16 水中衝撃波フォーカッシングの 可視化と数値シミュレーション

東北大速研 下森一夫・伊藤勝宏 高山和喜
東北大医学部 桑原正明 北山修

Visualization and Numerical Study of Underwater
Shock Wave Focusing

Kazuo SHITAMORI*, Katsuhiro ITOH*, Kazuyoshi TAKAYAMA*,
Masa-aki KUWAHARA** and Osamu KITAYAMA**

Recently, underwater shock wave focusing has been applied to the non-invasive disintegration of kidney stones. However, due to the highly non-linearity, the shock wave focusing phenomenon is still unresolved. Therefore, it is crucial to clarify this complicated phenomenon. In this paper, the experimental and computational study of the underwater shock wave focusing is presented. The underwater shock wave was generated by using a 5mg lead azide ($\text{Pb}(\text{N}_3)_2$) pellet and a 10mg silver azide (AgN_3) pellet, and reflected by an ellipsoidal cavity, and focuses at 2nd focal point. The focusing process was visualized by using holographic interferometry. The peak pressure along the axis of the reflector were also measured by Kstler 601H pressure transducer. The interferometric results were compared with the numerical simulation conducted by using a Total Variation Diminishing (TVD) finite difference scheme. A good agreement was obtained between the computation and experiment.

1. 緒言

体外からの水中衝撃波のフォーカッシングによる結石症の治療は、非観血的に結石を破砕除去する治療方法である。Fig.1 に示すように、水中において回転楕円体の第一焦点で、放電あるいは火薬の微小爆発によって生じた球状衝撃波は、回転楕円面で反射し、第二焦点に収束する。このとき第二焦点に瞬間的に発生する高圧を利用して結石を破砕するわけである。しかしながら、衝撃波のような非線形波の反射、収束現象は非常に複雑であり、

* Institute of High Speed Mechanics, Tohoku University, Sendai, Japan

** Tohoku University School of Medicine, Sendai, Japan

十分な解明には至っていない。本研究では水中衝撃波のフォーカシング過程を実時間ホログラフィ法で可視化し、回転楕円体中心軸上の圧力を Kistler 601H 圧力変換器を用いて測定した。さらに TVD 差分スキーム[2,3]を用いて数値シミュレーションを行い、計測結果と比較し、水中衝撃波のフォーカシング過程を明らかにした。

2. 実験

2. 1 水中衝撃波の可視化

可視化計測には長径127.2mm、短径90mmの透明なアクリル樹脂製の回転楕円体反射筒を用いた。反射筒を水中に置き、アジ化鉛 5mgベレットを反射筒底部からファイバースコープで支持して第一焦点に位置させ、レーザを照射して起爆する。水中を伝播、収束する衝撃波を実時間ホログラフィ法で観測した[1]。Fig.2にその光学系を示す。光源はルビー・レーザ (Appolo Lasers Inc.) を使用した。

2. 2 圧力測定

圧力測定には長径 286mm、短径 186mmの回転楕円体を中心から38.5mmの点で中心軸に垂直に切った形状を持つ真鍮製の反射筒を用いた。反射筒の開口部の直径は178mmである。圧力測定はステンレス製の試験水槽 (500mm×500mm×500mm) 内で行い、反射筒の中心軸上の圧力を測定した。火薬はアジ化銀ベレット10mgを使用し、可視化実験と同様に起爆した。測定には圧力変換器 (Kistler 601H) を用い、その出力信号はデジタルメモリ (岩通製 DM-2350) およびコンピュータ (日本電気製 PC-9801) により処理、記録された。

Fig.1 Illustration of underwater shock wave focusing

Fig.2 Schematic diagram of experimental setup and optical arrangement

3. 数値シミュレーション

数値シミュレーションはHartenらによって開発されたLax-Wendroff型のTVD差分スキーム[2,3]を用いた。この計算スキームは不連続面において一次精度となり、振動のない安定した解が得られる。なお不連続面は、数メッシュ内で急峻にとらえられる。

二次元平面 (x, y) 上の非定常かつ非粘性軸対称流れに対する基礎方程式を保存形で書けば、

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} + W = 0 \quad (1)$$

ここに、 Q 、 F 、 G 、 W は、

$$Q = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + P \\ \rho u v \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho u v \\ \rho v^2 + P \end{bmatrix}, \quad W = \frac{1}{y} \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho u v \\ \rho v^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

なるベクトルで、 ρ は密度、 P は圧力、 u 、 v は速度ベクトルの x 、 y 方向成分である。ただし、等エントロピ流れを仮定し、エネルギー保存式の代わりに水の状態方程式、Taitの式[4]を導入する。

$$\frac{P + B}{P_0 + B} = \left[\frac{\rho}{\rho_0} \right]^n \quad (3)$$

ここに、衝撃波の強さが、 $P < 25 \text{ kbar}$ の場合、 B 、 n は一定値と近似でき、 $B = 2963 \text{ bar}$ 、 $n = 7.415$ である。

火薬の爆発は瞬間的に水中に高圧のスポットがあらわれるとした。このスポットは第一焦点を中心とした半径 35 mm の球状をしており、その圧力は実験より求めた球状衝撃波の圧力をもとに 300 気圧 とした。メッシュサイズは 601×301 で、計算は東北大学大型計算機センターの NEC SX-1 および ACOS 1000 で行った。TVD 差分スキームの詳細は、文献 2, 3 を参照されたい。

4. 結果と考察

Fig. 3 (a)~(c) は、反射衝撃波が第二焦点に収束する過程を示す実時間ホログラフィ写真である。第一焦点付近の円形の影は、火薬の爆発による生成ガスである。写真中 A は第一焦点で発生し、直接伝播する球状衝撃波である。写真中 B は回転楕円体面で反射し第二

焦点に収束する反射衝撃波で、写真中その付近の急激な濃度変化は、大きな密度勾配を示している。水中衝撃波の一部はアクリル樹脂製反射筒自身の中を伝播しており、その透過した波は再び水中を伝播している（写真中 C）。また生成ガスの気泡の崩壊により二次衝撃波が発生している（写真中 D）。これら複数の波が互いに干渉しあい複雑な様相となっている。Fig.4 (a)~(c)に数値シミュレーションの結果を示す。Fig.4 は等密度線図および圧力分布の三次元表示であり、等密度線 1本は水の初期密度の1000分の1である。Fig.4 (a)~(c)の等密度線図の様相は実時間ホログラフィ写真、Fig.3 (a)~(c)の傾向と良く一致する。また圧力分布によれば、反射衝撃波が次第に収束し、500 気圧を超える高い圧力が発生していることがわかる。しかし数値シミュレーションでは、水中衝撃波のフォーカシングは球状衝撃波と反射衝撃波のみが伝播する、比較的単純なものであり、実時間ホログラフィ写真のような回転楕円体反射筒内部を伝播する衝撃波、生成ガスの気泡が崩壊するときに生じる二次衝撃波などとの干渉はない。Fig.5 は実験および数値シミュレーションより求めた中心軸における最大圧の履歴である。横軸は第二焦点からの距離で負の方向に反射筒があり、縦軸は圧力を示す。第二焦点付近では数値シミュレーションは、実験値と同様の傾向を示している。数値シミュレーションの最大圧力は実験より100 気圧ほど低いがこれは衝撃波の圧力の減衰が実験よりも大きいためである。また、数値シミュレーションと実験の最大圧力点の位置のずれは、実際の水中衝

(a)

(b)

(c)

Fig.3 Real time hologram

(a) $t = 53.5 \mu\text{sec}$.

(b) $t = 89.2 \mu\text{sec}$.

(c) $t = 107.0 \mu\text{sec}$.

Fig.4 Computational isopycnics and three dimensional display of the pressure field

Fig.5 Peak pressure history along the axis of the reflector

撃波のフォーカシングがFig.3のように様々な衝撃波が干渉しあい、より複雑であるためと思われる。

5. 結言

TVD 法による水中衝撃波のフォーカシング過程の数値シミュレーションは、可視化および圧力測定実験と、定性的かつ定量的によい一致を得た。今後、水中衝撃波のフォーカシングの医療への応用について定量的な議論、さらに複雑な現象の予測が可能となった。

参考文献

- [1] 高山和喜, 桑原正明, 水中衝撃波フォーカシングによる上部尿路結石破碎装置の開発, 病態生理, Vol.5, No.2, 1986.
- [2] A.Harten, High Resolution Schemes for Hyperbolic Conservation Laws, J.Comp.Phys., Vol.49, 1986.
- [3] T.Aki, Computation of Unsteady Shock Wave Motion by the Modified Flux TVD Scheme, Proc. 10th Intl.Conf.Numerical Method in Fluid Dynamics, 1986.
- [4] I.I.Glass and L.E.Heuckroth, Low-Energy Spherical Underwater Explosions, UTIAS Report No.96, 1964.