ビームラインにおける衝撃波の減衰に及ぼすバッフル板形状の影響*

滝谷 俊夫^{*1}, 東野 文男^{*2}, 寺田 幸博^{*1}
小村 明夫^{*3}, 杉山 弘^{*4}, 安藤 正海^{*4}Influence of Baffle Plate Geometry on Decay of Shock Waves
Propagating in a BeamlineToshio TAKIYA, Fumio HIGASHINO, Yukihiro TERADA,
Akio KOMURA, Hiroshi SUGIYAMA and Masami ANDO

Dependency of geometries of baffle plates in a shock tube on the decay of shock waves was investigated to find an optimal design for acoustic delay lines(ADLs) in beamlines of a synchrotron radiation facility. Fabricating a thin orifice, a coned baffle plate, a diverging tube and a converging tube as a model of the ADL, we performed pressure measurement with piezo-pressure transducers by using a dedicated shock tube and two-dimensional flow visualization around the model by means of Schlieren photography. According to the results of pressure measurements, a theory of one-dimensional steady flow employed generally is not available for the coned baffle. The decay ratios defined by the strength of incident and transmitted shock waves clearly differ among the four types of the ADL models, although all of the models have the same aperture. These results suggest that non-steady phenomena observed by the Schlieren photography, such as shock wave reflection and diffraction, viscous flow behind shock waves, may be involved in shock wave decay through baffle plates.

Key Words: Compressible Flow, Orifice, Schlieren Method, Shock Tube, Shock Wave

1. はじめに

シンクロトロン放射光施設におけるビームラインの真空事故において, ビームライン中を衝撃波が伝播して放射光リングの真空を破壊する危険がある. このため, ビームラインには非常用速断弁, 衝撃波遅延管, 圧力センサ及びインターロック系統から成る真空保護装置が装備されている. 衝撃波遅延管は流入する気体の速度を減衰させるための装置であるが, 近年, ビームラインの長尺化とともにその設置自体が見直されるようになってきた. これまでに衝撃波遅延管の性能に関してはいくつかの研究が実施されており^{(1)~(3)}, その設計法も確立されている. ところが, 従来の研究ではソフトリーク時における気体の流れを拡散方程式あるいは分子流のダイレクトシミュレーションで扱える範囲に限定した議論が中心であった. 長尺化したビームラインにあっては, ソフトリーク時の気体の拡散速度よりもむしろ文字どおりの衝撃波の伝播速度が問題となる

が, このような連続流体力学的観点からの報告は見あたらない. 長尺ビームラインにおける衝撃波遅延管の簡略化あるいは省略にあたって, ビームラインの他の内装機器の持つ衝撃波減衰の機能を利用することが可能なため, これらの機能を連続流体力学の立場から調べておくことが重要である.

本研究では, ビームライン内装機器のモデルを衝撃波管に挿入し, 衝撃波のマッハ数及び圧力測定ならびに補助的手段としてのシュリーレン光学写真によって各モデルに対する衝撃波減衰への影響を比較検討することを目的とする.

2. 衝撃波の減衰に関する実験

2・1 実験装置 代表的な内装機器のモデルとして, 衝撃波遅延管で従来使われている円錐状バッフル板, 放射光のアブソーバとして使われる拡大管及び鋭いエッジを有するオリフィスを選定し, 図1に示すような対応する3種類の円筒状供試体を製作した.

圧力減衰率の測定に使用した衝撃波管を図2に示す. これは別報⁽⁴⁾において示した吸込み式衝撃波管の途中に供試体を挿入したものである. この衝撃波管は内径68.8mm, 長さ3mの助走部と長さ1mの試験部をフラン

* 原稿受付 1997年10月13日.

^{*1} 正員, 日立造船(株) (☎551-0022 大阪市大正区船町2-2-11).^{*2} 正員, 東京農工大学 (☎184-0012 小金井市中町2-24-16).^{*3} 日立造船(株).^{*4} 高エネルギー加速器研究機構 (☎305-0801 つくば市大穂1-1).

Fig. 1 Geometries of test pieces

ジで結合したものであり、供試体は上流から2番目と3番目のセクション間に挿入した。各セクションの中央には圧力センサを埋め込み、破膜はコイルばねの力で自己復帰する撃針によって行なった。

2・2 衝撃波マッハ数の測定 供試体の形状による衝撃波の減衰効果を定量的に評価するために、供試体を通する前後の衝撃波マッハ数を以下のように測定した。衝撃波の通過時刻は、圧力センサによって急激な圧力上昇として捉えられる。これより、供試体前後のそれぞれ2個の圧力センサ間を伝播する衝撃波の通過時間差がわかり、衝撃波の速度が求まる。衝撃波マッハ数は、実験室の気温に基づく衝撃波前方の音速から算出した。

入射マッハ数に対する通過マッハ数を図3に示す。図において、プロット点は各供試体に対する実験値を、実線は衝撃波管オリフィスモデルを用いた理論値⁽⁵⁾を表わしている。モデルにおけるオリフィスの非圧縮流れに対する縮流係数 C_{ci} の値は0.5から0.9の範囲で0.1刻みとした。計算は流れが縮流部で閉そくする場合の入射マッハ数についてのみ行なった。このモデルより得られる通過マッハ数に対して、 C_{ci} の値の影響は C_{ci} が大きいほど小さくなることが図よりわかる。オリフィスに対する実験値は理論計算値とその傾向が良く対応しており、 $C_{ci}=0.7$ から0.9の理論計算値とおおよそ一致している。拡大管の場合、通過マッハ数はオリフィスの場合よりもやや小さめに現われ、理論計算の $C_{ci}=0.6$ の場合にはほぼ対応している。一方、円錐状バッフル板の場合、入

Fig. 3 Transmitted Mach number after passing through test piece

射マッハ数が比較的小さい条件ではその通過マッハ数はオリフィスの場合よりも小さいが、入射マッハ数が2.0付近では逆にオリフィスよりも大きい。

衝撃波管オリフィスモデルでは定常流れが仮定されており、衝撃波の入射マッハ数及びオリフィスの開口比が同じ場合、衝撃波の減衰の程度は非圧縮流れの縮流係数のみによって決定される。非圧縮流れの縮流係数はポテンシャル理論より、バッフル板の各形状に対して一意的に求められる。したがって、衝撃波管オリフィスモデルを用いれば非圧縮流れの縮流係数を通じてバッフル板の形状の効果がわかるはずである。ところが、円錐状バッフル板に対する実験結果は、その傾向が理論計算値と異なっており、その相違は非圧縮流れの縮流係数の違いによって単純に説明できるものではない。したがって、入射マッハ数に対する衝撃波減衰の傾向をさらに詳しく調べる必要がある。

Fig. 2 Schematic drawing of experimental apparatus

Fig. 4 Pressure rises resulted from shock wave propagation

Fig. 5 Pressure decay ratio for various test pieces

2・3 圧力減衰率の測定 供試体の形状による衝撃波の減衰効果を衝撃波の圧力に基づいてさらに詳細に調べるために、衝撃波管による圧力減衰率の測定実験を行なった。圧力減衰率 ξ は減衰の効果を評価す

る指標であり、式(1)によって定義した。

$$\xi = \frac{P_2 - P_2'}{P_2 - P_1} \quad (1)$$

ここで、 P_2 は供試体への入射衝撃波圧力、 P_2' は供試体通過後の衝撃波圧力及び P_1 は管内初期圧力である。なお、 P_2 は図2における圧力センサ S_1 及び S_2 の測定値を、 P_2' は圧力センサ S_3 及び S_4 の測定値をそれぞれ平均した数値である。

供試体がオリフィスの場合、衝撃波の通過による圧力上昇量を入射マッハ数に対して図4に示す。縦軸は圧力上昇量 $P_2 - P_1$ 及び $P_2' - P_1$ をそれぞれ対数軸で示してある。オリフィス前後の衝撃波の圧力は、入射マッハ数の増加とともに直線的に減少していくことが図よりわかる。図には、回帰直線とともに、95%の信頼限界曲線も描いた。回帰直線の傾きは、二本の直線については等しい。

図4に示した信頼限界の幅を測定の誤差 $\pm \delta P_2$ 及び $\pm \delta P_2'$ と見積り、圧力減衰率の誤差 $\delta \xi$ を式(2)によって評価する。

$$\begin{aligned} \delta \xi &= \left| \frac{\partial \xi}{\partial P_2} \right| \delta P_2 + \left| \frac{\partial \xi}{\partial P_2'} \right| \delta P_2' \\ &= \frac{P_2' - P_1}{(P_2 - P_1)^2} \delta P_2 + \frac{1}{P_2 - P_1} \delta P_2' \quad (2) \end{aligned}$$

図4の回帰直線より ξ を算出し、 $\pm \delta \xi$ の幅を加えた図を図5(a)に示す。実線の圧力減衰率は入射マッハ数の増加に伴ってやや減少するが、0.81から0.82の間に留まっている。同様にして求めた円錐状バッフル板に対する圧力減衰率の測定結果を図5(b)に示す。圧力減衰率の実線は実験範囲でおおよそ0.86から0.78程度まで、入射マッハ数の増加とともに減少する傾向を示す。図5(c)に示した拡大管に対する圧力減衰率は、円錐状バッフル板の場合よりも急勾配で入射マッハ数の増加とともに低下する。次に、比較のために拡大管を逆向きに装着して縮小管とした場合の圧力減衰率を図5(d)に示す。縮小管の場合は圧力減衰率の値が最も小さく、回帰直線から得られた値は0.70から0.78の間である。また、圧力減衰率の値は入射マッハ数の増加とともに上昇しており、拡大管及び円錐状バッフル板とは逆の傾向を示している。このことは、圧力減衰率の値は供試体の開口径だけでは決まらず、供試体の形状に応じて生ずる衝撃波の反射・回折、衝撃波背後の渦などの非定常現象が大きく影響することを示唆している。

3. 衝撃波の非定常現象

3・1 衝撃波の可視化装置 供試体を通過する衝撃波の非定常現象を確認するために、以下に示す衝

衝撃波の可視化実験を行った。衝撃波の可視化に使用した装置は一般に用いられる衝撃風洞である。本実験における衝撃風洞は、内径70mm、長さ1mの鋼製円管の高圧部、幅56mm、高さ46mm、長さ2mの鋼製矩形管の低圧部、低圧部管端に装着された幅40mm、高さ260mm、長さ600mmの矩形断面を有するテストセクション及び直径380mm、長さ500mmのダンプタンクから構成される。高圧部にはコンプレッサー用ポート、低圧部には真空ポンプ用ポートが取り付けられている。テストセクションの入口より100mm上流の低圧管内には写真撮影のトリガ信号に用いる圧力センサを埋め込んだ。光源にはキセノンフラッシュランプを用いた。圧力センサが衝撃波を感知すると、光源にトリガ信号が送られ、ランプが発光する。写真撮影のタイミングは遅延回路によって任意に設定できるようにした。

衝撃波の可視化実験に用いた供試体はオリフィス型、円錐状バッフル型及び拡大管型の3種類である。いずれも二次元の供試体であり、その流路高さは40mm、開口部の間隙は8mmである。

3・2 光学観察 衝撃波の減衰を表わすシュリーレン写真を図6(a)～(c)に示す。衝撃風洞の初期条件は、いずれの場合も高圧部が1気圧、低圧部が0.25気圧である。各写真にはトリガ信号による光学観測の開始時刻からの経過時間を示してある。図6(a)はオリ

フィスを通過する衝撃波の挙動を表わす写真であり、半円状に広がった衝撃波が上下壁面で反射している様子がわかる。壁面における衝撃波の反射角度は時間の経過とともに直角に近づき、最初に通過した衝撃波の形状は平面に戻っていく。オリフィスのエッジからは渦が発生し、次第にきのこ状に発達する。オリフィス上流では、オリフィス板からの反射衝撃波とエッジで回折した衝撃波が干渉している。図6(b)は拡大管に侵入する衝撃波の挙動を表わす写真である。拡大管の入口で反射衝撃波と回折衝撃波が干渉の様子は図6(a)と同様であるが、拡大管内を通過する衝撃波は反射衝撃波を伴わず壁面とほぼ直角に一定曲率を維持しながら進行する。これに対して、図6(c)の円錐状バッフル板を通過する衝撃波は、拡大部においても平面衝撃波の形状を保ちながら伝播する。しかし、壁面近傍では衝撃波の分枝が観察され、いわゆるλ形衝撃波となっている。このλ形の部分は衝撃波の伝播とともに発達していく。一方、円錐状バッフル板の外側に侵入した衝撃波はバッフル外壁面と干渉してマッハ反射の形態を示している。バッフル外側は閉塞しているため、反射衝撃波は入口の回折衝撃波と干渉して、さらに複雑な様相を呈している。このように、3種類の供試体に対して、衝撃波が通過する際のその伝播形態はそれぞれ異なることがわかる。ビームラインの真空保護

Fig. 6 Schlieren photographs of shock wave transition

システムの設計において、衝撃波の微妙な伝播速度の違いを問題にする場合は、以上述べたようなバッフル板形状の衝撃波減衰効果への影響を考慮する必要がある。

4. 結 言

放射光ビームラインにおける衝撃波の減衰機構を比較するために、製作した3種類の供試体を衝撃波管に挿入して衝撃波の圧力測定及び可視化による衝撃波の減衰を評価した。その結果を要約すると以下のとおりとなる。

- (1) 衝撃波マッハ数の測定実験によると、円錐状バッフル板については、厳密には衝撃波管オリフィスモデルを適用できない。
- (2) 圧力減衰率の測定を実施し、衝撃波の減衰を定量的に調べた。薄いオリフィスでは、入射マッハ数の影響は小さい。拡大管及び円錐状バッフル板の場合、入射マッハ数が大きいほど圧力減衰率は小さくなる。
- (3) 縮小管に対する圧力減衰率は入射マッハ数の増加とともに高くなる。この傾向は拡大管及び円錐状バッフル板の場合と逆の傾向であり、衝撃波の減衰に対し

て供試体近傍を伝播する衝撃波の非定常現象が関わっていることを示している。

- (4) 供試体を通過する衝撃波の伝播形態をシュリーレン写真によって観測し、供試体の形状による衝撃波の伝播形態を定性的に調べた。同一の拡大率をもつ拡大管と円錐状バッフル板の間でも衝撃波の伝播形態は異なり、衝撃波の減衰に対して衝撃波背後の流れの影響が重要であることを確認した。

文 献

- (1) Jean, R. and Rauss, J., Protection against reentry of air into vacuum installations, *Le Vide*, **19**-111 (1964), 123.
- (2) Okano, T. and Tominaga, G., An analysis of the transient responses of acoustic delay lines, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **20**-9 (1981), 1729.
- (3) Suetsugu, Y., Application of the Monte Carlo method to pressure calculation, *J. Vac. Sci. Technol.*, **A14**-1 (1996), 245.
- (4) 滝谷・東野・阿部・寺田・小村・安藤, 低圧管内における微小圧力波の減衰, *機論*, **62**-596, B (1996), 1337.
- (5) 伊東・鳥住・北村・板谷, 管オリフィスの定常高速流動特性の衝撃波管アナログによる解析, *機論*, **46**-412, B (1980), 2296.