

令和元年6月13日現在

機関番号：12614

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K18318

研究課題名（和文）流体振動制御を用いた水面搬送手法の開発

研究課題名（英文）Development of water transportation method using fluid vibration control

研究代表者

小池 雅和 (KOIKE, Masakazu)

東京海洋大学・学術研究院・助教

研究者番号：70756337

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では流体振動を用いた新たな海上輸送手段を開発するために、大域のおよび局所的な振動を用いた基礎研究、空気圧を利用した振動発生手法の開発に取り組んだ。その結果、従来の集合本数と振動数の関係式の適用範囲をより明確にした。そして、ブイ型振動発生装置を用いた局所的な振動を用いて水槽内の粒子の位置決め搬送に成功した。さらに、搬送しやすい粒子の材質を明らかにした。また、ブイ型振動発生装置の適切な制御手法として、フィードバックとフィードフォワードを切り替えて使用する方法を提案した。対策方法の有効性は実機実験により検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究結果の一つはブイ型振動発生装置を用いた局所的な振動を用いて水槽内の粒子の搬送を実現したことである。これは、海上輸送の一つの可能性を示したという点で社会的な意義がある。また、ブイ型発生装置の振動発生手法としてon-off操作を前提とし、フィードバック制御とフィードフォワード制御を切り替えて使用する手法を提案した。on-off操作にもかかわらず、目標振動追従能力が格段に向上するといった点に学術的な意義がある。

研究成果の概要（英文）：In this research, in order to develop a novel method of ocean transport using fluid vibration, we worked on basic research using global and local vibration, and development of a vibration generation method using air pressure. As a result, scope of application of the conventional relational expression between the number of sets and frequency was clarified more. Using the local vibration with the buoy-type vibration generator, we succeeded in positioning and transferring the particles in the water tank. Furthermore, we clarified the material of easy-to-convey particles. In addition, as a suitable control method of the buoy type vibration generator, we proposed a switching method using feedback and feedforward. The effectiveness of the proposed method is verified by some experimental results using an experimental setup.

研究分野：制御・システム工学

キーワード：流体振動 スロッシング 空気ばね

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

現在、物資の輸送手段としては陸上輸送(車, 鉄道), 航空輸送(飛行機), 海上輸送(船舶)などが存在する。その中でも輸送コストが大幅に小さいものが船舶として知られており, 国際貨物輸送量の97%を占めると言われている。つまり, 海上輸送が極めて重要な分野だといえる。しかし, 船舶ですら10トンの荷物を東京から福岡に運ぶのに10万円ほどのコストがかかり, 加えて, 石油・石炭などのエネルギー資源を消費するうえ, 二酸化炭素を排出してしまう。エネルギー資源の少ない日本にとって, 船舶にとって変わる新たな省エネルギーな海上輸送手段を確立することが急務であると考えられる。国内外では海上輸送手段の基礎研究としてスロッシング現象を利用した研究などがある。これは, 規模はかなり小さくなるが, 水槽全体を加振することで液中に存在する固体(砂や石)を所望の位置に整列させるといった研究である。しかし, 海全体を加振することは不可能であるため, そのまま適用することは難しい。また, 海流を利用した輸送手段も研究されている。海流は場所によってある程度決まっているので, 大雑把に所望の位置へ輸送しようといった研究である。ただし, 監視艇や作業艇を必要とし, つど位置修正を行うといった煩わしさを伴う。このような背景のもと, 新たな海上輸送手段が求められている。

2. 研究の目的

海上または海中に振動を発生させるブイを複数個スパースに配置することで, 海流にわずかに影響を及ぼし, 所望の位置に自動で荷物船(動力なし)を波に載せて届けるという海上輸送手段を開発することを大目的とし, その第一段階としてスロッシング現象をベースとした基礎研究をおこなう。

3. 研究の方法

本研究においては, 次の3つの基礎研究に取り組んだ。

(1) 大域的な振動による基礎研究

従来研究では, 小型水槽を用いて水槽全体を加振し, 水槽内の粒子を特定位置に集める研究がなされている。そして, 加振周波数と粒子の集合本数の関係式(理論式)を明らかにしている。しかし, 関係式の適用範囲が不明確であり, 特に, 水深との関係が不十分な関係式になっていた。そこで, 水深をパラメータとして多数の条件で実機実験を行うことで, その関係を明らかにする。加振装置としてはXYステージを用いる。高周波数で振動させる際には追従性を考慮して加振振幅を小さくするなどの工夫をする。また, シーケンシャルに加振周波数を変化させることで, 粒子を任意の位置に移動させることができるのかを明らかにする。さらに, 粒子の材質による違いも調査する。具体的には, AS樹脂, ガラス, ジルコニアを用いて実機実験する。

(2) 局所的な振動による基礎研究

(1)のように水槽全体を加振するのではなく, 水槽を固定し, 水面上部に二本のアクチュエータ(加振器)を設置し, アクチュエータを上下に加振することで局所的な振動を作り出す。この加振手法によって(1)と同様に水槽内の粒子を特定位置に移動させることができるのかを明確にする。また, 加振器先端の形状による違いを調査する。

(3) 空気圧を利用した振動発生手法の開発

振動発生用アクチュエータとしては電気駆動の「パルスモータ」などが一般的に広まっている。しかし, 本研究では水中内における加振を想定しているため, 防水などの対策が必須となり, パルスモータは不向きであると考えられる。そこで, 本研究では, 電気駆動ではなく, 空気圧を利用した振動発生手法の開発をおこなう。空気圧駆動のアクチュエータとしては「空圧シリンダ」, 「空気ばね」などが存在する。ここでは, 空気ばねを用いた位置決め性能の向上を目指す。なお, 空気の流入出には電磁弁を用いるため, on-off 操作入力を前提とする。

4. 研究成果

(1) 大域的な振動による基礎研究

図1のように小型水槽を用いて水槽全体を加振することで, 搬送現象を解析した。加振装置としてはXYステージを用い, 数10Hz程度で加振実験を行った。荷物船の変わりに, 比重の異なる二つの粒子を用いた。一つは水面に浮く粒子, 一つは水中に沈む粒子である。実験の結果, 水面に浮く粒子においては, 多くの未知の要因が複雑にからんで搬送現象を起こしており, 任意の位置への搬送が困難であった。一方, 水中内の粒子においては, 特定の周波数・振幅・容器の水面までの高さ・容器の振動方向の長さ依存して特定の位置への搬送現象がみられた。従来文献でも水中内での粒子の搬送現象は解析されており, 集合本数と周波数の関係式が導かれている。しかし, 水面の高さ方向の振幅が限りなく小さい等の非常に理想的な仮定を設けており, 適用範囲が不明確だった。一方, 本研究によって, 水深と容器の長さの比に対する条件を明らかにし, 従来文献で示されている集合本数と周波数の関係式の適用範囲を明確にした。図2に集合本数と周波数の関係性を載せた。従来研究の関係式よりも精度の向上がみられる。

加振周波数をシーケンシャルに組み合わせることで、特定の位置ではなく任意の位置に水中粒子を移動させる基礎実験をおこなった。その結果、多数の粒子を任意の位置に移動させるのは非常に困難であることがわかった。低い振動数であれば、綺麗に特定の位置に搬送できるのだが、高い周波数だと、振幅を大きくできないため、搬送力が低下してしまうのが大きな原因である。また、容器の壁面と振動方向を厳密に直交した位置関係で保つ必要があり、その調整誤差も原因の一つである。また、使用した粒子の材質はAS樹脂、ガラス、シリコンアであるが、AS樹脂が搬送させやすいことも分かった。

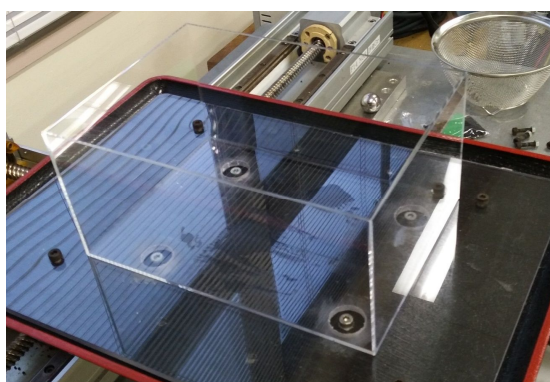


図1 XY ステージ型加振器と水槽

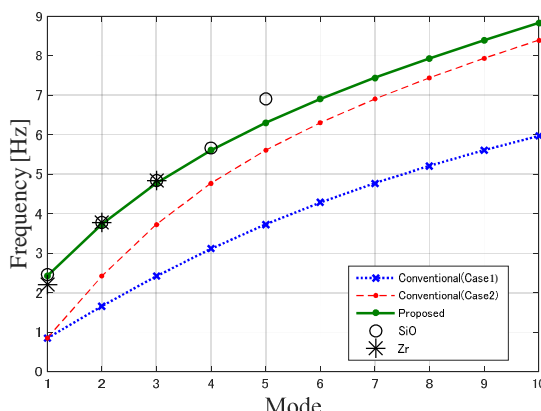


図2 集合本数と周波数の関係

(2) 局所的な振動による基礎研究

図3に示すブイ型振動発生装置を用いて粒子の移動現象を確認した。具体的には、水槽全体加振と同様の現象を引き起こす振動パターンを探った。この基礎実験では水深、粒子、振動数など、多数のパラメータを変えた実験をおこなった。その結果、水槽内に少なくとも1本~7本までは粒子を集中させる可能性があることを確認した。ただし、集合本数が多くなればなるほど、粒子を特定の位置に移動させることが難しくなることがわかった。この原因は振動発生装置の先端の板が所望のサイン波の形を歪ませていることが主たる原因である。現状先端の板はアクチュエータと共に鉛直方向に可動するだけであるが、先端の板を波の接線方向に傾くように駆動させるような工夫により改善できると考えられる。上記の結果は学会で報告している。[学会発表]

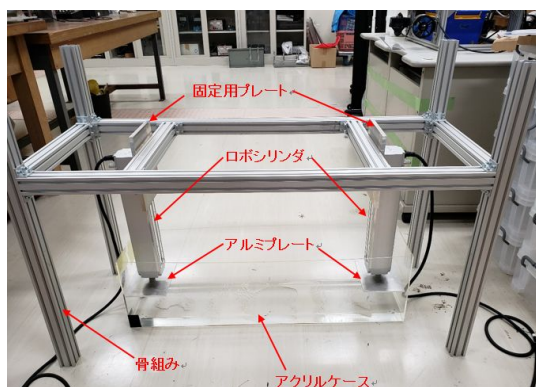


図3 ブイ型振動発生装置

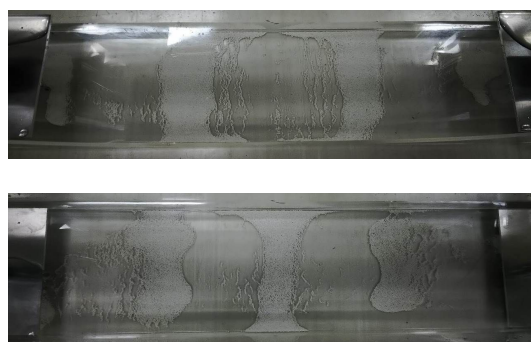


図4 集合本数2本と3本

(3) 空気圧を利用した振動発生手法の開発

空気ばねを対象に on-off 入力を用いた制御で位置決め誤差をより小さくするための手法を構築した。具体的な手法の特徴を以下に示す。フィードバック制御とフィードフォワード制御を切り替えて使用する方法である。時間的にパラレルに使用するのではなく時間的にシリアルに使用する点に特徴がある。図5のように状態空間の原点近傍に切り替え境界を設定する。切り替え境界まではフィードバック制御を施し、切り替え境界から原点まではフィードフォワード制御を施す。切り替え境界は複数の区分に分割しておく、事前実験によって各区分における適切なフィードフォワード入力列を準備しておく必要がある。この入力列は高い制振性能をもたらすと同時に定常偏差を小さくするようなものでなければならない。高い制振性能をもたらす入力列は比較的容易にみつけることができるので、この入力列を基準にオフラインで所望の入力列に修正する方法を提案した。具体的には、基準の入力列の有する制振性能が劣化しないように修正する。図6のように大きさの異なるインパルス外乱を用いた実機実験による検証で定常偏差のばらつきを評価した。米印が提案手法を用いた場合、丸印がフィードバック制御のみを用いた場合である。フィードバック制御のみの場合に比べて30%ほどばらつきの幅が減少す

る．なお，フィードバック制御ではリアプノフ関数に基づく方法を使用している．上記の結果は雑誌論文及び学会で報告している．[雑誌論文][学会発表 ~]

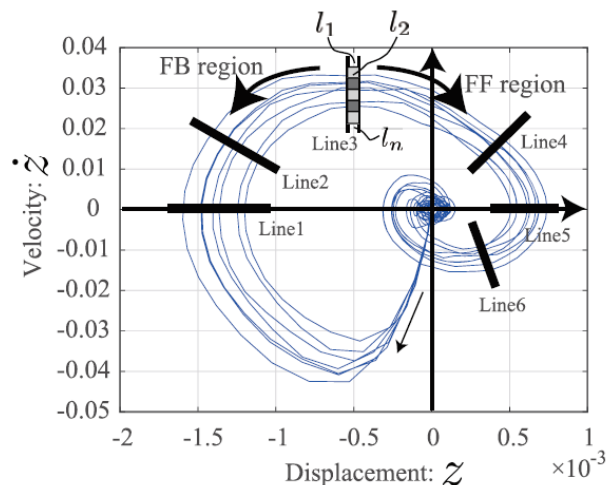


図5 状態空間における切り替え境界

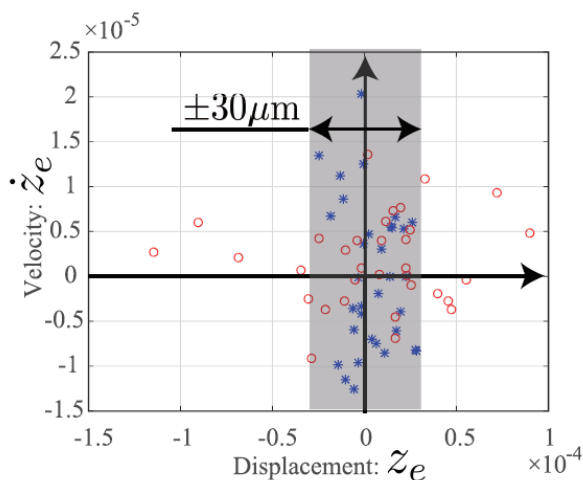


図6 位置決め誤差

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 1 件)

小池雅和, 中田 拓海, 章 菲菲, 田原 淳一郎: フィードフォワード入力列を用いた on-off 弁駆動型空圧式除振台の振動抑制制御, 電気学会論文誌 C, Vol.138, No.9, pp.1067-1074, 2018 年, 査読有

[学会発表](計 5 件)

Masakazu Koike, Feifei Zhang, Junichirou Tahara: Multi-axis positioning control for pneumatic isolation table by using on-off valves, Proc. of The 36th IASTED International Conference on Modelling, Identification and Control, pp186-193, 2017 年, 査読有

井上良太, 小池雅和, 章ふえいふえい, 田原淳一郎: 吸排気入力に関する公倍数制約を考慮した on-off 弁型空圧式除振台の高精度な位置決め制御, 第 59 回自動制御連合講演会, SaA4-4, 2016 年

中田拓海, 小池雅和, 章ふえいふえい, 田原淳一郎: オフセットゼロ入力を用いた on-off 弁駆動型空圧式除振台の振動抑制制御, 第 22 回知能メカトロニクスワークショップ, 2A2-3, 2017 年

銀屋 統, 小池雅和, 章ふえいふえい, 田原淳一郎: 単一のサーボ弁を用いた空圧式除振台の 3 軸振動抑制制御, 第 60 回自動制御連合講演会, FeSP2-1, 2017 年

悦道悠太, 小池雅和, 章ふえいふえい: 水面加振による流体振動を用いた粒子の位置決め制御第 6 回制御部門マルチシンポジウム, PS2-2, 2019 年

[その他]

ホームページ等

<http://masakazukoike.site44.com/interestsjp.html>

6 . 研究組織

(1)研究協力者

研究協力者氏名: 田原 淳一郎 (東京海洋大学・学術研究院)

ローマ字氏名: Junichirou Tahara

(2)研究協力者

研究協力者氏名: 章ふえいふえい (東京海洋大学・学術研究院)

ローマ字氏名: Feifei Zhang