

計測データに基づく気液二相乱流中の速度場の数値補間法の提案

A Proposal for Numerical Interpolation of Velocity Field in Turbulent Bubbly Flow Based on Measured Data

80717008 飛松章太 (Shota Tobimatsu)

Supervisor : 菱田公一 (Koichi Hishida)

1. 緒言

気液二相流は工業的に多岐にわたり用いられており、これらの装置の安全性の向上や高効率化を目指すうえで、気液二相流の流動構造の詳細な解明は必要不可欠である。しかしながら気液二相流ではレイノルズ応力による乱流エネルギーの生成、散逸をはじめとする乱流輸送現象において気泡がどのように寄与するかは明確に明かされていない。乱流は非線形でかつ3次元現象であるため、これらの現象の詳細な把握には速度の全方向の空間分布や圧力分布が必要とされるが、気泡を含んだ流動場の速度および圧力の取得は実験計測だけでは困難であるというのが現状である。本研究では、実験計測^[1]による2次元2方向の時々刻々の速度ベクトルから計測面奥行き方向の第3方向速度を数値計算により補間することを目的とする。与えられた乱流の2次元2方向の速度ベクトルを数値計算空間に代入することで流体の流量および運動量の保存則から、次時刻の速度ベクトルとの整合性を満たす最適な第3方向速度を決定する方法を提案する。加えて、数値計算空間内に気泡モデルを配置することで気液二相流を模擬し、実験計測時の計測情報以外の速度および圧力の情報を補間する。

2. 数値計算方法および条件

本研究では、計測により得られたデータを平行平板乱流(チャネル乱流^[2])の計算空間内に配置する。Fig. 1に本研究で用いるチャネルDNSの幾何系を示す。y方向にNo-Slip, x, z方向に周期境界を設け、メッシュ分割は128×192×128とした。時間積分にはRK3/CN法^[1]を用い、粘性項には2次中心差分を用いた。また、壁方向流路中央の面を計測面と仮定してここに2次元2方向の計測速度情報^[1]をxz平面に外挿した。計測速度情報および計算パラメータをTable 1に示す。

3. 3方向速度推定法

Fig. 2に本研究で用いた3方向速度推定法のフローを示す。本研究の場合、流路中央において速度成分のうち2成分が既知(u_G, w_G)であることからN.S.方程式(x方向)を差分化すると(1)式のようになり、これより計測面奥行き速度 v_x が得られることになる。

$$\frac{u^{i+1} - u^i}{2\Delta t} + u \frac{u_{i+1} - u_{i-1}}{2\Delta x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \Big|_{i,k} + w \frac{u_{k+1} - u_{k-1}}{2\Delta z} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{Re} \left(\frac{u_{i+1} + u_{i-1} - 2u}{4\Delta x} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \Big|_{i,k} + \frac{u_{k+1} + u_{k-1} - 2u}{4\Delta z} \right) \quad (1)$$

同様の処理をz方向N.S.方程式についても行いその両者から仮定速度 v^* を算出する。 (u_G, v^*, w_G) を用いて時間積分を行い、その結果から v^* を次式により修正する。

$$v^* = v^* + \varepsilon_1 (u_G^{n+1} - u^{n+1}) + \varepsilon_2 (w_G^{n+1} - w^{n+1}) \quad (2)$$

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$ は修正係数である。さらに、本研究では計測面奥行き速度を仮定した後にこれを用いて計測面周囲の速度も修正した。通常、乱流のある断面にその乱流と関連性のない速度情報を単

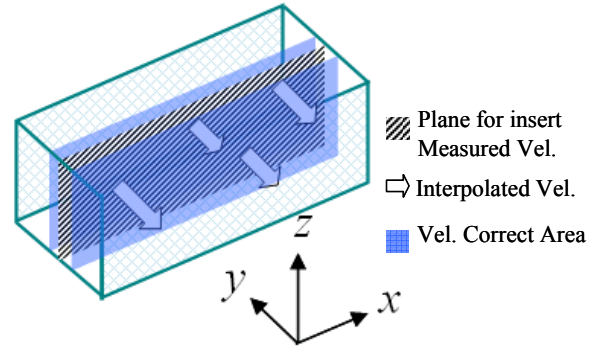


Fig. 1. Channel DNS Geometry

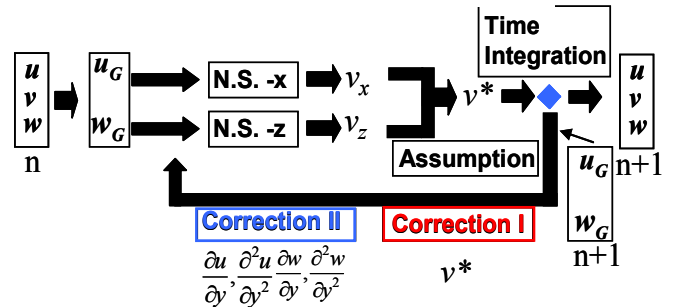


Fig. 2. Measured Velocity Distributions

Table 1 Simulation & Measurement Condition

	(a)Simulation		(b)Measurement	
Length	x: 7.0δ	x ⁺ : 1260	x: 1200pix	x ⁺ : 2722
	y: 2.0δ	y ⁺ : 360	-	-
	z: 3.5δ	z ⁺ : 630	z: 900 pix	z ⁺ : 2079
Reb	9600	Reb	9900	
Reτ	295	Reτ	305	
Δt[s]	2.0e-3	FR[Hz]	500	

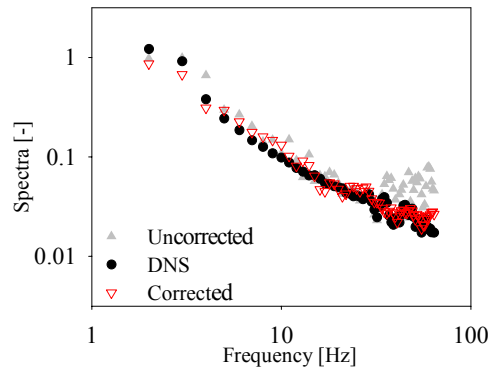


Fig. 3. Profiles of Streamwise Energy Spectra

に入力しても奥行き方向の周囲流体との速度差から急激な速度変動を生んでしまう。これを軽減するため本研究では(2)式で v^* を修正したのち、修正値を(1)式に用いて今度は速度情報挿入面に垂直方向の速度 ($u_{f+1}, u_{f-1}, w_{f+1}, w_{f-1}$) も修正を加えた。メインステップ1つに対して v^* および $u_{f\pm 1}, w_{f\pm 1}$ の修正を40回繰り返し、これを260フレームの時々刻々の計測データに対して補間を行った。

Fig. 4 は単相乱流の主流方向速度の時間推移のスペクトルをプロットしたものである。計測面の奥行き方向の周囲速度の修正を行わないときに比べ、急激な速度変動が軽減されたことで修正前に見られる速度変動の高周波成分が除去され、より自然な乱流現象を再現していることが確認される。

Fig. 5 はある定点における修正回数に対する推定値 v^* 、および誤差の推移をプロットしたものである。推定速度の修正を重ねるにつれて奥行き方向速度 v^* が一定の値に近づいてゆき、同時に時間積分した数値計算結果 u^{n+1}, w^{n+1} と与えられた次時刻速度 u_G^{n+1}, w_G^{n+1} との誤差が縮小することから(2)式が収束してゆくことがわかる。また、Fig. 6 に計測面に垂直方向±2個分の速度成分をプロットした。Fig. 6 より、修正を重ねるにつれて計測面の周囲の速度成分も空間的により滑らかになるよう修正が行われていることがわかる。

4. 気泡流のシミュレーション

気泡流において、気泡周囲の流体は気泡の影響を受ける。本研究で用いた計測結果は同時計測で気泡画像も撮像されているため、各時刻において気泡の位置が判明している。従って通常の二相流の計算において現れる界面の移動や変形を追跡する必要はなく、界面のモデル化のみ行えばよい。本研究では気泡周りに滑り無しの運動学的条件を用いて次のようにモデル化した。

$$\mathbf{u}_f \cdot \mathbf{n} = \mathbf{u}_s \cdot \mathbf{n} \quad (3)$$

ただし、 \mathbf{u}_s は界面の速度ベクトル、 \mathbf{u}_f は流体側を意味し、 \mathbf{n} は界面の法線ベクトルである。

計測結果のうち気泡の影響が出ていると思われる時刻のデータ 20[Frame]を用いて気泡画像からの気泡速度(3)式と前節の速度推定を組み合わせると速度補間を行うと Fig. 6 のように気泡周囲の3方向の速度情報を得ることができる。これより気泡後流に強い流れの乱れが確認される。気泡の通過が見られるある定点で気泡通過の前後の主流速度 u および v, w の推移をプロットしたものが Fig. 7 である。ある定点に気泡が近づくと主流速度が上昇し(気泡速度)、通過後は v, w が大きくなり、気泡の後流で乱れが強くなる過程が確認される。

Fig. 8 は速度とのカップリングで解かれた定点の圧力変動を時系列でプロットしたものである。これより、二相流において圧力の変動はより細かく現れることがわかる。さらに圧力変動のスペクトル解析を Fig. 9 に示した。参考のための速度のスペクトルと比較するとこの両者がおおむね同じ周波数でピークを迎えていることからこの圧力変動は気泡の影響によるものと推測される。

5. 結言

■N.S 方程式に現在時刻と次時刻の情報を用いることで第3方向速度を推定し、同時に計測面の奥行き方向の前後速度を修正することで、時々刻々の計測値と整合性のある第3方向速度が得られ、DNS との併用による速度補間の可能性を示した。

■本研究の数値補間を気液二相乱流に用い、時々刻々の2次元に方向の気液二相流の速度情報から3方向成分および圧力変動を得た。これより気泡の通過に伴い全体の流れの乱れを増加させる過程を確認した。

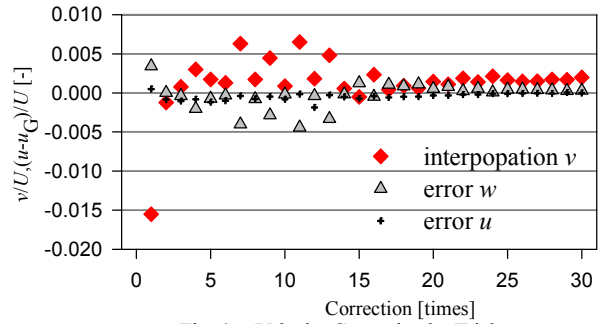


Fig. 4. Velocity Correction by Trial

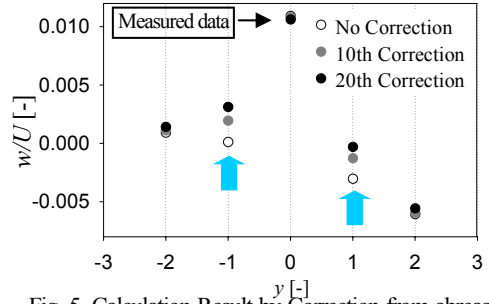
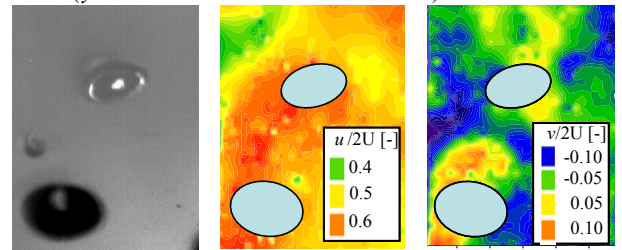


Fig. 5. Calculation Result by Correction from abreast view ($y=0$ Means Measured Area Insert Plane)



(a) Picture (b) Interpolation Velocity (L:u, R:v)
Fig. 6. Counter maps of Interpolated Velocity at a moment.

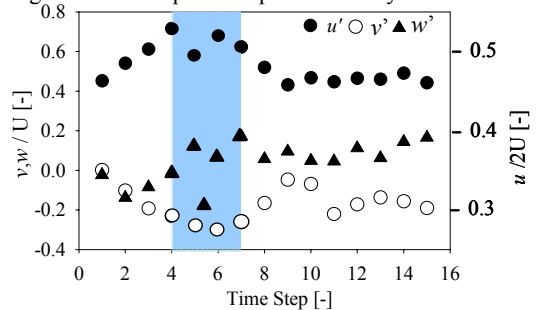


Fig. 7. Velocity Transition during a Bubble Passing Certain Point. (■; Bubble is Entering)

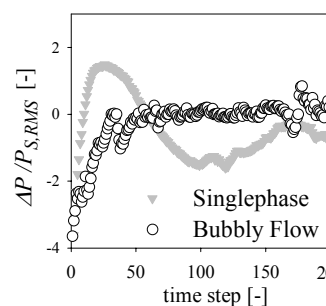


Fig. 8. Time History of Pressure

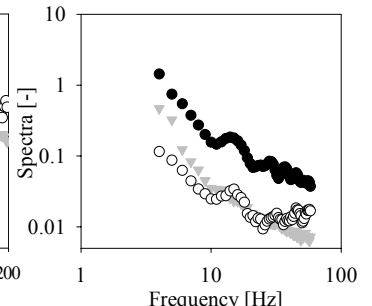


Fig. 9. Profiles of Pressure Fluctuation Spectra.

参考文献

- [1] 子安正光・佐藤洋平・菱田公一, 日本流体力学会(2007)
- [2] K. Fukagata and N. Kasagi; Int. J. Heat Fluid Flow; V.24/No.3/P.480-490;(2003)