

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 19 日現在

機関番号：13501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24760390

研究課題名(和文)エアロゾルを含む都市環境を包括的に考慮した短時間強雨予測手法の構築

研究課題名(英文)Development of a prediction method of short-time heavy rainfalls considering the urban environments including aerosols

研究代表者

相馬 一義 (SOUMA, Kazuyoshi)

山梨大学・総合研究部・准教授

研究者番号：40452320

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：近年日本では、都市域における短時間強雨による被害が顕著である。その予測精度向上を目指して本研究では、研究代表者らがこれまでに開発してきた都市域における加熱と摩擦を詳細に考慮した雲解像気象モデルに、新たにエアロゾル(大気中の微粒子)の影響を組み込んだ短時間強雨予測手法を構築した。さらに2012年8月12日大阪における短時間強雨を対象に構築した手法を適用し、数値実験によりエアロゾルが短時間強雨予測に与える影響を検討した。その結果、現実的なエアロゾル分布を考慮した実験では降水量が大阪平野南部で増加し、日本などの湿潤地域では、エアロゾルの影響により降水が強まる事例がある可能性が示唆された。

研究成果の概要(英文)：Recently, the short-time heavy rainfall events over urban areas have caused severe damage in Japan. In this study, a prediction method of short-time heavy rainfalls considering the effects of aerosols was developed. The method is based on an advanced cloud resolving model, which has been developed by principal investigator and collaborators, considering detailed urban environments including artificial land cover, anthropogenic heat, and building height distribution. The developed method was applied to a short-time heavy rainfall event which occurred in Osaka on 12 August in 2012. In an experiment considering aerosol effects, the amount of precipitation increased over southern part of Osaka plain, compared with the other experiment without aerosol effects. As a result, it was indicated that the precipitation amount can increase by the effects of aerosols in humid region like Japan in some rainfall events.

研究分野：工学

キーワード：エアロゾル 大気陸面相互作用 大気陸面結合モデル 短時間強雨 都市活動 都市環境 降雨予測  
雲解像モデル

### 1. 研究開始当初の背景

都市域では活発な生産・消費活動に伴い、郊外と異なる特有の気象が形成される。具体的にはアスファルトなどの人工的土地被覆、クーラー等からの人工排熱による加熱の強化が気温を上昇させ、高層建物が摩擦による風の乱れを増大し、都市域での上昇気流強化につながる。その結果、積乱雲の発生・発達強化され、降水にも大きな影響を与える可能性が指摘されている。

晴れた状態から急激に発生・発達する積乱雲がもたらす短時間強雨は予測が困難で、近年日本の都市域で大きな被害をもたらしている。例えば2008年7月28日に兵庫県神戸市都賀川で5名が犠牲になり、2008年8月5日に東京都豊島区雑司ヶ谷付近で下水道工事中の5名が犠牲になるなど多くの被害が報告されている。

それを踏まえて研究代表者らは都市における加熱と摩擦を詳細に表現可能な雲解像気象モデル(短時間強雨予測に用いられる数値気象モデル)CReSiBUC(Souma et al., 2013他)を開発し、その降水予測への影響を評価してきた。

都市における加熱と高層建物の存在に加えて、大気汚染によって生じるエアロゾルの増加も見逃すことができない。アジアに多数存在するメガシティでは都市活動の活発化に伴い多くの人為起源エアロゾルが排出されており、特にユーラシア大陸起源のエアロゾルが偏西風に乗って日本にも多く流入している。エアロゾルは雲の種となり、降雨に大きな影響を与える可能性が指摘されており、短時間強雨に影響を与える可能性が高い。

これまで研究代表者らが開発してきた雲解像気象モデル CReSiBUC にエアロゾルを与える効果を導入したモデルを開発することで、都市特有の環境を包括的に考慮した短時間強雨予測が実行可能になると期待される。

### 2. 研究の目的

以上を踏まえて本研究では、都市における加熱と摩擦を詳細に考慮した雲解像気象モデルにエアロゾルの影響を組み込んだ短時間強雨予測手法を構築する。

さらに夏季の短時間強雨を抽出して開発した手法を適用し、エアロゾルが短時間強雨予測に与える影響を評価する。

### 3. 研究の方法

(1) エアロゾルを含む都市環境を包括的に考慮した短時間強雨手法の構築

本研究ではまず、全球エアロゾルモデル SPRINTARS (Takemura et al., 2000, 2002,

2005) の計算結果(空間解像度 1.125 度、鉛直 56 層)について、3次元線形補間を行い、雲解像気象モデルの計算格子点に内挿するプリプロセッサを作成した。

続いて、大気モデルについて従来使用してきた CReSSver2.2 から、エアロゾルの直接・間接効果を表現するために必要な詳細な大気放射過程及び 2 モーメントバルク法に基づく雲物理過程を考慮した CReSSver3.4 への更新を行った。2 モーメントバルク法では、乾燥空気単位質量あたりに含まれる降水・雲粒子の質量(混合比)に加えて、降水・雲粒子の個数(数密度)も予報する。また、本研究で必要とされる大規模計算に対応するために、モデルを名古屋大学及び京都大学のスーパーコンピュータで運用可能にし、計算時間を大きく短縮させた。

さらに Lohmann et al. (1999, 2000) を参考として、エアロゾル数密度が降水に与える影響を CReSiBUC に導入した。

具体的には雲解像気象モデルの計算格子内に存在するエアロゾル数密度と鉛直風速を用いて、雲底における雲水数密度の増加量を計算した。雲水数密度の変化に応じて雲水混合比が変化し、雲物理などさまざまな過程を経て最終的に降水量変化につながる。本研究で構築した雲解像気象モデルを中核とする短時間強雨予測手法の概略を図 1 に示す。

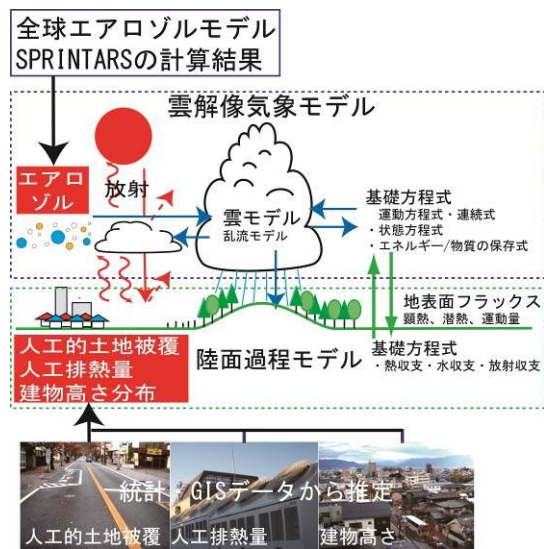


図 1 本研究で構築した、エアロゾルを含む都市環境を包括に考慮した短時間強雨予測手法の概念図

本研究では SPRINTARS で計算された月平均の硫酸塩、海塩、黒色炭素と有機物の内部混合物、外部混合の黒色炭素、2 次有機物、について数密度を合計したものをエアロゾル数密度として取り扱った。本研究ではエアロゾル数密度の時間変化については無視し、各パラメータについては Lohman et al. (1999) が -Ghan 実験で使用した値を用いた。鉛直風速については、本研究では雲解像気象モデルを用いて雲中の風を予報できる空間解像

度で計算を行うことから、グリッドスケールの鉛直風速を用いて与えた。また、エアロゾルが雲水数密度に与える影響は Lohman et al. (1999) と同様に 30 分ごとに計算を行った。

エアロゾル以外の都市環境については以下のデータを用いて現実的な値を与えた。人工的土地被覆を含む土地利用については、国土地理院による国土数値情報（空間解像度約 100m；1994 年調査に基づく）を用いた。人工排熱量については野依（2015）、相馬（2015）に基づく月別・時間帯別データ（空間解像度約 500m）を用い、建物高さについては野依（2015）、相馬（2015）が GIS データに基づき推定した建物階数割合データ（空間解像度約 250m）を用いた。

## （2）短時間強雨への手法適用とエアロゾルが与える影響評価

2012 年 8 月 18 日の大阪市で発生した短時間強雨を対象に開発した手法を適用した。この日は大阪市で 14 時過ぎから降水が観測され、15 時には前 1 時間降水量が 52.0mm に達する短時間強雨が観測された。この大雨により大阪府内で、床上浸水 2 棟、床下浸水 64 棟、土砂崩れ 1 ヶ所などの被害が発生した。また、落雷により大阪市で 2 名が犠牲となり、8 名が負傷する大きな被害が発生した。

日本におけるエアロゾル数密度にはユーラシア大陸からの流入が大きく影響しており東日本よりも西日本でその影響を受けやすいこと、日本において首都圏に次ぐ規模の大都市圏を有することから、大阪を対象地域として選択した。

また、2012 年夏季には京阪神地域を対象として、京都大学をはじめとする様々な研究機関（山梨大学を含む）が連携して集中観測を行っており、複数の X バンド MP レーダーやミリ波レーダー等の最先端機器を用いた観測データを活用できる可能性があるため、2012 年 8 月 18 日の事例を対象とした。

図 2 に示す計算領域について、水平方向の空間解像度は 2km、格子点数は 240×240 に、鉛直方向は平均 300m 間隔で 45 層（最下層は 50m）に設定した。日本時間の 9 時を初期時刻とし、21 時まで 12 時間の計算を行った。

大気場の初期・境界条件については、気象庁が提供するメソ客観解析データ（空間解像度 5km；3 時間毎）を用いて現実的な値を与えた。地形標高データについては USGS (U.S. Geological Survey) が提供する GTOPO30（空間解像度約 1km）を用いる。海面水温については Group for High Resolution Sea Surface Temperature (GHRSSST) が提供する空間解像度約 5km の日平均データを用いて与えた。葉面積指数については SPOT VEGETATION 10day composite データ（空間解像度約 1km）を用いて与えた。

数値実験として、都市環境として人工的土地被覆・人工排熱量・建物高さ分布に加えて

エアロゾル数密度分布を考慮した実験（AERO）と、エアロゾル数密度分布を考慮しない実験（NOAERO）を行い、両者の結果を比較した。数値実験の設定を表 1 にまとめる。



図 2 計算対象領域

表 1 本研究で行う数値実験の設定：各実験で考慮する都市環境情報。

	人工的土地被覆	人工排熱量分布	建物高さ分布	エアロゾル数密度分布
AERO 実験				
NOAERO 実験				

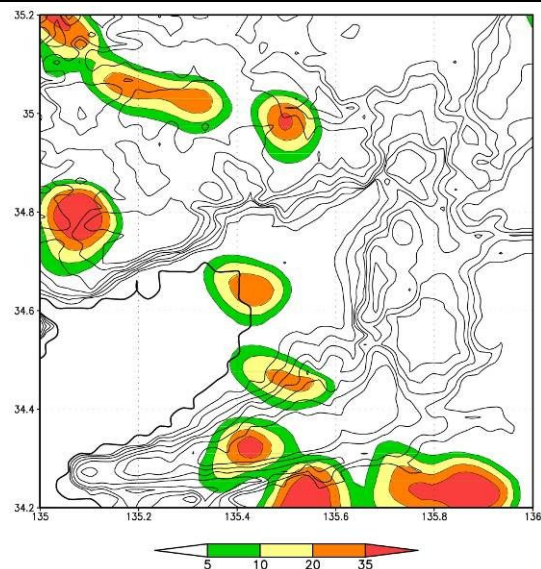


図 3 AERO 実験における 2012 年 8 月 18 日 11 時～17 時にかけての積算降水量(mm)

## 4. 研究成果

AERO 実験で再現された 11 時～17 時までの 6 時間積算降水量を図 3 に示す。大阪における雨量観測値（59.5mm）と比較して降水量を過小評価する傾向はみられるものの、大阪平野中部から南部にかけて 20mm 以上の降水域

が再現されている。

さらなる改良と精度向上は必要なものの、エアロゾルを含む包括的な都市環境を包括的に考慮した短時間強雨手法のプロトタイプを構築できたといえる。

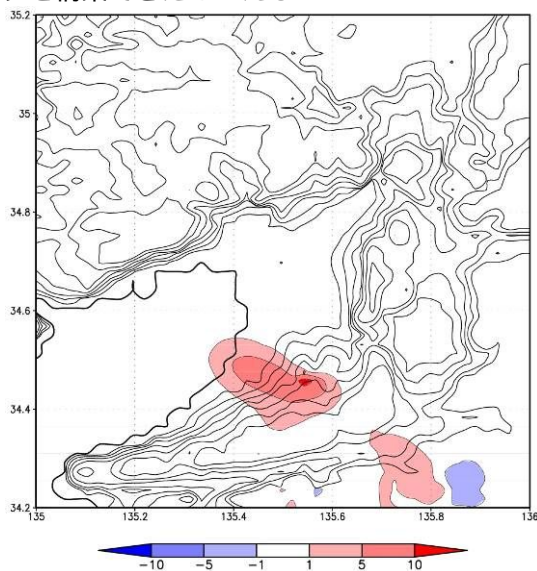


図4 2012年8月18日11時~17時にかけての積算降水量の差(mm; AERO実験 NOAERO実験)

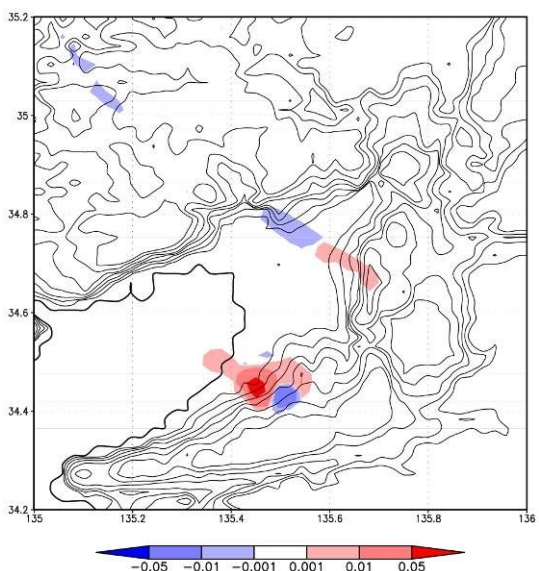


図5 2012年8月18日15時の鉛直平均雲水混合比の差(g/kg; AERO実験 NOAERO実験)

図4に2012年8月18日11時~17時の積算降水量について、AERO実験の結果からNOAERO実験の結果を引いた差を示す。AERO実験ではNOAERO実験と比較して大阪平野南部で降水量が増加している。

気候予測におけるエアロゾルの効果については、雲水の数密度が増加することで、水蒸気量が限られている状況では雲粒の平均粒径が減少し、結果として降水量が減少することが強調されることが多い。その結果雲が長時間持続し放射過程に影響を与えることが気候予測において重要であるためである。

しかし、日本のように水蒸気量が豊富な地

域では、エアロゾルの影響で雲水の数密度が増加しても、豊富な水蒸気によりそれぞれの雲粒が成長し、平均粒径はそれほど減少しない状況が起こりうる。その結果、この事例では図5に示すように雲水混合比が増加し、衝突併合等の過程を経て図6に示すような雨水混合比の増加につながり、結果として降水量が増加したと考えられる。

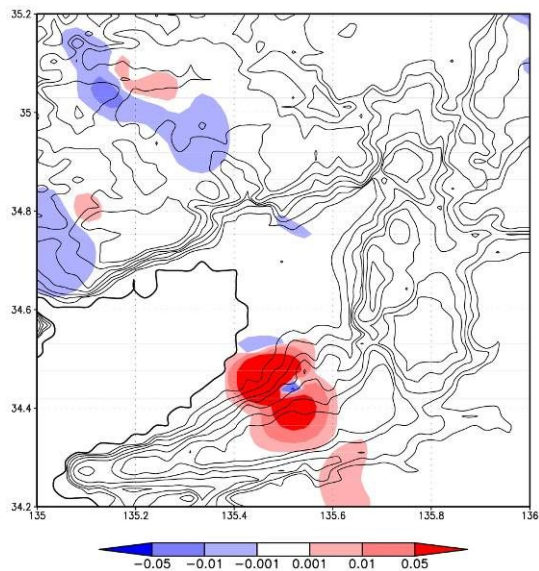


図6 2012年8月18日15時の鉛直平均雨水混合比の差(g/kg; AERO実験 NOAERO実験)

以上から、本研究の成果は以下のようにまとめられる。

1. 研究代表者らがこれまで構築してきた人工的土地被覆・人工排熱量・建物高さ分布を考慮した短時間強雨予測手法を基に、さらに大気汚染に伴うエアロゾルの増加を加えた、包括的な都市環境を考慮した短時間強雨手法のプロトタイプを構築した。
2. 2012年8月18日大阪で発生した短時間強雨を対象として構築した手法を適用した。その結果、降水量を過小評価する傾向があるものの、大阪平野中部から南部にかけての降水域については再現することができた。
3. エアロゾルが短時間強雨予測に与える影響を、数値実験により検討した。その結果、日本のように水蒸気量が豊富な地域では、エアロゾルによる雲水数密度の増加が雲水混合比の増加につながり、降水量が増大する事例があることが示された。

今後は現状の2モーメントバルク法に基づく雲物理パラメタリゼーションの枠組みを維持した上でより精緻なモデルを導入するなど、より観測値に近い降水量を再現できるよう手法を改良していく必要がある。

さらに、レーダーによる降水量観測に加えて、情報通信研究機構等が2013年から夏季

の京阪神で行っているドップラーライダー（可視光を用いたレーザー）による風速・エアロゾル観測値と再現計算結果を比較するなど、エアロゾルと雲との相互作用により踏み込んだ検証を行っていく必要がある。加えて、研究代表者らは2013年8月から2015年1月にかけて兵庫県芦屋市において、顕熱フラックスを中心とした詳細な都市環境連続観測を行っており、その成果も手法改良へ活用していく予定である。

また、設定した空間解像度（2km）と鉛直解像度（45層、平均300m、最下層50m）が本研究で対象とした2012年8月18日大阪における短時間強雨の空間スケールに対して粗いことが、AERO実験における降水量の過小評価につながったと考えられる。今後は名古屋大学スーパーコンピュータシステムを活用し、より空間解像度の高い実験を行う必要がある。

#### 参考文献

- Lohmann, U., J. Feichter, C. C. Chuang, and J. E. Penner: Prediction of the number of cloud droplets in the ECHAM GCM, *Journal of Geophysical Research*, 104, pp.9169-9198, 1999.
- Lohmann, U., J. Feichter, J. Penner, and R. Leaitch: Indirect effect of sulfate and carbonaceous aerosols: A mechanistic treatment, *Journal of Geophysical Research*, 105, pp.12193-12206, 2000.
- Takemura, T., H. Okamoto, Y. Maruyama, A. Numaguti, A. Higurashi, and T. Nakajima, 2000: Global three-dimensional simulation of aerosol optical thickness distribution of various origins. *Journal of Geophysical Research*, 105, 17853-17873.
- Takemura, T., T. Nakajima, O. Dubovik, B. N. Holben, and S. Kinne, 2002: Single-scattering albedo and radiative forcing of various aerosol species with a global three-dimensional model. *Journal of Climate*, 15, 333-352.
- Takemura, T., T. Nozawa, S. Emori, T. Y. Nakajima, and T. Nakajima: Simulation of climate response to aerosol direct and indirect effects with aerosol transport-radiation model, *Journal of Geophysical Research*, D02202, doi:10.1029/2004JD005029, 2005.
- 大阪管区气象台：平成24年8月18日の落雷について（大阪の気象速報），<http://www.jma-net.go.jp/osaka/kikou/saigai/pdf/sokuhou/20120820.pdf>，2015年5月30日閲覧。
- 相馬一義：京阪神における局地的大雨予測への詳細な都市環境情報導入とその影響

評価，河川整備基金助成事業平成26年度報告書（助成番号：26-1263-012），p.24, 2015.

- 野依亮介：詳細な都市活動情報を考慮した京阪神地方における局地的大雨予測に関する研究，山梨大学修士論文，p.99, 2015.

#### 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）

〔雑誌論文〕(計 5件)

Hasti Widyasamratri, Kazuyoshi Souma, Tadashi Suetsugi, Hiroshi Ishidaira, Yutaka Ichikawa, Hiroshi Kobayashi, Ichiko Inagaki, Kazuhiro Kakizawa: Heat and dry island observed over Jakarta, Indonesia, in 2012, *International Association of Hydrological Sciences Publication*, 364, pp.140-144, 2014. 査読あり  
Kazuyoshi Souma, Kenji Tanaka, Tadashi Suetsugi, Kengo Sunada, Kazuhisa Tsuboki, Taro Shinoda, Yuqing Wang, Atsushi Sakakibara, Koichi Hasegawa, Qoosaku Moteki, and Eiichi Nakakita: A comparison between the effects of artificial land cover and anthropogenic heat on a localized heavy rain event in 2008 in Zoshigaya, Tokyo, Japan, *Journal of Geophysical Research*, 118, pp.11,600-11,610, doi:10.1002/jgrd.50850, 2013. 査読あり  
Kazuyoshi Souma, Kengo Sunada, Tadashi Suetsugi and Kenji Tanaka: Use of ensemble simulations to evaluate the urban effect on a localized heavy rainfall event in Tokyo, Japan, *Journal of Hydro-environment Research*, 7 (4), pp.228-235, doi:10.1016/j.jher.2013.05.001, 2013. 査読あり  
Kazuyoshi Souma, Kenji Tanaka, Tadashi Suetsugi, Kengo Sunada, Eiichi Nakakita, Kaoru Takara, and Satoru Oishi: The effects of soil moisture on a summertime convective rainfall over mountainous area and its contiguous plain in central Japan, *International Association of Hydrological Sciences Publication*, 359, pp.246-252, 2013. 査読あり  
相馬一義, 田中賢治, 末次忠司, 坪木和久, 篠田太郎, 榊原篤志, 長谷川晃一, 茂木耕作, 中北英一: 現実的な地表面状態量初期値が2008年に東京都で発生した局地的大雨へ与える影響, 土木学会

水工学論文集, 第 57 卷 (土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.69, No.4), I\_343-I\_348, 2013. 査読あり

〔学会発表〕(計 12 件)

Hasti Widyasamratri, Kazuyoshi Souma, Tadashi Suetsugi, Hiroshi Ishidaira, Yutaka Ichikawa, Hiroshi Kobayashi, and Ichiko Inagaki: A comparison of air temperature and land surface temperature to detect an urbanization effect in Jakarta, Indonesia, Proceedings of 34th Asian Conference on Remote Sensing, SC02-581-588, 2013, Bali, Indonesia, 20-24 Oct.(oral).  
Kazuyoshi Souma, Masahiro Hikita, Tadashi Suetsugi, Yuqing Wang, Jun Magome, Kazuhiro Kakizawa, Temur Khujanazarov, and Kenji Tanaka: The effects of satellite-derived Eurasian snow water equivalent on flooding in Chao Phraya river basin in 2011, Proceedings of 34th Asian Conference on Remote Sensing, SC05-67-70, 2013, Bali, Indonesia, 20-24 Oct.(oral).  
渡邊彩花, 相馬一義, 末次忠司, 佐野哲也, 大石哲, 柿澤一弘, 石平博: 山岳域における X バンド MP レーダーの定量的活用に向けた地上雨量計との比較解析, 水文・水資源学会 2013 年研究発表会要旨集, pp.116-117, 2013, ポスター発表, 神戸大学, 神戸, 9/25-9/27.  
野依亮介, 相馬一義, 末次忠司, 田中賢治, 大石哲, 中北英一, 市川温: 観測解析と雲解像モデルを用いた 2011 年大阪における局地的大雨発生の要因分析, 水文・水資源学会 2013 年研究発表会要旨集, pp.14-15, 2013, 口頭発表, 神戸大学, 神戸, 9/25-9/27.  
野依亮介, 相馬一義, 末次忠司, 田中賢治: 2011 年 8 月 27 日大阪における局地的大雨発生の要因分析, 土木学会第 68 回年次学術講演会講演概要集, 11-115 (DVD), 2013, 口頭発表, 日本大学生産工学部津田沼キャンパス, 千葉, 9/4-9/6.  
相馬一義, 田中賢治, 茂木耕作, 坪木和久, 篠田太郎, 榊原篤志, 長谷川晃一, 萬和明, 中北英一, 末次忠司, 砂田憲吾: CReSS への陸面過程モデル SiBUC の導入と局地的大雨研究への活用, 平成 24 年度地球水循環研究センター計画研究報告会 CReSS15 周年研究会研究報告書, pp.30-34. 2013, 名古屋大学, 名古屋, 3月4~5日 (oral).  
Hasti Widyasamratri, Suharyadi, Kazuyoshi Souma, Tadashi Suetsugi: Urban index and vegetation index for analysis of urban environmental condition at Semarang Municipality,

Book of abstracts of 8th International Conference on Urban Climate and 10th Symposium on the Urban Environment (ICUC8), International Association for Urban Climate, 203, 2012, oral, Dublin, Ireland, 6 Aug.- 10 Aug.  
渡邊彩花, 相馬一義, 末次忠司, 砂田憲吾, 佐野哲也, 柿澤一弘: 山梨県における詳細な気象レーダー情報を用いた土砂災害危険度推定の試み, 第 31 回日本自然災害学会学術講演会概要集, pp.177-178, 2012, 口頭発表, 弘前大学, 弘前, 9/17-9/19.  
渡邊彩花, 相馬一義, 末次忠司, 佐野哲也: 気象レーダーを用いた山梨県における土砂災害危険度推定に関する研究, 土木学会第 67 回年次学術講演会講演概要集, 11-172 (DVD), pp.343-344, 2012, 口頭発表, 名古屋大学 東山キャンパス, 名古屋, 9/5-9/7.  
Kazuyoshi Souma, Kengo Sunada, Tadashi Suetsugi, Kenji Tanaka: Use of ensemble simulations to evaluate the urban effect on a localized heavy rainfall event in Tokyo, Japan, 10th Congress of the Asia and Pacific Division of the International Association for Hydro-Environment Engineering and Research 2012 (IAHR-APD 2012) Proceedings, IAHR, p8, oral, Jeju, Korea, 19 Aug.- 23 Aug., 2012.  
Kazuyoshi Souma, Kengo Sunada, Tadashi Suetsugi, Kenji Tanaka: Effects of urban heating on a heavy rainfall over Tokyo, Book of abstracts of 8th International Conference on Urban Climate and 10th Symposium on the Urban Environment (ICUC8), International Association for Urban Climate, p.168., oral, Dublin, Ireland, 6 Aug.- 10 Aug., 2012.  
相馬一義, 砂田憲吾, 末次忠司, 田中賢治: 都市加熱が 2008 年雑司が谷付近における局地的大雨に与えた影響, 2012 年度日本気象学会春季大会講演予稿集, pp.112, 2012, 口頭発表, つくば国際会議場, つくば, 5/26-5/29.

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.tok2.com/home/ksouma/soumacresibuc2.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

相馬 一義 (SOUMA Kazuyoshi)

山梨大学・大学院総合研究部・准教授

研究者番号: 40452320