

## 論文の内容の要旨

論文題目 A Numerical Weather Prediction Model with Urban Surface Processes  
and Its Application to the Kanto Region  
(都市地表面過程を考慮した数値気象予測モデルの開発と関東地方への適用)

氏名 陽 坤  
ヨウ クン

人間活動の一面として、都市化は交通問題、大気汚染、騒音など多くの問題を引き起こしてきた。そういった問題の一部は都市における地表面過程と密接に関係しており、他の地表面過程とは異なっている。一般に都市化に伴い、地表面でのエネルギー分割が大きく変わる。そして、それにより生じる大気の温暖化により、局所的な循環パターンや、ヒートアイランドが引き起こされる。従って、地域的な気象や汚染物質拡散の予測精度を改善するには、都市地表面過程についての研究が不可欠である。これまでヒートアイランドや大気汚染の研究で都市地表面過程をモデル化したものがいくつかなされているが、都市化による影響のモデルを精度化するには、放射、接地境界層の構造、熱輸送における3次元の異方性といった都市域の特徴についてより細かく研究する必要がある。

本研究は都市の特徴に焦点を当て都市地表面過程モデル (USPM) を構築する事を目指す。日本の関東地域は都市化の割合が高い領域であるが、そこでの都市化と地形が気象発達に与える影響を調べる数値気象予測モデルと USPM を組み合わせることを目指す。

提案する都市地表面過程モデルは放射、空気力学乱流輸送、及び土壌面でのエネルギー収支と水分収支という3つのサブモデルから成り立っている。USPM では土地利用形態を、都市化領域、土壌面、高密度の植生域、低密度の植生域、水体の5タイプに分類している。なお、都市化領域とは都市ビル群、不透水性の地面、それらを取り巻く植生などを含んだものである。

基礎的研究の一つは、放射モデルの開発である。まず、利用可能なデータに基づいて全天日射を評価する二つのモデルを提案する。一つは、日照時間と地表面気象データを用いて日射量を計算するモデル、もう一つは大気における湿度の鉛直分布を用いて計算するものである。前者は USPM をオフラインで実行する時に適用されるものであり、後者は USPM を気象予測モデルと

組み合わせて実行するとき適用されるものである。都市域においては都市の粗度要素（建物や樹木など）の影響を受ける放射フラックスを修正した解析手法を提案する。さらに、アルベドの天頂角に対する依存性についても観測データを用いて改善した。

乱流輸送スキームにおいては都市地表面層の特徴を考慮している。地表面層は都市キャノピーレイヤー、粗度サブレイヤー、慣性サブレイヤーから成り立っている。都市キャノピーレイヤーは修正地表面の下の部分として定義される。慣性サブレイヤーにおいて、乱流輸送はモニン-オブコフの相似則（MOST）という一般的な相似則に従う。しかし、粗度サブレイヤーにおいては、MOST は利用できず、平均変数と乱流項のパラメータ化には粗度サブレイヤー用の相似則が導かれた。そして、慣性サブレイヤーにおける乱流輸送の一般的な解及び粗度サブレイヤーにおける反復解が開発された。本研究では一般的な相似則（MOST）の結果と粗度サブレイヤー用の相似則の違いを示した。粗度サブレイヤー用の相似則は不安定な粗度レイヤーにおける運動量損失の値を大きく見積もるが、平均変数の変化率は小さく見積もる。さらに、本研究は都市化域における運動量交換容量が非都市化域のものよりも大きい、熱交換容量は非都市化域のものに非常に近いということを指摘した。

土壌面のエネルギー収支と水分収支モデルは強制復元法（FRM）に基づいて開発され、それは温度にも土壌水分にも適用される。水蒸気輸送の表面抵抗を決定する際には簡単な植物生理学のメカニズムを考慮した。都市域における熱輸送の三次元異方性を考慮するにはさらに変数が導かれなくてはならない。

USPM のケーススタディーでは表面温度が地表面のタイプ（植生、地面、屋根、および壁）、太陽の天頂角、及び気象によって支配されているということを示した。日中の場合、快晴時の都市地表面では顕熱フラックスがエネルギー収支を支配するのに対し、降雨直後は潜熱フラックスが突然増加し、都市キャノピーによる遮断降水量がすべて蒸発すると潜熱フラックスは突然減少するという挙動を示した。従って、USPM は都市地表面におけるエネルギーの配分をうまく表現できていると考えられる。

都市地表面過程の役割を調べるために、USPM と ARPS(Advanced Regional weather System) という気象モデルを組み合わせたシステムを関東地域に適用し、いくつかの点が明らかになった。

（１）関東圏と周囲の海洋の間での地表面過程の差異により日中は強い海風が生じるが、夜に生じる陸風は非常に弱い。さらに海風は陸風よりも長い時間続く。シミュレーションした風は日中の観測結果には合致するが、夜間の観測データは他の局所的な原因によって影響を受けやすいため、シミュレーションとはあまり合致しない。（２）日中において、関東地方のヒートアイランドの位置は、都市地表面や人為起源の熱のみならず、土壌の湿り具合に非常に敏感である。雨の後などで、土壌が湿っているときには人為起源の熱に従い、熱の中心は都市に位置するが、何日か快晴が続いた後など土壌が乾いているときには東京の北西部にシフトする。この結果は東京とその北西部にあるステーション間における観測結果の比較により確かめられた。（３）地表面過程がない場合に比べて地表面過程があると降雨量を増加させていることがケーススタディーによりわかった。このように地表面過程は降雨発生において重要な役割を果たしており、数値気象予測においては強調すべきものである。

地形や都市化が豪雨に及ぼす影響も関東の豪雨記録を通して検証した。シミュレーションにより、わかったことは以下の通りである。（１）結果的には激しい降雨は二カ所で起こり、一カ所

は関東北部、西部の山地の近くであり、これは地形による力学的効果に関係している。もう一方所は東京湾の東であり、これは都市化に関連している。(2) 力学的効果は少なくとも3つの点で気象発達に影響を及ぼしている。一つ目は地形性の雲であり、これは山の斜面に沿って空気が上昇することに起因する。二つ目は旋風の発生への影響である。関東北部、西部の山脈は風向きと風速を変える壁の役割を果たし、それにより正の渦が発生する。山地の近くでは新しい低気圧が発生しやすい状況になる。三つ目は山脈から関東平野へと‘乗り越えていく’ながれである。もしも‘乗り越えていく’流れが平野上の空気塊よりも冷たいならば、平野の空気塊は二つの空気塊の境界に沿って持ち上げられる。もしも大気層が条件付き不安定ならば上昇気流が層を乱し、対流性雲を形成、降雨をもたらす。(3) 都市化により降雨の頻度は増加する可能性があるが強度は弱まる。顕熱フラックスの都市域と海における違いにより、日中は強い表面温度の力が生じ、それが陸上での局所低気圧の発達を促進する。地表面過程の日変化によりこの種の局所低気圧は日中に現れ、夜になると消滅するのである。