

回折する衝撃波の挙動に関する研究*

(第2報, 溝付き開放端による衝撃波の減衰過程)

小原 哲郎^{*1}, 大八木 重治^{*1}
高藤 亮一^{*2}, 蔡 品^{*1}

A Study on Behavior of Diffracted Shock Wave (2nd Report, Process of Shock Wave Attenuation by Cavities inside Open End of a Tube)

Tetsuro OBARA^{*3}, Shigeharu OHYAGI,
Ryouichi TAKAFUJI and Pin CAI

^{*3} Department of Mechanical Engineering, Saitama University,
255 Shimo-Ohkubo, Saitama-shi, Saitama, 338-8570 Japan

Experiments are carried out to investigate behavior of shock wave diffraction from a safety-engineering point of view. Because, once the shock wave is released into an ambience, high pressure and negative pressure lasting for relatively long period have possibility to cause serious damages against human bodies as well as general buildings. Therefore, it should be one of the most significant subjects to attenuate the shock wave efficiently within a short distance from the source. In this report, a cavity is installed at an open end of a shock tube and flow-fields behind diffracted shock wave are visualized using schlieren photography. In addition, piezo-electric pressure transducer is flush mounted on the surface of reflector, which is installed at test section, and pressure histories are recorded with wide frequency response. Lastly, numerical simulation using the TVD finite difference scheme is performed to compare with the experimental results. As a result, (i) the pressure histories on the reflector coincides well between the numerical and experimental results, (ii) flow-fields behind the shock wave are clarified, (iii) maximum pressure behind reflected shock wave can be attenuated by installing several cavities inside the open end of the shock tube.

Key Words: Compressible Flow, Computational Fluid Dynamics, Shock Wave, Flow Visualization

1. 緒 言

可燃性気体の爆発による災害は社会的にも大きな影響を与えるが、これには衝撃波の発生と伝播が深く関与している。衝撃波が通過した際の過圧力の値に対する被害予測のデータ⁽¹⁾によれば、安全限界のしきい値となる過圧力 Δp は約 2.1 kPa であり、大気圧の 2% 程度の小さな値にすぎない。現実にも高压配管系の事故や可燃性気体の爆発によって発生した衝撃波により被害がもたらされている。さらに高速列車が長いトンネルに突入した際のトンネル出口付近でも弱い衝撃波に起因する爆発音が発生することから、この騒音を解消もしくは軽減することが望まれている⁽²⁾⁻⁽⁴⁾。このような観点から、衝撃波が開放端から回折してから短い距離内で衝撃波を減衰させる方法を確立することは、安全工学上の重要課題である⁽⁵⁾⁽⁶⁾。瀬戸口ら⁽⁷⁾や

中山ら⁽⁸⁾は、衝撃波管の開口端にヘリカルベーンを設置し、衝撃波の伝ばマッハ数が $M_s \leq 1.25$ の比較的小さい場合に衝撃波の減衰効果があることを明らかにしている。Inoue ら⁽⁹⁾は、 $M_s \leq 1.2$ の衝撃波が渦と干渉することにより衝撃波の収束現象を引き起こし、音を発生させるメカニズムを数値解析により明らかにしている。Timofeev ら⁽¹⁰⁾は、流路内に複数のバツフル板を設けた場合の数値シミュレーションを行い、 $M_s=2$ で伝ばする衝撃波の減衰過程について明らかにしている。これらの報告より、衝撃波が伝ばする流路内に凹凸を設け、凹部分で発生する膨張波を先行する衝撃波に追いつかせることにより、衝撃波を減衰させることができると考えられる。しかしながら、開放端の上流部分に取付ける凹凸の形状や数、および衝撃波を短い距離内で減衰させるための凹凸の最適寸法等については複雑であり十分明らかにされていない。

著者らは第1報⁽¹¹⁾で衝撃波の回折と反射現象に着目し、衝撃波が衝撃波管の開放端から回折する際の挙動について実験ならびに数値シミュレーション法を用いて調べた。また観測部に反射体を設け、反射体前面のよどみ点圧力の時間履歴について明らかにした。そ

* 原稿受付 2000年11月13日。

^{*1} 正員, 埼玉大学工学部(☎338-8570 さいたま市下大久保255)。

^{*2} (株)日立製作所(☎300-0013 土浦市神立町502)[元: 埼玉大学大学院]。

E-mail: tobara@mech.saitama-u.ac.jp

の結果、実験結果と数値シミュレーション結果は良好な一致を示すとともに、流れ場の時間的変化と圧力履歴の対応関係について明らかにした。したがって、ここで用いた方法により、開放端に凹凸がある場合の衝撃波の減衰メカニズムも明らかにすることができると考えられる。

本報では、衝撃波を開放端出口から短い距離で減衰させることに着目し、衝撃波管の開放端出口から上流部分に複数の凹凸を設け、凹凸形状が衝撃波の減衰に及ぼす影響について調べた。実験では、第1報⁽¹⁾と同様に衝撃波が開放端から放出される際の流れ場についてシュリーレン法を用いて可視化観察を行った。次に、実験では可視化観察することが困難な溝内部における流れ場に着目し数値シミュレーションを行った。また、反射体よどもみ点の時間履歴について計測し、開放端に設ける溝の個数と衝撃波の減衰過程について調べた。

2. 実験

2.1 実験装置および方法 実験には第1報⁽¹⁾で用いた無隔膜形衝撃波管⁽¹²⁾を用いた。衝撃波管の全長は約10 m、管の内径は50 mmである。衝撃波管装置の概略とその特性については第1報⁽¹⁾で述べてあるので、ここではその詳細を省略する。図1に衝撃波管の管端に取付けた開放端の概略を示す。開放端は真ちゅう製で内径は25 mmである。開放端の上流側(左側)の端は、角を鋭角にしたクッキーカクタ形状をしており、この部分で衝撃波面は $D=25$ mmに切り取られる。これは衝撃波背後に発達する境界層の影響をできるだけ取り除くためである。開放端の観測部側には、幅 $L=12.5$ mm、深さ $H=12.5$ mm($L/H=1$)の溝が内壁面に設けられている。この凹凸部分で衝撃波は、回折や反射等を繰返すことになり、減衰させることができるものと考えられる。なお、溝部は1個ずつが独立するように設計されており、この溝部を溝なしのものに取り替えることにより、溝の数 N_c を零か

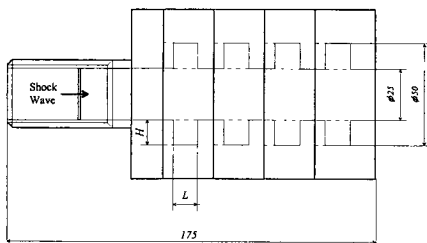


Fig. 1 Schematic diagram showing an open end of shock tube

ら4まで変えて実験を行った。観測部内には、第1報⁽¹⁾で用いたものと同様の反射体(外径50 mm)を開放端の中心軸と一致させて設置した。この反射体はアルミニウム製で、反射体の中心には圧電式圧力変換器(PCB社製、Model 113 A 24、応答時間1 μ s)を埋め込んである。これにより、回折した衝撃波が反射体と干渉した際のよどもみ点圧力を計測した。衝撃波の可視化にはキセノン放電管(菅原研究所製、NP-1 A、発光時間180 ns)を光源とするシュリーレン光学系を用いた。

2.2 実験条件 開放端から反射体までの距離を50 mmで一定とし、衝撃波の伝ばマッハ数 M_s を1.3, 1.6, 2.2の3条件を選定して実験を行った。それぞれのマッハ数について、開放端に設ける溝の個数を $N_c=1, 2, 4$ と変化させて実験を行った。駆動気体はマッハ数が低い条件($M_s=1.3$ および1.6)では窒素、マッハ数が高い条件($M_s=2.2$)ではヘリウムを用いた。試験気体は空気であり、実験は室温状態で行った。

3. 数値計算

開放端から放出される際の衝撃波の挙動を明らかにするため数値計算を行った。また、開放端上流の溝付近における衝撃波の反射・回折現象を可視化観察することは本実験では困難であるため、溝付近を伝ばする衝撃波の挙動についても数値シミュレーションを行った。基礎方程式を定式化するにあたり、流れ場に対して以下の仮定をおいた。

- (1) 流れ場は軸対称である。
- (2) 気体は比熱比一定の理想気体である。
- (3) 粘性、熱伝導、拡散の影響は無視できるほど小さい。

これらの仮定のもとに定式化される基礎方程式⁽¹³⁾を、Explicit Predictor-Corrector TVDスキーム⁽¹⁴⁾を用いて計算した。

計算領域の大きさは 200×100 mmである。計算格子は正方形で格子点数を 600×300 点の計180 000点とした。初期条件として開放端上流側にRankine-Hugoniotの関係式⁽¹³⁾から求められる不連続面をおいた。境界条件は壁面および中心軸に反射条件、その他は自由境界条件とした。また、開放端内部の溝付近における衝撃波の伝ば挙動を明らかにするため、計算領域を溝付近のみと小さくした数値計算も行った。この場合の計算領域は 40×30 mmであり、溝の数は $N_c=1$ である。計算格子は正方形で、格子点数は 400×300 点の計120 000点である。

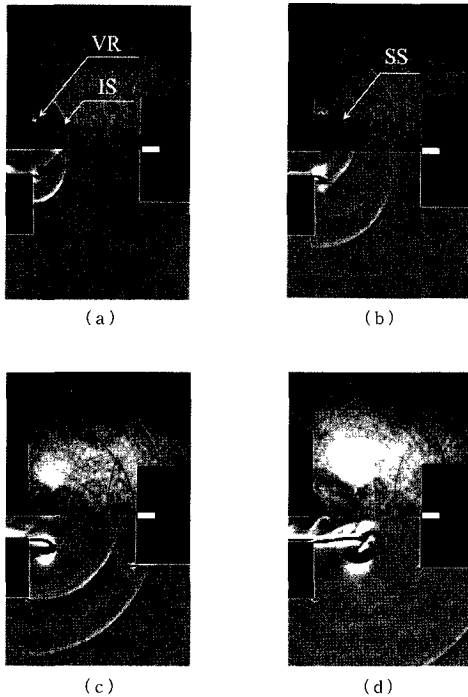


Fig. 2 Experimental and computational schlieren photographs, upper: experimental, lower: computational ($M_s=1.3$, $N_c=1$)

4. 結果および考察

まず、衝撃波の伝ばマッハ数を $M_s=1.3$ とし、開放端における溝の数を $N_c=1$ および $N_c=4$ にした場合の流れ場の相違について述べる。次に溝の数を $N_c=1$ で一定とし、衝撃波の伝ばマッハ数を $M_s=1.6$ および $M_s=2.2$ にした場合について述べる。最後に溝の数の違いが衝撃波の減衰過程に及ぼす影響について考察する。

4・1 マッハ数 $M_s=1.3$, $N_c=1$ の流れ場 図2に衝撃波の伝ばマッハ数が $M_s=1.3$ 、開放端に取付けた溝の数が $N_c=1$ の場合に得られた流れ場の様子を示す。図2の上部は実験で得られたシュリーレン写真であり、下部が数値計算結果をもとに画像処理して作成した数値シュリーレン像である。実験では、開放端上流の溝内部の領域について可視化することができないため、黒く撮影されている。衝撃波は写真左側の溝付き開放端より右方向に伝ばし、右側にある反射体と干渉の様子が観察できる。なお、反射体のよどみ点には実験において挿入した圧力変換器の位置が示されている。

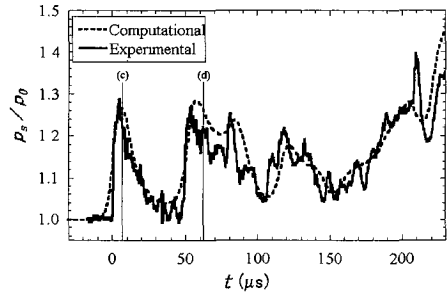


Fig. 3 Pressure histories measured at stagnation point of a cylindrical reflector ($M_s=1.3$, $N_c=1$)

図2(a)では、先頭衝撃波(IS)が開放端から回折し始めており、開放端の角から渦輪(VR)が形成され始めている。これは、衝撃波背後の高速気流が開放端から膨張する際、周囲の低速気体との間の速度差に起因して生じる。また、開放端角部で形成される膨張波が先行する衝撃波に追いついた点から衝撃波は回折を始めるため、中心軸付近の衝撃波面はまだ平面に近い。図2(b)では、開放端より放出される衝撃波の背後に、第2の衝撃波(SS、二次衝撃波と呼ぶ)が追従する様子が観察される。この二次衝撃波は第1報⁽¹⁾で明らかかなように開放端に溝を設けない場合には観察されないことから、溝部によって形成されたものである。なお、二次衝撃波が発生するメカニズムについては後述する。二次衝撃波は、先頭衝撃波の回折によって生成された渦輪と干渉しながら伝ばする。二次衝撃波が渦輪と干渉することにより、衝撃波は屈折し衝撃波面は球形にならず、中心部分が湾曲したような形状となり伝ばする。図2(c)および図2(d)では、先頭衝撃波、二次衝撃波と続いて反射体と干渉し、その反射衝撃波が開放端からの渦と干渉の様子がわかる。このように開放端から放出される際の衝撃波の形状や開放端出口で形成される渦輪の挙動など、数値計算によるシュリーレン画像は実験結果とよく一致する。

図3に反射体よどみ点で計測された圧力履歴を示す。図3の横軸は先頭衝撃波が反射体と干渉してからの経過時間 t 、縦軸は圧力 p_s を試験気体の初期圧 p_0 で無次元化した圧力を示す。図3中の(c)、(d)は、図2(c)および図2(d)の写真が撮影された時刻に対応する。実線は実験によって計測された圧力波形であり破線は数値計算結果である。数値計算で得られた圧力波形は実験結果と定量的にもよく一致する。回折した衝撃波が反射した際の過圧力 $\Delta p (= p_s - p_0)$ は初期圧力の約0.3倍である。第1報⁽¹⁾に示したように開放端に溝を設けない場合、回折した衝撃波が反射する

ことにより $\Delta p/p_0 \approx 0.5$ の圧力上昇が反射体に作用したのに対し、溝を1個設けることによって $\Delta p/p_0 \approx 0.3$ へと約40%低下することがわかる。これは、先頭衝撃波が溝部分で回折する際に発生する膨張波が先頭衝撃波に追いつき、先頭衝撃波の圧力を低下させるために生じる。二次衝撃波が反射体に干渉することに起因する圧力上昇が図3に示す $t=50 \mu\text{s}$ の後にとらえられている。二次衝撃波による最高圧力は先頭衝撃波が反射体と干渉した際の最高圧力とほぼ同程度であることがわかる。その後、管内からの弱い衝撃波を伴った複雑な流れが反射体と衝突してよどむため、圧力変動が生じる。開放端内部に溝を設けることにより、先頭衝撃波の圧力を低下させることができるが、追従する二次衝撃波が反射体と干渉するため圧力波形は大きく変動することが明らかにされた。これらの複雑な圧力変動をもたらす原因は、開放端に設けた溝内部における衝撃波の挙動に起因しており、次に溝内部における衝撃波の挙動にのみ着目した数値シミュレーションを行った。

4.2 二次衝撃波の発生機構 図4は、開放端上流における溝の数を $N_c=1$ とした場合の数値計算結果である。衝撃波の伝ばマッハ数は $M_s=1.3$ であり、上図は等密度線、下図は速度ベクトル線を示す。衝撃

波は図4の左から右方向へと伝ばし、(a)~(d)の順で時間が経過する。図4(a)では溝部分で回折した衝撃波が溝の底部で反射する様子がわかる。また、前述したのと同じ機構で溝角部から渦が形成され発達する様子が速度ベクトル線図からもわかる。溝部で回折した衝撃波は溝の底面および右側の壁面で反射するため、流れ場は極めて複雑な様相を呈する。図4(b)では、溝の底部で反射した衝撃波が、渦と干渉しながら中心軸へと伝ばする。さらに、図4(c)では溝の右側面で反射した衝撃波が渦を回折して伝ばする。図4(c)および図4(d)では、これら二つの衝撃波が中心軸上で互いに収束することで、局所的に高密度の領域を生じさせる様子がわかる。図2のシュリーレン写真で観察された二次衝撃波は、このような溝底部からの反射衝撃波が中心軸で収束するメカニズムにより形成されたと考えられる。すなわち、溝で回折した衝撃波が溝の底面および側面で反射して中心軸で収束することにより局所的高密度領域を形成させ、これが二次衝撃波を駆動すると考えられる。また、図3に示した先頭衝撃波と二次衝撃波の時間間隔 $\Delta t=50 \mu\text{s}$ は溝の深さ $H=12.5 \text{ mm}$ を衝撃波が往復する時間とほぼ一致する。なお、溝の深さ H が十分大きければ、溝の角部

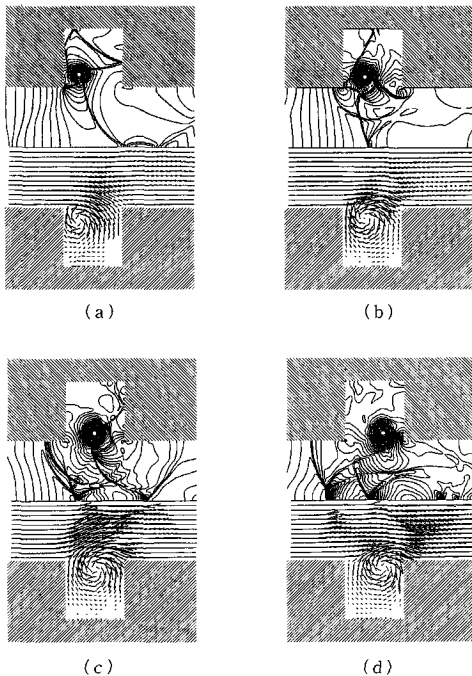


Fig. 4 Flow fields inside a cavity, upper: iso-density, lower: velocity vector ($M_s=1.3$, $N_c=1$)

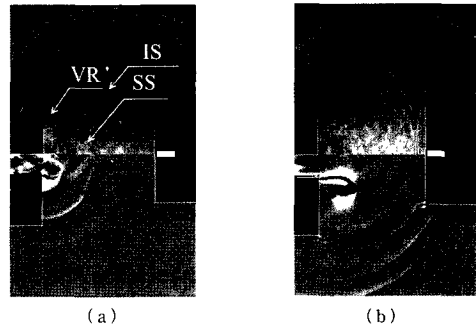


Fig. 5 Experimental and computation schlieren photographs ($M_s=1.3$, $N_c=4$)

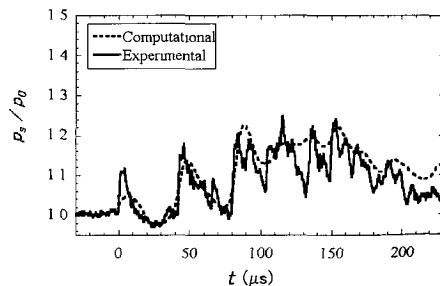


Fig. 6 Pressure histories ($M_s=1.3$, $N_c=4$)

で形成される渦を用いて二次衝撃波を減衰させる効果も考えられる。

4・3 マッハ数 $M_s=1.3$, $N_c=4$ の流れ場 図5に衝撃波の伝ばマッハ数が $M_s=1.3$ で、溝の数を $N_c=4$ とした場合の流れ場の様子を示す。また、図6には反射体よみ点で計測された圧力履歴を示す。溝の数を $N_c=4$ に増やすことにより、先頭衝撃波が反射した際の圧力上昇は、 $\Delta p/p_0 \approx 0.1$ となり先頭衝撃波の圧力については約80%低下させることができる。また、衝撃波による密度こう配も小さくなるためシュリーレン写真上でも衝撃波が不鮮明になる。図5(a)の上図に示した実験結果では明りょうではないが、下図の数値計算結果では、先頭衝撃波背後に第2、第3の衝撃波が追隨して伝ばするのが確認できる。これも前述したように、衝撃波が4個の溝部で次々と回折し反射することによって中心軸で複数の局所高密度領域が形成されることに起因する。先頭衝撃波背後の圧力波形上には第2以降の衝撃波の干渉による圧力上昇がとらえられている。先頭衝撃波背後の圧力は負圧となっているが、これは衝撃波が溝部で回折する際に発生する複数の膨張波が中心軸上で収束した反射体と干渉することによる。なお、数値計算では実験で得られた圧

力波形に見られる周波数成分の高い圧力変動は十分とらえられておらず、計算格子数が少ないことが原因と考えられる。また、先頭衝撃波の反射圧力についても差異が生じているが、全体的な傾向として実験結果と数値計算結果はよく一致する。

4・4 マッハ数 $M_s=1.6$, $N_c=1$ の流れ場 図7に衝撃波の伝ばマッハ数が $M_s=1.6$ 、溝の数を $N_c=1$ とした場合の流れ場の様子を示す。また、図8に反射体よみ点の圧力履歴を示す。

図7(a)では、溝によって反射した衝撃波が中心軸上で収束し反射している。反射した衝撃波は開放端出口の角部からの膨張波と干渉する様子がわかる。図7(b)では、開放端出口の角部から形成される膨張波の波尾(ET)がはっきりと確認できる。また、渦輪内部で二次衝撃波が生じているのが数値計算結果から明らかである。これは、渦の外側で流れが加速され、局所的に超音速となることによって生じる。また、先頭衝撃波が反射体で反射し、溝部で形成された二次衝撃波と干渉する様子がわかる。

図8で明らかなように回折した衝撃波が反射することによって最高圧力は $\Delta p/p_0 \approx 0.5$ となる。第1報⁽¹⁾で示したように溝がない場合の最高圧力 $\Delta p/p_0 \approx 1.1$

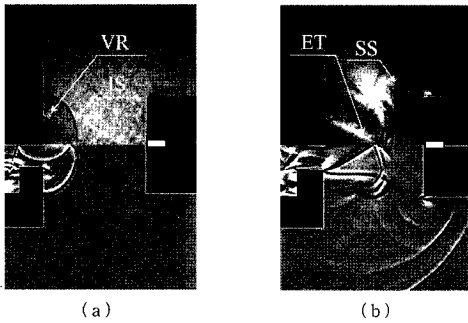


Fig. 7 Experimental and computational schlieren photographs ($M_s=1.6$, $N_c=1$)

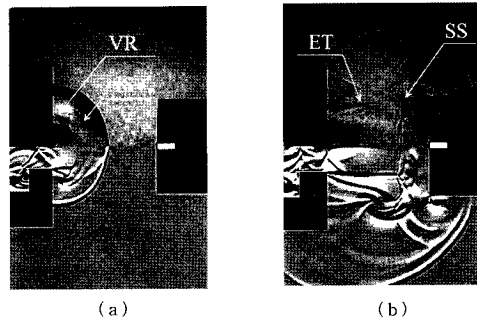


Fig. 9 Experimental and computational schlieren photographs ($M_s=2.2$, $N_c=1$)

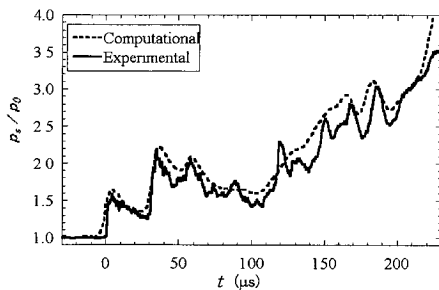


Fig. 8 Pressure histories ($M_s=1.6$, $N_c=1$)

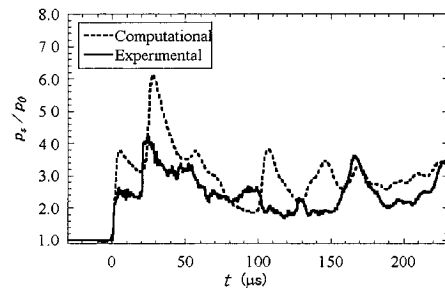


Fig. 10 Pressure histories ($M_s=2.2$, $N_c=1$)

と比べて約45%に低下する。しかしながら二次衝撃波が反射することによる圧力上昇は高く、 $\Delta p/p_0 \approx 1.1$ に達する。また、 $t \approx 100 \mu\text{s}$ 以降で圧力が上昇し続けるが、これは衝撃波が反射体と干渉した際の反射衝撃波と回折した衝撃波に追従する接触面とが干渉し、反射衝撃波が反射体前方で定在するためであり、反射体前方の流れ場がよどむために生じる。

4.5 マッハ数 $M_s=2.2$, $N_c=1$ の流れ場 図9に衝撃波の伝ばマッハ数が $M_s=2.2$ 、溝の数を $N_c=1$ とした場合の流れ場を示す。また、図10に反射体よどみ点の圧力履歴を示す。衝撃波の伝ばマッハ数が $M_s > 2.07$ の条件では、衝撃波背後の熱気流のマッハ数が $M_2 > 1$ となり超音速となる。したがって、衝撃波背後のじょう乱は衝撃波管の上流へと伝ばすることができない条件である。図9で明らかなように溝部で反射して形成された二次衝撃波は、しだいに先頭衝撃波に追いつく様子が観察できる。図10に示す圧力波形においても、先頭衝撃波が反射体と干渉してから $\Delta t \approx 20 \mu\text{s}$ で二次衝撃波が到達し、その時間間隔が $M_s=1.3$ の場合に比べて短い。これは、先頭衝撃波背後の熱気流の温度が高いため音速が高く、二次衝撃波の伝ば速度が先頭衝撃波の伝ば速度を超えるためであ

る。なお、実験結果と数値計算結果で圧力波形上に差が生じているが、これは数値計算においては粘性の影響を考慮しておらず、凹凸内部の流れに差異があるためと考えられる。

4.6 衝撃波の減衰効果 図11に衝撃波の伝ばマッハ数と衝撃波背後の無次元過圧力との関係を示し、開放端における溝の数 N_c による衝撃波の減衰効果を示す。図11の横軸は衝撃波の伝ばマッハ数 M_s 、縦軸は先頭衝撃波が反射体表面で反射した際の最高圧力 p_s の無次元過圧力である。○印は開放端に溝を設けない場合 ($N_c=0$)を示す。図11より開放端に溝を設けることによって $1.3 \leq M_s \leq 2.2$ で伝ばする衝撃波に対して減衰効果があることが明らかである。特に M_s が大きい場合、反射衝撃波背後の圧力を低下させる効果が大きい。また、開放端に設ける溝の数が多いほど衝撃波を減衰させる効果も大きいことが明らかである。先頭衝撃波の伝ばマッハ数が $M_s \leq 1.5$ の条件では、開放端に設ける溝の個数を増やすことによって先頭衝撃波背後の圧力を低下させることができる。しかしながら、 $M_s \geq 1.6$ の条件では、溝の個数を $N_c=4$ に増やしても衝撃波を減衰させることができない。これは、前述したように M_s が大きい条件では先頭衝撃波背後の熱気流が超音速となり、溝部で形成された二次衝撃波がしだいに先頭衝撃波に追いつくためと考えられる。したがって、マッハ数が高い衝撃波を減衰させるためには溝部の深さ H を十分大きくとることが重要と考えられる。一方、先頭衝撃波に追従する二次衝撃波による無次元過圧力とマッハ数の関係を図12に示す。図12の横軸は衝撃波の伝ばマッハ数 M_s であり、縦軸は二次衝撃波が反射体と干渉した際の過圧力 $p_{s,2}$ の無次元圧力を示す。図11と同様に溝の個数 N_c を変化させた場合について示してある。図12より、 $N_c=1$ および $N_c=2$ の場合の二次衝撃波による圧力上昇は、開放端に溝を設けない場合の先頭衝撃波の過圧力とほぼ同程度であることが明らかである。しかしながら、溝の個数を $N_c=4$ まで増やした場合には、二次衝撃波による過圧力も小さい。したがって、先頭衝撃波および二次衝撃波の過圧力を減衰させるには、溝の個数を増やすことが有効と考えられた。

5. 結 言

開放端から回折する衝撃波を短い距離内で減衰させることを目的とし、開放端に複数の凹凸を設けて実験ならびに数値シミュレーションを行った。得られた知見を以下に要約する。

- (1) 衝撃波管の開放端付近に凹凸を設けることに

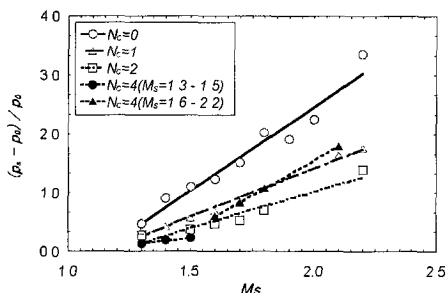


Fig. 11 Relationship between non-dimensional overpressure $(p_s - p_0)/p_0$ and Mach number M_s

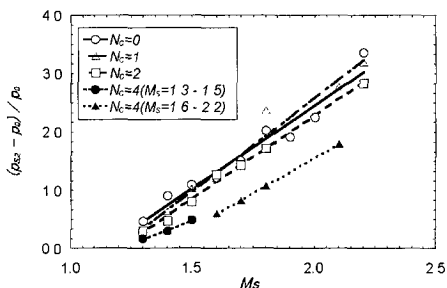


Fig. 12 Relationship between non-dimensional overpressure of secondary shock wave $(p_{s,2} - p_0)/p_0$ and Mach number M_s

より、先頭衝撃波の圧力を大幅に低下させることができる。

(2) 溝部で回折した衝撃波が溝の底部および側面で反射することにより、二次衝撃波を生成する。また、衝撃波の伝ばマッハ数が高い場合、二次衝撃波が反射体と干渉することによって大きな圧力上昇をもたらす。二次衝撃波による第2の圧力上昇を減衰させるには、溝の個数を増やすことが有効と考えられた。

(3) 衝撃波の伝ばマッハ数が比較的小さく衝撃波が弱い場合、開放端に設ける溝の数を増やすことにより、衝撃波背後の圧力を小さくすることができる。一方、伝ばマッハ数が高い条件では、二次衝撃波がしだいに先頭衝撃波に追いつくため、溝の数を増やしても衝撃波の減衰効果は上がらない。

(4) 数値計算で得られた流れ場は定性的に実験結果を説明できた。

本研究を行うにあたり、科学研究費〔奨励研究(A), 11750129〕および日本証券奨学財団研究調査助成金(1017号)を受けた。また、本実験を行うに当たり本学学生 高橋貴幸君および本学 吉橋照夫技術官の協力を得た。ここに付記し謝意を表する。

文 献

- (1) 高山和喜編, 衝撃波ハンドブック, (1995), 727-734, シュプリンガー・フェアラーク東京.
- (2) 松尾一泰, 圧縮性流体力学—内部流れの理論と解析—, (1994), 226-229, 理工学社.
- (3) 佐宗章弘・ほか2名, 高速列車トンネル突入による圧縮波の衝撃波への遷移, 機論, 63-616, B(1997), 3944-3951.
- (4) 仲尾晋一郎・ほか4名, バラスト内流れを考慮した高速鉄道トンネルを伝ばする圧縮波の特性, 平成10年度衝撃波シンポジウム講演論文集, (1999), 669-672.
- (5) Obara, T., ほか3名, Study of Shock Wave Diffraction from an Open End of the Tube, *Proc. 21st Int. Symp. Space Tech. Sci.*, (1998), 927-932.
- (6) 高藤亮一・ほか3名, 溝の付いた管内で減衰した衝撃波に関する研究, 平成10年度衝撃波シンポジウム講演論文集, (1999), 305-308.
- (7) 瀬戸口俊明・ほか4名, 衝撃波の管開口端からの放出に起因する衝撃騒音の低減法に関する研究, 平成10年度衝撃波シンポジウム講演論文集, (1999), 601-604.
- (8) 中山博愛・ほか3名, 管開口端から放出されたパルス波のパッシブコントロール (ヘリカルベーン付きボックスによる強さの低減), 機論, 66-646, B(2000), 1387-1391.
- (9) Inoue, O. and Hattori, Y., Sound Generation by Shock-Vortex Interactions, *J. Fluid Mech.*, 380(1999), 81-116.
- (10) Timofeev, E. V. and Takayama, K., Shock Wave Propagation through Plane Channels Equipped with Different Baffle Systems, 平成10年度衝撃波シンポジウム講演論文集, (1999), 441-445.
- (11) 高藤亮一・ほか4名, 回折する衝撃波の挙動に関する研究 (第1報, 衝撃波の回折と反射過程) 機論, 65-639, B(1999), 3602-3607.
- (12) 大野達也・ほか4名, 無隔膜駆動部を用いた極超音速衝撃風洞の実験と解析 (圧力特性と $x-t$ 線図), 千葉大学工学部研究報告, 47-1(1995), 7-16.
- (13) Anderson, J. D., Jr., *Modern Compressible Flow with Historical Perspective*, (1990), 186-205, McGraw-Hill, Inc.
- (14) Yee, H. C., Upwind and Symmetric Shock-Capturing Schemes, *NASA Tech. Memo.* 89464(1987).