

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 27 日現在

機関番号：12614

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2016～2017

課題番号：16H06805

研究課題名(和文)超音波パルスドップラー法を応用した船体周り気泡挙動モニタリングシステムの開発

研究課題名(英文)Development of Bubble Behavior Monitoring System around the Ship Body by Means of Ultrasonic Pulsed Doppler Method

研究代表者

井原 智則 (Ihara, Tomonori)

東京海洋大学・学術研究院・助教

研究者番号：70767350

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：超音波パルスドップラー法を応用し船舶海洋工学分野における新たな気泡挙動モニタリング手法を提供するための研究を行った。まず、広帯域計測を実現するためのトランスデューサ開発を行い、さらに、計測利便性を向上するための特殊な機構を考案し、その利用が実用上影響がないことを示した。また、最新の技術を用いて遅延のないリアルタイム計測が出来る計測システムを構築した。信号処理手法についても再検討を行い、オイラー的手法に加えてラグランジュ的手法を提案し、その性能評価および計測領域等についても検討を行った。これらを組み合わせたシステムで実船環境を踏まえた適用性の検討を行い、本来の目的に対して妥当な結果を得た。

研究成果の概要(英文)：Development of bubble behavior monitoring system around the ship body was investigated utilizing ultrasonic pulsed Doppler method. Research has been carried out into several steps. Broadband ultrasonic transducer was firstly investigated. Special mechanism was proposed to realize higher utility for the sensor positioning. Real time measurement system was then proposed employing the state of the art digital signal processing techniques. The signal processing method itself was also investigated. Besides the traditional Euler approach, Lagrange approach was proposed to track bubble behavior in both spatial and temporal means. Finally, those techniques are successfully merged together to demonstrate the applicability of the developed measurement system.

研究分野：実験流体力学

キーワード：超音波パルスドップラー法 UVP法 気液二相流

### 1. 研究開始当初の背景

近年、船舶に対する環境性能・安全性能への要求の高まりを受け、船体設計における技術的ハードルがより高くなっている。そうしたなか、様々な革新的な技術が開発され、実船への適用が進んでいる。例えば、空気潤滑法による摩擦抵抗低減は既に実用化の域にある一方、気泡径やその挙動については数値シミュレーションを用いた評価が主となっており、剪断力計や光学観察を用いた計測は限られた範囲で行われているのみとなっている。また、船舶安全性能について操縦性の評価を行うために船尾周りの流動のシミュレーションも近年では広く行われており、そうしたシミュレーション結果を実験的に計測するための手法が必要とされている。船体周りの流動を計測するための手法としては、レーザ光学系と撮像光学系を水没させた曳航型装置による計測が開発されているが、計測システムは複雑かつ高価となり、汎用性が高いとは言えず、適用は試験水槽に限られてくる。一方、実海域においては海水物性や清浄度が経時的に変化をする上に3次元的外部流れが存在するため、非常に複雑な流動場となっている。従って、実船へ適用可能な汎用性の高い船体周り流動の計測装置の開発が求められている。

超音波を用いた計測手法はその高い汎用性から、医療分野や工学分野で長年にわたり用いられてきた。中でも、超音波パルスドップラー法を用いた計測は Acoustic Doppler Current Profiler(ADCP)として広く用いられ、海洋流動の解明に大きな貢献をしてきた。ADCPは通常1MHz未満の低周波を用いる事で広域の計測を行っているが、船体周りなどのトランスデューサ近傍は不感帯領域として計測困難であった。申請者はADCPと同様の超音波パルスドップラー法を用いた超音波流速分布計測法(UVP)の開発に携わり、管内流動やチャンネル内流動などの流動現象の解明に取り組んできた。

UVPにおいては、ADCPに比べて比較的高いメガヘルツ帯を利用する。また、周波数領域を分けることでで気泡からの信号を同時に弁別出来る事もこれまでに示している。このUVPにおける気泡計測は、超音波が波長より小さい物体表面では反射せずに透過することを利用して。ここで、複周波数を同時に用いて反射信号を解析することで、気泡の速度分布に加えて、気泡径分布を計測可能であることが示唆される。通常は、複数のトランスデューサ・パルス発信器を用いて多数の超音波ビームを照射するが、これまでの研究で実際の超音波トランスデューサは広帯域特性を有し、また、圧電素子の特性から放射スペクトルにおいては広帯域の特性を持つ事が分かっている。そこで、本研究においては、広帯域トランスデューサを用いて超音波パルスドップラー法を応用した汎用性の高い船体周り気泡挙動モニタリングシステムの開発に取り組んだ。

### 2. 研究の目的

船舶に関する環境性能・安全性能の向上へ実験流体力学の観点から寄与するべく、船体周りの気泡挙動モニタリング技術の開発を行った。本研究では、実船環境に適用可能な高い汎用性を持つ計測技術の開発を目的とし、超音波パルスドップラー法を応用した計測システムの構築を行った。また、従来では流速分布計測のみに限られていた同手法を気泡径同時モニタリングへ拡張することを試みた。その上で、これらを統合し、実船への適用性について明らかにすることを目的とした。

### 3. 研究の方法

かかる技術の実現に向け、計測システムの要素開発と検証を実験室レベルで行い、それらを統合することで目的を達成することを目指した。具体的な手法としては以下の4段階に分けている。

- (1) 超音波トランスデューサの開発
  - (2) 信号処理システムの構築
  - (3) 気泡計測および計測領域の評価
  - (4) 実船環境を踏まえた適用性の検証
- これらを行い、本研究で開発した計測システムの有効性と将来の技術発展可能性を示す。

### 4. 研究成果

#### (1) 超音波トランスデューサの開発

本研究で目的とする広帯域計測を実現するためには、かかる特性を得られるような中心周波数の選定が重要となる。一般に、広帯域特性を志向した際にはQ値の低い圧電素子が有利となる。そこでまずは、既存のトランスデューサについてその周波数応答特性の評価を行った。特性の評価においては、超音波トランスデューサをパルサー・レーサーに接続し、励起周波数を掃引して反射波の信号強度をフーリエ変換により取得した。実験では、水中に設置した反射ブロックに向かって100mm程度の距離でトランスデューサ設置し、壁面ブロック表面からの反射波について信号処理を施した。評価を行ったのは、中心周波数が2, 3, 4MHzのトランスデューサである。実験結果を図1に示す。この結果を見ると、中心周波数が上がるに連れ、広帯域となっている事が分かる。従って、今回評価した条件では4MHzの中心周波数において最も所望の特性が得られる事が分かった。

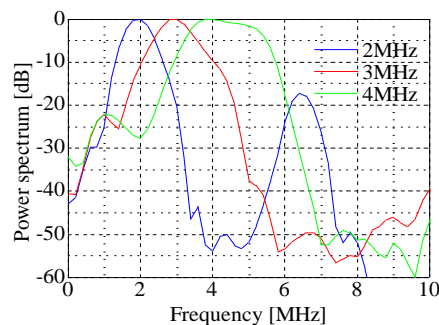
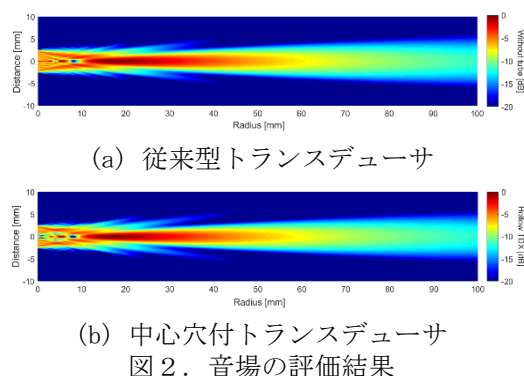


図1. トランスデューサ毎の周波数応答特性

続いて、最終的な目的である実験時の計測利便性についても検討を行った。超音波は流体中において機械的な振動波として伝搬する。従って、直接目視することは不可能である。これまでの UVP 計測においては超音波トランスデューサのホルダー（治具）を精密に設置することで計測線の位置を陰に担保していた。しかしながら、船体周り等の広域環境流を計測する際には、ホルダーの位置を細かく制御することは困難となる。そこで、計測線を目視確認出来るように光ファイバー付トランスデューサを考案した。このトランスデューサでは、超音波素子の中央に光ファイバーを貫通させ、そこからレーザー光を照射することで水中における計測線の可視化を可能とした。一方で、この機構を組み込むことにより、音場が従来のトランスデューサと大きく変化することが懸念される。そこで、数値シミュレーションによって、音場の評価を行った。さきほどの結果を基に、中心周波数を 4 MHz とした上で、穴がない場合とある場合での音場を図 2 に示す。この結果から、近距離音場においては若干の変動が見られる物の、遠距離場においてはほぼ同一の音場が得られる事が分かる。一般に、近距離場の計測は信号強度等が不安定であるために用いられないことから、実用上は影響ないと判断できる。この結果を持ってトランスデューサを製作し、所望の特性が得られている事を確認した。



## (2) 信号処理システムの構築

旧来の UVP 信号処理システムにおいては、広汎にアナログ処理が用いられていたが、現代では高速アナログ・デジタル変換器(ADC)と高速な PC が安価に手に入るようになったため、フルデジタルで信号処理を行う事が可能となった。そこで、図 3 に示すような計測システムを構築した。計測システムは①パルサー・レーザ、②トランスデューサ、③ADC、④信号処理用 PC からなる。本研究で構築した装置においては、PC 内蔵型の高速度 ADC を用いた。PC 内蔵型 ADC を用いる利点としては、直接メモリ転送(DMA)が容易に実現可能などところにある。すなわち、高速で繰り返し送信する超音波信号を並行して同時にサンプリングし、全波形を一挙に信号処理対象とすることができる。また、LabVIEW や C++ などの高スループット信号処理バックエンドを用いる事で

オンライン処理を実現し、タイムラグのない高リアルタイムな計測システムを構築することが出来た。

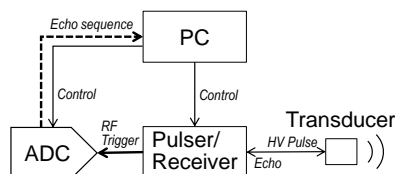


図 3. UVP 計測システム構成図

信号処理については、大まかに分けてオイラー的な処理手法とラグランジュ的な処理手法の評価を行った。オイラー的な処理については一般的な UVP 信号処理の延長場にある。まず、エコー信号  $E(t)$  に送信周波数  $f_0$  を乗じて低域通過フィルタを通すことで複素信号を復調し、ドップラー遷移周波数  $f_D$  を含む複素系列を得る。

$$z(t) = \text{LPF}[E(t)\{\cos(2\pi f_0 t) + j \sin(2\pi f_0 t)\}] = \frac{A}{2} e^{j2\pi f_D t}$$

ここで、 $f_D$  はパルス繰り返し周波数  $f_{PRF}$  でサンプリングされると見なされるため、カットオフ周波数は  $f_{PRF}/2$  となる。この上で、適切なフィルタ処理を施し、ドップラー遷移周波数の推定を位相差から行う。

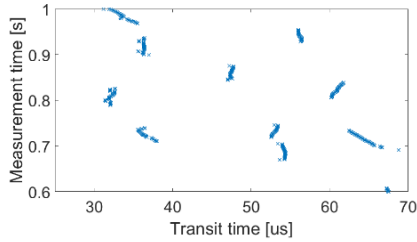
$$f_D = \frac{f_{PRF}}{2\pi} \arg \sum z^*(t) \cdot z(t+1/f_{PRF})$$

もう一方のラグランジュ的アプローチについては、その本質は対象の信号をトラッキングすることにある。本研究においては、気泡が計測対象であることから、背景の信号レベルに対して気泡起因のエコーは高い信号レベルを有している。そこで、まずは単純な閾値判定により気泡部分の推定を行い、その後に相互相関処理を施して気泡位置・強度・計測時間に関するデータリストを得る。気泡は連続的に空間を移動している事を考えると、得られたデータリストは気泡の連続挙動の軌道を計測時間軸で離散化したデータであると言える。従って、これらのデータ点をクラスタリングすることで気泡軌道を再構成できる。本研究では、距離関数を気泡位置と計測時間について定義してクラスタリングをまず行った。このクラスタリングでは、近接する気泡同士の接続も発生する。そこで、信号強度の連続性に着目し、時系列方向での強度ピークが双ピークになっていた場合には、クラスタを分割する手法をとった。また、2つのトランスデューサを用いて同計測線を計測することで精緻に気泡径を計測する試みも行った。

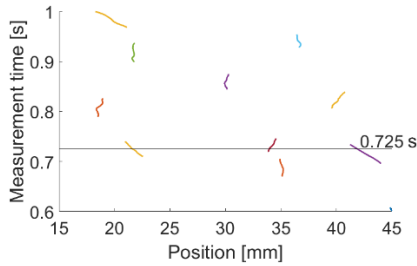
## (3) 気泡計測および計測領域の評価

前項において構築したシステムについて、実験を行い、同時に撮影した動画を処理して得られた計測結果との比較を行った。気泡軌道に関する計測結果の例を図 4 に示す。図に示すとおり、新たに構築した手法では、画像計測に対して良好な一致が見られていること

が分かる。また、計測体積を通過した気泡数についても比較したところ、5%程度の誤差で画像処理結果と一致し、本手法の妥当性を示した。



(a) 超音波による計測結果



(b) 画像処理による計測結果

図4. 気泡軌道の再構成結果比較

また、気泡径についても同様の実験を行い、その計測誤差は $\pm 0.17$  mm 程度である事を見いだした。この値はビデオカメラでの解像度とほぼ同じ値を示しており、このことから高精度で気泡径を再構築できることを示した。

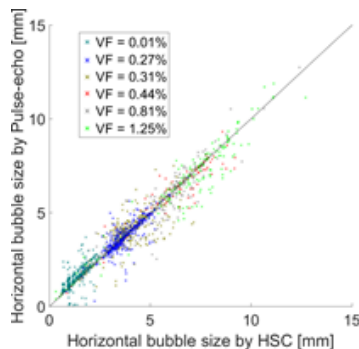


図5. 気泡径の再構成結果比較

次に、超音波による計測領域に関する検討を行った。検出された気泡の始点と終点を音場強度と共にプロットした結果を図6に示す。この結果を見ると、音場強度が $-12$  dB となる点と良く一致している事が分かる。従って、この結果から当然の結果ではあるが、計測領域が音場から従って定められることを確認出来た。

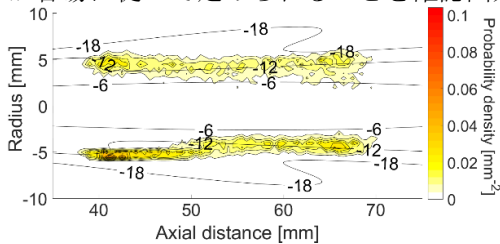


図6. 気泡計測開始・終了位置と音場の関係

#### (4) 実船環境を踏まえた適用性の検証

本研究の背景でも述べたが、空気潤滑法の適用に当たっては、プロペラへの気泡巻き込みなどが懸念されている。そこで、プロペラへの気泡巻き込み時における負荷変動に着目して実験を行った。実験では、回流水槽にて電動機駆動のプロペラ駆動系を設置し、そこに流入する気泡について評価を行った。計測に際しては、プロペラ回転と同期させた高速度ビデオカメラでプロペラ周囲流動の観察を行った。得られた動画データから、輝度に関してプロペラ回転数成分を遮断する周波数処理を施した上で、平均輝度値の時間変動を得た。そして、電動機の負荷変動と相関をとった結果、輝度値と負荷変動が正の相関を示す事を明らかにした。その上で、気泡流入量が輝度と一次の相関を持つと仮定して、負荷変動に関する実験データを評価したところ、これらはよく一致していることが分かった。従って、負荷変動をモニタリングすることで気泡流入量が推定できるという事を明らかにし、これらを特許に出願した。

また、得られた知見を基に東京海洋大学が有する電池推進船・らいちょう N で負荷変動から推定した気泡流入量と超音波による計測結果が相関するかについて適用性の検証を行った。また、計測を行うに際しての諸課題についても抽出を行った。実船のプロペラ近辺において 8 MHz の超音波トランスデューサにて計測を行った際の信号スペクトルを図7に示す。この結果では、励起周波数成分である 8 MHz に加えて、二倍波成分である 4 MHz や 800 kHz 近傍の信号ピークが強く観察されている。これらは、本船が電池推進船であることから、インバータやその他電気機器類の放射ノイズに起因すると考えられる。この点は、これから多く用いられるであろう電気推進船特有の問題であると言え、本研究で開発した手法を用いる上で大きな課題になると言える。しかしながら、開発した手法を用いることでノイズをある程度はフィルタリング出来たため、気泡計測自体は負荷変動と相関して検出を行えたことから、本研究において開発した手法の有効性を示す事が出来たとと言える。

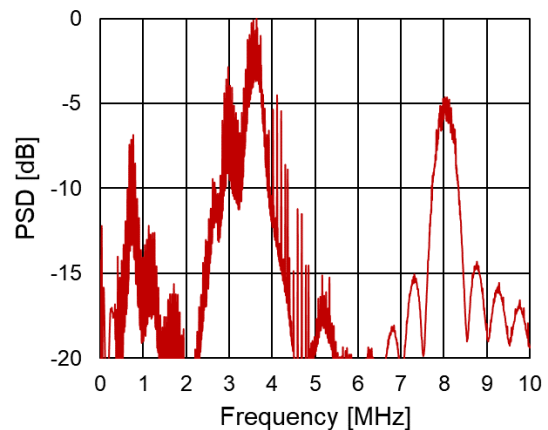


図7. プロペラ周囲気泡計測時のスペクトル

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計4件)

- ① Antonin POVOLNY, Hiroshige KIKURA and Tomonori IHARA, Ultrasound Pulse-Echo Coupled with a Tracking Technique for Simultaneous Measurement of Multiple Bubbles, Sensors, Vol.18, 1327, 16 pages, 2018, 査読あり.
- ② 大出 剛, 賞雅 寛而, 波津久 達也, 井原 智則 “回転速度一定制御モータ推進システムにおけるプロペラ周囲気泡とスラスト変動の特性評価”, マリンエンジニアリング, Vol. 53, 4, pp. 117-122, 2018, 査読あり.
- ③ 大出 剛, 賞雅 寛而, 波津久 達也, 井原 智則 “トルク一定制御モータ推進システムにおけるプロペラ周囲気泡とスラスト変動の特性評価”, マリンエンジニアリング, Vol. 53, 4, pp. 111-116, 2018, 査読あり.
- ④ Tsuyoshi ODE, Tomoji TAKAMASA, Etsuro SHIMIZU, Tatsuya HAZUKU, Hiroyasu KIFUNE and Tomonori IHARA, Detection of Near-Propeller Bubbles and Thrust Power in a Constant Torque Control Motor Propulsion System, Journal of the JIME, Vol. 53, 3, pp. 362-367, 2018, 査読あり.

[学会発表] (計5件)

- ① Tsuyoshi ODE, Tomoji TAKAMASA, Etsuro SHIMIZU, Tatsuya HAZUKU, Hiroyasu KIFUNE and Tomonori IHARA, Detection of Near-Propeller Bubbles and Thrust Power in a Constant Torque Control Motor Propulsion System, 11th International Symposium on Marine Engineering (ISME TOKYO 2017), Tokyo, Japan, October 2017, B08-209.
- ② 熊 汇捷, 井原 智則, 波津久 達也, 賞雅 寛而 “海水中に形成する気泡の上昇特性と合一特性について”, 第87回マリンエンジニアリング学術講演会, 東京, 2017年5月, pp. 37-38.
- ③ 大出 剛, 清水 悦郎, 波津久 達也, 井原 智則, 山口 源貴 “モータ推進システムにおけるプロペラ近傍気泡発生検出”, 第87回マリンエンジニアリング学術講演会, 東京, 2017年5月, pp. 33-34.
- ④ 井原 智則, 木倉 宏成, 村川 英樹 “混相流計測に適用可能な超音波流速分布計測システムの開発”, 日本機械学会流体工学部門講演会, 宇部, 2016年11月, No. 0507.
- ⑤ Antonin POVOLNY, Tomonori IHARA and Hiroshige KIKURA, The Signal Processing of Ultrasonic Reflector

Recognition and Tracking Technique, 10th International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering (ISUD10), Tokyo, Japan, September 2016, pp. 53-56.

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計2件)

①  
名称: 気泡発生検出装置および気泡発生検出方法

発明者: 大出 剛, 賞雅 寛而, 清水 悦郎, 波津久 達也, 井原 智則

権利者: 国立大学法人東京海洋大学

種類: 特許

番号: 特願 2017-095263 号

出願年月日: 2017年5月12日

国内外の別: 国内

②

名称: プロペラ負荷状態推定装置、プロペラ負荷状態推定方法、およびプロペラ負荷状態推定プログラム

発明者: 大出 剛, 賞雅 寛而, 清水 悦郎, 波津久 達也, 井原 智則

権利者: 国立大学法人東京海洋大学

種類: 特許

番号: 特願 2017-095748 号

出願年月日: 2017年5月12日

国内外の別: 国内

○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

<http://www2.kaiyodai.ac.jp/~takamasa/>

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

井原 智則 (IHARA, Tomonori)

東京海洋大学・学術研究院・助教

研究者番号: 70767350

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

(4) 研究協力者

賞雅 寛而 (TAKAMASA, Tomoji)

波津久 達也 (HAZUKU, Tatsuya)

大出 剛 (ODE, Tsuyoshi)

武田 靖 (TAKEDA, Yasushi)

木倉 宏成 (KIKURA, Hiroshige)

ポボルニー アントニン (POVOLNY, Antonin)