

## 安全な飛行制御系とは(4)

－設計基準に安定余裕が規定されている

KMAP (ケーマップ) 研究会

代表 片柳亮二(\*)

### 1. 安定余裕の設計基準

図 1.1 は、前資料「安全な飛行制御系とは(3)」で検討した不安定な先尾翼機のピッチ角制御系である。近年の飛行制御系はフライ・バイ・ワイヤ方式となっており、コンピュータがコントロール舵面のフル舵角まで操舵するため、制御系の不具合は致命的な事故につながる危険がある。これまで、多くの不具合を克服した成果である設計ノウハウとしてまとめられた設計基準の中に、制御系の安定余裕を確保するよう規定されている。具体的には、各コントローラ舵面系統において、ゲイン余裕±6dB 以上、位相余裕 45° 以上の安定余裕を持つことが規定されている。ゲイン余裕 6dB または -6dB とは、ゲインが 2 倍または 1/2 倍になっても安定である要求である。

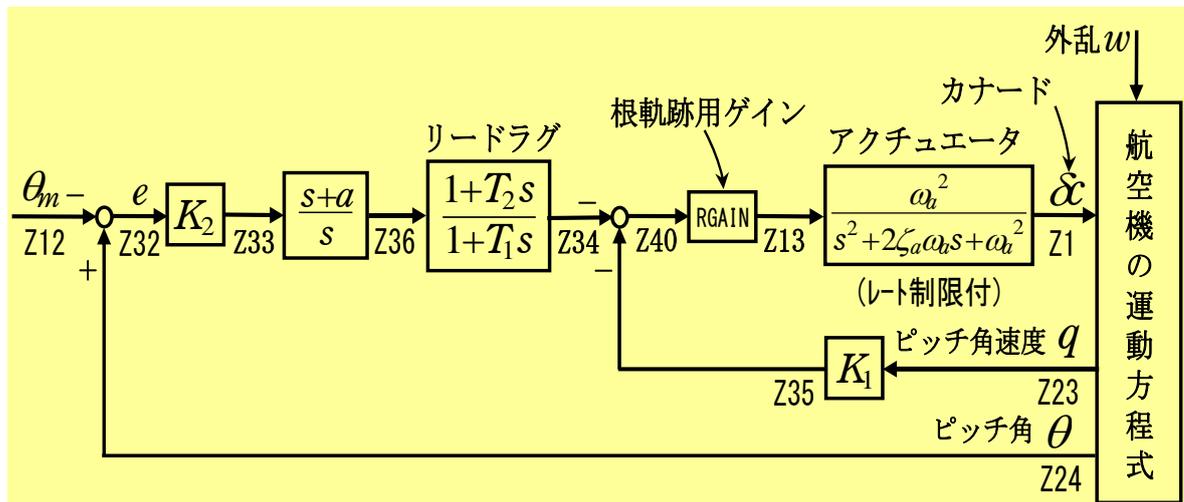


図 1.1 不安定な機体のピッチ角制御系

この安定余裕要求は、実際の飛行前に、実物のハードウェア(コンピュータ、アクチュエータなど)を用いた地上試験において規定値を満足しているか確認していく必要がある。この安定余裕は、空気力の推定誤差や種々のハードウェアの非線形や遅れの影響などを考慮したもので、経験値として規定されている値である。設計時には、基本的には同じ安定余裕要求を満足することを確認していくが、たとえ設計時に安定余裕要求を満足していてもハードウェアを用いた地上試験で満足しないことが起こる。その場合には設計から見直しが必要になる。このような設計見直しとなるとスケジュールに影響を与えるため、そのようなことを避けるためには、設計時の数学モデルを極力実物の特性に近い状態にしておくことが重要である。例えば、アクチュエータ

(\*)T-2CCV 研究機(日本初のコンピュータ制御の飛行機)および F-2 支援戦闘機の飛行制御則の設計を担当。40 年以上に亘り三菱重工および大学にて飛行制御の設計と研究を実施。現在も KMAP 研究会にて活動を続けている

(<http://r-katayanagi.air-nifty.com/>, E-mail:qqq00437@nifty.com)

のモデル化は、1次遅れとするのは理想的すぎるので、少なくとも2次遅れ形にするなどである。

ここでは、図 1.1 のピッチ角制御系について、安定余裕の要求を満足するようにフィードバックゲインを決めることを行う。これは難しい設計のように考えられるが、KMAPゲイン最適化という方法を用いると、難しい理論は必要なく簡単に解が得られることを次に示す。

## 2. 設計に用いる機体

ここで用いる機体は、「安全な飛行制御系とは(3)」で検討した不安定な先尾翼機のピッチ角制御系である。図 2.1 に主要諸元と3面図を示す。

機体重量(着陸)	6.45 (tf)
主翼面積	20.7 (m <sup>2</sup> )
翼面荷重	312 (kgf/m <sup>2</sup> )
平均翼弦	1.74 (m)
スパン	12.8 (m)
胴体長	14.0 (m)
カナード面翼(exp)	2.23 (m <sup>2</sup> )
主翼カナード間距離	4.28 (m)
カナード容積比	0.265 (—)
全機空力中心	10.3 (%MAC)
重心	35.3 (%MAC)

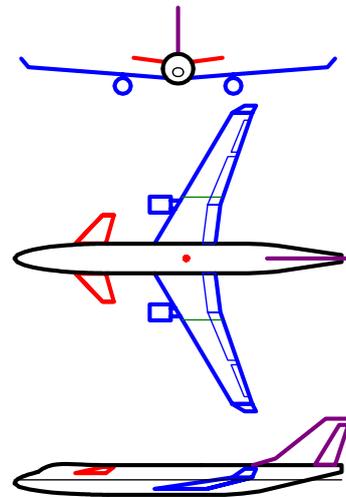


図 2.1 機体例の主要諸元と3面図

## 3. KMAPゲイン最適化によるゲイン設計

ここでは、次の設計目的①～④を同時に満足すること、すなわち多目的制御設計をおこなう。この中の設計目的③が安定余裕要求である。その他の設計目的の内、①と②は「安全な飛行制御系とは(3)」で検討したものである。設計目的④は「安全な飛行制御系とは(3)」の設計結果の性能が十分でなかったものを改善するための要求である。

設計目的①：アクチュエータを考慮する  
 設計目的②：振動極を極力左 45° のライン上に配置して安定化する  
 設計目的③：ゲイン余裕 10dB 以上，位相余裕 45° 以上で安定化  
 設計目的④：外乱から姿勢角応答の  $H_{\infty}$  ノルムを -25dB 以下にする

まず、KMAPを立ち上げると次のように表示される。

```

##### < KMAP*** 解析内容選択 > #####
##                                     (20**.*.*) ##
## ● 従来型のキーイン方式による各種KMAP解析 ##
##   1 : 「一般」(下記以外) ⇒ 航空機の運動・制御系解析, スピン運動 ##
##   2 : 「CDES」           ⇒ 航空機(含む機体形状データ)の解析 ##
##   3 : 「CDES.WAT」       ⇒ 水中ビークルの運動・制御系解析 ##
##   4 : 「EIGE」          ⇒ 基礎的な制御, 振動, 最適化, ##
##                           ロボットの制御, 自動車の制御, 船の制御 ##
##   5 : 「EIGE.MEC」      ⇒ 工作機械の制御解析 ##
##   6 : 「HAYA」         ⇒ キーインなしで航空機シミュレーション ##
##   7 : シミュレーションデータの保存と加工 ##
## ----- ##
##   11: 有限要素法(FEM)による構造物の弾性解析 (参考図書⑥ 参照) ##
##   12: 差分法(FDM)による流体, 熱の流れの解析 (参考図書⑥ 参照) ##
##   13: 飛行機の翼理論, 2次元ポテンシャル流厳密解 (参考図書⑮ 参照) ##
## ----- ##
## ● 飛行機(CDES)の自動化解析(新規) ##
##   23: 解析スタート ⇒ 保存リストをコピーしてデータ新規作成 ##
## ----- ##
##   (20:自動化解析の説明, 30: 取り扱い説明書(pdf資料)) ##
##   (86:参考図書, 87:KMAP変更内容の履歴, 88:注意事項の表示) ##
## ----- ##
##   9 : 終了 ##
#####
● 上記の番号を選択 -->

```

ここで, 23, 13, 98 とキーインすると, 例題のインプットデータのリストが表示されるので, その中から次のデータ

「CDES.多目的飛行制御 22.Y170927.DAT」

の番号をキーインするとそのインプットデータのコピーが取り込まれる.

次に, 制御則メニューが表示されるので, 0 とキーインすると, 計算が進み, <インプットデータ修正(後半部)>と表示されるので, 次のようにキーインしてKMAPゲイン最適化を実施する.

1, 9, 1, 0, 0, 1, 1, -25, 0, 1, 10, 45, 98, 0, 0, 7, 1, 7

こうして, ゲイン最適化の計算が開始され, 100万回の探索の結果が表示される.

$$K_1 = 1.62, \quad K_2 = 3.48, \quad a = 0.0803, \\ T_1 = 4.99, \quad T_2 = 8.86$$

次に, <解析結果の表示>で 1 とキーインすると, 安定解析図が次のように表示される. これから, 設計目的①, ②が実現されていることがわかる.

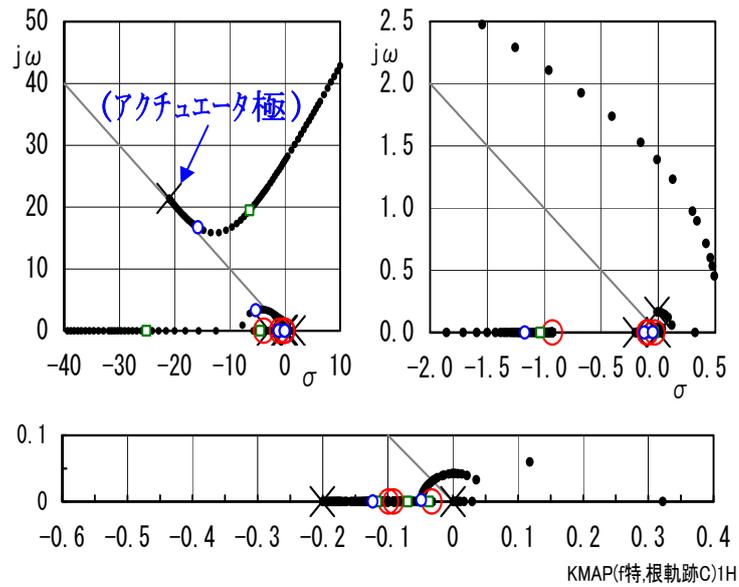


図 3.1  $\alpha$ ラインの根軌跡  
(CDES. 多目的飛行制御 22. Y170927. DAT)

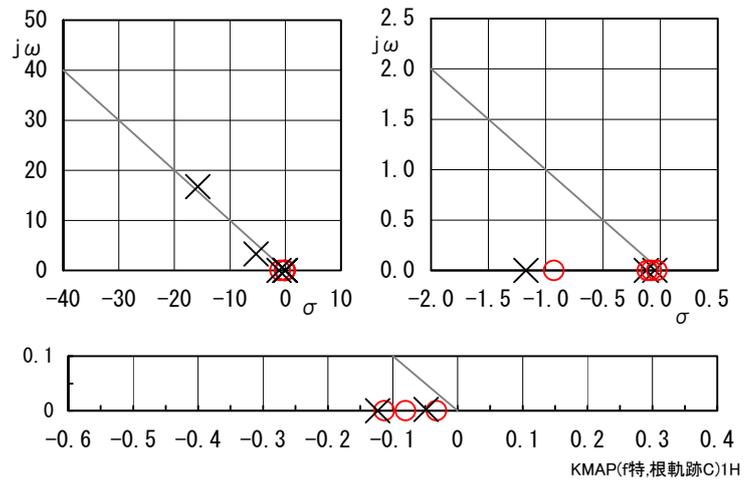


図 3.2  $\theta/\theta_m$ の極・零点

図 3.3 は、オープンループの周波数特性である．この周波数特性から安定余裕まとめると表 3.1 のようであり，設計目的③が実現されていることがわかる．

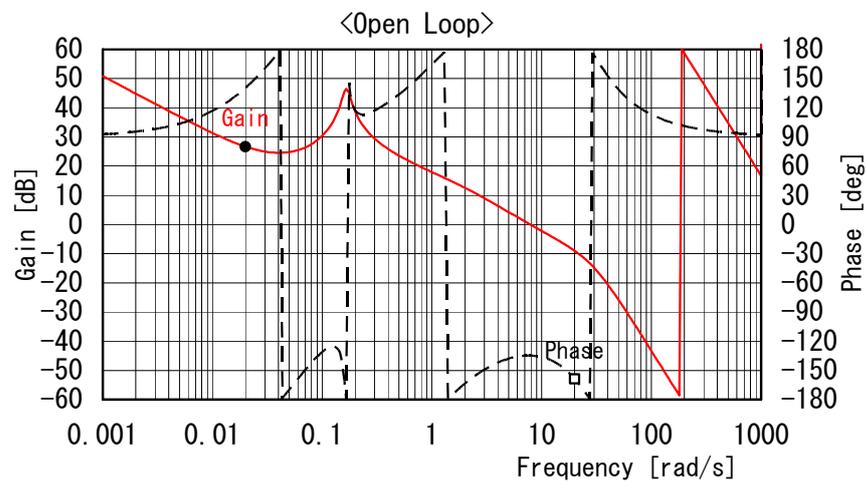


図 3.3 オープンループの周波数特性

表 3.1 安定余裕

周波数(rad/s)	ゲイン余裕 (dB)	位相余裕(deg)
0.044	24.6	—
1.40	15.5	—
7.95	—	45.3
29.0	13.4	—
ゲイン余裕最小値 = 13.4 (dB), 位相余裕最小値 = 45.3 (deg)		

図 3.4 は、機体下方からの外乱  $w$  に対するピッチ角の応答のゲインと位相である。この外乱応答の  $H_\infty$  ノルムは  $-25\text{dB}$  となっており、設計目的④が実現されていることがわかる。

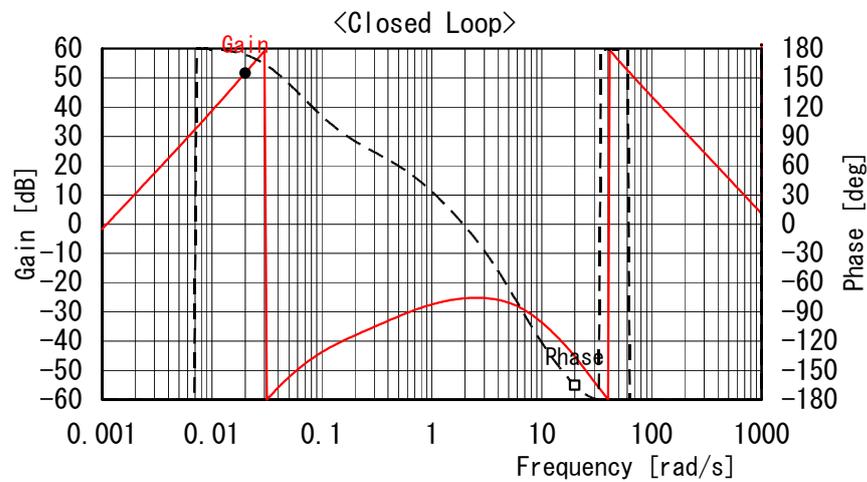
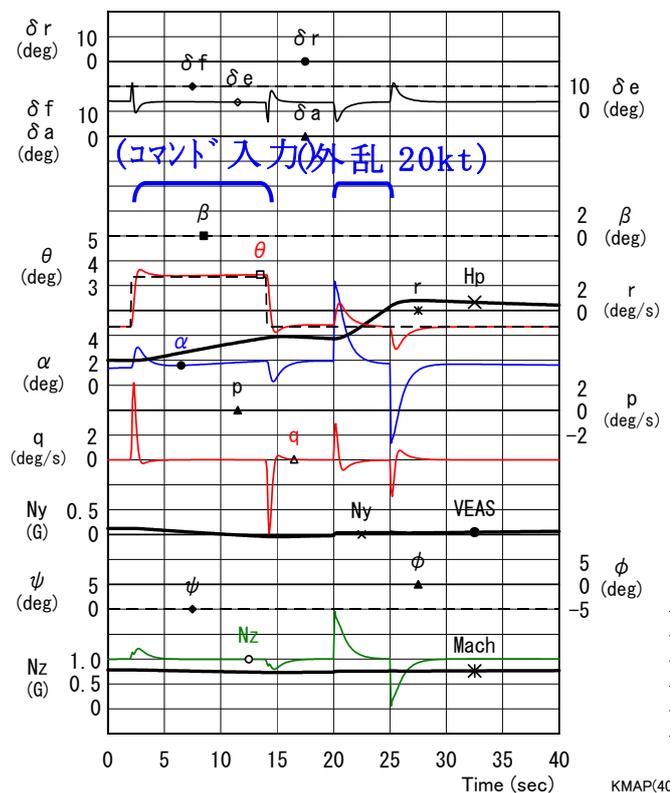
図 3.4 外乱特性  $\theta/w$  の周波数特性

図 3.5 コマンド応答および外乱特性

図 3.5 は、 $t=2\sim 14$  秒にピッチ角 $+2^\circ$  コマンドを入れ、さらに  $t=20\sim 25$  秒に下から外乱  $20kt$  が入力された場合のシミュレーション結果である。安定は十分であり、コマンドに対するピッチ角の追従も良好である。また、外乱入力に対するピッチ角も  $0.5^\circ$  程度と小さいことがわかる。

以上