

費用関数を用いた室内環境推定手法の開発

(第1報) 温度・速度場推定の可能性評価

Development of the method to estimate indoor environment using cost function

(Part1) Potential assessment to estimate temperature and flow field

正会員 ○吉見 敦史 (ダイキン工業)

正会員 塩地 純夫 (ダイキン工業)

正会員 小松 彰 (ダイキン工業)

正会員 近藤 明 (大阪大学)

正会員 井上 義雄 (大阪大学)

学生会員 久野 貴大 (大阪大学)

Atsushi YOSHIMI*¹ Sumio SHIOCHI*¹ Akira KOMATSU*¹

Akira KONDOU*² Yoshio INOUE*² Takahiro KYUNO*²

*¹ DAIKIN INDUSTRIES, LTD. *² Osaka University

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.

はじめに

オフィス空間など実際に使われている状況の室内環境を正確に把握することは、快適性の面からだけでなく、空調設備の非効率運転の原因を特定する上で省エネ性の面からも重要である。実際の室内環境を把握する手段として、センサーや計測機器による計測(温度分布、速度分布など)と数値計算(CFD)が考えられる。計測は測定点を細かくすることが難しいことから、室内環境のマクロな把握が可能である。一方CFDでは、吹出し気流分布や壁面条件などの境界条件を実際の現象に合わせて設定することが困難であることから、計算結果が室内環境を再現できているか信用し難いといった課題がある。

筆者らは、室内の一部の計測値とCFDによる計算値から室内全体の空気分布を推定する手法として、計測値とCFDによる計算値を融合させた費用関数法(CFM: Cost Function Method)を研究している。費用関数法は、計測値を直接挿入するのではなく、流れ場の支配関数を満たしながら、計測点がある位置では計測値に近づくようにCFDを行う手法である。この手法を用いることで、発熱量など条件が正確に分からない場合でも、いくつかの計測値とCFDによって室内環境を再現できる可能性がある。本報では、境界条件が適切に設定されていないCFDが、費用関数により実測された流れ場を再現できるか評

価を行った結果について報告する。

1. 費用関数法

1.1 費用関数法とは

費用関数法とは、目標設定値をある関数で表現し、その目標設定値を最小(または最大)にするような条件を見つける方法である。本研究の場合、目標設定は場を支配する基礎方程式と実測値を満足することである。関数は基礎方程式の残差と、「計測値とCFDによる計算値の差」の各々の二乗の和である。この関数を最小値にする条件を求め¹⁾。

1.2 費用関数法の概要

支配方程式を以下のように定義する。

$$f_k(\xi_i, \eta_j) = 0$$

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)

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」

の二乗と、「測定値の修正量」の二乗の和として式(1)であらわされる。

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

ここで $\int d\xi$ は対象領域にわたる全ての ξ に関する積分を、添え字の 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、温度場を得ようとする手法が費用関数法である。さらに費用関数は以下に示す目的に応じた3種類の係数を導入している。

- 1) 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項の寄与を調整するための係数
- 2) 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
- 3) 重み係数 α_j, α_k : 等価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)を反復計算により解いて η_j を求める。

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

初期値については測定値 $\eta_{j,obs}$ が存在する格子点では測定値を用いる。それ以外の欠落点では最適化計算の収束を早めるためにあらかじめ CFD 解析を行い、解析結果を用いる。

費用関数法では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) に分類できる。それぞれの手法で考慮される偏微分の組み合わせを図-1に示す。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さらに温度分布を修正するサイクルが生まれるために全従属成分の精度向上が予測される²⁾。

1. 3 室内環境推定に適用する場合の課題

これまで費用関数法は2次元等温場や3次元等温場に

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

図-1 f_k と η_j の組み合わせ
(網掛け部分は統合型のみ)

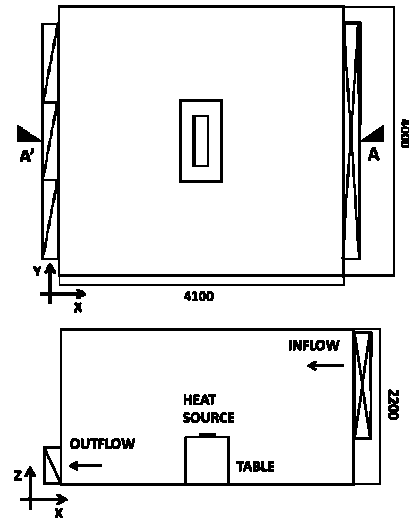


図-2 環境試験室の概略図

における温度場、速度場の修正の可能性が評価されており、数値の修正が確認されている³⁾。本研究の目的である室内の一部の実測値と CFD から室内全体の空気分布を推定する手法として用いるには以下の課題が挙げられる。

- 1) 費用関数法で挿入する計測値の数や位置の設定基準がない。
- 2) 費用関数法における融合の際に、計測値に与える重み係数の決定方法が確立されていない。
- 3) 計測データのないエリアに対する影響が確認されていない。

本報では、費用関数法を適用することで異なる境界条件を与えた CFD の結果が計測値に近い値に修正されることを、計測値と計算値の相関を計算することで評価を行う。

2. 基礎試験

評価で使用する計測値を取得する目的に、環境試験室で温度分布、速度分布を測定した。この試験室は室内の温湿度や吹出し口からの風速を自由に調整することができる。試験室では、部屋中央に設置した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

行う簡単な室内を設定した。室内の概要を図-2に示す。室内寸法[mm]は4100W×4000D×2200Hである。吹出し口寸法[mm]は3500W×1500Hで開口面積は5.25m²である。風量は50.4m³/minz(風速平均0.16m/s)に設定し、給気温度は20℃に設定した。熱源は最大容量600Wのものを3つ、砂を敷き詰めた容器の上において、Y軸方向に縦に並べた。それぞれの熱源は可変抵抗器を接続することで発熱量を自由に設定できるようにした。計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。

熱源容量500W-200W-500Wの計1200Wとした場合のY軸方向中央におけるXZ断面(A-A')の温度、速度分布をそれぞれ図-3、図-4に示す。計測の結果、浮力の影響と対流の両方の影響を受けて熱が左上方に流れていることが確認できた。

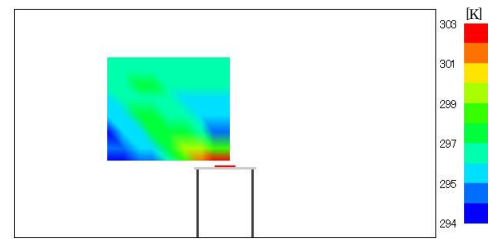


図-3 温度分布(基礎試験)

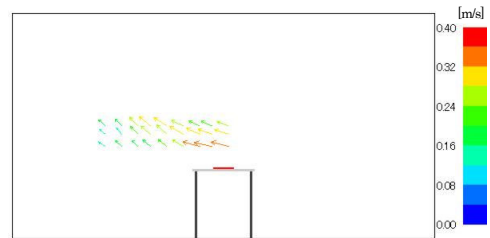


図-4 速度分布(基礎試験)

表-1 境界条件

給気量	0.16m/sで均一
排気量	自由開放
発熱量	合計1200W(400W-400W-400W)
壁条件	全壁面において熱伝達10W/m ² /K

3. 費用関数法の可能性評価

費用関数法を行うことで適切でない境界条件を与えても温度場、速度場が修正されることを確認するために、環境試験室内のCFDを行った。乱流モデルに標準k-εモデルを採用した。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105×100×55の均一メッシュにおける定常計算を行った。境界条件を表-1に示す。熱源の値を実験で設定した値と異なり、均一に設定した。CFDでの計算結果の温度、速度分布をそれぞれ図-5、図-6に示す。

CFDの計算結果でも基礎試験の場合と同様に、浮力の発生による上昇気流が確認できた。しかし計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い流れになっていることが確認できた。これは熱源の境界条件が試験条件と異なり、熱源中央部での発熱量を設定値より大きくしたことに起因する。また、発熱体から発生した熱が空気中だけでなく、砂を通じて机に伝わった熱を考慮していないため、空気中への放熱量を過大評価した可能性も考えられる。

次に、計測値を用いて費用関数法によるCFD計算結果の修正を行った。このとき計測値は、A-A'断面に対して面対称であるとし、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度、速度分布を図-7、図-8に、統合型によるものを図-9、図-10に示す。今回重み係数αは1とした。

費用関数法を適用することによって、CFDのみでは強く発達していた温度上昇と上昇気流が、計測値程度に抑えられていることが確認できた。温度分布、速度分布ともに、個別型と統合型の間には明確な差は見られなかった。

計算結果の定量的な比較を行った。温度、速度(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を

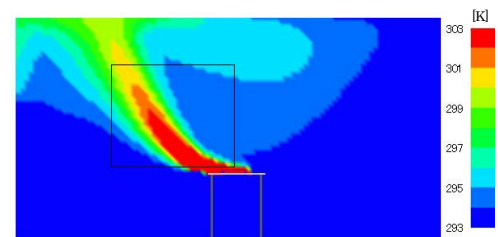


図-5 温度分布(CFD)

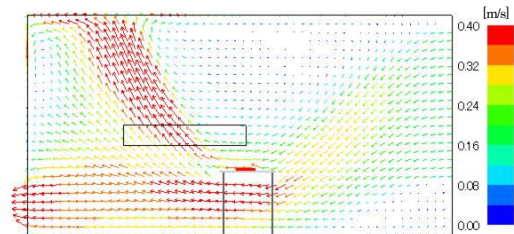


図-6 速度分布(CFD)

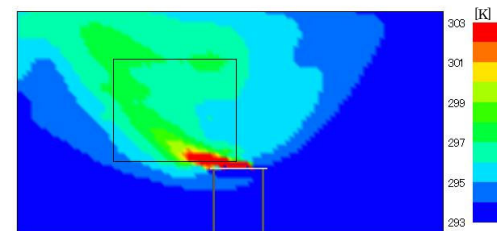


図-7 温度分布(個別型)

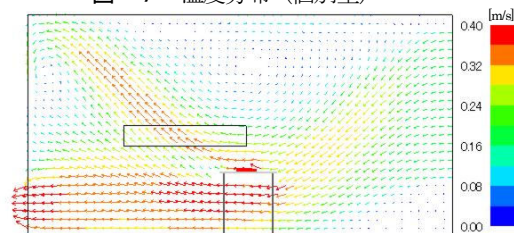


図-8 速度分布(個別型)

計算した。その結果を図-11, 図-12, 図-13に示す。横軸に計測値をとり、縦軸を計算値とした。角度についてはXZ平面における水平方向を基準とした。

相関図から温度、速度ベクトル角度と大きさの全てでCFDの結果のみの計算結果より費用関数法を適用した結果が、より計測値に近い値をとっていることが確認できた。また、個別型と統合型に関してわずかに統合型のほうが計測値に近い値をと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できなかった。

4. まとめと今後の課題

費用関数法を用いることで、試験設定条件と異なる境界条件で計算したCFD計算結果を修正し、より計測値に近い値になることを確認した。これまでの研究⁴⁾で2次元定常場計算では個別型に対し統合型が明らかな優位性が見えているが、本結果では個別型と統合型では優位な差はみられなかった。挿入する計測値を減らしていった際に差が見えてくるのではないかと考えられる。

今回は測定点を多く用いて費用関数法による修正を行った。実用化に向けて、挿入する測定点を減らした場合でも流れ場が修正されるかどうか調べる必要がある。また、計算の高速化、重み関数の設定方法の一般化、測定点のないエリアへの影響などが課題として挙げられる。

費用関数法では計算結果が修正される場所は基本的に測定データのある場所に限定されるが、新たに気象の分野で検討されている4VCA(4 dimensional variable continuous assimilation)法⁵⁾をCFD計算結果の修正に用いることで測定点のないエリアにおいても精度が向上する可能性があるため、これも検討していく予定である。

参考文献

- 1) 加賀昭和, 塩田卓, 近藤明, 井上義雄, 山口勝人” 測定値とCFDの融合のための費用関数法の非定常流れ場への適用” 日本機械学会論文集(B編)69巻682号(2003-6)
- 2) 久野貴大, 近藤明, 井上義雄, 塩地純夫, 小松彰” 費用関数法を用いた温・速度場推定手法の可能性評価” 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会(第41回) A42,2012年3月
- 3) 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環境の把握” 空気調和・衛生工学論文集No79, 2000年10月
- 4) Akira kondo et al.,”Understanding of flow and scalar fields by combing Measured Data and CFD”,ASHRAE ANNUAL CONFERENCE,Albuquerque,2010
- 5) 吉村慶一, 近藤明, 加賀昭和, 山口克人” VCA を用いた気象場の初期設定に関する研究” 第15回流体力学シンポジウム, E03-3

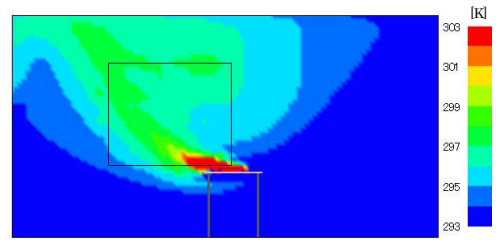


図-9 温度分布 (統合型)

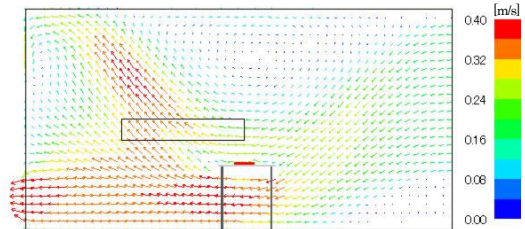


図-10 速度分布 (統合型)

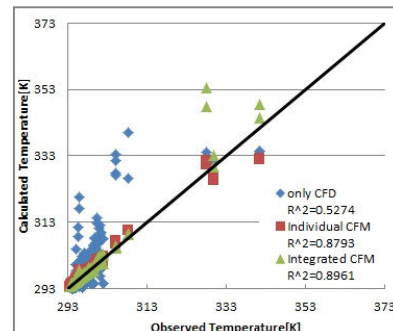


図-11 実測値と計算値の相関図 (温度)

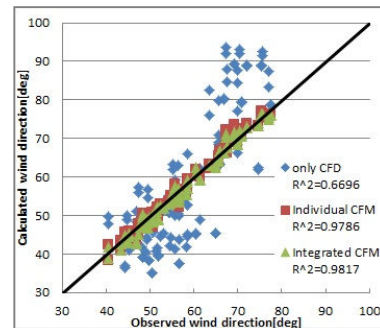


図-12 実測値と計算値の相関 (速度ベクトル角度)

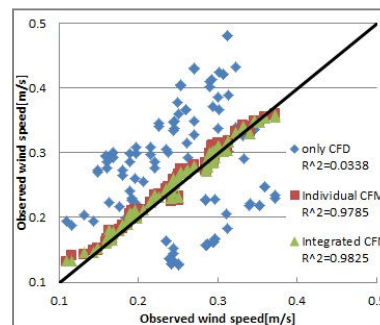


図-13 実測値と計算値の相関 (速度ベクトル大きさ)