

研 究 主 論 文 抄 録

論文題目

医療応用を対象とした水中パルス放電により誘起される衝撃波に関する研究

熊本大学大学院自然科学教育部 工学専攻 機能創成エネルギー教育プログラム  
( 主任指導 佐久川 貴志 教授 )

論文提出者 佐藤 允彦

主論文要旨

水中に瞬間的に高電圧を印加し放電を行うことでプラズマが生成され、それに伴い衝撃波が誘起される。水中放電により誘起される衝撃波は、水処理・材料加工・医療といった幅広い分野で実用化へむけた研究開発が盛んにされている。特に、衝撃波を用いた代表的な医療技術として挙げられる体外衝撃波結石破碎術 (ESWL: Extracorporeal Shock Wave Lithotripsy) は、人体の外から高圧な衝撃波を照射し結石を破碎することができる革新的な手法である。この手法の登場により人体を必要以上に傷つけない低侵襲な治療が可能になり、衝撃波治療という新分野が形成されることとなった。さらに近年の研究では、衝撃波には破壊作用だけでなく難治性骨折の治療や虚血性心疾患の治療といった細胞や組織へ特異な影響を与えることが報告されている。これらの作用は衝撃波の高い過剰圧とその後の負圧によるキャビテーションに起因するものと推測されるが詳しいメカニズムは明らかにされておらず、衝撃波に関する更なる研究が必要とされる。水中放電を用いた衝撃波は初期の衝撃波治療では多く利用されてきたが、近年の医療用途で臨床使用される衝撃波生成装置は主に電磁振動か圧電素子を用いて衝撃波を照射する。その理由は、放電による衝撃波生成法は高圧力・急峻な圧力立上り・高繰り返し・装置の簡素化・小型化といった長所があるにも関わらず、衝撃波を制御するための電気的なパラメータが不明瞭であり出力の再現性が低いという課題があるためである。加えて、放電に限らず水中プラズマにより誘起される衝撃波の生成原理が明らかでないという問題もある。

以上のことから、本研究では医療応用に焦点を当てた水中パルス放電による衝撃波について調査する。衝撃波の生成方法は、対向させた棒対棒電極の電極間距離をわずかに空けて固定した衝撃波生成装置を作成し、水中に沈めたその装置の電極間に磁気パルス圧縮方式パルスパワー電源を用いて放電を発生させ、衝撃波を生成する。衝撃波生成装置を2種類作成し、一つはレーザーを用いた観測を可能にするシリンダーともう一つは衝撃波による細胞実験を容易にする放物状リフレクターを用意した。シリンダーは電極間から球状衝撃

波を生成し、放物状リフレクターは球状衝撃波を反射することで平行衝撃波として出力することができる。

本研究では、はじめに放物状リフレクターから出力される高圧衝撃波を制御するために必要な水中放電の電気的パラメータについて検討した。パルス電源の圧縮段数とピーキングキャパシタを変化させて異なる立ち上がり時間と放電持続時間を持つ放電波形を得た。それらの放電より生成される衝撃波の圧力を光学式圧力測定器により測定した。得られた電気パラメータと衝撃波圧力の関係から、衝撃波圧力を制御するために重要な電気パラメータは放電エネルギーと放電持続時間であるという結論を得た。加えて、立ち上がり時間は水に投入できるエネルギーを増加させることができ、結果としてより高圧力の衝撃波を生成することが可能となる。また、放物状リフレクターにより生成される衝撃波は最大 40 MPa の圧力と 0.6 mJ/mm<sup>2</sup> のエネルギー密度を持ち、体外衝撃波治療や細胞・組織を対象とした研究開発に適用可能であるということを示した。

電気パラメータと衝撃波圧力の関係から、水中衝撃波の生成原理と衝撃波を誘起するプラズマとの関係性についても明らかにする必要があることがわかった。そこで、高速度フレーミングカメラ及びシャドウグラフ法・シュリーレン法を用いて水中パルス放電により生成される衝撃波の一連の現象を観測した。まず、高導電率の水中で生成される衝撃波と低導電率の水中で生成される衝撃波の比較を行った。観測結果として、水処理などで考察されるエネルギーバランス式のモデルは低導電率時の水中衝撃波の生成と一致するが、高導電率時の水中衝撃波の生成には適応できないということがわかった。しかし、高導電率の水中で放電により生成される衝撃波は、低導電率時と比較して、安定した衝撃波の生成が可能であり高い再現性を持つことから、医療分野へ適応できるということが示された。その結果を踏まえ、より高い放電エネルギーを用いて水中プラズマにより誘起される衝撃波の時空間解析を行った。衝撃波の圧縮過程では3種の連続する衝撃波が観測された。プラズマによる2種の衝撃波とキャビティによる1種の衝撃波が生成され、プラズマによる衝撃波は圧縮限界による水の準安定状態を引き起こすことによって水の相転移を誘起している可能性があることが示された。また、それらが重なり合って伝播するために高い圧力を保ったまま比較的長い距離を伝播できることがわかった。最後に、医療応用へむけた新たな指標を提案するために、電極径と放電エネルギーを変化させて生成された衝撃波の特性(最大圧力・立ち上がり時間・衝撃波エネルギー密度)を調査した。圧力測定によって得られた衝撃波波形を解析した結果、電極径の違いにより最大圧力と衝撃波エネルギー密度が変化することを示した。その要因を観測結果から考察すると、膨張体積の異なるプラズマは生成するキャビティに影響を及ぼし、そのキャビティが異なる特性を持つ衝撃波を生成することが明らかになった。

以上より、医療分野への応用を対象とした水中パルス放電により誘起される衝撃波について実験を行った。その結果として衝撃波を制御するための電気パラメータの解明や再現性の高い衝撃波生成を行う方法が明らかになり、水中放電による衝撃波生成は医療分野へ適応可能であるということを示した。さらに、その生成過程を明らかにしたことで、圧縮性流体力学や分子動力学といった幅広い分野へむけた衝撃波現象の解明及び既存のプラズマ

を用いた医療応用技術の理解と更なる衝撃波の医療技術の発展に役立つことが期待される。  
また、放電による衝撃波特性を調査したことにより得られた新たな指標は、今後の衝撃波  
医療分野における研究において活用されることが見込まれる。