

極浅海における電磁場観測機器の開発 (I)

西留紳也・和田拓朗・松本和也・石井勇太・高宮弘幸・大森喜由奈・清村哲一朗・
鶴飼江梨子・新貝雅文・佐藤数美・下泉政志 (九州職業能力開発大学校)

Preliminary report regarding the development of an Ocean Bottom Electromagnetometer for the extremely shallow sea (I)

S. Nishidome, T. Wada, K. Matsumoto, Y. Ishii, H. Takamiya, K. Oomori,
T. Kiyomura, E. Ukai, M. Shingai, K. Sato, and M. Shimoizumi
(Kyushu Polytechnic College)

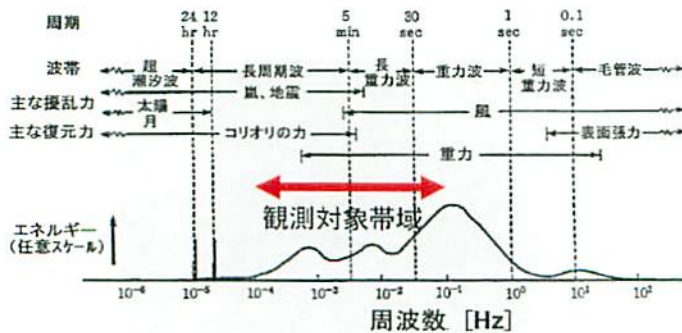
Abstract

An ocean bottom electrometer for shallow sea (SS-OBE) has been developed and pilot experiments of the SS-OBE at the seafloor of the shallow sea have been conducted. The SS-OBE is built at a very low cost, nevertheless experimental results suggest that it can be practically used for seafloor geo-electrical observation. Preliminary experimental results will be presented in this report.

1. はじめに

九州北部は過去に目立った地震活動歴がない地震空白地帯であったが、2005年3月20日午前10時57分に、福岡県西方沖(福岡市の北西40km沖)を震源とするマグニチュード7.0の地震が発生した。本地震は日本列島ではどこでも大きな被害をもたらす地震が起こりうるという現実を改めて浮き彫りにしたが、特に、福岡市近郊の沿岸域で発生したという点で我々は大きな衝撃を受けた。

ところで、浅海では深海底での電磁場観測と異なり、海水の動きによるセンサの揺れが極めて深刻な影響を及ぼす(例えば、半田・田中、1992)。そのため、沿岸域において電磁場観測が実施されたことは皆無に等しい。第1図に海における表面波のスペクトルを示すが、海面を吹く風などにより誘起された海水の運動は、浅海においては海底まで到達し機器を振動させてしまう(例えば、宇野木・久保田、1996)。そしてその周波数帯域は、ほぼ電磁気観測帯域と重なっており、特に、磁場観測には非常に厳しい環境であることが予測できる。この事は、下泉ほか(2000)や吉村ほか(2004)による沿岸域での実験データから確認することができる。そこで、それに対する対策を施した装置を開発し、浅海での電磁場変動観測の実現可能性を探る試みを開始した。



第1図 海における表面波のスペクトル (能沢, 1999)

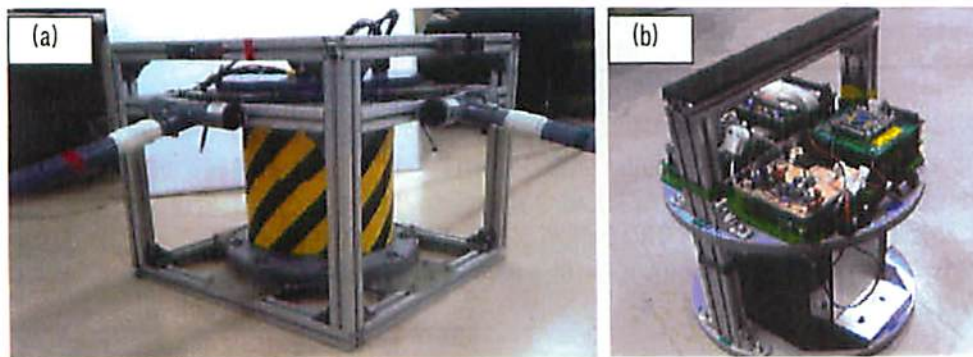
Fig.1 The spectrum of surface wave in the sea

2. 電位差計測装置(OBE)

波浪による装置の揺れの影響を軽減する最も単純で、かつ有効な方法は、装置を低く、小型化することである。そこで、第2図、第1表に示す仕様の装置を製作した。同図(a)に示す耐圧容器は、塩化ビニール製の厚さ10mm、外径300mm、高さ400mmの円筒の両端に塩化ビニール製のフランジを溶接したものである。この円筒容器の蓋(直径420mm、厚さ15mm)には塩化ビニールより靱性があるポリカーボネイトを使用した。

この耐圧容器内には、同図(b)に示す電源(シール型鉛バッテリー:12V 22AH 2個)と電子回路部を格納している。なお、電子回路部は、投入・回収時の衝撃を考慮し、ピンコンタクトでスタックアップ接続することで高信頼性が得られ、かつ小型(約90×96mm)のPC/104標準バスボードを採用した。計測部の構成とその仕様を第2表に示す。着底後の方位と傾斜を知るために方位計と傾斜計を搭載し、それぞれ100nT、0.01°の精度で12ビットA/Dコンバータにより1秒サンプリングで計測している。装置の揺れは主に傾斜時系列データから推定した。

今回は、数日の実験期間であるため、周期数10秒以上の地磁気脈動により誘導される電位差の検出が主である。その大きさは観測点下の比抵抗に依存するが、周期100秒で1nTの磁場変動の場合、見かけ比抵抗 ρ_a の定義より、10(100) Ωm 一様の場合0.7(2.2) $\mu\text{V/m}$ 程度であるので、計測精度は0.1 $\mu\text{V/m}$ と設定した。4m長の銀・塩化銀電極間の電位差を500倍に増幅後、 $\Delta\Sigma$ 型20ビットA/Dコンバータ(Cirrus Logic社 CS5506)により10HzサンプリングでAD変換(入力換算で0.01 $\mu\text{V/LSB}$)し、10回の計測値の平均値を1秒値として1時間単位でコンパクトフラッシュカードに記録している。



第2図 海底電位差計 外観

Fig.2 The outside appearance of OBE

第1表 OBE 機構部仕様

Table 1 the specification of OBE mechanics

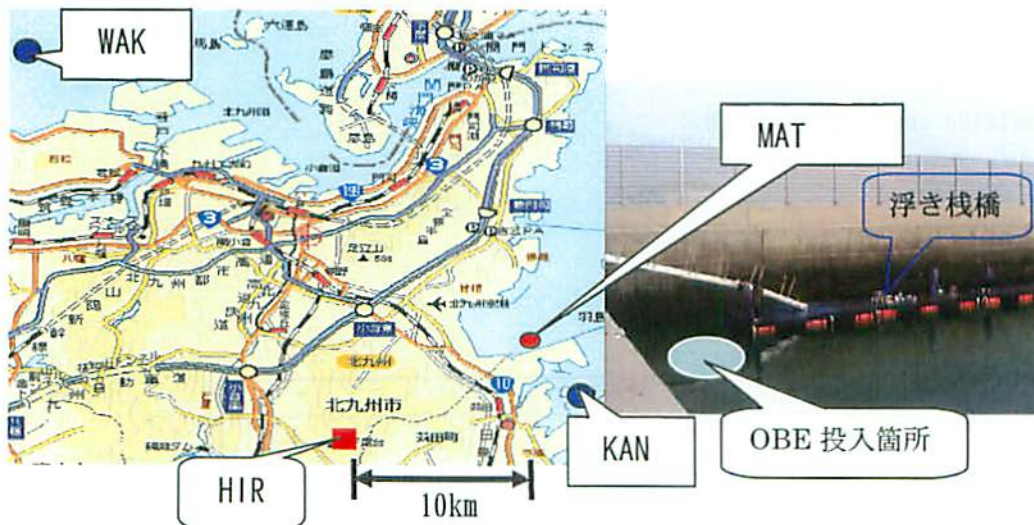
フレーム	580×580×580mm (A6N01SS-T5:アルミ)		
耐圧容器	φ300×400mm 長、円筒形 上・底面部:15mm 厚ポリカーボネイト 側面部:10mm 厚塩化ビニール		
電極アーム	φ30×2000mm 長×4本 (塩化ビニール)	水中コネクタ	Seacon社 AWM-2/12
空中重量:540N、水中重力:260N			

第2表 OBE 計測部仕様

Table 2 the specification of OBE instrument

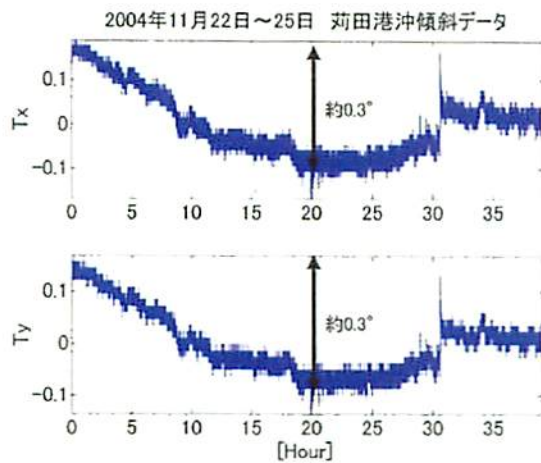
方位計測	フラックスゲート型 (東北金属 TMC-2000)		
成分数	2	測定磁場範囲	±75,000nT
測定精度	100nT	ADC	12ビット
		消費電力	DC+12V, 10mA
傾斜角計測	静電容量変化検出 (ADI 社 900)		
成分数	2	測定傾斜角範囲	±20°
測定精度	0.01°	ADC	12ビット
時定数	0.3秒	消費電力	DC+9V, 10mA
電位差計測	センサ: 銀・塩化銀電極 (クローバテック社) 4個 電極間隔: 4m		
成分数	2	測定電極間電圧範囲	±5mV
測定精度	0.1μV	ADC (CS5506)	20ビット
入力換算 雑音電圧	0.4μVpp	消費電力	DC+12V, 20mA
記録・制御部	CompactFlashカード (32MB) コントローラ: KL5C80A16 (10MHz)、FLASH-ROM512KB、SRAM32KB RTC、PC104bus I/F、RS232C I/F 消費電力 DC+5V, 50mA		

実験地点を第3図に示す。試作器の実験は主に松山漁港 (MAT) で行い、漁船を使用しての実験は、2004年11月に松山漁港近くの苅田沖 (KAN: 水深~10m) と、12月に玄海灘の若松沖 (WAK: 水深~18m) で数日間実施した。北九州市内には工場や発電所などがあるため電磁場環境は悪く、人工雑音か波浪による揺れによる雑音であるのか判断が難しいことが予想された。そこで、実験時には、人工雑音のモニタもかねて松山漁港から10km程度離れた平尾台 (HIR) で電磁場5成分を1秒サンプルで同時計測した。



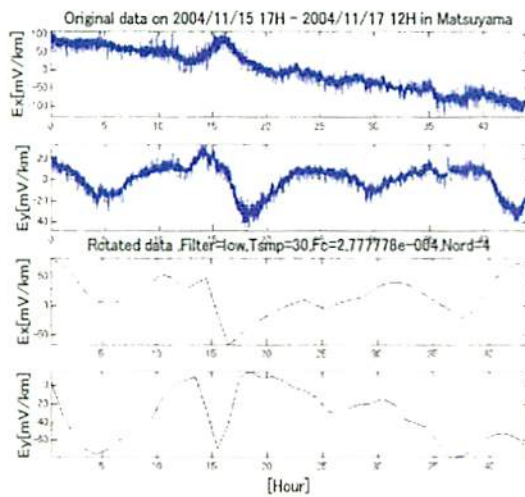
第3図 OBE 実験地点 (MAT: 松山漁港、KAN: 苅田沖、WAK: 若松沖、HIR: 平尾台)

Fig. 3 Locations of OBE experiment sites



第4図 松山漁港での OBE 投入後の傾斜計データ

Fig. 4 Time series of instrumental tilt data observed at MAT



第5図 松山漁港での電場データ

Fig. 5 Time series of electric field variation data observed at MAT. Upper 2 panels show raw data and lowers show low pass filtered data.

次に、2000年の有明海での実験では、検出できなかった自然磁場変動（地磁気脈動 $Pi2$ ）により誘導された電場が検出できたことに関して述べる。第6図は荻田沖の電場（下2段）と平尾台で同時観測した電磁場変動（上4段）の一時間分のデータである。二地点間の距離が10kmと近いこともあり、陸上の電場二成分とOBEで取得した海底での電場二成分が非常に酷似していることが分かる。これは、観測した全期間で見られ、市内の工場や発電所からの漏洩電流が広域に流れていることを示しており、その地電流ノイズは海底下においても検出された。

この電磁環境下において、0時10分頃と0時47分頃に陸上の磁場データに地磁気脈動が発生しているが、これらにより誘導された電場信号が陸上だけでなく、海底においても捕らえていることが確認できる。0時47分頃の周期が100秒程度の地磁気脈動の変動振幅は約4nTで、それに対応する誘導電場の振幅は陸上で約40 μ V/m、海底で約20 μ V/mである。従って、みかけ比抵抗 ρ は、海底では500 Ω m、陸上ではこの4倍の2,000 Ω mと推定できる。

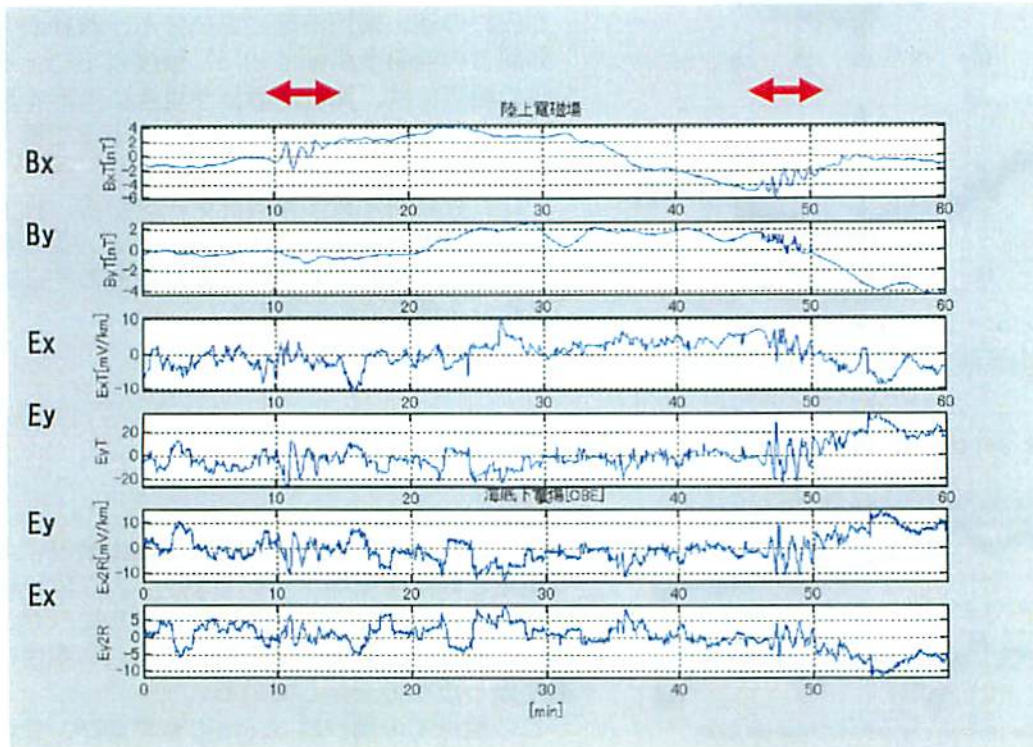
装置の設置・回収は、自己浮上方式でなく、有索方式で実験しているため、ロープの揺れが装置に伝わらないように錘（約20kg）を取り付ける必要があった。これにより、数ノットという流れの速い関門海峡においても、数秒から数分間での傾斜変動幅は0.5°程度以下に、その他の地点では、海況が静穏な場合には第4図に示すように装置の揺れは、0.1°以下まで抑えることができた。

この数日間に渡る傾斜計データから、投入後10数時間程度はドリフトしているが、この現象は着底した海底下の地質により程度の差はあるが他の2地点でもみられた。

第5図には、第4図と同期間に松山漁港において測定された全電場データを示す。上2段には生データを、下2段には、30秒サンプルにリサンプルした後、方位計データを用いて南北、東西に座標変換したものを示している。

この地点での潮汐は3.5mにもおよび、この海面の昇降運動に伴う海水の水平方向の流れが主磁場を横切ることにより誘導された電場成分が顕著である。それを20 μ V/mとすると、潮流は約1ノット（約0.5m/s）程度となる。荻田港沖や若松沖のデータに関しても同様な結果が得られたが、松山漁港のような内湾よりは沖の方がその電場変動は少なく、流速は0.3m/s程度であった。

機器のノイズレベルは有明海での実験時とほぼ同じ程度以下であるので、有明海の海底下の比抵抗が苅田沖よりも1桁以上小さいために有明海では検出できなかったのであろうと思われる。



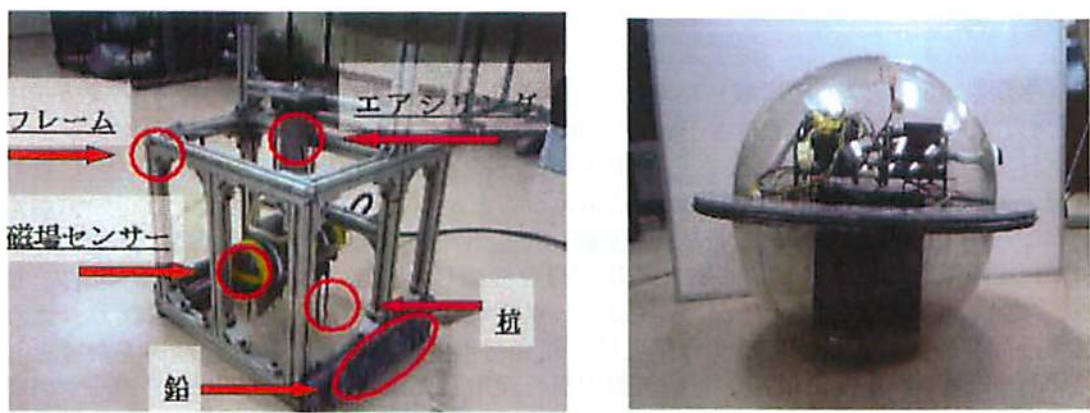
第 6 図 自然電磁場変動データ (上 4 段は、陸上 (平尾台) において観測された水平磁場 2 成分と電場 2 成分の 1 時間データであり、下 2 段は海底で観測された電場 2 成分のデータで、方位計データにより座標回転したものであり、上側が東西 Ey、下側が南北 Ex 成分である。)

Fig. 6 Time series of electromagnetic field variation data observed at land site HIR (upper 4 panels) and seafloor site KAN (lower 2 panels).

3. 磁場変動計測装置(OBM)

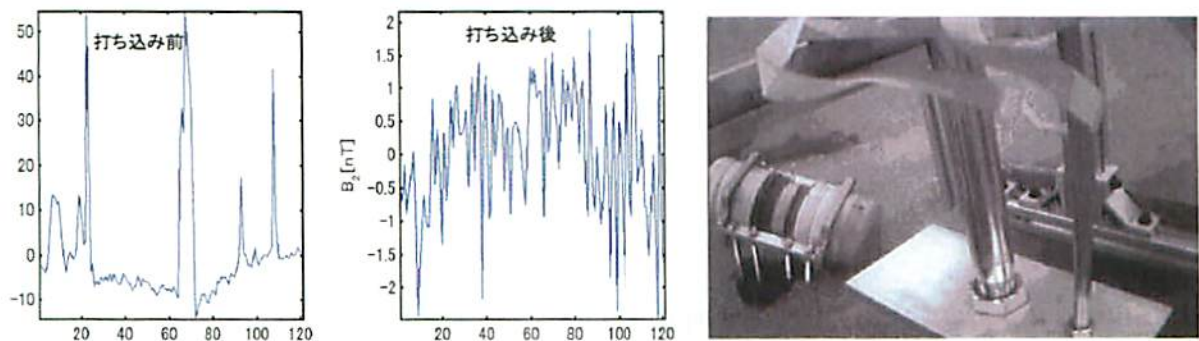
通常、地磁気脈動の信号強度は数 nT 程度以下であり、主磁場の $10^{-4} \sim 10^{-6}$ と非常に微小である。波浪によって磁場センサが 1° 揺れた場合、それにより 600nT 程度の変動が発生してしまう。従って、磁場センサの揺れは、分解能を 0.1nT とした場合でも 10^{-4} 以下に抑える必要があり、この実現は非常に困難であると考えられる。我々は、この問題に対して磁場センサと計測部を別にし、杭を取り付けたセンサ部を海底に打ち込むことでセンサの揺れを抑えることを試みた。第 7 図に製作した OBM 装置の外観を示す。今回は、水中コネクタや耐圧容器の準備が出来なかったため、OBE とは異なり、塩ビパイプに口潰けしたフラックスゲート磁力計センサを海底に設置し、そこから信号を有線で海上に浮かべた球体の防水容器に伝送する方式をとった。

打ち込みは、装置が海底に着底したことをフレームに取り付けた水中カメラで確認後、エアシリンダに船上から圧縮空気を送り込むことにより行った。



第 7 図 OBM 装置の外観 (左図：打ち込み機構部とセンサー部、右図：海上に設置する計測部)

Fig. 7 The outside appearance of OBM



第 8 図 松山漁港での海底磁場データ (左：センサ打ち込み前、右：打ち込み後) と設置状況

Fig. 8 Geomagnetic field variation data observed by OBM at MAT.

第 8 図に松山漁港で行った OBM 実験データのうち、打ち込み前と後の 2 分間のデータを示しているが、打ち込み後には磁場の変動幅が打ち込み前より 1 桁程度以上減少していることが分かる。なお、打ち込み後のデータに周期数秒から数 10 秒程度の振動が定常的に見られるが、これは浮き桟橋上の鉄板の振動によることが後日判明した。

そこで、場所を若松沖に変えて実験を行ったが、残念なことに、装置すべてを船にさらわれてしまい、データを取得することができなかった。有索方式の場合には、このような事態も発生するという教訓を得た。

以上より、現時点では、磁場センサを打ち込むことにより変動レベルやドリフトを低減できることは確認できたが、センサの揺れを目標値の 10^{-4}° 以下までに抑えることが出来るかどうかの実証はできていない。従って、浅海底での磁場変動計測の可能性の検証は今後の課題である。

4. おわりに

極浅海（水深数 10m 程度の沿岸域）においては、深海で使用されているガラス製の球体耐圧容器でなくとも、安価な塩ビ円筒（厚さ 10mm）で水圧に耐えることができ、数日間程度においては水密性も十分であることを確認した。さらに、OBE 装置を高さ 50cm 程度に低床化することにより、静穏な海況下では、装置の揺れを 0.1° 以下に抑えることが可能であり、数 $\mu\text{V}/\text{m}$ 以下の誘導電場を計測することができることも確認できた。実際、北九州沖の周防灘や響灘の水深 10 数 m の浅海底において、地磁気脈動により誘導された電場信号を検出した。ただ、実験期間が 3~4 日と短かったため、海況が荒れた場合のデータは得られていない。計測器の低消費電力化を図り、より長期間の観測を行う必要がある。また、今年度は、開発初年度であったため、極浅海を対象とした装置設計であったが、次年度にはステンレス製円筒を採用して水深 100m 程度以上の浅海での観測を計画している。

一方、フラックスゲート磁力計を用いた磁場変動計測に関しては、従来の一体型でなく、検出回路部とセンサ部を分離し、センサを海底に打ち込む方式を試験してみた。現時点では、これによっても海水の動きによる磁場変動を数 nT 以下に抑えることは出来ておらず、さらに改良、実験を行う必要がある。

最後に、海での実験において、多大なるご協力を頂いた幸丸船頭の東条さん、龍神丸船頭の津室さんに感謝申し上げます。

本研究は平成 14 年度九州職業能力開発大学校開発課題のテーマとして実施したものである。

参考文献

- 半田駿、田中良和、海底電磁力計による有明海での MT 観測、佐賀大学教養部研究紀要、24、1-6、1992、
- 宇野木 早苗、久保田雅久、海洋の波と流れの科学、東海大学出版会、1996
- 能沢 源右衛門、新しい海洋科学、成山堂書店、1999
- 下泉政志、半田駿、田中良和、茂木透、湯元清文、浅海用海底電位磁力計の開発（I）、CA 論文集、54-60、2000
- 吉村 公孝、山根一修、Steven Constable、Arnold Orange、浅海域での電磁法調査の問題点と対策試案、物理探査、Vol. 57、No. 4、383-394、2004
- 浦 環、高川真一、海中ロボット、成山堂書店、1997
- 島 伸和、大道寺 貴、簡易型海底電位差計の開発（1）、CA 論文集、157-162、1995