

令和 2 年 6 月 22 日現在

機関番号：32613

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06206

研究課題名（和文）選択拡散分離技術の理論検証とその実用化のための研究

研究課題名（英文）Theoretical Verification and Practical Realization of Selective Diffusional Separation Technique

研究代表者

森下 明平（Morishita, Mimpai）

工学院大学・工学部・教授

研究者番号：70599399

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,700,000円

研究成果の概要（和文）：溶液を特定の周波数で加振した場合に溶質の拡散する速さが溶質の分子量に依存する性質を利用した物質分離技術の理論検証を行う装置を設計製作した。その過程で、細管群で構成される拡散分離部の低コストな製造方法と、溶液を加振するシングルハルバッハ界磁型リニアモータの設計製作手法が確立された。特に当該リニアモータでは、磁場に鏡像法を適用することで端効果のないリニアモータを実現できた。さらに、溶液を加振するために静止摩擦のない注射器を用いたが、注射器には必然的に水漏れが発生する。注射器からの水漏れに関わらず、空気の侵入を防ぎ、細管群内の溶液に単一の正弦波状の圧力を加えられるリニアモータ駆動手法を確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

一般のコイル可動型リニア同期モータでは界磁の両端で磁界の周期性が乱れるため、全長に比べてストロークが短くなる。今回開発したシングルハルバッハ界磁型リニア同期モータでは鏡像法の適用で、界磁両端部での磁界の周期性が維持される。このため、長ストローク、低推力リップルであり、超精密位置決め用アクチュエータとして工作機械やカメラ用ジンバル機構などへの応用が期待できる。また、製作した液相成分選択拡散装置の両端にはリニアモータが取り付けられ、注射器を押し引きすることで細管群両端に所定の差圧を発生させている。加圧側に推力制御、減圧側に位置制御を用いる協調制御はプッシュプル加圧システムへの展開が期待できる。

研究成果の概要（英文）：We designed and manufactured a device that theoretically verifies the material separation technology using the property that the diffusion rate of solute when the solution is excited at a specific frequency depends on the molecular weight of the solute. In the process, a low-cost manufacturing method of the diffusion separation part composed of a group of capillary tubes and a design and manufacturing method of a single Halbach field-type linear motor that vibrates a solution were established. Particularly, in the linear motor, by applying the mirror image method to the magnetic field, a linear motor having no end effect could be realized. Furthermore, although a syringe without static friction was used to excite the solution, the syringe inevitably leaks water. We have established a linear motor drive method that can prevent air from entering and apply a single sinusoidal pressure to the solution in the capillary group regardless of water leakage from the syringe.

研究分野：電気機器工学

キーワード：シングルハルバッハ界磁 液相成分選択拡散装置 拡散分離部 細管群 協調制御 推力制御 位置制御 端効果

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

複種溶質含有液での選択的溶質分離は、無機/有機原料化学、生化学、物理化学等の科学分野だけでなく、石油化学、食品・化粧品・医薬品工業等の産業分野において不可欠な基本技術である。しかし、「乾燥法は消費電力大、吸着法やクロマトグラフィーは使用済吸着材処理、吸収法は液相適用不可」という問題を有するので、新たな分離手法の開発が待たれている。

2. 研究の目的

「管内強制振動流による溶質の選択的拡散分離法」(選択的質量拡散理論)は、電力をほとんど要せず、使用部材の交換・処理が不要な上、液相溶質にも適用可能である。質量輸送用電磁駆動ドリムパイプは、この新手法を用いた液相2成分分離デバイスである。本研究は、「この新規デバイスによる特定溶質分離」と「新規デバイスの実験結果に基づく実用的拡散係数算定式の確立」を目的としている。

3. 研究の方法

- ① 質量拡散理論に基づく機械設計パラメータの導出
- ② 液相成分選択拡散分離装置各部(質量拡散部、リザーバ、ディスプレイサ)の設計製作
- ③ リニアモータの設計製作
- ④ 全体組立
- ⑤ リニアモータ駆動方法の立案
- ⑥ 拡散実験

4. 研究成果

- ① 機械パラメータの計算結果:

<Step1>

溶質をメチレンブルー、溶媒を純水とし、溶質の分子量、溶媒の粘性係数、細管内径から、拡散係数増加率をパラメータとする実効拡散係数と共振周波数を得た。

<Step2>

拡散係数増加率をパラメータとする潮汐変位、溶媒の動粘性係数、細管群総断面積、シリンジ内径からリニアモータの最大推力と正弦波加振周波数および加振ストロークを得た^[1]。

質量拡散部細管長: 135 mm

細管内径: 0.25 mm

細管本数: 4000 本

シリンジ内径: 15.0 mm

リニアモータ必要推力: 35.5 N

加振周波数: 0.00734 Hz (拡散係数増加率 400 を得る場合)

加振ストローク_(p-p): 20.0 mm (拡散係数増加率 400 を得る場合)

- ② 磁極回転角 45° のシングルハルバッハ界磁を用いた円筒型リニアコアレス同期モータを設計するにあたり、鏡像法を磁界に適用した設計手法を確立した^[2]。

鏡像法成立条件: ヨーク中に永久磁石残留磁束密度以上の磁束密度が発生する透磁率の材料を用い、設計ギャップ長においてヨークに磁気飽和が発生していないこと。

円筒型リニアモータリング界磁 外径/内径/全長: 36.0/31.6/114.0 mm

リング界磁永久磁石厚: 5.7 mm

円筒ヨーク 外径/内径: 20.2/13.1 mm

リング電機子コイル 外径/内径/全長: 30.6/21.2/45.5 mm

リング電機子コイル厚: 7.6 mm

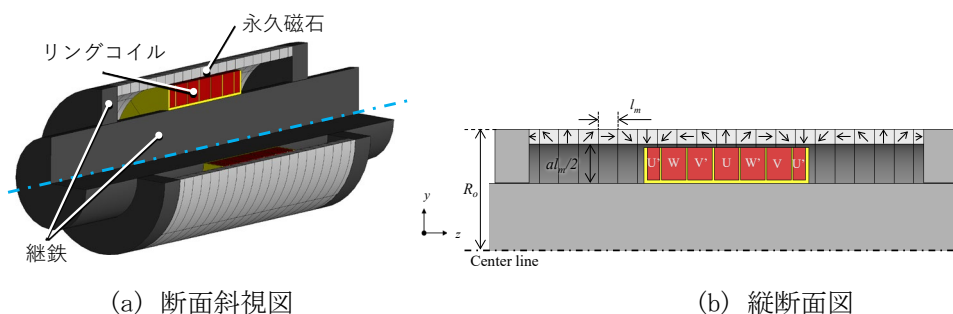


図1 シングルハルバッハ界磁型円筒型リニアコアレスモータの概容

- ③ ②のリニアモータでリング磁石の製作が困難であることが判明したため、新たに、磁極回転角 45° のシングルハルバッハ界磁を用いた角型リニアコアレス同期モータを設計・製作し、設計手法および製作方法を確立した^[3]。

設計推力の変更：重力が拡散に及ぼす影響を見るため、液相成分選択拡散分離装置を縦置きにすることを考慮し、リニアモータ推力を 35.5 N から 75 N に変更した。

角型リニアモータ界磁 R_o/R_g / 全長 : 39.0 / 30.6 / 168.0 mm
 界磁永久磁石 幅 / 高さ / 全長 : 8.4 / 8.4 / 38.3 mm
 角型ヨーク R_{co}/R_{si} 内径 : 19.2 / 12.6 mm
 角型電機子コイル 外寸 / 幅 / 全長 : 59.2 / 9.4 / 67.2 mm
 角型電機子コイル厚 : 11.2 mm

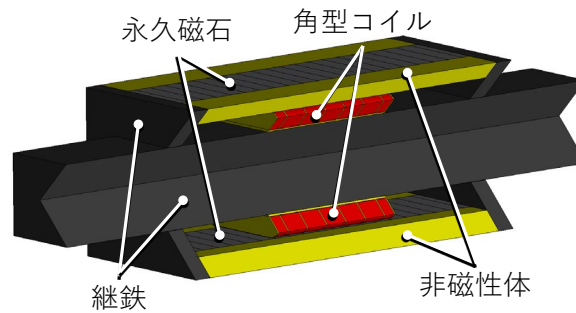


図2 シングルハルバッハ界磁型角型リニアコアレスモータの概容

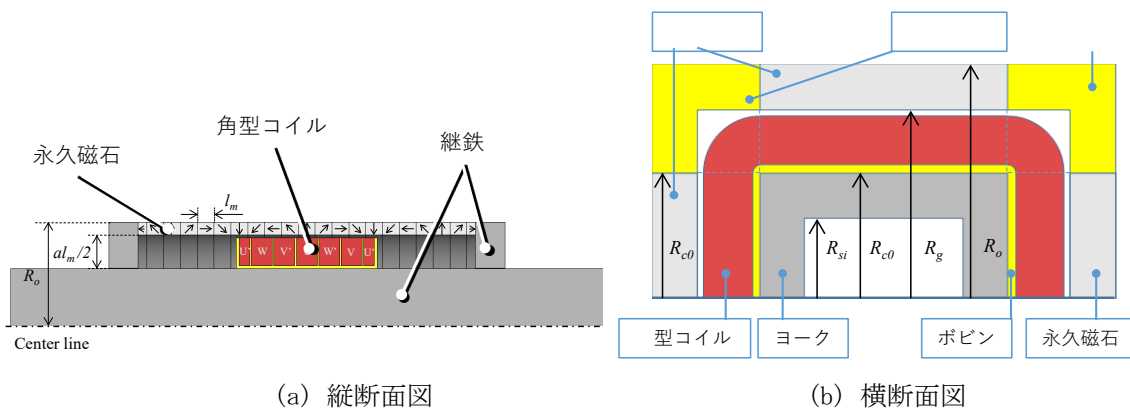


図3 シングルハルバッハ界磁型角型リニアコアレスモータの構造

- ④ ①の成果で求めたパラメータを用いて液相成分選択拡散分離装置各部（質量拡散部、リザーバ、ディスプレイサ）の設計・製作を行い、質量拡散部を構成する細管（内径 0.2 mm）4000 本からなる細管群の製作方法を確立した^[2]。

4004 本の細管を 154 本ずつ 26 束で細管群を構成し、低コスト化を達成。製作した液相成分選択拡散分離装置とその両側に配置されるリニアモータを図 4、図 5 に示す。

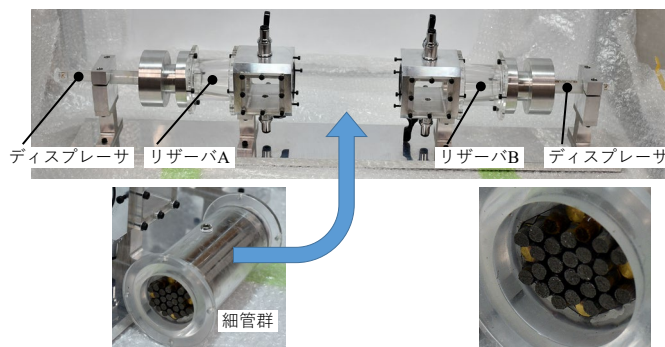


図4 液相成分選択拡散分離装置

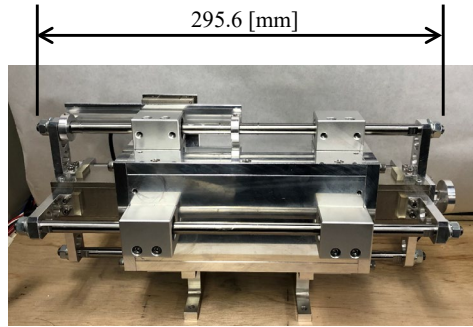


図5 シングルハルバツハ界磁型角型リニア同期モータ

また、リニアモータを取り付けた装置全体の様子を図6に示す。

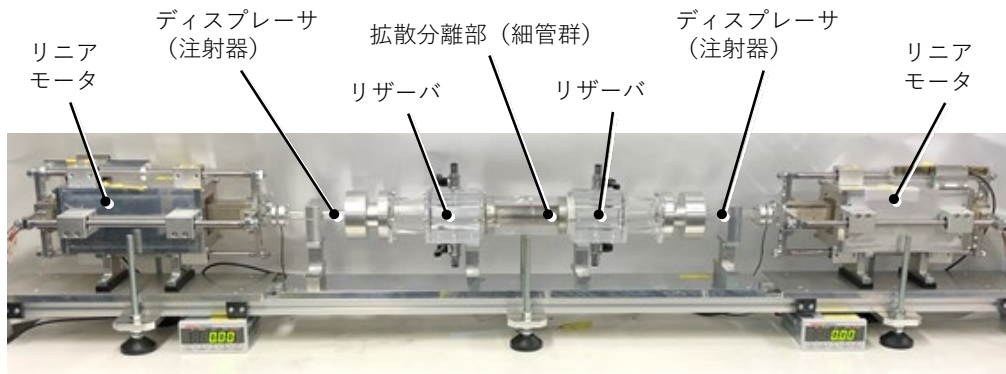


図6 液相成分選択拡散分離装置

- ⑤ ③で製作した 2 台のリニアモータを④で製作した液相成分選択拡散分離装置に組み込み、シリンジからの水漏れとシリンジへの空気侵入を防止できるリニアモータ駆動手法を確立した^{[4]-[6]}。

液相選択拡散分離装置が液体で満たされていれば非圧縮性流体として取り扱うことができることから、両端に取り付けられたリニアモータにおいて、引き側に正弦波潮汐変位を与える位置制御、押し側に引き側の力がディスプレイサ（注射器）からの空気侵入を防止できる値になるような推力制御を施すことで、押し側ディスプレイサからのわずかな水漏れおよび摩擦を許容しながら正弦波潮汐変位を与える位置推力協調制御の制御ブロック図を図7に示す。

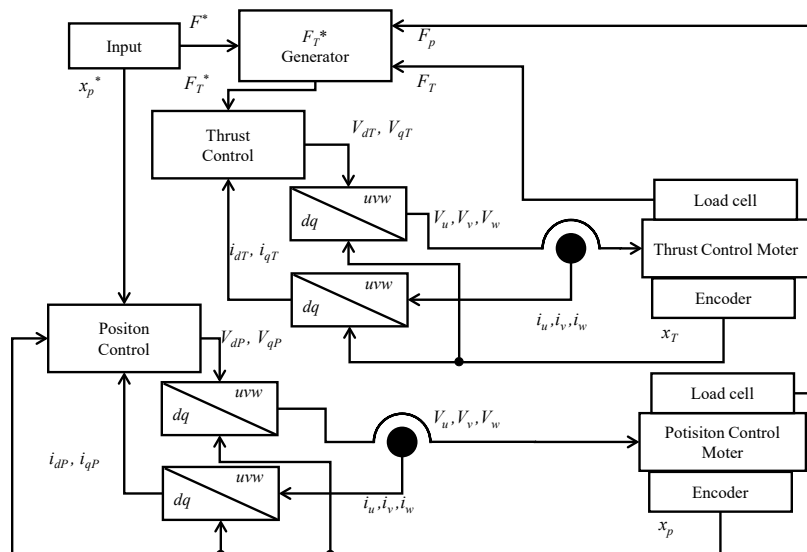


図7 位置推力協調制御

実験データを図8に示す。本装置では、引き側リニアモータ可動子位置の正弦波の頂点で、引き側のリニアモータの制御が位置制御から推力制御へ切り替わって押し側リニアモータに、押し側リニアモータの推力制御が位置制御に切り替わって引き側のリニアモータになる。この場合、各リニアモータの位置信号と推力信号が切り替わるが、図6は2台のリニアモータにおいて推力制御されているリニアモータの位置信号と位置制御されているリニアモータの位置信号を表している。位置制御側の位置信号が正弦波となっているため、潮汐変位も正弦波となっていることがわかる。

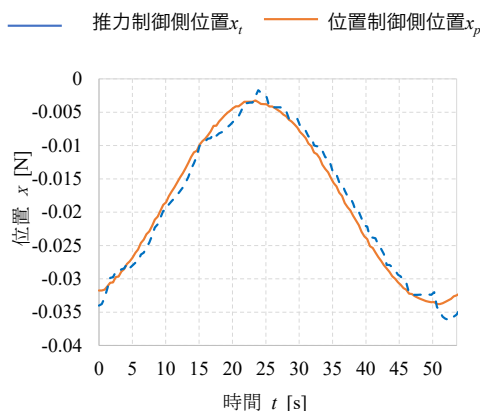


図8 位置・推力協調制御実験結果

研究成果③でのリニアモータの再設計と新型コロナウイルスの影響のため、当初の目的である拡散実験による理論検証を行うには至らなかったが、液相成分選択拡散分離装置を完成させることはできた。今後、引き続き拡散実験を行い、成果を広く公に発信予定である。

参考文献：

- [1] 甲斐 秀一, 森村 暢夫, 森下 明平:「液相成分選択拡散分離装置の開発-電磁駆動部の設計-」, 第30回電磁力関連ダイナミクスシンポジウム, 3-2-01, pp.564-567 (2018. 5. 25)
- [2] 森村 暢夫, 甲斐 修一, 森下 明平:「液層成分選択拡散分離装置の開発-シングルハルバツハ配列を用いた電磁駆動部の設計-」, リニアドライブ研究会資料 LD-18-044, pp.45-49 (2018. 8. 23)
- [3] 甲斐 秀一, 森村 暢夫, 森下 明平:「液相成分選択拡散分離装置の開発-角型リニア同期モータの設計-」, 第31回電磁力関連のダイナミクスシンポジウム, 23A1-1, pp.なし, 東京工業大学 すすかけ台キャンパス (2019. 5. 23)
- [4] 甲斐 秀一, 森下 明平:「液相成分選択拡散分離装置の開発-電磁駆動部の制御-」, 電気学会全国大会講演論文集, No.5-003, Vol. 5, pp. 5-6 : 平 31 (2019. 3.13)
- [5] 甲斐 秀一, 森下 明平:「液相成分選択拡散分離装置の開発-電磁駆動部の駆動試験-」, リニアドライブ研究会資料 LD-19-078, pp. 23-26 (2019.12.12)
- [6] 甲斐秀一:「液相成分選択拡散分離装置の開発」, 2019 年度工学院大学大学院修士論文 (2020. 3. 9)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 甲斐 秀一
2. 発表標題 液相成分選択拡散分離装置の開発 - 電磁駆動部の設計 -
3. 学会等名 第30回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 森村 暢夫
2. 発表標題 液層成分選択拡散分離装置の開発 - シングルハルパツハ配列を用いた電磁駆動部の設計 -
3. 学会等名 マグネティックス / リニアドライブ合同研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 甲斐 秀一
2. 発表標題 液相成分選択拡散分離装置の開発 - 電磁駆動部の制御 -
3. 学会等名 平成31年電気学会全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 甲斐 秀一
2. 発表標題 液相成分選択拡散分離装置の開発 - 角型リニア同期モータの設計 -
3. 学会等名 第31回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 甲斐 秀一
2. 発表標題 液相成分選択拡散分離装置の開発 - 電磁駆動部の設計 -
3. 学会等名 第30回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

本研究は、「管内強制振動流による溶質の選択的拡散分離法」（選択的質量拡散理論）の実験による理論検証が主目的であったが、実験装置の開発に想定より多くの時間を要し、この目的が未達となった。しかし、装置は完成したので、今後とも本研究を継続し、理論検証を行っていく。

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
--	---------------------------	-----------------------	----