

平成30年6月11日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14340

研究課題名（和文）光応答性ナノ粒子を用いた圧力計測法開発を核とした風洞実験オンデマンド化への挑戦

研究課題名（英文）Challenge for on-demanding wind tunnel experiment by developing pressure measurement method using photoresponsive nanoparticles

研究代表者

西嶋 一欽（Nishijima, Kazuyoshi）

京都大学・防災研究所・准教授

研究者番号：80721969

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、ナノ粒子の光応答特性を圧力計測に利用する、新たな風洞実験手法の要素技術の開発を目指した。まず、スケール実験における最適な幾何学および機械的なスケールについてナノ粒子の圧力に対する光応答特性と流体现象の相似則を考慮しつつ理論的に検討した。この検討に基づき、実験装置のプロトタイプを製作した。続いて、この実験装置を用いて流れを制御する手法を開発した。これにより、風洞実験に用いる一様流や境界層乱流などの流れを制御できることを確認した。一方、上記の2課題と並行して、圧力計測に用いるナノ粒子の最適化についても理論的・実験的に検討した。

研究成果の概要（英文）：This study aims at developing a novel method for wind tunnel experiment by developing a new pressure measurement method. The novelty lies in the use of the photoresponsivity of nanoparticles as a means for the measurement of pressure on object surfaces. To achieve this goal, firstly, optimal geometrical and mechanical scales of the experiment were theoretically investigated, taking into account the photoresponsivity of nanoparticles and the relevant similarity laws of fluid dynamics. Then, on the basis of the investigation, a prototype of the experiment device was actually built. Secondly, ways to control the flow of fluid media were developed by using the built experiment device. In parallel to the two abovementioned tasks, the optimization of nanoparticles was theoretically and experimentally conducted. With these tasks, the research group has succeeded in developing elements of techniques required for the realization of the novel wind tunnel experiment method.

研究分野：防災・強風災害・耐風性能評価

キーワード：耐風設計 風洞実験 圧力計測 光学応答 ナノ粒子

1. 研究開始当初の背景

研究代表者の西嶋らは、これまで建築物の被害予測や耐風設計を目的として、乱流境界層風洞実験装置を用いた風洞実験を行ってきた。それらの実験で用いてきた既存の方法では、計測したい本来の流れ場を乱さないように、導圧チューブの配置に工夫を要する。また、チューブの存在や計測孔サイズの物理的な制約により、模型を小型化できない。これらの事情のため、風洞実験の自由度が大幅に制限されている（= 既存風洞実験法の弱点）。一方、研究分担者の飯田らは近年、共鳴効果が鋭敏な金属ナノ粒子集積系において、粒子間隔がわずかにオーダー変化しただけで、スペクトルピークの位置が可視域で10nm近くシフトすることを理論および実験により解明した。西嶋は、飯田との「光科学異分野横断セミナー」での議論を通じて、金属ナノ粒子集合系の光応答の感性を用いれば、その分散液を模型表面に塗布するだけで、流れ場を乱さず高解像度な圧力測定が可能になり、未来型風洞実験法へと展開できるとの着想に至った。

2. 研究の目的

本研究では金属ナノ粒子集合系の光応答の感性を利用した革新的な圧力計測技術の開発を核とした、未来型風洞実験法の確立に挑戦する。この方法が実現すれば、大幅に小型化された風洞模型を用いて高解像な実験を行うことが可能になる。これにより、実形状建物の詳細な風圧分布性状に関するデータベースを高精度かつ効率的に作成できる。また、既存のPIV流速計測技術や3Dプリンタ技術と組み合わせれば、これまでの実験法に比べて格段に高い自由度で、迅速かつ装置設置場所を選ばず（= オンデマンド）に、風洞実験を実施できる。

特に、本研究では、未来型風洞実験法の確立を目指して、以下の課題に取り組む。

（課題1-1）：レイノルズ数とナノ粒子光応答感度に応じた、最適な流体媒質と実験スケールの解明。

（課題1-2）：最適化された流体媒質および実験スケールでの流れ場制御手法の開発。

（課題2）：流体中の金属ナノ粒子集積系の圧力応答特性の最適化。

3. 研究の方法

本研究の方法は以下のとおりである。

（課題1-1）に対して：風洞実験によって明らかにしたい流体现象を模擬するための指標としてのレイノルズ数と、ナノ粒子光学応答が検出可能な圧力範囲を制約条件とした、最適な流体媒質と実験スケールを解明する。

（課題1-2）に対して：相似目標とする乱流境界層特性を安定的に生成するための物理的機構を開発する。

（課題2）に対して：流れによる圧力印加の下での金属ナノ粒子集積系の光学応答の変

化を最適化し、物体表面の空間的圧力分布をmm以下の空間分解能で数値化できるシステムを構築する。

4. 研究成果

4.1 課題1-1に対する成果

レイノルズ数およびナノ粒子光応答感度に応じた流体媒質および実験スケールを最適化し、さらに実験装置を作成した。

実験装置の主要部は回流型水槽で、ポンプ駆動によって流れを発生させるものである。流体には常温の水を用いる。図1に実験装置の流路部の平面図および立面図を示す。流路部の大きさは幅1245mm奥行き500mm（ポンプ除く）、測定部及びポンプ以外の流路の断面は100mm×100mm、測定部の断面は30mm×30mmでその長さは335mmである。測定部にはハニカムによって整流し縮流した流れを流入させる。流速はポンプの出力を変えることで制御する。本実験装置では、流速を1m/sから4.3m/sの範囲で脈流が発生せず、安定して制御することが可能である。

注意：本研究では、レイノルズ数やナノ粒子集積系の応答感度を考慮し、流体媒質として液体を用いる。従って、開発する装置は厳密に「風」洞と呼ぶことはできないが、ここでは便宜的に風洞と呼ぶことにする

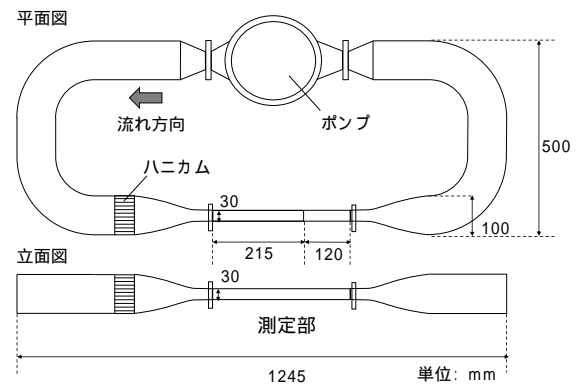


図1. 実験装置流路部の平面図および立面図

4.2 課題1-2に対する成果

相似目標とする乱流境界層特性を安定的に生成するための物理的機構を上記実験装置に実装し、一様流および境界層乱流を生成することに成功した。以下に実験概要および結果を示す。

実験概要：実験は、測定部上部（縮流部端部から215mmまで）に粗度ブロックを配置しない場合と2種類の粗度ブロック（図2参照）を配置した場合の合計3ケース実施した。粗度ブロックはCNCフライス盤を用いて作成し、ミリ以下の精度で作成できることを確認した。流速は測定部下流部において概ね4.0～4.3m/sとなるように調整した。流れ場の計測はPIVにより行った。

実験結果：まず、一様流流れの再現可能性を検証するために、測定部に粗度ブロックを

配置せずに流れを発生させた。その結果、壁面から約 2.6mm 程度まででは壁面の影響を受けるものの、それ以外の領域ではほぼ一様な流れを再現することができた。次に、2 種類のラフネスブロック配置に対して、測定部における流れを計測した。ここでは、一辺 2.7mm の立方体ラフネスブロックを配置した場合についてその結果を紹介する。図 3 に計測開始から 2/15 秒、150/15 秒、852/15 秒における流れ方向の速度成分のコンターを示す。また、測定部最下流部から 50mm、高さ 20mm における流れ方向の流速時刻歴を図 4 に示す。この図の流速時刻歴において、周期の大きな変動は見られず、測定部下流部においては定常な流れが生成されていることがわかる。

最後に流れ方向の平均流速および乱れの強さを図 5 に示す。測定部下流部において、ラフネスブロックの高さの 3 倍程度まで境界層が発達していることがわかる。

以上の理論的考察に基づく実験装置の製作、および実験装置を用いた実験を通じて、本研究が目指す『金属ナノ粒子集合系の光応答の敏感性を利用した革新的な圧力計測技術の開発を核とした未来型風洞実験法』の主要な要素技術を確立したといえる。

本課題 1 - 1、1 - 2 の遂行には、米田格氏、波岸彩子氏、土井こずえ氏にご協力いただいたので、ここに謝意を表す。また、上記の研究成果報告は、学会発表[1]の内容を本報告書のために抜粋・要約したものである。

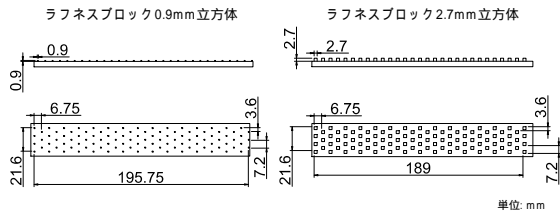


図 2 . ラフネスブロックのサイズと配置

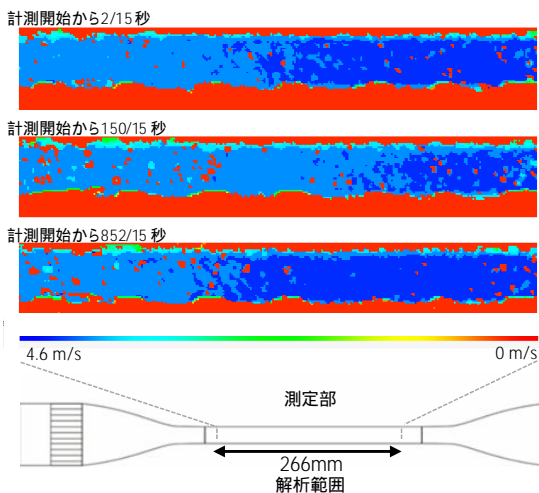


図 3 . 流れ場スナップショット

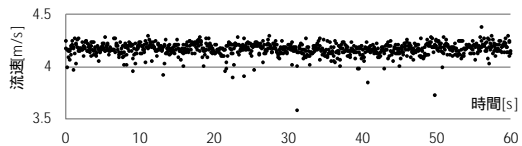


図 4 . 流れ方向の流速時刻歴

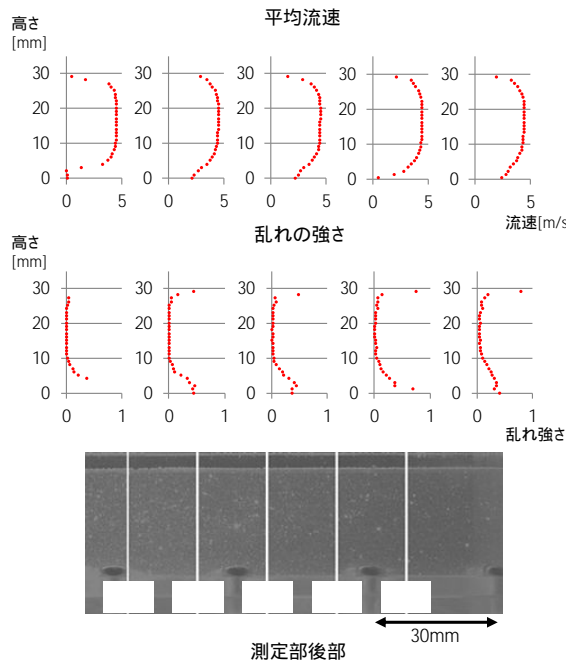


図 5 . 平均流速と乱れの強さの鉛直プロフィール

4 . 3 課題 2 に対する成果

流体中の物体表面圧力の計測への応用を目指し、光応答性の金属ナノ粒子を化学的な方法で高密度に刺激応答性のポリマービーズに固定した「外部刺激応答性金属ナノ粒子固定化ビーズ」の開発と基礎物性の評価に成功した。

これまでに分担者の飯田らは、高密度に金属ナノ粒子を固定化したプラスチックビーズの光散乱・光吸収が固定化に用いるバインダー分子の長さによって顕著に変化することを理論的・実験的に明らかにしていた [JPCC 2013]。この変化は金属ナノ粒子中の局在表面プラズモンの協効効果によるものであり、多重極の超放射が起源である。これらの知見に基づき、図 6 (a), (b) では直径 20 nm の銀ナノ粒子を約 1000 個固定した直径 400nm 前後のビーズの消衰スペクトル(散乱+吸収)を理論計算した。この計算では、ナノ粒子の直径と粒子数は一定のままコアビーズの直径を変化させて消衰スペクトルを計算している。たとえば、直径が 400 nm から 390 nm に圧縮された場合に平均のナノ粒子間距離が 2 nm から 1.4 nm となるが、消衰スペクトルのピークが 10 nm 近くもシフトすることが分かった。

この理論計算を足掛かりに、温度応答性のポリマーである PNIPAM でコアビーズを化学

的に作製し、金ナノ粒子を高密度固定化した外部刺激応答性金ナノ粒子固定化ビーズの開発に成功した(図6(c))。初期の物性評価のため、飯田Gで所有する光ピンセットを用いて、開発したビーズ1個1個にレーザー光照射すると敏感にビーズのサイズが小さくなり、目標としていたmmよりずっと小さな10 μm程度の領域で光学応答が変化することも確認した。この変化はレーザーをオフにすると元に戻り、可逆的な変化であることも分かった。現状の実験系では、光圧の影響に加えて、金属ナノ粒子自体の光発熱効果による温度上昇がビーズ径の変化の原因として支配的と考えられるが、温度と圧力には熱力学的な相関があるため、目的である未来型風洞実験装置中の流れによる圧力計測のための重要な知見を獲得したと言える。

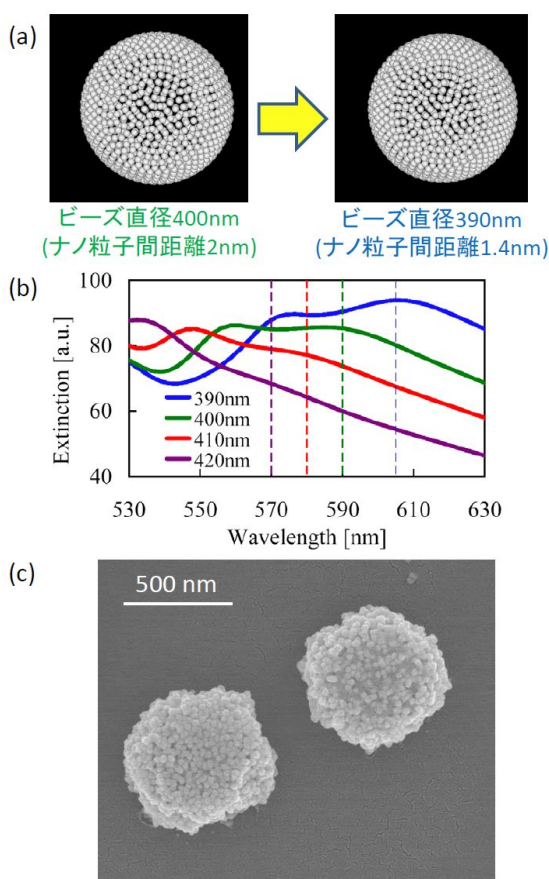


図6. (a)刺激応答性金属ナノ粒子固定化ビーズの光応答計算の理論モデル。(b)各ビーズ直径での消衰スペクトル。(c)開発した刺激応答性金ナノ粒子固定化ビーズの走査型電子顕微鏡(SEM)像。

さらに、作製した金属ナノ粒子集積構造体を測定対象となる建築物の模型表面に塗布するための条件探索も行った。基板にPNIPAMビーズを塗布して乾燥させると、ガラス基板全面に自己組織化によりビーズを均一に集積できる条件があることが分かった(図7)。このPNIPAMビーズ集積基板に金ナノ薄膜をイオンパッチで被覆することで、光学応答に変化が得られることも分かり、数十 μm ~

数 mm に渡る十分に大面積の領域での圧力応答評価のための基板開発における重要な進展があったと言える。

さらに、金属薄膜上に形成したナノホールの近傍にランダム突起構造を付与することで表面感性が高まることを理論的に解明した成果も局所的な圧力センサへの応用可能性を期待させる予想外の成果と考えている(JPC-Lett. 2017, Spotlightに選抜、日刊工業新聞などで紹介)。また、液液界面での蒸発過程におけるナノ粒子の自己組織化により、多様なパターン形成が可能であることも理論的に明らかにし(Appl. Phys. Lett. 2018)、刺激応答性金属ナノ粒子固定化ビーズの塗布のための重要な知見も得た。

本課題2の遂行に当たり、床波志保先生、山本靖之氏、奥井悠河氏、林康太氏、山本陽二郎博士、田村守博士にご協力を頂いたのでここに謝意を表す。

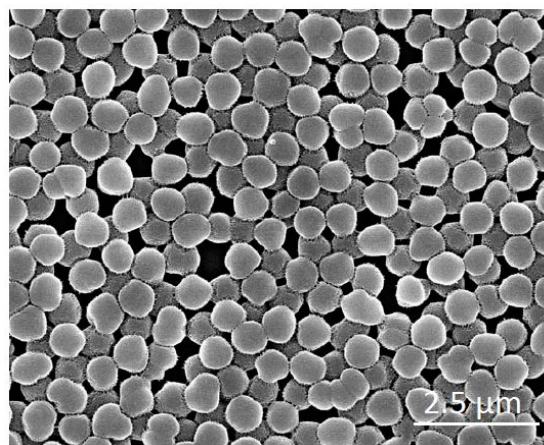


図7 基板上に自己組織化で配列した刺激応答性のビーズのSEM像

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

[1] M. Tamura, K. Okamoto, K. Tamada*, T. Iida*, "Stochastic approach to simulation of evaporation-triggered multiple self-assembly of mixed metal nanoparticles and their variable superradiance", Applied Physics Letters, Vol. 112, 033106 (1-5) (2018). DOI: 10.1063/1.5005830

[2] 田村守、床波志保、飯田琢也、ナノフォトニクスのための動的光学理論と生体応用、機能材料、Vol. 37、No. 8 (2017)。

[3] T. Yoshikawa, M. Tamura, S. Tokonami*, T. Iida*, "Optical Trap-Mediated High-Sensitivity Nanohole Array Biosensors with Random Nanospikes", The Journal of Physical Chemistry Letters, 8, 370-374(2017).

DOI: 10.1021/acs.jpcllett.6b02262

The Journal of Physical Chemistry Letters の Volume 8, Issue 2 の Spotlights

に選抜(35件の掲載論文中3件が選抜)。

〔学会発表〕(計10件)

[1]西嶋一欽(2018)小型回流型水洞実験装置における流れ場の制御,2018年度日本建築学会大会(東北)学術講演会

[2]T. Iida, S. Tokonami, "Light-induced assembling of metallic nanoparticles exhibiting multipole superradiance toward novel biosensors", 2018 International Conference on Material Strength and Applied Mechanics (MSAM 2018), (Kitakyushu City, Japan, 2018/4/10~4/13) <<招待講演>>

[3] 飯田琢也、床波志保、「光マニピュレーションに基づく分子認識の光誘導加速」,第225回フォトポリマー講演会、(於:大阪府立大学 I-site なんば(大阪府大阪市浪速区)、2018/1/26) <<招待講演>>

[4] 飯田琢也、床波志保、「ナノ粒子の光誘導集積技術の開発とバイオ分析・環境計測応用」,表面科学技術研究会 2018 ナノ粒子を取り巻く現状と今後の展望 - ナノ粒子応用への期待とリスク -, (於:島津製作所 京都本社(京都市)、2018/1/19) <<招待講演>>

[5] 飯田琢也、「生化学反応の光誘導加速システム(LAC-SYS)の開発」,第4回ヘキサカンファレンス、(於:大阪府立大学 I-site なんば(大阪府大阪市浪速区)、2017/11/29~11/30) <<招待講演>>

[6] T. Iida, S. Ito, S. Tokonami, "Light-included Biomolecular Recognition Based on Nano Optical Manipulation", Optics & Photonics Japan 2017, (於:筑波大学東京キャンパス(東京都文京区)、2017/10/30~11/2) <<招待講演>>

[7] 飯田琢也、「光過によるナノ物質の力学制御と螺旋状バイオマテリアルの光集積への展開」,第1回千葉大学分子キラリティー研究センター学生シンポジウム、(於:千葉大学、2017/10/5) <<招待講演>>

[8] T. Iida, Shiho Tokonami, "Development of Light-induced Acceleration System (LAC-SYS) for Control of Various Biochemical Reactions", 合田研セミナー、(於:東京大学本郷キャンパス(東京都文京区)、2017/10/4) <<招待講演>>

[9] 飯田琢也、石井実、「生命機能光制御技術 生化学反応の光誘導加速システムとバイオ分析」,イノベーション・ジャパン 2017、(於:東京ビッグサイト(東京都江東区)、2017/8/31~9/1) <<招待講演>>

[10] 山本靖之、清水恵美、床波志保、飯田琢也、「凹型気液界面を有する流体中における高効率光発熱集合法の開発」,第64回応用物理学会春季学術講演会、(於:パシフィコ横浜(神奈川県横浜市)、2017/3/14~3/17)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等:

京都大学防災研究所

<http://www.dpri.kyoto-u.ac.jp/>

大阪府立大学 LAC-SYS 研究所

<http://www.p.s.osakafu-u.ac.jp/~t-iida/LAC-SYS/index.html>

<新聞・メディア発表>

成果の一部[J. Phys. Chem. Lett. 8, 370 (2017)]が日刊工業新聞(2017/1/23)、オプトロニクス(2017/1/10)等で紹介された。

<受賞>

OMC17 Best Paper Award from SPIE (2017/4/21) [受賞者: Takuya Iida]

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西嶋 一欽 (NISHIJIMA, Kazuyoshi)

京都大学防災研究所・准教授

研究者番号: 80721969

(2) 研究分担者

飯田 琢也 (IIDA, Takuya)

大阪府立大学理学研究科・准教授

研究者番号: 10405350

西村 宏昭 (NISHIMURA, Hiroaki)

京都大学防災研究所・研究員

研究者番号: 60420725