

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 17 日現在

機関番号：82723

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04933

研究課題名（和文）動的乱流格子と直動装置の併用による強乱流場の生成

研究課題名（英文）A Method for Generating Strong Turbulence via Combination of Active Turbulence Grid and Translating Wing Model

研究代表者

溝口 誠（MIZOGUCHI, Makoto）

防衛大学校（総合教育学群、人文社会科学群、応用科学群、電気情報学群及びシステム工学群）・システム工学群・准教授

研究者番号：10532781

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では乱流生成装置の一種である動的乱流格子を用いた風洞実験に、気流に対して模型を並進させる直動装置を組み込むことで、風洞単体よりも強い乱れの生成に取り組んだ。実験結果より、本実験法によって模型と主流の相対速度、模型に対する有効乱れ強さが調整可能であり、動的乱流格子単体よりも強い乱れが実現できることを明らかにした。また、同風洞試験法で得られる乱れ強さ設定自由度の高さを応用し、小型無人航空機の空力特性と乱れ強さの関係を明らかにする研究に取り組み、広い乱れ強さの範囲で気流の乱れが翼空力特性に及ぼす影響を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

無人航空機の運用には安全性向上が欠かせないが、気流の乱れは姿勢の急変につながるため大きな問題となりうる。特に小型の無人航空機を対象とした場合、想定すべき乱れ強さは広い範囲にわたる。本研究の成果によって、多様な乱れ強さの風洞実験を実現したことは、乱れ強さと翼空力特性の関係の理解に大きく貢献できる。また、本研究で提案した実験手法が有する乱れ強さ設定自由度の高さは、航空機に限らず自動車、建造物への影響や、風車による自然エネルギー利用促進など広く社会が要求する問題の解決手法創造への貢献も期待できる。

研究成果の概要（英文）：A method of wind tunnel testing is proposed for generating strong streamwise turbulence by adjusting the relative velocity between the free stream and the model translated via a linear motion mechanism. Moreover, the effect of turbulence on the aerodynamic characteristics of small unmanned air vehicles is investigated. The results show that the proposed method enables us to adjust the relative velocity and effective turbulence intensity. The range of turbulence intensity available increases. Moreover, the effect of turbulence intensity is experimentally revealed in a broad range of turbulence.

研究分野：航空宇宙工学，低レイノルズ数，小型無人機空力特性，環境じょう乱

キーワード：空力特性 乱れ強さ 風洞試験法 環境じょう乱生成 低レイノルズ数

### 1. 研究開始当初の背景

無人航空機の運用には安全性向上が欠かせないが、気流の乱れは姿勢の急変につながるため大きな問題となりうる。建物が少なく開けた地勢でも自然風には乱れが含まれている。また、都市部の建造物に誘起された気流の乱れは、郊外でも残存することが知られている。さらに、無人航空機に対する有効乱れ強さは、気流自体の乱れの他、気流と機体の相対速度にも依存する。そのため、小型無人航空機を対象とした場合、想定すべき乱れ強さは広い範囲にわたる。

小型無人機の翼特性が大型航空機のそれと異なることは以前から知られている。小型無人機が飛行する低レイノルズ数領域における翼空力特性や安定性に関しては多数の研究が行われているが、気流の乱れがおよぼす影響についての理解は進んでいない。乱れを含む気流の生成には従来型乱流格子や動的乱流格子が用いられることが多いが、生成できる乱れ強さには上限が存在する。また、乱れ強さの変更は乱流格子の交換や動的乱流格子の駆動状態変更で行われるが、その自由度はあまり高くない。

このような背景から、小型無人航空機の空力特定に対する気流乱れの影響に関する理解を進めるためには、強い乱れが生成可能で、乱れ強さの調整自由度の高い実験環境が必要であった。

### 2. 研究の目的

本研究では乱流生成装置の一種である動的乱流格子を用いた風洞実験に、気流と模型を並進させるための直動装置を組み込んだ実験法の提案と実証に取り組んだ。この風洞実験では、気流自体の乱れは動的乱流格子により生成される。一方、模型と気流の相対速度は主流流速と模型並進速度によって決定され、模型に対する有効乱れ強さは、模型と気流の相対速度に対する気流乱れの割合で決定される。そのため、動的乱流格子と模型直動装置の併用によって相対速度を可変とし、風洞単体よりも強い乱れの生成が期待できる。ただし、このような実験の実現には、並進する模型に働く空気力測定の実現と妥当性評価が必要である。本研究では上述の実験環境を整備し、実験の実現と妥当性評価に取り組んだ。

### 3. 研究の方法

本研究ではまず、動的乱流格子が組み込まれている既存風洞に、模型を気流と並進させるために必要な模型直動装置およびその駆動システムを導入し、予定していた実験環境を整備した(図1)。直動装置の移動速度が一定な試験区間を確保するため、駆動装置の調整や風洞測定室の延長は、研究の進捗状況にあわせて随時行った。そのうえで、以下の三段階に分けて研究を進めた。

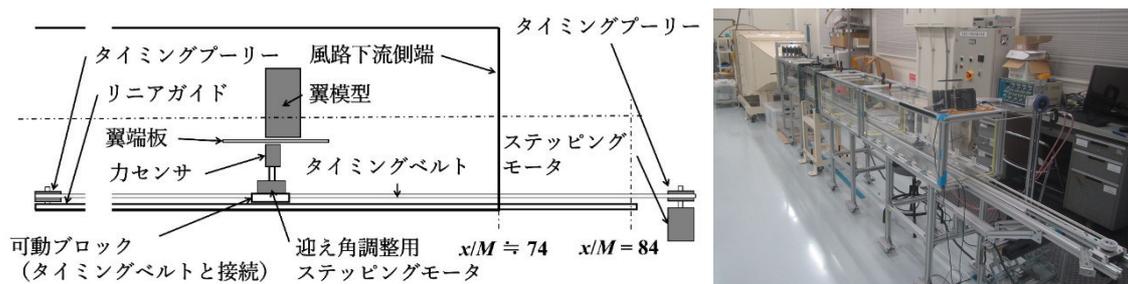


図1 直動装置の概要(左)と実験装置全体図(右)

#### (1) 直動装置の併用によって実現できる乱流特性の評価

直動装置上に熱線流速計を取り付け、気流に対して流速センサを並進させ、模型と主流の相対速度、模型に対する有効乱れ強さの変化を調べた。また、測定結果を解析的な予測結果と比較することで、研究計画立案時の予測を検証した。

#### (2) 直動装置上で気流と並進する翼模型に働く空気力測定の実現

直動装置に翼模型を取り付け、気流と並進する実験模型に働く空気力の測定を行った。その測定結果を、模型に対する有効乱れ強さやレイノルズ数が同じ条件において、模型並進を伴わない従来型の風洞試験結果と比較することで、並進模型に働く空気力測定が実現されているかどうかを確認した。

#### (3) 並進模型に対する半裁実験の実現と測定結果の妥当性評価

並進模型に翼端板を取り付けた半裁実験を実現し、様々な有効乱れ強さと翼空力特性の関係を調査した。乱れ強さが弱い場合の実験結果については、模型並進を伴わない従来型風洞試験の結果と比較して、その妥当性を評価した。さらに、風洞単体よりも強い乱れ強さにおける翼空力特性の測定結果を検討した。

#### 4. 研究成果

本研究では、模型直動装置を導入した動的乱流格子を組み込んだ風洞自体の特性評価を行いつつ、第3節で述べたそれぞれの段階について主に以下の成果を得た。

- (1) 主流平均速度を $\bar{U}_f$ 、直動装置の目標移動速度を $U_{m,d}$ とし、有効乱れ強さ $TI_{eff}$ との関係を整理して図2に示す。有効乱れ強さは直動装置上に設置した熱線流速計で測定した。動的乱流格子非稼働時(図中では passive と表記)、直動装置を併用することで乱れ強さを1.5%~3%の範囲で調整できた。また、動的乱流格子駆動時(図中では hybrid および active と表記)には、図に示した結果では乱れ強さ8%までの範囲で、自由度の高い乱れ強さが設定できることが分かる。直動装置を併用しない場合の乱れ強さは動的乱流格子と測定部との距離で変更できるため、図2に示されていない範囲の乱れ強さも生成可能である。この例のような実験結果から、本研究で提案した手法によって動的乱流格子単体よりも強い乱れの生成と、幅広い範囲における設定自由度の高い乱れの生成が可能であることを確認した。
- (2) 直動装置に平板翼模型を取り付け、気流と並進する模型に働く空気力の測定を行った。測定結果の例を図3に示す。模型加減速時には気流と模型の相対流速が変化するため空気力も変化するが、模型直動速度が一定になると、揚力および抵抗も一定となることがわかる。また、風洞単体の特性評価から設定した測定領域(図中では $x/M = 55 \sim 70$ )では、一定な空気力が測定されていることが分かる。測定された空気力を基に評価した空力係数は、直動を伴わない風洞試験結果と一致し、並進模型に対する測定結果の妥当性が確認された。
- (3) 模型翼端に翼端板を設置し、並進模型についての半載実験環境を構築し(図4)、空力係数と有効乱れ強さの関係を評価した。図5に例として幾何学的アスペクト比2、翼厚比5%の矩形平板翼について、迎え角13 degの揚力係数と乱れ強さの関係を示す。図5に示した例では、乱れ強さ6%程度までは揚力係数が乱れ強さに対して線形的に増加するが、さらに大きな乱れ強さでは揚力係数が乱れ強さに依存しなくなった。このような乱れ強さが翼空力特性に及ぼす影響を、本研究で提案した風洞試験法によって明らかにすることができた。

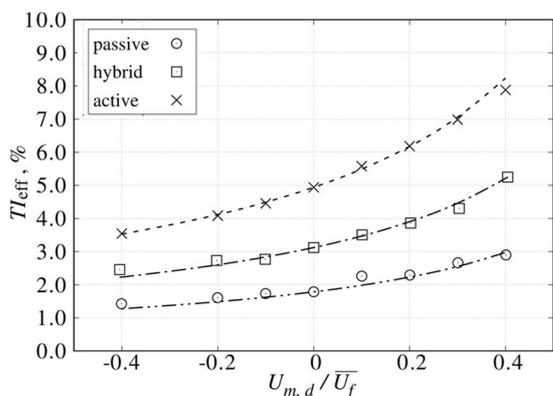


図2 乱れ強さと直動装置駆動速度

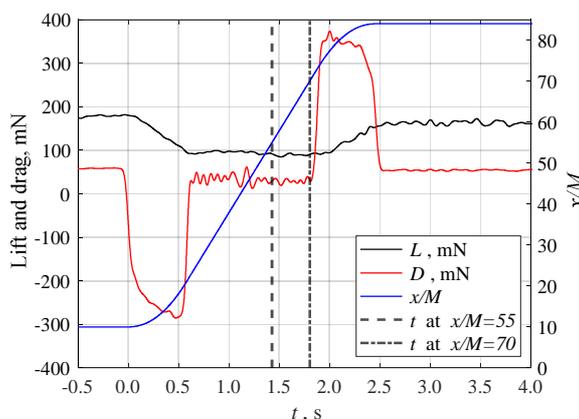


図3 直動する平板翼に働く空気力  
(迎え角 12 deg)

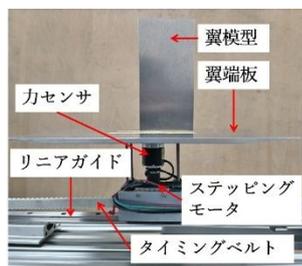


図4 半載実験用平板翼模型

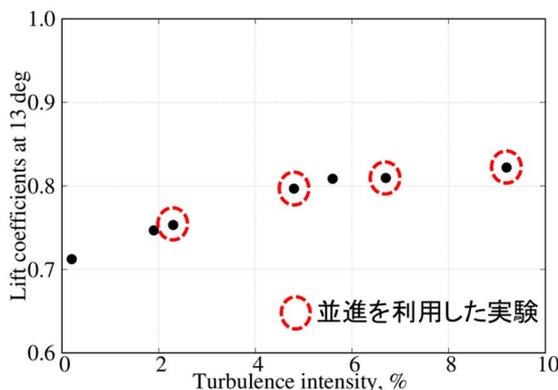


図5 乱れ強さと揚力係数の関係  
(迎え角 13 deg)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 溝口 誠, 井藤 創	4. 巻 22
2. 論文標題 動的乱流格子が生成する気流に駆動パラメータが及ぼす影響	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 航空宇宙技術	6. 最初と最後の頁 20 ~ 27
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2322/astj.22.20	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 溝口 誠, 加瀬 正亮, 井藤 創	4. 巻 22
2. 論文標題 低速風洞における主流方向速度変動の生成手法	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 航空宇宙技術	6. 最初と最後の頁 36 ~ 43
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2322/astj.22.36	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9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 溝口 誠, 加瀬 正亮, 井藤 創
2. 発表標題 並進モデルを利用した主流速度変動が翼空力特性に及ぼす影響の観察
3. 学会等名 第55回流体力学講演会 / 第41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 2023年

1. 発表者名 溝口 誠, 加瀬 正亮, 井藤 創
2. 発表標題 風洞内で気流と並進する実験モデルを利用した環境じょう乱の生成
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 加瀬 正堯, 溝口 誠, 井藤 創
2. 発表標題 低レイノルズ数流れにおける高アスペクト比翼の空力特性に乱れが及ぼす影響
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 Masataka Kase, Hoang A. Nguyen, Makoto Mizoguchi, Hajime Itoh
2. 発表標題 Influence of Turbulence Intensity on Aerodynamic Characteristics of Pitching NACA0012 Wing at Low Reynolds Numbers
3. 学会等名 AIAA SciTech 2022 Forum (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 加瀬 正堯, グエン ホアン アン, 藤田 一熙, 溝口 誠, 井藤 創
2. 発表標題 水槽を用いた流れ場の可視化によるNACA0012翼型空力特性に関する考察
3. 学会等名 第53回流体力学講演会 / 第39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 2021年

1. 発表者名 溝口 誠, 藤田 一熙, 加瀬 正堯, 井藤 創
2. 発表標題 動的乱流格子を用いた低レイノルズ数領域における二次元翼風洞実験
3. 学会等名 第53回流体力学講演会 / 第39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 2021年

1. 発表者名 溝口 誠, グエン ホアン アン, 井藤 創
2. 発表標題 低レイノルズ数領域においてピッチングする二次元翼空力特性に翼断面形が及ぼす影響
3. 学会等名 日本機械学会2021年度年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masataka Kase, Makoto Mizoguchi, Hajime Itoh
2. 発表標題 Influence of Turbulence Intensity on Flow Field around NACA0012 Wing at Reynolds Number of 20000
3. 学会等名 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology (APISAT 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤田 一熙, 溝口 誠, 井藤 創
2. 発表標題 低レイノルズ数流れにおける強い乱れがNACA0012翼型の空力特性におよぼす影響
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

〔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
---------------------------	-----------------------	----

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