

審査の結果の要旨

氏名 池田 貞一郎

本研究は、腎臓結石の破碎術(Lithotripsy)に、音響キャビテーションの崩壊現象を効果的に利用せんとするものである。現在、衝撃波結石破碎術 (Shock Wave Lithotripsy)においては、(1) キャビテーションによる体組織損傷、(2) 破砕片の微細化が困難、という2点の問題が現在においても未解決であり、解決を目指したさまざまな研究が行われている。結石破碎の研究開発におけるキャビテーションの研究は、流体機械における研究と同様、いかにして、その発生を抑え、また、大きな崩壊を引き起こされない状態を作り出すか、という観点からの研究が行われている。一方で、キャビテーションの崩壊現象を、有効に結石破碎に結びつけるという観点からの研究も同時に行われている。本論文は、後者の立場をとるものである。結石破碎のメカニズムそのものにもキャビテーション崩壊が関わっていることは、衝撃波結石破碎の研究の初期から示唆されており、この効果をいかに効率よく引き出し、かつ不必要なキャビテーションの発生や崩壊を抑えるか、ということが研究の大きな目的となる。ここで、キャビテーション気泡が、音場中でいかなる挙動を示しているかと言うことを理解した上で、そのコントロールを行うことが不可欠となってくる。

本研究は、以上の背景に鑑み、超音波によって発生するキャビテーション気泡の発生成長 共振 崩壊 消滅、からなる一連のサイクルにおける物理現象の理解のもと、その領域の局在化と強制崩壊のコントロールを可能とし、その上で、結石破碎における2つの問題点：キャビテーションによる体組織損傷、および破砕片の微細化、という2つの問題を解決する、非常に侵襲性の低い結石破碎法の可能性を示している。

本論文は五章からなっている。第一章において、SWL 機器開発の経過とその問題点が述べられている。また、キャビテーションの領域・強制崩壊をコントロールする技術の必要性、及び本研究における、キャビテーション制御手法の概念が説明されている。ここでは、流体機械の研究において、長年にわたって研究対象となっている、クラウドキャビテーションの崩壊現象を、局在的な強制崩壊を引き起こすことにより、結石破碎手法という医療機器への有効利用へ転化するという、本研究の基本的な概念が呈示されている。

第二章は「キャビテーションによる結石破碎作用の増強」であり、キャビテーションの発生領域とその強制崩壊をコントロールすることで、結石表面の局在領域に高圧力集中ができることが実験的に確認され、また、実際の結石破碎試験で、SWL 機器の2点の問題を解決しうることが示されている。ここでは、高周波の超音波パルスで局在的に生成されたクラウドキャビテーションを、続いて照射される低周波パルスの超音波で強制崩壊させることが試みられている。モデル結石、腎臓結石の破碎試験においては、上記の超音波波形を

利用することによる，結石破砕作用の著しい上昇と，結石を表面から削り取るようにキャビテーションエロージョンで削り取ることができること，の二点が示されている．また本手法によって得られた 2 mm 以下の破砕片はキャビテーションを効果的に利用することによって得られた結果であり，本研究における大きな成果と考えられる．

第三章は「手法における現象を支配する因子」であり，気泡群の挙動を支配すると考えられるパラメータに関して検討が行われ，その影響と特性が確かめられている．特に高周波パルス波による半楕円球状の気泡クラウドの発生・成長過程と，低周波パルス波による，気泡群の応答が，さまざまな超音波パラメータと異なる周囲媒質の状態において調べられ，本手法における気泡群挙動のパラメータへの依存性および特徴が明らかにされている．

第四章は第三章での検討をうけた，「破砕力の最適化と気泡群挙動の検出」である．最大効率で破砕を行いつつ，その効果を外部からモニタリングするための検討が行われている．ここでは，気泡崩壊による固体壁面への高圧力集中と，遠方で検出される音圧の相互関係が実験的に明らかにされている．第四章で検討された実験手法および実験結果は，様々なパラメータ間の依存関係を定量的に明らかにし，手法の最適化プロセスを容易にするのみならず，実際の治療機器に応用した際に患部での治療効果判定として利用することが可能である．第四章で得られた結果において，特筆すべきは，音響キャビテーションが固体壁面近傍に存在するときに，壁面に対して圧力の増強作用が起きる，ということが実験的に明らかにされている点である．現在，超音波治療開発の基礎研究において，音響キャビテーションは，基本的に強い散乱体として作用するというのが基本的な見解である．しかしながら，ある超音波およびキャビテーション気泡群の条件が満たされると，強い音波の透過作用，増強作用が引き起こせるとする結果は，現在の超音波治療における音響キャビテーションの認識に新たな学術的な知見を付与し，かつ応用への転化が強く期待される．

第五章は結言であり，第二章から第四章の内容がまとめられている．ここにおいて，論文を通して，超音波キャビテーション気泡の，領域の局在化・強制崩壊・外部からのモニタリング，という，治療応用を考えたキャビテーション制御のうち最も大切な 3 つの要件が実験的に明らかにされ，応用への提案が行われていることは極めて独創的であり，非常に優れた論文である．

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる．