

## プロセスシステム

【問1】ある国の鉄鋼業の年間生産量は  $1.0 \times 10^8$  ton である。鉄は市場で利用された後、鉄鋼業がもつ電気炉において再溶融することでリサイクルされる。ところが、市場において銅の混入が発生し、鉄からの経済的な分離は不可能となる。以下の設問1) および2) に答えよ。有効数字は2桁とする。

- 1) 上述の鉄のフローを図示すると図1のようになる。市場における銅の混入(ストリーム4)が年間  $2.0 \times 10^5$  ton とする。このとき、市場に投入される鉄(ストリーム2)中の銅の濃度(質量基準)を最大0.5%としたい。

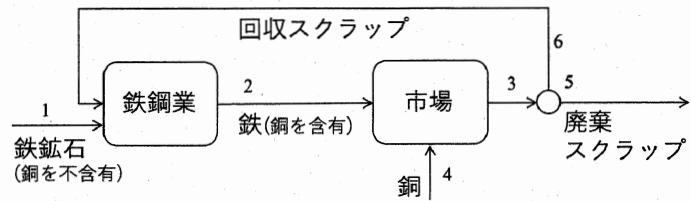


図1

定常状態を仮定し、その場合のリサイクル率  $r$  [-] の最大値を導出する。以下の空欄について、 ,  ,  は文字式で、 は数値で答えよ。

ストリーム  $i$  ( $i=1 \sim 6$ ) を、鉄と銅の質量流量  $\phi_i$  [ton/year],  $c_i$  [ton/year] を成分とするベクトル  $\mathbf{X}_i = \begin{pmatrix} \phi_i \\ c_i \end{pmatrix}$  で表記する。また、ストリーム  $i$  の質量流量を  $F_i (= \phi_i + c_i)$  [ton/year] とおく。

$F_2 = 1.0 \times 10^8$  ton/year より、 $\mathbf{X}_2, \mathbf{X}_3$  の成分を、 $c_2$  を用いて表すと、

$$\mathbf{X}_2 = \begin{pmatrix} \text{ア} \\ c_2 \end{pmatrix}, \mathbf{X}_3 = \begin{pmatrix} \text{ア} \\ \text{イ} \end{pmatrix} \quad (1)$$

となる。リサイクル率  $r$  の定義から、

$$F_5 : F_6 = (1 - r) : r \quad (2)$$

なので、

$$\mathbf{X}_6 = r \cdot \mathbf{X}_3 \quad (3)$$

となる。さらに、

$$\mathbf{X}_1 + \mathbf{X}_6 = \mathbf{X}_2 \quad (4)$$

であるので、式(4)中の銅の物質収支より  $c_2$  を  $r$  で表せば、

$$c_2 = \text{ウ} \times 2.0 \times 10^5 \quad (5)$$

となる。ストリーム2における銅の濃度(質量基準)の条件より、 $r$  の最大値  $r_{\max}$  は、以下のように算出される。

$$r_{\max} = \text{エ} \quad (6)$$

2) 実際には、回収スクラップは同じ市場ではなく、より低品位な材料を許容する市場で再利用される。これを表現したモデルを図2に表す。以下の文章を読み、空欄  オ  ~  コ を文字式で答えよ。また、 サ についてはA, B からいずれかを選べ。

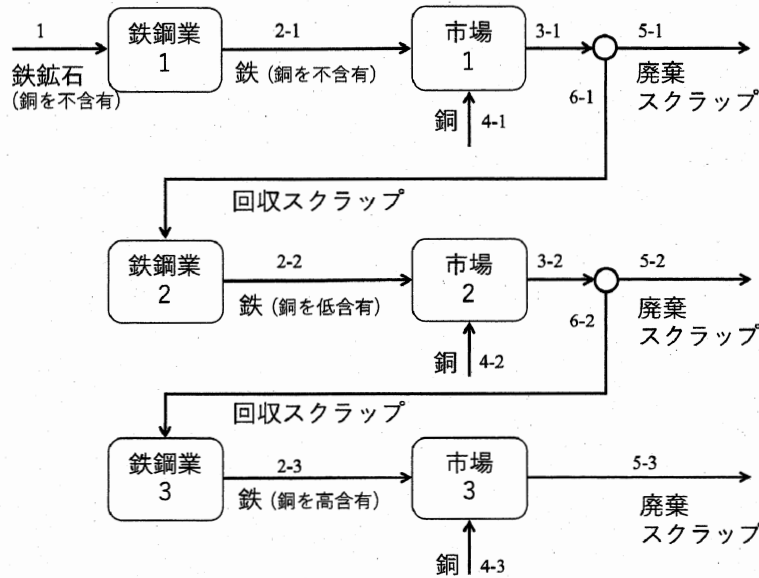


図2

調査の結果、各市場における銅の混入は、

市場 1:  $4.0 \times 10^4$  ton/year, 市場 2:  $6.0 \times 10^4$  ton/year, 市場 3:  $1.0 \times 10^5$  ton/year と判明した。

次に、銅の物質収支に着目する。各市場から廃棄スクラップとして系外に出ていく銅の質量流量を、市場 1 からのリサイクル率  $r_1[-]$ , 市場 2 からのリサイクル率  $r_2[-]$  で表すと、

市場 1 から系外に出る銅:  オ   $\times 10^4$  ton/year

市場 2 から系外に出る銅:  カ   $\times 10^4$  ton/year

市場 3 から系外に出る銅:  キ   $\times 10^4$  ton/year

となる。

さらに、 $r_1, r_2$  と鉄鋼の市場全体のリサイクル率  $r$  との関係を考える。図1と図2を対応させ、図1のストリーム6は図2のストリーム6-1と6-2の合計と等しくなることに着目すれば、図1のモデルの  $r$  と図2のモデルの  $r_1, r_2$  の関係は、

$$\frac{r}{1 - r} = \text{ク} r_1 + \text{ケ} r_1 r_2 + \text{コ} r_2 \quad (7)$$

となることがわかる。 $(r_1, r_2) = (0.1, 0.2)$  の場合をA,  $(r_1, r_2) = (0.2, 0.1)$  の場合をBとすると、 サ のほうが市場全体のリサイクル率  $r$  は高くなる。

【問2】フィードバック制御に関する以下の設問に答えよ。

1) 図3のブロック線図に示す伝達関数  $G_p(s)$

$$= \frac{1}{(0.5s+1)(s+1)}$$

のプロセスと比例調節計 (比例ゲイン:  $K_p > 0$ ) からなるフィードバック制御系が安定となる  $K_p$  の範囲を求めよ。また、この制御系が振動的な応答を示す  $K_p$  の範囲を示せ。

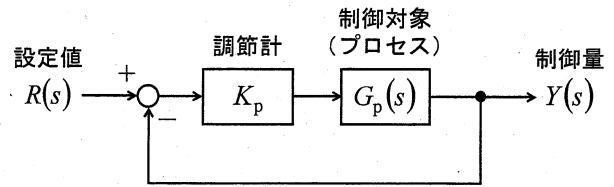


図3

2) 図3のプロセスの伝達関数  $G_p(s)$  を

$$\frac{e^{-0.2s}}{0.5s+1}$$

としたときの開ループ伝達関数 (一巡伝達関数)  $G(s)$  のボード線図 (位相) を描いたところ図4が得られた。このフィードバック制御系が安定となる  $K_p$  の範囲を求めよ。ただし、この開ループ伝達関数のゲインは次式で与えられる。

$$|G(j\omega)| = \frac{K_p}{\sqrt{1+0.25\omega^2}}$$

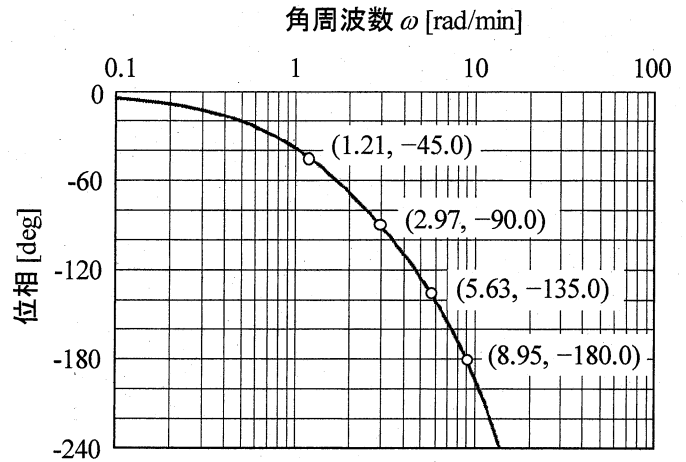


図4

ここで、 $\omega$ は角周波数、 $j$ は $\sqrt{-1}$ である。

3) 設問2)の制御系において、ステップ状設定値変更 ( $0 \rightarrow 1$ ) をした際の定常偏差 (オフセット) を求めよ。

4) PID 調節計を用いて制御を行う場合、設定値の変更に際し、微分動作のために出力の急変が生じることがある。これを避ける方法として、図5(a)のブロック線図に示した設定値 ( $R(s)$ ) の変更に対して微分動作を働かなくする方法 (微分先行型 PID 調節計 (IP-D 調節計)) がある。IP-D 調節計は、図5(b)のように設定値にフィルタを通した PID 調節計と等価である。図5中の (ア) ~ (エ) に適切な文字式 (伝達関数) をそれぞれ入れよ。ただし、比例ゲイン、積分時間、微分時間は、それぞれ  $K_p$ ,  $T_I$ ,  $T_D$  とする。

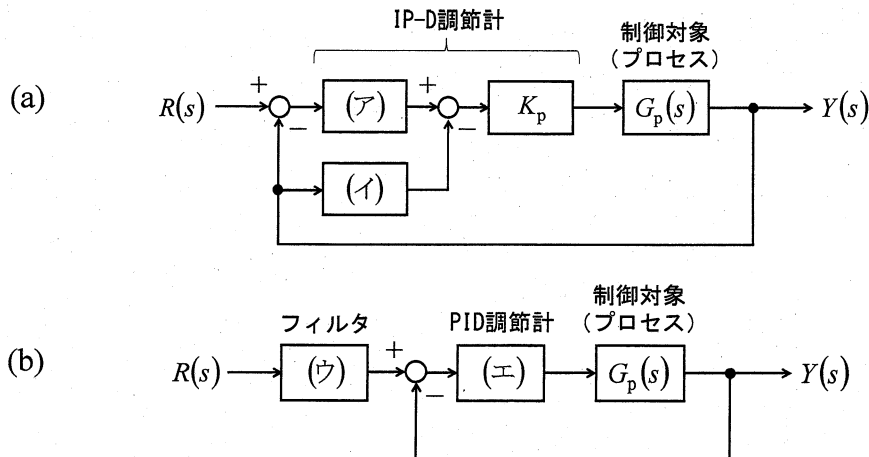


図5