成型爆薬による速度 7 km/sec 級高速射出試験装置の開発^{*1}

Development of a Conical Shaped Charge System

Aiming at an Impact Velocity of 7 km/sec

永 尾 陽 典^{*2}・木 部 勢 至 朗^{*2}・清 水 隆 之^{*3}・引 地 誠^{*4}

Yosuke NAGAO, Seishiro KIBE, Takayuki SHIMIZU and Makoto HIKIJI

Key Words; Space Debris, Conical Shaped Charge System, Hyper Velocity Impact

Abstract: A Conical Shaped Charge System (CSC) is most suitable for an experimental device realizing a piece of typical debris of one gram mass and 10km/sec velocity in a low earth orbit. However, space debris is solid although the projectile discharged by a CSC is a solid-solution. Moreover, it is known that the damage situations generated by the collision with a solid and the solid-solution projectile are different. However, the difference cannot be clarified quantitatively. On the other hand, a solid one gram mass and 7 km/sec. projectile can be launched by the two staged light gas gun as the maximum performance. Then, the authors have been developing CSC which can discharge projectile of one gram mass and 7 km/sec. for the purpose of performing this comparison. This paper describes the design and development process of this CSC which can discharge a projectile with required mass and velocity successfully.

1. 緒 論

宇宙基地や宇宙往還機などが滞在する地球低軌道(LEO)にはデブリが宇宙機に対して約 10km/sec の相対速度で周回しており、その数は記録されていないミリメートルオーダーのものまで入ると 4,000 万個といわれている^{1,2)}。さらに、衛星打ち上げ数の増加に伴ってその数は増え続けていると考えられている。またこれらのデブリ衝突が原因と考えられる衛星の破壊や機能障害の事例として、1996 年フランスの人工衛星セリウス、2006 年ロシアの静止衛星エクスプレス AM11 におけるデブリ衝突事故が確認されている。これらの環境のもとで運用される有人国際宇宙ステーションの与圧構造は、質量 1g、速度 10km/sec のデブリ衝突に耐える能力を有することが求められており、デブリバンパーで保護している。この耐デブリ性能の評価と実証には実験が必要となるが、地上において超高速で衝突実験を行える装置は限られている。それらの中でも 2 段式軽ガスガンは運用が比較的容易であるが、1g のプロジェクタイトルを射出する場合に安定した性能が得られる速度は約 7km/sec が上限と考えられる。これ以上の速度 12km/sec 程度までの射出を行う場合は成型爆薬による射出装置などを使う必要がある。さらに早い速度 15km/sec 程度までの場合にはレーザガンや、更に高速を出せるレーザー加速器を用いた例³⁾ などがある。しかし、これらの設備は大電源を必要とし周辺設備も含めると大規模になることや、プラズマガンでは射出できる質量がミリグラム・オーダーであるために構造

物の耐デブリ性能評価には能力が不足するなどの課題がある。諸外国でも、衝突実験によるデブリ評価データ取得には 2 段式軽ガスガンと成型爆薬（以後 CSC と称す、CSC ;Conical Shaped Charge）による装置を用いた実験の報告が大半であり、実験装置の制約が大きいと推測できる。日本でも宇宙基地日本モジュールのデブリバンパー評価のために、CSC による超高速射出装置を用いて速度 11 km/sec で衝突実験が行われている⁴⁾。

一方、2 段式軽ガスガンで射出するプロジェクタイトルは固体であり、飛翔中に形状や質量の変化は起こらない。これに対し、CSC を用いる超高速射出装置は速度 10 km/sec レベルで質量の大きな模擬デブリをジェット形態で射出することはできるが、このジェットの形状は 2 段式軽ガスガンで通常用いられる球状ではなく、中空円錐筒でかつ飛翔中にその形状や密度が変化することが知られている。CSC によるジェットの特徴については、白木らが実験結果を報告しており、安定したジェットが必ずしも得られないことを課題として挙げている⁴⁾。また、プロジェクタイトルが同じ質量であっても、球形と非球形（円筒及び平板）の場合を比べると、非球形デブリの方が標的板貫通能力は 1.2~2 倍程度高いと、Christiansen らが形状の及ぼす影響について報告している⁵⁾。さらに、CSC による加速装置では金属が溶融してジェットとなり射出されるため、飛翔中のジェットは高温となっていることが推測される。この飛翔中のジェット温度は金属の融点以下まで下がっているとの観測結果が報告され、したがって固体であるといわれている⁶⁾ が幅広くは確認されていない。また飛翔中にジェットの形状が変わりつつ質量が減少する現象について片山らが数値シミュレーションを行い、生成されたジェット各部位の速度勾配と材料許容力との関係によって分離し質量が減少すると結論付けている⁷⁾。この変形、分離の程度はジェット

^{*1}©2007 日本航空宇宙学会

平成 16 年 11 月 6 日 宇宙科学連合講演会で講演

平成 19 年 3 月 12 日原稿受理

^{*2}宇宙航空研究開発機構 総合技術研究本部

^{*3}三菱重工業（株）名古屋航空宇宙システム製作所

^{*4}中国化薬（株）火工開発部

の熔融状態に影響される。また衝突面においてはジェットの有する運動エネルギーは標的板の変形破壊のエネルギーとして消費されるとともに、ジェット自体の完全熔融や気化などの相変化にも消費される。そのため同質量であっても、ガスガンによる固体が衝突する場合の標的板損傷と、固体と熔融体とが混在する可能性の高い状態（以後、固融混相体と称す）と考えられる、CSCのジェットが衝突する場合の標的板損傷とでは、衝突する物質の形状差のみでなくジェット状態による影響も考慮する必要がある。微少な質量であるジェットでは、熔融化や気化するために必要なエネルギーは衝突時の運動エネルギーに比べると小さいが、固体と固融混相体との状態の差異が及ぼす影響について、ジェット形状の影響も含めた検討が、成型爆薬による損傷評価には必要となる。すなわち、実際の宇宙デブリは固体であるが、地上実験では耐デブリ特性評価に必要とされる質量1gで速度10 km/secの固体衝突実験はできないため、CSCによる実験結果は正確な評価とされない可能性がある。またこの課題に対し明確に答えた研究はみあたらない。

そこで、著者らは第一段階として10 km/sec以上の速度を安定的に得るため、CSCによる超高速射出装置の開発を推進し、9~12 km/secの速度域で質量・速度ともにほぼ安定したジェットを射出できる装置を完成させている⁸⁾。しかし、これのみではCSCによる固融混相体射出に伴う前述の課題解決にはならない。すなわちCSCによってガスガンと同速度、同質量での射出実験を行い、両者による損傷の関係を明らかにすることで、ガスガンでは困難な10 km/secレベルの速度域で固体デブリが衝突した時の、構造への影響をより正確に推定することが可能であり、そのためには新たな装置開発が必要である。

これらを背景に、本研究では将来的に2段式軽ガスガンとCSCによる超高速装置との実験結果を直接比較するため、2段式軽ガスガンの上限速度である約7 km/secまで速度を下げた、CSCによる超高速射出装置の開発を試みた。この装置開発では、CSCによるジェット生成過程を超高速衝突シミュレーション・ソフトによって解析し、ジェットの質量と速度に最も影響を与えるCSCの各部寸法パラメータを見出した。この結果を参考にして、CSCの構成品のなかでこれらに最も影響のあることが示されたインヒビタ（Inhibitor；制限板）寸法を設定し、所要の質量と速度が得られるようにCSCの各部寸法を段階的に実験で確認しながら設定した。本報は上記の装置開発の概要を報告し、CSCの寸法が射出する質量に与える影響を明らかにする。

2. 成型爆薬超高速射出装置とシミュレーション解析

2.1 CSCによる射出試験装置 CSCは、小型軽量で極めて簡便な構成ながら大きな破壊力が得られるため、第2次世界大戦の間に兵器として急速に発展している。これはノイマン効果といわれる原理により、少量の火薬によって標的の厚い鋼鉄を溶かせる程のエネルギーが得られるためである⁹⁾。構成は簡単で円形の金属外筒に火薬を詰め、一方を円

錐形の金属ライナーで蓋をするだけである。この円錐ライナーが反対側の端面から点火された爆薬による爆轟波によって中心軸上で衝突し、大きな運動エネルギーを得て熔融変形し金属ジェットとなって放出される。この金属ライナーの材質には、銅や鋼材などが用いられることが多いが、デブリ模擬のジェットを再現するために本研究ではアルミニウム合金を用いた。これはアルミニウム合金の密度がこれらの材料密度より低く、ジェットがより高速となる効果を期待したことと、宇宙機へ衝突したデブリはロケットや人工衛星の主材料であるアルミニウム合金が50%以上占めているとの報告例があり¹⁰⁾、衝突事象の把握には同種材料を用いることが適切と判断したためである。

一方、このライナー・熔融金属ジェットがすべて射出されると、その質量はデブリ衝突試験のジェットとしては大きくなりすぎる。そこでCSCの放出端部の中央に小さな孔の開いたインヒビタを挿入しておき、ジェットの先端部のみがその孔を通過してターゲットに向かって放出される仕組みとしている。インヒビタの前方にはスペーサを介して、インヒビタの孔よりやや大きい円孔を中心に持つ防御板があり、中心軸から外れて飛散する先端ジェットの破片及び飛翔してくるインヒビタ自体を受け止め、衝突事象を解明するためのターゲットに所定のジェット以外の物が衝突することを防いでいる。

著者らの研究⁸⁾でCSCのライナー角度やインヒビタ長さをパラメータとして実験を重ね、速度約7 km/sec、質量1g程度のシングルジェットを実現している。しかしながら、速度10 km/sを出すCSCと比較すると、ジェット速度、形状に不安定性が見られた。またこれらの実験からCSC外筒の直径 D_o を70.0 mmから78.4 mmに増やすことで速度のパラッキが平均値に対して $\pm 6.5\%$ から $\pm 1\%$ 以内と大きく安定する結果を得ている。そこで今回はCSCの直径を78.4 mm一定としたまま、インヒビタの長さ H と円孔の内径 d をパラメータとし、あらかじめシミュレーションで影響を把握した。この結果を参照しつつ、発射試験を行いながらこれらの最適寸法を実験により決める手順を採用した。第1図にCSCによる超高速射出装置の構成を示す。CSCの円筒とライナーは共にアルミニウム合金であるが、材種はそれぞれAl6061、AL1050とし、インヒビタの材料は銅を用いた。火薬はTNTを用い薬量は840 gである。第2図にパラメータであるインヒビタの長さ H と内径 d の位置をそれぞれ示す。また第3図に外観を示す。

第1図 CSCによる射出装置の概要

2.2 飛翔速度とジェット形状シミュレーション解析

CSC のパラメータ設定実験に先立ち、ライナー直径変更の影響を把握するためにシミュレーション解析を行った。解析ツールはAUTODYN-2D™を用いた。解析モデルは第4図の軸対称モデルを用いた。第1表にモデル化の各要素と状態方程式及び強度の構成則を示す。ここでの材料特性などはAUTODYNに組み込まれている数値をそのまま用いている。各要素の持つ特徴は文献11)にわかり易く解説されているので詳しくはそれを参照されたい。しかし、オイラーの方法は流体に、ラグランジェの方法は固体の変形にそれぞれ適していると一般に言われており、これらと変形の程度を勘案してモデル化した。第5図にインヒビタのないフリージェット状態での解析結果を示す。この解析ではライナーをシェル要素でモデル化している。これにより、ライナーに与えられる圧力・速度をシミュレーション結果から求め、これらを入力としてジェット速度は理論解から求めるJetting解析¹²⁾によって、各要素節点のジェット速度を出力した。CSC直径 D_o を70.0 mmから78.4 mmに拡大するとジェット速度が僅かに向上する結果となっている。第2表にこの解析結果と、2.1項で述べた著者らの研究8)によるインヒビタを用いないフリージェット射出試験結果との比較を示す。試験結果と解析結果とは良く一致しておりこのモデル化による解析の有効性が確認できた。

そこで生成ジェットの大きさに対してインヒビタの長さ H と内径 d が及ぼす影響をシミュレーションによって求めた。この解析ではライナーをオイラー要素としている。第6図及び第7図に長さ H が一定の場合と、内径 d が一定の場合との計算結果をそれぞれ示す。第6図のCase1と

Case3とを比較すると、インヒビタ内径 d を変化させても、図中に赤丸で囲んで示す生成ジェットの大きさや形状には差異が少なく、このパラメータがジェットに及ぼす影響は小さいと考えられる。これに対して第7図のCase4とCase6との比較では、インヒビタの長さ H を変化させると、赤丸で囲んだ部分の生成ジェットの大きさや形状の変化は大きく、このパラメータがジェットに及ぼす影響は大きいと判断できる。

以上のシミュレーション解析結果を基にしてインヒビタ内径 d を20 mmに固定し、長さ H を試験ごとに加工して変更することにより生成ジェットが最適となるインヒビタ形状を実験で導き設定することにした。

第1表 解析モデルの構成

名称	モデル化	材料	状態方程式	強度モデル
爆薬(TNT)	Euler	TNT	JWL	None(Hydro)
ライナー	Euler*	アルミ	Tillotson	None(Hydro)
ケース	Lagrange	2024T351AL	Shock	Johnson-Cook
ブースタ	Lagrange	2024T351AL	Shock	Johnson-Cook
インヒビタ	Lagrange	CU-OFHC	Shock	Steinberg-Guinan

*フリージェット解析ではShellとした

第2表 飛翔速度の実験結果と解析結果

CSC直径 (mm)	実験結果 (平均値) (km/sec)	解析結果 (最大ジェット速度) (km/sec)
ϕ 70.0	7.05	7.11
ϕ 78.4	7.13	7.25

第2図 インヒビタ断面 (内径 d , 長さ H)

第4図 CSC シミュレーション解析モデル

第3図 CSC による射出装置の外観写真

第5図 CSC の直径 D_o の差によるジェット速度の差異解析結果

3. 高速射出実験と結果

3.1 高速射出実験方法 インヒビタは6個準備し、各回の実験結果を反映して次の実験の長さ H を設定した。ジェットが衝突するターゲットは ϕ 200 mm×長さ100 mmの円柱アルミニウム合金を用いた。第8図に試験の形態を示す。フラッシュX線チューブを生成ジェットが飛翔する経路に沿って2カ所(Ach, Bch)に設置し、生成ジェットの形状と2点間の時間差から速度の計測を行った。ジェットの質量計測は、長さ40 mmの基本楔形参照体、その長さを120 mmに延ばした3倍長クサビ型参照体、3 mmごとに板厚を変化させた階段状参照体、及び既知の質量(1.78 g)を持つダミー弾をX線写真に同時に写しこんで、画像解析による比較解析で求めた。画像解析は、あらかじめ参照体板厚と輝度との関係性を求めておき、画像に写ったプロジェクタイトル輝度と参照体輝度とをピクセル単位で比較し、得られた厚さと面積から各点の質量を求め、これを積分してジェット全体の質量を求めた。このときダミー弾の画像解析結果から背景輝度の影響を毎回補正している。その補正に基づいた生成ジェット質量は、前述の3種類の参照体による画像解析計算質量の平均値から求めた。参照体の材料はいずれもアルミニウム合金である。第9図にこれらの参照体等の寸法と形状概要を示す。また、生成ジェットの衝突によるターゲットの孔の大きさや深さ及び表面状況を調べた。6回的高速衝突実験のうち3回目の実験でほぼ生成ジェットが一定の質量と形状になったと判断し、その後の実験は前述のパラメータを固定して防御板を取り付けて行った。また最後の2回の実験は生成ジェットの質量と速度再現性の確認と、生成ジェットに続いて飛翔してくる後追いジェットの確認も行った。そのためAchとBchとを発射後の同時刻に撮影することでこの後追いジェットの形状を

捉えることを試みている。したがってこの場合は、生成ジェットの速度はAchとBchとの通過時間の差異からは求められないため、試験番号H16-4のAch通過時間からの推測値である。

Case 1 : $H=25, d=20$

Case 3 : $H=25, D=30$

第6図 インヒビタ長さ H 一定での解析結果

Case 4 : $H=20, d=20$

Case 6 : $H=13, d=20$

第7図 インヒビタ円孔径 d 一定での解析結果

第8図 高速衝突試験装置概要

3.2 各実験結果の概要 第3表にCSCによる実験結果を示す。第10図にパラメータ H を変えて実験を行い、取得した X 線写真を示す。6回の実験結果概要は以下のとおりである。

1 回目（試験ケース H16-1）；インヒビタ円錐部長さ $H=20$ mm である。ターゲットに数個の浅いが、直径の大きなクレータと数多くの小さなクレータが生じた。また、インヒビタが衝突したとみなせる痕がある。Bch には数 mm 程度の微小粒が多数観察されるが、それぞれが微小なために画像解析によって質量を求めることができなかった。これは生成ジェットが分解し広範囲に分散したためと考えられる。

2 回目（試験ケース H16-2）；インヒビタ円錐部長さ $H=15$ mm である。ターゲットの中心付近に直径 50 mm、深さ 37 mm のクレータが生じている。またクレータ内にスラグの刺さった痕がある。X線画像 Ach の X 線不作用のため、速度計測はできなかった。X線画像 Bch には $\phi 16.8$ mm、長さ 8.3 mm、質量 1.5 g のリング状ジェットとその周辺に雲状の薄いジェットが観測され、全体の形はモリ状となっている。

3 回目（試験ケース H16-3）；インヒビタ円錐部長さを短くすることの有効性がわかり、その確認のため円錐部長さをさらに短くし $H=13$ mm と設定した。ターゲットのクレータ形状は2回目の結果と同等となった。また前回と同じくクレータ内にスラグの刺さった痕がみられる。X 線画像 Bch では $\phi 9.3$ mm、長さ 8.8 mm、質量 2.4 g の円筒型の生成ジェットが確認できた。この時のジェット速度は 7.47 km/sec であった。また2回目と同様に薄い雲状のジェットが観測されたが、その量は少なくなった。この結果

から良好なジェット生成が可能なパラメータを設定できたと判断し、これ以降の実験はインヒビタ円錐部長さ $H=13$ mm を一定として用いることとした。

4 回目（試験ケース H16-4）；この実験から防御板とスパーサをつけ完全な実験形態で射出実験を行った。ターゲットの中央付近に直径 45 mm と直径 29 mm の2つが一部分重なった雪だるま状のクレータができたが、X線画像 Bch でも比較的大きなジェットが2個存在していることが確認できた。X 線画像 Bch には $\phi 11$ mm、長さ 8.3 mm、質量 1.2 g のやや広がったジェットが確認できた。また、先端

(A) 基本クサビ形参照体

(B) 階段状参照

(C) 3倍長クサビ型参照体

第9図 画像解析参照体の寸法・形状

第3表 成型爆薬による実験結果

試験 ケース	インヒビタ H :埋込深 h :入口厚 d :入口径	スパーサ ／防御板	フラッシュX 線ディレイ	ジェット形状 (単位:mm)	CSC端部 からの距 離	先端 ジェット 速度	画像解 析質量	試験の状況等 (単位:mm)	ジェット映像 於:Bch
	[mm]	○:有 ×:無	[μ sec]		[mm]	[km/sec]	[g]		
H16-1	$H=20$ $h=10$ $d=20$	×	A: 41.2 B: 107.1	A:最大 $\phi 29.3$ きのこ形状。 B: $\phi 83.7$ に散らばった多数の微小ジェット。 中央に薄い帯が観測できる。	A: 75.7 B: 555.4	7.28	A: - B: -	Achのフィルムが爆発時に折れ曲がり感光。 標的板: $\phi 20$ 、深さ13のクレータ $\phi 20$ 、深さ13のクレータ 他多数の微小クレータ	第10図 ①
H16-2	$H=15$ $h=10$ $d=20$	×	A: 40.0 B: 107.0	A:測定できず。 B:全体的に薄くモリ型形状。 $\phi 16.8$, L8.3の リング型ジェットあり。	A: - B: 555.4	計測 できず	A: - B: 1.49	AchのX線不作用 標的板: $\phi 50$ 、深さ37のクレータ スラグ刺し跡有り。	第10図 ②
H16-3	$H=13$ $h=10$ $d=20$	×	A: 41.3 B: 106.9	A: $\phi 26$ の傘から $\phi 9.3$ に狭まり再び $\phi 36.7$ に 広がりが $\phi 9.0$ に戻るキノコ型 B: $\phi 9.3$, L8.8のジェット。後方にクラウド状の 薄い影あり。	A: 73.0 B: 555.4	7.47	A: - B: 2.44	比較的良好なシングルジェット。 標的板: $\phi 50$ 、深さ47のクレータ スラグ刺し跡有り。	第10図 ③
H16-4	$H=13$ $h=10$ $d=20$	○	A: 107.1 B: 177.1	A:最大 $\phi 18.6$, L32.6 のまとまらない形。 前方に質量が集中。 B: $\phi 11.2$, L8.3まで濃いジェットでL23.3まで は薄いジェット。先端ジェットから分離した 微小ジェット複数あり。	A: 574.9 B: 1099.9	7.50	A: - B: 1.20	先端ジェットがやや広がった。 標的板: $\phi 45$ 、深さ35と $\phi 25$ 、深さ26の 2つのクレータが雪だるま型。	第10図 ④
H16-5	$H=13$ $h=10$ $d=20$	○	A: 177.1 B: 177.0	A: $\phi 1$ 以下の微小ジェットが多数あり。 B: $\phi 11.0$, L6.6 のジェット。中空の部位あり。 後方にクラウド状の影あり。	A: 534.8 B: 1093.4	7.42 *	A: - B: 1.18	後追いジェットの確認。速度3.5km/sec以下 の微小ジェットが見られた。 標的板: $\phi 45$ 、深さ35のクレータ。 他に微小クレータ多数。	第10図 ⑤
H16-6	$H=13$ $h=10$ $d=20$	○	A: 177.2 B: 177.1	A:射線上一列に並んだ $\phi 1$ 以下の微小 ジェットが多数あり。 B: $\phi 11.2$, L9.3 のジェット。後方に微小 ジェットあり。	A: - B: 1093.4	7.38 *	A: - B: 0.75	後追いジェットの確認2回目。H16 -5と同様 の結果。 標的板: $\phi 45$ 、深さ35のクレータ。 他に微小クレータ多数。	第10図 ⑥

* H16-4のAchのジェット位置から推測した速度

ジェットの後方に微小なジェットが複数みられる。これはX線画像Achに写っている画像からわかるとおり、初めは一つのジェットであったものがジェット内に生じた速度差によって分離したものと考えられる。この時のジェット速度は7.50 km/sec が得られ、3回目とほぼ同じ結果となった。

5回目(試験ケース H16-5) ; 4回目と全く同じ条件で実験を行い、あわせて後追いジェットの確認を行った。ターゲットの中央には直径45 mmのクレータが生じた。またクレータ内部とその周辺に微小クレータがみられる。X線画像Bchには $\phi 11$ mm、長さ6.6 mm、質量1.2 gのリング状のジェットが確認できた。X線画像Achには速度が3.5 km/sec 以下で $\phi 1$ mm程度の微

小後追いジェットが多数確認できた。

6回目(試験ケース H16-6) ; 再現性確認として4回目、5回目と同じ条件設定で実験を行い、後追いジェットの再現性確認も行った。ターゲットの中央には直径45 mmのクレータが生じ、5回目と同じくクレータの内部と周辺に微小クレータがみられる。X線画像Bchには $\phi 11.2$ mm、長さ9.3 mm、質量0.8 gのリング状のジェットが確認できた。またX線画像Achには $\phi 1$ mm程度の微小後追いジェットが一行に並んでいることが確認できた。5回目と比べるとプロジェクトイルの速度はやや低い、クレータ径、深さも同じで、ターゲットに与えた損傷が同じであるところから、概ね再現性があると判断した。

第11図にターゲットの衝突面と、衝突部を切り出した断

① $H=20$ mm, $V=7.28$ km/sec, m =測定できず

④ $H=13$ mm, $V=7.50$ km/sec, $m=1.20$ g

② $H=15$ mm, V =測定できず, $m=1.49$ g

⑤ $H=13$ mm, $V=7.47$ km/sec, $m=2.44$ g

③ $H=13$ mm, $V=7.47$ km/sec, $m=2.44$ g

⑥ $H=13$ mm, $V=7.38$ km/sec, $m=0.75$ g

第10図 成型爆薬によるジェットの状況(フラッシュX線画像)

面を示す。この図から防御板の中央に集中質量の衝突を確認できるが、同時に後追いジェットによると思われる細かな衝突痕がクレータ内部とクレータから離れた周囲にそれぞれ認められる。

4. 実験結果の考察と課題

4.1 インヒビタの寸法とジェットについて CSCのインヒビタ円錐部長さを $H=13\text{ mm}$ とした 3 回目以降は速度 7.4 km/secの安定したジェットが得られている。質量に関しては、3 回目を除けば質量 0.8~1.2 gであり、ターゲットの損傷状況からも再現性が確認できたと考えられる。3 回目のみジェット質量は 2.44 gと大きい。3 回目までは生成ジェット撮影のBch位置をCSC端部から 555 mmとしたが、4 回目以降は衝突直前の質量を計測するためターゲットに近い 1100 mmとし、約 2 倍の離れた位置としている。その

ため 3 回目までの位置では、生成ジェット飛翔中の質量減少が 4 回目以降に比べて少なく、この質量差が観測されたと考えられる。ジェット速度と質量との関係を第 4 表及び第 12 図に示す。以上から、4 回目以降の結果について考察すると、質量に関してはH16-6 のみやや小さいが他の実験ケースでは安定している。統計上の確度の高い評価を行うには実験数が少ないので標本を増やす必要はあるが、質量の変動係数は 20%程度でありこの種の実験結果としては安定しているといえる。また速度に関しては変動係数も 0.7%と極めて小さく、速度の再現性は確立できたといえる。またこのジェットの長さ L と直径 d との比 L/d が 1 未満であることがX線画像から判った。ジェットの L/d が大きいと、衝突時にすべてがクラウド化せず一部がそのまま衝突するためターゲットの損傷状況が異なってくる多段衝突となることが知られているが、今回はそのような損傷状況となっていない。すなわちCSCによるジェットと固体球を衝突させるガスガンとの比較には、この多段衝突が起こらないために L/d が小さいことが必要であり、今回の試験条件でこの要求を満足することも確認できた。またCSCによる安定したジェット生成には、インヒビタ内径 d よりも長さ H が支配的であるとのシミュレーション解析結果に対して、高速射出実験によってこの予測が確認できた。これらの結果から、著者らが開発したCSCによって所望のジェット形状を実現できると共に、シミュレーションの有効性を確認できた。また

第 4 表 ジェット速度と質量との関係

実験 ケース	H [mm]	m [g]	V [km/sec]	備考
(H16-3)	13	2.44	7.47	質量の測定位置は以下と異なる(参考)
H16-4	13	1.20	7.50	
H16-5	13	1.18	7.42	
H16-6	13	0.75	7.38	
標準偏差		0.208	0.050	-4~-6
変動係数(%)		19.9	0.7	-4~-6

第 12 図 ジェット速度と質量との関係 ($H=13\text{ mm}$ 一定の場合)

第 11 図 衝突後のターゲット板の衝突面と切断面 (ケース H16-5; $V=7.42\text{ km/sec}$, $m=1.18\text{ g}$)

第 13 図 H16-6 Ach の後追いジェット・フラッシュ X 線画像

CSC寸法設定に有効なパラメータを明らかにすることができ、今後の性能変更にも柔軟な対応が可能となった。一方、後追いジェットとして $\phi 1\text{ mm}$ 程度、速度 3.5 km/sec 以下の微小ジェットが多数存在することもX線画像から確認できた。ターゲットの損傷状況からもこの存在が確認できる。H16-6のAchに写った後追いジェットを第13図に示す。この微小ジェットの存在とその除去は今後の課題である。

4.2 ジェットの質量測定について ジェットの質量測定はフラッシュX線画像解析によって行った。第14図に各参照体における輝度と厚さの関係を示す。基本クサビ形参照体と階段状参照体とは同じ関係式であるが、3倍長クサビ形参照体のみ関係式の傾きが異なることがわかる。これは解析質量に差異が生じる一因と考えられる。背景輝度と質量との関係についても既知質量のダミー弾を用いて比較したが、参照体の種類によってこの関係は平行移動的に異なることがわかった。また背景輝度が小さくなる（暗く）に従い算出する質量が大きくなった。その他に画像中央からの距離と解析質量の関係についても検討したが、各参照体の質量と中央からの距離を表す関係式の傾きはほぼ同じであるが、やはり平行移動的にそれぞれ異なることがわかった。画像解析によって質量算出を行う方法として、著者らが試みた各参照体方式の中では、階段状の参照体は厚さが段階的であるため、画像解析では誤差のすくない評価が可能であった。クサビ形参照体は、微小な質量差異を画像から誤差を少なく同定することを目指して試みたが、背景の濃淡や中心からの距離による影響が大きいために、むしろ誤差を大きくする結果となった。現時点では、階段状参照体により段階的に濃淡解析を行い、その間は直線補間する方法が最も精度が高く、質量測定に適した参照体形状と考えられる。ただし、今回の実験で用いたフラッシュX線画像処理方式によるジェット質量算出方式は現時点では約-10~20%の誤差を含んでおり、さらに小さいジェットの質

第14図 各参照体の輝度と板厚との関係

量測定を行う場合には画像処理精度向上が今後の課題となるものの、著者らの実験目的には十分な精度を達成している。

また、画像解析による質量はジェットの外形のみから得られる簡易計算よりいずれも小さい結果となった。簡易計算ではジェットを円筒と仮定して求めている。しかし実際はジェットの質量が減少しつつ飛翔している状況から、一部は半気化状態である可能性が高くこれによって密度が低くなっているためと考えられる。

4.3 ジェット生成シミュレーション解析について ジェット形状についてのCSCによる実験結果とAUTODYNによるシミュレーション解析結果との比較では、ジェット形状はインヒビタ円錐部長さに依存しており、その長さが短いほど先端ジェットが大きくなるという傾向が一致した。

第15図に起爆後 $35\mu\text{ sec}$ 時の解析結果とフラッシュX線画像との比較を示す。ジェットの外形も解析と試験ではほぼ一致している。CSCの寸法パラメータ設定に先立ち行ったシミュレーションでのモデル化手法や得られた結果は、実験結果の傾向をよく推測しており、著者らの行ったCSCによる、アルミニウム合金の溶体化を含むジェット生成は、解析で十分にシミュレーションできたと考えられる。ただし、実験で得られた事象と解析結果では以下の差異がある。

- 1) H16-3のX線Ach画像に見られるように先端に質量が集中したジェットは、解析では完全には再現できていない。
- 2) 生成ジェットはX線画像からは完全な中空ではないと考えられるが、解析結果では中空となっている。
- 3) 試験結果ではインヒビタは完全に口が閉じていない。

1), 2)に関しては、アルミニウムライナがジェットになる時にCSC中心軸上に集まり内部エネルギーが高くなる。そのため解析ではこの内部エネルギーでアルミニウム合金が気化しており、中空となったと考えられる。解析での状態方程式の最適化や材料特性に修正の余地がある。3)に関しては、インヒビタ材料である銅の高温時弾性率が解析に用いた数値より高い可能性があり、材料物性を実験結果から修正するなどにより、解析と実験との差異を少なくする必要がある。また、今回の実験は大気中で実施しておりジェット飛翔中の損耗や形状に与える空気が与える影響も今後の課題であろう。文献4)にもCSCによる生成ジェット飛翔中

(A) AUTODYNによる解析結果

(B) フラッシュX線画像

第15図 生成ジェットの解析と実験との比較

の質量変化率は、大気中の方が真空中より大きいことが報告されており、大気の影響があることを裏付けていると考えられる。但しこれを解析的に求めることは難しく、実験的に求めることが現実的と考えられる。

以上の課題はあるが、本 CSC 実験装置によってガスガンと同速度・同質量での比較射出実験を行い、両者の相関を得ることが可能となる。これによって、CSC による固融混相体が超高速衝突する場合の損傷状況から、固体が衝突した場合の損傷をより正確に評価できることとなる。

5. 結 論

超高速射出装置を得るために、シミュレーション解析の実施とそれに基づく寸法選定を行い、さらに実験により確認しつつ開発を行い以下の結論を得た。

1. 2 段式軽ガスガンとの直接比較を目指して CSC による超高速射出装置を開発し、インヒビタの寸法を適切に選択することにより、質量 0.8~1.2 g, 速度 7.4 km/sec の生成ジェットを確実に得ることが可能なことを確認した。これによって著者らの目標達成の見通しが得られた。ただし、本装置は後追いジェット除去の方法を確立することが必要であり、今後の課題である。
2. CSC によって生成されるジェット質量の制御は、インヒビタの円錐部長さ H が支配的であり、 H が低いほどジェット質量は大きくなることを解析で示し、実験で確認した。
3. AUTODYN-2D による数値シミュレーションは、CSC ジェット生成解析にも有効であることを実験結果から確認できた。ただし、さらに精度を向上させるためには実験との比較による研究継続が重要である。
4. 生成ジェットの質量計測を、X線フラッシュ画像による参照体との輝度比較解析によって行う著者らの手法

では、階段状参照体が最も有効である。ただし、誤差を減らすためには、さらに画像処理に関する研究が必要である。

参 考 文 献

- 1) Interagency Group for National Security Council: Report on Orbital Debris, USA, Jan. 1989.
- 2) National Research Council: ORBITAL DEBRIS, National Academy Press, 1995.
- 3) 山内良昭, 中野元博, 尾崎典雅, 田中和夫: 三層構造飛翔体のレーザー加速によるデブリ模擬衝突試験, 日本航空宇宙学会論文集, **51**(2003), pp.690-696.
- 4) 白木邦明, 片山雅英, 八坂哲雄: 成型爆薬による超高速衝突試験と飛翔体形状の影響評価, 日本航空宇宙学会論文集, **49**(2001), pp.300-309.
- 5) Christiansen, E. L. and Kerr, J. II.: Projectile Shape Effects on Shielding Performance at 7 km/s and 11 km/s, Int. J. Impact Eng., **20**(1997), pp.165-172.
- 6) Walker, J. D., Grosch, D. J. and Mullin, S. A.: Experimental Impacts above 10 km/s, Int. J. Impact Eng., **17**(1995), pp.903-914.
- 7) Katayama, M., Takeba, A., Toda, S. and Kibe, S.: Analysis of Jet Formation and Penetration by Conical Shaped Charge with the Inhibitor, 1998 Hypervelocity Impact Symposium, Huntsville, AL, USA, 1998.
- 8) 航空宇宙技術研究所: 成型爆薬を用いた超高速射出法の相関にする基礎データ取得作業報告書 (その 5, その 6; 平成 14 年度), (その 7, その 8; 平成 15 年度) .
- 9) Zukas, J. A., ed.: High Velocity Impact Dynamics, John Wiley & Sons, New York, (1990) pp.731-829.
- 10) Hyde . J.L., et al.: A History of Meteoroid and Orbital Debris Impacts on the Space Shuttle, ESA SP-473, October 2001.
- 11) 片山雅英: 流体と固体の衝撃シミュレーション, 高圧力の科学と技術, **8**(1998), pp.251-259.
- 12) Katayama, M. and Kibe, S.: Numerical Study of the Conical Shaped Charged for Space Debris Impact, International Journal of Impact Engineering, **26**(2001), pp.357-368.