

京都大学防災研究所

拠点研究（特別推進）（課題番号：2021B-01）

次世代型圧力計測技術の確立

令和3年4月1日 ～ 令和4年3月31日

研究代表者：西嶋一欽（京都大学防災研究所）

本報告書は、京都大学防災研究所拠点研究（特別推進）（課題番号：2021B-01）の助成を受け、下記の研究組織により実施された研究成果をまとめたものである。

研究組織

研究代表者

西嶋一欽 京都大学防災研究所・准教授

研究分担者

森 信人 京都大学防災研究所・教授

飯田琢也 大阪公立大学研究推進機構協創研究センターLAC-SYS 研究所・所長

床波志保 大阪公立大学研究推進機構協創研究センターLAC-SYS 研究所・副所長

目次

1. 研究の背景と目的.....	1
2. 計測装置と可視光スペクトル計測.....	3
3. 拠点研究としての展望.....	5

1. 研究の背景と目的

本研究の目標は、金属ナノ粒子集合系の光応答の感性を利用した新原理に基づく圧力計測技術を確立することである。特に本研究では、分光イメージングカメラを用いて高分解能で光スペクトルのピークシフトを観測することで、粒子集合系のマクロ・ナノ構造特性とピークシフトの関係を明らかにし、計測圧力レンジに応じた粒子集合系を最適設計することを目的とする。成果が実用化されれば、風洞実験や水理実験に利用可能な革新的圧力計測手段を提供できる。

本研究グループはこれまで、流れ場の現象は相似則さえ満たせば流体の種類に拠らないという原理に基づいて、既存の大型境界層風洞実験を革新する研究を行ってきた。基本的なアイデアは、乱流を支配する無次元量の一つであるレイノルズ数を一定にするとき、流体として空気の代わりに動粘性係数が小さい液体（水あるいは水溶液）を用いることで、代表流速と代表長さの積を小さくできることを利用することである。例えば常温の水と空気を比較した場合、水の動粘性係数は空気の 1/15 程度であるから、代表流速を同じにすれば幾何学的スケールは 1/15 にすることができ、実験装置を大幅に小型化することができる。このアイデアに基づいて、本研究グループでは回流型小型水路（図 1）を開発し、京都大学防災研究所境界層風洞実験室にて実験装置として運用している。同装置の測定部にライフネスブロックを配置することで、地表面付近の風速を模擬することができる¹。

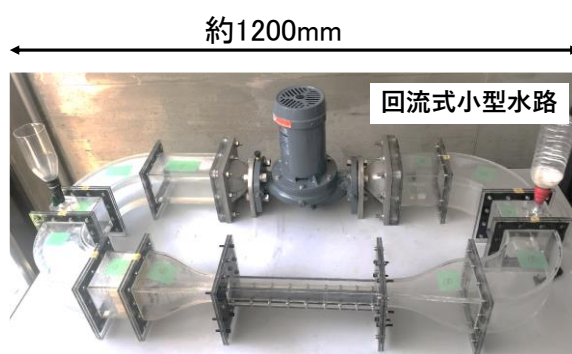
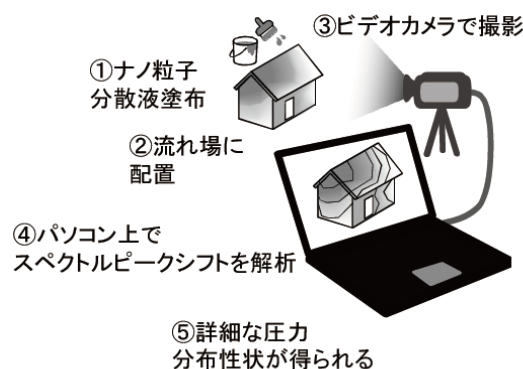


図 1. 回流型小型水路

風速場／流れ場の計測であれば既存の PIV (Particle Image Velocimetry) 技術を用いることで計測が可能である。一方、対象物に作用する風圧／圧力を評価するためには、既存の方法（模型表面に圧力測定孔をあけ、チューブを介して圧力センサに導圧する）を用いることは、模型自体が小型化されることおよびセンサが水濡・水没することから、困難である。このことから、本研究グループのメンバーらは、H28-29 科研費挑戦的研究（萌芽）「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のオンデマンド化への挑戦」において、金属ナノ粒子集合系の光応答鋭敏性を基本原理とした圧力計測手法（図 2）の可能性を実証した。

¹ 西嶋一欽, 小型回流型水洞実験装置における流れ場の制御, 日本建築学会大会学術講演梗概, 構造 I, pp.177-178, 2018.



高解像度かつ非接触で圧力計測が可能

図2. 新たな圧力計測方法のイメージ図

この手法は、模型表面に圧力に応じて色（可視光域のスペクトル）が変化するナノ粒子分散液を塗布した模型を流れ場に配置し、ビデオカメラ等で色の変化を録画することで圧力を計測するものである。さらにこの成果を踏まえ、R1-R2 京都大学防災研究所一般共同研究「テーブルトップ風洞実験における圧力計測を目的とした液晶-ナノ粒子ハイブリッド型光応答材料の開発」では、ナノ粒子集合系の設計を行い、印可圧力に応じて色（可視光スペクトル）が変化することを実証した（図3）。さらに、マイクロなスケールで印加された圧力に応じて可視光スペクトルのピークがシフトすることを確認した²。

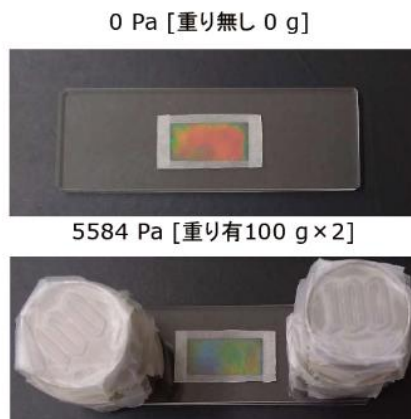


図3. 圧力センサおよび圧力測定装置概略図³

本研究課題期間においては、このような印加圧力に応じた可視光スペクトルの変化をマクロなスケールで計測し、集合系分散液の粘性や剛性などのマクロ材料特性および集合系を構成するナノ粒子微細構造を様々に変化させたナノ粒子集合系（以下、感圧塗料）の圧力応答時空間特性を計測する実験手法を構築する。

² 大間知誠也, 林康太, 石倉諒汰, 田村 守, 床波志保, 西嶋一欽, 飯田琢也, 圧力センサ開発に向けた金ナノ粒子添加液晶の光応答の圧力依存性解析、第 81 回応用物理学会秋季学術講演会、9p-Z17-13, 2020.

³ 西嶋一欽, 大間知誠也, 林康太, 石倉諒汰, 田村守, 床波志保, 飯田琢也, テーブルトップ風洞実験における圧力計測：液晶-ナノ粒子複合材料の圧力下での光応答、令和元年度京都大学防災研究所研究発表講演会、C31, 2020.

2. 計測装置と可視光スペクトル計測

様々な環境下での感圧塗料の可視光域スペクトル性状を計測するための装置を開発した(図4)。計測装置は、ハイパースペクトルカメラ(測定波長範囲 400-1000nm、波長分解能 3.3nm の性能を有する)、ハロゲン光源、サーモグラフィ、1 軸ステージ、フレームで構成されている。感圧塗料に圧力を印加する方法として、ガラス板等で挟み込み加圧する方法、加減圧が可能な圧力チャンバー内に感圧塗料を塗布した試験体を配置する方法、回流型水槽内に配置し水流により加減圧する方法を想定している。ハイパースペクトルカメラはラインスキャン型なので、面的に撮影するためにはカメラまたは試験体をスライドさせる必要がある。図4は、ハイパースペクトルカメラを片持ち梁に設置し、1 軸ステージ上に配置した試験体をスライドさせながら撮影する場合のセットアップである。圧力チャンバー内や水槽内に試験体を配置した場合には、試験体をスライドさせることは困難なのでハイパースペクトルカメラを1 軸ステージに装着し、カメラをスライドさせることで試験体を面的に撮影する。感圧塗料は温度によって特性が変化するので可能な限り一定温度化で計測・実験を行うことが好ましい。水槽を用いた実験下では、ハロゲン光源照射による温度上昇を打ち消す低温熱源を水槽内に設置することで温度を一定に保つことが比較的容易である。また、水温と試験体の温度が同一であると仮定することで試験体の温度を計測することができる。一方、試験体をガラス板で挟み込んだり、圧力チャンバー内に設置するなど、空気中に設置する場合には温度を一定に保つことが困難なので、光源にフィルタを取りつけたうえで、短時間で計測を終えるなどの工夫が必要である。なお、空気中に試験体を配置して計測を行う場合には、サーモグラフィによって試験体表面温度を同時に測定・記録する。

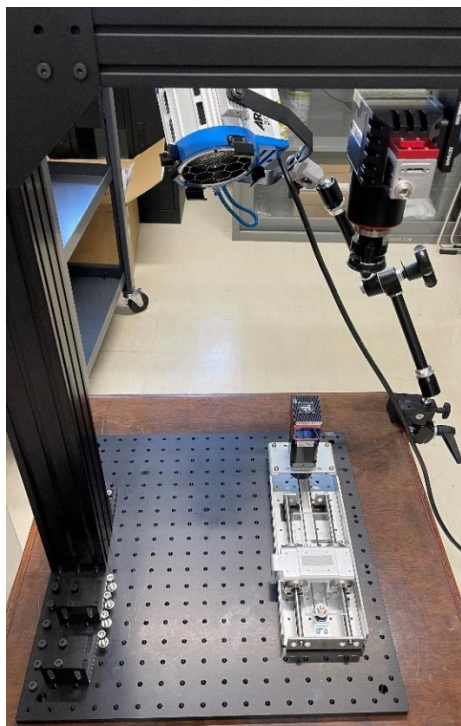


図4. 可視光スペクトル計測装置

上に示した計測装置を用いて感圧塗料（図5）の可視光スペクトルを計測した例を図6に示す。可視光領域は概ね 400nm~760nm である。図中の異なる8個のスペクトルは試験体の8個所の領域の空間統計スペクトルである（太線が平均値、塗られている範囲は平均±標準偏差に相当する）。本研究期間での目標であった、マクロスケールでの可視光スペクトルの変化を計測できることが確認できた。

なお、図に示した8個のスペクトルにおいてピークの位置は概ね一致しているが、厳密に一致しているわけではなく、またピーク以外の領域での反射強度も異なっている。これは図5に示した通り、現時点での感圧塗料は色（可視光スペクトル）が均一ではないことに起因する。均一な可視光スペクトルを持つように塗布する方法あるいは不均質な可視光スペクトルの補正方法は今後の研究課題の一つである。



図5. 感圧塗料のサンプル

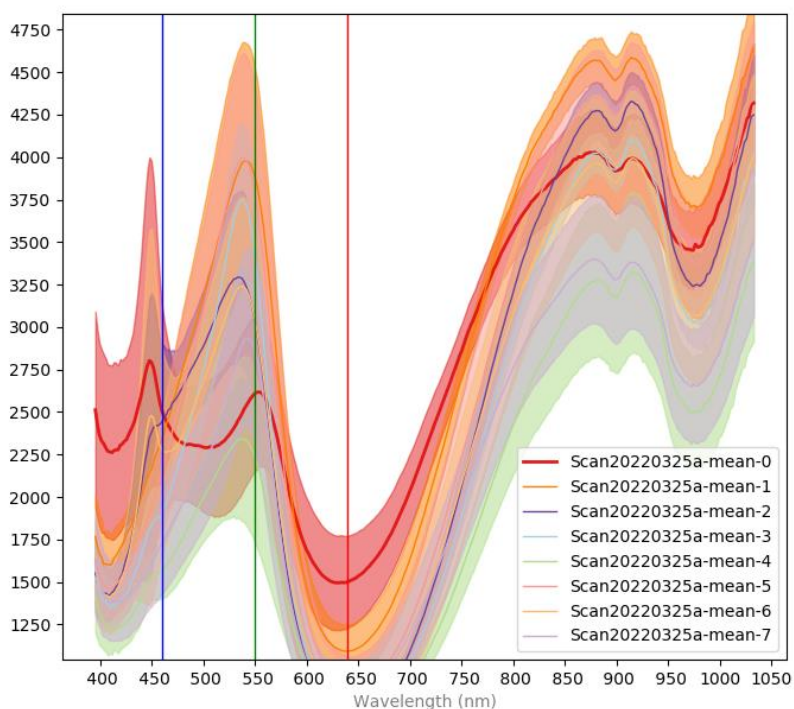


図6. 計測したスペクトル（反射強度）

3. 拠点研究としての展望

本研究期間中の直接的な成果は上記の通りであるが、本研究期間中の交流（オンラインでの意見交換ならびに 2022 年 3 月 25 日に京都大学防災研究所で実施した研究成果報告会）を通じて、大阪公立大学 LAC-SYS 研究所主要メンバーおよび若手研究者（学生 2 名を含む）との研究ネットワークを発展させた。また、学生には本研究に必要な不可欠な感圧粒子の調整・最適化に取り組んでもらうなど、積極的に異分野協働研究に参画する機会を創出した。

また、本研究の取り組みを「縮尺模型実験の新展開」として位置付けることで、防災研究所内の他の大型実験施設を用いて縮尺模型実験を行っている研究者と定期的に意見交換する機会を持ち、防災研究所の大型実験施設の将来展望を検討した。

さらに、本研究に関連する研究として、R2-R4 年度科研費挑戦的研究（開拓）「磁性ナノ粒子マニピュレーションによる乱流制御型風洞実験手法」を推進中である。現在、京都大学防災研究所が保有している回流型小型水槽では、ライフネスブロックを配置するなどのパッシブな方法で乱流を生成しているが、この研究では作用流体中に磁性粒子を分散させ外部から磁場を与えることで、アクティブに乱流を制御しようというものである

今後は、これらの一連の研究を推進し成果を統合することで、流体に関する縮尺模型実験の研究拠点の構築を目指す。