周波数特性を用いた PIV 計測における精度評価法の検討

川勝 麻由^{*}, 西尾 茂, 桐本 兼輔 (神戸大学大学院)

Evaluation of PIV Measurement by Means of Spectral Analysis

Mayu KAWAKATSU, Shigeru NISHIO and Kensuke KIRIMOTO

ABSTRACT

Present paper proposed an evaluation procedure on PIV measurement by means of spectral analysis. The PIV measurement data has different frequency characteristics from that of true value of flow field. If we can detect the difference without referring the true value, it could be a useful tool for the evaluation of PIV measurement quality. The general characteristics of error occurrence were investigated using VSJ standard image, and it is found that the main change of the error appearance could synchronize to the behavior of high-frequency components. The authors proposed an evaluation index using this fact, and the validity was examined by changing the parameters of PIV analysis.

Keywords : PIV, Spectral analysis, Error evaluation, Quality control

1. 緒言

粒子画像流速測定法(Particle Image Velocimetry: PIV)は、流れの可視化画像を用いて流場の計測を行う手法であり¹⁾、近年の光学機器の発展に伴い、計測精度の向上や実用的な3次元計測システムの開発など、性能と機能の充実が目覚ましい。一方、PIVの精度管理については、計測過程が多数のサブプロセスで構成されているため、誤差要因は多岐に渡る²⁾。このため、対象とする流場や計測に用いる装置に応じて最適パラメータの同定が必要となるが、計測誤差の評価は運用者の判断に頼らざるを得ず、客観性の確保は難しい。このような状況の打開には、客観的に精度を管理できる手法の構築が必要である。

そこで本研究では、流場と誤差の周波数特性がそれぞれ異なることに着目し、周波数解析に基づく誤差評価指標の確立を目指した。本論文は、VSJ標準画像の原データとPIV計測結果を周波数領域で比較し、誤差パラメータとの関連性を調査することにより、定量的な誤差評価の可能性を示したものである。

2. PIV 計測と誤差

2.1 VSJ 標準画像を用いた誤差発生特性の検証

PIVは、時間間隔 Δt で撮影された流れの可視化画像を相関法などで解析し、画像の移動量 Δx を求めることにより、速度を計測する。PIVの計測誤差は、可視化画像を得るまでの実験および撮像系に起因する誤差と、画像解析の際に生じる誤差に大別される。本論文では、

画像解析過程で生じる誤差に着目し、この挙動の調査と推定法の検討を行った。

画像解析過程において生じる誤差は、(1)粒子分布パターンの誤対応により発生する大きな誤差、(2)画像の変形や回転などにより相関値の減少により発生する中程度の誤差、(3)画像ノイズや量子化に起因する比較的小さな誤差に大別できる³⁾。本論文では、主に(2)の中程度の誤差を対象とするが、誤差の発生はランダム性が強く、流速ベクトルの変化とは独立に発生するものと考えられる。本論文では、このような誤差発生特性を周波数解析に捉え、誤差指標への利用の可能性を検討した。

Fig.1 VSJ standard Image and the analyzed velocity distribution.

本論文では、VSJ標準画像⁴⁾を用いてPIV誤差発生特性の調査を行った。Fig.1(a)はVSJ標準画像#301の一例である。VSJ標準画像は、数値シミュレーション結果を基に生成された人工画像であり、流場の情報が既知であるため、解析誤差を直接求めることができる。本研究で用いた#301は非定常流場に基づいており、時系列の特性検討が可能である。Fig.1(b)は、PIV解析で得ら

れた速度ベクトル分布である。特に大きな誤ベクトルは見当たらず、全般に滑らかな速度分布が得られている。このベクトル分布から、誤差の存在や大きさを読み取することは難しい。ここでは誤差量を直接計算できるため、画像の変形量と誤差発生との相関を見ることができる。Fig.2はその比較であるが、Fig.2(a)は画像変形量の時間平均分布であり、変形量は画像の伸縮、剪断、回転成分のノルムに経験的な感度係数を加えた次式の指標⁵⁾を用いた。

$$Q = \sqrt{\varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2 + \gamma_{xy}^2 + 9 \cdot \zeta^2} \quad (1)$$

また、Fig.2(b)は128時刻の標準画像を解析した際の時間平均誤差の空間分布であるが、この分布はFig.2(a)の画像変形パラメータの分布と傾向が一致しており、強い相関があることが推察される。

Fig.2 Comparison of image deformation rate and averaged measurement error.

Fig.2(b)の誤差分布を Fig.1(b)の計測値の空間分布から見出すことは難しいが、時系列の計測データからは比較的容易にこれを見つけることができる。Fig.3は、Fig.1(a)に示した画像中央位置における速度の絶対値の時間変化である。実線は標準画像の原データを示し、白丸が計測結果を示す。

Fig.3 Velocity change of PIV measurement in time domain.

Fig.3においてPIV解析の結果は全体的には原データと大方一致しており、流場の変化をよく捉えている。しかし、原データの滑らかな変化に対して、計測値では細かい振動が生じている。この傾向は、原データとの比較において顕著に見ることができるが、細かい振動の存在は原データと重ね合わせなくても、検出は可能である。

本研究では、真値の知り得ない実験画像の解析における誤差推定法の構築を目指す。これに Fig.3 で示される誤差発生ランダム性を利用する。

2.3 周波数解析

Fig.4は、標準画像の128時刻にわたって得られる速度ベクトルを周波数解析した結果である。PIV計測では2次元の速度ベクトル(u,v)が得られるが、ここでは成分毎にフーリエ変換した結果を合成し、振幅分布として示している。実線は原データであり、丸印は計測値を示す。Fig.4(a)は、前節で解析を行った画像中央位置における周波数解析結果である。流場の原データが高周波数領域に向かって滑らかに減少するのに対して、PIVの解析値は一樣に小さくならず、高周波数帯域で特異な挙動を示す。Fig.4(b),(c)は、それぞれFig.2(a)の図中にa, bで示した、画像変形量の異なる点における解析結果である。原データの周波数特性は、いずれの点においても滑らかに変化しているのに対して、解析結果ではFig.4(b)で原データより大きくなり、Fig.4(c)でほぼ一致する。特にこの変化は高周波数領域で顕著である。

Fig.4 Comparison of frequency domain characteristics between original and measured velocities.

そこで、高周波数領域では原データの振幅と比較し解析値の差が大きくなることに着目し、任意の周波数でスペクトルを分離し、高周波数領域を誤差と見なすことによって誤差の評価を行うことを考えた。誤差の発生の傾向は Fig.2 で示したように、画像変形と強い相関を持っていることが確かめられているから、Fig.4の周波数特性の変化は誤差指標として利用が可能であると考えられる。

3. 誤差評価指標と妥当性の検討

3.1 誤差評価指標

前節では VSJ 標準画像の代表的な計測点における基本的な誤差の挙動と周波数特性の関係を示し、誤差評価指標の提案を行ったが、本節では全域における検証と提案した評価指標の妥当性検討結果について述べる。

Fig.5 は、全領域において VSJ 標準画像の原データと PIV 解析結果の比較を示す。両者の比較は、周波数分析の結果得られたスペクトルを積分し、パワー値を算出して行っており、変動の平均振幅の比較に相当する。原データと解析結果の分布は概ね分布が似ているが、解析値の方がやや大きな値を示している。特に画面中央の右下部分において、解析値のパワーが非常に高い値をとっているが、この位置は Fig.3(a)に示したとおり画像の変形が大きくなり、誤差が増大する領域である。

Fig.5 Comparison of total power of spectra, (a) Original, (b) Measured.

2.3 節の考察結果を踏まえて、Fig.5(b)にある周波数で閾値を設けて周波数帯域に分けた比較を行うこととした。Fig.6 はその閾値を基準に高周波数領域と低周波数領域で分離したスペクトルパワーの分布である。高周波数領域の分布を示す Fig.6(b)は、Fig.5(a)に示す原データの分布より Fig.5(b)に示す解析値の分布形状に似ており、特に Fig.5(b)においてパワー値が増大する領域の位置、形状が類似している。このことから、Fig.5 で比較した原データと解析値の差異は、PIV 解析の高周波数特性に由来すると考えることができる。

Fig.6 Separated spectral powers of measured velocity fields, (a) Low frequency domain, (b) High frequency domain.

この特性を定量的に検証するため、原データについても周波数帯域に分けて解析値と比較を行うこととした。

Fig.7 は、原データを Fig.6 の解析値と同様に周波数帯域に分け、計測値の比をとったものである。原データは誤差を含んでいないので、この比の値が 1 に近づくほど誤差が少ないことを示す。Fig.7(a)の低周波数領域の分布では、全域にわたって 1 付近のなだらかな分布であるのに対して、Fig.7(b)の高周波数領域では 2 近くの非常に大きな値を示す領域が現れ、解析値と原データの隔たりが大きくなっていることがわかる。解析値と原データの差は解析誤差であるので、高周波数領域の特性が異なることを利用して、誤差の分離・抽出が行える可能性を示している。この性質を利用した誤差抽出法は種々の方法が考えられるが、最も単純な方法として 2.3 で述べた、高周波数領域を誤差と見なすことによって誤差分離を行う手法の妥当性が確かめられた。

Fig.7 Spectral power ratio of original and measured velocity, (a) Low frequency domain, (b) High frequency domain.

3.2 誤差管理法の妥当性検証

前節では周波数に基づいた誤差分離の妥当性を示したが、本節では PIV 解析パラメータの変化に対する誤差挙動に対して、本論文で提案する誤差評価法の追従性を検討する。

Fig.8 Change of error appearance and spectra to the size of correlation area.

Fig.8(a)に、相関領域サイズを変化させたときの解析値の高周波成分パワー値と誤差のRMS値挙動の比較を示す。比較の対象位置は、Fig.1(b)に示した画像中央である。また、Fig.8(b)~(d)に相関領域寸法を11, 17, 25 [pixel]としたときのスペクトル分布を示す。黒菱形は原データの、白丸は計測値を表している。Fig.8(a)より、平均誤差と高周波数帯域のパワー値は同様の分布を示していることが分かる。これは、Fig.8(b)の高周波数領域において、解析値のスペクトル値が原データに比べて高い値をとっているのに対して、Fig.8(c),(d)においてこの差が減少することからも理解できる。

さらに、画像の変形量の違う計測点における比較をFig.9およびFig.10に示す。Fig.9は、変形量の大きい、Fig.3(a)の図中'a'で示す領域での解析結果である。Fig.9(a)に示す誤差のRMS値の挙動と高周波数帯域のパワーの変化が一致していることがわかる。Fig.9(a)の誤差指標の変化はわずかであるが、Fig.9(b),(c),(d)では、相関領域が大きくなるにつれて、高周波数成分の誤差が小さくなることが明瞭にわかる。

Fig.9 Change of error appearance and spectra to the size of correlation area at large shear flow.

一方、Fig.10は、変形量の少ない、Fig.3(a)の図中'b'で示す領域での解析結果である。Fig.9(a)において、誤差のRMS値と高周波数帯域のパワー値の値が近いことと、相関領域寸法の変化に対して両者ともあまり変化しないという点では挙動は一致しているが、RMS値が20pixel付近で極小となる誤差挙動を評価指標が必ずしも捉えているとは思われない。Fig.10(b),(c),(d)の周波数特性の変化では、原データと解析値のスペクトルの差異は小さく、相関領域寸法に対する変化も、ここで想定している閾値より小さい領域でも同様に発生している。

このような誤差挙動探知の原理を利用すると、誤差発生が画像変形に伴うなど原因が比較的単純な場合には、的確に誤差量を推定することができる。本論文では、周波数解析によりPIV計測の挙動を推定する方法につい

て、最も基本的な誤差発生特性に基づいて、その推定法および誤差指標の提案を行ったが、具体的手法としては最も単純な方法を採用しているため、検討課題の余地は多く残されている。しかし、直接誤差を抽出することが出来ない実際の計測現場においては、このような手法が示された意義は高く、今後の改善によって実用に向けた精度向上が期待されるものである。

Fig.10 Change of error appearance and spectra to the size of correlation area at small shear flow.

4. 結 言

VSJ標準画像を対象にPIV解析結果の周波数分析を行った結果、誤差発生の偶然性が強い成分が高周波成分として現れ、サンプリング周波数によっては周波数帯域で流場の変動と誤差を分離できることがわかった。特に画像変形が大きく、PIV計測の誤差が顕著な場合に、この傾向が強いことが認められた。この性質を利用し、周波数帯域に閾値を設定して計測誤差の評価を行う方法を提案し、その妥当性を検討した。この結果、提案した評価指標は定性的にはPIVの計測誤差を捉える得ることが確認された。今後、誤差の推定精度を改善し、評価システムとしての実用性を向上させることを目指す。

参 考 文 献

- 1) Raffel, M., Willert, C., J.Kompenhans, J.: Particle Image Velocimetry, A Practical Guide, Springer-Verlag (1998)
- 2) 可視化情報学会編: PIVハンドブック, 森北出版 (2002)
- 3) 西尾 茂, 村田滋: PIV計測の画像解析過程における誤差分析における誤差分析法の開発, 可視化情報学会誌, Vol.23, Supp. No.1 (2003) pp.39-42
- 4) Okamoto, K., Nishio, S., Saga, T., Kobayashi, T.: Standard Images for Particle Image Velocimetry, Jour. of Measurement Science and Technology, Inst. of Physics, Vol.11, No.6, (2000) pp.685-691.
- 5) 西尾 茂, 桐本兼輔: PIV計測における相関分布の高次解析—粒子パターンの変形が及ぼす影響について—, 可視化情報学会誌, Vol.25, Suppl. No.2 (2005) pp.197-200.