

高性能気象モデルによる重慶市の熱環境のシミュレーション

Simulation of thermal environment simulation in Chongqing using a high-performance meteorological model

張 洪賓^{*1}

荒巻 俊也^{*2}

泉 岳樹^{*3}

花木 啓祐^{*1}

Hongbin ZHANG

Toshiya ARAMAKI

Takeki IZUMI

Keisuke HANAKI

ABSTRACT : A highly versatile numerical code – the Regional Atmospheric Modeling System (RAMS) was used into the heat island simulation of an inland mega-city – Chongqing, China. The total horizontal calculation area was 2,000km×2,000km and the total vertical space was from 50cm under ground to the upper air 15,000m. The USGS (U.S. Geological Survey) topography and land use data, the NCEP (National Centers for Environmental Prediction) meteorological data were used as the input data of this simulation. The phenomenon that the temperature of Chongqing's urban area was higher than that of suburb was identified, and the feasibility of using RAMS into the simulation of thermal environment was proved. It was also identified that the local climate in the smaller scale could be expressed by generating two-way interactive nesting grid.

KEYWORDS : RAMS, thermal environment, heat island, Chongqing, nesting

1. はじめに

1950 年から 1995 年にかけて世界の都市人口は 7.4 億人から 26 億人へと急増しており、2025 年までの 30 年間に、52 億人へと 2 倍に増大すると考えられている⁽¹⁾。とりわけ、途上国においてはこれからも急激な都市への人口集中が見込まれている。このような都市人口の増加による都市の広域化や都市活動の拡大により、都市環境に対して様々な環境負荷が与えられるようになっていく。緑地面積の減少や、地表面改変、エネルギー消費の増大などを原因としたヒートアイランド現象もその一つであり、大きな社会問題となっている。

ヒートアイランド現象は、19 世紀初頭にロンドンにおいて最初に観測された。都市とその周辺地域の温度分布図を見たときに、都心部が高温化し、等温線が島状に都心部を取り巻く形になっていることからヒートアイランドと名づけられた。これまでのヒートアイランドに関する研究は、主に現象把握や発生機構の解明を目的とした現象解明型研究が主流であり、研究手法により概ね観測研究、統計学的研究、数値シミュレーション研究の 3 種類に分類されている⁽²⁾。先進国だけではなく、多くの途上国の都市（シンガポール、バンコク、上海、北京など⁽³⁾）を対象とする研究も行われてきた。これらの研究により、ヒートアイランド発生のメカニズムが定性的には明らかになってきたとともに、ヒートアイランドが都市の快適さを損なうだけでなく、冷房使用の増加による夏季エネルギー消費量の更なる増大や、ダストドームの生成による都市大

*1 東京大学大学院工学系研究科都市工学専攻 Department of Urban Engineering, The University of Tokyo

*2 東京大学先端科学技術研究センター Research Center for Advanced Science and Technology, The University of Tokyo

*3 東京都立大学大学院理学研究科地理科学専攻 Department of Geography, Tokyo metropolitan University

気環境の悪化などその他の環境影響を引き起こすことも分かってきた。

ヒートアイランドに対する理解が深まるにつれて、問題解決指向型の研究が 90 年代半ばから求められるようになった。そのために、都市域全体の熱環境を総合的に捉えるメソスケールのシミュレーションが非常に重要な役割を果たしている。気象学でのメソスケールとは数百 m から数千 km 程度を表し、このスケールの現象を対象として解析を行うモデルをメソスケールモデルという。しかし、多くの空間規模メソスケールモデルでは、ブシネスク近似と静水圧平衡を仮定した基礎方程式を用いるため、評価対象地域の最小メッシュ幅がおおよそ 1km~5km という制限が存在する^(4,5)。

これに対して、本研究では非静水圧平衡方程式を導入した比較的新しい高性能気象モデル The Regional Atmospheric Modeling System (RAMS) をヒートアイランドのシミュレーションに使用することを試みた。

2. RAMS (The Regional Atmospheric Modeling System)

RAMS (The Regional Atmospheric Modeling System) はコロラド州立大学、及び MRC/ASTER division 社により開発・改良された多目的数値モデルである。1984 年に RAMS の基本となる概念が雲や海風モデルの進化により初めて登場してから、5 回の修正を経て 2000 年に Version4.3 が発表されている⁽⁶⁾。

RAMS は、1)大気モデル、2)データ分析、3)処理後の画像化と分析、という 3 つの部分から構成され、以下が主な特徴である⁽⁷⁾。

- 1) 4DDA モデル：3D 空間の時間変化をシミュレーションできる；
- 2) 非静水圧平衡：メッシュサイズには下限がなく、半球レベルからビル風までを扱える；
- 3) テレスコープ効果：大領域の計算と小領域の計算を双方向のネスティングで結合したシミュレーションが可能である。
- 4) LES モデル：乱流拡散モデル LES (Large Eddy Simulation) を取り込むことが出来るため地表面境界層での乱流拡散を高精度で予測することが可能となる；

RAMS をヒートアイランドのシミュレーションに用いることにより、今までのメソスケールモデルが抱えていた最小メッシュ幅の制限という問題を解決するとともに、ネスティング機能によりメソスケールの熱環境のシミュレーションとより小さいスケールでのシミュレーションを有機的につなげて評価することが可能になる。

3. 対象地域の概要

本研究では、現在急激な開発が進んでいる中国南西部にある典型的な内陸都市—重慶を対象都市として、RAMS による熱環境のシミュレーションを行った。

今まで熱環境に関する研究の対象となった都市の多くは臨海部に位置している。これは、既存の大都市の多くが臨海部に立地していることと、内陸地域での熱環境は周辺の複雑な地形の影響を強く受けるため、メソスケールモデルによるシミュレーションが技術的に困難であることなどが理由として考えられる。本研究では、RAMS を利用することにより重慶市のような内陸に位置する都市の熱環境のシミュレーションも可能になると考えた。

重慶は長い歴史を持つ且つ近年大きく発展している都市である。3,000 年以上前から自然に発生した“都市”であり、中国の有数な重工業地帯として長い間中心的な役割を果たしてきたが、80 年代の改革開放政策開始以来、重工業が衰退し、急速な成長を遂げた東部沿岸地域に大きな遅れをとってきた。しかし、三峡ダムの建設をきっかけに、1997 年 3 月 14 日から重慶は北京、上海、天津とならぶ中国 4 番目の中央直轄市に昇格しており、「西部大開発」プロジェクトの波に乗って開発が進み、新しい都市として生まれ変わろうとしている。今後、開発とともにヒートアイランド問題が深刻になることが考えられるので、重慶の熱環境状況を説明することには意義がある。

重慶市はチベット高原から長江中下流域平原に移り変わる地帯、四川盆地の南東部、山峡ダムの貯水区域に立地している。総面積は約 82,000km²、総人口がおよそ 3,000 万人であり、面積・人口とも現在中国国内で第一位の都市である⁽⁸⁾。中心部は長江と支流の嘉陵江の間に突き出した三角洲のような地区に位置する。長江が西から東に向けて貫流し、市内での総延長が約 665km である。地形の最大の特徴は起伏が激しいことであり、最高海拔が 2796.8m にものぼるのに対して、最低海拔は 73.1m である。

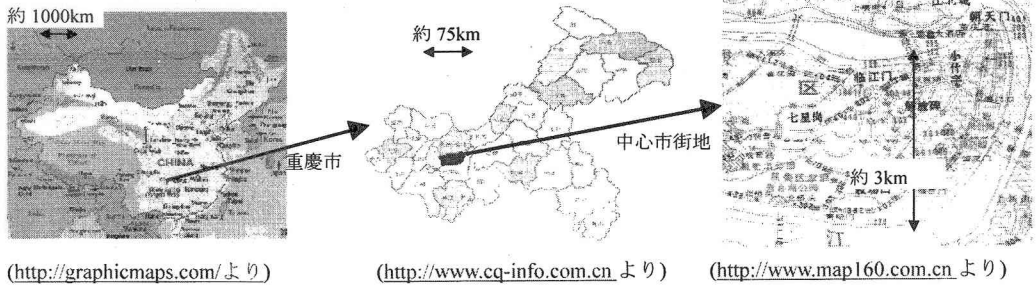


図 1 重慶市の位置とその形状

重慶市の年平均気温は約 15℃、亜熱帯モンスーン湿潤気候に属しており、冬は暖かいが、夏は非常に暑く、最高気温が 40℃を超える日も珍しくない。昔から中国の“三大火鉢”の一つとして有名である。したがって、夏季のヒートアイランド形成は重大な問題となりうる。

年平均降水量は概ね 1000～1400mm である。霧が多く、大気汚染も深刻な問題となっている。7 月、8 月は月平均日照時間が 230 時間以上あるが、その他の月では平均 150 時間未満である。

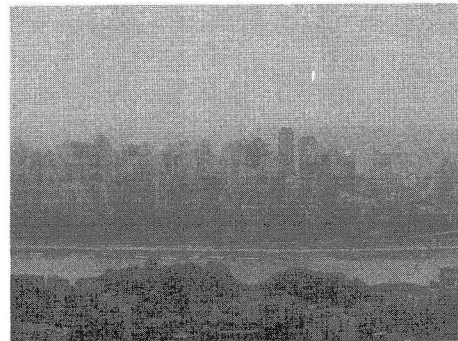


図 2 “霧都”ともいわれる重慶

(2002.5.16 重慶にて撮影)

4. 計算領域の選択及びメッシュの設定

重慶が内陸部複雑地形にあるため周囲の気象条件などが不安定になりやすいことに加えて、広い面積を有するので、本研究では下図(図 5)に示した A 点 (104.0° E、31.0° N) を中心とする 2000km×2000km の面積を全計算領域(グリッド 1)とした。この領域中心が重慶の中心部より離れている理由は、北西部にあるチベット高原が重慶の気象状況に影響を与える可能性が大きいと考えられるからである。

さらに、重慶の市街地所在地(東経 106.5°、北緯 29.5° 周辺)を中心にもう一つネスティング解析を行うためのグリッド 2 (大きさ 500km×500km)を設けた。

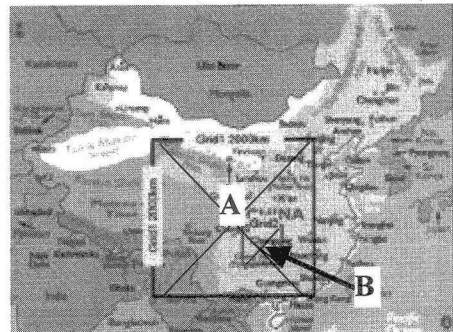


図 3 水平グリッドのイメージ

メッシュサイズについては、グリッド1を20km×20kmの100×100(1万)メッシュにきり、グリッド2も同じく5km×5kmの100×100より細かい1万メッシュに切ることにした。

鉛直方向の計算領域は、地下50cmから高度15,000mまでとし、地下を不等間隔で11層に分割した。グリッド1は全部で19層となり、第1層(グラウンドが第1層の底面)の厚さを100mとし、以後1.15倍の比率で層の厚さを増大させた。1層の厚さが1200mを超えた層より上空の層は全て1200mの均一な厚さにした。

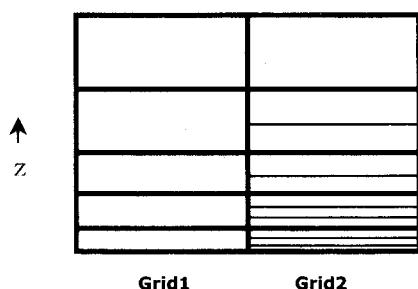


図5 垂直方向のメッシュ分割

4.2 シミュレーションの設定

USGS(U.S. Geological Survey)の地形、土地利用データ、気象データとして NCEP (National Centers for Environmental Prediction) の Global Tropospheric Analyses⁽⁹⁾を使用した。データリストは下記通りとなる。

- 1) DEM - 30-Minute Digital Elevation Model、 約1km解像度の地形データ；
- 2) sst - sea surface temperature、 全球海面温度データ；
- 3) ogedata - 1992年4月から、1993年3月までの Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) 観測データに基づいて抽出した解像度約1km程度の土地利用データ；
- 4) ds082.0 - Global Tropospheric Analyses、2.5 degree グリッドの全球対流圏観測データ⁽¹⁰⁾；今回使用したのは、ds082.0 データセット中の1996年7月30日の1000mb、850mb、700mb、500mb、400mb、及び300mbの各等圧面における風向・風速(u、v方向)、温度、相対湿度、ジオポテンシャル高度5種類に関する部分である。

シミュレーションの主な設定条件を下記に示す。

- 1) 基本地形構成(Topography scheme)：Reflected Envelope Orography
- 2) 境界モデル(Lateral boundary condition flags)：Klemp/Wilhelmson cloud model
- 3) 地表面モデル(Surface layer/soil/vegetation model)：Soil/Vegetation model
- 4) 地下層深さ (最下層からの配列)：0.5, 0.4, 0.3, 0.25, 0.20, 0.16, 0.12, 0.09, 0.06, 0.03, 0.01 (単位：m)
- 5) 土壌湿度 (最下層からの配列)：0.35, 0.35, 0.35, 0.35, 0.35, 0.35, 0.35, 0.35, 0.35, 0.35, 0.35 (単位：100%)
- 6) 土壌温度 (最下層からの配列)：-2.0, -1.8, -1.5, -1.0, 0.5, 2.0, 3.5, 5.0, 5.0, 5.0, 5.0, (単位：℃)

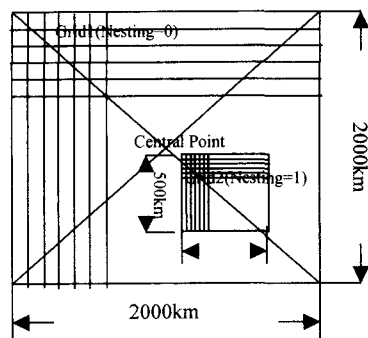


図4 水平方向のメッシュ分割

グリッド2については、グリッド1の地表面1層から4層にかけ図7に示すように、更に3、3、2、2の順にそれぞれを等分割した。従って、グリッド1の鉛直方向は全部で30層(11+19)であるのに対して、グリッド2のほうは36層(11+19+2+2+1+1)からなる。

このように水平方向及び鉛直方向に対してそれぞれネスティングをかけて重慶の中心部分をより細かく解析することとした。

5. 結果と考察

シミュレーションは1996年7月30日を対象し0時からの24時間の連続計算である。図6に示しているのは、0時、12時（UTC時間制、重慶の緯度に相当時間に換算するとおよそ午前7時と午後7時となる）における温度分布結果である。

(a)、(c)は全ドメイン（グリッド1）の上空72.4m等高面上における0時及び12時の結果であり；(b)、(d)はネスティングをかけたグリッド2の結果で、それぞれ0時、12時での上空23.6m等高面上の温度分布である。

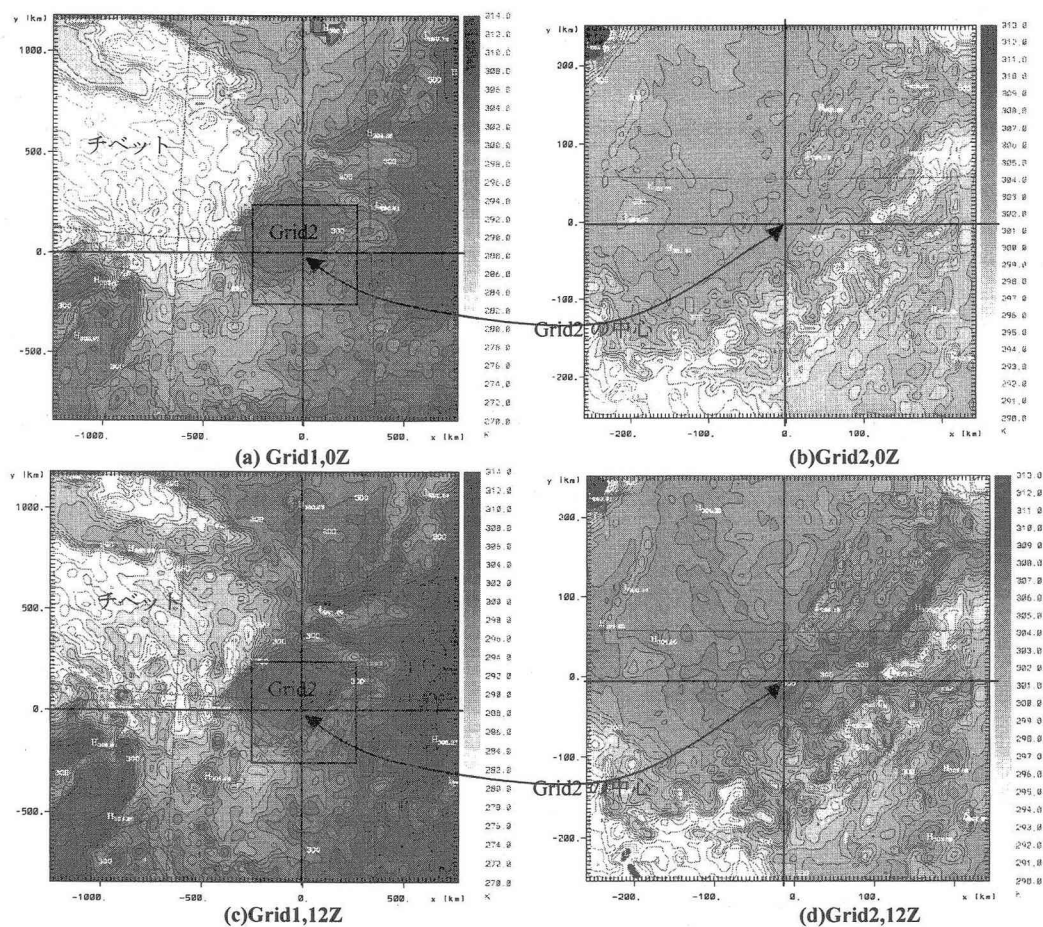


図6 シミュレーション結果の例

グリッド1の温度分布図より、気温がチベット高原に向け低くなっていることが確認できる。これは標高が高くなることによるものと考えられる。更に、重慶都市部の気温が周辺地域に比べ2～4℃程度高くなっていることも確認できた。

0時と12時の温度分布図を比べると、12時の方が気温は全体的に高くなっており、都市域と周辺地域の温度差も大きくなっているが分かった。

グリッド2の温度分布図では、グリッド1の方で判別できなかったより細かい温度分布の変化も再現された。メッシュを小さくすることにより局地的な気候の再現性が向上したことは確認できた。

6. まとめ

今回重慶を対象とするシミュレーション結果から、重慶市街域の気温が周辺地域より高いことは確認できた。そして、RAMS を熱環境のシミュレーションに応用する見通しも付いた。しかし、シミュレーションの精度については、まだ検証を行っていない。人工排熱を評価する部分はまだモデルに入れていないので、人工排熱による熱環境へ影響はまだ反映されていない。

今後は、RAMS に人工排熱を評価する部分を組み込み、RAMS をより熱環境のシミュレーションに適するように改良することが必要である。

参考文献：

- (1) OECD Observer 日本語版 No.217
- (2) 泉 岳樹、ヒートアイランド研究の現状と今後の方向性に関する試論－転換期における「環境研究」のあり方を視野に－、環境システム研究論文発表会講演集，28，427-435
- (3) 久保 幸夫他、バンコク及び上海における気象観測網の展開とヒートアイランド現象の分析、ヒートアイランドの計測制御システム中間報告書、平成 11 年 2 月、p49~81
- (4) 花木 啓祐、浦野 明、清田 修、緑地による街区規模での熱環境改善効果のシミュレーション、ヒートアイランドの計測制御システム中間報告書、平成 11 年 2 月、p96~119
- (5) 泉 岳樹、数値シミュレーションによる都市熱環境の解析とその制御方法に関する研究、博士論文、p1~18
- (6) The Regional Atmospheric Modeling System version 3b User's Guide、MRC／ASTER
- (7) Robert L. Walko & Craig J. Tremback, *RAMS INTRODUCTION TO RAMS 4.3/4.4*, ASTER Division, Mission Research Corporation
- (8) 重慶之窗、<http://www.cq-info.com.cn>、2002 年 9 月 6 日
- (9) Atmospheric, Meteorological, and Environmental Technologies、<http://www.atmet.com/>、2002 年 9 月 6 日
- (10) SCD'S DATA SUPPORT SECTION、<http://dss.ucar.edu/index.html>、2002 年 9 月 6 日