

論文

超音波治療器の出力簡易測定

岡野 宏* 河村 洋*

A simple measurement instrument of ultrasonic power for ultrasonic therapy

Hiroshi Okano and Hiroshi Kawamura

Abstract Ultrasonic power of an ultrasonic therapy apparatus should be measured at the point of the transducer, since the measurement value at that point reflects the effect of therapy and the safety of using the apparatus. However, expensive instrument is needed to measure the ultrasonic power precisely, and complicated and delicate adjustment is indispensable for using the instrument. Therefore users of the instrument such as doctors, are asking for a more simple measurement instrument using ultrasonic power. We discussed practical and simple measurement method. The ultrasonic power of the apparatus is beamed to the top of a conical float which is floating on the degassed water in the cylindrical tank. The ultrasonic power is calculated from the measurement results of the sinking velocity of the float. We compared the measurement result obtained by this simple instrument with that obtained by a normally used precision instrument. Both results had good agreement.

Keywords Simple measurement method, Ultrasonic power, Transducer, Therapy, Safety of using, Conical float, Velocity

1. はじめに

皮膚内部へ温熱効果を有する超音波治療器は欧米で広く普及している。日本においても、類似効果を有するマイクロ波治療器に比べ、不要電磁波が同時に使用中の他の医療機器に与える影響が少なく、また、生体に与える悪影響も少ない超音波治療器の需要は増加すると考えられている。

超音波治療器においては、治療効果や安全性の面から実際の導子（プローブ）から放出されている超音波の出力測定が必要である。しかし、超音波の出力測定には、通常、複雑で微妙な調整が不可欠な、高価で精密な測定器が利用されてきた。このため、病院等の現場で超音波出力の簡易測定が強く求められている。

この簡易測定の方法として、直進流による水中の水車回転数から出力を換算する、水車回転法、放射圧の差から生じる水中の薄膜歪みから出力を換算する、薄膜歪み法等を検討したが、浮き上下法が有効であった。

本報告では、超音波の出力を実用されている2種類の測定器で求めた上で、浮きの上下法による安価で実用的な簡易出力測定器を考案し、理論解析及び実験結果の考察を行った。

2. 方法

超音波の出力を、測定精度が高い実用的なハイドロホ

ン（水中マイクロホン）と電子天秤を用いる二つの方法で測定した。この測定結果を利用し、簡易測定について実験試作を行った。

2.1 超音波出力の精密測定

2.1.1 ハイドロホンによる測定

脱気水中の超音波導子から放出される音圧を、アクチュエータの先端に取り付けたハイドロホンで計測してコンピュータ合成をし、三次元の音圧分布として測定した。機器は米国 SEA 社製の超音波出力強度測定装置で、測定項目は、総出力パワー、ERA（有効放射面積）、BNR（ビーム不均等率）、三次元放射分布である。測定周波数は1MHz~5MHzであり、測定精度は、総出力パワーは $\pm 20\%$ 、ERAは $\pm 20\%$ 、BNRは $\pm 30\%$ の仕様になっている。

なお、本測定は、理学療法機器工業会の協力を得て、伊藤超短波（株）で実施した。

2.1.2 電子天秤による測定

超音波を脱気水中に放射し、この音圧を円錐形の反射板で受ける電子天秤の原理で測定した（図1）。

この原理は、JIS T1501 に定められている精密天秤による超音波出力の測定方法を簡易化したものである。

本方法は、円錐形の反射板の中心を超音波導子の中心と一致させ、正面から正確に音圧が反射板に加わる調整が測定のポイントとなっている。

測定器は、米国オーミック社 超音波パワーメータ MODEL UPM-DT-1 で、測定範囲は0~30W、測定周波数

*電気応用技術グループ

は1MHz~10MHzで、出力の測定精度は±3%である。

なお、上記二つの実験で用いた超音波治療器の出力は、工場において電子天秤により校正された出力表示がされている。

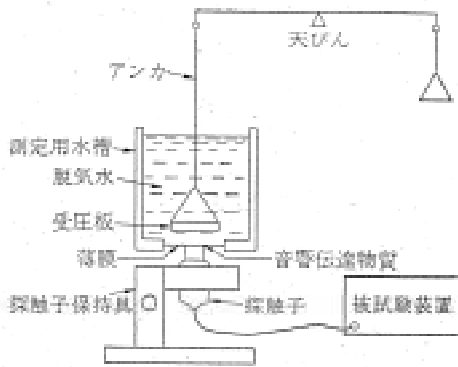


図1 電子天秤の原理

2.2 浮き上下法による超音波出力の簡易測定

浮き上下法は水中に置いた浮きの上下で、出力を検出する方法である。これは図2で示すように、脱気水を入れた円柱状の水槽に、水の比重よりわずかに小さい、円錐または円柱形の浮きを上部が平面になるように入れ、その平面部分に超音波を当てて、その放射圧により浮きを沈め、浮きの沈む速度を測定することによりその超音波出力を換算する。

水槽は、予備実験から、浮きの速度測定に信頼性を持たせるため有効測定長を780mmとした。また、浮きの軌道が安定するように水槽の内部を二重にし、浮きのガ

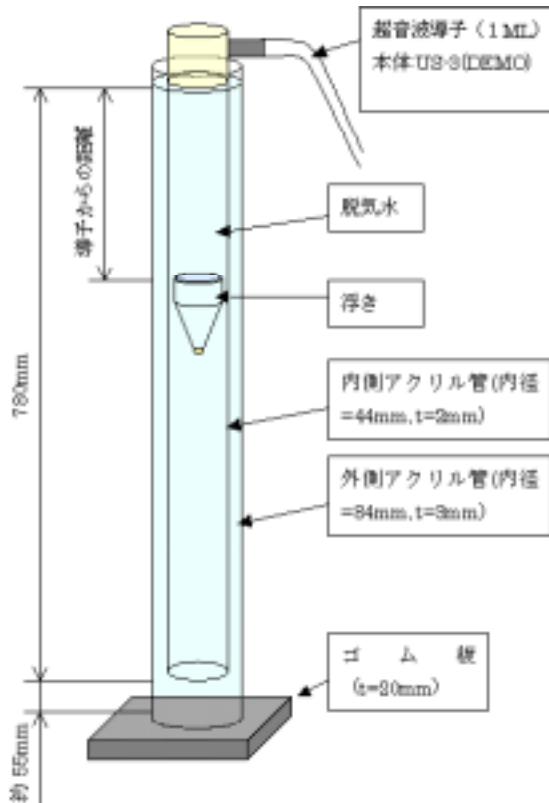


図2 浮き上下法の測定方法

イドとした。

浮きの形状は予備実験を行い、動作の安定する図3に示すような円錐形のものを選定した。浮きの材質は、浮力の変動を小さくするため、吸水性の極少ないポリプロピレン樹脂を使用し、さらに姿勢が安定するように円錐または円柱の先に重りをつけ重心を低くした。

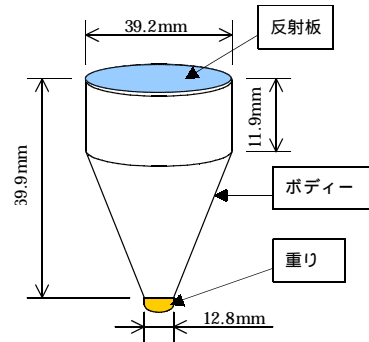


図3 浮きの形状

超音波導子は、1ML(周波数1MHz, 振動子サイズ: ERA=5.4cm², 特性: BNR=3.4)を用いた。1MLを選定した理由は、超音波の総出力がS(1.4W)に比べてL(10.8W)の方が大きく、かつ3MHzに比べて1MHzの方が一般的に使用されているからである。

3. 結果及び考察

超音波出力の精密測定と簡易測定の結果を図、表で明示し、考察を加えた。

3.1 超音波出力の精密測定

3.1.1 ハイドロホンによる測定

三次元の音圧放射分布を測定し、図4に示した。立体図の横方向は導子の放射面積を、縦方向は音圧の強さを表している。この結果から、導子形状の大きさ、周波数の高低で、超音波出力の音圧放射分布に大きな相違のあることが判明したが、安全性に危害のある大きなピークは認められず(BNR = 5以下)、今回検討している平均値的簡易測定でも十分に実用的な測定が出来ることが確認できた。

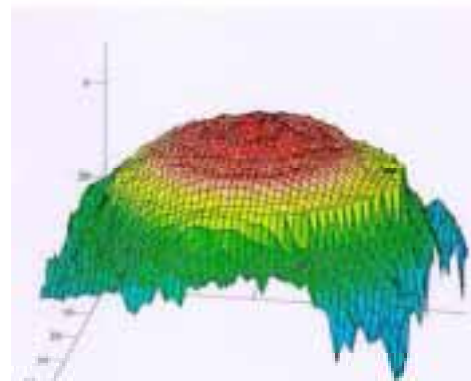


図4 超音波出力の音圧放射分布(1ML)

しかし、この測定方法は測定器の定格に示すように総出力パワーの測定には有効でなかった。

3.1.2 電子天秤による方法

超音波治療器の出力表示と実際に放出された出力を電子天秤で測定し、図5に示す。図5では1MLの導子を用いているが、3MHzの導子や、小形状の導子を用いても出力表示値と実際の出力の直線性は成り立っている。

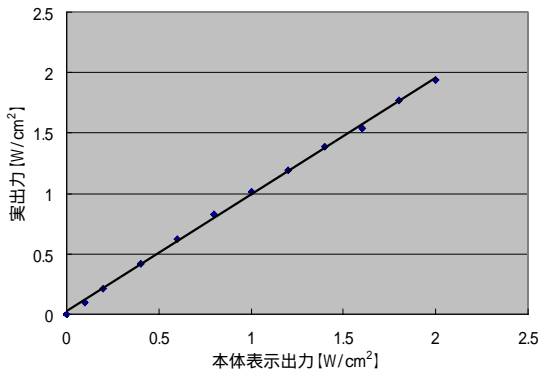


図5 表示出力と実出力の関係

さらに、最大出力 2W/cm² の時の出力をハイドロホンと電子天秤で測定すると、両者の測定値の差は導子の形状、周波数の相違により 20% を超えてしまうこともあった¹⁾。

そこで、今後の簡易測定の出力量基準としては、直線性が良く、測定精度の高い電子天秤を用いることにした。本実験では、この電子天秤で校正した超音波治療器のデジタル表示された出力を簡易測定の出力量基準に採用した。

3.2 浮き上下法による超音波出力の簡易測定

浮き上下法についてデータの再現性を確認するために、脱気レベルの影響と、浮きの形状について検討を行った。

脱気水は空気中に放置すると、空気を常時吸気する。そこで、脱気が不十分になり、音圧により気泡が発生し、測定データに影響を与える。そこで本実験では、当日作製した脱気水を使用して行った。

浮きの形状として、浮きと水との影響、作り安さ、浮きに作用する放射圧の安定性を考慮して形状の異なる、円錐形タイプ、円柱形タイプ、大きさの異なるタイプ、反射板の異なるタイプの5種類を作製した。

この内、円柱形のは管の途中で引っかかりが生ずることがあり、データが安定しなかった。そこで、浮きが管の中で左右にぶれにくく、かつ内径とクリアランスが少ない、図3の浮きを実験に使用した。

この結果測定データの再現性と安定性が得られた。そこで、測定方法および設計の妥当性を評価するため、浮きが超音波の出力によって上下する理論運動方程式と、この式から速度に関する実用的近似式を求め、実験による近似値と実測値の比較検討を行った。

浮きの運動方程式は、重力加速度 [mg] (m : 浮きの

質量、 g : 重力加速度) , 浮きの浮力 [- V] (: 媒質 (水) の密度、 V : 浮きの体積) , 放射圧 [Fs (X)] (X : プローブと浮きまでの距離) , 水の抵抗力 [- Fr (v)] (v : 浮きのスピード) からなり、以下のように表すことができる。

$$mg - V + Fs (X) - Fr (v) = m dv / dt \dots (1)$$

放射圧 [Fs (X)] は、浮きの重さ (浮力) と超音波出力を変化させ、その時の浮きが静止した距離を測定し、各出力での放射圧を求めた図6より、2.0W/cm²、1.5W/cm²、1.0W/cm² の出力をそれぞれ以下のように近似した。

$$Fs (X) = aX^b \dots (2)$$

[a , b : グラフより求められる定数]

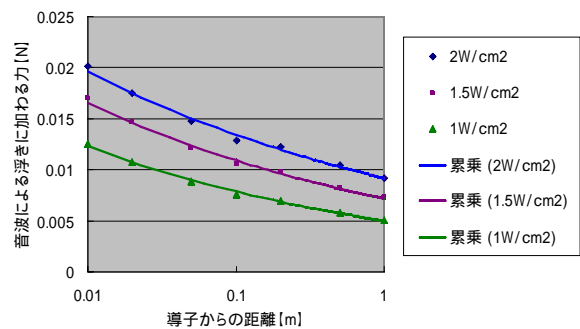


図6 各超音波出力での放射圧

浮きにかかる水の抵抗 [- Fr (v)] は、超音波を放射せず、浮きの重さを変化させてスピードを測定し、浮きの水の抵抗力を求めた図7より、以下のように近似した。

$$Fr (v) = cv^2 + ev \dots (3)$$

[c , e : グラフより求められる定数]

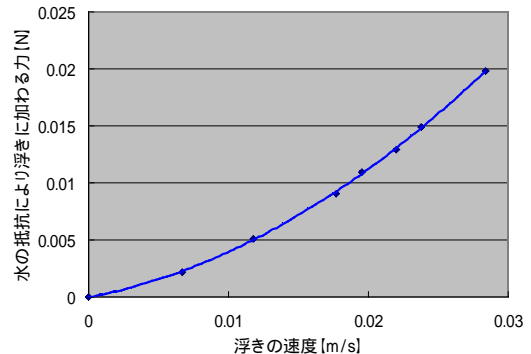


図7 速度と浮きにかかる水の抵抗力

(1) の理論運動方程式に (2) , (3) 式を代入すると、
 $mg - V + aX^b - (cv^2 + ev) = m dv / dt \dots (4)$

今、重力、浮力や放射圧と水の抵抗が釣り合っていると浮きの速度は一定になる。その時の速度を v_b と仮定す

ると、上記運動方程式(4)は、 $dv/dt = 0$ だから以下のように表す事が出来る。

$$mg - V + aX^b - cv_b^2 + ev_b \quad \dots (5)$$

そこで、上記(5)式を v_b について変形すると以下の速度に関する実用的な近似式が得られる。

$$v_b = (-e + (e^2 + 4c(mg - V + aX^b))) / 2c \quad \dots (6)$$

但し上記(6)式は、導子近くの速度変化が大きい位置や、浮きに加わる力が各超音波出力での放射圧を測定した図6のように変化している場合は、単純に成り立たない。しかし、浮力の相違による移動時間(放射圧なし)を測定した図8をみると、想定される浮きに加わる最大の力($1.98 \times 10^2 N$)においても、約0.1 mからすでに重力加速度と水の抵抗が釣り合っており、速度が一定(直線)になっている。また、各超音波出力での放射圧を測定した図6の浮きに加わる力の変化レベルをみると、十分小さいので、ほぼ(6)式で近似して良いと考えられる。

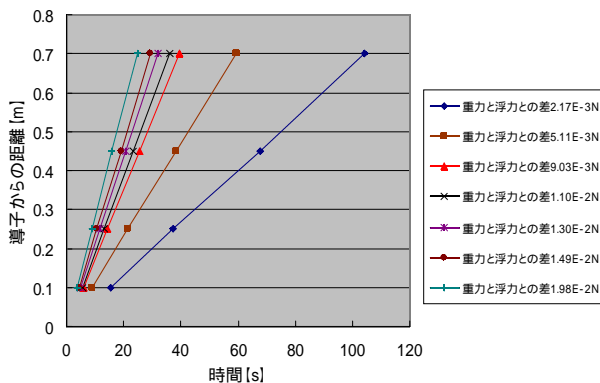


図8 浮力の相違による移動時間(放射圧なし)

浮きの移動実測時間を測定した図9と(6)式で求めた浮きの速度の近似値を図10に示した。ただし、測定条件は実験に利用した浮きの重さと浮力の差である $mg - V$ を $-2.73 \times 10^{-2} N$ とした。すると、プローブと浮きとの距離が約0.2 m以上で、近似値と実測値は約15%以下で一致することが確かめられた。

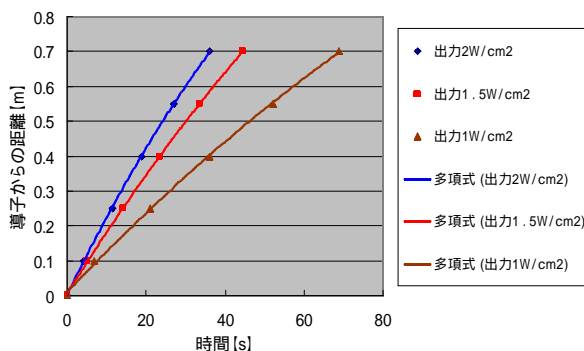


図9 浮きの移動時間

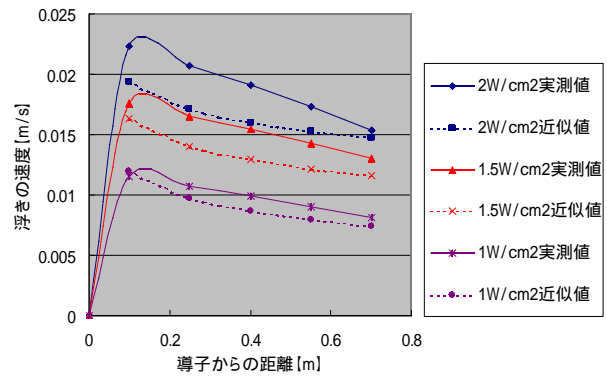


図10 浮きの移動速度の実測値と近似値

以上のことから、超音波出力の簡易測定方法として浮き上下法の有効性と、その簡易測定設計時の近似式の有効性を確認することが出来た。

さらに、主に必要とされる最大出力付近($1W/cm^2 \sim 2W/cm^2$)で計測できる速度の差が十分あり、簡易測定として実用精度が評価できることが判明した。

4. まとめ

超音波治療器の超音波出力を安価で簡易的に求めるには、浮き上下法が実用的であり、理論的検討の上、設計手法として実用的な簡易出力測定器として考案することができた。

この際に、超音波出力の精密測定では、音圧の三次元分布と、微弱の音圧分布を測定するには、ハイドロホンを用いることが必要である。超音波の出力には、電子天秤を用いる方法が、精度の高いことが確認できた。

本研究を実施するにあたり、御協力いただいた理学療法機器工業会、伊藤超短波(株)及び栗木礼二氏に感謝いたします。

参考文献

- 岡野宏, 斉藤雅弘: 日本医科機器学会誌 Vol. 68, No. 68 (1998).

(原稿受付 平成13年度7月31日)