雷活動規模の定量的評価について

宮崎 忠臣 岡田 富男

前橋工科大学工学部情報工学科

Quantitative evaluation of lightning electrical activity

Tadaomi Miyazaki, Tomio Okada

Department of Information Engineering, Maebashi Institute of Technology, 460-1 Kamisadori-cho, Maebashi, Gunma 371-0816, Japan.

A lightning strength parameter denoted as α or LAIDO (Lightning Activity Index No.), which characterizes the phenomena of lightning activity, has been proposed. LAIDO is defined by the characteristic energy obtained from the probability distribution of the radiation field generated by lightning discharges. In order to confirm the validity of LAIDO, the relationship between α and lightning discharge currents given by LPATS has been examined. The thunderstorms in the whole areas of Gunma prefecture have been investigated during summer seasons in 2001 and 2002.

LAIDO is found to be independent on the distance between the observation site and the thunderstorms if the total lightning current for each thunderstorm is same. The electrical activity of thunderclouds can be represented by LAIDO independently on the distance. The relationship between α and the probability of lightning stroke disasters has been examined for the plain and the mountain areas. At $\alpha=10$, the probabilities for the plain and mountain areas are about 2.6% and 1%, respectively. These might depend on the number of the architectures in the areas.

Keywords : Lightning discharge, radiation field, lightning activity, evaluation of LAIDO

1. まえがき

IT 革命と称される現代の高度情報化システム社会においては、直撃雷はもちろんのこと、誘導雷に起因する雷災害による社会的損失は非常に大きい。そこで、襲雷に対してあらかじめ待避・回避の処置をとり被害の軽減・防止を図ることはこれまで以上に多くの分野から要求されている（電学技報，2002）。

これまで多くの研究者によって雷雲の大きさ、強さを表す研究が行われてきたが、人工物に被害をもたらす雷の電気的な活動規模は雷放電の頻度、振幅、放電間隔、継続時間などを測定した結果を利用した定性的な判断が行われているにすぎなかった（Brook 他, 1985; Janischewskij 他, 1996; Solomon 他, 1996）。

ところで、台風、あるいは地震には、その強度を判定する基準があることは良く知られている。

そこで、筆者らは、雷の電気的な活動度の定量的な判定指数として「雷度指数（以下、雷度と略称）」を提唱してきた（Miyazaki 他, 1986）。

本研究では、雷放電に伴って発生する電磁界成分中の輻射電磁界成分のエネルギー分布を計測する装置で得られたデータを統計処理することにより、雷度を求めた。放電によって失われる雷雲の電気的な活動規模の判定指数である雷度の定量的な評価は LPATS データの雷放電電流値を用いて行った。

電気施設の耐雷設計を行うに当たって、その地域にどの程度の強さの雷が発生するのかを知る必要がある場合に、本観測システムで求められた雷度は非常に有効な指標となり得るといえる。

2. 雷度算出システムの概要

2-1 輻射電磁界成分の分析

本研究では、雷放電に伴って発生する電磁波を CIGRE 型アンテナにより受信し、信号中の 100kHz 成分を検波し、二乗器を通して波形整形を行い、空電信号の輻射電磁界成分のエネルギー分布を求め、統計処理を行うことにより、雷雲の電気的な活動度として雷度の算出を行っている。

雷は対地、雲放電を問わず、その雷撃過程において強い電磁界放射が行われている。この場合、電磁界は放射源からの距離 r の方向に球面状に伝搬する球面波で、三つの異なった性質、すなわち、静電界・誘導電磁界・輻射電磁界の成分をもつ。静電界は $1/r^3$ 、誘導電磁界は $1/r^2$ 、輻射電磁界（以下、輻射成分と略称）は $1/r$ に比例する（虫明 他, 1970）。

一方、空電電界強度と周波数の関係は 5 kHz 付近にピークがあり、この前後の周波数で電界強度は急激に低下する（高木, 1959）。100kHz では電界強度は 1 割程度に減少するが、低周波帯では各成分の分離が困難であることから、放電エネルギーの巨視的傾向を測るには他の 2 成分に比べて距離による減衰が最も少なく、

かつ、雷放電源から 5km 以上で受信すると 90% 以上が輻射成分と考えられる空電信号の 100kHz の同調成分を観測し、分析を行った (Miyazaki 他, 1986)。

したがって、雷活動規模の定量的判定を行うために雷放電に伴って放出される空電信号のエネルギー分布を求めるデータとして輻射成分を用いて雷活動規模の考察を行うものである。雷度が大きいときには対地放電(いわゆる落雷)も多いことから、落雷による被害の予測が可能となり、耐雷設計の指標としての利用も可能になるものと考えられる。なお、観測地点から 5km 圏内の近接雷に関しては静電界成分を用いて同様の手法で雷度を算出している (宮崎 他, 1991)。

2.2 輻射成分のエネルギー測定回路

空電信号の輻射成分のエネルギー分布を求めるための測定回路(以後、雷度計と略称)を製作した。この雷度計で受信されるパルス状の信号は電界のエネルギーの積分値に比例した積分電界強度であるといえる。雷度計の概略図を図 1 に示す。図 1 に示すように、100kHz 同調回路、利得切り替え増幅器、二乗検波回路、10kHz ローパスフィルタ回路で構成されている。図中には示していないが、回路出力を外付け A/D コンバータによりコンピュータに取り込み種々の処理を行っている。

Fig.1 Schematic diagram of LAIDO measuring system

2.3 雷度の測定原理

雷度は、雷度計の観測データを用いて注目している雷雲の最盛期と考えられる 10 分間の各放電エネルギー範囲ごとの放電数を集計して算出する。

Fig.2. Energy distribution of lightning discharges (Aug. 10, 2001, 20:21-20:31)

図 2 は、雷度計を用いて得られた雷雲の放電によって失われた輻射成分の放電エネルギー値と各エネルギー範囲ごとの頻度数との関係を示したもので、図中の直線は近似回帰直線である。(1) 式はこれを数式化したものである (Miyazaki 他, 1986)。

$$\ln \frac{N_a}{\sqrt{W}} = -\frac{1}{\alpha^*} \cdot W \quad \dots (1)$$

ここで、 W は放電によって失われた雷雲の電気的なエネルギーの振幅値を表し、 N_a は放電エネルギーの範囲ごとの頻度数で、 $N_a = \frac{\delta n / N}{\delta W}$ 、 δn はエネルギー振幅値 W と $W + \delta W$ の間にある放電数、 N は全体の放電数である。

(1) 式は輻射成分のエネルギー分布を表しており、しかも対数分布であることを示している。ここで、

$\alpha = (1/\alpha^*)$ とする係数 α を定義すると (1) 式は、(2) 式で表せられる。

$$\ln \frac{Na}{\sqrt{W}} = -\alpha \cdot W \quad \dots (2)$$

この数係数 α が雷度である。

3. 観測例

3.1 雷度計のデータ解析例

図 3 は雷度計で観測された 2001 年 8 月 10 日の雷活動最盛時の 10 分間のデータ解析例である。図 3 は縦軸に $Na/\sqrt{W}$ を取り、横軸は V^2 としている。本研究の計測法は 2.1、2.2 で述べたように輻射成分を計測している。この計測条件では輻射成分は放電電流に比例しているとみなせる。放電エネルギーは放電電流の二乗に比例する。したがって、図 3 の横軸はエネルギーに比例する。振幅の分割数は A/D 変換器の分解能に依存する。本計測システムでは 50mV の振幅範囲ごとに分割した。図中の直線 (以下、近似直線と略称) は最小二乗法により求めた。この近似直線の傾きが (2) 式の α である。得られた雷度は 1.76 であった。

3.2 電流値のデータ解析例

図 4 は図 3 と同じ時刻の雷度を LPATS の電流値データを用いて算出した例である。図 4 も同様に縦軸に $Na/\sqrt{W}$ を取り、横軸は I^2 である。LPATS から得られる電流値は、電流と遠方電磁界強度の間に比例関係を仮定して決定される (財満 他, 1996)。放電電流の二乗は放電エネルギーに比例するので図 4 の横軸は放電エネルギーに比例する。図 4 の振幅の分割は、電流最小値の最頻度値が 5kA である (財満 他, 1996) ことから、5kA ごとに分割し、その分布状態を上記と同じ手法で描き、雷度を算出した。放電電流 (以下、雷電流と略称) から算出された雷度は 7.9 であった。雷度の違いは、空電信号の計測方法、および計測器の違いによる。

Fig3. Energy distribution of radiation field
(Aug. 10, 2001;17:29-17:39)

Fig.4. Energy distribution of calculated from LPATS
data of the same time at fig.3
(Aug.10, 2001:17:29-17:39)

3.3 LPATS データ

LPATS データは東京電力 (株) の到来時間差方式による雷放電位置標定システムにおいて観測されたデータである。このデータには、雷放電の緯度・経度・時刻・電流値、および極性が記録されている。図 5 は 2001 年 8 月 10 日の 14 時から 22 時までの雷電流の時系列変化を示している。図で横軸は雷放電時刻 (分) を、縦軸は雷電流値 (kA) を示す。

Fig.5. Time series change of the lightning discharge current (Aug. 10, 2001)

図6は、図5と同日、同時間帯の雷撃点（青色の-印、および赤色の+印で示す）を、本学（黒色の+印で示す）を中心とする半径64kmの観測域内（群馬県のほぼ全域）に描いたものである。雲放電点は除去してある。図で青色の-印、赤色の+印はそれぞれ負、および正極性放電の雷撃点を示す。図で黒枠で囲み①を付してある領域（以下、領域①と略称）は図3、および図4の雷度の算出を行った雷雲である。このように特定地域の雷撃点を抽出し、この地域の雷電流の時系列の描くデータ処理手法も本研究で開発した。図中、左端上部の直線は8kmの距離を示す。以下の観測図においても同様である。

Fig.6. Map of lightning stroke points in the area with the 64km radius, of which our university is center (Aug. 10, 2001, 14:00-22:00)

Fig.7. Time series of the lightning discharge current at the same time as shown in figure 4 (Aug. 10, 2001, 17:29-17:39)

図7は図6の領域①、すなわち17:29~17:39間の雷電流の時系列変化を示す。この時間帯の雷電流は負極性のみが観測されている。これは雷電流の9割は負極性である夏季雷の特徴を示している。

図8は、図3、および図4と同じ時間帯、17:29~17:39の10分間の雷撃点を観測域内に描いた図である。図より17:29~17:39の時間帯で雷活動を行っている中で本学に一番近く、かつ、活発なのは本学より東約40kmの領域①の雷雲の雷活動である。したがって、図3の雷度計の観測データは領域①の雷活動最盛時の幅

Fig.8. Map of lightning stroke points at the same time as shown in figure 4.

射成分のエネルギー分布を観測しているといえる。このように雷活動を行っている雷雲が複数個存在している場合でも雷撃領域や雷活動時間を指定することにより、個々の雷雲の雷度の算出が可能となる。

3.4 単一雷雲について

レーダ観測域内のレーダエコー、あるいは LPATS の雷電流時系列データから雷活動を行っている雷雲が一個の状態と判定できる雷雲を単一雷雲と定義する。雷度計のデータは位置標定の難しい CIGRE 型アンテナで受信されたデータを用いているので単一雷雲と確認できる雷活動についてのみ行っている。

図 9 はレーダエコーから単一雷雲と判定できる例である。2001 年 8 月 27 日の 23:21 から 23:51 までの 30 分間の雷撃点 (図中の青色の一印) と 21:36 のエコーを重ねて描いた例である。高度 6,000m のエコーが描かれている。この高度は夏季雷の一般的な負電荷高度である (Williams, 1989)。エコーは一辺が 2 km で、その降水強度の単位は [mm/hr] である。ほとんど多くの雷放電は 16 [mm/hr] 以上の降水強度領域で発生すると考えられる (宮崎 他, 1989)。図の雷撃点、およびレーダエコー等からこの時間帯に雷活動を行っている雷雲は 1 個であるといえる。そこでこの 30 分間の雷度を雷度計、および LPATS データの両者から算出し、比較・検討を行った。

Fig.9. Map of lightning stroke points from 23:21 to 23:51 and radar echo at 21:36 of 6000m altitude (Aug. 27, 2001)

4. 雷度の評価

4.1 雷度計、および LPATS データから算出した雷度の比較

雷度計は輻射成分を測定しているため $1/r$ の距離の要因が残る。そこで、雷度の検証は距離の影響を受けていないとされる LPATS データを用いて雷度計のデータから算出された雷度と比較・検討を行った。

雷度計の観測データを用いて雷度を算出する場合は、単一雷雲のデータを用いることが望ましい。そこで、図 9 のレーダ観測データより単一雷雲と判断の出来ている 2001 年 8 月 27 日の 23:21 から 23:51 までの 30 分間の観測データを使用した。雷活動最盛時は総放電量の最も多い 23:31 から 23:41 の 10 分間であるとした。表 1 に雷活動最盛時とその前後 10 分間の雷度計 (①)、および LPATS (②) の総放電エネルギー量、およびそれぞれの雷度を①、②に示す。

Table 1. Temporal change of LAIDO for a single active thundercloud (: the most active phase: 23:31-23:41) (Aug. 27, 2001)

時 間	総 放 電 量		雷 度	
	① V^2 [V^2]	② I^2 [kA^2]	①	②
23:21~23:31	0.195	344.89	2.14 : $\alpha 1$	14.4
23:31~23:41	0.277	1099.03	2.90 : $\alpha 2$	20.3
23:41~23:51	0.249	400.32	2.54 : $\alpha 3$	18.4

表 1 より、雷雲の雷活動最盛時の総放電エネルギー量、および雷度は前後の 10 分間に比べ共に高いことが判る。

4.2 雷雲までの距離が等しく、雷度が異なる場合の例証

表 1 の雷度の推移を図 10 に描く。図 9 に示す雷雲は表 1 の雷度算出時間帯はほとんど移動していなかった。したがって、この観測例を雷雲までの距離が等しく、雷度が異なる場合の例とする。

Fig.10 Energy distribution of radiation fields shown in table 1 (Aug. 27, 2001, 23:21-23:51)

図 10 は、雷度算出の近似直線を同一グラフ上に表示した例である。雷雲までの距離が等しい場合、雷度が大きいほど近似直線の勾配が緩やかに描かれていることが分かる。

4.3 雷雲までの距離が異なり、雷度が等しい場合の例証

Fig.11. Map of lightning stroke points of two different thunderclouds (Aug. 14, 2001, Aug. 29, 2001)

図 11 はこの計算に用いた本学から約 55km、および約 29km 離れた雷雲の雷活動最盛時の 10 分間の雷撃点をプロットした例である。図に挿入した数値よりこの 2 つの雷雲は雷放電数、総雷電流量ともにほぼ等しいといえる。このデータを雷雲までの距離が異なり、雷度が等しい場合の例とする。

図 12 は雷雲までの距離が異なり雷度が等しい場合の雷度算出過程を示す。雷度は観測地に近い雷雲は 14.41、遠い雷雲は 14.03 と算出され、ほぼ等しいといえる。このことは、雷活動規模が同じであれば距離に関係なく同程度の雷度を示すといえる。よって、雷度表示することにより距離の要因が取り除けていると考えられる。近似直線を図 12 のように同一グラフに描くと雷度がほぼ同じなので直線の勾配はほぼ等しく描かれている。観測地に近い雷雲 (d1) の近似直線は、遠い雷雲 (d2) の近似直線の上側に平行移動するかのよう描かれている。

Fig.12. Energy distribution of lightning discharge currents (d1: Aug. 29, 2001, d2: Aug. 14, 2001)

4.4 雷活動最盛時の判定

雷度は雷活動最盛時の 10 分間の空電信号 (輻射成分) の振幅ごとの頻度数より算出を行う。しかし、雷活動を行っている雷雲が一つであるといえる日はまれで、図 6 に示すようにほとんどの場合、複数の雷雲が雷活動を行っている。したがって、雷度算出に必要な空電信号源が特定できる観測例はまれであり雷度の検証が

困難であった。そこで、図 6 のように注目領域の雷雲、または図 7 のように雷活動時間を限定して、その領域、あるいは時間内の LPATS の雷電流時系列データから雷活動最盛時の判定を行った。

雷活動最盛時の判定は、まず、1 分ごとの電流総和を求める。次に 1 分ずつずらしながら 10 分間の和を求め、最大値を示す時間帯を雷活動最盛時とした。

4.5 雷撃事故を起こした雷雲の同定

観測地図上にプロットされた雷撃事故発生場所(以下、事故点と略称)の緯度、経度を日本国土地理院の地形図閲覧システムを使用し、決定する。次に、事故発生時間と LPATS 放電データを照合することにより雷撃事故を起こした雷雲を同定する。

Fig.13 Change of the discharge currents

雷雲の雷活動時間は、雷雲の発生から消滅に至る雷電流量の推移で判定する。図 13 は 2000 年 8 月 2 日に前橋工科大学より東南東約 6km で発生した雷雲の雷電流量の推移図である。横軸は発生から消滅までの時間を、縦軸は 10 分間の雷電流量の総和を示す。図より、17 時 55 分から 18 時 05 分の 10 分間が雷活動最盛時と考えられる。また、図中の縦線は雷撃事故が発生した時刻を示している。この雷雲は事故を 8 回発生させていたことが分かる。雷撃事故は雷活動最盛時にかけて発生している例が多いといえる。

5. 雷度評価結果

5.1 評価結果

夏季雷の雷放電は、負極性放電が 9 割以上を占め、正極性放電は少ない。また、雷放電の 7 割以上は、10kA ~ 40kA の低エネルギー部の放電が多いことが判っている。雷撃事故を起こしたと考えられる雷電流極性は負極性放電が多く、正極性放電はほとんどなかった。一般的に雷放電エネルギー、即ち、雷電流値が、大きければ大きいほど事故が発生し易いと考えられる。過去 4 年間の観測において、事故を起こしたと考えられる負極性放電の雷電流値は、最大値が -94kA で、最小値は -6.5kA で、平均値は -22.6kA (データ数: 514 個) であった。

ここで、雷度算出方法をもう一度検証する。雷度は雷活動最盛時の 10 分間の空電信号 (輻射成分) の振幅ごとの頻度数より算出される。雷度の算出は最小二乗法を用いて近似直線を求め、その勾配の逆数を用いている。このとき、高エネルギー部の 1、2 個の雷放電によって、直線の勾配が大きく変動する例も見られる。しかし、前述のように雷撃事故は低エネルギー部で発生しているので近似直線を算出するときは低エネルギー部の勾配で算出することとした。

表 2 は雷撃事故を起こした雷雲を発雷地域別に分類して表記している。ここでは、平野部は 200m 以下、丘陵部は 500m 以下の海拔高度を、山間部は 1000m 以上の海拔高度とした。各地域の雷度の最大値、最小値、平均値が示されている。

Table2. LAIDO of the thunderclouds which caused the lightning stroke accidents

発雷地域	雷度		
	最大値	最小値	平均値
平野	19.3 ± 2.6	7.4 ± 0.7	12.3
丘陵	16.7 ± 0.9	8.1 ± 0.6	12.1
山間	22.1 ± 1.6	9.0 ± 1.0	13.1

表 2 より、雷撃事故を起こした雷雲の雷度の最小値は、山間部で 9.0、平野部で 7.4 であることから雷度 7 未満では雷撃事故は発生しないと考えられる。

5.2 雷度と雷撃事故発生確率

図 14 は、横軸に雷度（事故が発生させた雷雲の雷活動最盛時の雷度）を、縦軸に事故発生確率（雷撃事故件数／絶対地放電数）を描いた図である。

Fig.14. Probability of lightning stroke accidents against LAIDO

図中の点線は、平野部データを面積領域で考えた場合、事故発生確率の大きいデータから求めた近似直線である。同様に、山間部データの場合は、実線で表している。図より、同じ雷度でも平野の方が事故発生確率は高く、雷度 10 の雷雲が上空にあると、事故発生確率は、平野部で約 2.6%、山間部で約 1.0% であると考えられる。

5.3 雷度の定量性の評価

台風、あるいは地震には、その強度を判定する基準があることは良く知られている。しかし、雷の強度に関しては未だに雷放電に伴って発生する空電信号の頻度、振幅、放電間隔、あるいは継続時間などで定性的な判断を行っているのが現状である。しかしながらこのような方法では、観測地点から各々の雷雲までの距離の相違、あるいは発生時刻など外的要因により見かけ上の雷強度が変わり定量的な比較は困難であった。

図 15、および図 16 は定性的な判断、すなわち、一定時間の雷電流量や放電頻度の関係からでは実際の雷活動規模の定量的な比較が困難なことを示す例として、雷度と総雷電流量、雷度と雷放電数との関係を描いた図である。これらのデータはいずれも雷撃事故を起こした雷雲の総雷電流量と放電数である。

Fig.15. The relationship between all discharge currents and LAIDO

Fig.16. The relationship between lightning discharge numbers and LAIDO

図 15 は横軸に雷度を、縦軸には雷度算出時間（雷活動最盛時の 10 分間）の総雷電流量を描いた図である。同様に、図 16 は横軸に雷度を、縦軸には雷度算出時間内の放電数を描いた図である。図中の直線は、近似直線である。2 つの図とも負の相関を示している。したがって、これまで行われてきた総雷電流量や、雷鳴や

電光等の放電数の多寡による雷活動規模の判定では雷雲までの距離の違いによる差異（距離依存性）や、雷活動時刻など（環境依存性）により不確実なものになるといえる。

これに対し、雷度 α を雷放電によって失われた雷雲の電氣的エネルギー分布の特性値と考え、この α を雷活動規模を定量的に示す「雷度」とする本方式は雷のエネルギーを同一の測定系で測定するならば、原理的にはきわめて正確にどのような場所、または時刻に発生した雷でもその強度を比較することを可能としているといえる。

6. まとめ

雷放電に伴って発生する電磁界成分中の輻射電磁界成分のエネルギー分布を統計処理することにより雷度を求めた。雷度算出は、雷活動最盛時の10分間の放電エネルギー（低エネルギー部）を用いて算出した。

単一雷雲の観測例を得るのは困難であるので、検証データとして距離の影響を受けていないとされるLPATSの雷電流値を用いた。

本研究で雷度を算出し、解析を行った結果、以下のことが判明した。

- (1) 雷度は、雷放電エネルギー源が観測地より5 km以遠であれば、どの測定系においても、ほぼ同じ値で示される。
- (2) 雷度は、観測地から等距離に在る雷雲の場合は、雷活動規模に比例した値で示される。
- (3) 雷度は、観測地から異なる距離に在る雷雲でも、雷活動規模が同じであれば、同じ値で表示される。
- (4) 雷度7以上から雷撃事故は発生しているため、雷撃事故に対する雷度の閾値は7と推定される。

結論として、雷度は雷放電によって失われた雷雲の電氣的な雷活動規模を定量的に表しているといえる。したがって、本研究の目的である雷災害の軽減・防止に役立つ耐雷設計の指標が得られたと考える。

謝辞

終わりに、「雷度」の検証に用いたLPATS、レーダエコー、および雷撃事故データは東京電力(株)より提供を受けました。謝意を表します。また、本研究の一部は音羽電機工業(株)の援助を受けました。お礼申し上げます。

参考文献

- Brook, M., C. Rhodes, O. H. Vaughan, Jr., R. E. Orville, and B. Vonnegut, Night time observation of thunderstorm electrical activity from a high altitude airplane, *J. Geophys. Res.*, **90**, 6111-6120, 1985.
- 電気学会技術報告 第902号, 高度情報社会の雷害問題の実情と研究課題, 2002.
- Janischewskyj, W., J. S. Chang, A.M.Hussein, V. Shostak, I. Rusan, and Y. Chen, Parameters of CN Tower lightning during severe and non-severe thunderstorms, The 10th Int. Conf. on Atmos. Electr., 384-387, Osaka, 1996.
- Miyazaki, T., Y. Nishida, and S. Kawamata, Energy Distribution of Lightning Discharges in Summer Thunderstorms, *T. IEE Japan*, **106**, 155-166, 1986.
- 宮崎忠臣, 西田靖, 国分里美, 川俣修一郎, 雷放電時の静電界成分のエネルギー分布と雷活動度, 電学論 **B,122**, 63-68, 1991.
- 宮崎忠臣, 西田靖, 川俣修一郎, 気象用レーダによる雷雲の同定, 電学論 **B,109**, 25-31, 1989.
- 虫明康人, 安達三郎, 基礎電波工学, 第3章, 共立出版, 1970.
- Solomon, R., V. Hoffman, and M. B. Baker, Lightning Frequency and Tropical Storms: Model and Observation, The 10th Int. Conf. on Atmos. Electr., 388-391, Osaka, 1996.
- 高木増美, 空電雑音の総合的研究会講演論文集, 76, 1959.
- Williams, E. R., The Tripole Structure of Thunderstorms, *J. Geophys. Res.*, **94**, 13151-13167, 1989.
- 財満英一, 望月東, 吹山直樹, 北条準一, 石井勝, 到来時間差方式の雷放電位置標定システム(LPATS)による雷放電の観測, 電学論 **B,116**, 1033-1038, 1996.

(Received October 25, 2007; revised December 16, 2007;
accepted December 25, 2007)