

2016 年度修了

修士論文

都市気象 - 建物エネルギー連成モデルの  
街区電力需給予測への応用

東京大学大学院 新領域創成科学研究科

環境システム学専攻

学籍番号 47-146798

田代 太一

指導教員 井原 智彦 准教授

2017 年 2 月 23 日提出

## 目次

第1章	緒言	4
1.1	緩和策と適応策	4
1.2	世界的なエネルギー需要の増大	5
1.3	都市の人口とエネルギー消費	7
1.4	我が国における環境問題	8
1.5	日本のエネルギー消費	10
1.6	日本のエネルギー供給	12
1.7	再生可能エネルギーの導入とスマートグリッド	13
1.8	統計モデルによる電力需要予測	15
1.9	物理シミュレーションモデル	16
1.10	本研究の目的	17
第2章	シミュレーションモデル CM-BEM の概要	18
2.1	CM-BEM 連成モデル	18
2.2	メソスケールモデル WRF	21
2.2.1	WRF の概要	21
2.2.2	WRF の基礎方程式	22
2.2.3	WRF における都市の位置づけとサブモデル	25
2.3	都市キャノピー気象モデル CM	27
2.3.1	都市キャノピーの概念	27
2.3.2	CM の開発背景と概要	28
2.3.3	CM を構成するサブモデル	31
2.4	建物エネルギーモデル BEM	36
2.4.1	建物エネルギーモデルの開発背景と概要	36
2.4.2	BEM を構成するサブモデル	37
2.4.3	電力消費量の推定	40
2.5	汎用モデル（サブグリッドモデル）	43
2.5.1	汎用モデル開発の背景	43
2.5.2	従来モデルの計算概要と課題	43
2.6	太陽光発電モデル	47
2.6.1	太陽光発電パネルの設置	47
2.6.2	太陽光発電量の推定	48
第3章	調査範囲とデータ	51

3.1	調査対象地域.....	51
3.2	実測データの整備.....	53
3.2.1	気象データ.....	53
3.2.2	電力データ.....	57
3.3	CM-BEM 入力データの整備 .....	57
3.3.1	大阪市周辺域における街区種別の分類.....	57
3.3.2	大阪市周辺域における交通排熱の推定.....	58
3.2.3	空調期間の設定および解析期間カテゴリーの分類.....	61
第4章	街区スケールにおける電力消費量の算出.....	63
4.1	ベースロードスケジュールの作成.....	63
4.2	空調稼働スケジュールの作成.....	68
4.3	街区スケールにおける電力消費量の算出.....	73
4.4	考察 .....	85
4.4.1	ベースロードスケジュールの妥当性の考察.....	85
4.4.2	空調稼働スケジュールの妥当性の検証.....	85
4.4.3	電力消費量の実測値と計算値の比較.....	86
第5章	新モデル（汎用モデル）の開発.....	87
5.1	汎用ベースロードスケジュールの作成.....	88
5.2	空調稼働スケジュールの作成.....	91
5.3	街区種別割合の算出.....	91
5.4	新モデルの電力消費量推定.....	92
5.5	考察 .....	103
5.5.1.	街区 D, 街区 B1 における誤差の原因について .....	103
5.5.2.	業務用途の細分化.....	104
第6章	太陽光発電量の推定.....	108
6.1	太陽光発電量の推定と検証.....	108
6.2	推定した発電量に関する考察.....	109
第7章	電力需給ポテンシャル評価.....	110
第8章	まとめと今後の展望.....	113
参考文献	.....	114
謝辞	.....	119

## 第1章 緒言

### 1.1 緩和策と適応策

我々の周りには様々な「環境問題」が溢れている。よく耳にする地球温暖化も地球スケールの環境問題であり、掃除をせずに放置することで生じる私の机まわりの環境悪化もまた、広義の意味では「環境問題」ではないだろうか。本研究の緒言として最初に、どのような環境問題にも通ずる対策設計の重要な概念である、緩和策と適応策について述べる。

環境問題に対する対策は多様に存在するが、環境の悪化や現象の進行を食い止めるために実施する「緩和策」と、変化した環境に応じて我々が生活や行動様式を適応させる「適応策」に大別される。「緩和策」は現象の原因を取り除くことが目的であるため、自然・人間システム全般へ影響が波及するのに対し、「適応策」は特定の対象のみに対策を講じるため影響が限定的である。つまり、緩和策の波及効果は広域的・横断的であるのに対し、適応策は限定的・個別的であるという特徴をもつ[1]。

ここでは一例として地球温暖化を取り上げる。地球温暖化は世界的に気温が上昇する現象であるため、現象の進行を食い止めるためには原因とされる温室効果ガス  $\text{CO}_2$  の排出を削減する必要がある。そのためこの場合の緩和策は、省エネルギー、二酸化炭素固定技術 (Carbon dioxide Capture and Storage; CCS) などが挙げられ、京都議定書のような排出抑制のための国際的なルール策定も緩和策に含まれる[1]。一方、適応策の例としては、暑さに対する暑熱対策 (クールビズ)、渇水に対する貯水池の建設、高温に耐性のある農作物に栽培種を変更することが挙げられる[2]。地球温暖化には早くから緩和策が注目され、施策されてきた。これは適応策だけでは温暖化を乗り切ることが不可能だという見込みがあったためである。また、地域や動物種によって適応力や適応策を施策するコストが大きく異なり、全てのカテゴリーを包括できるような適応策を導入することは非常に難しい。そのような面から地球温暖化では緩和策が中心となり、適応策は補完する立ち位置にあった。しかし、近年、地球温暖化においても適応策の重要性が認められてきた。これは地球温暖化の進行を完全に食い止めることは不可能であるため、影響は少なからず存在し、適応能力の低い地域・動物種は早い段階で被害を受けるため、これに対する対策を講じる必要が考えられたためである[2]。

以上のように、緩和策と適応策には時間・地域スケールでの特徴を持っており、現象によってお互いのバランスを調節することが必要である。そのためには現象の何が原因で、どのような影響が問題となっているかを適切に評価する必要があるといえる。

## 1.2 世界的なエネルギー需要の増大

現在、世界規模でエネルギー消費量が増大している。Fig. 1.1 に各地域および世界全体での一次エネルギー消費量を示す[3]。この図では 1965 年から 2014 年までの一次エネルギー消費量を示しているが、年々消費量が増加している傾向が確認できる。地域別に見ると、北米や欧州の一次エネルギー消費量はここ 30 年間で大きな増減は見られない一方、アジア大洋州での一次エネルギー消費量は大きく増加していることが確認できる。

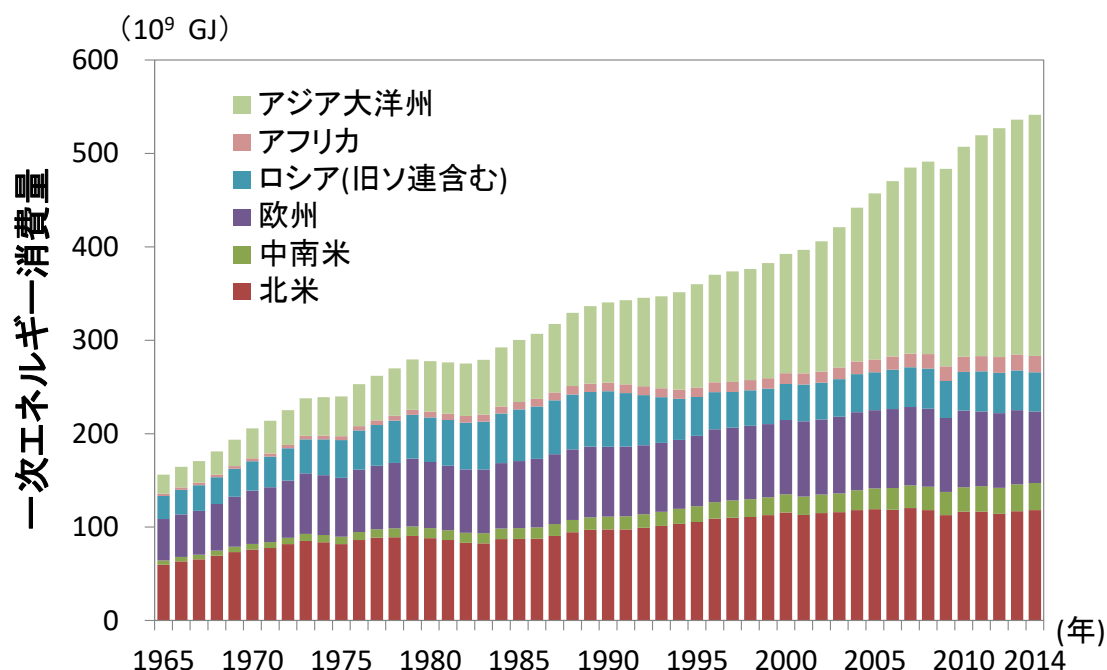


Fig. 1.1 世界の 1 次エネルギー消費量の推移

(出典) [3]より作成

この世界的に増加している原因を考えると、世界的な人口増加が主な原因として挙げられる。我々人類は約 50 万年前に薪などを使用して火を利用して以来[4]、活動とエネルギー消費は切り離せない関係にある。時代の移り変わりにより、使用するエネルギー源や用途は変化していったが、人の経済活動にはエネルギーの消費が必ずあると言ってもよい。当然ながら人とエネルギー消費との間に相関関係が考えられる以上、人口が増えるとエネルギー消費も増大する傾向を示すことは容易に想像がつく。Fig. 1.2 は世界規模での人口の推移を示している。この図から年々世界人口が増加していることが確認できる。また内訳では、欧州・北米での人口が変わらないこと、アジア大洋州での人口が増加していることを踏まえても、一次エネルギー消費量と人口の増加にはある程度の関係性を見出すことができる。

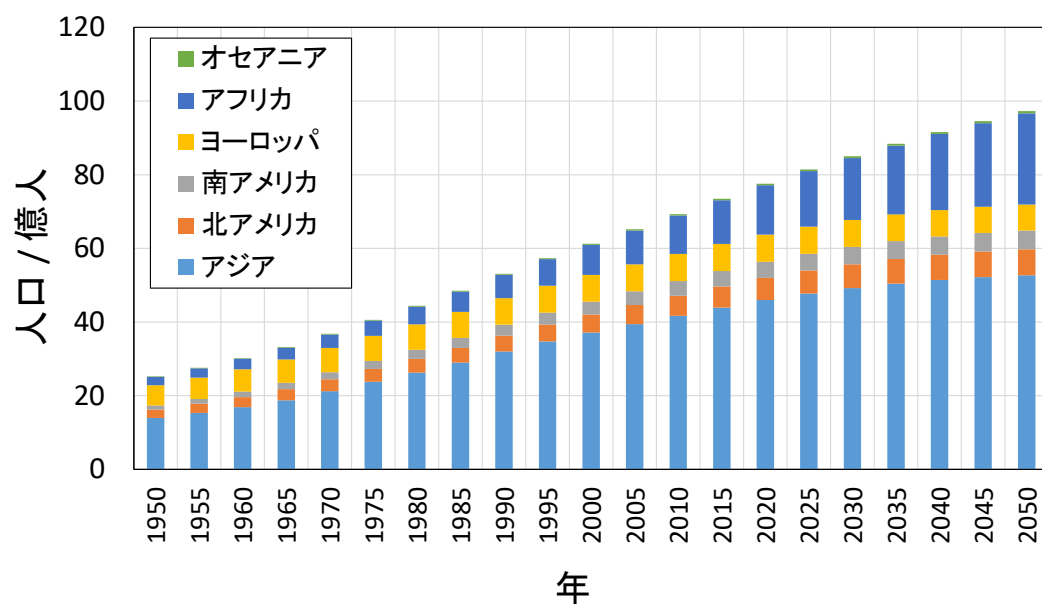


Fig. 1.2 世界規模での人口の推移  
(出典) [5]より作成

この一次エネルギー消費量増大は地球環境の悪化をもたらす。そのため、この一次エネルギー消費量を減らす方向で対策を考える方法がある。人とエネルギー消費の関係は上述の通りであるため、対策は① 一人あたりのエネルギー消費量を減らす、② 人口を減らす、の2種類に大別されるが、Fig. 1.2 から今後人口が増加する傾向は明らかであり、我々一人あたりの一次エネルギー消費量を減らすことが必要となることが言える。ではこのエネルギーはどこで消費されているのか、について次節で紹介する。

### 1.3 都市の人口とエネルギー消費

1.2 節で世界の人口とエネルギー消費が増大していることを示した。これに加え、国連の報告[6]によると、2014 年には世界人口の 54%が都市部にて生活を送っており、2050 年には 66%まで増加することが予測されている。また、郊外人口と都市人口の推移を Fig. 1.3 に示す。Fig. 1.3 より、世界人口が増加するに伴い、郊外人口は大きな増加は見られないが、都市人口は増加の一途を辿っている。そのため、以前に比べ都市の環境問題の重要性も増しているといえる。人口とエネルギー消費が比例関係にあるとすると、都市人口が増加していることから、都市での省エネルギー対策を施すことが必要である。

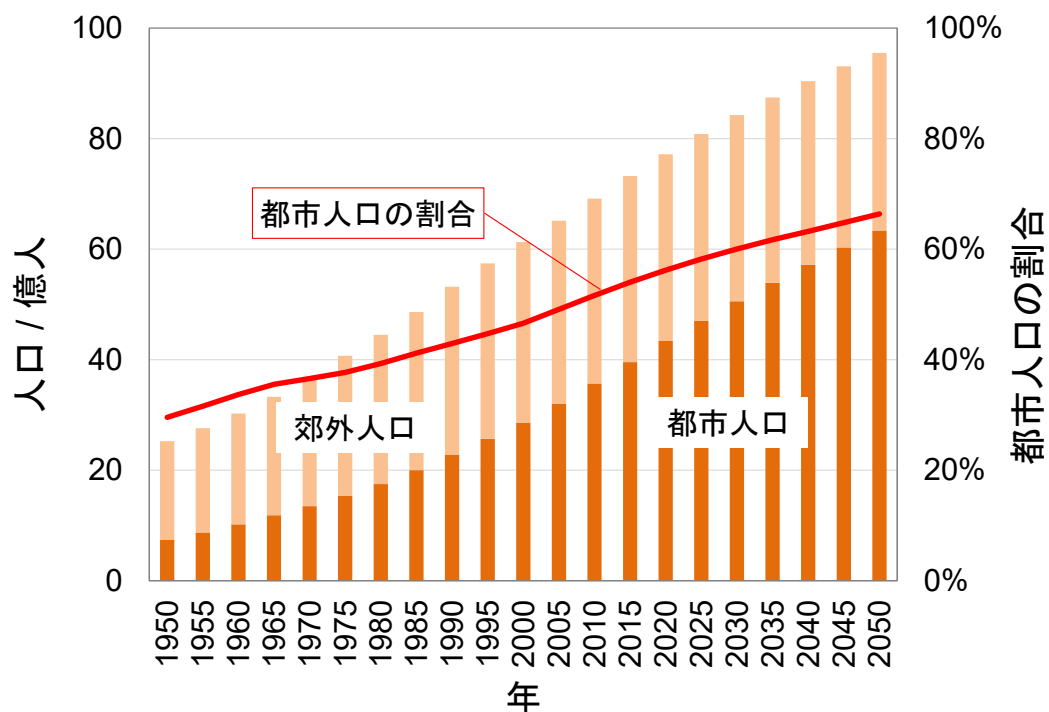


Fig. 1.3 郊外人口と都市人口の推移  
(出典) [5]より作成

## 1.4 我が国における環境問題

1945 年に第二次世界大戦が終戦を迎え、そこから現在に至るまで日本は急激な経済成長を遂げてきた。経済発展を優先するあまり環境への配慮が、環境への問題も数多く提起されてきた。1950 年代～1960 年代の 4 大公害事件を契機として、1967 年に公害対策基本法を制定されて以降、多くの環境問題が社会問題となるに従い国民の環境への意識は成熟していったのではないだろうか。

都市人口が増加している話は前節にて説明したが、我が国の都市の環境問題として現在問題となっているものに「ヒートアイランド現象」が挙げられる。ヒートアイランド現象とは都市の中心部の気温がその周辺域に比べ高くなる現象で、地図上に気温の高低を描くと島状に高くなる現象である[7]。Fig. 1.4 に関東地方の 30℃以上の合計時間の分布を示す。一般的にヒートアイランド現象は冬の夜間から明け方にかけての時間に最も顕著になる。また、夏のヒートアイランド現象では最高気温は大きく上昇しないものの、気温が下がりにくいという特徴を示す[7]。

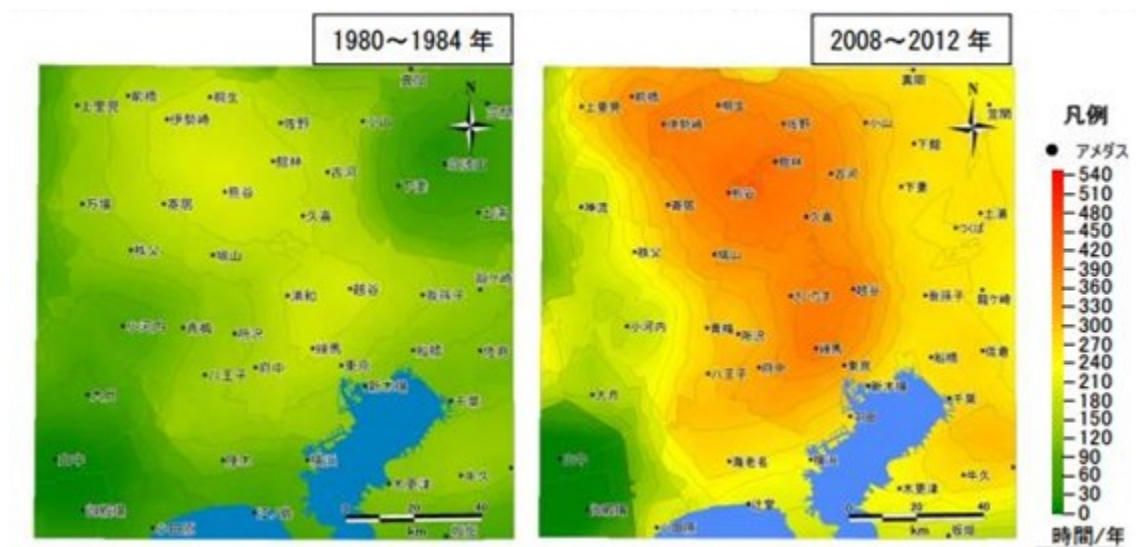


Fig. 1.4 関東地方における 30℃以上の合計時間の分布  
(出典) [7]より抜粋



このヒートアイランド現象の原因として以下の 3 つが指摘されている。それぞれについて簡単に説明する[7]。

- (1) 人工排熱の増加
- (2) 地表面被覆の人工化
- (3) 都市形態の高密度化

(1) 人工排熱の増加

人工排熱は我々の身の回りでは自動車や空調機器、また都市全体で見ると工場や火力発電所から排出される熱のことを指す。

(2) 地表面被覆の人工化

緑地が減り、アスファルトやコンクリートといった人工被覆になると、日射からのエネルギーを貯め込み（反射率の低下）、地表面の温度が上昇する。一方、植物は葉の蒸発散効果によって熱を貯め込まない。また、植物によって影ができる場合は地表面の温度上昇を抑える効果がある。

(3) 都市形態の高密度化

建物が密集をすると風通しが悪くなり、熱の拡散や換気による熱の移動が起こりにくくなるので熱が逃げにくくなる。また、天空率（空の見える割合）が低下することで夜間の放射冷却が弱まり、熱を夜間も貯め込みやすくなる。

## 1.5 日本のエネルギー消費

我が国のエネルギー消費は 1960 年から 1970 年の高度経済成長期に国内総生産（GDP）よりも高い伸び率で増加した[3]。しかし、1973 年と 1978 年のオイルショックを契機として製造業を中心に省エネルギー志向が高まった。一方で原油価格が 1990 年代に低水準になる中で、家庭部門、業務部門を中心にエネルギー消費は増加した（Fig. 1.5）。近年では東日本大震災以降の節電意識の高まりからエネルギー消費は現象傾向にある。

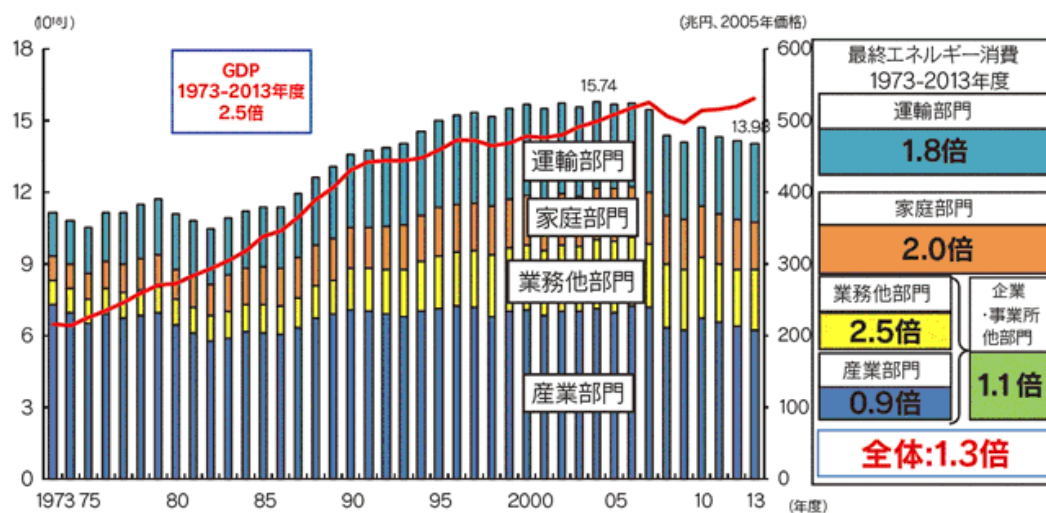


Fig. 1.5 最終エネルギー消費と GDP の推移

（出典）[3]より抜粋

次に、エネルギー消費を部門別に考えてみる。家庭や業務などの分野を民生部門というのが、Fig. 1.7 に部門別の電力最終消費の推移を示すと、右肩上がりに民生部門で使用するエネルギーが増加していることがわかる。次に2次エネルギーの消費について考える。2次エネルギーとは、石油や石炭（1次エネルギー）が電気や都市ガスのように変換されたエネルギーを指す。Fig. 1.8 に家庭・業務のエネルギー消費に占める割合を示す。ここで、電力が1990年以降右肩上がりに増加していることが分かる。つまり、民生部門にて増加しているエネルギー消費は主に電力であり、電力消費を抑える対策を考える必要がある。

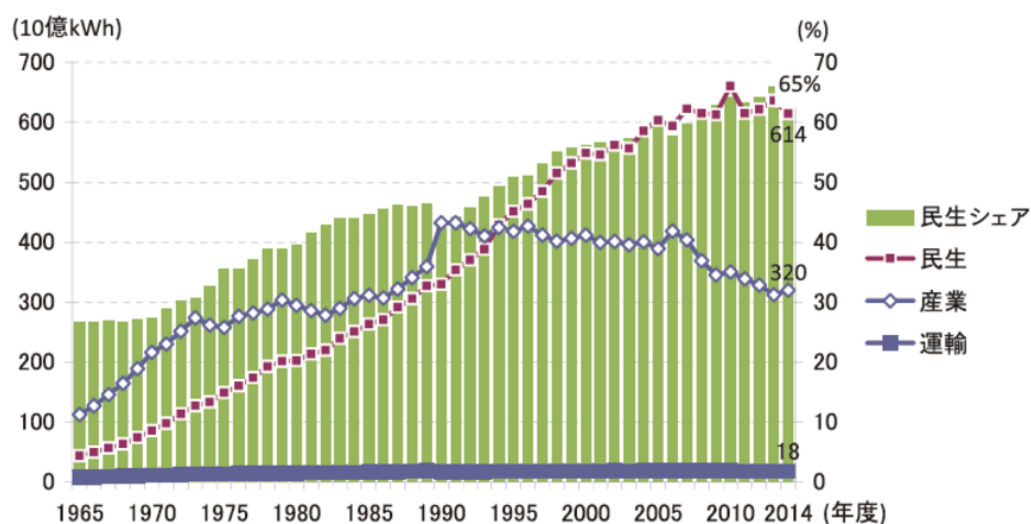


Fig. 1.6 部門別電力最終消費の推移  
(出典) [3]より抜粋

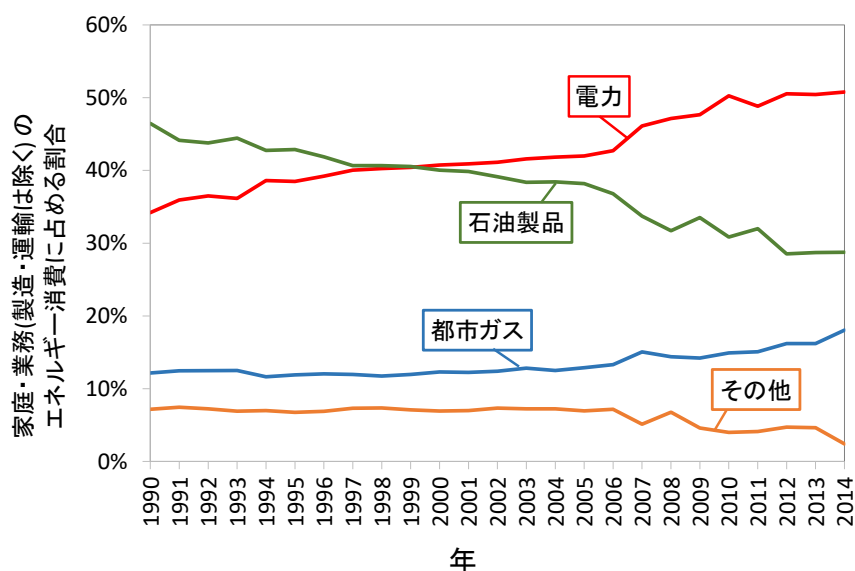


Fig. 1.7 家庭・業務のエネルギー消費に占める割合  
(出典) [8]より作成

## 1.6 日本のエネルギー供給

次にエネルギー供給について考える。Fig. 1.8 に 1 次エネルギー国内供給の推移を示す。我が国では 1965 年から 2005 年にかけて増加の一途を辿っていた。近年は 2005 年のピーク時に比べるとやや減少している。Fig. 1.8 にて注目すべきことは、化石燃料（石油、石炭、天然ガスなど）の比率の高さである。2011 年の東日本大震災以降、原子力発電に対する世論の風当たりが強くなり、2017 年 1 月現在、ほとんどが稼働していないため原子力によるエネルギー供給はほとんどない。そのため地球温暖化の原因となる CO<sub>2</sub> を排出する石炭、石油、天然ガスなどのエネルギー源に頼らねばならない状況である。近年では太陽光発電などの再生可能エネルギーの導入が盛んに進められているが、Fig. 1.8 を見ても割合は小さい。化石燃料依存のエネルギー体制から脱却するためにも、我が国にとってエネルギー消費の削減と再生可能エネルギーの導入促進は急務であるといえよう。

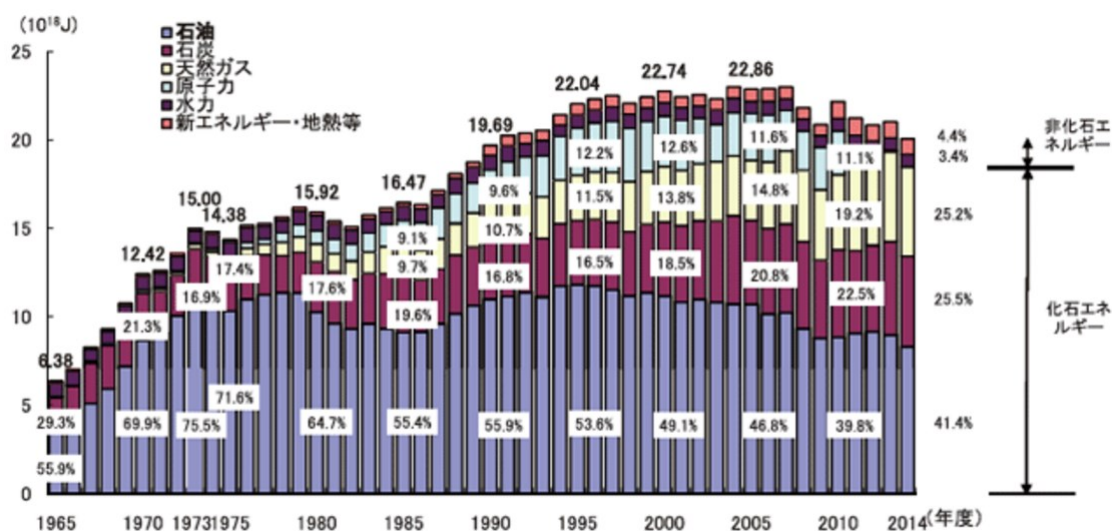


Fig. 1.8 一次エネルギー国内供給の推移

(出典) [3]より抜粋

## 1.7 再生可能エネルギーの導入とスマートグリッド

再生可能エネルギーは化石燃料以外の燃料のうち、永続的に使用することができるエネルギーを指す。代表的な再生可能エネルギーに太陽光、風力、水力、地熱、バイオマスなどが挙げられる。特に導入が進んでいるのが太陽光発電で、2012年に創立された再生可能エネルギーの固定価格買取制度（Feed in Tariff；通称FIT）は太陽光発電の普及に一役買った。Fig. 1.9に太陽光発電の導入量を示す。2012年の制度実施以降、導入が加速していることがわかる。太陽光発電は地球温暖化の原因となる温室効果ガスを発電段階で排出しないことから注目されているが、一方で太陽光発電には天候や日照条件などにより出力が不安定であるという課題も残されている[3]。

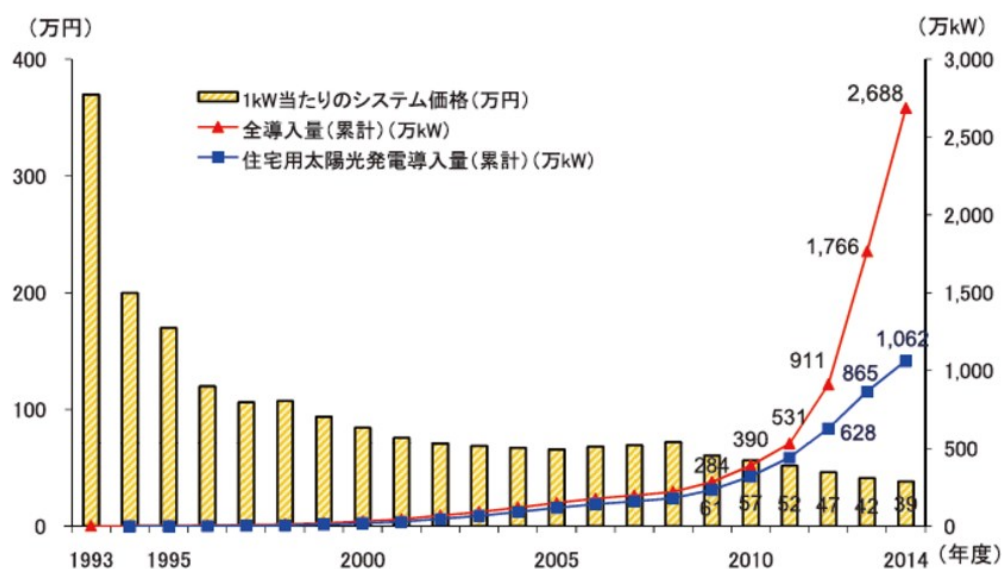


Fig. 1.9 太陽光発電の国内導入量とシステム価格の推移

(出典) [3]より抜粋

再生可能エネルギーの課題を解消する技術の一つにスマートグリッドがある。Fig. 1.10 にスマートグリッド概念図を示す。スマートグリッドとは従来一方向的であった、電力事業者からの送電と、太陽光発電などの分散型電源からの発電を双方向に組み合わせ、電力利用の最適化を図る技術である[9]。スマートグリッドは、蓄電機能を搭載した自動車や蓄電池などとネットワークを介し接続し、建物内の電力需要を制御することによって、不安定な再生可能エネルギーを含めた電力需給調整を可能とする[10]。

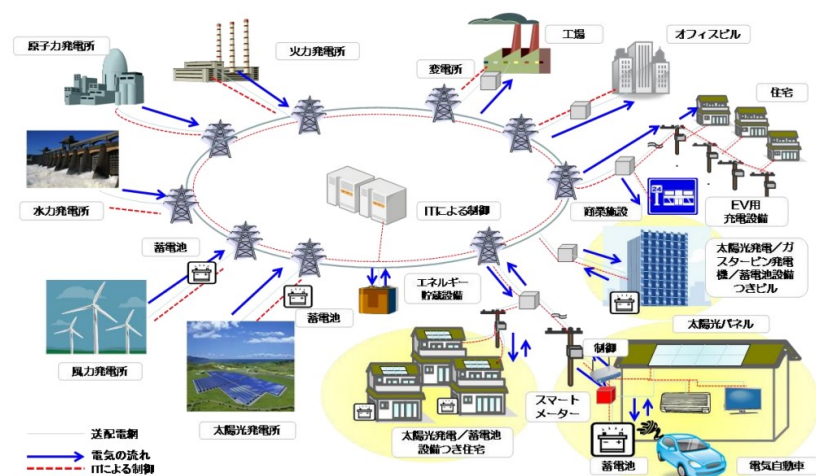


Fig. 1.10 スマートグリッド概念図  
(出典) [11]より抜粋

スマートグリッドの関連するシステムとサービスの世界市場は 2020 年までに 4000 億ドルに達すると推計されている[12]。しかし、「スマートグリッド」の定義や導入背景と目的は国によって異なるのが現状である。Table 1.1 に各国のスマートグリッド導入背景と主目的を示す[13]。欧州や日本では再生可能エネルギーの大量導入を主目的としているのに対し、米国では発電設備や送電設備の脆弱性が課題とされていることから、電力インフラの信頼性向上に重きを置いている。また、再生可能エネルギーに着目している欧州と日本でも、欧州は風力発電、日本は太陽光発電に重きを置いていることも興味深い点である。

Table 1.1 各国におけるスマートグリッド導入の背景と主目的

	欧州	米国	日本
背景	再生可能エネルギーの 大量導入	発・送電設備の インフラ不足	太陽光発電の 大量導入
主目的	風力発電大量導入時の 安定運用	ピーク需要の削減 供給信頼度の向上	太陽光大量導入時の 安定運用

(出典) [13]より作成

## 1.8 統計モデルによる電力需要予測

スマートグリッドのような需給調整のためには、電力需給を予測する必要がある。特に電力系統の電力需要予測は古くから検討されており、重回帰モデルなどに基づき、過去のデータなどを用いて電力需給を予測する。この予測は電力会社などで広く用いられており、例えば東京電力ではHP上で「でんき予報」として電力需要実績と需要予測を公開している[12]。また、中部電力では電力需要予測の結果を報告[15]している。Table 1.2 に曜日区分ごとの絶対値平均誤差を、Table 1.3 に月ごとの絶対値平均誤差を示す。予測対象前日および1週間前の最大電力需要や気象状況、曜日状況などを入力することで電力需要を予測している。この報告より、約98%の精度で需要予測が可能であることがわかる。一方でこのような過去のデータをもとに予測する統計モデルは、過去のデータがない地域や将来予測などには活用できない、といった課題もある。

Table 1.2 中部電力での曜日ごとの電力需要予測

曜日	絶対値平均誤差
平日	1.57 %
休日	2.46 %
全日	1.81 %

(出典) [15]より作成

Table 1.3 中部電力での月ごとの電力需要予測

4月	5月	6月	7月	8月	9月
1.57 %	1.67 %	1.79 %	2.23 %	2.16 %	2.00 %
10月	11月	12月	1月	2月	3月
2.19 %	1.61 %	1.69 %	1.51 %	1.81 %	1.40 %

(出典) [15]より作成

## 1.9 物理シミュレーションモデル

統計モデルが過去のデータがない地域では活用できない一方で、気象要素などから物理的に電力需要を予測する物理モデルも存在する。建物スケールでは、我が国では **Building Energy Simulation Tool (BEST)** [16]が活用されている。これは建物内の空調や給湯、水道にいたるまで細分化されたエネルギー消費を求めることができる。また、米国では **EnergyPlus** が活用されており、無償で使用ができることから世界で最も人気のある建物スケールでの物理モデルである[17]。また街区スケールで例を挙げるとすると **Kikegawa et al [18]**が開発したメソスケール - 都市気象 - ビルエネルギーモデルがある。国内で広く活用されており、高根らによって名古屋に適用されたほか、**Kikegawa et al [19]**によって東京都大手町街区に適用した場合には実測の電力消費量を計算値でうまく再現出来た。また、他の街区スケールでの評価では、**Salamanca et al [20]**の **s-CM-BEM** (**Kikegawa et al** の **CM-BEM** と混同しないよう頭文字 **s** をつけた) がある。これは **Kikegawa et al [18]**のモデルに類似しているが、部屋に入射する日射の角度も考慮に入れている。

これらいくつかのモデルを挙げたが、どのモデルも理想的な街区の電力需要をある程度予測することはできるが、複数の建物用途を考慮する街区に対し適用することは困難である。このような複数の建物用途が混在する街区を考慮できるシミュレーションモデルは現在までに存在しない。今後の導入が進む太陽光発電やスマートグリッドなどの需給予測に対し、複数の建物用途が混在する街区にて物理モデルが応用できれば、太陽光発電やスマートグリッド大規模導入の一助となる。



### 1.10本研究の目的

都市人口の増加や電化率の上昇から、都市の電力需要増加が増加している。特に化石燃料由来の発電に依存している今日では、電力需要の増加が温室効果ガスの排出へとつながり、地球温暖化を加速させる。地球温暖化への対策として期待されている再生可能エネルギーは導入が進んでいるが、出力を天候に依存するため供給の不安定性が課題となっている。

電力の需要と供給を最適化できるスマートグリッドは再生可能エネルギーの課題を解消できる技術の一つとされているが、スマートグリッドに不可欠な電力需要の推定は確立しておらず、ほとんどが過去のデータに基づく統計モデルを用いている[21]。今後の都市開発や気候変動を考慮すると、将来予測可能なシミュレーションモデルが必要不可欠である。電力需要の予測には過去のデータに基づく統計モデルが使用されることが多いが、これから開発される都市や、気候変動の影響を受けた将来の街区に対し適用することはできない。一方で気象と電力需要の現実的な関係を考慮できる物理モデル（例えば[18][19][20]）は、理想的な街区の電力需要をある程度予測することはできるが複数の建物用途を考慮する街区に対し適用することは困難である。このような複数の建物用途が混在する街区を考慮できるシミュレーションモデルはこれまで現在までに存在しない。本研究では、複数用途が存在する街区を考慮した電力需給シミュレーションモデルの開発と検証をおこなう。開発は Kikegawa et al [18]による都市キャノピー・建物エネルギー連成モデル（CM-BEM）をもとに開発する。検証は 2013 年 4 月-2014 年 3 月における大阪市域の複数の実街区の電力供給データにもとづき、電力需要予測の精度を従来モデルと新たに開発したモデルにて比較する。

## 第2章 シミュレーションモデル CM-BEM の概要

本研究では都市気象・建物エネルギー連成モデル (CM-BEM) を用いた。このモデルは都市構造の影響を考慮した気象モデル (都市気象キャノピーモデル ; CM) と建物内で生じたエネルギー消費やそれに伴う空調機器系統の人工排熱を都市の気象へフィードバックするモデル (建物エネルギーモデル ; BEM) を連成させたモデルである[22]。本章では CM-BEM を構成するそれぞれのモデルについて、事例や連成モデル CM-BEM での立ち位置を交えながら概要を述べる。

### 2.1 CM-BEM 連成モデル

本研究では都市キャノピーモデル (urban Canopy Model ; CM) と建物エネルギー連成モデル (Building Energy Model ; BEM) を結合したモデル CM-BEM を用いる。CM-BEM の概要を Fig. 2.1 に示す。CM は建物構造の影響を受けた都市の気象を表現し、その気象条件を基に BEM にて建物内の熱環境を再現する。BEM 内では顕熱、潜熱それぞれに対し空調熱負荷が計算され、空調機器によって熱処理、大気への人工排熱となって排出される。CM は BEM からの排熱を受け、再度都市キャノピー内の気温や湿度といった気象要素を計算する。CM の計算のためには境界条件として、都市キャノピー上空に位置する、より広域な気象データが必要であり、この役割を広域気象モデル WRF (Weather Research and Forecasting model ; WRF) が担う。WRF と CM を接続したモデルでは WRF の計算条件を上端境界として CM-BEM を動かすが、CM-BEM の計算結果 (運動量、顕熱、潜熱、放射フラックス) を上端境界である WRF に返す双方向タイプ (WRF-CM-BEM と表記。例えば[22]) と計算負荷を軽くするために CM-BEM の計算結果を WRF には返さない単方向タイプ (CM-BEM と表記。例えば[23]) が存在する。本研究では①通年計算を目的とする、②計算都市領域を都市広域に広げることを今後に見据えている、以上のことから、単方向タイプ CM-BEM を用いる。また、Table 2.1-Table 2.4 に CM, BEM の各モデルからの入力データおよび出力データを示す。

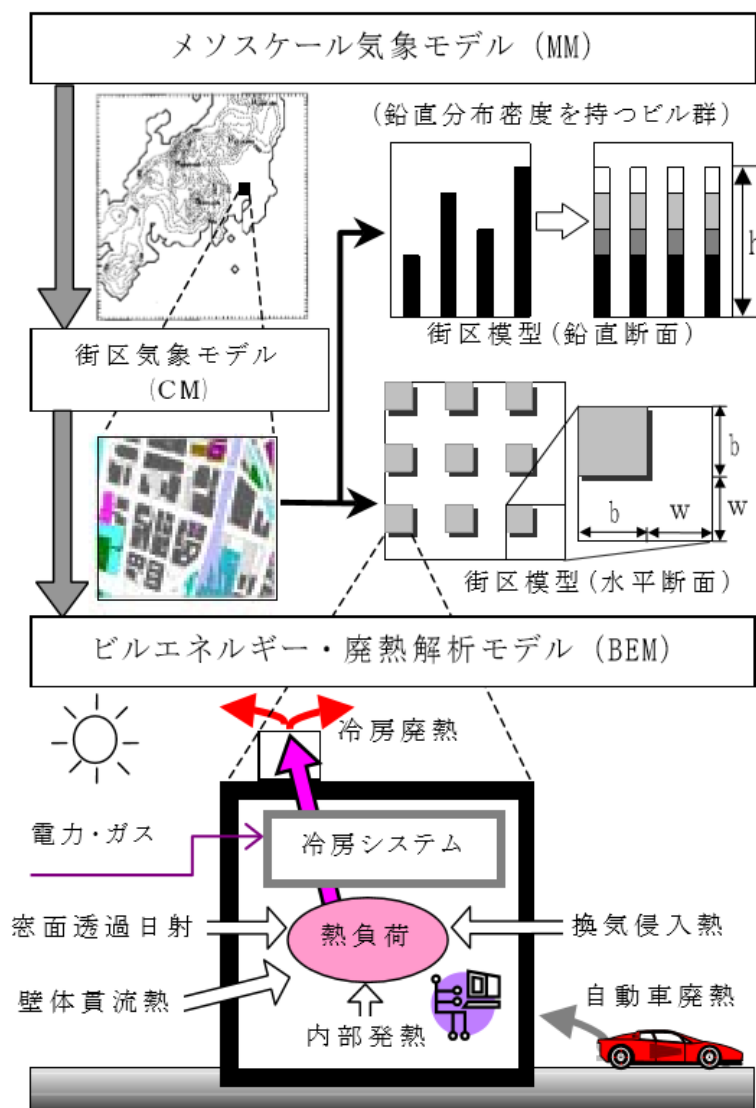


Fig. 2.1 WRF-CM-BEM のモデル概要  
(出典) [22]から引用

Table 2.1 CM の入力データ

入力項目	詳細
<b>【各街区の固定値】</b> ・ 街区形状データ ・ 街区被覆データ ・ 建物構造データ <b>【時刻ごとの変動値】</b> ・ WRF からの出力データ ・ 自動車廃熱データ ・ BEM からの空調排熱	平均建物幅 ( $b$ ), 道路幅 ( $w$ ), 高度別建物存在割合 ( $P_w(z)$ ) アルベド, 射出率, 熱物性値など 壁体層構成, 窓比率 温位, 風速, 比湿, 日射量, 長波放射量, 積算降水量 グリッド別, 時刻別の自動車排熱量 建物から排出される空調排熱 (顕熱・潜熱)

Table 2.2 CM の出力データ

出力項目	詳細
・ 大気 ・ 建物表面 ・ 地表面	各高度の気温, 湿度, 風向, 風速, 日射量 建物表面温度, 建物の日射反射や放射, 建物表面熱収支 地表面温度, 地表面の熱収支

Table 2.3 BEM の入力データ

入力項目	詳細
・ CM からの熱の出入り ・ 空調機器設定 ・ 電気機器設定	伝導熱, 放射熱, 換気による 設定温度, 成績係数, 稼働スケジュールなど 稼働スケジュール

Table 2.4 BEM の出力データ

出力項目	詳細
・ 室内熱環境 ・ 空調熱負荷 ・ 空調エネルギー消費量 ・ 空調廃熱量	室温, 湿度 空調熱負荷 (顕熱, 潜熱) 電力消費量, ガス消費量 空調排熱量 (顕熱, 潜熱)

## 2.2 メソスケールモデル WRF

気象学の分野では長い間、領域気象モデル（メソスケール気象モデル）の開発や同モデルを利用した研究がおこなわれてきた。このようなモデルの中でも、都市気象分野では Weather Research and Forecasting model（WRF）が広く利用されている。

### 2.2.1 WRF の概要

WRF は米国大気研究センター（NCAR）と米国環境予測センター（NCEP）を中心とする共同プロジェクト（WRF プロジェクト）によって開発されたモデルであり、現在は Version 3.0（WRFV3）[24]が公開されている（2016 年 11 月 1 日段階では最新は Version 3.8.1）。この WRF は大別して 2 つに分けられ、天気予報用に向け開発された Nonhydrostatic Mesoscale Model（NMM-WRF）と、研究用に向け開発された Advanced Research WRF（ARW）がある。しかし、個々のモデルの相違点は天気予報と研究どちらを意識して開発されたかということであり、天気予報と研究どちらか一方しか使用できないというわけではない[25]。また、この 2 つのモデルのうち本研究では ARW を使用している。そのため以後 WRF と書いてある場合は ARW を指すものとする。

WRF は誰でも使えるコミュニティーモデルを目的として開発された。その考えに基づき、使用は全てフリーであり、WRF USERS' PAGE（<http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/>）にてユーザー登録をすればソースコードを誰でも利用することができる。利用目的が商用であっても、また改変することも自由であるため、多様なユーザーが利用しやすい環境となっている[26]。

### 2.2.2 WRF の基礎方程式[27]

WRF は、完全圧縮の非静力モデルである。基礎方程式は大別して以下の 4 種類から成る。

- (1) 運動方程式
- (2) 連続の式
- (3) 状態方程式
- (4) 熱の保存式

#### (1) 運動方程式

運動方程式は運動を記述する基本的な方程式で、Newton の第二法則（ある物体の運動量の時間変化率は、それに作用している力の総和に等しい）を表している。以下

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) + F_1 \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) + F_2 \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) + F_3 \quad (2.3)$$

- $t$ : 時間[s]  
 $u, v, w$ : 各座標方向に対する速度成分[m s<sup>-1</sup>]  
 $\rho$ : 密度 [kg m<sup>-3</sup>]  
 $x, y, z$ : 各ベクトル座標 [m]  
 $K_x, K_y, K_z$ : 拡散係数 [m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>]  
 $F_1, F_2, F_3$ : コリオリ力等

これら (2.1) 式-(2.3) 式はそれぞれ流体の運動を表現している。具体的には左辺第 1 項は局所変化, 第 2 項から第 4 項は各  $x, y, z$  軸方向の移流を表現し、右辺第 1 項は気圧傾度力, 右辺第 2 項から第 4 項は各  $x, y, z$  軸方向の拡散, 右辺第 5 項はその他の力（コリオリ力など）を表現している。

## (2) 連続の式

流体は、「物質は原因もなく生まれたり消えたりしない」という物理学で一般的な考え方に沿う。これは連続の式（方程式）と呼ばれ、以下の式で表現できる。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0 \quad (2.4)$$

$t$ : 時間 [s]

$u, v, w$ : 各座標方向に対する速度成分 [ $\text{m s}^{-1}$ ]

$x, y, z$ : 各ベクトル座標 [m]

$\rho$ : 密度 [ $\text{kg m}^{-3}$ ]

## (3) 状態方程式

流体力学の分野では大気を理想気体とみなし、(2.5) 式のような状態方程式が成り立つ。ここで気体の圧力は気温，密度に比例することを表現している。

$$P = \rho RT \quad (2.5)$$

$P$ : 圧力 [ $\text{N m}^{-2}$ ]

$\rho$ : 密度 [ $\text{kg m}^{-3}$ ]

$R$ : 気体定数 [ $\text{J K}^{-1} \text{kg}^{-1}$ ]

$T$ : 絶対温度 [K]

(4) 熱の保存式

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} + w \frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + \Delta Q_\theta \quad (2.6)$$

$\theta$  : 温位 [K]

$u, v, w$  : 各座標方向に対する速度成分 [ $\text{m s}^{-1}$ ]

$x, y, z$  : 各ベクトル座標 [m]

$K_x, K_y, K_z$  : コリオリ力等

$\Delta Q$  : 系に出入りする熱量 [J]

これらの基礎式を地形に沿った質量座標系（乾燥大気の静水圧座標系）へ変換し、さらに地図投影した座標系へ変換することにより、モデルとしての基礎方程式が導出される[26]。本研究では WRF 内の放射モデルから地面付近における短波・長波放射量、力学モデルから風速・温位・水蒸気量を計算結果として都市キャノピーモデルに与える。



### 2.2.3 WRFにおける都市の位置づけとサブモデル

気象学の体系の中で、都市は陸面の一つに過ぎないが、都市の形状や人工排熱など都市の特徴によって都市上空の大気も影響を受ける。しかしヒートアイランド現象に代表されるように都市の気象は独特であり、影響を捉えることは難しい。その理由として以下の 3 点が挙げられる[28]。

- (1) 都市表面の幾何形状の多様性
- (2) 人工排熱など人間活動に絡む不確実性
- (3) 観測データ取得、モデル化の困難さ

都市の影響を考慮することは難しいことを述べたが、この影響を考慮しないメソスケールモデルでは、夜間の気温を過小評価することが指摘されていた[28][29]。そのため都市の取り扱い是非常に重要である。そこで現在の WRF には都市モデルが複数用意されている。

地表モデルは大別して、地表面熱収支と土壌の熱伝導方程式からなる平板 5 層モデル (5-Layer SLAB Model) と、植生キャノピーモデル・土壌モデル・水文モデル・雪氷モデルから構成される統合陸面モデル (Noah-Land Surface Model) がある[26]。

SLAB モデルは伝統的なモデルで熱収支、設置層の式、土壌の式を連立して解くことによって、地表面温度や地表面フラックスを計算する。つまり、これらの式で用いる地表面パラメーターを都市用に設定することで都市の影響を表現する。この方法は簡便だが、夜間の気温を過小評価することが指摘されている[28][29]。

LSM では地表面のパラメーターを都市用に設定することは SLAB モデルと同様だが、サブモデルとして都市の構造を物理的に表現したキャノピーモデルを選択することができる。建物の存在による放射冷却の緩和、建物間での放射の反射、風速の低下などを考慮することができ、種類は大別して単層キャノピーモデルと多層キャノピーモデルの 2 種類がある。WRF には単層キャノピーモデルとして Kusaka et al [30]で開発され、Kusaka and Kimura [31]で改良されたモデルが用いられ、多層キャノピーモデルとして Martilli et al [32]で開発されたモデルが用いられている。また Ver. 3.2 以降ではビルエネルギーモデル (Salamanca and Martilli [33]) も導入している。

(c) ビルエネルギーモデル

Fig. 2.2 にビルエネルギーモデルの概要を示す。ビルエネルギーモデルは、建物を一つのボックスと捉え、建物内部とキャノピー層内の大気との顕熱・潜熱の移動を表現する熱収支モデルである[32]。このモデル内では窓から入ってくる日射、長波放射、顕熱、潜熱、壁を通じて伝わる伝導熱、建物内の人間活動などが考慮されている[26]。実際には建物からの人工排熱は外気温や一日の行動スケジュールによって大きく左右される。この熱収支モデルを用いることにより、これまで固定の値やパターンとして与えていた人工排熱を、動的に与えることができる。

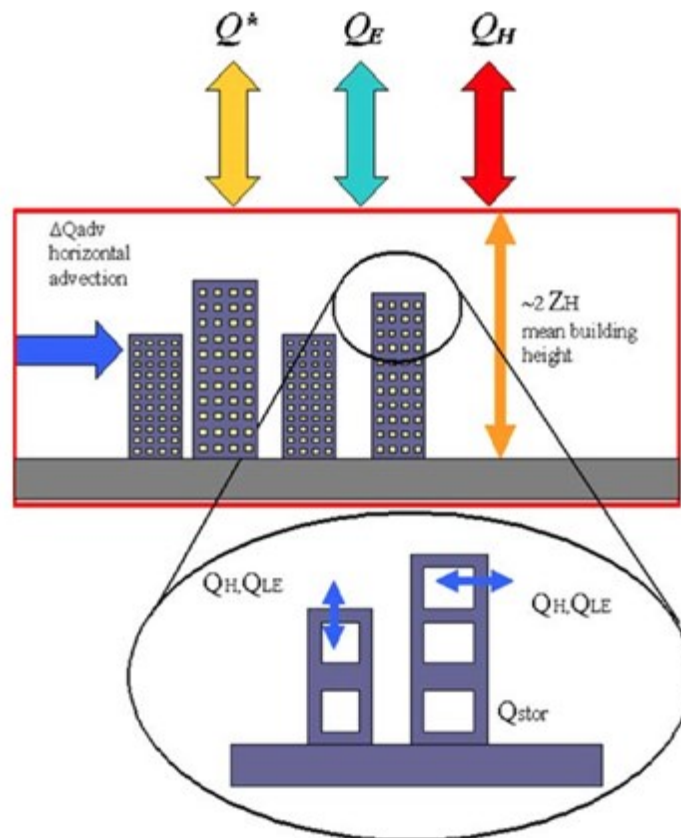


Fig. 2.2 ビルエネルギーモデルの概要図  
(出典) [33]より抜粋

## 2.3 都市キャノピー気象モデル CM

### 2.3.1 都市キャノピーの概念

「キャノピー」とは直訳すると「天蓋」や「ひさし」、「傘」といった意味があるが、気象学の分野ではキャノピー層、都市キャノピー、森林キャノピーといった言葉があり、空の一部または全体に建物や樹木の枝葉が存在している空間を指す。

このような空間は地表面に何も存在しない空間に比べ、風や放射の挙動が大きく異なる。またキャノピー空間だけでなく、その上部に位置する大気への影響も平坦な面とは異なる。そのため地上に存在する物体や植生が与える影響を考慮した手法として、キャノピーモデルが考えられた。

1990 年代に入ると都市の 3 次元構造を気象学の分野で扱うようになり、また単一のビルスケールを数値流体力学 (Computational Fluid Dynamics ; CFD) モデルで扱っていた建築学の分野とメソスケールモデルの高分解能化を図ってきた気象学のスケールが重なるようになってきた[34]。従来の CFD モデルでは伝熱、蓄熱および太陽高度や影の影響などの考慮をすることによる計算負荷の面での限界があり、またメソスケールモデルでもビル上空の議論ではなく、実測をおこなうような地表面での議論はできなかった。これら両分野の接点として都市キャノピーモデルの必要性が認識されてきた。

現在では都市キャノピーを再現するモデルは多数にあるが、これらは異なる空間スケールや熱効率、エネルギー消費、地理的状況、気象予測を基にしている[35]。気象モデル（前述の WRF など）に組み込むモデルとしては平面のみを考える SLAB モデル、1 層の特殊な層を考える単層都市キャノピーモデル、都市キャノピーを多層として扱う多層キャノピーモデルがある（2.1.2 節参照）。これらは都市キャノピー内の放射条件や顕熱、潜熱の輸送過程、都市表面の多様性をどのように扱うかで考え方が分かれる[34]。

### 2.3.2 CMの開発背景と概要

前述の WRF では広域の気象要素を表現することができるが、最小オーダーである 10 km 間隔グリッドの底部（地表面）は都市域も含め平板として扱うため、都市キャノピーに存在する大気は表現できない。つまり、WRF では都市域上空（都市の形状の影響を受けない範囲）は表現できるが、建築物が存在する地表面付近の大気層では都市の効果（人工排熱や建物が存在することによる気流の変化といった熱的、力学的影響）を考慮することが出来ない。

そこで都市キャノピー内部の状態について議論をするため、近藤ら[34]によって多層キャノピーモデルである都市キャノピーモデル（Urban Canopy Model ; CM）が開発された。Fig. 2.3 に CM の街区形状の概要を示す。CM 内は、水平方向では正方底面とする建物構造を等間隔で配置することにより街区形成されており、鉛直方向では高度別の建物存在割合により、高さ方向の非均一性を表現している。この建物構造により、実際のキャノピー層内で生じる特有の放射収支や乱流過程を簡易的に表現する。

キャノピーモデルは大別して単層キャノピーモデルと多層キャノピーモデルに分けられる。参考までに次ページよりそれぞれの概要を述べる。

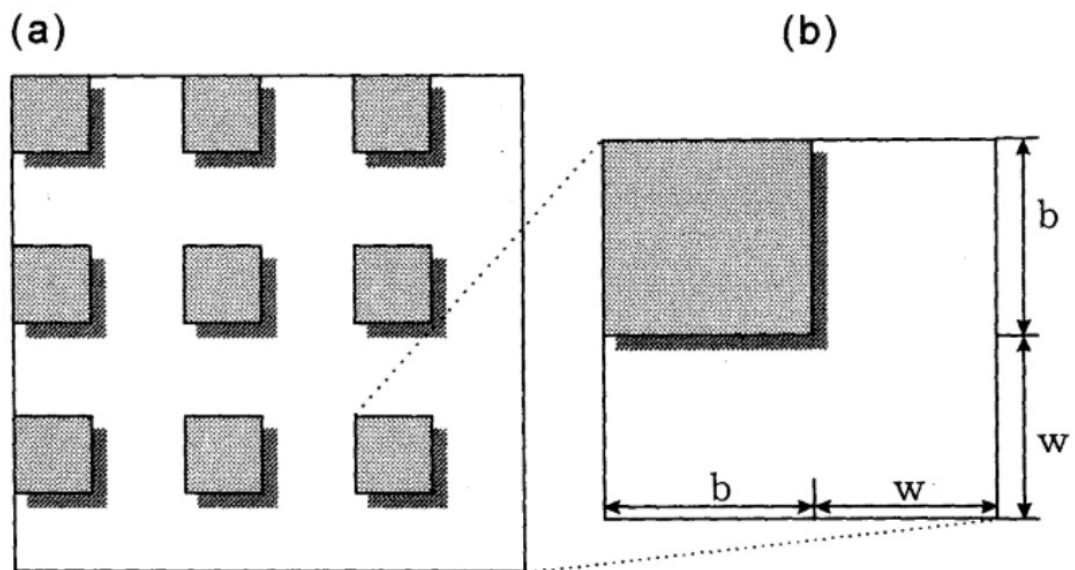


Fig. 2.3 CM の街区形状の概要

（出典）[34]より引用

Fig. 2.4 に単層キャノピーモデルの概要図を示す。単層キャノピーモデルでは、建物の存在による放射冷却の緩和や、建物間での放射の反射、風速の低下を表現するが、鉛直方向で建物の分布を考慮しない[28]。つまり、温度はキャノピー内を代表する温度のみが計算される。建物屋上面や建物壁面、道路面が受ける放射は建物や道路の反射、影の影響を受けて計算される。最終的に計算されたフラックスはそれぞれの面の面積重み平均値として算出される。このモデルでは SLAB モデルで表現できなかった都市気候の特徴（日中の蓄熱と夜間の正の顕熱フラックス）が表現できる[30]。また、鉛直方向で建物の分布を表現しないため、計算負荷はほとんどない[28]。

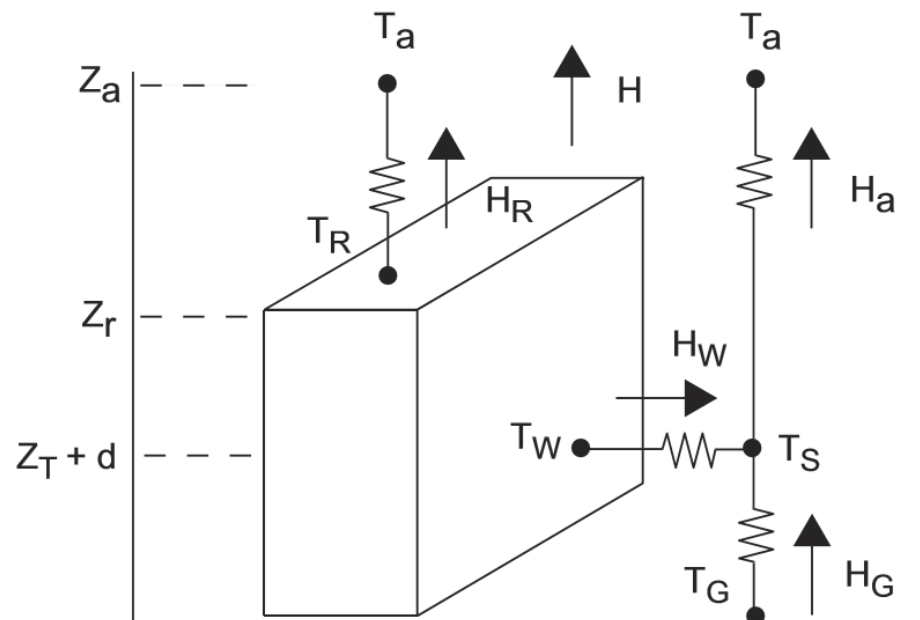


Fig. 2.4 単層キャノピーモデルの概要  
(出典) [30]より抜粋

## (2) 多層キャノピーモデル

Fig. 2.5 に多層キャノピーモデルの概要図を示す。このモデルは単層キャノピーモデルと比べ、再現していなかった鉛直方向での建物の分布を表現している点が大きく異なる。建物屋上面や建物壁面、道路面が受ける放射や温度、フラックスの計算方法はSLABモデル、単層キャノピーモデルとも基本的には同様である。このモデルでもキャノピー内の個々の建物の違いは表現できないため、街区内の詳細な温度分布まで表現できないが、代表的な地上気温や鉛直方向での風速、温度を良好に表現できることが確認されている[26]。

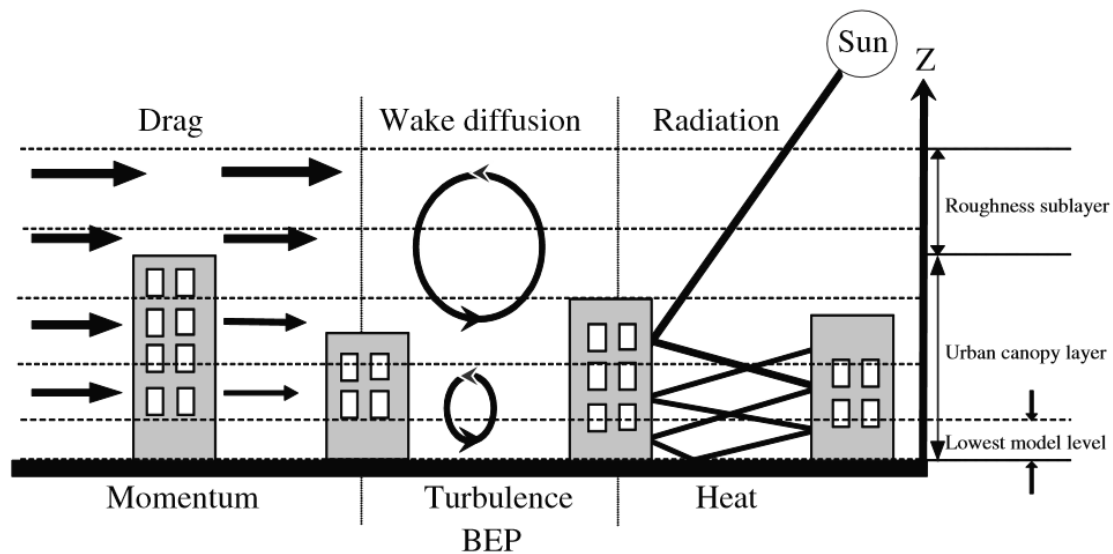


Fig. 2.5 多層キャノピーモデル (Building Energy Plus ; BEP) の概要  
(出典) [37]より抜粋

### 2.3.3 CM を構成するサブモデル

CM は都市の気象要素を再現することに加え、それに伴う地表面、建物表面の熱収支を考慮することが特徴である。それらを表現するために、主に 3 種類のサブモデル（大気層モデル、表面熱収支モデル、放射モデル）によって構成されている。本節ではそれぞれの概要について述べる。

#### (a) 大気層モデル

CM は気象要素の空間分布を鉛直方向にのみ考慮している。つまり、同じグリッドにおいて水平方向での気象要素は各代表値 1 種類のみを考えるが、鉛直（高度）方向では単位高度ごとに代表値が存在する。この過程は“CM が計算対象とする都市キャノピー大気層の鉛直スケール（ex. -100 m）に比し、十分に大きな水平スケール（ex. -1 km）の範囲に均一な街区形状が広がる状況下において妥当性を有する（[22]より抜粋）”としている。そのため、CM 内では運動量、熱、水蒸気の支配的輸送機構は鉛直方向のみを考慮し、水平方向の移流・拡散は無視される。ここでは運動方程式、熱と水蒸気の基礎方程式の 2 種類を取り扱う。

CM 上の大気モデルでの運動方程式は以下の式で表現する。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{1}{m} \frac{\partial}{\partial z} \left( K_m \cdot m \cdot \frac{\partial u}{\partial z} \right) - c_d a u (\sqrt{u^2 + v^2} + f(v - v_g)) \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{1}{m} \frac{\partial}{\partial z} \left( K_m \cdot m \cdot \frac{\partial v}{\partial z} \right) - c_d a v (\sqrt{u^2 + v^2} + f(u - u_g)) \quad (2.8)$$

$u, v$  : 風速の東西成分, 南北成分 [ $\text{m s}^{-1}$ ]

$K_m$  : 乱流拡散係数 [ $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ]

$c_d$  : ビルによる抵抗係数 [-]

$u_g, v_g$  : 地衡風の東西, 南北成分 [ $\text{m s}^{-1}$ ]

$f$  : コリオリ因子 [ $\text{N m s}^{-2}$ ]

$m$  : キャノピーの有効空気体積率 [-]

$a$  : ビル面積密度 [-]

ここで、右辺第 1 項は運動量の鉛直乱流拡散、第 2 項はビルによる抵抗、第 3 項は気圧傾度とコリオリ力の効果を表す。鉛直方向の平均流の風速 ( $w$ ) は静水圧平衡の仮定に依り 0 と考えている。

CM 上での熱と水蒸気の基礎方程式は顕熱と以下の式で表す。

$$c_p \rho \frac{\partial \theta}{\partial t} = c_p \rho \frac{1}{m} \frac{\partial}{\partial z} \left( K_h \cdot m \cdot \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + Q_{Ws} + Q_{Rs} + Q_{As} + Q_{Vs} \quad (2.9)$$

$$I \rho \frac{\partial q_v}{\partial t} = I \rho \frac{1}{m} \frac{\partial}{\partial z} \left( K_q \cdot m \cdot \frac{\partial q_v}{\partial z} \right) + Q_{Wl} + Q_{Rl} + Q_{Al} + Q_{Vl} \quad (2.10)$$

$\theta, q_v$  : 大気温度, 比湿 [K, kg kg<sup>-1</sup>]

$c_p$  : 大気比熱 [J kg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>]

$\rho$  : 大気密度 [kg m<sup>-3</sup>]

$I$  : 蒸発潜熱 [J]

$K_h, K_q$  : 鉛直乱流拡散係数 [m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>]

$Q_{Ws}, Q_{Wl}$  : 側壁面からの顕熱, 潜熱輸送 [J]

$Q_{Rs}, Q_{Rl}$  : 屋根面からの顕熱, 潜熱輸送 [J]

$Q_{As}, Q_{Al}$  : 冷房室外機からの人工発熱, 潜熱 [J]

$Q_{Vs}, Q_{Vl}$  : 建物換気に伴う外気側からみた交換顕熱, 潜熱量 [J]

ここで、右辺第 1 項は顕熱と潜熱の鉛直乱流拡散、第 2 項-第 5 項はキャノピー内に存在する建物からの顕熱と潜熱の発生熱量を指す。

#### (b) 表面熱収支モデル

CM 上では、建築物表面および地表面からの大気への顕熱、潜熱フラックスの算出は各表面における熱バランスを基に考える。

$$R_N = H_s + H_l + G \quad (2.11)$$

$R_N$  : キャノピー内の純放射量 [W m<sup>-2</sup>]

$H_s$  : 顕熱フラックス [W m<sup>-2</sup>]

$H_l$  : 潜熱フラックス [W m<sup>-2</sup>]

$G$  : 伝導熱量 [W m<sup>-2</sup>]

ここで、街区表面のうち側壁面は大気層と同様に鉛直格子により高度方向に分割され、分割した後の要素に対し (2.11) 式を適用する。



(c) 放射モデル

都市キャノピー内で考慮すべき放射として、短波放射と長波放射がある。短波放射は太陽から直接入射される直達光と天空からの散乱光の 2 種類を、長波放射は天空からの赤外放射と各街区面からその表面温度に応じ射出される長波放射を考える。またそれぞれにおいて隣ビルからの反射も考える必要がある。それぞれの放射は、(1) 屋上面、(2) 側面壁、(3) 道路面の 3 種類の表面を考える。CM での放射計算の概要を Fig. 2.6 に示す。

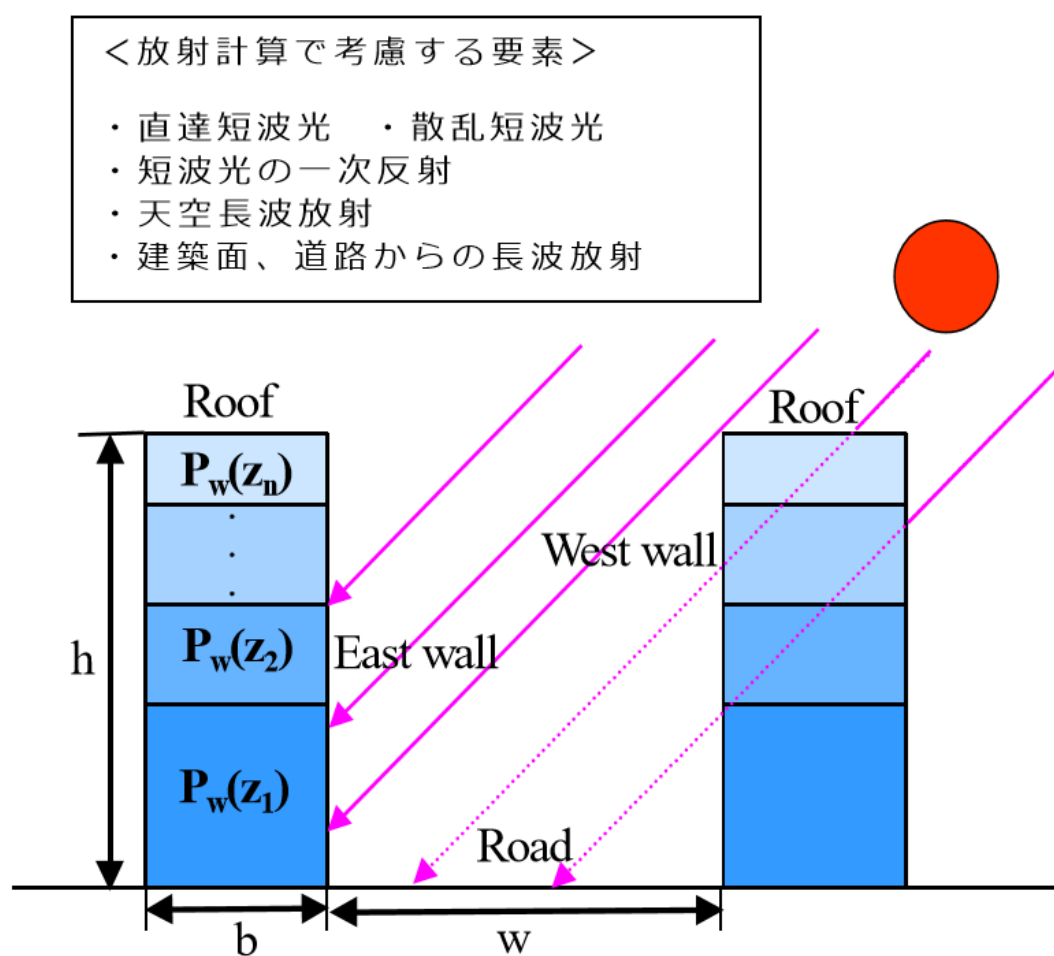


Fig. 2.6 CM での放射計算の概念図

(出典) [22]より引用

上記の放射計算について、街区要素面  $i$  での正味放射量  $R_{Ni}$  は次式のようにになる。

$$R_{Ni} = \varepsilon_i \cdot svf_i \cdot L_s - \varepsilon_i \sigma T_i^4 + \sum_j vf_{j \rightarrow i} (\varepsilon_j \sigma T_j^4) + (1 - ref_i)(I_{di} + svf_i \cdot I_D) \\ + (1 - ref_i) \sum_j vf_{j \rightarrow i} \cdot (I_{dj} + svf_j \cdot I_D) \quad (2.12)$$

【添え字】

$j$  :  $i$  面からの視野内に存在する他の面要素

【文字】

$L_s$  : 天空放射

$I_d$  : 直達日射フラックス

$I_D$  : 散乱日射フラックス

$\varepsilon$  : 各面の長波放射率

$ref$  : 各面のアルベド

$T$  : 各面の表面温度

$\sigma$  : ステファン・ボルツマン定数

$svf$  : 各面の天空率

$vf_{j \rightarrow i}$  :  $j$  面からみた  $i$  面の形態係数

屋上面が受ける直達光は、隣ビルの影の影響を全く受けない場合から屋上面に存在する影の割合を差し引いた量で与える。屋上および隣ビルの配置を東西断面で表すと (Fig. 2.7)、屋上よりも高いビル (Fig. 2.7; 右側ビル) の影の水平面上の長さ (Fig. 2.7;  $x$ ) が平均道路幅 (Fig. 2.7;  $w$ ) よりも大きくなった場合生じる[34]。その時、影の部分の直達光は高さ  $z$  における建物の存在割合  $P_w(z)$  の影響を受けるので、 $1 - P_w(z)$  の割合で透過してくるものとする。屋上面を囲む東西南北の壁面に直達光が当たっていた場合では、壁面からの反射も考える必要がある。壁面への直達放射量、反射率、反射光が当たる入射角、壁面の存在割合を用い、反射光を求める。

また屋上面が受ける天空からの散乱光は全天散乱光量と天空率の積で与える。また、直達光と同様に散乱光においてもビルの存在割合に応じて透過があるとし、壁面からの反射も同様に求める。

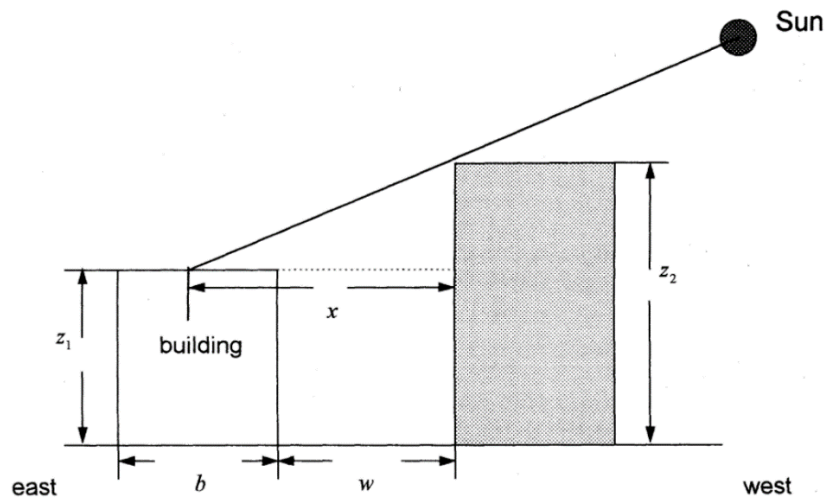


Fig. 2.7 屋上面が受ける直達光[34]

側面壁が受ける直達光は東西南北方向それぞれ求める。屋上面に日射する放射量を基準として、太陽光の仰角、方位角を考慮し、任意の側壁面の放射量を求める。

側壁面が受ける散乱光は、屋上面が受ける散乱光と同様に天空率を変数として、天空からの斜面散乱光を求める。また向かい壁面からの反射も屋上面と同様に算出する。また斜面散乱光の算出には **Perez** の斜面合成モデル[38][39]を用いる。

また、屋上や壁面で植栽がある場合の放射量は、植栽の面積と反射率から植栽が吸収する放射量を求め、これを植栽がない場合から差し引いた値を用いる。

壁面からの反射は直達光・散乱光ともに隣ビルの反射率と建物存在割合を乗じることで算出する。

道路面の直達光、散乱光の算出は屋上面と同様である。影の割合を考慮し、影がない状態から差し引く。影が存在する場合は、 $1 - P_w(z)$ の割合で透過光を求める。また屋上面と同様に散乱光も全天散乱光量を天空率で補正し、側壁面からの反射も同様に求める。

最後に長波放射について考える。屋上が受ける長波放射量は、空から到達する長波放射量と隣ビルの壁から射出される長波放射量の和である。空から到達する長波放射量は、実際の場合では天頂角への依存性が大きい、ここでは散乱光と同様に方位依存性がないと考え天空率を用いて表現をする。

壁から射出する長波放射量は、壁面の温度に依存した値を用いる。また壁面が受ける長波放射量は短波放射と同様に空からの長波放射量および壁面からの長波放射量の和となる。

道路面が射出する長波放射、到達する長波放射量は側壁面の場合と同様に扱う。

## 2.4 建物エネルギーモデル BEM

### 2.4.1 建物エネルギーモデルの開発背景と概要[18][27]

建物エネルギーモデルの概要を Fig. 2.8 に示す。上述の CM にて再現されたキャノピー気象および建物表面状態を境界条件として、BEM は建物内外の熱収支を非定常計算し、空調室外機からの人工排熱や換気や漏気による外気への熱の移動を表現する。BEM は建物をボックスとして扱うように簡略化が施されているものの、工学系の詳細な空調シミュレーション同様、壁体伝導熱や窓面透過日射等の建物熱収支に関連する全要素（室内発熱、壁体伝導熱、窓面透過日射、空調による排熱、換気による熱の出入り）を考慮している。CM からの入力条件に基づき、建物内部の冷房熱負荷  $Q_{ac}$  を非定常数値計算により算出し、その熱負荷を処理するための  $E_{ac}$  を空調機器の成績係数（Coefficient of Performance ; COP）を算出する。そして空調廃熱を  $Q_{ac}$  と  $E_{ac}$  の和によって算出し、大気へと排出することで、都市の人工排熱を再現する。

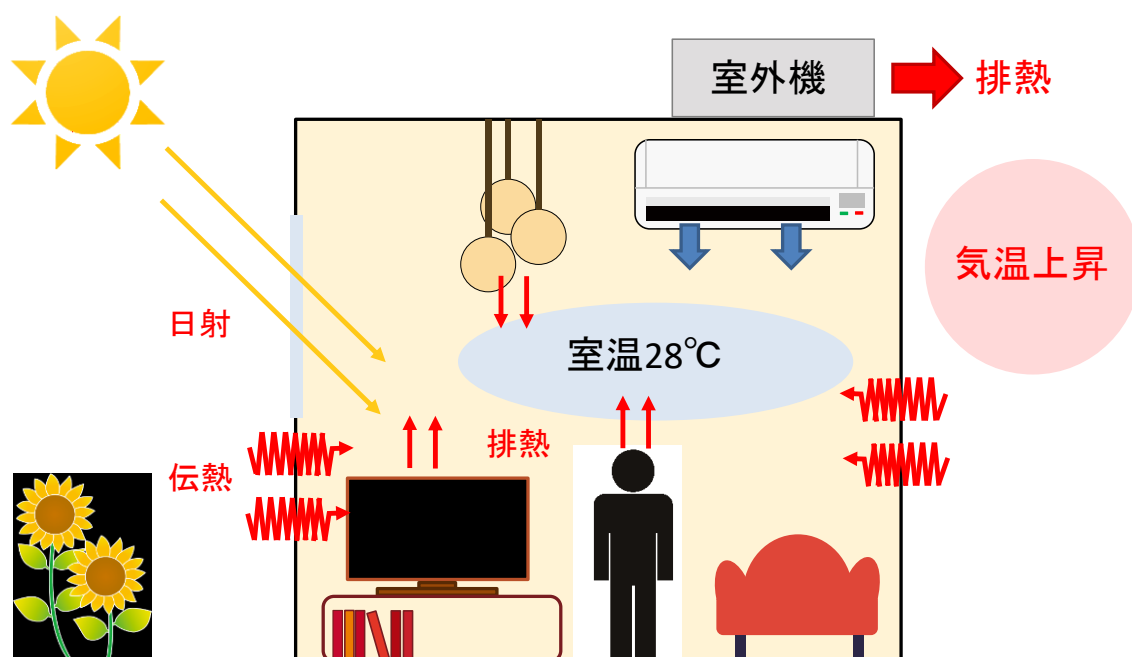


Fig. 2.8 BEM のモデル概要

## 2.4.2 BEM を構成するサブモデル

### (1) 熱負荷算定モデル[27]

BEM 内では建物内の熱負荷（夏季は冷房による室温低下処理，冬季は暖房による室温上昇処理）を顕熱と潜熱に分けて算出している。顕熱負荷  $H_{in}$  と潜熱負荷  $E_{in}$  は以下の 2 式によって求める。

$$H_{in} = \sum i A_i h_i (T_{wi} - T_r) + \sum i A_i \eta_j S_j + (1 - \beta) C_p \rho V_a A_f (T_a - T_r) + A_f q_E + A_f P \phi_P q_{hs} \quad (2.13)$$

$$E_{in} = (1 - \beta) \iota \rho V_a A_f (q_{Va} - q_{Vr}) + A_f P \phi_P q_{hl} \quad (2.14)$$

$H_{in}$  : 顕熱負荷 [W]

$E_{in}$  : 潜熱負荷 [W]

$A_i, A_j$  : 屋上，側壁の室内側面積，窓面積 [ $m^2$ ]

$h_i$  : 総合熱伝達率 [ $W m^{-2} K^{-1}$ ]

$T_{wi}$  : 室内側壁面温度 [K]

$T_r, T_a$  : 室温，外気温 [K]

$\eta_j$  : 窓面日射透過率 [-]

$S_j$  : 窓面日射入射量 [ $W m^{-2}$ ]

$\beta$  : 全熱交換器熱効率 [-]

$C_p$  : 空気比熱 [ $J kg^{-1} K^{-1}$ ]

$\rho$  : 空気密度 [ $kg m^{-3}$ ]

$V_a$  : 単位床面積あたり外気導入量 [ $m^3 s^{-1} m^{-2}$ ]

$A_f$  : 建物床面積 [ $m^2$ ]

$q_E$  : 機器発熱 [ $W m^{-2}$ ]

$P$  : ピーク時人員密度 [人  $m^{-2}$ ]

$\phi$  : 人員密度の時間変動係数 [-]

$q_{hs} q_{hl}$  : 人体顕熱発熱 [ $W 人^{-1}$ ], 人体潜熱発熱 [ $W 人^{-1}$ ]

$\iota$  : 蒸発潜熱 [ $J kg^{-1}$ ]

$q_{Va}, q_{Vr}$  : 外気比湿 [ $kg kg^{-1}$ ], 室内比湿 [ $kg kg^{-1}$ ]

ここで、(2.14) 式は空調熱負荷における顕熱成分を表している。右辺第 1 項は壁体貫流熱，第 2 項は窓面透過日射，第 3 項は換気顕熱負荷，第 4 項および第 5 項は室内の照明機器や電気機器からの内部発熱と在室人員からの内部発熱を表現している。一方、(2.14) 式は潜熱成分を表しており、第 1 項は換気に伴う湿気流入，第 2 項は人体からの水分蒸発（皮膚呼吸，発汗など）を表現している。

## (2) 室温・湿度算定モデル[18][27]

BEM の大きな目的として、空調による顕熱、潜熱負荷がどの程度かを計算し、その計算結果を基に排熱を求め大気へフィードバックする。そのため ((2.14) 式を計算するため) には未知変数である、室温  $T_r$ 、室内比湿  $q_{vr}$  を求める必要があり、それは以下によって求められる。

$$Q_B \frac{dT_r}{dt} = H_{in} - H_{out}, \quad H_{out} = \zeta_p \gamma H_{in} + \zeta_p \gamma Q_B (T_r - T_{rset}) / \Delta t \quad (2.15)$$

$$\varphi V_B \frac{dq_{vr}}{dt} = E_{in} - E_{out}, \quad E_{out} = \zeta_p \gamma E_{in} + \varphi \zeta_p \gamma V_B (q_{vr} - q_{vrset}) / \Delta t \quad (2.16)$$

- $Q_B$  : 建物内空気の総熱容量 [ $J K^{-1}$ ]
- $V_B$  : 建物内空気の総容積 [ $m^3$ ]
- $H_{out}$  : 空調システムによる顕熱負荷 [W]
- $E_{out}$  : 空調システムによる潜熱負荷 [W]
- $\gamma$  : 建物総延床面積に占める空調面積割合 [-]
- $\zeta$  : 空調システムの運転スケジュール [-]
- $T_{rset}$  : 室内の空調設定温度 [K]
- $Q_{vrset}$  : 室内の空調設定湿度 [ $kg kg^{-1}$ ]
- $\Delta t$  : BEM 上の数値積分の時間間隔 (time-step) [s]

以上の(2.15) 式は各時刻に発生した空調熱負荷と処理できた量の差分に比例した室温と室内比湿の変動を表現した式である。室温や室内比湿は建物外部から出入りする熱量によって決まるが、それと同時にその熱を空調が処理しようとするため、それらの差し引きで室温や室内比湿は変化する。つまり上記 2 式は、ある時刻において外部からの熱の出入りによって生じた熱負荷に対し、空調の処理が追い付かなかった量 (= 処理できた量の差分) によって室温や室内比湿が定まることを表現している。

### (3) 排熱算定モデル[18][27]

上述の熱負荷算定モデル，室温・湿度算定モデルにより算出した顕熱負荷  $H_{out}$ ，潜熱負荷  $E_{out}$  を用い、大気へフィードバックするための排熱  $Q_A$  を算出する。

$$E_C = \frac{H_{out} + E_{out}}{COP}, \quad (\because COP = \frac{H_{out} + E_{out}}{E_C}) \quad (2.17)$$

$$Q_A = E_C + (H_{out} + E_{out}) = \frac{COP + 1}{COP} (H_{out} + E_{out}) \quad (2.18)$$

$H_{out}$  : 空調システムによる顕熱負荷 [W]

$E_{out}$  : 空調システムによる潜熱負荷 [W]

$E_C$  : 空調エネルギー消費量 [W]

$Q_A$  : 空調廃熱 [W]

COP : 空調機器の成績係数 [-]

COP とは消費エネルギーあたりの空調能力であるため ((2.17) 式 右側式)、空調の熱処理による消費エネルギーは (2.18) 式で表現できる。また大気への排熱は (2.18) 式のように、処理すべき顕熱負荷  $H_{out}$ ，潜熱負荷  $E_{out}$  と、処理に費やす消費エネルギーの和として表現できる。

### 2.4.3 電力消費量の推定

本研究では CM-BEM で計算できる要素の中で、特に電力消費量について議論をする。そこで以下に電力消費量の推定方法と概念を示す。

現行の CM-BEM では街区の電力消費量 $E_{all}$ は電気機器（テレビ、電気調理器具など）・照明機器の電力消費量 $E_{el}$ と空調機器の電力消費量 $E_{ac}$ の和として計算される。

$$q_E = q_{el} + q_{ac} \quad (2.19)$$

$q_E$ : 街区における電力消費量 [W]

$q_{el}$ : 街区における電気機器・照明機器の電力消費量 [W]

$q_{ac}$ : 街区における空調（冷房・暖房）機器の電力消費量 [W]

$q_{el}$ は一般にベースロードと呼ばれ、気温や湿度といった気象条件に依存せず、年間を通して一定の挙動を示す電力消費量を指す。また、 $q_{ac}$ は夏季では冷房機器、冬季では暖房機器の消費電力を指す。

BEM 内では、建物外部からの熱収支を計算することで、建物内部における冷房熱負荷を計算することができる。外気から建物内へ流入（暖房期では外気へ流出）した熱量に対し、空調の設定温度に応じて空調を稼働させ処理する。この空調稼働に費やす消費電力は、処理する熱量、空調機器の成績係数、空調機器稼働スケジュールによって算出する。

$$q_{ac} = \frac{(H_h + H_e) \times S_{aci}}{COP_{ac}} \quad (2.20)$$

ここで、

$q_{ac}$ : 空調消費エネルギー量 [W]

$H_h$ : 処理する顕熱量（冷房時は除去顕熱量）[W]

$H_e$ : 処理する潜熱量 [W]

$S_{aci}$ : 時刻*i*における空調機器稼働スケジュール [-]

$COP_{ac}$ : 空調機器のエネルギー効率 [W W<sup>-1</sup>]



空調稼働を考えた際には、建物内外からの熱の出入りを考える必要がある。熱負荷は大別して、夏季には外部から空調室（空調空間）に流入する熱負荷  $Q_{out}$ 、内部から発生する熱負荷  $Q_{in}$ 、空調の稼働スケジュールが変動したことによる新たな空調空間に存在する熱負荷  $Q_{new}$  を考える必要がある。

$$H_{out} = Q_{out} + Q_{in} + Q_{new} \quad (2.21)$$

$H_{out}$  : 空調により処理する潜熱負荷／顕熱負荷 [W]  
 $Q_{out}$  : 外部から空調室に流入する熱負荷 [W]  
 $Q_{in}$  : 空調室内部熱負荷 [W]  
 $Q_{new}$  : 空調の稼働スケジュール変動による  
 新たな空調空間に存在する熱負荷 [W]

BEM 内では空調稼働スケジュールによって建物全体に占める空調部分の変動を表現している。つまり、建物全体に対して空調空間がどの程度占めているのかを時刻別に設定することで、現実の在室状況によって空調空間が増減することを表現している。空調機器は空調する空間の熱の流入のみに対して機能するので、外から建物に流入する熱に対し空調稼働スケジュールを乗じることで空調空間に流入する熱量を算出することができる。また、外から流入する熱だけでなく、テレビなどの電気機器や照明機器、人体発熱といった内部発熱に対しても考慮する。

$$Q_{in} = Q_{thr} + Q_{Ap} + Q_{hum} \quad (2.22)$$

$Q_{in}$  : 空調室内部熱負荷 [W]  
 $Q_{thr}$  : 外気からの壁体貫流熱負荷 [W]  
 $Q_{Ap}$  : 照明・電気機器発熱量 [W]  
 $Q_{hum}$  : 人体発熱量 [W]

現実では時刻ごとに建物の在室率が異なり、建物内に人が増える（在室率が上がる）と同時に空調を稼働させるので空調空間（現実では空調を稼働させる部屋数）が増加する。その際に、新たに空調稼働となった空間では室温が外気温に近いので空調の設定温度との差を処理する必要がある。BEM 内では、前ステップに比べ空調稼働スケジュールが大きい場合、その差分の空間の空気に対し室温と設定温度との差の熱量を処理することで表現する（Fig. 2.9 参照）。

$$Q_{\text{new}} = \Delta S_{\text{aci}} \times C_{\text{p,air}} \times \Delta T \quad (2.23)$$

$Q_{\text{new}}$  : 空調の稼働スケジュール変動による  
新たな空調空間に存在する熱負荷 [W]  
 $\Delta S_{\text{aci}}$  : 空調稼働スケジュールの変動差 [-]  
 $C_{\text{p,air}}$  : 建物内空気熱容量 [ $\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$ ]  
 $\Delta T$  : 室温と外気温の温度差 [K]

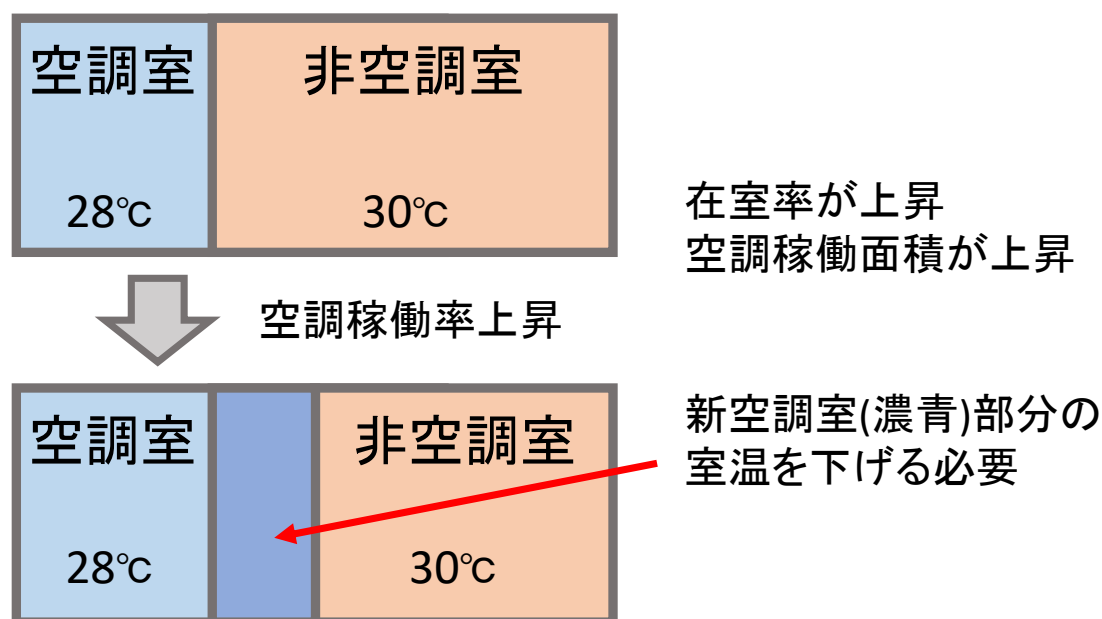


Fig. 2.9 空調稼働スケジュールの変動による熱負荷の概要

## 2.5 汎用モデル（サブグリッドモデル）

### 2.5.1 汎用モデル開発の背景

従来の都市キャノピーモデル-建物エネルギー連成モデルは都市の影響を考慮した気象を再現するために開発されたモデルであるが、気温などの気象要素に加え人工排熱量に関するエネルギー消費量の議論もされてきた[19][20]。

代表街区にて精度よい電力消費量の推定が確認できたが、一方で混在街区では実測値の再現に課題が残った。本モデルの長所として、計算負荷が小さく通年、広範囲のシミュレーションが可能な点が挙げられる。その特徴を活かすためには、モデルが活用できる地点を代表的な地点（単一の建物用途）だけでなく、用途が混在するような地点でも活用できる汎用的なモデルを目指す必要がある。そのため本節では開発する新モデルの概要を述べる。また後述の第5章では、汎用モデルの計算結果と考察を示す。

### 2.5.2 従来モデルの計算概要と課題

従来の CM-BEM では、シミュレーションする各街区に対し土地用途によって3種類の街区種別（業務街区、戸建住宅街区、集合住宅街区）に分類する。街区種別に応じて入力するパラメーターの値を変え、土地用途による街区の特徴を表現する。Table 2.5 に入力するパラメーター項目を、Fig. 2.10 に従来モデルの計算概要を示す。

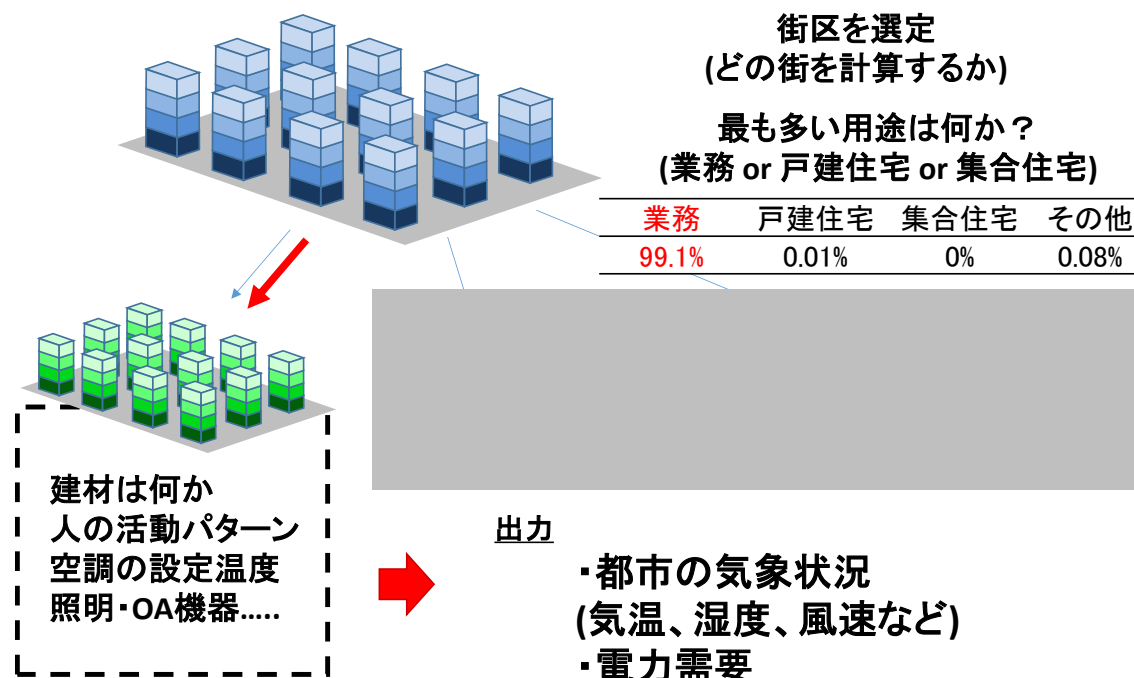


Fig. 2.10 従来モデルの計算概要

Table 2.5 街区種別により異なる入力データ

入力項目	入力項目の詳細
建物物性値	日射反射率，長波放射率，熱伝導率など
空調機器設定	設定温度，空調運転期間，換気回数など
空調機器種類	機器数，機器の種類，空調機器の性能（COP）など
スケジュールデータ類	空調（冷房・暖房）稼働スケジュール 電気機器稼働スケジュール

以上のようなシミュレーションをするため、代表的な街区（土地用途が単一に近い街区；例えば西新宿街区 Fig. 2.11 左図）では街区種別を判断し単一のパラメーターを与える仮定は適切だと考えられる。しかし、用途が混在している街区（Fig. 2.11 右図）では、土地用途の僅かな差で街区種別が変わるため、単一のパラメーターを与える仮定は適切だとは言えない。混在街区の建物用途割合を Table 2.6 に示し、混在街区（最大用途が戸建住宅の 34.6%）の種別を戸建住宅街区（本来の種別），集合住宅街区，業務街区と仮定した場合の電力消費量を Fig. 2.12 に示す。

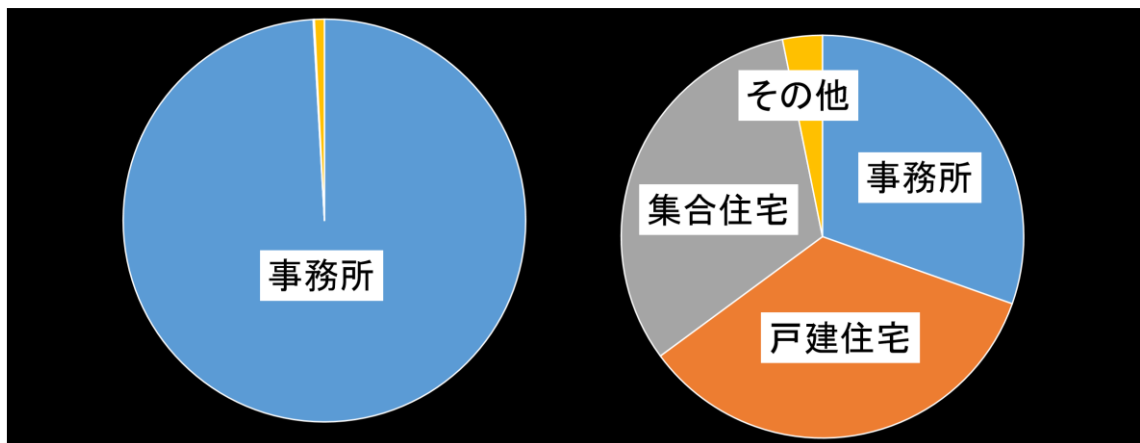


Fig. 2.11 街区の建物用途割合

(左) 西新宿街区

(右) 東蒲田街区

Table 2.6 混在街区の建物用途割合

事務所類	戸建住宅	集合住宅	その他
30.5%	34.6%	32.0%	3.0%

※赤字はこの街区の最大建物用途を示す

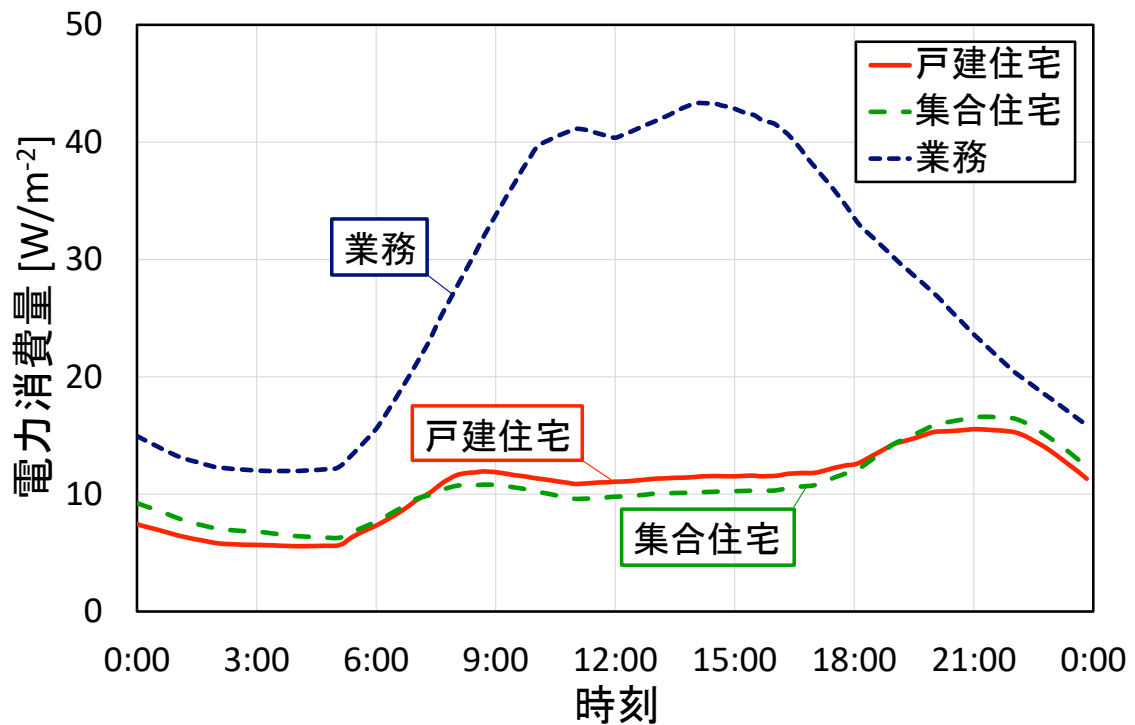


Fig. 2.12 混在街区を他の街区種別と仮定した場合の電力消費量

場所：東蒲田（本来は戸建住宅街区）

計算日時：2007 年 8 月 4 日

Fig. 2.12 より、街区種別の入力パラメーターが変わることによって電力消費量の計算値に大きく影響を及ぼすことが確認できた。特に業務街区は住宅街区（集合住宅街区，戸建住宅街区）に比べ OA 機器などが多いため消費電力が多い。現実の街区（ここでは実測値）はこの業務利用が約 30%，住宅利用が約 65%のそれぞれの電力消費の積み上げであるため、従来モデルの計算結果（戸建住宅街区と分類）では過小評価することが考えられる。

そのため従来の WRF-CM-BEM を用いた研究では、代表的な街区（土地用途が単一に近い街区）のみを計算対象とし評価をおこなっていた。

以上より、このモデルの特徴である計算負荷が小さいことや物理パラメーターを入力することで推定ができる汎用性を活かすためにも、代表街区だけでなく混在街区など様々な街区への適用が求められる。開発した汎用モデルの計算概要については次節にて述べる。

### 2.5.3 新モデルの計算概要

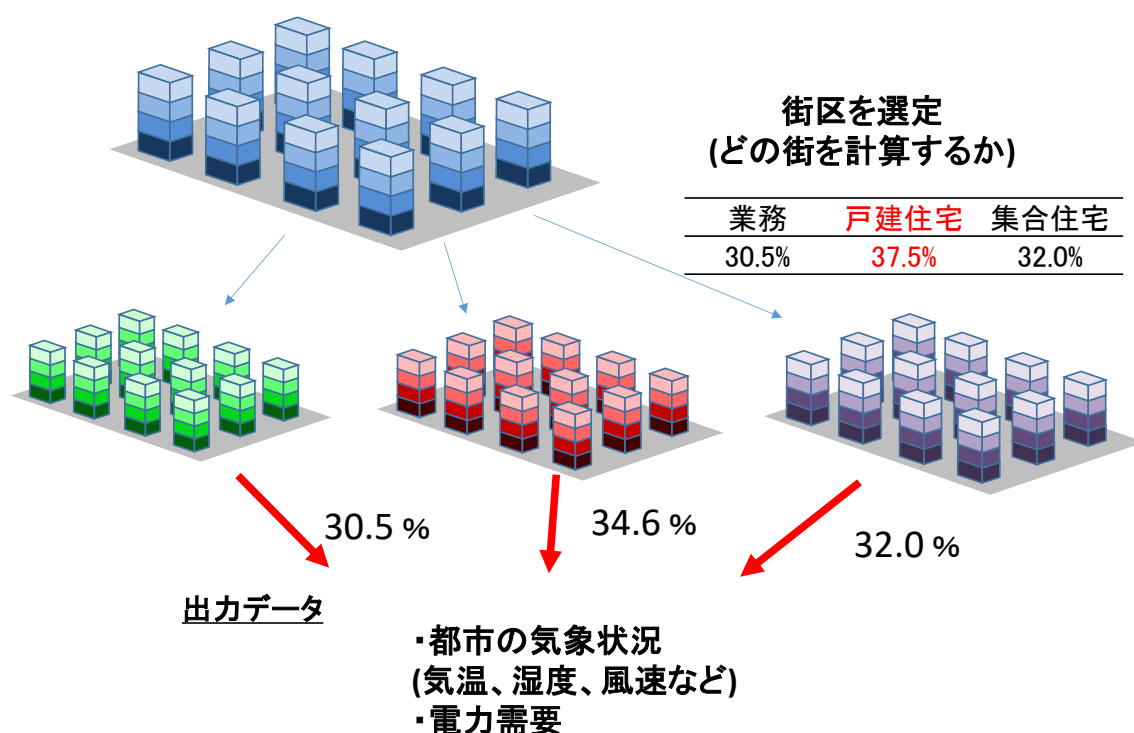


Fig. 2.13 新モデルの計算概要

Fig. 2.13 に新モデルの計算概要を示す。新モデルは、モデルを構成する大気の基本方程式や熱収支式は従来モデルと同様であるが、モデルの計算フローとモデルの仮定に変更を加えた。従来モデルでは街区の建物用途割合を参照し、割合が最も高い種別をその街区の街区種別として考え、種別に応じたパラメーターを一律に与えていた。前節で述べた通り、これは街区に存在する建物の種類（戸建住宅や業務ビルなど）を 1 種類とする考え方である。しかし現実の街区では建物の種類は 1 種類ではなく、複数の用途が混在している（後述；Table 3.1）。

そこで新モデルでは、建物用途割合で街区種別を判断せず、3 種類の街区種別に対応する入力パラメーターを全て与え、建物の壁に 3 種類の属性を持たせる。3 種類の属性それぞれに対し、従来と同様の計算をおこない、建物と大気との熱の出入りを示す顕熱・潜熱フラックスを算出する。一方、建物は 3 種類存在するが大気は 1 種類なので、それぞれのフラックスを延床面積割合で加重平均をとる。そこで再度計算された大気は 3 種類の属性を持つ建物の壁と熱のやり取りをおこなう。以上のような計算フローを用いることで、複数の建物の種類が存在していることを再現している。

## 2.6 太陽光発電モデル

導入が期待されるスマートグリッドは電力需給両面の推定が必要となる。そこで、前節までに述べた電力需要の推定に加え、新たに電力供給面の推定として、都市で導入が進む太陽光発電量推定モデルの開発をおこなう。

### 2.6.1 太陽光発電パネルの設置

太陽光発電パネル設置の概要を図 00 に示す。太陽光発電量はパネルの温度に影響を受けるため、パネルの熱収支を考えることは重要である。太陽光発電パネルは玄地[40]の実測を参考に、屋上から 60 cm 離れた状態を仮定した。実際にパネルを屋上面に設置する場合は傾斜をつける場合が多いが、熱収支を考える上で傾斜を考慮するとパネルと屋上面屋根の間の熱収支が複雑となるため、水平設置を仮定した。また、太陽光発電パネルの熱収支式は以下の式で表される[40]。

$$(1 - A)I + J + \varepsilon_w \sigma T_w^4 = H_p + 2\varepsilon_p \sigma T_p^4 + C\rho_p d_p \frac{dT_p}{dt} + Pow \quad (2.24)$$

【添え字】

$P$  : 太陽光発電パネル

$W$  : 屋上壁

【文字】

$A$  : アルベド [-]

$I$  : 短波日射量 [ $\text{W m}^{-2}$ ]

$J$  : 長波日射量 [ $\text{W m}^{-2}$ ]

$\varepsilon$  : 射出率 [-]

$\sigma$  : ステファンボルツマン定数 [ $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}$ ]

$T$  : 温度 [K]

$H$  : 顕熱フラックス [ $\text{W m}^{-2}$ ]

$C\rho$  : 体積熱容量 [ $\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$ ]

$d$  : 厚さ [m]

$Pow$  : 単位面積あたりの発電量 [ $\text{W m}^{-2}$ ]

(2.24)式では太陽光発電パネルの両面からの熱の出入りを示している。左辺はパネルに入るエネルギーを、右辺はパネルから出るエネルギーやパネル温度の上昇、発電に費やすエネルギーを示している。

### 2.6.2 太陽光発電量の推定[41][42]

太陽光発電を導入する場合、発電量を推定するために日本工業規格（JIS）で定められた推定方法を用いてあらかじめ発電量の推定をおこなう[41]。しかし、この際に用いる日射量は平均的气象条件時の年積算や月積算値を用いる。つまり、年積算や月積算の発電量の推定はおこなうことができるが、時刻別の発電量を推定することができない。

一方で、本研究で用いる気象モデルは、時刻別の都市における気温や日射量、太陽光パネル温度を計算することができ、これらを用いることで、時刻別の発電量を求めることができる。

本研究では JIS の太陽光の発電量推定方法を用い、気象モデルにて求めた日射量、太陽光パネル温度を代入することで発電量を算出する。

太陽光発電量は以下の式によって求める。

$$Pow = H_A \times K \times \frac{P_{AS}}{G} \quad (2.25)$$

$Pow$  : 発電量 [Wh]

$H_A$  : 斜面日射量 [ $\text{W m}^{-2}$ ]

$K$  : 総合設計係数 [-]

$P_{AS}$  : 太陽光発電アレイのシステム容量 [kW]

$G$  : 標準試験による日射強度 [ $\text{kW m}^{-2}$ ]

(通常は 1 kW の値を使用)



ここで、総合設計係数 $K$ はパネルの温度上昇やパネルの汚れによる発電量低下を示す補正係数であり、以下の式によって求められる。

$$K = K' \times K_{PT} \quad (2.26)$$

$$K' = K_{HD} \times K_{PD} \times K_{PU} \times K_{PA} \times \eta_{INO} \quad (2.27)$$

$K'$  : 基本設計係数 [-]

$K_{PT}$  : 温度補正係数 [-]

$K_{HD}$  : 日射量変動補正係数 [-]

推定した機関の日射量の確からしさを表す補正係数  
(JIS の推奨値は 0.97)

$K_{PD}$  : 経時変化補正係数

汚れ、効率劣化、ガラス面反射を考慮した補正係数  
(JIS の推奨値は 0.95)

$K_{PU}$  : アレイ負荷整合補正係数

アレイ電力動作点の最適動作点とのずれを補正した係数  
(JIS の推奨値は 0.94)

$K_{PA}$  : アレイ回路補正係数

配線抵抗損失を考慮した補正係数  
(JIS の推奨値は 0.97)

$\eta_{INO}$  : パワーコンディショナー実行効率

パワーコンディショナーの変換効率を表す数値  
(JIS の推奨値は 0.90)

また、温度補正係数 $K_{PT}$ はパネル温度の上昇にともなう発電効率低下を補正する係数であり、以下の式によって求められる。

$$K_{PT} = 1 - \alpha_{Pmax} (T_p - T_s) \quad (2.28)$$

$\alpha_{Pmax}$  : パネルの温度係数 [ $K^{-1}$ ]  
(結晶系の JIS 推奨値は 0.0041)

$T_p$  : パネル温度 [K]

$T_s$  : 参照温度 (25°C) [K]

ここでパネル温度 $T_p$ は(2.24)式によって求められる。したがって、時刻別に変化するパネル温度と、それにともなう発電量低下を表現することができる。

2.6.1 節にて太陽光パネルの熱収支式を示した。熱収支式をもとにパネル温度を求める際には複雑化を避けるために、屋上面に対し水平に設置することを仮定した。しかし、発電量の推定は傾斜による影響が大きいため、(2.25)式の日射量は水平面の日射量でなく、斜面日射量を用いる。また、傾斜角は NEDO 日射量データベース (MONSOLA-11) [43]による大阪の年間最適傾斜角 (29.2°) に近く、文献等でも広く用いられており他文献との比較が容易な 30° を指定した。

また、(2.25)式の太陽光発電アレイの発電容量は、屋上に設置する発電容量の大きさを示すので、太陽光発電パネルが設置できる面積に比例する。みずほ情報総研の太陽光発電ポテンシャルを推定した報告[44]では、30° の傾斜をもたせた太陽光パネルは 1 kW の容量につき 11.55 m<sup>2</sup> の面積が必要であることを示している。したがって、本研究では設置面積をこの値で除することで設置容量を求める。

## 第3章 調査範囲とデータ

### 3.1 調査対象地域

本研究では街区スケールにおける電力消費を再現できるシミュレーションモデルを開発する（4章および5章）ために、大阪市周辺を調査地域とした。大阪市内周辺を選定した理由は、モデルの検証データ等、各種入力データ入手の容易性に配慮したためである。また、大阪市周辺域中、7地点において気象データと電力供給量の実測データを入手した[49]。Fig. 3.1 に大阪市周辺の調査対象街区を、Table 3.1 に調査対象街区の建物用途割合を示す。建物用途割合は建物ポリゴン GIS データと土地利用ポリゴン GIS データより、用途ごとの延床面積をベースに割合として表した。そのうち、集合住宅の用途割合が 33%以上の街区を集合住宅街区 (Apartment residential area ; A)，戸建住宅の用途割合が 33%以上の街区を戸建住宅街区 (Detached residential area ; D)，業務の用途割合が 33%以上の街区を業務街区 (Business district ; B1 - B2)，運輸施設が 33%以上の街区を運輸街区 (Transportation area ; T)，以上の条件を満たさない街区を混在街区 (Mixed area ; M1 - M2) とした。

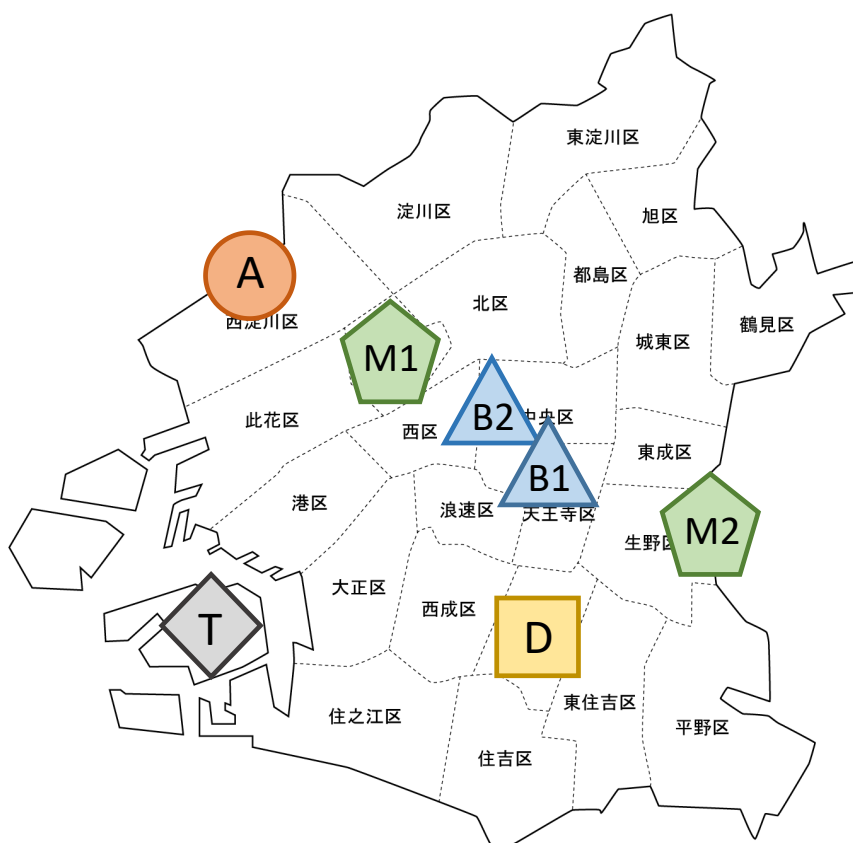


Fig. 3.1 調査対象範囲

Table 3.1 対象地域における建物用途割合

調査 範囲	大阪市内										大阪市外 <sup>*1</sup>		延床面積 [km <sup>2</sup> ]
	戸建 住宅	集合 住宅	商業	業務	教育 文化	厚生 医療	工場	供給 処理	運輸 施設	その他	住宅	その他	
<b>A</b>	28%	33%	7%	8%	4%	3%	11%	0%	5%	1%	-	-	2.73
<b>D</b>	37%	30%	11%	6%	9%	2%	1%	0%	2%	2%	-	-	2.20
<b>B1</b>	0%	8%	14%	68%	2%	0%	0%	0%	3%	5%	-	-	2.25
<b>B2</b>	0%	1%	3%	87%	4%	0%	0%	0%	2%	3%	-	-	1.08
<b>M1</b>	15%	29%	13%	15%	4%	3%	12%	2%	7%	2%	-	-	2.07
<b>M2</b>	15%	15%	7%	5%	4%	3%	9%	0%	3%	1%	33%	4%	1.75
<b>T</b>	0%	21%	8%	21%	8%	1%	5%	0%	34%	2%	-	-	5.46

(出典) [45][47][46][47]より作成

各調査範囲における、建物用途割合を延床面積ベースで表記

\*1 : M2 は大阪市外域を含むが、正確な建物用途割合が不明であったため、住宅とその他に分類した

## 3.2 実測データの整備

本研究ではシミュレーションモデルの開発にあたり、実測値との比較，検証を行った。そのため、実測データは大阪市周辺域の 7 地点において、気象データ（気温，相対湿度，気圧，日射量）、電力データ（変電所単位での電力消費量）を整備した。

### 3.2.1 気象データ

夏季や冬季の空調稼働期間において、電力消費量は気温に大きく影響を受けることが知られている。また、都市の気象要素（気温や湿度、風向、風速）は都市に存在する建物の材質や、建物の密集度の影響を受ける。従って、都市の電力消費を適切に評価するためには、都市における気象変化を把握することが必要である。そこで本研究では、引地[48]や橋本[49]らが行った気象観測データを用いた。

観測は大阪市周辺域を対象とし、以下の基準により観測地点を選定した。

- ① 約 5 km～10 km 間隔
- ② 公的機関（学校）の屋上や公園に年間を通して観測機器の設置が可能
- ③ 周辺に大規模な工場や建築物、道路など測定に悪影響を与えるものが存在しない
- ④ 比較的建物用途や街区構造が均一である

観測項目は、屋上設置の場合は気温[°C]，相対湿度[%RH]，気圧[hPa]，日射量[W/m<sup>2</sup>]の 4 項目を、公園設置の場合は気温[°C]，相対湿度[%RH]の 2 項目を測定した。Table 3.2 に各設置場所と観測項目を示す。

気温，相対湿度，気圧は T&D 社製の TR-73U を用い、日射量は Kipp&Zonen 社製の CMP3 を用いて観測した。Fig. 3.2 および Table 3.3 に気温，相対湿度，気圧測定機器の仕様を、Fig. 3.3 および Table 3.4 に日射量観測機器の仕様を示す。また、各項目の測定期間を街区ごとにまとめた表を Table 3.5 に示す。

Table 3.2 設置場所と観測項目

設置場所	観測項目
屋上設置（学校）	気温[°C]，相対湿度[%RH]，気圧[hPa]，日射量[W m <sup>-2</sup> ]
地上設置（公園）	気温[°C]，相対湿度[%RH]



Fig. 3.2 気温， 相対湿度， 大気圧観測機器（T&D 社, TR-73U）  
（出典） [49]より抜粋

Table 3.3 気温， 相対湿度， 大気圧観測機器の仕様（T&D 社, TR-73U）

	気温	相対湿度	大気圧
センサ	サーミスタ	高分子膜抵抗式	大気圧センサ
測定範囲	-40-110°C (オプションセンサ)	10-95 %RH	750-1100 hPa
精度	平均±0.3 °C [0-50 °C]	± 5 %RH [25°C, 50 %RH]	± 1.5 hPa
測定分解能	0.1°C	1 %RH	0.1 hPa

（出典） [49]より抜粋



Fig. 3.3 日射量観測装置 (Kipp&Zonen 社, CMP3)  
(出典) [49]より抜粋

Table 3.4 日射量観測機器の仕様 (Kipp&Zonen 社, CMP3)

項目	仕様値
測定波長範囲	300-2800nm
感度	5 – 20 $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$
応答速度	< 18 sec. (95%)
経年変化	< 1% / year
非直線性	< 1% (0-1000 $\text{W}/\text{m}^2$ )
方位角特性	< 20 $\text{W}/\text{m}^2$ (1000 $\text{W}/\text{m}^2$ の光源で天頂から 80°まで)
傾斜角特性	< 1% (1000 $\text{W}/\text{m}^2$ まで)
仕様温度範囲	-40-+80 °C
測定範囲	< 2000 $\text{W}/\text{m}^2$

(出典) [49]より抜粋

Table 3.5 観測地点における観測期間

	気温	相対湿度	大気圧	日射量
R1	2013/3/9 9:40 - 2014/3/18 9:00			2013/3/9 9:30 - 2014/3/18 9:10
R3	2013/3/11 15:20 - 2014/3/19 13:00			2013/3/11 15:15 - 2014/3/19 13:10
B1	2013/3/13 14:30 - 2014/3/19 14:00			2013/3/13 14:20 - 2014/3/19 14:45
B2	2013/3/8 12:40 - 2014/3/18 13:00			2013/3/8 12:40 - 2014/3/18 13:25
M	2013/3/13 12:20 - 2014/3/20 14:00			2013/3/13 12:15 - 2014/3/20 13:40
R6	2013/3/11 12:10 - 2014/3/20 12:00			2013/3/11 12:05 - 2014/3/20 13:30
T	2013/3/8 15:50 - 2014/3/20 9:00			2013/3/8 15:40 - 2014/3/20 9:00

(出典) [49]より抜粋



### 3.2.2 電力データ

シミュレーションモデルの開発を目的として、気象観測をおこなった地点に対応する変電所の供給範囲を選定した。また、変電所の供給範囲内での電力供給量を、範囲内での電力消費量とみなした[52]。データの期間は2013年4月1日-2014年3月31日の前1時間積算電力供給量を用いた。

## 3.3 CM-BEM 入力データの整備

### 3.3.1 大阪市周辺域における街区種別の分類

現行の WRF-CM-BEM では建物用途割合をもとに3種類の街区種別（集合住宅街区、戸建住宅街区、業務街区）に分類し、街区種別に応じて建築物の物性値や電力消費パターンを与えシミュレーションをおこなう。そこで先行研究として WRF-CM-BEM を大阪にて適用した引地[48]を参考にして、大阪市周辺街区の土地利用の分類をおこなった。大阪市内の範囲では平成19年大阪市建物現況データ[45]、数値地図5000[46]を用い、また大阪市外の範囲では数値地図5000[46]、詳細地図2012（近畿）[47]を用いて分類した。

Fig. 3.4 に街区種別分類の概念図を示す。まず、平成19年度大阪市建物現況データ、数値地図5000の建物用途ごとの延床面積を用い、住宅と分類された延床面積の割合が50%を超える場合は「住宅街区グリッド」、業務と分類された延床面積の割合が50%を超える場合は「業務街区グリッド」とする。次に住宅街区グリッドを戸建住宅街区（木造住宅街区）と集合住宅街区（耐火住宅街区）に分類した。建物用途・構造別の延床面積を参照し、木造の面積（木造住宅）が非木造＋耐火構造（耐火住宅）の面積を上回った場合は「戸建住宅街区」、非木造＋耐火構造の面積が木造の面積を上回った場合は「集合住宅街区」とした。また、建造物が少なく天空率が0.8を超える街区はCM-BEMを適用しない都市グリッドとした。この分類の結果は第4章にて用いる。

本研究では従来のCM-BEMのモデルに改良を加え、街区種別の分類をせず複数の建物用途の影響を考慮できるモデル（汎用モデル；サブグリッドモデル）の開発をおこなった。この結果は第5章にて詳しく述べる。

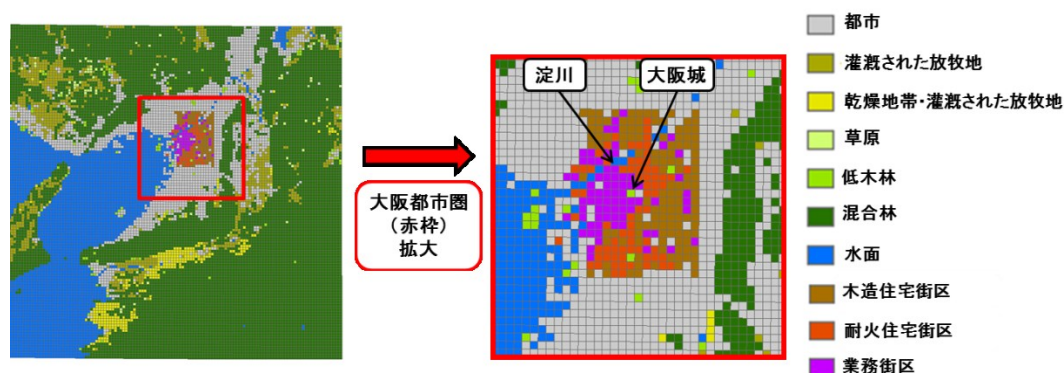


Fig. 3.4 街区種別選定の概念図

(出典) [48]より抜粋

### 3.3.2 大阪市周辺域における交通排熱の推定

都市における交通廃熱は、自動車、鉄道、船舶などが考えられるが、この中でも自動車が支配的である。鉄道網が発達した東京を例に挙げると、最終エネルギー消費の割合では90%近くが自動車である[53]。自動車の熱効率は約20~30%程度[54]であり、つまりエネルギー消費の20~30%が走行に寄与するエネルギー、残りの70~80%は摩擦などに費やされ最終的に熱に変換される。そのためエネルギー消費=自動車廃熱と考えると、都市における自動車廃熱の割合は非常に大きいと言える。東京23区を対象として人工排熱の排出特性を明らかにした研究例では、23区の人工排熱（全熱）は約32 W/m<sup>2</sup>であり、8月の水平面全天日射量の18%に相当するとし、その半分が交通廃熱としている[55]。

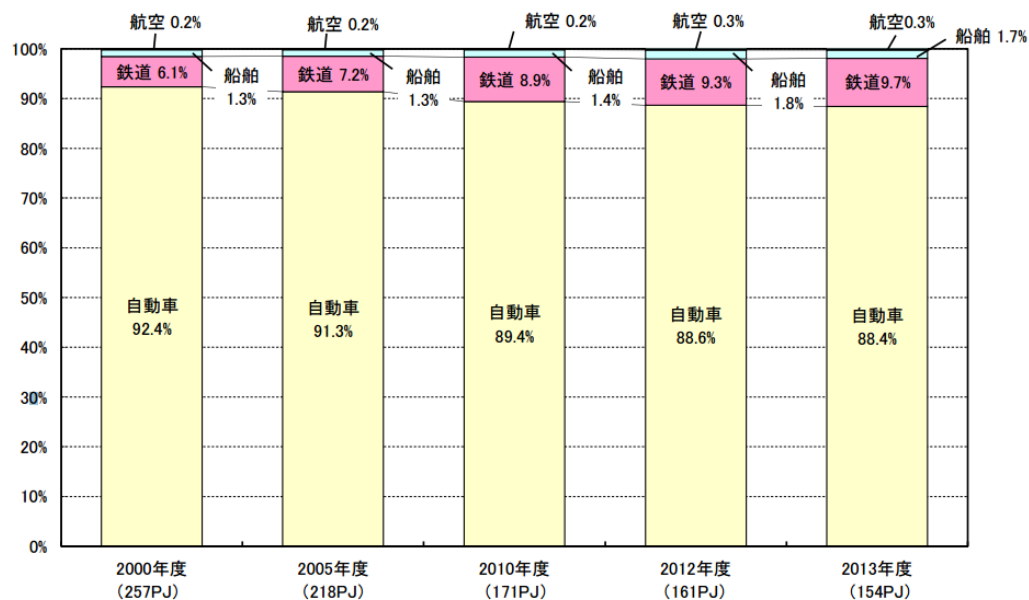


Table 2.7 東京都の運輸部門の最終エネルギー消費（運輸機関別）の構成比

(出典) [53]より引用

以上のように交通廃熱は都市の高温化に寄与し、夏季や冬季の空調需要にも影響を及ぼす。しかし、対象とする大阪市周辺域での自動車廃熱の推定例は見当たらない。そこで本研究では、大阪市周辺の自動車排熱は全国・3次メッシュ別の大気汚染物質排出量データである東アジア大気汚染物質排出量グリッドデータベース (EAGrid2000) [56]中の自動車 CO<sub>2</sub> 排出量より自動車排熱量を推定した。

EAGrid2000 は東アジアを対象として二酸化硫黄 (SO<sub>2</sub>)、窒素酸化物 (NO<sub>x</sub>) などの大気汚染物質のグリッド別 (1 km 四方) 排出量を推定したデータベースである。日本のデータは自動車、建設・産業・農業機械、農業廃棄物の野焼き、船舶などに分類されている。それぞれに対し、大規模燃焼発生源 (発電所や廃棄物燃焼施設)、小規模燃焼発生源 (小規模廃棄物燃焼施設や農業廃棄物の野焼き)、移動発生源 (自動車や船舶、航空機) などに分類し、環境省主導の排出量総合調査や Japan Clean Air Program (JCAP) の研究成果を参考に排出量を推計している。

EAGrid2000 のデータを用い、自動車廃熱を推定する。この推定にあたり、いくつかの過程を用いた。まず、自動車の燃料はガソリン、ディーゼル、LPG の 3 種類に限定した。また、大阪市内周辺域を走行する自動車の燃料種類、発熱量ベースの構成比は街区や時刻に依存せず、一律とした。以上の仮定を基に、3次メッシュ  $j$  における時刻  $t$  の自動車 CO<sub>2</sub> 排出量;  $E_{jt}$  [kg-CO<sub>2</sub> / h] は下記式によって表現できる。

$$E_{jt} = X_g \times AH_{jt} \times e_g + X_d \times AH_{jt} \times e_d + X_{LPG} \times AH_{jt} \times e_{LPG} \quad (3.1)$$

【添字】

g: ガソリン燃料

d: ディーゼル燃料

LPG: LPG 燃料

【文字】

$E_{jt}$ : 3次メッシュ  $j$  における

時刻  $t$  の自動車 CO<sub>2</sub> 排出量 [kg-CO<sub>2</sub> / h]

$AH_{jt}$ : 3次メッシュ  $j$ , 時刻  $t$  における

自動車燃料の総発熱量 (総発熱量) [J / h]

$e$ : 各燃料の CO<sub>2</sub> 排出係数 [kg-CO<sub>2</sub> / J]

$X$ : 発熱量ベースでの燃料消費構成比 [-]

上記、(3.1)式にて、自動車 CO<sub>2</sub> 排出量  $E_{jt}$  は EAGrid2000 に収録されているデータであるため、使用する燃料消費のうち任意の燃料消費の割合を示す  $X$  や各燃料の CO<sub>2</sub> 排出係数  $e$  を用いることで、任意の街区、任意の時刻に発生する自動車交通排熱量  $AH_{jt}$  を推定する。

また、ここで各燃料の CO<sub>2</sub> 排出係数  $e$  について考える。元売り 5 社のガソリンに関する高位発熱基準での CO<sub>2</sub> 排出原単位は平均して 68.8 g-CO<sub>2</sub> / MJ (国内採用値) である。一方、軽油では 69.2 g-CO<sub>2</sub> / MJ (国内採用値) であり、LPG では 58.6 g-CO<sub>2</sub> / MJ (国内採用値) である[48]。

また、東京都の自動車部門における燃料消費量 (1995 年時点) はガソリンが 60%、軽油が 33%、LPG が 7%となっており、各燃料の排出係数とこれら燃料消費量の割合を加重平均すると、東京都における自動車の CO<sub>2</sub> 排出係数代表値は 68.2 g-CO<sub>2</sub> / MJ となる[48]。これはガソリンの CO<sub>2</sub> 排出係数と比較しても、排出原単位としての誤差は 1%未満である。加えてガソリン、軽油の排出係数の差異も 0.6%と小さく、東京都自動車部門ではガソリン、軽油で 93%のシェアを占める。大阪府の自動車部門の燃料構成は不明であるが、大阪市域の燃料別自動車保有台数 (Table 3.6 [56]) はガソリンが 82%、軽油が 11%を占めており、東京都と同様にこれらの割合が大きい。そのため以上の仮定により、東京都のシェア最大の燃料であるガソリンの CO<sub>2</sub> 排出係数 (68.8 g-CO<sub>2</sub> / MJ) を換算に用い、自動車排熱量を概算する。

Table 3.6 大阪市域の燃料別自動車保有台数

車種	ガソリン / 台	軽油 / 台	LPG / 台	その他 / 台
乗用	440,589	1,559	9,098	29,173
貨物	56,820	47,985	443	7,124
乗合	118	1,857	2	166
特殊	5,116	13,894	276	1,212
小型二輪	22,784	0	0	0
計	502,643	65,295	9,819	37,675
割合 (その他除く)	82%	11%	2%	6%

(出典) [56]をもとに作成

### 3.2.3 空調期間の設定および解析期間カテゴリーの分類

また、 $E_{ac}$  は夏季では冷房機器、冬季では暖房機器の消費電力を指す。空調稼働時期は一般的に建物用途によって異なり、外気温や日射量、湿度といった外部熱環境に大きく依存している。この外部熱環境は年度や場所によって異なるが、日本工業規格（JIS C 9612, JIS B8616 ; 2006）、日本冷凍空調工業会規格（JRA4048 ; 2006）では標準気象データの日平均気温を用い冷房期間と暖房期間の定義を定めて、空調機器の通年エネルギー消費効率（Annual Performance Factor ; APF）の算出に用いている。Table 3.7 に APF 算出条件を示す。また Table 3.7 を参考に、モデルの入力パラメーターである空調使用期間を設定した。各街区における空調稼働期間を Table 3.8 に示す。加えて Table 3.7 を参考にし、4 章では時期を 3 種類のカテゴリーに分け評価をおこなった。カテゴリーを Table 3.9 に示す。本論文にて「夏季」、「中間期」、「冬季」は以下の日程を指すものとする。

Table 3.7 APF の算出条件

		住宅用 ルームエアコン	店舗・オフィス用 エアコン	ビル用マルチ・ 設備用エアコン
規格		JIS C9612 ; 2013	JRA4048 ; 2006	
建物用途		住宅	戸建店舗	事務所
使用 期間	冷房	5 月 23 日～10 月 4 日	5 月 23 日～10 月 10 日	4 月 16 日～11 月 8 日
	暖房	11 月 8 日～4 月 16 日	11 月 21 日～4 月 11 日	12 月 14 日～3 月 23 日
使用日数		週 7 日	週 7 日	週 6 日
使用時間		6:00～24:00	8:00～21:00	8:00～20:00

（出典）[58]を参考に作成

Table 3.8 モデルに入力する空調稼働期間

街区	空調稼働期間	
	冷房	暖房
集合住宅街区	5 月 23 日～10 月 4 日	11 月 8 日～4 月 16 日
戸建住宅街区	5 月 23 日～10 月 4 日	11 月 8 日～4 月 16 日
業務街区	4 月 16 日～11 月 8 日	12 月 14 日～3 月 23 日

(出典) [58]を参考に作成

Table 3.9 解析期間カテゴリーの分類

カテゴリー	日程
夏季	2013 年 7 月 1 日～8 月 31 日
中間期	2013 年 4 月 5 日～4 月 30 日
	2013 年 10 月 21 日～11 月 15 日
冬季	2014 年 1 月 1 日～2 月 28 日

## 第4章 街区スケールにおける電力消費量の算出

本章では、前章までのシミュレーション条件を用い、前述の CM-BEM を用い、街区スケールにおける電力消費量の推定を試みた。

### 4.1 ベースロードスケジュールの作成

空調稼働しない時期（中間期）は日本では春季および秋季に存在し、この時期の電力消費は電気機器・照明機器などに限られる。そのため、人の在室率や行動パターンに大きく依存し、曜日の変化を除くと日変化は見られないといえる。これは、Fig. 4.2（夏季での週ごとの電力消費量）に比べ Fig. 4.1（中間期での週ごとの電力消費量）のばらつきが小さいことから確認できる。また、街区ごとに特色がみられ、業務利用が多い街区 B2 と戸建住宅が多い街区 D、集合住宅が多い街区 A ではベースロードの値の大きさに違いが確認できた (Fig. 4.3)。

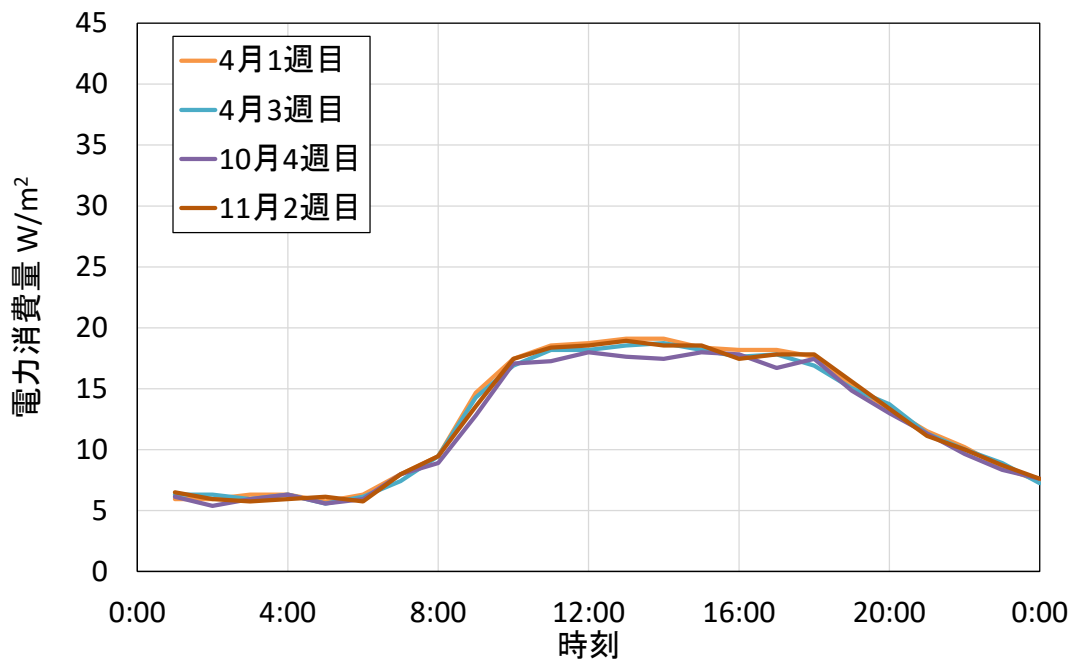


Fig. 4.1 業務街区（B2）における中間期間中の電力消費量（実測値）平均値

ここで実測値は期間中の平日を設定し、以下の日程とした。

4 月 1 週目：2013 年 4 月 8 日～2013 年 4 月 12 日

4 月 3 週目：2013 年 4 月 22 日～2013 年 4 月 26 日

10 月 4 週目：2013 年 10 月 28 日～2013 年 11 月 1 日

11 月 2 週目：2013 年 11 月 11 日～2013 年 11 月 15 日

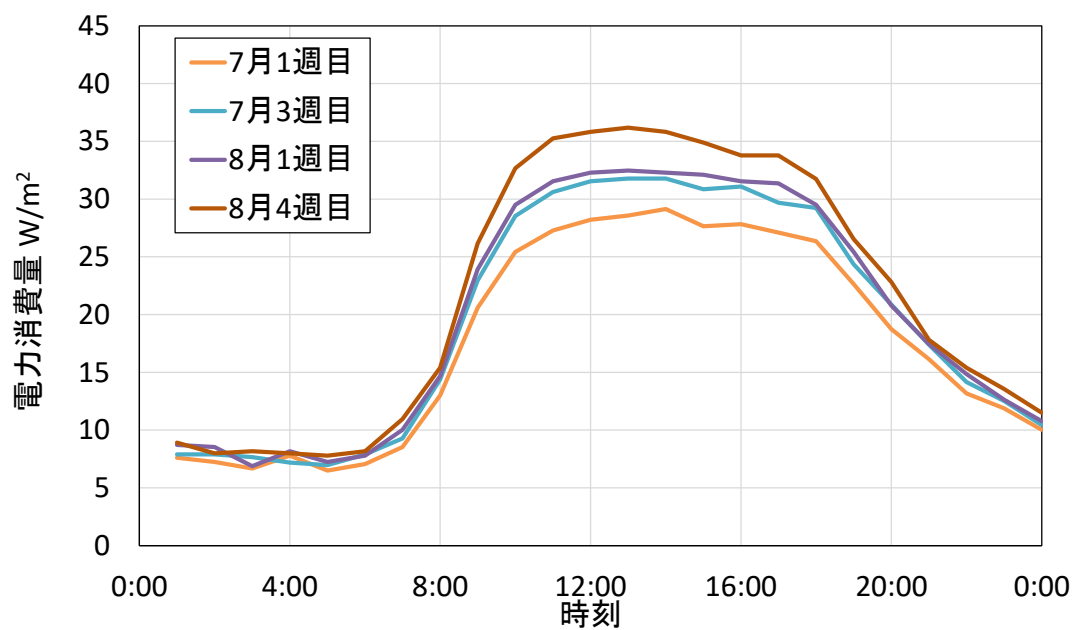


Fig. 4.2 業務街区（B2）における夏季期間中の電力消費量（実測値）平均値

ここで実測値は期間中の平日を設定し、以下の日程とした。

7月1週目：2013年7月1日～2013年7月5日

7月3週目：2013年7月16日～2013年7月19日

8月1週目：2013年7月29日～2013年8月2日

8月4週目：2013年8月19日～2013年8月23日



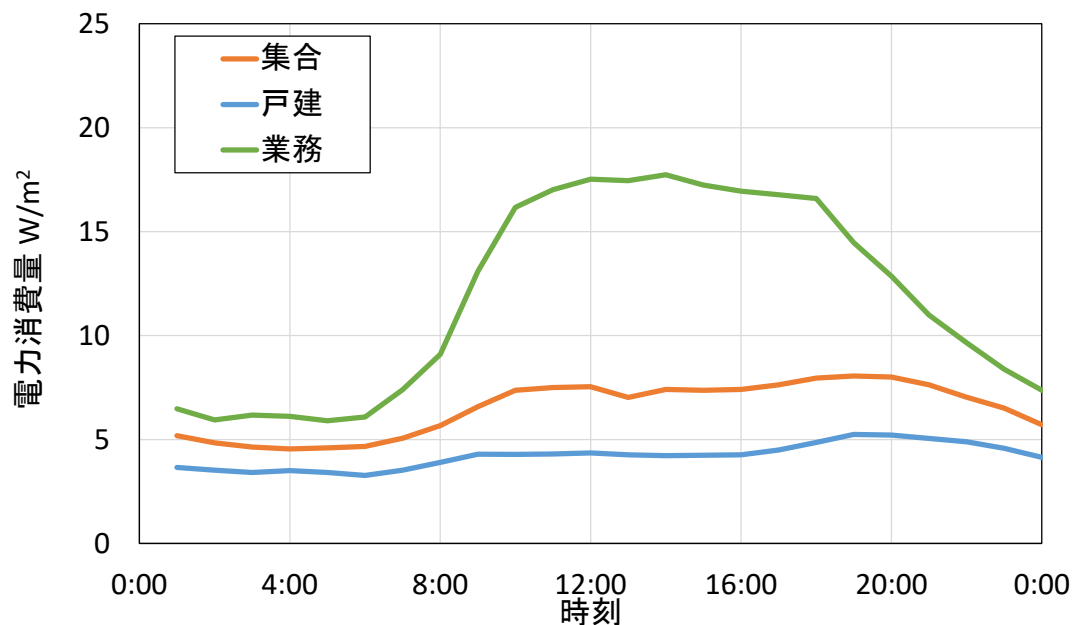


Fig. 4.3 中間期における街区ごとの電力消費量（平日）

集合住宅街区：街区 A

戸建住宅街区：街区 D

業務街区：街区 B2

現行の CM-BEM では 3 種類の街区種別（集合住宅街区，戸建住宅街区，業務街区）を与えることから、ベースロードは街区種別毎にスケジュールを与えることで推定する。各街区種別の用途割合が最も大きい街区をその街区種別の代表として設定し、街区 A を集合住宅街区、街区 D を戸建住宅街区、街区 B2 を業務街区の代表として扱う。

ベースロードスケジュールは橋本[49]の解析結果を用いる。このベースロードは各街区の供給電力量を平日，土曜，休日の曜日毎に分類し、 $t$ -検定をおこなったところ、全てのプロットで有意水準 0.05 ( $p < 0.05$ ) で統計的に有意であった[49]。各街区における曜日ごとのベースロードスケジュールを Fig. 4.4 - Fig. 4.6 に示す。

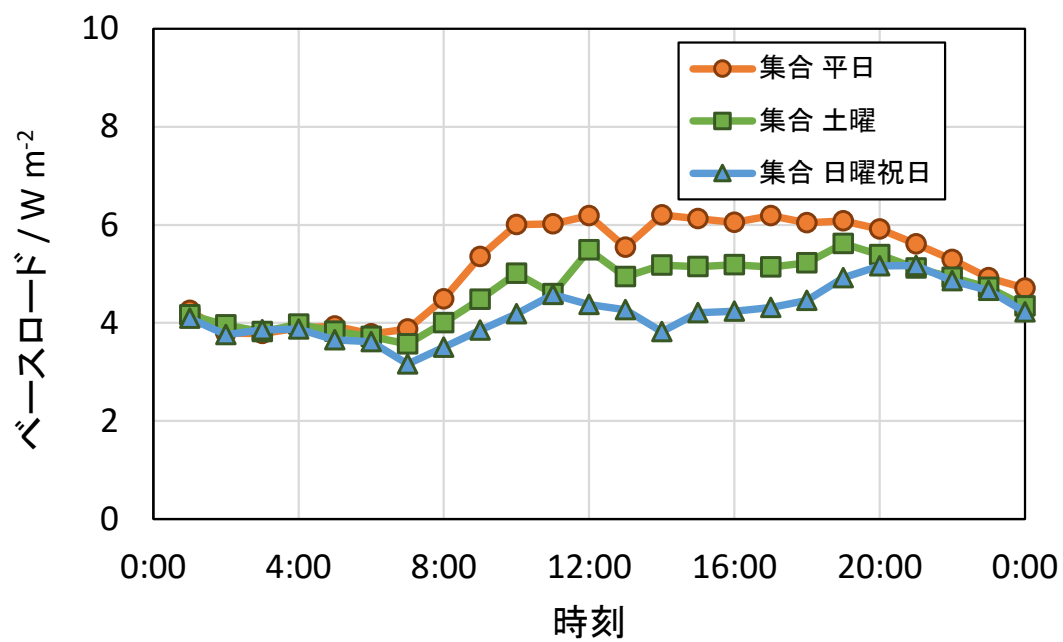


Fig. 4.4 集合住宅街区 (街区 A) のベースロード

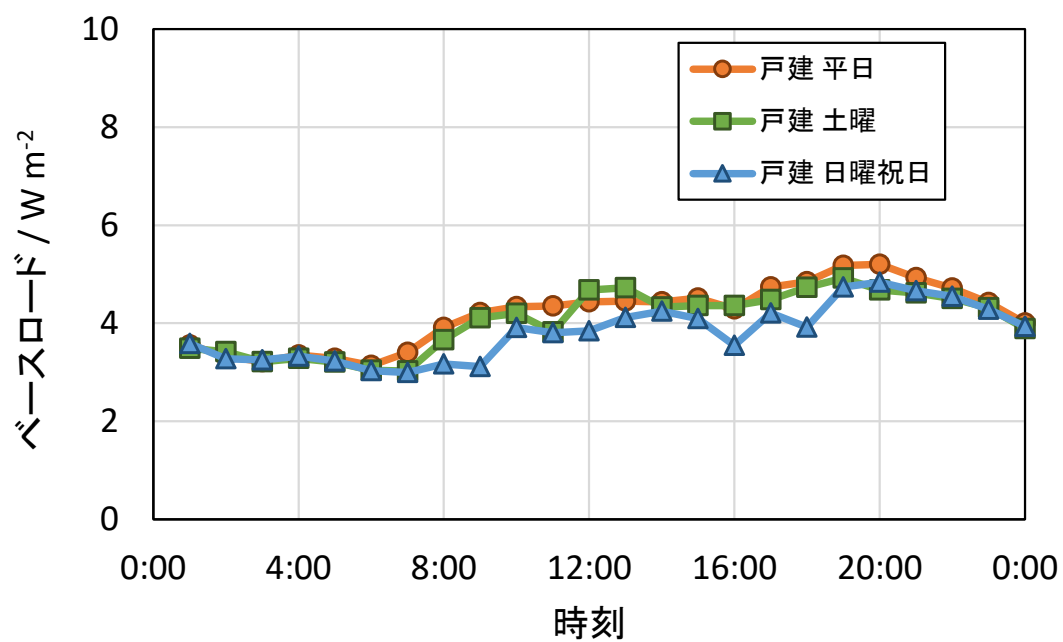


Fig. 4.5 戸建住宅街区 (街区 D) のベースロード

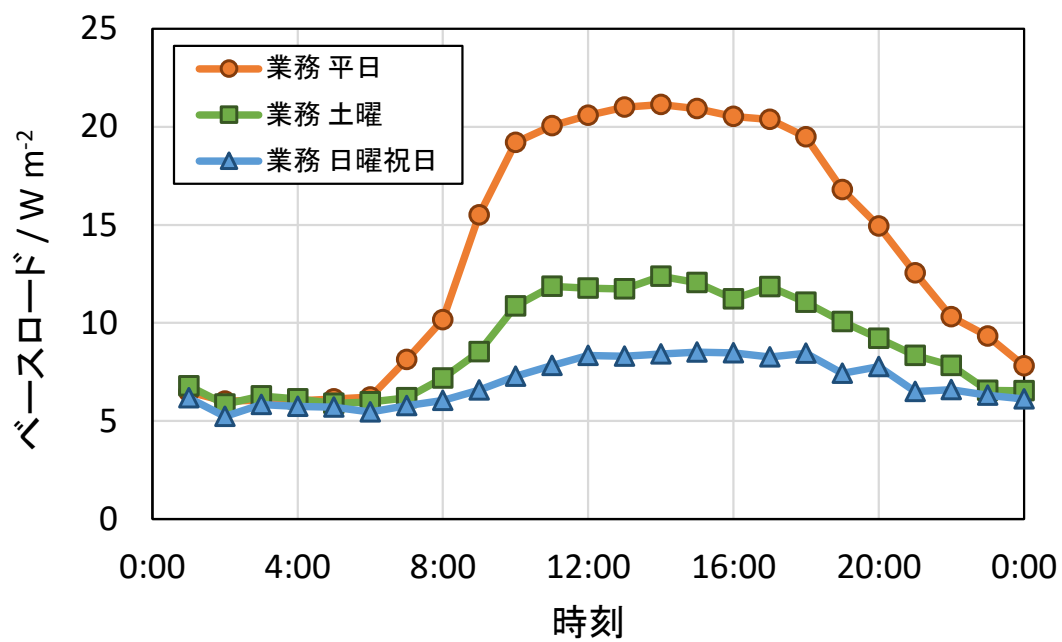


Fig. 4.6 業務街区（街区 B2）のベースロード

## 4.2 空調稼働スケジュールの作成

夏季の電力消費量は大きく別してベースロードと冷房負荷の和（Fig. 4.7）である。夏季の冷房負荷は大きく、また冷房負荷は気温や湿度といった気象要素に大きく左右されることから、国内外で冷房負荷の推定可能なシミュレーションモデルを開発してきた。しかし、空調稼働スケジュールは地点や気象条件，人の行動パターン，空調の設定や性能に依存するので、広く用いられているデータはほとんどない。

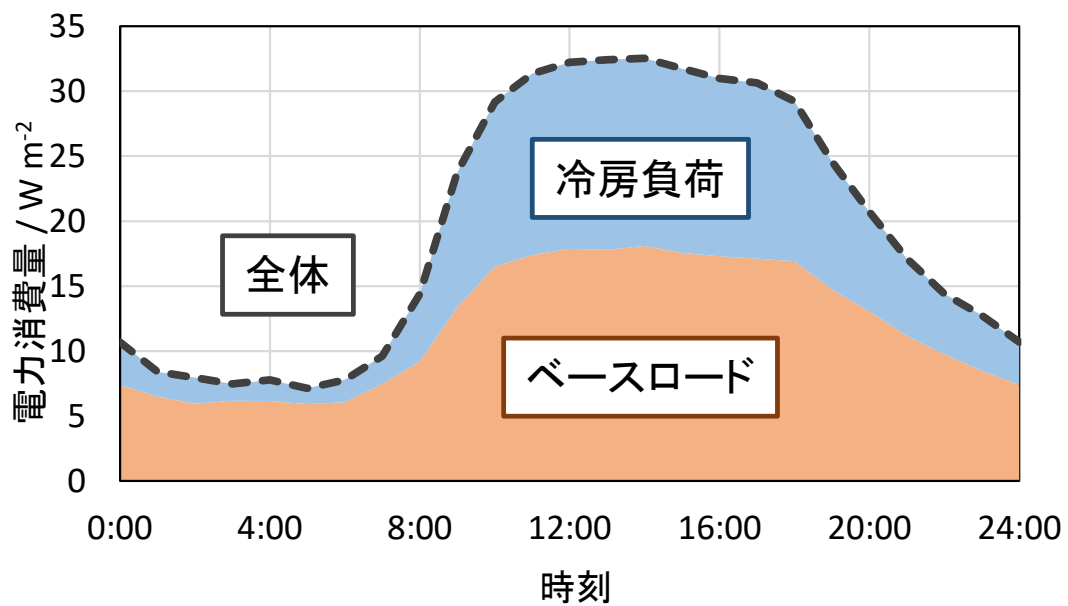


Fig. 4.7 夏季における全電力消費量の内訳の概念図  
(例として業務街区 B2 平日の平均値)

空調機器は主に在室している際に使用するため、空調の稼働スケジュールに相当し入手が容易なデータとして、在室率（起床在室率）がある。住宅での起床在室スケジュールを Fig. 4.8 に、オフィスでの在室スケジュールを Fig. 4.9 に示す。在室スケジュールは空調稼働スケジュールと相関があると考えられるものの、例えば夏季の早朝では在室率は高くとも外気温が低いため空調稼働率も同様に高いとは考えられない。つまり、在室率を空調稼働スケジュールとして用いるには議論が必要であると言える。

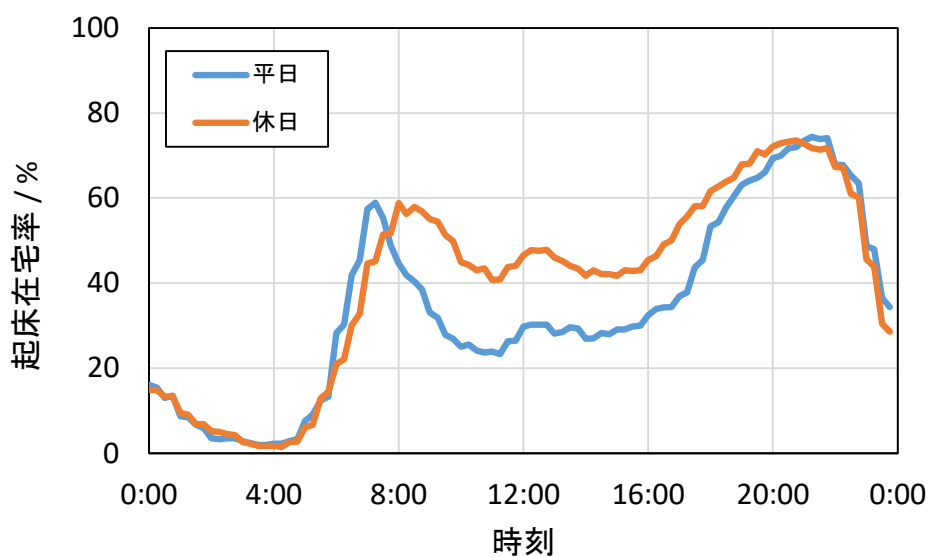


Fig. 4.8 住宅における起床在室スケジュール  
(出典) [59]より作成

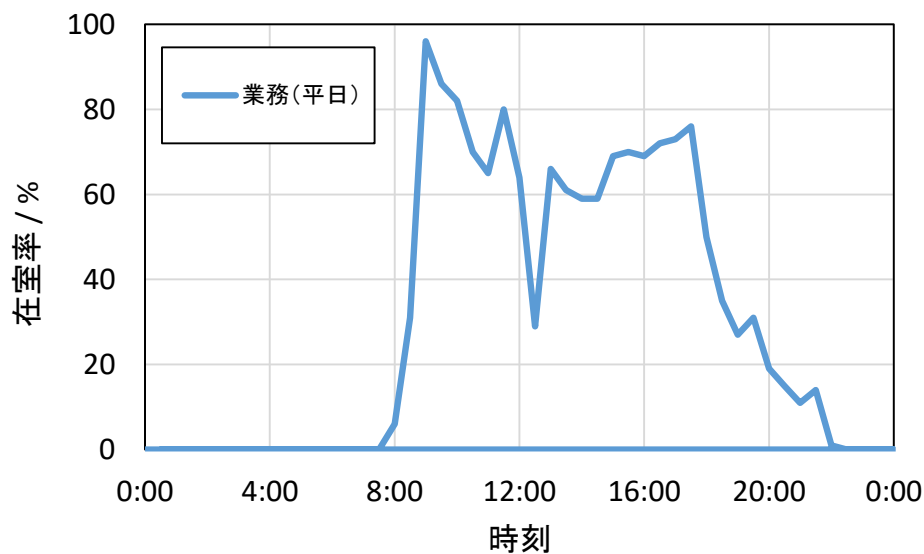


Fig. 4.9 オフィス建物での在室スケジュール  
(出典) [60]より作成

本研究では電力消費量の実測値を入手しているため、未知の値である空調稼働スケジュールを各時刻において算出した（(4.1)式参照）。

$$\begin{aligned} (\text{空調による電力消費}[\text{既知}]) = \\ (\text{空調稼働率}[\text{未知}]) \times (\text{空調機器の電力消費原単位}[\text{既知}]) \end{aligned} \quad (4.1)$$

集合住宅街区、戸建住宅街区、業務街区の街区種別それぞれについて、平日、土曜、休日（日曜・祝日）の冷房・暖房稼働スケジュールを作成した。Fig. 4.10 - Fig. 4.15 に示す。

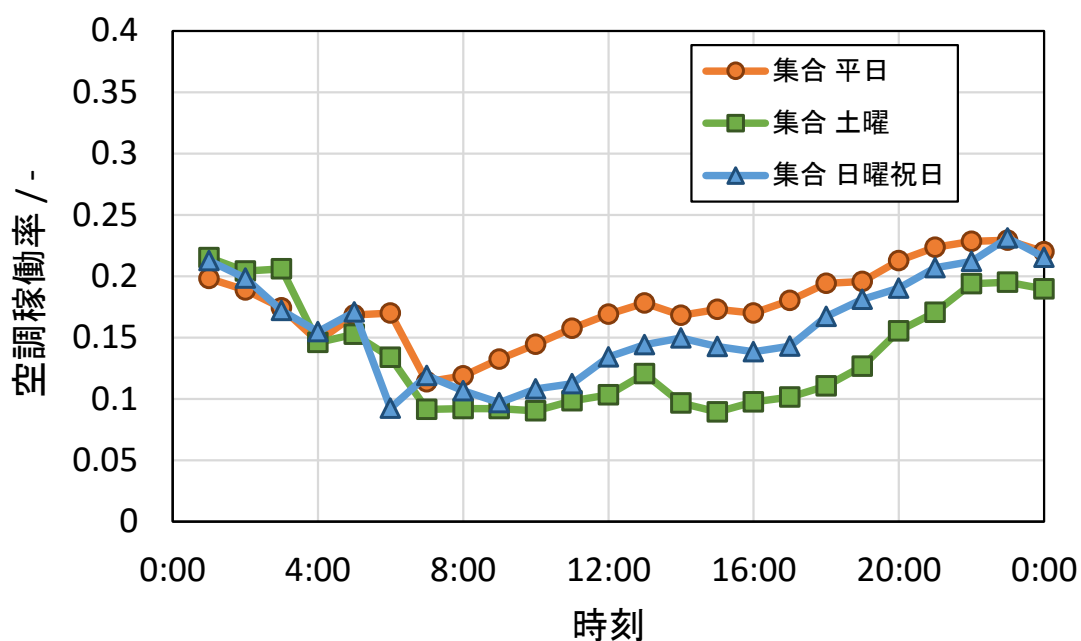


Fig. 4.10 集合住宅街区の冷房稼働スケジュール

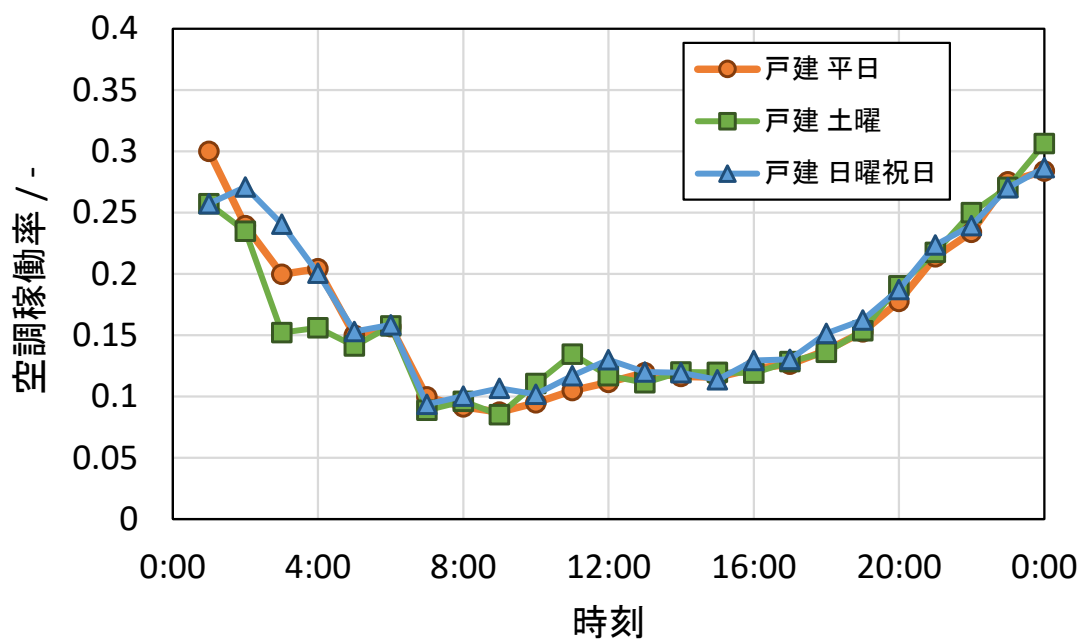


Fig. 4.11 戸建住宅街区の冷房稼働スケジュール

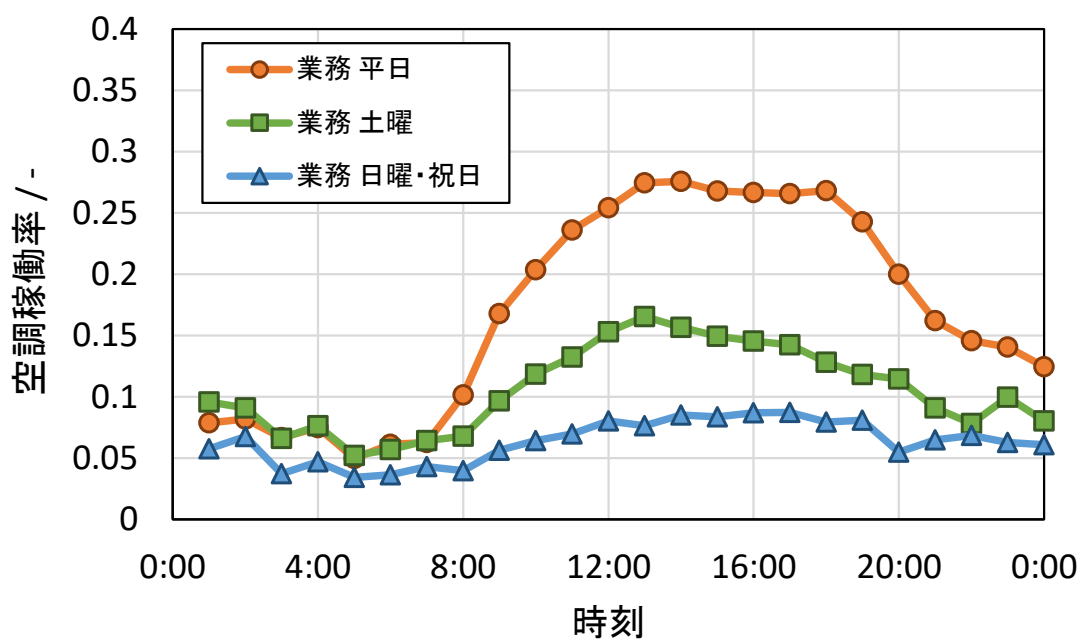


Fig. 4.12 業務街区の冷房稼働スケジュール

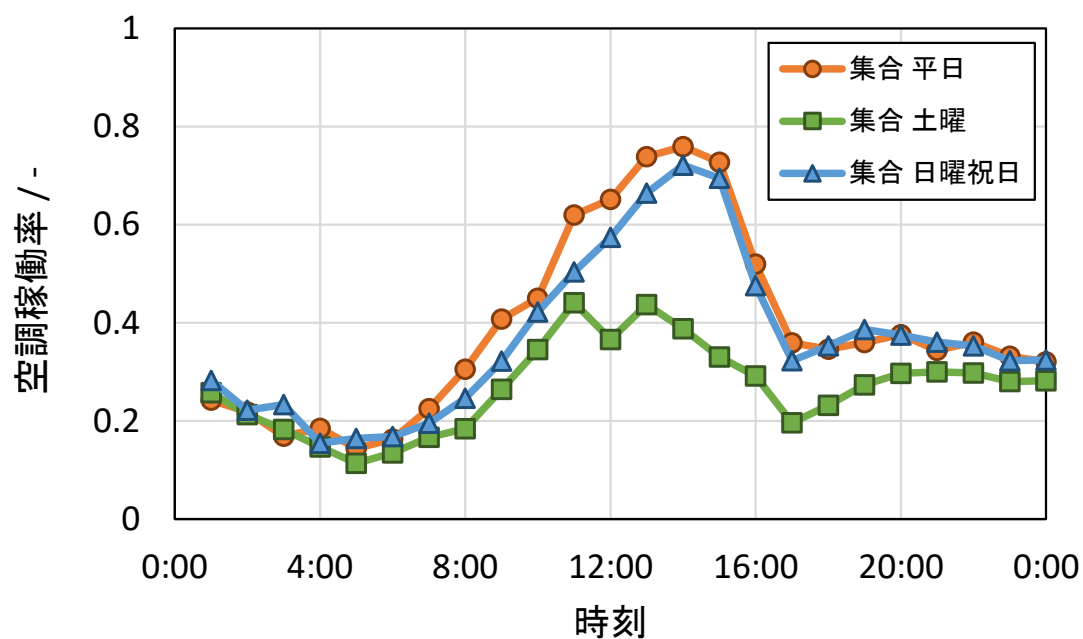


Fig. 4.13 集合住宅街区の暖房稼働スケジュール

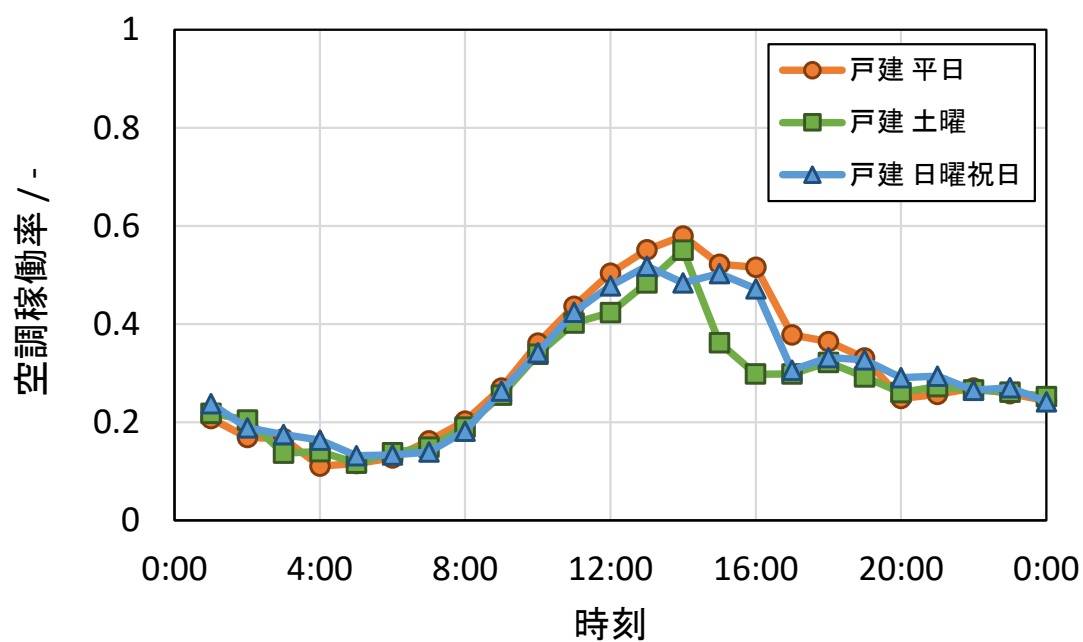


Fig. 4.14 戸建住宅街区の暖房稼働スケジュール



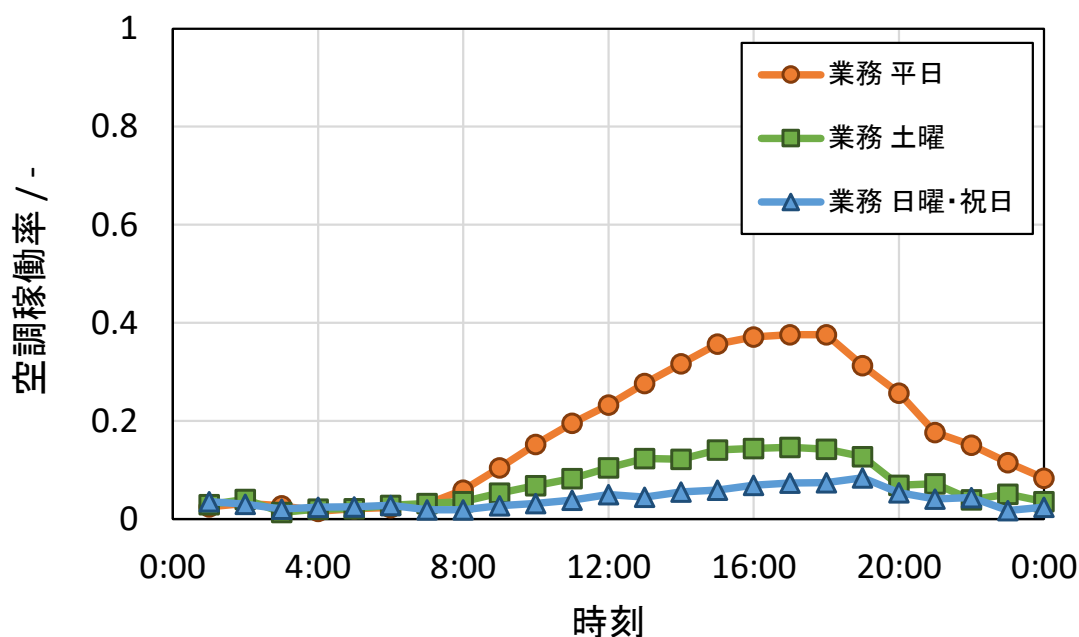


Fig. 4.15 業務街区の暖房稼働スケジュール

### 4.3 街区スケールにおける電力消費量の算出

4.2 節, 4.3 節にて、集合住宅（街区 A）、戸建住宅（街区 D）、業務（街区 B2）の代表街区においてベースロードおよび空調稼働スケジュールの作成をおこなった。次に本節では、作成したスケジュールを用い、代表街区（街区 A、街区 D、街区 B2）および代表街区以外の街区（街区 B1、街区 M1、街区 M2、街区 T）について計算値と実測値との比較をおこない、モデルの精度を検証した。

電力消費量の計算値と実測値の比較は、目的によって考えるタイムスケールを検討する必要があるといえる。デマンドレスポンスといったスマートグリッドへの応用を考える際には時刻別での電力消費量の応答のカーブ（例えばピークとなるのが何時頃なのか、日中や夜間でどの程度の消費量の差が生じるのか）を表現する必要がある。一方で、高反射塗料や屋上緑化といった省エネ施策評価といった対策設計であれば、季節、通年を通した電力消費量の再現性が求められる。今回の研究では対策設計を目的としたモデルの開発を目指しているが、モデルの改良による多岐の応用への期待を込めて、時刻別および通年電力消費量の両面からモデルの電力消費量について検証する。

Fig. 4.16 - Fig. 4.36 に各街区における期間（夏季、中間期、冬季）の電力消費量について実測値と計算値をそれぞれ示し、また Table 4.1 に各街区における期間（夏季、中間期、冬季）の積算電力消費量について、実測値と計算値の実測値ベースでの割合を示す。ここで Table 4.1 について、示す割合が正の値であれば、実測値に対して計算値が過大評価していることを示しており、負の値であれば過小評価をしていることを示す。

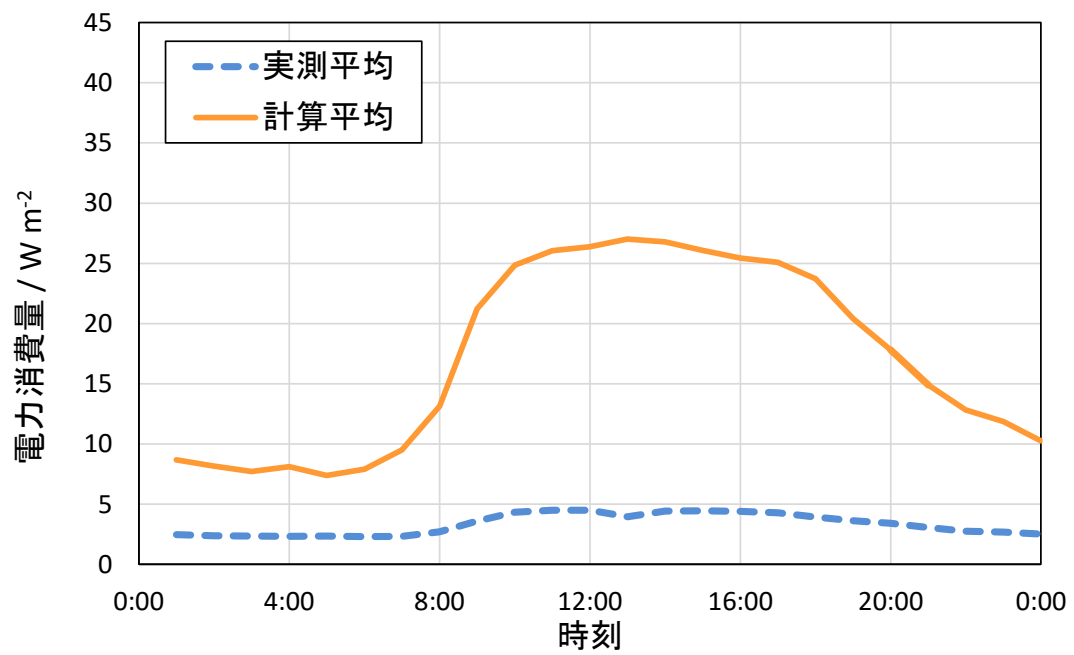


Fig. 4.16 夏季の電力消費量平均値の実測値と計算値の比較（街区 T）

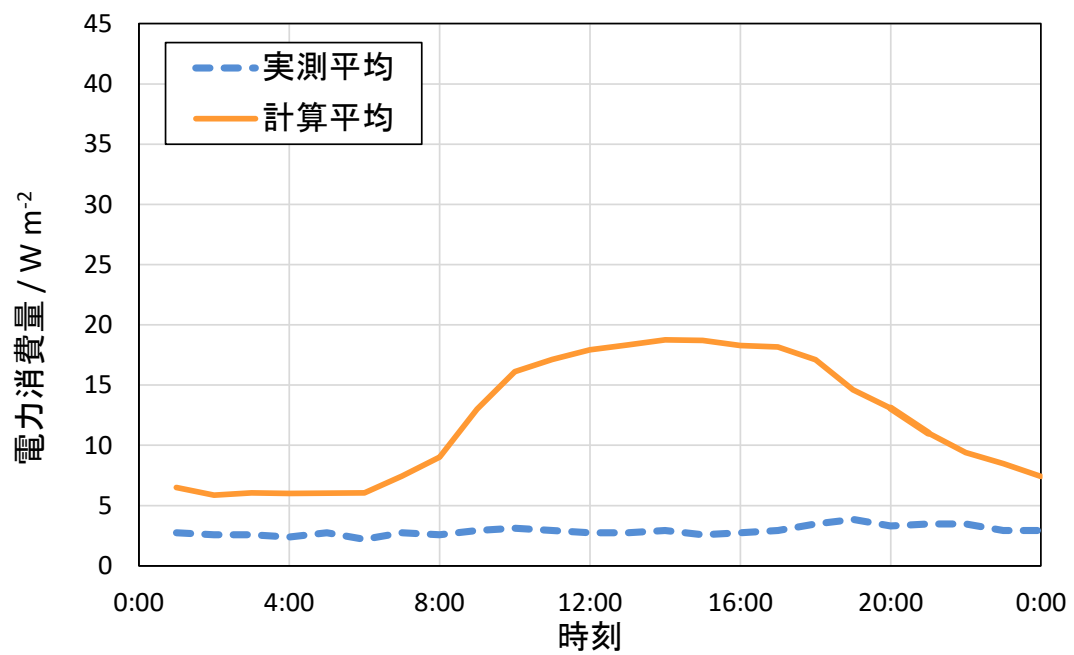


Fig. 4.17 中間期の電力消費量平均値の実測値と計算値の比較（街区 T）

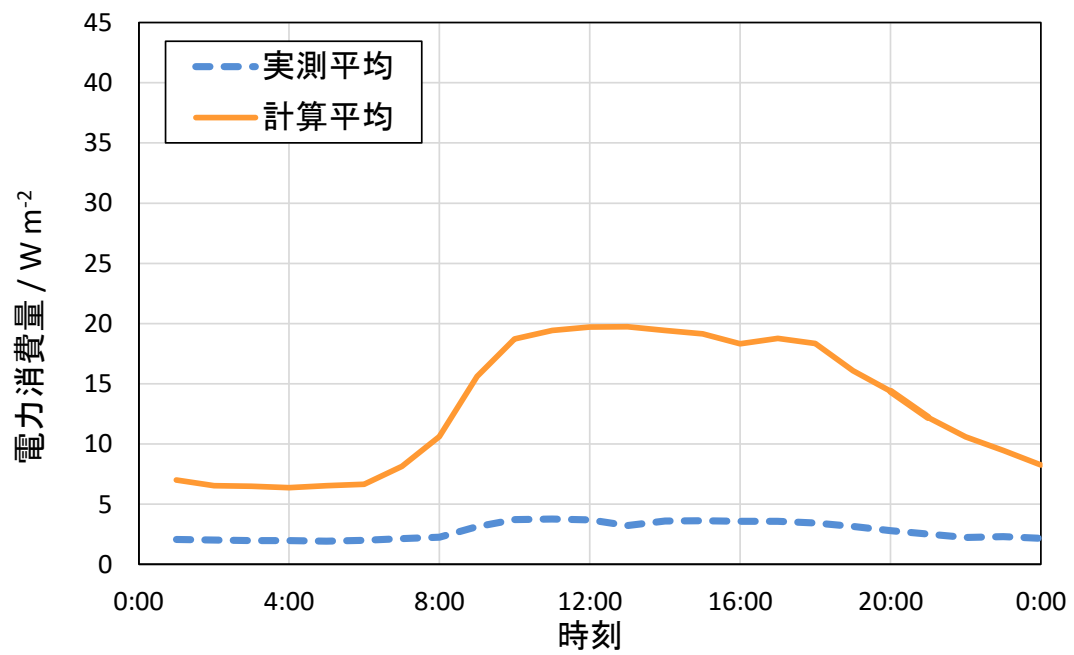


Fig. 4.18 冬季の電力消費量平均値の実測値と計算値の比較 (街区 T)

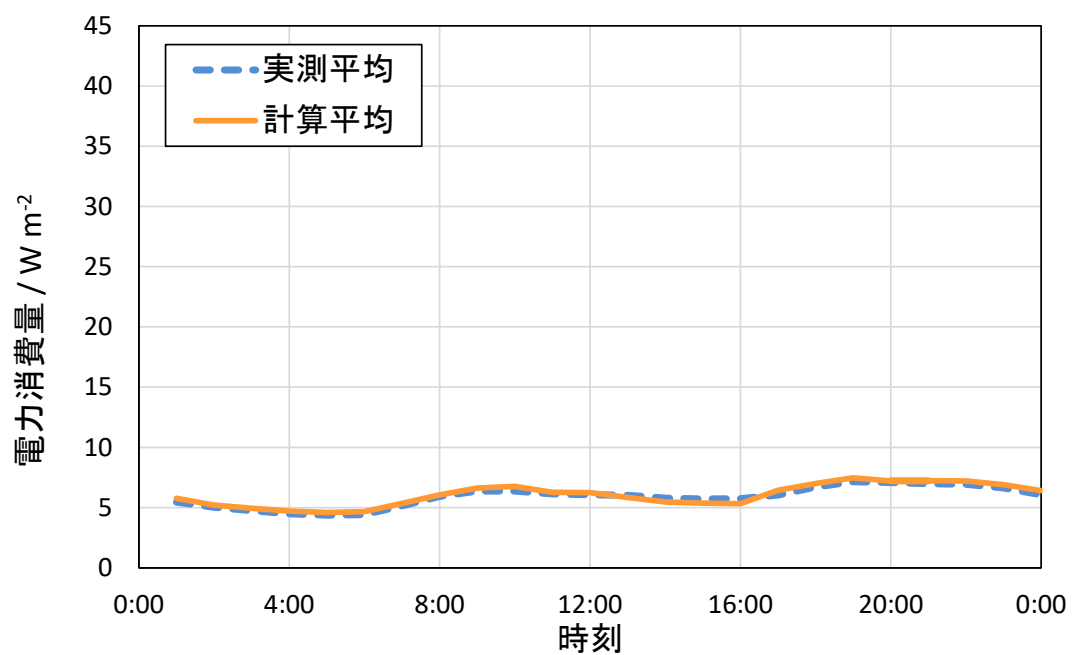


Fig. 4.19 夏季の電力消費量平均値の実測値と計算値の比較 (街区 D)

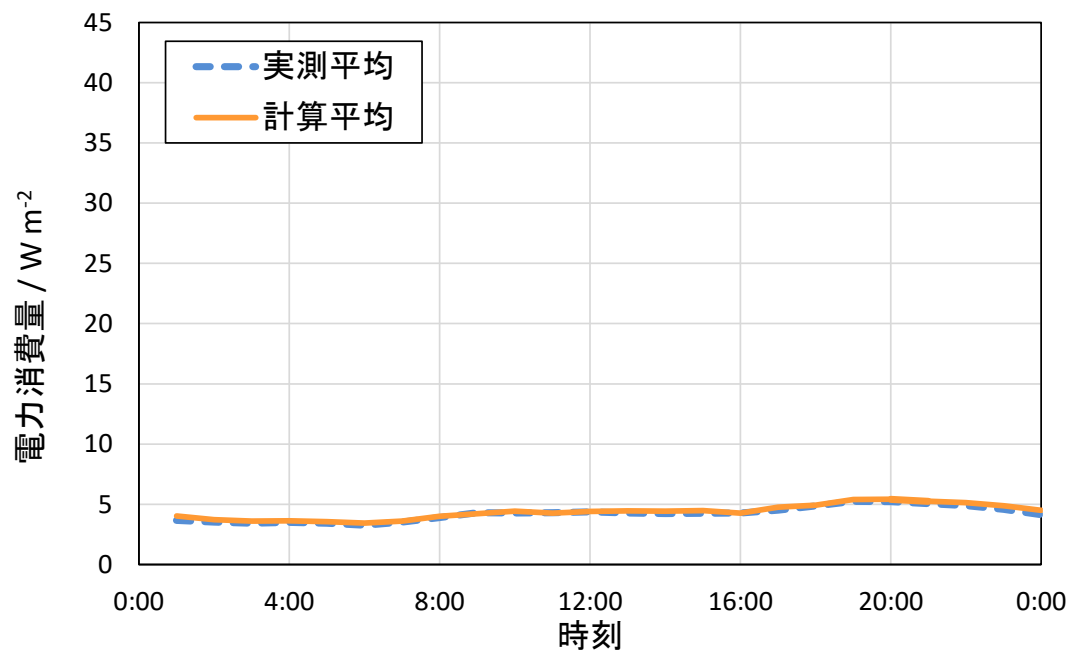


Fig. 4.20 中間期の電力消費量平均値の実測値と計算値の比較（街区 D）

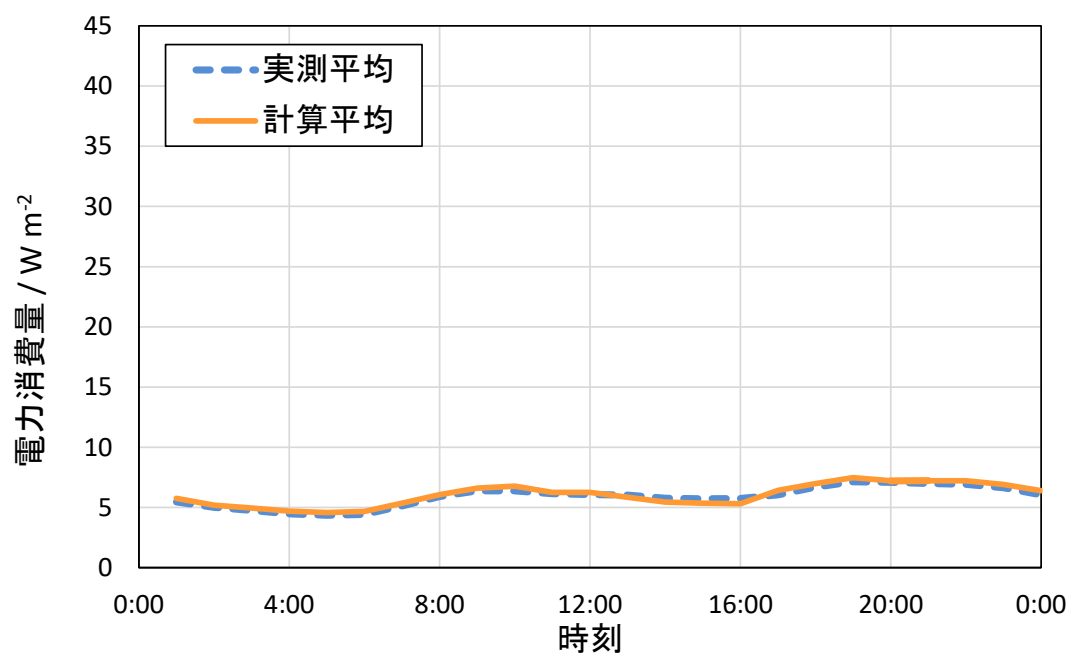


Fig. 4.21 冬季の電力消費量平均値の実測値と計算値の比較（街区 D）

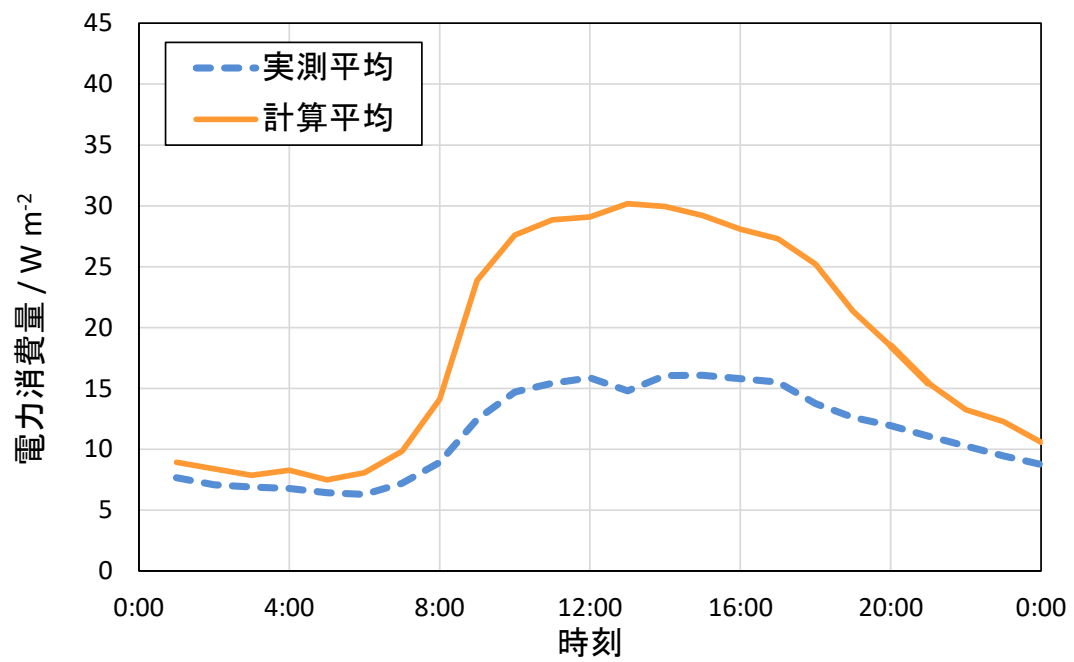


Fig. 4.22 夏季の電力消費量平均値の実測値と計算値の比較（街区 M1）

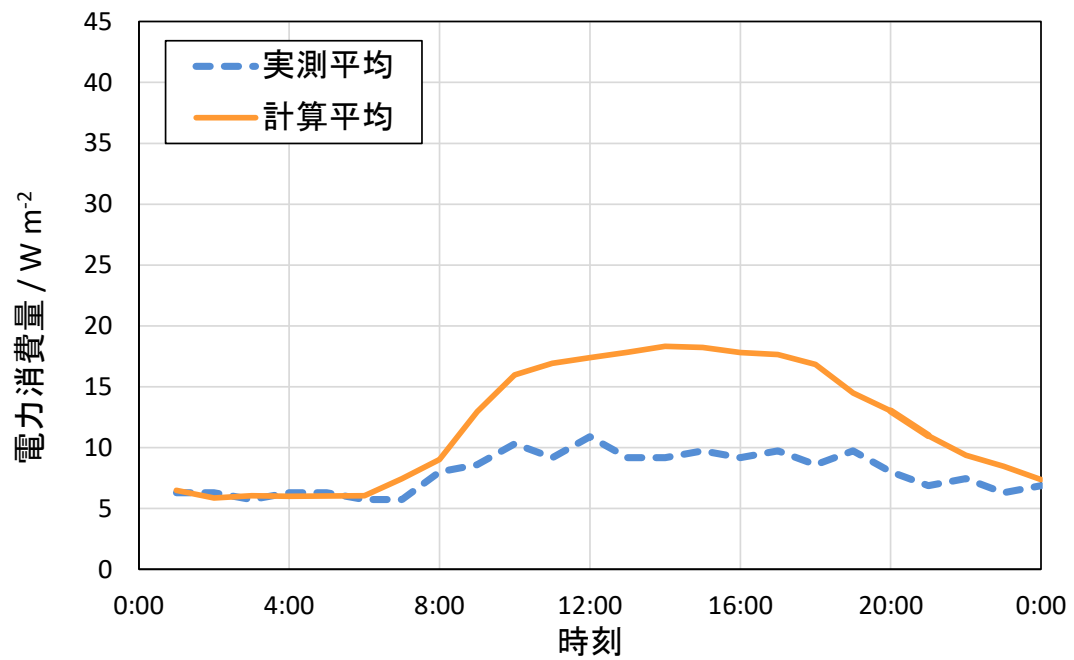


Fig. 4.23 中間期の電力消費量平均値の実測値と計算値の比較（街区 M1）

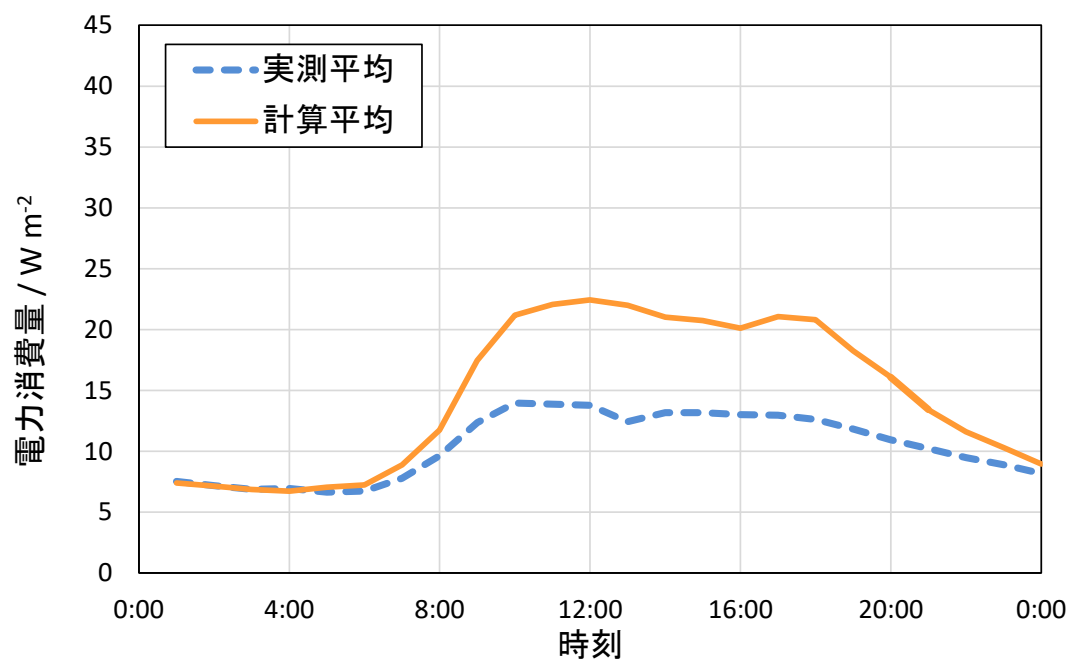


Fig. 4.24 冬季の電力消費量平均値の実測値と計算値の比較（街区 M1）

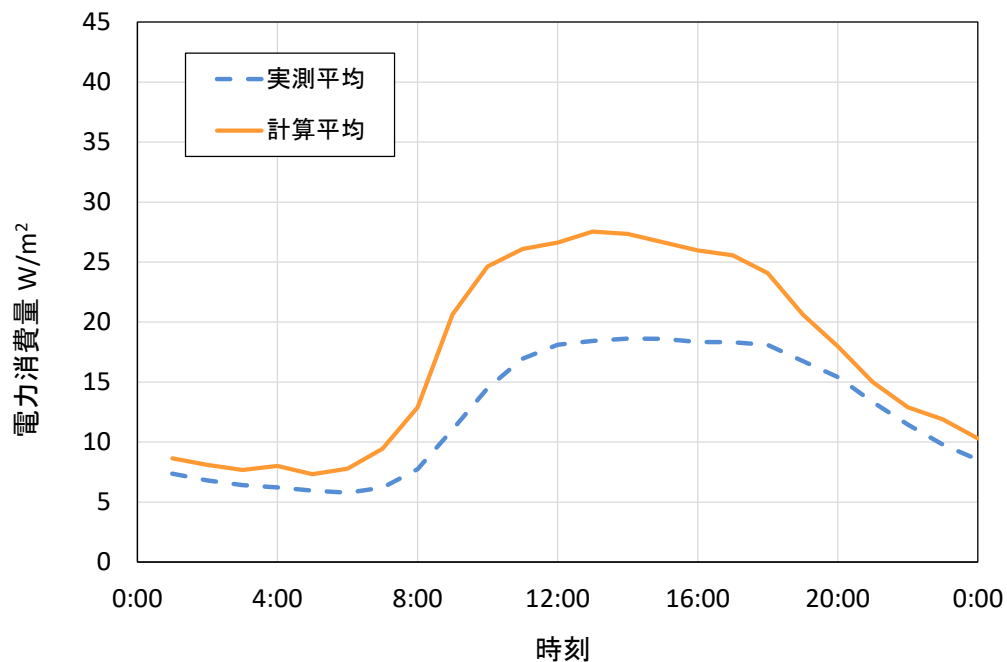


Fig. 4.25 冬季の電力消費量平均値の実測値と計算値の比較（街区 B1）

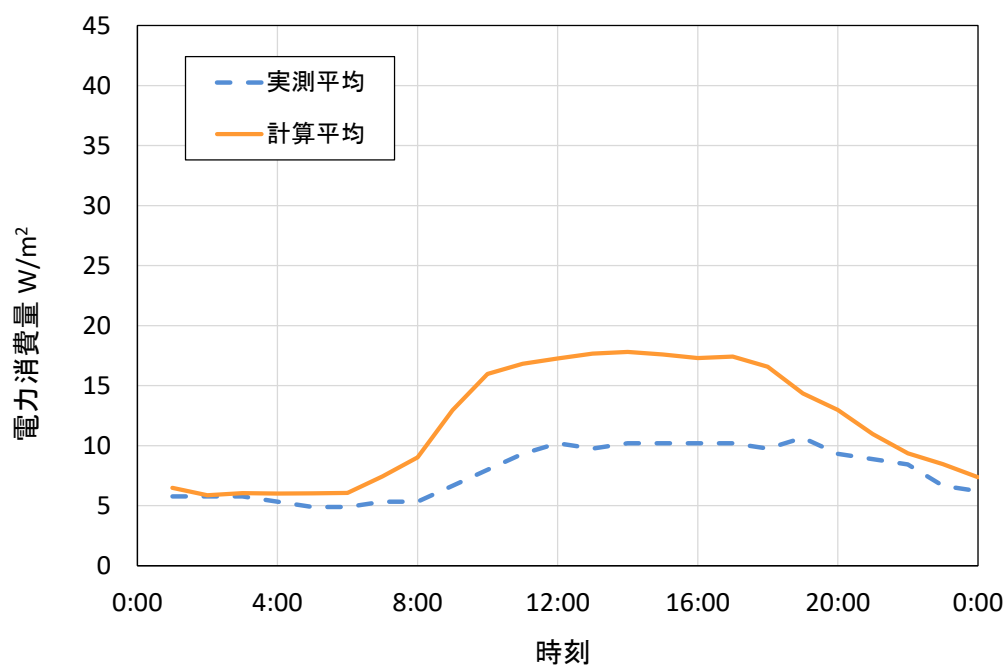


Fig. 4.26 中間期の電力消費量平均値の実測値と計算値の比較（街区 B1）

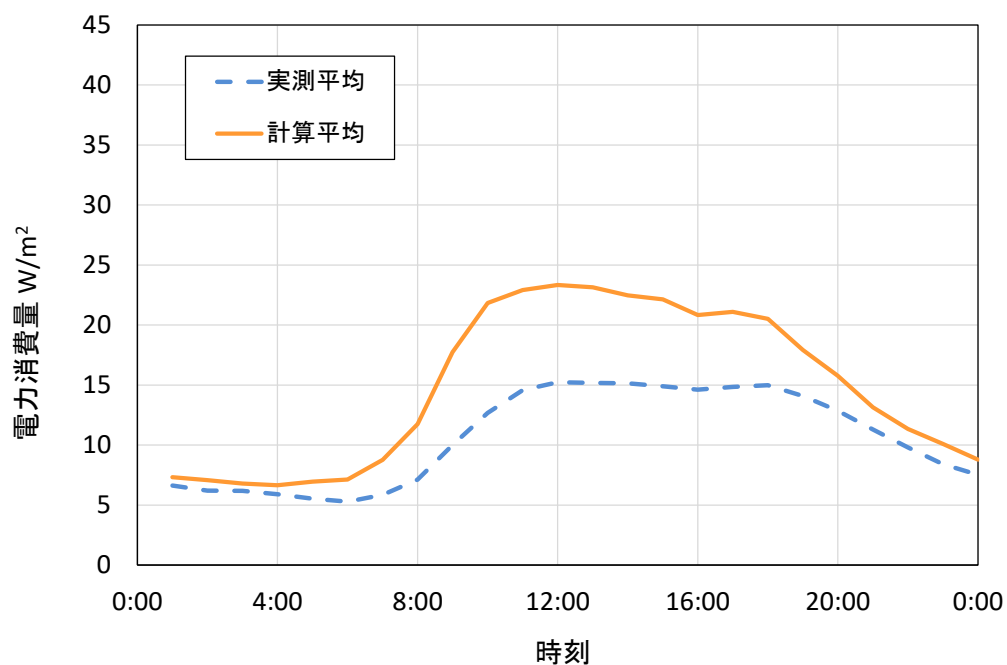


Fig. 4.27 冬季の電力消費量平均値の実測値と計算値の比較（街区 B1）

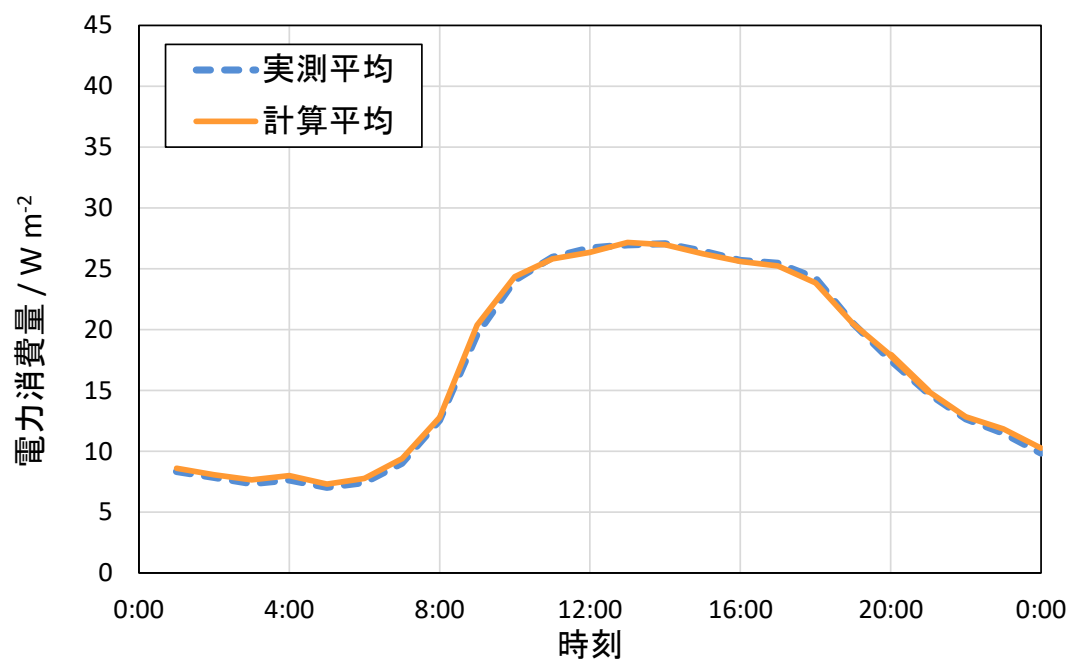


Fig. 4.28 夏季の電力消費量平均値の実測値と計算値の比較（街区 B2）

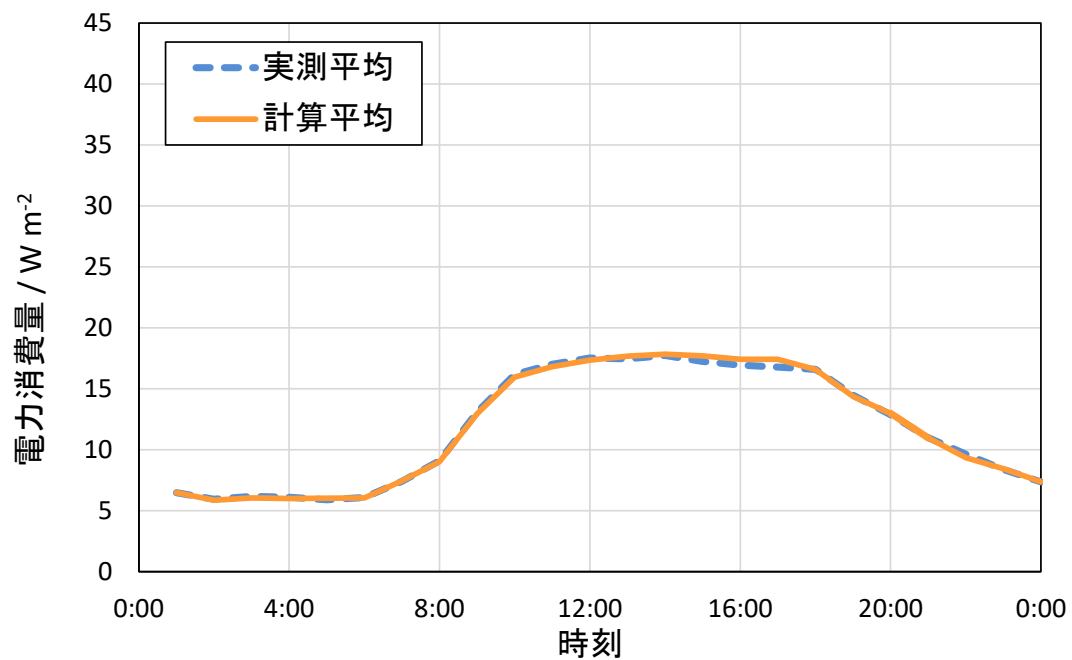


Fig. 4.29 中間期の電力消費量平均値の実測値と計算値の比較（街区 B2）



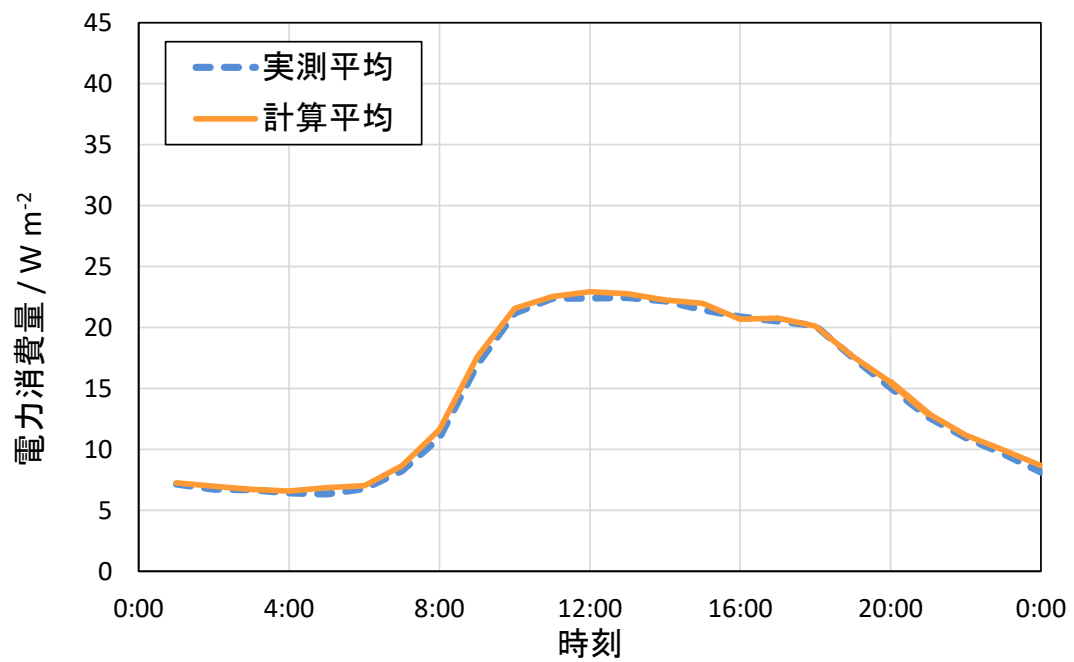


Fig. 4.30 冬季の電力消費量平均値の実測値と計算値の比較（街区 B2）

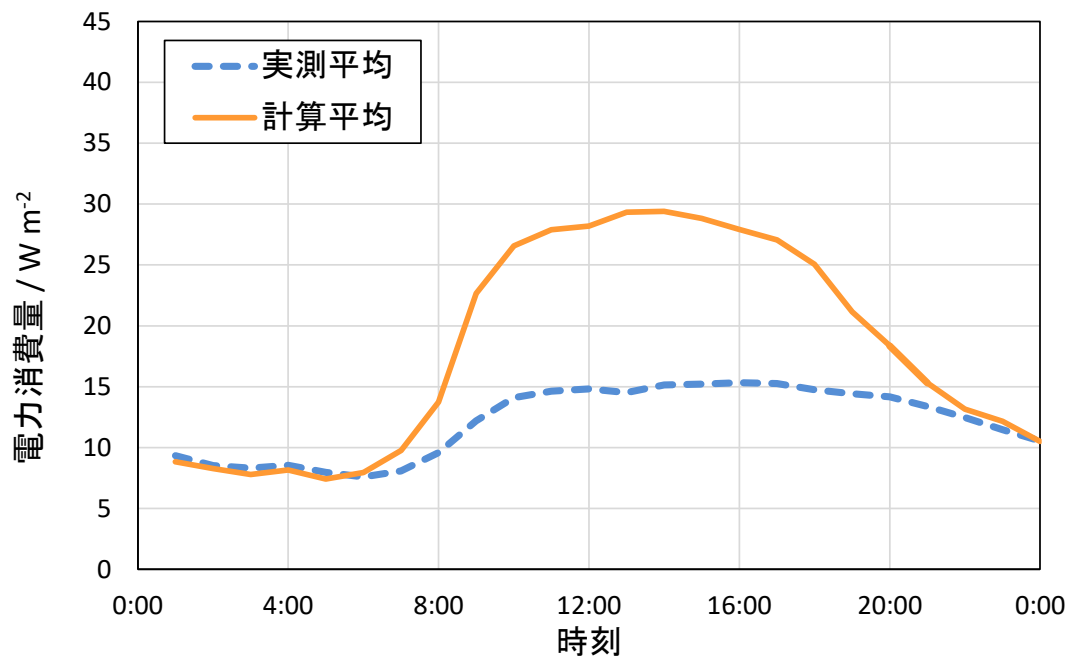


Fig. 4.31 夏季の電力消費量平均値の実測値と計算値の比較（街区 M2）

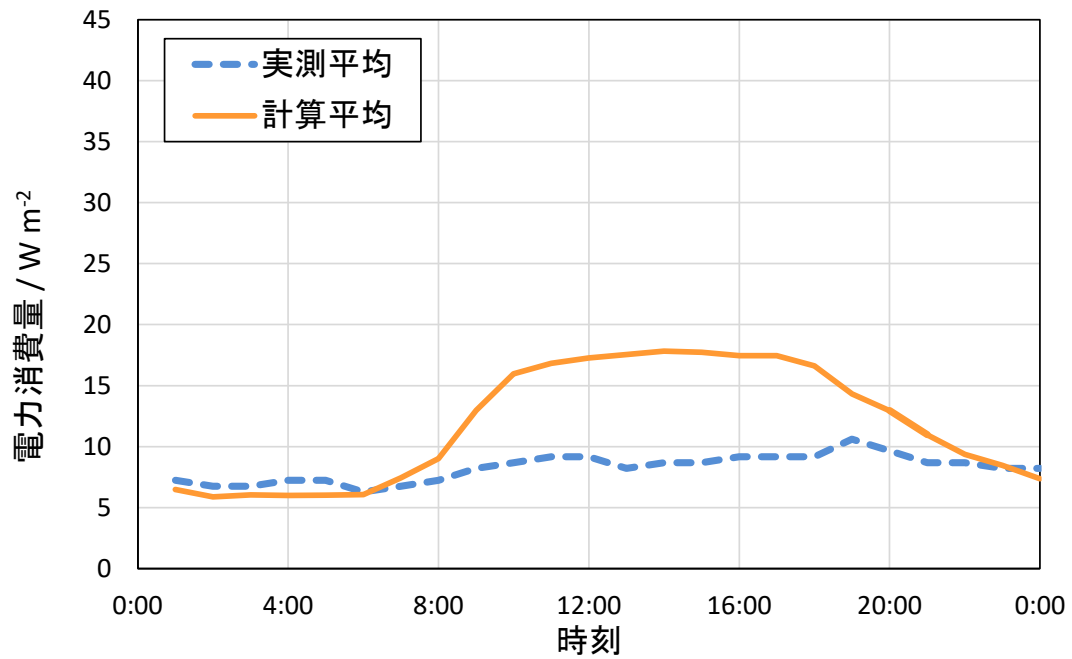


Fig. 4.32 中間期の電力消費量平均値の実測値と計算値の比較（街区 M2）

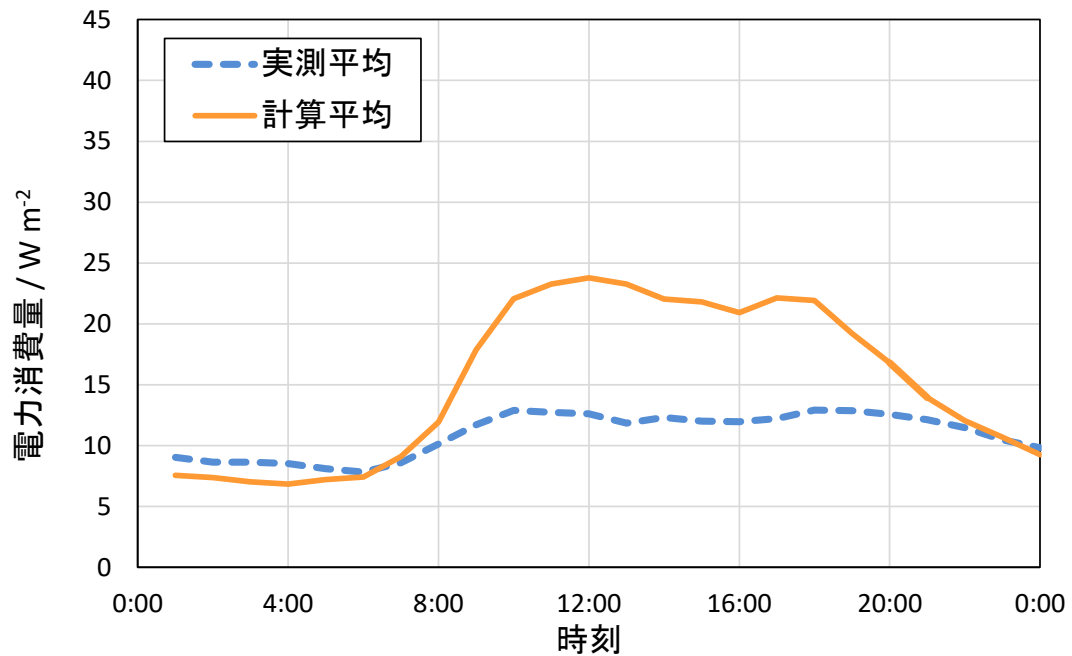


Fig. 4.33 冬季の電力消費量平均値の実測値と計算値の比較（街区 M2）

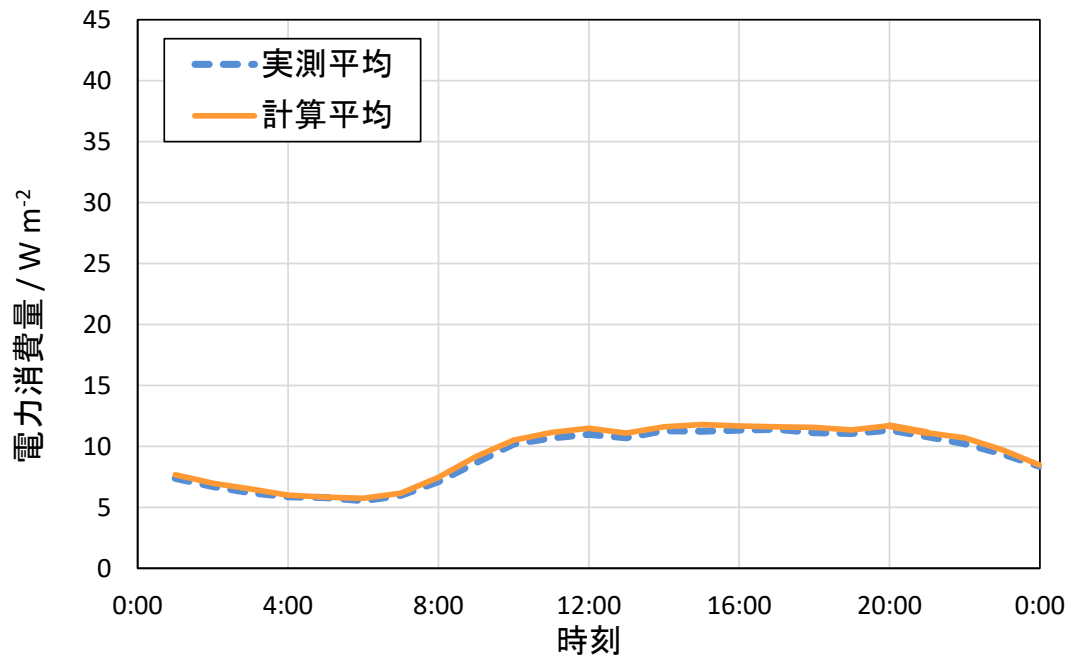


Fig. 4.34 夏季の電力消費量平均値の実測値と計算値の比較（街区 A）

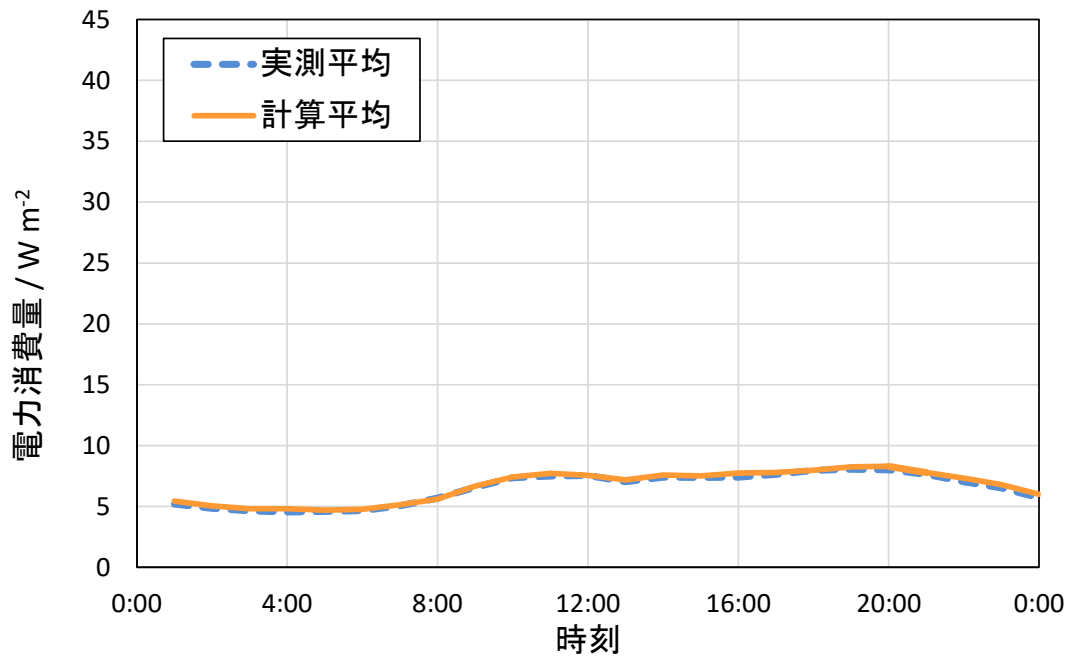


Fig. 4.35 中間期の電力消費量平均値の実測値と計算値の比較（街区 A）

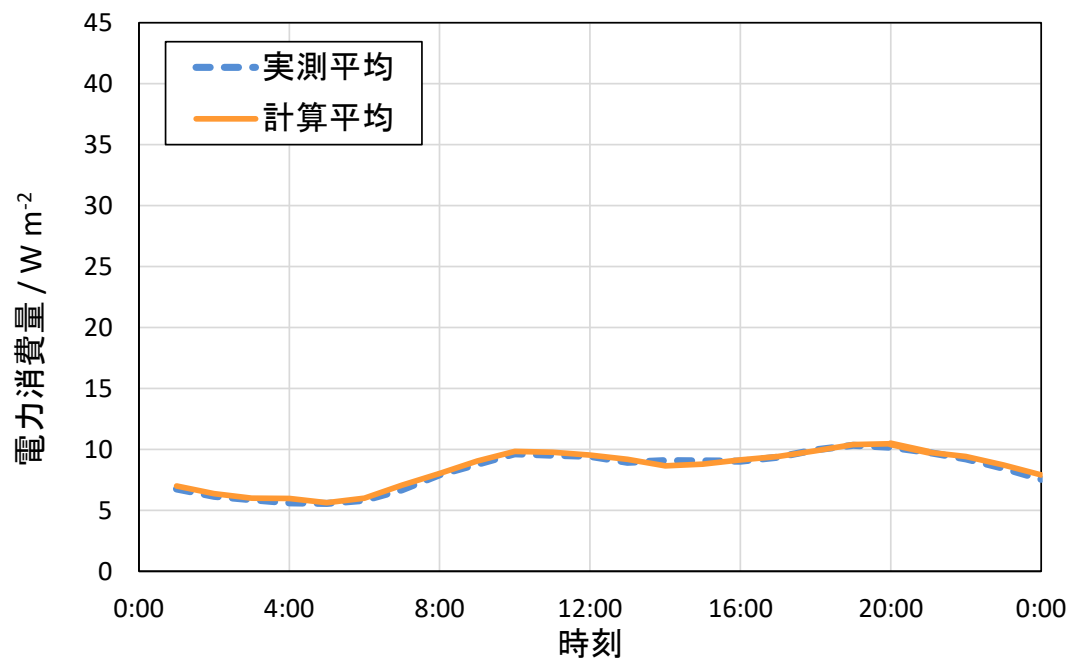


Fig. 4.36 冬季の電力消費量平均値の実測値と計算値の比較（街区 A）

結果として、チューニングをして値を合わせた街区以外では全ての街区で過大評価をし、その差は概ね 30 %～60 %（街区 T を除く）であった。街区 T は運輸部門の建物用途割合が 36 %あり、実測値も他の街区と比べると電力消費量の実測値が極端に低く、異なる挙動を示していた。

Table 4.1 各期間の積算電力消費量の実測値と計算値の差の割合（実測値ベース）

街区	T	D	M2	B1	B2	M1	A
夏季	416 %	4 %	63 %	38 %	1 %	50 %	3 %
中間期	350 %	4 %	39 %	32 %	0 %	38 %	2 %
冬季	373 %	3 %	40 %	40 %	2 %	40 %	2 %

## 4.4 考察

### 4.4.1 ベースロードスケジュールの妥当性の考察

4.2 節にて作成したベースロードスケジュールは実測値をもとに作成したが、この実測値は全てが街区種別（集合住宅、戸建住宅、業務）の用途によって消費された電力ではない。例えば、集合住宅の代表街区である街区 A を挙げると、建物用途割合において集合住宅の占める割合は 33 % であり、残りの用途の影響を大きく受ける。つまり、今回の研究では便宜上街区 A の電力消費量を全て集合住宅で消費されたとみなしスケジュールを作成したが、実際は街区 A の電力消費量の中に戸建住宅や業務用途によって消費された電力消費量も含まれている。特に業務用途による電力消費量は住宅に比べると大きいため、業務用途が含まれている住宅街区は影響を受け、本来のスケジュールの真値（街区種別の用途のみの値）よりも過大評価していることが考えられる。また、電力消費量は在室率と相関関係（比例関係ではないことに留意）にあることが考えられるので、住宅では朝型や夕方型に電力消費のピークが、業務では日中にピークが位置すると考えられる。そのため住宅街区に業務用途が混在すると、日中の電力消費が増えるので電力消費量のピーク位置が変化することが考えられる。今回作成した戸建住宅のベースロードスケジュールは時刻別に見て、ほぼ横ばいのグラフを示したが、これは住宅の朝夕のピークと業務のピークが重なったためではないかと考えられる。

### 4.4.2 空調稼働スケジュールの妥当性の検証

4.3 節にて作成した空調稼働スケジュールの妥当性を住宅の起床在宅率や業務建物の在室スケジュールと比較し妥当性について考える。

夏季の集合住宅街区、戸建住宅街区の冷房稼働スケジュールは日中に小さく、夜間に高い値となった。これは住宅の起床在宅率の傾向と一致する結果となった。また業務街区では日中に高い値を示し、夜間に低い値を示した。これも文献値と同様の傾向が見られた。一方で、文献値では朝夜の在室率は 0 となっているが、実測値ではその時刻においても冷房負荷は確認され、作成した冷房稼働スケジュールはこれを反映した。これは文献値が理想的なオフィスを想定しているのに対し、実測の電力消費量は商業用途や業務種別の中でも様々な細分化された用途を含んでいるためだと考えられる。

冬季の集合住宅街区、戸建住宅街区の暖房稼働スケジュールは夜間に比べ、日中が高くなる結果となった。この理由として、①業務街区が混在していること、②日中は夜間に比べ気温が高く処理すべき熱量が小さいこと、の 2 点が関与していることが考えられる。①に関して、実測値には業務用途の影響が考えられるが、この業務用途のピークは在室率が高い日中に位置する。そのため、住宅用途が 100 % の場合に比べ業務が混在することで、日中の電力消費量は大きくなる。また②に関して、日中は気温が夜間に比べ高く、空調によって処理すべき熱量は小さい。4.3 節の空調スケジュールでは処理すべき熱量に対し空調機

器の COP の逆数と空調稼働スケジュールを乗じ電力消費量を算出しているので、処理すべき熱量が小さく、実測された電力消費量が大きいと空調稼働率は高くなってしまう。以上より、①の原因である、業務街区の影響を取り除くことで、現実には則した稼働スケジュールになると考えられる。

#### 4.4.3 電力消費量の実測値と計算値の比較

4.4 節にて各街区においてシミュレーションをおこなった結果、各期間の積算電力消費量の実測値と計算値との差は実測値ベースで概ね 30 %～60 % (街区 B1, M1, M2) となった。この理由について考察する。

現行の CM-BEM では最大の建物用途割合に応じて入力パラメーターを与える。入力パラメーターは集合住宅、戸建住宅、業務街区の 3 種類を整備しており、いずれかの値を入力する。そのため、混在街区 (M1, M2) ではそれぞれの最大建物用途割合が 10%～30%にも関わらず、それらの建物用途割合をもとにその街区がどのような街区なのかを決定する。したがって混在街区を例に挙げると、実際には街区に業務建物が少ないにも関わらず、街区にある建物を全て業務建物として仮定している (詳しい計算過程に関しては 2.5.1 節を参照)。実際の街区では単一の建物用途はほぼ存在せず、建物用途が混在した状態を再現できるよう改善する必要があるといえる。

## 第5章 新モデル（汎用モデル）の開発

第 4 章にて従来モデルでは、建物用途割合を参考に代表街区（3 街区；集合住宅街区，戸建住宅街区，業務街区）を設定し、各代表街区における橋本[49]の解析結果をベースロードスケジュールとして設定した。また、各代表街区の夏季および冬季の実測値から空調稼働スケジュールを作成した。そして作成したベースロード・空調稼働スケジュールを用い、代表街区以外の街区について電力消費量の推定をおこなった。結果として、街区 M1，街区 M2，街区 B1 における夏季・中間期・冬季積算電力消費量の実測値と計算値の差は、実測値ベースで概ね 40 %～60 %（Table 4.1 参照）であった。考察として、街区種別を選別し街区内を単一の街区種別とする仮定が適切でないこと，作成したスケジュールには他の街区種別の影響を受けていることが考えられた。

本章では、第 4 章での結果および考察を踏まえたモデル開発をおこなった。実際の街区では様々な用途の建物が混在しているが、この混在性を考慮したモデルを開発することで CM-BEM の汎用性向上を図る。新汎用モデルの概要については 2.5 節にて記載した。第 5 章ではベースロードスケジュールの再検討をおこない、作成したスケジュールを用い 7 街区において計算をおこなった。

## 5.1 汎用ベースロードスケジュールの作成

第 4 章にて作成したベースロードスケジュールは他の街区の影響（例えば集合街区のベースロードスケジュールであれば業務や集合住宅用途の影響）を受けることが考えられた。そのため、他の用途の影響を受けていないベースロードスケジュール（新汎用ベースロードスケジュール）の作成をおこなう。新しい汎用ベースロードスケジュールは以下の式によって求めた。

$$E_A = a_A \cdot E_{0A} + a_D \cdot E_{0D} + a_B \cdot E_{0B} + a_O \cdot E_{0O} \quad (5.1)$$

$$E_D = a_A \cdot E_{0A} + a_D \cdot E_{0D} + a_B \cdot E_{0B} + a_O \cdot E_{0O} \quad (5.2)$$

$$E_{B1} = a_A \cdot E_{0A} + a_D \cdot E_{0D} + a_B \cdot E_{0B} + a_O \cdot E_{0O} \quad (5.3)$$

$$E_{B2} = a_A \cdot E_{0A} + a_D \cdot E_{0D} + a_B \cdot E_{0B} + a_O \cdot E_{0O} \quad (5.4)$$

$$E_{M1} = a_A \cdot E_{0A} + a_D \cdot E_{0D} + a_B \cdot E_{0B} + a_O \cdot E_{0O} \quad (5.5)$$

$$E_{M2} = a_A \cdot E_{0A} + a_D \cdot E_{0D} + a_B \cdot E_{0B} + a_O \cdot E_{0O} \quad (5.6)$$

### 【添字】

- A: 集合住宅
- D: 戸建住宅
- B: 業務
- O: その他用途

### 【文字】

- $E$ : 電力消費量実測値 [W m<sup>2</sup>]
- $E_0$ : 汎用ベースロード [W m<sup>2</sup>]
- $a$ : 建物用途割合 [-]

各街区の中間期実測値と各街区の建物用途割合を上記の式にあてはめ、連立方程式を解く要領で集合住宅、戸建住宅、業務の汎用ベースロードスケジュールを求める。しかし、その他用途のベースロード $E_{0O}$ は現行の CM-BEM で対象としている街区種別に当てはまらず、建築物の物性値や空調機器の設定値といった入力パラメーターの整備ができていないため、本研究では用いない。Fig. 5.1-Fig. 5.3 に集合住宅、戸建住宅、業務街区の汎用ベースロードを曜日ごとに示す。



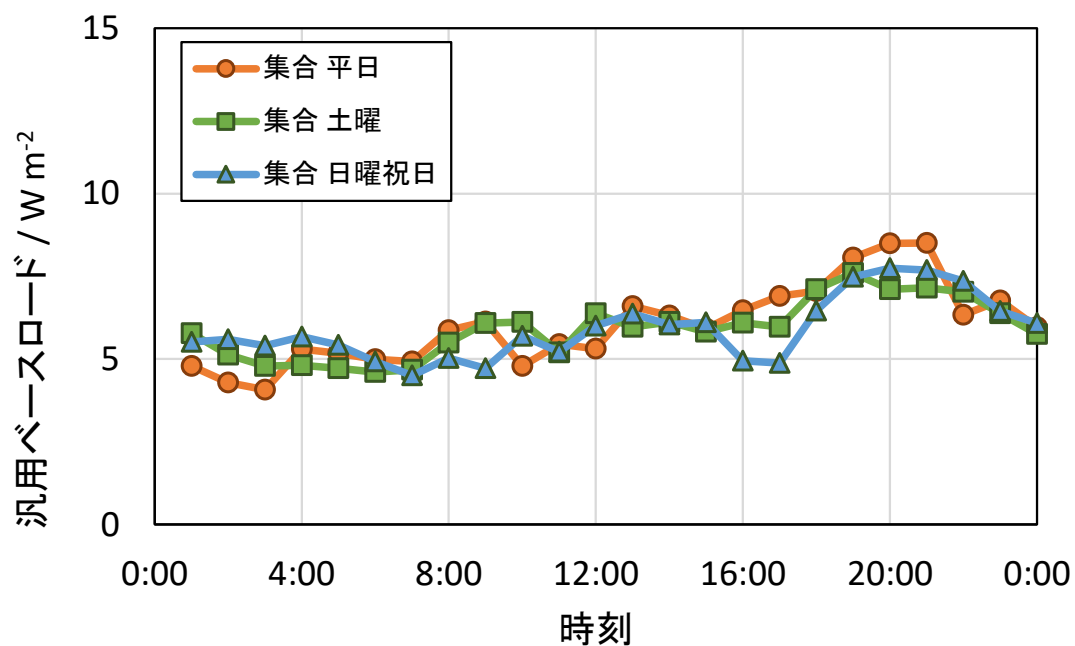


Fig. 5.1 集合住宅街区における各曜日のベースロードスケジュール

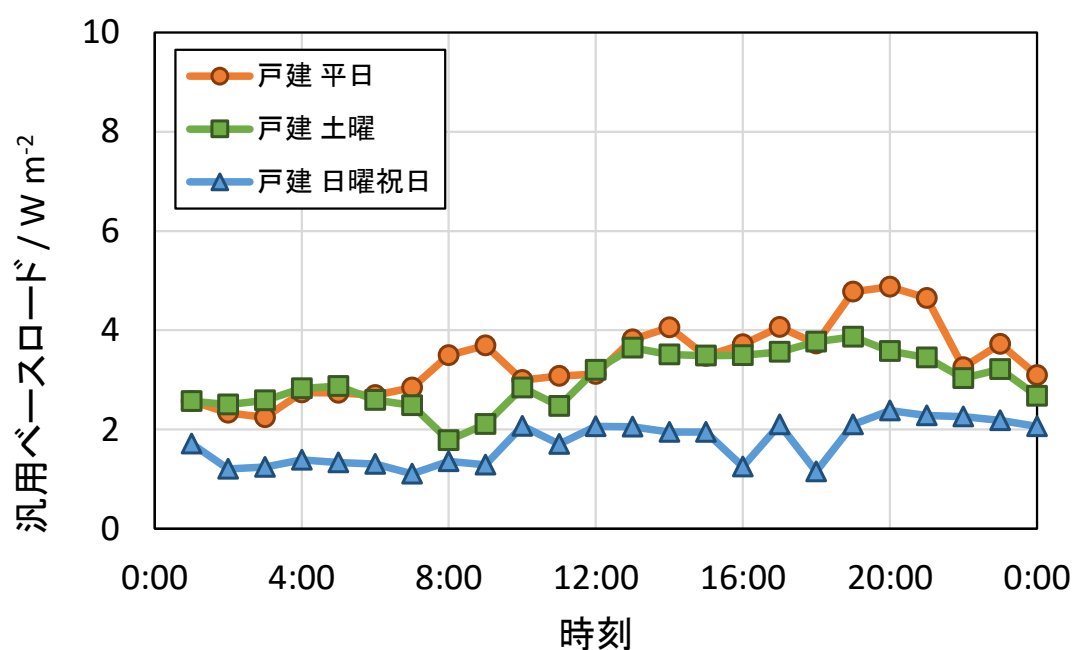


Fig. 5.2 戸建住宅街区における各曜日のベースロードスケジュール

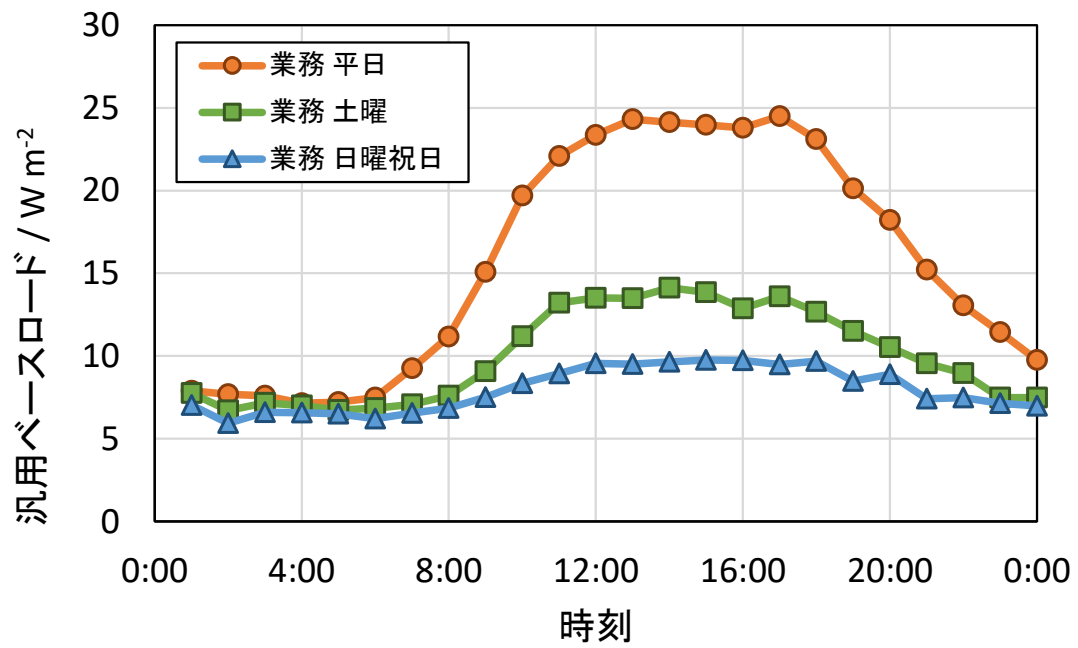


Fig. 5.3 業務街区における各曜日のベースロードスケジュール

## 5.2 空調稼働スケジュールの作成

第 4 章にて空調稼働スケジュールを作成したが、ベースロードスケジュールと同様に他の街区の影響を受けることが考えられた。そのため、他の用途の影響を受けていない空調スケジュールの作成が必要だが、4.2 節で述べたように夏季の電力消費量はベースロードと空調による電力消費量の和である。5.1 節で作成したベースロードスケジュールは現段階で誤差が生じる（5.4 節で後述）ので、空調による電力消費量のみの値を参考に空調スケジュールを作成することは難しい。したがって、本研究では便宜上、第 4 章で作成した空調スケジュールを使用した。

## 5.3 街区種別割合の算出

新モデルでは大気への排熱のフィードバック、電力消費量に対し、街区の土地用途の割合を乗じることで各種建物の混在を表現する。そのためには各街区について土地用途割合を整備する必要がある。Table 3.1 には調査範囲の建物用途割合を示した。Table 3.1 には分類する戸建住宅、集合住宅、業務だけでなく、商業や工場、運輸なども存在していることが確認できる。本研究では戸建住宅、集合住宅、業務のみデータ整備（入力データ；建築物の物性値やスケジュールデータなど）をおこなっているため、その他の用途は除き 3 種類の街区種別の合計を 100 %とした。Table 5.1 に新モデルにて用いる延床面積割合を示す。

Table 5.1 新モデルにて用いる延床面積割合

	集合住宅	戸建住宅	業務街区
A	0.47714	0.407031	0.115829
D	0.40576	0.507671	0.086569
B1	0.10761	0.004686	0.887704
B2	0.012252	0.002566	0.985182
M1	0.489106	0.25159	0.259304
M2	0.434578	0.418369	0.147052
T	0.504243	0	0.495757

## 5.4 新モデルの電力消費量推定

5.1 節にて作成したベースロードスケジュール，5.3 節にて作成した街区種別割合を入力条件として、新モデルの電力消費量推定をおこなった。Fig. 5.4-Fig. 5.24 に各街区における夏季，中間期，冬季の電力消費量平均値の実測値と計算値の比較を示す。さらに計算した積算電力消費量（実測値）と実測の積算電力消費量の差分を実測値に対する割合で検証した。結果を Table 5.2 に示す。従来モデルではチューニングをしていない代表街区以外の街区で概ね 30 %-60 %の誤差がであったが、新汎用モデルでは 10 %-40 %ほどとなった。建物が混在した状態を再現することにより、実測値と計算値の差は小さくなったと考えられる。

Table 5.2 新モデルでの積算電力消費量における実測値に対する計算値の割合

街区	T	D	M2	B1	B2	M1	A
夏季	281 %	32 %	-29 %	33 %	1 %	-16 %	-9 %
中間期	252 %	30 %	-30 %	39 %	11 %	-15 %	-9 %
冬季	257 %	21 %	-21 %	31 %	2 %	-18 %	-9 %

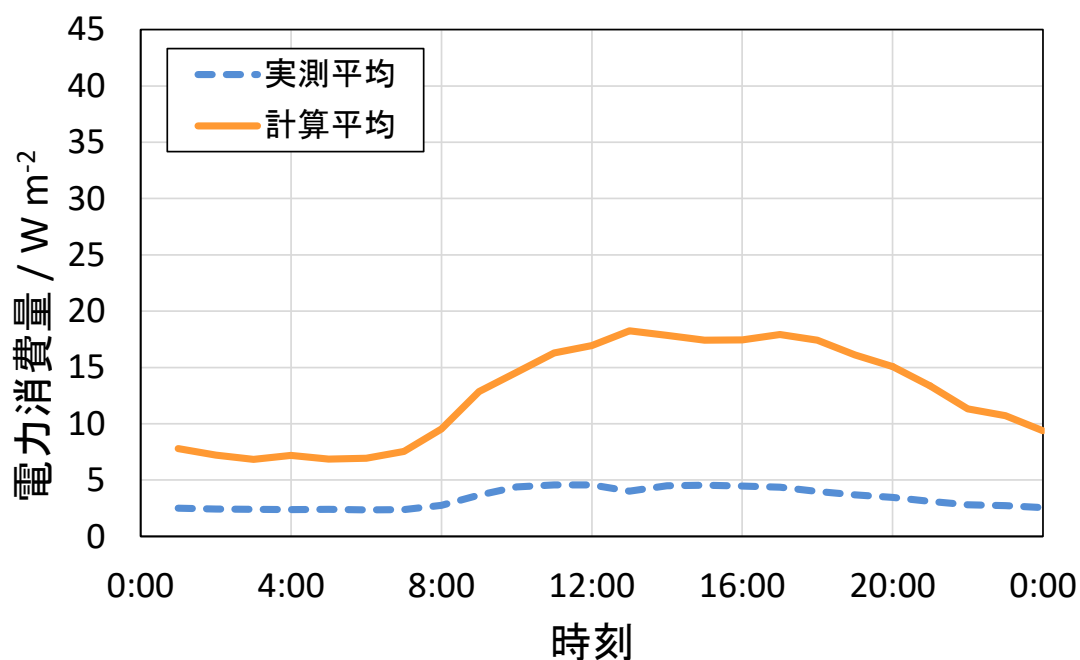


Fig. 5.4 夏季の電力消費量平均値の実測値と計算値の比較（街区 T）

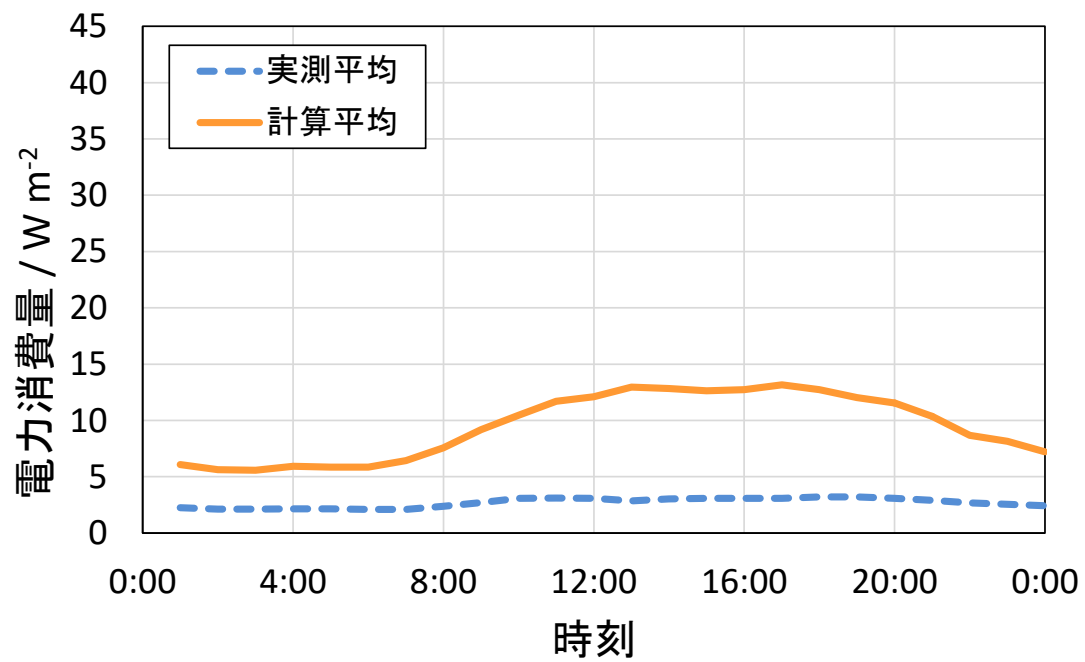


Fig. 5.5 中間期の電力消費量平均値の実測値と計算値の比較（街区 T）

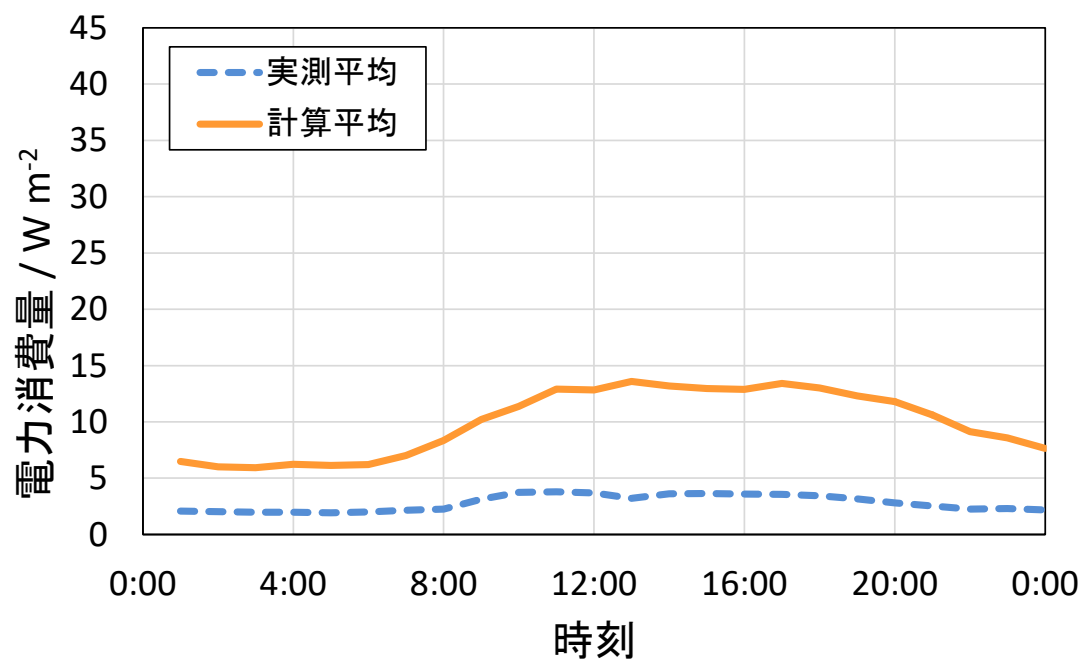


Fig. 5.6 冬季の電力消費量平均値の実測値と計算値の比較（街区 T）

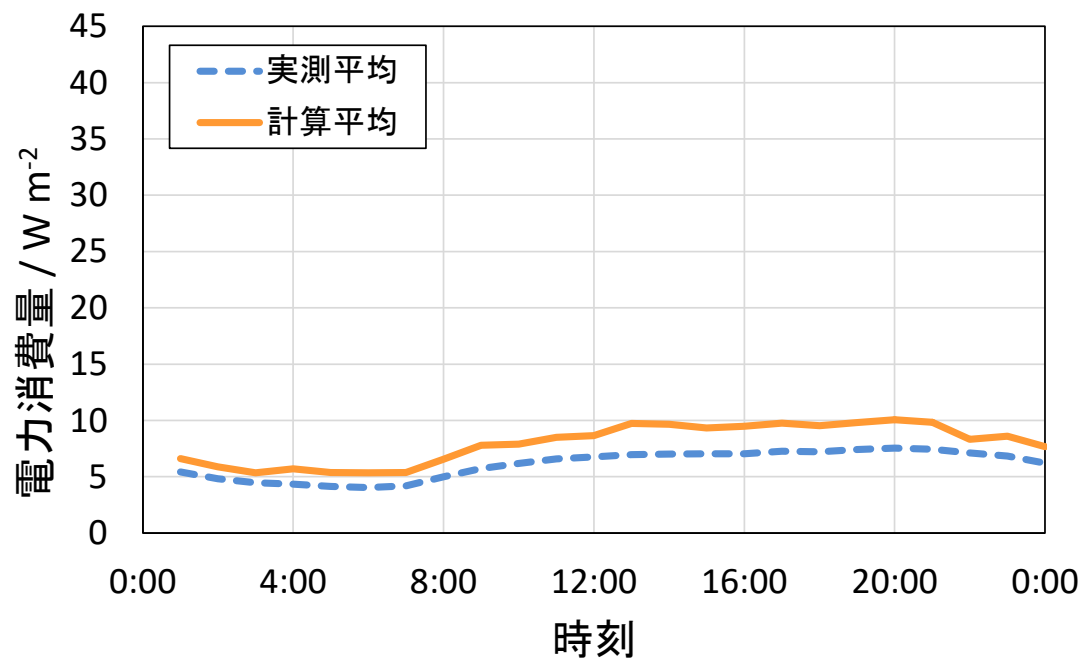


Fig. 5.7 冬季の電力消費量平均値の実測値と計算値の比較（街区 D）

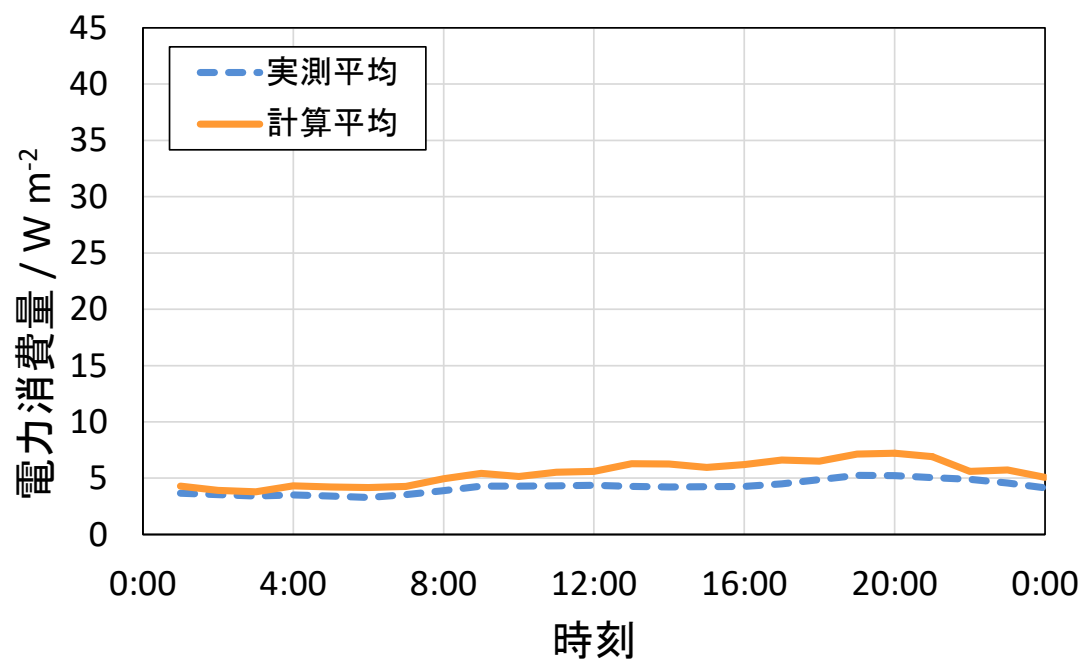


Fig. 5.8 中間期の電力消費量平均値の実測値と計算値の比較（街区 D）

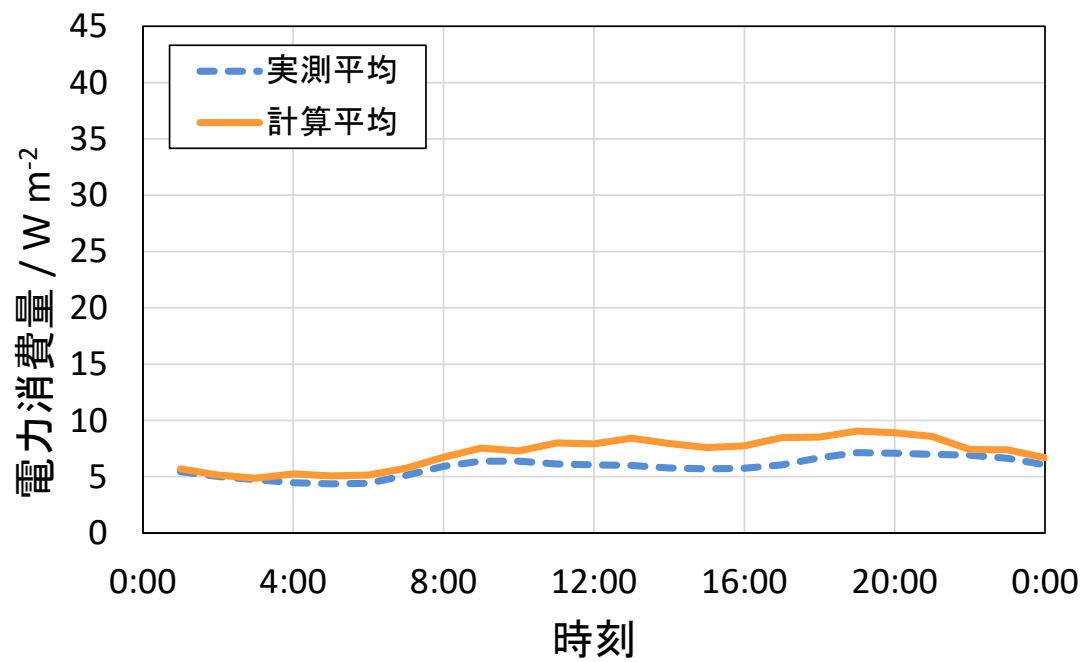


Fig. 5.9 冬季の電力消費量平均値の実測値と計算値の比較（街区 D）

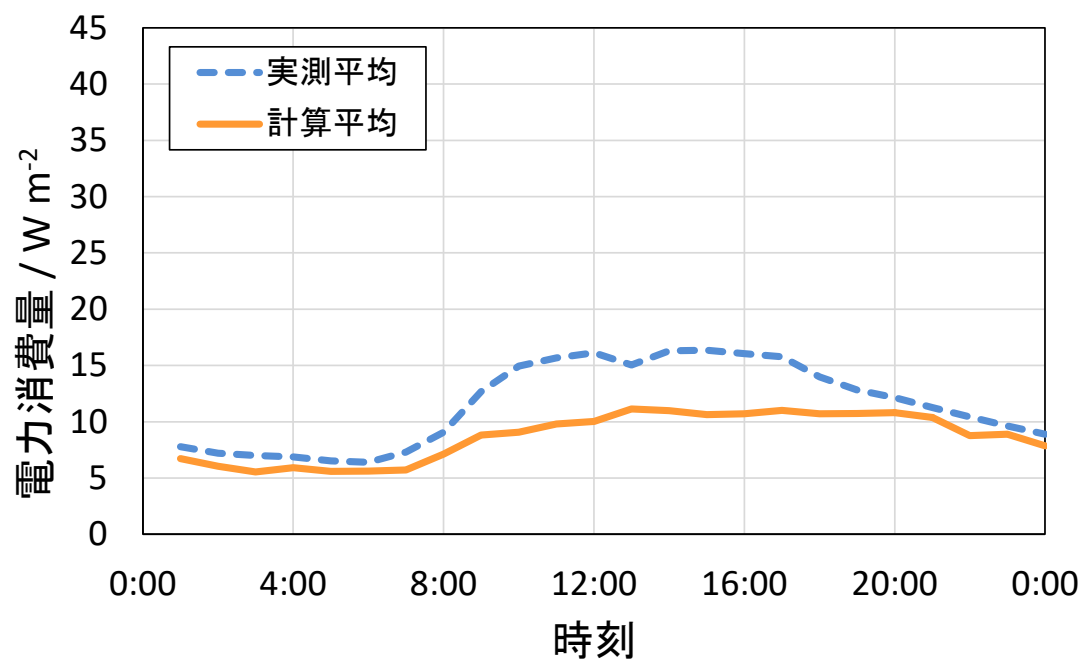


Fig. 5.10 夏季の電力消費量平均値の実測値と計算値の比較（街区 M2）

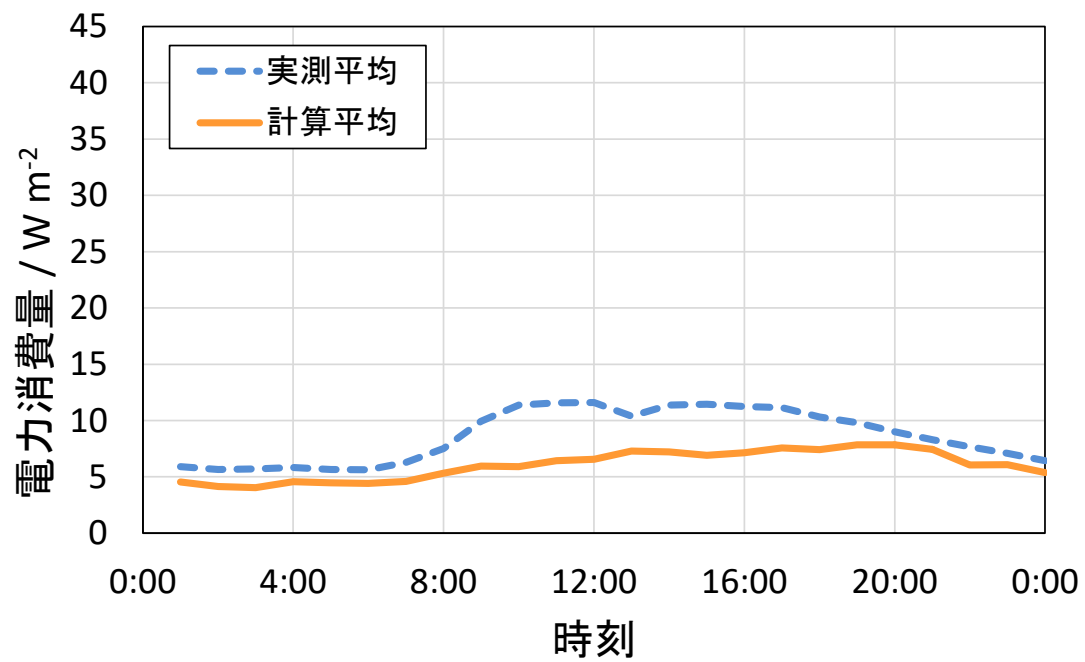


Fig. 5.11 中間期の電力消費量平均値の実測値と計算値の比較（街区 M2）

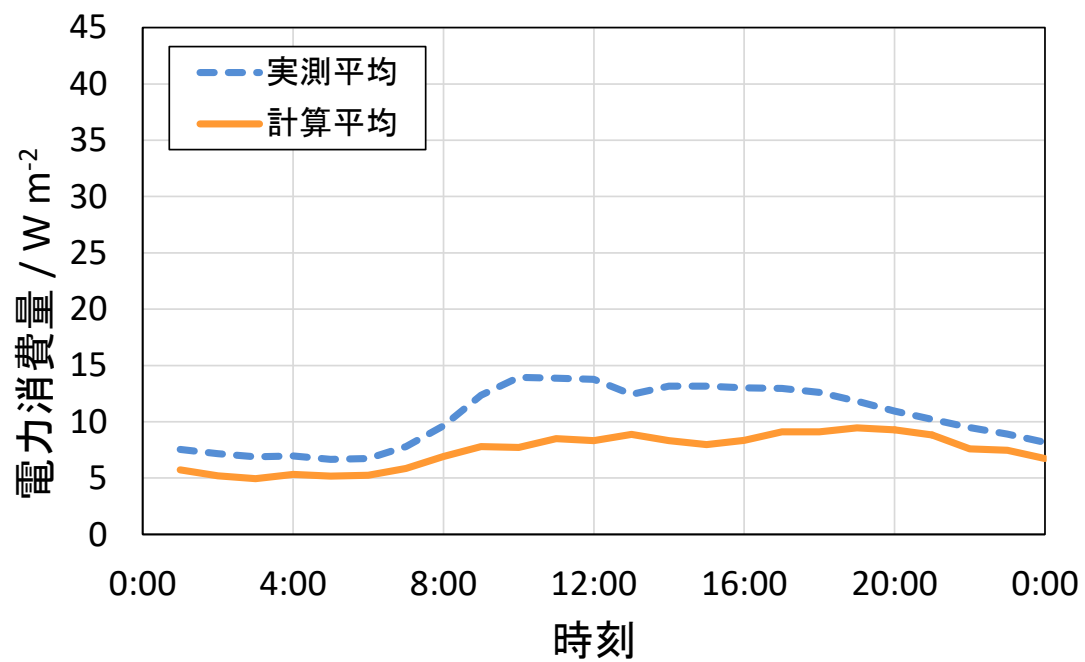


Fig. 5.12 冬季の電力消費量平均値の実測値と計算値の比較（街区 M2）



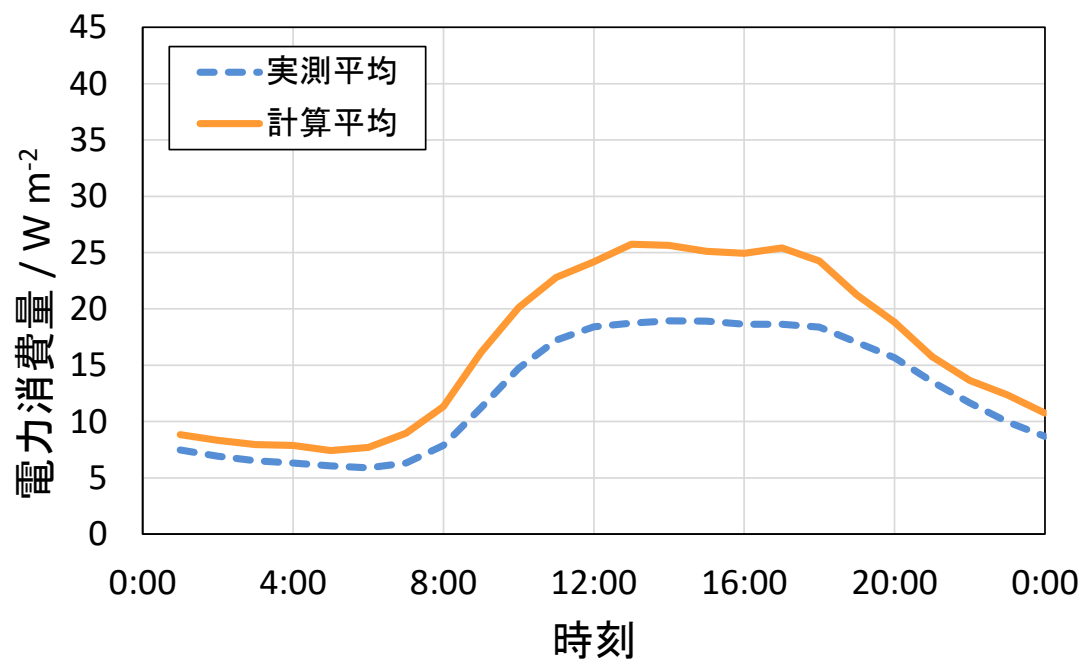


Fig. 5.13 夏季の電力消費量平均値の実測値と計算値の比較（街区 B1）

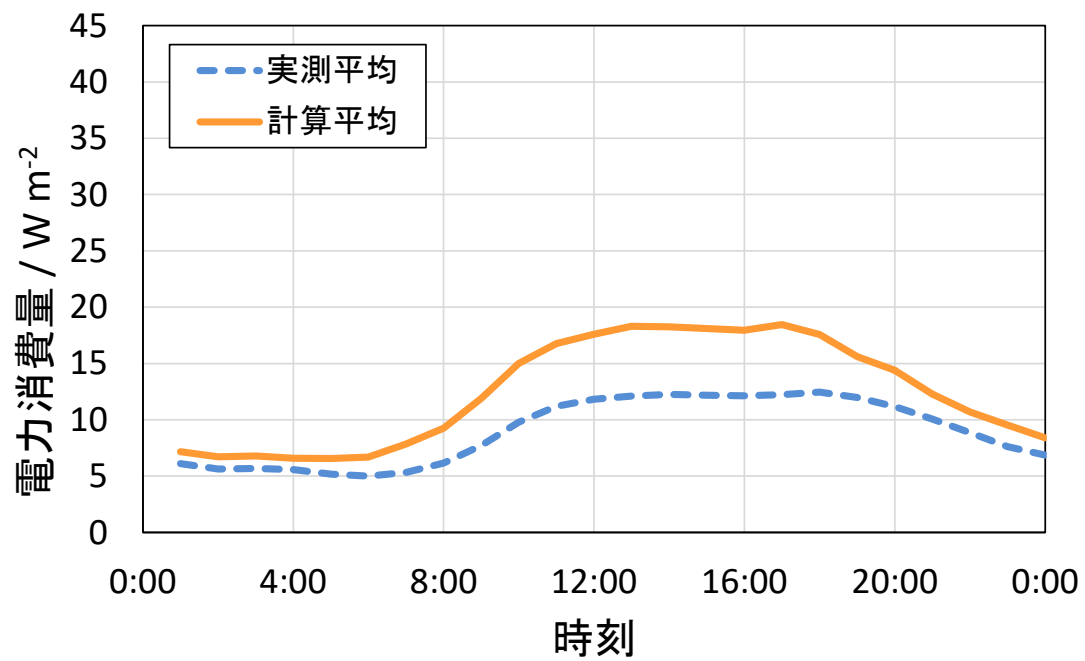


Fig. 5.14 中間期の電力消費量平均値の実測値と計算値の比較（街区 B1）

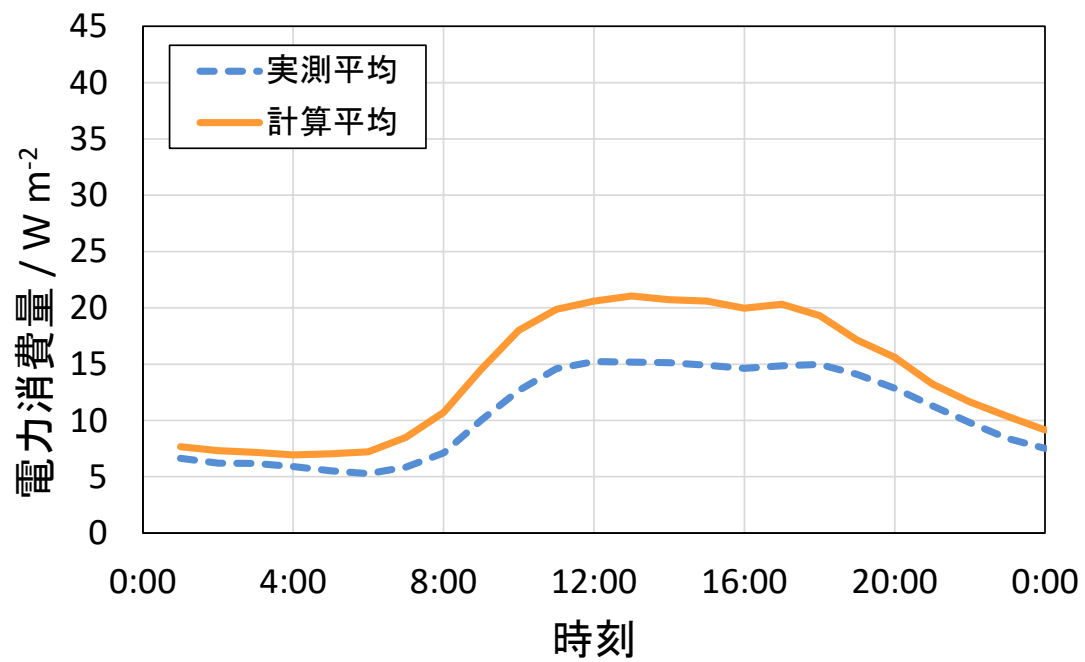


Fig. 5.15 冬季の電力消費量平均値の実測値と計算値の比較（街区 B1）

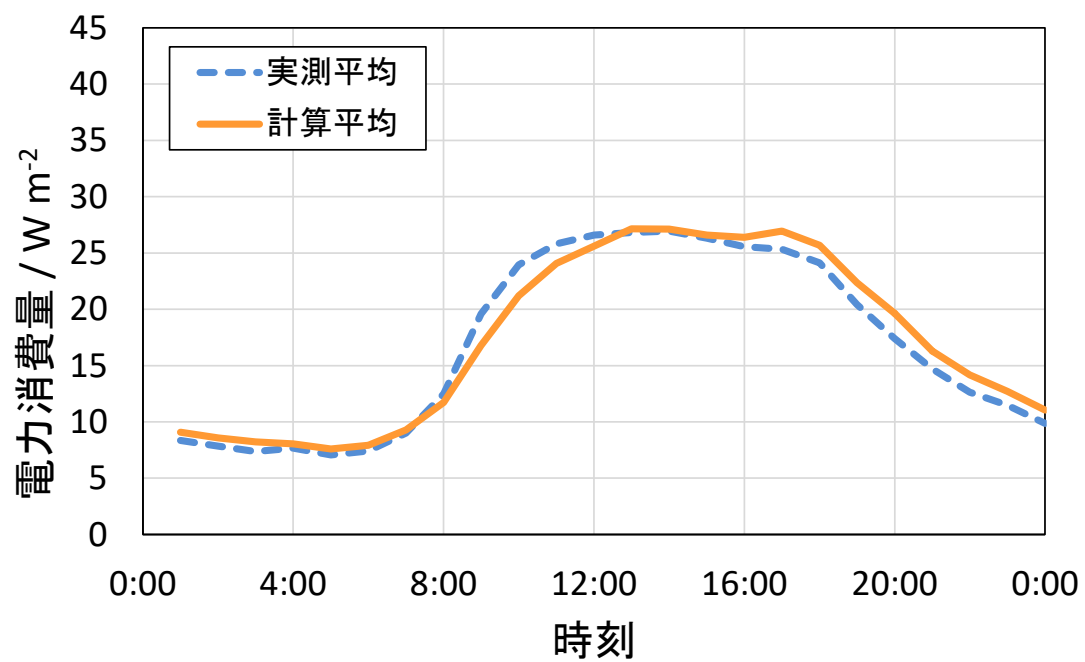


Fig. 5.16 夏季の電力消費量平均値の実測値と計算値の比較（街区 B2）

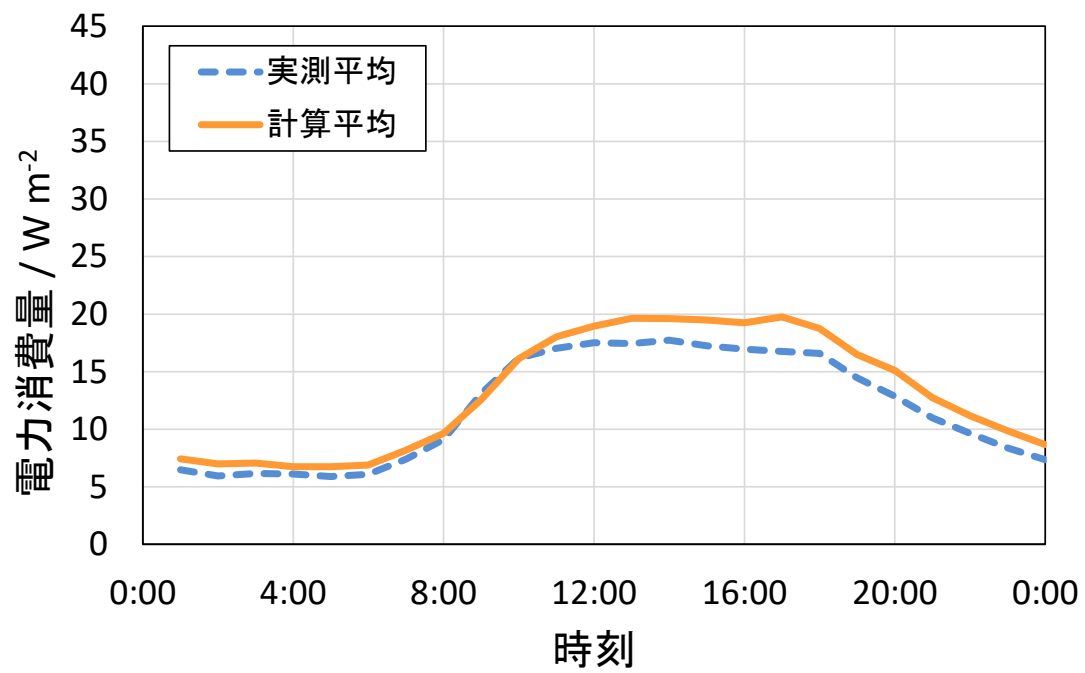


Fig. 5.17 中間期の電力消費量平均値の実測値と計算値の比較（街区 B2）

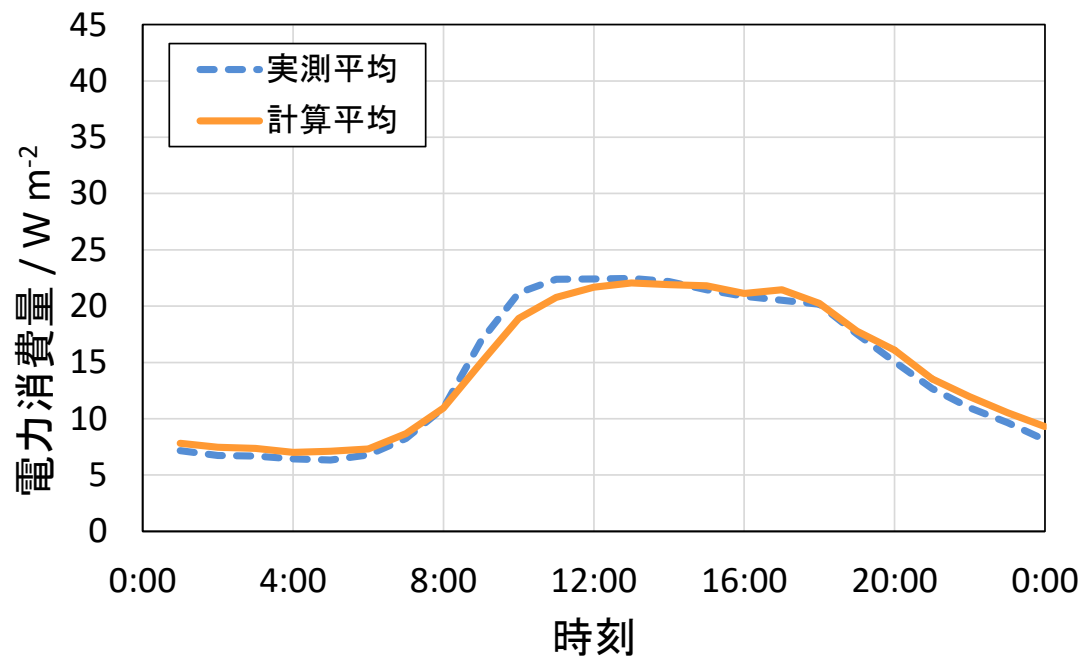


Fig. 5.18 冬季の電力消費量平均値の実測値と計算値の比較（街区 B2）

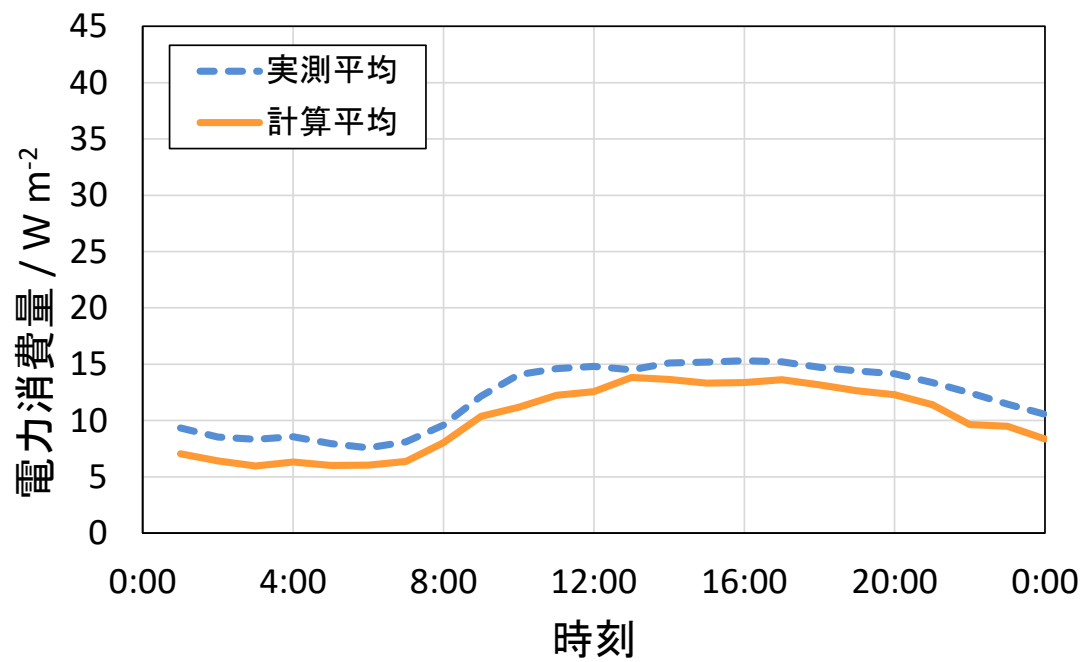


Fig. 5.19 夏季の電力消費量平均値の実測値と計算値の比較（街区 M1）

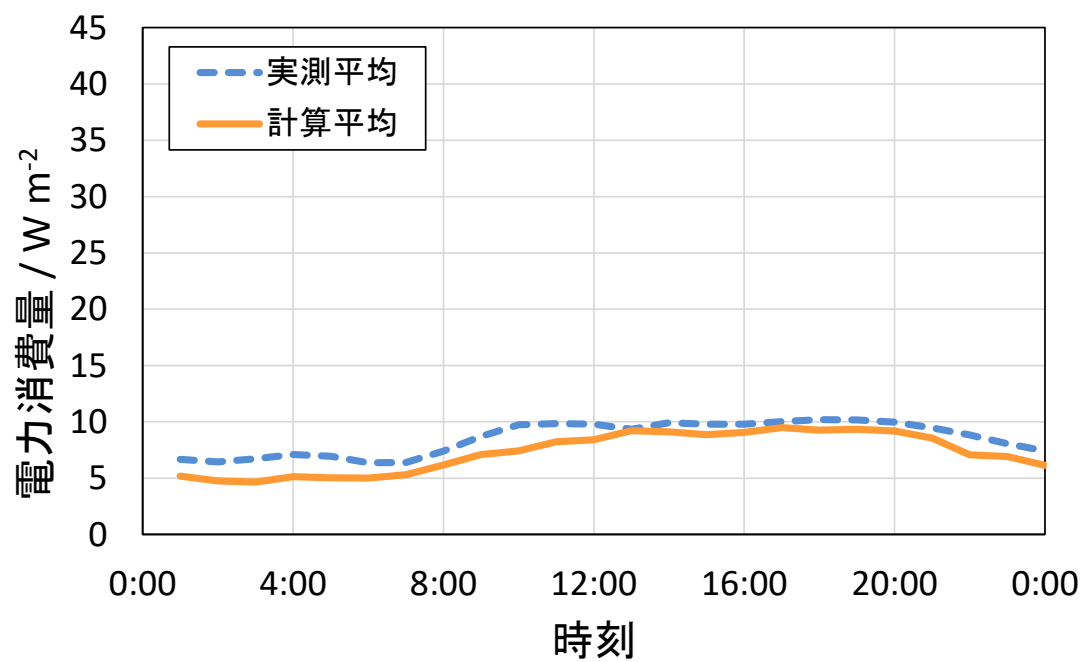


Fig. 5.20 中間期の電力消費量平均値の実測値と計算値の比較（街区 M1）

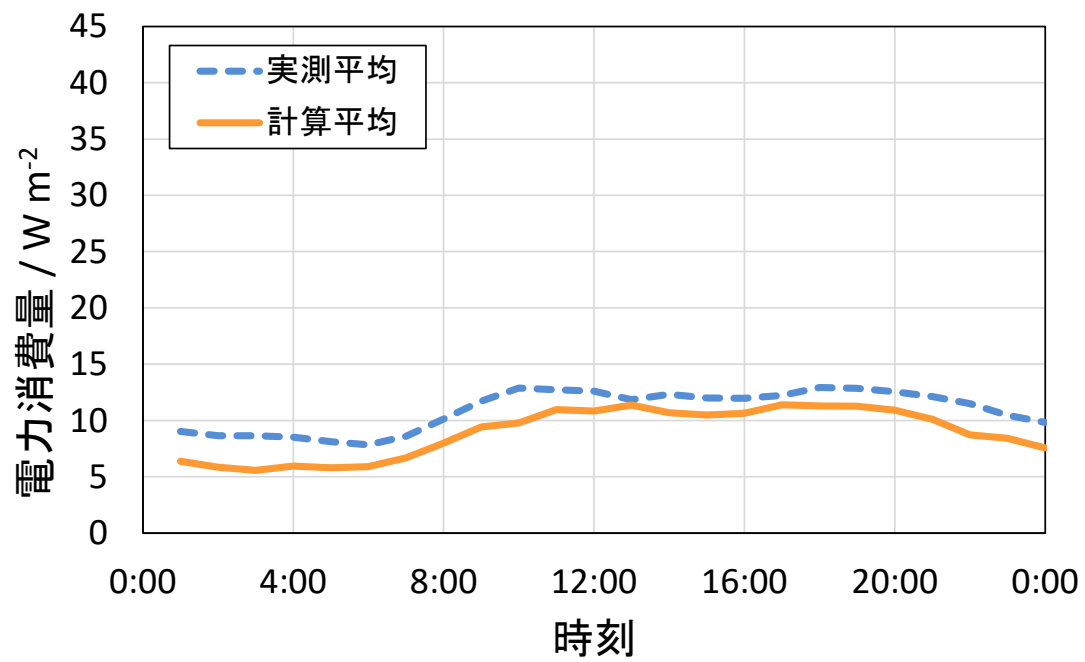


Fig. 5.21 冬季の電力消費量平均値の実測値と計算値の比較（街区 M1）

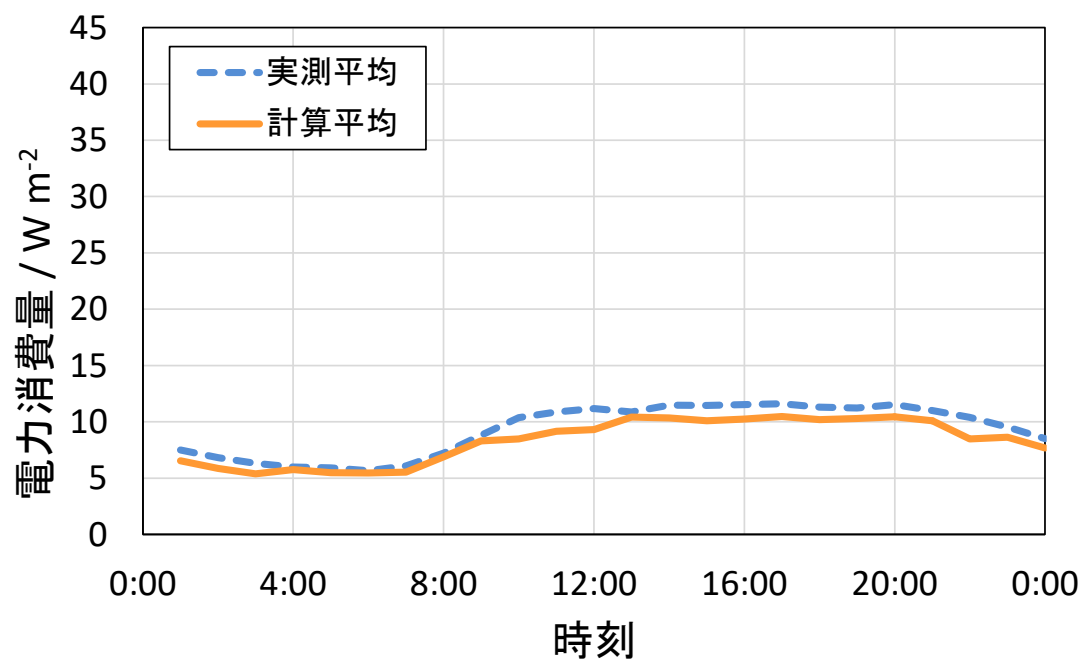


Fig. 5.22 夏季の電力消費量平均値の実測値と計算値の比較（街区 A）

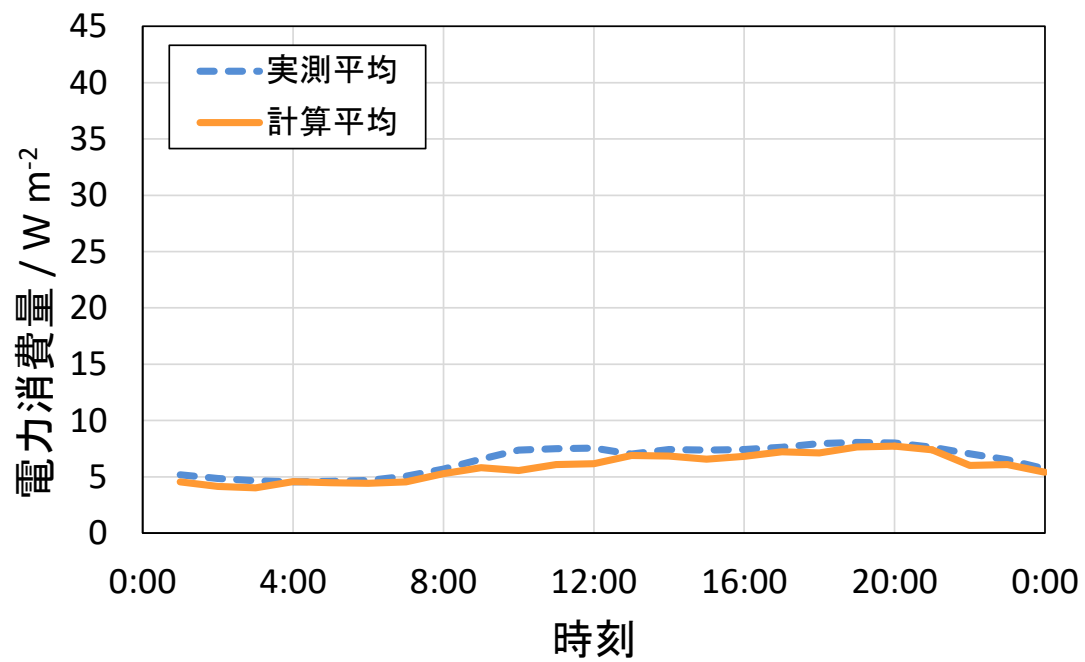


Fig. 5.23 中間期の電力消費量平均値の実測値と計算値の比較（街区 A）

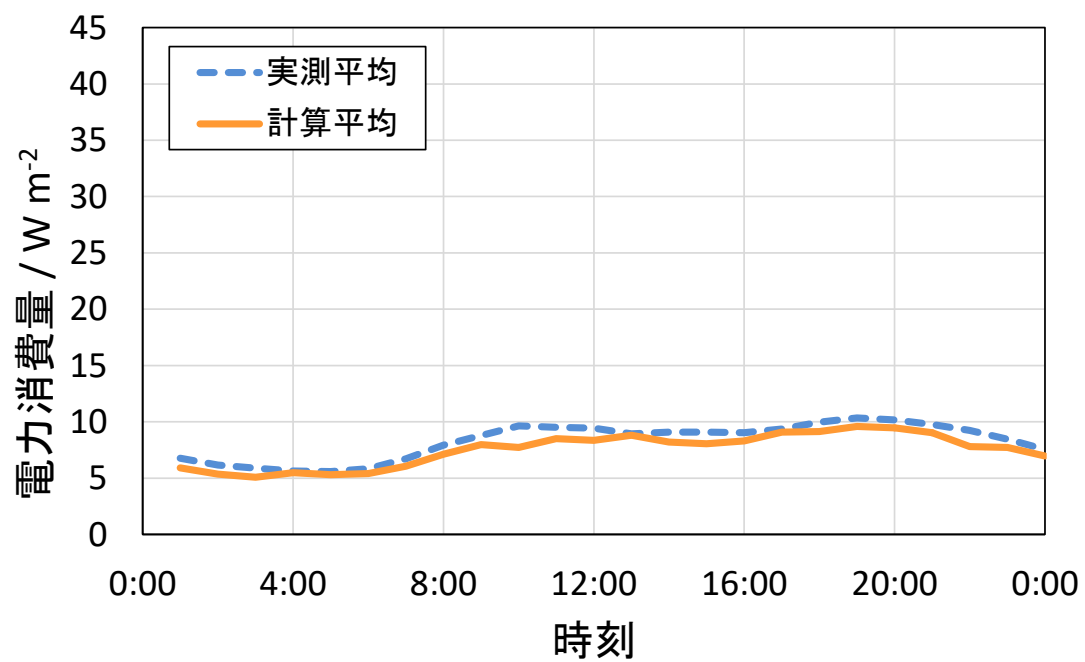


Fig. 5.24 冬季の電力消費量平均値の実測値と計算値の比較（街区 A）

## 5.5 考察

2.2 節にて述べた新たな汎用モデルを用い、電力消費量の推定をおこなった。結果として、従来モデルではチューニングをしていない代表街区以外の街区で概ね 30 %–60 %の誤差があったが、新汎用モデルでは 10 %–40 %ほどとなった。しかし、その中でも建物が混在した状況を再現することにより、実測値と計算値の差は小さくなったと考えられる。その一方で、街区 D や街区 B1 では実測値と計算値との差が比較的大きかった。これら誤差の原因と今後のモデル開発の道筋について考察をする。

### 5.5.1. 街区 D, 街区 B1 における誤差の原因について

街区 D および街区 B1 の建物用途割合 (Table 3.1) を参照すると、それぞれの建物用途割合に商業用途 (街区 B1 が 14 %, 街区 D が 11 %) が含まれている。Fig. 5.25 に事務所 (左図) と商業施設 (右図) における床面積と 2 次エネルギーの関係を示す。この図より業務の床面積あたりのエネルギー消費量 (この図では斜めの線 ; 回帰式の傾きを参照する) は、事務所に比べると商業施設が大きい。

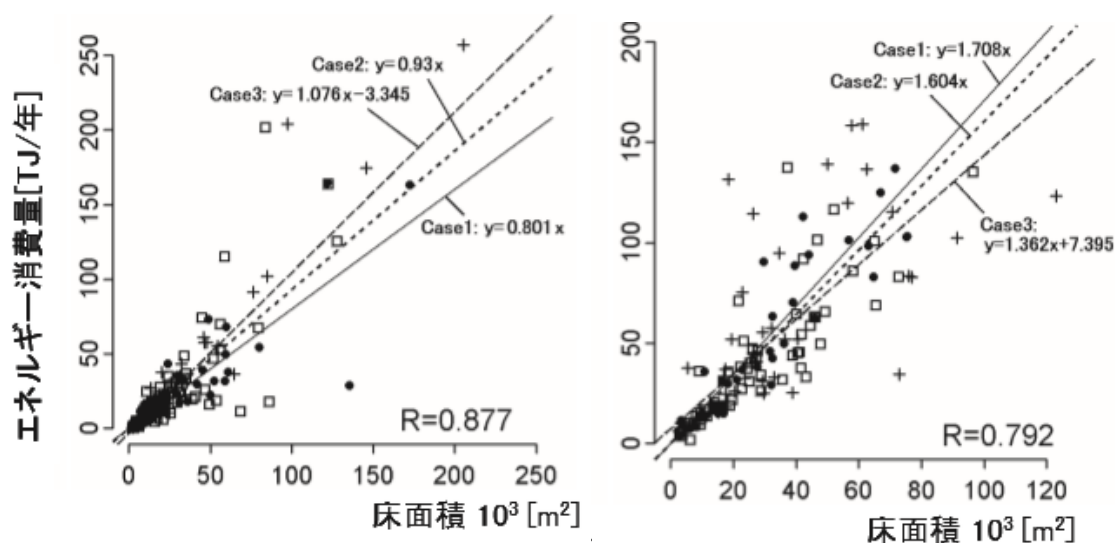


Fig. 5.25 事務所と商業施設における床面積と 2 次エネルギーの関係

左：事務所 右：商業施設

(出典) [61]より抜粋

また参考までに、他の文献でも同様の知見を示している。Fig. 5.26 に各資料におけるエネルギー消費原単位の比較を示す。この結果から文献調査の平均値を用いると、商業施設は事務所に比べ 2 倍近いエネルギー消費原単位を示していることが分かる。したがって、誤差の原因のひとつに商業施設の割合を加味していなかったことが挙げられる。

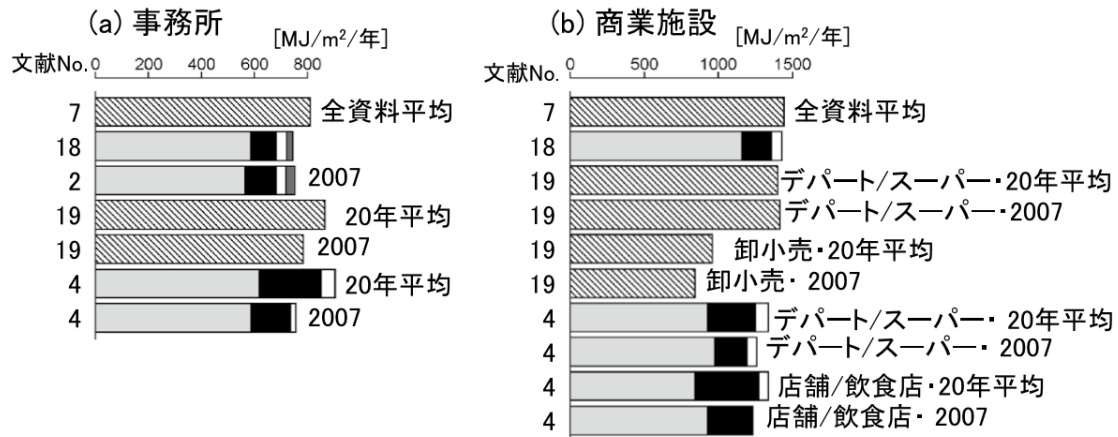


Fig. 5.26 各資料におけるエネルギー消費原単位の比較  
(出典) [62]より抜粋

#### 5.5.2. 業務用途の細分化

この節では街区 B1, B2 の比較を通して誤差の原因を探る。街区 B1, B2 は業務の用途割合がともに高いが、街区 B1 でのみ電力消費量の再現に課題が残った。これは 5.5.1 節にて示した商業用途の割合も考えられる。加えて、住宅用途に比べ、業務用途はエネルギー原単位が大きく、誤差の原因になりやすい。したがって業務用途の中にも考慮していない要因を探る。

業務用途をさらに細かく分類し、考慮していなかった傾向を掴むために、業務用途の建物を延床面積ごとに分類した。各街区の延床面積別業務建物の存在割合を Fig. 5.27–Fig. 5.31 に示す。ここで大阪市外域を含む街区は、詳細な街区データを入手できなかったのを除いている。

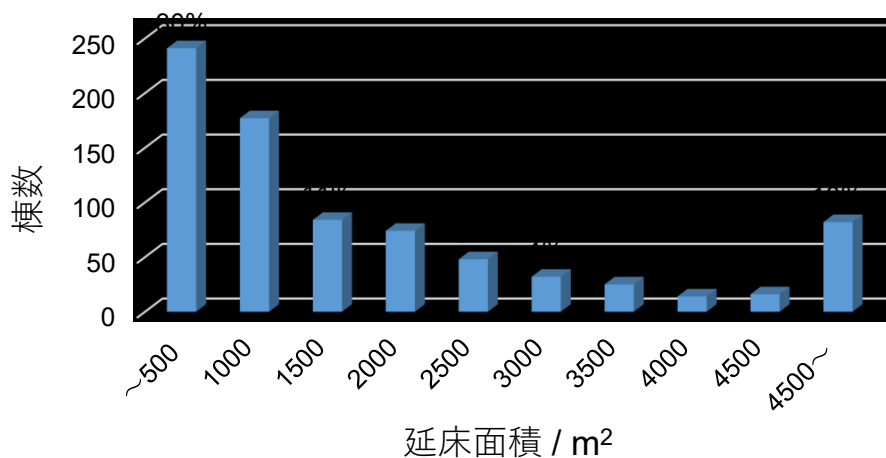


Fig. 5.27 延床面積別業務建物の存在割合 (街区 B1)



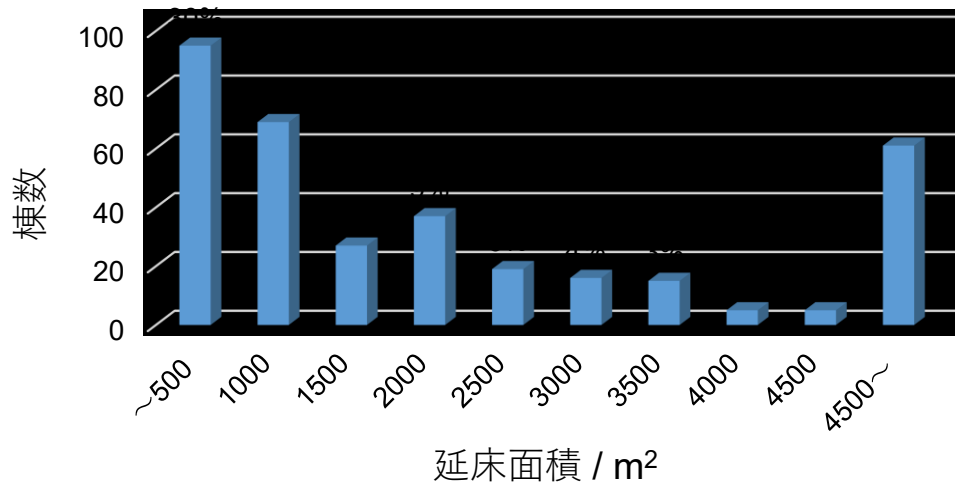


Fig. 5.28 延床面積別業務建物の存在割合（街区 B2）

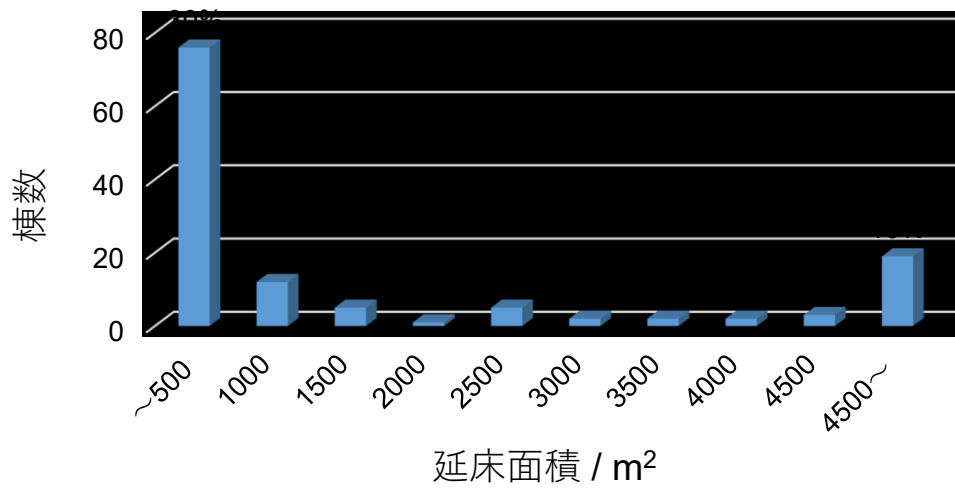


Fig. 5.29 延床面積別業務建物の存在割合（街区 M1）

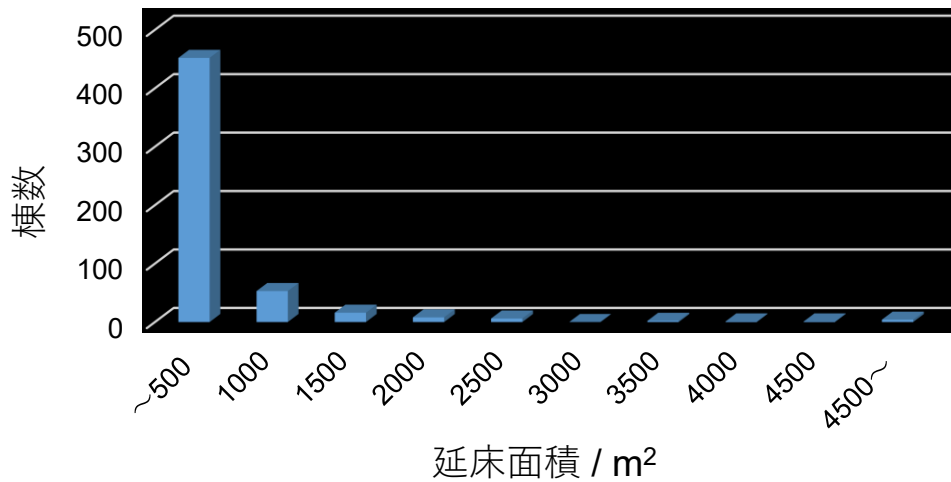


Fig. 5.30 延床面積別業務建物の存在割合（街区 A）

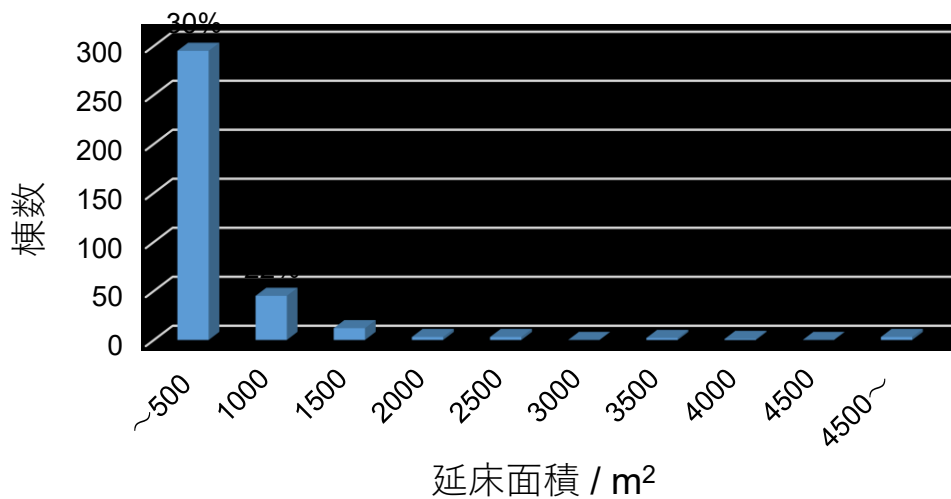


Fig. 5.31 延床面積別業務建物の存在割合（街区 D）

これらグラフより、住宅街区（例えば街区 A Fig. 5.30）に含まれる業務用途は延床面積が 500 m<sup>2</sup> 以下の割合が大きいですが、業務街区（例えば街区 B2 Fig. 5.28）に含まれる業務用途建物では、建物あたりの延床面積が大きく異なりました。以上より、街区によって同じ業務用途であっても種類が異なることが考えられる。

また、Fig. 5.32 に建物規模別エネルギー消費原単位を示す。この図から建物の延床面積が異なるとエネルギー原単位も変化する可能性があることが言える。本研究では業務用途で 1 種類の入力パラメーターを与えたが、業務用途を延床面積別に細分化することが必要だと考えられる。

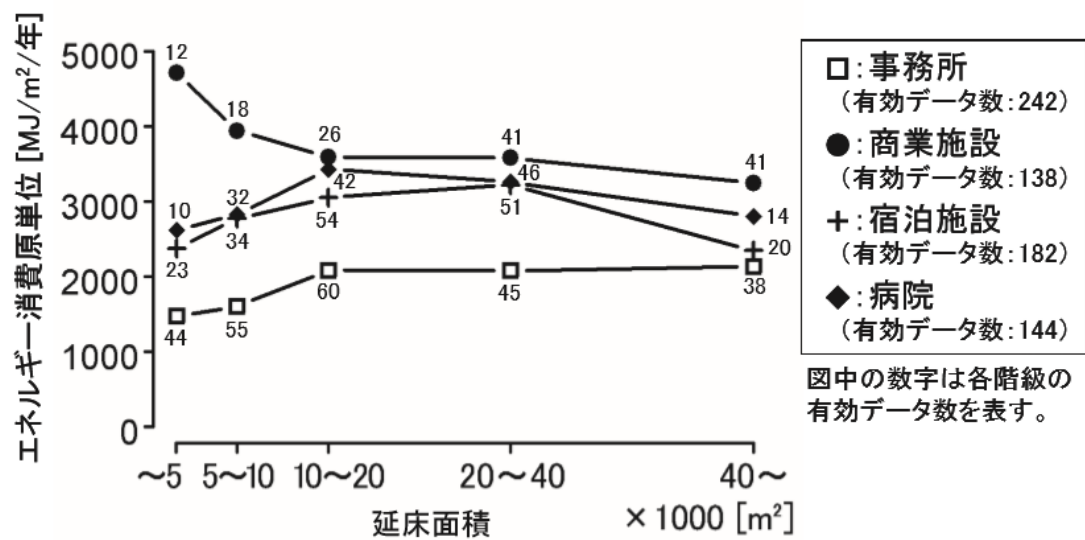


Fig. 5.32 建物規模別エネルギー消費原単位  
 (出典) [61]より抜粋

## 第6章 太陽光発電量の推定

太陽光発電量推定モデルを開発し、発電量を求めた。また、求めた発電量の妥当性の検証として、広く用いられている簡易シミュレーションソフトと比較した。

### 6.1 太陽光発電量の推定と検証

簡易シミュレーションソフトとして、資源エネルギー庁が HP 上で公開している発電量シミュレーター[63]を用いた。この発電量シミュレーターは設置地域、設置形態、設置角度、設置方位、太陽電池種別、設置容量を入力することで、月別の発電量や近傍フィールドでの実測値、設置に必要な面積を求めることができる。この簡易シミュレーションソフトは Microsoft Excel 上にて計算をするため、動作環境を問わず広く利用が可能で、太陽光発電システム導入前の試算やシステム設計に利用されている。

Fig. 6.1 に太陽光発電量の本モデルにおける計算値と簡易シミュレーションソフトの計算値を示す。本モデルの計算値は 2013 年 4 月 1 日-2014 年 3 月 31 日の期間における気象条件を用いた。また本モデルにより計算された年間積算発電量と簡易シミュレーションソフトの年間積算発電量を Table 6.1 示す。結果として、本モデルの年間積算発電量は簡易シミュレーションソフトに比べ約 2 割程度過大評価した。本モデルの計算値は簡易シミュレーションソフトに比べ過大評価する結果となったが、発電量のオーダーは妥当な値となった。この結果より、概ね発電量の再現が可能であるといえる。

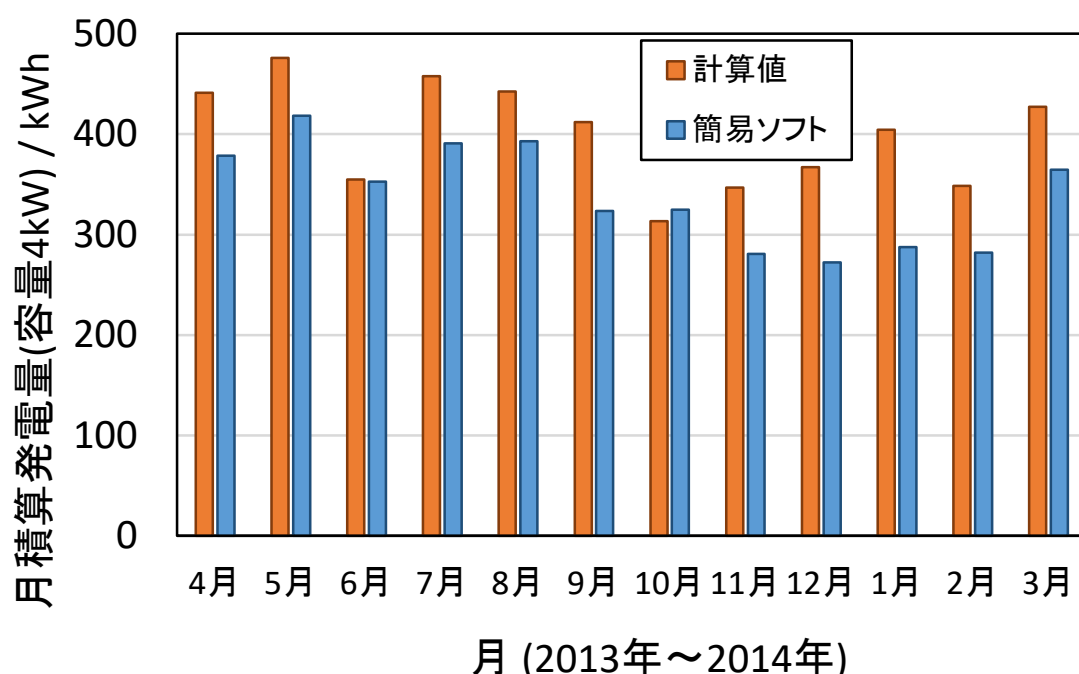


Fig. 6.1 本モデルの計算値と簡易シミュレーションソフトの計算値

Table 6.1 本モデルによる年間積算発電量と簡易シミュレーションソフトの計算値

本モデルによる計算値	簡易ソフト
4,792 kWh	4,069 kWh

## 6.2 推定した発電量に関する考察

本モデルでは簡易シミュレーションソフトに比べやや過大評価をする結果となった。この原因は本モデルを計算するための初期条件の精度に原因があると考えられる。したがって、今後のモデル改良に向けて発電量に関する課題を考える。

太陽光発電量の推定に大きく寄与する日射量に関して、本モデルでは広域気象モデル（WRF）より初期条件として取得している。したがって、この初期条件によって発電量の精度は左右される。しかし、このWRFの日射量は精度に課題があることが報告されており、嶋田[64]らによると、WRFで再現する雲量が実測に比べて少なく、日射量を過大評価すると報告されている。

そこで日射精度向上のためにWRF-Solar[65]の開発が進められている。このWRF-Solarはエアロゾル（大気中の塵）を考慮することで日射予測の高精度化が可能であり、特に日本では黄砂が日射予測に影響を及ぼすため、期待されている[66]。

本モデルの今後の展望として、初期条件の精度を向上させることが課題であり、WRF-Solarをはじめとして適切なモデルの選択が必要だと考えられる。

## 第7章 電力需給ポテンシャル評価

第5章では電力需要予測モデル、第6章では電力供給予測モデルについて検証をおこなった。本章ではこれらのモデルを組み合わせることで街区スケールにおける電力需給を同時に推定する。

まず屋上面における太陽光発電設備の設置可能面積を求める。みずほ情報総研が太陽光発電ポテンシャルを算出した例を参考にすると、屋上面において冷却塔や給水塔など他の構造物の占有を考慮した太陽光発電設備の設置可能面積は86%である。また保安スペースなど太陽光発電設備以外に必要となる面積を除いた割合は58%である。これらを乗じて、50%を太陽光発電設備の設置可能面積とした。

街区スケール（1 km × 1 km）の建物の屋上面の50%に太陽光発電パネルを設置した際の年間の電力消費量と電力供給量を求めた。街区の特徴を示すために、街区A、街区D、街区B2を選定し、街区ごとの年間の電力消費量と発電量の比較をFig. 7.1に示す。結果として街区Aや街区Dは電力消費量の約40%-50%を発電量でまかなうことができるが、業務利用が多い街区B2では約4%にとどまった。これは街区B2の電力消費量が大きいのに対し太陽光発電パネルが設置できる屋上面の面積が限られるためだと考えられる。

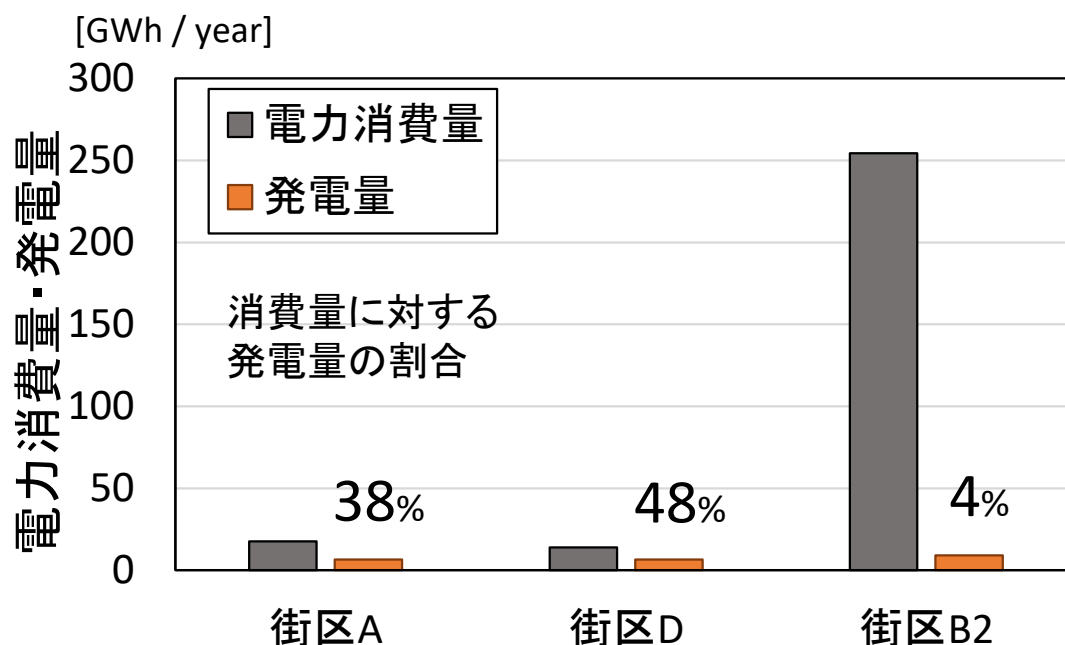


Fig. 7.1 各街区の年間電力消費量と発電量

次に Fig. 7.1 において電力消費量を発電量で多くまかなえていた街区 D において、時刻別の電力需給を確認した。本モデルでは、月積算値や年積算値ではなく、時刻別の電力消費量と発電量を求めることができるという特徴がある。期間は電力消費が少なく発電量が大きいとされる 4 月 8 日からの 1 週間を選定した。Fig. 7.2 に街区 D における時刻別の電力消費量と発電量を示す。この結果より、時刻別の電力消費量と発電量を評価できていることが確認できる。

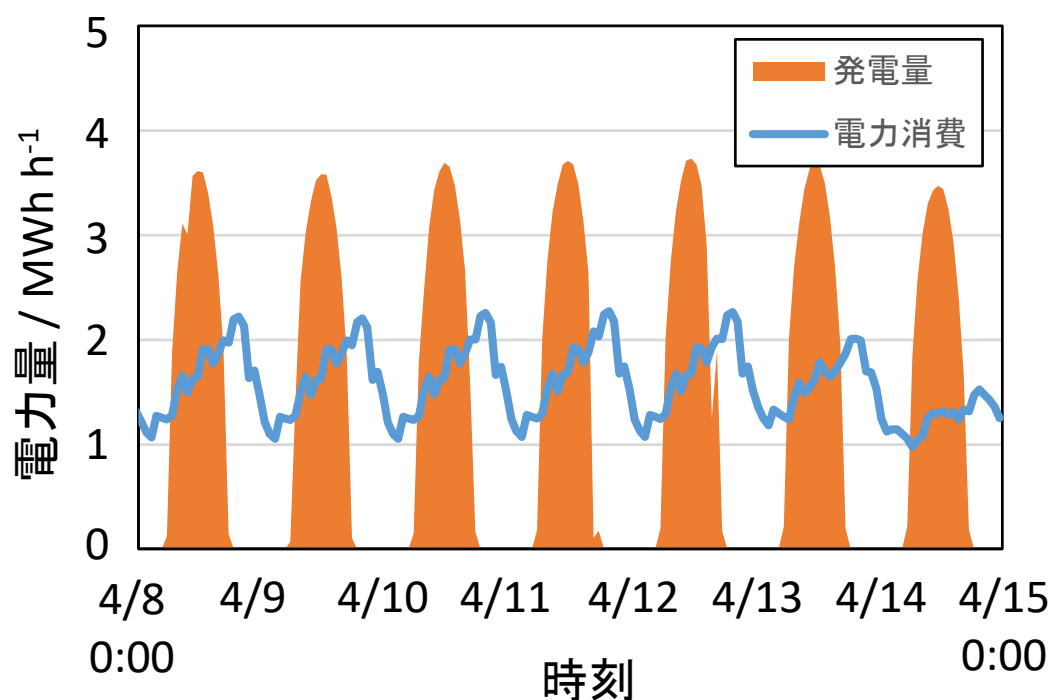


Fig. 7.2 街区 D における時刻別の電力消費量と発電量

次に Fig. 7.3 に街区 D における 4 月-5 月における時刻別の電力消費量と発電量の平均値を示す。またここで青の実線は電力消費量を、面グラフは発電量を示す。特に橙色の面積は発電量が電力消費量を上回っている (= 余剰電力) を示しており、これらを積算すると約 10 MWh となる。つまり、この街区において電力をロスなく有効活用するためには容量 10 MWh の蓄電池などを導入することが必要だといえる。このように電力需給を同時に評価することにより、街区にどの技術をどの程度導入すべきなのか、といった対策導入への提言が可能であると考えられる。

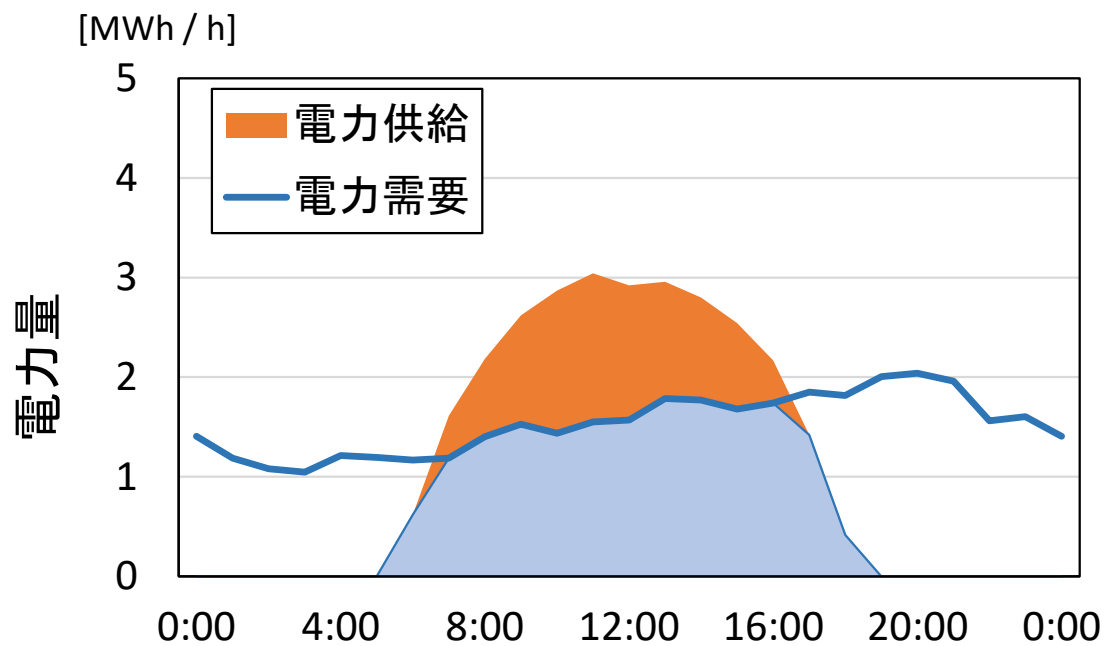


Fig. 7.3 街区 D における 4 月・5 月における時刻別の電力消費量と発電量の平均値



## 第8章 まとめと今後の展望

地球温暖化への対策として期待されている再生可能エネルギーは導入が進んでいるが、出力を天候に依存するため供給の不安定性が課題となっている。

電力の需要と供給を最適化できるスマートグリッドは再生可能エネルギーの課題を解消できる技術の一つとされているが、スマートグリッドに不可欠な電力需要の推定は確立しておらず、ほとんどが過去のデータに基づく統計モデルを用いている。今後の都市開発や気候変動を考慮すると、将来予測可能なシミュレーションモデルが必要不可欠である。

電力需給の予測には過去のデータに基づく統計モデルが使用されることが多いが、これから開発される都市や、気候変動の影響を受けた将来の街区に対し適用することはできない。一方で気象と電力需要の現実的な関係を考慮できる物理モデルは、理想的な街区の電力需要をある程度予測することはできるが、複数の建物用途を考慮する街区に対し適用することは困難である。このような複数の建物用途が混在する街区を考慮できるシミュレーションモデルはこれまでに存在しない。本研究では、複数用途が存在する街区を考慮した電力需給シミュレーションモデルの開発と検証をおこなう。開発は都市キャノピー・建物エネルギー連成モデル（CM-BEM）をもとに開発し、検証は2013年4月-2014年3月における大阪市域の複数の実街区の電力供給データにもとづき、電力需要予測の精度を従来モデルと新たに開発したモデルにて比較した。

電力需要の面では結果として、従来のモデルでは理想的な街区以外で概ね30%-60%の誤差があったが、新モデルでは10%-40%ほどとなった。建物が混在した状態を再現することにより、実測値と計算値の差は小さくなったと考えられる。街区の延床面積割合を用い、複数の街区種別に分類することで、街区の電力需要の特徴を把握できることがわかった。

電力供給の面では、資源エネルギー庁の簡易シミュレーションソフトと比較をした結果、過大評価する傾向が見られたが、発電量として妥当な値を示した。

電力需給ポテンシャル評価では、需給を時刻別に同時評価できることが示され、蓄電池など対策導入への提言もできることがわかった。

今後の展望として、モデルの精度向上に向けて考慮できる街区種別を増やす、特にエネルギー原単位が大きいと考えられる商業用途や業務用途の細分化が必要である。また日射量の精度向上を図るために、WRF-Solarなどを導入し初期条件の精度向上が必要である。街区スケールにおいて電力需給の予測をおこなえる新モデルは、より精度を向上させることで都市の対策評価やスマートグリッド導入の一助となると考えている。

## 参考文献

- [1] 国立環境研究所 地球環境研究センター.: IPCC 第5次評価報告書のポイントを読む, pp4, 2015.
- [2] 高橋 潔.: 温暖化の適応策, 国立環境研究所ニュース, Vol.24, No.2, pp9-10, 2005.
- [3] 資源エネルギー庁, エネルギー白書 2016.
- [4] 経済産業省編.: エネルギー白書 2013, pp8, 2013.
- [5] 総務省統計局.: 世界の統計 2016.  
<<http://www.stat.go.jp/data/sekai/0116.htm>> (2017年1月26日閲覧)
- [6] United Nations.: 2014 Revision of World Urbanization Prospect.
- [7] 環境省.: ヒートアイランド対策ガイドライン平成24年度版, 2013.  
<[http://www.env.go.jp/air/life/heat\\_island/guideline/h24/chpt1.pdf](http://www.env.go.jp/air/life/heat_island/guideline/h24/chpt1.pdf)> (2017年1月26日閲覧)
- [8] 資源エネルギー庁.: 総合エネルギー統計 1990～2014年.  
<[http://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total\\_energy/](http://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/)> (2016年9月3日閲覧)
- [9] 高山丈二.: スマートグリッドの導入に向けた動きと我が国の課題, レファレンス 60(12), 29-49, 2010.
- [10] 阿部裕.: スマートグリッドが引き起こす社会インフラの変革, 三井物産戦略研究所, 2010.  
<[http://mitsui.mgssi.com/issues/report/r1004t\\_abe.pdf](http://mitsui.mgssi.com/issues/report/r1004t_abe.pdf)> (2016年8月23日閲覧)
- [11] 次世代エネルギーシステムに係る国際標準化に関する研究会.: 次世代エネルギーシステムに係る国際標準化に向けて, pp2, 2010.  
<<http://www.meti.go.jp/report/downloadfiles/g100129d01j.pdf>> (2017年2月22日閲覧)
- [12] 経済産業省.: 欧米地域におけるスマートコミュニティ関連技術の海外展開モデル調査研究事業, 2015.  
<[http://www.meti.go.jp/meti\\_lib/report/2015fy/000688.pdf](http://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2015fy/000688.pdf)> (2017年2月22日閲覧)
- [13] 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構.: NEDO 再生可能エネルギー技術白書第2版, 第9章, 2014.  
<<http://www.nedo.go.jp/content/100544824.pdf>> (2017年2月22日閲覧)
- [14] 東京電力.: でんき予報.  
<<http://www.tepco.co.jp/forecast/index-j.html>> (2017年2月21日閲覧)
- [15] 小林正行.: 環境変化に対応した電力需要予測システムの開発, 中部電力技術開発ニュース, No.123, 2006.  
<[https://www.chuden.co.jp/resource/corporate/news\\_123\\_N12325.pdf](https://www.chuden.co.jp/resource/corporate/news_123_N12325.pdf)> (2017年2月21日閲覧)

- [16] 村上周三.: 外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発（その1）, *空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集*, 2007.
- [17] 畠田博之, *EnergyPlus* のユーザーインターフェースの開発, *空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集*, 2006.
- [18] Yukihiro Kikegawa, Yutaka Genchi, Hiroshi Yoshikado, Hiroaki Kondo.: Development of a numerical simulation system toward comprehensive assessments of urban warming countermeasures including their impacts upon the urban buildings' energy-demands, *Applied Energy*, Vol 76, Issue 4, pp449-466, 2003.
- [19] Yukihiro Kikegawa, Ai Tanaka, Yukitaka Ohashi, Tomohiko Ihara, Yoshinori Shigeta.: Observed and Simulated Sensitivities of Summertime Urban Surface Air Temperatures to Anthropogenic Heat in Downtown Areas of Two Japanese Major Cities Tokyo and Osaka, *Theoretical and Applied Climatology*, pp175-193, 2014.
- [20] Francisco Salamanca, Alberto Martilli.: A new Building Energy Model coupled with an Urban Canopy Parameterization for urban climate simulations—part II. Validation with one dimension off-line simulations, *Theoretical and Applied Climatology*, 99, pp345-356, 2010.
- [21] 原亮一.: 電力システムの需給運用に関わる時系列データの解析・予測技術, *電気学会論文誌B*, Vol. 134, No.4, pp276-279, 2014.
- [22] 亀卦川幸浩.: 都市気候・建物エネルギー連成数値モデルの開発と適用, *環境科学会誌*, 28(1), pp37-44, 2015.
- [23] Tomohiko Ihara, Yukihiro Kikegawa, Kazutake Asahi, Yutaka Genchi, Hiroaki Kondo.: Changes in year-round air temperature and annual energy consumption in office building areas by urban heat-island countermeasures and energy-saving measures, *Applied Energy*, Volume 85, Issue 1, pp12-25, 2008.
- [24] William C. Skamarock, Joseph B. Klemp, Jimy Dudhia, David O. Gill, Dale M. Barker, Michael G. Duda, Xiang-Yu Huang.: A Description of the Advanced Research WRF Version 3, NCAR/TN-475+STR. *NCAR TECHNICAL NOTE*, 2008.
- [25] 日下博幸.: 領域気象モデル WRF について, *ながれ*, 28, pp3-12, 2009.
- [26] 日下博幸.: 領域気象モデル WRF の都市気候研究への応用と課題, *地学雑誌* Vol. 120, No. 2, pp285-295, 2011.
- [27] 亀卦川幸浩.: 熱環境と空調エネルギー需要の相互作用を考慮した都市高温化対策の評価, 東京大学大学院 博士論文, 2001.
- [28] 神田学.: WRF の都市気象研究への応用, *ながれ*, 28, pp21-28, 2009.
- [29] 飯塚悟, 金原和矢, 日下博幸, 原政之, 秋本祐子.: 夏季の名古屋の温熱環境を対象とした現状再現の精度検証と疑似温暖化手法を併用した将来予測の試み領域気象モデル WRF による名古屋都市圏の温熱環境シミュレーション（その1）, *日本建*

築学会環境系論文集, Vol. 75, No. 647, pp87-93, 2010.

- [30] Hiroyuki Kusaka, Hiroaki Kondo, Yokihiro Kikegawa, Fujio Kimura.: A Simple Single-Layer Urban Canopy Model For Atmospheric Models: Comparison With Multi-Layer And Slab Models, *Boundary-Layer Meteorology*, Volume 101, Issue 3, pp329–358, 2001.
- [31] Hiroyuki Kusaka, Fujio Kimura.: Coupling single-layer urban canopy model with a simple atmospheric model : Impact on urban heat island simulation for an idealized case, *J. Meteor. Soc. Japan*, 82, pp67-80, 2004.
- [32] Alberto Martilli, Alain Clappier, Mathias W. Rotach.: An urban surface exchange parameterization for mesoscale models, *Boundary-Layer Meteorology*, Volume 104, Issue 2, pp261–304, 2002.
- [33] Francisco Salamanca, Alberto Martilli.: A new Building Energy Model coupled with an Urban Canopy Parameterization for urban climate simulations—part II. Validation with one dimension off-line simulations, *Theoretical and Applied Climatology*, 99, pp345-356, 2010.
- [34] 近藤 裕昭.: 都市キャノピー, *天気*, 56(8), pp677-678, 2009.
- [35] C.S.B. Grimmond. Et al.: Urban Surface Energy Balance Models: Model Characteristics and Methodology for a Comparison Study, *Meteorological and Air Quality Models for Urban Areas*, pp97-123, 2009.
- [36] 近藤 裕昭, 劉 發華.: 1次元都市キャノピーモデルによる都市の熱環境に関する研究, *大気環境学会誌*, Vol. 33, No. 3, pp179-192, 1998.
- [37] Fei Chen, Hiroyuki Kusaka, Robert Bornstein, Jason Ching, C. S. B. Grimmond, Susanne Grossman-Clarke, Thomas Loridan, Kevin W. Manning, Alberto Martilli, Shiguang Miao, David Sailor, Francisco P. Salamanca, Haider Taha, Mukul Tewari, Xuemei Wang, Andrzej A. Wyszogrodzki, Chaolin Zhang.: The integrated WRF/urban modelling system: development, evaluation, and applications to urban environmental problems, *International Journal Of Climatology*, Volume 31, Issue 2, pp273–288, 2010.
- [38] 曾我 和弘, 赤坂 裕, 二宮 秀興.: 全天日射量から斜面日射量を推定する各種モデルの比較, *日本建築学会計画系論文集*, 第 519 号, pp31-38, 1999.
- [39] Richard Perez, Pierre Ineichen, Robert Seals, Joseph Michalsky, Ronald Stewart.: Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance, *Solar Energy*, Volume 44, Issue 5, pp271-289, 1990.
- [40] 玄地裕, 菅原有希, 大友順一郎, 温慶茹, 高橋宏, 稲葉敦.: 太陽電池パネル設置時の屋上面熱収支の実測とモデルの構築, *環境システム研究論文集*, Vol. 30, pp271-276, 2002.
- [41] 日本工業規格, 太陽光発電システムの発電電力量推定方法, JIS C 8907 (2005).

- <<http://kikakurui.com/c8/C8907-2005-01.html>> (2017 年 2 月 20 日閲覧)
- [42] 日本工業規格, 太陽光発電用語, JIS C 8960 (2012).  
<<http://kikakurui.com/c8/C8960-2012-01.html>> (2017 年 2 月 20 日閲覧)
- [43] NEDO 日射量データベース MONSOLA-11  
<<http://app0.infoc.nedo.go.jp/metpv/monsola.html>> (2017 年 2 月 20 日閲覧)
- [44] みずほ情報総研株式会社.: 平成 22 年度新エネルギー等導入促進基礎調査事業 (太陽光発電および太陽熱利用の導入可能量に関する調査), pp8, 2011.  
<[http://www.meti.go.jp/meti\\_lib/report/2011fy/E001772.pdf](http://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2011fy/E001772.pdf)> (2017 年 2 月 20 日閲覧)
- [45] 大阪市計画調整局「H19 年度建物現況 GIS データ」
- [46] 国土地理院「数値地図 5000」
- [47] esri ジャパン「ArcGIS データコレクション 詳細地図 2012」
- [48] 引地裕基.: 大阪都市圏での通年・高密度日射観測にもとづく都市気象・建物エネルギー連成数値モデルの検証, 明星大学大学院, 2013.
- [49] 橋本侑樹.: 街区スケールにおける気象要素に対する電力感応度の解析, 東京大学大学院 修士論文, 2015.
- [50] T&D 社 TR-73U 製品仕様  
<<https://www.tandd.co.jp/product/dataloggers/tr73u/specification.html>> (2017 年 2 月 20 日閲覧)
- [51] PREDE 社 日射計経年変化 CMP3&アプリケーション  
<<http://www.prede.com/PDF/CMP3.pdf>> (2017 年 2 月 20 日閲覧)
- [52] 橋本侑樹, 鍋島美奈子, 重田祥範, 亀卦川幸浩, 井原智彦.: 業務および住宅街区の気温・湿度に対する電力感応度の解析と考察—2013 年・大阪市内の観測を通して—, 日本建築学会環境系論文集, 第 81 巻, 727 号, pp827-834, 2016.
- [53] 東京都.: 東京都の温室効果ガス排出量.  
<[https://www.kankyo.metro.tokyo.jp/climate/other/emissions\\_tokyo.html](https://www.kankyo.metro.tokyo.jp/climate/other/emissions_tokyo.html)> (2017 年 1 月 22 日閲覧)
- [54] 神田学編, 都市の気象と気候 気象研究ノート第 224 号, 日本気象学会, pp57-87, 2012.
- [55] 足永靖信, 李海峰, 尹聖皖.: 顕熱潜熱の違いを考慮した東京 23 区における人工排熱の排出特性に関する研究, 空気調和・衛生工学会論文集, No.92, pp121-130, 2004.
- [56] 国立環境研究所地球環境研究センター.: 東アジア大気汚染物質排出量グリッドデータベース.  
<[http://www.cger.nies.go.jp/db/eagrid/eagrid\\_index\\_j.html](http://www.cger.nies.go.jp/db/eagrid/eagrid_index_j.html)> (2017 年 1 月 20 日閲覧)
- [57] 大阪府.: 大阪府における自動車環境対策の歩み 平成 24 年度版, 1-5 大阪府域・大阪市域の車種別・用途別・燃料別自動車保有台数.  
<[http://www.pref.osaka.lg.jp/kotsukankyo/haigasu/h24ayumi\\_ref.html](http://www.pref.osaka.lg.jp/kotsukankyo/haigasu/h24ayumi_ref.html)> (2017 年 1 月

20 日閲覧)

- [58] 一般社団法人日本空冷空調工業会.: 業務量エアコンの APF 表示について.  
< [https://www.jraia.or.jp/product/com\\_aircon/s\\_apf.html](https://www.jraia.or.jp/product/com_aircon/s_apf.html) > (2017 年 1 月 22 日閲覧)
- [59] NHK 放送文化研究所編: データブック 国民生活時間調査 2010, NHK 出版, 2011.
- [60] ゾーンオフィスの計算—建築計算編—. 2015 年度 BEST 専門版講習会資料, pp20.  
< [http://www.ibec.or.jp/best/event/pdf/BEST\\_K1\\_case2\\_2zoneoffice\\_20150925.pdf](http://www.ibec.or.jp/best/event/pdf/BEST_K1_case2_2zoneoffice_20150925.pdf) >  
(2017 年 1 月 15 日閲覧)
- [61] 平野勇二郎, 外岡豊, 伊香賀俊治, 亀卦川幸浩, 藤沼康実, 下田 吉之.: 民生業務部門  
エネルギー消費原単位に関する各種資料の比較評価, *日本建築学会環境系論文集*  
Vol. 73, No. 633, pp1331-1339, 2008.
- [62] 平野勇二郎, 稲葉陸太, 酒井広平, 早渕百合子, 大迫政浩.: 民生業務部門における  
業種別エネルギー消費量の詳細推計, *環境科学会誌*, Vol. 26, No. 5, pp430-439, 2013.
- [63] 資源エネルギー庁.: 発電量シミュレーター.  
< [http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving\\_and\\_new/ohisama\\_power/sim/](http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/ohisama_power/sim/) > (2017  
年 2 月 21 日閲覧)
- [64] 嶋田進, 劉媛媛, 夏慧, 吉野純, 小林智尚, 板垣昭彦, 宇都宮健史, 橋本潤.: メソ気  
象モデル WRF による日射計算の精度検証, *太陽エネルギー*, 38(5), pp41-48, 2012.
- [65] Pedro A. Jimenez, Joshua P. Hacker, Jimmy Dudhia, Sue Ellen Haupt, Jose A. Ruiz-Arias,  
Chris A. Gueymard, Gregory Thompson, Trude Eidhammer, Aijun Deng.: WRF-Solar:  
Description and Clear-Sky Assessment of an Augmented NWP Model for Solar Power  
Prediction, *American Meteorological Society*, Jul 2016, pp1249-1264, 2016.
- [66] 大竹秀明.: 気象データの再生可能エネルギー分野への利用可能性, 第 12 回ヤマセ  
研究会資料, 2016.  
< [http://wind.gp.tohoku.ac.jp/yamase/reports/data12/Ohtake\\_160311.pdf](http://wind.gp.tohoku.ac.jp/yamase/reports/data12/Ohtake_160311.pdf) > (2017 年 2 月  
21 日閲覧)

## 謝辞

本研究を遂行し、修士論文を作成するにあたり、多くのご支援とご指導を頂きました。指導教員の井原智彦准教授に深く感謝致します。また副査の大友順一郎准教授には面談を通して、環境システム情報学の吉田好邦教授には合同ゼミを通して、大変有益な助言を頂きました。ここに記して感謝申し上げます。

本研究は数値シミュレーションモデルの開発を通して、明星大学理工学部総合理工学科環境・生態学系の亀卦川幸浩教授のご協力を頂きました。また、東京電力の山口さんにはプログラムの初歩からご指導頂きました。気象データの編集および GIS データの編集は亀卦川研究室に所属する徳竹さんのサポートなしでは出来ませんでした。心より感謝申し上げます。

また研究室を問わず、環境システム学専攻に在籍する方々には研究、私生活共にお世話になりました。研究の面では、横断的な学問に触れることができたことは今後の私の大きな財産になると思いますし、何より先生方が親身になって学生に寄り添ってくださる雰囲気非常に好きでした。先生方、同期のみなさんには 2 年間（正確には 2 年半でした）しかない修士課程の研究生活を充実したものにしてく頂き、深く感謝しています。

そして、家族のような井原研究室の皆さんには、様々な思い出を貰いました。井原先生には、最初は右も左も分からない私でしたが、優しく丁寧に指導頂きました。井原研のメンバーにも恵まれ、先輩の天沢さん、橋本さん、畑さんには迷惑ばかりかけ、研究室の同期の船津（秋入学の数少ない同期でした）、前田、草間には研究や私生活の悩みを最も聞いてもらいました。後輩も優しく気が利く後輩ばかりで、後輩と過ごした時間は最高に楽しかったです。井原研の皆さん、今後ともよろしくお願い致します。

最後に長崎から温かく見守ってくれた両親には、今の感謝の気持ちを正しく伝える言葉を持ち合わせていません。これまで自分で言うのも変な話ですが、自分勝手な子供だったと思います。本大学院を選んだこと、入試を受けていたことも何も知らせていませんでしたし、「来月からここに通うから」と一方的に話した時の呆れた顔は今でも覚えています。それでも両親が愛情を持って、辛抱強く支援してくれたからこそ、この大学院で自分のやりたい研究が出来ました。心から感謝申し上げます。