

混合系推進薬の燃焼に関する研究

II 燃焼面の形状と燃速測定法の吟味

伊 東 威*

1. 緒 言

ロケット推進薬の線燃速測定として Crawford¹⁾ が strand burning 法を提案して以来、如何なる推進薬に於てもこの方法が無条件に採用されている。然し Crawford は無煙火薬についての測定データを挙げていないが、混合系に対しては可能性のみに触れてデータを挙げていない。吾々がこの方法を混合系に適用する時、常にデータのばらつきを経験する。この原因の大部分は inhibitor の不完全さに帰せられるが、先づばらつきの成因を明らかにした上で、精密な燃速値を求める場合如何にすべきかを考察する。

2. 燃焼面の形状の観察

実験は過安/ポリエステル (80/20) 混合系について行はれた。過安の粒度分布は Fig. 1 に示される。薬径を 13mm とし、一端面の中央に点火して大気圧下に燃焼させた時、inhibitor の種類により呈する面の形状は Photo 1 に示される。Crawford は無煙火薬の場合について inhibitor として PVA 及び Vinylite (塩化ビニール及び酢酸ビニール共重合体) を用い、燃焼面が平面であることを述べて居り、其他多くの人々も混合系の場合に就て同様な合成樹類を採用しているが燃焼面については触れていない。筆者が当混合系に就て行つた総ての実験に於ては、Photo 1 に示される如く燃焼面は平面でなかつた。即ち多くの場合燃焼面は凸円錐を呈し、セロテープ一重の場合変動を示すが、平均としてみれば扁平に近い凸曲面が現れ、セロテープ二重の場合のみ略々平面を維持した。いま strand 法により測定される燃速を strand 線燃速と呼

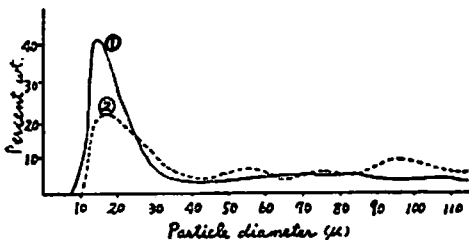


Fig. 1 Particle-size distribution of ammonium perchlorate

ぶことにする。燃焼面の形状を問題とせず strand 線燃速を求めるならば、凸円錐を呈するものはいずれも甚だしい高値に、セロテープ一重は可成り広範囲に、又二重は割に一定して狭い範囲にばらつく結果が得られる。セロテープ一重及び二重の場合の測定値のばらつきは Fig. 2 の頻度分布曲線によつて示される。以上の測定値の高値及び大きいばらつきの原因は、測定中に現れる燃焼面の形状変化の度合に關係すると推定される。

3. 沿面速度と中心速度との關係

上述2に於ける推定に従へば、各種の inhibitor と strand 線燃速との關係は、燃焼面と上記線燃速との關係として一般化することが出来る。即ち inhibitor の如何に拘らず、部分的に早い燃焼が薬と空気との境界面に出現すると、燃焼面の変形を起させる作用が現れる。この沿面燃焼の出現が一定か、不定期かによつて strand 線燃速が略々一定の高値を示すか、不規則にばらつくかの結果が生ずる。この推定は現象観察より定性的には容易に納得され得るが、更に沿面燃焼が上述の定義通り境界面にのみ起ることと、それが薬の軸方

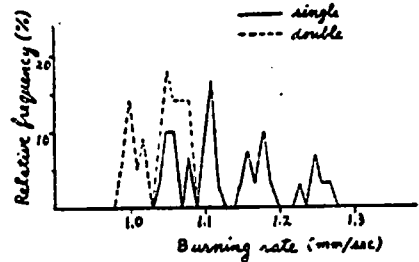


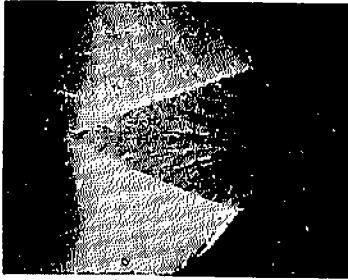
Fig. 2 Frequency of values of burning rate obtained by strand burning method for strands wrapped with adhesive cellophane tape

向に於ける燃焼面の移動速度に及ぼす影響とを定量的に示す必要がある。その為上記沿面燃焼速度に対して中心部の軸方向の侵蝕速度を中心燃焼速度と呼び両者を比較する。測定は inhibitor 無しの裸薬包について行はれた。即ち燃焼面移動と同時に校正された 100 サイクルのカウンター数字管の点灯を撮影し、移動距離と時間からその区間の平均速度を求めた。この結果は Fig. 3 に示される。同図によれば中心速度は最初の

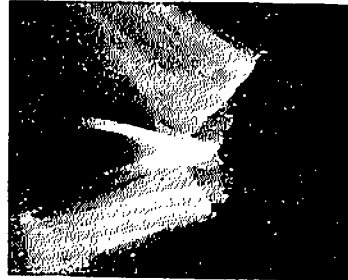
昭和35年7月23日受理

* 防衛大学校化学教室 横須賀市

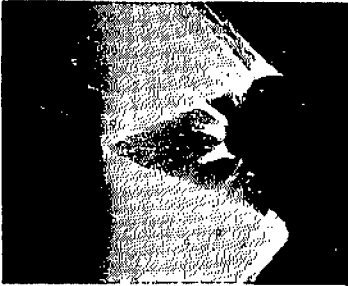
(1) PVA
 $t=0.05$



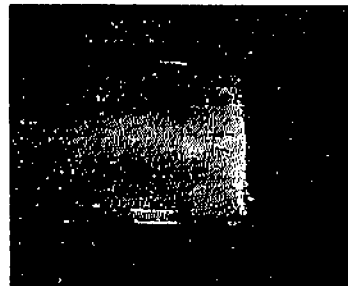
(5) Rigolac
 $t=0.06$



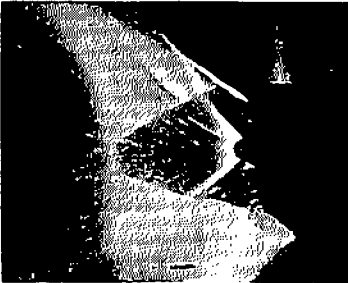
(2) Epikote
 $t=0.57$



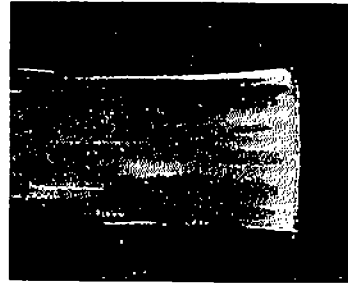
(6) Cellotape
single
 $t=0.05$



(3) Vinyl
chloride
 $t=0.06$



(7) Cellotape
double
 $t=0.10$



(4) Vinylac
 $t=0.04$



(8) None

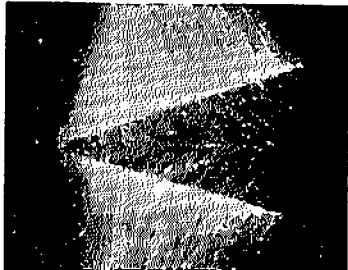


Photo 1 Direct photography of burning surface of strand, t : thickness of coating (mm)

微小距離では、葉包の内部へ垂直に侵蝕する速度（之を真の線燃速と呼ぶ）を示すが、直ちに沿面燃焼に影響され中心速度は沿面速度と等速まで引き上げられ、以後はその沿面速度に引きずられる。即ち高値の沿面速度が面移動速度を支配し、それが strand 線燃速として求められる経過を示している。燃焼初期に呈する中心速度を真の線燃速値と見做す時、それと沿面速度とは測定結果より夫々 1.2mm/sec 及び 3.5mm/sec となる故、葉柱内部の侵蝕燃焼は常に 1.2mm/sec、沿面燃焼は常に 3.5mm/sec の速度で進行するとして、

Fig. 3 の実験と同種の葉について波面移動を作図すると Fig. 4 の如くなる。この図に基き点火面からの距離に対して中心及び沿面速度を求めると、Fig. 3 の点線の如く示され実験と作図の結果は略々一致する。このことは沿面燃焼が実際に葉と空気との境界面にのみ起るとした前提の正しいこと、並びに左うした作図法によつて略々実際に近い燃焼波面の形状が示されることを認め得る。inhibitor を有する strand についても常に一定した沿面速度を呈する場合には、上記と同じ考へを適用することが出来る。又セロテープ一重の

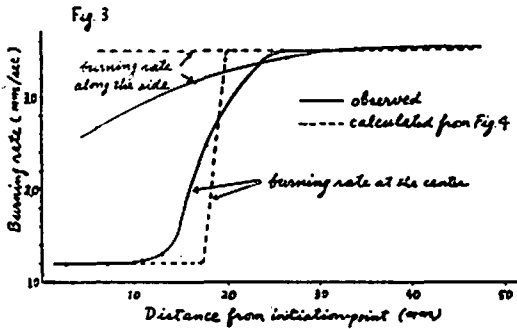


Fig. 3 Relation between burning rate in the direction of axis at the centre of strand and the rate along the side surface. (Diameter of strand, 18.4mm; without inhibitor)

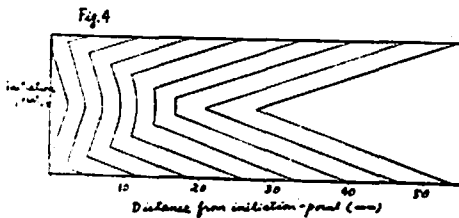
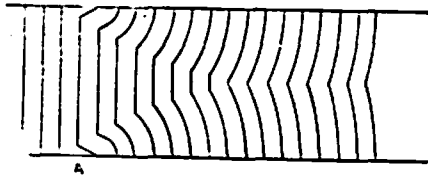
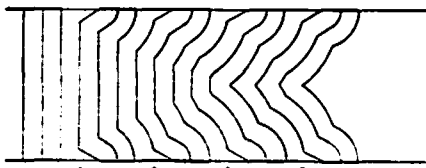


Fig. 4 Drawing representation of configuration of regressive burning surface. (Postulates: diameter of strand, 18.4mm; without inhibitor; burning rate along the side 3.5mm/sec; burning rate of regression, 1.2mm/sec)



(i) When an irregular burning along a part of side surface (A) occurs during only one second, an irregular surface is formed and suppressed progressively.



(ii) When an irregular burning along several parts of side surface (A, B, C, D) occurs at intervals of two seconds, burning surface become progressively irregular

Fig. 5 Drawing representation of configuration of regressive burning surface (rate, r mm/sec) in case of occurring quick burning ($2r$ mm/sec) along the inhibiting side of the strand (dia, 8r mm)

場合の現象に対しては、不規則に現れる沿面燃焼を作図にとり入れることにより、実際の燃焼状態に近似した面形態と面移動が作図的に示される (Fig. 5)。以上を総括すれば inhibitor が完全で而も燃焼面が平面である事の観察のない限り、strand 線燃速は大なり小なり沿面燃速の影響を蒙り真の線燃速と一致しないと云うことである。

4. 真の線燃速に対する検討

4-1 セロテープ一重の場合

この場合不時の沿面燃焼が処々に起り、その状況は肉眼で観察される。従つて strand 線燃速値は Fig. 2 の如く広範囲にばらつき、これから真の線燃速値を求むることは出来ない。

4-2 セロテープ二重の場合

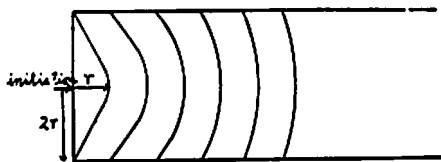
この場合セロテープが燃焼灰化する面より葉側に稍々明るい部分が認められ、又燃焼面から出る燃焼ガスは一重の場合と逆に絞られた形で発生していることが観察される。このことから波面は平面より稍々凹の状態に近いと考へられる⁹、その程度はごく僅かである。この場合の strand 線燃速値は Fig. 2 の如く割合にまともなり真の線燃速値を得るに適當と思われる。然し乍ら減圧或は加圧下の場合セロテープ一重の状況と同じ沿面の現象が現れて完全なものとは云い難い。

4-3 inhibitor 無しで凸円錐状に燃焼する場合

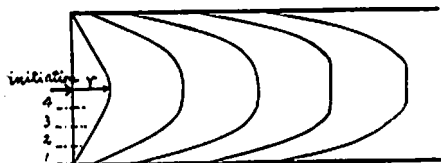
完全な inhibitor が得られなければむしろ inhibitor による異常現象の懸念を除いた方法に期待がかけられる。仮に inhibitor の無い場合を考へると、この場合は沿面の物理的状態が一定ならば一定の凸円錐が形成される。今任意時間の二つの凸円錐形燃焼面の写真から単位時間の燃焼体積を求め、之を円錐表面積で割れば円錐面に垂直に進む真の線燃速が算出される¹⁰⁾。この方法に従い Fig. 3 を求めた写真より燃速を計算すると 1.15 乃至 1.17mm/sec が得られる。この場合円錐の頂部は丸く、底周辺部は概して不明瞭であるが、計算の簡便の爲概略の円錐形を仮定した。従つて精度は余り期待出来ない。

4-4 薄い二平面間を凹円錐状に燃焼する場合

strand の端面を無限大に広くし軸長を極端に縮めた場合を考へると、strand の端面の一点に点火した時中心部に垂直に侵蝕する波面は真の線燃速で進む。波面の最先頭は逆の端面に最初の発焰を示すから、点火と終端の初焰時刻を求めれば平行平面間の垂直距離を進む速度が算出される。この無限大の端面の概念を実用的な見地まで拡張する。その場合 inhibitor により端面の沿面燃焼をどこかで抑へ、抑へた後の inhibitor の燃焼が燃速に対して無効果の、或はその効果出現前に測定完了の条件が必要である。端面の沿面燃焼阻止

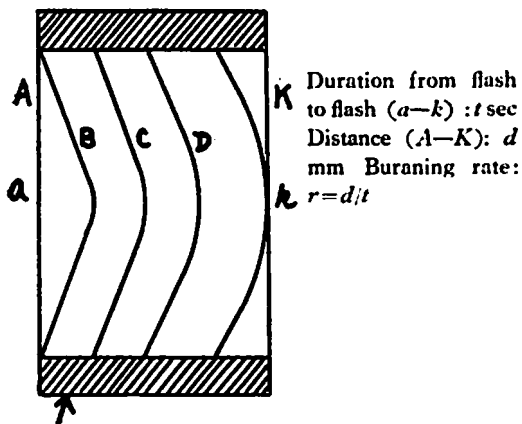


(i) Postulates are followings; regressive burning rate, r , burning rate along the inhibiting side surface, $1/2r$, and along the initiation surface, $2r$.



(ii) Postulates are followings; regressive burning rate, r , and burning rate in 1st, 2nd, 3rd and 4th layer, $1/4r$, $1/2r$, $3/4r$ and r respectively.

Fig. 6 Drawing representation of configuration of the burning surface in case of occurring slow burning along the inhibiting side.



hard vinyl chloride tube

Fig. 7 Schematic representation of burning surface in a hard vinyl chloride tube.

は簡単であるから、その後の inhibitor の燃焼が接する葉の燃速に与へる影響のみについて考へる。即ち inhibitor の量は相当厚く施すから、この影響は接触面のみ燃速低下に現れる場合と、葉の中心方向に向つて同心円的に順次低下して現れる場合との二つを考へる。両者の場合作図は Fig. 6 の如く描くことが出来る。(i) の仮定の場合葉に対して減速の影響はあらわれない。(ii) の仮定の場合燃焼面は図の如き変形を示すが、中心部の燃速は減速されない。この形は勿論同心円状に低下する燃速値の仮定のとり方によつて

変り得る。何れにせよ実験的には葉径を順次大にして inhibitor の影響が中心部に対して無視され得ることと、点火後の微小時間内に定常燃速に達することを試みる必要がある。之の測定法は Fig. 7 に示されるが以下この方法の可能性に就て吟味する。

5. 4-4 の測定法の吟味

4-4 の測定法による場合 inhibitor は葉保持材と考へて差支へない。筆者は当測定法に対して硬質塩化ビニール管 (厚み 2.5mm) を選んだ。この管に充填された葉に就て、材質が葉中心部の燃速に影響するや否やの吟味は径 13mm, 20mm 及び 32mm の三種を用い、長さ約 10mm 乃至 15mm の距離にて行はれた。その結果は Table 1 の如く全く同一の燃速を示した。端面の中央点火位置より端面上を進む波面がビニール管に到達する時間内に、中心部の葉軸方向の燃焼波面の先端は、32mm, 20mm 及び 13mm 径に対して夫々測定距離の約 $1/2$, $1/3$ 及び $1/5$ の位置にある。従つてビニールの燃焼が影響するならば、その時刻以後の燃焼に対して効果を及ぼし、三者間の燃速には差が生ずべきである。Table 1 の結果は三種の径に於て何れも中心部の燃速にビニール燃焼の影響が及ばなかつた事を示した。

Table 1 Effect of diameter of vinyl chloride tube on burning rate (A. P. ②/ Polyester 20/ 80 1 atm 15°C)

Shot No.	Burning rate (mm/sec)		
	dia. of tube 13mm	20mm	32mm
1	1.05	1.05	1.07
2	1.04	1.05	1.05
3	1.05	1.05	1.07
4	1.04	1.06	1.04
5	1.05	1.06	1.04
6	1.06	1.05	1.07
7	1.06	1.05	1.06
8	1.07	1.04	1.04
9	1.05	1.06	1.05
10	1.06	1.05	1.05
average	1.053	1.052	1.054

点火直後の線燃速度は次の如くして測定された。即ち点火後直ちに CCl_4 で火を消し、葉軸方向の凹状の波面の最先端までの距離を顕微鏡により、又時間を 8 mm フィルム (32コマ、時間較正入れ) により求め、平均燃速を算出した。その結果は Fig. 8 に示される如く点火直後の燃速は 10mm 乃至 15mm の距離範囲内に於て測定された真の線燃速と殆ど変らない。同図にて距離 15mm を越えた燃速値が若干高いことは

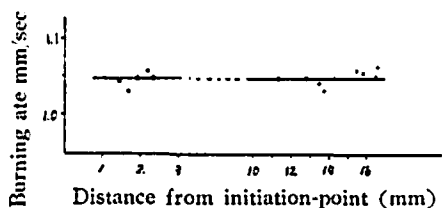


Fig. 8 Burning rate in neighbourhood of initiation-point and at a distance

塩化ビニール管が残留し、それに炭素の残渣が附着して火焰の噴出孔を絞る結果と考へられる。以上の結果を考慮して適当な測定条件を求むるならば、管径は13 mm 以上とし、測定距離は燃焼時間と距離との測定精度から決定さるべきであるが、5mm 乃至 15mm とする。但し狭径の場合は出来るだけ短距離とする、と定めることが出来る。

本法による測定の誤差は 10mm 乃至 15mm の測定距離にて、測長はマイクロメーターを、測時は普通より稍々高速の連続コマ撮り法を用いた場合、 $\pm 0.5\%$ 程度に置くことが出来る。本法の特徴とするところは、微小距離から真の線燃速を精密に測定し得る点にあり従つて小薬量なる為ポンプ中の圧力変動を考慮する場合に対しても適用し得ることである。

6. 総 括

1) 各種の inhibitor による混合系 strand 線燃速

値のばらつき及び高値への傾向の原因が沿面燃焼による燃焼面移動に関係あることを示した。又沿面のみ早い燃焼が生ずるとして作図した結果は実験とよく一致し作図法による考察の正しさを認めた。

2) Crawford の strand 線燃速測定法は粗い観測に対しては適用され得るが、精度を要求される目的に対しては適当でない。筆者は後者の目的に沿う測定値を得る為に Fig. 7 の如く、薄い二平行面間を凹円錐状に燃焼する波面先頭の最初と最後の発光を撮影することにより真の線燃速を求むる測定方法を提案した。

終りに、本実験に対し論議を賜つた本校野村教授並びに実験を援助下された竹永茂夫君に厚く感謝する。

文 献

- 1) Crawford, Ir., C. Huggett, F. Daniels and R. E. Wilfong: J. Anal. Chem 19, 630, (1947).
- 2) F. A. Warren: Rocket propellants 90, (1955); PVA を引用。
R. N. Wingress: Internal Ballistics of Solid-Fuel Rockets 167, (1950); cellulose acetate を引用。
M. Summerfield et al: Report presented at ARS meeting (1958); quick-drying airplane lacquer を使用。
国内の講演では多くセロテープを使用。
- 3) A. G. Gaydon, H. G. Wolfhard: Flames 54, (1953); Gouy's 法による。

Studies on Combustion of Composite Propellants II. Irregularity of Burning Surface and Measurement of Burning Rate

Takeshi Ito

Photographic observations were made for burning surface of strands restricted on the long side with various inhibiting materials (Photo. 1). The photographs showed that the strands burned very irregularly. The flame spread along the long side of the strand, producing a conical or a tilted burning surface. The observed burning rate was the rate of propagation of the burning reaction over the surface of the strand, rather than a desired rate of regression of the strand in a direction normal to the burning surface. The conical burning surface was probably due to quick burning along the side of the strand and the random tilting of burning surface was due to imperfect restriction. The observed shapes of burning surface for

the strand without an inhibitor agreed with those obtained from drawing method where a stationary propagation of flame along the side of the strand occurred at the side surface alone (Fig 3, 4). The phenomena of producing conical or tilted surface were explained by the similar drawing procedure (Fig. 5, 6).

The burning rate is determined from measurement of time duration from initial flash at point *a* to a flash at point *k* by means of motion picture (Fig. 7). The burning rate thus obtained appears to be independent of a nature of surrounding plastic holder. The influence of diameter of vinylchloride-tube on the burning rate may be neglected as shown in Table 1. (Defense Academy)