

# Bluetooth Low Energy を用いた雨水貯留槽内における水中ロボットの位置測位

藤原 明広<sup>\*1</sup>, 笠井 利浩<sup>\*2</sup>, 今井 貴大<sup>\*3</sup>, 中山 裕貴<sup>\*3</sup>

## Location Measurement of Remotely Operated Vehicle in Rainwater Harvesting Tank Using Bluetooth Low Energy

Akihiro FUJIHARA<sup>\*1</sup>, Toshihiro KASAI<sup>\*2</sup>, Takahiro IMAI<sup>\*3</sup>, and Yuki NAKAYAMA<sup>\*3</sup>

<sup>\*1</sup> Faculty of Environmental and Information Sciences, Department of Management and Information Sciences

In recent years, rainwater harvesting systems have drawn renewed attention from not only usage of natural resources but also flood mitigation under torrential rainfall in urban areas. To spread the systems in urban areas, it is necessary to consider cost-effective tank maintenance, such as how to check tank conditions frequently and how to maintain clean condition inside the tank. To do this, use of underwater robot is one of possible solutions. In this paper, we firstly review the current rainwater harvesting technologies. Then, we also explain the current underwater robots and their location measurement technologies. Finally, we demonstrate from our experiment with combination of OpenROV and Bluetooth Low Energy (BLE) that it is possible to measure location of underwater robot for cost-effective maintenance under a limited condition.

**Key Words** : Location Measurement, Rainwater Harvesting System, Underwater Robot, Bluetooth Low Energy

### 1. はじめに

近年, 地球温暖化による気候変動が顕著化し, 国際的に CO<sub>2</sub> 排出量削減対策などの必要性が高まっている. 2014 年 12 月に発表された, 環境省の今後の気候変動予測に関する予測結果<sup>(1)</sup>によると, 地球温暖化効果ガスの全ての代表濃度経路シナリオ (Representative Concentration Pathways : RCP シナリオ)<sup>(2)</sup>において, 将来の降雨パターン (年降水量, 大雨による降水量, 無降水日数) は, (1) 年降水量の変化は, 明瞭な変化傾向はない. (2) 一方, 大雨による降水量および無降水日数は, それぞれ多くのシナリオ・ケースで増加傾向となることが予測されている. 今後, 水に恵まれた我が国においても記録的な豪雨による洪水や渇水による被害が予測され, その対策として雨水活用が挙げられる. 雨水活用の先進国であるドイツでは, 2010 年 5 月 1 日にドイツ雨水法が施行され, 新築もしくは改築の建物では雨水を下水道に流すことは禁じられている. 建築主はその土地に降った雨水を貯留, 浸透, 蒸散, 利用等の方法によって総合的に管理することが義務化され, この法律に適合しない場合には建築工事が許可されない仕組みになっている<sup>(3)</sup>. 日本国内においても, 2014 年 5 月 1 日に, 「雨水 (あまみず) の利用の推進に関する法律」が施行された. この法律の趣旨・目的は, 「雨水の貯留及び雨水の水洗便所, 散水等の用途への使用を推進することにより, 水資源の有効利用を図るとともに河川等への雨水の集中的な流出を抑制する<sup>(4)</sup>」とされており, 今後日本国内においても様々な建築物に雨水活用施設が設置される事が予想される.

このような背景の下, 今後, 雨水活用施設の設置と共に雨水貯留槽のメンテナンスが問題となる. 雨水貯留槽内の点検や清掃は, 安定した貯留雨水の水質管理に欠かせない作業である. 大型の貯留槽の場合, 槽内に人が入ってメンテナンスを行うためには事前に数十~数千 m<sup>3</sup> にもなる貯留雨水を排水する必要がある, 時間と手間の

\* 原稿受付 2016 年 2 月 29 日

<sup>\*1</sup> 環境情報学部 経営情報学科

<sup>\*2</sup> 環境情報学部 環境・食品科学科

<sup>\*3</sup> 工学部 経営情報学科 4 年

E-mail: fujihara@fukui-ut.ac.jp

関係でメンテナンス時の労力が大きくなる。

本報では、大型の雨水貯留槽のメンテナンスツールとして役立つことが期待される水中ロボットを取り上げ、その制御や作業を行う際に役立つ雨水貯留槽内での位置測位に関する研究動向を報告する。また、近距離無線通信技術として注目を集めている Bluetooth Low Energy (BLE) を用いて雨水貯留槽内での水中位置測位を行った実験結果を報告する。最後に以上の結果を考察することで、水中ロボットの位置測位の可能性と今後の課題について議論する。

## 2. 雨水活用施設の現状と課題

日本建築学会環境基準 雨水活用ガイドライン<sup>(5)</sup>では、雨水タンクおよび雨水貯留槽の定義として比較的小型（容量  $1\text{m}^3$  程度まで）の地上設置型のものを雨水タンク、地下や半地下、または床下に設置される、大型の製品もしくは現場施工型のもの（ $1\text{m}^3$  程度以上）を雨水貯留槽としている。雨水タンクは、年間約 4~5 万台ほど販売されているが、本報で対象となる雨水活用施設は少なくとも数  $\text{m}^3$  以上の容量を持った貯留槽であるため、雨水貯留槽を対象に述べる。

### 2.1 雨水活用施設の普及状況

先にも述べたように、近年環境意識の高まりや都市部における洪水緩和と上水道水の節水を目的として、様々な大型施設に雨水活用施設が導入されている。最も古く、代表的な施設としては新国技館（東京都墨田区）の例が挙げられる<sup>(6)</sup>。2012 年度末時点における雨水を利用している公共施設や事務所ビル等の数は、日本全国で 1851 施設ある（Fig. 1）。地域別には、関東および東海地域に存在する施設が全体の約 55% を占めており、その中でも 1970 年代中頃から推進を行っている東京都に多く存在する<sup>(7)</sup>。近年の設置例としては、東京スカイツリー（東京都墨田区）や MAZDA Zoom-Zoom スタジアム広島（広島県広島市）が挙げられ、前者には首都圏最大級の雨水貯留槽（約  $2635\text{m}^3$ ）が設置されている。この雨水貯留槽は、 $1835\text{m}^3$  の流出抑制槽と  $800\text{m}^3$  の雨水利用用貯留槽から構成され、雨水の利用と都市型洪水の緩和を目的とした施設となっている。貯留雨水は、屋上緑化散水、トイレ洗浄用水、太陽光パネル冷却等多目的に利用されており、年間約  $3000\sim 4500\text{m}^3$  の雨水が有効利用されている<sup>(8)</sup>。一方、後者の MAZDA Zoom-Zoom スタジアム広島には、浸水対策用雨水貯留槽  $7000\text{m}^3 \times 2$  槽と雨水利用用貯留槽  $1000\text{m}^3$  が設置され、時間雨量  $53\text{mm}$  に対応できる雨水流出抑制施設としての役割も備えた雨水貯留施設が設置されている<sup>(9,10)</sup>。

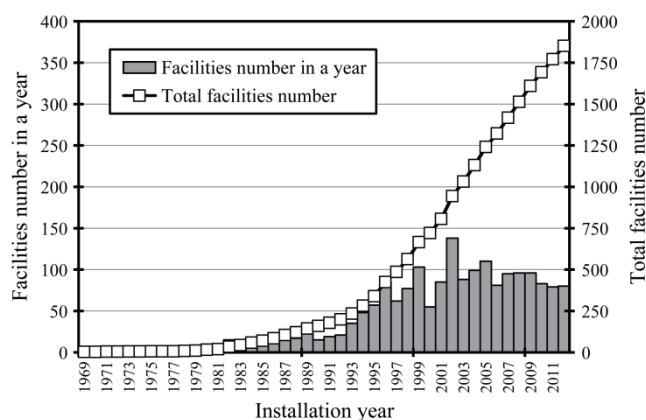


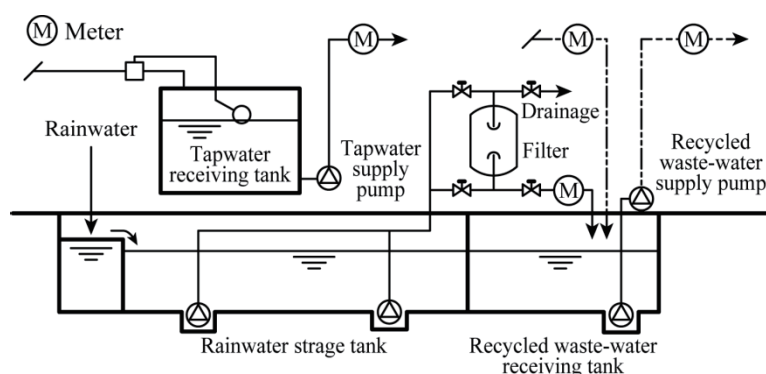
Fig. 1 Trend of the number of rainwater harvesting systems in Japan<sup>(7)</sup>.



Fig. 2 The inside of the rainwater storage tank of MAZDA Zoom-Zoom Stadium Hiroshima.

## 2.2 雨水活用施設の構造

大規模雨水貯留施設の例として、福岡ドーム（福岡県福岡市）の給水・雨水利用のフロー図を、Fig. 3<sup>(11)</sup>に示す。大規模スポーツ施設であるドームでは、その特性上水の使用量が非常に多く、また安定した水供給が必要なことから水の循環使用や節水が求められる。また、降雨時のドーム屋根から多量に流れ出る雨水による下水道や公共水域への流入負荷を低減することにも役立っている。屋根に降る雨は、屋根周辺に設けられた雨水ドレン等によって雨水貯留槽に集められる。貯留された雨水はポンプ圧送され、砂ろ過装置等を経て中水取水槽に給水されてからトイレ洗浄用水や植栽への散水用に利用される<sup>(11)</sup>。雨水貯留槽や雨水受水槽には、雨水中に微量に含まれる空気中の塵埃等が徐々に蓄積するため、定期的なメンテナンスが必要となる。



Catchment area: 25900m<sup>2</sup>, Storage capacity : 2900m<sup>3</sup>

Purpose of rainwater: Flushing for toilet and Watering plants

Fig. 3 Diagram of water supply and rainwater use of Fukuoka Dome<sup>(11)</sup>

## 2.3 雨水活用施設の維持管理

雨水活用装置を維持するためには、管理者による日常の点検と定期的な維持管理が必要となる。維持管理が必要な構成要素は、集水面（屋根）、樋（とい）、雨水貯留槽、整雨・制菌装置、水栓・便器等末端器具およびその他機械類に大別される。集水面やといについては、3ヶ月に1回程度の目視点検を行い、必要に応じて清掃を行わねばならない。雨水貯留槽の維持管理は、雨水の用途や集雨、整雨、保雨の方法によって異なるが、貯留雨水の水質を清浄に保つ上で重要であり、以下の①～⑥のような管理項目が挙げられる<sup>(5)</sup>。これらの管理項目の内、雨水貯留槽を維持する上で最も重要な、①の構造点検や、④に記載されている沈殿物等の確認作業において、貯留槽内部の状況を確認するためには作業員が貯留槽内に入る必要があり、そのために貯留槽内の雨水を一度排水する等の操作が必要となる。この排水作業は、特に大型の雨水活用施設においては長い時間を要すると共に貯留した多量の雨水を無駄にすることに繋がり、非常に非効率である。以上のことから、雨水活用施設の維持管理現

場においては本報で取り上げるような水中ロボットの開発が望まれている。

- ① 年1回、目視で雨水貯留槽の外側および内部の構造点検実施
- ② 月1回、目視で貯水状況を確認
- ③ 沈殿物、異物の混入が顕著な場合、雨水貯留槽内を清掃
- ④ 雨水貯留槽内の雨水の水質確認（月1回：沈殿物・異物確認，週1回：制菌レベルで運用の場合）
- ⑤ 定期的に、検査機関による貯留雨水の水質検査を実施
- ⑥ 必要に応じて、水道水等を補給

その他の整雨・制菌装置，水栓・便器等末端器具およびその他機会類については，各装置の取扱説明書等に従って稼働状況を確認すると共にフィルター等の清掃や消耗部品の交換等を定期的実施しなければならない<sup>(5)</sup>。

### 3. 水中ロボットについて

水中ロボットは大きく分けて，人がリアルタイムに遠隔操縦する ROV（Remotely Operated Vehicle）と，潜行前にあらかじめ処理を入力して潜行後は自律的に航走する AUV（Autonomous Underwater Vehicle）の二つに分類される。通常，ROV はリアルタイムに操縦するために有線の通信路が確保されている。一方，AUV では有線の通信路は必ずしも必要ではない。水中清掃のためのロボットは，現状では AUV は存在しない。従って，本稿では水中清掃用の ROV について紹介する。また，近年注目を集めている ROV である OpenROV についても紹介する。

#### 3.1 水中清掃ロボットの現状

雨水貯留槽内を清掃する ROV としては，西戸崎興産株式会社の水中清掃ロボット<sup>(12)</sup>がある。これは，浄水池の水底を清掃する用途で開発されており，キャタピラで水底を走行しながら砂等の堆積物を吸引ホースで水の外に排出する原理になっている。また，機体にカメラを搭載しており，タンク内を観察しながら清掃が可能である。人が浄水池の内部を清掃するためには，一旦水を抜く必要がある。水を抜く作業は一般に労力がかかり，水槽内の防水塗装の劣化などの問題もある。水中ロボットの登場でこれらの労力や心配が無くなったという意味で画期的であった。一方，位置測位機能がない為に，カメラ画像に頼った清掃にならざるを得ないという問題がある。また，キャタピラ走行のみで，鉛直方向の移動は不可能である。また，ROV は人が操縦しなければならないので手間がかかる。将来的には AUV になって自動的に水中清掃を行ってくれるようになれば理想的である。

#### 3.2 OpenROV について

水中ロボットは，電子回路による推進器の制御や防水などの技術が必要である為，これまでは限られた人しか開発に手を出すことができなかった。しかし，その状況に大きな変化を与えたのが OpenROV<sup>(13)</sup>である。OpenROV はオープンソース・ハードウェア<sup>(14)</sup> という仕様が完全に公開された水中ロボットなので，誰もが自作や改造が可能である。また，自作キットが約 10 万円でオンラインストアから購入可能になっている<sup>(15)</sup>。水中をパソコン上のブラウザから操作することで，遠隔操縦が可能になっている。標準でウェブカメラを搭載しており，水中の状況をリアルタイムにパソコンの画面に転送することができる。また，拡張機能として深度センサやロボットアームも搭載することが可能である<sup>(14)</sup>。理論的には水深 75 メートルの海水に潜航可能である為，海洋関係の研究者が調査の為に購入することもある。電源としてはリチウムイオン電池 6 本を使用し，コントロールボードを介して 3 つのブラシレスモータを制御し，水中を自在に移動することができる。OpenROV にはキーボードまたはゲームパッドを用いて操縦することができる LED ライトが 4 つ搭載されており，暗い場所でも視界を保つことができる。また，OpenROV には Beaglebone Black (BB)<sup>(16)</sup> という小型 PC ボードが積んである。BB はウェブサーバを積んでおり，パソコンとインターネット・プロトコルを用いて通信することができる。OpenROV とパソコンは有線接続されており，電力線通信を利用して通信を行っている。現在は水中でインターネットに接続するのは困難であるが，将来の水中におけるユビキタス通信技術としても注目されている。福井アカデミアホテルのプールに OpenROV を潜水させてカメラから撮影した画像の一つを図 4 に示す。



Fig. 4 Sample image captured by OpenROV.

## 4. 位置測位技術について

### 4.1 水中における位置測位技術

水中での位置測位は、一般にソナーという海洋音響技術を用いて行われる。ソナーとは、水中音波を用いて海中の物体に関する情報を得る為の技術であり、位置測位だけでなく、水中観測や水中通信もその意味に含めることがある<sup>(17)</sup>。ソナーはアクティブソナーとパッシブソナーの二種類に分類できる。アクティブソナーは水中に音波を放射し、物体に反射して戻ってくる音波を受信して解析することで、その物体に関する情報を得るものを言う。従って、アクティブソナーには送波器と受波器が必要になる。一方、パッシブソナーは物体自身が放射した音波を受信して解析することで、その物体に関する情報を得るものを言う。従って、パッシブソナーは受波器のみがあれば機能する。ソナーは音波を探知することで、音波の伝播特性を利用した水中における空間的距離の測定ができる。また、一つの音波を複数の受波器で受信することで、空間的な方向も計測可能になる。また、音波の波形をアナログまたはデジタル変復調方式で情報を取り出すことで水中通信機としてデータ伝送する技術も開発されている。しかし、音波は電磁波と比較して伝播速度やデータ伝送速度が遅いという特徴もある。また、水面や障害物による音波の散乱がノイズになり、通信を妨げることもある。従って、水中における情報通信技術には、高速かつ安定した通信を行うという観点から、未だ多くの課題が残されている。

### 4.2 Bluetooth Low Energyを用いた屋内位置測位技術

近年、BluetoothやWi-Fi等の近距離無線通信を用いて、GPSが不得意とする屋内位置測位を行う技術が注目を集めている。その中の一つにApple社が提案したiBeacon<sup>(18)</sup>がある。iBeaconは低消費電力版BluetoothであるBluetooth Low Energy (BLE)という無線通信技術を用いて、ビーコンモジュールという発信端末から数メートル範囲内に存在するスマートフォンやタブレット等の受信端末へ一斉にプッシュ型情報配信を行うことができる。ここでプッシュ型情報配信とは、受信側がその情報を受信したいかどうかに関わらず、発信側が押し付ける形で情報配信されるブロードキャスト方式のことを意味する。各ビーコンモジュールにはUniversal Unique Identifier (UUID)というモジュールに固有なIDが割り振られている。また、majorやminorといった利用者が任意の数字でIDを割り振ることもできる。無線通信で受信端末に送る情報のことをアダプタイジング・パケットと呼ぶ。このパケットにはUUID, majorおよびminor番号の情報が含まれている。このアダプタイジング・パケットを受信することで、ビーコンモジュールを一意に特定することが可能になる。また受信した電波強度を利用して、発信元のビーコンモジュールからの距離を計測する機能も備えている。このシステムにおいてビーコンモジュールは基本的に電波を発信するだけである。従って、電波の受信はあくまでビーコンモジュールの近くに来たかどうかを判断する情報でしかなく、情報配信や位置測位は受信端末側で適切に計算することによって行われる。また、既存のBluetoothやWi-Fiなどに比べて発信にかかる消費電力が少ない為、電池交換を頻繁に行う必要がない。従って、殆ど放置状態でシステムを維持できるので、メンテナンスに優れているという特徴もある。一般的なビーコンモジュールにおいて、単三電池2本で約1年程度の寿命があるといわれている。また、ビーコンモジュール自体の価格も一個辺り数百～千円程度であり、安価にシステムを構築できることも魅力的な特徴の一つである。

この技術は、商店内での商品紹介やクーポン配信、美術館や博物館等での展示品の紹介、野球場での入場管理、屋内位置測位と経路誘導など様々な用途で利用されて始めている。またビーコンモジュールを屋内に据え付けるのではなく、個人が所有物につけて持ち歩くことにより、紛失を防ぐ用途にも用いられている。近年では iBeacon 以外にも Google 社の提案する Eddystone<sup>(19)</sup> という類似したサービスも出てきており、BLE を用いたサービスは今後の更なる普及が期待される。

ここで様々な利用価値のある BLE の利用範囲を更に広げるについて検討してみる。先に GPS では位置測位が困難な場所で位置測位を可能にする技術として BLE を紹介したが、雨水貯留槽内のような水中も GPS での位置測位が困難な場所である。従って、水中ロボットを雨水貯留槽内に潜行させてメンテナンスや清掃をさせることを考えた時に、水中ロボットの位置測位は一般に困難になる。前述したソナーによる位置測位は可能ではあるが、ソナー装置の設置には一般に高額のコストがかかる。BLE を用いて位置測位を行うことができれば、比較的安価に水中でも位置測位ができる可能性がある。また、無線通信技術を併用できれば、水中の位置測位と同時にタンク外への情報転送にも活用できる。スマートハウスとして無線通信機器を家電に搭載し、全ての家電をインターネットに接続する Internet of Things (IoT) という概念があるが、BLE はこれとの相性が良い。雨水タンクもスマート雨水タンクとして IoT に取り込む研究もある<sup>(20)</sup>。従って、BLE を用いた雨水貯留槽内における位置測位の可能性を確認する価値があると考えられる。一方、BLE は 2.4GHz 帯の電波を用いているが、この帯域の電波は水に吸収され易い。従って、空気中のように伝播距離を延ばすことは不可能である。しかし、空気中よりも短い距離であれば電波を伝えることが可能なはずである。BLE を用いた雨水貯留槽内における位置測位の可能性を確認する為に、ビーコンモジュールから発信する電波の伝播距離がどれくらいになるかを実験的に見積もる必要がある。

## 5. 実験方法

ビーコンモジュールから発信する電波強度とビーコンモジュールからの距離の関係性を測定することができれば、それを雨水貯留槽内における位置測位に応用することが可能になる。そこで、この電波強度の距離依存性を調査する方法を以下に説明する。

### 5.1 電波強度観測ロガーについて

まずビーコンモジュールの発信する電波の強度を計測する為に電波強度を記録するロガーが必要になる。今回は Android OS を搭載したスマートフォン (Google Nexus 5) で BLE ロガーとして動作するアプリケーションを自作した。開発環境には Android Studio<sup>(21)</sup>を用いた。作成したロガーの概観について図 5 に示す。図中のトグル・スイッチをオンにすると、電波強度の記録が始まる。また、スイッチをオフにすると記録が中断される。ロガーには、観測時刻、UUID、major 番号、minor 番号、近接度、電波強度等が画面上に表示されると共に、テキストファイルに CSV 形式のデータとしても保存される。ここで近接度とは、ビーコンモジュールから受信側のスマートフォンまでの距離を分類した指標であり、ごく近く (Immediate)、近く (Near)、遠く (Far)、距測不能 (Unknown)、電波測定不能 (Out) の 5 種類ある。それぞれの定義としては、距測結果が数 cm 範囲内ならば Immediate、約 1m 範囲内ならば Near、約 10m 範囲内ならば Far、電波が届くが距測が不可能な場合は Unknown、電波が届かなければ Out となる。しかし実際には、ビーコンモジュールを設置する環境における電波ノイズや物理的な電波の遮蔽効果にも依存する為、距離はあくまで目安である。

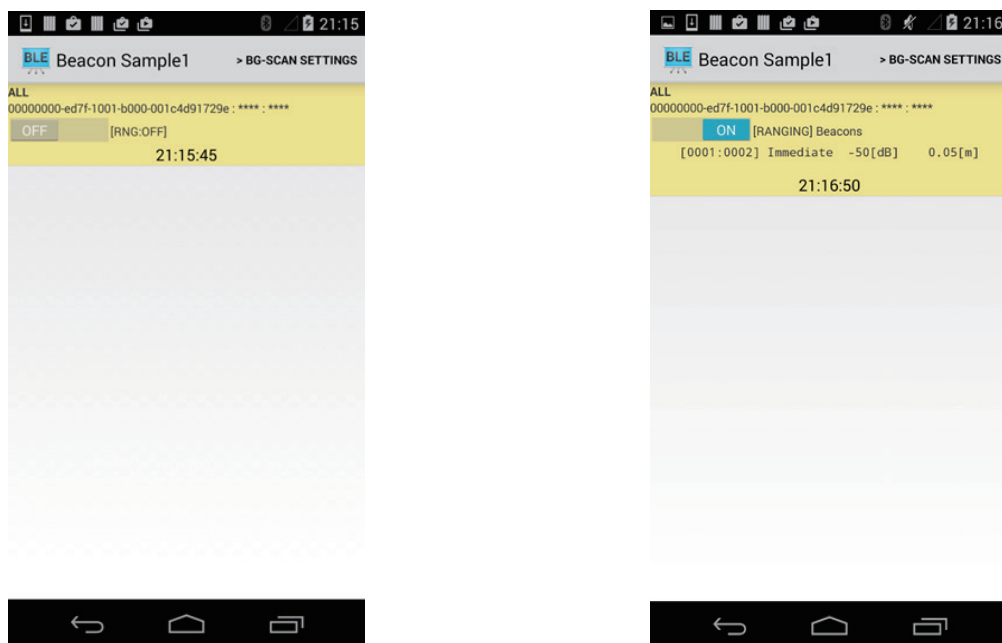


Fig. 5 Screens of the BLE logger. A screen when the toggle switch is OFF (left) and that when the switch is ON (right).

## 5.2 小型水槽における電波強度測定

次に前節で紹介したロガーを用いて、水中における電波強度測定を行う。本実験では、株式会社アプリックス社のビーコンモジュール（MyBeacon 汎用型 MB004 Ac<sup>(22)</sup>）を使用した。またスマートフォンを水中に沈める為、浸水によるスマートフォンの故障を防ぐ為に防水ケース（Owltech Waterproof iPhone/SmartPhone Case OWL-MAWP08<sup>(23)</sup>）を使用した。実験の様子を図 6 に示す。小型水槽の一つの外壁にビーコンモジュールを固定し、防水ケースに封入したスマートフォンをビーコンモジュールと同じ高さに保ちながら水中での位置を移動させて、その時にロガーが示す電波強度の値とビーコンモジュールからの直線距離を定規で計測した。



Fig. 6 Images in the experiment for detecting radio-field intensity in a water tank. A view from above (left) and that at the beacon-module side (right).

## 5.3 雨水貯留槽における電波強度測定

雨水貯留槽における水中ロボットの位置測位の可能性を検証する為に、福井工業大学構内に設置している雨水貯留槽を使用した実験も行なった。まず水中ロボットとして、OpenROV バージョン 2.7 キットを購入し、水中ロ

ボットを作成した。また、雨水貯留槽の外壁にビーコンモジュールを8個取り付け付けた。この時、雨水貯留槽の上部と下部の周囲に等間隔に4箇所ずつ設置した。雨水貯留槽にビーコンモジュールを設置した様子を図7に示す。ロガーがビーコンモジュールを区別できるように、上部のビーコンにはmajor番号0を、下部のビーコンにはmajor番号1を割り当て、図7の右図のように手前から反時計周りにminor番号を0, 1, 2および3となるように設置した。防水ケースに封入したスマートフォンをOpenROVの底辺部に固定した。スマートフォンを搭載したOpenROVを雨水貯留槽の上部にある入り口から潜水させ、ロガーからビーコンモジュールの電波強度を測定した。

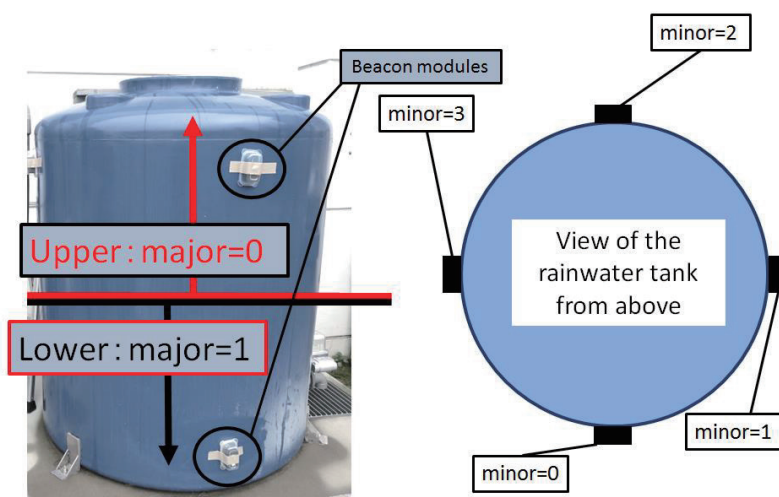


Fig. 7 Rainwater tank and mounting positions of beacon module.  
A view at the front side (left) and a schematic view from above (right)

## 6. 結果と考察

### 6.1 小型水槽における結果

スマートフォンで受信した電波強度とビーコンモジュールを設置した場所の水槽内壁からの距離の関係を図8に示す。ビーコンモジュールからの距離が離れるにつれてほぼ線形に電波強度が減衰することが分かる。ビーコンモジュールとの距離が0[cm]の時、電波強度が-56[db]である。一方、空気中では距離0[cm]では約-20[db]程度を観測する。このことから、水中での電波強度は弱くなることが分かる。また、空気中では10[m]程度の距離なら電波が届くが、水中では17[cm]近辺から電波が届かなくなることが測定結果から分かる。これは電波が水に吸収されてしまうことが理由であると考えられる。水槽内壁面周辺の十数センチメートル程度の範囲なら、図8に見られる電波強度と距離の線形特性から、ビーコンモジュールを用いた距離測定が可能であることが分かった。しかし、それを超える範囲では電波が届かないため不可能であることも分かった。



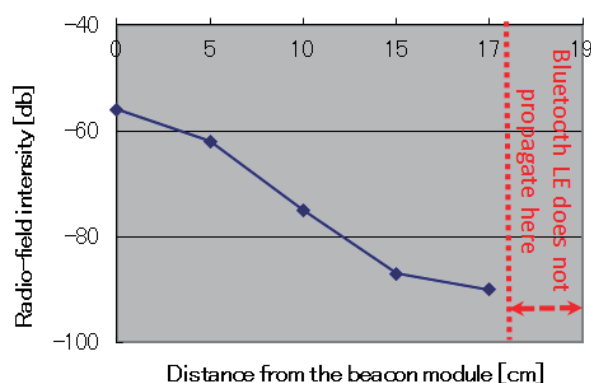


Fig. 8 Relationship between BLE radio-field intensity and the distance from beacon module.

## 6.2 雨水貯留槽における結果

雨水貯留槽に水中ロボットを潜水させて電波強度を測定した結果、タンクの中央部においては電波が検出不能であった。しかし、ビーコンモジュールが設置してある壁面周囲 10cm 程度に水中ロボットを移動させたときに電波を検出することができた。このことから、小型水槽における結果と同様の電波伝搬が雨水貯留槽でも起きていることが推測される。

今回用いた雨水貯留槽は中央部では壁面から 50~60[cm]程度の距離がある為、BLE では電波が中央部までは到達できないと考えられる。しかし、水中ロボットを壁面周辺にのみに限定して動かすのみの作業であれば、ビーコンモジュールを壁面に 10[cm]程度の間隔で密に配置することによって壁面のどの辺りにいるかを検出することは十分に可能であることが分かった。

## 7. まとめと今後の課題

本研究では、雨水貯留槽内に OpenROV を潜水させた状態で、BLE 技術を用いた位置測位の可能性について実験的に検証した。BLE が利用している周波数は 2.4GHz 帯であり、この帯域は電波が水に吸収されて減衰し、伝播しにくい。従って、小型水槽実験からビーコンモジュールから十数センチメートル程度の距離までしか電波が伝播しないことが分かった。また BLE は低消費電力通信であるという特徴から、単純に電力を増加させて電波を遠くまで飛ばすことも本来の趣旨に反する。周波数帯を GHz 帯から MHz 帯や kHz 帯へと小さくすることで電波吸収されにくくなることが知られている<sup>(24)</sup>。電波伝播の距離を延ばす為に、今後は 2.4GHz 帯以外の低消費電力無線通信技術としてスマートハウスへの導入も期待されている Wi-SUN (920MHz 帯) 等の利用可能性についても検討すると良いかもしれない。

雨水貯留槽に充分沢山のビーコンモジュールを設置すれば、タンク内壁周辺であれば水中ロボットがどこの内壁周辺にいるかの検出が可能になることも分かった。実際のところ、現在のままでは位置測位というよりタンク内壁周辺の一次元的な距離測位しか行うことができない。周波数帯の検討を進めることにより、電波が水中内をより伝播するようになれば、ビーコンモジュールで三点測位方式を用いることによって三次元的な位置測位が可能になる。また、雨水貯留槽で利用可能な安価なソナーシステムの開発によっても水中ロボットの位置測位が可能になる。今後の水中ロボットの研究は ROV から AUV に移行してきている。水中で自動的にメンテナンスや清掃作業を行う AUV の構築の為に、今後も安価で手軽に水中での位置測位を行える技術を検討していく必要がある。

## 謝 辞

MAZDA Zoom-Zoom スタジアム広島の雨水貯留槽内の写真をご提供頂いた、広島工業大学 宋城基氏に感謝いたします。

## 文 献

- (1) 環境省, “報道発表資料: 日本国内における気候変動予測の不確実性を考慮した結果について (お知らせ) ”, <http://www.env.go.jp/press/19034.html> (参照日 2016 年 1 月 24 日).
- (2) D. P. Vuuren, J. Edmonds, M. Kainuma, K. Riahi, A. Thomson, K. Hibbard, G. C. Hurtt, T. Kram, V. Krey, J. Lamarque, T. Masui, M. Meinshausen, N. Nakicenovic, S. J. Smith and S. K. Rose, “The representative concentration pathways: an overview”, *Climatic Change*, Vol.109 (2011), pp.5-31.
- (3) 環境新聞, “雨水産業への道 第 5 回, Klaus. W. Koenig”(2015 年 8 月 25 日).
- (4) 国土交通省 HP: 雨水の利用の推進に関する基本方針について, <http://www.mlit.go.jp/common/001082127.pdf> (参照日 2016 年 1 月 24 日).
- (5) 日本建築学会編, 日本建築学会環境基準 AIJES-W0002-2011 雨水活用建築ガイドライン(2014), 64p., 日本建築学会.
- (6) 水道機工 HP: 雨水利用システム, [http://www.suiki.co.jp/hensen/85\\_95/85\\_2.htm](http://www.suiki.co.jp/hensen/85_95/85_2.htm) (参照日 2016 年 2 月 15 日).
- (7) 国土交通省水管理・国土保全局水資源部: 平成 26 年版日本の水資源 (2014), 193p., 佐伯印刷.
- (8) 塚原啓司: 東京スカイツリータウン～雨水利用、江戸文化継承地「墨田区」で粋な取組み～ (2015), pp.16-20, IBEC.
- (9) 中国地方の都市・住宅整備事業事例集 下水道 広島市大州雨水貯留池, <http://www.cgr.mlit.go.jp/chiki/Kensei/jyutaku/jirei/001oozuchosuiti.pdf> (参照日 2016 年 2 月 15 日).
- (10) 広島市 HP 広報ひろしま市民と市政 大州雨水貯留池, <http://www.city.hiroshima.lg.jp/www/contents/1344820298556/html/common/506cdaab022.html> (参照日 2016 年 2 月 15 日).
- (11) 社団法人空気調和・衛生工学会編: 雨水利用システム 設計と実務 (2014), 169p., 丸善.
- (12) 西戸崎興産株式会社水中清掃ロボット, <http://www.saitozakikousan.co.jp/22259.html> (参照日 2016 年 2 月 28 日).
- (13) OpenROV <http://www.openrov.com/> (参照日 2016 年 2 月 28 日).
- (14) Open Source Hardware Association <http://www.oshwa.org/definition/japanese/> (参照日 2016 年 2 月 29 日).
- (15) OpenROV Store, OpenROV v2.8 Kit <http://store.openrov.com/collections/openrov/products/openrov-v2-8-kit> (参照日 2016 年 2 月 28 日).
- (16) BeagleBone Black <http://beagleboard.org/BLACK> (参照日 2016 年 2 月 28 日).
- (17) 海洋音響学会編, 「海洋音響の基礎と応用」, 成山堂書店(2004).
- (18) Apple Inc., iBeacon for Developers <https://developer.apple.com/ibeacon/> (参照日 2016 年 2 月 28 日).
- (19) Google, Eddystone <https://developers.google.com/beacons/> (参照日 2016 年 2 月 28 日).
- (20) 森山ら, スマート雨水タンクと降水レーダを用いた防災情報システムの開発, 福岡工業大学環境科学研究所所報 Vol. 7, pp. 5-13 (2013).
- (21) Android Studio, <http://developer.android.com/intl/ja/sdk/index.html> (参照日 2016 年 3 月 31 日).
- (22) 株式会社アプリックス, MyBeacon®汎用型 MB004 Ac, <http://www.aplix.co.jp/product/mybeacon/mb004ac/> (参照日 2016 年 2 月 28 日).
- (23) Owltech, Waterproof iPhone/SmartPhone Case OWL-MAWP08, <http://www.owltech.co.jp/products/mawp08/> (参照日 2016 年 2 月 28 日).
- (24) JAMSTEC, やってみよう! 海と地球の自由研究 実験! 海中で電波は使えない? <http://www.jamstec.go.jp/j/kids/jiyu-kenkyu/006/> (参照日 2016 年 2 月 28 日).

(平成 28 年 3 月 31 日受理)