

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 12 日現在

機関番号：11501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560186

研究課題名(和文) 渦ゆらぎの制御を用いた快適な空調環境と食品の自然乾燥に関する研究

研究課題名(英文) Research on Relaxation Environment and Natural Drying of Food by Using Control of Vortical Fluctuation

研究代表者

李鹿輝 (Rinoshika, Akira)

山形大学・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) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、心地良い自然の風に近い風を作り出す渦ゆらぎの発生装置の開発・応用を目的とする。ゆらぎ発生装置はそれぞれ四角柱、角柱及び1/4円柱によりスリットを構成される。結果として、スリット間隔が小さいほうが比較的弱い渦が確認でき、間隔が大きいほうが強い渦が確認できた。スリット間隔が小さいほうが1/fゆらぎが広範囲で確認できた。

食品の自然乾燥の研究では、渦発生装置を用いて自然風に近い渦の流れを発生させ、効率的に乾燥することを目的とする。角柱の渦発生装置の場合は初期段階から乾燥速度が速かったことがわかった。より小さい渦の流れの方がゆらぎを発生し、より効率的に乾燥には適していることがわかった。

研究成果の概要(英文)：This study focuses on the phenomenon of vortex fluctuation generated by various bodies. This fluctuation may provide relaxation for human. The fluctuations of instantaneous velocity and vorticity are measured by PIV and are analyzed by FFT for various models. It is found that 1/f fluctuation occurs in a wide range for small interval of all models. The low vorticity is generated by the small interval models, and the high vorticity is generated by the large interval models.

This study aims at applying the vortex flow simulating a natural wind to dry food in order to decrease the time of food drying. The experiment of food drying was performed in a wind tunnel at a constant air velocity, and carrot, sweet potato, pineapple and apple were used as test foods. A square cylinder was adopted to generate vortex flow and test foods were setup at the downstream of vortex flow. It is found that the vortical fluctuation flow decreases the moisture content of carrot and sweet potato quickly.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：渦 ゆらぎ 快適環境 食品乾燥

1. 研究開始当初の背景

21世紀は『ひと(人)』の時代と言われ、物質的、精神的に豊かで安全かつ楽しい人間社会が求められている。今年の夏のような記録的な猛暑や熱帯夜の増加により、居住などに快適な環境の整備は緊急な課題となる。これまで、夏の蒸し暑さへの対応として、扇風機やエアコンを有効に利用してきた。しかし、人間は扇風機や空調機の風よりも窓から入る自然の風のほうを快適に感じる。原因は自然風の気流ゆらぎの中にカオス的な性質があることがよく知られている。この物理現象の本質としては、自然風に含まれている3次元渦はゆらぎ特性が存在すると考えられる。すなわち、自然風は空間的・時間的にゆらぎ特性をもつといえる。また、快適な空調環境を付与することや省エネルギー化の目的から、自動車の空調環境でも快適な自然環境の風に近いゆらぎ風が望まれている。

一方、食品分野では、水産物の干し物に代表されるように、天日乾燥・陰干し・寒干しなど自然の風や太陽光を利用して乾燥させているものが多くあるが、現在では安定生産や衛生面から機械乾燥に置換えるケースが多くなっている。機械乾燥技術の発達により一定品質のものが安定して生産できるようになってきた一方で、乾燥製品において原料の風味を残したい、柔らかく乾燥したいというような他製品との差別化や付加価値向上の要望は尽きておらず、自然界を模擬した乾燥方法や乾燥技術のさらなる向上が望まれている。

2. 研究の目的

本研究は渦ゆらぎの発生装置の開発・応用を目的とする。自然風に含まれている3次元渦ゆらぎのまだ解明されていない基礎的研究を行い、周波数-空間-時間において渦ゆらぎの特性を利用した新たな渦ゆらぎの発生装置を開発する。渦ゆらぎの発生装置は心地良い自然の風に近い風を作り出すことができる。その応用として、居住・オフィス空間・自動車の車内などの環境中に快適な風の流れを作る空調システムおよび食品の自然乾燥などの分野に展開する。研究期間内には以下のことを完成する。

- 1) 心地良い自然の風に含まれている多重スケールの3次元渦のゆらぎ特性を解明する。
- 2) 自然風の周波数-空間-時間のゆらぎ特性に基づいて、自然の風に近い快適な渦ゆらぎを発生する装置を開発する。
- 3) 快適な空調環境を提供するため、渦ゆらぎの発生装置は扇風機に应用し、3次元渦のゆらぎ特性を評価する。
- 4) 食品を柔らかく乾燥するため、渦ゆらぎ装置の導入により機械乾燥の特性を改善する。

3. 研究の方法

- (1) 渦ゆらぎを用いた扇風機

本研究では、流れの中に置かれた様々なゆらぎ発生装置から渦放出過程のゆらぎ現象に着目し、PIV解析などを用いて各種ゆらぎ発生装置の瞬間速度・渦度のゆらぎを解析し、装置の形状がゆらぎ特性に与える影響について検討する。

図1にPIV計測の実験装置を示す。カバーをはずした有翼型扇風機の前に、モデルを固定する。シート状のレーザー光を照射し、ベビーパウダーをモデル後方に落下させ、実験モデルの後方340mm~640mmの側面の流れをハイスピードカメラで撮影する。撮影速度は1000FPS、シャッター速度は1/2000秒である。撮影後、録画した1000枚の画像をPIV解析ソフトにより解析し、実験モデルごとの流れの速度分布と渦構造を比較する。

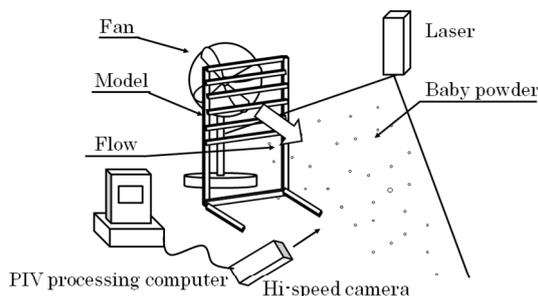


図1 PIV計測の実験装置

本研究で用いるゆらぎ発生装置の断面は図2に示す3種類である。

ゆらぎ発生装置の全体図は図3に示し、間隔が15mmと20mmの2つのスリットを用意する。全てのモデルの代表寸法は10mmとなる。

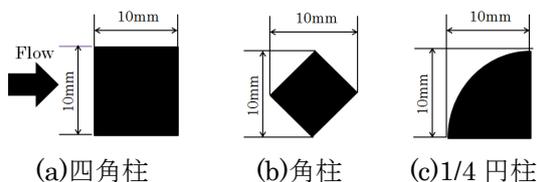


図2 ゆらぎ発生装置の断面図

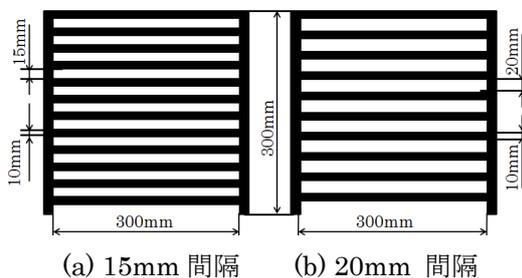


図3 ゆらぎ発生装置の全体図

1/f ゆらぎは、ある信号へ離散フーリエ変換を適用し、そこから求めたパワースペクトル対周波数の両対数グラフから求められる傾きの大きさから定義できる。図4はパワースペクトル対周波数の両対数グラフの例である。近似直線の傾きが急になるほど単調な信号といえ、特に傾きが-1のものを1/f周波数成分とし、これが一般的に1/f

ゆらぎと呼ばれる。

パワースペクトルの数値配列と各周波数を両対数グラフで表したときの傾きを求める方法として、累乗近似を用いて直線に回帰させ、その傾きを求める。式(1)のように各周波数、パワースペクトルを常用対数で表し、式(2)の累乗近似の式より回帰直線を求める。

$$X_k = \log_{10} f_k \quad Y_k = \log_{10} y_k \quad (1)$$

$$a = \frac{n \sum_{k=1}^n X_k \cdot Y_k - \sum_{k=1}^n X_k \sum_{k=1}^n Y_k}{n \sum_{k=1}^n X_k \cdot X_k - \sum_{k=1}^n X_k \sum_{k=1}^n X_k} \quad (2)$$

式(2)より求められた回帰直線の傾き a により、各時系列データの周波数特性を解析する。

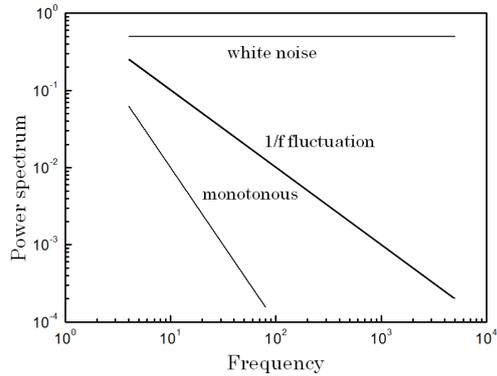


図4 ゆらぎの定義

(2) 渦のゆらぎによる食品の自然乾燥

本研究は、自然風に近い渦の流れを食品乾燥に応用することを目的とする。方法として、小型低速風洞において、円柱・角柱等を用いて渦の流れを生じさせ、食品乾燥試験を行い、得られる試料の性質について検討・評価する。

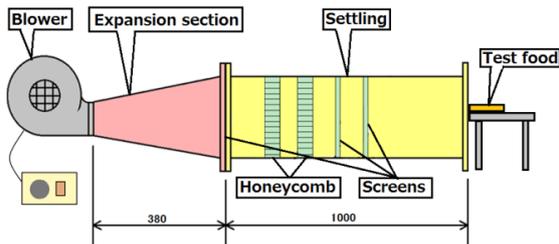


図5 食料品乾燥の実験装置

本研究で用いた実験装置の構成図は図5に示す。風洞出口の断面寸法は 300 mm×300 mm である。風洞出口の最大風速は $U=3.15$ m/s であり、最大レイノルズ数は $Re=62,402$ である。出口端では風洞の乱れ強さが 0.45% となり、断面の速度分布の非一様性が 4.54% となる。

渦のゆらぎを発生させるため、本研究は図6に示すような2種類(角柱・平板)のモデルを使用した。モデルの代表寸法は 50mm である。これらを風洞の実験区間に設置し、後方

に渦を発生させる。

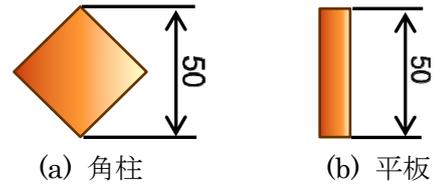


図6 渦のゆらぎ発生装置

角柱後流に発生する渦の流れの可視化写真は図7に示す。角柱後方にカルマン渦列が鮮明に観察される。



図7 角柱後流の渦の可視化写真

本研究では乾燥試料としてさつまいも、にんじん、パイン、りんごの四種類を使用した。試料の大きさは約 30g の直方体とした。

試料を風洞出口の実験台(図5)に置く。そして、渦発生装置がない場合、渦発生装置を風洞出口から 125mm の位置に置いた場合、175mm の位置に置いた場合の三つのケースを実験する。室温は約 23 °C、湿度は約 26% を保ち、それぞれの実験で乾燥に伴う試料の重量を 10 時間にわたり測定する。乾燥の初期段階の方が重量の変化が著しいことから、実験開始から 0~2 時間では 15 分毎、2~5 時間では 30 分毎、5~10 時間では 60 分毎に測定を行った。なお最初の試料の重量を W_0 、乾燥途中で測る試料の重量を W とする。試料の含水率を調べるため、別に用意した同じ重量の試料を完全に水分がなくなるまで電子レンジで加熱する。その際、加熱前の重量を W_0 、加熱後の重量を W_ϵ とする。このときの含水率 k_ϵ は次式から求められる。

$$k_\epsilon = \frac{W_0 - W_\epsilon}{W_\epsilon} = \frac{W_0}{W_\epsilon} - 1 \quad (3)$$

この含水率は平衡含水率と呼ばれる。乾燥途中の含水率は下式で定義される。

$$k = \frac{W - W_\epsilon}{W_\epsilon} = \frac{W}{W_\epsilon} - 1 \quad (4)$$

また、乾燥速度は R =含水率の変化/単位時間で表され、次式より求められる。

$$R = -\frac{dk}{dt} [h^{-1}] \quad (5)$$

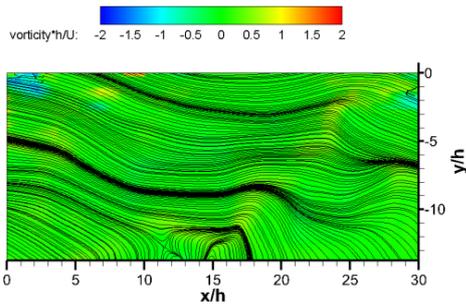
時間が経過するとともに含水率は減少し、平衡含水率に達すると乾燥は進まなくなる。また、重量の異なる試料 W_0 を使用する場合は次式を用いる。

$$k = \frac{W W'_e}{W'_e W'_e} - 1 = \frac{W}{W'_e} (1 + k_e) - 1 \quad (6)$$

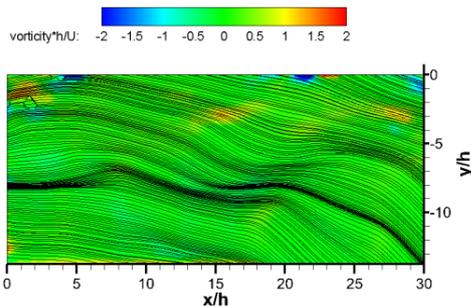
4. 研究成果

(1) 渦ゆらぎを用いた扇風機

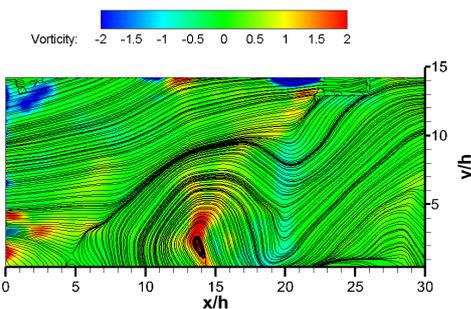
図8はゆらぎ発生装置の後流のPIV計測結果が瞬時の渦度を示すものである。黒線は瞬時の流線を示す。また、 y/h の座標0は扇風機を中心を表わす。全てのモデルで、端部に比べると、中心に近い位置で比較的強い渦度が確認できた。また、スリット間隔が小さいほうが比較的弱い渦度が全体的に分布していて、間隔が大きいほうでは比較的強い渦が全体的に分布している。さらに、流線から全てのモデルで中心から端部へ空気が流れていることが分かる。



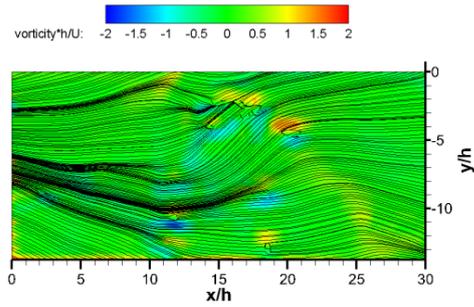
(1) 四角柱 (間隔 15mm)



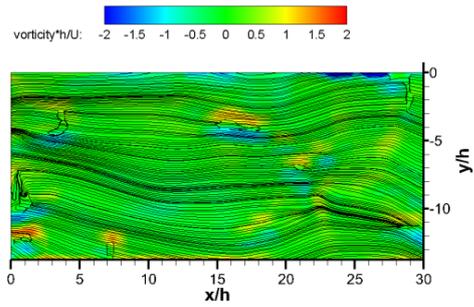
(2) 角柱 (間隔 15mm)



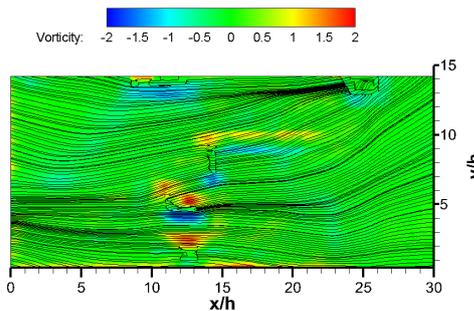
(3) 1/4 円柱 (間隔 15mm)



(4) 四角柱 (間隔 20mm)



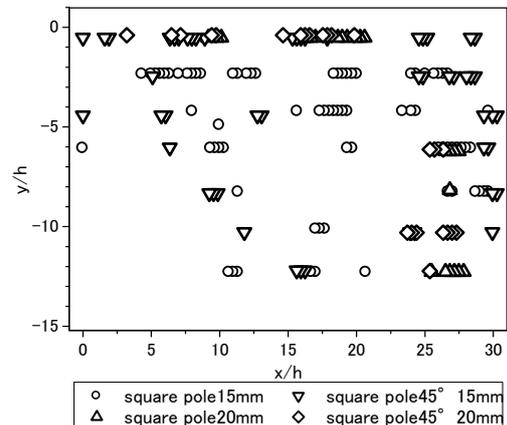
(5) 角柱 (間隔 20mm)



(6) 1/4 円柱 (間隔 20mm)

図8 各種ゆらぎ発生装置の後流の瞬時流線と渦度

図9は瞬時渦度のFFT解析の結果から求めた $1/f$ ゆらぎの発生位置を示したものである。全てのゆらぎ発生装置でスリット間隔が小さいほうが $1/f$ ゆらぎの発生位置が広範囲で確認できた。また、扇風機の方によく確認でき、扇風機に近い位置では中心付近で、離れた位置では端の方で多く確認できた。



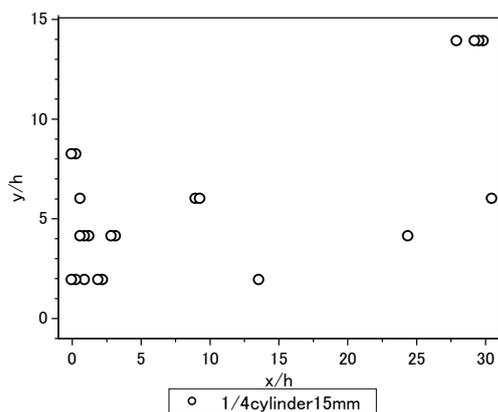


図9 ゆらぎ発生位置の分布

本研究では、スリット間隔が小さいほうが比較的弱い渦が確認でき、間隔が大きいほうが強い渦が確認できた。また、スリット間隔が小さいほうが1/f ゆらぎが広範囲で確認できた。そして、ゆらぎ発生装置の形状の違いにより1/f ゆらぎが確認できる位置にあまり違いが見られなかった。

(2) 渦のゆらぎによる食品の自然乾燥

本実験により、角柱はゆらぎ発生装置としてもっと効果があることがわかった。図10と11は風洞出口から角柱までの距離 x が125mmの場合と175mmの場合の含水率 k の変化について定速の場合と比較したものである。にんじんについて、 x が125mmの場合、 k の値は定速の場合と差はみられなかった。一方、 x が175mmの場合初期段階から早く乾燥し始め、最終的な含水率の値も定速に比べ小さくなった。さつまいもについて、 x が125mmの場合早く乾燥し、最終的な含水率の値も定速に比べ小さくなった。さらに x が175mmの場合、実験開始から45分間は定速の場合に比べ、やや早く乾燥していたが、その後差はみられなかった。

これらの角柱の位置による結果の違いは乾燥前の含水率の差によるものと考えられ、含水率の値が大きいにんじんは主流方向の流速が高い方が、そして含水率の値が小さいさつまいもは垂直方向の速度変動が大きい方が早く乾燥することが分かった。

さらに図12と13に $x=125\text{mm}$ と $x=175\text{mm}$ のときの乾燥速度の変化を定速の場合と比較したものを示す。にんじんについて、 $x=175\text{mm}$ のときの乾燥速度が他の二つよりも高くなっていることから、乾燥が早くなることが分かった。一方、さつまいもについて、 $x=125\text{mm}$ における初期段階での乾燥速度が高いことから、このとき早く乾燥していることが分かった。

本研究では、ゆらぎ発生装置により食品の乾燥実験において、にんじんは試料が角柱から遠い方が、さつまいもは試料が角柱と近い方がはやく乾燥した。これによって食材が持つ含水率に応じて適した角柱の位置が異なることが分かった。

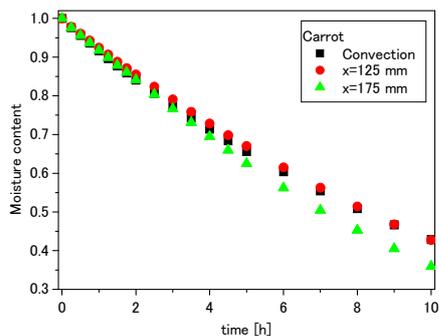


図10 人参の含水率の時間変化

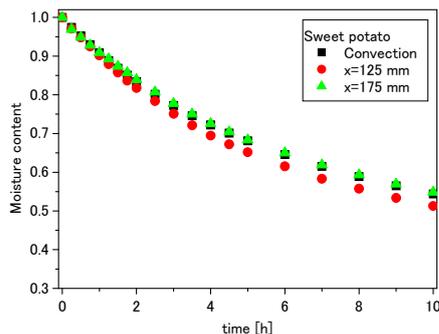


図11 さつまいもの含水率の時間変化

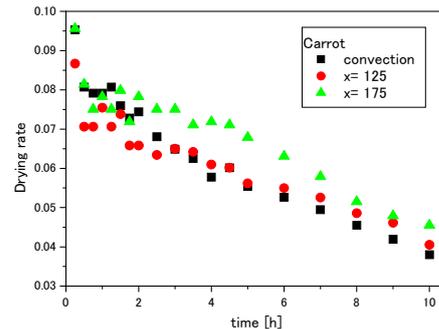


図12 人参の乾燥速度の時間変化

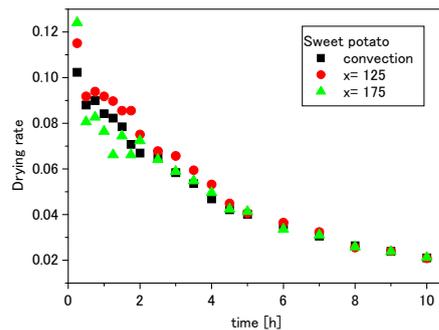


図13 さつまいもの乾燥速度の時間変化

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計8件)

- ① A. RINOSHIKA, "Dilute pneumatic conveying of a horizontal curved 90° bend with soft fins or dune model", *Powder Technology*, 査読有, Vol.254 (2014), pp. 291–298.

- ② F. Yan and A. RINOSHIKA, “Particle fluctuation velocity of a horizontal self-excited pneumatic conveying near the minimum pressure drop”, *Powder Technology*, 査読有, Vol.241 (2013), pp.115-125.
- ③ F. Yan and A. RINOSHIKA, “High-speed PIV measurement of particle velocity near the minimum air velocity in a horizontal self-excited pneumatic conveying of using soft fins”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 査読有, Vol.44 (2013), pp.534-543.
- ④ A. RINOSHIKA, “Effect of oscillating soft fins on particle motion in a horizontal pneumatic conveying”, *International Journal of Multiphase Flow*, 査読有, Vol.52 (2013), pp.13-21.
- ⑤ F. Yan and A. RINOSHIKA, “An experimental study of a horizontal self-excited pneumatic conveying”, *ASME Journal of Fluids Engineering*, 査読有, Vol.134 (2012), 04302-1~7.
- ⑥ F. Yan and A. RINOSHIKA, “Characteristics of particle velocity and concentration in a horizontal self-excited gas-solid two-phase pipe flow of using soft”, *International Journal of Multiphase Flow*, 査読有, Vol.41 (2012), pp.68-76.
- ⑦ F. Yan, A. RINOSHIKA and H. Nonaka, “An experimental study on a horizontal energy-saving pneumatic conveying system with soft fins”, *Powder Technology*, 査読有, Vol.217 (2012), pp.516-522.
- ⑧ A. RINOSHIKA and H. Omori, “Orthogonal wavelet analysis of turbulent wakes behind various bluff bodies”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 査読有, Vol.35 (2011), pp.1231-1238.

〔学会発表〕（計 10 件）

- ①小池純平、李鹿輝、渦ゆらぎを用いた扇風機に関する実験研究、可視化情報全国講演会、2013年9月27日（会津）。
- ②橘川佑美、李鹿輝、後流渦を用いた食品の自然乾燥、可視化情報全国講演会、2013年9月27日（会津）。
- ③鈴木駿也、李鹿輝、中野政身、柔らかいフィンの振動による誘発した流れの可視化、可視化情報全国講演会、2013年9月27日（会津）。
- ④佐藤賢司、李鹿輝、柔らかいフィンの振動による水平曲管空気輸送、可視化情報全国講演会、2013年9月27日（会津）。
- ⑤藤本峻、李鹿輝、ウェーブレット多重解像度法による三次元後流の解析、可視化情報全国講演会、2013年9月27日（会津）。
- ⑥李鹿輝、坂部愛、渦のゆらぎによる食品の自然乾燥、可視化シンポジウム、2013年7月16日（東京）。

- ⑦藤本峻、李鹿輝、ウェーブレット変換による多重スケールの後流構造解析、可視化シンポジウム、2013年7月16日（東京）。
- ⑧藤本峻、李鹿輝、非対称物体の後流構造に関するウェーブレット解析、可視化シンポジウム、2012年7月24日（東京）。
- ⑨藤井啓行、李鹿輝、各種後流における渦ゆらぎの可視化、日本機械学会東北支部講演会、2011年9月22日（米沢）。
- ⑩ A. RINOSHIKA and H. Omori, “Two-Dimensional Orthogonal Wavelet Analysis of Turbulent Structures in Various Near-Wakes”, *Proceedings of The 11th Asian Symposium on Visualization*, Niigata, Japan (2011.6.5), No.08-03, pp.1-7.

〔図書〕（計 1 件）

- ①S. Fujimoto and A. RINOSHIKA, “Orthogonal Wavelet Analysis of Flow Structures in Asymmetric Wakes”, *Lecture Notes in Mechanical Engineering: Fluid-Structure-Sound Interactions and Control*, Springer Berlin Heidelberg (2014), pp.63-69.

6. 研究組織

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