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_abstract.pdf, 論文内容の要旨

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学　位　論　文　内　容　の　要　旨

博士の専攻分野の名称　　博士（工学）　　氏名　能登　大輔

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)

熱対流の体系的な研究は 1900 年のベナールの実験以降, 一世紀以上の歳月がたつ今なお活発に行われている. 熱流体力学の基礎物理現象としてだけでなく, 応用先は大気海洋における大規模流動など地球惑星科学, 天体物理学にも通ずる. 工学的には輸送システムとしての制御と予測を考える上で, 重要なプラットフォームでもある. 流動の駆動源が流体内部の密度差を解消するための浮力であるため, 根本的な理解には, 速度場だけでなく温度場の計測が必要となる. 流れ場計測は粒子画像流速分布計測法 (PIV) や粒子追跡法 (PTV) をはじめとした, デジタル画像処理技術として発展してきた. 二次元画像として記録された輝度信号の時空間情報を用いた解析技術である. 速度場計測ではモノクロ画像として記録された流れ場中の輝度分布を追跡する. 一方, 現代において広く普及するカラー画像の処理としては, 記録された高ビット深度の色情報を十分に活用しきれていない. 色情報の利用によって画像処理としての流体計測を飛躍的に拡張できる. すなわち, 光学機器を煩雑化することで高度化されてきた流れ場計測を, 計測自体の簡易性・実装性を保ったまま, カラー画像処理で実現できる. このような発展的計測法は, 特に熱対流のような速度場に加え温度場の計測が必須となる対象においてその威力を発揮する. 本博士論文では速度場計測の機能を損なうことなく, 付加情報として色情報を二次元速度場以外の物理量取得に利用する, 新たな流体計測法を確立する.

本博士論文では, 色情報を用いた流体可視化計測法の開発と, その応用として熱対流の複合物理計測を扱っており, それぞれの成果を個別にまとめた. 論文は研究全体の緒論および結論を含め全四部で構成されており, 背景と目的が第一部で述べられている.

第二部では, カラーデジタル画像処理による, 新たな流体計測法の可能性を探索した. ここで取り上げるのは, 色情報をカメラ視軸方向の空間座標として, あるいは流体変形を表す複屈折による干渉色として取り扱う手法である. 初めに二色レーザーを用いた二断面同時速度場計測法を開発した. 色情報からカメラ視軸方向に異なる位置にある二つの計測断面を分離する技術である. カメラ二台を使用することで, 二断面の同時ステレオ PIV 計測法を確立した. 液化天然ガスタンクを模擬した不混和二層対流を計測対象として, その機能の有用性を示した. 従来不可能であった各層における対流セルの三次元的な結合構造を定量化することを可能とした. 静止状態にあった粘性比が小さい二流体は対流開始直後の発達過程において, 熱的結合構造を示すことが示された. また, 地球の回転を模擬した弱回転場の影響が, わずかに熱的結合を弱めることを明らかにした. 二色分離法のさらなる機能拡充を目的として, カメラ一台のみを用いた短視点三成分速度場計測法「Dual-plane single-pixel correlation 法」を開発した. 輝度の連続時間情報のみを用いて画素単位の空間解像度を持つ時間平均速度場計測を可能とした「Single-pixel PIV」と, 二断面の空間相関によって面外速度成分を計測する「Dual-plane PIV」の機能を融合することで実現された. 強三次元流れ場においてその性能を検証した. 上述の二手法では分類問題に色情報を利用したが, 連続変化する色情報による回帰問題への利用も行った. 視軸方向に連続的に色変化するレインボー光による三次元カラー PTV の開発であ

る. 色-深さ較正を機械学習による多変数回帰問題として行い, 三次元三成分速度場計測を一台のカメラと一台の光源のみで実現した. 開発手法は通常の PIV と比較され, 強三次元流れ場を十分によく計測できることが検証された. 色情報を用いた発展的な流体計測法として, 非ニュートン流体における光弾性を用いた応力場直接計測法の可能性を調査した. せん断によって誘起された流れ場において複屈折により呈色される干渉色が, せん断応力と一意に対応することを示した. これによって, 速度勾配の空間分布を色情報として定量化する,PIV など従来法に代わる新たな流体計測の可能性が開けた.

第三部では, 色情報を温度として表現可能な感温液晶粒子を用いることで, 熱対流の現象解明を行った. 数時間におよぶ長時間スケールの遷移現象が観察される, 発達過程の水平対流現象を調査した. 水平対流は同一水平面上に不均質熱源を配置することで駆動される熱対流であり, 平衡状態においては不安定化源による直接的な浮力と, 水平方向の温度 (浮力) 分布に起因する傾圧トルクが駆動力となり, 安定化源による復元力が制動力となるため, 左右非対称の対流セルが形成される. 一方, 静止状態からの発達過程においては, 不安定化源による直接的な浮力が存在しない状態があり, 平衡状態と同じレイリー数で現象が整理できない. 傾圧トルクと復元力のバランスを表す時間変化する無次元量を新たに定義することで, 発達過程においても無次元数による記述ができることを示した. 感温液晶粒子による熱対流計測は, 複合的な時間スケールを有する, 熱対流から回転熱対流へと至るスピンアップ過程の調査においても適用された. 剛体回転へと至る過程で, 壁面の境界層の伝ぱに伴い円筒容器の壁面近傍に同心円状の対流ロール構造が形成されることが分かった. さらに, 対流ロールの境界においてケルビン・ヘルムホルツ不安定性が生じ, 同心円状に整列した渦柱が形成された. 渦柱の周方向波数はその生成半径位置に関わらず, ロスビー数 (浮力とコリオリ力の比) によって整理されることが分かった. 内部領域と上下面のせん断が十分に緩和されると, 熱境界層の剥離による渦柱の形成が急速に発展した. これらの流動様式の変化は段階的に発生し, エクマンスピンアップ時間の数倍で回転対流の平衡状態に達することが分かった. 回転対流の平衡状態では系回転軸方向に伸長した無数の柱状の渦構造が流れ場を支配するが, このような局所流体構造は熱対流計測において軽視されてきた. 系全体での熱輸送量が重視されるためである. 一方渦柱は長時間にわたって存在し, 自由拡散的な挙動をしながら流体層を移流する. 地球規模の大規模流れに拡張したとき, 各渦柱が担う時々刻々と変化するはずの局所熱輸送量は重要な計測対象である. そこで, 感温液晶粒子の移動から速度場を計測するとともに, その発色を温度場として定量化する熱輸送量の可視化計測手法を開発した. シート光とカメラを同時に駆動させる機構を構築し, 渦柱が支配する回転熱対流の流れ場計測を行った. スキャニングステレオ PIV による三次元三成分速度場計測と, 色情報および空間情報を機械学習によって温度場へと多変数回帰する三次元温度場計測を実現した. 渦柱を個別に検出し, その内部で輸送される熱量を定量化した. 各渦柱の担う熱輸送と, 渦柱自体の拡散挙動的な並進運動の関係を明らかにした. 非定常な局所熱輸送量と流体構造のダイナミクスの関係を議論した.

第四部では, 第一部から第三部の知見がまとめられ, 色情報を用いた流体計測の可能性と, それによる熱対流計測の今後の展望が述べられている.