

令和元年6月21日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K06612

研究課題名(和文) 飛行機の高精度な静的空力特性推定を可能にする飛行試験データ処理手法の研究

研究課題名(英文) Research on Flight Test Data Analysis Methods for Precise Estimation of Static Aerodynamic Characteristics of Airplane

研究代表者

上野 真 (Ueno, Makoto)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・航空技術部門・主任研究開発員

研究者番号：20392821

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)：本研究は飛行試験から飛行機の静的空力特性を精度良く取得するために、課題1：「静的とみなせるデータの抽出」と課題2：「静的空力特性データのばらつき抑制」の二つの研究課題の実施を目指すものである。

課題1についてはウェーブレット変換を用いることで定常飛行区間を自動的に抽出することを可能とし、課題2については多峰性をクラスタ解析を用いることで単峰性データに分解することで解決した。これらによって、自動的に静的空力特性を推定に適した時間領域を抽出して、ばらつきの少ない空力特性推定を可能とするものである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

日本においても民間機の開発が進んでいる現在、飛行試験で得られた空力特性を地上試験と比較して差の原因を設計に反映できるようにすることは急務である。また、精度の良い空力特性が取得できれば運航会社の運航計画改善も期待できる。本研究の成果は、これまで非常に大きなばらつきを伴うことが多く、地上試験との比較が困難であった飛行試験から静的空力特性を少ないばらつきで推定することを可能とするものである。

研究成果の概要(英文)： This research aims to resolve two subjects for estimating aerodynamic characteristics of airplane. The first is to extract quasi-static period from an entire flight. The second is to suppress scattering of data from aerodynamic data acquired in flight tests.

For the first subject, static flight periods are successfully extracted employing the wavelet analysis. For the second subject, multimodal data are decomposed into monophasic data by cluster analysis.

By these results above, automatic detection of quasi-static flight test data period and aerodynamic characteristics estimation with less scattered data is achieved.

研究分野：空気力学

キーワード：飛行試験 ウェーブレット解析 バイズ推定 クラスタ解析

### 1. 研究開始当初の背景

飛行機の空力設計は主に静的空気を表す空力係数を使って行われており、製品として設計の妥当性を検証するためには実機で取得した静的空力係数のフィードバックが非常に重要であり、実現できれば飛行機設計技術をより確かなものとする事が可能になる。さらに、運航の面でもより低燃費の飛行計画の立案が可能になる。しかし、飛行中の飛行機の空力特性を地上試験（風洞試験・数値シミュレーション）と精度良く比較しようとする公開された試みは少ない（例えば、文献[1, 2]）。また、その精度も地上試験との差を有意とするには不足している。よって、従来の飛行試験は操舵入力に対する応答を見るシステム同定分野での動特性試験や、上昇率や旋回半径といった、直接的な空力係数とは違う観点の総合的性能の確認を主としてきた[3]。

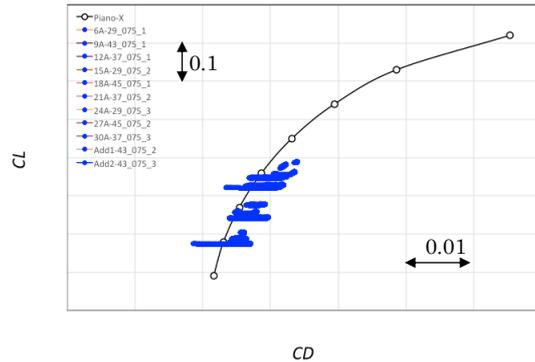


図1：飛行試験で取得された揚力係数と抵抗係数

飛行試験データから静的空力特性を取得する時に最初に直面する課題が二つある。一つはいかにして効率的に広範囲の「静的とみなせる」データを取得するかという点であり、もう一つは切り出した静的データからいかに精度の良いデータを抽出するかという点である。これらを解決しない限り、地上試験との比較を議論する段階に至ることができないため、本研究では静的空力特性の飛行試験・地上試験比較実現に至る初期段階として、これらの課題を解決することを目指した。

第一の課題は、飛行機の姿勢・速度・レイノルズ数を任意に設定することが困難であることによる。すなわち、重量（主に燃料重量によって規定される）と飛行高度、飛行速度（マッハ数）を決定すると姿勢やレイノルズ数が一意に決められてしまい、地上試験のように同一の主流条件で迎角を変えようとするれば、一定高度で飛行しながら燃料を消費して重量が変化するので待たなければならないため、極めて非効率な飛行が要求される点を解決しなければならない。

第二の課題は、静的とみなせる区間で静的空力係数を求めても、非常に大きなばらつきが観測されることである。図1に実際に飛行試験で取得された揚力係数  $CL$  と抵抗係数  $CD$ （マーカー）を性能推算プログラム（白抜きマーカー+実線）と比較したグラフを示す。このケースでは、静的な空気力計測を実現するために、一定の飛行条件を保つように意図した飛行を行ってデータ取得を行ったが、特に抵抗係数が過大なばらつき（最大で  $\Delta CD = 0.01$  程度）を示している。

第一の課題は、飛行機の姿勢・速度・レイノルズ数を任意に設定することが困難であることによる。すなわち、重量（主に燃料重量によって規定される）と飛行高度、飛行速度（マッハ数）を決定すると姿勢やレイノルズ数が一意に決められてしまい、地上試験のように同一の主流条件で迎角を変えようとするれば、一定高度で飛行しながら燃料を消費して重量が変化するので待たなければならないため、極めて非効率な飛行が要求される点を解決しなければならない。

### [参考文献]

- [1] Craig, R.E. and Reich, R. J., AIAA 81-2423, 1981.
- [2] Webb, T.S., Kent, D.R., and Webb, J. B., AGARD CP-242, 1978.
- [3] Kimberlin, R. D., AIAA Education Series, AIAA, 2003.

### 2. 研究の目的

日本においても民間機の開発が進んでいる現在、飛行試験で得られた空力特性を地上試験と比較して差の原因を設計に反映できるようにすることは急務である。また、精度の良い空力特性が取得できれば運航会社の運航計画改善も期待できる。しかし、飛行機の飛行試験は、空力に関しては上昇率、旋回性能や応答といった性能の比較が主で、静的空力特性（抵抗、揚力など）の形での地上試験（風洞試験・数値シミュレーション）との比較はあまり行われてこなかった。これは飛行試験で取得される空力特性の精度があまりにも悪かったことによる。精度が悪化する原因はまだ明らかになっていない部分も多いため、本研究では、まず「静的データの自動判別」と各種の誤差要因を弁別するために必要な「データのばらつきの抑制」を実現することを目的とする。

### 3. 研究の方法

本研究では、静的な空力特性を地上試験に匹敵するばらつきで大域的に取得するため、課題①：飛行試験の時系列データから静的とみなせる区間を自動抽出し、課題②：抽出された静的空力特性データのばらつきの抑制、を行った。

課題①に関しては、研究分担者の一人が、すでにウェーブレットによるフィルターバンクを用いた定常飛行時間帯の抽出手法を考案しており、空力特性取得を目的としない通常の飛行試験データから、静的データとみなせる時間帯がかなり多数、抽出できることが判明している。これらのデータは長い飛行時間の中に分布しており、自動的に重量すなわち迎角を変更したデータを収集することが可能になる。

課題②に関してはクラスタ解析を用いて混合分布を正規分布のように一つの峰を持った分布の結合へとクラス分けすることで、取得データ全体のばらつきを抑制することとした。

### 3-1. データの取得

研究に使用するデータを取得するには所属機関の実験用飛行機(図2)を使用し、遷音速巡航形態を対象とする。使用した実験用航空機は米国セスナ社の中型ビジネスジェット機であるセスナ式 680型(商品名サイテーション・ソプリン)を実験用に改造したものであり、飛行可能範囲は、高度47,000 ft(約14 km)、図2の写真に示されるように機首にエアデータを取得するエアデータセンサーを搭載するためのノーズブームを装備している。また、表1に示すような計測項目の時系列データの取得が可能であり、ネットワークベースの飛行データ計測システムにより、舵角センサ等のアナログ信号、母機アビオニクス等のデータ、JAXAが開発したGPS/INS複合航法装置であるMSAS-GAIAのデータ等を、ネットワークを介して記録している[5]。

飛行試験はいずれも図3のようにマッハ数を指定しつつ、高度を変えながら飛行することでデータ取得するパターンを主として行なった[5]。このような飛行をすることでマッハ数を変えると圧縮性の影響を変化させることができ、高度を変えると迎角とレイノルズ数を変更することになり、時間の経過で重量が変化することで迎角が変化することとなる。それぞれの指定条件でスラストレバーをなるべく触らずに2分間マッハ数と高度を維持しての静的飛行区間を設けてデータを取得した。

取得したデータは、GPS/INS以外の計測系が20Hzサンプリングであるのに対し、GPS/INSは50Hzサンプリングでデータを取得しているので、20Hzでリサンプリングしてマージした。また、加速度のみノイズの影響を抑えるためにリサンプリング前に11点移動平均操作を行った[8]。

本研究では縦の空力係数のみに注目している。特に積極的に操舵を行わなければ風見安定があること、人為的な制御にはスラストレバーしか用いておらず、高度保持モードの自動操縦で飛んでいるため、少なくとも人為的には積極的な操舵は行わないことから、動的な効果は無視し、純静的なデータ処理が可能とした。さらに、風の上下方向成分は無視できるとする。このような場合、縦の空力係数の算出には静的な力の釣り合いの式を用いた[5, 8]。

### 3-2. 静的区間の抽出

課題①については、飛行中に取得したデータ全体を対象として、Haarウェーブレットを使用したフィルターバンクを適用した上で多重解像度解析を行うことで定常飛行時間帯の抽出を行っていたこれまでの研究に加えて、新しく”phase indexer”と”correlation measure”の2つの機能を導入した[6]。Phase indexerは事前に規定したルールベースの判定器を導入することで、定常飛行として抽出された区域の中から定常水平飛行のみならず、上昇・下降、直線飛行・旋回といった飛行中のフェーズを自動的に区分できるようにする機能であり、Correlation measureは変化が生じている時に、どのデータが変化に対して寄与が大きいかを2つのパラメータの関与の強さで判定する機能である。

Phase indexerは定常飛行として抽出された区間内における勾配等にルールを適用することで定常飛行の種類を判定するものである。Correlation measureの詳細は文献[6]に譲るが、長い周期と短い周期の信号強度の差の相関を取ることで2つのパラメータの関与の強さを判定す



図2: JAXA 実験用航空機「飛翔」

表1: 「飛翔」の主な計測データ

分類	種別	項目
操作角	アナログ	コラム, ホイール, ラダーペダル, スラストレバー
舵角	アナログ	エルロン, エレベータ, ラダー, 水平安定板, エルロンタブ, ラダータブ, フラップ, スポイラ
MSAS-GAIA	RS422	位置, 速度, 姿勢, 加速度, 角速度
母機アビオニクス	ARINC429	FMS(1/2), FADEC(LH/RH), VOR, ILS, DME, 電波高度計, ADC(対気速度, 気圧高度等), AHRS(姿勢, 方位, 加速度)

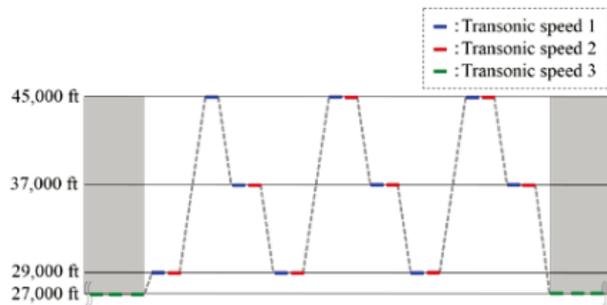


図3: 飛行試験経路の例

るものである。

### 3-3. ばらつきの抑制

課題②については、まず、ばらつきに関連して静的空力特性のセンサー由来の不確かさ（系統不確かさ）について不確かさ解析を実施した[4]。ばらつきはデータ取得中の偶然誤差に由来するものであり、系統不確かさとは異なるものであるが、最終的なデータの不確かさは系統不確かさとの合成で求まることから、系統不確かさも重要である。ここでは、空力係数を算出するために使用した各種データの取得に使用したセンサー類の系統不確かさを不確かさの伝播則に従って積み上げることで、系統不確かさを推定した。また、各入力量の不確かさの寄与度を可視化するために、合成不確かさに対する各入力量の不確かさの比の二乗を不確かさパーセント寄与度として算出した。

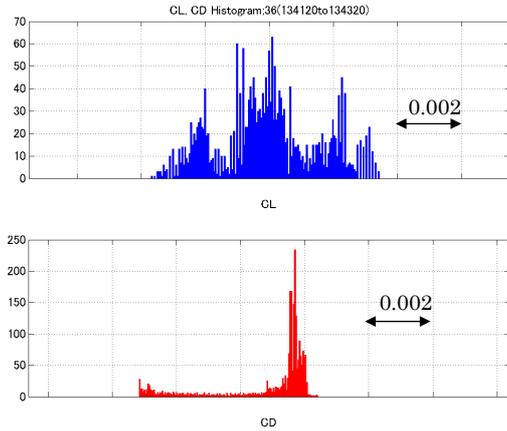


図4：空力係数のヒストグラム（上：CL，下：CD）

飛行試験で得られたばらつきの抑制については、クラスタ解析を用いたアプローチを実施した。定常飛行を意図して自動操縦の高度保持モードでマッハ数を固定するべく推力を調整した上で空力係数を取得した場合の空力係数のヒストグラムを図4に示すが、飛行試験のデータは多峰性を持っていることが多い。そこで、クラスタ解析を実施して多峰性のデータを単峰のデータに分解することで、ばらつきを抑制することとした。現在論文誌での査読中であるため、手法の詳細は現時点では割愛する。

### 3-4. 大域的なモデル化

課題①と課題②の成果を包含する空力特性の大域的なモデル化を最終的に行うにあたって、カーネル法によるノンパラメトリックなモデル化[8]とパラメトリックなモデル化[9]を試みた。ノンパラメトリックなモデル化では空力特性をマッハ数（圧縮性）、レイノルズ数（粘性）、迎角（対気姿勢角）の関数と考え（風見安定を考慮して横滑り角は無視）、ガウス過程回帰を適用することでモデル化した。また、パラメトリックなモデル化では、以下の式で圧縮性、粘性、対気姿勢の影響を考慮して抵抗係数  $C_D$  をモデル化した。式中の  $Re$  がレイノルズ数、 $M$  がマッハ数である。対気姿勢は揚力係数  $C_L$  が迎角と線形な関係を持つことから、揚力係数を考慮することでモデルに組み込まれている。モデルパラメータの決定にはMCMC (Markov chain Monte Carlo) を用いた。

$$C_D \approx C_{D0} + C_{DRe} \log_{10} Re + C_{Dc} \left( \frac{1}{\sqrt{1-M^2}} - 1 \right) + C_{Di} C_L^2$$

## 4. 研究成果

### 4-1. 静的区間の抽出

文献[6]では、水平定常飛行、上昇・下降など、飛行中にいくつかの条件が一定に維持される飛行を抽出することを可能とした。図5にその例を示す。図中それぞれのグラフに各種データの時系列変化を紫色で示すが、各データにおいて定常区間を薄い緑のマスクが、薄い赤が増加区間、薄い青が減少区間を示し、概ね時系列データの変化を自動的に抽出できていることが分かる。

本研究では、静的空力特性を対象としているため、対気姿勢が変化している状態、すなわち水平から上昇・下降、水平から旋回、加減速など、飛行状態が変化する区間は扱わない。本成果は水平定常飛行、定常上昇・下降飛行といった静的空力特性を説明しうる飛行状態を自動的に抽出するものであり、空力特性取得を目的としないデータからも定常飛行区間を抽出することに成功していることに加えて、その飛行区間がどのような飛行状態を表すかのラベル付けも自動で行うことができた。

### 4-2. 系統的な不確かさ

不確かさの一例として、設定高度 43,000 ft、設定マッハ数 0.65 での不確かさを計算したところ、相対不確かさは 0.071 となった。これは風洞試験の不確かさの 2.7 倍に相当する。また、同時に不確かさパーセント寄与度を計算したところ、迎角  $\alpha$  (約 46%)、 $x$  軸方向加速度  $a_x$  (約 36%)、次いで推力  $T$  (約 18%) であることが確認された。すなわち、これらの不確かさを改善することで、使用したデータ源の系統的な不確かさに起因する空力係数の不確かさを改善できることが分かった[4]。

#### 4-3. ばらつきの低減

クラスタ解析を実施することで、抵抗係数にして 0.0025~0.0040 あった抵抗係数のばらつきを 0.0015~0.0020 まで低減する事ができた。詳細については本報告書作成時点で論文誌に投稿し、査読中である。

#### 4-4. 大域的なモデル化

ガウス過程近似を用いたモデル化を行った結果の一例を図 6 に示す[8]。このグラフで横軸は迎角を表す。赤いマーカーがデータ、青い線がモデル、黒い破線がモデルの 95%信頼区間を示す。データ全体に対して、モデルの予測値とデータの差全体の分布は 95%信頼区間に含まれるようである。信頼区間の幅は  $\pm 25$  drag counts ほどであり、当初のばらつきからすると要求値の 2.5 倍程度まで縮小することができた。ただし、あるマッハ数でみた時に誤差の分布が傾向を持ってしまふような状況は見られた。すなわち、大域的には誤差の分布がガウス分布になるとしても、局所的には誤差の分布が必ずしもそうはならない。

パラメトリックなモデル化[9]では、サンプルの分布が単峰性を持つ結果を示し、ガウス過程回帰のような偏り無しにモデル化可能であることが分かった。しかし、例えば CD0 のサンプルの分布幅は 0.02 を越えるものであり、信頼度としては不十分な結果となった。

### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

2016年度

[4] 西城 大, 保江 かな子, 上野 真, 成岡 優, 富田 博史, 中北 和之, JAXA 実験用航空機「飛翔」飛行試験で取得された実機空力係数の系統不確かさ解析、日本航空宇宙学会論文集、65 巻、3 号、2017 年 6 月。

〔学会発表〕(計 5 件)

2015年度

[5] 保江かな子, 上野 真, 成岡 優, 中北和之, JAXA 実験用航空機「飛翔」の実機性的空力特性取得飛行試験、第 53 回飛行機シンポジウム、2015 年 11 月。

2016年度

[6] Masaru Naruoka, A Wavelet Based Flight Data Preprocessing Method for Flight Characteristics Estimation and Fault Detection, 30<sup>th</sup> Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, Sep 2016.

2017年度

[7] 成岡 優, 実飛行データを用いた静的動的飛行特性の同時推定手法、日本航空宇宙学会第 48 期年会講演会、2017 年 4 月。

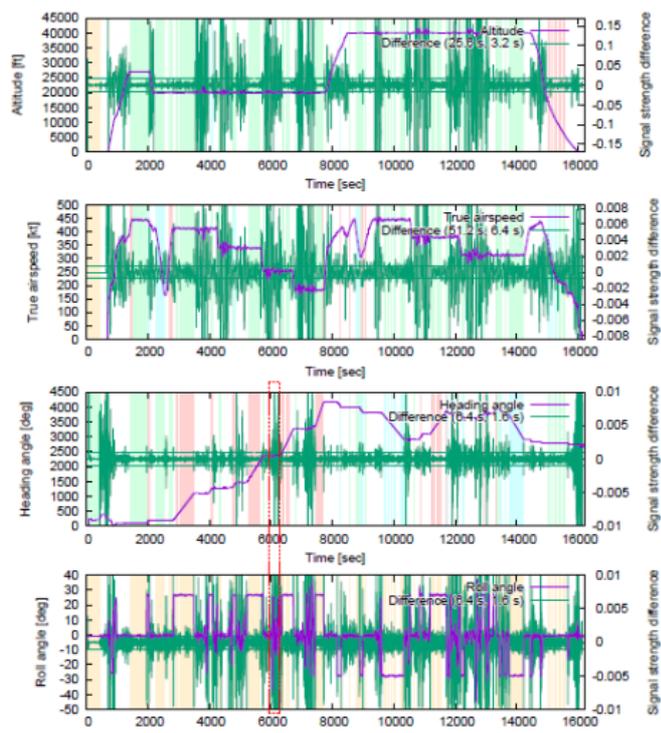


図 5 : マスクされた領域が抽出された区間

データ全体に対して、モデルの予測値とデータの差全体の分布は 95%信頼区間に含まれるようである。信頼区間の幅は  $\pm 25$  drag counts ほどであり、当初のばらつきからすると要求値の 2.5 倍程度まで縮小することができた。ただし、あるマッハ

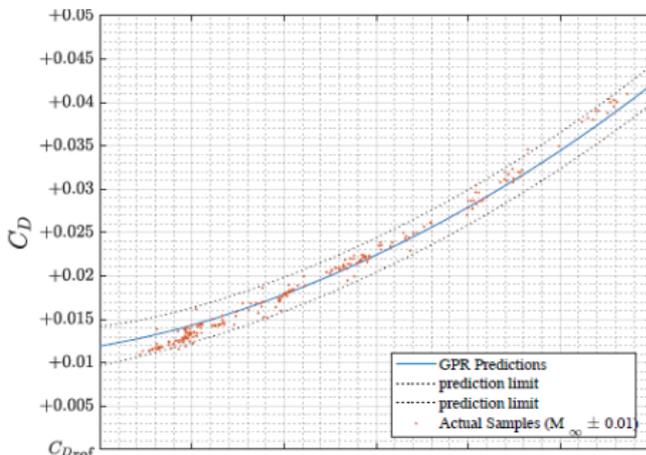


図 6 : モデルの出力 (CD, M=0.5)

[8] 上野 真、保江かな子、成岡 優、内山貴啓、飛行試験からの空力特性推定における効率的なモデル化について、第 55 回飛行機シンポジウム、2017 年 11 月.

2018 年度

[9] Masaru Naruoka, Bayesian Approach to Flight Characteristics Modeling with Real Flight Data, 31st Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, Nov 2018.

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等  
無し

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：成岡 優

ローマ字氏名：Naruoka Masaru

所属研究機関名：国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構

部局名：航空技術部門

職名：主任研究開発員

研究者番号 (8 桁)：10649073

研究分担者氏名：保江 かな子

ローマ字氏名：Yasue Kanako

所属研究機関名：国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構

部局名：航空技術部門

職名：研究開発員

研究者番号 (8 桁)：70597799

### (2) 研究協力者

無し

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。