

令和元年6月18日現在

機関番号：53701

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K14695

研究課題名(和文)音響キャビテーションノイズに基づく液体の粘度・密度の新規計測法の開発

研究課題名(英文) Development of method of measuring liquid properties employing acoustic cavitation noise

研究代表者

黒山 喬允 (Kuroyama, Takanobu)

岐阜工業高等専門学校・その他部局等・助教

研究者番号：40781737

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、音響キャビテーションノイズに基づいて液体の物性値を計測する手法の原理を確立することである。音響キャビテーションの単純なモデルである単一気泡系における気泡振動の数値解析と、超音波ホーン下に生じた音響キャビテーションの実験的な計測によって、音響キャビテーションノイズのパワースペクトルと液体の物性値の関係を検討した。その結果、音響キャビテーションノイズのパワースペクトルが液体の物性値に依存して大きく変化する入射超音波音圧振幅が存在することを明らかにした。また、適切な音圧振幅を用いることで、水性液体の粘度と強い相関を持つパラメータをパワースペクトルから算出することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は強力な超音波によって生じる音響キャビテーションからの放射音(ノイズ)を用いる新しい原理に基づいて、液体の物性値を計測しようとする手法を提案するものである。音響キャビテーションノイズのパワースペクトルを評価するにあたっては、入射超音波の音圧振幅に留意する必要があることを示唆した。また、パワースペクトルから算出したパラメータと粘度の間に強い相関があることを示し、この原理に基づき液体の物性値、特に粘度を推定できる可能性を示した。この成果は音響キャビテーションを援用する計測に先鞭をつけるものである。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to establish the basic principle of the measurement method of liquid properties employing the acoustic cavitation noise. The relationship between the power spectrum of the acoustic cavitation noise and the liquid properties is examined with the numerical simulation of the bubble radial oscillation in the single bubble system and the experimental observation of the acoustic cavitation under the ultrasonic horn. It is confirmed that the suitable pressure amplitude of the incident ultrasound for the liquid property measurement exists. It is found that the parameter calculated from the power spectrum of the acoustic cavitation noise, which correlate to the liquid viscosity.

研究分野：強力超音波, 音響キャビテーション, 光応用計測

キーワード：音響キャビテーションノイズ 粘度 ブロードバンドノイズ 分数調波

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

粘度や密度といった物性値は液体の重要な指標であり、工業や医療のみならず食品など液体を扱う様々な分野においてその計測が求められている。特に液体粘度については、迅速化や省力化、製造ラインにおけるその場計測を達成するために、近年でも新たな計測手法の研究が盛んである。サンプルに挿入した板の振動態様から粘度・密度を同時計測する手法[1]や、サンプル中に配した金属球を電磁気力によって回転させ粘度を計測する手法[2]、パルスレーザによって液体表面を加振しその応答から粘度を求める手法[3]などが研究されている。しかしながら、サンプルへのプローブ挿入が必要、対象の光学特性の影響を受けるといった問題が存在し、上述の要求に全て答える手法は未だ存在しない。また、その場計測を実現するためには装置が簡便であることが必須である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、音響キャビテーションノイズの周波数スペクトルに基づいて液体の物性値を計測する手法の原理を確立することである。音響キャビテーションは Fig. 1 に示すように強力な超音波による負圧によって発生する直径 100 μm 以下の多数の微細な気泡であり、超音波の周期的な圧力変動に伴って膨張・収縮(半径振動)を繰り返す。また、この気泡は半径振動に伴って音響キャビテーションノイズと呼ばれる音波を放射する。音響キャビテーションは液体の慣性や粘性の影響を大きく受けるため、半径振動は入射した超音波に対し非線形的となる。このため、音響キャビテーションノイズも超音波の整数倍の周波数を持つ高調波成分や、整数分の 1 の周波数を持つ分数調波成分を含み、これらの成分は液体の物性値に応じて変化する。したがって、音響キャビテーションノイズの周波数スペクトルに基づいて、液体の物性値を計測できると考えた。本研究では、液体の物性値と音響キャビテーションノイズ周波数スペクトルの関係を検証し、周波数スペクトルから液体の物性値を推定する手法を検討する。

3. 研究の方法

本研究ではまず、液体の物性値と音響キャビテーションノイズの関係を、Fig. 2(a)に示す液中にただ一つの気泡を捕捉し超音波によって安定的に振動させる単一気泡系[4]について調べる。単一気泡系には気泡が 1 個しか存在せず気泡間の相互作用や液体の流れ、気泡の移動が起こらない。このため、実験的な解析が容易であり、また実験によって得られる気泡半径振動は Keller-Miksis 方程式[5]と呼ばれる気泡の半径振動を与える微分方程式の解とよく一致することが知られている。この Keller-Miksis 方程式に基づく数値解析によって、特に気泡の振動態様と放射される音響キャビテーションノイズの関係、また気泡を駆動する超音波の音圧振幅と気泡の振動態様・音響キャビテーションノイズの周波数スペクトルの関係を明らかにする。

次に、複数の気泡が存在し相互に作用を及ぼしあう通常の音響キャビテーションについて、音響キャビテーションノイズのパワースペクトルと液体の物性値の関係について実験的に調べ、パワースペクトルに基づく液体の物性値推定が可能かを検討する。複数の気泡が存在する通常音響キャビテーションでは、Fig. 2(b)のように合体・分裂、放射音波の干渉といった気泡間相互作用によって、分数調波や超高調波、広帯域ノイズが発生する。単一気泡振動では気泡半径振動の数値解析が可能であり、半径振動の解析結果から音響キャビテーションノイズの周波数スペクトルを得ることができたが、通常の音響キャビテーションでは実験的に音響キャビテーションノイズを調べるほかない。このため単一気泡系の解析によって得た知見に基づき、入射超音波の音圧振幅や気泡の振動態様に影響を与える液体の物性値を変化させながら音響キャビテーションノイズを実験的に計測し、それらの関係を検証する。また、単一気泡系では生じない、分数調波成分、分数調波成分の整数倍の周波数を持つ超高調波成分、いずれにも該当しないノイズフロアの成分である広帯域ノイズについても液体物性値との関係を検証する。

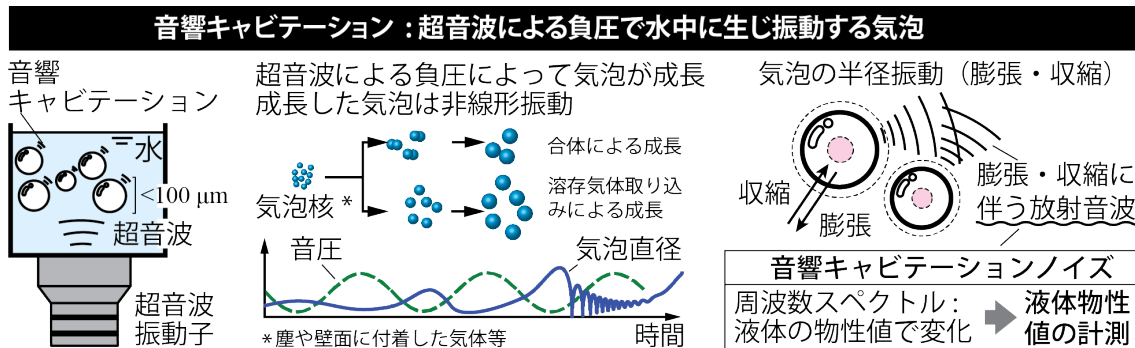


Fig. 1 音響キャビテーション.

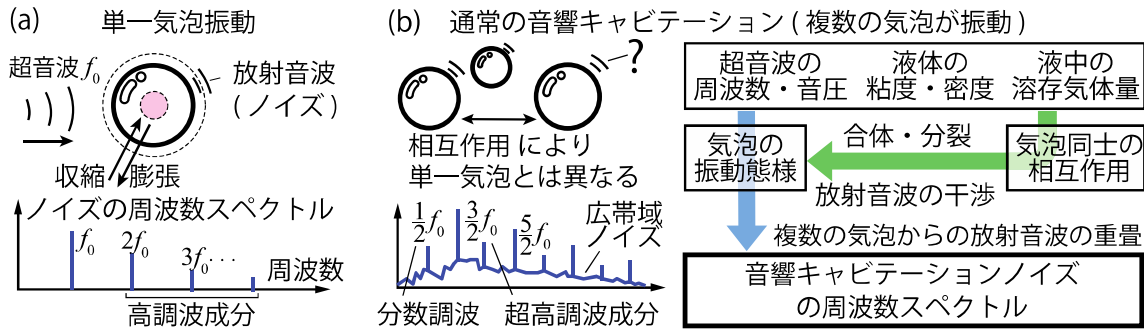


Fig. 2 音響キャビテーションノイズと液体物性値の関係.

#### 4. 研究成果

##### (1) 単一気泡系での検討

単一気泡系での単一気泡振動を調べるために、Keller-Miksis 方程式[5]に基づく数値解析を行った。入射する超音波の周波数は 28 kHz、粘度の他の液体の物性値は水と同じであるとし、気泡内は Ar ガスで満たされているものとした。また超音波非入射時における気泡の半径(初期半径)は 5  $\mu\text{m}$  とした。入射超音波の音圧振幅 80, 100, 130 (kPa) に対する、超音波の周期内での気泡半径変化を Fig. 3(I) に示す。また Figs. 3(II), 3(III) には気泡半径振動から求めた気泡からの放射音の音圧[6]とそのパワースペクトル包絡をそれぞれ示す。なおパワースペクトル包絡は 2 次(56 kHz)成分のパワーが 0 dB となるよう正規化した。

Figure 3(I) より、入射する音圧振幅が大きいほど気泡半径の振幅が大きくなることを確認できる。半径振動は(a) 80 kPa の条件では振幅も小さく半径の極大付近が歪んだ正弦波様となっているが、(b) 100 kPa の条件では粘度が 1  $\text{mPa}\cdot\text{s}$  の場合、半径が極大となる時間以降に振動的となるリバウンドが生じている。また、音圧振幅が大気圧を超える(c) 130 kPa では入射超音波の音圧が正となる付近まで膨張し、その後収縮を起すという振動態様が見られる。放射音の音圧は、気泡半径の 1 階及び 2 階時間微分が大きくなるに従って強くなる。このため、(b) および (c) の場合においてリバウンド時や急収縮時に強い音圧が見られる。特に(c) の場合では最収縮時に強いパルス状の放射音が見られる。また、(b) および (c) では粘度が高くなるにつれて特にリバウンドが抑制される。これは、気泡の半径の短い時間での変化を粘性抵抗が妨げるためである。これに伴い、粘度が高くなるにつれて放射音の音圧振幅も小さくなる。

Figure 3(III) より、(b) の場合に粘度に依存するパワースペクトルの変化が顕著となることを確認できる。これは、上述の通り入射する超音波の音圧振幅が小さいと気泡が十分に膨張せずリバウンドといった強い非線形振動を起さず、また音圧振幅が大きいとパルス状の放射音が生じスペクトルが白色するためである。したがって、正規化したパワースペクトル包絡から粘度を推定することを考える場合には適切な入射超音波の音圧振幅が存在することがわかる。すなわち気泡がリバウンドを呈するなど強い半径振動の非線形を示し、かつパルス状放射音が支配的とならない音圧振幅で気泡を駆動することが望ましいといえる。このような音圧振幅で気泡を駆動した時の放射音スペクトルに基づき、粘度を推定する Support vector 回帰[7]を行なったところ、1 - 20  $\text{mPa}\cdot\text{s}$  の範囲で粘度を推定するモデルを作成することができた。同様の検討を密度についても行なったが、水性液体で考えられる程度の密度変化ではパワースペクトル変化は小さく、本条件での推定は難しいことがわかった。

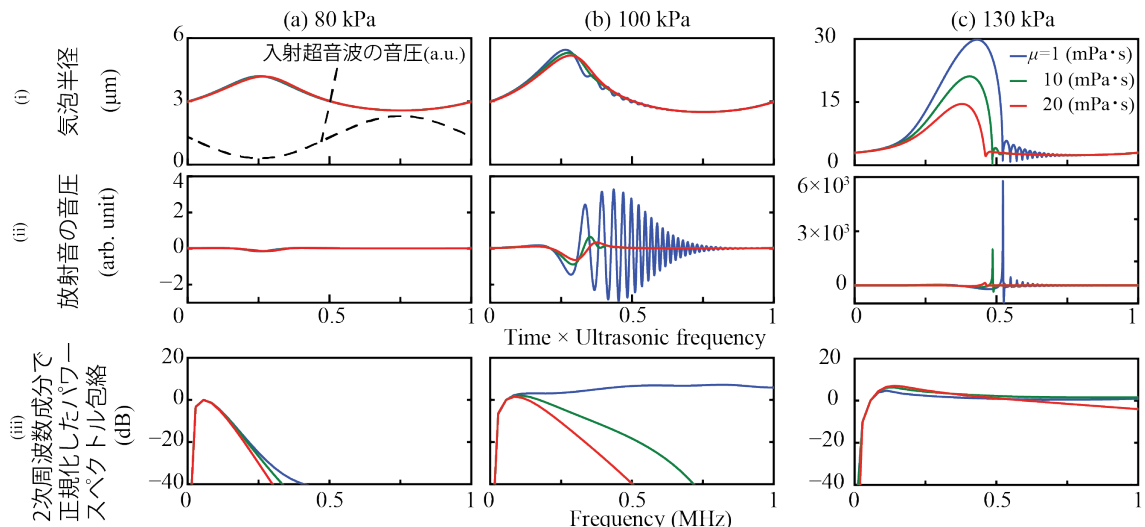


Fig. 3 音圧振幅と(I)気泡半径振動(II)気泡からの放射音(III)放射音パワースペクトルの関係。(a) - (b)は入射超音波の音圧振幅 80, 100, 130 (kPa)に対応する。

## (2) 複数気泡系での検討

単一気泡系では入射超音波の音圧振幅を、気泡振動のリバウンドが起きる程度とした時に最も放射音パワースペクトルの粘度に依存した変化が大きくなり、この時パワースペクトルは粘度が大きくなるに従って、高次の成分が小さくなることがわかった。一方で、多数の気泡が存在する通常の音響キャビテーションでは、単一気泡系における解析では加味できない気泡間の相互作用が生じる。そこで、液体の物性値を変化させながら、実験的に音響キャビテーション気泡から放射される音響キャビテーションノイズの計測を行った。音響キャビテーションは水槽中に挿入したホーン付ボルト締ランジェバン振動子によって発生させる。ボルト締めランジェバン振動子の駆動周波数は 19.2 kHz であり、ホーン出力面の直径は 30 mm である。水槽はアクリル製で内側の断面寸法は 50×40 mm<sup>2</sup> であり、その外面に張り付けた Polyvinylidene difluoride(PVDF)フィルムにより音響キャビテーションノイズを取得する。PVDF フィルムからの出力信号はアナログ-デジタル変換器で取得し、計算機を用いて Welch 法によってパワースペクトルを推定した。

Figure 4 に推定した音響キャビテーションノイズのパワースペクトルを示す。Figures 4(a), 4(b)はそれぞれ入射超音波の音圧振幅が比較的低い場合と高い場合に対応する。パワースペクトルは水とグリセロールの混合比を変化させながら、粘度を 1, 10, 20 mPa·s とした場合について示した。入射音圧振幅が低い場合、パワースペクトルは主に入射超音波(基本)周波数を持つ基本波成分と、その整数倍の周波数を持つ高長波成分によって構成される。音圧振幅を高めて行くと、基本波周波数の 1/2 の周波数を持つ分数調波成分、またその整数倍の周波数を持つ超高調波成分とノイズフロアに相当する広帯域ノイズが卓越する。Figure 4(a)の条件では、基本波成分は粘度間で大きな差はないが高調波成分は粘度が大きくなるに従って小さくなっていくことがわかる。これは、単一気泡系における解析と同様の傾向である。一方で、入射超音波の音圧振幅を高くすると高調波成分の大きさと粘度の間に単調な関係は見られなくなる。一方で、広帯域ノイズパワーの粘度間での差は大きくなり、粘度が高いほど広帯域ノイズパワーは小さく、高調波、分数長波、超高調波の明瞭なピークが見られる。

入射音圧振幅が高い場合には気泡が多数発生し、数密度が高まるため気泡同士の合体が盛んに起こるようになる。また、合体によって半径を大きくした気泡は圧壊し小さな気泡へと分裂する。このような放射音を生じる気泡の数の増減によってブロードバンドは生じると考えられている[6]。一方で、合体や分裂を伴わず長い時間にわたって振動する気泡の数が増えると高調波成分が卓越することが知られている[9]。高粘度では粘性抵抗により気泡の移動が妨げられ、分裂や合体が生じにくくなり気泡が安定化されると考えられる。このため、高い音圧振幅においても広帯域ノイズのパワーが小さく、高調波成分のパワーは大きくなるものと思われる。入射超音波の音圧振幅を徐々に増加させて行くと、まず高調波成分が卓越し、その後広帯域ノイズのパワーが大きくなっていく。このため、高調波成分と広帯域ノイズのパワー比はある入射超音波の音圧振幅で最大値を取る。この比の最大値を、粘度が 20 mPa·s のとき 1 として正規化すると、10, 1 mPa·s ではそれぞれ 0.66, 0.13 となり強い相関が見られた。このように、通常の音響キャビテーションでは単一気泡系において着目した高調波パワーの変化だけでなく、広帯域ノイズ等に注目することで高い精度で粘度を推定できる可能性がある。

以上のように、本研究では単一気泡系および複数の気泡が存在する通常の音響キャビテーションにおいて気泡が放射する音響キャビテーションノイズのパワースペクトルに着目することで、液体の物性値、特に粘度を推定できる可能性を示唆した。特に、音響キャビテーションの測定において入射超音波の音圧振幅を最適化することが重要であり、その値を掃引しながら測定を行うことで物性値推定に有用な情報が得られることを明らかにした。しかしながら、広帯域ノイズの発生機序等は不明な点もある。そこで、気泡振動の光学的計測法を考案しこれを用いる半径振動計測と音響キャビテーションの計測を組み合わせることで、本研究の結果が生じた機序を明らかにするための検討を開始している。

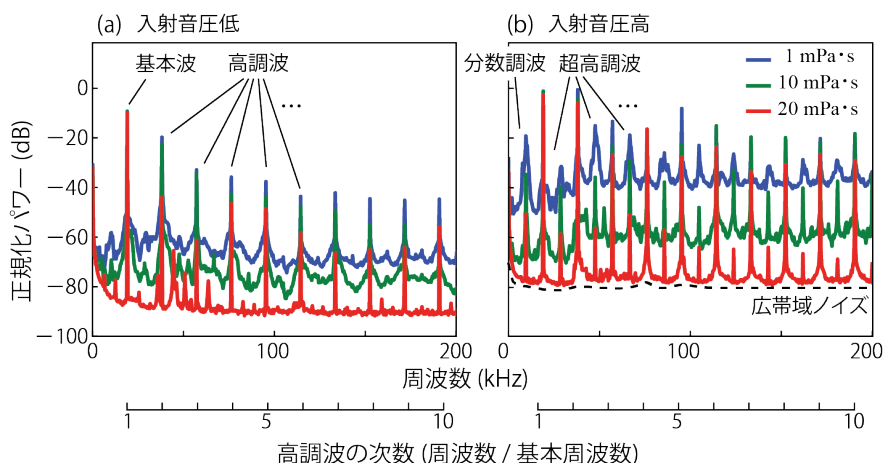


Fig. 4 音響キャビテーションノイズパワースペクトルの粘度依存性。(a) 入射超音波の音圧振幅が小さい場合 (b) 大きい場合。

## <引用文献>

- [1] Jun Takarada, Naoto Wakatsuki, Koichi Mizutani, and Ken Yamamoto, "Measurement of liquid viscosity and density using single piezoelectric resonator with two vibration modes," Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 51, p. 07GB07, July 2012.
- [2] 保田 正範, 倉内 奈美, 中村 美希, 平野 太一, 細田 真妃子, "球回転型(EMS)粘度計の開発および商品化," 日本レオロジー学会誌, Vol.50, pp.223 – 228, October 2012.
- [3] 大屋 温輝, 滝口 広樹, "パルスレーザー粘度計の開発(近赤外レーザー誘起表面波法を用いた粘性率の自動高速測定装置開発)," 日本機械学会論文集, Vol.80, p. TEP0369 (11 pages), July 2014.
- [4] D. F. Gaitan, L. A. Crum, C. C. Church, and R. A. Roy, "Sonoluminescence and bubble dynamics for a single, stable, cavitation bubble," Journal of Acoustical Society of America, Vol. 91, pp. 3166 – 3183, June 1992.
- [5] Y. A. G. Man and F. J. Trujillo, "A new pressure formulation for gas-compressibility dampening in bubble dynamics models," Ultrasonics Sonochemistry, Vol. 32, pp. 247 – 257, March 2016.
- [6] K. Yasui, T. Tuziuti, J. Lee, T. Kozuka, A. Towata, and Y. Iida, "Numerical simulations of acoustic cavitation noise with the temporal fluctuation in the number of bubbles," Ultrasonics Sonochemistry, Vol. 17, pp. 460 – 472, August 2009.
- [7] 船津 公人, 金子 弘昌, ソフトセンサー入門, コロナ社, 2014 年.
- [8] P. D. Welch, "The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: a method based on time averaging over short, modified periodograms," IEEE transaction on audio and electroacoustics, Vol. AU-15, pp. 70 – 73, June 1967.
- [9] M. Hodnett, R. Chow, and B. Zeqiri, "High-frequency acoustic emissions generated by a 20 kHz sonochemical horn processor detected using a novel broadband acoustic sensor: a preliminary study," Ultrasonics Sonochemistry, Vol. 11, pp. 441 – 454, October 2003.

## 5 . 主な発表論文等

### [ 雑誌論文 ] ( 計 2 件 )

Takanobu Kuroyama, "Spatial distribution measurement of acoustic cavitation bubbles by laser backscattering with confocal optics," Acoustical Science and Technology, Vol. 40, 査読付, July 2019(in printing).

黒山 喬允, "音響キャビテーションノイズの粘度依存性," 超音波テクノ, Vol. 31, 査読無, pp. 80 – 85, 2019 年 1 月.

### [ 学会発表 ] ( 計 6 件 )

Takanobu Kuroyama, "Viscosity dependence of harmonics and ultra-harmonics of acoustic cavitation noise," 2018 IEEE International Ultrasonics Symposium, October 2019.

DOI: 10.1109/ULTSYM.2018.8580173.

北川雅千弥, 黒山 喬允, "振幅変調超音波入射時の気泡半径振動に基づく単一気泡系のパラメータ推定," 日本音響学会 2018 年秋季研究発表会講演論文集, pp. 103 – 104, 2018 年 9 月 .

黒山 喬允, "レーザ後方散乱を用いる音響キャビテーション空間分布の 3 次元計測," 日本音響学会 2018 年秋季研究発表会講演論文集, pp. 83 – 84, 2018 年 9 月 .

畑中 佑斗, 黒山 喬允, "単一気泡振動放射音スペクトルからの粘度推定モデル," 信学技報, US2017-06, pp. 71 – 76, 2018 年 1 月.

Yuto Hatanaka and Takanobu Kuroyama, "Viscosity dependence of acoustic emission spectra from single bubble oscillation," Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics, Vol. 38, 1P4-9 (2 pages), October 2017.

黒山 喬允, "媒質粘度による単一気泡放射音スペクトル変化の音圧振幅依存性," 日本音響学会 2017 年秋季研究発表会講演論文集, pp. 1203 – 1204, 2017 年 9 月.

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。