

GAP/AN/AP系低公害推進薬の低圧における着火特性

—マグナリウム効果について—

梶田裕子*, 斎藤猛男**, 山谷寿夫**

霜田正隆**, 岩間 彬***

過塩素酸アンモニウムを20~30%含むGAP/AN/AP系低公害推進薬の低圧における着火特性が、CO₂レーザを用いて研究された。AN-40及びマグナリウムを含むMg・Al-5推進薬共に、39.9~53.2kPa (300~400Torr) 以上の減圧空気雰囲気中では自立着火するが、不活性雰囲気中では非自立着火であった。この様に自立着火性には、雰囲気中の酸素が影響を与えている。更に雰囲気圧力を低下させると両推進薬共不安定な振動現象を生じる。Mg・Al-5推進薬は、AN-40よりやや振動現象を生じやすい。低熱流束側では、マグナリウム入り推進薬は、AN-40推進薬に比べて着火時の表面温度が約20℃低いにも関わらず、着火遅れ時間は長く、それだけ多くのエネルギーを吸収し、表面近傍の固相内の熱層も厚くなり、AN-40推進薬より自立着火性に優る。高熱流束側では、両推進薬は着火遅れ時間、自立着火性とも同等の着火性能を示した。DTAによる熱分解研究から、推進薬組成混合物において、マグナリウムを硝安に対し0.1添加する事は、APを硝安に対し0.25増加することとほぼ同等の熱分解効果を示した。これが高熱流束側でのAN-40とMg・Al-5推進薬の着火性能がほぼ同等である原因の一つであると思われる。

1. 緒 言

固体推進薬の低公害化の観点から、従来使われてきた酸化剤であるCl元素を含む過塩素酸アンモニウム(AP)の代替酸化剤として再び硝酸アンモニウム(AN)が脚光を浴びるようになってきた。しかしながら、ANには製造時や貯蔵時において問題となる吸湿性や相転移による比体積の変化がある。それらについては、福山、その他多数の研究¹⁻¹⁰⁾が工業火薬に発表されている。最近では、ANとKNO₃、NiOやZnOとの共晶により、ANの常温付近に存在する相転移点を消滅させたり、移動させたりする相安定化硝安

の研究^{11), 12)}が盛んに行われている。ANは燃焼速度が小さく、燃焼温度が低いという燃焼性能上の欠点を持ち、AN系推進薬はAP系推進薬に比べ燃焼・着火性において劣る¹³⁾。そこで、AN系推進薬のその欠点を補うために高エネルギー物質をバインダーとして使用し、更に、金属燃料としてマグネシウム粉を混入し¹⁴⁾、従来の推進薬のエネルギーレベルを保持しようという考えが生じてきている。高エネルギーバインダーとして一番実用性に近いのはグリンジルアジ化ポリマー(GAP)であり、GAP自身の熱分解や燃焼研究¹⁵⁻¹⁸⁾、更に種々な酸化剤と組み合わせた推進薬の燃焼挙動¹⁹⁾等多くの研究が行われている。それらの研究から、GAPの熱分解の律速反応は初期におけるアジド基からのN₂ガスの分離であり、その後主鎖が切れ、HCN、(CN)₂、N₂Oや低級炭化水素が生成することがわかってきた。しかし、現在までの所、酸化剤としてANのみを使用した推進薬は実用的性能を発揮することは出来ず、APを一部混入せざるをえない状態である。φ70mm小型ロケットモータの地上燃焼実験の結果から、最低30%程度のAPを混入せざるをえない²⁰⁾。従ってAPから発生する塩化水素ガスの量は、従来の

1995年8月24日受理

*東京応化工業(株)

〒253-01 神奈川県高座郡寒川町田端1590

TEL 0467-75-2151

**文部省宇宙科学研究所 宇宙推進研究系

〒229 神奈川県相模原市由野台3-1-1

TEL 0427-51-3911 Ext. 2827

FAX 0427-51-1183

***リードテック(株)

〒225 神奈川県横浜市青葉区あざみ野

3-4-8-403

TEL 045-903-6089

FAX 045-903-6089

AP系推進薬に比べて半減されるが、完全な除去にはほど遠い。しかし、着火・燃焼性向上のため入れたマグネシウム粉末により、AP中の塩素原子はマグネシウム金属と優先的に反応し、塩化マグネシウムとして掃気される可能性がある。

現在の研究は、AN系推進薬の低圧における着火特性の研究として、マグナリウム合金(Mg・Al)の添加による低圧着火への効果を調べた。着火・燃焼促進剤として、製造工程において危険性を伴うマグネシウムの代わりにMg/Al=50/50のマグナリウム合金を用いた。試料は、酸化剤70%、GAP30%のAN系推進薬で、酸化剤70%中30%AP、40%ANであるAN-40推進薬、及びそれと同じ割合の酸化剤を含む推進薬で、APを20%に減らしAN50%とした代わりに、GAP30%のうち5%をマグナリウム(Mg・Al)で置き換えたMg・Al-5推進薬について0.1MPa(1気圧)以下の減圧下での着火性を調べた。推進薬中に混入したマグナリウム量は、Mgが優先的にAP中のClと反応すると仮定した場合、ClをMgCl₂として掃気するに十分な量である。

2. 実験方法

試料は、Table 1に示す組成で実験室的に製造した推進薬ブロックから切り出した3×3×15mmのストランドである。

APは日本カーリット製、ANは関東化学の市販の1級試薬、マグナリウムはMg/Al=50/50のレアメタリック(株)製である。GAPは日本油脂製(分子量2270)のプレポリマーをダイセルヒュルス製イソフォロンディイソシアナート(IPDI)と東京化成工業(株)のトリメチロールプロパン(TMP)で硬化したものである。

その他、ANの熱分解触媒であるニクロム酸アンモニウム(AD)、燃焼安定剤としてのジルコニウム粉、放射吸収剤としてのカーボンブラック等をそれぞれ少量ずつ含む。上記の試料が空気またはアルゴンガス(Ar)で満たされた減圧チャンバー内に水平におかれ、時間的にも空間的にも放射強度分布が均一化された波長10.6μmのCO₂レーザーにより照射され着火された。着火時間(t_i)は試料表面にレーザー光が照射された時から、最初の火花がフォトランジスターにより検知されるまでの経過時間である。表面温度履歴は試料表面に張られたφ20μmのKタイプ熱電対により求めた。実験装置の詳細は、文献²¹⁾に示す。又各試料の熱的性質をDTAにより調べた。更にAP及びマグナリウム金属粉のANの熱分解反応への影響を調べるために、AN/AP/AD=20/10/1、AN/AP/AD=20/15/1、AN/AP/AD/Mg・Al=20/10/1/2の各粉末混合試料についてもDTA測定を行った。DTA測定は、約5mgの

Table 1 Propellant formulation

Propellant Ingredient	Mg・Al-5	AN-40
AP ^(a)	20	30
AN ^(b)	50	40
GAP	25	30
Mg・Al ^(c)	5	—
Besides, containing a small amount of (NH ₄) ₂ Cr ₂ O ₇ , carbon black, Zr.		

(a) Particle Diameter $d_{AP} \leq 43\mu\text{m}$

(b) Particle Diameter Distribution

$d_{AN} \leq 74\mu\text{m} \cdots \cdots 5.5\%$

$74\mu\text{m} < d_{AN} \leq 104\mu\text{m} \cdots \cdots 8.6\%$

$104\mu\text{m} < d_{AN} \leq 295\mu\text{m} \cdots \cdots 41.1\%$

$295\mu\text{m} < d_{AN} \leq 495\mu\text{m} \cdots \cdots 44.1\%$

$d_{AN} > 495\mu\text{m} \cdots \cdots 0.7\%$

(c) Particle Diameter

$10\mu\text{m} < d_{Mg \cdot Al} < 100\mu\text{m}$

各試料を0.1MPa(1気圧)のArあるいはN₂雰囲気下で昇温速度20K/minで加熱し行った。

3. 結果と考察

3.1 DTA曲線

Fig. 1にMg・Al-5とAN-40推進薬のDTA曲線を示す。まず130℃近辺にANの(Ⅱ)相から(Ⅰ)相への結晶系の転移による吸熱、165℃付近にANの融解による吸熱がみられる。Mg・Al-5の228℃、AN-40の225℃付近における鋭い立ち上がりを示す急激な発熱ピークは、主にGAPによるN₂ガス放出を伴った激しい発熱分解(Fig. 2(d))により、AN等の分解反応が加速されたものと考えられる。その後、AN-40では320℃付近にAPの分解に基づく発熱が続くが、Mg・Al-5ではマグナリウムの存在により、その発熱ピークの位置が低温側に移動している。

Fig. 2(a)はAN/AP/AD=20/10/1の組成の粉末混合試料のDTA曲線を示す。その熱的挙動はFig. 1同様であるが、主ピークは236℃に現れている。Fig. 2

(b)はAPの割合を増加したAN/AP/AD=20/15/1の試料であるが、発熱ピーク温度が228℃と約10℃低温側に移動している。Fig. 2(c)は、Fig. 2(a)の試料にマグナリウムを加えた組成AN/AP/AD/Mg・Al=20/10/1/2のDTA曲線である。Mg・Alの添加は、Fig. 2(b)におけるAPの増加同様の効果を示し、主ピーク温度が228℃と低下している。従って、APの量をANに対し0.5から0.75に増加することと、ANに対しMg・Alの0.1の添加は酸化剤の発熱反応に対し殆ど

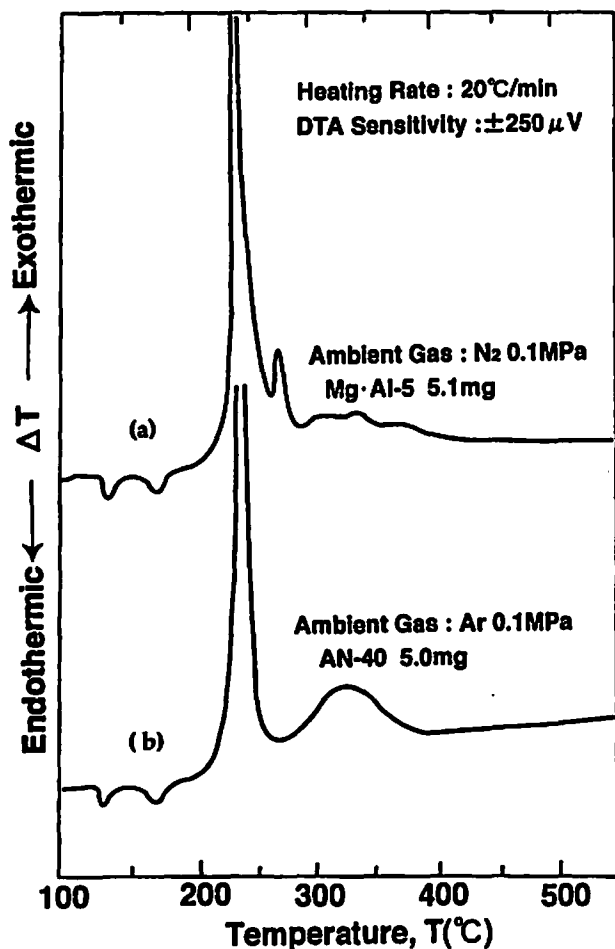


Fig. 1 DTA curves of Mg·Al-5 and AN-40 propellants

同等の効果を示すことがわかる。

3.2 着火特性図

Fig. 3, 4 に Mg·Al-5 推進薬の空気中と Ar 中における着火特性図を示す。但し, Fig. 4 においては煩雑さを避けるため実験点を省略した。AN-40, Mg·Al-5 両推進薬共, 39.9~53.2kPa (300~400Torr) 以上の空気中では自立着火 (着火直後外部加熱源を除去しても燃焼が持続する) (Self-Sustaining Ignition; S.S.I.) するが, アルゴンガス雰囲気下では自立着火しない。この様に空気中の酸素が自立着火に影響を及ぼしていることがわかる。現用の AP 系推進薬では約 13.3kPa (100Torr) 以上の Ar あるいは N₂ ガス等の不活性雰囲気中でも自立着火する。それ故, AN 系推進薬は AP 系に比べ低圧における着火性能が劣ることが分かる。不活性ガス雰囲気中では外部加熱源により推進薬試料が熱分解し, 着火火炎を生じるが, 熱分解ガス成分中の酸化剤成分が不足しているため火炎温度が低く, 火炎から推進薬試料表面への熱のフィードバック量が少なく, 外部加熱源を取り去ると火炎が持続できない。しかし, ある圧力以上では外部加熱源の持続により不

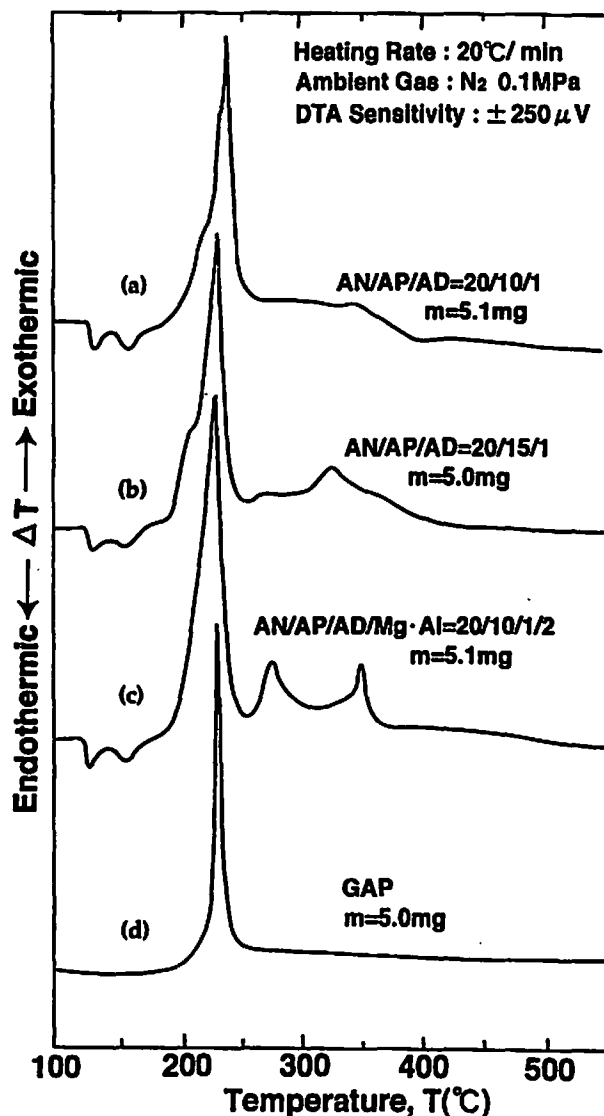


Fig. 2 DTA curves of propellants' solid ingredient mixtures

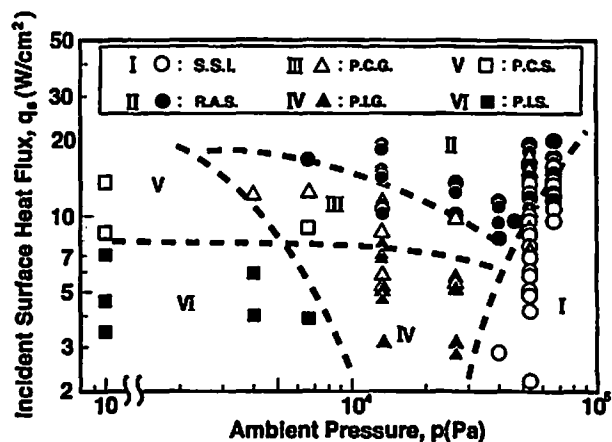


Fig. 3 Ignition characteristic map for Mg·Al-5 propellant in air

活性ガス中でも定常燃焼 (放射支援定常燃焼) (Radiation-Assisted Steady-State Combustion; R.A.S.) 出

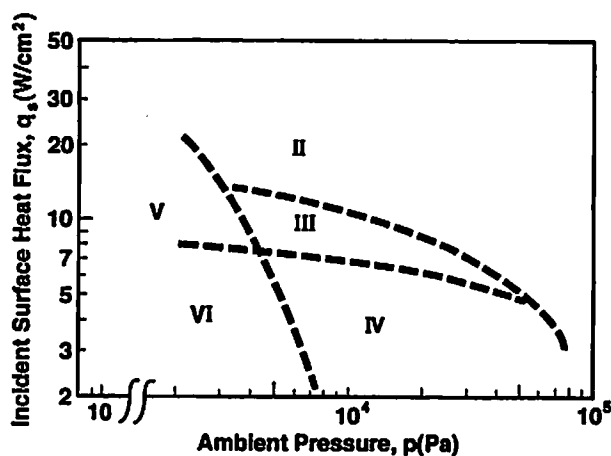


Fig. 4 Ignition characteristic map for Mg·Al-5 propellant in Ar gas

来る。空気雰囲気中では、一旦着火すれば、試料からの熱分解酸化性気体の不足分を雰囲気中の酸素ガスが補い、外部加熱源を除去しても定常燃焼が維持できる。圧力が低くなると共に気相中の O_2 ガスの影響は減少し、空気中でも自立着火できなくなる。26.6kPa (200 Torr) 以下になると、レーザの照射中にも関わらず熱流束 $8.37\sim 12.6\text{W/cm}^2$ ($2\sim 3\text{cal/cm}^2\text{s}$) の範囲では、フォトランジスターにより検知される火炎からの放射強度が周期的に変動する気相振動燃焼 (Pulsating Combustion in Gas-phase; P.C.G.) が開始され、更に、熱流束が低くなる ($q_s < 8.37\text{W/cm}^2$) と火炎の発生と消炎が周期的に繰り返される気相振動着火 (Pulsating Ignition in Gas-phase) へと遷移する。この現象は、火炎反応で消費されるガス量と熱分解により生成するガス量とのバランスが崩れ、振動燃焼が開始される。更に、熱流束が減少すると熱分解ガス発生量が気相で消費される量に追いつかなくなり、一旦消炎する振動着火状態になると考えられる。2.66~3.99 kPa (20~30Torr) 以下の減圧状態になると、発生した分解ガスの拡散速度が大きくなり、気相中に十分な濃度の可燃性混合ガスが形成されず、気相中に火炎は生じなくなり、表面燃焼へと移行する。この表面燃焼は不安定であり、熱流束の大小により、表面からの放射強度が周期的に変動する表面振動燃焼 (Pulsating Combustion at Surface) と、表面の灼熱と表面からの放射がなくなる消炎が一定周期で繰り返される表面振動着火 (Pulsating Ignition at Surface) に分類できる。AN-40の着火特性図もまたMg·Al-5のものと殆ど変わらないが、やや空気雰囲気中での自立着火領域は狭くなっている。空気雰囲気中での自立着火と非自立着火との境界付近では、Mg·Al-5推進薬は、AN-40推進薬に比べて振動現象を起こし易い。これはマグネシウム合金の添加によりMg·Al-5推進薬の熱伝導性が

	S.S.I.	R.A.S.	P.C.G.	P.I.G.
Air 53.2kPa	○	△	□	◇
Ar 66.5kPa		▲		◆

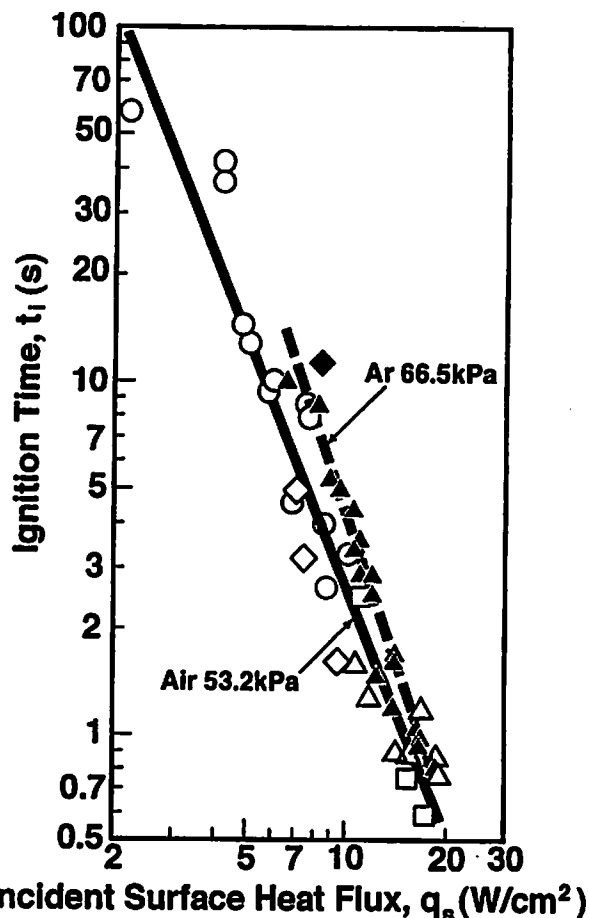


Fig. 5 Ignition times of Mg·Al-5 propellant at air 53.2kPa and Ar 66.5kPa

良くなり、表面での熱バランスが崩れやすくなるためと考えられる。

3.3 着火遅れ時間と着火エネルギー

一般に着火遅れ時間は雰囲気圧力の低下と共に長くなる。AN-40推進薬に関しては、一定圧力下では着火遅れ時間は空気中でも不活性Arガス中でもほとんど差は生じない。従って、AN-40の着火現象を支配しているのは固相における熱分解反応である。それは、推進薬中の硝安が 165°C 付近で融解し、試料表面が液状になり気相の影響を受けにくくなるためと考えられる。一方Mg·Al-5推進薬では、空気53.2kPa (400 Torr) とアルゴン66.5kPa (500Torr) で着火遅れ時間を比較したFig. 5より、データのばらつきはあるが、空気中の方が着火遅れが短くなり空気中の酸素が着火時間を短くし、気相反応が着火に影響を与えている事が分かる。Mg·Al-5推進薬の場合には、液状化した表面に浮かんだマグネシウム粉が集塊し、外部加熱放

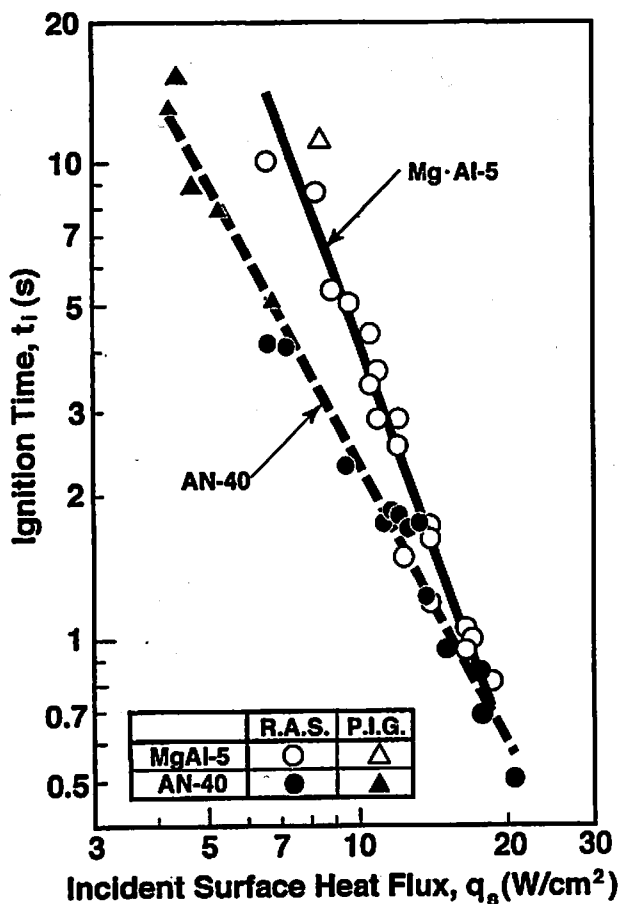


Fig. 6 Ignition times of Mg·Al-5 and AN-40 propellants at Ar 66.5kPa

射によりホットスポットを形成し雰囲気中の酸素の酸化作用を促進させるため、空気中の方がアルゴン中より着火遅れ時間が短いと考えられる。

Fig. 6 に、アルゴン 66.5kPa (500Torr) における Mg·Al-5 推進薬と AN-40 推進薬の着火遅れ時間の比較を示す。Mg·Al-5 推進薬の着火遅れ時間 t_i は、AN-40 の t_i に比べ低熱流束側では大きい、熱流束の増加と共にその差は減少する。Mg·Al-5 推進薬の t_i が AN-40 より大きい傾向は、Fig. 1 における両推進薬の DTA 曲線における発熱ピーク温度の関数と一致している。低熱流束側では、 t_i の大部分を化学反応時間より物理的な不活性加熱時間が占めているから、マグナリウム添加により、Mg·Al-5 推進薬の熱伝導度が大きくなり表面照射エネルギーが固体内部に伝導し易くなり、AN-40 よりクリティカルな着火表面温度に達するのにより長い時間が掛かると考えられる²³⁾。一方入射熱流束が増加するにつれて、着火遅れ時間中の化学反応が占める割合が増加し、固相表面での熱的性質と着火遅れ時間の間の相関関係が現れてくる。酸化雰囲気中では気相反応の影響が現れ、Mg·Al-5 と AN-40 の着火遅れ時間の差はアルゴン雰囲気中より

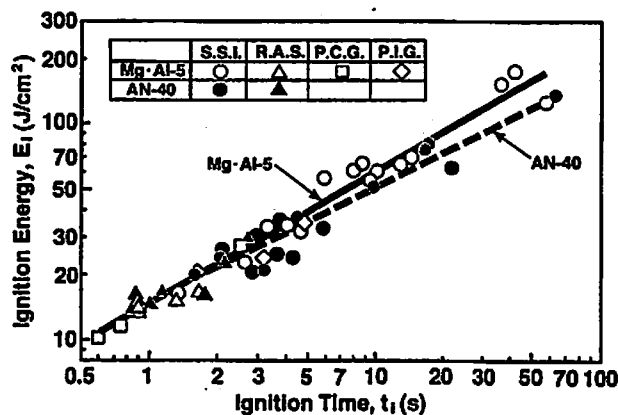


Fig. 7 Ignition energies of Mg·Al-5 and AN-40 propellants at air 53.2kPa

短くなる。マグナリウム含有推進薬の両対数グラフ面上での着火遅れ時間の表面熱流束に対する直線の傾きの絶対値は 2 より大きくなり、表面での発熱反応のみを考慮する表面着火理論²⁴⁾から逸脱するようになる。これは、マグナリウムによる固体内部への熱の拡散による固体内部での反応の影響が無視できなくなるためと考えられる。

Fig. 7 に、横軸に着火時間を、縦軸に着火するまでに試料が吸収した着火エネルギー（熱流束×着火時間）を示す。同じ雰囲気圧では Mg·Al-5 が、同じ着火時間に対しより多量のエネルギーを AN-40 より吸収している事が分かる。

3.4 着火時の表面温度

Fig. 8 は、Mg·Al-5 の空気 66.5kPa (500Torr) における表面温度の時間履歴を示す。表面温度は、試料表面に張った $\phi 20\mu\text{m}$ の K タイプ熱電対により測定した。照射開始と同時に表面温度は、不活性固体の表面温度上昇曲線に沿って上昇する。175℃ 付近に硝安の融解によると思われる少し波立った部分が現れ、それ以後は反応熱の影響を受け温度上昇速度が増加した曲線になり、258℃ で急激な温度上昇を示し着火に至る。AN-40 の表面温度履歴においても、常に 170℃ 付近に硝安の融解を示す挙動が現れる。Fig. 9 は、両推進薬の着火時の表面温度を示す。空気中でもアルゴン中でもばらつきの範囲内で AN-40 の着火表面温度は $285 \pm 13^\circ\text{C}$ であり (Fig. 9 (a))、一方 Mg·Al-5 (Fig. 9 (b)) では、 $266 \pm 11^\circ\text{C}$ と AN-40 より 20℃ 位低い。従って Mg·Al-5 の表面温度が AN-40 より 20℃ 低いにも関わらず、着火遅れ時間が長いことは、着火までにより多くのエネルギーを吸収し固体表面近傍の内部の熱層が厚く生長している事を意味する。この事が Mg·Al-5 推進薬の自立着火性が AN-40 より幾らか優れている原因となっている。

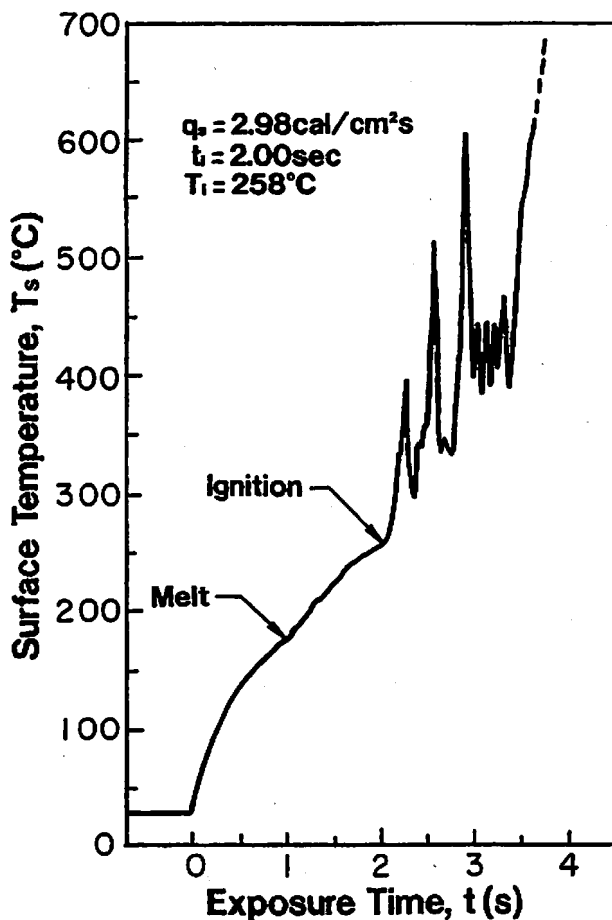


Fig. 8 Surface temperature history till ignition for Mg·Al-5 propellant at air 66.5kPa

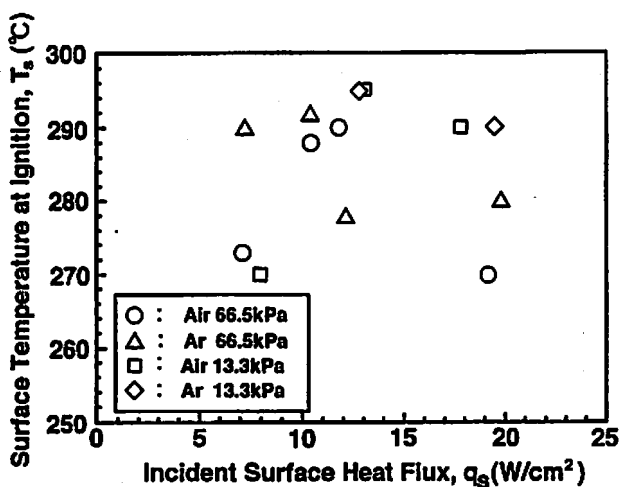


Fig. 9(a) Surface temperatures at ignition of AN-40 propellant

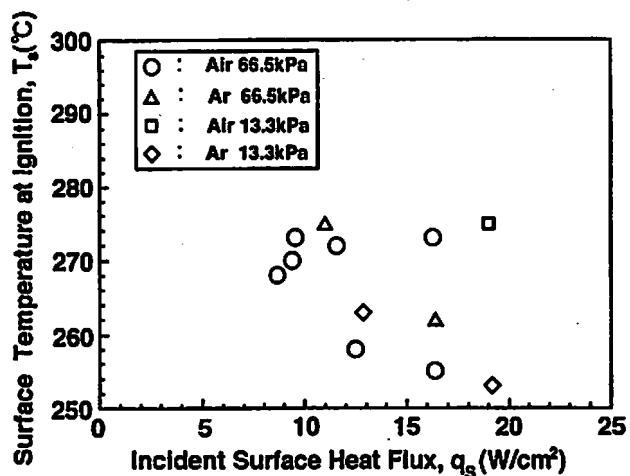


Fig. 9(b) Surface temperatures at ignition of Mg·Al-5 propellant

これらの急激なピークを持つ発熱反応は、主にバインダーであるGAPの激しい発熱反応によりANの分解反応が加速されたものである。

3. AN系推進薬は減圧下の、不活性雰囲気中では自立着火せず、39.9～53.2kPa (300～400Torr) 以上の空気雰囲気中で自立着火する。従って、自立着火性には気相中の酸素を必要とする。
4. AN-40の着火遅れ時間は雰囲気気体に依存せず、凝縮相反応に支配される。一方、Mg·Al-5推進薬の着火遅れには気相での反応が寄与している。
5. Mg·Al-5推進薬はマグナリウムの混入により推進薬の熱伝導性が良くなり、低熱流束側では固相内部への熱の拡散によりAN-40推進薬より着火遅れ時間が長くなると同時に、固相表面近傍での熱層が厚くなり僅かではあるがAN-40推進薬より自立着火性が優る。高熱流束側では、両推進薬の着火遅れ時間、自立着火性ともほぼ同等であり、これはマグナリウムとAPのANに対する熱的効果がほぼ同等であることに一部起因すると考えられる。
6. 着火時に表面は硝安の融解により液状を呈し、表面温度はばらつきはあるが、雰囲気気体の種類、熱流束の大きさ等による影響は殆ど見られず、平均温度はAN-40推進薬では285℃、Mg·Al-5推進薬では266℃とマグナリウム入り推進薬の方が約20℃低温で着火する。

謝 辞

本研究の一部は平成2年度(第20回)火薬工業技術奨励会研究助成金により実施しました。此処に記して感謝の意を表します。

文 献

- 1) 日野熊雄, 工業火薬協会誌, 8, 25 (1947)

4. 結 論

1. マグナリウム、硝安、過安、ニクロム酸アンモニウム混合粉末のDTA測定より、熱的性質に関して実験組成内ではマグナリウムの添加は、AP量の増加と同等の效果を持つ。
2. AN-40、Mg·Al-5両推進薬のDTA測定より、そ

- 2) 保坂義信, 工業火薬, 9, 2 (1948)
- 3) 山本祐徳, 沢田継男, 工業火薬, 10, 160 (1949)
- 4) 山本祐徳, 沢田継男, 同上, 11, 240 (1950)
- 5) 吉田銀次郎, 長田英世, 工業火薬, 11, 101 (1950)
- 6) 福山郁生, 工業火薬, 16, 2 (1955)
- 7) 福山郁生, 同上, 16, 218 (1955)
- 8) 福山郁生, 同上, 17, 193 (1956)
- 9) 福山郁生, 同上, 20, 119 (1959)
- 10) 原泰毅, 児玉多朗, 長田英世, 工業火薬, 33, 72 (1972)
- 11) B. S. Park, K. B. Lee, and J. W. Lee, Proceedings of 24th International Annual Conference of ICT, 4-1 (1993)
- 12) W. Engel, N. Eizenreich, and A. Demling, Proceedings of 24th International Annual Conference of ICT, 3-1 (1993)
- 13) 桑原卓雄, 松尾信二, 火薬学会誌, 56, 135 (1995)
- 14) M. Q. Brewster, T. A. Sheridan, and A. Ishihara, J. Propulsion and Power, 8, 760 (1992)
- 15) M. Farber, S. P. Harris, and R. D. Srivastava, Combustion and Flame, 55, 203 (1984)
- 16) N. Kubota, and T. Sonobe, Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 13, 172 (1988)
- 17) S. Hommura, T. Katoh, K. Hori, A. Hasebe and A. Iwama, Proceedings of 22th International Annual Conference of ICT, 46-1 (1991)
- 18) Y. Haas, Y. B. Eliahu and S. Welner, Combustion and Flame, 96, 212 (1994)
- 19) N. Kubota, T. Sonobe, A. Yamada, and H. Shimizu, J. Propulsion and Power, 6, 686 (1990)
- 20) 高橋映江, 土橋貴明, 斉藤猛男, 岩間 彬, 森本国雄, 平成4年度工業火薬協会春季年会講演要旨集, p. 62 (1992)
- 21) T. SAITO, M. SHIMODA, T. YAMAYA and A. IWAMA, Combustion and Flame, 85, 68 (1991)
- 22) 斉藤猛男, 山谷寿夫, 霜田正隆, 岩間 彬, 工業火薬, 47, 150 (1986)
- 23) 原山美知子, 斉藤猛男, 岩間 彬, 工業火薬, 44, 327 (1983)
- 24) A. D. Baer and N. W. Ryan, AIAA J., 3, 884 (1965)
- 27) 加藤一成, 中下吾郎, 火薬学会誌, 56, 130 (1995)

Ignition characteristics of GAP/AN/AP-based solid propellants for low pollution at sub-atmospheric pressures

by Yuhko KAZITA*, Takeo SAITO**, Toshio YAMAYA**
Masataka SHIMODA** and Akira IWAMA***

The ignition characteristics of GAP/AN/AP-based solid propellants for low pollution including 20~30wt.% AP were investigated by means of CO₂ laser. Both AN-40 and Mg·Al-5 containing magnalium propellants showed self-sustaining ignitability (S.S.I.) beyond 39.9~53.2kPa (300~400Torr) in air, but non-S.S.I. at sub-atmospheric pressures in inert gases. The above fact shows that ambient oxygen gas plays an important role on self-sustaining ignition. Decreasing pressures made instable pulsating behaviors occur for both propellants. Mg·Al-5 propellant is easier to suffer instable behaviors than AN-40. At lower heat fluxes the propellant containing magnalium has the lower surface temperature at ignition by ca. 20°C as compared to AN-40, but has the longer ignition delay time. Mg·Al-5 propellant absorbs more amount of energy till ignition, and therefore its thermal layer at subsurface grows thicker, which makes Mg·Al-5 propellant a little superior to AN-40 in self-sustaining ignitability. On the other hand, at higher heat fluxes both propellants showed the same ignition potential concerning ignition delay times and self-sustaining ignitability. According to DTA curves for various mixtures of propellant ingredients (AN, AP, AD, Mg·Al), the addition of 0.1 of magnalium to AN has nearly similar effect on the pyrolysis of propellants to that of 0.25 of AP to AN. This may be one of the causes for the fact that both AN-40 and Mg·Al-5 propellants are nearly equal in the ignitability in the range of higher heat flux.

(*Tokyo Ohka Industry Co., Tabata 1590, Samukawa Town, Kouza-gun,
Kanagawa Prefecture 253-01

**The Institute of Space and Astronautical Science, Yoshinodai 3-1-1,
Sagamihara City, Kanagawa Prefecture 229

***Lead Tech Co., Azamino 3-4-8-403, Aoba-ku, Yokohama-shi,
Kanagawa Prefecture 225)