海底電気探査システムの開発と適用事例

井 上 誠*

Development and case studies of the new submarine electric sounding system

Makoto INOUE*

ABSTRACT

Submarine electric sounding, which is conducted by towing a measuring cable behind a survey vessel, is a kind of electrical survey methods below sea surface. This method is applied to investigate dredging areas of channels, geological structures and mineral resources at offshore areas in foreign countries. In Japan, only some field tests of the method were carried out during 1950-1953 and in 1965. A new survey and analysis system is developed using the latest innovation techniques. After some field studies, this system has been improved for the practical use and is proved usefulness for marine engineering surveys. This paper describes the outline of the developed system and case studies of it.

Key words: submarin electric sounding, survey system, analysis system, marine engineering survey

1. はじめに

水中における電気探査解析の基本理論は、すでに国内においては吉住ほか(1965)により、海外においてはLagabrielle(1983)によって紹介されている。

電極を配置した測定用ケーブルを海底に沈めて船で曳航しながら測定する海底電気探査法は、海外では航路の浚渫区域の調査や海底の資源調査など、広域の海底地盤を調査する手法として利用されており(例えばWynn et al., (2001)), 現在では海底電気探査を専門とする会社(例えばDEMCO (Dredging Exploration Mining Consults), Belgium)や調査機器を販売する会社が存在する。しかしながら、国内での事例は少なく、三菱鉱業株式会社高島鉱業所が1950~1953年に海底炭層調査に用いたとの記録が残されている。また、吉住ほか(1965)は神奈川県平塚沖波浪灯台基盤調査に適用したことを報告している。なお、測定ケーブルを海底に降ろして船によって曳航する手法以外の海底地盤を対象とした国内での電気探査としては、塚田ほか(1954)が諫早湾においてウェンナー電極配置用ケーブルを海面に浮

かべて垂直探査を行なった例と千葉ほか(1998)が陸上と同様に等間隔に電極を配置したケーブルを海底面に設置して高密度電気探査法を実施した例が報告されている。

著者は、関係研究機関とともに、最新技術を駆使した海底電気探査の実用化と適用性について研究を続けてきた(井上ほか(2000), 井上ほか(2002), 西村ほか(2003), 井上ほか(2004a, 2004b))。本論文では、これまでの研究成果を取りまとめて海底電気探査法の技術の概要を紹介するとともに、その技術を用いた海底地盤の調査事例を紹介する。

2. 海底電気探査

海底の地盤を対象とした電気探査には、海面に電極を浮かべて測定する方法と海底面に電極を沈めて測定する方法がある。前者は、陸上の解析法がそのまま利用できる長所があるが、海水の比抵抗が約 $0.3\Omega\text{m}$ と非常に低いために電力損失が非常に大きく、水深が深くなると電位の測定が難しくなる欠点がある。後者は、水深による電位補正をするために解析が複雑になる欠点はあるが、

2005年5月30日原稿受付; 2005年7月11日受理

* 基礎地盤コンサルタンツ(株)

〒102-8220 千代田区九段北1-11-5

Manuscript received May 30, 2005; Accepted July 11, 2005.

* KISO-JIBAN CONSULTANTS

1-11-5 Kudan-kita chiyodaku Tokyo. 102-8220 Japan.

©2005 SEGJ

直接海底に電極を設置して測定するため、海底下の地質状況を強く反映したデータを取得できる長所がある。

電極を海底面に接して測定する電気探査法には、等間隔に電極を配置したケーブルを海底に固定して高密度に測定を行う高密度電気探査タイプと垂直探査の電極配置をしたケーブルを曳航して測定する垂直探査タイプとがある。前者の高密度電気探査タイプは、測定に時間がかかるため、その間に生じた潮位変化を解析時に正しく補正できない欠点がある。後者の垂直探査タイプは、測定機材と測定法を改良することにより短時間に1地点での測定を終えることができることから、測定時の潮位を容易に補正することができる。この理由から垂直探査タイプの海底電気探査法を開発の対象とした。

開発した海底電気探査は、Fig. 1 に示すように垂直探

査測定用に電極を配置したケーブルを5トン程度の船で曳航しながら連続的に測定する方法である。作業船には電気探査の測定システム以外に、船を測線上にナビゲーションするためのD-GPSシステム、海底地形と水深を正確に測量するための音響測深器、ケーブルに取り付けたトランスポンダの位置を測量するための水中測位システムを装備している。Fig. 2 に海底電気探査測定システムのシステム構成図を示す。これらの装置は、それぞれ独立したパソコンにより自動測定を行うため、測定時に正確な時刻と測定データをファイルとして自動記録することでデータの同期性を確保している。

開発した電気探査装置の仕様を Table 1 に示す。この装置の特徴は、最大電流3Aの交替直流送信装置と最小測定電位 $10\mu\text{V}$ の25 ch/s (2回スタック時) 高速ス

Fig. 1 Schematic diagram of the submarine electric sounding measurement system.

Fig. 2 Block diagram of the measurement system

Table 1 The specification of the measurement system

Model name	Submarine electric sounding system (Map-2)
Manufacturer	KISO-JIBAN COSULTANTS CO., LTD.
1. Control unit	
The number of current electrode	1 pair
The number of potential electrode	Max 50 pairs
Measurment range	Potential : 0 ~ 3.0V, 0 ~ 0.3V
	Current : 0 ~ 5.0A
Noise filter	Low pass filter
Scanning device	Potential electrode 50 pairs
Scanning speed	25 c h/s
2. Transmitter	
Output current	0 ~ 3 A (max DC 250 V)
Maximum output effect	750 W
3. Measuring Cable	
The number of current electrode	1
The number of potential electrode	19
Electrode configuration	Pole-dipole array
Electrode spacing	a = 0.5m ~ 48m
Cable length	250 m (electrod part 96 m)
External diameter	30 mm ϕ
Maximum tensile strength	1,000 kgf
Weight	250 kg

Table 2 The specification of the positioning system

Model name	Positioning detection device (ALS-20DQ)
Manufacturer	KAIYO DENSHI Co., Ltd.
Control unit part	
Measurement distance	0 ~ 500m (1m step)
Measurement depth	0 ~ 300m (1m step)
Measurement cycle	1 s
The number of maximum control	6 ch
Transmitting frequency	19.608 ~ 21.739kHz
Receiving frequency	19.231kHz
Indication	25, 50, 100, 150m 4 step
Power supply	AC100V $\pm$ 10% 50 ~ 60Hz
	DC12V $\pm$ 10%
Dimension	360mm (w) $\times$ 200mm (D) $\times$ 217mm (H)
Weight	6kg
Transponder part	
Receiving frequency	19.608~21.739kHz
Receiving sensitivity	150 μ V
Answer frequency	19.231kHz
Answer output	2W
Measurement depth	0 ~ 300m
Power supply	DC 7 ~ 12V
Dimension	ϕ 54mm $\times$ 297mm (L)
Weight	0.57kg

キャンニング電位測定装置である。

水中測位システムは、D-GPS、磁方位計、傾斜角計、トランスポンダから構成されている。水中測位システムでは、トランスポンダで測量した作業船に対する相対位置に船の方向、ローリング、ピッチングなどの補正を加えた後、D-GPSで求めた作業船の絶対位置を使ってトランスポンダの緯度経度を決定する。水中測位シ

テムの仕様を Table 2 に示す。

海水の比抵抗が約 0.3 Ω m と非常に低いので十分な測定電位を得るために 1 A を超える電流を流す必要がある。また、高速で測定を行うために 1 対の電流電極で異なる深度の電位が測定できる電極配置を使用する必要がある。

Fig. 3 は海底電気探査で使用可能な電極配置を示す。

Fig. 3 Electrode configurations for the submarine electric sounding method

三菱鉱業㈱では3極法，吉住ほか（1965）では2極法が使用されている。海外の例ではシュランベルジャー法やダイポール・ダイポール法の利用例が報告されている（例えば Wynn et al., (2001)）。

同一深度までの探査を行う場合には，2極法は海底部の測定用ケーブルは最も短い，無限遠電極 P2 を非常に長くする必要があり，現場でのケーブル操作が難しいという欠点がある。シュランベルジャー法，ダイポール・ダイポール法と3極法は海底に接するケーブルは比較的短く，国内における海洋土木工事の測定に適している。しかしながら，シュランベルジャー法とダイポール・ダイポール法は，3極法に比べて送信電流に対しての測定電位が小さいという欠点がある。このような理由から浅海の海洋土木調査に適した3極法を採用した。Fig. 3 で示す3極法は，電流電極を固定して測定を行うために垂直探査の中心点が電極間隔ごとにずれる欠点がある。海底堆積物は安定した水平層であることが多いことから海底地盤を水平多層構造モデルと仮定すれば，電

極中心が多少ずれても同じ電極間隔であれば同じ測定結果が得られる。このことから，1対の電流電極で測定したすべての電位測定値について，電極間隔1mの時の電極中心位置を垂直探査の共通中心点とみなして1次元解析を行った。

海底に設置された測定用のケーブルは潮流やうねりの影響を受けて安定するまで時間を要することがあるため，測定値の品質管理を Fig. 4 に示す測定画面により行っている。一般の小型船は4ノット未満では操船が困難であるため，測定は移動と停船を繰り返して行う。画面右上に表示されたVES曲線が安定した状態になった時点で船を移動させる。時系列のデータを画面左上に示し，前回データとの比較も同時に確認できる。Fig. 5 は測定されたデータの拡大図である。Fig. 5 に示すように見掛け比抵抗は0.1 Ω m から2.0 Ω m の範囲にあり，ノイズの少ないきれいなVES曲線が得られる。

水深は，トランスポンダに取り付けた水圧計情報と音響測深による測深データから決定した。基準水位に補正

Fig. 4 Measurement control panel on a personal computer.

Fig. 5 An example of measured sounding curves

するための検潮所を設置して、潮汐変化を測定した。

3. 解析法

全体の解析流れ図を Fig. 6 に示す。以下に順を追って詳細を説明する。

解析の準備として、比抵抗の測定データから品質の良いデータのみを選択し、これに水中トランスポンダのデータから計算した座標情報を結合して解析用のデータ

Fig. 6 Flow chart of analysis

ファイルを作成した。計算時の水深による電位補正は測定時の実水深を使用し、解析結果である比抵抗断面図の水深は検潮記録から指定された基準水位に補正した水深で表示した。

Fig. 7 Three-layers model for sea water correction

水深による電位補正は、Fig. 7に示す解析モデルを用いて、海底面上に電極がある場合の解析理論に基づいて行った。水深による電位補正の計算方法（井上ほか，2000）を以下に示す。

海水中に電流電極（C）および電位電極（P）の両方が存在する場合は，3層構造（媒質 ρ_1, ρ_2, ρ_3 ）において中間にある媒質（ ρ_2 ）中にCおよびPの電極が存在する場合に相当する。CおよびP電極が海底に存在する場合は，中間層の境界上に電極が存在する場合と考えられる。吉住ほか（1965）は，この状況におけるPにおける電位 V を(1)式として示している。

$$V = \frac{\rho_2 I}{4\pi} \left[\sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-k_1 \cdot k_2)^n}{\sqrt{(n2d)^2 + a^2}} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-k_1 \cdot k_2)^n}{\sqrt{(n2d)^2 + a^2}} + k_2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-k_1 \cdot k_2)^n}{\sqrt{(2d + n2d)^2 + a^2}} - k_1 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-k_1 \cdot k_2)^n}{\sqrt{(n2d)^2 + a^2}} \right] \quad (1)$$

ただし，

a ：電極間の距離

d ：水深

$k_1 = (\rho_2 - \rho_1) / (\rho_2 + \rho_1)$

$k_2 = (\rho_3 - \rho_2) / (\rho_3 + \rho_2)$

ここで， $\rho_3 = \infty$ であることを考慮すると， $k_2 \div 1$ となり，これを(1)式に代入して a で整理すると，

$$V = \frac{\rho_2 I}{4\pi a} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-k_1)^n}{\sqrt{1 + 4n^2(d/a)^2}} + \frac{1}{\sqrt{1 + 4(d/a)^2}} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-k_1)^n}{\sqrt{1 + 4((nd+d)/a)^2}} - k_1 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-k_1)^n}{\sqrt{1 + 4n^2(d/a)^2}} \right] \quad (2)$$

となる。

CおよびPの電極が陸上にある場合，P点の電位 V_c

は(3)式で示すことができる。

$$V_c = \frac{\rho_1 I}{2\pi a} \quad (3)$$

海底で測定した電位 V を陸上で測定した電位 V_c に変換するための電位補正量 ΔV は，

$$\Delta V = V_c - V \quad (4)$$

となる。(4)式に(2)式および(3)式を代入し，整理すると，

$$\Delta V = \frac{\rho_1 I}{2\pi a} - \frac{\rho_2 I}{4\pi a} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-k_1)^n}{\sqrt{1 + 4n^2(d/a)^2}} + \frac{1}{\sqrt{1 + 4(d/a)^2}} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-k_1)^n}{\sqrt{1 + 4((nd+d)/a)^2}} - k_1 - k_1 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-k_1)^n}{\sqrt{1 + 4n^2(d/a)^2}} \right] \quad (5)$$

となる。

1対の電流電極（ C_1, C_2 ）および電位電極（ P_1, P_2 ）がある場合の測定電位 ϕ は

$$\Phi = V(r_{11}) - V(r_{12}) - V(r_{21}) + V(r_{22}) \quad (6)$$

r_{11} ： $C_1 P_1$ の距離 r_{12} ： $C_1 P_2$ の距離

r_{21} ： $C_2 P_1$ の距離 r_{22} ： $C_2 P_2$ の距離

となる。ここで，(6)式に(3)式を代入すると，

$$\Phi = \frac{\rho_2 I}{4\pi r_{11}} \left[1 - k_1 + (2 - k_1) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-k_1)^n}{\sqrt{1 + 4n^2(d/r_{11})^2}} + \frac{1}{\sqrt{1 + 4(d/r_{11})^2}} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-k_1)^n}{\sqrt{1 + 4((nd+d)/r_{11})^2}} \right] + \frac{\rho_2 I}{4\pi r_{12}} \left[1 - k_1 + (2 - k_1) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-k_1)^n}{\sqrt{1 + 4n^2(d/r_{12})^2}} + \frac{1}{\sqrt{1 + 4(d/r_{12})^2}} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-k_1)^n}{\sqrt{1 + 4((nd+d)/r_{12})^2}} \right] + \frac{\rho_2 I}{4\pi r_{21}} \left[1 - k_1 + (2 - k_1) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-k_1)^n}{\sqrt{1 + 4n^2(d/r_{21})^2}} + \frac{1}{\sqrt{1 + 4(d/r_{21})^2}} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-k_1)^n}{\sqrt{1 + 4((nd+d)/r_{21})^2}} \right] + \frac{\rho_2 I}{4\pi r_{22}} \left[1 - k_1 + (2 - k_1) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-k_1)^n}{\sqrt{1 + 4n^2(d/r_{22})^2}} + \frac{1}{\sqrt{1 + 4(d/r_{22})^2}} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-k_1)^n}{\sqrt{1 + 4((nd+d)/r_{22})^2}} \right] \quad (7)$$

となる。ここで $\rho_2, r_{11}, r_{12}, r_{21}, r_{22}, d$ は既知であり， ϕ は測定値である。 ρ_1 は理論的に求められないため， ρ_1 に初期値を与え，測定電位 ϕ との誤差が収束判定設定値以

下になるまで反復修正を行う逆解析により近似解を求める。

水深による電位補正を行った測定値から、リニアフィルター法 (O'Neill and Merrick (1984)) による層構造モデル計算と Bayes の方法による反復修正法 (Talantola, 1987) を併用した多層構造解析を行う。

この海底電気探査システムでは、垂直探査の解析結果を水平方向、深度方向に補間してコンタリングした比抵抗断面図として出力する。

4. 調査事例

2000年以降、これまでに浅海域において実施された海底電気探査の事例を報告する。

4.1 黒部扇状地沖合における淡水湧出地点の調査

2001年から3カ年にわたって、富山県の黒部扇状地の沖合で湧出している淡水に関する水理構造を調査する目的で、魚津市―黒部市―入善町―朝日町の沖合、海岸近傍から水深60m (一部水深160m) までの区域において延べ測線長約55kmの調査を行った (井上ほか, 2002)。

Fig. 8は、黒部川の河口から東に約5kmの入善町横山沖の水深10mから水深65mにかけての南北方向の比抵抗断面図である。水深10m～15mの比較的浅いところは表層に0.5～1.0Ωmの比抵抗層が分布し、その下位に1.0Ωm以上の高比抵抗層が分布する。また、海底が急激に深くなる地点付近では表層に0.3～0.5Ωmの低比抵抗層が分布する。この地域の海底地盤調査から、水深の浅い部分のやや高比抵抗の表層は砂分の多い地層、その下位の比抵抗層は埋没した扇状地堆積物、水深の深い部分の低比抵抗の表層は細粒分の多い堆積層に対比できる。

Fig. 9は、本地区の水深10m付近を海岸線に平行に

測定した断面図である。この海域の湧出淡水を採取すると、周辺海底地盤の比抵抗に比べて高い200Ωm程度の比抵抗を示す。既知の湧水地点の分布を勘案すると、Fig. 9の矢印で示す高比抵抗の分布域は淡水地下水が分布すると考えられる。この淡水地下水を示すと考えられる高比抵抗異常の分布から、本海域の海底地盤内では平野部の帯水層のように帯水層が水平に広がらず、扇状地の枝沢状に沖合へ流れて湧出していると考えられた。

4.2 沖合堤防基盤調査

本件は、沖合堤防の基盤調査のために音波探査を実施した区域において、音波探査と海底電気探査との比較を目的に実施した調査である (西村ほか, 2003)。

Fig. 10は、比抵抗断面図とブーマー震源を用いた音波探査断面を並べた図である。比抵抗断面図には地質断面図を重ね合わせた。図中のAc1は砂質シルト、As2は礫混じり砂、Agは砂礫、Ac2は礫混じり粘土、As3は礫混じり砂質土である。基盤岩は四万十帯の砂岩優勢の砂岩・頁岩互層である。Ac1は0.5～5.0Ωm、As2は2.0～5.0Ωm、Agは5.0～10.0Ωm、Ac2は5.0～10.0Ωm、As3は5.0～10.0Ωm、基盤岩は10.0Ωm以上と対比された。

図中のA, Bは同一地点を示し、矢印はAg層の上部境界面を示す。矢印部の境界面は、音波探査と海底電気探査解析結果ともほぼ同じ位置に示されている。海底電気探査の結果に見られる基盤岩の凹状形状は、音波探査断面から判読することは困難である。これは回折波の発生により見づらくなっているためと考えられる。また、サンドドレーンが施工されているB地点右側の平らな区域は、海底電気探査では深部まで比抵抗構造の解析がされているが、音波探査断面ではほとんど判読できなかった。

Fig. 8 An example of the analyzed results at the TOYAMA BAY

Fig. 9 Fresh water aquifers below seabed characterized on the resistivity section

Fig. 10 An example of comparison of results between submarine electric sounding and acoustic survey.

4.3 海上最終処分場における遮水層調査

海上設置の最終処分場の調査では遮水層となる不透水層の3次元的な分布調査が重要となる。分布を確認するために多くのボーリングを実施すれば良いのであるが、ボーリングを実施することは大切な不透水層に穴を開けて遮水効果を低減させることになる。このため、非破壊で不透水層の3次元的な分布を調査する目的で海底電気探査を実施した(井上ほか, 2004a)。

Fig. 11は、海上最終処分場建設予定地における調査測線配置図である。測線2および測線3は堰堤の中心

線上の測線である。Fig. 11に作業船の航跡と測点の航跡を示した。この図に見られるように、ケーブル曳航分だけ余分に作業船を運行しなければ測定ができない。また、移動と停船を繰り返して測定するために測点位置がジグザグになる。したがって、各測点を予定測線上に投影した断面で比抵抗断面図を表示した。

Fig. 12は、No. 1 測線の比抵抗断面図にボーリング柱状図を重ね合わせた図である。図中の Ac1 はシルト、As1 は砂・シルト混じり砂・礫、Ac2 は砂質シルト・粘土シルト、Dg1 は砂礫・粘土混じり砂礫である。Ac1

Fig. 11 Layout map of ship trails and survey points

Fig. 12 An interpreted resistivity section with geological columns

と As1 の境界および Ac2 と Dg1 の境界は比抵抗分布とよく一致しているが、As1 と Ac2 の境界は比抵抗の区分と完全には一致しない。この原因は、砂質シルト (Ac2) とシルト混じり砂 (As1) の比抵抗差がほとんどないことによるものと考えられる。

Fig. 13は、3 測線の解析結果をパネル表示で示した図である。遮水層 (Ac2) は、今回の調査では 0.7~1.2 Ωm の比抵抗を示し、他の地層に比べて多少比抵抗が高く解析された。また、下位の砂礫層 (Dg1) は、0.4~1.0 Ωm と比抵抗が低く解析された。

海底電気探査は、調査目的である非破壊で遮水層の 3 次元的な分布状況を調査する方法として利用できることがわかった。

5. まとめ

海底電気探査を浅海域の地盤調査に適用して、ボーリング結果と音波探査結果と対比してきた。

海底電気探査の欠点は、次に示すとおりである。

- 1) 海底に障害物がある場合や調査地点が狭い場合には、ケーブルを曳航できないために調査ができ

Fig. 13 Impervious layers beneath sea bed characterized on the resistivity section with geological columns

ない。

- 2) 比抵抗しか解析されないために力学的な解釈が難しい。
- 3) これまでの調査事例が少ないため、測線上にボーリング結果がないと比抵抗だけでは地盤状況を直接推定ができない。

海底電気探査が音波探査より優れている点は、次のとおりである。

- 1) 地層を比抵抗で区分することができる。
- 2) 水深が浅くても測定できる。
- 3) サンドドレーンなどの海底地盤改良が施工され、音波が透過し難いような地点でも深部までを調査できる。

これまでの検証で明らかになった海底電気探査の適した利用法には次のようなものがある。

- 1) ボーリング間を地質補間するための調査
- 2) 遮水層などの3次元的分布の確認調査
- 3) サンドドレーン等の地盤改良前後の地盤調査
- 4) 淡水湧出地点の調査および水理構造調査

海底電気探査は、音波探査と同様に浅海域の海底地盤調査に適した手法である。しかしながら、測点の位置と水深による電位補正などを理論的に検討していかなければならない課題が残されている。今後、さらなる理論的な検討を行うと共に適用事例を増やすことにより、更に精度の高い海底地盤調査法へと改良していきたい。

参 考 文 献

- 千葉昭彦・吉田秀隆・森内博之・佐々木裕 (1998) : 浅海底電気探査実験, 物理探査学会第98回学術講演論文集, 177-181
- 井上 誠・三木 茂・菅智 浩・横井良広 (2000) : 曳航型海底電気探査の解析法について, 物理探査学会第102回学術講演会講演論文集, 289-292
- 井上 誠・佐々木勝・徳永朋祥・中田智浩・戸井田克 (2002) : 海底電気探査システムの開発, 物理探査学会第106回学術講演会講演論文集, 189-192
- 井上 誠・西垣 誠・Kankam-Yeboah, K.・Stephan Mattersteig, S.・中平徹也 (2004a) : 海底電気探査法の遮水層調査への適用, 第39回地盤工学研究発表会, 2193-2194
- 井上 誠・佐々木勝・八野祐二 (2004b) : 海底電気探査法の改良, 物理探査学会第110回学術講演会講演論文集, 63-66
- Lagabriele, R. (1983) : The effect of water on direct current resistivity measurement from the sea, river or lake floor, *Geoexploration*, 21, 165-170
- 西村和貴・佐々木勝・内田篤志・井上 誠 (2003) : 海底電気探査による防波堤調査の一例, 全地連 e-フォーラム2003
- O'Neill, D. J., Merrick, N. P. (1984) : A digital liner filter for resistivity sounding with a generalized electrode array, *Geophys. Prosp.*, 32, 105-123
- Tarantola, A. (1987) : *Inverse problem theory*, ELSEVIER
- 塚田 正・落合敏郎・長谷川和夫・小沢武雄 (1954) : 長崎県長崎大干拓電気探査, *物理探査*, 7, 4, 202-207
- Wynn, J., McGinnis, T., Williamson, M. (2001) : A new marine geophysical method for mapping placer sands, buried metallic objects, and androgenic sediments beneath the seafloor, *Proceedings of the Oceanology International Americas annual meeting*
- 吉住永三郎・谷口敬一郎・入江恒爾・佐藤忠五郎・高木光哲・梅田貞夫 (1965) : 平塚における海底地質探査, *水曜会誌*, 15, 8, 371-374