

超音波による定在波中の粒子分布計算

Calculation of Particle Distribution in Standing Wave by Ultrasonic

○森博明¹, 西野真一², 河府賢治³, 越智光昭³

Hiroaki Mori, Shinichi Nishino, Kenji Kofu, Mitsuaki Ochi

Purpose of this research is to analyze minute particles motion in air while ultrasonic vibration is generated by flexural vibration plate. Firstly, it is necessary to obtain that the acoustic pressure distribution of standing wave which has one node and two anti-node. This pressure distribution between two plates was calculated by computational fluid dynamics and measured by Laser Doppler Vibrometer. As a result, calculated and measured results were almost same value. Then volume fraction of particles in this acoustic pressure fluctuation was calculated by CFD. However, the particles distribution was unchanged. It means that particles were not concentrated in acoustic pressure node in this calculation condition. Therefore, it is necessary to consider acoustic radiation force on particles.

1. 緒言

これまでの研究において平板上にカーボナイト粒子を散布し、その平板に超音波によるたわみ振動を発生させることで平板表面部分のカーボナイト粒子が振動の節の部分へ集まることが分かっている¹⁾。また、小塚らにより水中において超音波を利用することで微小粒子の挙動を制御できることが証明されている²⁾。そこで超音波を空気中に応用することで空気中の微小粒子を任意の場所に集めることができると言える。空気中の微小粒子を特定の場所へ集めることが可能ならば新たな集塵法を提案できる。ナノサイズ粒子の集塵は高コストであること、回収が困難であるなどの問題がある。なおナノ粒子集塵の実験を行うには莫大なコストが要求される。超音波集塵の効果の計算が可能になれば、実験行程の短縮、コスト削減並びに最適条件の提案が可能となる。本年度は定在波の節が一つになるように解析モデルを変更し、板間音圧の測定値と計算結果を比較した。また、音圧変動領域中の粒子濃度分布がどのように変化するかを調べた。

2. 理論

2.1 支配方程式

数値流体解析には Cham 社製熱流体解析ソフト PHOENICS を用いた。流体運動の一般支配方程式は連続の式、運動方程式より、従属変数を ϕ とすると(1)式のように表わされる。なお、今回は一定温度の元計算を行うためエネルギー方程式については考慮しない。

$$\frac{\partial}{\partial t}(r\rho\phi) + \text{div}(r\rho u\phi) = \text{div}(r\Gamma_{\phi} \text{grad}\phi) + S_{\phi} + S_{BC} \quad (1)$$

ここで Γ_{ϕ} は交換係数、 $S_{\phi}+S_{BC}$ は生成項であり速度成分や各種境界条件等任意の値をとる ϕ に対応したものが入る。 r は相の体積分率であり单相流の場合 1 をとる。(1)式を完全陰解法、ハイブリッド法にて線形化、離散化し、定常項、移流項、拡散項、生成項をまとめた 2 次元離散化方程式が、セル総数分得られる。これからセル総数を N とした N 元 1 次連立方程式をたて、ヤコビ法等の反復計算を行うことで各変数を求めている。

2.2 平板のたわみ振動

今回の解析において Fig.1 のような平板のたわみ振動を再現する必要がある。平板の振動方程式は以下式(2)のように与えられる。

$$\begin{aligned} \Delta y &= f(x) \cdot g(y) \\ f(x) &= A_m \sin\left(\frac{\pi}{L}x\right) \\ g(y) &= \sin(2\pi ft) \end{aligned} \quad (2)$$

なお今回の解析では節間隔 $L=18\text{mm}$, 周波数 $f=20.8\text{kHz}$ とした。(2)式より解析領域内の IX, IY 平面格子に Fig.2 のように変位

Δy を与えることでメッシュを振動させ、さらに振動境界に Blockage object を配することで平板のたわみ振動を再現し平板間の音圧分布を求める。また上板の境界面を同様に振動させる事で反射音波を再現した。板の寸法等が異なっても同じような結果が得られたために計算の簡略化の為に小型化した。

2.3 解析領域 計算条件

次に格子数、領域の大きさを Table1 に示す。解析領域と実験で用いた振動板の寸法は異なるが、計算において節の数や板の寸法等が異なっても同じような結果が得られたために計算の簡略化の為に小型化した。

3. 境界条件・計算の諸条件

3.1 音圧変動解析

平板間の音圧変動解析には Fig.3 の解析領域を用いた。端面は自由流出境界とし blockage object を図のように配置した。また板間隔は振動周波数 20.8kHz の音波が節を一つ持つように 8.2mm に決定した。

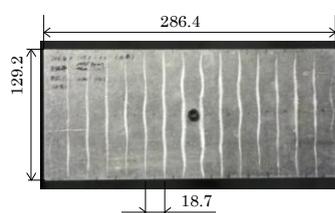


Fig.1 Vibration plot (units in mm)

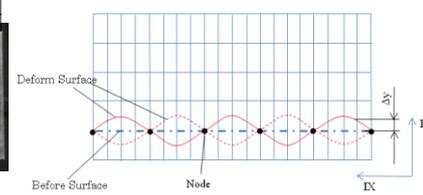


Fig.2 Deform grid

Table 1 Computational grid

	x	y	z
cell number	120	72	1
size [mm]	120	38.2	1

Table 2 Analysis condition

Domain fluid	compressible air
turbulent model	laminar flow
Time step range Δt [msec]	1.5024×10^{-3}
Time step Number [step]	1600
flat plate length [mm]	90
Number of anti-nodes	5
Vibration frequency f [kHz]	20.8

Table 3 Plate distance & Max amplitude

Distance between plates y_d [mm]	maximum amplitude $A_{m \max}$ [μm]
8.2	1.0, 1.5

3.2 粒子体積分率分布計算

平板間に音圧分布を発生させた時の粒子濃度解析には Fig.4 の解析領域を用いた。図中の流入境界にて空気と粒子の比率が 0.999:0.001 の状態で各相が流入するように設定した。また計算の手順については流速 1m/sec の空気と粒子が流れる速度場を定常計算し、その結果を初期値として平板振動計算を非定常計算で行った。

4. 計算結果および考察

1) 圧力変動解析

Fig.4 にある瞬間における超音波振動平板間の音圧分布の計算結果を示す。設定条件通りに振動の腹の部分に 5 つ、振動の節の部分に一つ現れており板間の音圧分布が得られた。しかし、Fig.4 から定在波が得られているか分からない。そこで音圧振動の 3 周期分の値の最大値をとること、振動の腹、節の位置での音圧の時間変動値をとる事でこれを確認した。Fig.5 は計算結果から得られた音圧の 3 周期分の値の最大値と LDV で測定した結果を比較したものである。図より板間隔の中心付近に振動の節が現れ、音圧の最大値を取っても音圧の腹及び節が生じていた。さらに板振幅と板間音圧との間に比例関係がある事が計算においても証明された。また、LDV での測定結果の比較においては振動の節の位置がずれ、計算結果との間に 5dB ほどの差が生じた。これは板間隔が 8.2mm と小さい事からレーザーが板に干渉し誤差が生じたものと思われる。

2) 粒子体積分率解析

Fig.6 に音圧変動領域中の粒子体積分率分布についての計算結果を示す。図のように空気流速 1m/sec の場合では粒子は圧力分布の節の位置で集まらず、板間でほぼ一定の体積分率を保っていた。また流出境界付近で両振動平板近傍に粒子の体積分率が大きくなったがこれは壁面近傍で空気速度が小さい為に集まったといえる。粒子が圧力分布の節の位置に集まらない理由として粒子は圧力・速度の分布の影響を受け運動するが、正圧・負圧が交互に高速で変動する為、その場で上下に振動したまま空気に流されていると考えられる。圧力、速度の変動から粒子の運動を計算するだけでは板間音場中の粒子分布を計算する事は出来ず、音波により粒子が受ける力について考える必要がある。また、実験的に超音波音場内で液滴の集中させる事は報告されている⁽³⁾。そこでこの条件を参考に再度計算し、粒子体積分率を計算する事で本解析に足りない部分を考察し CFD による計算をカスタマイズする必要がある。

5. 結論

- 1) 腹と節の位置について、CFD による計算値と LDV による測定値がほぼ同じ傾向を示した。振動の節を一つにする事で、振動の節と腹の分布を計算する事が出来た。
- 2) 音圧変動領域中での粒子の体積分率を計算したが粒子分布は初期状態のままであり音圧の変動による瞬間的な圧力差だけでは粒子を節の部分に集める事が出来なかった。
- 3) 音圧変動が粒子に与える外力について明らかにし計算に組み込む必要がある。

6. 参考文献

- 1) 平井康裕, 河府賢治, 越智光昭, 三浦光: 超音波による壁面摩擦低減効果に及ぼす音圧の影響, 粉体工学会誌, Vol.47, No.4, 222-229 (2010).
- 2) 小塚ら: 集束超音波による定在波を用いたマイクロモニピ

ュレーション, 電子情報通信学会論文誌. A, 基礎・境界 J80-A(10), 1654-1659,(1997)

- 3) Michael J. Anderson: "Use of Acoustic Radiation Pressure to Concentrate Small Particles in an Air Flow", Ultrasonics Symposium, 2002. Proceedings. 2002 IEEE, 481 - 484 vol.1

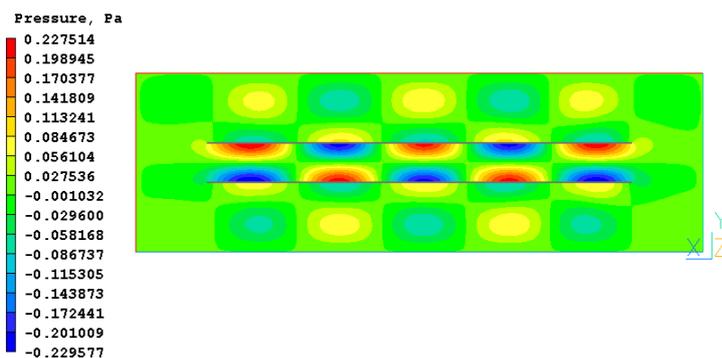
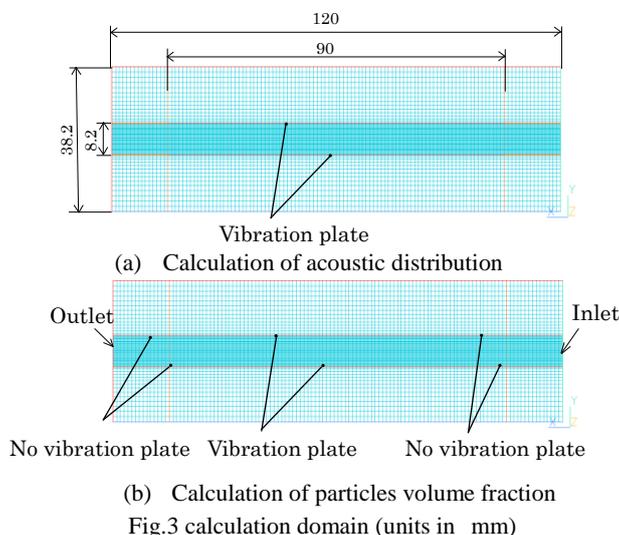


Fig. 4 Calculation result of pressure distribution ($A_m=1.0\mu\text{m}$, time=2.3768msec)

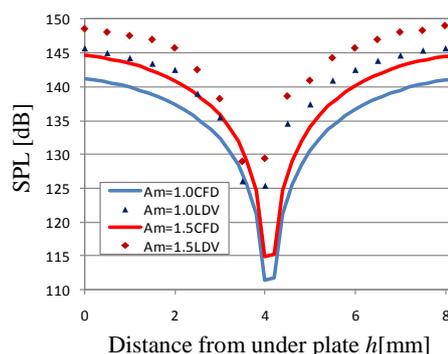


Fig.5 Comparison of calculated and measured result

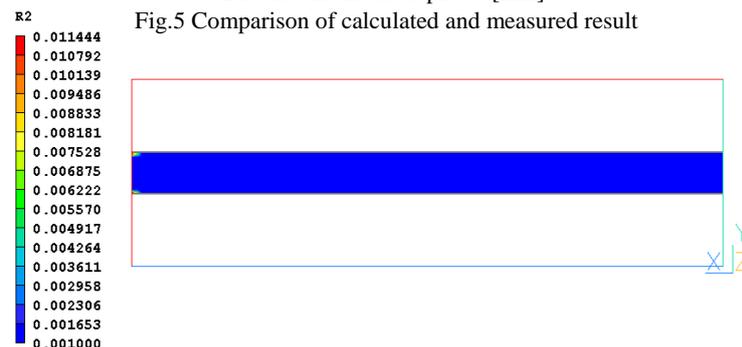


Fig.6 calculation of volume fraction between two vibration plates (Time =2.403846msec)