



研究ノート

# 測定値と支配方程式を併用した環境場の推定

加賀 昭和\*

Estimation of Environmental Field  
by Coupling Measured Value and Governing Equations

Key Words : Field Estimation, Indoor Airflow, Flow Visualization, Hybrid-PIV

## 1. はじめに

工学分野において、実用的な見地から、対象となる現象を比較的単純な物理モデルで記述しようとしたとき、モデルの不正確さや、それを数値的に解く場合の解法に含まれる誤差、あるいは境界条件の不確かさなどにより、理論解が現実と一致しない場合も多い。一方、現象を測定値だけから把握しようとしたとき、対象場全体を把握するのに十分な密度の測定値を得ることが難しいという場合もしばしばある。私どもの研究室が扱っている大気環境、空気環境の問題もその一例である。

たとえば、建築内の空気環境を考えた場合、物理的な環境は、温湿度、風速、各種汚染物質の濃度などで表現され、それらを支配する方程式は空気の運動方程式、連続式、水蒸気・熱・各種汚染物質の輸送方程式であるが、上述の理由により、簡単な乱流モデルを用いて数値解により環境を再現することは困難である。また、室全体を正確に測定することで環境を把握することも、空間が大きい場合にはとくに、多大な労力を要する。

そこで私どもの研究室では、このような対象に対して、測定誤差を含んだ限られた数の測定値と、現象を支配する方程式との両方を、できるだけ有効に用いて、場全体を推定する手法を研究テーマの一つに挙げている。

## 2. 推定手法

私どもが用いている手法は、次式で定義される評価関数が最小となるように、温湿度、風速、各種汚染物質の濃度などの従属変数を、場全体で推定する手法である。

$$\text{評価関数} = \int \{ \Sigma (\text{推定値} - \text{測定値})^2 + \Sigma (\text{支配方程式の残差})^2 \} dX$$

ここで、 $\int dX$ は、独立変数である空間座標と時間に関する対象領域全体にわたる積分を表しており、 $\Sigma$ は、すべての従属変数に対しての和をとることを示している。このようにすると、測定値が存在しない点では、推定値は周辺の測定値をいわば境界条件とした支配方程式の解に近いものとなり、測定値が存在する点では、推定値は、測定値を支配方程式を満足する方向に修正した値となる。また、評価関数としてすべての従属変数に対して、測定値修正量と支配方程式の残差の自乗の和をとったものを用いているために、従属変数相互の間の関係が推定結果に反映される。たとえば極端な場合、速度に関する測定値がまったくなく、温度に関する測定値のみがある場合、温度はその測定値を修正したかたちで推定され、速度はその温度分布が熱輸送方程式を満足するように推定される。すなわち、速度の推定に関して熱がトレーサとしての役割を果たす。この点が私どもが提案している手法の特徴であり、その長所は数値実験<sup>1)</sup>や環境試験室での適用実験<sup>2)</sup>により検証されている。

## 3. 適用例

ここでは、比較的単純な例として、提案している手法を二次元平板後流の速度分布の推定に用いた例を示す。この場合には、観測値は速度のみ、支配方程式は空気の運動方程式と連続式のみである。

\* Akikazu KAGA  
1946年4月6日生  
1971年大阪大学大学院工学研究科機械工学専攻修士課程修了  
現在、大阪大学大学院・工学研究科・環境工学専攻、教授、工学博士、環境工学・流体工学  
TEL 06-6879-7668  
FAX 06-6879-7668  
E-Mail a.kaga@env.eng.osaka-u.ac.jp



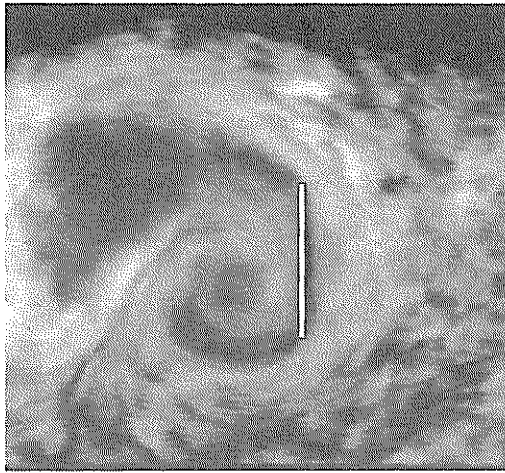


図1 平板後流の可視化画像(ビデオフレーム画像)

図1は大阪大学研究用風洞内で撮影した流れの可視化画像であり、トレーサにはグリセリンミストを用いている。このように煙状のトレーサで可視化した流れのVTR画像から、速度分布を画像処理によって時系列的に求めるPIV(Particle Imaging Velocimetry：粒子画像速度計測)手法は私どもの研究

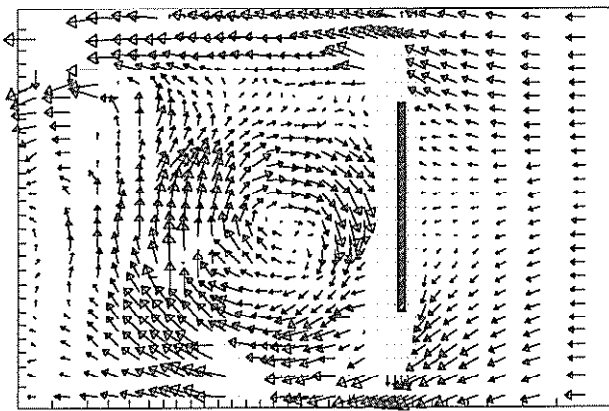


図2(a) 画像から算出した速度分布

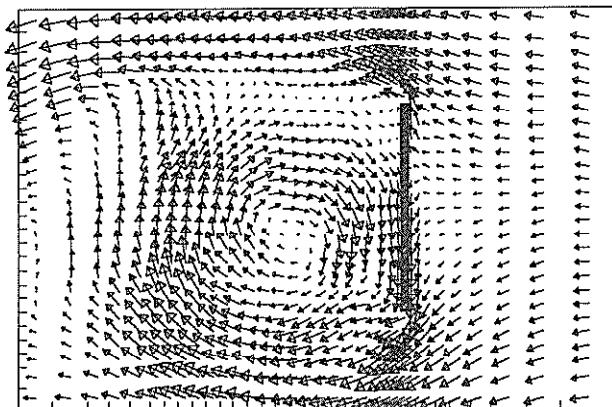


図2(b) 支配方程式を併用した推定結果

室でも独自に開発しており<sup>3)</sup>、その手法を用いて算出した速度分布は図2(a)のようになる。手法の特徴として、図2(a)にはデータの欠落と計測誤差が含まれているが、これに提案している推定手法を適用することで、図2(b)のような、より自然な流れ場が得られる。また、図2(a)のように密度の高い測定値が得られない場合を想定して、各時刻ごとに10個程度のまばらな測定値だけを与えた場合でも、カルマン渦の時間的に変動する流れがおよそ再現されている。推定のための支配方程式では乱流モデルに標準 $k-\epsilon$ モデルを用いており、支配方程式だけを単独に数値的に解くことによって、図3(c)のように時間的に変動する流れ場は得られず、測定値を導入することで初めて時間変動する流れが得られる。このように限られた数の測定値のみでも、現実に近い流れ場が再現されるのは、推定する時刻の直前の時刻における流れ場が妥当に推定されていることに負う部分が多い。図3(b),(c)の推定では最初の10時間ステップ程度は推定誤差が大きく、その後はほぼ一定の値となっている。このことは、提案する手法が、時間的に変動する流れの次の時刻の状態を予測する手法としても利用できる可能性を示している。予測におけるこの考え方は、天気の数値予報に用いられている、測定値と支配方程式を併用する手法とも共通するものである。

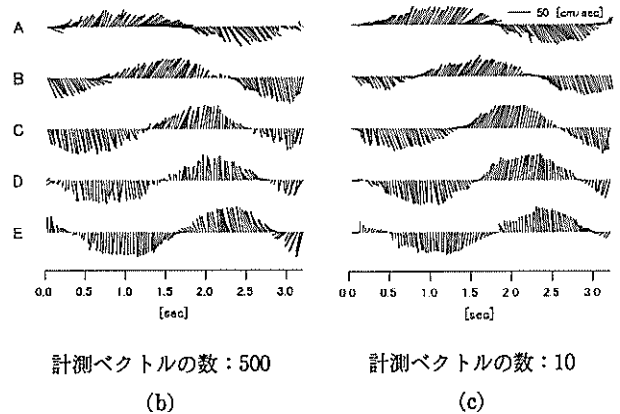
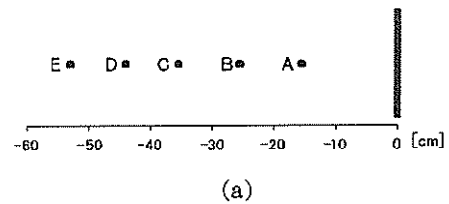


図3 下流点の推定ベクトルの経時変化と計測ベクトル数の関係

## 4. ま と め

室内空気環境の場を適用例として、測定値と支配方程式を併用した場の推定手法を紹介した。提案する手法を用いることによって、測定値の欠落を補間し、測定値に含まれる誤差を軽減させることが可能である。また、その関係を支配方程式によって記述することができる複数の物理量が推定対象となるとき、一方の測定値に、他方を推定するためのトレーサとしての役割をもたせることもできる。さらに、時間的に変動する現象に対しても、その直前の状態を測定値を併用することで現実に近いかたちに推定しておけば、短時間の将来予測までは可能と考えられる。私たちの研究室では現在、この手法を大気環境の場に拡張することを試みているが、このような手法が効果を発揮する例は、空気環境・大気環境の場以外にも数多くあるものと考えている。

## 参 考 文 献

- 1) 塩田 卓・加賀昭和・近藤 明・山口克人・井上義雄：観測値と流体方程式を融合した室内空気環境の把握，空気調和・衛生工学会論文集，No.79, pp.29-36 (2000.10)
- 2) 阿部知之・塩田 卓・加賀昭和・井上義雄・近藤 明・山口克人：煙可視化速度計測法と費用関数法を適用した空調室の気流分布推定，可視化情報学会誌，Vol.20, Suppl. No.1, pp.215-218 (2000.7)
- 3) 加賀昭和・井上義雄・山口克人：気流分布の画像計測のためのパターン追跡アルゴリズム，可視化情報学会誌，Vol.14, No.53, pp.108-115 (1994.4)

