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 —

稲葉善治** 上口賢男** 根子哲明**

Pressure Profile Trace Control on Fully Electric Injection Molding Machine (1st Report)

— Application of Learning Control for Flow Pressure Control —

Yoshiharu INABA, Masao KAMIGUCHI and Noriaki NEKO

In case of plastic injection molding process, stable molding is the most required and pressure profile deviation under injection velocity control is used for a judgment factor of stable molding. Formerly pressure profile is controlled only during hold process (pressure controlled stage) and is not controlled during injection process (velocity controlled stage). To achieve the stable injection process, Pressure Profile Trace Control is developed. This control is able to trace the original pressure profile at good part produced by controlling pressure directly. To control pressure directly with fully electric injection molding machine, the force control of electric servomotor has to be used. Force control of electric servomotor is developed for various areas, especially robot application. But there is a little application at injection molding area. Simple closed loop force control was not able to get good result. To improve the functionality, learning system is introduced for force control.

Key words: pressure control, force control, learning system, stable molding, injection molding machine

1. 緒 言

携帯電話、ノートブックパソコンに見られるように、電子機器類の軽薄短小化競争は今なおとどまる所を知らない。そしてこの軽薄短小化を支えているのはプラスチック製の極小のコネクタや極薄の外装部品などである。このため、これらのプラスチック部品に要求される寸法精度や外観品質には極限とも言える厳しいレベルが要求されている。

こうした厳しい品質保証の要求に対処する最も信頼性の高い手段は成形品の全品検査である。しかしながら、大量に量産されるプラスチック部品の全数検査は、莫大な検査工数を必要とするうえ、仕掛在庫の増加や生産の流れを阻害する要因になるので、一般的には極力これを避けようとする傾向にある。

従って、実際の成形現場では、全品検査に代わる品質管理手段として、溶融樹脂が金型内部に注入される時の樹脂の圧力をモニタし、この結果得られた圧力カーブをショットごとに比較して、成形の安定性を評価することが一般に行われていた。

そこで筆者らは、射出時の樹脂圧と成形安定性には密接な関係¹⁾があることに着目し、射出時の樹脂圧を安定させる技術の開発を試みた。そして、重量ばらつきを評価することで、樹脂圧が安定すれば成形が安定することを確認した。

本研究では、この樹脂圧が安定すれば成形が安定するという考え方を一歩進め、成形品が良品である時の樹脂の圧力カーブを記憶しておき、成形時にはその圧力カーブを再現する圧力制御機能を開発し、圧力波形追従制御と命名した。

この制御を電動式射出成形機で完成させるためには、電気サーボモータによる流動圧力の制御が必要となった。

Fig.1 Construction of fully electric injection molding machine

サーボモータによる力制御は、ロボットの分野^{2)~4)}である程度応用されているが、流動圧力⁵⁾を扱った例はすくない。また、射出成形機のように制御対象が、樹脂や金型など成形品ごとに変わるような系では、固定の制御では良い結果を得ることはできなく成形品に合わせて制御対象を学習する手法が必要になった。

本研究で開発された圧力波形追従制御は、学習制御^{6)~8)}を応用し、従来の成形と比較して、数々の優れた特徴を実現することができた。この内容を以下に報告する。

2. 圧力波形追従制御

2.1 射出装置の概要と流動圧力の検出(圧力波形)

図1に電動サーボ式射出成形機の概要を示し、図2には溶融樹脂を金型に注入する射出装置を示す。射出装置には、射出スクリー回転と、樹脂の射出(スクリーの前後進)用に2つのサーボモータが搭載されている。

*原稿受付 平成10年8月31日

**正会員 ファナック(株)(山梨県南都留郡忍野村)

Fig.2 Injection mechanism

Fig.3 Velocity control in injection process

Fig.4 Pressure profile trace control in injection process

射出成形プロセスは、計量・射出及び保圧工程に分かれている。計量工程では、射出スクリーを回転させることにより、一定量の樹脂をバレル前方に移送させながらヒータの熱とスクリーによるせん断熱で樹脂を熔融混練する。その後、射出工程に入り、射出用サーボモータが射出スクリーを前進させることで、この熔融樹脂を金型内に注入する。最後の保圧工程では、金型内で樹脂が冷却固化する際の収縮を補うため、射出スクリーが設定された圧力で樹脂を金型に供給する。このプロセスの中で、射出及び保圧工程では、射出スクリーを前方に駆動する力によりバレル及び金型内の樹脂に圧力が発生する。この樹脂圧力を検出するため、今回使用した電動サーボ式射出成形機では、図2に示す通り射出スクリーの後部に力センサを取り付けている。この力センサは射出スクリーの反力を検出するため、検出される圧力は図からわかる通りバレル内の樹脂圧力となる。また、こうして得られる圧力データを連続的に記録することで、射出開始から保圧完了までの樹脂の圧力カーブを得ることが出来る。こうして得られたカーブを、本稿では圧力波形と呼ぶこととする。

2.2 圧力波形追従制御の基本構想

図3に示すごとく、従来、射出成形のプロセスにおいて、射出工程（射出開始から保圧開始までの区間）では射出スクリー位置に応じた射出速度、保圧工程（保圧開始から保圧完了ま

Fig.5 Open loop pressure control by velocity

での区間）では圧力がそれぞれ制御の対象となっていた。この理由は、成形技術者が成形条件を設定する際、金型内部の樹脂の流動状況を想定して、各パラメータを決定することによる。成形条件の設定には色々な手法が提案されているが、現在、この条件設定方法が最も一般的である。

ここで、射出工程の射出速度と速度切替位置による条件設定方法では、樹脂の圧力は射出速度の結果として得られる値であり、制御の直接的な対象にはなっていない。このため、成形中に、金型温度・計量した樹脂の粘度・逆流防止弁の閉鎖タイミング・金型のガスベントすきまの変化などに変動が生ずると、射出工程における樹脂圧に変動が生じていた。こうした挙動は、樹脂圧を連続的に記録して得られた圧力波形の変動として、より視覚的に観測することが出来る。

従って、実際の成形現場では、この圧力波形を観察し成形状態を評価することが行われていた。すなわち、圧力波形の変動幅と成形の安定性との間に一般的に強い相関が成り立つとされており、成形技術者は圧力波形の変動幅が少なくなる方向に成形条件パラメータの調整を行っている。

筆者らは、この事実に基づいて、圧力波形を直接制御することにより成形を安定させることが出来ると考えた。すなわち、射出開始から保圧完了までの全区間にわたり圧力制御を行うことにより圧力波形の変動幅を抑え、結果として安定した成形品を得ることを図った。ここで、圧力制御の参照圧力として良品成形時の圧力波形を使用することにより、成形品の変動幅が抑えられるだけでなく、安定した良品の成形が期待出来ることになる。

図4に射出工程から保圧工程まで全区間を圧力制御のみで制御する概念を示す。通常、射出工程においては、樹脂の持つ粘弾性により圧力の閉ループ制御を行うための樹脂圧の十分な応答速度を得ることが出来ない。従って、樹脂の圧力を射出の制御装置にフィードバックしても適切な制御ゲインを得ることが出来ず、追従出来ないか、発振してしまうかのどちらかであった。このため、本研究の前は、通常、保圧工程のみ圧力の閉ループ制御が実施されていた。

本研究では、以下に述べるように、射出成形がサイクリックな工程であることに着目し、学習制御を導入することにより、射出成形の全区間にわたる圧力の閉ループ制御を可能にした。

2.3 圧力の閉ループ制御

さて、図5に示す成形の伝達系 $G_{vp}(s)$ が常に一定であれば、良品時の速度 V_0 を毎回指令することにより常に良品成形時と同じ圧力変化 P を得ることが出来るはずである。しかしながら、実際の成形の伝達系は図6に示すように、樹脂や金型の温度、樹脂の粘性及び金型の状態などの要因があり、長時間にわたりこれらの状態を一定に保つことは不可能である。従って、このように状態が変化する系において良品成形時の圧力変化 P を常

Fig. 6 Transfer system of injection molding process

Fig. 7 Force control by electric servo motor

に安定して得るには、これらの変動要素を閉ループ制御で補償する必要があり、必然的に圧力を閉ループで制御せざるを得ない。筆者らは本研究に先立ち、「電動サーボ式射出成形機における圧力制御⁹⁾」を既に開発した。前回の研究では、図7に示すごとく、一般工作機械の制御を目的としたサーボ制御系において、圧力センサからの出力と目標圧力との偏差から作成した速度指令を速度制御に帰還させることにより、電動サーボ式射出成形機に適した力制御、すなわち閉ループ圧力制御を実現できることを示した。この制御系では、制御対象が圧力であり、操作量が速度であるので、図8に示すように、圧力(力)偏差から速度指令を作成するゲイン関数を $G_f(s)$ とする制御系を構築した。

ところで、前回開発した閉ループ圧力制御機能は、保圧工程という射出スクリーが非常に低速で移動する工程を扱ったので、実用上は問題の無い制御性を確保することが出来た。

しかしながら、本研究で圧力制御の対象にしている射出工程においては、樹脂が金型に注入されていく過程で、樹脂の流れの状態に応じて射出用サーボモータに加わる負荷が変動する。このため、前回開発した1つの固定ゲインによる圧力制御系のままでは、射出の開始から保圧の終了までの全域にわたって良好な制御性を確保することは不可能であった。

熔融樹脂を金型に注入する工程を考察すると、図9に示すように少なくとも次の3つのステージに分割することができると考えられる。

- a: 樹脂が金型内の自由な空間に流入するステージ
- b: 樹脂が金型内に充てん完了する直前のステージ
- c: 樹脂が金型内で冷却・収縮する分を補うステージ

これらの各々のステージは、下記のごとく定性的な特徴を有しており、閉ループ圧力制御を行うためのゲイン決定の重要な手がかりになった。

P_0 : Pressure in good parts producing

P : Actual pressure

$G_f(s)$: Pressure transfer function

$$G_f(s) = K_{pv}$$

$$K_{pv} = 5K_0 \quad V \geq 3(\text{rpm})$$

$$K_{pv} = K_0 \quad V < 3(\text{rpm})$$

$$K_0 = 0.6(\text{rpm/N})$$

Fig. 8 Closed loop pressure control by velocity

Fig. 9 3 stages of resin flow condition

まず、aのステージは射出工程と呼ばれる工程であり、射出スクリーは樹脂を金型に注入するために、次のb、cのステージに比較して高速で、かつ速度を変えながら動いている。

従って、このステージでは射出スクリーのダイナミックな動きに追従するために比較的大きなゲインを必要とする。また、樹脂の流入経路の形状は複雑であり、特にゲートのような狭い部分を樹脂が通過する際には非常に大きな射出速度と負荷の変動を伴う。このため、aのステージでは特にきめ細かく、かつ、ダイナミックなゲインの調整が必要である。

次にbのステージは、樹脂が金型に充てんされる直前であり、急に射出スクリーに対する負荷が増大すると同時に射出速度が急減速される箇所である。この減速が正常におこなわれないと、圧力波形にスパイクと呼ばれる不要な圧力ピークが発生し、成形品にバリなどの成形不良が発生させることになる。このため、このステージでは射出速度を確実に抑え込むために適切なゲインを必要とする。

最後にcのステージは、樹脂が金型に充てん完了された後の工程で、保圧工程と呼ばれる。射出スクリーには高負荷がかかるが動きは低速なので、比較的小きなゲインで安定した制御が可能であった。ここで、このcのステージのゲイン K_0 に関しては筆者らの圧力制御の研究⁸⁾で既に報告されている。

さて、この基本パターンを念頭において、実際の金型を使用して各々のステージのゲインを決定した。この際a、b、cの各々のステージを成形機が認識する手段として、射出用サーボ

Fig.10 Outline of test part

Table1 Experimental condition

Injection molding machine	FANUC ROBOSHOT α -30A, Screw diameter : ϕ 22
Mold	Case
Resin	ABS
Shot size	32.5 mm
Switch position of injection velocity	10.0 mm
V-P transfer position	5.0 mm
Injection velocity 1	40 mm/s
Injection velocity 2	6 mm/s
Hold pressure 1	120MPa 2.0 s
Hold pressure 2	80MPa 0.2 s
Hold pressure 3	40MPa 0.2 s
Screw speed 1	100 rpm
Screw speed 2	50 rpm
Switch position of screw speed	30.5 mm

モータの回転速度を利用した。すなわち、成形機にサーボモータの回転速度を監視し、回転速度が3 rpm 以下になった時点までcのステージの開始と認識させた。また、実験的に求めたcのゲインを元に、a, bのゲインをcのゲインの5倍とした。この結果、これまで困難とされていた射出成形の全域にわたる閉ループ圧力制御が可能になったが、新たに次の問題が発生した。すなわち、こうして決められたゲインは、そのゲインを設定した金型や樹脂に対しては良好な制御性を確保できたが、金型や樹脂を変えた場合には必ずしも良好な制御性を得ることが出来なかった。従って、金型や樹脂が変わった場合にはその都度ゲインを再設定する必要があった。しかしながら、今回の場合、規準圧力波形を固定したときの速度を同時に取得できるため、この速度を補正する方法を検討することにした。

2.4 樹脂と金型の組合せによる圧力波形の特徴

前節で述べたように、成形時の圧力波形には基本的なパターンがあり、その波形は3つのステージに分割される。これらの3つのステージを成形機が自動的に判別し、各ステージに適した補正速度を設定することを考えた。そこで、この技術の開発準備として、ある金型において様々な樹脂を使用して成形実験を行い、樹脂と圧力波形の関係を調べた。

図10にはこの実験に使用した金型で成形される成形品の外形図を示す。図11には各樹脂に対する連続100ショットの重ね書きをした圧力波形と圧力偏差を示す。ここで、圧力偏差は100ショットの圧力波形の平均に対する各圧力波形の差の絶対値で、圧力波形に対して6倍のスケールでグラフ中央に示した。また、本実験を行った時の射出成形条件を表1に、また温度条件を表2に示す。

POM : Polyacetal
PA : Polyamide
PBT : Polybutylene terephthalate
ABS : Acrylonitrile Butadiene Styrene Copolymer
Gf : Glass fiber

Fig.11 Injection pressure and pressure deviation

Table2 Temperature condition (°C)

Material	Nozzle	Barrel 1	Barrel 2	Barrel 3
POM	190	200	195	190
ABS	240	250	240	230
PA66	280	280	275	270
PBT	240	250	240	230

図11のグラフから、結晶性樹脂（PA66）と非晶性樹脂（ABS）という樹脂の特性や、ガラス繊維の有無などで、圧力の変動幅に大きな違いが生じていることがわかる。しかしながら、これらのグラフの圧力変動を吟味すると、各グラフの変動幅は異なるものの、変動を生じる場所は各グラフとも共通であることに気づく。このことは、圧力変動がランダムな場所に発生するのではなく、金型内の経路において特定の場所で発生することを示唆している。すなわち、この圧力変動を監視することにより、成形機は金型の圧力変動が発生しやすい箇所¹⁰⁾¹¹⁾と発生しにくい箇所を自動的に特定することが出来る。

3. 学習制御の導入

さて、圧力波形追従制御の基本構想は、基本となる原圧力波形が存在していることが前提であった。この原圧力波形には射出速度と切替位置を調整する従来の成形条件設定の手法で得られた成形品の波形を使用する。その際、成形品が良品である時の圧力波形を原波形に使用することにより、圧力波形追従制御で成形された成形品も良品であることが期待できる。ここで、前節の実験から、同じ金型において、圧力波形の変動はランダムな箇所には発生するのではなく、樹脂の経路の特定箇所が発生していることがわかっている。

sw : Learning start switch
 V_0 : Velocity in good parts producing
 V : Actual velocity
 P_0 : Pressure in good parts producing
 P : Actual pressure
 $G_f(s) = K_{pv}$
 $K_{pv} = 5K_0 \quad V \geq 3(\text{rpm})$
 $K_{pv} = K_0 \quad V < 3(\text{rpm})$
 $K_0 = 0.6(\text{rpm}/\text{N})$

$U_{n+1} = U_n + K_0 \cdot (P - P_0)$ ただし、 $U_0 = 0$
 $V_{comp} = U_{n+1}$

Fig.12 Block diagram of learning system

このことは、樹脂の挙動が金型内における樹脂の経路の特性によって大きく影響を受けており、かつ、その箇所に適切な補正速度を設定することができれば成形サイクルを重ねて学習させることにより、閉ループ圧力制御の精度を高めることが出来る可能性を示唆している。

また、本研究で使用している閉ループ圧力制御は操作量として射出速度を使用している。従って、閉ループ圧力制御を実行するためには、圧力偏差から速度指令を作成する必要がある。

以上の検討から、サイクルごとに原圧力波形と今回の圧力波形との圧力偏差から射出速度補正関数により新しい速度指令を作成し、速度ループに重畳していく方式の学習制御を考案した。

3.1 学習制御システム

学習制御には色々な方法が提案されている。これらを参考にして図12に示すような圧力偏差から速度補正を作る学習システム U_{n+1} を考案した。 U_{n+1} はオペレータが学習開始スイッチ sw を選択することで起動する。1回目の学習は次のように行われる。

$$U_1 = U_0 + K_0 \cdot (P - P_0) \quad \text{ただし、} U_0 = 0 \text{ とする。} \quad (1)$$

学習を終了するために、目標とする圧力波形と実際の圧力波形の差を評価する方法も考えられる。しかしながら、この方法では成形の安定度は評価できるが、実際の製品の良し悪し（外観不良など）を評価することはできない。このため、学習終了はオペレータが目視で判定し、オペレータが止めるまで n 回続ける方式とした。この間、速度の補正值 $V_{comp} = U_{n+1}$ が学習され

Fig.13 Base pressure and base velocity

Fig.14 Result of velocity control

ることになる。本研究においては、良品成形時の速度が基準としてあるため、この U_{n+1} を既に存在する基準の速度に対する補正量とする方式とした。

3.2 学習制御の実験

本研究の学習制御を評価するため、意図的に外乱を与える成形実験を行った。外乱を発生させる原因としては、成形材料に100%の粉砕材を使用することで樹脂の粘度をばらつかせた。すなわち、再生材料は処女材に比較して余計な熱履歴を持つことと、カッターでランダムに粉砕されるために樹脂の粒径が不ぞろいであることから、射出成形機で溶融混練された場合、樹脂の粘度がばらつくことが知られている。樹脂の粘度のばらつきは射出速度が一定の場合、射出圧力のばらつきの原因となるから、本稿で提案した学習制御による閉ループ圧力制御の評価用の外乱として使用できる。

本実験では、図10に示す成形品の金型を用い、射出速度以外の成形条件は表1の値を使用して成形実験を行った。射出速度に関しては、実験より、樹脂の粘度の影響を強く受けた35mm/sを選び、一速の設定とした。

この条件で、圧力波形追従制御を行わずに連続20ショットの成形を行い、得られた圧力波形の重ね書きした結果を図14に示す。また図13には今回用いた基準となる原圧力波形と射出速度を示す。ステージaでは射出速度が大きく、ステージbで急速に減速し、ステージcにおいては射出速度がほとんどゼロになっているのがわかる。

3.3 学習制御の評価

図14を観察すると、速度制御をしているため、速度波形は基準とほとんど同じであることがわかる。しかし、圧力は射出開始後約1秒の間、基準圧力から大きく低い方にずれていることがわかる。

Fig.15 Trial process

Fig.16 Result of learning control

この理由は、成形材料に再生材を使用したため、熱履歴により樹脂の粘度が低下しており、同じ射出速度に対して圧力が上がらないことによる。また、1秒より後では金型内に樹脂がほぼ充てんされたため、追従性が良くなっている。

この状態で、圧力波形追従制御の学習を開始した。図15は、射出開始から終了までの100msごとの基準波形に対する圧力偏差を求め、この偏差の平均値を各試行ごとに示している。縦軸には圧力、横軸には成形サイクルの回数を表示した。このグラフから学習を重ねて行くにつれて、圧力偏差の平均値が小さくなって行く様子が理解できる。今回の実験では12回目の試行でほぼ基準圧力に一致している。

図16は、基準圧力波形と学習開始から終了までの圧力波形及び基準速度と学習によって作られた速度指令を示す。このグラフが示すように射出開始から1秒間の基準波形と実際の波形との偏差が改善され、図14と比較すると全体的に安定し、再現性が向上していることがわかる。また、速度波形から流動中の圧力を上げるため、補正量に従って射出速度を上下させる学習が行われたことがわかる。

この実験結果により、本研究で開発した学習制御による圧力波形追従制御が、圧力波形の良好な再現性を持つことを実証することができた。さらに、この機能は圧力波形を再現するばかりでなく、成形品の重量ばらつきも抑えることがわかった。

本実験で使用した金型による成形品の重量ばらつきと成形時のピーク圧力のばらつきを図17に示す。グラフの左側は通常の成形による値であり、右側は学習制御を行った圧力波形追従制御による値である。各々の値は連続20ショットの成形を行った平均値を示している。

今回の実験結果では圧力偏差が約1/2、また重量ばらつきも約1/2になっていることがわかる。

Fig.17 Control effect for weight and pressure deviation

Fig.18 Fluctuation of weight of molded part

Fig.19 Comparison of pressure profile (velocity control)

Fig.20 Comparison of pressure profile (pressure control)

4. 圧力波形追従制御の成形安定性に対する効果

さて、圧力波形追従制御の目的は成形安定性であった。そこで、再び図10に示すケースの金型を使用して成形安定性の実験をおこなった。成形条件は表1の値を使用した。また、樹脂はABSの処女材を使用し、金型を60℃に温調して成形を行った。

図18に圧力波形追従制御と従来の射出速度制御による成形の各々200ショット連続成形したときの成形品の重量ばらつきを示す。このグラフから、成形品の重量ばらつきを $3\sigma/\bar{x}$ と比較すると、射出速度制御では0.0384%であったのが、圧力波

形追従制御では 0.0168%であり、圧力波形追従制御によって重量ばらつきが大きく改善されていることがわかる。

また、図 19, 20 に、それぞれ同一条件による 200 ショットの圧力波形と射出スクリュウ位置および、金型内部に取り付けた圧力センサ出力の重ね書きを示す。図 19 は速度制御の成形のため、時間に対する位置のデータは安定しているが、射出圧力がばらつき、さらに金型内部に取り付けたセンサ出力である金型内圧力にもばらつきが見られることがわかる。この理由として外乱の影響が考えられる。ところが、図 20 に示すように圧力波形追従制御により、射出圧力を閉ループ制御した場合は、射出開始後 1.25 秒位から位置データはばらつくが、射出圧力や金型内圧力が安定していることがわかる。これは、圧力波形追従制御により、外乱による成形の不安定要因が補償されたためと考えることができる。

5. 結 言

プラスチック射出成形において、保圧工程の閉ループ圧力制御は一般に行われていたが、射出工程における閉ループ圧力制御は不可能であった。本研究では、学習制御を導入することにより、従来不可能であった射出工程の閉ループ圧力制御を実現した。

また、従来、射出成形品の品質管理は、成形時の圧力ばらつきをモニタすることが一般的に行われている。本研究では、良品成形時の圧力波形を基準圧力波形として、各成形サイクルの圧力波形を繰り返し再現する圧力波形追従制御機能を開発した。

これらの開発により、下記に示す項目の成果が得られた。

- (1) 保圧工程では閉ループ圧力制御が通常行われているが、従来、射出工程の閉ループ圧力制御は実現されていなかった。本研究では、成形工程を 3 つのステージに分割し、各々のステージで適切なゲインをあらかじめ設定することにより射出開始から保圧完了までの全区間での閉ループ圧力制御を実現した。
- (2) さらに、既に得られている圧力波形および速度指令を基準として、学習機能を使用した速度補正機能を開発した。この機能により、金型や樹脂を変えたり、成形の状態が変化しても、その都度のゲイン調整が不要になった。

- (3) この機能を使用し、良品成形時の圧力波形を基準圧力として成形時の波形そのものを追従させる圧力波形追従制御を開発した。
- (4) 圧力波形追従制御を適用することにより、射出速度・切替位置を設定する従来の成形方法と比較して、成形品の重量ばらつきを半分以上に抑えることが出来た。

謝 辞

本論文をまとめるにあたり、東京大学工学部 樋口教授に懇切丁寧な指導を賜りました。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 綾井英二：射出成形機マニュアル，工業調査会 (1990) 8-18
- 2) 吉川恒夫：ロボットにおける力制御の現状と将来，日本ロボット学会誌，9，6(1991) 764.
- 3) M. H. Raibert and J. J. Craig：Hybrid Position/force Control of Manipulator, IEEE Trans, ASME, J, Dyn, Sys, Meas, Control. 102 (1981) 126.
- 4) 志村康治，堀洋一：ロボットマニピュレータにおける力制御のロバスト化と衝突過程の制御，日本ロボット学会誌，11，2 (1993) 235.
- 5) 平岡和夫：射出成形機動作におけるサーボモータを用いた速度・圧力制御，応用機械工学，33，10(1992) 88.
- 6) 樋口俊郎，山口智実：逆伝達関数補償法を組合せた繰返し制御を適用したバイトの位置決め制御，システムと制御，30，8 (1986) 503.
- 7) 中野道雄，井上 恵，山本 裕，原 辰次：繰返し制御，計測自動制御学会 (1989).
- 8) 新 誠一：適応制御とその周辺，計測と制御，32，12(1993) 975.
- 9) 稲葉善治：電動サーボ式射出成形機における圧力制御，精密工学会誌投稿中 (1998)
- 10) 山口章三郎：プラスチック成形加工，実教出版 (1985) 106-137
- 11) 横井秀俊，村田泰彦，澤田 聡，岡 克典：ガラスインサート金型による樹脂流動応答特性の解析，生産研究，45，6(1993) 414.