
平成 21 年度 修士論文

射出成形機のインピーダンス制御に関する研究

指導教員 池浦良淳 教授



三重大学大学院工学研究科機械工学専攻
システム設計研究室
藤田 哲矢

目次

第1章	緒言	1
第2章	実験装置概要	3
	2. 2 計測システム	4
	2. 2. 1 変位の計測方法	4
	2. 2. 2 樹脂から加わる力の計測方法	4
	2. 3 装置仕様	6
第3章	制御理論	9
	3. 1 インピーダンス制御	9
	3. 2 仮想バネの平衡点位置の設定	13
第4章	実験装置のパラメータ推定	16
	4. 1 パラメータ推定方法の選定	16
	4. 2 慣性質量の測定	17
	4. 3 拡張カルマンフィルタのアルゴリズム	17
	4. 4 モデルへの適用	19
	4. 5 入力波形の選定	20
	4. 6 拡張カルマンフィルタによるパラメータ推定	22
第5章	仮想バネ平衡点位置設定	26
	5. 1 実験条件	26
	5. 2 実験データについて	28
	5. 3 実験結果	29
第6章	インピーダンスパラメータの設定	33
	6. 1 実験条件	33
	6. 2 実験データについて	34

6. 3	仮想質量の影響	34
6. 4	仮想バネ定数の影響	38
6. 5	仮想粘性係数の影響	43
6. 6	比較結果	46
第7章	パラメータの汎用性検証実験	47
7. 1	実験条件	47
7. 2	実験データについて	49
7. 3	射出体積の導出方法	49
7. 4	仮想バネ定数の射出体積への影響	49
7. 5	仮想粘性係数の射出成形への影響	51
第8章	結言	52
	参考文献	53
	謝辞	54

第1章

緒言

現在、プラスチック製品は、我々の身の回りの至る所に存在し、今や我々の生活に欠かすことはできないものになってきている。射出成形法とは、プラスチック成形法の中のひとつで、プラスチック成形法の中で最も一般的な方法である。構造としては、シリンダ内で加熱溶解したプラスチック材料をスクリーンで圧入し、冷却、固化させて成形するといったもので、製品を作る様子が注射器の動きと似ていることから、この名が付けられている。射出成形で作られる製品は、日用品、電気製品や自動車の部品など様々であり、世の中のプラスチック製品の大半は射出成形によって作られている。成形工程は、型閉じ、射出、保圧、冷却、型開き、取り出しの流れで行われており、構造としては非常に原始的である。このサイクルのうち、射出・保圧工程では装置の可動部分の動作を制御し、樹脂を金型形状に合わせて適切に流し込み、押し固める必要があり、製品の品質を左右する重要な工程である。現在の射出成形機における射出部の制御法は、射出成形機の樹脂を金型内部に流し込む射出工程では金型内部の形状に合わせて、流し込む樹脂の量を適切に調整する必要があり、装置の可動部分の速度を制御しなければならない。さらに、金型内部の形状が複雑なものであるほど、何段階かに分けて細かく目標速度を設定し、制御する必要がある。射出工程の後、樹脂を金型内部に流し込んだ後には、金型内部で樹脂が冷却され収縮していくので不足分の樹脂を補充する必要があり、圧力を加えることで樹脂を押し固め不足分を補わなければならない。この工程は保圧工程と呼ばれ、保圧工程を行い、樹脂の収縮分を補わなければならない。この工程は保圧工程と呼ばれ、保圧工程を行い、樹脂の収縮分を補わなければならない。以上より、射出成形機において製品を成形するためには2つの異なる制御対象を工程に応じて適切に制御する必要がある。しかし、前述した制御方法では射出工程から保圧工程へ移行する際に速度制御から力制御への制御系の切り替えが存在してしまう。制御系を切り替えるタイミングは適切に設定しなければならない。その理由を以下に述べる。樹脂を金型内に完全に

流し込んだすぐの位置をジャストパック位置と呼び、制御系を切り替えるタイミングをこのジャストパック位置丁度で行うと金型の内部に圧力のオーバーシュート（ショック圧）が発生し、バリや成形ばらつきなどの成形不良の原因となりやすい。そのためジャストパック位置の少し手前で制御系の切り替えを行う必要があるのだが、保圧工程に移行してすぐに速度の急激な低下が生じ、フローマークと呼ばれる成形不良を生じてしまう。このため、制御系の切り替えをスムーズに行うことが成形不良をなくするために重要であることが分かる。⁽¹⁾ 熟練者であれば経験的に成形不良の種類に応じてどのような対策を講じれば良いのかということが分かるが、射出成形に不慣れである初心者にとっては対策を講じにくいという問題点がある。そこで、本研究では制御系の切り替えなしに射出・保圧工程を実現するためにインピーダンス制御法を用いる。インピーダンス制御法は人間の運動特性を模倣した制御法として提案され、速度や力の精度は従来の制御法よりは劣るものの、制御系の切り替えがないといった点が利点として挙げられる。また、その運動特性を質量、粘性、剛性の物理的な特性として把握できるので、パラメータも比較的推定しやすいといえる。制御系の切り替えがなくなることによって射出・保圧行程の設定の単純化を図ることが可能と考えられる。⁽²⁾

伊藤ら（2008）は射出成形機にインピーダンス制御法を適用し、ある金型における最良インピーダンスパラメータを決定し、その値は他の金型にも有効である事を示した。⁽³⁾ しかし、文献(3)における制御理論では問題点が生じたことから、本研究では新たな理論を提案し、それに伴い、再度インピーダンスパラメータの設定実験を行い、汎用性について検証を行った。本研究で新たに提案する理論の詳細は第3章に述べる。

第2章

実験装置概要

2.1 実験装置

本研究で用いる実験装置の全体図と可動部分のモデル図をそれぞれ Fig. 2.1, に示す。ペレットと呼ばれる樹脂原料をホッパーの中に入れる。樹脂原料はヒータにより溶解され、ノズル内部にためられる。モータを駆動することでモータ軸に取り付けられた駆動プーリ（プーリ小）を回転させ、タイミングベルトにより従動プーリ（プーリ大）に回転を伝達する。従動プーリの回転はボールねじに伝達される。ボールネジが回転することでリニアガイドに取り付けられた装置可動部分を前進させる。可動部分にはスクリュが取り付けられており、スクリュによってノズル内部にためられた樹脂をノズル先端から押し出す仕組みとなっている。

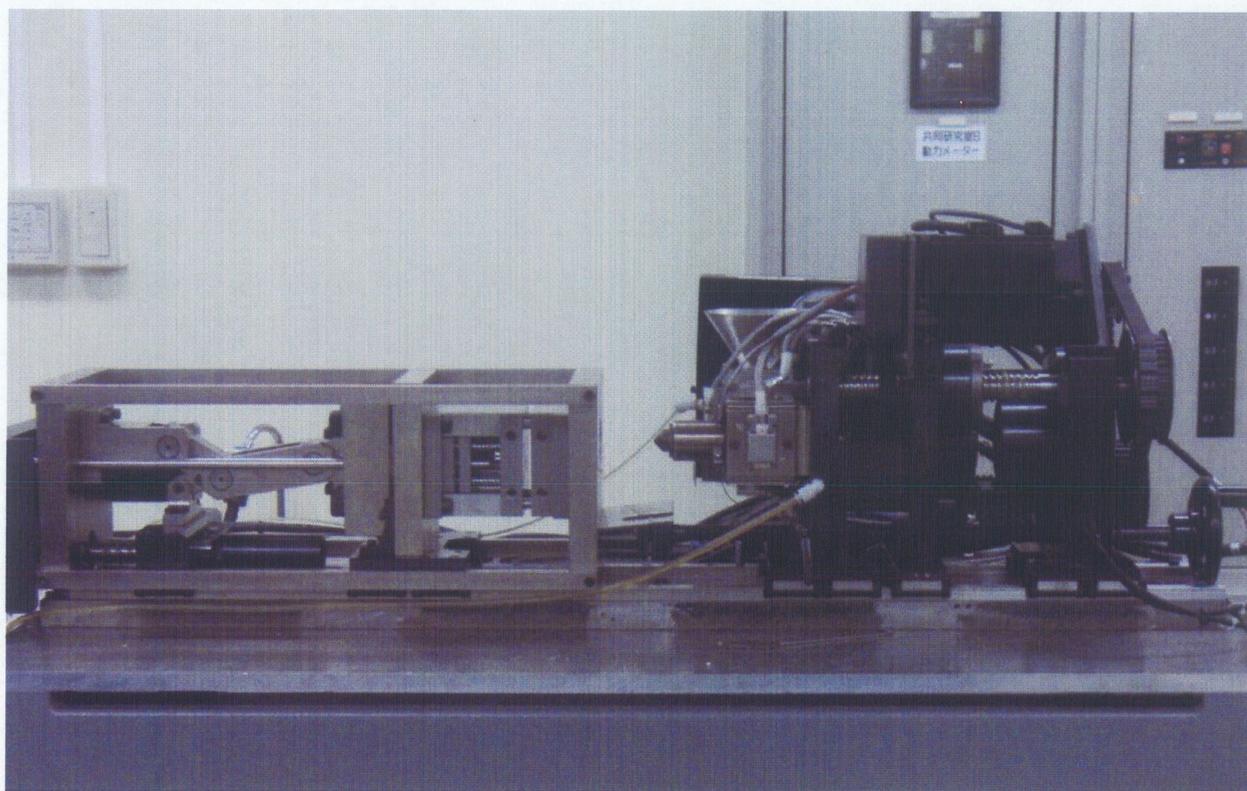


Fig. 2.1 実験装置全体図

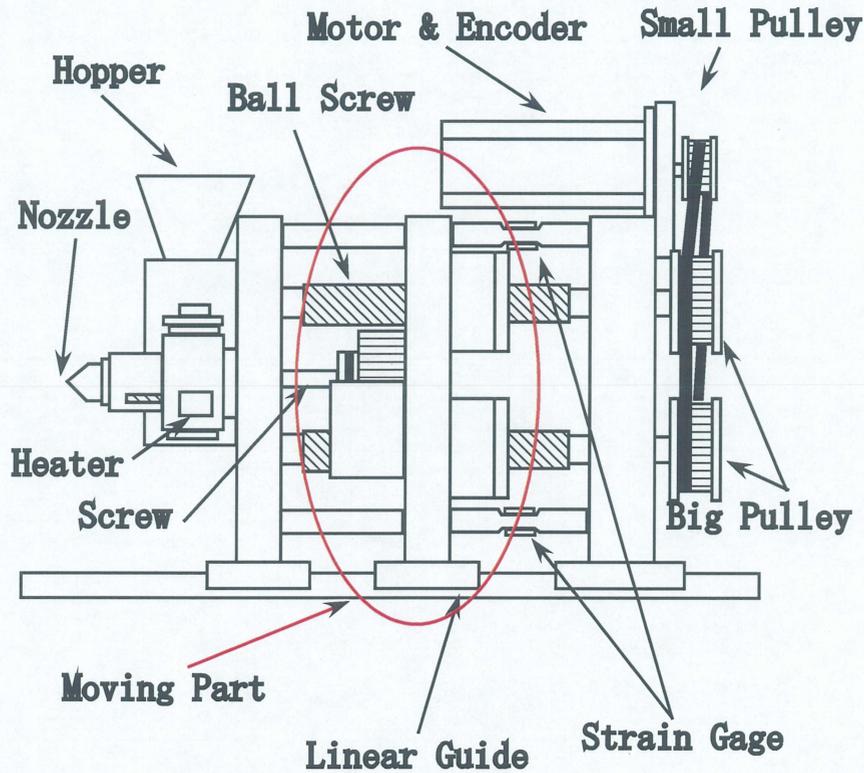


Fig. 2.2 可動部分モデル図

2.2 計測システム

本装置の計測システムについて以下に述べる。本装置において計測するのは、可動部分の変位 x [m] と樹脂から加わる力 f [N] の2つである。

2.2.1 変位の計測方法

可動部分の変位 x についてはモータ後部に取り付けられたエンコーダの回転角度を可動部分の移動量に変換することで計測する。

2.2.2 樹脂から加わる力の計測方法

樹脂から加わる力 f の計測方法について述べる。樹脂から加わる力というのは作用反作用の法則よりスクリュが樹脂を押し力と等しい。

可動部分の前方及び後方の固定ユニットは、はりによって結合されている。はりの一部を応力が集中するように細く加工し、加工部分にひずみゲージを貼り付ける。ひ

ずみゲージの使用方法は対辺2アクティブゲージ法で行い、曲げひずみにより生じるゲージ出力をキャンセルすると同時に軸方向のひずみにより生じる出力を増幅させる。実験装置に取り付けたはりおよび力センサの写真を Fig. 2.3 に示す。可動部分が前進した際、可動部分が前方の固定ユニットを押し、はりがひずむことでひずみゲージから電圧を検出する。その後、ひずみゲージの出力電圧は微小であるので、ひずみアンプによって出力電圧を増幅する。本装置においては、はり及びひずみゲージを2組使用している。その理由として、本来はスクリュ部に生じる力を計測したいのだが、装置の機構上、スクリュ部で力を直接計測することは困難であるため、スクリュ部から等距離に2本のはりを取り付け、それぞれのはりに加わる応力を平均化することでスクリュ部に生じる力を計測する。2本のはりに生じる応力についてはオペアンプを2組用いて製作した加算回路を使用することで平均化を行う。Fig. 2.4 にその回路図を示す。2組のひずみゲージの出力電圧をそれぞれひずみアンプで増幅し、それぞれのひずみアンプからの出力電圧を上記の非反転増幅回路に入力することで平均化し、加算回路の出力電圧を力に変換することでスクリュ部に生じる力の計測を行う。

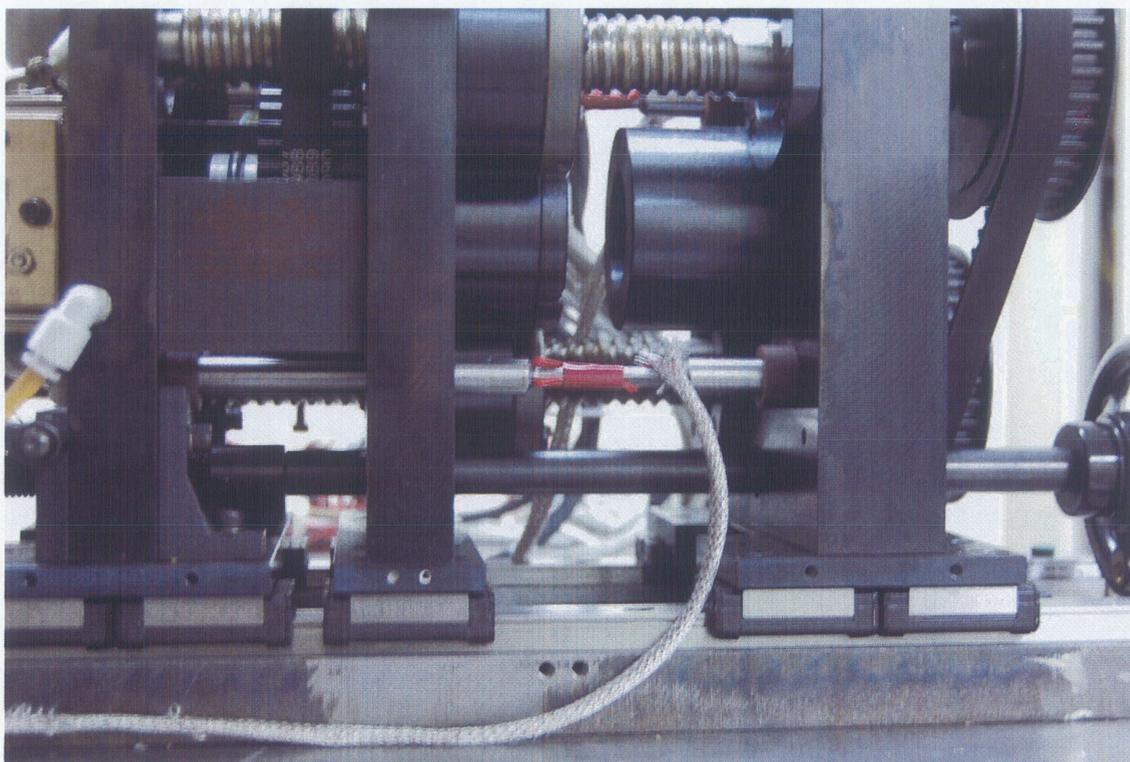


Fig. 2.3 力センサ

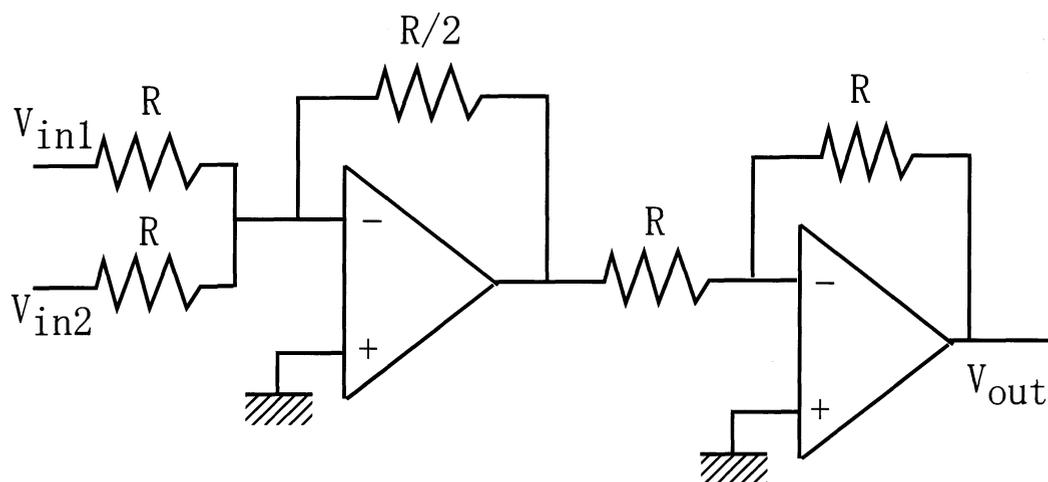


Fig. 2.4 加算回路

2.3 装置仕様

本実験装置の仕様値を Tab. 2.1 に示す.

Tab. 2.1 実験装置仕様値

項目	数値
スクリュ径	14[mm]
射出体積	3.0[cm ³]
可塑化能力	15.0[kg/h]
最大射出圧力	76.0[MPa]
最大射出保圧	60.0[MPa]
射出率	15.0[cm ³ /s]
射出ストローク	20.0[mm]
定格射出速度	100[mm/s]
スクリュ回転速度	300[rpm]
ボールねじリード	6[mm]
ボールねじ慣性モーメント	19.90×10^{-4} [kgm ²]
モータ軸慣性モーメント	2.70×10^{-4} [kgm ²]
トルク / 圧力伝導率	120
設定ばね定数	75
駆動プーリ (プーリ小) 歯数	20
従動プーリ (プーリ大) 歯数	36

また、本装置で用いるモータは三洋電気製ACサーボモータのSANMOTIONである。モータの写真を Fig. 2.5 に示し、Table. 2.2 にその仕様を示す。



Fig. 2.5 AC サーボモータ

Table. 2.2 モータ仕様値

項目	単位	
モータ型番号		<i>Q2AA08100D</i>
質量	kg	5.1
定格出力	kW	1
入力電源電圧 (AC)	V	200
定格回転数	min ⁻¹	3000
最高回転数	min ⁻¹	5000
定格トルク	N・m	3.18
瞬時最大ストールトルク	N・m	12.5

次にモータ後部に内蔵されたエンコーダの仕様を Table. 2.3 に示す。

次に力センサの仕様について述べる。本装置で用いたひずみゲージは共和電業製 KFS シールド型箔ひずみゲージである。ひずみゲージの仕様を Table. 2.4 に示す。

Table. 2.3 エンコーダ仕様値

項目	単位	
質量	kg	0.1
軸慣性モーメント	kgm ²	4.1×10^{-7}
許容回転角速度	rad/s ²	1.0×10^5
分解能	P/R	8192

Table. 2.4 ひずみゲージ仕様値

項目	単位	
型番号		KFS-5-120-J1-11
ゲージ長	mm	5
ゲージ抵抗	Ω	120.2 ± 0.4
ゲージ率	—	$2.09 \pm 2.0\%$

第3章

制御理論

本章では、本研究で用いるインピーダンス制御についての理論を述べる。

3.1 インピーダンス制御

インピーダンス制御とは Fig. 3.1 に示すように可動部分の動きをあたかも、質量、バネ、ダンパ系のように動作させるものである。バネの平衡点（支持部）の位置を変更することで、材料を設定したバネ、ダンパで材料を押し込むことができる。仮に材料の充填中に大きな力が加わってもバネ特性でその力を減少させることができる。また、充填後においても、バネの平衡点をある位置に保つことでバネ特性により保圧動作を実現することができる。つまり、制御系を切り替えることなく、材料の充填と保圧を実行できる。インピーダンス制御には大きく分けて2種類ある。力制御をベースとするものと位置制御をベースとするものである。力制御をベースとするものは安定であるが、装置の動特性を把握しないと正確なインピーダンス特性を出すことができない。また、位置制御をベースとするものは所望のインピーダンス特性を出すことができるが、不安定になりやすい。本研究では、安定性を重視することと比較的正確なインピーダンス特性を出す必要はないと思われるので、力制御ベースのインピーダンス制御を用いる。力制御ベースのインピーダンス制御は、Fig. 3.2 のようなブロック線図で実現することができる。可動部分の位置と材料から加わる力を計測し、インピーダンスコントローラからサーボモータへの指令トルクを出力する。

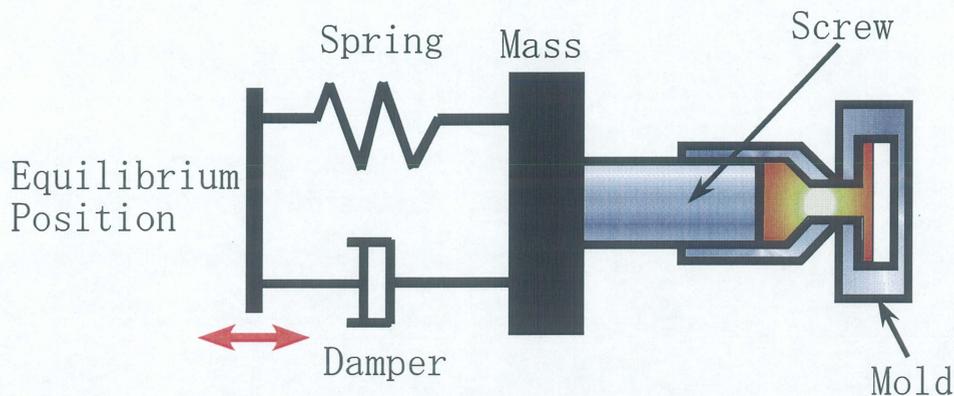


Fig. 3.1 インピーダンス制御モデル

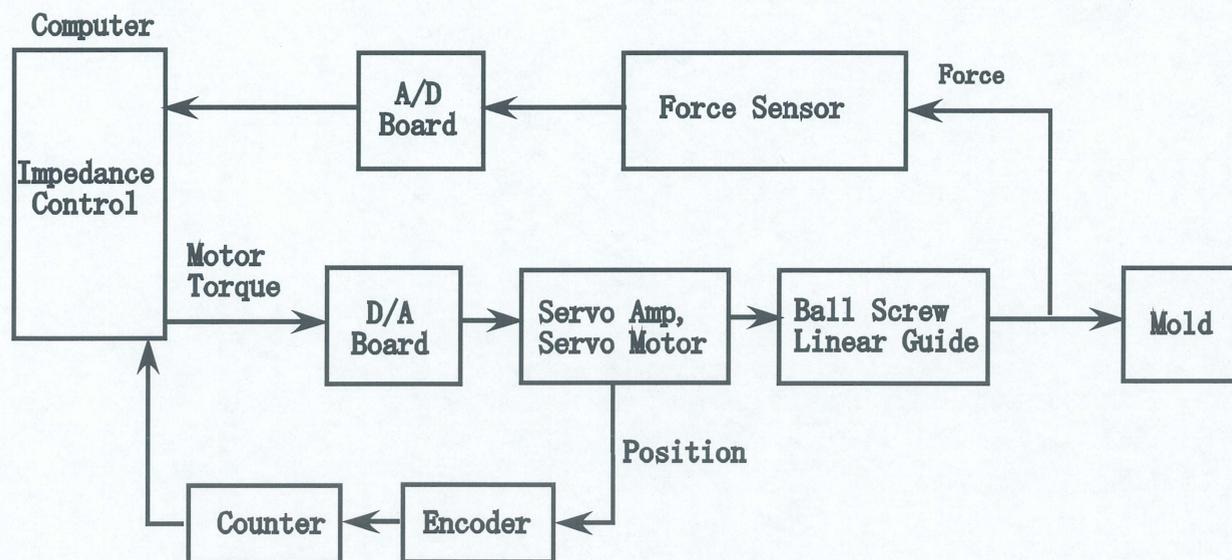


Fig. 3.2 ブロック線図

インピーダンスコントローラでは、指令のモータトルクを次に示すように計算する。初めに装置の運動方程式を以下のように導出する。
 まず、モータ軸の運動方程式については次のようになる。

$$(J_M + J_{G1}) \frac{d\omega_m}{dt} = T_M - r_1 F_p \tag{3.1}$$

ここで J_M はモータ軸の慣性モーメント [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$], J_{G1} はモータ側プーリの慣性モーメント [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$], ω_m はモータ軸の角速度 [rad/s], T_M はモータのトルク [Nm], r_1 はモータ側プーリの半径 [m], F_p はプーリの伝達力 [N] である。

次にボールネジ軸についての運動方程式は以下のようになる。

$$(J_s + J_{G2}) \frac{d\omega_s}{dt} = r_2 F_p - T_a \quad (3.2)$$

ここで J_s はボールネジの慣性モーメント [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$], J_{G2} はボールネジ側プーリの慣性モーメント [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$], ω_s はボールネジ軸の角速度 [rad/s], r_2 はボールネジ側プーリの半径 [m], T_a はボールネジ軸の駆動トルク [Nm] である。

次に装置可動部分の運動方程式は以下のようになる。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} = F_a - f - F \quad (3.3)$$

ここで, m は装置可動部分の質量 [kg], c は装置可動部分の粘性係数 [$\text{N} \cdot \text{s/m}$], x は装置可動部分の変位 [m], F_a はボールネジの軸力 [N], f は樹脂から受ける負荷力 [N], F は装置可動部分の摩擦力 [N] である。

ボールネジ駆動トルク T_a とボールネジ軸力 F_a については以下の関係が成り立つ。

$$T_a = \frac{l}{2\pi\eta} F_a \quad (3.4)$$

ここで l はボールネジのリード [m], η はボールネジ正効率 [-] である。

また,

$$\dot{x} = \frac{l}{2\pi} \omega_s = \frac{l}{2\pi} \frac{z_1}{z_2} \omega_m \quad (3.5)$$

z_1 , z_2 はそれぞれモータ側プーリとボールネジ側プーリの歯数である。ここで, 減速比の関係より

$$\frac{z_1}{z_2} = \frac{R_1}{R_2} = \frac{r_1}{r_2} \quad (3.6)$$

と書き直す。ここで R_1 , R_2 はモータ側プーリとボールネジ側プーリの直径 [m] である。式 (3.1) ~ 式 (3.6) を用いてモータトルクから装置本体への運動方程式を表すと,

$$\left[m + \frac{4\pi^2 \eta}{l^2} \left\{ \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^2 (J_M + J_{G1}) + (J_s + J_{G2}) \right\} \right] \ddot{x} + c\dot{x} = \frac{2\pi\eta}{l} \frac{z_2}{z_1} T_M - f - F \quad (3.7)$$

これを書き換えて

$$M\ddot{x} + c\dot{x} = \lambda T_M - f - F \tag{3.8}$$

ここで M は装置可動部分の慣性質量 [kg], λ はモータトルクからスライダの推進力への変換係数 [-] でありそれぞれ以下のように表せる.

$$M = m + \frac{4\pi^2 \eta}{l} \left\{ \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^2 (J_M + J_{G1}) + (J_s + J_{G2}) \right\} \tag{3.9}$$

$$\lambda = \frac{2\pi\eta z_2}{l z_1} \tag{3.10}$$

次に, 目標となるインピーダンス特性は Fig. 3.3 のような特性である. これより目標となるインピーダンス特性は式 (3.11) のようになる.

$$m_d \ddot{x} + c_d (\dot{x} - \dot{x}_e) + k_d (x - x_e) = -f \tag{3.11}$$

ここで, m_d , c_d , k_d はそれぞれ仮想質量 [kg], 仮想粘性係数 [N・s/m], 仮想バネ定数 [N/m] である. また x_e は仮想バネの平衡点位置 [m] である.

式 (3.8) 及び式 (3.11) より \ddot{x} を消去し, T_M について解くと以下のようになる.

$$T_M = \frac{1}{\lambda} \left[\frac{M}{m_d} \{-f - c_d(\dot{x} - \dot{x}_e) - k_d(x - x_e)\} + f + F + c\dot{x} \right] \tag{3.12}$$

これがインピーダンスコントローラに組み込まれる基礎式となる.

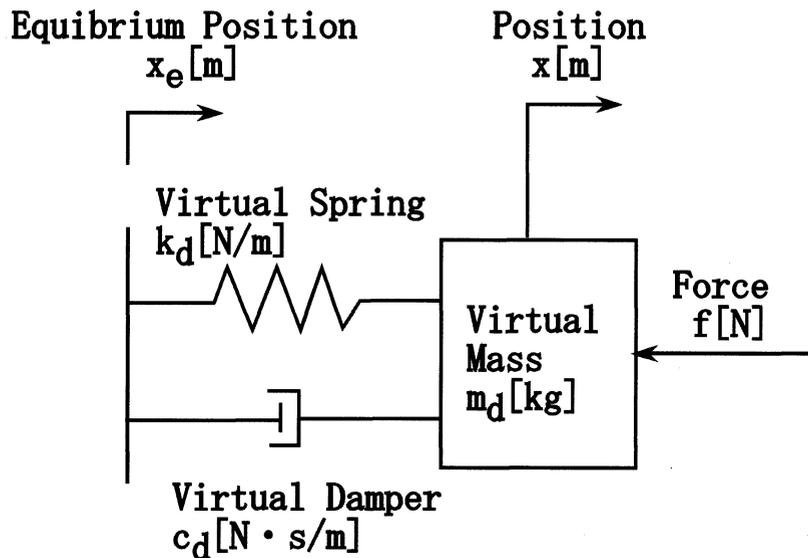


Fig. 3.3 インピーダンスモデル

3.2 仮想バネの平衡点位置の設定

第1章において、射出成形機にインピーダンス制御を適用し、仮想バネの平衡点位置 x_e を変化させ射出・保圧工程を実現すると述べた。ここで、文献(3)では x_e を直線的に変化させる理論を採用していたが、その理論では問題点が存在する。理由については後述するが、まずは文献(3)の理論を以下に示す。

式(3.12)のコントローラを用いて、射出行程はバネの平衡点 x_e を以下のように変化させて行う。

$$x_e = v_d t + x_0 \quad (3.13)$$

ここで、 v_d は目標射出速度 [m/s]、 x_0 は射出開始位置 [m]、 t は時間 [s] である。また、保圧行程は平衡点を以下の値に設定することで行う。

$$x_e = x_p + \frac{f_d}{k_d} \quad (3.14)$$

ここで、 x_p は樹脂注入後の位置 [m]、 f_d は目標出力 [N] である。従って、バネの平衡点は、計量終了位置から式(3.14)に設定した値まで式(3.13)に従って変化させることになる。そのグラフを Fig. 3.4 に示す。横軸および縦軸はそれぞれ時間 [s]、可動部分の変位 [mm] であり、 t_f は射出完了時間 [s] である。

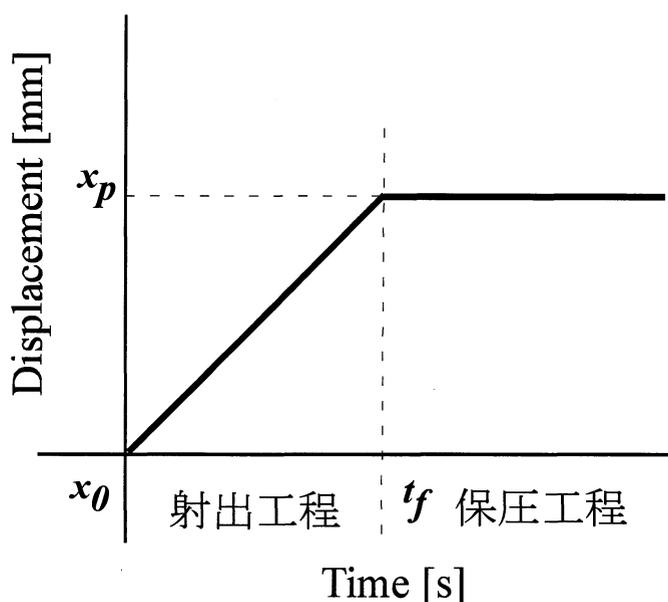


Fig. 3.4 従来理論の仮想バネの平衡点位置軌道

ここで、実験装置には慣性力が働いているため、Fig. 3.4 のような直線軌道の場合、装置可動部の変位 x と x_e との差が工程移行時近傍で大きくなってしまい、出力に影響を及ぼしてしまう恐れがある。また、実験装置の金型の温度は樹脂の温度に比べかなり低くなっているため、可動部分の射出開始直後の速度が遅い場合、材料が充填しきる前にゲート部分の樹脂が固化してしまい、ショートショットなどの成形不良が生じると考えられる。

従って射出開始速度を落とさず、かつ滑らかな軌道を描く理論を新たに提案する。以下に新たに提案する仮想バネの平衡点位置変化の理論を示す。

射出行程はバネの平衡点 x_e を以下のように変化させて行う。

$$x_e = \frac{x_0 - x_f}{2} (t - t_f)^2 + x_f \quad (3.15)$$

また、保圧行程は平衡点位置を以下の値に設定することで行う。

$$x_e = x_f + \frac{f_d}{k_d} \quad (3.16)$$

ここで、 x_0 は射出開始位置 [m]、 t_f は射出完了時間 [s]、 x_f は樹脂注入後の位置 [m]、 f_d は目標出力 [N] である。従って、バネの平衡点は、射出開始位置から式(3.16)に設定した値まで式(3.15)に従って変化させることになる。そのグラフを Fig. 3.5 に示す。横軸および縦軸はそれぞれ時間 [s]、可動部分の変位 [mm] であり、 t_f は射出完了時間 [s] である。提案理論を用いることにより、前述した問題が改善されたかどうか実際に比較する必要がある。比較実験については第5章で述べることとし、次章では射出成形機にインピーダンス制御法を適用するための下準備として、装置可動部の持つ未知パラメータの推定について述べる。式(3.12)において、パラメータ M 、 c 、 F は装置可動部分が持つパラメータである。これらのパラメータのうち、慣性質量 M は装置可動部分の質量を測定することである程度目安が立てられると思われるが、粘性係数 c や摩擦力 F においては測定することが困難であると考えられる。しかし、これらの未知パラメータをある程度正確に把握しておかなければインピーダンス制御で正確に制御できない。そのため、本研究ではまずこれらのパラメータを明らかにすることから始める。

*

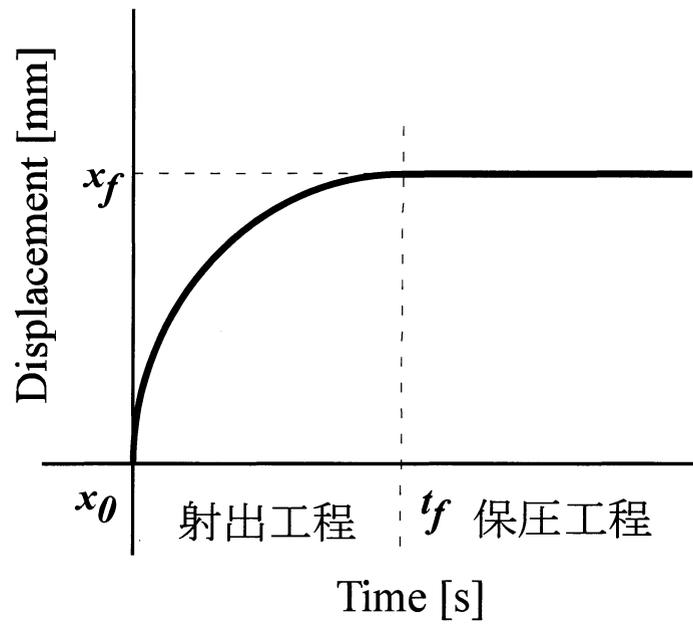


Fig. 3.5 提案理論の仮想バネ平衡点位置の軌道

第4章

実験装置のパラメータ推定

4.1 パラメータ推定方法の選定

2章で述べたようにインピーダンス制御を行う下準備として装置が持つパラメータ（慣性質量 M [kg]，粘性係数 c [N·s/m]，摩擦力 F [N]）を明らかにしておく必要がある。ここでパラメータを推定する方法はおおまかに分けると，データを採取後にパラメータを推定及び近似するオフライン推定法とデータを採取しながらパラメータ推定も同時に行うオンライン推定法の2種類に分けられる。

射出成形機は長時間連続的に使用しプラスチック製品を一日に大量に製作する機械である。本実験装置においては駆動方式にボールネジを採用しており，ボールねじガイド部分にグリスを塗布することで，装置可動部分に生じる摩擦力の低減を狙っている。射出成形を長時間連続で行う場合，ガイド部分のグリス塗布状況が変化し，可動部分の送り性能が低下してしまう可能性がある。本研究で用いるインピーダンス制御法では装置の動特性を考慮して行う制御方法であるため，装置の動特性が変化すると，以前までは良好な結果を得られる制御入力であったとしても，長時間使用するうちに良好な結果が得られなくなる可能性がある。そのため，射出成形機にインピーダンス制御法を用いて長時間使用するのであれば，制御と同時にデータを採取して，パラメータをその度更新していく必要がある。オフライン推定法ではデータ採取後に推定を行うため，次に射出成形を行うまでに時間のロスがある。このような理由から本研究では前述した推定方法のうち，オンライン推定法を用いてパラメータを推定することとする。オンライン推定法の中で，パラメータを逐次更新，推定すると知られるカルマンフィルタのアルゴリズムを今回採用することとする。さらに本装置の非線形性を考慮したうえで，カルマンフィルタの中でも，推定値近傍で非線形関数を線形近

似するとされる拡張カルマンフィルタのアルゴリズムを用いてパラメータ推定を行う。(4)

4.2 慣性質量の測定

実験装置の持つ未知パラメータのうち、装置可動部分の慣性質量 M は式(3.9)より、可動部分の質量 m [kg] と慣性モーメント系の質量 m_M [kg] の和である。まず m はばねばかりによって測定し、その値を以下に示す。

$$m = 13.03 \text{ [kg]} \quad (4.1)$$

m_M はカルマンフィルタにより推定を行うため、詳細は4.6節で述べる。

4.3 拡張カルマンフィルタのアルゴリズム

本研究では、拡張カルマンフィルタを用いて装置のパラメータを推定する。そのアルゴリズムについて述べる。

いま状態ベクトルが X_i 、出力ベクトルが Y_i とする離散時間のシステムの状態方程式、出力方程式が

$$X_{i+1} = \phi_i(X_i) + v_i \quad (4.2)$$

$$Y_i = h_i(X_i) + w_i \quad (4.3)$$

で表されているとする。ここで、 i は離散時間系におけるサンプリングステップ、 v_i 、 w_i はガウシアン白色ノイズベクトルで平均値0、分散は任意とする。

次に、推定したいパラメータがある場合は、それをパラメータベクトル θ_i として、新たに状態ベクトル

$$Z_i = \begin{bmatrix} X_i \\ \theta_i \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

を定義し、(4.2)式、(4.3)式を次のように書き換えた拡大系を考える。

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}_{i+1} &= \Phi_i(\mathbf{Z}_i) + \mathbf{V}_i \\ &= \begin{bmatrix} \phi_i(\mathbf{X}_i) \\ \theta_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{v}_i \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.5)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{Y}_i &= \mathbf{H}_i(\mathbf{Z}_i) + \mathbf{W}_i \\ &= h_i(\mathbf{X}_i) + \mathbf{w}_i \end{aligned} \quad (4.6)$$

拡張カルマンフィルタによる*i*ステップでの*i+1*における \mathbf{Z} の推定値を $\hat{\mathbf{Z}}_{i+1/i}$ とすると、 $\hat{\mathbf{Z}}_{i+1/i}$ は以下のように求められる。

$$\hat{\mathbf{Z}}_{i+1/i} = \Phi_i(\hat{\mathbf{Z}}_{i/i}) \quad (4.7)$$

$$\hat{\mathbf{Z}}_{i/i} = \hat{\mathbf{Z}}_{i/i-1} + \mathbf{K}_i[\mathbf{Y}_i - \mathbf{H}_i(\hat{\mathbf{Z}}_{i/i-1})] \quad (4.8)$$

$$\mathbf{K}_i = \mathbf{P}_{i/i-1} \mathbf{B}_i^T [\mathbf{B}_i \mathbf{P}_{i/i-1} \mathbf{B}_i^T + \mathbf{R}_i]^{-1} \quad (4.9)$$

$$\mathbf{P}_{i/i} = \mathbf{P}_{i/i-1} - \mathbf{K}_i \mathbf{B}_i \mathbf{P}_{i/i-1} \quad (4.10)$$

$$\mathbf{P}_{i+1/i} = \mathbf{A}_i \mathbf{P}_{i/i} \mathbf{A}_i^T + \mathbf{Q}_i \quad (4.11)$$

$$\mathbf{A}_i = \frac{\partial \Phi_i(\hat{\mathbf{Z}}_{i/i})}{\partial \mathbf{Z}_i} \quad (4.12)$$

$$\mathbf{B}_i = \frac{\partial \mathbf{H}_i(\hat{\mathbf{Z}}_{i/i})}{\partial \mathbf{Z}_i} \quad (4.13)$$

ここで、 \mathbf{K}_i はカルマンゲイン、 $\mathbf{P}_{i/i}$ は推定誤差共分散行列、 \mathbf{Q}_i 、 \mathbf{R}_i はそれぞれ \mathbf{V}_i 、 \mathbf{W}_i の共分散行列である。

ここで推定値の初期値 $\hat{\mathbf{Z}}_{0/-1} = \bar{\mathbf{Z}}$ と推定誤差共分散行列の初期値 $\mathbf{P}_{0/-1} = \bar{\mathbf{P}}$ 、 \mathbf{Q}_i 、 \mathbf{R}_i を設定すれば、式(4.7)～式(4.13)により、サンプリングステップごとの推定値が求まる。本論文では $\bar{\mathbf{Z}}$ 、 $\bar{\mathbf{P}}$ 、 \mathbf{Q}_i 、 \mathbf{R}_i をカルマンフィルタの設定値と呼ぶ。

4.4 モデルへの適用

装置の運動方程式は樹脂による影響を考慮して、樹脂をまったく入れない状態で行うため、式(2.9)より $f = 0$, $f_a = \lambda T_M$ とおいて、

$$M\ddot{x} + c\dot{x} = f_a - F \quad (4.14)$$

とする。時間 t での状態ベクトルを $\mathbf{X}_t = [x_t \ \dot{x}_t]^T$ とすると、 $\dot{\mathbf{X}}_t$ は、

$$\dot{\mathbf{X}}_t = \begin{bmatrix} \dot{x}_t \\ \frac{1}{M_t}(f_{at} - F_t - c_t \dot{x}_t) \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

ここで、サンプリング時間を Δt として一次差分近似の手法を用いて離散化すれば

$$\dot{\mathbf{X}}_t \cong \frac{\mathbf{X}_{k+1} - \mathbf{X}_k}{\Delta t} \quad (4.16)$$

と表せる。よってシステムの状態方程式と出力方程式は、出力を装置の変位とすると、

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_{i+1} &= \phi_i(\mathbf{X}_i) + \mathbf{v}_i \\ &= \begin{bmatrix} \dot{x}_i \Delta t + x_i \\ (f_{ai} - F_i - c_i \dot{x}_i) \frac{\Delta t}{M_i} + \dot{x}_i \end{bmatrix} + \mathbf{v}_i \end{aligned} \quad (4.17)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{Y}_i &= h_i(\mathbf{Z}_i) + \mathbf{w}_i \\ &= x_i + \mathbf{w}_i \end{aligned} \quad (4.18)$$

となる。本研究では推定したいパラメータベクトルは $\theta_i = [M_i \ c_i \ F_i]^T$ であるから、 θ_i を含めた拡大系の状態方程式と観測方程式は

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}_{i+1} &= \Phi_i(\mathbf{Z}_i) + \mathbf{V}_i \\ &= \begin{bmatrix} \dot{x}_i \Delta t + x_i \\ (f_{ai} - F_i - c_i \dot{x}_i) \frac{\Delta t}{M_i} + \dot{x}_i \\ M_i \\ c_i \\ F_i \end{bmatrix} + \mathbf{V}_i \end{aligned} \quad (4.19)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{Y}_i &= H_i(\mathbf{Z}_i) + \mathbf{W}_i \\ &= x_i + \mathbf{W}_i \end{aligned} \quad (4.20)$$

となる。このシステムを式(4.7)～式(4.11)の拡張カルマンフィルタのアルゴリズムに適用する。なお、式(4.12)、式(4.13)は

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_i &= \frac{\partial \Phi_i(\hat{\mathbf{Z}}_{i/i})}{\partial \mathbf{Z}_i} \\ &= \begin{bmatrix} 1 & \Delta t & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 - \frac{\hat{c}_i}{\hat{M}_i} \Delta t & \frac{\hat{F}_i + \hat{c}_i \hat{x}_i - f_{ai}}{\hat{M}_i^2} \Delta t & -\frac{\hat{x}_i}{\hat{M}_i} \Delta t & -\frac{1}{\hat{M}_i} \Delta t \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.21)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{B}_i &= \frac{\partial H_i(\hat{\mathbf{Z}}_{i/i})}{\partial \mathbf{Z}_i} \\ &= [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] \end{aligned} \quad (4.22)$$

のようになる。

4.5 入力波形の選定

推定実験の際にどのような入力波形を用いるかの選定を行う。入力波形の条件として3つのことが挙げられる。

まず1つ目の条件として、入力に用いる波形が多く周波数帯域を持つ波形である必要がある。そのため、周期的な波形である単純な \sin 波などは適応できない。

また2つ目の条件として、符号の切り替えが存在する波形である必要がある。本装置における可動部分のストロークは $20[\text{mm}]$ と大変短い。そのため、例えば可動部分が前進するような方向の入力ばかりを与えていると、すぐに可動部分が前方の固定ユニットに接触し、それ以上動作ができなくなる。カルマンフィルタではパラメータの初期値の設定がパラメータの収束値から大幅に外れている場合、パラメータが収束するのに時間がかかる。パラメータの値については事前情報がなく、まったく検討がついていないのが現状であるため、できる限り時間をかせぐ必要がある。このような理由より、可動部分を一定方向だけでなく、前後両方向に動かせるよう符号の切り替えを持つ波形である必要がある。

3つ目の条件としては装置がほとんど静止しないような波形であるということである。本研究の理論で考えている摩擦力は静摩擦力ではなく動摩擦力である。連続的な入力波形であれば、入力の大きさが装置の静摩擦力を超えるまでは、入力を与えても装置が稼動しない不感帯の影響が大きくなってしまう。その不感帯内では、可動部分が静止しているため、カルマンフィルタによる摩擦力の推定値が静摩擦力を推定しようとしてしまう。その後、不感帯を超えたところで、摩擦力の推定値が動摩擦力を推定しようとしてしまい、結果として推定値が不安定になる可能性がある。以上の理由で、入力波形にはその大きさが常に静摩擦力を超えるように不連続な波形を用いる。実験装置が静止している時間を短くして、不感帯内の影響を小さくすることが望ましい。

前述した3つの条件を踏まえ、本実験では Fig. 4.1 のような周期 4、パルス幅 50%、大きさ $\pm 600[\text{N}]$ の矩形波を用いることとする。条件 1 を考えると、周期的な矩形波よりもパルス幅がランダムな矩形波の方が周波数帯域も多く持つため良いように思われる。しかしパルス幅がランダムなことにより、例えば、かなり前方まで可動部分が移動してから入力の符号が切り替わった場合、後退しようとする方向のパルス幅が短くなってしまふことで、可動部分があまり後退できず、再び前方に動き出し、固定ユニットに接触するという可能性がある。そのため、周期的な矩形波を用いることで、

前方及び後方の移動距離を等しく保ち、可動部分が固定ユニットに接触することがないようにする。

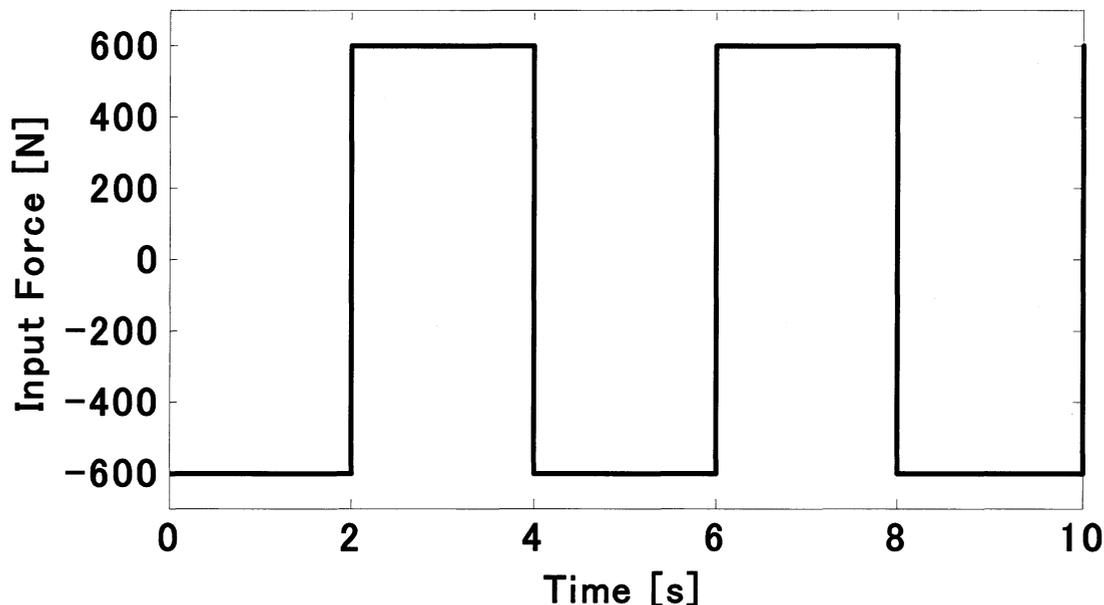


Fig. 4.1 入力する矩形波 [N]

4.6 拡張カルマンフィルタによるパラメータ推定

実験装置にカルマンフィルタを用いてパラメータ推定を行う。推定するパラメータは m_M , c , F の3種類であるが、 m_M は装置可動部分を取り外した状態で推定を行わなければならない。実験装置の機構上、可動部分を取り外すことは困難であることから、 m_M は(3)で採取したデータを採用することとし、その値を以下に示す。

$$m_M = 3.98 \text{ [kg]} \quad (4.23)$$

式(4.1), (4.23)より慣性質量 M は以下のようにになる。

$$M = m + m_M = 13.03 + 3.98 = 17.01 \text{ [kg]} \quad (4.24)$$

次に c , F の推定を行う。実験条件としては、パラメータが十分に収束する時間を考慮して、測定時間は約100秒間とする。入力には前述したFig. 4.1のような周期4、パルス幅50%、大きさ ± 600 [N]の矩形波を用いることとする。また、樹脂による影響を考慮して、装置には樹脂が全く入っていない状態にする必要がある。すなわち $f = 0$ とす

る。しかし、樹脂をすべて取り除くことは困難であることから、射出スクリュを取り外し、可動部分が樹脂に触れないようにして実験を行う。Table. 4.1に実験の際に用いたカルマンフィルタの設定値を示す。

Table. 4.1 カルマンフィルタの設定値

\bar{P}	M_0 [kg]	c_0 [N · s/m]	F_0 [N]	Q_i	R_i
$diag([0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0])$	15	1000	100	$diag([10^{-3} \ 10^{-2} \ 5 \ 1000 \ 50])$	10

実験により得られたグラフおよび波形のピーク部分の拡大図をそれぞれFig. 4.2, Fig. 4.3に示す。実験の測定時間は100秒間であるが、そのうち最後の8秒間のデータのみFig. 4.2に示す。横軸に時間[s]、縦軸に可動部分の変位[mm]を示す。青線が実際の可動部分の変位であり、赤線がカルマンフィルタの推定値である。またその時得られたパラメータ(c , F)の推定値をTable. 4.2に示す。Fig. 4.2ではほとんど違いが見られないが、Fig. 4.3をみると、波形のピーク部分では若干の誤差が生じていることが分かる。このピーク部分は入力波形に用いた矩形波が不連続になる部分である。入力波形は理論上は不連続であるのだが、実際の装置では必ずしも不連続にはなりえない。そのため、波形が不連続になる部分では、実際の可動部分の変位からカルマンフィルタの推定値が外れるといった結果となった。しかし、波形がピークになる以外の部分では、実際の挙動に推定値が良く適合していることから、推定はうまくできているのではないかと考えられる。

次章からは、今回得られたパラメータの値を用いてインピーダンス制御を行う。本研究では、インピーダンス制御を行うのと同時にカルマンフィルタを使用し、射出成形中にパラメータを逐次更新、推定するという点までには至らなかったが、本装置はカルマンフィルタでのパラメータ近似が可能であることが分かった。そのため、今後、インピーダンス制御理論とカルマンフィルタのアルゴリズムを組み合わせることは十分に実現可能ではないかと考える。

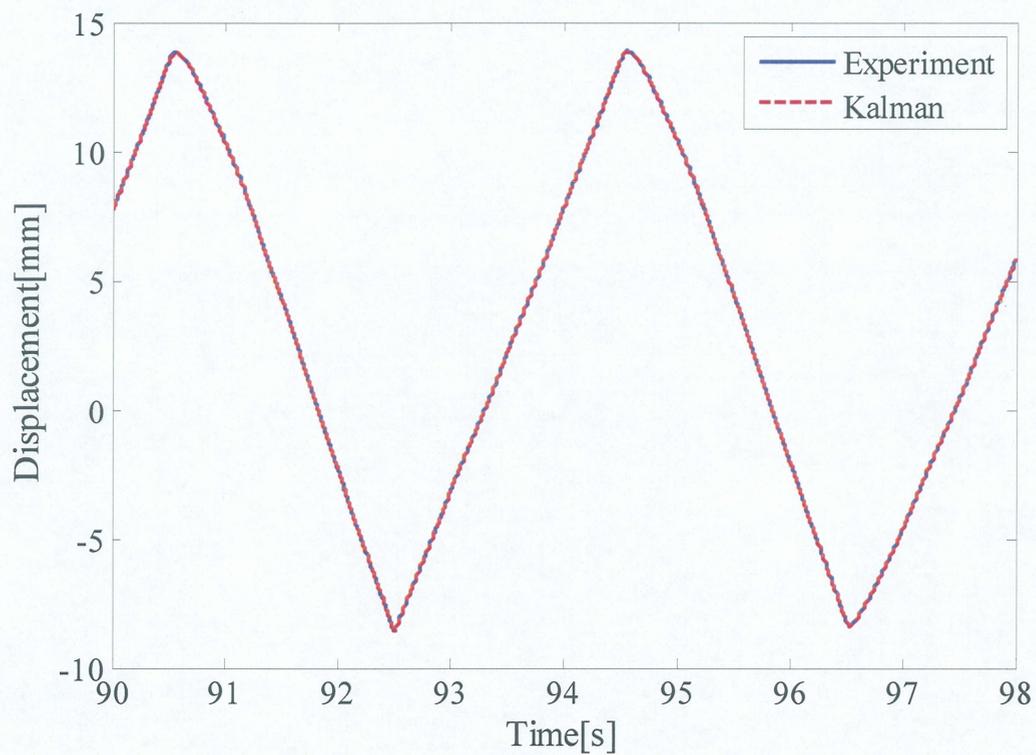


Fig. 4.2 カルマンフィルタによる推定結果

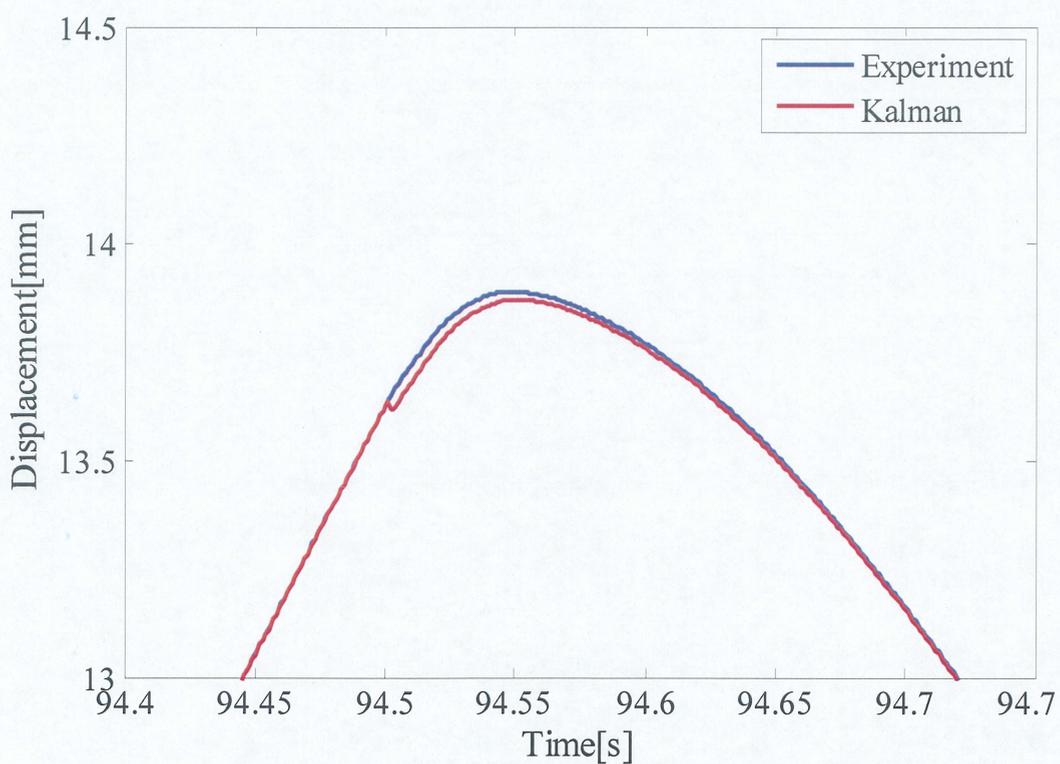


Fig. 4.3 波形ピーク部分の拡大図

Table. 4.2 パラメータの推定値

c [N · s/m]	F [N]
2202.9	553.0

第5章

仮想バネ平衡点位置設定

前章で実験装置の持つ未知パラメータ推定を行ったことにより、操作者が任意に決定するパラメータを設定すればインピーダンス制御法で射出成形を行うことが可能となった。具体的には仮想質量 m_d [kg]、仮想粘性係数 c_d [N·s/m]、仮想バネ定数 k_d [N/m]、射出時間 t 、目標保圧力[N]、仮想粘性係数 P_d [N]の5種類である。これらの値については(3)より、目安となる値が明らかになっているため、その値を参考に著者が適宜設定する。本章では、第3章で述べた仮想バネの平衡点位置変化の理論についての比較実験について述べる。実験は従来理論・提案理論それぞれの場合について射出成形を行い、データを採取し比較する。そこから仮想バネの平衡点位置の変化理論が射出成形に与える影響について考察する。

5.1 実験条件

仮想バネの平衡点位置における従来理論と提案理論の比較実験を行うにあたって使用する金型の写真を Fig. 5.1 に示す。本実験において用いるのは、ケーブルクランプという製品を作るための金型である。ケーブルクランプとは、文字通りケーブルを把持する製品である。ここで、射出成形では金型温度によって樹脂の入りやすさが変わってしまう。そのため、金型を一定温度に保つためにヒータを取り付ける。簡易温度調節機(ミスミ製)によりヒータに電流を流すことでヒータを発熱させ、ヒータの発熱により金型温度を上昇させる仕組みとなっている。次に本実験における入力条件を述べる。本実験では目標保圧力 P_d は80[MPa]に設定する。文献(3)においては同金型は目標保圧力 P_d は40～50[MPa]に設定していたが、十分に安定した射出成形をするには設定値が低いと考えられるため前述の設定値とした。また、インピーダンス制御における射出行程から保圧行程への切り替えに要する時間 t は文献(3)では仮想バネ定数 k_d 、目

標速度 v_d ，目標保圧力 P_d の3つの項の関係により決定していたが，第3章で述べた提案理論は目標速度 v_d の項を式に組み込んでいないため，射出時間 t を操作者が設定するパラメータとして新たに追加した．サンプリング周波数は1[kHz]に設定し，データは射出工程開始から5秒間計測する．またパラメータの設定値を Table. 5.1 に示す．



Fig. 5.1 ケーブルクランプ金型

Table. 5.1 設定するパラメータ

項目	数値 [単位]
M	17.01[kg]
c	2202.9[N · s/m]
F	553.0[N]
P_d	80[MPa]
t	1[s]
m_d	17.01[kg]

Table. 5.1 設定するパラメータ

項目	数値 [単位]
c_d	2000[Ns/m]
k_d	50000[N/m]

5.2 実験データについて

パラメータを Table. 5.1 のように設定し仮想バネの平衡点位置における従来理論と提案理論それぞれの場合について射出成形を行う。実験データの一例を Fig. 5.2 に示す。グラフは横軸に時間 [s]，縦軸に上から順に，装置可動部分の変位 [mm]，可動部分の速度 [mm/s]，樹脂から加わる圧力 [MPa]，モータの出力 [N]，仮想バネの平衡点位置変化の軌道 [mm] を示す。まず，変位についてはモータに取り付けられたエンコーダにより計測するということは第2章で述べた。変位は射出開始時から負の方向へと変化していくことで樹脂を押し出しているということを表す。そして，変位データが一定になった時点で，樹脂を押し固める段階(保圧工程)に移行したということになる。

速度については変位のデータをサンプリング毎に差分することにより計測する。射出中，変位データが負の方向に変化していくため，本来速度は負の符号であるが，データを見やすくし，比較しやすくするために符号を反転させて表示する。圧力については力センサ(ひずみゲージ)により測定するというのも第2章で述べた。射出成形では樹脂を押し出す力(射出力)の単位を [N] ではなく [Pa] で表すことが一般的であるため，本研究でも [Pa] で表している。

モータ出力についてはセンサ等で計測するのではなく，パソコン上でインピーダンス制御を行うために必要とするモータ出力を計算し，保管することで計測している。

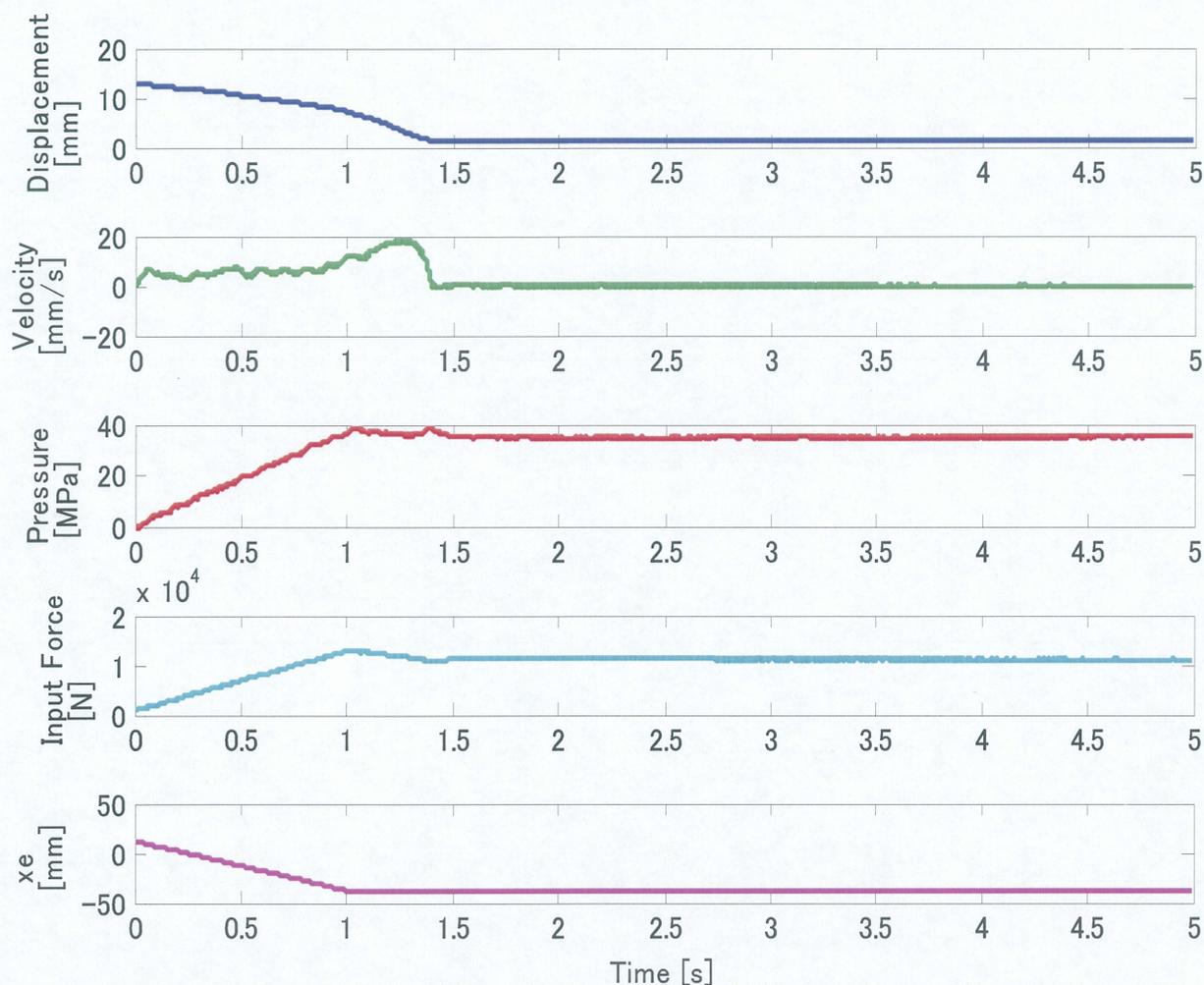


Fig. 5.2 実験データ例

5.3 実験結果

従来理論・提案理論それぞれについて射出成形を行い、その時のモータの出力、可動部分の変位、速度、樹脂から加わる圧力について比較したグラフを Fig. 5.3~Fig. 5.7 に示す。ここで、従来理論と提案理論それぞれにおける仮想バネの平衡点位置変化の軌道を近づけるため、従来理論での射出時間を 0.7[s] とした。まず、Fig. 5.3 をみると、従来理論における問題点であった、射出工程から保圧工程へ移行する際に生じるショック圧が、提案理論では軽減されていることが分かる。これは工程移行前後での仮想バネの平衡点位置変化の軌道と装置可動部分の実際の変位の差が少なくなったためと考えられる。また Fig. 5.6 をみるとモータ出力が最大となる時間において樹脂から加わる

圧力も抑えられていることが分かる。次に Fig. 5.4 では、提案理論では従来理論に比べ変位が大きくなっていることが分かる。これは提案理論の方が樹脂をよく押し出せているといえる。しかし Fig. 5.5 をみると可動部分の最大速度はそれほど差がない。従来理論では射出時間を 0.7[s] としたことにより、可動部分の最大速度および加速度が大きくなるはずであるが、提案理論とそれほど差がない。これは提案理論では射出開始直後における可動部分の速度勾配が上昇したためにこのような結果となったと考えられる。また従来理論ではモータ出力のショック圧の影響により射出成形に悪影響を及ぼしているのではないかと考えられる。

以上の事から本研究で新たに提案した理論は、従来理論と比べ、モータ出力のショック圧の軽減とそれによる樹脂圧の抑制、また射出開始直後の速度上昇を図ることが可能となった。しかし制御理論を再構築したことにより、(3) で決定した最良インピーダンスパラメータの値を再設定する必要があるか検証しなければならない。次章では、インピーダンスパラメータの条件を変更して射出成形を行い、インピーダンスパラメータの設定作業および各パラメータが射出成形に及ぼす影響を検証する。

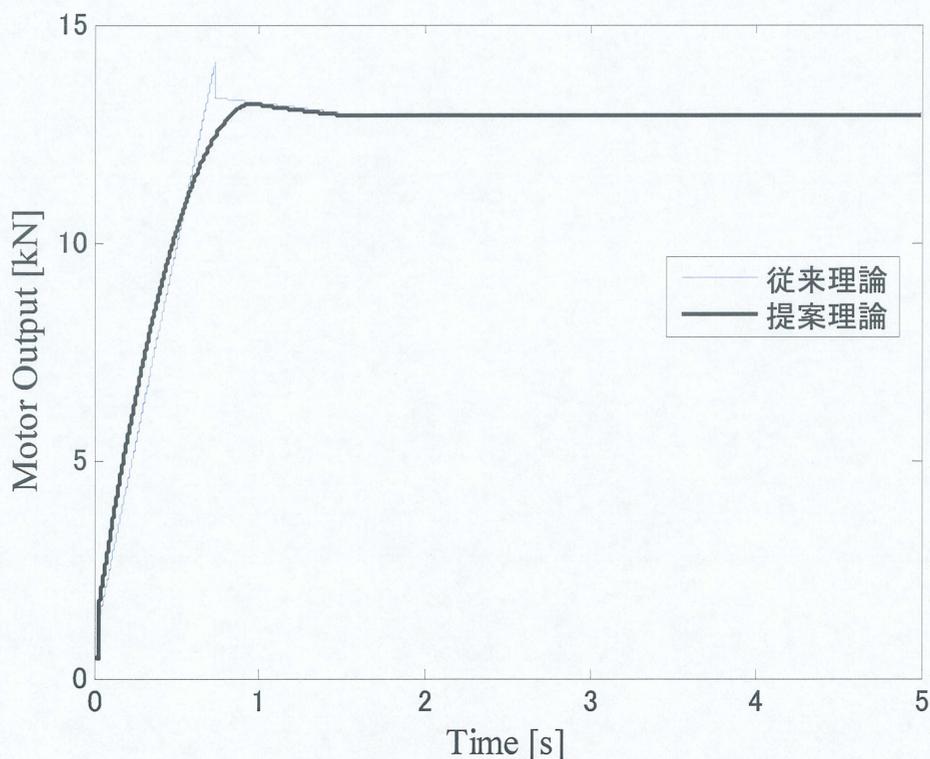


Fig. 5.3 モータ出力

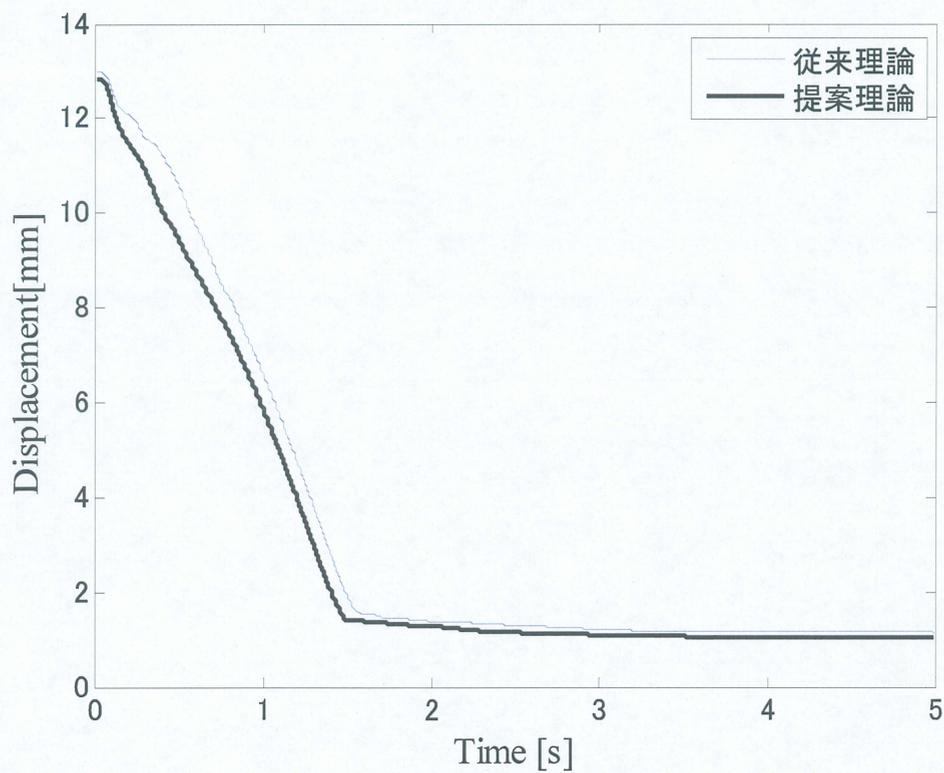


Fig. 5.4 可動部分の変位

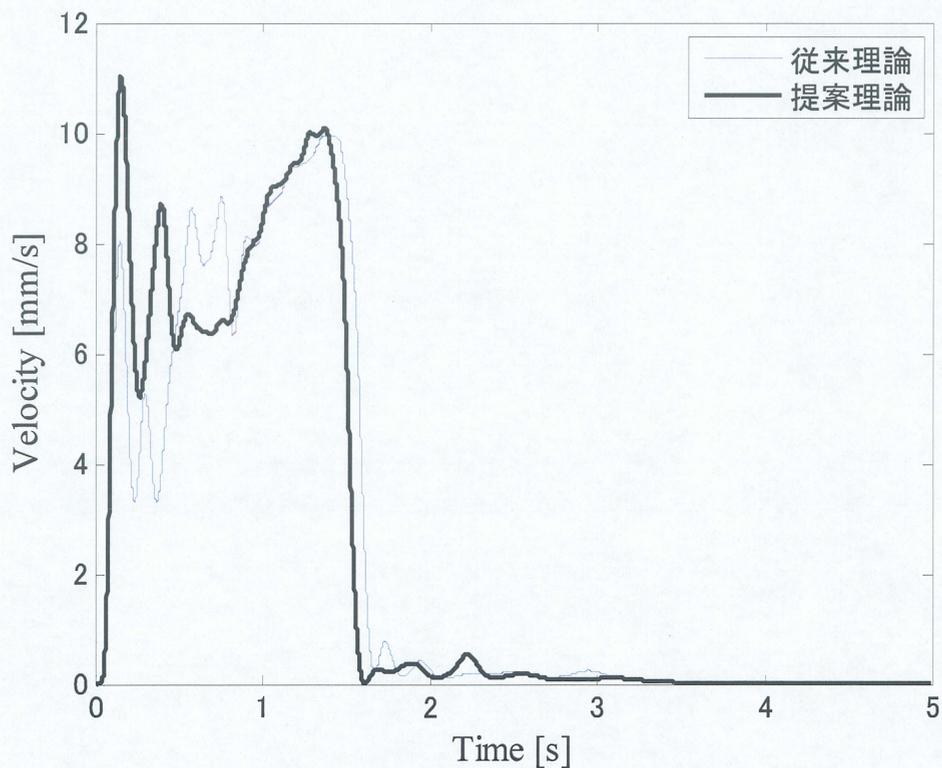


Fig. 5.5 可動部分の速度

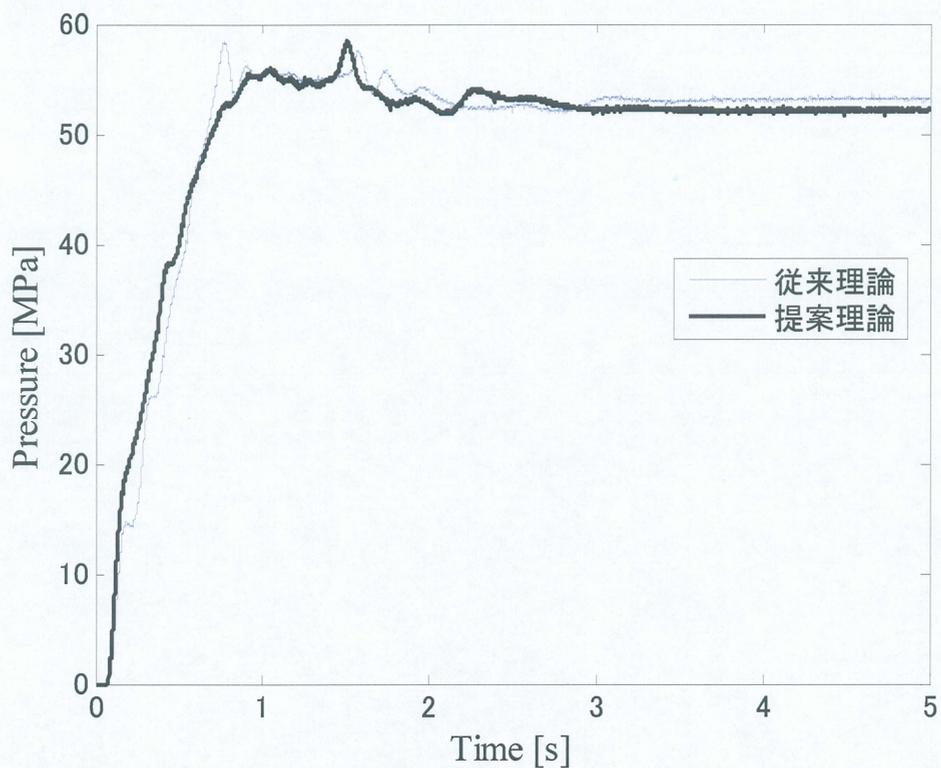


Fig. 5.6 樹脂から加わる圧力

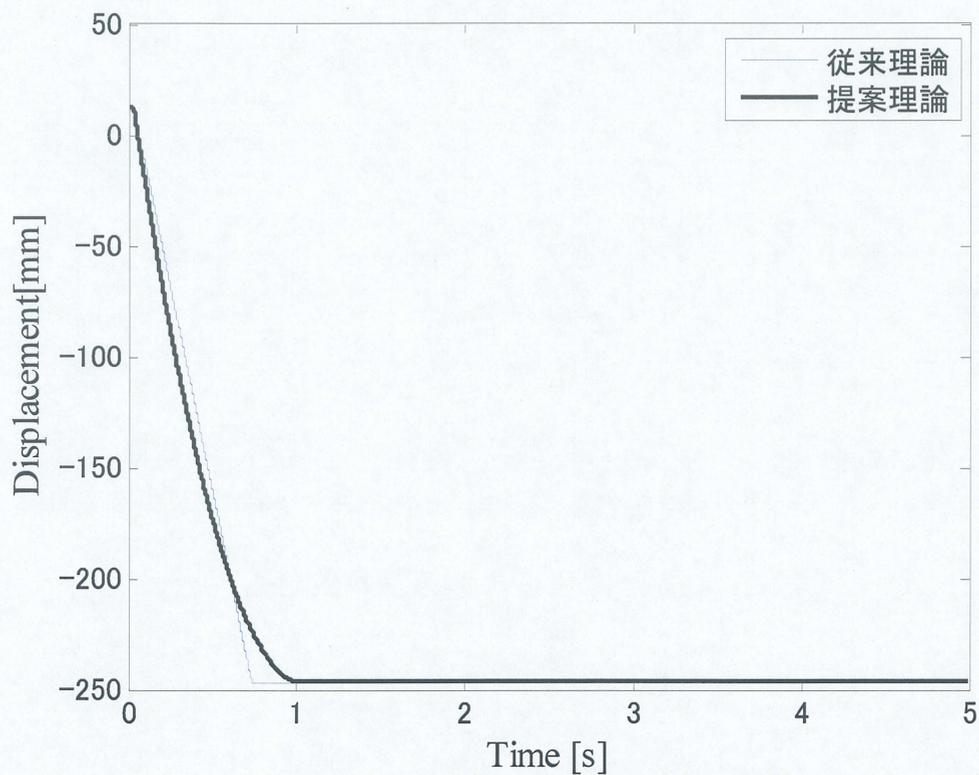


Fig. 5.7 平衡点位置の軌道

第6章

インピーダンスパラメータの設定

本章では、前章で述べた提案理論を採用することにより (3) で求めた最適インピーダンスパラメータを再設定する必要があるか検証実験を行う。具体的にはインピーダンスパラメータ仮想質量 m_d 、仮想粘性係数 c_d 、仮想バネ定数 k_d それぞれの条件を変更し射出成形を行い、射出成形にどのような影響を及ぼすのかについて実験、考察する。最終的に最適なインピーダンスパラメータを決定することを目標とする。

6.1 実験条件

インピーダンスパラメータの変更実験を行うに当たって使用する金型は、前章と同じケーブルクランプ金型である。本実験における入力条件をTable. 6.1に示す。またサンプリング周波数は1kHzに設定し、データは射出行程開始から5秒間だけ計測するものとする。パラメータ m_d 、 c_d 、 k_d についてはTable. 6.2のように設定する。また、サンプリング周波数は1[kHz]に設定し、データは射出行程開始から5秒間だけ計測する。

Table. 6.1 入力条件

項目	数値 [単位]
M	17.01[kg]
c	2202.9[Ns/m]
F	553.0[N]
P_d	80[MPa]
t	1[s]

Table. 6.2 設定するインピーダンスパラメータ

インピーダンスパラメータ	設定値 [単位]
仮想質量 m_d	10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17.01 [kg]
仮想粘性係数 c_d	100, 500, 1000, 2000, 4000, 5000 [N・s/m]
仮想バネ定数 k_d	10000, 12500, 20000 ~ 100000, 150000 200000, 250000, 300000 [N/m]

6.2 実験データについて

採取するデータは前章と同様にモータの出力[N], 装置可動部分の変位[mm], 可動部分の速度 [mm/s], 樹脂から加わる圧力 [MPa], 仮想バネの平衡点位置変化の軌道 [mm]の5種類である. ここで, 仮想バネの平衡点位置変化の軌道はパラメータによって変化しない場合があるのでその条件下では省略する. グラフは横軸に時間 [s], 縦軸に前述した各データとする. 前述した5種類のデータをインピーダンスパラメータ m_d , c_d , k_d をそれぞれ変更した条件で比較する. 本章における実験の目的は最適インピーダンスパラメータを決定することである. しかし, 同時に3つのパラメータを一意に決めることは難しい. そこで, まず1つのパラメータに絞り, それについて比較及び考察することで1つ目のパラメータを決定する. その後, 2つ目, 3つ目についても同様の手順で行い, 最終的に3つのパラメータの設定を行うという流れで本章の解析を進めることとする.

まず初めに仮想質量 m_d について比較したときの結果を次節に示す.

6.3 仮想質量の影響

仮想質量 m_d についての比較を行う. このとき, 仮想粘性係数 c_d , 仮想バネ定数 k_d についてはTable. 6.2の領域内で選んで固定し, 仮想質量 m_d のみ変更して比較してある. このとき, 可動部分の変位, 速度, 樹脂から加わる圧力, モータの出力について比較したグラフをFig. 6.1~Fig. 6.4に示す. Table. 6.2に示したすべての条件を図示すると比較しづらいため, $m_d=10, 13, 17.01$ [kg]の3種類について比較したものを図示する.

このグラフにおける仮想粘性係数 c_d は2000[N・s/m]、仮想バネ定数 k_d は50000[N/m]である。またグラフの凡例の欄にはそれぞれの仮想質量の条件を示してある。

Fig. 6.1~Fig. 6.4 から、仮想質量 m_d の値を小さくすると、モータ出力は大きくなり、可動部分の変位量の増加、可動部分速度は上昇し、樹脂から加わる圧力は増加することがわかる。これは仮想質量はインピーダンス制御において物体に働く慣性力に関係している点、また式(3.12)において M/m_d という項に含まれるということが主な原因であると考えられる。射出成形では、樹脂が金型内に入り始めると同時に樹脂の冷却が開始し、樹脂が固まり始め、時間が経つに連れて入りにくくなっていく。そのため、できる限り速い速度で樹脂を金型内に押し出すことが理想とされている。以上を踏まえると仮想質量の値は小さい方がよいと考えられる。しかし、仮想質量の設定値を小さくすればするほど、モータ出力と目標保圧力との差が大きくなってしまふ。それに加え、Fig. 6.1 では $m_d=10$ [kg]の時に出力波形が乱れてしまっている。また(3)において $m_d=10$ [kg]を最適値としたが、その時の目標保圧力 P_d は50[MPa]と設定したにもかかわらず、実際の保圧力は約70[MPa]であり、差が20[MPa]と大きすぎる。これは目標保圧力が射出に必要な圧力を下回っている状況で、仮想質量の設定値を小さくすることで強引に射出したのではないかと考えられる。以上の考察より、仮想質量 m_d の値は目標保圧力に近づく値をとるよう設定するのが望ましいと考える。 $m_d=17.01$ [kg]の時ににおけるモータ出力の収束値は約12000[N]≒80[MPa]であり、目標保圧力に近い値をとっている。この値は装置可動部の慣性質量と同じであり、式(3.12)において $M/m_d=1$ となる値である。 M/m_d の値を変化させると、仮想粘性係数 c_d や仮想バネ定数 k_d の項にも影響を与えるため極端に変化させることは避けるべきである。従って本研究における仮想質量の最適値は $m_d = 17.01$ [kg]とする。

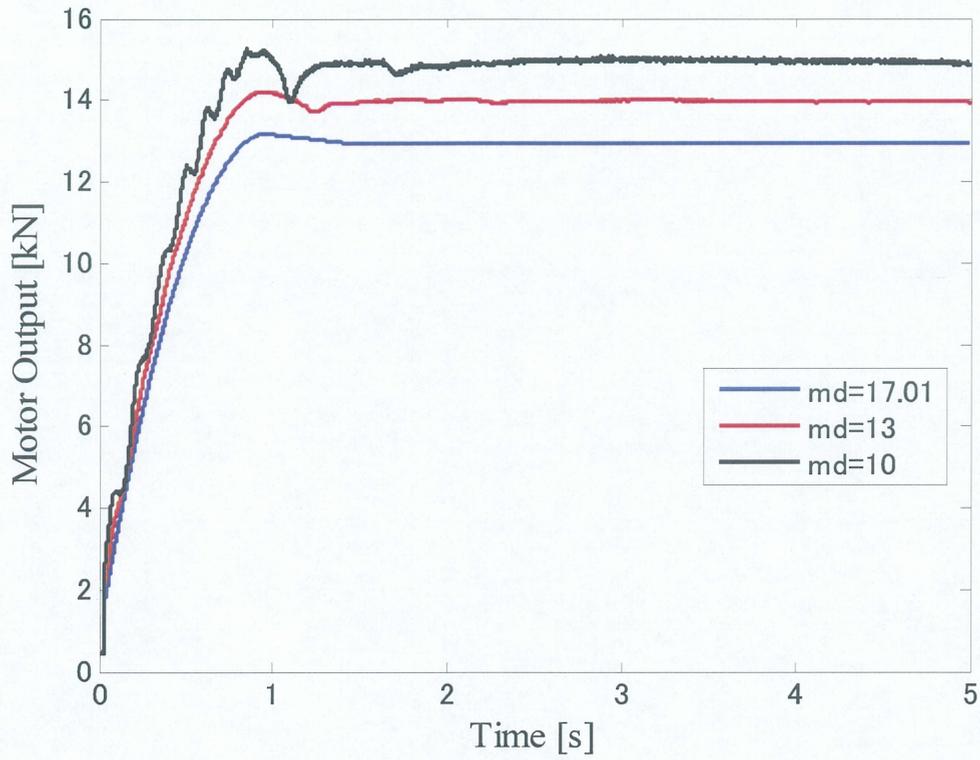


Fig. 6.1 モータ出力

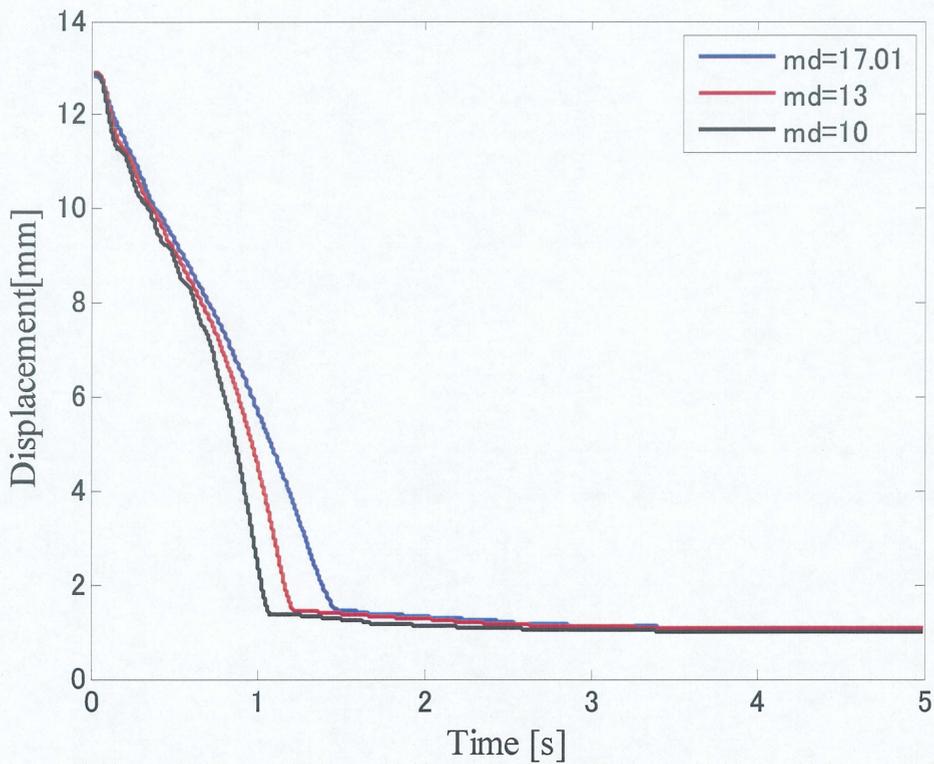


Fig. 6.2 可動部分の変位

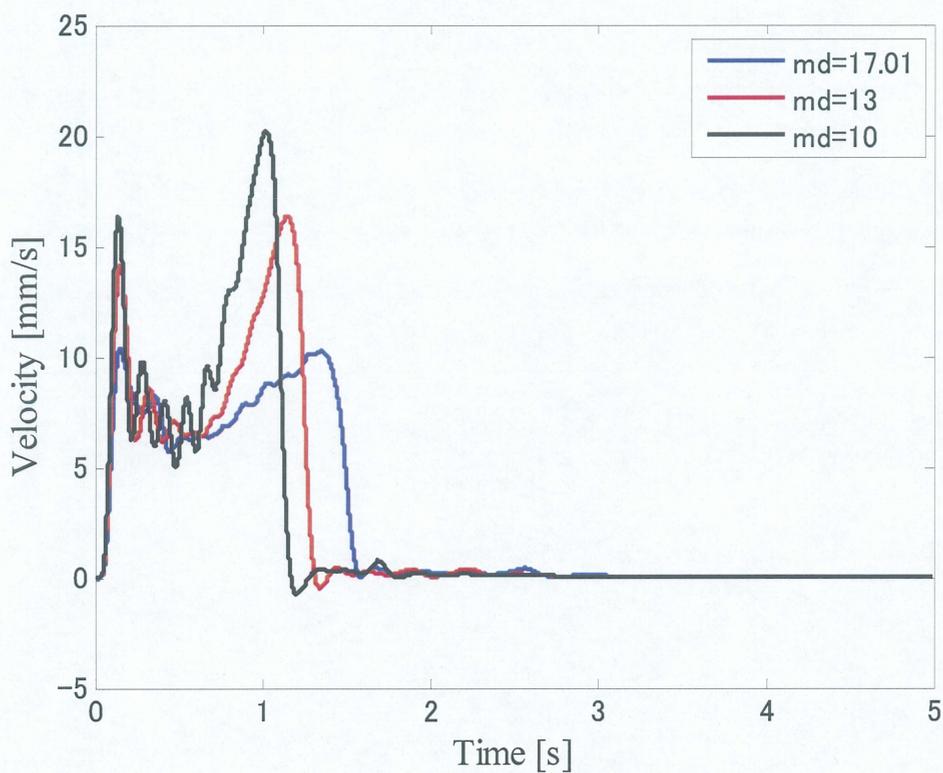


Fig. 6.3 可動部分の速度

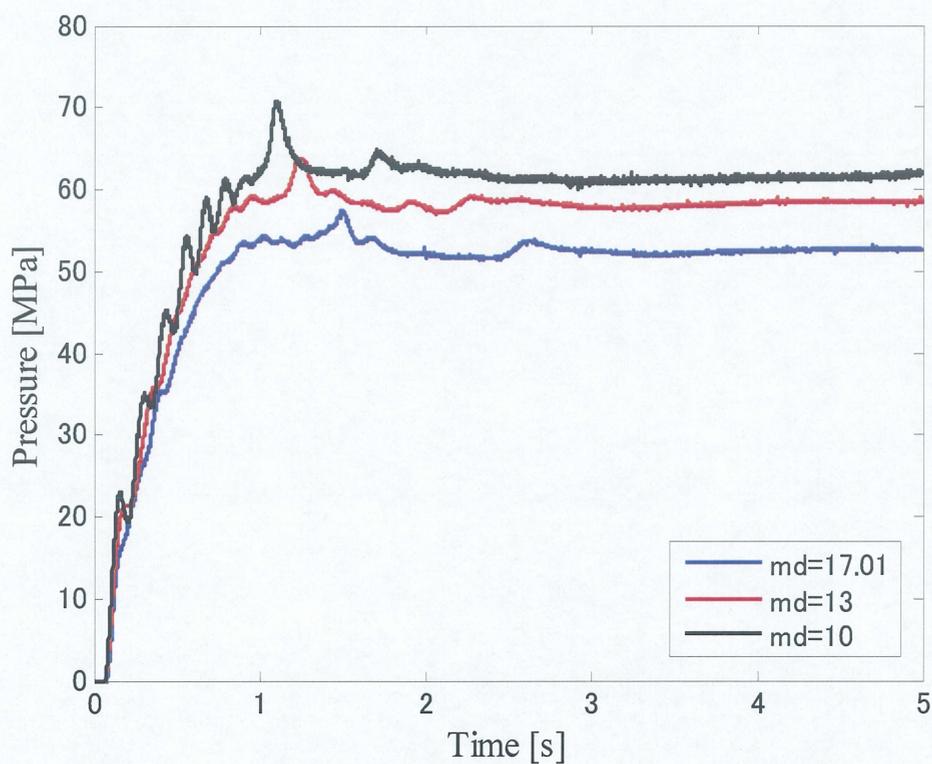


Fig. 6.4 樹脂から加わる圧力

6.4 仮想バネ定数の影響

次に仮想バネ定数 k_d の影響についての実験を行う。仮想質量 m_d は前述したように $m_d = 17.01$ [kg] とする。前節と同様に、仮想バネ定数 k_d のみを様々に変更し、仮想粘性係数 c_d は Table. 6.2 の領域内で一定値に保ち比較を行う。可動部分の変位、速度、圧力、モータ出力について比較したグラフを Fig. 6.5~Fig. 6.9 に示す。比較し易くするために4種類のデータのみを載せる。グラフの凡例の欄にはその時の仮想バネ定数 k_d の条件を示す。

Fig. 6.5~Fig. 6.9 より、仮想バネ定数の設定値を小さくすると、射出開始直後の可動部分の速度は射出終了時のそれより大きくなることがわかる。仮想バネ定数を大きくすると徐々に射出開始直後の速度が小さくなり、反対に射出終了時の速度が大きくなっていくことがわかる。それは Fig. 6.5 のモータ出力の変化をみてもわかる。Fig. 6.6 より、仮想バネ定数が10000, 300000[N]の場合は可動部分の変位量が大きくなり、仮想バネ定数が30000, 100000[N]の場合には変位量が小さくなる。これは先ほど述べた射出開始直後の速度と射出終了時の速度の関係によるものと考えられる。仮想バネ定数は式 (3.16) より、仮想バネの平衡点位置の変化量を決定するパラメータとなっている。Fig. 6.9 より、仮想バネ定数を大きくするとバネの平衡点位置の変化量は小さくなり、逆に小さくすれば変化量は大きくなることがわかる。また仮想バネ定数は式 (3.12) 内の $-k_d(x-x_e)$ の項として構成されている。この2点を考慮すると、仮想バネ定数を大きくしていくと、途中モータ出力が小さくなり、またある値まで大きくするとモータ出力が大きくなったためこのような結果となったと考えられる。しかし、仮想バネ定数を大きくすることには問題がある。可動部分の変位は、樹脂の影響により常に同じ値をとらない場合がある。すると射出成形の度に異なる相対変位となる。加えて仮想バネの平衡点位置の変化量は小さくなっているため、保圧力にばらつきが生じてしまうと考えられる。そこで、保圧力のばらつきが生じているのか実験を行った。実験条件は本章と同条件とし、仮想バネ定数を12500, 30000, 60000, 100000, 300000[N/m]の5種類の条件下でそれぞれ10回ずつ射出成形を行う。データは保圧工程移行後の3秒間採取し、データの平均値及び標準偏差を導出しばらつきを比較する。そのグラフを Fig. 6.10 に示す。横軸はそれぞれの入力条件、縦軸に保圧力の平均値 [kN] と標準偏差 [kN]

を示す. Fig. 6.10 より, 仮想バネ定数が小さい場合にはばらつきはほとんどなく, 仮想バネ定数が大きくなれば保圧力のばらつきが大きくなることわかる. また, 様々な金型を使用する場合には仮想バネの平衡点位置の変化量を大きくする, すなわち仮想バネ定数を小さく設定し, 金型形状に合わせて余分な力を軽減してくれるようなバネ特性を持たせた方が都合がいいと考えられる. よって仮想バネ定数は小さく設定することが望ましい. しかし, Fig. 6.5 より, 仮想バネ定数の設定値を小さくしすぎると, モータ出力の最大値と目標保圧力との差が大きくなってしまふことがわかる. そのため本研究での仮想バネ定数の最適値はモータ出力と保圧力との関係を考慮し, 30000[N/m]とする.

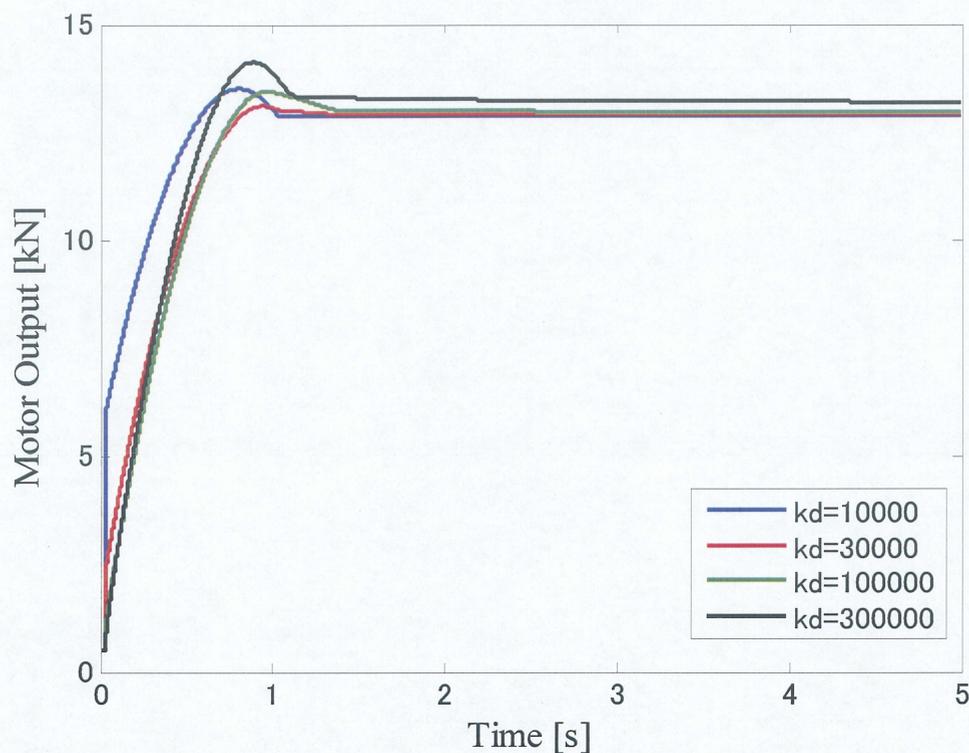


Fig. 6.5 モータ出力

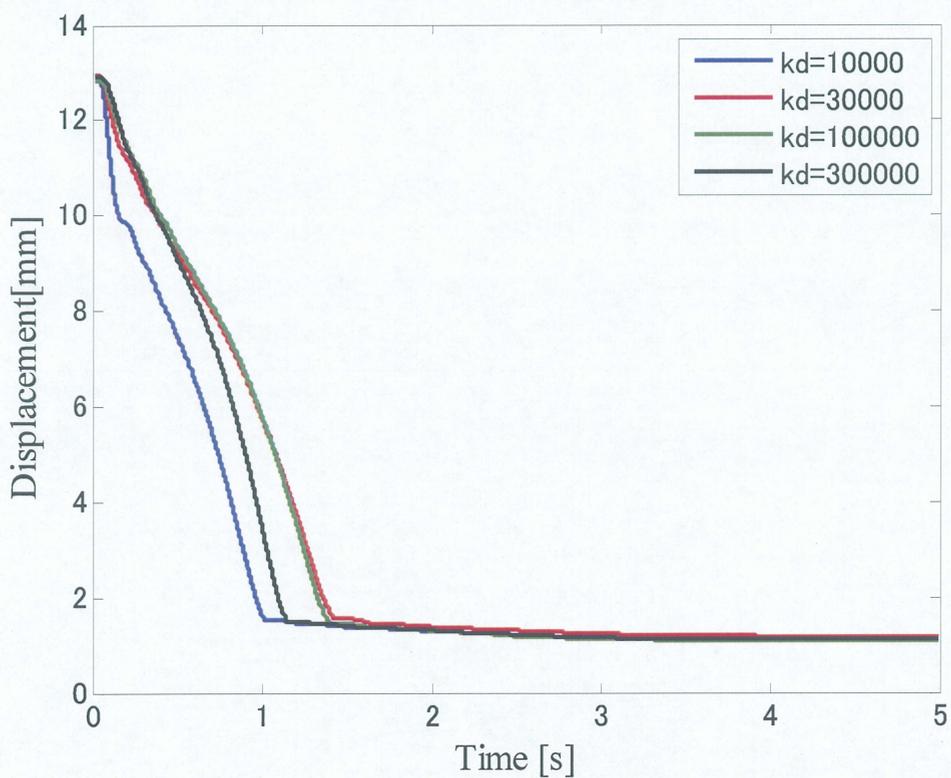


Fig. 6.6 可

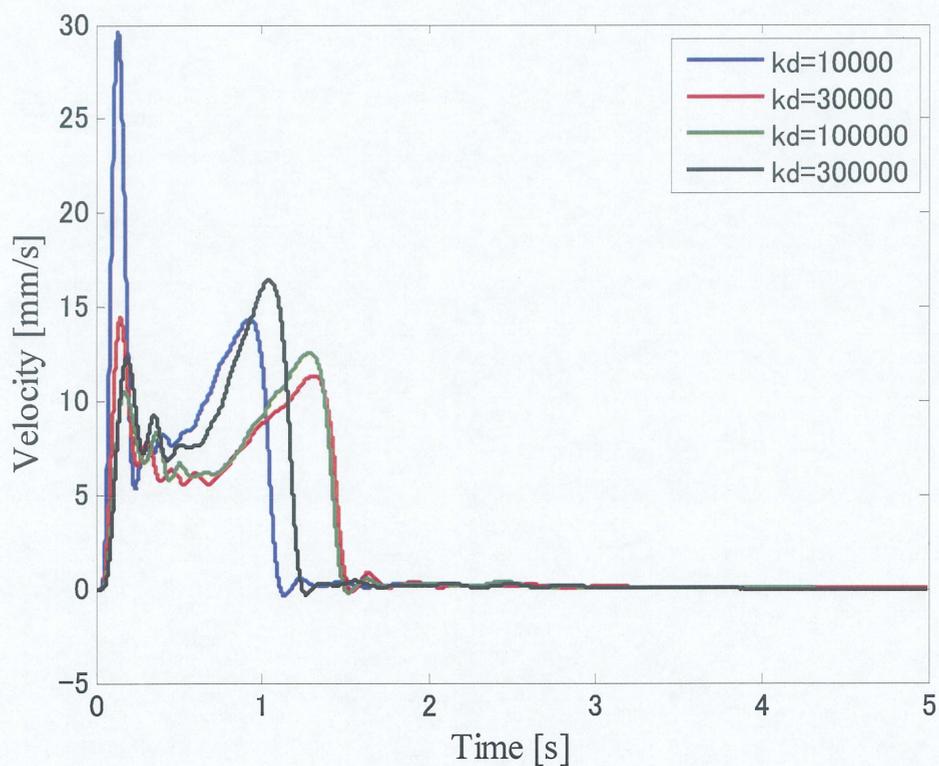


Fig. 6.7 可動部分の速度

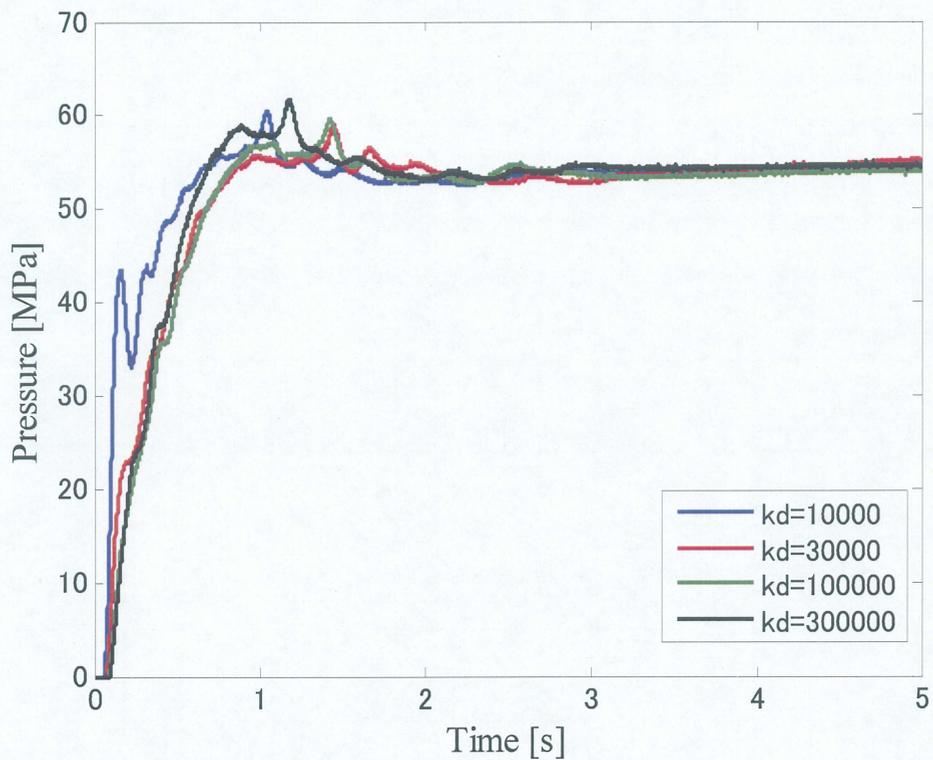


Fig. 6.8 樹脂から加わる圧力

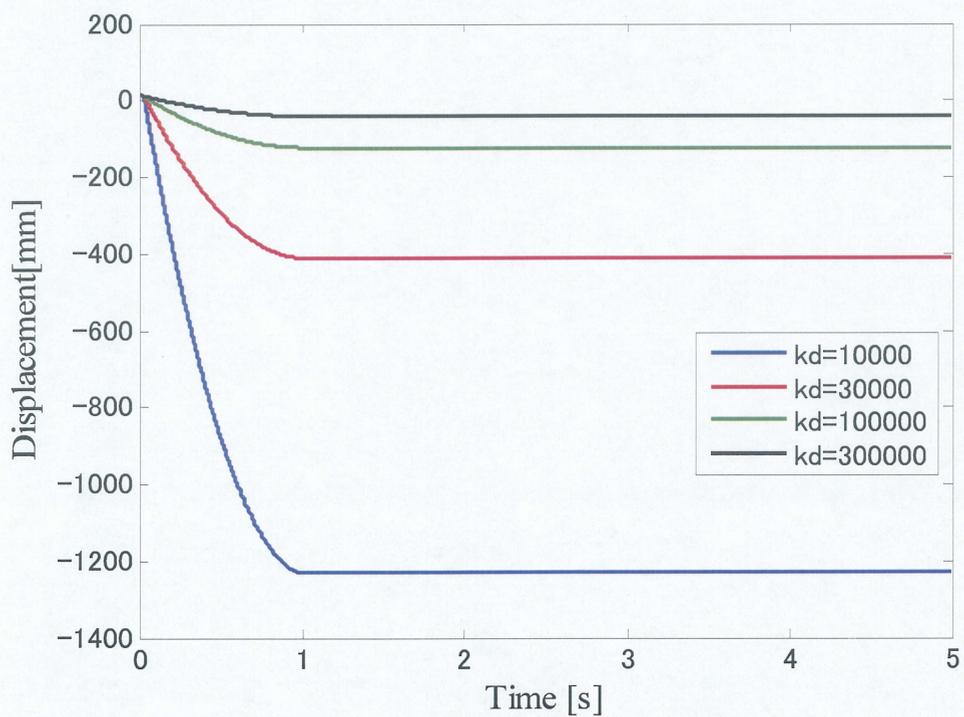


Fig. 6.9 仮想バネの平衡点位置の軌道

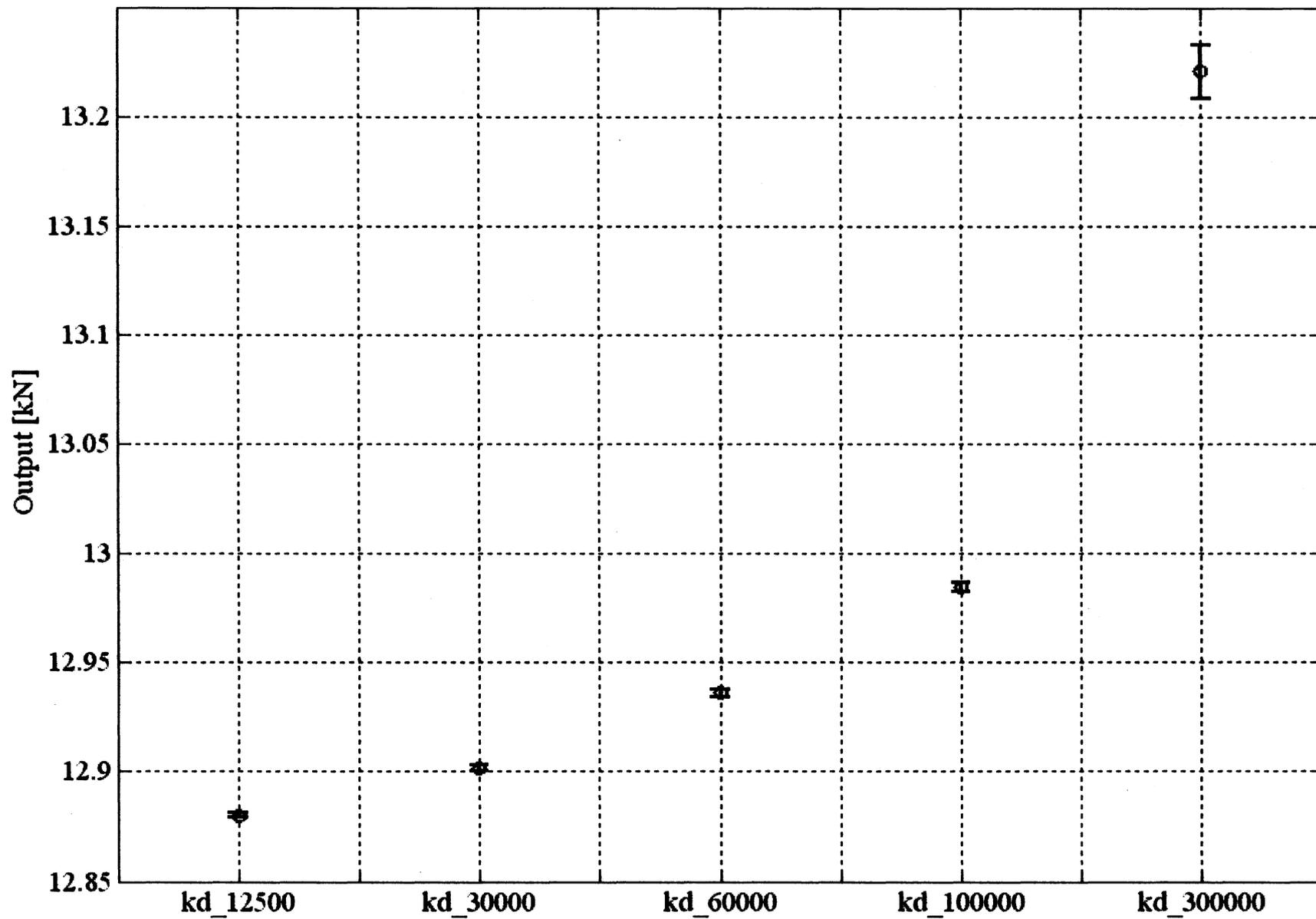


Fig. 6.10 各仮想バネ定数における保圧力の平均と標準偏差

6.5 仮想粘性係数の影響

最後に仮想粘性係数の影響について考察する。仮想質量 $m_d=17.01[\text{kg}]$ に設定し、仮想粘性係数 c_d を様々に変更し射出成形を行った。ここで、仮想粘性係数 c_d が射出成形に及ぼす影響は仮想バネの平衡点位置の変化量が大きいほど顕著に現れると考えられるため、仮想バネ定数 k_d は $30000[\text{N/m}]$ に設定した。その時のモータ出力、可動部分の変位、速度、樹脂から加わる圧力、について比較したグラフを Fig. 6.11 ~ Fig. 6.14 に示す。グラフの凡例の欄にはそのときの仮想バネ定数の条件を示す。

Fig. 6.13 より、仮想粘性係数の設定値を大きくすると射出開始直後の速度が大きくなることが分かる。その他のグラフでも同様のことが言える。仮想粘性係数はインピーダンス制御において制御系の時間遅れに関係しており、仮想粘性係数を大きくすることで制御系の時間遅れを改善し、追従性を向上することができる。しかし、その追従性は仮想バネの平衡点位置の変化している間のみ影響を及ぼすため、仮想バネの平衡点位置が変化しなくなると追従性はほとんど現れない。よって設定した射出時間内に射出が完了する場合には仮想粘性係数を大きくした方がよいと考えられる。しかし、Fig. 6.11 より、仮想粘性係数の値を大きく設定すると、他のインピーダンスパラメータの場合と同様にモータ出力の最大値と目標保圧力との差が大きくなってしまふ。以上の事から、仮想粘性係数は大きくした方がよいが、あまり大きすぎない値に設定することが好ましい。本研究では装置の追従性を向上させ、かつモータ出力の最大値と目標保圧力の差があまり大きくなりすぎない値である $c_d=2000[\text{N}\cdot\text{s/m}]$ に設定する。

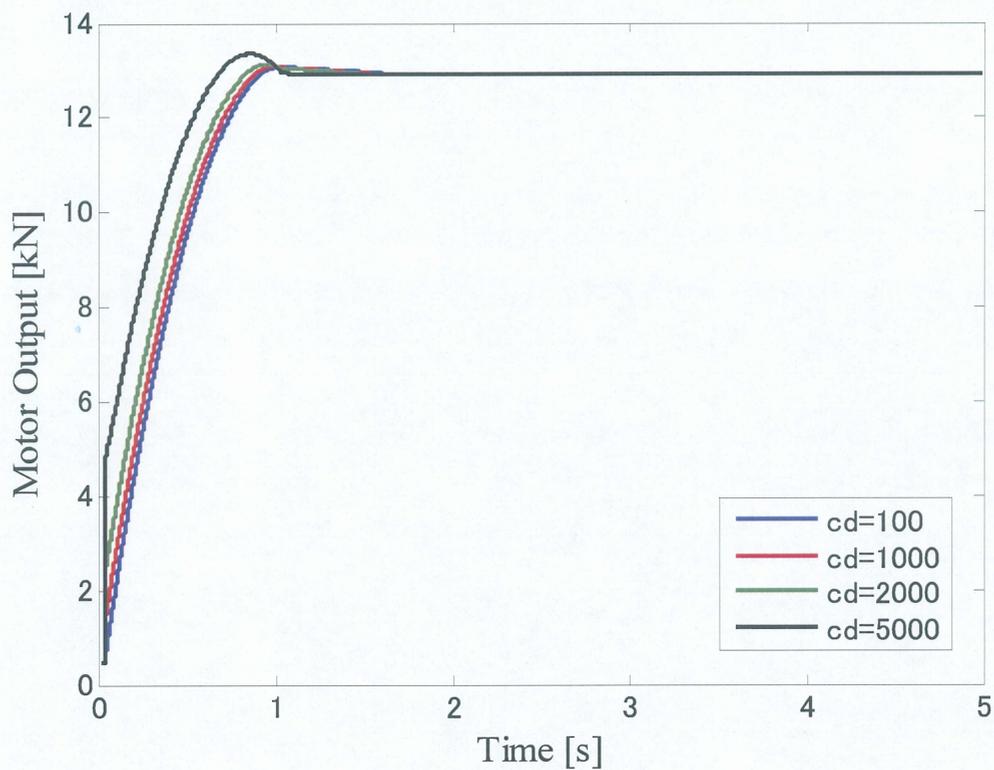


Fig. 6.11 モータ出力

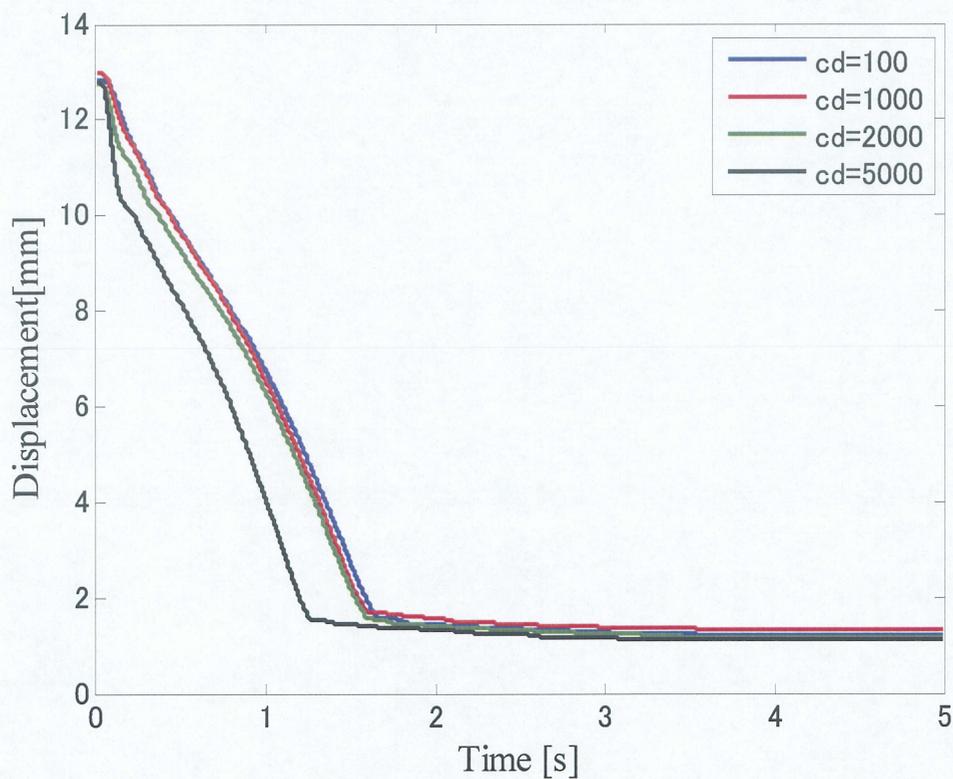


Fig. 6.12 可動部分の変位

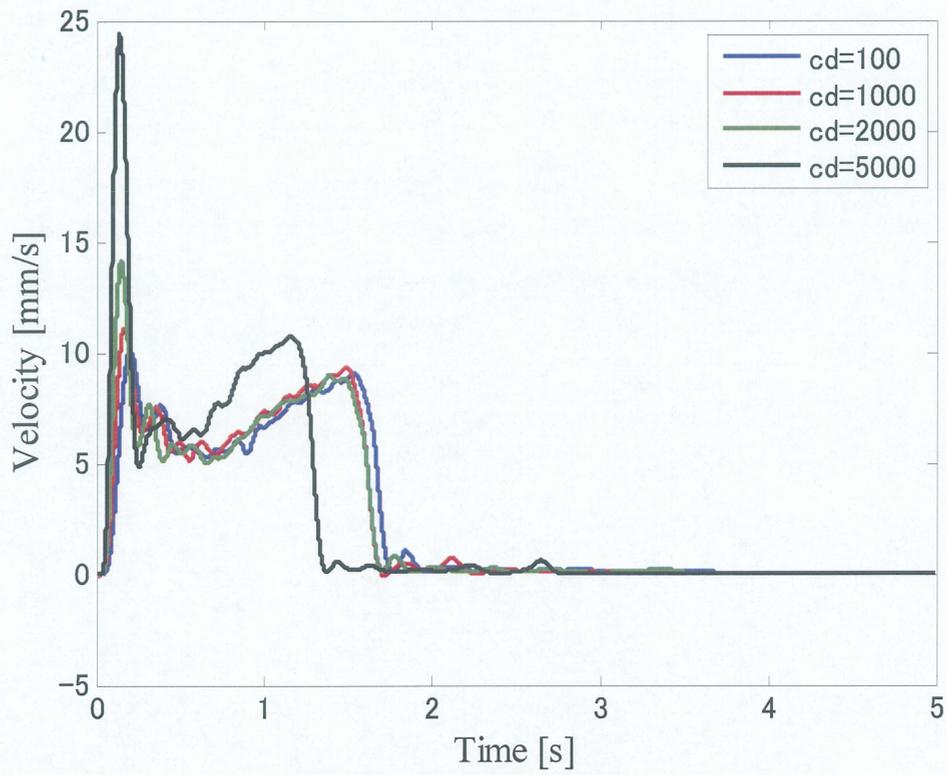


Fig. 6.13 可動部分の速度

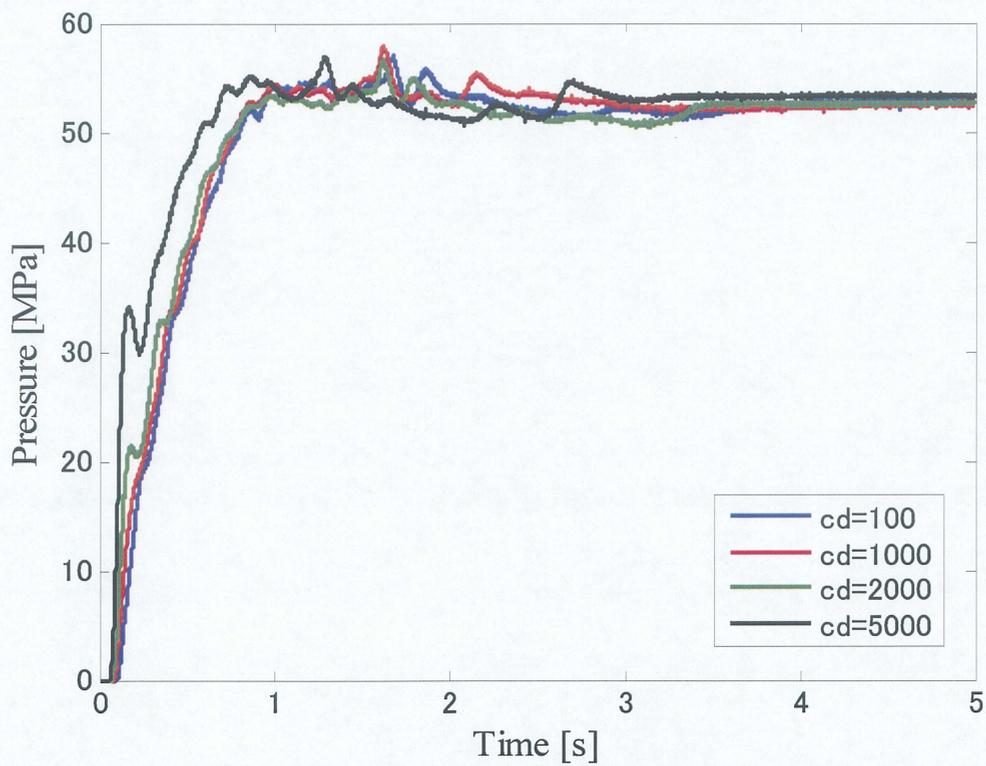


Fig. 6.14 樹脂から加わる圧力

6.6 比較結果

本実験において用いた金型ではインピーダンスパラメータを Table. 6.3 のように設定したが、このパラメータが他の金型においても有効なものであるか検証する必要がある。次章では温調機能を内蔵し、本章で用いた金型とは樹脂流路の異なる金型を用いてインピーダンス制御を行う。これにより、金型の種類に応じてインピーダンスパラメータを変更する必要性について検証する。

Table. 6.3 インピーダンスパラメータの設定値

インピーダンスパラメータ	設定値 [単位]
仮想質量 m_d	17.01[kg]
仮想粘性係数 c_d	2000[N*s/m]
仮想バネ定数 k_d	30000[N/m]

第7章

パラメータの汎用性検証実験

前章で決定したインピーダンスパラメータは、ケーブルクランプ金型において最適であると述べた。金型を変更したときにインピーダンスパラメータを変える必要がなければ、そのインピーダンスパラメータは汎用性があると考えられる。本章ではインピーダンスパラメータに汎用性があるか実験を行う。

7.1 実験条件

以下に本章で行う実験の実験条件を示す。まず本章の実験で用いる金型の写真を Fig. 7.1 に示す。ケーブルクランプ金型と同様にヒータが取り付けられている。金型形状はSDカード型で、形状は複雑ではないが、前章まで用いていたケーブルクランプ型に比べ容積は半分以下となっている。ケーブルクランプ金型の容積約 $2.0[\text{cm}^3]$ に対し Fig. 7.1 金型の容積は約 $0.8[\text{cm}^3]$ である。また、製品の大きさを計測したところ、約 $20 \times 21 \times 1[\text{mm}]$ であった。これは流路が非常に狭く、製品不良が発生しやすい形状といえる。このことから、Fig. 7.1 の金型どおりに射出成形するためには、適切なパラメータ設定が必要となり、インピーダンスパラメータの信頼性の検証に向いているといえる。

次に本実験におけるインピーダンス制御の入力条件を Table. 7.1 に示す。それぞれの条件について10回ずつ実験を行い、製品の評価を行う事で、前章で決定したインピーダンスパラメータが Fig. 7.1 の金型においても最良なパラメータであるのか検証する。ここで、本実験では仮想質量 m_d の条件は変更せず仮想バネ定数 k_d と仮想粘性係数 c_d の2種類のパラメータのみ変更条件を変更して行う。これは6.3節より、 m_d はモータ出力に与える影響が非常に大きいためである。 m_d を大きく設定する分には構わないが、仮想質量 m_d を小さく設定するとモータ出力が非常に大きくなってしまいう可能性がある。よって m_d を変更して実験するためには、目標保圧力 P_d を変更しモータ出

力を抑える必要がある。しかし、 P_d を変更すると仮想バネの平衡点位置 x_e の変位も変化し、 $k_d \cdot c_d$ の特性も変化することから、 m_d のみの影響を検証することは困難である。従って本実験は m_d の条件を変更せず行う。

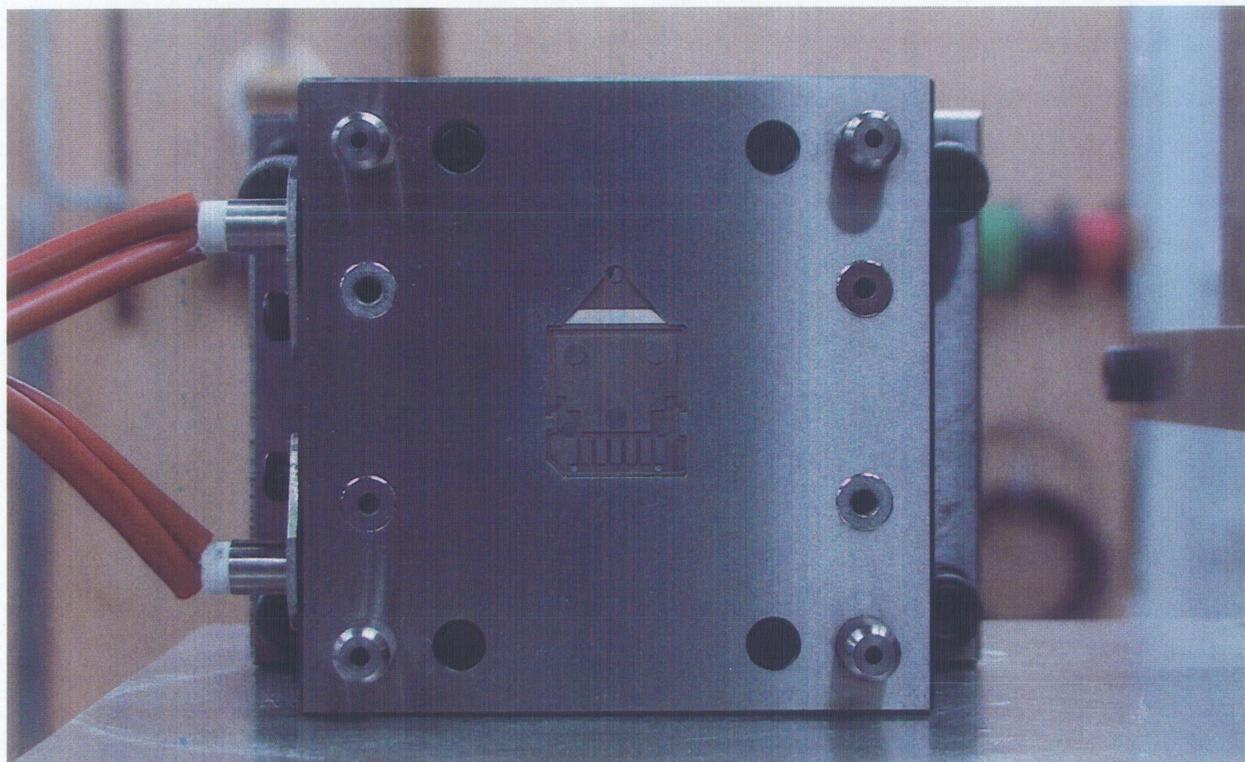


Fig. 7.1 SD カード金型

Table. 7.1実験条件

パラメータ	数値 [単位]
仮想質量 m_d	17.01[kg]
仮想粘性係数 c_d	100, 500, 1000, 2000 [N · s/m]
仮想バネ定数 k_d	30000, 60000, 10000, 300000[N/m]
射出時間 t	0.3[s]
目標保圧力 P_d	90[MPa]

7.2 実験データについて

実験で測定する項目は前章と同様に、モータの出力、可動部分の変位、可動部分の速度、樹脂から加わる圧力の4種類であるが、本実験に必要なデータは可動部の変位データのみである。実験データは前章と同様に射出開始より5秒間測定し、サンプリング周期は1kHzで行うこととする。前章では制御性能の観点について考察を行ったが、本章では製品評価として射出体積を導出し考察する。

7.3 射出体積の導出方法

射出体積とは、スクリュが金型に流す樹脂量であり、製品の品質にかかわる重要な項目の一つである。本実験では射出体積のばらつきを比較する。射出体積のばらつきが小さければ、制御の再現性が高いといえるため、パラメータの有効性を判断する材料としては有効であるといえる。

射出体積 V は式(7.1)のように求められる。

$$V = A\Delta x = \frac{\pi D^2}{4}\Delta x \quad (7.1)$$

ここで A はスクリュ断面積 [m^2]、 D はスクリュ直径 [m]、 Δx は可動部分の射出開始時からの移動量(ストローク) [m] である。条件下で各10回の射出成形を行い、射出体積の平均と標準偏差を求め比較する。

7.4 仮想バネ定数の射出体積への影響

まず、仮想バネ定数を変更して実験を行った。仮想バネ定数を Table. 7.1 の4種類の場合について射出体積をそれぞれ比較した図を Fig. 7.2 に示す。横軸にそれぞれの入力条件、縦軸に射出体積の平均値 [cm^3] と標準偏差 [cm^3] を示す。Fig. 7.2より、各パラメータ毎にモータ出力に違いが出ることから、射出体積の平均値にも違いが生じることがわかる。 $k_d=30000[\text{N/m}]$ の時、射出体積の平均値は高く、標準偏差は小さくなっている。これは、6.4節より、保圧力のばらつきが小さく、かつ射出開始直後の可動部分の速度が速いことが原因と考えられる。 $k_d=300000[\text{N/m}]$ の時は平均値は高いが標準

偏差が大きくなった。これは前述したように、 k_d を大きくすると保圧力のばらつきが大きくなるが、射出完了時の可動部分の速度は速いため、平均値は高く、標準偏差は大きくなったのではないかと考えられる。 $k_d=60000$, 100000 [N/m]の時は共に平均値は低く、標準偏差も大きくなっている。これは、6.4節で述べた射出開始と射出終了時の速度の関係が影響していると考えられる。実験で用いた金型は流路が狭いため、射出時の可動部分の速度が遅いと樹脂が途中で固まってしまい、それ以上押し出せなくなってしまう。 $k_d=100000$ [N/m]の場合、 $k_d=60000$ [N/m]の場合と比べ射出開始直後の速度は遅いが、射出完了時の速度は速いため、樹脂が固まってもある程度押し出すことができる。しかし $k_d=60000$ [N/m]の時は、射出開始直後及び完了時の速度が同程度のため、樹脂が固化する影響を受けて標準偏差が大きくなったのではないかと考えられる。これは $k_d=100000$ [N/m]の時より $k_d=300000$ [N/m]の時の方がばらつきが小さいことからいえる。以上のことから、 k_d が小さい時に安定して射出成形ができていといえる。従って本実験で用いた金型における最適な仮想バネ定数は 30000 [N/m]である。

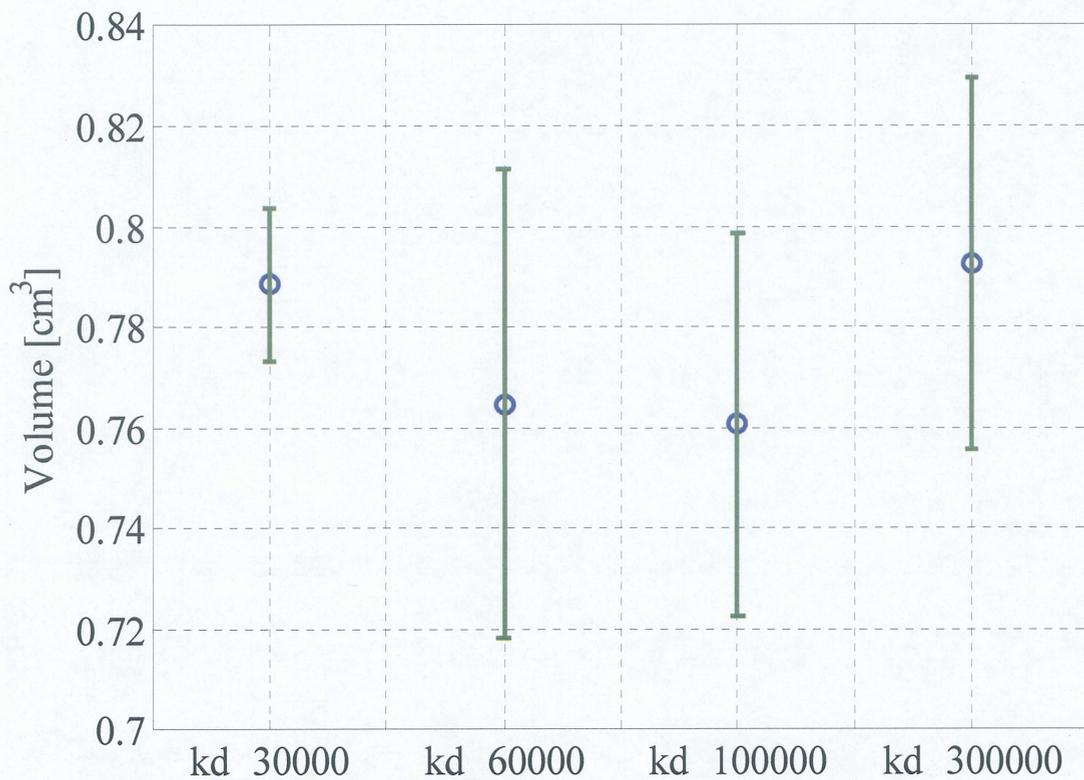


Fig. 7.2 仮想バネ定数の違いによる射出体積のばらつき

7.5 仮想粘性係数の射出成形への影響

次に、仮想粘性係数 c_d のみを変更して実験を行った。前節より、仮想バネ定数 k_d の値は30000[N]で固定する。仮想バネ定数をTable. 7.1の4種類の場合について射出体積をそれぞれ比較した図をFig. 7.3に示す。横軸にそれぞれの入力条件、縦軸に射出体積の平均値[cm³]と標準偏差[cm³]を示す。Fig. 7.3より、 c_d を大きくしていくと平均射出体積は大きくなり、標準偏差は小さくなるという傾向を確認した。 c_d を小さくすると射出体積のばらつきが大きくなるのは、6.5節より、装置の追従性が低下したためと考えられる。以上のことから、本実験で用いた金型における仮想粘性係数 c_d の最適値は2000[N・s/m]である。

本節と前節の結果より、本章の実験で用いた金型におけるインピーダンスパラメータの最適値は、前章で用いたケーブルクランプ金型でのインピーダンスパラメータのそれと同値になった。これは、本研究で設定したインピーダンスパラメータは、使用した2種類の金型において汎用性があるといえる。

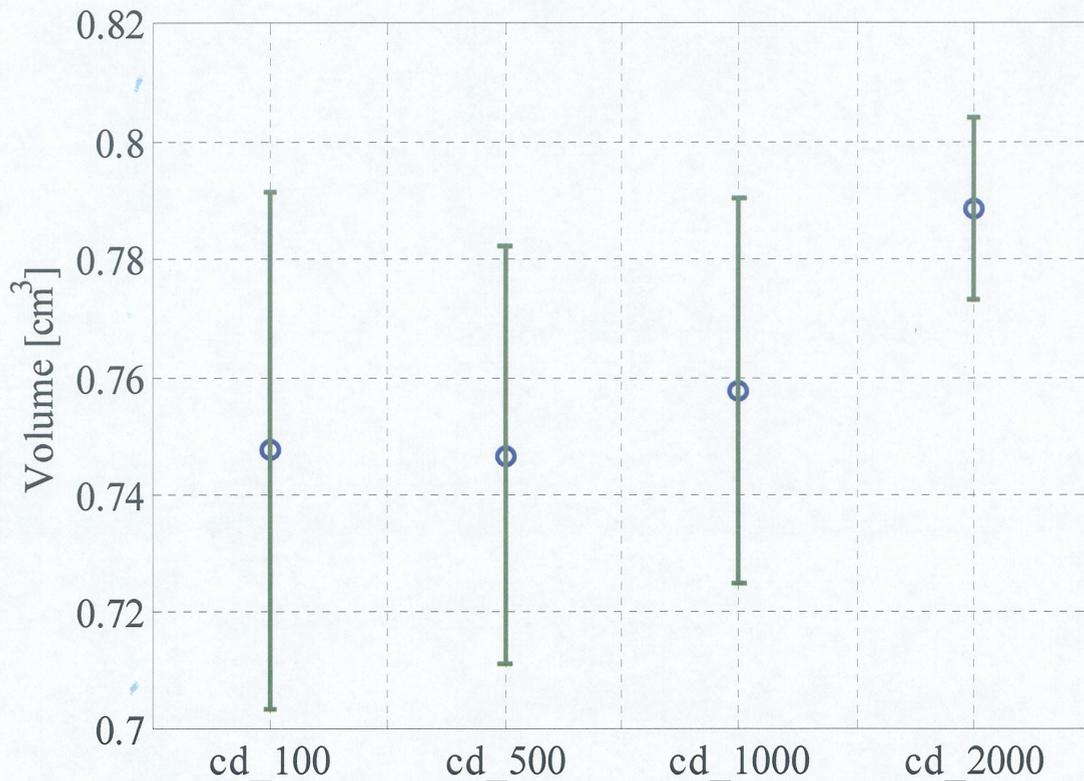


Fig. 7.3 仮想粘性係数の違いによる射出体積のばらつき

第8章

結言

本研究では射出成形機にインピーダンス制御を用いて射出成形を行った。本研究の結果を以下にまとめる。

- (1) 従来の仮想バネの平衡点位置の変化理論における問題点を改善するための新たな理論を提案した。また従来理論と提案理論の比較実験を行い、従来理論において問題点となっていたモータ出力のショック圧の軽減を確認した。
- (2) 最適インピーダンスパラメータの設定実験を行い、実験に使用したケーブルクランプ金型における最適なパラメータ値を決定した。
- (3) 温度調節機能付SDカード金型を用いて、金型に応じてインピーダンスパラメータを再設定する必要性について実験を行った。実験の結果、(2)で決定したインピーダンスパラメータは本研究で使用した2種類の金型において汎用性があることを確認した。

今後の予定としては、(3)については金型の検証数がまだ十分ではないため、今後さらに検証の必要がある。また本研究では式(3.12)のように装置可動部分の加速度 \ddot{x} を消去した。この場合、可動部分の仮想質量 m_d を変化させると、仮想粘性係数 c_d 、仮想バネ定数 k_d それぞれの項に影響を及ぼし、検証するインピーダンスパラメータの特性のみでなく、その他のパラメータの影響も受けてしまう可能性がある。

ここで、(3.8)、(3.11)より、樹脂より加わる力 f を消去すると次式のようなになる。

$$T_M = \frac{1}{\lambda} [(M - m_d)\ddot{x} - c_d(\dot{x} - \dot{x}_e) - k_d(x - x_e) + c\dot{x} + F] \quad (8.1)$$

式(8.1)は、 m_d 、 c_d 、 k_d の各項が独立しているため、各パラメータの影響のみを検証するのに適していると考えられる。また、可動部の加速度 \ddot{x} については加速度センサによって計測すれば、簡単な制御プログラムの変更のみで実装可能であると考えられる。

参考文献

- (1) 有方 広洋：‘射出成形加工の不良対策’，日刊工業出版社，(2003)
- (2) 池浦 良淳：‘第2章－(8)成形機のフィードバック制御’，平成17年度地域新生コンソーシアム研究開発事業「マイクロ成形機の開発とそれを活用した生産革新技術の研究」成果報告書，pp.45-49，(2006年3月)
- (3) 伊藤一功，池浦良淳：‘射出成形機のインピーダンス制御に関する研究’，三重大学大学院平成19年度修士論文
- (4) 片山 徹：‘新版応用カルマンフィルタ’，朝倉書店，(2000)

謝辞

本研究を進めるにあたり，周囲の方々からの多大な助言，激励のおかげで無事に論文を書き上げる事ができました．この場をお借りして皆様に感謝の意を表したいと思っております．

本研究を進めるにあたり，研究の方針や指導，MATLAB ならびにその他のソフトウェアの使用方法など種々のご助言を賜りました池浦良淳教授に心より感謝し，今後の更なるご活躍を心より祈っております．

また，本研究を進めるにあたり，研究室内発表などでの手厳しくも的確な指摘，ご助言を賜りました早川聡一郎准教授に心より感謝いたします．

本研究において，主に実験装置の機構についての様々のご助言を賜り，研究の内外で大変ご尽力して頂きました澤井秀樹技術職員に心より感謝しております．

また，私が学部4年時代に多大なご支援を賜り，それ以降の研究室でのあり方を指南して下さいました，現在は社会人としてご活躍されている伊藤一功先輩に心より感謝しております．

また，私の様な未熟者に1年間，終始熱心に協力してくれた学部4年の中口賢一君に心より感謝し，今後の益々のご活躍を期待しております．

そして，研究室での3年間を非常に実りある有意義なものにできたのは，同じ時間を共有できた同期の石本唯常君，サフワン君，野邊雅也君，矢野岳水君の存在が非常に大きかったと感じております．心より感謝し，今後の更なる飛躍を期待しております．

最後に，システム設計研究室の博士課程の皆様，修士1年，学部生，卒業生の皆様に心より感謝の意を表すとともに，皆様の今後ますますのご発展をお祈りさせていただき，本論文の結びとさせていただきます．