

流体計測

① 趣旨

様々な流体関連機器において、流速場を把握することはそれら機器の性能や安全性の向上に必要不可欠である。本ロードマップでは、流速場の計測法として一般的に普及している粒子画像流速測定法 (PIV) に焦点を当て、そのダイナミックレンジの将来予測を行う。

② 技術課題に対する社会的・技術的ニーズ

流速場を捉えるためには、主に数値計算に基づく方法と実験的方法とがある。前者は、境界条件を明確に定めることができ、実験で計測することが困難な多次元・多点の速度情報を再現性良く得ることができるが、一方で、計算格子の解像度や乱流モデルの妥当性の検証が常に要求される。一方、後者では、境界条件を明確に定めて実験を行えば、流れ場自体には疑義が生じることはないが、流速を計測するにあたって測定可能な物理量の種類や次元に制限を伴うと共に、常に不確かさを伴う。このように、両者それぞれ一長一短があるため、それらによって得られた結果を相互に比較することで互いの欠点を補間しながら流動場を理解することが望ましく、今日の流体関連機器の設計開発における一般的な手段となっている。

実験的方法によって流速場を捉える際に有効な計測手段として、粒子画像流速測定法 (PIV) が挙げられる。PIV は、トレーサ粒子を流れ場に混入した上でそれを可視化し、その画像から速度情報を得る方法である。瞬時の多点における速度情報を得ることができるため、流れの瞬間的な構造を理解するのに有用であると共に、数値計算結果との比較において親和性が高い。一方で、測定精度は従来の手法に比較して1桁程度低く、後述のダイナミックレンジの向上が望まれている。

③ キーパラメータ解説

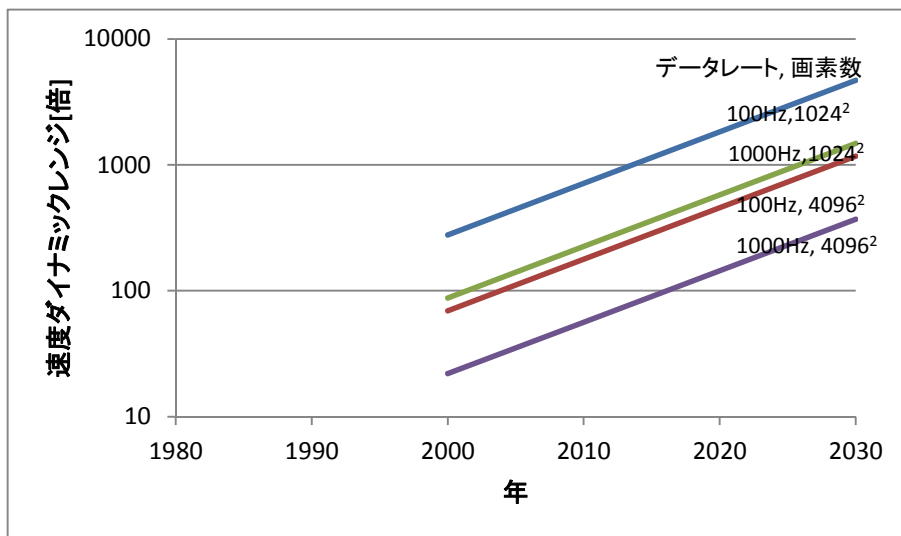
一般に測定のダイナミックレンジとは測定可能なレンジに対する測定誤差の割合である。PIV の速度のダイナミックレンジ (速度 DR、測定誤差：測定可能な速度範囲) は 1:100 程度と、熱線流速計などの従来の手法 (～1:1000) に比較して低いのが現状である。また、空間ダイナミックレンジ (空間 DR、空間分解能：測定可能な領域サイズ) も 1:100 程度かそれ以下であり、直接数値計算法 (DNS) やラージ・エディ・シミュレーション (LES) などの数値計算結果と比較すると十分とは言い難い。本ロードマップでは、これら速度ダイナミックレンジと空間ダイナミックレンジをキーパラメータとして取り上げる。

④ キーパラメータの高度化を実現するメカニズムの可能性

速度 DR は、多数の測定結果を平均して瞬時の速度を得ることで測定誤差を低減すること、および、粒子像の多時刻追跡によって粒子移動距離を延伸することで改善が可能と思われる。そのためにはカメラのフレームレートの向上が有効であろう。また、空間 DR は十分なトレーサ粒子が存在する場合には画像の解像度に依存すると考えられる。画像の解像度は、レンズの収差および回折限界を無視すれば、カメラの画素数の増加に伴って向上する。このように、カメラの性能と PIV の速度・空間 DR は直結していると予想される。高速カメラメーカー国内 2 社が発売したカメラの性能を調査した結果、カメラのデータレート、すなわち画素数×フレームレートは 10 年で 6.6 倍に向上しており、この傾向が今後も続くとすれば 2025 年には 1M 画素で 100kfps のカメラが入手可能となる。これを用いて流れ場の時系列計測を行い、時間的に連続する n 個の測定結果をアンサンブル平均すれば、そのランダム誤差は $n^{-1/2}$ 倍に低減することが期待される。これに従えば、2025 年には速度 DR が従来の 10 倍（～1:1000）のデータが 1kHz で取得できると予測される。ただし、このときのカメラの画素数は 1M 画素(1k×1k)であり、空間解像度は現状と同程度となる。一方、画素数が 16M 画素 (4k×4k) では空間 DR は従来 (1k×1k) の 4 倍となるが、上記と同程度の速度 DR の向上を実現するためにはデータレートが 60Hz に低下する。

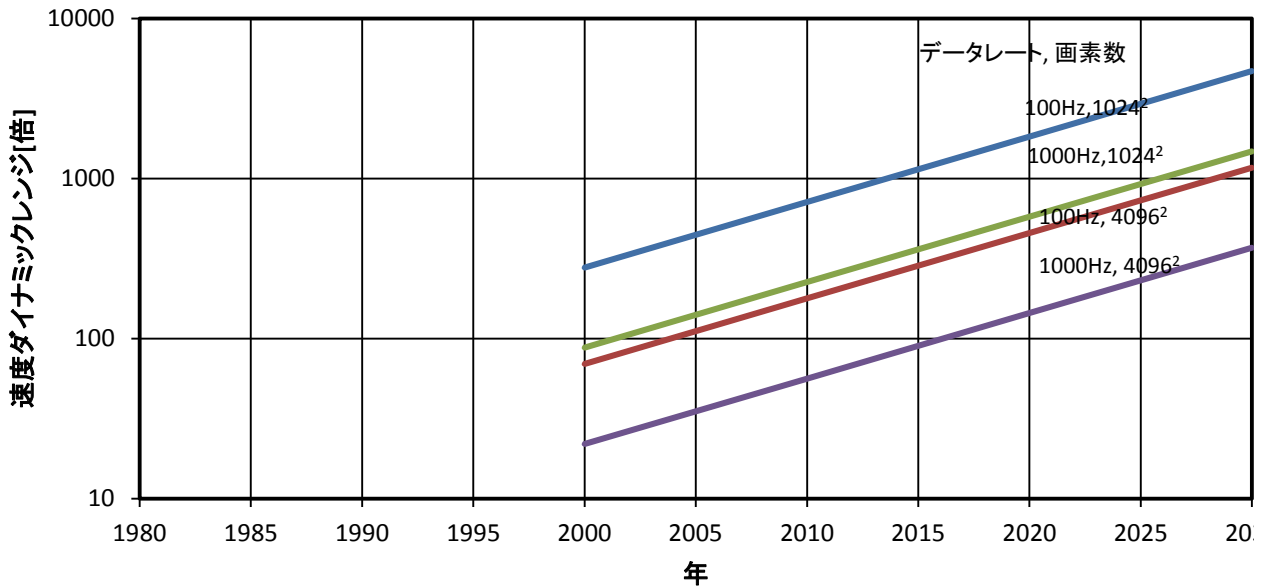
- ⑤ 将来の社会に関する展望 現在、工業製品はますます高性能化、高付加価値を要求され、一方、製品の早期市場投入のため開発期間のますますの短縮化が要請されている。そのため、従来の設計―試作サイクルを速めると共に、開発段階で精度の高い物理情報を取得することが要求される。このようなニーズに対し、従来は数値解析の利用によってこれを実現する動きが主流であったが、試作と計測、双方の高速化、低価格化、高精度化が実現できれば、実験も新世代の物づくりツールとして再評価されよう。現状の PIV は、高価な計測法として受け止められ勝ちであるが、半導体レーザーや LED の利用、CCD や CMOS 技術の発展によって大幅な低価格化が実現できれば、今まで以上にものづくりの現場に不可欠なものとなることが期待される。PIV の低価格化により、その応用としてダイナミックな流量計測への展開も期待される。また、PIV の計測結果にもとづき空間の圧力分布の計測あるいは推定が可能になれば、将来の数値解析技術の持つべきシェアの一部を担うことも可能になる。このように、ブレークスルーすべき課題も多くあるが、大きく発展する技術であることは疑う余地がないものとする。

	～1980	～1990	～2000	～2010	～2020	～2030
社会・技術ニーズ		瞬時速度場の計測による乱流構造の同定	多次元速度場の測定	高時間分解能 PIV による音場推定	高空間分解能 PIV による DNS との直接比較	PIV による圧力分布計測 LES を代替する PIV
技術的ブレークスルー		画像取り込み装置の汎用化	デジタル出力カメラの汎用化	高速・高解像度カメラの汎用化 高繰り返しレザ光源の汎用化	高 DR 計測可能な PIV アルゴリズムの開発	超高速・超高解像度カメラの汎用化 PIV の低価格化
社会・市場の変化	第一次オイルショック	第二次オイルショック	インターネットの普及 バブル崩壊	中国市場の発展	東北地方太平洋沖地震 福島第一原発事故	製品市場投入期間の短縮 超高齢化社会



社会・技術ニーズ

～1990	～2000	～2010	～2020	～2030
瞬時速度場の計測による乱流構造の同定	多次元速度場の測定	高時間分解能PIVによる音場推定	高空間分解能PIVによるDNSとの直接比較	PIVによる圧力分布計測 LESを代替するPIV



技術的ブレークスルー

画像取り込み装置の汎用化	デジタル出力カメラの汎用化	高速・高解像度カメラの汎用化	高繰り返しレーザ光源の汎用化	高DR計測可能なPIVアルゴリズムの開発	PIVの低価格化
第二次オイルショック	インターネットの普及 バブル崩壊	中国市場の発展		福島第一原発事故 東北地方太平洋沖地震	超高速・超高解像度カメラの汎用化 PIVの低価格化 超高齢化社会 製品市場投入期間の短縮

社会・市場の変化