

室内温熱環境の最適設計における多目的問題に関する研究

——日照・日射を考慮した窓面最適設計における考察——

A Study of Multi Objective Problem in Optimizing Indoor Thermal Environment

—— Window Design Optimization Considering Sunshine and Solar Radiation ——

菅 健太郎*・金 泰延**・加藤 信介*

Kentaro SUGA, Taeyeon KIM and Shinsuke KATO

1. はじめに

本研究は室内の温熱環境を与えられた拘束条件の中で目標とする条件に最も近い最適解を求める最適設計手法に関する研究の一環である^{文献1-3)}。この研究は環境シミュレーションとオペレーションズリサーチにおける最適探索手法を組み合わせた最適設計ツールの開発を最終目的とする。本報では窓面の設計を例に多目的最適化問題を扱う。

一般に窓面の設計は日射・日照などの多様な問題を総合的に考慮する必要がある。多目的関数における最適化問題としてとらえられる。これらの目的関数は、例えば日射受熱や温熱快適性を考慮すると窓面は小さく、日照の確保を考慮すると窓面は大きくしたいというトレードオフの関係となっており、そのすべてを満たす真の最適値は存在しない。どの目的関数に重きをおくかは、設計時の制約や設計者のバランス感覚などによって決まり、結果としてある妥協点としての選択解が決定される。本研究では一般的なオフィス空間を対象として、この相反する目的に対するバランス感覚(価値観)を変化させたとき窓面の最適設計値がどのように変化するかについての検討を行い、感覚的なバランス感覚と定量的な各目的関数同士の関係を明らかにすることを目的とする。

2. 最適化問題設定

2.1 対象モデル

解析対象モデルを図1に示す。用途はオフィスとし、窓面の方位は真南のみを想定する。天井には2列の照明を設定しており、3つの部分でそれぞれオン・オフを切り替えられるように設定する。作業面は750 [mm]の高さに設定し、温熱感の評価対象とする人体モデルを4体作業面の側

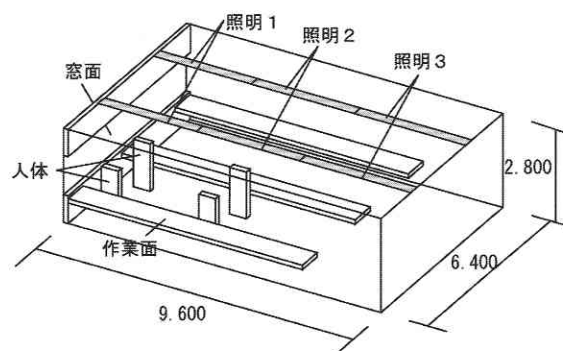


図1 解析対象モデル概要

に設定する。

2.2 目的関数

窓面設計において考慮する内容は多岐にわたるが、ここでは定量化し難い景観や心理的な要素は一応検討範囲に含めない。今回目的関数として設定したのはPMV、エネルギー消費、昼光率、均斉度の4つである。今回拘束条件として与えた室条件のもとでPMV(絶対値)とエネルギー消費は最小化すること、昼光率と作業面上の均斉度は最大化することを設計目標とする。設計目標との距離を定量的に評価する具体的な目的関数を表1に示す。ここで昼光率、均斉度がPMV、エネルギー消費と同様に最小化問題となるよう変換を施す。また重み付けの値が均等に影響する必要があるため、時間ごとの評価値を足し合わせた値が0から1に変化するように、全ケースの最大値・最小値で無次元化している。

2.3 設計パラメータ

表3に拘束条件として与える設計パラメータの種類と範囲を示す。最適化の対象とする南面の窓面の面積・位置は図2のように8パターンを設定した。オフィス想定し、天窗、頂側窓など他の採光形態は考慮しない。窓ガラスの種類は普通ガラス、二重ガラス、low-eガラスの3種類と

*東京大学生産技術研究所 人間・社会部門

**霊山大学

研 究 速 報

表 1 目的関数

PMV	$PMV = \sum_{\text{TIME human}}^4 \sqrt{pmv_{\text{human}}^2}$ $F_{PMV} = \frac{PMV - PMV_{\text{MIN}}}{PMV_{\text{MAX}} - PMV_{\text{MIN}}} \rightarrow \text{最小化}$
エネルギー消費	$EGY = \sum_{\text{TIME}} \frac{HE}{COP} + LE$ $F_{EGY} = \frac{EGY - EGY_{\text{MIN}}}{EGY_{\text{MAX}} - EGY_{\text{MIN}}} \rightarrow \text{最小化}$
昼光率 (注1)	$DR = \sum_{\text{TIME}} \frac{\sum_i S_i dr_i}{\sum_i S_i}$ $F_{DR} = \frac{DR_{\text{MAX}} - DR}{DR_{\text{MAX}} - DR_{\text{MIN}}} \rightarrow \text{最小化}$
均斉度 (注2)	$UR = \sum_{\text{TIME}} \frac{E_{\text{MIN}}}{E_{\text{MAX}}}$ $F_{UR} = \frac{UR_{\text{MAX}} - UR}{UR_{\text{MAX}} - UR_{\text{MIN}}} \rightarrow \text{最小化}$

F : 目的関数
 PMV : PMV 値の時間合計値
 EGY : エネルギー消費の時間合計値
 DR : 昼光率の時間合計値
 UR : 均斉度の時間合計値
 MAX, MIN : 各評価値の全ケース中の最大値、最小値を示す
 F_{PMV} : PMV の目的関数
 F_{EGY} : エネルギー消費の目的関数
 F_{DR} : 昼光率の目的関数
 F_{UR} : 均斉度の目的関数
 E : 作業面要素における照度 (添字は最大・最小を表す)
 HE : 時間ごとの空調負荷
 LE : 時間ごとの照明消費エネルギー
 COP : 成績係数
 dr_i : 時間ごとの作業面要素 i における昼光率
 S_i : 作業面要素 i の面積
 pmv_{human} : 各時間ごとの PMV 値
 human : 人体番号 (1 ~ 4)
 TIME : 解析時間 (8 : 00 ~ 18 : 00)

表 3 設計パラメータ

パラメータ	制約条件
窓面の面積、位置	8 パターン
窓ガラスの種類	3 種類 (普通、二重、low-e)
外部ルーバーの有無	2 パターン
ロールスクリーンの有無	2 パターン
室内設定温度	18 ~ 26 [°C], 9 パターン
合計 864 ケース	

表 4 ガラスの日射・日照に対する特性値

	日射		日照
	透過率	吸収率	透過率
普通ガラス	67.6	27.1	87.6
二重ガラス	45.0	46.1	58.3
Low-e ガラス	31.8	54.0	41.2

※値は垂直入射時の値[%]とする

した。日射・日照に対するガラスの特性値を表 4 に示す。外部ルーバーは入射する日射エネルギー、もしくは照度を 50 % 遮蔽するようモデル化し (例 : 200 [W/m²] → 100 [W/m²]), ルーバーの形状による室内分布特性の違い等

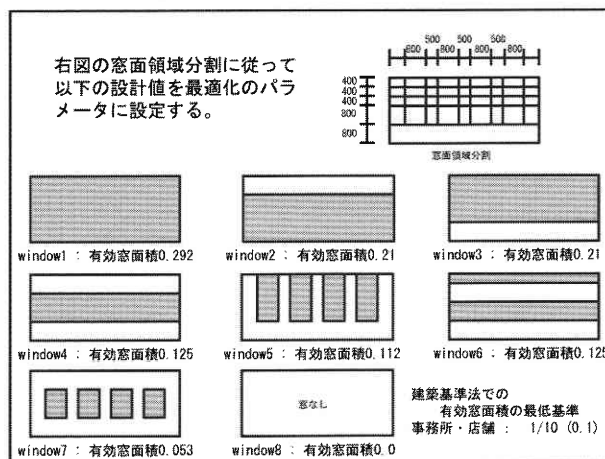


図 2 窓パターン

図 3 解析ケース表記

TYPE [窓パターン][ガラス種類][外部ルーバー][内部ルーバー][室温]

窓パターン 図 2 の番号に相当
 ガラス種類 1 : 普通ガラス 2 : 二重ガラス 3 : low-e ガラス
 外部ルーバー 1 : あり 0 : なし
 内部ロールスクリーン 1 : あり 0 : なし
 室温 2 桁表記、[°C]

例) TYPE 620123 → 窓パターン 6, ガラス種類 : 二重ガラス、
外部ルーバーなし、ロールスクリーンあり、
室温 23 °C

表 5 重み付けパターン

1	均等評価型	$G_{PMV} = G_{EGY} = G_{SR} = G_{UR}$
2	PMV、エネルギー重視型	$G_{PMV} = G_{EGY} > G_{SR} = G_{UR}$
3	昼光率、均斉度重視型	$G_{SR} = G_{UR} > G_{PMV} = G_{EGY}$
4	PMV 重視型	$G_{PMV} > G_{EGY} = G_{SR} = G_{UR}$
5	昼光率重視型	$G_{SR} > G_{PMV} = G_{EGY} = G_{UR}$
6	均斉度重視型	$G_{UR} > G_{PMV} = G_{EGY} = G_{SR}$
7	エネルギー重視型	$G_{EGY} > G_{PMV} = G_{SR} = G_{UR}$

は考慮しない。ロールスクリーンはすべて覆うか、上げるかのいずれかとし、入射する日照・日射の直達成分がすべて拡散光として室内に放出されるようモデル化する。また放射解析においてロールスクリーン表面は完全拡散面とする。

設計パラメータの組み合わせによる解析ケースの表記を図 3 のように定め、以降この数字並びにより表すことにする。

2.4 評価関数

評価関数は次式のように目的関数を重み付けして足し合わせることににより一つの評価関数とする。

$$VAL = G_{PMV} F_{PMV} + G_{EGY} F_{EGY} + G_{SR} F_{SR} + G_{UR} F_{UR}$$

G：各評価関数に対する重み関数

F：各目的に対する評価関数

各目的関数のバランスを評価する上式の重み関数の値を変えることで変化する最適解を検討するのが目的である。今回は表5に示す重み付けパターンについて検討を行う。

2.5 最適化手法

最適化を行う際に、一般的には計算時間を少なくするためにGA等の各種の最適化手法が用いられるが、今回は重み付けに対する最適値の変化を詳細に解析することを目的としており、検討ケースも少ないため最適化手法は用いず全探索を行う。

3. 解析概要

3.1 解析手順

図4に各ケースについて行った解析の手順を示す。

3.2 解析手法

1) 日射解析：日射解析は直達日射、天空日射^{注4)}による吸熱分布を解析する。複雑な室内での微小面要素の形態係数はモンテカルロ法により詳細に算出し、相互反射はgebhartの吸収係数を用いた^{文献2)}。放射率は赤外線放射に関しては放射率0.9、日射に関しては放射率0.7を用いた。

2) 室内対流・放射・熱輸送解析：室内対流・放射・熱輸送解析は放射に関しては詳細な解析を行うが、対流に関しては室内完全拡散を仮定し、室温は均一として各壁面及び室全体での熱バランス式を解くことにより、各壁面での温度分布を求める^{注5)}。対流熱伝達率は一様に4.0 [W/m².K]

として与えた。得られた空調除去熱量からCOP（ここでは3.0）を用いて空調消費エネルギーを求める。またPMVを人体モデル4体に対してそれぞれ算出する。PMVを算出する際の平均放射温度は直達日射を考慮し、周壁からの放射温度と、直達日射の放射温度を含めた値を用いている。

3) 日照解析：日照においても日射解析と同様に直射光と天空光^{注4)}による照度をGebhartの吸収係数を用いて算出する^{注6)}。得られた作業面での照度分布より昼光率を算出する。なおここでの昼光率は全天空光と直射日光を合わせたものとして算出した。

4) 照明計算：照明は日射解析の結果作業面において必要照度400 [lx]を満たさない部分の面積が2割以下となった場合に、必要な部分（インテリア、中間、ペリメータ域）が自動的に点灯するように設定している。点灯した照明本数より照明負荷を算出する。また照明点灯の結果の作業面での照度分布より照度の均斉度を算出する。

5) 解析対象日時：今回は日射の影響の大きいと考えられる秋期（10月1日）を例として解析を行う。解析対象時刻は8時から18時までとし、直達・天空日射、直射光・天空光による影響を一時間ごとに計算する。また外気温度は拡張アメダス気象データの標準年EA気象データを用いた。

4. 解析結果・考察

4.1 重み付けの値の検討

まず各重み付けパターンについて、重み付けの値に対する感度解析を行った。例としてPMV・エネルギー重視型重み付けパターンについて、その値を変化させたときの最適解上位5ケースを表6に示す。小さく重み付けした場合と、大きく重み付けした場合とで最適解の順位にあまり影響がないことがわかる。これは最適設計に対するエネルギーの感度が非常に高いことを示していると考えられる。他の6パターンの重み付けについても同様であった。すなわち、窓面の最適設計値は「何を」重視するかに影響は受けても、「どれだけ」重視するかにはそれほど影響を受けないことを示している。

表6 重み付けの値の検討（PMV・エネルギー重視型）

重み付け	1:1:1:3	1:1:1:4	1:1:1:5	1:1:1:6	1:1:1:7
1位	311123	311123	311123	311123	311123
2位	311122	311122	311122	510123	510123
3位	510122	510122	510122	510122	510122
4位	810023	510123	510123	311122	311122
5位	510123	810023	311124	311124	311124

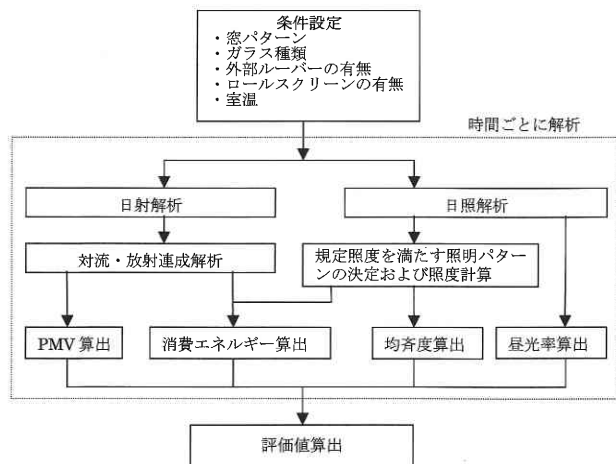
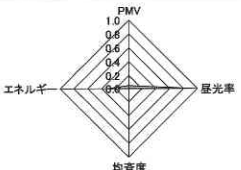
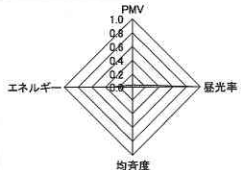
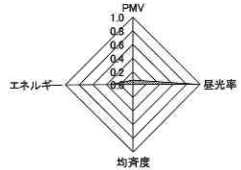
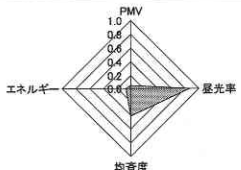
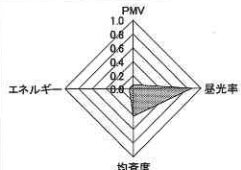
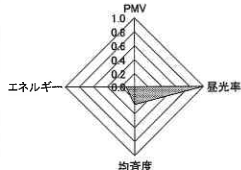
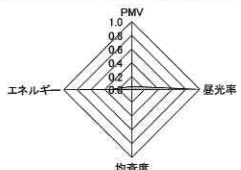
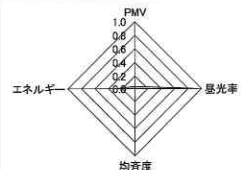
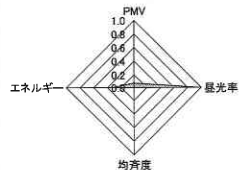
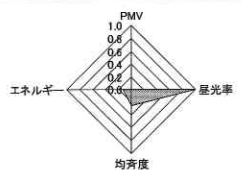
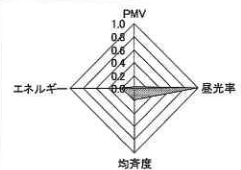
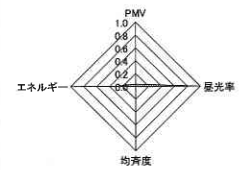
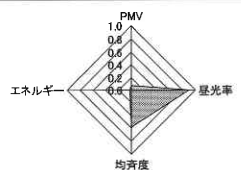
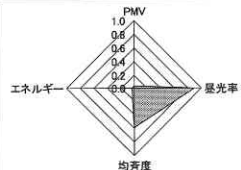
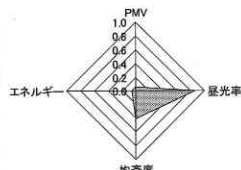
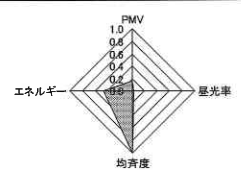
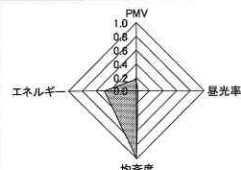
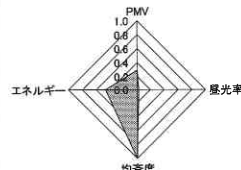
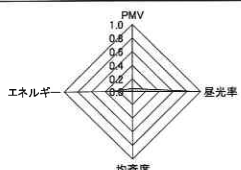
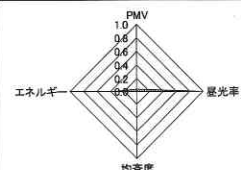
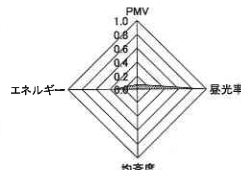


図4 解析手順

表7 重み付けパターンごとの最適設計解 (上位3ケースまで)

重み付けパターン	1位	2位	3位
均等評価型 GPMV : 1 GEGY : 1 GSR : 1 GUR : 1			
PMV、エネルギー重視型 GPMV : 4 GEGY : 4 GSR : 1 GUR : 1			
昼光率・均斉度重視型 GPMV : 1 GEGY : 1 GSR : 4 GUR : 4			
PMV重視型 GPMV : 7 GEGY : 1 GSR : 1 GUR : 1			
エネルギー重視型 GPMV : 1 GEGY : 7 GSR : 1 GUR : 1			
昼光率重視型 GPMV : 1 GEGY : 1 GSR : 7 GUR : 1			
均斉度重視型 GPMV : 1 GEGY : 1 GSR : 1 GUR : 7			

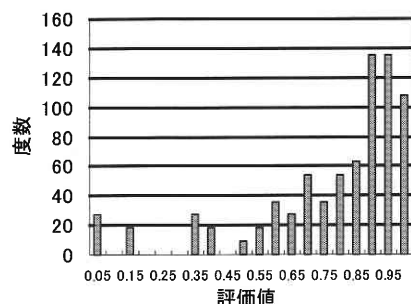


図5 昼光率のヒストグラム

4.2 重み付けの最適解に対する影響の検討

次に各重み付けパターンでの最適解上位3ケースを表7に示す。均斉度を上げるためにはロールスクリーンなどにより直射光を遮り、窓の高さを上げる（例えばTYPE 631123）などの一般的傾向が現れている。またエネルギー重視型の例では、日射取得による空調エネルギーの増大と、照明エネルギーの削減効果のバランスにより窓パターン5が最適値であることが示される^{注7)}。

4.3 目的関数同士の関係に関する考察

全ケースを見ると昼光率重視型以外のいずれのパターンにおいても昼光率は悪い評価値となっている。図5に昼光率のヒストグラムを示す。評価値が悪い1の方に分布が偏っており、今回の窓形状・室内形状では昼光率を高くするように設計することが難しいことが示される。また昼光率を重視して最適化したケースでは均斉度の評価値が大きく悪くなっており、両者の強いトレードオフ関係が見て取れる。一方PMV、エネルギー消費、均斉度については顕著なトレードオフ関係は見られず、三者を同時に最適化することは比較的容易であると考えられる。

5. ま と め

最適化の考えに基づいて、従来あまり検討されることの少なかった異なる価値基準を持つ指標同士の関係に関する考察例を示した^{注8)}。今回は例として10月1日のみを解析対象とし、目的関数も限られたものとしたが、より現実的には季節による影響、あるいはコスト等を考慮する必要がある。また探索空間が比較的狭いことから全探索を行ったが、今後上記の項目を考慮して目的関数や設計パラメータの数を増やした場合には遺伝的アルゴリズム (GA) など

の最適化手法を用いる必要がある。

(2002年11月15日受理)

注

- 1) 作業面要素の昼光率を面積による加重平均により評価する。ここで昼光率は直射光と天空光を合わせたものとする。
- 2) 作業面上での照度についての均斉度とする。
- 3) 今回の解析では省エネ基準に合わせて3.0とした
- 4) 日射・日照の直達成分はBouguerの式、天空成分はBerlageの式を用いて算出する。大気透過率0.64、太陽定数はそれぞれ1353 [W/m²]、142000 [lx]とした。
- 5) 天井、床面及び南面以外の壁面は断熱を仮定した。また南面の室内側での熱伝達を省いた熱貫流率は、ガラス面で2.8 [W/m²・°C]、壁面で0.92 [W/m²・°C]として算出した。
- 6) 部屋の各部位における反射率は、壁72.8 [%]、床17.2 [%]、天井98.5 [%]とした。
- 7) これは均斉度や昼光率も多少影響した結果である。
- 8) 多目的最適化問題に関する従来研究では、加重と最小化法や制約法などの恣意的な重み付けまたは制約により一つの最適解を求める研究と、多目的遺伝的アルゴリズム (MOGA) 等を用いて出来るだけ多様なパレート解集合を求めようとする研究の2つが挙げられる。本研究では両者を組み合わせて、重み付けを変えることによりパレート解集合上を探索しながら、多目的関数同士の関係を細かく検討した例として位置づけることが出来る。

謝 辞

本研究を行うにあたり、大成建設株式会社の関係者の方々に多大なるご協力を賜りました。ここに記し、謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 金，加藤，村上：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—吹き出し口の一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梗概集，2000
- 2) 金，加藤，村上：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) 加藤，金，村上：室内温熱環境のCFD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，2001
- 4) 大森，梁，林，加藤，村上：複雑形状に対応する放射伝熱解析法の開発と数値サーマルマネキンへの適用，日本建築学会大会学術講演梗概集，2001