

建築物における空調ゾーン単位での設計用熱負荷推定に関する研究

A study on estimation of the cooling and heating load for air conditioning zone in the early design phase

○大橋 巧実(名古屋市立大学)
正会員 日角 友香(ダイキン工業)
正会員 鵜飼 真貴子(名古屋大学)

正会員 尹 奎英(名古屋市立大学)
正会員 松井 伸樹(ダイキン工業)
特別会員 奥宮 正哉(名古屋大学)

1. 研究背景・目的

熱負荷を建築計画段階で推定することは空調機器容量を事前に検討することができ、設計者において大きな手助けとなる。また必要機器容量を正確に推定することで過大な機器選定を避けることが可能となり、空調機によるエネルギーロスを削減することにつながる。しかしながら建築計画段階において少ない建物情報から比較的簡便に空調ゾーン単位で熱負荷推定を行うことのできる手法は未だに存在していない。計画段階において空調ゾーン単位での熱負荷予測を行う利点として、個別分散空調またはFCUや空調機などの空調二次側機器の空調ゾーンごとの機器容量を事前に決定できるということが挙げられる。

そこで本研究では建築計画段階において、比較的簡便に空調ゾーンごとの熱負荷推定を行うことのできる熱負荷推定手法提案を目的とし、モデル化の概念を示すとともに説明変数の抽出と基礎的な検討を行う。

熱負荷推定に関しては多数の既往研究がなされており、推定手法により以下の三つに分類分けされると考えられる。

(i) EnergyPlus、TRNSYS、MicroHASPなどのシミュレーションソフトを用いる熱負荷推定手法

(ii)ニューラルネットワーク²⁾、カルマンフィルタ³⁾、ARIMAモデル⁴⁾、GMDH⁵⁾などを用いる熱負荷推定手法

(iii)重回帰分析⁶⁾、実験計画法⁷⁾、頻度表⁸⁾などによる既存の熱負荷推定モデルを用いる熱負荷推定手法

このうち(i)、(ii)に分類される手法では熱負荷推定に用いる説明変数が多いまたは計画段階では取得不可能なものが含まれており、本研究目的には適合しないと判断した。(iii)に分類される手法では説明変数の個数が5~10個程度と比較的少なく、その中でも重回帰分析による推定モデルを用いた手法は、熱負荷推定式が一意に決まるため、より簡便であるといえる。

よって本研究では重回帰分析を用いて、本研究目的に即した熱負荷推定モデルの作成を試みる。

2. 研究概要

2.1 熱負荷推定モデル概要

作成を目指す熱負荷推定モデルは、最大負荷日と月平均負荷日における空調ゾーンごとの時刻別負荷を推定するモデルとする。ここで時刻別負荷を単純化するために、オフピーク時は負荷を均等にし、同じ日積算負荷を有する時刻別負荷にモデル化を行う。

単純化を行うことにより、最大負荷日の推定モデルは最大熱負荷(Qhour_peak)、ピーク発生時刻(tpeak)、ピーク相当運転時間(Hr)で表すことができる。また、建物の熱負荷特性は平均外気温と日平均熱負荷の相関関係における回帰直線の傾きと切片で表されることが分かっている⁹⁾。これを用いて、月平均負荷日の推定モデルは同回帰直線の傾き(a)、平均外気温と室内設定温度が等しいときの同回帰直線上の点(B)、ピーク発生時刻の期間最頻値(tpeak)、ピーク相当運転時間(Hr)で表すことができる。図1に最大負荷日・月平均負荷日の時刻別負荷単純化の概念図を示す。

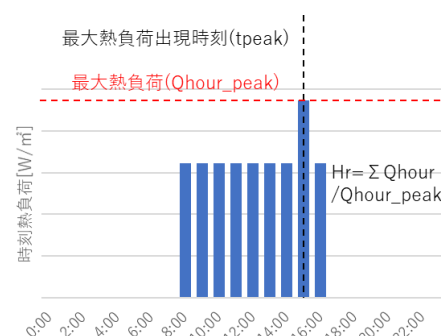


図1 最大負荷日・月平均負荷日の時刻別負荷単純化

2.2 熱負荷推定モデル作成手順

本研究では、表1に示す各目的変数における重回帰式を導出し、熱負荷推定モデルを作成する。図2に示す異なるフロアプランを有するモデル建物に対

して異なる熱負荷条件を与えた複数のケースについて EnergyPlus ver.8.9.0 を用いた熱負荷計算を行い、それをもとに算出された各目的変数の値を用いて各重回帰式の導出を行う。

3. 熱負荷推定モデルにおける目的変数および説明変数

表 1 に本推定モデルにおける目的変数、説明変数を示す。説明変数については建築計画段階において取得可能であると考えられる必要最低限の情報を用いることとした。これらの説明変数については説明変数間の相関係数が 0.3 以下となっており、相関関係が弱いことを確認した。

表 1 本予測モデルの目的変数及び説明変数

記号	目的変数
a	日平均外気温と日平均熱負荷の重回帰直線の傾き[-]
B	平均外気温と室内設定温度が等しいときの日平均負荷(重回帰直線上の点と等しい) [W/m ²]
Qhour_peak	最大熱負荷[W/m ²] ^{注1)}
Hr	ピーク相当運転時間の期間平均値 [hour]
tpeak	ピーク発生時刻の期間最頻値 [hour]

記号	説明変数
FLRTYP ^{注2)}	地階:1、中間階:2、最上階:3
OW _{n,s,e,w} ^{注3)}	各方位の床面積に対する外壁相当面積比に関する変数 [W/m ² K]
IW	内壁面積/床面積[-]
Hgain	内部発熱強度[W/m ²]
WinRaito	窓面積/床面積[-]
SC	窓の日射遮蔽係数[-]

4. モデル建物におけるゾーンごとの熱負荷計算

モデル建物は一般的な事務所ビルを想定した三階建ての建物モデルを想定した。

図 2 に二つのモデル建物のフロアプランを示す。また表 2 に変化させる熱負荷条件を示す。これら条件の組み合わせにより合計 72 ケースについてモデル建物の熱負荷計算を行った。また各モデル建物に対してゾーンごとに熱負荷計算を行うことにより、ゾーンごとの目的変数の算出を可能にし、ゾーン間混合を考慮することによりゾーンごとの熱負荷計算値を実際値に近づけるよう配慮した。

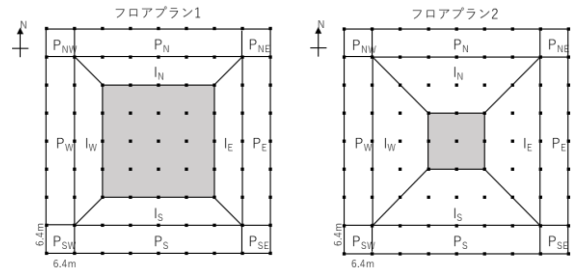


図 2 モデル建物フロアプラン

表 2 変化させる熱負荷条件

熱負荷条件項目	Case1	Case2	Case3
内部発熱強度 [W/m ²]	21.7	47.6	83.4
断熱材厚さ [mm] (外壁の U 値 [W/m ² K])	25 (U 値 : 1)	50 (U 値 : 0.69)	
窓面積率[%]	15	30	65
窓種類[-] (U 値[W/m ² K]、SC 値[-])	単層 ガラス (U 値 : 4.36、 SC 値 : 0.53)	複層 ガラス (U 値 : 2.3、 SC 値 : 0.31)	

5. 熱負荷推定モデル作成

5.1 熱負荷推定モデルの初期検討

a、B については空調期間により数値が異なることが予想されることから⁹⁾、冷房期(a_cooling、B_cooling)と暖房期(a_heating、B_heating)に分け重回帰式を導出することとする。また今回の検討においては、Qhour_peak、a_cooling、B_cooling を目的変数とする重回帰式の検討結果のみを示す。

初期検討として、一次多項式で表される線形重回帰式を導出し精度を確かめるとともに、誤差の原因分析を行った。また、各重回帰式の精度指標には決定係数(R²)、二乗平均平方根誤差(RSME)、最大絶対誤差(MaxAE)を用いた。表 3 に各目的変数の重回帰式から得られた精度指標を示す。

式 1 は Qhour_peak における線形重回帰式を示す。重回帰式による予測値の決定係数は 0.964 であり、各説明変数の p 値^{注4)}は有意水準の 5%より小さくなった。また、各説明変数の係数は SC を除いて正の値となっており、各説明変数は目的変数を適切に説明していることが確認できた。

図 3 に Qhour_peak の実際値と推定値の散布図を示す。

図に示すように、 Q_{hour_peak} の推定値は実際値に比べて 25%程度の誤差で推定できることが分かる。

図4に式1を用いて推定した Q_{hour_peak} の推定誤差を示す。上図から窓面積率 Case3、窓種類 Case2 の条件において他の条件に比べ推定誤差が大きくなっていることが分かる。また下図より二方向ペリメータゾーン(例えば、 P_{NW} 、 P_{NE} 、 P_{SW} 、 P_{SE} のゾーン)とインテリアゾーンで推定誤差が大きくなる傾向が見受けられる。

これは、窓面積率、窓種類の違いがもたらす Q_{hour_peak} への影響が当該ゾーンの形態によって異なってくることを示すものであり、このような結果は $a_{cooling}$ 、 $B_{cooling}$ においても同様であった。

以上のことから、推定誤差の原因の一つとして、窓面積率、窓種類、空調ゾーンの形態による相互の作用が初期検討では考慮されていないということが考えられる。

5.2 熱負荷推定モデルの精度改善

初期検討を踏まえ、推定精度の向上策として、窓面積率、窓種類、外皮性能関連の説明変数 OW の相互作用項(例えば、 OW と $WinRatio$ 、 OW と SC 、 $WinRatio$ と SC 、 OW と $WinRatio$ と SC)を用いた非線形回帰を行った。また説明変数の有意性を示す p 値が 0.05 を上回った場合は、当該項を削除して、すべての項の p 値を 0.05 以下となるようにした。

表4に各重回帰モデルの R^2 値、 $RMSE$ 値、 $MaxAE$ 値を示す。上記の操作により回帰式の推定精度が向上したことが分かる。

式2に Q_{hour_peak} における非線形重回帰式を示す。また、図5に Q_{hour_peak} の実際値と推定値の散布図を示す。

図6からもわかるように、窓面積率、窓種類の違いによる推定誤差や空調ゾーンごとの推定誤差のばらつきが初期検討時に比べ減少したことが確認できる。

追加された項のうち、 p 値が有意水準の 5%を下回ったものは、 OW と $WinRatio$ 、 OW と $WinRatio$ と SC からなる項であり、その他追加を行った相互作用項は p 値が有意水準の 5%を大幅に上回ったため、精度向上には寄与しなかったといえる。

このような結果は $a_{cooling}$ 、 $B_{cooling}$ においても同様であった。

以上のことから、重回帰式による熱負荷推定においては非線形での回帰は推定精度の向上に一定の効果期待できることが分かった。

$$Q_{hour_peak} = f_1(FLRTYP, OW_N, OW_S, OW_E, OW_W, IW, Hgain, WinRatio, SC) \quad (式1)$$

表3 初期検討時の各重回帰式の R^2 値、 $RMSE$ 値、 $MaxAE$ 値

	Q_{hour_peak}	$a_{cooling}$	$B_{cooling}$
R^2	0.96	0.97	0.98
$RSME$	11.8	0.67	3.95
$MaxAE$	40.5	2.45	14.75

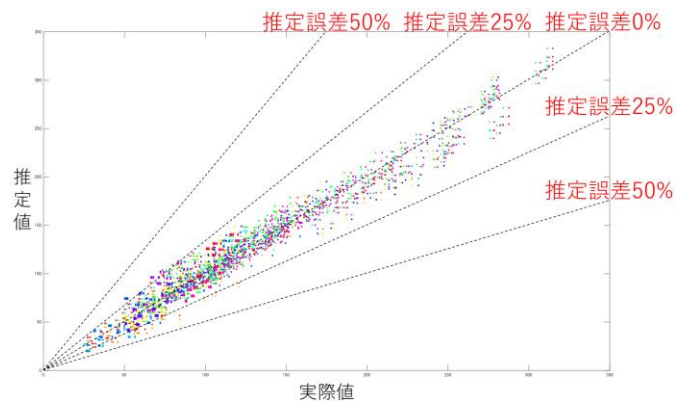


図3 初期検討時における Q_{hour_peak} の実際値と推定値の相違

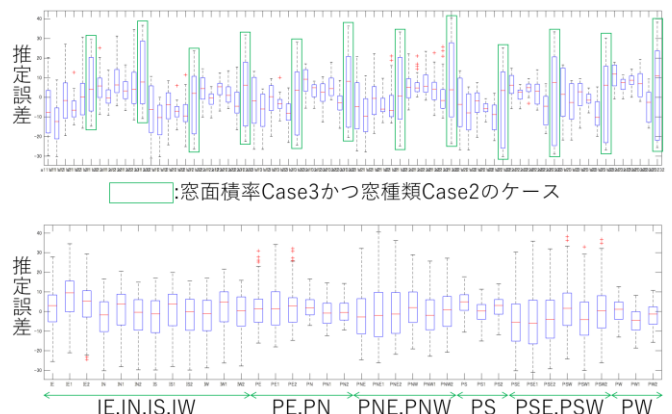


図4 初期検討時における Q_{hour_peak} 推定誤差 (上:異なる熱負荷条件のケース別、下:空調ゾーン別)

$$Q_{hour_peak} = f_2(FLRTYP, OW_N, OW_S, OW_E, OW_W, IW, Hgain, WinRatio, SC) \quad (式2)$$

表4 改善変更後の各重回帰モデルの R^2 値、 $RMSE$ 値、 $MaxAE$ 値

	Q_{hour_peak}	$a_{cooling}$	$B_{cooling}$
R^2	0.98	0.99	0.99
$RSME$	7.99	0.41	2.38
$MaxAE$	39.25	1.50	8.43

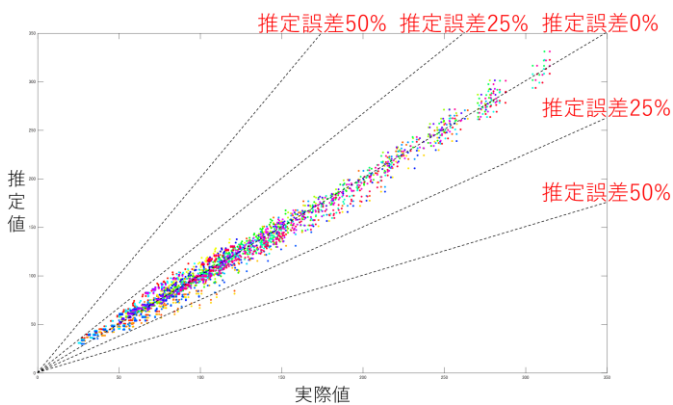


図 5 精度改善後における Qhour_peak の実際値と推定値の相違

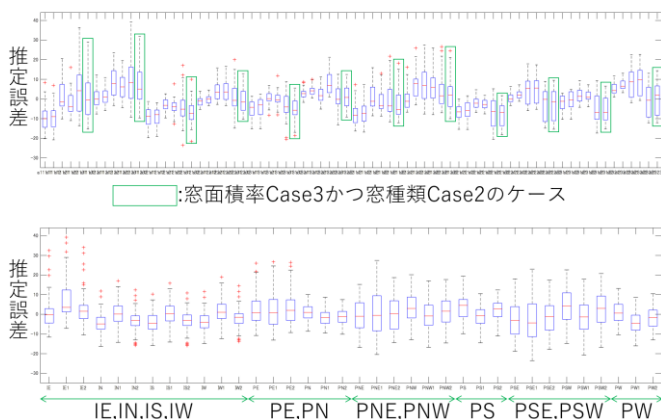


図 6 精度改善後における Qhour_peak 推定誤差 (上:異なる熱負荷条件のケース別、下:空調ゾーン別)

6. まとめおよび今後の展望

本報では、比較的簡便に空調ゾーンごとの熱負荷推定を行うことのできる熱負荷推定手法提案を目的とし、モデル化の概念を示すとともに説明変数の抽出と基礎的な検討を行った。

検討の結果、初期検討で用いた線形重回帰式により、一定の精度で熱負荷推定を行うことができることが確認された。また説明変数間の相互作用を考慮する非線形回帰を用いることで推定精度を向上できることを確認した。

非定常の年間熱負荷計算結果を限られた説明変数を用いて推定を行うことから、高い精度を追求することは容易ではない。しかしながら、設計時において、信頼性を確保しうる推定精度を実現することは不可欠であり、適正な精度目標の設定とその達成のための検討が必要である。

今後の作業として、各重回帰式の更なる精度向上、ピーク発生時刻およびピーク相当運転時間についての推定精度検討、各補正式の作成を行う予定である。

注釈

1) 本研究における熱負荷推定は温暖な地域に建つ建築物を対象としており、空調機器の容量選定に係る説明変数の Qhour_peak は冷房最大負荷とする。

2) 重回帰分析のため、カテゴリーデータに変換を行った。

$$3) OW = \{U_w * OWL * (1 - \eta_g) + U_g * OWL * \eta_g\} * CHGH / Area$$

U_w : 外壁の熱貫流率[W/m² K]、 U_g : 窓の熱貫流率[W/m² K]、OWL: 外壁水平方向長さ[m]、 η_g : 窓面積率[-]、CHGH: 天井高[m]、Area: 空調ゾーン床面積[m²]

4) 統計的仮説検定において、帰無仮説の元で検定統計量がその値となる確率のこと

参考文献

1) 日角友香, 尹奎英, 鶴飼真貴子, 松井伸樹, 奥宮正哉: 建築物の年間熱負荷予測モデルの開発に関する研究(第1報) モデル開発の概要と課題整理, 空気調和・衛生工学会大会(北海道), 2019

2) 鈴木紀子, 佐久間正芳, 杉浦匠: ニューラルネットワークを用いた空調熱負荷予測, 空気調和・衛生工学会大会 学術講演論文集, 733-736, 1994

3) 鄭明傑, 西谷義彦, 中原信生: カルマンフィルタを用いた空調負荷予測に関する研究, 空気調和・衛生工学, 73(3), 228, 1999

4) 金原昭臣, 黒須茂, 宮坂房千加, 神村一幸: ARIMA モデルによる空調熱負荷予測, 計測自動制御学会論文集, 26(6), 721-728, 1990

5) 鄭明傑, 西谷義彦, 中原信生: GMDH を用いた空調負荷予測に関する研究, 空気調和・衛生工学会論文集, 26(83), 65-74, 2001

6) 松尾陽, 林憲徳, 高草智: 月平均気象データによる事務所建築の期間熱負荷予測法に関する研究:(その2)五変数重回帰式の作成及び各地の期間熱負荷の検討, 空気調和・衛生工学会大会 学術講演論文集, 441-444, 1983

7) 中原信生, 中村信治: 地域冷暖房シミュレーション用の熱負荷推定法に関する研究: 第1報-計算の方法ならびに事務所建築の熱負荷推定, 空気調和・衛生工学会 論文集, 19(54), 43-53, 1994

8) 井上宇市, 李春夫, 相賀洋, 金子健志: 熱負荷要素分類による熱負荷・熱源エネルギー消費量の推定法: その1 熱負荷推定法, 空気調和・衛生工学会大会 学術講演論文集, 281-284, 1981

9) 森田洋平, 長井達夫, 塩地純夫, 村山紘之: 空調運転データを用いた建物熱特性把握と年間熱負荷推定法に関する研究, 空気調和・衛生工学会大会 学術講演論文集, 863-866, 2011