

# 漏洩同軸ケーブルを用いたリアルタイム豪雨検知のための人工降雨実験

東京大学 学生会員, (独) 日本学術振興会特別研究員 DC ○水谷 司  
 東京大学 フェロー, (独) 科学技術振興機構 (CREST 研究担当) 藤野 陽三  
 三菱電機 (株) 猪又 憲治  
 辻田 亘  
 東京大学 正会員 長山 智則  
 正会員 西川 貴文  
 三菱電機 (株) 鹿井 正博  
 鷲見 和彦

## 1. 研究背景と研究目的

降雨, とくに集中豪雨は空間的・時間的変動が大きく, その正確な把握のニーズは高い. この社会的需要に応えるため, 本研究ではハイウェイラジオや鉄道無線用アンテナとして軌道中央若しくは両脇に敷設された漏洩同軸ケーブル(LCX: Leaky Coaxial cable)に着目した. LCXは, 図1に示すように同軸ケーブルの外部導体表面に周期的に設けられたスロットから微弱電波が漏洩する機構をもち, 周波数によりその電波の放射特性を変化させることができる超短波帯域用アンテナである<sup>[1]</sup>. 本研究では, LCXから放射される電波の降雨時の変動を検知することで, ケーブルに沿ってリアルタイムに豪雨を検知できるシステムの開発を目的とする.

## 2. 双LCXシステムによる位置同定

LCXを送受信用に2本平行に配置し, 特定の周波数帯域幅で電波を伝送し, 送受信する系を考える. 各周波数で伝送した際に受信される信号  $E(t) = |E(t)|e^{-i\theta(t)}$  ( $t$ は時刻) を並べたベクトルをフーリエ変換することで, 遅延時間ごとの受信信号が得られる. この遅延時間は電波送信から電波受信までの時間, すなわちLCX上のどのパスを電波が伝搬してきたのかを示すので, この原理によりLCX上各点での受信信号を特定することが可能となる<sup>[3], [4]</sup>. 本研究では, この双LCXシステムを構築し, 人工降雨実験を行った.

## 3. 人工降雨実験およびデータ解析

### 3.1 雨水流出実験装置と実験系

降雨量と受信信号の定量的な評価を行うため京都

大学防災研究所所有の雨水流出実験装置を用いた. 雨水流出実験装置は  $30\text{m} \times 18.75\text{m}$  の大きさで, 約  $100\text{mm/h} \sim 300\text{mm/h}$  の人工降雨を再現できる. 図2に, 本実験場で1分間降雨強度  $240\text{mm/h}$  の人工降雨を降らせた状況を示す. この実験場に2. で述べたように長さ  $20\text{m}$  のLCXを  $1.5\text{m}$  間隔で2本平行に配置し, それぞれを計測機に接続し, 周波数帯域幅  $285 \sim 315\text{MHz}$  で電波を送受信できる双LCXシステムを構築した(図3). 豪雨として, 1分間降雨強度  $150\text{mm/h}$ ,  $240\text{mm/h}$  の2段階の人工降雨を用いた. リファレンス用の降雨強度の計測には, LCXから約  $1\text{m}$  離して設置した転倒マス式雨量計(分解能  $0.2\text{mm}$ )を用いた. 受信信号の標準化周波数は,  $16\text{Hz}$  とする.

### 3.2 解析に用いる信号

受信信号は計測機およびLCXの温度特性に影響を受けるため, 信号強度あるいは位相そのものの値と降雨量との相関を見出すことは困難である. 従って, 変動成分として信号強度の一次差分値

$$\Delta|E(t_i)| = |E(t_i)| - |E(t_{i-1})| \quad (i \text{は正の整数})$$

に着目する. 実験で計測した51分間48960点の受信強度の一次差分値と雨量計により計測した1分間降雨強度の時系列をそれぞれを次項図4, 図5に示す. 図4から約  $240\text{mm/h}$  の極めて強い降雨強度の状態でも降雨による変動がノイズフロアに埋もれて確認できないことが分かる.

### 3.3 多重解像度解析によるノイズ除去と考察

図4から降雨による変動のみを抽出するために, 非定常時系列解析の一つである, 一次元離散ウェーブレット変換による多重解像度解析(MRA)により

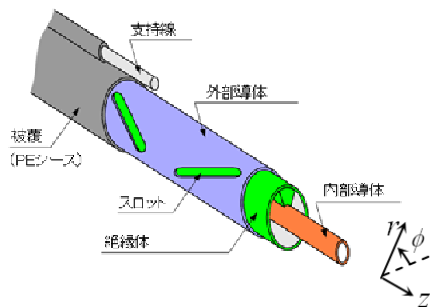


図1: LCXの一般的構造



図2: 人工降雨 240mm/h

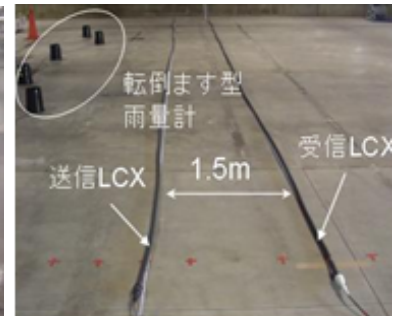


図3: 双LCXシステム

キーワード 漏洩同軸ケーブル, 降雨検知, 雨水流出実験装置, 人工降雨実験, 多重解像度解析, ノイズ除去  
 連絡先 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1 東京大学本郷キャンパス一号館 TEL 03-5841-6099

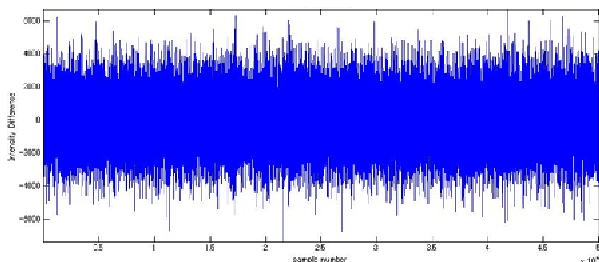


図 4 : 受信強度の一次差分値 (51 分間)

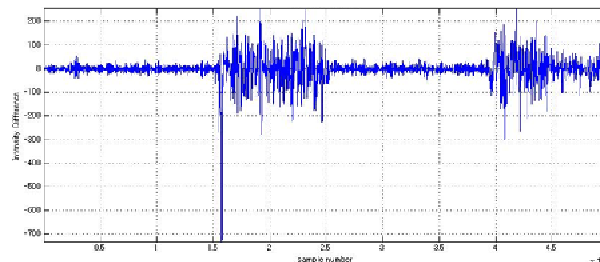


図 6 : レベル 5 まで詳細係数を除去して再構成した時系列(ノイズ除去後の信号)

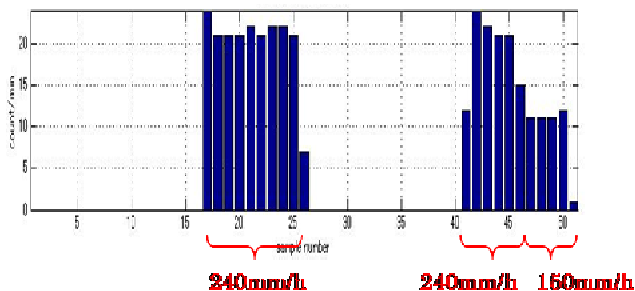


図 5 : 雨量計による 1 分間降雨強度

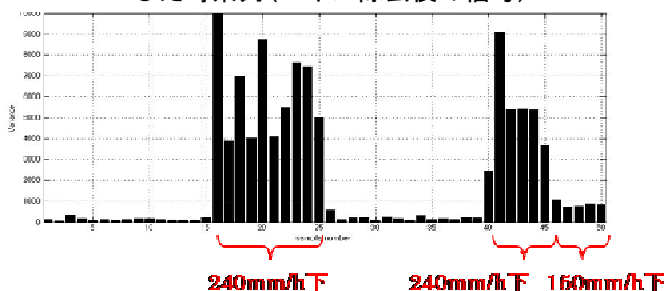


図 7 : 図 6 のノイズ除去後信号の 1 分間局所標本分散の推定値

ノイズ除去を行った。正規直交ウェーブレットには Meyer ウェーブレットを有限インパルス応答 (FIR) ベースで近似し、高速アルゴリズムを使えるようにした離散 Meyer ウェーブレット<sup>[5], [6]</sup>を用いた。そして、ノイズ除去のため scale-dependent smoothing 法<sup>[6]</sup>により、ノイズの影響が顕著なレベル 1 からレベル 5 までのウェーブレット係数をゼロにして、再構成を行った。

図 6 は、図 4 の受信強度の一次差分値をノイズ除去した結果であり縦軸は見やすいようにスケールアップしてある。図 7 は、図 6 のノイズ除去後の信号の 1 分間局所標本分散を計算した結果である。図 7 から 240mm/h と 150mm/h の異なる降雨強度下で受信信号から推定した標本分散に有意な差があることが読み取れる。1 回目、2 回目それぞれの 240mm/h の降り始め直後に標本分散が大きくなっている理由は、ウェーブレット変換の特性に依存しているものと考えられる。ウェーブレットは信号の特異性 ( $n$  回微分の不連続性) に顕著に反応する特性を持っており、降雨の降り始めは LCX が乾燥した状態から雨滴の着水により突如濡れた状態となるため、受信信号に不連続な変化が生じると予想される。そのため、降雨が降る前と降り始めとの境界でウェーブレットが強く反応し、再構成の結果、その部分での差分値が大きくなったと考えられる。また、2 回目の 240mm/h において降り始めを除けば、標本分散がおおよそ一定値を示しているのに対して、1 回目の 240mm/h の場合には降り始め後もばらつきが大きいことが分かる。これは、送信用 LCX が散水直下に設置されているため降雨量が安定していなかった可能性が考えられる。今後降雨量がより安定した状態で繰り返し人工降雨実験を行い、受信信号から推定される降雨強度の精度について検討を重ねていきたい。

#### 4. 結論

離散ウェーブレット変換による多重解像度解析を用いて、極めてノイズレベルの高い LCX の受信信号から降雨強度との相関が見られるまでに有意な情報を抽出することに成功した。しかし、降雨強度が一定の状態でもノイズ除去後の信号の標本分散値がばらつくなどの現象が見られたので、今後実験と解析を重ねて原因を明らかにしていきたい。

#### 5. 謝辞

本研究は、科学技術振興機構の支援により実現した。また京都大学防災研究所中川一教授のご厚意により、雨水流出実験装置を使用させて頂くことができた。心より御礼申し上げます。

#### 6. 参考文献

[1] 岸本, “LCX 通信システム,” 電子情報通信学会編, 1982; [2] 水谷, “表面波モードに着目した漏洩同軸ケーブルによる降雨量検知のための電磁波理論の展開,” 土木学会年次学術講演会講演概要集, vol. 64, no. II-174, pp. 347-348, Sep. 2009; [3] K. Inomata, “Target Detection with Surface and Radiation Mode of Leaky Coaxial Cable,” ISAP2007, vol. 2D4-3, pp. 510-513, Aug.2007; [4] 猪又, “LCX の表面波崩れを利用した降雨量の計測,” Technical report of IEICE. SANE2009-141, pp.13-18, Jan. 2010; [5] Abry, P., “Ondelettes et turbulence. Multiresolution algorithms de decomposition, invariance dechelles,” Diderot Editeur, Paris; [6] M. Misiti, “Wavelet Toolbox™4 User’s Guide,” The Math Works, Inc., 2010; [7] P. S. Addison, “The illustrated Wavelet Transform Handbook Introductory Theory and Applications in Science, Engineering, Medicine and Finance,” Institute of Physics, 2002.