小山工業高等専門学校研究紀要
第　39　号（2007）37－46

制御理論講話（その10）
―ロバスト制御の応用―

A Lecture on Control Theory (Part 10)
―Applications of Robust Control―

渡利　久規，山崎　敬則，山川　雄司*，黒須　茂**
Hisaki WATARI，Takanori YAMAZAKI，Yuji YAMAKAWA*，Shigeru KUROSU**

本稿では，制御理論講話（その9）の補足として1次系について再び考察し，よりH_∞制御を理解することを目的としてまとめている．まず，復習を兼ねて，H_∞制御の概要と解法について論じる．つぎに，1次系を例にして，より理解を深めることにする．

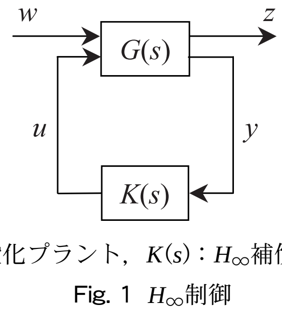
****

1.　H_∞制御理論

1.1　H_∞制御

H_∞制御とは，入力から出力までの伝達関数のゲインの最大値（すなわち，H_∞ノルム）をある値γ 以下にするということである．

H_∞制御の解法には，多くの方法が提案されているが，本稿では，DoyleらによるDGKF法[3)] を採用する．



$G(s)$：一般化プラント，$K(s)$：H_∞補償器

Fig. 1　H_∞制御

*)　平成14年度機械工学科卒業(東京大学大学院在学中)

**)　研究所“Crotech”

1.2　H_∞制御問題

定義された外乱wと制御量zとの間の閉ループ伝達関数$G_{zw}(s)$に対して

$$\|G_{zw}\|_\infty < \gamma \qquad (1)$$

とし，かつFig.1の閉ループ系を安定にする制御器$K(s)$（H_∞補償器という）を求める問題である．H_∞制御問題を解くために，まず，**一般化プラント**を求めておかなければならない．

1.2.1　一般化プラント

現代制御では，状態方程式と出力方程式で議論していたが，ロバスト制御ではモデル化誤差（または重み関数）なども含めて，プラントの拡大系として，H_∞制御では一般化プラントというものを定義する．

$$\left.\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + B_1 w + B_2 u \\ z &= C_1 x + D_{11} w + D_{12} u \\ y &= C_2 x + D_{21} w + D_{22} u \end{aligned}\right\} \qquad (2)$$

ここで，$\boldsymbol{x}$は状態量，$\boldsymbol{z}$は制御量，$\boldsymbol{w}$は外部入力，$\boldsymbol{u}$は操作量，$\boldsymbol{y}$は出力である．

1.2.2　H_∞制御問題の解法

解法には，さまざまな提案がなされている．最初に一般解が与えられたのは，1988年のGlover, Doyleの論文である．この論文では，3つのRiccati方程式を解くことによってH_∞制御問題を解いている．翌年，1989年にはDoyle, Glover, Khargonekar,

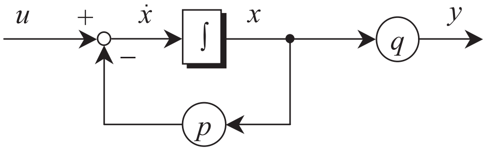


Fig. 2　状態線図

Francisらによって2つのRiccati方程式を解くことでH_∞制御問題の解を与えた．最近の研究では，LMI（線形行列不等式）やBMI（双線形行列不等式）による解法も提案されている．本稿では，1989年のDoyleらの論文よりDGKF法とよばれる解法を用いることにする．

2.　例題

例題から，H_∞制御の解法を理解しよう．

1次系（ノミナルプラント）

つぎのプラントに対して，コントローラの設計を行う．

$$P_0(s) = \frac{K}{Ts+1} \qquad （ここで，K=1,\ T=10[\mathrm{min}]）$$

プラントの分母・分子をTで割り，つぎの式に書き直す．

$$P_0(s) = \frac{K/T}{s+1/T} = \frac{q}{s+p}$$

ここで，$p = 1/T(0.1),\ q = K/T(0.1)$

プラントを状態方程式と出力方程式で表わすと，

$$\left.\begin{aligned} \dot{x} &= -px + u \\ y &= qx \end{aligned}\right\}$$

となり，状態線図はFig. 2のようになる．ここで，x：状態量，y：出力である．

さらに，各入出力に重みを考え，H_∞制御系を構成するとFig.3となり，一般化プラントはつぎのように定義される．

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \hline z_u \\ z_1 \\ z_y \\ \hline y \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{c|ccc|c} -p & b_1 & 0 & 1 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \\ c_1 & 0 & 0 & 0 \\ c_y q & 0 & 0 & 0 \\ \hline -q & 0 & b_r & 0 \end{array}\right] \begin{bmatrix} x \\ \hline w_1 \\ r \\ \hline u \end{bmatrix} \tag{3}$$

ここで，x：状態量，z_u：制御量（制御入力），z_1：制御量，z_y：制御量（出力），y：観測量，w_1：外乱，r：目標値，u：制御入力である．

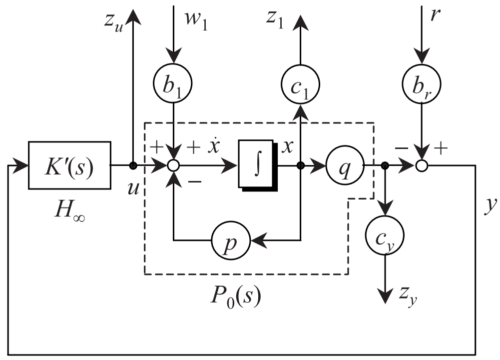


Fig. 3　H_∞制御系

八つあん「操作量に該当するuに制御量z_uを割り当てているよ．なにか理由があるんでしょう？」

ご隠居「DGKF法の前提条件に

$$D_{12}{}^T D_{12} = I$$

がある．この条件を満たすために，$D_{12}= [1\ 0\ 0]^{\mathrm{T}}$にしなければばならない．そのため，制御量$z_u$と制御入力$u$を考えたのだ」

DGKF法の条件を満足するかを確かめる必要がある．実際に計算すると，

$$D_{12}{}^T C_1 = B_1 D_{21}{}^T = 0,\ D_{12} D_{12}{}^T = I$$
$$D_{11}=0,\ D_{22}=0$$

となり，これらの条件は満足しているが，

$$D_{21} D_{21}{}^T = \begin{pmatrix} 0 & b_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & b_r \end{pmatrix}^T = b_r^2$$

となり，条件を満たしていないため，DGKF法を用いてH_∞制御問題を解くことができない場合が存在する．すなわち，

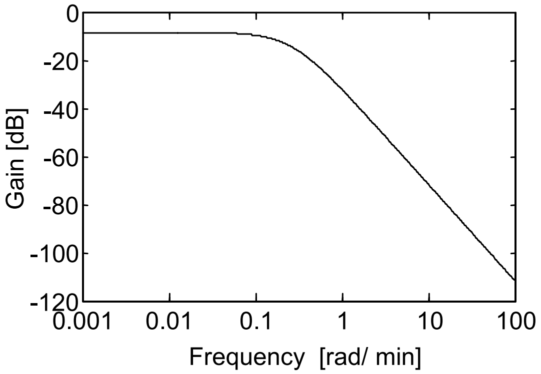
$$\|G_{zw}\|_\infty < \gamma$$

を満たさない補償器を設計してしまうことがある．しかし，この問題の場合には，目標値に対する重みb_rを1とすることによって，DGKF法の条件を満足することができる．

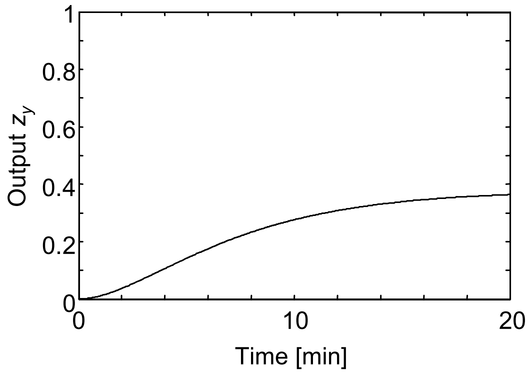
重みをつぎのように与えた．

$$b_1=1,\ b_r=1,\ c_1=0,\ c_y=1,\ \gamma=0.75$$

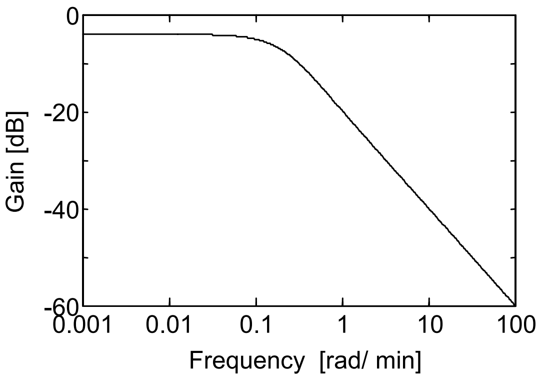
このように，入力・出力に対する重みを1として，γを最小化する問題，すなわちH_∞ノルムを最小



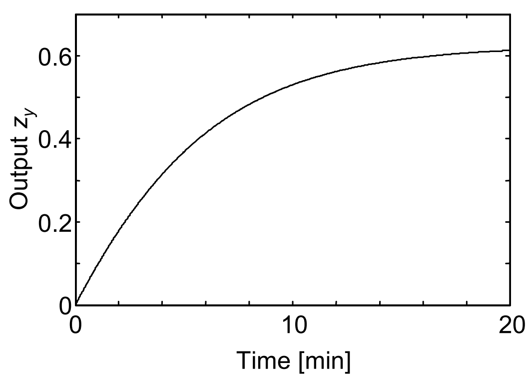
（a）z_y/r のボード線図



（c）目標値応答（ステップ応答）



（b）z_y/w_1のボード線図



（d）外乱応答（ステップ応答）

Fig. 4 制御性能

にする制御則を求める問題をH_∞**最適制御問題**と呼んでいる．このときに設計された補償器の伝達関数はつぎのようである．

$$X=0.0680$$

$$Y=6.7962$$

$$K(s)=\frac{0.2582}{s+0.4271}$$

目標値応答，外乱応答，ボード線図をFig.4に示す．

八つあん「γ=0.75とすれば，目標値ならびに外乱から出力（z_y）へのボード線図の定常ゲインが0dB以下になって，オフセットがでるのは，当然でしょう？γ=1000にしたらどうなるの？」

ご隠居「これについては，あとで表にまとめるから待ってくれ！」

制御系がI型でないため，これらの応答を見てわかるように，オフセットを生じていることがわかる．また，外乱については，入力1に対して，最大出力が約0.6という点から，ほとんど外乱抑制の効果が見られない．

八つあん「b_rは1でないとダメなんですか？」

ご隠居「そうだ．b_rを大きくしていくと，すべての伝達関数をγ未満に抑えることができない」

八つあん「ご隠居．具体的に説明してもらえませんかね」

ご隠居「b_rは設計パラメータに関わらないので，どれだけ変化させても補償器の伝達関数は変化しない．しかし，一般化プラントにおける目標値rから偏差に対応するyまでの伝達関数は，

$$\frac{y}{r}=b_r\frac{1}{1+PK}$$

で与えられる．通常，b_rを変化させれば，それに対応して補償器の伝達関数は

$$\max\left(\frac{y}{r}\right)=\max\left(b_r\,\frac{1}{1+PK}\right)<\gamma$$

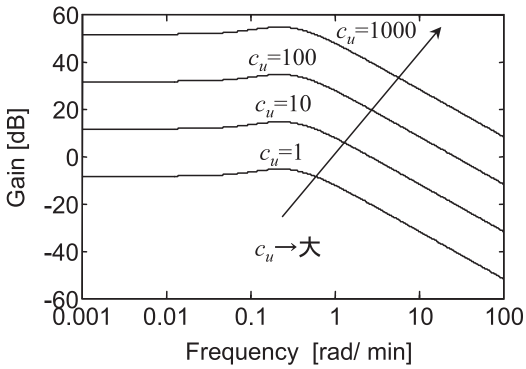
を満たすように変化するはずである．しかし，今回の場合には，b_rを大きくしても，補償器の伝達関数が変化しないため，b_rを大きくしていくとゲインが$20\log_{10}b_r$で増加し，γ未満にできない．このように，DGKF法の条件を満足しないときは，H_∞制御問題を解いていないのだ．したがって，Fig.3における一般化プラントを用いてH_∞補償器を設計するためには，b_rを1にしなければならない」

八つあん「ご隠居．b_r=1を変化させても，H_∞補償器が変化しなければ，目標値応答を改善することができないということですか？」

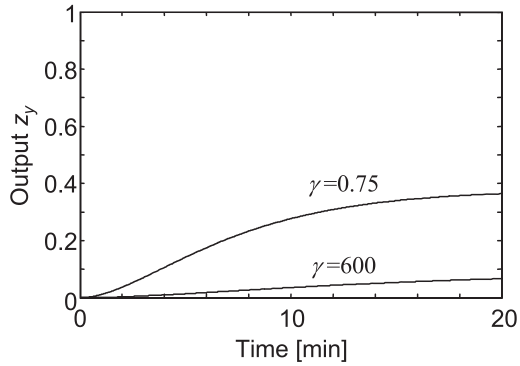
ご隠居「そうだ．だから，今回は目標値追従特性は無視してH_∞補償器を設計しているのだ．しかし，外乱に対する重みb_1やc_yを変化させれば，H_∞補償器が変化するから，改善することは可能だ．でも，目標値応答を重要視して設計したい場合には，どうすることもできないのだ．したがって，また一般化プラントを再定義しなおして，何とかB_1，B_2，C_1，C_2の中にb_rが関わるようにしなければならんのだ．その一例を示したのが，制御理論講話（その9）で示した積分器を一般化プラントに付加することだったりするのだ．また，目標値rから出力z_yへの伝達関数を考えた場合，定常ゲインを1（0dB）にしなければならない．したがって，H_∞ノルムをγ未満にするというH_∞制御問題に不向きである．そのため，偏差から出力への伝達関数を小さくする問題や目標値から偏差への伝達関数を小さくする問題に帰着させるような工夫が必要となるのだ」

八つあん「ご隠居，操作量uに制御量z_uを割り当てた理由も，ただ単に$z_u=u$とおいて，DGKF法の条件を満足させているだけではなく，z_u = $c_u u$として，その重みc_uを1にしているという意味なんですね？」

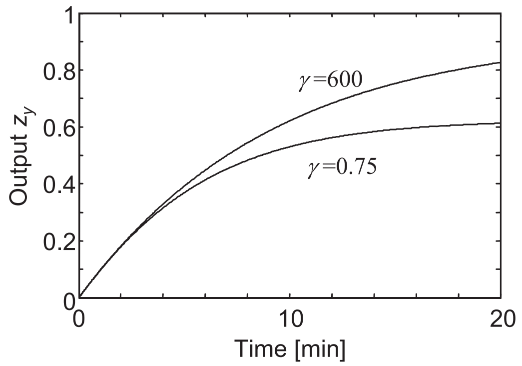
ご隠居「そういうことじゃ．もちろんD_{11}，D_{12}，D_{21}，D_{22}はRiccati方程式に関係してないから，得られる補償器の伝達関数には変わりはない．ところが，c_uを増加させたときに，r → z_uのゲイン線図を画くと，Fig.5(a)のようになる．Fig.5(a)を見ると，c_uを1以上にすると，$\gamma=0.75$を満足してな



(a) c_uを変化させたときのz_u / rのボード線図



(b) 目標値応答



(c) 外乱応答

Fig. 5 制御性能

いことがわかる．そこで，γを大きくして，c_u = 1000に対してγ= 600として設計すると，補償器の伝達関数はつぎのようになる．

$$K(s)=\frac{0.0172}{s+0.183}$$

このときの目標値応答と外乱応答を示したのが，Fig. 5(b), (c)である．これより，操作量uを重要視すると，途端に応答が悪化するのじゃ」

八つあん「b_r = 1，c_u = 1というのはわかったのですが，b_r = 1000，c_u = 1000とすれば，DGKF法の条件

$$D_{21}D_{21}{}^T=I,\ \ D_{12}{}^TD_{12}=I$$

を満足しないから，一般化プラントから再定義しなければなりませんか？」

ご隠居「なんど同じことを聞くのじゃ．一般化プラントを再定義してもよいが，今回の一般化プラントの場合には，重みを調整することによって，DGKF法の条件を満足することができるから，一般化プラントを再定義しなくてもよいのだ」

2.1 Riccati解と補償器の伝達関数

つぎに，b_1，c_yとγを変化させたときのRiccati解と補償器の伝達関数を**Table1**に示す．今回，制御量z_1に対する重みc_1は0とした．つまり，c_yによってz_yを見ているから，z_1は無視してもよいと考えている．

Table 1を見てわかるように，b_1やc_yを単独に同じ割合で増加させたとき，フィードバックゲインXやオブザーバゲインYの値は変わるが，補償器の伝達関数は(b)と(c)との対応した項目において全く変わらない．また，b_1を増加させたとき，フィードバックゲインXはほとんど変化がなく，オブザーバゲインYが増加している．一方，c_yを増加させたとき，オブザーバゲインYはほとんど変化がなく，フィードバックゲインXが増加している．さらに，両方を増加させたとき，フィードバックゲインとオブザーバゲインは重みを単独で増加させたときと同じ割合で増加している．そして，補償器のゲインが増加していくこともわかる．

以上の結果より，ある重み1つだけを大きくするよりも，複数の重みを調整することによって，補償器の設計を行う方が効果的であることがわかる．

熊さん「ご隠居！計算結果だけ見せられても困りますよ．今回の場合はスカラーで計算できるんですから，数式で示してくださいよ」

ご隠居「わかったよ．まず，はじめに$B_1B_1{}^T$，$B_2B_2{}^T$，$C_1{}^TC_1$，$C_2{}^TC_2$を計算してしまおう．一般化プラントをベクトル・行列で示したのが，式（3）だから，B_1，B_2，C_1，C_2は次式で与えられる．

$$B_1=\begin{bmatrix}b_1 & 0\end{bmatrix},\quad B_2=\begin{bmatrix}1\end{bmatrix}$$

$$C_1=\begin{bmatrix}0 & c_1 & c_yq\end{bmatrix}^T,\quad C_2=\begin{bmatrix}-q\end{bmatrix}$$

これらを用いて計算すると，

$$B_1B_1{}^T=b_1{}^2,\ \ B_2B_2{}^T=1$$

$$C_1{}^TC_1=c_1{}^2+c_y{}^2q^2,\ \ C_2{}^TC_2=q^2$$

であるから，これらをRiccati方程式に代入すると，つぎのようになる．

$$\begin{cases}-pX-Xp+X\left(\gamma^{-2}b_1{}^2-1\right)X+\left(c_1{}^2+c_y{}^2q^2\right)=0\\ -pY-Yp+Y\left(\gamma^{-2}\left(c_1{}^2+c_y{}^2q^2\right)-q^2\right)Y+b_1{}^2=0\end{cases}$$

$$\begin{cases}X^2\left(\gamma^{-2}b_1{}^2-1\right)-2pX+\left(c_1{}^2+c_y{}^2q^2\right)=0\\ Y^2\left(\gamma^{-2}\left(c_1{}^2+c_y{}^2q^2\right)-q^2\right)-2pY+b_1{}^2=0\end{cases}$$

さらに，2次方程式を解くと，つぎのようにRiccati解は与えられる．

$$X=\frac{2p\pm\sqrt{4p^2-4\left(\gamma^{-2}b_1{}^2-1\right)\left(c_1{}^2+c_y{}^2q^2\right)}}{2\left(\gamma^{-2}b_1{}^2-1\right)}$$

$$Y=\frac{2p\pm\sqrt{4p^2-4\left(\gamma^{-2}\left(c_1{}^2+c_y{}^2q^2\right)-q^2\right)b_1{}^2}}{2\left(\gamma^{-2}\left(c_1{}^2+c_y{}^2q^2\right)-q^2\right)}$$

さらに簡単にすると，

$$X=\frac{p\pm\sqrt{p^2-\left(\gamma^{-2}b_1{}^2-1\right)\left(c_1{}^2+c_y{}^2q^2\right)}}{\left(\gamma^{-2}b_1{}^2-1\right)}$$

$$Y=\frac{p\pm\sqrt{p^2-\left(\gamma^{-2}\left(c_1{}^2+c_y{}^2q^2\right)-q^2\right)b_1{}^2}}{\left(\gamma^{-2}\left(c_1{}^2+c_y{}^2q^2\right)-q^2\right)}$$

b_1	1	1	1	1	1	1
c_y	1	1	1	1	1	1
γ	0.75	1	2	3	4	5
X	0.0680	0.05	0.0431	0.0421	0.0418	0.0417
Y	6.7962	5.0	4.305	4.2116	4.1807	4.1667
H_∞補償器の伝達関数	$\frac{0.2582}{s+0.4271}$	$\frac{0.03333}{s+0.1667}$	$\frac{0.01943}{s+0.1774}$	$\frac{0.01809}{s+0.1804}$	$\frac{0.01767}{s+0.1815}$	$\frac{0.01748}{s+0.182}$

(a) γ を変化させたとき

b_1	1	10	100	1000
c_y	1	1	1	1
γ	1000	1000	1000	1000
X	0.0414	0.0414	0.0415	0.05
Y	4.14	90.5	990.05	9990
H_∞補償器の伝達関数	$\frac{0.0172}{s+0.183}$	$\frac{0.375}{s+1.05}$	$\frac{4.107}{s+10.04}$	$\frac{49.98}{s+100.1}$

(b) b_1 を変化させたとき

b_1	1	1	1	1
c_y	1	10	100	1000
γ	1000	1000	1000	1000
X	0.0414	0.905	9.9	99.9
Y	4.14	4.14	4.15	5.0
H_∞補償器の伝達関数	$\frac{0.0172}{s+0.183}$	$\frac{0.375}{s+1.05}$	$\frac{4.107}{s+10.04}$	$\frac{49.98}{s+100.1}$

(c) c_y を変化させたとき

b_1	1	10	100	500
c_y	1	10	100	500
γ	1000	1000	1000	1000
X	0.0414	0.905	9.95	57.6018
Y	4.14	90.5	994.99	5760.2
H_∞補償器の伝達関数	$\frac{0.0172}{s+0.183}$	$\frac{8.191}{s+1.91}$	$\frac{999.9}{s+20}$	$\frac{49660}{s+129.5}$

(d) b_1，c_y を変化させたとき

Table 1　重み（b_1・c_y）と γ を変化させたときのX，Y，H_∞補償器の伝達関数

のようにRiccati解は計算できるのだ．この数式から，フィードバックゲインXには，出力に対する重みc_yが大きく依存していることがわかる．一方，オブザーバゲインYには，出力に対する重みb_1が大きく依存していることがわかる．

b_1=500，c_y=500，γ^{-2}=0としたときについて計算すると，

$$X=49.9$$
$$Y=4990$$

が得られる．γを極端に大きくすると，X=57.6，Y=5760（Table 1(d)）に比べれば，フィードバックゲインやオブザーバゲインが小さくなることがわかる．

また，Riccati解が存在するためには，ルートの中身が正の値にならなければならない．ゆえに，重みを与えるのにも限界があることがわかるだろう．実際に計算すると，2つのRiccati解からつぎの2つの条件を導くことができる．

フィードバックゲイン*X*からの可解条件導出

$$p^2-\left(\gamma^{-2}b_1^{\ 2}-1\right)\left(c_1^{\ 2}+c_y^{\ 2}q^2\right)>0$$

c_1=0を考慮すると，

$$p^2-\left(\gamma^{-2}b_1^{\ 2}-1\right)c_y^{\ 2}q^2>0$$

$$\gamma^{-2}b_1^{\ 2}c_y^{\ 2}q^2<p^2+c_y^{\ 2}q^2$$

$$\gamma^{-2}b_1^{\ 2}c_y^{\ 2}<1+\left(\frac{c_y p}{q}\right)^2$$

さらに，p=0.1，q=0.1を代入すると，

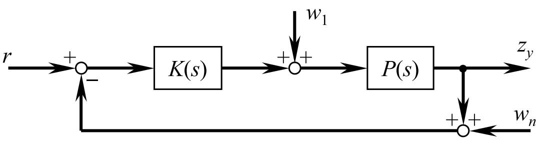
$$\gamma^{-2}b_1^{\ 2}c_y^{\ 2}<1+c_y^{\ 2}$$

オブザーバゲイン*Y*からの可解条件導出

$$p^2-\left(\gamma^{-2}\left(c_1^{\ 2}+c_y^{\ 2}q^2\right)-q^2\right)b_1^{\ 2}>0$$

c_1=0を考慮すると，

$$p^2-\left(\gamma^{-2}c_y^{\ 2}-1\right)b_1^{\ 2}q^2>0$$



w_n：観測ノイズ

Fig. 6　制御系

$$\left(\gamma^{-2}c_y^{\ 2}-1\right)b_1^{\ 2}<\frac{p^2}{q^2}$$

さらに，p=0.1，q=0.1を代入すると，

$$\left(\gamma^{-2}c_y^{\ 2}-1\right)b_1^{\ 2}<1$$

これらをまとめると，つぎの2つの条件式はRiccati解が存在するための条件となる．

$$\begin{cases}\gamma^{-2}b_1^{\ 2}c_y^{\ 2}<1+c_y^{\ 2}\\ \gamma^{-2}b_1^{\ 2}c_y^{\ 2}<1+b_1^{\ 2}\end{cases}$$

これらの条件を満足しないと，H_∞補償器を導出することができない．事実，b_1，c_yを1としたとき，γの限界値は0.707という結果が得られ，はじめに設計したγ=0.75は妥当な結果であったことがわかるだろ」

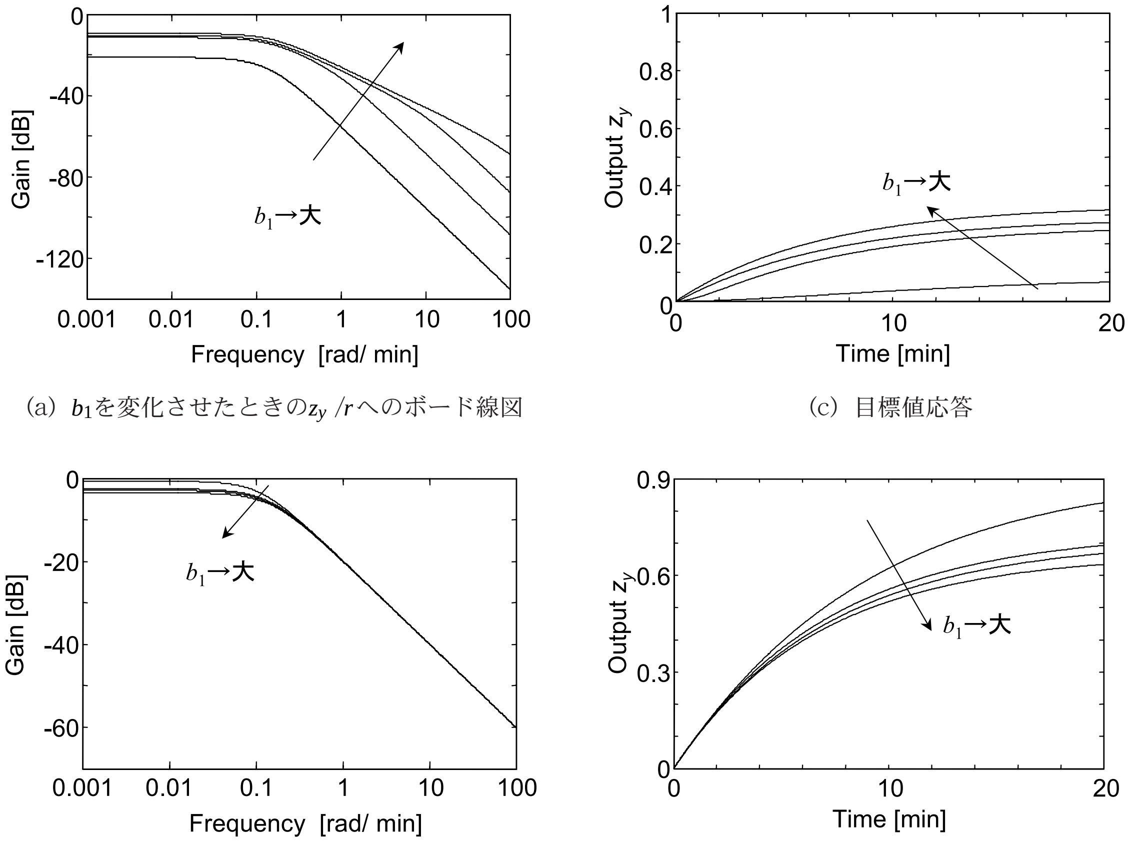
八つあん「H_∞補償器が導出できないとは，どういうことが起こるのですか？」

ご隠居「フィードバックゲインX，オブザーバゲインYが計算できない．すなわち，Riccati解を求めることができないのだ」

熊さん「ご隠居．可解条件があることはわかりましたが，重みを変化させると，どのように変化していくのか示してくださいよ」

2.2　H_∞補償器の制御性能

ご隠居「わかった．Fig.6に示す一般的な制御系において，b_1だけを変化させたときの目標値から出力へのボード線図，外乱から出力へのボード線図と目標値応答・外乱応答，また，b_1とc_yを変化させたときの目標値から出力へのボード線図と外乱から出力へのボード線図と目標値応答・外乱応答をFig. 7とFig. 8に示すぞ」



(a) b_1を変化させたときのz_y /rへのボード線図
(c) 目標値応答
(b) b_1を変化させたときのz_y /w_1へのボード線図
(d) 外乱応答

Fig. 7　b_1を変化させたときの制御性能

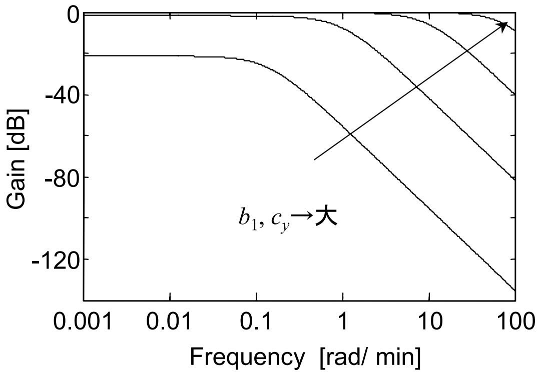
Fig.7よりb_1のみを大きくしたときのボード線図を見ると，目標値については，あるところから制御性能は改善されていない．また，このボード線図は観測ノイズから出力へのボード線図と等価であるから，観測ノイズの観点から見ると，高周波においてゲインが上昇していることから，制御系がノイズに弱くなっていることがわかる．つぎに，外乱についてのボード線図を見ると，低周波領域におけるゲインが若干であるが減少していることがわかる．高周波領域では全く変化がない．

つぎに，Fig. 8よりb_1とc_yを大きくしたときのボード線図を見ると，b_1のみを大きくしたときよりも帯域幅が広くなっていることから，はるかに制御性能が上昇していることがわかる．しかし，観測ノイズw_nから出力z_yへの伝達関数が目標値rから出力z_yへの伝達関数と同じであるから，それだけ観測ノイズに弱くなっていることもわかる．H_∞補償器を適用したときの制御系は2次系になっている．そのため，ゲインを上昇させると，2次系に見られる共振点が見られるはずである．しかし，H_∞補償器の場合には，共振点を作らないように設計されているように見える．

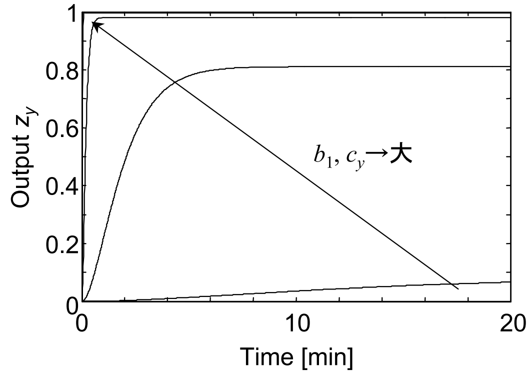
つぎに，外乱についてのボード線図を見ると，b_1のみを大きくしたときと同様に，低周波領域において大きくゲインが減少していることがわかる．また，高周波領域では，ほとんど変化がない．

熊さん「ご隠居！重みを大きくしたら，目標値応答や外乱応答が良好になることはわかりましたが，他の周波数特性が悪化したりはしないんですか？」

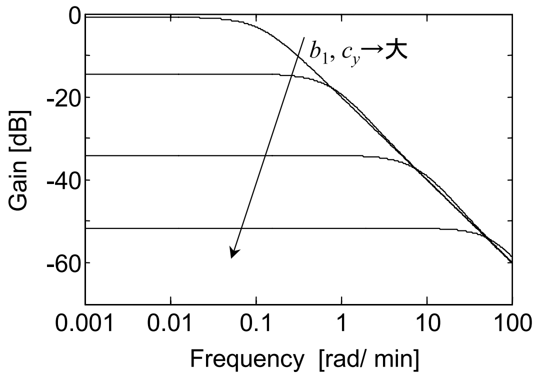
ご隠居「おぉ！いい質問じゃな．この問題の場合



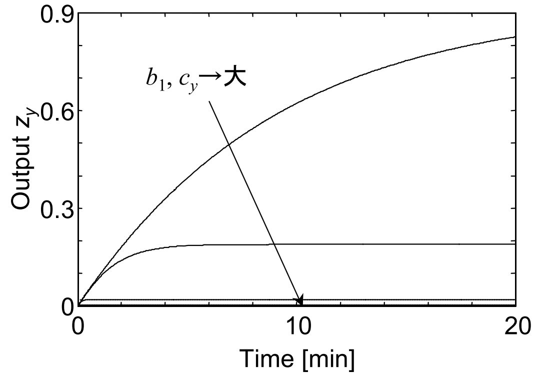
（a）b_1を変化させたときのz_y /rへのボード線図



（c）目標値応答



（b）b_1を変化させたときのz_y /w_1へのボード線図



（d）外乱応答

Fig. 8　b_1，c_yを変化させたときの制御性能

では，目標値rから操作量z_uや外乱w_1から操作量z_uへのH_∞ノルムが増大してしまうのだ（Fig.9）．ここでは，目標値rから操作量z_uへのボード線図を示すぞ」

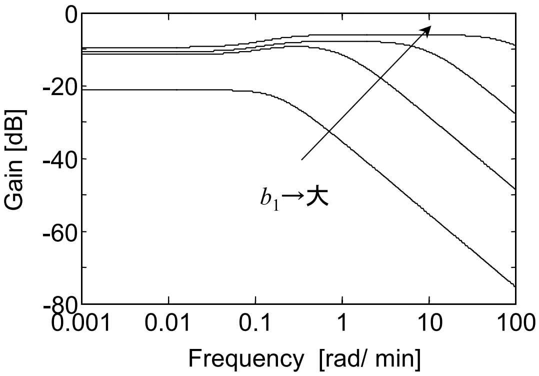
熊さん「それはどういう意味ですか？」

ご隠居「これは，大きな操作量が必要だということを意味しているのだよ．したがって，操作量の制限がある場合には，目標値から操作量や外乱から操作量へのH_∞ノルムの評価指標に加えなければならないのだ．応答を早くするためには，それだけの大きなエネルギーが必要で，当たり前の結果が得られたわけだ．このように，ある伝達関数のH_∞ノルムを小さくしようとすると，他の伝達関数のH_∞ノルムが増加してしまうのだ．」

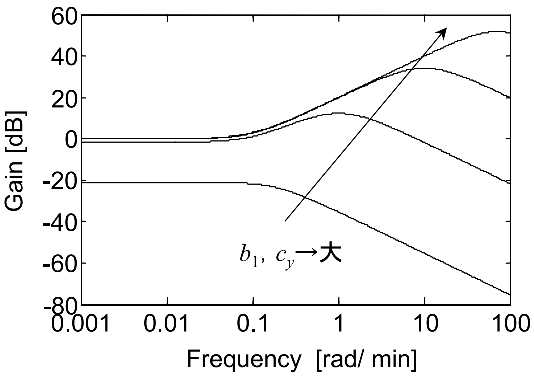
熊さん「結局，操作量を犠牲にしてもいいから，とにかく応答だけはよくしてくれといったら，どうすりゃいいんだ？」

ご隠居「そしたら，b_1=500，c_y=500としてくれ！そのときの目標値応答，外乱応答，操作量の応答をFig.10に示すぞ．このように，目標値応答・外乱応答ともにすぐに定常状態となり，目標値応答に関しては，オフセットも見られない．しかし，操作量を見ると，最大約300も必要となってしまうのだ」

八つあん「1960年代に最適制御が出現したときも，純慣性系の最短時間制御でBang-bang Controlが使いものにならないということが取り沙汰されました．その後，KalmanがLQ制御，LQI制御なるものを提案し，フィードバック制御が導入されてやっと最適制御は使いものになると認められました．しかし，こうしてご隠居からH_∞制御の導入を拝聴したわけですが，理想に近い目標値応



(a) b_1を変化させたときのz_y /rのボード線図



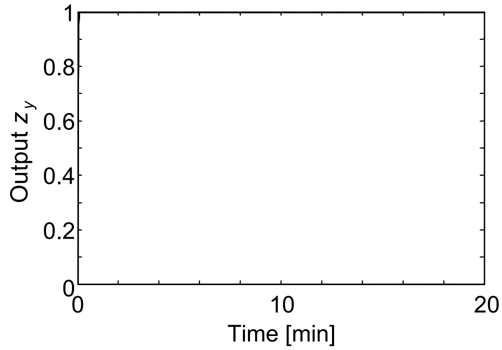
(b) b_1, c_yを変化させたときのz_y /rのボード線図

Fig. 9　目標値から操作量へのゲイン線図

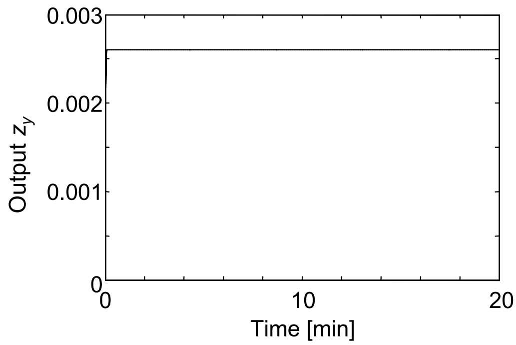
答や外乱応答をするように設計すると，とてつもない操作量が必要となる．当たり前といえば当たり前の結果ですが，だからどうすればいいんですか．新しい制御を導入すれば，新しい視点が与えられなければ意味がないと思うんですがね」

熊さん「わしらは温度制御だの，サーボ制御だのいっていますが，結局制御系のことをよく理解してないと思うんですよ．だって，目標値応答とか外乱応答しか思いつかないんだもの．そういう要求では，それなりの答えしか得られないのは当然だと思うよ」

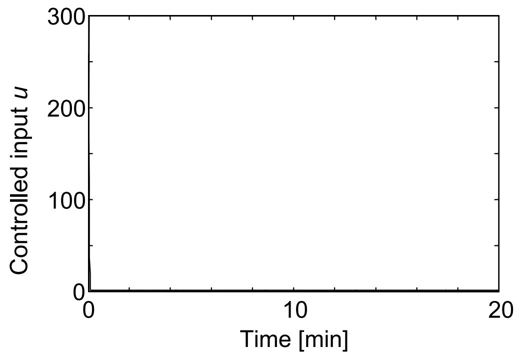
ご隠居「そういうことだ．操作量への規制をどういう形で決めていくかということがわかって，はじめてH_∞制御の導入が意味をもってくるんではないかね」



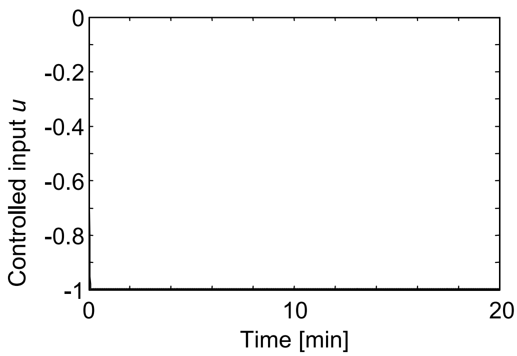
(a) 目標値応答



(b) 外乱応答



(c) 目標値応答における操作量



(d) 外乱応答における操作量

Fig. 10　ステップ応答