

令和 6 年 6 月 11 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01524

研究課題名（和文）低レイノルズ数においてcntTSPを用いた運動する物体表面上の流れ場計測の研究

研究課題名（英文）Flow field measurement on a moving object surface using cntTSP at low Reynolds numbers

研究代表者

永井 大樹 (Nagai, Hiroki)

東北大学・流体科学研究所・教授

研究者番号：70360724

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：本提案は、低レイノルズ数流れにおいて運動する翼面上の流れにおいて変化する層流/乱流の境界層遷移位置などを可視化する技術の確立を目的とする。計測には、カーボンナノチューブを薄膜化したヒータ（cnt）と感温塗料（TSP）を組み合わせたcntTSPを用いる。これまでに、cntTSPを回転翼ロータブレード表面に塗布し、ホバリング/前進飛行状態のロータブレード表面における温度分布、また温度分布の時系列画像から摩擦応力分布への変換も行った。特に前縁剥離渦（Leading Edge Vortex, LEV）の形成が明確に見られ、推力やトルクの数値を議論する際の有力なツールとなることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本提案では、ドローンなどに代表される回転翼飛行体のロータリーブレード上の流れ場を時系列温度分布の可視化を行うことで解明することを目的としている。そのために、カーボンナノチューブを薄膜化したヒータを翼表面上に塗布し、流れによる微小な温度変化を増幅し、その温度変化を発光として捕らえる感温塗料技術を組み合わせた。この技術により、回転翼表面上で生じる前縁はく離渦や摩擦応力分布を可視化することができた。この成果により、力計測で得られた推力やトルクの数値を議論する際に流れ場との対比が可能となるためドローンなどの飛行体開発において非常に有力なツールになるといえる。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this proposal is to establish a technique to visualize the position of laminar/turbulent boundary layer transitions, etc., which change the flow over a moving airfoil surface in low Reynolds number flow. For the measurement, cntTSP, a combination of a heater (cnt) with a thin film of carbon nanotubes and a thermosensitive paint (TSP), will be used. We have applied cntTSP to rotor blade surfaces and, measured temperature distributions on rotor blade surfaces in hovering and forward flight conditions, and converted time series images of the temperature distributions into frictional stress distributions. In particular, the formation of the leading edge vortex (LEV) was observed, and proved to be a powerful tool in discussing thrust and torque values.

研究分野：空気力学

キーワード：低レイノルズ数 感温塗料 摩擦応力分布 cntTSP カーボンナノチューブ 回転翼

1. 研究開始当初の背景

低レイノルズ数環境 ($Re=10^3-10^5$) で飛行する航空機 (ドローンや火星飛行機など) は、動的な機構を持つものが多く、その動安定性評価には運動する翼の空気力学を理解することが必要である。これらは、特に従来の線形理論が適用できない非線形の飛行領域を利用するため、非線形の運動方程式と非定常空気力学に基づく安定性の考察が重要となる。

このような運動する物体 (機体や翼単体、回転翼など) 周りの流れ場を定性的に理解することは可能だが、失速特性のヒステリシスや空気力の時間遅れを特定するための直接的な解答にはならない。すなわち翼表面上の圧力分布や摩擦応力分布、境界層遷移位置の時空間変化を正確に把握する必要がある。しかし、運動する翼の表面情報を得るのは技術的に難しく、特に低レイノルズ数領域での計測は非常に困難となっている。

これに対し、本提案では、カーボンナノチューブ (CNT) を薄膜化したヒーターを用い、感温塗料 (TSP) と組み合わせることで流れ場を可視化する技術 (cntTSP) を開発することとした。具体的には、CNT ヒーターで層流と乱流の熱伝達率の違いを増幅し、TSP で温度変化を発光として捉える。これにより、流れの剥離位置、層流/乱流の境界層遷移位置、再付着位置を検出可能にする。この技術により、運動する物体の非線形空力特性と表面流れ場との関係を正しく議論できるようになるといえる。

動的な翼表面上の流れ場の様子を捉えるといったこれまでに例のないこの技術が確立されれば、低レイノルズ数環境だけでなく一般航空機にも適用でき、その波及効果は計り知れないものといえる。

2. 研究の目的

本提案では、低レイノルズ数での流れ場の計測技術の新たなアプローチを提供し、動的な翼の非線形空力特性の理解を深め、UAV や μ UAV などの設計に大きく貢献することを目指して、cntTSP を用いて運動する翼面上の流れの剥離位置、層流/乱流の境界層遷移位置、再付着位置を時系列で検出する技術を確立することを目的とする。特に、運動する物体に適用するためには、運動に対する温度変化の追従性、十分な発光強度や均一性を担保することが求められる。これらを解決することを第一の目標として掲げ、最終的にはローターブレードのような回転翼体への適用を目指す。

3. 研究の方法

TSP は、色素分子の温度消光による発光強度の変化を利用して温度場を計測する光学的手法である。TSP の色素分子に固有の波長を照射すると、色素分子が励起されて、基底状態に戻る際に一部のエネルギーを光として放出する。この発光強度が温度に依存することから、物体表面の温度場計測が可能となる。低速での TSP 計測では、模型表面と気流の間に温度差を設け、対流による熱交換を促す。このときの熱交換量は、流れ場の強制熱伝達率によって決まる。レイノルズアナログから熱伝達率は表面摩擦と関係があるため、模型表面に形成された温度分布を計測することで、流れ場の状態を推定できる。

模型の加熱には赤外線ヒーターが用いられることが多い。しかし、発光波長との重複を防ぐため、計測中は加熱を止める。そのため、長時間の計測は困難となり、低速回転では撮影枚数が限られる。また移動物体には、均一に熱を供給することが困難である。そこで提案された手法が cntTSP である。図 1 に cntTSP の構成を示す。模型上に塗布された Carbon NanoTube (CNT) に給電し、ジュール熱による内部発熱を利用する。そのため、回転体にも安定して加熱することができる。CNT 層の上に塗布されたスクリーン層は、TSP 層で生じた発光を反射させて発光強度を高める役割である。

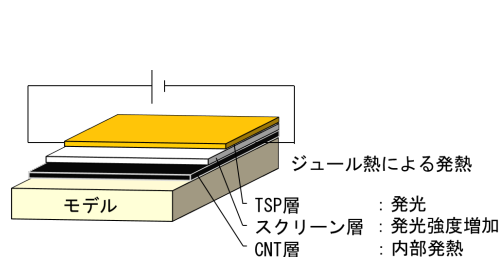


図1 cntTSP の構成

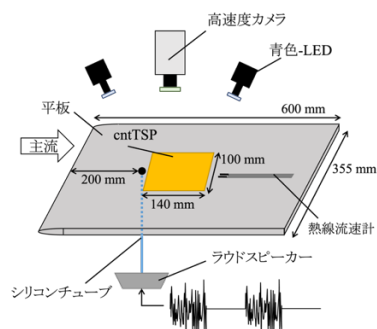


図2 cntTSP 応答性評価試験セットアップ

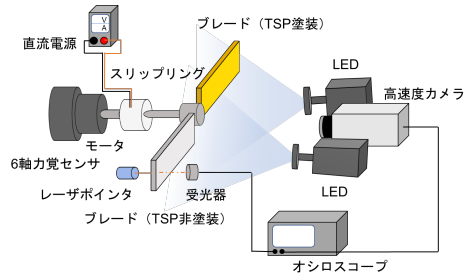


図3 実験セットアップの概略図

4. 研究成果

本研究では、はじめに cntTSP の応答性評価を行った。実験では、平板境界層に局所擾乱を周期的に導入して流れ場に変化を作り、cntTSP によって計測される温度の振幅を計測することで周波数応答を調査した。図4に間欠擾乱を主流に与えることによって生じた乱流楔による温度分布である。ただし、温度変化の振幅波小さいことから、取得した時系列の温度データに対して特異値分解(Singular Value Decomposition、SVD)を施してある。この結果から、10Hz 程度の変動流れ場であれば、温度変化が 10^{-3} K オーダーであっても計測可能であることが明らかとなった。

次に、図3のセットアップで回転翼体のローターブレード表面の温度分布を可視化した。その結果、前縁ではく離れた渦による (Leading Edge Vortex、LEV) による温度分布変化 (図5 a) と摩擦応力線図 (図5 b) が明瞭に捉えられ、別途計測した力計測との比較を行うことで、運動する物体の非線形空力特性をより深く理解することができた。このことから、低速において運動する物体の非定常流れ場の計測技術としてこの cntTSP が非常に有力なツールであるといえる。

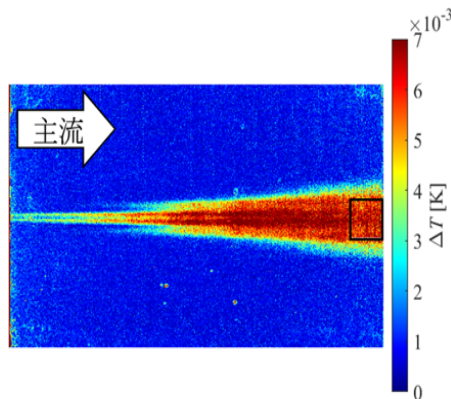
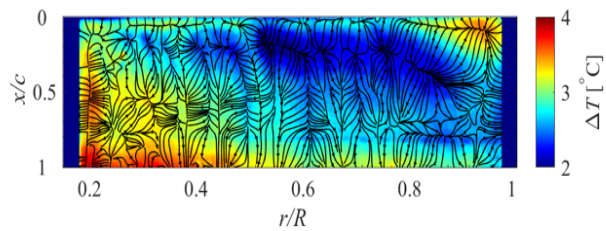
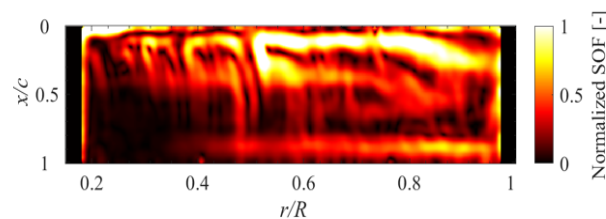


図4 間欠的な乱流楔の発生(10Hz) に伴う温度変動の RMS 分布



(a) 温度分布と摩擦応力線



(b) 摩擦応力絶対値分布

図5 ローターブレード表面の可視化結果例

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5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 Tsubasa Ikami, Ren Nishimura, Hiroki Nagai	4. 巻 65
2. 論文標題 cntTSP visualization technique for rotating blade surface flow at low Reynolds number	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Experiments in Fluids	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s00348-023-03757-x	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 Tsubasa Ikami, Yasufumi Konishi, Hiroki Nagai	4. 巻 34
2. 論文標題 Evaluation of the frequency characteristics of cntTSP measurement for unsteady low-speed flow	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Measurement Science and Technology	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1361-6501/acb8d0	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 Tsubasa Ikami, Koji Fujita, Hiroki Nagai	4. 巻 22
2. 論文標題 Influence of Formulations on Characteristics of Ruthenium-Based Temperature-Sensitive Paints	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/s22030901	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 Tsubasa Ikami, Koji Fujita, Hiroki Nagai, Daisuke Yorita	4. 巻 32
2. 論文標題 Measurement of boundary layer transition on oscillating airfoil using cntTSP in low-speed wind tunnel	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Measurement Science and Technology	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1361-6501/abe2be	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15件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 9件）

1. 発表者名 伊神翼, 西村練, 永井大樹
2. 発表標題 cntTSPを用いた前進飛行するロータの非定常流れ場構造の可視化
3. 学会等名 日本航空宇宙学会 第54期 年会講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 伊神翼, 西村練, 永井大樹
2. 発表標題 低レイノルズ数回転翼に生じる前縁はく離渦のcntTSPによる可視化—アスペクト比の効果—
3. 学会等名 日本流体力学会 年会2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 西村練, 伊神翼, 永井大樹
2. 発表標題 cntTSPを用いた低レイノルズ数中回転翼に生じる前縁はく離渦の可視化
3. 学会等名 第61回飛行機シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ren Nishimura, Tsubasa Ikami, Hiroki Nagai
2. 発表標題 Visualization of Leading Edge Vortex in Low Reynolds Number Rotor by cntTSP
3. 学会等名 Twentieth International Conference on Flow Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 伊神翼, 西村練, 永井大樹
2. 発表標題 cntTSPを用いた回転翼における表面摩擦応力場の計測
3. 学会等名 第19回学際領域における分子イメージングフォーラム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ren Nishimura, Tsubasa Ikami, Hiroki Nagai
2. 発表標題 Surface Flow Measurement in Low-Rotational-Speed Rotor using cntTSP
3. 学会等名 AIAA SciTech Forum 2024 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tsubasa Ikami, Ren Nishimura, Hiroki Nagai
2. 発表標題 Visualization of Rotor Surface Flow in Hovering by cntTSP
3. 学会等名 19th International Conference on Flow Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Ikami, K. Takahashi, Y. Konishi, H. Nagai
2. 発表標題 FREQUENCY RESPONSE OF CARBON-NANOTUBE TEMPERATURE-SENSITIVE PAINT
3. 学会等名 The 13th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊神翼, 高橋幸一, 小西康郁, 永井 大樹
2. 発表標題 カーボンナノチューブ感温塗料の周波数応答
3. 学会等名 第54回流体力学講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tsubasa Ikami, Koji Fujita, Hiroki Nagai, Daisuke Yorita
2. 発表標題 Response Evaluation of cntTSP for Detection of Dynamic Boundary Layer Transition in Low-Speed Wind Tunnel
3. 学会等名 The AIAA Science and Technology Forum and Exposition 2021 (国際学会)
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	藤田 昂志 (Fujita Koji) (80774471)	金沢工業大学・工学部・講師 (11301)	

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
---------	---------