固体ロケット打ち上げ事故時の爆発威力について(Ⅱ)

- 衝突・爆発現象のモデル化-

兵藤幸夫^{*},中村博行^{*},小坂勝明^{**} 鈴木 茂^{**},中山 卓^{**},荒井敬司^{**} 千萊正俊^{**},田中克己^{***},松永猛裕^{***}

(I)で述べた10kg級, 100kg級および1 ton級固体ロケットモータの衝突実験の結果に基づい て、その衝突・爆発現象をモデル化し、爆発時のTNT換算率および破片の飛散距離を計算し た。その結果、爆発のTNT換算率については衝突実験で得られたTNT換算率をほぼシミュレー トできた。また、これをTitan実験に適用したところ、ほぼ実験結果を説明できた。したがって H-IISRB級のモータについてもこのモデルが適用できると考える。H-IISRBの衝突速度30 m/sで生じる爆発に対してこのシミュレーションを行うとTNT換算率は0.44%となり、このク ラスの事故モードに対してTNT換算率を2%とすれば十分であると考える。

最大飛散距離については、実験値に基づく最大飛散距離を与える式、D(m)=80・Wp^{0.24}は、 Titan実験(推進薬盤約37トン)の結果およびモデル計算の結果とほぼ一致し、かつ安全側である のでH-IISRB級モータにも適用できると考える。

1. はじめに

ロケット打上げ射場における適正な保安距離を設定 するための調査研究の一環として、10kg級、100kg 級、及び1 ton級固体ロケットモータの衝突実験が行 われた。(1)では実験概要と実験結果について述べ た。すなわち、爆風圧から計算されるTNT換算率は衝 突速度に強く依存し、衝突速度50 m/sでは0.2%程 度、100 m/sでは約2%である。一方、破片の飛散距 離はモータサイズに強く依存し、実験結果によれば衝 突時の推進薬盤をWp(kg)とすれば最大飛散距離D(m) は、D=80×Wp^{0.24}で表される。

| 1997年10月13日受理 |
|--------------------------|
| *宇宙開発事業団 |
| 〒105-6190 東京都港区浜松町2-4-1 |
| 世界贸易センタービル |
| TEL 03-3438-6211 |
| FAX 03-5402-6515 |
| **日產自動車(株)宇宙航空事業部 |
| 〒350-1107 埼玉県川越市的場新町21-1 |
| TEL 0492-31-1112 |
| FAX 0492-31-1116 |
| ***通商産業省工業技術院物質工学工業技術研究所 |
| 〒305-0046 茨城県つくば市東1-1 |
| TEL 0298-54-4697 |
| FAX 0298-54-4697 |
| |

ここ(II)ではこれらの実験結果に基づいて固体ロ ケットモータの衝突・爆発現象をモデル化して爆発時 のTNT当量および破片の飛散距離を計算し、実験結果 と比較することによりモデルの妥当性を検証した。

2. 衝突・爆発現象のモデル化

ロケットの衝突から爆発に至る現象は、次のように 観察された。ロケットの推進薬部分が衝突したとき、 先端部から火炎が噴出するがすぐに収る。その後大き な火炎の噴出があり、飛散物も飛び出す。

これより、次の爆発機構を推定した。固体ロケット が衝突すると先端部から圧徴し、モータケースと推進 薬の変形・破壊が開始される。このとき、モータケー ス先端部が破壊し、燃焼ガスが極くわずかに噴出する が、この部分はすぐに圧徴によって塞がれる。推進薬 が破壊されていくにつれて推進薬が微細破片になって いくので、燃焼表面積が増加していき、ガス発生量が 増加していく。この間、先端部が圧潰されて密閉状態 になることにより燃焼室圧力が急激に上昇していく。 燃焼室圧力がモータケースの破壊圧力を超えるとその 部分を破裂させ、一気に高圧になった燃焼ガスが噴出 して爆風を生成するとともに飛散物を発生させる。な お、燃焼ガスはノズルからは常に排出されている。こ のモデルをFig.1に示す。このモデルでは便宜上、推

火薬学会誌



Fig. 1 Conceptual model of bursting motor

進薬破片は一部が集合してストリップ状になり、初速 を得た後軸方向に細分化されると考える。

このモデルをBakerらによる圧力容器の破裂モデル¹⁾ に、推進薬の燃焼によるガスの発生、圧潤による燃焼 ガス体積の減少、爆発しない残存部の効果を考慮して 以下により拡張して定式化する。

モータケース破片で囲まれた内側と健全部のモータ 内の燃焼ガスの理想気体の状態方程式は、次式で表せ られる。

 $P(t)V(t) = n(t)RT(t) = m(t)R_{1}T(t)$ (1)

P:燃焼ガス内圧,V:燃焼ガス内体積,n:モル
 数,R:一般気体常数,T:燃焼ガス温度,m:燃
 焼ガス質量,R₁:常数

(1)式の両辺を時間tで全微分し整理すると、

$$\dot{P}(t)/P(t) + \dot{V}(t)/V(t) = \dot{m}(t)/m(t) + \dot{T}(t)/T(t)$$
 (2)

等エントロピー性を条件として,

 $\dot{T}(t)/T(t) = \{(k-1)/k\}\dot{P}(t)/P(t)$ (3)

k:比熱比 したがって式(2)は,

 $\dot{P}(t)/P(t) = k \{\dot{m}(t)/m(t) - \dot{V}(t)/V(t)\}$ (4)

$$=\frac{\rho_{p}A_{b}(t)P_{b}^{(n-1)}\alpha a_{b}^{2}(P(t)/Pb)^{(n-1/k)}}{\pi L_{b}\{r^{2}(t)+(L_{r}/L_{b})R_{0}^{2}-m_{pf}(t)/\pi \rho_{p}L_{b}\}}$$

$$\frac{k\{2\pi L_{b}(r(t)-R_{0})+A_{t})(2/(k+1)\}^{(k+1)/2(k+1)}a_{b}(P(t)/Pb)^{(k-1)/2t}}{\pi L_{b}\{r^{2}(t)+(L_{r}/L_{b})R_{0}^{2}-m_{pf}(t)/\pi\rho_{p}L_{b}\}}$$

$$-\frac{k\{2r(t)-R_{c}^{2}v(t)/L_{b}\}}{r^{2}(t)+(L_{r}/L_{b})R_{0}^{2}-m_{p}(t)/\pi\rho_{p}L_{b}}$$
(5)

 $\rho_p: 推進薬密度、<math>A_b(t): 燃焼表面積, P_b: 破裂時$ $モータ内圧、 <math>\alpha: 燃焼速度係数, n: n指数, r(t):$ 破片飛散距離(変位)、 $L_r: 破裂時モータケース残存$ 部長さ、 $L_b: 破裂時モータケース破壊部長さ, R_0:$ 推進薬内径、 $R_c: モータケース内径, m_{pr}(t): 推進$

Kayaku Gakkaishi, Vol. 59, No. 2, 1998

薬破砕部質量, A_t:スロート面積, a_b:P_bにおける 音速, v(t):モータ銜突速度

(5)式の第1項は燃焼ガスの生成項,第2項は燃焼 ガス裂目とノズルからの噴出し項,第3項は燃焼ガス 体積の変化項である。一方,破片はガス流に乗って膨 張するガスと同じ速度で移動すると仮定すると,一様 流のエネルギー保存より,

$$(1/2)\dot{r}^{2}(t) + a^{2}(t)/(k-1) = a_{h}^{2}/(k-1)$$

これより、

$$P(t) = P_{b}(1 - ((k-1)/2a_{b}^{2})\dot{r}^{2}(t))^{k/(k-1)}$$
(6)

したがって、破片の運動方程式は、

$$M_r \ddot{r} = A_r P(t)$$

であるから,

 $\ddot{\mathbf{r}} = (\mathbf{A}_{f} / \mathbf{M}_{f}) \mathbf{P}_{b} \{ 1 - ((k-1)/2a_{b}^{2}) \dot{\mathbf{r}}^{2}(t) \}^{k/(k-1)}$ (7)

M₁:破片質量, A₁:破片面積

式(5)及び式(7)を連立微分方程式としてrについて 解き、破片の初期飛散速度rを求めるとともに放出ガ ス質量を求め、そのエネルギーからTNT当量を求め る。次にこのシミュレーション計算にあたって必要な 要素について以下に述べる。

(1)破裂時モータ内圧(P_b)

破裂時のモータ内圧(P_b)は、圧消による燃焼ガス体 積の減少、推進薬の破砕による燃焼面積の増加に伴う 発生ガス量の増加、ノズルからの燃焼ガスの排出を考 慮して以下により求めた。式(4)より、

$$\dot{P}(t)/P(t) = k(\dot{m}(t)/m(t) - \dot{V}(t)/V(t))$$

であり、これを用いて

$$= \frac{\rho_{\rm p} A_{\rm b}(t) P_{\rm c}^{(n-1)} \alpha a_{\rm c}^{2} (P(t)/P_{\rm c})^{(n-1/k)}}{\pi (R_{\rm o}^{2} L_{\rm c}(t) - R_{\rm c}^{2} L_{\rm v}(t))}$$

$$\frac{kA_{t}(t)(2/(k+1))^{(k+1)/2(k-1)}a_{c}(P(t)/P_{c})^{(k-1)/2k}}{\pi(R_{0}^{2}L_{r}(t)-R_{c}^{2}L_{v}(t))}$$

$$-\frac{k(R_{c}^{2}-R_{0}^{2})v(t)}{R_{0}^{2}L_{c}(t)-R_{c}^{2}L_{u}(t)}$$
(8)

P_e: 銜突時モー夕内圧, a_e: P_e時音速, L_e(t) = L_m L_q(t): 残存モータケース長, L_m: モータケース
 長, L_v(t) = ∫^t_{un}v(t)dt: 銜突によるモータケース短縮
 長, t_m: モータケース座屈開始時刻
 式(8)をPについて解き, 破裂時の内圧P_bを求めた。

- 85 -







(2)燃焼面積(A,(t))

燃焼面積(A、(t))を以下により与えた。

衝突による爆風の発生に関して、衝突による燃焼面 積の急激な増大が深く関わっていると考えた。燃焼面 積は、推進薬の微細化の程度に大きく影響される。そ こで、衝突によって微細化された推進薬の大きさをダ ミー推進薬モータの衝突実験と要素試験で得られた回 収した微細片のサイズ分布から次のように推定した。

ダミーモータの衝突実験は10kg級(衝突速度: 100m/s, 200m/s), 100kg級(衝突速度:100m/s)につ いて実施した。このうち、微細片に至る推進薬のほぼ 全量を回収できた100kg級、衝突速度100m/sの衝突実 験から得られた比表面積と累積推進薬破片質量の関係 をFig.2に示す。この図は、比表面積は各微細片の質 **量から微細片を立方体としたときの表面積を求め、破** 砕推進薬破片の累積した質量に対して比表面積がどの ように変化するかを示したものである。同様にして、 10kgダミー推進薬モータ(衝突速度:100m/s, 200 m/s)についても実験結果を整理し、100kg級のデータ と比較するために4.1倍(衝突断面積比)し, 100kg級 のデータとあわせてFig.3に示した。この図から、同 じ推進薬量が破壊しても、200m/sの方が100m/sより 約2倍比表面積が大きくなっていること、及びモータ のサイズが異なってもその衝突断面積で補正すれば比 表面積と累積質量はほぼ同じとなることが分った。ま た、推進薬種の異なるSOB推進薬とSRB推進薬との破 砕状況の違いを調べるため、要素試験を行った。この うち,代表例として直径15mm,長さ30mm,質<u></u>分約 9.7gの円柱状実推進薬供試体で衝突速度114m/sから 得られた結果をFig.4に示す。これらの結果から、 両推進薬の破砕状況にそれほど違いの無いことが判 った。

先に述べた、モータ残存長の観測結果とAUTODYN -2Dによるシミュレーション結果がほぼ一致している ので、AUTODYN-2Dによる推進薬破壊部の計算結果 はほぼ実際の状況を表していると考えられる。した がって、衝突後のある時刻での燃焼表面積は次の様に して求めた。即ち、シミュレーション計算結果による 推進薬破壊部の全質量を累積質量としてそれに対応す る比表面積をグラフから求め、これに推進薬破壊質量 をかけて破壊部の燃焼表面積を求め、これに健全部分

Comparison of SRB propellant(BP-201J) with SOB propellant(TP-H7036A)





| Motor size | Burst time * 1 (msec) | Burst length •2 (m) | Propellant mass of burst length (kg) *4 | Pi (kg/cm²) | TNT equivalent calculated | | TNT equivalent by |
|--------------------------------|--------------------------|------------------------|---|-----------------------------|------------------------------------|------------------------------------|----------------------------|
| | | | | dPi/dt (kg/cm²/s) •5 | Gas mass base *6 | Maximum internal energy base *7 | result (kg) *8 |
| 10kg class motor (100m/s) | 4. 0 (2. 0) | 0. 3 | 4 | 235 190×10 ³ | 235 190×10 ³ 0.1 0.0 | | 0. 22(90°) 0. 21(45°) |
| 10kg class motor (200 m/s) | 2. 1 (1. 1) | 0. 8 | 4 | 770 2600×10 ³ | 0.66 | 0. 19 | 1. 78(90°) 1. 45(45°) |
| 100kg class motor (50m/s) | 5. 5 (2. 7) | 0. 3 | 14 | $55 \\ 6 \times 10^3$ | 0. 17 0. 10 | | 0. 11 (90°) 0. 06 (45°) |
| 100kg class motor (100 m/s) | 4. 5 (2. 5) | 0. 4 | 30 | 120 50×10 ³ | 0. 54 | 0. 21 | 0. 99(90°) 2. 1(45°) |
| lton class motor (100 m/s) | 9. 0 (3. 9) | 0. 5 | 100 | 150 50×10 ³ | 9. 3 | 3. 0 | 9. 1 (90°) 20. 1 (45°) |
| SOB | 16. 0 (4. 5) | 0. 7 | 740 | 240 120×10 ³ | 21 | 8.0 | 7. 3(90°) 23. 6(45°) |
| SRB (30m/s) | 200 *9 (45) | 0.6 | 3500 | 58 0. 13×10 ³ | 260 | 132 | |
| | 690 •10 (535) | 0.0 | 17300 | 85 0.05×10 ³ | 480 | 158 | _ |

Table 1 TNT equivalent by impact model calculation and experimental results

*1 : Time from the contact of nose tip onto wall to burst. Parenthetic value is the time from the contact of propellant end.

*2 : Length of destroyed propellant at burst calculated by AUTODYN-2D

*3 : Assumed that full length of propellant was destroyed at burst.

.

*4 : Mass of destroyed propellant at burst calculated by AUTODYN-2D

*5 : Pi: Internal pressure at burst, dPi/dt: Internal pressure rising rate

*6 : TNT equivalent of gas mass base means (mass of gas discharged) ×1.5

*7 : TNT equivalent derived from maximum internal energy of the motor

*8 : TNT equivalent derived from the peak over-pressure of blast wave Parenthetic value is the angle between sensor line and sled rail.

*9 : Burst time is assumed to be the time of gas discharge calculated by AUTODYN-2D

*10 : Burst time is assumed to be at maximum explosion potential (internal pressure of 85kg/cm², velocity of 0m/s)



の燃焼表面積を加えてある時刻での総燃焼表面積とした。

(3)推進薬の燃焼速度

推進薬の燃焼速度はαPⁿとして求められ、先に示し た(5)式に反映している。SRB推進薬は20MPaまでの 圧力範囲では圧力感度が低く、n指数:n=0.27であ るが、20MPa以上ではn=1.0となる。これは密封ポン プ試験法により測定して得られた。この関係をシミュ レーション計算に反映した。

3. TNT当量シミュレーション計算結果

前項のモデルにより各衝突実験について爆発のTNT 当量をシミュレーション計算した結果をTable1及び Fig.5に示す。各衝突実験の計測された爆風圧から求 めたTNT当量とシミュレーション計算による爆発により放出された燃焼ガス質量から求めたエネルギーの TNT当量を比べると、シミュレーション計算結果は実験結果の約1/3~1倍程度になっていてやや少な目で あるがオーダーは一致しており、10kg級、100kg級、 1 ton級及び推進薬種の異なるSOB(約4 ton級)に亘っ てほぼ爆発現象をシミュレートできたと考える。ま た、本モデルにより、Titan実験について、文献で分る 範囲のパラメータと文献から分らないものはSRBと同 じであると仮定したパラメータを用いてシミュレー ション計算を行った。Titan実験結果ではTNT換算率 は5.5-9.5%であるが、計算結果は19.5%となり計算 結果の方が大きくなった。しかし、Titan実験では衝

| | Initial cond | lition for calc | ulation | Maximum scattering distance | | | |
|---------------------------------|--------------|------------------|---------|-----------------------------|-----|--------------|--|
| Motor size | Ballistic | Initial velocity | | calculated | | Experimental | |
| | coefficient | *3 | *4 | *5 | *6 | result | |
| 10 kg class motor (100 m/s) | 25 *1 | 124 | 130 | 97 | 123 | 92 | |
| 10 kg class motor (200 m/s) | 25 *1 | 298 | 305 | 135 | 170 | 110 | |
| 100 kg class motor (50 m/s) | 113 *1 | 60 | 63 | 124 | 186 | 205 | |
| 100 kg class motor (100 m/s) | 113 *1 | 100 | 105 | 250 | 309 | 235 | |
| lton class motor (100 m/s) | 127 •2 | 170 | 170 | 388 | 475 | 400 | |
| SOB (50m/s) | 153 •2 | 175 | 175 | 450 | 551 | 397 | |

Table 2 Maximum scattering distance (calculated and experimental)

*1 : Measured value

*2 : Estimated value from estimated mass and experimental formula,

Ballistic coefficient $\beta(kgf/m^2) = 10(M/1.1)^{1/3}$ M: Fragment mass

*3 : Initial velocity without kinetic energy

*4 : Initial velocity with kinetic energy

*5 : Initial velocity without kinetic energy, drag coefficient Cd=1

*6 : Initial velocity with kinetic energy, drag coefficient Cd=0.75

突壁が破壊されており、推進薬の破壊が少なくなった と考えられ、衒突壁が破壊されないとして計算した結 果に対して、実験結果が少な目になっているのは妥当 であると考える。

4. 最大飛散距離シミュレーション計算結果

2項のモデルにより計算した初速と実験により得ら れた推進薬破片の弾道係数を用いて、水平方向に対 する初期飛行角は母大飛散距離を与える30°で計算し た。この最大飛散距離と実験結果の比較をTable2に 示す。これから、100kg級の衝突速度50m/sと、後で 述べるが捕捉装置の影響があると推測されるSOBの衝 突速度50m/sを除けば、計算値と実測値がよく合って いることが分る。100kg級の衝突速度50m/sについて は、衝突速度が小さいことからモータケースの一部し か破壞しなかったため、非破壞部分から破壞個所にガ スが補給されることにより破片の初速が大きくなり. **過大飛散距離が大きくなったことが考えられる。この** 現象は後述の解析結果(Fig.7)からも取付けられる。 なお、Parker²⁾によると直方体に近い形状の抗力係数 Cdは0.75であるのでこの値を使っても評価したが、抗 力係数Cd=1の方がよく一致する結果となった。ま た、この表で運動エネルギーを考慮した場合とは、衝 突エネルギーにより破片が初速を得るので、それを考 慮して計算した場合である。実験結果から、この初速 は衝突速度の約1/3となったので、これを考慮して計 算してみたが、最大飛散距離に及ぼす影響は小さいこ とが分った。

また、Titan実験の最大飛散距離を計算すると844m が得られた。実験結果は914mであるので、計算値は 実験値と概ね同等であると言える。実験では障壁が破 壊されていることから、障壁の破壊片等の効果によっ てモータの裂け目が遮蔽されてガスの放出が制限され たことが考えられる。この場合、飛散破片に働くガス の力積は大きくなり実験の飛散距離は計算値より大き くなる。

推進薬破片質量と飛散距離と飛散シミュレーション 結果をFig.6に示す。ここで、推進薬破片質量と弾道 係数の関係は前報4項(4)の関係式を用いて、飛散距 離と初速の関係を求めた。初速が一定であれば破片質 量すなわち破片弾道係数が大きくなると最大飛散距離 が大きくなる。しかし実際には、破片質量が大きくな ると初速が小さくなるので、最大飛散距離は頭打ちと なり、先のシミュレーション式の定義によるストリッ プ状の推進薬破片に対して求めた初速に対して、スト リップ状の推進薬破片の長さをその幅の1.5倍(推進薬 破片の縦横比を実験で求められた中央値の1.5と仮



Fig. 6(a) Fragment mass vs scattering distance: 100kg class motor (50 m/s)











Fig. 6(d) Fragment mass vs scattering distance: SOB(50m/s)

定。)で割った値を推進薬破片質量として求めた母大飛 散距離がその上限値となる。 大飛散距離が大きくなったのは、衝突モードの場合、 衝突によってモータ内圧が高くなったこと及び長さ直 径比:L/Dが大きいため残存部からのガスの補給によ

衝突モードの方が推力中断/指令破壊モードより最

火薬学会誌





り飛散物を大きく加速したことが主要因と考えられ る。H-IISRB(推進菜量約59トン)について、2項で述 べたモデルについてモータの破裂した部分の長さの モータ全長に対する割合(%)をパラメータとして推進 薬破片質量と最大飛散距離の関係を求めた結果をFig. 7に示す。この図から、破裂部分が小さいほど最大飛 散距離が大きくなることが分る。ちなみに、H-IISRB の衝突シミュレーションの場合、破裂部分は0.6mと 計算され、これはモータ長の3.6%にあたる。この場 合の最大飛散距離は約860mとなる。なお、SOB実験 の 吸大飛散距離(397 m)は実験式 D=80×Wp^{0.24}から 得られる値(574m)より小さく、またモデルによる飛 散の解析結果よりも小さい。これは、SOBの衝突実験 の安全確保のために設置した捕捉装置が破片の衝突で かなり破損していることから、この捕捉装置の影響で **最大飛散距離が小さくなった可能性が考えられる。**

5. 結 論

(1)爆発のTNT換算率

10kg級, 100kg級, 1 ton級推進薬のH-IISRB相似

モータ及び推進薬種の異なるH-I SOBについて50m/s ~200m/sの衝突速度の実験における爆発のTNT当量 をほぼシミュレートできた。これをTitan実験に当ては めたところ、ほぼ実験結果を説明できた。したがっ て、H-IISRB級のモータについてもこのシミュレー ションが適用できると考える。

H-ISRBに対してこのシミュレーションを行うと TNT当量は260kgでTNT換算率は0.44%となり、定常 燃焼圧のガス容器の破裂モードとなる。したがって、 モデルの誤差を考えても、H-ISRB級の30m/sの衝突 速度で生じる爆発に対して、TNT換算率を2%とすれ ば十分であると考える。

(2) 最大飛散距離

実験値に基づく最大飛散距離を与える式:D(m)= 80・Wp(kg)^{0.28}は、推進薬量約37トンのTitan実験の結 果及びシミュレーション結果とほぼ一致し、かつ、安 全側であるので、H-IISRB級のモータにも適用でき ると考える。H-IISRBに対してこのシミュレーション 計算をすると813mとなり、この実験式により計算す ると1118mとなった。この実験式を使えば安全側であ り、この実験式を固体推進薬モータの銜突モードにお ける最大飛散距離の算出式とすることができると考 える。

辞

魸

文

実験にご協力いただいた通商産業省工業技術院物質 工学工業技術研究所の飯田光明,中山良男両氏及び実 験に従事された日産自動車(株)宇宙航空事業部及び日 本油脂(株)の方々に謝意を表します。

献

- W. E. Baker, "Workbook for Predicting Pressure Wave and Fragment Effects of Exploding Propellant Tanks and Gas Storage Vessels", NASA-CR-134906, September, 1977
- Loyd C. Parker, "Solid Propellant Size Distribution Model For Large Solid Rockets Final Report, RTI Report No. RTI/5180/26-09F, May 5, 1993

On the explosion potential of solid rocket at launch failure (II)

- Analysis by math. model developed -

by Yukio HYODO^{*}, Hiroyuki NAKAMURA^{*}, Katsuaki KOSAKA^{**} Sigeru SUZUKI^{**}, Takashi NAKAYAMA^{**}, Keiji ARAI^{**} Masatoshi CHIBA^{**}, Katsumi TANAKA^{***} and Takehiro MATSUNAGA^{***}

The mathematical model for impact/explosion phenomena has been developed based on the results of the sled tests for 10 kg class, 100 kg class and 1 ton class solid rocket motor described in (1). TNT yield and fragment flight distance were calculated using this math.model. The results of the calculation proved that the model could simulate the TNT yield obtained in above sled tests and Titan sled test reported. Therefore this model is applicable to SRB class rocket motor. The model calculation for 30m/s impact of H-II SRB predicts TNT equivalent ratio of 0. 44 %. Consequently TNT equivalent ratio of 2 % is sufficiently safer estimation for such failure mode. The longest flight distance derived from the experimental formula, $D(m)=80 \cdot Wp(kg)^{0.24}$, nearly coincides with the result of model calculation and with the result of Titan experiment (propellant mass of about 37ton), and moreover gives safer distance. Consequently this formula is applicable to H-II SRB class motors.

(*National Space Development Agency of Japan, World Trade Center Bldg. 2-4-

- 1, Hamamatsu-cho, Minato-ku, Tokyo 105-6190, Japan
- ** Aerospace Division, Nissan Motor Co., Ltd., 21 1, Matobashinmachi, Kawagoecity, Saitama-ken 350–1107, Japan
- *** National Institute of Material and Chemical Research, 1 1, Higashi, Tsukubacity, Ibaraki 305–0046, Japan)