を行い、電磁気構造設計・伝熱制御設計及び攪拌操作設計の基礎的なデータを蓄積することにある。

本申請による“容器内部の翼を電磁誘導加熱し攪拌する”研究の進展により外部加熱では不可能な高精度温度制御による高品質な化学物質の創製、かつ高速な液温制御による装置スケールアップの実現や加熱時間の大幅短縮など、物質生産プロセスを革新する大きな可能性を秘めている。

3. 研究の方法

高速・高精密な液温制御を実現するための電磁誘導加熱攪拌翼の電磁誘導・非接触給電・伝熱・制御・構造に関する、電気・機械構造設計及び攪拌操作設計に資する基礎的なデータ収集のため、以下の項目について研究を進める。

- (1) 電磁誘導加熱攪拌システム設計のための攪拌翼の伝熱特性や熱応答性、混合過程や温度場の把握を電磁誘導加熱攪拌実験および電磁界・熱流体連成解析にて行う。同時に電磁誘導コイルの翼内部への装着法を検討し、密閉型を試作する。
- (2) 高出力・高効率非接触給電回路における等価回路・材料・構造の最適化検討
- (3) 内部誘導加熱攪拌翼を用いた熱流動可視化計測実験

4. 研究成果

(1) 電磁誘導加熱攪拌実験による伝熱特性の把握(福井工大)

実験装置の外観と構成を図2-1と図2-2に示す。コイル⑤への投入電力は、直流電源①よりインバータ②、ブラシ③、スリップリング④を経由して供給される。攪拌槽は塩化ビニル製で、断熱材として容器周りに発泡ポリエチレンを用いている。また、上部には攪拌軸が通る穴みきアクリル製フランジを設け、液封構造とし、熱漏洩を極力抑えた構造とした。槽壁には水平方向にポートを設け、 $\phi 1.5\text{mm}$ のK熱電対を挿入して溶液温度を測定した。

攪拌翼はSUS430製でその形状外観を図3に示す。攪拌翼はコイルが、4つの矩形の開口部がある翼板2枚に挟まれた半密閉構造となっている。誘導加熱実験ではロータリージョイント⑭および⑮を用いないため、攪拌翼外周に挟み込まれている冷却水管を取り外している。翼温度測定には攪拌軸に搭載した小型データログに $\phi 0.1\text{mm}$ のK熱電対を接続し、7点の温度測定を行った。溶液には水、60wt%および80wt%グリセリン水溶液を用いた。コイルには、44.5kHzの高周波を通電し、発熱量は約300Wである。翼回転数は10~60rpmとした。本研究では $490 < \text{Re} < 54000$ の誘導加熱された攪

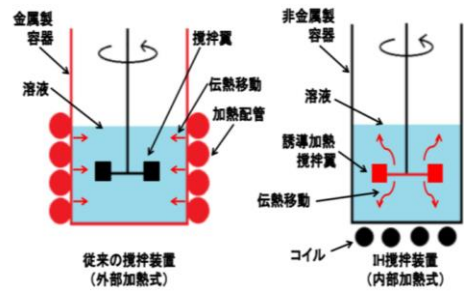


図1 外部加熱と内部翼加熱構成



図2-1 実験装置外観

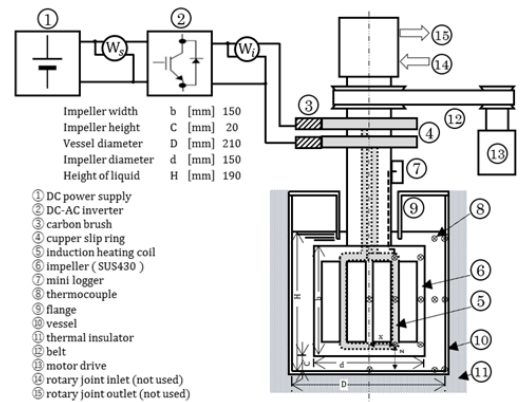


図2-2 実験装置構成

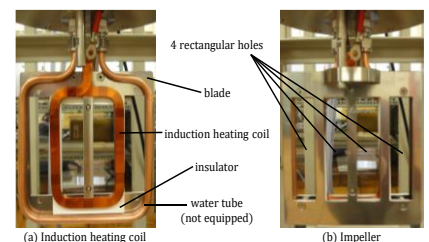


図3 内部誘導加熱攪拌翼

拌翼まわりの熱伝達率を明らかにした。さらに j 因子の形に一般化することによって、外部冷却における槽壁伝熱と比較した。

図 4 に翼伝熱特性、j 因子の Re 依存性を示す。翼と溶液間の伝熱相関式は (1) 式で表された。

$$Nu = hd/k = 4.13Re^{0.53}Pr^{1/3}Vis^{-0.14}$$

for $4.9 \times 10^2 < Re < 5.4 \times 10^4$ (1)

また、内部誘導加熱攪拌翼の j 因子は槽壁伝熱(外部冷却)の2倍以上と優れた特性を示した。さらに、図 5 に回転数と時定数の関係を示す。図を見ると翼の熱応答性を示す時定数 τ は 6~25 s であり、また、 τ は熱伝達率 h に反比例しており、1 次遅れの挙動を示すことが分かった。

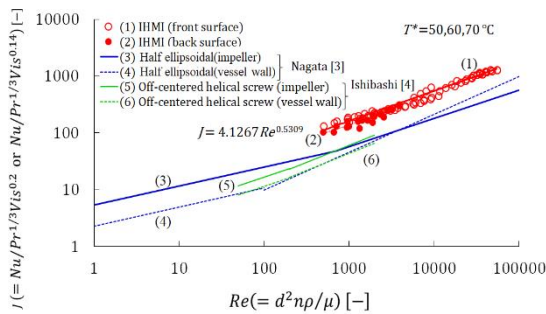


図 4 熱伝達特性 j 因子の Re 依存性

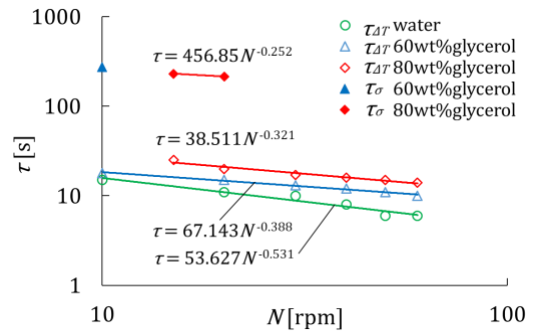


図 5 回転数 N と τ の関係

(2) リング翼の熱流体解析結果(福井工大)

試作された、コイル周りを完全に翼板にて密閉した密閉型リング状攪拌翼の熱伝達特性及び時定数を把握するために汎用解析ソフト ANSYS を用いた電磁界・熱流体解析を実施した。図 6 に示すリング状攪拌翼は密閉型であり、食品加熱用途を想定している。

図 7 に解析の全体モデルを、図 8 に密閉型リング状攪拌翼の解析モデルを示す。

攪拌翼はリング状であり、回転軸は鉛直方向である。解析は電磁界・熱流体連成の非定常連成解析であり、翼とコイルに計 300W 入力した。高粘度域は層流モデル、低粘度域は SST-k- ω モデルを用いて解析した。解析時間刻みは 0.01s とした。

図 9 に翼表面の温度分布を示す。Re はレイノルズ数 [-] であり、 $nd^2/(\mu/\rho)$ で定義される無次元数である。ここで、n は回転数 [1/s]、d は翼径 [m]、 μ は粘度 [Pa · s]、 ρ は密度 [kg/m³] である。解析から算出された熱伝達率は、Re = 33 において、 $hi = 415 \text{ W/m}^2\text{K}$ 、 $ho = 234 \text{ W/m}^2\text{K}$ であり $hi/ho = 1.77$ 倍、Re = 686 において $hi = 619 \text{ W/m}^2\text{K}$ 、 $ho = 441 \text{ W/m}^2\text{K}$ であり $hi/ho = 1.4$ 倍と翼内部 IH は外部槽壁 IH と比較して良好な伝熱特性を示す。Re = $30 \sim 3.2 \times 10^4$ の範囲で内部 IH の h は外部 IH と同程度、もしくは大きく、Re が小さいほど hi/ho 比が顕著となる。高粘度流体ほど内部翼誘導加熱方式は適していると言える。また、温度むらがる認められるため、翼内部に装着するコイルの配置並びに翼板へのクラッド鋼板(炭素鋼板と SUS 板の合板)を使用するなどその低減化が課題である。また、Re = 5417 を除いて全 Re 域で溶液内部の温度ばらつきは外部加熱と比較して小さい。特に、高粘度の Re = 33 (100wt%グリセリン、60rpm)の場合、外部加熱 1.6K に対して、内部翼加熱は 0.8 K と半分であった。高粘度域では伝熱特性、温度ばらつきで優位であることが分かった。今後は、本解析結果の精度検証を実験結果との比較にて行う予定である。



図 6 リング状密閉型攪拌翼

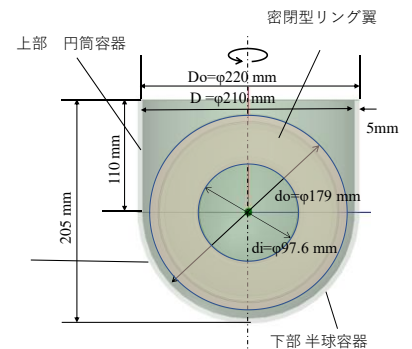


図 7 解析全体モデル

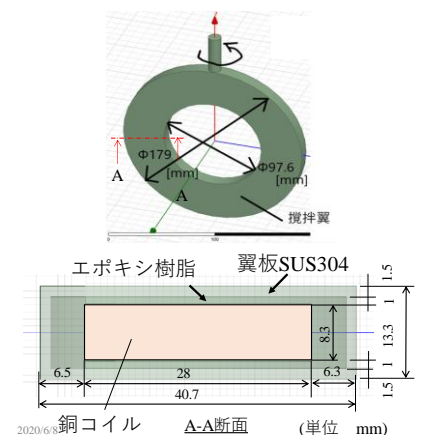


図 8 密閉型攪拌翼解析モデル

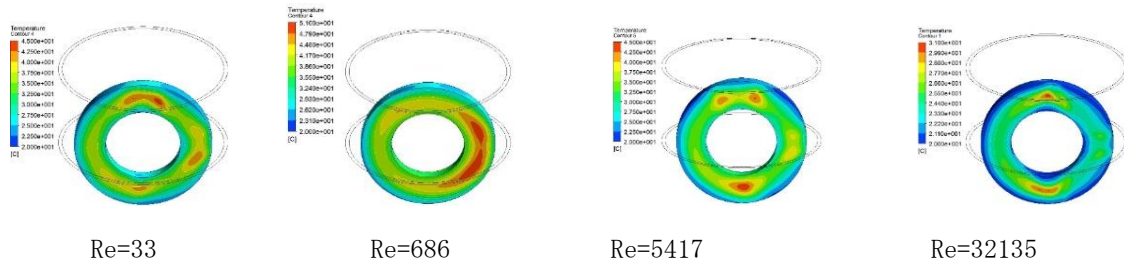


図9 各 Re 域における翼表面温度分布

(3) 非接触給電回路の検討(福井工大)

誘導加熱攪拌装置に搭載され、給電するための小型・高効率給電方式として図10に示すような円筒型非接触給電コイル方式を提案した。

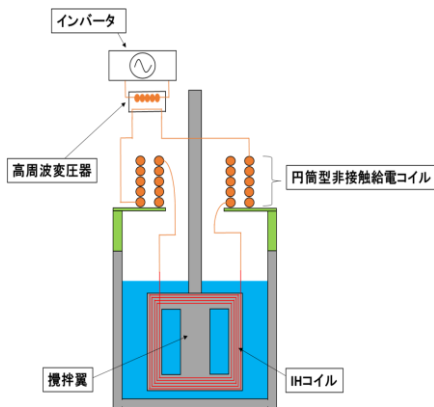


図10 円筒型非接触給電コイル方式

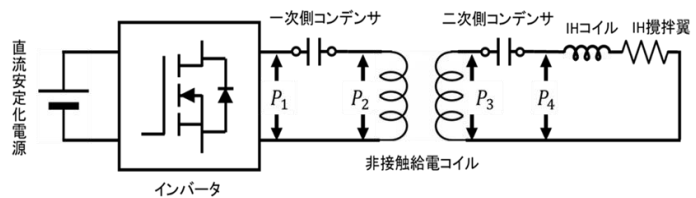


図11 非接触給電回路

負荷を電磁誘導加熱コイル及び攪拌翼として、直流安定化電源からの入力電力を 50 W 以上とし、周波数を 10 kHz、20 kHz、30 kHz、40 kHz、50 kHz と 10 kHz ずつ増加させ攪拌翼を誘導加熱した。

その際、図11に示すP1、P2、P3、P4間のそれぞれで電圧及び電流の測定を行う。その測定結果より給電効率の実験値 $\eta_{trans, exp}$ を算出する。コンデンサの選定に関して、給電効率が理論上最も良くなる値のコンデンサを使用した場合と、直列共振をとることでインピーダンスを 0Ω にした場合とを比較、検証する。

図12に給電効率 $\eta_{trans, exp}$ の周波数特性を示す。図から給電効率は 95% 以上が得られることが分かった。特に 1:1 の理論値のコンデンサに合わせた時の給電効率は、ほぼ 100% に近い結果が得られ、かつ良く一致している。この事から提示した等価回路に基づく給電効率の理論式は精度が良く、現象を十分に記述できていると考えられる。また、ほとんどの結果は周波数が 40 kHz の時にピークに達しているが、給電効率の周波数依存性は少ないといえる。

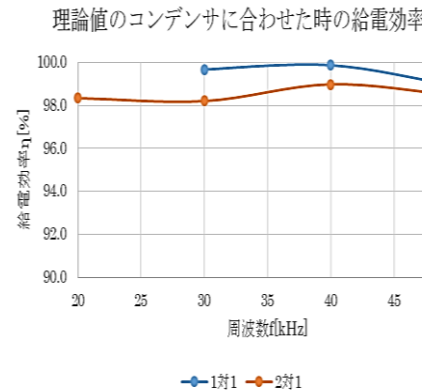


図12 給電効率の周波数特性

以上のように、コイル対の巻数比を n 対 1 として高周波変圧器を省いたトランスレスを検証した。結果、以下の結論を得た。

- ①円筒型形状のコイルにおいてもトランスレスを実証し、小型化、軽量化に寄与する見通しを得た。
- ②給電側コイルの巻数を可変することによる変圧および給電効率 95% 以上の高効率を実証した。

(5) 低 Re 域における攪拌流動可視化による孤立混合領域の消滅に関する流動把握(神戸大学)

誘導加熱攪拌用途の一つとして、高粘度流体の層流域の攪拌混合に関して従来の外部加熱方式と内部翼加熱(外部通電)の比較を行った。シート状のレーザー光を側面から照射することで、IMR(孤立混合領域)断面の脱色過程を観察した。タービン翼への投入電力は外部コイルからの非接触給電で 200 W とした。実験開始初期の攪拌 Reynolds 数 $Re = 27$ にて槽内溶液温度の経時変化を測定した。

図 13 に実験装置の構成を示す。タービン翼への通電は外部通電方式であり、図 14 に溶液温度の時間的変化、図 15 に攪拌翼周りの混合状態の可視化写真を示す。

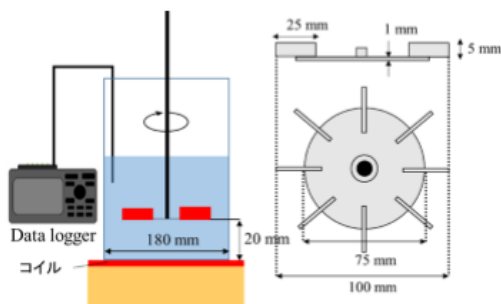


図 13 装置構成(外部通電誘導加熱)

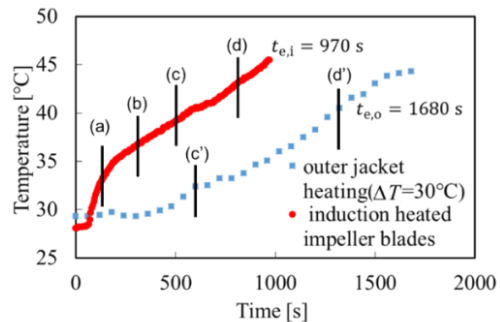


図 14 溶液温度の時間変化

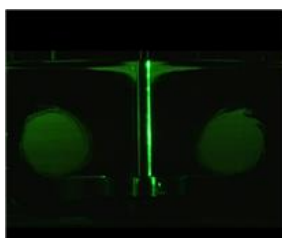


図 15-1 孤立混合領域

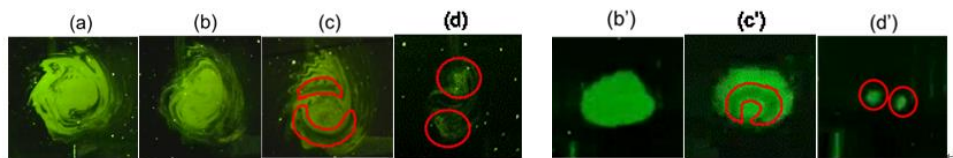


図 15-2 孤立混合領域の形状推移

攪拌槽では通常乱流状態で混合を行うことが効率的であるが、混合する物質が剪断に対して脆弱である場合や流体の粘性が高い場合には、層流状態での混合操作が必要となる。攪拌槽内の層流混合場では、対流によって物質移動が迅速に行われる通常の攪拌混合領域以外に、その領域との境界面において拡散移動による物質交換が支配的な IMR が出現し、この IMR の存在により槽内全体の均一混合が妨げられる要因となっている。そのため、IMR の除去に関する研究は多くなされおり、工業的に用いる場合、このような未混合領域の消滅を効率的に行う必要がある。そこで本研究では、電磁誘導を利用した内部翼加熱型攪拌装置を用い、高粘性流体の混合促進効果の検証を行った。そのため、低 Reynolds 数域での攪拌操作を行い、IMR の形状変化を可視化実験により観察し、非常常混合特性を伝熱の観点から明らかにすることを試みた。動作流体にはグリセリンを 2 L 用い、混合過程の観察には蛍光染料ウラニンをトレーサーとして用いた。ウラニンはアルカリ溶液中では緑色の蛍光を呈し、中性・酸性では脱色されることから、この中和反応を利用して混合過程を観察した。

観察結果より、内部翼加熱装置と Shahirudin らによって示されたジャケット式加熱の IMR 消滅時間はそれぞれ 970 s, 1680 s であり、本研究の内部翼加熱攪拌装置により大幅に短縮された。これは内部翼加熱攪拌装置の低 Reynolds 数域における伝熱特性が優れていると考えている。

この時消費された熱量はそれぞれ 194 kJ, 327 kJ であり、内部翼加熱によって消費された熱量はジャケット式加熱に比べ、約 3/5 倍に減少した。この結果より内部翼加熱攪拌装置は、高粘性流体を用いた層流混合場での攪拌操作において有用であるといえる。

今後は、内部翼加熱(内部通電)攪拌翼を用いた連続加熱及び非連続加熱における IMR (孤立混合領域)の消滅過程の観察による現象の比較を行う。

以上、本研究において得られた成果について述べたが、本技術は現行のバッチ式の攪拌技術と対比されるべき技術であると考えている。現行の攪拌槽は工業的バッチ生産の汎用装置であり、熱的制御は主に外部ジャケットからの熱媒体の加熱により行われている。

ゆえに、熱容量が大で遅速な制御しか行えないため、現状では、応答性に優れた精密制御は行われていない。本提案の誘導加熱攪拌翼は内部加熱であり、過去、その翼伝熱特性について論じられたことはない。また、伝熱特性や熱応答に優れた誘導加熱型攪拌方式であり、従来のバッチ式では実現しえない高応答性と大容量化が可能となる。結果、dynamic に加熱制御するインテリジェントな攪拌反応システムを構築でき、高収率化と高品質化が実現し、現行バッチ式攪拌技術の革新につながると考えている。

以上

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1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 Hirofumi Takehara, Yushi Hirata, Naoto Ohmura, Noriyuki Kimura, Nobuichi Nakao, Kazushige Nakao	4. 巻 -
2. 論文標題 Heat Transfer Characteristics of Induction Heating Mixing Impeller	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 proceeding, 16th European Conference on Mixing 16, Mixing 16 9-12 September 2018, Toulouse, France	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 中尾一成	4. 巻 39
2. 論文標題 特集 非接触給電技術の最新動向4 非接触給電技術の攪拌機の誘導加熱への適用	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 電気設備学会誌	6. 最初と最後の頁 565-568
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Keisuke Kintsu, Takaaki Shimizu, Noriyuki Kimura, Toshimitsu Morizane Hideki Omori, Hiroki Ishida, Kazushige Nakao
2. 発表標題 Feasibility Study on Simultaneous Induction Heating of Agitating Impeller and Container of Mixer
3. 学会等名 IFEEC-ECCE ASIA（国際学会）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Keisuke KINTSU, Noriyuki KIMURA, Toshimitsu MORIZANE, Hideki OMORI, Hiroki ISHIDA, Kazushige NAKAO
2. 発表標題 Output Power Maximization for Double Layer Heating of Impeller and Container of Mixer
3. 学会等名 EPE'17 ECCE Europe（国際学会）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kazushige Nakao, Hiroki Ishida, Noriyuki Kimura
2. 発表標題 Application and Verification of an Electromagnetic Field Resonance Type Wireless Power Transfer Method to Mixing Blade Heated by Induction Heating
3. 学会等名 2017 19th International Conference on Electrical Drives and Power Electronics (EDPE) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hiroki Ishida, Kazushige Nakao, Noriyuki Kimura
2. 発表標題 Efficient Heating of Mixer by Induction Heating of Mixing Blade and Energy Transfer Analysis for Optimization
3. 学会等名 ICRERA 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 福田 康平,堀江 孝史,大村 直人,平田 雄志,竹原 紘史,中尾 一成
2. 発表標題 IHを用いた攪拌翼加熱型攪拌槽の非定常混合特性
3. 学会等名 第20回化学工学会学生発表会(東広島大会), I08(2018年)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 竹原 紘史,平田雄志,大村直人,木村紀之,中尾総一,中尾一成
2. 発表標題 電磁誘導加熱された攪拌翼まわりの伝達特性
3. 学会等名 化学工学会 第83年会, PE315(2018年)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 加熱冷却攪拌装置	発明者 中尾一成, 中尾総一	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、JP 2019-118874	出願年 2018年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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	木村 紀之 (Kimura Noriyuki) (00144428)	大阪工業大学・工学部・教授 (34406)	
研究 分担者	大村 直人 (Ohmura Naoto) (50223954)	神戸大学・工学研究科・教授 (14501)	
研究 協力者	平田 雄志 (Hirata yushi)		