

室内温熱環境の CFD 解析による最適設計手法の開発

- 遺伝的アルゴリズムを組み込んだ 2 段階型最適設計 -

Indoor Thermal Environment based on CFD Simulation

- Two Step Optimal Design Method using Genetic Algorithm -

金 泰延, 〒153-8505 東大生研, 東京都目黒区駒場 4-6-1, taeyeon@iis.u-tokyo.ac.jp
 加藤信介, 〒153-8505 東大生研, 東京都目黒区駒場 4-6-1, kato@iis.u-tokyo.ac.jp
 村上周三, 〒223-8522 慶応義塾大学理工学部, 横浜市港北区日吉 3-14-1, murakami@sd.keio.ac.jp
 Taeyeon Kim, IIS, Univ. of Tokyo, 4-6-1 Komaba Meguro-ku Tokyo, Japan
 Shinsuke Kato, IIS, Univ. of Tokyo, 4-6-1 Komaba Meguro-ku Tokyo, Japan
 Shuzo Murakami, Keo University, 3-14-1 Hiyoshi Kohoku-ku Yokohama Kanagawa, Japan

The optimal design method of indoor thermal environment using CFD coupled simulation (hereafter CFD) is developed in this study. CFD could analyze the thermal environment considering the distribution of temperature, velocity, etc. in a room. It would be therefore appropriate to use CFD for the optimal design method considering their distributions. In this paper, the optimal design means the most appropriate boundary conditions of the room (e.g. the types of HVAC system, the location of supply inlet, etc.) among the conditions where the design target of indoor thermal environment is achieved.

1. はじめに

本研究は、室内温熱環境の CFD 解析を用いた最適設計手法の開発を目的とする。筆者らはその研究の基礎的な検討として建築・空調条件を最適化するフィードバックを組み込んだ最適設計手法の検討を行った^(文¹)。しかし、一般に CFD 解析は計算負荷が高く、従ってフィードバックによるその最適条件探索も膨大な計算量が必要になるため、実用に供するには必ずしも現実的ではない。本研究ではこの問題に対し、CFD 解析を用いない簡易な室内環境解析を併用する 2 段階型最適設計手法を提案する^(文²)。これは、最適探索方法として遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm, 以降 GA)の導入^(文³)と、この際の最適条件探索の過程で CFD 解析を用いない簡易な室内温熱環境解析方法を導入し、より少ない計算量で広範な条件から複数の最適条件候補を探索する第 1 段階と、その後の最適条件の候補である少数の条件に関してのみ CFD 連成による解析評価する第 2 段階の方法を用いる。本報ではこの方法の詳細を解説し、その適用例を示す。

2. CFD 連成解析を利用する最適設計手法の問題点

一般に室内環境の設計には、空調システム、室形状、空調負荷条件など検討すべき設計パラメータが数多く存在する。これらの設計パラメータの組み合わせ(以降、設計条件)に関し、すべてを検討し最適条件を探し出すことは容易ではない。特に室内環境性状解析において、計算量の多い CFD を用いる場合、実用を考えるとほとんど不可能と思われる。本研究では最適条件を効率的に探索できる 2 段階の最適設計手法を開発することにより上記の問題に対処する。

3. GA を用いた 2 段階最適設計手法(図 1)

3.1. GA の導入と簡易的な室内温熱環境解析手法

第 1 段階の最適な設計条件の探索は GA により行う。この際、室内温熱環境性状は比較的計算量の少なく済む簡易的な室内温熱環境解析を用いる。この簡易解析は様々な方法が考えられるが、本研究では、室内温度、湿度の分布を既知として与える放射・伝導連成シミュレーションを用いる。この

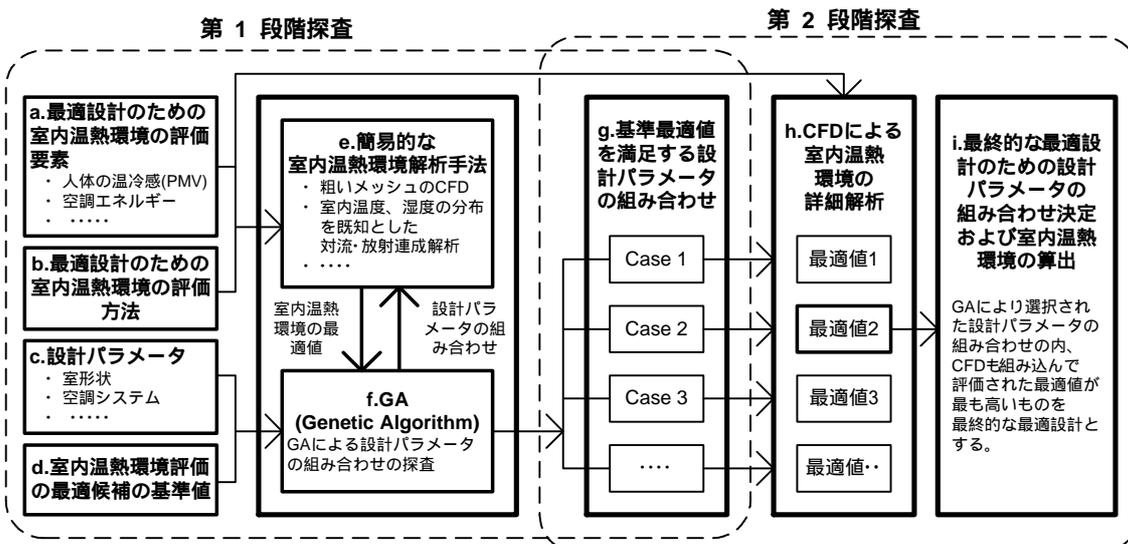


Fig. 1 Indoor Thermal Environment based on CFD Simulation of Two Step Optimal Design Method using Genetic Algorithm

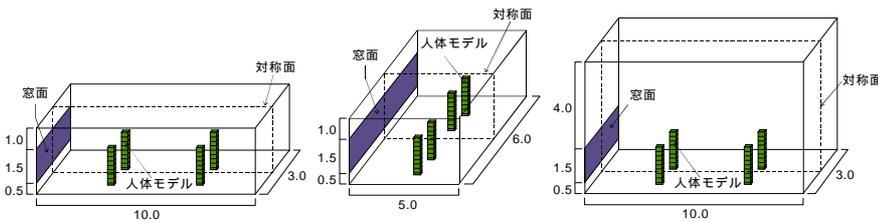


Fig. 2 Types of room for optimal design (3 cases)

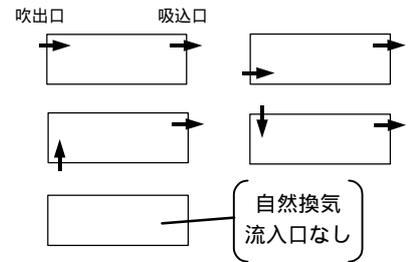
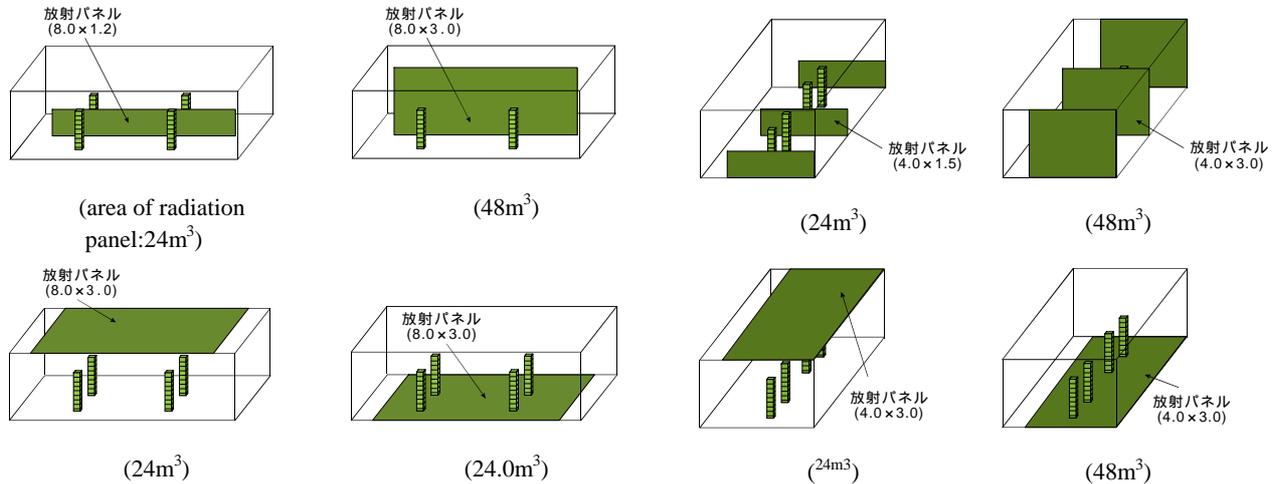


Fig. 3 Locations of supply inlets of natural ventilation



(a) Room types of Fig.2-

(a) Room types of Fig.2-

Fig. 4 Locations of radiation panel (4 cases)

Table 1 Functions for evaluating thermal environment

関数	G(i) (重み関数)	D(i) (個別評価関数)	N(i) (無次元化のための基準量)
各人体モデル(合計 4 体)の PMV	When $ PMV < 1 : 0.125$ When $ PMV > 1 : 0.0$	1.0 $ PMV $	1.0
空調エネルギー	0.3	Q_{total} Q_{panel}	Q_{total}
上下温度差	When $\Delta T < 2.0 : 0.2$ When $\Delta T > 2.0 : 0.0$	2.0 上下温度差	2.0

Q_{total} :室内空調負荷、 Q_{panel} :放射パネルが負担する空調エネルギー

手法は室内空気の温度、湿度分布は予め仮定するが、固体面の温度分布による不均一な放射場解析は詳細に行う^(注1)。

3.2. 室内温熱環境の数量化による最適程度の評価
最適化の過程で必要となる室内温熱環境性状の数量化評価法には大きな自由度が存在するものと考えられる。本研究では、複数の室内温熱評価要素において、それを(1)式に示す一価の評価関数に総合化して評価する。

$$O_{total} = \sum_i G(i) \times (D(i) / N(i)) \quad (1)$$

ただし、

O_{total} : 最適程度を判断するための評価値

$G(i)$: 設計目標 i に対する重み関数

$D(i)$: 設計目標 i に対する評価関数

$N(i)$: 無次元化のための基準量

3.3.2 段階最適設計手法の手順 (図1)

- (1) 最適設計のための室内温熱環境の評価要素と、その数量化評価方法を決定する。また、設計パラメータおよび室内温熱環境の数量化評価の第1段階の最適候補を選ぶための基準値も確定する(図1の a~d)。
- (2) GA による最適設計条件を探索する。この探索の段階では、室内環境の数量化評価が最適候補の基準値以上とな

る設計条件を選ぶ。室内温熱環境は、室内温度、湿度の分布を予め仮定した放射・伝導連成シミュレーションを用いる(図1の e~g, 第1探索)。数量化評価値が予め設定した最適候補基準値を越えるものを第2段階の最適探索の候補とする。

- (3) 第2段階の最適候補として GA により選択された設計条件の環境性状を室内温熱環境の CFD 連成解析により解析する(注2)。この段階の温熱環境の数量化評価も、第1段階と同じ方法を用いる。CFD 連成解析により、温度、湿度の室内分布が詳細に解析されるため、第1段階の探索と異なる数量化評価値が得られる場合もある。
- (4) CFD により解析された設計条件の内、数量化評価値が最も高いものを最適設計とする(図1の i)。

4. 最適設計探索の実施例：放射パネルを用いる自然換気ハイブリッド空調システムの最適設計

4.1. 解析対象(図2)

放射パネルを用いる自然換気ハイブリッド空調方式(文4)を用いるオフィス空間を解析対象とする。室内には、人体生理モデルにより放熱、放湿する人体モデルを4体設置する。中間期を対象とし、自然換気導入量は 900m³/h(温度:16℃, 湿

度 60%)と固定. 詳細な室内空調負荷および計算条件は(注³)参照.

4.2. 室内温熱環境の評価方法(表1)

室内温熱環境は, 人体モデルのPMV(0に近いほど最適), 放射パネルの空調投入熱量(少ないほど最適), 上下温度差(小さいほど最適)により評価する(注⁴). ここではこの3つの要素を用いて, 室内温熱環境を式(1)の数量化評価関数により評価する. 式中の各関数の詳細は, 表1参照. 最も高い総合評価値が1.0となるように各関数を定義している.

4.3. 設計パラメータ(図2~4)

合計 3120 ケースの設計条件を検討する. 室形状(図2, 3 ケース): 3つの室形状. 自然換気流入口の位置(図3, 5 ケース): 外壁の上, 下, 天井, 床に設置する場合および自然換気を使用しない場合. パネルの設置位置(図4, 4 ケース): 天井(設置面積: 24m²), 床(24m²), 室内中央(24m²(高さ1.5m), 48 m²(3.0m))に設置. 放射パネルの形状(2 ケース): 多板型, 単板型(注⁵). 放射パネル表面温度(13 ケース): 9~21. 自然換気流入口の幅(2 ケース): 0.5m, 0.1m(自然換気導入量は 900m³/h と一定).

4.4. GA を用いた第1段階探索のための計算条件

GA による探索の際, 設計パラメータに対応する 6Bit の遺伝子を用いる. また, 10 個の遺伝子を探索集団とし, 50 世代まで探索を行うことにする. 遺伝子操作のための交差率および突然変異率をそれぞれ 0.8, 0.2 とする(文^{2,3}).

5. 解析結果

5.1. GA を用いた第1段階探索(図1の a~g, 図5, 表2, 第1探索)

GA による最適設計の探索過程を図5に示す. 6回の探索(世代)で, 遺伝子集団の最適評価の最大値は 0.9 以上の高い評価値まで達する(最適評価値の最大は 1.0). 遺伝子集団の平均値は約 20回の探索で 0.8 前後の高い最適値を示す. これは, GA は少ない回数で効率よく最適値の探索ができるということを示す. GA により選択された温熱環境評価値の上位 11(すべての設計条件の 0.4%に相当)までを表2に示す(注⁶). 探索の結果, 放射パネルを床に設置し表面温度を 21 にした場合が最も高い評価値を示した(注7). この場合の人体モデルの PMV は 0.0 で, 室内冷房負荷の約 24%(798W)を放射パネルが負担している.

5.2. CFD を用いた第2段階最適設計探索(図1の h~i, 表2, 第2探索)

全てのケースにおいて, 室内に形成される温度成層による上下温度差と人体モデルにおける PMV は多少低くなったということにより, 室内温熱環境の評価は GA による第1段階探索の場合と比べ低い値を示す. 11 ケースの内, 最も評価値が高い設計条件(表2(1))と低い設計条件(表2(6))での風速分布と温度分布のみを示す.

(1) 評価値が最も高かったケース(表2-(1), 図6, 7)

自然換気(流入幅:0.1m)は天井から鉛直に流入. 放射パネル(単板型, 表面温度:21)

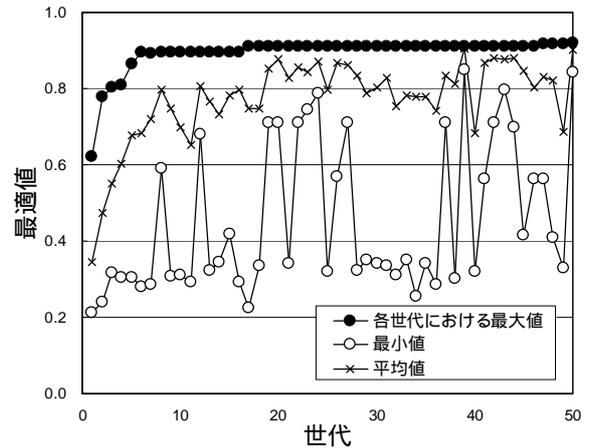
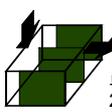
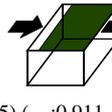
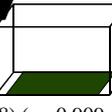
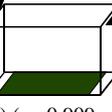
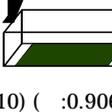
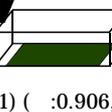
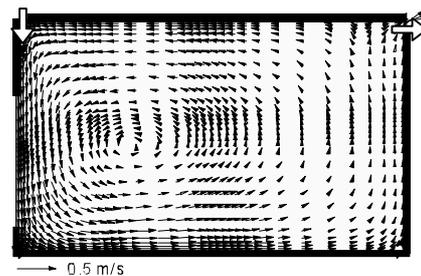


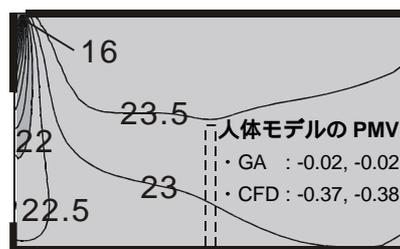
Fig. 5 Procedure of optimal design using GA

Table 2 Evaluated value for optimal design using GA and CFD

 <p>幅:0.1m 放射パネル 形状:単板型 表面温度:21</p> <p>(1) (:0.919, :0.676)</p>	 <p>流入 流出 0.5m 単板型 21</p> <p>(2) (:0.919, :0.650)</p>	 <p>0.5m 単板型 21</p> <p>(3) (:0.916, :0.640)</p>
 <p>0.1m 単板型 21</p> <p>(4) (:0.915, :0.659)</p>	 <p>0.5m 単板型 21</p> <p>(5) (:0.911, :0.631)</p>	 <p>0.5m 単板型 21</p> <p>(6) (:0.911, :0.203)</p>
 <p>0.1m 単板型 21</p> <p>(7) (:0.911, :0.649)</p>	 <p>0.5m 単板型 21</p> <p>(8) (:0.909, :0.658)</p>	 <p>0.1m 単板型 21</p> <p>(9) (:0.909, :0.667)</p>
 <p>0.1m 単板型 21</p> <p>(10) (:0.906, :0.611)</p>	 <p>0.5m 単板型 21</p> <p>(11) (:0.906, :0.610)</p>	<p>()内の数字は, 室内温熱環境の数量化評価値(E_{total})を示す. は GA を用いる第1段階探索, は CFD を用いる第2段階探索によるものである.</p>

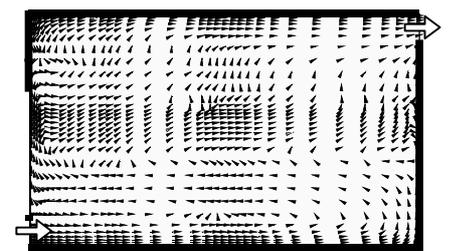


(a) Velocity (center of room)

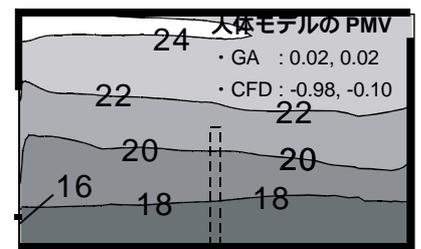


(b) Temperature ()

図6 The case where optimum value is high (Table 2-(1))



(a) Velocity



(b) Temperature

図7 The case where optimum value is low (Table 2-(6))

は床面に設置される。自然換気の導入により、反時計回りの循環流が生じる。この循環流により比較的均一な温度分布を示す。人体近傍の温度は 23 程度を示す。気流速度は 0.2 以下の低速となる。人体の PMV は、約 0.4 となる。また、放射パネルによる空調エネルギーは、GA を用いた第 1 段階探査の場合より多少(1258W)増えた。

(2) 評価値が最も低かったケース(表 2-(6)、図 8, 9)

自然換気(流入幅:0.5m)は窓側の空間下部から水平に流入。放射パネル(単板型、表面温度:21)は天井面に設置。自然換気の流入速度が遅いため、空間全体的に 0.1m/s 前後の低い速度分布を示す。上下温度差は大きく、約 6 程度を示す。人体の PMV は約-0.1 ~ -1.0 となり、他のケースと比べ低い値を示す。放射パネルによる空調エネルギーは 1138W となる。

6. 今後の課題

今回は中間期という季節条件を対象として解析を行った。しかし、この条件で得られた最適設計の結果は、必ずしも他の季節条件(例えば夏期、冬季)においても最適になるとは限らない。今後、年間を通じて評価する最適化設計条件の探査法を考察し、その妥当性の検討を行う予定である。

7. 結論

- (1) GA を用いた CFD の室内温熱環境の 2 段階最適設計探査手法を開発し、オフィス空間を対象とした最適設計(最適条件の探査)を行いその有効性を示した。
- (2) GA を用いた 2 段階探査により、最適な設計条件を効率よく少ない計算量で探査できる。

参考文献

- (1) 金泰延, 加藤信介, 村上周三, "室内温熱環境の CFD 逆問題解析による最適設計手法の開発 吹出口の位置および形状の違いが室内環境に及ぼす影響", 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集(2000)
- (2) 金泰延, 加藤信介, 村上周三, "遺伝的アルゴリズムと CFD を組み込んだ室内温熱環境の 2 段階型最適設計手法の開発", 日本建築学会大会学術講演梗概集(2001)
- (3) S. Wang, X. Jin, "Model-based optimal control of VAV air-conditioning system using genetic algorithm", Building and Environment, 35, pp. 471-487 (2000)
- (4) 平山禎久, 加藤信介, 村上周三, 加藤信介, 宋斗三, "自然通風と放射パネル冷房を併用したハイブリット空調方式に関する研究", 日本建築学会大会学術講演梗概集(2000)

注

- (1) 放射計算は、形態係数は Monte Carlo 法により、壁面間相互放射熱移動の解析は Gebhart 吸収係数法により行う。
- (2) 3 次元非等温の標準 k-e モデルを用いる。壁、ガラス面、人体からの顕熱、潜熱の発熱分布は、簡易対流・放射連成シミュレーションで解析されたものを用いる。各面の対流熱伝達率は固定する(天井面:6, 床面:3, 側面:4, 人体モデル:4(W/m²·)。人体モデルには人体生理モデルを組み込む。
- (3) 日射:500W(窓面に与える), 照明:600W(空間一様発生), OA 機器:1200W(空間一様発生), 人体:1008W(顕熱, 潜熱成分を含む値。8人(=0.25人/m²)の内4人による冷房負荷は人体モデルに、その他は空間に一様発生), 合計:3308W, 外気は温度 30 , 相対湿度 60%とする。
- (4) 今回の例では GA による探査(第 1 探査)において、室内空気温度一定を仮定し上下温度分布はないものとした。
- (5) 計算上では対流熱伝達率を変更することによりモデル化する。多板型の場合、単板型より 3 倍高く設定した。

- (6) 今回 GA により選択された上位 11(全体の 0.4%)までの設計条件は、全設計条件の上位 0.5%以内に入る。これは、GA の探査能力が最適室内温熱環境設計に充分であることを示す。
- (7) 表 2 の設計(1)と(2)(自然換気流入口の幅が違う場合)の GA による最適評価値の差は、自然換気流入口の放射場への影響によるものである。