

2114 飛行風試法による空力特性解析 多目的実証実験機 MuPAL- α の飛行データを用いて

Estimation of Aerodynamic Characteristics using “In-flight Wind Tunnel Test” from Flight Test Data

萩原 智子・東海大学

正 小林 修・東海大学

増位 和也

Tomoko Hagiwara・Tokai University

Osamu Kobayashi・Tokai University

独立行政法人 宇宙航空研究開発機構

Kazuya Masui

Japan Aerospace Exploration Agency

Key Words: Airplane Aerodynamic characteristics · flight test data

1. はじめに

本研究では航空機の飛行運動データを使用し、機体の空力特性推定を行っている。解析方法は飛行風試法¹⁾を採用した。以下に飛行風試法の特色をあげる。

- 各時刻の測定データは、他の時刻のデータと独立して扱える。即ち、時刻の順番を並べ替えても、ある部分のデータを取り除いてもよい。
- また、時間的に連続していない別の飛行試験データを重ね合わせて解析することも可能である。
- 飛行データ取得時に初期トリムをとる必要性がない。
- 空気力と測定データとの関係が直接的であり、解析過程での物理的意味を理解しやすい。

2 章で航空機「P2V-7 改」のシミュレーションデータからの解析、3 章で航空機「MuPAL- α 」²⁾の実機データを用いる応用例を紹介する。4 章では今後の課題として解析法を非線形領域へ拡張する試みについて述べる。

2. 飛行風試法

ここでは、航空機の数学モデルとして以下に示す縦の線形微擾運動方程式を用いる。

$$\dot{u} = X_0 + X_u \cdot u + X_{\dot{\alpha}} \cdot \dot{\alpha} + X_{\alpha} \cdot \alpha + X_q \cdot q + X_{\delta_e} \cdot \delta_e - g \cdot \theta \quad (1)$$

$$U_0 \cdot \dot{\alpha} = Z_0 + Z_u \cdot u + Z_{\dot{\alpha}} \cdot \dot{\alpha} + Z_{\alpha} \cdot \alpha + (Z_q + U_0) \cdot q + Z_{\delta_e} \cdot \delta_e \quad (2)$$

$$\dot{q} = M_0 + M_u \cdot u + M_{\dot{\alpha}} \cdot \dot{\alpha} + M_{\alpha} \cdot \alpha + M_q \cdot q + M_{\delta_e} \cdot \delta_e \quad (3)$$

$$\dot{\alpha} = Z'_0 + Z'_u \cdot u + Z'_{\dot{\alpha}} \cdot \dot{\alpha} + Z'_{\alpha} \cdot \alpha + Z'_q \cdot q + Z'_{\delta_e} \cdot \delta_e \quad (2)'$$

$u, \alpha, q, \theta, \delta_e$ はそれぞれ初期トリム状態からの X 軸方向の飛行速度、迎え角、ピッチレート、ピッチ姿勢角、昇降舵舵角の変化量であり、 U_0 は初期トリム時の X 軸方向の飛行速度、 g は重力加速度である。また、 X, Z, M はそれぞれ X 軸、Z 軸、そして Y 軸回りのモーメントに関する有次元空力微係数である。 X_0, Z_0, M_0 はノイズや誤差などを考慮した有次元空力係数である。式(2)' は式(2)を $\dot{\alpha}$ についてまとめた式である。飛行風試法を用いてこれらの微係数を求めていく。

P2V-7 改のシミュレーションデータを用い解析手順を述べる。以下にシミュレーションに使用した微係数の概要を示す。

時間刻み幅: 0.05 秒 $U_0=89.55(\text{m/s})$ $g=9.8(\text{m/s}^2)$

$X_0=0$ $X_u=-0.0215(1/\text{s})$ $X_{\alpha}=4.481(\text{m/s}^2)$

$X_{\dot{\alpha}}=X_q=0(\text{m/s})$ $X_{\delta_e}=0(\text{m/s}^2)$

$Z_0=0$ $Z_u=-0.227(1/\text{s})$ $Z_{\alpha}=-71.93(\text{m/s}^2)$

$Z_{\dot{\alpha}}=0(\text{m/s})$ $Z_q=1.756(\text{m/s})$ $Z_{\delta_e}=3.932(\text{m/s}^2)$

$M_0=0$ $M_u=0(1/(\text{m} \cdot \text{s}))$ $M_{\alpha}=-3.78(1/\text{s}^2)$

$M_{\dot{\alpha}}=-0.28(1/\text{s})$ $M_q=0.992(1/\text{s})$ $M_{\delta_e}=2.48(1/\text{s}^2)$

$$Z'_u = -0.0025(1/\text{m}) \quad Z'_{\alpha} = -0.8(1/\text{s})$$

$$Z'_q = 0.98 \quad Z'_{\delta_e} = -0.044(1/\text{s})$$

解析を行うにあたって、まず微係数に対応する変数を説明変数と呼ぶことにする。図 1 は各説明変数の時系列データである。縦の運動、昇降舵操舵を正弦波 2 周期与え、その後舵面固定で自由運動させた。縦軸に式(2)' の左辺と右辺の偏差を、横軸に説明変数をプロットした回帰平面をつくる。ここでは微係数の値が未知なので、各 Z' に 0 を代入しておく。

$$Y_0 = \dot{\alpha} - (Z'_u \cdot u + Z'_{\dot{\alpha}} \cdot \dot{\alpha} + Z'_{\alpha} \cdot \alpha + Z'_q \cdot q + Z'_{\delta_e} \cdot \delta_e) \quad (4)$$

偏差を式(4)のように表すこととする。 Z には 0 を代入しているの、 $Y_0 = \dot{\alpha}$ となる。図 2 に回帰平面を示す。回帰平面の中で縦軸と横軸の値の相関が最も強い回帰平面を抜き出す。その回帰平面に 1 次の近似線を挿入し、傾きを読み取り、それを空力微係数と仮定する。図 2 の中では、横軸を q としたグラフが最も相関が強くなる。そのグラフから読み取った近似線の傾きは 0.71 であった。そして先ほどは 0 としていた Z'_q に 0.71 を代入し、式(2)' の偏差を計算する。つま

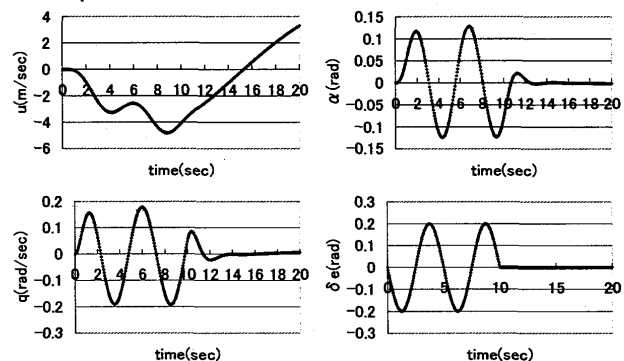


図 1. シミュレーションデータ概要

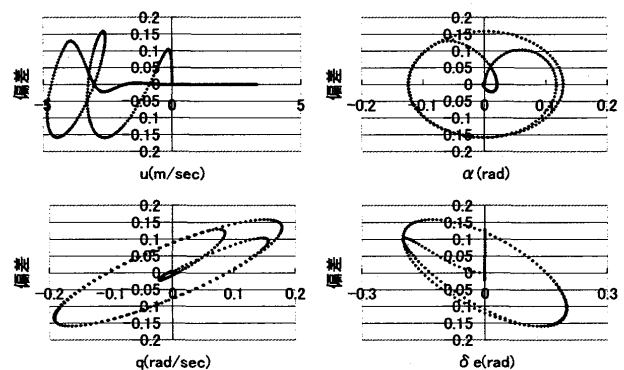


図 2. 回帰平面 (シミュレーションデータより)

りここでの偏差は $Y_1 = Y_0 - 0.71 \cdot q$ となる。偏差を計算し、回帰平面を作り、相関の強いグラフの近似線から傾きを読み取るという手順を何度も繰り返していく。式(4)を以下に書き換えると理解しやすい。

$$Y_n = Y_{n-1} - (Z_u' \cdot u + Z_\alpha' \cdot \alpha + Z_q' \cdot q + Z_{\delta_e}' \cdot \delta_e) \quad (4')$$

このようにして $\dot{\alpha}$ と推定値の偏差を減らしていくことにより空力微係数を求める。以下に解析結果を示す。

$$Z_u' = 0.000029 \quad Z_\alpha' = -0.0025 \quad Z_q' = -0.8$$

$$Z_q' = 0.99 \quad Z_{\delta_e}' = -0.036$$

先に示した値と比較すると、誤差はあるが、近い値になっていることがわかる。 Z_{δ_e}' の値に誤差があるのは、多重共線性¹⁾の影響が考えられる。

3. 「MuPAL- α 」解析結果

図3にMuPAL- α の時系列飛行データを示す。初期トリム時の飛行速度 U_0 は63(m/sec)であり、時間刻み幅は約0.02秒である。 $\dot{\alpha}$ の値は、Z軸方向の加速度をX軸方向の速度で除したものを使用した。前節同様 $\dot{\alpha}$ の解析結果を述べる。

$$\dot{\alpha} = -0.0021 - 0.0022 \cdot u - 1.7\alpha + 0.42 \cdot q - 0.74 \cdot \delta_e \quad (5)$$

式(5)は飛行風試法で求められた微係数を式(2)'に代入したものであり、図4は解析結果と飛行運動データとの比較である。多少の誤差はあるが、解析値と運動データがほぼ重なり合っており、実機MuPAL- α の飛行データにおいても飛行風試法により空力特性を推定できることを示している。

4. 空力特性推定・非線形領域への拡張の試み

これまでは線形領域における飛行運動データを用い解析を行ってきた。4章では飛行風試法を非線形領域に拡張する試みについて述べていきたい。飛行風試法では、回帰平面をつくることによりデータのばらつきや推移が可視化できる。この長所を用いて非線形への拡張ができるのではないかと考えたためである。またここでは、機体P2V-7改の微係数に手を加え、シミュレーションしたデータを用い解析する。シミュレーションに用いた微係数は、 Z_u 以外は2章に示したものと同様である。 $\alpha \leq 0.087\text{rad}$ の領域で $Z_\alpha' = -0.803$ ($Z_\alpha = 71.93$)、 $\alpha > 0.087\text{rad}$ の領域で $Z_\alpha' = 0.803$ ($Z_\alpha = 71.93$)となる非線形データを作成した。図5に時系列データを示す。

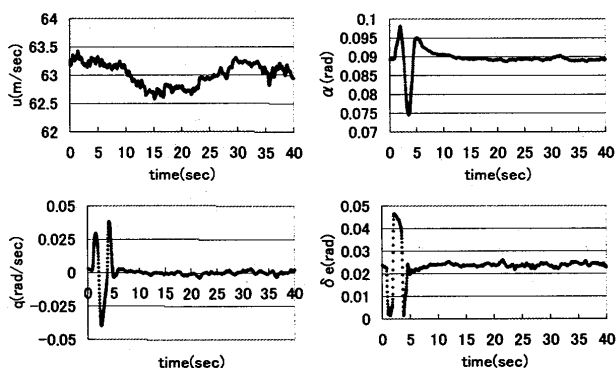
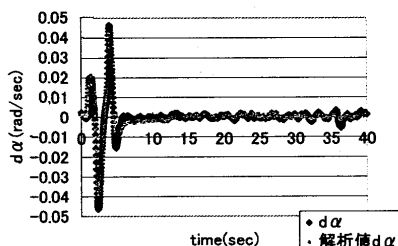


図3. MuPAL- α ・飛行データ概要



(図4では $\dot{\alpha}$ を
 $d\alpha$ と表記してい
る)

図4. MuPAL- α 解析結果

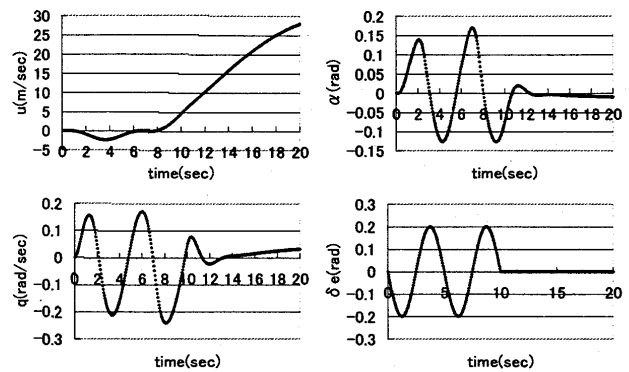


図5. シミュレーションデータ (非線形) 概要

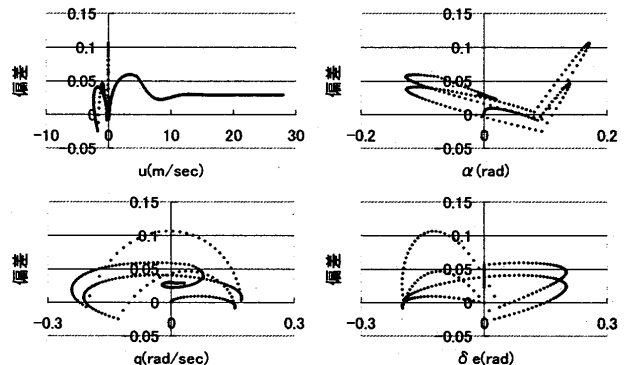


図6. 回帰平面 (非線形のシミュレーションデータより)

2章と同様、 Z_α' が α に対して線形であると仮定し、飛行風試法により解析を行った。求められた微係数を示す。

$$Z_u' = -0.00236 \quad Z_\alpha' = -0.456 \quad Z_q' = 0.98 \quad Z_{\delta_e}' = 0.0611$$

ここで、 $\dot{\alpha}$ と推定値の偏差を縦軸、説明変数を横軸にプロットした回帰平面を図6に示す。迎え角についてのグラフが、約 0.087rad を境に分布が極端に異なっている。ここで $\alpha \leq 0.087$ 、 $\alpha > 0.087$ それぞれの範囲で1次の近似線を挿入し、傾きを読み取り、先ほど推定された微係数と足し合わせたものを新しい微係数 Z_{α_1}' ($\alpha \leq 0.087$)、 Z_{α_2}' ($\alpha > 0.087$)とする。回帰平面より読み取った傾きの値は、 $\alpha \leq 0.087$ の領域で -0.296 、 $\alpha > 0.087$ の領域で 1.39 であった。上記の推定値 Z_α' と足し合わせると $Z_{\alpha_1}' = -0.75$ 、 $Z_{\alpha_2}' = 0.936$ となった。これらの微係数を用い新しく $\dot{\alpha}$ の推定値を求める。そしてシミュレーションデータとの偏差を求め、飛行風試法を適用しさらに偏差を求めるという手順を繰り返し行った。このようにして偏差を減らしていき、求められた微係数は以下である。

$$Z_u' = -0.00255 \quad Z_{\alpha_1}' = -0.791 \quad Z_{\alpha_2}' = 0.808$$

$$Z_q' = 0.991 \quad Z_{\delta_e}' = -0.0285$$

上記のようにシミュレーションに使用した微係数と近い値になり、迎え角 $\alpha = 0.087\text{rad}$ で Z_α の値が変わることを回帰平面から読み取ることができた。ここでは Z_α の値が変わるというシミュレーションを行い、解析方法を探っていたが、実際の航空機での非線形運動はより複雑であることが予想される。複雑な非線形運動のシミュレーションを行い、解析方法をより深く探っていくこと、最終的には実機の非線形領域での飛行運動に適用していくことを目標としている。

参考文献

(1) 日本航空宇宙学会誌(第40巻 第463号・第466号)
(第41巻 第479号)

【飛行データからの空力特性推定】(第1報,第2報,第6報)

(2) 日本航空宇宙学会第34期年会講演会講演集

【多目的実証実験機(MuPAL- α)の開発と運用】