

TUMSAT-OACIS Repository - Tokyo

University of Marine Science and Technology

(東京海洋大学)

水中での電波通信を用いたモジュール型水中ロボットの開発

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2019-11-22 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 小澤, 正宜 メールアドレス: 所属:
URL	https://oacis.repo.nii.ac.jp/records/1839

博士学位論文

水中での電波通信を用いた
モジュール型水中ロボットの開発

令和元年度
(2019年9月)

東京海洋大学大学院
海洋科学技術研究科
応用環境システム学専攻

小澤 正宜

目次

第1章	序論	1
1-1	研究の背景	1
1-2	研究の目的	4
1-3	論文の構成	5
第2章	海中探査機材開発の現状.....	7
2-1	はじめに	7
2-2	海中探査機材の必要性	7
2-3	探査機材に使用される要素技術.....	11
2-3-1	水中ロボットのモジュール化.....	12
2-3-2	水中での無線通信技術.....	13
2-4	まとめ.....	15
第3章	モジュール型水中ロボットの開発	19
3-1	はじめに	19
3-2	モジュール型水中ロボット「MaNTA」	19
3-3	「MaNTA」の製作	25
3-4	動作確認	32
3-5	MCUV と従来水中探査機材の比較	33
3-6	江戸っ子1号.....	34
3-7	まとめ.....	35
第4章	海中電波通信手法の開発.....	38
4-1	はじめに	38
4-2	海中電波通信手法の概容.....	38
4-2-1	電波伝搬の基礎.....	38
4-2-2	提案手法.....	44
4-2-3	実験	45
4-2-4	実験結果.....	47
4-3	伝搬経路の材質が与える影響.....	47
4-3-1	検証内容.....	47
4-3-2	実験	48
4-3-3	実験結果.....	49
4-4	伝搬経路の断面形状が与える影響.....	51
4-4-1	検証内容.....	51
4-4-2	実験	52
4-4-3	実験結果.....	54
4-5	使用する周波数が与える影響.....	55
4-5-1	検証内容.....	55

4-5-2	実験	55
4-5-3	実験結果	57
4-6	電界強度と通信速度の対応	58
4-6-1	検証内容	58
4-6-2	実験	59
4-6-3	実験結果	60
4-7	まとめ	61
第5章	水中ロボットでの利用に向けた海中電波通信手法の拡張	65
5-1	はじめに	65
5-2	海中電波通信手法における伝搬距離の伸長手法	65
5-2-1	検証内容	65
5-2-2	実験	65
5-2-3	結果	68
5-3	海中電波通信手法適用時の位置拘束	72
5-3-1	検証内容	72
5-3-2	実験	72
5-3-3	結果	74
5-4	複数規格の混在	75
5-4-1	検証内容	75
5-4-2	実験	75
5-4-3	結果	77
5-5	伝搬経路の屈曲が与える影響	78
5-5-1	検証内容	78
5-5-2	実験	78
5-5-3	実験結果	80
5-6	まとめ	82
第6章	結論	84
謝辞		86

第1章 序論

1-1 研究の背景

海は地球表面の約 70%を占める塩水で満たされた領域であり、その中でも水深が 200[m]を超える深さの海が一般的に深海と呼ばれている [1]。深海は太陽光が届かず、深度に比例した高い水圧がかかる非常に過酷な環境であり、その広さは海面面積の約 80%と、地球表面の半分を超える範囲を占める。深海は簡単に行ける距離にありながら、その過酷さ、広大さから宇宙空間に匹敵する未踏の領域とされている。その深海には、原初の地球に近い環境や進化を止めて当時の形のまま生き残っている古代生物、陸上とは異なるエネルギーを基にした生命圏や地球のマントルに最も近い場所が存在することが分かっている。深海を調査するという事は、生命の起源や進化の過程、地球の成り立ちなどを知ることにつながるため、学術的に重要な価値がある。それだけでなく、経済的な側面から見ても海底油田やメタンハイドレードのようなエネルギー分野、コバルトリッチクラストやマンガンクラスト、レアアース泥のような鉱物資源分野、食用魚や海洋深層水の活用といった食料生産分野など様々な業種から、新たな資源の産出源として大きな期待の目が向けられている。このため各国とも深海に高い関心を示しており、深海をより詳しく、効率よく知るために次に示すような様々な調査方法を模索している。

現代における代表的な深海の調査手法は大きく分けて洋上から行う手法と海中から行う手法がある。洋上から調査する手法は、主に船舶に装備された調査機器を用いて計測を行うものであり、広範囲の状況を大まかに知るのに適した手法である。Fig.1-1 に船舶を用いた海面からの調査手法の例を示す [2]。海面から音響ビームを発射してその反射強度を観測し海底面の状況を知るマルチナロービーム音響測深、エアガンを使用して大音響を発生させ、海底面下からの反射音を観測するサブボトムプロファイラーなど、広い範囲を計測できる反面、深海から大きく離れたところから計測を行うため、分解能が低くなる。

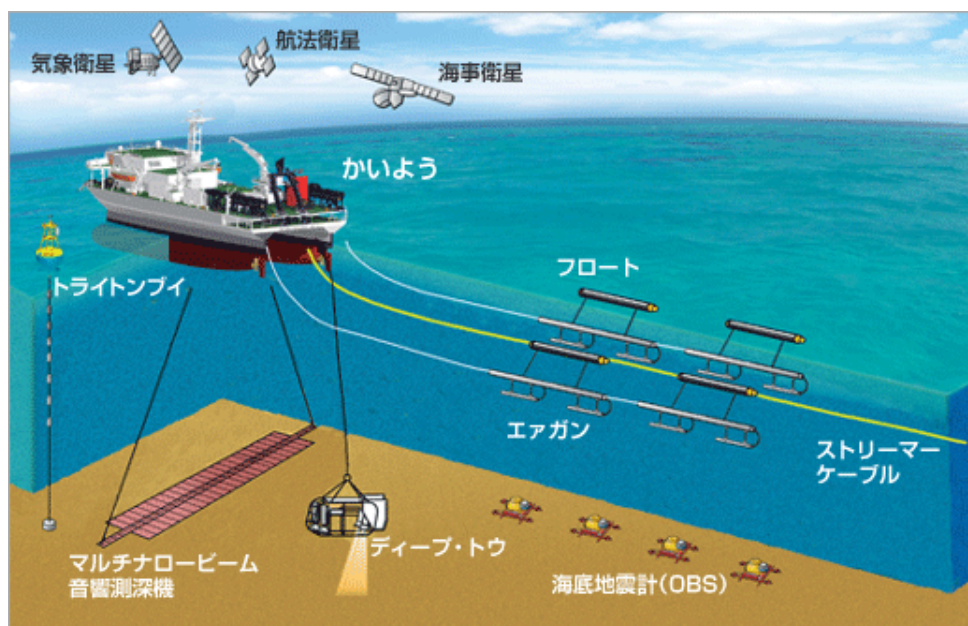


Fig. 1-1 Research Vessel KAIYO and Her Equipment [2]

そこでより精度が求められる場合には、計測機器を深海に近づけて計測する、海中から調査を行う手法がとられる。計測機器を深海に近づけるために、Autonomous Underwater Vehicle(AUV)や Remotely Operated Vehicle(ROV)、ディープトウといった水中探査機器に取り付けて運用が行われる。AUV や ROV の運用にはそれを支援するための船舶が必要であるが、より調査効率を高めるために、1 隻の支援船から複数の水中機器を運用する手法の開発が進められている [3]。

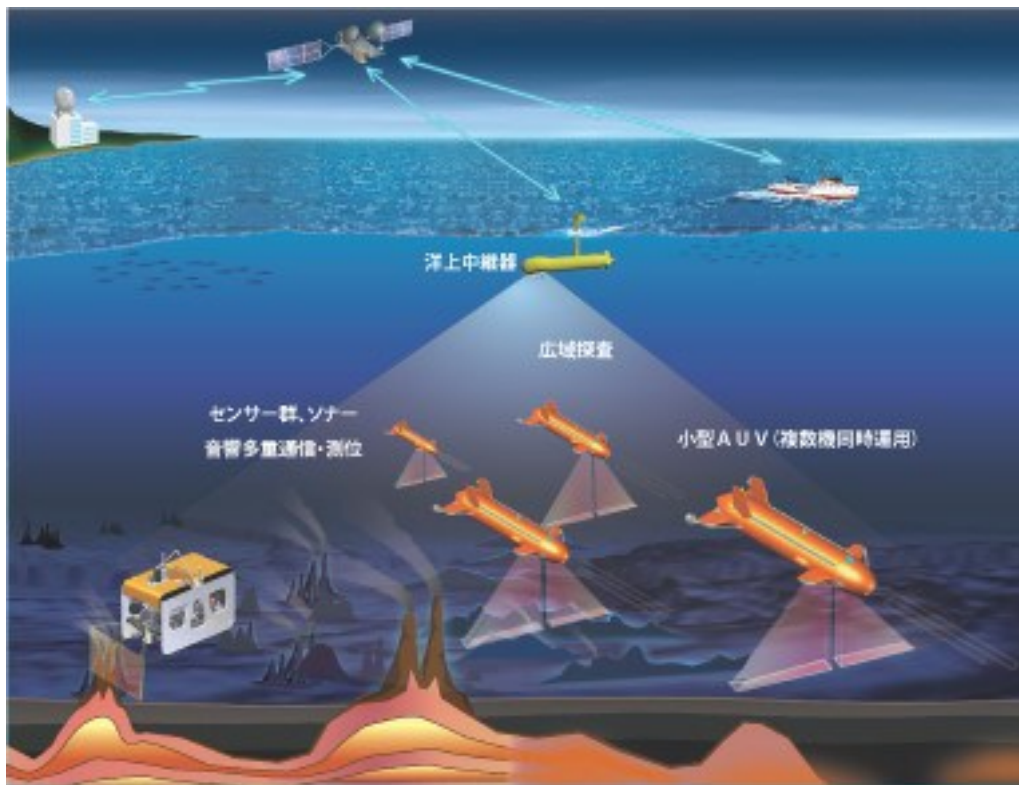


Fig. 1-2 Development of Multi AUV Operating Method by SIP Program [3]

海中から調査する手法には、地殻変動や水温、塩分濃度の連続的変化などのように広範囲、超長期間に渡る連続観測が求められるものがある。このような調査対象の場合、Fig.1-3 に示す DONET [4]やアルゴ計画 [5]のアルゴフロートのように、長期間の稼働が可能な観測機器を広範囲に展開する手法がとられている。最近の研究例としては Unmanned Surface Vehicle(USV)からの大量の AUV の展開や、Autonomous Underwater Explorer(AOE) と呼ばれる小型の探査機器を多数海域に展開するといった、大量の探査機器を同時に展開・運用する手法、氷海域に代表される水平方向への長距離展開に必要な、母船からの支援がない状況での運用手法など、広範囲や長距離運用の手法が検討され始めている。

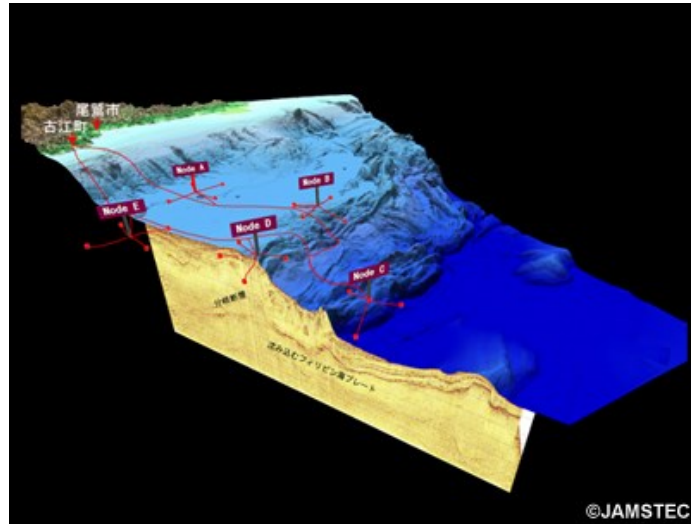


Fig. 1-3 Earthquake Observation System DONET [4]

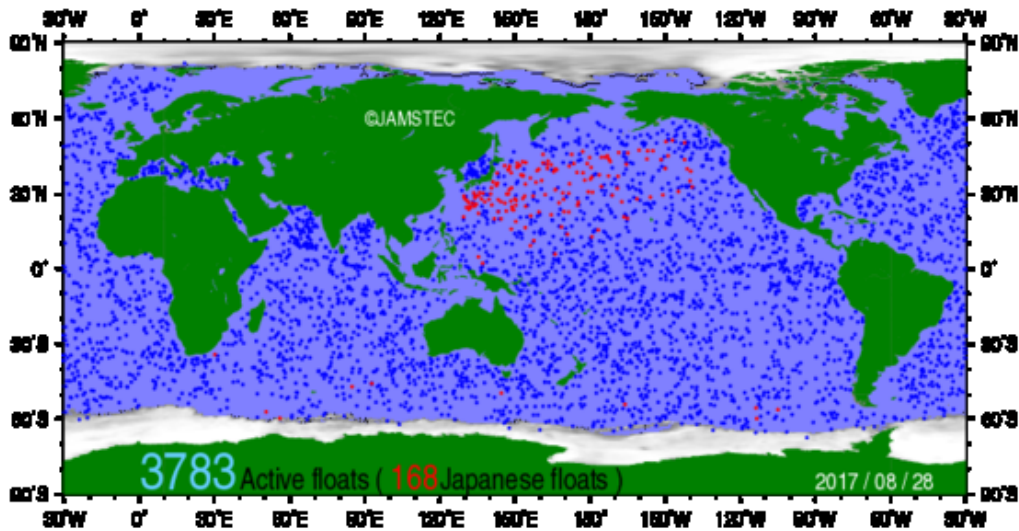


Fig. 1-4 Argo Float Distribution Map [5]

上記で示した通り、現在の深海調査の開発方針はSIPのような複数台運用によるデータ収集の効率向上、Scripps Institution of OceanographyやNational Oceanography Centre(NOC)のような複数台運用による広範囲データの同時取得、氷海域調査のような長時間の自律航行の3種類が進められている。この中でもScrippsのAutonomous Underwater Explorers(AUEs) [6]のような複数台運用による広範囲データの同時取得は、一定海域の多点同時計測データというこれまでにない形式の計測データを取得することが可能である。これまでは計測の精度を向上させる手段はセンサの性能に依存していたが、AUEsのように大量のデータを取得することが可能になれば、複数の計測データを統計的に処理して精度を上げるという選択肢の実現が見込まれる。また、広範囲の計測データをAUVやROVの詳細な計測データと組み合わせるなど、詳細な観測だけでは得られなかった周辺環境からの影響などが明らかになる可能性がある。このように、同時に

運用する探査機器を増加することで、これまでの探査機器とは異なる、新しいデータのかたちを提供できる可能性がある。

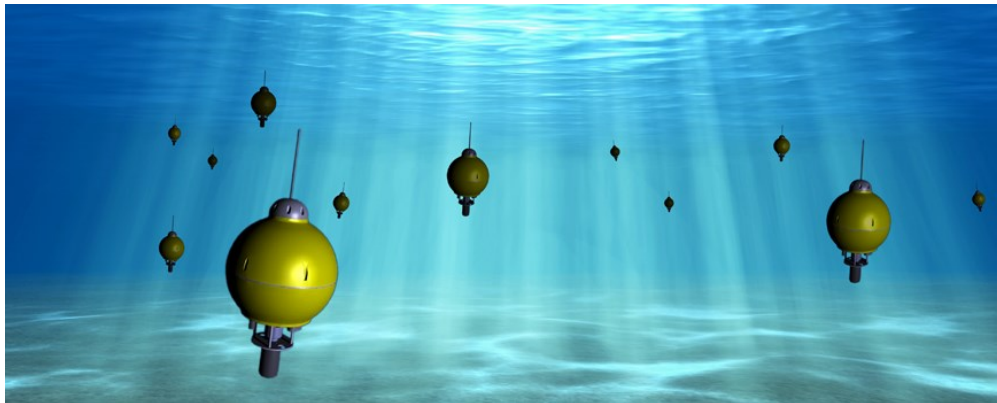


Fig. 1-5 Scripps's Swarms of Autonomous Underwater Explorers(AUEs) [6]

複数台運用によって新たなデータの取得が可能になると、探査機材の構成方法も取得方法に合わせた新たな要求が挙げられることが見込まれる。これにより、これまでの単機で高精度を求める探査機材の開発とは異なる、今後の深海探査機材開発の新たな方向性ができていくことが予想される。

1-2 研究の目的

探査機材の大量展開という新しい調査方法を実現しようとする、探査機材にはこれまでと異なる技術、要求が求められることが予想される。

大量の機材を展開して様々なデータを計測するとき、例えば光学カメラのような計測範囲の狭いデータと海水温度や密度分布のような広範囲で変化が少ないデータとでは、計測で必要となる空間的な間隔が異なる。そのため、センサを装備する機材としない機材が用意されることになるが、運用を行っている最中は装備する機材による区別をせずに使用できると利便性が高い。また、実運用上では一部の機材が不調となり、使用不可能な場合でも計測作業に支障を与えないことが望まれる。この冗長性を確保するためには、機材はできるだけ共通的な構造とすることと、装備する部品は容易に交換可能にしておくことが必要である。さらに、デジタルカメラの画素数に代表されるように、近年はセンサ精度が日進月歩で向上しており、計測精度の要求もそれに合わせ機材の寿命と比べて速いサイクルで変更が求められる。これらの要望に応えるためには、個別の機能ごとに機材を分割し独立して動作できるようにし、それらを通信により接続して機材を構成する方法が有効であると考えられる。本論文ではこの機材が分割され、独立動作が可能となった状態をモジュールと呼ぶ。

個々のモジュールは単一の機能しか持たないため、探査機材として運用するためには複数のモジュールを連携して動作させなければならない。そのためには、モジュール間の通信をどのように安定して成立させるかが大きな課題のうちの一つである。通信を確立する方法には有線接続と無線接続の2種類が存在する。これまでの水中機材では、通信経路間の接続を回路の物理的な接

触で担保する水中コネクタを使用した有線通信が多く使用されてきている。この有線接続は、高い接続の確実性を担保する一方で、配線経路の確保や多数の機器の接続に向かないなどの物理的な制約、接点不良や断線による接続失敗のリスクが存在する。一方、光、音波、電波を使用する無線接続は、これまで水中で機器同士を近距離で接続するような用途に利用されてこなかった。しかし、無線接続、特に電波を用いた通信は陸上の機材で広く一般的に使用されており、通信速度の高さ、接続数の多さ、位置拘束の低さを同時に実現している。これをモジュール間の接続に適用することができれば、同時接続するモジュール数が多い機材構成など、従来の有線接続には向かない構成の実現を容易にすることや、コネクタの配置や配線への考慮を低減することなど、有線接続とは異なる利点を享受することが可能になる。

以上より、大量展開に向けた探査機材の実現には機材をモジュール化することが有効であり、モジュール化を実現する要素技術としてモジュール間の無線接続が必要であると考えた。本研究では、このモジュール化及びモジュール間の無線接続について、実現方法及び利用可能な範囲を検討し、示すことを目的とする。

1-3 論文の構成

本論文の構成は以下のとおりである。まず第2章では、深海を探査するうえで探査機材が必須であることを改めて述べ、探査機材の開発史を振り返りながら、今後の機材に求められると考えた要素技術について先行研究を交え検証する。

第3章では、本論文で提案するモジュール型水中ロボットの構成と、コンセプト実証機「MaNTA」の製作、作動確認およびコンセプトを適用した「江戸っ子1号」について紹介する。

第4章では、機材のモジュール化を実現する上で重要な要素技術である海中電波通信手法について、考え方および基礎的な実験内容を紹介する。

第5章では、海中電波通信手法の応用的な利用方法について検証することで、海中電波通信手法の適用範囲を広げ、実際に探査機材へ適用する場合の適用範囲を明確にするための検討を行う。

最後に第6章で、本論文のまとめを行う。

参考文献

1. 国際海洋環境情報センター. 図解 深海とは. (オンライン) (引用日: 2017年8月10日.)
<http://www.godac.jp/deepsea.html>.
2. 海洋研究開発機構. 海洋調査船「かいよう」. (オンライン) (引用日: 2017年8月27日.)
<http://www.jamstec.go.jp/j/about/equipment/ships/kaiyo.html>.
3. 次世代海洋資源調査技術研究開発プロジェクトチーム. AUVの複数運用手法等の研究開発.
(オンライン) (引用日: 2017年8月27日.)
<https://www.jamstec.go.jp/sip/enforcement-2/development2-2.html>.
4. 海洋研究開発機構. 地震津波観測監視システム. (オンライン) (引用日: 2017年8月27日.)
<https://www.jamstec.go.jp/donet/j/donet/>.
5. アルゴ計画推進委員会. アルゴ計画・日本公式サイト. (オンライン) (引用日: 2017年8月29日.)
http://www.jamstec.go.jp/J-ARGO/index_j.html.
6. 山崎徹, ほか. SIP「次世代海洋資源調査技術」における産総研の2015年度の成果と今後の取り組み. 出版地不明: GSJ 地質ニュース Vol. 5 No. 8, 2016. ページ: 251-255.
7. 和辻智郎. 深海外部共生研究分野の成果と展望. 出版地不明: 日本微生物生態学会誌 Vol. 32 No. 1, 2017. ページ: 4-5.
8. 内閣府. エネルギー戦略協議会(第2回)議事次第. (オンライン) (引用日: 2017年7月17日.)
http://www8.cao.go.jp/cstp/tyousakai/juyoukadai/energy/2kai/haifu_energy_02.html.
9. 関邦博. 海に潜る-高圧生理学の現在と未来-. 出版地不明: 日本物理学会誌, Vol. 54, No. 3, 1999. ページ: 192-197.
10. JOGMEC. 西アフリカと大水深石油開発動向. (オンライン) 2015年5月18日. (引用日: 2017年8月22日.)
https://oilgas-info.jogmec.go.jp/report_pdf.pl?pdf=1505_out_g_gh_ng_cm_gq_ga_ao_deepwater%2epdf&id=5982.
11. 資源エネルギー庁 資源・燃料部. 石油上流開発/石油・天然ガス資源確保について. (オンライン) 2007年10月. (引用日: 2017年8月22日.)
<http://www.meti.go.jp/committee/materials/downloadfiles/g71015c04j.pdf>.

第2章 海中探査機材開発の現状

2-1 はじめに

深海は過酷な未知の環境であり、学術的分野に限らず様々な商業分野から探査を行い、未知領域を解明することが期待されている。深海はその過酷さから、人間が直接生身で到達し確認できる深度には限りがあるため、探査機材を用いて調査を行うことが一般的である。探査には大別すると機材を水上に配置して行う方法と、機材を水中に潜航させて行う方法があるが、より詳しく対象を調査するためには、機材を水中に潜航させる方法が用いられる。

深海は高い水圧で太陽光が全く届かず、粘性が高くかつ導電性のある一様流体という、空気中とは全く異なる条件の環境である。このような環境では移動に多大なエネルギーを必要とし、通信の手段は限られており、取得できる視界はごく狭い範囲に留まるため、人間に限らず探査機材にとっても非常に過酷な環境である。このような環境で自在に行動し、探査を行うために、人間は様々な技術を発展させ、探査機材へ適用を行ってきた。つまり、技術が進展し、探査機材へ適用できる技術が増加するごとに、より広く、より詳しく深海を知ることが可能になってきていると言える。

技術の進展により深海のことが詳細に分かるようになると、その次はより違った角度から、さらに詳しく知りたいという要望が挙げられるようになる。第1章で挙げた AUV やその大量展開はその典型的な例であり、広範囲をより効率よく調査したいという要望から、実現に向けた努力が行われている。上記のとおり、技術進歩による調査範囲の拡大と要望からの調査範囲の拡大は互いに影響しあっている。そしてこれは今後の探査機材の開発においても同様に進められると予想される。

このように、海底探査機材は技術の発展と新たな調査の要望により、様々な手段が考案され、実施されてきた。本章では、これまでの海中探査機材の開発史を俯瞰したうえで、先行研究における進捗と、本研究において解決すべき課題の明確化を行う。

2-2 海中探査機材の必要性

深海ははるか昔から人類にとって身近な未知の領域であり、様々な手段でより深い場所を調査するための手段が模索されてきた。Fig.2-1 (1)に示す機材を例に、現在用いられている探査機材の変遷を示す。探査機材は大きく分けて、人間が機材内部に入って操作する有人型と、人間が中に入らない無人型に分類されている。有人型はさらに人間が水圧の影響を受ける形式と、耐圧構造によって人間の居住環境が大気圧に保たれる形式に分かれている。無人型はさらに遠隔操縦を行う形式と、事前のプログラムによって自律行動を行う形式に分かれている。以降に上記分類の発展の経緯を示す。

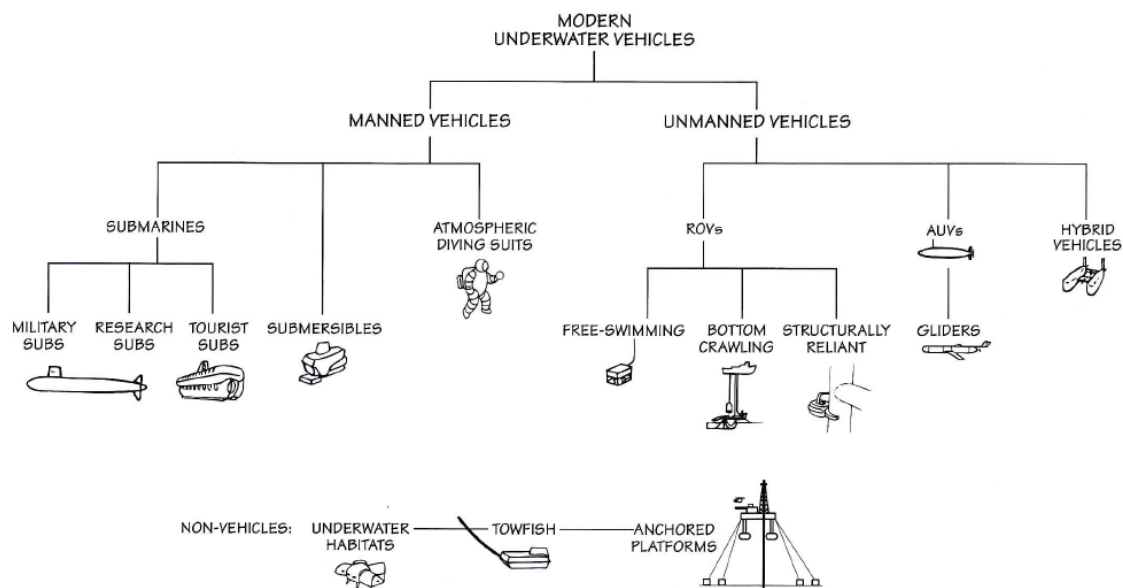


Fig. 2-1 Classification of modern underwater vehicles (1)

海中探査の歴史は古く、アレキサンダー大王がガラスの樽に入って海中探検をしたという逸話が残っているほど、昔から海中という未知の領域を知るための手段が模索されてきていた。まだ通信や遠方を探知する技術のなかった中世までは、海中を知る手段はアレキサンダー大王の逸話にあるガラス樽やダイビングベルのように、空気を目的の深度まで持っていくための容器を使って人間が直接深海に赴き、観察を行うというものが主流であった。これらの手段はダイビングと同様に、人間が高圧にさらされることになるため、人間の体が耐えられない高圧環境下を探索することは不可能であった。これが近代に入ると、設計技術や材料技術の発展により、潜水球に代表される構造内部の圧力を大気圧に保つことが可能な耐圧容器が開発される。これにより生身では耐えられない高圧環境である深海へ人間が赴いて観察を行うことが可能となった。有人の探査機材の中でも有名なものが、マリアナ海溝最深部へ到達したとされているトリエステである。トリエステの外観を Fig. 2-2、内部構造を Fig.2-3 に示す (2)。トリエステはガソリンを用いた浮力調整機構を耐圧球の外部に装備しており、これが今日における物体の密度差を利用した重量・浮量の調整の基礎になったと言われている。また、このときの主な観測手法は人間による目視であり、耐圧容器には観測窓が取り付けられているほかは計測用の機材が装備されていないことが確認できる。

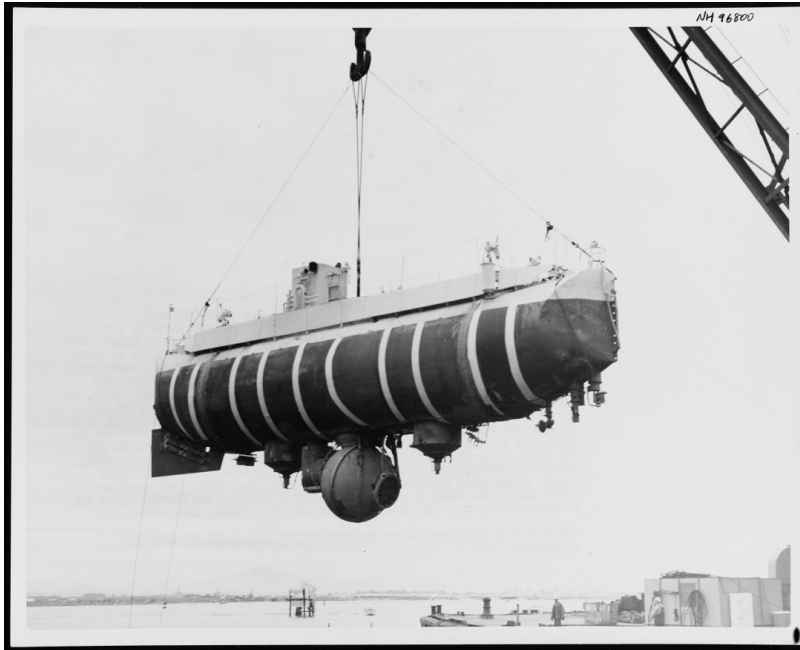


Fig. 2-2 Overview of Trieste (2)

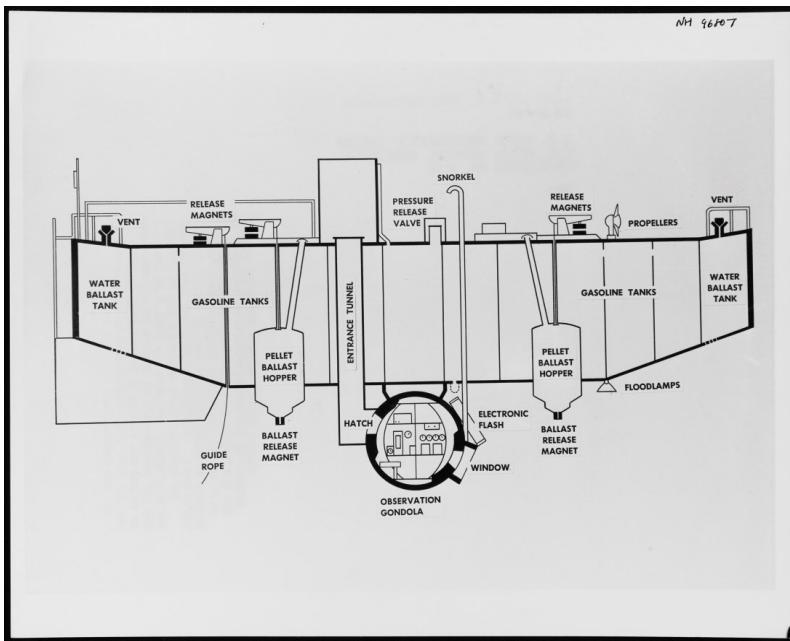


Fig. 2-3 Internal Structure of Trieste (2)

トリエステによる探査ののち、音響による通信、センシング技術や電気、遠隔制御の技術が発展したことで、人間が機体に乗らなくても十分な観測情報が得られるようになったため、無人で探査を行うという選択がとられるようになった。ROVはこのような背景から実現されており、有人潜水艇と比べて安全に、扱いやすい機材で深海を探査することを可能にした。Fig2-4に示すかいこうはトリエステと同様にマリアナ海溝を探査することが可能な機材であるが、無人化したことにより機材の大きさ、重量を小さく抑えることが可能になり、有人機と比べより簡単に調査を行うことが可能になった



Fig. 2-4 Overview of Kaiko [3]

ROV は母船からの給電と操作を行うためにアンビリカルケーブルを有しているが、広範囲を探索するときには動作の制約になる。また、長時間の機体操作は ROV オペレーターにとって大きな負担になることから、自動で探索を行うことが求められるようになった。AUV はこのような背景と自動制御技術の発展、自己位置計測精度の向上によって実現されている。Fig. 2-5 に示す JAMSTEC のうらしまの他、民生品として広く使用されている WHOI の REMUS や SAAB 社、Kongsberg 社などがラインナップをそろえている。

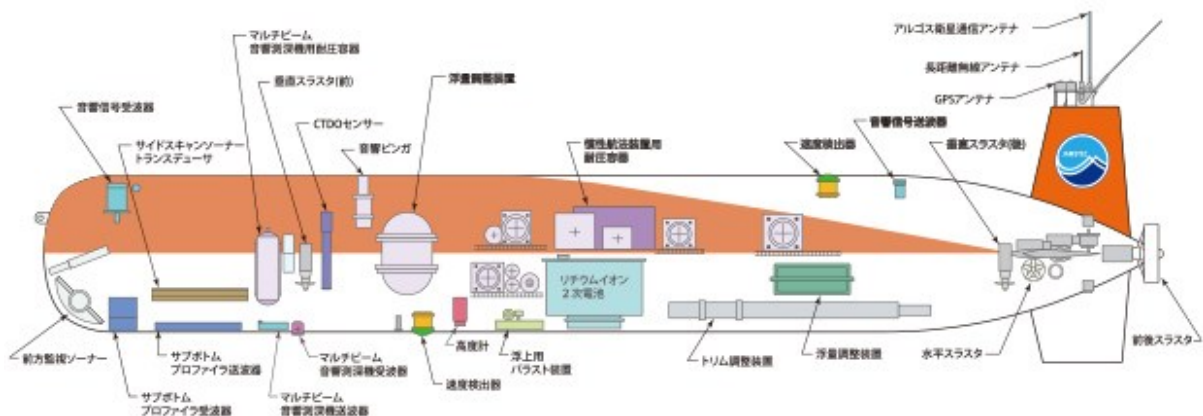


Fig. 2-5 Internal Structure of Urashima [4]

AUV は広範囲を調査することが可能であるが、調査完了までデータを得ることができず、またリアルタイムで制御ができないという欠点がある。そこで1つの機体を AUV と ROV の両方の用途を使用することを可能にした Hybrid ROV(HROV)が考案された。もっとも新しい製品では、HROV にさらに水中スクーターの機能を追加した、Fig. 2-6 に示す Strategic Robotic System 社の fusion [5]のような製品も販売されている。



Fig. 2-6 Operation Image of Strategic Robotic System's SRS fusion [5]

これらはすべて機材単体での運用を主眼においていたが、調査効率向上の要望とモニタリング技術、通信技術の発展により、SIP プログラムや Scripps Institution of Oceanography, National Oceanography Centre(NOC)などが、複数台 AUV の同時運用に関する研究を実施している。SIP プログラムは高性能な機体の同時運用による作業効率の向上、Scripps や NOC は広範囲に複数台の AUV を展開することで、同時刻における海域内の変化を取得することを目指している。

このように、探査機材は技術の進歩とそれに合わせた要望の高度化により、様々な構成が検討され、実際に運用されてきている。これらを使用した調査は人間による実施が不可能な深度を優に超えており、探査機材なしでは深海調査は実施できないと言っても過言ではない。深海の調査はまだ不十分だと考えられているため、今後も探査機材を用いて深海の詳細な解明が進められると予想される。

2-3 探査機材に使用される要素技術

現在使用されている探査機材は、複数のセンサを装備して複雑な観測計画を実行していることから分かる通り、高度にロボット化されてきている。ロボットは総合学問分野であり、様々な要素技術で成り立っている。次に、海中探査機材で用いられている要素技術を示す。

深海を探査する機材は搭乗員や電子回路を保護するために、高い水圧に耐え、水を遮断する耐圧構造および止水構造が求められる。そうして用意された大気圧環境内に、行動計画の実行やセンサの制御を行うための電子回路が複数種搭載される。耐圧構造は漏水を考慮したリスク分散や搭載内容を機能ごとにまとめることによる取り扱い性を向上させる目的で複数個に分割されることが多く、これらは何らかの通信により接続がなされている。フレームとして用意されたこれらの機器の上に、周囲を計測するためのセンサや、移動するためのスラストなどが搭載される。そして、事前に用意された行動計画、人間の手による操縦、センサ計測結果と機材の制御情報を組み合わせて、探査機材を自在に動作させる。

ここでは様々な要素技術がある中でも特に、第1章で今後の海底探査機材にとって重要となると述べた、機材のモジュール化および水中での通信技術について述べる。

2-3-1 水中ロボットのモジュール化

陸上では、2010年頃からロボットの製作方法として、システムの分散化とミドルウェアによるそれらの結合という考え方が広まってきている。これは、Arduino等の多機能なマイコンやRaspberry Piに代表される小型PCを使用して単機能に特化したシステムを製作し、それらをROS [11]やRTM [12]のプロトコルで相互にメッセージをやり取り可能とすることで、1つの機体として振舞わせるという構成方法である。これら分散型システムの目的とするところは機能の独立、機能間の疎結合化による追加変更のしやすさ向上、一度制作した機能の再利用性の向上であり、ミドルウェアを用いることで、これらの実現が加速されている。

陸、空のロボットでは水中のロボットと異なり、電気的な接合が簡単であること、分散システム間通信の制約が少ないこと、水密が不要であることなどから、分散型のシステム構成は進められているものの、積極的にモジュール化を進める動機が弱い。その中でも研究が進められているのが、井上 [6]らのように同一のモジュールを複数個接続することで、新たな移動機能を獲得するという形式のものである。このような同一モジュール同士の接続は、機能の冗長化および移動機能同士の相互作用による新たな移動機能の獲得といったところでの利点があるが、移動機能を持つモジュール同士を組み合わせさせた移動機能の拡張を意図しており、例えばセンシング機能の獲得のようなまったく別の機能を追加していくことを意図したものではない。

陸、空のロボットと比較し、水中で使用されるモジュール構造は、より機能単位でのパッケージングを行ったシステムの研究、開発が進められている。日本国内における水中ロボットのモジュール化の例としては石塚ら [7]によって行われたマニピュレータのモジュール化がある。この研究は他の研究に先立って水中ロボットにモジュール化の概念を導入した先駆的な内容であり、マニピュレータ機能をパッケージングし、そこに動力線、信号線を接続する形式である。モジュール化をよりすすめることで石塚らのモジュール化よりもより疎結合化を実現化した例としては、大室ら他による湖沼調査用小型水中ロボットに関する一連の研究が挙げられる [8] [9] [10] [11] [12]。各モジュールに電源を搭載することでモジュール単体での動作を実現し、モジュール間の通信をXBeeで行うことによって、これまでコネクタによって制限されていた接続数を大幅に増加することに成功している。また、様々な拡張モジュールの開発および動作検証も進められており、モジュール構造を生かした機能拡張も実現している。この研究における最大の制約は運用範囲を湖沼調査に限定していることである。空気中と比べると水中は電波の減衰が大きく、水の成分によって減衰の度合いは大きく変化する。大室らは、機材の運用範囲を電波の減衰が少ない純水に近い環境である湖沼に限定することと、モジュールの配置距離に制限を設けることで水中での利用を可能としている。この手法は、通信の成否が水の成分に多分に影響を受けるため、常に安定した通信が可能であるとは言い難い。また、地球上の水分の97.5%を占める塩水 [13]での利用を制限することは、モジュール型水中ロボットの利用拡大を考える時に大きな障害となる。

一方海外では、モジュール構造を採用しているTELEDYNE Marine社のGAVIA (14)が輸送コストの低いUUVとして販売されている。GAVIAの外観図をFig.2-7に示す。

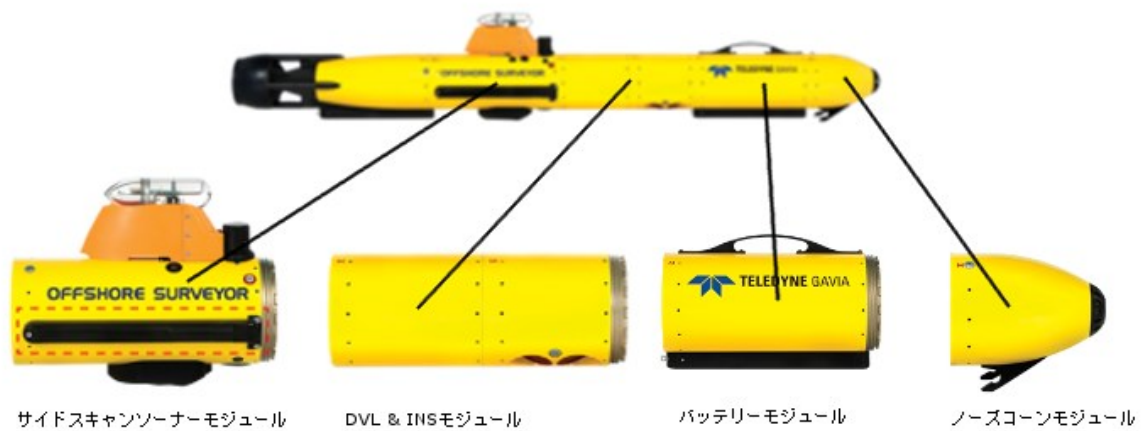


Fig. 2-7 Overview of GAVIA AUV (14)

GAVIA は海水でも利用が可能な巡航型の AUV であり、円筒形のモジュールを組み合わせた形状となっている。各節毎に機能の異なるモジュールとなっており、ミッションで求められる機能に前方のノーズコーンモジュールと最後尾のスラスターモジュール、バッテリーモジュールを組み合わせることで 1 台の UUV として使用可能になる。接合部には通信線と電源線を有するコネクタがあり、すべてのモジュールで共通のコネクタを使用している。これにより、任意の数のモジュールを追加することを可能とした。GAVIA はこのような拡張性を、モジュールの接続方向を機体長手方向に限り、巡航型 AUV の形状を崩さないことで実現している。

このように、既にモジュール構造を採用した UUV の研究開発例や製品も出始めており、実環境での利用も行われている。しかし運用場所や UUV の運用形態が制限されているため、本論文で実現するモジュール構造は、より提案する観測システムに適した、モジュール間の接続の自由度を確保した形態を検討する必要がある。

2-3-2 水中での無線通信技術

通信は一般的に有線通信と無線通信に分けられる。その名前の通り、通信を行う基板同士が物理的な経路で接続されていれば有線通信、基板同士に物理的な接触がなく通信を成立させるものが無線通信である。無線通信はさらに使用する媒体によって分類が行われるが、水中で無線通信の媒体として使用されているのは音波、光、電波の 3 種類である。次にそれぞれの特徴について述べる。

水、特に海水は電磁波を強く減衰する性質を持っている。そのため光、電波は大きく減衰してしまい、短い距離しか伝搬しない、一方で水は空気中に比べ高い密度を有していることから、粗密の伝搬である音波の減衰は非常に低い。この性質を利用し、水中で数百 m を越える通信を実現

するときには音波が用いられる。また、音波は通信だけでなく、ソナーなどのセンシングにも使用されている。音波は海水の物理的なプロファイルの変化によって大きく屈折するため、その伝搬を詳細に知ることは難しいとされている。また、帯域が狭いため通信速度は他の媒質に比べて低い。音波による通信の例として、Fig.2-8 に水中ロボットと母船間の音響通信について示す [15]。通信速度は最も遠距離となるしんかいの場合で 16[kbps]と、陸上で使用される通信と比較して非常に低く、また音響プロファイルの影響が大きいため鉛直方向との通信に用いられるのが一般的である。

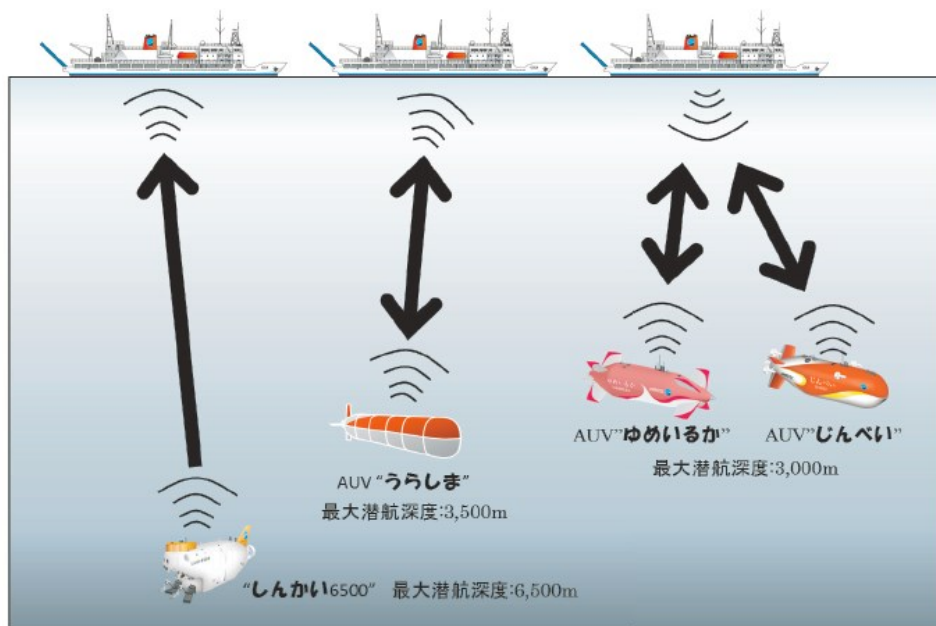


Fig. 2-8 Acoustic Communication between Underwater Vehicle and Mother Ship [15]

光は電磁波の一種で、特に海水中では波長が 400[nm]から 700[nm]の範囲である可視光の減衰が、その前後の帯域より低くなるためによく用いられる。その伝達距離と指向性の関係により、指向性をあまり持たせたくない時には通常の光源が、伝搬距離を大きくしたい時などにはレーザー光が用いられる。また、水面からの高さや周囲の水質による透明度の違いにより、青色光や緑色光が使い分けられる。光通信の例として、Fig.2-9 に Sonardyne 社の製品である Bluecomm を示す [16]。深度 100[m]対応の Bluecomm 100 は最大通信距離が 10[m]で、通信速度は環境条件により 1-5[Mbps]である。通常のもデムと同様、LAN ケーブルを接続すると使用することが可能である。



Fig. 2-9 Sonardyne Bluecomm [16]

陸上の通信では定番である電波は、今回挙げた3種の中でももっとも水中で使われる機会の少ない媒体である。伝搬速度は速く、帯域も広く取ることができ、技術研究により様々な通信手法が実現していることから、陸上のような減衰が少ない環境では非常に利便性が高い。しかし、周波数が高くなるほど海水による減衰が大きくなるため、水中での通信には利点を生かすことが難しく、使用する場合は低周波数帯の電波が用いられてきている。電波は空気-水中の界面を越えるときの影響が少ないため、過去には潜水艦との通信用途に研究が行われてきたこともある。現在、電波は研究レベルで利用の検討が行われており、Kenichら [17]、Al-Shamma'aら [18]がMHz帯の利用を検討している。

モジュール間の通信という近距離かつ速い通信速度が求められる状況において、音波は散乱が大きく通信速度が低いため不適である。光は指向性が高く光軸を合わせる必要があること、送受信素子間は透明度の高い物体しか配置できなくなることから、多点での通信が予想されるモジュールには適用しにくい。電波は減衰が大きな難点ではあるが、これを解決することが可能であれば、多点かつ近距離の通信は実現しており、モジュール間通信に適した通信方法となる可能性がある。

2-4 まとめ

深海という過酷な環境下で調査・観測を行うためには、探査機材を用いることが必須である。探査機材は世の中の技術の進歩と、実現された探査機材から新たに求められるニーズによって進展してきており、今後も同様に探査機材の開発が進められると考えられる。

海中探査機材の古くは、人が直接対象の深度まで潜り観察を行うというものであり、人間が環境圧を受けるものであった。これが耐圧容器を用いて大気圧の環境を持ち込み、遠隔操縦によって人間の搭乗が不要となり、自律制御で運用中の人間の関与をなくすという進展を遂げ、現在は自律制御された探査機材を大量に広範囲同時運用することが検討されている。

現在の探査機材は様々な構成要素で成り立っている総合技術分野であり、多くの要素技術が用いられている。その中でも、広範囲の複数運用に関する要素技術として、本論文では機材の構成方法と無線通信技術に着目した。機材を構成する要素ごとに分割しモジュール化することで部品の再利用性や機能の更新を容易にする試みが、ロボットの運用フィールドを問わず検討されている。水中においては、運用形態や運用場所を制限することによりモジュール化を実現している例があるが、これらよりも提案する観測システムに適したモジュールの形態を検討する必要がある。水中における無線通信には音波、光、電波が媒体として用いられている。減衰量の低さから音波の利用が中心となりながら、それぞれの特性に合わせて使用用途の検討が行われている。モジュール間を無線通信で接続するには、同一機材内部における多点との高速通信を実現することが必要であり、電波の利用が期待される。

参考文献

1. **Moore, Steven W., Bohm, Harry and Jensen, Vickie.** *Underwater Robotics*. s.l. : Marine Advanced Technology Education Center, 2010.
2. **U.S. Navy.** Naval History and Heritage Command. [Online] [Cited: 7 17, 2017.] <https://www.history.navy.mil/>.
3. **海洋研究開発機構.** 無人探査機「かいこう」. (オンライン) (引用日: 2017 年 7 月 16 日.) <http://www.jamstec.go.jp/j/about/equipment/ships/kaiko.html>.
4. -. 深海巡航探査機「うらしま」. (オンライン) (引用日: 2017 年 7 月 17 日.) <http://www.jamstec.go.jp/j/about/equipment/ships/urashima.html>.
5. **Strategic Rototic Systems.** Strategic Rototic Systems Home Page. (オンライン) (引用日: 2018 年 7 月 29 日.) <http://www.srsfusion.com/>.
6. **井上洋平, 増本憲泰.** モジュール型ロボットの構成による機能拡張に関する研究-増解結機構の設計-. 出版地不明 : Proceedings of the 2013 JSME Conference no Robotics and Mechatronics, Tsukuba, 2013. ページ: 1A2-A05.
7. **石塚誠, 石井 和男.** マニピュレータを搭載した水中ロボットの開発-動作シミュレーションとモジュール構造設計に基づく水中マニピュレータの開発・設計-. 出版地不明 : 日本船舶海洋工学会論文集 第 6 号, 2007. ページ: 35-43.
8. **大室拓哉, 高橋隆行.** 水中ロボットのための電源内蔵型ワイヤレススラスタモジュールの開発. 出版地不明 : 計測自動制御学会東北支部 第 261 回研究集会, 2010. ページ: 資料番号 261-6 1-6.
9. **猿田祐平, 大室拓哉, 高橋隆行.** 湖沼調査用モジュール構造型小型水中ロボットの開発-メインモジュールの施策と基礎的評価-. 出版地不明 : Proceedings of the 2012 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, 2012. ページ: 2P1-I11(1-4).
10. **大室拓哉, 猿田祐平, 高橋隆行.** 湖沼調査用モジュール構造型小型水中ロボットの開発-汎用動力モジュールの開発-. 出版地不明 : Proceedings of the 2013 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, 2013. ページ: 2A2-N02(1-4).
11. **鷹箸修平, 五十嵐伸一, 高橋隆行.** 湖沼調査用モジュール構造型小型水中ロボットの開発-不攪乱柱状採泥モジュールの実現と評価-. 出版地不明 : Proceedings of the 2014 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, 2014. ページ: 1A1-H07(1-4).
12. **神尾終太, 高橋隆行.** 湖沼調査用モジュール構造型小型水中ロボットの開発-拡張状態オブザーバを用いた位置及び姿勢制御の検討-. 出版地不明 : Proceedings of the 2015 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, 2015. ページ: 2A2-D08(1-4).
13. **国土交通省.** 平成 26 年度版日本の水資源 第Ⅱ編 第 1 章 水の循環と水資源の賦存状況. (オンライン) (引用日: 2017 年 7 月 16 日.) <http://www.mlit.go.jp/tochimizushigen/mizsei/hakusyo/index5.html>.
14. **TELEDYNE Marine.** GAVIA AUV. [Online] <http://www.teledynemarine.com/gavia-auv/?BrandID=9>.
15. **Open Source Robotics Foundation.** ROS.org. (オンライン) (引用日: 2017 年 7 月 16 日.)

<http://wiki.ros.org/>.

16. **National Institute of Advanced Industrial Science and Technology**. OpenRTM-aist Official Website. (オンライン) (引用日: 2017年7月16日)
<http://www.openrtm.org/openrtm/ja/content/openrtm-aist-official-website>.
17. 関邦博. 海に潜る-高圧生理学の現在と未来-. 出版地不明: 日本物理学会誌, Vol. 54, No. 3, 1999. ページ: 192-197.
18. 山崎徹, ほか. SIP「次世代海洋資源調査技術」における産総研の2015年度の成果と今後の取り組み. 出版地不明: GSJ 地質ニュース Vol. 5 No. 8, 2016. ページ: 251-255.
19. 和辻智郎. 深海外部共生研究分野の成果と展望. 出版地不明: 日本微生物生態学会誌 Vol. 32 No. 1, 2017. ページ: 4-5.
20. 海洋研究開発機構. 有人潜水調査船「しんかい6500」. (オンライン) (引用日: 2017年7月16日.) <http://www.jamstec.go.jp/j/about/equipment/ships/shinkai6500.html>.
21. 内閣府. エネルギー戦略協議会(第2回)議事次第. (オンライン) (引用日: 2017年7月17日.) http://www8.cao.go.jp/cstp/tyousakai/juyoukadai/energy/2kai/haifu_energy_02.html.
22. 国際海洋環境情報センター. 図解 深海とは. (オンライン) (引用日: 2017年8月10日.) <http://www.godac.jp/deepsea.html>.
23. **Tritech**. ROV / AUV Side Scan. (オンライン) (引用日: 2017年9月10日.) <http://www.tritech.co.uk/media/products/side-scan-sonar-seaking-auv-rov.pdf>.
24. **BlueRobotics**. BlueRobotics Home Page. (オンライン) (引用日: 2017年9月10日.) <http://www.bluerobotics.com/>.
25. **PIXHAWK Project**. PX4 autopilot Home Page. (オンライン) <https://pixhawk.org/>.

第3章 モジュール型水中ロボットの開発

3-1 はじめに

第2章では、海中の探査を効率的に行うことや、より広範囲の同時計測を行うことを目的として、複数台の探査機材の同時運用が注目されていることを述べた。効率化を求めた複数台同時運用では、高性能な AUV の同時運用数を増やすことで、1回の運用航海における調査範囲を広げることが検討されている。一方で広範囲の同時計測では、低価格な探査機材を使用し、海域をカバーするように分布させることで、これまで得ることが難しかった任意の海域における時間変化というデータを入手することが検討されている。このように、複数台同時運用においてもその目的により求められている探査機材の形態は大きく異なり、それに合わせて使用される要素技術にも差異が生じる。

海域全体をカバーするような複数台同時運用では多くの探査機材を必要とすることから、機材1台当たりのコストを低減することは重要な課題のうちの一つである。コストの低減としてまず俎上に上がるのはセンサ、スラスタをはじめとした個別の部品の価格低減や使用する部品点数を減らすことであるが、求められる計測精度や機能、性能を実現するために高性能な部品を選択する必要がある場合も考えられる。より多くの状況でのコスト低減を目指すとなると、1度製作した部品の再利用が容易であることや、部品を要求に沿って変更する必要があるときに簡単に行えるなどといった、機材の構成方法に焦点を当てて検討することも手段の一つとして考えられる。本章では、要求に合わせた利用部品の変更を容易とする構造としてモジュール化について検討し、モジュール構造化を実現する例として、モジュール型水中ロボット実証試験機「MaNTA」を提案する。

3-2 モジュール型水中ロボット「MaNTA」

水中探査機器にとって、運用時の要望に応じて機能拡張を検討することは大きな課題となる。様々な先行研究がその課題を解決するための手段を提案してきているが、海中で利用可能であり、かつ運用形式を変更できるほどの変更自由度の高いモジュール型水中ロボットは提案されていなかった。本章では、上記を実現するコンセプトの一つとして、MCUV(Module-Composite Underwater Vehicle)を提案する。MCUVの概念図を Fig.3-1, 3-2, 3-3 に示す [1] [2] [3]。

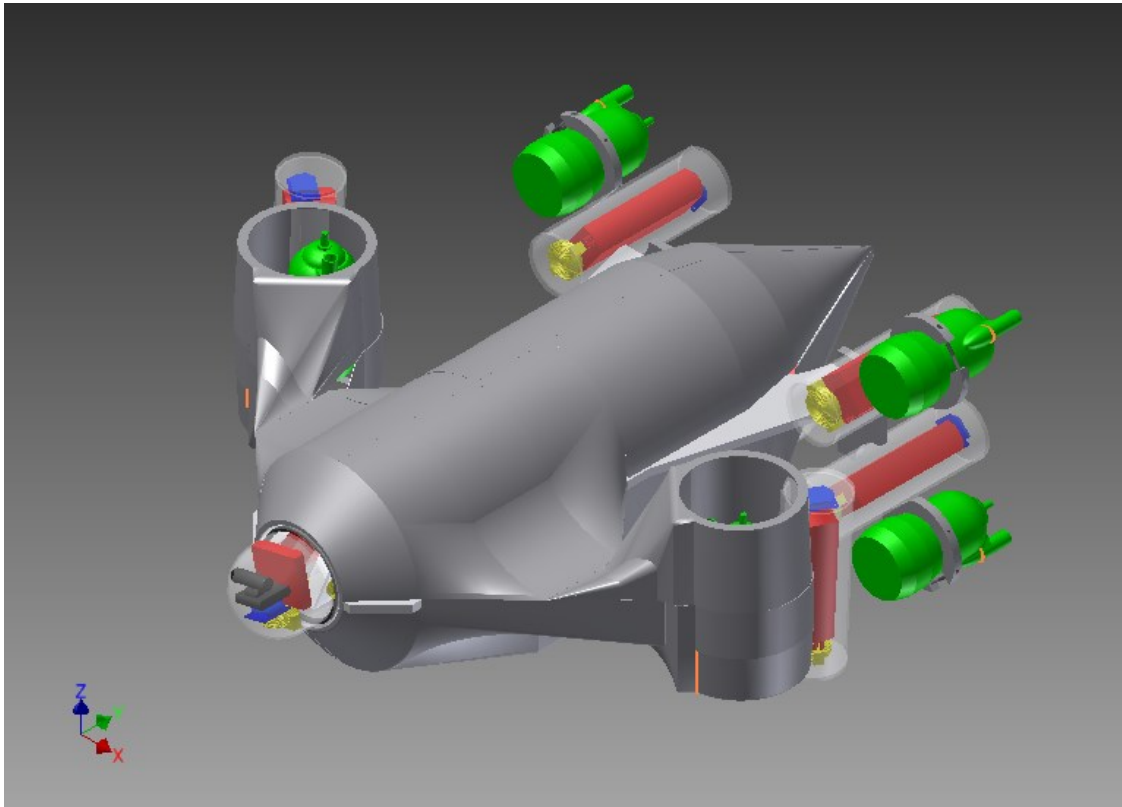


Fig. 3 -1 Overview of MCUV Concept Design : Hovering Type

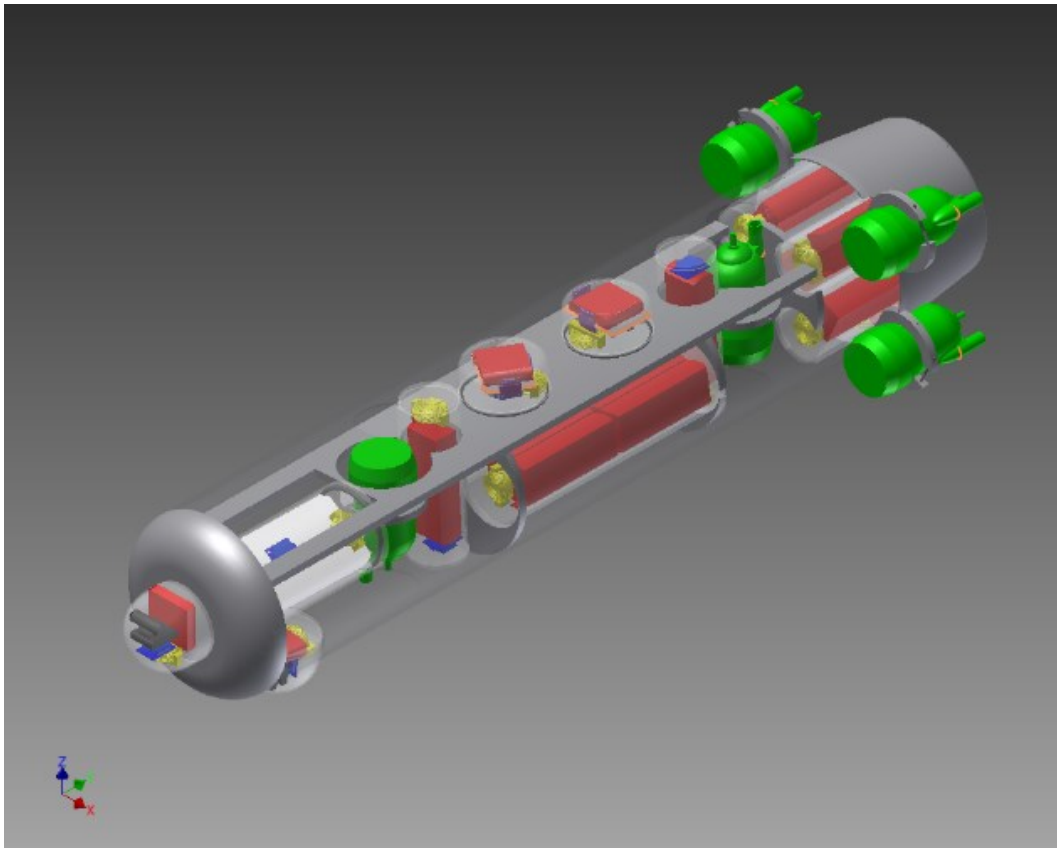


Fig. 3 -2 Overview of MCUV Concept Design : Cruise Type

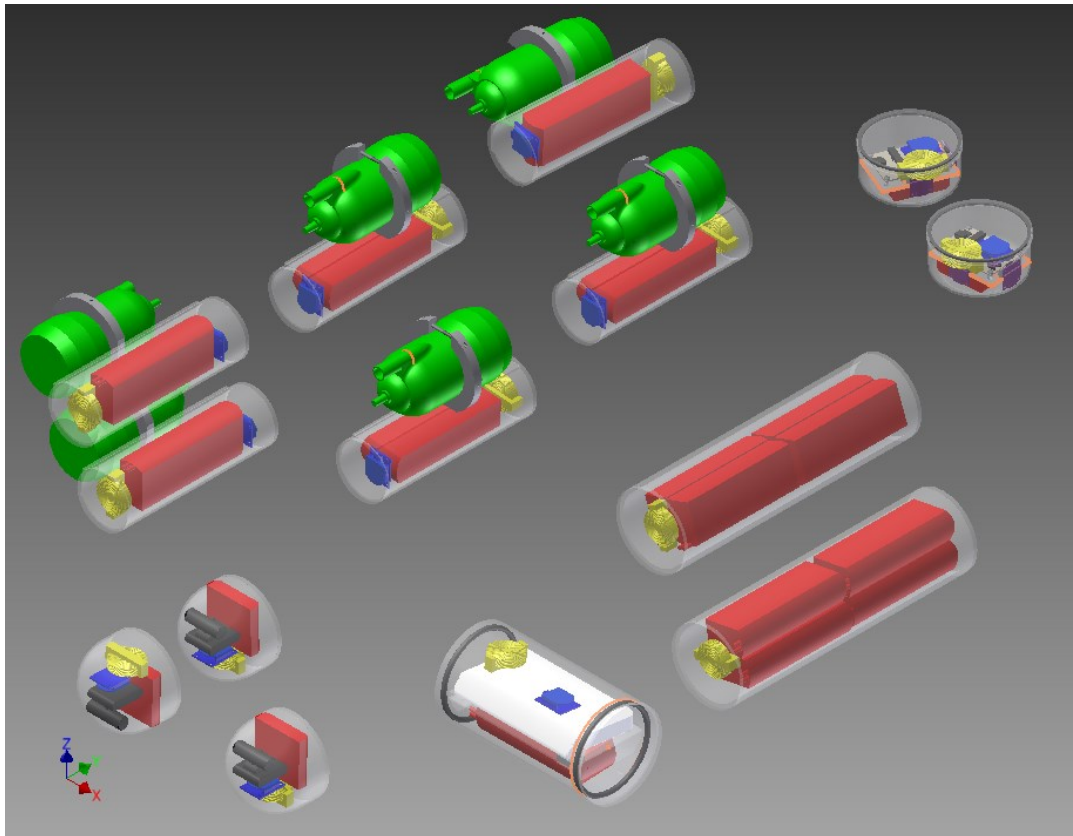


Fig. 3-3 Modules for MCUV

Fig. 3-1 と Fig. 3-2 はどちらも Fig. 3-3 のモジュールを使用しており，異なるフレームとフェアリングを取り付けることで，ホバリング型と航行型という異なる AUV 型水中探査機材を構成することを実現している．それぞれのモジュールは水中ロボットを構成する各要素(スラスタ，姿勢センサ，カメラなど)のほか，基本構成として制御ユニット，バッテリー，通信機器，非接触給電装置を持つ．これらを水密容器に封入することで，通常運用時はモジュールの水密を開けることなく運用及び充電を可能とした．Fig. 3-4 に標準的なモジュールの構成を示す．このように，MCUV は，水中ロボットを構成する各要素を，それぞれ別のパッケージで独立して動作可能なモジュールという単位に分割し，必要な機能を持つモジュールを通信によって同期的に動作させることでロボットとして振舞わせるというコンセプトである．

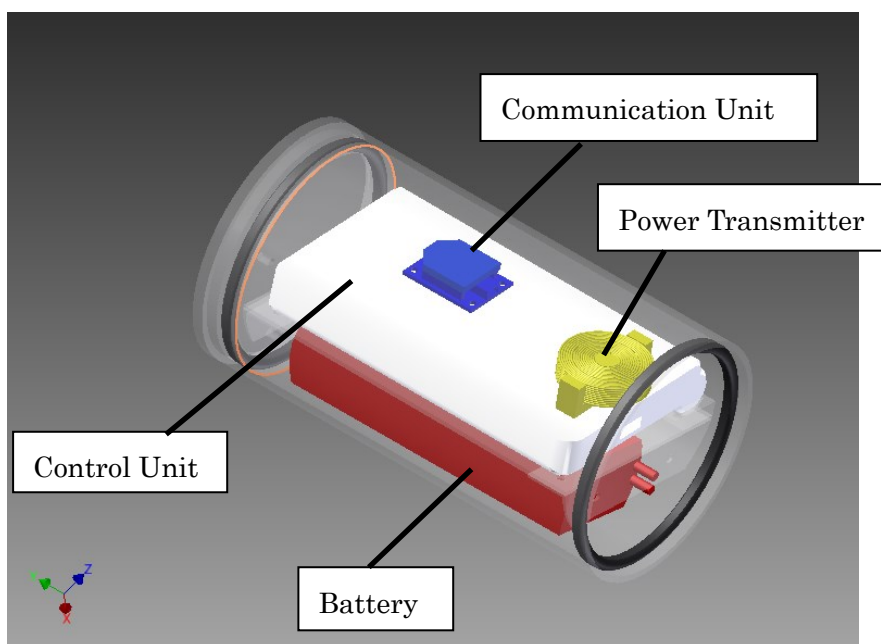


Fig. 3-4 Composition of Standard Module

モジュール同士を連携させながら動かすためには、先の段落で触れた通り通信を行うことが必要である。これまでの海中における通信では、音響または光を用いことが多数であった。これらの通信手法は、近距離で多数と通信を行うのには向かず、通信機器同士の位置の制約も大きいことから、複数のモジュール間での通信を必要とする MCVU での利用には適さない。そこで、本論文ではモジュール間の通信を第 4 章で提案する海中電波通信手法を用いて実現することとした。海中電波通信手法の適用により、今まで海中では困難であった短距離にある機器間での位置拘束性の低い高速通信を可能とした。Fig.3-5 に海中電波通信手法のイメージを示す。通信を行いたい 2 点間に電波伝搬用の経路を用意することで、周囲の海水による減衰を受けることなく電波による通信を実現する手法である。海中電波通信手法については、第 4 章および第 5 章で詳しく説明する。この MCVU のコンセプトを実証する試験機として製作したのが「MaNTA」(Module-composite and Non-Tethered AUV)である。「MaNTA」の外観を Fig. 3-6, 3-7, 3-8 に示す。この章の以下の段落では、「MaNTA」の設計、製造、動作確認およびモジュール構造の適用例について述べる。

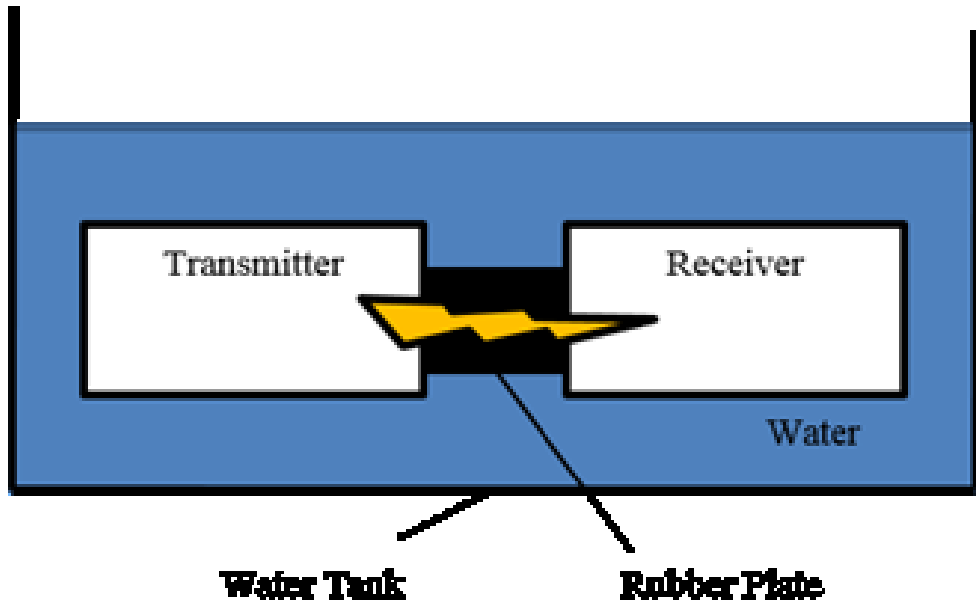


Fig. 3-5 Image of UHF Band Communication Method under the Sea

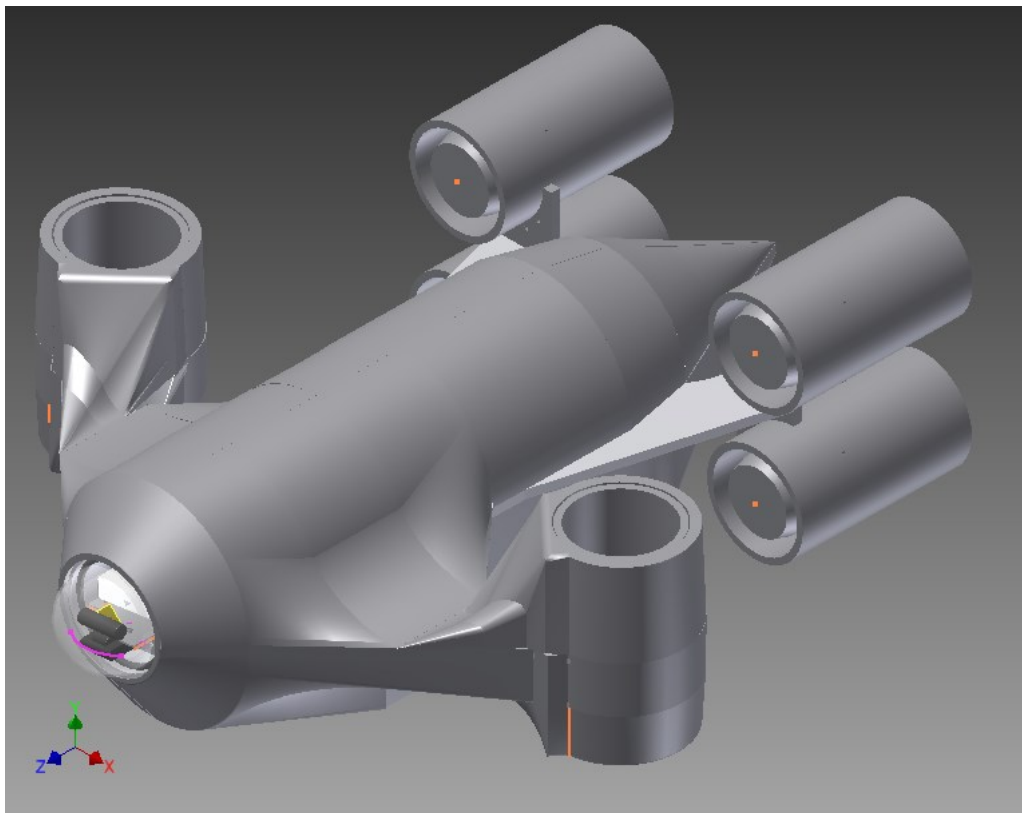


Fig. 3-6 Overview of MCUV MaNTA

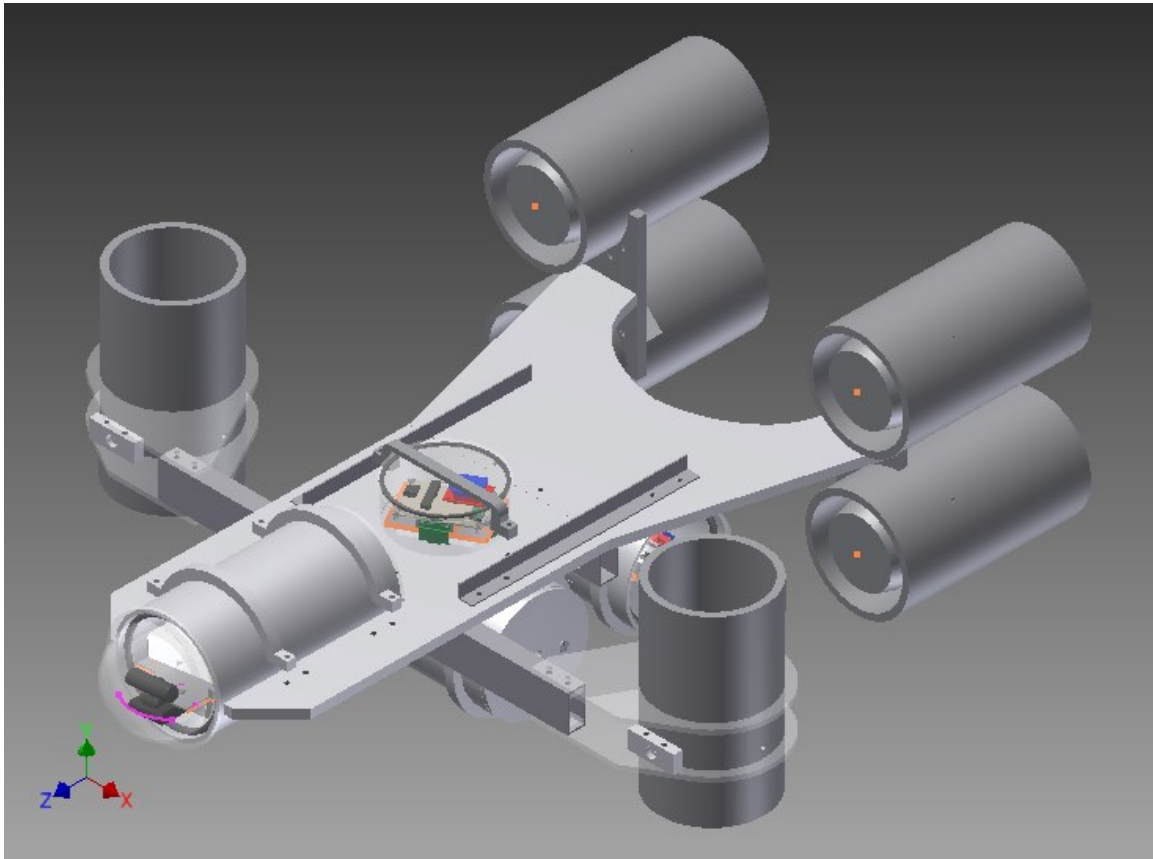


Fig. 3-7 Overview of MCUV MaNTA without Fairing

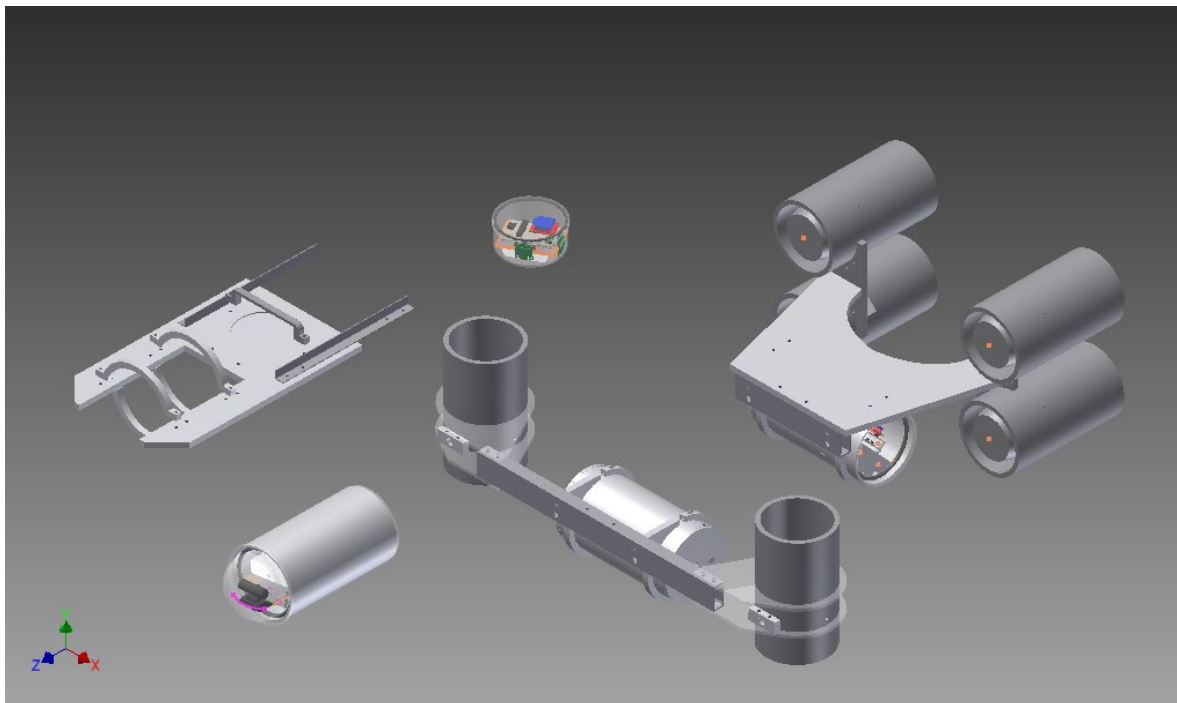


Fig. 3-8 Modules of MaNTA

3-3 「MaNTA」の製作

MaNTA は MCUV というコンセプトで水中探査機材を構成することについて、実現可否を確認するための実証試験機である。MaNTA は 2 つのスラストモジュール、センサモジュール、遠隔操作モジュール、カメラモジュールおよびフレーム、フェアリングで構成されている。

モジュールとはモジュール型水中ロボットを構成する要素である。各モジュールは最低限の機能として探査機材の機能の一部および基本構成である無線通信機器、非接触給電受信部、コントローラ、バッテリーを含み、モジュール毎に水密が行われているものとする。通信を無線で行うことにより接続用のコネクタが不要となるため、漏水や水密容器の強度低下の原因となる、水密容器へのコネクタを取り付けるための機械加工が不要となる。重量と浮力は中性浮量となるよう調整され、探査機材構成後のバラストなどによる重量調整の手間を減らせるようにしている。非接触給電技術を用いてバッテリーの充電を行うことにより、充電時の水密の開閉を必要としない構造にすることで、水漏れの原因の一つである蓋部分の開閉の回数を減らし、一度行った水密を保持できるようにしている。このように、モジュールはそれ単体で動作することが可能な構成であり、外部との通信を行うことで他のモジュールと連携が可能となるシステムである。

今回の実証において、MCUV としての機能分割の検証として重要度の低い非接触給電装置および各モジュールの中性浮量調整は割愛することとした。非接触給電装置の海中利用は本論文の内容とは別に研究が進められているため [4] [5]、将来的にこれらの成果を用いることを検討する。

1. スラストモジュール

スラストモジュールは、モジュールの基本構成に推力発生装置であるスラストを取り付けた、MCUV における推進力の発生源である。Fig.3-9, 3-10 に水平スラストモジュール、Fig.3-11, 3-12 に垂直スラストモジュールを示す。MaNTA の製作においては、同一方向に推力を発生する能力を一つの機能とし、水平スラストモジュール、垂直スラストモジュールとしてモジュール化した。このように、モジュール化はモジュール製作者が提供する機能がパッケージングされているものであり、スラスト単体をモジュール化するような機能を最小単位まで分割する必要は必ずしもない。水平スラストモジュール、垂直スラストモジュールとも、スラスト、スラストを支えるフレームおよびモジュールの基本構成である通信機器、バッテリー、マイコンを含めた制御回路、電源回路を有する。モジュールの基本構成は誘電体で製作した水密容器に収められ、O リングで止水している。

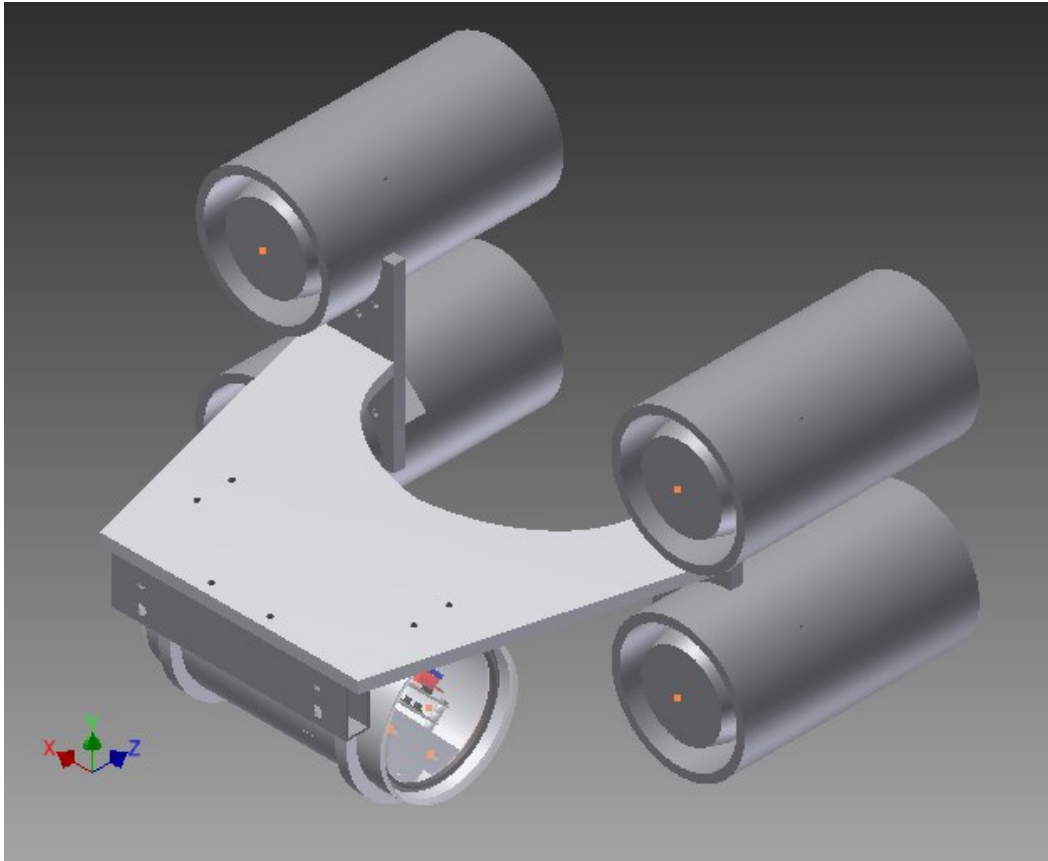


Fig. 3-9 3D Design of Horizontal Thruster Module



Fig. 3-10 Picture of Horizontal Thruster Module

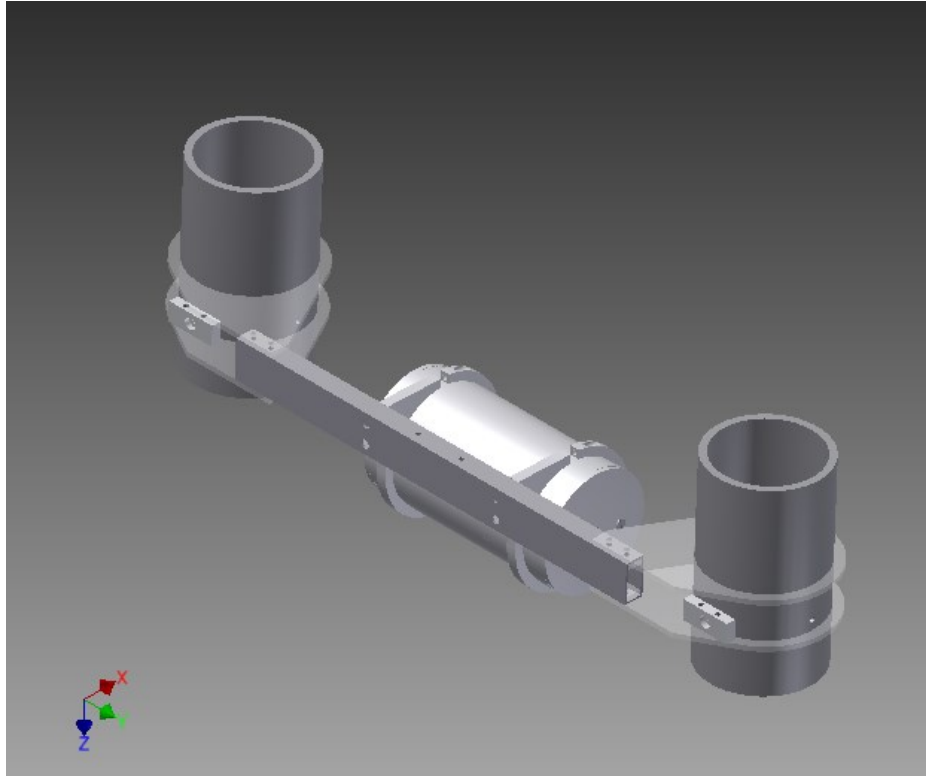


Fig. 3-11 3D Design of Vertical Thruster Module

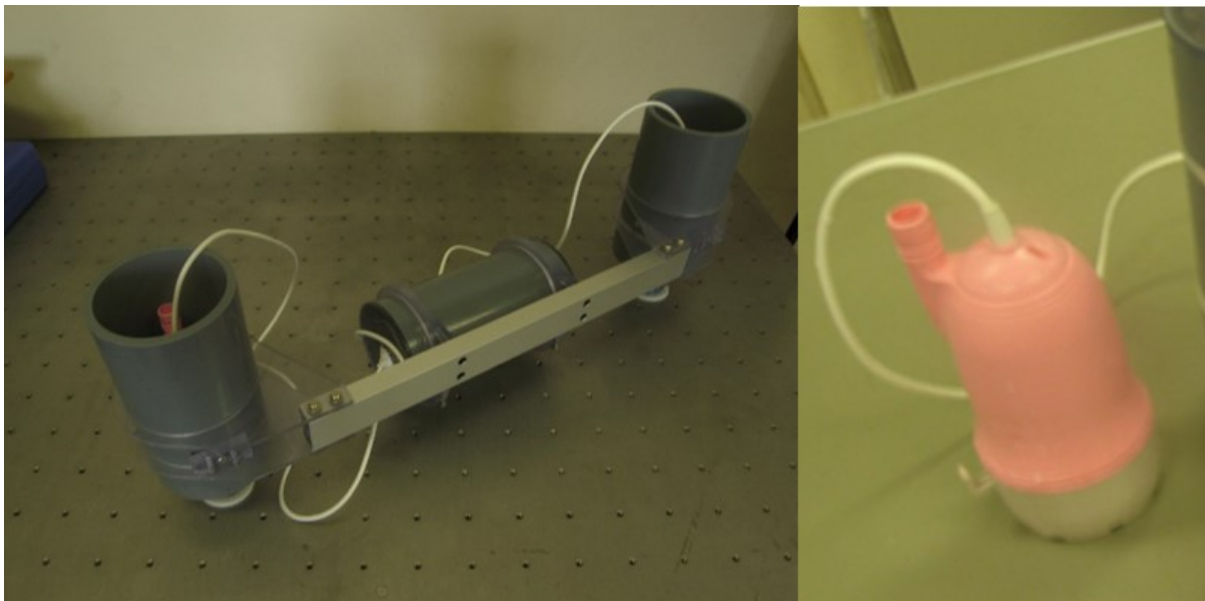


Fig. 3-12 Picture of Vertical Thruster Module

2. センサモジュール

センサモジュールは自己の姿勢計測を行うことを目的としたモジュールであり、モジュールの基本構成のほかに、個別機能として加速度 3 軸、角加速度 3 軸の計 6 自由度が計測可能な IMU を持つ。IMU で取得したデータは、マイコンで処理が行われ、通信装置を経由して必要なモジュールへ送信される。Fig. 3-13, 14 にセンサモジュールの外観図を示す。

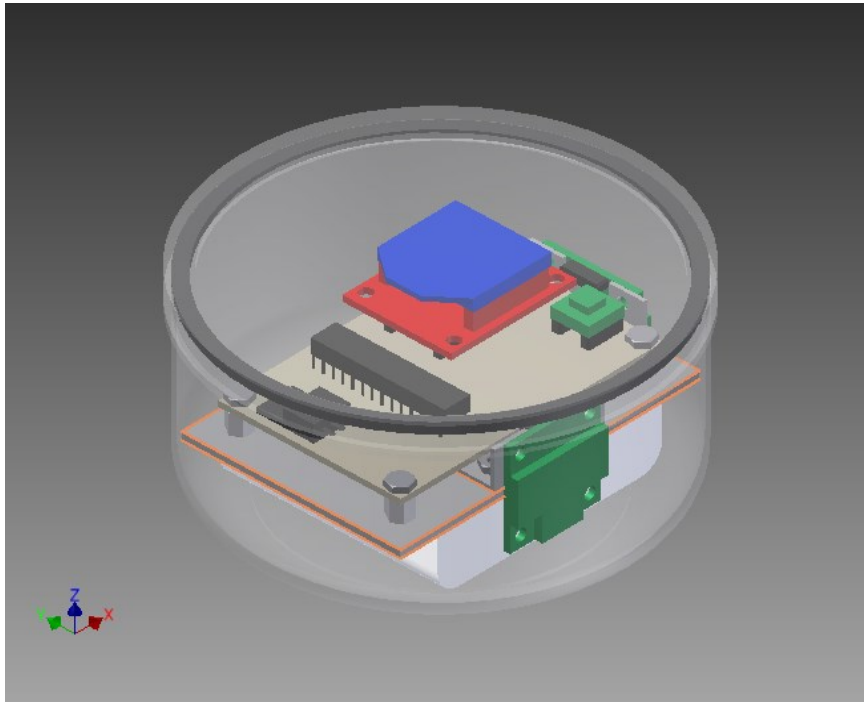


Fig. 3-13 3D DDesign of Sensor Module

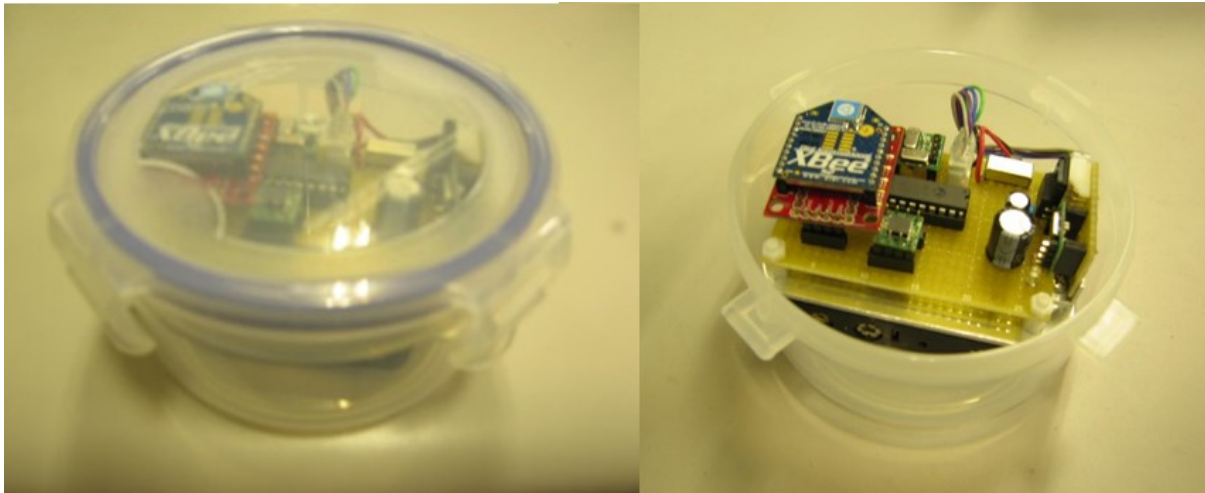


Fig. 3-14 Pictures of Sensor Module

Left : Overview

Right : Remove the waterproof rid

3. 遠隔操作モジュール（有線コントロールモジュール）

遠隔操作モジュールは有線コントロールモジュールとも呼称しており，陸上から MCUV を有線操作するためのモジュールである．パソコンに直接接続可能な通信装置を水密容器に封入し，通信線を経由して陸上のパソコンと接続している． Fig.3-15 に遠隔操作モジュールの外観図を示す．

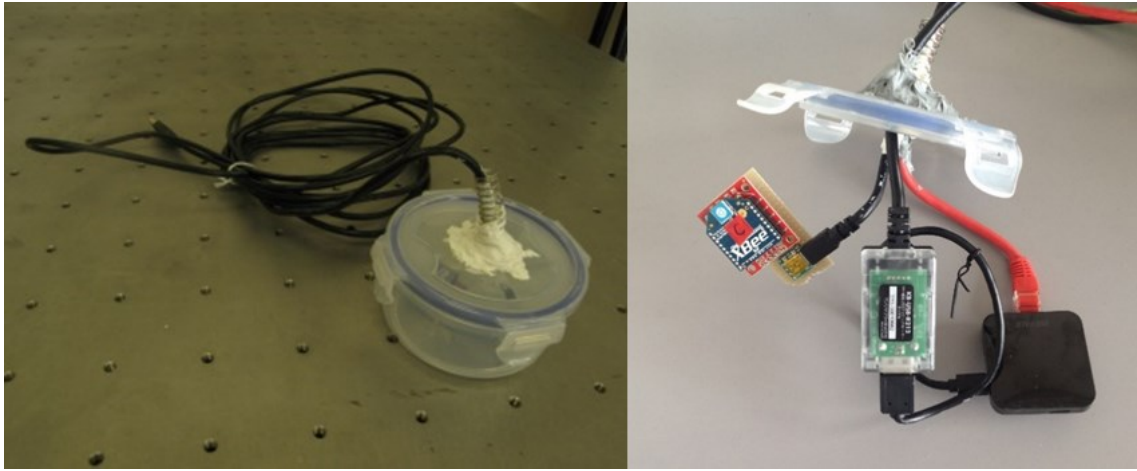


Fig. 3-15 Overview of Remote Control Module

Left : Overview

Right : Inside of waterproof case

4. カメラモジュール

カメラモジュールは、映像情報を取得するためのモジュールである。個別機能としてカメラを持ち、周囲の映像を取得する。取得した映像は、基本構成のひとつである通信素子を用いて他のモジュールに送信する。Fig.3-16, 17にカメラモジュールの外観図を示す。

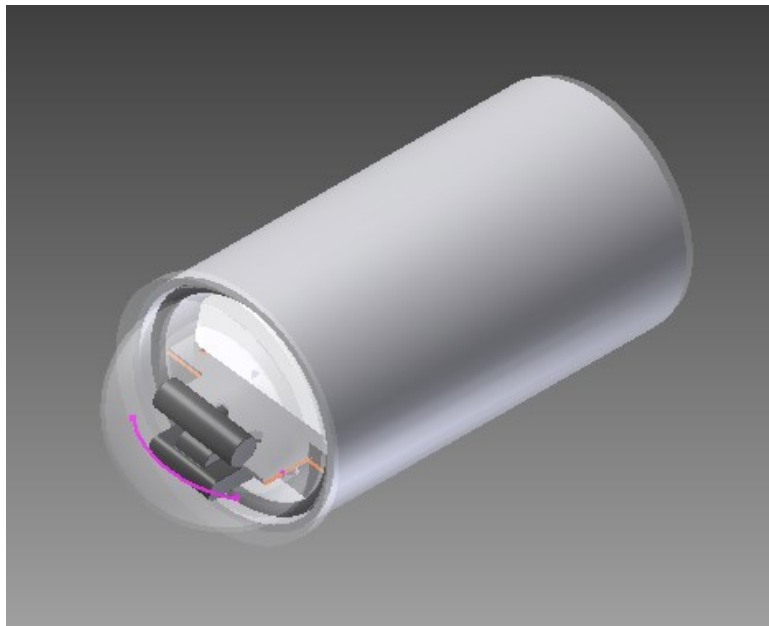


Fig. 3-16 3D Design of Camera Module



Fig. 3-17 Picture of Camera Module

5. フレーム

フレームには以下の3つの機能が要求される.

- 1.MaNTA の機体としての形状を保つという機械的強度を発揮すること
- 2.各モジュールの固定場所を提供すること
- 3.海中電波通信手法における電波の伝搬経路になること

上記を満たすために、フレームの素材は高い強度を有する誘電体であるエンジニアリングプラスチックを使用する。また、金属部材による補強を入れることで、第5章で紹介する海中電波通信手法の通信距離伸長手法を適用した状態となることが期待できる。Fig.3-18にフレームの外観図を示す。

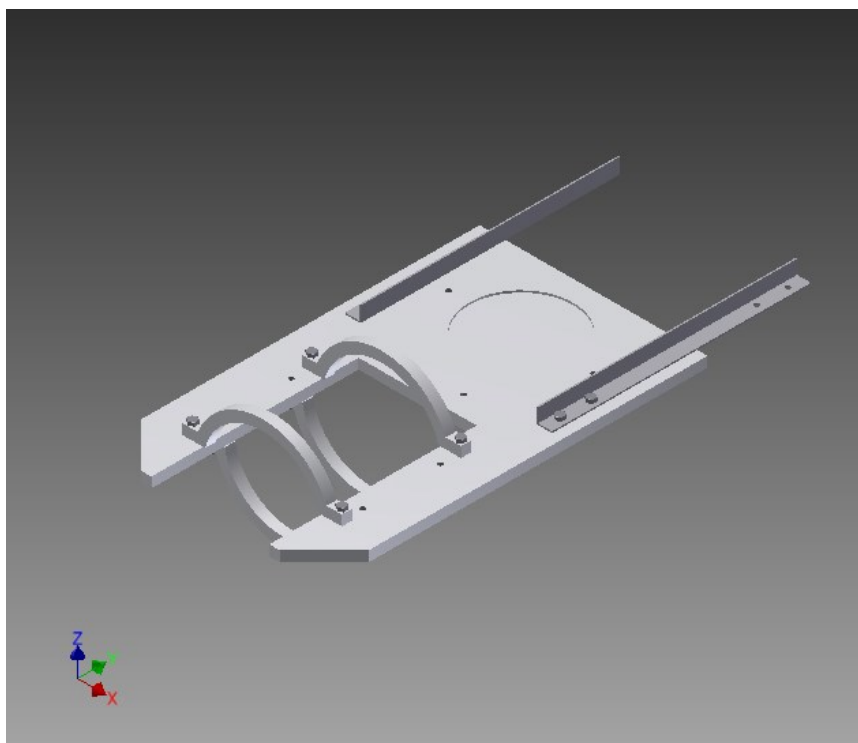


Fig. 3-18 3D Design of Frame

6. フェアリング

フェアリングは流体抵抗の低減を目的として用いられる覆いである。実運用を行う上では、エネルギー効率や最高速度を改善するため重要度の高い部品であるが、MaNTAの目的は水中探査機材をモジュールに分割すること、およびそれらを通信で相互に接続し、動作を確認することであるため、モジュールへの分割可否に直接関係のないフェアリングはMaNTAにおいては重要性が低い。本論文においては、フェアリングは設計のみ行い、製作については割愛した。設計したフェアリングを Fig.3-19 に示す。

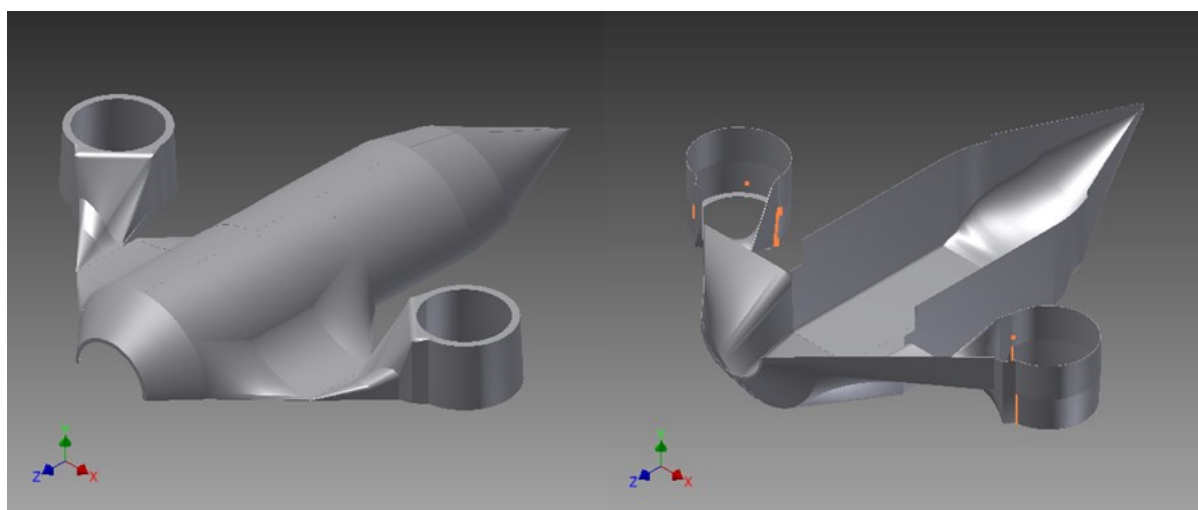


Fig. 3-19 3D Design of Fairing

3-4 動作確認

3-3 で製作したモジュールは、最終的に 1 台の水中ロボット「MaNTA」として組み上げた。使用するすべてのモジュールである、垂直スラストモジュール、水平スラストモジュール、センサモジュール、遠隔操作モジュール、カメラモジュールをフレームに固定することで、Fig.3-24 の動作確認の模式図、Fig.3-25 に動作確認の様子に示す MaNTA の機体を構成した。機体を構成したのちに、それを用いて水槽で動作確認を実施した。

動作確認では、MaNTA は ROV としての運用が行われた。遠隔操作モジュールを使用することで、陸上から MaNTA が操作可能な構成としている。陸上のパソコンが生成した動作信号は遠隔操作モジュールの通信素子を用いて MaNTA の各モジュールに送信される。同時に、カメラモジュールは映像を遠隔操作モジュールに送信し、遠隔操作モジュールのケーブルを通じて陸上のパソコンがカメラ映像を取得し、画面に表示する。センサモジュールは MaNTA 自身の姿勢情報を計測し、通信素子を使用して他のモジュールに送信することで、姿勢制御に活用する。MaNTA 動作確認時のデータの流れの例を Fig.3-26 に示す。

このように、動作確認として MaNTA の移動、カメラ映像の取得、姿勢情報の取得を行い、想定通りの動作を実現したことから、MaNTA を簡易な ROV として動作させることに成功した [6]。これにより、独立した機能を持つモジュールを通信によって接続し、水中探査機材として動作させるという MCVU のコンセプトは実現可能であることを実証した。

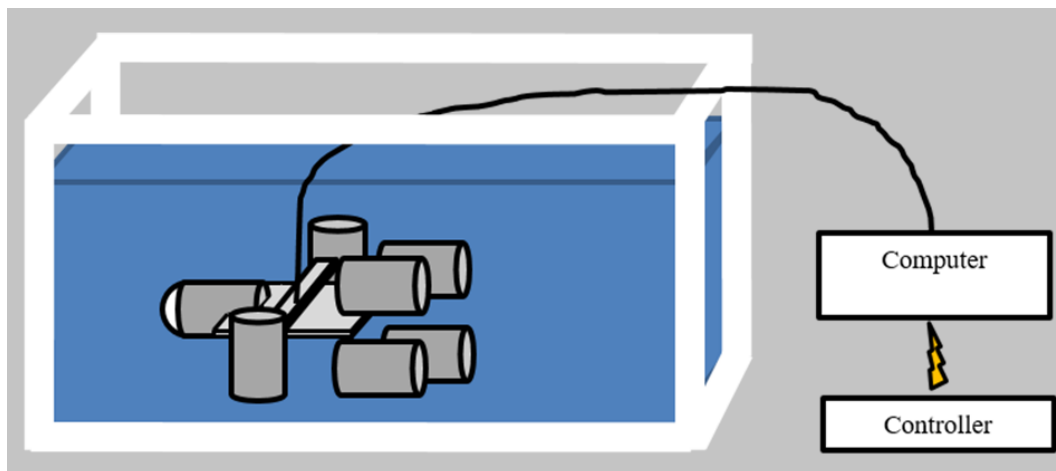


Fig. 3-20 Outline of MaNTA Confirmation

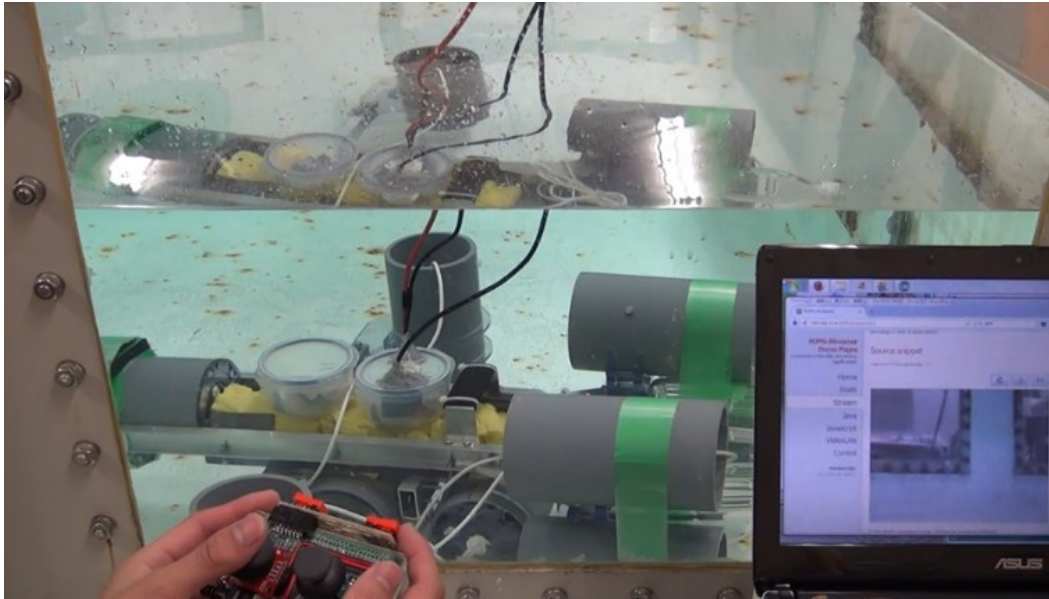


Fig. 3-21 Confirmation of MaNTA

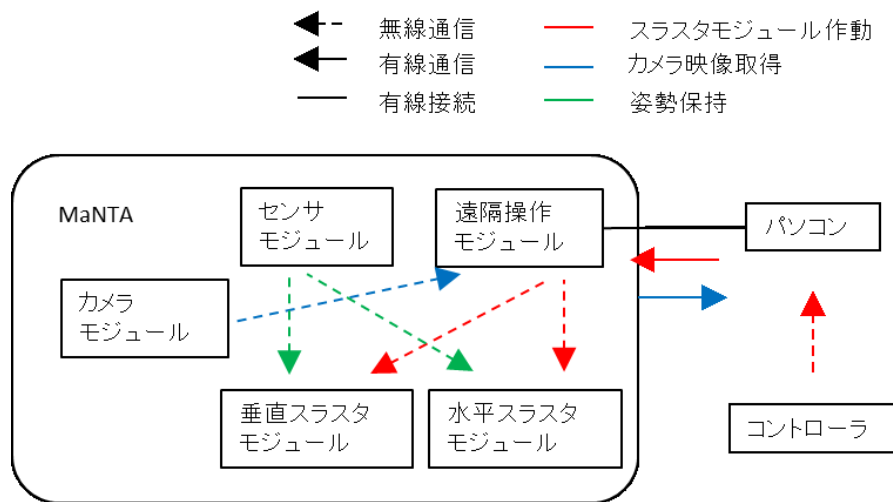


Fig. 3-22 Data Flow during Confirmation

3-5 MCUV と従来水中探査機材の比較

ここでは MaNTA の設計条件を元に、通常的水中探査機材の設計と MaNTA の設計を比較し、MCUV のコンセプトによって安価に機器が製作できる条件を検討する。

通常的水中探査機材の電源設計では、運用時間と速度によってバッテリーのおおよその容量が決まり、それに合わせて耐圧容器などの外形が決められる。また、追加機能が予測される場合、バッテリーに余剰の容量を持たせ、耐圧容器に追加機能用のコネクタが取り付けられるよう、機械加工をしておく必要がある。そうして完成した探査機材には、想定していた体積、重量、電源以下の追加機能しか搭載することは出来ない。多くのプロジェクトでは拡張部分より先に実現すべき機能があるため、拡張部の余裕を持つことはできず、結果として後からの機能追加は実質不可能となっている。

一方、MaNTAの実証確認においては、最初にスラスタモジュールと遠隔操作モジュールが製作され、単体モジュールでの構成可否の検証が行われた。その後、他のモジュールの完成に伴い随時MaNTAに追加し、動作確認が実施された。この時、カメラモジュールのような後から実装されたモジュールは、製作開始時点ではどのような機器を使用するか想定すらされていないにもかかわらず、最終的にMaNTAに組み込む段階では体積の確保と重量・浮量の調整のみで搭載を実現している。このように、MCUVはモジュールごとにバッテリーおよび耐圧容器寸法を決める。追加機能が発生するとしても、最初期の電力設計にそれを織り込む必要はないため、動作確認と実機制作を切り分けたうえで、同一の部品を再利用することが可能である。

水中機器は中性浮量の調整および全体の重量分布とスラスタの位置関係が非常に重要であり、運動性能、制御の難易度、エネルギー効率に大きく影響を与える。通常の集中型システム構成の水中探査機材であれば、重量物である耐圧容器を少なくすることが可能であり、また事前に耐圧容器、バッテリー、スラスタの位置関係をよく検討して最適な配置へ持ってくるのが可能である。スラスタの変更が発生した場合でも、重量バランスへの影響はスラスタの重量のみである。一方で、MCUVはモジュールごとに水密をとるため耐圧容器の量が多くなる。モジュール変更時の重量バランスへの影響も、集中型システム構成と比較して耐圧容器、バッテリーの分だけ影響が大きくなる。

水中機器の機能追加・変更への対応可否を決める要因のひとつとして、耐圧容器と耐圧容器外の機器を接続するためのコネクタの取り付け可否が挙げられる。集中型システム構成では、コネクタの追加加工が容易ではないこと、耐圧容器外との接続が多くコネクタを取り付ける場所がないことなど、物理的な制約が多く発生する。一方で、MCUVではモジュールがフレームに接触していれば通信が可能であるため、フレームへの固定ができればその機能を追加することが可能である。

上記の内容を総合すると、MCUVの設計手法が有利になるのは、以下のような場合であると言える。

- ・機能の追加、変更が予定されており、その内容が未定の場合。
- ・重量バランス、電力の設計に余裕を持たせられる場合。
- ・耐圧容器の大きさに対して、接続する外部機器が多い場合。
- ・既存のモジュールに流用可能なものが存在する場合。

反対に、以下のような場合はMCUVの設計手法は価格的に不利になると言える。

- ・決められた用途からの変更がない、又は変更内容の予想がつく場合。
- ・重量、電力で限界設計を行わなければならない場合。
- ・水中機器に求められる機能が限定的であり、耐圧容器と接続する機器が少ない場合。
- ・1点物を設計する場合、または設計変更なしで量産が行われる場合。

3-6 江戸っ子1号

MCUVのコンセプトが適用された例として江戸っ子1号が挙げられる [7]。江戸っ子1号は中小企業、大学・学術機関、金融機関の連携プロジェクトで製作された、フリーフォール型の深海探査機である。江戸っ子1号の構成を Fig.3-23 に示す。江戸っ子1号の耐圧容器には、規格品の

ガラス耐圧球が用いられており、耐圧球毎にそれぞれ別の機能を有している。耐圧球同士は海中電波通信手法を使用して接続しているので、ガラス耐圧球へのコネクタの施工という難易度の高い加工が不要となり、また漏水、圧壊のリスクも低減している。販売元の岡本硝子は江戸っ子 1号の事業化に合わせてフルデプスに対応した 13 インチガラス球の開発を行っており、このような簡単な構成で世界最深部の光学観測が可能である。

このように、移動機能を排して光学観測のみに特化した機体構成とすること、高価な水中専用品を可能な限り使わず、使用する場合でも流通量の多い規格品を選定して使用することで低価格な水中機器を実現している。また、小型のシステムであるため投入、回収で使用する運用母船を選ばない。よって、MCUV のコンセプトを使用することで、本論文で提案する観測システムに適した、安価に製造、運用が可能な探査機材の実現が可能であることが、江戸っ子一号プロジェクトを通じて実証されている。

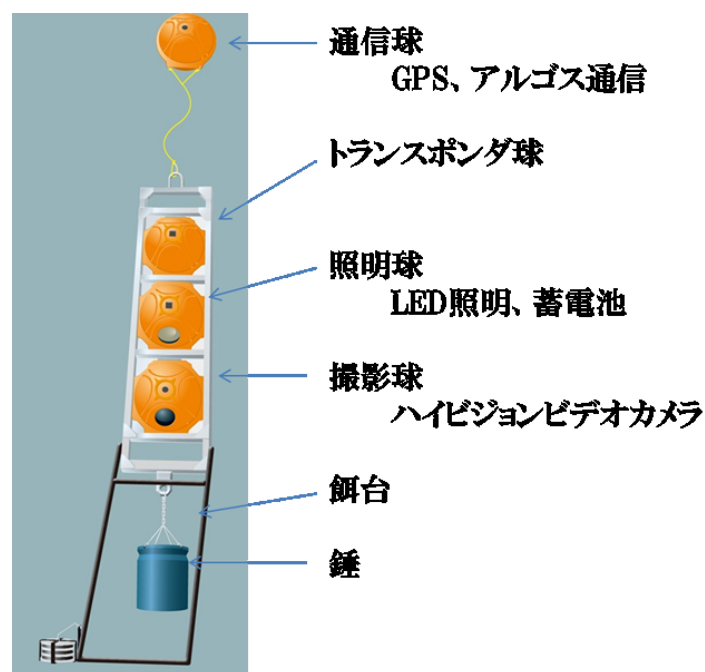


Fig. 3-23 Components of Edokko 1 [7]

3-7 まとめ

広範囲に大量展開し観測を行うための水中探査機材が持つ課題の一つとして、機材の価格を低減することが挙げられる。本章では、水中探査機材の構成手法として、部品の再利用が容易かつ任意の形態を構成可能とするため、水中探査機材の部品をモジュールという単位でパッケージングし、モジュールを組み合わせ期待を構成するというMCUVのコンセプトを提案した。このコンセプトを実証するため、実証試験機であるMaNTAを製作した。

本章でのMaNTAはスラスタ、センサ、遠隔操作、カメラの各モジュールおよびフレームと遠隔操作の陸上側PCから構成されている。各モジュールはそれぞれ個別の機能および無線通信機、バッテリー、マイコンを有し、独立して水密容器に収められている。これらをフレームに取り付け、フレームを通じた海中電波通信手法により通信を確立することでROVとして構成した。

動作検証を通じ、提案した **MCUV** のコンセプトによって水中で動作する機体を製作することが可能であることを示した。

MCUV はモジュール化を行うことで従来の水中探査機材と比べて個別部品の再利用性の高さと構成変更の容易さを実現している。また、海中電波通信手法を適用することにより、コネクタ数の不足や機械的な追加工を不要とすることが可能である。そのトレードオフとして、分割して水密容器を持つことにより重量、空間的には不利な要素がある。よって、**MCUV** が従来機器と比較して有利となるのは、機能の追加変更が多く、機材の重量や体積的な余裕が持たせられ、それらがまとまった数で製作される場合であると結論付けた。

MCUV のコンセプトは江戸っ子 1 号プロジェクトに採用され、機材を容易に構成することに貢献した。江戸っ子 1 号は 4 つの耐圧ガラス球にそれぞれ撮影、照明、通信、**GPS** という別々の機能を持たせ、1 つの機材として組み合わせられている。これらの耐圧ガラス球の間はゴムで作られた伝搬経路が取り付けられており、耐圧ガラス球間で連携をしながら観測を行える構成となっている。

このように、**MCUV** のコンセプトを提案し、試験機 **MaNTA** による検証および江戸っ子 1 号による実海域試験を通じ、コンセプトを使用して機材の構成が可能であり、また様々なメリットが得られることが確認できた。

参考文献

1. **OzawaMasayoshi** , **ShimizuEtsuro**. Design and Development of Module-Composite Underwater Vehicle. 出版地不明 : Proceedings of the OCEANS 2011 MTS/IEEE KONA Conference & Exhibition, 2011.
2. -. Development of Module-Composite Underwater Vehicle. 出版地不明 : Proceedings of ISME KOBE 2011 9th International Symposium on Marine Engineering, 2011. ページ: B6-2.
3. 清水悦郎 , 小澤正宜. 水中ロボット. 特許第 5791044 号 PCT 国際出願, 2011 年 9 月 16 日.
4. **FukudaH**, ほか . New Concept of an Electromagnetic Usage for Contactless Communication and Power Transmission in the Ocean. 出版地不明 : Proceedings of 2013 IEEE International Underwater Technology Symposium, 2013. ページ: UT2013-1127.
5. **KurodaJ**, ほか. Underwater Wireless Charging Antenna for UUV. 出版地不明 : MAST ASIA Tokyo 2017, 2017.
6. 小澤正宜, 清水悦郎 , 松岡諒. MCUV MaNTA の製造. 出版地不明 : ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, 2016. ページ: 1A2-17a6.
7. 江戸っ子 1 号プロジェクト. フリーフォール型深海探査機 江戸っ子 1 号. (オンライン) (引用日: 2017 年 9 月 19 日.) <http://edokko1.jp/>.
8. **OzawaMasayoshi**, **ShimizuEtsuro** , **MatsuokaRyo**. Development of Camera Module for Module-Composite Underwater Vehicle. 出版地不明 : The Proceedings of the Twenty-sixth (2016) International Ocean and Polar Engineering Conference, 2016. ページ: 505-510.

第4章 海中電波通信手法の開発

4-1 はじめに

これまで海中の通信として多く求められていたのは、探査機材と母船や離れた探査機材同士でやり取りを行うための通信であり、長距離を伝搬させることが当たり前であった。そのため、低速であるが海中での減衰が少ない音響を用いた通信が主に用いられてきた。しかし、第3章で提案したMCUVのコンセプトや、AUVの水中ステーションへのドッキングといった、比較的近距离で高速の通信を行うというこれまでと異なるニーズが出始めている。音波はその特性上通信速度に限りがあり、また散乱が大きくなることから近距离での通信には向いていないため、海中での特別な通信用途向けに、光と電波を媒体とした通信の需要が表れ始めている。

本章では特に、第3章で示したMCUVのような、海中内の狭所における通信技術として海中電波通信手法を提案する。本通信手法の考え方を示したのち、基本的な通信特性を明らかにし、適用に際しての指針を示す。通信特性の検証においては、Austらの取った方法を参考とし、実験で得られた結果を通じて明らかにするという方針とする [1]。

4-2 海中電波通信手法の概容

4-2-1 電波伝搬の基礎

4-2-1-1 電磁波の減衰

電波とは特定の帯域の電磁波のことを指し、電場と磁場が交互に鎖状に繋がりエネルギーが伝搬していく現象であると言われている。Fig4-1にアンテナから発射された電波の伝搬するイメージを示す [2]。電磁波のうち波長が0.1[mm]以上のものを電波と呼び、0.1 [mm]-20[nm]を光、20[nm]-30[pm]をX線、30[pm]以下をγ線と呼称している [3]。Fig4-2に電磁波の分類を示す [2]。

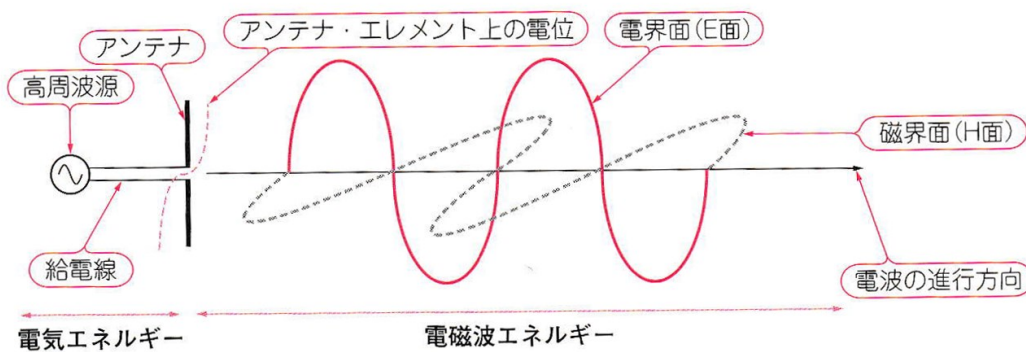


Fig. 4-1 Image of Electromagnetic Wave Propagation [2]

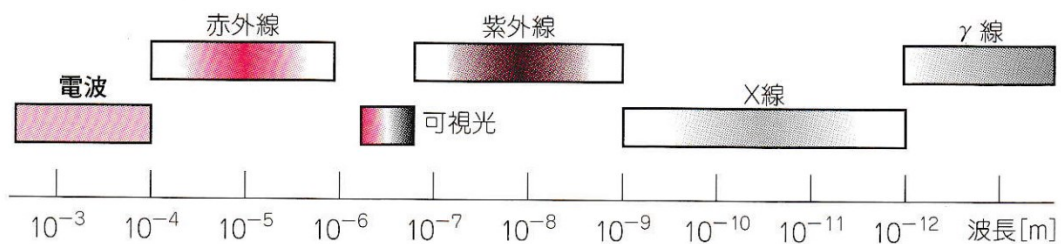


Fig. 4-2 Classification of Electromagnetic Wave [2]

電波が伝搬する際、電波の保有するエネルギーは伝搬とともに低下する。低下する要因には 2 種類あり、放射によるエネルギーの散逸と、伝搬経路の持つ導電性によるエネルギーの消費である。放射によるエネルギーの散逸のイメージを Fig.4-3 に示す [3]。電波が点波源から発生すると仮定した場合、電波のエネルギーは全方位に等しく放射される。距離 r だけ伝搬したところで面積 dA の範囲の電波のエネルギーが利用できるすると、利用可能なエネルギー E_r は Formula 4-1 によって表される。

$$E_r = E_0 \frac{dA}{4\pi r^2} \quad \text{Formula 4-1}$$

$$dA = r^2 \sin \theta d\theta d\phi$$

ここで、 E_0 :点波源が発生するエネルギー、 θ :z 軸からの傾き [deg]、 ϕ :x 軸からの傾き [deg] である。拡散は電波のエネルギーを放射する方向性に寄与する問題である。電波の送受信に使用するアンテナは、その構成方法によって放射する方向性を制御することが可能な機材であり、使用するアンテナの種類によってその利得を調整することが可能である。

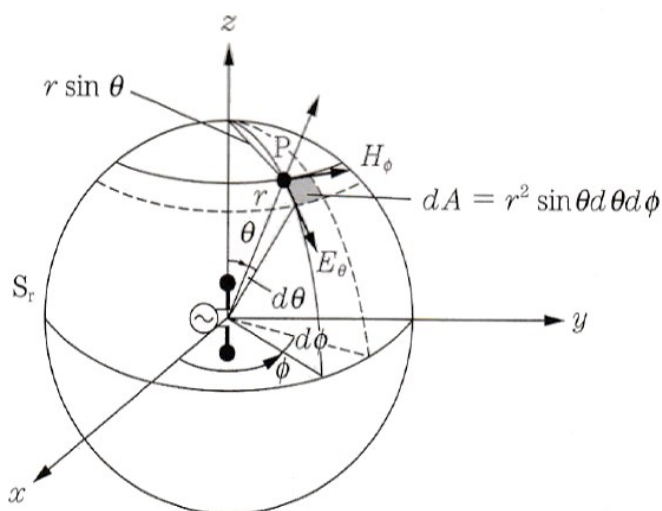


Fig. 4-3 Image of Electromagnetic Wave Radiation [2]

もう一つの低下要因である，伝搬によるエネルギーの消費のイメージを fig.4-4 に示す [3]．真空中を z 軸方向に伝搬する平面波は Formula4-2 によって表される．

$$\begin{cases} \dot{E}(r) = [\dot{E}_x & 0 & 0], \dot{E}_x(z) = \dot{E}_1 e^{-jk_0 z} \\ \dot{H}(r) = [0 & \dot{H}_y & 0], \dot{H}_y(z) = \dot{H}_1 e^{-jk_0 z} \end{cases} \quad \text{Formula 4-2}$$

ここで， $\dot{E}(r)$:観測点 r における電界[V/m]， \dot{E}_x : $\dot{E}(r)$ の x 方向成分[V/m]， $\dot{E}_x(z)$:波源から距離 z [m]における電界[V/m]， \dot{E}_1 :波源における電界[V/m]， k_0 :真空中の波数[rad/m]， $\dot{H}(r)$:観測点 r における磁界[A/m]， \dot{H}_y : $\dot{H}(r)$ の y 方向成分[A/m]， $\dot{H}_y(z)$:波源から距離 z [m]における磁界[A/m]， \dot{H}_1 :波源における磁界[A/m]である．また， k_0 は Formula4-3 によって表される．

$$k_0 = \omega \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} \quad \text{Formula 4-3}$$

ここで， ω :角周波数[Hz]= $2\pi f$ ， f :周波数[Hz]， ε_0 :真空中の誘電率= 8.854×10^{-12} [F/m]， μ_0 :真空中の透磁率= $4\pi \times 10^{-7}$ [H/m]である．真空中は導電率 $\sigma = 0$ [S/m]の理想的な伝搬が行われるが，実在する物質は $\sigma \neq 0$ [S/m]の損失性媒質であるため，伝搬時に減衰が発生する．減衰を考慮した伝搬は Formula4-4 によって表される．

$$\begin{cases} \dot{E}(r) = [\dot{E}_x & 0 & 0], \dot{E}_x(z) = \dot{E}_1 e^{-jkz} \\ \dot{H}(r) = [0 & \dot{H}_y & 0], \dot{H}_y(z) = \dot{H}_1 e^{-jkz} \end{cases} \quad \text{Formula 4-4}$$

ここで k :損失媒質中の波数[rad/m]であり，Formula4-5 によって与えられる．

$$k = \omega \sqrt{\varepsilon \mu} = \beta - j\alpha \quad \text{Formula 4-5}$$

ここで ε :複素誘電率[F/m]， μ :透磁率[H/m]， α :減衰定数[Np/m]， β :位相定数[rad/m]であり， ε は Formula4-6 で示すとおり導電率を誘電率 ε に組み込んだ表現である．

$$\varepsilon = \varepsilon \left(1 - j \frac{\sigma}{\omega \varepsilon} \right) \quad \text{Formula 4-6}$$

また， α と β はそれぞれ Formula4-7, 4-8 によって表される．

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\varepsilon \mu}{2}} \sqrt{\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \varepsilon} \right)^2} - 1} \quad \text{Formula 4-7}$$

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\varepsilon \mu}{2}} \sqrt{\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \varepsilon} \right)^2} + 1} \quad \text{Formula 4-8}$$

損失性媒質中の電界と磁界を α ， β を用いて表すと Formula4-9 のとおりとなる．

$$\begin{cases} \dot{E}_x(z) = \dot{E}_1 e^{-\alpha z} e^{-j\beta z} \\ \dot{H}_y(z) = \dot{H}_1 e^{-\alpha z} e^{-j\beta z} \end{cases} \quad \text{Formula 4-9}$$

以上より，損失性媒質中を電波が伝搬する場合，Fig.4-4 に示す通り $e^{-\alpha z}$ に比例して減衰する．

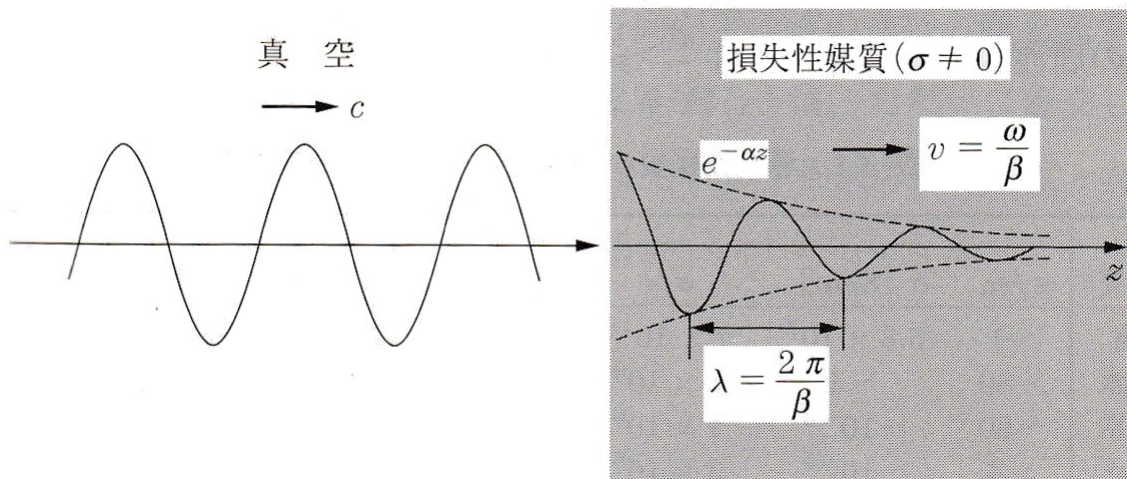


Fig. 4-4 Attenuation of Electromagnetic Wave [3]

Formula 4-4 から 4-9 で示した通り，損失性媒質中の導電率 σ 及び角周波数 ω が大きいほど減衰定数が大きくなり，伝搬時の損失が大きくなる．海洋関係者に広く知られているとおり，電波は海中では減衰が大きくほとんど通じないというのは，海水が良導電体であり，減衰定数が空気中と比べ非常に大きいため，実用に足る距離を伝搬する前に検出不可能なレベルまでエネルギーが減衰してしまうからである．

4-2-1-2 伝搬経路内の伝搬形式

伝搬経路の材質と同様に重要なのが，伝搬経路の断面積である．本論文において海中電波通信手法が MCUV を実現するための手法として有望視している要因のひとつに，薄板での通信が可能であることが挙げられる．電波の伝搬形態はその伝搬経路の断面形状，寸法により大きく異なる．波長の数倍という十分に広い空間を確保できる場合，その伝搬は自由空間伝搬となり，伝搬を直線で近似して考えることができるようになってくる．一方で，海中電波通信手法のような伝搬経路が波長の寸法前後の狭い領域では，モード伝搬が主流となり，伝搬形態を考えると導波管の理論を考慮する必要がある．モード伝搬状態では，伝搬経路内部の端部において波の変位が 0 になる(端部に波の節がくる)電波しか存在できない．Fig.4-5 に導波管内を TE_{01} モードで伝搬する電磁波を示しているが，この図が示す通り管の端部である y 軸の 0 と a の点において，電界強度が 0 になっていることが確認できる．これは伝搬経路内部に電波が進入するときの角度が，伝搬経路の形状によって決定すると言い換えることができる．経路内で節の数が 0 になるものは基本モード，節の数が n 個になるものを n 次の高次モードと呼び区別する．表記方法としては，進行方向に対して電界の変化がない波を TE 波，磁界の変化がない波を TM 波と呼び，伝搬経路の高さ方向 a と幅方向 b にそれぞれ波の腹がいくつ存在するかによって TE_{ab} モード， TM_{ab} モードと呼称する．基本モードである TE_{01} モードは伝搬経路幅方向の電界の節の数 0，腹の数 1 で高さ方向には分布を持たない伝搬状態であり，最も伝搬損失が小さくなる．

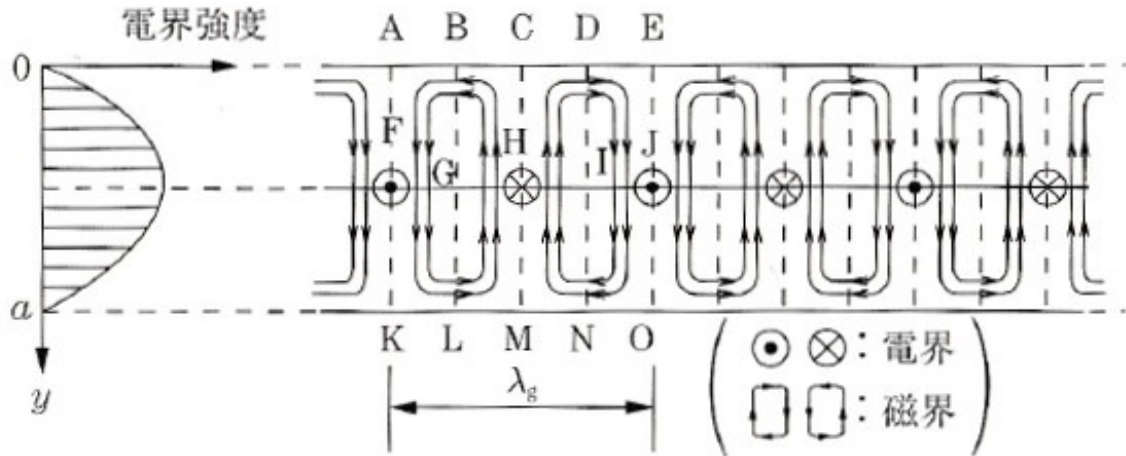


Fig. 4-5 TE₀₁ Mode Propagation in Waveguide [3]

4-2-1-3 海中での電波利用方法

伝搬損失が大きな海中で電波を用いる手段として、これまでに3種類の手法が提案されている。1つ目は低周波数帯を用いる方法 [4]、2つ目は海底を伝搬させる方法 [5]、3つ目は近傍界の減衰を抑えることで全体の減衰量を減らすという方法 [6]である。

電波の利用は軍事的な目的から始まっており、陸上ではレーダーによる探知及び通信での利用が進められてきた。海中での電波による通信は、潜水艦との通信を目的としてこの時に研究開発がなされており、様々な知見が得られている。Formula4-7にも示されている通り、電波の減衰量は周波数に反比例して大きくなっていく。このため、より低い周波数の電波を使用して通信を行うことで、通信距離を延ばすことが可能である。潜水艦との通信を考えた場合、VLF(3-30[kHz])を使用して空中での水平距離 20[km]ののち、水面下 5-10[m]程度の通信が実現可能である [4]。この手法は提示した3手法の中で最もよく知られており、近年のデジタル処理技術の進展によって比較的高い周波数帯での利用が可能になってきている [7]。欠点としては、長距離の通信を可能とするためには低い周波数を使用する必要があるため、通信速度が遅くなること、アンテナが大きくなることが挙げられる。

海洋において、電波が海水を通過して通信を実現することは物理法則的に難しい。しかし、海底に設置した計測器などであれば、電波は海水中の伝搬の代わりに海底を伝搬していくことが可能であるため、これを利用することで海底と陸上間の通信が実現可能であるという提案がされている [5]。土中の伝搬は組成中に含まれる水分量によって減衰特性が変化することが知られており、比較的精度のよい経験式や Fig.4-6 のような周波数特性表も提案されている [8]。

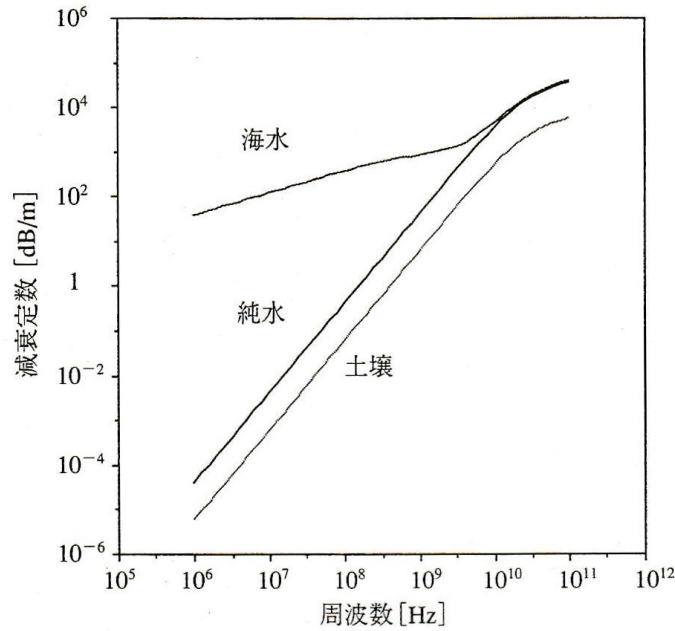


Fig. 4-6 Diagram of Frequency Characteristics [8]

土壌は海水と比較して非常に低い減衰定数であるため、1つ目の手法として示した低周波数の利用に比べて高い周波数帯が利用できる。そのため、低周波の利用と比べ通信速度の向上やアンテナの小型化が期待できる。一方、通信を行う機器が海底に着底している必要があることや地底内部の様子が不明であり、金属を多く含むなどで導電率の高い地質が途中に入ってしまうと通信ができなくなるが、それを事前に知ることが難しいということが欠点として挙げられる。

電波伝搬は近傍界と遠方界に分けて考えられる。伝搬損失の大部分は近傍界で発生し、遠方界ではその損失は低く一定となっている。Al-Shamma'a [9], Lucas [10] [11], 吉田 [6] [12]らはこの近傍界での損失に着目し、ここでの減衰を抑える工夫をすることで海中においても通信距離を延ばす手法を提案した。今までに提案されている内容は MHz 帯の利用であるため、陸上機器と比べると通信速度は遅くなるが、海中での電波利用を促進する画期的な提案であり、さらなる研究の進展が望まれるところである。これらの提案の欠点は、近傍界の損失を抑えるためにアンテナを純水などの導電率の低い物体で満たした中に入れたうえで水密容器に収める必要があることである。小型の水中機器に適用する場合は体積、重量的に不利になることが考えられる。

4-2-1-5 高周波数帯無線通信の規格

一般消費者向けに広く販売されている無線機器として、Wi-Fi, ZigBee, Bluetooth などの規格があるが、これらはすべて ISM バンドと呼ばれる周波数帯が使用されている。ISM バンドとは通信以外の用途に広く用いるために設定された帯域であり、設定時の趣旨は電子レンジのような高出力で周囲の通信状況に影響を及ぼす可能性のある機器が利用することで、他の通信機器に影響を与えないようにすることを目的としている。ISM バンドは 2.4[GHz]のほか、ラジコンで使用されている 20[MHz]や 40[MHz]帯、アメリカのみ設定されている 900[MHz]帯、気象レーダーでも使用されている 5[GHz]などが存在する。通信の速度と機器の小型化の観点から、無線 LAN 規格(IEEE 802.11)の多くでは 2.4[GHz]帯と 5[GHz]帯が使用されている。

4-2-2 提案手法

海中電波通信手法は、通信を行いたい2点間に誘電体で作られた伝搬経路を配置し、そこを通じて電波の伝搬を行うことで、海水による減衰の影響を排し、電波による通信を成立させるという手法である [13] [14]. Fig.4-7, 4-8 に海中電波通信手法のイメージと構成を示す.

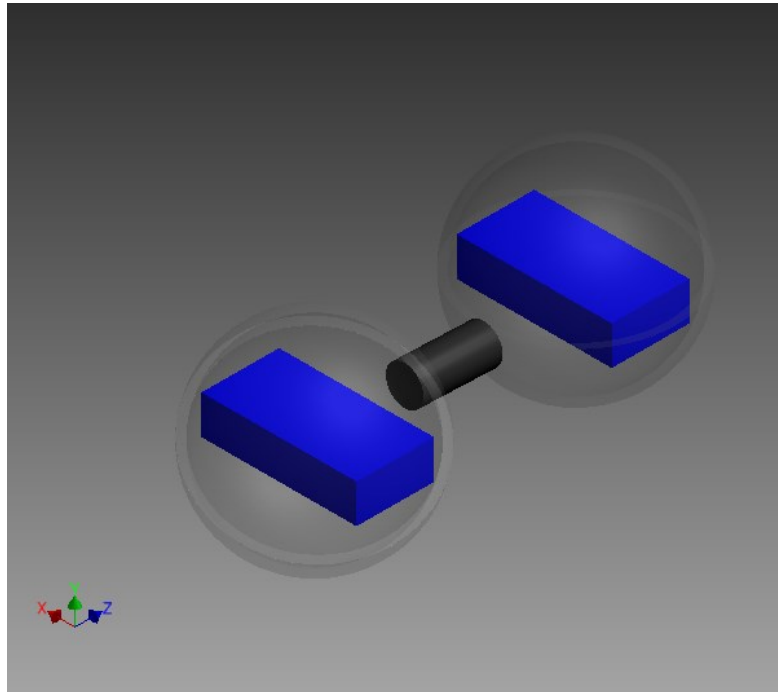


Fig. 4-7 Image of UHF Band Communication Method under the Sea

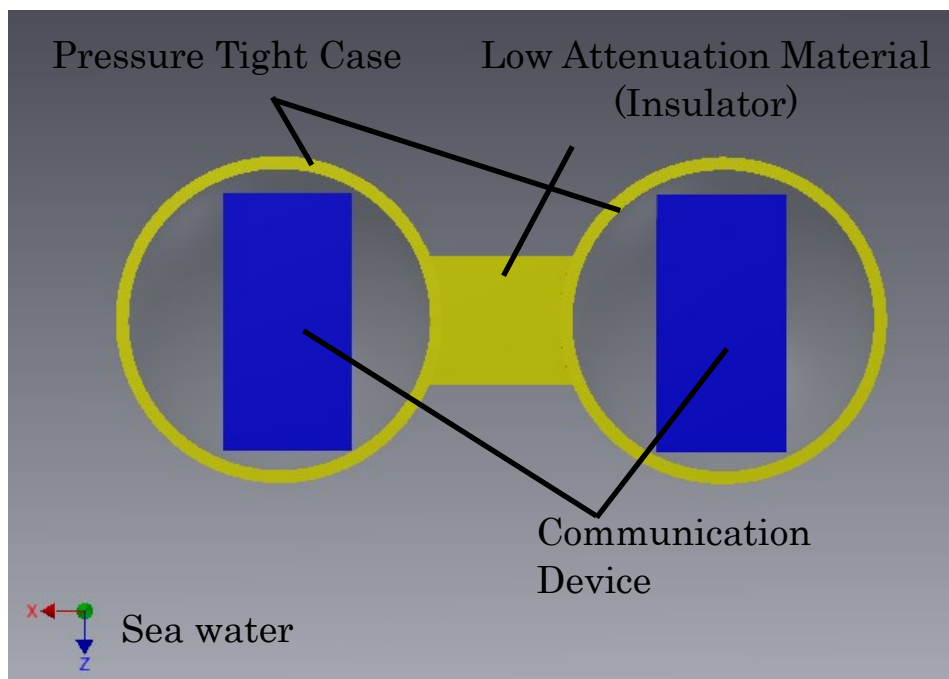


Fig. 4-8 Composition of UHF Band Communication Method under the Sea

海中電波通信手法は、MCUVのモジュール間で安定した高速通信を実現するために開発した手法である。そのため、本手法では以下に示す点を実現することを目的としている。

- ・海中で利用可能である
- ・安価な機器を使用することができる
- ・音響通信と比較し、通信速度が速い
- ・通信機器の配置条件が厳しくない(見通し線の確保が不要である)
- ・UUVの機体程度の距離で通信可能である

4-2-3 実験

海中電波通信手法により、電波が配置した伝搬経路を経由して伝搬し、水中にある通信機器との通信が成立することを確認するために実験を行った。

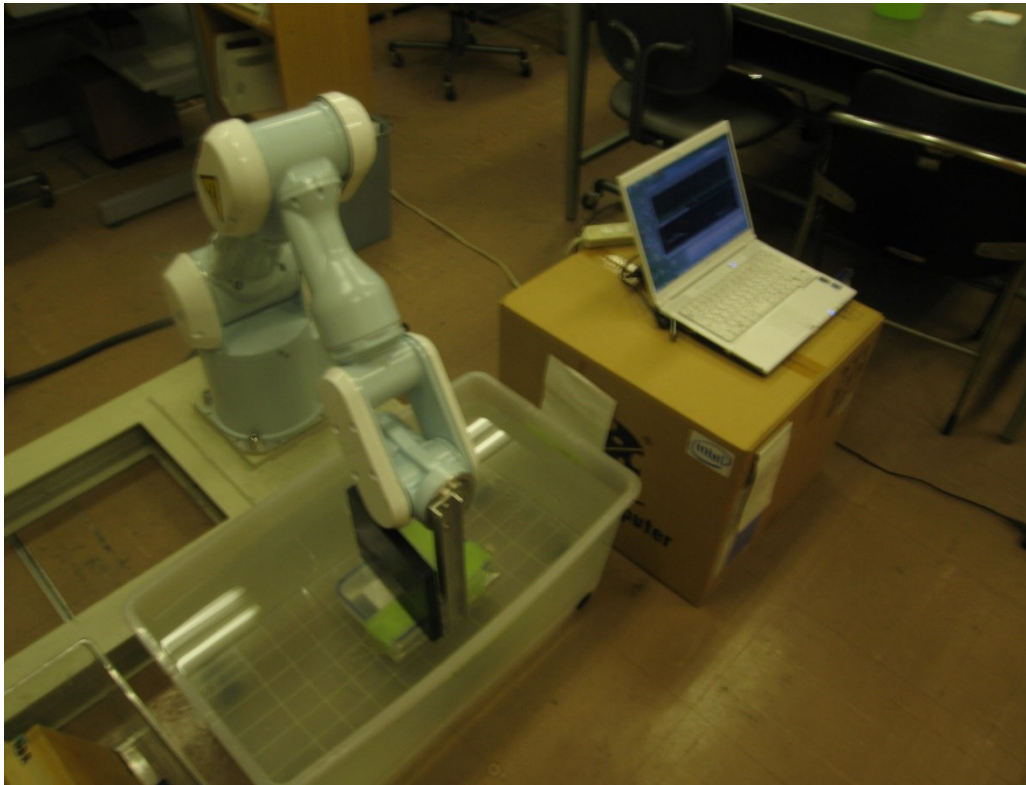


Fig. 4-9 Picture of Confirmation Experiment for UHF Band Communication Method

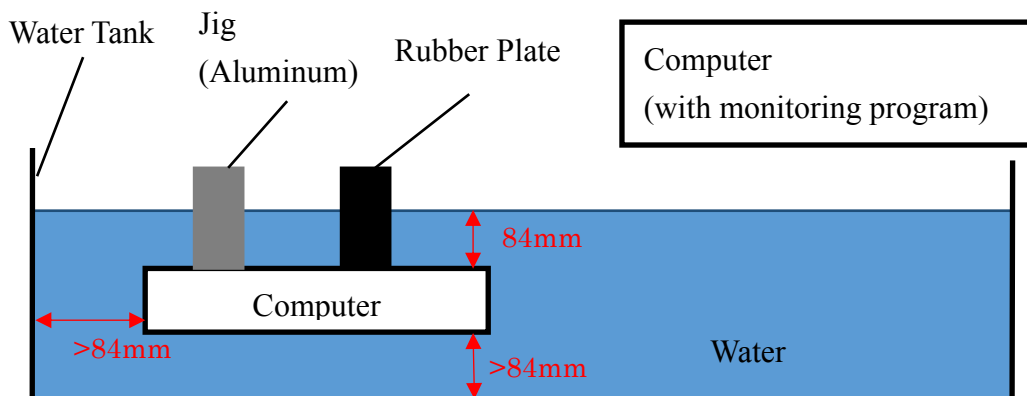


Fig. 4-10 Composition of Confirmation Experiment

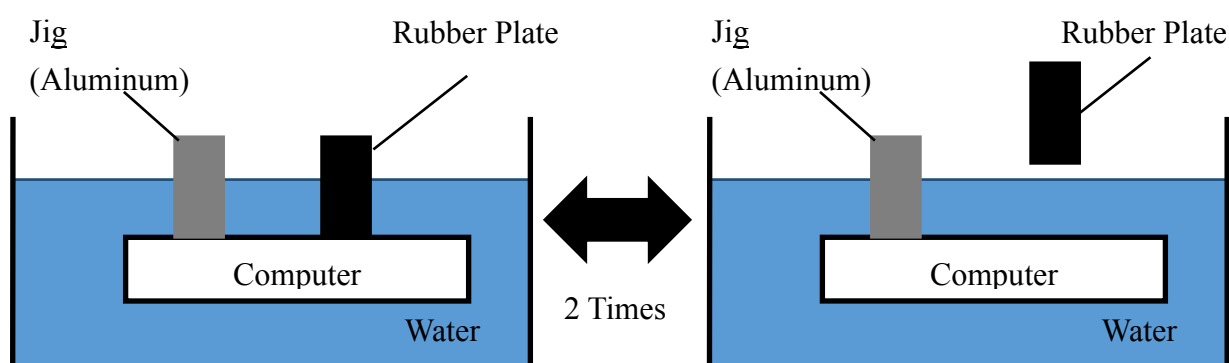


Fig. 4-11 Switching Propagation Condition

実験に用いた構成を Fig.4-9, 4-10 に示す. パソコンを 2 台用意し, それらをアドホック通信状態とした. Wi-Fi アンテナは, パソコンに元々取り付けられている $\lambda/4$ 波長のチップアンテナであり, 指向性がほぼなく特定の偏波面を持たない. 水中に沈める方のパソコンでは, 電界強度計測ソフトである inSSIDer を起動し, 水中における電波の受信状況を記録できるようにした. inSSIDer は電波暗室内でスペクトラムアナライザ(MICRONIX 社製 MSA458)の計測結果と比較し, 計測値が同様の傾向を示すことを確認している. その後, 水中に沈めるパソコンを樹脂製の水密容器に封入し, 投入用の治具で固定した. 治具にはアルミチャンネルを使用することで, 治具を通じた電波の伝搬が発生しないようにした. これらを水中に沈めるのに十分な大きさの水槽を用意し, その中を人工海水で満たした. 水密容器に伝搬経路を接触させた状態で人工海水中に深度 84[mm]まで沈め, そこで伝搬経路の接触状態の切り替えを 2 度行い, その間の電界強度の計測値を比較した. 接触状態の切り替えの様子を Fig.4-11 に示す. なお, 水密容器を沈める際, 水槽の壁面および底面から十分に離し, 水中の伝搬距離は水密容器上面方向が最も短くなるよう調整している. 空気中に設置したパソコンは, 特にアンテナ同士の位置関係に関する考慮は行わずに配置した. 伝搬経路には寸法 200×200×20[mm]のスチレン・ブタジエンゴム(SBR)を使用した. 伝搬経路として使用した材質の誘電率と導電率は後述の Table4-1 に示す [15] [16].

4-2-4 実験結果

実験結果を Fig.4-12 に示す。水密容器から伝搬経路を外した時点で電界強度の低減が始まり、直後に通信が途絶した。途絶後に改めて伝搬経路を接触させると通信が復旧した。2 回目の通信復旧では途絶前より電界強度が低下しているが、これは伝搬経路の接触状態や、アンテナと伝搬経路の厳密な位置が変化したことが原因で低下したものと考えられる。



Fig. 4-12 Result of Air to Underwater Communication

本実験の結果により、従来利用されてこなかった水中における高周波数帯の電波が利用可能であることが示された。また、アンテナ同士が直線関係になくても通信が行えるため、通信装置間の位置関係の自由度が比較的高いこと、寸法 $200 \times 200 \times 20$ [mm] の伝搬経路で伝搬が可能であったことから、従来の電波伝搬で考えられている、波長に対して十分な大きさを有する伝搬経路形状とは異なる条件で伝搬が可能となることが示された。

4-3 伝搬経路の材質が与える影響

海中電波通信手法の利用により、電波の減衰の大きな海中における高周波数帯の電波を用いた通信が成立することを明らかとした。ここで問題になるのが、電波伝搬に影響を与える要素である。4-2-1 で示した通り、電波の伝搬において真空中の伝搬は非損失とされ、水中では減衰が大きくなり、金属に至っては伝搬しないことから分かる通り、伝搬媒質が減衰に与える影響は非常に大きい。また、同じ水中であっても、淡水と海水を比較すると、海水による減衰のほうが圧倒的に淡水より大きくなる。ここで物質の電気的特性の一つである導電率を比較すると、海水の導電率は 4 [S/m] であり、河川の平均値である 0.011 [S/m] と比べて格段に高い数値を示す。これらのおり、広く知られている事実と合致する性質として、伝搬媒質の電気的特性は電界強度の減衰に大きな影響を与える。これより、本項では伝搬に影響を与える要素のうち、物質の電気的特性に着目して比較実験を行った。

4-3-1 検証内容

ここでは、伝搬経路として利用する材質として、複素誘電率、導電率が異なる材質を複数用意し、経路を伝搬した後の電界強度をもって通信距離を評価する。利用可能な周波数は通信機器の選定により決まってしまうことから、海中電波通信手法において伝搬時の損失を抑えるためには、Formula 4-7 および 4-8 より誘電率、導電率、透磁率が低い材料が適していると予測できる。

4-3-2 実験

1.伝搬経路にゴムを用いた実験

伝搬経路に用いる材質を変化させ、これらの電気的物性と電界強度に相関があるかを確認した。実験の構成を Fig.4-13 および 4-14 に示す。

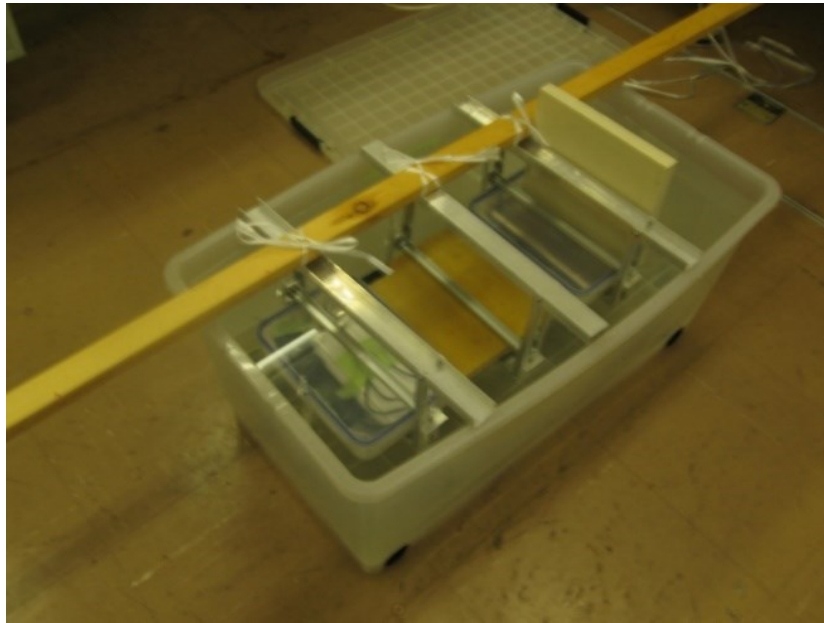


Fig. 4-13 Picture of Experimental Composition for Propagation Material

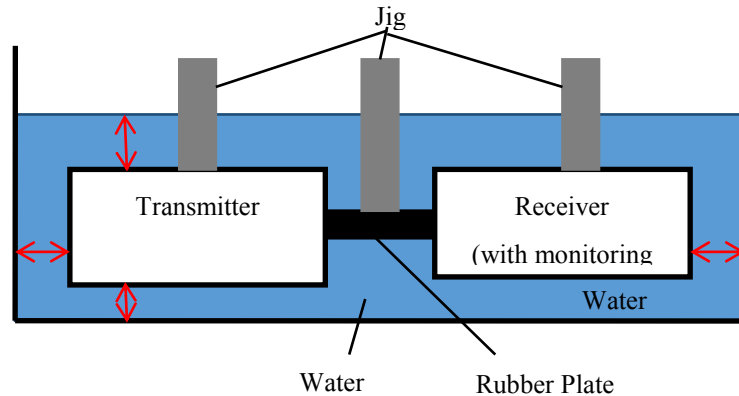


Fig. 4-14 Image of Experimental Composition for Propagation Material

十分大きな水槽を用意し、それを人工海水で満たした。海水は、水道水に人工海水の素(テトラマリンソルトプロ)を入れ、比重計を利用して比重が 1.023[-]になるように調整したものを使用した。樹脂製の水密容器を 2 個用意し、お互いにアドホック通信状態とした小型パソコン 2 台を別々の容器に封入した。受信側とした小型パソコンでは、電界強度を計測するソフトである inSSIDer を立ち上げ、実験中の電波の伝搬強度を計測、記録できるようにした。この水密容器に寸法 200×200×20[mm]の伝搬経路を接触させて治具で固定し、水槽の中央に沈めた。治具はアルミニウムで作成することで、治具を通じた伝搬が発生しないようにしている。水槽に沈める際は、Fig.4-15 に赤い矢印で図示した水密容器と水面および水槽底部、側面部との距離が $1/e$ 減衰距離

以上となるように十分にとり，伝搬経路以外を伝搬して通信が成立しないように配慮した．本実験で用いた伝搬経路の材質とその誘電率，導電率の一覧を Table 4-1 に示す [14]．なお，本実験で用いた材質の比透磁率はすべて 1[-]である．

Table 4-1 Electrical Property of Rubbers for Propagation Channel

Material	Permittivity [F/m]	Conductivity [S/m]	Intensity of communication [dB]
Natural rubber (NR)	2.0 – 3.0	$10^{-10} - 10^{-15}$	-63
Styrene-butadiene rubber (SBR)	2.9 – 3.0	$10^{-10} - 10^{-15}$	-64
Nitrile rubber (NBR)	15 – 20	$10^{-9} - 10^{-10}$	-67
Ethylene propylene diene rubber (EPDM)	3.1 – 3.4	$10^{-12} - 10^{-15}$	-64
Polychloroprene rubber (CR)	7.5	$10^{-10} - 10^{-12}$	-67
Silicon rubber (Q)	3.2 – 10.0	$10^{-11} - 10^{-15}$	-64
SBR(conductive)	-	0.02	Disconnect
Tire rubber	-	$< 5 \cdot 10^{-6}$	-83

4-3-3 実験結果

計測結果を Fig.4-15 から 4-23 に示す．また複数回計測時の平均を Table4-1 に示す．導電性 SBR とタイヤゴムという，比較的導電率の高い 2 種を除き，安定して通信を行うことが可能であった．また，導電性 SBR はすべての計測回で通信を行うことができなかったのに対し，タイヤゴムは Fig.4-21 のように通信が不可能な場合と通信が可能であった場合が混在した．これは，電波が伝搬経路を伝搬することに起因する減衰と，伝搬経路の配置や接触具合など，経路内部の伝搬以外に起因する減衰があり，経路内部以外に起因する減衰の具合によって通信可否が変化したと考えられる．なお，本実験結果からは，誘電率に起因する傾向は確認することができなかった．

計測結果を確認すると，通信の状態は水中にある間ほぼ一定の値をとることが確認できる．これは通信装置間の位置関係に変化がないこと，周囲の電波の影響がすべて海水によって減衰されることから，外乱のない安定した通信が実現していることを示している．

本実験では，透磁率の比較は行わなかった．透磁率が高い物質である磁性体はすべて金属であり，自由電子による電波の反射が発生することから，透磁率のみ変化させて計測を行うことが困難であり，検討に実用性がないためである．

本論文ではゴムの誘電率および導電率を変化させた場合を比較したが，樹脂を比較した場合には，導電率が支配的であることのほか，誘電率と電界強度に負の相関関係があることが実験的に確認されている [17]．

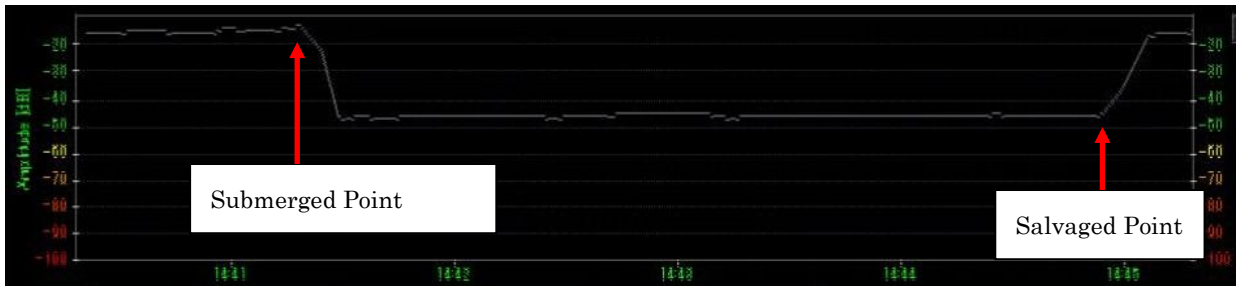


Fig. 4-15 Result of NR



Fig. 4-16 Result of SBR



Fig. 4-17 Result of NBR

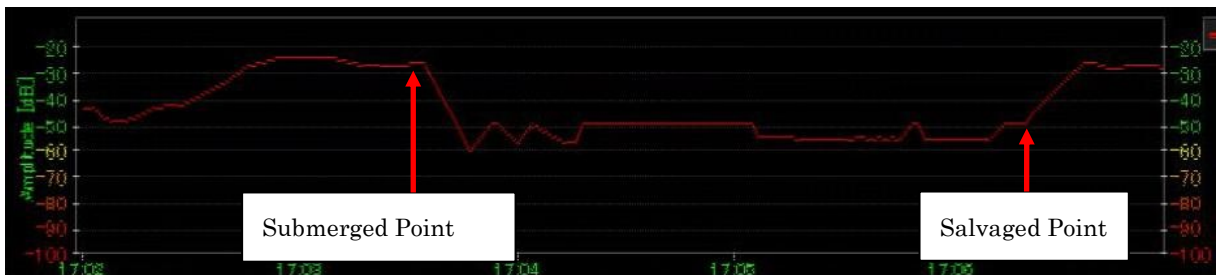


Fig. 4-18 Result of CR



Fig. 4-19 Result of EPDM

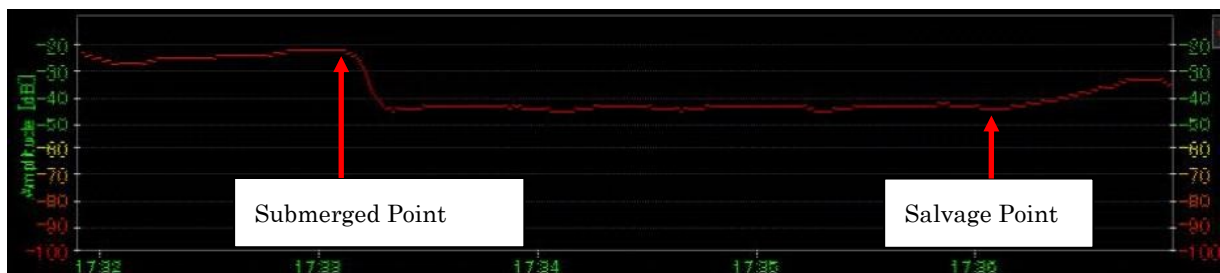


Fig. 4-20 Result of Q



Fig. 4-21 Result of Tire rubber

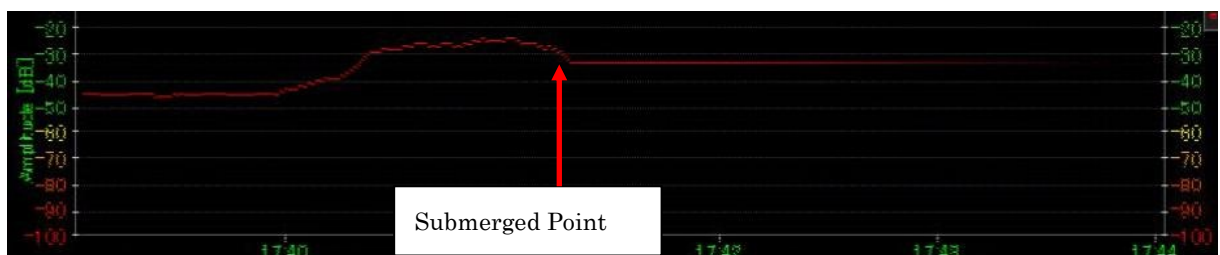


Fig. 4-22 Result of Conductive SBR

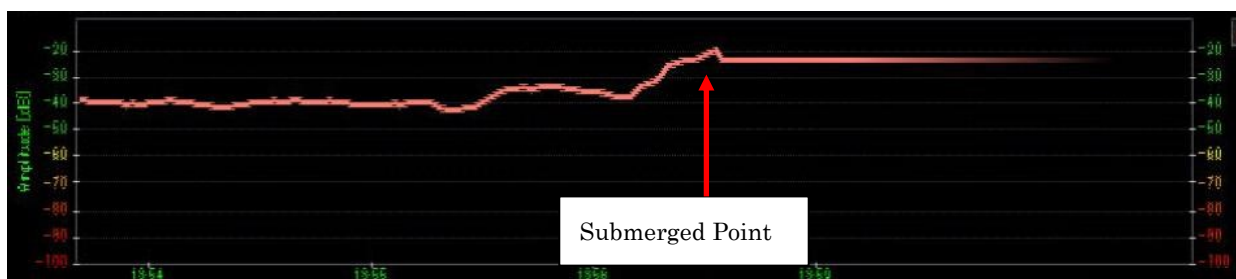


Fig. 4-23 Result of No Plate

4-4 伝搬経路の断面形状が与える影響

4-4-1 検証内容

海中電波通信手法においては、伝搬経路は電波の通信だけでなく機械的な強度が求められることから、伝搬経路の寸法は様々な値をとることが予想される。その場合、伝搬経路内の伝搬モードは基本モードに限らず、様々な次数のモードが入り混じった複雑な電場になり、理論的な解析が非常に困難になることが予想される。そのいずれの場合においても本手法の適用が可能であることを示すためには、様々な断面寸法の伝搬経路を用意し、実験的に通信状態を確認することが有効である。なお、上記に関連があるものとして、山口らが行った任意断面を持つトンネル内の電波伝搬に関する研究 [18]は、本内容の方針を検討するうえで一つの指針となる。山口らは異なる

る形状のトンネル内を電波が伝搬した時の減衰定数の変化について述べている。この研究では、トンネルは電波の波長に対して十分な広さを持っており幾何学的な取り扱いが可能な条件であること、伝搬経路を誘電体が囲んでいるという仮定をおいていることから、海中電波通信手法とは伝搬形態が異なる可能性がある。ただし、同一寸法の円形断面と方形断面を比較した場合、方形断面が伝搬に有利になることが示されているなど、伝搬経路の形状に関する指針が示されている。

4-4-2 実験

本実験は断面積による伝搬状態の変化を比較する。断面積の変化は、伝搬経路の高さ方向と幅方向の寸法を変化させ、電界強度の変化を計測した [19]。

伝搬経路の幅方向の寸法を変化させたときの実験構成を Fig.4-24 に示す。また、高さ方向の寸法を変化させたときの実験構成を Fig.4-25 に示す。4-3 と同様に、アドホック通信状態としたパソコン 2 台を水密容器内に入れ、その上に厚みおよび幅の異なる伝搬経路を配し、電界強度を計測した。伝搬経路の材質にはシリコンゴムを使用した。幅方向の寸法変化時の伝搬経路を Fig.4-26、高さ方向の寸法変化時の伝搬経路を Fig.4-27 に示す。幅方向の寸法変化には $200 \times 40 \times 50$ [mm] と $200 \times 40 \times 25$ [mm] の伝搬経路を用意し、幅方向を 50[mm] から 200[mm] まで 25[mm] 刻みで計測した。厚み方向の寸法変化には $200 \times 10 \times 50$ [mm] の伝搬経路を用意し、厚みを 10[mm] から 100[mm] まで 10[mm] 刻みで計測した。幅方向、厚み方向それぞれの場合において、伝搬経路の端部から 50[mm] を水密容器と接触させ、計測を行った。その際、伝搬経路と水密容器および伝搬経路同士は接触させるだけとし、接着剤や固定用の治具などは用いていない。高さ方向は 1 つの条件につき 10 回の計測、幅方向は 1 つの条件につき 5 回の計測を行い、平均化を行った。

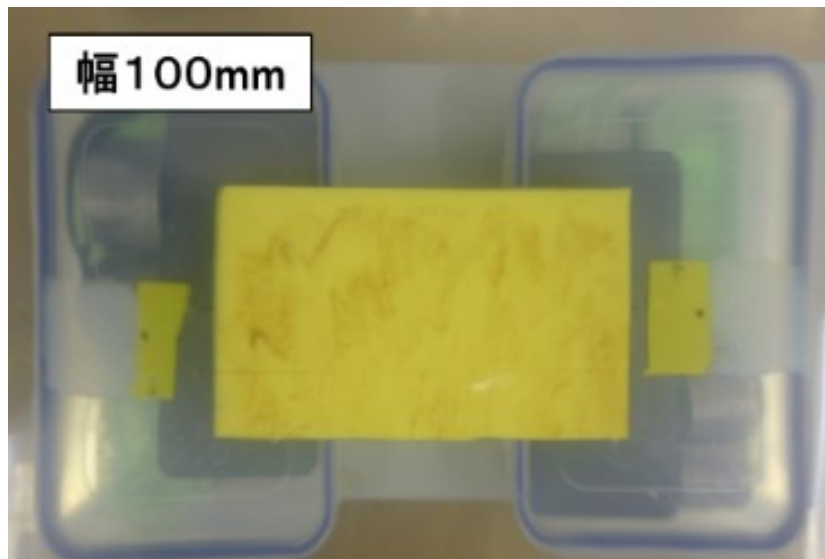


Fig. 4-24 Picture of Experiment for Comparing Width of Propagation Channel

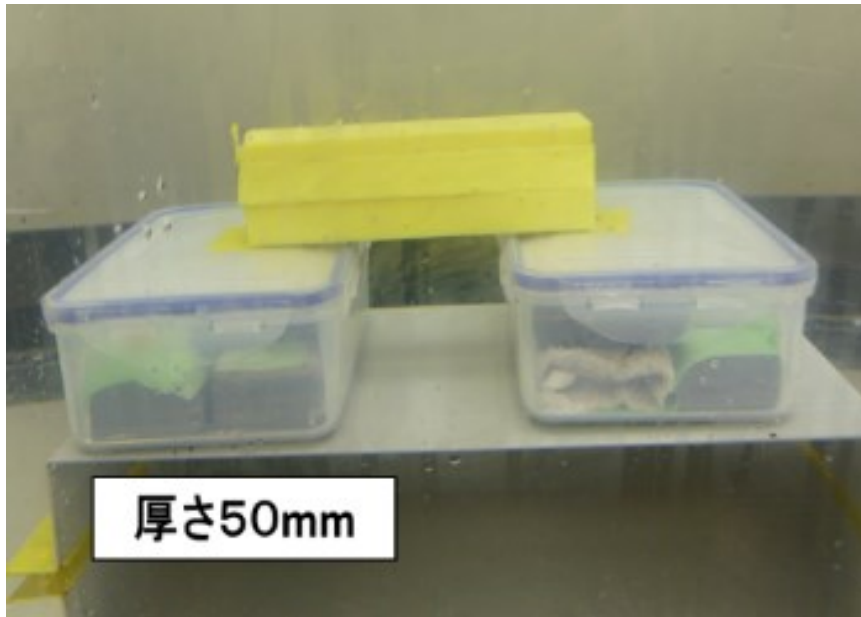


Fig. 4-25 Picture of Experiment for Comparing Thickness of Propagation Channel

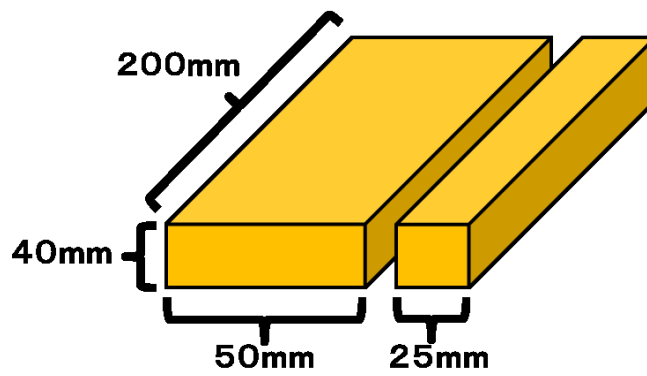


Fig. 4-26 Propagation Channel for Width Comparison

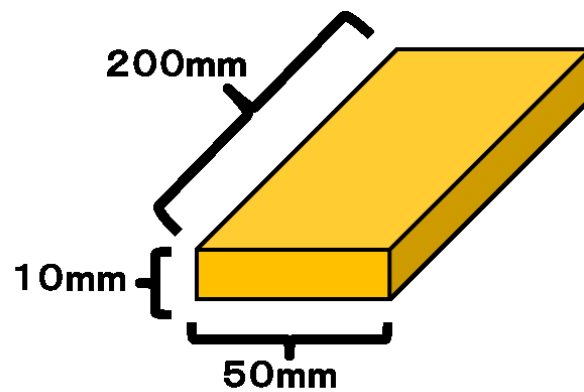


Fig. 4-27 Propagation Channel for Thickness Comparison

4-4-3 実験結果

幅方向の実験結果を Fig.4-28 に示す．幅が 100[mm]になるまでは単調増加傾向にあり，100[mm]を超えてから一度 175[mm]で大きく落ち込むが，200[mm]まではほぼ同程度の値となっている．通信に周波数 2.4[GHz](波長 124[mm])の Wi-Fi を使用しているため，この結果からは波長の長さ近辺まで伝搬経路の幅を確保することで，電界強度が安定することが言える．この実験結果からは幅 175[mm]における電界強度低下の原因は不明だが，考えられる原因としては伝搬経路の接触具合の変化，伝搬経路が複数に分割されていることによる影響，送受信アンテナの位置関係と伝搬モードの不一致などが挙げられる．

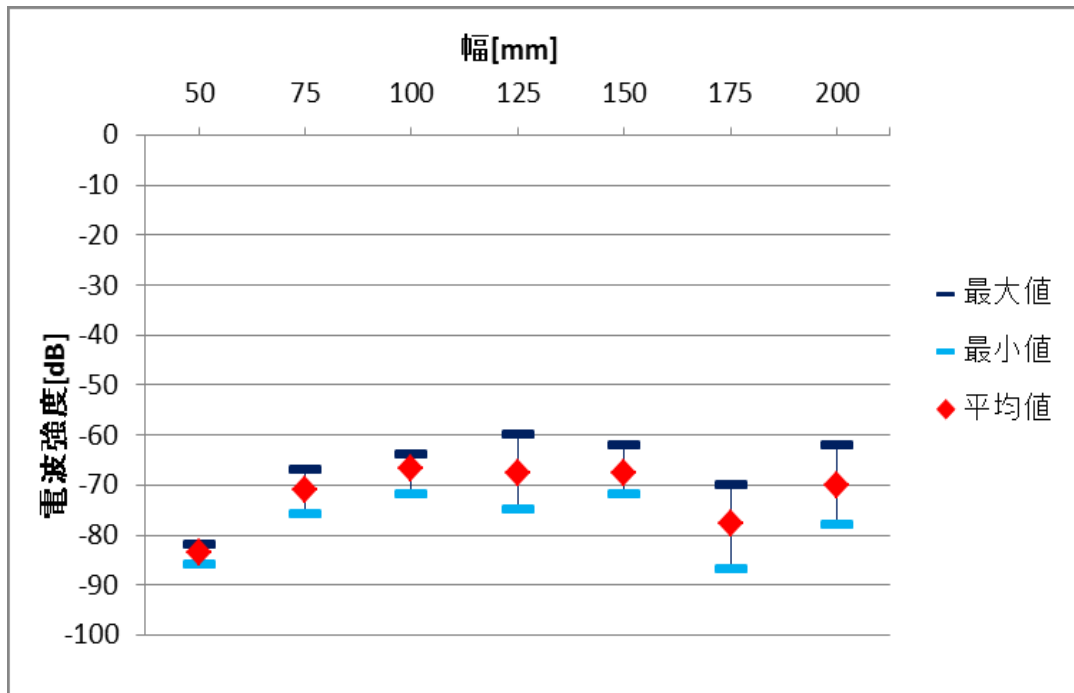


Fig. 4-28 Result of Width Comparison

高さ方向の実験結果を Fig.4-29 に示す．幅方向の場合と比較して明確な傾向は確認できない．幅の変化と比較して検討すると，伝搬経路部の厚みが変化しても，伝搬経路と水密容器の接触部の面積は変化していない．これより，厚みの実験においては，伝搬経路への電波の入射量が電界強度に与える影響がボトルネックになり，経路の厚みを変化しても電界強度に影響を与えなかったという可能性が考えられる．

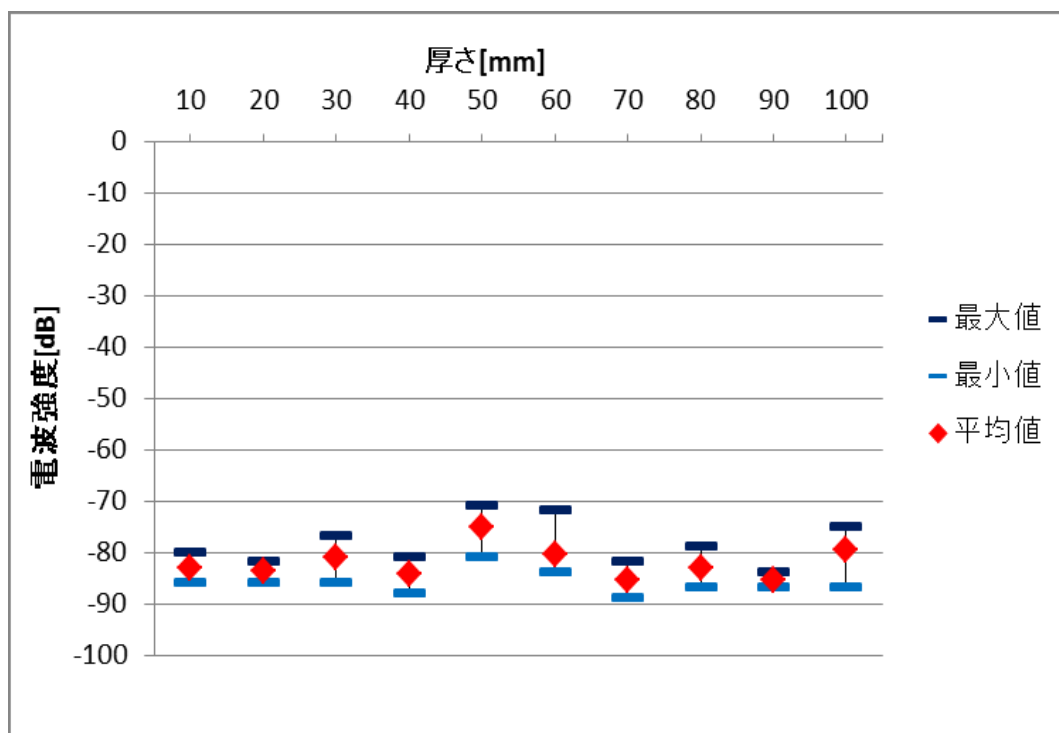


Fig. 4-29 Result of Height Comparison

4-5 使用する周波数が与える影響

4-5-1 検証内容

どの方式の通信を用いた場合でも，周波数の変化は通信に大きな影響を与える．海中電波通信手法においても，より高周波数帯の電波を用いることで，伝搬の一部が自由空間伝搬とみなせるようになる可能性や，より断面寸法の小さい伝搬経路の利用が可能になること，電界強度の減衰抑制，通信速度の向上などが期待できる．

電波の伝搬には遮断波長と呼ばれる経路幅が存在し，伝搬経路の幅が波長の半分以下となると，その伝搬経路は減衰が急激に大きくなる [8]．海中電波通信手法では伝搬経路の寸法に制限が発生することが常であり，より小さな伝搬経路での伝搬が求められるため，遮断波長による電界強度の大幅な減衰は設計時点で避けなければならない．そのため，それぞれの周波数で遮断領域周辺の電界強度の挙動を明らかにすることで，設計的に遮断が発生することを回避できることが期待される．また，2.4[GHz]と5[GHz]では波長の長さが半分程度となるため，より高周波数帯の電波を用いることは手法適用時の寸法条件の緩和につながる事が予想される．

4-5-2 実験

本実験では，使用する電波の周波数帯を変更した際に，伝搬可能な距離および必要とする断面積がどのように変化するかを検証する [20]．Fig.4-30 に実験構成の全体図，Fig.4-31 に水密容器の内部構成を示す．前項までと同様の水槽，水密容器，小型 PC を用意する．小型 PC は，明示的に通信で使用する電波の帯域を変えられるよう，2.4[GHz]と5[GHz]の Wi-Fi ドングルを用意し，これを取り換えて使用し通信を行った．実験に使用した伝搬経路の寸法を Table4-2 に示す．

伝搬経路の寸法を波長で無次元化した値が同一である場合、それらの減衰の挙動は等しくなると予想されるため、2.4[GHz]の波長である125[mm]と、5[GHz]の波長である60[mm]を基準とした寸法で伝搬経路を用意した。Table中の相対値は、各周波数の波長を基準とした際の比である。

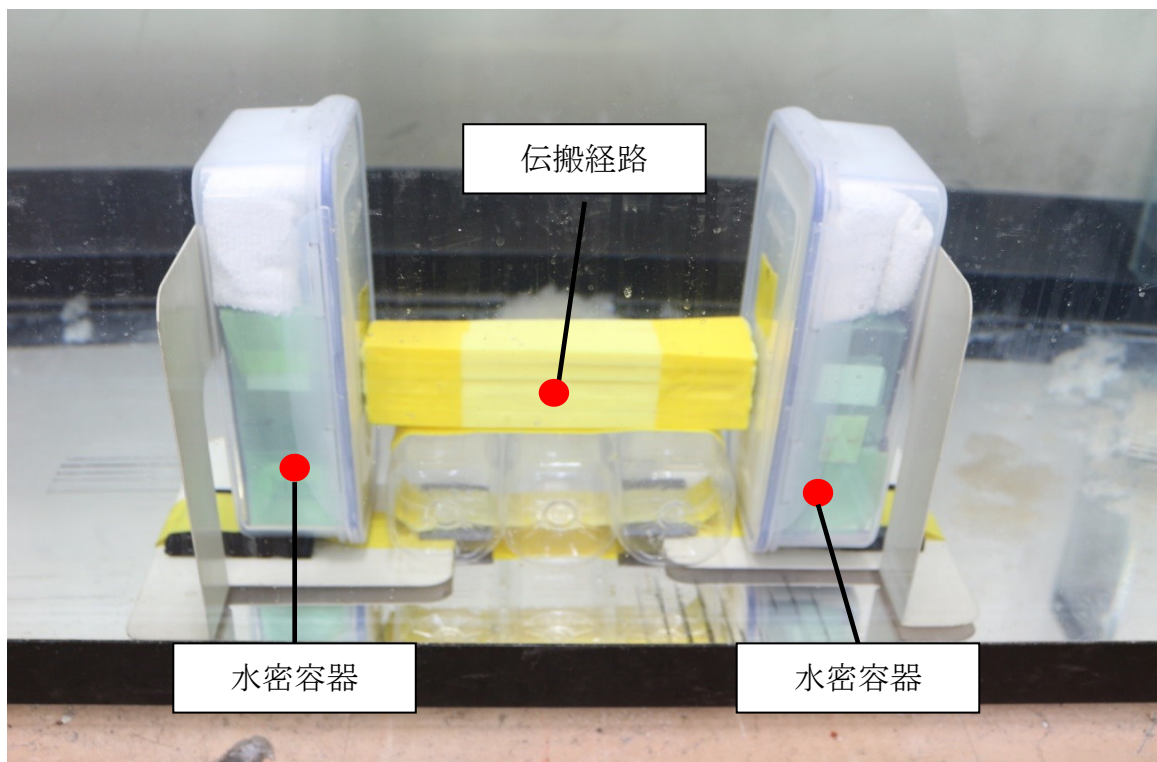


Fig. 4-30 Composition of Experiment for Frequency Difference

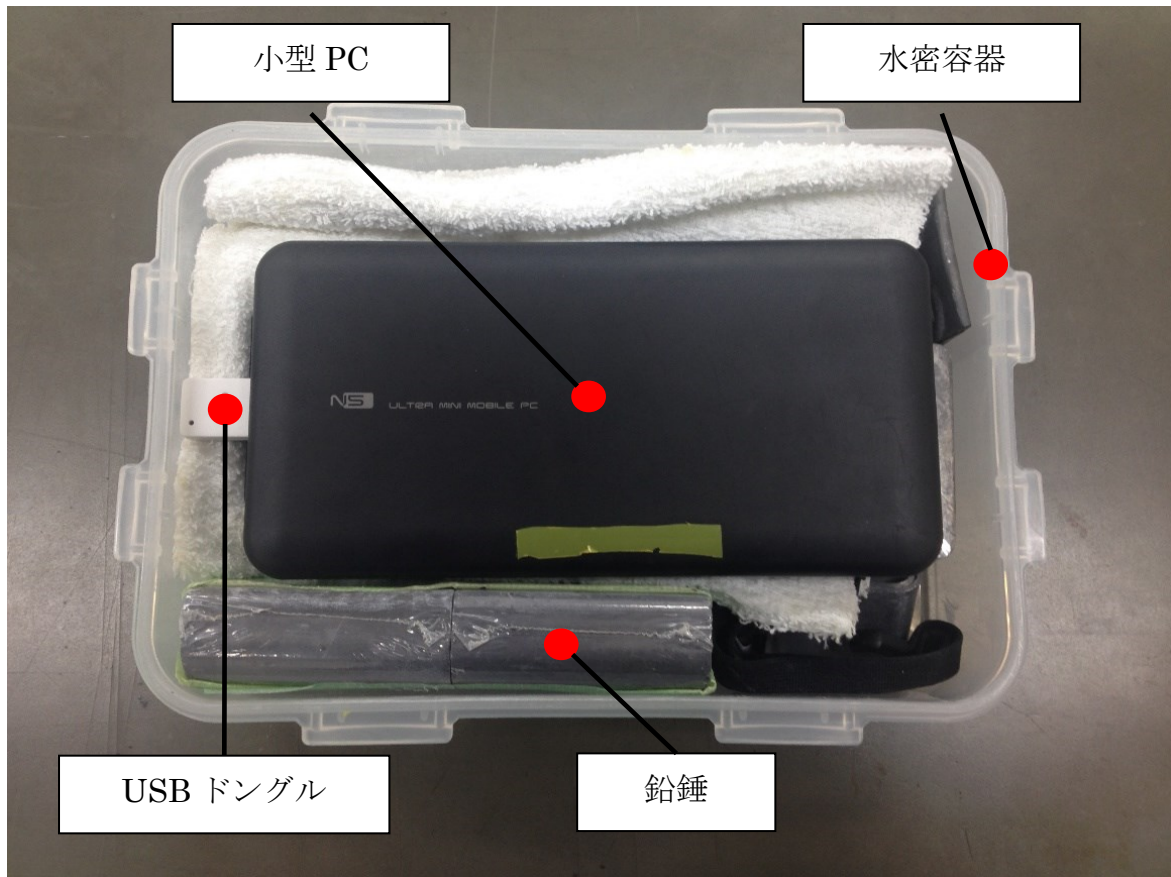


Fig. 4-31 Inside Composition of Watertight Case

Table 4-2 Size of Propagation Channel

経路 番号	幅 [mm]	高さ [mm]	距離 [mm]	相対値	
				2.4GHz	5GHz
1	200	40	200	1.6×0.32×1.6	3.3×0.67×3.3
2	150	20	200	1.2×0.16×1.6	2.5×0.33×3.3
3	100	20	200	0.8×0.16×1.6	1.7×0.33×3.3
4	75	20	200	0.6×0.16×1.6	1.3×0.33×3.3
5	50	10	200	0.4×0.08×1.6	0.8×0.17×3.3
6	200	40	96	-	3.3×0.67×1.6
7	150	20	96	-	2.5×0.33×1.6
8	100	20	96	-	1.7×0.33×1.6
9	75	20	96	-	1.3×0.33×1.6
10	50	10	96	-	0.8×0.17×1.6

4-5-3 実験結果

実験結果を Fig.4-32 に示す. 計測結果は遮断波長における減衰量が無限大になる点と, 伝搬経路の断面積が十分得られることで, 伝搬の形態が自由空間伝搬に近づく点が存在することが予想

される。実験結果からは、同一の経路を用いて 2.4[GHz]と 5[GHz]を比較した場合、5[GHz]の電界強度の減衰は少なく抑えられている。これは、5[GHz]の周波数を用いることで、伝搬経路の幅が波長と比較して広くなり、より自由空間伝搬に近付いたためと考えられる。また、伝搬経路の長さを波長で無次元化した値が 1.6 の結果同士は、近似曲線も似通った結果となっている。これらより、海中電波通信手法においても、伝搬経路の波長に対する大きさが電界強度の減衰に大きく影響を与えることと、無次元化した断面寸法を用いることで、未知の電波の減衰量予測が行える可能性があることが言える。

また、経路 1 及び経路 6 を用いた計測は、他の結果と比べ電界強度の減衰が少ない。これは 4-4 で示された通り、十分な断面積をもつ伝搬経路のほうがより入射や伝搬時の減衰の条件が緩やかになるためであると考えられるが、この傾向は使用する周波数によらないことが確認された。

半波長以下の伝搬経路幅または高さを持つ伝搬経路は、減衰量が非常に大きな値となっているが、伝搬が可能である。文献 [8]が示す通り、1 波長から半波長の周辺を遷移領域として、通常の伝搬から遮断領域への遷移が行われていることが読み取れる。

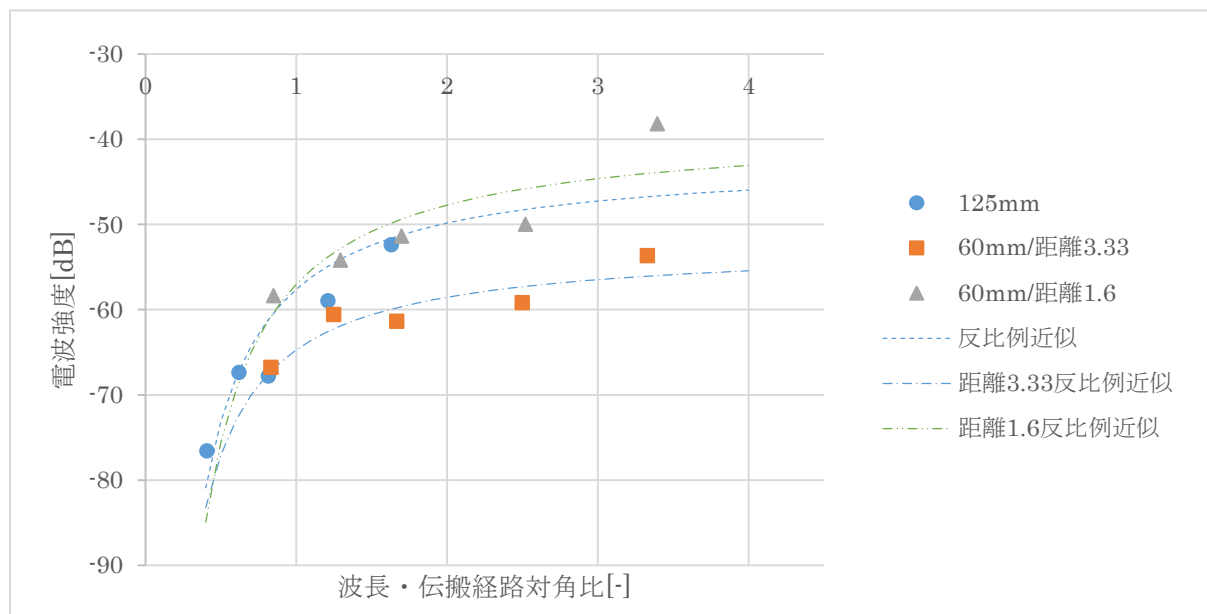


Fig. 4-32 Result of Frequency Difference

4-6 電界強度と通信速度の対応

4-6-1 検証内容

これまでの実験はすべて電界強度の計測を行ってきたが、電界強度は通信の到達可能距離を確認する指標であり、通信を行う場合に問題となるもう一つのパラメータである通信速度に関しては検討してきていない。ここでは、電界強度が通信速度に与える影響について検証した [21]。

電波の減衰とは、電波の振幅の減少である。電界強度が低下し電波の利得が下がることで、高周波数部分の振幅が減少し、受信できなくなることが予想できる。帯域として考えた場合、高周波数部分の帯域が減衰により使用不可能になり、使用できる帯域が狭まることになる。通信速度は使用可能な帯域幅に大きく影響を受けるため、電界強度の低下は通信速度の低下につながる可

能性があることが予想できる。

4-6-2 実験

実験構成を Fig. 4-33 に示す。Wi-Fi ドングルを取り付けた小型パソコンでベンチマークツールである Iperf を立ち上げ、通信速度を計測可能な状態とする。これと Wi-Fi ドングルを取り付けた陸上側パソコンをアドホック通信状態として、小型パソコンを水密容器に封入する。水密容器に伝搬経路を立てた状態で水中に沈め、深度を 200[mm]から 400[mm]を 50[mm]毎になるように調整する。この時、伝搬経路は小型パソコンの Wi-Fi ドングルの直上に設置し、陸上側パソコンの Wi-Fi ドングルとができる限り直線状に配置されるようにする。

用意した伝搬経路を Fig.4-34 に示す。また、寸法を Table4-3 に示す。伝搬経路の材質はシリコンゴムを使用した。伝搬経路の断面形状は円筒形と長方形とし、断面積の異なるものをそれぞれ 3 種ずつ用意した。その際、円筒形と長方形の同サイズ同士は同一の断面積となるように調整した。



Fig. 4-33 Side and Top View of Experimental Composition for Communication Capacity

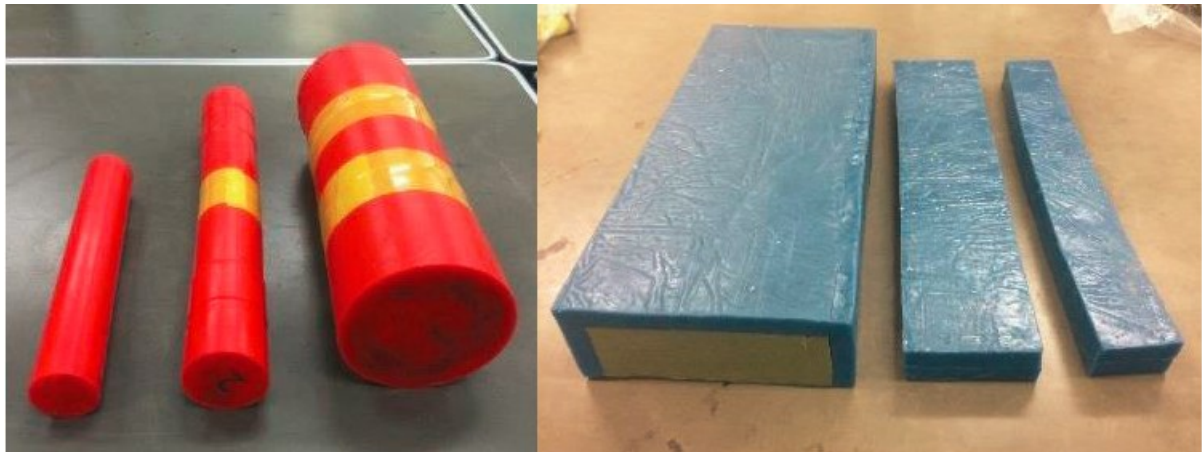


Fig. 4-34 Propagation Channel of cylinder and cuboid

Table 4-3 Size of Propagation Channel

	Small	Medium	Large
Cross section Area [mm ²]	1134	1964	7854
Cylinder Diameter [mm]	38	50	100
Cuboid Dimension [mm]	26×43.6	26×75.5	52×151

4-6-3 実験結果

計測結果を Fig. 4-35 に示す。横軸方向の変化から、伝搬距離が大きくなると通信速度は低下する傾向にあることが確認できる。通信速度低下の割合は断面積が小さな経路ほど顕著であり、断面積が大きい経路では影響の度合いが低い。

形状による影響に着目すると、基本モードに近い中型の経路で違いが顕著に表れている。中型の円筒形経路の通信速度は大型の経路とほぼ遜色ない程度であるが、長方形経路は伝搬経路が伸びるにつれて大型の経路から小型の経路に近いレベルまで通信速度が低下している。長方形の経路はその形状の複雑さから様々な高次モードが混在することが予想される。高次になるほど電界強度の低下量が増加するため、これが原因で単純なモードしか存在しない円筒形経路よりも通信速度が低下していると予想される。この実験結果より、伝搬経路の断面形状は、特に基本モード近傍において通信速度に大きな影響を与えることが確認された。

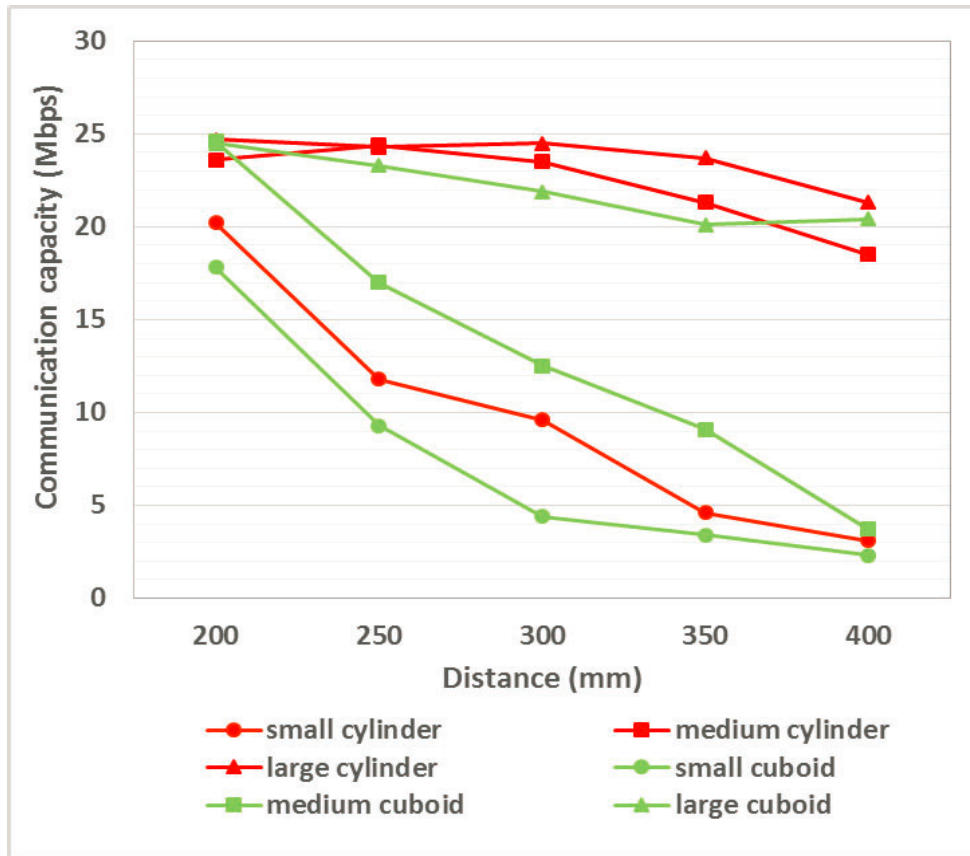


Fig. 4-35 Result of Communication Capacity

4-7 まとめ

海中において、これまでとは異なる利用方法の無線通信が求められるようになってきており、そのうちの一つに海水に囲まれた狭所での高速通信がある。本章ではこれに対し、伝搬経路を誘電体で確保し、GHz帯の周波数の電波を用いて通信を実現するという海中電波通信手法を提案した。

海中電波通信手法を実現し、これを実際の機器で利用するためには手法の持つ特性を把握する必要がある。伝搬経路の特性としては材質と断面積、電波の特性として周波数がそれぞれ電界強度の低下に影響があると予想したため、実験によってその影響を確認した。材質は特に導電率の影響を大きく受け、また、導電率が無視できる部分では誘電率の大小が電界強度と相関関係を有していた。断面積は一方方向に十分な長さを確保すると電界強度が安定することと伝搬経路に入射する面積の影響が大きいことが確認された。周波数は、同一の伝搬経路を用いた場合は高周波数帯がより狭所での通信で電界強度の低下が少ないこと、波長に対する伝搬経路の寸法比を揃えると周波数によらず似た傾向を示すことが確認できた。

通信を行う上で、通信速度は通信距離と同等に影響を考慮する必要がある。これを、断面積を等しくし、形状を変化させた伝搬経路を用いて検証を行った。伝搬距離が延びるほど形状が通信速度に与える影響は大きくなること、高次モードの伝搬が予想される複雑な断面形状の経路は通信速度の低下が発生しやすい傾向にあることが確認できた。

これらの実験結果より、本手法の実機における適用範囲について、基本的な方針を示すことが

できた.

参考文献

1. **AustS, PrasadV , NiemegeersG. M. M.I.** Outdoor Long-Range WLANs: A Lesson for IEEE 802.11 ah. 出版地不明 : IEEE Communication Surverys & Tutorials, 2015. ページ: 1761-1775.
2. **CQ出版社.** RFワールドNo.3 無線LANのしくみとシステム構築法. 出版地不明 : CQ出版株式会社, 2008.
3. **松田豊稔, 宮田克正 , 南部幸久.** 電波工学. 出版地不明 : コロナ社, 2008.
4. **MooreK.Richard.** Radio communication in the sea. 出版地不明 : IEEE Spectrum November, 1967. ページ: 42-51.
5. **CheXianhui, ほか.** Re-Evaluation of RF Electromagnetic Communication in Underwater Sensor Network. 出版地不明 : IEEE Communications Magazine December 2010, 2010. ページ: 143-151.
6. **吉田弘.** 海中のELFならびにHF電磁波伝播の検討. 出版地不明 : 物理探査学会第117回学術講演会論文集, 2007. ページ: 257-258.
7. **EdwardsChris.** the cruel sea. 出版地不明 : Engineering & Technology 8 August - 11 September, 2009.
8. 「電波伝搬ハンドブック」編集委員会. 電波伝搬ハンドブック. (編) 細矢良雄. 出版地不明 : リアライズ理工センター, 1999, 8, ページ: 65-84.
9. **Al-Shamma'aAhmadI., ShawAndrew , SamanSaher.** Propagation of Electromagnetic Waves as MHz Frequencies Through Seawater. 出版地不明 : IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol.52, No.11, 2004. ページ: 2843-2849.
10. **LucasJ , YipCK.** A determination of the propagation of electromagnetic waves through seawater. 出版地不明 : International Journal of the Society for Underwater Technology, Vol 27, No 1, 2007. ページ: 1-9.
11. **YipCK, GoudevenosA , LucasJ.** Antenna design for the propagation of EM waves in seawater. 出版地不明 : International Journal of the Society for Underwater Technology, Vol 28, No 1,, 2008. ページ: 11-20.
12. **YoshidaHiroshi, ほか.** Underwater Electromagnetic Transmission for an AUV. 出版地不明 : Proceedings of the Twenty-sixth (2016) International Ocean and Polar Engineering Conference, 2016. ページ: 551-555.
13. **清水悦郎 , 小澤正宜.** 水中通信システム. 特許第5761829号 PCT出願, 2012年9月14日.
14. **MasayoshiOzawa , EtsuroShimizu.** Development of UHF band communication method under the sea. 出版地不明 : The Proceedings of the Twenty-second (2012) International Ocean and Polar Engineering Conference, 2012. ページ: 472-478.
15. **華陽物産株式会社.** ゴム物性一覧表. (オンライン) (引用日: 2017年7月23日) <http://www.kayo-corp.co.jp/>.
16. **株式会社 KDA.** プラスチックの基礎知識. (オンライン) (引用日: 2017年7月23日) <http://www.kda1969.com/>.

17. 石川滉大. 海中電波通信手法の開発. 出版地不明 : 東京海洋大学海洋電子機械工学部卒業論文, 2013.
18. 山口芳雄, 阿部武雄, 関口利夫. 任意断面をもつトンネル内電波減衰定数の近似式について. 出版地不明 : 電子通信学会論文誌 '84/3 Vol.J67-B No.3, 1984. ページ: 352-353.
19. **TakahashiAzumi**, ほか. Characteristic Analysis of UHF Band Propagation Channel Form under the Sea. 出版地不明 : Proceedings of the International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 2014. ページ: 1925-1930.
20. 小澤正宜, ほか. 海中電波通信における周波数と伝搬経路断面形状に関する一考察. 出版地不明 : JIME 第 84 回学術講演会講演論文集. ページ: 59-60.
21. **HayamiAkihiro**, **OzawaMasayoshi**, **ShimizuEtsuro**. Throughput Analysis of Radio Communication under Water. 出版地不明 : Proceedings of the International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (IEEE SMC 2015), 2015. ページ: 479-483.
22. 松永利明, 内田一徳, 金基采. 基本的な分岐を持つ方形トンネル内の電波伝搬特性. 出版地不明 : 電子情報通信学会論文誌 B-II Vol.J79-B-II No.7, 1996. ページ: 399-406.
23. **OzawaMasayoshi**, ほか. Communication characteristics of UHF band under the sea through inflected propagation channel. 出版地不明 : Proceedings of 2013 IEEE International Underwater Technology Symposium, 2013. ページ: UT2013-1022.
24. 松永利明, 下河大浩, 内田一徳. S 字形曲がりおよびクランク形トンネル内の電波伝搬. 出版地不明 : 社団法人映像情報メディア学会技術報告, 2003. ページ: 21-24.
25. 松永利明, ほか. クランク形曲がりをもつ方形トンネル内の電界強度分布. 出版地不明 : 電子情報通信学会総合大会, 1995. ページ: 20.

第5章 水中ロボットでの利用に向けた海中電波通信手法の拡張

5-1 はじめに

第4章にて、海中の狭所で高速の通信を行うための手段として、海中電波通信手法を提案し、その基本的な特性を実験的に提示した。この手法を実際に探査機材へ適用することを考えたとき、同一経路でより減衰を抑えることや、より狭い伝搬経路においても通信が成立可能であれば、その利便性は高くなり、適用範囲を広げることが可能になると考える。

海中電波通信手法は水中での高周波数帯電波の利用という意味では画期的な手法であるが、電磁気学的視点から見た場合、損失誘電体内のモード伝搬であり、導波管内の伝搬に近似して考えることが可能である。これを念頭において考えると、導波管の伝搬において有利、不利になる内容が大きく海中電波通信手法に影響を与えることが考えられる。よって、本章では導波管の伝搬形態を参考とした拡張手法を提示しつつ、実験を通じてその効果を検証していくこととする。

5-2 海中電波通信手法における伝搬距離の伸長手法

5-2-1 検証内容

海中電波通信手法を用いることで、水中における電界強度の大幅な減衰を抑えることができるが、本手法のみではまだ伝搬経路から外部へ電波が伝搬することによる減衰が発生する。より減衰を抑え、通信距離を伸ばすことで、本手法の利用範囲を広げることが可能である。

電波の通信距離を伸ばす方法についてよく知られているものに、導波管がある。導波管は、金属でできた管の内部に電波を通すことで、電波による通信距離を伸ばしたものである。電波の伝搬途中に金属が存在すると、金属は電波を反射するため、四方を金属で囲まれた中に電波のエネルギーを通せば外部に漏洩しない。これにより導波管は長距離の電波伝搬を行うことを可能としている。これを海中電波通信手法に適用すると、伝搬経路の外部を金属で覆うことで、伝搬経路から外部への伝搬を抑え、より遠くまで通信を行うためにエネルギーを使用することが可能となる [1] [2]。すでにトンネルでは同様の手法によりトンネル壁面への侵入を抑制し、減衰を抑制した例が存在する [3]。

また、4-6で示したように、電波は遮断波長以下の幅の隙間を通り抜けることができない [4]。これを利用すると、本項で提案する電波伸長手法において、伝搬経路を覆う金属が一部欠けていることや、板の代わりに金属網で覆うことでも同様の効果が得られることが期待できる。

5-2-2 実験

実験の構成を Fig.5-1 に、用意した伝搬経路を Fig.5-2 から Fig.5-6 に示す。第4章の実験と同じく、水槽に海水を満たし、その中に小型パソコンを封入した水密容器を2つ入れた。小型パソコンは水密容器への封入前に Wi-Fi でアドホック通信状態としておき、電界強度計測ソフトである inSSIDer を立ち上げ、電界強度を記録している。水密容器を水中に沈める前に、用意した伝搬経路を水密容器に接触させ、海中電波通信手法が適用可能な状態とした。伝搬経路は伸長手法の有無による電界強度の改善効果を確認するために、巻きなしとアルミ巻きの長さ 200[mm]と 300[mm]を用意した。また、覆う金属に穴が開いている場合の穴の影響を確認するために、網目が 2[mm]と 4[mm]の亜鉛網で巻いた経路の長さ 300[mm]を用意した。伸長手法を適用する伝搬

経路に巻きつけるアルミ箔，2[mm]目亜鉛平織金網，4mm 目亜鉛平織金網は水密容器との接触部である端部から 50[mm]角を開けるようにして巻き付けた．伝搬経路の断面寸法はすべて 50[mm]角，また水密容器との接触部は両端とも端部から 50[mm]として，水密容器から伝搬経路への入射部と伝搬経路の断面の寸法が等しくなるようにした．

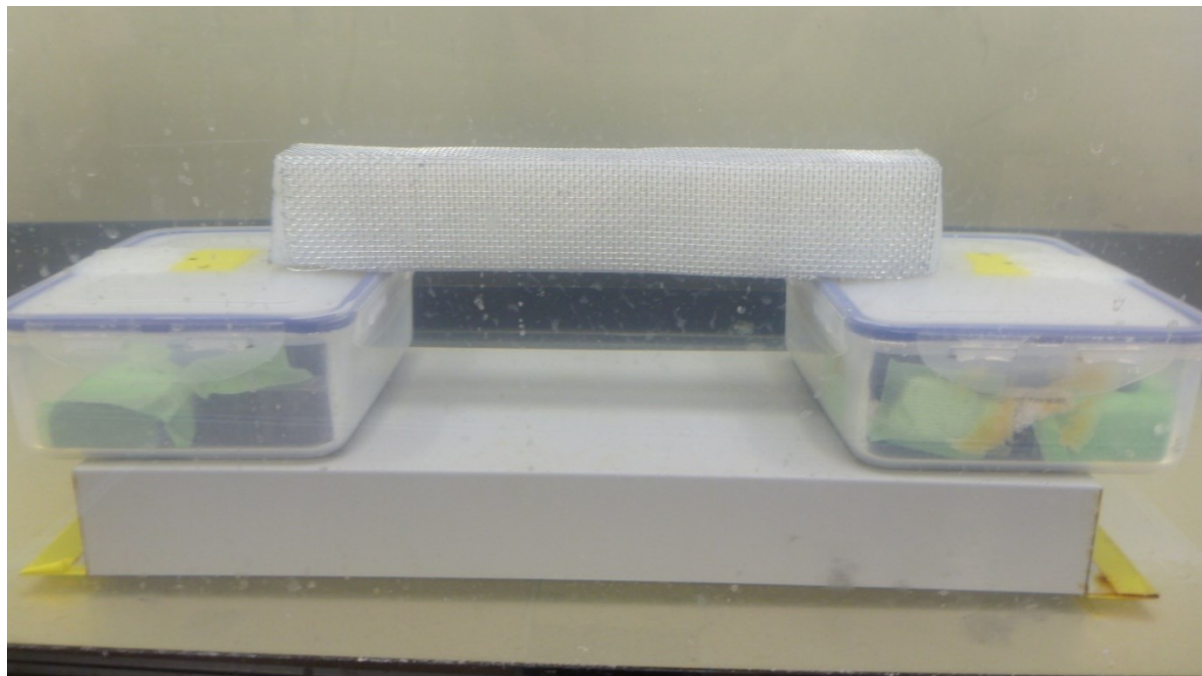


Fig. 5-1 Picture of Experiment for Extended Method

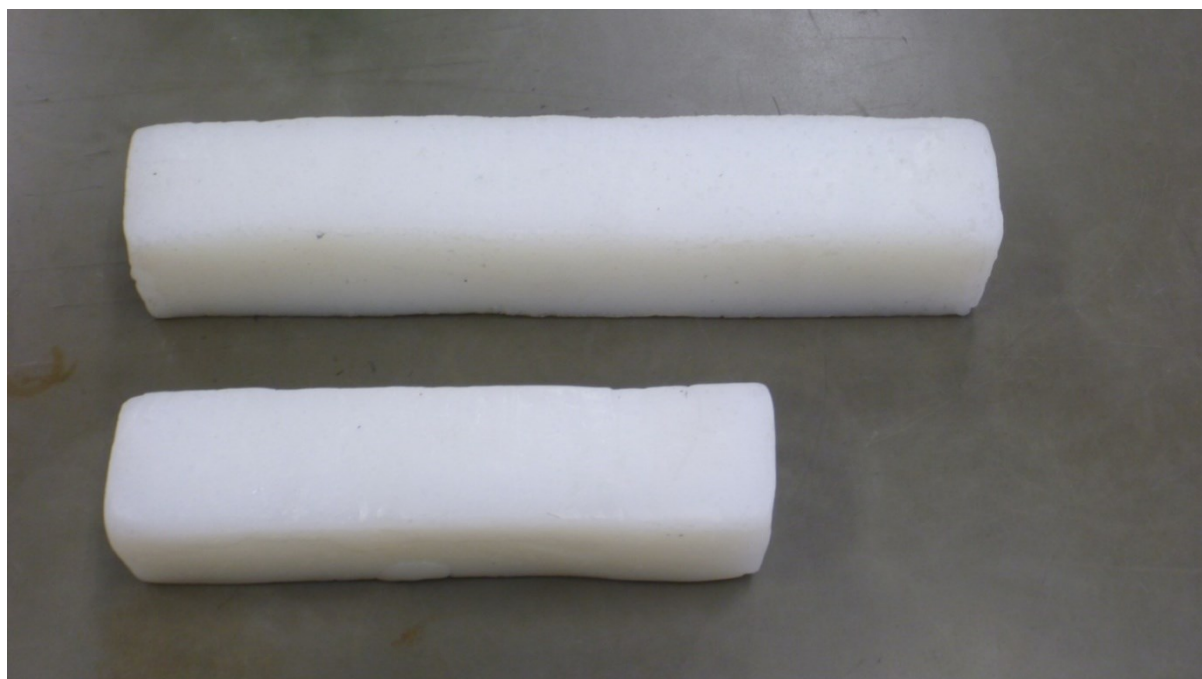


Fig. 5-2 Propagation Channel with no Wrapping (Length 300[mm](above) and 200[mm](below))



Fig. 5-3 Propagation Channel Wrapped by Aluminum Foil (Length 300[mm])



Fig. 5-4 Propagation Channel Wrapped by Aluminum Foil (Length 200[mm])

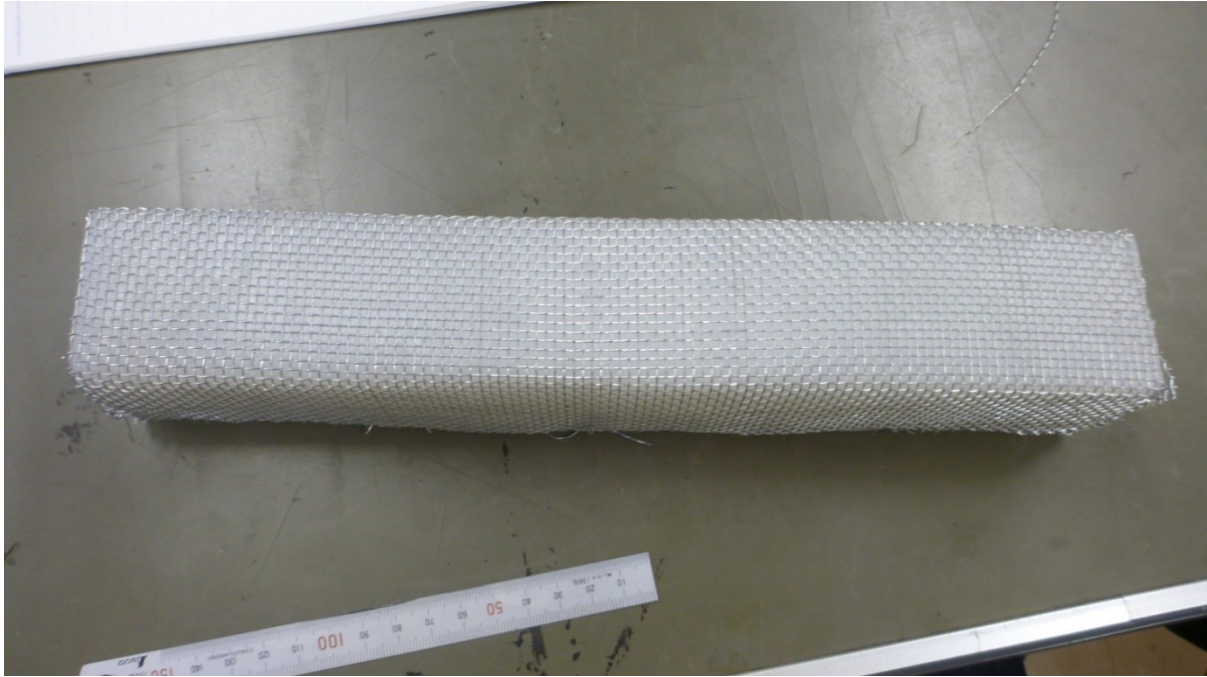


Fig. 5-5 Propagation Channel Wrapped by 2[mm] Square Zinc Wire Mesh (Length 300[mm])

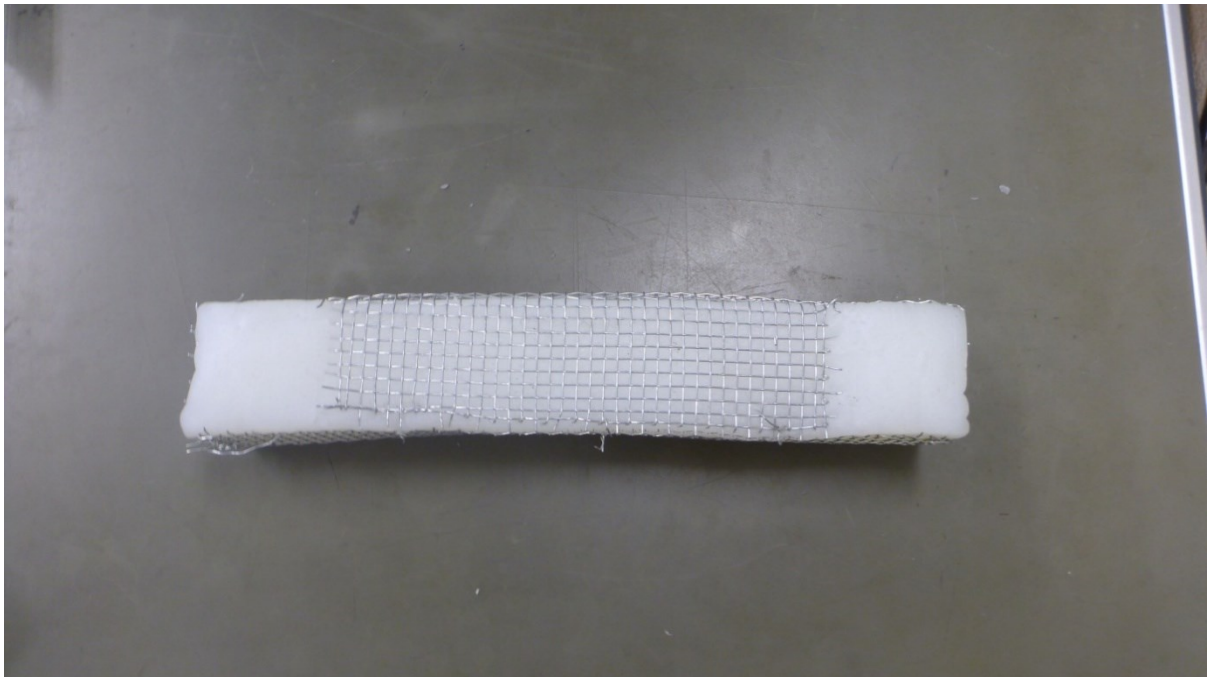


Fig. 5-6 Propagation Channel Wrapped by 4[mm] Square Zinc Wire Mesh (Length 300[mm])

5-2-3 結果

アルミ箔巻き付けの有無を比較した計測結果を Fig.5-7 に示す. 伝搬経路にアルミ箔を巻かない状態と巻いた状態を比較すると, 巻いた状態のほうがより電界強度の減衰が抑えられていることが確認できる. また, 巻かない状態と比べて, 伝搬経路の長さが 200[mm]から 300[mm]に伸

びた時に電界強度の低下度合いが少ない。この結果より、本項で提案した伸長手法は通信距離の伸長に対し有効であることが確認できた。

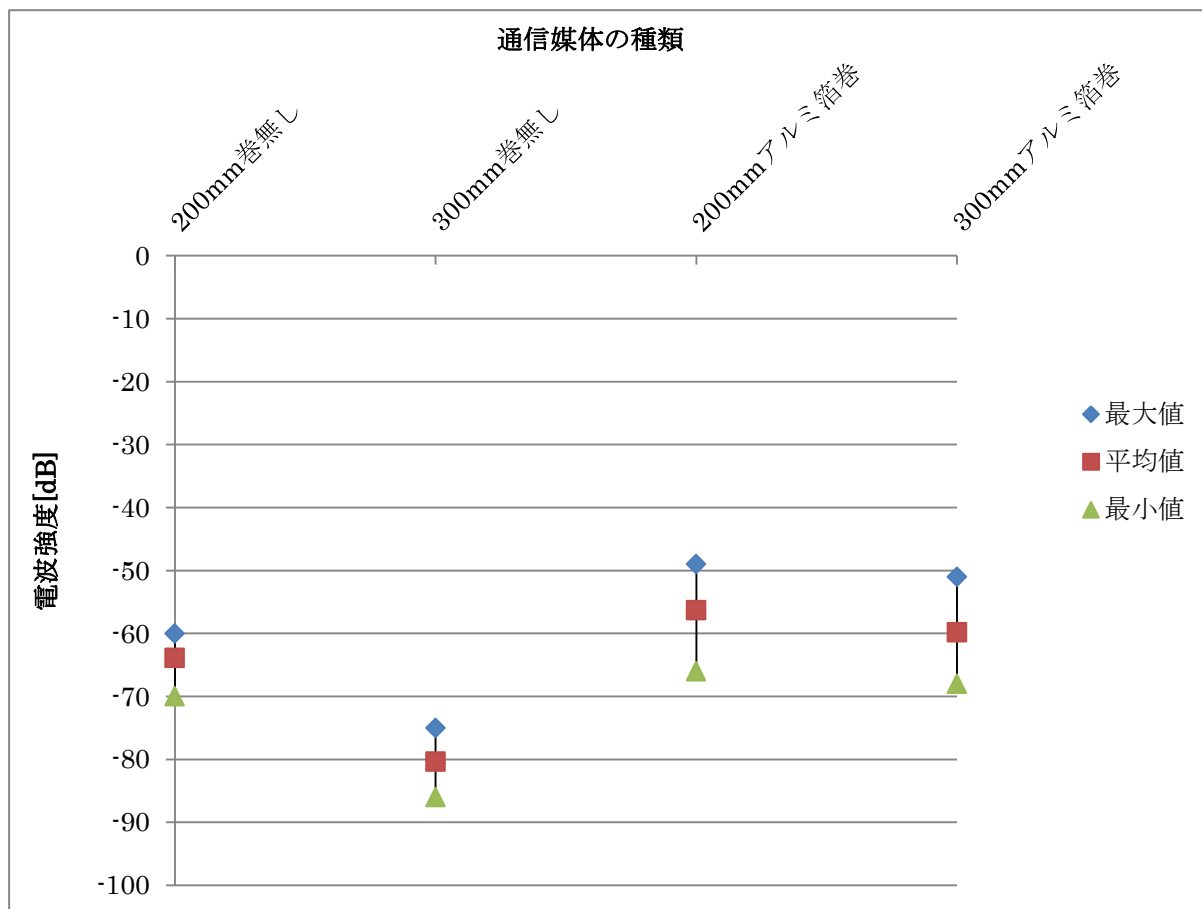


Fig. 5-7 Result for Comparing Aluminum Foil Wrapping

伝搬経路に巻く金属に金属網を用いた比較結果を Fig.5-8 に示す。すべての金属を巻き付けた結果は巻き付けていないものと比べて減衰量が抑えられていることが確認できる。アルミ箔と亜鉛網の結果を比較すると、平均と最大値のばらつきはほぼ変わらないが、最小値のばらつきが亜鉛網のほうが少ない結果となっている。最大値が変わらないことから、巻き付ける金属の穴の有無および穴の大きさによる改善効果の変化はないと考えられる。一方、最小値のばらつきには10[dB]ほどの差がついている。電界強度の低下は伝搬経路と水密容器の接触具合や水密容器内部の部品の微妙な位置関係によって変化するため、これら伝搬経路への金属巻き付けとは異なる部分が原因で発生した低下であると考えられる。

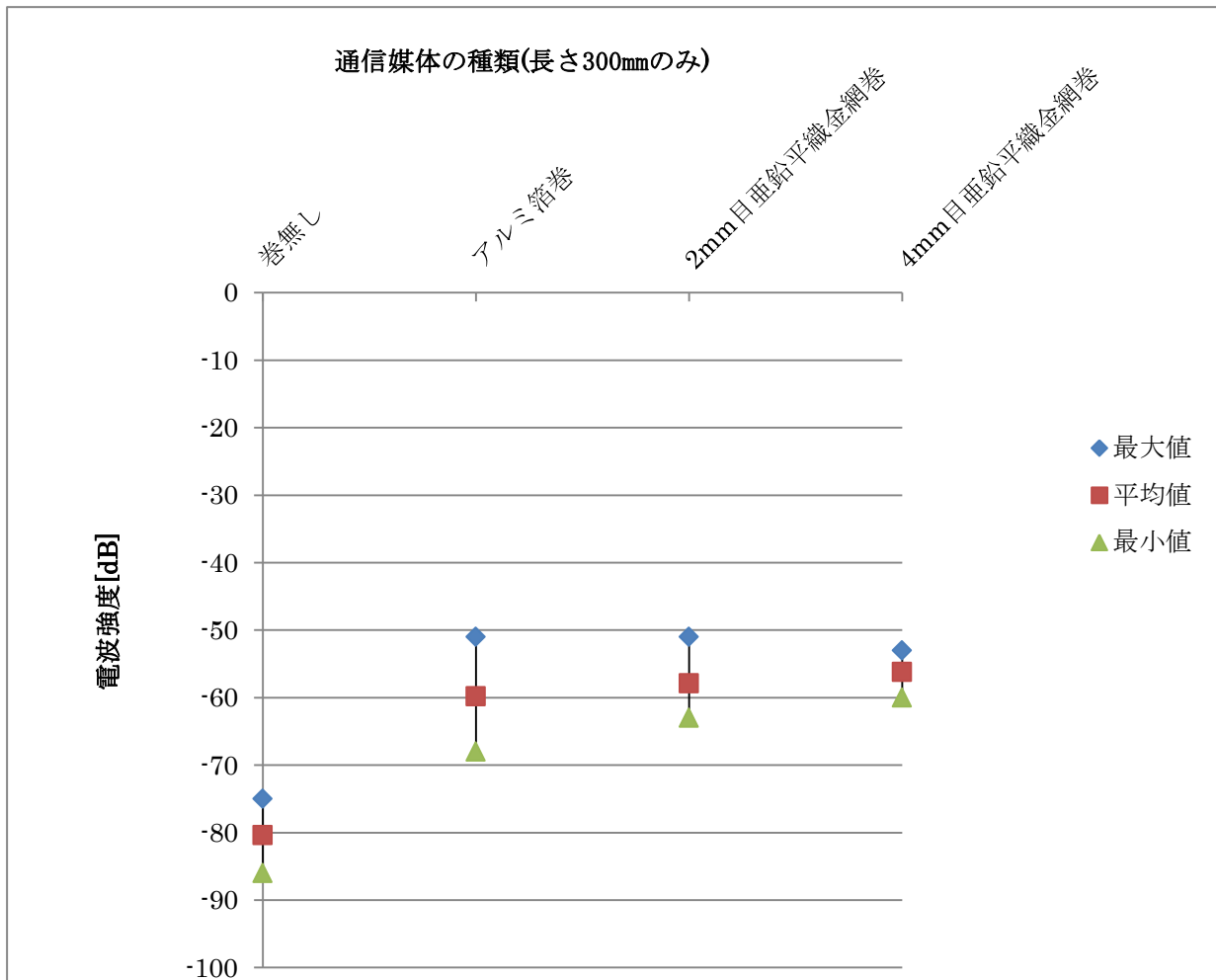


Fig. 5-8 Result for Comparing Wrapping Material

伸長手法を適用した場合の電界強度と通信速度の関係について示す [5]。実験方法は 4-6 と同様であり、伝搬経路は Fig.5-9 に示すものを使用した。寸法は Table4-3 で示した寸法と同様で、本項で提案した伸長手法を適用している。結果を Fig.5-10 に示す。すべての経路において Fig.4-39 から改善がみられる。特に、小型と中型の長方形経路が大型の円筒形経路、長方形経路と遜色ないレベルまで改善している。小型と中型の長方形経路では高次モードの発生による減衰が発生していると考えたが、この高次モードが金属部で反射することにより外部へのエネルギーの漏洩を抑え、電界強度の低下を抑えたものと考えられる。

この結果より、通信速度の視点から見た場合でも通信距離伸長手法が有効であることが確認できた。



Fig. 5-9 Propagation Channel Wrapped by Aluminum Foil for Communication Capacity

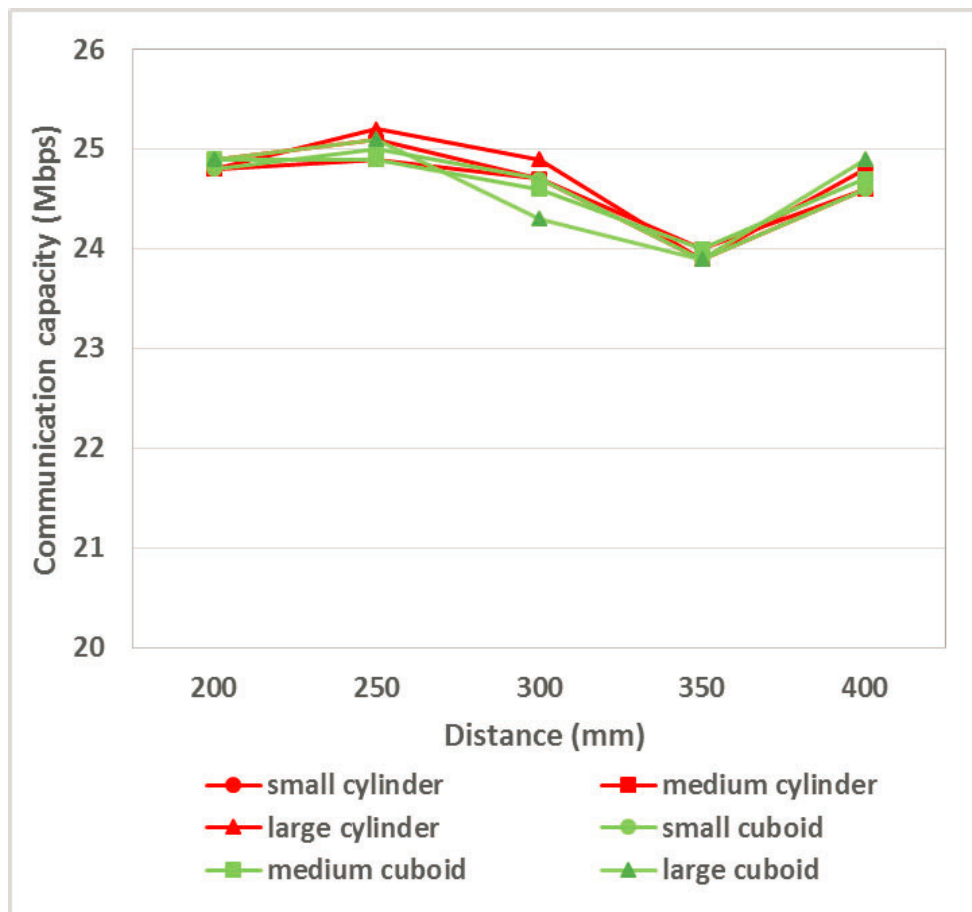


Fig. 5-10 Result of Communication Capacity with Range Extension Method

5-3 海中電波通信手法適用時の位置拘束

5-3-1 検証内容

海中電波通信手法は江戸っ子一号プロジェクトで適用されており、モジュール間の通信に利用された [6]。その際、内部機器の配置によっては、通信が成立しないという事象が発生した。同事象は内部のフレームによって電波が伝搬する経路が完全に遮断されたことで発生したため、通信機器を配置する位置と、内部フレームによって伝搬が遮断される条件を検討する必要があることが判明した。

5-2 の伸長手法でも述べた通り、電波は金属内部を伝搬せず、ごく表層部で反射する性質を持つ。これは金属が内部で保有している自由電子に電波が作用し、自由電子のエネルギーを上げることで、自由空間電子が再度金属外部に放射するためと考えられている。江戸っ子一号の例では、金属により電波が反射され、または容器外部に伝達し海水により減衰したため、受信装置まで電波が到達しなかったことが原因であると考えられる。このため、内部フレームに一部伝搬用の経路を設けておくことで、通信が成立すると予想される。

本項では、送受信機器とフレームに設けた経路および海中電波通信手法で使用する伝搬経路の位置関係による通信状態の変化について確認する。

5-3-2 実験

実験の構成を Fig.5-11、通信窓の位置関係を Fig.5-12 に、水密容器の内部を Fig.5-13 に示す。水密容器を 2 つ用意し、そのうち片方の内側をアルミ箔で完全に覆った。Fig.5-12 に示すように、アルミ箔の底面側の一部に一辺 40[mm]の正方形の穴をあけ、電波を伝搬させるための通信用窓とした。通信用窓は、水密容器長手方向に 3 種、幅方向に 3 種の計 9 種の箇所と、窓なしの全 10 種を用意した。これらの水密容器に、Wi-Fi でアドホック通信状態とした小型パソコン 2 台をそれぞれ 1 台ずつ封入し、シリコンゴム製の寸法 910[mm]×260[mm]×10[mm]の伝搬経路上に載せ、海中電波通信手法を適用した状態にした。Fig.5-13 に示すように、小型パソコンの右手側に Wi-Fi ドングルを取り付け、これを使用して通信を行うことで、送受信で使用するアンテナの位置が分かりやすくなるようにし、アンテナ位置と通信窓の位置関係による影響が観察できるようにした。伝搬経路に接触した状態の水密容器を水槽に沈め、電界強度を計測した。計測には、小型パソコン上で inSSIDer を立ち上げて記録した。各計測は 5 回ずつ行い、計測結果を平均化した。

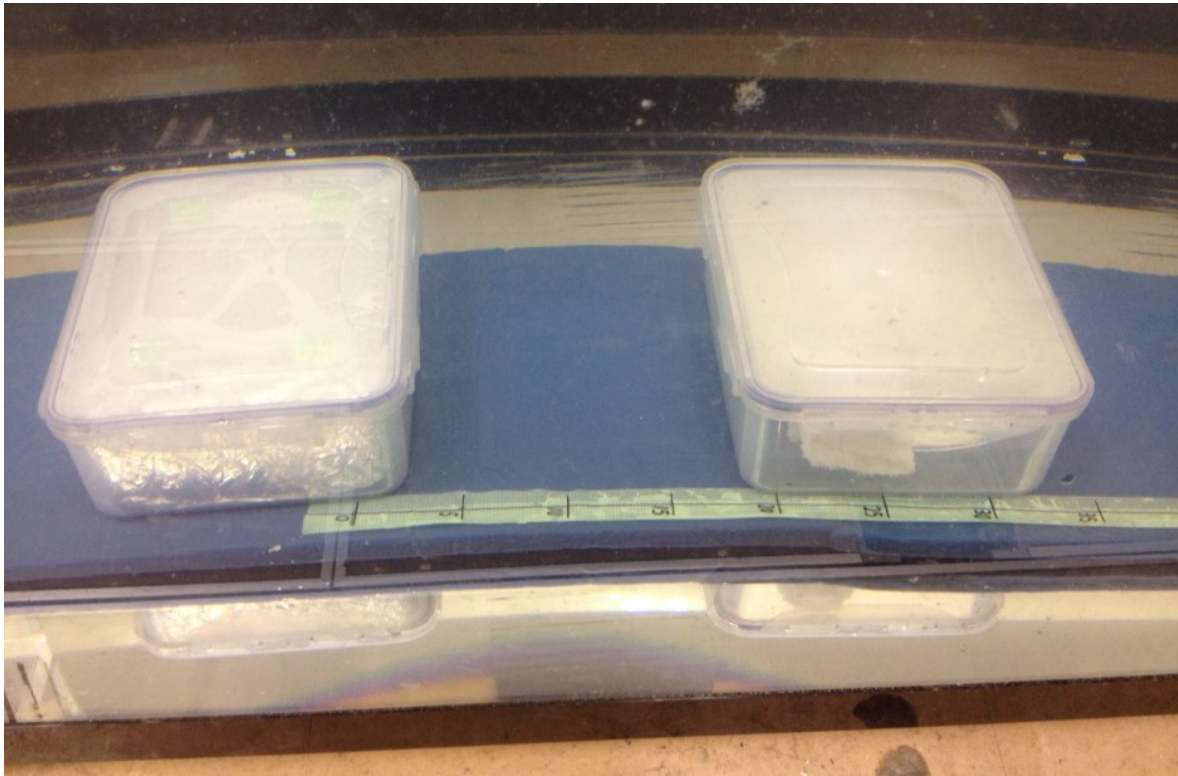


Fig. 5 -11 Experimental Component for Confirming Positional Relation

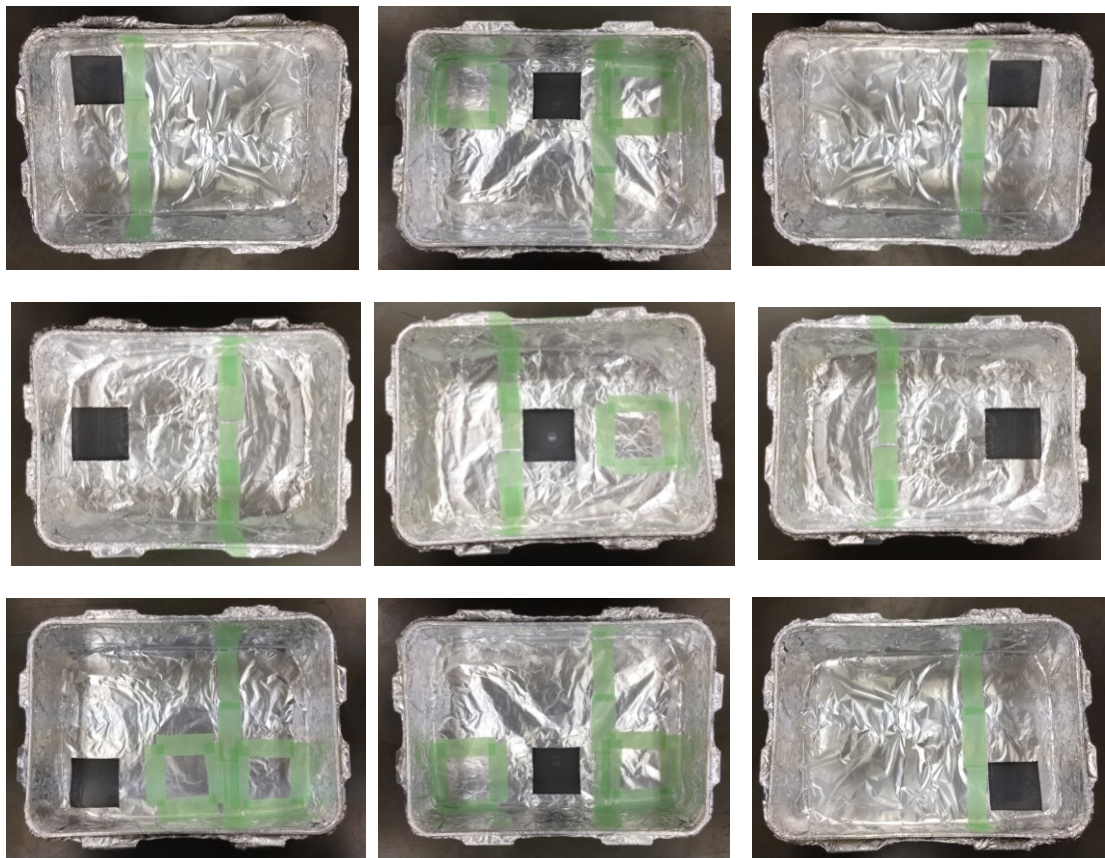


Fig. 5 -12 Propagation Window and Position of Window

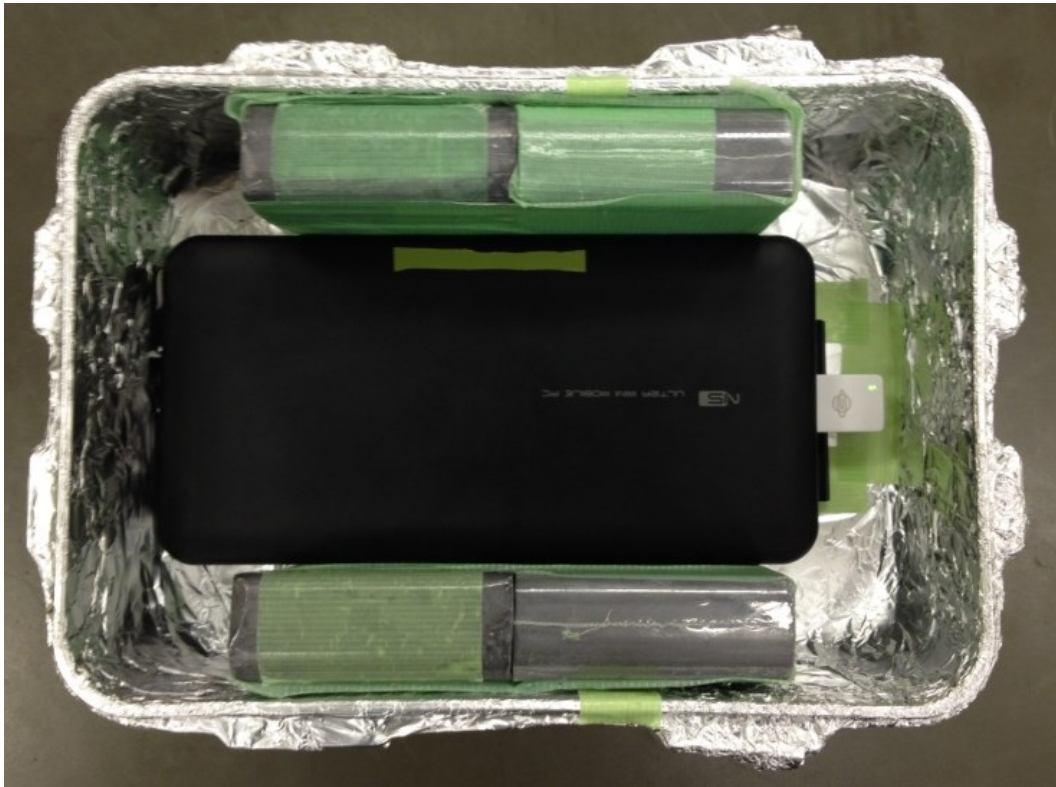


Fig. 5-13 Inside of Watertight Case

5-3-3 結果

計測結果を Fig.5-14 に示す. アルミ箔に穴がない状態では通信が成立しなかったが, 穴をあけることで伝搬経路までの伝搬が確保され, 通信が成立するようになることが確認できる. 穴の位置によって電界強度に変化がみられるが, 穴の位置と電波強度の相関については本実験の結果からは確認できなかった. しかし, 小型パソコンおよび錘をケース内に配置すると中央周辺の穴が塞がれる形となるために中央の穴は強度が下がる傾向にあること, 上が通信先を向いていることから左右で上と下を比較した場合上の強度が高くなる傾向にあることが読み取れる. これより, フレームを用いる場合は完全に全体を覆わなければ電波が伝搬すること, 金属を配置する場合は通信窓の周辺を可能な限り避け, 通信窓の閉塞や通信機器への影響を避けるのが重要であると言える.

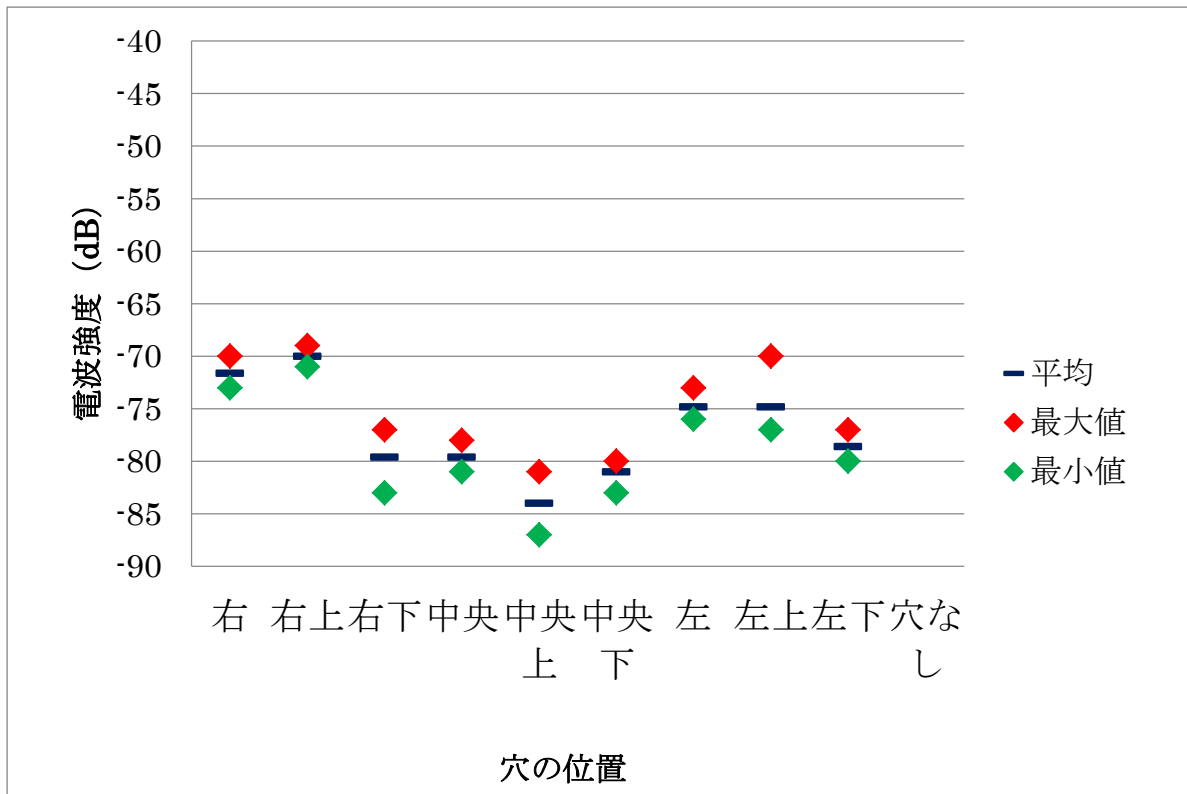


Fig. 5-14 Result of Positional Relation

5-4 複数規格の混在

5-4-1 検証内容

電磁波を用いる通信は様々な通信規格が検討、規格化されている。2.4[GHz]帯でよく知られているものだけでも、Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee などの規格が制定、利用されている。これらの規格はそれぞれ通信方式に特長があるが、すべて 2.4[GHz]の周辺を使用して通信を行っており、同時に使用した場合、お互いに干渉する恐れがある。しかし、ISM バンドを使用するという条件上、干渉、妨害は容認できなければならない。

本項では、同一の周波数帯を使用する、異なる規格の通信を利用した場合の、お互いへの干渉の度合いについて実験的な確認を行う。ここでは、Wi-Fi と ZigBee という、2 種類の方式を併用した場合について確認を行った [7]。両規格とも使用する中心周波数が固定であるため、周波数ホッピング方式をとる Bluetooth と比較するよりも干渉の影響が大きく出ることが予想される。

5-4-2 実験

実験の構成を Fig.5-15 から 5-17 に示す。小型パソコンを封入した水密容器と、Wi-Fi 及び ZigBee の通信素子を封入した水密容器をそれぞれ用意した。通信素子を封入した水密容器は、容器を加工して有線で通信素子と小型パソコンとは別のパソコンに接続できるようにした。小型パソコンには USB カメラを接続し、カメラサーバーを立ち上げておいた。

使用する周波数を Table5-1 に示す。Wi-Fi 側の使用周波数はチャンネル 1 の 2.412[GHz]で固定とし、ZigBee 側の中心周波数には最も近い 12 チャンネルの 2.410[GHz]、最も遠い 24 チャン

ネルの 2.470[GHz], 自動接続で選択された 13 チャンネルの 2.415[GHz]を使用した.

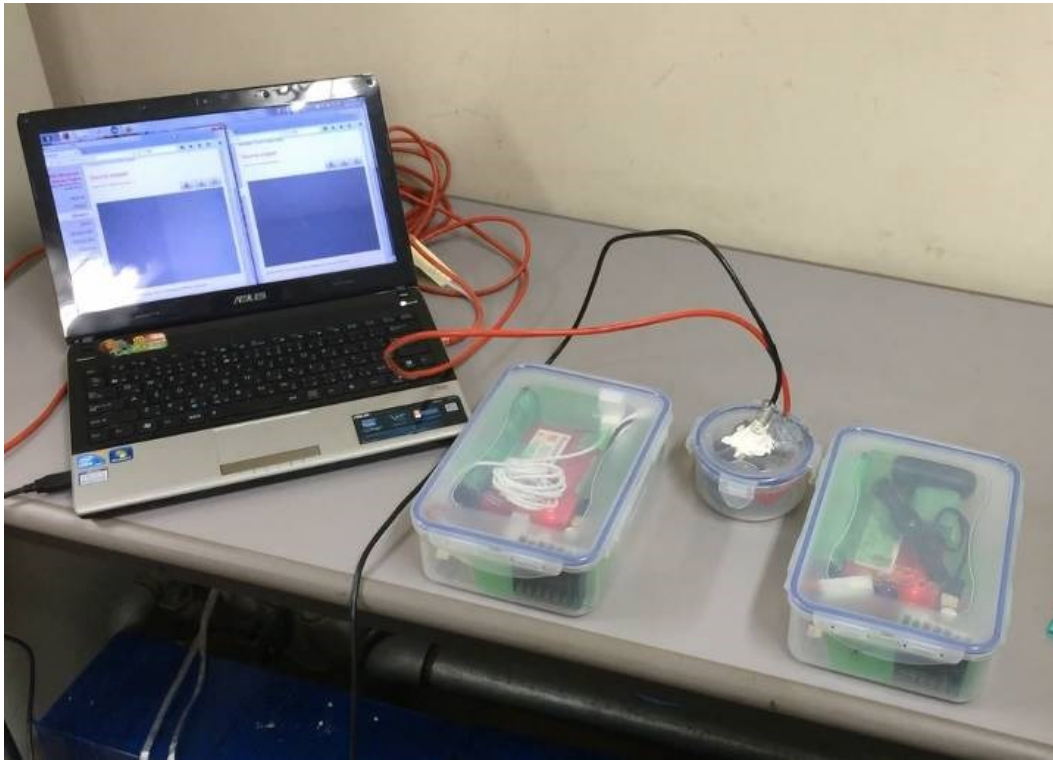


Fig. 5-15 Components for Experiment of Mixing Communication Standard

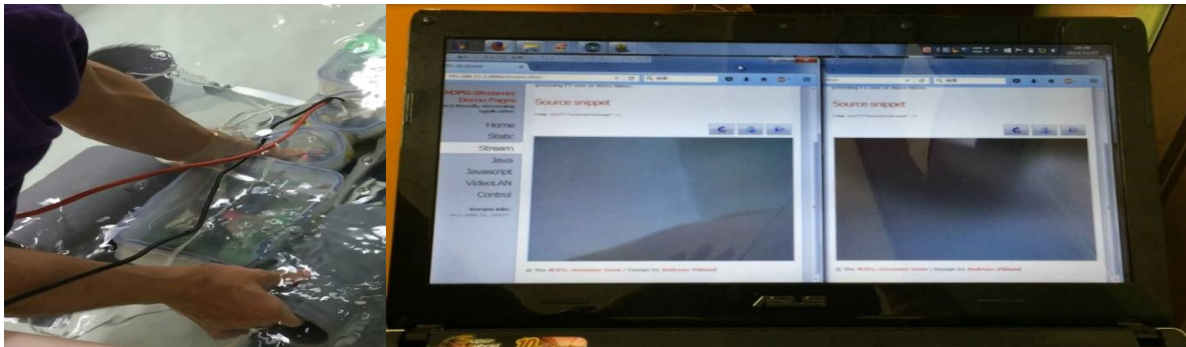


Fig. 5-16 Experimental Situation

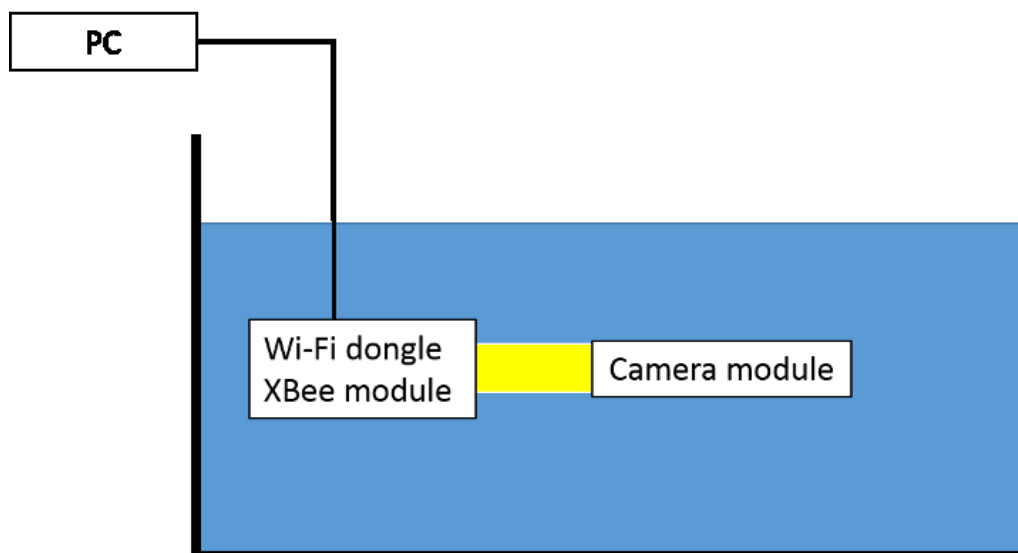


Fig. 5-17 Image of Experimental Components

Table 5-1 Frequency for Experiment

Standard	Channel	Center freq. [GHz]	Width of freq. [MHz]
Wi-Fi	1	2.412	22
ZigBee	12	2.410	2
	13	2.415	
	24	2.470	

5-4-3 結果

実験結果を Table5-2 に示す。Indi は Wi-Fi, ZigBee をそれぞれ別々に計測した結果, その他の3つが Wi-Fi と ZigBee を同時に使用した時の計測結果である。Wi-Fi 側の計測結果は, Bit rate, Link quality, Signal level, Mean receive rate のどれも干渉の影響を確認できなかった。ZigBee 側の計測結果は, Mean signal level には影響が出ていないが, Retry number の値が Wi-Fi に近い値である channel12, channel13 を使用した時に増加している。この計測結果からは, 干渉の影響は ZigBee 側に再送回数の増加という形で出てきていることが確認できる。

本実験では Wi-Fi 側でカメラ映像という大容量のデータ通信を行っていたため, 一度 Wi-Fi が通信を行うとそのデータ量により, 帯域を占有していたと考えられる。よって映像伝送間に通信をしようとした ZigBee は干渉を受け, Retry Number を増加させた。逆に ZigBee で通信していた内容は簡単なコマンドのやり取りのみで帯域の占有時間が短く, Wi-Fi 側に影響を与えなかったと考えられる。これより, 海中電波通信手法においても, 異なる規格による同一帯域の同時利用は不可能であり, 時分割的な利用方法が必要になることが確認された。

Table 5-2 Result of Experiment

		Indi.	Near.	Far.	Auto connect
Wi-Fi channel		1	1	1	1
XBee channel		13	12	24	13
Wi-Fi	Bit rate [Mbps]	150	150	150	150
	Link quality [-]	97/100	100/100	100/100	100/100
	Signal level [-]	63/100	71/100	72/100	69/100
	Mean receive rate [Mbps]	1.370	1.315	1.270	1.330
XBee	Retry number [times/times]	0/690	38/735	5/750	20/720
	Mean signal level [dB]	-52.0	-50.6	-52.1	-43.8

5-5 伝搬経路の屈曲が与える影響

5-5-1 検証内容

4-4 の実験でも触れたとおり，海中電波通信手法においては伝搬経路の幅方向に十分な寸法を持たせることで，伝搬時の損失が小さくなる傾向にある．一方で，実用時の通信機器の位置関係は必ずしも条件のよい配置で使用できるとは限らない．4-1 の実験で示した通り，海中電波通信手法を発見した時には，アンテナの位置関係は直線上になくても通信が成立している．このような直線関係ではないアンテナの配置を有効に活用することが可能になれば，海中電波通信手法の大きな利点になると考えられる．

アンテナの配置が直線関係にない状態での通信については，松永らが伝搬経路の屈曲における検証を行っている [8] [9]．松永らの検証から，S 字曲げおよびクランク曲げの両方において，曲げ部分で電界強度の急落が発生することと，曲げ部分を離れることで曲げ部分入射前の電界強度近くまで回復することが確認できる．また，S 字曲げよりもクランク曲げは減衰が大きくなること，クランク曲げの角部に反射板を置くことで，クランク曲げ角部で発生する大きな減衰を抑制することが可能であることが示されている．松永らの検証では，伝搬経路は波長に対して十分な幅を持っていることが仮定されていたため，海水電波通信手法では伝搬の形式が異なる可能性があるが，これらと同様に，角部をスムーズにすることで減衰量を抑えられる可能性がある．

5-5-2 実験

Fig.5-18 および 5-19 に実験の構成を示す [10]．実験手段は他の実験と同様，水槽を人工海水で満たし，その中に小型パソコンを封入した水密容器を 2 つ入れ，その間に伝搬経路を設置した．伝搬経路の設置方法は，屈曲部に対する入射方向の影響を確認するため，伝搬経路の断面からと

底面から入射するよう配置した. Fig.5-20 に, 実験で使用した伝搬経路を示す. 左から順に直線, 30°]曲げ, 60°]曲げ, 60°]曲げ(屈曲部 R 付き), 90°]曲げである. 伝搬経路の断面は $50[\text{mm}]$ の方形とし, 中心距離を $300[\text{mm}]$ とした. 屈曲は 0°]から 90°]まで, 30°]ずつ変化させたものを用意し, 屈曲位置は経路の中央とした. また, 松永らの検証より [8], 曲げ部分の角部をスムーズにすることで電界強度の低下が減少したことから, 60°]曲げの経路においては, 屈曲部の R 取りの有無が電界強度に与える影響も同時に比較した. 各条件で 5 回ずつの計測を行い, それらを平均化して比較した.

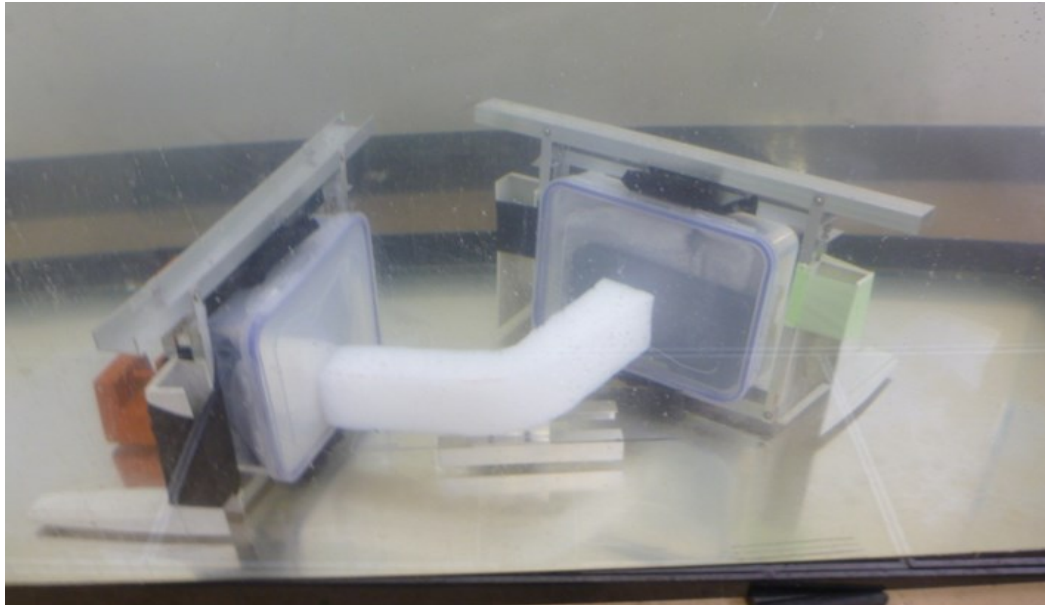


Fig. 5-18 Picture of Experiment for Inflected Propagation Channel

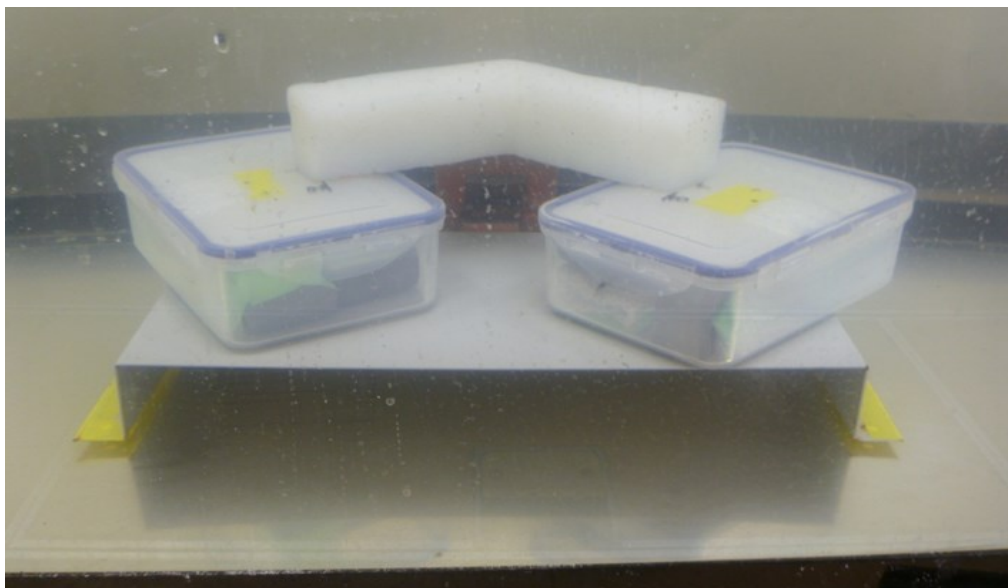


Fig. 5-19 Variation of Inflected Propagation Channel Placement



Fig. 5-20 Inflected Propagation Channel

5-5-3 実験結果

断面から入射した場合の比較を Fig.5-21 に、底面から入射した場合の比較を Fig.5-22 に示す。断面からの入射とした場合、伝搬経路の屈曲による有意な傾向は確認できず、すべての屈曲状態において通信が可能であった。Rの有無による影響も屈曲と同様、有意な差異は得られなかった。一方、底面からの入射とした場合、屈曲角度が大きくなるにつれて電界強度の下限が低下していくことが確認でき、値の収束が悪くなっている。90° 曲げの経路では最低値が-90[dB]近くまで減衰しており、Wi-Fi 通信が不可能になる手前まで低下している。また、こちらでは R の有無により電界強度及び電界強度の収束度合いを改善することができている。伝搬経路幅に違いはあるが、松永らの検証と同様に、海中電波通信手法においても屈曲部をスムーズにすることで余計な減衰が抑えられることを確認した。

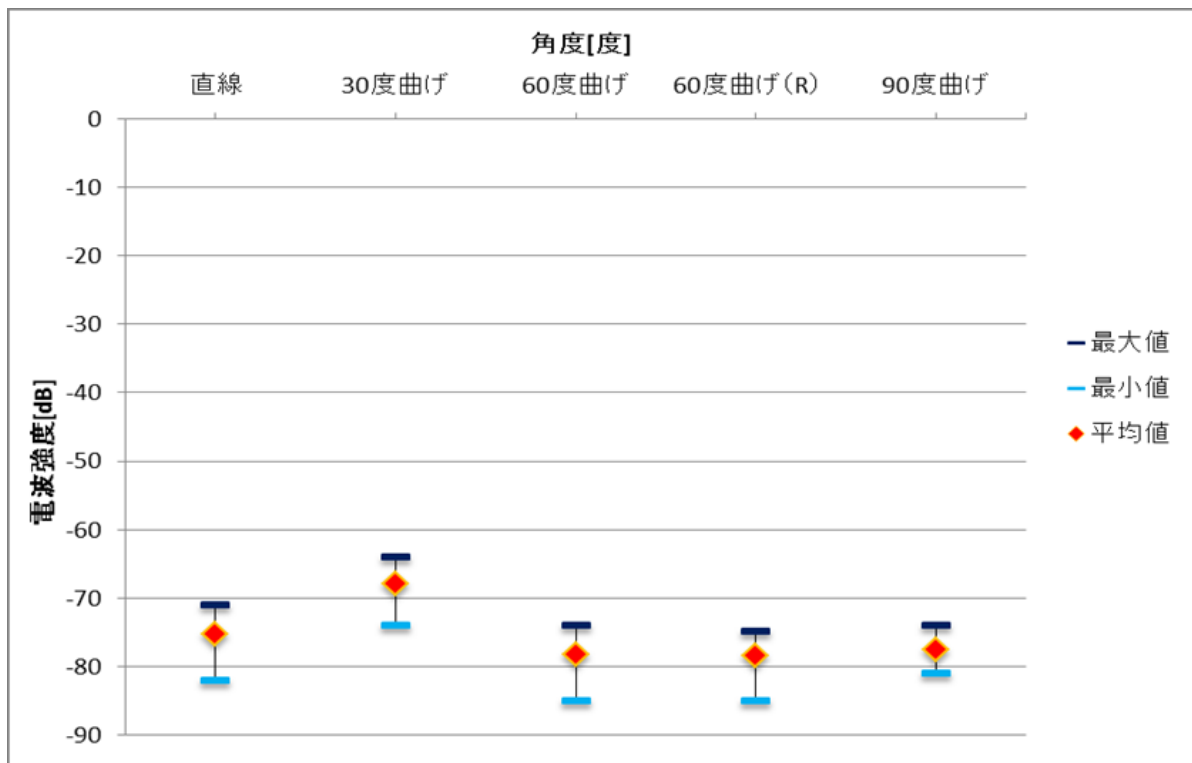


Fig. 5-21 Result Diagram -Incident from Cross Section-

(a)

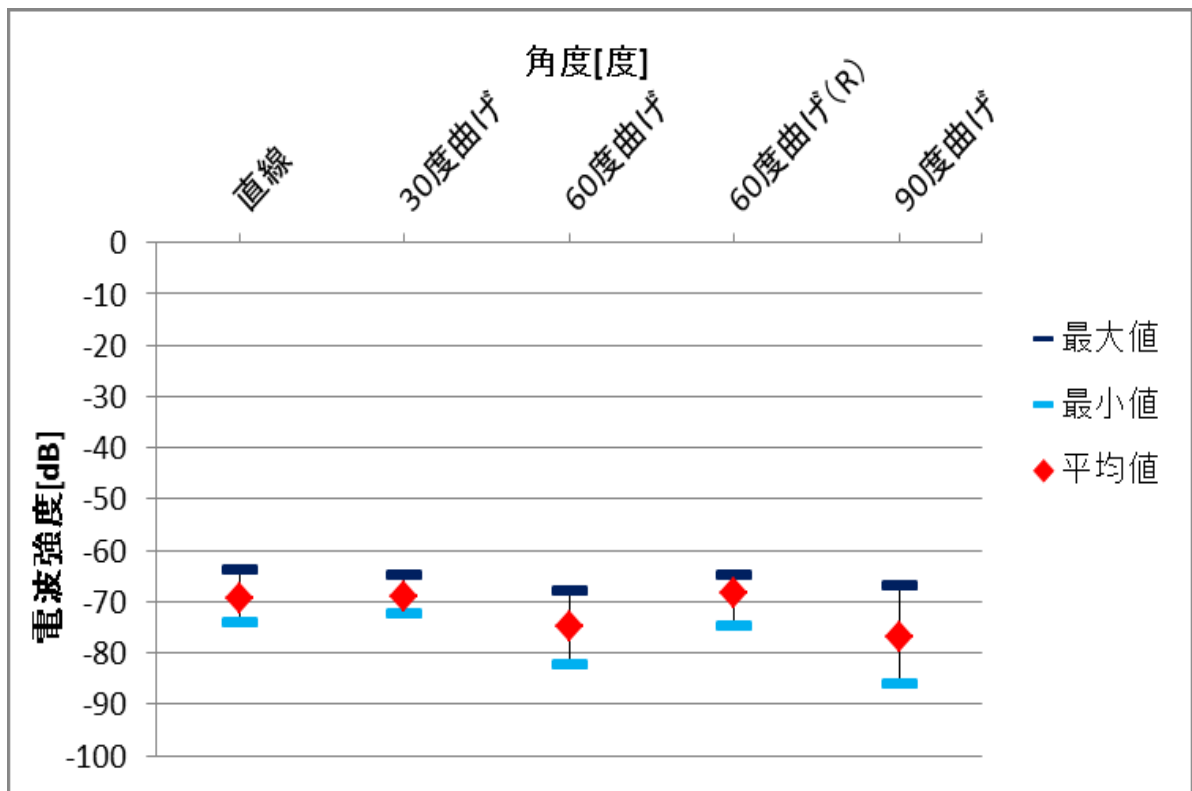


Fig. 5-22 Result Diagram -Incident from Bottom-

5-6 まとめ

本章では、海中電波通信手法の適用範囲を拡大、および局限するための実験を行い、適用可能な範囲を模索した。

伝搬経路を金属で覆い、伝搬経路からの伝搬用エネルギーの発散を防ぐ通信伸長手法の提案により、通常の中電波通信手法では通信が不可能な範囲まで通信を実現した。この実験では、伝搬経路を全て覆うのではなく、網のような穴が開いている金属でも機能を発揮することを確認できた。

金属が電波を遮断することから、通信経路の途中に金属壁があると、そこで電波が遮断されてしまう。ただし、水密容器内という十分に狭い空間において、経路の一部を開けておくことで、十分通信が可能な電界強度で伝搬を行うことができる。この時、LoSを確保するという考え方からも言える通り、できるだけ伝搬経路の変針量を小さくすることで、伝搬損失を抑えることが可能である。

複数の通信規格が同一の周波数を使用すると干渉が発生する。このとき、発信する電波の強度がほぼ等しいのであれば、データ伝送量の大きい側の通信にはほぼ影響が出ず、データ伝送量の小さい側の再送回数が増加する。

屈曲については、本手法は単純な屈曲の影響をほぼ受けずに通信が可能であること、屈曲の角部を滑らかにすることで、電界強度の減衰を改善できることを確認した。

これらの知見を活かしていくことで、海中電波通信手法をより適切に適用することが可能である。

参考文献

1. 清水悦郎, ほか. 海中電波通信手法伸長手法. 申請中
2. SaitoTakuya, ほか. Development of Method to Extend Radio Wave Communication Range under the Sea. 出版地不明 : Proceedings of the International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 2014. ページ: 1913-1918.
3. 山口芳雄, ほか. 金網によるトンネル内電波減衰の改善について. 出版地不明 : 電子情報通信学会技術研究報告 MW93-52, 1993. ページ: 23-30.
4. 「電波伝搬ハンドブック」編集委員会. 電波伝搬ハンドブック. (編) 細矢良雄. 出版地不明 : リアライズ理工センター, 1999, 8, ページ: 65-84.
5. HayamiAkihiro, OzawaMasayoshi , ShimizuEtsuro. Throughput Analysis of Radio Communication under Water. 出版地不明 : Proceedings of the International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (IEEE SMC 2015), 2015. ページ: 479-483.
6. 海洋研究開発機構. Blue Earth Time Travel 120 「江戸っ子一号」が日本海溝推進 8,000m の深海底に降り立つ. (オンライン) (引用日: 2017年7月24日) https://www.jamstec.go.jp/j/jamstec_news/20131220/img/be120_p24-27.pdf.
7. OzawaMasayoshi, ShimizuEtsuro , MatsuokaRyo. Development of Camera Module for Module-Composite Underwater Vehicle. 出版地不明 : The Proceedings of the Twenty-sixth (2016) International Ocean and Polar Engineering Conference, 2016. ページ: 505-510.
8. 松永利明, 下河大浩 , 内田一徳. S字形曲がりおよびクランク形トンネル内の電波伝搬. 出版地不明 : 社団法人映像情報メディア学会技術報告, 2003. ページ: 21-24.
9. 松永利明, ほか. クランク形曲がりをもつ方形トンネル内の電界強度分布. 出版地不明 : 電子情報通信学会総合大会, 1995. ページ: 20.
10. OzawaMasayoshi, ほか. Communication characteristics of UHF band under the sea through inflected propagation channel. 出版地不明 : Proceedings of 2013 IEEE International Underwater Technology Symposium, 2013. ページ: UT2013-1022.

第6章 結論

海洋には学術的、経済的に高い利用価値があり、それを活用するためには海中探査機材の活用が不可欠である。広範囲を効率よく同時に探査することが求められ始めており、それに応えるために探査機材を同時に運用する手法の開発が着手されつつある。複数同時運用を実現するために様々な提案が行われているが、本論文では探査機材の低コスト化を実現するために、海中電波通信手法を用いたモジュール型水中ロボットを提案した。

第1章ではまず、海洋のうちでも特に深海は宇宙空間と並ぶ過酷な環境であり、地球の半分以上を占める広大な領域であることを述べた。そこには学術的、経済的に様々な価値を有する資源が存在することが知られているため、各国とも高い関心を示しており、より詳しく知るための様々な調査方法が模索されている。船やROV、AUVなどの探査機材が調査に用いられてきており、近年ではそれらを複数台同時に運用することの検討が進められている。これにより、今まで得ることが困難であった一定海域の多点同時計測というデータが取得可能になると、新たな探査機材が求められることが予想される。この新たな探査機材には、構成部品を容易に交換可能とするためのモジュール化と、モジュールに分割した構成部品を容易に接続するための通信技術が必要になると考えた。

第2章では改めて深海という環境を調査することの難しさを述べたのち、これまでどのような探査機材が開発されてきたかを示した。深海探査はダイビングベルのような有人の環境圧潜水から始まり、技術の進歩に合わせて耐圧殻を使用した有人潜水艇、無人での遠隔操縦を可能としたROV、自律行動を行うAUVが開発、運用されてきた。現在は調査の高効率化を目的として、AUVの複数台運用といった広範囲で同時に複数台の機材を運用するための技術開発が行われている。大量の機材を運用することを考えたとき、全体のコストをどのようにして避けるかという問題を避けることはできない。陸上ではこれを、システムを分割してモジュール化することにより、モジュール単位での再利用性を高めるという手段で実施しており、水中探査機材の一部でも同様の試みが行われている。通信は有線接続と無線接続があり、無線接続では音波、光、電波の3種が媒体として使用されている。電波は水中での減衰が大きいためこれまであまり用いられてこなかったが、モジュール間の接続という近距離、高速かつ多点での通信において他の媒体より適している可能性がある。

第3章では、探査機材のコスト低減として機材の構成方法に着目し、構成部品の再利用性を高めるための手段としてモジュール化構造を有する探査機材であるMCUVを提案した。本提案におけるモジュールとは、探査機材を構成する要素に単体で動作可能とするための機能を付与したものである。MCUVはモジュールを第4章で提案する海中電波通信手法によって連携させ、一つの機材として振舞わせるというコンセプトである。このコンセプトは実証試験機「MaNTA」および「江戸っ子1号」を通じて、実機を構成することが可能であり、流通量の多い規格品の利用によるコスト低減に寄与できることを確認した。

第4章では、モジュール間のような近距離かつ多点で高速通信が求められる状況において、高周波の電波を使用して通信を実現する海中電波通信手法を提案した。海中において通信を行いたい2点間に誘電体を配置することで、海水による減衰を受けない伝搬経路を用意し、通信を実現するものである。海中電波通信手法に影響を与える要素としては伝搬経路の材質と形状、電波の

周波数が考えられ、それらは通信距離と通信速度に対して影響を与えるものと考えた。これらの項目について実験を通じて検証を行うことで、材質は導電率および誘電率が低いものが適していること、形状は1辺の長さが波長以上確保できるとよいこと、より高い周波数は狭所における通信で有利であることという指針が得られ、また、電界強度の低下は通信距離と通信速度の両方に影響を与えることを確認した。

第5章では、海中電波通信手法の適用範囲をより広げるため、伝搬形態に近い導波管の理論を参考としながらその手段を模索した。導波管では伝搬経路からのエネルギーの漏洩を防ぐことで通信距離を伸ばしている。これを参考とし、伝搬経路を金属の薄膜または網で覆うことにより、通信距離を延長することが可能であることを確認した。伝搬経路の途中が完全に金属で遮断されると通信が通じなくなるが、一部を通信窓として開けておくことで通信が成立する。通信窓の位置による電界強度への影響を確認したが、窓を遮断することにより通信が不可能になること以外に明確な相関は得られなかった。同一周波数帯の通信規格を複数同時に使用することについては、帯域が完全に重複するのを避けることで利用が可能である。本手法は伝搬経路が屈曲しアンテナ同士が直線関係になくても通信が成立することが大きな利点である。伝搬経路は 90° まで曲げても通信が可能であり、屈曲部周辺の角部をスムーズにすることでさらに減衰を抑制することができることを確認した。

以上の実験を通じて、本研究で目的とした通り、大量展開用機材に向けた要素技術としてモジュール化およびモジュール間の通信手法を提案し、その利用可能な範囲を、実験を通じた検証により示した。また、これらの要素技術を提示することで、新たな深海探査機材開発に向けた一助となることができた。

以下では、今後の展開として3つの例を示す。1つ目として、MCUVはそのモジュール配置の自由度の高さから、モジュールの付け替えを行うたびに微妙に位置関係が変化し、制御特性が変化することが考えられる。MCUVをより有用な提案とするためには、微小な誤差を許容し、適応的に利用が可能な制御則の研究が必要である。2つ目として、MCUVのモジュールの配置変更のタイミングを本論文では明示していないが、これらを探査機材運用中に行うことを可能にすれば、運用内容に細かく合わせた機材の分離変形が可能になり、エネルギーや時間の効率向上につながられる可能性がある。3つ目として、海中電波通信手法を実際に探査機材で使用するためには、機材を製造する前に通信の可否を予測できなければいけない。そのためには、様々な材質が隣り合って複雑な場を形成しているモジュール内を、正確に予測できるシミュレータを実現することが必要である。

謝辞

本論文を執筆するにあたり，指導教員である清水教授には，多大なるご指導，ご尽力を頂きました．感謝の意を表します．

また，私の研究を引き継ぎ，これらを発展，進歩させてくれた研究室の後輩や、就学と業務の両立に理解を示していただいた三井造船株式会社の本田健一部長をはじめとする上司，同僚の方々にお礼申し上げます．

最後に，ここまで私の学業を支えてくれた両親と，生活面を支えてくれた妻 知美への感謝の気持ちをもって，謝辞にかえさせていただきます．