

ETC ガン技術を適用した二段式軽ガス銃による 推進剤の着火から飛翔体発射までの作動時間測定

(平成16年11月30日 原稿受付)

機械知能工学科	赤 星 保 浩
機械知能工学科	高 良 隆 男
機械知能工学専攻	松 田 英 二
機械知能工学専攻	福 重 進 也
機械知能工学専攻	唯 岡 成 好
機械知能工学科	北 川 潤 一
ハルビン工科大学	キョク デンツイ

Measurement of Delay Time from Propellant Ignition to Projectile Launch in Two-Stage Light Gas Gun Using Electrothermal-Chemical Gun Technology

by Yasuhiro AKAHOSHI
Takao KOURA
Eiji MATSUDA
Shinya FUKUSHIGE
Masayoshi TADAOKA
Junichi KITAGAWA
Qu YANZHE

Abstract

A hypervelocity launcher is a necessary equipment for hypervelocity impact tests. We attained muzzle velocity of 7.94 km/s in 28mm/10mm Two-Stage Light Gas Gun (TSLGG) in the conventional. In this study, we propose a counter impact to improve velocity. It is important to control variation of delay time from propellant ignition to projectile launch for the counter impact test. Therefore, we developed TSLGG, which Electrothermal-Chemical (ETC) gun technology is applied to, using mixture of NH_4NO_3 , polyoxymethylene, and Al powder as propellant. In this paper, we measured projectile velocity, delay time, current profile and discharge voltage profile in the present TSLGG and discussed feasibility of control of variation of the delay time.

1. 緒 言

近年、宇宙開発が進展すると共に地球の周回軌道の上に蓄積されたスペースデブリ（以下デブリ）と宇宙構造物との衝突が問題となってきた。この衝突に対する防御構造の開発を行うためには、地上での超高速衝突実験が不可欠である。これまでに当研究室では二段式軽ガス銃

(Two-Stage Light Gas Gun:TSLGG)を使用した実験において飛翔体速度7.94 [km/s]を達成した⁽¹⁾。しかしデブリと宇宙構造物との相対衝突速度は最高で15 [km/s]にも及ぶため、10 [km/s]が限界といわれる TSLGGでは達成が困難だと考えられる。そこで電気エネルギーと推進剤の化学反応エネルギーとを併用した Electrothermal-Chemical (ETC) ガンの技術を TSLGG の一段目に適用したガンを開発し

た。本研究ではこの新たに開発した ETC 式 TSLGG と従来式 TSLGG の二台を対向に設置し、対向衝突による超高速衝突の実現を最終的な目標に掲げている。対向衝突で問題となるのは推進剤への着火信号から実際に飛翔体が発射されるまでの作動時間のばらつきである。この作動時間が大きくばらつくと衝突位置も大きくばらつくことになる。10 [km/s] 級の対向衝突を考えた場合、数十ミリ秒のばらつきは衝突位置で考えると数百メートルのばらつきとなる。この作動時間ばらつきの最も大きな原因として挙げられるものは、従来式 TSLGG の一段目に点火玉と黒色火薬による無煙火薬の着火を採用していることであると考えられる。黒色火薬は燃焼の広がりが遅く、そのため燃焼速度にばらつきを生じ無煙火薬の着火速度にも影響を及ぼす。現在当研究室の超高速衝突実験室で運用している中型 TSLGG は Fig.-1 に示されているように 20 ~ 30 [ms] のばらつきが生じている。これに対して ETC 式 TSLGG はコンデンサバンクからの電気エネルギーによって推進剤を燃焼させるため燃焼速度が安定し、対向衝突に有効であると考えられる。本稿では単一のパラメータで実験を行い、飛翔体速度及び作動時間、点火部の電流、放電電圧履歴の測定を行ったので報告する。

2. TSLGG

2.1 TSLGG の概観

TSLGG はグラム~キログラム程度までの飛翔体を加速させる最も一般的な装置であり、様々な研究機関で使用されている。TSLGG の概観図を Fig.-2 に示す。右から点火部、ポンプチューブ、高圧カップリング部、ロケットチューブ、速度計測部、資料室となっている。当研究室の超高速衝突実験室では大型 TSLGG、中型 TSLGG の二台を運用している。それぞれの主要な設計パラメータ及び性能を Table-1 に示す。

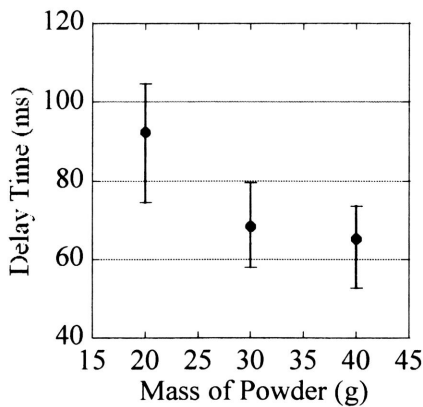


Fig.-1 Delay time in middle size TSLGG

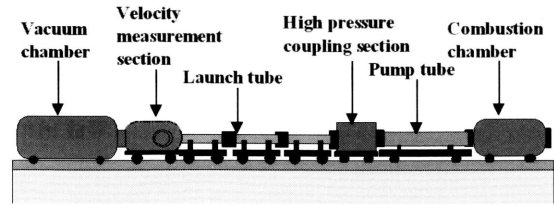


Fig.-2 Configuration of TSLGG

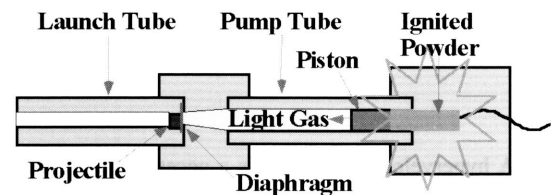
Table-1 Parameter and performance of TSLGG in KIT

Size of TSLGG	Total length [m]	Pump tube		Launch tube		Max velocity [km/s]	Driver gas
		Bore [mm]	Length [m]	Bore [mm]	Length [m]		
		Middle	12	28	2.4		
Large	14	60	3.1	14	2.6	6.16	He

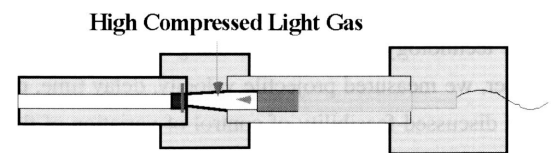
2.2 TSLGG の作動原理

TSLGG は大きく分けて3つの段階を経て超高速飛翔体を発生させる。以下の Fig.-3 に火薬が着火してから飛翔体が加速を始めるまでの作動過程を示す。

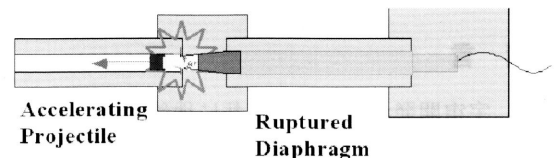
- (a) 発破器から信号が送られ着火した火薬の燃焼ガスがピストンを押し出し、ピストンは加速を始める。
- (b) 加速を始めたピストンが急速に軽ガスを圧縮する。圧縮された軽ガスは衝撃波の反射により最終的に数千気圧まで達する。加速されたピストンはやがてテーパ部に達し強制的に停止させられる。
- (c) 高圧に圧縮された軽ガスがダイアフラムを破断し、



(a) Process of combustion powder



(b) Process of compression driver gas



(c) Process of accelerating projectile

Fig.-3 Operational principle of TSLGG

急速に膨張を始める。ピストン前面と飛翔体後面との間で衝撃波が反射を繰り返すことにより超高压ガスによって飛翔体はロンチチューブ内で加速される。

2.3 TSLGGのパラメータ

TSLGGの性能を決定させるためのパラメータには、銃の寸法など設計時に決定する設計パラメータと実験時に変更可能な作動パラメータの二種類がある。

2.3.1 設計パラメータ

以下に主な設計パラメータを以下に示す。

- ・ 燃焼室容積
- ・ ポンプチューブ内径及び長さ
- ・ テーパセクション形状（テーパ角）
- ・ ロンチチューブ内径及び長さ

2.3.2 作動パラメータ

TSLGGは作動パラメータによって作動行程における力の程度及びバランスが決定される。主な作動パラメータを以下に示す。

- ・ 火薬（推進剤）量
- ・ ピストン質量
- ・ 軽ガス初期充填圧力及び種類
- ・ ダイアフラムの破断圧力
- ・ 飛翔体質量

これらの作動パラメータは、実際には一つずつパラメータを変えていくという経験的手法に基づき、実験による作動パラメータの決定を行う。特に、ピストン質量、軽ガス初期充填圧力、ダイアフラムの破断圧力のバランスが難しく、誤った選定を行ってしまうと飛翔体以外のもの（ピストンやダイアフラムの破片）まで資料室内に飛散させることになってしまう。

3. ETCガン

3.1 ETCガンの作動原理

ETCガンは飛翔体の推力として、電気エネルギーと推進剤の化学反応エネルギーを併用したガンである。レールガンやコイルガンと共に電磁気銃（Electromagnetic Launcher:EML）の一つとして研究が進められてきた⁽²⁾。Fig-4にETCガンの点火部の構造を示す。推進剤はポリエチレンで作製した燃焼室（カートリッジ）に投入する。カートリッジの陽極、陰極はコイル状の銅線で銅通されている。コンデンサバンクからの充電電圧が解放されると銅線に大電流が流れ、蒸発、プラズマ状態へと移行していく。このプラズマが発生した大量のガスの圧力によって推進剤を燃焼させ、飛翔体を加速させる仕組みとなっている。ETCガンの技術をTSLGGの一段目に適用することで点火玉と火薬を用いた従来のTSLGGより燃焼速度が安定し、対向衝突にも有効であると考えられる。

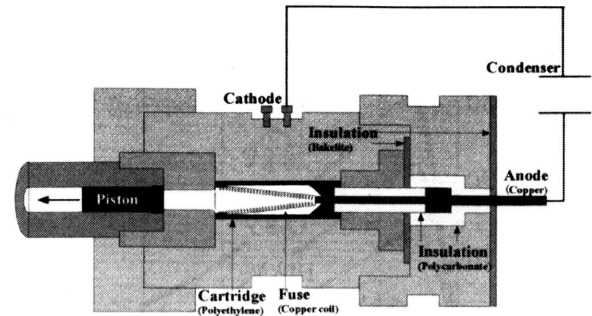


Fig-4 Configuration of ETC gun

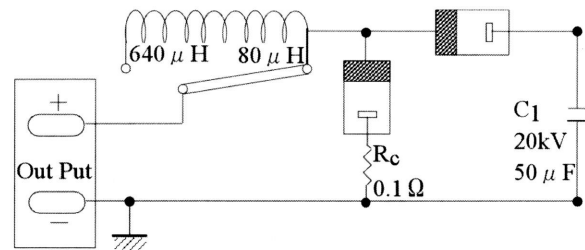


Fig-5 Circuit diagram of 10 kJ condenser bank

3.2 コンデンサバンク

実験に用いたコンデンサバンクの回路図を Fig-5 に示す。本研究で使用するコンデンサバンクは10kJで充電電圧は0~20[kV]、インダクタンスは、80, 160, 320, 640 [μH]の変更が可能である。このコンデンサバンクの充電電圧、インダクタンスを変えた電流履歴を Fig-6 に示す。(a)より、充電電圧を上げるとピーク時の電流値が大きくなることが確認できる。また、(b)よりインダクタンスを減少させると電流のピーク時までの時間が短くなることが確認できる。

4. ETC式TSLGGでの実験

4.1 パラメータの決定

4.1.1 ETC式TSLGGの製作（設計パラメータの決定）

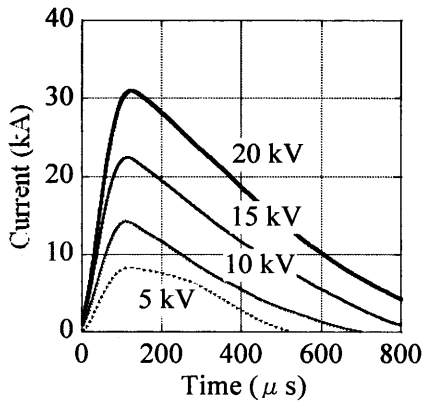
設計パラメータは次の事を考慮に入れ決定した。

- ・ 従来式TSLGGの実績を考慮し決定する。
- ・ できるだけ低コストで製作するため点火部、ポンプチューブ、ロンチチューブは既存のものを加工する。そのためある程度の制限のもと、決定する。

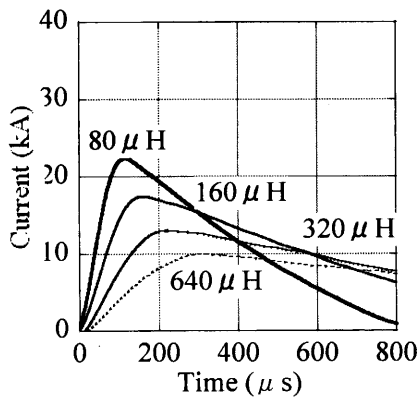
燃焼室（カートリッジ）の容積については作成時に内径を変更することで変更可能である。ただし燃焼室の肉厚を薄くすると放電エネルギーが散逸するため⁽³⁾、今回実験で使用する燃焼室内径は、22[mm]とした。Table-2にETC型TSLGGの主な設計パラメータについて示す。

4.1.2 作動パラメータの決定

推進剤には硝酸アンモニウム (NH₄NO₃) とポリオキシメチレン (POM)、アルミニウム粉末を混合したものを



(a) Different charge voltages (Inductance 80 μH)



(b) Different inductances (Charge voltage 15kV)

Fig.-6 Current profile of 10 kJ condenser bank (discharge only)

Table-2 Design parameter of ETC TSLGG

Cartridge		Pump tube		Taper deg	Launch tube		Total length
Bore	Length	Bore	Length		Bore	Length	
[mm]	[m]	[mm]	[m]	[deg]	[mm]	[m]	[m]
22	85	20	825	4	5	830	2.5

Table-3 Operational parameter

Mass of Plopellant	Mass of Piston	Diaphragm		Initial Charged Pressure of Helium Gas	Mass of Projectile
		Thickness	Chipping Load		
[g]	[g]	[mm]	[N]	[MPa]	[g]
12	25.5±0.5	1.5	0.56	0.55	0.2±0.01

5:2:1の比で使用した。NH₄NO₃は起爆性が低く、取り扱いが比較的安易であることから多くの産業用爆薬の主原料として用いられている。POMは可燃性のプラスチックであり、大量のCH₂O基を含んでいるためNH₄NO₃と反応することで水素をより多く発生させることができる。アルミニウム粉末は代表的な金属可燃材で鈍感なNH₄NO₃への添加によって起爆感度が上がることが知られている⁽⁴⁾。その他の作動パラメータは2.3.2節で述べたように経験的手法に基づき、実験によって決定した。Table-3に決定した作動パラメータを示す。

4.1.3 放電パラメータの決定

ETC式TSLGGは従来式TSLGGのパラメータの他にコンデンサバンクの放電パラメータの決定も必要である。本研究では作動時間の安定が目的であり、そのため推進剤の着火速度、燃焼速度のばらつきをコントロールしなければならない。このコントロールを行うためには、燃焼室内の銅線に短い時間で勢よく大電流を流す必要がある。そこでインダクタンスは80[μH]に決定した。ただし、充電電圧はコンデンサバンクの寿命を考えると最大負荷での実験を数多く行うことは望ましくない。そのため充電電圧は15[kV]に決定した。

4.2 飛翔体速度及び、作動時間の測定

4.2.1 測定方法

4.1節で決定したパラメータで飛翔体速度及び、作動時間の測定の測定を行った。飛翔体速度はワイヤカット法で測定し、作動時間は推進剤への着火信号からワイヤの1段目が切れるまでの2[m]で測定を行った。

4.2.2 実験結果

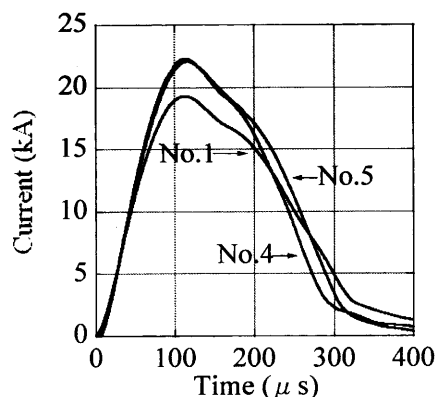
実験結果をTable-4に示す。飛翔体速度は秒速3[km]後半から4[km]前半であり、推進剤への着火信号から飛翔体がワイヤ一段目をカットするまでの作動時間は平均で2.42[ms]でばらつきは170[μs]であった。10[km/s]級の相対衝突で衝突位置に換算すると、1~2[m]程度のばらつきとなり十分許容範囲である。

4.2.3 電流、放電電圧履歴の測定

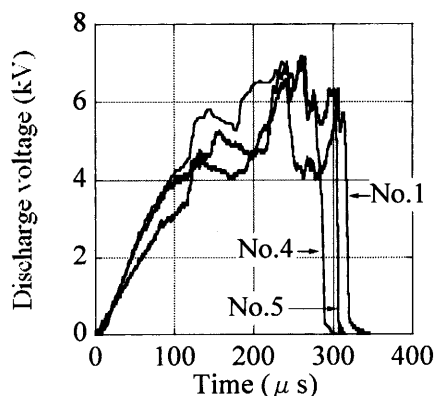
今回行った実験では飛翔体速度及び、作動時間と共に点火部の電流、放電電圧履歴をそれぞれログスキューコイル高圧プローブを使用して測定を行った。Fig-7では実験番号1, 4, 5の燃焼状態での電流、放電電圧履歴を示している。Fig-6の燃焼なしでの電流履歴(15[kV], 80[μH])とFig-7の(a)とを比較すると大きく違う点として電流の減少速度が挙げられる。カートリッジ内では電流がピークに近づいた100[μs]付近で銅線が蒸発し、プラズマ化を開始する。これは放電電圧履歴(b)からも、100[μs]付近に一つ目のピークがあることから確認できる。放電のみであればこのまま緩やかに電流、電圧共に減少していくが推進剤の着火を行った場合、銅線のプラズマ化が開始された約200[μs]後に推進剤が着火される。この推進剤の燃焼した衝撃によってカートリッジ内での電流及び電圧は急速に減少していると考えられる⁽⁵⁾。また、Table-5に飛翔体速度及び作動時間と放電結果の関係を

Table-4 Experiment result 1

Experiment No.	1	2	3	4	5
Velocity (km/s)	3.49	4.10	3.75	3.91	4.17
Delay Time (ms)	2.51	2.47	2.40	2.34	2.44



(a) Current profiles



(b) Discharge voltage profiles

Fig.-7 Current and discharge voltage profiles

Table-5 Experiment result 2

Experiment No.	Velocity (km/s)	Delay time (ms)	Peak current (kA)	Peak voltage (kV)	Discharge duration (μs)
1	3.49	2.51	20.00	6.60	313
4	3.91	2.34	22.86	7.18	278
5	4.17	2.44	23.13	7.16	303

まとめている。各実験の最大電流値と飛翔体速度に着目すると、飛翔体速度の遅い実験1では、最大電流値が低くなっている。次に電流の立ち下り時間と作動時間に着目すると電圧の下がり始めの時間、つまり推進剤の着火開始が早いほど、作動時間が早くなっていることが確認できる。これは作動時間が推進剤の着火速度によって決定されていることを示している。従って今後作動時間のばらつきをさらに抑えるためには、毎回の実験で銅線の長さやコイルの巻き方など、より厳しい制限の下、カートリッジを組み立て、着火速度を安定させる必要がある。

5. 結 言

- ・飛翔体速度4[km/s]付近での作動時間は平均で2.42[ms]でばらつきは170[μs]であった。

- ・飛翔体速度は燃焼室の最大電流値に依存する。
- ・カートリッジ内電圧の下がり始め、つまり推進剤の着火速度が作動時間に最も依存している。

謝 辞

本研究で使用した10kJコンデンサバンクは平成14年度九州工業大学研究支援費の支援の下で導入されたことをここに記し、厚く御礼申し上げます。また、本研究は本学超高速衝突実験施設で行われたことを付記します。

参考文献

- (1) 古川浩司 “二段式軽ガス銃における発射速度の高速化及び作動時間履歴の測定” 平成15年度九州工業大学修士論文
- (2) Harry D. Faire “The Science and Technology of Electric Launch”, IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL.37, NO.1, 2001
- (3) Pascal Andre, William Bussiere, Emmanuel Duffour, Luc Brunet, and Jean-Marie Lombard “Effects of Dielectric Material on Arc Plasma Pressure and Ablation Measurement in High-Power Apparatus”, IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL.39, NO.1, 2003
- (4) Kazunari Ikuta “Ohmic Ignition of Alcohol-Ammonium Nitrate Mixture for Hot Light Gas Generation”, Jpn J. Appl. Phys. Vol.36 1997
- (5) Thomas H.G.G.Wese, Joseph Kruse, Paul Schaffers, and Hans-Karl Haak “Status and Results of the German R&D Program on ETC Technologies”, IEEE TRANSACTION ON MAGNETICS, VOL.37, NO.1, 2001