

# USV を経由して UUV からソーナー画像を リアルタイムデータ伝送する試験

— 並列航走による水中リアルタイムデータ伝送システム ( URCS ) の開発 —

**Experiment to Investigate the Real-Time Data Transmission of Sonar Images  
from a Cruising UUV to a Distant Support Vessel via a USV**

— **Development of an Underwater Real-Time Communication System ( URCS ) using Parallel Cruising** —

鈴木俊光	航空宇宙事業本部防衛システム事業部機器技術部	主査
須藤拓	技術開発本部総合開発センター機械技術開発部	主査
小林陽	技術開発本部総合開発センター制御技術開発部	
越智文俊	海洋・鉄構セクター愛知工場設計部	主査
鈴木尚也	防衛装備庁 艦艇装備研究所システム研究部	防衛技官
蒲英樹	防衛装備庁 艦艇装備研究所システム研究部	防衛技官
北島仁	防衛装備庁 艦艇装備研究所システム研究部	防衛技官

防衛省技術研究本部から依頼を受け、2010年2月に「無人航走体構成要素（その1）の研究試作」、2011年2月に「無人航走体構成要素（その2）の研究試作」の研究を開始した。そのなかで無人水中航走体（UUV）と無人水上航走体（USV）を用いた水中リアルタイムデータ伝送システム（URCS）、および協制御を用いたUUVとUSVの並列航走技術（PaCTeCC）を開発した。本稿では2014年7月に実施した「UUVから遠隔の支援船にUSVを経由してソーナー画像をリアルタイムに伝送する試験」の結果について述べる。

We have developed the Underwater Real-time Communication System ( URCS ) and a method called Parallel Cruising Technology by using Cooperative Control ( PaCTeCC ). The URCS is a system that allows an Unmanned Surface Vehicle ( USV ) to relay information on the status of an Unmanned Underwater Vehicle ( UUV ) together with sonar images to a distant base in real-time. This research was conducted in phases 1 and 2 of the “Study of UUV Technology,” a research program carried out for Japan Ministry of Defense. A sea trial involving the real-time data transmission of sonar images from a cruising UUV to a distant support vessel via a USV was conducted in July 2014. In this paper, we describe the PaCTeCC method and report the experiment results.

## 1. 緒 言

近年、UUV（無人水中航走体）を使った海底調査がさまざまな場面で実施されている。観測地域の広がりに伴い、有人の支援船が接近できないような海域での観測も予想される。津波、海難事故、または航空機墜落の後の捜索では、発見した物体を直ちに見分ける必要がある。このような場面で、効果的な観測を行うためには、離れた基地へ情報を伝送することや、リアルタイムの情報を基に観測コースを変更することが必要になる。

離れた場所からUUVを操作する例として、浮上したUUVを衛星通信を介して遠隔で操縦する研究がJAMSTEC（国立研究開発法人海洋研究開発機構）吉田

ら<sup>(1)</sup>によって報告されている。また、ASIMOVプロジェクトでは、オペレータが介在するUUVとUSV（無人水上航走体）の並列航走が開発されている<sup>(2)</sup>。さらにLBL（Long Base Line）ナビゲーションでUUVを追跡するUSVが開発されている<sup>(3)</sup>。

UUVを離れた支援船から操作し、水中を航走しているUUVから観測データをリアルタイムに取得することは非常に有効であるが、いまだその技術は開発されていない。そこで、筆者らはUSVを中継局として用いた水中リアルタイムデータ伝送システム（URCS）を開発した。このUSVは航走中のUUVのステータスや観測データを受信し、離れた支援船へ伝送することができる。観測データはリアルタイムに伝送される。USVは二つの音響通信器を

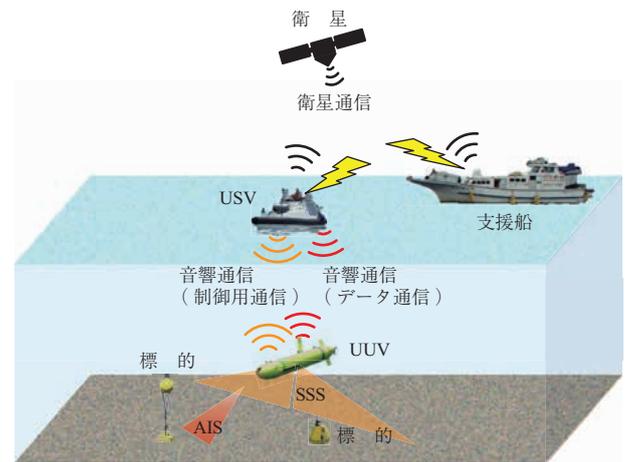
使って UUV と通信し、インマルサット（通信衛星による移動体通信を提供する民間企業）衛星通信（以下、衛星通信）を使って離れた場所と通信する。二つの音響通信器の一つは画像データを伝送する目的で使われる高速データ通信、他方はステータスやコマンドを伝送する目的で使われる制御用通信である。高速データ通信に使われるモデムは画像データを伝送するため制御用通信モデムに比べて伝送容量が大きいものを選定した。一般的に音響モデムを使ってデータ容量の大きい通信を行うためには電波と同じように高い周波数を使う必要があり、指向性が強くなる<sup>(4)</sup>、<sup>(5)</sup>。音波信号はスラントレンジ（センサから目標物までの直線距離）が大きくなればなるほど減少していく。この観点から USV は UUV の直上に保持するのがデータ伝送にとって効果的である。しかしながら、波・潮流・風などの外乱が多い海で UUV と USV の位置関係を保持することは困難である。そこで筆者らは協調制御を用いた UUV と USV の並列航走技術（PaCTeCC）を開発し UUV と USV に実装した。

筆者らは海で URCS と PaCTeCC の効果を確認するために UUV と USV を 1 台ずつ製作した。2014 年 7 月に USV を経由して、水中を航走する UUV から、ソナー画像を遠隔の支援船にリアルタイムデータ伝送する試験を実施し、その機能を確認した。

2 章では開発した URCS のシステムを詳細について、3 章ではシステム構成と機能の実装について説明する。4 章では試験結果について説明し、5 章では結論について述べる。

## 2. URCS

URCS の概念図を第 1 図に示す。はじめに UUV はサイドスキャンソナー（SSS：Side Scan Sonar）などのソナーを使って海底画像を取得する。次に UUV は画像データを USV に高速データ通信を使って伝送する。最後に USV がそのデータを離れた支援船に衛星通信を使って伝送する。UUV と USV はデータ伝送の間 PaCTeCC



第 1 図 URCS の概念図  
Fig. 1 Schematic illustration of the URCS

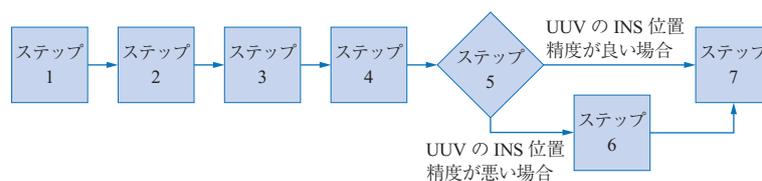
を使って並列航走する。リアルタイムデータ伝送を実現するために USV を常に UUV の直上に配置し続けることが効果的なためである。

選定した高速データ通信用のモデムは、45 度の指向性をもっている。これは我々が製作した UUV の制御深度のうち最も浅い 20 m の場合、水平偏差が 20 m 以内になるように USV を保持する必要があることを意味している。

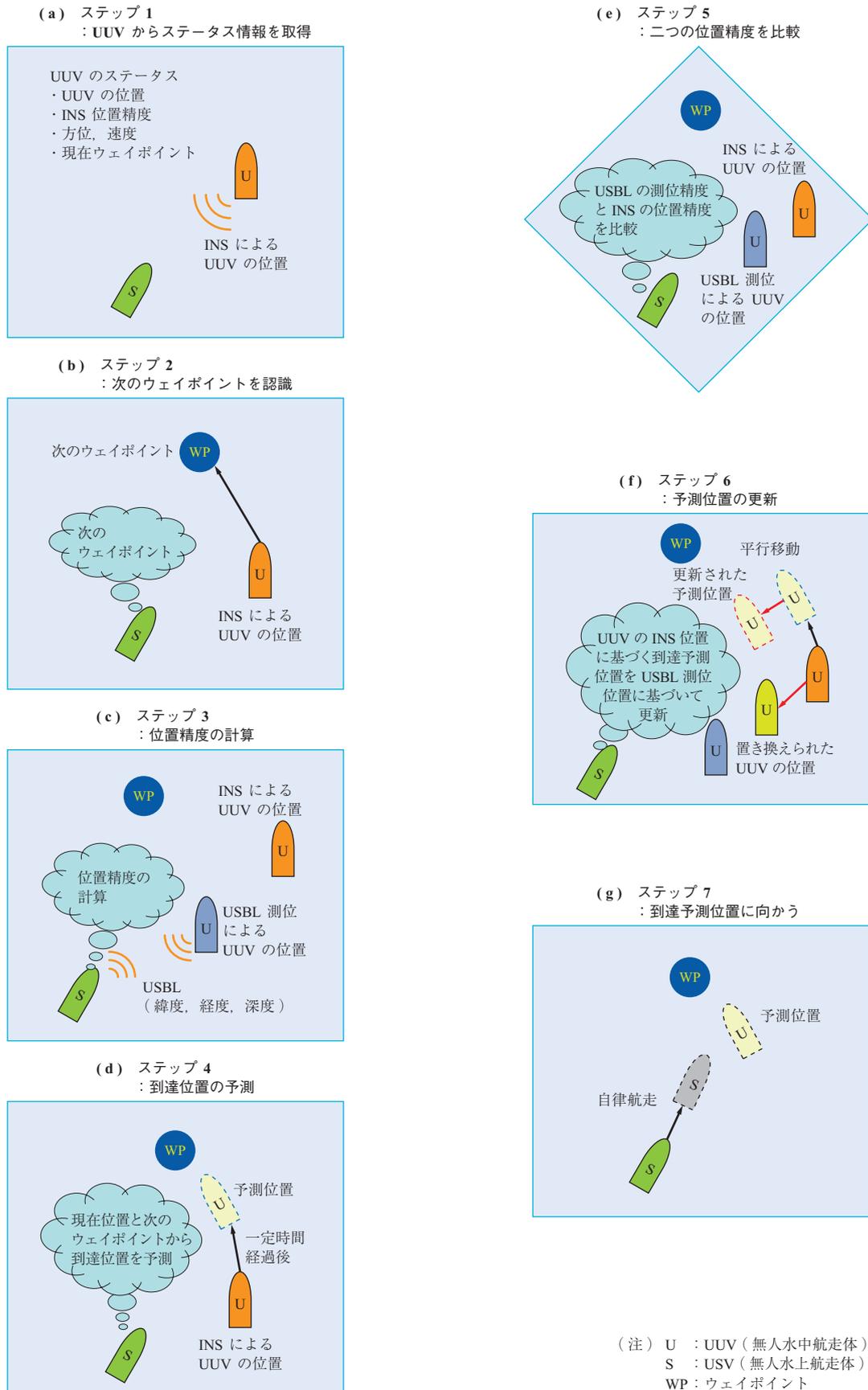
UUV マスター時の PaCTeCC の手順（ステップ）を第 2 図に示し、ステップ 1～7 の詳細を次に示す。PaCTeCC はステップ 1～7 を繰り返し実行する。

### ステップ 1（第 3 図 - (a)）

USV は制御用通信を使って UUV のステータスを取得する。ステータスには UUV の位置、INS（慣性航法装置）位置精度、方位、速度、現在ウェイポイント（水面からの深度もしくは海底からの高度と、緯度、経度およびウェイポイントを通過したとみなす範囲で表される通過点）などが含まれる。次のステータスや測位データが取得できない場合は前回取得した UUV のステータスを基に到達位置の予測をあらためて実施することで航走を継続することができる。



第 2 図 PaCTeCC の手順（7 ステップ）  
Fig. 2 PaCTeCC procedure (7 steps)



第 3 図 PaCTeCC の手順 (ステップ 1~7)  
 Fig. 3 PaCTeCC procedure (steps 1-7)

ステップ2 (第3図 - (b))

USV はステータスデータから UUV が次に目指すウェイポイントを認識する。

ステップ3 (第3図 - (c))

USV は USBL ( Ultra Short Base Line ) で UUV の位置を取得し、USBL で測位した UUV の位置精度を計算する。

ステップ4 (第3図 - (d))

USV は UUV の INS 位置と次のウェイポイントを基に、一定時間後の UUV の到達位置を予測する。

ステップ5 (第3図 - (e))

USV は USBL の測位精度と UUV の INS 位置精度を比較する。

ステップ6 (第3図 - (f))

もし UUV の INS 位置精度が悪い場合は、USV は UUV の INS 位置に基づく到達予測位置を USBL 測位位置に基づいて更新する。

ステップ7 (第3図 - (g))

USV は自律航走機能によって到達予測位置に向かって制御される。

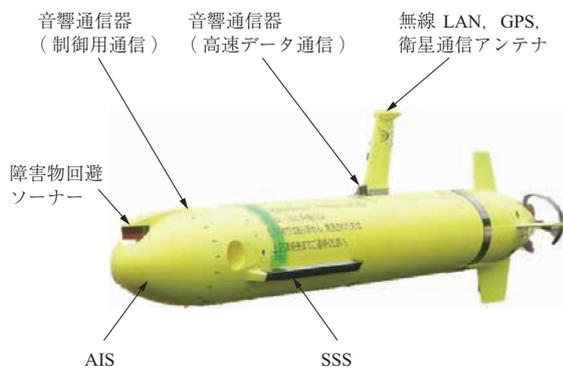
### 3. 機 材

URCS は以下の要素で構成されている。

#### 3.1 UUV

UUV は、① 自律航走機能 ② 障害物回避機能 ③ 画像収集機能 ④ 画像情報処理機能 ⑤ 画像伝送機能、を有している。外観を第4図に、諸元を第1表に示す。UUV は海底画像のための SSS と、前方のための音響画像ソナー ( AIS : Acoustic Imaging Sonar ) を備えている。

通常、UUV は現在位置を INS から取得する。DVL ( Doppler Velocity Log ) がデータを取得できる海底高度を



第4図 UUVの外観  
Fig.4 UUV overview

第1表 UUVの諸元  
Table 1 UUV specifications

項目	仕様
全長	3.5 m
重量	350 kg ( 気中 ) -2.0 kg ( 水中 )
最大深度	200 m
最大速度	7 kt
推進器	・プロペラ ( 主推進用 3 枚羽 ) ・サブスラスター ( 回頭用 )
航走時間	12 時間 ( 5 kt 航走時 )
センサ	・INS ・DVL ・深度圧器 ・GPS ・障害物回避ソナー ・SSS ・AIS
通信	・無線 LAN ・イリジウム衛星通信器 ・音響通信器 ( 高速データ通信 ) ・音響通信器 ( 制御用通信 ) ・USBL 測位装置

航走しているときには INS は DVL データを参照する。しかし、この INS-DVL システムを用いると、時間が経過するにつれ位置誤差が蓄積する。そこで、誤差が期待値よりも悪くなる前に INS 位置を正確な計測値でアップデートする必要がある。UUV の位置は USV の USBL と GPS ( Global Positioning System ) によって計測され、音響通信で送られ、定期的にアップデートされる。そのため、UUV の位置誤差は限定的で、位置精度は良い。

ソナーで取得した音響画像データはデータ伝送の前に圧縮される。圧縮の品質は 10 段階で設定可能である。これは目標物の大きさや海域の通信環境に応じて設定する。一方、生データは UUV 内部のハードディスクドライブに保存され、UUV を揚収後にイーサネットを使ってアクセスすることができる。画像データの伝送に使用される音響モデムには、伝送レートが 32 kbps のものを採用した。

#### 3.2 USV

USV は、① 自律航走機能 ② 障害物回避機能 ③ UUV 測位機能 ④ 画像情報取得機能、を有している。

USV の外観を第5図に、諸元を第2表に示す。

#### 3.3 管制ユニット

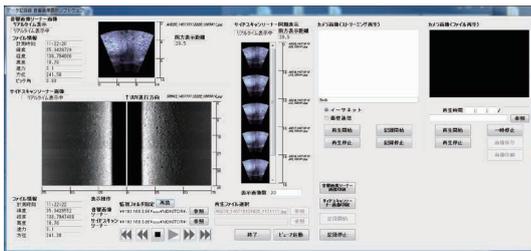
管制ユニットは 2 台のラップトップ PC、衛星通信装置、非常停止装置で構成されている。ラップトップ PC のうち 1 台はデータ表示に使われ、もう 1 台は UUV と USV の操作に使われる。操作画面のイメージを第6図にデータ表示器、第7図に操作画面を示す。データ表示用 PC はリアルタイムで通信された AIS 画像と SSS 画像を



第 5 図 USV 外観  
Fig. 5 USV overview

第 2 表 USV の諸元  
Table 2 USV specifications

項目	仕様
全長	8 m
幅	2.85 m
高さ	4.8 m
重量	3 100 kg (気中)
最大速度	7 kt
推進器	ウォータージェット船外機 2 機
航走時間	12 時間 (5 kt 航走時)
センサ	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ INS</li> <li>・ USBL 測位装置</li> <li>・ GPS</li> <li>・ 障害物情報取得装置</li> <li>・ 画像情報取得装置</li> </ul>
通信	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 無線 LAN</li> <li>・ インマルサット衛星通信器</li> <li>・ 音響通信器 (高速データ通信)</li> <li>・ 音響通信器 (制御用通信)</li> </ul>



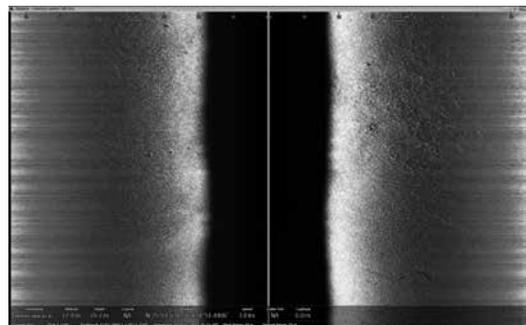
第 6 図 データ表示器  
Fig. 6 Data viewer

表示することができる。SSS と AIS の画像を第 8 図と第 9 図に示す。操作用 PC はリアルタイムで UUV と USV のステータスを表示することができる。

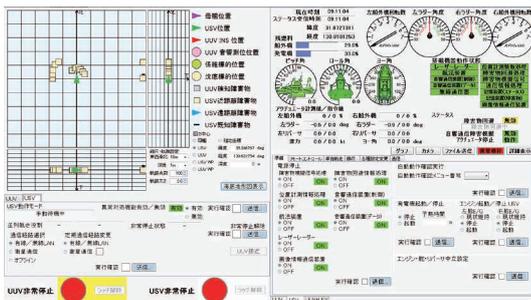
UUV, USV および管制ユニットは LAN で接続されている。UUV や USV が海面で管制ユニットに近い場合は無線 LAN を使って操作することができる。無線 LAN 通信ができない距離の場合は衛星通信 (一般総称) を使った通信が可能である。UUV が水中にいるときは衛星通信または無線 LAN を使って USV にアクセスし、USV の制御用音響モデムを使って UUV と通信を行う。

データ伝送の音響モデムは一方通信である。管制ユニットは画像伝送が成功したかどうかを監視し、失敗した場合は制御用通信を介して該当画像データを再送する指令を出してリアルタイムでの表示を優先させる。

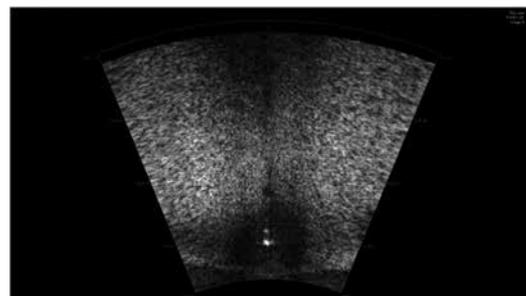
遠く離れた管制ユニットと USV 間の通信のために、USV は衛星通信を採用している。伝送レートは 256 kbps である。衛星通信は帯域保障タイプもしくはベストエフォートタイプをセレクトすることが可能である。これらの衛星通信で UUV が取得した音響画像、USV が取得した周囲画像と USV および UUV のステータスが受信され、USV および UUV への指令が送信される。



第 8 図 SSS 画像  
Fig. 8 Image of SSS data



第 7 図 操作画面  
Fig. 7 Control console



第 9 図 AIS 画像  
Fig. 9 Image of AIS data

## 4. 実海域試験

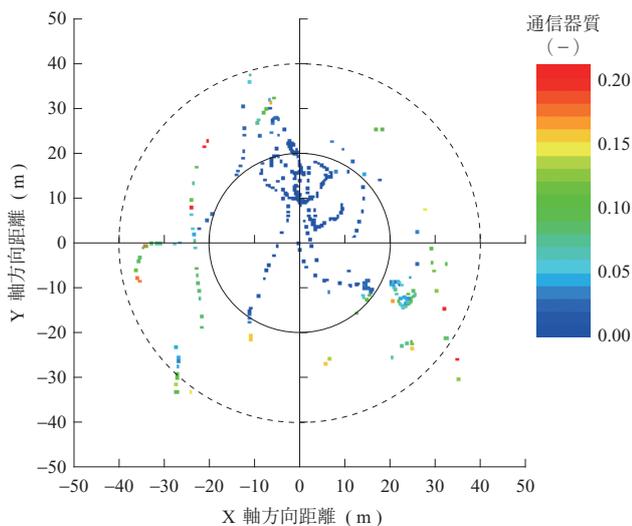
実海域試験は 2014 年 6 ~ 7 月に日本の駿河湾で実施された。

### 4.1 高速音響通信装置の性能確認

確認は駿河湾の水深 35 m のエリアで行われた。筆者らは、UUV が深度 20 m をくし型に自律航走している間に、USV を UUV と高速データ通信ができなくなるまで UUV から離すようにマニュアルで走らせた。音響通信可能範囲の確認結果を第 10 図に示す。この図は UUV を上から見た図である。原点は UUV の中心で、UUV の前方はこの図の上側になる。USV が UUV と通信成功した位置をプロットした。点の色は音響装置メーカーで規定した通信品質を意味する。低い（青い）方が良い。内側の円の半径は 20 m で、これは 45 度の指向性の範囲であり、UUV と USV が保持すべき水平偏差である。高速データ通信の音響装置は 45 度の指向角で適切に動作できることが確認された。仕様通りの性能である。さらに、45 度の指向角の範囲外においても通信できていることが分かる。

### 4.2 ソナー画像のリアルタイムデータ伝送試験

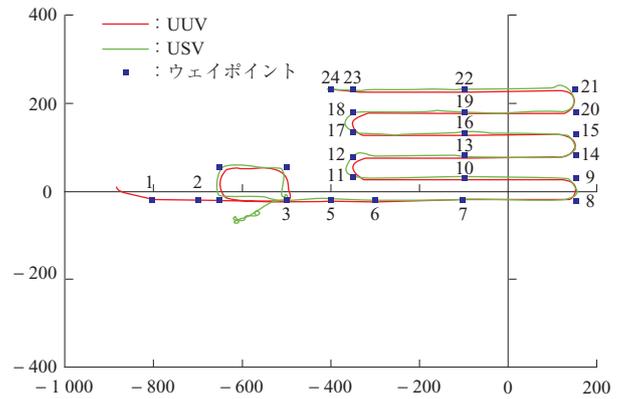
ソナー画像のリアルタイムデータ伝送試験は駿河湾の水深 35 m 前後のエリアで行われた。第 11 図に UUV と USV の航跡を示す。航走速度は 3 kt、航走時間は 46 分 20 秒、航走距離は 5.5 km であった。AIS の圧縮品質は 1（画像サイズ最小）とし、各 AIS 画像の圧縮後のサイズは 2 kB であった。AIS 画像の伝送周期は 5 s。SSS の



(注) 音響通信確認 (UUV 深度 20 m)

第 10 図 音響通信可能範囲の確認結果 (単位: m)

Fig. 10 Results for verification of coverage area for acoustic communication (unit: m)

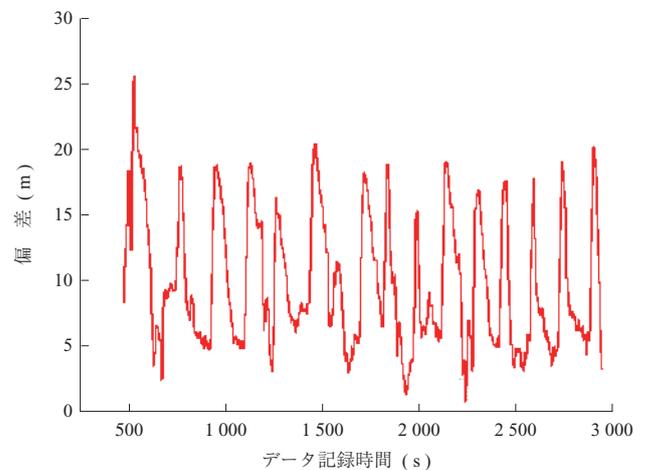


第 11 図 UUV と USV の航跡 (単位: m)  
Fig. 11 Trajectories of UUV and USV (unit: m)

圧縮品質は 1（最小）とし、各 SSS 画像の圧縮後のサイズは 9 kB であった。SSS 画像の伝送周期は 30 s。USV は PaCTeCC で制御した。

試験中の UUV と USV の水平偏差を第 12 図に示す。縦軸は水平偏差を示し、横軸は試験区間での経過時間を示す。試験区間は第 11 図に示す 5 ~ 23 である。UUV と USV の水平距離はほぼ 20 m 以内を保っていたことが分かる。第 10 図に示したとおり、この距離であれば高速データ通信が可能である。

データ伝送の結果を第 3 表に示す。UUV は試験中に SSS の画像を 72 画像、AIS の画像を 348 画像送信した。USV は SSS 画像を 72 画像、AIS 画像を 339 画像受信した。伝送成功率は SSS が 100%、AIS が 97.4% であった。SSS の 11 画像と AIS の 45 画像が再送された。これより、高い成功率で画像を送信できることが分かる。



第 12 図 UUV と USV の水平偏差  
Fig. 12 Horizontal distance between UUV and USV

第3表 データ伝送の結果  
Table 3 Data transmission results

項目	UUV 送信データ数	USV 受信データ数	再送信指令による USV 受信データ数	送信成功率 (%)
SSS	72	72	11	100
AIS	348	339	45	97.4

## 5. 結 言

筆者らは URCS と PaCTeCC の技術を開発した。そしてリアルタイムデータ伝送を実現した。その技術は UUV と USV を用いた実海域試験において証明された。これらの技術を用いることによって、より効果的に海洋研究が行われることが期待できる。さらに、複数箇所パトロールや海域のモニタリングにも適用できる。将来的にはこの技術を複数 UUVs システムに応用できる。

### — 謝 辞 —

本研究は防衛省の「無人航走体構成要素の研究試作その1、その2」を基に、防衛省が「所内試験」を実施した結果を基にしています。

実海域試験においてサポートして下さった株式会社オキシーテックの関係各位に対して、ここに記し、深く感謝いたします。

### 参 考 文 献

(1) K. Yoshida, K. Izumi, H. Yoshida, R. Miura and F. Ono : Demands on Reliable and Robust Wireless Communications under Land-Sea-and-Air Extreme Environments IEICE TRANSACTIONS on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences Vol. E96-A No. 5 (2013. 5) pp. 844 - 852

(2) António Pascoal, Paulo Oliveira, Carlos Silvestre, Luis Sebastião, Manuel Rufino, Victor Barroso, João Gomes, Gerard Ayela, Pascal Coince, Marcus Cardew, Anne Ryan, Hugh Braithwaite, Nicholas Cardew, Jonathan Trepte, Nicolas Seube, J. Champeau, P. Dhaussy, V. Sauce, R. Moitié, Ricardo Santos, Frederico Cardigos, Marc Brussieux and Paul Dando : Robotic ocean vehicles for marine science applications: the European ASIMOV project OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition Vol. 1 (2000. 9) pp. 409 - 415

(3) Robert R. Williams : Design and Experimental Evaluation of an Autonomous Surface Craft to Support AUV Operations Massachusetts Institute of Technology (2007. 4)

(4) H. Ochi, T. Shimura, T. Sawa, Y. Amitani, H. Nakajoh, T. Hyakudome, S. Tsukioka, T. Murashima and T. Aoki : Underwater Acoustic Data Transmission System for AUV “URASHIMA” The Fourteenth International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE2004) CD-ROM Vol. 2 (2004. 5)

(5) H. Ochi, Y. Watanabe and T. Shimura : An Experiment of Short Range Underwater Acoustic Communication Using QPSK, ECUA2006 (2006. 6) pp. 849 - 854