

臨海都市上空の境界層内のプロファイルと高気圧下の積乱雲形成の関係

課題責任者

客野 尚志

関西学院大学総合政策学部

著者

客野 尚志^{*1}

^{*1} 関西学院大学 総合政策学部

キーワード： 積乱雲, 高気圧下, 大気境界層, 都市的土地利用, 海風, サーマルブルーム

1. 背景

都市環境の変化が、メソβ、メソγの気象現象に影響を与える可能性については多くの研究が示唆している。しかしながらそのプロセスについては依然明確でない点も多く残されている。特に、一般にゲリラ豪雨とも称される、不意の積乱雲の発生とその成長、そしてその帰結としての豪雨については、環境面、防災面からも社会的関心が高い課題の一つとなっている。特に、都市化に伴う高密度化、水面や緑地の現象がこれらの積乱雲の発生、成長に寄与し得るのかということについては、世界中で活発な議論がすすめられている所であり、さまざまな立証や反証が積み重ねられている。

この研究では、夏季の高気圧に覆われた晴天の日に、不意に発生、成長し、さらに局地的に激しい降水をもたらした積乱雲に着目し、この発生と成長について、都市的環境がどのような影響を与えるのか数値シミュレーションをとおして考察を行う。そして、このことを通して、防災や環境に鑑みた、都市計画、都市デザインの示唆を得ることを目的とする。

2. 目的

本研究の目的は、数値モデルにより、夏季の都市上空の主に大気境界層周辺の気象のプロファイルを明らかにし、特に都市化が大気上層の積雲や積乱雲の形成のトリガーになりえるのかという点について定量的、定性的に考察することである。

この研究では具体的には夏季の高気圧下の臨海都市部上空における次の各点に着目して、分析を進める。

1. 境界層内外の鉛直流と相当温位の分布
2. 各高度における水平方向の風の特徴
3. 大気境界層上部の発散（収束）

これらは、いずれも積乱雲や積雲の「タネ」となり得る要素であり、上空の温位や風向、風速分布などの諸条件が整うことで、これらのタネが短時間に成長し、積乱雲となり、不意かつ大量の降水をもたらす可能性がある。

3. 方法と対象日時の気象概要

(1) 対象日時の気象状況

研究対象日は2025年7月8日の午後（日本時間）とする。同日14時30分頃にかけて、大阪市中心部から北西約30km付近の地点で、急速に積乱雲が発生し、それ

が兵庫県三田市で時間雨量93mmに至る降水をもたらした。この不意で急激な降雨は、アンダーパスの冠水や、道路の溢水、道路の浸水などの被害をもたらした。この積乱雲は発達しつつ、西に移動し、広島県や島根県でも、時間雨量110mmを超える降水をもたらした。

同日の天気図を確認すると、日本時間の朝9時の時点で島根県の北側約500km付近に中心気圧1012hPaの高気圧中心が位置し、この高気圧に覆われることにより、本州はおおむね晴れた。しかし、先述のように午後から西日本の一部に激しい降水が確認された。マクロスケールで見ると、高気圧の縁辺流となる東から南東の風があり、これにより太平洋から伊勢湾、そして大阪付近に流入するような風の流れが発生していた。筆者はこの縁辺流により、大阪付近で発生した熱性の対流による上昇流が都市上空で収束し、これが上空に水分と熱を供給し、今回の積乱雲の形成につながったという仮説を立てて以下の分析を行った。

(2) 方法

地球シミュレータ上で、マルチスケール大気結合モデルMS SGを使用することにより、都市上空の気象学的プロファイルを明らかにした。計算は、メソスケールの計算と、マイクロスケールの計算に分けて実施した。

メソスケールモデルについては、対象日時は、先述の時間を含む、2025年7月8日9時～18時（JST）に設定し、場所は大阪府大阪市北区中之島付近を中心とする約100km四方の領域とした。その他の計算の詳細は表にまとめた通りである。

表1 メソスケールモデルの計算設定の詳細

積分時間	20250708 00:00-09:00 (UTC)
気象境界条件	気象庁のMSMを元に設定
中心位置	135.5011 34.6938
ネスティング	3段階（双方向）
水平方向解像度	1000m、3000m、1000m
水平方向格子数	全ネストで100×100格子
鉛直方向格子数	55格子（地表面から4000mまで）
土地利用データ	国土数値情報（土地利用）および地球地図より作成
標高データ	地理院地図および地球地図より作成
出力時間刻み	1分

マイクロスケールに関しては、先の位置を中心とする2 km四方の領域と設定し、2025年7月8日13時～15時(JST)を計算時間に設定した。

表2 マイクロスケールモデルの計算設定の詳細

積分時間：20250708 04:00-06:00 (UTC)
気象境界条件：メソスケールモデルをもとに与える
中心位置：135.5011, 34.6938
水平方向解像度：5 m
水平方向格子数：400×400格子
鉛直方向格子数：150格子
※地表面から100層までは5m刻み、それより上部は等比数列状に刻み幅を増加(上端はおおむね2000m)
土地利用データ：国土数値情報(土地利用)と航空写真の目視などを元に作成
標高データ：地理院地図より作成
出力時間刻み：10秒

4. 結果と考察

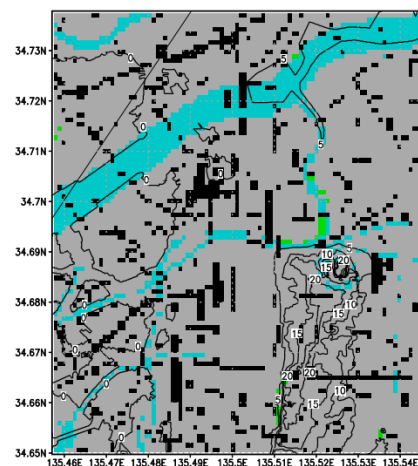
(1) メソスケールの状況

7月8日13:50の計算結果を示す。なお、前後の時間帯、各高度の状態の4次元的数据を目視で確認し、この時間帯において鉛直流がもっとも顕著に見られたためにこの時間の値を用いる。また上記のように、3段階のネスティングを行ったが、ここでは第三段階、すなわち100m解像度かつ、100×100格子の結果を用いる(すなわち10km四方の領域となる)。以下の各図で色が塗られた範囲がこの第三段階のネスティングの範囲である。図1は、対象地域の土地利用図に標高を重ねたものである。図中、灰色および黒色に着色した部分が主に建物や道路・鉄道用地で、水色の部分が水面、緑色が緑地を示す。コンターは標高を示す。計算対象領域のほとんどは建物用地であることがわかる。

図2は高度546.5mの境界層中間付近における、鉛直流と水平方向の風向風速を標高図の上に重ねたものである。暖色系の色がついた部分は上昇流が確認される部分である。領域全体において小規模な上昇流域と下降流域が近接して存在していることがわかる。また鉛直流の大きさも大きく、絶対値で1m/s以上を示す地点が多くある。これは、暑熱下の都市環境で局所的サーマルブームが複数発生した状況で、対流活動が活発なことを示している。一方で、水平方向の風に注目すると、一部の比較的強い上昇流の傍にはシアが形成されているものの、全体的には明確にシアと上昇流(下降流)との関係は確認されない。

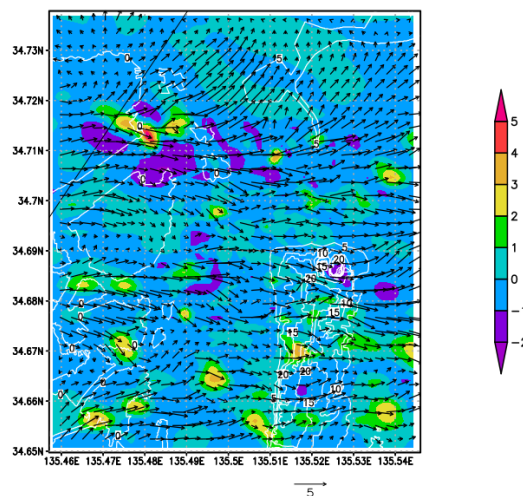
図3は境界層内上端直上付近の高度1203mの状況である。なお、後述のように、温位の鉛直分布を確認することにより概ねの境界層上端の高さを推定した。鉛直流の凡例が図2とは異なることに着目しつつ、両図を比較すると、絶対値は境界層中間ほど大きくないものの、上昇

流域と下降流域は存在し、さらにその空間的なサイズが大きくなっていることがわかる。境界層の上端より上部の安定層であることに注目すると、下層からの上昇流が境界層を抜けて、安定層の中でも上昇をつづけている様相を見てとることができる。鉛直流の大きさは境界層内部よりは小さいものの、それでも0.5m/s以上の領域が広がっていることから、旺盛なまとまった上昇流が存在することが確認される。さらに図2と図3で卓越風の風向が異なることにも着目したい。図2においては、西の海風が卓越している。一方で、1203mでは、南東から南の風が中心となり、これはマクロスケールの気圧配置、すなわち高気圧の縁辺流に起因する上空の風況を示している。図の中心付近に東西方向に延びる上昇流域が確認されるが、この上昇流が背景風により北西方向に流され、先に述べた積乱雲の形成につながったと考えられる。そしてこの東西に延びる上昇流域の下部は大阪の都市部が位置する場所であり、都市化の影響がここに表れている可能性が示唆される。



GRADS/COLA

図1 対象地域の土地利用と標高



GRADS/COLA

図2 境界層中間付近の鉛直流、水平方向の風の状況

図4は同じ高度における水平風の発散（収束）の分布を示したものである。暖色系の色が発散、寒色系が収束を示す。図3とあわせてみると、複数の上昇流域において、発散と収束の極大が対応していることがわかる。例えば、緯度 34.71N、経度 135.48E 付近では顕著な発散と、それに伴う下降流がみられ、図中心付近の緯度 34.695N 経度 135.509E 付近では顕著な収束と上昇流域が重なっている。前者は、発散と上昇が重なっていることから、下方からの上昇流がこの高度で発散していること、すなわち上昇流が減衰の局面にあることを示していると考えられる。一方で、後者は、収束と上昇が重なっていることから、さらに上昇が強化されることを示唆している。

ここまで見たように、境界層中間付近ではサーマルブルームに起因するとみられる旺盛な対流があり、境界層直上付近では、これらが面的にまとまり、さらに一部の上昇流域は強化されつつ、卓越風により北西方向に流される構造があることが確認された。次節では、マイクロスケールレベルの解析により、この図中心付近に位置する上昇流域を含む領域の大気の構造を、境界層内外の風や湿度、温位の分布をもとに詳細に検証する。

(2) マイクロスケールの状況

解析領域中心付近の $1500\text{ km} \times 1500\text{ m}$ 、高度約 1700 m の領域における、高解像度の大気の状態を検証する。なお、以下の分析は JST 13:50~13:55 までの 10 秒刻みの 30 の時間断面の結果を平均して作成したものである。

図5は、34.6938N における XZ 断面（経度—高度断面）で、相当温位と風向、風速分布を図化したものである。ただし、鉛直方向の大きさは 10 倍していること、図の視認性を高めるために、粗視化していることに留意されたい。経度 135.500E 付近の狭い範囲で高度 $800\text{ m} \sim 1400\text{ m}$ にかけて非常に強い下降流と上昇流が並存していることがわかる。特に上昇流は高度 1300 m 付近で水平方向に広がりつつ、さらに上空に移動している。相当温位分布をみると、地表付近を除くと 800 m まではほぼ一様で、それより上部で成層状に高度とともに低くなるものの、高度 1600 m では再び値が高くなっている。これは 135.499E 付近の上昇流が上空で水平方向に広がっていることに対応している。また高度 500 m 程度では海風に起因する西風により対流コアが流される様子が確認できる。また図の可読性が低くなるので割愛したが、高度 200 m 以下では、建物に起因する複雑な風況が見られた。

図6は、上記の並列する下降流域と上昇流域における温位分布をグラフ化したものであり、これらは 50 m 程度の間隔に位置するものである。他の部分でとったプロファイルも同様の傾向を示しているため、これは全般的にこの領域における温位のプロファイルを代表しているとみられる。高度 $100\text{ m} \sim 600\text{ m}$ が混合層、 900 m 程度までは遷移層、 1000 m 付近に境界層の上端があるとみられる。それより上部は自由大気で、高気圧下の明確な安定成層構造が確認される。両者の差に着目すると、高度 100 m 程度までは地表面の影響を受け、青線の部分で

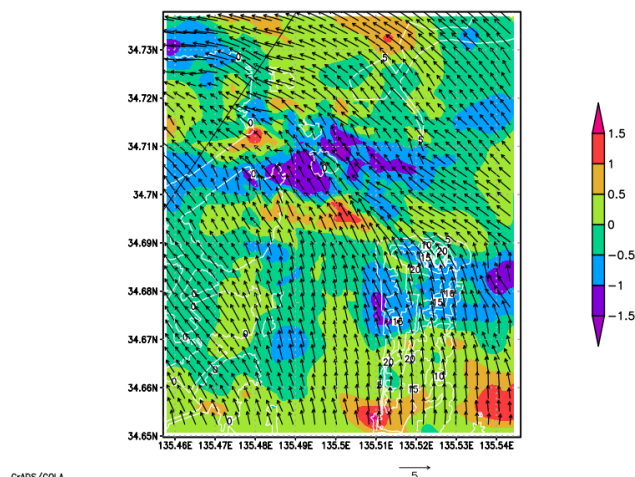


図3 境界層上端直上の鉛直流、水平方向の風の状況

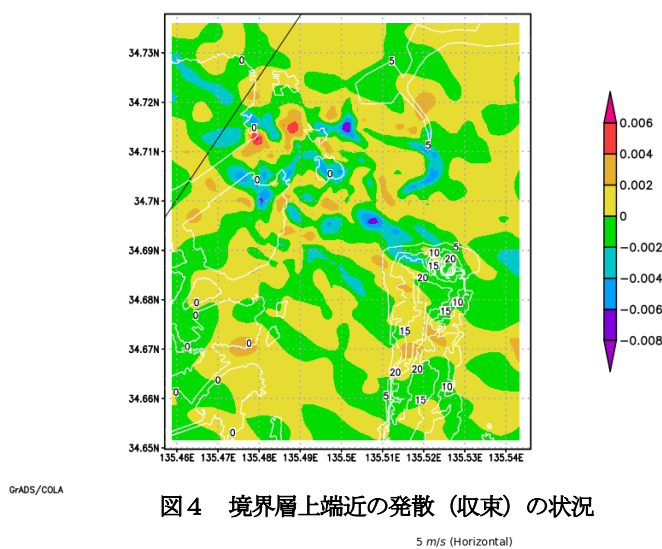


図4 境界層上端近の発散（収束）の状況

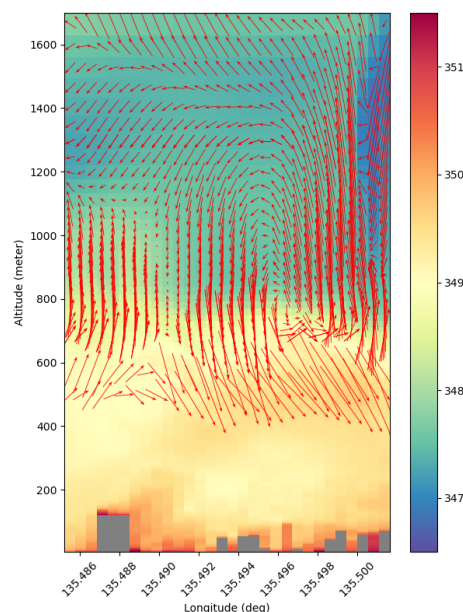


図5 マイクロスケールの XZ 断面（風と相当温位）※鉛直風速は 10 倍強調している。

温位が高い。1000m～500m程度まではほぼ差がないが、それより上部では、下降流域で一貫して温位が高くなっている。これは上空の高温位の大気が降下しているためである。高度1000m～1200mにかけては上昇流域で温位が低く、下層の大気が持ち上げられている様子が確認される。

図7は高度497.5m付近における、水平風分布をベクトル表示するとともに、鉛直方向の風況をグラデーションでしめしたものである。赤系の色が上昇流、青系が下降流を示している。図8は同様の図を高度1295mで作成したものである。高度約500m付近では海風が卓越し、また概ね800～1000m間隔で上昇流域のコアと下降流域のコアが市松状に並んでいることが確認される。これは典型的なサーマルプルームの状況を示していると考えられる。一方で、高度約1300m付近をみると、背景風が広域の気圧バランスに起因する南東風となり、さらに上昇流域が風下方向にまとまり、大きな塊をなしていることがわかる。南側の下降流域は補償流と考えられる。このことから考えられることは、境界層の中間に存在する混合層に存在する複数のサーマルプルームが西からの海風に流されつつまとまり、それが大気境界層を突き抜けて、自由大気の中で背景風に流され、それが面的に展開しているということである。

大阪という海風ある都市中心付近において、下部から供給される相当温位の高い空気が海風により面的にまとまりつつ上昇し、それが境界層上端を超え、さらに背景風の南東風に乗って北西方向に流される。そしてそれが30分後に30km程度離れた兵庫県中南部付近で急速に発展し、積乱雲を形成し、猛烈な降水をもたらしたという一つの解釈を、これらの一連の分析から読み取ることができる。

5. 総括

本研究では、高気圧に覆われた晴天下で不意に発生し、急速に発達し、激しい降水をもたらした積乱雲事象に着目し、その発生と発達において都市化が与えた影響について、MSGを用いた数値シミュレーションに基づいて分析、考察した。その結果、臨海部に展開する都市域から発生する相当温位が相対的に高いプルームが海風に流されながらまとまり、それが上昇の過程で境界層上端を超えて自由大気まで到達し、さらに背景になる南東風に流されて、いずれ積乱雲の形成に寄与したというシナリオの可能性を示唆することができた。

また、この報告書では示していないが、メソスケールの計算結果をみると、実際に積乱雲が形成された14:30頃の兵庫県中部から南部の高度1000m、5000m、8000mの鉛直流の計算結果をみると、まとまった上昇流域は存在していなかった。それは境界条件として与えたMSMで捉えられていなかったため、当然の帰結ではあるが、それでもこの分析において、MSMでは捕捉されなかった、積乱雲の形成、発達の兆候を見出すことができ、そしてこれに都市的環境が寄与する可能性を示すこ

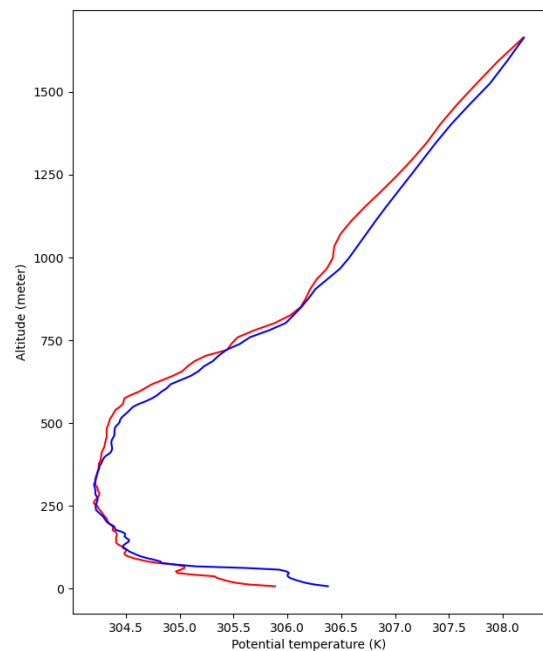


図6 二地点の温位の鉛直プロフィール

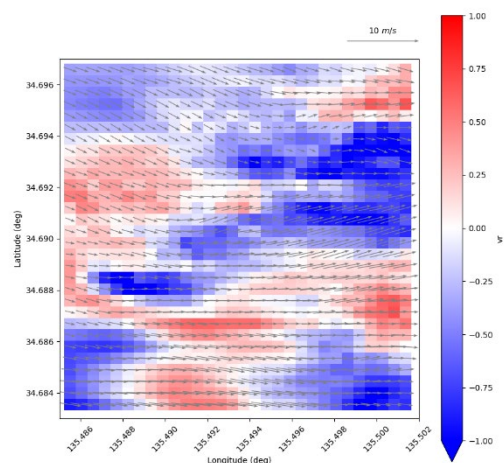


図7 高度500mの水平方向風況と鉛直流の分布

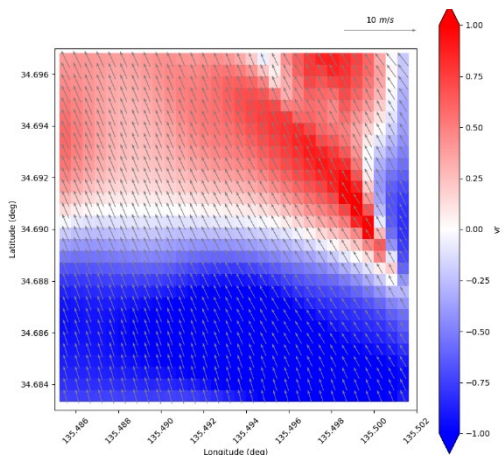


図8 高度1300mの水平方向風況と鉛直流の分布

とができたのは、一つの成果であり興味深い点である。

もちろん、この点を厳密に議論するには、より広範な空間範囲の分析、さらに時間的にも長時間の結果を時系列で評価する必要があり、さらに雲物理にも勘案した分析が必要で、その点については今後の課題として位置づけたい。

謝辞

本研究の遂行にあたっては、MSGを活用することが不可欠であった。これについて、国立研究開発法人海洋研究開発機構地球情報科学技術センター松田景吾副主任研究員から多くの技術的アドバイス、支援をいただいた。ここに深く感謝の意を示す。また、地球シミュレータの操作については、ESユーザーサポートの皆様にも多くの助言をいただいた。改めて、感謝の意を表したい。

文献

Keigo Matsuda, Ryo Onishi, Keiko Takahashi (2018) Tree-crown-resolving large-eddy simulation coupled with three-dimensional radiative transfer model, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 173, 053-066, <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2017.11.015>.
K. Takahashi, R. Onishi, Y. Baba, S. Kida, K. Matsuda, K. Goto, H. Fuchigami (2013) Challenge toward the prediction of typhoon behaviour and down pour. J. Phys. Conf. Ser., 454, 012-072.
京都大学生存圏研究所グローバル大気観測データ気象庁データ, <https://database.rish.kyoto-u.ac.jp/arch/jmadata/>.
G. K. Vallis (2017) Atmospheric and Oceanic Fluid Dynamics (2nd Edition), Cambridge University Press.