

直立浮上式防波堤に関するシステム機器 の開発

DEVELOPMENT OF SYSTEM MACHINERY OF
BUOYANCY-DRIVEN VERTICAL PILING BREAKWATER

木原一禎¹・有川太郎²・小林真³・永友久信⁴

Kazuyoshi KIHARA, Taro ARIKAWA, Makoto KOBAYASHI
Hisanobu NAGATOMO

¹ 正会員 工修 三菱重工鉄構エンジニアリング(株) 橋梁事業本部 (〒108-8215 東京都港区港南2-16-5)

² 正会員 博(工) 独) 港湾空港技術研究所 海洋・水工部 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

³ 正会員(株) 工修 大林組 海洋土木技術部 (〒108-8502 東京都港区港南2-15-2)

⁴ 東亜建設工業(株) 設計部 (〒102-8451 東京都新宿区西新宿3-7-1)

In the harbor and the fishing port, there is a breakwater to keep safety for the surge of the open sea. However, the disaster risk in the area along the coastline (e.g. the upsizing of the typhoon, the rise of the mean sea level, and the tsunami due to the huge earthquake such as the 2004 Indian Ocean earthquake) is of increasing concern. It is not possible to set up the fixed breakwater at the port entrance, so it is difficult to say to ensure the sufficient security for those risks. 'Buoyancy-driven vertical piling breakwater' is the new conceptual retractable breakwater to solve such a problem. The upper piles, which are stored in the lower piles embedded in the seabed in normal time, are surfaced when tsunami or large waves arrive. The development of the 'buoyancy-driven vertical piling breakwater' started in 2004. Several technical verifications, such as a large scale model test, numerical simulations, structural analysis, and a verification test at Numazu port, were carried out. This report shows that the wireless control system can successfully control 'Buoyancy-driven vertical piling breakwater' through experiments *in situ* and in the laboratory.

Key Words : Buoyancy-Driven Vertical Piling System, mobile breakwater pile, levitated breakwater, breakwater, seawall

1. はじめに

全国各地の港湾では、高波等の災害から人命や港湾施設を守るため、防波堤の整備が進められてきた。しかし、港湾の港口部には船舶の航路を確保する必要から固定式防波堤を設置することができず、港口部から侵入する高波等のエネルギーを十分に低減できる真に安全な港湾を整備することは難しいのが現状である。この問題を解決するため、平常時に船舶の航行を阻害しない可動式防波堤である「直立浮上式防波堤」の開発を行ってきた^{1)~6)}。この防波堤は図-1に示すように海底面下に設置され、浮上鋼管(上部鋼管)が下部鋼管内部に格納された二重管構造となっている。この浮上鋼管内に送気することで異常時にのみ浮上させ、高波や津波などの侵入波を遮蔽する事ができるこれまでにない防波堤である。本報では、直立浮上式防波堤を浮上、沈降させ、かつ常時(格納時)の不具合を監視するシステムの開発について報告する。

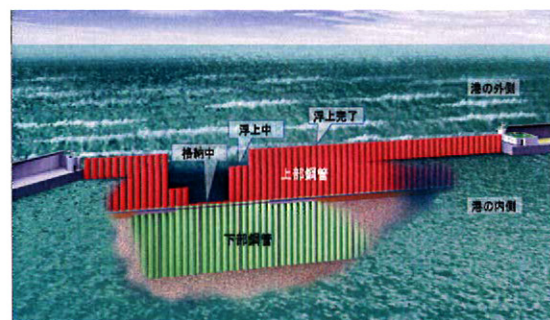


図-1 直立浮上式防波堤概要図

2. 研究の目的

直立浮上式防波堤は図-2に示すように海底面下に設置した下部鋼管とその内側に挿入した浮上・沈降可能な上部鋼管(浮上鋼管)からなる鞘管構造であり、空気を送り上部鋼管を浮上させることができる。

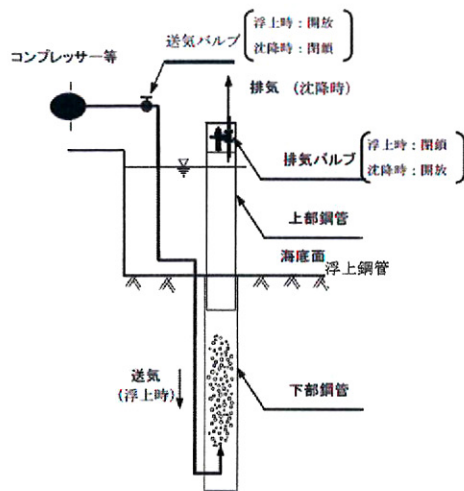


図-2 浮上・沈降の基本原理

津波などの異常時に防波堤を確実に浮上させ、かつ平常時に船舶の航行などを阻害しないようにするためには、浮上鋼管の浮上・沈降システムを確立すると同時に、格納時には、管内空気圧・送気設備・システムの不具合を監視する必要がある。それらのシステム端末は浮上鋼管内部に設置するが、二重管構造のため、浮上鋼管内のシステムへ有線で電力供給する場合は線が切断したり、絡んだりする恐れがある。そこで、システム端末への電力供給（通信）手段として、水中では電磁誘導の原理を応用した非接触通電システム（1 対のパワーカプラー方式 以下カプラーと称す）および気中では無線通信を用いることを考案した。図-3にシステムのイメージ図を示す。そこで、本システムを検証するため、以下の2点を主な目的として基礎的実験ならびに実証試験を行った。

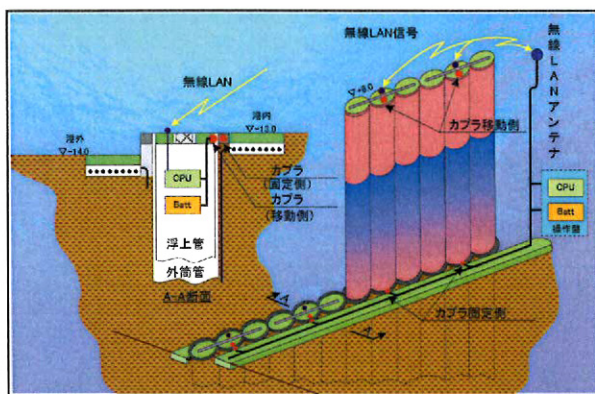


図-3 システム概念図（着底時・浮上時）

- ① 異常時に確実に浮上させ、遠隔操作で沈降できるシステムの構築（例：緊急地震速報発令後、数分程度の目標時間内に確実に浮上出来るシステムの構築）
- ② 平常時の監視システムの構築（浮上鋼管内に設置した、監視システムへの電源供給、通信手段の確立）

3. 陸上水槽によるパワーカプラーの性能確認試験

実海域による性能試験に先立ち、陸上においてカプラーの通電状況等の基本性能を確認した。これまで、カプラーを水中で使用した事例がないため、カプラーに止水対策を施し実験を行った。

(1) パワーカプラーの概要

パワーカプラー（非接触給電装置）⁸⁾は、電磁誘導作用により給電側の電磁コイルから、受電側の電磁コイルに電力を伝達する。電力伝達の原理は変圧器と同じであるが、1次側と2次側のコイル鉄芯はともに分離され空間の磁束変化により電力の伝達が行われる。図-4にパワーカプラーの概念図を示す。パワーカプラーは、10～30mm以内の隙間であれば、電力、通信が可能な装置である。

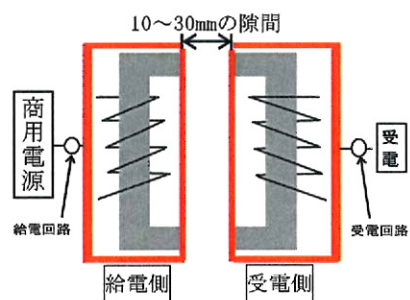


図-4 パワーカプラー概念図

(2) 介在物影響試験

カプラーの実海域（港区域等）への適用を想定し、カプラーの隙間内に挟まる介在物の影響試験を行った。

a) 試験方法

制御装置を小型水槽（横 800×縦 1400×高さ 600 程度）内に設置して、水槽内に海水、清水などを満たし、給・受電側カプラー間に泥等を挟むなど条件を変えてカプラーの通電、通信効率を検証した。

（図-5）

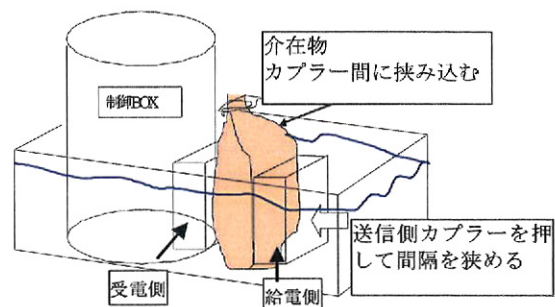


図-5 介在物試験実験概要書

b) 計測ケース

・パワーカプラー間隔

カプラーの間隔は、5mm, 10mm, 15mm, 20mm, 25mm, 30mm の6ケースとした。

また、斜めケース（隙間不均一）は、下記3ケースで計測した。カプラーの下端を5mmで固定して、上端間隔を10mm（傾斜1.43%）、20mm（傾斜4.3%）、30mm（傾斜7.1%）としてカプラーを斜め状態にして計測を行った。

・水質

給・受電側カプラーの隙間に介在させる流体は、泥水、清水、海水の3ケースとした。

・介在物

カプラーの断面は、35cm×35cmの面積を有している。磁束はカプラー面の中央部に集中しており、この磁束内に金属類が介在した場合、通電効率が低下することが懸念されている。このため、介在物影響試験を実施した。（写真-1）

想定した介在物は、実海域の海底に存在する可能性がある以下のような金属類を選定した。

- ①鉄缶：鉄製ジュース缶をつぶしたもの
- ②アルミ缶：アルミ製ジュース缶をつぶしたもの
- ③番線：建設現場で使用する番線
- ④鉄片：30cm 角程度の鋼材（板厚 5mm 程度），材質はSS400など一般的なもの
- ⑤軟泥＋鉄粉：鉍物質の泥を想定して標準的な堆積泥（密度 1.4t/m³ 程度）に、鉄粉を質量比で3,7,10%混ぜた試料（3種類）

c) 介在物試験結果

隙間20mmの介在物試験について、図-6、図-7に結果を示す。

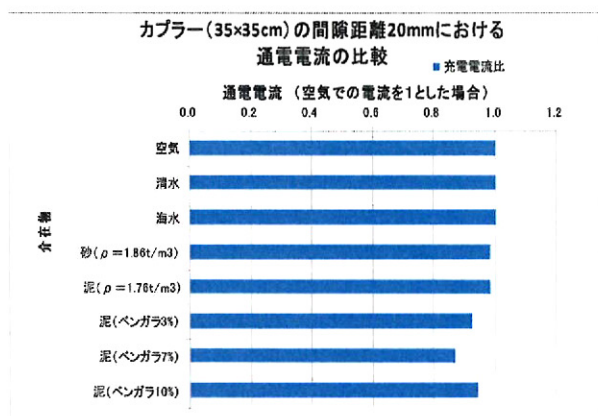


図-6 介在物影響試験（泥水、清水比較）

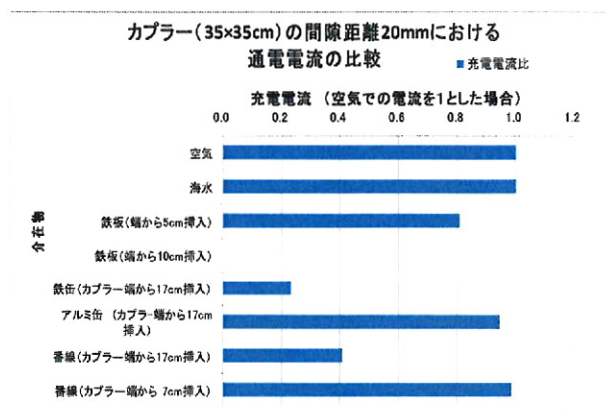


図-7 金物介在試験結果

同図より以下のことが分かる。

- ① 介在物が無い状態では、気中、水中での送電ロスが小さい。
- ② 介在物として、磁性体のものは伝送効率を著しく低下させる。
- ③ カプラーを貫通するような大きな磁性体（鉄板など）をカプラーの30%程度挿入させると通電不能となる。

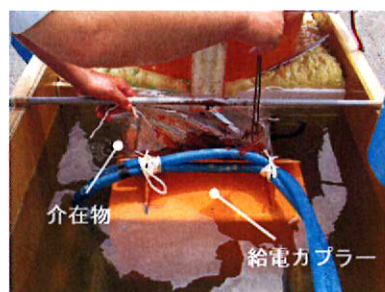


写真-1 介在物試験状況

d) 無線 LAN による通信確認

無線 LAN は上部鋼管を陸上基地からの信号より浮上鋼管を沈降させる目的で使用する他、バッテリーの残量計測や計器類の情報収集手段として重要な役割がある。実験では、2.4GHz 帯の市販の LAN システムを利用した、通信距離確認結果のグラフを図-8に示す。

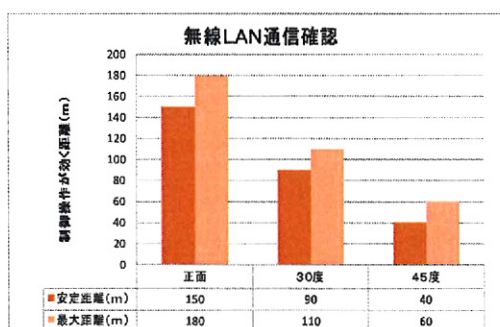


図-8 無線LANの通信距離確認結果

受信する角度が大きいと受信効率は低下するが、正面向きでは、距離 150m で安定してデータ通信、制御が出来ることが確認できた。

ただし、無線 LAN アンテナの近くに鋼板があると影響を受けることが確認できたので、アンテナの配置には注意が必要である。

4. 実海域実証試験

遠隔操作の確認試験とパワーカプラーの水中での作動について、沼津港の実証実験施設を使用して適用性の検証を行った。

(1) 試験施設の概要

試験施設の配置図を図-9 に示す。

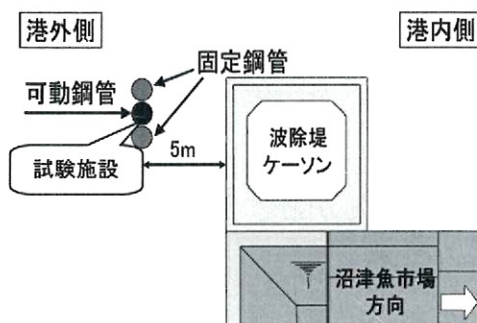


図-9 試験施設配置図

施設の概要は以下のとおりである。

設置時期：平成 18 年 9 月

上部鋼管（浮上鋼管）：φ 1,422mm L=14.75m

下部鋼管：φ 1,600mm L=16.75m

固定鋼管：φ 1,422mm×2 本（静岡県施工）

設置水深：7.5m，鋼管天端：+3.25m

浮上設備：コンプレッサー及び送気管

(2) 実証試験

システム作動確認試験は、建設 3 年後にあたる平成 21 年 5 月に既設の浮上鋼管上部に試験用制御ユニット（写真-2）を設置し、システムの作動確認試験を行った。制御ユニットの構成を写真-3に示す。制御ユニットは 3 段構成とし、下段に蓄電池（バッテリー）、中段にインバータ、上段に PLC（制御装置）及び無線 LAN システムを配置した。操作指令は、陸上に配置したパソコンで行うシステムとした。また、パワーカプラーについては、写真-4に示すように海底面で 20mm 程度の隙間になるよう設置した。



写真-2 試験状況

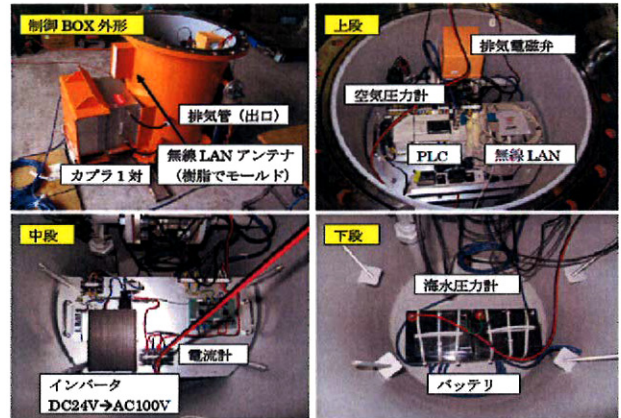


写真-3 制御ユニットの構成

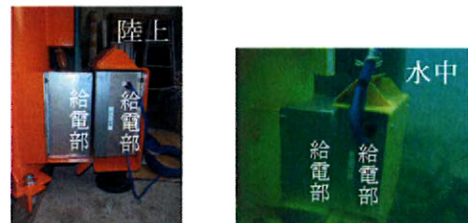


写真-4 パワーカプラー取付状況

(3) 浮上鋼管圧力計測結果

圧力計測のデータシートの例を図-10に示す。図-10のデータは、PCの画面データのコピーである。浮上管内のシステム作動中の記録は、PLCに付属する記録装置に記憶され、無線により陸上の操作用PCに送られ、状況を随時モニター監視できる。

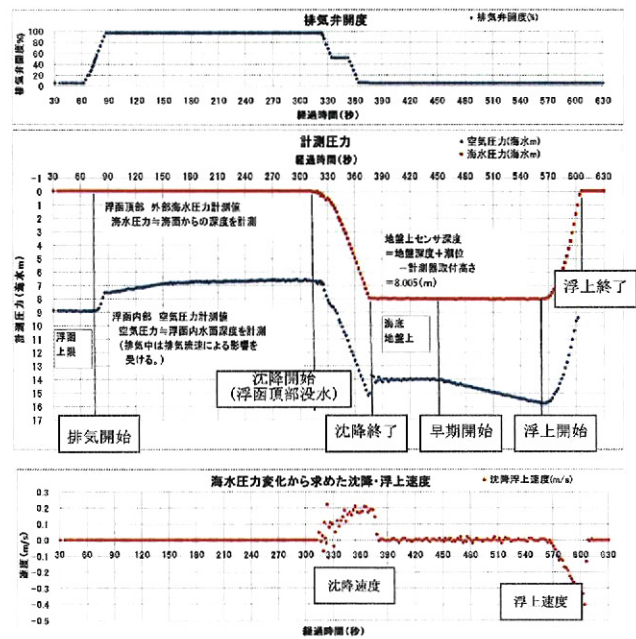


図-10 圧力計測のデータシート

図-10より、沈降時間は約60秒（最大速度0.2m/s）、浮上時間は送気開始から160秒（最大速度は0.4m/s）で浮上完了している事が分かる。図-10の下沈

降速度のグラフが乱れているのは、海水圧力が風波による圧力変動により変化するためであり、海水面のわずかな波の変動まで正確に計測できている。実験期間中、システムの不具合はなく、システムが良好に作用していることが確認できた。

a) 沈降記録

記録データから、浮上状態の浮上鋼管内部の空気圧力は平均85.1(kPa)であった。この時の空気層は浮上管内空気圧、測定潮位から計算すると11.45(m)となり、浮力は12.29(tf)と計算できる。

浮上鋼管の空気中重量は14(t)であり、水中重量は鉄換算で、 $14 \times (7.85 - 1.025) / 7.85$ (7.85：鉄の単位体積質量、1.025：海水の単位体積質量) = 12.1(t)となることから、実測値と計算値がほぼ一致した。

c) 浮上記録

沈降状態の浮上鋼管は平均で5.91(m)の空気層高さが送気により7.71(m)高さになったとき浮上を開始した。この時の浮力の実測値は12.06(tf)であり、沈降時に得た浮力記録とほぼ一致する。

以上のように浮上鋼管の状況が随時監視できることが分かった。

(4) パワーカプラーの通信、通電確認

a) 通信状態確認

沈降中のデータは、カプラーとの通信により継続して収録されていたことを確認した。

また、沈降中は水深7.5～8.5m程度で海水圧力が75～85kPaとほぼ正確な値で記録され記憶装置に保存されている事が確認できた。

b) 給電状態の確認

カプラー間隔とカプラー通電電流との関係についての測定結果を表-1に示す。

表-1 カプラー間隔と通電電流

月 日	カプラー通電電流(A)	カプラー間隔計測値(mm)				計測値平均(mm)
		①	②	③	④	
5/25	0.37	10	5	5	5	6.3
5/26	0.30	9	12	11	13	11.3
5/27	0.21	16	19	16	20	17.8

カプラー間隔の計測は、3回実施した。図-11にカプラーの通電状況を示す。カプラー間隔が平均6.3mmの時、通電電流は0.37Aあり、通電電圧はDC 26V程度であった。従って、通電電力は $0.37A \times 26V = 9.6VA$ 程度の能力であった。カプラーの電力は、約10VAの電力であり、空気中と同等な出力が確保できている。海中において継続的に非接触給電ができるようになったことは、過去に同じよう

な事例がないことから、評価できる成果である。

一方、制御装置部機器の消費電流は、0.8A程度でほぼ一定電流が確保できた、実験途中に消費電流が1.2A程度まで上昇した事があったが、これは、排気用電磁弁の動作により電力が消費されたものであり問題はないと考えている。

以上のことから、実海域でもカプラーが問題無く使用できることが証明された。

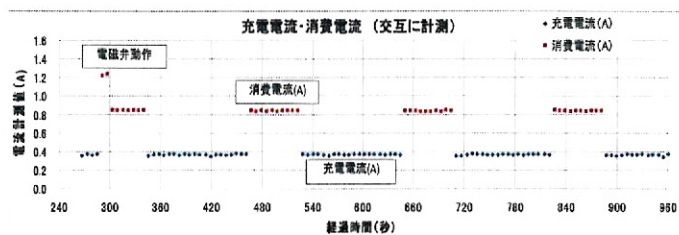


図-11 カプラーの通電変化

5. まとめ

(1) 陸上試験

- ①カプラーは水中（泥水）においても気中と同様の給電能力があることが分った。
- ②カプラー間に金属片が挟まると送電効率が20%以上低下することが分った。実機では海底面に設置することから、カプラー間に侵入物防止カバーを設置するなど万全の対策が必要である。
- ③市販の小型無線LANを用いて制御装置への通信確認試験を行ったところ、正面向きで150mの通信が可能であり、実機でも問題なく使用できることが分った。

(2) 実海域実証試験

- ①制御装置、カプラー、無線LANを組み合わせたシステムで、上部鋼管沈降等の遠隔操作及び平常時（上部鋼管格納時）のシステム自己監視が支障なく行えることを確認した。
- ②監視システムでは管内空気圧の計測により、空気室の漏気のチェックをはじめ、上部鋼管の浮上・沈降中の鉛直レベルや昇降速度も明らかにすることができた。

なお、本報では紹介できなかったが、平成21年5月の実海域試験において、上部鋼管格納中の管内溶存酸素量や建設3年後の付着生物・鋼材腐食調査も行っており、本防波堤の維持管理計画に反映させていく予定である。また、これらについては別の機会に公表する予定である。

6. 今後の展望

本防波堤が津波等の異常時に確実に機能するための要求性能は、確実かつ迅速な操作、日常のシステム監視、航路安全監視である。今回の一連の試験では、前2者の制御システム及び基幹装置部品について

て問題が無いことを確認した。一方、実機における操作トラブルは決して許されるものではなく、送気設備（配管、送気装置）と制御・通信装置の二重化を図り万全のシステムとする予定である。

図-12は全体システムの1例であり、図中の①～④部分が今回試験対象としたシステム部分である。津波対応の場合、システムの二重化を基本としており、確実な操作を担保している。ただし、システムの弱点を把握するためにリスク分析が不可欠であり、現在実施している基本分析に加え、実施段階においては詳細なリスク分析を行う予定である。

謝辞：沼津港実証試験を行うに当たり、静岡県建設部港湾局、沼津土木事務所の皆様並びに（独）港湾空港技術研究所 菊池喜昭地盤・構造部長をはじめとした皆様には多大なるご支援を頂いた。

本研究は、著者4者と新日鉄エンジニアリング㈱の5者の共同研究である。投稿時の諸般の理由で共同執筆者として記載できなかったが、構造面での支援を頂いており感謝を申し上げる。

また、制御システムの構築、データ収集については、エム・イー・シーエンジニアリングサービス㈱の方々の協力を頂いた。ここに記して深甚なる謝意を表す。

参考文献

- 1) 山根隆行, 有川太郎, 伊藤政人, 増山琢也, 亀井幸雄, 宮坂政司: 直立浮上式防波堤の開発, 海洋開発論文集 第21巻, pp. 115~120, 2005.
- 2) 有川太郎, 中野史丈, 野村逸人, 下迫健一郎, 宮島正悟, 小林真, 虎石龍彦, 荒井清, 木原一禎: 直立浮上式防波堤の津波・風波に対する水理特性, 港湾空港技術研究所資料, No. 1156, 2007.
- 3) 有川太郎, 下迫健一郎, 小林真, 虎石龍彦, 荒井清, 木原一禎: 大規模水理模型実験による津波・高波に対する直立浮上式防波堤の水理特性に関する研究, 海洋開発論文集 第23巻, pp. 117~122, 2007.
- 4) 有川太郎, 坂口章, 小林真, 虎石龍彦, 櫻井良宏, 木原一禎: 直立浮上式防波堤の実海域実証試験, 海洋開発論文集, 第24巻, pp. 93~98, 2008.
- 5) 有川太郎, 坂口章, 小林真, 山本邦弘, 櫻井良宏, 木原一禎: 直立浮上式防波堤の開発, 防衛施設学会20年度年次研究発表 概要集 P15~19, 2008.
- 6) 木原一禎, 有川太郎, 坂口章, 濱地克也, 永友久信, 山本邦弘: 直立浮上式防波堤の数値計算手法に関する研究, 海洋開発論文集, 第25巻, pp. 99~104, 2009.
- 7) 片平洋一, 駒田圭成, 里成典: 大容量非接触給電装置の開発, 愛知電機技報 NO.29, 2008.

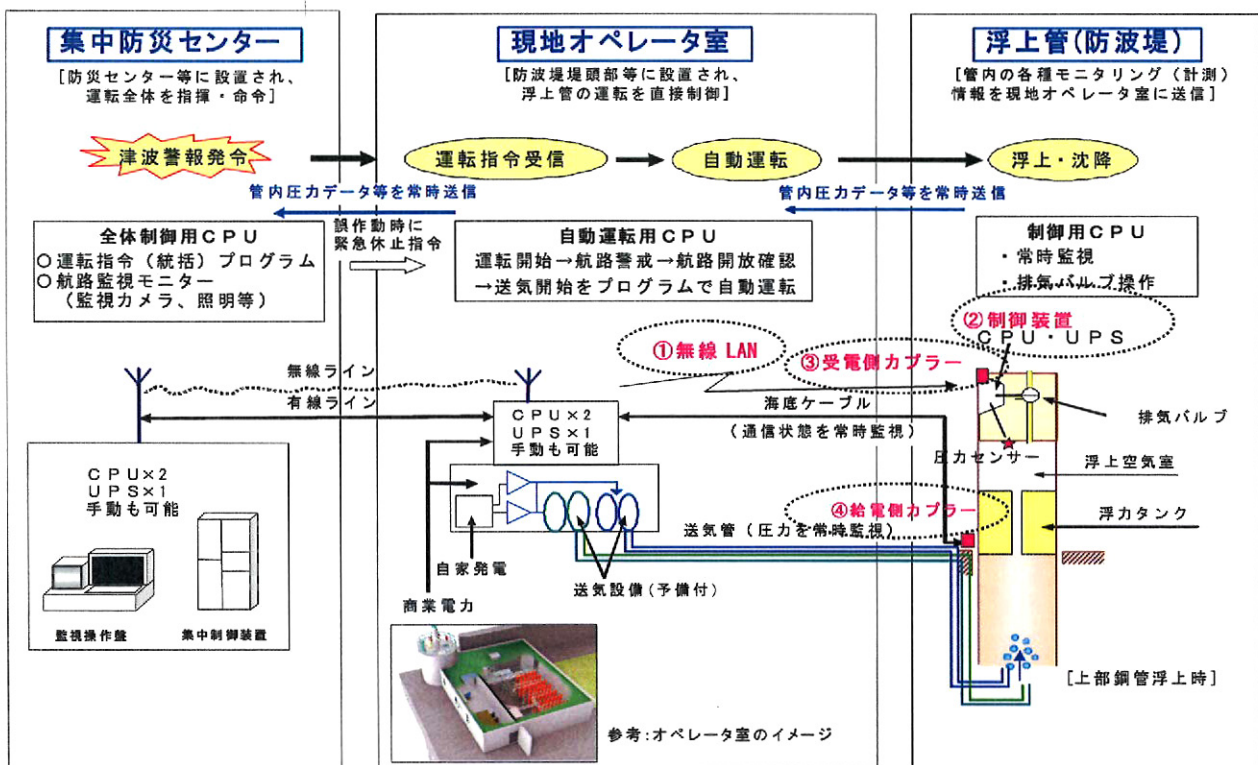


図-12 全体システムのイメージ