

令和 2 年 7 月 6 日現在

機関番号：10103

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06940

研究課題名(和文) 航空機姿勢制御における流体力学的推力偏向技術の性能評価システムの開発と応用

研究課題名(英文) Development and Application of Fluidic Thrust Vectoring Technique for Aircraft Attitude Control

研究代表者

畠中 和明 (Hatanaka, Kazuaki)

室蘭工業大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：30749320

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：流体力学的推力偏向(Fluidic Thrust Vectoring: FTV)技術をモデル航空機に組み込み、有効な姿勢制御機構として従来の姿勢制御手法と同等以上に機能することを示すことを目的として研究を実施した。再現性を確保した飛行試験によってFTVシステムの定量的な性能評価を行うことを可能とするために、既定の周回コースを自動的に飛行するシステム及び各種飛行データを収集・保存するロギングシステムを構築した。FTVノズルの開発過程に飛行試験による性能評価を組み込むことにより、風洞試験や数値解析では得られない課題の抽出が可能となり、FTVシステムの開発サイクルを加速することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の特色は、学術的には圧縮性ノズル流れの制御に関する流体力学と制御工学の融合およびその応用として位置づけられる。ノズル流れのFTVによる偏向特性について、偏向制御用二次流(入力)と偏向角(出力)の関係は、極めて非線形な流体现象に依存している。本研究は、この複雑なノズル流れに対して高度な制御を行うことによって、FTVを航空機の姿勢制御という実用レベルの応用へ引き上げるという点で、非常に独創的なものである。本研究によってFTV機構の開発サイクルが強化された結果、より高性能なFTV機構が短期間で実現されると予想され、FTV機構の実用化に向けて、本研究の工学的・社会的意義は大きい。

研究成果の概要(英文)：This study was conducted to show that the Fluidic Thrust Vectoring (FTV) technique is an effective approach for aircraft attitude and is more effective than the conventional attitude control method. A system that automatically flies around a predetermined course and a logging system that collects and stores various types of flight data was developed to enabling quantitative performance evaluation of FTV system through flight tests. Incorporating performance evaluation through flight tests into the development process of FTV nozzles made it possible to identify problems that cannot be solved by wind tunnel tests or numerical analysis, and successfully accelerated the development cycle of the FTV system.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：航空機姿勢制御 推力偏向 流体力学

1. 研究開始当初の背景

通常、航空機の姿勢制御はエルロン・ラダー・エレベータ等の各種舵面を操作して機体周囲の気流・圧力に変化を与えることによって行われるが、近年、推力ジェットの方法を偏向することによって機体の姿勢を制御する推力方向制御 (Thrust vectoring) 技術の研究・開発が世界各国で行われている。排気部に設けた可動式ノズルやフラップ等により機械的にエンジン排気の方法を変える MTV (Mechanical Thrust Vectoring) 方式が、昇降舵や方向舵と併用する形で既に軍用機を中心として実用化されている。推力方向制御は、旋回や離着陸など、飛行性能の大幅な向上が期待される技術であるとともに、尾翼機能を代替することによって空力抵抗削減に寄与し、航空機燃料の消費削減による環境・エネルギー問題の改善にも大きく寄与することが期待できる重要な技術である。一方で、MTV はジェットを偏向させるための複雑な機械的機構を必要とし、重量増加による燃費への影響、製造・保守経費の増大などの問題が懸念される。

本研究で開発を目指す FTV は、推進器の幾何学的形状は変化させず、推進器の主流に対して制御用の 2 次流を様々に作用させることで流体力学的に排気方向を変化させるものである。FTV は MTV のように複雑な機械的機構が不要で、重量や保守経費の削減と信頼性の向上が図れるため、将来の推進力偏向機構として研究開発が活発に行われているが、まだ本格的な実用例は報告されていない。

研究代表者のグループは、2009~2011 年度に基盤研究 (C) 課題番号: 21560162 「空気力学に基づく航空機の次世代型推力方向制御に関する基礎及び実用研究」を実施し、風洞による実験と数値解析によって超音速領域で利用可能な斜め衝撃波による超音速 FTV の性能について、各種制御パラメータとの関係を研究した。FTV による推力偏向性能は、推進器ノズル形状、二次噴流吹き出し機構 (位置、形状、角度) 及びノズル圧力比 (NPR) や二次噴流圧力比 (SPR)、さらには運転条件及び飛行環境 (高度、速度) 等々、実に多くの要因に依存して複雑であるため、これらすべてのパラメータを事前に最適化したうえで、これを実機に応用して実用化を図ることは極めて困難である。そこで、先ず実用可能と思われる FTV ノズルの基本構造を選定したうえで、この基本ノズルに特化して最適化してゆくことでも十分な FTV 性能が得られることを実証したいと考え、科研費研究、「流体力学的推力方向制御による航空機の姿勢制御方法の開発と

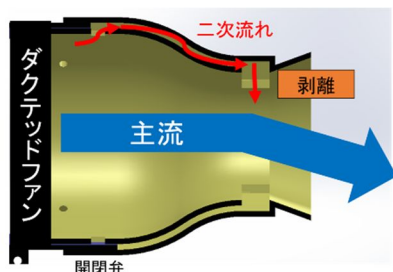


図 1. FTV ノズル動作原理

小型模型による飛行試験」(2014~2016 年度基盤研究 (C) 課題番号: 20420807) を実施した。この研究では模型による飛行試験や、将来的に商用機への応用を目指すことを考慮して、亜音速領域での運用を前提にして数値解析による試行研究の結果、図 1 に概略を示す基本ノズル機構を採用することにした。この FTV ノズルは主流から分岐させた時流を再びスロート部で主流に加えることで推力偏向を行うもので、数値解析及び実験により 15 度の主流偏向角を得ることを確かめた。更にこの FTV ノズルを市販の小型模型飛行機に取り付けて飛行実験を行い、FTV 機構によりピッチ角を制御して機体を上昇・下降させること

ができることを示した。

以上の研究によって、当初選定したノズルの基本構造で、実用的な姿勢制御を実現可能な FTV 性能が確認された。しかし、実機での飛行実証試験から、従来の舵面操作による姿勢制御を置き換えるまでの性能には達していなかったため、以後はそれまでの研究を発展させ、より性能の高い FTV 機構の開発を進める必要があった。開発を進めるうえで重要となるのは、飛行試験で得られたデータを設計へフィードバックし、改善を施したうえで再度飛行試験によって検証する開発サイクルを確立することであった。そのためには、飛行試験において再現性・信頼性の高いデータを収集する必要があった。しかしそれまでのマニュアル操縦による試験では、飛行条件を一定にそろえることが困難であり、収集される飛行データも十分ではないことから、飛行試験の結果を次の開発ステップへ十分に活用できていないという問題を抱えていた。開発サイクルの研究レベルでの要素 (数値解析や風洞試験による評価) はこれまでの研究でほぼ確立されているため、飛行試験をこのサイクルへスムーズに組み込むことが重要となる。研究代表者は、最新の MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術を用いて一定の飛行条件を再現性良く実現できる自動飛行システム、及び詳細な飛行データを収集するためのロギングシステムを構築することによって、FTV 機構開発サイクルを加速することが可能になると考えた。

2. 研究の目的

従来より研究開発を継続している流体力学的推力偏向 (FTV) 技術をモデル航空機に組み込み、有効な姿勢制御機構として従来の姿勢制御手法と同等以上に機能することを示すことを目的とする。そのために、同一の飛行条件下で試験を行うための自律飛行システム、また飛行データを詳細に収集するためのロギングシステムを構築する。これにより、従前の研究では困難であった再現性の高いデータ収集を実現し、正確な FTV の性能評価を可能とする。実機で得られたデータを FTV ノズルの設計へフィードバックし、数値シミュレーションによる性能予測、風洞試験による検証と組み合わせ、より高性能な FTV 機構を実現するループを構成する。このループを上記目的達成のために用い、実用的な FTV 機構の開発を促進する。

### 3. 研究の方法

#### 3-1. 自動飛行システム及び飛行データロギングシステムの構築と飛行試験

飛行試験により FTV 性能を評価する際、自動飛行により所定のコースを周回飛行するシステムを機体に組み込み、飛行条件を所定の誤差範囲内に収められるようにした。加えて、次の開発ステップへ向けて詳細な飛行データを取得するためのロギングシステムも準備した。試験機体はバッテリー駆動のダクトファン方式を採用したが、本方式は飛行可能時間が 5 分程度と短い。試験時間を最大限確保するためにも、自動飛行は離着陸を含めた形で構築を行った。これらの要求をすべて満たすシステムを本研究期間内にゼロから開発することは困難であるため、制御用ソフトウェアには、オープンソースで開発が進められている自律飛行コードをベースとして用い、FTV に最適化した改造を行って使用することとした。

試験機に搭載するハードウェアには、Linux ベースのリアルタイム OS が動作するカードサイズコンピュータに、ジャイロ・加速度計・気圧高度計・GPS が一体となったカードサイズ基盤を接続して使用した。更に対気速度を測定するためのピトー管、地面までの正確な距離を測定するためのレーザー式距離計を組み合わせ使用した。GPS には、誤差 10cm オーダーの高精度即位が可能な RTK-GPS 方式を採用する。飛行データの主メモリは、テレメトリーによる伝送では容量が限られるため、気体に取り付けられた SD カードへ最大 50Hz で任意のデータを保存することとした。以上のハード・ソフトを組み合わせることにより、再現性が高く、高精度なデータを取得可能なシステムを構築した。本システムは、シミュレータを用いてハードウェアも含めた統合的な動作確認を行ったうえで試験機に搭載し、自動飛行システムの全体動作試験を実施した。

#### 3-2. FTV ノズルの最適化及び飛行試験

自動飛行システムの開発と並行して、これまでの研究で得られたデータを基にした改良型 FTV ノズルを設計・製作した。先行研究で開発した FTV ノズルは、上下に最大 15 度の偏向角を生じさせることができるが、ノズル形状の最適化、及び二次流路形状の最適化を行うことにより、さらに大きな偏向角を得られる改良を行う。改良型ノズルについて、数値解析及び風洞試験による性能評価を行い、従来の飛行システムに搭載して飛行試験を実施した。

### 4. 研究成果

#### 4-1. 自動飛行システム及び飛行データロギングシステムの構築とプロペラ機による飛行試験

プロペラ機を使用して自動飛行システム及び飛行データロギングシステムの開発を進め、高い再現性で周回飛行を実現するシステムと、詳細な飛行データをロギングするシステムの構築に成功した。これにより、舵面で行う姿勢制御と FTV 機構を使用した姿勢制御性能の比較検証を定量的に行うことができる試験環境を実現することが可能となった。また、FTV ノズルの改良による性能改善も飛行試験を通して確認すること、および FTV 機構実用化へ向けたより実際的な評価を行うことも可能となった。更に、フライトコントローラの機能である自動離着陸を含めた完全自律飛行にも成功しており、バッテリーの制約による 3~4 分の飛行時間を効率的に試験時間として使うことができるようになった。

#### 4-2. FTV ノズルの最適化

先行して開発していた FTV ノズルを改良し、主流偏向角の制御性を改善することに成功した。

(1) 制御用の二次流取り込み口の位置を数値解析で検討した結果、従来の位置よりも後流側に配置した方が効率よく二次流を取り込めるという結果を得、実験においてもより大きな主流偏向角が得られることを確認した。

(2) 二次流取り込み口のバルブ開度に対する偏向角の値に極端な非線形性が存在していた。具体的には、バルブを開けた直後の偏向角変化率が大きく、バルブ開度が大きくなるにしたがって変化率が小さくなり、バルブ開度 80% 以降は偏向角が飽和状態となっていた。制御性を考慮すると、バルブ開度と偏向角変化量は直線関係になり、バルブ操作範囲の全域で偏向角制御が可能である方が有利であることから、二次流取り込み口の形状について検討を行った。バルブ開度に対する二次流取り込み口の面積が非線形に変化するよう改良を加えたところ、偏向角の変化量がほぼバルブ操作量に比例するまでに改善した。

(3) 先行して開発していた FTV ノズルは、ノズルの絞りが大きく、推力に影響が出ることが判った。ノズルの絞り比は、大きくすると大きな偏向角が得られるが推力が落ち、小さくすると推力は保たれるが偏向角が小さくなるというトレードオフの関係にある。絞り比の異なる複数のノズルを試作し、飛行に十分な推力を確保しつつ姿勢制御に必要な偏向角を確保可能な絞り比を特定した。

#### 4-3. 飛行試験

4-1 で構築した自律飛行システムをダクトファンタイプの模型飛行機に搭載した飛行試験を実施し、再現性の高い周回飛行を行うことに成功した。次に FTV ノズルを搭載しての飛行を試みたところ、上述の推力不足が明らかとなり、飛行に十分な推力を得るための FTV ノズル改良を実施し、改良後の FTV ノズルを搭載した飛行試験を実施した。自動飛行中にエレベータに

よる姿勢制御から FTV による姿勢制御に切り替え，安定した水平飛行が行えることを確認した。この結果は，FTV ノズル開発サイクルの中に飛行試験を組み込み，早期にノズルの改善点を見つけ改良が実現したものであり，本研究の当初の目的であった「飛行試験を通した FTV ノズル開発サイクルの加速」が機能した最初の例となった。

#### 4 - 4 . 数値解析による検討

数値解析によって FTV ノズルの性能評価を行うため，また FTV ノズルの最適な形状を数値解析によって効率的に探索するために，シミュレーションによる現象の再現に取り組む中で，シミュレーションにおける主流の偏向角が実験値よりも小さくなるという課題を抱えていたが，ダクトファンによって引き起こされる旋回流を模擬することによって推力偏向角が増加することを見出した。次に旋回の高さをパラメータとして計算を実施し，旋回強度が増すと偏向角も増加することが確認された。また，シミュレーション結果を詳細に解析し，旋回によって引き起こされる遠心力によって主流が二次流路へ効率的に導入され偏向角が増加する原因になっていることを明らかにした。

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 廣田 光智, 畠中 和明, 齋藤 務, Srisha M. V. RAO	4. 巻 66
2. 論文標題 亜音速FTVノズルの特性とその飛行実証	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本航空宇宙学会論文集	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2322/jjsass.66.1	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 該当する

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件／うち国際学会 0件）

1. 発表者名 三浦 航
2. 発表標題 亜音速FTVの偏向角に対する旋回流の効果の数値解析的研究
3. 学会等名 第56回飛行機シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 村井 礁, 三浦 航, バトルオフ チュルンドルジ, 畠中 和明, 廣田 光智, 齋藤 務
2. 発表標題 亜音速FTVノズルにおけるノズル絞り比が推力と偏向角に及ぼす影響
3. 学会等名 日本機械学会第96期流体工学部門講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 村上 正人
2. 発表標題 亜音速FTVノズルにおける二次流路形状が偏向角に及ぼす影響
3. 学会等名 第55回飛行機シンポジウム
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

流体的推力方向制御 (Fluidic Thrust Vectoring : FTV) に関する研究  
<https://pe1.mech.muroran-it.ac.jp/research/compressible/ftv.html>  
第56回飛行機シンポジウムで研究成果の発表を行いました  
<https://pe1.mech.muroran-it.ac.jp/research/activities/as2018.html>  
日本機械学会第96期流体工学部門講演会にて研究成果の発表を行いました  
<https://pe1.mech.muroran-it.ac.jp/research/activities/fedconf18.html>  
第55回飛行機シンポジウムで研究成果の発表を行いました  
<https://pe1.mech.muroran-it.ac.jp/research/activities/as2017.html>  
流体的推力方向制御 (Fluidic Thrust Vectoring : FTV)  
<https://pe1.mech.muroran-it.ac.jp>

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	廣田 光智  (Hirota Mitsutomo)  (50333860)	室蘭工業大学・大学院工学研究科・准教授    (10103)	