

# 費用関数法を用いた室内温熱環境の推定

## Estimating Indoor Flow and Temperature Fields Using Cost Function Method

○Dong Kunting (大阪大学)

松尾 智仁(大阪大学)

嶋寺 光(大阪大学)

近藤 明 (大阪大学)

DONG Kunting\*<sup>1</sup>Tomohito MATSUO\*<sup>1</sup>Hikari SHIMADERA\*<sup>1</sup>Akira KONDO\*<sup>1</sup>

\*<sup>1</sup> Osaka University

The estimation of the indoor physical field in a target region is essential. There are two methods that have been widely used to estimate temperature fields, CFD (Computational Fluid Dynamics) and measurements. However, it is not easy to obtain reliable CFD simulation data due to the errors accompanied by discretization, numerical calculation and uncertainty of boundary conditions, also observation data due to unavoidable measurement errors. Herein, to estimate indoor flow and temperature fields accurately, Cost Function Method (CFM) consisting of errors of basic equations and of observed data errors was proposed in this study and confirmed to be valid.

### はじめに

快適な室内温熱環境の構築するためには、正確に室内温度場を把握する必要がある。流れの温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 には離散化やモデル近似による誤差が存在し、また実測にも使用する測定機器、データの変換ならびに測定者の人為的な誤差が必ず存在する。

そこで本研究ではより正確に室内温熱環境を把握するため、測定値を用いて流れの支配方程式を補間・修正する費用関数法を適用することで室内温度分布を推定し、費用関数法の有効性を評価することを目的とした。

### 1.費用関数法について

費用関数法とは、費用関数と呼ばれる関数を作成し、この関数を最小化するように場を修正する手法である。

費用関数  $CF$  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。

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

ここで、支配方程式:  $f_k(\xi_i, \eta_j) = 0$  について、

- $\xi_i$ : 独立変数 (空間座標、時間)
- $\eta_j$ : 従属変数 (速度、圧力、温度、濃度)
- $f_k$ : 支配方程式 (運動方程式、連続の式、温度の保

存式、スカラーの保存式)

- $C_{ij}$ : 精度係数 (測定点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)
- $\beta_j, \beta_k$ : 等価係数 (各変数が同程度の不確実性を持つとき、費用関数に対する各変数の寄与が同程度になるように調整するための係数)
- $\alpha_j, \alpha_k$ : 重み係数 (各支配方程式、変数の相対的な重要性を主観的に設定するための係数)

$\int d\xi$  は対象領域全体にわたる全ての  $\xi$  に関する積分を、添字  $obs$  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  $f_k$ 、および測定値の修正量  $\eta_j - \eta_{j,obs}$  を全て用いて費用関数を定義する。全ての  $\eta_j$  を  $\eta_{j,obs}$  のまわりで変化させて  $CF$  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。費用関数は残差・誤差の大きさを示す値であるため、小さい方が望ましい。費用関数法では、費用関数を最小化するように変数を変化させる、という操作を繰り返し行うことで、CFD 計算値を修正する。

$CF$  を最小化するためには式(1)を  $\eta_j$  で偏微分して0と書いた式(2)を反復計算により解いて  $\eta_j$  を求める。費用関数を最小化する CFD 計算値を探索するために、最急降下法 (steepest descent method) を用いる。

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

本研究では、費用関数法の妥当性を検証するために数値実験を行った。観測データから未知の室内温度分布を推定する数値実験の手順を以下に示す。

- 1) 熱源が既知の場合について CFD シミュレーションを行い、温度分布を求める（「正解値」）。
- 2) 観測点を配置し、室内の温度分布の一部を抜き出したものを観測データとする。
- 3) 観測データと費用関数法を用いて、熱源が未知の場合の CFD シミュレーションを修正し、温度分布を推定する。

## 2. 数値実験方法

### 2.1 対象領域と計算条件

数値実験においては、数値解析の結果を実際の場合（「正解値」）とみなし、その計算結果の一部を抜き出したものを観測データとみなす。熱源が設置された 3 次元室内空間を対象に、CFD シミュレーションを行った。

対象領域を Fig.1 に示す。領域は  $4.2 \times 4.0$  m、高さ 2.2 m である。東西を X 方向、南北を Y 方向、鉛直方向を Z 方向とし、床面南西端に原点を取った。また、中央の机の上に  $0.04 \times 0.24 \times 0.04$  m の熱源が 3 つあり、東側壁面から給気、反対の西側壁面から排気を行う。正解値の作成における境界条件を Table 1 に、観測点の配置を Fig.1 及び Table 2 に示す。

CFD シミュレーションには、オープンソース CFD ツールボックスである OpenFOAM のバージョン 4.0 を修正して用いた。非圧縮性非等温流れを仮定し、ブシネスク近似により浮力を表現した。乱流モデルには標準  $k-\epsilon$  モデルを用いた。支配方程式は運動方程式、連続の式、温度の保存式である。速度と圧力の連成解法には SIMPLE 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。

Table 1. Boundary conditions of calculation for correct field

Boundary	Boundary condition
Inlet	Velocity: 1 m/s Temperature: 20°C
Outlet	Free outflow
Walls	Velocity: No slip Temperature: 20°C
Heat Sources	Thermal loads: 400 W $\times$ 3

### 2.2 観測データの作成

各熱源の発熱量が 400W の計 1200W とした場合の y 方向中央における XZ 断面の温度・速度分布を Fig.2-3 に示す。吹出口から西向きに水平に吹出された流れは熱源付近を通過し、図中左下の吸込口側に向かう。熱源の風下で温度が上昇することが分かる。主流の流れが速いため、熱は主に移流により輸送されており、高温の領域が熱源から吸込口に向かって、流れに沿って風下に伸びている。

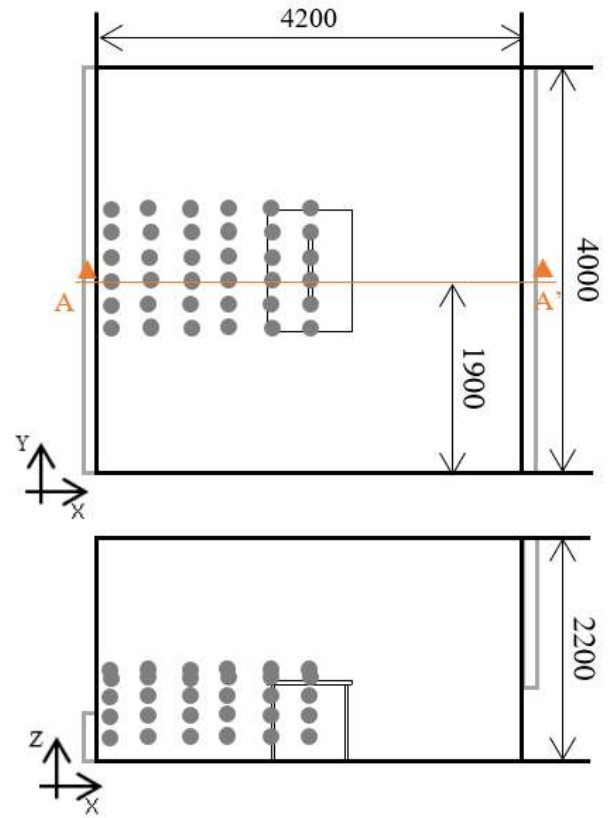


Fig.1. Calculation domain and observation points

Table 2. Information of observation points

Coordinates of observation points						
X	0.1	0.5	0.9	1.3	1.7	2.1
Y	1.5	1.7	1.9	2.1	2.3	2.5
Z	0.3	0.5	0.7	0.82	0.9	

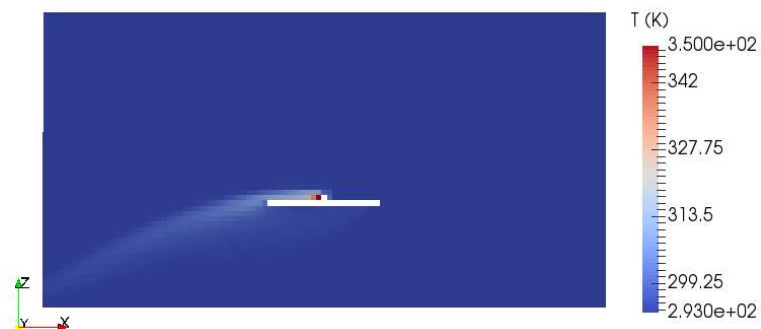


Fig.2. Calculated correct temperature distribution

その計算結果の観測点における温度を抜き出し、観測データを作成した。なお、観測誤差はないものとした。

## 3.費用関数法による推定

費用関数法を適用するための初期 CFD 計算条件として、観測データの作成に用いたのと同じ対象領域に対し、熱

源を発熱させずに計算を行った。境界条件を Table 3 に、温度分布を Fig.4(a) に示す。初期条件では熱源が発熱しないため、室内には温度分布が存在していない。

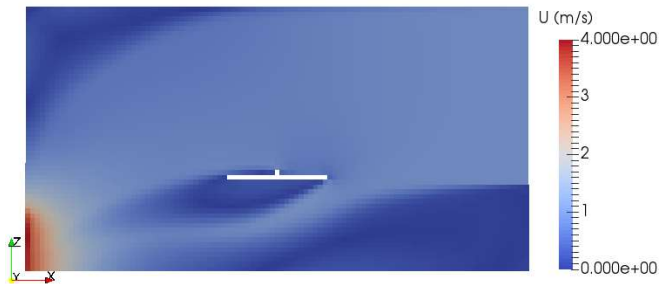


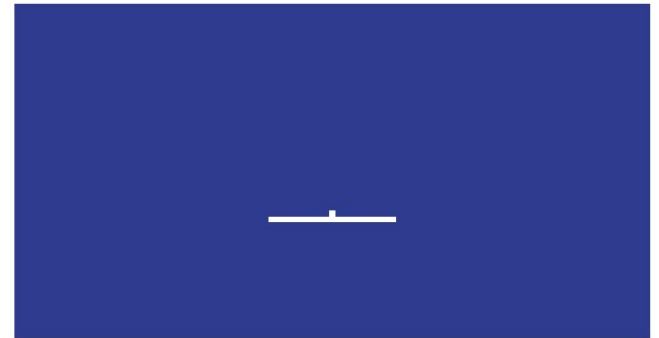
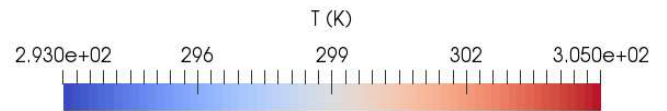
Fig.3. Calculated velocity distribution

この計算結果と観測データに対して費用関数法を適用する。このとき観測値は温度 180 点 (6×6×5) を挿入し、観測点における温度を固定した。費用関数法は、観測点の温度を固定し、費用関数を最小化するように、CFD 計算値を修正する。費用関数法で修正された場合は初期と比べて左下の吸込口側に温度が上昇し、熱が吸込口に向かって流れていく傾向が見られる。修正の空間分布について、費用関数法は観測点の周辺を修正することしか出来ておらず、物理現象に適応していない。また Fig.4(b) 中赤色の熱源周辺に集中している高温部分も再現されていない。Fig.4(c) より観測点の位置が費用関数法の計算結果に重大な影響を与えている事が分かった。

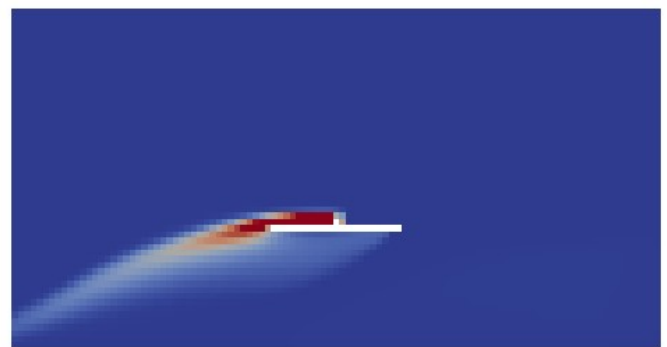
Table 3. Boundary conditions of CFM calculation

Boundary	Initial condition
Inlet	Velocity: 1 m/s Temperature: 20°C
Outlet	Free outflow
Walls	Velocity: No slip Temperature: 20°C
Heat Sources	Thermal loads: 0

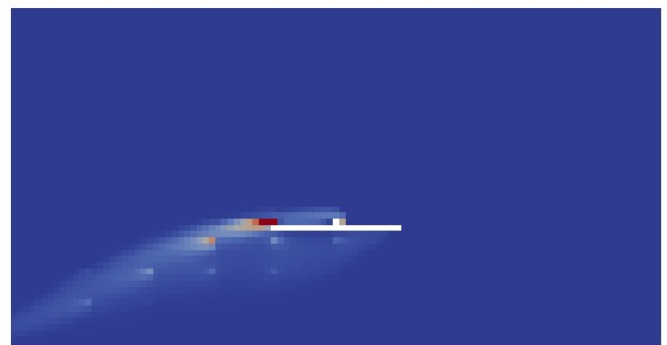
正解値と初期値の発熱量の差による影響を評価するため、観測データの場合と同じ対象領域に対し、熱源を 200W で発熱させ、計算を行った。初期条件を Table 4 に、A-A'断面の温度分布を Fig.5(a) に示す。観測値を Fig.5(b) に、修正された温度分布を Fig.5(c)に示す。Fig.5 により、温度において費用関数法を用いることで、結果が正解値に近い分布になっていることが確認できる。Fig.4 と比べ、正解値との発熱量の差が小さい初期条件における数値解析結果を用いることで、推定値が正解値により近づくことが分かった。正解値と初期値の発熱量の差を小さくすることによりさらなる改善が見てとれる。



(a)



(b)



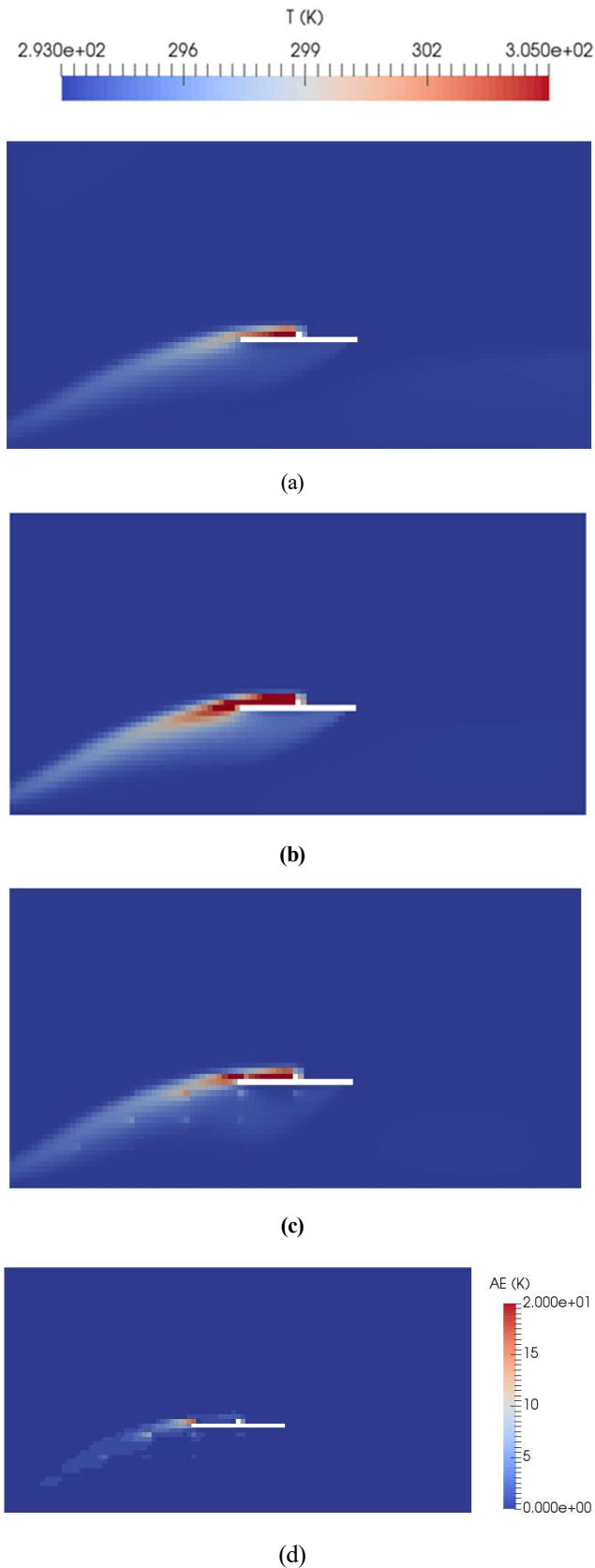
(c)



(d)

Fig.4 Temperature distribution

- ((a), Initial temperature distribution
- (b), Temperature distribution of "correct" calculation
- (c), Temperature distribution using CFM
- (d), Absolute error between initial value and "correct" calculation)



**Fig.5** Temperature distribution  
 (a), Initial temperature distribution  
 (b), Temperature distribution of 'correct' calculation  
 (c), Temperature distribution using CFM  
 (d), Absolute error between initial value and "correct" calculation

**Table 4.** Boundary conditions of CFM calculation with small heat source

Boundary	Boundary condition
Inlet	Velocity: 1 m/s Temperature: 20°C
Outlet	Free outflow
Walls	Velocity: No slip Temperature: 20°C
Heat Sources	Thermal loads: 200 W × 3

#### 4.まとめ

本研究では、室内全体の空気分布の正確な把握を行うために、観測値の持つ情報を活かして支配方程式の残差と測定値と推定値との誤差を同時に考慮する費用関数法を提案した。この手法を用いるため、既知の熱源発熱をする場合について CFD シミュレーションを行い、温度分布を求め、観測データを作成した。さらに異なる初期条件における数値解析を行うことで費用関数法を適用し、温度分布の再現を試みた。温度において費用関数法を用いることでかなりの改善が見られた。正解値と初期値の発熱量の差を小さくすることによりさらなる改善が見られる。その結果、費用関数法を用いることで、温度場を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。

本研究は将来的に費用関数法を用いて、部分的な環境条件と観測値を入力することでそれを満たす温度・速度分布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が目標としている。今後の課題としては、推定精度を高めるためには測定点の位置や数、重み付けの推定をしなければならない、また必要であれば観測値から予測される流れ場の擬似データの作成による測定点箇所の拡大を考慮すべきである。さらに計算時間の短縮や初期条件の決め方など検討すべき課題は多い

#### 参考文献

- [1] 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測定値と数値解析の融合手法, 第 22 回環境工学総合シンポジウム 2012
- [2] 吉見 敦史, 塩地 純夫, 小松 彰, 近藤明, 井上義雄, 久野貴大. 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. 空気調和・衛生工学会大会 学術講演論文集 2012.2(0), 2195-2198, 2012
- [3] 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
- [4] Kondo A, Nakagawa H, Kaga A, and Inoue Y 2010 understanding of flow and scalar fields by combing Measured Data and CFD ASHRAE Trans. Vol.116 Issue 2 318-328