Characteristics of Vertical E-field Waveforms Associated with Return-strokes on Southeastern Sea of Kyushu

Koji Michishita Member (Shizuoka University, teknich@ipc.shizuoka.ac.jp)

Nozomu Nagatsuna Student Member (Shizuoka University, f0631049@ipc.shizuoka.ac.jp)

Tomomasa Murakami Member (Shizuoka University, f0311054@ipc.shizuoka.ac.jp)

Takashi Harada Member (Kyushu Electric Power Co., Inc., takashi.harada@kykuden.co.jp)

Keywords: lightning, return stroke, peak current, electric field, attachment process

The lightning detection network has widely spread, and the research has actively been done by using the location of the lightning striking point and/or the peak current obtained by the network. Recently, Cummins et al. have clarified that the maritime return-stroke current on the southern and eastern sea of the USA is higher than the inland return-stroke current by using the results obtained by NLDN.

Figure 1 shows the area subject to analysis of return-stroke current peaks obtained by JLDN. Figure 2 shows 50% values of estimated peak current of inland and maritime strokes. In the case of negative first strokes, the maritime return-stroke current is higher than the inland stroke current in contrast to the cases of negative subsequent and positive first strokes. This is similar to the result on the southern and eastern part of the USA obtained by NLDN.

The authors also compare the characteristics of the electric field waveforms associated with maritime negative and positive strokes in summer. The return strokes are categorized in reference to the pulses in the time derivative of the E-field waveforms in the time

range from -4 to 1 microseconds of the dominant peak. That is, if the subsidiary pulse whose amplitude is at least 30% of the amplitude of the dominant peak appears within $\pm 1 \mu\text{s}$ of the dominant peak, the event will be termed “Type B” strokes. The events producing one or more pulses in the interval from $-4 \mu\text{s}$ to $-1 \mu\text{s}$ before the dominant peak with no pulses within $\pm 1 \mu\text{s}$ will be termed “Type C” strokes. The events having a single large pulse in the time interval from $-4 \mu\text{s}$ to $+1 \mu\text{s}$ corresponding to the fast-transition in E-field, will be termed “Type A” strokes.

The statistics of the peak E-fields associated with negative first strokes dependent on the categorized types are shown in Table 1. The frequency of occurrence for each type agrees with the results obtained in Florida with the discrepancy of less than 6%. The peak of the E-field waveform normalized at the distance of 100 km by using the inversely proportional relationship to the distance is also shown in Table 1. Both the averages and the 50% values for Type B and Type C are higher than those for Type A by 20 to 30%. In the cases of negative subsequent strokes and positive strokes, the frequency of occurrence for Type A strokes is 91% and 80%, respectively, in contrast to the negative first strokes. Therefore, it is pointed out that high frequency of occurrence of Type B and Type C strokes might be one of cases of the observed difference between the maritime and inland stroke currents in the case of negative first strokes.

Fig. 1. Areas subject to analysis of return-stroke current peaks obtained by JLDN

Fig. 2. 50% value of estimated peak current of inland and maritime strokes

Table 1. Parameters of E-field and dE/dt waveforms associated with negative first strokes

		Type A	Type B	Type C
Frequency	number	75	110	83
	ratio[%]	[45]	[49]	[37]
100km E [V/m]	Average (Standard deviation)	15 (5.6) [7.6 (2.8)]	20 (6.1) [11 (5.5)]	19 (7.1) [8.7 (3.7)]
	90%value	9.3	11	10
	50%value	13 [7.4]	18 [9.0]	16 [7.6]
	10%value	23	27	31
100km dE/dt [V/m/μs]	Average (Standard deviation)	32 (11)	33 (11)	32 (12)
	90%value	18	19	18
	50%value	32	31	31
	10%value	47	45	50
Distance [km]	Average	82	94	95
	(Standard deviation)	(33)	(32)	(32)

九州南東海上に発生した雷に伴う垂直電界波形の特徴

正員 道下 幸志* 学生員 長綱 望*
正員 村上 智允* 正員 原田 貴司**

Characteristics of Vertical E-field Waveforms Associated with Return-strokes on Southeastern Sea of Kyushu

Koji Michishita*, Member, Nozomu Nagatsuna*, Student Member,
Tomomasa Murakami*, Member, Takashi Harada**, Member

The lightning detection network has widely spread, and the research has actively been done by using the location of the lightning striking point and/or the peak current obtained by the network. Recently, Cummins et al. have clarified that the maritime return-stroke current on southern and eastern sea of the USA is higher than the inland return-stroke current by using the results obtained by NLDN. In this paper we compare the inland and the maritime return-stroke current in southeastern part of Kyushu by using the data obtained by JLDN. In case of negative first strokes, the maritime return-stroke current is higher than the inland stroke current in contrast to the cases of negative subsequent and positive first strokes. The authors investigate characteristics of the electric field waveforms associated with maritime negative and positive strokes in summer. As a result, it is pointed out that high frequency of occurrence of time-derivative of E-field waveforms having multiple pulses close to the dominant peak might be one of causes of the observed difference between the maritime and inland stroke currents in case of negative first strokes.

キーワード：雷，帰還雷撃，電流波高値，電界，結合過程

Keywords: lightning, return stroke, peak current, electric field, attachment process

1. はじめに

電力設備の効果的な雷害対策を施す際、雷性状を把握する事は重要である。現在では国内外で落雷位置標定システム (LLS)⁽¹⁾⁽²⁾ が用いられ、このシステムにより得られた結果を用いて、落雷密度の季節変化や帰還雷撃電流パラメータについての報告がなされている^{(3)~(6)}。文献(7)では、アメリカ南部及び東部での観測結果に基づいて、負極性第一帰還雷撃の推定電流波高値は、海上に発生した雷撃の方が陸上のものより大きく、海と陸の境界線で明白な変化が確認出来るが、負極性後続雷撃及び正極性雷撃については異なる傾向を示すことを指摘し、この現象の主要な原因は、下向きリーダと上向きリーダの結合過程⁽⁸⁾にあると推定している。

文献(9)では、文献(10)や文献(11)に示された電界波形 (E 波形) とその時間微分波形 (dE/dt 波形) の微細構造を検討し、海上に発生した負極性第一帰還雷撃に伴う電界波形の内、約 37% は dE/dt 波形の中で最大ピークの $1\mu s$ 前後に別の大きなピークを含み、これらの電界波高値の平均値は別のピークを含まないものの値より 36% 大きい事を明らかにした。文献(9)では、 dE/dt 波形内の複数のパルスは、1つの放電路に複数の電流パルスが発生した場合や、複数の放電路が形成された場合に発生するものと推定している。

本報告では、日本の雷放電位置標定ネットワーク⁽¹²⁾ (JLDN) で得られたデータを用いて、九州南東部地域における陸上及び海上に発生した負極性第一雷撃、負極性後続雷撃及び正極性第一雷撃の電流波高値を比較する。また、この地域で夏季に熱雷に伴って発生した電界波形の特徴を、負極性第一雷撃、負極性後続帰還雷撃及び正極性第一雷撃の各々について検討した結果について述べる。

2. 電流波高値の比較

〈2・1〉解析対象 図1に、JLDNにより得られた帰還雷撃電流波高値の解析対象とした地域を示す。図1に示すエリアの面積は、約 36000 km² (南北及び東西約 190 km)

* 静岡大学大学院工学研究科
〒432-8561 浜松市中区城北 3-5-1
Dept. of Electrical & Electronic Eng., Shizuoka University
3-5-1, Johoku, Naka-ku, Hamamatsu 432-8561

** 九州電力 (株) 総合研究所
〒815-8520 福岡市南区 2-1-47
Research Labs., Kyushu Electric Power Co.
2-1-47, Shiobara, Minami-ku, Fukuoka 815-8520

図1 JLDNにより得られた帰還雷撃電流波高値の解析対象地域

Fig. 1. Areas subject to analysis of return-stroke current peaks obtained by JLDN.

である。JLDNにより2006年の7～9月にこのエリアに位置標定された雷撃を解析対象とした。また、JLDNで推定された電流波高値が、負極性雷撃については10 kA以下、正極性雷撃については15 kA以下の雷撃は雲放電である可能性があるため、それらは解析対象外とした。JLDNで得られた負極性雷撃のデータの内、先行する雷撃から200 ms以内、かつ雷撃点間の距離が1 km以内に発生したものは後続雷撃の可能性があるので、それ以外のデータを負極性第一雷撃によるものと見なした。負極性後続雷撃は、先行する雷撃との標定位置の差が誤差長径より小さく、また、先行する雷撃から30 ms以内に発生し、かつ雷撃点間距離が100 m以内の雷撃とした。正極性雷撃に関しては後続雷撃が発生することはまれであるため、全て第一雷撃によるものと考えた。

〈2・2〉推定電流波高値 図2に、負極性第一雷撃、負極性後続雷撃及び正極性第一雷撃の電流波高値の50%値を比較したものを示す。データ数は、海上雷撃の場合が負極性第一雷撃、負極性後続雷撃及び正極性雷撃で各々25607, 65, 1657であり、陸上雷撃の場合が各々16726, 58, 861である。負極性第一雷撃の電流波高値の50%値は陸上雷撃が23 kAで、海上雷撃の場合の26 kAが13%程度大きい。これに対して負極性後続雷撃の50%値は、陸上15 kAと海上16 kAと大きな差は見られない。また、正極性雷撃では陸上25 kAと海上24 kAとやはり大きな差は見られない。

負極性第一雷撃のみが、雷撃点が陸上か或いは海上かで電流波高値に相違が認められ、負極性後続雷撃や正極性雷撃で電流波高値に大きな相違が認められないのは、アメリカの雷放電位置標定ネットワーク(NLDN)によりアメリカ南部及び東部で得られたのと同様の結果となっている⁷⁾。一方、NLDNによる観測結果⁷⁾では、海上への雷撃が陸上への雷撃よりも約25%大きくなっており、図2に示した約13%の相違よりも2倍程度大きくなっている。これは、文献(7)で観測対象となっているアメリカ南部及び東部(南北1700 km, 東西2200 km)の海岸線に沿っての平均的な

図2 陸上及び海上に発生した雷撃の電流波高値

Fig. 2. Estimated peak current of inland and maritime strokes.

雷性状が、九州(南北及び東西約190 km)南東部の雷性状とは異なっている事や、文献(7)では数kAと電流値の小さい雷撃も対象としているのに対して、本論文では10 kA以上の雷撃のみを対象としたことで、海上への雷撃と陸上への雷撃電流の推定値の相違が見かけ上小さくなったことが原因と考えられるが、原因の究明や各要因による影響の度合い等の詳細については、今後の課題とする。

3. 海上に発生した落雷に伴う電界波形の解析

〈3・1〉解析対象 著者らは、九州南部の4地点で雷に伴う電界観測を行っており、この内の2地点では磁界の観測も行っている⁽¹³⁾。雷撃に伴って発生した電磁界波形を高周波成分まで精度良く測定するためには、電磁波が陸上を伝搬することによる高周波成分の減衰の影響を可能な限り小さくする必要がある。よって本論文では、海岸線から約300 mの場所に位置する観測局(志布志局)のデータを使用した。この観測局には2つの電界記録システムがある。一つのシステムでは、1.8 kHz～2.5 MHzの周波数帯域で測定された電界を、分解能12ビット、サンプリング時間40 ns、記録時間160 msのディジタイザにより記録している。もう一つのシステムでは、1 kHz～10 MHzの周波数帯域で測定された電界を、分解能10ビット、サンプリング時間40 ns、記録時間8 msのディジタイザにより記録している。解析対象とした負極性第一雷撃及び正極性雷撃のデータは、すべて後者のシステムにより観測されたもので、負極性後続雷撃のデータは、比較的記録時間の長い前者のシステムによって得られたものである。

〈3・2〉垂直電界波形の分類 志布志局で観測された垂直電界波形から電界の時間微分波形を計算し、計算された波形を文献(9)の基準に従って分類する。文献(9)では、解析対象のdE/dt波形のピーク時刻を0とし、-4～1 μsの間に発生したピーク値の10%以上の波高値をもつパルスに注目している。本報告では、dE/dt波形のS/N比が低いため、最大ピーク値の30%以上の波高値をもつパルスに着目した。

図3 Type A の電界波形及び電界時間微分波形

Fig. 3. An example of E-field and its time-derivative waveforms associated with “Type A” stroke.

(b) Time derivative of E-field

図4 Type B の電界波形及び電界時間微分波形

Fig. 4. An example of E-field and its time-derivative waveforms associated with “Type B” stroke.

−4〜1 μs の時間帯に、最大ピーク値の 30%以上の波高値をもつパルスが存在しない場合、その雷撃を Type A と分類する。図 3 に Type A 波形の一例を示す。また、最大ピーク時刻の $\pm 1 \mu\text{s}$ 以内に、該当するパルスが存在する場合、Type B と分類する。図 4 に Type B 波形の一例を示す。さらに、最大ピーク時刻の $\pm 1 \mu\text{s}$ 以内に該当するパルスが無く、−4〜−1 μs 間にパルスが存在する場合、その波形を Type C に分類する。図 5 に Type C 波形の一例を示す。

これらの時間微分波形の発生要因の解明は今後の課題の一つであるが、下向きに進展してきたリーダに対応した上向きのリーダの開始から帰還雷撃の開始まで短時間継続する、結合過程 (attachment process)⁽⁸⁾ にその原因となる現象が発生していると推定されている⁽⁹⁾。文献 (9) には、結合過程で、下向きに進展するリーダや海上から上向きに進展するリーダが間欠的に進展した場合や、同じく結合過程に枝分かれ等により複数の放電路が形成され、それらを帰還雷撃電流が流れた場合などが可能性のある要因として挙げられている。著者等は、前者は Type C の、後者は Type B の電界の時間微分波形が発生する要因となっているのではないかと考えている。

熱雷と界雷では雷性状が異なることが予測されるため、本論文では、雷撃点が海上にあり、陸上の伝搬距離が 385 m 以下で、かつ、熱雷に伴って発生した電界波形のみを解析対象とした。

〈3・3〉 負極性第一帰還雷撃 表 1 に、負極性第一雷撃について、タイプ別に分類された電界波形及び dE/dt 波形のパラメータを示す。また、文献 (9) で得られた値も表 1

(b) Time derivative of E-field

図5 Type C の電界波形及び電界時間微分波形

Fig. 5. An example of E-field and its time-derivative waveforms associated with “Type C” stroke.

の [] 内に示している。

2005 年に志布志で得られた結果と文献 (9) の結果を比べると、各タイプの発生頻度は 7%以下の差で一致している。電界波高値が雷撃点までの距離に逆比例すると仮定して雷

表 1 負極性第一雷撃の電界及び dE/dt 波形のパラメータ

Table 1. Parameters of E-field and dE/dt waveforms associated with negative first strokes.

		Type A	Type B	Type C
Frequency	number	75	110	83
	ratio[%]	[45]	[49]	[37]
100km E [V/m]	Average (Standard deviation)	15 (5.6)	20 (6.1)	19 (7.1)
	90%value	9.3	11	10
	50%value	13	18	16
	10%value	23	27	31
100km dE/dt [V/m/μs]	Average (Standard deviation)	32 (11)	33 (11)	32 (12)
	90%value	18	19	18
	50%value	32	31	31
	10%value	47	45	50
Distance [km]	Average	82	94	95
	(Standard deviation)	(33)	(32)	(32)

[]: Results in (9)

撃点までの距離に換算した電界（以下 100 km E と略記）を比較すると、Type B 及び Type C の 50% 値は Type A よりも 38% 及び 23% 各々大きくなり、これは文献 (9) と同様の傾向を示している。また、文献 (9) の結果と比較すると Type A の発生割合が減少し、波高値の大きい Type B や Type C の発生頻度が少し高くなっている。これは、100 km E が、著者の方が大きい事が原因の一つである。なお、著者らが解析対象とした雷撃の標定位置と観測局の平均的な距離は、文献 (9) のデータのものより長い為、志布志で得られた波高値の方が大きくなっている。

図 6 に、100 km に規格化した dE/dt ピーク値と、その雷撃点から観測局までの距離の関係を示している。また、図 7 は Type A の電界波形の立ち上がり時間と、雷撃点から観測局までの距離の関係を示している。立ち上がり時間は、電界ピーク値の 30% の値から 90% までの値を用いている。図 6 及び図 7 では、距離に対する依存性は殆ど認められない。しかし後述するように、陸上を 300 m から 385 m 伝搬した影響は無視できないため、解析対象の雷撃は、陸上伝搬による波形変歪をほぼ同程度受けていると考えられる。

図 8 に、Type A、Type B 及び Type C の電界ピーク値と dE/dt ピーク値の関係をj示している。Type A 及び Type B では、ある程度の相関が見られるのに対し、Type C では相関が認められない。両者の相関については、ファーストトランジション⁽¹⁴⁾に対応する単独のパルスのみで構成される Type A についてのみ、物理的な意味を見出すことができる。文献 (11) では、雷撃の電界ピーク値を dE/dt ピーク値で除した値を特徴的な立ち上がり時間と定義している。Type A の 75 例におけるこの特徴的な立ち上がり時間は約 220 ns であり、文献 (9) では志布志の結果より約 20% 短い 160 ns であったと報告されている。これは、著者らの測定システ

図 6 100 km に規格化した dE/dt ピーク値と、雷撃点から観測局までの距離の関係
Fig. 6. Peak dE/dt (range-normalized to 100 km) dependent on the range for 305 first strokes.

図 7 Type A に分類された電界波形の立ち上がり時間と雷撃点から観測局までの距離の関係
Fig. 7. Rise time associated with “Type A” strokes, dependent on the range.

図 8 負極性第一雷撃の電界ピーク値と dE/dt ピーク値

Fig. 8. Peak E vs. the (dominant) peak dE/dt for negative first strokes waveforms.

ムのサンプリング時間間隔が長いことや、電磁波が海岸から観測点まで 300～375 m 陸上を伝搬した事による影響が原因と考えられる。

〈3・4〉 負極性後続雷撃 表 2 に、負極性後続雷撃のタイプ別に求めた発生頻度及び 100 km E の 50% 値を、先行する負極性第一雷撃の結果とともに示す。負極性第一雷撃が Type A 以外を含む割合が高くて、それに続く後続雷撃は 90% 以上が Type A となり、Type B や Type C のような波形はまれである。これは、第一雷撃及び後続雷撃の結合過程の相違を反映したものと考えられる。データ数が

表 2 負極性後続雷撃の電界及び dE/dt 波形
パラメータ

Table 2. Parameters of E-field and dE/dt waveforms associated with negative subsequent strokes.

		Type A	Type B	Type C
Frequency	number	40[16]	2 [9]	2 [8]
	ratio[%]	91[48]	4.6 [27]	4.6 [24]
100km E [V/m]	Average (Standard deviation)	8.9 (3.4)	—	—
	50%value	8.8 [14]	—	—
Distance [km]	Average (Standard deviation)	38 [37] (18)	—	—

[]: Data for preceding first strokes

図 9 負極性後続雷撃における 100 km dE/dt ピークと雷撃点から観測局までの距離の関係

Fig. 9. Peak dE/dt (range-normalized to 100 km) dependent on the range for all 44 negative subsequent strokes.

図 10 電界波形の立ち上がり時間と雷撃点から観測局までの距離

Fig. 10. Rise time dependent on the range for negative subsequent strokes in our dataset.

全体で 44 例と少なく、Type B 及び Type C は 2 例しか得られなかったため電界波高値に関する統計的な信頼性は低いため、表には値を示していない。

図 9 及び図 10 に、負極性後続雷撃の雷撃点から観測局までの距離と 100 km dE/dt の関係及び立ち上がり時間の関係を示す。第一雷撃と同様、雷撃点の距離と dE/dt ピーク及び立ち上がり時間に相関はほとんど見られない。

図 11 に、負極性後続雷撃の Type A における電界ピーク値と dE/dt ピーク値の関係を示す。先に述べた特徴的な立

図 11 負極性後続雷撃の Type A における電界ピーク値と dE/dt ピーク値の関係

Fig. 11. Peak E vs. the (dominant) peak dE/dt for Type A negative subsequent strokes waveforms.

表 3 正極性第一雷撃の電界波形及び dE/dt 波形のパラメータ

Table 3. Parameters of E-field and dE/dt waveforms associated with positive first strokes.

		Type A	Type B	Type C
Frequency	number	43	8	3
	ratio[%]	80	15	5.6
100km E [V/m]	Average (Standard deviation)	19 (9.6)	—	—
	50%value	16	—	—
Distance [km]	Average (Standard deviation)	92 (19)	—	—

ち上がり時間は 221 ns と、第一雷撃のものとほぼ一致した。

〈3・5〉 正極性第一雷撃 表 3 に、正極性第一雷撃の統計値を示す。正極性雷撃についても、発生頻度は Type A が 80% と大部分を占める。Type B や Type C のデータ数が各々 8 例及び 3 例と少なく、100 km E 等に関する統計的な信頼性は低いため、表には値を示していない。

図 12 及び図 13 に、正極性雷撃の雷撃点から観測局までの距離と 100 km dE/dt ピーク値及び立ち上がり時間の関係を示す。図 12 では R^2 が他の例よりも多少大きく、両者に正の相関が見受けられるが、図 13 の電界波形の立ち上がり時間と雷撃点から観測局までの距離には有意な相関は認められない。測定系は電界の絶対値が基準値を超えた時点でトリガしているので、トリガレベル付近にピーク値をもつデータを、雷撃点までの距離が 100 km の場合に換算した場合には、雷撃点までの距離が長いほど換算した波高値は大きくなる。正極性雷撃で対象としたデータには、トリガレベル付近にピーク値をもつ例が多い上に、立ち上がり時間は伝搬距離の影響を殆ど受けなかったため、雷撃点から観測局までの距離と 100 km dE/dt ピーク値の正の相関が多少強くなったと考えられる。海上を伝搬することで高周波成分が減衰することの影響であれば、負の相関が認められるはずである。

図 14 に、正極性第一雷撃の Type A に分類された電界ピーク値と dE/dt ピーク値の関係を示す。先に述べた特徴

図 12 正極性第一雷撃の 100 km dE/dt ピーク値と雷撃点から観測局までの距離の関係

Fig. 12. Peak dE/dt (range-normalized to 100 km) dependent on the range for 54 positive first strokes.

図 13 正極性雷撃における電界波形の立ち上がり時間と雷撃点から観測局までの距離の関係

Fig. 13. Rise time dependent on the range for 54 positive strokes.

的な立ち上がり時間は 292 ns となり、負極性雷撃に対するものよりも大きい値となった。これは、正極性雷撃に伴って発生した電界波形では、負極性雷撃と比較して立ち上がり時間が長いことが反映されていると考えられる。

以上の検討の結果、dE/dt 波形の最大ピーク時刻付近に別のパルスが存在する雷撃 (Type B と Type C) は、負極性第一雷撃では 70% に達するものの、負極性後続雷撃では 9%、正極性雷撃では 20% と低い値になり、負極性第一雷撃に関しては、これらの雷撃の電界のピーク値は、最大ピーク時刻付近に別のパルスが存在しない Type A よりも、100 km に規格化した電界ピーク値は 10~30% 大きくなる事が判明した。また、これらの結果に海上を電磁波が伝搬することによる高周波成分の減衰が及ぼす影響は殆ど認められなかった。

落雷位置標定システムでは、観測された磁界波形の波高値から電流波高値を推定するため¹⁾、電磁界の波高値が大きい Type B や Type C の雷撃電流波高値が大きく推定されることになる。JLDN で推定された南九州の南東海域への負極性第一雷撃で陸上への雷撃よりも電流値が大きく推定され、負極性後続雷撃や正極性雷撃でこの傾向が認められないのは、負極性後続雷撃や正極性雷撃では発生割合の低い Type B や Type C の電界波形の発生頻度が負極性第一雷

図 14 正極性第一雷撃の Type A における、電界ピーク値と dE/dt ピーク値の関係

Fig. 14. Peak E vs. the (dominant) peak dE/dt for positive Type A strokes.

撃では高いことが原因の一つと考えられる。前述したように、Type A、Type B 及び Type C の電界波形の発生には、下向きのリーダと上向きの放電との結合過程 (attachment process) で発生する現象が関連するものと推定されているため、海上と陸上への負極性第一雷撃で落雷位置標定システムの電流値が異なるのは、物理的には結合過程に一因がある事が示されたと考えている。

4. 結 言

九州南部で発生する雷の電流波高値を、JLDN により得られた結果に基づいて検討すると共に、海上への雷撃に伴って発生した電界波形の特徴について調査した。この結果、以下のような知見が得られた。

(1) 2006 年に南九州で発生した雷撃の推定電流波高値を解析した結果、負極性第一雷撃の電流波高値は、陸上よりも海上の方が 13% 大きいという結果を得た。一方、負極性後続雷撃及び正極性雷撃には、陸上と海上で推定電流値に有意な差は認められなかった。これは、アメリカ南部及び東部の雷に関する NLDN の測定結果と同様の傾向であった。

(2) 志布志湾沿岸の海上に発生した負極性第一帰還雷撃に伴う垂直電界波形を解析した結果、dE/dt 波形の最大ピーク時刻付近に別のパルスが存在する雷撃が全体の約 70% あり、これらの 100 km に規格化した電界ピーク値は、パルスが発生していない雷撃に比べて 10~30% 大きかった。これは文献 (9) と同様の傾向である。

(3) 負極性後続雷撃及び正極性雷撃に伴う垂直電界波形を解析したものうち、dE/dt 波形の最大ピーク時刻付近に別のパルスが存在する雷撃はほとんど存在しないことが分かった。

(4) 以上の検討から、落雷位置標定システムにより南九州の南東海域で得られた負極性第一雷撃でのみ、陸上への雷撃よりも電流値が大きく推定されるのは、負極性後続雷撃や正極性雷撃では発生割合が低く、結合過程にその発生原因があると考えられる、最大ピーク時刻付近に別のパ

ルスが存在する電界の時間微分波形の発生頻度が負極性第一雷撃では高いことが原因の一つと考えられる。

(平成 19 年 2 月 27 日受付, 平成 19 年 5 月 23 日再受付)

文 献

- (1) K.L. Cummins, M.J. Murphy, E.A. Bardo, W.L. Hiscox, R.B. Pyle, and A.E. Pifer: "A combined TOA/MDF technology upgrade of the U. S. National Lightning Detection Network", *J. Geophys. Res.*, Vol.103, No.D8, pp.9035–9044 (1998)
- (2) K.L. Cummins, E.P. Krider, and M.D. Malone: "The US National Lightning Detection Network and applications of cloud-to-ground lightning data by electric power utilities", *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*, Vol.EMC-40, pp.465–480 (1998)
- (3) W. Schulz, K.L. Cummins, G. Diendorfer, and M. Dorninger: "Cloud-to-ground lightning in Austria: A 10-year study using data from a lightning location system", *J. Geophys. Res.*, Vol.110, No.D09101, doi:10.1029/2004JD005332 (2005)
- (4) T. Suda, T. Shindo, S. Yokoyama, S. Tomita, A. Wada, A. Tanimura, N. Honma, S. Taniguchi, M. Shimizu, T. Sakai, Y. Sono, K. Yamada, M. Komori, K. Ikesue, and K. Toda: "Lightning Occurrence Data Observed with Lightning Location System Operated by Power Utilities in Japan", International Conference on Lightning Protection (ICLP), No.2b.3, pp.111–116 (2002)
- (5) N. Honma, F. Suzuki, Y. Miyake, M. Ishii, and S. Hidayat: "Propagation Effect on field waveforms in relation to time-of-arrival technique in lightning location", *J. Geophys. Res.*, Vol.103, No.D12, pp.14141–14145 (1998)
- (6) K. Shinjo, T. Wakai, T. Sakai, and M. Ishii: "Accuracy of LLP system and lightning frequency map evaluated from transmission line faults", *T. IEE Japan*, Vol.117-B, No.11, pp.1448–1457 (1997-11) (in Japanese)
新庄一雄・岩井武夫・酒井 勉・石井 勝:「落雷位置標定システムの精度と落雷頻度マップの送電線トリップ事故に基づく評価」, 電学論 B, **117**, 11, pp.1448–1457 (1997-11)
- (7) K.L. Cummins, J.A. Cramer, W.A. Brooks, and E.P. Krider: "On the effect of land: Sea and other earth surface discontinuities in LLS-Inferred lightning parameters", VIII International Symposium on Lightning Protection (2005)
- (8) V.A. Rakov and M.A. Uman: Lightning physics and effects, p.137, Cambridge University Press, Cambridge (2003)
- (9) N.D. Murray, E.P. Krider, and J.C. Willett: "Multiple pulses in dE/dt and the fine-structure of E during the onset of first return strokes in cloud-to-ocean lightning", *Atmospheric Research*, Vol.76, pp.455–480 (2005)
- (10) J.C. Willett, E.P. Krider, and C. Leticinturier: "Submicrosecond field variations during the onset of first return strokes in cloud-to-ground lightning", *J. Geophys. Res.*, Vol.103 No.D8, pp.9027–9034 (1998)
- (11) J.C. Willett and E.P. Krider: "Rise times of impulsive high-current processes in cloud-to-ground lightning", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol.AP-48, pp.1442–1451 (2000)
- (12) M. Ishii, M. Saito, F. Fujii, J. Hojo, M. Matsui, N. Itamoto, and K. Shinjo: "LEMP from Lightning Discharges Observed by JLDN", *IEEJ Trans. PE*, Vol.125, No.8, pp.765–770 (2005)
- (13) K. Michishita, T. Ochiai, and K. Ikesue: "Estimation of lightning current parameters based in measured electric field", IWHV2004, ED-04-139, SP-04-51, HV-04-81 (2004)

- (14) C.D. Weidman and E.P. Krider: "The fine structure of lightning return stroke wave forms", *J. Geophys. Res.*, Vol.83, No.C12, pp.6239–6247 (1978)

道 下 幸 志 (正員) 1962 年 9 月 24 日生。1991 年 3 月東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻博士課程終了。工学博士。同年 4 月静岡大学助手, 1994 年 4 月同助教授, 現在に至る。主として, 雷に起因する環境電磁工学に関する研究に従事。IEEE, AGU Member., 日本大気電気学会, 電気設備学会会員。

長 綱 望 (学生員) 1981 年 7 月 27 日生。2006 年 3 月静岡大学工学部電気・電子工学科卒業。同年 4 月静岡大学大学院工学研究科入学, 現在に至る。主として, 雷性状に関する研究に従事。

村 上 智 允 (正員) 1982 年 9 月 8 日生。2005 年 3 月静岡大学工学部電気電子工学科卒業。2007 年 3 月静岡大学大学院工学研究科修了, 現在に至る。主として, 雷性状に関する研究に従事。

原 田 貴 司 (正員) 1965 年 4 月 7 日生。1988 年 3 月九州工業大学工学部電気工学科卒業。同年 4 月九州電力(株)入社。現在, 同社総合研究所勤務。主として, 配電線の信頼性向上に関する研究に従事。