

〈一般研究課題〉 磁気力伝達での非接触液体攪拌のための
フロート位置推定による回転制御

助成研究者 大同大学 田中 淑晴



磁気力伝達での非接触液体攪拌のための フロート位置推定による回転制御

田中 淑晴
(大同大学)

Rotation control by estimation of the float's position for non-contact liquid stirring using magnetic force transmission

Toshiharu Tanaka
(Daido University)

Abstract :

In the production of food, beverages, and pharmaceuticals, stirring is an essential process used to prevent ingredient sedimentation and to ensure uniform concentration. Conventional stirring systems employ a motor-driven blade connected via a shaft, supported by sealing components such as rolling bearing and V-rings. However, mechanical contact between components can generate wear particles, posing a significant risk of contamination by foreign matter. To address this issue, this study proposes a fully non-contact power transmission system that employs magnetic force to rotate a floating rotor positioned on the liquid surface. In the proposed system, the absence of bearings for rotor support makes the rotor susceptible to disturbances induced by fluid flow, leading to rotational deviation. The objective of this research is to develop a method for detecting such deviations and to achieve efficient mixing at the maximum possible rotational speed. To validate the proposed concept, a torque measurement system utilizing a pair of neodymium magnets is designed and fabricated. Experimental torque measurements and magnetic field simulations are conducted, indicating good agreement, with the measured torque reaching approximately 0.1[Nm]. Subsequently, a magnetic stirring device is developed, and actual stirring experiments are carried out. Hall sensors are employed to measure the magnetic flux density, enabling the detection of rotor deviation. It is demonstrated that adjusting the deceleration based on real-time magnetic feedback

can reduce the recovery time required for the rotor to return to its intended rotational state.

1. はじめに

飲食品や薬剤の製造において、成分の沈殿防止および濃度の均一化のために攪拌作業が行われる。その攪拌工程での装置は、主に貯蔵容器と攪拌翼ならびに翼を回転させるためのモータから構成される。攪拌翼に回転の動力をモータから伝達するために軸が用いられ、その軸を支持するために転がり案内やVリングなどのシール材が用いられる。しかし、転がり案内の転がり面やシール材の摺動面からは摩耗粉が発生するため、異物混入のリスクが非常に大きくなる。そのため、「磁気力を使用した非接触動力伝達」の攪拌装置が提案されている[1]~[3]。隔壁を介して非接触で動力を伝達するが、実際はタンク内に軸を支持するための軸受があり異物混入のリスクは変わらない。また、電磁石や超電導バルク体を用いて非接触の攪拌装置[4][5]も提案されているが、構造が複雑となり非常に高価となる。これらを踏まえて本研究では、磁気力によって液面に浮くフロート回転子を回転させる完全に非接触な動力伝達を実現する。しかし、フロート回転子は支持される軸受などが無いため、回転によって生じる液体の流れが外乱力となり、回転が逸脱する。そのため、フロート回転子の逸脱を検出し、最高回転数で効率よく攪拌できる手法を構築することを目的とする。

2. 実験装置

2.1 伝達トルクの測定と解析

ネオジム磁石対によって伝達されるトルクを測定するための装置を図1に示す。アクチュエータはオリエンタルモータ社製のACサーボモータNXM975M、トルクを測定するために共和電業社製トルクメータTPS-A-10NMを用いた。ACサーボモータの生じるトルクをネオジム磁石対が脱調するトルクまで徐々に大きくする。そのときに生じる伝達トルクを、方端を軸に固定したトルクメータおよびACサーボモータのドライバの出力にて測定する。装置全体のサイズはW415×D355×H1000[mm]である。ACサーボモータはトルク制御とし、指令トルクに相当する印加電圧は安定化電源の出力を用い、ネオジム磁石対が脱調するまで徐々に電圧を大きくし磁石対を回転させる。

ネオジム磁石対の伝達トルクを磁場解析ソフトによってシミュレーションするために、図1の測定装置の磁石対を模擬したモデルを図2に示す。磁場解析には、Ansys社のAnsys Electronics Desktop (AEDT)のMaxwell 3Dを用いた。ネオジム磁石を取り付けるための円板の直径は200[mm]、取付ピッチ円直径は150[mm]とする。ネオジム磁石のサイズは直径30[mm]×厚さ5[mm]とし、オジ

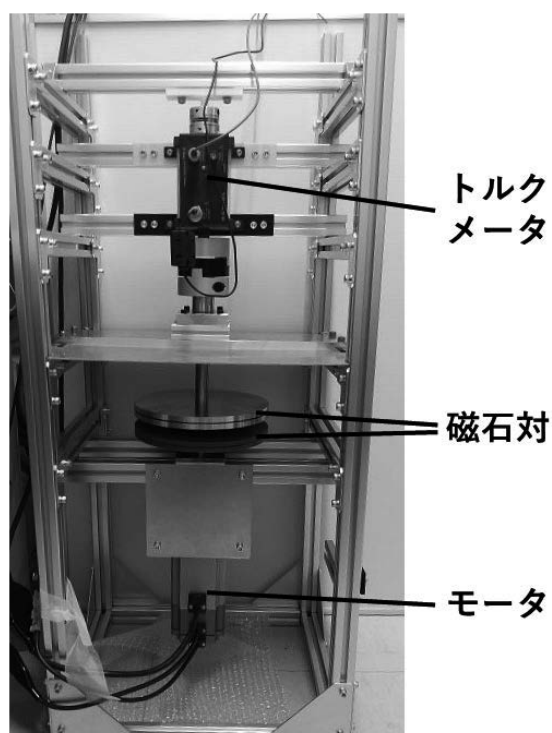


図1. トルク測定装置

ム磁石は上下に4個ずつ計8個とする。上下に配置されたネオジム磁石対のギャップは16[mm]とする。ネオジム磁石を取り付ける円板の材質は、ポリエチレン(Polyethylene, PE)とし、雰囲気の設定は空気とする。

2.2 攪拌試験機

磁気力による非接触での動力伝達を用いた液体攪拌の試験機を図3に示す。上部に取り付けられたACサーボモータによって上側の磁石を配置した円板を回転させる。そのとき、下側の磁石を配置した回転子と一体の円板に取り付けられた磁石との吸着力によって円板が回転する。ネオジム磁石の配列の様子を図4に示す。ネオジム磁石のサイズは直径10[mm]×厚さ5[mm]とし、取付ピッチ円直径は40[mm]とする。回転子の下部には、攪拌翼を取り付けるための軸が取り付けられており、回転子が回転することによって攪拌翼も回転し、タンク内の液体が攪拌される。回転子は液面に浮くため、回転子の高さ位置は、パンタグラフ式のラボジャッキにて調整する。回転子の位置が高すぎるとネオジム磁石の吸着力によって、上側の円板に引き寄せられてしまう。一方、回転子の位置が低すぎるとネオジム磁石対の吸着力が著しく小さくなるため、回転子の回転を制御し難くする。そのため、回転子を適切な高さに調整する必要がある。ネオジム磁石対の間に生じる磁力を評価するため、磁束密度を測定するための機器を図5に示す。磁束密度の測定にはホール素子を用い、ネオジム磁石の取付ピッチ円直径上に45°ごとに計8個配置する。ここでは、磁束密度から伝達力を算出することは難しいため、回転子が逸脱したかの判別は測定された磁束密度の大きさを代替して用いることとする。

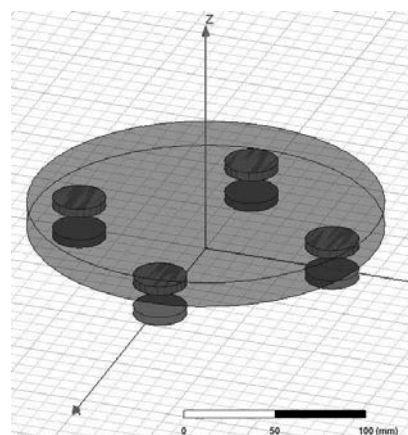


図2. 磁石対の解析配置

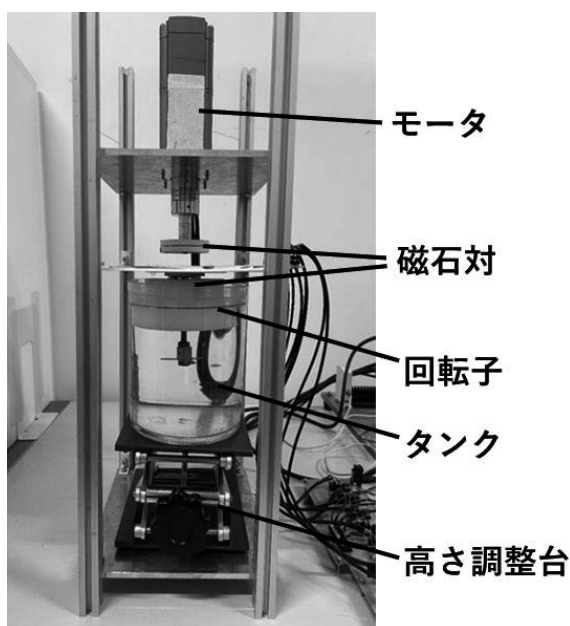


図3. 流体攪拌装置

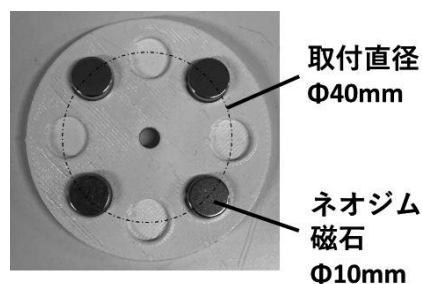


図4. 磁石列配置の様子

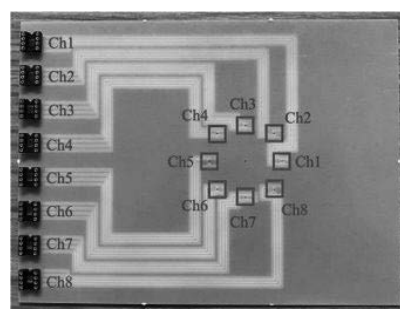


図5. 磁束密度測定素子の配置

3. 実験結果

3.1 伝達トルクの測定

ネオジム磁石対を用いて非接触に動力を伝達する図1の実験装置を用いて測定されたトルクと図2の解析対象を磁場解析して得られたトルクの結果を図6に示す。トルク制御されたACサーボモータへトルクに比例する印加電圧を徐々に大きくし回転している結果を示す。赤線がACサーボモータへの印加電圧から算出されたトルク値、青線が解析結果である。測定結果では、回転開始時に0.2[Nm]程度の大きなトルクを生じ、回転中は約0.1[Nm]程度のトルクが生じている。正負のトルクが生じているのは、固定されている上側のネオジム磁石に対して、回転子のネオジム磁石が近づくとき吸着力によって引き寄せられる力が発生するため負のトルクが生じる。一方で、ネオジム磁石対が対向する位置でかみ合ってから、遠ざかるときは吸着力を引きはがそうとする力が発生するため正のトルクが生じる。そのため、回転中は周期的な正負のトルクが生じる。解析結果でも同様に周期的な正負のトルクを生じた。周期的に0.3[Nm]程度の大きなトルクが検出される箇所があるが、回転中はおおむね0.1[Nm]程度のトルクを生じていることが分かる。これは、測定結果とよく一致している。

以上のことから、ネオジム磁石対による非接触動力伝達中のトルクを測定するための装置の設計製作を行い、回転中のトルクを測定できた。また、磁場解析によって得たトルクとおおむね一致することが分かった。

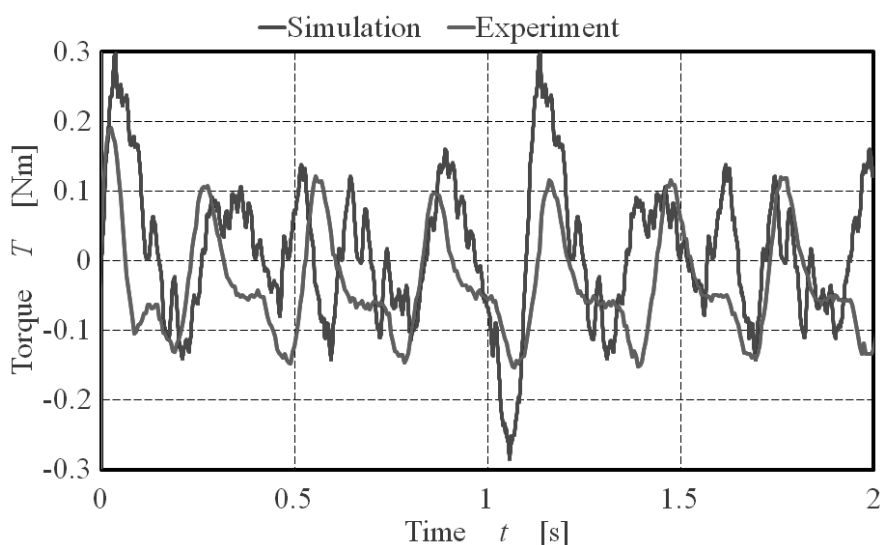


図6. 実験と解析のトルクの比較

3.2 攪拌中の回転速度

ネオジム磁石対を用いた図3の攪拌装置において、攪拌中の回転子の正常な回転軌道における磁束密度の測定結果と回転子が逸脱したときの測定結果を図7に示す。磁束密度のホール素子をCH1～8の8個分の測定結果と代表例としてCH1とCH2を抜粋した測定結果を示す。ここでは、回転子の回転速度は200[min^{-1}]とする。同図(a)の正常な回転中では、CH1～8のいずれも回転に応じて周期的に100[mT]程度の磁束密度が測定できていることが分かる。一方で、同図(b)の回転子が逸脱した結果では、いずれのCHも磁束密度が乱れていることが分かる。このことから、正常の回転状態と

比較し明らかに回転子が逸脱していることが判断できる．そのため，回転中の磁束密度の違いによって回転子の逸脱を検出し，回転速度の調整を可能とする．ここでは，磁束密度の大きさに対して閾値を設定し逸脱したかの判定を行うこととする．

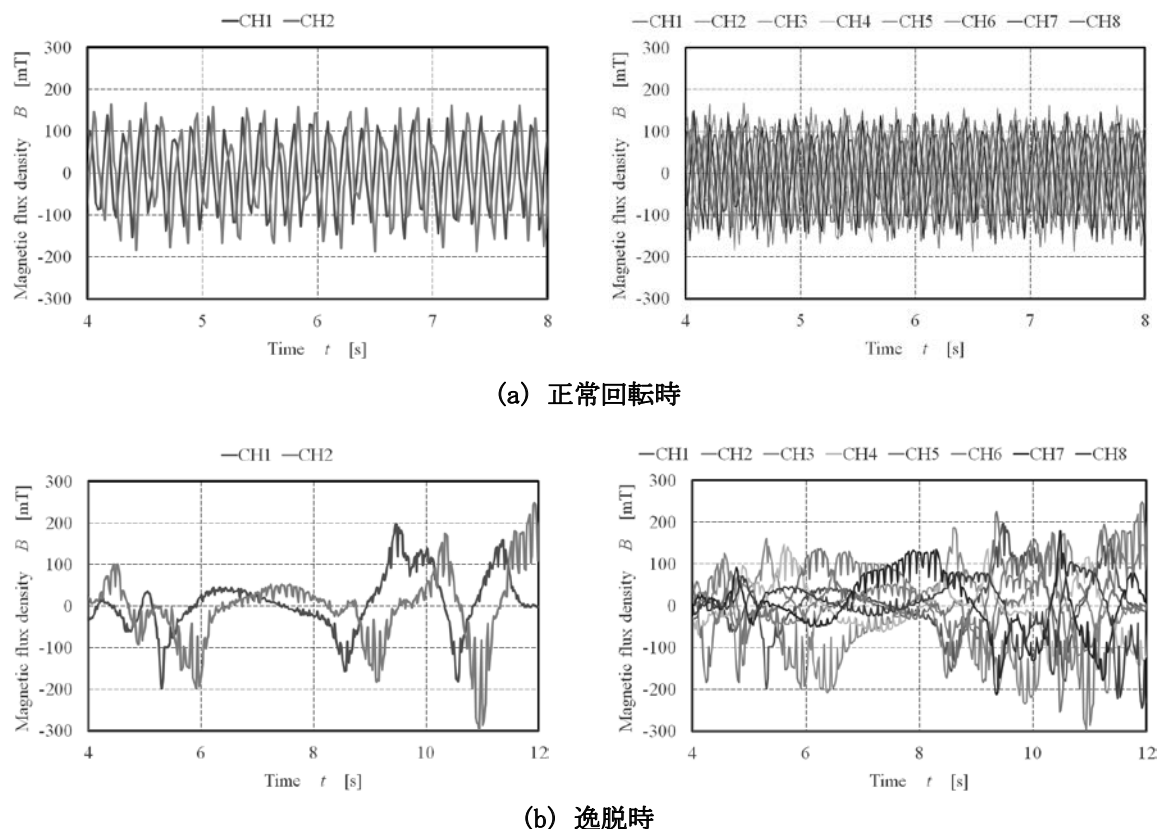


図7. 磁束密度の測定結果

次に，磁束密度の測定を通じて回転子の逸脱を検出し，回転を減速し正常状態に復帰したと判断したのち，加速して正常の回転数まで復帰させたときの回転速度の結果を図8に示す．回転速度は，外部に取り付けられた非接触式のタコメータによって測定する．回転子が逸脱したと判定された約5秒のときから回転子を減速させる．そのときの減速の大きさを変化させ $8[\text{min}^{-1}]$ および $40[\text{min}^{-1}]$ とする．ここでは，回転速度を復帰させる加速の大きさは同じとする．減速の大きさの違いによる測定結果を比較すると，減速が大きい $40[\text{min}^{-1}]$ の方が約 $80[\text{min}^{-1}]$ 付近で早く安定し，加速へと移行している．一方，減速が小さい $8[\text{min}^{-1}]$ では，約 $65[\text{min}^{-1}]$ まで減速し，加速へと移行している．このことから，減速の大きさが小さい方が安定するまで時間を要していることが分かる．それに伴い，回転速度 $200[\text{min}^{-1}]$ まで復帰するまでに時間を必要とすることが分かった．減速の大きさと回転速度が $200[\text{min}^{-1}]$ へ復帰するまでに要した時間の関係をまとめたものを図9に示す．減速の大きさが $8[\text{min}^{-1}]$ のとき復帰まで約20秒， $16[\text{min}^{-1}]$ のとき約15秒， $24[\text{min}^{-1}]$ のとき約14秒， $40[\text{min}^{-1}]$ のとき約11秒となり，前述のとおり，減速が大きくなるにつれて，復帰までの時間が早くなることが分かる．これは，回転子を早く減速させ，回転子の挙動を安定させることが復帰時間を早め効果がえられているものと考えられる．

なお，本制御を実施するにあたり，磁束密度を測定するためのホール素子からの電圧測定やタコ

メータの出力電圧を行うために用いたマイコンのサンプリング周期やAD変換および通信速度などに課題が見つかり、Arduino UNOなど各種マイコンで実験を試行した。その結果、M5Stack Technology 社のM5 StampS3が最高クロック周波数240[MHz]で動作し、挙動も安定していたため採用した。

以上のことから、ホール素子を用いて磁束密度を測定した結果を利用して、回転子の逸脱を検出し、回転速度を変化させた。その結果、減速の大きさが回転子の正常軌道への復帰時間へ影響を及ぼし、減速が大きいほど早く復帰することが分かった。

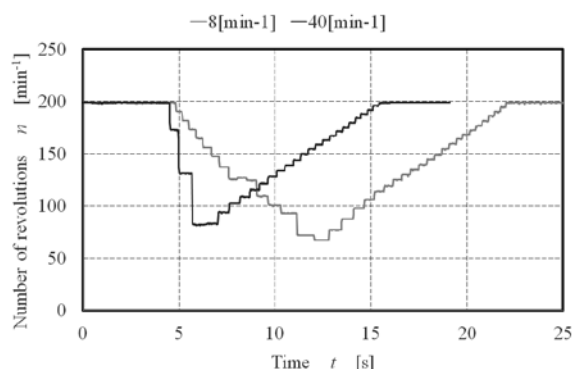


図8. 回転速度の測定結果

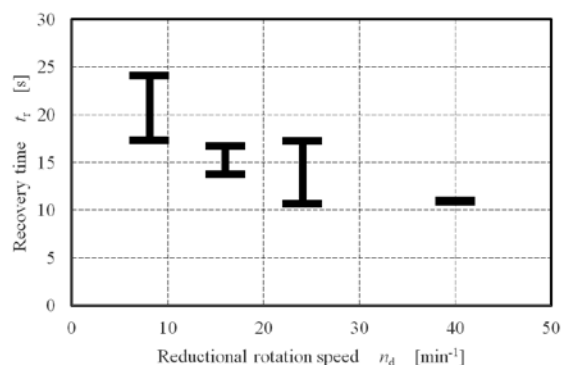


図9. 減速の大きさと復帰時間の関係

4. おわりに

ネオジム磁石対による非接触動力伝達による液体の攪拌工程において、回転子の逸脱を検出し、最高回転数で効率よく攪拌できる手法を検討した。そのための実験装置の設計および製作を行った。また、非接触による伝達トルクの測定を行い、以下のとおりの結果を得た。

- 1) 伝達トルクの測定では、約0.1[Nm]のトルクを検出し、これは磁場解析による結果とほぼ同等である。
- 2) 攪拌における回転子の逸脱を磁束密度の測定結果から判定し、減速の大きさを変化させることによって、回転子の正常軌道への復帰時間に及ぼす影響を明らかにした。

今後は、逸脱判定を閾値でなく機械学習などを組み込むことや減速の大きさを定数ではなく、適切な変数を用いることなどを検討する。また、より高速での回転や液体の粘性の影響なども具体的に調査する。

参考文献

- [1] 小谷明 他：非接触磁気駆動攪拌における回転体形状の検討，FOOMA技術ジャーナル，Vol.18，No.1，(2023)13-16.
- [2] 宮崎晏灯 他：PIV 解析による非接触型高粘度液体攪拌の評価，日本設計工学会東海支部令和6年度研究発表講演会講演論文集，(2025)73-74.
- [3] 株式会社プロスパイン，鈴木雄真 他：磁気カップリング及び攪拌装置，特許第5849343号.
- [4] 住友重機械工業株式会社，直原和哲：非接触攪拌装置，特開平4-18928.
- [5] アイシン精機株式会社，岡徹雄：非接触攪拌装置における回転翼の設置方法およびその方法を使用した非接触攪拌装置，特許第4304448号.