

## 学位論文題名

## キャピテーションによる機械式人工弁の表面壊食に関する研究

## 学位論文内容の要旨

キャピテーションによる壊食が原因と思われる人工弁の破損例が報告されて以来、機械式人工弁のキャピテーションの発生が注目されている。弁の破壊は人工弁装着者を直ちに死に至らしめるため、キャピテーションを発生しない弁の開発が強く望まれている。これまでの研究で、機械弁にキャピテーションが発生する機序として、弁が急激に閉鎖する際に負圧を発生させるウォーター・ハンマー、同様に弁が急激に閉鎖する際に弁と弁座間の隙間で生じるスキズ・フローなどが挙げられているが、その詳細は不明である。特に、ディスク開閉試験により実際に壊食を生成し、壊食至る過程を実験的に検討した研究は皆無に近い。

本論文では、機械弁におけるキャピテーションの発生から弁表面壊食に至る一連の過程を解明することを目指して、モデル弁ディスクを用いた 3 種類の試験を行い、機械弁の表面壊食に影響を与える各種パラメータについて検討を行った。以下に、本論文の内容を各章に分けて要約する。

第 1 章では、人工弁の歴史、本研究の背景、目的、論文の構成について述べた。

第 2 章では、機械弁の破損原因になるキャピテーション現象について述べ、また、その動力学的理論および表面壊食を起こすメカニズムについて述べた。

第 3 章では、加速耐久試験によるキャピテーションとの壊食の検討について述べた。機械弁の機械的耐久性を短期間に評価することを目的として、人工弁開発時には加速耐久試験が行われる。しかし、これまでの加速耐久試験は剛体ホルダー内で行われ、弁近傍の圧力に大きな影響を与えると思われる生体下のコンプライアンスは考慮されていない。そこで、まずコンプライアンスを付加して加速耐久試験を行い、表面壊食とコンプライアンスの関係を定量的に評価した。コンプライアンスは、その大きさと、付加する位置を変え、 $5.4 \times 10^5$  回の弁開閉を行う加速耐久試験を実施した。その結果、予想とは異なり、剛体ホルダーに比べコンプライアンスを付加したホルダーにおいて壊食ピットの数が増加し、さらにピットの直径も増加する結果を得た。また、コンプライアンスの付加によりウォーター・ハンマーは減少したことから、加速耐久試験ではウォーター・ハンマーがディスク表面壊食の主因子ではないと推測された。

表面壊食に影響を与えられようと思われるもうひとつのパラメータであるスキズ・フローに着目し、高速度ビデオカメラを用いてディスク閉鎖速度の計測を行い、表面壊食との関係を検討した。その結果、当初の予想とは異なり、コンプライアンスを付加することによりディスク速度が増加していた。これより、コンプライアンスの付加がスキズ・フローを増加させ、その結果、キャピテーションの発生量が多くなり、表面壊食を増加させるという機序の存在が示唆された。また、同じ高速度カメラを用いてデ

ディスクが閉鎖する様子を撮影した結果、キャピテーション気泡が実際にディスク周縁部に発生し、その発生部位は壊食ピット発生部位と一致することが確認できた。

第4章では、自然心模擬回路による壊食試験について述べた。加速耐久試験では、コンプライアンスの付加がディスク表面の壊食ピットを増加させるという結果となったが、弁の開閉速度や圧力条件が自然心とは大きく異なるという問題点があった。そこで、生理学的な圧力レベルでも壊食が生じることを実証するために、自然心模擬回路を試作し、コンプライアンスの設定条件を変えて、ディスクの閉鎖速度や表面近傍での圧力変化を計測するとともに、ディスク表面に発生する壊食との関係について検討した。その結果、生理学的な圧力レベルでも壊食ピットが生成されることを確認できた。また、コンプライアンスとディスク閉鎖速度はよく相関し、コンプライアンスが増加すると閉鎖速度は低下し、表面壊食ピットも減少する傾向が見られた。この結果は、コンプライアンスの付加量と壊食ピットの発生量の関係に着目した場合には、加速耐久試験と矛盾するが、閉鎖直前のディスク速度と壊食ピットの発生量に着目すれば、一致していることから、壊食ピット生成に対するスキズ・フローの重要性が示唆された。

第5章では、スキズ・フローに着目した壊食試験について述べた。以上、2つの試験結果を通じてディスク表面を壊食させる機序としてはディスク閉鎖速度と直接的な関係にあるスキズ・フローが重要と考えられた。そこで、ディスクの閉鎖速度が比較的広い範囲で制御できるソレノイド駆動型の弁開閉装置を開発し、ディスク速度を直接制御して機械弁の連続開閉実験を行い、ディスクの表面に生じた表面壊食を定量的に評価した。その結果、壊食ピットの発生が、ディスク閉鎖速度に関して閾値を持つ現象であり、その閉鎖速度の閾値は本研究で用いた機械弁では約 0.4 m/s であることが分かった。さらに、この閾値はスキズ・フローによって生じる負圧がキャピテーション発生の必須条件のひとつである飽和水蒸気圧に相当することを見いだした。

第6章は、本研究の結論であり、本論文の成果をまとめた。

本研究の結果では、スキズ・フローはディスク閉鎖速度に依存するので、ディスク閉鎖速度が表面壊食生成の最もよい指標となることが示唆される。これらの結果は、機械弁の開発において表面壊食の発生を防ぐための弁葉のメカニズム設計のための指針を与えるものと考えられ、スキズ・フローの発生を軽減するために弁座の形状は最も重要な設計要素といえる。

以上

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 山 本 克 之  
副 査 教 授 狩 野 猛  
副 査 教 授 三 田 村 好 矩  
副 査 助 教 授 下 岡 聡 行

## 学 位 論 文 題 名

### キャビテーションによる機械式人工弁の表面壊食に関する研究

キャビテーションによる壊食が原因と思われる機械式人工弁の破損例が報告されて以来、機械弁におけるキャビテーションの発生が注目されている。弁の破壊は人工弁装着者を直ちに死に至らしめるため、キャビテーションが生じない弁の開発が強く望まれている。これまでの研究で、機械弁におけるキャビテーションの発生機序として、弁閉鎖時のウォーター・ハンマーやスキズ・フローが挙げられているが、その詳細は不明である。特に、弁ディスクの開閉試験により実際に壊食を生成し、その生成過程を実験的に検討した研究は皆無に近い。本論文は、機械弁におけるキャビテーションの発生からディスク表面壊食に至る一連の過程を解明することを最終目的として、モデル弁を用いた3種の試験を行い、機械弁の表面壊食に影響を与える各種力学量について検討している。

人工弁の耐久性を短期間に評価するために加速耐久試験が行われているが、加速耐久試験は剛体ホルダー内で行われ、生体下のコンプライアンスは考慮されていない。コンプライアンスの付加は、弁近傍の圧力を変え、キャビテーションの発生に大きく影響すると考え、本論文では、まずコンプライアンスを付加して加速耐久試験を行い、表面壊食とコンプライアンスの関係を定量的に評価している。その結果、予想とは異なり、コンプライアンス付加ホルダーでは、剛体ホルダーに比べ、壊食ピット数、ピット径ともに増加する結果を得ている。また、コンプライアンスの付加によりウォーター・ハンマーは減少したことから、加速耐久試験ではウォーター・ハンマーがディスク表面壊食の主因子ではないと推測している。次に、高速ビデオカメラを用いてディスク閉鎖速度を測定し、コンプライアンス付加によりディスク速度が増加していたことから、コンプライアンス付加がスキズ・フローを増加させ、その結果、キャビテーションの発生量が多くなり、表面壊食を増加させるという機序の存在を推論している。また、同様にしてディスクが閉鎖する様子を撮影した結果、キャビテーション気泡が実際にディスク周縁部に発生し、その発生部位は壊食ピット発生部位と一致することを確認している。

加速耐久試験では、弁の開閉速度や圧力条件が自然心とは大きく異なることから、次に、

自然心模擬回路を試作し、生理学的な圧力レベルでも壊食が生じることを実証している。すなわち、コンプライアンスの設定条件を変えて、ディスク閉鎖速度、ディスク近傍圧力、ディスク表面壊食などを観察した結果、コンプライアンスとディスク閉鎖速度はよく相関し、コンプライアンス付加により閉鎖速度は低下し、表面壊食ピットも減少することを見出している。この結果は、コンプライアンスの付加量と壊食ピットの発生量の関係に着目した場合には、加速耐久試験の結果と矛盾するが、閉鎖直前のディスク速度と壊食ピットの発生量に着目すれば、一致していることから、壊食ピット生成に対するスキズ・フローの重要性について改めて言及している。

次に、スキズ・フローに着目した実験として、ディスクの閉鎖速度を比較的広範囲に制御できる新規なソレノイド駆動型の弁開閉装置を開発し、ディスク速度を直接制御して機械弁の連続開閉実験を行い、ディスク表面に生じた表面壊食を定量的に評価している。その結果、壊食ピットを発生するディスク閉鎖速度には閾値があり、本研究で用いた機械弁では約 0.4 m/s であるとしている。また、この閾値はスキズ・フローによって生じる負圧がキャビテーション発生の必須条件のひとつである飽和水蒸気圧に相当することを見出している。さらに、壊食ピットの数と径を詳細に分析し、これらは弁近傍の圧力低下とその持続時間に良く相関することも明らかにしている。

最後に、以上の結果とキャビテーション理論に基づき、機械式人工弁における表面壊食生成過程を考察するとともに、本研究で得られた一連の成果をまとめ、結論としている。

以上を要するに、本論文は、機械式人工弁のディスク開閉試験を実施し、キャビテーション壊食の発生条件と生成量を弁近傍の各種流体力学量と比較検討して、機械式人工弁における壊食生成過程の一端を初めて明らかにしたものであり、人工臓器工学の分野に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。

以上