

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：82706

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26820251

研究課題名(和文)建築物の構造を考慮した都市部局地豪雨再現実験

研究課題名(英文) Numerical experiment of localized heavy rainfall over urban area using resolved urban buildings

研究代表者

馬場 雄也 (Baba, Yuya)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・アプリケーションラボ・研究員

研究者番号：60512861

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,700,000円

研究成果の概要(和文)：都市部局地豪雨が都市部の建築物によってどのように引き起こされるのかを明らかにするため、建築物の構造を考慮した気象シミュレーションによって再現実験を試みた。結果、建築物の構造が低く大気への影響が小さいほど、緩やかな強制力によって降水が起きる直前までに大気不安定度が増大し、鉛直構造が強化された対流が誘起されることが分かった。この鉛直構造が強化された対流は下層の水蒸気をより多く上層へと輸送するため、氷で構成される雲を増加させ、結果として強い降水を都市部にもたらすことが分かった。建築物の構造を考慮しない追加実験で検証した結果でも同様の傾向が再現された。

研究成果の概要(英文)：Idealized numerical experiment was performed to simulate localized heavy rainfall over urban area. The experiment is aimed at investigating how the localized heavy rainfall is caused by urban buildings. The results showed that lower urban building tends to increase atmospheric instability before convection occur due to slow and small forcing to the atmosphere. The increased instability enhanced vertical structure of convection which transports lower humidity to upper atmosphere, leading to increase of ice water content that eventually causes heavy rainfall over urban area. Additional numerical experiment that employed bulk parameterization for urban building also showed that localized heavy rainfall occurred through similar process, and resulted in similar rainfall trends.

研究分野：気象

キーワード：局地豪雨

1. 研究開始当初の背景

温暖化に代表される気候変動に伴い、全国的に豪雨の頻度と強度が増しつつある。加えて都市域では局地豪雨の頻度・強度増加が郊外よりも大きな増加傾向を示しており、温暖化が局地豪雨を強める恐れがあることが懸念されている。しかし、都市部での局地豪雨は通常の局地豪雨に比べて極めて狭い範囲で発生し、発生条件が特定できないため予測が難しい。

都市部における局地豪雨の発生は都市部建築物の高層化や土地利用の変化、人工排熱の増加を伴う都市化の影響を受けていると考えられている。実際に都市部で局地豪雨の経年増加が観測から確認されているが、その過程と発生条件は地域性や気象条件に依存するなど現象を左右する要因が多く、十分に明らかにされていない。都市部の局地豪雨に影響を及ぼす要因として、建築物の高層化による風の収束場形成、土地利用の変化による蓄熱と人工排熱による上昇流の発生、都市部から排出されるエアロゾルによる積乱雲の強化(雲頂高度が上昇)の3つの要因があることが分かっている。これらのうち、近年いくつかの都市部における観測結果から、この要因が都市部で局地豪雨を引き起こしている可能性が指摘されている。

日本で発生する局地豪雨のほとんどは同じ場所に停滞した積乱雲群(バックビルディング型と呼ばれる)によるもので、都市部で発生する局地豪雨もしばしばこの積乱雲群によってもたらされる。先に述べたこの要因はこの積乱雲群を誘発し、都市部での局地豪雨を引き起こすきっかけとなっている。例えば2008年の雑司ヶ谷豪雨では、都心にある高層建築物群によって発生した風の収束場を元に積乱雲が風下で発達・停滞し、同じ場所に次々と新たな積乱雲が発生するという、バックビルディング型積乱雲群の傾向が顕著に現れていた。

上述のように建築物の高層化による気象への影響が指摘され始めているが、これまでの研究方法ではその素過程を解析することは難しく、建築物が気象へ及ぼす影響検証には不確実性が含まれていた。例えば観測からは現象に関わる素過程を抽出して解析することは難しく、素過程を抽出し検証できる数値シミュレーションでは、気象現象に着目すると都市スケールの現象を再現することはできず、都市キャノピーモデルのように都市スケールの現象を大幅にモデル化する必要があった。都市を構成する建築物の影響に主な着眼点を置き、高解像度の気象シミュレーションで考慮すれば、直接的に、かつ不確実性を排除して解析することができる。申請者はこれまでに上述の問題を解決するために、建築物の形状を考慮した高解像度気象シミュレーションを実現する数値モデルの開発に取り組んできた。

2. 研究の目的

本研究では建築物の構造を考慮した高解像度気象シミュレーションモデルを用いて、建築物の高層化によって発生する都市部局地豪雨の再現を試みる。研究開始当初、研究期間内に達成を目指したのは以下の2点である。

(1) 高層化した建築物が及ぼす積乱雲の発生、持続過程を数値実験により理解する。

建築物が局地豪雨をもたらす積乱雲をどのように発生させるのか、また発生した積乱雲が建築物の影響によってどのように持続するのかを理解する。積乱雲の発生・持続過程を理解することで積乱雲を発生させる建築物の特徴(建築物の高さおよび複数の建築物で構成される建築物群の構造)と気象条件を特定する。

(2) 都市部局地豪雨を発生させやすい都市構造の特徴を明らかにする。

現実の都市部では様々な建築物が混在しており、季節や日によって気象条件も様々に変化する。都市部の都市構造と気象条件によって形成される環境場が局地豪雨を発生させやすい条件に当てはまるとき、都市部で局地豪雨が発生する。(1)で得られた知見と、現実の都市構造データ・気象データとを元に、都市部局地豪雨を発生させやすい都市構造の特徴を明らかにする。

3. 研究の方法

以上の研究の背景と目的を元に計画した研究方法は次のとおりである。ただし、研究進捗状況や途中経過に応じて当初の計画からは研究方法を変更している。

(1) 建築物を解像した建築物によって誘発される積雲対流の理想数値実験

ステップ1・積乱雲を発生させる建築物の構造抽出: 建築物の高さおよび風向きに並行な構造の大きさに着目して、積乱雲を発生させる建築物の特徴を現実の都市構造データを参照しながら推定する(図1)。建築物の

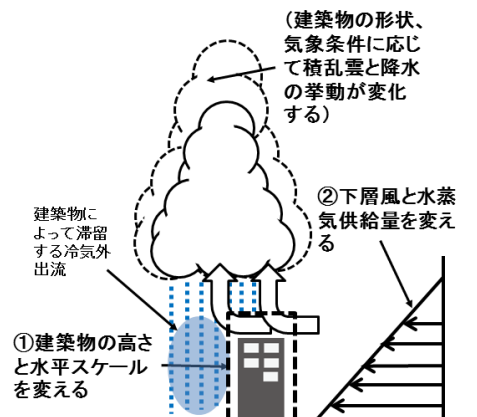


図1: 建築物によって引き起こされる積乱雲の理想数値実験概略図。

構造はこれまでの予備実験で積乱雲が発生

することが分かっている条件を基本条件とする。豪雨が発生する代表的な気象条件を与えることで気象条件を固定し、積乱雲の応答を見ながら建築物の構造を変化させて特徴を抽出する。抽出した構造の特徴を現実の都市構造データと比較し、数値実験による推定の妥当性を確認する。

ステップ2・積乱雲を持続させる気象条件の抽出：局地豪雨をもたらす積乱雲の挙動は建築物だけでなく、気象条件からも影響を受ける。既往研究による知見に基づけば積乱雲を発生させる要因は建築物にあると考えられるが、積乱雲が持続し、豪雨をもたらすためには、都市を覆う大気下層風の流れと雲の元となる水蒸気の供給量が重要となるはずである。大気下層風の風速および水蒸気の供給量を変化させて、積乱雲が建築物により発生した後、持続して強い雨をもたらす条件を明らかにする。このとき、風向きから見て建築物の後方、風下に冷気外出流によって冷たく重い空気が滞留し、積乱雲の発達を持続させる働きをするため、気象条件に対する降水の感度と傾向に注目する。

(2) 建物を解像せず、従来の気象シミュレーション手法に従って都市部の影響を運動量フラックス、顕熱フラックスにより与えた理想数値実験

研究進捗に伴い論文投稿を行ったが、建築物に対する格子解像度と気象シミュレーションの格子解像度を合わせる方法では、建物に対する解像度がどうしても不足するとの指摘があり(検証結果、水平解像度を上げることができる上限は数百メートルであった)また前例の無いシミュレーション手法で本研究の例のみで妥当性を示すことは困難であったため、論文受理には至らなかった。そこで研究計画を変更し、建築物を解像した検証結果によって得られた知見により推定されるメカニズムが従来の気象シミュレーション手法に従った方法でも再現されることを実証するために、都市部における建築物の影響を運動量フラックス、顕熱フラックスでモデル化し、従来と同様のシミュレーション手法を用いて再実験および解析を行った。実験・解析結果については国際論文として投稿し、改訂中である(Baba, Atmos. Res. 2016)。

#### 4. 研究成果

(1) 建築物を計算格子で解像した建築物によって誘発される積雲対流の理想数値実験

建築物を解像する実験設定を行い、建築物と気象条件によってどのように積乱雲が発生し、持続するのか検証を行った。実験設定の概略を図2に示す。代表的な湿度および温位の鉛直分布を与え、下層風に鉛直シアがあり、上層では鉛直シアが弱いという中緯度における典型的な気象条件を設定し、建築物による収束場の発生により上昇流を伴う雲の発生をシミュレーションによって模

した。検証では気象条件として風速を変化させ、建築物の特徴として建築物の高さを変化させて、降水の変化を検証した。変化させたパラメータは予備実験によって影響の特に大きかったもののみを抽出している。

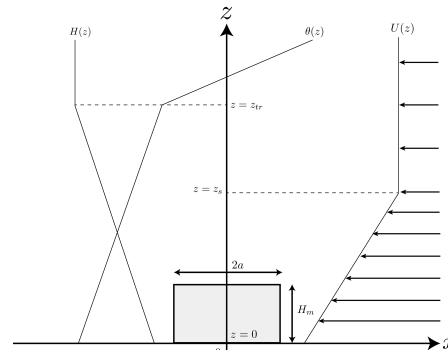


図2：理想数値実験で設定した湿度、温位、風速分布の概略図(灰色の領域は建築物を示す)。

図3に理想数値実験から得られた降水およびコールドプールのホフメラー図(時間に伴う東西移動分布)を示す。図に示したのは建築物の高さを変え、下層風速が弱い場合の実験結果である。この条件のとき、強い降水は上昇流を伴う雲の発生(対流セル)の前方に発生し、その下流側に弱い降水が伴って

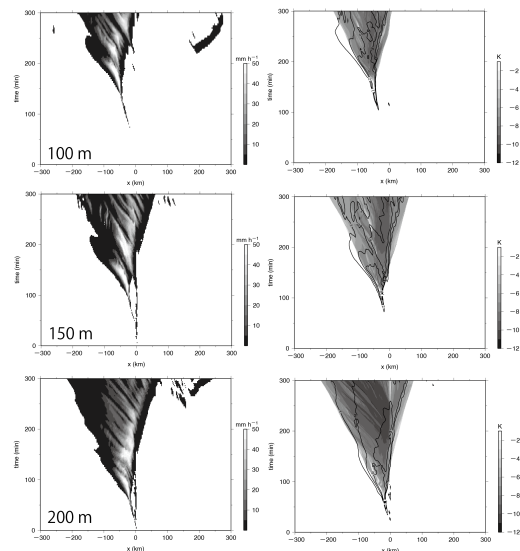


図3：降水(左)およびコールドプールのホフメラー図。図中数字は考慮した建築物の高さを示す。

る。この降水傾向はスコールラインタイプの降水傾向とほぼ同じである。しかし、建築物の高さが変わると降水の傾向も変化し、建築物の高さが低くなるほど、強い降水が同じ場所に停滞することが分かる。また、この結果から強い降水が起こるとき、強い降水の元となる雨水の粒形は大きくなるため、蒸発は抑

制され、降水に伴う地表面の気温低下は小さいことが分かった。上述のホフメラー図に現れたとおり、建築物によって上昇流が誘発され、雲が発生すると降水の強さは増加する。図4に下層風速や建築物の高さに応じた降

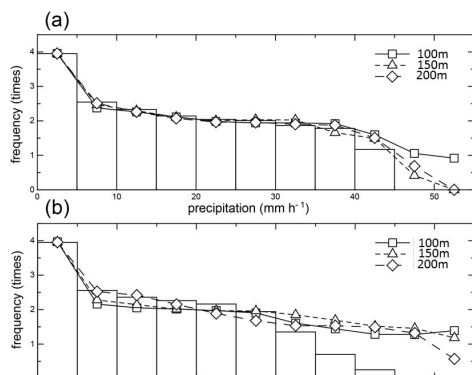


図4：降水強度の頻度分布。棒グラフは建築物が無い場合の降水強度に相当。各線は異なる高さの建築物のケースに相当。(a)下層風が強い場合、(b)下層風が弱い場合。

水強度の頻度分布の変化を示す。この降水強度分布からも建築物によって強い降水強度が増加することが分かる。特に建築物の影響は下層風が弱い場合に顕著で、下層風が強い場合に比べて強い降水強度の頻度が増える割合が大きくなる。以上のことから建築物と気象条件によって降水分布や降水強度が大きく変化することが分かった。この変化をもたらす原因は、降水が起きる前の建築物周辺の大気場の不安定性が変化することに原因がある。

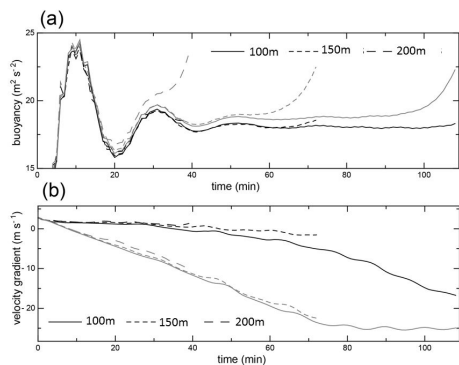


図5：下層風が弱い場合の降水が起こる直前までの(a)浮力および(b)下層風鉛直シアアの時間変化。

図5に降水が起きる直前までの建築物周辺における浮力と下層風の鉛直シアアの時間変化を示す。降水が起こる直前には水蒸気の凝結によって大きな浮力が発生し、風が上昇流によって変化することで鉛直シアアが小さくなる。建築物の高さが低いとき、降水が起こる前までに緩やかな凝結が発生し、建

築物の周辺で浮力が緩やかに上昇、同時に下層風の鉛直シアアが減少する。結果として浮力が鉛直シアアによる不安定性を上回る浮力支配の大気環境場が形成されて、鉛直構造が強められた対流が発生する。このような状況下で発生した対流は、鉛直構造が強められるために、下層水蒸気を上層へと輸送し、上層の雲を増加させ、結果として強い降水の元となる氷雲や、雪、あられ(氷の水物質)などを増やす。この傾向は氷の水物質の生成に伴う潜熱放出量が増加することで確認することができた(図は省略)。

(2) 建築物を計算格子で解像せず、従来の気象シミュレーション手法に従って都市部の影響を運動量フラックス、顕熱フラックスにより与えた理想数値実験

建築物を解像した理想数値実験からは、下層風速が弱く、建築物の高さが低い場合に、積乱雲を発生させる直前までに建築物上空で大気不安定性が増大し、積乱雲の鉛直構造が強化されるメカニズムがあることが分かった。この鉛直構造の強化は、強い降水をもたらす水の物質発生を促進するため、結果としてこの条件下では強い降水強度の頻度が増加する。

本研究においてこのようなメカニズムが存在することは示唆できたものの、建築物を解像した数値シミュレーションは既往研究において前例がなく、手法の妥当性を本研究の例のみで示すことが困難であったため、従来の気象シミュレーション手法に従いつつ、同様のメカニズムによって降水強度の増加が発生し得るか検証することとした。次の検証では、建築物を解像せずに代表的な運動量フラックス、顕熱フラックスを与えることで都市部の建築物群を模擬することとした。運動量フラックスは、都市部における代表的な粗度長を用いたバルクフラックスから見積もり、顕熱フラックスは観測から得られている都市部から発生する顕熱フラックスを基準として複数の値をパラメータとして与えた。これら都市部における建築物を模擬するフラックスは既往研究で示されている都市部の広さを基準として、計算領域中央に広がりを持たせて配置した。気象条件は先の理想実験とほぼ同一である。先の理想実験では流体力学的効果のみに着目したが、この理想実験では顕熱フラックスにより、熱力学的効果も考慮されている。

建築物を解像しない実験では流体力学的効果に比べて、熱力学的効果が降水の変化に影響を及ぼす傾向が強いことが確認された。この理想実験から得られた降水のホフメラー図を図6に示す。都市部からの顕熱フラックスが大きいほど早い時期に降水が開始されて持続している。一方で顕熱フラックスが小さいほど、降水が開始される時期は遅くなり、また先の建築物を解像した場合と同様に強い降水が起こっている。粗度長を大きくし

た場合、つまり建築物の高さを高くした場合には、強い降水がより多く増える傾向が確認された。このとき、顕熱フラックスが大きい

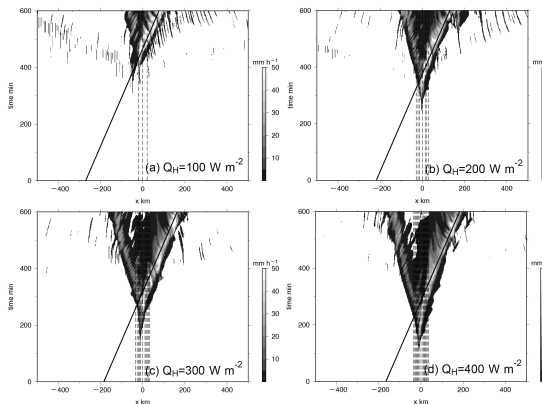


図6：建築物を解像しない理想実験で得られた降水のホフメラー図。図中  $Q_H$  は顕熱フラックスの大きさ、実線は平均移動速度、点線は顕熱フラックスの分布を示す。

ほど、都市域の風下で降水が増加し、小さいほど都市域で降水が増加しており、この傾向は先行研究が示している都市域による降水変化の傾向と整合している。

建築物を解像した理想実験と同様に、対流が開始される直前における都市域上空の大気状態について調べたところ、都市部からの影響が小さいほど、対流が開始される前までに大気不安定度が増大する傾向が確認された。図7に対流が起こる直前の対流有効位置エネルギー(CAPE)と水平風速の鉛直分布を示す。都市からの顕熱フラックスが小さいほど、対流が起きる直前のCAPEの値は大きくなっていることが分かる。このとき、都市域の粗度長が大きいほどCAPEの値はより大きくなっており、都市域が及ぼす大気への摩擦の影響がCAPEを増大させる傾向があることが分かる。このCAPEの上昇は、都市域上部で顕熱フラックスにより顕熱エネルギーが上昇すると同時に、湿度の高い大気が滞留することで引き起こされていると考えられる。

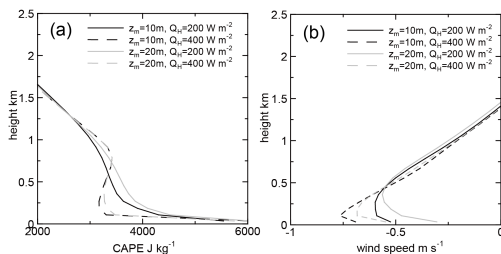


図7：対流が起きる直前の(a)対流有効位置エネルギーおよび(b)水平風速の鉛直分布。

高い不安定性を持った大気では、強く鉛直構造が強化された対流が開始される可能性

が高くなる。建築物を解像しない場合でも、同様に大気不安定性が増したとき、強い初

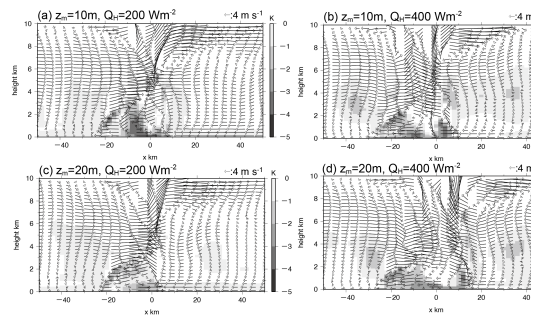


図8：対流が起きた直後の風速および冷気外流の鉛直分布。各図は異なる粗度長と顕熱フラックスの条件に該当。

期対流が引き起こされる様子が確認できた(図8)。このとき、初期に大きな鉛直構造を持った深い冷気外流が形成されており、初期対流に続いて発生する後続の対流を誘発する影響があることが示唆された。実際に、初期に深い冷気外流が形成されると、鉛直方向に風の循環場が発生し、下層の水蒸気を上層へと運ぶことで水蒸気の凝結を促進する効果があることが解析から明らかになった。この効果はさらに鉛直構造が強化された対流の東西移動を緩やかにするため、冷気外流の上部に流れ込む水蒸気量を増加させ、冷気外流の上部で結合した対流構造を形成することに寄与する(図9)。結果として、鉛直構造が強化された対流が維持されるため、先の理想数値実験の結果同様、氷の水物質を増加させるので、強い降水を増加させる結果となる。

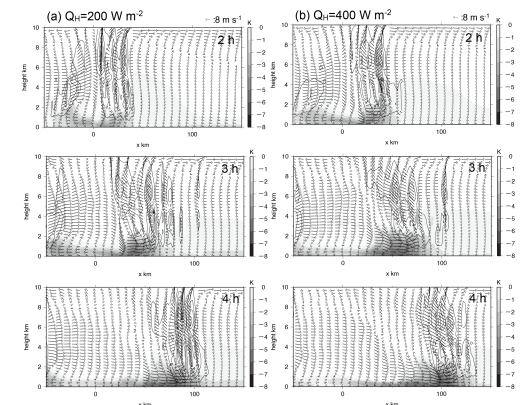


図9：対流が起きた後の風(ベクトル)、冷気外流の気温(シェイド)および潜熱放出分布(コンター)。与えた顕熱フラックスが小さい(左)ほど鉛直構造が強化される。

以上の結果から、建築物の構造を計算格子で解像した場合と、解像しない場合で、都市域における建築物からの影響が小さいほど、都市部上空で大気不安定性が高まり、強い対

流が発生することで降水強度が増すことが明らかになった。建築物を解像しないケースでは解像するケースに比べて都市部の流体力学的効果が相対的に小さくなったが、これは考慮した粗度に相当する建築物の高さがかなり小さくなったことに起因すると考えられる。都市域からの影響が小さすぎると、当然ながら対流を引き起こすのに必要な強制力が不足するため、降水自体が引き起こされなくなり、気象条件が時間の経過とともに変化していくので、豪雨の発生への寄与が不明瞭になる。しかしながら、気象条件の変化が緩やかで、都市域からの強制力が無視できない程度になった場合、都市域が豪雨を引き起こす可能性は充分にあり得る。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計2件)

(1) 馬場 雄也、弱い地形性強制力による降水強化、日本気象学会 2015 年度春季大会、2015 年 5 月 22 日、つくば国際会議場(茨城県つくば市)

(2) 馬場 雄也、急峻な微細地形への対流の応答実験、日本気象学会 2014 年度春季大会、2014 年 5 月 24 日、横浜市開港記念会館(神奈川県横浜市)

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

馬場 雄也 (Baba, Yuya)

国立研究開発法人海洋研究開発機構 ア  
アプリケーションラボ・研究員

研究者番号：60512861