

超音波レビテーションを用いた ターゲット・デリバリシステムの開発

伊賀和音*

2021年2月28日

1 序論

1.1 音波レビテーション

音波レビテーションは、音波を用いて物体を浮遊させる方法である。音波で定在波を作り、その節に物体をトラップすることができる [1]。節ごとにトラップすることができるので、トラップ位置の間隔は波長の $1/2$ となる。音波には人間には聞こえない超音波を用いることが多い。元々は反射板を使って定在波を作っていたが、その方法では厳密に波長の整数倍である必要があった。反射板ではなく、上下から同じ周波数の音波を出すことで、波長の整数倍にする必要がなくなり、設定が容易になった。

1.2 うなりによる節の移動

異なる点 A と B から波長 λ_A と λ_B の波が出ていることを考える。 $t = 0$ のとき、A と B の間の地点 P で 2 つの波の節が揃っているとする。2 つの波の速度 v_s が等しいとすると、 $t = \frac{2v_s}{\lambda_A + \lambda_B}$ のとき、それぞれの節から位相が 2π ズレた節同士が出会う。節同士が出会う地点は点 P から $\frac{\lambda_B - \lambda_A}{2}$ だけ移動した地点となる。変数 k を式 1.1 のように定めると、節の移動速度 v は式 1.2 のようになる。特に、2 つの波の波長が近く $|k| \ll 1$ のとき、次のように近

似できる。

$$\lambda_B = (1 + k)\lambda_A \quad (1.1)$$

$$v = \frac{k}{2 + k}v_s \quad (1.2)$$

$$v \simeq \frac{k}{2}v_s \quad (1.3)$$

1.3 研究の目的

現在、自由電子レーザーでは、レーザー相互作用点を数 10Hz での繰り返し周波数で稼働させて物質に照射を行う実験をしている。照射対象の物質の配置は、テープ上に物質を置き、それを移動させる方法で行われていることが多い。しかし、テープからの散乱や、テープ自体の飛散による照射チャンバー汚染が問題となっている。そこで、本研究では、音波レビテーションの技術を用いてターゲットデリバリのシステムを試作した。また、音波レビテーションで問題とされている高速性の評価を行う。最終的な構想として、音響液滴射出によって飛び出した液滴の位置を音響浮揚で位置を固定して X 線自由電子レーザーを照射させることを考えている。

1.3.1 現在使用されているターゲットデリバリシステム

X 線自由電子レーザーでは効率的なデータ収集が必要となっている。X 線自由電子レーザーをサンプルに照射して、その回折画像をとるのだが、レーザーに露出したサンプルは破壊され

* 電気通信大学 Ⅲ類 米田研究室

てしまう。そのため多数(数百から数十万)のサンプルを X 線自由電子レーザーの繰り返しごとに相互作用点に送り込む必要がある [3]。X 線自由電子レーザーの繰り返し周波数は施設により異なるが、兵庫の SACLA では最大で 60 Hz となる [4]。

1.4 目標とする装置

図 1.1 に目標とする装置のイメージを示す。60 Hz で繰り返すレーザーの相互作用点に繰り返しごとにサンプルを送り込む。サンプルの移動速度 v とサンプル同士の間隔 d を用いて、 $v/d = 60 \text{ Hz}$ となればよい。サンプル

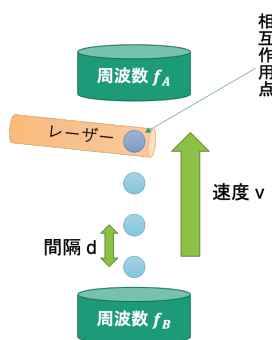


図 1.1 装置のイメージ

同士の間隔 d は上下のトランスデューサの周波数 ($f_A \approx f_B$) によって決まる。サンプルの移動速度 v は上下のトランスデューサの周波数差によって決まる。サンプルは音響液滴射出などによって射出された液滴(平均密度 1 g/cm^3)である。

周波数は、超音波浮揚で一般的な周波数 $f_A \approx f_B = 40 \text{ kHz}$ とする。サンプル同士の間隔 d はおよそ 8.25 mm となる。したがって、要求される移動速度 v は 25.5 cm/s である。式 1.3 から、周波数差を 60 Hz とすれば良いことがわかる。

2 実験

2.1 実験装置の設計

トランスデューサの 2 つの端子 V_{a1} と V_{a2} に周波数 f_A の信号を入力することで周波数 f_A の音波を出力する。 V_{a1} と V_{a2} に逆位相の電圧を印加することで電流を双方向に流すようにした。電圧の増幅および反転には TC4428

の IC を用いた。TC4428 は反転と非反転の 2 ゲートを持つドライバである。TC4428 は最大で 18 V 、 1.5 A まで出力できる。反対側のトランスデューサも同様にした。

実験で用いた回路を図 2.1 に記す。図 2.2 に

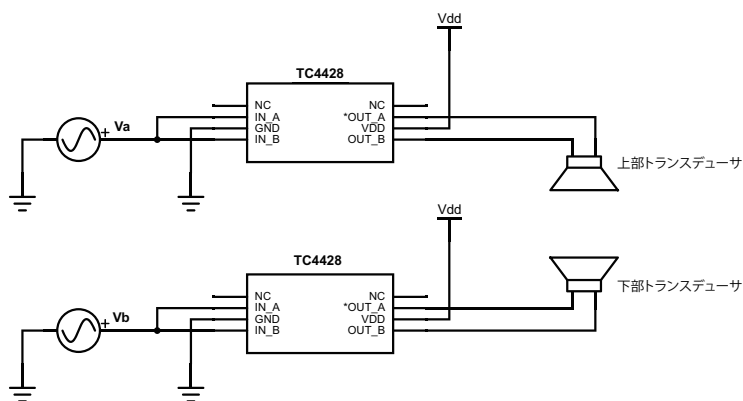


図 2.1 回路図

装置を示す。上部トランスデューサと下部トランスデューサ

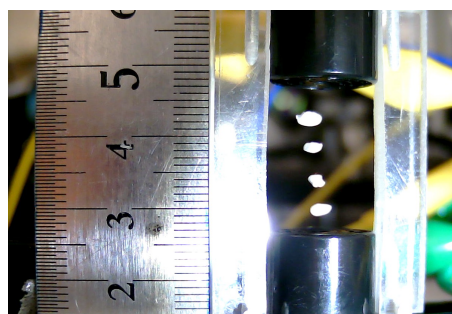


図 2.2 装置図 ($f_A = f_B = 40 \text{ kHz}$ のとき)

ランスデューサは 2 cm だけ離して固定した。 V_a と V_b からは、それぞれ周波数が f_A と f_B の矩形波を出力した。 V_a および V_b から出る信号は、TC4428 によって振幅 V_{dd} の矩形波に増幅した。交流電源 V_a および V_b には、JUNTEK の JDS6600 を用いた。電源電圧 V_{dd} には、BJT の PS3030R を用いた。それぞれのトランスデューサの入力には、同周波数で逆位相の信号が入力される。上下のトランスデューサへは、それぞれ異なる周波数を入力することができ

る。波形の立ち上がりの際に信号が減衰振動していたことが確認できた。また、別のトランスデューサでの信号立ち上がりの際にも減衰振動していたことが確認できた。これは、上下の TC4428 の電源 V_{dd} を共通しているためだと考えられる。電源にキャパシタを挟むことで振動を抑制できると考えられる。トランスデューサの入力信号に矩形波を用いているが、トランスデューサは共鳴動作するため出力は正弦波となる [1]。図 2.2 で 4 箇所を発泡スチロールを浮揚した様子を示している。各発泡スチロール間の距離は平均 4.25 mm となっていた。これは 40 kHz の音波の波長の 1/2 によく一致している。一方で、発泡スチロールが軸上からずれて斜めに配置していた。原因として、以下の 3 つが考えられる。上下 2 つのトランスデューサがつくる定在波は、縦方向のトラップ能力は高いが、横方向は弱いこと。支柱による音波の反射などの影響。トランスデューサが厳密に軸上に配置できていないこと。

2.2 速度の測定

密度 0.020 g cm^{-3} の発泡スチロール 0.2 mg を浮揚させた。電源電圧は $V_{dd} = 12.0 \text{ V}$ とした。入力周波数は $f_B = 40.00000 \text{ kHz}$ とし、 f_A を変えながら発泡スチロールの移動速度を測定した。

2.3 必要な電源電圧の測定

入力周波数は $f_A = f_B = 40.00000 \text{ kHz}$ とした。発泡スチロールは 0.4 mg の球を使用した。発泡スチロールの密度を変えながら、浮揚できる最小の電源電圧 V_{dd} を測定した。

3 結果および考察

3.1 速度の測定

速度の測定結果を図 3.1 に記す。これを最小二乗法でフィッティングして以下の一次式が得

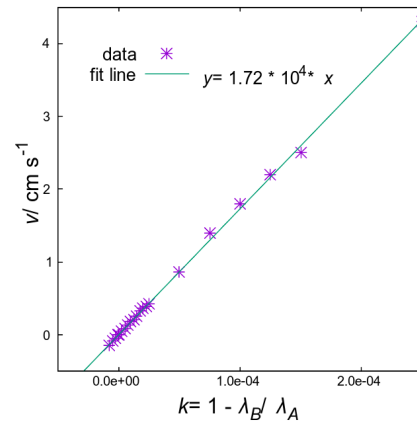


図 3.1 上下の周波数差と移動速度 v の関係

られた。

$$v = (1.72 \pm 0.01) \times 10^4 \text{ cm s}^{-1} \times k \quad (3.1)$$

式 1.3 を用いると次のように音速 v_s が得られる。

$$v_s = 345 \pm 2 \text{ m s}^{-1} \quad (3.2)$$

音速 v_s はセルシウス温度 t を用いて $v_s = 331.5 \text{ m/s} + 0.61 \text{ m/s}^\circ\text{C} \times t$ と近似できる [2] ので、次のように室温 t が得られる。

$$t = 22 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C} \quad (3.3)$$

以上より式 1.3 の妥当性が確認できた。

3.1.1 高速性

今回の設定では $k = 2.5 \times 10^{-4}$ (10 Hz 差) より大きくすると浮揚できなくなった。つまり、 4.3 cm s^{-1} が、今回測定できた最高速度であった。

3.2 必要な電源電圧の測定

図 3.2 に測定結果を横軸に密度 ρ 、縦軸に扶養に必要な電源電圧 V_{dd} をプロットしたグラフを記す。これをフィッティングして次の一次式が得られた。

$$V_{dd} = (80.7 \pm 1.0) \text{ V/g cm}^{-3} \times \rho + (4.75 \pm 0.06) \text{ V} \quad (3.4)$$

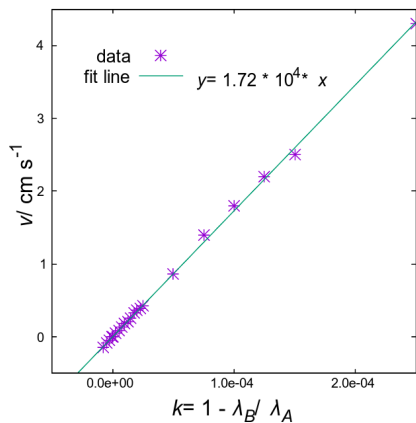


図 3.2 密度と必要な電源電圧の関係

フィッティングは、外れ値とみられる 0.050 g cm^{-3} を除いて行なった。

今回の設定で水 (1.0 g cm^{-3}) を浮揚させるのに必要な電源電圧は、 $V_{dd} = (85.5 \pm 1.1) \text{ V}$ であると考えられる。

3.3 装置の評価

トラップ中の球 (0.02 g cm^{-3} , 0.4 mg) の振動は、 $V_{dd} = 7.0 \text{ V}$ で横方向に 0.26 mm 、縦方向に 0.07 mm であった。2.1 節で述べたように、横方向のトラップ能力が比較的弱いと考えられる。また、支柱に張り付いて浮揚することがあったことから、支柱による影響も無視できないものであると考えられる。

また、落下したターゲットがトランスデューサ内に侵入してしまうという問題点も見つかった。これは中央の軸上にトランスデューサを設置しないセットアップ [1] を用いることで回避できる。このセットアップは横方向のトラップ能力が向上するメリットもある。

4 結論

今回の設定では水程度の密度を浮揚させるのに 85 V の電源電圧が必要であることが予想できた。また、 4.3 cm s^{-1} の速度で発泡スチロールを移動させることに成功した。今回使用

した 40 kHz ではトラップ位置の間隔はおよそ 4.3 mm となる。したがって 4.3 cm s^{-1} での配置の繰り返しは 10 Hz となる。

今後は、中央の軸上にトランスデューサを設置しないセットアップ [1] を用いてどこまで移動中のブレを抑えられるか検証したい。また、 50 Hz でのデリバリの達成や高精度でのデリバリに向けた開発をする。

参考文献

- [1] Asier Marzo *etc.*, "TinyLev: A multi-emitter single-axis acoustic levitator", *Review of Scientific Instruments.*, Volume 88, Issue 8, page 085105, August 2017,
- [2] 中村晃, "音速について考えてみよう!", https://www.kanazawa-it.ac.jp/efc/15_education-research/15_2_with_high_schools/pdf/24.pdf, 金沢工業大学, 2008, (2022年1月30日閲覧)
- [3] Isabelle Martiel *etc.* "Strategies for sample delivery for femtosecond crystallography", *Acta Crystallographica Section D*, Volume 75, Issue 2, pp.160-177, February 2019
- [4] 国立研究開発法人 理化学研究所 放射光科学研究センター X線自由電子レーザー施設 SACLA "ビームライン" <http://xfel.riken.jp/users/bm102-11.html> (2022年1月31日閲覧)
- [5] R.R. Boullosa *etc.* "An Ultrasonic Levitator", *Journal of Applied Research and Technology*, Volume 11, Issue 6, pp.857-865, December 2013