Experimental study of micro combustion of DDNP

○ 岡田 貴洋 (九大・工)
 生田 竜也 (九大・工)
 高橋 厚史 (九大・工)

山田 吉徳 (旭化成ケミカルズ)
 永山 邦仁 (九大・工)

Takahiro Okada, ¹Yoshinori Yamada, Tastuya Ikuta, Kunihiro Nagayama and Koji Takahashi
 Dept. Aeronautics and Astronautics, Kyushu University
¹Asahi Kasei Chemicals Corporation

Abstract : MEMS application using solid propellant has prospect of new device. However, such micro-scale combustion phenomenon using explosive powder has not been enough explored. This paper treats DDNP powders in MEMS tanks are examined by using MEMS structure in atmosphere and vacuum environments. Results obtained by high speed camera are discussed with powder property and ambient conditions.

Key Words : MEMS, DDNP, micro combustion

1. はじめに

半導体の超微細加工を駆使して作られたMEMS (Micro Electro Mechanical system)は情報通信分野だけでなく医療分野や航空宇宙分野などさまざまな分野への応用が期待されている。マイクロロケット[1]やマイクロタービン[2]などのPowerMEMSの研究が進められている。これは携帯用デバイスの従来のバッテリーに代わる新たな動力源として期待されている。これらは固体、液体、気体の燃料を化学反応させてエネルギーをとりだすが、それらの中でも特に火薬等の固体燃料はほかの燃料に比べ燃料漏れの心配が少ないという利点がある。さらに液体、気体を燃料とするものに比べ、バルブのような可動する部品が必要なく、タンクと着火のためのヒータのみで十分であるので構造が単純で小型化に適しているという利点もあり、新しいデバイスの創成が期待されている。しかし固体燃料を用いたマイクロスケールの燃焼現象はまだよくわかっていないということが問題点として挙げられる。また燃焼を行う周囲の環境が燃焼現象にどのような影響を与えるかもよくわかっておらずそれを知る必要がある。そこで本研究では雷管用起爆薬として用いられるジアゾジニトロフェノール(DDNP)を固体推進剤として用い、そのマイクロスケールにおける燃焼現象を調べた。

2. 実験

この実験に用いたマイクロタンクは幅400 μ m、高さ100 μ m、長さが2mmもしくは6mmの2種類でSiの微細加工技術を用いて製作し、この中にDDNPを充填して燃焼試験を行った。着火のためのヒータはガラスプレート上にPt/Ti金属薄膜ヒータを製作したものとタングステンワイヤーヒータの2種類を用意した。薄膜ヒータを使う場合、ヒータつきガラスプレート、マイクロタンクをFig. 1のように重ね、二つのパーツを接着、固定する。その後タンク内に火薬を充填し、最後にカバーガラスで蓋をする。カバーガラスとタンクも同様に接着しこれを実験試料とした。

タングステンワイヤーを用いる場合、薄膜ヒータのついていないガラスプレートとSiマイクロタンクでワイヤーをはさみ、接着した。そのほかは薄膜ヒータの場合と同様である。本研究で用いたワイヤーは ϕ 50 μ mである。実際の燃焼試験では製作したサンプルを電気回路に接続し、消費電力5Wで加熱した。このときの様子を高速カメラで撮影し、その撮影された映像から着火遅れ時間や燃焼速度を求めた。

3. 結果と考察

3.1 大気中燃焼試験 大気中燃焼試験では針状結晶DDNP、直径の異なる2つの球状DDNPの3種類を用いた。大気中でのDDNPの燃焼試験の結果および実験条件はTable 1のようになった。

Table 1を見ると火薬形状は燃焼速度には影響しないが、着火遅れ時間に影響を与えていることがわかる。火薬径が小さいほど着火遅れ時間が短く、応答性が良いことが確認された。これは火薬径が大きいほど熱容量が大きく、着火温度にまで上昇するのに時間がかかるためであると考えられる。

また、タンクの長さが長いほど速度が速くなる傾向があるが、粒径に依存しないことがわかった。

3.2 真空中燃焼試験 3.1節と同様のサンプルを真空チャンバー内に設置し、燃焼実験を行った。このとき使用した火薬は180 μ m球状DDNPを使用し、タンクは2mm、ヒータはPt/Ti薄膜ヒータを用いた。約10Pa程度の真空チャンバー内に試料をセットし実験を行った。その結果、燃焼現行の装置では燃焼しないことがわかった。特に薄膜ヒータはDDNPが燃焼する前に切れてしまうことが確認されたため、ヒータを直径50 μ mのタングステンワイヤーヒータに変更し、改めて実験を行った。その結果やはり燃焼はせず、DDNPが融解することがわかった。その原因として以下のようなことが考えられる。

- ・酸素バランスの悪さ
- ・火薬とヒータとの接触面積の小ささ
- ・球状DDNPの含有水分量

DDNPはもともと酸素バランスが悪い。そこでタンクに充填する際に酸化剤となるKClO₃を混合し、酸素バランスの影響を調べた。火薬とヒータの接触面積が小さいとヒータからの火薬に伝わる熱量が小さくなってしまう可能性がある。そこでヒータとの接触面積を増加させるため、充填する火薬より細かい針状結晶DDNPを用いて接触面積の影響を調べた。また球状DDNPは針状DDNPよりも水分を多く含んでいるのでその影響があるかを調べるために乾燥させたDDNPを燃焼させて調べた。

Table 2のNo.7~No.10がその結果である。Table 2に示した通り、どの場合も燃焼せずに融解した。Fig. 2はサンプルNo.7の実験後の様子である。Fig. 2のようにタンク内に充填したDDNPが溶解し、タンクとカバーガラスの隙間に広がっていた。その他のサンプルも同様の結果であった。この結果

Fig. 1 Configuration of micro rocket

Fig. 2 The result of combustion test No.7

Table 1 Experimental conditions results (atmosphere)

No.	Powder shape	Tank length [mm]	Ignition delay [ms]	Burning rate [cm/s]
1	Spicular $34 \times 85 \mu\text{m}$	2	4	28.57
2		6	7	23.08
3	Spherical $\phi 180 \mu\text{m}$	2	10	25.00
4		6	36	46.15
5	Spherical $\phi 90 \mu\text{m}$	2	5	28.57
6		6	5	35.29

Heater Pt/Ti heater
Pressure 1 [atm]
Power 5 [W]
Consumption

Table 2 Experimental conditions and results (vacuum)

No.	Powder shape	Pressure/Tank Type	Heater	Result
7	Spherical $\phi 180 \mu\text{m}$	Vacuum/Open	W wire	Melting
8	Spicular $34 \times 85 \mu\text{m}$	Vacuum/Open	W wire	Melting
9	Spicular (Dry type)	Vacuum/Open	W wire	Melting
10	Spicular + KClO_3	Vacuum/Open	W wire	Melting
11	Spherical $\phi 180 \mu\text{m}$	Atmospheric/Closed	Pt/Ti thin film	Burned
12	Spherical $\phi 180 \mu\text{m}$	Vacuum/Closed	Pt/Ti thin film	Burned

Tank length 2 [mm]
Pressure Atmospheric 1 [atm]
Vacuum 10 [Pa]
Power 5 [W]
Consumption

から酸素バランス、火薬とヒータの接触面積、DDNP 含水量のいずれも真空中燃焼試験における着火にはあまり関係がないということがわかった。

真空中で燃焼しない原因をさらに検討すると、ヒータをONにして加熱を始めたときに発生する可燃性ガスが外に漏れてしまい着火に至らないのではないかとということ挙げられる。これまで使用してきたサンプルはヒータ付近にガスの排出口があり、真空環境下では大気中に比べ排出されるガス量が多いことが予想される。そこで発生したガスの排出が着火に影響を与えるかを調べるため、新たに排出口を塞いだ密閉型のサンプルを製作し燃焼試験を行った。

3.3 密閉型サンプル燃焼試験 まず大気中で密閉型サンプルが燃焼するか調べた。Table 2 のサンプル No.11,12 は密閉度を上げるため改良した Pt/Ti 薄膜ヒータを使用した。この燃焼試験の結果、大気中では密閉状態でも DDNP が燃焼するということが確認できた。このときの燃焼の様子はサンプル No. 3 とほぼ同様であった。

次に真空中で密閉したサンプルの燃焼試験を行った。実験条件、実験結果は Table 2 の No.12 である。Table 2 で示したように真空中でも燃焼するということがわかった。しかし大気中での実験と比べて以下のような異なる点があった。

- ・ヒータ ON から約 100ms までの間ヒータ付近の DDNP の融解が確認されたが、その後燃焼した。
- ・発光しなかった。
- ・燃焼速度が大気中の試験に比べるとおよそ半分になった。

このような相違点があった原因として考えられるのは着火前のタンク内が減圧されてしまうということである。密閉

型サンプルではあるが完全に密閉できていたわけではなく、サンプルの真空引きの間に完全には塞ぎきれなかった微小な隙間からタンク内の空気が排出され、減圧されることが予想される。そのためヒータからの熱で発生したガスがタンクに充填して発火温度に達するまで時間がかかり着火遅れ時間が長くなったと考えられる。また発光せず、燃焼速度が遅くなった原因もタンク内の減圧により大気中に含まれる酸素が減少し、さらに DDNP 特有の酸素バランスの悪さが影響した結果、発生する熱量が大気中のものと比べると小さくなったためであると考えられる。

密閉型マイクロタンクを使用することで真空環境下でも DDNP が燃焼することが示された。

4. 結論

この研究では DDNP のマイクロスケールでの燃焼現象を調査した。大気中において 3 種類の DDNP の燃焼試験を行ったが、火薬の粒径が小さいほど反応性が良いことがわかった。また真空中の燃焼にいて、大気中で燃焼試験を行ったサンプルをそのまま使用しても着火せず融解するが、真空中であっても密閉型のサンプルであれば燃焼させられることが示された。

参考文献

- [1] H. Ebisuzaki, K. Takahashi, "Design and testing of multi-pulse MEMS solid rocket" International Workshop on Power MEMS 2003
- [2] O.Liedtke, A. Schulz, "Development of a new lean burning combustor with fuel film evaporation for a micro gas turbine" Experimental Thermal and Fluid Science 27 (2003) 363-369