

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

堀 三計*

1. まえがき

C Dやレンズ等の高精度・高品質部品にプラスチック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。このため、金型等を機械加工する際にも高い精度が要求されるようになってきた。しかし、現在のところ、工具磨耗や工作機械の熱変形などにより設定した切込量と実際の切込量が必ずしも一致せず、高精度で仕上げるためには加工を中断して寸法計測を行う必要がある。このため、加工中に工作物の寸法や表面粗さを測定できれば金型などの機械加工を高精度・高効率で行えると思われる。他方、樹脂の収縮や金型の変形のため成形品の寸法精度を μm 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、射出成形時のように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溶融樹脂の固化挙動に大きく依存する。このため、成形品の品質を向上するためには、金型内溶融樹脂の固化挙動を十分に把握する必要がある。しかし、金型内溶融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⁽¹⁾、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⁽²⁾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。

そこで本研究では、機械加工中の工作物の寸法や表面粗さを超音波で測定する方法について明らかにするとともに、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の測定方法についても検討した。さらに、金型キャビティ内溶融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、及び、成形品の厚さを超音波で測定する方法についても検討した。また、超音波計測の応用として、表面波による金属同士の接触状態の検出を試みた。

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

表1 各種材料の音響インピーダンス

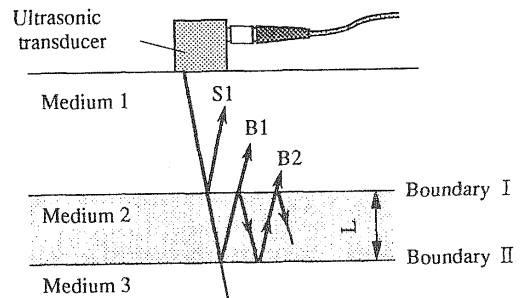
| Material | Acoustic impedance Ns/m ² |
|--------------|--------------------------------------|
| Steel | 45.3 × 10 ⁶ |
| Polyethylene | 1.74 × 10 ⁶ |
| Water | 1.50 × 10 ⁶ |
| Air | 0.0004 × 10 ⁶ |

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⁽³⁾は、

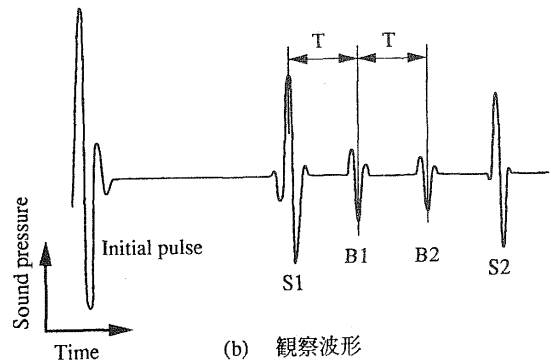
$$R_E = (Z_1 - Z_2)^2 / (Z_1 + Z_2)^2 \quad (1)$$

$$R = (Z_1 - Z_2) / (Z_1 + Z_2) \quad (2)$$

となる。ここで、 R_E はエネルギー反射率、 R は音圧反射率、 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 ρ 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。



(a) 超音波の伝播挙動



(b) 観察波形

図1 測定原理概略

また、媒質2の厚さLはその音速Vと超音波が媒質2を往復伝播する時間T、つまり反射波B1とB2の時間間隔Tにより、

$$L = V \cdot T / 2 \quad (3)$$

で求めることができる。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. 超音波による工作物の寸法・表面粗さ測定⁽⁴⁾⁽⁵⁾及び金属同士の接触状態検出

機械加工中の金型等の工作物の寸法形状や表面粗さを加工中に測定できれば、加工精度を容易に向上させることができる。また、測定のために加工を停止する必要がなくなるために、加工時間を短縮することができる。そこで、本研究では先ず、超音波を使って金型などの工作物の寸法形状や表面粗さを加工中に測定する方法について検討した。測定には超音波探傷法のパルス反射法を利用した。

また表面波を使って、金属同士が接触した状態の検出を試みた。

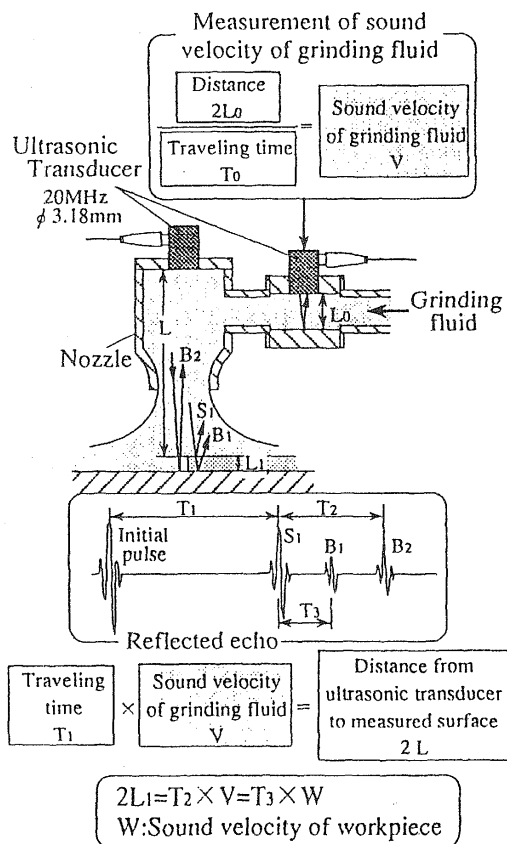


図2 寸法測定装置概略

3.1 寸法測定

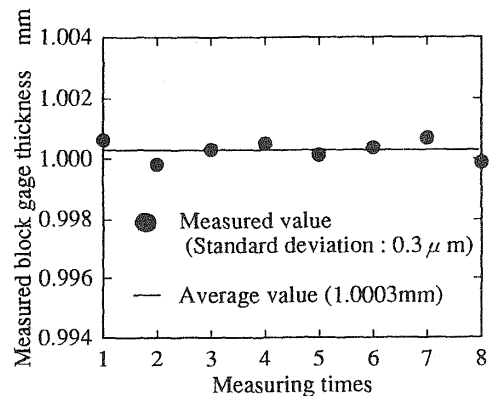
寸法測定の概略を図2に示す。同図に示すように、加工液を超音波の伝播媒体として工作物へ超音波を投射すると、加工液と工作物との境界面で超音波の一部が反射し、同図中に示すような反射波が得られる。ここで、超音波送受信子と工作物表面までの距離Lは次式から求められる。

$$L = V \{1 - (U/V)^2\} T1 / 2 \quad (4)$$

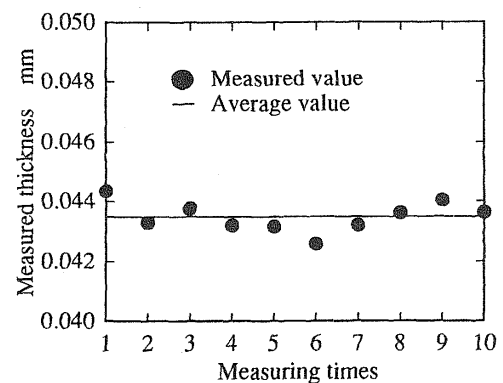
なお、T1/2は超音波が超音波送受信子から工作物表面まで伝播する時間、Uは加工液の流速、Vは加工液の音速である。一般的に、加工液の流速は1m/s程度であり、加工液として使用される水や鉱油の音速が1400m/s前後⁽³⁾であるので、U/Vは1/1000以下となる。このため、距離Lは近似的に、

$$L = V \cdot T1 / 2 \quad (5)$$

で求めることができる。なお、このとき距離Lを100mmとすると加工液の流速(1m/s)によって生じる誤差は0.1μm以下となる。また、伝播時間を0.5nsの精度で測定した場合



(a) ブロックゲージによる段差量測定結果



(b) 研削加工により得られた段差量測定結果

図3 寸法測定結果

には、距離 L を100mmとすると測定精度は $0.7\mu\text{m}$ となる。以上のように、超音波を使って μm オーダーで超音波送受信子と工作物表面との距離を測定することができる。さらに、一般に液体の音速は温度により変化するため、本方法では加工液の音速を測定しながら寸法測定を行った。なお、加工液の音速は、熱膨張率の小さいスーパーアンバーでできた段差量が 0.1115mm の段差部からの反射波の時間間隔を測定して求めた。

そこで、本方法で厚さ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 $0.004\mu\text{m}$ 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、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、式(5)を使って段差量を求めた。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 、標準偏差は $0.3\mu\text{m}$ となった。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合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 $0.24\mu\text{m}$ である。同図より、測定値の標準偏差は約 $0.7\mu\text{m}$ 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、 μm オーダーで寸法を測定できることが明らかとなった。

3.2 表面粗さ測定

表面粗さを測定するために図4に示すように、二つの焦点型の超音波送受信子を使用した。超音波送受信子の周波数は20MHzで、二つの超音波送受信子の間の角度は56度である。一方の超音波送受信子から超音波を工作物表面に投射し、表面で反射した超音波反射波を他方の超音波送受信子で受信し、反射波の強度を測定した。図5に測定結果を示す。縦軸は反射波高比 r で、 $r = h/h_0$ (h : 反射波の振幅、 h_0 : 反射波の最大振幅)から求められる値である。横軸は、超音波送受信子と測定面との間の距離である。同図に示されるように、反射波高比は超音波送受信子と測定面との間の距離だけではなく、測定面の表面粗さによっても変化することが分かった。そこで、同図を表面粗さと反射波高比との関係に再整理した結果、図6に示すように反射波高比は表面粗さが増すと減少することが明らかとなった。つまり、反射波の最大振幅 h_0 と、超音波送受

信子と測定面との間の距離が明らかであれば、反射波高比の値から表面粗さを求めることができることが分かった。以上のことから、超音波を使って表面粗さを測定できることが明らかとなった。

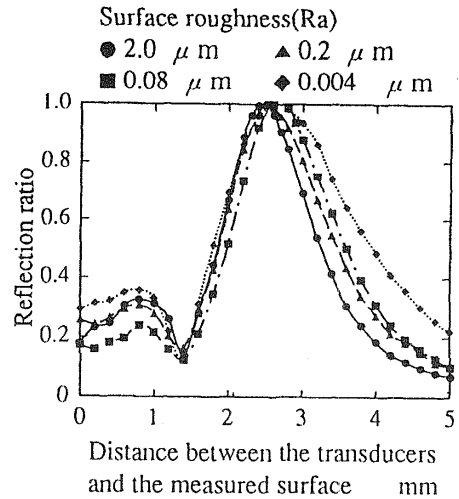


図5 測定面からの距離と反射波高比

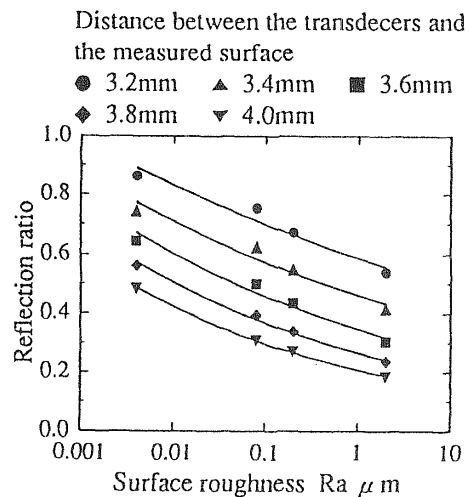


図6 表面粗さと反射波高比

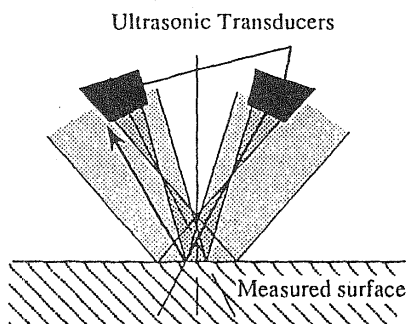


図4 表面粗さ測定装置概略

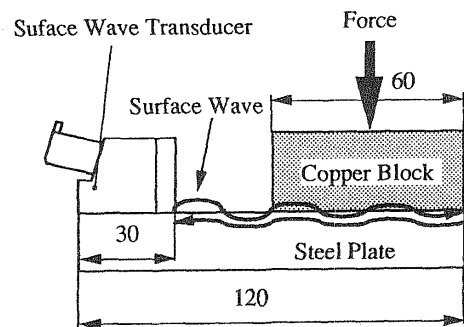


図7 表面波による接触状態検出概略

3.3. 表面波による金属接触状態の検知

図7に実験装置概略を示す。表面波用超音波送受信子は鋼平板上に置かれており、表面波は鋼平板の表面を伝播して鋼平板の端で反射し、表面波用超音波送受信子で受信される。実験ではこの鋼平板上に銅ブロックを置き、銅ブロックを鋼平板に押しつける圧力と鋼平板の端で反射してくる反射波の振幅について調べた。なお、使用した表面波羊腸音波送受信子の周波数は5MHzである。結果を図8に示す。横軸は銅ブロックと鋼平板との接触面圧、縦軸は反射波高比で、 $r = 1 - (h/h_0)$ (h : 反射波の振幅, h_0 : 接触面圧が0 Paの時の反射波の振幅) から求められる値である。なお、10回の負荷除荷を繰り返したときの反射波高比の挙動を示してある。また、鋼平板と銅ブロック接触面の表面粗さがRa0.22 μ mの場合とRa0.06 μ mの場合について実験を行った。同図に示されるように、接触面圧が増すと表面粗さや負荷除荷の回数に関係なく反射波高比が急増し、一定値に近づく挙動が得られた。これは、銅ブロックが平板に接触して押しつけられることにより鋼平板上を伝播する表面波が減衰したためである。以上のように、表面波を使ってその反射波高比の変化を調べることにより、平板上に他の物体が接触したことを検出できることが明らかとなった。

4. 射出成形金型のキャビティ寸法測定

超音波を使用して寸法を μ mオーダーで測定できることが明らかとなったので、型締め時及び射出圧力や保圧に相当した内圧が負荷されたときの金型キャビティ寸法の測定を行った。

図9に本研究で使用した金型の概略を示す。金型は直径80mm、厚さ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。固定側金型の外表面には、キャビティ寸法の測定を行うために振動子径6.35mm、周波数5MHzの超音波送受信子を取りつけた。キャビティ寸法の測定では、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を測定して前述の式(3)よりキャビティの厚さを求めた。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。

金型内のキャビティ厚さを測定した結果を図10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

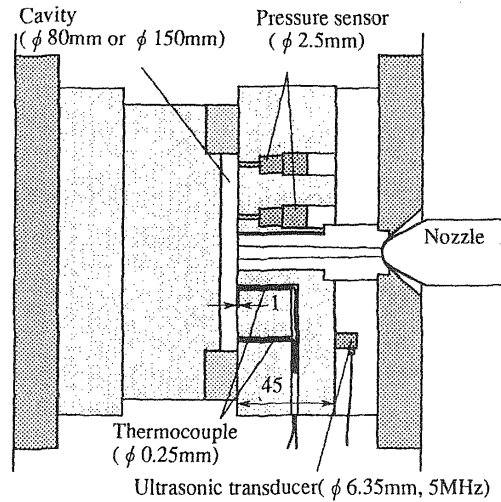


図9 金型概略

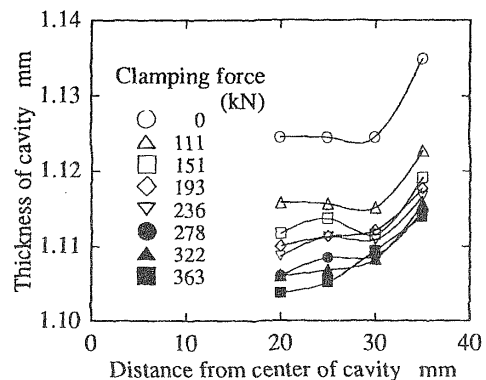


図10 キャビティ厚さ分布

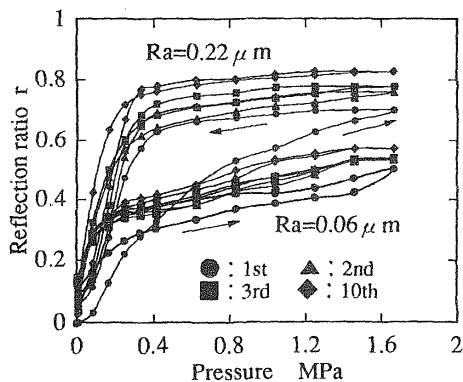


図8 接触面圧と表面波の反射波高比

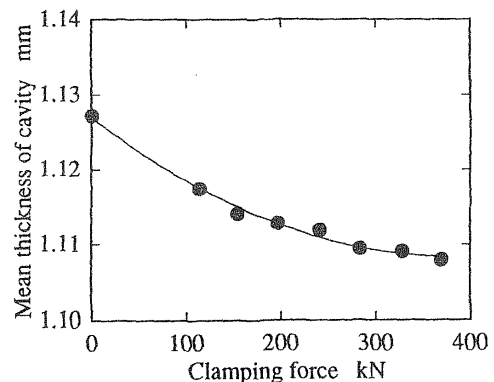


図11 型締め力とキャビティ平均厚さ

さである。なお、中心から20mmまではスプル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11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 $10\mu\text{m}$ 薄くなるだけで、その変化量は僅かであった。図12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 μm 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

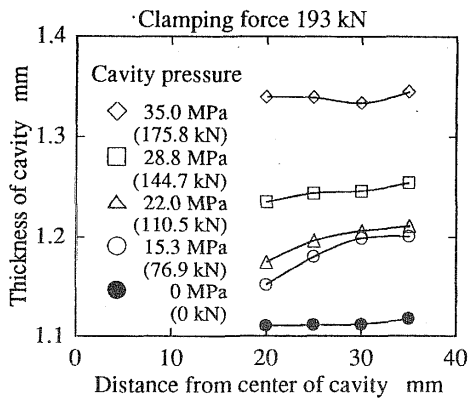


図12 キャビティ厚さ分布 (キャビティ内圧負荷時)

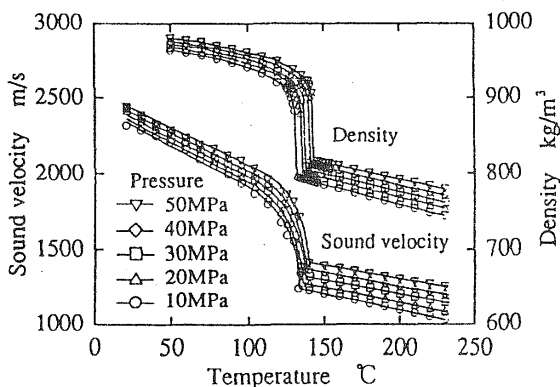


図13 高密度ポリエチレンの音速、密度、圧力、温度の関係

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。

5. 金型内溶融樹脂の固化挙動の検出と成形品の厚さ測定⁽⁶⁾⁽⁷⁾

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、図13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、固層と熔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を連続的に記録した例を図14に示す。使用した金型は図9に示したもので、キャビティ厚さは2mmで、超音波送受信子はキャビティ中心から18mmの位置に取り付けた。なお、使用した超音波送受信子は周波数5MHz、振動子径6.35mmである。同図(a)に示されるように射出開始約3秒後に、金型キャビティ内の樹脂を伝播して樹脂と金型との境界面から反射してきた反射波B2が現れており、超音波で測定している位置に樹脂が充填されたことが分かる。さらに、射出開始後約3秒からキャビティ内樹脂の固層と熔融層との境界面か

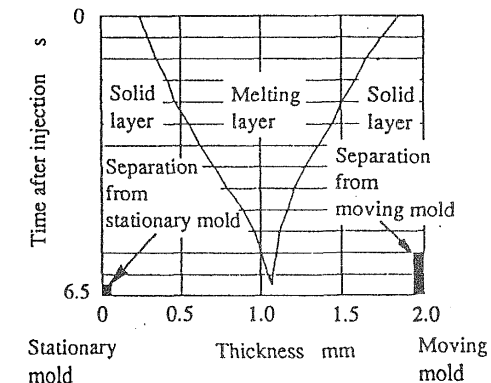
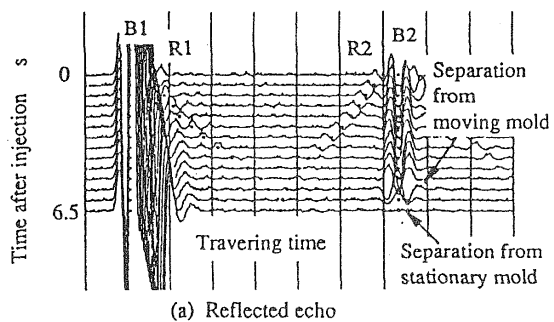


図14 金型内溶融樹脂の固化挙動

らの反射波Rを検出することができた。反射波B1とR1、またはB2とR2の時間間隔は金型内の固層厚さを表しており、この時間間隔が射出開始からの時間とともに大きくなっていることは、金型内で固層の厚さが厚くなっていることを示している。また、射出開始約11.5秒後に反射波B2が消えたことから、成形品が金型Iから剥離したことが示された。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層の厚さを下式のようにして求めた。

$$L_s = L_c - (V \cdot T / 2) \quad (6)$$

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13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ために、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樹脂充填後は約16MPaで一定とな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14(b)に示す。縦軸は射出開始からの時間、横軸はキャビティの厚さを表しており、実線は固層と溶融層の境界である。また、金型表面（横軸の値が0又は2.0mmの位置）に示した太い実線は、成形品が金型から剥離したことを表している。同図に示されるように、超音波を使って、成形中の固層厚さを測定できることが分かった。

次に、超音波探傷法の水浸法を応用してプラスチック射出成形品の厚さ分布を測定した一例を図15に示す。使用した超音波送受信子はビーム径がφ0.2mmの焦点型超音波送受信子である。測定した成形品形状は、同図中に示すよう

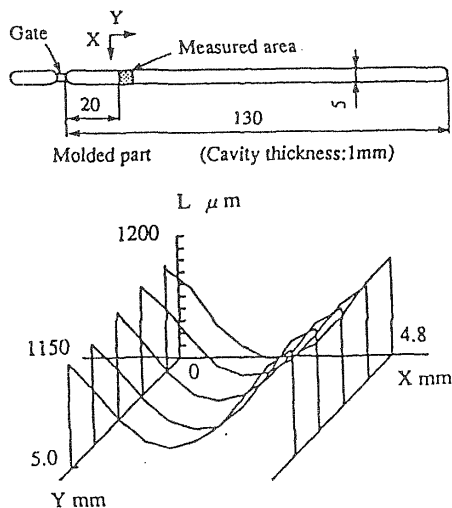


図15 プラスチック射出成形品の厚さ分布

に長さ130mm、幅5mm、キャビティ厚さ1mmのものである。同図に示されるように、成形品の厚さが幅方向の中央で薄くなる結果が得られた。これは、キャビティ内に流入してきた溶融樹脂は金型と接した部分から冷却されるため、中心部分の冷却が遅れ、結晶化度が高くなって収縮したためである。以上のように、従来測定が難しかったプラスチック成形品の厚さ分布を超音波を使ってμmオーダーで測定できることが明らかとなった。

6. あとがき

超音波を使用した寸法・表面粗さ測定、および成形中の金型内溶融樹脂の固化状態の測定について検討した結果、以下の結果が得られた。

- (1) 超音波を使って、加工中の金型などの工作物の寸法形状をμmオーダーで加工中に測定できることが分かった。さらに、二本の焦点型超音波送受信子を使用することにより、超音波を使って工作物の表面粗さを測定できることが明らかとなった。
- (2) 横波超音波を使用して金属の接触を検出できた。
- (3) 超音波を使って型締め時や内圧が加わった状態の金型キャビティ寸法を測定できることが分かった。
- (4) 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、固層と溶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。
- (5) 従来難しかったプラスチック成形品の厚さ分布を超音波を使ってμmオーダーで測定できた。

引用文献

- (1) Yokoi H., et al.: Measurement of Mold Melt-Temperature Profiles along Cavity Thickness, Proc. of PPS-5 (1989)140
- (2) 黒崎, 佐藤, 金: 射出成形の保圧過程に生じる金型内樹脂流動の可視化観察と成形品の残留歪みに与える影響, 成形加工, 4,4(1992)256
- (3) 日本学術振興会製鋼台19委員会編: 超音波探傷法, 日刊工業新聞社
- (4) N.NISHIWAKI,S.HORI,et al.: Measurement of Workpiece Thickness on Surface Grinding Machine by Ultrasonic Wave, Proc. of 1st ABTEC(1993)233
- (5) N.NISHIWAKI,S.HORI,et al.: Measurement of Workpiece Shape and Roughness by Wave during Grinding Process, Proc. of 2nd ABTEC(1995)215
- (6) N.NISHIWAKI,A.CUI,M.KONNO,andS.HORI: Observation of Solidification Behavior in Mold by Using Ultrasonic Technology, Proc. of PPS'94 (1994)182
- (7) 西脇, 堀, 鳥崎, 吉田, 峯尾: 超音波による成形品の音速分布, 厚さ分布の自動計測及び固化挙動の可視化, 成形加工'96, (1996)73