

極浅海における電磁場観測機器の開発（Ⅱ）

吉村 修司・山中 康平・井上 和彦・榮留 祥吾・下楠 蘭 潤・濱渦 慎也・山下 忠伸・
井上 大輔・上前 雄二・斉藤 賢太郎・瀬戸口 倫貴・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 (Ⅱ)

S. Yoshimura, K. Yamanaka, K. Inoue, S. Eidome, J. Shimokusuzono, S. Hamauzu,
T. Yamashita, D. Inoue, Y. Kamimae, K. Saitou, N. Setoguchi, M. Shingai, K. Sato
and M. Shimoizumi (Kyushu Polytecnic College)

Abstract

Observation of geomagnetic and geo-electrical variation field yields important information on the distribution of electrical conductivity of the earth's interior. The measurement, however, has been so far restricted on land and on deep sea. It is therefore important to extend observation to the shallow sea.

An ocean bottom electrometer for the shallow sea (SS-OBE) has been developed and pilot experiments 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. And an acoustic release unit designed for coastal and inland water to 100 meters depth, capable releasing 50 kg loads is developed and tested. In this second report some experimental results will be presented.

1. はじめに

近年、海陸同時電磁気観測が可能となり、構造解析においては海陸接合問題などが提起されている(藤、2005)。ところで、海陸境界部にあたる浅海では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ため、電磁場観測が実施されたことは殆どなかった。この電磁場観測のフロンティア領域といえる浅海においても、海洋研究開発機構(JAMSTEC)や原環センター(RWMFRC)などにより実用機の研究開発が進行中である(笠谷ら、2006; 吉村ら、2004)。

我々も昨年より水深 100m 程度までの浅海専用の自然電磁場変動観測機器の開発に取り組んでいるが、開発初年度は、適用可能水深を数 10m 程度と設定して設計・製作した塩ビ製の耐圧容器を用いてテスト実験を行い、地磁気脈動により誘導された電場信号を検出した(西留ら、2005)。本年度は、適用可能水深を 100m 程度に設定し、金属(アルミニウム)製の耐圧容器を設計・製作し、実海域実験を行った。さらに、音響切離し機能を実現するために、魚群探知機に使用されている超音波振動子を利用した装置を開発し、水深 100m 程度まで適用可能であることを検証した。今回は、これらに関して報告する。

2. 電位差計測装置(OBE)

2.1 浅海用耐圧容器

水深が 10m 深くなるにつれて水圧は約 1 気圧(≒0.1MPa)ずつ増加していく。海底で計測を行うためには、使用最大水深においても破損することのない十分な耐圧強度を有する容器の中に、計測回路やバッテリーなどの機器を密封する必要がある。この耐圧容器があつて初めて海底での計測が可能になる。水深 6700m まで保障されたガラス耐圧球の価格は、チタンなどの金属製耐圧球に比べて高価ではない(例えば、Benthos 社 2040-17H)ことから、OBEM(海底電位差磁力計)や OBS(海底地震計)

ではガラス球が用いられることが多い(図1(a))。我々も市販のガラス球を採用するという選択肢もあったが、適用水深を数100m程度までの極浅海と限定し、より安価で取扱いの容易な耐压容器を開発する方針をとった。昨年は、軽量で腐蝕の心配がなく、安価な塩化ビニール(PVC:厚10mm、 ϕ 318mm)で円筒形状の耐压容器を製作した(図1(b))。ところで、JIS K 6741 規格に準拠した硬質塩化ビニール管(一般用パイプ)の場合、直径により厚さが定まっており、呼び径300mmの場合、厚さは10mmである。従って、円筒部にフランジを溶接して蓋を取り付ける必要があり、材質の強度も考慮するとせいぜい水深50m程度が限界であった。

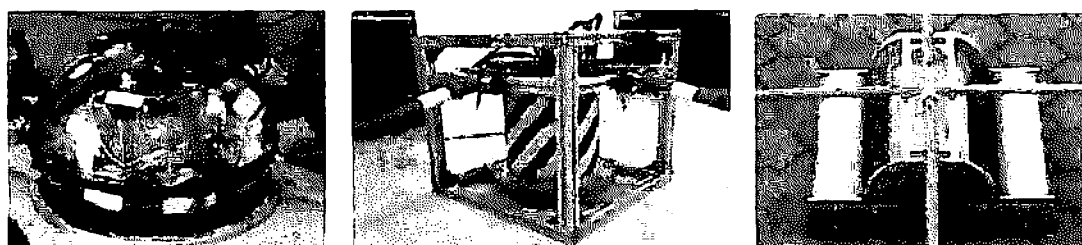


図1 (a)深海用ガラス耐压球 (b)塩化ビニール製耐压容器 (c)アルミニウム製耐压容器

Fig.1 Appearance of 3 pressure tight vessels

今回は、水深100m以上の耐压を実現するために、材質を金属(ステンレスとアルミニウム)に変更した。ただ、市販ステンレスパイプ(SUS304材、 ϕ 220mm)の場合、その比重のため、自己浮上を実現するためには長さが1m以上となり、小型化することは難しい。そこで、今回はアルミニウム合金(A5052)に関してのみ報告する。

耐压容器の円筒部は、水圧による圧縮力により圧縮応力が生じるため水圧に対しては強いが、ある程度圧力が高くなると圧壊する(座屈して潰れてしまう)。従って、最大水圧(今回は、2MPa $\approx$ 水深200m)において圧壊することのないように、安全率を見込んで設計する必要がある(浦ら、1997)。今回は、安全率を2として弾性座屈設計を行い得られた円筒厚は5.2mmであった。そこで、市販品の6.5mmを選択した。ところで、円筒形状の耐压容器で一番の問題点は蓋部の強度設計である。特に、電線貫通コネクタを有する蓋部の厚み選定が難しい。今回は、圧力容器の設計(小林、1995)を元に円筒部、および蓋部の厚みを概算し、最終的には図2に示すCAE解析(COSMOSXpress)を行い、最大応力と安全率2以上の耐力を有する厚さ16mmを蓋厚とした(図1(c))。

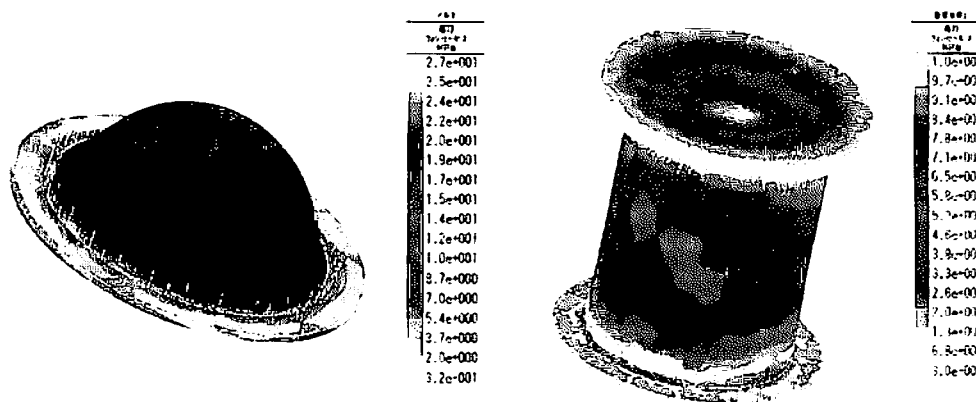


図2 アルミ製耐压容器のCAE解析結果(水深200m下での応力分布)

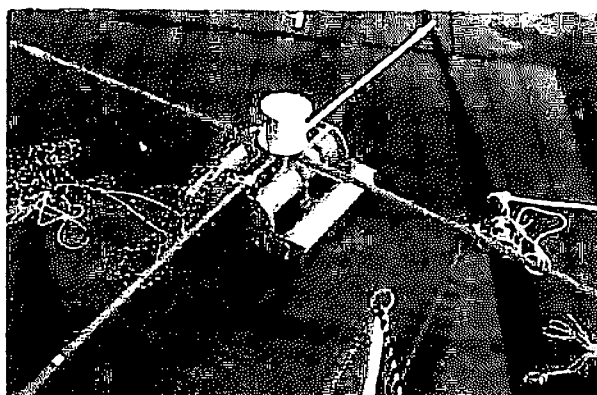
Fig.2 Stress distribution under the pressure of 2MPa

以上の設計に基づいて製作した装置の仕様を第1表に、音響分離装置を装着した OBE 装置の外観を第3図に示す。

第1表 OBE 機構部仕様

Table 1 Specification of OBE mechanics

耐圧容器	φ 216×600mm 長、円筒形、アルミニウム合金(A5052)製 上・底蓋：16mm 厚、円筒部：6.5mm 厚		
	空中重量：230N、浮力：450N		
浮力体	φ 130×600mm 長、円筒形、アルミニウム合金(A5052)製、2 個 上・底蓋：15mm 厚、円筒部：5mm 厚		
電極アーム	φ 25×1500mm 長×4 本 (塩化ビニール)	水中コネクタ	Seacon 社 AWM-2/12



第3図 海底電位差計 (OBE) 外観

Fig. 3 The outside appearance of OBE

第2表 OBE 計測部仕様

Table 2 Specification of OBE instrument

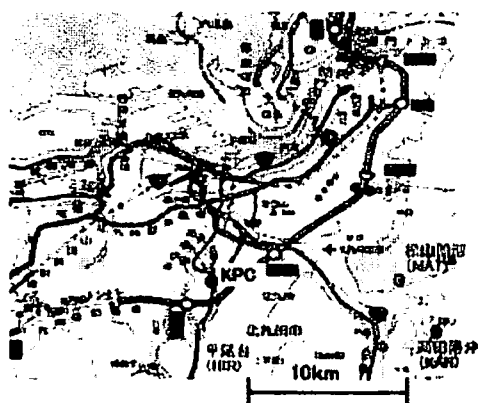
方位計測	MI センサ (PNI 社 MicroMag3)		
成分数	3	測定磁場範囲	±1, 100, 000nT
測定精度	15nT	インターフェース/消費電力	SPI/ DC+3V, 0.5mA
傾斜角計測	静電容量変化検出 (ADI 社 900)		
成分数	2	測定傾斜角範囲	±20°
測定精度	0.01°	ADC	12ビット
時定数	0.3 秒	消費電力	DC+9V, 10mA
電位差計測	センサ：銀・塩化銀電極 (クローバテック社) 4 個 電極間隔：3 m		
成分数	2	測定電極間電圧範囲	±5mV
測定精度	0.1 μV	ADC (CS5506)	20ビット
雑音電圧	0.8 μVpp	消費電力	DC+12V, 20mA
記録・制御部	CompactFlash カード (128MB)		
	コントローラ：H8/3067 (16MHz)、FROM128KB, SRAM128+4KB RTC, SerialPort 3ch, PC104bus I/F		
		消費電力	DC+5V, 70mA

2.2 計測・制御部

耐圧容器内には、電源（リチウムイオン二次電池：24V 25AH 1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 PC/104 バスボードを採用している。計測部の構成と仕様を第 2 表に示す。電極はクローバテック製銀―塩化銀電極を用いており、電位差計測精度は $0.1\mu\text{V}/\text{m}$ と設定し、3m 長の電極間の電位差を 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 サンプルングで A/D 変換（入力換算で $0.01\mu\text{V}/\text{LSB}$ ）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。また、着底後の方位と傾斜を知るため、方位計（MI センサ）と傾斜計（静電容量変化検出センサ）を搭載し、それぞれ 15nT、 0.01° の精度で 1 秒値を記録している。

2.3 実海域実験データ

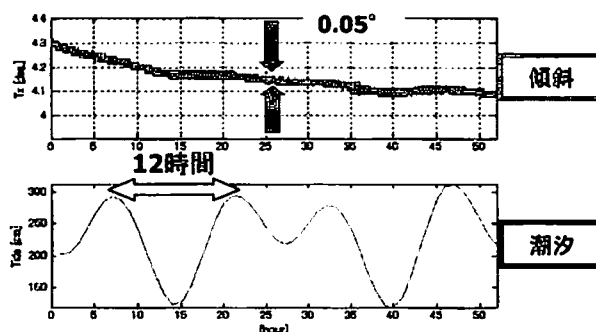
実験地点を第 4 図に示しているが、実験は主に松山船溜（MAT）で行い、漁船を使用しての実験は松山漁港近くの荻田沖（KAN：水深～10m）で実施した。北九州市内には工場や発電所などがあるため電磁場環境は悪く、人工雑音か波浪による揺れによる雑音であるのか判断が難しいことが予想された。そこで、実験時には、人工雑音のモニタもかねて松山漁港から 10km 程度離れた平尾台（HIR）で電磁場 5 成分を 1 秒サンプルで同時計測した。



第 4 図 OBE 実験地点（MAT：松山船溜、KAN：荻田沖、HIR：平尾台）

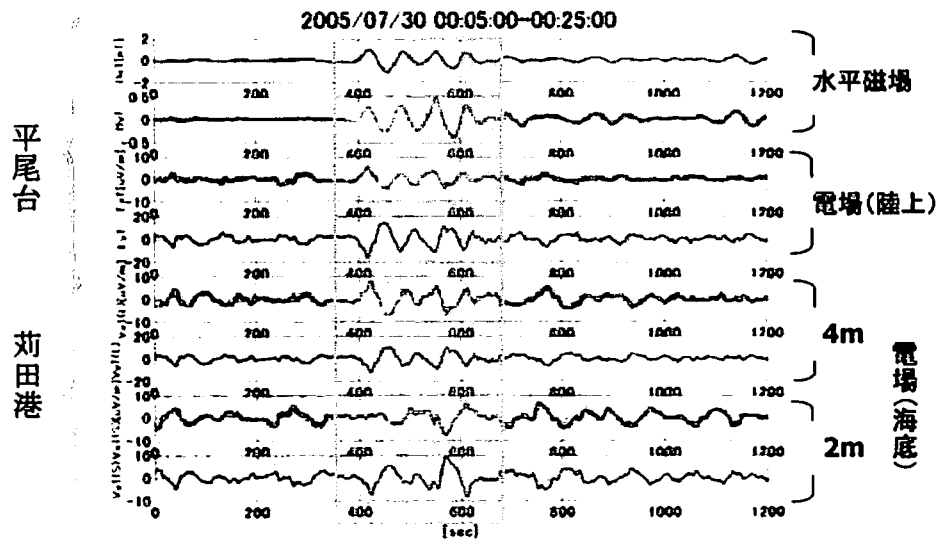
Fig.4 Location of OBE experiment sites

海水の流れによる装置の揺れを防ぐために高さ 300mm と昨年度よりも約 1/2 にまで低床化した。これにより、図 5 に示すように、潮流の影響はデータから見ることはできず、短周期変動も 0.05° 程度以下となっている。ただ、投入後 10 数時間程度はドリフトしている。



第 5 図 OBE 投入後の傾斜計データ (上段) と潮汐データ (下段)

Fig.5 Time series of instrumental tilt data observed (Upper panel) and tide data (Lower panel)



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、電場 2 成分の 20 分間データで、下 4 段は海底で 4m、2m スパンで観測された電場 2 成分データ)

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

第 6 図は、荻田沖の海底での電場(下 4 段)と平尾台で同時観測した電磁場変動(上 4 段)の 20 分間のデータである。海底での電場計測では、電極間隔のデータへの影響を調べるために 2 方向 X, Y の電極間隔を 4m と 2m の 2 種類で行った。なお、海底での電場データは方位計データにより磁氣的南北、東西方向に変換している。

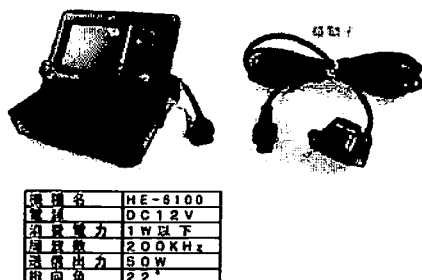
図 6 はノイズの比較的小さい夜間のデータであるが、市街地のごく近傍のため、陸上よりも OBE で取得した海底での電場ノイズの方が大きい。これは、観測した全期間で見られ、市内の工場や発電所からの漏洩電流が広域に流れていると思われる。この電磁環境下において、0 時 11 分頃に磁場データに地磁気脈動が発生しているが、これらにより誘導された電場信号が陸上だけでなく、海底においても捕らえていることが確認できる。変動振幅約 4nT の地磁気脈動(周期 70 秒程度)に対応する誘導電場の振幅は陸上で約 $40 \mu\text{V/m}$ 、海底で約 $30 \mu\text{V/m}$ である。電極間隔が 2m の場合(下 2 トレース)は、やはり SN 的にみて不十分である。そこで、船上での操作性を考え、また信号検出のみという実験目的から中間の 3m で以降の海域実験を行っている。この実験結果より、本観測では電極アームの取り付けに何らかの工夫をし、より長い電極スパンを採用することが望ましいことを再確認した。

3. 音響切離し装置

水深 100m を超える海底から観測機器を回収する場合、装置に取り付けたケーブルを人力で引き上げる「有索方式」よりも、船上からの浮上命令により自動的に海上に浮上する「自己浮上方式」が実用的である。これにより、装置と海上のブイをつなぐケーブルも不要になり、トラブル発生の可能性も少なくなる。この自己浮上方式を実現するためには音響切離し装置が必要であり、信頼性の点から市販品を使用するのが理想であるが、残念ながら高価である。そこで、魚群探知機(以降、魚探と略記)に使用されている超音波振動子(トランスジューサー)を利用して水中実験を行った(図 7)。

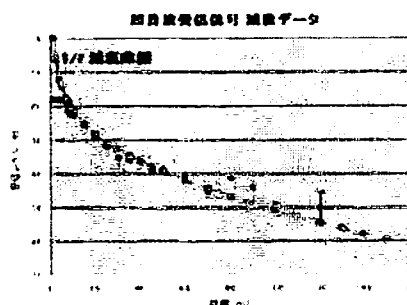
市販品の場合、超音波周波数は 10kHz~30kHz 程度で、送受信指向性はほぼ半球($\pm 90^\circ$)であるが、数 100m 探知能力のレジャー用魚探の場合、分解能の面から 200kHz (50kHz) が多く使用されており、その指向性は $\pm 10^\circ$ ($\pm 22^\circ$) 程度である。我々は、当初、200kHz のもの(本多電子製 HE-6100、TD04A)を用いて実験を行った。その結果、図 8 に示すように片方向ではあるが、アルミ製切離し専用耐圧容

器に振動子を格納した状態で 100m 以上の通信が可能であることを確認した。現在は、50kHz/200kHz の 2 周波を切り替えられ、最大適用水深 500m の魚探（古野電気製 LS-6100、525T-PPD）を用いた実験を行っている。



第7図 使用した魚群探知機と超音波振動子

Fig.7 A fish-finder and its transducer

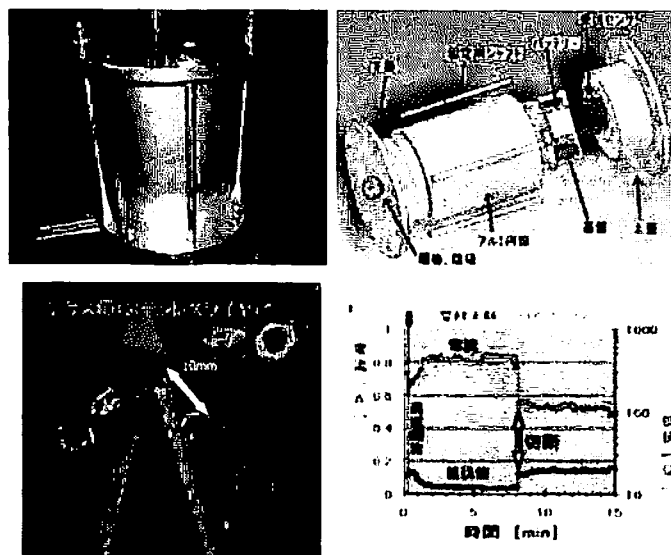


第8図 超音波信号の距離減衰データ

Fig.8 A decay curve of ultrasonic signal

図8に受信信号レベルの距離による減衰データを◆で示し、それにフィットする $1/r$ の減衰曲線も示している。これは全長 120m の浮き桟橋を利用し、海面下 1m に送信振動子とアルミ製耐圧容器（図9）に格納した受信振動子を向かい合わせ、その間の距離を変化させて得たものである。80m を超えると多重反射や回路ノイズの影響でデータが減衰曲線から外れているが、100m 程度は通信可能であると判断できる。なお、耐圧容器材はアルミ合金 (A5052) を使用し、溶接を必要としない空圧シリンダーの構造を採用し、水密性を高めるため、上蓋と円筒、下蓋と円筒の間にはそれぞれ O リングを使用した。

次いで、強制電気腐蝕によって海中で錘を切離すため、図9に示すような切離し装置を設計・製作し、実験を行った。安全荷重 70kg のステンレスワイヤ（φ1mm）で、30kg の鉛製の錘を吊るしたナイロンロープを支え、これをプラス極として、マイナス極との間に 12V を印加した際の電流の時間変化を図9右下に示している。通電開始後、0.8A 程度の電蝕電流が流れ、約 8 分でワイヤは切断された。この自己浮上実験は、松山船溜の水深 3m の所で行った。



第9図 音響切離し耐圧容器(上段)と強制電蝕機構と電蝕時の電流時間変化(下段)

Fig.9 Acoustic release unit and its details with an experimental data

4. まとめ

極浅海（水深数 10m から 100m 程度の沿岸域）においては、ガラス製球体耐圧容器でなくとも、安価な塩化ビニールやアルミニウム製円筒形耐圧容器でその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った。さらに、OBE 装置を高さ 30cm 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は 0.05° 以下であり、数 $10\mu\text{V/m}$ の誘導電場を計測できた。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おらず、1 ヶ月程度の長期観測などより多くの基礎実験を行い、実用性を高めることが必要である。今回、金属製耐圧容器を開発したが、水深 100m 以上の耐圧を持つ容器を自作することは、設備や費用の点から困難であることを実感した。そこで、次年度は、ガラス耐圧球を用いて水深数 100m に挑戦したいと考えている。

また、魚探用の超音波振動子を用い、水中通信を 100m 程度の距離では実現できることも確認した。ただ、今回は片方向 1 ビット通信であり、今後電子回路の改良などを行い、双方向複数ビットの通信を実現し、その信頼性を十分確認する必要がある。より実用的な装置に改良していく必要がある。

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磁力計の改良が終わり、現在陸上で試験中である。今後、海底での実験を行う予定である。

最後に、OBEM の実海域実験に際して便宜を図って頂いた、福岡県苅田港務所、幸丸の東城船頭さんに御礼申し上げます

本研究は平成 17 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。

参考文献

- 笠谷 貴史、後藤 忠徳、小型海底電位差磁力計の開発、CA 論文集、2006
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、57、383-394、2004
藤 浩明、海底電磁気観測の現状と将来、物理探査、58、227-239、2005
西留 紳也ら、極浅海における電磁場観測機器の開発（I）、CA 論文集、16-22、2005
西留 紳也ら、浅海用 OBEM の開発、九州職業能力開発大学校 2004 年度生産系開発課題論文集、2005
エス・イー・エイ（SEA）社 HP、<http://www.seanet.co.jp/>（Benthos社製品 代理店）
小林 英男 編、圧力容器 <1>基本・指針、日本規格協会、1995
浦 環、高川真一、海中ロボット、成山堂書店、1997
本多電子 HP、<http://www.hondex.co.jp/>
古野電気 HP、<http://www.furuno.co.jp/product/marine/index.html>
榮留 祥吾ら、浅海用 OBEM の開発、九州職業能力開発大学校 2005 年度生産系開発課題論文集、2006