

超音波流動を利用した高分子液体の攪拌

村田頼信、木村 智、南川慶二、小山清人 (山形大・工)

1、はじめに

液体中に超音波を放射すると超音波流動と呼ばれるジェット状の流れが観察される¹⁾。この超音波流動は、超音波の減衰によるエネルギー密度の勾配に起因して起こると解釈されている²⁾。この超音波流動は、容器の外部から直接内部の液体を流動させることができるなど³⁾、応用面から新たな展開が期待できる。

射出成形工程において、金型内部に超音波流動を発生させ、高分子熔融体を局所的に攪拌できればウェルドラインなどの成形不良を除去し、成形品の品質向上につながると考えられる。これまで、無限領域における超音波流動の水中での可視化⁴⁾が行われており、超音波流動の発生機構が説明されている⁴⁾。また、高分子溶液中の超音波流動については、伝搬媒質である液体の粘性が超音波の吸収減衰源としての駆動力の発生と抵抗源としての流れを妨げる力の両方に作用することが報告されている⁵⁾。しかし、実際に金型内部における超音波流動を考察する場合、厚さが有限な領域における超音波流動を検討しなくてはならない。

そこで、本研究では、有限領域内で低粘度の高分子液体中に超音波流動を発生させ、懸濁法⁶⁾を用いてそのときの流れの可視化を行った。さらに超音波流動の流速分布を測定することによって、超音波流動におよぼす反射波の影響を調べた。

2、実験方法

超音波流動の可視化実験装置を図1に示す。可視化用の容器として、透明なパイプ（ポリカーボネイト：直径70mm）を鉄板に接着し、その内部に高分子溶液（シリコンオイル）を入れた。超音波発生源は直径10mmのPZT振動子とした。この振動子の共振周波数は1.1MHzである。振動子より周波数1.1MHzの超音波を鉄製のバッファ（直径26mm、長さ63mm）と鉄板（厚さ

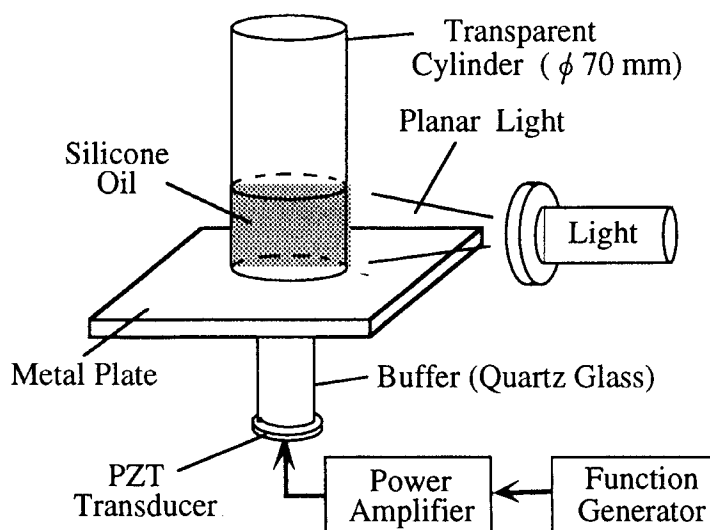


図1 シリコンオイル内の流動可視化システム

15mm) を介してシリコンオイル中に放射した。振動子への印加電圧は $165V_{p-p}$ 一定とした。超音波流動を可視化するために、トレーサーとしてHDPE粉（三井石油化学製Hi-zex Milion341L、球径 $300\mu m$ ）をシリコンオイル中に分散させた。また、可視化を行うために、容器の側面方向から平面光を当てた。

実験は、室温下で行った。超音波流動は、ビデオカメラで装置の正面から撮影し、ビデオに記録した。そして、テレビ画面から直接、トレーサーが一定区間を通過する時間を測定して流速を計算した。そして、高分子液体の厚み（深さ）と印加する電圧波形を変化させ、そのときの、超音波流動を観察した。

媒体として用いたシリコンオイル（信越化学工業社製、KF50）の構造式を図2に、密度、粘度、吸収係数、音速値を表1にそれぞれ示す。この材料を選択した理由は、高分子液体の透明性が高いこと

である。これは超音波流動の可視化をおこなう場合に、可視化を容易にする。また、水と比べて吸収係数値が高く、超音波流動が起こり易い。その上、粘度が低いので流動を妨げる力が小さい。

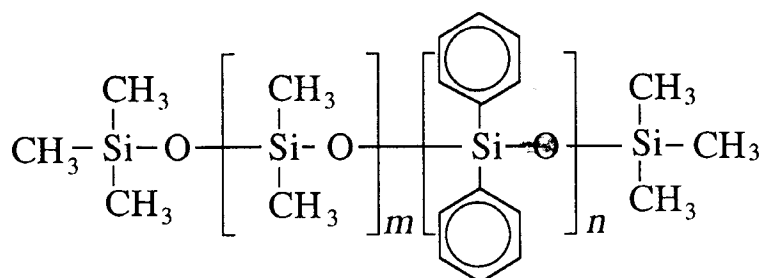


図2 シリコンオイルの構造式 ($m=53, n=3$)

表1 シリコンオイルの物性値

	Density (g/cm^3)	Viscosity (cpoise)	Sound Absorption α/f^2 (25°C) (neper·s ² /cm)	Sound Velocity (m/s) (25°C)
Silicone Oil	0.98~1.00	100	0.6×10^{-14}	980

3、結果および考察

図3は、印加電圧0, $165V_{p-p}$ のときの超音波流動の可視化写真（露出時間：10秒）とその概略図を示している。シリコンオイルの厚さは20mmとした。印加波形には連続波を用い、周波数1.1MHzで行った。超音波を放射していない場合、流動は観察されない。これに対し、印加電圧 $165V_{p-p}$ を振動子に印加し超音波を放射すると、試料内部に流れが発生した。しかし、流れは非常に乱れており、従来の超音波流動に見られるようなジェット状の流れとは異なっていることが示された。

図4は、シリコンオイルの厚さを変化させたときの厚さ方向における流速分布を測定したものである。シリコンオイルの厚さを20mm, 30mm, 40mmと変化させて実験を行った。いずれの場合についても印加電圧 $165V_{p-p}$ 、周波数1.1MHzの正弦連続波を高分

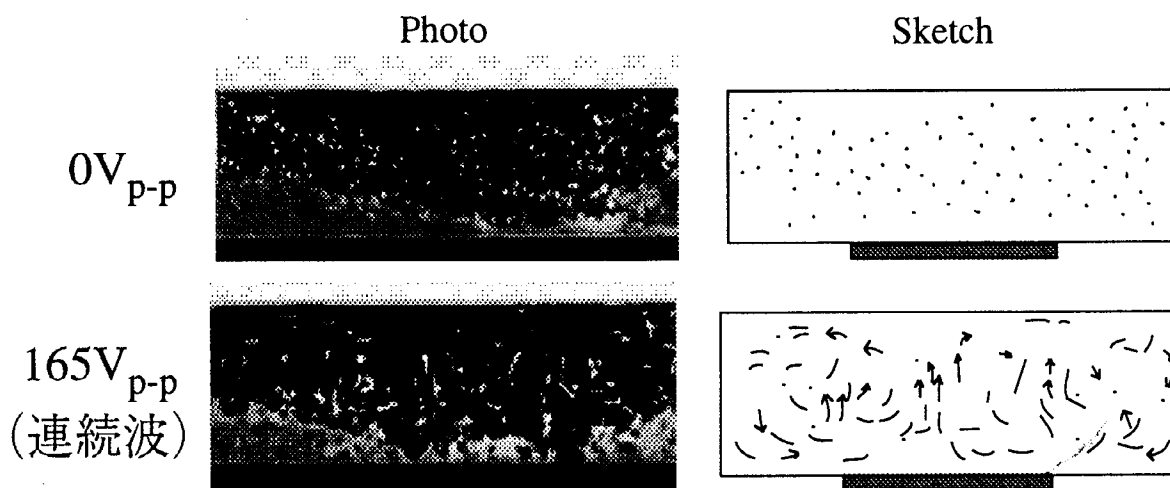


図3 超音波流動の可視化写真

子液体中に放射した。図4から、試料の厚さの変化にかかわらず、超音波流動が観察された。厚さが小さくなるにつれ、深さ方向の流速は僅かに遅くなった。また、流速の最大値は、厚さが大きくなるにつれ後方に移動することがわかった。

そこで、連続波を放射した場合、有限領域中に発生する超音波流動は反射波の影響を受けるのではないかと考え、ここで以下のような無次元化を行った。

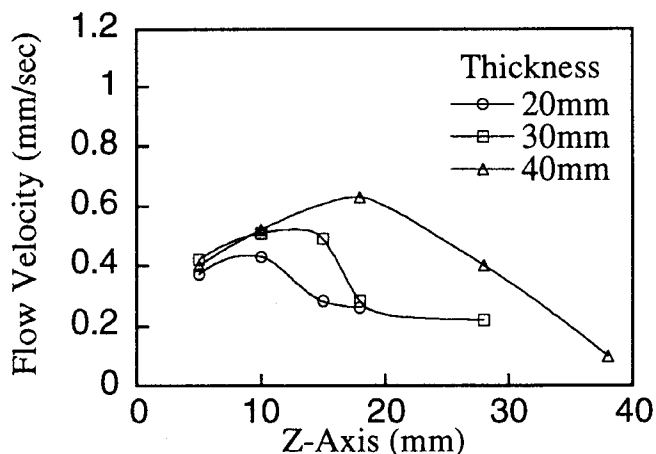


図4 厚さを変化させたときの深さ方向の流速変化 (連続波)

$$Z/d = (\text{深さ方向(mm)}) / (\text{試料の厚さ(mm)}) \quad (1)$$

$$V/V_{\max} = (\text{流速(mm/sec)}) / (\text{最大流速(mm/sec)}) \quad (2)$$

図4を上式に従って無次元化した結果を図5に示す。どの厚さにおいても最大流速値は、 $Z/d=0.4$ 付近に重なることが示された。このことから、厚さが有限な領域中に連続波を放射した場合、深さ方向の流速の最大値は、試料の底面付近ではなく、上面との中間部分となることがわかった。

次に、試料上面からの反射波の影響を除去する手段として、バースト波を用いることを考えた。印加電圧は、 $165V_{p-p}$ で連続波の場合と同一とした。バースト波40波を振動子から放射し、繰り返し周期 T を変化させて流速を測定した。また、実験時のシリコンオイルの厚さは20mm一定とした。

図6は、繰り返し周期 $T=110\mu\text{sec}$ 、印加電圧 $165V_{p-p}$ のときの超音波流動の可視化写真

(露出時間：10秒) とその概略図である。ジェット状の流れが発生していることが示された。このことよりバースト波を用いた場合、反射波の影響がなくなり、無限領域における超音波流動と同様な流れが発生することがわかった。

図7は、バースト波と連続波の深さ方向における流速分布の比較を示したものである。連続波の場合と比べてバースト波を用いたときの流速は大きい（連続波：0.43mm/

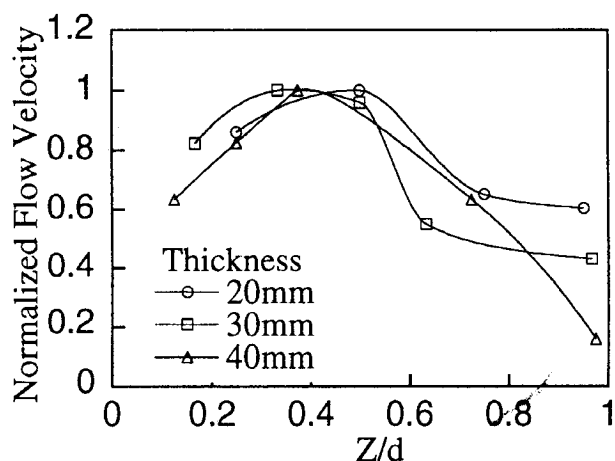


図5 規格化した深さ方向の流速変化（連続波）

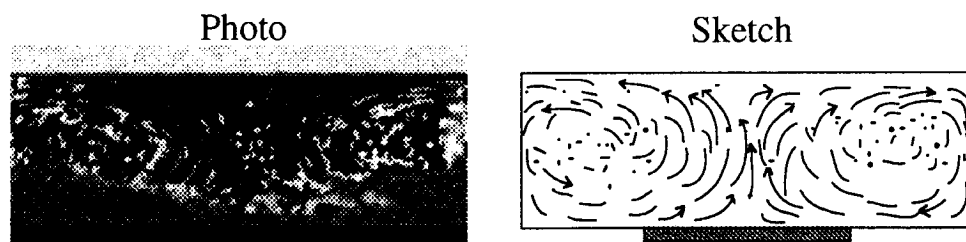


図6 超音波流動の可視化写真（バースト波）

sec, バースト波：1.10mm/sec) ことがわかった。また、流速の最大値は、連続波と比べてより音源側に近づいている（連続波：Z=10mm, バースト波：Z=5mm）ことが示された。図8は、Z=5mmにおけるバースト波と連続波の半径方向における深さ方向の流速の比較を示したものである。連続波の場合と比べてバースト波では、中心の流速が大きいことがわかった。

バースト波の繰り返し周期を変化させ、深さ方向の流速を測定した結果を図9に示す。繰り返し周期を60μsec, 110μsec, 160μsecと変化させ流速を測定した。その結果、最大流速はそれぞれ0.64mm/sec, 1.1mm/sec, 0.71mm/secとなった。このことから、繰り返し周期の違いによって流速が変化する結果が得られた。

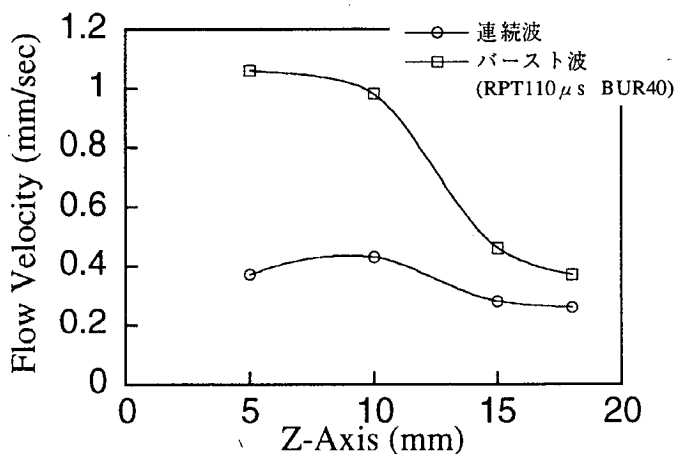


図7 印加電圧波形の違いによる深さ方向の流速変化

バースト波の繰り返し周期に対するそれぞれの流速を図10に示す。バーストの波の数は40一定とした。繰り返し周期 $36.8 \mu \text{ sec}(=40 \text{ 波})$ 時の流速は連続波の場合の流速を示す。この図から、繰り返し周期 $110 \mu \text{ sec}$ を頂点として、それより繰り返し周期の大きい領域においても、繰り返し周期の小さい領域においても流速は徐々に低下していることがわかった。

以下に厚さが有限な領域における超音波流動を考察する。従来、研究されてきた無限領域における超音波流動では、超音波流動の駆動力は時間平均エネルギー密度の勾配で示される。印加電圧が同一の場合、時間平均エネルギー密度は、連続波において最大となる。一方、バースト波を用いた場合、超音波を放射していない時間が存在し、時間平均エネルギー密度は連続波と比べて低下する。波の数を同じにした場合、時間平均エネルギー密度は、繰り返し周期が大きくなるほど低下する。このことから、無限領域における超音波流動では、時間平均エネルギー密度の最も大きい連続波が最も流速が大きく、バースト波において繰り返し周期が大きくなるほど流速は低下する。

しかしながら、図10に示すように厚さが有限な領域中に発生する超音波流動は、繰り返し周期が110

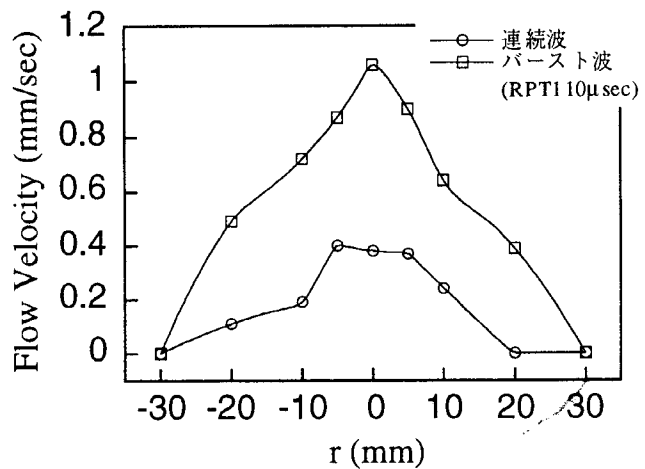


図8 印加電圧波形の違いによる半径方向の流速変化

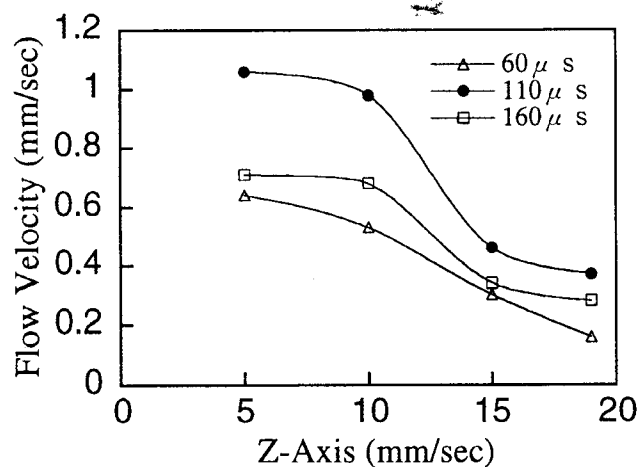


図9 繰り返し周期を変化させたときの深さ方向の流速変化

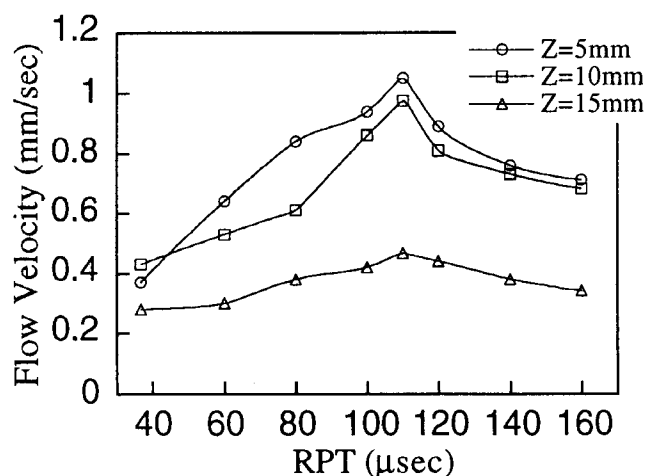


図10 繰り返し周期に対する流速変化

μsec より小さい領域では、流速は徐々に低下する。流速が低下する原因として、図11に示すように反射波の影響が考えられる。連続波において反射波の影響は最も大きくなる。このことは図3に示すように乱れた流れとして観察される。バースト波の繰り返し周期を大きくすることによって反射波の影響は低減され、流速の上昇につながっていると考えられる。反射波の影響は、繰り返し周期が $110\mu\text{sec}$ 以上の領域では反射波の影響は除去される。この領域では図6に示されるようなジェット状の流れが見られ、無限領域における超音波流動と同一に考えることができる。また、繰り返し周期の大きい領域では、時間平均エネルギー密度の低下にともなって、流速が低下している。

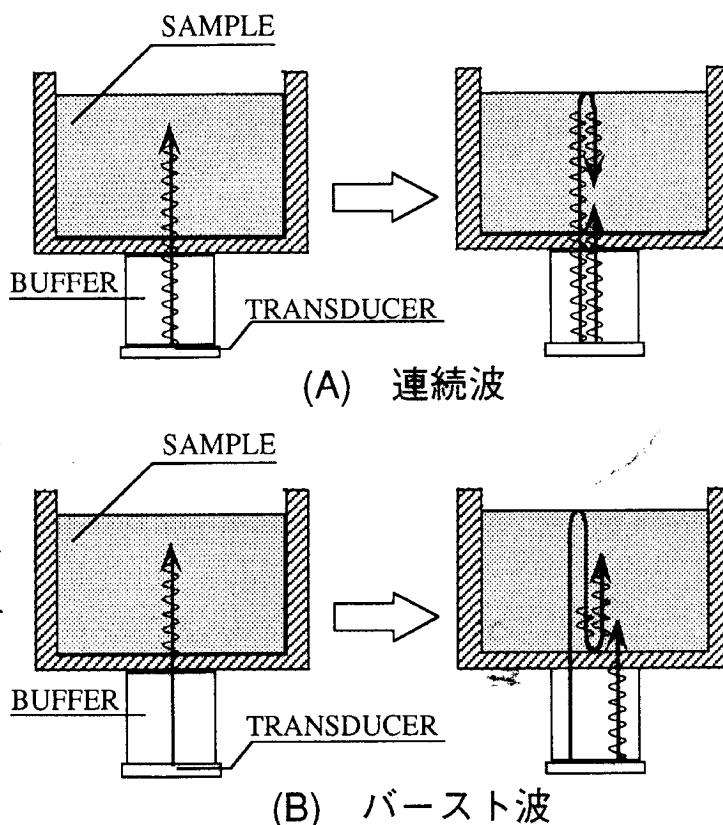


図11 連続波とバースト波の伝搬の比較

4. 結論

本研究では、シリコンオイルを使用して、その内部に発生する超音波流動の可視化を行った。また、その流速を深さ方向および半径方向について測定した。そして、試料の厚さと振動子に印加する電圧波形によって、どの様に超音波流動に影響するかを調べた。さらに、有限領域内で効率よく超音波流動を発生させるための条件を明らかにすることを試みた。

その結果、連続波を放射した場合に発生する超音波流動は、反射波の影響を受けるために乱れた流れが発生した。また、最大流速値は $0.4 \times (\text{試料の厚さ})$ 付近に現れ、厚さが小さくなるにつれて流速は僅かに遅くなった。これに対して、バースト波を用いることによって、局所的な流動が発生することを示した。また、バースト波の繰り返し周期の大きい領域では、反射波の影響は除去される。さらに、このとき無限領域における超音波流動と同一に考えられ、発生する超音波流動は時間平均エネルギー密度に依存する流動が発生することを示した。

【参考文献】

- 1) H.Mitome, *Jpn.J.Appl.Phys.*, 30-1, (1991)60 .
- 2) 実吉純一 他：超音波技術便覧（改訂新版）,日刊工業新聞社,(1980)p.123.
- 3) 木村 智 他：第38回音波の物性と化学討論会講演論文集（徳島）,(1993)p.19.
- 5) H.Mitome, A.Ishikawa, H.Takeda and K.Koyama, 13th.ISNA., 28-2, (1993)pp.53-60.
- 6) 三留秀人：第14回非線形音響研究会,(1990)pp.1-5.
- 4) 三留秀人：衝撃波シンポジウム,(1990)pp.1-6.