SAFIRによる雷観測結果と 気象用レーダエコーとの照合

正員 園 井 康 夫 (関西電力)
正員 河 崎 善一郎 (大阪大)
正員 松 浦 虔 士 (大阪大)
非会員 松 井 敏 明 (関西電力)
正員 下 倉 尚 義 (関西電力)

Comparison between Lightning Observation by SAFIR and Meteorological Radar Echo

Yasuo Sonoi, Member (Kansai Electric Power Co., INC), Zen-Ichiro Kawasaki, Member, Kenji Matsuura, Member, (Osaka University), Toshiaki Matsui, Non-member, Naoyoshi Shimokura, Member (Kansai Electric Power Co., INC)

SAFIR (Système de Surveillance et d'Alerte Foudre par Interferométrie Radioélectrique) has been equipped and operated since June 12th, 1992 as a cooperative project among Osaka University, Kansai Electric Power Co., INC. and a French manufacturer DIMENSIONS. The operational coverage includes Northern Kin-ki District, Wakasa District and Hokuriku District. To evaluate the SAFIR system performance, we chose both the summer thunderstorm active area and the winter thunderstorm area. That meant we intended to evaluate the system performance through the summer thunderstorm activity and to apply the system to winter thunderstorm monitoring. As a method for evaluation, the cross correlation between the radar echo pattern and the distribution pattern of lightning discharge was calculated. We obtained the high cross correlation and got to the conclusion that the accurate location of SAFIR was proved statistically. We also show the case study of the occurrence of a ground flash to demonstrate the function of lightning warning by SAFIR.

キーワード：雷予知警報システム (SAFIR), 干渉計, 気象用レーダ, 二次元相互相関関数

1. ま え が き

近年エレクトロニクス技術の進歩とあいまって、雷活動を自動的にかつ広域にわたってモニタすることのできるシステムが種々製品化され、実用に供されている。すなわち、それらはLLP⁽¹⁾であり、LPATS⁽²⁾であり、SAFIR⁽³⁾であるが、いずれも雷活動に伴い放射される電磁界量ないしは電磁波を受信することにより、雷を検知あるいはモニタしている。これらのシステムは、各々独自の動作原理に基づいて設計・実現

されたものであり、各々固有の特徴を有しているが、本論文の主題とは離れることになるので、本論文ではこれらの機能比較については詳細に取り上げないこととする。

LLPは、歴史的に見て最も早い時期に商品化されたこととも関連して、国の内外を通じて最多のユーザを有している。更に我が国にあっては、主として電力会社・関連機関が設置し、雷撃電流の分布および落雷頻度マップなどの統計量を知るうえで、このLLPを用いた多くの成果を上げている⁽⁴⁾。またLLPに少し

遅れて商品化された LPATS も、最近になって一部の電力会社により我が国に導入され、実運用に供されつつある。一方、SAFIR (Système de Surveillance et d'Alerte Foudre par Interferometrie Radioelectrique) ⁽³⁾ は、フランスの ONERA グループにより考案され 1989 年に初めて商品化されたため、前述のニシステムに比し後発のシステムとなっていて、現時点で実運用されているのは、フランス国内のニシステムとフランス領ギアナの一システムのみで、我が国内ではごく最近試験的に運用され始めた。

著者らは、上記 SAFIR の特徴である「落雷の予知・警告」機能に注目し、大阪大学、関西電力およびフランス・ディメンション社が協力して、近畿北部、若狭および北陸地方を検知範囲として、同システムを設置し性能を検証するプロジェクトを開始した。特に上記地区を選定した理由は、現在の国内雷研究の主たる興味が「北陸の冬季雷」にあることを考慮し、かつ夏季雷活動期間中に SAFIR 稼動試験および性能評価を行った後、冬季雷に適用しようと考えたからである。

そこで本論文では、SAFIR の標定精度を評価するため、以下のように議論を進めることとする。まず第 2 章では、SAFIR の概要とその設置について述べる。第 3 章では、SAFIR 観測結果と気象用レーダ観測結果を照合することにより標定精度を評価する。次いで第 4 章では、夏季雷観測期間中最も興味ある結果の得られている、平成 3 年 9 月 5 日若狭地区における雷活動を例にとり、SAFIR の「落雷の予知・警告」機能について言及する。

2. SAFIR システム概要

図 1 にアンテナサイト、SAFIR システムによる放電位置標定可能範囲、および理論上の標定誤差を示す。すなわち、4 素子からなる干渉計用アンテナ (地上高 17 m, 図 2) を、サイト 1・弥栄町 (京都府)、サイト 2・彦根市 (滋賀県)、およびサイト 3・三国町 (福井県) の 3 地点に設置し、雲放電および対地放電に伴って放射される VHF 波帯インパルスを受信する。

アンテナ各素子へ入射するインパルス波の位相差は、各アンテナサイトにおけるインパルス波の到来方位を与えるので、原理的には 2 箇所以上のアンテナサイトを設ければ、各アンテナサイトにおける方位直線の交点 (交会法) として、放電位置が決定できる。なお、各アンテナサイトにおける受信機は、同システムで受信可能な 110~118 MHz のうち 115 MHz, 115.5 MHz および 114 MHz に各々同調 (帯域幅 1 MHz)

図 1 SAFIR の検知範囲
Fig. 1. Coverage of SAFIR.

図 2 システムの構成
Fig. 2. Configuration of SAFIR system.

してある。これは、各サイトにおける 24 時間にわたる背景雑音の測定結果から決定した。更に受信可能最低レベルは、背景雑音強度を考慮して、各々 -88, -87 および -88 dBm とした。

図 1 からわかるように、上記アンテナサイトは著者らが興味を有している、冬季雷発生域としての若狭湾と、夏季雷の発生域としての琵琶湖周辺の両方を取り囲む、一辺約 100 km の正三角形となるよう選定してある。更にアンテナ頂部に装備した GPS 受信機により、3 箇所のアンテナは、1 μ s の精度で時間同期されている。また測定データは、各アンテナサイトに装備した CPU により、時間窓 100 μ s として一次処理され、公衆データ専用回線 (9600 BPS) を介して 1 秒ごとにメインステーションのある大阪大学構内に転送

図 3 平成 3 年 7 月 20 日の標定結果
Fig. 3. Distribution of lightning discharge localized by SAFIR on 20th July in 1991.

されている。なお、毎秒当たりの標定可能放電総数は、データ転送、メインステーションの信号処理の都合上、最大 100 に限定している。なお本論文では、誌面の都合で割愛するが、サイトエラーの校正も連続およびパルス波の両方で行っている⁽⁵⁾。

本システムでは、1 秒間に最大 100 点の放電位置を標定するため、標定された各点が同一の雷放電に属するものであるか否かを自動的に判別するための基準が必要である。そしてこの基準は、雷放電物理の観点から矛盾のないものでなければならない。このような観点から、今回の稼働では以下の基準により位置標定を行うこととした。

(1) 雷放電の定義を、たかだか 500 ms の継続時間とする。

(2) 雷放電の水平距離としては、隣り合う標定点の距離が 25 km を超えない。

(3) (2) の 2 点間を現象 (雷放電など) が伝搬する速度としては、光速の 3 分の 1 (10^8 m/s) を超えない。

すなわち、上記の基準で同一の雷放電と判定できた標定点は、画面表示の際直線で結ぶことにより同一雷放電とわかるように配慮した。以上の基準で標定された結果の一例が図 3 で、これは 7 月 20 日 13 時から 16 時にかけての梅雨前線の南下に伴う近畿地方一円における発雷の様子である。

3. 気象用レーダ観測結果との照合

平成 3 年夏季は気象的に不安定な日が多く、SAFIR 稼働開始の 6 月 12 日から 9 月 30 日に至る 109 日間のうち、本システムでは 41 日の発雷日を記録している。そこで本章では、これらのデータと福井地方気象台東尋坊レーダ観測結果とを比較・照合することにより放電点標定精度を議論する。一般に、この種のモニタシステムの標定精度の議論は、広域にわたる落雷点位置の特定が容易でないため、全測定結果を落雷の事実と照合することは困難であり、ビデオ観測結果との照合、特定の高構造物への雷撃との照合およびロケット誘雷実験結果との照合などの事例解析が主な手段で、システムの検知範囲の広域性を考慮した、統計的な意味での精度の検討は、著者らの知る限りなされていない。また、レーダデータとの照合においても、レーダエコーに標定された雷撃点を重畳する形で議論することが多く、これもまた統計的という観点からは、満足のいくものではない。

一方、著者らは、LLP による落雷位置標定結果に関し、個々の落雷位置に注目するのではなく、単位広さ当たりの落雷密度とレーダエコーパターンとを比較すれば、定性的によく一致するという結論を得ている⁽⁶⁾。そこで本論文では、文献 (6) の議論を一步進め、SAFIR により標定される放電点分布のパターンと、レーダエコーパターンとの相互相関関数、二次元相互相関関数を求め両者の類似度を議論する。ところで、気象用レーダのエコー強度と降水量の関係は Marshall-Palmer の公式⁽⁷⁾として知られており、更にレーダ気象学の分野では、降水強度と雷の発生には因果関係のあることが通説⁽⁶⁾となっている。従って、SAFIR 観測による放電点分布のパターンとレーダエコーのパターンの相関関数の高いことが確認できれば、統計的な意味で両者の標定精度の高いことが確かめられることになる。

一例として、図 4 に 9 月 5 日 18 時のレーダエコーパターンを示す。今回、本論文で用いる東尋坊レーダの空間分解能は $2.5 \text{ km} \times 2.5 \text{ km}$ であり、三つの異なる仰角で PPI モード測定の後、数値処理し地上高おおよそ 2 km の位置の降水量を求めている。ちなみに反射強度と降水量は、 $20 \text{ dBz} = 0.5 \text{ mm/h}$, $25 \text{ dBz} = 1.0 \text{ mm/h}$, $30 \text{ dBz} = 2.0 \text{ mm/h}$, $35 \text{ dBz} = 4.0 \text{ mm/h}$ 等々の関係であり、またエコー強度は 7 階調であるが、図 4 ではエコー強度階調の情報は省略する。また図 5 に、同日 18 時～18 時 7 分の SAFIR で標定され

図 4 平成 3 年 9 月 5 日のレーダエコー
Fig. 4. Radar echo on 5 th September in 1991.

図 5 平成 3 年 9 月 5 日放電点の標定状況
Fig. 5. Distribution of lightning discharge localized by SAFIR on 5 th September in 1991.

た放電点の分布を示す。

特に 7 分間の放電点分布を示すのは、レーダデータが、7 分または 8 分ごとに得られているからである。図 4、図 5 中に示す正方形の領域は $50 \text{ km} \times 50 \text{ km}$ であるが、この領域の相互相関関数を以下のようにして求める。すなわち上記の正方領域を、レーダの空間分解能に対応させ 20×20 のメッシュに分割し、各分割内の放電点分布の密度を求めれば、(1)式により相互相関関数が求められる。

ここに X_{ij} 、および Y_{ij} は各々 i 行 j 列のメッシュ

図 6 相関関数の時間変化 (9 月 5 日)
Fig. 6. Time variation of correlation function (5 th September).

図 7 相関関数の時間変化 (7 月 20 日)
Fig. 7. Time variation of correlation function (20 th July).

図 8 相関関数の時間変化 (8 月 11 日)
Fig. 8. Time variation of correlation function (11 th August).

に対応するレーダエコー強度 (mm/h)、および放電密度 (個/ km^2/min) である。図 6 が、図 4、図 5 の正方領域に対し、(1)式より求められた 9 月 5 日 17 時 45 分～18 時 35 分の相関関数の時間変化である。

$$R_{mn} = \frac{M^{-1}N^{-1} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N X_{i,j} Y_{i+m,j+n}}{\sqrt{M^{-1}N^{-1} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N X_{i,j}^2} \sqrt{M^{-1}N^{-1} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N Y_{i,j}^2}}$$

(M=N=20) (1)

東尋坊レーダの観測結果によれば、本解析で対象とした領域には17時45分になって新しい雷雲セルが発生し、時間経過とともに成長しつつ東進し18時40分ごろ上記の正方領域外へ移動している。一方、相関関数は、雷雲セルの発生時には低いものの、10分後には0.6という値を示し、雷雲の領域内での活動時は若干の変動はあるものの、0.6~0.76の範囲をとりつつ、雷雲の通過後は急速に悪くなっている。この0.6~0.76という相関関数は、二次元の相関関数であることを考慮すれば、高い相関を示すものと判断でき、レーダエコーパターンと放電点分布パターンが類似していることが結論できる。換言すれば、統計的な点から、SAFIRの標定精度の高いことが確認される。なお、雷雲の発生時および通過後に相関関数の値が低いのは、検討対象としている正方領域に存在する雷雲が小さく、降水があったにもかかわらず、その雷雲内での放電活動が少なかったためと考えられる。すなわち、降水活動は雷放電現象の必要条件ではあるが、十分条件ではないことを意味している⁽⁸⁾。図7および図8に、同様の手法で求めた7月20日と8月11日の相関関数の時間変化を示すが、いずれも高い相関関数を示している。上記の議論より、SAFIRの標定精度は、検知範囲内では夏季雷の場合、日時場所を問わず高いことが、統計的に検証できたことになる。

4. 9月5日若狭地方の雷活動

9月5日の若狭地方の雷活動中、18時3分に東経136°2'50"北緯35°31'50"の送電鉄塔に落雷のあったことが知られている。なお、この地点は、前章の正方領域に含まれている。そこで、本章ではこの雷活動を例にとり、SAFIRの落雷予知機能について議論する。

同日の雷は、午後になって丹後半島付近に発生し、東進の後、越前海岸から福井県に上陸したことが、レーダでもSAFIRでも確認されている。前章でも示したように、図4および図5に示した正方領域に降水がレーダにより確認されるのは17時45分である。いま、この領域内に発生した降水に関して、SAFIRで標定された1分当たりの放電点標定数の時間変化を求めると図9のようになり、また1分当たりの雷放電数の時間変化を求めると図10のようになる。図9および図10からもわかるように、SAFIRではレーダによ

図9 1分当たりの放電点標定数の時間変化
Fig.9. Time variation of the number of lightning discharge per minute.

図10 1分当たりの雷放電数の時間変化
Fig.10. Time variation of the number of flashes per minute.

る降水の検知に1分遅れて最初の放電点および雷放電を記録しており、その後雷雲の発達とともに放電点標定数および雷放電数の増加・減少を記録している。

ところで前節の議論からもわかるように、放電標定数とレーダエコーより推定される降水量、言い換えれば雷雲の形状とは高い相関がある。このような観点から、放電点分布を用いて推定した17時57分の若狭付近の雷雲位置を図11に示す。

図11では、南北に並ぶ二つの雷雲セルが認められ、いずれのセルも放電密度の高いコア部とその周辺部からなっている。なお、コア部は特に落雷の可能性が高いと考えられる部分で、落雷の警報域となっている。上記のセルのうち、本章で注目しているのは図中下側のセルであり、このセルは同図中に三角形で示した、雷撃を受けた送電鉄塔の直上にある。加えて上記の警報域であるコア部が、6分後に起こった落雷点を含んでいる。この例は落雷の事後に確認された1例に過ぎないが、SAFIRの落雷予知警報機能を証明するもの

図 11 17 時 57 分の雷雲の推定位置

Fig. 11. Estimated location of thundercloud at 17:57.

であろう。実際 SAFIR の稼動以後、検知範囲内の送電系統への雷撃が 7 例あり、1 例を除いて 5~10 分以前に同様の警報を出していることが確認されている。SAFIR の警報に即応した、送電系統の切換えといった実運用という観点からは、今後データを蓄積していく必要があると考えられるが、事例解析という観点からは予知警報機能の検証は満足のいくものとなっている。

5. あとがき

本論文では、雷予知警報システム (SAFIR) の設置概要を示し、平成 3 年夏季の観測データを、気象用レーダ観測結果と照合することにより、統計的な観点からの標定精度を議論した。具体的な手法としては、二次元相互相関関数を 50 km×50 km の領域を対象として求める手法を適用している。本論文内では、誌面の都合上 3 例の結果を示すにとどめているが、夏季雷の場合には、他の事例においても高い相関関数を示し、SAFIR の標定精度の高いことが確認された。更に予知警報機能を評価するために、雷撃点の確認されている 9 月 5 日若狭地区の雷活動を例にとり、SAFIR が実際の落雷の 6 分以前に既に警報を出していることを示した。第 4 章でも述べているように、実運用という観点からはデータを蓄積していく必要があると考えられるが、それは今後の課題としたい。

(平成 4 年 4 月 10 日受付, 同 4 年 10 月 1 日再受付)

- (1) 山田, 他: 「落雷位置標定システムによる近畿地方の雷観測結果」, 電学論 B, 111, 24 (平 3-1)
- (2) 吹山, 他: 「LPATS による雷放電位置標定精度の予備的検討」, 平 3 電気学会電力・エネルギー部大(II), p. 323
- (3) P. Richard, et al.: "VHF-UHF interferometric measurements application to lightning discharge mapping", *Radio Science*, 20, No. 2, 171 (1985)
- (4) 「落雷位置標定システムを用いた落雷頻度マップ作成手法の開発」, 電中研報告 T 90053 (平 3)
- (5) 河崎, 他: 「SAFIR による雷活動のモニタリング」, 電気学会放電・高電圧合同研資, ED-91-1 37; HV-91-54 (平 3)
- (6) 河崎, 他: 「落雷頻度でみた夏季, 冬季の雷活動」, 天気, 39, No. 2, 89 (平 4)
- (7) R. J. Doviak, et al.: "Doppler Radar and Weather Observations", p. 195 (1984) Academic Press, Inc.
- (8) D. Atlas: Radar in Meteorology, p. 86 (1990) American Meteorological Society

園 井 康 夫 (正員)

昭和 27 年 12 月 5 日生。52 年 3 月京都大学大学院工学研究科修士課程修了。同年 4 月関西電力(株)入社。現在, 同社総合技術研究所勤務。主として, 雷および送電に関する研究に従事。

河 崎 善 一 郎 (正員)

昭和 24 年 1 月 17 日生。53 年 3 月大阪大学大学院博士課程修了。54 年 4 月~平成元年 7 月名古屋大学空電研究所勤務。同年 7 月大阪大学講師, 現在, 同助教授。工学博士。環境電磁工学, 雷放電物理に関する研究に従事。

松 浦 虔 士 (正員)

昭和 13 年 1 月 1 日生。37 年 3 月大阪大学大学院修士課程修了。同年 4 月住友電気工業(株)入社。52 年 1 月大阪大学工学部助教授, 63 年 3 月同教授。工学博士。電気エネルギーの発生・伝送・制御に関する研究に従事。

松 井 敏 明 (非会員)

昭和33年11月1日生。54年3月石川工業高等専門学校電気工学科卒業。同年4月関西電力(株)入社。現在、同社総合技術研究所勤務。主として、雷および送電に関する研究に従事。

下 倉 尚 義 (正員)

昭和19年1月1日生。42年3月慶応義塾大学電気工学科卒業。同年4月関西電力(株)入社。現在、同社総合技術研究所主席研究員。主として、雷および送電に関する研究に従事。