

GA と CFD による自然換気併用ハイブリッド 空調システムの信頼性最適設計

Reliability Optimization of Hybrid Air-conditioning System with Natural Ventilation by GA and CFD

李 廷 淮*・加 藤 信 介**

Jeong Hoe LEE and Shinsuke KATO

1. はじめに

より早く、より効率的にという時代の流れは建築設計の分野においても例外ではない。本研究では GA による設計条件の最適化探査の過程において変動条件に対して確率変数的取り扱いを導入し、すべての変動条件に対して制約条件を満たす事を保証する意味で信頼性を高める最適設計ツール開発を目的とする。ここでは変動条件として外界気象条件を確率変数として扱い、室内環境が設計目標に維持され、かつ省エネルギーが達成されるという観点から最適化を行う。本研究で示す最適化は想定し得るすべての外部変動に対して、設計目標が達成されるという意味で一つの信頼性最適設計となる。

2. 外部環境一点設定の最適設定の問題点

現在、室内気流の CFD を用いる最適設計は変動する外気条件に対して一点主に極大値となる最大負荷時のみ考慮することが多い。しかし、これは変動するすべての条件に対して制約条件を満たすことが保証されておらず、その意味で最適設計とは言えない。

3. 遺伝的アルゴリズムを用いる二段階信頼性最適設計の手法

信頼性の確保された最適設計とは、設計時に確定する事が困難な不確実な設計要因の変動に対しても設計時に課された制約条件を満足し、且つ最適化の評価における評価の高い設計の組み合わせを探し出す事である。本報で示す GA と CFD を用いる 2 段階最適設計は自然通風と機械空調を併用する室内温熱環境制御において室内の温熱環境に関する制御条件を満たす最も省エネルギー的な設計の組み合わせを探し出すことを目的とする。設計時に確定することが困難な不確定要素として

は、例えば室内の温熱環境をセンシングするセンサーが正しくその環境を把握できず一定の誤差を持つ可能性や、空調吹出風量や温度がセンサーにより指示された吹出風量や温度を供給する事ができず誤差を持つ可能性、さらには設計としての窓の位置、大きさ、吹出し口の位置などが設計とは異なり、誤差を持って設定される可能性などが上げられる。また、これら要素の他、外界気象条件の変動範囲が想定とは異なる事による誤差も考えられる。信頼性最適設計はこれらの確率的な変動要因に対して制約条件を満たす最適解を探し出す事を意味するが、ここでは、研究の初期として外部気象条件そのものを確率的変動要因として扱

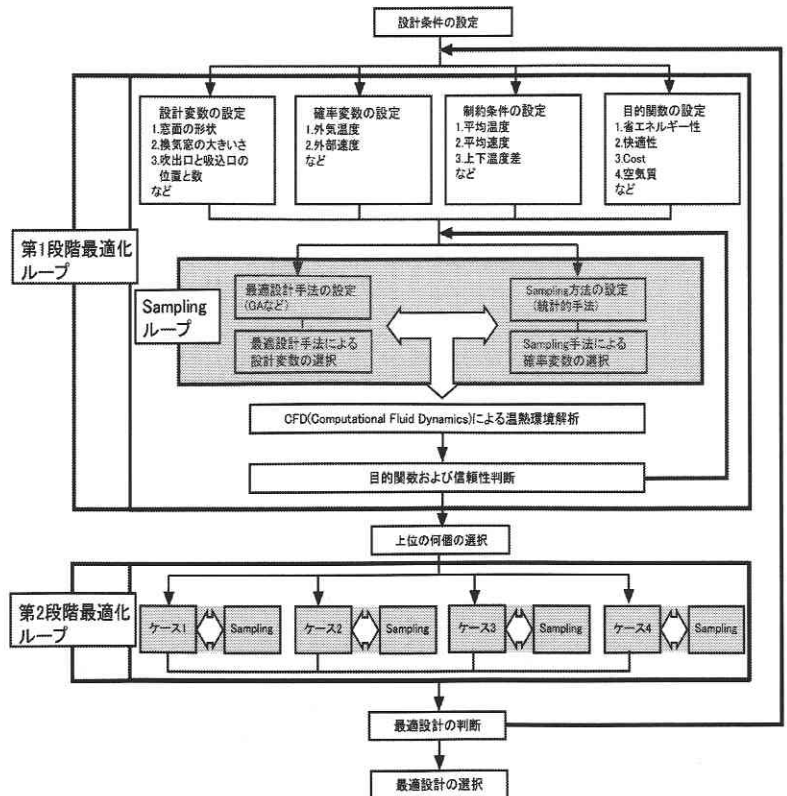


図 1 最適設計の過程

*東京大学大学院工学系研究科

**東京大学生産技術研究所 人間・社会部門

う。具体的には確率変数（ここでは外界の気象条件）に変動するサンプリンググループを導入する。サンプリンググループで全ケースが設定した制約条件を満足する場合、その設計の組み合わせが最終的に最適設計になる候補設計案となる。第一段階で計算負荷を考慮して、粗いメッシュの簡易解析で信頼性を持つ設計案を探索し、第二段階では第一段階で選ばれた上位の何ケースにおいて、細かいメッシュで詳細な検討を行う。

3.1 信頼性最適設計の手順

- ①考慮する設計変数（形状）、確率変数（外気条件）、制約条件、目的関数を設定する。
- ②最適手法（遺伝的アルゴリズム）により設計変数を選択し、サンプリング手法により確率変数を選択する。
- ③選ばれた設計変数と確率変数により CFD (Computational Fluid Dynamics) 解析を行う。
- ④②～③までのループを繰替え、第一段階の上位何ケースを選択する。
- ⑤第二段階では選ばれた上位ケースの詳細な検討を行う。

4. 信頼性最適設計の実施例

本章では確率的変動要因として、空調や建物の設計と実際との差異などを考慮する信頼性最適設計手法に関して、その適用の初歩的な例として、本来の信頼設計の趣旨とは異なるが外部の気象条件自身を確率的変動要因として検討する。自然換気併用型ハイブリッド換気・空調システムに適用し最適解の探査を行う。

4.1 解析対象の基本モデル

本研究で設定した室内オフィスの基本モデルを図2に示す。奥行き10.8mの連続したオフィスを想定し、この内の1.8m幅（1スパン3.6mの半分）を解析対象とする。片側の壁面、反対側の壁面はそれぞれ窓上部に自然換気用の開口を持つ。ハイブリッド空調方式を採用した場合の空調空気供給はタスク空調を意識し床面の吹出口から行う。排気は天井吸込口とする。なお、ハイブリッド空調時、室内への新鮮外気導入は自然換気のみにより行い、空調吹出空気の外気導入はない。オフィスは3.6mスパン毎に窓面に直角方向のI字型パーティションにより区画され机が設置されている。各机の上にパソコンなどによる内部発熱源として発熱面を設置している。室内発熱条件を表1に示す。

4.2 設計変数

検討した設計変数を図3に示す。①自然換気の出入口の形状：25ケース。②窓の形状：60ケース。③床面の機械空調の吹き出し口：6ケース。合計9000ケースである。検討した設計変数を図3に示す。①自然換気の出入口の形状：25ケース。②窓の形状：60ケース。③床面の機械空調の吹き出し口：6ケース。合計9000ケースである。

4.3 確率変数

本報では確率的変動要因として外気温の変動を適用す

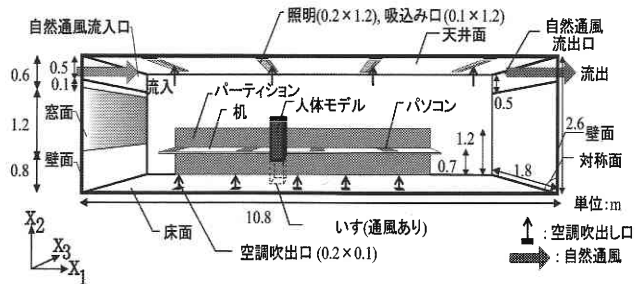


図2 基本モデル

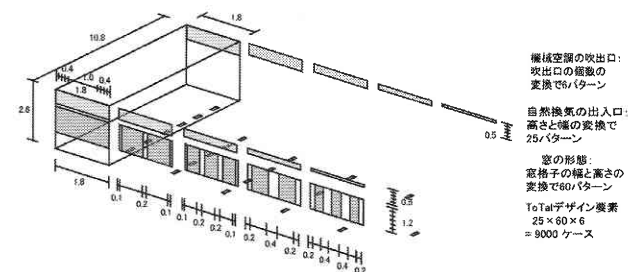


図3 設計変数

表1 室内発熱条件

発熱体	日射 (窓面)	照明 (4個)	パソコン (4個)	人体モデル (1人)	床面 (人体4人)	合計
熱量(W)	100W/m ²	400	800	55	220	1700
*床面積(19.4 m ²)当り顕熱負荷は87.6(W/ m ²)、人体モデルは0.45m×0.33m×0.88mの直方体、顕熱のみ考慮						

表2 気象データと統計値

時刻	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
気温 [°C]	20.3	20.9	21.9	23.1	23.6	24.2	25.5	25.5	25.6	24.7	24.2
平均 (M) = 23.59°C, 分散(σ ²)=3.13°C, 標準偏差 (σ) = 1.77°C											

る。変動の範囲としては日本建築学会・拡張アメダス気象データの標準年10月1日における気温変動の値を用いる。表2に気象データを示す。

4.4 確率変数の扱い方

8:00から18:00までの対象になる事務室空間が普段利用される時間の一時間単位のデータを用いる。区間の代表値が出る確率をサンプリングの時に求められる目的関数に掛ける重み係数として用い、変動する外気条件に対して目的関数が統計的にどのくらい満たすかを判断する。ここで確率の和は必ず1にはならない。変動する値を100%範囲で考慮しない代わりに考慮する統計的な範囲を示す。それで本報では外気温の平均値 (M) を中心として、表3に示すように正負2σの範囲（全範囲の95.4%）のみを考慮する事を示す。

表 3 区間別の確率とその代表値

区間	確率	代表値(単位: °C)
$-2\sigma \sim -\sigma$	0.136	20.93 (M-1.5σ)
$-\sigma \sim M$	0.341	22.07 (M-0.5σ)
$M \sim \sigma$	0.341	23.84 (M+0.5σ)
$\sigma \sim 2\sigma$	0.136	25.61 (M+1.5σ)

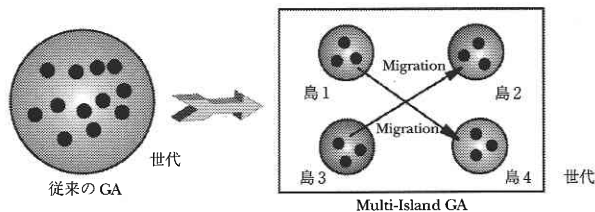


図 4 従来の GA と Multi-Island GA の比較

表 4 Multi-Island GA の設定

島の大きさ (Size of Sub-Population)	10
島 (Number of Island)	5
世代 (Number of Generation)	10
交差率 (Rate of Crossover)	0.8
突然変異 (Rate of Crossover)	0.1
移住率 (Rate of Migration)	0.5
移住間隔 (Interval of Migration)	3
計算ケース	$500(10 \times 5 \times 10) \times 4$ (サンプルング)=2000

4.5 遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm)

第 1 段階で用いる遺伝的アルゴリズムは Multi-Island Genetic Algorithm を用いる。Multi-Island GA では 1 つの世代における固体群が複数の島 (Number of Island) に分割され、各島 (Island) は独立に遺伝的操作を行い、島の間に移住 (Migration) と呼ばれる固体情報の交換を行う。図 4 に Multi-Island GA の島と移住の概念を示す。移住は世代間隔を決める移住間隔と、移住する固体の割合を決定する移住率 (Rate of Migration) により決められる。このような Multi-Island GA の島と移住の概念を用いることにより単一集団分析である一般的な GA に比べて精度よく高品質な解が得られる。さらに単一集団分析において問題となる解の偏在化の可能性も低くなり、より一般的な解が求められる事が可能とされている。(文 3) 詳細な設定は表 4 に示す。

4.6 CFD 解析条件

表 5 に CFD 解析における境界条件及び解析条件を示す。流れ場の解析は標準 k-ε モデルに基づく 3 次元 CFD 解析を行う。

表 5 境界条件及び計算条件

INLET	$k_{in} = 3/2 (U_{in} \times 0.05)^2$ $\epsilon_{in} = C_{\mu}^{3/4} \times k_{in}^{3/2} / l_{in}$, $C_{\mu} = 0.09$ l_{in} = 吹き出し幅の 1/7 U_{in} は自然換気の流入・空調の吹き出し口速度
OUTLET	U_{out} , は質量保存側による。 T_{out} , k_{out} , ϵ_{out} はフリースリップ
壁面	一般化対数則 (Wall Function)、 対称面はフリースリップ 人体モデル、床面などの発生量固定
乱流モデル	高 Re 数型 k-ε モデル
差分スキム	一次風上スキム
メッシュ数	第 1 段階 $55(X_1) \times 25(X_2) \times 16(X_3) = 22000$ 第 2 段階 $78(X_1) \times 35(X_2) \times 22(X_3) = 60060$
U: 気流速度 (m/s), k: 乱流エネルギー (m^2 / s^2), ε: k の散逸率 (m^2 / s^3), l_{in} : 流入口の長さスケール (m), T: 温度 (°C)	

5. 最適設計の設定

5.1 目的関数

最適化の過程で必要となる最適性評価のための数量化法には大きな自由度が存在するものと考えられる。本報では、自然換気による顕熱除去量で省エネルギー性を判断するのみの単目的評価を行う。評価関数は式 (1) となる。

$$E(kW) = C_p \times \rho \times \Delta T \times Q \dots \dots \dots (1)$$

E: 自然換気による顕熱除去量 (目的関数)

C_p : 空気の定圧比熱 (J/kg · K), ρ : 空気の密度 (kg/m^3)

ΔT : 換気窓の出入り口の温度差 (K), Q : 風量 (m^3/s)

最適評価は (1) 式の顕熱除去量が大きい程良い設計という評価となる。

5.2 制約条件

居住域 (X1 方向 = 0.9 ~ 10.8 m, X2 方向 = 0.0 ~ 1.5 m, X3 = 0.0 ~ 1.8 m) の平均温度が 23°C ~ 27°C, 平均風速は 0.5 m/s 以下, 上下温度差は 3.5°C 以下と設定する。

5.3 その他条件

自然換気の換気回数は 10 回に固定し、床面の空調吹き出し口は一個あたり 0.6 回, 19°C に固定する

6. 解析結果

6.1 GA と CFD を用いた第一段階探索の結果

Multi-Island GA と簡易的な CFD の連成による第一段階の最適設計の探索結果を図 5 と図 6 に示す。図 6 に示される第一段階の最適化結果から上位 3 位までの結果に対して第 2 段階の詳細な CFD 解析を行い、ここで第 1 段階での

ランキング結果とは異なる

結果が出る場合もある。目的関数である顕熱除去量が 0.6 kw 以上になるケースは 3 世代から見え始める。世代に

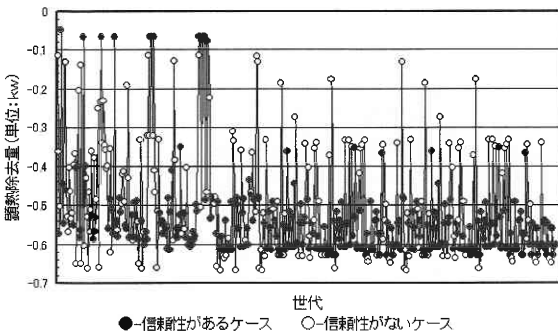


図5 GA 探索曲線

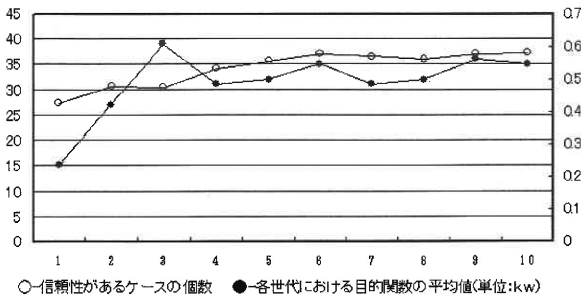


図6 GA 探索結果の分析

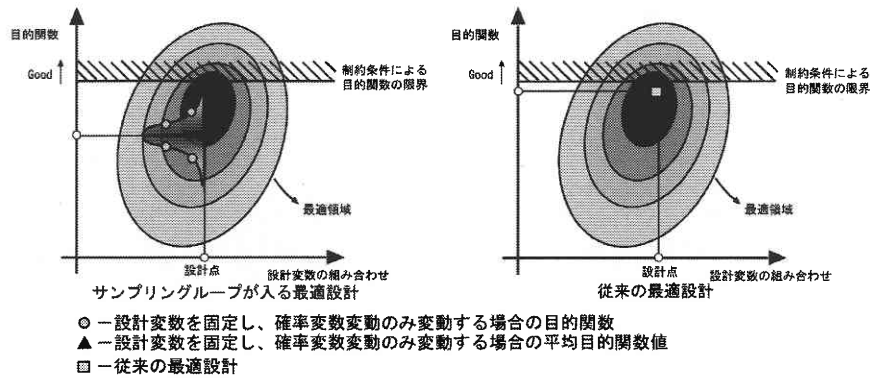


図7 サンプルンググループの考察

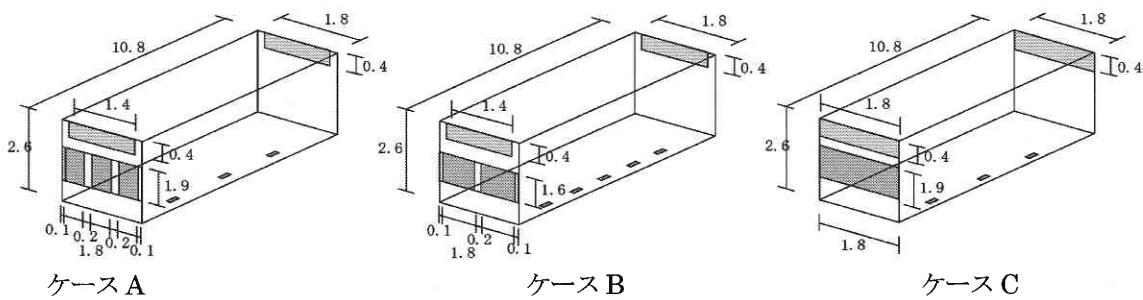


図8 第一段階で選ばれた上位ケース (単位: m)

おける平均目的関数値は 6 世代以後で安定的に高い値を示す。6 世代以後の計算で信頼性があると判断できるケースは各世代に 35 ケース前後である。

6.2 第一段階探索のサンプリンググループの考察

サンプリンググループの意味を図7に示す。図7に示すように信頼性最適設計では最適化の評価が高いの従来の設計より優れた結果は得られない。その理由は設計点において確定できない確率変数が変動した場合にも制約条件を満たすように設計点と制約条件の間の安全距離が必要になるためと思われる。即ち、サンプリンググループはある設計点において確率変数が変動しても制約条件を必ず満たすようにスクリーニングを行う過程となる。

6.3 第一段階探索で選ばれた設計

探索の結果、①自然換気の開口は大きいものが選ばれる。これは自然換気の開口が大きくなるほど顕熱除去量が多くなるためと思われる。②床面の機械空調の吹出し口は自然換気の開口と窓との関係で選ばれる。窓面の熱負荷が増加する場合は床面の吹出し口は増加し、自然換気の開口が小さくなるほど増加する傾向が見られる。第一段階で選ばれた設計を図8に示す。

6.4 第二段階探索の結果

第二段階の CFD 計算結果を図9～図20に示す。第二段階から得られた目的関数値は第一段階の計算値と少し異なる値が得られた。これは第一段階での CFD 解析の際、解がメッシュ依存性のある解像度の粗いものを用いて計算量を削減したためである。第一段階で信頼性があると判断で

研究速報

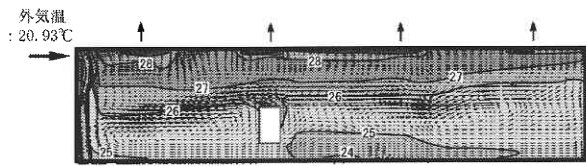


図9 第2段階のAケースのCFD結果 (外気温: 20.93°C)

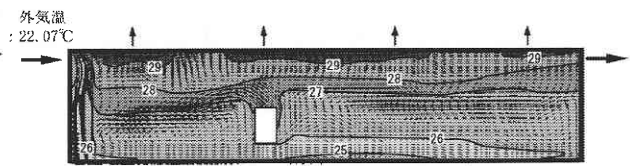


図10 第2段階のAケースのCFD結果 (外気温: 22.07°C)

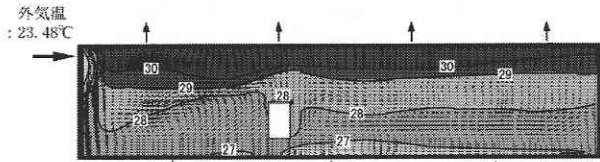


図11 第2段階のAケースのCFD結果 (外気温: 23.48°C)

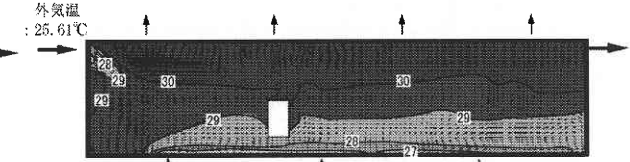


図12 第2段階のAケースのCFD結果 (外気温: 25.61°C)

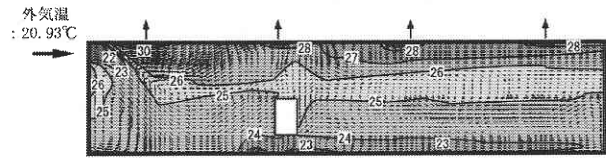


図13 第2段階のBケースのCFD結果 (外気温: 20.93°C)

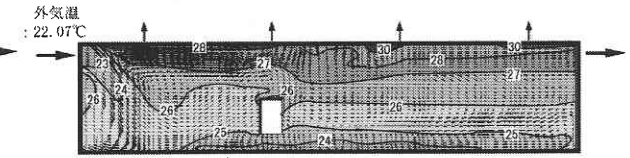


図14 第2段階のBケースのCFD結果 (外気温: 22.07°C)

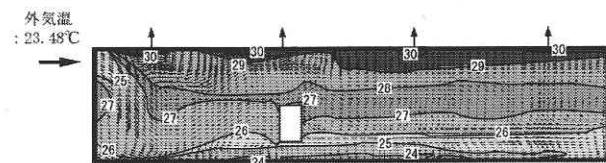


図15 第2段階のBケースのCFD結果 (外気温: 23.48°C)

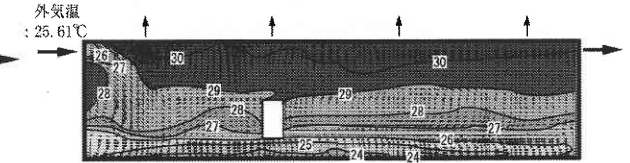


図16 第2段階のBケースのCFD結果 (外気温: 25.61°C)

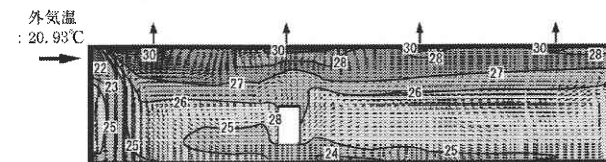


図17 第2段階のCケースのCFD結果 (外気温: 20.93°C)

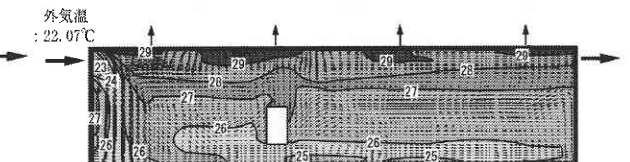


図18 第2段階のCケースのCFD結果 (外気温: 22.07°C)

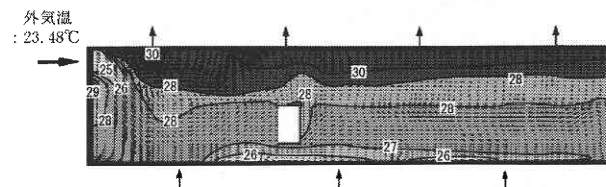


図19 第2段階のCケースのCFD結果 (外気温: 23.48°C)

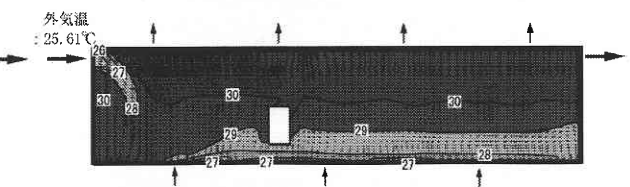


図20 第2段階のCケースのCFD結果 (外気温: 25.61°C)

きたケースも第二段階では制約条件をすべて満たす事ができず信頼性がないケースとなる場合もある。第一段階と第二段階に計算結果を表6に示す。本研究での最適設計は変動する外気温 (考慮範囲 95%) に対して制約条件をすべて満たし、信頼性を満足したケースはBになり、統計的な目的関数値は 0.601 kw になる。ケース A とケース C は外気温変動が高温側の 1.5σ となる 25.61°C の場合に制約条件を満たす事ができず信頼性がないと判断され、最適設計の候補から除された。

6.5 今後の課題

今回は確率的変動をする要素として実際に実現される場合における誤差ではなく外界気象条件を取り上げ、中間期を代表する 10月1日において信頼性最適設計を行った。しかし、この条件で得られた信頼性最適設計の結果は、必ずしも他の季節条件においても信頼性があるとは限らない。今後年間を通じて信頼性を評価する最適設計を検討し、その妥当性の検討を行う予定である。

表6 第一段階と第二段階の結果比較

ケース	外気温 (単位: °C)	第二段階 の信頼性	一段階の目的 関数値 (単位: kW)		第二段階の目的 関数値 (単位: kW)	
A ケース	20.93	○	0.096	0.628	0.094	0.634
	22.07	○	0.234		0.234	
	23.84	○	0.219		0.226	
	25.61	×	0.079		0.08	
B ケース	20.93	○	0.091	0.613	0.093	0.601
	22.07	○	0.23		0.22	
	23.84	○	0.214		0.215	
	25.61	○	0.078		0.073	
C ケース	20.93	○	0.091	0.611	0.094	0.63
	22.07	○	0.219		0.232	
	23.84	○	0.219		0.22	
	25.61	×	0.082		0.084	

7. 結 論

- ①信頼性最適設計の一例として、従来最大負荷時の一点で最適される空調問題に対して、外気気象条件そのものを確率変数とし、中間期における自然換気併用ハイブリッド空調システムの信頼性最適設計を行い、その有用性を

示した。

- ②確率変数の導入と同時に信頼性を判断する統計的な方法を適用し、その有用性を示した。
 ③遺伝的アルゴリズムを用いた2段階探索により、最適な設計条件を効率よく少ない計算量で探索ができることを示した。
 ④中間期における自然換気併用ハイブリッド空調方式の省エネルギー効果を明らかにした。

謝 辞

本研究の一部は文部科学省科学研究費補助金・一般研究(S)の助成を得て行ったことを付記する。

(2004年1月5日受理)

参 考 文 献

- 1) 金泰延, 加藤信介, 村上周三: CFD連成解析を用いた室内温熱環境の最適設計システムの開発(第1報)最適設計手法の原型作成とその応用, 空気調和・衛生工学会論文集, No. 84, pp. 53-60, 2002. 1.
- 2) 張ら: オフィスビルにおける自然換気併用ハイブリッド空調に関する研究 第1報—タスク・アンビエント型ハイブリッド空調方式とその省エネルギー効果に関する外気条件の影響, 空気調和・衛生工学会論文集, No. 83, pp. 81-90, 2001. 10.
- 3) 廣案知之, 三木広範: 2固体分散遺伝的アルゴリズム, No. 11, 990-995, 2002.