

多点同時通電技術を用いた高速電気探査手法の開発

山下善弘*・フランソワ ロベール**・ジャン クリストフ グーリー**・
ベルナール ボルジョワ**・ベノワ テキシエ***

Development of Rapid Electrical Survey Method Using Multiple, Simultaneous Current Injection Technique

Yoshihiro YAMASHITA*, François LEBERT**, Jean-Christophe GOURRY**,

Bernard BOURGEOIS** and Benoit TEXIER***

Abstract

Measurement efficiency in electrical geophysical exploration methods has been improved by increasing number of receivers along with the progression of electronics. Recently, methods for injecting current at multiple points simultaneously have been proposed. By increasing number of transmitters, we can expect further increase of measurement efficiency. We developed a multiple simultaneous current injection method based on Code-Division Multiple-Access (CDMA) technique. This paper describes basic theory of CDMA and demonstrates that the data obtained by the multiple simultaneous current injections were equivalent with conventional method. The method can be applied to time domain IP (chargeability) survey. Data quality improvement against random noise observed is similar to a stacking procedure. We developed two kinds of instruments, one for shallower part with comparably low power, and the other for deeper sounding and IP measurement. We then conducted time-lapse resistivity measurements during saline water injection using a small water tank, and successfully observed resistivity change associated with the injection. This technique will contribute to finer time resolution of time-lapse surveys and will increase 3D survey efficiency.

Keywords: Geophysical exploration, Multiple simultaneous current injection, Resistivity, Induced polarization

要 旨

物理探査の一手法である電気探査は、従来、地盤への通電を行う送信機は1台とし、電位応答を測定する受信機を多チャンネル化して、測定データを高密度化するとともに測定効率の向上を図ってきた。近年、送信機も多チャンネル化し、複数の異なる点で同時に通電を行う多点同時通電技術により、測定効率をさらに向上させる手法が提案されている。本論文では、この多点同時通電技術のうち符号分割多元接続(Code-Division Multiple-Access, CDMA)と呼ばれる方式に基づく手法による探査方法および測定器の開発を行った。本論文ではCDMA方式による多点同時通電技術の原理に関して詳述し、従来の単点通電による方法と測定結果を比較して短時間で同等な結果が得られることを示した。また電気探査のうち地盤の分極特性を電位過渡応答により測定する時間領域IP法へも拡張可能なことを示した。さらにCDMA方式による多点同時通電技術には、通電波形に用いる符号時系列数と同じ回数のスタッキング(加算平均)処理と同等のランダムノイズに対するS/N比向上効果があることを示した。本手法を実現する測定器として、比較的浅部を対象とする小出力の測定器と、比較的大出力の測定器の2種類を開発した。小出力測定器では、水槽実験により、塩水注入後で比抵抗が比較的短い時間で経時変化する様子をとらえることができた。大出力測定器では、一般的な土木地質調査規模で、従来方法と多点同時通電での測定展開手順を比較し、両方で同等の結果が得られることを確認した。この技術は変化の速い現象に対する比抵抗モニタリングへの活用や、実用的な3次元電気探査への貢献が期待できる。

キーワード：物理探査，多点同時通電，比抵抗，IP法

*応用地質（株）エンジニアリング本部 ** B.R.G.M. *** IRIS Instruments

*OYO Corporation Engineering Headquarters, ** B.R.G.M., *** IRIS Instruments

1. まえがき

物理探査技術のうち電気探査は、古くは地下水調査や金属資源鉱床調査に活用され、その後トンネル調査や河川堤防調査といった土木地質調査や環境調査などにも利用されるようになってきた。探査の方法も、水平成層構造を前提とした1次元垂直探査から始まり、2次元的地形や地下構造を考慮できる2次元探査、さらにはより現実の地下構造を再現する3次元探査へと進歩し、近年では3次元構造の変化を経時的に捉える4次元探査が行われるようになりつつある。このような探査の高次元化に伴って、取得する測定データ数も指数関数的に増加している。このようなデータ取得の高効率化は、近年の電子機器技術の進化に支えられている。測定効率向上のための技術進化の一つは、電位を測定する受信機の多チャンネル化である。鈴木ら¹⁾は、240チャンネル同時に電位測定を行える測定器を開発した。現在では、商用測定器では8~12チャンネル程度の電位同時測定はすでに一般的になっている。受信機の多チャンネル化に加えて、近年送信機も同様に多チャンネル化し、複数の地点で同時に通電することで測定効率をさらに向上させる手法が提案されている。神宮司ら²⁾は、通電に用いる交流電流の周波数を通電点ごとに変えることで複数点での同時通電を実現した。今村³⁾は符号分割多元接続(Code Division Multiple Access, 以下CDMAと呼ぶ)方式により多点での同時通電による比抵抗測定方法を提案した。送受信機両方の多チャンネル化によるデータ取得効率のさらなる向上は、繰り返し測定における時間分解能の向上や、3次元・4次元探査をよりコスト効果の高いものとする現場計測技術として期待できる。本論文では、これらの送受信両方の多チャンネル化による測定効率向上技術のうち、CDMA方式による多点での同時通電技術を用いた電気探査について述べる。CDMA方式による送信の多チャンネル化は、チャンネル相互の干渉が起こりづらく、また使用できる通電波形の拡張性に優れるといった特長を有している。本論文では、この多点同時通電技術の探査原理・測定方法、従来の電気探査測定手法との比較実験について述べるとともに、時間領域IP法への拡張方法の提案、ランダムノイズに対する耐性といったデータ品質の検証についてあわせて述べる。また多点同時通電型の測定器について紹介し、本手法の課題および特長を活かした今後の展開などについてまとめる。

2. 多点同時通電技術による電気探査

2.1 探査原理

CDMAとは携帯電話などの情報通信分野において、多数対多数の同時通信を実現するための信号処理技術

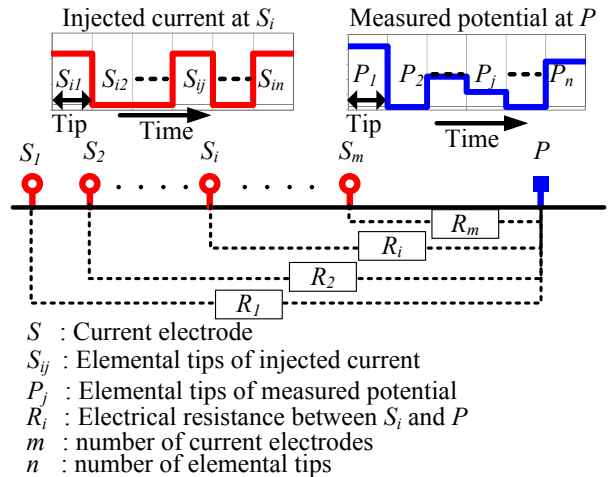


図1 多点同時通電技術の概念図

Fig.1 Conceptual model of multi transmission DC resistivity profiling

のひとつである。CDMAでは、複数の発信側が擬似雑音符号と呼ばれる符号系列に基づいた信号を同時に発する。受信側ではすべてを重ね合わせた信号を受信し、信号処理によりそれぞれの発信点からの信号を分離・抽出する。この際に重要な性質は、発信に用いる符号系列の相互相関がゼロ、すなわち数学的に直交する特徴をもつという点である。この性質により、異なる多数の発信点からの信号を、相互干渉が少なく伝達することができる。多数同時通信に用いられる代表的な他手法として周波数分割(FDMA)方式や時間分割(TDMA)方式があげられる⁴⁾が、CDMA方式はこれらの手法よりも相互干渉が起こりにくくノイズにも比較的強い手法とされており、限られた周波数帯域をより有効に用いることができる特長があるとされる。CDMA方式の電気探査への応用においては、地盤への通電波形を、この直交する符号系列に基づいて設計することで多点での同時通電を実現する。

図1にCDMA方式による多点同時通電の概念図を示す。同図に示すとおり、 m 点の電流電極 $S_1 \sim S_m$ と1点の電位電極 P を用いた場合を考える。複数の電流電極を用いて同時に電流を流した場合、ある電位電極で観測される電位は、各電流電極からの応答の重ね合わせとなる。多点同時通電における通電波形の極性切り替えの単位は擬似雑音符号の1つに相当し、この符号の単位をチップと呼ぶ。電流電極 S_i における j 番目のチップでの電流値を S_{ij} とし、 S_i と P の間の抵抗を R_i とする。電位電極 P において j 番目のチップで観測される電位は、オームの法則および電位の重ね合わせの原理に基づいて式(1)で表すことができる。

$$P_j = S_{1j} \cdot R_1 + \dots + S_{ij} \cdot R_i + \dots + S_{mj} \cdot R_m = \sum_{i=1}^m S_{ij} \cdot R_i \quad (1)$$

用いる符号系列のチップ総数を n とした場合、式(1)は行列表記を用いて式(2)のように表すことができる。

$$\mathbf{P} = \mathbf{S} \cdot \mathbf{R} \quad (2)$$

ただし

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} P_1 \\ \vdots \\ P_j \\ \vdots \\ P_n \end{bmatrix} \quad \mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_{11} & \cdots & S_{i1} & \cdots & S_{m1} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{1j} & \cdots & S_{ij} & \cdots & S_{mj} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{1n} & \cdots & S_{in} & \cdots & S_{mn} \end{bmatrix} \quad \mathbf{R} = \begin{bmatrix} R_1 \\ \vdots \\ R_i \\ \vdots \\ R_m \end{bmatrix}$$

式(2)における行列 \mathbf{S} の各列の要素は電流電極 $S_j \sim S_m$ での通電波形の時系列を表す。ここで通電波形の時系列として、それぞれの電流時系列の符号ベクトルが相互に直交する、すなわちそれぞれの系列の内積がすべてゼロになるような性質をもつ組み合わせのものを用いた場合、式(2)は行列 \mathbf{S} を直接解く必要がなく求めることができる。式(2)の両辺に \mathbf{S} の転置行列 \mathbf{S}^T を左から掛けることで、式(2)は式(3)のように変形できる。

$$\begin{bmatrix} \sum_{j=1}^n S_{1j} \cdot P_j \\ \vdots \\ \sum_{j=1}^n S_{ij} \cdot P_j \\ \vdots \\ \sum_{j=1}^n S_{mj} \cdot P_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^n S_{1j}^2 & \cdots & \sum_{j=1}^n S_{1j} \cdot S_{ij} & \cdots & \sum_{j=1}^n S_{1j} \cdot S_{mj} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{j=1}^n S_{ij} \cdot S_{1j} & \cdots & \sum_{j=1}^n S_{ij}^2 & \cdots & \sum_{j=1}^n S_{ij} \cdot S_{mj} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{j=1}^n S_{mj} \cdot S_{1j} & \cdots & \sum_{j=1}^n S_{mj} \cdot S_{ij} & \cdots & \sum_{j=1}^n S_{mj}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1 \\ \vdots \\ R_i \\ \vdots \\ R_m \end{bmatrix} \quad (3)$$

ここで $S_j \sim S_m$ での通電波形の時系列のそれぞれの内積がゼロであることを利用すれば、式(3)の右辺第一項の行列は、式(4)に示すように各通電波形時系列の絶対値の2乗を要素とする対角行列とすることができる。

$$\begin{bmatrix} \sum_{j=1}^n S_{1j} \cdot P_j \\ \vdots \\ \sum_{j=1}^n S_{ij} \cdot P_j \\ \vdots \\ \sum_{j=1}^n S_{mj} \cdot P_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^n S_{1j}^2 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \sum_{j=1}^n S_{ij}^2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & \cdots & \sum_{j=1}^n S_{mj}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1 \\ \vdots \\ R_i \\ \vdots \\ R_m \end{bmatrix} \quad (4)$$

式(4)右辺第一項の行列は、これより各電流電極と電位電極との抵抗 R_i は、式(5)で表すように通電波形と観測電位波形の時系列の内積を、通電波形時系列の絶対値の2乗で除した値として求めることができる。

$$R_i = \sum_{j=1}^n S_{ij} \cdot P_j \bigg/ \sum_{j=1}^n S_{ij}^2 \quad (5)$$

実際の測定においては、電流および電位に直流ノイズなどのバイアス値が加わることを考慮し、内積の計算の

表1 符号長を4とした場合の組み合わせ例

Table.1 An example of tip series of 4 transmitters

	Tip 1	Tip 2	Tip 3	Tip 4
Current S_1	-1	1	-1	1
Current S_2	-1	1	1	-1
Current S_3	-1	-1	1	1
Current S_4	-1	-1	-1	-1

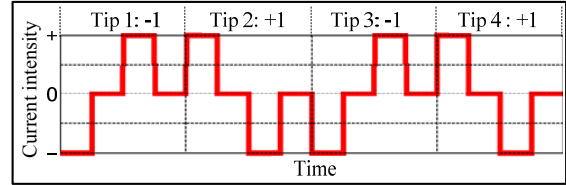


図2 表1における S_j での符号系列を用いて単位波形として交替直流波形を用いた場合の通電波形例

Fig.2 An example of current waveform of S_j in Table. 1 when using 50 % duration square waveform

代わりに共分散を、絶対値の2乗では分散による演算を用いる。相互に直交する符号系列の生成には、擬似雑音符号の一種である M 系列を利用するものや Walsh 符号⁴⁾なども利用できる。符号長が長いほど同時通電点を増やすことができる。通電点の上限は、符号長を 2^n 個 (n は自然数)とした場合、符号長と同数の 2^n 個まで利用できる。符号系列に対し、電気探査で一般的に用いる通電波形を適用する。すなわち符号系列を+1と-1の組み合わせで表す場合、この2種類の符号を電気探査で通常用いられる矩形波形や交替直流波形での+/-の極性と対応させて通電波形を構成する³⁾。表1に4点の通電点 $S_j \sim S_4$ を設定した場合の、各通電点で使用する符号の組み合わせ例を示す。また表1での S_j における符号系列へ、交替直流波形を対応させた通電波形例を図2に示す。前述のとおり符号長が長いほど通電点を増やすことができるが、1チップあたりの通電時間が同じであれば、符号長に比例して1回の通電時間も長くなることに注意が必要である。

2.2 従来手法との比較

多点同時通電による比抵抗計測の実用性を評価することを目的として現場実験を実施した。実験の概要は以下のとおりである。

- 実験場所：BRGM 敷地内 (フランス, オルレアン市)
- 測定機器：多点同時通電電気探査試作機(応用地質製)
- 送受信数：送信 7 ch, 受信 7ch
- 電極配置：2 極法配置
- 電極数：28 (1 m 間隔)
- 測線長：27 m
- 単位通電波形の種類：矩形波形

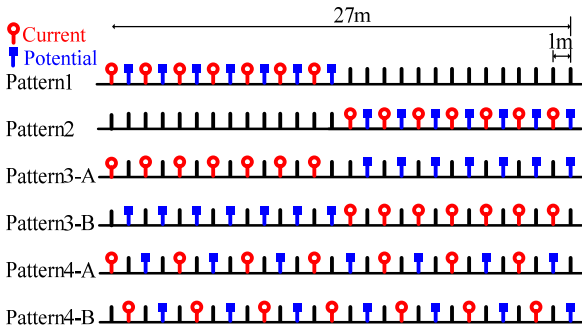


図3 7点同時通電に用いた2極法電極配置

Fig.3 Electrode configurations of field experiments with 7 transmitters current injection

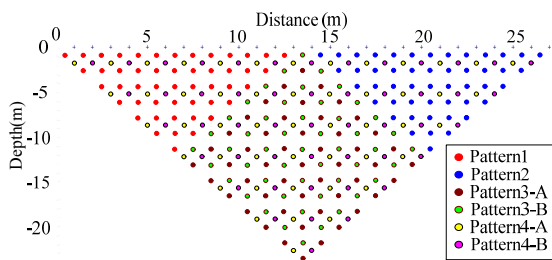


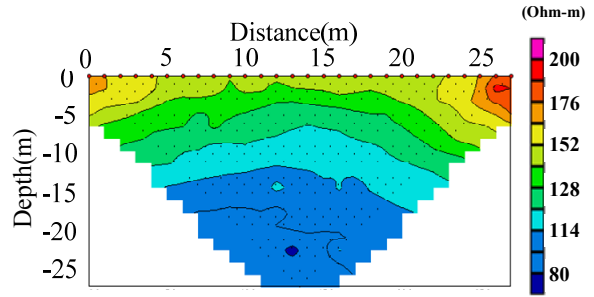
図4 図3の電極配置での見掛け比抵抗表示点位置

Fig.4 The reported points plot of 294 points of apparent resistivity when using 6 patterns of electrodes shown in Fig.3

今回用いた電極配置を図3に示す。実験では、電流電極間隔および電位電極間隔を2mとした配置で4通り、4mとした配置で2通りの計6通りの電極配置を設定して294点の測定を行った。この場合の見掛け比抵抗の測定点表示位置を図4に示す。見掛け比抵抗の深度表示点位置はEdwards⁵⁾による effective depth を使用した。

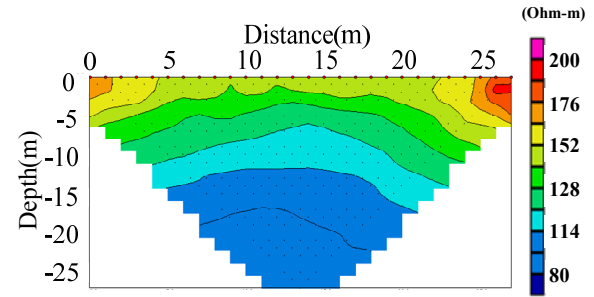
実験では7点同時通電による測定結果と、商用電気探査器による測定との比較測定を行った。商用電気探査器はIRIS Instruments社製のSYSCAL PPOを用いた。SYSCAL PROでの測定は比較のための参照データとするため、通電電流値を190~240mA程度として十分なS/Nを確保した。多点同時通電測定での通電電流値は20mAとした。測定結果の見掛け比抵抗擬似断面図を図5に示す。SYSCAL PROによる測定データを基準とした場合、多点同時通電での測定結果の差異は全測定点294点の平均で1.8%であり、単点通電と同等の測定結果が得られていることがわかる。

測定に要する時間について、多点同時通電の測定器で同内容の測定を比較した場合、送信機7台を用いた場合は送信機1台で8回スタッキングを行った場合の1/7になる。図5の例では、1チップで周期2秒の矩形波形を単位通電波形としたので1セットの通電時間は16秒(2秒×8チップ)であり、図3に示す6通りの測定に要する通電時間は96秒であった。電気探査での実際の作業は、測定に要する時間のほか電極展開・切替の時間など



(i) 7点同時通電による測定結果

(i) Measurement result using 7 current transmission



(ii) 商用電気探査機 SYSCAL PRO による測定結果

(ii) Measurement result with commercial instrument, SYSCAL PRO

図5 従来手法との見掛け比抵抗測定結果比較

Fig.5 Apparent resistivity pseudo-sections measured at test site in BRGM

他の要素も含まれ、またノイズ状況によって必要なスタッキング数も異なるため、送信台数を増加させた倍率だけ作業効率が向上するとは一概には言えないが、例えばモニタリング測定のように展開が固定されており、測定時間が作業の大部分を占めるような場合には、多点同時通電による時間短縮の効果が大きいと考えられる。

2.3 時間領域 IP 法への拡張

IP法とは強制分極法とも呼ばれ、地盤の分極特性、すなわち電荷のたまりやすさを測定する手法である。たとえば金属鉱物が多く含まれる地盤では、地盤へ通電した際に一時的に電荷がたまりやすい性質があることから、主として鉱床探査において発展してきた手法である。粘土鉱物を多く含む地盤も同様の性質を持つため、土木地質調査でも粘土化した破砕帯などを対象とした調査で比抵抗探査と併用されることがある⁶⁾。また近年では廃棄物調査といった環境調査における浅部調査でも利用されている⁷⁾。IP法の中で時間領域IP法と呼称・分類される調査手法では、地盤へ通電中に、物質表面に蓄積された電荷が通電遮断直後に放電する現象を、測定電位の過渡応答として測定する。時間領域IP法では、通電波形として図6上図で示すような休止時間付きの矩形波を用いる。この通電波形で図6下図に示す過渡応答を含んだ電位波形を測定し、電流遮断前の電位 V_p と、電流遮断後に過渡的に変化する電位 $V_s(t)$ との比率を時

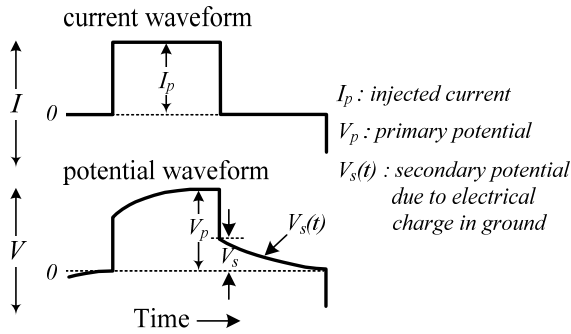


図 6 時間領域 IP 法の測定

Fig 6 The schematic of time domain IP

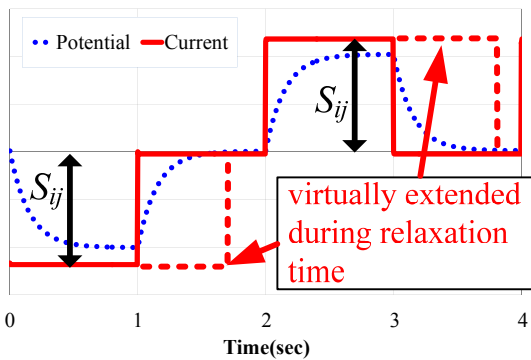


図 7 多点同時通電における時間領域での充電率計算方法の概念図

Fig.7 The schematic of decoding chargeability from superposed potential waveform

間積分し、充電率と呼ぶ値 M を求めて過渡応答の定量評価に用いる。

多点同時通電において基本となる通電波形として、図 6 上図に示すような休止時間のある矩形波形を用いれば、時間領域 IP 法の測定が可能と考えられる⁸⁾。多点同時通電の場合、過渡応答を含む電位波形も各通電点からの重ね合わせ波形として測定される。これを比抵抗の場合と同様に各通電点からの個別応答として分離する必要があるが、電流遮断後の現象である過渡応答部では式(5)の S_{ij} は 0 となって右边が不定形となりこのままの形では解くことができない。そこで過渡応答部分の波形形状を復号するために、過渡応答部に対応する時間では、仮想的に電流値が遮断直前の値を保つと仮定する (図 7)。

このような仮定を設けることで、電流がゼロである過渡応答範囲における式(5)右边を計算することができる。ここでは時間領域における充電率を計算するための波形形状を復号することを目的として、式(5)右边のうち分母部分のみを計算し、遮断前の電流値に対する比率を復号信号として過渡応答波形を求める。時間領域における充電率の計算では、この復号した過渡応答波形を用いて、求めたい時間範囲を積分する。この手順は、式(5)での不定形を回避するための数値計算上の工夫にすぎ

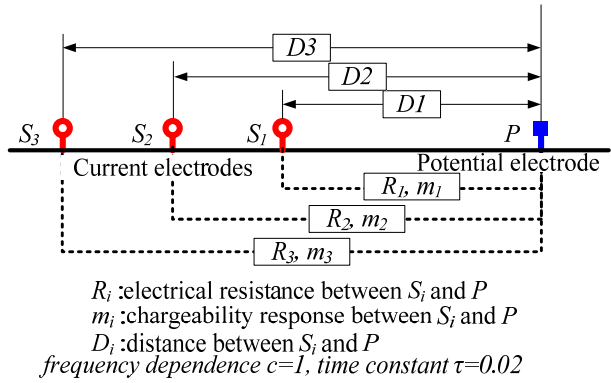


図 8 多点同時通電による充電率計算手法検証の数値実験モデル図

Fig.8 The schematic of the numerical experiment of IP decoding calculation.

ず、物理的な意味はもたない。この充電率計算方法の妥当性を検証することを目的として、数値実験およびフィールド実験を実施した。

数値実験に用いる過渡応答の計算では、Cole-Cole モデルによる複素比抵抗を用いた⁹⁾。複素比抵抗 $Z(\omega)$ は式(6)で表される。

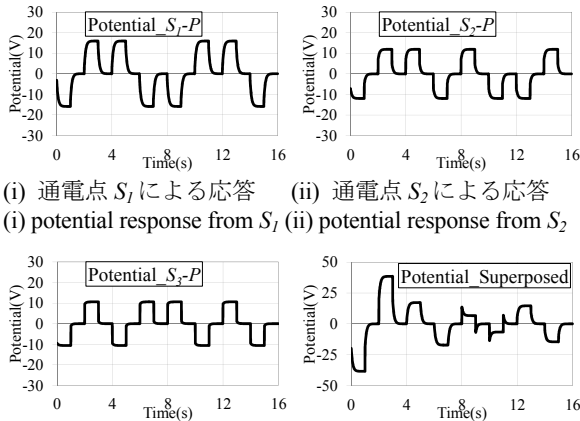
$$Z(\omega) = R_0 \left[1 - m \left(1 - \frac{1}{1 + (i\omega\tau)^c} \right) \right] \quad (6)$$

R_0 は直流電流を用いた場合の比抵抗、 m は充電率¹⁰⁾、 τ は時定数、 c は周波数依存係数と呼ばれる物性値である。簡単のため $c=1.0$ と考えると、時間領域における電位の過渡応答 $V(t)$ は I_0 を通電電流値として式(7)で表すことができる。

$$V(t) = m \frac{R_0}{I_0} e^{-t/\tau} \quad (7)$$

数値実験に用いたモデルを図 8 に示す。電極配置を 2 極配置として同時通電点を 3 点 (S_1, S_2, S_3)、電位測定点 (P) を 1 点設定した。3 点それぞれの通電点と電位測定点との間の抵抗をそれぞれ R_1, R_2, R_3 、充電率を m_1, m_2, m_3 とし、電位測定点における各通電点からの電位応答を重ねあわせて模擬観測電位波形を作成した。通電波形の作成には表 1 で示した符号の組み合わせ Tx1~Tx3 を用いた。符号に対応させる単位通電波形は交替直流波形を用いた。図 9(i)~(iii)に、 $R_1=100 \Omega \cdot m, R_2=150 \Omega \cdot m, R_3=200 \Omega \cdot m, m_1=0.8, m_2=0.4, m_3=0.1$ と設定した場合の、電位測定点 (P) における通電点 S_1, S_2, S_3 それぞれによる応答を示した。またそれらの重ね合わせ波形を図 9(iv)に示した。実際の測定では、図 9(iv)が測定される電位波形である。

図 10 に、重ね合わせの電位波形を 3 点それぞれの通電点からの応答に分離し、復号した信号波形を示す。図 10 より、復号した信号波形では、数値実験モデルで設



(i) 通電点 S_1 による応答 (ii) 通電点 S_2 による応答
 (i) potential response from S_1 (ii) potential response from S_2
 (iii) 通電点 S_3 による応答 (iv) (i),(ii),(iii)の重ね合わせ
 (iii) potential response S_3 (iv) Superposing (i),(ii),(iii)

図9 数値計算により求めた過渡応答を含む電位波形
 Fig.9 Calculated potential waveforms including transient response

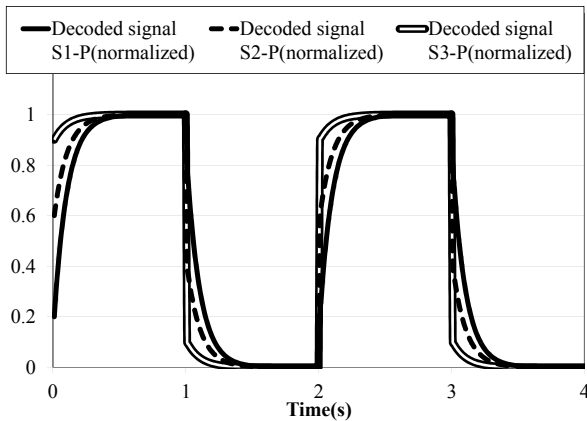


図10 重ね合わせの電位波形より復号した過渡応答を含む信号波形
 Fig.10 The signal waveforms including transient signal decoded from superposed potential waveform.

定した充電率 m の大きさに応じた過渡応答を示す結果が得られた。すなわち見掛充電率が最も大きい $m_1=0.8$ とした S_1-P の組み合わせで過渡応答が最も顕著な波形となり最も小さい値の $m_3=0.1$ とした S_3-P の組み合わせでは過渡応答が最も小さい波形が再現されている。

これらの過渡応答の程度がモデルで設定した見掛充電率の値と対応しているかどうかを確認するため、図10に示した復号信号波形から過渡応答部の時間積分値としての見掛充電率 M_{multi} を求めた。積分範囲は電流遮断後0.12秒経過後から0.8秒間とした。さらにこの0.8秒の範囲を20等分して幅0.04秒の時間窓を設定し、それぞれの時間窓における積分値を求めた。通電点1点からのみによる応答波形(図9(i)~(iii))についても同様に見掛充電率 M_{single} を求め、3点同時通電からの計算値である M_{multi} との比較を行った。通電点 S_3 からの応答の比較結果例を図11に示す。図11に、横軸を多点同時通電による見掛充電率 M_{multi} 、縦軸を単点通電による見掛充

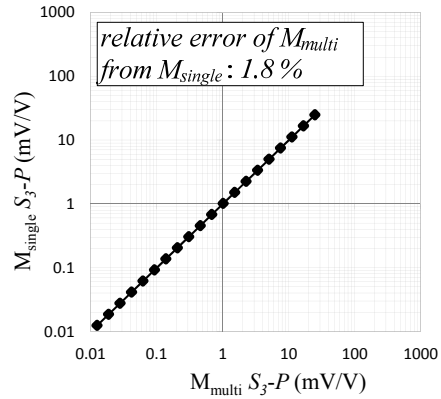


図11 通電点 S_3 からの過渡応答について M_{multi} と M_{single} を20の時間窓それぞれで比較した例
 Fig.11 An example of comparison of M_{single} and M_{multi} at S_3-P .

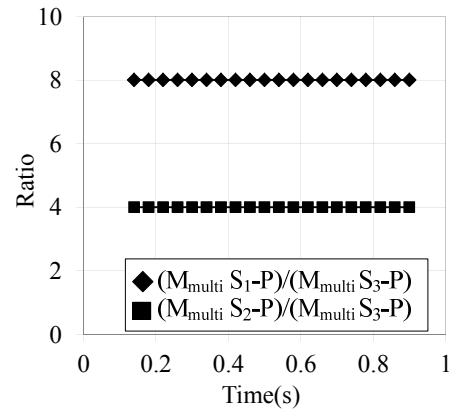


図12 3点同時通電での復号計算後の充電率 M_{multi} と単一通電点での充電率 M_{single} との比較図。 S_3-P 間の充電率を基準として20個の時間窓で比較した。
 Fig.12 The comparison of the ratio between M_{multi} of S_1-P with M_{multi} of S_3-P , and M_{multi} of S_2-P with M_{multi} of S_3-P .

電率 M_{single} として、20個の時間窓それぞれでの値の相関を示した。両者は20個の時間窓すべての値がよく一致している。 M_{single} を基準とした M_{multi} の相対誤差は、平均1.8%程度であり等価な値が得られていると言える。図12には、数値モデルでの充電率パラメータの相対関係が復号計算後に保存されていることを確認した結果を示す。充電率パラメータの比は、 S_3 と P の組み合わせ(S_3-P)での $m_3=1$ を基準とすると、 $m_1/m_3=8$ 、 $m_2/m_3=4$ である。一方で3点同時通電の電位波形から復号した M_{multi} の比率は(S_3-P)での見掛充電率 M_{multi} を基準として、20個の時間窓すべてで $(S_1-P)/(S_3-P)$ が8、 $(S_2-P)/(S_3-P)$ が4となり、数値モデルで設定した充電率パラメータの相対関係と等しい結果を得た。

多点同時通電による時間領域IP法のフィールド実験を行った。使用した主な機材を表2に示す。電極配置は図13に示すようなダイポールダイポール配置とした。

表 2 多点同時通電による IP 法現場測定実験に用いた測定器の主な仕様

Table.2 Principal instruments of the field experiments

Functions	Instruments	
Transmitter	3 SYSCAL PROs modified for multi-transmission	Manufactured by IRIS Instruments
Receiver (potential)	SYSCAL Pro	
Receiver (current)	2 I-Fullwaver 1 SYSCAL Pro	

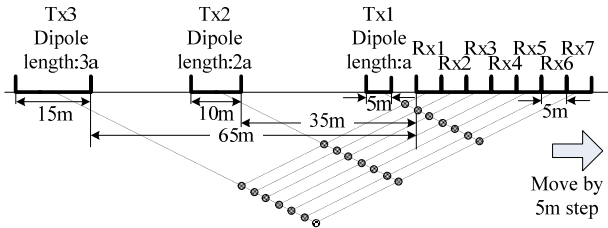


図 13 多点同時通電による IP 法現場測定実験に用いた電極配置図

Fig.13 The electrode configuration of the field experiment of IP measurement with multiple transmitters

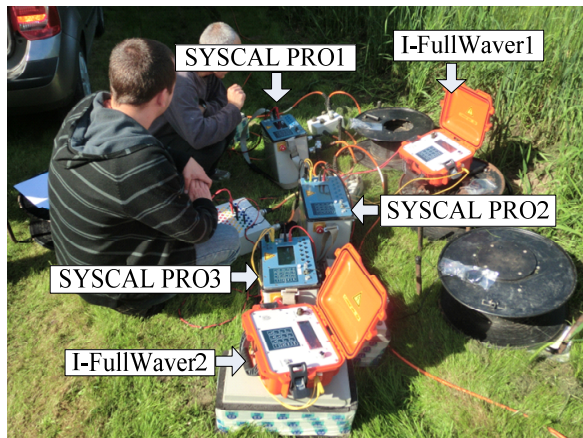
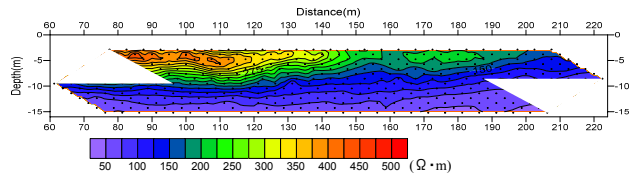


図 14 多点同時通電による IP 法フィールド測定状況

Fig.14 The appearance of multi current transmission resistivity and IP measurement using modified commercial instruments

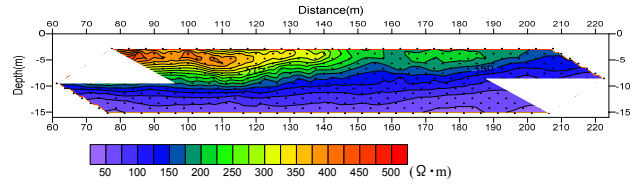
図 13 中, Tx は通電用ダイポール, Rx は電位測定ダイポールを表す。同時通電を行う電流ダイポールを 5m, 10m, 15m の 3 種類とした。電位測定ダイポール長は 5m とし 7 チャンネルの同時測定を行った。フィールド実験では, 従来通りの単点通電による測定もあわせて行った。測定状況を図 14 に示す。

図 15 には単点通電と多点同時通電による見掛け比抵抗擬似断面図, 図 16 には見掛け充電率擬似断面図を示した。図 15 と図 16 では見掛け充電率について比較的良好な結果が得られた電流ダイポール長が 5m と 10m のものについて示した。図 15, 図 16 では断面形状が平行四辺形を 2 つ重ねたような形状になっているが, 上部が電流ダイポール長が 5m による測定データ, 下部が電流ダイポ



(i) 3 点同時通電による見掛け比抵抗擬似断面図

(i) the result of multi current transmission measurement

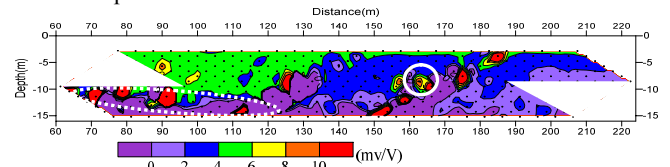


(ii) 従来手法(単点通電)による見掛け比抵抗擬似断面図

(ii) the result of single current transmission measurement

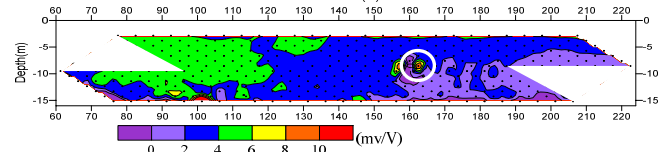
図 15 多点同時通電による IP 法現場測定実験結果, 見掛け比抵抗測定結果の比較

Fig.15 The comparison of apparent resistivity pseudo-sections of the multi current injection field experiment



(i) 3 点同時通電による見掛け充電率擬似断面図

(i) the result of 3 current transmission measurement



(ii) 従来手法(単点通電)による見掛け充電率擬似断面図

(ii) the result of single current transmission measurement

図 16 多点同時通電による IP 法現場測定実験結果, 見掛け比抵抗および見掛け充電率測定結果の比較

Fig.16 The comparison of apparent chargeability pseudo-sections of the multi current injection field experiment

ル長が 10m による測定データを示している。図 15 に示す見掛け比抵抗値の比較では, 3 点同時通電測定結果の単点通電との相対差異は約 1.5% であり, 両者で等価値が得られた。図 16 に示す見掛け充電率の比較では, 見掛け充電率が 0~2, 2~4, 4~6 mV/V の値を示す箇所の大局的な傾向は一致している結果が得られている。過渡応答の減衰形状の比較のため図 16 で両方の測定結果に共通して特徴的に認められる見掛け充電率異常箇所(図中の丸囲い箇所)で, 20 個の時間窓における見掛け充電率値を比較した。比較結果を図 17 に示す。両者はよく一致しており, 多点同時通電による測定において時間領域 IP 法の測定が可能なのことがわかった。一方, 図 16 において 3 点同時通電の結果では, 単点通電の結果とは一致しない局所的な異常値が数多く認められる(たとえば点線囲い

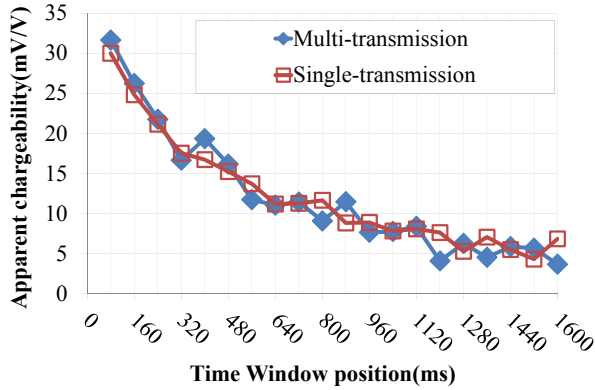


図 17 3 点同時通電と単点通電による電位過渡応答部の比較:図 16 内丸囲い部の高見掛充電率箇所での比較

Fig.17 A comparison of potential transient curves between multi current injections and single current injection : The example at the part circled at Fig.16

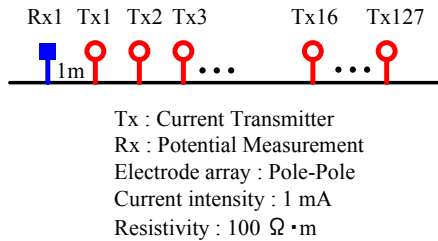


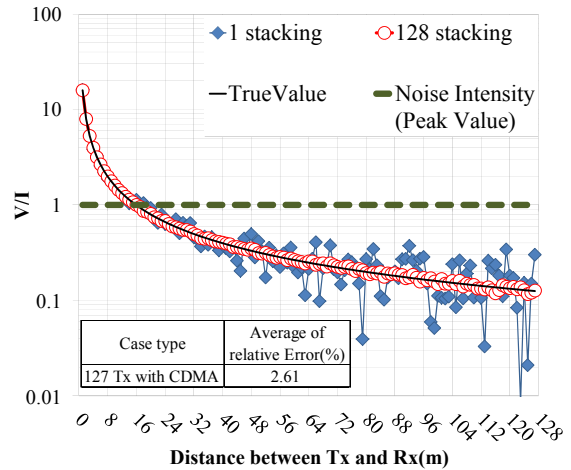
図 18 ランダムノイズ除去効果確認のための数値実験モデル図

Fig.18 The numerical experiment model to simulate the characteristic of signal enhancement

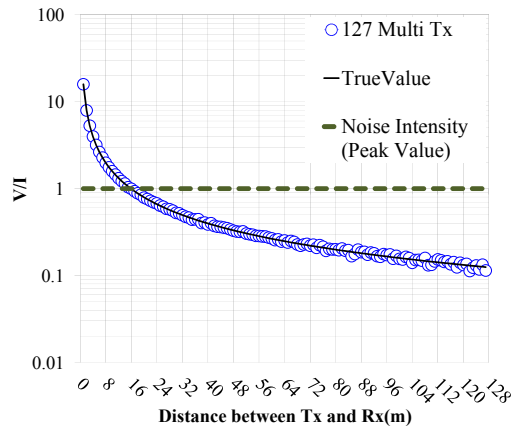
箇所). 電流ダイポールと電位ダイポールとの距離がより大きい場合信号レベルが小さくなる電流ダイポール長 15m の場合ではこの傾向がより顕著であった. この原因として, 実験に用いた測定器が定電圧制御であり電流制御が十分精密に行えていなかった可能性が考えられる. 充電率測定に関してはさらに検証を行う必要があると考える.

2.4 データ品質に関する性質

山下ら¹¹⁾は多点同時通電による測定を通常の単点通電による測定と比較し, 多点同時通電による測定ではランダムノイズの影響が比較的少ないことを示唆した. 式(5)右辺の分子項には各チップにおける測定電位の積和演算が含まれており, この項には加算平均によるスタッキング処理による S/N 比向上と同等の効果, すなわち加算回数 M 回の場合には S/N 比が \sqrt{M} 倍に向上する効果が含まれると考えられる. この性質を検証する目的で数値実験およびフィールド実験を行った¹²⁾. 数値実験では, 図 18 のように比抵抗 $100 \Omega \cdot m$ の均質媒質上で 127 点の電流電極と 1 点の電位電極を想定して 2 極法による測定を実施したケースを考えた. 通電する電流は, 2 秒周期の交替直流波形を単位通電波形として通電波形を



(i) 単点通電スタッキング 1 回と 128 回の比較結果
(i) The result of potential decay curve assuming 1 Tx, 1 and 128 stacking



(ii) 送信 127 点としたときの電位減衰曲線
(ii) The result of resistance decay curve assuming 127 multi-Tx

図 19 多点同時通電および単点通電によるランダムノイズを含む電位減衰曲線の比較

Fig.19 The resistance decay curves of resistance

設定した. この場合, 符号系列の長さは 128 チップとなり, 通電時間は 256 秒となる.

図 19 に, 数値計算の結果として電流電極-電位電極間の距離と測定抵抗(測定電位/通電電流)の大きさの関係を表す電位減衰曲線を示した. 電流電極-電位電極間の距離が大きくなるほど理論電位は小さくなるので, 電位電極におけるノイズの影響が大きくなり S/N 比は低下する. 図 19 では, 電位電極でのノイズとしてピーク振幅が $\pm 1 \text{ mA}$ のランダムノイズを加えた場合について理論値(黒実線)との比較を示した. 図 19(i)に単点通電を模擬した場合の電位減衰曲線としてスタッキング 1 回とスタッキング 128 回の 2 通りを示す. 図 19(ii)には 127 点の同時通電を模擬した場合の電位減衰曲線を示す. 図 19(i)より, スタッキング 1 回の測定結果は電流電極-電位電極間の距離が大きくなるほどランダムノ

イズの影響でばらつきが大きくなり、真値からの誤差も大きい。スタッキング 128 回後には S/N 比が向上していることがわかる。これに対し図 19(ii)に示した 127 点での同時通電での結果は、図 19(i)での単点通電での 128 回スタッキングと同様にばらつきも小さく真値との誤差も小さい良好なデータ品質であることが分かる。

次に、電位電極でのランダムノイズ強度を変化させた場合の S/N 比と、それぞれのノイズ強度における模擬測定値の理論値からの相対誤差との相関を求めた結果を図 20 に示す。図 20 では単点通電・1 回スタッキングの場合と、127 点同時通電の場合の 2 通りについてそれぞれの S/N 比に対する誤差分布を示した。あわせてこれらの分布を指数関数で近似した結果を示した。図 20 より、たとえば真値との相対誤差を 1%以内とするために必要な S/N 比は、単点通電の場合には 16.85 dB であり、127 点同時通電の場合は -5.48 dB であった。これらの差異である約 22 dB を多点同時通電によるランダムノイズに対する S/N 比向上効果と考えた場合、この値は、128 回の加算平均によるスタッキング処理による S/N 比向上効果である $21.01 \text{ dB} = 20 \log_{10} \sqrt{128}$ に近い値であることが確認できた。

フィールド実験では、図 21 に示す電極配置を用いて、

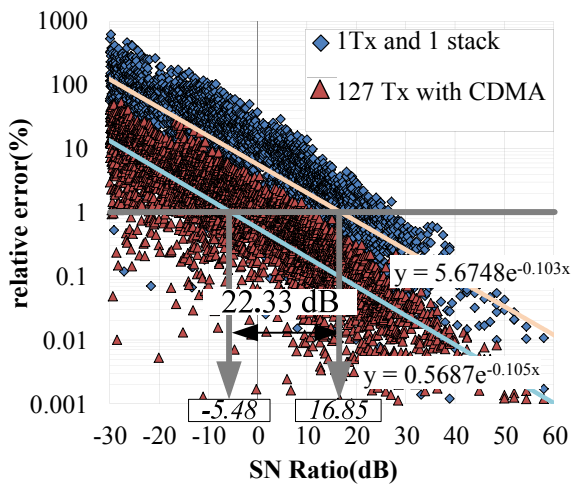


図 20 電位電極でのノイズ強度を変化させた場合の S/N 値(dB)と、理論値からの相対誤差との相関図

Fig.20 The relationship between S/N and relative errors from theoretical values of each combination of Tx and Rx

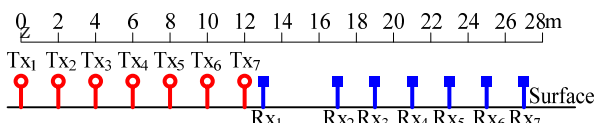


図 21 ランダムノイズ除去効果確認のためのフィールド実験電極配置図

Fig.21 Electrode array of multiple-current injection field test to confirm the effect of random noise reduction

7 点同時通電による測定と、単点通電でスタッキング回数を 1 回および 8 回とした場合の測定結果を比較した。表 3 に測定内容の一覧を示す。測定データ品質の評価は、単点通電により通電電流を 80 mA として十分な S/N 比を確保した測定を参照測定とし、参照測定での見掛け抵抗からの相対差異を各測定結果と比較することで行った。結果は図 22 に示すとおり、7 点同時通電の測定結果(Case 3)は、単点通電での 8 回スタッキングによる測定結果(Case 2)と比べて参照データからの相対差異は小さく、単点通電での 8 回スタッキングと同等のデータ品質であることが確認できた。

充電率測定についても同様の S/N 比向上効果が得られるかについて等価回路⁹⁾を用いた室内測定で検証を行った。図 23 左図は測定に用いた等価回路を示す。図 23 右図には測定結果のうち電位波形の過渡応答部を示した。測定では、7 点同時通電による測定と、単点通電でスタッキングを 1 回と 8 回とした測定で計 3 種類行った。単点通電の場合、図 23 右図での点線囲いで示した過渡応答終端部では、スタッキング 1 回ではノイズの影響を受けてばらつきが大きくなっているのに対して、スタッキング 8 回ではデータ品質が向上していることがわかる。7 点同時通電による測定では単点通電でスタッキングを 8 回行った場合と同等の結果が得られた。

表 3 ランダムノイズ除去効果確認のためのフィールド実験での通電点数とスタック数条件一覧

Table.3 The conditions of field test to confirm the effect of random noise reduction

ID	Number of Transmitters	Number of Receivers	Current (mA)	Stack Number	Number Of Tips
Ref	1	7	80	8	-
Case 1	1	7	1	1	-
Case 2	1	7	1	8	-
Case 3	7	7	1	-	8

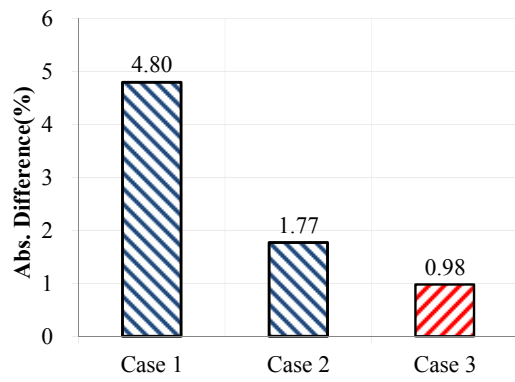


図 22 表 3 Case 1~Case 3 の計測条件における参照データとの相対差異平均の比較

Fig.22 Average of difference from reference data of each field measurement, Cases 1, 2 and 3 shown in Table.3

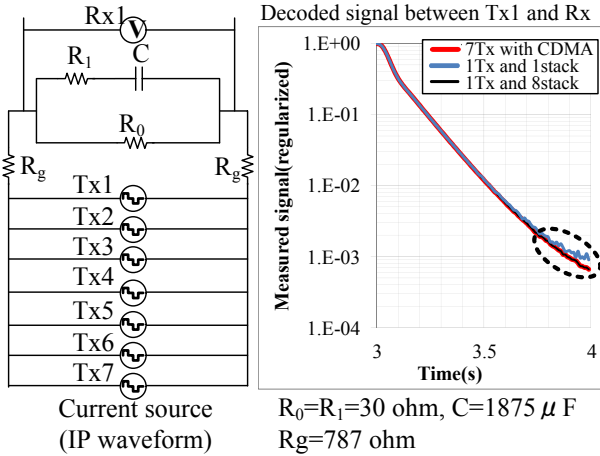


図 23 等価電気回路を用いた多点同時通電による過渡応答部のノイズ除去効果確認実験, (左) 等価回路図, (右) 7台同時通電と単点通電による測定結果比較

Fig.23 The diagram of IP measurement with multiple-current injection on equivalent electrical circuit (left), the comparison of 7 simultaneous current injection and one current injection (right)

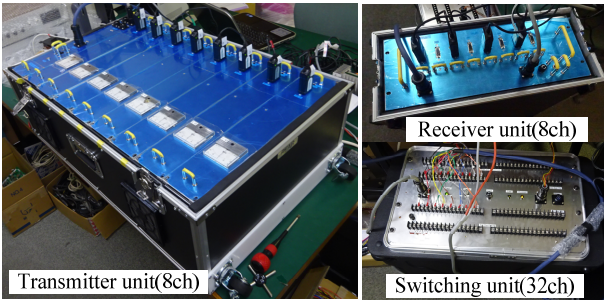


図 24 小出力型多点同時通電電気探査機の外観(応用地質(株)製)

Fig.24 Multi Transmitter Multi Receiver Resistivity/IP instrument manufactured by OYO

3. 測定機器

CDMA 方式による多点同時通電技術に対応した電気探査機は、今村ら¹³⁾によるものがあるが、ここでは、筆者らが開発を行った計測機器について、比較的浅部を対象とした小出力の汎用測定器と、既存の商用電気探査機をベースとして多点同時通電技術に対応した比較的大出力に対応できる測定器の2種類について述べる。

3.1 小出力の汎用多点同時通電電気探査機

図 24 に計測システムの外観を示す。また表 4 に主な仕様を示す。図 24 に示した多点同時通電型の計測器は送信機 8 台と受信機 8 台、および 32ch の自動電極切替器を有しており任意の電極配置に対応する。仮に 1 符号あたりの通電波形として 500 ms 周期の矩形波を用いた場合、符号長を 8 とすれば 4 秒で 64 データ(8×8)を取得することができる。

表 4 測定器の主な仕様

Table.4 Main specifications of Multiple current transmission resistivity meter manufactured by OYO

Multi transmitter DC resistivity meter manufactured by OYO Corporation		
Transmitter (current injection)	Number of Tx unit	8
	Maximum output voltage	±200 V
	Maximum Current intensity	200 mA
	D/A	16 bit
Receiver (Potential measurement)	Sampling time of recording current waveform	10ms
	Number of Rx unit	8
	Input voltage	±10V
	Input impedance	9.4 MΩ
Electrode Switching unit	A/D	24 bit delta-sigma
	LPF	10Hz
	Sampling time of recording potential waveform	10ms
	Maximum Electrode	32

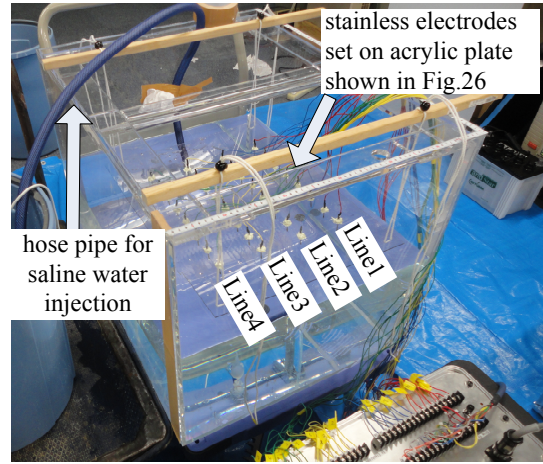


図 25 塩水注水実験に使用した水槽実験装置外観
Fig.25 The tank and electrodes for saline water injection experiment

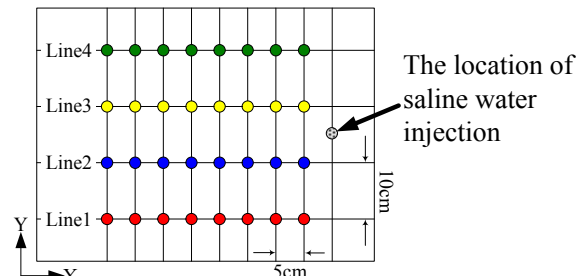


図 26 アクリル板上の電極設置状況
Fig.26 The plan-view of electrodes location set on an acrylic plate

本測定器を用いて、比較的短時間に比抵抗が変化する現象を捉えることを目的として水槽実験を行った。実験では、図 25 に示すような縦 60 cm×横 75 cm×高さ 60 cm の小型水槽内に、水道水を高さ約 30 cm まで満たした状態から塩水を注水して水の比抵抗を経時的に変化させ、その変化を見掛比抵抗の 3 次元的な計測で捉えることを目的とした。電極は、図 26 に示すように縦 45 cm×横 60 cm のアクリル板上に、面的に 32 本のステンレス製

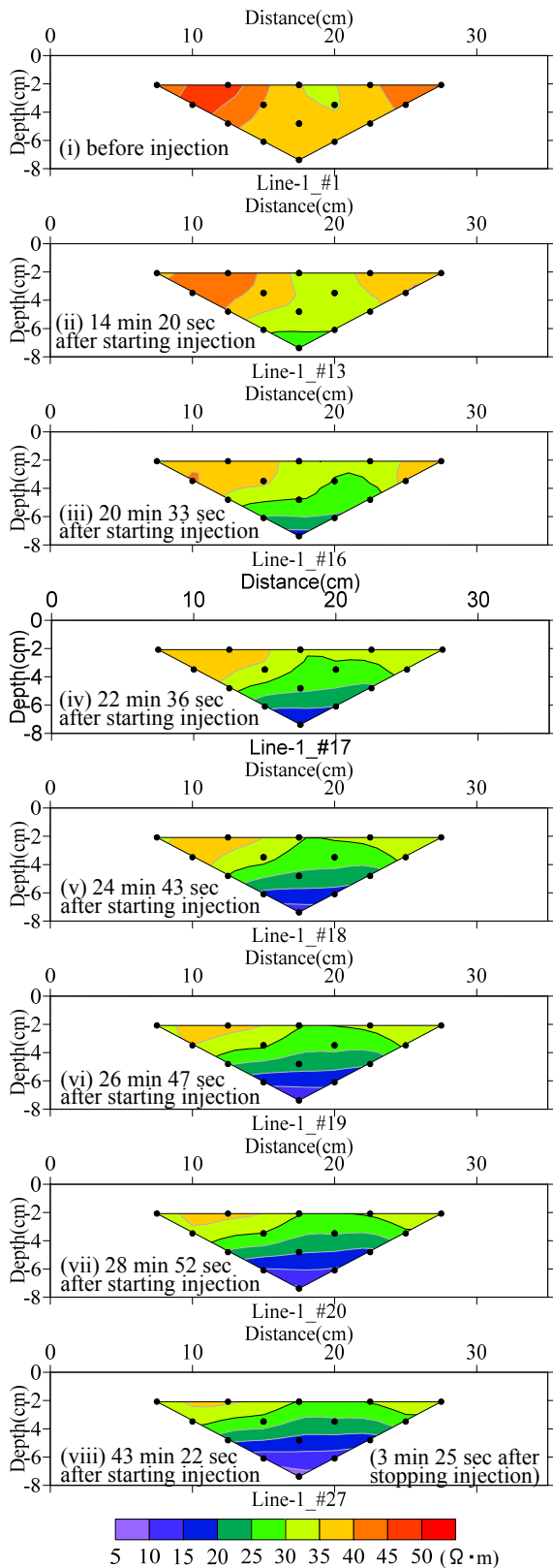


図 27 塩水注水に伴う Line1 の見掛比抵抗経時変化。

Fig.27 The change of measured apparent resistivity after injecting saline water of Line1

電極(8 電極×4 列)を配置し、2 次元測線を 4 本、すなわち Line1～Line4 を設定した。

電極を設置したアクリル板を水面上に設置し、測定を

連続的に繰り返して水槽内の比抵抗の経時変化を測定した。塩水の注入位置は、図 26 に示す箇所とし、水面下から 1～3cm 程度の深さから注入した。塩水注入は 2 回に分けて実施した。1 回目は濃度 0.5% の塩水 10 L を約 0.7 L/min で注水した。しかし注水中および注水後に各測線での見掛比抵抗値に変化が見られなかった。このため次に濃度 2% の塩水 20 L を約 0.5 L/min で引き続き注水した。電極配置はダイポールダイポール電極配置を用いた。電極の切替によって、Line1～Line4 それぞれに送信 2 チャンネルと受信 2 チャンネルをわりあてて同時に測定することで、4 測線での計測の時間差が生じないようにした。測定では、送信 8ch×受信 8ch(64 データ)の同時測定を、送受信位置の異なる 5 パターン(320 データ)で行って 1 セットとして約 2 分間隔で繰り返した。

図 27 に、Line1 測線における 2 次元見掛比抵抗擬似断面の時間変化を示す。図 27(i)に示すように 2 回目の注水開始前は見掛比抵抗は概ね 40～50 Ω・m 程度であった。注水開始後 14 分を超えるころ(図 27(ii))から下部より徐々に見掛比抵抗が低下し始め、塩水注水にともなって見掛比抵抗は断面下部から低下する傾向が継続する。見掛比抵抗変化が速い場合は、約 2 分間隔の測定それぞれ(図 27(iii)～(vi))で見掛比抵抗が 20 Ω・m 以下の部分が徐々に上昇している様子が捉えられた。これは高濃度の塩水が注入直後に水槽下部へ沈降した後、徐々に水槽内で拡がる状況を捉えたものと考えられる。注水開始後約 29 分(図 27(vii))には、擬似断面下部の見掛比抵抗は 10～15 Ω・m 程度まで低下した。これ以降の見掛比抵抗の変化は緩やかになり、図 27(viii)に示す注水開始後約 44 分でも見掛比抵抗変化は大きくは変化していないことがわかる。図 28 には、注水開始後約 31 分における Line1～Line4 それぞれの見掛比抵抗擬似断面図を示した。図 28 より平行する 4 測線で同様に見掛比抵抗が低下していることから、塩水の注入後の拡がり水槽内でほぼ一様であることが把握できた。

図 27、図 28 では、Line1～Line4 それぞれの 2 次元測線上での送受信の組み合わせのみで見掛比抵抗変化を求めた結果を示したが、計測データには送受信の組み合わせが各 2 次元測線をまたがる 3 次元的なデータ(例えば送信が Line1 上で受信が Line4 上など)も含まれている。このように多点同時通電技術により複数の通電点を面的に配置することで、複数の測線における変化を時間差少なく捉えるとともに 3 次元測定データも同時に効率よく取得することができる。

3.2 大出力対応の多点同時通電電気探査機

IRIS Instruments 社製 SYSCAL PRO をベースとし、3 台の送信機と 6 台の受信機を内蔵した多点同時通電対応型の電気探査機を開発した¹⁴⁾。図 29 に製作した多点同時通電電気探査機(SYSCAL Multi Tx)の外観を示す。本機は、3 台の内蔵送信機それぞれが SYSCAL PRO と

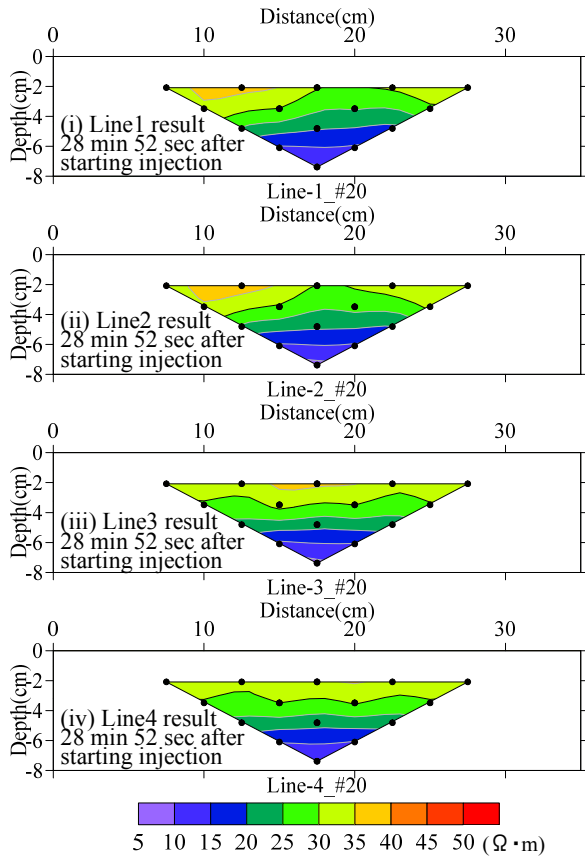


図 28 塩水注水後約 29 分における Line1, Line2, Line3, Line4 での見掛比抵抗擬似断面
Fig.28 Apparent resistivity pseudo-section of Line1, Line2, Line3, Line4

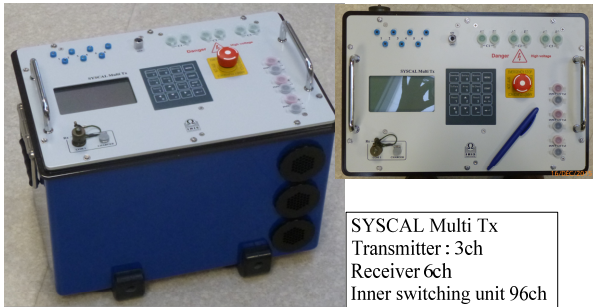
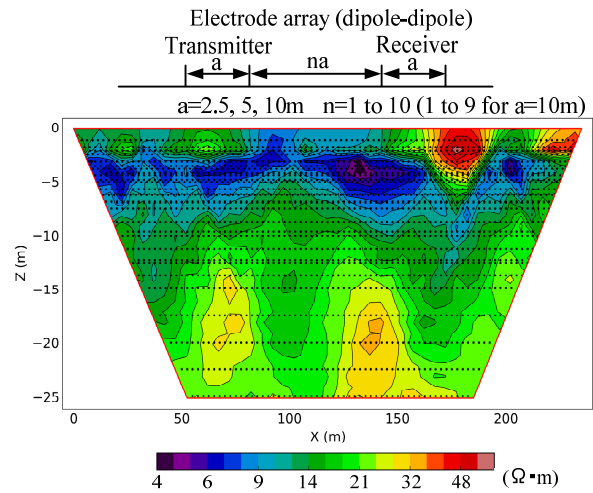
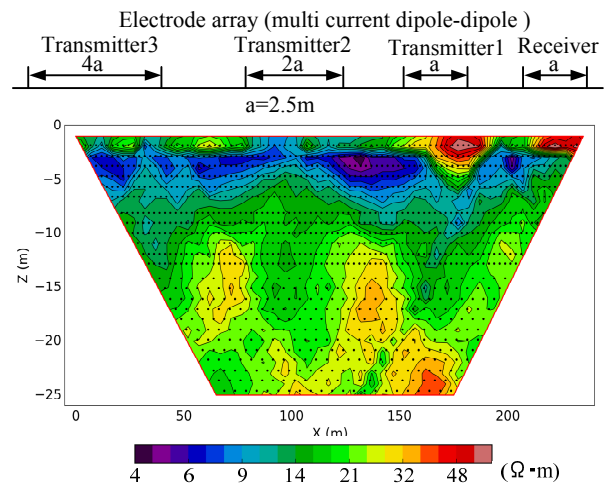


図 29 IRIS Instruments 社製多点同時通電電気探査機 (SYSCAL Multi Tx)の外観
Fig.29 SYSCAL Multi Tx : Multi Transmitter Multi Receiver Resistivity/IP instrument manufactured by IRIS Instruments

同等の最大出力電圧±800 V, 電力 250 W と比較的大きな出力を持っていることが特長である。電極自動切替器 96 チャンネルを内蔵し自動切り替えが可能である。出力が大きいため、前述の機種と比較してより深部の探査や、特に充電率に関して S/N 比の高い測定が期待できる。2.3 節で述べた IP 法の実験に用いた改良型 SYSCAL PRO と比較すると、前者は定電圧制御に対し、本機は符号波形の精密な電流制御が必要であるため定電流制御としている。



(i) 単点通電で従来のダイポールダイポール電極配置展開を用いた測定による見掛比抵抗擬似断面図
(i) Measurement result of Apparent resistivity pseudo-section using 1 transmitter with conventional spread pattern of dipole-dipole electrode array



(ii) 3 点同時通電に適したダイポールダイポール電極配置展開を用いた測定による見掛比抵抗擬似断面図
(ii) Measurement result of Apparent resistivity pseudo-section using 3 transmitters with optimized spread pattern of dipole-dipole electrode array

図 30 多点同時通電対応型の SYSCAL Multi Tx による電気探査機を用いた単点通電と多点通電による測定結果の比較

Fig.30 The comparison of apparent resistivity pseudo-section between conventional measurement and multi-current injection under different procedure of electrode array spreads using SYSCAL Multi Tx

多点同時通電対応の SYSCAL Multi Tx を用いて、電極配置の展開の違いによる測定結果への影響を評価することを目的としてフィールド実験を行った。実験では電極配置としてダイポールダイポール電極配置を用いた。展開の方法として、単点通電では従来行われている

ように、最小電極間隔と電流ダイポール電位ダイポール間の距離を逐次変更しながら測定を行う方法で測定を行った。一方、3点同時通電による測定では、図13に示したような、3台の送信機それぞれに対して3種類の異なる電極間隔の電流ダイポールを割り当てて同時に通電し測定を行った。電極は2.5m間隔で96本設置した。測定点は単点通電で2307点、3点同時通電で1296点である。測定結果として、図30(i)に単点通電による見掛比抵抗擬似断面図、図30(ii)に3点同時通電による見掛比抵抗擬似断面図を示す。

図中、黒丸点は測定点の表示点を示す。データの密度は両者で異なるが、得られた見掛比抵抗の分布はよく一致している。このように多点同時通電による測定を考慮した電極配置展開でも、データ密度を十分に確保した展開を行うことで従来手法と同等の測定結果が得られることがわかった。

4. 考察

2.4節では、CDMA方式を用いた多点同時通電による測定では通電波形に用いる符号長が長いほどランダムノイズに対するS/N比が向上し、その効果は単点通電によって符号長と同じ回数のスタッキングを行った場合と同等であることを示したが、これは地盤に印加する電力量の観点から考えても合理的である。単点通電でIAの定電流を、Vの電圧をかけてt秒間通電する測定をN回繰り返すスタッキング測定で電力量を W_s とする。これに対して多点同時通電において単位通電波形として単点通電と同様の波形を用い、符号長をNとした場合の1通電点あたりの電力量を W_m とする。 W_s および W_m はともに式(8)で表されることになり、両者は等価であることがわかる。

$$W_s = W_m = I \cdot V \cdot t \cdot N \quad (8)$$

通電点をM点設定した場合、簡単のためVも各通電点で一定とすれば、式(8)に示す電力量のM倍が地盤に印加される。単点通電では通電点の切り替えをM回繰り返すため測定の合計時間は $M \cdot t$ 秒になる。これに対してM点の多点同時通電を用いれば測定時間はt秒であり、2.2節でも述べたように通電時間だけで比較すれば、多点同時通電では最大でM倍の測定効率が得られることがわかる。CDMA方式による多点同時通電技術は、従来の電気探査と等価な電力量をより効率的に地盤へ印加する方法とも換言できる。実際の調査全体の効率は、電極設置やケーブル展開等の測定に付随する作業やノイズ状況によって必要なスタッキング回数が異なることなどを考慮すると、多点同時通電技術の特長が活かされる主な形態として次のような場合が挙げられる。

1) 定位置でのモニタリング測定

電極・ケーブルを据え置き、通電・測定以外の作業量が少ない場合、多点同時通電の高速性により繰り返し測定の時間間隔を短縮できる。さらにわずかな変化を捉える必要のあるモニタリング測定では、ランダムノイズに対する耐性が効果的に働くと考えられる。

2) 3次元探査・4次元(3次元繰り返し)探査

総じて測定データ量が多量となるため、1)の繰り返し時間間隔の短縮に加えて多点同時通電による作業効率向上によるコスト削減効果が期待できる。また3.1節の水槽実験で設定したように、隣接する複数の2次元測線を同時並行で測定でき、異なる地点での変化を短い時間差で捉えることができる。

5. 今後の展望と課題

今後の展望として、本技術の大きな特長である変化の速い現象をモニタリングする際、繰り返し時間間隔を短縮することができる点を活かす方向性がある。電気探査によるモニタリング調査は、斜面や盛土中の低飽和領域における水分変化のモニタリング^{15), 16)}や地すべり地域のモニタリング¹⁷⁾といった分野で適用が進められている。近年増加する急激な豪雨に起因するような時間変化の速い現象への適用などが考えられる。このようなモニタリング測定では効率的な測定とともに、経時変化に着目した解析手法¹⁸⁾を適用することもまた重要である。地すべりの監視では、電気探査による比抵抗測定データから電極位置と比抵抗構造を同時に求める解析手法を用いることで、電気探査のモニタリング測定により電極位置の変位を解析して地表変位を評価するという応用研究が行われている^{19), 20)}。このような用途でも高速な測定のメリットが活かされる可能性がある。また、金属資源探査のようにプロジェクト規模が比較的大きい場合や現場での調査工期が限られている場合は、多点同時通電技術による作業効率向上効果のメリットが大きくなる。特に金属資源探査などでは2.2節で示したIP法への拡張が重要になると考えられる。調査範囲が広域にわたり3次元探査のために平面的に測定点を多数配置する場合には、分散型測定と呼ばれるような送受信機それぞれを独立して動作させる測定形態が取られることがある²¹⁾。このような分散型測定において多点同時通電技術に基づき複数の送信機を同時に利用可能となることで作業を効率化するシステムの構築が考えられる。異なる地点に分散して同時に探査が行えることは、受信機のみ増設による効率化では実現できない、多点同時通電技術ならではの特長と言える。

課題としては、ハードウェア面では、測定器、特に通電用送信機の多チャンネル化に伴う大型化・高価格化が

挙げられる。送信機の増設は、受信機増設に比べて一般的に大型化しやすく製作コストもかさみやすい。これについては、2.4節で示したランダムノイズへの耐性を活かすことにより、小出力でも多数の送信機を備えることでS/N比の高い測定データが得られることが期待でき、製品の小型化・低価格化につながる可能性がある。ソフトウェア面の課題として、例えば3.2節で示したように電極配置の展開方法が従来の電気探査の手順とは異なりやや複雑である点が挙げられる。多点同時通電において、種々の電極配置に対応する電極展開の最適化手順やデータQC手順の確立も技術普及のために重要なことである。

6. あとがき

本論文では、電気探査の測定において符号分割方式により通電を多チャンネル化する多点同時通電技術の原理について詳述し、従来の電気探査との比較、時間領域IP法への拡張、本手法が持つランダムノイズへの耐性について述べた。あわせて多点同時通電を実現するために開発した特徴の異なる2種類の測定器を紹介した。電気探査における送受信機両方の多チャンネル化による測定効率の向上は、特に電極を長期間設置して行うモニタリング測定での繰り返し時間間隔の短縮や、測定点が膨大になる3次元探査の現場作業のコスト低減に貢献が期待できる。送信機の多チャンネル化は受信機の多チャンネル化と比べると現状コスト高になるが、送信を多チャンネルにするほど小出力でも品質の良いデータが得られる性質があることから、送信装置の小型化による低価格化につながる可能性があると考えている。

参 考 文 献

- 1) 鈴木浩一, 塩竈裕三, 久野春彦, 東 義則. 超高速電気探査装置の開発: 未固結地盤中の地下水流動モニタリングへの適用. 物理探査. 60巻, 第6号, 2007, p. 515-526.
- 2) 神宮司元治, 狩野嘉昭. マルチ送信比抵抗トモグラフィ計測システムの開発とその応用について. 物理探査学会第114回学術講演会論文集, 2006, p. 215-218.
- 3) 今村杉夫. CDMA方式を用いた多チャンネル同時通電による瞬時電気探査の可能性(その1)原理と基礎実験. 物理探査学会第117回学術講演会論文集, 2006, p. 273-274.
- 4) 石井 聡. 無線通信とデジタル変復調技術. CQ出版社, 2005.
- 5) Edwards, L.S. A Modified Pseudosection For Resistivity And IP. GEOPHYSICS, Vol.42, No.5, 1977, p. 020-1036, SEG
- 6) 伊関伸一. IP映像法の開発—比抵抗と充電率を用いた2次元インバージョン—. 応用地質年報, No.17, 1995, p. 27-37.
- 7) Carlson, N., Bouzid, N., Byrd, R. Environmental applications of the IP method: Surveys of subsurface waste The Leading Edge, Vol. 34, No.2, 2015, p. 214-220, SEG
- 8) Yamashita, Y., Lebert, F., Gourry, J-C., Bourgeois, B., Texier, Benoit. A Method To Calculate Chargeability On Multiple-Transmission Resistivity Profile Using Ccode-Division Multiple-Access SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2014, p. 1775-1779, SEG
- 9) Pelton, W. H., Ward, S. H., Hallof, P. G., Sill, W. R., Nelson, P. H. Mineral Discrimination And Removal of Inductive Coupling with Multifrequency IP. GEOPHYSICS, Vol.43, No.3, 1978, p. 588-609, SEG
- 10) Seigel, H. O. Mathematical Formulation And Type Curves For Induced Polarization. GEOPHYSICS, Vol.24, No.3, 1959, p. 547-565, SEG
- 11) Yamashita, Y., Lebert, F., Gourry, J-C., Bourgeois, B. A Practical Field Experiment of Multiple Transmission Resistivity Profiling Using Code Division Multiple Access. 2nd Near-Surface Asia Pacific Conference, Expanded Abstract, 2015, Electric-EM-NMR Methods, SEG
- 12) Yamashita, Y., Lebert, F. The characteristic of multiple current resistivity profile using Code-Division Multiple-Access Technique Regarding Data Quality. 19th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Expanded Abstract, 2013, Mo S2a 10
- 13) 今村杉夫, 稲崎富士, 北 高穂, 坂西啓一郎. 符号分割多点同時通電による高速比抵抗探査装置の開発と適用. 物理探査学会第128回学術講演論文集. 2013, p. 203-206.
- 14) Gance, J., Texier, B., Leite, O., Bernard, J., Truffert, C., Lebert, F., Yamashita, Y. Multi-transmitter/multi-receiver high-speed measurements of soil resistivity and induced polarization – Hydrological application European Geosciences Union General Assembly 2016, EGU (in press)
- 15) 高倉伸一, 吉岡真弓, 内田洋平, 石澤友浩, 酒井直樹. 比抵抗モニタリングによる盛土中の水分変化の推定. 物理探査, 第65巻, 第4号, 2012, p. 223-236,
- 16) Chambers, J.E., Gunn, D.A., Wilkinson, P.B., Meldrum, P.I., Haslam, E., Holyoake, S., Kirkham, M., Kuras, O., Merritt, Wragg, A.J. 4D Electrical Resistivity Tomography Monitoring Of Soil Moisture Dynamics In An Operational Railway Embankment. Near Surface

- Geophysics, Vol.12, 2014, p. 61-72, EAGE
- 17) Supper, R., Ottowitz1, D., Jochum, B., Kim, J. H., Römer, A., Baron, I., Pfeiler, S., Lovisolo, M., Gruber, Stefanie., Vecchiotti, Filippo. Geoelectrical Monitoring: An Innovative Method To Supplement Landslide Surveillance And Early Warning., Near Surface Geophysics, Vol.12, p. 133-150, 2014, EAGE
- 18) Kim, J.H., Yi, M.J., Park, S.G, Kim, J. G. 4-D inversion of DC resistivity monitoring data acquired over a dynamically changing earth model, Journal of Applied Geophysics, Vol.68, No.4, 2009, p. 522–532, Elsevier
- 19) Kim, J.H., Yi, M.J., Supper, R., Ottowitz, D. Simultaneous Inversion of Resistivity Structure and Electrode Locations in ERT, 20 th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Extended Abstract, 2014, We Olym 0, EAGE
- 20) Wilkinson, P.B., Uhlemann, S.S., Chambers, J.E., Meldrum, P.I. Inversion to Recover Electrode position Displacements on 3D Electrical Resistivity Tomography Monitoring Grids. 20 th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Extended Abstract, 2014, Tu Verg 05, EAGE
- 21) Eaton, P., Anderson, B., Queen, S., Mackenzie, I, Wynn, D. NEWDAS - the Newmont Distributed IP Data Acquisition System. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2010 p. 1768-1772, SEG