

# 加熱金属平板に衝突する GAP 単一液滴の着火特性 -衝突による液滴の変形が GAP の着火に及ぼす影響-

日本大学 理工学部 桑原研究室

○柳沼 高太, 伊藤 朗, 桑原 卓雄

## 1 諸元

### 1.1 研究背景

人工衛星や探査機等の宇宙機は、軌道投入、姿勢制御においてスラスタを使用する。特に姿勢制御等の厳しい動作を行う場合、スラスタは短時間に多数回作動するため、一液性推進薬を用いることで構造を単純化し、故障要因を減らす事で信頼性を向上させている<sup>[1]</sup>。

現在、ヒドラジンが一液性スラスタの推進薬として使用されている。ヒドラジンは触媒で容易に分解し、比推力も大きいという利点から長年用いられてきた。

しかし、毒性と腐食性が非常に強い為、取扱いには危険が伴う。我々は、取扱いが容易な次世代一液性推進薬として、グリンジルアジ化ポリマー(GAP)に着目した。GAPはヒドラジンに比べて真空比推力が大きいので、性能面においても優れている。更に密度も大きいので、推進薬タンクの小型化が図れる。

GAPを一液性スラスタの推進薬として用いる際、推力発生までの時間が短い事、つまり応答性が良い事が重要である。応答性を決める要因の一つとして、推進薬の着火遅れ時間がある。応答性を良くするため、スラスタの構造は着火遅れ時間を短くする事に注目する。まず、GAPを加熱する際、高温雰囲気による加熱と高温金属による加熱が考えられるが、金属の熱伝導性の良さを考慮し、加熱した金属にGAPを噴く構造にする。また、噴く際は、霧状化(微粒化)して表面積を大きくすることで、流入熱量を増やすことができる<sup>[2]</sup>。以上よりスラスタの構造は、加熱した金属平板にGAPを噴霧し、熱分解で発生するガスによって推力を得る方法(Fig. 1)を考える。

Figure 1の構造図においてインジェクターから噴霧される推進薬の速度は7~60 m/sになる<sup>[1]</sup>。GAP液滴の速度が7~60 m/sで金属平板に衝突すると、衝突速度によって平板との接触面積に変化が生じ、平板からの

熱の流入量が増えると考えられる(Fig.2)。これは、衝突速度の変化が着火遅れ時間に影響することを意味する。GAPの着火とは、急激な熱分解に起因する爆発(M.E.: Micro Explosion)の発生で液滴が消失することである<sup>[3]</sup>。

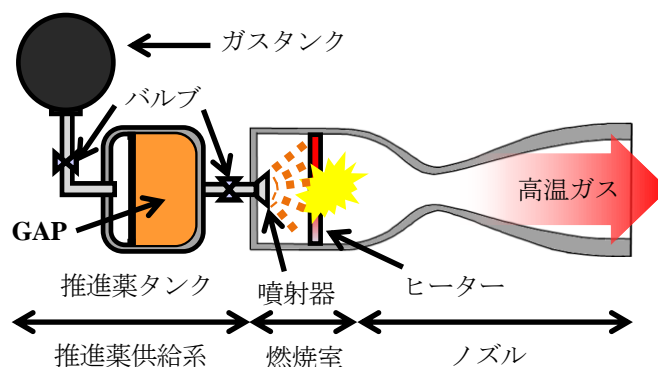


Fig. 1 GAP スラスタの構造図

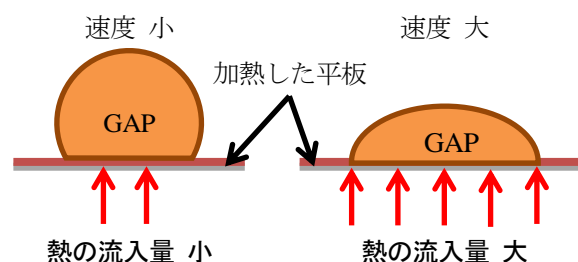


Fig. 2 衝突速度と接触面積の関係

### 1.2 平板接触時間の定義

金属である平板からの流入熱量が多いこと、本研究では液滴の平板との接触面積の変位に注目していることから、重要なのは液滴と平板が接触している時間である。よって、GAP液滴が平板と接触してから急激な分解反応によって平板から離れるまでの時間を、平板接触時間と定義する。Figure 3にGAP液滴が衝突してから離脱するまでの画像を示す。

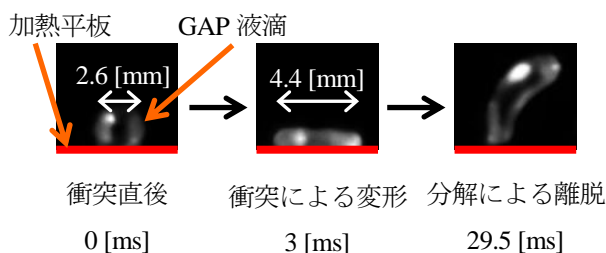


Fig. 3 衝突後の GAP 液滴の挙動

### 1.3 研究目的

本研究では、GAP 液滴の衝突速度と平板接触時間の関係を調べた。GAP 単一液滴を加熱金属平板に衝突させ、平板接触時間を速度の関数であるウェーバー数で評価した。

## 2 GAP の特性

Table 1 に GAP の物理、化学特性を示す<sup>[4]</sup>。GAP は分子構造内に 1 個のアジド基(-N<sub>3</sub>)を有し、生成熱 (957 kJ/kg) が正であるという特徴を持ち、断熱火炎温度が 1400 K に達する自己燃焼特性を有する。

Table 1. GAP の物理的、化学的特性

分子量	1.98	[kg/mol]
密度	$1.30 \times 10^3$	[kg/m <sup>3</sup> ]
生成熱	957	[kJ/kg]
断熱火炎温度	1465	[K] (5MPa)
主要生成物	N <sub>2</sub> , C(s), CO, H <sub>2</sub>	

## 3 ウェーバー数と平板接触時間の関係

### 3.1 実験装置及び実験方法

実験装置を Fig. 4 に、実験条件を Table 2 に示す。平板温度は、GAP の分解が確実に発生する温度にした。金属平板は耐熱性と耐久性を考慮して選んだ。インジェクターを使用し、アクリルボックスの鉛直上から加熱金属平板に向けて、GAP 単一液滴を落下させた。取得画像から平板に衝突する直前の液滴径(初期液滴径) $d$ 、落下速度  $v$ 、平板接触時間  $\tau$  を測定した。初期液滴径  $d$  は 4 方向(0°, 45°, 90°, 135°)について測定し、平均したものを用いた。加熱金属平板はセラミックヒーターで加熱したステンレス平板を用いた。測定回数

は、各落下高さごとに 10 回、合計 40 回とした。

Table 2. 実験条件

雰囲気	窒素
雰囲気圧力	大気圧
平板温度	$T_p = 623$ [K]
金属平板 粗さ, 材質	$R_y = 3.2$ [ $\mu$ m], SUS430
初期液滴径	$d = 2.5 \sim 3.0$ [mm]
落下距離	$H = 10, 40, 160, 400$ [mm]
衝突速度	$v = 0.15, 0.7, 1.7, 2.4$ [m/s]

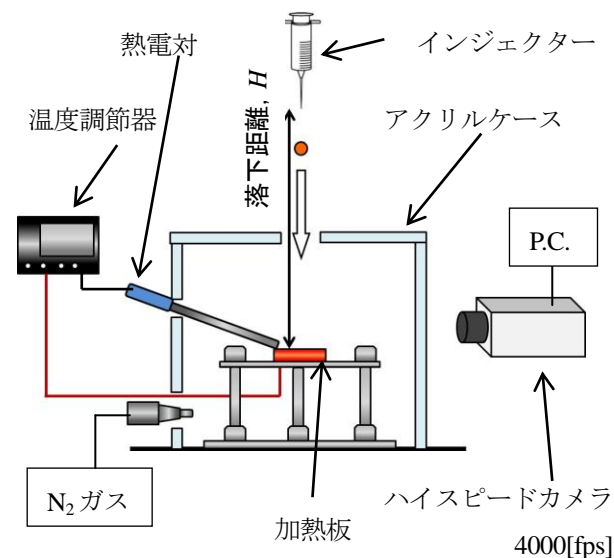


Fig. 4 実験装置

### 3.2 ウェーバー数

ウェーバー数は液体の慣性力と表面張力の比である。一般的に、液滴と平板の衝突において、液滴の挙動はウェーバー数が支配的なパラメータになることが知られている<sup>[5]</sup>。ウェーバー数は(1)式で定義される。各記号の意味を Table 3 に示す。

$$We = \frac{\rho d v^2}{\sigma} \quad (1)$$

Table 3. (1)式の各記号

液滴密度	$\rho$
初期液滴径	$d$
衝突速度	$v$
液滴表面張力	$\sigma$

液滴の密度はデータシート<sup>[6]</sup>より  $1.3 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup>、衝

突速度と液滴径は、GAP を噴霧した際のウェーバー数である 1.27~936(液滴径 1~10  $\mu\text{m}$ )の範囲を模擬できること、かつ再現性を確保する為に自由落下で得られることを考慮し、Table 2 のように設定した。表面張力については Wilhelmy 法を用いた測定装置により、GAP の表面張力を測定した。測定の結果は液温 18°C において、35 mN/m となった。

#### 4 実験結果及び考察

Figure 6 に、平板温度が 623 K のときのウェーバー数と平板接触時間の関係を示す。We=70 付近で平板接触時間を最小にする極値が存在すると考えられる。

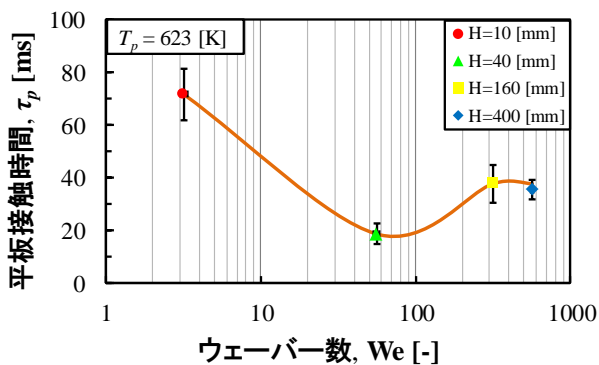


Fig. 6 ウェーバー数と平板接触時間の関係

ウェーバー数は、液滴の変形に関連するパラメータであるので、ウェーバー数と平板接触時間の関係を仲介していると考えられる液滴の平板との接触面積の変位を求めてみる。接触面積に関しては、Fig. 7 を参考に(2)式より接触面積変位率  $\omega$  を求めて、Fig. 8 に時間履歴で示した。

$$\omega = \left( \frac{d_{HA}^2}{d_{HB}^2} \right) \times 100 \quad (2)$$

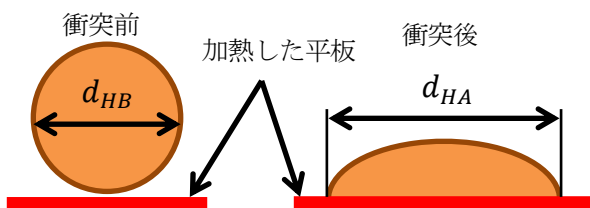


Fig.7 (2)式における各記号の意味

ここで、接触面積変位率が 100% を超えるということは、衝突前の断面積よりも大きい断面積で平板と接触している事を意味する。着地からの経過時間が 0~5 ms においては変動が大きく、それ以降は定常であるという結果が得られた。

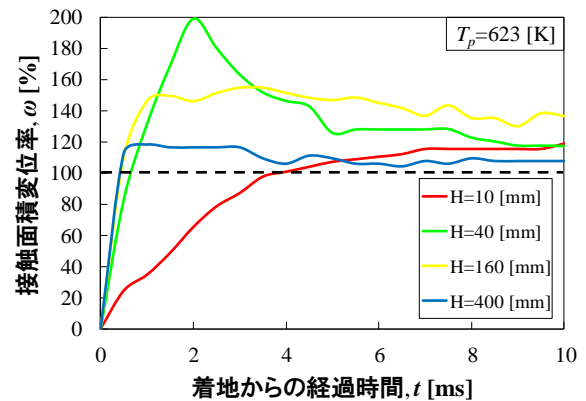


Fig. 8 接触面積変化率の時間履歴

さらに、平板から液滴への熱の流れ方を見るために、この二物質間の熱流束の時間履歴を算出した。熱流束は熱伝導方程式より近似的に求める<sup>[7]</sup>。モデルは Fig. 9 のような二次元非定常熱伝導方程式を考える。(3)式を差分化し、数値計算で算出した。その際、液滴が接触した瞬間( $t=0$ )に液滴側の表面温度が液滴の初期温度 ( $T_G=293$  K) になり、その後の熱伝導により温度が上昇する、ヒーター側の温度は変化しないという条件を用いた。差分距離は 0.1 mm、差分間隔は 0.5 ms とした。求めた熱流束の時間履歴を Fig. 10 に示す。

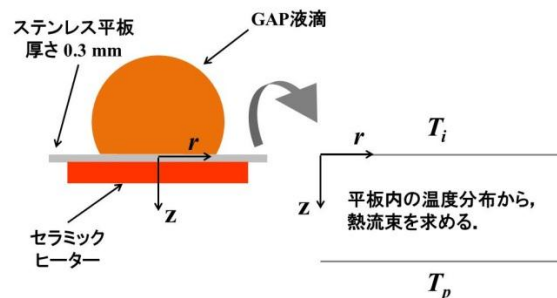


Fig. 9 熱伝導モデル

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left\{ \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right\} \quad (3)$$

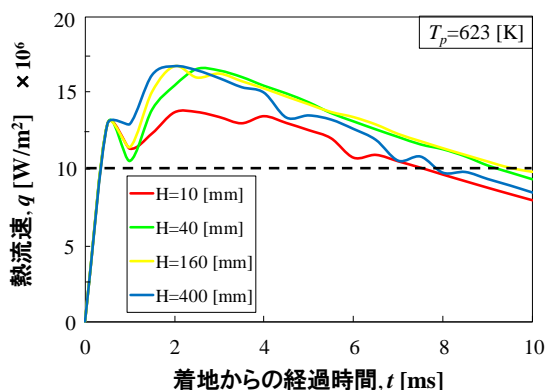


Fig. 10 熱流束の時間履歴

算出した接触面積と熱流束の時間履歴を重ね合わせることで、GAP 液滴へ流入した熱量と平板接触時間との関連を求める。熱量については、衝突時刻から 10 ms 後には、接触面積変位率の変動が少なくなっていること (Fig. 8), 熱流束は 10 ms 付近でオーダーが 1 つ落ちること (Fig. 10) の 2 点より、10 ms までに流入した量で評価する。求めた流入熱量と平板接触時間の関係を Fig.11 に示した。これより、ウェーバー数と平板接触時間の関係 (Fig.7) が極値をとったのは、平板との接触面積が大きくなった為、流入する熱量が増加したからである (Figs. 8, 11)。

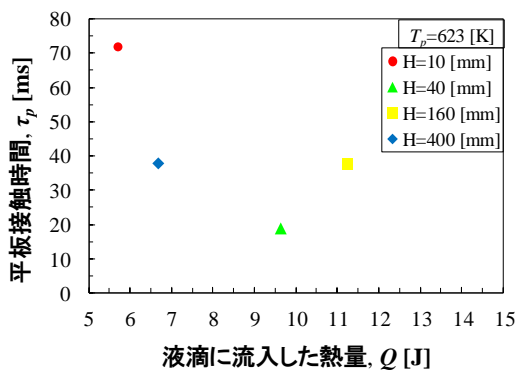


Fig. 11 流入熱量と平板接触時間の関係

最後に、算出した熱量、比熱、液滴の質量から 10 ms 後の GAP 液滴の内部温度を推算した。GAP 液滴に流入した熱量と内部温度との関係を Fig. 12 に示す。比熱の温度依存性は考慮していないため、平板温度よりも高い温度になっている点も見受けられるが、平板接触時間が短い点ほど内部温度が高いため、このことから

も平板との接触面積が平板接触時間に影響を及ぼしていると考えられる。

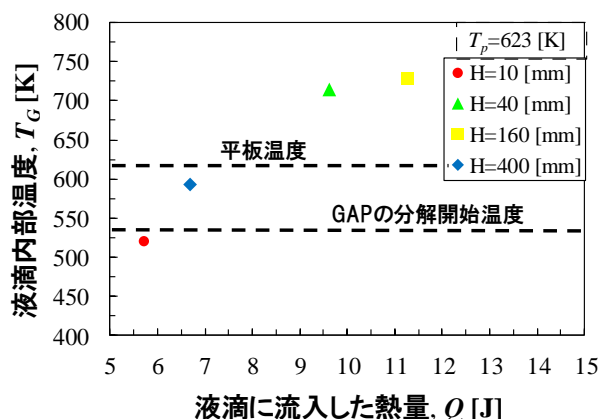


Fig. 12 流入熱量と液滴内部温度の関係

## 5 結論

GAP 液滴は、平板との接触面積が増大する程、平板接触時間も短くなる。また、平板接触時間を極小にするウェーバー数が存在する。

## 6 参考文献

- [1] ジョージ・P.サットン, 「ロケット推進工学」, 山海堂, pp.204-206, pp.228-229, p.320, 1995
- [2] 賀谷龍, 「次世代一液性推進薬の着火・燃焼特性—GAP 液滴—」, AIAA, 2009
- [3] 奥田庸平他, 「GAP を用いた一液性推進薬の着火特性-AP 粒子の添加による分解反応時間の短縮-」, 第 52 回日本大学理工学部学術講演会, 2008
- [4] ギュンター・ホンメル, 「危険物ハンドブック」, シュプリンガー・フェアラーク東京, p.272, 1991
- [5] 藤本仁他, 「表面粗さの異なる加熱金属平面に衝突する微小液滴の変形挙動特性」, 社会法人日本鉄鋼協会 鉄と鋼, Vol.82, No.12, pp.12-16, 1996
- [6] 日油株式会社, 「GAP5003 製品安全データシート」, 整理番号 TSD-808, 2009
- [7] 稲田茂昭 他, 「加熱面に衝突する液滴の非定常熱伝達(第 1 報, 固液接触状態に及ぼす液滴サブクール度の影響)」, 日本機械学会論文集(B 編)51 巻 463 号, pp.1047-1050, 1985