一般論文

電動式射出成形機用負荷シミュレータの射出速度制御における相似則

赤　坂　則　之[*1]

Study of Simillarity Law between Electric-motor Driven Injection Molding Machine and Simulator at Injection Velocity Control

Noriyuki AKASAKA[*1]

In coping with the trend toward the much higher powered electric-motor driven injection molding machine, multi-AC servomotors control system have become necessary in order to control the molding machine mechanism. Thus, it is inevitable to use the synchronous position control technology not to cause the exececssive mechanical stress in the molding machine body. Accordingly, it is much necessary to have a load simulator of the molding machine to study the control technology. This paper clarifies the similarity law between the actual molding machine and the simulator so that we are able to anticipate the control performance at the actual machine from that at the simulator and to get the control gain parameters at the actual machine from that at the simulator to realize the same control performance as the simulator.

1. まえがき

高精度な制御と優れた応答性を特長とする AC サーボモータは，永久磁石の性能向上とコストダウンの実現により大容量化が図られた結果，従来油圧駆動されていた中型射出成形機(型締力 350t 以上 850t 以下)，さらには大型機(型締力 850t 以上)にも AC サーボ駆動が急速に適用されるようになった 1)~3)。射出成形機での AC サーボ駆動のメリットは，成形安定性の向上，油圧駆動でのりリーフ損失を無くすことによる 50%にも及ぶ省エネ効果およびクリーン性の 3 つがある。図 1 は射出・保圧機構の模式図を示す。サーボモータの回転運動は減速機を介して倍力機構としてのボールねじに伝えられ，ボールねじ軸上のナットの直線運動に変換されスクリュの前後進移動が実現される。

スクリュ先端部に貯められた溶融樹脂は，スクリュの前進移動により金型内に高速充填されるが，このとき成形不良回避のため，所定の射出圧力以下という制約が課される。この射出圧力工程に続いて金型内に充填された樹脂に圧力を掛ける保持圧工程がある。この 2 つの工程を射出・保圧機構が担う。

一方，サーボモータが大容量化したとは言え，射出成形機の大型化に対応できる高速充填，高圧保持を実現するにはサーボモータの多軸駆動が機械コストの観点から不可避である。現状は 2 軸駆動が一般的で，図 2 は 2 軸駆動での射出・保圧機構の模式図を示す。

ところで，多軸駆動法では射出成形機本体に過度の応力を与えないためには，駆動時にすべてのボー

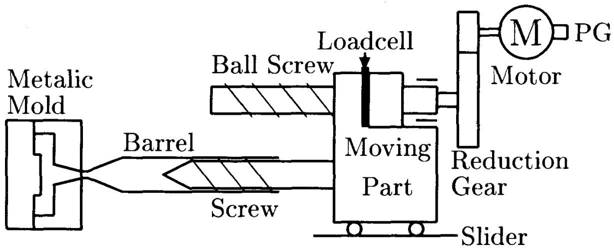

Fig. 1: Schematic diagram of injection molding mechanism

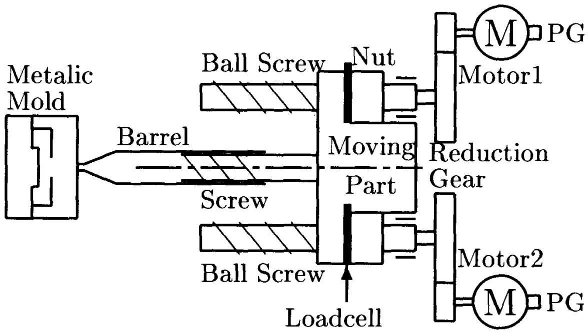

Fig. 2: Schematic diagram of two-motors injection molding mechanism

*1 久留米工業高等専門学校制御情報工学科

ルねじ軸上のナット位置が同じであること，言い換えると多軸サーボモータの位置同期制御が不可欠である。射出速度制御では各軸モータエンコーダからのフイードバック信号が使えることから，多軸共通の位置指令信号(パルス信号)を使うことにより多軸位置同期制御は可能である。しかし，上述の射出圧力工程および保持圧工程での圧力制御[4)~6)]では，サーボモータは圧力検出信号(ロードセル信号)をフイードバック信号とするトルク制御モードとなり，多軸サーボモータの位置同期制御は出来なくなる。

上述したように，射出成形機の大型化に対して導入された AC サーボの多軸駆動法では，位置同期制御が重要な技術課題となる。この技術課題の解決には，次の理由によりシミュレータ装置が不可欠である。

多軸 AC サーボの位置同期制御技術を開発するのに実機を使用すると，位置同期制御が不良のときには，技術検証時に機械本体に過度の応力を与えて実機を破損する危険がある。

シミュレータ装置の構成は, 小容量サーボモータ，動力伝達系(減速機＋ボールねじ)，油圧シリンダによる模擬負荷および実機仕様と同じ制御装置からなる。模擬負荷は油圧シリンダの高圧側を利用し，比例電磁圧力調整弁で可変負荷とする。シミュレータ装置の採用により，次のような利点が期待される。

(1)　シミュレータ装置の小型化を図ることにより，実機に比べて消費動力が小さく経済的である。
(2)　樹脂の消費が無く，試験成形品の処分を要しない。また実機で必要なバレルのヒートアップ時間が不要である。
(3)　シミュレータ装置での制御性能より，実機での制御性能および制御パラメータを予測できる。

本報は, シミュレータ装置の上記利点(3)を達成するために必要とされる実機とシミュレータ装置の相似則を理論的に明らかにする[7)]。

2.　射出・保圧機構の動特性数式モデル

2.1　単軸駆動系の動特性数式モデル

理解を容易にするため，始めに単軸駆動の場合を扱う。図1は射出・保圧機構の単軸駆動での模式図を示す。ボールねじのナット部分に連結されたスクリュ可動部の速度制御はサーボモータの速度制御により行われる。またスクリュ先端部の樹脂の圧力制御はサーボモータのトルク制御により行われるが，本報では射出速度制御に限定し，圧力制御は扱わない。相似則の意味を説明するために，図1に示す射出･保圧機構での動特性数式モデルを以下に述べる。

2.1.1　モータ軸運動方程式

$$(J_M + J_{G1})\frac{d\omega_m}{dt} = T_M - r_1 F \qquad (1)$$

ここで，J_M：モータ本体慣性モーメント(kgcm^2)，J_{G1}：モータ側減速歯車慣性モーメント(kgcm^2), ω_m：モータ角速度(rad/sec), T_M: モータトルク(Ncm), r_1：モータ側減速歯車半径(cm)，F：減速機伝達力(N)，t：時間(sec)である。

2.1.2　ボールねじ軸運動方程式

$$(J_S + J_{G2})\frac{d\omega_s}{dt} = r_2 F - T_a \qquad (2)$$

ここで, J_s: ボールねじ軸慣性モーメント(kgcm^2), J_{G2}：負荷側減速歯車慣性モーメント(kgcm^2)，ω_s：ボールねじ軸角速度(rad/sec)，r_2：負荷側減速歯車半径(cm), T_a: ボールねじ駆動トルク(Ncm)である。

2.1.3　スクリュ可動部運動方程式

$$\frac{W}{g}\frac{dv}{dt} = F_a - F_L - \mu W \frac{v}{|v|} \qquad (3)$$

$$\frac{dx}{dt} = v \qquad (4)$$

ここで，W：スクリュ可動部重量(N)，g：重力加速度(cm/sec^2), v：スクリュ可動部速度(cm/sec), x：スクリュ位置(射出開始時 x＝0)(cm)，F_a：ボールねじ軸力(N)，F_L：スクリュが樹脂から受ける負荷力(N)，μ: スクリュ可動部スライダ摩擦係数(-)である。

T_a と F_a は次の関係がある。

$$T_a = \frac{l}{2\pi}\frac{1}{\eta}F_a \qquad (5)$$

ここで，l：ボールねじリード(cm)，η: ボールねじ効率である。

v, ω_s, ω_m は次の関係がある。

$$v = \frac{l}{2\pi}\omega_s = \frac{l}{2\pi}\frac{r_1}{r_2}\omega_m \qquad (6)$$

F_L は次式で表される。

$$F_L = A_s P_i + C_{mt}\frac{v}{|v|}|v|^{\alpha} \qquad (7)$$

ここで，A_s：スクリュ断面積(cm^2)，P_i：バレル貯留部(スクリュ先端)樹脂圧力(N/cm^2)，C_{mt}：バレル粘性抵抗係数，α: 速度べき乗係数(-)である。

2.1.4　バレル貯留部樹脂圧力方程式

$$\frac{V_i}{\beta}\frac{dP_i}{dt} = A_s v - Q_{in} \qquad (8)$$

$$V_i = V_{i0} - A_s x \qquad (9)$$

ここで，V_i：バレル貯留部容積(cm^3)，V_{i0}：バレル貯留部容積初期値(射出開始時)(cm^3)，Q_{in}：金型への樹脂射出量(cm^3/sec)，β：樹脂体積弾性係数(N/cm^2)である。

2.1.5　サーボモータ特性

$$T_M = K_T i_m \qquad (10)$$

ここで，K_T：モータトルク係数(Ncm/A)，i_m：モータ電流(A)である。

2.1.6　モータ軸換算運動方程式

式(1)～(3)，(5)，(6)を使ってモータ軸角速度 ω_m を求める式を導出する。式(1)，(2)，(6)を使って，ω_s, F を消去すると次式を得る。

$$\left\{J_M + J_{G1} + (J_S + J_{G2})\left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2\right\}\frac{d\omega_m}{dt} = T_M - \frac{r_1}{r_2}T_a \qquad (11)$$

式(3)，(5)，(6)，(11)を使って，T_a,F_a を消去すると次式を得る。

$$J_{eq}\frac{d\omega_m}{dt} = T_M - \frac{r_1}{r_2}\frac{l}{2\pi}\frac{1}{\eta}\left(F_L + \mu W\frac{v}{|v|}\right) \qquad (12)$$

ここで，

$$J_{eq} = J_M + J_{G1} + (J_S + J_{G2})\left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 + \frac{W}{g}\left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2\left(\frac{l}{2\pi}\right)^2\frac{1}{\eta} \qquad (13)$$

式(12)は，運動方程式(1)～(3)をモータ軸に換算した運動方程式を表し，式(13)はモータ軸換算等価慣性モーメントを表す。また，式(4)，(6)より，次式が得られる。

$$\frac{dx}{dt} = \frac{r_1}{r_2}\frac{l}{2\pi}\omega_m \qquad (14)$$

2.2　単軸駆動系の無次元化動特性数式モデル

2.2.1　射出駆動系の無次元化動特性数式モデル

2.1 で述べた数式モデルより無次元化変数を用いた数式モデルを導出する。式(7)，(10)，(12)より

$$J_{eq}\frac{d\omega_m}{dt} = K_T i_m - \frac{r_1}{r_2}\frac{l}{2\pi}\frac{1}{\eta}\left\{A_s P_i + C_{mt}\frac{v}{|v|}|v|^\alpha + \mu W\frac{v}{|v|}\right\} \qquad (15)$$

式(15)右辺の負荷項のうち，第2項のバレル粘性抵抗と第3項のスクリュ可動部スライダ摩擦抵抗は，一般に第1項の射出圧力負荷に比べて小さいと考えられるので無視すると，式(15)は次式で表される。

$$J_{eq}\frac{d\omega_m}{dt} = K_T i_m - \frac{r_1}{r_2}\frac{l}{2\pi}\frac{1}{\eta}A_s P_i \qquad (16)$$

式(16)の変数を無次元化すると，

$$J_{eq}\omega_{max}\frac{d}{dt}\left[\frac{\omega_m}{\omega_{max}}\right] = K_T i_{max}\left[\frac{i_m}{i_{max}}\right] - \frac{r_1}{r_2}\frac{l}{2\pi}\frac{1}{\eta}A_s P_{max}\left[\frac{P_i}{P_{max}}\right] \qquad (17)$$

ここで，ω_{max}：モータ定格回転数(rad/sec)，i_{max}：モータ定格電流(A)，P_{max}：最大射出圧力(N/cm^2)である。

式(17)の両辺をモータ定格トルク T_{Mmax}(Ncm)で割ると，

$$J_{eq}\frac{\omega_{max}}{T_{Mmax}}\frac{d}{dt}\left[\frac{\omega_m}{\omega_{max}}\right] = \left[\frac{i_m}{i_{max}}\right] - \frac{r_1}{r_2}\frac{l}{2\pi}\frac{1}{\eta}\frac{A_s P_{max}}{T_{Mmax}}\left[\frac{P_i}{P_{max}}\right] \qquad (18)$$

ここで，$T_{Mmax}=K_T i_{max}$である。

式(14)の変数を無次元化すると，次式を得る。

$$\frac{d}{dt}\left[\frac{x}{x_{max}}\right] = \frac{r_1}{r_2}\frac{l}{2\pi}\frac{\omega_{max}}{x_{max}}\left[\frac{\omega_m}{\omega_{max}}\right] \qquad (19)$$

ここで，x_{max}：最大スクリュ位置(cm)である。

式(6)の変数を無次元化すると，次式を得る。

$$\left[\frac{v}{v_{max}}\right] = \frac{r_1}{r_2}\frac{l}{2\pi}\frac{\omega_{max}}{v_{max}}\left[\frac{\omega_m}{\omega_{max}}\right] \qquad (20)$$

ここで，v_{max}：最大射出速度(cm/sec)である。

以上求めた無次元化数式モデル式(18)～(20)の見通しを良くするために，射出成形機の基本性能を表す射出率 Q_{max}(cm^3/sec)および射出馬力 W_{max}(W)を導入する。Q_{max}, W_{max} は次のように定義される。

$$Q_{max} = A_s v_{max} \qquad (21)$$

$$W_{max} = P_{max} Q_{max} \qquad (22)$$

式(21)，(22)より

$$v_{max} = \frac{Q_{max}}{A_s} \qquad (23)$$

$$P_{max} = \frac{W_{max}}{Q_{max}} \qquad (24)$$

式(18)の P_{max} に式(24)を代入すると，次式を得る。

$$J_{eq}\frac{\omega_{max}}{T_{Mmax}}\frac{d}{dt}\left[\frac{\omega_m}{\omega_{max}}\right] = \left[\frac{i_m}{i_{max}}\right] - \frac{r_1}{r_2}\frac{l}{2\pi}\frac{1}{\eta}\frac{A_s}{T_{Mmax}}\frac{W_{max}}{Q_{max}}\left[\frac{P_i}{P_{max}}\right] = \left[\frac{i_m}{i_{max}}\right] - \frac{r_1}{r_2}\frac{l}{2\pi}\frac{A_s\omega_{max}}{Q_{max}}\frac{W_{max}}{T_{Mmax}\omega_{max}}\frac{1}{\eta}\left[\frac{P_i}{P_{max}}\right] \qquad (25)$$

次に式(20)の v_{max} に式(23)を代入すると，次式を得る。

$$\left[\frac{v}{v_{max}}\right]=\frac{r_1}{r_2}\frac{l}{2\pi}\frac{A_s\omega_{max}}{Q_{max}}\left[\frac{\omega_m}{\omega_{max}}\right] \tag{26}$$

式(26)を使うと，式(25)は次のように表せる。

$$J_{eq}\frac{\omega_{max}}{T_{Mmax}}\frac{d}{dt}\left[\frac{\omega_m}{\omega_{max}}\right]=\left[\frac{i_m}{i_{max}}\right] -\left[\frac{v}{v_{max}}\right]\Big/\left[\frac{\omega_m}{\omega_{max}}\right]\cdot\frac{W_{max}}{T_{Mmax}\omega_{max}}\frac{1}{\eta}\left[\frac{P_i}{P_{max}}\right] \tag{27}$$

モータ発生馬力 $T_{Mmax}\ \omega_{max}$ に伝達効率 ηを乗じたものが，射出馬力 W_{max} に等しいことから，次式が成り立つ。

$$W_{max}=\eta T_{Mmax}\omega_{max} \tag{28}$$

式(27)は，式(28)より次のようになる。

$$J_{eq}\frac{\omega_{max}}{T_{Mmax}}\frac{d}{dt}\left[\frac{\omega_m}{\omega_{max}}\right]=\left[\frac{i_m}{i_{max}}\right] -\left[\frac{v}{v_{max}}\right]\Big/\left[\frac{\omega_m}{\omega_{max}}\right]\cdot\left[\frac{P_i}{P_{max}}\right] \tag{29}$$

式(29)の両辺に〔ω_m/ω_{max}〕を乗じると，次式を得る。

$$\frac{1}{2}J_{eq}\frac{\omega_{max}}{T_{Mmax}}\frac{d}{dt}\left[\frac{\omega_m}{\omega_{max}}\right]^2=\left[\frac{i_m}{i_{max}}\right]\left[\frac{\omega_m}{\omega_{max}}\right] -\left[\frac{v}{v_{max}}\right]\left[\frac{P_i}{P_{max}}\right] \tag{30}$$

式(30)は，射出・保圧機構の無次元化されたエネルギ方程式である。式(30)の左辺は射出機構部の慣性エネルギ，右辺第1項はサーボモータの発生エネルギ，右辺第2項は樹脂になされる仕事である。

次にモータ定格回転数 ω_{max} に対応する射出速度を最大射出速度v_{max}とすれば，式(6)より次式が成り立つ。

$$v_{max}=\frac{r_1}{r_2}\frac{l}{2\pi}\omega_{max} \tag{31}$$

式(20)，(31)より次式が成り立つ。

$$\left[\frac{v}{v_{max}}\right]=\left[\frac{\omega_m}{\omega_{max}}\right] \tag{32}$$

式(32)より，式(29)は次のように表される。

$$J_{eq}\frac{\omega_{max}}{T_{Mmax}}\frac{d}{dt}\left[\frac{\omega_m}{\omega_{max}}\right]=\left[\frac{i_m}{i_{max}}\right]-\left[\frac{P_i}{P_{max}}\right] \tag{33}$$

式(31)より，式(19)は次のように表される。

$$\frac{d}{dt}\left[\frac{x}{x_{max}}\right]=\frac{v_{max}}{x_{max}}\left[\frac{\omega_m}{\omega_{max}}\right] \tag{34}$$

式(33)，(34)が射出駆動系の無次元化動特性数式モデルである。

2.2.2　射出圧力系の無次元化動特性数式モデル

式(6)，(9)を使うと，式(8)は次のようになる。

$$\frac{(V_{i0}-A_s x)}{\beta}\frac{dP_i}{dt}=A_s\frac{r_1}{r_2}\frac{l}{2\pi}\omega_m-Q_{in} \tag{35}$$

式(35)の変数を無次元化すると，

$$\frac{V_{i0}}{\beta}P_{max}\frac{d}{dt}\left[\frac{P_i}{P_{max}}\right] -\frac{A_s}{\beta}x_{max}P_{max}\left[\frac{x}{x_{max}}\right]\frac{d}{dt}\left[\frac{P_i}{P_{max}}\right] =A_s\frac{r_1}{r_2}\frac{l}{2\pi}\omega_{max}\left[\frac{\omega_m}{\omega_{max}}\right]-Q_{max}\left[\frac{Q_{in}}{Q_{max}}\right] \tag{36}$$

$$V_{i0}=A_s x_{max} \tag{37}$$

と式(21)，(31)より，式(36)は次のようになる。

$$\frac{1}{\beta}A_s x_{max}P_{max}\left\{\frac{d}{dt}\left[\frac{P_i}{P_{max}}\right]-\left[\frac{x}{x_{max}}\right]\frac{d}{dt}\left[\frac{P_i}{P_{max}}\right]\right\} =A_s v_{max}\left\{\left[\frac{\omega_m}{\omega_{max}}\right]-\left[\frac{Q_{in}}{Q_{max}}\right]\right\}$$

上式より次式が得られる。

$$\left\{1-\left[\frac{x}{x_{max}}\right]\right\}\frac{d}{dt}\left[\frac{P_i}{P_{max}}\right] =\beta\frac{v_{max}}{x_{max}}\frac{1}{P_{max}}\left\{\left[\frac{\omega_m}{\omega_{max}}\right]-\left[\frac{Q_{in}}{Q_{max}}\right]\right\} \tag{38}$$

式(38)が射出圧力系の無次元化動特性数式モデルである。ここで射出量〔Q_{in}/Q_{max}〕は一般的に射出圧力〔P_i/P_{max}〕の関数で，その関数関係はバレルのノズル形状，金型の入口形状，キャビティ形状で決まる。

$$\left[\frac{Q_{in}}{Q_{max}}\right]=f\left(\left[\frac{P_i}{P_{max}}\right]\right) \tag{39}$$

2.3　射出速度制御系の無次元化動特性数式モデル

2.3.1　射出速度制御系のブロック線図

図3は，射出速度制御系のブロック線図を示す。

プログラマブルコントローラ(PC)は，スクリュ位置に応じた階段状の射出速度指令 V^*(cm/sec)をパルス列 V_p^*(pulse/sec)としてサーボアンプに出力し，サーボアンプ内のカウンタで積算されたスクリュ位置指令 x_p^*(pulse)が位置制御ループに与えられる。ここで，以降の理解のために電子ギアについて説明する。電子ギア n_e(pulse/cm)は，物理単位の変数，例えばスクリュ位置 x(cm)とそれをパルス単位で表したときの変数 x_p(pulse)を関係付けるもので，次式で定義される。

$$n_e=\frac{x_p}{x} \tag{40}$$

式(40)から解るようにスクリュ移動の物理単位量

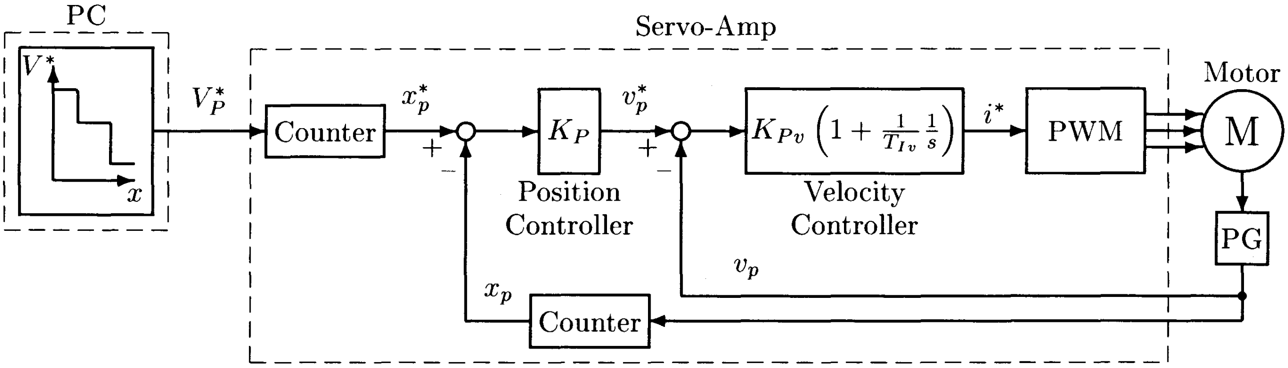

Fig. 3: Block diagram of injection velocity control system

(例,cm) に対応するモータエンコーダのパルス数を与えるもので，エンコーダの分解能，減速比とボールねじリードで決まる。したがって，電子ギア n_e を使えば，x_p^* を出力する上記カウンタは次式で表される。

$$x_p^* = \int V_p^* dt = n_e \int V^* dt \tag{41}$$

図 3 では，射出速度制御を，速度制御ループを内部ループに含む位置制御ループで実現していることが判る。図 3 で添字 p はパルス単位の変数を意味するが，物理単位の変数とは次の関係がある。

$$x_p^* = n_e x^* \quad v_p^* = n_e v^* \quad x_p = n_e x \quad v_p = n_e v \tag{42}$$

ここで，x^*：スクリュ位置指令(cm)，v_p^*：スクリュ速度指令 (pulse/sec)，v^*：スクリュ速度指令 (cm/sec)，x_p：スクリュ実位置(pulse)，v_p：スクリュ実速度(pulse/sec)である。

式(42)より，図 3 中の変数，v_p^*, v_p, x_p^*, x_p を電子ギア n_e で割れば，物理単位の変数に変わることが判る。速度制御器はモータ電流指令(トルク指令)i_m^*(A)を PWM 回路に出力し，PWM 回路は 3 相交流電流(電圧)信号をサーボモータに出力する。

2.3.2　射出速度制御系の無次元化動特性数式モデル

(1)　位置制御器(P 動作)

$$v_p^* = K_P(x_p^* - x_p) \tag{43}$$

ここで，K_p 位置制御器比例ゲイン(1/sec)である。

(2)　速度制御器(PI 動作)

$$i_m^* = K_{Pv}\left\{(v_p^* - v_p) + \frac{1}{T_{Iv}}\int (v_p^* - v_p) dt\right\} \tag{44}$$

ここで，K_{Pv}：速度制御器比例ゲイン (A/(pulse/sec))，T_{Iv}：速度制御器積分時間(sec)である。

式(41)の変数を無次元化する。式(41)より

$$x_{max}\left[\frac{x_p^*/n_e}{x_{max}}\right] = v_{max}\int\left[\frac{V^*}{v_{max}}\right] dt$$

式(42)を使うと，上式は次のようになる。

$$\left[\frac{x^*}{x_{max}}\right] = \frac{v_{max}}{x_{max}}\int\left[\frac{V^*}{v_{max}}\right] dt \tag{45}$$

式(43)の変数を無次元化する。式(43)の両辺を電子ギア n_e で割ってから無次元化すると，

$$\left[\frac{v_p^*/n_e}{v_{max}}\right] = K_P\frac{x_{max}}{v_{max}}\left\{\left[\frac{x_p^*/n_e}{x_{max}}\right] - \left[\frac{x_p/n_e}{x_{max}}\right]\right\}$$

式(42)を使うと，上式は次のようになる。

$$\left[\frac{v^*}{v_{max}}\right] = K_P\frac{x_{max}}{v_{max}}\left\{\left[\frac{x^*}{x_{max}}\right] - \left[\frac{x}{x_{max}}\right]\right\} \tag{46}$$

無次元化比例ゲイン $\overline{K}_P$ を

$$\overline{K}_P = K_P\frac{x_{max}}{v_{max}} \tag{47}$$

とすると，式(46)は次のようになる。

$$\left[\frac{v^*}{v_{max}}\right] = \overline{K}_P\left\{\left[\frac{x^*}{x_{max}}\right] - \left[\frac{x}{x_{max}}\right]\right\}$$

式(32)を使うと，上式は次のように表せる。

$$\left[\frac{\omega_m^*}{\omega_{max}}\right] = \overline{K}_P\left\{\left[\frac{x^*}{x_{max}}\right] - \left[\frac{x}{x_{max}}\right]\right\} \tag{48}$$

ここで，ω_m^*：モータ速度指令(rad/sec)である。

式(44)の変数を無次元化する。式(44)の両辺を電子ギア n_e で割ってから無次元化すると，

$$\frac{i_{max}}{n_e}\left[\frac{i_m^*}{i_{max}}\right] = K_{Pv}v_{max}\left\{\left(\left[\frac{v_p^*/n_e}{v_{max}}\right] - \left[\frac{v_p/n_e}{v_{max}}\right]\right) + \frac{1}{T_{Iv}}\int\left(\left[\frac{v_p^*/n_e}{v_{max}}\right] - \left[\frac{v_p/n_e}{v_{max}}\right]\right) dt\right\}$$

式(42)を使うと，上式は次のようになる。

$$\left[\frac{i_m^*}{i_{max}}\right] = K_{Pv}n_e\frac{v_{max}}{i_{max}}\left\{\left(\left[\frac{v^*}{v_{max}}\right] - \left[\frac{v}{v_{max}}\right]\right) + \frac{1}{T_{Iv}}\int\left(\left[\frac{v^*}{v_{max}}\right] - \left[\frac{v}{v_{max}}\right]\right) dt\right\} \tag{49}$$

無次元化比例ゲイン $\overline{K}_{Pv}$ を

$$\overline{K}_{Pv} = K_{Pv} n_e \frac{v_{max}}{i_{max}} \tag{50}$$

とすると，式(49)は次のようになる。

$$\left[\frac{i_m^*}{i_{max}}\right] = \overline{K}_{Pv}\left\{\left(\left[\frac{v^*}{v_{max}}\right] - \left[\frac{v}{v_{max}}\right]\right) + \frac{1}{T_{Iv}}\int\left(\left[\frac{v^*}{v_{max}}\right] - \left[\frac{v}{v_{max}}\right]\right)dt\right\}$$

式(32)を使うと，上式は次のように表せる。

$$\left[\frac{i_m^*}{i_{max}}\right] = \overline{K}_{Pv}\left\{\left(\left[\frac{\omega_m^*}{\omega_{max}}\right] - \left[\frac{\omega_m}{\omega_{max}}\right]\right) + \frac{1}{T_{Iv}}\int\left(\left[\frac{\omega_m^*}{\omega_{max}}\right] - \left[\frac{\omega_m}{\omega_{max}}\right]\right)dt\right\} \tag{51}$$

3. 射出速度制御での相似則

3.1 射出速度制御での相似則

2.2 および 2.3 で述べた射出・保圧機構と射出速度制御系の無次元化動特性数式モデルのブロック線図を図 4 に示す。始めに，図 4 を利用して相似則の考え方を説明する。図 4 のブロック線図を，実機モデルとシミュレータモデルの 2 通りに描いたとする。このとき，下記の 3 つの条件からなる〔相似則条件〕が実機モデルとシミュレータモデルの間で成り立てば，両者の無次元化変数の時間応答は完全に一致することになる。すなわち，次の式(52)〜(55)が成り立つ。シミュレータモデルでは変数名に′記号を付けている(以下同じ)。

$$\frac{x(t)}{x_{max}} \equiv \frac{x'(t)}{x'_{max}} \tag{52}$$

$$\frac{P_i(t)}{P_{max}} \equiv \frac{P'_i(t)}{P'_{max}} \tag{53}$$

$$\frac{\omega_m(t)}{\omega} \equiv \frac{\omega'_m(t)}{\omega'_{max}} \tag{54}$$

$$\frac{i_m(t)}{i_{max}} \equiv \frac{i'_m(t)}{i'_{max}} \tag{55}$$

ここで，モータ電流指令 $i_m^*(t)$ とモータ実電流 $i_m(t)$ 間の時間的遅れは無視し，次式が成り立つとしている。

$$i_m(t) = i_m^*(t) \tag{56}$$

〔相似則条件〕

(1) 図4の二重枠に示す次の3つのパラメータが等しい。すなわち，

$$\frac{T_{Mmax}}{J_{eq}\omega_{max}} = \frac{T'_{Mmax}}{J'_{eq}\omega'_{max}} \tag{57}$$

$$\beta\frac{v_{max}}{x_{max}}\frac{1}{P_{max}} = \beta'\frac{v'_{max}}{x'_{max}}\frac{1}{P'_{max}} \tag{58}$$

$$\frac{v_{max}}{x_{max}} = \frac{v'_{max}}{x'_{max}} \tag{59}$$

(2) 射出速度制御系の制御パラメータが等しい。

$$\overline{K}_P = \overline{K}'_P \tag{60}$$

$$\overline{K}_{Pv} = \overline{K}'_{Pv} \tag{61}$$

$$T_{Iv} = T'_{Iv} \tag{62}$$

(3) 〔Q_{in}/Q_{max}〕と〔P_i/P_{max}〕の関係が等しい。

$$f\left(\left[\frac{P_i}{P_{max}}\right]\right) = f'\left(\left[\frac{P'_i}{P'_{max}}\right]\right) \tag{63}$$

以上が相似則の基本的考え方である。すなわち，式(52)〜(55)が成り立つという意味で実機とシミュレータの相似則が成り立つためには，式(57)〜(63)が成り立つ必要がある。

3.2 相似則パラメータの利用法

始めに式(57)〜(59)の相似則パラメータについて述べる。式(59)が成り立つことから，式(58)は次のように書ける。

$$\frac{\beta}{P_{max}} = \frac{\beta'}{P'_{max}} \tag{64}$$

したがって，射出速度制御での負荷特性を決める相似則パラメータは次の 3 つとなる。

$$\frac{T_{Mmax}}{J_{eq}\omega_{max}} \qquad \frac{\beta}{P_{max}} \qquad \frac{v_{max}}{x_{max}} \tag{65}$$

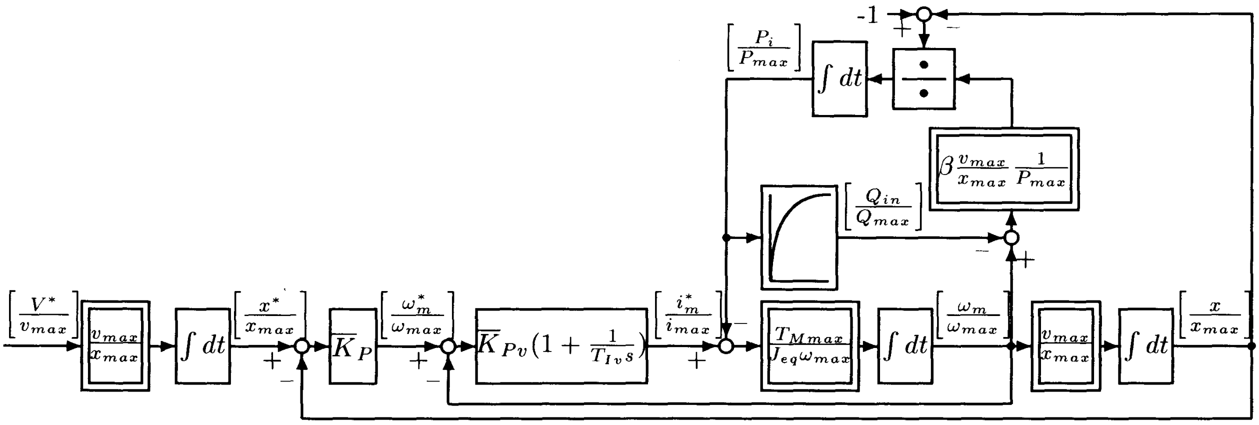

Fig. 4: Dimensionless block diagram of injection velocity control process

実機射出成形機と次のような対応付けをしたシミュレータを考える。

実機射出成形機		シミュレータ
スクリュ	⇔	ピストン
バレル	⇔	油圧シリンダ
溶融樹脂	⇔	作動油
射出圧力	⇔	油圧シリンダ高圧側圧力

上記のような油圧シリンダによる模擬負荷シミュレータを考えるとき，式(65)の相似則パラメータが実機と一致するシミュレータを設計すれば，両者間で式(52)〜(55)の相似則が成り立つことが期待できる。

式(60)〜(62)の相似則パラメータについて述べる。シミュレータを使った制御実験で次の制御パラメータが決まったとする。

$$\overline{K}'_P \qquad \overline{K}'_{Pv} \qquad T'_{Iv} \qquad (66)$$

式(60)〜(62)が成り立つように，実機での制御パラメータ$\overline{K}_P, \overline{K}_{Pv}, T_{Iv}$を決めれば，シミュレータで得られている射出速度制御性能と同じ制御性能が実機で得られると予測できる。言い換えると，シミュレータで得られた射出速度制御性能と同じ制御性能を実現できる実機での制御パラメータを得ることができる。

式(63)の関係について述べる。

〔Q_{in}/Q_{max}〕と〔P_i/P_{max}〕の関係は，バレルのノズル形状，成形品毎に異なる金型形状で変化するので，式(63)の関係式は適当な関数で代表させる。

重要なことは，〔Q_{in}/Q_{max}〕と〔P_i/P_{max}〕の関係が変化しても，射出速度制御系のロバスト性が確保される必要があることである。これに関しては，シミュレータについても全く同じことが言える。

4. 多軸駆動系での相似則

4.1. 多軸駆動系の動特性数式モデル

図2は，2軸駆動での射出・保圧機構の模式図を示す。数式導出を簡単化するため，図2の可動部中心線に沿って可動部を分割したモデルを考える。このとき，2分割された可動部は，動力伝達系に繋がった各サーボモータにより単軸駆動されると考えられる。ただし，2分割された可動部は，完全に位置同期された動きをすると仮定する。図2でモータ1，モータ2のモータ軸換算運動方程式は，単軸駆動での運動方程式(16)に倣って次のように表せる。

$$J_{eqm}\frac{d\omega_{m1}}{dt} = T_{M1} - \frac{1}{2}\frac{r_1}{r_2}\frac{l}{2\pi}\frac{1}{\eta}A_sP_i \qquad (67)$$

$$J_{eqm}\frac{d\omega_{m2}}{dt} = T_{M2} - \frac{1}{2}\frac{r_1}{r_2}\frac{l}{2\pi}\frac{1}{\eta}A_sP_i \qquad (68)$$

ここで，

$$J_{eqm} = J_M + J_{G1} + (J_S + J_{G2})\left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 + \frac{1}{2}\frac{W}{g}\left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2\left(\frac{l}{2\pi}\right)^2\frac{1}{\eta} \qquad (69)$$

J_{eqm}:モータ1台当たりのモータ軸換算等価慣性モーメントで可動部重量を1/2にしている。

ω_{m1}：モータ1の角速度(rad/sec)，T_{M1}：モータ1のトルク(Ncm)，ω_{m2}:モータ2の角速度(rad/sec)，T_{M2}：モータ2のトルク(Ncm)である。

式(67)，(68)では各モータが負担する射出圧力負荷を1/2にしている。2台のモータの位置同期条件より次式が成り立つ。

$$\left.\begin{array}{l}\omega_{m1} = \omega_{m2} = \omega_m \\ T_{M1} = T_{M2} = T_M\end{array}\right\} \qquad (70)$$

式(67)と式(68)を足し，式(70)を使うと次式を得る。

$$2J_{eqm}\frac{d\omega_m}{dt} = 2T_M - \frac{r_1}{r_2}\frac{l}{2\pi}\frac{1}{\eta}A_sP_i \qquad (71)$$

2台のモータについての軸換算等価慣性モーメントの和をJ_{eq2}とすれば，式(69)より次式が成り立つ。

$$J_{eq2} = 2J_{eqm} = 2J_M+2J_{G1}+2(J_S+J_{G2})\left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 + \frac{W}{g}\left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2\left(\frac{l}{2\pi}\right)^2\frac{1}{\eta} \qquad (72)$$

式(72)より，式(71)は

$$J_{eq2}\frac{d\omega_m}{dt} = 2T_M - \frac{r_1}{r_2}\frac{l}{2\pi}\frac{1}{\eta}A_sP_i \qquad (73)$$

2軸駆動でのモータ1台当たりの運動方程式は，式(73)より次のようになる。

$$\frac{J_{eq2}}{2}\frac{d\omega_m}{dt} = T_M - \frac{1}{2}\frac{r_1}{r_2}\frac{l}{2\pi}\frac{1}{\eta}A_sP_i \qquad (74)$$

一般に乃軸駆動でのモータ1台当たりの運動方程式は，次式で表せる。

$$\frac{J_{eqT}}{n}\frac{d\omega_m}{dt} = T_M - \frac{1}{n}\frac{r_1}{r_2}\frac{l}{2\pi}\frac{1}{\eta}A_sP_i \qquad (75)$$

ここで，

$$J_{eqT} = nJ_M + nJ_{G1} + n(J_S + J_{G2})\left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 + \frac{W}{g}\left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2\left(\frac{l}{2\pi}\right)^2\frac{1}{\eta} \qquad (76)$$

その他の数式モデル式(6)，(8)，(14)は，多軸駆動系でも同じ式が成り立つ。

4.2 多軸駆動系の無次元化動特性数式モデル

2.2 で述べた無次元化操作を繰り返すことで無次

元化モデルが得られる。ただし，式(28)は，n 軸駆動系では次式となる。

$$W_{max} = n\eta T_{Mmax}\omega_{max} \tag{77}$$

詳しい式の誘導は省略するが，式(77)を使って式(75)の変数を無次元化すると，次式が得られる。

$$\frac{J_{eqT}}{n}\frac{\omega_{max}}{T_{Mmax}}\frac{d}{dt}\left[\frac{\omega_m}{\omega_{max}}\right] = \left[\frac{i_m}{i_{max}}\right] - \left[\frac{P_i}{P_{max}}\right] \tag{78}$$

式(76)より，次式が成り立つ。

$$\overline{J}_{eq} = \frac{J_{eqT}}{n} = J_M + J_{G1} + (J_S + J_{G2})\left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 + \frac{1}{n}\frac{W}{g}\left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2\left(\frac{l}{2\pi}\right)^2\frac{1}{\eta} \tag{79}$$

上式より $\overline{J}_{eq}$ は，多軸駆動系でモータ 1 台当たりのモータ軸換算等価慣性モーメントを表している。

したがって，式(79)を使うと，式(78)は次式で表せる。

$$\overline{J}_{eq}\frac{\omega_{max}}{T_{Mmax}}\frac{d}{dt}\left[\frac{\omega_m}{\omega_{max}}\right] = \left[\frac{i_m}{i_{max}}\right] - \left[\frac{P_i}{P_{max}}\right] \tag{80}$$

式(80)より，多軸駆動系でも $\overline{J}_{eq}$ を使えば，単軸駆動系での無次元化式(33)と同一に成ることが判る。

その他の無次元化動特性数式モデル式(34), (38), (39)は同じである。さらに 2.3 で述べた射出速度制御系の無次元化動特性数式モデル式(45), (48), (51)も同じである。ただし，式(48)，(51)はモータ台数 n 個づつある形になる。

4.3　多軸駆動系射出速度制御での相似則

多軸駆動系の $\overline{J}_{eq}$ の意味は単軸駆動系の J_{eq} に相当すると考えられることから，多軸駆動系での相似則パラメータも，単軸駆動系の相似則パラメータ式(65)と同じになることが判る。敢えて，多軸駆動系での相似則パラメータを書けば，次のようになる。

$$\frac{T_{Mmax}}{\overline{J}_{eq}\omega_{max}} \qquad \frac{\beta}{P_{max}} \qquad \frac{v_{max}}{x_{max}} \tag{81}$$

4.4　多軸駆動系相似則パラメータの利用法

多軸駆動系のシミュレータを想定するとき，多軸モータが 1 つの可動部に連結するような実機と同じ構造は許されない。シミュレータによる制御実験時にシミュレータを破損する危険があるからである。多軸駆動系のシミュレータの構成は，モータ 1 台に 1 個の油圧シリンダ(模擬負荷)からなる独立した単軸構造を複数もつ構成となり，その単軸構造は相似則パラメータとして式(81)に示すように J_{eq} の代わりに $\overline{J}_{eq}$ を用いれば, 3.2 で述べた単軸駆動系の相似則が適用できる。

5. ま と め

電動式射出成形機の大型化に対応して導入された AC サーボの多軸駆動法では，機械本体に過度の応力を与えないためには多軸サーボモータの位置同期制御が不可欠で，この技術課題の解決には技術検証時の実機破損防止の点からシミュレータ装置が必要になる。本報は，射出成形機の射出速度制御において，シミュレータ装置の制御性能より実機の制御性能および制御パラメータを予測できる相似則を理論的に明らかにした。なお，圧力制御での相似則および相似則に基づいたシミュレータ装置の設計手順は別報で明らかにする[8)]。本研究は平成 13 年度科学研究費補助金で実施した。

参 考 文 献

1)　稲葉善治，伊藤進，“ 電動サーボ式射出成形機用ボールねじの寿命に関する研究 ”，精密工学会誌，65－6，(1999－6)，pp.805－809

2)　中村晋哉，“ 射出成形機の電動化と高負荷用ボールねじ ”，日本機械学会誌，103－978，(2000－5)，pp.340

3)　宮口和男，二宮瑞穂，中村晋哉，他 2 名，“ 高荷重用ボールねじの負荷分布の均一化とそれによる寿命延長 ”，精密工学会誌，67－2，(2001-2)，pp.217－221

4)　稲葉善治,上口賢男，根子哲明，“ 電動式射出成形機における圧力波形追従制御(第 1 報)-流動圧力制御における学習制御の適用 ”, 精密工学会誌, 65－2，(1999－2)，pp.293－299

5)　稲葉善治，松原俊介，上口賢男，“ 電動サーボ式射出成形機における圧力制御 ”，精密工学会誌，65－49(1999－4)，pp.542－548

6)　稲葉善治，上口賢男，根子哲軋，“ 電動式射出成形機における圧力波形追従制御(第 2 報)-圧力波形編集制御における学習制御の適用 ”, 精密工学会誌，65－5，(1999－5)，pp.746－752

7)　赤坂則之，“ 電動射出成形機の負荷シミュレータの相似則研究 ”，日本機械学会 2002 年次大会講演論文集Ⅶ，(2002－9)，pp.273－274

8)　赤坂則之，“ 電動射出成形機負荷シミュレータの相似則に基づく設計法 ”, 日本機械学会 2002 年次大会講演論文集Ⅶ，(2002-9)，pp.275-276

(2004 年 2 月 16 日　受理)