

次世代の天気予報モデルWRFへの 都市キャノピーモデルの導入効果

日下 博幸¹・Fei CHEN²・Mukul TEWARI³・平口博丸⁴

¹正会員 (財)電力中央研究所 地球工学研究所 流体科学領域 (〒270-1194千葉県我孫子市我孫子1646)
E-mail:h-kusaka@criepi.denken.or.jp

²正会員 National Center for Atmospheric Research (P.O. Box 3000 Boulder, CO 80307-3000, USA)
E-mail:feichen@ucar.edu

³非会員 National Center for Atmospheric Research (P.O. Box 3000 Boulder, CO 80307-3000, USA)
E-mail:mukul@ucar.edu

⁴正会員 (財)電力中央研究所 地球工学研究所 流体科学領域 (〒270-1194千葉県我孫子市我孫子1646)
E-mail:hiromaru@criepi.denken.or.jp

次世代の天気予報モデルWRFが米国大気研究センター、米国環境予測センター、米国海洋大気庁予報システム研究所などによって開発されている。しかしながら、このモデルにおける都市の取り扱いはまだ不十分である。本研究では、Kusaka et al. (2001)によって開発され、Kusaka and Kimura (2004)によって改良された都市キャノピーモデルをWRFモデルに導入し、そのインパクトを評価した。都市キャノピーモデルを導入した結果、モデル地表面は日没後も大気を暖めるようになった。これは、都市キャノピーモデルを導入することによって、従来から指摘されてきた都市気候の熱収支の特徴を、領域気象モデルで定性的に表現できるようになることを意味している。また、都市キャノピーモデルの導入が数値予報の精度を向上させる可能性を示唆するとともに、夜間のヒートアイランドに対する都市のキャノピー効果の重要性も示唆している。

Key Words : WRF model, Single-layer urban canopy model, Urban heat island, Numerical weather prediction, Numerical simulation

1. はじめに

近年、メソスケール気象モデル（以下、メソモデル）は、都市のヒートアイランド現象、風力発電などの環境とエネルギーにかかわる気象の予測・解析ツールとして、幅広く利用されている^{1)~6)}。Ichinose ら¹⁾は詳細な土地利用データと人工排熱データをメソモデルに導入し、エネルギー消費が都市のヒートアイランドに及ぼす影響を評価した。亀井川ら⁴⁾はメソモデル、都市キャノピーモデル、ビルエネルギーモデルを利用することによって、エネルギー需要を推定した。村上ら⁵⁾はメソモデルと非線形型 $k-\epsilon$ モデルを風力発電用風車の立地選択に応用している。ペンシルベニア州立大学 (PSU) と米国大気研究センター (NCAR) が開発した第5世代のメソスケールモデル⁹⁾ (PSU/NCAR-MM5, 以下MM5) は、世界で最も多くのユーザーをもつメソモデルの一つであり、このモデルもまた、環境とエネルギーにかかわる研究に直接的、もしくは他のモデルとの併用により間接的に貢献してき

た¹⁰⁾。現在、米国では、NCAR、米国環境予測センター (NCEP)、米国海洋大気庁の予報システム研究所 (NOAA/FSL)、米国空軍気象局 (AFWA) などが共同で、研究用モデルのMM5や天気予報モデルのEtaモデルの後継モデルに位置付けられるWeather Research and Forecast (WRF) モデルを開発している¹¹⁾。しかしながら、現時点では、都市の効果は植生モデルのパラメータ調節という形でしか考慮されていない。ヒートアイランド研究をはじめとする都市の大気環境の研究にこのモデルを利用するためには、地表面モデルの改良を行うことが望ましい。そこで、われわれ WRF プロジェクト陸面モデリンググループでは、都市の効果をより物理的に考慮した都市キャノピーモデルの導入を行っている。本研究では、都市キャノピーモデルを含むWRFモデルとそれを含まない標準のWRFモデルを比較することにより、WRFへの都市キャノピーモデルの導入効果を評価する。

2. 数値モデルの概要

(1) WRFモデル

WRFモデルの基礎方程式系は運動方程式・連続の式・熱力学の式・混合比の保存式からなり、地形に沿った質量座標系（静力学気圧座標系）で記述されている。基礎式には、静力学平衡や非圧縮の近似はほどこされていない。時間スキームには3次精度のルンゲ・クッタ、移流項の空間差分には5次精度の風上差分もしくは6次精度の中央差分が適用されている。ただし、計算機環境に応じて時間、空間差分の次数を落とすことは可能である。また、WRFモデルでは5次風上差分により陰に生じる数値粘性以外の人為的な数値粘性項は導入されていない。一方で、MM5の時間スキームは2次精度のリープ・フロッグ、移流項は2次中央差分であり、人為的な強い数値粘性が入れられている。これらのことから、WRFモデルはMM5に比べて、より高解像度の計算に適していると考えられている。WRFモデルにはMM5同様、複数の物理モデルオプションが用意されている。それらの多くはMM5から移植されたものであるが、RUC-LSM（陸面モデル）、YSU, Smagorinsky（乱流モデル）、WSM3, WSM5, WSM6（雲物理モデル）などMM5に導入されていないモデルもある¹²⁾。

(2) 都市キャノピーモデル

本研究で導入された都市キャノピーモデルはKusakaら¹³⁾によって開発され、Kusaka and Kimura^{14), 15)}によって改良された単層キャノピーモデルである。(a)都市を道路とその両側に並ぶ建物からなるストリートキャニオンの集合体とみなしている、(b)キャニオン内での短波・長波放射の反射が計算される、(c)ゼロ面変位が考慮されている、(d)キャニオン内の弱い風速、(e)屋根面、壁面、道路面で別々に熱収支、表面温度、内部温度が計算される、(f)屋根面とキャニオン空間で計算されたフラックスをその面積比に従い加重平均することによって、都市全体から放出されるフラックスを計算する、などの特徴を持っている（図-1）。紙面の都合上、全ての構成式を記すことはできないので、夜間の気温の計算に特に重要となる長波放射のみを以下に記す。屋根面、壁面、道路面における壁面反射を含めた正味の長波放射量はそれぞれ、(1), (2), (3)式の通りである。

$$L_R = \varepsilon_R (L^\downarrow - \sigma T_R^4) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} L_W = & \varepsilon_W (L^\downarrow F_{W \rightarrow S} + \varepsilon_G T_G^4 F_{W \rightarrow G} + \varepsilon_W \sigma T_W^4 F_{W \rightarrow W} - \sigma T_W^4) \\ & + \varepsilon_W \{ (1 - \varepsilon_G) L^\downarrow F_{G \rightarrow S} F_{W \rightarrow G} + (1 - \varepsilon_G) \varepsilon_W \sigma T_W^4 F_{G \rightarrow W} F_{W \rightarrow G} \\ & + (1 - \varepsilon_W) L^\downarrow F_{W \rightarrow S} F_{W \rightarrow W} + (1 - \varepsilon_W) \varepsilon_G \sigma T_G^4 F_{W \rightarrow G} F_{W \rightarrow W} \\ & + \varepsilon_W (1 - \varepsilon_W) \sigma T_W^4 F_{W \rightarrow W} F_{W \rightarrow W} \} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} L_G = & \varepsilon_G \{ L^\downarrow F_{G \rightarrow S} + \varepsilon_W \sigma T_W^4 F_{G \rightarrow W} - \sigma T_G^4 \} \\ & + \varepsilon_G \{ (1 - \varepsilon_W) L^\downarrow F_{W \rightarrow S} F_{G \rightarrow W} + (1 - \varepsilon_W) \\ & \varepsilon_G \sigma T_G^4 F_{W \rightarrow G} F_{G \rightarrow W} \\ & + \varepsilon_W (1 - \varepsilon_W) \sigma T_W^4 F_{W \rightarrow W} F_{G \rightarrow W} \} \end{aligned} \quad (3)$$

ここで L^\downarrow は下向き長波放射、 ε , σ , F はそれぞれ射出率、ステファン・ボルツマン定数、ビューファクターを意味する。添え字のS, R, W, Gはそれぞれ天空、屋根面、壁面、地面を意味する。添え字の矢印はある面からある面へのビューファクターの方向を意味する。この都市キャノピーモデルは観測された表面温度や正味放射量をよく再現できること、メソスケール現象に対するそのパフォーマンスはより複雑で高精度な多層モデルと同等であることが確認されている¹³⁾。

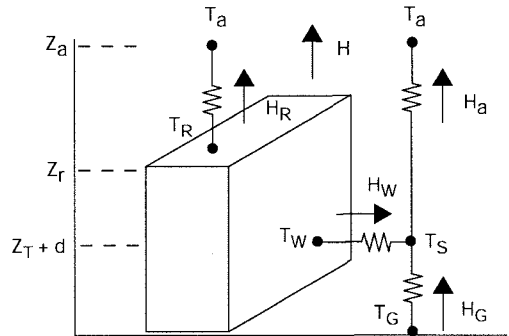


図-1 都市キャノピーモデルの概要。Tは気温、Hは顕熱フラックスを意味する。Z_a, Z_r, Z_lはそれぞれ参照レベル、屋根面レベル、熱に対する粗度高さを意味する。dはゼロ面変位を意味する。

3. WRFへの都市モデル導入効果

(1) 計算対象事例

2004年7月7日午前9時の地上天気図を図-2に示す。この日は高気圧に覆われ、全国的に晴れとなった。このような日には局地循環がよく発達し、埼玉県南部や関東平野の内陸部で高温となることが多い^{16), 17)}。本事例においても、午後3時に、東京都の北部から埼玉県の南部（さいたまなど）、栃木県南部（小山など）にかけて35度を

(3) 結果

標準 WRF を用いたシミュレーションによって得られた 7 月 7 日午後 3 時の地上気温の分布と地上風系を図-7 に示す。関東平野を覆ういわゆる大規模海風や関東平野の北部と西部の山岳を上昇する谷風を再現している。しかしながら、局地不連続線を再現できるほど高解像度ではないため、明瞭な海風前線は認められない。初期値の誤差、放射モデルの誤差、人工排熱を入れなかった誤差などから、地上気温は全体的に 3 度程度の負のバイアスを持っているものの、分布に関しては、高温域が海老名から埼玉、熊谷、前橋および小山、宇都宮付近まで広がっているなどの傾向は再現した。東京湾西側沿岸の気温が観測にくらべて著しく低い理由は土地利用データの誤差（図-6）によるものだと考えられる。都市モデル導入 WRF によって計算された地上気温の分布と地上風系は標準 WRF のそれとおおよそ類似している（図-8）。

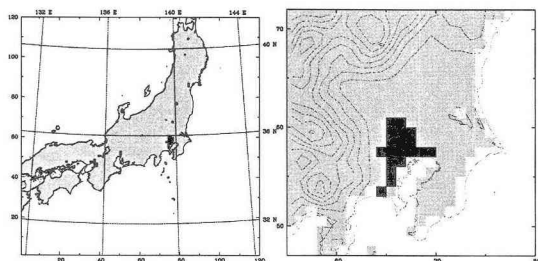


図-6 モデルの計算領域(左図)と関東平野付近の拡大図(右図)。白は水面、黒は都市、灰色はその他の土地利用カテゴリーを意味する。

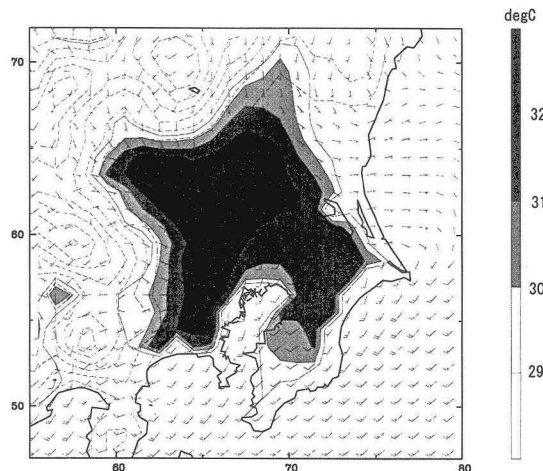


図-7 標準 WRF によって計算された午後 3 時の地上 2m の気温と地上 10m の風。

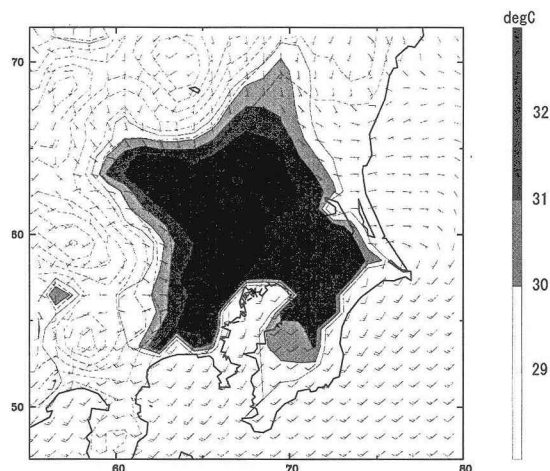


図-8 図-7 と同じ。ただし、都市モデル導入 WRF。

次に、標準 WRF と都市モデル導入 WRF によって計算された翌日午前 3 時の気温分布と風系をそれぞれ図-9、図-10 に示す。標準 WRF、都市モデル導入 WRF とともにたまた付近を中心として 28 度を越す高温域が認められる。ただし、都市モデル導入 WRF の計算結果に、この高温域がより強く表れている。高温域の中心が観測よりも北側に現れた理由は、WRF によって計算された気温分布が実際よりも移流の影響を強く受けていること、WRF で用いている土地利用データが都市域における非一様性を表現していないこと、都心の大きな人工排熱の効果がモデルに反映されていないこと、土地利用データの誤差のためと思われる。

標準 WRF と都市モデル導入 WRF によって計算された 7 月 7 日午後 9 時の顕熱フラックスの分布をそれぞれ図-11、図-12 に示す。標準 WRF によって計算された都市域におけるこの時間の顕熱フラックスは負の値となったが、都市モデル導入 WRF は都市域で平均 5-10W/m²程度、最大で 15W/m²を越える顕熱フラックスを地表面から放出している。この地表面から大気への熱の供給により、都市の冷却が遅れ、前述した夜間の高温域が明瞭に形成されると考えられる。これらの結果は、都市のキャノピー効果が、都市の下層大気の冷却を緩和し、気温の日較差を小さくしていることを強く示唆している。

最後に、WRF と MM5 の違いを示す例として、領域気象モデル MM5 で計算された午後 9 時の顕熱フラックスを図-12 に示す。この MM5 は NCAR の標準版であり、都市モデルは導入されていないが、LSM は導入されている。顕熱フラックスは関東平野全域で負の値となっており、本事例のような気象場に MM5 を適用する場合、従来から指摘されているように²⁾、地表面モデルなどで使われているパラメータの調整を行う必要があることを示している。

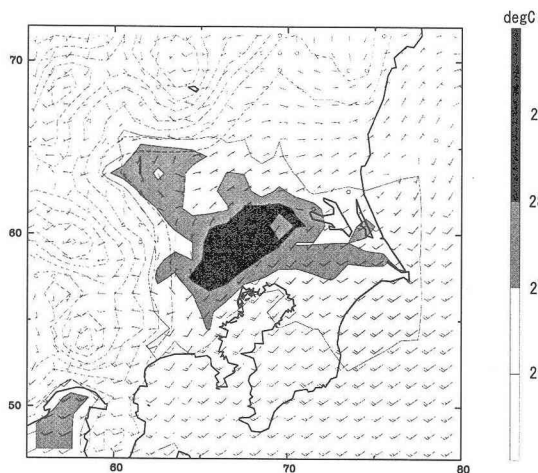


図-9 標準 WRF によって計算された午前 3 時の地上 2m の気温と地上 10m の風。

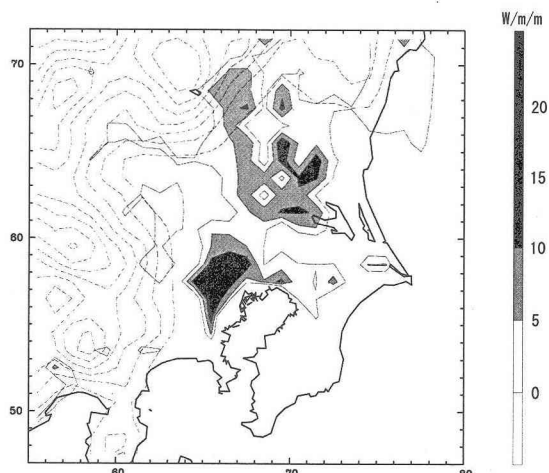


図-12 図-11 と同じ。ただし、都市モデル導入 WRF。

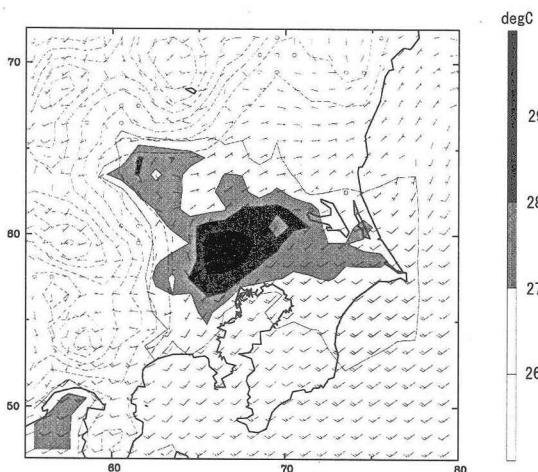


図-10 図-9 と同じ。ただし、都市モデル導入 WRF。

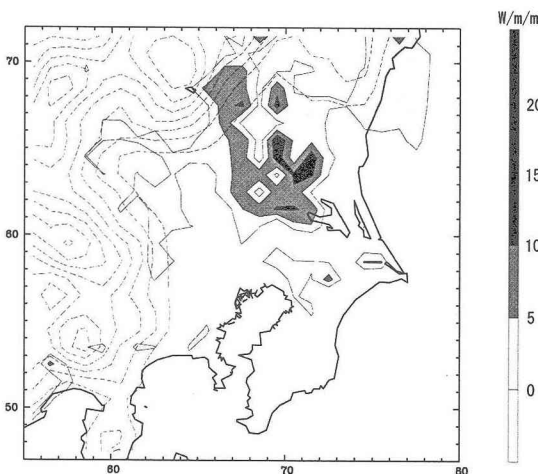


図-11 標準 WRF によって計算された午後 9 時の顕熱フラックス。

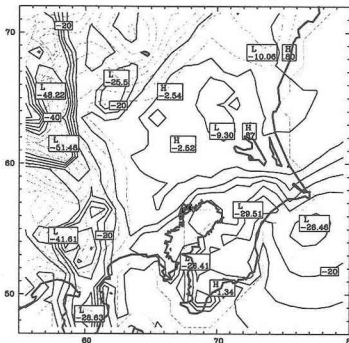


図-13 MM5 によって計算された午後 9 時の顕熱フラックス。

4. まとめ

大気環境シミュレーションの精度向上のために WRF モデルに都市キャノピーモデルを導入し、そのインパクトを調査した。その結果、都市モデル導入 WRF のほうが日較差が小さく、都市の風下側の気温をより高温化させることが確認された。また、都市モデルを導入することにより、定性的ではあるが、都市気候の特徴の一つである日没後の正の顕熱フラックスを表現できるようになった。これらの結果は夜間の都市気温のシミュレーションに対して都市キャノピー効果を含むモデリングが重要であること、都市モデルの精度をさらに向上させることにより、WRF が大気環境の予測、解析に対してさらに有力なツールになりえることを示唆している。現在、WRF プロジェクト陸面モデリンググループでは、ネスティングバージョンへの都市モデルの導入が行われている。本研究で確認された水平格子間隔 10km の WRF モデルのパフォーマンスはネスティングを用いたより高解像度の計算に対して有用な情報となるであろう。

参考文献

- 1) Ichinose, T., K. Shimodono, and K. Hanaki: Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo, *Atmos. Environ.*, Vol. 33, pp.3897-3909, 1999.
- 2) 浦野明, 花木啓祐, 一ノ瀬俊明, 下堂蘭和宏: 都市活動の立体的再配置による都市熱環境の制御に関する研究, *環境システム研究*, Vol.25, pp.463-467, 1997.
- 3) 大橋唯太, 木田秀次: 京阪神地域における都市再開発が局地気象に与える影響について —領域型数値モデルを用いた実験—, *環境システム研究*, Vol. 28, pp. 339-344, 2000.
- 4) 亀卦川幸浩, 玄地裕, 近藤裕昭, 花木啓祐: 街区構造に応じた高温化対策の導入が都市空調エネルギー需要に及ぼす影響, *エネルギー・資源*, 23 巻, 3 号, pp.200-206, 2002.
- 5) 村上周三, 持田灯, 加藤信介, 木村敦子: 局所風況予測システム LAWEPS の開発と検証, *ながれ*, Vol.22, pp.375-386, 2003.
- 6) 石原猛: 非線形風況予測モデル MASCOT の開発とその実用化, *ながれ*, Vol.22, pp.387-396, 2003.
- 7) 谷川亮一: LOCALS™ による風況シミュレーションモデルの開発と風況評価, *ながれ*, Vol.22, pp.405-415, 2003.
- 8) 内田孝紀, 大屋裕二: 風況予測シミュレータ RIAM-COMPACT の開発 - 風況精査とリアルタイムシミュレーション -, *ながれ*, Vol.22, pp. 417-428, 2003.
- 9) Dudhia, J., A nonhydrostatic version of the Penn State / NCAR mesoscale model: Validation tests and simulations of an Atlantic cyclone and cold front, *Mon. Wea. Rev.*, Vol.121, pp.1493-1513, 1993.
- 10) 嶋田進, 大澤輝夫, 深尾一仁, 橋本篤, 村上智一, 安田孝志: 洋上風力発電の検討を目的とした伊勢湾上の 1km 格子風況シミュレーション, 第 12 回地球環境シンポジウム論文集, pp.227-232, 2004.
- 11) NCAR: The Weather Research and Forecasting model, cited on <http://wrf-model.org/index.php>, 2004.
- 12) Dudhia, 2004: The Weather Research and Forecast model version 2.0: http://www.mmm.ucar.edu/mmm5/workshop/workshop-papers_ws04.html.
- 13) Kusaka, H., Kondo, H., Kikegawa, Y., and Kimura, F.: A simple single-layer urban canopy model for atmospheric models: Comparison with multi-layer and slab models, *Bound.-Layer Meteor.*, Vol.101, pp.329-358, 2001.
- 14) Kusaka, H. and Kimura, F.: Coupling a single-layer urban canopy model with a simple atmospheric model: Impact on urban heat island simulation for an idealized case, *J. Meteor. Soc. Japan*, Vol. 82, pp.67-80, 2004.
- 15) Kusaka, H. and Kimura, F.: Thermal effects of urban canyon structure on the nocturnal heat island: Numerical experiment using mesoscale model coupled with urban canopy model, *J. Appl. Meteor.*, Vol.43, pp.1899-1910, 2004.
- 16) Kusaka, H., Kimura, F., Hirakuchi, H., and Mizutori, M.: The effects of land-use alteration on the sea breeze and daytime heat island in the Tokyo metropolitan area, *J. Meteor. Soc. Japan*, Vol. 78, pp.405-420, 2000.
- 17) 藤部文昭: 関東平野における春・夏季晴天日の気温分布の日変化, *天気*, Vol. 40, pp. 759-767, 1993.
- 18) Kain, J. S., and Fritsch, J. M.: Convective parameterization for mesoscale models: The Kain-Fritsch scheme, *The representation of cumulus convection in numerical models*, K. A. Emanuel and D. J. Raymond, Eds., Amer. Meteor. Soc., 1993.
- 19) Hong, S.-Y., and Pan, H.-L.: Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model, *Mon. Wea. Rev.*, vol.124, pp.2322-2339, 1996.
- 20) Chen, F., and Dudhia, J.: Coupling an advanced land-surface/hydrology model with the Penn State/NCAR MM5 modeling system. Part 1: Model description and implementation, *Mon. Wea. Rev.*, Vol.129, pp. 57-604, 2000.
- 21) Joseph A. Zehnder.: Simple modifications to improve fifth-generation Pennsylvania State University-National Center for Atmospheric Research Mesoscale Model performance for the Phoenix, Arizona, metropolitan area. *J. Appl. Meteor.* Vol. 41, pp.971-979, 2002.

IMPACT OF THE URBAN CANOPY MODEL IN THE NEXT-GENERATION NUMERICAL WEATHER PREDICTION MODEL WRF

Hiroiyuki KUSAKA, Fei CHEN, Mukul TEWARI and Hiromaru HIRAKUCHI

The next-generation numerical weather prediction model, WRF has been developed in the collaboration of NCAR, NCEP, NOAA/FSL, for instance. However, the WRF model still uses a conventional approach for the urban surface parameterization. We show in this paper a research and development efforts with regards to developing a land surface model coupled with urban canopy model for the WRF model. The urban canopy model is the single-layer model developed by Kusaka et al. (2001) and modified by Kusaka and Kimura (2004). Both of the modified and standard WRF were applied to simulate the local weather to investigate impact of the urban canopy model. The result shows that the urban canopy model releases sensible heat from the urban surface after sunset, which is one of the essential features of urban climate. This indicates that the urban canopy model could help to increase accuracy of weather forecasts and the canopy structure plays a significant role in nocturnal heat island formation.