

令和元年5月23日現在

機関番号：11501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06067

研究課題名(和文) 複雑系の三次元後流のマルチスケール特性を利用した流れの制御技術

研究課題名(英文) Flow control technology using multi-scale characteristics of three-dimensional complexity wakes

研究代表者

李鹿輝 (RINOSHIKA, AKIRA)

山形大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：00253906

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、多数の物体の周りの流れ場に対して、2DPIVを用いて瞬時速度の計測・可視化を行った。物体の形状、個数、高さ及び配置などは渦構造との関係を調べた。新たな防波堤の形状を研究するため、波形状表面をもつ角柱の後流構造の実験研究を行った。波形状モデルの後流において、背面に生じる低速領域と剥離領域が拡大されたことがわかった。新たな防波堤に使用される低アスペクト比の円柱のまわりの3次元流れに対して、3次元PIV計測を行った。3次元渦の形成、干渉、減衰の過程を解明し、新たな防波堤を支配する大規模渦構造を抽出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は多数の低アスペクト比の物体が発生した三次元渦構造や渦励振の機構などを解明するとともに、渦の制御という観点から効果的に津波のエネルギーを消散させる新たな構造の防波堤に応用できる。防波堤の高さを抑制する経済効果とともに、防災・減災などの国土強靱化に結びつき、非常に特色のある基礎・応用研究である。また、悲惨な自然災害から「命を守る」と「減災」の基本対策より、本研究は国の防災上にも重要な研究といえる。

研究成果の概要(英文)：In this study, 2DPIV was used to measure and visualize the instantaneous velocity of the flow field around several bodies. The shape, number, height and arrangement of the objects were investigated in relation to the vortex structures. In order to study the shape of the new breakwater, we conducted an experimental study on the wake structures of a square cylinder with a wave-shaped surface. In the wake of the wave shape model, it was found that the low velocity area and the separation region generated were enlarged. Three-dimensional PIV measurements were performed on three-dimensional flow around a low aspect ratio cylinder used for the new breakwater. We elucidated the formation, interference and attenuation processes of the three-dimensional vortex, and extracted large-scale vortices that dominate new breakwaters.

研究分野：流体工学

キーワード：後流 渦 流れ制御

1. 研究開始当初の背景

2011年3月11日は人類が忘れられない。東日本大震災では巨大津波の発生により三陸海岸を中心に広汎な太平洋側海岸線に甚大な被害を被って、2万におよぶ人的被害を引き起こした。多くの防波堤が破壊・変形した。その中、30年という年月を費やし、水深が63メートルで全長1960メートル、1200億円以上の膨大な費用を費やしてギネスブックに掲載されている岩手県の釜石港湾口防波堤も破壊された。現在、大きな津波被害を受けた東日本大震災を教訓にして、日本を初め、世界的にも巨大津波に対する防災技術が求められている。政府は国民の生命と財産を守り抜くため、事前防災・減災の考え方にに基づき、強くてしなやかな国をつくるための国土強靱化を推進している。津波災害について、東日本大震災の津波の反省から防波堤を高くすることを第一の対策として検討されている。現在、図1に示すようなケーソン防波堤は一般的に使われているが、ケーソンの形状によってスリット型の消波ケーソン堤もある。また、波力を軽減するため、堤体前面に消波ブロックの配置も使用している。しかし従来の防波堤では想定する波を堰き止めるために、高さだけで津波の威力を減ずる事は、巨大な防波堤となりかつ巨額な費用もかかる。したがって、津波被害の軽減のため、防波堤の流体力学的特性から技術の解決策を検討することが必要である。これまでの流体工学の研究では、単一体のアスペクト比の円柱後流の渦構造(図2)に関する基礎研究が行っているが、多数の低アスペクト比の物体後流の研究やそれにより津波エネルギーの消散と破壊力の低減に関する研究はほとんどなされていない。

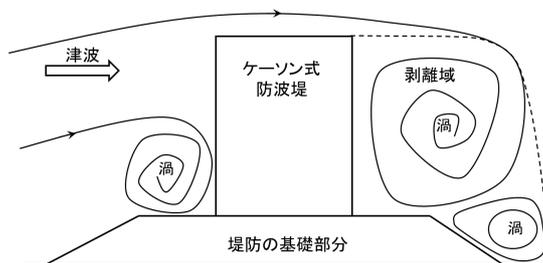


図1 従来のケーソン防波堤の構造と津波のイメージ

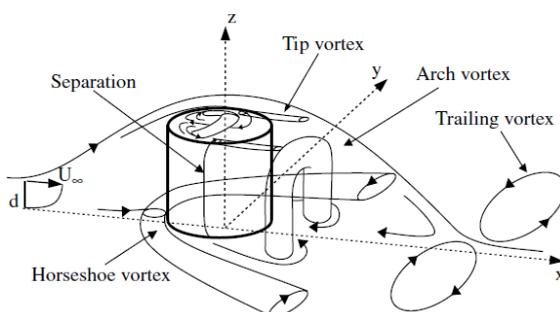


図2 低アスペクト比の物体後流の渦構造

2004年12月26日インドネシアのスマトラ島沖で起こった大津波の調査結果によると、沖合にある海底の岩礁・珊瑚礁は、津波の速度を下げ、破壊力を減少させたことがわかった。なぜなら津波が過ぎると岩礁・珊瑚礁(多数物体)からは渦が発生し、それが結果的に水の堤防となり、津波エネルギーを非常に有効的に減衰・拡散したと考えられる。このように、岩礁や珊瑚礁の効果を学び、自然に逆らわない形の対策を立てることが、今後の津波対策の重要なポイントのひとつといえる。

最近、我々の未公開の研究では、ある複数配列の低アスペクト比の円柱が大きな振動流(フ

アラデー波)を誘発したことを初めて発見した。詳細な渦・波相互干渉の機構はまた明らかにしていないが、この振動流を利用することによって流れのエネルギーを打ち消すことが可能と考えられる。これまで、複数の低アスペクト比の物体は発生した相互干渉の三次元渦構造や渦励振が解明されていない。

2．研究の目的

本研究は多数の低アスペクト比の各種形状物体が発生したマルチスケール渦の発生・干渉・破壊などの相互作用の機構を解明する。応用研究の展開として、流れのエネルギーを消散させる渦の制御により、津波エネルギーを消散させることができる防波堤を研究する。今後、それらの研究成果は防波堤の機能性構造の開発へ足がかりをつかみたい。

3．研究の方法

回流水槽中の平板上において各種形状の低アスペクト比の物体群が発生した三次元後流の構造を2DPIVと3DPIV可視化により計測する。三次元ウェーブレット変換などにより、物体群から放出されるマルチスケールの渦の発生・干渉・破壊の過程を明らかにする。

4．研究成果

(1)本研究では、四つの有限長円柱の周りの流れ場に対して、2DPIVを用いて瞬時速度の計測・可視化を行った。物体の形状、個数、高さ及び配置などは渦構造との関係を調べた。円柱配置によって後流の渦放出周波数が異なり、1.28[Hz]の周波数が下流側円柱後流を占める割合が高くなると、それとほぼ同じ周波数で水面に振動を生じた。さらに、円柱物体の形状、高さ、個数及び配置に対して、3次元流れのLES数値シミュレーション(Large Eddy Simulation)を行った。実験が見えない3次元渦の構造及び渦の相互作用の過程を明らかにした。また、物体の形状・配置などによって渦が誘発した振動流を解明した。

(2)新たな防波堤の形状を研究するため、波形状表面をもつ角柱の後流構造の実験・数値計算研究を行った。波形状モデルの後流において、背面に生じる低速領域と剥離領域が拡大される。また、FFT解析の結果から、角柱モデルの後流では特定の周波数が支配的に存在し、それがカルマン渦によるものであるのに対し、波形モデル後流では、周波数に一貫性が見られず、スペクトルも小さな値をとる、このことから、カルマン渦と異なる、新たな二次元渦の生成が生じていると考えられる。これらの二次元渦の生成により、渦度やレイノルズ応力の散逸が見られ、下流での乱れ幅を抑制する様子がPIVの結果から分かった。なお、波形は波長が短く、山と谷の数が多いモデルほど乱れる幅は抑制された。LES数値計算によるモデル近傍の圧力分布では、角柱モデルに比べ波形モデルの背圧が高く、圧力回復が速い結果となった。ここから圧力差によって生じる圧力抗力の抑制が期待できる。

(3)本研究は平板上に置かれた低アスペクト比円柱(Fig.1a)後方の剥離領域と先端面の渦を制御する目的とする。以下の三つの受動制御法を新たに提案する。先端面と側背面を貫通する傾斜穴を設ける方法(Fig.1b)。円柱後方に吸込み、他先端面に吹出しを発生させる(RIH, Rear Inclined Hole)。円柱前方と後方面を貫通する水平穴を設ける方法(Fig.1c)。水平穴から後方に吹出しを発生させる(HH, Horizontal Hole)。側前面と先端面を貫通する傾斜穴を設ける(Fig.1d)。先端面に吹出しを発生させる(FIH, Front Inclined Hole)。

本研究で使用した物体モデルは、Fig.1(a)に示すようにアクリル製の円柱である。その直径Dと高さHとも70mmで、アスペクト比(H/D)は1とする。穴の直径と位置による制御効果の違

いを検討するため、穴の直径を $d = 8\text{mm}$, 10mm , 12mm 、穴の位置を $h = 20\text{mm}$, 35mm , 50mm と変化させた。本研究では平板上に置かれた円柱の側面、上面および後方面から速度分布を計測ため、回流水槽において PIV 計測を行った。通常円柱と各種穴円柱の後流に関する平均流線、平均速度成分、レイノルズ応力、乱流運動エネルギー、スペクトル、瞬時の流れ構造を評価する。さらに、小型風洞において通常円柱と各種穴円柱の抗力を計測した。

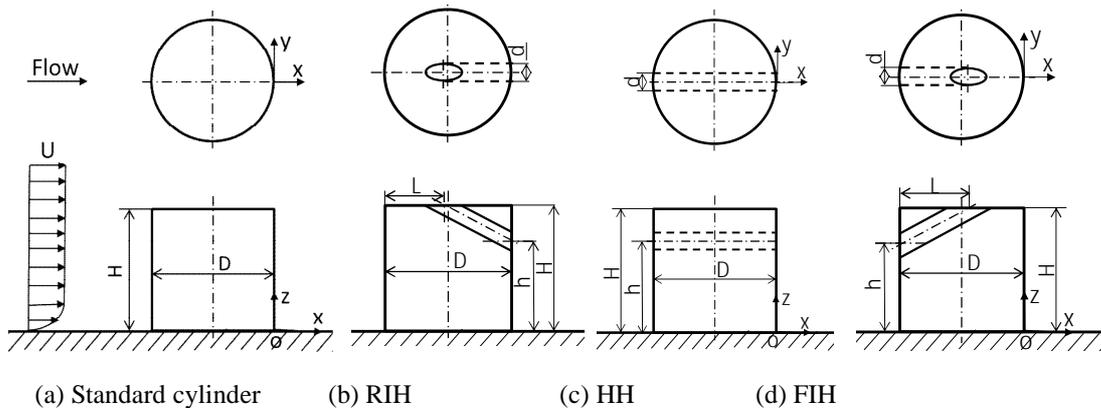


Fig.1 Experimental setup and cylinder models

これまで、穴の直径 $d = 10\text{mm}$ の円柱に対して穴の位置を $h = 20\text{mm}$, 35mm , 50mm と変化させ、PIV 計測実験を行った。以下の結果を得た。

先端面と側背面を貫通する傾斜穴を設ける有限長円柱 (RIH, Fig.1b) まわりの流れ構造の結果：

- (a) RIH 円柱後流において、穴中の流れは側面から先端面へ吹き上げている。先端面の剥離渦に対する吹き出し、後方の大きな剥離域に対して吸い込みという制御が行われる。
- (b) RIH 円柱後流には、先端面の渦と後方のはく離領域が減少し、レイノルズ応力と乱流運動エネルギーも小さくなった。

円柱前方と後方面を貫通する水平穴を設ける有限長円柱 (HH, Fig.1c) まわりの流れ構造の結果：

- (a) 水平の吹き出しによって、HH 円柱後流の後方のはく離領域が減少している。
- (b) HH 円柱後流の負のレイノルズ応力の領域と乱流運動エネルギーは減少している。
- (c) 水平穴の吹き出し流れにより後方の瞬時の大きな渦もいくつかの小さい渦に破壊される。

側前面と先端面を貫通する傾斜穴を設ける有限長円柱 (FIH, Fig.1d) まわりの流れ構造の結果：

- (a) FIH 円柱後流には、穴の吹き出し流により先端面の渦は小さくなるが、後方のはく離領域が大きくなった。
- (b) 円柱の後方領域のレイノルズ応力と乱流運動エネルギーはほかの円柱より高くなっている。

この結果より、FIH 円柱は津波のエネルギーを消散させる新たな構造の防波堤に応用することが可能である。

さらに、小型風洞において通常円柱と各種穴円柱の抗力を計測した。先端面と側背面を貫通する傾斜穴の円柱と円柱前方と後方面を貫通する水平穴を設ける円柱は通常円柱に比べて抗力が約 10% に低減したことが分かった。

(4) 新たな防波堤に使用される低アスペクト比の円柱のまわりの 3 次元流れに対して、高解像度 Tomographic PIV 計測を行った。3 DPIV 実験計測が得た 3 次元流れの速度データに対して、3 次元ウェーブレット変換を行い、空間 時間において防波堤の周りに各スケールの渦のエネ

ルギー分布を定量的に解析した。3次元渦の形成、干渉、減衰の過程を解明し、新たな防波堤を支配する大規模渦構造を抽出した。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 12 件)

- (1)Y. Zheng, Lin Dong, A. RINOSHIKA, “Multi-scale wake structures around the dune”, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol.104, June 2019, Pages 209-220. (査読有)
- (2)Lin Dong, A. RINOSHIKA, “Comparison between rotation swirler and non-rotation swirler in a horizontal swirling flow pneumatic conveying”, Powder Technology, Vol.346, 15 March 2019, Pages 396-402. (査読有)
- (3)Lin Dong, A. RINOSHIKA, “Self-excited pneumatic conveying through vertical curved 90° bends”, Powder Technology, Vol.346, 15 March 2019, Pages 291-300. (査読有)
- (4)Y. Zheng, A. RINOSHIKA, J. Suo, “Wavelet based phase average on the multi-scale wake structures of square cylinder”, International Journal of Wavelets, Multiresolution and Information Processing, Vol. 16, No. 06, 1850055 (November 2018). (査読有)
- (5)Y. Zheng, A. RINOSHIKA, “Wavelet multi-resolution analysis on particle dynamics in a horizontal pneumatic conveying”, Advanced Powder Technology, Vol.29, Issue 10, October 2018, pp.2404-2415. (査読有)
- (6)H. Rinoshika, A. RINOSHIKA and S. Fujimoto, “Visualization of a finite wall-mounted cylinder wakes controlled by a horizontal or inclined hole”, Journal of Visualization, Vol.21 (2018), pp.543–556. (査読有)
- (7)H. Rinoshika, A. RINOSHIKA, “Effect of a horizontal hole on flow structures around a wall-mounted low-aspect-ratio cylinder”, International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol.71, pp.80–94 (2018). (査読有)
- (8)Y. Zheng, A. RINOSHIKA, “Analysis of particle dynamics in a horizontal pneumatic conveying of the minimum pressure drop based on POD and wavelet transform” Powder Technology, Vol.320 (2017), pp.726-738. (査読有)
- (9)S. Fujimoto and A. RINOSHIKA, “Multi-scale analysis on wake structures of asymmetric cylinders with different aspect ratios”, Journal of Visualization, Vol.20 (2017), pp.519–533. (査読有)
- (10)H. Rinoshika, A. RINOSHIKA and S. Fujimoto, “Influence of an inclined hole on flow structure around a finite wall-mounted circular cylinder of low aspect ratio, Bulletin of the JSME, Journal of Fluid Science and Technology. Vol.12, No.1 (2017), Paper No.16-00636, DOI: 10.1299, pp.1-13. (査読有)
- (11)Y. Zheng, A. RINOSHIKA and S. Fujimoto, “Two-dimensional orthogonal wavelet multi-resolution analysis on multi-scale flow structures behind triangle cylinder”, International Journal of Wavelets, Multiresolution and Information Processing, Vol. 14, No. 6 (2016) 1650051 (14 pages). (査読有)
- (12)Y. Zheng, S. Fujimoto and A. RINOSHIKA, “Combining wavelet transform and POD to analyze wake flow”, Journal of Visualization, Vol.19 (2016), Issue 2, pp 193–210. (査読有)

〔学会発表〕(計 11 件)

- (1) 李鹿博華, 李鹿輝, Tomographic PIV 計測に基づいた低アスペクト比円柱の後流構造の三次元ウェーブレット解析, 第 47 回可視化情報シンポジウム, 2019 年 7 月.
- (2) 李鹿博華, 李鹿輝, 有限長円柱まわりの後流の多重スケール構造に関する制御, 第 46 回可視化情報シンポジウム, 2018 年 7 月.
- (3) 李鹿博華, 藤本峻, 李鹿輝, 平板上に置かれた円柱後流の受動制御, 第 45 回可視化情報シンポジウム, 2017 年 7 月.
- (4)H. Rinoshika, S. Fujimoto, A. Rinoshika, “Wake Flow Control of a Finite Wall-mounted Cylinder with a Horizontal Hole”, 4th Symposium on Fluid-Structure-Sound Interactions and Control, 21–24 August 2017, Tokyo, Japan, pp.110-111.
- (5)H. Rinoshika, S. Fujimoto, A. Rinoshika, “Flow Structures around a Finite Wall-mounted Cylinder having an Inclined Hole”, 4th Symposium on Fluid-Structure-Sound Interactions and Control, 21–24 August 2017, Tokyo, Japan, pp.112-113.
- (6)Y. Zheng and A. Rinoshika, “Particle dynamic analysis of a horizontal pneumatic conveying based on wavelet analysis”, Proceedings of International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition 2017, July 2017.
- (7)H. Rinoshika, A. Rinoshika, S. Fujimoto, “Effect of a horizontal hole on flow structures around a wall-mounted low-aspect-ratio cylinder”, Tenth International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena, July 2017, Chicago-IL, USA, P-8, pp.1-7.
- (8)H. Rinoshika, S. Fujimoto, A. Rinoshika, “Influence of various inclined holes on flow structures around a finite wall-mounted cylinder”, The14th Asian Symposium on Visualization, May 22–26, 2017, Beijing, China, ASV14-FC-16, pp.1-7.

- (9) H. Rinoshika, S. Fujimoto, A. Rinoshika, "Passive control of flow structures around a low-aspect-ratio cylinder mounted on a flat plate", The 24th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics, 21-26 August 2016, Montreal, Canada, NO.129587, pp.1-2.
- (10) 藤本峻, 李鹿輝, ウェーブレット多重解像度法による非対称物体の後流構造解析, 第 44 回可視化情報シンポジウム, 2016 年 7 月.
- (11) 李鹿博華, 藤本峻, 李鹿輝, 平板上に置かれた低アスペクト比の円柱後流の多重スケール構造, 第 44 回可視化情報シンポジウム, 2016 年 7 月.