

透過電磁波プロファイリングによる地盤導電率分布
の推定精度
— 電磁界数値シミュレーションに基づく基礎的検討 —

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 独立行政法人農業工学研究所 公開日: 2024-03-08 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 黒田, 清一郎, 中里, 裕臣, 奥山, 武彦 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.24514/0002000065

透過電磁波プロファイリングによる地盤導電率分布の推定精度

- 電磁界数値シミュレーションに基づく基礎的検討 -

黒田清一郎*・中里裕臣*・奥山武彦*

	目次
緒言	205
方法	206
1 電磁界数値シミュレーションの方法	206
2 モデル地盤の設定条件	206
3 シミュレーションの設定条件	207
4 導電率分布の推定方法と推定精度の評価方法	208
シミュレーション結果	208
1 中心周波数100MHz分散 1.0mの場合の結果	208
2 全シミュレーション結果	209
導電率分布の推定精度の評価	209
結言	212
参考文献	212
Summary	214

緒言

地下水・土壌汚染対策の分野では、拡散移流方程式等に基づく数値計算によって地盤中の流体および汚染物質の挙動を予測することが一般的なものとなり、それに基づくシナリオ分析や対策が行われ始めている。農村地域の地下水における硝酸性窒素の高濃度化や島嶼地域における地下水への塩水侵入等の問題も、同様な試みが今後より多く行われていくものと考えられる。しかしながら、一方で西垣(2002)は、そのような数値モデルによる予測・評価技術の現状を踏まえた上で、地盤の詳細な不均質性を取り扱う方法がないこと、数値解析結果の精度に見合った観測体制が確立されていないこと、解析と観測の比較がなされた例も少ないこと、等が課題として残されていると指摘している。このことは、数値計算が必要とする情報量、あるいは数値計算から得られる情報量にたいして、実際に現在の技術で計測できる情報量が不足していることを示すものと考えられる。

数値計算に用いる溶質分散係数等のパラメータの同定や計算結果の評価を行う場合には、空間的にも時間的にも密で連続したデータの取得が必要である。しかし実際の野外の地盤では、一般的にこれは困難である。例えば、土壌の汚染状況を把握する場合、もっとも確実なのはボーリング

コアサンプルの分析によるものである。しかし自然条件の変化等によるその後の経時変化を追跡するためにさらなるサンプリングを行うことは、コスト、労力が共に必要となる。また得られた結果の変化が、時間的な変化か、地盤の不均一性によるものかを判断することが困難である。一方、埋設型のセンサーやテンシオカップの利用等も考えられる。これは時間的に連続したデータの取得は容易であるが、空間的に連続した情報を取得することが困難である。

電磁波トモグラフィに代表される高周波数(数MHz～数百MHz)の透過電磁波を用いた地盤探査は、物理探査技術の中でも比較的高い空間分解能で地盤中の物性の連続した空間分布を評価できる手法である(佐藤, 利岡, 1998-a)。同手法では透過する電磁波の伝播速度と伝播過程における電磁波強度の減衰情報を元にして評価が行われる。前者から地盤の体積含水率分布が推定できるのに対し、後者は地盤の導電率を評価することができる。透水性亀裂等の調査に用いられている塩水トレーサおよび減衰トモグラフィによる探査は、この後者の特徴を利用したものである。これは亀裂の存在が懸念される地盤においてボーリング孔を設置し、X線撮像における造影剤のように、そこに塩水トレーサを注入する。そして2本のボーリング孔に挿入した送受信アンテナで電磁波を透過させ、その電磁波の減衰情報等をもとに逆解析手法によって導電率の2次元断面を得て(減衰トモグラフィ)、その塩水注入前後の時間変化から、亀裂位置の検出を試みるものである(Lane, 1996)。

もし、地盤中の汚染物質の存在によって導電率等の地盤の電磁気特性に十分な変化が生じて、透過電磁波による探査手法がそれを十分に検知するだけの感度を有し、かつ物質の移流や分散現象を評価するのに十分な空間分解能を有

* 造構部土木地質研究室

平成16年1月20日受理

キーワード：電磁波，地盤の導電率，電磁界シミュレーション，
電磁波探査，地盤環境

するならば、同手法は地下水・土壌汚染対策の分野においても、空間的に連続した情報とその時間発展を評価できる有効な手法になりえるものと考えられる。

また、汚染物質の影響による電磁気特性の変化が小さく汚染状況そのものを捉えることができなくても、同手法に十分な空間分解能があれば、塩水等のトレーサを人為的に注入しその後の挙動を把握することによって、移流や分散状況の評価が可能になるものと思われる。この場合は数値予測における分散係数等パラメータの原位置評価技術として有効なものと考えられる。

以上のような観点で、本研究は電磁波トモグラフィ等の透過電磁波を用いた探査手法が、塩水トレーサの進入状況等の定性的な把握だけでなく、地盤中の溶存物質の移流や分散現象の評価に適用できるかどうか、特に十分な空間分解能を有するかどうかを評価することを目的とする。そして透過電磁波による導電率分布の推定精度と、伝播過程において生じる誤差とその要因について、時間領域の電磁界解析による数値シミュレーションによって、定量的な評価を行うものである。

本報では、地盤中に層状に高導電率部が存在し、それを透過電磁波によって直交する1次元のプロファイリングを行う状況を想定してシミュレーションを行った。その結果に基づき、電磁波パルスの中心周波数（もしくは波長）、および電磁波伝播距離が誤差に与える影響について特に注目して検討を行った。

方法

1 電磁界数値シミュレーションの方法

地盤中の電磁波の伝播過程のシミュレーションはMaxwell方程式の時間領域の差分法に基づき行った。

実際の電磁波を用いた地盤中での計測を厳密に再現する

には3次元での解析が必要であるが、数値計算の安定条件を満たしてそれを行うには膨大な計算リソースと時間を必要とする。そこで本報では次式で表されるTMzモードの2次元のMaxwell方程式（例えばTaflove and Hagness, 2000）に基づき、数値計算を行った。

$$\begin{aligned} \frac{E_z}{t} &= \frac{1}{\mu} \left[\frac{H_y}{x} - \frac{H_x}{y} \right] - E_z \\ \frac{H_x}{t} &= -\frac{1}{\mu} \frac{E_z}{y} \\ \frac{H_y}{t} &= \frac{1}{\mu} \frac{E_z}{x} \end{aligned} \tag{1}$$

ここで

E_z : 電界 (z成分)

H_x, H_y : 磁界のx, y成分

μ, σ : 誘電率, 導電率および透磁率

Maxwell方程式の差分化についてはYeeのアルゴリズム (Yee, 1966) に基づいて行った。

2 モデル地盤の設定条件

シミュレーションは次のようなモデル地盤を想定して行った。対象領域は15m x 15mの正方形の領域とした (Fig. 1)。モデル地盤中の電磁波伝播速度にかかわるパラメータである透磁率および比誘電率は一定とし比透磁率 μ_r は1, 比誘電率 ϵ_r は9とした。このモデル地盤での電磁波伝播速度 V_p は、高周波低導電率条件での関係式

$$V_p = \frac{C}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \tag{2}$$

ここで

C: 光速 0.30m/ns

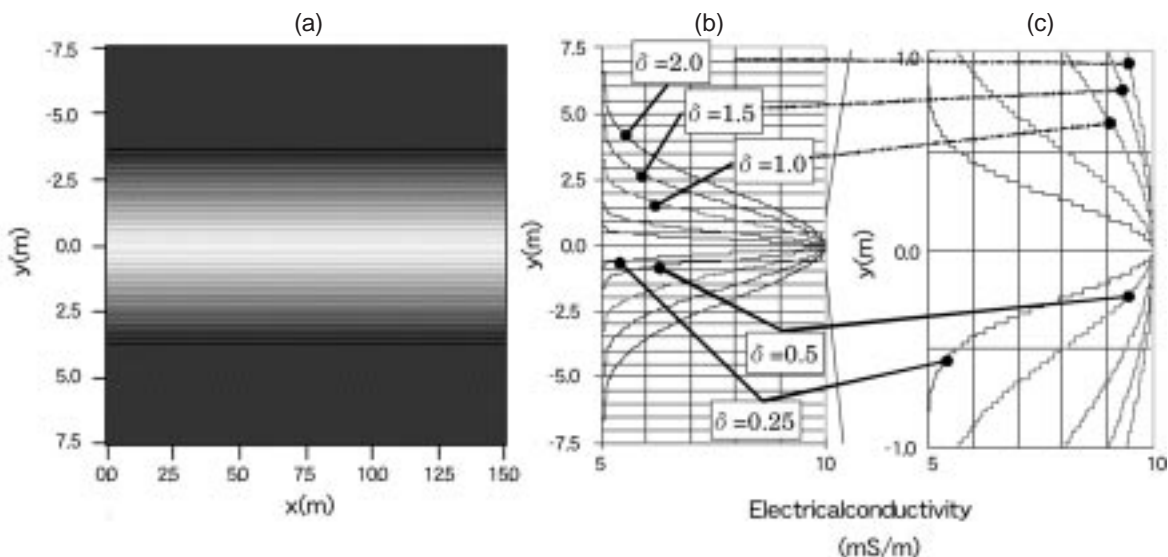


Fig.1 : モデル地盤の導電率分布 ((c) は $y = -1.0 \sim 1.0$ mの拡大図)
Electrical conductivity distribution in model soil

より0.10m/nsとなる。この条件は体積含水率が約20～25%程度の地盤を想定している。

モデル地盤の導電率の分布状況をFig. 1に示した。x方向については一定値で、y方向にのみ不均一な分布を有するものとし、次式の誤差分布関数で表現される導電率分布をもつものとした。

$$\sigma(y) = \sigma_0 + (\sigma_1 - \sigma_0) \exp\left[-\left(\frac{y - y_0}{\sqrt{2}}\right)^2\right] \quad (3)$$

y_0 は解析領域の中央である $y = 0$ の位置とした($y_0 = 0$)。この分布は y_0 を中心とし長さ δ の分散を有する誤差分布関数である。この設定条件は均一な物性を有する地盤の中に、塩水トレーサあるいは電気伝導度が異なる汚染物質等が層状に存在し、それが地盤中で拡散等の影響を受けながら上下に広がっている状況を想定している。(3)式の δ は0.25m, 0.5m, 1.0m, 1.5m, 2.0mの5通り設定した。この5通りのモデル地盤の導電率分布をFig. 1-(b)に示した。またFig. 1-(c)には中央 $y = 0$ 付近の拡大図を示した。モデル地盤は後に述べるように25mmの空間格子で離散化したので、導電率分布は階段状になっていることがわかる。なお本報では $\sigma_0 = 0.005\text{S/m}$ (5mS/m), $\sigma_1 = 0.010\text{S/m}$ (10mS/m)に設定した。

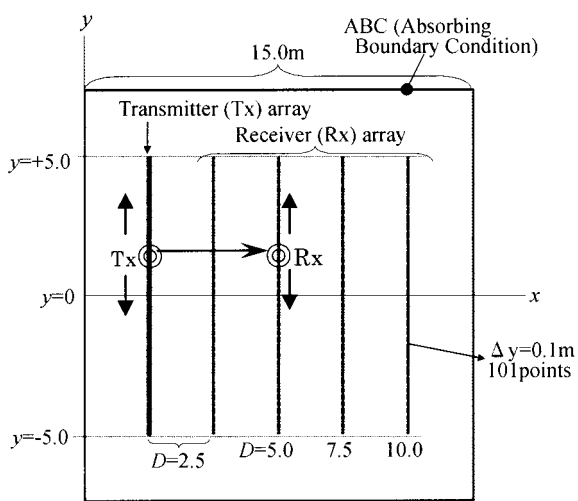


Fig. 2 : シミュレーション空間と送受信点配置
Domain of simulation and the locations of transmitter and Receiver points

3 シミュレーションの設定条件

シミュレーション領域における送受信点の配置をFig. 2に示した。送受信アレイの間隔DをD = 2.5, 5.0, 7.5, 10.0mの4パターン設定した。それぞれの列には $y = -5.0 \sim +5.0\text{m}$ の10mの間に0.1m間隔で101点送受信点を配置した。図にはD = 5.0mの送信受信(Tx, Rx)の組み合わせを示した。このように同じyの値の組み合わせで送信受信を行うことでy方向のプロファイリングを行うよ

うな送受信配置とした。

送信点ではRicker's Waveletとよばれる次式で表される関数で電流を給電することによって電磁波を発生させた。

$$i(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[4 \left(\frac{t}{\tau} \right)^3 - \left(\frac{t}{\tau} \right)^4 \right] \cdot e^{-t/\tau} \quad (4)$$

ここで

$$\tau = 1 / (4 \pi f_c) \quad (5)$$

で f_c は上式のWaveletのスペクトルが最大のパワーを示す中心周波数である。本報での実験条件としては、これを25MHz, 50MHz, 100MHz, 150MHz, 200MHzの5通りに設定し検討した。上記のような時間領域のパルス波に関しては、空間分解能の指標となる波長を、有効波長 $\lambda_{\text{eff}} = V_p / f_c$ として定義する。この有効波長 λ_{eff} は上記の場合でそれぞれ4.0m, 2.0m, 1.0m, 0.66m, 0.5mとなる。

シミュレーション条件の組み合わせをTable 1にしめした。導電率分布の誤差分布関数中のパラメータである分散 δ が5通り(0.25m, 0.5m, 1.0m, 1.5m, 2.0m), 送信波の中心周波数 f_{eff} が5通り(25MHz, 50MHz, 100MHz, 150MHz, 200MHz), 送受信間隔Dが4通り(2.5m, 5m, 7.5m, 10m), 合計 $5 \times 5 \times 4 = 100$ ケースについてシミュレーションを行った。

Table 1 数値シミュレーションの設定条件
Conditions of numerical simulation

中心周波数 f_c (MHz)	25	50	100	150	200
有効波長 λ_{eff} (m)	4.0	2.0	1.0	0.66	0.5
導電率分布の分散 δ (m)	0.25	0.50	1.0	1.5	2.0
送受信間隔 D (m)	2.5	5.0	7.5	10.0	

格子間隔および時間ステップについては数値計算の安定性を考慮して決定した。格子間隔は経験則として最小波長の1/10程度以下が適しているとされている(Taflove and Hagness, 2000)。今回のシミュレーションでは、 $f_c = 25, 50, 100\text{MHz}$ については25.0mm, $f_c = 150, 200\text{MHz}$ については12.5mmとした。この場合には、許容される最小の波長を前者は0.25m, 後者は0.125mと想定したことになる。これらの値は前述の各周波数の有効波長よりは十分小さく、空間差分格子間隔は条件を満たしているといえる。

時間ステップ Δt については2次元のCourantの安定条件を満たすように次式で決定した。

$$\Delta t = \frac{x}{\sqrt{2} v_{\text{max}}} \quad (6)$$

V_{max} はシミュレーションの上で想定される最大の伝播速度である。今回はこれを真空中の電磁波伝播速度(光速度, 0.30m/ns)とした。

Table 2 格子および時間ステップのパラメータ設定条件
Time and space increment parameters

中心周波数 f_c (MHz)	25,50,100	150,200
差分格子間隔 Lattice space increment d/l	25.0mm	12.5mm
時間ステップ Time increment dt	59.0ps	29.5ps

4 導電率分布の推定方法と推定精度の評価方法

Maxwell 方程式について, x方向に進行する平面波の電解の振幅を E_{pp} とすると

$$E_{pp} = E_0 e^{-\alpha z} \quad (7)$$

ここで E_0 は $Z = 0$ のときの振幅である。 α は減衰率で, 高周波低導電率の誘電性媒質中では次式のようになる(佐藤・利岡, 1998)

$$\alpha = \frac{\omega}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (8)$$

今回のシミュレーションで設定したモデル地盤の導電率は10mS/m以下であり, 数MHz以上の電磁波に対しては十分, 誘電性媒質と考えることができる。そこで前節で述べたような送受信条件で得られた時間領域受信波形に対し, 初動のピークと次の異符号のピークの電界強度の差より振幅を求め (peak to peak, ここでは E_{pp} と記す), これを (7)(8) 式から導出される次式によって導電率を推定した。

$$\sigma_{est} = A \log E_{pp} + B \quad (9)$$

ここで σ_{est} は電解強度から推定された導電率である。上式の係数 A, B については, 導電率 $\sigma_0 = 5, 6, 7, 8,$

9, 10mS/mの均一な地盤を設定し, それぞれについてシミュレーションを行って, σ_{est} と E_{pp} の間に線形性が成り立つことを確認した後に, 較正直線を求めて決定した。

以上のような方法で推定された y 方向の導電率分布について, 地盤中の溶質移動の分野で用いられている質量分布のモーメント法(例えば Ellsworth et.al., 1981)により, 導電率分布の分散を推定した。これを元のモデル地盤の分散長との比較を行うことによって推定精度の評価を行った。

また導電率推定値そのものの精度の検討は, 中央 $y = 0$ での導電率の推定値とモデル地盤の同位置の値 σ_1 を比較することによって行った。

シミュレーション結果

1 中心周波数100MHz分散 1.0mの場合の結果

シミュレーションとその解析の過程を明示するために, ここではまず一事例として, 中心周波数 $f_c = 100\text{MHz}$, モデル地盤の導電率分布の分散 $\sigma = 1.0\text{m}$, そして送受信間隔 $D = 5.0$ の場合の, シミュレーション結果の詳細を示す。

Fig. 3 は $y = 0$ を送信点として電磁波を放射した後の, 電界強度分布の変化を示したもので, 電磁波の伝播過程を把握することができる。なお同図では電解強度を色の濃淡で示している。電磁波は円状に全方位に対して均等な速度で伝播していることがわかる。また導電率が高い $Z = 0$ 付近では電磁波の減衰が大きく, 強度が低くなっていることがわかる。

Fig. 3 で示したような電磁波の送信を $y = +5.0 \sim -5.0\text{m}$ までの10mの区間について0.1mピッチで101点行い, 送信点と同じ y の値の位置で受信した際の受信波形について Fig. 4 に示す。元の地盤の導電率に対応し, $y = 0$ を中心に電磁波のピークが減衰していることがわかる。この受信波形のプロファイルの中から $y = 0.0, +5.0\text{m}$ の受信波形を図示したものが Fig. 5 である。導電率が高い $y = 0.0$

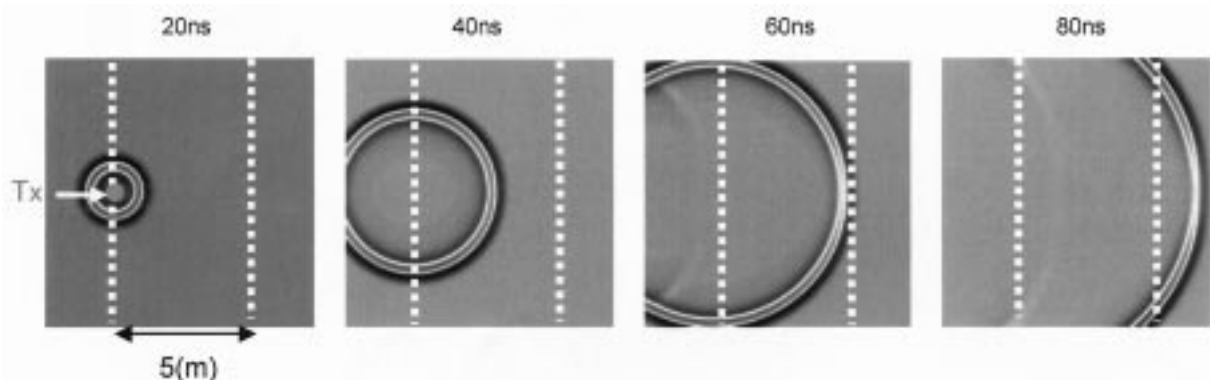


Fig. 3 : $Z = 0.0$ から電磁波を送信した後の電界強度分布の変化 ($f_c = 100\text{MHz}$, $\sigma = 1.0\text{m}$ の場合)
Snap shots of Electrical field in the model field (Case in $f_c = 100\text{MHz}$ and $\sigma = 1.0\text{m}$)

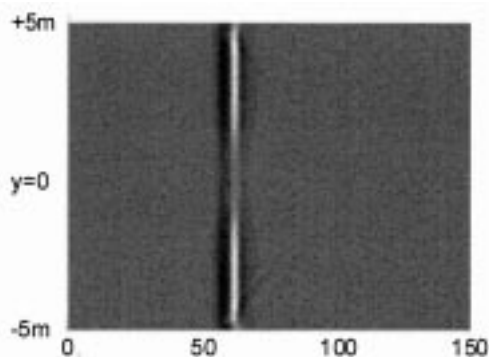


Fig. 4 : 受信波形プロファイルの一例
($f_{\text{eff}} = 100\text{MHz}$, $\delta = 1.0\text{m}$, 送受信間距離 $D = 5.0\text{m}$ の場合)

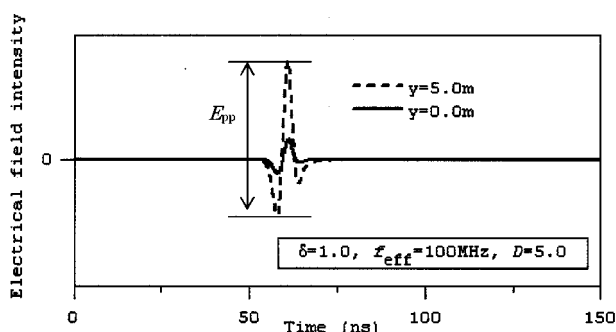


Fig. 5 : 受信波形の一例
($f_c = 100\text{MHz}$, $\delta = 1.0\text{m}$, $D = 5.0\text{m}$ の場合)
An example of original wave forms

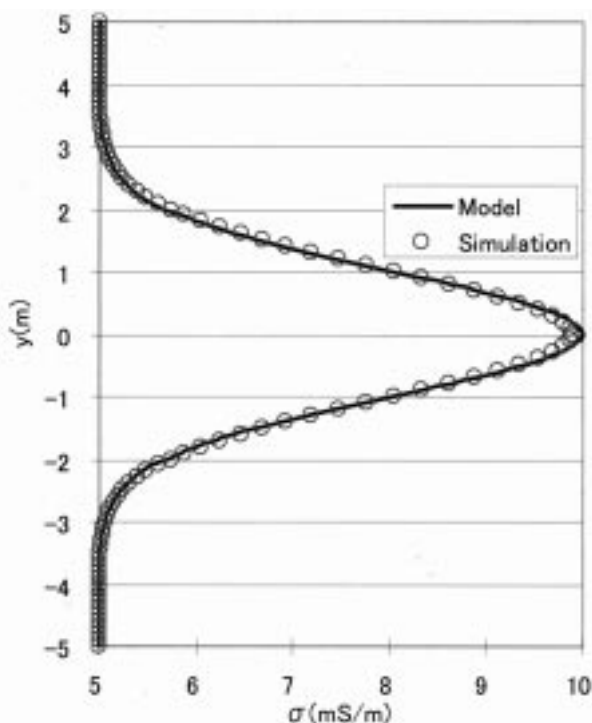


Fig. 6 : 導電率推定結果の一例
($f_c = 100\text{MHz}$, $\delta = 1.0\text{m}$, $D = 5.0\text{m}$ の場合)
An example of estimation for a conductivity profile

とバックグラウンドに近い $y = +5.0\text{m}$ では電解強度に明瞭な差がでており, $y = 0.0$ の波形の強度が明らかに低下していることがわかる。Fig. 5 には $y = 5.0\text{m}$ の場合の E_{pp} の読み取り方法を示した。このようにして読み取った E_{pp} から (8) 式より導電率を推定し, 地盤の導電率プロファイル (分布) を推定した (Fig. 6)。

2 全シミュレーション結果

前節の方法で導電率分布を推定した全結果を Fig. 7-1,2 に示した。なお $y = 0$ に対する対称性は全ての場合について確認できたので正の領域だけを示した。

$\delta = 0.25\text{m}$ では全周波数で元モデルの分布を表現できていないことがわかる。傾向としては中心周波数が低いほど, また送受信間距離 D が長くなればなるほど, モデルとの差が大きく生じることがわかる。この傾向は $\delta = 0.5\text{m}$ の場合でも同様である。

一方, ゆるやかな分布の $\delta = 1.5\text{m}$ あるいは 2.0m の場合は全ての周波数で元モデルの分布形状を十分よく表現できている。特に 150MHz や 200MHz の高周波数の電磁波による推定結果はほぼ一致している。

以上のように, 透過電磁波による推定は概ねプロファイルを再現しているものの, 推定に用いた電磁波の中心周波数, 有効波長の違いを反映させたものとなった。

導電率分布推定精度の評価

前章で示した結果をもとに本章では精度を定量的に評価する。精度の評価は, 中央 $y = 0$ でのピークの導電率の推定値 σ_{est} , および導電率分布の分散 σ の推定値と, モデル地盤のもとの値との比較によって行う。

Fig. 7 で示された, 元モデルと推定値との差は, 電磁波の有効波長が長いほど大きくなっている。またその差が生じるのはモデルの分布に対して推定値の分布が緩やかな鈍いピークとなることに起因している。一般的な傾向として, 推定に用いる電磁波の波長のスケールに対して, 対象とする分布のスケールが小さくなると, その波長ではより細かい分布を十分記述することができなくなり, 推定された分布は元の分布よりも「ぼやけた」もの, 「なまった」形状となっている。一般に波動現象を用いた探査の場合, その分解能は波長を基準として定義される。例えば反射法地震探査における分解能は, 地中の二つの異なる物性が独立の反射面として分離できる限界とされ, Rayleighの1/4波長則, 分解能を1/2波長とするRickerの基準等が知られる (Kallweit and Wood, 1982)。本報で取り扱ったのは同じ波動現象であるが, 反射波探査ではなく, 上記のような分解能と直接結びつけることはできない。しかしここでモデルと推定値の差が生じる傾向を系統的に議論するために, 分解能に関する定義と同様に波長を基準として, 「対

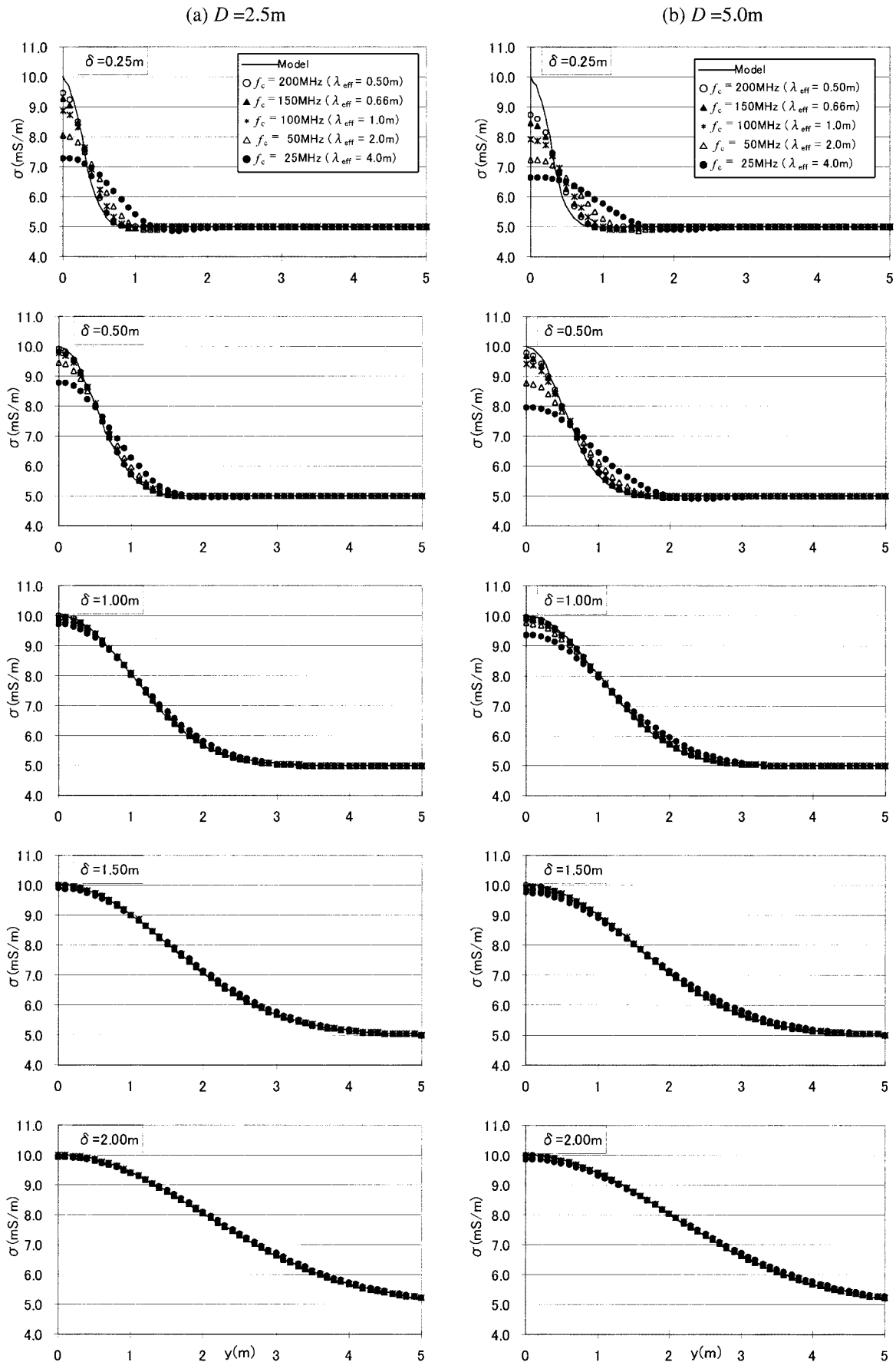


Fig.7-1: 透過電磁波による推定導電率分布 (数値シミュレーション結果)

Estimation for electrical conductivity profile by transmittive electromagnetic wave by numerical simulation

D (m) : Separation between Transmitter and receiver, δ : Variance of electrical conductivity distribution in model soil

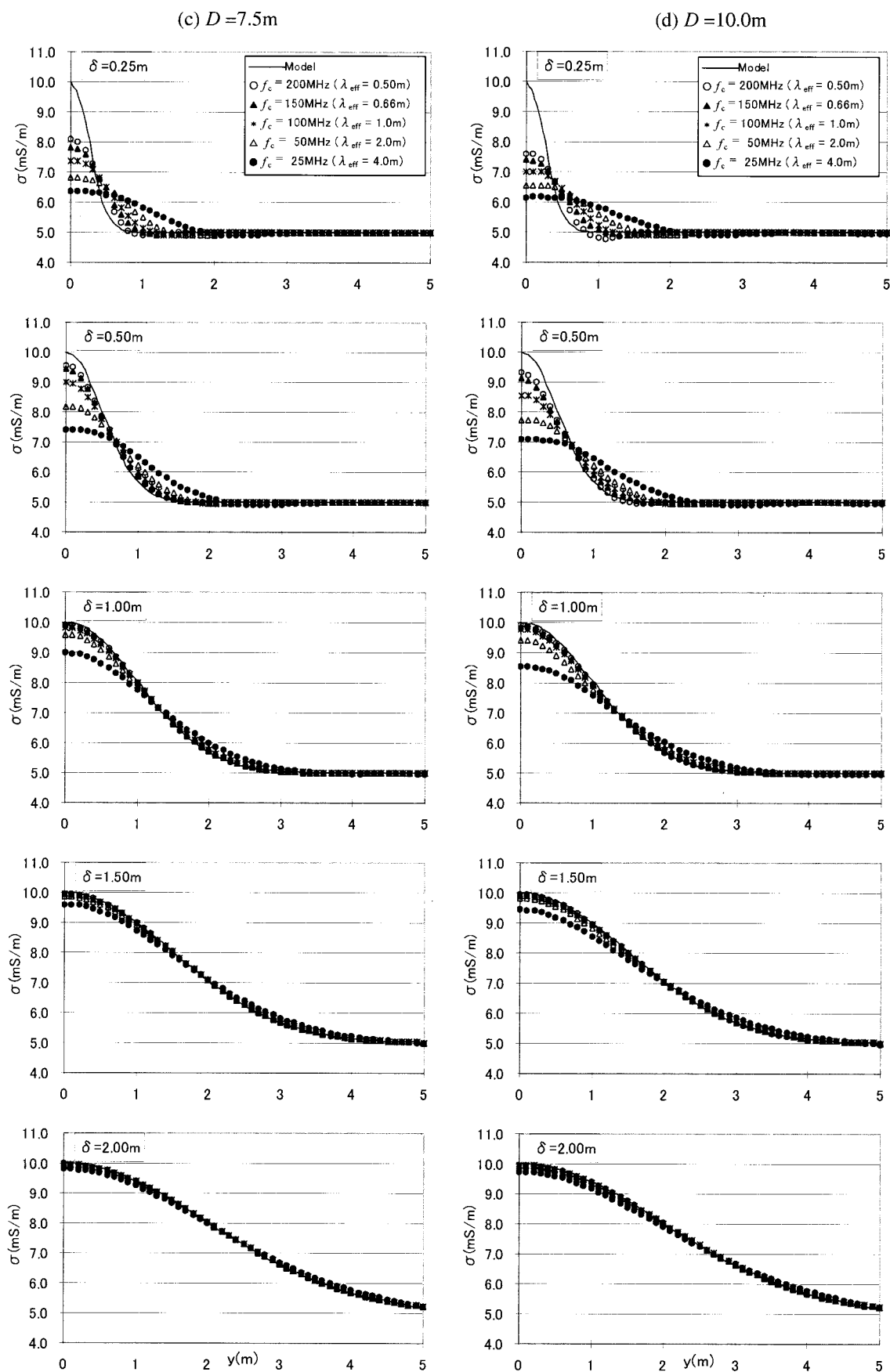


Fig.7-2: 透過電磁波による推定導電率分布 (数値シミュレーション結果)

Estimation for electrical conductivity profile by transmissive electromagnetic wave by numerical simulation

D (m) : Separation between Transmitter and receiver, δ : Variance of electrical conductivity distribution in model soil

象とする分布のスケール」と「推定に用いた電磁波の有効波長」の比を指標として検討する。

そこでモデル地盤の導電率分布の分散と推定に用いた電磁波の有効波長との比, すなわち $\delta_{model}/\lambda_{eff}$ を指標として誤差を検討した結果をFig. 8 に示した。

中央 $y = 0$ でのピークの推定導電率の値 σ_{1est} についてはもとのモデル地盤の値 σ_{1model} で除して表示した (Fig. 8-(a))。導電率分布の分散の推定値 δ_{est} についても元のモデルの値 δ_{model} で除して表示した (Fig. 8-(b))。両者ともに1に近いほど正確な推定であることを示す。

Fig. 8-(a) については, $\delta_{model}/\lambda_{eff}$ が1/2より大きい場合には, 推定値は概ね一致している。しかし1/2以下では誤差は急増し, 以降 $\delta_{model}/\lambda_{eff}$ が小さくなるほどその誤差が増大している。 $\delta_{model}/\lambda_{eff} = 1/8$ では推定値は元のモデルの値の60~70%程度となってしまう, もはや適切な推定ではない。

一方, 図には送受信間距離 D についても区分して示した。一般に距離 D が大きいほどモデルとの差が大きくなる傾向があり, その傾向は特に $\delta_{model}/\lambda_{eff}$ が1/2より小さい場合に顕著である。これは電磁波の伝播過程で差が拡大されていく

ことを示している。

Fig. 8-(b) より δ_{est} についても同様な傾向があり, $\delta_{model}/\lambda_{eff}$ が1/2以下で無視できないモデルと推定値との差が生じる。また $\delta_{model}/\lambda_{eff}$ が小さいほど, また D が大きいほどその差が大きくなる傾向があった。

V 結 言

透過電磁波によって導電率のプロファイルを推定する際の精度を, 時間領域の差分法に基づく数値シミュレーションによって検討した。

地盤中に導電率の高い汚染物質やトレーサが拡散・分散等の影響を受けながら層状に分布している状況を想定し, その導電率分布を分散で特徴付けられる1次元の誤差関数で記述した。これを透過電磁波によってその分布を推定した場合, その精度は対象とするもとのモデル地盤の分布のスケールである分散 δ_{model} と, 利用する電磁波の有効波長 λ_{eff} との比 $\delta_{model}/\lambda_{eff}$ で特徴づけることができた。すなわち $\delta_{model}/\lambda_{eff}$ が1/2より大きい場合にはモデルと推定値との差は十分小さいが, それ以下になるとその差は急増する。また送受信間距離 D については一般的に D が大きくなるほど差も大きくなる傾向があり, 特にその傾向は1/2ないしは1/4以下になると顕著なものになった。

応用を考えたとき, 今回検討したような誤差関数型の分布に関しては, 適切な中心周波数の透過電磁波の選択によって, 十分伝播過程において生じる誤差を回避することができ, 分布形状の推定に有効であると考えられる。その際の電磁波の中心周波数の選択にあたっては, 対象とするスケールすなわち分散 δ_{model} より1/2 λ_{eff} すなわち半波長が小さくなるような周波数を選択する必要がある。

実際には電磁波の波長が短い程, すなわち高周波であるほど地盤中での減衰は大きくなるので, 地盤の土性あるいは間隙溶液の状況によっては, 上記の条件を満たす短い波長を選択できないかもしれない。その場合には推定された分布は, なまりの影響を受け誤差が生じていること, その誤差は伝播過程において増大し送受信間距離が長いほど大きくなることを考慮する必要がある。

参考文献

- 1) Ellsworth, T.R.: A 3D field study of solute transport through unsaturated, layered porous media, Water Resources Researches, Vol.27 (5), 951-965 (1981)
- 2) Kallweit, R.S and Wood, L.C. (1982): The limits of resolution of zero-phase wavelets, Geophysics, Vol.47, pp.1035-1046
- 3) Lane, J.W., Jr., Haeni, F.P., Placzek, Gary, and

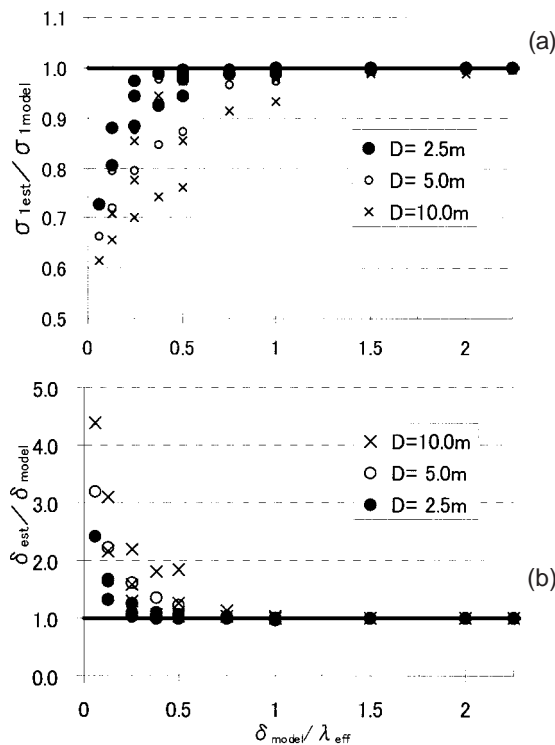


Fig. 8 : 中央 $y = 0$ の導電率推定値 (σ_{1est}) および誤差分布関数の分散 (δ_{est}) の推定値と波長との関係 Estimation for σ_{1} & δ_{est} and the dependence of its accuracy on the wave length

- σ_{1model} : Electric conductivity of model soil at $y = 0$
- σ_{1est} : Estimated electrical conductivity at $y = 0$ by EM wave
- δ_{model} : Variance of the electrical conductivity distribution in model soil
- δ_{est} : Estimated by EM-wave

- Wright, D.L., Use of borehole radar methods to detect a saline tracer in fractured crystalline bedrock at Mirror Lake, Grafton County, New Hampshire, Proceedings in Sixth International conference of Ground Penetrating Radar (GPR'96), 185-190 (1996)
- 4) 西垣誠：地下水・土壌汚染の予測評価技術，地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会第8回講演集，13-18 (2002)
- 5) 佐藤源之・利岡徹馬：物理探査ハンドブック 手法編 電磁波トモグラフィ，物理探査学会，760-761 (1998-a)
- 6) 佐藤源之・利岡徹馬：物理探査ハンドブック 手法編 第7章地中レーダ，物理探査学会，399-431 (1998-b)
- 7) Taflove, A., Hagness, S. C.: Computational Electrodynamics, 2nd Edition, Artech House Publishers, 67-107 (2000)
- 8) Yee, K.S.: Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media, IEEE Trans. Antennas and Propagation, Vol.14, 302-307 (1966)

The accuracy of the estimation for Electrical Conductivity Profile in Geo-environment by the Profiling of Transmittive High Frequency Electromagnetic Wave

- Numerical Study by Electrical Magnetic Field Simulation-

Seiichiro KURODA, Hiroomi NAKAZATO, Takehiko OKUYAMA

Summary

The accuracy of evaluation for the electrical conductivity profile in soil was estimated by the electromagnetic field simulation based on finite difference time domain method. The simulation demonstrated the profiling by transmittive electromagnetic wave to measure the vertical distribution of highly electric conductive zone which is generated by the error function with dispersion of σ . The accuracy of the profiling by EM wave was characterized by $\sigma_{\text{model}} / \sigma_{\text{eff}}$, which is the ratio of the variance of error function to the effective wave length of the electromagnetic wave used for measuring. If the ratio was larger than 1/2, the error of estimation by EM wave was negligible. But if it was smaller than 1/2, the error became bigger. The error depended on the distance of propagation also. In the situation where the ratio $\sigma_{\text{model}} / \sigma_{\text{eff}}$ was smaller than 1/2, the longer propagation distance caused the bigger error.

Keywords : Electromagnetic wave, Electrical Conductivity of soil, EM field simulation, Electromagnetic wave exploration, Geo-environment