

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 21 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25870153

研究課題名(和文)伊豆沼・内沼におけるハス生息状況の3次元音響計測システムの開発と観測

研究課題名(英文)Development of 3 dimensional acoustic measurement system for lotus habitat monitoring at lake Izunuma-Uchinuma.

研究代表者

水野 勝紀(mizuno, katsunori)

東京大学・生産技術研究所・助教

研究者番号：70633494

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：高分解能音響ビデオカメラを用いて、水中の3次元画像構築手法を開発した。本手法により、濁水に阻まれて従来は確認が困難であった水中の様子を分解能1cm程度で空間的に可視化することが可能となった。また、地中を3次的に非接触で把握するための新しい音響計測システムを開発し、湖底から55 cm程度の深さにある蓮根の分布を世界で初めて可視化した。これら成果は、今後の湖沼管理手法の先駆けとなるものと期待される。

研究成果の概要(英文)：We developed a new measurement system for 3D visualization of underwater by using high-resolution acoustic video camera. The method can visualize the underwater with 1 cm resolution without the effect of transparency of water. In addition, we developed a new measurement system to visualize the space under the water bottom. We confirmed a natural plant root with diameter of 0.025 - 0.030 m in the reconstructed three-dimensional acoustic image. The plant root was at a depth of about 0.54 m. The measurement systems for aquatic plant will be useful for the non-destructive assessment of the status of the space under the water and water bottom.

研究分野：水中音響計測

キーワード：3次元音響画像 音響ビデオカメラ サブボトムプロファイラー 音響コアリング 蓮根 ハス オオハクチョウ 伊豆沼

1. 研究開始当初の背景

宮城県北部に位置する伊豆沼・内沼は、夏期はハス *Nelumbo nucifera* などの水生植物が水面を覆い、冬期には多数の鳥類が飛来するほか、魚類、昆虫類なども豊富で生物多様性の豊かな沼である。ハスは富栄養化の進んだ不透明な水環境で大きな群落を形成する抽水植物であり、夏期には沼の水面面積の40%以上を覆いつくしていた。伊豆沼・内沼は、2008年度の環境省水質調査において、日本の湖沼の中でワースト1のCOD (Chemical Oxygen Demand)濃度であり、自然再生の取組みが進められていた。

一方で、伊豆沼・内沼は1985年に国内2番目のラムサール条約登録湿地として指定されており、国内最大級の渡り鳥の越冬地として国際的にも重要な湿地である。近年、ロシア北東部より飛来するオオハクチョウ *Cygnus Cygnus* が蓮根(ハスの根)を採食する姿が盛んに観測されており、蓮根が越冬期におけるオオハクチョウの重要なエネルギー源の一つとして考えられていた。伊豆沼では、2012年夏のハス生息密度が観測地点によって大きく異なっており、オオハクチョウの採食行動がハス生息状況に影響を与えていると推測された。このようにハスは、沈水植物群落に影響を及ぼす一方で、オオハクチョウの餌としての役割も担っており、複雑な伊豆沼生態系において特に重要な環境要因の一つとして考えられたため、その生息状況を効率良く定量的に評価し、数値指標に基づいた管理手法の確立が求められていた。

従来の浅瀬域における水生植物の調査方法は、主にダイバーや金属フレームを用いた直接計測法と、衛星や航空による光学画像や音響計測などの間接計測法が用いられていた。前者は、測定精度が実測者のスキルや調査気候などの影響を受けることに加え、広範囲マッピングを行う際に多大な時間と労力を要し、後者の光学画像計測は、広範囲マッピングに適するため近年研究が進んでいるが、濁度の影響を受けやすく、富栄養化の進んだ湖沼域では必ずしも最適な手法ではなかった。音響計測は濁度に影響されず、直接計測法と比べて効率的な観測が可能であるが、種判別や正確な生息数把握が困難など、再現性の面に課題が残っていた。

このような状況下で、申請者は高分解能音響イメージングソナーを応用すれば、湖沼の水中下を可視化し水生植物の生息状況を詳細に把握することが出来ると考えた。さらに、湖底下に存在している蓮根の埋没量や深度、分布形状を定量的に把握出来れば、越冬期におけるオオハクチョウの蓮根摂取量や、埋没量に対する夏期のハス出現率との関連性など、新しい視点からハス生態系をモデリング可能となり、伊豆沼・内沼をはじめとする、各地の湖沼における今後の環境管理に大きく寄与出来ると考え、本研究に着手した。

2. 研究の目的

(1) 水中の3次元可視化手法開発

近年、水産分野で注目されつつあったMHz帯域の高分解能音響イメージングソナーを用いて、高濁度の水面下を可視化し、ハス生息状況を3次元マッピングするための手法を開発、試行する。水中3次元可視化プログラムとハス密度分布、ハクチョウによる蓮根捕食穴、水深の自動計測ソフトウェアを開発し、従来の直接計測法と比べ、短時間で広域のマッピングが可能であることを示す。

(2) 堆積層内の可視化手法開発

堆積層内を音響的に可視化するための浅深度サブボトム音響ソナーを開発し、湖底下の蓮根分布や浮泥厚み計測システムを構築する。特に、堆積層内に分布する植物を音響的に可視化する取り組みは、世界的にも例がないため、基礎特性試験の後に、実フィールドにて屋外計測を実施する。そこでは浮泥の分布状況や、蓮根の埋没深度を計測する。また、新しい音響信号処理手法を開発し、蓮根や浮泥層からの反射波を的確に抽出する。

(3) 他の水生植物研究への展開

本研究で開発する上記の高分解能水中可視化手法は、従来手法と比べ、高効率な水生植物の資源量推定や詳細な経時データ記録を可能とするため、他の浅瀬域における水生植物研究への展開も期待出来る。本研究内で開発が完了し、他の研究へ応用可能なものは、技術の普及のために、逐次展開していく。

3. 研究の方法

(1) 水中の3次元可視化手法開発と音響画像処理手法

図1に観測系を示す。高分解能音響ビデオカメラ DIDSON(Sound Metrics, Bellevue, WA, USA)と内臓の動揺センサ(True Point, Honeywell, NJ, USA)及び、DGPS(GPS16X, GARMIN, Olathe, KS, USA)を小型ボートに艀装し、音響データを取得した。

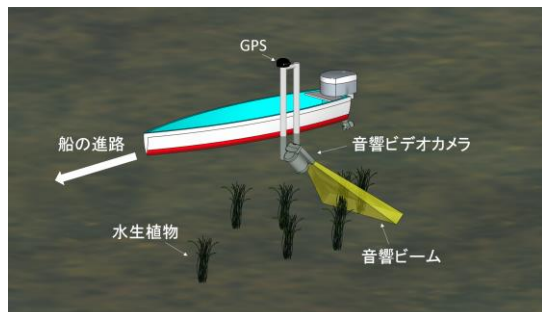


図1 観測系

また、3次元音響画像構築に必要な、連続した薄いスライス状の音響データを作成するために垂直視野角1°の音響レンズをDIDSONに装着し、音響ビデオカメラを45°傾けた状態で支持した。船を移動させながら連続したスライス状のデータを取得し、

それらを再合成することで3次元の空間的な植生分布が表現される。浅瀬水域を調査対象としているため、測定可能レンジよりも分解能を重視し、HFモードを使用した。今回、計測ウィンドウ幅は2.55 mとし、フレームレートは10 fpsで計測した。この場合の画像ピクセル分解能は5 mm程度である。

今回、冬季に渡り鳥の採食行動が頻繁に確認されていたエリアを含む、図2に示す測線を航行し、音響データを取得した。

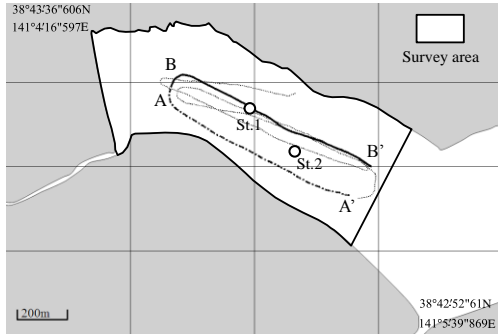


図2 測線図

また、今回、図3に示す音響画像処理フローに従い、(a)水中の3次元音響画像構築、(b)ハスの茎の自動計数、(c)採食穴の自動計数を行った。これら処理内容の詳細は、研究業績[図書①、②]を参照されたい。

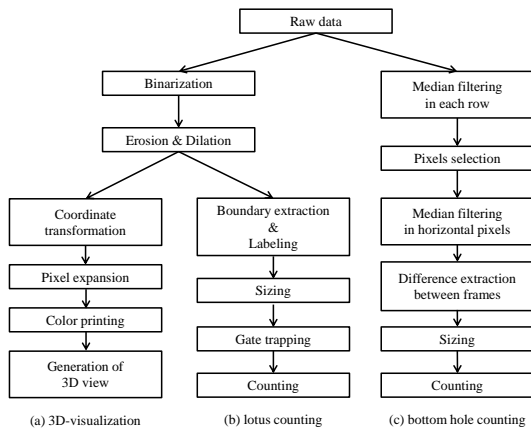


図3 画像処理フロー

(2) 堆積層内可視化システムの開発

堆積層内の比較的浅部(~1 m)を高い分解能(~1-2 cm)で計測する音響デバイスは、市販されていないため、新しい音響デバイスを開発した。堆積層内の吸収減衰と垂直分解能を考慮し、中心周波数は100 kHzとした。また、水上を移動しながら広域に堆積層厚みなどを計測するための、船上計測用の計測システム(MSA: 図4)と、定点で蓮根を正確に計測するための設置型計測システム(MSB: 図5)を開発した。MSBは、防水の2軸ステージ駆動部(1.2×1.2×0.6 m³, custom-made, Arc Device, Koganei)と音響計測部から構成され、独自に開発したソフトウェアによって制御される。2次元平面の計測領域内で音響計測部を自動走査しながら音響データを取得し、計測後、専用に開発した3次元音響画像構築によって音響データを可視化する。ま

た、システムの効率的な改善・改造に役立てるために、堆積層内の音波伝搬可視化シミュレーターを開発し、開発に利用した(研究業績学会発表⑨)。



図4 MSA(船上計測システム)

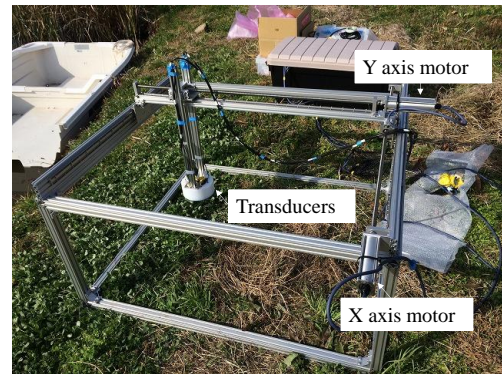


図5 MSB(設置型計測システム)

(3) 他の水域での3次元水中計測

上記で開発する技術を、その他水域の調査に応用し、その有効性を確認する。特に、高分解能音響ビデオカメラを用いて、対象とする調査水域は、植物分布計測の必要性が高い栃木県の湯ノ湖と、フィリピンミンダナオ島南東部のプハダ湾とし、水生植物の3次元計測を行う。

4. 研究成果

(1) 水中の3次元可視化結果

高分解能音響ビデオカメラを用いて、水中の3次元画像を構築すると、図6に示すように、水中の空間的な様子が再構築される。ハスの茎は直径1-2 cm程度であるが、3次元画像内では明確にハスの分布が再現され、ハス分布密度の違いが視認出来る。図7にハスの分布密度と捕食穴の分布密度の水深依存性を示す。

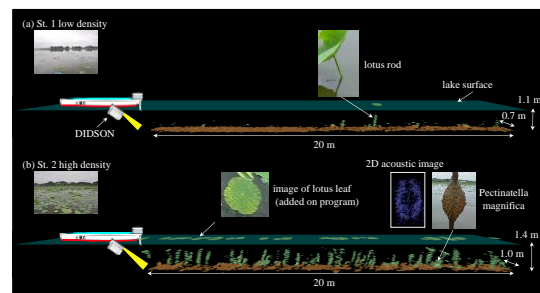


図6 3次元音響画像例

図 7 より、ハスの生息密度は、水深 1.3 m を境に著しく変化しており、浅い程生息密度が低かった。また、採食穴の分布密度は、水深 1.0 m を境に変化しており、浅い程採食穴が多かった。伊豆沼は季節毎に水深を管理しており、冬季は計測を実施した初夏の季節より 0.5 m 程水深が低い。よって、白鳥が訪れた時期のハス生息密度の変化位置における水深は 0.8 m 程度であった。また事前の調査により、白鳥が採食する蓮根は水底下 0.4 m 前後の位置に広がっていることが確認されていたので、変化位置における蓮根は、水面から約 1.2 m の深さ位置にあったと推察される。ところで、白鳥の水中での採食可能深度は凡そ、その体長の 2/3 程度であると報告されている。伊豆沼で蓮根を採食するオオハクチョウの体長は 1.4-1.6 m であるため、採食可能な深度は水面から 0.9-1.1 m であったと考えられる。よって、ハスの生息密度が著しく変化していた箇所における蓮根の位置（水面から 1.2 m 程度）は、白鳥が採食可能な限界深度を示しており、それより浅いエリアにおいてはハスの生息密度が白鳥の採食行動の影響を強く受けていたことが示唆された。別の視点から見ると、沼の水深を上手く調節することで、白鳥の採食行動をコントロールし、ハスを適正管理することも可能であると考えられる。

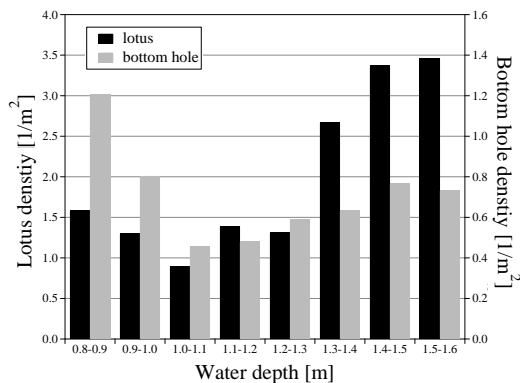


図 7 ハス分布密度と水深変化

(2) 堆積層内可視化結果

MSA を用いて取得したデータの一部を図 8 に示す。

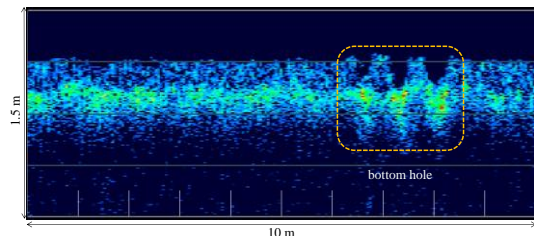


図 8 堆積層内のエコーグラム

この図は、ボートを移動しながら得られたデータ列を時系列方向に再合成し、音波の反射強度を明度に変換して得られるいわゆるエコーグラムである。図 8 に示す様に、反射強度の違いから 20 cm 厚み程度の底泥層が確認

出来る。また、白鳥がそれら底泥層の下に生息している蓮根を捕食した痕も確認出来、蓮根が湖底から 20 cm 程度の深度に存在していたと推測される。

また、MSA を用いて計測した堆積層表面の反射強度分布、採食穴分布、水生植物分布図を図 9 に示す。

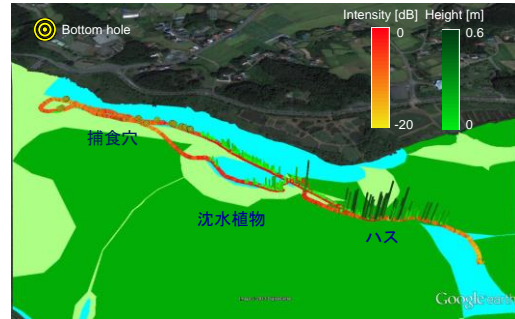


図 9 反射強度・採食穴・水生植物分布

音響計測の結果、反射強度の高いところは、砂泥質の底質を反映しており、低いところは泥質の底質を反映している。砂泥質のエリアには、ハスが生えておらず、その他の沈水植物が繁茂していた。また、泥質エリアの浅部は、採食穴が多数確認され、ハスも生えていなかった。また、泥質エリアの深部は、ハスが繁茂していた。

MSB を用いて取得した音響データから構築した三次元音響画像を図 10 に示す。計測エリア中央付近において、送受波器の表面から計測エリア中央付近の湖底表面(約 200 layer)までの距離を水の音速と音波伝搬時間から推定すると、約 14 cm であった。設置した際に、システム全体が約 6 cm 沈み込んだと推定される。湖底表面には、設置する際に折れたと考えられるハスの茎が確認された。また、堆積層内の反射強度の変化から層の境界部が確認された。

また、深度方向に音響断層画像を確認していくと、深度約 54 cm の位置に、強反射体が確認出来た(図 11)。実際の柱状コアリングの結果を考慮すると、この反射体はコアリング時に採取された蓮根を表している。これは、実際の柱状コアリング結果とほぼ一致した。

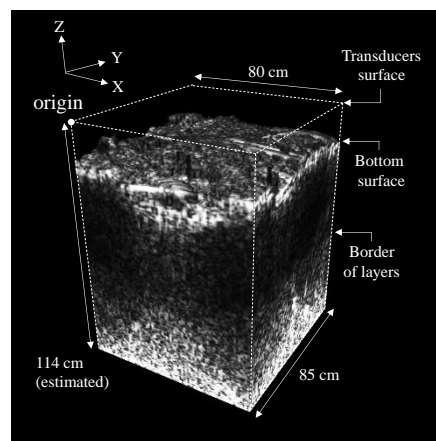


図 10 堆積層内の 3 次元音響画像

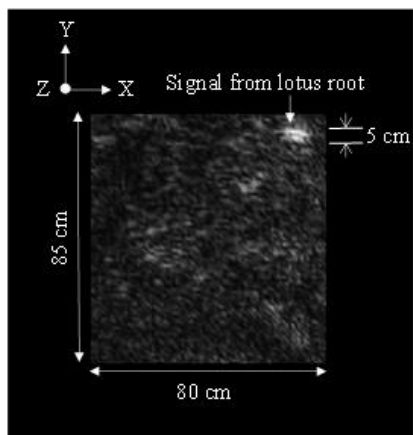


図 11 2次元断層音響画像

(3) 他の水域での3次元水中計測

栃木県湯ノ湖で計測した沈水植物群落の3次元分布図を図12に示す。

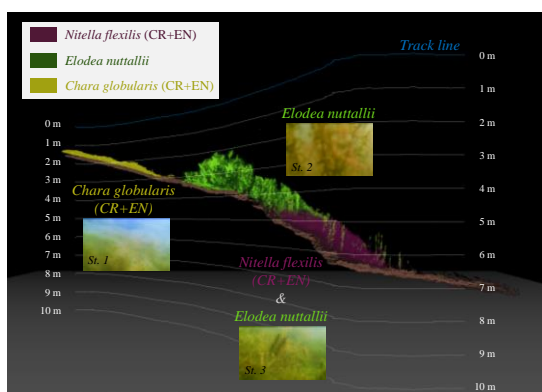


図 12 沈水植物群の分布図

水深5-7 m付近において、在来種のカタシヤジクモとコカナダモが混生している。また、それより深い箇所ではヒメフラスコモの植生が確認出来ていないことから、ヒメフラスコモは浅瀬域よりコカナダモ繁殖の影響を受け、光量などの影響からか、自身のさらに深部への生息領域拡大は難しい状況であることが分かる。また、図13にフィリピン沿岸域で計測した海草の3次元分布図を示す。

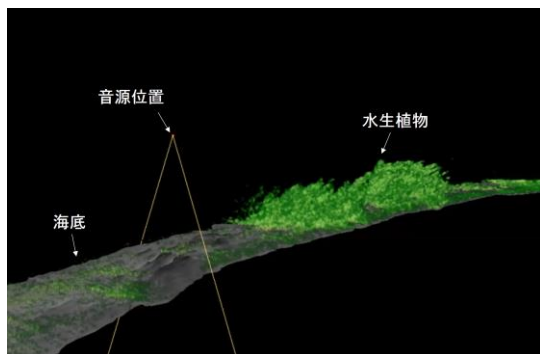


図 13 水生植物の分布図

これらの様に、本研究課題において開発した水中3次元可視化手法は様々な水域において応用可能であり、今後の水中環境計測への更なる展開が期待される。

以上より、本研究課題により、

- ①水中3次元画像の可視化手法開発
 - ②堆積層内の3次元可視化手法開発
 - ③開発した技術の他水域への展開
- を達成することが出来た。今後は、これら技術を用いた長期的なモニタリングや広域に渡る計測が期待される。

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 K. Mizuno, X. Liu, F. Katase, A. Asada, M. Murakoshi, Y. Yagita, Y. Fujimoto, T. Shimada, and Y. Watanabe “Automatic non-destructive three-dimensional acoustic coring system for in situ detection of aquatic plant root under the water bottom” Case Studies in Nondestructive Testing and Evaluation, 査読有, vol. 5, pp. 1-8, 2016, DOI information: 10.1016/j.cnsdt.2016.01.001

② M. Nagaso, K. Mizuno, A. Asada, K. Kobayashi, and M. Matsukawa “Experimental and Finite-difference Time-domain Simulation Study of the Precise Measurement of the Gonad of a Small Fish Using a 25-MHz Acoustic Focus Probe” Marine Technology Society Journal, 査読有, 49(5) pp. 31-37, 2015年

③水野勝紀・虻川和紀・徐純輝・浅田昭, 音響ビデオカメラを用いた沈水植物調査手法の検討, J. Marine Acoust. Soc. Jpn., 査読無, vol. 42, no. 1, pp.25-29, 2015年

④ K. Mizuno and A. Asada “Three dimensional mapping of aquatic plants at shallow lakes using 1.8 MHz high-resolution acoustic imaging sonar and image processing technology.” Proceedings of 2014 IEEE Ultrasonics Symposium, 査読無, pp. 1384-1387, 2014, DOI information: 0.1109/UT.2015.7108250, 2015年

[学会発表] (計 13 件)

- ① **【招待講演】** 水野勝紀, ”音響ビデオカメラを用いた水中生物・植物情報の可視化” 海洋音響学会 第4回 水中音響における可視化技術部会, 2016年3月, 東京工業大学
- ② 水野勝紀・劉曉飛・片瀬冬樹・浅田昭・村越誠・八木田康信・藤本泰文・嶋田哲郎, ”3次元音響コアリングシステムを用いた堆積層内の蓮根検出の試み”, 日本陸水学会80回プログラム 2015 函館, 講演 No. 2B14, 第80回大会, 講演要旨

- 集, P.96, 2015年9月, 北海道大学
- ③ **【招待講演】** K. Mizuno, “Measurement system for aquatic plants and creatures”, Forum of Seagrass and Dugong Research ICT-Based Strategy, 2015年, 6月, Mati, Philippines
- ④ 水野勝紀・劉曉飛・浅田昭・片瀬冬樹・村越誠・八木田康信・藤本泰文・嶋田哲郎・渡辺好章, “三次元音響コアリングシステム (3D-axis) の開発”, 海洋音響学会 2015年度研究発表会, 2015年5月, 東京大学生産技術研究所
- ⑤ **【招待講演】** 水野勝紀, “フィリピン沿岸域に生息するジュゴンの観測と餌場調査 - その時, 人魚と出会った -” 第55回中海海底工学フォーラム, 2015年4月, 東京大学生産技術研究所
- ⑥ **【招待講演】** 水野勝紀, “音響ソナー技術の生物調査への応用 ~新たな側面から水中生物・植物を計る~” 海洋調査技術学会第26回研究成果発表会 2014年11月, 海上保安庁海洋情報部
- ⑦ K. Mizuno and A. Asada, “Three dimensional mapping of aquatic plants at shallow lakes using 1.8 MHz high-resolution acoustic imaging sonar and image processing technology.” 2014 IEEE International Ultrasonics Symposium, P2A2-6, 2014年9月, Chicago, USA
- ⑧ 水野勝紀・浅田昭, “高分解能音響イメージングソナーを用いた沈水植物群の分類と3次元マッピング手法の検討” 日本陸水学会 79回プログラム 2014 つくば, 講演 No. P-20, 第79回大会, 講演要旨集, P.166, 2014年9月, 筑波大学
- ⑨ 水野勝紀・浅田昭・八木田康信・村越誠・藤本泰文・嶋田哲郎, “音響パルス反射法を用いた蓮根生息状況可視化技術の開発に向けた研究 -実測値と計算値の比較-”, 海洋音響学会 2014年度研究発表会, 2014年5月, 神奈川大学
- ⑩ 水野勝紀・嶋田哲郎・浅田昭・藤本康文・嶋田哲郎, “音響パルス反射法を用いた水生植物・底泥厚・底質計測手法の開発”, 日本陸水学会 78回プログラム 2013 大津大会, 講演 No. 3B10, 第78回大会, 2013年9月, 龍谷大学
- ⑪ K. Mizuno, K. Abukawa, A. Asada, Y. Fujimoto, and T. Shimada, “Status assessment of eutrophied lake using high-resolution acoustic imaging sonar and sub-bottom acoustic sonar: in Lake Izunuma” SIL (International Society of Limnology) 32th congress, Abstracts p295, 2013年8月, Budapest, Hungary
- ⑫ K. Mizuno, K. Abukawa, A. Asada, Y. Fujimoto, and T. Shimada, Survey of lotus root habitat under the lake

bottom using a single-beam acoustic technique: in Lake Izunuma. OCEANS' 13 MTS/IEEE, 2013年6月, Bergen, Norway

⑬ 水野勝紀・嶋田哲郎・浅田昭・藤本泰文・嶋田哲郎, “音響パルス反射法を用いた浅深度サブボトムプロファイリングによる底泥下蓮根生息状況可視化技術の開発 -湖沼域の定量的な環境保全手法確立を目指して-”, 海洋音響学会 2013年度研究発表会, 13-02, 2013年5月, 東京大学生産技術研究所

〔図書〕 (計 3 件)

- ① 水野勝紀, “水中環境計測”, 音響キーワードブック, コロナ社, pp. 248-249, 2016年
- ② 水野勝紀・浅田昭, 「特集記事」 “高分解能音響ビデオカメラを用いた鳥類の採食行動がハス生息密度に及ぼす影響の計測”, 超音波テクノ, 2015 7-8月号, 日刊工業出版, pp. 1-5, 2015年
- ③ 水野勝紀・浅田昭, 「解説記事」 “高分解能音響ビデオカメラを用いた水生植物群の分類と三次元マッピング”, 超音波テクノ, 2014 9-10月号, 日刊工業出版, pp. 77-82, 2014年

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 1 件)

名称: 水底面下の堆積層の音響による情報収集方法及び水底面下の堆積層の音響による情報収集装置

発明者: 水野勝紀, 浅田昭, 池田克彦, 村越誠

権利者: 国立大学法人東京大学, 株式会社アーク・ジオサポート

種類: 特許

番号: 特願 2015-098178 号

出願年月日: 27年5月13日

国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

水野 勝紀 (MIZUNO, Katsunori)

東京大学生産技術研究所・特任助教

研究者番号: 70633494

(2) 協力研究者

嶋田 哲郎 (SHIMADA Tetsuo)

宮城県伊豆沼・内沼環境保全財団・上席主任研究員

研究者番号: 30538723

藤本 泰文 (FUJIMOTO Yasufumi)

宮城県伊豆沼・内沼環境保全財団・主任研究員

研究者番号: 20538722