HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Study on thermal convection by advancement of color-based optical measurements [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	能登, 大輔
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第14676号
Issue Date	2021-09-24
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/83233
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Daisuke_Noto_review.pdf, 審査の要旨

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称　博士 (工学)　　氏名　能登　大輔

審査担当者　主　査　准教授　田坂 裕司
副　査　教　授　村井 祐一
副　査　教　授　大島 伸行
副　査　教　授　渡部 正夫
副　査　染矢 聡　（産業総合研究所・省エネルギー研究部門）

学位論文題名

Study on thermal convection by advancement of color-based optical measurements
(色画像処理計測の高度化による熱対流研究)

熱対流現象は, 熱流体工学分野のみならず, 大気海洋における大規模流動など地球惑星科学, 天体物理学においても重要な基礎物理現象である. ベナールやレイリー卿による体系化から一世紀以上にわたり理論, 実験, 数値計算によって現象解明が進められてきた. 物理現象を過不足なく再現する実験研究が重視される一方で, 温度変動計測の困難さが現象解明進展の律速となっている. 粒子画像流速計測法 (PIV) に代表される従来のモノクロ画像計測では, 速度場と温度場の同時計測が困難なためである. 一方で, カラー画像処理としては高ビット深度の輝度情報を十分に活用しきれていない. 熱対流の熱流動を定量化するために, そのような制限のある従来の計測法を光学系の煩雑化なしに高度化する, 実用的な色画像流体計測が求められる.

本論文では, PIV が有する二次元二成分速度場計測の計測精度や簡便性を損なうことなく, 空間と速度情報の高次元化, 並びに温度などの付加的物理量計測を, 色情報を付加的に用いることで実現する, 色画像処理計測技術の開発が行われている. 流体計測における色情報の利用を分類問題および回帰問題に分離し, 計測対象の要求を満たす実用的な計測法が確立されている. また, これまで温度場の半定量的可視化計測に用いられてきた感温液晶粒子の流動特性を詳細に調査することで, 論文の後半では水平対流および回転熱対流を対象として, それを用いた複合的な時間スケールの流体現象の解明が行われている. 論文は序論と結論を含む 4 部構成となっており,2 部及び 3 部が成果の中核となっている. これらの成果は以下のように要約される.

(1) 二色レーザーで照射された二断面を単一のカラー粒子画像から分離することで, 各断面における PIV による速度場計測が可能となった. 二台のカメラを用いて, 二断面同時ステレオ PIV 計測を実現し, 不混和二層対流の結合構造が調査された. 従来法では計測不可能であった三次元的な対流セルの結合構造が面同士の相互作用として定量化された.

(2) 二色レーザーで照射された二断面の粒子画像における輝度の時間信号を利用して, 二断面を通過する粒子の面外速度を算出するアルゴリズムが提案された. 一台のカメラのみで二断面の二次元三成分速度場計測が実現された.

(3) カメラ視軸方向に無段階変化するレインボー光を照射し, 粒子の散乱光色の変化から面外座標を定量化するカラー PTV 法が確立された. 実装環境下において光学機器に変更なく「その場」での色-座標較正を可能とする実用的な較正スキームが提案された. 色情報を多元変数として扱う人工

ニューラルネットワークを用いた多重回帰分析によって処理することにより, 十分な精度と計測システムの簡易性を併せ持つ, 三次元三成分の速度場計測が実現された.
(4) 水に微小板状粒子を添加した際に発現する, 複屈折に起因する干渉色について, 局所流体変形との一意な関係が明らかにされた.
(5) 水平対流現象における, 熱拡散時間と同等の長時間スケールの時空間発展が, 感温液晶粒子を用いた可視化計測により調査された. 傾圧トルクと復元力のバランスを表す無次元数を新たに導入することで, 時間変化する対流構造の特徴量を統一的に表現できることが示された.
(6) 精緻な速度分布計測により, 回転熱対流のスピンアップにおける複数の時間スケールが重畳する遷移過程のメカニズムが調査された. 複数の不安定性を段階的に経ることで, 無秩序な乱流状態から規則的なパターンを形成し, 回転熱対流の平衡状態へと至ることが示された.
(7) 回転熱対流中に形成される渦柱の運動と局所熱輸送量の関係を明らかにすることを目的として, 三次元速度温度場同時計測法が確立された. 感温液晶の発色を人工ニューラルネットワークによって温度へと変換する手法が提案された. 渦柱の並進運動が局所熱輸送量と相関を持つことが明らかとなり, 渦柱群は熱境界層成長の抑制と促進のバランスによって自由拡散的に振る舞うことが示された.

これを要するに, 本論文では色情報を計測し物理量として定量化する複数の流体計測法を,「その場」較正によって実用に足る手法として確立し, 実際にそれを用いることで, 複雑な熱流体現象において新たな知見が得られることが示されている. この成果は, モノクロ画像処理として成熟した既存手法の自由度を大幅に拡張し, 広く普及している流体可視化計測の限界を打破するものである. また, この実験研究を通して明らかとなった各種熱対流現象の知見は, 現状数値計算を中心として進められている, 各種工学, ならびに物理学や地球惑星科学の諸問題の理解を前進させる結果である. これら計測手法開発と現象探求の成果は, 実験流体力学の可能性を広げ, 熱流体工学の発展に大きく貢献するものである. よって, 著者は北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格があるものと認める.