水液滴群との干渉による衝撃波低減に関する研究*

Study on Shock Wave Pressure Attenuation by Shock Wave Interaction with Water Droplets

大谷 清 伸**
OHTANI Kiyonobu小川 俊 広**
OGAWA Toshihiro杉山 勇 太***
SUGIYAMA Yuta丹波 高 裕***
TAMBA Takahiro

Abstract This paper reports preliminary experimental results of shock wave/ water droplets interaction phenomena related to shock wave pressure attenuation. Water droplets were generated by dropping from a several needle pipes, were interacted with micro-explosive-induced shock wave. The process of induced spherical shock wave/ water droplets interaction phenomena was visualized by shadowgraph method and recorded by a high-speed camera. The pressure histories of propagated shock wave interacting with water droplets were measured simultaneously by using the pressure transducer. High-speed shadowgraph sequential images show that interacted water droplets were highly deformed, and a wave front of a secondary shock wave was decayed. The simultaneously measured pressure history shows that a primary shock wave peak pressure was attenuated with interacting at water droplets, and a peak pressure ratio was decreased.

Keywords: Shock wave, Shock pressure attenuation, Shock wave interaction, Water droplet, Micro-explosive

1. はじめに

エネルギー物質の瞬間的なエネルギーの開放によって発生する爆風（衝撃波圧力）の低減は、爆風による外傷性損傷をはじめとする衝撃波圧力による生体損傷に関連し、衝撃波医療応用研究において重要な研究課題である[1-3]。

爆風による外傷性損傷では、爆風とそれに伴う現象によって引き起こされる外傷性損傷を 4 つの原因要素に分類されている。その内、先行する衝撃波とそれに引き続く超音速の流れによる圧力変化が生体内に伝播して損傷を引き起こす一次損傷（Primary Injury）では、衝撃波圧力のピーク過剰圧とパルス幅（正圧の持続時間）とその積であるインパルスが重要なパラメータとされており、その値によって生体損傷の危険度が変わるとされている[2, 3]。

一方、この爆風におけるパラメータと起爆点からの距離との間には Hopkinson-Cranz Scaling

Law[4, 5]と呼ばれるスケール則が成り立ち、換算距離 Z_{sd} （Scaled Distance）として以下の通り定義される。

$$Z_{sd} = R/W^{1/3} \quad [\text{m/kg}^{1/3}] \quad (1)$$

ここで R は起爆点からの距離[m]、 W は爆薬の薬量[kg]である。ただし、爆薬の種類によって威力が異なるため、ここでの爆薬は一般的に TNT（トリニトロトルエン）を基準としている。

この換算距離を用いて爆発現象を相似化することができるため、少量の薬量を用いた実験で実際の大きな薬量の爆発を模擬できる。また人や建築物の爆発被害を事前に防ぐための安全の指標として保安距離（K 値）としても用いられている。

爆風（衝撃波圧力）の低減のため、衝撃波と固体粒子、液体粒子[6-9]、多孔質体[10]や粗面等との干渉現象の低減効果の機序解明に関する実験

* Received: 4 November 2020 / Accepted: 25 February 2020 / Published online: 15 April 2021

** 東北大学流体科学研究所 〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平 2-1-1

TEL: (022)217-5037 FAX: (022)217-5033 E-mail: ohtani@ifs.tohoku.ac.jp

*** 産業技術総合研究所

的、数値解析的研究が多くなされている。ここで粒子との干渉の場合、衝撃波圧力低減は干渉による粒子の圧縮、分散、熱移動等の効果により粒子径、粒子密度、空間の粒子充填度をパラメータとして、その効果が変化するとされている。

これら粒子群との干渉による衝撃波低減に関わる実験的研究では、比較的大きな薬量の爆薬を用いた管内等の閉空間での水ミストと衝撃波干渉実験[6, 7]や衝撃波管を用いた単一水液滴との衝撃波干渉実験[8]であり、水液滴群と干渉する衝撃波波面の変形等の詳細な可視化で本現象の評価を行っていない。そこで光学可視化計測が可能な微小薬量の爆薬の起爆による衝撃波を用いた小規模実験で水液滴群との衝撃波干渉実験を実施し、高時間、高空間分解での高精度な可視化によって、水液滴群との衝撃波干渉による衝撃波圧力の低減効果の現象解明が有効であると考ええる。

本研究では、水粒子群と衝撃波の干渉による衝撃波圧力低減効果の機序解明を目的に、微小爆薬起爆による衝撃波と水液滴群との干渉実験を実施し、水液滴群と干渉した衝撃波挙動のシャドウグラフ光学可視化計測および圧力計測結果について報告する。

2. 実験装置および実験方法

Fig. 1 に水液滴群と衝撃波干渉実験の概略図を示す。本実験では上方に金属細管(内径 0.47 mm、長さ 8.0 mm) 4 本を 3 列に並べ固定したものを配置して水を連続的に供給して水液滴を複数落下させて一定範囲に水液滴を分布させた。水液滴の分布範囲は衝撃波発生位置と後述する圧力センサ設置位置を結ぶ線上で幅 $W=40$ mm、奥行き $D=37$ mm である。金属細管に供給する水量は約 1.0 L/min とした。衝撃波は微小爆薬(アジ化銀ペレット (AgN₃)、密度 3.83 g/cm³、質量 10 mg、昭和金属工業)を起爆して発生させた。本アジ化銀ペレットは、以前、体外衝撃波結石破碎術において結石破碎の衝撃波医療に用いられていた非常に小さな薬量の爆薬であり、ある程度の距離を保てば耳栓のみの防護具で通常の実験室で実験が可能なるものである。本実験では薬量を電子マイクロ天秤 (Supermicro S4、精度 0.1 μ g、Sartorius) で計測した。換算距離はこの計測量と光学可視化計測画像における起爆点からの圧力計測距離より個々の換算距離を算出した値である。アジ化銀

Fig. 1 Schematic diagram of an experimental setup for micro-explosive-induced spherical shock wave/water droplets interaction.

ペレットは光ファイバ (GC.400/500、コア径 0.4 mm、フジクラ)の先端に接着した状態で設置し、パルスレーザ光 (Nd:YAG レーザ、SAGA220、波長 1,064 nm、パルス幅 7 ns、照射エネルギー約 20 mJ/pulse、BM. Industries) を光ファイバを介して照射して起爆した。また水液滴が発生衝撃波と干渉する位置は、起爆点から水液滴が分布する中心位置までの距離を約 25 mm とした。

本研究では微小爆薬起爆によって発生する衝撃波が水液滴と干渉する挙動に関して、メタルハライド光 (LS-M210、住田光学ガラス) を光源とし、1 組のシュリーレン鏡 (焦点距離 5,000 mm) を用いて構築したシャドウグラフ光学系で可視化し、高速度カメラ (HPV-X、解像度 400 pixel $\times$ 250 pixel、島津製作所) で記録した。また、起爆点から約 100 mm 離れた位置に設置した圧力センサ (603B1、Kistler) を用いて衝撃波圧力を計測した。微小爆薬起爆用のパルスレーザの発光信号を高速度カメラのトリガー信号として用い、圧力計測データと同時記録することで、光学可視化計測、圧力計測を同期させた。

3. 実験結果および考察

Fig. 2 に微小爆薬起爆による球状衝撃波の水液滴群干渉挙動の高速度シャドウグラフ連続写真を示す。アジ化銀ペレットの薬量は $m=10.68$ mg である。撮影速度は 2 μ s/frame (500 kfps)、露光時間 0.4 μ s である。図中に起爆からの経過時間を

Fig. 2 Sequential shadowgraph images of micro-explosive-induced spherical shock wave interaction with water droplets. (interframe time 2 μ s, exposure time 0.4 μ s)

示してある。

図より微小爆薬アジ化銀ペレットの起爆によって発生した球状の先頭衝撃波 (Primary shock wave) は水液滴群と干渉し、その後圧力センサ位置まで伝播する。衝撃波と干渉した水液滴は、図中の破線の円形で囲った起爆点に近い範囲のものは起爆点に対して直角方向に引き延ばされたように大きく変形して、一部が分裂して微細化して周りに分布している。変形が確認できる液滴の範囲は起爆位置より半径約 40 mm 程度であり、その外側の上下に分布する水液滴には大きな差異が確認できない。つまり本実験条件では起爆位置より約 40 mm の範囲の比較的近い範囲で水液滴との干渉によって効果があることを示している。一方、水液滴群と干渉した先頭衝撃波波面は干渉による変形は明確には見られない。二次衝撃

Fig. 3 Shock wave pressure history of shock wave interaction with water droplets.

波 (Secondary shock wave) 波面は水液滴がない側では確認できるが、干渉した側は不明確になっており減衰しているのがわかる。また、衝撃波背後に明確に見える爆発生成気体は、水液滴群との干渉がない場合にははっきりしていない。水液滴の落下によって周囲に微細な液滴が漂っているが、衝撃波背後の膨張波の作用によって微細な液滴が膨張し明確になったと考える。

Fig. 3 に高速度シャドウグラフ光学可視化計測と同時計測した衝撃波圧力の時間履歴を示す。比較のため換算距離がほぼ同じである水液滴群と干渉しない場合を併記する。この場合の換算距離は約 $Z_{sd}=4.56 \text{ m/kg}^{1/3}$ であった。縦軸は過剰圧 [kPa]、横軸は微小爆薬起爆からの経過時間 [μ s] である。

図より水液滴群と干渉した先頭衝撃波圧力 (実線) は干渉しない場合 (点線) に比べて、圧力センサへの到達時間が遅くなり、ピーク圧力が若干ではあるが低下している。到達時間より衝撃波の伝播速度を求めると、水液滴群と干渉しない場合で約 513.4 m/s、水液滴群と干渉した場合で約 509.4 m/s となり若干の速度低減が確認できた。また、Fig. 2 の光学可視化計測結果において波面の減衰が確認された二次衝撃波に関して、到達時間が大幅に遅延しており二次衝撃波が水液滴との干渉によって減衰していることを示している。二次衝撃波の形成は、爆発生成気体の急激な膨張に

よる先頭衝撃波の誘起とその逆方向への膨張波の発生と収束、再膨張が重要な過程となっており、先頭衝撃波の減衰が、膨張波の収束、再膨張過程を緩慢にさせたため、二次衝撃波が減衰したと考える。一方、丹波らは、本研究と薬量規模の異なる爆薬起爆によって発生する衝撃波と水液滴群との干渉実験を行い、先頭衝撃波ピークがなだらかになる結果を得ている[12]。本実験条件では水液滴群との干渉による圧力波形の大きな違いは見られず、先頭衝撃波の立ち上がりが急峻なままである。今後、本実験薬量での実験においても同様の圧力波形の変化が見られる条件の探索とその機序解明を行いたい。

ここで、水液滴と衝撃波圧力の干渉現象を考察するため、まず水液滴分布領域のボイド率を算出する。ボイド率は Fig. 2(a)の衝撃波干渉前の画像より、微小爆薬と圧力センサの間の水液滴が分布する幅 $W=40$ mm、高さ $H=60$ mm の範囲の水液滴個々の面積を求める。次に液滴を球と仮定して求めた面積よりそれぞれの半径、体積を求めて、水液滴の総体積を算出する。そして、解析領域面積と水液滴が分布する奥行き $D=37$ mm の範囲の体積との割合よりボイド率を算出すると、ボイド率 $\alpha_G=0.996$ であった。

次に水液滴領域の音速 c および密度 ρ 、そして音響インピーダンス Z (媒体の音速と密度の積) を求める。気液二相媒体中の圧力波の伝播速度は式(2)で定義される等温平衡音速の式が用いられる[13]。ボイド率 $\alpha_G=0.001$ 以上で近似的に求められた式であり、これは気相 (空気) と液相 (水) の圧縮率の大きな差に関わり気液混合媒体の大きな密度変動によって、この音速は気体のみ、液体のみの場合に比べて低速になることが知られている。

$$c = \sqrt{\frac{P_L}{\alpha_G(1-\alpha_G)\rho_L}} \quad (2)$$

ここで、 ρ_L は液体 (水) の密度、 P_L は液体の圧力である。本研究では同式を変形して、ボイド率、気体および液体の密度、気体の音速で表される式 (3) [14] を、水液滴領域の密度を式(4)の簡略化していない式を用いて変換した。

$$c = \sqrt{\frac{1}{\alpha_G(1-\alpha_G)} \frac{\rho_G}{\rho_L}} c_G \quad (3)$$

$$\rho = \alpha_G \rho_G + (1 - \alpha_G) \rho_L \quad (4)$$

$$c = \sqrt{\frac{1}{\alpha_G \rho_G + (1 - \alpha_G) \rho_L} \frac{\rho_G}{\alpha_G}} c_G \quad (5)$$

ここで、 ρ_G は気体 (空気) の密度、 ρ_L は液体 (水) の密度、 c_G は気体 (空気) の音速である。式(4)、(5)より算出した水液滴領域の密度 ρ 、音速 c 、音響インピーダンス Z は Table 1 に示す通りである。表には、水液滴群の周囲の空気の値を併記した。

Table 1 List of acoustic impedance value.

Material	Density ρ [kg/m ³]	Sound velocity c [m/s]	Acoustic impedance Z [kg/(m ² s)]
Air ^[11]	1.2929	331.45	428.6
Air-Droplets	4.94	169.9	839.3

表より、水液滴群領域の音響インピーダンス $Z_{AD}=839.3$ kg/(m²s) であり、周囲の空気の値 $Z_{Air}=428.6$ kg/(m²s) に比べ高くなっている。

ここで、衝撃波の媒体への透過に関しては音響インピーダンスを考慮すると以下の透過率 T_p の式が成り立つ。

$$T_p = \frac{P_t}{P_i} = \frac{2Z_t}{Z_t + Z_i} \quad (6)$$

ここで、 P_t は透過波のピーク圧力、 P_i は入射波のピーク圧力、 Z_t 、 Z_i は順に透過する媒体および透過前の媒体の音響インピーダンスである。

そこで衝撃波が空気中から水液滴群領域を通過した際の衝撃波ピーク圧力 P'_{Air} をこの透過率の式より算出する。まず、空気中から水液滴群領域中へ透過した衝撃波ピーク圧力 P_{AD} は干渉前の空気中の衝撃波のピーク圧力を P_{Air} として、各音響インピーダンス値を代入して $P_{AD} = \{2Z_{AD}/(Z_{AD} + Z_{Air})\}P_{Air} = 1.32P_{Air}$ となる。

さらに水液滴群領域から外側の空気の領域へ透過する過程で、通過した際の衝撃波ピーク圧力 P'_{Air} は以下の通りとなり、 $P_{AD} = 1.32P_{Air}$ を代入す

Fig. 4 Primary shock wave peak pressure ratio.

ると、 $P'_{Air} = \{2Z_{Air}/(Z_{Air} + Z_{AD})\}P_{AD} = 0.90P_{Air}$ となり、衝撃波圧力は干渉前の衝撃波のピーク圧力の 0.90 倍に減衰する計算となった。ここで Fig. 3 における先頭衝撃波の水液滴群との干渉の有無によるピーク圧力比は 0.96 であるため、若干低い値であるが比較的一致する結果となった。

この結果の差は水液滴の分布の非一様性によって、比較的希薄な部分を衝撃波が通過した際に干渉の効果が弱まることが考えられるが、計測自体の精度も含め検討すべきであり、また衝撃波が水液滴群と干渉する距離で衝撃波威力の低減効果が変化するのかが重要な点と考える。

Fig. 4 に先頭衝撃波のピーク圧力の分布を示す。縦軸は水液滴群と干渉させた衝撃波圧力を計測した圧力波形の各先頭衝撃波ピーク圧力値 (過剰圧: ΔP) より絶対圧 ($\Delta P + P_0$) を求め、大気圧 (P_0) で除した圧力比 ($(\Delta P + P_0)/P_0$) である。横軸は換算距離 [$m/kg^{1/3}$] である。図中には比較のため、水液滴群と干渉しない場合を同様にプロットした。

図より先頭衝撃波ピーク圧力比は水液滴群と干渉しない■印の分布と比較して、水液滴と干渉した●印の分布が低くなっており、低減されていることがわかる。圧力比で 1~2% 程度低下する結果となった。

4. まとめ

本研究では、水液滴群と衝撃波の干渉による衝撃波圧力低減効果の機序解明を目的に、微小爆薬

起爆による衝撃波と水液滴群との干渉実験を実施し、水液滴群と干渉した衝撃波挙動のシャドウグラフ光学可視化計測および圧力計測結果について報告した。

微小爆薬の起爆によって発生した球状衝撃波は水液滴群と干渉して、伝播速度およびピーク圧力が低減することが確認できた。

今後は、水液滴の大きさ、充填度、衝撃波を作用させる幅等をパラメータとして同様の計測を行い、衝撃波圧力低減に効果的な水液滴の干渉の仕方を明らかにするとともに、水液滴と衝撃波の干渉現象のより詳細な圧力計測、可視化計測等を行い、今回の衝撃波圧力低減に関わる透過だけでなく、反射や吸収効果等についても検討し、機序解明に取り組んでいく予定である。

参考文献

- [1] Takayama, K. and Saito, T., Shock Wave/ Geophysical and Medical Applications, Annu. Rev. Fluid Mech., Vol. 36, 347-379 (2004).
- [2] Nakagawa, A., Manley, G. T., Gean, A. D., Ohtani, K., Armonda, R., Tsukamoto, A., Yamamoto, H., Takayama, K. and Tominaga T., Mechanisms of Primary Blast-Induced Traumatic Brain Injury: Insights from Shock-Wave Research, J. Neurotrauma, Vol. 28(6), 1101-1119 (2011).
- [3] Nakagawa, A., Ohtani, K., Armonda, R., Tomita, H., Sakuma, A., Mugikura, S., Takayama, K., Kushimoto, S. and Tominaga, T., Primary Blast-induced Traumatic Brain Injury: Lessons from Lithotripsy, Shock Waves, Vol. 27, 863-878 (2017).
- [4] Hopkinson, B., British Ordnance Board Minutes, 13565 (1915).
- [5] Cranz, C., Lehrbuch der Ballistic, Springer - Verlag, Berlin (1926).
- [6] Mataradze, E., Chikhradze, N., Bochorishvili, N., Akhvlediani, I. and Tatishvili D., Experimental Study of the Effect of Water Mist Location on Blast Overpressure Attenuation in a Shock Tube, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, Vol. 95, 042031 (2017).
- [7] Chen, L., Zhang, L., Fang, Q. and Mao, Y., Performance Based Investigation on the Construction of Anti-blast Water Wall, Int. J. Impact. Eng., Vol. 81, 17-33 (2015).
- [8] Liang, Y., Jiang, Y., Wen, C. and Liu, Y., Interaction of a Planar Shock Wave and a Water Droplet Embedded with a Vapour Cavity, J. Fluid Mech., Vol. 885, R6 (2020).
- [9] Pntalier, Q., Lhoumeau, M., Milne, A. M., Longbottom, A. M. and Frost, D. L., Numerical Investigation of Particle-blast Interaction during Explosive dispersal of Liquids and Granular Materials, Shock Waves, Vol. 28, 513-531 (2018).

- [10] Kitagawa, K., Yasuhara, M. and Takayama, K., Attenuation of Shock Waves Propagating in Polyurethane, Shock Waves, Vol. 15, 437-445 (2006).
- [11] National Astronomical Observatory of Japan (ed.), Chronological Scientific Tables, Maruzen, Tokyo (2015). (in Japanese)
- [12] Tamba, T., Sugiyama, Y., Ohtani, K. and Wakabayashi, K., Experimental Investigation of Blast Wave Pressure Mitigation by Water Droplets Interaction, Sci. Tech. Energetic Materials, Vol. 81(1), 29-32 (2020).
- [13] Wijngaarden, L. Van, One-Dimensional Flow of Liquids Containing Small Gas Bubbles, Annu. Rev. Fluid Mech., Vol. 4, 369-396 (1972).
- [14] Iguchi, M., Takei, M. and Matsui, G., Basic Concepts of Heat and Fluids Engineering, Asakura (2008). (in Japanese)
-