

都市気候・ビルエネルギー連成モデルによる ヒートアイランド対策の評価

Assessment of Countermeasures against the Heat Island with a Combined Model of Urban Climate,
Urban Canopy and Building Energy Consumption

近藤裕昭^{*1} 亀卦川幸浩^{*2} 玄地裕^{*1} 井原智彦^{*1} 大橋唯太^{*3} 東海林孝幸^{*4}

Hiroaki KONDO Yukihiko KIKEGAWA Yutaka GENCHI Tomohiko IHARA Yukitaka OHASHI Takayuki TOKAIRIN

*1 産業技術総合研究所 National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

*2 明星大学 Meisei University

*3 岡山理科大学 Okayama University of Science

*4 豊橋技術科学大学 Toyohashi University of Technology

Corresponding Author: Hiroaki KONDO, kondo-hrk@aist.go.jp

Abstract.

The AIST developed a multi-scale analysis model to assess the countermeasures against urban heat island phenomena. The model consists of three sub models; urban climate model, multi-layer urban canopy model and building energy consumption model. The overall performance is fairly good. Because it is too heavy for the full-spec model to assess the countermeasure around a year, the combined model of urban canopy and building energy consumption model was used to assess the countermeasures. The results demonstrate that photo catalyst, solar reflective painting and the ground source heat pump are promising countermeasures.

キーワード：数値モデル解析、連成モデル、街区スケール、排熱の動的評価

Key words: Numerical analysis, combined model, city block scale, dynamic analysis of anthropogenic heat

1. はじめに

気象庁によれば、ここ 100 年間の日本の中小都市の気温上昇は 1.0°C 程度であるのに対し、大都市の気温上昇の平均は 2.5°C (東京は 3°C) である¹⁾。一方、都市化の影響を受けていない日本の観測点での気温上昇は 0.2°C 程度である²⁾。また、近年は熱帯夜の出現日が増加しているのが特徴である。このように、近年都市において顕著な気温の上昇に対して数多くの緩和対策が提案されつつあるが、本報告ではこれらに定量的な評価を加えるために産総研で開発したマルチスケール評価モデルについて紹介する。このモデルの開発に際しては、モデル自身の評価のため、東京のいくつかの街区内における気温等の詳細な観測を行った。一方、緩和策の中には気温を下げるためにかえって冬季の暖房用エネルギーを増加させてしまうようなものが含まれる可能性があり、これらは地球環境対策の面からは排除する必要がある。従ってモデルの開発においては夏季ばかりではなく、通年での対策評価が可能であることを目標にした。

2. モデルの構成

本研究では水平方向に 500m 程度の街区スケールをターゲットとして、業務街区、住宅街区等の街区の特徴毎に最適なヒートアイランド対策を評価するモデルを構築することを目標とした。ここで開発したモデルはメソスケール気象モデル(MM)、都市キャノピーモデル(CM)、ビルエネルギーモデル(BEM)の3つのモデルの連成モデルである(Fig.1)。本研究では目的に応じてこのうちの2つまたは3つの連成モデルを対策評価に使用した。従来、人工廃熱は燃料消費原単位等から静的に計算される場合が多かったが、この連成モデルではビルエネルギーモデルを都市キャノピーモデルと連成させて計算することにより、動的に扱うことができる。また、都市キャノピー内の複雑な放射過程を簡略化し、さらに床面密度の鉛直分布に依存して放射量やビル壁面からの顕熱輸送量が決まるようした。

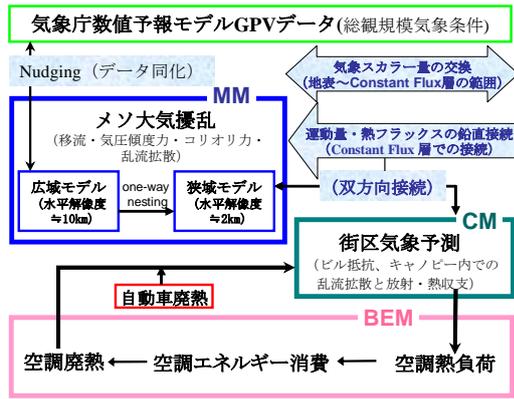


Fig.1 A flowchart of the combined model

2. 1 メソスケール気象モデル (MM)

計算の対象は約 500m 四方の小さい空間であるが、そこでの気温の日変化を計算するためには数百 km 四方におよぶ領域の気象条件を時々刻々と計算する必要がある。ここで開発したモデルで一番外側の領域の計算を担当するメソスケール気象モデルは、日本の中央部を囲む約 500km 四方の領域をカバーする(Fig.2)³⁾。そのさらに外側の領域からの影響については、気象庁の数値予報の計算結果 (GPV-MSM) を境界条件として与える。MM の計算は 2 段階行い、水平方向に約 10km の格子解像度を持つ外側領域をまず計算し、その結果を用いて東京付近の約 180km 四方の領域を約 2km の格子解像度で計算した(1-way nesting)。また、内側領域の東京 23 区の領域(145 格子)には、次に述べる都市キャノピーモデル (CM) を組み込めるようにした。

2. 2 都市キャノピーモデル (CM)

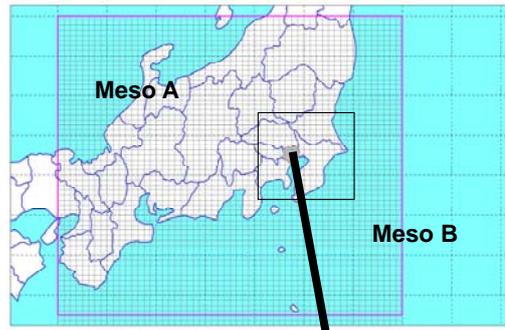
メソスケール気象モデルでは、通常 1 格子内の地表面は一様平面であり、粗度長というパラメータで大まかに地表面の凸凹の流れに対する影響を表現する。このため、都市に特徴的な建物の存在による放射、風、気温に対する影響をあまりよく表現することができない。一方で、最近では単体や複数のビルのまわりの風の流れや気温について CFD (Computational Fluid Dynamics : 数値流体力学) モデルを用いて計算ができるようになってきているが、建物間の放射伝達を正確に計算するには膨大な計算時間がかかり、通常の計算機では日変化を計算するには困難が伴う。そこで、鉛直方向の 1 次元の拡散方程式を基本とした多層の都市キャノピーモデルを構築した⁴⁾。

モデルの基本方程式系は、風速については、

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{1}{m} \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m \cdot m \cdot \frac{\partial u}{\partial z} \right) - cau \left(\sqrt{u^2 + v^2} \right) + F_u$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{1}{m} \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m \cdot m \cdot \frac{\partial v}{\partial z} \right) - cav \left(\sqrt{u^2 + v^2} \right) + F_v$$

$$m = 1 - \frac{b^2}{(w+b)^2} \cdot P_w(z)$$



Mesoscale model regions

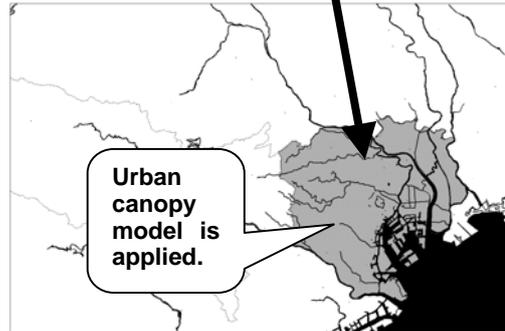


Fig.2 Computational Domain.

であり、ここで w, b はそれぞれある街区に含まれるビルの平均間隔及び平均ビル幅である。 $P_w(z)$ は全部のビルに対する高度 z 以上の高さのビルの割合である。 u, v はそれぞれ東西、南北方向の風速成分、 K_m は乱流拡散係数、 c は抵抗係数、 a はビルの表面積が空間に占める割合である。 F_u, F_v はその他の外力 (たとえばコリオリ力) であるが、メソスケール気象モデルと接続する場合には考慮しない。

温度、水蒸気についての基本方程式系は、

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{1}{m} \frac{\partial}{\partial z} \left(K_h \cdot m \cdot \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + \frac{1}{c_p \rho} Q_s(z, t)$$

$$\frac{\partial q_v}{\partial t} = \frac{1}{m} \frac{\partial}{\partial z} \left(K_q \cdot m \cdot \frac{\partial q_v}{\partial z} \right) + \frac{1}{l \rho} Q_L(z, t)$$

であり、ここで c_p, ρ は空気の定圧比熱と密度、 l は蒸発の潜熱、 Q_L, Q_s はそれぞれその高度・時間におけるビルや道路表面からの潜熱および顕熱と人工廃熱としての潜熱・顕熱の和である。

各表面からの顕熱・潜熱を計算するためには、その表面における熱収支を計算する必要がある。このため、キャノピー内の仮想的なビルに対し、ビルの壁面が正確に東西南北の 4 方向を向いているものとし、ビルの影の影響や view factor を近似的に計算して各高度の放射量を計算した。また、放射量はビルの高度分布 $P_w(z)$ により、一部は透過するものとした。

2. 3 ビルエネルギーモデル (BEM)

ビルエネルギーモデル (これ以降 BEM と略す) は、都市キャノピー大気と建物間の熱交換過程を表現する

為に開発・導入された数値モデルである⁵⁾。

BEM は建築物に関しては単室近似の非定常の空調熱負荷計算を担うモデルであり (Fig.3), 空調熱負荷を顕熱分と潜熱分とに分離して算出している。顕熱分については、壁体貫流熱量, 窓面透過日射, 換気顕熱負荷, 室内の照明・機器と在室人員からの顕熱発熱を計算対象とし, 潜熱負荷成分としては, 換気に伴う建物内への湿気流入と人体からの水分蒸発を考慮している。非定常計算により予測される, 以上の顕熱・潜熱負荷と空調システムによるその処理量との差分にもとづき, 建築内の温度および湿度の時間変動をシミュレートできる。また, 処理された空調熱負荷と空調機器における消費エネルギーにもとづき空調廃熱を予測可能なモデルとなっている。

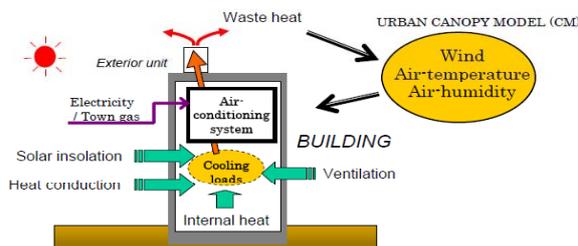


Fig.3 Relation between the building energy consumption model and urban canopy model.

3. 観測結果との比較

3.1 都内における観測

モデル自身のパフォーマンスを検証するため, 2002年7月と8月に東京都心(神田および日本橋:業務街区)で詳細な街区内部気温分布等の観測を行った, 期間は2002年7月28~30日, 8月9~11日の計6日間である。観測を行った地域の地図を Fig.4 に示す。神田地区と日本橋地区で観測された街区平均気温の時間変化を Fig.5 に示す。Fig.5 からわかるように, ほとんどの時間帯で AMeDAS 東京で観測された地上気温(実線)よりも神田・日本橋地区の気温(破線と丸印)の方が高い。またどちらの街区でも, 夜間よりも日中の

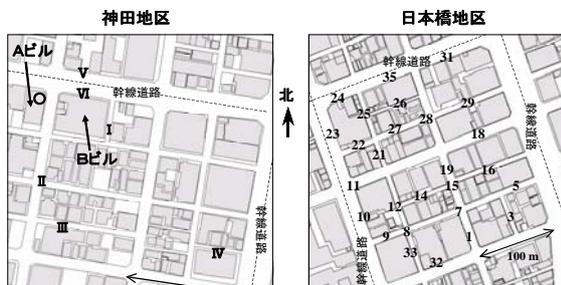


Fig.4 The locations of the observation.

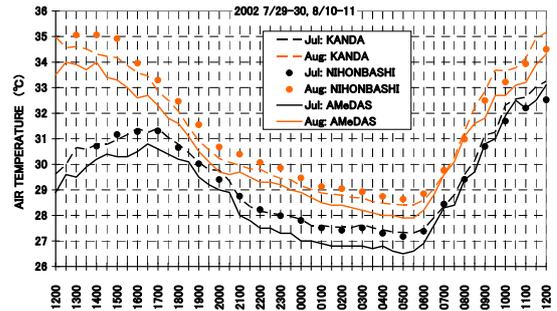


Fig.5 The comparison of the present observation with the AMeDAS Tokyo.

方が気温の空間的なばらつきが大きい(Fig.6)。これは日中の気温が日向日陰の影響を強く受けていることに起因するものと考えられる。

3.2 都市キャノピー・ビルエネルギー連成モデルの評価

ここで開発したモデルはメソスケール気象モデル(MM), 都市キャノピーモデル(CM), ビルエネルギーモデル(BEM)の3つのモデルの連成モデルである。しかしながら, 通年の対策評価を行うため年間の計算を行うにはこのフルスペックのモデルでは計算負荷が大きい。このため, 通年の対策評価はもっぱら CM と BEM の2つのモデルの連成モデルで行い, その境界条件は AMeDAS データ等より作成したデータにより行った。ここではその計算結果と観測結果の比較を Fig.6 に示す。

CM では水平方向に 500m 程度, 上空 250m までの計算を行っている。2002 年度の街区での観測は 7 月は週日, 8 月は休日を対象として行った。これに対応して, モデル計算では 7 月に対してはビルエネルギーモデル

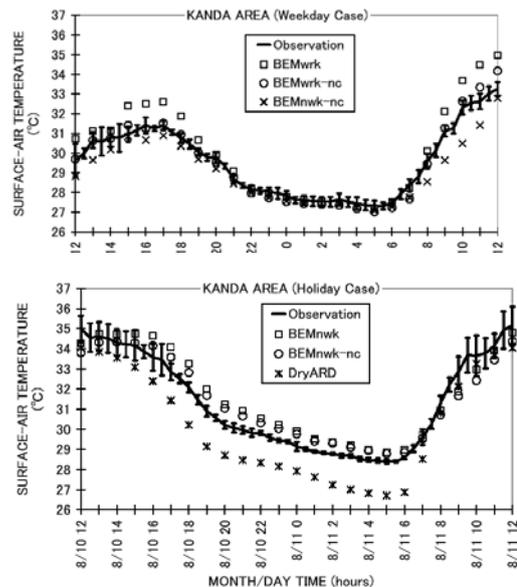


Fig.6 The comparison of the combined model results with the observation. Top is a weekday case and bottom is a holiday case.

を駆動して人工廃熱を与えた。一方8月の計算では人工廃熱を入れないで計算を行った。神田地区における結果を比較すると、週日では自動車排熱とオフィスビルからの排熱を導入した結果(Fig.6のBEMwrk)は観測値を上回る結果となっている。また、人工廃熱を全く導入しない結果(同BEMnwk-nc)は観測値を下回る結果となっており、人工廃熱としてオフィスビルからの排熱のみを考慮した結果(同BEMwrk-nc)が観測値と最も一致している。これは自動車排熱をA,Bビルの前の大きな通りを通行する自動車交通量から推定しており、この値が観測値周辺の500m四方の領域の平均の交通量より過大であったためと推定される。Fig.6下の図のDryARDはキャノピーモデルを入れないメソスケール気象モデル単独の値であり⁶⁾、特に夜間に実測値を再現できない。

3.3 メソスケール気象モデル・都市キャノピーモデル・ビルエネルギーモデル連成モデルの評価

都市キャノピーモデル(CM)とビルエネルギーモデル(BEM)の連成モデルを更にメソスケールモデル(MM)とtwo-way nestingの手法で結合したMM-CM-BEM連成モデルを用い、2002年7月の街区内気象観測時の再現シミュレーションを行った例を示す。計算期間は観測実施日(7月29日、30日)を含む2002年7月20日から30日までの10日間である。

シミュレーション結果より、神田の実測気温とモデルにより予測された地上気温を比較した結果を、Fig.7に示す。図中、MM-CM-BEM連成モデルにより予測された地上気温は、昼夜を通じてMM単独の計算による気温を上回ることが分かる。これは連成モデル上では、ビルによる廃熱や貯熱、更には夜間放射冷却の抑制等の都市キャノピーの効果が考慮されていることに拠る。また、MM単独の結果に比べ、連成モデルでは最高気温の出現時間が大きく改善され、観測データを用いずに都市キャノピーの平均気温とその時間変化をよく再現できている。

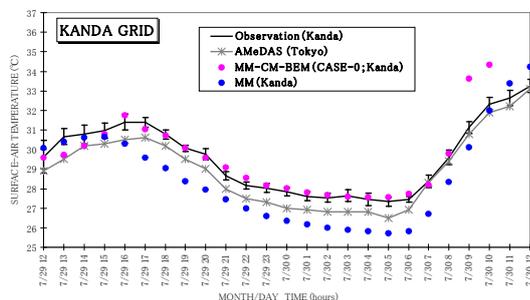


Fig.7 The comparison of the results from full-spec model, from the MM only and observations

4. 対策の通年評価

ヒートアイランド対策には、緑被率の向上や道路舗装の改善のように、都市計画にかかわるものがあるが、ここではこのようなすべての対策を評価したわけではなく、排熱が何らかの形でかかわるものを中心に評価

を行った。

具体的には以下の4項目について評価を行った。

- 日射の反射に関連する対策：高反射塗料
- 潜熱輸送に関連する対策：光触媒コーティング
- 省エネルギーに関連する対策：高断熱化
- 人工排熱の排熱位置に関連する対策：空調排熱源の高所配置化、地中熱源ヒートポンプ

以上の対策について、東京都の平均的な業務街区である千代田区九段北の街区を標準業務街区としてCM-BEMの2モデルの連成モデルで通年の評価を行った。モデルの駆動には2002年6月から2003年5月までの1年間のAMeDASデータを元にデータを作成した。気温の通年計算結果について無対策時との変化をFig.8に示す。これらの対策技術の評価指標として、対策効果の定量化に際し用いた熱環境に関わる指標は以下の通りである。ただし、評価は無対策ケースに対する増減量で行った。

<夏季>

- ① 気温 昼間における30[°C]以上延べ時間の増減(真夏日出現日数の代替指標)
- ② 夜間における25[°C]以上延べ時間の増減(熱帯夜出現日数の代替指標)

<冬季>

- ① 昼間における5[°C]以下延べ時間の増減
- ② 夜間における5[°C]以下延べ時間の増減

昼間30[°C]以上の延べ時間数の削減を指標にとると、光触媒コーティング、地中熱源ヒートポンプ、高反射塗料、空調排熱源の高所配置化、空調機器の省エネルギー、内部発熱機器の省エネルギーの順に、ヒートアイランド緩和効果が大きい。特に光触媒コーティング、高反射塗料、地中熱源ヒートポンプの3対策は、他の対策技術よりも効果が大きかった。一方、他の対策技術は、これらの対策と比べると、それだけでヒートアイランド緩和対策として位置づけるのは難しいことが分かる。

しかし、対策の通年での効果を検討する場合、8月の気温低減効果だけではなく、他の項目も評価する必要がある。特にヒートアイランド緩和効果が大きいと考えられる2つの対策に関しては、光触媒コーティングを導入した場合は夏季の湿度の上昇が見込まれ、また高反射塗料を導入した場合は冬季に外気・室内気温を下げるため通年でのエネルギー消費量の増大が見込まれる。一方、地中熱源ヒートポンプは、熱環境・エネルギーの両面で有効な対策であり、副作用を考慮せずに導入が可能な対策として位置づけられる。

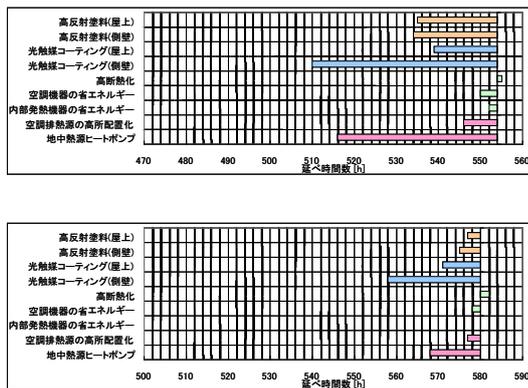


Fig.8 The variation of hours when the outdoor temperature is over 30°C (top) and those when the outdoor temperature is over 25°C at night (bottom).

5. おわりに

以上、産総研で開発を行った都市気候、都市キャンピー、ビルエネルギー連成モデルの紹介と、都市キャンピー・ビルエネルギー連成モデルによるヒートアイランド対策評価の例を示した。ここでは紹介を省いたが、前節のような解析は、木造住宅街区やRC造住宅街区別にも行っている。また、エネルギー関連機器以外の対策評価にも適用可能である。

謝辞

本技術報告は環境省地球環境保全等試験研究費により行った研究の成果の一部をまとめたものである。

文献

- 1) 鬼頭昭雄, 2004: 天気, **51**, 93-95
- 2) 近藤純正ホームページ 2005: <http://www.asahi-net.or.jp/~rk7j-kndu/kenkyu/ke04.html>
- 3) Kondo, H. 1995: *J. Appl. Met.*, **34**, 1439-1448.
- 4) Kondo, H., Y. Genchi, Y. Kikegawa, Y. Ohashi, H. Yoshikado and H. Komiyama, 2005: *Boundary-Layer Meteorology*, **116**, 395-421.
- 5) Kikegawa, H., Y. Genchi, H. Yoshikado and H. Kondo, 2003: *Applied Energy*, **76**, 449-466
- 6) 大橋唯太, 平野勇二郎, 玄地裕, 亀卦川幸浩, 近藤裕昭, 吉門洋, 2004: 水工学論文集, Vol.48 February, pp.133-138.

(Received June 9, 2006, Accepted July 3, 2006)