

Lightning Current Diffusion into Water

Shinichiro KAIKAWA*, Yoki IKEDA* and Naoto NAGAOKA*

(Received November 4, 2014)

Lightning current distribution into water is clarified by means of finite difference time domain (FDTD) method, which is one of numerical electromagnetic analysis methods. The lightning current is concentrated on the sea surface due to skin effect. The tendency becomes notable with the increase of salinity of seawater. On the other hand, the lightning current diffuses toward the seabed with the decrease of the salinity. A ship on the sea has to release a lightning current into a surface portion of seawater, and has to have earth-plate(s) for grounding installed apparatus as deep as possible to protect from a lightning. The independent earthing is difficult to realize for the ship on the lake or river due to the skin depth of the freshwater. The area of the earth-plate for the lightning protection should be increased as much as possible to decrease its grounding resistance.

Key words : current distribution, marine structure, lightning current, salinity, sea

キーワード : 電流分布, 海上構造物, 雷電流, 塩分濃度, 海

水中への雷電流拡散様相

開川信一郎*, 池田陽紀*, 長岡直人*

1. 緒言

一般的に、落雷の対象となるのは周囲より相対的に高い構造物である。そのため陸上では、ビルや鉄塔などの高構造物が、洋上では風力発電風車等が落雷の被害を受けることが多い。また、洋上に構造物はほとんど無いことから、高さは低い航行中または停泊中の船舶が落雷の対象となり得る。これら洋上における耐雷対策の検討には、水中への雷電流放出・拡散様相を考慮する必要があるが、水中における電流分布については十分に明らかにされているとは言い難い。本研究では、洋上の雷撃対象物か

ら水中に放出された雷電流の拡散様相について時間領域差分法 (FDTD 法)¹⁾を用いた数値電磁界解析により検討する。これより、これまであまり検討されてこなかった船舶からの雷電流の放電について考察する。

2. 海水の導電率と表皮効果

導体に流れる電流は表皮効果により、その周波数が高いほど導体表面付近に分布する。また、流れる電流が導体表面を流れる電流の $1/e$ (約 37%) となる深さまでの厚さを表皮厚と呼ぶ²⁾。表皮厚 δ [m]

*Power System Analysis Laboratory, Electrical and Electric Engineering, Graduate School of Science and Engineering, Doshisha University, Kyoto

Telephone: 0774-65-6324, FAX: 0774-65-6801, E-mail: duo0324@mail4.doshisha.ac.jp

は電流の周波数 f [Hz], 導体の透磁率 μ [H/m], 導電率 σ [S/m] を用いて(1)式で与えられる³⁾.

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \tag{1}$$

(1)式より海水の表皮厚を算出する場合, 海水の導電率が必要となるが, 海水の導電率は塩分濃度や海水温の影響を強く受けるため, これらのパラメータと導電率の関係を十分に考慮する必要がある. 一般に水溶液の導電率はこれに含まれるイオンの量とその移動度で定まる. 海水には様々な電解質が含まれるが, それらの約 8 割を塩化ナトリウム(NaCl)が占める⁴⁾. このことから, 海水の導電率は塩化ナトリウムの濃度と海水温に強く依存する. 任意の電解質水溶液における導電率 σ_A [S/m] は基準温度 (通常 0 °C) における導電率 σ_0 [S/m], 温度 t [°C] から, 次に示す実験式で与えられる⁵⁾.

$$\sigma_A = \sigma_0 (1 + C_1 t + C_2 t^2) \tag{2}$$

ここで, σ_0 , C_1 と C_2 は電解質の濃度によって決まる係数である. Table 1 に示す濃度 5 %, 10 % における塩化ナトリウム水溶液の各係数を用いて海水温が 5 °C, 15 °C, 25 °C, 35 °C における塩分濃度と導電率の関係を Fig. 1 に示す. これより, 塩分濃度によらず, 海水温が 10 °C 低下すると 15 ~ 20 % 程度導電率が低下することが知られる.

塩分濃度が 0 % の場合, 水溶液中に電解質が存在しないため導電率は 0 であると仮定し, 導電率が塩分濃度に比例すると仮定する.

$$\sigma_A = \alpha S \tag{3}$$

ただし近似係数 α は, 海水温が 5 °C のとき $\alpha = 0.91880$, 15 °C のとき $\alpha = 1.1625$, 25 °C のとき $\alpha = 1.4266$, 35 °C のとき $\alpha = 1.7061$ である.

この近似結果を直線で Fig. 1 に示す.

この近似結果をもとに, 各濃度における表皮厚 δ の周波数特性を Fig. 2 (a) に示す. なお, 海水の透磁率 μ は真空の透磁率 $1.26 \mu\text{H/m}^0$, 海水温は 25 °C とした. また, Fig. 2 (b) に塩分濃度 3.5 % における海水温を変化させた時の表皮厚 δ の周波数特性を示す.

Fig. 2 において, 表皮厚は式(1)の通り周波数の平方根に反比例する. 平均的な海水である塩分濃度

3.5 % では, 周波数 1 MHz における表皮厚は約 20 cm

Table 1. Coefficients for conductivity approximation of saline solution.

Density	5%	10%
σ_0	4.30	7.79
C_1	0.0295	0.0293
C_2	1.03×10^4	0.950×10^4

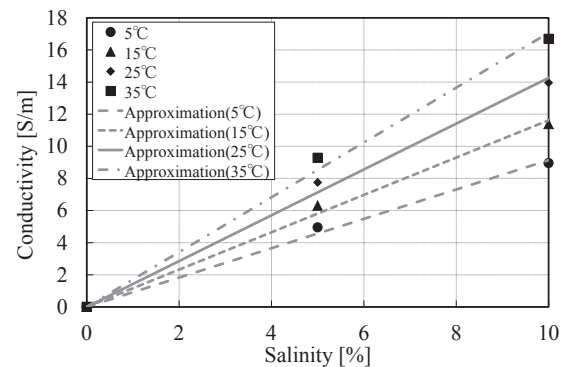
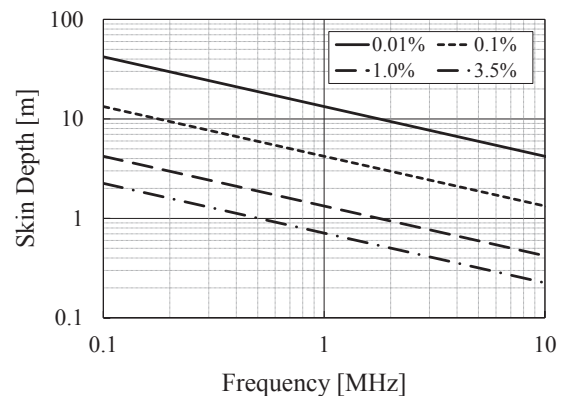
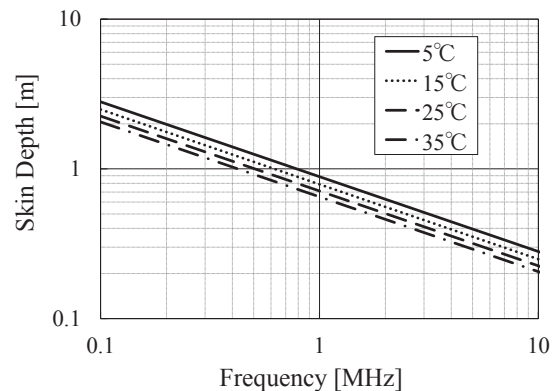


Fig. 1. Conductivity vs. salinity characteristic.



(a) effect of salinity.



(b) effect of water temperature.

Fig. 2. Skin depth of seawater.

程度であり、水温に応じて変化する。この表皮厚は、小型船舶の喫水程度であり、接地板の取り付けなどの雷害対策を講じるにあたり、考慮する必要がある。また、汽水や淡水に相当する低濃度(0.01%, 0.1%)では、表皮厚は3mを超え船舶喫水よりも大となる。

なお、急峻な雷電流すなわち高周波成分を多く含む雷電流と比して、冬季雷に多いといわれる緩波頭雷では比較的深部まで雷電流が分布することが考えられ、雷対策にはこれらを考慮して検討する必要がある。

3. 数値解析による検討

3.1 塩分濃度変化と電流分布

本論文では、電磁界解析により水中の雷電流分布の解析を行う。Fig. 3 に示す FDTD 解析空間 $X \times Y \times Z = 30 \text{ m} \times 30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ を一辺 0.1 m の立方体セルに分割表現し、水面は解析空間の下端から 15 m とする。水面の中央に配置した電流源より電流を注入し、水中における電流密度を観測する。注入電流波形は波頭長 $1 \mu\text{s}$ 、定常値 1.0 A とした。電流密度観測範囲は、注入点を中央とし Fig. 3 内に灰色の矩形で示す、水平方向に 20 m、水深 10 m までの範囲を 1 m 間隔とした。

Fig. 4 (a) および (b) は時刻 $5 \mu\text{s}$ における水中の電流分布である。図中の矢印の向きと長さは、それぞれ電流の進行方向と振幅の対数を表す。なお、この時刻においては電流波形はほぼ平坦となっている。

平均的な海水塩分濃度である(a)3.5%では水中深部へと向かうほど電流密度が小であるのに対し、淡水に分類される濃度(b)0.01%では浅部と深部で電流密度の差異は塩分濃度 3.5%の場合に比べ小である。これは湖や河川のように塩分濃度が低い場合、表皮厚は大となり、水中へ放出された電流が水中深くまで侵入するためであり、前章での特性とも符合する。

3.2 深さ方向の海水導電率変化と電流分布

3.1 節から、電流分布は海水の水温や塩分濃度の

影響を受けることが知られたが、実際の海ではこれらのパラメータは均一ではなく、場所によって異なる。

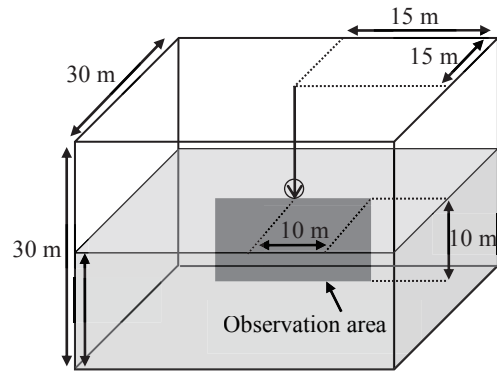


Fig. 3. FDTD model.

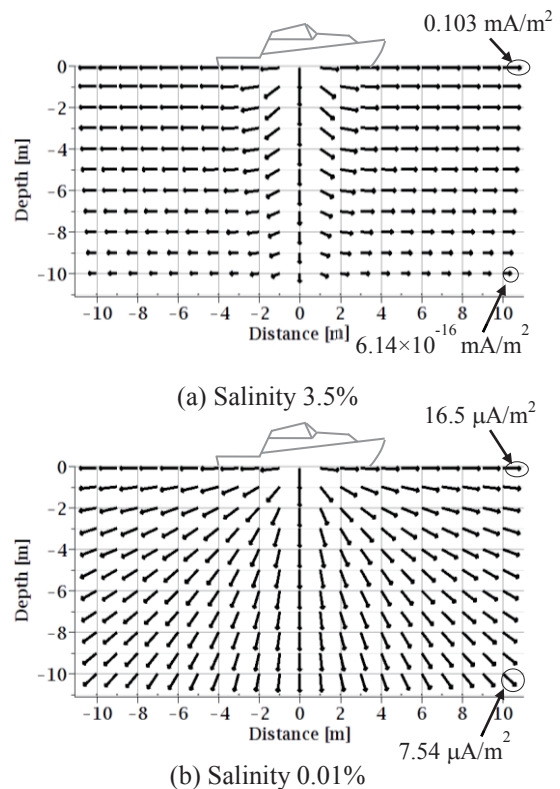


Fig. 4. Current distribution.

例えば、海は深度に応じて浅部から深部へと順に、表水層、水温躍層、深水層の3つの層に分けられるが、各層で水温が異なるため、導電率が異なる。

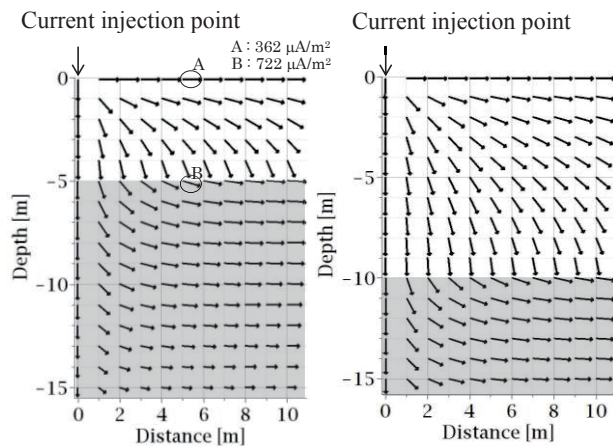
また、潮流がぶつかり合う場所や、河口付近などの淡水が海水に流入する場所では、塩分濃度の異なる水が接する水域がある。このような水域では、海

水と淡水の密度が異なるため攪拌されにくく、高塩分濃度層の上に低塩分濃度層が形成され、深さ方向で導電率の異なる層が形成される。

Fig. 5 に水中上部の導電率が $\sigma=14.3$ mS/m (淡水), 下部が $\sigma=4.99$ S/m (海水) と異なる層が存在する場合の時刻 $5 \mu\text{s}$ における水中電流分布を示す. Fig. 5 (a) は上下層の境界面が水深 5 m に, Fig. 5 (b) は水深 10 m にある.

Fig. 5 より水中へ放出された電流は上層では水底方向へと進行するが, 下層では水平方向へと進行する. また, Fig. 5 (a) の図中に丸で示す A 点 (水面) と B 点 (水深 5 m) の電流密度を比較すると水面より水中深部の方が電流密度は高くなる.

さらに, Fig. 5 (a), (b) それぞれの場合における海面での電流密度を Table 2 にまとめる. 電流密度は電流注入点から水平方向に 20 m までを 5 m 間隔で示す.



(a) Conductivity changes at 5 m depth. (b) Conductivity changes at 10 m depth.

Fig. 5. Current distribution within double layer water.

Table 2. Current density at seawater surface [$\mu\text{A}/\text{m}^2$].

Boundary depth	Distance from current injection point			
	5 m	10 m	15 m	20 m
5m (a)	362	48	10	3
10m (b)	410	88	30	12

Table 2 から上下層の境界が浅い水深で形成される方が水面を流れる電流は小となる. これは, 上層

より導電率が大である下層の方が電流は流れやすく, また, 下層が比較的海面から近い方が下層を流れる電流が増加し, 結果として水面を流れる電流が減少するためである.

3.3 水平方向の海水導電率変化と電流分布

3.3.1 低導電率水域から高導電率水域への電流拡散

Fig. 6 に低導電率領域 (淡水, 導電率 14.3 mS/m) から高導電率領域 (海水, 導電率 4.99 S/m) へと雷電流が拡散する場合の時刻 $5 \mu\text{s}$ における電流分布を図示する. Fig. 6 より水中へ放出された電流は低導電率領域において水中深部まで拡散するが, 低導電率領域から高導電率領域へ侵入後, 水面へと急激に進行する. これは, 低導電率領域の表皮厚に比べ, 高導電率領域の表皮厚が小であることに起因する.

さらに, Fig. 7 に水面における電流密度を示す. 横軸は電流注入点からの水平距離とし, 落雷した際の水面における雷電流拡散範囲を表す. また, 淡水または海水のみで形成される様な水域の計算結果も Fig. 7 に合わせて示す. Fig. 7 から, 均一な導電率の水面を流れる電流は落雷点からの水平距離に反比例する. しかし, 低導電率領域から高導電率領域へと電流が拡散する場合, 2つの領域の境界面付近 (電流注入点から水平方向 5 m ~ 15 m の範囲) では, 電流を注入した低導電率領域より電流注入点から遠い高導電率領域の方が水面を流れる電流が増加する. この解析結果は, 落雷地点から離れた場所を航行していた場合でも, 航行水域が周囲と比べて部分的に高導電率の水域であった場合, 場所によっては落雷点までの水平距離が短い水域より大きな電流が海面を流れる危険性を示す. また, この結果は河口付近で淡水が海水へ流入する場所のように, 導電率の異なる海域が形成される場所が予測できる海域において, 灯台や構造物を建設する際の検討事項の一つともなる.

さらに, Fig. 7 において電流が低導電率領域から高導電率領域へと拡散する時と高導電率領域のみ存在する時とで水面の電流密度を比較すると, 落雷地点から水平方向に 10 m 以上離れた水域 (境界を

越えた水域)では低導電率領域から高導電率領域へと拡散する時の方が大である。これは、表皮厚が大となる低導電率領域において深部まで侵入した電流が、表皮厚が小となる高導電率領域に侵入し、表皮厚の変化に合わせて浅部に集中するためである。

以上のことから、導電率の異なる水域が存在する海で低導電率領域側へ落雷した場合、落雷地点からの水平距離が離れていても高導電率領域側を航行中の船舶が受ける被害が、均一な導電率の海における雷被害と比べ大となる可能性がある。

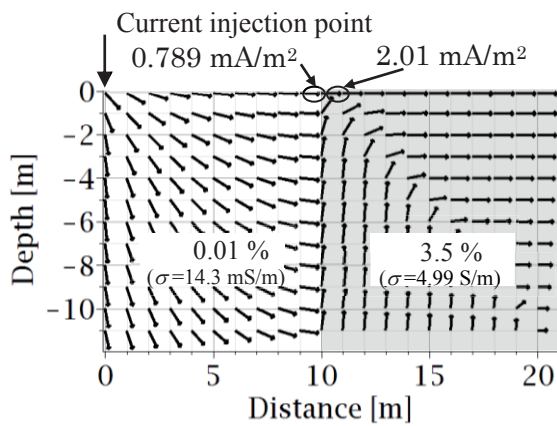


Fig. 6. Current diffusing to high conductivity water area.

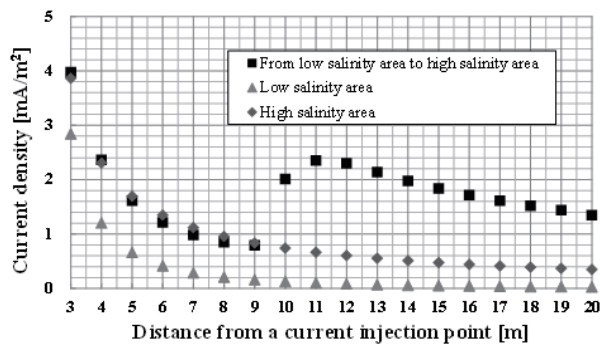


Fig. 7. Current density vs. distance characteristics when a current diffusing to high conductivity water area.

3.3.2 高導電率水域から低導電率水域への電流拡散

Fig. 8 に高導電率領域から低導電率領域へと雷電流が拡散する場合の時刻 $5 \mu\text{s}$ における電流分布を示す。水中を拡散する電流は低導電率領域との境界付近において電流の向きは水平方向成分より水底

方向成分が支配的となる。また、Fig. 8 から高導電率領域の水深 10 m における電流密度は、低導電率領域との境界面に近づくと従い増大し、高導電率領域の表皮厚は小であるにも関わらず、境界面付近では深部まで電流が侵入する。さらに、横軸を落雷地点からの水平方向距離とし、水面における電流密度を示す Fig. 9 より、高導電率領域から境界を介して低導電率領域へ電流はほとんど侵入しないことが知られる。

以上より、付近に低導電率領域が存在する水域で高導電率領域に落雷した場合、雷害は低導電率領域へは波及しにくいと想定される。

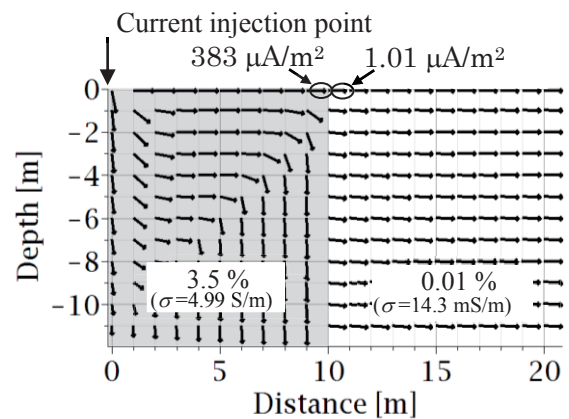


Fig. 8. Current diffusing to low conductivity water area.

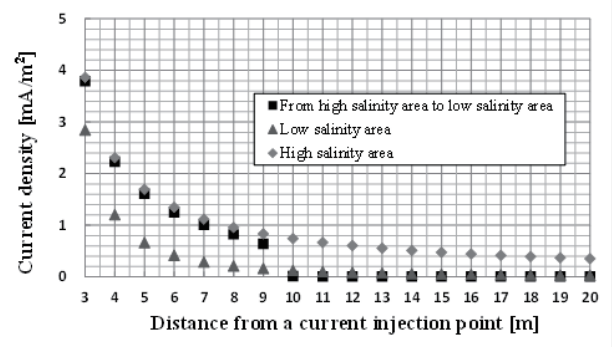


Fig. 9. Current density vs. distance characteristics when a current diffusing to low conductivity water area.

4. 結言

本研究では、雷電流が水中へ放出された際の電流拡散様相を FDTD 法による数値電磁界解析により明らかにした。

水中へ放出された雷電流は、表皮効果により水面付近の浅部に分布し、塩分濃度が高く水温が高いほど、すなわち導電率が高くなるほどこの特性が顕著となる。一方、塩分濃度が小となるほど表皮厚は大となり、電流は深部へと拡散する。また、実際の海洋は水温や塩分濃度が不均一であり、導電率が異なる水が接することもある。そのような水域において、電流は導電率のより高い水域に集中する。

以上示した水中電流分布の特性から、海上航行時の船舶は、船内機器類の接地を船底付近の海中深部（表皮厚を超える深さ）に取ると共に、雷電流を海中浅部にて放出することで、船内機器の雷保護が可能である。一方、海水と比して抵抗率が大きい湖や河川を船舶が航行する場合、雷電流を水中へ放出する避雷用接地板の接地抵抗値が海上航行時と比

して大となる。したがって、船底に可能な限り広い面積を有する被雷用接地板を設けるなどし、十分に接地抵抗値を低減する必要がある。

参考文献

- 1) 宇野亨, FDTD 法による電磁界およびアンテナ解析, (コロナ社, 東京, 1998) .
- 2) 築地武彦, 電気磁気学, (理工学図書株式会社, 東京, 1994), p.387.
- 3) 山田直平, 桂井誠, 電気学会大学講座 電気磁気学, (社団法人電気学会, 東京, 2010), p.336-339.
- 4) 高野健三, 友田好文, 地球科学講座第4巻 海洋, (共立出版株式会社, 東京, 1983), p.51-52.
- 5) 電気学会通信教育会, 電気学会大学講座 電気磁気学, (社団法人電気学会, 東京, 1985), p.3.
- 6) 工学ハンドブック編集委員会, 海洋工学ハンドブック, (コロナ社, 東京, 1975), p.74.