

単一気泡の強制駆動時における過渡応答について

◎村田嘉孝 渡辺好章 (同志社大・工)

1. はじめに

近年、水中微小気泡の音波入射に対する非線形挙動を積極的に利用しようとする試みがなされている。このような水中気泡の挙動を記述するモデルは古くから知られており報告例も多いが、その多くは気泡の定常応答部分の検討である。しかしながら、気泡の過渡応答は気泡の非線形挙動の生成機構の解明に役立つと考えられる。また、過渡応答は気泡を超音波応用計測に用いる際にも避けられない重要な問題である。そこで、これまでに筆者らは過渡応答に着目して気泡の非線形挙動を取り扱ってきた。前報告^{1) 2) 3)}では気泡の2倍周期振動の生成機構と成長過程について過渡応答に注目して検討を行い、鋭敏な初期値依存性の原因究明や自己の正帰還による2倍周期振動の成長が発生している事を報告した。また、時間変化を伴った強制振動の分析手法としてポアンカレ断面の時間変化を紹介し、

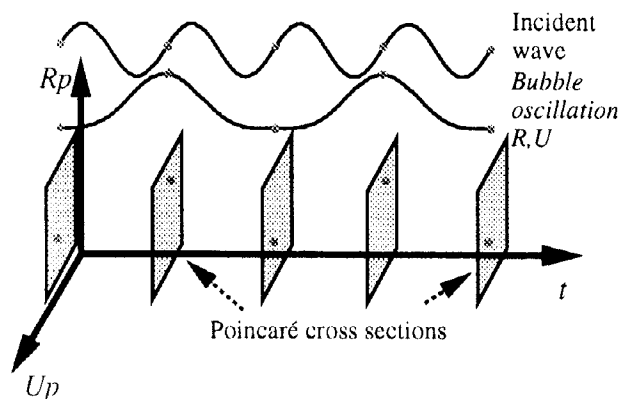
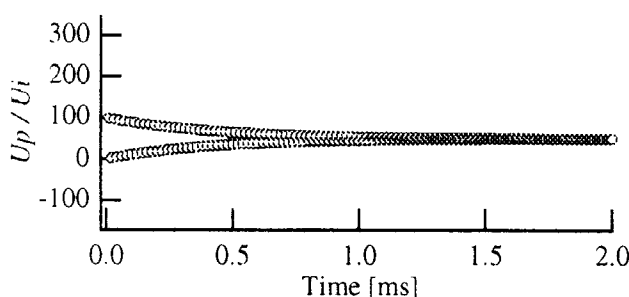


Fig.1 The extension of Poincaré map.

Fig.2 Time swept Poincaré map (U_p-t).

この分析手法を使用すれば気泡振動の過渡応答時間が算出可能である事を提案した。

本報告ではこれらの内容を総括し、強制駆動時の気泡の過渡応答について検討を行う。

2. 過渡応答時間の算出方法

気泡の過渡応答時間の算出方法は2つあり、ポアンカレ断面の時間変化を用いる方法と時間波形の包絡線を用いる方法である。

2.1 ポアンカレマップの時間変化を利用した過渡応答時間の算出方法

ポアンカレマップの時間変化は強制駆動力の任意の位置位相における気泡の瞬時半径 R_p と速度 U_p を各周期毎に時間順で連続して並べたもので、気泡振動状態の時間的な変化を分析する手法である (Fig.1). 得られた立体図を眺める視点を変えると過渡応答部分での気泡振動の状態分析に利用可能である。例えば Fig.2 では、時間経過とともに図上の点の軌跡が1つに収束するので振動が同期振動に至る事が判る。この性質を利用すると、点の収束したとみなせる時刻が気泡の過渡応答時間を表していると考えられる。

2.2 時間波形の包絡線を利用した過渡応答時間の算出方法

これは時間波形の包絡線を抽出して過渡応答時間を算出する方法である。従って、時間波形さえ得られれば、たとえ強制駆動力が存在しない条件においても過渡応答時間を算出することが出来る。しかしながら、包絡線を正確に再現する必要がある為、時間波形のサンプリング間隔はポアンカレマップの時間変化を利用した場合より十分に短くしておく必要がある。

2.3 算出方法の違いと過渡応答時間

実際に両者の算出方法で強制駆動された気泡の過渡応答時間を算出して比較してみる。今回、過渡応答時間として取得するのは次の値である。ポアンカレマップの時間

変化を用いた場合には、 U_p - t 平面図を利用して周期毎の速度 U_p が駆動音圧 P_i から得られる速度振幅値 $U_i = P_i / \rho c$ の1%の範囲に収まった時に収束したとみなし、その時刻を過渡応答時間とする。一方で、包絡線を用いた場合には気泡壁面速度の時間波形の包絡線から抽出した速度 U の値が、先程と同じく駆動音圧 P_i から得られる速度振幅値 U_i の1%の範囲に収まった地点での時刻を過渡応答時間とする。計算には圧縮性液体モデル⁴⁾を用い、気泡初期半径 1 ~ 140[μm] の気泡が音圧 10[kPa]、周波数 50 [kHz] の正弦波で駆動された際の気泡初期半径と過渡応答長さの関係を Fig.3 に示す。概ね両者の結果は良い一致を示す。これより、提案したポアンカレマップの時間変化を用いた過渡応答の算出方法は妥当な手段であるといえる。

3. 駆動条件が過渡応答へ与える影響

気泡が様々な入射音波の条件の下で駆動された際の過渡応答時間をポアンカレマップの時間変化を用いて算出する。

3.1 駆動音波の立ち上がり形状が過渡応答時間に与える影響

音圧 1[kPa]、周波数 100[kHz] の正弦波で駆動した際の気泡初期半径と過渡応答長さの関係を Fig.4 に示す。一般的に気泡の過渡応答時間は気泡初期半径が大きくなるにつれて長くなることが分かる。また、駆動音波に正弦波状の振幅変調をかけて立ち上がり形状を緩やかにした場合、通常の正弦波で駆動するよりも過渡応答時間は短くなり、立ち上がりが 5, 10, 30[cycle] と緩やかになると過渡応答時間は急激に短くなることが分かる。この関係を詳しくみると、気泡初期半径が共振気泡径の 30[μm] よりも大きくなる程この影響が顕著に現れ、ほんの僅かに立ち上がり波形を緩やかにして駆動するだけでも大きく過渡応答時間が短くなると言える。一方で共振より小さい気泡初期半径では、立ち上がり形状の影響はあまり見られない事が分かる。

3.2 気泡径と過渡応答時間の変化の割合

次に駆動周波数を変化させた場合の影響を調べる。パラメータとして周波数を 50、

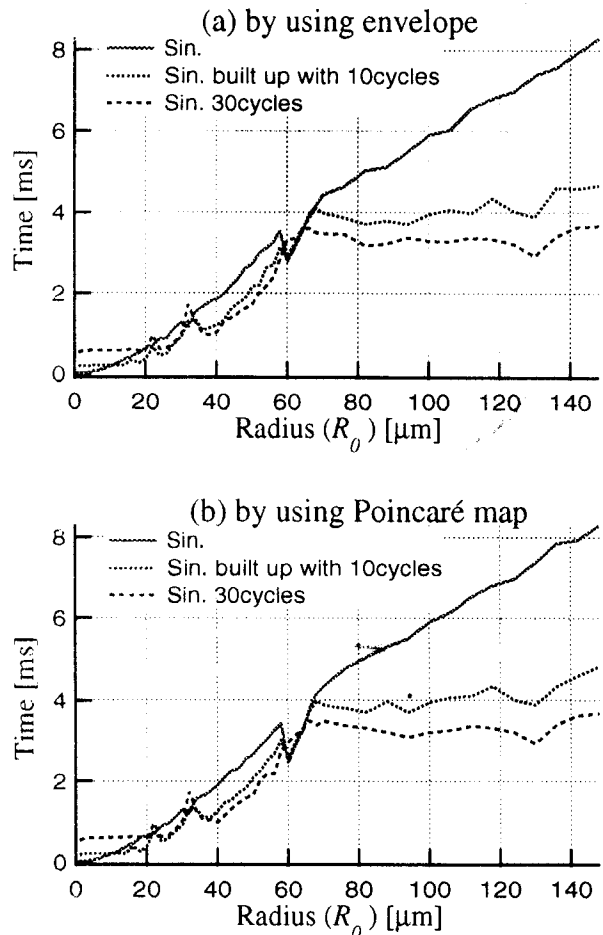


Fig.3 Relationship between bubble radius and transitional response time.(at 10kPa 50kHz)

100, 200[kHz] と変化させ、音圧 1[kPa] の正弦波で駆動時の過渡応答時間を Fig.5 に示す。それぞれの周波数毎に共振気泡径が異なるので、横軸は各周波数毎の共振気泡径 R_{res} で規格化した気泡径で示してある。図では気泡共振点を境にして全く傾きが異なる。規格化気泡径が1以下の時、気泡は規格化気泡径の約2乗(1.7~2.1)に比例して過渡応答時間が長くなる。逆に規格化気泡径が1以上の時には、規格化気泡径の1乗に比例して過渡応答時間が長くなる。

3.3 駆動音圧が過渡応答時間へ与える影響

音圧 50[kPa]、周波数 100[kHz] の正弦波(Fig.6(a))で駆動した際の気泡初期半径と過渡応答長さの関係を Fig.7 に示す。駆動音圧の影響は共振点と2倍周期振動付近で顕著に現れるが、その他の領域では目立った

影響は見られない。これらの領域では音圧上昇に伴って過渡応答時間が増減するが、これは音圧の立ち上がり波形にも依存している。純粋な正弦波で駆動した場合、音圧増加によって共振点と2倍周期時の過渡応答時間は短くなる。しかし、正弦波状の振幅変調 10, 30[cycle]にて徐々に立ち上がる音圧波形(**Fig.6(b)**)で駆動した場合、共振点付近では過渡応答時間が減少するものの、2倍周期時の過渡応答時間はかなり長くなる。例としてこれらの時間波形を **Fig.8** に示す。この過渡応答時間の増加は、2倍周期振動が差音成分を利用した自己正帰還によって成長して発生するという生成・成長機構を有するため、より緩やかな立ち上がり波形の元では十分に成長するだけの駆動音圧が得られず、2倍周期の発生が遅れるためである。

4. まとめ

ポアンカレマップの時間変化を利用して気泡振動の過渡応答時間を圧縮液体モデルにおいて計算した。気泡初期半径に対する過渡応答時間は共振点を境にして大きく異なった傾向を示した。さらに音圧波形の立ち上がりの形状によって過渡応答時間は大きく異なる事が分かった。

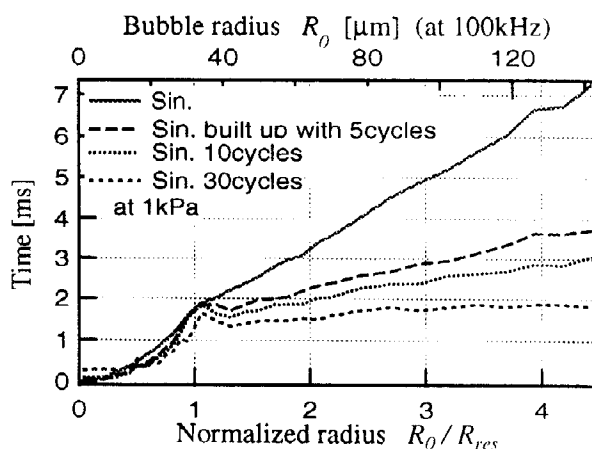


Fig.4 Relationship between bubble radius and transitional response time.(at 1kPa)

参考文献

- 1) 村田,渡辺;信学技報,US95-62(1995)
- 2) 村田,渡辺;音講論集,平成7年9月,平成8年3月
- 3) 村田,渡辺;USE96,PA-7 (1996)
- 4) U.Parlitz et al , J.Acoust. Soc. Am. **88**, 1061-1077 (1990).

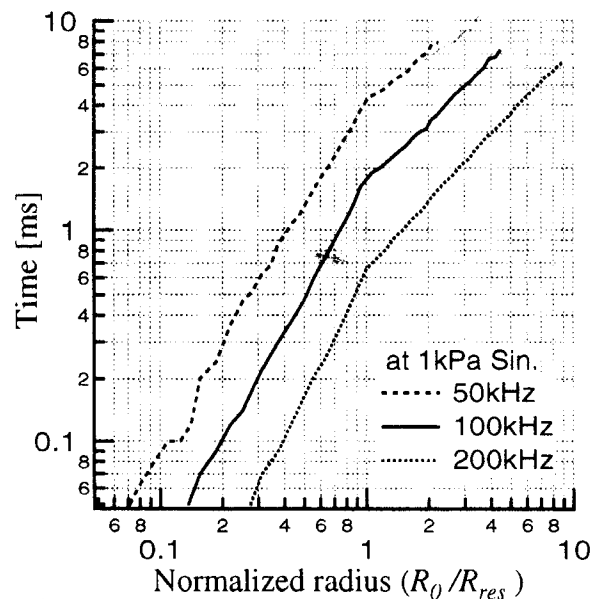


Fig.5 Transitional response time as a function of the driving frequency.

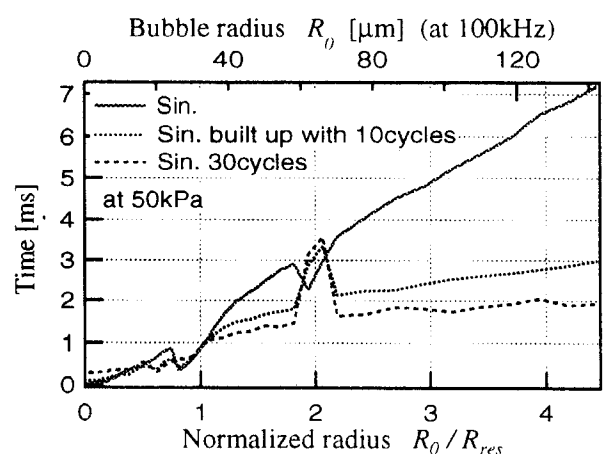
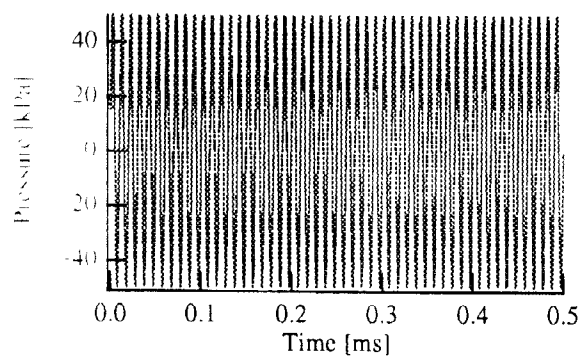
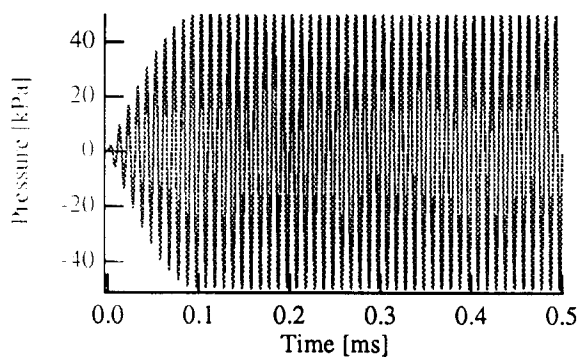


Fig.7 Relationship between bubble radius and transitional response time.(at 50kPa)

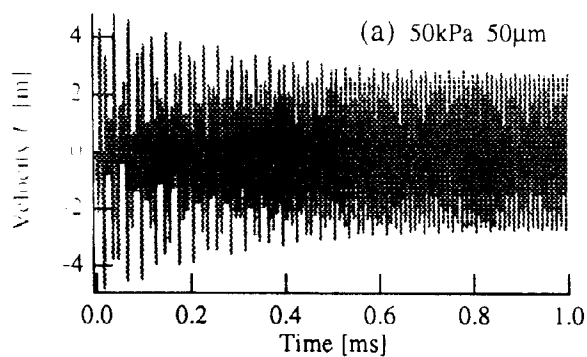


(a) Sinusoidal wave

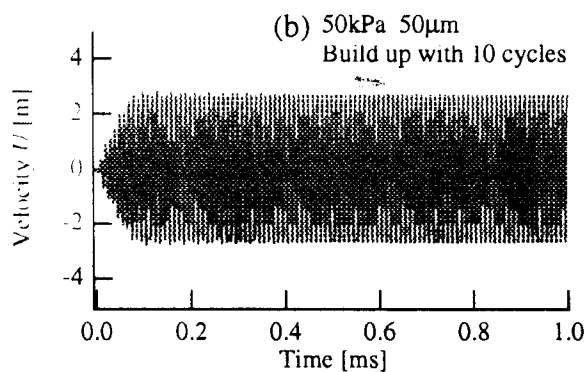


(b) Sinusoidal wave built up with 10 cycles

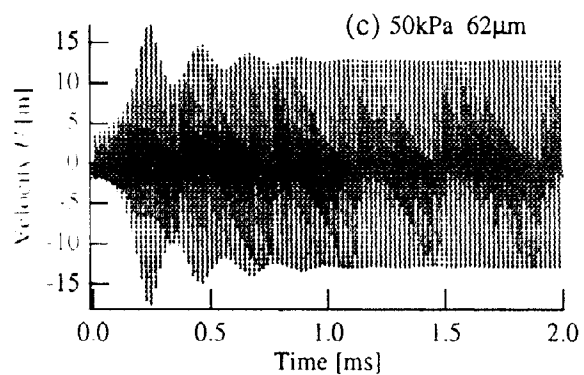
Fig.6 Time profiles of driving force at 50kPa.



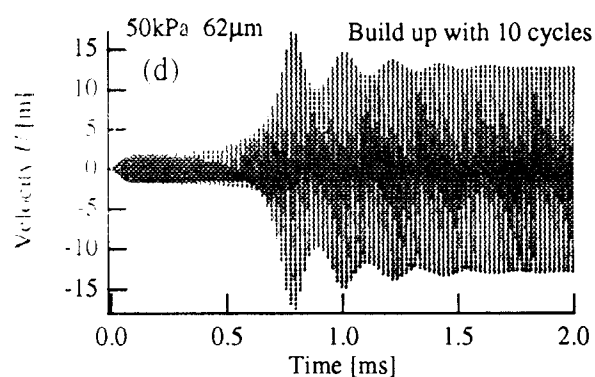
(a) 50kPa 50 μ m



(b) 50kPa 50 μ m
Build up with 10 cycles



(c) 50kPa 62 μ m



(d) 50kPa 62 μ m
Build up with 10 cycles

Fig.8 Velocity-time curves of bubble