

干渉計を導入した「落雷等予測システム」の構築について

町田 輝次¹・吉田 智²

¹㈱気象工学研究所 技術部 (〒550-0003大阪府大阪市西区京町堀1-8-5)

²大阪大学大学院 工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1) .

VHF波帯広帯域デジタル干渉計(以下、「干渉計」という)は、大阪大学大学院河崎教授(国際大気電気学委員会会長)が1995年から研究・開発した雷雲監視装置であり、局地的豪雨の発生源である雷雲からの放電パルス信号(電磁波)を直接受信(パッシブ・レーダと称する)し、その3次元データ解析から、半径40km範囲内の雷雲発生、雷雲の盛衰、落雷(放電含む)場所及び時刻の予測と落雷痕跡特定等(竜巻含む)を専任の気象予報士が行う。

これら情報を特定ユーザーに提供する意味で『落雷等予測システム(以下、「システム」という)』と呼ぶ事にする。

キーワード: 国土防災、気象情報、局地的豪雨監視、落雷・竜巻予測と痕跡特定、安全・安心な避難誘導、河川・道路施設の保全(災害復旧含む)、防災体制

1. まえがき

2007年11月17日にIPCC(気候変動に関する政府間パネル)第4次報告書が発表され、地球温暖化の影響により、豪雨や渇水の発生頻度の増加、台風の強度増加等に関する気候変動が指摘されている。

また、最近10年(1998~2007)と20年前(1976~1987)の降雨現象を比較すると、時間50mmの大雨(非常に激しい雨)は約1.5倍、時間80mm(猛烈な雨)の大雨は約1.8倍、時間100mmの大雨は約2.1倍に夫々増加している。

加えて、2008年7月28日に発生した神戸市灘区都賀川の20分間で34mm(約100mm/h相当)という局地的豪雨(ゲリラ豪雨ともいう)により十数分という極めて短時間に1m以上の出水が発生し、5名の尊い命が失われたことは記憶に新しいところである。

国土交通省は、水害防止への適応策として主に施設整備(ハード)、危機管理対応(ソフト)を打出している。

局地的豪雨の発生源である雷雲(写真-1)の盛衰を干渉計(写真-2)にて監視(立体画像)・情報提供するシステムは局地的豪雨の監視、落雷・竜巻予測(時間、場所)に基づく避難・誘導、誘導雷からの河川管理施設等の施設保全、落雷痕跡の特定による迅速な施設点検・補修等を図るため、電気分野で研究・開発された雷雲監視装置であり、これまでの気象レーダー(広域降雨強度:現状は平面画像)、テレ・メーター(実測降雨量)と相まって観測施設の多重化(局地的豪雨による被害軽減方策提言中間とりまとめ:2010年10月8日)として

の利活用が期待される。



(写真-1)¹⁾ 雷雲と雷



(写真-2) 干渉計設置

なお、米国では近年大竜巻が幾度となく発生し、2011年4月にアラバマ州で340人、5月にミズーリ州で124人の犠牲者が出ている。

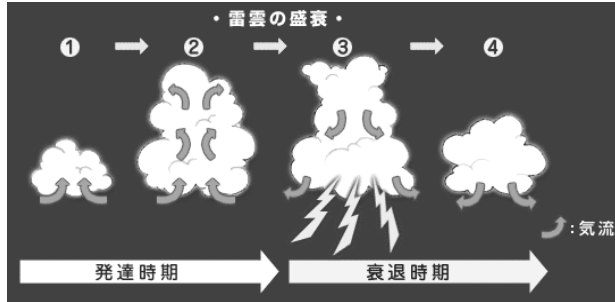
今後、我が国での竜巻の監視に向けたシステムの運用も目指している。

2. 落雷等予測システム

2-1. 気象現象

局地的豪雨及び雷の発生源である雷雲の一生は、発生→成長→成熟→衰退→消滅という盛衰過程をたどり、一般的には図-1に示す①→④のように変化し、特に③の時に落雷しやすいとされている。

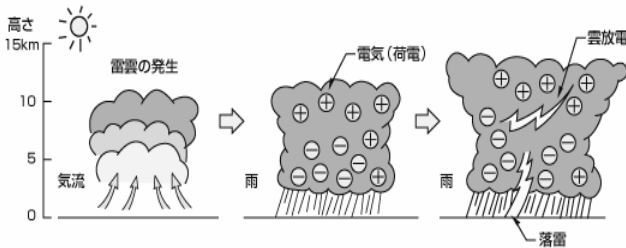
なお、①と④の状態を「弱雷」、②の状態を「中雷」③の状態を「強雷」と称して表示される。



(図-1²⁾ 雷雲の盛衰模式図

また、積乱雲(雷雲含む)の多くが、地上付近と上空の温度差による大気的不安定によって生ずるが、ときには地形や建物等の影響を受ける事もある。

まず、図-2に示すように上昇気流が発生しながら雨粒や氷晶が上空で急成長し、これらは上昇気流に逆らって落下運動を始めるため、下降気流が発生して氷晶や氷粒(霰・雹)の摩擦に伴う静電気が発生し(おおそ-10℃~-15℃帯)、積乱雲と地上との電荷(上方に+、下方に-)の違いにより電圧が高まることによる結果として雲放電(下方-が上方+に移動)が始まり、落雷(下方-が地上+に移動)に至る。



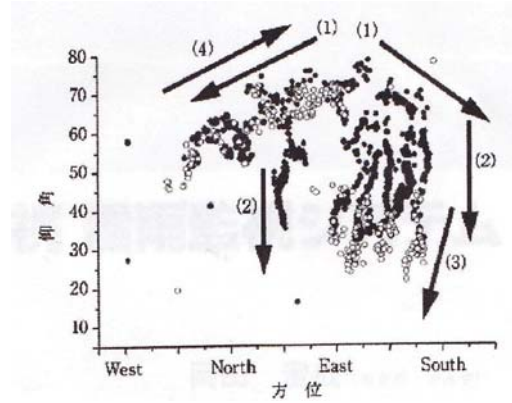
(図-2³⁾ 雷雲の発生と電荷の分布模式図

この氷晶や氷粒の摩擦により静電気が発生し、その時放射されるVHF波帯の電磁波を直接受信する装置として干渉計が研究・開発されるに至った。

2-2. 干渉計の原理

干渉計の開発者である河崎教授によれば、雷は放電路の分岐時にVHF波を発することが検証されており、VHF発信点(分岐点)をトレースすると、雷の放電路の可視化が可能となる。

図-3は、干渉計による雷雲内で完結する放電路の枝分かれして進展する放電模様を可視化した事例であり、方位角と仰角の視線方向で表しており、以下にその説明を記す。



(図-3⁴⁾ 広帯域干渉計による雲放電の観測結果

これによれば、放電路は(1)北東から左右に分かれ、(2)6本が同時に進行する。(3)東の枝の進行が終了後(4)では(1)と同経路を逆に進行した。

雷雲内のため、光観測では雲放電の進展模様を把握することは困難であるが、本装置により雷雲内の放電路(落雷含む)の特徴を観測する事ができる。

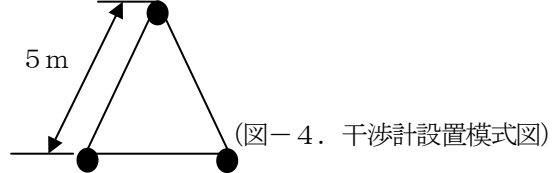
2-3 干渉計装置

干渉計は、対象領域(半径40km程度を目安)に、高さ約1.5m、Φ30cmの円盤形受信器(写真-2)を正三角形(一辺5m:図-4)頂に一器ずつ計3器(以下、1基という。)を設置するもので、事前の現地調査に基づき監視範囲やロケーション及び重要性を考慮して、設置箇所及び設置数を選定する。

なお、干渉計は設置スペースや設置作業も容易であり、既存の気象レーダー等に比較し、コストや運用面、法手続き不要等も含めて有利性を備えている。

ちなみに、昨年行なわれた「平城遷都1300年記念祭」では落雷からの人命保護という重要性に鑑み、奈良地方気象台と近接する奈良公園の2ヶ所に干渉計を設置して万全を期したところである。

なお、干渉計の本稼動にあたっては事前に飛行機等のノイズを調査し、除去している。

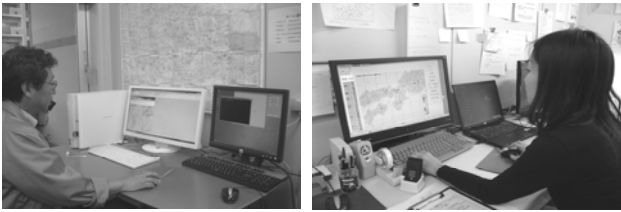


(図-4) 干渉計設置模式図

2-4. 落雷等(局地豪雨監視含む)の予測

近畿全域に張り巡らされている広域的LLS(関西電力:雷放電・落雷位置評定システム)や、既存の気象レーダー及び干渉計より得られたパルスデータ(2分間隔のパルス数累計)等から、専任の情報処理技術者(写真-3)が3次元解析(時系列処理含む)等を迅速に行ない、雷雲の発生、雲頂高度、発達状況、移動(落雷・竜巻場所及び時刻等)、落雷痕跡等を専任の気象予報士(写真-4)が予測し、特定ユーザーに

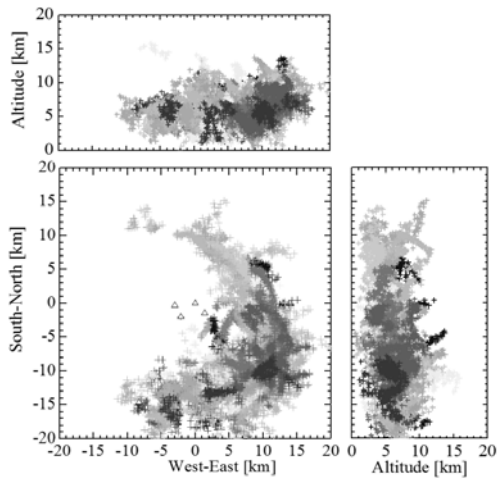
に向けた情報提供を実施するもので、所要時間は 10 分程度である。



(写真-3. 左: 専任情報処理技術者データ解析)
(写真-4. 右: 専任気象予報士による落雷等予測)

なお、図-5 に雷雲内での放電及び落雷の経路画像 (白黒色の濃淡で、0.7 秒間の移動を示す) の観測事例を紹介する。

落雷の見方としては、図-5 に示す立体画像に上空から地上に至るパルス経路が受信された事に基づく。



(図-5. パルス箇所表示、上段: ↑方向投影、下段 右→方向投影、下段左: 平面投影を表す。)

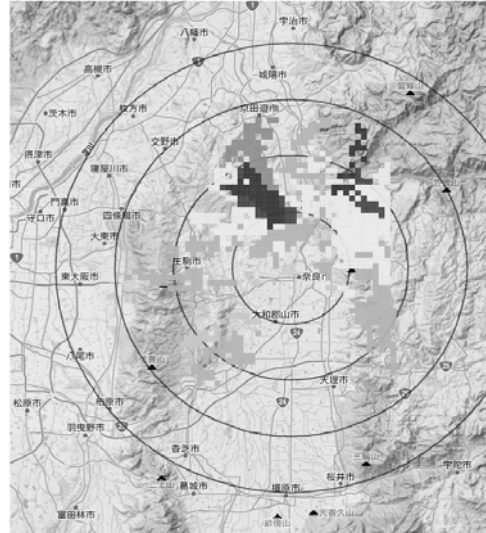
3. 干渉計を導入した落雷等予測実績

2010 年 4 月 24 日～11 月 7 日にかけて約 363 万人もの来場者を迎えて盛大に開催された「平城遷都 1300 年記念祭」会場 (写真-5) での特に落雷から人命の安全・安心を確保するため、奈良地方気象台と奈良公園に干渉計を計 2 基設置 (1 基は正の補完と予備の意味合い) し、落雷予測に基づく来場者の避難・誘導を延べ 15 回にわたり行なわれたが事故もなく、その取組みは新聞報道等 (P-6 参考文献) で大きく取り上げられるなどして、関係者から評価が得られたところである。



(写真 5⁵) 平城遷都 1300 年記念祭会場全景)

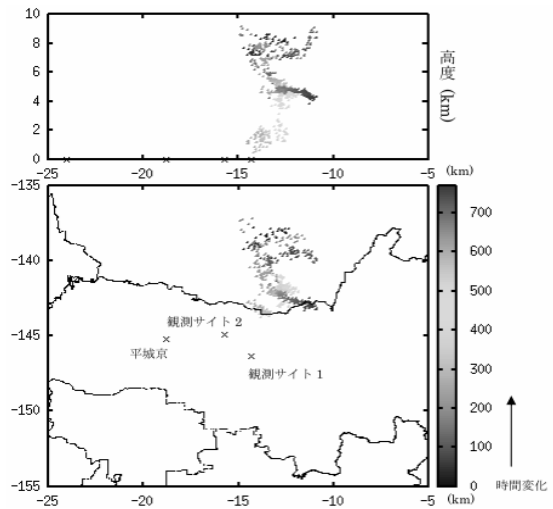
図-6 に、2010 年 7 月 25 日 17 時に避難・誘導情報 (平城宮会場から 10 km 以内に雷を検知し、今後会場付近でも落雷の恐れがあり、18 時頃まで落雷に注意が必要。なお、18 時 10 分に避難解除) が発表された落雷予報時の干渉計データ処理画像 (半径 5 km ごと及び一メッシュ 250m 四方) を示す。



(図-6. 干渉計データ処理平面画像)

※白黒色の濃淡に応じて現時点から 90 分前、60 分前、30 分前、20 分前、10 分前 現時点 (最も濃い部分) を同時表示し、経歴を追って予測に資する。
※円の中心は、平城 1300 年記念祭会場である

図-7 は、図-6 と同時期に干渉計が観測したパルス処理画像である。



(図-7. 上図は↑方向断面、下図は平面)

※白黒色濃淡に応じてパルスの 0～0.7 秒間移動を示している。

なお、実際の避難・誘導の情報提供は、平城遷都 1300 年記念祭事業者である「平城遷都 1300 年記念事業協会」と事前に作成した避難・誘導マニュアル (表-1) に基づき行なったところである。

- ・注意段階 1 : 会場から 20~40 km 範囲に雷が検知され、会場に到達すると予測された場合。
- ・注意段階 2 : 会場から 10~20 km 範囲において、雷が検知された場合。
- ・警戒段階 : 会場から 10 km 範囲において雷が検知され、30 分以内に落雷の危険が予測された場合。(場内スピーカー等により避難・誘導開始)
- ・解除 : 雷検知地点が会場から離れ、かつ再接近及び落雷

(表-1⁶⁾ 避難・誘導マニュアル

4. システムの利活用方法

4-1. 落雷予測及び落雷痕跡の特定

現時点において、主に落雷の予測(落雷の場所及び時刻等)と落雷に伴う場所及び時刻の特定はこれまでの実績から、実用段階に入っているものと考えている。このため、以下の利活用が可能となる。

- ※イベントでの避難・誘導による人命確保
- ※職員、工事作業員等の労働安全の確保
- ※落雷地点を特定し、迅速な施設点検・補修作業
- ※迅速な防災体制の確立

4-2. 具体的な利活用方法

(1) 管理設備等保全

落雷被害には大別して、建物や避雷針への「直撃雷」と、商用電源や通信線から侵入する「誘導雷」とがあり、大阪管区気象台への聞取り(表-2)内容から、④に照らして有効と考えられる。

- ①直接雷: 避雷針
- ②誘導雷(通信ケーブル): 避雷器
- ③誘導雷(電話回線): 耐電トランス
- ④誘導雷(商用電源): 落雷30分前の予備発切替運転(以後、参考)

(表-2. 大阪管区気象台聞取内容)

(2) 落雷地点の迅速な把握

ダム・湖沼等管理施設には、中継所、水位・雨量観測所、放流警報局、水質保全設備、放流設備、発電設備、水門、樋門、ポンプ場等重要な防災施設が広範囲に点在して設置されている場合がある。

よって、これらの設備へ落雷した場合の点検及び補修作業を危機管理上から迅速に行なうためには、早期に落雷痕跡(地点と時刻)の特定が必要のため、システムは故障設備の早期発見の役目を十分担えるものと考えられる。

適用先案としては、水門と樋門、ポンプ場、給水機場起伏堰等多数の重要な河川管理施設等が広範囲に点在している公共施設が考えられる。

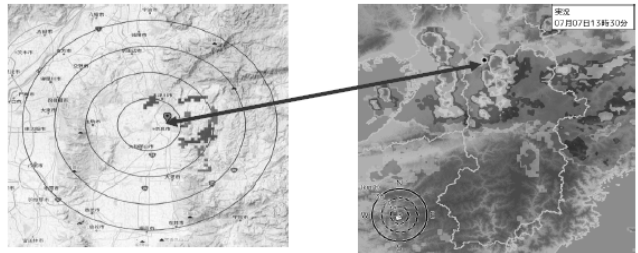
(3) 落雷証明書の発行

落雷に伴う設備の各種損害保険を受けるためには、一般的に気象専門機関による「落雷証明書」が必要とされる事から、システムは落雷地点及び時間が特定されるため、損保会社に対する証明書の信頼性は高いものと推察される。

(4) 迅速な防災体制の確立

干渉計は、各気象台が注・警報を発表する前に既に積乱雲発生段階(降雨より卵の段階)及び警報・注意報解除より前に衰退現象を掴んでいる事から、局地豪雨における迅速な防災体制の対応が可能となる。

2010年7月7日の事例を図-8、表-3に示す。



(図-8. 左: 干渉計画像、右: 気象レーダー画像)



(表-3⁷⁾ 奈良地方気象台の注・警報発表経過

4-3. 局地的豪雨予測(監視含む。)の可能性

現段階では実証段階と言えるが、以下の事が現時点では把握されている。

(1) パルス発信回数と氷晶衝突回数(図-9)

雷雲が発するVHFパルス発信回数と雷雲中の霰と氷晶同士の衝突回数とは高い相関がある。

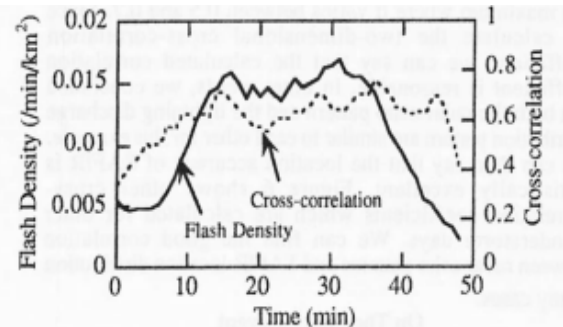


Figure 5. Time variation of the cross-correlation coefficient between radar echo pattern and location distributions on September 5th.

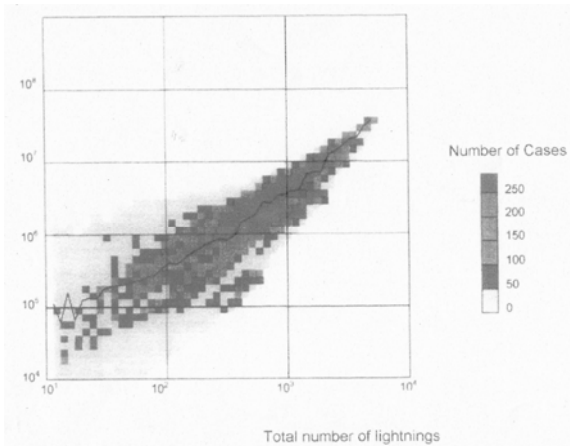
(図-9⁸⁾ VHFパルスの発信回数「一線」と雷雲中の霰と氷晶の衝突回数「・・・線」の相関

(2) 受信パルス数と雷雲総水量

受信パルス数(横軸)と雷雲総水量(縦軸)と

は相関が成り立つ。(図-10)

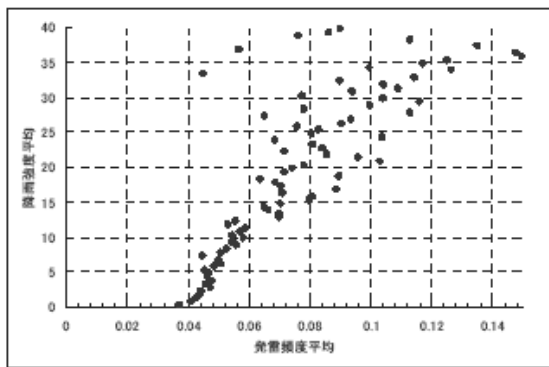
なお、図作成にあたってパルス数1個を霰1個として比重を掛けて総水量(m³)を算出した。



(図-10)⁹⁾ 干涉計受信パルス数と雷雲水量相関
※白黒色の濃淡は、ケース数を表す。

(3) 落雷頻度と降雨強度

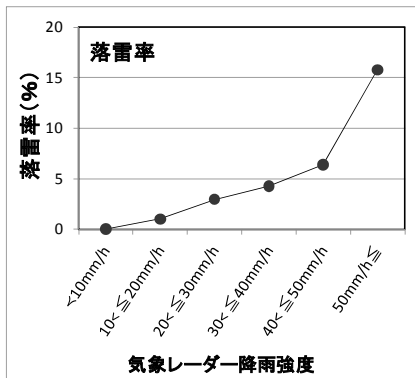
落雷頻度が高くなると、降雨強度が増す関係がわかる。(図-11)



(図-11)¹⁰⁾ 落雷頻度平均「横軸」と降雨強度平均「縦軸」)

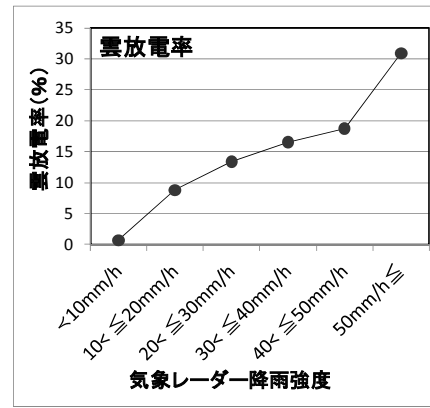
(4) 落雷数～放電数～降雨強度

2008年7月3日の気象レーダー降雨強度～落雷率～放電率の相関を求めた。(図-12、13)



(図-12. 落雷率「縦軸」と降雨強度:「横軸」)

※落雷のあったメッシュ数/総メッシュ数
※総メッシュ数とは、気象レーダー降雨強度でグラフの縦軸強度の段階に入ったメッシュの総数。



(図-13. 放電率「縦軸」と降雨強度:「横軸」)
※放電のあったメッシュ数/総メッシュ数
※総メッシュ数とは、気象レーダー降雨強度でグラフの縦軸強度の段階に入ったメッシュの総数。

これらの調査から、気象レーダーの降雨強度が強くなる程落雷や雷放電が多くなる事がわかる。

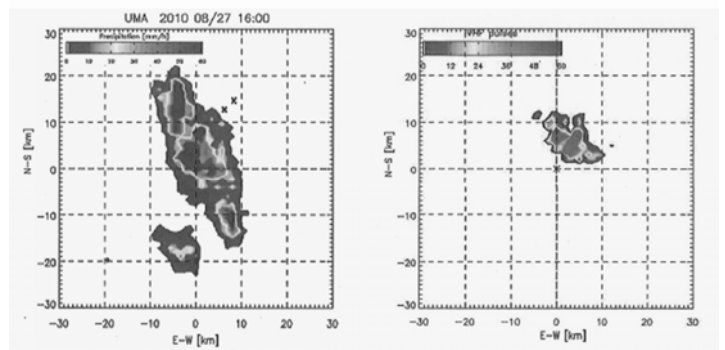
以上の事から、今後地域特性を有する気象現象をモニタリングにてデータを積み重ねることにより、雷雲の盛衰～降雨強度～降雨総水量の相関により、短時間降雨予測の可能性が伺える。

4-4. 局地的豪雨の監視

システムは、雷雲が発するパルス信号を直接受信する事から、極端に言えば天空が開けてさえすれば地形の影響を受けず、特に山間部での雷雲等に伴う局地的豪雨の観測には適しているものと思われる。

また、実績等から雷雲に伴う局地的豪雨時には(強い雷雲ほど放電や落雷かつ降雨も激しいと言われる)放電や落雷が8割程度起こっている事から、干涉計を導入した監視(特に、支配的な豪雨域雲の盛衰:現在は6段階表示)によって局地的豪雨予測の判断指標として十分役立つものと推察され、ダムを含む河川管理及び道路管理(交通規制)等への活用が考えられる。

なお、平城遷都1300年祭で奈良県広陵町馬見丘陵に設置した2010年8月27日16時の干涉計と気象レーダーとの関係を図-14に示す。



(図-14. 左:気象レーダーエコー、右:干涉計平面)

これらから、気象レーダーと干渉計パルスとは高い相関がある事が見出され、雷雲の特に強いゾーンを掴んでいる事から、雷雲の盛衰監視に適しているものと思われる。

なお、この時に奈良地方気象台が発表した気象注・警報を表-4に示す。

《8月27日》
15:45 会場 10km以内の範囲で降雨はないが雷雲を検知
15:54 大雨、雷、洪水注意報
17:00 大雨・洪水警報、雷注意報
18:08 雷注意報

(表-4¹¹⁾ 奈良地方気象台の注意・警報発表経過)

上記の事から、大雨・洪水警報が発表される1時間45分前には干渉計により雷雲の発生が観測されている。

この事からも、システムによる局地的豪雨の監視が的確に実施できる事を示している。

4-5. 局地的豪雨盛衰指標 (仮称) の導入

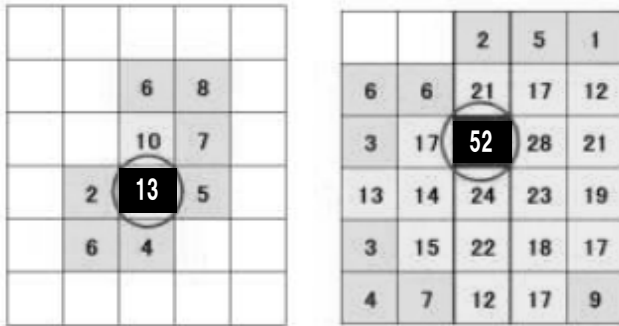
干渉計パルス数が雷雲の盛衰 (強弱) を端的に表している事から、これを局地的豪雨を把握するため定量的な指標にし、防災の実務者である土木技術者がわかりやすく理解できるように考えているところである。

以下に、別途検討したXバンドMPレーダ数値を用いた図-15に示す「ゲリラ豪雨発達指数 (以下、指数という)」計算手法を応用する考えであり、これを「局地的豪雨盛衰指標 (仮称)」と称する。

「ゲリラ豪雨発達指数 (仮称)」とは、一定時間の雨量強度の差が、しきい値 (境目数値) を超えた場合に、関係機関に伝達する一種のアラーム情報である。

この例では、観測の時間差を10分、しきい値を30mm/hとした場合、ゲリラ豪雨指数は39mm/hであるからアラーム情報が該当する流域の関係行政機関に伝達され、防災体制の迅速な確立や降雨予測等へ活用されるものとする。

左右の図は同一範囲のメッシュを表示、図中の数字は、mm/h



10時00分
左図の範囲のメッシュの最大値→13mm/h
右図の範囲のメッシュの最大値→52mm/h
●ゲリラ豪雨指数: 52-13=39mm/h

(図-15. ゲリラ豪雨発達指数の計算例)

5. 今後の課題検討

今後の最重要課題とされる降雨予測については、継続したモニタリングの実施により干渉計～気象レーダー～地上雨量との相関を掴み、特に雷雲監視と気象レーダーが有する降雨強度表示が出来るよう早期に確立したい所存である。

この事により、気象観測設備の多重化の一手法として明確に存在価値が裏付けられるものと推察される。

なお、局地的豪雨の監視に加え、竜巻や火山噴火及び土石流の監視にもシステムは応用できるものと考えており、今後の研究・開発に取り組んでいく所存である。

6. まとめ

以上、これまで大雨に関する情報は気象レーダーやアメダス等が主役であったが、電気分野からの気象監視システムとして局地的豪雨の発生源である雷雲から発生する電磁波 (パルス信号) を地上に設置した干渉計が直接受信する「パッシブ・レーダー」の導入により、雷雲の監視、落雷予測及び落雷痕跡の特定による避難・誘導、労働安全の確保、施設保全、落雷による迅速な施設点検と補修作業等への実用化が図られている事になり、防災の新たなシステムとなる。

また、降雨予測に必要とされる降雨強度の観測について、モニタリングを継続的に行なう事により、特に局地エリアに限定すれば気象レーダーが有する降雨強度の観測に関する補完機能は図れるものと確信を持った次第である。

最後に、システムの構築に際し、ご指導下さった河崎大阪大学教授、池淵京都大学名誉教授をはじめとする関係者の皆様に心から感謝申し上げ、2010年9月1日に大阪大学と弊社とで設立された「大阪大学雷雲予測プロジェクト産学共同体」を通じて更なるシステムの向上・普及を目指していきたい。

《引用文献》

- 1) ウィキペディア百科事典 2) 中部電力(株)雷情報
- 3) 日本雷保護システム協会 4) 電気現場技術 2010. 11
- 5) 平城遷都 1300年記念事業協会
- 6) 平城遷都 1300年記念事業協会 7) 奈良地方気象台
- 8) 大阪大学雷研究室 9) 大阪大学雷研究室
- 10) 第5回降水ミッション科学公募 2010年度共同研究成果報告書 2010. 3
- 11) 奈良地方気象台

《参考文献》

- ※産経新聞 2010年5月28日「平城遷都ハイテク予報」
- ※朝日新聞 2010年5月28日「落雷予測で安全確保」
- ※神戸新聞 2010年9月30日「高精度で雷雲を予知」
- ※NHK総合TV 2010年2月5日
「見えない雷 2万分の1秒の世界」