

Evaluation of the method to estimate flow and temperature field using cost function

○ 久野 貴大 (大阪大学)

正 近藤 明 (大阪大学)

井上 義雄 (大阪大学)

正 塩地 純夫 (ダイキン工業)

正 小松 彰 (ダイキン工業)

Takahiro KYUNO*¹ Akira KONDO*¹ Yoshio INOUE*¹ Sumio SHIOCHI*² Akira KOMATSU*²*¹ Osaka University, 2-1 Yamadaoka, Suita-shi, Osaka*² DIKIN INDUSTRIES, LTD., 2-4-12 Nakasakinishi, Kitaku, Osaka-shi, Osaka

In fluid dynamics, CFD(Computational Fluid Dynamics) and measurements have been used for estimating flow fields. However, CFD has inevitably errors accompanied by boundary condition, discretization and numerical calculation, and measurements include missing data and some errors involving their methods. In this study, cost function which consists of errors of basic equations and of errors measured data was proposed to correct measurements using governing equations in room heat environment and understand both flow and scalar field accurately. As a result, it was confirmed that Cost Function Method is effective to estimate velocity and temperature if boundary condition is settled improperly in CFD.

Keywords: Cost Function Method, CFD, Room Flow

1.はじめに

流体工学における流れ場の速度分布や温度分布、濃度分布を把握するための手法として、数値解析 (CFD: Computational Fluid Dynamics) によるものと実測 (OFD: Observed Fluid Dynamics) によるものの2つの方法がある。しかし CFD には境界条件の簡略化や、数値解析の際のモデル近似や離散化による誤差が存在し、また OFD にも測定誤差や欠測が存在する。このため流れ場全体の正確な把握は困難であると考えられる。

本研究ではより正確に温・速度場を把握する手法として、測定値と流れ場の支配方程式を用いて補完・修正する費用関数法を提案する。これは測定値と数値解析を融合することによって、測定値の持つ情報により計算における境界条件の誤差を改善し、より精度の高い場の推定が出来ると予想される。そこで室内熱環境の空気分布の推定に適応することで、本手法の有効性を評価することを目的とした。

2.費用関数法

支配方程式: $f_k(\xi_i, \eta_j) = 0$ について、

ξ_i : 独立変数 $i=1,2,3$ (空間座標), 4 (時間)

η_j : 従属変数 $j=1,2,3$, (速度成分 u, v, w), 4 (圧力), 5 (温度)

f_k : 支配方程式 $k=1,2,3$, (NS 方程式の x, y, z 成分), 4 (連続の式), 5 (温度の保存式)

であると定義する。

費用関数 (CF: Cost Function) は最適化対象として考慮する従属変数に関連したすべての支配方程式の残差の二乗及び測定値の修正量の二乗の和として式 (1) で表される。

$$CF = \int \left\{ \sum_k \alpha_k \beta_k f_k^2(\xi_i, \eta_j) + \sum_j \alpha_j \beta_j C_{i,j} (\eta_j - \eta_{j,obs})^2 \right\} d\xi \quad \dots (1)$$

ここで $\int d\xi$ は対象領域全体にわたる全ての ξ に関する積分を、添え字 obs は測定値を表している。式 (1) のように関連する支配方程式 f_k 、及び測定値の修正量 $\eta_j - \eta_{j,obs}$ を全て用いて定義し、全ての η_j を $\eta_{j,obs}$ の周りで変化させて CF を最小化させることによって、より合理的な流れ場を得ようとする方法を費用関数法 (CFM: Cost Function Method) として提案する。さらに費用関数にはいかに示す目的に応じた次の3種類の係数を導入している。

- ・精度係数 $C_{i,j}$: 測定値毎の測定点の精度に応じて測定値修正量の項の寄与を調整するための係数
- ・等価係数 β_j, β_k : 次元の異なる費用関数各項への寄与を同等に評価するための係数
- ・重み係数 α_j, α_k : 透過係数により同等に評価される各項の寄与を目的に応じて主観的に操作する係数

CF を最小化するためには式 (1) を η_j で偏微分して 0 とお

いた式 (2)

$$\int \left\{ \alpha_k \beta_k \sum f_k \frac{\partial f_k}{\partial \eta_j} + \alpha_j \beta_j C_{i,j} (\eta_j - \eta_{j,obs}) \right\} d\xi = 0 \quad \dots (2)$$

を反復計算により解いて η_j を求める。なお、初期値については、測定値 $\eta_{j,obs}$ が存在する格子点ではこれをそのまま使い、それ以外の欠測点では最適化計算の収束を早めるために予め数値解析を行い、これを用いることにする。費用関数法ではその扱う支配方程式及び最適化する従属変数の組み合わせにより個別型費用関数法 (individual CFM) と統合型費用関数法 (integrated CFM) に分類する。それぞれの手法で考慮される $\partial f_k / \partial \eta_j$ の組み合わせについて Figure.1 に示す。

		k				
		1	2	3	4	5
j	1	○			○	○
	2		○		○	○
	3			○	○	○
	4	○	○	○		
	5					○

Figure.1 Combination of k and j in CFM (Integrated CFM in shaded region)

個別型において速度は NS 式と連続式を偏微分し、温度は温度の保存式を偏微分することで式(2)を最小化して解を求める。統合型では個別型で用いられた組み合わせに加えて温度の保存方程式を速度成分で偏微分することで温度分布から速度分布を推定する。これにより温度分布から速度分布を修正し、修正された速度分布からさらに温度分布を修正するサイクルが生まれるため全従属成分の精度が向上することが予測される。

3.実測

費用関数法の対象となる3次元室内熱環境での速度分布と温度分布を測定するため、室内の温湿度や吹き出し口からの風速を自由に調節することができる環境試験室において実験を行った。本研究では費用関数法の有効性を検証することを目的とするため、部屋の中央に作業机の上に発熱源を置き、側壁面から給気、反対の側壁面から排気を行う簡単な室内を想定する。室内の概要を Figure.2-3 に示す。

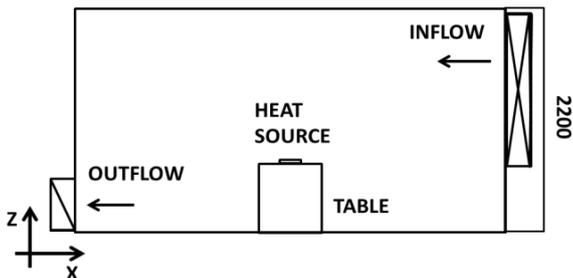


Figure.2 Candidate Room(x-z cross section)

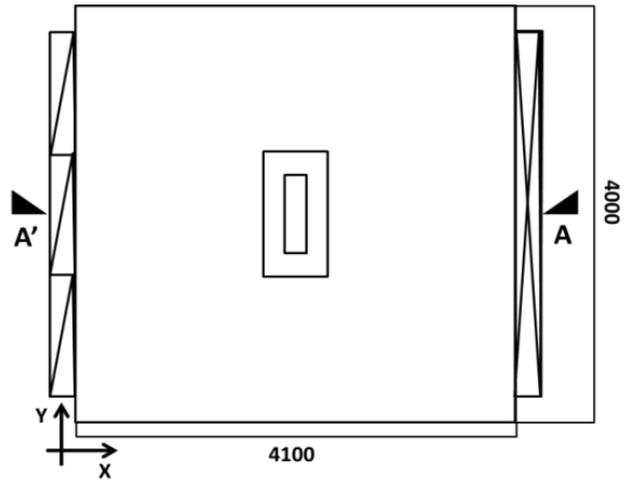


Figure.3 Candidate Room(x-y cross section)

室内寸法[mm]は 4100W×4000D×2200H であり、給気温度は 20° C に設定した。熱源は最大容量 600W のものを 3 つ用意し、それぞれを可変抵抗器に繋ぐことで発熱量を自由に設定できるようにした。

実測には熱電対と超音波風速計を用いて、温度を 432 点(9×6×8)、速度を 54 点(9×2×3)測定した。以下に熱源容量 400W-400W-400W の計 1200W とした場合の y 方向中央における XZ 断面(A-A')の温・速度分布を Figure.4-5 に示す。

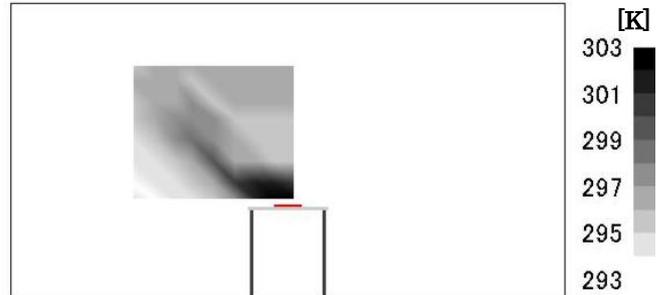


Figure.4 Observed Temperature distribution (A-A')

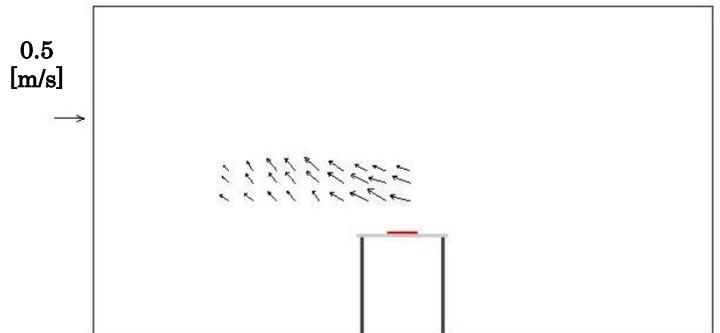


Figure.5 Observed Velocity distribution (A-A')

実測の結果、図中左上に向かって温度、速度共に発達しているのが確認できた。これは熱源により発生した熱によって浮力が生じ、その上昇気流と吹き出し口からの水平方向の空気の流れが合わさったためである。費用関数法の対象として温度分布と速度分布での浮力の効果を検証するという目的において、この結果は浮力と対流がバランスよく取れていると言えることが出来る。

4.費用関数法による推定

費用関数法では、測定値の欠測部に数値解析のみの結果を代入することで計算の収束を早める。室内熱環境を対象として数値解析を行うため、比較的低流速の乱流場における非圧縮性流れと仮定する。そこで乱流モデルには標準 $k-\epsilon$ モデルを採用する。解法としては SIMPLE 法を、移流項の差分法としてべき乗法を用いて、 $105 \times 100 \times 55$ の均一メッシュにおける定常計算を行った。用いた境界条件を Table.1 に示し、数値解析のみの計算結果の温・速度分布を Figure.6-7 に示す。(図中の黒枠は実測値の挿入箇所を含む空間を示す。)

Table.1 Boundary condition

INFLOW	0.16m/sec (uniform distribution)
OUTFLOW	No restraint
HEAT	1200W (uniform from each surface)
WALL SURFACE	Heat Transfer Rate 10W/m ² /K

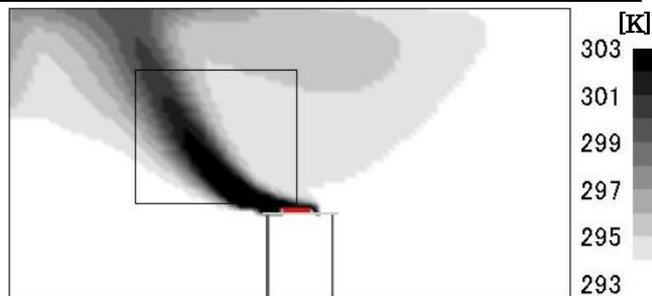


Figure.6 Temperature distribution using only CFD

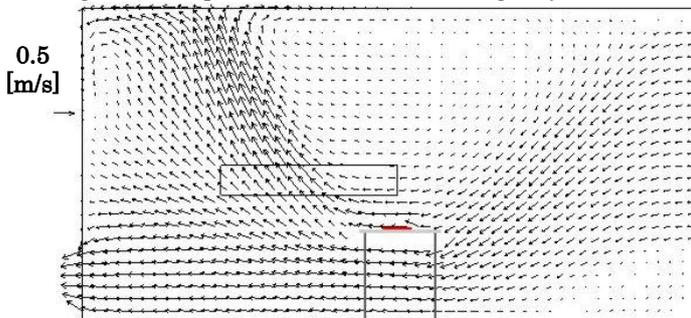


Figure.7 Velocity distribution using only CFD

数値解析でも実測の場合同様に浮力の発生による上昇気流が確認できる。しかし実測値と比較して温度の高い部分が大きく、上昇気流も範囲が広く強くなっているのが分かる。これは熱源の発熱量の条件の設定が正確にできていないことによるものと考えられる。

この計算結果と実測値を用いて費用関数法を適用する。このとき実測値は A-A' 断面に対して面对称であるとし、温度 864 点(432×2)、速度 108 点(54×2)を挿入した。個別型により推定された温・速度分布を Figure.8-9 に、統合型によるものを Figure.10-11 に示す。

費用関数法を適用することによって、数値解析のみでは強く発達していた温度と上昇気流が、実測値程度に抑えられていることが確認できる。このことから数値解析のみよりも費用関数法を用いることによって境界条件からの誤差を修正

しより実測値に近い値を得ることが出来たと言える。また個別型と統合型を比較すると、個別型よりも統合型の方が僅かだが上昇気流が熱源に近くで発生し、温度上昇も小さく抑えられている。これは温度の保存式を速度で偏微分することによって温度がより実測値に近い値となり、その結果上昇気流の位置も改善されたと考えられる。しかし、温度分布での熱源上部(実験値挿入箇所右上)において、上昇気流から不自然に右側に突き出た形の温度上昇が見られる。これは実測値において実測の際に天井にこもってしまった熱により熱源上部が温度上昇していることの影響が出てしまったためと考えられる。

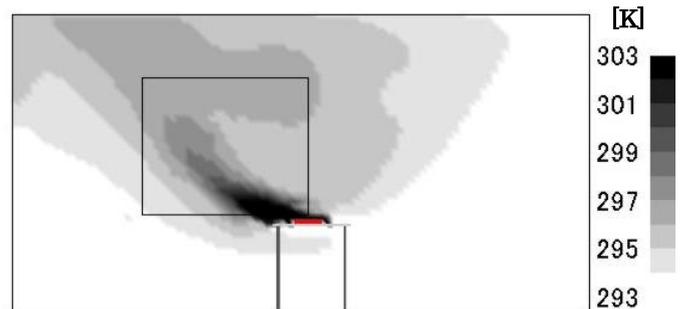


Figure.8 Temperature distribution using individual CFM

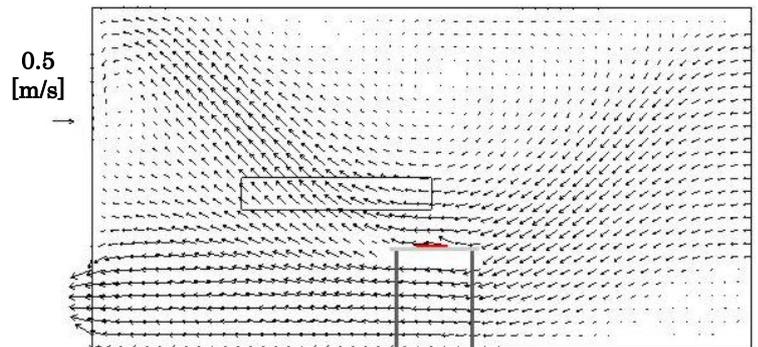


Figure.9 Velocity distribution using individual CFM

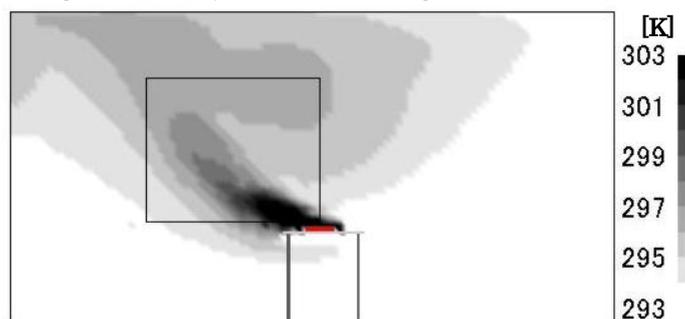


Figure.10 Temperature distribution using integrated CFM

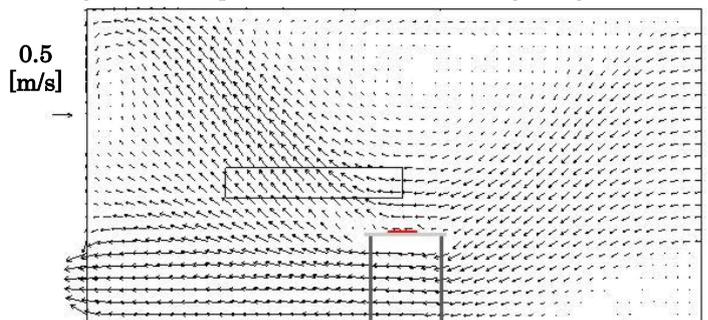


Figure.11 Velocity distribution using integrated CFM

計算結果を定量的に比較するため温度、速度ベクトルの角度、大きさについて測定値とそれぞれの計算結果の相関図をFigure.12-14に示す。この時、横軸に測定値を取り、縦軸を計算値とした。丸印が数値解析のみ、四角を個別型費用関数法、三角を統合型費用関数法が計算結果を示す。また角度についてはXZ平面における水平方向を基準とした。

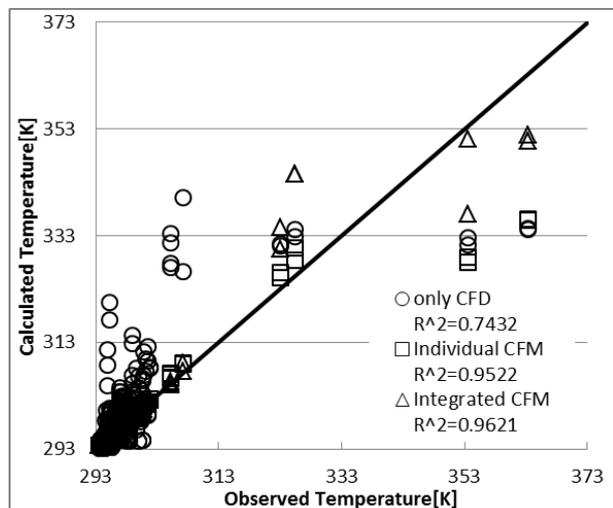


Figure.12 Observed versus calculated temperature

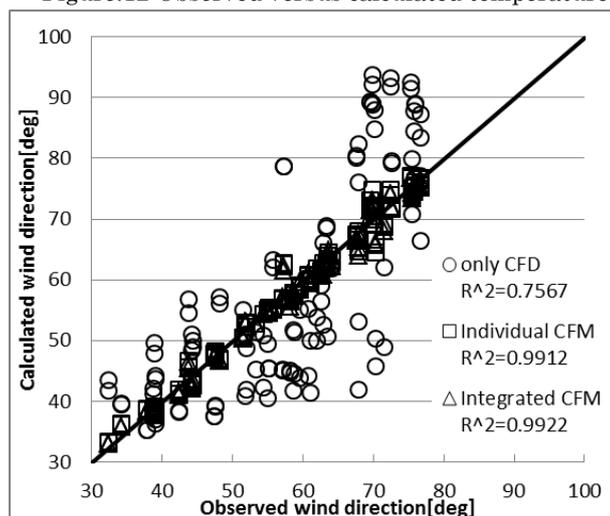


Figure.13 Observed versus calculated wind direction

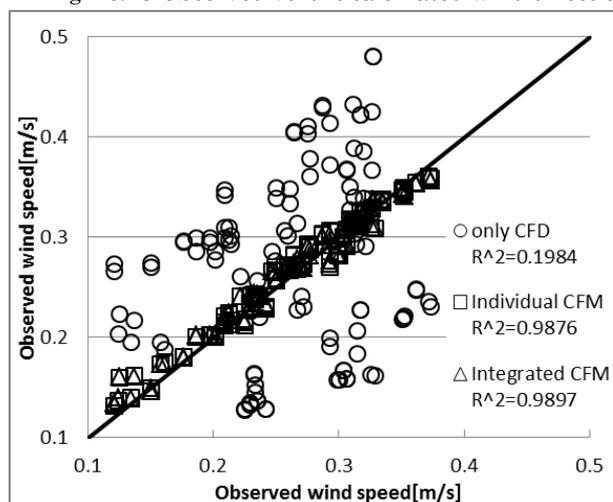


Figure.14 Observed versus calculated wind speed
相関図から温度、速度ベクトルの角度と大きさの全てで数

値解析のみの結果よりも費用関数法を適用した結果が、より実測値に近い値を取っていることが確認でき、費用関数法の有効性を証明できた。また、個別型と統合型に関してわずかに統合型の方が実測値に近い値を取っていると言えるが明確な差は見られず、はっきりとした優位性を確認することは出来なかった。

5.まとめ

本論文では、室内全体における空気分布の把握を行うために、測定値の持つ情報を活かしながら支配方程式の物理法則を可能な限り満たすような流れ場を与える費用関数法を提案した。この手法を用いるため、吹き出し空気温度・風速を自由に調節することの出来る環境試験室において、熱源が存在する3次元定常非等温場を模擬し、熱源による浮力の効果について温度と速度を測定した。そして実験環境をモデル化し、数値解析のみの推定を行った上で、費用関数法を適用し、数値解析のみの結果と比較することで費用関数法により得られた流れ場の妥当性と室内空気分布の把握への有効性を検証した。その結果、費用関数法を用いることで、温・速度場ともに数値解析のみより正確に推定することが可能であることを証明できた。統合型については同じ室内熱環境での2次元定常場計算では、個別型よりも明らかな優位性が見られている^[4]が、本研究における3次元定常場計算では改善がわずかであり、個別型との明確な差は確認することは出来なかった。これについては2次元での適用の場合と同様、挿入する実測点を減らしていった際に差異が見られてくるのではないかと考えられており、今後の課題の一つである。

本研究は将来的に費用関数法を用いて、部分的な環境条件を入力することでそれを満たす給排気条件や発熱源汚染源を逆問題として解析的に解くツールとして応用することを目標としている。そのためには本研究のように多くの点での実測は困難であり、測定点の位置や数、重み付けが重要であり、それらの推定をしなければならない。また実測値から得た情報により熱源の発熱量などの境界条件を修正するような手法や、実測値を挿入した箇所以外へ改善を促すような手法への発展が望まれる。さらに実用化に向けては、計算時間の短縮や不均一格子への適用など検討すべき課題は多い。

参考文献

- [1] 塩田卓, 加賀昭和, 近藤明, 井上義雄, "費用関数法を用いた測定値と数値解析の融合による室内空気分布の把握手法に関する研究" 大阪大学学位論文, 2000
- [2] 水谷幸夫, 香月正司共訳, "コンピューターによる熱移動と流れの数値解析", 森北出版株式会社, 1985
- [3] 空気調和・衛生工学会編, "空気調和・衛生工学便覧第14版 1 基礎編" 空気調和・衛生工学会, 2010
- [4] Akira Kondo et al., "Understanding of flow and scalar fields by combining Measured Data and CFD", ASHRAE ANNUAL CONFERENCE, Albuquerque, 2010