平成 31 年度
神戸大学大学院工学研究科 博士課程前期課程
機械工学専攻　入学試験問題

科目名：生産工学･制御工学　［ 1 / 3 ］

（問題［1］，［2］は別々の答案用紙に回答すること．）

［1］　以下の(1)～(4)の問いに答えよ．

(1) 図 1-1 に示す 2 次元切削モデルについて次の問いに答えよ．

(a) 図中の角度 α，ϕ の名称を示せ．

(b) 図中の角度 ϕ の値によって切削力の大きさが決まるが，ϕ が 20° と 30° では切削力が大きいのはどちらか示せ．また，その理由を簡潔に説明せよ．

(c) 工具材料に要求される特性を 2 つ挙げて，その特性が必要となる理由を説明せよ．



図 1-1　2 次元切削モデル

(2) 図 1-2 の砥石の状態を示す模式図を見て次の問いに答えよ．

(a) 図中①の正常な砥石の状態に対して，砥石の切れ味が劣化する②，③，④の状態がどのように呼ばれているかを示せ．

(b) 図中②と③の砥石の状態で，砥石の切れ味が劣化する理由を説明せよ．

(c) 砥石の自生作用という現象を説明せよ．

(3) 図 1-3 に示す部品番号①の部品図を見て次の問いに答えよ．

(a) “M12” および “3-M12” の意味を説明せよ．

(b) 102×102×22 の鋼板（材質は S45C）からこの部品を加工するために必要な切削工具を列挙せよ．

(4) 工作機械における “母性の原理” を簡潔に説明せよ．

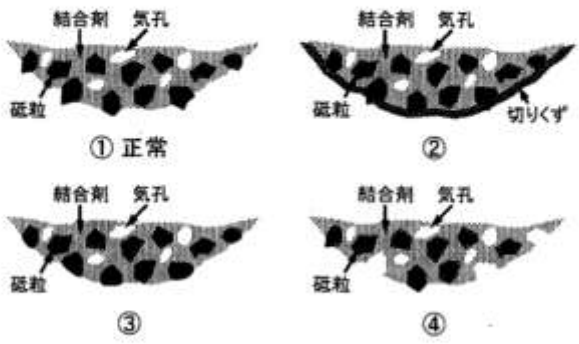


図 1-2　砥石の状態を示す模式図

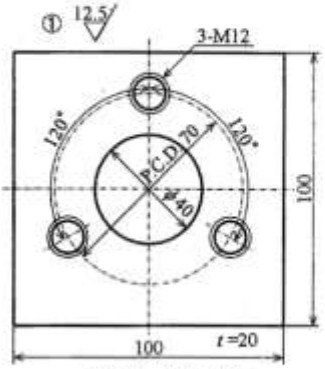


図 1-3　部品図

2019（H31）年度　⑤生産工学　問題

【1】（1）〈2 次元切削モデル〉

（1）図 1-1 に示す 2 次元切削モデルについて次の問いに答えよ。

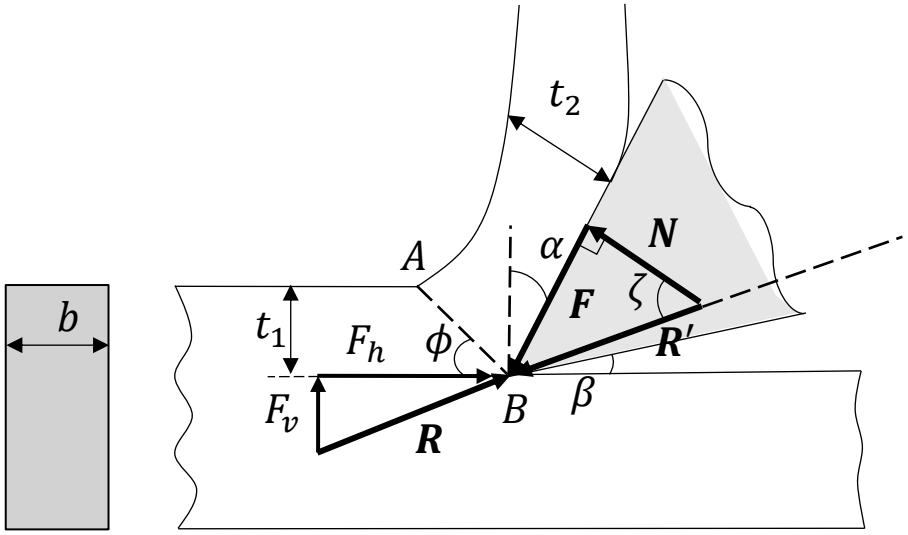


図 1　2 次元切削モデルと 2 次元切削における力のつり合い

ここで、図に示した記号は以下の 2 次元切削における用語である。

α：すくい角　β：逃げ角　**ϕ：せん断角**　ζ：摩擦角

t_1：切込み　t_2：切りくず厚さ　b：切削幅

R , R'：合成切削力　F_h：水平分力（主分力）F_v：垂直分力（背分力）

F_s：せん断面せん断力　F_n：せん断面垂直力

F：すくい面摩擦力　N：すくい面垂直力

（a）図中の角度 α, ϕ. の名称を示せ。

α：すくい角　　ϕ：せん断角

（b）図中の角度 ϕ の値によって切削力の大きさが決まるが、ϕ が 20° と 30° では切削力が大きいのはどちらか示せ。また、その理由を簡潔に説明せよ。

$\phi = 20°$ の方が、$\phi = 30°$ より切削力は大きい。せん断角が大きいほど、
せん断面面積が小さくなり、より少ない力で切削が行われるから。

（c）工具材料に要求される特性を 2 つ挙げて、その特性が必要となる理由を説明せよ。

・耐摩耗性…硬く摩耗しない工具は、高速切削が可能であるから。

・耐欠損性（耐衝撃性・靭性）…強く折れない工具は、断続切削が可能であるから。

・耐熱性…高温でも、硬さと強さを保つ必要があるから。

【1】（2）〈砥石〉

（a）図中①の正常な砥石の状態に対して、砥石の切れ味が劣化する②,③,④の状態がどのように呼ばれているかを示せ。
②目詰まり　③目つぶれ　④目こぼれ
（b）図中の②と③の砥石の状態で、砥石の切れ味が劣化する理由を説明せよ。
② … 隙間に切りくずが詰まってしまっているから。 ③ … 砥粒が潰れて平らになってしまっているから。
（c）砥石の自生作用という現象を説明せよ。
多層の固定砥粒工具を用いた加工において、上の砥粒が破砕あるいは脱落することにより、下から新しい切れ刃を発生して切れ味のよい状態を維持する現象。

【1】（3）〈製図法〉

（a）“M12”および“3-M12”の意味を説明せよ。
・“M12”…メートル並目ねじの呼び径 12 [mm] ・“3-M12”…同じサイズの穴・ねじが 3 個
（b）102×102×22 の鋼板（材質は S45C）からこの部品を加工するために必要な切削工具を列挙せよ。
・ドリル　・旋盤　・ボール盤　・フライス盤

【1】（4）〈母性の原理〉

（4）工作機械における“母性の原理”を簡潔に説明せよ。
切削加工のように、工作物から一定量を加工工具によって除去する加工においては、製品の寸法や形状の精度は、工作機械の持つ動的精度によって制限される。 つまり、工作機械の精度以上の製品を作ることはできない。（できるはずがない！） したがって、**子である製品は母なる工作機械に制約・転写される**という原理である。

2019（H31）年度【1】講評

（1）機械工学実験でもお馴染みの 2 次元切削モデルについての問いである。 （2）（1）同様に、製造プロセス工学Ⅰの範囲からの出題である。研削加工。 （3）製図法の基本的な知識が問われている。実習を思い出せばよい。 （4）母性という単語から意味は推測できる。というか知ってて当然。答え方がムズイ。解答は、JSME 辞典から引用したが、「転写」という語句を入れた方がいいかも。

平成 31 年度
神戸大学大学院工学研究科 博士課程前期課程
機械工学専攻　入学試験問題

科目名：生産工学･制御工学　［ 2 / 3 ］

(問題 [1]，[2] は別々の答案用紙に解答すること．)

[2] フィードバック制御系に関する以下の問いに答えよ．

(1) 図 2-1 に示す回転系において，θ[rad] は回転体の回転角，I[kg·m^2] は回転体の軸周りの慣性モーメント，D[N·m·s] は両端の軸受部での粘性摩擦の影響を合わせた回転運動に関する粘性摩擦係数，τ[N·m] は回転体に加わるトルクである．まずこの回転系の運動方程式を示し，そこから τ から θ までの伝達関数 $G(s)$ を求めよ．

(2) 問 (1) の $G(s)$ の周波数応答を測定したところ，図 2-2 のようなボード線図を得た．ゲイン線図には折れ線近似の直線も点線でプロットしてある．これより，

$$G(s) = \frac{10}{s(10s+1)}$$

と推定した．この推定の過程を述べるとともに，このときの I と D の値を示せ．

(3) 問 (2) で推定した $G(s)$ を制御対象として，図 2-3 に示すようなフィードバック制御系 1 を構成した．ただし $K(>0)$ は比例ゲインである．この系の閉ループ伝達関数 $H(s)$ を求めよ．さらに，この $H(s)$ において $K = 10$ とし，目標値として $\theta_d = \sin\sqrt{10}\,t$ の正弦波を与えたときの出力 θ の定常応答を時間 t[s] の関数として示せ．

(4) 図 2-3 のフィードバック制御系 1 の θ_d から偏差 e までの伝達関数を求め，そこから定常速度偏差を K の関数として示せ．

(5) 図 2-4 に示すように，フィードバック制御系 1 のフィードバックループの途中にノイズ除去のために一次遅れフィルタを挿入した新たなフィードバック系を考え，これをフィードバック系 2 とする．フィルタの時定数を $T = 0.1$[s] としたとき，このフィードバック系 2 が安定となる K の範囲を求めよ．

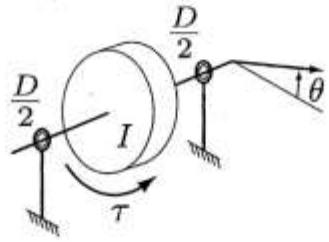


図 2-1: 回転系

平成 31 年度
神戸大学大学院工学研究科 博士課程前期課程
機械工学専攻　入学試験問題

科目名：生産工学･制御工学　[3 / 3]

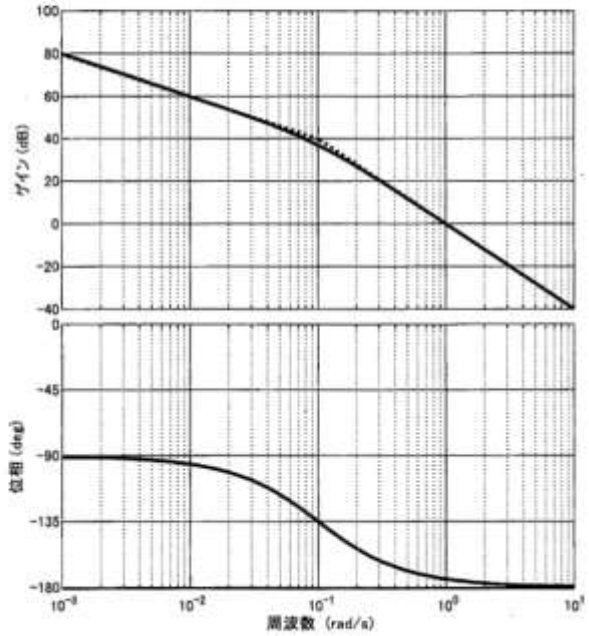


図 2-2: ボード線図

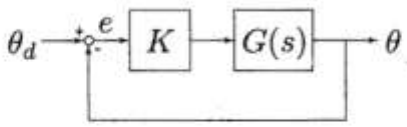


図 2-3: フィードバック制御系 1

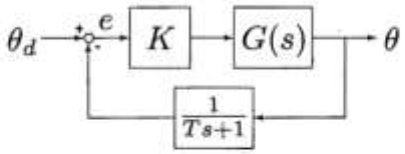


図 2-4: フィードバック制御系 2

2019（H31）年度　⑤制御工学　問題

【２】問題〈FB・回転系〉

（１）図 2-1 に示す回転系において、θ [rad] は回転体の回転角、I [kg·m^2] は回転体の軸回りの慣性モーメント、D [N·m·s] は両端の軸受部での粘性摩擦の影響を合わせた回転運動に関する粘性摩擦係数、τ [N·m] は回転体に加わるトルクである。まずこの回転系の運動方程式を示し、そこから τ から θ までの伝達関数 $G(s)$ を求めよ。

回転体に加わるトルクの合計は $-D\dot{\theta}(t)+\tau(t)$ である。これが $I\ddot{\theta}(t)$ に等しいので、

$$I\ddot{\theta}(t)+D\dot{\theta}(t)=\tau(t)$$

となる。出力 $\theta(t)$ と入力 $\tau(t)$ のラプラス変換をそれぞれ $\Theta(s), T(s)$ とし、

初期値 0 のもとで運動方程式をラプラス変換すると

$$Is^2\Theta(s)+Ds\Theta(s)=T(s)$$

を得る。したがって、τ から θ までの伝達関数 $G(s)$ は

$$G(s)=\frac{\Theta(s)}{T(s)}$$

よって、

$$\therefore G(s)=\frac{1}{Is^2+Ds}$$

（２）$G(s)$ の周波数応答を測定したところ、図 2-2 のようなボード線図を得た。

ゲイン線図には折れ線近似の直線も点線でプロットしてある。これより、

$$G(s)=\frac{10}{s(10s+1)}$$

と推定した。この推定の過程を述べるとともに、このときの I と D の値を示せ。

$$\begin{cases} 20\log|G_1(j\omega)G_2(j\omega)|=20\log|G_1(j\omega)|+20\log|G_2(j\omega)| \\ \angle\big(G_1(j\omega)G_2(j\omega)\big)=\angle G_1(j\omega)+\angle G_2(j\omega) \end{cases}$$

上式の関係と図より、$G(s)$ が以下の 3 つの要素の直列結合で表されると仮定される。

$$\begin{cases} G(s)=K：\text{比例系} \\ G(s)=\dfrac{1}{s}：\text{積分系} \\ G(s)=\dfrac{1}{Ts+1}：1\text{ 次遅れ系} \end{cases}$$

〈上記の 3 つの要素の直列結合で表されると仮定した推定の過程〉

まず、ゲイン線図（図 2-2 上図）において、折れ線近似は $\omega = 10^{-1}$ において交点をもつ 2 つの線分で構成されている。それらの傾きは、

$$\begin{cases} \cdot\ \omega \leq 10^{-1} \text{ の範囲で } -20\ [\mathrm{dB/dec}] \\ \cdot\ 10^{-1} \leq \omega \text{ の範囲で } -40\ [\mathrm{dB/dec}] \end{cases}$$

また、位相線図（図 2-2 下図）において、

ある 1 次遅れ系の位相線図を -90 [度]下側に移動させたものに等しいことがわかる。

以上、$G(s)$ は比例系 K, 積分系 $1/s$, 1 次遅れ系 $1/(Ts+1)$ の直列結合であると考えられる。

・比例系（位相遅れなし）

$$G_1(s) = K$$

$$\text{ゲイン：} g_1 = 20\log|G_1(j\omega)| = 20\log|K|$$

・積分系（位相 90° 遅れる）

$$G_2(s) = \frac{1}{s}$$

$$\text{ゲイン：} g_2 = 20\log|G_2(j\omega)| = 20\log|1/j\omega| = 20\log(1/\omega) = -20\log\omega$$

・ 1 次遅れ系

$$G_3(s) = \frac{1}{Ts+1}$$

次に、$G(s)$ を構成する比例系の K と 1 次遅れ系の T を求める。

ゲイン線図において 2 つの線分の交点の周波数は $\omega = 10^{-1}$ であるので、

$$\therefore T = 10$$

また、$\omega = 10^{-1}$ における折れ線近似のゲインは 40 [dB] であるが、

これは、$\omega = 10^{-1}$ における比例系、積分系、1 次遅れ系のゲインの和に等しい。

これら 3 つの（折れ線近似における）ゲインはそれぞれ $20\log K$, $20, 0$ [dB] であるので、

$$40 = 20\log K + 20 + 0$$

$$\therefore K = 10$$

以上より、このシステムは以下の伝達関数の直列結合だと推定される。

$$G_1(s) = 10, \quad G_2(s) = \frac{1}{s}, \quad G_3(s) = \frac{1}{10s+1}$$

したがって、

$$G(s) = G_1(s) \cdot G_2(s) \cdot G_3(s)$$

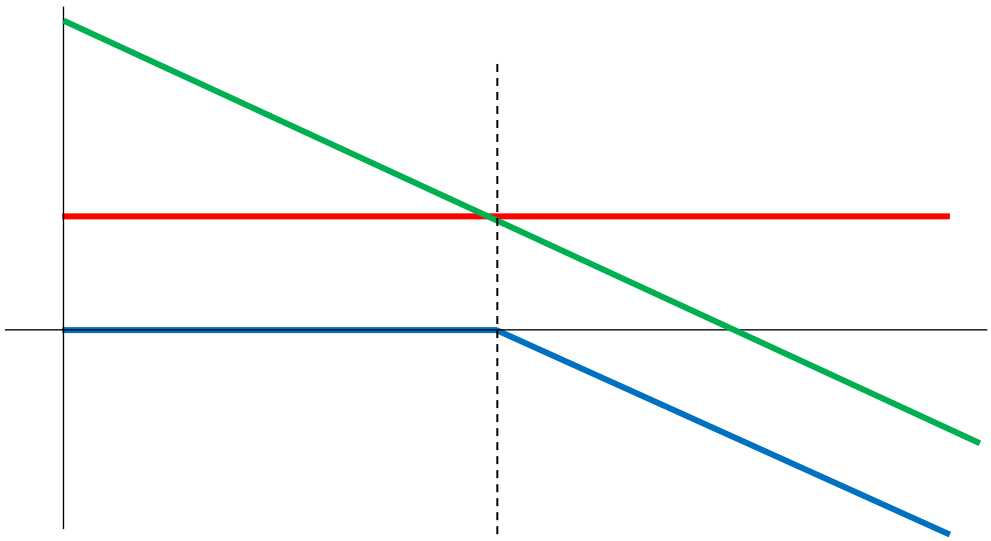
$$= 10 \cdot \frac{1}{s} \cdot \frac{1}{10s+1}$$

$$= \frac{10}{s(10s+1)}$$

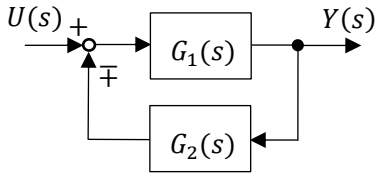
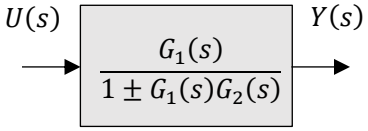
$$= \frac{10}{10s^2+s} = \frac{1}{1s^2+0.1s}$$

（1）の結果と比較すると、

$$I = 1, \quad D = 0.1$$



（3）推定とした $G(s)$ を制御対象として、図 2-3 に示すようなフィードバック制御系 1 を構成した。ただし $K\,(>0)$ は比例ゲインである。この系の閉ループ伝達関数 $H(s)$ を求めよ。さらに、この $H(s)$ において $K=10$ とし、目標値として $\theta_d=\sin\sqrt{10}t$ の正弦波を与えたときの出力 θ の定常応答を時間 t [s] の関数として示せ。

フィードバック結合		

閉ループ伝達関数 $H(s)$

$$H(s)=\frac{G(s)\cdot K}{1+G(s)\cdot K}$$

$$\therefore H(s)=\frac{\dfrac{10}{s(10s+1)}\cdot K}{1+\dfrac{10}{s(10s+1)}\cdot K}$$

$$=\frac{10K}{s(10s+1)+10K}$$

$$\therefore H(s)=\frac{10K}{10s^2+s+10K}$$

出力 θ の定常応答

$H(s)$ の極 s は、

$$10s^2+s+10K=0$$

を解いて、

$$\therefore s=\frac{-1\pm\sqrt{1-400K}}{20}$$

よって、$K=10$ のとき $H(s)$ は安定である。

$H(s)$ が安定なとき、入力 $\sin\omega t$ に対する出力の定常応答 $\tilde{y}(t)$ は、次式で表される。

$$\tilde{y}(t)=|H(j\omega)|\sin\big(\omega t+\angle H(j\omega)\big)$$

$H(s)$ の周波数伝達関数は

$$H(j\omega) = \frac{10 \cdot 10}{10(j\omega)^2 + (j\omega) + 10 \cdot 10}$$

であり、$\omega = \sqrt{10}$ に対して

$$H\left(j\sqrt{10}\right) = \frac{10 \cdot 10}{10\left(j\sqrt{10}\right)^2 + \left(j\sqrt{10}\right) + 10 \cdot 10} = \frac{100}{j\sqrt{10}}$$

となる。したがって、

$$\therefore \begin{cases} \left|H\left(j\sqrt{10}\right)\right| = 10\sqrt{10} \\ \angle H\left(j\sqrt{10}\right) = -\dfrac{\pi}{2} \end{cases}$$

となるので、出力 θ の定常応答 $\tilde{y}(t)$ は

$$\therefore \tilde{y}(t) = 10\sqrt{10}\sin\left(\sqrt{10}t - \frac{\pi}{2}\right)$$

（4）図 2-3 のフィードバック制御系 1 の θ_d から偏差 e までの伝達関数を求め、そこから定常速度偏差を K の関数として示せ。

入力 $\theta_d(t)$ と偏差 $e(t)$ のラプラス変換をそれぞれ $\Theta_d(\mathrm{s}), \mathrm{E}(\mathrm{s})$ とし、
加え合わせ点に注目する。

$$\Theta_d(\mathrm{s}) - G(s)K \cdot \mathrm{E}(\mathrm{s}) = \mathrm{E}(\mathrm{s})$$

$$\Theta_d(\mathrm{s}) = \mathrm{E}(\mathrm{s}) + G(s)K \cdot \mathrm{E}(\mathrm{s})$$

$$\Theta_d(\mathrm{s}) = (1 + G(s)K)\mathrm{E}(\mathrm{s})$$

よって、伝達関数は、

$$\therefore \frac{\mathrm{E}(\mathrm{s})}{\Theta_d(\mathrm{s})} = \frac{1}{1 + G(s)K}$$

定常速度偏差 e_s は、目標値 $\boldsymbol{\theta_d(t) = t}$ に対する定常偏差といい、以下の式で求められる。

$$e_s = \lim_{s \to 0} sE(s)$$

$$\therefore e_s = \lim_{s \to 0} \frac{s}{1 + G(s)K}\Theta_d(\mathrm{s})$$

$$\Theta_d(\mathrm{s}) = \mathcal{L}\{\theta_d(t)\} = \frac{1}{s^2}$$

（２）の結果を代入する。

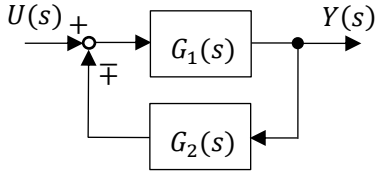
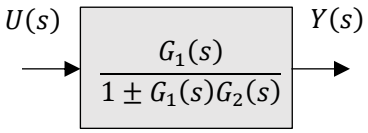
$$\therefore e_s = \lim_{s\to 0} \frac{s}{1+\frac{10}{s(10s+1)}\cdot K}\cdot\frac{1}{s^2}$$

$$= \lim_{s\to 0} \frac{s\cdot s(10s+1)}{s(10s+1)+10K}\cdot\frac{1}{s^2}$$

$$= \lim_{s\to 0} \frac{10s+1}{s(10s+1)+10K}$$

$$\therefore e_s = \frac{1}{10K}$$

（５）図 2-4 に示すように、フィードバック制御系 1 のフィードバックループの途中にノイズ除去のために一次遅れフィルタを挿入した新たなフィードバック制御系を考え、これをフィードバック系 2 とする。フィルタの時定数を $T = 0.1$ [s] としたとき、このフィードバック系 2 が安定となる K の範囲を求めよ。

フィードバック結合		

フィードバック制御系 2 の伝達関数 $g(s)$ は、

$$g(s) = \frac{KG(s)}{1+KG(s)\cdot\frac{1}{Ts+1}} = \frac{(Ts+1)\cdot KG(s)}{(Ts+1)+KG(s)}$$

$T = 0.1$ と、（２）の結果を代入する。

$$\therefore g(s) = \frac{(0.1s+1)\cdot K\cdot\frac{10}{s(10s+1)}}{(0.1s+1)+K\cdot\frac{10}{s(10s+1)}} = \frac{(0.1s+1)\cdot 10K}{s(10s+1)\cdot(0.1s+1)+10K}$$

$$= \frac{(0.1s+1)\cdot 10K}{s(s^2+10.1s+1)+10K} = \frac{(0.1s+1)\cdot 10K}{s^3+10.1s^2+s+10K}$$

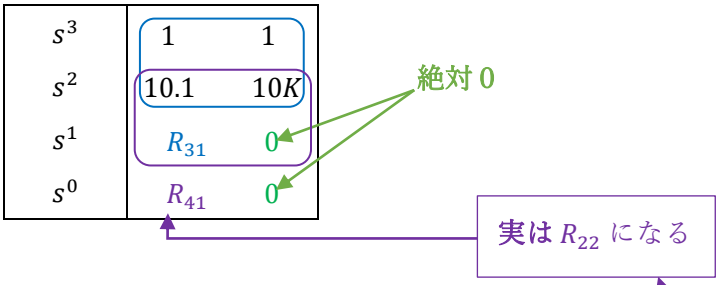
伝達関数の分母多項式 $d(s)$ は、

$$d(s) = s^3+10.1s^2+s+10K$$

以下、**ラウスの安定判別法**を用いて、安定性の条件を求める。

$$d(s) = \mathbf{1}\cdot s^3 + \mathbf{10.1}\cdot s^2 + \mathbf{1}\cdot s + \mathbf{10K}$$

ラウス表



$$R_{31} = -\frac{\begin{vmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{21} & R_{22} \end{vmatrix}}{R_{21}} = -\frac{\begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 10.1 & 10K \end{vmatrix}}{10.1}, \quad R_{32} = -\frac{\begin{vmatrix} R_{11} & R_{13} \\ R_{21} & R_{23} \end{vmatrix}}{R_{21}} = -\frac{\begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 10.1 & 0 \end{vmatrix}}{10.1}$$

$$R_{41} = -\frac{\begin{vmatrix} R_{21} & R_{22} \\ R_{31} & R_{32} \end{vmatrix}}{R_{31}} = -\frac{\begin{vmatrix} 10.1 & 10K \\ R_{31} & 0 \end{vmatrix}}{R_{31}}, \quad R_{42} = -\frac{\begin{vmatrix} R_{21} & R_{23} \\ R_{31} & R_{33} \end{vmatrix}}{R_{31}} = -\frac{\begin{vmatrix} 10.1 & 0 \\ R_{31} & 0 \end{vmatrix}}{R_{31}}$$

安定性の必要十分条件は、$d(s) = 0$ のすべての根の実部が負であることである。

そして、$d(s) = 0$ のすべての根の実部が負であることの必要十分条件が、

条件① ラウス数列がすべて正　かつ　条件② すべての係数が正

を満たすことである。

条件①を考える。

$$R_{31} = -\frac{\begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 10.1 & 10K \end{vmatrix}}{10.1} = -\frac{1}{10.1}(10K - 10.1)$$

$$R_{41} = -\frac{\begin{vmatrix} 10.1 & 10K \\ R_{31} & 0 \end{vmatrix}}{R_{31}} = -\frac{1}{R_{31}}\cdot(-10K)\cdot R_{31} = 10K\ (= R_{22})$$

よって、次式を解けばよい。

$$\begin{cases} -\dfrac{1}{10.1}(10K - 10.1) > 0 \\ 10K > 0 \end{cases}$$

したがって、

$$\therefore\ 0 < K < 1.01$$

今回、条件②は条件①に含まれているので、これが答えとなる。

【別解】フルビッツの安定判別法を用いて、安定性の条件を求める。

$$d(s) = \mathbf{1}\cdot s^3 + \mathbf{10.1}\cdot s^2 + \mathbf{1}\cdot s + \mathbf{10K}$$

の係数から次の行列を作る。

$$H = \begin{bmatrix} a_{n-1} & a_{n-3} & a_{n-5} \\ a_n & a_{n-2} & a_{n-4} \\ 0 & a_{n-1} & a_{n-3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10.1 & 10K & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 10.1 & 10K \end{bmatrix}$$

そして、H の $i \times i$ 主座小行列式（左上隅の $i \times i$ 小行列の行列式）を H_i とし、

$H_1, \cdots, H_n$ を計算する。すなわち、

$$H_1 = a_2, \quad H_2 = \begin{vmatrix} a_2 & a_0 \\ a_3 & a_1 \end{vmatrix}, \quad H_3 = \begin{vmatrix} a_2 & a_0 & 0 \\ a_3 & a_1 & 0 \\ 0 & a_2 & a_0 \end{vmatrix} \ (= a_0 H_2)$$

これらのフルビッツ行列式とよばれる小行列式を計算する。

$a_n > 0$ のとき、システムが安定であるための必要十分条件は、

$H_1, \cdots, H_n$ がすべて正であること

である。

$$H_1 = a_2 = 10.1 > 0$$

$$H_2 = \begin{vmatrix} 10.1 & 10K \\ 1 & 1 \end{vmatrix} = 10.1 - 10K$$

$$H_3 = \begin{vmatrix} 10.1 & 10K & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 10.1 & 10K \end{vmatrix} = 10.1 \cdot 10K - 10K \cdot 10K = 10K(10.1 - 10K) \ (= a_0 H_2)$$

よって、次式を解けばよい。

$$\begin{cases} 10.1 - 10K > 0 \\ 10K(10.1 - 10K) > 0 \end{cases}$$

したがって、

$$\therefore 0 < K < 1.01$$

（別解終わり）

2019（H31）年度【２】略解

（１）	$I\ddot{\theta}(t) + D\dot{\theta}(t) = \tau(t)$ $G(s) = \dfrac{1}{Is^2 + Ds}$
（２）	$I = 1, \quad D = 0.1$
（３）	$H(s) = \dfrac{10K}{10s^2 + s + 10K}$ $\tilde{y}(t) = 10\sqrt{10}\sin\left(\sqrt{10}t - \dfrac{\pi}{2}\right)$
（４）	$e_s = \dfrac{1}{10K}$
（５）	$0 < K < 1.01$

2019（H31）年度【２】講評

（１）回転の運動方程式は立式できただろうか。機械力学と同様に、
最初の運動方程式の立式が一番難しいといっても過言ではない。
ここで間違えると以降の問いは全滅なので、注意されたい。今回は回転系。
（２）ボード線図の知識が問われている。
（３）周波数応答の知識が問われている。
（４）定常偏差の知識が問われている。
（５）安定性の知識が問われている。小数がいやらしい。計算ミスしそう。

出題者は非常に手練れており、満遍なく制御工学の知識を問われている。
満遍なく復習して、知識の抜けがないようにしたい。慣れてしまえば大した問題ではない。
フィードバック結合の伝達関数は覚えてしまった方がよい。