

キャビテーション気泡による口腔洗浄器の洗浄力向上

Development of an Oral Cleaning Device using a Cavitation Jet

布村 真人
Mahito Nunomura

要 旨

口腔（こうくう）洗浄器の洗浄能力向上のために、ノズルを通る水流にキャビテーション気泡を発生させ、気泡が崩壊する際の衝撃力を利用し、従来取れなかった汚れを除去する業界初の技術に着目した。開発では、流体解析を活用し、キャビテーション気泡の発生量がノズル細径部から出口の圧力差と相関があることを見いだした。特にノズルに設けた細径部をパラメータとし、使用者の水勢実感を維持する水量200 ml/min以上かつ汚れ除去率60%を達成するキャビテーション気泡の発生条件として、細径部内径を1 mm以下の適値に導出し設定した。その結果、使用実感となる水量を落とすことなく、従来の水流洗浄では除去できなかった歯垢（しこう）が除去できる傾向を確認できた。

Abstract

In order to improve the ability of the mouth washer to remove dirt, we focused on the industry's first technology to remove dirt that could not be removed hitherto by generating cavitation bubbles in the water flow passing through the nozzle and using the impact force when the bubbles collapsed. During development, using fluid analysis, we found that the amount of cavitation bubbles correlated with the pressure difference from the nozzle's small diameter part to the outlet. In particular, using the small-diameter part provided in the nozzle as a parameter, as a cavitation bubble generation condition that achieves a value of 200 ml/min or more for the water force felt by the user and achieves a dirt removal rate of 60%, an appropriate value of 1 mm or less for the small-diameter part's inner diameter was derived and set. As a result, it was confirmed that plaque, which could not be removed by conventional washing with water, could be removed without reducing the amount of water that would be felt during use.

1. はじめに

歯磨きでは、しっかりブラッシングしていても、歯と歯の間や歯周ポケットには歯ブラシで取りきれない汚れが多く残り、このことが原因で、多くの人が歯に問題を抱えているとされている[1][2]。

水流洗浄は、ブラシの届きにくい部分の汚れを強力な水流で洗い流すことができ、日常の歯磨きに水流洗浄のケアを加えることは非常に有用であると報告されている[3][4]。

しかし、民生用の従来商品では、水流が当たっていても、汚れを落としきれないという問題があり[5]、汚れ除去能力の向上が望まれている。

従来の水流を利用した洗浄で、洗浄力をアップさせるためには、噴射圧力を上げなくてはならず、圧力を上げ過ぎると口腔内を傷つけるため、噴射圧力は上げることができない。

本開発では、噴射圧力や噴射流量を従来から変えずに水流の洗浄力を向上させる技術として、気泡の崩壊衝撃力で汚れを除去するキャビテーション噴流に着目した。

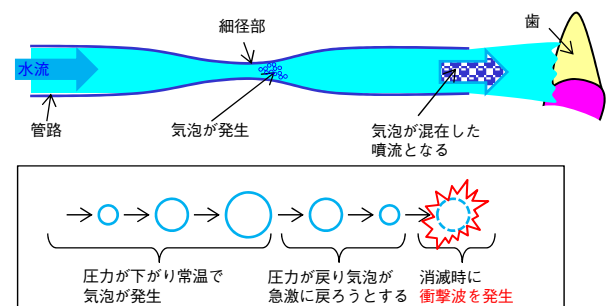
開発では、キャビテーションを高効率に発生させるための指標となる条件を導出し、導出した条件をもとに流体解析とQSD（品質安定化設計）手法^(注1)を用いることで、従来品では取れなかった汚れを除去できるノズルを

実用化することに成功したので、その内容について報告する。

2. キャビテーション噴流について

キャビテーション噴流の原理について第1図に示す概要図を用いて説明する。

液体が流れる管路中に細径部を設けた場合、細径部で液体の速度が増大して圧力が下がり、飽和蒸気圧まで圧



第1図 キャビテーションジェットの概略

Fig. 1 Overview of the cavitation jet

(注1) タグチメソッドを当社でアレンジした品質安定化設計手法。

力が減少すると、液体が気体（気泡）になる。

次に、細径部から出口にかけて管径を拡大することにより圧力が回復し、再び飽和蒸気圧以上の状態に戻ると、気泡が液体に戻る際、ごく短時間に気泡が破壊消滅し、瞬間的に高い衝撃波を発生する。

この気泡発生から消滅までの現象のことをキャビテーションといい、管路外の大気中などに噴射するキャビテーションを伴う噴流のことをキャビテーション噴流という。

この衝撃波の発生は、古くから一般的に流体を用いた機械に致命的損傷を与える現象として知られているが、洗浄においては、キャビテーション気泡の崩壊衝撃力は有効利用できる[6][7]。

3. キャビテーションを発生させるノズル開発

3.1 ノズル開発時に留意する制約条件

汚れを除去するためのキャビテーションを高効率に発生させる条件は、特に工業用の洗浄用途においては研究が進み、多くの論文で明らかにされている[8][9]。

また、歯科医療用途においても、チタン製のインプラント表面の汚れ除去にキャビテーション噴流を利用する研究発表がある[10]-[12]。

しかし、これらは生体への用途ではないため、洗浄性能に重きを置き、5 MPa～10 MPaもの高圧力であることや、ノズル製作法が確立されておらず製作費用が高額になるなど、500 kPa程度の民生用の口腔洗浄器として実用化には至っていない。

また、実用化させるためには、洗浄性能向上の他に、従来品を使用してきたお客様の水流による実感を維持することと、低コストであることが求められる。

そこで、開発時に留意すべき点は、以下である。

- ① キャビテーション気泡により水勢が弱くなるため、従来品の水勢の実感（流量：200 ml/min以上）を維持し、従来品を好んで使用していただいていたお客様の満足度を維持すること
- ② 管路中に細径部を構成するノズルについて、低コストで量産可能な射出成型でノズルを実現し、商品価格を上げないこと

以上の内容に留意しながら、最適な口腔洗浄用ノズルを開発する必要がある。

3.2 キャビテーション発生とお客様実感維持のモデル化

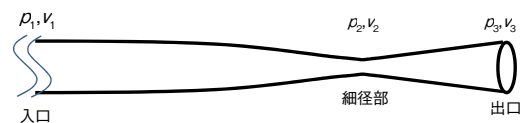
[1] キャビテーション量と吐出荷重の数値化

上記の制約のもと、高効率にキャビテーションを発生させ、かつ流量や吐出荷重においてもお客様が満足でき

るノズルを開発するためには、キャビテーション発生にかかわる要因を見だし、数値化する必要がある。

しかし、キャビテーションや吐出荷重に直結する因子は明らかになっていないため、独自で見いだす必要がある。

そこで、第2図に示したベンチュリ管内を通る流体について、ベルヌーイの定理をあてはめ、キャビテーションが発生するための条件と、吐出荷重をコントロールできる条件を検討した。



第2図 各位置における圧力と断面積の関係

Fig. 2 Pressure and fluid velocity of each part

第2図において、損失を含めたベルヌーイの定理は次の(1)式で示される[13]。

$$\begin{aligned} p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 &= p_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \Delta p_{s12} \\ &= p_3 + \frac{1}{2}\rho v_3^2 + \Delta p_{s12} + \Delta p_{s23} \quad \dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

Δp_{s12} は、第2図において入口から細径部にかけて管路が急収縮した際の流体の圧力損失、 Δp_{s23} は、細径部から出口にかけて管路が急拡大する際の流体の圧力損失を表す。

キャビテーション気泡による衝撃波の大きさは、細径部で流体の圧力が急に減少し、出口で圧力が急回復する際に発生する現象であるから、 p_3 と p_2 の差に表れるはずである。

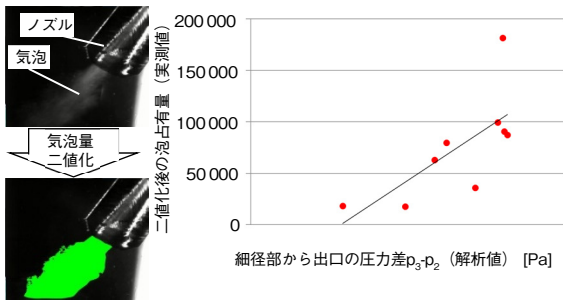
以上を検証するために、複数の条件で試作したキャビテーション噴流ノズルについて、流体解析で各ポイントの圧力と流体速度および、圧力損失を算出した。

細径部と出口の圧力差 $p_3 - p_2$ の流体解析値と、試作ノズルによる泡量の実測値との相関グラフを描くと、第3図に示すように、正の相関傾向が得られた。

ここで、泡量の実測値には、高速度ビデオカメラで気泡の発生を撮影し、2値化処理によって面積値を求めた。

このグラフは、細径部と出口部の圧力差が大きいノズル開発を行うことが、キャビテーション気泡による洗浄力を向上させ、かつ、吐出荷重による実感を強くすることを示している。

そこで、細径部と出口部の圧力差をノズル評価における出力として利用し、検討を行った。



第3図 圧力差と泡量の相関図
Fig. 3 Correlation diagram of the pressure and bubbles

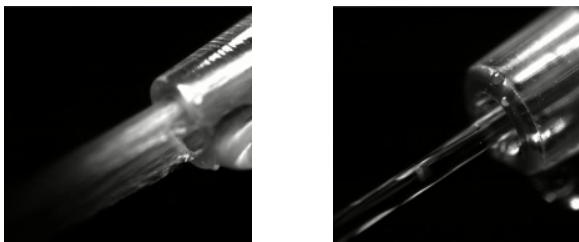
〔2〕 管路内剥離量の数値化

キャピテーション噴流においてしばしば第5図 (b) のように、気泡を伴わないことがある。これは、キャピテーション噴流ノズルは、第1図に示すように細径部から出口部にかけて管路が急拡大するのだが、流体がノズル内壁面に沿わずに剥離するからである。この現象が起きますと、細径部で飽和水蒸気圧まで減少した圧力が、出口側で狙い通りに回復しないため、キャピテーション気泡が発生しなくなる。そうなると、汚れの除去性能が低下する原因につながる。

そこで、流体の剥離が起きる原因を明らかにするため、第4図 (a) のように内壁面に沿って噴射されるノズル群と、第4図 (b) のように内壁面に沿わず噴射されるノズル群について切断面形状を分析した。

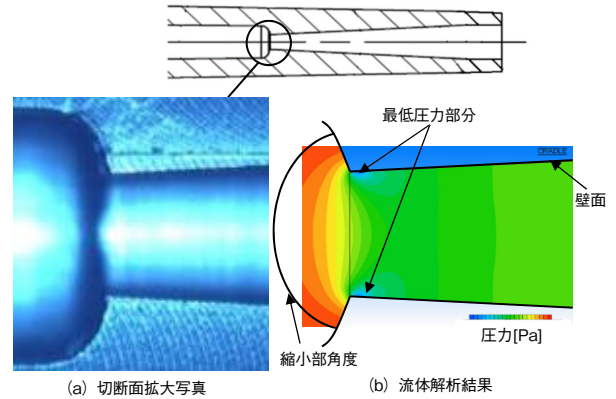
その結果、特に第5図に示すノズル入口から細径部へ至る縮小部の角度の大きさが流体の剥離に大きく影響していることがわかった。

縮小部角度をパラメータとして流体解析で分析した結果第6図のように、縮小部角度が大きくなると、細径部直後に発生する圧力が負圧になり、水流が内壁面に沿わず剥離し、キャピテーションが発生しないことがわかったため、水流が剥離しないように縮小部角度を設定した。

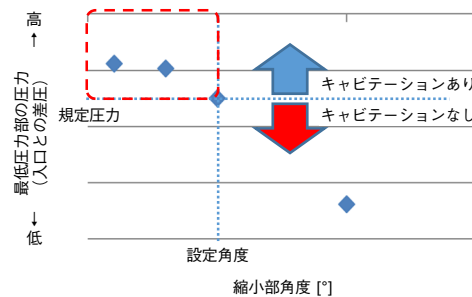


(a) 内壁面に沿っている (キャピテーションあり)
(b) 内壁面に沿っていない (キャピテーションなし)

第4図 ハイスピードカメラによる画像
Fig. 4 High-speed camera photograph after injection



第5図 ノズル断面の流体解析結果
Fig. 5 Cut surface and fluid analysis results of the nozzle



第6図 縮小部角度と最低圧力部圧力の関係
Fig. 6 Relationship between the reduction unit angle and the lowest pressure portions pressure

3.3 お客様実感と洗浄性能を両立する細径部内径の決定

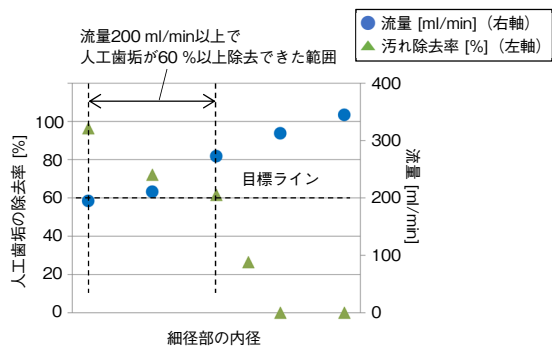
キャピテーションによる洗浄力と、お客様の水勢の実感を両立するノズル開発のために、特に性能に影響する細径部内径をパラメータとして、洗浄力を表す汚れ除去率と、水勢の実感の指標となる噴射流量を検証した。

汚れには、人工プラークを均等な厚みに塗布したガラスプレートを使用した。この汚れは、従来品ではまったく除去できないことを確認した。

お客様が水勢の実感を維持できる値を、従来品をもとに流量200 ml/min以上と決定し、その範囲内で従来品では除去することができない汚れの除去率目標値60%以上を達成する細径部内径を検討した。

ノズルからの水流の吐出荷重一定のもと計測した結果を第7図に示す。細径部内径を適値に選定することにより条件を満たすことがわかり、最適条件として導出できた。

以上により、洗浄力、お客様の实感、低コストを全て満たすノズルを開発できた。



第7図 細径部の内径と除去率、流量の関係
Fig. 7 Relationship between the small-diameter part's inner diameter and dirt removal rate, and flow rate

4. 検証結果

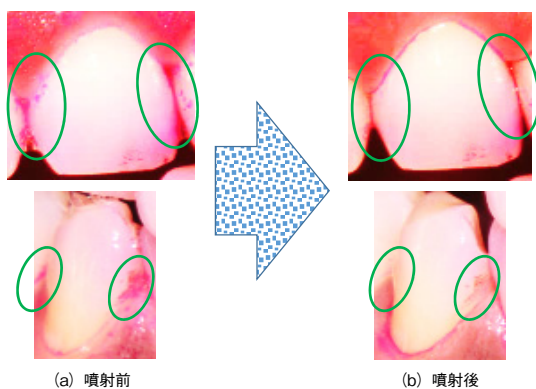
開発したノズルにおいて、ヒトモニターによる歯垢除去能力を検証した結果の写真を第8図に示す。

評価は、1度歯ブラシとフロスを用いて歯面の歯垢を除去してから通常通りに生活し、1.5日分の歯磨きを停止して歯垢を溜(た)めた2名で実施した。

試験前は歯ブラシを用いず、歯垢染色液で歯垢を染めた後を噴射前として撮影した。

その後、口腔洗浄器に開発したノズルを接続し、歯間に当たるよう、口蓋側から10秒ずつ洗浄した。

洗浄後は、再度歯垢染色液で歯垢を染めて噴射後として撮影した。



第8図 ヒトモニターによる歯垢除去結果
Fig. 8 Results of plaque removal by human monitors

第8図に示すように、特に歯ブラシの届きにくい歯間や歯周ポケット周辺において、従来の水流洗浄ではまったく除去できなかった歯垢を除去できる傾向を確認できた。

5. まとめ

以上、本開発では、口腔洗浄器の汚れ除去性能を向上させるために、キャビテーション噴流技術を応用し、ユーザーの実感を維持して従来品では除去できなかった汚れを除去することができた。

また、キャビテーション噴流ノズルにおける必要条件として、キャビテーション気泡の発生量がノズル細径部から出口の圧力差と相関があることを見だし、特にノズルに設けた細径部をパラメータとし、使用者の水勢実感を維持する水量200 ml/min以上かつ汚れ除去率60%を達成するキャビテーション気泡発生条件として、細径部内径を適値に導出し設定した。

この過程で、さらなる洗浄効果向上や他用途水平展開のための設計ノウハウの蓄積ができた。

参考文献

- [1] 中川種昭 他, “電動歯ブラシのプラーク除去効果に関する研究 (第1報),” 日歯周誌, 第34巻, 4号, pp. 901-906, 1992.
- [2] 中川種昭 他, “電動歯ブラシのプラーク除去効果に関する研究 (第2報),” 日歯周誌, 第34巻, 4号, pp. 907-915, 1992.
- [3] 八島章博 他, “水流洗浄器と音波ハブラシ併用が歯周ポケット内細菌へ与える影響,” 日歯保存誌, 第54巻, 4号, pp. 314-320, 2015.
- [4] 江連雅孝 他, “実験的歯周炎における水流式口腔内洗浄器の応用とアクア酸化水の清掃効果, 歯薬療法,” vol. 15, no. 2, pp. 74-79, 1996.
- [5] 小鷲悠典 他, “家庭用口腔洗浄器の歯垢除去効果について,” 歯周病誌, 第18巻, 4号, pp. 511-515, 1976.
- [6] 祖山均, “キャビテーション・ショットレス・ピーニングによる軽金属材料の表面改質,” 軽金属, 第56巻, 第1号, pp. 56-62, 2006.
- [7] 時枝寛之, “キャビテーション噴流技術を用いた高速清掃装置の開発と応用,” 建設の施工企画, no. 704, pp. 44-50, Oct. 2008.
- [8] 清水誠二 他, “キャビテーション噴流について,” ターボ機械, 第17巻, 11号, pp. 22-26, 1989.
- [9] 小林陵二 他, “キャビテーションジェット特性に対するノズル仕上げ精度の影響,” 噴流工学, vol. 15, no. 3, pp. 4-8, 1998.
- [10] Mariko Kikuchi et al., “Evaluation of the efficiency of cleaning dental plaque on titanium using cavitating jet,” Journal of Biomechanical Science and Engineering, vol. 9, no. 3, 2014.
- [11] Junki Yamada et al., “Removal of Oral Biofilm on an Implant Fixture by a Cavitating Jet,” Implant Dentistry: Dec. 2017 vol. 26 issue 6, pp. 904-910, 2017.
- [12] 滝口尚 他, “インプラントチタン表面清掃の新たな試み,” 日歯周誌, 第60巻, 1号, pp. 4-12, 2018.
- [13] 大場謙吉 他, 流体の力学, コロナ社, pp. 47, pp. 97, 東京, 2006.

執筆者紹介



布村 真人 Mahito Nunomura
アプライアンス社 技術本部
Engineering Div., Appliances Company