KMAP による自動車の制御(2)－外力を受けた場合の運動

2017(H29).12.2 片柳亮二

【問題】 自動車の 2 輪車モデル[1)]により，横外力を受けた場合の自動車の運動を求めよ．ただし，自動車の諸元データは以下とする[4)]．

m=1100(kg)，　I_z=1600(kg・m^2)，　K_1=32000(N/rad)，

K_2=45000(N/rad)，　l_1=1.15(m)，　l_2=1.35(m)

V=100km/h，　F_0=500N(横外力)

なお，外力の作用点は重心位置(l_0=0)とする．

【解】

図 1 に示すように，横風などの外力が作用した場合の自動車の運動について考える．

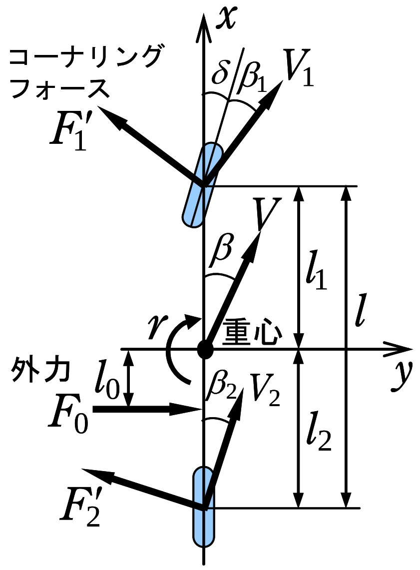

図 1　外力が作用した場合の運動モデル

前資料「KMAP による自動車の制御(1)」を参考に，2 輪車モデルの運動方程式に外力の影響を加えると次のようになる[1)]．

$$\begin{cases} \dot{\beta} = -\dfrac{K_1+K_2}{mV}\beta - \left(1+\dfrac{K_1 l_1 - K_2 l_2}{mV^2}\right) r + \dfrac{K_1}{mV}\delta + \dfrac{57.3}{mV}F_0 \\ \dot{r} = -\dfrac{K_1 l_1 - K_2 l_2}{I_z}\beta - \dfrac{K_1 l_1^2 + K_2 l_2^2}{I_z V} r + \dfrac{K_1 l_1}{I_z}\delta - \dfrac{57.3 l_0}{I_z}F_0 \end{cases} \tag{1}$$

ただし，βは重心の横滑り角，rはヨー角速度，δは前輪タイヤの実舵角，K_1およびK_2はコーナリングパワーである．

また，(1)式を行列で表すと次のようになる．

$$\begin{bmatrix} \dot{\beta} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\dfrac{K_1+K_2}{mV} & -1-\dfrac{K_1 l_1 - K_2 l_2}{mV^2} \\ -\dfrac{K_1 l_1 - K_2 l_2}{I_z} & -\dfrac{K_1 l_1^2 + K_2 l_2^2}{I_z V} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \beta \\ r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dfrac{K_1}{mV} & \dfrac{57.3}{mV} \\ \dfrac{K_1 l_1}{I_z} & -\dfrac{57.3 l_0}{I_z} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta \\ F_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

(ハンドル操作時の運動方程式)(β, r, δは deg 系, F_0は N)

KMAP で解析する.

KMAP(バージョン 114 以降)を起動して,
①「KMAP***解析内容選択画面」⇒“4”キーイン
②「データファイル利用方法」⇒“3”をキーイン
③「例題ファイルデータの取得」⇒例として,“3”をキーイン
④「3:機械システム制御の実際の例題」⇒“50”キーイン
例題のインプットデータ ⇒ EIGE.PRB6.2-3.DAT
⑤「新しいファイル名入力してください」と表示されるので,以下,次のようにキーイン
0 0 3 5

これで解析計算が実行されて,安定解析結果が次のように表示される.

```
***** POLES AND ZEROS *****
POLES( 5), EIVMAX= 0.4646D+01
 N         REAL               IMAG
 1    -0.26566154D+01    -0.38115386D+01  [ 0.5718E+00, 0.4646E+01]
 2    -0.26566154D+01     0.38115386D+01    周期 P(sec)= 0.1648E+01
 3     0.00000000D+00     0.00000000D+00
 4     0.00000000D+00     0.00000000D+00
 5     0.00000000D+00     0.00000000D+00
ZEROS( 3), II/JJ= 5/ 2, G= 0.2805D-01
 N         REAL               IMAG
 1     0.00000000D+00     0.00000000D+00
 2     0.00000000D+00     0.00000000D+00
 3     0.00000000D+00     0.00000000D+00
```

この画面を消すと,「解析結果の表示」の画面になるが,画面を上にスクロールすると,次の AP,B2 行列およびスタティックマージンが次のように表示されている.

```
....AP....... NI=  2  NJ=  2
 -0.2518D+01    -0.9718D+00
  0.1497D+02    -0.2795D+01

....B2....... NI=  2  NJ=  2
  0.1046D+01     0.1874D-02
  0.2300D+02     0.0000D+00

{P}H34;       0.12442E+00  (スタティックマージン)
```

次の「解析結果の表示」に戻す.

```
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$< 解析結果の表示 >$$$$$$$$$$$(KMAP***)$$$$$$$$$$$$
$$  0 : 表示終了 (次の解析 または 終了へ)                                 $$
$$  1 : 安定解析図(f特,根軌跡)     (Excel を立ち上げてください)           $$
$$         (極・零点配置, 根軌跡, 周波数特性などの図が表示できます)       $$
$$         (極・零点の数値データは“9”(安定解析結果)で確認できます)       $$
$$  6 : ﾅｲｷｽﾄ線図                    (Excel を立ち上げてください)          $$
$$  7 : ｼﾐｭﾚｰｼｮﾝ図(KMAP(Simu))       (Excel を立ち上げてください)          $$
$$         (Z191～Z200 に定義した値をタイムヒストリー図に表示できます)    $$
$$  9 : 釣り合い飛行時のデータおよび安定解析結果   (TES13.DAT)            $$
$$ 10 : その他の Excel 図,  101 : KMAP 線図(1),  102 : KMAP 線図(2)       $$
$$ 14 : 取り扱い説明書(pdf 資料),(15:ｲﾝﾌﾟｯﾄﾃﾞｰﾀ表示),(16:Ap,B2 行列表示) $$
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
```

ここで,「1」,「7」および「10」とキーイン/Enter すると, 極・零点, ボード線図, 横外力に応答および走行軌跡が次のように Excel で表示することができる.(ただし, 目盛りは適宜修正して使用)

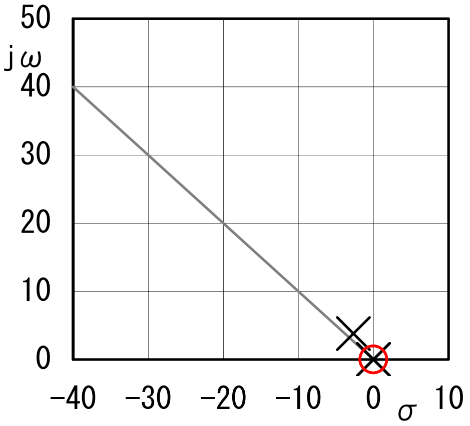

図 2 r/F_0の極・零点
(V=100km/h)

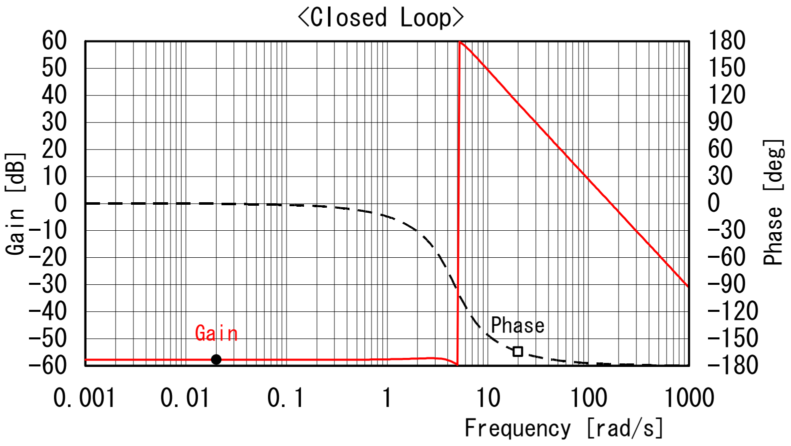

図 3 r/F_0の周波数特性(V=100km/h)
(EIGE.PRB6.2-3.DAT)

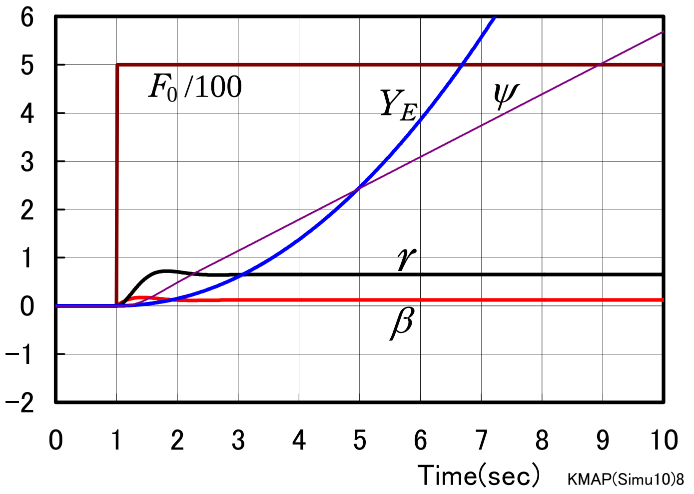

図 4 重心に横外力 500N の応答(V=100km/h)

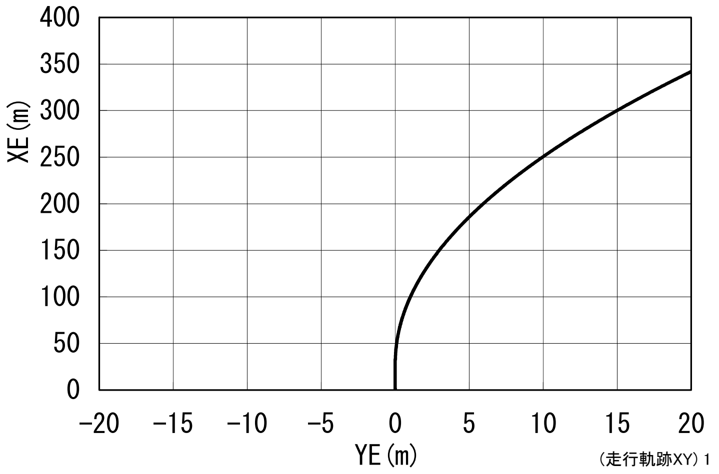

図 5　走行軌跡(横外力 500N)(V=100km/h)

図 2 は r/F_0 の極・零点，図 3 は r/F_0 の周波数特性である．この運動は，減衰比のよい安定な 2 次遅れの特性であることがわかる．図 4 は，重心に左から 500N の外力が加わった場合のシミュレーション結果で，車は右に横滑り運動($\beta>0$)となる．図 5 は，走行軌跡であるが左からの外力により右に移動していることがわかる．なお，スタティックマージン(S.M.)は 0.1244 で正であるので US である．

「解析結果の表示」で 15 とキーインすると，このケースのインプットデータが表示される．
(同様な問題では，例題ファイルをコピー利用して，数値を変更して解析を行っていくとミスを防ぐことができる)

```
#######################(インプットデータ)#######################
EIGE.PRB6.2-3.DAT (横外力)US
NXP             = 2
tmax(s)         =      40.000
1.NU1------> 2
  T , U1             0.0000         0.0000
                    60.0000         0.0000
3.NU3------> 4
  T , U3             0.0000         0.0000
                     1.0000         0.0000
                     1.0010       500.0000
                    60.0000       500.0000
5.NU5------> 2
  T , U5             0.0000         0.0000
                    60.0000         0.0000
********10********20********30********40********50********60********70******
<積分数, IRIG, TDEBUG 時間, 補間関数>  6  0    0.0  0
      <Control System Data>          Hi *---GAIN----NCAL*NO1*NO2*NO3*NGO*LNO
```

```
//AP,B2 行列ﾃﾞｰﾀ設定
H1=G;(m)                        H 0  0.1100E+04  11   1   0   0   0   0
H2=G;(Iz)                       H 0  0.1600E+04  11   2   0   0   0   0
H3=G;(K1)                       H 0  0.3200E+05  11   3   0   0   0   0
H4=G;(K2)                       H 0  0.4500E+05  11   4   0   0   0   0
H5=G;(L1)                       H 0  0.1150E+01  11   5   0   0   0   0
H6=G;(L2)                       H 0  0.1350E+01  11   6   0   0   0   0
//
H7=H3+H4;(K1+K2)                H 0              21   7   3   4   0   0
H8=H3*H5;(K1*L1)                H 0              23   8   3   5   0   0
H9=H4*H6;(K2*L2)                H 0              23   9   4   6   0   0
H10=H8*H5;(K1*L1**2)            H 0              23  10   8   5   0   0
H11=H9*H6;(K2*L2**2)            H 0              23  11   9   6   0   0
H12=G;(V)                       H 0  0.2780E+02  11  12   0   0   0   0
H13=H1*H12;(mV)                 H 0              23  13   1  12   0   0
H14=H13*H12;(mV**2)             H 0              23  14  13  12   0   0
H15=H2*H12;(IzV)                H 0              23  15   2  12   0   0
//
H16=H7/H13;((K1+K2)/(mV))       H 0              24  16   7  13   0   0
H17=H16*G;(AP11)                H 0 -0.1000E+01  17  17  16   0   0   0
H18=H8-H9;(K1L1-K2L2)           H 0              22  18   8   9   0   0
H19=H18/H14;(K1L1-K2L2)/mV**2)  H 0              24  19  18  14   0   0
H20=G;(-1)                      H 0 -0.1000E+01  11  20   0   0   0   0
H21=H20-H19;(AP12)              H 0              22  21  20  19   0   0
H22=H18/H2;((K1L1-K2L2)/Iz)     H 0              24  22  18   2   0   0
H23=H22*G;(AP21)                H 0 -0.1000E+01  17  23  22   0   0   0
H24=H10+H11;(K1L1**2+K2L2**2)   H 0              21  24  10  11   0   0
H25=H24/H15;(H24/IzV)           H 0              24  25  24  15   0   0
H26=H25*G;(AP22)                H 0 -0.1000E+01  17  26  25   0   0   0
//
H27=H3/H13;(B2-11=K1/mV)        H 0              24  27   3  13   0   0
H28=G;(57.3)                    H 0  0.5730E+02  11  28   0   0   0   0
H29=H28/H13;(B2-12=57.3/mV)     H 0              24  29  28  13   0   0
H30=H8/H2;(B2-21=K1L1/Iz)       H 0              24  30   8   2   0   0
H31=G;(L0)                      H 0  0.0000E+00  11  31   0   0   0   0
H32=H31*G;(B2-22=-57.3*L0)      H 0 -0.5730E+02  17  32  31   0   0   0
H36=H32/H2;(B2-22=-57.3*L0/Iz)  H 0              24  36  32   2   0   0
//
AP(I1,J1)H17;                   H 0             621   1   1  17   0   0
AP(I1,J2)H21;                   H 0             621   1   2  21   0   0
AP(I2,J1)H23;                   H 0             621   2   1  23   0   0
AP(I2,J2)H26;                   H 0             621   2   2  26   0   0
//(ｺﾝﾄﾛｰﾙ入力)=(Z1,Z3,Z5)
B2(I1,J1)H27;                   H 0             623   1   1  27   0   0
B2(I1,J2)H29;                   H 0             623   1   2  29   0   0
B2(I2,J1)H30;                   H 0             623   2   1  30   0   0
B2(I2,J2)H36;                   H 0             623   2   2  36   0   0
//
{Print(AP,B2,CP)}I2,J2,K1;      H 0             671   2   2   1   0   0
//(ｺﾝﾄﾛｰﾙ Z1 に強制力ｲﾝﾌﾟｯﾄ)
Z1=U1*G;(Delta)                 H 0  0.1000E+01  52   1   1   0   0   0
Z3=U3*G;(F0(N))                 H 0  0.1000E+01  52   3   3   0   0   0
//
//-----(Staic Margin)
H31=H9-H8;(K2L2-K1L1)           H 0              22  31   9   8   0   0
H32=H31/H7;(H31/(K1+K2))        H 0              24  32  31   7   0   0
H33=H5+H6;(L=L1+L2)             H 0              21  33   5   6   0   0
H34=H32/H33;(S.M.)              H 0              24  34  32  33   0   0
{P}H34;                         H 0             601  34   0   0   0   0
//-----(XE,YE)
Z8={1/S,t>=G}Z7X4;(Integ(Z7=r)) H 0  0.0000E+00 110   8   7   4   0   0
```

```
 62  Z9=Z8+Z6;(PSI+Beta)          H 0              35   9   8   6   0   0
 63  H35=Z9;(PSI+Beta)            H 0              12  35   9   0   0   0
 64  H36=FCOSD[H35];(cos(PSI+Beta))  H 0           19  36  35   0   0   0
 65  H37=FSIND[H35];(sin(PSI+Beta))  H 0           18  37  35   0   0   0
 66  Z10=H36;(cos(PSI+Beta))      H 0              54  10  36   0   0   0
 67  Z11=H37;(sin(PSI+Beta))      H 0              54  11  37   0   0   0
 68  Z12=Z10*H12;(XEdot)          H 0              74  12  10  12   0   0
 69  Z13=Z11*H12;(YEdot)          H 0              74  13  11  12   0   0
 70  Z14={1/S,t>=G}Z12X5;(XE)     H 0  0.0000E+00 110  14  12   5   0   0
 71  Z15={1/S,t>=G}Z13X6;(YE)     H 0  0.0000E+00 110  15  13   6   0   0
 72  //-------------------------
 73  //安定解析出力に追加する場合
 74  //は,下記に R(6+NXP)～を設定.
 75  //ｼﾐｭﾚｰｼｮﾝ用出力(Z191～Z200)
 76  //(このﾃﾞｰﾀが TES6.DAT に入る)
 77  Z191=Z6*G;(x1=Beta)          H 0  0.1000E+01  53 191   6   0   0   0
 78  Z192=Z7*G;(x2=r)             H 0  0.1000E+01  53 192   7   0   0   0
 79  Z193=Z3*G;(F0)               H 0  0.1000E-01  53 193   3   0   0   0
 80  Z194=Z15*G;(YE)              H 0  0.1000E+01  53 194  15   0   0   0
 81  Z195=Z14*G;(XE)              H 0  0.1000E+01  53 195  14   0   0   0
 82  Z196=Z15*G;(YE)              H 0  0.1000E+01  53 196  15   0   0   0
 83  Z197=Z8*G; (PSI)             H 0  0.1000E+01  53 197   8   0   0   0
 84  //(最後に次の END 文が必要)
 85  {Pitch Data END};            H 0             899 888 887 886   0   0
 86  //*-----------------------------
 87  //*(注 1)状態方程式使用の場合
 88  //* Z1,Z3,Z5     : 制御入力設定済
 89  //* Z6～(NXP 個) : 状態変数設定済
 90  //* Ri は安定解析の出力で下記注意
 91  //* R6～(NXP 個) : 状態変数に対応
 92  //* R(6+NXP)～Rn: 出力変数の追加
 93  //* 解析出力ｷｰｲﾝは i=4～(R 設定数)
 94  //*
 95  //*(注 2)状態方程式使用しない場合
 96  //* Zi は全て通常の Z 変数
 97  //* R6～出力変数を設定
 98  //* 解析出力ｷｰｲﾝは i=4～(R 設定数)
 99  //$-----------------------------
 ---------(縦系ゲイン最適化－探索範囲)-------------------------------------
探索ゲイン数= 0
 重み係数=  0.0000E+00  影響範囲(rad/s)=  0.0000E+00
 *****(ゲイン最適化－重み関数 W(s))*****
極の数= 0
零点数= 0
ゲイン=  0.0000E+00 -------------------------------------------------------
         初期値 X( 1)=  0.0000E+00
                X( 2)=  0.0000E+00
100  {Control Data END};          H 0             999   0   0   0   0   0
 ----------------------------(DATA END)--------------------------------------
```

このインプットデータの制御則部は，「解析結果の表示」画面で「101」および「102」とキーインすると，次の KMAP 線図で確認できる．

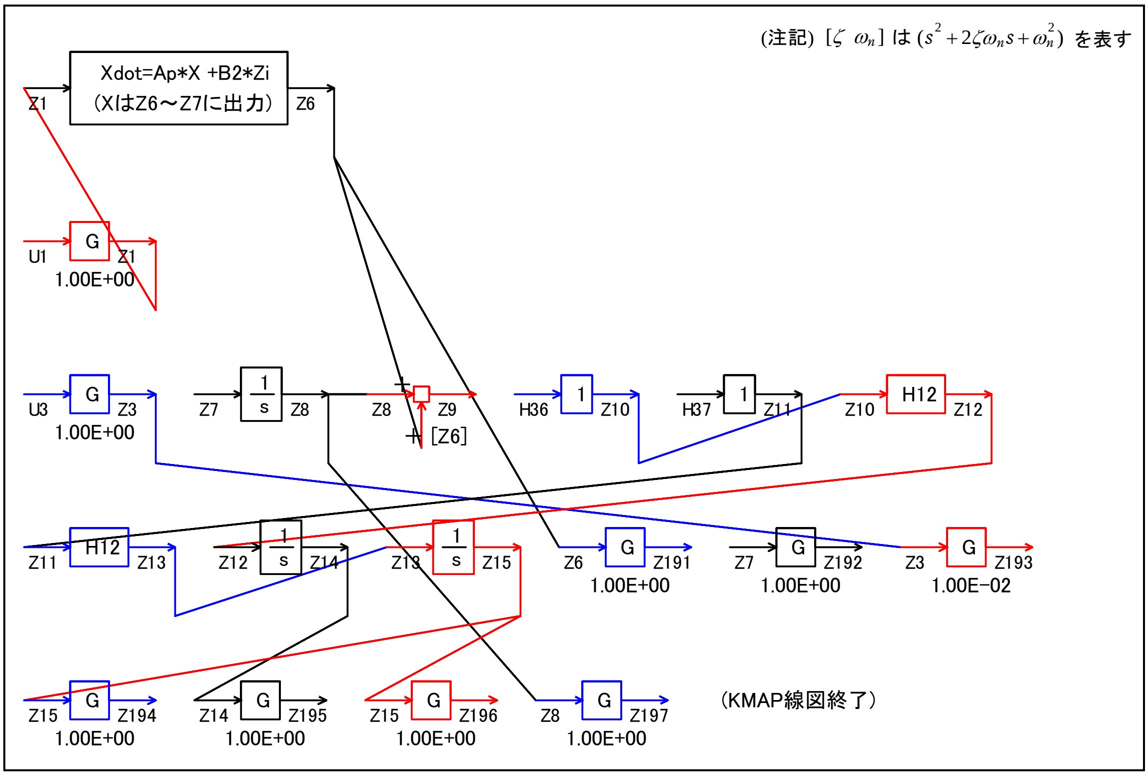

図 8　KMAP 線図

図 8 の KMAP 線図は，インプットデータの制御則部をそのデータ順に図にしたもので，信号の流れにミスがないか確認するのに便利である．

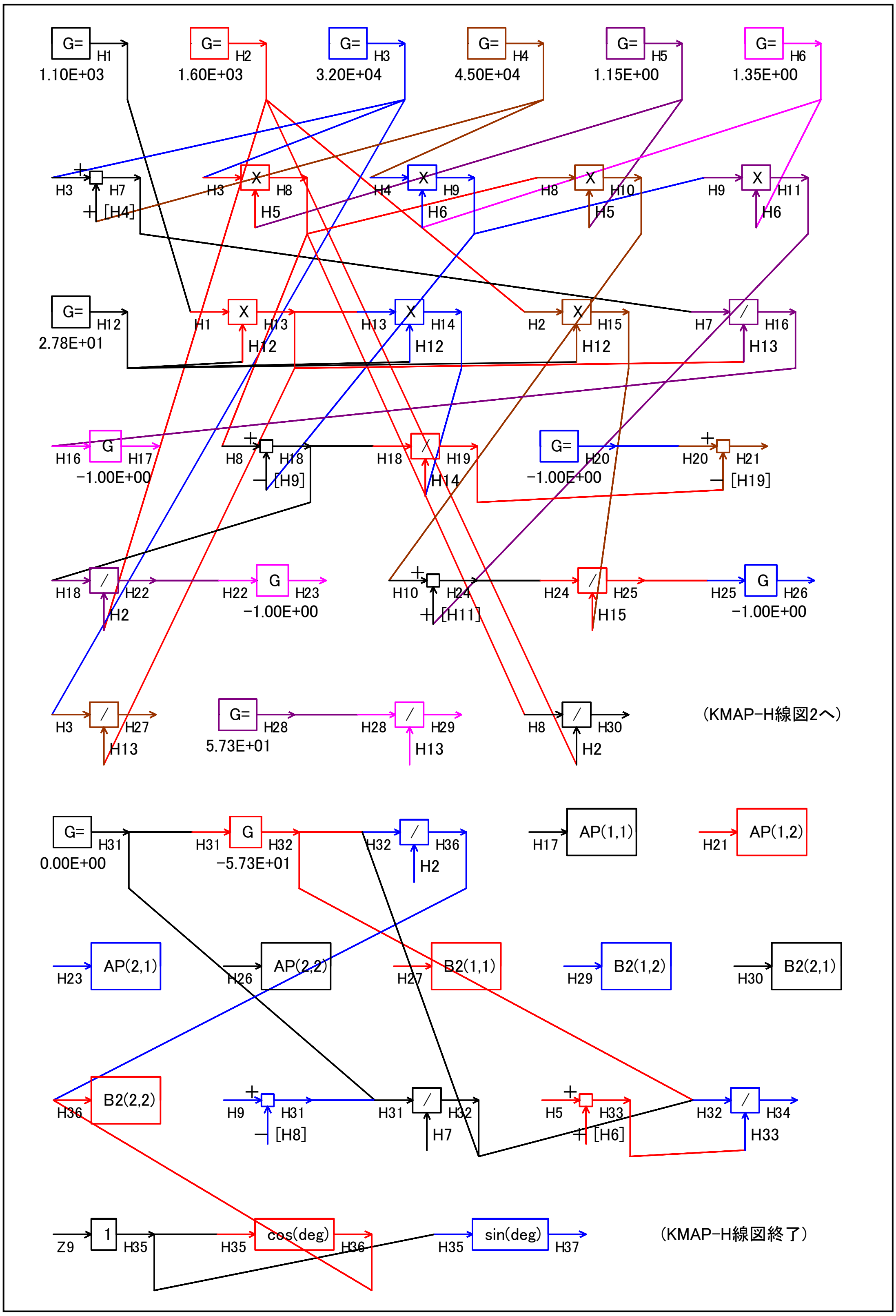

図 9　KMAP-H 線図

図 9 の KMAP-H 線図は,計算に用いられる中間変数 H についての信号の流れを図にしたものである.

（参考図書）
1）片柳亮二：機械システム制御の実際－航空機，ロボット，工作機械，
自動車，船および水中ビークル，産業図書，2013.
2）片柳亮二：初学者のためのＫＭＡＰ入門，産業図書，2012.
3）片柳亮二：航空機の飛行力学と制御，森北出版，2007.
4）景山克三，景山一郎：自動車力学，理工図書，1984.
5）カヤバ工業(株)：自動車の操舵系と操安性，山海堂，1996.
6）安部正人：自動車の運動と制御，東京電機大学出版局，2008.
7）片柳亮二：(KMAP 解説資料)
KMAP による自動車の制御(1)－ﾊﾝﾄﾞﾙ操作時の運動，2017.
8）http://r-katayanagi.air-nifty.com/

以上