

都市キャノピー・ビルエネルギー連成解析モデルによる気温形成過程と電力需要気温感応度の再現性に関する研究

石坂泰斗¹・井上達也²・中川靖久³・井原智彦⁴・山口和貴⁵・亀卦川幸浩⁶

¹学 (工) 明星大学大学院理工学研究科環境システム学専攻 (〒191-8506 東京都日野市程久保2-1-1)

E-mail: 09mb001@stu.meisei-u.ac.jp

²学 (工) 株式会社エヌシーエス (〒254-0042 神奈川県平塚市明石町2-20)

³学 (工) 中外テクノス株式会社 (〒305-8569 千葉県千葉市緑区大野台2-2-16)

⁴博 (工) 産業技術総合研究所研究員 安全科学研究部門 (〒267-0056 茨城県つくば市小野川16-1)

E-mail: ihara-t@aist.go.jp

⁵学 (理) 東京電力株式会社技術開発研究所地球環境技術グループ (〒230-8510 神奈川県横浜市鶴見区江ヶ崎町4-1)

E-mail: yamaguchi.ka@tepcoco.jp

⁶博 (工) 明星大学准教授 理工学部環境システム学科 (〒191-8506 東京都日野市程久保2-1-1)

E-mail: kikegawa@es.meisei-u.ac.jp

都市気温は排熱の効果や地表面より放出される顕熱の風による移流や拡散などといった物理過程によって決まる。東京の低層戸建住宅街区域で取得されたこれら物理過程に関わる運動量・熱フラックスの実測データを用い、都市キャノピー・ビルエネルギー連成解析モデルによるその再現性を検証した。その結果、モデルは実測フラックスの夏季日変化の傾向を定性的には再現したが、幾つか問題点も見出された。

加えて、東京の業務街区と集合住宅街区で観測された実測気温・比湿と各街区の実電力需要量をもとに解析した電力需要の気温・比湿感応度を、都市キャノピー・ビルエネルギー連成解析モデルがどの程度再現できるかを検証した。その結果、両街区共に電力需要気温感応度は良好に再現できるものの、比湿感応度の再現性はやや低下することが判明した。

Key Words : urban thermal environment, heat island, electricity consumption, anthropogenic heat, numerical simulation, Tokyo

1. はじめに

ヒートアイランド問題の対策を考える際、数値モデルによるヒートアイランド現象及びその対策効果の予測が重要である。都市がもたらす大気熱環境への熱的・力学的影響過程をより現実的に考慮可能な数値気象モデルとして都市キャノピーモデルの有用性が認められつつある。この都市キャノピーモデルとは、地表から建物屋上の平均高度の範囲に存在する都市キャノピー大気層について、気温、湿度、風速の時間変動等の街区スケールの気象を予測する数値気象モデルのことである。ここで、ヒートアイランド現象に関連する都市気温は排熱の効果や都市表面から放出される顕熱の風による移流・拡散等といった様々な物理過程のバランスによって決まる。しかし、都市の気象・熱環境の形成に直接的に影響を与える都市表面と大気間の運

動量と熱の鉛直交換量(フラックス)についての予測精度解析は十分に行われていない。そこで、本研究では、先行研究¹⁾で開発された街区気象(気温、湿度、風速)と建物の空調熱負荷・排熱量を予測可能な都市キャノピー・ビルエネルギー連成解析モデル(以降、CMBEM)を対象として、都市気温の形成に関わるこれら物理過程の再現性の検証を試みた。

更に、エネルギーと都市気象の関係性を明らかにすることは、ヒートアイランド現象や地球温暖化の将来的進行を予測し、また、温暖化がもたらす都市エネルギー需要への影響を把握する上で重要である。これと関連し、玄地らは東京23区で建物用途別に気温変化による電力需要量の変化量を定量化した²⁾。また、平野らは電力需要気温感応度について実測値を用いた場合とシミュレーションモデルを用いた場合とで比較した³⁾。しかし、本来、電力需要気温感応度はその対

象街区の気象要素と電力需要量から算出すべきであるにもかかわらず、先行研究では気象要素として対象街区周辺の気象台やアメダスの測定データを代替利用している為、正確な感応度を算出していない可能性もある。そこで、本研究では、対象街区内で測定された実測気温・比湿を用い、より信頼性の高い電力需要感応度を算出した上で、CMBEMより予測された気温・比湿と冷房電力需要とを関連付け、モデルによる感応度を定量化し、両者を比較することで電力需要感応度のモデルによる再現性を合わせて検証することを目的とした。

2. 使用モデル

(1) 数値モデル

本研究で使用したCMBEMは一次元都市キャノピーモデル（以降、CM）とビルエネルギー排熱解析モデル（以降、BEM）を結合したものである。CMBEMの概念図を図-1に示す。CMBEMより予測される主な物理量について、気温は都市キャノピー内建物や自動車からの排熱（顕熱）を考慮し、湿度は排熱の潜熱分に加え、土壌や植生からの潜熱を、風速は水平方向の運動量の鉛直乱流拡散やビルによる抵抗を、放射は短波・長波放射のキャノピー内での吸収・反射を考慮して予測している。

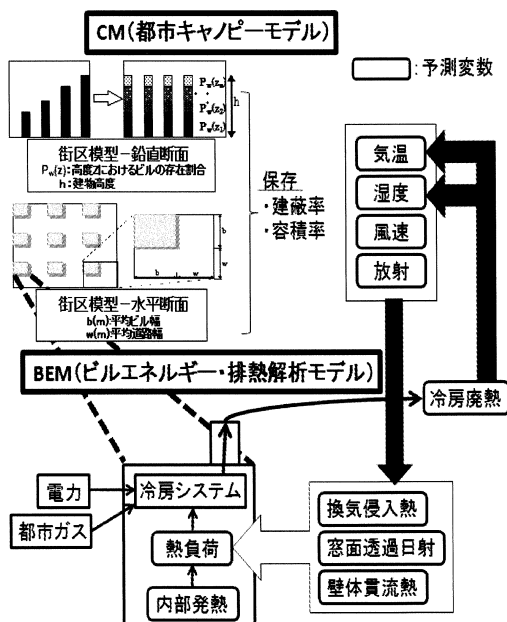


図-1 CMBEMの概念図

(2) モデル計算条件の設定

上空気象場の外部気象条件を境界条件として、街区キャノピー空間の気象予測をするのがCMである。予測された街区気象条件下、建物側の熱的応答過程の表現を担うのがBEMである。よって、外部気象条件や街区条件、建物特性等のモデルへの入力条件が必要となる。主な入力条件一覧を表-1～表-4に示す。

表-1 外部気象条件

計算対象街区	A街区*	B街区*	久が原
計算対象期間	2007年7月22日～8月27日		2005年8月12日～2005年9月7日
上端境界	東京管区気象台での特別測定値より推定		8月19, 31日は実測値。その他の日は東京管区気象台データを使用
全天日射			

*4. (1) 後述

表-2 対象街区の平均構造

計算対象街区	A街区	B街区	久が原
平均道路幅(m)	9.55	12.25	6.20
平均建物幅(m)	14.14	10.44	9.59
天空率(-)	0.26	0.65	0.56

表-3 CMの計算条件

設定項目	A街区	B街区	久が原
屋上			
アルベド(-)	0.20	0.20	0.15
射出率(-)	0.90	0.90	0.90
人工被覆面積割合(-)	1.00	1.00	1.00
緑地面積割合(-)	0.00	0.00	0.00
建物壁体			
アルベド(-)	0.20	0.20	0.15
窓面アルベド(-)	0.47	0.38	0.38
射出率(-)	0.90	0.90	0.90
窓面射出率(-)	0.87	0.87	0.87
壁面面積割合(-)	0.67	0.82	0.82
窓面積割合(-)	0.33	0.18	0.18
緑地面積割合(-)	0.00	0.00	0.00
道路			
人工被覆面アルベド(-)	0.20	0.20	0.12
緑地アルベド(-)	0.15	0.15	0.15
水面アルベド(-)	0.20	0.20	0.23
射出率(-)	0.90	0.90	0.90
水面射出率(-)	0.90	0.90	0.93
人工被覆面積割合(-)	0.94	0.82	0.71
緑地面積割合(-)	0.06	0.17	0.21
水面積割合(-)	0.00	0.01	0.09

表-4 BEMの計算条件

計算対象街区	A街区	B街区	久が原
空調設定温度(°C)	26	28	26
空調設定湿度(%)	50	50	50
人体顕熱発熱量 (W / 人)	59	59	59
人体潜熱発熱量 (W / 人)	31	31	31
外気導入力 (m ³ / m ² ・h)	3.00	0.72	0.72
単位面積あたり在室 人員(人 / m ²)	0.13	0.02	0.02
排熱位置	各階	各階	各階

3. 気温の予測に至る物理過程（フラックス）の再現性解析

(1) 実測手法

著者らは東京工業大学のグループ⁴⁾が東京都大田区久が原の観測タワーにおいて観測した U^* （運動量フラックス）、 H （顕熱フラックス）、 LE （潜熱フラックス）、 $S\uparrow$ （上向き短波放射）、 $L\uparrow$ （上向き長波放射）、 Rn （正味放射量）の実測値とCMBEMによる計算結果との比較に基づき、都市の気温形成過程に関わるこれら物理過程の再現性について検証した。計算領域は図-2に示した夏季の卓越風向に対する代表的なフラックスソースエリアである楕円の領域である。久が原周辺は1km四方にわたり高さのほぼ均一な低層住宅地が広がっている（戸建住宅街区）。主な外部気象条件は表-1に示した通りだが、風速と $S\downarrow$ （下向き短波放射）、 $L\downarrow$ （下向き長波放射）に関しては、8月19日の前1週間に19日の久が原実測値を、31日の前1週間に31日の久が原実測値を設定した。

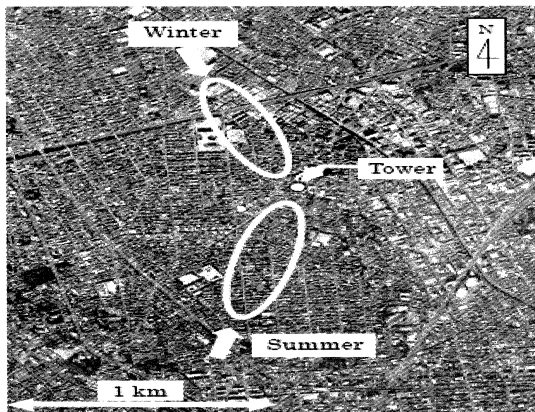


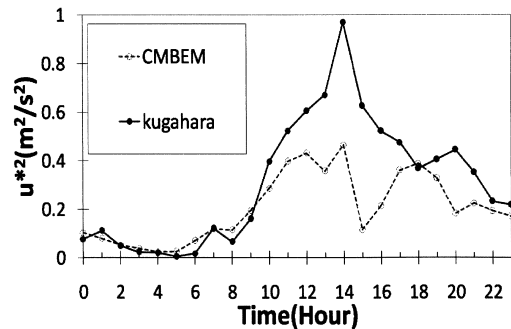
図-2 モデル検証における計算領域と実測地点

(2) シミュレーション結果との比較

久が原地上29mにおける U^* の実測値とCMBEMの計算結果との時系列比較（8月19日）を図-3に示す。朝夜は比較的計算結果と実測値が一致するものの、昼間は計算結果と実測値の乖離が大きい。原因の一つとしてCMBEM上で、 U^* の予測値の大きさを支配する乱流拡散係数 K_M が現実の値と異なる可能性が考えられた。一方、昼間に大気的不安定化に伴い、 U^* も増加する傾向は定性的には再現できている。放射フラックスに関しては、放射の収支式（(1)式）に示した Rn の各成分について8月19日の久が原地上29mにおける実測値とCMBEMの計算結果との時系列を比較した（図-4）。

$$Rn = S\downarrow - S\uparrow + L\downarrow - L\uparrow \quad (1)$$

$S\uparrow$ は6～16時付近で実測よりも大きな値となった。これは実際の都市キャノピーの凹凸によって起こる日射のトラップ現象によるアルベドの低下をCMBEMが十分に再現できていない為と考えられた。 $L\uparrow$ は9～13時以外の時間帯は実測よりも小さな値となった。CMBEMでは屋上面と道路面からの $L\uparrow$ は考慮しているが、側壁からの $L\uparrow$ は考慮していない為だと考えられた。熱収支に関しては、 H 、 LE 、 Rn について8月19日の久が原地上29mにおける実測値とCMBEMの計算結果とを比較をした（図-5）。CMBEMでは H を日中、特に過大評価した。これは顕熱の乱流拡散係数 K_H の再現性が不十分であることなどが原因と考えられた。一方、 LE については、若干の過小評価の傾向は認められたものの、CMBEMは実測値の日変化を概ね再現可能であった。また、 Rn についても日変化をよく再現できているが、夜間は実測よりも過大評価の傾向にあった。これは、図-4に示した $L\uparrow$ が過小評価されていることが原因だと考えられた。

図-3 久が原における U^* の再現結果と実測値の比較

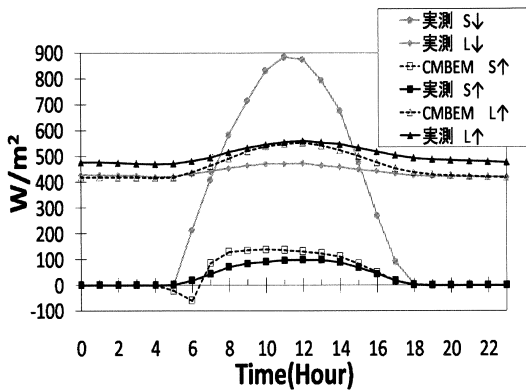


図-4 久が原における放射の再現結果と実測値の比較

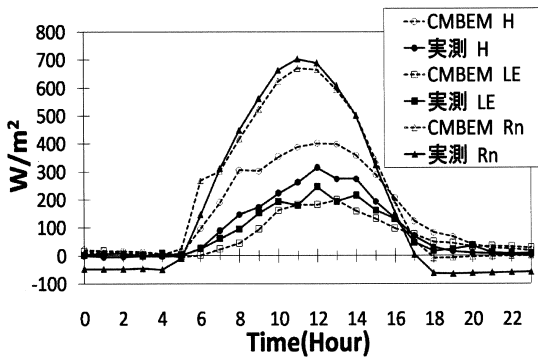


図-5 久が原における地表面熱収支の再現結果と実測値の比較



図-6 A街区における計測地点（十）

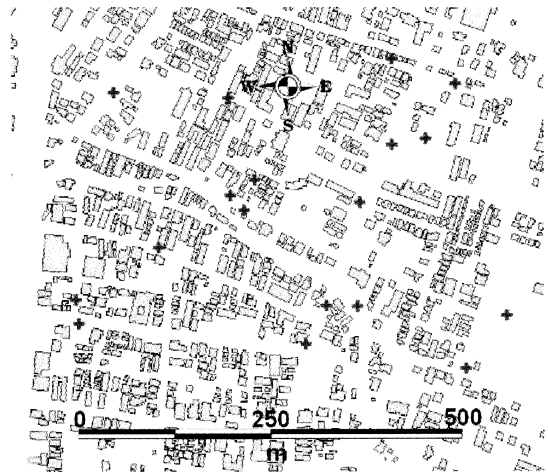


図-7 B街区における計測地点（十）

4. 街区内実測に基づく電力需要気温・比湿感応度の定量化とモデルによる再現

(1) 感応度の概念

著者らが2007年7月29日～8月26日に東京23区内のA街区（業務街区（図-6））とB街区（集合住宅街区（図-7））で行った多点連続計測で取得した実測気温・比湿を用い、(2) 式より電力需要の気温・比湿感応度を算出した。

$$E = E_0 + \left(\frac{\Delta E}{\Delta T} \right)_s (T - T_s) + \left(\frac{\Delta E}{\Delta Q} \right)_s (Q - Q_s) \quad (2)$$

式中、 E [W/floor- m^2] は建物単位延床面積あたりの夏季電力需要量、 T [°C] は気温、 Q [g/kg] は比湿、 T_s [°C] は分岐点気温、 Q_s [g/kg] は分岐点比湿、 $(\Delta E/\Delta T)_s$ [W/floor- m^2 /°C] は建物単位延床面積あたりの夏季電力需要の気温感応度、 $(\Delta E/\Delta Q)_s$ [(W/floor- m^2) / (g/kg)] は同比湿感応度を表す。 $(\Delta E/\Delta T)_s$ は、 $T \geq T_s$ の場合に気温が1°C上昇するに連れて建物単位延床面積あたりで域内の冷房電力需要が何W増加するのかを表わしている。同様に $(\Delta E/\Delta Q)_s$ は、域内の比湿が増加するに連れて冷房時の建物内除湿に伴い増加する電力需要について、その比湿との関係を線形近似したものである。また、残りの E_0 は気象条件（気温・比湿）に左右されない、即ち空調用途以外のBase-loadの電力需要に相当する。以上の概念を図-8に示す。ここでは気温感応度の例を示しているが、比湿感応度の場合は図-8の横軸が時別比湿 (g/kg) となり、分岐点は比湿分岐点となる。

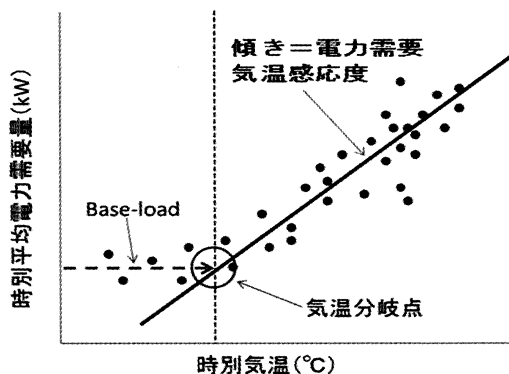


図-8 電力需要気温感応度の概念図

(2) 感応度の算定結果

著者らは算出した電力需要感応度の内、自由度調整済み決定係数0.5以上、F検定で有意となった平日の時間帯の電力需要感応度を採用した。電力需要感応度を各街区の電力需要計測エリアの建物延べ床面積で除し、正規化した。感応度の算定に際し、(2)式に実測値を代入した場合とCMBEMの計算結果を代入した場合とで比較し、再現性の検証を試みた。なお、CMBEMによる計算は複数のケースで行った。ケース毎の計算条件を表-5に示す。

表-5 ケース毎の計算条件

	計算内容
case-1	業務街区、集合住宅街区の標準設定
case-2	実測Base-loadを機器発熱スケジュールに採用
case-3	実電力需要-Base-load=冷房電力 冷房電力/時間最大冷房電力 =新空調スケジュール 葛西のみ新スケジュール×0.626
case-4	地上気象条件を実測値に変更
case-5	B街区のCOP=5.03(case-1)を2.58に変更

計算の結果、A街区はcase-2を、B街区はcase-5をCMBEM再現計算の設定条件として使用した場合、電力需要気温感応度はA街区(図-9)、B街区(図-10)共に実測値をほぼ再現できることが判明した。しかし、電力需要比湿感応度はA街区(図-11)、B街区(図-12)共に実測値を再現するに至らなかった。この要因として、冷房中の室内湿度をCMBEMは一定値に制御する計算を行っている事が考えられた。現実的には冷房中の湿度は設定、または管理もされていないケースが多いと考えられた。即ち、空調機器による除湿とは温度が下がったことにより、空気中の水分が結露して除湿するもの(なりゆき除湿)であり、CMBEMではこの効果を考慮していないことが原因であると考えられた。

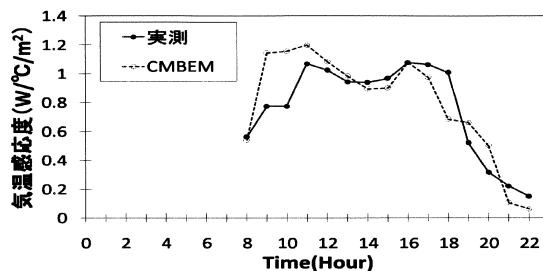


図-9 電力需要気温感応度の再現結果 (A街区)

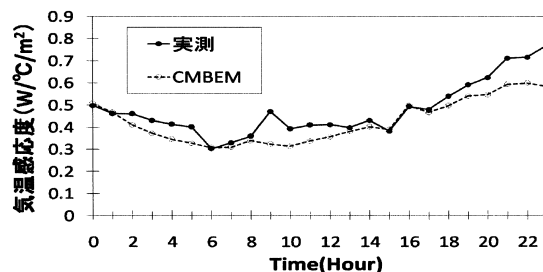


図-10 電力需要気温感応度の再現結果 (B街区)

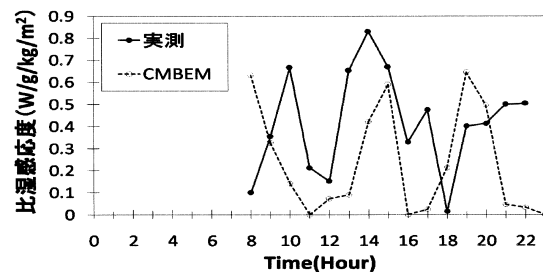


図-11 電力需要比湿感応度の再現結果 (A街区)

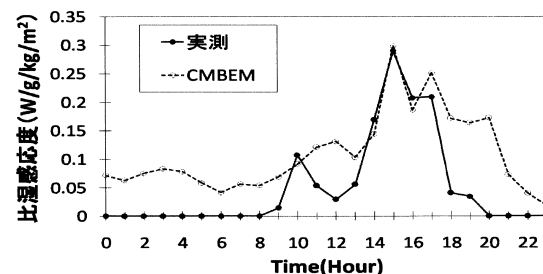


図-12 電力需要比湿感応度の再現結果 (B街区)

5. まとめ

本研究では、都市気温を決定する放射や熱収支といった物理過程におけるCMBEMの再現性の検証を行った。対象街区は久が原を選定した。また、実測及びCMBEMより予測された気温・比湿を電力需要と関連付け、CMBEMの電力需要感応度の再現性の検証も合わせて行った。対象街区は東京23区内の業務街区（A街区）と集合住宅街区（B街区）を選定した。得られた結果を以下に示す。

- U^{*2} の再現結果より、昼間の計算結果と実測値の乖離が大きい原因の1つとしてCMBEM上で、 U^{*2} の予測値の大小を支配する乱流拡散係数 K_M が現実とは異なる値として予報されている可能性が考えられた。
- R_n の成分である $S \uparrow$ をCMBEMは十分に再現できず、実際の都市キャノピーの凹凸によって起こる日射のトラップ現象によるアルベドの低下を十分には再現できていない可能性が示唆された。また、 $L \uparrow$ は側壁からの放射成分を考慮していない為に9～13時以外の時間帯は実測よりも過小評価したと考えられた。
- 熱収支の再現結果より、日中の H の過大評価や LE の過

小評価はCMBEM内の乱流拡散係数の予報値に原因があると考えられた。 R_n の夜間の過大評価は、 $L \uparrow$ の過小評価が原因だと考えられた。

- 電力需要気温感応度は表-5のように計算条件を変更し、再現計算を行った結果、実測をほぼ再現できた。しかし、電力需要比湿感応度は冷房中の湿度を一定値制御していることなどが関係し、実測値の再現には至らなかった。

参考文献

- 1) kikegawa. et. al : Development of a numerical simulation system toward comprehensive assessments of urban warming countermeasures including their impacts upon the urban buildings' energy-demands, *Applied Energy* 76 (2003) 449-466
- 2) 玄地裕他：東京都における電力需要の分析 第24回エネルギー・資源学会研究発表会，東京都，講演論文集(2005)pp.265-268
- 3) 平野勇二郎他：事務所および住宅における空調・給湯用エネルギー消費量の気温感応度算定に関する各種手法の相互比較，*エネルギー・資源* Vol.27 No.3 pp.218-224 2006年
- 4) 森脇亮，神田学：住宅街における熱収支と CO_2 フラックスの年間積算値，*水工学論文集*，49，pp.362，2005

STUDY ON PERFORMANCE OF URBAN CANOPY-BUILDING ENERGY COUPLED SIMULATION MODEL CONCERNING ITS REPRODUCIBILITY OF TEMPERATURE FORMATION PROCESS AND TEMPERATURE SENSITIVITY OF ELECTRIC POWER DEMAND

Yasuto ISHIZAKA, Tatsuya INOUE, Yasuhisa NAKAGAWA, Tomohiko IHARA, Kazuki YAMAGUCHI and Yukihiro KIKEGAWA

The urban air temperature is affected by the physical process like the advection, diffusion, and anthropogenic heating. We verified the reproducibility of these measurement values observed over detached house district in Tokyo by CMBEM. As a result, some problems were left although there was time zone in which CMBEM was able to reproduce those observations.

Additionally, we verified the reproducibility of temperature and humidity sensitivity of regional electric power demand observed in the office district and housing complex district in Tokyo by CMBEM. As a result, the electric power demand temperature sensitivity was able to be reproduced almost. Therefore, it was thought that CMBEM was a suitable model for reproducing the electric power demand temperature sensitivity.