

KMAPの例題(5)－航空機の舵面追加(補関数の利用)

H23.9.15(A) 片柳亮二

1. 航空機の舵面追加とは

KMAPによって航空機の運動を解析する場合，操縦舵面としては通常図 1.1 に示すように，エレベータ δe ，エルロン δa ，ラダー δr およびフラップ δf を用いる．

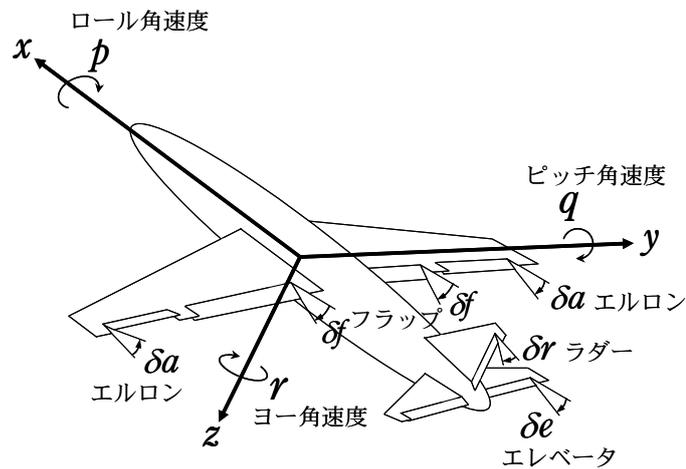


図 1.1 航空機の操縦舵面

これらの通常の舵面に加えて，例えば左右のエレベータを差動舵面（左右エレベータを非対称に操舵）として利用する場合がある．実際には左右のエレベータ（または全動の水平尾翼）はピッチ運動には左右が同じ方向に動き，ロール／ヨー運動には左右が反対方向に動く．このロールおよびヨー運動を発生するエレベータ差動舵面は，解析においては通常のエレベータ舵面に加えて，新たな差動舵面を追加することにより模擬することができる．

2. エレベータ差動舵面の空力係数の設定

新たな操縦舵面を追加するために、KMAPでは補間関数が用意されている。これにより舵面操舵による空気力モーメントの影響を作り出すことができる。具体的なインプットデータの作り方を次に示す。

(1) KMAPの起動から制御則修正準備

C:\¥KMAP フォルダ内の、“KMAP**実行スタートファイル.BAT” (**はバージョン番号) バッチファイルをダブルクリックすると、解析プログラムKMAPが起動する。次に、以下のようにキーインする(“”部分)。

- “1” ←航空機などの一般解析
- “1” ←航空機の運動・制御系解析
- “3” ←例題ファイルをコピー利用
- “12” ←大型旅客機の制御なしのデータを利用
- “RK1” ←適当なファイル名記入
- “2” ←安定性解析およびシミュレーション
- “0” ←インプットデータ(前半部)修正なし
- “1” ←制御則を修正
- “67” ←行表示開始行
- “90” ←行表示終了行
- “1” ←行追加
- “69” ←追加行指定(その行の後に追加)、このとき次のように表示される。

***** (Q4) *****
 参考(①キーイン⇒ Q1:注意事項, Q2:関数表, Q3:機体データE, Q4:使用済み Z, D, H, R 番号)

- 上記関数番号“FXXX”をキーイン。その他の関数は“F0”をキーイン。
 制御則の一時的表示は“P”キーイン。
<制御式の入力>

(2) 空力係数設定の具体的な方法

追加するエレベータ差動舵面の具体的な空力係数を補間関数に設定してみよう。上記<制御式の入力>に“F0”とキーインすると、その他の関数グループが次のように表示される。

＜制御式の入力＞	
F0	

(((制御則には、下記に示す種々の関数が使Ⓐ用できます)))	
1	<Z, X, U, 加減算> <X, U, Z の G 倍> <H を Z に設定> <Z と H, E との乗除算> <一般データ H の設定>
2	<数学関数> <行列デ-タイフット>
3	<フィルタ演算> <時間 t の Z の値> <時間 t で Z の値変更> <特殊な時間関数操作> <各種関数発生>
4	<Z のリミット値> <リレ-, 不感帯> <最適制御解析ルーチン> <行列の表示> <行列操作> <各種解析法>
5	<縦系フィードバック> <横・方向系フィードバック> <安定性ゲイン変動指定>
6	<GO TO 文> <安定解析用応答 R の設定> <変数の表示> <実行一時停止> <各種操作>
●上記グループ番号 1~6, または 0(全関数) をキーイン -->	

ここで“2” とキーインすると次のように表示される.

2	<数学関数> F14 H1=逆数 [E2]; F15 H1=絶対値 [H2]; F16 H1=符号 [H2, H3 の正負]; F18 H1=sin [H2 (deg)]; F58 H1=sin [H2 (rad)]; F19 H1=cos [H2 (deg)]; F59 H1=cos [H2 (rad)]; (途中省略) F46 H1=loge [H2]; F47 H1=log10 [H2]; F48 H1=補間 [H2(入力), H3]; (途中省略)
	<行列デ-タイフット> F611 AP (I1, J2); F621 AP (I1, J2) H3; F612 BP (I1, J2); F622 BP (I1, J2) H3; F618 B1 (I1, J2); F628 B1 (I1, J2) H3; F613 B2 (I1, J2); F630 AP (H1, H2) H3; F631 H1=AP (H2, H3); F632 H1=AP (I2, J3);
●上記関数番号“FXXX”をキーイン. その他の関数は“F0”をキーイン. 制御則の一時的表示は“P”キーイン.	
＜制御式の入力＞	

ここで, “F48” とキーインすると次のように表示される.

----(Q4:使用済み Z, D, H, R 番号)----

(Zi) i= 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15

(Zi) i= 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 40

(Zi) i= 70 90

(Di) i=

(Hi) i=

(Ri) i= 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 21 22 23 24

***** (Q4) *****

参考 (①キーイン⇒ Q1:注意事項, Q2:関数表, Q3:機体データ E, Q4:使用済み Z, D, H, R 番号)

●上記関数番号“FXXX”をキーイン. その他の関数は“F0”をキーイン.

制御則の一時的表示は“P”キーイン.

<制御式の入力>

F48

H1=FHOKA[H2, H3];

H 番号=?

ここで, 具体的にエレベータ差動舵面の空力係数を補間関数に設定する. 上記“H1=FHOKA[H2, H3]”の式中の H 番号は 500 番まで使えるので適当な番号を指定すればよい. 上記に使用済みの H 番号が表示されるが, H1, H2, H3 は使われていないので同じ番号を設定すればよい. この補間関数にエレベータ差動によるローリングモーメント係数 C1DDe を迎角 ALP の関数として設定する例を次に示す.

(下記の朱記部分がキー入力である)

H 番号=? 1

H1=FHOKA[H2, H3];

2 つ目の H 番号=? 2

H1=FHOKA[H2, H3];

3 つ目の H 番号=? 3

H1=FHOKA[H2, H3];

(注意)この補間式の上流側で, 対応する補間関数番号を“H3”に入力しておくこと)

(下記範囲にコメント記入)

(HOKAN No. 1)

(補間関数は 10 個まで) 補間データの修正は関数番号を, 新規作成は 99, 終了は 0 をキー)

99

[補間関数 1] 0

入力変数の折れ点数?(99 入力で元データのまま)=2

2

<<入力変数データ>>

0.0000E+00 0.0000E+00

折れ点の数は 20 点まで可能

“入力変数名”を修正しますか?, Yes=1(入力後,変数名キ-ン), No=0

1

ALP(deg)

入力変数デ-タを修正しますか?, Yes=1, No=0

1

ALP(deg) (1)= 0.0000E+00 --> (99 入力で元デ-タのまま)=-10
-0.1000E+02

ALP(deg) (2)= 0.0000E+00 --> (99 入力で元デ-タのまま)=20
0.2000E+02

<<補間デ-タ>>

0.0000E+00 0.0000E+00

“補間デ-タ名”を修正しますか?, Yes=1(入力後,変数名キ-ン), No=0

1

CIDDe

補間デ-タを修正しますか?, Yes=1, No=0

1

ALP(deg) (1)= -0.1000E+02 : CIDDe (1)= 0.0000E+00
--> (99 入力で元デ-タのまま)=-0.001

-0.1000E-02

ALP(deg) (2)= 0.2000E+02 : CIDDe (2)= 0.0000E+00
--> (99 入力で元デ-タのまま)=-0.001

-0.1000E-02

[補間関数 1] 2

ALP(deg) -0.1000E+02 0.2000E+02

CIDDe -0.1000E-02 -0.1000E-02

(補間関数は 10 個まで) 補間デ-タの修正は関数番号を, 新規作成は 99, 終了は 0 をキ-ン)

ここで, 関数 1 の設定は終了として “0” とキーインすると次のように表示される.

```

(W382.DAT) 1,500FT,165KT 1G (PA), タッチロール例
67 //*****
68 //...<<Da 系,ここから記述>>...
69 Z70=U2*G; (-pcmd) H 0 0.1000E+01 52 70 2 0 0 0
70 H1=FHOKA[H2,H3]; (HOKAN No. 1) H 0 48 1 2 3 0 0
71 //
(途中省略)

```

●その行の後に, 行追加を続けますか? Yes=1, No=0

ここで, “H3” は対応する補間関数番号であるので, H3 に “1” を入力しておく. これは次のようにすればよい.

- “0”
- “1” ←新に行追加
- “69” ←69 行の後に追加
- “F11” ←関数 F11 指定
- “3” ←H 番号 3 指定
- “ (HOKAN No. 1)” ←コメント記入
- “1” ←H3 に 1 を入力

その結果、次のように表示される。

```

-----
(W382.DAT) 1,500FT,165KT 1G (PA),タッチロール例
67 //*****
68 //...<<Da系,ここから記述>>...
69 Z70=U2*G; (-pcmd)           H 0  0.1000E+01  52  70  2  0  0  0
70 H3=G; (HOKAN No. 1)         H 0  0.1000E+01  11  3  0  0  0  0
71 H1=FHOKA[H2,H3]; (HOKAN No. 1) H 0           48  1  2  3  0  0
72 Z40=Z29*G;                   H 0 -0.1000E+01  53  40  29  0  0  0
   (途中省略)
-----
●その行の後に、行追加を続けますか?  Yes=1, No=0

```

いま設定した補間関数を用いて、入力変数 H2 に対して補間された値が H1 に出力される。なお、補間関数データを再度確認したい場合は、次のインプットデータ修正において“8”を選択すればよい。

- ```

----- (インプットデータ修正) (後半部) -----
1 = 制御則
 (・制御ブロック図における各ブロックの入出力関係をインプットデータに記述)
2 = 初期飛行条件 (高度, 速度, G)
3 = ハイット操舵
 (・U1~U5 を時間の折れ線関数として設定して利用できる)
4 = デバッグ時間
 (・シミュレーション時に各状態変数を 0.1 秒毎に表示する開始時間)
5 = 空力 (MACH 関数)
6 = 空力 (MACH, ALP 関数)
7 = 空力 (MACH, Hp 関数)
8 = 補間関数
=====

```

このとき、次のように補間関数が表示される。

```
[補間関数 1] 2
ALP(deg) -0.1000E+02 0.2000E+02
CIDDe -0.1000E-02 -0.1000E-02

(補間関数は 10 個まで) 補間データの修正は関数番号を、新規作成は 99, 終了は 0 をキー)
```

同様にして、エレベータ差動によるヨーイングモーメントの空力係数 CnDDe も補間関数 2 を用いて設定できる。実際に 2 つの補間関数を設定した後のインプットデータを見ると、次のように設定されていることが確認できる。

```

NXP(積分数), IRIG(=1:リグ*), TDEBUG 時間 25 0 0.0 2
[補間関数 1] 2
ALP(deg) -0.1000E+02 0.2000E+02
CIDDe -0.1000E-02 -0.1000E-02
[補間関数 2] 2
ALP(deg) -0.1000E+02 0.2000E+02
CnDDe -0.1000E-02 -0.1000E-02
<Flight Control System Data> Hi *---GAIN---NCAL*N01*N02*N03*NGO*LNO
1 //(注 1)制御文は 6~37 カラムに記述
2 //(注 2)X1~X11, X15~X16 は使用済
3 //(注 3)Z1~Z28 は設定済
(以下省略)
```

補間関数が 2 個ある  
ことを示す

### 3. エレベータ差動効果の運動方程式への組み込み

新たな操縦舵面の効果を航空機の運動方程式に組み込むために、KMAPでは次のような機能が用意されている。

$x$ 軸方向の力に、Z6(単位は kgf)が加算される  
 $y$ 軸方向の力に、Z7(単位は kgf)が加算される  
 $z$ 軸方向の力に、Z8(単位は kgf)が加算される

$x$ 軸まわりのモーメントに、Z9 (単位は kgf・m)が加算される  
 $y$ 軸まわりのモーメントに、Z10(単位は kgf・m)が加算される  
 $z$ 軸まわりのモーメントに、Z11(単位は kgf・m)が加算される

すなわち、Z6～Z11 に航空機の各軸に働く力およびモーメントを定義することにより、運動方程式にその影響を加算できる。

ここでは、エレベータ差動によりローリングモーメント係数  $C_{lDDe}$  およびヨーイングモーメント係数  $C_{nDDe}$  を用いて、 $x$ 軸まわりのモーメント Z9 および  $z$ 軸まわりのモーメント Z11 を設定してみよう。まず、上記制御則作成ルーチンにおいて、次のような表示になっているとする。

\*\*\*\*\* (Q4) \*\*\*\*\*  
 参考(①キー⇒ Q1:注意事項, Q2:関数表, Q3:機体データE, Q4:使用済み Z, D, H, R 番号 )  
 ●上記関数番号“FXXX”をキーイン。その他の関数は“F0”をキーイン。  
 制御則の一時的表示は“P”キーイン。  
**<制御式の入力>**

この<制御式の入力>欄に、実際の制御則を入力していくわけであるが、その前にまず“Q3”とキーインしてみよう。すると次のように、航空機の運動に関する機体データが表示される。例えば“E17”は主翼面積、“E36”は動圧である。ただし、KMAPの単位は全て工学単位を使用しているので、使う際には単位に注意する。その他“E38～E61”は有次元空力係数である。これらのデータを適宜使うことにより、KMAPによる航空機の解析を自分なりに拡張することが可能である。

## &lt;制御式の入力&gt;

Q3

E3 =  $\alpha$  (deg)E12=Ix (kgf·m·s<sup>2</sup>)E14=Iz (kgf·m·s<sup>2</sup>)

E16=Weight (kgf)

E18=b (m) ( $\lambda \lambda^\circ$ )

E20=CG (%)

E33=M (m/s) (マッハ数)

E35= $\rho$  (kgf·s<sup>2</sup>/m<sup>4</sup>) (空気密度)

E37=VEAS (kt) (等価対気速度)

E4 =  $\beta$  (deg)E13=Iy (kgf·m·s<sup>2</sup>)E15=Ixz (kgf·m·s<sup>2</sup>)E17=S (m<sup>2</sup>) (翼面積)

E19=C. BAR (m)

E32=a (m/s) (音速)

E34=V (m/s) (真対気速度)

E36=0.5  $\rho V^2$  (kgf/m<sup>2</sup>) (動圧)E38=Xu (1/s), E39= $\chi \alpha$  (m/(s<sup>2</sup>·deg)), E40=Zu (deg/m), E41=Z  $\alpha$  (1/s)E42=Z  $\delta e$  (1/s), E43=Z  $\delta f$  (1/s), E44=Mu1 (deg/(m·s)), E45=M  $\alpha 1$  (1/s<sup>2</sup>)E46=M  $\delta e 1$  (1/s<sup>2</sup>), E47=M  $\delta f 1$  (1/s<sup>2</sup>), E48=Mq1 (1/s), E49=M  $\theta 1$  (1/s)E50=Y  $\beta$  (1/s), E51=Y  $\delta r$  (1/s), E52=L  $\beta 1$  (1/s<sup>2</sup>), E53=L  $\delta a 1$  (1/s<sup>2</sup>)E54=L  $\delta r 1$  (1/s<sup>2</sup>), E55=Lp1 (1/s), E56=Lr1 (1/s), E57=N  $\beta 1$  (1/s<sup>2</sup>)E58=N  $\delta a 1$  (1/s<sup>2</sup>), E59=N  $\delta r 1$  (1/s<sup>2</sup>), E60=Np1 (1/s), E61=Nr1 (1/s)

E62=Nx (G)

E63=Nz (G)

E64=CNGEARC : 脚 1.0 (UP), 0.0 (DN)

E65=DSPEEDB : S/B 0.0 (DN) ~ 1.0 (UP)

E66=RGAIN (DT)

E67=qdot (deg/s<sup>2</sup>)

E68=time (s)

\*\*\*\*\* (Q3) \*\*\*\*\*

参考 (①キーイン⇒ Q1:注意事項, Q2:関数表, Q3:機体データE, Q4:使用済み Z, D, H, R 番号)

●上記関数番号“FXXX”をキーイン。その他の関数は“F0”をキーイン。

制御則の一時的表示は“P”キーイン。

&lt;制御式の入力&gt;

これらの機体データを用いて、 $x$ 軸まわりのモーメント Z9 および  $z$ 軸まわりのモーメント Z11 を作ると次のようになる。

## W. DIFF. TAIL. DAT エレベータ差動(補関数の利用)

(途中省略)

2. NDa-----&gt; 6

|       |        |         |
|-------|--------|---------|
| T, Da | 0.000  | 0.000   |
|       | 2.000  | 0.000   |
|       | 2.200  | -10.000 |
|       | 5.000  | -10.000 |
|       | 5.200  | 0.000   |
|       | 60.000 | 0.000   |

(途中省略)

\*\*\*\*\*

NXP(積分数), IRIG(=1:リグ), TDEBUG 時間 25 0 0.0 2

```

[補間関数 1] 2
ALP (deg) -0.1000E+02 0.2000E+02
CIDDe -0.1000E-02 -0.1000E-02
[補間関数 2] 2
ALP (deg) -0.1000E+02 0.2000E+02
CnDDe -0.1000E-02 -0.1000E-02
(途中省略)
67 //*****
68 //... <<Da 系, ここから記述>>...
69 Z70=U2*G; (-pcmd) H 0 0.1000E+01 52 70 2 0 0 0
70 //
71 H3=G; (HOKAN No. 1) H 0 0.1000E+01 11 3 0 0 0 0
72 H1=FHOKA[H2, H3]; (HOKAN No. 1) H 0 48 1 2 3 0 0
73 H6=G; (HOKAN No. 2) H 0 0.2000E+01 11 6 0 0 0 0
74 H4=FHOKA[H5, H6]; (HOKAN No. 2) H 0 48 4 5 6 0 0
75 H7=E36; (0.5*RHO*V2) H 0 13 7 36 0 0 0
76 H8=E17; (S) H 0 13 8 17 0 0 0
77 H9=E18; (b) H 0 13 9 18 0 0 0
78 H10=Z22; (ALP) H 0 12 10 22 0 0 0
79 H11=H7*H8; (0.5*RHO*V2*S) H 0 23 11 7 8 0 0
80 H12=H11*H9; (0.5*RHO*V2*S*b) H 0 23 12 11 9 0 0
81 H13=H12*H1; (0.5*RHO*V2*S*b*CIDDeH 0 23 13 12 1 0 0
82 H14=H12*H4; (0.5*RHO*V2*S*b*CnDDeH 0 23 14 12 4 0 0
83 //
84 Z71=Z70*G; H 0 0.1000E+01 53 71 70 0 0 0
85 //(DIFF. Elevator Actuator)
86 Z72={G2^2/[G1G2]G3}Z71X12X13; H 0 0.7000E+00 124 72 71 12 0 0
87 H 0 0.5000E+02 124 0 0 13 0 0
88 H 0 0.1000E+04 124 0 0 0 0 0
89 Z72={G1<=, <=G2}; (DIFF. Elevator) H 0 -0.2000E+02 85 72 0 0 0 0
90 H 0 0.2000E+02 85 0 0 0 0 0
91 Z9=Z72*H13; (X-Moment) H 0 74 9 72 13 0 0
92 Z11=Z72*H14; (Z-Moment) H 0 74 11 72 14 0 0
(以下省略)

```

シミュレーション実施後，“C:¥KMAP¥エクセル図”のフォルダを開け，“KMAP(時歴 40P)8D.xls”のエクセル図を表示し，データ部分の適当な所にカーソルを置いて右クリックして，“データ更新”を行うと次のようなタイムヒストリーが表示できる。(ワードファイルには“拡張メタファイル”として貼り付ける)

(なお，補間関数を用いた場合は線形安定解析には反映されない。線形安定解析を行う場合は，エレベータ差動の空力係数はH変数で定義しておけば実施できるがここでは省略する。)

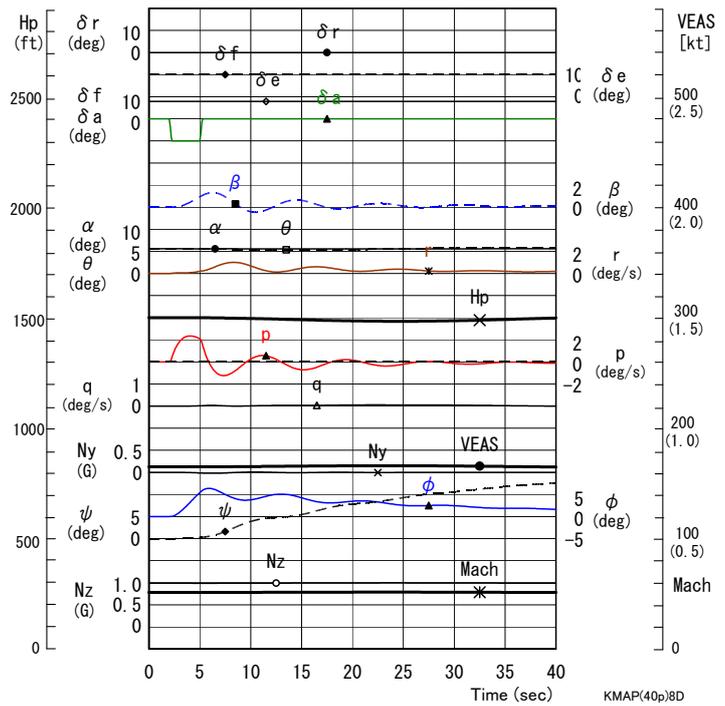
まず，エレベータ差動のない通常のエルロン操舵の応答を右に示す。

この場合の空力係数は

$$C_{l_{\Delta\alpha}} = -0.0008$$

$$C_{n_{\Delta\alpha}} = -0.00011$$

である。



これに対して，今回のエレベータ差動を加えた場合の応答を右に示す。

エレベータ差動へはエルロン操舵量と同じ量を操舵している。なお，エレベータ差動の空力係数は

$$C_{l_{\Delta\delta}} = -0.001$$

$$C_{n_{\Delta\delta}} = -0.001$$

である。ロール運動量が増加していることがわかる。

