

磁気通信方式での理論的伝搬特性

笠嶋善憲 *

Theoretical Characteristic of Propagation for Magnetic Transmission System

Yoshinori Kasashima

Electromagnetic wave has extremely low frequency in the region of 100Hz ~ 10,000Hz and can transmit through seawater, ground and atmosphere. This paper describes expressions for the theoretical radio wave transmission loss in homogeneous medium and characteristics of the radio wave propagation in two or more medium layers by using FEM for Two-Dimension Magnetic Fields.

1. はじめに

近年、音響周波数帯の電磁波を用いた地盤・海水中で通信可能な通信システムが土木の現場などで使用されている。一般の周波数が高い電波は地盤や海水中のような導電性のある媒質中では減衰が極めて大きく通信には用いられないが、周波数が 10,000Hz 程度以下の電磁波は媒質中での減衰がそれほど小さくなく、現在の技術では 50m~100m 程度の通信が可能となっている。

この装置のメーカーのホームページによると、本通信システムは「ダムにおけるワイヤレス土水圧計の計測」、「ボーリングマシーンによる地盤掘削時の地盤強度測定」などに使用できるとしている。また、本通信システムは、その伝搬の主体は磁界となるため、一般には磁気通信方式と呼ばれている。

本論文の前半では、本通信システムの均一媒質中での理論的伝搬特性と受信点の磁界強度の近似式を示し、後半では、2次元 FEM 磁界解析プログラムでの計算結果による異なる媒質の層状地盤中の伝搬特性の特徴を示す。

2. 磁気通信システムの概要

本通信システムの実測データを掲載した論文として「関西空港島埋立区での海底地盤沈下計測結果」¹⁾があり、ここに掲載されているシステム図を Fig.1 として示す。この通信システムは約 30m 海底の土砂埋立状況を把握・管理するもので、海底に設置した沈下データ送信機中には水圧計、データロガがあり、水圧データは順次データロガに収録が

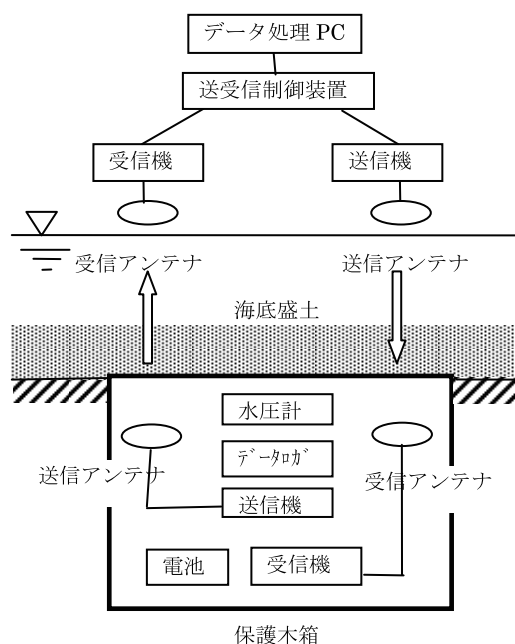


Fig.1 Measurement System Using Magnetic Transmission Type Water Pressure Gauge

つづけられ、海上船舶上の送受信制御装置からのデータ送信開始命令を受信すると、沈下データ送信機から海上の船舶にデータが送信されるものである。

本通信システムは、使用周波数が低く、従って伝搬インピーダンスが低いため、伝搬の主体は磁界となり、送受信アンテナにはコイル状のループアンテナを用いる。また、周波数が低くなると、それに比例して情報伝送量が少なくなるため、少量のデータを時間をかけて送信することになる。

本通信システムの使用対象の地盤を構成する各種媒質の電気定数を Table-1 に示す。³⁾

Table-1 Conductivity and
Relative Permittivity

媒質	導電率 σ [S/m]	比誘電率 ϵ_r
空気	0	1
乾土	0.001	5
湿土	0.02	31
海水	4	81

3. 均一媒質中での磁界強度

3. 1 受信点の電磁界強度

透磁率 μ_0 、誘電率 ϵ 、導電率 σ の均一な媒質中に Fig.2 に示すように平面上に面積 S [m²] のループアンテナを置き、そのアンテナに周波数 f [Hz]、 I [A] の電流を流したときのアンテナから十分離れた点 P の電磁界は(1)式となる。²⁾

$$\left. \begin{aligned} H_r &= \frac{IS}{2\pi} e^{-jkr} \left(\frac{1}{r^3} + \frac{jk}{r^2} \right) \cos \theta & (a) \\ H_\theta &= \frac{IS}{4\pi} e^{-jkr} \left(\frac{1}{r^3} + \frac{jk}{r^2} - \frac{k^2}{r} \right) \sin \theta & (b) \\ E_\phi &= -\frac{j\omega\mu_0 IS}{4\pi} e^{-jkr} \left(\frac{1}{r^3} + \frac{jk}{r^2} - \frac{k^2}{r} \right) \sin \theta & (c) \end{aligned} \right\} \dots (1)$$

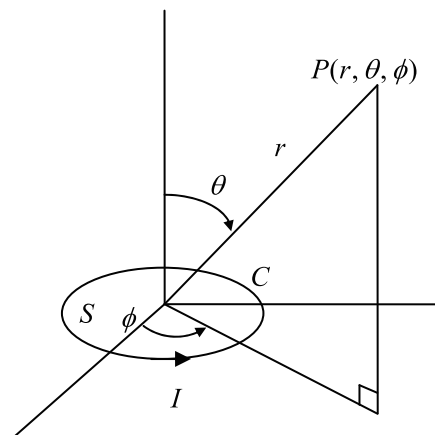


Fig.2 Small Loop Antenna

ただし、 $\omega = 2\pi f$, $k = \sqrt{\omega^2 \mu_0 \epsilon - j\omega \mu_0 \sigma} = \beta - j\alpha$

ここで k は伝搬定数、 α は減衰定数、 β は位相定数を示し、それらは(2)式のようなになる。

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon} \sqrt{\frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon} \right)^2} - 1 \right)} & (a) \\ \beta &= \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon} \sqrt{\frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon} \right)^2} + 1 \right)} & (b) \end{aligned} \right\} \dots (2)$$

Table-1 にも示すように、本通信システムの使用条件を媒質の比誘電率 $\epsilon_r = 1 \rightarrow 81$ 、導電率

$\sigma = 0.001 \rightarrow 4[S/m]$ 、及び周波数 $f = 100 \rightarrow 10,000 \text{ Hz}$ と限定した場合、(2)式は $(\sigma/\omega\epsilon)^2 \ll 1$ となり(3)式のように近似できる。

$$\alpha \cong \beta \cong \sqrt{\frac{\omega\mu_0\sigma}{2}} \quad [1/m], [rad/m] \quad \dots\dots\dots (3)$$

また、この条件下では(1)式から求まる $E_\phi/H_r, E_\phi/H_\theta$ 、すなわち伝搬インピーダンスは非常に低くなり、本通信システムの伝搬の主体は磁界の H_r, H_θ であることが分かる。よって、以下では(1)-(a),(b)式の H_r, H_θ のみを検討する。

3. 2 受信点の最大磁界強度の近似式

(1)-(a),(b)式において e^{-jkr} はうず電流損失を示す。また、 $1/r^3, jk/r^2, -k^2/r$ は距離減衰を示すが、これらの3つの項の値は(4)式の条件のとき等しくなる。

$$kr = 1 \quad \dots\dots\dots (4)$$

よって、(1)-(a),(b)式は r が(4)式よりもずっと小さくなれば $1/r^3$ の項が、ずっと大きければ $-k^2/r$ の項が支配的となり、(1)-(a)式の H_r 、(1)-(b)式の H_θ では係数が2倍異なること、またその方向が 90° 異なることも考慮に入れると受信点の最大磁界強度は(5)式のように近似できる。

$$\left. \begin{array}{l} r \ll \frac{1}{k} \\ H_r \cong \frac{IS}{2\pi} e^{-jkr} \frac{1}{r^3} \cos \theta \quad (a) \\ \\ r \gg \frac{1}{k} \\ H_\theta \cong -\frac{IS}{4\pi} e^{-jkr} \frac{k^2}{r} \sin \theta \quad (b) \end{array} \right\} \quad \dots\dots\dots (5)$$

3. 3 媒質による受信点の最大磁界方向

媒質に Table-1 に示す湿土、海水の二つを選んで、それらの媒質中での本通信システムで $f=1,000\text{Hz}$ の送受信間距離に対する受信点の最大磁界強度とその方向について検討してみる。

(1) 湿土中 ($\sigma = 0.02 [S/m]$)

(3)、(4)式より

$$\alpha \cong \beta \cong \sqrt{\frac{\omega\mu_0\sigma}{2}} \cong 8.9 \times 10^{-3} \quad [1/m], [rad/m]$$

$$r = \frac{1}{|k|} = \frac{1}{|\beta - j\alpha|} \cong 77 \quad [m]$$

よって、湿土中において、送受信間距離が約 70m 以内の受信点の最大磁界強度は、ほぼ(5)-(a)式で近似される。そして、その方向は $\theta = 0^\circ$ となる。

(2) 海水中 ($\sigma = 4 [S/m]$)

(3)、(4)式より

$$\alpha \cong \beta \cong \sqrt{\frac{\omega \mu_0 \sigma}{2}} \cong 1.25 \times 10^{-1} \quad [1/m], [rad/m]$$

$$r = \frac{1}{|k|} = \frac{1}{|\beta - j\alpha|} \cong 5.8 \quad [m]$$

よって、海水中において、送受信間距離が約 6m よりも大きい受信点の最大磁界強度は、ほぼ(5)-(b)式で近似される。そして、その方向は $\theta = 90^\circ$ となる。

3. 4 各種媒質中での距離減衰特性

Fig.3(a),(b)に、完全式(1)-(a),(b)を用いた $f=1,000\text{Hz}$ 一定、 $S=0.1\text{ m}^2$ 、 $I=10\text{A}$ でのTable-1に示す各種媒質中における送受信間距離に対する受信磁界強度の計算結果を示す。Fig.3(a)では(1)-(a)式で $\theta=0^\circ$ とした場合の空気(黒実線)、乾土(赤紫実線)、湿土中(緑実線)を、(b)では海水中での(1)-(a)式で $\theta=0^\circ$ (赤実線)、(1)-(b)式で $\theta=90^\circ$ (赤破線)の場合を示している。特に(b)においては、赤実線と破線が $r=10\text{m}$ 付近で交差しているが、これが前項で示した最大磁界が H_r から H_θ ($H_\theta = H_t$)に入れ替わることを示している。

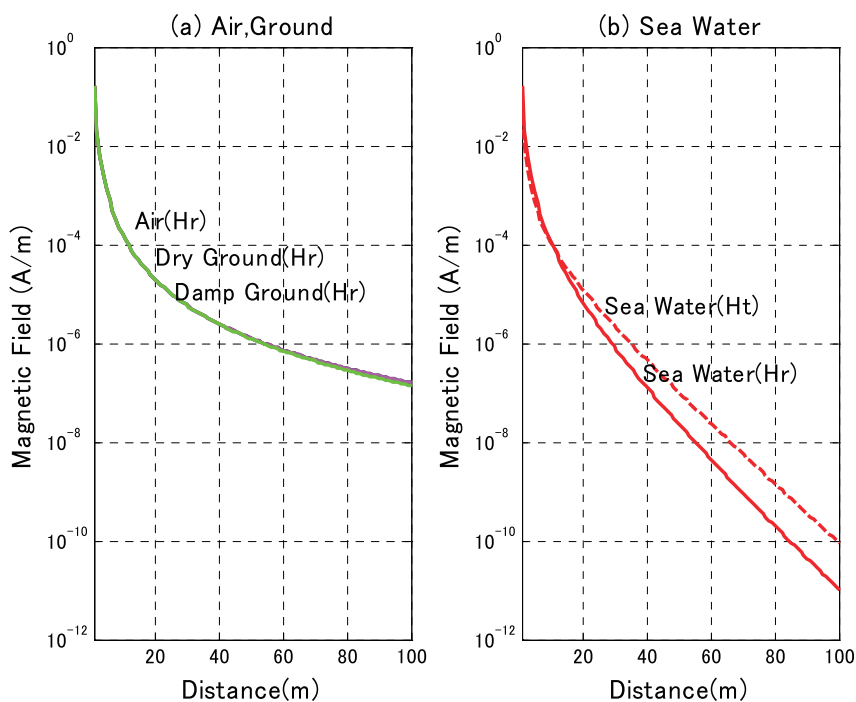


Fig.3 Magnetic Field Intensity at Observation Points

3. 5 各種媒質中での周波数減衰特性

Fig.4(a),(b)に、完全式(1)-(a),(b)を用いた $r=30\text{m}$ 一定、 $S=0.1\text{ m}^2$ 、 $I=10\text{A}$ でのTable-1に示す各種媒質中におけるアンテナ電流の周波数に対する受信磁界強度の計算結果を示す。Fig.4(a)では(1)-(a)式で $\theta=0^\circ$ とした場合の空気(黒実線)、乾土(赤紫実線)、湿土中(緑実線)を、(b)では海水中での(1)-(a)式で $\theta=0^\circ$ (赤実線)、(1)-(b)式で $\theta=90^\circ$ (赤破線)の場合を示している。特に(b)においては、赤実線と破線が $f=120\text{Hz}$ 付近で交差している。これ以上の周波数では H_θ が優勢となることを示している。

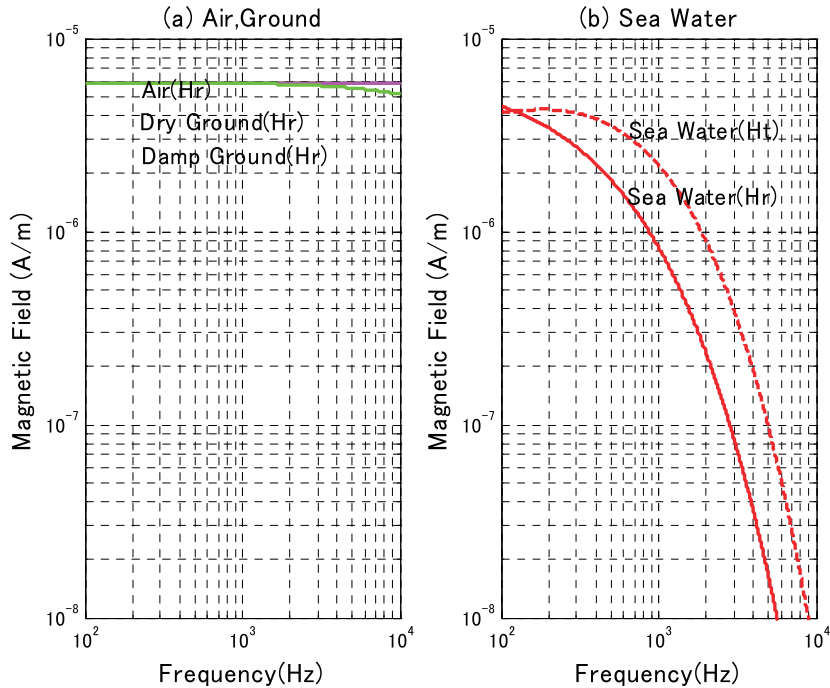


Fig.4 Magnetic Field Intensity at Observation Points

4. 多層媒質中での磁界分布の特徴

4. 1 計算モデル

ここでは媒質中に無限長導線を置き、それに交流を流した場合の導線に垂直な断面の磁界分布を2次元 FEM 磁界解析プログラムで計算し、その結果を検討する。この場合の受信点の磁界強度は、うず電流損失と距離減衰の $1/r$ の項により決まり、(1)式での磁界強度とは距離減衰の項に関して異なるが、多層媒質中の磁界分布の特徴は媒質中のうず電流損失で決まるため、特に問題はない。

Fig.5 に計算モデルを示す。z 軸方向に一様、xy 平面で層状断面になるような媒質の $x=0, y=15\text{m}$ の z 軸方向に無限長導線を置き、それに $f=1,000\text{Hz}$ 、 $I=10\text{A}$ の電流を流したとき、 $x=0\sim 30\text{m}$ 、 $y=0\sim 30\text{m}$ の xy 平面上の磁界分布を計算する。層状媒質中での磁界分布の特徴は、同じ送信条件での均一媒質中での磁界分布と比較して行う。

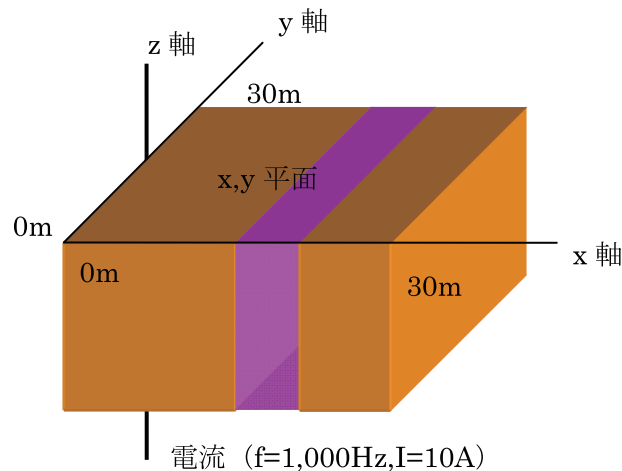


Fig.5 Geometry of Calculation Example

4. 2 均一媒質中での磁界分布

Fig.6 に全域が均一な湿土地盤の場合の計算結果を示す。

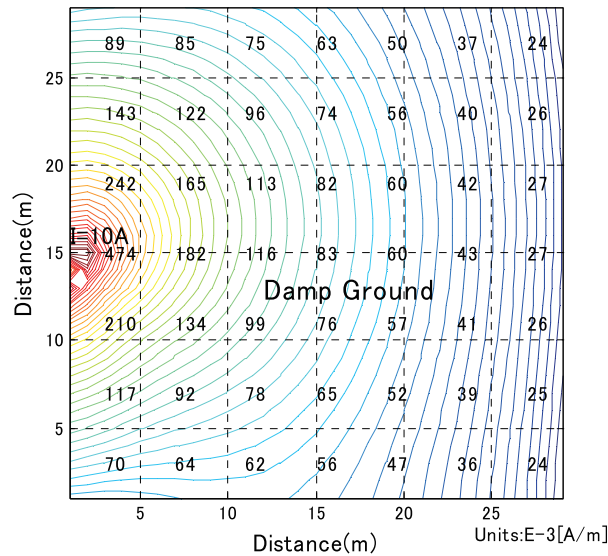


Fig.6 Magnetic Fields in Damp Ground

4. 3 伝搬方向に地盤層と海水層の境界面がある場合

Fig.7 に $x=0\sim 30\text{m}$ で $y=0\sim 12\text{m}$ を海水層、 $y=12\sim 30\text{m}$ を湿土層とした場合の計算結果を示す。これを Fig.6 と比較すると境界面付近では部分的に海水中でも磁界が強くなっている。また、海水層によるうず電流損失の影響が全体に及び境界面から遠く離れた湿土層中にも及んでいることが分かる。さらに、海水層の代わりに金属に近い導電率 ($\sigma=100[\text{S/m}]$) の層として同様の計算をしてみると全域の減衰がより激しく、境界面付近の磁界の強い箇所はなくなる。

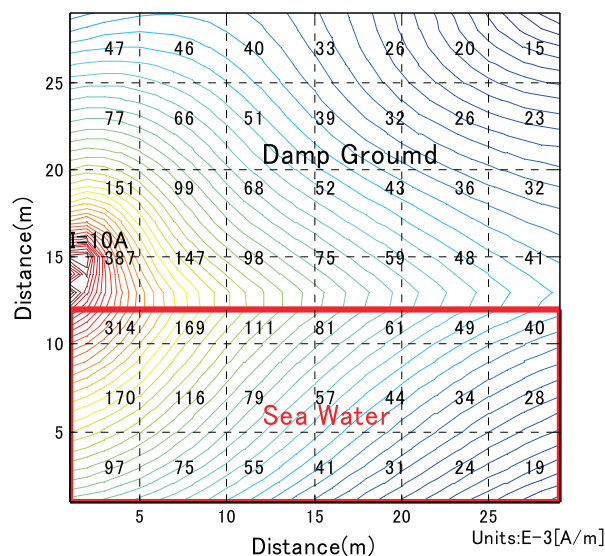


Fig.7 Magnetic Fields on Border of Ground and Sea

4. 4 伝搬方向の地盤層が海水層に挟まれた場合

Fig.8 に、 $x=0\sim 30\text{m}$ で $y=0\sim 7\text{m}, y=23\sim 30\text{m}$ の領域を海水層、それに挟まれた領域を湿土層とした場合の計算結果を示す。これを Fig.6 と比較すると磁界は湿土層部分を導波管内のように平面波状に大きな減衰を受けながら伝搬していることが分かる。さらに、海水層の代わりに金属に近い導電率 ($\sigma=100[\text{S}/\text{m}]$) の材料層として同様の計算をしてみるとこの特徴はより顕著になり、両サイドの材料層中での磁界はほとんど零となり、湿土層を伝搬する磁界は急激な減衰を受けることが分かる。

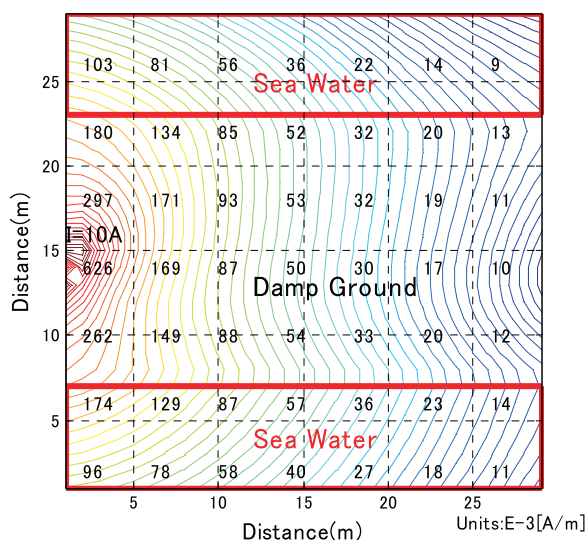


Fig.8 Magnetic Fields in Ground between Seas

4. 5 伝搬方向に垂直に湿土層、海水層、湿土層がある場合

Fig.9 に、 $y=0\sim 30\text{m}$ で $x=15\sim 20\text{m}$ を海水層、残りの領域を湿土層とした場合の計算結果を示す。これを Fig.6 と比較すると湿土層中の磁界は、海水層の手前では海水層からの反射があるように強く、また後方では海水層で遮へいされたように弱くなっていることが分かる。さらに、海水層の代わりに金属に近い導電率 ($\sigma=100[S/m]$) の材料層として同様の計算をしてみるとこの特徴はより顕著になり、特に後方の湿土層中の磁界ほとんど零となる。

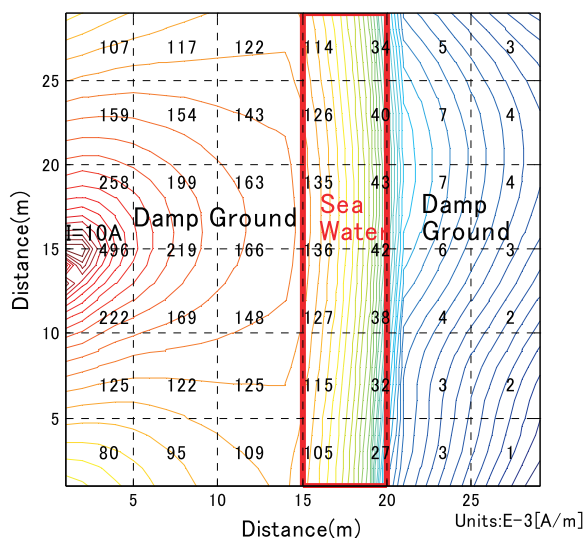


Fig.9 Magnetic Fields in Layers of Ground and Sea

4. 6 伝搬領域内に柱状の海水層がある場合

Fig.10 に、 $x=12\sim23\text{m}$, $y=12\sim23\text{m}$ の領域を z 軸方向に長い柱状の海水層とし、残りの領域を湿土層とした場合の計算結果を示す。これを Fig.6 と比較すると、全体的には磁力線が海水層に集まってその中でうず電流損失を受けているが、海水層の手前では海水層からの反射で強く、また後方では陰となり弱くなっていることが分かる。さらに、海水層の代わりに金属に近い導電率 ($\sigma=100[S/m]$) の材料層として同様の計算をしてみると、この傾向はより強くなることが分かる。

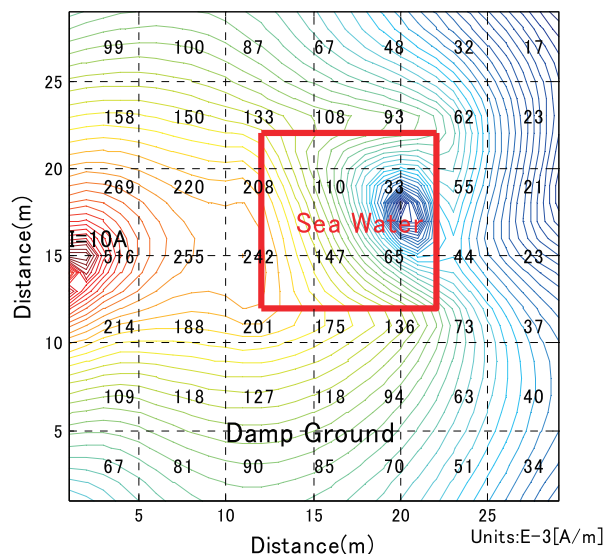


Fig.10 Magnetic Fields in Ground having Sea Water Pillar

5. まとめ

本通信システムの基本の伝搬特性は、導電率の低い一般的地盤では送受信点間距離を r とするとほぼ $1/r^3$ に比例し、導電率の高い海水中では k^2/r に比例する。そして、前者の場合は受信コイルを送信コイルに平行に、後者の場合は直角に置くと効果的に受信ができる。また、多層構造地盤中では、導電率の高い層（海水層など）が、その層でのうず電流損失で、全層地盤の磁界を弱め、かつ、その層の前方では磁界を反射させ、後方では遮へいさせる。本論文で使用した FEM プログラムでは無限要素を入れておらず特に周辺領域の計算結果の数値には誤差が大きいことをお断りしておく。

参考文献

- 1) 田端、水上、森川、浅香：大規模埋立地における磁気伝送水圧式沈下計による沈下測定、海洋開発論文集、第19巻、2003、pp.171,176.
- 2) 虫明康人：アンテナ・電波伝搬、コロナ社、2002、pp.54-55, pp.128-129.
- 3) 前田憲一：電波工学、共立出版、1970、p189.

(平成 21 年 3 月 31 日受理)