降雨現象の短期的周期特性に関する研究

永田 喜大¹・吉見 和紘²・永島 健³・山田 正⁴

¹学生会員 中央大学 理工学研究科 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)
E-mail:nagata@civil.chuo-u.ac.jp

²学生会員 中央大学 理工学研究科 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

³正会員 株式会社 建設環境研究所 (〒170-0013 東京都豊島区東池袋2-23-2)

⁴フェロー会員 中央大学 理工学部 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

近年, 地球温暖化に伴う気候変動の影響により降雨規模, 降雨形態の変化が指摘されている. また, それに伴って日本では, 台風や豪雨による洪水や土砂災害のリスクが増大している. 平成26年8月20日には広島県で大規模な土砂災害が起こった. こうした災害から被害を軽減させるためには, 降雨現象の特性を正確に把握することが必要であり, 台風や集中豪雨など突発的, 短い時間スケールの気象現象がどのように変化するかが非常に重要である. また, 降雨時系列の乱れた成分の時定数を求める事は流出現象の不確実性を評価するのに極めて重要である. そのため, 降雨強度などの短期的な特性についても解明を行う必要がある. そこで本研究では, XRAINと時間分解能の高い雨量計のデータを用いて1分間降雨強度の時間的周期変動の特性の把握を目的として研究を行った.

Key Words : *spectral analysis, XRAIN, linear rainbands, uncertainty*

1. はじめに

近年, 地球温暖化に伴う気候変動の影響により降雨規模, 降雨形態の変化が指摘されている. また, それに伴って全国土の7割を山地, 丘陵地を占める日本では, 台風や豪雨による洪水や土砂災害のリスクが増大している. 平成26年8月20日には広島県で線状降水帯が発生し12時間に250mmを超える豪雨により大規模な土砂災害が起こった. この災害による被害は死者74人, 全壊の家屋数133戸と甚大な被害をもたらした. こうした災害から被害を軽減させるためには, 降雨現象の特性を正確に把握することが極めて重要である. 降雨特性の長期的な変動周期においては, 近森ら¹⁾によって研究が行われており, 日本の年降水量は33年の周期があることを示している. また, 糸川ら²⁾は関東地方の山間部を解析対象として10地点中8地点で年最大日降雨量, 年最大2日累積降雨, 年最大3日累積降雨量に99ヶ月から162ヶ月(8年3ヶ月から13年6ヶ月)の周期があることを示している. これらは長期的な周期性に関する特性であり, 年あるいは数か月の単位の降水量の変動評価としては非常に有用であるが一雨単位での災害へのリスク評価は難しい. 台風や集中豪雨など突発的, あるいは短い時間スケールの気象現象がどのように変化するかは洪水, 土砂災害から被害を軽減させるためには非常に重要である. また, 吉見ら³⁾は確率過程論に基づいて流出現象の不確実性を評価する理論的枠

組を提案している. その中でも, 降雨時系列の乱れた成分の時定数を求める事は極めて重要な位置づけであると指摘している. そのため, 一雨単位での降雨強度などの短期的な特性についても解明を行う必要がある. そこで本研究では, 平成26年8月20日の広島県を対象に時間分解能の高いXRAINと時間分解能の高い転倒ます式の雨量計のデータを用いて1分間降雨強度の時間的, 空間的な周期変動の特性の把握を目的として研究を行った.

2. 対象降雨

本研究では, 平成26年8月20日の降雨を対象に解析を行う. この豪雨は温かく湿った空気が日本海に停滞する前線に向かって流れ込み, 広島県で19日夜から20日明け方にかけて線状降水帯を発生させ, 短時間に集中して猛烈な雨を降らせた. 土砂災害の起きた広島市周辺ではこの線状降水帯が上空に位置していた. この線状降水帯が広島市で確認された1時から4時の間を対象として, 降雨強度の周期特性の解明を行う. 図-1に示す春日野地点では1分間隔の高い時間分解能をもつ雨量計が設置されている. また, コンターは対象期間内にXRAINで観測された総雨量を示しており, 広島市内で非常に強い雨が降ったことが見て取れる. XRAINのデータは国土交通省の合成処理局によって処理された合成雨量データを

用いている。この合成雨量データは1分間隔で4分の1地域メッシュ(緯度間隔7.5秒 経度間隔11.25秒の1辺の長さが約250m)ごとのデータとなっている。また、雨量は観測仰角が0.03°と0.05°の仰角スキャンされたデータを合成することによって求められている。

この春日野地点の雨量データと上空のXRAINの雨量データを用いて、雨の周期特性の解析を行い地上と上空との周期特性の違いについて検討した。また、図-1に示すように雨域の移動方向に沿った測線ABを引き、その区間内のXRAINの降雨データを抽出し、スペクトル解析を行うことで雨域の移動による降雨強度の周期の変化と乱れ成分の特性について解析を行った。

対象期間のXRAINと地上雨量計の1分間降雨強度の時系列を図-2に示す。XRAINの降雨強度を見ると、降雨開始から20分後には50mm/hを超える雨が降り始め、2時間以上にわたり強度を維持したまま降り続けている。また、降雨強度が100mm/hを超える時間も幾度もあり、とても強い雨が降ったことがわかる。

3. 解析手法

本研究の解析手法は降雨強度の時系列データを使って、降雨強度のパワースペクトル密度の分布から周期を求める。まず、降雨強度の平均をとり、各時間の降雨強度から平均を引くことで偏差を求め、その値を用いてスペクトル解析を行う。平均の仕方はさまざまあるが、ここでは単純平均と単純移動平均を用いて解析を行う。単純移動平均は過去10minのデータを用いて平均することとした。パワースペクトル密度の計算は降雨強度の自己相関関数から離散フーリエ変換を行うことにより求める。降雨強度のパワースペクトル密度は式(1)から求められる。

$$G(\omega) = \sum_{\tau=-c}^c r_{xx}(\tau)w(\tau/2c)e^{-i\omega\tau} \quad (1)$$

τ : 時間, $r_{xx}(\tau)$: 自己相関関数, w : 窓関数, c : ウィンドウ幅。ここで、窓関数には矩形窓、ハニング窓、ハミング窓など様々な種類が存在するが、周波数の推定で最も重要なのは周波数分解能がよいことである。そのため、ここで窓関数は周波数分解能がよく一般的に用いられるハミング窓を使って解析を行う。また、自己相関関数は(2)式で表され、遅延時間との降雨強度積の期待値で表される。

$$r_{xx}(\tau) = E[x(t)x(t+\tau)] = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n x(t)x(t+\tau) \quad (2)$$

$x(t)$: 1分間降雨強度, τ : 遅れ時間。これを用いる事によって、時系列データのコレログラムが求められ、その形状

図-1 対象雨量計地点とXRAINによる3時間積算雨量のコンター

図-2 対象地点におけるXRAINと地上雨量計の1分間降雨強度

を見ることでデータの特性などがわかる。また、(3)式を用いることにより、地上雨量計とXRAINとの時系列データにどのような相関関係にあるのかをみる。

$$r_{xy}(\tau) = E[x(t)y(t+\tau)] = \sum_{t=1}^{n-\tau} x(t)y(t+\tau) \quad (3)$$

$r_{xy}(\tau)$: 相互相関関数, $x(t)$: 地上雨量計による1分間降雨強度, $y(t)$: レーダ雨量計による1分間降雨強度。これらの手法を用いて降雨強度の強い周期性成分の解析と相関の解析を行った。

乱れ成分を取り出す方法としては、ベイズモデルによる方法やトレンドモデルによる方法など様々ある。⁵⁾ここではパワースペクトル密度から周期性の強い成分を用いて、サイン関数の和で近似曲線を求め、そして元のデータと近似曲線との残差を求める事により、その残差を降雨強度の乱れた成分とみて解析を行った。

3. 降雨強度の周期特性

図-3 単純平均法と移動平均法により求めた降雨強度のパワースペクトル (右図：単純平均法, 左図：移動平均法) (上図:地上雨量計, 下図:XRAIN)

図-4 降雨強度の自己相関係数(左図：地上雨量計, 右図：XRAIN)

降雨強度データの単純平均からの偏差をもちいてスペクトル解析を行ったものと降雨強度データの移動平均からの偏差をもちいてスペクトル解析を行ったものを図-3に示す。図に示す 95%信頼区間はラグの自己相関が 0 である帰無仮説である。地上、レーダのどちらの雨量データも約 20 分の周期で卓越し、上空と地上とで同じ周期をもっていることがわかる。また、単純平均と移動平均とで比較すると、周期性の強い値、波形ともにほとんど変わらないが、移動平均から求めた周期分布の方が、周期性の強い成分についての反応が大きいことがわかる。また、地上雨量計と XRAIN とで周期性の強い値を比べると、どちらも 13.0, 19.0, 28.0min 付近の値で強い周期性を示し、ほぼ同じようなパワースペクトル密度の分布を持っていることがわかる。1min の周囲でも強い周期がみられるがこれは雨量観測機器の時間分解能が 1min であり、それに起因して強くなっているものと考えられる。また、それ以下の周期成分については観測機器の時間分解能よりも小さい値であるためノイズであると考えて無視する。次に、降雨強度のデータからコレログラムを求

めたものが図-4 である。コレログラムの形状を見ると時間が 0min の時の 1.0 から少しずつ減少しながら、相関係数は波状に形を成している。また、5min 付近で 95%信頼区間に入り、それ以降はその区間内にコレログラムが存在する。このような形状は正弦波とノイズで組み合わされたデータからコレログラムを求めた時の形状と類似している。そこでパワースペクトル密度関数の分布から周期性の強い成分を読み取り、その周波数成分を用いて降雨強度の近似周期曲線を正弦波の和によって求める。

4. 近似周期関数と乱れ成分の抽出

図-3 に示した数値の部分で周期は大きくなることから、これらの値を用いて近似周期曲線を求める。降雨強度の細かい変動を評価すると同時に、一雨の全体を通した大きな変動をも表現する必要がある。そのため、近似周期曲線で用いる周期は周期性の強い 5 つの成分と 1 つの長周期成分の計 6 つの周期を用いて計 6 つのサイン関数の和で雨量データを表現する。なお、近似周期曲線を

図-5 強い周期成分から求めた降雨強度の近似曲線と乱れ成分(左図:地上雨量計, 右図:XRAIN)

図-6 降雨強度の乱れ成分におけるパワースペクトル密度の分布図(左図:地上雨量計, 右図:XRAIN)

図-7 降雨強度の乱れ成分における自己相関係数(左図:地上雨量計, 右図:XRAIN)

求める際には、降雨強度のデータと近似周期曲線との残差 2 乗和が最小となるときの振幅と時間遅れの値をそれぞれ用いている。ここで求められた近似周期曲線と、降雨強度の時系列データとの残差を図-5 に示す。求められた周期関数は降雨強度の時系列データに概ねあっている。残差成分を見ると、地上雨量計は XRAIN に比べて細かく複雑な変動をしていることがわかり地上雨量計の方が乱れ成分を多く含んでいる。これは図-3 のパワースペクトルからも小さい周期成分で強い周期性を示していることから明らかである。また、残差成分は、地上雨量計では $\pm 50\text{mm/h}$ の間で変動しているのに対して、XRAIN では $\pm 20\text{mm/h}$ の間で変動していることがわかる。この差は XRAIN の降雨強度の時系列データに比べて地上雨量計は細かい変動を多く含んでいたことにより大きな変動となっている。ここで、求められた近似周期曲線を降雨強度との残差を乱れ成分として、この乱れ成分の周期性や自己相関係数などの解析を行う。

5. 乱れ成分の周期特性

乱れ部分の周期特性についても3と同様に行う。乱れ成分のパワースペクトル密度の分布を求めたものを図-6 に示す。30, 23, 10min の付近で強い周期性があるのはどちらも同じであるが、分布の形は降雨強度をパワースペクトル密度の分布を求めた時ほど類似した形状をなしていない。特に、6.4min の時点では地上雨量計の方には大きな周期性を示しているが XRAIN ではそのような周期性がない。これは、地上雨量計と XRAIN とで降雨観測の違いによるものや、上空から地上へ到達するまでの風や地形などからの影響によるものと考えられる。乱れ成分からコレログラムを求めると図-7 のような形状が得られる。このグラフの形状は時間 0min の後にすぐに 95% 信頼区間内で不規則な形状を成しており、この形状はホワイトノイズのデータからコレログラムを求めたような形状を成している。そのため、地上雨量計では特にそのような傾向

が出ている。一方で、図-6を見ると周期の強い成分が残っていることがわかる。また、これらのことから今回対象とした豪雨では雨量計のデータから近似周期曲線を求める際には6つのサイン関数の和で十分に表すことができ、乱れ成分の抽出が可能であることがわかる。しかし、この乱れ成分は対象期間のとり方によっては成分が変わる可能性があるため、さらなる検証が必要である。この乱れ成分の分布が正規分布に類似しているため、正規分布に仮定して表現すると、図-8のように描ける。地上とレーダとで比較すると平均値についてはどちらも-2.5前後を示しているが、標準偏差については地上雨量計の乱れ成分の方が分布の幅が広くて地上雨量計で27.4、XRAINで15.0の値を示している。XRAINは1辺が約250mの空間の平均を取っているため乱れ成分の分布の幅は地上雨量計に比べて小さくでている。また、この分布は降雨観測による不確実性や、風や地形などによる自然環境の影響による不確実性など様々な不確実性などによって変化する。この降雨の乱れ成分を分布として与え、インプットとして与えることで流出計算や河道計算を経て、河川水位の分布を得ることができるようになる。そしてその水位の分布から、従来では決定論的なリスク評価しかできなかったものが、確率論的なリスク評価ができるようになる。そのため、この乱れ成分の分布は洪水リスク評価をする上で必要なものとなる。

6. 空間的な降雨特性

ここまでは、春日野地点を例に 1 地点で地上雨量計と XRAIN の雨量データの比較で議論してきたが、ここでは、その空間的な特性について述べる。図-1 に示すように 3 時間の総降雨量で 50mm 以上降った区間に距離約 45km の測線 AB で 15km 毎の等間隔の距離はなれた 4 地点の XRAIN の降雨強度を用いて同様にスペクトル解析を行う。A 地点から順にそれぞれの点を地点 1, 2, 3, 4 と呼ぶことにする。地点 1 から 4 の移動平均を用いて求めたパワースペクトル密度の分布を図-9 に示す。この図から線状降水帯発生地点に近い方にある地点 1 では、降雨の周期性が小さく、ほとんど見えなかったのが雨域が進行するにしたがって、周期性が強くなりそして、地点 4 に到達するとまた周期が弱くなっている。また、総降雨量の特に大きかった地点に近い 2 点では 19min 付近で周期が強くなっている様子がわかる。そして、全体を通して似たような時間で周期は大きくなっていることがわかる。このことから、1 地点から求めた強い周期成分を線上の他の地点でも用いることができる。そこで、代表 1 地点から求めた強い周期成分を抽出し、その周期を用いて他の地点の近似周期曲線を求める。そして各地点

図-8 降雨強度の乱れ成分の分布 (上図: 地上雨量計, 下図: XRAIN)

図-9 測線 AB 間の 4 地点における降雨強度のパワースペクトル密度の分布

図-10 50 地点から求めた乱れ成分の平均と標準偏差の分布

の乱れ成分を取り出しその乱れ成分を調べることで、この降水の全体の乱れ成分の特性を見る。測線上にある 50 地点を用いて近似周期曲線の推定をおこない、乱れ成分を取り出した。これらの乱れ成分から得た平均と標準偏差の分布を図-10 に示す。標準偏差と平均との変動係数はそれぞれ 0.195, 1.30 である。この降雨イベントで乱れ成分の標準偏差は 20, 平均は-2.67 であることがわかった。この値から乱れ成分の分布特性がわかり、代表地点での周期成分を用いることで他の地点近似周期曲線を求める事ができる可能性があることがわかる。そのため、降雨パターンなどの違いによりこの分布特性を詳しく知る必要がある。

7. まとめ

XRAIN と地上雨量計の降雨強度の時系列データを用いて降雨強度とその乱れ成分の周期特性について検討した。本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 春日野地点において地上雨量計と XRAIN とで降雨強度はどちらも約 20 分で卓越した周期性成分がみられる。また、周期性の強い成分はどちらも同じような値を示す傾向がみられる。
- (2) スペクトル解析で得られた周期を用いてサイン関数の和で表現された近似曲線と降雨データとの残差から得られた自己相関関数はホワイトノイズのデータでコレログラムを求めたときの形状と類似した形状を示した。
- (3) 線状降水帯の移動方向ではどこでも強い周期成分は同じような値を示し、周期の空間的な相関がみられた。
- (4) 代表地点 1 地点から得られた周期成分を用いて抽出した測線 AB 上の乱れ成分は平均-2.67, 標準偏差 20.0 で分布し、代表地点での周期成分を用いることで他の地点近似周期曲線を求める事ができる可能性を示した。

ここでは、平成 26 年 8 月の広島県豪雨を対象に短期

的な周期成分解析を行った。今後は台風や前線性の雨などのいくつかの事例を用いて降雨形態の違いによる周期特性の変化と外部条件との関係性を明らかにすることが目標である。また、乱れ成分の不確実性についての定量的評価を行い、洪水・土砂災害などのリスク評価手法に対する有用な知見を得ることを目標とする。そのためには、降雨特性のさらなる把握が必要である。

謝辞

本研究は科研費基礎研究 (A) 「可能最大洪水に対応できる数理科学的な河川計画手法の確立」(代表者、山田正) の支援を受けて、行われたものである。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 近森邦英：年降水量の統計的諸特性について，農土誌，71(2)，pp.125-130, 2003.
- 2) 糸川和弘，荒川貴志，岡部真人，山田正：統計学を用いた大雨の発生頻度と周期性に関する研究，水文・水資源学会 研究発表会要旨集 23(0)，122-122, 2010.
- 3) 吉見和紘，山田正，山田朋人：確率微分方程式の導入による降雨流出過程における降雨の不確実性の評価，土木学会論文集 B1(水工学) Vol.71, No.4, I_259-I_264, 2015.
- 4) 渡辺武彦，松浦正典，深和岳人，山田正：新記録の出現理論に基づく大雨の発生頻度に関する研究，土木学会第 47 回年次学術講演会講演要綱集, 1992.
- 5) 小野寺光永，井須芳美，長嶋雲兵，吉田裕亮，細矢 治夫：フーリエ変換とベイズモデルおよびトレンドモデルによる時系列データのノイズ除去，The Journal of chemical software 5(3)，113-127，1999-09-15 SOCIETY OF COMPUTER CHEMISTRY, JAPAN.

(2015. 4. 7 受付)

A STUDY ON THE SHORT-TERM CHARACTERISTICS OF RAINFALL PHENOMENON

Yoshiro NAGATA, Kazuhiro YOSHIMI, Ken NAGASHIMA, and Tadashi YAMADA

In recent years, it has been pointed out that climate change due to global warming has effected to the scale and form of rainfall. In Japan, many regions have experienced floods, landslides from unusually intense rains, and much of the country has seen record-breaking rainfalls. By 20th August 2014, the number and scale of rainfall, flood had already become so exceptional that caused major landslides in Hiroshima prefecture. In order to reduce the damage from such disasters, It is necessary to accurately grasp the characteristics of rainfall phenomenon, typhoons and torrential rains immediately. Understanding whether the meteorological phenomena change in short time will help finding the time constant of the turbulent component of rainfall time series to evaluate the uncertainty runoff discharge. Thus, an illustration the intensity and duration of rain events is critical to indicate the rainfall properties. This study analyses one minute rainrate by using the data from high rain-gauge of XRAIN and the work also carried out the research about characteristics of the periodic fluctuation.