

# 金型の加工性状が射出成形時の型内圧力・金型温度に及ぼす影響

メカニクス系工学専攻 准教授 西藪 和明  
東大阪モノづくり専攻 修士学生 長井孝太郎  
藤塚精密金型株式会社 専務取締役 藤塚 孝征

## 1. 緒言

プラスチック射出成形は、高温に加熱し溶融したプラスチックを金属の型に高速かつ高圧で射出し、金型内で冷却固化した後で型から取り出して、プラスチック成形品を得る製造方法であり、最も一般的な熱可塑性プラスチックの成形方法の一つである。高品質なプラスチック成形品を安定して製造するためには、射出成形金型の加工および組立の精度向上が不可欠である。近年、工作機械の加工精度の大幅な向上に加え、三次元 CAD による設計の自由度の向上や CAD/CAM による設計と加工の一元化により、射出成形金型部品の加工精度および製品設計から金型の設計・製造までの短納期が可能になり、結果としてプラスチック射出成形品の精度が向上し、その形状の複雑化が進んでいる。そのため、高品質なプラスチック成形品を得るためには、金型の部品および組立後の金型および、それにより製造されたプラスチック成形品の形状を正確に、かつ迅速に測定することが求められている。高精度な非接触三次元デジタイザやレーザ顕微鏡などの測定器具は、高い測定精度が要求され、かつ複雑な形状の成形品を生産するプラスチック射出成形の分野で、それらの需要が高まっている。しかしながら、射出成形金型製造業の大多数は中小零細企業で占められており、高価な測定機器は直接的な利益につながりにくいため、それらを自社で導入している企業は少なく、一部の企業に限られている。そのため、産学連携により大学等研究機関が保有する最新の測定機器を利用して、金型製造企業が製造した金型の形状測定を行うことは、大阪東部地域の地場産業の一つである金型産業を盛り立てる手段の一つになると思われる。

プラスチック射出成形において、成形不良は大きな問題である。これは、金型内でのプラスチックの流動および固化などの挙動を正確に把握することが困難であることが一因である。射出開始時のプラスチックは高温で、かつ高速で射出されたプラスチックはせん断発熱で昇温する。一方で、プラスチックの熱は型内を流動する過程で金型に熱伝達するため、金型内ではプラスチックの温度が常に変化し続ける。また、プラスチックは温度によって流動性が変化するため、その挙動を把握することは困難である。また、プラスチックの温度だけでなく、成形条件の組み合わせは無数に存在するため、金型内部のプラスチックの状態を把握することは不可能と言える。

射出成形金型は、ノギスやマイクロメータなどの接触式測定器具により、部品の寸法を測定することが多いが、キャビティの形状が複雑であることもあり、金型の形状や寸法を直接測定するよりも、その金型を用いて製造された成形品の形状や表面品位を測定することにより、金型の善悪を判断されることが大半である。しかし、成形品の形状や表面品位は材料や射出条件などの金型以外の因子による影響もあるため、金型の加工精度や組立精度が射出成形の挙動に及ぼす影響を直接評価できる手法が必要である。プラスチックの成形挙動を把握するための試みとして、これまで金型の一部に石英ガラスプリズムを取り付け、金型内部のプラスチックの流動挙動を直接観察する方法や、金型キャビティ表面に各種センサを設置し、金型内部のプラスチック挙動の一部を疑似的に把握する方法などが存在する。一方で、金型の肥大化は加工の難度および工数の増加、輸送する際の燃費の低下および成形機への取り付け性の低下など、悪い影響を及ぼす。スライド機構は、射出成形品のアンダーカットを処理する最も一般的な

方法の一つである。しかし、スライド機構は金型部品の中でも必要体積が大きく、本機構を複数設置した金型は、成形品の大きさに対して金型が肥大化する傾向にある。スライド機構を小型化させることにより、金型の小型化を推進することが可能であると考えられる。

本研究では、金型内に温度センサおよび圧力センサを挿入した金型を用いて射出成形を行い、金型入れ子の加工表面性状が射出成形されたプラスチック成形品の圧力および表面温度に及ぼす影響を調査し、金型内でのプラスチックの挙動を把握した。これらの結果より、プラスチック射出成形金型をオンラインで評価する手法の開発を目的とした。射出成形条件を変更することにより、金型内の圧力や温度は変化する。成形圧力を上げることで、成形時の型内圧力は上昇することが予想される。また、射出速度を上げることで、せん断発熱による発熱量が上がり、キャビティ表面に接する樹脂温度は上昇することが予想される。しかし、実際に型内圧力や型内温度を把握するには、金型内部にセンサなどの計測装置を設置する必要がある。そこで、金型内にセンサを設置し、樹脂射出成形の成形条件の変化による、金型内の圧力および温度の変化を調査した。

## 2. 実験方法および条件

本実験では、成形材料としてアクリロニトリルブタジエンスチレン(ABS)樹脂ペレット(東レ(株), トヨラック 920-555, 透明色, 収縮率 0.4~0.6%)を使用した。ペレットは、乾燥機にて 90°C で 2 時間以上の乾燥を行ってから成形に用いた。乾燥機は、ホッパー設置型(plas-aid HD2, (株)松井製作所)および据え置き型(MRN-111, (株)いすゞ製作所)を用いた。実験には、樹脂射出成形機(FANUC(株), ROBOSHOT  $\alpha$ -100SiA, 最大型締め力 1000kN)を用いた。

本実験には、カートリッジ式の射出成形金型を用いた。カートリッジ金型の外観を Fig.1 に示す。カートリッジ式金型は、金型の交換が容易であるという利点がある。成形品の形状は、Fig.2 に示すような ISO 引張り試験片および ISO 曲げ試験片とした。内金型のモールドベースの材料は炭素鋼(S55C)を用い、入子の材料は析出硬化系鋼(大同特殊鋼(株), NAK80)を用いた。金型キャビティ表面は、#1000 砥石にて仕上げを行った。



Fig.1 カートリッジ式金型

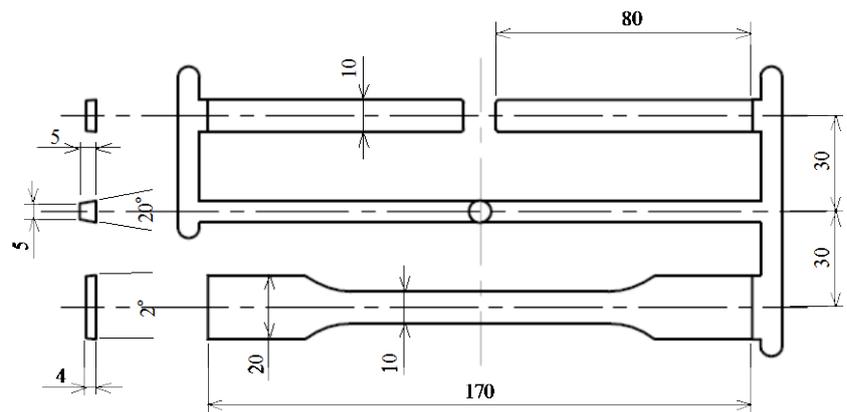
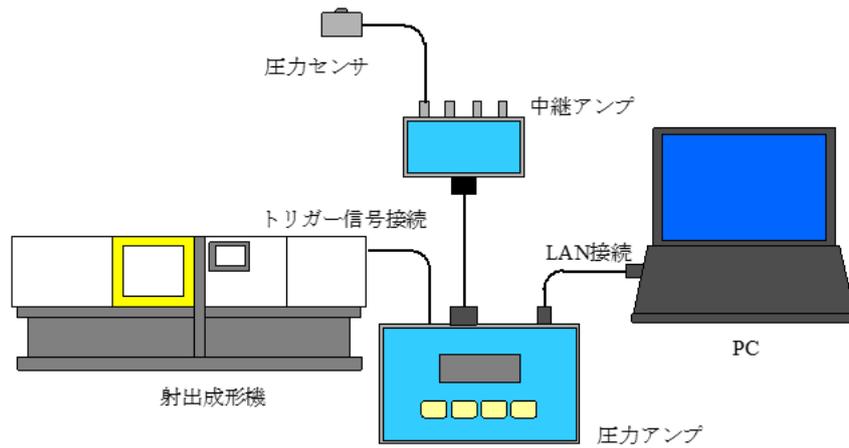
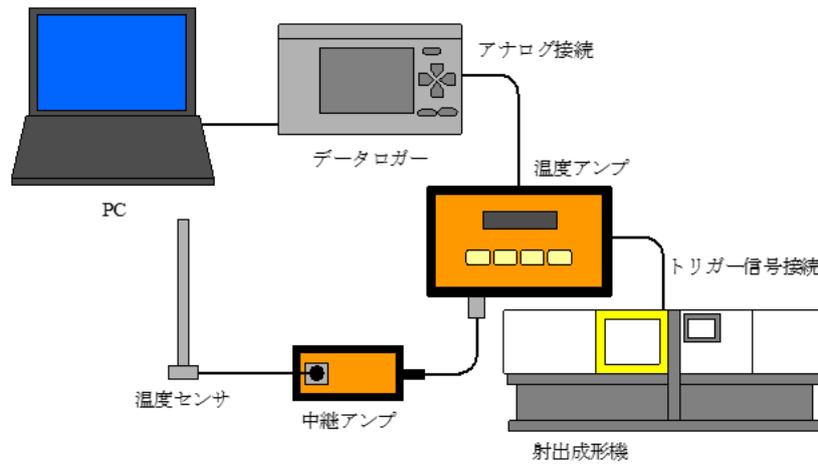


Fig.2 成形品の形状

樹脂射出成形金型に圧力センサ(双葉電子工業(株), 最大測定荷重 1kN, 耐荷重 1.5kN)および温度センサ(双葉電子工業(株), 最大測定温度 430°C, 耐荷重 150MPa)を設置した。各種センサおよびアンプと PC および射出成形機の接続図を Fig.3 に示す。アンプは、射出成形機とトリガー信号の接続を行い、成形機の型閉め開始と同時にモニターを開始するように設定を行った。また、センサの金型への設置位置および取り付け方法を Fig.4 に示す。

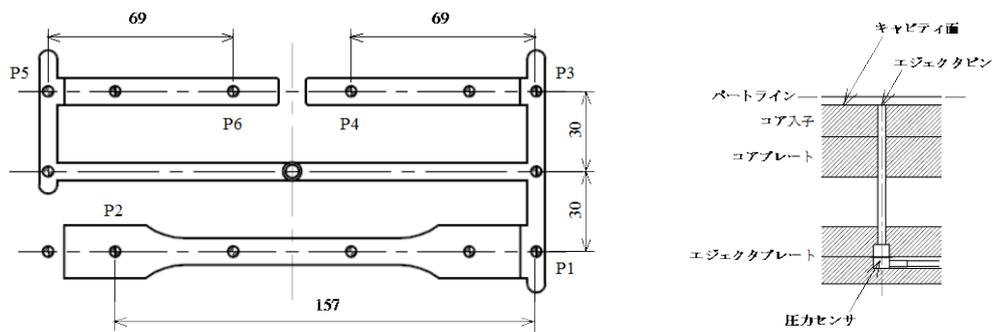


(a) 型内圧力測定

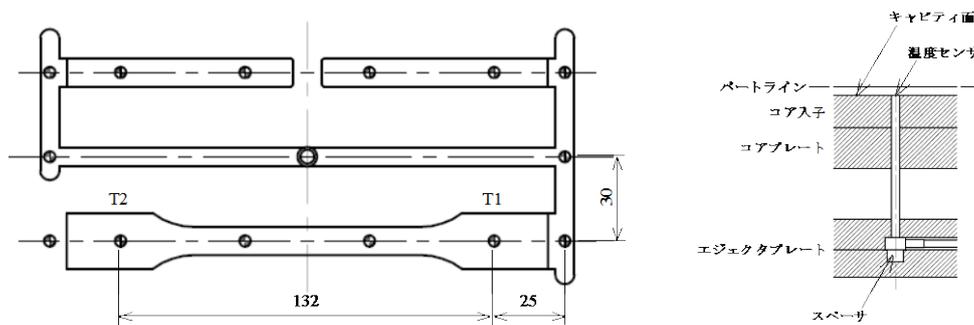


(b) 金型温度測定

Fig.3 型内圧力および金型温度計測のための装置図



(a) 圧力センサ



(b) 温度センサ

Fig.4 センサの設置位置および方法

成形条件を Table 1 に示す。成形圧力および射出速度を変化させた。成形パラメータを安定させるため、成形条件を設定後に、捨てショットとして 2 回成形を行った後、3 回めの成形のデータを取得した。また、充填完了後の樹脂の冷却は自然冷却とした。センサの測定間隔は 10ms とした。

Table 1 成形条件

成形圧力, $P_i$ (MPa)	40, 50, 60, 70
最大射出時間, $T_i$ (s)	4
シリンダー温度, $T_c$ (°C)	240
射出速度, $V_i$ (mm/s)	70, 80, 90, 100
保圧, $P_s$ (MPa)	0
保圧時間, $T_s$ (s)	0
冷却時間, $T_c$ (s)	35
試行回数, $N$ (times)	3
モニター開始	型締め開始時
サイクル時間, $T_c$ (s)	50

### 3. 実験結果および考察

#### 3. 1 時間経過による型内圧力および型内温度の変化

成形圧力  $P_i=50\text{MPa}$  および射出速度  $V_i=80\text{mm/s}$  で成形実験を行った場合の時間経過による型内測定圧力および金型測定温度の変化を Fig.5 に示す。型閉め開始から  $T=2\text{s}$  付近で急激に型内測定圧力および金型測定温度が上昇し、金型測定圧力は最大射出時間  $T_i=4\text{s}$  間、低下しながら高圧力を保持した後、急激に低下している。金型計測温度は最大値を示した後、緩やかに低下していることが分かる。

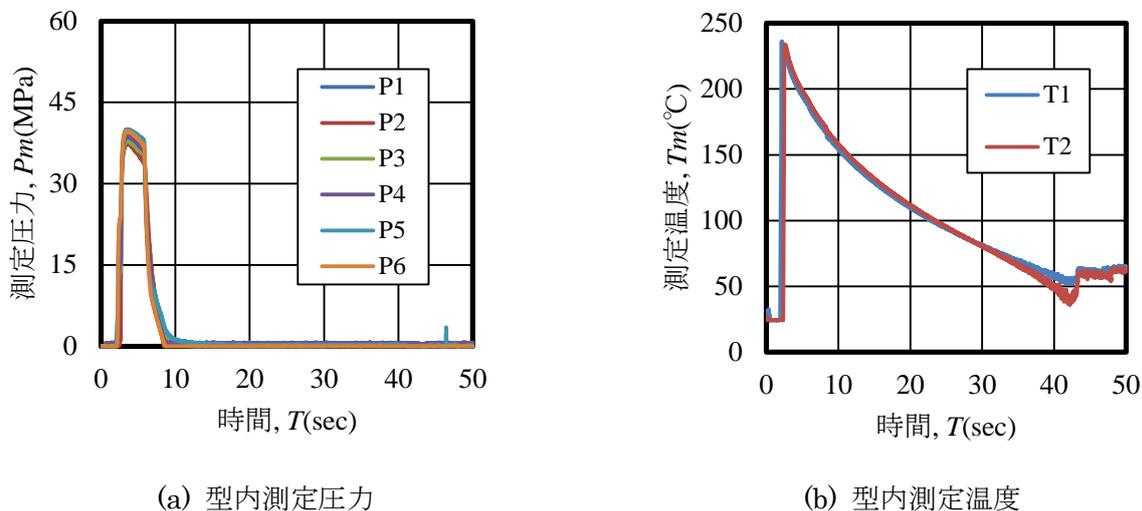


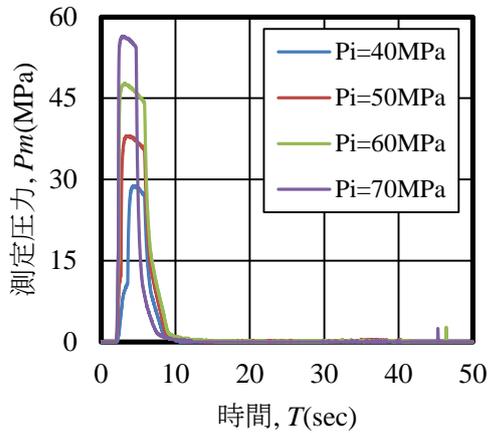
Fig.5 時間経過による型内測定圧力および金型測定温度の変化

#### 3. 2 成形圧力を変化させた場合

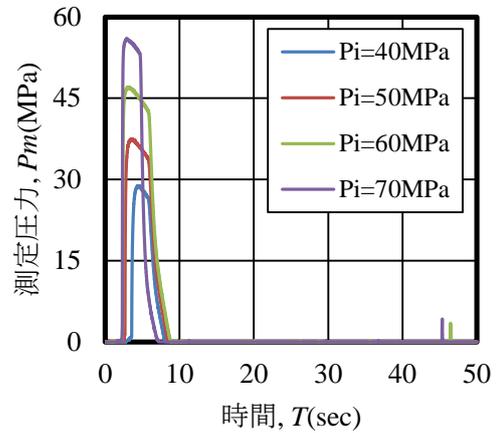
成形圧力を  $P_i=40, 50, 60, 70\text{MPa}$  に変化させ、射出速度を  $V_i=80\text{mm/s}$  で一定で成形実験を行った場合の時間経過による金型測定圧力および金型測定温度の変化を Fig.6 および Fig.7 に示す。成形圧力が上昇すると最大型内測定圧力が上昇している。また、 $P_i=40\text{MPa}$  の場合は、他の圧力よりも型内測定圧力の上昇開始が遅れていることが分かる。 $P_i=40\text{MPa}$  の場合は、 $T_2$  の位置に到達する時間が他の圧

力で成形した場合よりも長く、最大金型測定温度も低くなっている。これは、成形圧力が低いため、T2の位置までの充填時間が長くなり、プラスチックの熱が金型に熱伝達したためであると考えられる。

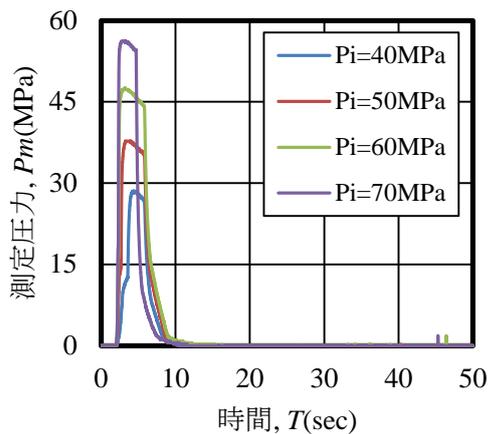
成形圧力と最大型内測定圧力の関係を Fig.8 に示す。最大型内測定圧力は、3 回測定を行った中の圧力の最大値を用いた。最大圧力は、圧力が増加すると比例的に増加した。また、成形圧力が増加すると最大温度は増加した。T2 は、成形圧力  $P_i$  が 60 および 70MPa のとき、T1 を上回っている。これは、せん断発熱により増加したと考えられる。



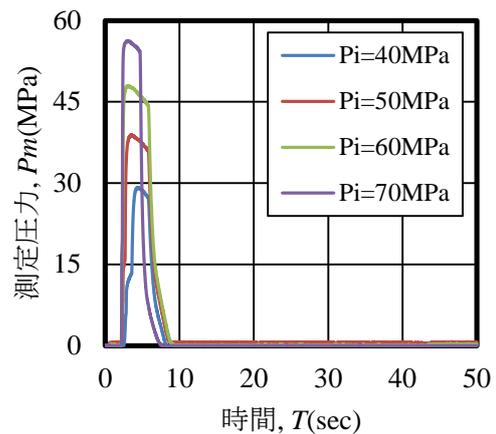
(a) P1 位置



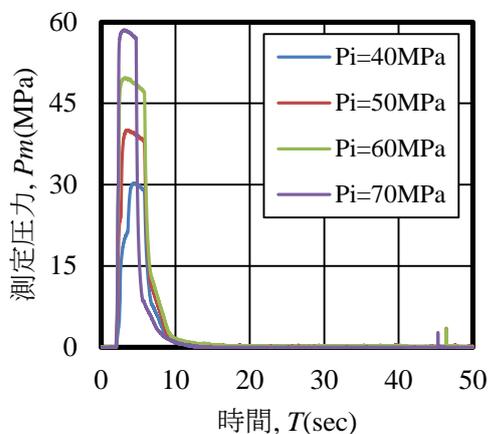
(b) P2 位置



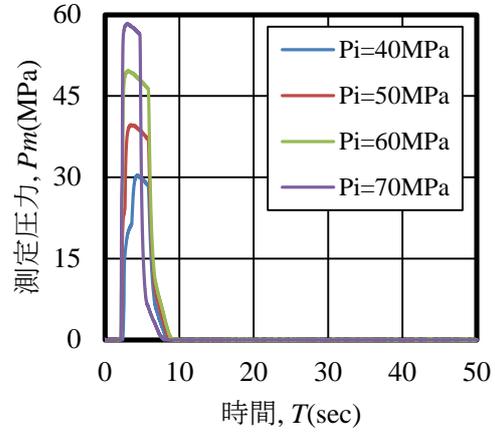
(c) P3 位置



(d) P3 位置

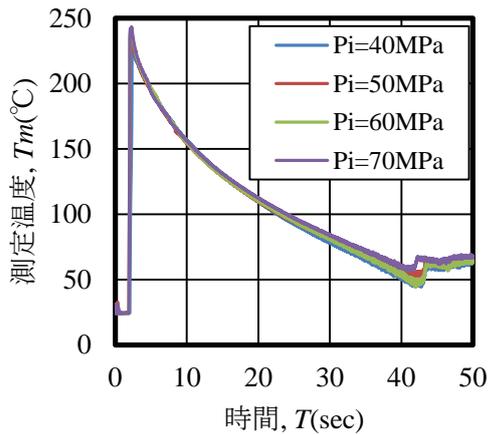


(e) P5 位置

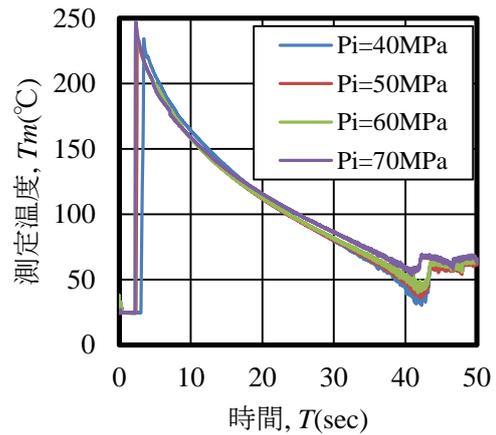


(f) P5 位置

Fig.6 位置ごとの時間経過による測定圧力の変化

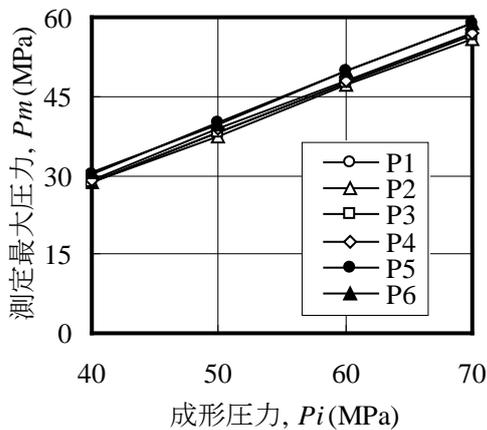


(a) T1 位置

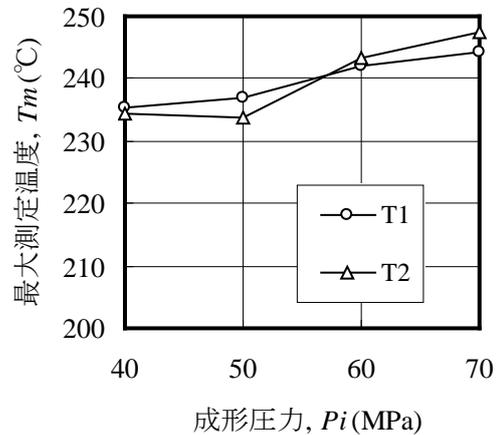


(b) T2 位置

Fig.7 位置ごとの時間経過による金型測定温度の変化



(a) 最大型内測定圧力



(b) 最大金型測定温度

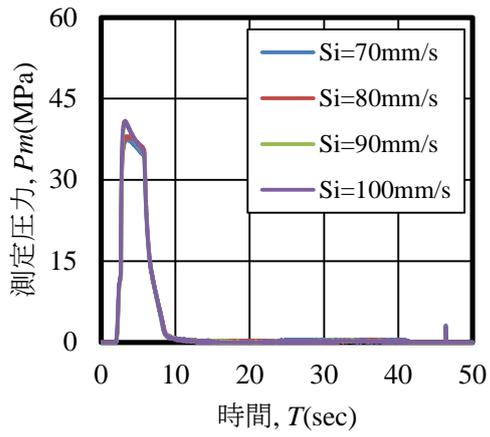
Fig.8 成形圧力と最大型内測定圧力および最大金型測定の関係

### 3. 3 射出速度を変化させた場合

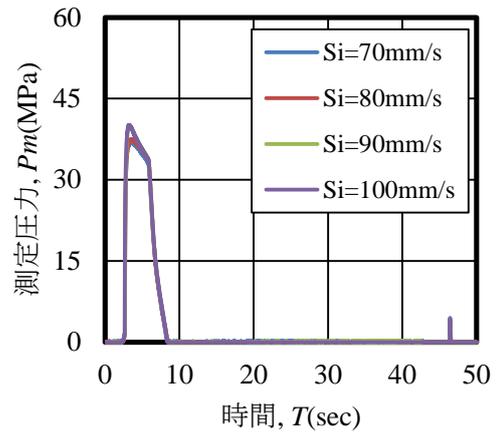
成形圧力を  $P_i=50\text{MPa}$  一定で、射出速度を  $V_i=70, 80, 90, 100\text{mm/s}$  変化させて成形実験を行った場合の時間経過による金型測定圧力および金型測定温度の変化を Fig.9 および Fig.10 に示す。

Fig.9 より、それぞれの射出速度で大きな変化は見られないが、 $V_i=100\text{mm/s}$  の場合は  $T=3\text{s}$  付近で他の射出速度よりも大きな値になった。また、射出速度が上がると最大型内温度が上がっていることが分かる。これは、せん断発熱により型内温度が上がったためと思われる。

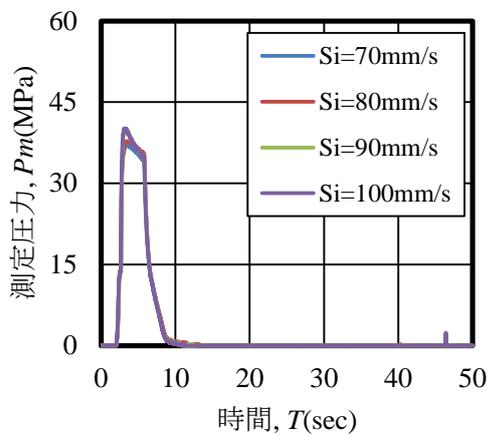
射出速度と最大型内測定圧力および最大金型測定温度の関係を Fig.11 に示す。Fig.11 より、それぞれの射出速度で大きな変化は見られない。Fig.10 より、射出速度が上がっても最大型内圧力の変化は見られなかった。



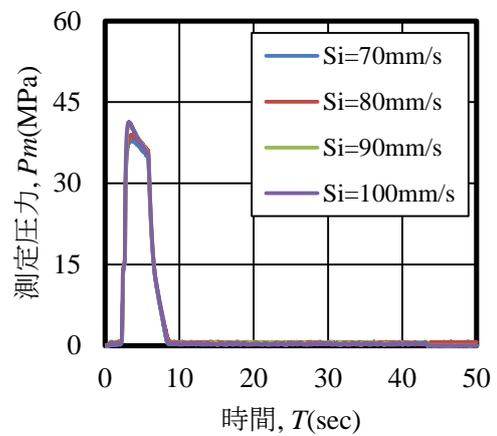
(a) P1 位置



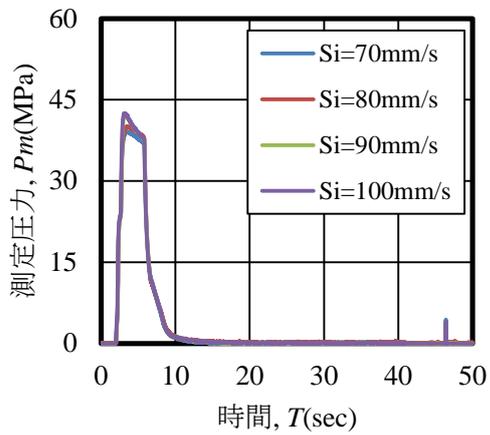
(b) P2 位置



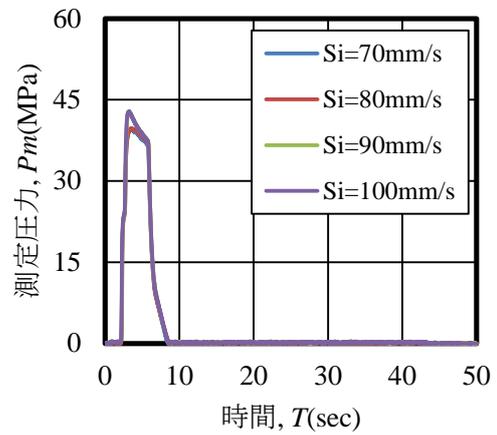
(c) P3 位置



(d) P4 位置

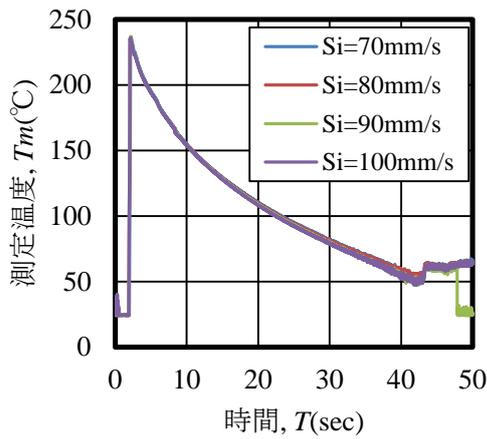


(e) P5 位置

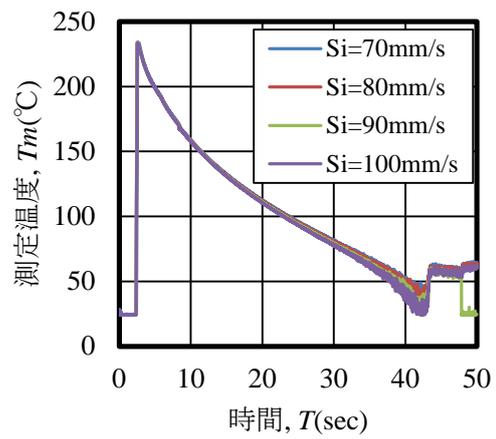


(f) P6 位置

Fig.9 位置ごとの時間経過による型内測定圧力の変化

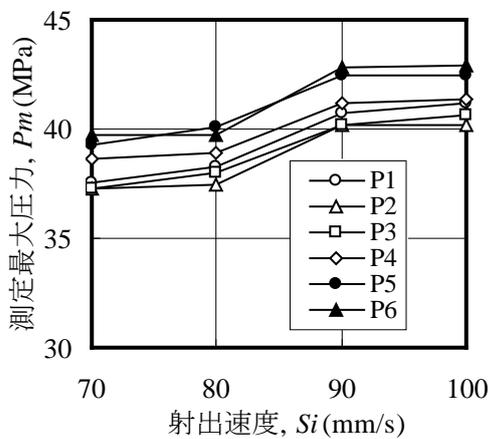


(a) T1 位置

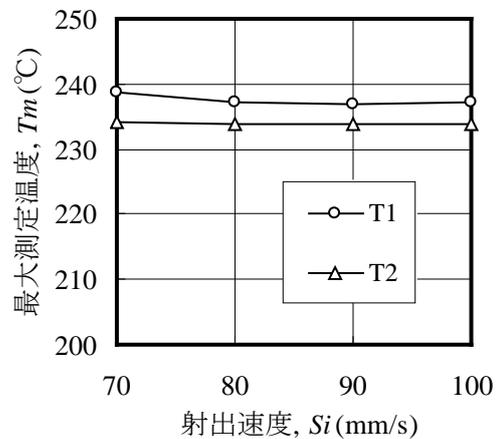


(b) T2 位置

Fig.10 位置ごとの時間経過による金型測定温度の変化



(a) 最大型内測定圧力



(b) 最大金型測定温度

Fig.11 射出速度と最大型内測定圧力および最大金型測定温度の関係

#### 4. 金型入子の加工表面性状とゲート断面積が型内圧力と型内温度に及ぼす影響

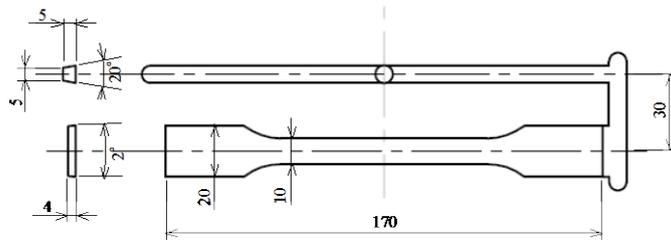
##### 4. 1 緒言

樹脂射出成形は、最も一般的な樹脂の成形方法の1つであるが、成形中の樹脂の挙動は複雑で、把握することは困難である。樹脂の流動挙動は、ランナーおよびゲートの断面積や形状によって変化することは、成形性の変化や成形品の成形不良などによって知られている。

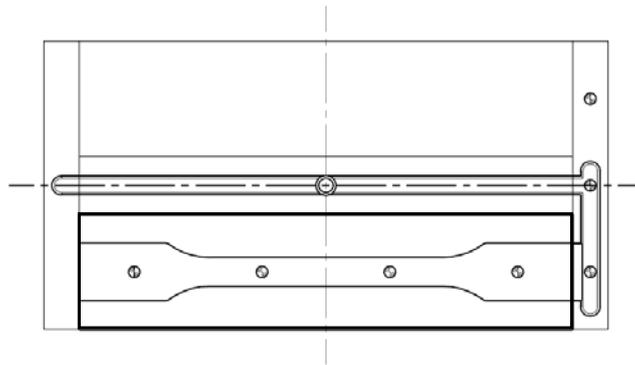
本研究では、金型のキャビティの加工表面性状およびゲートの断面積を変化させ、樹脂射出成形金型に圧力センサおよび温度センサを設置することで、金型のキャビティ加工表面性状およびゲートの断面積の変化による金型内部の測定圧力および測定温度の変化を調査した。

##### 4. 2 実験方法および条件

第3章で用いた同様の材料および実験装置を用いて、キャビティの加工表面性状の違いによる成形時の金型キャビティ表面の圧力および温度の変化を調査した。成形品および交換入子の形状を Fig.12 に示す。また、入子の加工性状を Fig.13 に示し、それらの表面粗さを Table 3 に示す。さらに、それらの加工性状の異なる入れ子を用いて作製した成形品の表面粗さを Table 4 に示す。

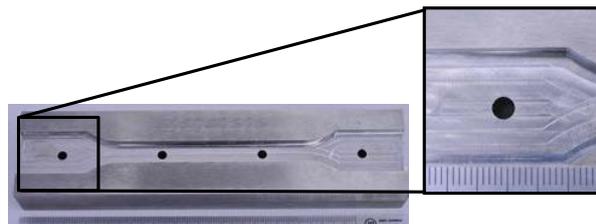


(a) 成形品の形状

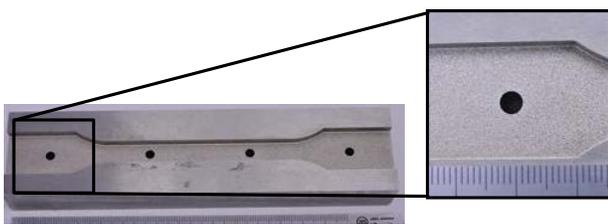


(b) 交換入子

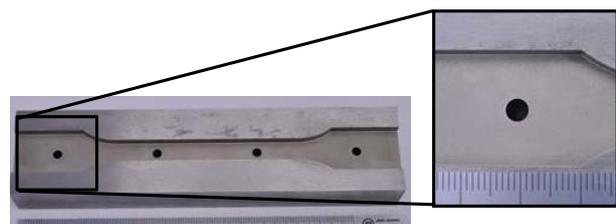
Fig.12 成形品および交換入子の形状



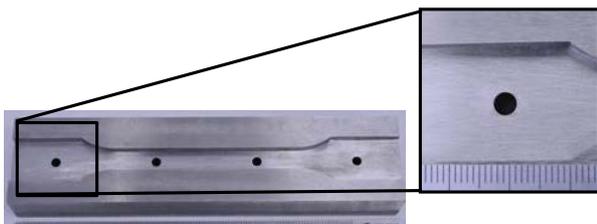
(a) 切削加工



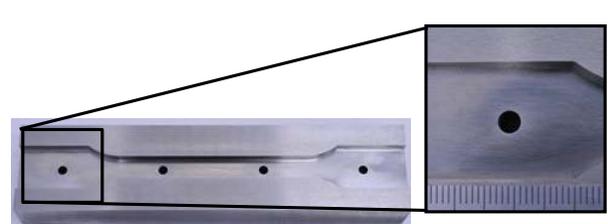
(b) 粗放電面



(c) 精密放電面



(d) 粗磨き面



(e) 精密磨き面

Fig.13 表面加工性状の異なる入子

Table 2 入子の加工性状と表面粗さ

		切削加工	放電加工	磨き加工
(a)	切削面	0.21 $\mu$ mRa	—————	—————
(b)	粗放電面	→	3.32 $\mu$ mRa	—————
(c)	精密放電面	→	1.43 $\mu$ mRa	—————
(d)	粗磨き面	→	→	0.10 $\mu$ mRa
(e)	精密放電面	→	→	0.03 $\mu$ mRa

Table 3 加工性状の異なる入れ子を用いて作製した成形品の表面粗さ

		切削加工	放電加工	磨き加工
(a)	切削面	0.20 $\mu$ mRa	—————	—————
(b)	粗放電面	→	3.62 $\mu$ mRa	—————
(c)	精密放電面	→	1.34 $\mu$ mRa	—————
(d)	粗磨き面	→	→	0.10 $\mu$ mRa
(e)	精密放電面	→	→	0.03 $\mu$ mRa

射出成形条件を Table 4 に示す。射出成形条件を変更する際に、データ収集しない成形を 2 回行った後、3 回の射出成形を行い、データを採取した。また、圧力センサおよび温度センサのサンプリング時間は 10ms とした。3 回計測した圧力データの最大値を最大射出圧力として評価した。

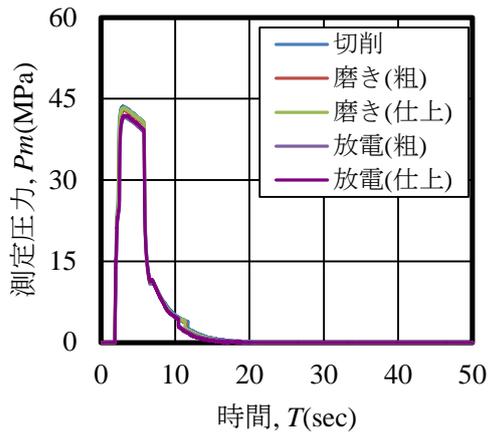
Table 4 射出成形条件

成形圧力, $P_i$ (MPa)	50
射出速度, $V_i$ (mm/s)	60
最大射出時間, $T_i$ (s)	3
シリンダー温度, $T$ (°C)	240
保圧, $P_s$ (MPa)	0
保圧時間, $T_s$ (s)	0
試行回数, $N$	3
データ採取時期	型閉め開始時
サイクル時間, $t$ (s)	50

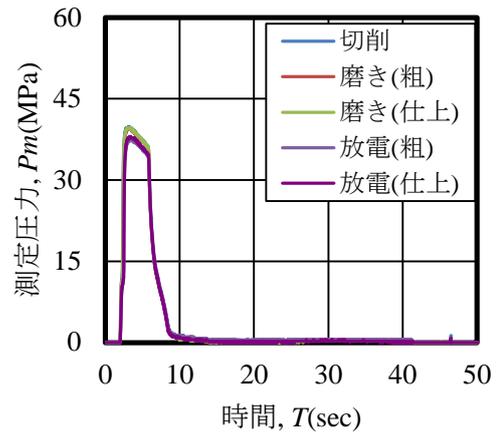
#### 4. 3 実験結果および考察

##### (1) 金型入子の表面性状の影響

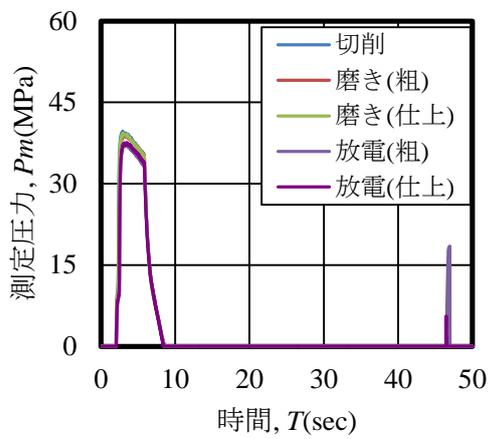
金型入子の表面性状の違いによる各測定位置での測定圧力の時間変化を Fig.14 に示す。Fig.14(a)より、スプルー直下の型内圧力は  $T=2s$  付近で急上昇し、最低成形時間  $T_i=3s$  間、高い値を保持しつつ緩やかに降下したのちに  $T=7s$  付近まで急降下し、 $T=15s$  付近までは緩やかに降下している。Fig.14(c)~(f)より、粗放電加工面のみ  $T=46s$  付近で大きく圧力が上昇している。これは、加工表面が非常に粗く、側面の離型抵抗が大きいためであると考えられる。



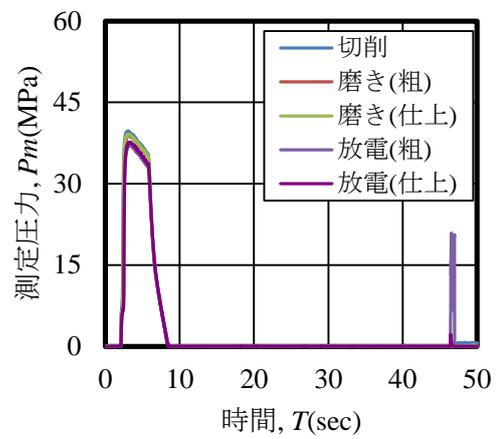
(a) P1 位置



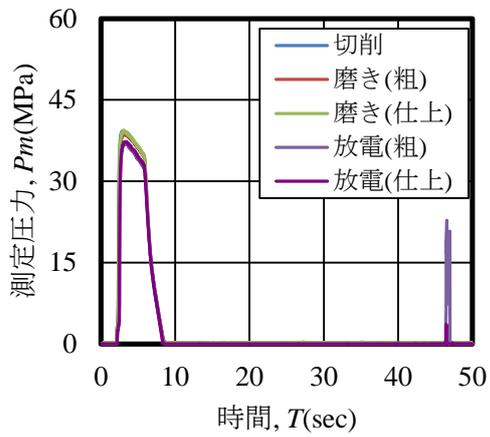
(b) P2 位置



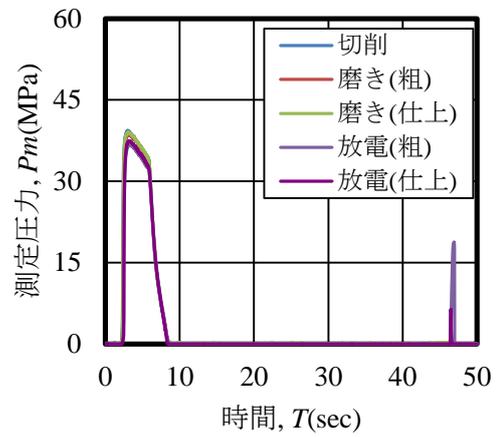
(a) P3 位置



(b) P4 位置



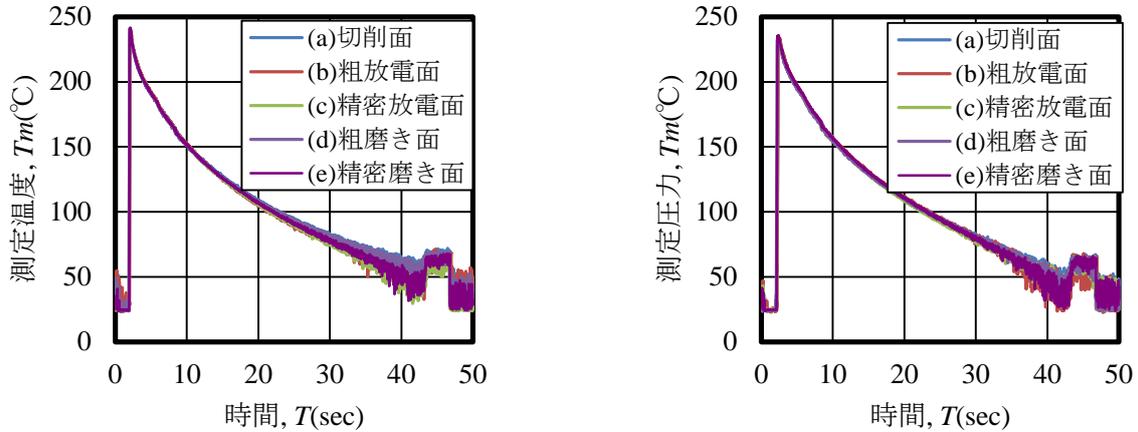
(a) P5 位置



(b) P6 位置

Fig.14 位置ごとの表面性状の違いによる測定圧力の変化

位置ごとの表面加工性状の違いによる測定温度の変化を Fig.15 に示す. 全ての表面加工性状において, 測定温度の大きな違いは見られなかった.

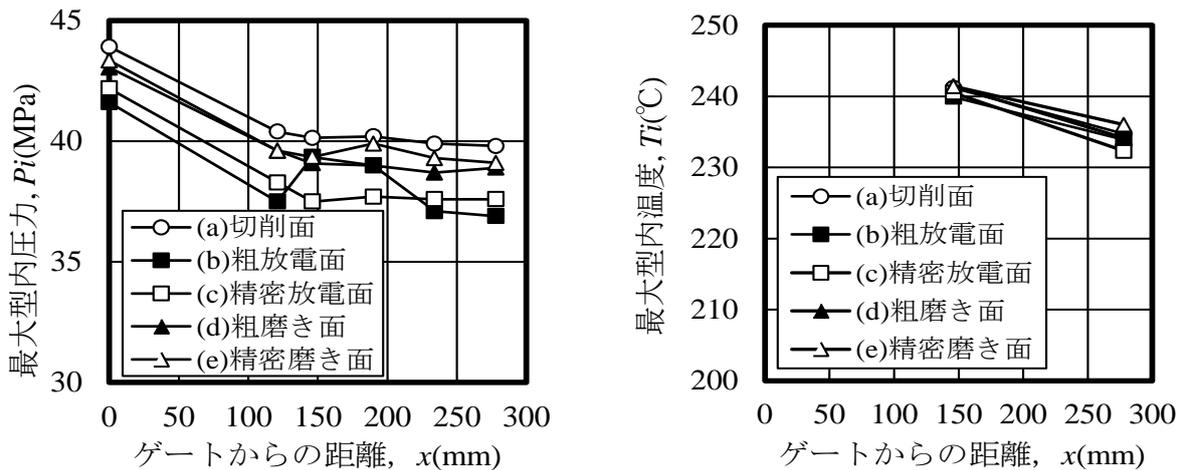


(a) T1 位置

(b) T2 位置

Fig.15 位置ごとの表面性状の違いによる測定温度の変化

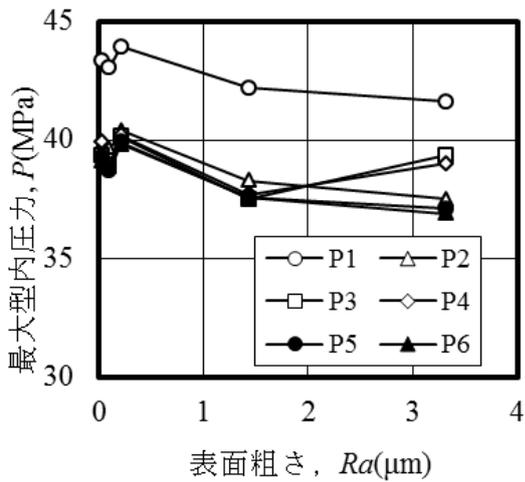
金型入子の表面加工性状の違いによる最大型内圧力および最大型内温度の測定位置の変化を Fig.16 および Fig.17 に示す. Fig.16 より, 最大型内圧力はゲートから離れるほど低下傾向を示すが, (a)切削面 > (e)精密磨き面 > (d)粗磨き面 > (b)精密放電面 > (c)粗放電面の順に大きいことが分かった. (b)粗放電面のみ, P<sub>3</sub>と P<sub>4</sub>位置で最大型内圧力が急増したが, これは金型表面が粗く, 流動抵抗が大きくなったためであると考えられるが, (e)精密磨き面は表面粗さが小さいが型内圧力は大きく, 複雑な成形挙動であると言える. 一方, Fig.17より, 引張試験片の両端部で最大型内温度差は金型入子の加工表面性状の差異よりも大きくなった.



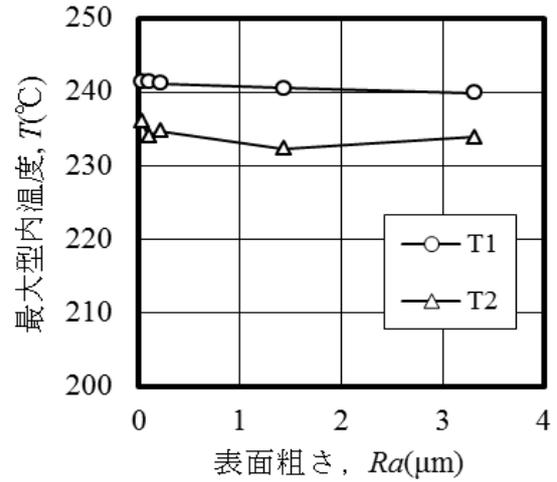
(a) 最大型内圧力

(b)最大型内温度

Fig.16 金型入子の加工方法が型内圧力・金型温度に及ぼす影響



(a) 最大型内圧力



(b) 最大型内温度

Fig.17 金型入子の表面粗さが型内圧力・金型温度に及ぼす影響

(2) ゲート断面積の影響

ゲート幅およびゲート厚さとゲート断面積の関係を Table 6 に示す. ゲート断面積の違いによる型内最大測定圧力および型内最大測定温度の変化を Fig.19 に示す. Fig.19 (a)より, P1 および P2 ではゲート断面積が減少すると最大測定圧力が増加していることが分かる. 一方, P3 から P6 ではそれぞれの位置による変化は見られないが, ゲート断面積が減少すると最大測定圧力も減少していることが分かる. ゲート断面積 A が 30mm より大きい場合は, P1 以外はほぼ同様の値を示すが, 30mm より小さい場合は P1 および P2 が上昇し, P3~P6 は降下していることが分かった. これは, ゲート断面積が小さくなることにより圧力が上昇したためと考えられる. また, Fig.19(b)より, 断面積が小さくなると最大型内温度は上昇する傾向にあるが, T2 では大きくばらついており, 複雑な温度変化をしていると言える.

Table 6 ゲート幅およびゲート厚さとゲート断面積の関係

ゲート幅 W(mm)	ゲート厚さ T(mm)	ゲート断面積 A(mm <sup>2</sup> )
1	1	0.91
10	1	9.91
20	1	19.91
10	3	29.21
20	3	59.21

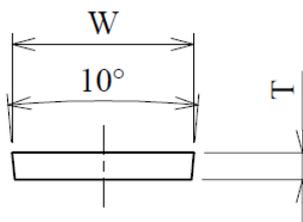
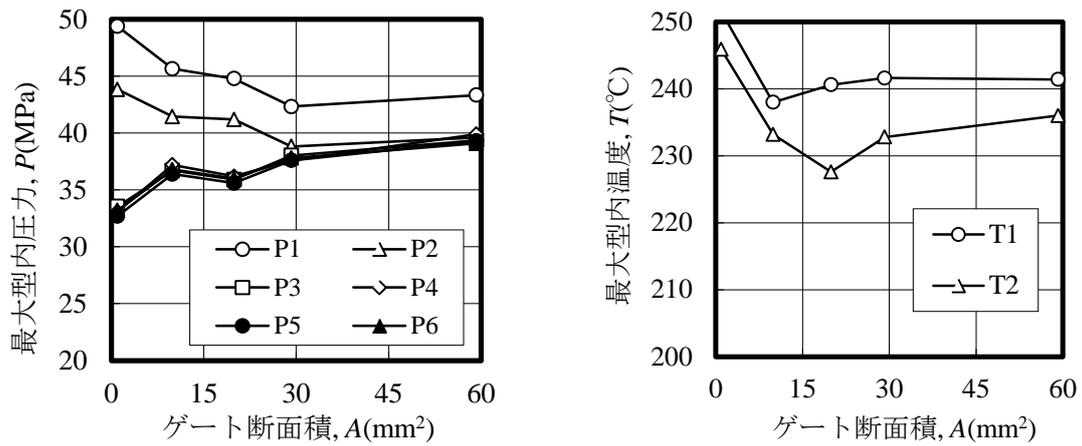


Fig.18 ゲートの断面形状



(a)最大型内圧力 (b)最大型内温度  
 Fig.19 ゲートの断面積が型内圧力と金型温度に及ぼす影響

## 5. まとめ

本研究は、金型内に温度センサおよび圧力センサを挿入した金型を用いて射出成形を行い、金型入れ子の加工表面性状が射出成形されたプラスチック成形品の圧力および表面温度に及ぼす影響を調査した結果、以下の知見が得られた。

- (1) 同一の成形条件下では、センサ位置による型内圧力の変化は見られず、型内圧力の分布はゲートからの距離やランナーの長さに関係なく、ある程度均一に分布した。
- (2) 型内温度については、流動末端に近づくほど低下する傾向を示した。これは、プラスチックの熱が金型に熱伝達しているためである。
- (3) 成形圧力が変化すると型内圧力は著しく変化し、型内温度は緩やかな変化を示した。成形圧力の変化により型内温度が変化することは、樹脂のせん断発熱によるものである。また、射出速度が変化すると型内圧力は緩やかな変化を示し、型内温度は変化を示さなかった。
- (4) 金型入れ子の加工性状を種々変化させて、射出成型中の型内圧力および温度計測を実施した結果、加工法の違いにより型内圧力に影響が見られたが、金型の表面粗さとの関係は一義的ではなく、複雑な成形挙動を示すことが分かった。
- (5) 加工性状の変化による型内温度の変化は小さく、型内温度による金型の加工性状を評価することは困難であることが分かった。
- (6) ゲート断面積がある一定値より大きくなると、圧力はほぼ一定の値となり、差異が見られないため評価対象とすることが適していないことが分かった。また、断面積の変化による温度変化は複雑で評価することは困難であることが分かった。