

# 微粒APと粗粒APを用いたAN/AP系推進薬の燃焼特性

吉田冴子<sup>†</sup>, 甲賀 誠

防衛大学校応用化学科 〒239-8686 神奈川県横須賀市走水1-10-20

<sup>†</sup>Corresponding address: g44032@nda.ac.jp

2006年2月22日 受付 2006年4月24日 受理

## 要旨

環境性に優れた推進薬として、AN系コンポジット推進薬が注目されている。しかし、AN系推進薬は着火性や燃焼性が悪いという欠点がある。一方、AP系推進薬は、燃焼の際塩化水素を発生するが、着火性と燃焼性に優れている。AN/AP系推進薬は、それぞれの酸化剤の欠点を補い実用可能な推進薬であると考えられる。AP系推進薬の燃焼速度は、APの粒子に依存する。AN/AP系推進薬の燃焼速度は、AP粒子径の影響を受けると考えられる。本実験では、3 μmの微粒APと180 μmの粗粒APを用いたAN/AP系推進薬の燃焼特性について調べ、それらを比較した。AN/AP系推進薬の熱分解性は、AP粒子径の影響をほとんど受けなかった。一方、燃焼速度はAP粒子径やAP含有率に大きく影響されることがわかった。微粒APを用いたAN/AP系推進薬の一部は、中断燃焼あるいは部分的に輝炎を発生したり、側面を伝火するような不安定燃焼を起こすことを明らかにするとともに、その原因について考察した。

## 1. 緒言

現在、コンポジット推進薬の中で、酸化剤として過塩素酸アンモニウム (AP) を用いたAP系コンポジット推進薬が最も広く使われている。なぜなら、AP系推進薬は燃焼性だけでなく、製造性や貯蔵性にも優れているからである。AP系推進薬の比推力は、AP含有率の増加にしたがい大きくなる。また、その燃焼速度はAP粒子径の減少にしたがい大きくなり、20 μm以下の微粒APを用いると燃焼速度は著しく増加する。ロケットの高速化のために、高燃焼速度の推進薬が要求されている。高燃焼速度の推進薬を得るために、微粒APの調製法が研究され<sup>1)~3)</sup>、その微粒APを用いた推進薬の燃焼性が報告されている<sup>4)~7)</sup>。しかし、AP系推進薬は利点ばかりでなく欠点もある。APはその分子中に塩素を含んでいるために、その燃焼ガス中に多量の塩化水素が含まれる。大量の塩化水素の放出は環境汚染につながる。これは、AP系推進薬の最大の欠点である。

いくつかの塩化水素を発生しない酸化剤または爆薬を用いたコンポジット推進薬の研究が行われている。その中で、APに代わる酸化剤として、硝酸アンモニウム (AN) が注目されている。ANは吸湿性や固結性が高く、相転移によって比体積が変化するなどの欠点がある。また、AN系推進薬の比推力と燃焼速度は、AP系推進薬のそれらの値に比べて小さく、低圧での着火性も悪い<sup>8)~10)</sup>。AN系推進薬の燃焼速度はANの粒子径に依存しない<sup>9)</sup>ために、AP系推進薬に比べて、広範囲にわたる燃焼速度を持つ推進薬、特に高燃焼

速度の推進薬を製造することが困難である。AN系推進薬のこれらの欠点を克服するために、触媒の研究<sup>11)~13)</sup>、マグネリウムやアルミニウム等の金属燃料の添加<sup>14)~18)</sup>、高エネルギーバイндаであるアジ化ポリマーを用いる試み<sup>19)~22)</sup>等が行われているが、まだ実用化に至っていない。

酸化剤としてANのみを用いた推進薬の実用化は困難であるために、ANの一部を酸化力が強いAPに置き換えることによって、燃焼性を改善させる研究も行われている<sup>23)~27)</sup>。AN/AP系推進薬は、推進薬中にAPを含むために、燃焼ガス中に塩化水素を生じるが、その量はAP含有率が小さいほど少なくすることができる。酸化剤としてANとAPの両方を用いたAN/AP系推進薬は、塩化水素の発生量を低減させることができるとともに、ANとAPがそれぞれの欠点を補うことによって、最も実用化に近い推進薬と考えられる。しかし、AN/AP系推進薬についての研究は、まだ十分に行われていない。

上述したように、AP系推進薬の燃焼速度は、用いたAPの粒子径の減少にしたがって大きくなる。AN系推進薬の燃焼速度はANの粒子径に依存しない。これらの推進薬の燃焼速度は、酸化剤含有率の増加にしたがい大きくなる。以上のことから、AN/AP系推進薬の燃焼性は、ANとAPの質量割合やAPの粒子径の影響を受けると考えられる。本実験では、粗粒APと微粒APを用いて、ANとAPの質量割合の異なるAN/AP系推進薬を製造し、それらの推進薬の燃焼速度について調べた。それらの結果について報告する。

## 2. 実験方法

本実験では、酸化剤としてAPとANを用いた。粗粒AP (CAP) と微粒AP (FAP) の2種類のAPを調製した。CAPは試薬特級品を5分間振動ミルで粉碎したAPを、FAPは凍結乾燥法で調製されたAP<sup>2)</sup>を用いた。CAPおよびFAPの平均粒子径はそれぞれ180 μmおよび3 μmであった。ANは試薬特級品を5分間振動ミルで粉碎したものをを用いた。ANの平均粒子径は56 μmであった。バインダとしてHTPBを用いた。

推進薬の基本組成は、酸化剤80%、HTPB20%とした。硬化剤であるIPDIは、HTPBに対して外割で8%添加した。ANはHTPBとのcompatibilityの悪さが指摘されている。この欠点を改善するために、ラウリルアミンの添加が有効であると報告されている<sup>9)</sup>。前報<sup>9)</sup>に基づいて、ラウリルアミンはHTPBに対して外割で0.5%添加した。Table 1に本実験で製造された推進薬の組成を示す。推進薬AはANのみで製造された試料である。推進薬B~FはCAPを用いた試料で、推進薬FはCAPのみで製造された試料である。推進薬G~KはFAPを用いた試料で、CAPを用いた推進薬と同様の割合で5種類の試料を製造した。推進薬試料はφ10 mm × 40 mmの大きさに成型した。

推進薬の熱分解性を調べるために、TG-DTAを行った。TG-DTAは、室温から823 Kの温度範囲で、窒素雰囲気下、昇温速度20 K·min<sup>-1</sup>、試料量約10 mgで行った。

推進薬は、チムニー型ストランド燃焼器を用いて窒素雰囲気下、圧力範囲0.5~7 MPaで燃焼させた。燃焼実験は、同一圧力で3回以上行った。燃焼速度は推進薬の燃焼を高速ビデオカメラで撮影し、その状況を観察することによって測定した。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 熱分解特性

本実験で製造した推進薬のTG-DTA曲線をFig. 1に示す。Fig. 1 aはANのみで製造した推進薬Aの測定結果である。ANの結晶転移の吸熱ピークが398 Kに、融解による吸熱ピークが443 Kに現れた。融解後、発熱分解が起こり、539 Kに発熱分解のピークが現れた。TG曲線によれば、約500~540 Kで急激な重量減少が起こり、800 Kまでに約80%の重量

減少が起こった。

Fig. 1 cとeは、それぞれCAPのみで製造された推進薬FとFAPのみで製造された推進薬KのTG-DTA曲線である。いずれもAPの結晶転移による吸熱ピークが513 Kに現れた。その後、発熱分解が起こった。推進薬FとKの発熱分解のピークはそれぞれ676 Kと643 Kであった。TG曲線によれば、推進薬FとKの発熱分解の開始温度はほぼ同じ(約540 K)であったが、発熱分解終了時の温度は、それぞれ約690 Kと約660 Kであった。

推進薬BはCAPを、推進薬GはFAPを含むAN/AP系推進薬であり、APを16%含有している。これらのDTA曲線によれば、推進薬Aとほぼ同じ温度に、ANの結晶転移と融解による吸熱ピーク、およびANに起因する推進薬の発熱分解のピークが現れた。推進薬Bの637 Kと推進薬Gの612 Kに現れた発熱ピークは、それぞれCAPとFAPによるものと考えられる。TG曲線によれば、約480 Kから約550 KにANに起因する重量減少(約50%)、約550 Kから約650 KにAPによる重量減少(約20%)が現れた。このことから、推進薬中のANとAPは、それぞれ独立して熱分解していると考えられる。これは、桑原らの報告<sup>10)</sup>と一致している。ANの有無に関わらず、FAPを含む推進薬のAPに起因する発熱分解は、CAPを含む推進薬のそれより20~30 K低温側にシフトした。しかし、AP粒子径の差によるANの熱分解への影響は見られなかった。

### 3.2 燃焼特性

燃焼速度の測定結果をFig. 2に示す。ANのみで製造された推進薬Aは1 MPa以下で着火せず、2 MPa以上では安定に燃焼した。いずれのAPを用いた場合も、AN/AP系コンポジット推進薬の燃焼速度はAN含有率の減少、すなわちAP含有率の増加にしたがって大きくなった。AP含有率16%の推進薬Bと推進薬Gは0.5 MPaで着火しなかった。CAPを含んだ推進薬の中で、AP含有率32%以上の推進薬C~Fは本実験の圧力範囲において安定な燃焼をした。FAPを含んだ推進薬の中で、AP含有率32%の推進薬Hは2 MPa以下では安定した燃焼が得られたが、3 MPa以上において中断燃焼した。AP含有率48%の推進薬Iは部分的に輝炎を発生したり、端面燃焼せず側面を伝火するような

Table 1 Propellant formulations.

Symbol	AN (%)	AP		HTPB (%)	AP/Oxidizer ratio (-)
		CAP (%)	FAP (%)		
A	80	—	—		0
B	64	16	—		0.2
C	48	32	—		0.4
D	32	48	—		0.6
E	16	64	—		0.8
F	—	80	—	20	1
G	64	—	16		0.2
H	48	—	32		0.4
I	32	—	48		0.6
J	16	—	64		0.8
K	—	—	80		1

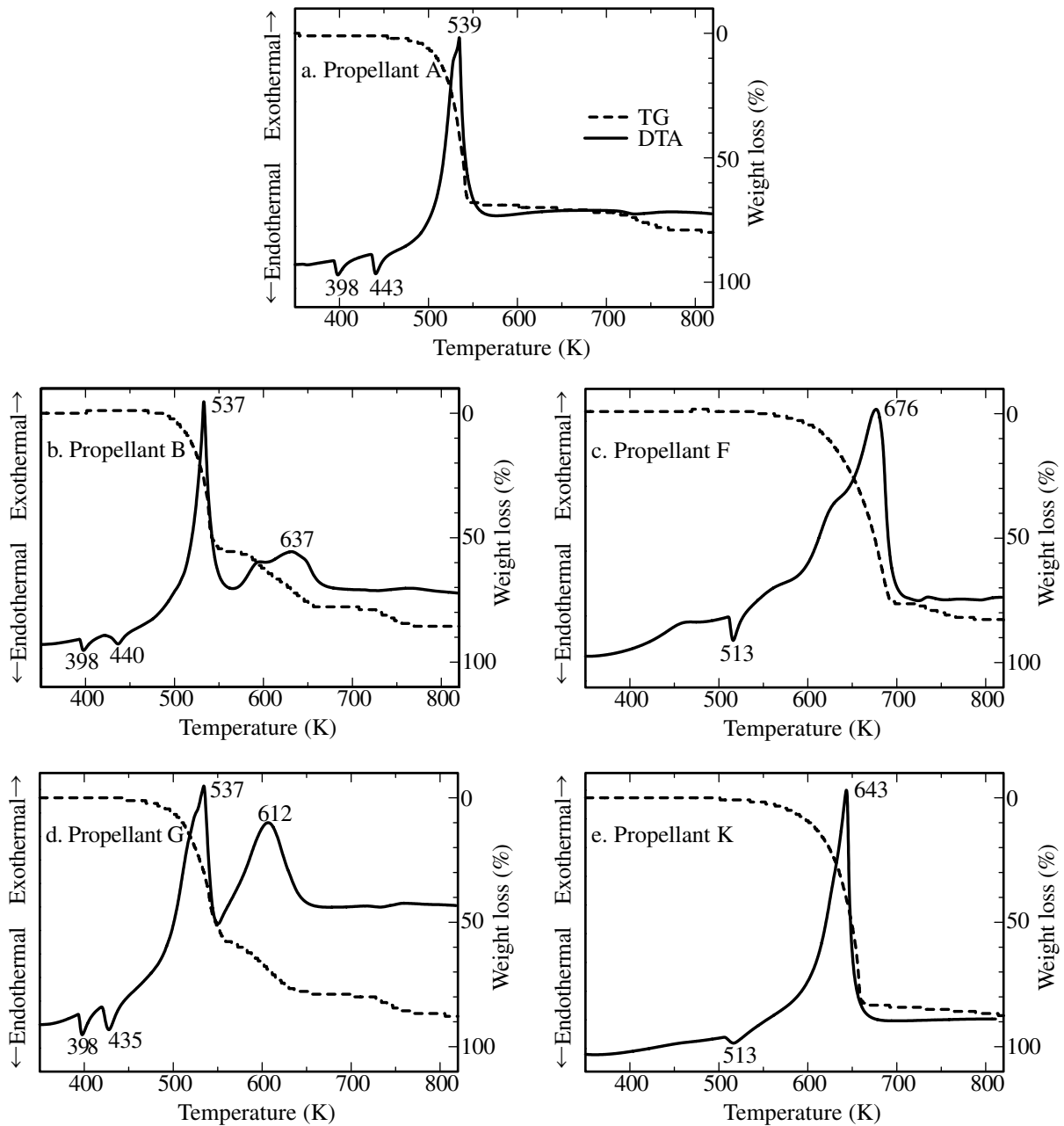


Fig. 1 TG-DTA curves.

不安定な燃焼が起こった。AP含有率64%以上の推進薬JとKは、本実験の圧力範囲において安定に燃焼した。

燃焼速度の測定結果に基づいて、AN/AP系推進薬の燃焼速度に及ぼす酸化剤中のAPの質量割合 (AP/Oxidizer比) の影響を求めた。その結果をFig. 3に示す。AN/CAP系推進薬の燃焼速度は、AP/Oxidizer比の増加にしたがって緩やかに増加している。AN/FAP系推進薬における燃焼速度の増加は、AP/Oxidizer比が0.2まではAN/CAP系推進薬のそれとほとんど同じであった。AP/Oxidizer比が0.8~1における燃焼速度の増加率は、AN/FAP系推進薬の方がAN/CAP系推進薬よりも著しく大きかった。

上述したように、CAPを用いたすべての推進薬では安定な燃焼が得られた。一方、FAPを用いた推進薬のうち、推進薬HとIは中断燃焼あるいは不安定燃焼をした。5 MPaにおいて中断燃焼した推進薬HとIをFig. 4に示す。中断燃焼

した推進薬Hの燃焼表面は、燃焼の進行方向に対してほぼ垂直であった。すなわち、推進薬Hは端面燃焼していることがわかった。一方、推進薬Iの燃焼表面は斜めになっている。これは、上述したように部分的に輝炎を発生したり、端面燃焼せず側面を伝火するような不安定な燃焼を起こしたためである。

中断燃焼した推進薬の表面をSEMで観察した。一例として、5 MPaで中断燃焼した表面のSEM写真をFig. 5に示す。推進薬Hが中断燃焼した表面 (Fig. 5 a) には、約3 μmの孔と約20~40 μmの孔が観察された。FAPの平均粒子径は3 μmである。小さい孔はFAPの痕跡であると考えられる。大きい孔の中には燃焼残留物があり、これはANであると考えられる。推進薬Iが中断燃焼した表面 (Fig. 5 b) には、約3 μmの孔と凸部、ならびに約30 μmの凸部が観察された。孔はFAPの痕跡であり、小さい凸部の表面下には

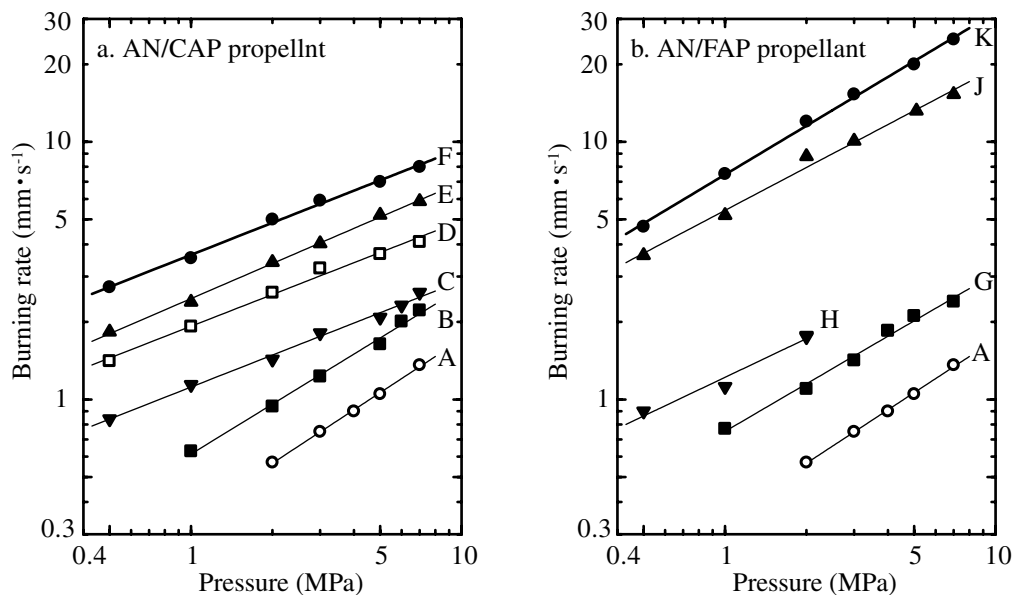


Fig. 2 Burning rate characteristics of AN/AP propellants.

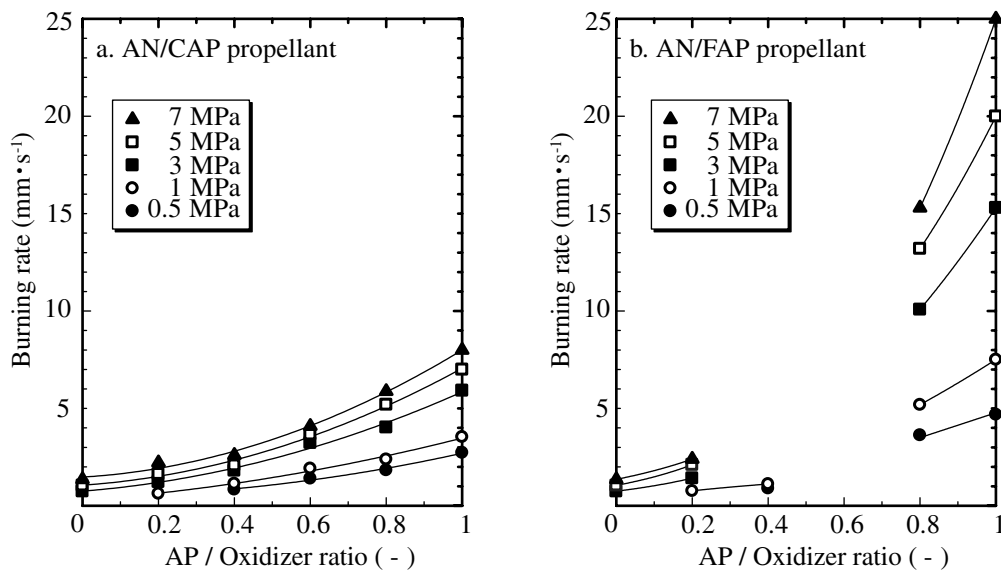


Fig. 3 Influence of AP/Oxidizer ratio on burning rate of AN/AP propellants.

FAPが存在し、大きい凸部の表面下にはANが存在すると考えられる。推進薬HとIのいずれの燃焼表面にもAPは露出していなかった。推進薬HとIが中断燃焼または不安定燃焼した原因を次項で考察する。

### 3.3 AN/FAP系推進薬の中断燃焼機構

本実験で製造した推進薬HとIは、酸化剤であるANとFAP、バインダであるHTPBから構成されている。FAPの粒子径はANのその約1/20と小さい。FAPはHTPBに分散し、そのFAPが分散しているHTPBの中に、ANが分散していると考えられることができる。FAPが分散しているHTPBをFAP-filled regionと呼ぶこととする。この場合、AN/FAP/HTPB系推進薬はANとFAP-filled regionで構成していると見なすことができる。

AN/FAP/HTPB系推進薬の燃焼は、それぞれの分解ガスが拡散・混合して燃焼するために非常に複雑である。上述したように、本実験ではAN/FAP/HTPB系推進薬をANとFAP-filled regionで構成していると考えられる。AN/FAP/HTPB系推進薬の燃焼をANとFAP-filled regionの燃焼としてとらえて、中断燃焼機構について以下考察する。

ANとFAP-filled regionが燃焼する場合、その燃焼特性はANとFAP-filled regionの燃焼性に大きく依存する。ANは酸化剤であるので、中断燃焼はFAP-filled regionの燃焼性に起因すると思われる。FAP-filled regionの燃焼速度の測定結果をFig. 6に示す。FAP-filled regionの燃焼速度は、FAP含有率の減少にしたがって小さくなった。FAP含有率68%では0.5および7 MPaで中断燃焼が起こった。FAP含有率62%以下では、0.5~7 MPaの範囲で燃焼しなかった。

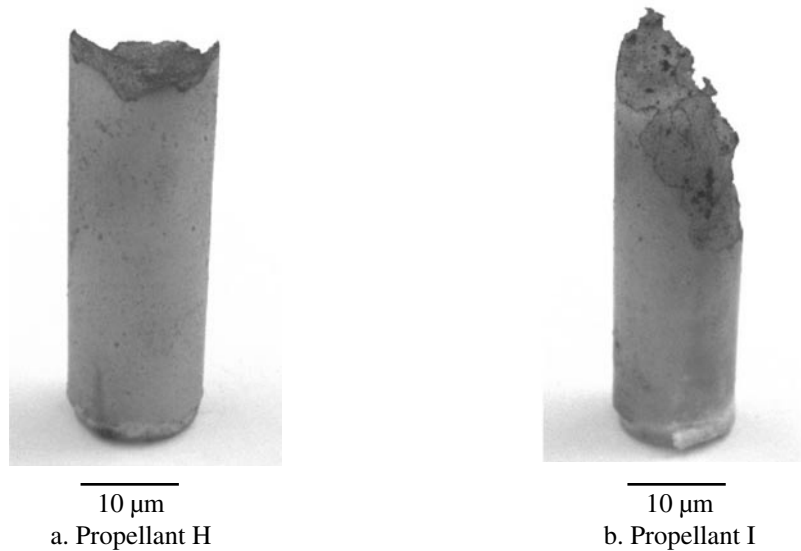


Fig. 4 Photographs of propellants self-quenched at 5 MPa.

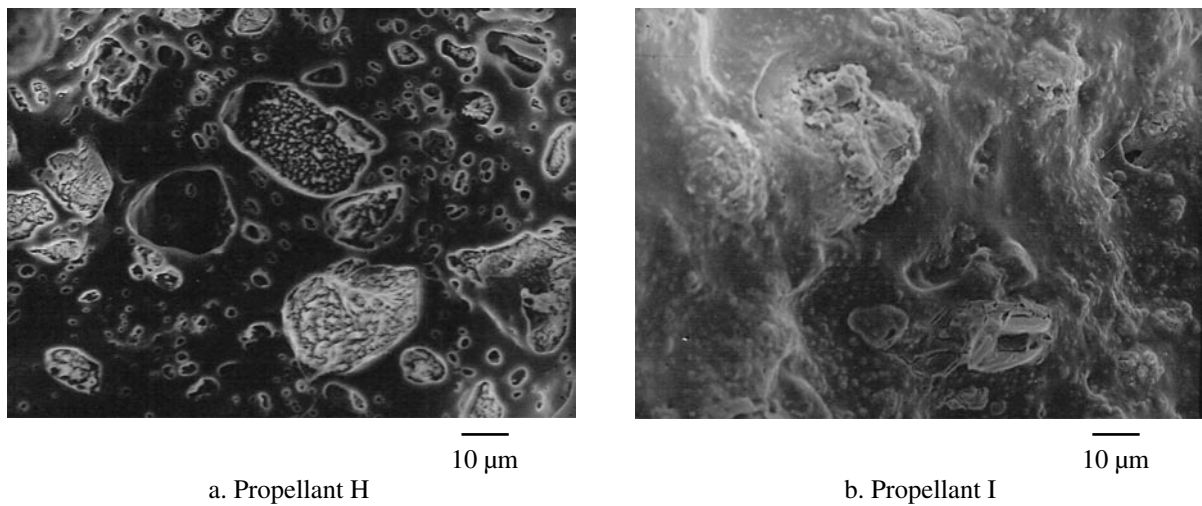


Fig. 5 SEM photographs of burning surfaces self-quenched at 5 MPa.

中断燃焼した推進薬HのFAP-filled regionはFAP含有率61.5%であり、不安定燃焼した推進薬Iのそれは70.6%であった。Fig. 6に基づけば、推進薬HのFAP-filled regionは自然性がなく、推進薬Iのそれは自然性があることがわかった。

Fig. 7に、AN/FAP/HTPB系推進薬の燃焼表面モデルを示す。ANとFAP-filled regionは、酸化性成分であるANの分解ガスと燃料成分であるFAP-filled regionの分解ガスが拡散・混合して燃焼する。熱は気相と燃焼表面において発生する。ANとHTPBは吸熱して分解する。ANは、主に気相で発生した熱のフィードバックによって分解すると考えられる。一方、FAP-filled region中のHTPBは、気相からの熱とFAPが熱分解する際に燃焼表面で発生した熱によって分解すると考えられる。ANとFAP-filled regionの燃焼が継続するためには、燃焼表面および気相で発生した熱によって、燃焼表面からそれぞれの分解ガスが発生し続けなければならない。言い換えるならば、ANとFAP-filled regionが燃焼するために必要な分解ガスを発生しなくなると、燃焼は中断する。

推進薬Hが2 MPa以下で安定に燃焼し、3 MPa以上で中断燃焼した原因について考察する。燃焼表面におけるエネルギーバランス式に基づけば、燃焼速度は次式のように表される<sup>28)</sup>。

$$r = \frac{\lambda_g (dT/dx)_{s^+}}{\rho_p \cdot c_p (T_s - T_o - Q_s / c_p)} \quad (1)$$

ここで、 $r$ は燃焼速度、 $\lambda_g$ は推進薬気相の熱伝導率、 $(dT/dx)_{s^+}$ は燃焼表面の気相側温度勾配、 $\rho_p$ は推進薬の密度、 $c_p$ は推進薬の比熱、 $T_s$ は燃焼表面温度、 $T_o$ は推進薬初期温度、 $Q_s$ は推進薬固相反応層における発熱量である。 $\lambda_g (dT/dx)_{s^+}$ は気相から燃焼表面への熱移動量を表している。圧力が増加すると火炎が燃焼表面に近づくために、 $(dT/dx)_{s^+}$ は大きくなる。(1)式によれば、 $(dT/dx)_{s^+}$ が大きくなれば、推進薬の燃焼速度は増加する。

APの粒子径が小さくなるほど、AP粒子1個が発生する

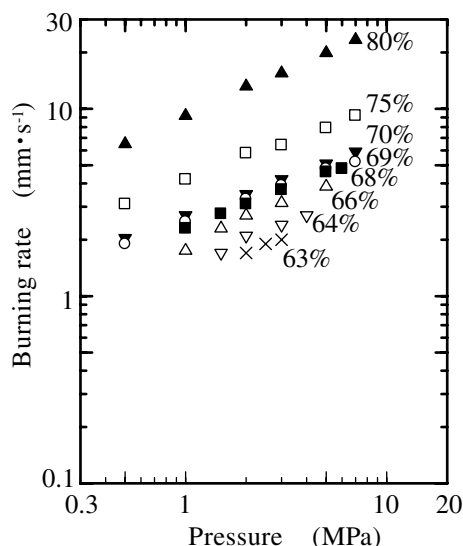


Fig. 6 Burning rate characteristics of FAP-filled region.

熱量は小さく、発熱している時間も短くなる。圧力が増加してAPの分解速度が速く<sup>29)</sup>なれば、APが発熱分解している時間は更に短くなる。したがって、高圧ではFAPは瞬時に発熱分解し、表面上から消失するために、FAPの分解と燃焼によってHTPBを加熱できる時間は極めて短い。

Fig. 6に示したように、FAP含有率が小さい推進薬は、低圧領域と高圧領域から燃焼の中断が起こった。高圧領域において、表面に露出したAPは瞬間的に発熱分解して消失してしまうために、その分解熱と気相から移動する熱によって、燃焼表面上のHTPBを分解できなくなり、燃焼は中断する<sup>30)</sup>。低圧領域では、APの分解熱および気相からフィードバックする熱で融解したHTPBが燃焼表面に露出したAPを覆ってしまうために、燃焼が中断する<sup>30)</sup>。

推進薬HのFAP-filled regionは、AP含有率が低いために自然性がない。推進薬HはANを48%含有している。推進薬Hが燃焼を継続するためには、酸化剤であるANが分解して酸化性ガスを補う必要がある。推進薬Hは2 MPa以下で安定に燃焼した。圧力が減少すれば、 $(dT/dx)_{s+}$ が小さくなり、気相からフィードバックする熱量は減少する。その結果、推進薬の燃焼速度は小さくなる。上述したように、推進薬中のANが燃焼すれば、酸化性ガスが補われるため、火炎が形成され、その火炎から燃焼表面に熱はフィードバックする。低圧において、気相からフィードバックする熱量が小さくなくても、推進薬の燃焼速度が遅くなれば、燃焼表面が加熱される時間は長くなる。燃焼表面を加熱する時間が長くなり、表面上にあるANとHTPBを分解するまで加熱できたために、燃焼が継続したと考えられる。

推進薬Hは3 MPa以上で中断燃焼した。圧力が大きくなると、気相から燃焼表面への熱移動量が増加するが、FAPは瞬間的に分解する。FAPの分解および燃焼により発生した熱は、極めて短い時間しかANとHTPBを加熱しないために、ANとHTPBから推進薬の燃焼に必要な分解ガスを発生できなくなり、中断燃焼が起きたと考えられる。Fig. 5 aに示したように、中断燃焼した推進薬Hの表面上に

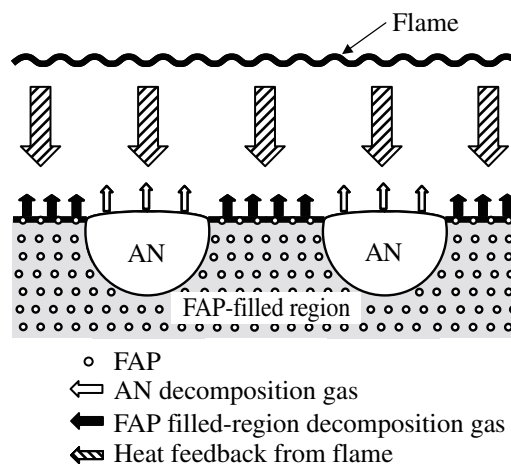


Fig. 7 Burning surface structure model of AN/FAP/HTPB propellant.

はFAPの痕跡と見られる孔があり、その中にFAPは残っていなかった。また、ANの燃焼残留物が観察された。Fig. 5 aはこの考察を支持するものである。

推進薬IのFAP-filled regionは自然性がある。すなわち、ANから発生する酸化性ガスがFAP-filled regionの燃焼を補わなくても、FAP-filled regionはそれ自身で燃焼できる。一方、ANは気相からのフィードバック熱によって融解し、その後分解する。ANは5分間振動ミルで粉碎して調製されたために、その粒度分布は5~110  $\mu\text{m}$ の範囲内にあった。燃焼表面に露出した微細なANは短時間で分解できるために、FAP-filled regionの燃焼面の後退とほぼ同時に燃焼するが、粗粒ANは融解して分解するまである程度の時間を必要とし、その間推進薬の燃焼表面上に存在すると考えられる。3.2項で述べたように、推進薬Iは部分的に輝炎を発生しながら燃焼した。推進薬表面に露出した粗粒ANが分解し、その酸化性ガスがFAP-filled regionの可燃性ガスと拡散混合して、瞬間的に着火燃焼した時に輝炎を発生する。この瞬間的な燃焼により発生した熱は、部分的に推進薬の燃焼を促進させるために、不安定燃焼が起きたと考えられる。

#### 4. 結論

粗粒AP (CAP)と微粒AP (FAP)を用いたAN/AP/HTPB系コンポジット推進薬の燃焼特性を調べ、それらを比較した。その結果、以下の事項が明らかになった。

- (1) APの粒子径は、AN/AP/HTPB系推進薬中のANの熱分解性にほとんど影響を及ぼさなかった。
- (2) AN/AP/HTPB系コンポジット推進薬の燃焼速度は、AN含有率の減少すなわちAP含有率の増加にしたがって大きくなった。AP含有率に対する燃焼速度の増加は、AN/CAP系推進薬よりもAN/FAP系推進薬の方が大きかった。
- (3) AN/CAP系推進薬は安定に燃焼した。一方、AN/FAP系推進薬は、AN/AP/HTPB = 48/32/20の組成では3 MPa以上で中断燃焼が起こり、AN/AP/HTPB = 32/48/20

では0.5~7 MPaにおいて不安定燃焼が起こった。

- (4) 一部のAN/FAP系推進薬で起きた中断燃焼または不安定燃焼は、ANの燃焼性およびFAPが分散しているHTPBの燃焼性に起因することがわかった。

## References

- 1) M. Kohga, Y. Hagihara, Journal of the Society of Powder Technology, Japan, 33, 273 (1996).
- 2) M. Kohga, Y. Hagihara, Kagaku Kogaku Ronbunshu, 23, 163 (1997).
- 3) M. Kohga, Y. Hagihara, Journal of the Society of Powder Technology, Japan, 34, 437 (1997).
- 4) M. Kohga, Y. Hagihara, Journal of the Society of Powder Technology, Japan, 34, 522 (1997).
- 5) M. Kohga, Y. Hagihara, Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 23, 182 (1998).
- 6) M. Kohga and Y. Hagihara, Kayaku Gakkaishi (Sci. Tech. Energetic Materials), 61, 51 (2000).
- 7) M. Kohga and Y. Hagihara, Sci. and Tech. Energetic Materials, 64, 75 (2003).
- 8) Y. Arakawa, M. Kohga, H. Tsuzuki and Y. Hagihara, Kayaku Gakkaishi (Sci. Tech. Energetic Materials), 58, 76 (1997).
- 9) Y. Arakawa, M. Kohga, H. Tsuzuki and Y. Hagihara, Kayaku Gakkaishi (Sci. Tech. Energetic Materials), 58, 83 (1997).
- 10) C. Ommen, S. R. Jain, Journal of Hazardous Materials, 67, 253 (1999).
- 11) Y. Hagihara, T. Ichikawa, H. Shinpo and M. Suzuki, Kogyo Kayaku (Sci. Tech. Energetic Materials), 52, 390 (1991).
- 12) H. Nakamura, M. Akiyoshi, K. Sakata and Y. Hara, Kayaku Gakkaishi (Sci. Tech. Energetic Materials), 61, 107 (2000).
- 13) S. Prem Flex, G. Singh, Combustion and Flame, 135, 145 (2003).
- 14) M. Quinn Brewster, Todd A. Sheridan, A. Ishihara, Journal of Propulsion and Power, 8, 760 (1992).
- 15) T. Kuwahara and N. Shinozaki, Kogyo Kayaku (Sci. Tech. Energetic Materials), 53, 131 (1992).
- 16) B. N. Kondrikov, V. E. Annikov, V. Yu. Egorshv, L. DeLuca, C. Bronzi, Journal of Propulsion and Power, 15, 763 (1999).
- 17) H. Murata, Y. Azuma, T. Tohara, M. Simoda, T. Yamaya, K. Hori and T. Saito, Kayaku Gakkaishi (Sci. Tech. Energetic Materials), 61, 58 (2000).
- 18) Brian E. Greiner, Robert A. Frederick Jr., Marlow D. Moser, Journal of Propulsion and Power, 19, 713 (2003).
- 19) K. Kato and G. Nakashita, Kayaku Gakkaishi (Sci. Tech. Energetic Materials), 56, 131 (1995).
- 20) Y. Kazita, T. Saito, T. Yamaya, M. Shimoda and A. Iwama, Kayaku Gakkaishi (Sci. Tech. Energetic Materials), 57, 1 (1996).
- 21) Y. Oyumi and E. Kimura, Kayaku Gakkaishi (Sci. Tech. Energetic Materials), 57, 9 (1996).
- 22) M. Takizuka, Kayaku Gakkaishi (Sci. Tech. Energetic Materials), 59, 181 (1998).
- 23) K. Kishore, V. K. Rajalekshmi, Indian Journal of Technology, 18, 334 (1980).
- 24) T. Kuwahara and N. Shinozaki, Kayaku Gakkaishi (Sci. Tech. Energetic Materials), 55, 108 (1994).
- 25) T. Kuwahara and S. Matsuo, Kayaku Gakkaishi (Sci. Tech. Energetic Materials), 56, 135 (1995).
- 26) T. Kuwahara, Kayaku Gakkaishi (Sci. Tech. Energetic Materials), 60, 67 (1999).
- 27) F. Nihal Tuzun, B. Zuhtu Uysal, Journal of ASTM International, 2, 233 (2005).
- 28) N. Kubota, "Pyrotechnic Chemistry", Chapter 11, p. 16 (2004), Journal of Pyrotechnics, Inc.
- 29) S. Morisaki, K. Komamiya, Thermochimica Acta, 12, 239 (1975).
- 30) M. Kohga and Y. Hagihara, Sci. and Tech. Energetic Materials, 64, 68 (2003).

# Burning characteristics of AN/AP-based composite propellants prepared with fine and coarse AP particles

Saeko Yoshida<sup>†</sup> and Makoto Kohga

Ammonium nitrate (AN)-based composite propellant has been attracted, primarily because of the clean burning nature of AN, oxidizer. However, this propellant has some disadvantages such as poor ignition and low burning rate. Ammonium perchlorate (AP)-based composite propellant has excellent ignition and burning characteristics, although the combustion gases include HCl. It is expected that AN/AP-based propellant would have an acceptable performance for practical applications because the disadvantages of the AN-based propellant would be compensated for the advantages of the AP-based propellant. The burning rate of the AP-based propellant depends on the AP particle size. The burning characteristics of the AN/AP-based propellant would be influenced by the AP particle size. In this study, burning characteristics of the AN/AP-based propellants with fine AP and coarse AP; 3  $\mu\text{m}$  and 180  $\mu\text{m}$ , were investigated. The thermal decomposition behaviors of the AN/AP propellants were independent of the AP particle size. The burning rate characteristics of AN/AP propellants were remarkably effected by the particle size and the content of AP. Some of the AN/AP propellants prepared with fine AP self-quenched or burned improperly: partial flashing flame and flame propagation along the side of the propellant. Furthermore, the cause of these unstable combustions was revealed.

**Keywords:** Ammonium nitrate, Ammonium perchlorate, Composite propellant, Combustion

National Defense Academy, 1-10-20 Hashirimizu, Yokosuka, Kanagawa 239-8686, JAPAN

<sup>†</sup>Corresponding address: g44032@nda.ac.jp