ローラポンプに取り付けた加速度センサによるキャビテーション検知手法の検討

Investigation of Detection Method of Cavitation by an Accelerometer Mounted on Outer Casing of Roller Pump

本多弘明　北澤涼　筒井駿介

大阪滋慶学園　出雲医療看護専門学校　臨床工学技士学科

Keyword：ローラポンプ，キャビテーション，加速度センサ，検知手法，マイクロバブル

１．はじめに

臨床工学技士の業務の一つに体外循環業務がある．体外循環業務とは，人工肺によって酸素化した血液をローラポンプや遠心ポンプを用いて体外と体内で循環させるもので，主に人工心肺装置や経皮的心肺補助装置（PCPS）などを用いて行う．それらの機器の使用中に発生しうる問題として，キャビテーションの発生が挙げられる．キャビテーションとは，流路の一部で流体にかかる圧力が減少することで，液体中に溶け込んでいるガスの一部がマイクロバブルや気泡として発生する現象である．ポンプを用いた体外循環においてキャビテーションの発生は大きな問題となり[1)]，特に発生したマイクロバブルが体内に入る空気塞栓を起こすなど体に致命的な悪影響を与える[2)]．また，気泡が消滅するときに振動が発生し，ポンプや血液回路に機械的ダメージを与える可能性もある．しかし，キャビテーション発生の検知方法は目視などの主観的な判断が主で，現在のところ客観的・定量的な判断はなされていない[3)]．よって本研究では，キャビテーションの発生自体を客観的で定量的な基準で判定する方法を検討した．

２．目的

ローラポンプのケーシングに加速度センサを取り付け，ポンプの加速度信号の大小によってキャビテーションの発生を検知する方法を検討することを目的とした．

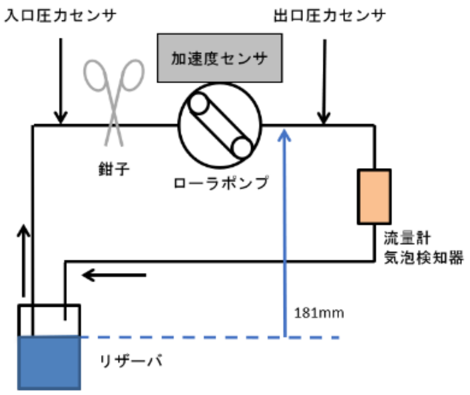


図１　実験回路

３．実験装置および実験方法

3.1　実験装置

ローラポンプ（STÖCKERT 社製 S3 Roller Pump, 最大回転数：250rpm, 最大流量：6.98L/min, ポンプヘッド直径：15cm），チューブ（塩化ビニル製，内径 3/8inch），加速度センサ（MicroStone 社製小型無線モーションレコーダー MVP-RF8-AC，フルレンジ 2G（約 20m/sec^2）），鉗子，流量計（気泡センサ付，HAS-CFP 測定範囲：0.0～±9.9L/min，精度：±10%以内），圧力センサ，リザーバを使用し，図１のような回路を構成した．なお，加速度センサは，マジックテープ付きのバンドと金属製のワイヤーを用いてローラポンプ上部に取り付けた．構成した回路内は水で満たし，リザーバ液面とローラポンプの高低差を 181mm とした．

3.2　実験方法

回転数 150～250rpm でポンプを運転させ，入口

圧力・出口圧力・流量およびローラポンプの振動

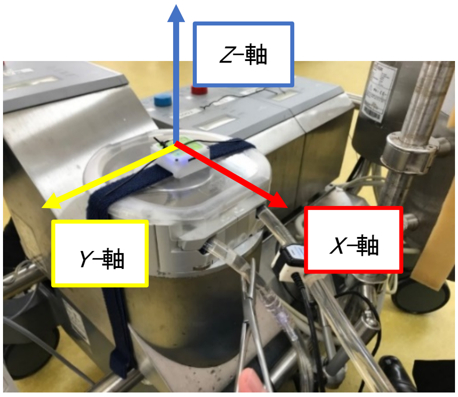


図２　実験装置と座標系

加速度の測定を開始する．その後，鉗子によってローラポンプ入口側回路を徐々に閉塞させ，キャビテーションを発生させながら入口圧力・出口圧力・流量・ローラポンプの振動加速度を計測する．なお，測定計の座標は図 2 のように，ポンプヘッドの回転軸方法を Z-軸とし，それに垂直に各々 X-軸と Y-軸をとった．

4．実験結果及び考察

ポンプ入口側回路を鉗子によってクランプすることで，キャビテーションの発生による気泡（マイクロバブル）や流路内の白濁が目視で観察できた．同時にポンプや回路全体の振動，騒音・異音の発生を確認した．また，ローラポンプ上部にマジックテープ付きのバンドとワイヤーで取り付けて固定した加速度センサによって，ローラポンプの加速度信号の振幅が徐々に増大することが確認できた（図３）．次に，加速度センサで測定した加速度信号の解析結果について述べる．

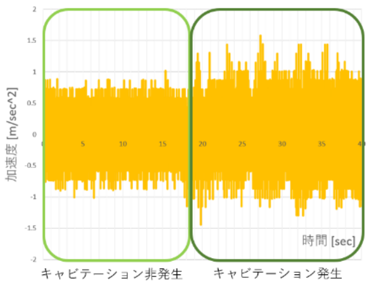


図 3　ポンプの振動波形（200rpm,　Y-軸）

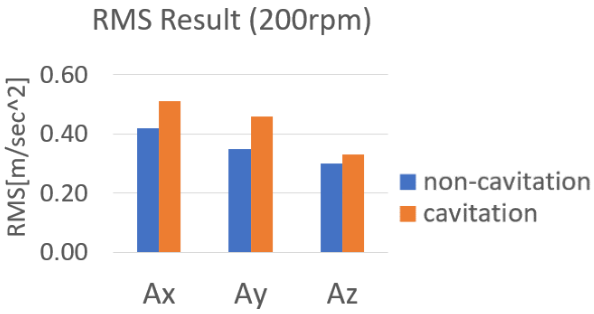


図 4　RMS 解析結果

4. 1　RMS 解析

RMS（Root Mean Square）とは信号波形の振幅の平均的な大きさを表す量であり，本研究ではポンプの振動における平均的な振幅の大きさを表す．RMS は式(1)を用いて計算することができる．

$$\mathrm{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} X_i{}^2} = \sqrt{\frac{X_1{}^2 + \cdots + X_n{}^2}{n}} \quad \cdot\cdot\cdot (1)$$

x_i：サンプリングした加速度［$\mathrm{m/s^2}$］

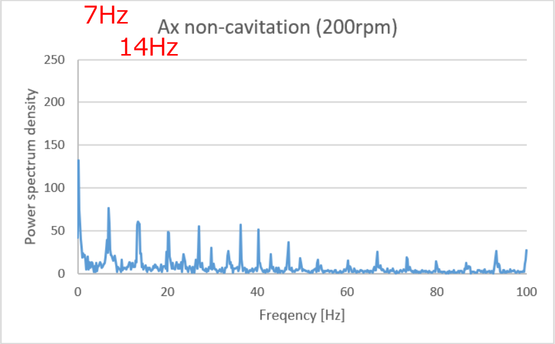
n：サンプリングの個数

ローラポンプで測定したキャビテーション発生時と非発生時の加速度の RMS 値の一例を図 4 に示す．図 4 は，図 3 の加速度信号の RMS 値を計算したものである．図 4 より，全ての座標軸（X-, Y-, Z-軸）についてその加速度の RMS 値は，キャビテーション発生時の方がキャビテーション非発生時より大きい結果となった．これより，キャビテーションの発生によって，ローラポンプに通常

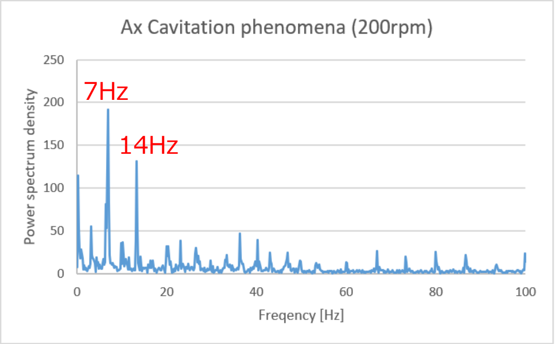
の回転運動で生じる振動以外の振動が加わったことがわかる．

4.4　FFT 解析

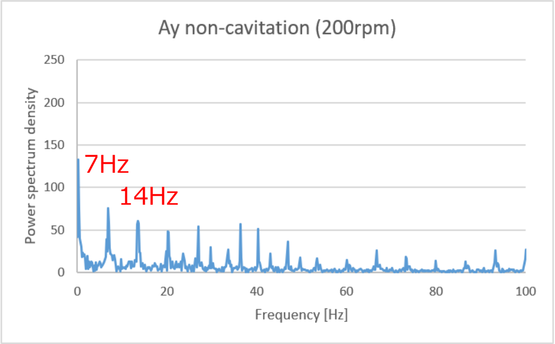
一般に波形は様々な周波数成分から構成されており，これらの波形から各周波数成分の強度を定量的に求める処理をスペクトル解析と呼ぶ．高速



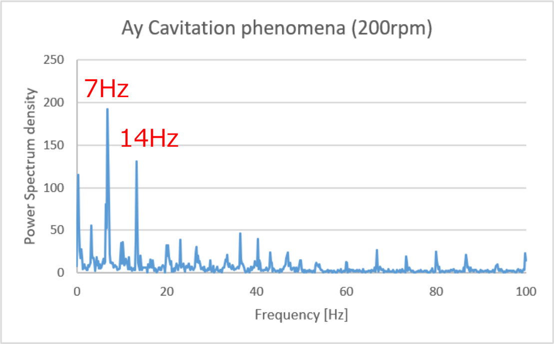
(a) *X*-軸方向の振動（non-cavitation）



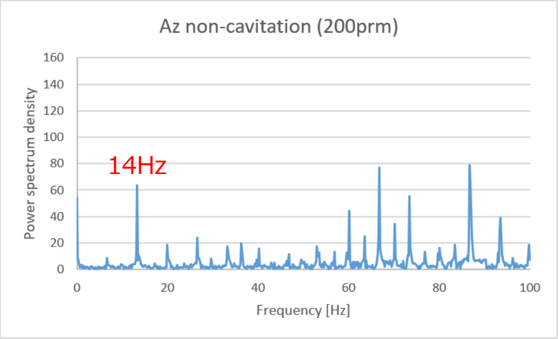
(b) *X*-軸方向の振動（Cavitation phenomena）



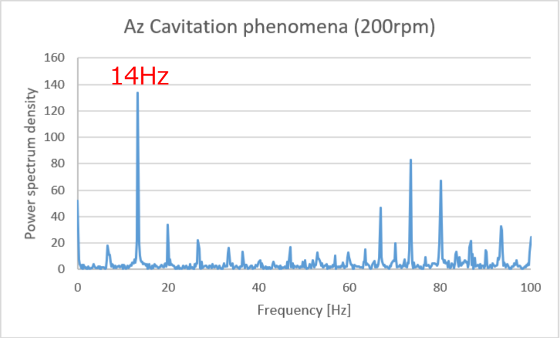
(c)*Y*-軸方向の振動（non-cavitation）



(d) *Y*-軸方向の振動（Cavitation phenomena）



(e)*Z*-軸方向の振動（non-cavitation）



(f) *Z*-軸方向の振動（Cavitation phenomena）

図 5　FFT 解析結果

フーリエ変換（FFT：Fast Fourier Transform）はスペクトル解析法の一つであり，ある時間間隔で並んだ離散的な時系列データ（本実験では加速度信号）の解析を高速アルゴリズムを用いて行う手法である．実際に測定した加速度信号におけるキャビテーション非発生時と発生時の FFT 結果を *X*-軸，Y-軸，*Z*-軸ごとに図 4(a)～(f)にそれぞれ示す．図 5(a), (c), (e)はキャビテーション非発生時の FFT

解析結果，(b)，(d)，(f)はキャビテーション発生時の FFT 解析結果である．図 5 より，*X* 軸および *Y* 軸方向では 7Hz 前後の周波数の振動が大きく，また 7Hz の整数倍の周波数でピーク（ハーモニックス）が出現していることがわかる．これはポンプの回転数に依存するもので, 図 4 では 200rpm でポンプが回転しているためである．本実験で使用しているローラポンプは，2 つのポンプヘッドでチューブをしごいて液体を送り出しているため，200rpm で回転するポンプヘッドのもつ周波数はおよそ 6.7Hz であり（200rpm/60sec×2 枚 ≒ 6.7Hz），これがグラフに現れたものだと考えられる．また，キャビテーション非発生時（non-cavitation）とキャビテーション発生時（cavitation）を比べると，特に低周波数領域（〜20Hz）において，キャビテーション発生時の方が FFT 解析の振動が大きく出ていることがわかる．なお，キャビテーション発生の検知やその後のマイクロバブルへの発達過程には，周波数解析のさらに詳細な検討が必要になると考えられる．

5. まとめ

本研究では，ローラポンプに加速度センサを取り付け，取得した加速度信号の解析を行った．結果，RMS 解析においては，キャビテーションの発生で RMS の増加すなわち加速度振幅の平均値の増加がみられた．これより，ポンプの振動加速度信号に RMS 解析を用いることが, キャビテーションの発生検知に有用であると考えられる．

6. 今後の課題

実験方法として，加速度センサの取り付け方法や回転数・流量・リザーバの高さの影響，および他のローラポンプを使用した加速度の測定などの検討が必要である．また，キャビテーション発生の検知やその後のマイクロバブルへの発達過程には，FFT 周波数解析のさらに詳細な検討が必要になると考えられる．

参考文献

1）水山成朗，村瀬道雄，藤井有蔵，八木良憲“配管外面に取り付けた加速度センサによるキャビテーション検知”日本機械学会論文集（C 編）74 巻 743 号，2008，pp. 1681‐1687.

2）Eiki Tayama，Kouichi Arinaga，Hirishi Kawano，Hiroshi Tomoeda，Tsuyoshi Oda，Nobuhiko Hayashida，Takemi Kawara，Shigeaki Aoyogi “Microbubble generation in roller and centrifugal pumps” J Artif Organs，1999，pp. 58-61.

3）Dazhuan Wul，Leqin Wang，Zongrui Hao，Zhifeng Li and Zhiren Bao，”Experimental study on hydrodynamic performance of a cavitating centrifugal pump during transient operation”，J. Mechanical Science and Technology 24(2)，2010，pp.575-582.

発表実績

- Hiroaki HONDA, Ryo KITAZAWA, Shunsuke TSUTSUI：*The 3rd Forum for Asian Clinical Engineering*, May 17, 2018, Shanghai, China.
- Hiroaki HONDA, Ryo KITAZAWA, Shunsuke TSUTSUI and Satoru OKAMOTO：*13th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics (13th ISEM)*, 13th ISEM Abstract Book, August 29, 2018, Kofu, Japan.
- 北澤涼，筒井駿介，本多弘明：“第 8 回中四国臨床工学会”，第 8 回中四国臨床工学会，プログラム・抄録集，p.110，2018 年 9 月 29 日.