

## (KMAP 使用例) 大型旅客機の最適レギュレータによるロール角制御

(KMAP113 以降のバージョンで解析可能)

KMAP(ケーマップ)研究会 片柳亮二

いま，制御対象の状態方程式が次のように表されるとする．

$$\begin{cases} \dot{x} = A_p x + B_2 u \\ y = C_p x \end{cases} \quad (2.2-1)$$

ここで， $x$ は状態変数ベクトル， $u$ は制御入力ベクトル， $y$ は評価関数用応答ベクトル， $A_p$ はシステム状態行列， $B_2$ は制御入力行列， $C_p$ は評価関数用応答設定行列である．このとき，評価関数を

$$J = \int_0^{\infty} (y^T Q_y y + u^T R u) dt \quad (2.2-2)$$

とおくと，この評価関数を最小とするフィードバック制御則が次式で与えられる．

$$u = -R^{-1} B_2^T P x \quad (2.2-3)$$

ここで， $P$ は次式の代数形行列リカッチ方程式

$$P A_p + A_p^T P - P B_2 R^{-1} B_2^T P + C_p^T Q_y C_p = 0 \quad (2.2-4)$$

の正値対称な解である．

評価関数用応答設定行列  $C_p$  は，例えば次のように設定する．

$$y = \begin{bmatrix} \beta \\ \phi \end{bmatrix} = C_p x, \quad \therefore C_p = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

このとき，評価関数の重みは，例えば次のように設定する．

```

----<最適レギュレータ> (重み Qy, R) ----
[ 1].... Qy( 1, 1)=  0.1000000E+01
[ 2].... Qy( 2, 2)=  0.1000000E+03
[ 3]....  R( 1, 1)=  0.1000000E+01
[ 4]....  R( 2, 2)=  0.1000000E+01

```

KMAP では，最適レギュレータ(LQR)の設計ルーチンとして次に示す関数 F651 が用意されている．なお，重み行列  $Q_y$  および  $R$  は演算の中でキーインして設定するようになっている．

{OptC(AP, B2, CP) 1} I1J2K3; (関数 F651)

(この 1, 2, 3 の数字は例)

この関数 F651 を呼び出すことで、最適レギュレータ (LQR) を計算することができる。ここで、I, J, K の番号は運動方程式の行列の次元を表す。

I=NX=4：飛行機のダイナミクス  
 J=NU=2：コントロー舵面  
 K=NY=2：応答

求められたフィードバックゲイン  $F$  (ただし、 $u=-F \cdot x$ ) は、インプットデータ内の最適レギュレータの関数 651 が記述されている行の次の行から、エルロン系 4 個、ラダー系 4 個の順にゲイン G に収納される。

		ゲイン							
76	{OptC(AP, B2, CP) 1} I4J2K2;	H 0	651	4	2	2	0	0	0
77	Z74=Z25*G;	H 0	0.1816E+01	53	74	25	0	0	0
78	Z75=Z26*G;	H 0	-0.3084E+01	53	75	26	0	0	0
79	Z76=Z27*G;	H 0	-0.1323E+01	53	76	27	0	0	0
80	Z72=Z71*G;	H 0	-0.9965E+01	53	72	71	0	0	0
81	Z94=Z25*G;	H 0	0.1078E+01	53	94	25	0	0	0
82	Z95=Z26*G;	H 0	-0.1263E+00	53	95	26	0	0	0
83	Z96=Z27*G;	H 0	-0.2381E+01	53	96	27	0	0	0
84	Z92=Z71*G;	H 0	-0.1119E+00	53	92	71	0	0	0

なお、Z25, Z26, Z27, Z28 (Z71=Z28-Z12) はそれぞれ  $\beta$ ,  $p$ ,  $r$ ,  $\phi$  の値が自動的に入る

ここでは、図 1 に示すように、大型旅客機のラダーロール角制御系を最適レギュレータを用いて設計する。

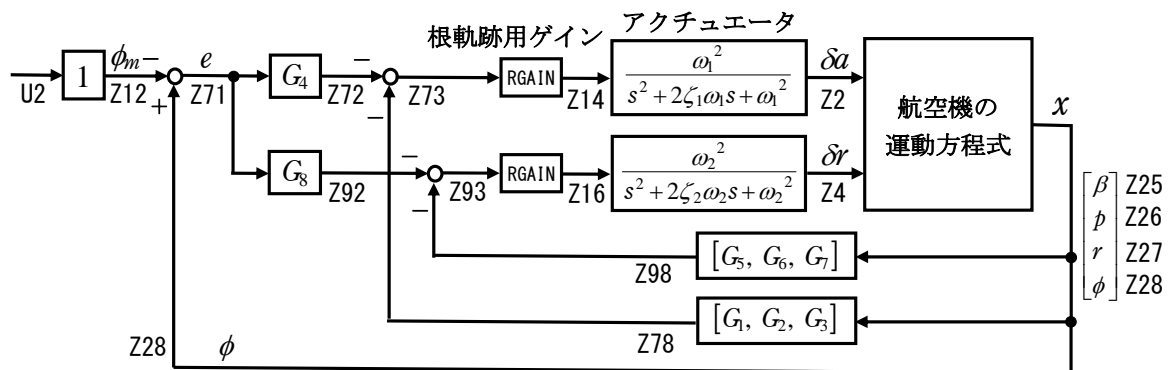


図 1 ロール角制御系のブロック図

(CDES. 最適レギュレータによるロール角制御 1.Y171005.DAT)

解析手順を以下に示す。(フィードバックゲインを求める際はアクチュエータはなしとし、安定の解析やシミュレーションはアクチュエータを含める)

- (1) KMAP113 以降のソフトを立ち上げ、自動化解析 “23” 選択
- (2) 設計方式 “13” 選択
- (3) 機体データ取得方法 “99” 選択

(4)機体データリストから例えば“44”(CDES.B777-200.Y120505.DAT)選択

(5)制御則リストから“501”(最適レギュレータによるロール角制御 1)選択

(6)下記が表示されるので、例えば  $Q_y(2, 2)=100$  に修正して“0”で進む

```
.....<<< 最適レギュレータ >>>.....
----<最適レギュレータ>(重み Qy,R) ----
[ 1].... Qy( 1, 1)=  0.1000000E+01
[ 2].... Qy( 2, 2)=  0.1000000E+01
[ 3]....  R( 1, 1)=  0.1000000E+01
[ 4]....  R( 2, 2)=  0.1000000E+01
----(INPUT)---- CHNG?=  


```

(7)一度このまま解析が実行され、終了すると自動化ファイル AUTO.AAA0.DAT が表示される.

(8)この AUTO.AAA0.DAT をマニュアルで修正して本格的な解析をする.

①<7>制御則の選択番号 501 を 0 に修正

②<58>のパイロット操舵をエルロン操舵にするため次のように修正

```
1. NDe-----> 2
   T , De           0.0000      0.0000
                   60.0000      0.0000

2. NDa-----> 6
   T , Da           0.0000      0.0000
                   2.0000      0.0000
                   2.1000      8.0000
                   15.0000     8.0000
                   15.1000     0.0000
                   60.0000     0.0000
```

③<16>の操縦をエルロン入力の“2”に修正

④<17>の出力をロール角の“6”に修正

(9)これらの AUTO.AAA0.DAT の修正を保存する

(このファイルは解析時常に利用するので消さない)

(10)コマンドプロンプト画面の<解析結果の表示>で、“0”選択

(11)下記表示がでるので、“1”選択すると修正されたデータで解析を実行

AUTO ファイルを修正して再計算しますか (0=No, 1=Yes(保存後)) -->

(12)下記が表示され.

```
.....<<< 最適レギュレータ >>>.....
----<最適レギュレータ>(重み Qy,R) ----
[ 1].... Qy( 1, 1)=  0.1000000E+01
[ 2].... Qy( 2, 2)=  0.1000000E+01
[ 3]....  R( 1, 1)=  0.1000000E+01
[ 4]....  R( 2, 2)=  0.1000000E+01
----(INPUT)---- CHNG?=  


```

ここで、例えば  $Q_y(2, 2)=100$  に修正して“0”で進む

```
.....<<< 最適レギュレータ >>>.....
```

```

----<最適レギュレータ> (重み Qy, R) ----
[ 1].... Qy( 1, 1)=  0.1000000E+01
[ 2].... Qy( 2, 2)=  0.1000000E+03
[ 3]....  R( 1, 1)=  0.1000000E+01
[ 4]....  R( 2, 2)=  0.1000000E+01
----(INPUT)---- CHNG?=

```

解析の途中に次のように表示される。(この表示は解析が終了した後に、画面を上スクロールすると見ることができる)

```

.....<<< 最適レギュレータ >>>.....
----<最適レギュレータ> (重み Qy, R) ----
[ 1].... Qy( 1, 1)=  0.1000000E+01
[ 2].... Qy( 2, 2)=  0.1000000E+01
[ 3]....  R( 1, 1)=  0.1000000E+01
[ 4]....  R( 2, 2)=  0.1000000E+01
----(INPUT)---- CHNG?=2
----(INPUT)----  Qy11=100
----<最適レギュレータ> (重み Qy, R) ----
[ 1].... Qy( 1, 1)=  0.1000000E+01
[ 2].... Qy( 2, 2)=  0.1000000E+03
[ 3]....  R( 1, 1)=  0.1000000E+01
[ 4]....  R( 2, 2)=  0.1000000E+01
----(INPUT)---- CHNG?=0
....AP..... NI=  4  NJ=  4
-0.1034D+00   0.6545D-01  -0.1000D+01   0.1127D+00
-0.2106D+01  -0.1530D+01   0.8984D+00   0.0000D+00
 0.2307D+00  -0.4170D-01  -0.1984D+00   0.0000D+00
 0.0000D+00   0.1000D+01   0.6554D-01   0.0000D+00

....B2..... NI=  4  NJ=  2
 0.0000D+00   0.2074D-01
-0.1066D+01   0.4365D-01
-0.2340D-01  -0.2172D+00
 0.0000D+00   0.0000D+00

....CP..... NI=  2  NJ=  4
 0.1000D+01   0.0000D+00   0.0000D+00   0.0000D+00
 0.0000D+00   0.0000D+00   0.0000D+00   0.1000D+01

<O MATRIX>... NI=  4  NJ=  4
-0.1867D-06  -0.2396D-06   0.2798D-07  -0.2746D-06
 0.1132D-06   0.4243D-06   0.3573D-08  -0.1047D-06
-0.7908D-07   0.2629D-06   0.7209D-07   0.2818D-06
 0.4274D-06   0.1360D-05  -0.3176D-07  -0.1063D-05

F: (u=-F·X)... NI=  2  NJ=  4
 0.1816D+01  -0.3084D+01  -0.1323D+01  -0.9965D+01
 0.1078D+01  -0.1263D+00  -0.2381D+01  -0.1119D+00

```

(13) 解析が終了すると<解析結果の表示>の画面となるので、“9”を選択すると、安定解析結果(エルロン系入力)が次のように表示される。

### エルロン系の解析

```

.....(釣り合い飛行時のデータ).....
S = 0.42800E+03 (m2)   CBAR = 0.79460E+01 (m)   Hp = 0.15000E+04 (ft)
W = 0.16091E+06 (kgf) qbarS= 0.19261E+06 (kgf) ROU = 0.11952E+00 (kgf·s2/m4)
V = 0.86778E+02 (m/s) VKEAS= 0.16500E+03 (kt)   b = 0.60900E+02 (m)
Ix= 0.11935E+07 (⇒)  Iz = 0.39250E+07 (⇒)  Ixz = 0.11935E+06 (kgf·m·s2)
CL= 0.83552E+00 (—)  α = 0.37503E+01 (deg) CG = 0.25000E+02 (%MAC)

```

(この CL は初期釣合 G に必要な CL です)

T= 0.24890E+05 (kgf)  $\delta f = 0.20000E+02$  (deg)  $\delta e = -0.18750E+01$  (deg)  
 $CL\alpha = 0.1072E+00$  (1/deg)  $Cm\alpha = -0.2570E-01$  (1/deg)  
 縦安定中正点 (neutral point)  $hn = (0.25 - Cm\alpha / CL\alpha) * 100 = 0.48981E+02$  (%MAC)  
 脚  $\Delta CD = 0.20000E-01$  (-), スピードブレーキ  $\Delta CD = 0.40000E-01$  (-)  
 脚-DN, スピードブレーキ オフン, 初期フラップ角  $\delta f_{pilot} = 0.20000E+02$  (deg)  
 (微係数推算用フラップ  $\delta f = 0.20000E+02$  (deg))

(CG=25%)	(CG= 25.00%)	(フライト <sup>*</sup> 有次元)
Cy $\beta = -0.133527E-01$	Cy $\beta = -0.133527E-01$	Y $\beta' = -0.103432E+00$
Cy $\delta r = 0.267702E-02$	Cy $\delta r = 0.267702E-02$	Y $\delta r' = 0.207366E-01$
Cl $\beta = -0.377991E-02$	Cl $\beta = -0.377991E-02$	L $\beta' = -0.210557E+01$
Cl $\delta a = -0.188831E-02$	Cl $\delta a = -0.188831E-02$	L $\delta a' = -0.106573E+01$
Cl $\delta r = 0.116076E-03$	Cl $\delta r = 0.116076E-03$	L $\delta r' = 0.436502E-01$
Cl $p = -0.442445E+00$	Cl $p = -0.442445E+00$	L $p' = -0.152999E+01$
Cl $r = 0.266266E+00$	Cl $r = 0.266266E+00$	L $r' = 0.898406E+00$
Cn $\beta = 0.172082E-02$	Cn $\beta = 0.172082E-02$	N $\beta' = 0.230651E+00$
Cn $\delta a = 0.525906E-04$	Cn $\delta a = 0.525906E-04$	N $\delta a' = -0.234014E-01$
Cn $\delta r = -0.127596E-02$	Cn $\delta r = -0.127596E-02$	N $\delta r' = -0.217173E+00$
Cn $p = 0.459872E-02$	Cn $p = 0.459872E-02$	N $p' = -0.417020E-01$
Cn $r = -0.215260E+00$	Cn $r = -0.215260E+00$	N $r' = -0.198417E+00$

\*\*\*\*\*

(NAERO=21) 横  $\delta a$  コントロールシステム解析

●出力キー: i=3:BETA, 4:p, 5:r, 6:PHI (不明なら 6 入力)

\*\*\*\*\* (フィードバック前の極チェック) \*\*\*\*\*

\*\*\*\*\* POLES \*\*\*\*\*

POLES( 8), EIVMAX= 0.200D+02

N	REAL	IMAG	
1	-0.14000000D+02	-0.14282857D+02	[ 0.7000E+00, 0.2000E+02]
2	-0.14000000D+02	-0.14282857D+02	[ 0.7000E+00, 0.2000E+02]
3	-0.14000000D+02	0.14282857D+02	周期 P(sec)= 0.4399E+00
4	-0.14000000D+02	0.14282857D+02	周期 P(sec)= 0.4399E+00
5	-0.15551251D+01	0.00000000D+00	
6	-0.12375303D+00	-0.65985109D+00	[ 0.1843E+00, 0.6714E+00]
7	-0.12375303D+00	0.65985109D+00	周期 P(sec)= 0.9522E+01
8	-0.29209023D-01	0.00000000D+00	

\*\*\*\*\* (フィードバック後の極チェック) \*\*\*\*\*

\*\*\*\*\* POLES \*\*\*\*\*

POLES( 8), EIVMAX= 0.326D+01

N	REAL	IMAG	
1	-0.24102385D+01	-0.21927057D+01	[ 0.7397E+00, 0.3258E+01]
2	-0.24102385D+01	0.21927057D+01	周期 P(sec)= 0.2865E+01
3	-0.43156966D+00	-0.63070110D+00	[ 0.5647E+00, 0.7642E+00]
4	-0.43156966D+00	0.63070110D+00	周期 P(sec)= 0.9962E+01
5	0.00000000D+00	0.00000000D+00	
6	0.00000000D+00	0.00000000D+00	
7	0.00000000D+00	0.00000000D+00	
8	0.00000000D+00	0.00000000D+00	

\*\*\*\*\*

(以下の解析結果はインプットデータの制御則による)

\*\*\*\*\* POLES AND ZEROS \*\*\*\*\*

POLES( 8), EIVMAX= 0.1963D+02

N	REAL	IMAG	
1	-0.13734913D+02	-0.14022305D+02	[ 0.6997E+00, 0.1963E+02]
2	-0.13734913D+02	0.14022305D+02	周期 P(sec)= 0.4481E+00
3	-0.12092427D+02	-0.12373021D+02	[ 0.6990E+00, 0.1730E+02]
4	-0.12092427D+02	0.12373021D+02	周期 P(sec)= 0.5078E+00
5	-0.26510299D+01	-0.26783301D+01	[ 0.7035E+00, 0.3768E+01]
6	-0.26510299D+01	0.26783301D+01	周期 P(sec)= 0.2346E+01
7	-0.43754975D+00	-0.64370841D+00	[ 0.5622E+00, 0.7783E+00]

```

8   -0.43754975D+00   0.64370841D+00   周期 P(sec)= 0.9761E+01
ZEROS( 4), II/JJ= 6/ 1, G= 0.4253D+04
N      REAL      IMAG
1   -0.13725341D+02  -0.14014806D+02 [ 0.6997E+00, 0.1962E+02]
2   -0.13725341D+02   0.14014806D+02
3   -0.43638325D+00  -0.64308760D+00 [ 0.5615E+00, 0.7772E+00]
4   -0.43638325D+00   0.64308760D+00
***** POLES AND ZEROS *****
POLES( 8), EIVMAX= 0.2000D+02
N      REAL      IMAG
1   -0.14000000D+02  -0.14282857D+02 [ 0.7000E+00, 0.2000E+02]
2   -0.14000000D+02   0.14282857D+02   周期 P(sec)= 0.4399E+00
3   -0.13728745D+02  -0.14015872D+02 [ 0.6998E+00, 0.1962E+02]
4   -0.13728745D+02   0.14015872D+02   周期 P(sec)= 0.4483E+00
5   -0.15560837D+01   0.00000000D+00
6   -0.32698906D+00  -0.75853433D+00 [ 0.3959E+00, 0.8260E+00]
7   -0.32698906D+00   0.75853433D+00   周期 P(sec)= 0.8283E+01
8   -0.16428748D+00   0.00000000D+00
ZEROS( 5), II/JJ= 1/ 3, G=-0.1327D+04
N      REAL      IMAG
1   -0.13733439D+02  -0.14020290D+02 [ 0.6998E+00, 0.1963E+02]
2   -0.13733439D+02   0.14020290D+02
3   -0.31815672D+01   0.00000000D+00
4   -0.43445354D+00  -0.64954701D+00 [ 0.5560E+00, 0.7814E+00]
5   -0.43445354D+00   0.64954701D+00

```

```

-----
          周波数              ゲイン余裕              位相余裕
          4.15000 (rad/s)              (1) 55.79389 (deg)
          19.00000 (rad/s)  (1) 17.38634 (dB)
-----

```

ゲイン余裕最小値 = 17.38634 (dB), 位相余裕最小値 = 55.79389 (deg)

- (注 1) 空中では初期速度が 10kt を超え、かつ、インプットデータで脚下げ指定の場合は脚 DN およびスピードブレーキオープンとしてトリム計算する。  
(注 2) 空中では初期速度が 10kt 以下の場合、フラップと連動して、フラップ 5° 以上で脚 DN とする。  
(注 3) 滑走中は脚は常に DN、また、スピードブレーキは初期速度が 10kt を超える場合にオープン。

(14) <解析結果の表示>で“1”を選択すると、安定解析図が次のように得られる。

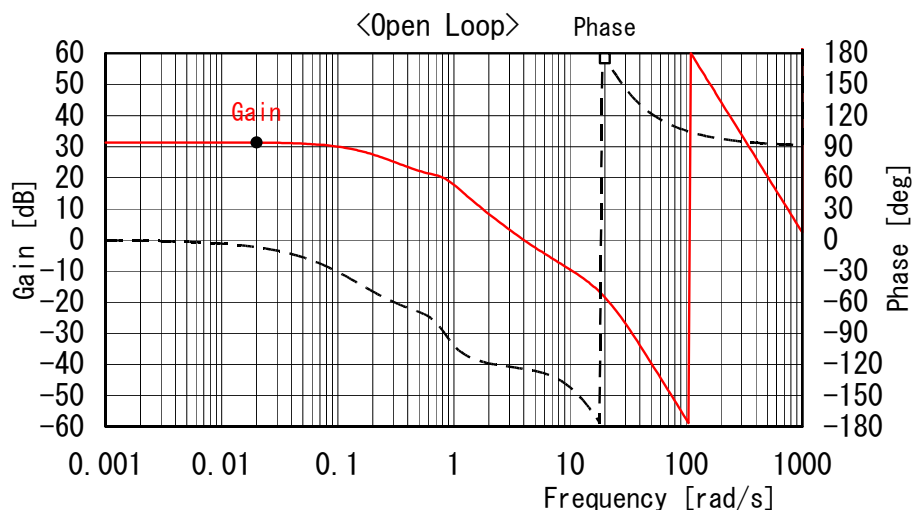


図 2 エルロン系オープンループの周波数特性

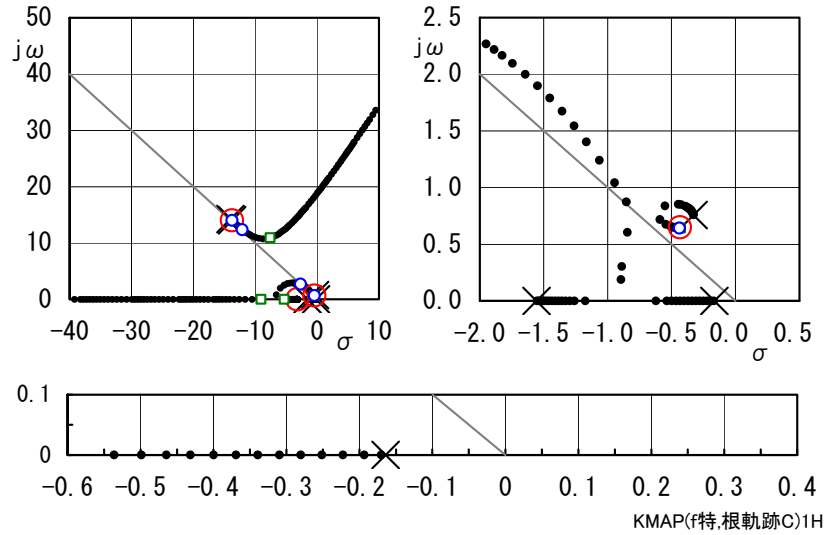
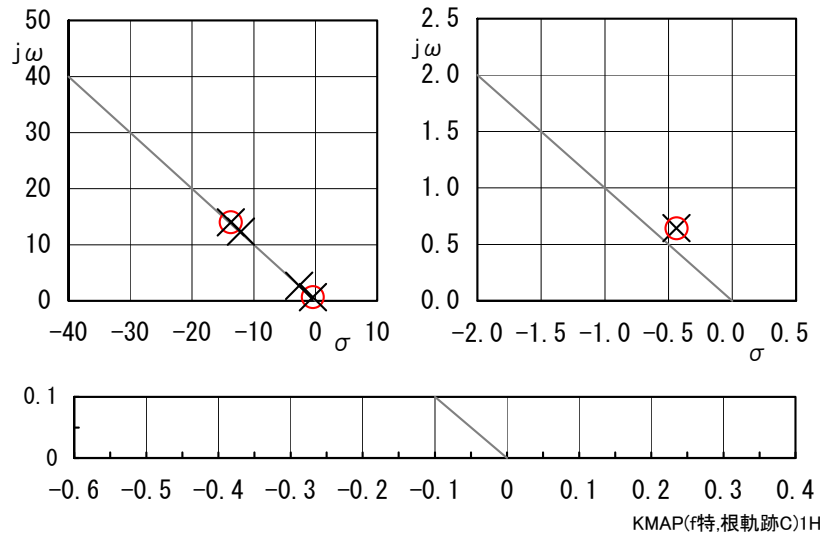
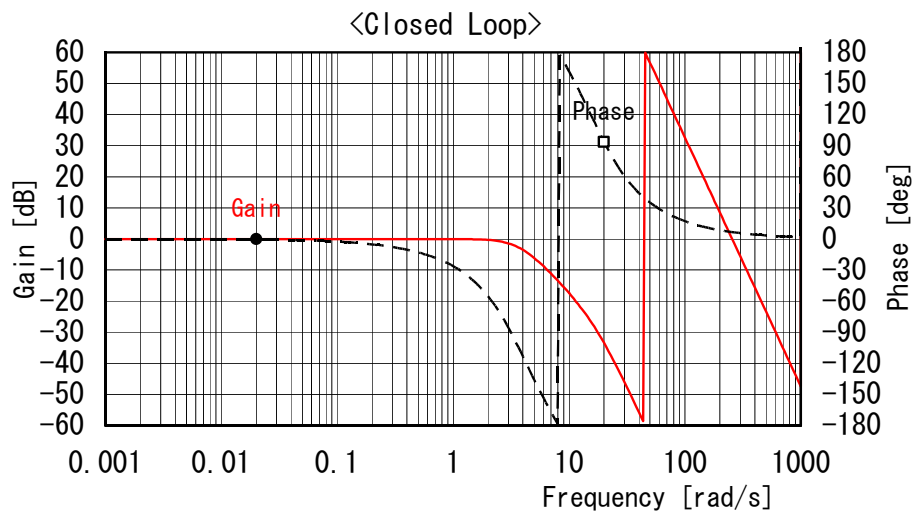


図3 エルロン系の根軌跡

図4 ロール角  $\phi/U2$  の極・零点図5 ロール角  $\phi/U2$  の周波数特性

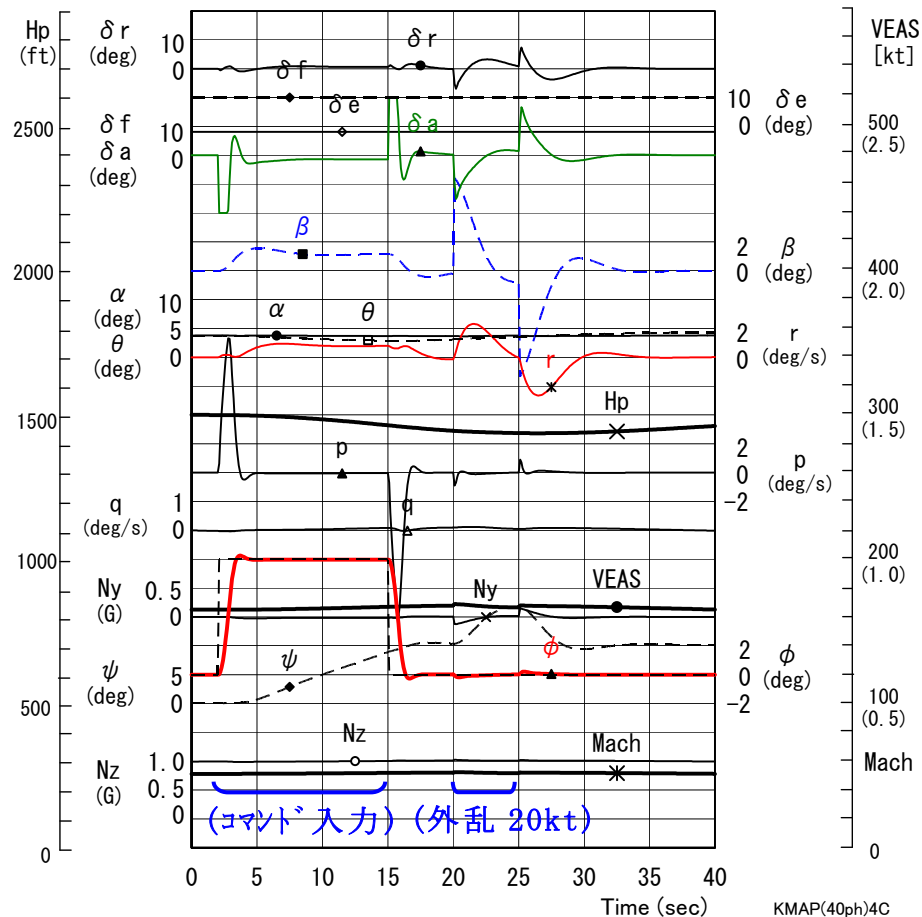


図 6 ロール入力シミュレーション

図 6 のシミュレーションの 20 秒～25 秒には、横ガスト 20kt が入力されているが、これは、インプットデータの中で次のように指定している。

```
....<vgust Input>.....
t1gust(s)      =      5.000
t2gust(s)      =     10.000
vgust12(kt)    =      0.000
t3gust(s)      =     20.000
t4gust(s)      =     25.000
vgust34(kt)    =     20.000
```

### ラダー系の解析

次に、ラダー系の解析であるが、図 1 のブロック図にはパイロットのラダー入力 U4 がない。そこで、U4 を横ガストの入力とすると、横ガスト入力に対する応答とともにラダー系オープンループの特性をみることができる。

(15)引き続き、AUTO.AAA0.DAT をマニュアルで次のように修正する

①<16>の横ガスト入力の“8”に修正

(16)これらの AUTO.AAA0.DAT の修正を保存する

(17)コマンドプロンプト画面の<解析結果の表示>で、“0” 選択



(18) 下記表示がでるので，“1” 選択すると修正されたデータで解析を実行  
 AUTO ファイルを修正して再計算しますか (0=No, 1=Yes(保存後)) -->

(19) 途中で次の表示がでるので，“4” 選択

● 設定したガストを，ゲイン最適化が可能となるように下記入力端を選択  
 してください。

★ 番号入力 ⇒ 1=U1 (De), 2=U2 (Da), 3=U3 (Df), 4=U4 (Dr), 5=U5 (DT)

(20) 下記が表示されるので，同じく  $Q_y(2, 2)=100$  に修正して “0” で進む

```
.....<<< 最適レギュレータ >>>.....
----<最適レギュレータ> (重み Qy, R) ----
[ 1].... Qy( 1, 1)= 0.1000000E+01
[ 2].... Qy( 2, 2)= 0.1000000E+03
[ 3].... R( 1, 1)= 0.1000000E+01
[ 4].... R( 2, 2)= 0.1000000E+01
----(INPUT)---- CHNG?=-
```

(21) 解析が終了すると<解析結果の表示>の画面となるので，“9” を選択  
 すると，安定解析結果(ラダー入力)と横ガストに対する応答が得られる。

```
..... (釣り合い飛行時のデータ) .....
S = 0.42800E+03 (m2)   CBAR = 0.79460E+01 (m)   Hp = 0.15000E+04 (ft)
W = 0.16091E+06 (kgf) qbarS = 0.19261E+06 (kgf) ROU = 0.11952E+00 (kgf·s2/m4)
V = 0.86778E+02 (m/s) VKEAS = 0.16500E+03 (kt)   b = 0.60900E+02 (m)
Ix = 0.11935E+07 (⇒) Iz = 0.39250E+07 (⇒)   Ixz = 0.11935E+06 (kgf·m·s2)
CL = 0.83552E+00 (－) α = 0.37503E+01 (deg)   CG = 0.25000E+02 (%MAC)
(この CL は初期釣合 G に必要な CL です)
T = 0.24890E+05 (kgf) δf = 0.20000E+02 (deg)   δe = -0.18750E+01 (deg)
CLα = 0.1072E+00 (1/deg) Cma = -0.2570E-01 (1/deg)
縦安定中正点 (neutral point) hn = (0.25 - Cmα / CLα) * 100 = 0.48981E+02 (%MAC)
脚 ΔCD = 0.20000E-01 (－),   スピードブレーキ ΔCD = 0.40000E-01 (－)
脚-DN,   スピードブレーキ オフン,   初期フラップ角 δfpilot = 0.20000E+02 (deg)
(微係数推算用フラップ δf = 0.20000E+02 (deg))

(CG=25%)           (CG= 25.00%)           (フライト 有次元)
Cyβ = -0.133527E-01   Cyβ = -0.133527E-01   Yβ' = -0.103432E+00
Cyδr = 0.267702E-02   Cyδr = 0.267702E-02   Yδr' = 0.207366E-01
Clβ = -0.377991E-02   Clβ = -0.377991E-02   Lβ' = -0.210557E+01
Clδa = -0.188831E-02   Clδa = -0.188831E-02   Lδa' = -0.106573E+01
Clδr = 0.116076E-03   Clδr = 0.116076E-03   Lδr' = 0.436502E-01
Clp = -0.442445E+00   Clp = -0.442445E+00   Lp' = -0.152999E+01
Clr = 0.266266E+00   Clr = 0.266266E+00   Lr' = 0.898406E+00
Cnβ = 0.172082E-02   Cnβ1 = 0.172082E-02   Nβ' = 0.230651E+00
Cnδa = 0.525906E-04   Cnδa = 0.525906E-04   Nδa' = -0.234014E-01
Cnδr = -0.127596E-02   Cnδr1 = -0.127596E-02   Nδr' = -0.217173E+00
Cnp = 0.459872E-02   Cnp = 0.459872E-02   Np' = -0.417020E-01
Cnr = -0.215260E+00   Cnr = -0.215260E+00   Nr' = -0.198417E+00
```

\*\*\*\*\*

(NAERO=22) 方向 δr コントロールシステム解析

● 出力キー: i=3:BETA, 4:p, 5:r, 6:PHI (不明なら 6 入力)

\*\*\*\*\* (フィードバック前の極チェック) \*\*\*\*\*

\*\*\*\*\* POLES \*\*\*\*\*

POLES( 8), EIVMAX= 0.200D+02

N	REAL	IMAG
1	-0.14000000D+02	-0.14282857D+02 [ 0.7000E+00, 0.2000E+02]

```

2  -0.14000000D+02  -0.14282857D+02 [ 0.7000E+00, 0.2000E+02]
3  -0.14000000D+02   0.14282857D+02  周期 P(sec)= 0.4399E+00
4  -0.14000000D+02   0.14282857D+02  周期 P(sec)= 0.4399E+00
5  -0.15551251D+01   0.00000000D+00
6  -0.12375303D+00  -0.65985109D+00 [ 0.1843E+00, 0.6714E+00]
7  -0.12375303D+00   0.65985109D+00  周期 P(sec)= 0.9522E+01
8  -0.29209023D-01   0.00000000D+00

```

\*\*\*\*\* (フィードバック後の極チェック) \*\*\*\*\*

\*\*\*\*\* POLES \*\*\*\*\*

POLES( 8), EIVMAX= 0.326D+01

```

N      REAL      IMAG
1  -0.24102385D+01  -0.21927057D+01 [ 0.7397E+00, 0.3258E+01]
2  -0.24102385D+01   0.21927057D+01  周期 P(sec)= 0.2865E+01
3  -0.43156966D+00  -0.63070110D+00 [ 0.5647E+00, 0.7642E+00]
4  -0.43156966D+00   0.63070110D+00  周期 P(sec)= 0.9962E+01
5   0.00000000D+00   0.00000000D+00
6   0.00000000D+00   0.00000000D+00
7   0.00000000D+00   0.00000000D+00
8   0.00000000D+00   0.00000000D+00

```

\*\*\*\*\*

(以下の解析結果はインプットデータの制御則による)

\*\*\*\*\* POLES AND ZEROS \*\*\*\*\*

POLES( 8), EIVMAX= 0.1963D+02

```

N      REAL      IMAG
1  -0.13734913D+02  -0.14022305D+02 [ 0.6997E+00, 0.1963E+02]
2  -0.13734913D+02   0.14022305D+02  周期 P(sec)= 0.4481E+00
3  -0.12092427D+02  -0.12373021D+02 [ 0.6990E+00, 0.1730E+02]
4  -0.12092427D+02   0.12373021D+02  周期 P(sec)= 0.5078E+00
5  -0.26510299D+01  -0.26783301D+01 [ 0.7035E+00, 0.3768E+01]
6  -0.26510299D+01   0.26783301D+01  周期 P(sec)= 0.2346E+01
7  -0.43754975D+00  -0.64370841D+00 [ 0.5622E+00, 0.7783E+00]
8  -0.43754975D+00   0.64370841D+00  周期 P(sec)= 0.9761E+01

```

ZEROS( 6), II/JJ= 6/ 2, G=-0.7100D+00

```

N      REAL      IMAG
1  -0.13981220D+02  -0.14265438D+02 [ 0.7000E+00, 0.1997E+02]
2  -0.13981220D+02   0.14265438D+02
3  -0.13624166D+02  -0.13906416D+02 [ 0.6998E+00, 0.1947E+02]
4  -0.13624166D+02   0.13906416D+02
5  -0.43806725D+00  -0.62404630D+00 [ 0.5745E+00, 0.7625E+00]
6  -0.43806725D+00   0.62404630D+00

```

\*\*\*\*\* POLES AND ZEROS \*\*\*\*\*

POLES( 8), EIVMAX= 0.2000D+02

```

N      REAL      IMAG
1  -0.14000000D+02  -0.14282857D+02 [ 0.7000E+00, 0.2000E+02]
2  -0.14000000D+02   0.14282857D+02  周期 P(sec)= 0.4399E+00
3  -0.12102553D+02  -0.12381181D+02 [ 0.6990E+00, 0.1731E+02]
4  -0.12102553D+02   0.12381181D+02  周期 P(sec)= 0.5075E+00
5  -0.26522829D+01  -0.26785037D+01 [ 0.7036E+00, 0.3769E+01]
6  -0.26522829D+01   0.26785037D+01  周期 P(sec)= 0.2346E+01
7  -0.16108387D+00  -0.52420570D+00 [ 0.2937E+00, 0.5484E+00]
8  -0.16108387D+00   0.52420570D+00  周期 P(sec)= 0.1199E+02

```

ZEROS( 5), II/JJ= 2/ 4, G=-0.2136D+03

```

N      REAL      IMAG
1  -0.12148029D+02  -0.12425175D+02 [ 0.6991E+00, 0.1738E+02]
2  -0.12148029D+02   0.12425175D+02
3  -0.26567792D+01   0.26830929D+01
4  -0.26567792D+01  -0.26830929D+01 [ 0.7036E+00, 0.3776E+01]
5  -0.52177941D+00   0.00000000D+00

```

-----  
周波数

ゲイン余裕

位相余裕

0.12000 (rad/s) (1) 175.22870 (deg)  
 0.91000 (rad/s) (2) 86.67487 (deg)  
 20.00000 (rad/s) (1) 34.17421 (dB)

ゲイン余裕最小値 = 34.17421 (dB), 位相余裕最小値 = 86.67487 (deg)

- (注 1) 空中では初期速度が 10kt を超え、かつ、インプットデータで脚下げ指定の場合は脚 DN およびスピードブレーキオープンとしてトリム計算する。
- (注 2) 空中では初期速度が 10kt 以下の場合は、フラップと連動して、フラップ 5° 以上で脚 DN とする。
- (注 3) 滑走中は脚は常に DN、また、スピードブレーキは初期速度が 10kt を超える場合にオープン。

(22) <解析結果の表示>で“1”を選択すると、安定解析図が次のように得られる。

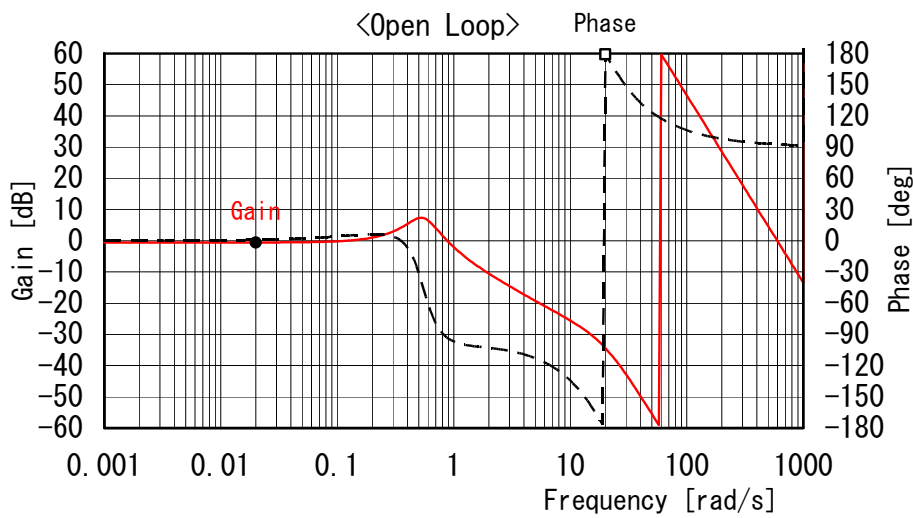


図 7 ラダー系オープンループの周波数特性

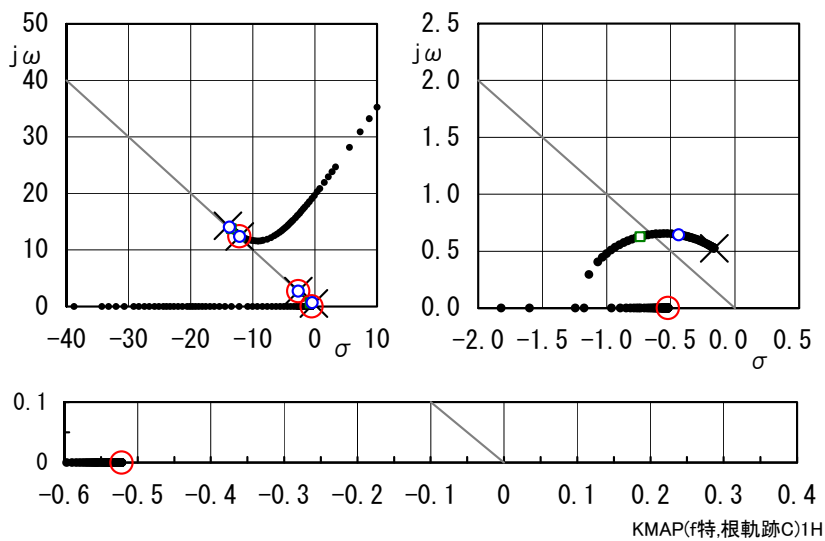


図 8 ラダー系の根軌跡

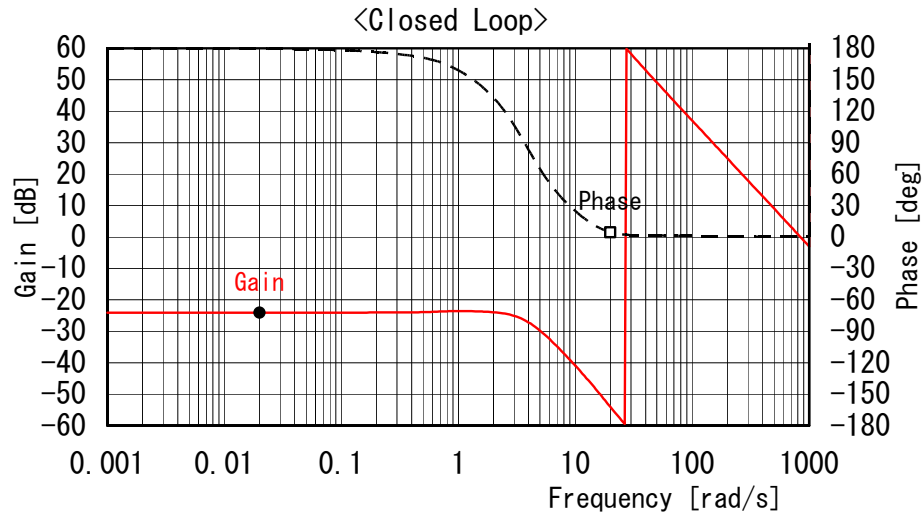
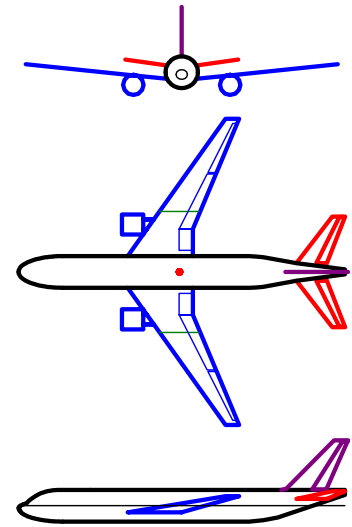


図 9 横ガストに対するロール角 ( $\phi/vg$ ) の周波数特性

なお、<解析結果の表示>で“3”を選択すると、Ecex1 図によって右図のように機体 3 面図が得られる。

(画面に表示された文章や図をワード文書で利用するには、当該部分の領域を選択し、ワードの「編集」タグから「形式を選択して貼り付け」を実施すると精度よく貼り付けることができる)



#### 参考文献

- 1) 片柳亮二：例題で学ぶ航空制御工学，技報堂出版，2014.

以上