

学位論文要旨

所属専攻 複合新領域科学 専攻

氏名 比嘉 修

論文題名

水中電気放電により生成される衝撃波とその応用に関する研究

要 旨

衝撃波は、エネルギーが蓄積されて瞬間的に解放されるとき、例えば爆発、放電、高速の相変化、衝突、高速変形、あるいは高速飛行に伴って発生する圧力擾乱が伝播するときにあられる音速を超えて伝播する圧力の波である。自然界において衝撃波は主に爆発や超音速飛行体による高速移動に伴いあられ、研究用途においては爆発、放電、レーザーアブレーション、超音波など様々な手法で生成される。衝撃波を利用した研究対象も多岐にわたり、環境、バイオテクノロジー、リサイクル、医療、ナノテクノロジーといった分野で適用されている。このような中、水中での衝撃波を利用した食品加工への応用について研究が進められている。水中で例えばリンゴのような果実に対し、衝撃波を適用した場合、水と音響インピーダンスの近い果実には衝撃波が透過しやすく、また食品内において多く内在される低インピーダンスの気層等との界面において反射膨張波との相乗により細胞壁が破壊される。この作用は、食品に対し破砕、軟化、殺菌など効果を既存手法にくらべ低いエネルギーで実現し、新しい食品加工技術として期待されている。

食品加工等で衝撃波を利用する際、その加工対象や目的に応じて衝撃波強度を広範囲に制御することが求められる。また、食品加工技術として衝撃波処理を実用化するには、爆薬など利用場所の制限された手法や、レーザーアブレーションなどの高額な設備を用いることは一般的に困難であり、かつ生産性を考慮し局所的ではなく広範囲に高強度の衝撃波を生成する必要がある。そこで本研究では、水中での電気放電を用いた衝撃波の生成技術に関して、水中での火花放電を利用したギャップ放電法による衝撃波生成技術と、より高強度の衝撃波が生成される金属細線爆発法を用いて、電気放電の放電特性と衝撃波強度の制御を軸として研究を進めた。さらに得られた知見により衝撃波による食品加工への応用として米の製粉へ適用し、水中衝撃波を用いた米粉製造装置を開発し、製粉能力や製粉の品質を評価することを目的とする。

本論文では、1章において研究の背景とその目的について説明した。2章では、電気放電による衝撃波の発生と応用の研究理論として、まず衝撃波の伝播に関する理論を述べた。次に衝撃波の発生手法で用いた電気放電現象の説明として、液体誘電体における絶縁破壊現

象について破壊に至るまでの過程を破壊要因とともに説明し、放電時の特性として、回路条件ごとの放電モードについて述べた。実験手法としては、衝撃波圧力の計測として用いられる条件と実験で用いた圧力センサーについて説明した。その他の計測方法として光学的な衝撃波観測の手法について述べ、光学観測結果の解析手法についても言及した。最後に衝撃波の応用として装置開発をする上で必要な、食品の物性値の計測手法について言及した。

3章では、初めにギャップ放電法による衝撃波の発生機構を調査するために、水中放電時の電圧電流特性の計測と高速度カメラを用いた光学的観察により、水中放電時の絶縁破壊現象と絶縁破壊後の衝撃波発生特性について調べた。

実験から水中火花放電において電極間に電圧を印加してから絶縁破壊が発生するまでには数10msの火花遅れが発生すること。また、この間に放電電極からジュール熱と電気分解に起因するガスが発生し対極まで進展後に気泡的破壊により絶縁破壊が発生すること。放電時の特性は減衰振動を示すが、反転後の火花放電は、最初の火花放電による膨張ガス中で発生し、水中衝撃波の生成には起因しないことを明らかとした。効率よく電気エネルギーを衝撃波に変換するには最初の火花放電時のエネルギー投入量を向上させることが必要であると提言した。

次にギャップ放電法による衝撃波の生成について放電回路のインピーダンスを操作することにより放電特性を変化させ、発生する衝撃圧の変化について調査した。実験では衝撃波発生電源の放電回路ケーブルを同軸ケーブルにすることにより放電回路の誘導インダクタンスを低下させた場合と充電されるコンデンサの静電容量を減らすことで放電周波数を変化させ放電電流の立ち上がり時間を圧縮した場合について、同一の充電エネルギー下における火花放電により発生する水中衝撃波の衝撃圧を比較した。実験により、ギャップ放電法による衝撃波の衝撃圧は放電電流の立ち上がり特性に依存することが明らかとなった。

4章では水中衝撃波の生成手法の一つである金属細線爆発法について、衝撃波発生装置の装置能力に最適化された細線条件の検討と、生成される衝撃波の制御のため、金属細線条件による発生される衝撃波の最大圧力について圧力センサーと光学観測を用いて評価した。実験では3.5kVで充電された4.9kJの放電エネルギーを厚さ1mmのアルミ板より切り出した長さ3mmの金属細線に投入し衝撃波を発生させた。金属細線は幅を0.6mm, 1mm, 1.4mmと変化させ放電特性とともにシュリーレン法により衝撃波の可視化を行い、カーブフィッティング法により解析した後に伝播特性を計算した。また、圧力センサーを用い、細線から距離30mmの位置での圧力履歴を計測し、光学観測による圧力値と合わせて発生する衝撃波の評価をした。実験の結果、充放電条件と金属細線条件の組み合わせには最適値があり、本実験においては1mmの細線幅の時に細線近傍での圧力が130MPaになると計算された。また、放電特性より細線熔融までに投入されたエネルギー量と細線の燃焼時間より細線爆発時の細線近傍の圧力について評価できることを明らかとした。

5章では、電気放電による水中衝撃波の発生技術の応用として、水中衝撃波を用いた連続

式の米粉製造装置を開発した。まず、予備実験として、充電エネルギーに対する製粉量の変化を調査した。実験の結果、充電エネルギー10kJを境に製粉量が急増し連続装置においてもこの条件を採用した。ギャップ放電方式を用いた米粉製造装置は充電エネルギー10kJの衝撃波発生装置4台と直径150mm、高さ1060mmの圧力容器、分級用の振動ふるい機により構成し、米の循環と充放電動作をロジックコントローラにより電子制御した。衝撃波発生装置の動作能力は8.7shot/min・台の充放電能力を有し、2.1kg/hの製粉能力を実現した。さらなる製粉能力の向上のため改良された金属細線爆発を用いた米粉製造装置では、細線供給装置を組み込み、直径1.2mmのアルミ細線を4.9kJの高電圧電気放電で爆破する衝撃波発生装置を連続運転化した。処理容器も内径305.5mm、高さ1130mmと大容量化し、処理容量と衝撃波強度を共に強化し、製粉能力を9.5kg/hと向上させた。

衝撃波処理による米の製粉について評価するため米の衝撃波伝播挙動を計測し、衝撃波の米への透過特性を評価した。実験ではSEP爆薬とHABW爆薬を用いた爆縮レンズにより平面衝撃波を生成し、インピーダンスマッチング法を用い米の衝撃波伝播特性を計算した。これにより、衝撃波処理による米粉製造装置における装置内部における衝撃波伝播の有効性を確認した。装置評価として衝撃波処理米粉について評価した。ギャップ放電法と金属細線爆発法で、単位時間当たりの製粉能力の推移を比較し、粉砕によるホース内での米の充填率の変化が製粉能力に与える影響について考察した。また、製粉された米の損傷デンプン率の変化から米粉製造装置の課題について言及した。最後に連続処理により製粉された米粉のSEM画像より、既存技術により製粉された米粉に対する優位性を確認した。

以上のより、電気放電による水中衝撃波の生成技術について、電気放電特性と発生する衝撃波のエネルギー強度の関係が定量的に示され、衝撃波の産業利用としての有用性がより明確に示された。これらは今後、衝撃波技術を種々の加工技術として実用化していく上で有効な指針となり得ると考えられる。