帰還雷撃に伴う電磁界波形の特徴の再現

学生員 宮崎 悟* 正員 石井 勝*
 正員 馬場 吉弘**

Reproduction of Features of Electromagnetic Field Waveforms Associated with Lightning Return Stroke

Satoru Miyazaki*, Student Member, Masaru Ishii*, Member, Yoshihiro Baba**, Member

A lightning return stroke model is indispensable in calculating electromagnetic field associated with a return stroke. A lot of return stroke models have been proposed, however, no model has ever succeeded in reproducing all the features of typical electromagnetic field waveforms at various distances. In this paper, two return stroke models are proposed. One is a Transmission-Line type model, and the other is modification of Diendorfer-Uman model. These models successfully reproduce all the features of typical electromagnetic field observed on ground.

キーワード：雷，帰還雷撃モデル，LEMP
Keywords: lighting, return stroke model, LEMP

1. はじめに

帰還雷撃モデルは，雷放電路上の電流とそれに伴う電磁界変化を結びつけるものであり，配電線や通信線の故障の原因となる誘導雷の解析⁽¹⁾や落雷位置標定システムにおける電流波高値の推定⁽²⁾にも用いられている。Rakov らは帰還雷撃モデルを物理モデル，分布定数回路モデル，電磁界モデル，工学モデルに分類している⁽³⁾。この中で工学モデルは，任意の位置（高さ）における電流波を地表での電流波形に関連付けた簡単な式で表現したものであり，帰還雷撃電流の波高値推定や誘導雷解析に広く用いられているのみでなく，雷放電路の構造解明という目的にとっても有用なモデルである。工学モデルは，帰還雷撃に伴う典型的な電磁界波形の特徴を再現するか否か調べることで評価が行われてきた⁽⁴⁾⁽⁵⁾。帰還雷撃に伴う全ての電磁界波形の特徴を再現することは，工学モデルにおける大きな目標となっている。しかし，そのようなモデルは未だ提案されていない⁽⁴⁾⁽⁵⁾。本論文では，帰還雷撃に伴う典型的な電磁界波形の全ての特徴を再現する工学モデルを2種提案する。

2. 従来の工学モデル

工学モデルを用いた電磁界計算では，一般に図1に示すような垂直な雷放電路を仮定する。位置（高さ） z の微小区間 dz を流れる電流 $i(z, t)$ によって発生する電磁界は，大地が完全導体平面であると仮定して(1)，(2)式を用いて計算できる⁽⁶⁾。

$$dB_{\phi} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\frac{\sin \theta}{r^2} i(z, t - r/c) + \frac{\sin \theta}{cr} \frac{\partial i(z, t - r/c)}{\partial t} \right] dz \dots\dots\dots (1)$$

図1 幾何学的位置関係
 Fig. 1. Geometry of the system.

* 東京大学生産技術研究所
 〒155-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1
 Institute of Industrial Science, University of Tokyo
 4-6-1, Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153-8505
 ** 同志社大学工学部
 〒610-0321 京田辺市多々羅都谷 1-3
 Faculty of Engineering, Doshisha University
 1-3, Miyakodani, Tatara, Kyotanabe 610-0321

$$dE_z = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left[\frac{2-3\sin^2\theta}{r^3} \int_0^t i(z, \tau - r/c) d\tau + \frac{2-3\sin^2\theta}{cr^2} i(z, t - r/c) - \frac{\sin^2\theta}{c^2r} \frac{\partial i(z, t - r/c)}{\partial t} \right] dz \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 r は微小区間と電磁界観測点の距離、 θ は観測点と微小区間を結ぶベクトルが鉛直方向に対する角、 ϵ_0 は真空の誘電率、 μ_0 は真空の透磁率、 c は光速である。

現在までに提案されている工学モデルは、伝送線路型モデルと放電型モデルに大別される⁽³⁾。それらの概念図を図2に示す。伝送線路型モデルは、地表に電流源を置き、電流波が上方へ伝搬していくモデルである。電流波の伝搬過程において、減衰も変歪もせず伝搬するモデルが伝送線路(TL)モデル⁽⁶⁾である。TLモデルは、伝搬に伴う減衰および変歪を考慮して様々な改良が加えられている⁽⁵⁾⁽⁷⁾。一方、放電型モデルは、リーダに蓄積されていた電荷が雷放電路の地上端から上昇する帰還雷撃電流波の波面の到達と共に拘束

図2 伝送線路型モデルと放電型モデルの概念図
Fig. 2. Schematic illustration of TL-type and discharge-type model.

を解かれ、光速で下向きに移動し電流となるモデルである。TCSモデル⁽⁸⁾では帰還雷撃の到達と共に遅滞無く電荷が拘束を解かれる。またDUモデル⁽⁹⁾では、帰還雷撃の到達と共に遅れ時間をもって電荷が拘束を解かれる。各種モデルの特徴と電流波の数式的表現をまとめたものを表1に示す。

工学モデルに対する評価は、典型的な帰還雷撃電流波形を入力としたときに、観測されている典型的な電磁界波形の主要な特徴を再現できるか調べることによって行われている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。評価に用いられる典型的な電磁界波形の特徴としては、Linらによる自然雷後続雷撃に伴う電磁界多点同時観測結果⁽¹⁰⁾(図3(a)~(c))より、以下の4つが挙げられている。

- (1) 電界、磁界ともに鋭い初期ピークがある(1 km程度以遠ではピークの大きさは距離に反比例する)(図3(a), (b), (c))
- (2) 数 km の距離の電界が初期ピーク後 100 μ s 程度の間直線的に増加する(図3(a))
- (3) 数 km の距離の磁界が初期ピーク後緩やかなピーク(hump)をもつ(図3(b))
- (4) 50 ~ 200 km の距離の電磁界が初期ピークの後数十 μ s でゼロレベルを横切る(図3(c))

また、近年のロケット誘雷技術を用いた観測により、雷

図3 後続帰還雷撃に伴う典型的な電磁界波形⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾
Fig. 3. Typical electromagnetic field waveforms associated with subsequent lightning return strokes⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾.

表1 各種工学モデルの特徴と数式的表現

Table 1. Summary of features and mathematical representation for some return stroke models.

Category	Model	Features	Mathematical representation
Transmission Line type	TL ⁽⁶⁾	No decay or distortion.	$i(z, t) = i(0, t - z/v_f)$
	MTLL ⁽⁷⁾	Linear decay with height	$i(z, t) = i(0, t - z/v_f) \times (1 - z/H)$
	MTLE ⁽⁷⁾	Exponential decay with height	$i(z, t) = i(0, t - z/v_f) \times \exp(-z/\lambda)$
	MTLD ⁽⁵⁾	Decay and distortion with height	$i(z, t) = i(0, t - z/v_f) \left[1 - \exp\left(-\frac{t - z/v_f}{\tau} \frac{\lambda_p}{z}\right) \right] \left(1 - \frac{z}{H_p} \right)$
Discharge type	TCS ⁽⁸⁾	Charge flows into channel instantly	$i(z, t) = i(0, t + z/c)$
	DU ⁽⁹⁾	Charge flows into channel with delay	$i(z, t) = i(0, t + z/c) - i(0, z/v_f + z/c) \times \exp\left(-\frac{t - z/v_f}{\tau_d}\right)$

z is coordinate along the channel, t is time, v_f is return stroke propagation speed, H is a parameter for MTLL model represents linear current decay, λ is a parameter for MTLE model represents exponential current decay, λ_p is a parameter for MTLD model represents current distortion, H_p is a parameter for MTLD model represents linear decay, τ is a time constant for MTLD model, c is speed of light, and τ_d is a discharge time constant for DU model.

図 4 工学モデルの評価に用いられた電流波形⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽¹³⁾

Fig. 4. Assumed channel-base current waveforms for validation of engineering models⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽¹³⁾.

表 2 各モデルによる後続雷撃に伴う電磁界波形の特徴の再現性の良否⁽⁴⁾⁽⁵⁾

Table 2. Ability of six models to reproduce major features of typical electromagnetic field associated with subsequent return stroke⁽⁴⁾⁽⁵⁾.

		Near—Far				
Feature		(5)	(1)	(2)	(3)	(4)
distance		50	5	5	5	100
		m	km	km	km	km
Transmission Line Type	TL ⁽⁶⁾	×	○	×	○	×
	MTLL ⁽⁷⁾	○	○	○	×	○
	MTLE ⁽⁷⁾	×	○	○	×	○
	MTLD ⁽⁵⁾	○	○	○	×	○
Discharge type	TCS ⁽⁸⁾	○	○	○	○	×
	DU ⁽⁹⁾	○	○	○	○	×

撃点から至近距離の電界において、次の特徴が報告されている⁽¹¹⁾。

(5) 50～100 m の距離で観測された電界には、平坦となる時間帯がある(図 3(d))。

Nucci ら⁽⁴⁾、Baba ら⁽⁵⁾は、図 4 に示すような電流波形を入力とし、各モデルを用いて計算された電磁界が上記 5 つの特徴を満足するかどうか検討した。電流波形は、Heidler 関数⁽⁸⁾と二重指数関数の和として表され、Berger⁽¹²⁾らがスイスの高構造物雷撃で観測した後続雷撃の平均的な波形を模擬したものである。これらの検討結果をまとめたものを、表 2 に示す。表 2 は、Nucci ら、Baba らの検討結果を、雷撃点からの距離が近い順に並べている。TCS および DU モデルは、遠方電磁界がゼロレベルを切る特徴のみを再現していないが、Thottappillil らは、Nucci らおよび Baba らが用いた電流波形と僅かに異なる電流波形(図 4)を入力とした時、TCS および DU モデルがこの特徴も再現することを示している⁽¹³⁾。しかし、入力電流波形の微細な差異によらず全ての特徴を再現するモデルは未だ提案されていない。

3. 提案モデル

3.1 雷放電路上の電流分布の検討 表 2 より、雷撃点に近い距離における電磁界波形の特徴は放電型モデル

が、雷撃点から遠い距離における電磁界波形の特徴は伝送線路型モデルが良く再現していることがわかる。雷放電路上の微小区間 dz を流れる電流によって発生する電磁界は、(1)、(2) 式に示されるように電磁界観測点までの距離にもなって減衰する。雷撃点近傍では、雷放電路上部までの距離が下部までの距離に比べて十分大きいので、雷放電路上部の電流による電磁界への寄与はほとんど無く、雷放電路上部を流れる電流によって電磁界が決定されと考えられる。一方遠方では、雷放電路上部までの距離は下部までの距離とあまり変わらないため、電磁界は上部を流れる電流の影響も受ける。従って、実際の雷放電路上の電流分布は、下部では雷撃点近傍の電磁界波形の特徴をよく再現する放電型モデルに似ており、上部では遠方電磁界の特徴をよく再現する伝送線路型モデルに似ていると考えられる。

図 5 に、各種モデルにおける電流波の波高値と 0–100% 立ち上がり時間の雷放電路上の位置に伴う変化を示す。この時各種パラメータは、Nucci ら、Baba らが用いた値と同じものを用いた⁽⁴⁾⁽⁵⁾。放電型(DU)モデルでは雷放電路上部で急激に電流波が減衰し、同時に急激に立ち上がり時間が増加(変歪)している。他方、雷放電路上部において伝送線路型(MTLL, MTLE, MTLD)モデルは放電型モデルより減衰が大きい。

以上の検討により、雷放電路上部で電流波が急激に減衰および変歪し、雷放電路上部でも大きな減衰を続けるモデルは、帰還雷撃に伴う典型的な電磁界波形の特徴を再現すると考えられる。その例として MTLD モデルのパラメータを変更した伝送線路型モデルと、DU モデルを改良した放電型モデルを提案する。

3.2 MTLD モデルのパラメータの変更 伝送線路型モデルを、雷放電路上部で電流波が急激に減衰および変歪するよう改良することを考える。伝送線路型モデルの中で、電流波の変歪を考慮するモデルは唯一 MTLD モデルのみである。MTLD モデルは、電流波高値の線形な減衰と立ち上がり時間の線形な増加をほぼ独立に定めることができるモデルで、電流波が λ_p だけ伝搬すると電流波の立ち上がり時間がほぼ $0.7 \mu s$ 増加する。文献(5)で用いられている $\lambda_p = 1000 \text{ m}$ では、雷放電路上部で電流波形がほとんど変歪せず、放電型モデルとはかけ離れる。そこで、提案モデルでは雷放電路上部での変歪を大きくするために λ_p を極端に小さくする。この急激な変歪によって、電流波の波頭部分がなくなることから、同時に雷放電路上部での急激な電流波の減衰も実現される。このモデルは、文献(5)のパラメータを用いたモデル(MTLD1)に対して MTLD2 として参照する。MTLD2 においては、雷放電路上部での急激な電流波の減衰と変歪を実現するために $\lambda_p = 50 \text{ m}$ とした。 H_p は、文献(5)と同じ 9000 m とした。図 6 に、MTLD2 モデルの電流波高値と立ち上がり時間の雷放電路上の位置による変化を示す。

3.3 DU モデルの改良 放電型モデルである DU モデルを雷放電路上部でも電流波が減衰を続けるよう改良す

(a) Current peak (0-7.5 km range)

(b) Current peak (0-0.5 km range)

(c) 0-100% current rise-time (0-7.5 km range)

(d) 0-100% current rise-time (0-0.5 km range)

図5 各モデルにおける電流波高値, 0-100% 立ち上がり時間の雷放電路上の位置による変化
 Fig. 5. Variation of current peak and 0-100% current rise-time dependent on height for each model.

(a) Current peak (0-7.5 km range)

(b) Current peak (0-0.5 km range)

(c) 0-100% current rise-time (0-7.5 km range)

(d) 0-100% current rise-time (0-0.5 km range)

図6 提案モデルにおける電流波高値, 0-100% 立ち上がり時間の雷放電路上の位置による変化
 Fig. 6. Variation of current peak and 0-100% current rise-time dependent on height for proposed models.

る。このことは DU モデルに雷放電路上部では減衰せず、雷放電路上部で減衰するような項を加えることで実現できる。提案モデルの要求は、例えば (3) 式で実現できる。

$$i(z, t) = i_{DU}(z, t) \times \left[1 - \exp \left\{ - \left(\frac{\lambda_d}{z} \right)^n \right\} \right] \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 $i_{DU}(z, t)$ は DU モデルにおける電流、 λ_d

は減衰を表す定数, n は定数である。
このモデルは以降, Modified DU model with additional Decay (MDUD) とする。MDUD モデルにおいて, 雷放電路下部での減衰が大きくなりすぎて他の電磁界波形の特徴を

図7 MDUD モデルにおいて付加された減衰関数
Fig. 7. Attenuation function for MDUD model.

再現できなくなることがないように, $\lambda_d = 5000$ m および $n = 2$ とした。このときの減衰関数を図 7 に示す。また, 図 6 に MDUD モデルの電流波高値と立ち上がり時間の雷放電路上の位置による変化を示す。MDUD モデルの電流波高値は高さ 2 km 付近でやや不自然な変化をしているが, これは単に提案モデルの減衰項を簡単な関数形で表現しようとしたためで重要ではない。

4. 電磁界計算結果および検討

以上の提案モデルと, MTLD1 および DU モデルを用いて計算された $d = 50$ m, 5 km, 100 km における電磁界波形を図 8 に示す。提案モデルのパラメータは前節で示したものをを用いた。また, 帰還雷撃は一定速度 v_f で上方に伝搬するものとし, その速度は Nucci ら⁽⁴⁾, Baba ら⁽⁵⁾ と同様に光学観測の結果⁽¹⁴⁾ から 130 m/ μ s とした。提案した 2 種のモデルは, いずれも典型的な帰還雷撃に伴う電磁界波形の全ての主要な特徴を再現している。なお, 図 3 の遠方電

図8 提案モデルを用いて計算された 50 m, 5 km, 100 km 地点における電磁界波形
Fig. 8. Calculated electromagnetic field waveforms at 50 m, 5 km, and 100 km, using proposed models.

磁界波形例の $20\mu\text{s}$ 付近に現れている shoulder と呼ばれる小さなピークは、MDUD モデルでよく再現されており、この特徴と電流分布の係に手がかりを与えている。なお、shoulder はいつも実測波形に顕著に現れるわけではない。

図 6 に示したように、両提案モデルは、雷放電路上部で急激に電流波が減衰および変歪し、雷放電路上部でも引き続き DU モデルより急速に減衰を続ける。しかし、立ち上がり時間は雷放電路上部になるほど両モデルで大きく異なっている。この雷放電路上部の立ち上がり時間は、地上で観測される電磁界波形の特徴にはあまり影響しない。

DU モデルを雷放電路上部で電流波が減衰を続けるよう改良することで、DU モデルの弱点であった遠方電磁界波形がゼロレベルを切る特徴が再現された。このことからこの特徴は、雷放電路上部で電流波が DU モデルよりも大きく減衰していることを示唆している。

TCS モデルを仮定すると、位置 z に蓄積されていた電荷が移動することによる電流は、帰還雷撃開始から帰還雷撃電流波面が z だけ進む時間 (z/v_f) と電荷が地表に達するまでの時間 (z/c) だけ遅れて地表で観測されるので、地表における電流には、時刻 $t = z/v_f + z/c$ に反映される。従って、雷放電路上の位置 z における電流波高値は、この時刻の地表の電流値によって決定される。DU モデルもほぼ同様である。従って放電型モデルでは、地表での電流波の波尾長が短い場合、雷放電路上部での電流波高値は小さくなる。すなわち雷放電路上部で大きく減衰する。Thottappillil ら⁽¹³⁾ はこの性質を利用し、波尾の短い電流波形を入力として、放電型モデルでも遠方電磁界がゼロレベルを切る特徴を再現できることを示した。しかし、Berger ら⁽¹²⁾ の観測結果では、約 75% の後続雷撃電流の波尾長は Thottappillil らが用いた $20\mu\text{s}$ よりも長い。今回提案したモデルは、標準的な波尾長 $32\mu\text{s}$ の電流波形に対して、遠方電磁界がゼロレベルを切る特徴を再現できる。

提案モデルでは、帰還雷撃速度を一定とした。しかし、文献(14)の観測では、雲底での帰還雷撃速度は雷放電路上部より 25% 程遅くなっている。3・1 節の検討から、その雷放電路上部の電磁界波形への影響は小さく、遠方の電磁界で、帰還雷撃が雷放電路上部に達した後の波尾部分へ影響することがわかる。しかし、観測された程度の速度変化では、電磁界がゼロレベルを切る時間が少し早くなる程度で、帰還雷撃速度を一定としても、本論文で検討した電磁界波形の再現性に関しては影響しない。

地上での雷電流と発光強度波形はピークまではよく一致し、地上の雷電流波高値とそれに伴う発光強度ピーク値の間には比例関係があるが、その後は発光強度のほうが早く減衰することが報告されている⁽¹⁵⁾。このことから、雷放電路上部では電流波の立ち上がり時間が長くなるにしたがい、雷電流と発光強度のピークが比例しなくなる可能性がある。比較可能な雷放電路上部 100 m 程の領域においては、提案モデルの電流波高値および立ち上がり時間の高度変化は、発光強度のピーク値と立ち上がり時間の変化の実測⁽¹⁶⁾ と概

ね一致する。

5. ま と め

本論文では、工学モデルの一つの大きな目標になっている、帰還雷撃に伴い地表で観測される典型的な電磁界波形の全ての特徴を、電流波の減衰と変歪を定量的に考慮した帰還雷撃モデルで再現できることを示した。計算される電磁界波形を典型的な観測波形と比較することにより、雷放電路上部数百 m では電流波が急激に減衰、変歪し、上部でも緩やかに減衰を続けると推論される。このことから、雷放電路上部での急激な電流波の減衰と変歪を含む伝送線路型モデル、電流波が雷放電路上部においても減衰する放電型モデルの 2 種を新たに提案し、観測される電磁界波形の全ての特徴を再現できることを確認した。雷放電路上部でのモデル上の電流波の減衰、変歪の様相は、発光強度から推測される電流波の減衰、変歪とおおむね一致する。

(平成 16 年 7 月 23 日受付、平成 16 年 11 月 22 日再受付)

文 献

- (1) K. Michishita and M. Ishii: "Analysis of Observed Lightning-Induced Voltage by Taking Account of Horizontal E-Field", *T. IEE Japan*, Vol.120-B, No.10, pp.1304-1308 (2000-10) (in Japanese)
道下幸志・石井 勝:「実雷撃に伴って観測された誘導電圧の水平電界を考慮した解析」, 電学論 B, **120**, 10, pp.1304-1308 (2000-10)
- (2) V.P. Idone, A.B. Saljoughy, R.W. Henderson, P.K. Moore, and R.B. Pyle: "A Reexamination of the Peak Current Calibration of the National Lightning Detection Network", *J. Geophys. Res.*, Vol.98, No.D10, pp.18323-18332, (1993-10)
- (3) V.A. Rakov and M.A. Uman: "Review and Evaluation of Lightning Return Stroke Models Including Some Aspects of Their Application", *IEEE Trans. Electromag. Compatibility*, Vol.40, No.4, pp.403-426 (1998-11)
- (4) C.A. Nucci, G. Diendorfer, M.A. Uman, F. Rachidi, M. Ianoz, and C. Mazzetti: "Lightning Return Stroke Current Models with Specified Channel-Base Current: A Review and Comparison", *J. Geophys. Res.*, Vol.95, No.D12, pp.20395-20408 (1990-11)
- (5) Y. Baba and M. Ishii: "Lightning Return Stroke Model Incorporating Current Distortion", *IEEE Trans. Electromag. Compatibility*, Vol.44, No.3, pp.476-478 (2002-8)
- (6) M.A. Uman, D.K. McLain, and E.P. Krider: "The Electromagnetic Radiation from Finite Antenna", *Ame. J. Phys.*, Vol.43, pp.33-38 (1975-1)
- (7) V.A. Rakov and A.A. Dulzon: "A Modified Transmission Line Models for Lightning Return Stroke Field Calculation", Proc. 9th Int. Symp. EMC, pp.229-235, Zurich, Switzerland (1991)
- (8) F. Heidler: "Traveling current source model for LEMP calculation", Proc. 6th Int. Zurich Symp. Electromagnetic Compatibility, pp.157-162, Zurich, Switzerland (1985-3)
- (9) G. Diendorfer and M.A. Uman: "An Improved Return Stroke Model with Specified Channel Base Current", *J. Geophys. Res.*, Vol.95, No.D9, pp.13621-13644 (1990-8)
- (10) Y.T. Lin, M.A. Uman, J.A. Tiller, R.D. Brantley, W.H. Beasley, E.P. Krider, and C.D. Weidman: "Characterization of Lightning Return Stroke Electric and Magnetic Fields from Simultaneous Two-Station Measurements", *J. Geophys. Res.*, Vol.84, No. pp.6307-6314 (1979-10)
- (11) M.A. Uman, V.A. Rakov, K.J. Rambo, T.W. Vaught, M.I. Fernandez, D.J. Cordier, R.M. Chandler, R. Bernstein, and C. Golden: "Triggered- Lightning Experiments at Camp Blanding, Florida (1993-1995)", *T. IEE Japan*, Vol.117-B, No.4, pp.446-452 (1997-4)
- (12) K. Berger, R.B. Anderson, and H. Kuroninger: "Parameters of Lightning Flashes", *Electra*, No.41, pp.22-37 (1977)
- (13) R. Thottappillil, M.A. Uman, and G. Diendorfer: "Influence of Channel Base Current and Varying Return Stroke Speed on the Calculated Fields of Three Important Return Stroke Models", Proc. Int. Conf. Lightning Static Electricity, pp.118.1-118.9, Cocoa Beach, FL (1991-4)

-
- (14) V.P. Idone and R.E. Orville: "Lightning Return Stroke Velocity in the Thunderstorm Research International Program (TRIP)", *J. Geophys. Res.*, Vol.87, No. C7, pp.4903-4915 (1982-6)
- (15) D. Wang, N. Takagi, T. Watanabe, V.A. Rakov, M.A. Uman, K.J. Rambo, and M.V. Stapleton: "A comparison of channel-base currents and optical signals for rocket-triggered lightning strokes", *Proc. 12th Int. Conf. on Atmospheric Electricity*, pp.557-560, Versailles, France (2003-6)
- (16) D. Wang, N. Takagi, X. Liu, T. Watanabe, and A. Chihara: "Luminosity Characteristics of Multiple Dart Leader/Return Stroke Sequence Measured With a High-Speed Digital Image System", *Geophys. Res. Lett.*, Vol.31, doi:10.1029/2003GL018613 (2004)

宮 寄 悟 (学生員) 1977 年 8 月 26 日生。2001 年 3 月東京大学工学部電気工学科卒業。2003 年 3 月東京大学大学院工学系研究科修士課程修了。同年 4 月博士課程に進学。現在に至る。雷放電に関する研究に従事。2003 年度電気学会論文発表賞。

石 井 勝 (正員) 1949 年 3 月 11 日生。1976 年 3 月東京大学大学院博士課程修了。工学博士。同年 4 月東京大学助教授, 生産技術研究所勤務, 1992 年同教授, 現在に至る。主として, 系統絶縁, 自然雷, 高電圧現象の測定に関する研究に従事。2004 年より電気学会 B 部門長。CIGRE SC C4 国内分科会委員長。1998 年電気学会進歩賞, 1999 年同論文賞。IEEE Fellow, AGU Member, CIGRE Member

馬 場 吉 弘 (正員) 1971 年 2 月 24 日生。1994 年 3 月東京大学工学部電気工学科卒業。1996 年 3 月同大学大学院工学系研究科電気工学専攻修士課程修了。1999 年 3 月同専攻博士課程終了。工学博士。同年 4 月同志社大学助手。2001 年 4 月, 同専任講師。2003 年~2004 年フロリダ大学客員研究員。電磁界パルスに関する研究に従事。1999 年電気学会論文賞。2002 年度同発表賞。AGU, IEE および IEEE Member