1106 SPH による Shaped Charge の 3 次元シミュレーション

Three Dimensional Simulation of Shaped Charges by Using SPH Solver

○三好 仁 (中国化薬) 正 廣江 哲幸 (熊本大学)

Hitoshi MIYOSHI, Chugoku Kayaku Co., Ltd., 4-5-14 Nihonbashi-honcho, Chuo-ku, Tokyo
Tetsuyuki HIROE, Kumamoto University

Key Words : Jet Formation, Gurney Energy, Collapse Velocity, SPH Solver

1. はじめに

Shaped charges(成形爆薬)は構造物の解体や宇宙ロケットの分離・指令破壊等に使用されている。また、産油国では油井管の側面穿孔にも使用されている。最近では人道支援活動の一環としてアフガニスタン等に放置された地雷の爆発処理用機材としても注目されている。

Shaped charges の侵徹性能評価には、標的鋼板を使った実際の試験とコンピュータを活用した各種のシミュレーションが実施されている。実際の試験ではフラッシュ X 線によるジェットの撮影や鋼板の間に挿入した箔的を用いて侵徹速度を計測し、その性能を確認している。しかし、フラッシュ X 線の画像は単発のショットであり、連続的な動きを確認するには情報不足である。得られる画像は 2 次元であり、ジェットの形態を 3 次元的に捉えることはできない。

シミュレーションによる基本性能評価の目的で、様々なコンピュータコードが提案されている。筆者らは商用コードとして入手が容易であり、Shaped charges の適用事例が多く報告されている AUTODYN を使用してきた。

AUTODYN における Shaped charge ジェットの計算は、(1) 2 次元軸対称モデルでライナを Shell Solver でモデル化して Jet Option を使う方法と、(2) 2 次元軸対称モデルでライナを Euler Solver でモデル化し、生成されたジェットの質量、速度勾配等の 2 次元データを 3 次元 Lagrange 空間に Remap する方法がある。

これらの方法は 2 次元軸対称モデルを用いて計算をするので、理想的なジェット生成が前提になっている。従って、実際の Shaped charges の開発段階で発生する問題点、特に標的への侵徹量不足等の解析には、有効なツールとして活用できない。従って、ジェットの挙動を総合的に把握するためには、3 次元情報を得る必要があると考える。

Shaped charges のジェット生成のような超高速現象を画像として捉える方法として Image Converter Camera を活用する方法が有効になってきた。Baum¹⁾らは、Shaped charges のライナ崩壊過程を 2.5 μ s 毎のイメコン画像として捉えている。ライナの崩壊現象が 3 次元的に得られると、Shaped charges の性能を視覚的に把握できることになり、非常に魅力的な手段である。

Fig. 1 にイメコン画像を示すが、やや奇妙ではあるが、非常に簡潔な形状だと感じている。

Shaped charges のジェット生成過程を 3 次元的にシミュレートする方法はこれまで数多く提案されてきた。

その中で SPH(Smoothed Particle Hydrodynamics) 法は、従来の Mesh 依存のモ

Fig. 1 IMECON image at 19.3 μ s after initiation¹⁾

デル化手法と異なり、モデル形状とそれが変形する過程を実際に近い形でシミュレートできるものである^{2,4)}。

本報では、AUTODYN-3D で SPH Solver による Shaped charges の 3 次元シミュレーションを行い、興味ある結果が得られたので、その概要を報告する。

2. Shaped charges のモデル化

Fig. 2 に示す Standard shaped charge を計算対象として選定した。これは Shaped charges のジェット生成を数学的に解析した PER 理論⁵⁾を基に構築された BASC コード⁶⁾による数値解析が行われており、それらの結果が利用できる点を選定の根拠とした⁷⁾。

Fig.2 Standard shaped charge

3. 計算条件設定

計算に使用したのは AUTODYN Version5.0.02 で、使用したコンピュータの主要スペックは CPU Pentium (R) 4, 3.40 GHz, 2.00 GB RAM である。

モデル化について当初は計算対象の Shaped charges そのままに、爆薬、ライナ、ケース、信管をそれぞれ設定したが、膨大な計算時間が必要になることが判明したので、モデルの簡略化を図った。

材料は AUTODYN に標準装備されている Material Library にあるものを使用したが、状態方程式、構成則等を Table 1 に示す。

Table 1 Material, EOS and Strength model for each part

Parts	Material	EOS	Strength Model
Liner	Oxygen-free high conductivity copper	Shock	Steinberg-Guinan
Explosive	Comp B	JWL	None

計算モデルを Fig. 3 に示すが、ライナについては、SPH solver を用いてモデル化した。最初に Lagrange solver を使って形状を作成し、SPH solver に Import する方法を取った。SPH の Particle size (平滑化長さ: Smoothing length)は ϕ 1.0 mm で、粒子数は 23,448 個である。計算結果は動画の mpg file で得られるが、ここではスナップショットを Fig. 4 に示す。時間は左上から順に 6.5, 8.5, 10.5, 12.5, 14.5 および 16.5 μ s の画像である。

Fig. 3 Calculation model

Fig. 4 Snapshots of calculation results

動画を詳細に観察すると、爆轟によりライナが崩壊しているが、崩壊速度は1,000~2,000 m/sであることが確認できる。さらに、上段中の8.5 μ sで先端速度約8,000 m/sのジェットが発生しているのが観察され、順次ジェットが伸びていくのが確認できる。

4. 考察

爆薬に接触した金属が、爆轟によって破片となって飛翔する速度はGurneyの式を使用して算出できる。Karppら⁸⁾は、1020 Steel円筒にComp Bを填装した場合の計算値と実測値を報告している。Comp Bの $(2E)^{1/2}$ を2.68とすると、

Fig. 5 Comparison between BASC and AUTODYN

Gurney velocityの計算値および実測値の最大値が2,100 m/sであることを示している。

今回の計算でも既に述べたように、ライナの崩壊速度は

最大で約2,000 m/sであることが観察されており、Gurneyの式との整合性が確認できた。

ジェットの速度を評価するグラフとしては、ライナの位置とジェットの速度の関係を表すものが多用される。BASCコードでの予測グラフ⁷⁾に今回AUTODYNで計算した点をプロットしたものをFig. 5に示す。ジェットの最高速度はよく一致しているが、ライナ中央部エレメントの速度がやや遅くなっている。

ライナの崩壊速度が約2,000 m/sであること、さらにFig. 4に示したように、ライナが崩壊した後に約8,000 m/sの速度粒子が生成し、前方に伸びていることが観察されている。

これはジェット生成のPER理論と合致するものであり、今回の計算でShaped chargesにより生成されたジェットがシミュレートされたものであることは確実であると判断できる。ただ、ジェット先端を表すSPH粒子がばらばらになっているように見えるが、今回はSPHの粒子径を $\phi 1.0$ mmとしており、粒子数が少なかったためFig. 1に見られるような先端の球状の形が形成できなかったものと判断する。

SPH粒子数を増やすことで、ライナ中央部のエレメント速度の増加、およびジェット先端形状を忠実に表現することができると考えている。

今回の計算は、Shaped chargesの3次元Simulationの可能性を探るものであった。ジェット生成が確認できたことから、計算手法を改善してジェットが標的を侵徹するところまで計算が可能になれば、この計算手法がShaped chargesのジェットの性能評価に活用できるものと考えている。

5. 今後の展開

今回は、Shaped chargesについてのみのSimulationであったが、従来2次元でのSimulationが主体であったEFP (Explosively formed projectile)についても、SPH Solverの適用が考えられる。

参考文献

- 1) D. W. Baum, L. L. Shaw, S. C. Simonson and K. A. Winer, "Liner Collapse and Early Jet Formation in a Shaped Charge," Proceedings of 14th International Symposium on Ballistics, Quebec, Canada, September 26-29, 1993
- 2) 田中 克己, SPH法による成形爆薬からのジェット生成機構の数値解析, 秋季研究発表講演会講演要旨集, pp. 59-60 (2004), 火薬学会
- 3) 田中 克己, SPH法による爆発・衝撃におけるクレータ形成機構の解析, 平成16年度衝撃波シンポジウム講演論文集, pp 185-186 (2005), 衝撃波研究会
- 4) H. Miyoshi, H. Ohba, H. Kitamura, T. Inoue and T. Hiroe, "Improvement on penetration performance of linear shaped charges: Evaluation by 2D and 3D simulation," Science and Technology of Energetic Materials, 2005 (in print)
- 5) E. M. Pugh, R. J. Eichelberger and N. Rostoker, "Theory of Jet Formation by Charges with Lined Conical Cavities," Journal of Applied Physics, **23**(1952), pp. 532-536
- 6) J. T. Harrison, "Improved Analytical Shaped Charge Code: BASC," BRL Technical Report No. ARBRL-TR-02300, March, 1981
- 7) W. P. Walter and J. A. Zukas, "Fundamentals of Shaped Charges," John Wiley & Sons, 1989, pp. 91-96
- 8) R. R. Karpp and W. W. Predebon, "Calculation of Fragment Velocities from Fragmenting Munitions," BRL Memorandum Report No. 2509, July 1975