

雷放電に伴う磁界変化を測定した離散波形データから 落雷電流波形を推定する一方法

新庄 一雄*1 川村 裕直*2

1. はじめに

送配電線への雷害対策が進んだ現在においても、依然、落雷が事故原因の最も大きな比率を占めており、電力流通設備を日本海側に有する北陸電力にとって、冬季に発生するシビアな落雷⁽¹⁾の影響を無視することはできない。また、雷被害の防止・軽減対策が進んだことにより、更なる対策のコストパフォーマンスは従来よりも低下しており、対策の追加で得られる効果を精度高く予測することが要求される。

落雷による電力設備事故の発生には、雷撃の頻度とその電流波形が大きく影響する。そのため、国内でも落雷電流の実態を把握すべく多くの取り組みが行われてきた⁽²⁾⁽³⁾が、実際の送配電線で事故を引き起こした雷撃の電流波形を把握できた例は、少ない。落雷位置標定システムは、広域の発雷状況は把握できるが電流波形に関する詳細な情報は得られない。また、雷電流に関する情報を電磁界波形から推定する試みも行われているが⁽⁴⁾⁽⁵⁾、電界によるもの、電流波高値や電荷量の推定に特化したものなどが主である。

そこで、当社は、北陸全域に発生する落雷の電流波形を把握すべく、雷放電に伴う電磁界波形の多地点観測を行っている⁽⁶⁾。これまでに、筆者らは、代表的な雷撃モデル⁽⁷⁾⁽¹²⁾を用い、実測雷撃電流波形から実測磁界波形の再現が可能か評価しており、冬季負極性雷撃に対しても磁界波形の形状をほぼ再現できることを確認している⁽⁶⁾。

本稿では、測定された落雷時の離散磁界波形から落雷電流波形を推定するための計算方法を提案する。あわせて、本方法の評価を行った結果についても報告する。

2. 観測装置と観測データ

最初に、本稿で提案する落雷電流波形の推定方法の評価に用いる雷撃電流波形や磁界波形を測定

した装置の概要について記しておく。

〈2・1〉観測の概要

北陸電力では、雷撃電流波形と雷放電に伴う電磁界波形の観測を通年で実施している。各観測局の配置を Fig.1 に示す。雷撃電流波形の観測は 1 地点 (Site G)、電磁界波形の観測は 6 地点 (Site A ~ F) で同時に行っている (本稿ではデータを用いていない局も示した)。なお、電磁界観測局の 2 地点 (D, E) は、観測期間中に移設しており、移設前後の位置をそれぞれ D1, D2 および E1, E2 と示した。Table 1 に、雷撃電流波形を測定した鉄塔から各電磁界観測局の磁界アンテナまでの距離を示す。雷撃電流観測局は、海拔約 450m の山頂付近に設置され、電磁界観測局は、海拔約 110m の山頂付近にある F 地点を除き、平野部に設置されている。

〈2・2〉雷撃電流・電磁界波形測定システムの概要

雷撃電流は、高さ 45m の鉄塔への雷撃を対象とし、ロゴウスキーコイルにて検出している。磁界変化は、地上高約 6m に設置した直交ループアンテナ (東西と南北方向の 2 ループ) を用いて検出している。

Table 2 に、両測定システムの仕様を示す。なお、電磁界波形測定システムの測定可能な最大値については、磁界に関する値のみ示した。なお、両測定システムの周波数特性には差異があり、記録される雷撃電流波形が比較的広帯域であるのに対し、磁界は、高・低周波帯の成分が減衰した波形として記録される。

〈2・3〉評価対象データの概要

本稿では、雷撃電流波形とそれに伴う磁界波形を 4 地点以上で測定できた冬季の負極性雷撃 2 件を評価対象とする。Table 3 に、これら 2 件の雷撃に関する基本的な情報を示す。また、第 5 章 6 節では、検証可能な磁界波形データが 1 地点でしか得られなかった雷撃 (前記 2 件以外) への適用例を示すが、この雷撃の基本情報については改めて示す。

〈2・3・1〉Case No.1 の測定データについて

*1 北陸電力株式会社 技術開発研究所 技術開発チーム
*2 北陸電力株式会社 技術開発研究所 研究企画・知的財産チーム

Case No.1 で記録された雷撃電流波形と磁界波形を、それぞれ Fig.2 (a), (b) に示す。

Fig.2 (a) は、一つの雷撃と判断された電流 (約 50ms 継続) の最初の 600 μ s 部分の波形である。Fig.2 (b) は、4 地点で同時に記録された磁界のうち、負極性電流パルス (P1) に対応した時間幅 40 μ s 部分の波形である。磁界波形の正負は、実測された雷撃電流波形の極性に合わせて図示している。グラフの縦軸は、各地点で測定された磁界波形の最初の負極性ピークのグラフ上の位置が、全地点

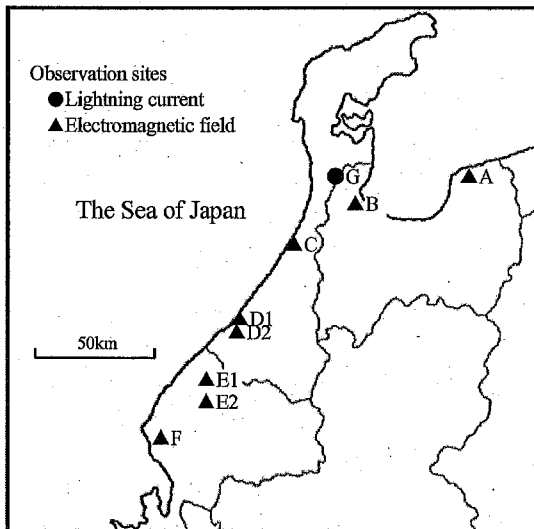


Fig.1. Location of the observation sites.

Table 1. Distances from the lightning current observation site to the electromagnetic field observation sites.

Site Name	Distance [m]	Site Name	Distance [m]
A	57,301	D1	70,329
B	12,610	D2	74,388
C	31,878	E1	98,975
F	129,544	E2	107,496

Table 2. Specifications of the measurement systems.

Site Name	G	A, B, F	C, D*, E*
Measurement target	Current	Electromagnetic field	
Vertical resolution [bit]	12	12	12
Sampling interval [μ s/Sample]	0.1	0.1	0.1
Recordable length [kwords]	12,582	1,048	262
Pre-trigger length [kwords]	786	114	16
Maximum vertical range	± 150 [kA]	± 0.6 [A/m]	± 0.6 [A/m]
Recorded time length [ms]	1258.2	104.8	26.2
Frequency characteristics	0.1Hz~1MHz	350Hz~600kHz	

* Site D1 and E1 were respectively moved to site D2 and E2 in Jan., 2016.

Table 3. Measured negative lightning current data.

Case No.	Occurred time		Peak Current [kA]
	Date	Time	
1	2014/12/16	21:48:53	-30.5
2.	2016/02/16	11:20:03	-33.6

で揃うように設定した。磁界波形の各地点の縦軸スケールの最大値は、B 地点 0.180, C 地点 0.063, D1 地点 0.030, E1 地点 0.021 [A/m] である。

〈2・3・2〉 Case No.2 の測定データについて

Case No.2 で記録された雷撃電流波形と磁界波形を、それぞれ Fig.3 (a), (b) に示す。

Fig.3 (a) は、約 150ms 継続する雷撃電流データの最初の負極性パルス部分 (100 μ s) の波形である。このパルス波形だけを見ると、電流は零から始まり、ほぼ零で終結している。Fig.3 (b) は、5 地点

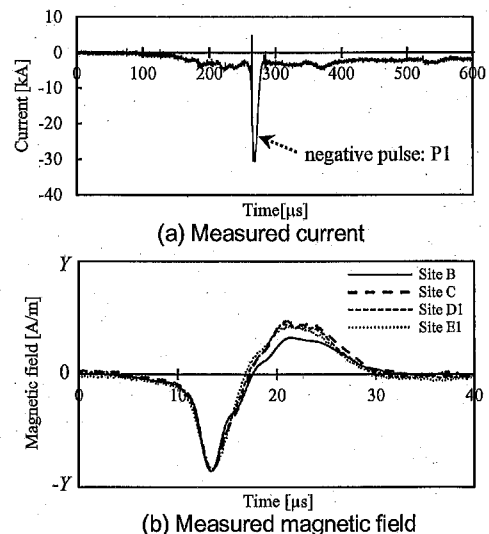


Fig.2. Measured current waveform and measured magnetic field waveforms at the observation sites associated with Case No.1 stroke. Y means maximum value of the vertical scale for each site as follows; Site B:0.180, C:0.063, D1:0.030, E1:0.021 [A/m].

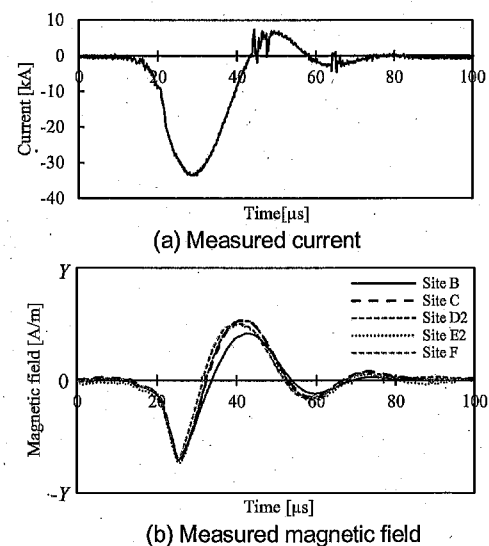


Fig.3. Measured current waveform and measured magnetic field waveforms at the observation sites associated with Case No.2 stroke. Y means maximum value of the vertical scale for each site as follows; Site B:0.200, C:0.069, D2:0.028, E2:0.020, F:0.018 [A/m].

で同時に記録された磁界のうち、この負極性電流パルスに対応した時間幅 100 μ s 部分の波形である。磁界波形の正負は、実測雷撃電流波形の極性に合わせている。グラフの縦軸は、Fig.2 (b)と同様に設定した。各地点の縦軸スケールの最大値は、B 地点 0.200, C 地点 0.069, D2 地点 0.028, E2 地点 0.020, F 地点 0.018 [A/m] である。

3. 磁界波形から落雷電流波形を推定する方法

〈3・1〉 落雷電流の推定計算に用いる幾何学モデル

雷撃電流波形観測を行った鉄塔は山頂付近 (約 450m) に位置しており、計算に用いる幾何学的モデルの配置を正確に模擬すると、Fig.4 に示した鉄塔設置地点である山 (大地) を基準とした電気映像 (灰色で表示) による幾何学的モデルを設定することが望ましい。ただし、本稿では、提案する落雷電流波形の計算式の複雑化を避けるため、平地への落雷を想定する一般的な幾何学モデル (Fig.4 の山の高さが零: $h_0=0$) に対応する(1)式を用いることにする⁽⁸⁾。

$$H(R, t) = \frac{1}{2\pi} \left[\int_0^h \frac{\sin \theta}{R^2} \cdot I_{up}(z, t - R/c) dz + \int_0^h \frac{\sin \theta}{cR} \cdot \frac{\partial I_{up}(z, t - R/c)}{\partial t} dz \right] \dots \dots \dots (1)$$

〈3・2〉 評価に用いる雷撃モデルについて

本稿の評価には、既に提案されている雷撃モデルのうち、Table 4 に示す 3 つの伝送線路 (Transmission Line; TL) 型モデルを用いる。これらのモデルは、Table 3 に示した 2 件の雷撃に対して、実測雷撃電流波形からの磁界波形形状の再現が比較的良好に行えることを確認している⁽⁶⁾。Fig.5 (a) には、TL 型モデルの概念図を、Table 4 には、各雷撃モデルを表す数式を示す。また、第 6 章において、落雷の電流 (電荷) が雲側から地上へと下向きに一定速度で伝搬する雷撃モデルを想定した落雷電流波形の計算式を示すため、あらかじめ Fig.5 (b) に概念図を示しておく。

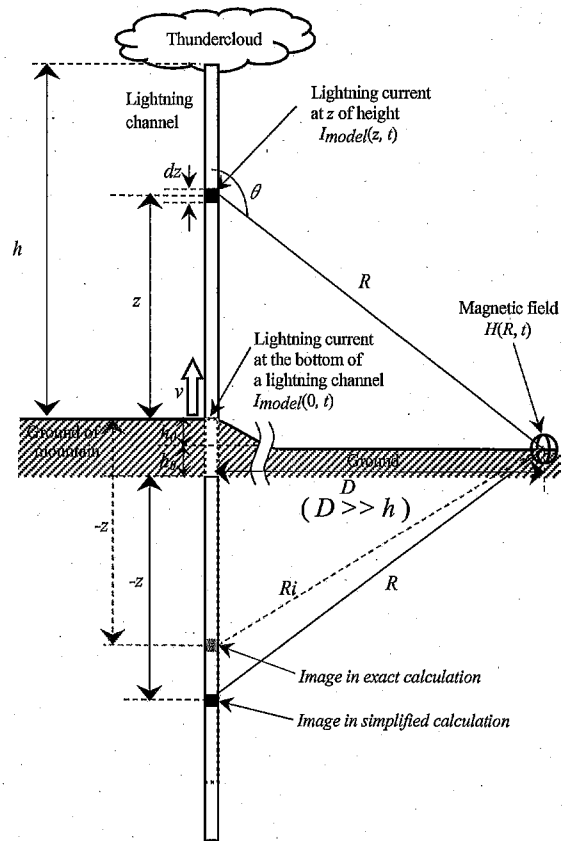


Fig.4. Geometry of the system for calculation of electromagnetic field radiated from a lightning stroke channel.

本稿で用いる TL 型モデルは帰還雷撃を想定したモデルであり、それらの元となっている TL モデル⁽⁷⁾は、雷放電路を雷電流が減衰や変歪をせずに上向きに伝搬するモデルである。MTLE (Modified TL model with Exponential current decay) モデル⁽⁸⁾は、TL モデルに雷放電路上における電流の指数関数に従う減衰を考慮したモデルである。MTLD (Modified TL model with current Distortion) モデル⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾は、線形な減衰に加えて変歪をも考慮したモデルである。なお、本稿で MTLD モデルと記す場合は、そのパラメータ λ_p の値として 50m を用いているが、提案元の文献(10)においては、これを MTLD2 と区別して記している。これら 3 つのモデルは、雷放電路上での電流波の減衰特性を、

Table 4. Mathematical representation of lightning return stroke models.

Category	Method	Mathematical representation	
Transmission Line type	TL	$I_{TL}(z, t) = I(0, t - z/v)$	t is time. z is coordinate along a lightning channel. v is propagation speed of lightning current.
	MTLE	$I_{MTLE}(z, t) = I(0, t - z/v) \cdot \exp(-z/\lambda)$	λ is height as a parameter represents exponential current decay.
	MTLD	$I_{MTLD}(z, t) = I(0, t - z/v) \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{t-z/v}{\tau} \cdot \frac{\lambda_p}{z}\right) \right] \cdot (1 - z/H_p)$	τ is a time constant and λ_p is height as parameters represent current distortion. H_p is height of a lightning channel as a parameter represent linear current decay.

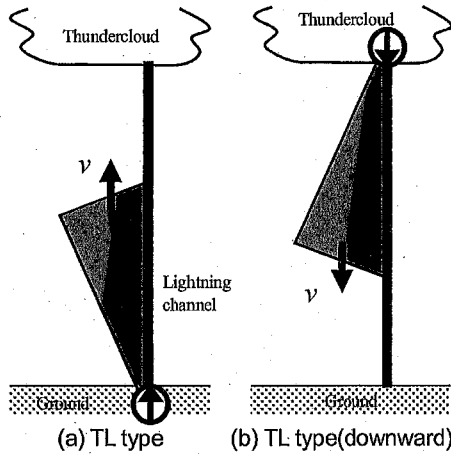


Fig.5. Schematic illustration of TL type models.
v is propagation speed of lightning stroke current.

それぞれ異なる関数で表現している。

〈3・3〉落雷電流波形推定のための基本計算式

測定された磁界波形の離散データから落雷電流波形（同じ時間間隔の離散データ）を求めるための(2)式を、(1)式を変形して導出する。

まず、(1)式の右辺にある磁界の放射成分を求める積分式の中の時間偏微分の項は、連続する2つの離散電流波形データの差から求める式へと置き換える。次に、右辺の2つの積分で用いられる離散電流波形データの時間的に最も早いデータ部分（落雷の放電路下端の電流波形データに相当）を積分式から切り離し、更に変形すると(2)式の落雷電流算出式となる。式の変形過程の詳細については略すが、(2)式から逆に戻す変形を行うと分かりやすいと思う。

$$I_{up}(0, t - R_{dz}/c) = \frac{1}{(Ai_{dz} + Ar_{dz}) \cdot dz} \left[\frac{1}{K} \cdot H(R, t) - \int_{dz}^h (Ai + Ar) \cdot I_{up}(z, t - R/c) dz + \int_0^h Ar \cdot I_{up}(z, t - R/c - dt) dz \right] \dots (2)$$

$$\left(\begin{array}{l} \sin \theta = D/R, \quad K = D/2\pi, \\ Ai = 1/R^3, \quad Ar = 1/(cR^2 \cdot dt), \\ R_{dz} = R(z = dz), \\ Ai_{dz} = 1/R_{dz}^3, \quad Ar_{dz} = 1/(cR_{dz}^2 \cdot dt) \end{array} \right)$$

(2)式では、落雷電流波形データの時間的に最も早い部分から順に求めて行く必要がある。現実的には、計算で使用する離散磁界波形の先頭データ（必ずしも落雷電流に対応している部分とは限らない）から順次波形を求めていくことになる。左辺が求める電流項となるが、右辺にも電流項が存在している。一見ループ計算のようだが、右辺の

電流項で用いる値は、その時点の計算ステップの前には、必要なものは全て求め終わっている。これは、雷電流波が上向きに伝搬するとした場合、高さz方向へと順次積分を進める際に用いる電流波形データは、上に行くほど時間的に前の電流波形データを用いる必要があることに基づいている。

以上のように、(2)式は、求めた電流値をそれ以後の計算ステップで順次用いることから、フィードバック型の計算を行っていると言える。そこで、本稿では、このような計算方法をFB法(Feed Back method)と記すこととする。特に、(2)式に従って忠実に計算する方法を、SFB法(Standard FB method)と記す。

〈3・4〉落雷電流波形推定計算時の発散を回避するFB法

SFB法を用い、対象とする磁界波形データや条件（雷放電路高さ、雷撃地点と磁界観測地点間の距離等）を様々な組み合わせに変えて離散磁界波形データ（第4章で示す模擬落雷電流波形から算出した波形）から落雷電流波形を計算したところ、それらの4割程度で計算結果が発散（求められた電流値が10の10乗kAを超える非常に大きな桁数まで増大）してしまう状況が確認された。

〈3・4・1〉SFB法で計算値が発散する状況

(2)式の雷放電路に沿った積分高さを変えて計算した落雷電流波形の変化を分析した結果、計算値が発散してしまう原因は、計算過程において先に求めた電流値を後の計算に用いるため、計算誤差が次第に増大することによるものであった。これは、FB法の弱点であり、離散データを用いて計算する際の注意点でもある。

また、計算結果が発散に至る切っ掛けとして、元となる離散磁界波形Hの峻度(dH/dt)の極性が反転するタイミング（急峻な波形ピーク等）で誤差が大きくなるケースが多いことが分かった。さらに、高さ方向への積分計算において、雷放電路下端から徐々に積分を進めて行くと、ある時点から一気に誤差が大きくなり、発散へと繋がって行くことも分かった。しかし、どこまで積分を進めると発散するのかはケース毎に異なり、その規則性については、見いだせていない。

〈3・4・2〉SFB法の発散を回避する方法

前節の状況を考慮し、発散を回避して計算結果（実務使用に耐えうる精度の電流波形）を得るこ

とができる計算方法を、以下に提案する。本方法は、(3)~(5)式の3つの関係式で成り立っている。本稿では、この計算方法をMFB法(改良型FB法: Modified FB method to avoid diverging in calculation)と記すことにする。

$$I_{ndz}(0, t - R_{dz}/c) = \frac{1}{(A_{idz} + A_{rdz}) \cdot dz} \left[\frac{1}{K} \cdot H(R, t) - \int_0^{ndz} (A_i + A_r) \cdot I_{up}(z, t - R/c) dz + \int_0^{ndz} A_r \cdot I_{up}(z, t - R/c - dt) dz \right] \dots (3)$$

$$I_{up}(z, t) = I_{up}(0, t - z/v) \cdot G(z) \cdot P(z, t) \dots (4)$$

$$I_{up}(0, t) = I_{ndz}(0, t) \cdot \frac{\int_0^{ndz} G(z) dz}{\int_0^h G(z) dz} \dots (5)$$

(4)式は、MFB法における雷撃モデルの一般式である。TL型モデルを想定しており、雷電流波は上向きに一定速度で伝搬するものとする。TL型モデルでは、放電路の高さ z の関数として雷電流波の減衰や変歪を規定しているものがある。今回提案する方法では、減衰を規定している関数部分 $G(z)$ [TL model: $G(z) = 1$, MTL model: $G(z) = \exp(-z/\lambda)$, MTL model: $G(z) = 1 - z/H_p$] を補正 ((5)式) に用いる。(4)式の $P(z, t)$ は、変歪を規定する関数を表しており、減衰を表す $G(z)$ とは切り離せるものとしている。ちなみに、本稿で用いる雷撃モデルの中では、MTLDモデルだけが変歪について規定している [$P(z, t) = 1 - \exp(-(t - z/v)/\tau \times \lambda_p/z)$]。

(3)式は、(2)式における高さ z 方向の積分を n 回までで止めてしまう式であり、 ndz は $n \times dz$ を表している。本稿の評価に用いるデータにおいては、 $dz (=v \times dt) =$ 雷電流波の伝搬速度 $v \times$ サンプル時間間隔 $0.1\mu s$ となる。

(5)式は、積分を n 回で止めた計算値((3)式)を、積分を全て行った場合に得られる値に近づけるために補正する式であり、多少の誤差は予想される。この式で求められた値が、MFB法による最終的な推定落雷電流波形となる。

また、(6)式は、(3)式において $n=1$ とした場合の式を簡潔に記したものである。この場合、積分項はなくなってしまう。(6)式を補正する式は、(5)式と同じである(ただし、分子は、積分ではなくなる)。第5章で示すが、提案手法を適用した結果の評価から、MFB法では、 $n=1$ でも十分な推定計

算結果が得られることを確認している。

$$I_{dz}(0, t - R_{dz}/c) = \frac{1}{(A_{idz} + A_{rdz}) \cdot dz} \left[\frac{1}{K} \cdot H(R, t) + A_{rdz} \cdot I_{dz}(0, t - R_{dz}/c - dt) \cdot dz \right] \dots (6)$$

また、落雷電流とそれに伴う電界の関係式が磁界のそれと構成が似ていることから、本稿で示したFB法の考え方は、電界波形(静電界成分を除く)を用いた落雷電流波形の推定への応用も可能である。

4. 模擬磁界による模擬落雷電流波形の再現

最初に、提案した落雷電流波形推定手法を、模擬落雷電流波形を用いて評価する。

<4.1> 評価に用いる模擬落雷電流波形について

Fig.6に、評価に用いる模擬落雷電流波形を示す。波形は、波高値 $100kA$ 、波頭長 $10\mu s$ 、最大波高点から $150\mu s$ で電流が零に至る三角波で、 $0.1\mu s$ 間隔の離散データとした。以降、この電流波形を t_i と記す。この波形は、単純な形状に対する計算例により、提案方法の妥当性や雷電流に異なる減衰特性を仮定する複数の雷撃モデルへの適用が可能であることを分かりやすく示すために設定したものである。

<4.2> 計算磁界からの落雷電流波形の推定計算

前章で示したSFB法およびMFB法によりFig.6の模擬落雷電流波形を用いて計算した事例を、Fig.7(a)-(c)に示す。Fig.7の凡例などに記載している英略字についての説明は、後述する。雷撃モデルとして、TL, MTL, MTL modelを用いた。また、計算に用いる幾何学的位置関係は、Fig.4の山の高さを考えないケース($h_0=0$)とした。また、計算に用いるパラメータ値は、雷放電路の高さ $h=1000m$ 、雷撃位置と磁界推定地点間の距離 $D=10km$ 、雷電流波の伝搬速度 $v=100m/\mu s$ とし、全モデルで共通とした。

Fig.7(a)~(c)の各図には、模擬落雷電流波形 t_i を用いて計算した磁界波形 cHt 、 cHt を用いてSFB法で求めた電流波形 I_{cht1} および cHt を用いてMFB法で求めた電流波形 I_{cht2} を示した。各図の cHt は、用いたモデルの特性に応じた減衰等が表れている。これらの cHt から推定計算を行った電流波形(I_{cht1} , I_{cht2})は、どのモデルケースにおいても t_i と一致し、図では重なっている。この

ように、 cHt に基づき求めた電流波形を cHt の元である模擬落雷電流波形と比較することにより、SFB 法の可逆性や MFB 法の数値補正精度を、計算方法として純粋に評価することができる。

〈4・2・1〉 SFB 法の適用結果

Fig.7 で示した計算電流波形は、SFB 法で発散せず、MFB 法では $n=1$ として求めたものである。先述したように模擬落雷電流波形 ti と SFB 法により推定計算した電流波形 $Icht1$ は一致（数値も完全に一致）しており、本例に関しては、計算磁界

cHt から元となった模擬落雷電流波形 ti へ完全に戻せることが確認された。

しかし、雷放電路の高さ h 、雷撃位置と磁界推定地点間の距離 D 、雷電流波の伝搬速度 v を様々な値の組み合わせ（200 通り以上）で計算を行った結果では、SFB 法では発散や稀頻度ではあるが振動してしまうケースが発生した。ただ、これらの計算結果から確認されたことは、電流波形 ti に基づき計算した磁界波形 cHt を用いて電流波形を逆推定した場合、SFB 法では、計算が発散等しなかった全てのケースで元の電流波形を完全に再現できたことである。

〈4・2・2〉 MFB 法の適用結果

模擬落雷電流波形 ti と MFB 法により推定計算した電流波形 $Icht2$ との差異は、若干あるものの、グラフ化すると識別できない程度に小さい。

MFB 法においても、SFB 法の場合と同じ h, D, v の組み合わせで計算を行った結果では、高さ方向の積分回数 n を 1 とした場合が最も安定して推定結果を得ることができた。 n の値を 1 よりも大きくする場合、値を適切に選ばば元とほぼ同じ形状の電流波形を得ることができるが、 n を大きくした方が電流波形の再現性が高まるわけでもない。

〈4・2・3〉 SFB 法・MFB 法の適用法

以上の結果から、FB 法の適用方法としては、まず SFB 法を用いた推定電流波形が発散・振動しなければその結果を採用し（全体の 5~6 割程度の見込み）、発散等する場合には、MFB 法で最適な積分回数 n を設定して電流波形を推定することが望ましい。ただし、誤差が許容範囲であることから、 $n=1$ に固定して MFB 法を用いたとしても実用上の問題はないと考える。

5. 実測磁界による雷撃電流波形の推定計算

〈5・1〉 実測波形を用いた計算に用いる幾何学モデルなど

実測した雷撃電流波形および磁界波形を用いた SFB 法、MFB 法の評価においても、前に提示した (1)~(5) 式をそのまま用いて行うこととする。これは、Fig.4 の幾何学モデルの黒色で示した電気影響を仮定した計算を行うことになる（以降、「簡易計算」と呼ぶ）。

この簡易計算は、実際の物理現象と整合しない部分はあるが、工学的モデルであるため、相当の

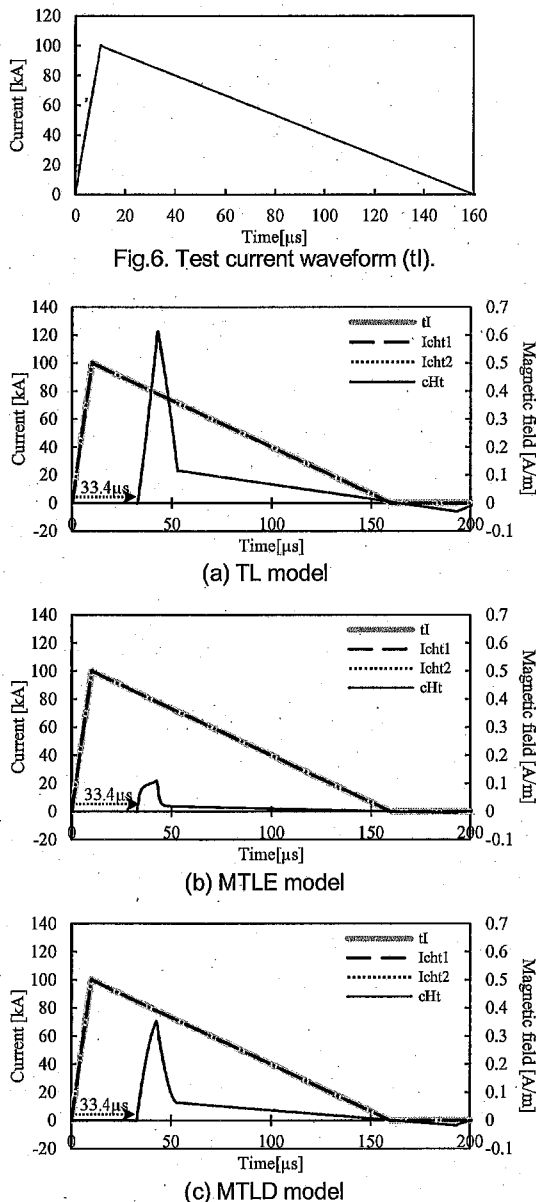


Fig.7. Test current waveform (ti), calculated magnetic field waveform (cHt) from ti , and calculated current waveforms from cHt with each TL type model ($h=1000m, v=100m/\mu s, D=10km$). ' $Icht1$ ' means a calculated magnetic waveform with SFB method and ' $Icht2$ ' means with MFB method.

計算値を得ることは可能である。簡易計算が厳密に行う計算と大きく異なる点は、電気影像から磁界アンテナまでの距離である。また、実際の雷電流波（移動電荷）の伝搬が、下の向きの場合もある。

電気影像からの距離の違いによる誤差に関しては、Fig.4 に示した記号では、厳密には R_i であるべきところを簡略計算では R とすることになる。この違いは、電気影像による磁界を計算する際に、磁界観測地点までの伝搬距離や伝搬時間に誤差を生じさせ、磁界の減衰や計算で用いる実測された離散磁界波形データの時刻の決定に影響する。ただし、本稿の評価に用いる雷撃に対し、簡易計算で実測電流波形から求めた磁界波形を厳密な計算で求めた磁界波形と比較したところ、Fig.2 (b)、Fig.3 (b) と同じ時間範囲の波形部分での二乗平均平方根誤差 RMSE (Root Mean Square Error) を厳密計算波形の最大振幅値で割った比率は、いずれも 1%以下であることを確認している。

また、雷電流波の伝搬方向の違いによる誤差に関しては、前記の電気影像と同様な評価を行い、下向き伝搬を上向き伝搬として計算した波形の RMSE を下向き伝搬として計算した波形の最大振幅値で割った比率は、いずれも 2%以下であることを確認している。

〈5・2〉実測波形に対する SFB 法・MFB 法の適用結果

前に示した 2 件の実測雷撃データ (Fig.2, Fig.3) を対象に、SFB 法と MFB 法 (全て $n=1$) を適用した結果について報告する。用いる雷撃モデルは、Table 4 に示した 3 モデル (TL, MTLE, MTL) である。また、これら 2 件の雷撃データに対して各雷撃モデルで用いたパラメータ値を、Table 5 に示す。なお、ここで示した雷電流波の伝搬速度 v および放電路の高さ h は、測定された電流波形から(1)式を用いて計算された各電磁界観測地点の

磁界波形が、実測された磁界波形に最も近い形状になったと判断した値である。ただし、これらの値は、真実の値とは限らない。以降、本章で示す計算結果は、全てこの値を用いて行ったものである。

以上にに基づき、SFB 法と MFB 法を用いて雷撃電流波形の推定計算を行った結果の評価一覧を、Table 6 に示す。また、Table 6 や以降に示す図においては、計算で用いた電流や磁界の波形、計算結果の電流波形、用いた FB 法を分かりやすくするため、以下に示す英略字を用いている。

mI : Site G にて実測された電流波形

cH : mI を用いて(1)式から計算した各電磁界観測地点の磁界波形 (全地点で共通)

mH : 各電磁界観測地点で実測された磁界波形 (全地点で共通)

Ich1 : 各電磁界観測地点の cH を用いて SFB 法で求めた Site G 地点の雷撃電流 (全雷撃モデルで共通)

Ich2 : 各電磁界観測地点の cH を用いて MFB 法で求めた Site G 地点の雷撃電流 (全雷撃モデルで共通)

Imh1 : 各電磁界観測地点の mH を用いて SFB 法で求めた Site G 地点の雷撃電流 (全雷撃モデルで共通)

Imh2 : 各電磁界観測地点の mH を用いて MFB 法で求めた Site G 地点の雷撃電流 (全雷撃モデルで共通)

また、推定計算により求められた電流波形を判定した結果等には、以下に示す記号を用いている。

- : 実測電流波形を完全に近く再現できた。
- : 実測電流波形をほぼ再現でき、ピーク値の誤差が 5%未満である。
- △ : 実測電流波形の再現が十分でなく、ピーク値の誤差が 5%以上ある。

Table 5. Most suitable values for each model's parameters in reproducibility of calculated magnetic field waveforms with the formula (1) to the measured ones.

Model	Most suitable values				Values of the parameters for each model	
	Case No.1		Case No.2		λ, λ_p [m] for MTLE, MTL models	τ for MTL model
	Propagation speed of lightning current: v [m/ μ s]	Height of lightning channel: h [m]	Propagation speed of lightning current: v [m/ μ s]	Height of Lightning channel: h [m]		
TL	170	500	180	700	-	-
MTLE	220	800	230	1100	$=h$	-
MTL	220	1000	230	1300	50	0.3

×：発散した計算結果が得られた。
 →：本記号の左側は、実測された磁界波形をそのまま使用した結果の判定。右側は、実測した磁界波形にオフセット補正を施した波形を使用した結果の判定。

以上を踏まえ、以降に示す図の凡例には英略字を示したため、誤解が生じない範囲で説明は省略することがある。

なお、以降提示する図は、極力異なる条件下での結果を効率的に示すため、用いた雷撃モデルや対象とした電磁界観測地点などは、さまざまに組み合わせたものとした。

(5.3) SFB法・MFB法の信頼性について

SFB法およびMFB法を適用した事例として、Case No.1の雷撃データに対してTLモデルを適用した、C地点の結果をFig.8に示す。これは、実測電流波形mIから求めた磁界cHからSFB法およ

びMFB法を用いて計算した電流波形(Ich1, Ich2)である。両方法とも、mIを完全に近く再現できている。

この例に限らず、Case No.1とNo.2の雷撃に対する各雷撃モデルでSFB法を用いた各電磁界観測地点のIch1は、計算結果が発散しなかった全てにおいて、完全にmIを再現できている。MFB法を用いたIch2においては、計算結果が発散することなく、全てのケースで完全に近くmIを再現できている。SFB法とMFB法を使用した結果には、若干の数値的差異は確認されるが、Fig.8のように、グラフ化するとほぼ重なって見える程度のずれしか生じていない。

これらの結果から、SFB法は、計算結果が発散してしまうケースを除けば計算精度が最も高いこと、MFB法は、結果が確実に得られ、ほぼSFB法に近い計算精度を有していることが確認された。

Table 6. Results of reproducibility judgement in calculations of lightning current waveforms using magnetic field waveforms.

Case No.	Lightning Stroke Model	Used magnetic field waveform (Substitution character)	Calculation method	Substitution character for calculation condition	Judgement of reproducibility				
					Site B	Site C	Site D1 or D2	Site E1 or E2	Site F
No.1	TL	Calculated (cH)	SFB	Ich1	×	●	×	●	-
			MFB	Ich2	●	●	●	●	-
		Measured (mH)	SFB	Imh1	×	△→△	×→×	△→△	-
			MFB	Imh2	○	△→○	△→○	△→△	-
	MTLE	Calculated (cH)	SFB	Ich1	×	×	×	●	-
			MFB	Ich2	●	●	●	●	-
		Measured (mH)	SFB	Imh1	×	×→×	×→×	△→△	-
			MFB	Imh2	○	△→○	△→○	△→△	-
	MTLD	Calculated (cH)	SFB	Ich1	×	●	×	●	-
			MFB	Ich2	●	●	●	●	-
		Measured (mH)	SFB	Imh1	×	△→○	×→×	△→△	-
			MFB	Imh2	○	△→○	△→○	△→△	-
No.2	TL	Calculated (cH)	SFB	Ich1	×	×	●	●	●
			MFB	Ich2	●	●	●	●	●
		Measured (mH)	SFB	Imh1	×	×→×	△→○	△→○	△→○
			MFB	Imh2	○	△→○	△→○	△→○	△→○
	MTLE	Calculated (cH)	SFB	Ich1	×	×	●	●	●
			MFB	Ich2	●	●	●	●	●
		Measured (mH)	SFB	Imh1	×	×→×	△→○	△→○	△→○
			MFB	Imh2	○	△→○	△→○	△→○	△→○
	MTLD	Calculated (cH)	SFB	Ich1	×	●	●	●	●
			MFB	Ich2	●	●	●	●	●
		Measured (mH)	SFB	Imh1	×	△→○	△→○	△→○	△→○
			MFB	Imh2	○	△→○	△→○	△→○	△→○

The character 'cH' is used in substitution for a calculated magnetic field waveform using the measured current waveform (mI). The character 'mH' is used in substitution for a measured magnetic field waveform. The substitution characters discerning calculation conditions of each current mean as follows; 'Ich1' means that current waveforms in the line were calculated using cH by the SFB method, 'Ich2' means that current waveforms in the line were calculated using cH by the MFB method, 'Imh1' means that current waveforms in the line were calculated using mH by the SFB method, 'Imh2' means that current waveforms in the line were calculated using mH by the MFB method. The symbols in the reproducibility judgement columns mean as follows; '●' means excellent reproducibility, '○' means good reproducibility less than 5% of error between the measured and calculated current peak values, '△' means bad reproducibility, '×' means divergence in calculation. The left side of '→' mark is a judgement about a current waveform calculated by using the original measured magnetic field waveform. The right side of '→' mark is a judgement about a current waveform calculated by using an offset corrected waveform from the original measured magnetic field waveform.

ちなみに、Table 6 の結果では、SFB 法を適用した場合に計算結果が発散してしまう割合は、約 44% もある。この値は、第 4 章で模擬落雷電流波形を用いて評価した際の発生割合と大差ない値である。

〈5・4〉 実測磁界波形のオフセット補正について

Fig.9 および Fig.10 に、2つの雷撃に対して3つの雷撃モデルを用い、MFB 法で電流の推定計算を行った結果 (Ich2 と Imh2) を示す。いずれも、雷撃地点に最も近い地点 B を対象としている。

対象とした雷撃や用いた雷撃モデルに依らず、

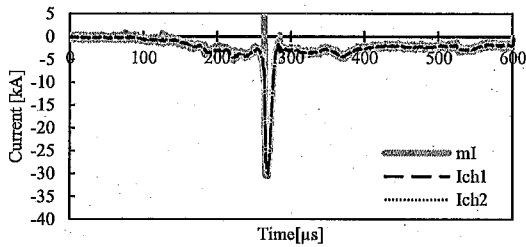


Fig.8. Case No.1, by TL model, at site C: Measured current waveform (ml) and calculated current waveforms (Ich1, Ich2) using magnetic field waveforms (cH). Calculation methods are SFB and MFB. Parameter values of TL model are shown in Table 1 and Table 5.

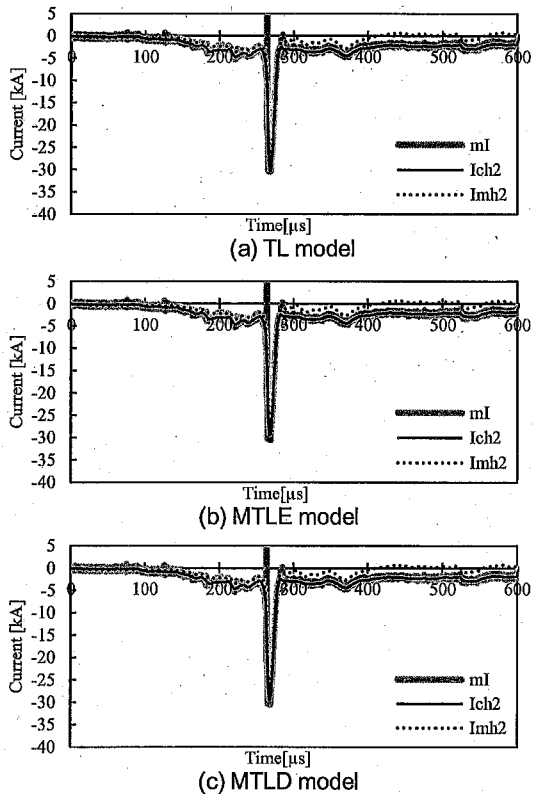


Fig.9. Case No.1, at site B: Measured current waveform (ml) and calculated current waveforms (Ich2, Imh2) using magnetic waveforms (cH, mH). Calculation method is MFB. Parameter values of the stroke current models are shown in Table 1 and Table 5.

計算磁界波形 cH を用いて計算した電流波形は、ほぼ実測電流波形と重なっている。このように、模擬波形を用いて確認された結果が、実測波形を用いた場合でも確認できた。

実測磁界波形 mH を用いて計算した電流波形は、Case No.1 においては、パルス p1 前後の比較的変動が小さい電流部分での誤差が大きく、特にパルス以後の誤差が大きくなっている。これは、周波数帯域の低域側が 0.1Hz である実測雷撃電流波形に対して 350Hz の実測磁界波形を用いて推定した電流波形では、パルス p1 前後の 350Hz よりも低い周波数成分が含まれる波形部分の減衰が大きく、大きな差異が生じたものと考えられる。Case No.2 においては、正極性に反転した部分の誤差が比較的大きい。また、MTLD モデルにおいては、負極性ピークの値にも差異が生じていることから、これらの差異は、計算に用いたパラメータである雷放電路高さ h や雷電流波の伝搬速度 v の設定誤差による可能性があると考えられる。ただし、いずれにおいても、実用上問題ないレベルであると判

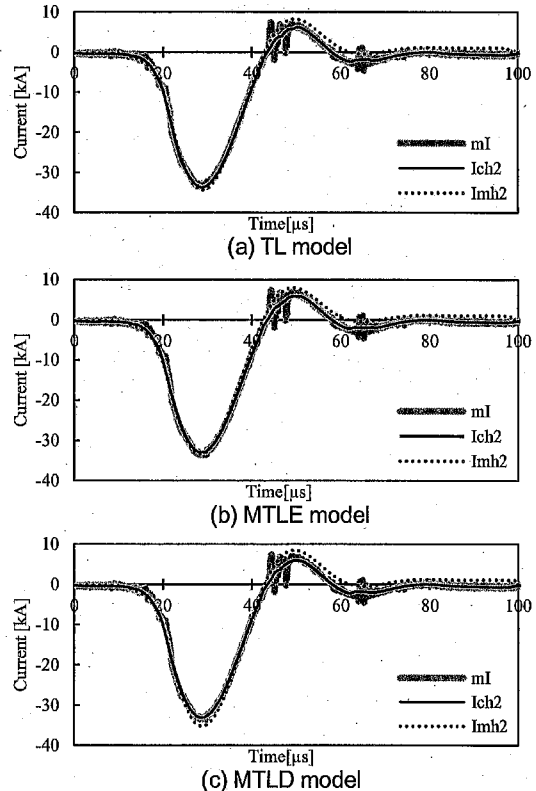


Fig.10. Case No.2, at site B: Measured current waveform (ml) and calculated current waveforms (Ich2, Imh2) using magnetic waveforms (cH, mH). Calculation method is MFB. Parameter values of the stroke current models are shown in Table 1 and Table 5.

断する。

Fig.11には、Case No.1に対してTLモデルによるMFB法を用い、地点Bよりも雷撃地点からの距離が遠い3地点の磁界波形から推定した雷撃電流波形を示す。本図には、Case No.1において測定された磁界波形データをそのまま計算に用いた場合と、オフセット補正した磁界波形データを用いた場合の推定計算結果を示した。測定値をそのまま用いた場合には、3地点とも、程度の差はあれ、推定計算された電流波形が明らかに実測電流とは異なる形状となっている。

これらは、実測磁界波形の周波数成分の影響とは考えられないため、実測磁界波形のオフセット補正を試みた。その結果が、破線で示したImh2である。C地点、D1地点のデータについては、オフセット補正することで推定計算される電流波形を実測電流波形にかなり近づけることができた。しかし、E1地点については、実測磁界波形のオフセットを調整しても、実測電流波形に近づけること

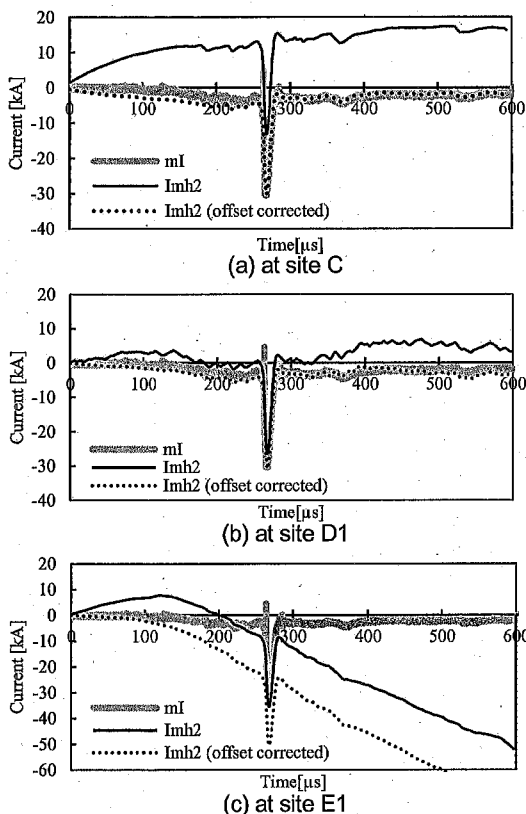


Fig.11. Case No.1, by TL model: Measured current waveform (ml) and calculated current waveforms (Imh2) using measured magnetic field waveforms (mH: original or offset corrected). Calculation methods are MFB. Parameter values of TL model are shown in Table 1 and Table 5.

はできなかった。一般に、雷撃位置から遠い地点の磁界波形を用いた場合、近い地点の磁界波形を用いて落雷電流波形を推定するよりも、大きな信号強度の補正が必要となる。このことは、重畳したノイズの影響が、近い地点よりも相対的に大きくなってしまふことを意味する。以上のことから、実測電流波形に近づけられなかった原因の一つとして、オフセット補正だけでは解消できないノイズ重畳の可能性も考えられる。

以上より、雷撃地点に最も近く、測定される磁界信号が最も強いB地点においては、実測値をそのまま用いても良好に電流波形を再現できることが確認された。これに対し、雷撃地点から遠く、磁界信号が小さい地点では、測定磁界へのノイズ重畳などが雷撃電流波形の推定計算結果に大きく影響するが、オフセット補正により改善できるケースも多いことが確認された。ちなみに、今回行ったオフセット補正は、パルス部の波高値を実測電流波形にほぼ合うように行ったものであり、完

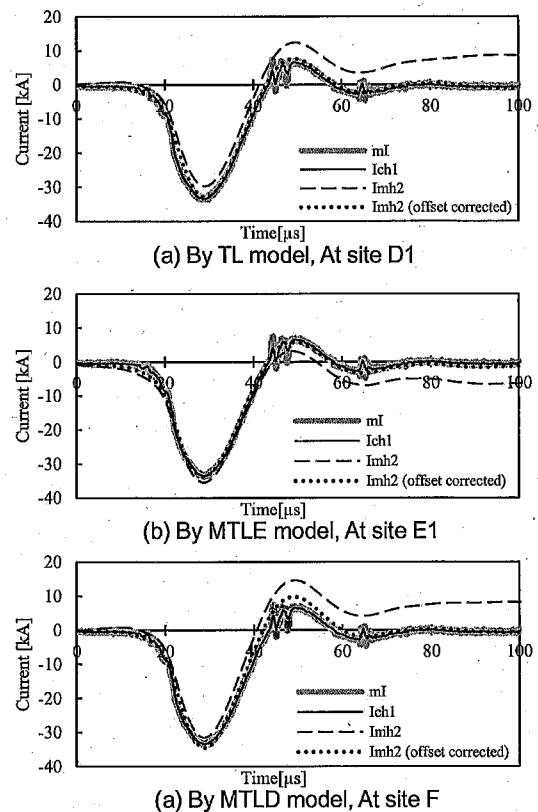


Fig.12. Case No.2: Measured current waveform (ml) and calculated current waveforms using magnetic field waveforms (ch1, original or offset corrected mH). Calculation methods are SFB and MFB. Parameter values of the stroke current models are shown in Table 1 and Table 5.

全な補正方法であるとは考えていない。

Fig.12 に、Case No.2 において測定された磁界波形データをそのまま用いた場合とオフセット補正した磁界波形データを用いた場合の比較を示す。ここでは、対象地点と用いた雷撃モデルが異なる組み合わせとなる波形を示した。結果の全体的な傾向は、Case No.1 の場合と同じであるが、オフセット補正を行うことにより全地点において実測電流波形に近づけることができた。これに関する Case No.1 との違いは、主に波形の時間的長さの違い (Case No.1 は 600 μ s, Case No.2 は 100 μ s) によるノイズ積算時間の差異の現れであり、Case No.2 のズレを相対的に小さく見せているものとする。実際に、一定時間長における両ケースの波形ズレの絶対量を比較すると、大きな違いは見られない。また、Case No.1 では小さな電流が長く続いていたのに対し、Case No.2 の波形振幅が全体的に大きいことが、Case No.1 のズレが大きく見える原因ともなっている。

また、Case No.2 に関しては、測定された磁界波形をそのまま用いて計算された電流波形 Imh2 を見ただけでは、実測磁界波形を補正する必要があることを適切に判断できない可能性がある。

〈5-5〉計算電流に見られた振動波形について

本稿で示した計算結果の中では1例であったが、実測磁界波形に SFB 法を用いて計算した電流波形が振動したものがあつた (Fig.13)。

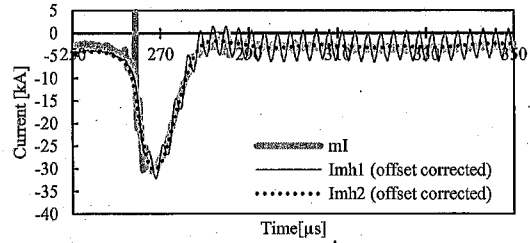
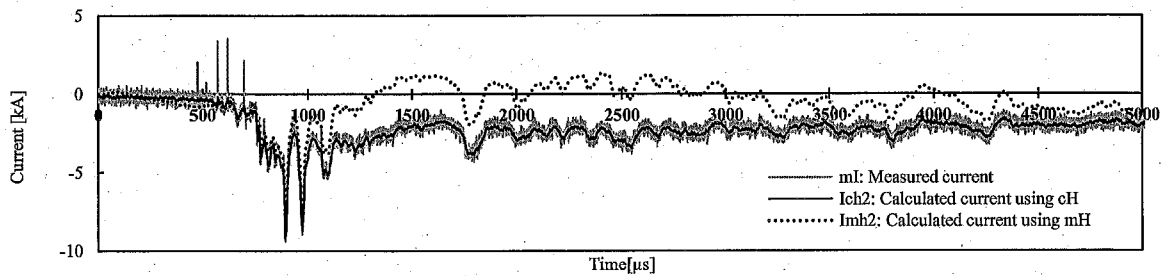


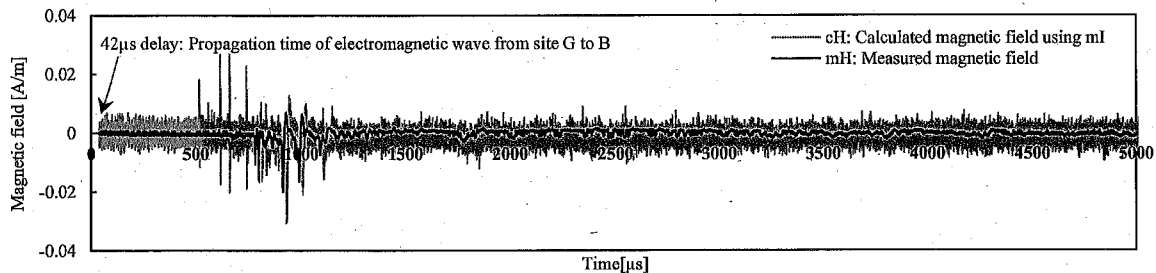
Fig.13. Case No.1, by TL model, at site C: Measured current waveform (ml) and calculated current waveforms (Imh1, Imh2) using measured magnetic field waveforms (mH) offset corrected. Calculation methods are SFB and MFB. Parameter values of TL model are shown in Table 1 and Table 5.

SFB 法には計算結果が発振してしまうリスクがあることは、先に述べた。また、SFB 法での計算結果が発散に至る切っ掛けとして、元となる離散磁界波形の急峻なピークなど、峻度の極性が反転するタイミングが多いことも述べた。Fig.13 に示した波形も、磁界波形における負極性ピーク付近から振動が始まっている (電流波形のピークではない)。すなわち、この電流波形は、発振には至らずに最後の計算まで終えたが、発散する可能性があつたことが振動として現れていると考えられる。

SFB の計算においては、電流項がフードバックされる。この効果は、順次求められる電流値が本来の値からずれると、電流算出のもととなっている磁界波形データが戻すように作用し、振動波形となって現れると考えられる。計算過程のどこかの時点で、計算された電流値を引き戻せないほど



(a) Measured current waveform and calculated current waveforms using ch and mH with MFB method at site G



(b) Calculated magnetic field waveform using ml and measured magnetic field waveform at site B

Fig.14. Case No.3, by MTLE model: Measured and calculated current and magnetic field waveforms.

大きくずれてしまうと、その後は、加速的に大きな値（正負）へと発散してしまうようである。ちなみに、この振動の周期は、雷放電路上を電流波が伝搬するのにかかる時間（ h/v 、雷放電路高さ h 、雷電流波の伝搬速度 v ）にほぼ等しかった。

〈5・6〉低周波成分の減衰の影響について

電流波高値が約10kAの比較的小さな雷撃で、2kA程度の電流が10ms以上継続する冬季負極性雷（Case No.3 2014/12/03 6:00:23）が、先に示した2件の雷撃以外に観測されている。この長い雷撃電流波形と比較対照できる磁界波形は、B地点でしか測定されていない。この雷撃に対して、MTLEモデルで実測電流波形 mI から計算したB地点の磁界波形 cH を用い、MFB法（ $n=1$ ）で推定した電流波形 I_{ch2} と地点Bで実測された磁界波形 mH を用いて推定した電流波形 I_{mh2} を、Fig.14 (a) に示す。参考として、Fig.14 (b) に前記の cH と mH を示す。

なお、計算に使用した雷電流波の伝搬速度 v および雷放電路高さ h は、実測雷撃電流波形から計算した磁界波形が実測磁界波形に最も近いと判断した値 $v=200\text{ m}/\mu\text{s}$ 、 $h=920\text{ m}$ とした。

実測された電流波形 mI には、微小な振動成分が波形全体に重畳している。その電流波形から計算したB地点の磁界波形 cH では、それらに対応した振動成分が大きな割合を占めており、振幅がほぼ同程度の両極性振動波が、波形全体を通して継続している。それに対して、B地点で実測された磁界波形 mH は、電流波形の波頭に対応する部分に比較的大きな振動波形が記録されているが、その他の部分では、 cH の振幅の10分の1程度の振動波形しか見られない。 mH において周波数の高い成分が減衰するのは、システムが持つ周波数特性が影響したためである。現に、 cH を遮断周波数 600 kHz のローパスフィルターに通すと mH 波形に近づくことを確認している。

実測電流波形から計算した磁界波形 cH を用いてMFB法で推定した電流波形 I_{ch2} は、実測された電流波形 mI と外形が完全に一致している。ただし、 I_{ch2} には、元となる cH にみられる周波数の高い振動に対応した振動波の重畳は見られない。これは、MFB法が計算ステップを略し、補正により電流波形の振幅を補っていることに由来している。

mH 波形を用いてMFB法で推定した電流波形 I_{mh2} は、電流波形の波頭部にある2つの大きなピークを過ぎるぐらいまでは比較的良い再現性を示すが、それ以後は、プラス側に大きくずれた形状となった。これは、受信磁界信号が強く、比較的良い再現性が期待されるB地点のデータであるが、この実測磁界波形に対してオフセット補正して電流波形の推定計算を試みても、より不自然な形状へと変化するだけであった。このことは、磁界測定システムが持つ低周波帯域のゲイン低下特性の影響が、主に測定された磁界波形 mH に現れている結果であると考えられる。これは、先述のCase No.1で確認された事象(Fig.9)よりも顕著である。

なお、実測される磁界波形の周波数帯域の補正法については、本稿は対象としないが、この磁界波形データに対して低周波帯域のゲイン低下の補正をフーリエ変換により試みたが、納得のいく結果は得られなかった。

〈5・7〉実測磁界波形へのSFB法・MFB法の適用について

以上のように、実測磁界波形にSFB法、MFB法を適用する場合、測定システムにより制限される実測磁界波形の周波数帯域や重畳するノイズ等の影響により、落雷電流波形の形状が適切に再現できない場合が生じる。

これらの発生は、SFB法やMFB法自体が根本的な原因なのではなく、磁界波形の測定精度の影響を大きく受けている。したがって、両方法を実際のデータに適用する際には、このような問題に遭遇する可能性が高いため、ノイズ重畳への対応策としてオフセット補正が有効な方法の一つであることを〈5・4〉で示した。なお、本稿で行ったオフセット補正の値は、デジタル値で1~2bit程度の小さな値である。この値は、測定システムが置かれた電磁環境等に左右されるため、異なる観測システムにおける補正値は異なるものと考えられる。

また、実測磁界波形の周波数帯域についても観測システムの性能に大きく左右されるため、周波数帯域の広いシステムで測定された波形を用いることができるのであれば、本稿のような問題は、より軽微となるであろう。ただし、本稿で用いた程度の周波数特性を有する測定システムによる磁界波形データを用いるとしても、第4章のような比較的急峻な形状を持つ波形の再現性は高いこと

から、雷過電圧の解析等に用いることは十分可能であると考える。

6. 電流波が下向き伝搬する雷撃モデルのFB法

第3章では、電流波が上向きに一定速度で伝搬する雷撃モデルを想定した場合の磁界波形から電流波形を推定計算する方法(式群)を示した。本章では、Fig.5(b)に示した電流波が雲から下向きに一定速度で伝搬するモデルに対応させた、磁界波形から電流波形を推定計算する方法(式群)を以下に示す。推定計算で求める電流波形は、雷放電路の最下端の雷撃電流に相当する波形である。

(7)式は(2)式に、(8)~(10)式は(3)~(5)式に、(11)式は(6)式にそれぞれ対応している。

$$I_{down}(0, t - R_h/c + h/v) = \frac{1}{(A_{ih} + A_{rh}) \cdot dz} \left[\frac{1}{K} \cdot H(R, t) - \int_{h-dz}^0 (A_i + A_r) \cdot I_{down}(z, t - R/c) dz + \int_h^0 A_r \cdot I_{down}(z, t - R/c - dt) dz \right] \dots\dots\dots (7)$$

$$\left[\begin{array}{l} \sin \theta = D/R, \quad K = D/2\pi, \\ A_i = 1/R^3, \quad A_r = 1/(cR^2 \cdot dt), \\ R_h = R(z = h - dz), \\ A_{ih} = 1/R_h^3, \quad A_{rh} = 1/(cR_h^2 \cdot dt) \end{array} \right]$$

$$I_{h-ndz}(0, t - R_h/c + h/v) = \frac{1}{(A_{ih} + A_{rh}) \cdot dz} \left[\frac{1}{K} \cdot H(R, t) - \int_{h-ndz}^{h-dz} (A_i + A_r) \cdot I_{down}(z, t - R/c) dz + \int_h^{h-ndz} A_r \cdot I_{down}(z, t - R/c - dt) dz \right] \dots\dots (8)$$

$$I_{down}(z, t) = I_{down}(0, t + z/v) \cdot G(z) \cdot P(z, t) \dots\dots\dots (9)$$

$$I_{down}(0, t) = I_{h-ndz}(0, t) \cdot \frac{\int_h^{h-ndz} G(z) dz}{\int_h^0 G(z) dz} \dots\dots\dots (10)$$

$$I_{h-dz}(0, t - R_h/c + h/v) = \frac{1}{(A_{ih} + A_{rh}) \cdot dz} \left[\frac{1}{K} \cdot H(R, t) + A_{rh} \cdot I_{h-dz}(0, t - R_h/c + h/v - dt) \cdot dz \right] \dots\dots (11)$$

これらの基本的な考え方も、上向き伝搬するモデルの場合と同じである。ただし、注意が必要なのは、適用するモデルの雷放電路上の雷電流の減衰を規定する関数G(z)は、雷放電路最下端の電流が零とはならないように設定する必要があることである。

本稿では省略するが、この方法で、Case No.1とNo.2の実測データに対し、雷電流波が下向き伝搬するとの設定で雷撃電流波形の推定計算を行った結果、上向きに伝搬するモデルの場合と計算値も

近く、問題点を含めてほぼ同じ傾向を示した。以上のように、SFB法、MFB法の基本的な考え方は、TL型モデルを想定する限りにおいて、雷電流波の伝搬方向に依らず適用が可能である。

7. おわりに

落雷に伴う磁界を測定した離散波形データから、元となった落雷の電流波形を推定する計算方法を提案し、評価を行った。主な結果は、以下の通りである。

(1) 落雷の電流波形から磁界波形を計算する(1)式において、時間的に最も早い電流波形(離散)データ項を分離して変形し、落雷電流を推定計算する式(SFB法)を導出した。(1)式を用いて計算された磁界波形をSFB法で逆計算すると、元の電流波形が完全に再現された。ただし、離散データを用いることによる計算結果の発散が、検討した半数弱のケースで確認された。

(2) SFB法の発散を回避する新たな推定計算法(MFB法)を提案した。MFB法(n=1)は、複数の雷撃や雷撃モデルに適用しても発散することなく、計算磁界から電流を逆計算しても、安定かつ小さな誤差で元の電流波形を推定することができた。以上より、SFB法で発散・振動しなければその推定電流波形を採用し、そうでなければ、MFB法(n=1)による推定波形を採用することが現実的な適用法である。

(3) 提案手法の問題ではないが、長く継続する雷撃に伴う磁界の測定波形から雷撃電流波形を推定した結果、電流波形の変化が小さく長く継続する(低周波)波形部分の実測波形との差異が、大きくなった。しかし、本稿と同程度の特性を有する測定システムから得られたデータであったとしても、落雷による過電圧の解析を行う分には十分な波形形状の再現性があると判断された。

本稿で提案した方法(MFB法)は、離散磁界波形から落雷電流波形の形状を推定する方法として、実用的には十分な精度を有すると判断した。しかし、観測で磁界波形を得たとしても、落雷個別の雷放電路の高さ(長さ、位置関係)や雷電流波(移動電荷)の伝搬速度等が不明なため、雷電流波形推定の大きな誤差となっている課題は依然残っている。

また、特に冬季雷において問題となる避雷器等の耐量の解析を行うには、取得される磁界の低周波成分の減衰がネックとなるため、磁界測定システムの広帯域化、測定された磁界波形データや計算された電流波形を適正かつ確実に補正できる方法の確立等が必要である。

参考文献

- (1) M. Ishii, M. Saito, F. Fujii, M. Matsui and N. Itamoto: "High-Current Lightning Discharges in Winter", IEEJ Trans. PE, Vol.128, No.1, pp.291-297 (2008) (in Japanese)
石井 勝, 齋藤幹久, 藤居文行, 松井倫弘, 板本直樹: 「大電流を伴う冬季の雷放電」, 電学論 B, Vol.128, No.1, pp.291-297 (2008)
- (2) K. Miyake, T. Suzuki and K. Shinjo: "Characteristics of Winter Lightning on Japan Sea Coast", IEEE Trans. Power Delivery, Vol.7, No.3, pp.1450-1456 (1992)
- (3) K. Shinjo, Y. Matsumoto, O. Sakuma, T. Wakai, T. Sakai, M. Ishii and H. Motoyama: "Characteristics of Transient Response of Okushishiku Test Transmission Line Struck by Natural and Triggered Lightning", IEEJ Trans. PE, Vol.117, No.4, pp.478-487 (1997) (in Japanese)
新庄一雄, 松本安弘, 佐久間 治, 若井武夫, 酒井 勉, 石井勝, 本山英器: 「自然雷および誘雷に対する送電線の過渡応答特性」, 電学論 B, Vol.117, No.4, pp.478-487 (1997)
- (4) T. Harada, K. Michishita: "Estimation of Lightning Current Parameters Based on Measurement of Electric Field Waveforms", 28th International Conference on lightning Protection, Vol.1-33, pp.219-224 (2006)
- (5) S. Kurihara, H. Nakata, Y. Hashimoto and K. Michishita: "A Verification of Estimation Accuracy of Lightning Current Waveform and Charge Transfer from Measured E-field Waveform", IEEJ Trans. PE, Vol.135, No.2, pp.118-124 (2015) (in Japanese)
栗原聡史, 中田英宏, 橋本洋助, 道下幸志: 「電界波形に基づく雷電流波形と電荷量変化の推定精度の実証」, 電学論 B, Vol.135, No.2, pp.118-124 (2015)
- (6) H. Kaneko, N. Naoki and K. Shinjo: "Application of TL Model for Estimation of Current Waveform of Winter Lightning Stroke", IEEJ Trans. PE, Vol.138, No.5, pp.346-351 (2018)
- (7) M. A. Uman, D. K. McLain and E. P. Krider: "The Electromagnetic Radiation from a Finite Antenna", Amer. J. Phys., Vol.43, pp.33-38 (1975)
- (8) V. A. Rakov and A. A. Dulzon: "A Modified Transmission Line Models for Lightning Return Stroke Field Calculation", Proc. 9th Int. Symp. Electromagnetic Compatibility, pp.229-235, Zurich, Switzerland (1991)
- (9) Y. Baba and M. Ishii: "Lightning Return Stroke Model Incorporating Current Distortion", IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility, Vol.44, No.3, pp.476-478 (2002-8)
- (10) S. Miyazaki, M. Ishii and Y. Baba: "Reproduction of Features of Electromagnetic Field Waveforms Associated with Lightning Return Stroke", IEEJ Trans. PE, Vol.125, No.5, pp.544-550 (2005) (in Japanese)
宮崎 悟, 石井 勝, 馬場吉弘: 「帰還雷撃に伴う電磁界波形の特徴の再現」, 電学論 B, Vol.125, No.5, pp.544-550 (2005)
- (11) F. Heidler: "Traveling Current Source Model for LEMP Calculation", Proc. 6th Int. Zurich Symp. Electromagnetic Compatibility, pp.157-162, Zurich, Switzerland (1985)
- (12) 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)