

令和 4 年 6 月 15 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02063

研究課題名(和文) 圧力・温度場非侵襲イメージング法の深化と移動変形物体，高温高圧場計測への展開

研究課題名(英文) Development of Non-invasive Imaging Method for Pressure and Temperature Fields and its Application to Measurements of Moving and Deformed Objects, High Temperature and High Pressure Fields

研究代表者

亀田 正治 (Kameda, Masaharu)

東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：70262243

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：感圧・感温塗料(PSP・TSP)と，超短パルス光源を主体とするコヒーレント反ストークスマン散乱(CARS)分光法を活用した非定常圧力・温度場測定法を開発した．具体的には，数気圧，250の環境に使用可能な新しいPSP，物体表面圧力・変形量同時計測のためのランダムドットPSP，より簡易なCARS光学系セットアップを可能とする光学フィルタによる狭帯域パルス光生成法を開発した．これらを用いて，高速回転する圧縮機インペラ表面の圧力・温度同時取得，遷音速航空機翼に見られるフラッターにともなう物体表面圧力，変形量同時取得，気体温度同定に必要な狭帯域パルス光を得ることに成功した．

研究成果の学術的意義や社会的意義

機械・航空工学では，実機の運転条件の制約となる非定常現象が多い．ここでは，200,000rpmで回転する圧縮機インペラ，遷音速気流中で変形する翼，2000 K，70気圧に達する内燃機関のような，実用的にも重要であるにもかかわらず，従来の方法では取得ができなかった対象の圧力，温度場測定を実現した．計測データとCFDなどの大規模数値解析との組み合わせにより，現象の適切なモデリングや望ましくない非定常現象を回避する設計方法の指針が得られる．

研究成果の概要(英文)：We have developed unsteady pressure and temperature measurement techniques utilizing pressure-sensitive and temperature-sensitive paints (PSP and TSP) and coherent anti-Stokes Raman scattering (CARS) spectroscopy, which is mainly based on ultrashort pulse light sources. Specifically, we have developed a new PSP that can be used in high-pressure, hot gas environment, a random-dot PSP for simultaneous measurement of surface pressure and deformation of the object, and a narrow-band probe light generation method using optical filters that enable simpler setup of CARS optics. Using these methods, we succeed in simultaneous measurement of pressure and temperature on the surface of a high-speed rotating compressor impeller, simultaneous measurement of airfoil surface pressure and deformation caused by flutter in transonic flow, and obtaining narrow-band pulse light sufficient for identification of gas temperature.

研究分野：流体工学

キーワード：流体工学 航空宇宙工学 流体計測

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

自動車や航空機では、環境負荷低減のために、騒音、燃費双方の低下が要請されている。中でも、自動車周りの風切音、ファン騒音、航空機離着陸時の空力騒音、コンプレッサ、タービンなどのサージングなどは、物体表面近傍の変動圧力場と強くリンクしているが、これらの原因を直接特定できる計測手段はなく、数値流体力学(CFD)解析との併用によるトライアルアンドエラーで技術開発が行われている。また、未利用熱・排熱の有効活用や燃焼の高効率化を図るために必要な熱流動の制御でも、制御のベースとなる熱流動場計測技術を高め、経験則に頼ってきたシステム内外の熱流動場を正確に評価する必要がある。いずれも「場」の把握が重要であり、半導体圧力センサや熱電対などの点計測に代わる計測手段の一層の深化が求められる。

光学計測は、「場」を乱さず把握する有効な手段であり、最近の機器性能の向上によって不可能と思われていたことが次々と実現されている。代表者も、感圧塗料 (pressure sensitive paint, 以下 PSP)・感温塗料 (temperature sensitive paint, 以下 TSP) を用いた物体表面圧力・温度場イメージング法の開発に取り組み、塗料自体の開発、特性把握、空力音にともなう数 Pa の微小圧力変動や高速回転コンプレッサ翼表面の圧力分布を捉える実証試験などに成功している。

しかし、圧力、温度に限っても、機械系で取り扱う熱流動場全体をカバーする計測法はいまだ発展途上である。特に、移動や変形をともなう物体周りや、コンプレッサやタービン、エンジンなどに見られる高温場に適用可能かつ信頼性の高い計測手段は確立されていない。..

### 2. 研究の目的

測定対象を乱すことなく圧力・温度場を計測するための光学的計測法を格段に深化、発展させる。感圧・感温塗料 (PSP・TSP) と、超短パルス光源を主体とするコヒーレント反ストークスラマン散乱 (CARS) 分光法を活用し、非定常圧力・温度場イメージング法を開発する。特に、自動車、航空宇宙、エネルギー産業において大きな需要が見込まれる、回転体や変形をともなう物体表面の圧力・温度分布、および、圧縮機、エンジン等に見られる高温高圧状態における圧力・温度計測をターゲットとし、3つの測定法 (高温環境用 PSP、移動変形物体用 PSP 計測システム、高温高圧場 CARS 計測システム) を開発し、現状の限界をはるかに上回る測定を実用的な方法論で実現する。本測定法の開発成功により、輸送機械、エネルギー機械の環境負荷低減技術の進展に寄与することを目指す。

### 3. 研究の方法

感圧・感温塗料 (PSP・TSP) と、超短パルス光源を主体とするコヒーレント反ストークスラマン散乱 (CARS) 分光法を活用した非定常圧力・温度場イメージング法を開発した。既存の手法では測定不可能な以下の3項目をターゲットに開発成功を狙った。

#### (1) 高温環境用 PSP の開発

コンプレッサのような数気圧、250 K の環境に使用可能な新しい PSP として、高温環境に耐える物体表面への色素固着方法を確立し、室温あるいは低温環境における大気圧以下の計測にとどまる現 PSP の計測範囲を格段に広げることを目指した。色素の固着法の選定、処理条件による発光量、感度の最適化を進めた。

#### (2) 移動変形物体用 PSP 計測システムの開発

航空機翼に見られるフラッタ現象のような流体・構造連成振動中の物体表面圧力・温度場計測システムを開発した。一つのシステムで、ステレオ撮影による物体の3次元位置同定と PSP 計測が同時に実現可能な PSP 塗布法、計測条件を見出し、風洞実験を通じて測定法の有効性を実証した。

#### (3) 高温高圧場 CARS 計測システムの開発

自動車用エンジン内部 (40 気圧、2000 K) の圧力、温度場を非侵襲かつ無標識 (発光分子等のトレーサなし) でとらえる手法の開発を進めた。超短パルス光源を主体とする CARS 分光光学系を発展させ、実用時に問題となる煩雑な光学系の調整を軽減しつつ、高圧場における非定常圧力・温度線分布をとらえる方法を検討した。高圧測定で問題となる非共振バックグラウンドを除去する方法の考案、および、高圧下光学系の簡素化のカギを握る、狭帯域パルス生成用光学フィルタの設計を、評価を行った。

### 4. 研究成果

#### (1) 高温環境用 PSP の開発

感圧塗料 (PSP) の室温以上での高速応答性の劣化は、高温環境下での PSP 測定において深刻な問題である。そこで、白金ポルフィリン (PtTFPP)、チタニア粒子、ポリイソブチルメタクリレート (polyIBM) からなる標準ポリマーセラミックス PSP (PC-PSP) の劣化機構を明らかにする特性評価を行った。2ゲート寿命法を適用した結果、PC-PSP は 100 度でも十分な圧力・温度感度を有するが、発光強度は試験中に著しく減少した。その後、熱安定性、光安定性、発光スペクトルを測定した結果、色素分子が直接大気にさらされることによる PtTFPP の光分解が主な劣化

原因であることが判明した．このような劣化を抑制するために，PC-PSP 調製の簡単な追加工程として，色素溶液に少量のウレタン樹脂の添加を試みた(図 1)．ウレタン樹脂の添加により，標準的な PC-PSP よりも若干時間応答が遅くなるものの，PSP の劣化を大幅に抑制することができた (Furuya et al. Sensors Vol. 21, No. 24, 8177, 2021)．

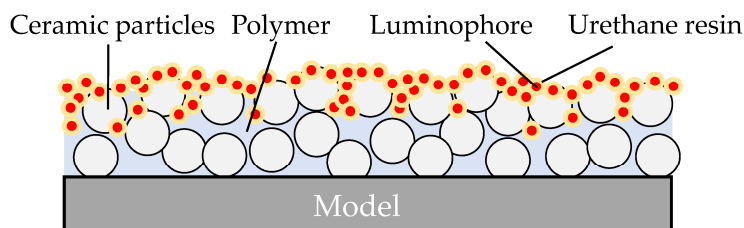


図 1 高温環境用 PSP

### (2) 移動変形物体用 PSP 計測システムの開発

遷音速翼のフラッタ機構を理解するためには，形状計測と空力計測を組み合わせる行うことが有効である．その手法の一つとして，ランダムドット型感圧塗料 (PSP) を用いて，遷音速流中の翼の変形と圧力場の時間分解グローバル計測を行った．ランダムドット型 PSP は，PSP 色素の意図的な光分解により，発光強度のパターン化されたテクスチャを有している．このドットにより，デジタル画像相関法 (Digital Image Correlation : DIC) を用いて，翼の表面形状だけでなく，圧力も同時に測定することができる．マッハ数 0.89、支配周波数 100Hz でフラッタを開始する 3 次元後退翼モデルを用いて，ランダムドット PSP の実現可能性を遷音速風洞試験で検証した．12 ビット高速カメラを用いて，変形量増加時の翼の非定常表面形状および圧力分布を計測した．実験の結果，フラッタ時の変形と表面圧力分布を時系列で計測することに成功した．計測された変形と圧力の精度は，レーザー変位計と半導体圧力計で得られた数点のデータを比較することで評価した．撮影レート 6.25kHz での各時間分解瞬時画像における精度は，変位で 1mm 以内，圧力で 1kPa 程度であった (Imai et al. AIAA 2021-0127, 2021; Imai et al. Exp. Fluids 2022, submitted)．

### (3) 高温高圧場 CARS 計測システムの開発

非対称時間波形のパルスを生成し(図 2)，ガス圧評価のための回転 CARS 測定の実現性を実証した．これにより，非共振バックグラウンドを除去し，高圧下での CARS 信号の緩和時間を得ることができた．(Iwata et al. OSA Technical Digest, 2020, paper C6D\_2)．

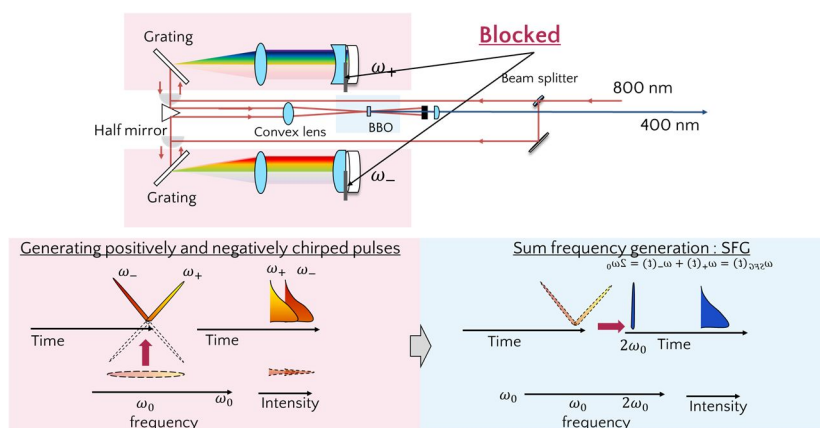


図 2 非対称時間波形生成光学系

バンドパスフィルタを用いたシングルパス和周波発生 (SFG) 法により，広帯域フェムト秒パルスから高強度 2 倍波狭帯域パルスを生じた．広帯域フェムト秒パルスから高強度の第二高調波狭帯域パルスを生じるために，バンドパスフィルタを用いたシンプルで効率的なシングルパス和周波発生 (SFG) 法を提案した．広帯域パルスに特定の量の高次分散を与え，SFG によって目標周波数における第二高調波出力のみが増強されるように整形した．実験の結果，SFG のパルス幅を 5.26nm から 0.85nm に圧縮することができた．さらに，SFG パルスのピークスペクトル強度は，フィルタなしのパルスの約 18 倍となった．このフィルタを用いたパルス整形法は，幅広い分野での非線形レーザー分光の利用を促進する重要な技術である．また，パルス整形ツールとしての光学フィルタのさらなる発展につながる (Iwata et al. Opt. Lett., 2022, submitted)．

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Furuya Takenori, Nakai Takumi, Imai Masato, Kameda Masaharu	4. 巻 21
2. 論文標題 Characterization and Improvement of Heat Resistance of a Polymer-Ceramic Pressure-Sensitive Paint at High Temperatures	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 8177 ~ 8177
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/s21248177	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Iwata Katsuya, Saito Yoichi, Ito Terumasa, Obara Yuki, Kameda Masaharu, Misawa Kazuhiko	4. 巻 1
2. 論文標題 High-Pressure Gas Measurement Using Time-Resolved Rotational CARS with Temporally Asymmetric Pulses	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 OSA Technical Digest	6. 最初と最後の頁 paper C6D_2
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/CLEOPR.2020.C6D_2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Imai Masato, Nakakita Kazuyuki, Nakajima Tsutomu, Kameda Masaharu	4. 巻 1
2. 論文標題 Unsteady Surface Pressure Measurement of Transonic Flutter Using a Pressure Sensitive Paint with Random dot Pattern	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 AIAA Paper	6. 最初と最後の頁 AIAA 2021-0127
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2514/6.2021-0127	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 今井 雅人, 中北 和之, 中島 努, 亀田 正治
2. 発表標題 ランダムドットPSPを用いた遷音速フラッタの非定常表面圧力場測定
3. 学会等名 流体力学講演会 / 航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム2020オンライン
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Iwata, K., Saito, Y., Ito, T., Obara, Y., Kameda, M. and Misawa, K.
2. 発表標題 High-pressure gas measurement using time-resolved rotational CARS with temporally asymmetric pulses
3. 学会等名 14th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masato Imai, Kazuyuki Nakakita, Tsutomu Nakajima and Masaharu Kameda
2. 発表標題 Unsteady Surface Pressure Measurement of Transonic Flutter Using a Pressure Sensitive Paint with Random dot Pattern
3. 学会等名 AIAA Scitech 2021 Forum (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 今井 雅人, 山本 洵, 中北 和之, 亀田 正治
2. 発表標題 動的変形を伴う翼表面圧力分布計測法の開発
3. 学会等名 第51回流体力学講演会 / 第37回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 上野 泰河, 今井 雅人, 中北 和之, 亀田 正治
2. 発表標題 ランダムドットPSPを用いた遷音速フラッタの圧力・変形量同時測定法の改良
3. 学会等名 第54回流体力学講演会 / 第40回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 古谷 豪教, 亀田 正治, 中井 琢己, 今井 雅人
2. 発表標題 非正常圧力場測のためのPC-PSPの改良
3. 学会等名 日本機械学会 第99期流体工学部門講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	天尾 豊 (Amao Yutaka)  (80300961)	大阪市立大学・人工光合成研究センター・教授  (24402)	
研究分担者	中北 和之 (Nakakita Kazuyuki)  (50358595)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・航空技術部門・主幹研究開発員  (82645)	
研究分担者	伊藤 輝将 (Ito Terumasa)  (60783371)	東京農工大学・学内共同利用施設等・特任准教授  (12605)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	小原 祐樹 (Obara Yuki)		

## 6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	齋藤 陽一  (Saito Yoichi)		
研究協力者	今井 雅人  (Imai Masato)		
研究協力者	岩田 克也  (Iwata Katsuya)		
研究協力者	中井 琢己  (Nakai Takumi)		
研究協力者	古谷 豪教  (Furuya Takenori)		
研究協力者	田島 加奈子  (Tajima Kanako)		
研究協力者	上野 泰河  (Ueno Taiga)		

## 7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------