

# 超音波による射出成形金型の寸法測定と成形品の固化挙動

東京農工大学 工学部 機械システム工学科

助手 堀 三計

(平成4年度研究開発助成 AF-92013)

## 1. 研究の背景

CDやレンズ等の高精度・高品質部品に射出成形品が使われるようになり、射出成形加工に対して高精度・高品質化への要求が高まってきた。しかし、樹脂の収縮や金型の変形のため成形品の寸法精度を $\mu\text{m}$ オーダーにすることは容易ではない。金型キャビティの寸法形状は鉛をキャビティ内に入れてプレスして測定しているため、金型へ高い圧力が作用したときの変形挙動を求めることができないのが現状である。また、組合せ金型では金型の接合面で変形が生じるため、負荷時のキャビティ寸法は無負荷時とは異なることが明らかにされている。一方、成形時の樹脂の収縮量については、樹脂の特性を考慮したCAE解析でほぼ明らかとなっており、金型キャビティ寸法と成形品との間の寸法誤差についても、CAE解析でほぼ明らかとなっている。このため、射出成形製品の寸法精度を向上させるには、金型キャビティ内へ圧力が負荷したときのキャビティ寸法を精度良く測定することが重要である。

また、成形品の品質は金型キャビティ内に充填された樹脂の固化挙動に大きく依存する。このため、品質を向上するためには、成形中の固化挙動を十分に把握する必要がある。しかし、金型内の樹脂の固化挙動の観察は、熱電対で金型キャビティ内樹脂の厚さ方向の温度分布を測定する方法<sup>(1)</sup>、透明なアクリル樹脂を透明な窓をつけた金型で成形したときの固化状況を光学的に測定する方法<sup>(2)</sup>があるに過ぎず、その他の樹脂に関してはCAEで推定するだけで、実験的に観察された例が無いのが現状である。

そこで本研究は、金型キャビティ内に圧力が負荷されたときのキャビティ寸法、及び、金型キャビティ内樹脂の固層発達挙動を金型の外部より超音波で測定する方法について検討した。また、超音波による寸法計測の応用として、従来測定が困難であった小径穴のダイス内径の測定を試みた。

## 2. 測定原理

図1に示す3種類の媒質からなる物体に超音波を投射すると、超音波は境界面Iで一部が反射し、残りが媒質IIに透過する。さらに、媒質IIに透過した超音波は境界面IIで一部が反射し、残りが媒質IIIに透過する。境界面Iでの反射率は、

$$RE = (Z_1 - Z_2)^2 / (Z_1 + Z_2)^2 \dots\dots\dots (1)$$

$R = (Z_1 - Z_2) / (Z_1 + Z_2) \dots\dots\dots (2)$ となる。ここで、 $Z_1$ は媒質1の音響インピーダンス、 $Z_2$ は媒質2の音響インピーダンス、 $RE$ はエネルギー反射率、 $R$ は音圧反射率である。なお、音響インピーダンス $Z$ は、媒質の音速 $C$ と密度 $\rho$ から $Z = \rho C$ で求められる。例えば、 $Z_2$ が0の場合は反射率は1となり超音波は境界面で全反射する。また、 $Z_1$ と $Z_2$ が等しい場合には反射率は0となり、全ての超音波が透過する。以上のように、音響インピーダンスが異なる媒質間の境界面で超音波は反射する。表1に音響インピーダンスの一例を示す。

また、媒質2の厚さ $L$ は、その音速 $V$ と超音波が媒質2を伝播する時間 $T$ 、つまり、反射波 $B_1$ と $B_2$ の時間間隔 $T$ により、

表1 各種材料の音響インピーダンス

| Material     | Acoustic impedance $Ns/m^3$ |
|--------------|-----------------------------|
| Steel        | $45.3 \times 10^6$          |
| Polyethylene | $1.74 \times 10^6$          |
| Water        | $1.50 \times 10^6$          |
| Air          | $0.0004 \times 10^6$        |

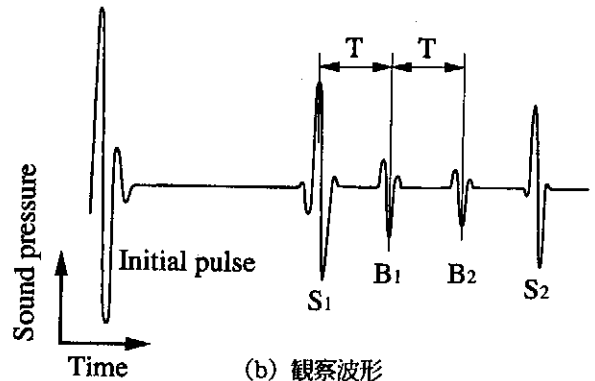
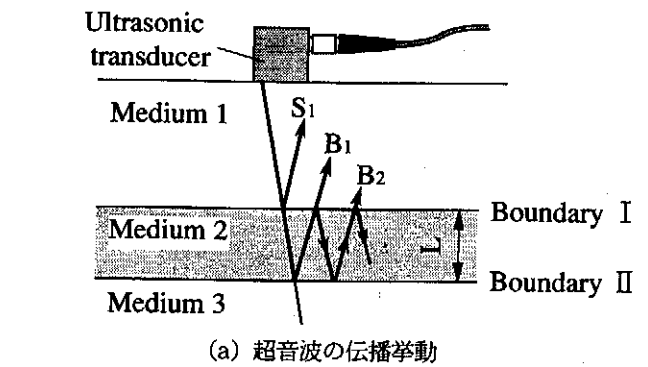


図1 パルス反射法による超音波の伝播挙動

$$L = VT/2 \dots \dots \dots (3)$$

で求められる。ここで、音速が既知であれば、反射波の時間間隔  $T$  を測定すれば媒質 2 の厚さ  $L$  を求めることができる。

### 3. 実験装置及び方法

図 2 に本研究で使用した金型の概略を示す。金型は直径 80mm または 150mm、厚さ 2mm または 1mm の円盤状のキャビティを持ち、その中心にダイレクトゲートがある。固定側金型には、キャビティ内の圧力を測定するために、直径 80mm の金型ではキャビティ中心から 16mm と 35mm の位置に、直径 150mm の金型では 15mm と 65mm の位置に直径 2.5mm の水晶圧電式圧力計を取り付けた。また、固定側金型の外表面に、振動子径 6.35mm、周波数 5MHz の超音波送受信子を取り付け、キャビティ寸法の測定や樹脂の固化挙動の観察を行った。なお、使用した樹脂は高密度ポリエチレンである。

キャビティ寸法の測定では、直径 80mm、厚さ 1mm のキャビティ内に手動式油圧ポンプで油を満たして加圧し、超音波が油を伝播する時間  $T$  を測定して式 (3) より厚さを求めた。なお、油の音速が温度により変化するため、実験中はキャビティ内の油温が一定となるようにした。

### 4. 実験結果及び考察

#### 4.1 射出成形金型の寸法測定

まず、超音波を使った寸法測定の測定精度を調べるために、厚さ 1mm のブロックゲージを厚さ 10mm のブロックゲージに重ねて得られた段差量の測定を行った。なお、ブロックゲージの表面粗さ  $Ra$  は  $0.004 \mu m$  である。超音波は段差の上方から水を伝播媒体として段差に向けて投射し、

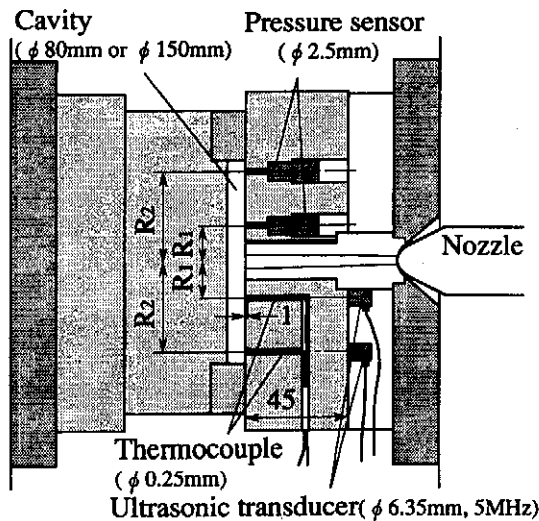
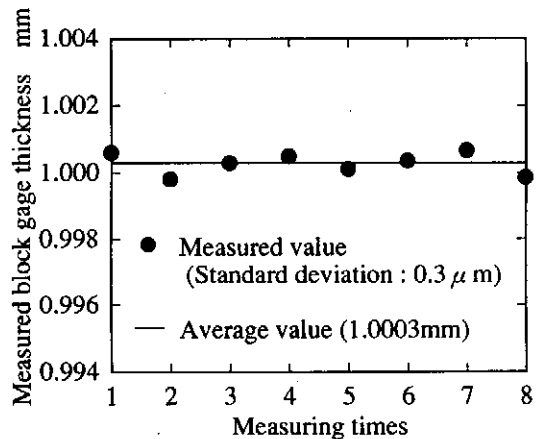


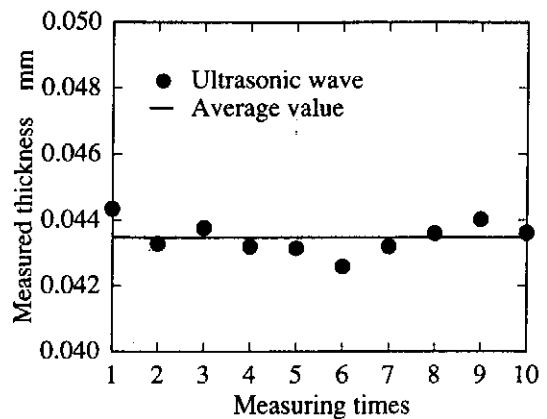
図 2 金型概略

厚さ 1mm 及び 10mm のブロックゲージ表面からの反射波の時間間隔を測定して段差量を求めた。結果を図 3 (a) に示す。横軸は測定回数、縦軸は段差量である。超音波で測定された段差量の平均値は  $1.0003mm$ 、標準偏差  $0.3 \mu m$  となった。なお、測定値の平均値が 1mm よりも大きくなったのは、ブロックゲージのすりあわせが十分ではなかったためと思われる。さらに、研削加工で得られた段差量を測定した結果を図 3 (b) に示す。表面粗さ  $Ra$  は  $0.24 \mu m$  である。同図より、測定値の標準偏差は約  $0.7 \mu m$  となり、測定値のばらつきは表面粗さの影響を受けることが分かった。しかし、金型キャビティ表面のように研削あるいは研磨された表面では、 $\mu m$  オーダーで寸法を測定できることが明らかとなった。

金型内のキャビティ厚さを測定した結果を図 4 に示す。横軸はキャビティ中心からの距離、縦軸はキャビティの厚さである。なお、中心から 20mm まではスプルーがあるために測定できなかった。同図はキャビティ内の圧力が 0Pa で、型締め力を変えた場合の結果である。つまり、射出前のキャビティ形状に相当する。同図に示されるように、本研究で使用した金型のキャビティ形状は、中心部のキャビティ



(a) ブロックゲージによる段差



(b) 研削による段差

図 3 本測定法の測定精度

厚さが薄く、周辺部が厚い形状であることが分かった。さらに、型締め力が増すにつれてキャビティ厚さが薄くなる結果が得られた。図5にキャビティの平均厚さと型締め力の関係を示す。同図からも型締め力が増すとキャビティの平均厚さが薄くなることが明らかである。しかし、型締め力が111kNから363kNへ増してもキャビティ厚さは約10  $\mu$ m 薄くなるだけで、その変化量は僅かであった。図6に油圧によりキャビティに内圧を負荷し、キャビティ厚さを測定した結果を示す。なお、型締め力は193kNである。同

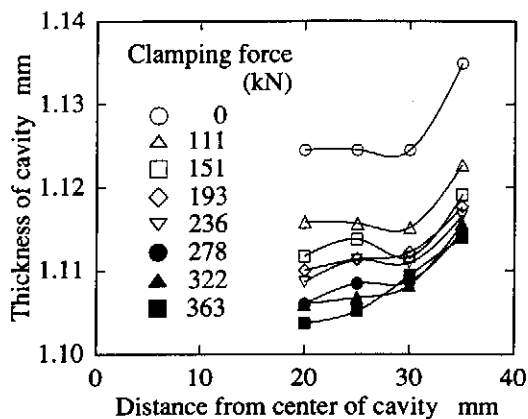


図4 キャビティ厚さ分布

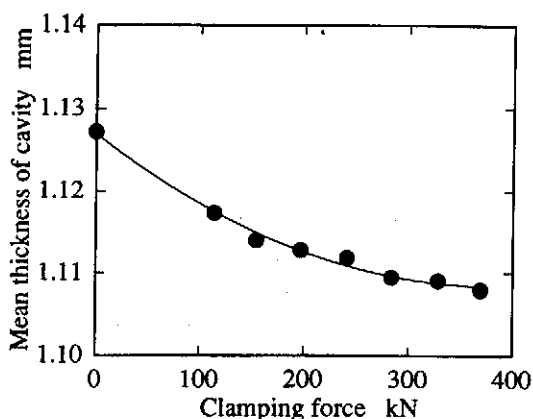


図5 型締め力とキャビティ平均厚さ

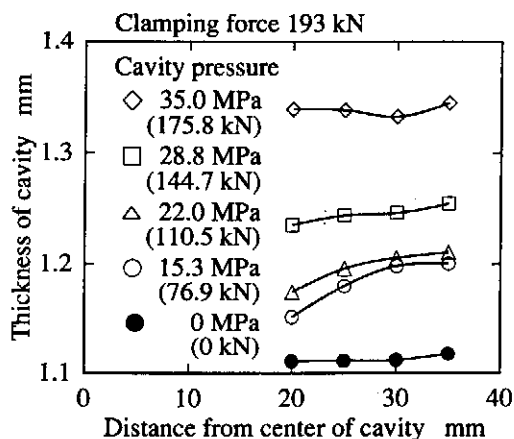
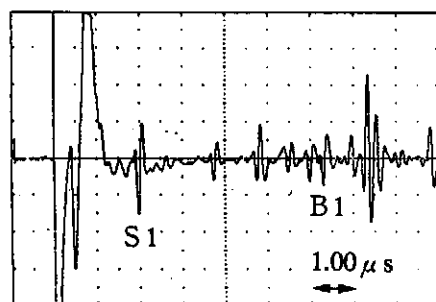
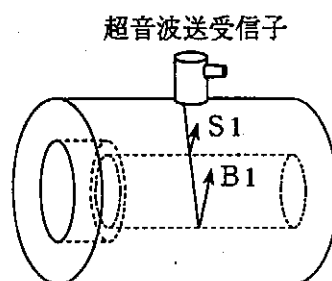


図6 キャビティ厚さ分布 (キャビティ内圧負荷時)

図に示されるように、キャビティ内圧力が低いとキャビティ厚さは中心が薄く、周辺が厚い形状となっているが、キャビティ内圧力が増すと均一化することが分かった。さらに、キャビティ内圧力が0MPaから15.3MPaとなると、つまり金型を押し開く力が76.9kNとなると、キャビティの厚さが数十  $\mu$ m 厚くなり、型締め力に比べてキャビティ内圧力がキャビティ厚さに及ぼす影響が大きいことが明らかとなった。従って、射出成形中の金型キャビティの厚さの変化は、型締め力の変化だけではなく、充填された樹脂により加えられる内圧の影響を明らかにする必要があることが分かった。

次に、この超音波による寸法計測方法を使って小径の穴の径を測定した結果を図7に示す。同図 (a) に示すように、穴に水を満たして、外表面に超音波送受信子を取り付けて測定した結果、(b) に示すような超音波反射波が得られた。



超音波反射波形

図7 小径穴測定結果

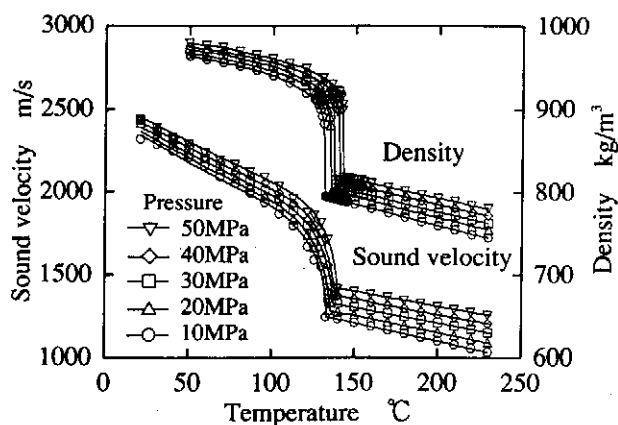


図8 音速、密度と温度、圧力の関係

この反射波のS1とB1との時間間隔と水の音速から穴径を求めた結果3.181mmとなり、3mm程度の小径の穴径を超音波で測定できることが明らかとなった。

#### 4.2 成形品の固化挙動

結晶性樹脂である高密度ポリエチレンの音速や密度と温度、圧力の関係を図8に示す。同図に示されるように、音速と密度の値は樹脂の温度が低くなると大きくなり、特に融点付近ではその値が大きく変化することが明らかとなった。これは、樹脂の固化に伴い急激に結晶化が進んだためである。この結果より、高密度ポリエチレンの音響インピーダ

ンス（音速×密度）は熔融状態と固化状態では大きく異なることが分かった。つまり、固層と溶融層の境界面で超音波が反射し、反射波形が観察できると考えられる。そこで、成形中に観察された超音波反射波形の一例を図9に示す。金型キャビティの直径は80mm、厚さ2mmである。同図に示されるように、射出前は樹脂が金型キャビティ内に充填していないため、キャビティ表面からの反射波だけが観察される。次に、溶融した樹脂が金型キャビティ内に充填されると、超音波の一部は樹脂に伝播し、移動側金型のキャビティ表面で一部が反射し、その反射波B1、B2が観察され

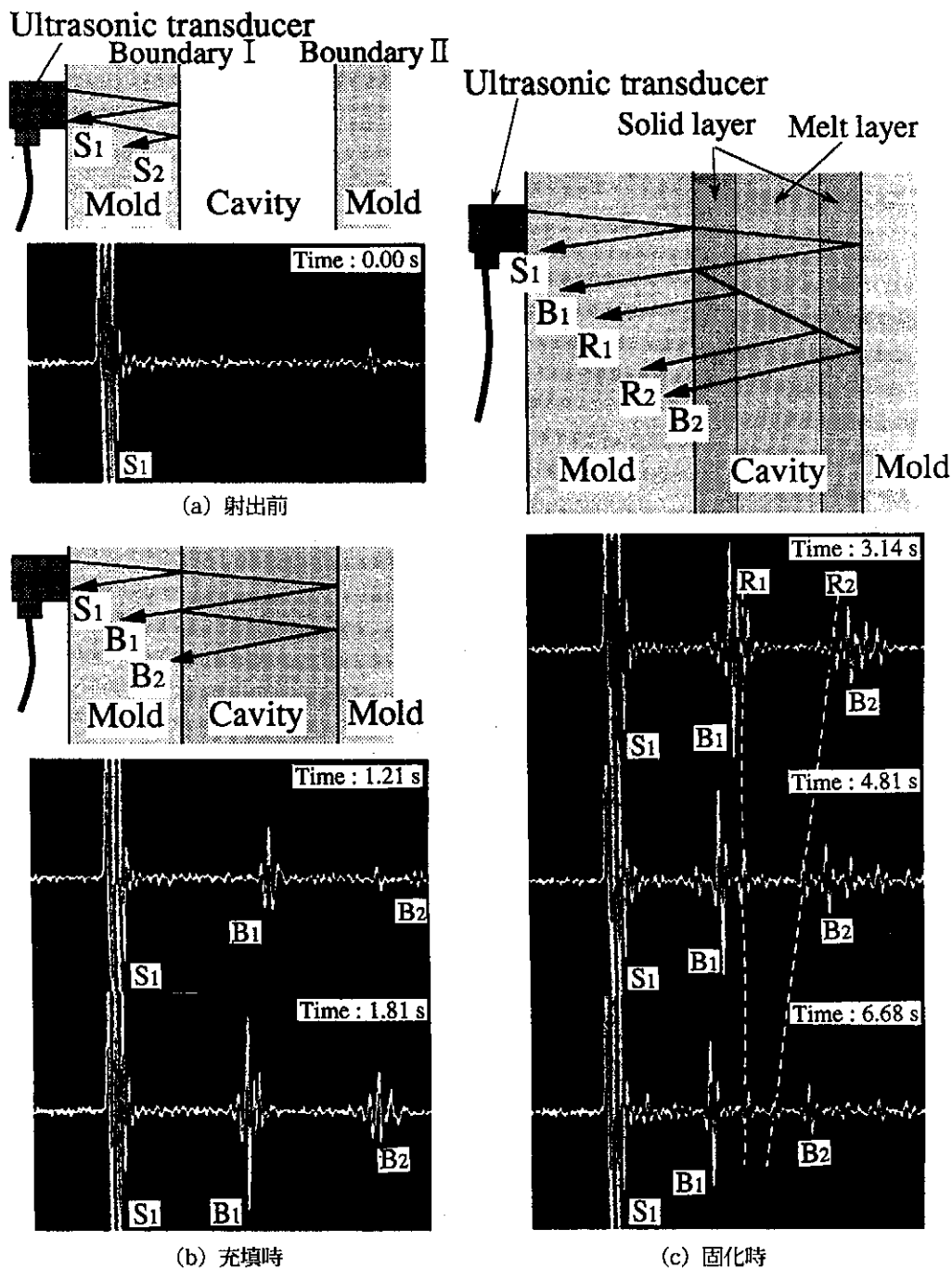


図9 成形中の超音波反射波形

る。さらに、充填された樹脂が固化し始めると、B1とB2の間に固層と溶融層の境界面からの反射波R1、R2が観察されることが明らかとなった。そこで、反射波R1、R2の時間間隔と溶融状態の樹脂の音速から固化層の厚さを下式のようにして求めた。

$$L_s = L_c - (V \cdot T / 2) \dots\dots\dots (4)$$

但し、Vは溶融状態の樹脂の音速、TはR1とR2の時間間隔である。ここで、図8において、高密度ポリエチレンでは融点以上の温度では温度や圧力の変化による音速の変化が小さい。そこで、本研究では溶融状態の高密度ポリエチレンの音速を一定と仮定して固化層の厚さを求めた。具体的には、本研究における射出条件では、成形中の金型内の圧力は図10に示されるように、樹脂充填後は約16MPaで一定となることが分かった。また金型内の溶融樹脂温度が約190℃から145℃の間で変化したことから、溶融樹脂の平均音速は1150m/sから1230m/sまで変化したと考えられる。そこで、本研究では平均音速を一定（圧力16MPa、温度160℃での音速1200m/s）として固層を求めた。なお、音速を一定と仮定した場合の誤差は数%であると考えられる。以上のように固層の発達挙動を求めた結果を図11に示す。同図はキャビティ直径80mmの場合である。横軸

は射出開始からの時間、縦軸は固層厚さである。同図に示されるように、キャビティ直径が小さく、測定点が近いために測定位置による固化挙動の違いは観察できなかった。そこで、キャビティ直径150mmの金型を使って得られた結果を図12に示す。同図に示されるように、中心から65mm、つまりゲートから65mmの位置の方が15mmの位置よりも固化速度が速いことが分かった。これは、ゲートから遠いほど樹脂が流動する際に冷却されるため、さらに、ゲートに近いほど保圧時にゲートから溶融樹脂が樹脂が僅かに充填されるために、ゲートに近い方が固化速度が遅くなったものである。次に、金型温度による違いを比較するために、中心から35mmの位置での固化層発達挙動を図13に示す。同図より、金型温度が低いと固層の発達が早いことが分かった。

以上のように、結晶性樹脂では融点付近で音響インピーダンスが急激に変化するために、金型内で固化するとき固層と溶融層との境界面で超音波の一部が反射し、その反射波の時間間隔を測定することにより固層の発達状態を検出できることが明らかとなった。

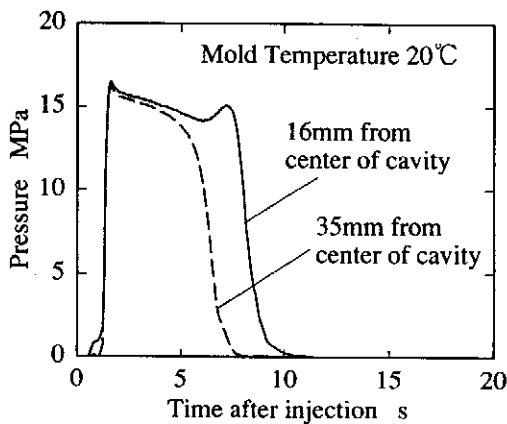


図10 キャビティ内圧力挙動

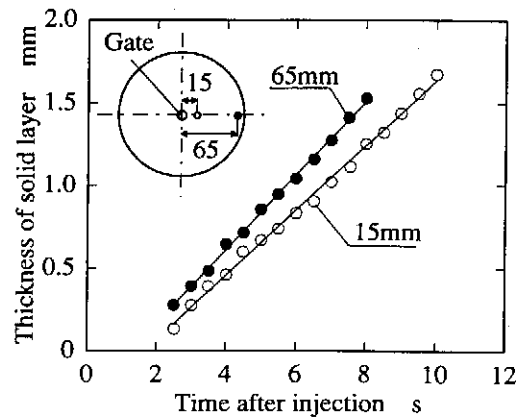


図12 固化層発達挙動（キャビティ直径φ150mm）

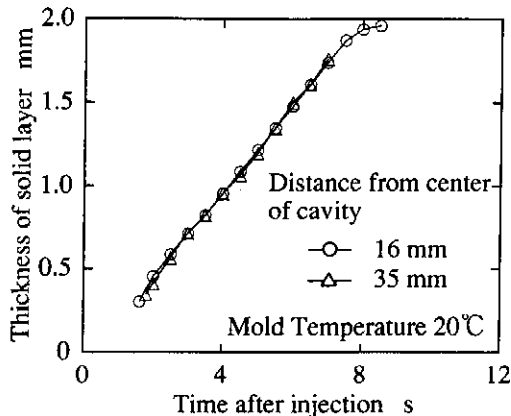


図11 固化層発達挙動（キャビティ直径80mm）

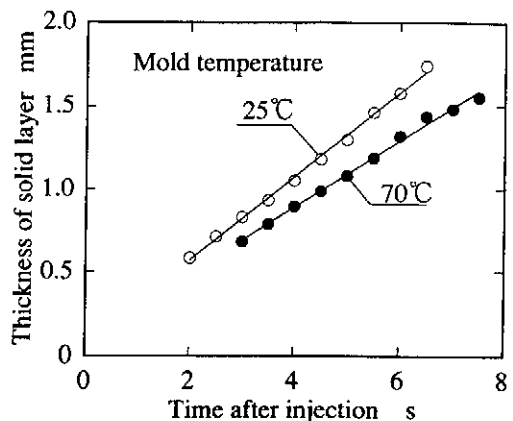


図13 固化層発達挙動（金型温度による影響）

## 5. 結言

本研究より、以下の結果が得られた。

- (1) 超音波を使って金型キャビティ寸法やダイなどの小径穴の寸法を測定できた。
- (2) 成形中の金型は射出圧力により大きく変形することが分かった。
- (3) 結晶性樹脂では融点付近で音速と密度が大きく変化するために、固層と熔融層の音響インピーダンスが大きく異なり、その境界面で超音波が反射することが分かった。また、この反射波の時間間隔を測定することにより、射出成形中の樹脂の固層の発達挙動を求めることができた。

最後に、本研究は(財)天田金属加工機械技術振興財団の研究開発助成を受けて行ったものであることを付記し、関係各位に甚大なる謝意を表します。

## 参考文献

- (1) Yokoi H., et al : PPS-5 Preprint, (1989) 140
- (2) 黒崎、佐藤、金 : 成形加工、4、4 (1992) 256

## 発表論文

- (1) N.NISHIWAKI, S.HORI, et al. : Measurement of Workpiece Thickness on Surface Grinding Machine by Ultrasonic Wave, Proc. of 1st ABTEC (1993)
- (2) N.NISHIWAKI, A.CUI, M.KONNO, and S.HORI : Observation of Solidification Behavior in Mold by Using Ultrasonic Technology, Proc.PPS'94 (1994)