東京都市域における夏季の降水システムの強化

佐　藤　友　徳*・寺　島　　司**・井　上　忠　雄***・木　村　富士男***

要　旨

12年分の降水レーダーデータをもとに，東京23区およびその周辺の都市域が夏季の降水システムに及ぼす影響について調べた．総観規模の降水システムが関東地方周辺に見られなかった日のうち，強い降水エコーが奥秩父の山岳域に発生した71日を対象として，ラグコンポジットによる降水頻度の解析を行った．山岳域で日中に発生した降水システムの多くは東進し，2時間半後～3時間半後には都市域を含む領域に到達する．このとき，都市域における降水頻度は周囲よりも明らかに高くなり，都市が降水システムを強化していることを示唆している．

1．はじめに

近年，都市部の発達にともないヒートアイランド強度が強まり，それと関連して夏季に都市が対流性の降水を増加させる可能性が指摘されている．米国では，1970年代に実施された都市気象に関する観測プロジェクト（METROMEX：Metropolitan Meteorological Experiment）で，夏季の午後に都市の風下側で降水が増加することが示された（Changnon and Huff, 1986）．同様の特徴はアトランタ（Dixon and Mote, 2003；Bornstein and Lin, 2000）やメキシコシティ（Jauregui and Romales, 1996）でも示されている．さらに最近では衛星 TRMM の観測から都市の風下側では周囲に比べて降水強度が強いということが統計的に示されている（Shepherd *et al*., 2002）．

わが国では，東京などの都市において局所的な豪雨による水害が社会的な問題となっている．東京周辺における夏季の豪雨に関しても都市化との関連が指摘されている（Yonetani, 1982, 1989；藤部，1998）．しかしながら，不安定な総観場のもとにおいては局地的な降水系は都市でなくても発達する可能性がある（藤部，2004）．それゆえ都市によって対流性の降水がどのように影響を受けているのかを，少数の事例から判断することは非常に難しい．

仮に都市が局所的な降水の発生や発達に影響を与えるならば，都市と周辺地域の間で，降水の強度や発生頻度に違いが生じるはずである．従って，降水の空間分布を長期間のデータから調べる必要があると考えられるが，過去には統計的に降水の空間分布について扱った研究は非常に少ない（藤部，1998；佐藤・高橋，2000などがある）．アメダスは比較的長期間のデータが入手可能であるが，空間代表性の問題があるため空間的に均一な降水の情報を得ることが難しい．三上ほか（2003）は，東京23区内に20箇所もの雨量観測点を設け，詳細な降水分布を観測している．しかし，降水の空間分布を統計的に調べるためには，長期間のデータの蓄積を待つ必要がある．

降水レーダーは雨量計に比べて水平・時間解像度が高く，空間的に均一な情報が得られる利点がある．さらに過去10年以上のデータが蓄積されており，都市周辺における降水の解析に適していると考えられる．齋藤・木村（1998）は降水レーダーを用いて，夏季の関東地方における降水の日変化について調べた．その結果，午後に日光周辺・奥秩父周辺の2地域で降水頻度が高く，それらの降水システムはしばしば東に移動し

* 日本学術振興会特別研究員・東京大学気候システム研究センター．t_sato@ccsr.u-tokyo.ac.jp
** 筑波大学大学院環境科学研究科（現所属：株式会社フランクリン・ジャパン）．
*** 筑波大学大学院生命環境科学研究科．

—2005年11月7日受領—
—2006年4月3日受理—

© 2006　日本気象学会

降水をもたらすことを示した．これらの降水システムは日中の谷風循環に伴い発生したもので，都市とは無関係に発生していると考えることができる．

そこで本研究では，東京都，埼玉県，山梨県の都県境に位置する奥秩父周辺の山岳地域で発生した降水システムの時空間変化について，長期間のレーダーデータを用いて調べる．特に平野部に焦点をあて，都市と降水頻度との関係について述べることにする．以後，本論文では23区周辺およびさいたま市，川口市付近を都市域と呼ぶことにする．奥秩父の山岳は都市域の西に位置しているため，ここで発生した降水システムを対象とすることで，都市域周辺を通過する降水事例を多く選び出すことが可能である．また，奥秩父山岳の降水システムは都市とは無関係に発生するため，都市による影響の有無について客観的に調べることができるという利点がある．

2．方法

本研究では気象庁の東京レーダーを用いる．解析期間は1989～2000年の7月，8月(期間中の総日数は744日）である．ただし同レーダーの観測間隔は1996年以前が7.5分間隔，1997年以降が10分間隔であるため，1996年以前のデータは10分間隔に換算して降水頻度の解析を行う．まず山岳域における降水イベントを対象として解析日を選定する．具体的には，関東山地の南部を領域A（35.70N-35.95N, 138.85E-139.10E：第2図の白四角)とし，この領域内でエコーレベル4（地上雨量で16-32 mm h^{-1}相当）以上を観測した事例を選ぶ．領域Aは齋藤・木村（1998）で午後に降水頻度が高いと指摘されている奥秩父に対応する．エコーレベル4は，降水システムがある程度発達したケースを対象としつつ，事例数が十分に確保できるように設定した条件である．次に，午前9時の地上天気図から，台風や寒冷前線が通過している日，梅雨前線が関東地方に位置している日，同天気図で関東地方が雨となっている日を除く．その結果，選ばれた71日を解析対象日とした．

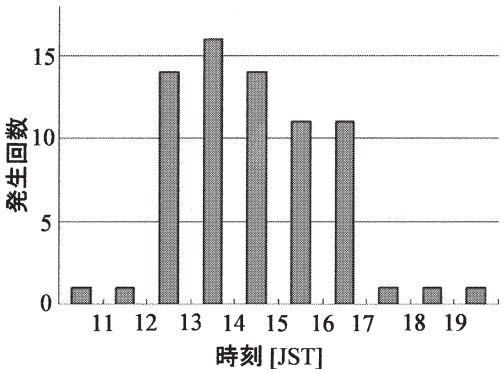
一般に降水量について合成解析を行うと，降水量が極端に大きい数事例の影響を強く受け易くなるため，長期間の観測データから都市による影響を見出そうとする本研究の趣旨には適さない．従って本研究では降水頻度について調べることにする．全ての解析対象日について，毎正時ごとにコンポジットをとる方法†と，降水エコーが発生した時刻を基準としてその後30分ごとにコンポジットをとる方法（以下，ラグコンポジット）で2種類の解析を行った††．ラグコンポジットは以下の方法で行う．

(1) 領域Aにおいてその日初めてレベル4以上のエコー（以後FSE；First Strong Echoと呼ぶことにする）を観測した時刻を初期時刻（$T=0$）とする．
(2) 初期時刻から30分ごとに時間帯を区切り，初期時刻から30分までを $T=0.5$，30分から1時間までを $T=1$，…，3時間半から4時間までを $T=4$ とする．
(3) 各時間帯における母数は213（＝30分/10分×71日）であり，そのうち降水エコーが出現した回数をピクセルごとに頻度（百分率）で表す．

本研究では，頻度10%以上の領域を便宜上，高頻度領域と呼ぶことにする．また，アメダスの地上風はレーダー観測時刻にもっとも近い正時のデータを合成した．

3．結果

領域AにおけるFSEの時間別発生回数を第1図に示す．最もFSEの発生回数が多いのは13時台である



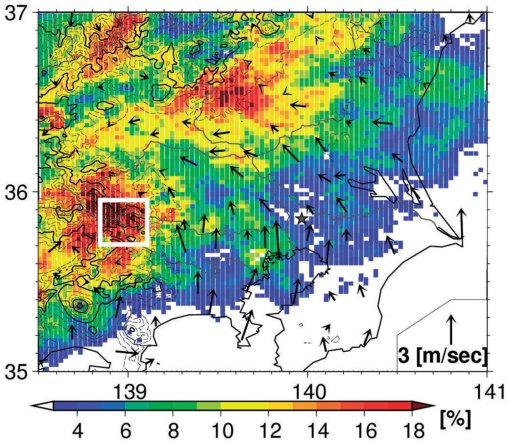
第1図　FSEの時間別発生回数．

† ここでは，解析対象日である71日ついて，i-1時10分から i 時00分の間に観測されたレーダーエコー頻度を i 時のエコー頻度として示す．

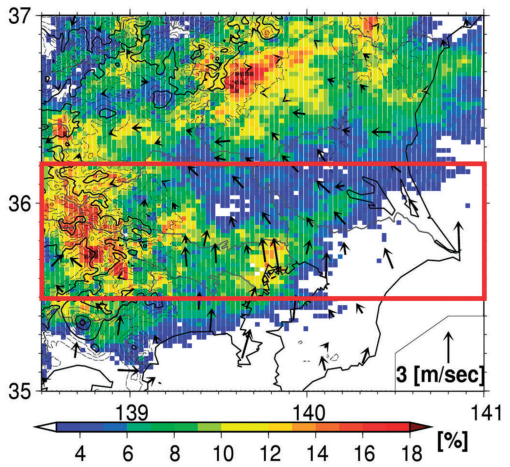
†† 東京南東部と筑波山付近では，地形や建造物に起因するクラッターによるエコーが常時観測されていた．それらの5グリッドについては解析からとり除き，図中では白抜きとした（140.106E 36.212N；139.691E 35.669N；139.746E 35.647N；139.719E 35.624N；139.774E 35.624N）．

が，12時から17時までの５時間に同程度の回数発生していることが分かる．第２図には17時のレーダーエコーの頻度分布を示す．降水頻度は，関東山地南東部や日光などの北関東の山岳において，周囲より高い．午後の早い時間に比べて関東平野では全体的に頻度が高くなっている．都市域では降水頻度が10％以上となり，周囲にくらべてさらに降水頻度が高いことが分かる．この結果は，都市域が降水システムに対して何らかの影響を及ぼしていることを示唆している．

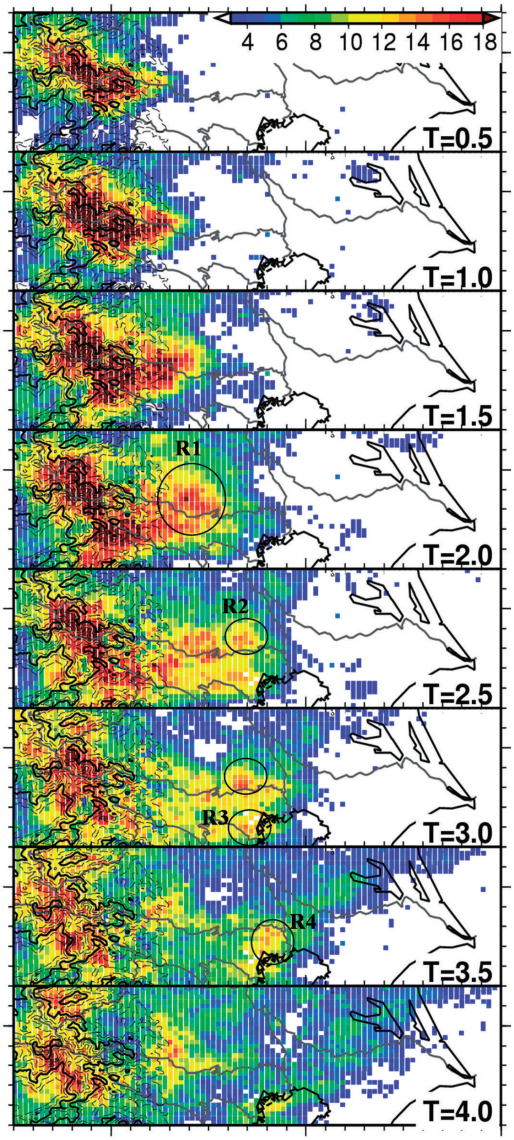
第３図にラグコンポジット（$T=3.5$）によるレーダーエコーの頻度分布図を示す．第２図と同様に，関東山地と北関東の山岳において頻度が高い．またこれら山岳のそれぞれ東側には，相対的に頻度の高い領域



第２図　17時における降水エコー頻度と地上風のコンポジット．白い四角は領域Ａ(35.70N-35.95N，138.85E-139.10E）を表す．等値線は標高を表し，太線は1000 m おき，破線は250 m おきに描いてある．灰色の実線は都県境を表す．星印は東京レーダーの位置を表す．



第３図　第２図に同じ．ただし，ラグコンポジット（$T=3.5$）による．赤い四角は第４図で示す領域を表す．



第４図　ラグコンポジットしたレーダーエコー頻度（％）の時間断面図．等値線，都県境線は第２図と同様．

が広がっている．ここで注目すべきは，都市域で周囲に比べて特に頻度が高いことである．時刻毎に解析した第2図に比べて，ラグコンポジット解析では場所による降水頻度のコントラストが明瞭になっていることが分かる．アメダスによる地上風のラグコンポジットは，関東平野南部で南風や南東風が卓越している．このような風系の特徴は $T=0$～5 でほぼ共通であった．

第3図において赤い四角で囲った領域におけるラグコンポジットの時間断面図を第4図に示す．$T=0.5$は(領域 A においてレベル4以上のエコーが発生した直後に対応するため)，関東山地で特に頻度が高く，東京を含む関東平野ではほとんど降水エコーが発生していない．$T=1$，$T=1.5$では関東山地南部で同様に頻度が高く，加えて高頻度領域の東端が徐々に東側へと延びている．これは，多くの降水システムが東進していること，あるいは Sato and Kimura (2005) で指摘されているように上空の水蒸気移流に伴って降水セルの発生しやすい不安定な気塊が東へ移動していることを示している．水蒸気の移流に関しては GPS を用いた観測からも確認されている(佐々木・木村，2001)．舘野の高層観測データによると，本研究で対象とした日においても700 hPa 面では 5 m sec^{-1}程度の西風が卓越していることから，対流圏中層の西風が高頻度領域の東進の原因であると考えられる．$T=2$ では，東京都と埼玉県の都県境付近における山麓地域の広い領域で14%を超える高い頻度が見られる(第4図に R1で示す)．

$T=2.5$では，高頻度領域がさらに東に移動する．高頻度領域は広く分布しているが，その中でもさらに降水頻度の高い地域が存在する．それは R1やさいたま市・川口市 (第4図 R2) に相当する地域である．$T=3$ では高頻度領域はさらに東へ移動し，R1では降水頻度がやや減少する．R2では高い降水頻度が維持され，東京23区南西部(第4図 R3)でも頻度が高くなる．$T=3.5$には，高頻度領域は狭くなるが，14%以上の高い領域が23区北東部(第4図 R4)に孤立して存在している．$T=3$ の前後から領域 A 内における頻度は全体的に減少するのにもかかわらず，$T=3.5$では23区北東部 (R4) でのみ頻度が維持されることは非常に興味深い．$T=4$ 以降は，東京湾岸に高頻度領域が移動し，徐々に頻度が低下する様子が確認された．このことから，奥秩父において強い降水エコーが観測された後，降水域は東へ移動または拡大し，FSE の観測後3時間から3時間半後には R2，R3，R4で示した都市域で周囲に比べ雨が降りやすくなることが示された．

4．まとめと考察

この研究では関東山地で強い降水が観測された日について，長期間の降水レーダーデータを用いて平野部における降水頻度を統計的に解析した．その結果，奥秩父で降水が発生した日には，山岳域から平野へ向けて雨の降りやすい地域が一様に拡大するのではなく，都市域では周囲に比べて顕著に降水頻度が高くなることが示された．都市域において頻度が高くなるのは，移動してきた降水システムによる降水エコーが消滅せずに都市域で持続すること，あるいは降水の発生しやすい気塊が移動して来た場合に都市域では周囲に比べて降水エコーがより出現しやすくなることを示している．これは降水セルが減衰しにくいこと，あるいは都市域で降水セルが発生や再発達しやすいことの結果であると考えられる．本研究ではこれらを区別せずに，降水システムの強化として扱う．

降水システムが都市域で強化された結果，高頻度域が現れることは，夏季に東京周辺で見られる積乱雲の特徴である「発達しやすく，長続きする」(小林，2004) ことを裏付ける結果でもある．藤部ほか (2002) は「東京23区に短時間強雨をもたらす降水系は，数十 km 以上のスケールを持つマクロな降水系の接近に呼応して発生・発達する傾向がある」と指摘している．第4図は，奥秩父で発生した降水システムが都市域で強化されることを客観的に示したものであり，非常に興味深い結果であるといえる．統計解析の結果は，複数の事例において特定の地域で降水システムが強化されていることを示唆している．都市域における降水頻度の増加は偶発的なものではなく物理的に意味を持った現象である可能性が高い．

山岳からの移流効果を考えず，仮にヒートアイランドの効果により都市域上空で降水セルが単独で発生する頻度が増えるのであれば，第4図に示したラグコンポジットでは，時間に関係なく高頻度領域が都市域に現れるはずである．奥秩父における降水を事例日選定の基準とした本研究では，そのような特徴は見られず，高頻度領域は奥秩父の山岳から徐々に東へと移動する．その中でも都市域に相当する R2，R3，R4の地域では，特に高い降水頻度が観測される．

Inoue and Kimura (2004)，井上ほか (2004) は長期間の衛星データの解析や現地観測から，夏の晴れた

日には都市の上空で対流雲が発生しやすいことを示し，都市域の熱源との関係を指摘している．中西・菅谷（2004）は都市の効果については言及していないものの，このような雲列が観測された日は平野で午後に降水が起こることが多いと述べている．都市部は建造物やアスファルト面に覆われており，さらに人工排熱量も多いため，周辺地域に比べて地表面温度や気温が高い．このような都市域の熱源は，雲の発生・発達だけでなく，都市域の外から移動してくる降水システムの強化にも影響を及ぼしているものと考えられる．

都市域において降水頻度が増加するメカニズムについては，今回の解析から判断することは困難である．風や水蒸気等の気象データの綿密な解析，都市の熱環境の解明，あるいは数値モデルによる実験が，都市による降水システム強化のメカニズムを調査するうえで有効な手段になるであろう．さらに，今回の解析手法では降水エコーがあるかないかだけの指標から頻度を求めているため，仮に降水エコーの強度が都市域で増加したとしても，頻度の違いには反映されない．今後，エコー強度の変化についても考慮できる解析手法を考案することで，都市が降水システムに及ぼす影響についてより詳細に解析することができると思われる．今回の解析により得られた降水エコーの頻度は，$T=3.5$ において都市域では全体の14%，それ以外の平野部では10%であり，サンプル数で言えばそれぞれおよそ30サンプルと21サンプルであった．都市域と降水システム強化についてのより明確な結論を得るためには，さらに長期間のデータを使用したり，解析手法を工夫することで事例数を増やすことも重要であろう．

謝　辞

査読者および担当編集委員から大変有益なコメントを多数頂きました．また筑波大学気候気象分野の皆様にはゼミ等を通じて貴重な助言を頂きました．ここに記して感謝いたします．

なお，本研究は第二著者（寺島　司）が筑波大学大学院環境科学研究科において研究した成果の一部をもとに，その後解析と執筆を行ったものである．

参 考 文 献

Bornstein, R. and Q. Lin, 2000：Urban heat islands and summertime convective thunderstorm in Atlanta：three cases studies, Atmos. Environ., **34**, 507–516.

Changnon, S. A. Jr. and F. A. Huff, 1986：The urban-related nocturnal rainfall anomaly at St. Louis, J. Clim. Appl. Meteor., **25**, 1985–1995.

Dixon, P. G. and T. L. Mote, 2003：Patterns and causes of Atlanta's urban heat island-initiated precipitation, J. Appl. Meteor., **42**, 1273–1284.

藤部文昭，1998：東京における降水の空間偏差と経年変化の実態．—都市効果についての検討—，天気，**45**，7–18．

藤部文昭，坂上公平，中鉢幸悦，山下浩史，2002：東京23区における夏季高温日午後の短時間強雨に先立つ地上風系の特徴，天気，**49**，395–405．

藤部文昭，2004：ヒートアイランドが降水におよぼす影響．—夏の対流性降水を中心にして—，天気，**51**，109–115．

Inoue, T. and F. Kimura, 2004：Urban effects on low-level clouds around the Tokyo metropolitan area on clear summer days, Geophys. Res. Lett., **31**, L05103, doi：10.1029/2003GL018908.

井上忠雄，仲田伸也，寺島　司，木村富士男，2004：写真観測と衛星で捉えた都市に出現する対流雲，天気，**51**，653–654．

Jauregui, E. and E. Romales, 1996：Urban effects on convective precipitation in Mexico City, Atmos. Environ., **30**, 3383–3389.

小林文明，2004：ヒートアイランドが降水におよぼす影響．—東京周辺における積乱雲の発達—，天気，**51**，115–117．

三上岳彦，泉　岳樹，安藤晴夫，塩田　勉，石井康一郎，森島　済，小島茂喜，2003：東京都区部の高密度気象観測システム（METROS），日本地理学会2003年度春季学術大会予稿集．

中西幹郎，菅谷真子，2004：夏季の東京湾周辺に発生する雲列と局地気象および午後の降水との関係，天気，**51**，729–739．

齋藤智興，木村富士男，1998：中部関東地方における夏期の対流性降水の日変化，天気，**45**，541–548．

佐々木太一，木村富士男，2001：GPS 可降水量からみた関東付近における夏期静穏日の水蒸気量の日変動，天気，**48**，65–74．

佐藤尚毅，高橋正明，2000：首都圏における夏期の降水特性の経年変化，天気，**47**，643–647．

Sato, T. and F. Kimura, 2005：Diurnal cycle of convective instability around the central mountains in Japan during the warm season, J. Atmos. Sci., **62**, 1626–1636.

Shepherd, J. M., H. Pierce and A. J. Negri, 2002：Rainfall modification by major urban areas：Observations from spaceborne rain radar on the

TRMM satellite, J. Appl. Meteor., 41, 689–701.
Yonetani, T., 1982：Increase in number of days with heavy precipitation in Tokyo urban area, J. Appl. Meteor., 21, 1466–1471.
Yonetani, T., 1989：Study of the urban effects on the occurrence of convective precipitation, Report of the National Research Center for Disaster Prevention, (44), 1–59.

Intensification of Convective Precipitation Systems over Tokyo Urban Area in Summer Season

Tomonori SATO*, Tsukasa TERASHIMA**, Tadao INOUE*** and Fujio KIMURA***

* (Corresponding author) JSPS research fellow・Center for climate system research, University of Tokyo, 5–1–5, Kashiwanoha, Kashiwa, 277–8568, Japan.
t_sato@ccsr.u-tokyo.ac.jp
** The master's program in Environmental Sciences, University of Tsukuba, (Present affiliation：Franklin Japan Co.).
*** Graduate school of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba.

(Received 7 November 2005；Accepted 3 April 2006)

Abstract

Modifications of precipitation systems by the metropolitan area in and around Tokyo (MAT) are investigated using radar data for twelve years period. Lag composite analysis of precipitation frequency is carried out for 71 summer days when strong precipitation echo was detected over mountainous area of Okuchichibu without synoptic scale disturbances near Kanto area. Most of precipitation systems generated in the mountainous area move eastward and arrive at the MAT in 2.5 to 3.5 hours after the initiation. Precipitation frequency in the MAT is remarkably high compared with that in surrounding areas. The results indicate that the MAT affects the intensification of the precipitation systems.