

令和 2 年 6 月 9 日現在

機関番号：11501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K06172

研究課題名(和文) 生物に学んだ流体関連振動を用いたエネルギーハーベスティング

研究課題名(英文) Energy harvesting based on bio-inspired fluid-structure interaction

研究代表者

M・A Langthjem (Langthjem, Mikael A)

山形大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：30344815

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)：(1) 薄板としてモデル化された単一の旗の場合、旗の後縁から放出される渦を適切に含めると、臨界流速が低下することが示された。さらに、旗の力学を正しくモデル化するには、コリオリと遠心力を含めることが不可欠であることが示された。(2) はたたく旗の無限の配列は解析され、魚がダイヤモンドパターンタイプの学校の形成で水泳からエネルギー的に利益を得るのと同じように、人がそのようなパターンでエネルギー収集フラグを配置することによってエネルギー的に利益を得ることが示された。(3) フェーズで羽ばたく旗に対応する渦配列の場合、安定性は不明だったが、そのような渦配列は常に不安定であることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

研究成果の学術的意義：単一の羽ばたく旗の基本的なダイナミクスと安定性に関連して、いくつかの側面が明らかにされている。慎重なエネルギー分析により、さまざまなタイプの流体力の相対的な重要性が明らかになった。Weihsの無限の魚群の分析は、羽ばたく旗からのエネルギー収穫の理解を深めることがわかっている。安定性に関連する新しい結果が見つかった。

研究成果の社会的意義：このプロジェクトは、再生可能エネルギーの科学的根拠を拡大した。エネルギーハーベスティングフラッピングフラグの無限の配列の結果は、大規模な配列での風力タービンの配置にも適用できる。

研究成果の概要(英文)：(1) For the case of a single flag, modelled as a thin plate, it has been shown that a proper inclusion of vortex shedding from the trailing edge of the flag lowers the critical flow speed. Furthermore, it has been shown that the inclusion of Coriolis and centrifugal forces is essential for a correct modelling of the flag dynamics. (2) An infinite array of flapping flags has been analyzed using Weihs's (1973, 1975) model of an infinite school of fish. Just as fish benefit energetically from swimming in a diamond pattern-type school formation, it has been shown that one benefits energetically by placing energy-harvesting flags in such a pattern. (3) For a vortex array that corresponds to flags fluttering in anti-phase it is known that this pattern is stable by certain conditions. For a vortex array that corresponds to flags fluttering in phase (or fish swimming in phase) the stability was not known. It has been shown in the present work that such a vortex array is always unstable.

研究分野：知能機械学・機械システム

キーワード：Vortex street Vortex array Flutter Flapping flag Stability Energy harvesting Energy analysis

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

1. 研究開始当初の背景

圧電素子を備えた旗の羽ばたきからのエネルギーハーベストに多くの努力が費やされてきた。しかしながら、その効率は低いことが知られている。

また、魚の群れの個々の魚は、周囲の魚によって作成された流れからエネルギー的に恩恵を受けることが知られている。

この研究の目的は、この知識を利用してエネルギーハーベスタの効率を改善することである。

2. 研究の目的

- (1) まず、単一の羽ばたき旗のダイナミクスと安定性を明らかにする。特に、旗からの航跡の数学的モデリングが旗の安定性にどのように影響するかを明らかにする。
- (2) 次に、フラグの無限配列からのウェイクのダイナミクスと安定性を明確にする。点渦モデルを適用する。
- (3) 3番目に、いくつかの相互作用するフラグのシミュレーションを実行する。
- (4) 4番目に、実験的検証を行う。

3. 研究の方法

単一のフラッピングフラグの場合、フラグは薄いプレートと見なされる。流体力は、テオドロセンの理論を使用して評価する。作業の目的は、フラッター振動のメカニズムの物理的な理解を得て、準定常モデルとは対照的に、複雑なテオドロセン関数を介して表される動的に変化する流体力の安定化効果を検証することである。

2番目の部分は、魚群の流体力学およびエネルギー的利点を理解するために使用されるモデル問題として **Weih**s (1973, 1975)によって導入された二重無限渦配列に関するものである。**Weih**s は 2つの異なる水泳モードを検討した。1つは魚が逆位相で泳ぐモード、もう1つは同位相で泳ぐモードです。水泳の逆位相モードに対応する渦配列の安定特性はよく理解されている。ただし、これは同相モードには当てはまらない。対応する渦配列の摂動のノーマルモード解析が実行される。

シミュレーション研究では、フラグモデルは集中定数モデルで、流れモデルは、離散点渦モデルとする。

4. 研究成果

単一の羽ばたき旗の場合、旗のエネルギーバランス分析は、泳ぐうなぎの動きと同様に、旗/プレートがドラッグタイプのフラッターモーションを実行する必要があることを示している。テオドロセン関数の小さな虚数部は、臨界流速度が準定常近似よりも小さいという意味で不安定化効果をもたらす。これらの予測は、数値固有値分析によって検証され、固有値ブランチ (特性曲線) をトレースすることの重要性が強調されている。

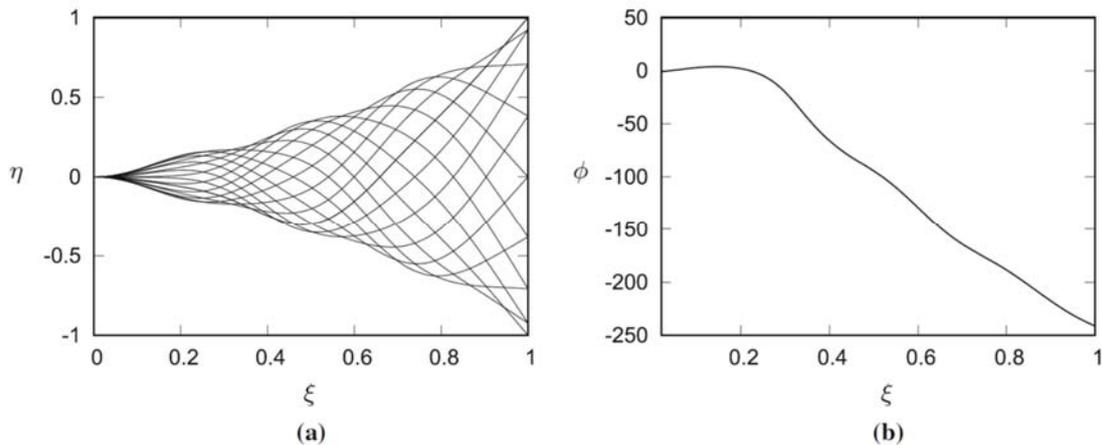


図 1. (a) 気流内の単一の旗の羽ばたき運動の例。 (b) 対応する位相角関数。

図 2 (a) は、逆位相で泳ぐ魚の群れを示している。図 2 (b) は、フェーズで泳ぐ魚の群れを示している。

図 3 は、対応する誘導速度場を示しており、逆位相水泳は完璧な追い風を与えることがわかる。同相での水泳は横風を与える。これが、魚群の魚が同相で泳がない理由です。



図 2. (a) 逆位相で泳ぐ魚の群れ。 (b) 逆位相で泳ぐ魚の群れ。

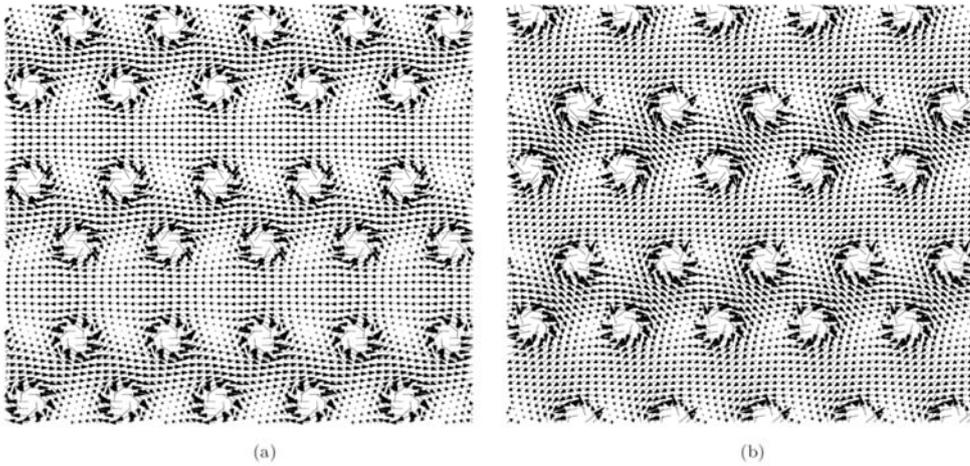


図 3. (a) 逆位相で泳ぐ魚の群れによる誘導速度場 (b) 同相で泳ぐ魚の群れによる誘導速度場

図 4 は、逆位相でフラッピングしている旗の誘導速度場を示しており、完璧な向かい風が生じている。したがって、相互作用しないフラグよりも多くのエネルギーをフローから取得できる。

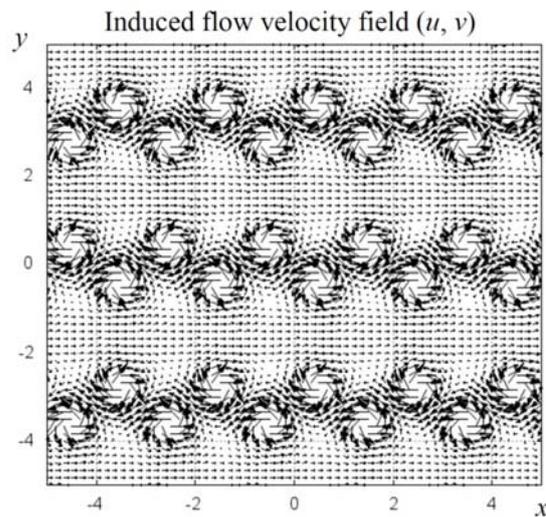


図 4. 逆位相でフラッピングするフラグの無限配列に対する誘導速度場

図 5 は、航跡内の点渦の分布と、1つのフラグから 8つの相互作用するフラグまでの対応する渦度フィールドを示している。

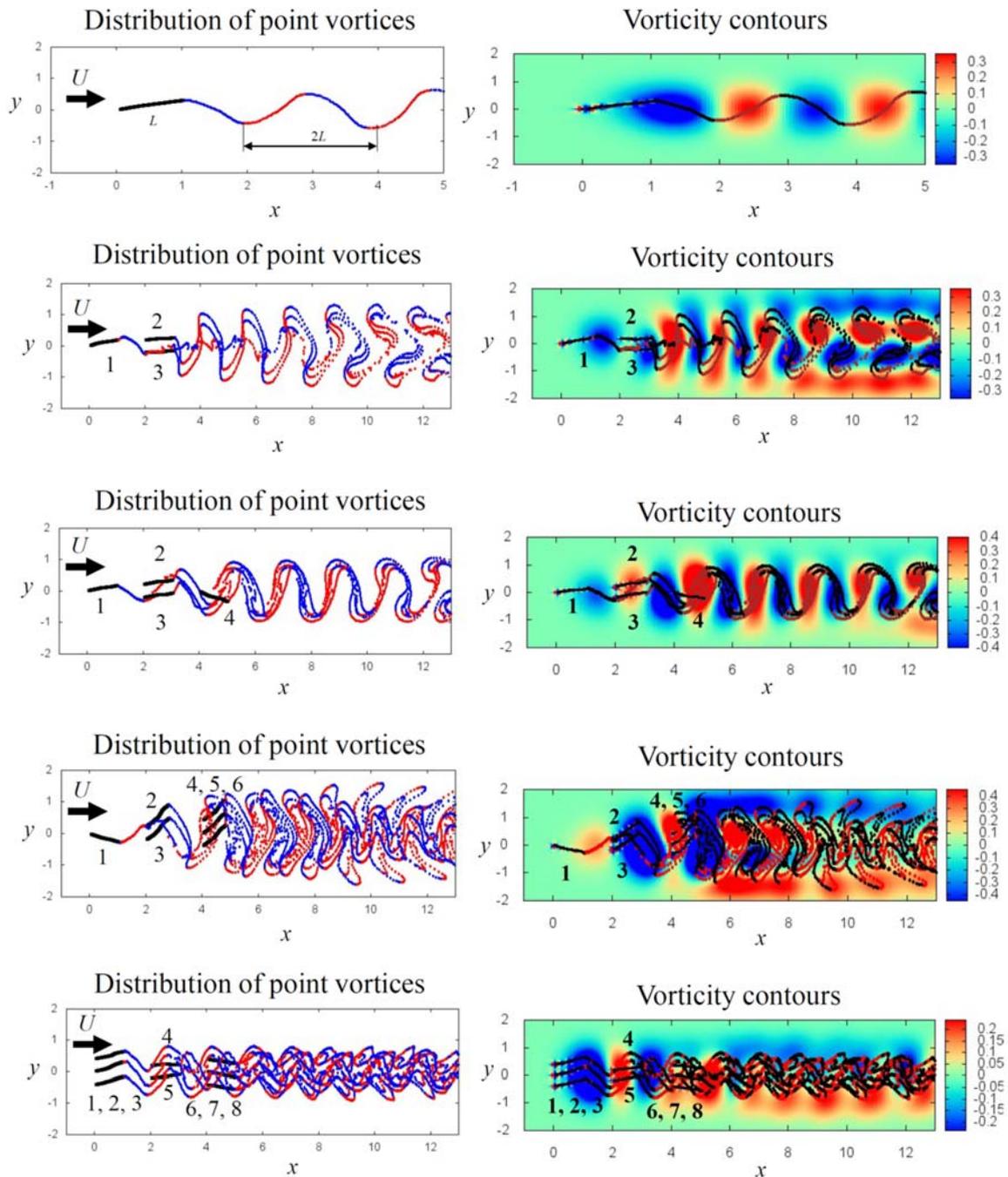


図 5.  
 1つのフラグから 8つの相互作用するフラグまで  
 (左) 後流における点渦の分布 (右) 後流の渦度分布

図 6 は、フラグの下流端の振幅を示しています。左は、ストリーム内の 1つのフラッピングフラグ。相互作用する 3つのフラグの右側。一部のフラグでは、相互作用により振幅が増加する可能性がある。

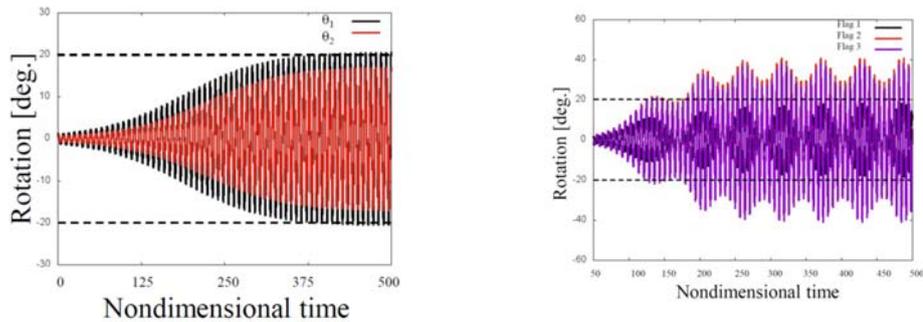


図 6. (左) 1つのフラグの下流端の振幅 (右) 相互作用する3つのフラグの下流端の振幅

#### 参考文献

1. D. Weihs 1973 Hydrodynamics of fish schooling. *Nature* 241, 290-291
2. D. Weihs 1975 Some hydrodynamical aspects of fish schooling. In: *Swimming and Flying in Nature*, Vol. 2 (T. Y.-T. Wu, C. J. Brokaw, C. Brennen, Eds.), pp. 703-718, Plenum Press, New York and London
3. M. A. Langthjem 2019 On the mechanism of flutter of a flag. *Acta Mechanica* 230(10), 3759-3781
4. M. A. Langthjem 2017 Optimum layout of a large number of interacting piezoelectric flags in axial flow. IUTAM Symposium on Dynamics and Topology of Vorticity and Vortices, June 13-16, 2017, Marseille, France. (Paper in preparation)
5. M. A. Langthjem 2019 Optimum power extraction from an infinite vortex array. IUTAM Symposium on Vortex Dynamics in Science, Nature and Technology, 24 Jun 2019 - 28 Jun 2019, San Diego, USA. (Paper in preparation)
6. M. A. Langthjem 2020 The stability of a doubly infinite vortex array. *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*, 9 pp. (in review).

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 6件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Mikael A. Langthjem, Masami Nakano	4. 巻 Vol. 32
2. 論文標題 A combined analytical and numerical analysis of the flow-acoustic coupling in a cavity-pipe system	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Theoretical and Computational Fluid Dynamics	6. 最初と最後の頁 pp. 451-473
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s00162-018-0462-4	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 該当する
1. 著者名 Mikael A Langthjem, Masami Nakano	4. 巻 2076
2. 論文標題 On localized trapped modes in a pipe-cavity system	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 数理解析研究所講究録	6. 最初と最後の頁 32-42
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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Mikael A Langthjem	4. 巻 To appear
2. 論文標題 Optimum power extraction from an infinite vortex array	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IUTAM Symposium on "Vortex dynamics in science, nature and technology"	6. 最初と最後の頁 1 pp.
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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Mikael A Langthjem	4. 巻 In print
2. 論文標題 On the mechanism of flutter of a flag	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Acta Mechanica	6. 最初と最後の頁 24 pp.
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 該当する

1. 著者名 Mikael Langthjem	4. 巻 Flash memory
2. 論文標題 Dynamics and stability of a forced liquid layer	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本流体力学会年会 2018論文集	6. 最初と最後の頁 2 pp.
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Mikael A Langthjem	4. 巻 To appear
2. 論文標題 An energy analysis of a fluttering flag	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 数理解析研究所講究録	6. 最初と最後の頁 9 pp.
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 ランジェム ミカエル	4. 巻 N/A
2. 論文標題 エナジーハーベスティングを高めるためにはためく旗の最適形状	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 第64回理論応用力学講演会・論文集	6. 最初と最後の頁 2 pp.
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 -

1. 著者名 Mikael Langthjem	4. 巻 N/A
2. 論文標題 On the optimum layout of a large number of interacting energy harvesting flags in axial flow	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 日本流体力学会年会 2017論文集	6. 最初と最後の頁 2 pp.
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 -

1. 著者名 Mikael Langthjem	4. 巻 N/A
2. 論文標題 Optimum layout of a large number of interacting piezoelectric flags in axial flow	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IUTAM symposium on Dynamics and Topology of Vorticity and Vortices	6. 最初と最後の頁 2 pp.
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 Mikael Langthjem	4. 巻 Submitted
2. 論文標題 On the mechanism of flutter of a flag	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Acta Mechanica	6. 最初と最後の頁 15 pp.
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 該当する

1. 著者名 M. A. Langthjem	4. 巻 N/A
2. 論文標題 On vortex shedding from a flapping flag	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 日本流体力学会年会講演アブストラクト集 (CD-ROM)	6. 最初と最後の頁 1-1
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 -

1. 著者名 M. A. Langthjem	4. 巻 N/A
2. 論文標題 Energy harvesting based on bio-inspired fluid-structure interaction	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 数値解析研究所講義録 (to be published)	6. 最初と最後の頁 1-7
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 -

1. 著者名 M. A. Langthjem	4. 巻 N/A
2. 論文標題 Optimum layout of a large number of interacting piezoelectric flags in axial flow	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IUTAM symposium on Dynamics and Topology of Vorticity and Vortices, Extended abstracts (to be published)	6. 最初と最後の頁 1-2
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 -

〔学会発表〕 計9件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 Mikael Langthjem
2. 発表標題 Dynamics and stability of a forced liquid layer
3. 学会等名 日本流体力学会 年会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Mikael Langthjem
2. 発表標題 On the mechanism of flutter of a flag
3. 学会等名 非線形波動現象の数理とその応用 RIMS共同研究 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Mikael Langthjem
2. 発表標題 Optimum power extraction from an infinite vortex array
3. 学会等名 IUTAM Symposium on "Vortex dynamics in science, nature and technology" (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Mikael Langthjem
2. 発表標題 Optimum layout of a large number of interacting piezoelectric flags in axial flow
3. 学会等名 IUTAM symposium on Dynamics and Topology of Vorticity and Vortices (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 ランジェム ミカエル
2. 発表標題 エナジーハーベスティングを高めるためはためく旗の最適形状
3. 学会等名 第64回理論応用力学講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Mikael Langthjem
2. 発表標題 On the optimum layout of a large number of interacting energy harvesting flags in axial flow
3. 学会等名 日本流体力学会年会 2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M. A. Langthjem
2. 発表標題 On vortex shedding from a flapping flag
3. 学会等名 日本流体力学会年会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 M. A. Langthjem
2. 発表標題 Energy harvesting based on bio-inspired fluid-structure interaction
3. 学会等名 RIMS研究集会「非線形波動現象の数理に関する最近の進展」
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 M. A. Langthjem
2. 発表標題 Optimum layout of a large number of interacting piezoelectric flags in axial flow
3. 学会等名 IUTAM symposium on Dynamics and Topology of Vorticity and Vortices (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 Sugiyama, Yoshihiko; Langthjem, Mikael; Katayama, Kazuo	4. 発行年 2019年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 236
3. 書名 Dynamic Stability of Columns under Nonconservative Forces	

1. 著者名 Y. Sugiyama, M.A. Langthjem, K. Katayama	4. 発行年 2018年
2. 出版社 Springer (accepted for publication)	5. 総ページ数 230
3. 書名 Dynamic Stability of Columns under Nonconservative Forces: Theory and Experiments	

〔産業財産権〕

〔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
--	---------------------------	-----------------------	----