

令和元年6月11日現在

機関番号：17201

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K12479

研究課題名（和文）気泡の生成・制御技術の研究開発と3次元ディスプレイへの応用

研究課題名（英文）Developing a bubble-projection three-dimensional display (BP3DD)

研究代表者

中山 功一（Nakayama, Koichi）

佐賀大学・理工学部・准教授

研究者番号：50418498

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,600,000円

研究成果の概要（和文）：液体中に投影光を拡散反射する気泡を、レーザーで生成する「気泡投影型3次元ディスプレイ（BP3DD）」を提案した。水、エタノール、ラウリル水溶液、炭素粉末混合液などの液体中に高エネルギーレーザーを集光させて気泡を生成する実験を行った。実験結果から、液体の圧力を下げることで、気泡生成に必要なエネルギーが低下することが確認できた。特に、液体が沸騰する直前の水蒸気圧に制御することで、気泡生成に必要なエネルギーが最も低くなることが確認できた。さらに、蒸発熱が水よりも小さいエタノールのほうが、気泡生成に必要なエネルギーが小さく、条件がたとえば0.5ジュールで気泡が生成できることが確認できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現状の立体映像は、3次元空間画像（3次元空間中に発光体/反射体を設置する方式）が実現できていない。人は物を立体的に見るために、両眼の輻輳角/両眼視差/焦点調節/運動視差の4つを主に用いている。全て矛盾なく鑑賞できる3次元空間画像の多くは、奥にある物体から発せられた光を、手前にある物体が遮らないため、奥が透けて見えるゴーストのような映像となる。本研究の結果、輻輳角/両眼視差/焦点調節/運動視差の全てを矛盾なく空中に実像として提示でき、全方位から多人数で観察でき、専用メガネが不要な3次元ディスプレイの実現可能性が示された。

研究成果の概要（英文）：We are developing a bubble-projection three-dimensional display (BP3DD) that will generate reflecting points in a liquid. This type of display is currently nonexistent. In this research, we examined bubble generation in water and ethanol to find the most suitable conditions for the BP3DD. Experimental results showed that when the water pressure was lower, the required energy to generate bubbles decreased linearly. The required energy should be lowest when the water pressure is similar to the water vapor pressure. When bubbles were generated in ethanol solution, the required energy was lower than that required in water. The minimum required energy to generate bubbles was approximately 0.5 J. We can conclude that the required energy to generate bubbles is dependent on the physical properties of the liquid and its pressure.

研究分野：メディア情報学

キーワード：3次元ディスプレイ 気泡投影 レーザ バーチャルリアリティ

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

### 1. 研究開始当初の背景

現状の立体映像表示方式は、(A) 2次元視差画像（右目と左目に異なる2次元画像を提示する方式）、(B) 3次元空間画像（3次元空間中に発光体/反射体を設置する方式）、(C) 電子ホログラフィに大別できる。立体ディスプレイとして(A)2次元視差画像方式は広まりつつあるが、理想的な立体映像を提示する(B)3次元空間画像/(C)電子ホログラフィは技術的に困難である。(B)3次元空間画像を実現するためには、いくつかの技術的な課題を解決する必要がある。

人は物を立体的に見るために、両眼の輻輳角/両眼視差/焦点調節/運動視差の4つを主に用いている。(A)方式の多くは、両眼の輻輳角と焦点調節に矛盾が生じ、運動視差を伴わないため、長時間の鑑賞は難しい。一方、(B)方式は全て矛盾なく鑑賞できるが、その多くは、奥にある物体から発せられた光を、手前にある物体が遮らないため、奥が透けて見えるゴーストのような映像となる。(C)方式では視域が狭く、ある一方向からしか再生像を観察できない。現実の3次元物体を見る場合と同様という意味で理想的な(B)3次元空間画像が期待されている。

本研究課題で取り組む気泡投影型3次元ディスプレイは、発光点ではなく反射点を任意の形状に生成する(B)方式に該当し、自然な立体像を提供できる可能性がある。

### 2. 研究の目的

本研究課題は、3次元空間中の任意の位置に反射体を設置するという技術的な課題を解決し、奥の光が透けて見えないことのない新しい(B)方式を実現するものである。

本研究で取り組む3次元ディスプレイの実現方法を以下に述べる。

透明液体（水）で満たされた密閉容器内の圧力を沸騰寸前まで下げる。波長1064nmの近赤外YAGレーザーをレンズで液体中に集光し局所的に加熱すると、気泡が生成される。集光位置をガルバノスキャナで制御することで、任意の位置に気泡が生成できる。この技術により、輻輳角/両眼視差/焦点調節/運動視差の4つを矛盾なく提示でき、全方位から観察でき、専用メガネが不要な3次元ディスプレイが実現できる。

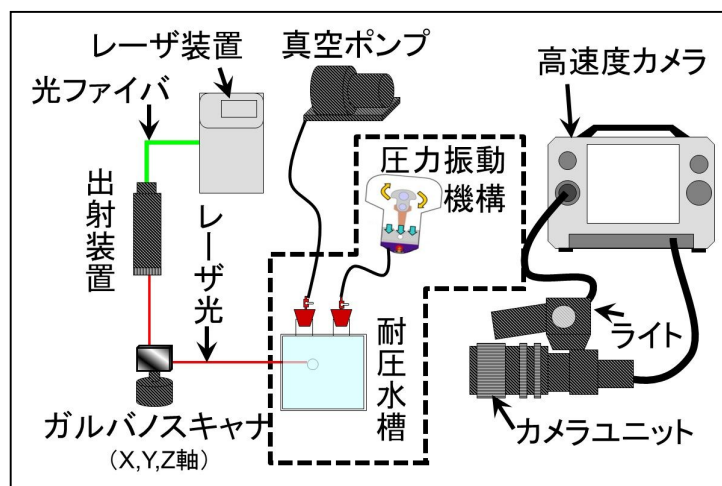
本研究課題では、気泡数（画素数）の多い高精細な立体像を水中に生成する技術を明らかにする。これまで、一つの気泡の生成に必要なエネルギーが20ジュールと非常に大きかったため、高精細な（多数の）気泡群の生成が困難であった。平成27年度までの申請者らの研究により、エタノール50%水溶液1000mlに対し、ラウリルベンゼンスルホン酸ナトリウム（界面活性剤）0.15グラムと炭素粉末0.10グラムを混合した液体を使用することで、1気泡あたりに必要なエネルギーが2.0ジュールと、従来の10倍の効率で気泡生成が実現した。この理由は、界面活性剤により表面張力（分子間力）が低下し、液体が気化（蒸発）しやすくなる上、炭素粉末によりレーザーエネルギーの吸収係数が増加したためである。本申請の研究期間内に、さらに10倍の効率となる0.2ジュールのエネルギーによる気泡生成を実現する水溶液を明らかにする。

### 3. 研究の方法

より低エネルギーで気泡が生成されるという意味で効率の良い水溶液を調査研究する。

水に混合する物質の候補として、沸点を下げる物質（エタノールなど）、比熱を下げる物質（シリコンオイルなど）、表面張力（蒸発熱）を下げる物質（界面活性剤など）、吸収係数を向上させる物質（炭素粉末など）を検討している。

レーザー波長（1064nm）におけるエタノール水溶液の吸収係数は精製水と同様であった。食塩水や砂糖水も吸収係数は変わらず、気泡生成に必要なエネルギーも変わらない。一方、炭素粉末と界面活性剤の添加により、気泡生成に必要なエネルギーが低下し、気泡生成効率が劇的に向上した。このことから、沸点を下げる物質、比熱を下げる物質、表面張力（蒸発熱）を下げる物質を中心に試行錯誤し、さらに効率的な組合せを検証する。実験装置は、右図を想定している。



### 4. 研究成果

液体中に気泡を生成するために必要なエネルギーは、液体の沸点や比熱などの液体の物性値に依存すると考えられる。よって、まず本研究で使用する液体を選定するため、以下の～の4種類の液体、およびそれらの混合液体である～について調査した。

精製水 2L  
 高機能性液体 (3M 社製 Novec 7100) 2L  
 ラウリルベンゼンスルホン酸ナトリウム 1g を添加した精製水 2L  
 (以下, ラウリル水溶液とする)  
 エタノール 2L  
 25vol%エタノール水溶液 2L  
 50vol%エタノール水溶液 2L  
 75vol%精製水 + 25vol%高機能性液体 2L  
 50vol%精製水 + 50vol%高機能性液体 2L  
 25vol%精製水 + 75vol%高機能性液体 2L  
 25vol%エタノール + 75vol%高機能性液体 2L  
 50vol%エタノール + 50vol%高機能性液体 2L  
 25vol%高機能性液体 + 25vol%エタノール + 50vol%精製水 2L  
 25vol%高機能性液体 + 50vol%エタノール + 25vol%精製水 2L  
 50vol%高機能性液体 + 25vol%エタノール + 25vol%精製水 2L  
 25vol%エタノール + 75%ラウリル水溶液 2L  
 50vol%エタノール + 50%ラウリル水溶液 2L  
 75vol%ラウリル水溶液 + 25vol%高機能性液体 2L  
 50vol%ラウリル水溶液 + 50vol%高機能性液体 2L  
 25vol%ラウリル水溶液 + 75vol%高機能性液体 2L

検討を行う際に使用した, レーザによる液体中気泡生成のための実験装置の構成を Fig.2-2 に示す. レーザ発振器は, Nd:YAG レーザ発振器 (ミヤチテクノス製 ML-2332B) を用いた. レーザ照射条件の設定およびレーザの照射は, 発振器に取り付けられたコントローラにより行う. レーザの波長は  $1.064\ \mu\text{m}$ , 最大定格出力 50W, ビーム径 8mm である. 発振されたレーザ光はコア径 0.4mm, 長さ 5m, 最大伝達エネルギー 30J, コア材質  $\text{SiO}_2$  の SI (ステップインデックス) 型光ファイバー (ミヤチテクノス製 SIH-04CA05m) によって伝送され, レンズ径 40mm, 入射側レンズ焦点距離 120mm, 出射側レンズ焦点距離 100mm, 出射角  $22^\circ$  の出射ユニット (ミヤチテクノス製 FOL-40A-120100-STD) により集光される. レーザが水平方向に照射されるように, 出射ユニットを治具に固定した.

また, 気泡の生成を確認するため, 走査方式プログレッシブ 最大フレームレート数 24000fps, 8bit 階調の高速度カメラ (KEYENCE 製 VW-5000) を用いた. ガラス製の観賞魚用水槽側面に固定治具を用いて高速度カメラのカメラユニットを設置し, 気泡が生成される様子を高速度カメラで撮影しコントローラ内のハードディスクドライブに記録した.

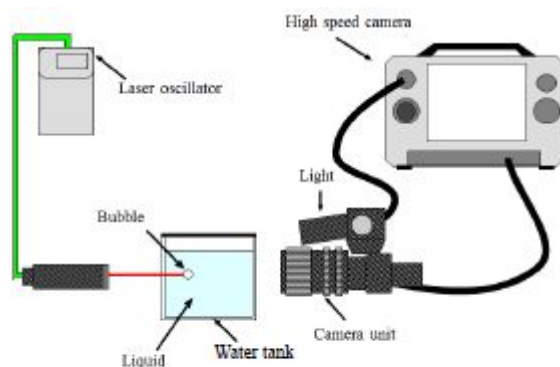


Fig.2-2 Experimental device

気泡生成およびその後の挙動を Fig.3-1 に示す 図に示すように, レーザ照射開始から 1ms 後に発光が観察され, 発光の 2ms 後に気泡が生成し, レーザ照射開始から 24ms 後にすべての気泡が消滅した.

各静水圧におけるラウリル水溶液の照射エネルギーと気泡生成率との関係を Fig.3-2 に示す 横軸が照射エネルギー, 縦軸が気泡生成率, プロットが各照射エネルギーでの気泡生成率を示す. 図よりラウリル水溶液は減圧を行うことで気泡生成に必要なエネルギーが低下することがわかる.

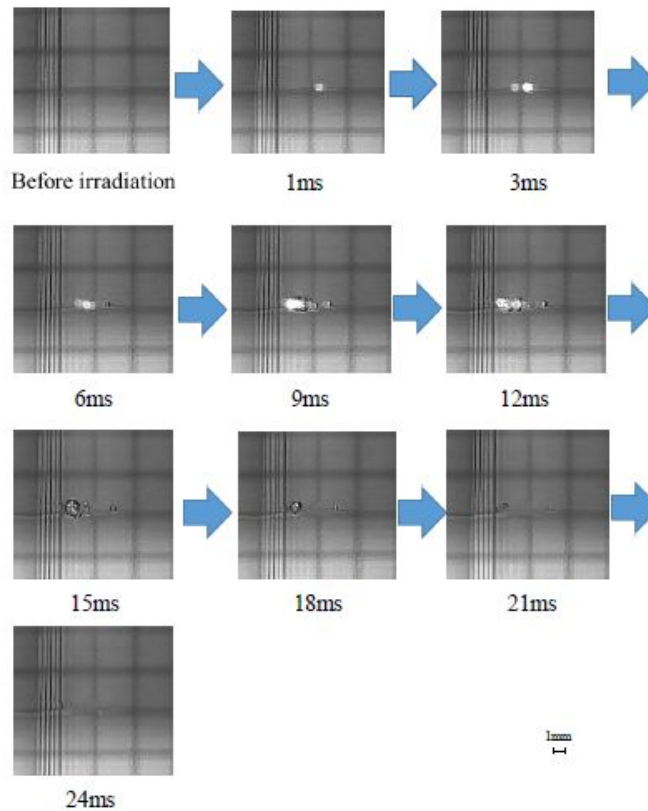


Fig.3-1 Bubble formation behavior at hydrostatic pressure of 0.04 MPa and irradiation energy of 20.7 J

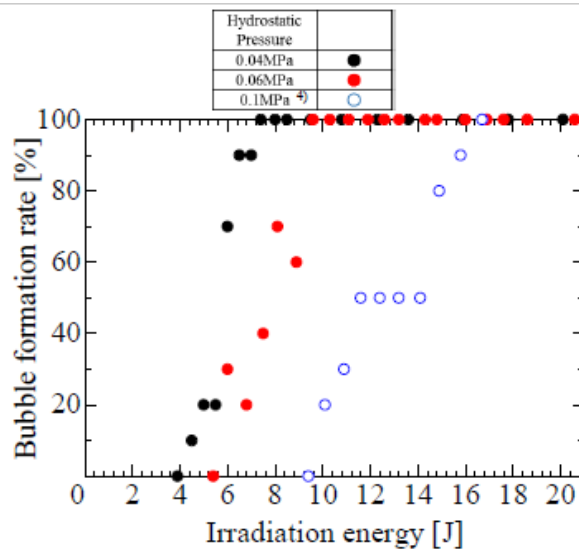


Fig.3-2 Relationship between irradiation energy and bubble formation rate for different hydrostatic pressures

各静水圧におけるラウリル水溶液の照射エネルギーと気泡径との関係を Fig.3-3 に示す。横軸が照射エネルギー、縦軸が気泡径、プロットが各照射エネルギーでの気泡径、実線が静水圧 0.04MPa、0.06MPa の平均気泡径、破線が 0.1MPa の平均気泡径を示す。照射エネルギーを同一としたとき、静水圧が低下するほど平均気泡径は増加する。これは、静水圧が低下することにより、蒸発した気体の体積の増大を抑制する力が減少したことが影響していると考えられる。また各静水圧の臨界エネルギー（気泡生成率 100% が得られた最低の照射エネルギー）での気泡径の平均は 0.1MPa および 0.06MPa のとき 0.6mm、0.04MPa のとき 0.7mm であり、静水圧が臨界エネルギーでの気泡径におよぼす影響は小さいと考えられる。これは減圧時、蒸発した気体の体積の増大を抑制する力が減少すると同時に、臨界エネルギーも低下するため、入熱量が減少したことが影響していると考えられる。

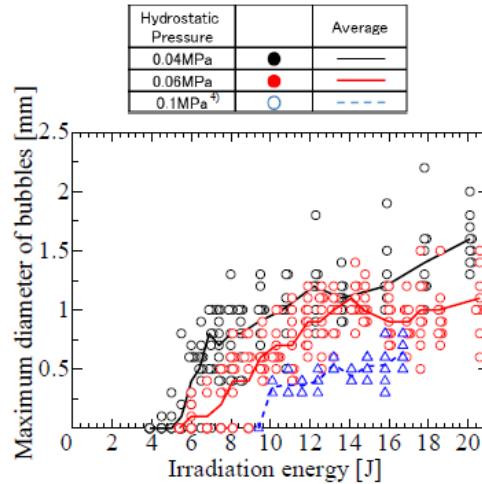


Fig.3-3 Relationship between irradiation energy and bubble diameter for different hydrostatic pressures

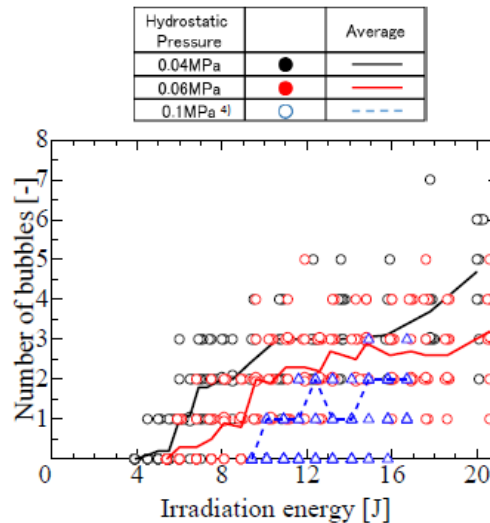


Fig.3-4 Relationship between irradiation energy and number of bubbles for hydrostatic pressures

各静水圧におけるラウリル水溶液の照射エネルギーと光軸上に発生した気泡数との関係を Fig.3-4 に示す。横軸が照射エネルギー、縦軸が気泡数、プロットが各照射エネルギーでの気泡数、実線が静水圧 0.04MPa、0.06MPa の平均気泡数、破線が 0.1MPa の平均気泡数を示す。照射エネルギーを同一としたとき、静水圧が低下するほど気泡数は増加する。これは、静水圧が低下し、液体の蒸気圧が低下することによって沸点が降下し、より低いエネルギーで蒸発が起るようになったためだと考えられる。

また各静水圧の臨界エネルギーでの気泡数の平均は 0.1MPa のとき 1.5 個、0.06MPa のとき 2.4 個、0.04MPa のとき 1.8 個であり、静水圧の変化は臨界エネルギーでの気泡数への影響が小さいと考えられる。

各静水圧におけるラウリル水溶液の照射エネルギーと気泡持続時間との関係を Fig.3-5 に示す。横軸が照射エネルギー、縦軸が気泡持続時間、プロットが各照射エネルギーでの気泡持続時間、実線が静水圧 0.04MPa、0.06MPa の平均気泡持続時間、破線が 0.1MPa の平均気泡持続時間を示す。グラフより、平均気泡持続時間は静水圧にかかわらず 10J 以上ではほぼ同様の値となるが 10J 以下になると静水圧の低下により平均気泡持続時間はおおむね増加した。これは、平均値を計算する際、気泡が生成されない条件では持続時間を 0ms としているため、臨界エネルギー以下の照射エネルギーでは気泡持続時間が短くなったと考えられる。またこの時発生する気泡の持続時間は 11ms 以下であり、長く持続しない。これより発生する気体は主に水蒸気であると考えられる。

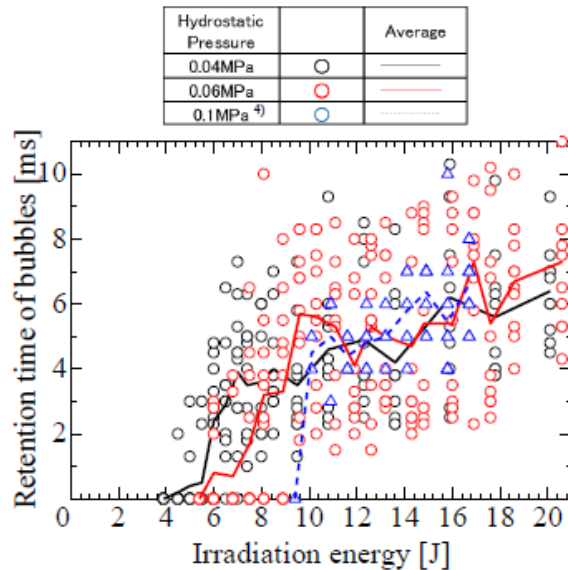


Fig.3-5 Relationship between irradiation energy and Retention time of bubbles for hydrostatic pressures

液体中にレーザを照射することによる気泡生成において、液体の種類、静水圧の変化が気泡生成、気泡径、気泡数、気泡持続時間および発光現象に与える影響を検討し、以下の結論を得た。

減圧時のラウリル水溶液は常圧時と同様に安定してレーザ光軸上に気泡が生成されたが、減圧時の高機能性液体は常圧時と異なりレーザ光軸上に気泡は生成されなかった。ラウリル水溶液は減圧を行うと気泡生成に必要なエネルギーは小さくなり、静水圧 0.04MPa のとき最小の臨界エネルギー 7.4J を得られた。これは本研究で得られた最も小さい臨界エネルギーであった。高機能性液体は常圧のとき最小の臨界エネルギー 10.4J を得られた。また一方減圧を行うと臨界エネルギーは得られなかった。ラウリル水溶液は静水圧が低いほど気泡数が多く、気泡径は大きくなった。ラウリル水溶液は減圧を行うと発光を伴わず生成する気泡数が増加した。以上の結果より静水圧 0.04MPa のラウリル水溶液において最小の臨界エネルギー 7.4J を得られ、常圧時より発光を伴わず生成する気泡数が増加するため、本研究において得られた 3次元ディスプレイに最適な条件だと考えられる。レーザ光の条件については、焦点距離が長いレンズを用いた場合に、集光点のみにおける気泡の生成ではなく、集光点の前後の領域にまで気泡が生成されることが明らかとなった。できる限り大口径で焦点距離の短いレンズを用いることが重要であることが示された。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 0 件)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

中山 功一 (NAKAYAMA Koichi)

佐賀大学・理工学部・准教授

研究者番号：50418498

### (2) 研究分担者

尾崎 仁志 (OZAKI Hitoshi)

三重大学・工学研究科・助教

研究者番号：90515660

沓名 宗春 (KUTSUNA Muneharu)

三重大学・工学研究科・リサーチフェロー

研究者番号：20153299