冬季近距離雷鳴による雷放電路の再現精度*

若松 勝寿**

沼津工業高等専門学校

石原 篤 和田 淳 堀井 憲爾***

名古屋大学工学部

Abstract. Experiments of triggered lightning to the power transmission line tower have been carried out at the top of a mountain (928m) near Kanazawa in Japan since the winter of 1986. The thunders were measured with a set of four microphones near the tower in winter of 1989. The lightning channels are minutely reconstructed from the computation of thunder data by means of a new ranging method.

The spatial resolution of sound source locations due to the microphone configuration is given, and the location error caused by wind is estimated for close sources. The sound sources in the range of lower than 1 km altitude above the observation site are located with an error of less than 1 % under the following conditions: When four microphones are located at the origin and on right angled axes in equal separations of about 5 meters, the sampling period of thunder data is required to be shorter than $85\mu\text{s}$, and the positions of microphones are exactly measured within the negligible error. The effect of the wind to the source location is not neglected if the wind speed exceeds 3 m/s.

1. はじめに

雷鳴は帰還雷撃電流によって放電路内の空気が瞬時に高温高圧に加熱されて爆発的に膨張して生じ、音響パルスが全放電路で同時に発生する。従って、音響パルスが3個のマイクロホンに到達するまでの伝搬時間から音源の位置が標定でき、ある時間窓で分割した音響信号から標定された音源を結ぶことによって雷放電路を再現できる(Few, 1970)。

筆者らは先の論文で、ロケット誘雷実験での雷鳴の特徴音と相互相関係数を使用した短い時間窓から、雷放電路を詳細に連続再現する方法を発表した(若松 他, 1988)。雷鳴から雷放電路を再現する音響法は、写真撮影できない雷雲内の放電路を3次的に再現できる特徴があり、雲底高度の低い冬季雷の有力な観測手段となりうる。この音響法が雷撃点の正確な位置標定手段や耐雷設計上重要な雷撃侵入角度と最終雷撃距離の観測手段となりうるか否かは再現精度による。音響法の再現精度に関する報告は、Nakano (1973) と Fewら (Few et al., 1974) が主に気象条件に起因する再現誤差を明らかにして気象学的観測手段となりうることを示した。Fewらは風と温度およびその高度分布

* The Accuracy of Channel Reconstruction from Nearby Thunder in Winter Lightning

** Masatoshi Wakamatsu

Department of Electrical Engineering, Numazu College of Technology, Numazu, 410

*** Atsushi Ishihara, Atsushi Wada, Kenji Horii

Department of Electrical Engineering, Nagoya University, Nagoya, 464-01

のデータを使用して、最大25%の距離誤差を5%に減少できるとしている。しかし、襲雷時に雷雲中の風と気温の高度依存データを測定することは困難である。

本論文では、先に発表した新たな音響再現法によって冬季雷の近距離雷鳴から雷撃点とその近傍の雷放電路を再現して、位置分解能と再現精度を明らかにする。再現精度は点音源の位置分解能と気象状態による音の伝搬速度の不均一性による位置誤差によって決まる。位置分解能はマイクロホンの配置形状と音源の位置によって異なるので、マイクロホンの配置形状と位置分解能の関係および位置分解能の指向性を明らかにし、位置分解能が音源の位置に依存しないマイクロホンの配置を示す。従来の位置標定は、音の伝搬面を平面波とみなして各マイクロホンへの到達時間差から方向を求め、音源の位置を決定している(Few, 1970)。ここでは、音源と3個又は4個のマイクロホンまでの伝搬距離から音源の位置を決定するので音波面を平面波近似しないため、平面波近似では誤差が大きくなる非常に近い音源に対して特に有効である。また気象条件による標定誤差では、最も大きな影響を与える風の効果を主に検討する。

ロケット誘雷実験では、至近距離から各種の観測が同時に行えるため雷撃点を特定でき、雷撃点の位置標定精度を明らかにするのに適している。1989年度のロケット誘雷実験では、鉄塔や送電線へ7回の誘雷に成功した。その近距離雷鳴から放電路を再現して静止写真と電流測定で確認されている雷撃点の位置を比較して再現精度を考察する。

2. 雷鳴観測と位置標定

ロケット誘雷実験場は石川県の鶴来町と金沢市の境界にある標高928mの奥獅子吼山頂である。ここは手取扇状地・加賀平野・日本海を見渡せ、日本海海上で発生した雷が冬の季節風によって直接襲来するので、冬季雷の実験には格好の地である。500kV送電線として設計され275kVで運用されていた30号鉄塔が奥獅子吼山頂にあり、現在は自然雷撃や電線着氷および気象の観測などに使用されている。この鉄塔へのロケット誘雷実験が1986年から実施され1989年までの4年間に、17回の鉄塔誘雷を含む39回の誘雷に成功している(堀井 他、投稿中)。

Table 1 に示す1989年度の鉄塔への誘雷実験では、雷鳴を記録するのに2組の正三角形を形成するように同一平面上に4個のマイクロホンを、30号鉄塔の中心とロケット発射台のそれぞれから25m以内の近距離に設置した。この実験のマイクロホン・発射台・鉄塔の配置をFig. 1 に示す。

Table 1. Rocket-triggered lightning flashes to the tower in 1989 experiment

Exp.No.	Date & Time	Point corrora	Striking point
89-04	11/18 22:22:00	-0.2 (μ A)	Lightning rod on tower
89-05	" 22:39:43	0.0	Top conductor
89-07	" 23:07:15	0.0	Top conductor
89-09	11/19 7:39:28	+5.0	Lightning rod on tower
89-10	" 8:06:40	+8.0	Ground wire
89-16	11/29 2:37:34	+5.0	Ground wire
89-21	12/ 1 1:22:51	-3.5	Middle arm

Fig.1. Arrangements of microphones, launcher and tower in Okushishiku mountain.

1987年度の誘雷実験での雷鳴解析から、マイクロホン間隔が10m離れただけで雷鳴波形の異なることが明らかになった(若松 他,1989)。そこでマイクロホン間隔10mを5mに変更し、各マイクロホン間の雷鳴波形の相関を良くした。マイクロホン位置の測定は、巻尺および特製の大型水準器を使用して慎重に行った。冬季山岳地での近距離雷鳴は支配的周波数が300Hzから400Hzと高いので(若松 他,1989)、周波数特性が40Hzから12kHzまで一定である無指向性ダイナミックマイクロホン(SONY:F-115)を使用した。

音源から3個のマイクロホンまでの距離は、誘雷による瞬時のパルスの電界変化の時刻から音響パルスが各マイクロホンに到達するまでの時間と音速の積として得られる。Fig. 2に示すように、音源からマイクロホン#1・#2・#3までの距離を L_1 ・ L_2 ・ L_3 、マイクロホン#1と#2の中点を原点に、マイクロホン#1から#2の方向をX軸の正方向にとる。距離 L_1 ・ L_2 を与える音源の位置は、点 $(x_0, 0.0)$ を中心に半径 R の円周上にある。ここでマイクロホン#1・#2の間隔

Fig.2. Relation between a sound source and microphone arrangement.

Fig.3. Relation between an error and microphone arrangement.

を D_{12} とすると、 x_0 と R はそれぞれ次式で与えられる。

$$x_0 = (L_1^2 - L_2^2) / (2D_{12}), \quad R = \sqrt{L_1^2 - (x_0 + D_{12}/2)^2} \quad (1)$$

音源の位置はこの円周上で #3 から L_3 の距離の点として決定できる。但し、#3 が X 軸上に位置するときは決定できない。

3. 再現精度

音響法による位置再現精度は、まず位置分解能で制限され、更に風の影響や気温の不均一性などの大気条件による誤差によって決まる。雷撃点の位置や雷撃点近傍の雷道を詳細に精度良く再現することに主眼を置いているので、大気条件については 1 km 以下の高度で検討する。

(3.1) マイクロホン配置と分解能

雷鳴波形を AD 変換するサンプリング時間は、音源とマイクロホン間の距離決定の分解能要因になる。サンプリング時間による位置分解能 Δs は、サンプリング時間 t_s の半分と音速 v_s の積であり、2点間の距離の最大誤差は $t_s \cdot v_s = 2\Delta s$ である。マイクロホン間隔 D より十分離れた音源 ($L_1 \approx L_2 = L$) に対する X 方向位置分解能 Δx は、 $2x_0 D_{12} = (L_1)^2 - (L_2)^2$ の関係から得られる。マイクロホン #2・#1・#3 の配置のなす角を θ とすると、 Y 方向位置分解能 Δy は Fig. 3 の線分 AC であり、線分 $AB = \Delta x (D_{12}/D_{13}) / |\sin(\theta)|$ と線分 $BC = \Delta x / |\tan(\theta)|$ の和として得られる。 Z 方向位置分解能 Δz は、音源の位置を点 (x_0, y_0, z_0) とすると、 $z^2 + y^2 + x^2 = L^2$ の関係から得られる。

$$\Delta x = (2L/D_{12}) \Delta s \quad (2)$$

$$\Delta y = [(|\cos \theta| + D_{12}/D_{13}) / |\sin \theta|] \Delta x \quad (3)$$

$$\Delta z = (x_0/z_0) \Delta x + (y_0/z_0) \Delta y \quad (4)$$

X 方向の分解能 Δx は音源までの距離 L に比例する。距離に対する比分解能 $\Delta x/L$ を良くするにはマイクロホン間隔 D_{12} を広くするか、サンプリング時間を短くすれば良い。しかし間隔 D_{12} を広くすると雷鳴波形の相関が低下し同一音源であるかどうかの判定が困難になる。一方サンプリング時間を短くするとデータ数が多くなり解析処理時間が長くなる。また雷鳴は伝搬中に局所的な大気の乱れによる影響を受けるので、マイクロホン間隔を極端に狭くして、サンプリング時間を短くすることで精度を上げるのは新たな問題を生じる。

$\theta = 0$ 度で分解能 Δy と Δz が発散するのは、マイクロホン #3 が #1・#2 と同一の X 軸上にあり、 y と z の位置を決定できないことを示す。一方 $\theta = 90$ 度で分解能 Δy は最小 $(D_{12}/D_{13}) \Delta x$ になる。これはマイクロホン #3 が #1 と #2 に直角に配置されていることを意味する。マイクロホン間隔 $D_{12} = D_{13} = 5$ m として、仰角 45 度で X 軸を基準にした水平角をパラメータにとり、 Z 方向と X 方向の位置分解能の比 $\Delta z/\Delta x$ の θ 依存性を

Fig. 4. Dependence of resolution on the microphone configuration.

Fig. 4に示す。正三角形配置ではマイクロホンの交差角 $\theta = 60$ 度、水平角は交差角 θ の半分の30度以下であるので、仰角45度のZ方向分解能はX方向分解能の2倍以下である。3個のマイクロホンでは位置分解能に指向性が生じ、仰角が小さくなるとともに(4)式より高さ方向の分解能 Δz が大きくなる。雷鳴の位置に関係なく精度を増すには、4個のマイクロホンを座標の原点とXYZ各座標軸上の等距離Dの位置に配置して、原点とX軸上・原点とY軸上・原点とZ軸上のマイクロホンからそれぞれ $x \cdot y \cdot z$ の位置を(2)式の分解能で決定できる。マイクロホン間隔を等しくすると、位置の比分解能は $2\sqrt{3}\Delta S/D$ 以下になる。比分解能による誤差を1%以下にするには、マイクロホン間隔5mでのサンプリング時間を85 μ s以下にしなければならない。

(3.2) 風による誤差

音波が大気中を伝搬するとき伝搬速度の不均一性から音の伝搬線が屈折して、音源の位置標定に誤差を生じる。その最大要因は風である。雷放電路は連続した点音源のつながりによって構成されているので、各点音源からの音波は球面波として伝搬する。いま水平面に平行な速度 $u(u_x, u_y, 0)$ の風があり、音速を v_s 、時刻 $t=0$ での音源の位置を高さ h の点 $(0, 0, h)$ とすると、時刻 t での波面は次式で表わせる。

$$(x - u_x t)^2 + (y - u_y t)^2 + (z - h)^2 = (v_s t)^2 \quad (5)$$

まず、マイクロホン配列中の1個のマイクロホンへの風による影響を考え、次にマイクロホン配列に与える誤差を調べる。マイクロホンがX軸上の点 $(x, 0, 0)$ に置かれているとして、(5)式より風の無いときと水平方向に一定の風が吹いているときの伝搬時間差から生じる伝搬距離に対する誤差を求める。1988年の実験で7回の誘雷成功時に測定した風速は、最大が10m/s、最小が0m/sで、平均が3.3m/sであったが、ここでは風速を10m/sとする。X軸となす風向の角度をパラメータとして、音源とマイクロホン間の距離に対する誤差をFig. 5に示す。音源からみて風向に垂直方向に置かれたマイクロホンの誤差は小さく、風速10m/sでは伝搬距離に対して0.05%の誤差で、音源からの水平距離によって変らない。また、風向きがマイクロホン方向に直角でない場合は誤差が大きくなり、風上側の方が風の影響は大きい。風速10m/sのときFig. 5より音源の真下から約 $(h/3)$ m以内にマイクロホンを設置すれば、風向に関係なくマイクロホンへの誤差は1%以下になる。

Fig. 5. Relation between error and the microphone position to a wind direction.

次に、マイクロホン配列中の2個のマイクロホンへの風による伝搬時間の違いから生じる標定位置の誤差を検討する。この誤差は風によって音の伝搬線が湾曲することによって生じ、マイクロホン間隔5 mでの誤差はFig. 5の誤差曲線上の5 m離れた2点の誤差の差から得られる。風速10 m/sの風では風向きがマイクロホン方向(角度0度)で、音源までの距離をL mとすると誤差の最大値はほぼ $(15/L)\%$ となり、伝搬距離で換算すると誤差は15 cmとなる。この差を2個のマイクロホンでのサンプリング時間による誤差に置き換える($2\Delta s = 0.15$)と、(2)式より3%の位置標定誤差に相当する。この誤差は音速に対する風速10 m/sの風による伝搬速度の変化に等しい。これは音源が風によってマイクロホンへの伝搬時間内に移動し、そこに仮想音源があるものと同じである。従って、風による誤差を1%以下にするには、風速3 m/s以上の風では標定された位置を風向きによって補正する必要がある。

高度10 km以下の対流圏では、高度とともに風が強くなる風のシアが存在する。標高1 kmと2 kmにはほぼ相当する900 mbと800 mbの冬の3ヵ月の月別平均シアは2.9から3.7 m/s/kmである(国立天文台編, 1990)。従って地上で風の影響がなくても1 km以上の高度の音源に対しては風のシアによる補正をしなければ、1%以下の精度では再現できない。

(3.3) その他の要因による誤差

音源とマイクロホンの距離から位置標定すると、音の伝搬面を平面波近似することなく位置標定できるので、波面の曲率による誤差は考慮する必要がない。次に大気条件の温度Tによる誤差は、音速 v は $v = 331.45 \{(273 + T)/273\}^{1/2}$ であるので気温を1°C以内の精度で測定すれば、音速に及ぼす誤差は0.18%以下である。気温の高度変化による音の伝搬線の湾曲効果が位置標定の誤差となるが、冬季近距離雷鳴は雷鳴の継続時間が短く雷雲高度も低い。特に、1 km以下の高度では気温の高度変化は一般に知られている変化率 $-6.5^\circ\text{C}/\text{km}$ で補正すればよく、また雷撃点とその近傍に限定すれば地上の測定気温を使用すればよい。

最後にマイクロホンの設置位置と鉄塔の相対位置の測定誤差が残されている。永続して観測する場合には厳密な測量によって誤差をなくせるが、山岳地で実験者による測定には困難を伴う。しかし、マイクロホン間隔5 mの3%の測定誤差15 cmは、位置標定に3%の誤差を生じる風速10 m/sの最大距離誤差15 cmに相当する。従って、1%の測定誤差があれば雷撃点の標定位置に1%の誤差が現われるので、再現誤差の要因にならないようにマイクロホン配置位置を正確に測定する必要がある。

4. 雷撃点の位置標定と雷放電路の再現

(4.1) 雷撃点の位置標定

実験番号No. 89-21は1989年12月1日1時22分に2段式ロケットを発射し、発射後1秒で誘雷した。静止写真と電流測定から確認されているように山側の中相アーム先端へ雷撃した(堀井 他, 投稿中)。時間窓の中心の時刻から伝搬時間を求めて音源までの距離を決定するので、時間窓の端で強い相関を伴うときには誤差を伴う。時間窓の長さを変えて位置標定した結果をTable 2に示す。筆者らの再現法では、雷鳴の特徴音を解析条件として使用しているので時間窓の長さによる標定位置の誤差が小さいものと考えられる。この位置標定に使用したAD変換でのサンプリング時間は190 μs で、3個のマイクロホンによる位置の比分解能は2.8%以下である。マイクロホンの中心から中相アームの先端までの距離は50.2 mであり、伝搬距離に対する誤差は3.5%から4.0%である。

これまでの誘雷実験での雷撃点は、いずれも山側方向に片寄った位置に標定されている(堀井 他, 投稿中)。実験場から約100 km北の輪島測候所の記録によると、約1 km上空で実験場の高度に相等す

る900mbの気圧の月別平均風向は、11月が267度・12月が271度・1月が279度である(国立天文台編、1990)。このように冬季雷での風は西風の季節風であるので山側にシフトされた位置に再現される。そこで風による誤差を考慮して音源位置を1.5mほど谷側にシフトさせる必要がある。

Table 2. Dependence of location and accuracy on the width of the time window length (No.89-21)
Striking point: P (10.7, 0, 44.4)

Time window	Ranged position	Error
5ms	(11.56, -1.16, 43.39)	1.76m, 3.5%
10ms	(12.37, -0.96, 44.98)	2.01m, 4.0%
20ms	(12.54, -0.05, 45.08)	1.96m, 3.9%

(4.2) 雷放電路の再現

Fig. 6はマイクロホン#1, #2, #3から実験番号No.89-21を再現した雷放電路である。Fig. 6 (a), (b)はそれぞれX-Z平面図とX-Y平面図で、高さ方向のZ軸は10m/div, 平面上のX軸とY軸は5m/divである。

Fig. 6. Reconstructed channels of the rocket-triggered lightning flashes to the tower in 1989 experiment (No.89-21).

詳細に再現するために10msの短い時間窓を使用し2msずつシフトさせて解析した。マイクロホン#1と#2、#1と#3、#2と#3の3組の相互相関係数の平均値が0.8以上の点を音源と判定した。雷放電路が大きく屈曲している点の座標は(41.2, 1.3, 59.1)で、誘雷後228ms経過してマイクロホン#1に到達した音源の位置である。これより上空にワイヤーが伸びていると考えられるので、ワイヤーの下端からの雷撃距離31m、垂線に対する侵入角度81度でほぼ水平方向に伸びて雷撃している。なおこの再現では測定気温0℃を使用し、風による補正をしていない。

5. まとめ

音源と3個または4個のマイクロホンまでの距離から位置標定する方法を示し、マイクロホンの配置形状と標定精度の関係を明らかにした。音源位置に関係なく精度を増すには、4個のマイクロホンを座標原点と各座標軸上の等距離Dの位置に設置する。音響信号をAD変換する際のサンプリング分解能を ΔS とすれば、位置の比分解能は音源の位置に関係なく $2\sqrt{3}\Delta S/D$ 以下になる。また1989年度のロケット誘雷実験での雷鳴から雷撃点の位置を標定し、音源からマイクロホンまでの伝搬距離に対する標定誤差が4%以下であることを示した。

音響再現法による標定誤差を1%以下にするには、マイクロホン配置の位置を誤差要因にならないように正確に測定すると、マイクロホン間隔5mで4個のマイクロホンを座標原点と各座標軸上に設置し、AD変換のサンプリング時間を85 μ s以下にする必要がある。また大気条件による誤差は、風速3m/s以上の風では標定位置を風向きにより補正し、高度1km以上の音源に対しては風速のシアと気温の高度変化率に関するデータで補正する必要がある。

最後に、名大・名工大・中部大・愛知工大・金沢工大・石川高専その他ロケット誘雷実験グループの皆さんと北陸電力(株)・中部電力(株)の関係者に深く感謝致します。なお、本研究の一部は文部省科学研究費の援助を受けて行われた。

参考文献

- Few, A. A., Lightning channel reconstruction from thunder measurements, J. Geophys. Res., 75, 7517-7523, 1970.
- Few, A. A. and T. L. Teer, The accuracy of acoustic reconstructions of lightning channels, J. Geophys. Res., 79, 5007-5011, 1974.
- 堀井憲爾 鬼頭幸生 和田淳 中村光一 角紳一 依田正之 饗庭貢 櫻野仁志 若松勝寿, 山岳部の試験送電線に対する冬季ロケット誘雷実験, 電学論に投稿中, 1990.
- 国立天文台編, 理科年表, 丸善, 376-377, 1990.
- Nakano, M., Lightning Channel Determined by Thunder, Proc. Res. Inst. Atmos., Nagoya Univ., 20, 1-7, 1973.
- 若松勝寿 堀井憲爾, ロケット誘雷による近距離雷鳴と雷放電路の再現, 電学論B, 109-B, 281-287, 1989.
- 若松勝寿 世森啓之 堀井憲爾, 雷鳴解析による雷放電路の再現, 電学論B, 108-B, 277-284, 1988.

(Received September 10, 1990; Revised October 23, 1990;
Accepted December 20, 1990.)