＜平成 27 年度助成＞

衝撃波を用いる非加熱食品加工のための小型衝撃波発生装置の開発

江口　啓
（福岡工業大学 工学部電子情報工学科）

1．はじめに

近年、日本を含む先進国においては、少子高齢化が深刻な社会問題となっている。このため、高齢者がより質の高い健康的な生活を送るために、咀嚼しやすく栄養が豊富な食品を提供することが求められている。しかしながら、一般的に食品を軟化するために行われている加熱加工処理には、食品に含まれる栄養素が熱によって破壊されてしまうという問題がある。そのため、近年、食品に含まれる栄養素を破壊せずに栄養価の高い加工食品を提供できる“非加熱食品加工処理”が研究・開発されている。なかでも、水中衝撃波を用いる非加熱食品加工処理[1)]は、低コストで食品を軟化処理できるために、多くの研究者の注目を集めている。

水中衝撃波を用いる非加熱食品加工装置は、主に出力電圧が 3.5kV 以上の高電圧発生回路と 200μF の大容量コンデンサ、高耐圧スイッチ、圧力容器によって構成されている。高電圧を発生する一般的な方法としては、巻数比が大きな変圧器が用いられるが、非常に高価であり、さらに重量が大きく占有体積が大きい。これに対して低コスト、かつ軽量な高電圧発生回路としてコッククロフト・ウォルトン（CW）回路[2)]がある。CW 回路はダイオードとコンデンサのみで構成される電圧増幅回路であり、単純な回路構成で高電圧を発生することができる。しかしながら、CW 回路は、①商用の交流電圧によって駆動されるために応答スピードが遅い、②高電圧を発生するための回路素子数が非常に多くなる、③ダイオードの閾値電圧の影響によって出力電圧効率が悪化するといった欠点がある。このため CW 回路を用いた非加熱食品加工装置は、低コスト化・軽量化が実現できるものの、食品加工処理に非常に時間がかかるという欠点をもつ。

本研究では、安価・高速に食品加工が可能な、水中衝撃波を用いる非加熱食品加工装置を開発する。具体的には、従来の CW 回路よりも高速に高電圧を発生できる小型高電圧発生回路を設計することで、非加熱食品加工装置の高速化を図る。従来手法とは異なり、提案する高電圧発生回路においては、入力の商用の交流電圧を AC-DC 変換ブロックで直流電圧に変換した後、ドライバー回路で直流電圧を高速な 2 相矩形波に変換し、最後に高速な 2 相矩形波によって昇圧回路を駆動することで高電圧を発生させる。提案回路を用いた非加熱食品加工装置の有効性については、実験により明らかにする。

2．水中衝撃波を用いる非加熱食品加工処理

2.1．加工処理装置の構成

図 1 に水中衝撃波を用いる非加熱食品加工装置を示す。同装置は主に高電圧発生回路、出力コンデンサ、水で満たされた圧力容器、高耐圧スイッチによって構成されている。水中衝撃波による非加熱食品加工処理においては、はじめに高電圧発生回路は 3.5kV 以上の高電圧を発生し、それを出力コンデンサへ充電する。その後、高電圧スイッチをオンすることで水中放電を行い、加工対象をスポーリング破壊する。このとき水中放電は 1 ミリ秒以下の非常に短い時間で行われるため、加工時間は外部キャパシタへの充電プロセスが支配的となる。このように水中衝撃波による加工処理の問題点は、外部キャパシタへの充

電時間であり、このことは高電圧発生回路の動作速度が遅いという問題点に起因している。

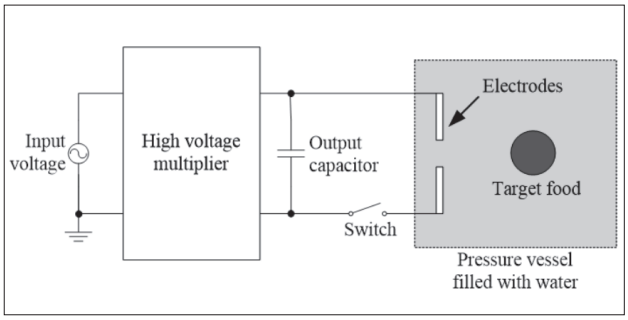


図１　水中衝撃波を用いる加工装置の構成

2.2. 高電圧発生回路

2.2.1. 従来回路の構成

図 2 に従来の CW 回路[2] の構成を示す。従来回路の出力電圧 V_{out} は、次式で与えられる。

$$V_{out} = 2N(V_{in} - V_{th}) \quad (1)$$

式 (1) において、V_{in} は入力電圧、N (= 1, 2, …) は回路の段数、V_{th} はダイオードの閾値電圧を表す。式 (1) に示す通り、従来回路においては回路の段数 N を増加させることで入力電圧を任意の $2N$ 倍に昇圧できる。しかしながら、従来回路には以下の問題点がある。①商用の交流電圧によって駆動されるため、動作スピードが遅い。②商用の交流電圧から水中衝撃波を発生させるために必要な 3.5kV 以上の高電圧を発生させるには、段数を 13 段以上にする必要があり、26 個のコンデンサと 26 個のダイオードを必要とする。③素子数が多い影響で回路の電圧、および電力効率が悪い。これによって、目標電圧を発生させるためにはさらに多くの素子が必要になり、回路の動作がさらに遅延するという悪循環が生じている。

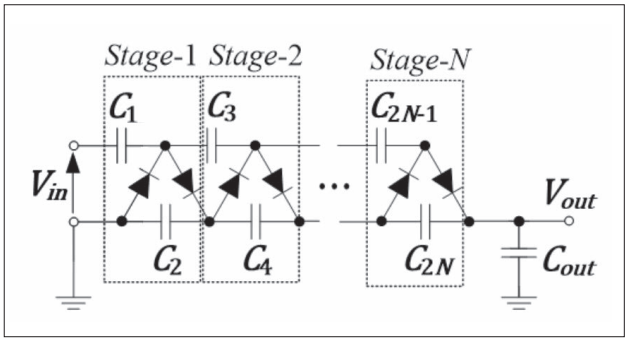


図２　コッククロフト・ウォルトン回路

2.2.2. 提案回路の構成

図 3 に提案する高電圧発生回路を示す。出力電圧 V_{out} は、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} V_{out} &= V_{po} - V_{mo} \\ &= 4N\cdot(4M+1)\cdot V_{in} - \{(4M+1)\cdot(4N+1)+1\}\cdot V_{th}, \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、$V_{po} = -V_{mo} \cong (4M+1)\cdot V_{cw}$ かつ $V_{cw} = 2N\cdot(V_{in} - V_{th})$

式 (2) において、N (= 1, 2, …) は AC-DC コンバータの段数、M (= 1, 2, …) は昇圧回路の段数、V_{po} は正の出力電圧、V_{mo} は負の出力電圧、V_{cw} は AC-DC コンバータの出力電圧を表している。式 (2) より、AC-DC コンバータの段数 N=1、正の昇圧回路の段数 M_p=2、負の昇圧回路の段数 M_m=1 とすることで、提案回路を用いて水中衝撃波を発生させるために必要な 3.5kV 以上の電圧を発生させることができる。提案回路は、①コンバータの双極構造化による回路段数の低減、②コンバータの対称構造化による出力電流の増加、③コンバータの縦列接続による高昇圧変換、④高速スイッチングによるコンバータの高速駆動、以上の 4 つの特徴によって非加熱食品加工処理の高速化を実現する。

3．実験結果

はじめに、提案する高電圧発生回路の有効性を確認するための実験を行った。**図 4** に出力電圧の過渡応答を示す。**図 4(a)** が示す通り、従来回路の出力電圧は 2.64kV、立ち上り時間は 69.87 秒であった。一方、提案回路の出力電圧は 3.45kV、立ち上り時間は 4.823 秒であった。この実験結果より、提案回路は従来回路よりも 14 倍以上高速に動作し、かつ 800V 以上の高い電圧を発生できることがわかる。

次に、提案の高電圧発生回路を組み込んだ非加熱食品加工装置を用いることで、食品の加工処理を行った。**図 5** に実験装置の外観を示す。実験におい

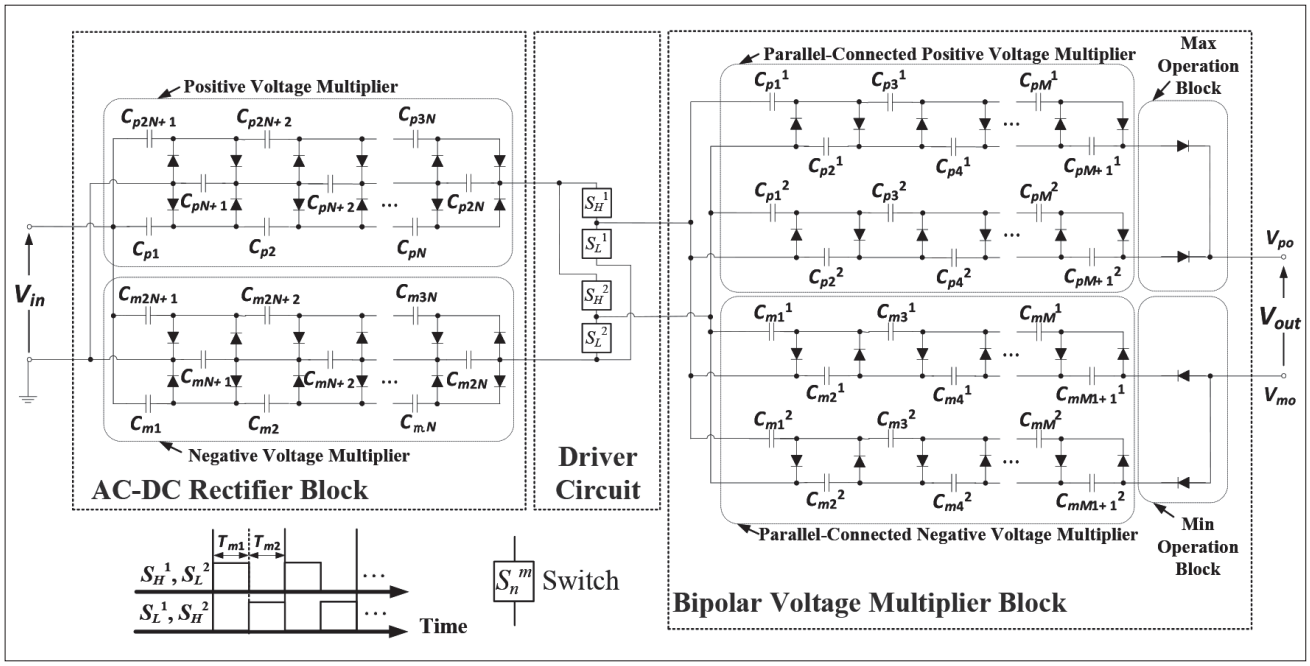
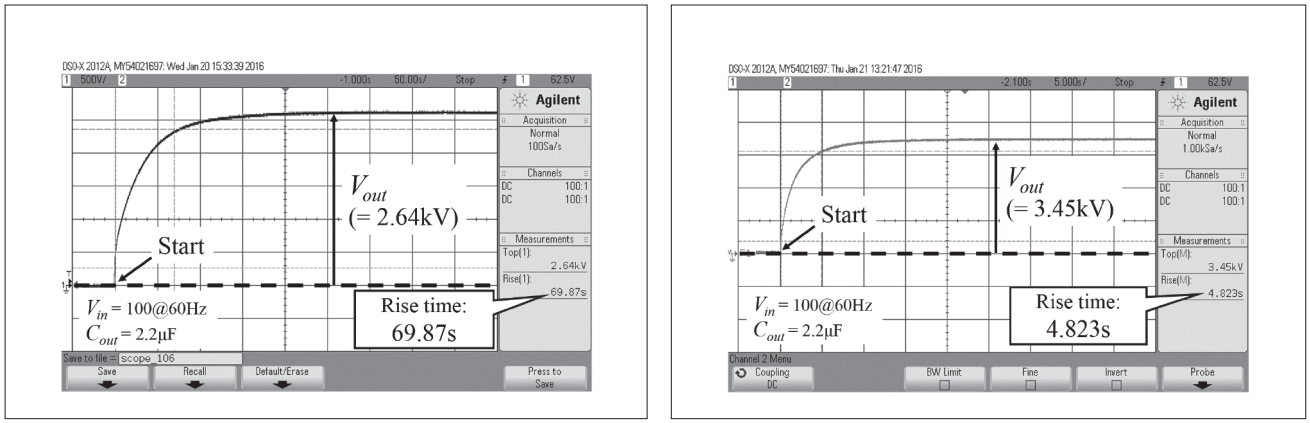


図 3　提案する高電圧発生回路



(a)　(b)

図 4　出力電圧の過渡応答　(a) 従来回路と (b) 提案回路

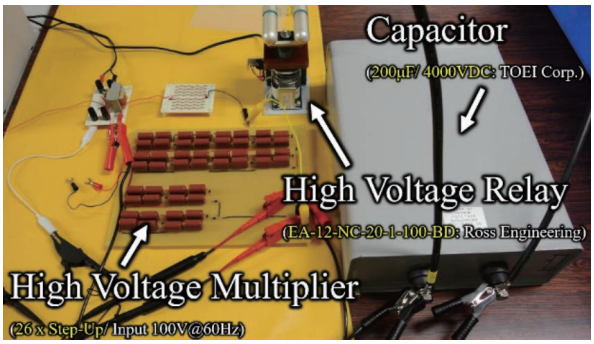


図 5　実験装置

図 6　加工後食品の断面

ては、圧力容器として市販の圧力鍋を加工したものを用い、電極間距離を 1.0cm に設定した。また、圧力容器中の媒質には水道水を用い、加工対象として林檎を用いた。**図 6** に加工処理後の林檎を示す。**図 6** の通り、提案回路を用いた非加熱食品加工によって加工対象の軟化に成功した。硬度計によって測定した結果、林檎の硬度を加工前 1175kPa から、加工後 647.2kPa に軟化できた。

4．まとめ

本論文では、水中衝撃波を用いる高速かつ安価な非加熱食品加工装置を実現するために、新しい高電圧発生回路の開発を行った。実験の結果、提案回路は従来回路よりも 14 倍以上高速に動作し、かつ 800V 以上の高い電圧を発生できることを明らかにした。また、提案の高電圧発生回路を用いた非加熱食品加工装置において、食品を軟化処理できることを実験によって明らかにした。具体的には、加工対象とした林檎の硬度を加工前 1175kPa から、加工後 647.2kPa に軟化できた。提案装置は、水中衝撃波を利用した非加熱食品加工の高速化・低コスト化に寄与すると考えられる。

謝　辞

本研究の遂行にあたり、貴重な研究助成を賜りました公益財団法人 浦上食品・食文化振興財団および関係者の皆様に御礼を申し上げます。

参考文献

1) S. Shinzato, Y. Higa, T. Tamaki, H. Iyama, S. Itoh, “Computational simulation of underwater shock wave propagation using smoothed particle hydrodynamics”, Materials Science Forum, vol. 767, pp. 86–91, 2013.
2) A. Lamantia, P. Maranesi, L. Radrizzani, “The dynamics of the Cockcroft-Walton voltage multiplier”, Proc. of the IEEE Power Electronics Specialists Conf., pp. 485–490, 1990.

Development of a novel high voltage multiplier for a non-thermal food processing system utilizing underwater shockwaves

Kei Eguchi
Department of Information Electronics, Fukuoka Institute of Technology

In recent years, non-thermal food processing has received substantial attention, due to the requirement for nutritious and soft processed foods in aging societies such as Japan. In past studies, many researchers have undertaken the development of non-thermal food processing technologies. Among others, we focused on non-thermal food processing utilizing underwater shockwaves, as this method can provide nutritious and soft processed foods at low cost. In assembling a non-thermal food processing system that utilizes underwater shockwaves, a high voltage multiplier is the vital component, as it is used for shockwave generation. In this paper, we propose a novel high voltage multiplier for a non-thermal food processing system utilizing underwater shockwaves. Owing to its series-connected bipolar topology, the proposed multiplier can achieve not only higher processing speed, but also higher step-up gain compared to conventional multipliers. Therefore, by utilizing the proposed multiplier, the non-thermal food processing system can realize high speed food processing. To clarify the effectiveness of the proposed multiplier, we conducted experiments concerning the non-thermal food processing system utilizing the proposed multiplier. The experimental results demonstrated that: (1) the settling time of the proposed multiplier was 14 times faster than that of the conventional multiplier, and (2) the flesh of the target food was softened by the non-thermal food processing system utilizing the proposed multiplier. By using the proposed non-thermal food processing system, the hardness of the processed food was reduced from 1175 kPa to 647.2 kPa. Based on these results, the proposed system can provide nutritious, fresh processed foods at low cost.