

SN の 開 発

秋 葉 鏡二郎・上 杉 邦 憲・岩 間 彬
中 村 巖・前之園 満 紀・似 田 功

1. 序 論

ラムダロケット以降，ロケットの段間切離機構にセパレーションナットが使われる様になってきた。セパレーションナット (SN と略称) を使用する利点としては

- (1) ロケットの直径が大きくなっても適用され得る。
- (2) 切断にともなう衝撃が少ない。
- (3) 火薬類の燃焼ガスが出ないので周囲を汚染しない。
- (4) 規格化により種類を限定し得る。

などが挙げられる。

反面，切断部に使用する SN のユニット個数を多く必要とするので，ユニット当りに高い信頼性が要求される。

ラムダの初期において (L-4S-1)，SN を使用した 2~3 段初断が異常であったことを契機とし，普通段間切断機構はいわゆるナット~ナット方式と称する二重安全型式がとられる様になった。そこで，現在段間に使用している SN 最大数は，M-4S 1~2 段における 6 対すなわち 12 個となっている。

ところで，いままで使用されてきた SN は，以下の点において改良，検討の余地が残されていた。

- a. 信頼性の定量化の不足。
- b. 動作時間のバラツキが多い。
- c. 規格化がなされていない。
- d. 組立が現地でしか行なえない。
- e. 時折，リード線引出し個所からのガスもれがある。

また，火工品全体についていえることではあるが，点火玉の最少発火電流が小さい，すなわち鋭感であることも問題点の 1 つである。

そこで SN 新規開発に際して，以下の大きな方針を初期において掲げた。

- (i) 引き出しリード線のコネクタ化
- (ii) 規格化
- (iii) 薬種の変更
- (iv) 信頼性の定量化
- (v) 斉発性点火玉の安全化

(i) は前記の d, e に対し，また (iii) は前記 b の改善策となるものであり，ほぼこの方針に

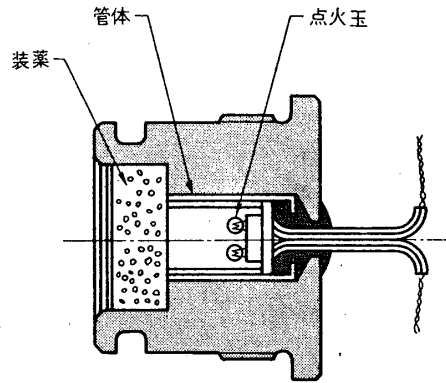
基づいて実現したのが、現在の規格化された SN である。

しかし、(v)の項目については、開発中期において、技術上の困難のため今回の目標からはずし、将来の課題として残すことにした。

すなわち、

(i) コネクタ化

従来は、第 1 図に示す様に通称豚の尻尾と称する様な 2 本あるいは 4 本のリード線がスクイブより出ており、点火線との結合は圧着端子でなされていたが、このため、第 1 には発火に対する安全性を考えると、すべてこの作業は現地で実施されることとなり、信頼性の上からも日程上からも好ましくないこと、第 2 に、この様なリード線引出し方法では、往々リード線に沿って、カートリッジ内ガスがもれ出すという不具合がでた。もち論、ガスもれは大部分、相当時間が経過したあとに検出される様なものであったので、これが事故に直結するものとなる可能性は考えにくい、信頼性の観点からは好ましいものではない。コネクタ化は、1,000 気圧の燃焼ガスに耐えることを目標として進められた。



第 1 図 旧型スクイブ

(ii) 規格化

ネジ径により規格化し、

8φ, 12φ, 16φ, 20φ, 26φ

の 5 種とした。これだけの種類があれば、K, L, M の各段切断に対しては必要十分である。

(iii) 薬種の変更

黒色火薬 (B/P) の欠点を調査し、薬種を TiH_2 系とした。

(iv) 信頼性の定量化

いわゆる強度、応力法により、引抜力、火薬力の分布より定量化する方法をとった。一応最も控えめの目標として、M 程度の複雑さをもったものについて 1,000 機に 1 機の故障を許容するものとしたが、後述のごとく、実際にはこれより 1 けた信頼性の高いものを作ることができた。

(v) 斉発性点火玉の安全化

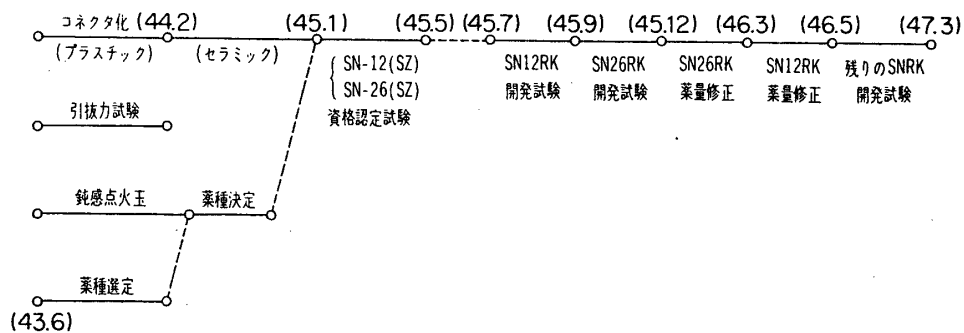
点火玉について、斉発性を持たせながら安全化、すなわち、アポロ等において標準になっている 1 A 1 W NO FIRE を達成することを目標としたが、技術的困難のため、斉発性か安全化のいずれか一方の要求をすてねばならなくなり、斉発性を重視し、安全化は従来通り、作業上の規制でカバーすることにした。

しかし、これについてはさらに研究を進め、成果を得た段階で考慮することとしている。

2. 開発経緯の概略

現在までの開発経緯を図で表わしたものが、第2図である。

SN 改良計画は、昭和 43 年度初期より開始された。43 年度は、コネクタ化と薬種についての初期検討と、SN 引抜き実験及び鈍感スクイブ点火頭の実験を行なった。44 年度よりセラミックコネクタの試作にとりかかり、一応年度末に至り完成、SN 計画は目標に達したかにみえた。しかし、44 年度末より 45 年度始めに計画した 12φ SN の最終資格認定試験において、斉発性が保証されていないことが実験より判明、重大な決断に迫られた。この



第2図 開発経過流れ図

時期になりこの欠点が発見されたのは、励起時間および斉発時間の測定が、計測系の検討不十分から誤った数値を与えていたことによるものであった。一方、この年度の第1次実験の K-10 C-3 には、この規格された 12φ SN の使用が予定されていたので、基本方針の一つであったスクイブの 1 A 1 W NO FIRE の要求をはずし、従来型点火頭をコネクタ化する方針に切りかえた。この型のスクイブを RK 型と略称する。RK 型による 12φ SN は飛しょう時の作動も確認されたので、次の使用号機としての L-4 SC-1 用の 26φ が 45 年度後半に試作され、45 年度末に L-4 SC の飛しょう前試験で機能確認がなされた。この結果、26φ については、SN 保護カバーが破損する効果が予想外に大きく、構造面より薬量を加減する要求が出された。

本来後述の様に、これまでの薬量決定には、切断後の周辺破壊効果を設計条件に入れていなかったもので、かなり薬量には余分を見込んであった。このため、再びここで、作動後の余剰エネルギーも考慮して薬量を修正し、満足なものを作ることができた。46 年度に至り、すでに実用された 12φ についてもこの考えによる薬量修正を行ない、46 年夏の L-4 SQ-1 の飛しょうテストで良好な結果を得た。

M については、M-4 S-4 より、規格化 SN を用い、この際、8φ については、薬種変更がなされた。

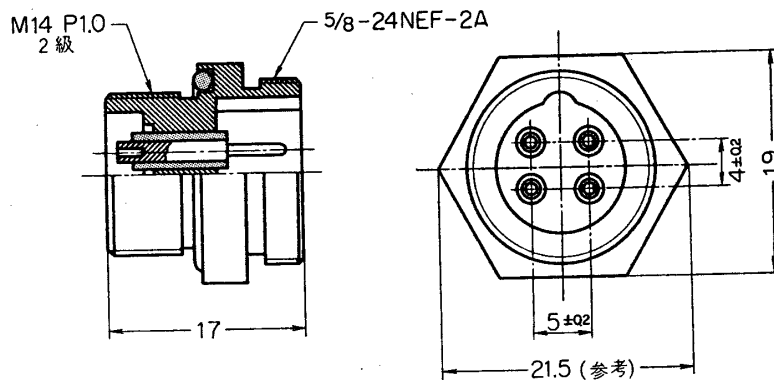
3. コネクタ化について

燃焼ガス 1,000 気圧に 10 秒時耐えることという仕様で、当初はエポキシ系、シリコン

系のプラスチック製で試作したが、700 気圧以上におけるガスもれを保証するに至らず、セラミック製のものへと移行した。

セラミック製としてアメリカで作られているものの多くは、ピン（2本ないし4本）が一つの一体となったセラミック中で絶縁されているが、高圧におけるセラミックの強度や、寸法の製作誤差を考慮して、われわれは、4本独立に同心の絶縁セラミックをもつ型を採用した。これらセラミックの内外面と金属の接着はローツケによるものである。

試作に関しては、形状、工程、材料の面でいくらかの曲折があったが、最終的に RK 型用スクイブに採用したものは第3図に示す様なもので、以下の仕様を満すものができあがった。



第3図 SN 用コネクタ

- 1° 接触抵抗 <math>< 2.0 \text{ m}\Omega \text{ (at DC. 1 A)}</math>
- 2° ピン間絶縁 >math>100 \text{ M}\Omega \text{ (at DC. 500 V)}</math>
- 3° 耐電圧 AC 500 V rms で異常なし
- 4° 耐気圧
 - A. インシュレータに 150 kg の荷重を 1 分間加え異常なし
 - B. ピンに 30 kg を 1 分間加え異常なし
 - C. 1,500 kg/cm² の燃焼ガスを 10 sec 加え異常なし

ここに 4° A~B は日本航空電子 KK における社内試験によるもので、C は日本油脂 KK における実作動テストによるものである。

なお、耐振動規格等その他の耐環境性については、スクイブ組立として実施した。この段階では、振動試験で接栓絶縁材（プラスチック）にひび割れが生じて、材質を変更したことがあった以外は、コネクタに関する問題はなかった。

4. 薬種の選定

薬種の選定に際しては、作動時間の短縮を目的とするものであるから、従来の B/P の特性が比較の対象となる。そこで、代表的な B/P 燃焼圧~時間特性をとって見たのが第4図である。これにみる様に B/P は動作時間が長いこととともに、バラツキが大きいことも大きな欠

点である。B/P より立ち上り時間の早いものを選ぶについてさらにB/Pの粒度を細かくすることも考えられたが、B/Pの真空着火性能がよくない点も考慮し、他の薬種選定にふみ切った。

一般的に、この種火工品用の火薬に対し、望ましい性能としては、以下の項目があげられよう。

1. 着火が確実であること。
2. 伝火，燃焼速度が早く，安定していること。
3. 秤量誤差の少ないこと——低密度，単位体積当りの発生ガス量の少ないこと。（大型火工品を除く。）
4. ガス温度が低いこと。
5. 環境による特性変化の少ないこと。

この種火薬として、外国において現用されているもののうち、酸化剤として NH_4ClO_4 ， KClO_4 ， KNO_3 ，テフロン，金属燃料として B, Ti, Mg を用いたものを試作し，最も作動時間の短い組合せとして， KClO_4 と Ti の組合せのものを採用することとした。さらにのちに，一般的性能以外に入手性，品質保証を考慮して，最終的に TiH_2 系を採用することとし，これを TEK1 と称することとした。この main charge の示圧曲線をとるために，容量可変の内圧測定チャンバを作り，最高圧 P_{\max} ~ 薬量 G ~ 空容積 V の関係を求め，ほぼ次の関係を得た。

$$P_{\max} = f \frac{G}{V}$$

$$\begin{aligned} G: g & \quad P: \text{kg/cm}^2 \\ V: \text{cm}^3 & \quad f = 5,900 \text{ cm} \end{aligned}$$

なお，黒色では $f = 2,500 \sim 3,000 \text{ cm}$ である。

これらの式は，Abel-Nobel の式 $f(G/V)/[1-a(G/V)]$ で，Covolume a を省略したものである。実用範囲は $G/V < 0.15$ であるので，これによる誤差は，普通の値として $a \approx 1$ を入れると，最大 15% 程度におさまるはずである。

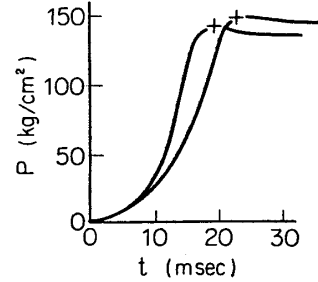
なお実験より求めた f は， $G/V < 0.5$ で急激に低下する傾向を示したが，実験条件より燃焼が不完全となったためかも知れず， G/V にのみ依存するか否かは検討の余地がある。

TiH_2 系の伝火燃焼速度は，黒色火薬よりも早く，バラツキが少ないことは確かであるが，なお単独では十分でなく，スチフネートを助装

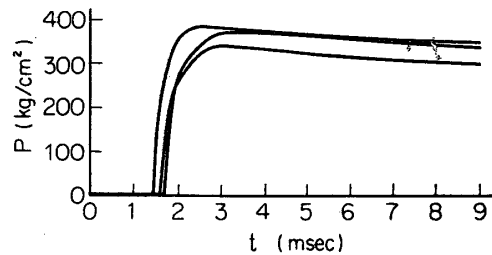
P-3 型

	P_{\max} (kg/cm^2)	$t_{P_{\max}}$ (msec)
1	144	22
2	149	19
3	144	19.5
4	143	19

条件
 W_p : B/P A-3 2.0gr
 F_v : 40.7 cm^3
 通電電流: 2 Amp.
 (但し，点火玉1コ当たり)



第4図 黒色火薬の示圧曲線例



第5図 KTB-2 の示圧曲線例

薬として用いた。また、装填の方法によっても左右され、特にステンレス板の気密ディスクを用いたことによる特性改善も顕著である。

8φ用の薬種は、他の5種とは若干異なっている。すなわち、8φでは、上述の薬種では所要薬量がきわめて少なくなり、秤量誤差からくる信頼性低下が懸念されたので、 f の少ないものとして、さらにボロンを添加したものを新たに採用することとし、これを KTB-2 と称することとした。

KTB-2 の着火性再現性は、むしろスチフネイトなしの TEK-2 よりすぐれている。これの示圧曲線を第 5 図に示す。

5. 薬量の決定

1. で述べたように、切断の失敗は最悪の場合でも 1,000 機に 1 機以上起きないようにしなければならない。これを M-4S 型ロケットで考えると 6 か所の切断点 (Sub~1st, 1st~2nd, 2nd~3rd, 3rd~CN, CN~4th, 4th~SA) があり、そのうちもっとも条件のきびしいのは 6 個の SN を同時に作動させる場合 (ただし dual) である。この場合切断の成功率を p_s とし、SN-個の失敗率を p_{SF} とすると

$$\begin{aligned} p_s &= [(1-p_{SF})^2 \times 2(1-p_{SF})p_{SF}]^6 \\ &= (1-p_{SF}^2)^6 \approx 1-6p_{SF}^2 \end{aligned} \quad (5-1)$$

であり、

$$p_s \geq 1-0.001/6$$

でなければならないから (5-1) 式より

$$p_{SF} \leq 0.00527$$

すなわち SN-個の成功率は 99.473% 以下であってはならない。

さてこの要求を満たすような SN を設計し、またできあがった SN が実際に要求を満たしているかを定量的にチェックするにはどのような方法があるだろうか。

一般にいかなる部品であっても数多くの試験を行なった結果から推測統計学的手法によってその信頼性を保証するというのがもっとも確実でよく行なわれる方法である。ところがこの方法には高い信頼性が要求されればされるほど試験回数 (個数) をふやさねばならないという欠点がある。たとえば n 個の部品を試験してそのうち k 個が故障であったとすると、故障率 p は信頼係数 α の下で次のように表わされる。

$k \neq 0$ or n のときは

$$\underline{p} = \frac{k}{(n-k+1)F_{2k}^{2(n-k+1)}\left(\frac{1-\alpha}{2}\right) + k} \leq p \leq \frac{(k+1)F_{2(n-k)}^{2(k+1)}\left(\frac{1-\alpha}{2}\right)}{(n-k) + (k+1)F_{2(n-k)}^{2(k+1)}\left(\frac{1-\alpha}{2}\right)} = \bar{p} \quad (5-2)$$

$k=0$ or n のときは

$$\underline{p} = \frac{k}{(n-k+1)F_{2k}^{2(n-k+1)}(1-\alpha) + k} \leq p \leq \frac{(k+1)F_{2(n-k)}^{2(k+1)}(1-\alpha)}{(n-k) + (k+1)F_{2(n-k)}^{2(k+1)}(1-\alpha)} = \bar{p} \quad (5-3)$$

第6図に $\alpha=0.05$, $k=0,1$ の場合について \bar{p} と n の関係を示した。これより明らかなように, $n=20$, $k=0$ すなわち 20 個の部品を試験して故障が 0 であっても故障率は 0 ないし 14% であるとしかれない。

われわれが今 SN に要求している成功率は 99.473% 以上であり, この成功率をこの方法で保証するには約 400 個の SN を作動させ, それらがすべて正常に働くことが必要である。しかももし 1 個でも作動しない SN があれば試験個数を増加するなり,

設計を変更して試験をやりすなりしない限り要求されている成功率に達していることを保証できない。特に SN のような火工品では反復使用できないため, このような方法で信頼性を保証することは金額的, 時間的にも不可能に近い。すなわち SN の設計にあたっては少ない試験個数で作動成功率を検定できるような方法が必要であった。

SN の設計パラメータとしては金物と薬種が決まれば装填する火薬の量だけが問題となる。もちろん作動成功率を高めるには火薬の量を増せばよいわけであるが, 火薬力が強すぎるとは金物の破壊, ロケット本体に与える衝撃などの問題が生じてくる。この構造上の問題も重要であるが, これについては後に述べることとして, ここでは火薬によってナットを引抜くに必要な力(引抜力)が得られるという SN の特徴をとらえてわれわれが用いている作動成功率の推定方法および設計段階における装填薬量の決定方法について述べる。

一般に n 個の標本(標本平均値 \bar{x} , 標本標準偏差 s)があった場合, 母集団を正規分布とすればその母集団の平均値 μ および偏差 σ は信頼係数 α の下で

$$\underline{\mu} = \bar{x} - t_{n-1}(1-\alpha) \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (5-4)$$

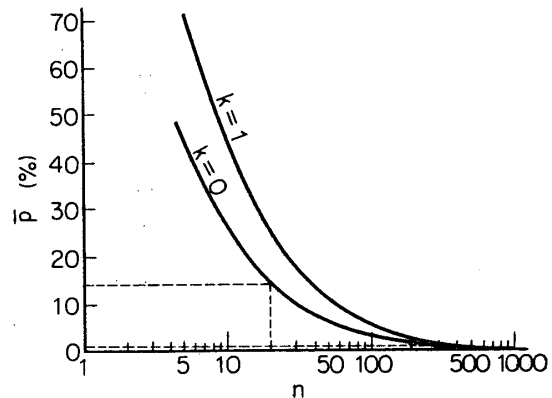
$$\bar{\mu} = \bar{x} + t_{n-1}(1-\alpha) \frac{s}{\sqrt{n}}$$

$$\underline{\sigma} = s \sqrt{\frac{n-1}{\chi_{n-1}^2 \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right)}} \quad (5-5)$$

$$\bar{\sigma} = s \sqrt{\frac{n-1}{\chi_{n-1}^2 \left(\frac{\alpha}{2}\right)}}$$

と推定できる。この区間推定は小標本法によるもので n が小さくても有効である。(5-4), (5-5) より

$$\left| \frac{\bar{x} - \mu}{\bar{x}} \right| = \left| \frac{\bar{\mu} - \bar{x}}{\bar{x}} \right| = \frac{s}{\bar{x}} \cdot \frac{t_{n-1}(1-\alpha)}{\sqrt{n}} \quad (5-6)$$



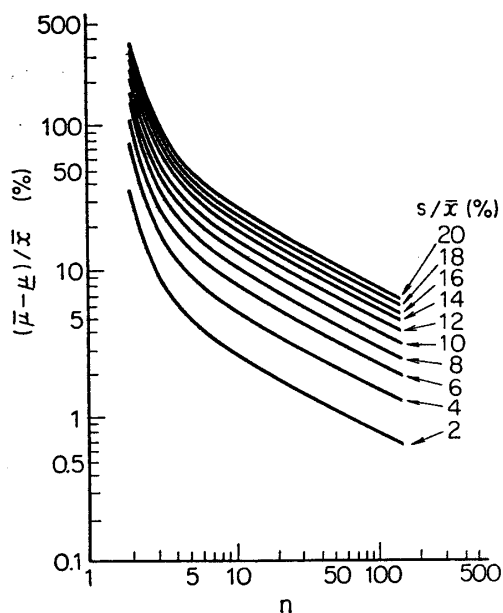
第6図 $\bar{p} \sim n$ 曲線 ($\alpha=0.05$)

$$\frac{\sigma}{s} = \frac{\sqrt{n-1}}{\sqrt{\chi_{n-1}^2 \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right)}} \tag{5-7}$$

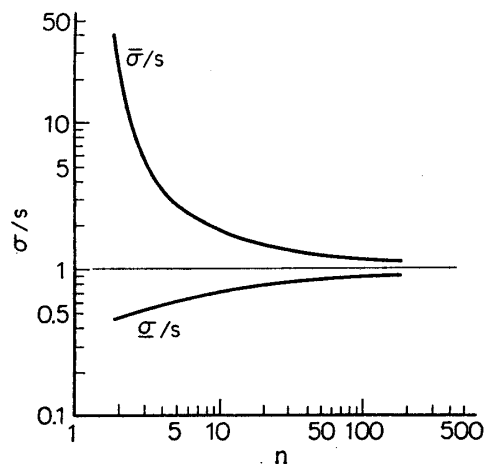
$$\frac{\bar{\sigma}}{s} = \frac{\sqrt{n-1}}{\sqrt{\chi_{n-1}^2 \left(\frac{\alpha}{2}\right)}}$$

第 7 図に (5-6) 式の関係をもとに $\alpha=0.05$ の場合について、 s/\bar{x} をパラメータとして表わした。また第 8 図は (5-7) 式を同じく $\alpha=0.05$ の場合について示したものである。

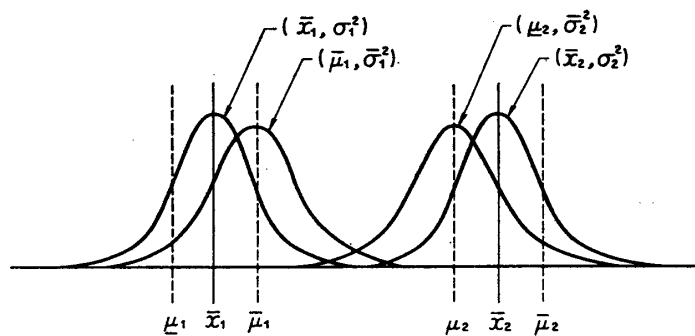
ここで SN における引抜き力と火薬力とをそれぞれ別個に適切な個数ずつ測定できたとすれば、それらから引抜き力の平均値 $\mu_1, \bar{\mu}_1$ 、偏差 $\sigma_1, \bar{\sigma}_1$ 、火薬力の平均値 $\mu_2, \bar{\mu}_2$ 、偏差 $\sigma_2, \bar{\sigma}_2$ がそれぞれ推定できる。(ただし引抜き力、火薬力ともに正規分布を仮定する) これらの推定値



第 7 図 母平均の推定 ($\alpha=0.05$)



第 8 図 母集団標準偏差の推定 ($\alpha=0.05$)



第 9 図 引抜き力および火薬力の推定

のうち, SN にとってもっとも条件の厳しい場合をとることにすれば, 引抜力については $(\bar{\mu}_1, \bar{\sigma}_1^2)$, 火薬力については (μ_2, σ_2^2) なる分布をしていると考えればよい. (第9図)

一般に二つの独立な正規分布 (μ_1, σ_1^2) , (μ_2, σ_2^2) があるとき, そのおのおのの独立変数の差の分布は正規分布 (μ, σ^2) (ただし $\mu = \mu_2 - \mu_1$, $\sigma^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2$) となる. そこで火薬力と引抜力の差を z とすると, その確率密度 $f(z)$ は,

$$f(z) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(z-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (5-8)$$

$$\text{ただし, } \mu = \mu_2 - \bar{\mu}_1, \quad \sigma^2 = \bar{\sigma}_1^2 + \sigma_2^2$$

となる. したがって SN 作動成功率すなわち $z > 0$ である確率は $X = (z - \mu)/\sigma$ で規準化して

$$\begin{aligned} p_{ss} &= \Phi\left(X > -\frac{\mu}{\sigma}\right) = 1 - \Phi\left(-\frac{\mu}{\sigma}\right) = \Phi\left(\frac{\mu}{\sigma}\right) \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx \end{aligned} \quad (5-9)$$

で与えられる. ここで

$$\begin{aligned} \mu_2 &= \bar{\mu}_1 + \alpha\bar{\sigma}_1 \\ \bar{\sigma}_2 &= \beta\bar{\sigma}_1 \end{aligned} \quad (5-10)$$

とおけば

$$\frac{\mu}{\sigma} = \frac{\mu_2 - \bar{\mu}_1}{\sqrt{\bar{\sigma}_1^2 + \bar{\sigma}_2^2}} = \frac{\alpha}{\sqrt{1 + \beta^2}} \quad (5-11)$$

したがって SN 作動成功率 p_{ss} は (5-9), (5-11) 式より

$$p_{ss} = \Phi\left(\frac{\alpha}{\sqrt{1 + \beta^2}}\right) \quad (5-12)$$

となる. したがって, 引抜力の標本分布 (\bar{x}_1, s_1^2) , 火薬力の標本分布 (\bar{x}_2, s_2^2) が得られれば, それらから α, β を算出して SN 作動成功率 p_{ss} を正規分布表より求めることができる.

以上は引抜力, 火薬力を別個に測定した場合に作動成功率を知る方法であるが, 設計の段階で薬量を決定するにはこの方法を逆にたどっていけばよい. すなわち金物ができあがった段階で機械的方法によりナットの引抜試験を行ない引抜力の分布推定値の上限 $(\bar{\mu}_1, \bar{\sigma}_1^2)$ を求

第1表 引抜力テスト結果

SN	資料個数 n	引抜力平均 $\bar{x}_1(\text{kg})$	標準偏差 s_1/\bar{x}	$c_1^* = f(n, s)$	$c_2^{**} = f(n)$	引抜力平均上限 $\bar{\mu}_1 = \bar{x}_1 + 0.5\bar{x}_1 c_1$	引抜力ばらつき上限 $\bar{\sigma}_1 = s_1 \cdot \bar{x}_1 \cdot c_2$
SN-8	16	86.8	0.170	0.180	1.58	94.6	23.3
SN-12	30	195.8	0.189	0.135	1.35	209.0	50.0
SN-16	20	263.2	0.129	0.120	1.45	279.0	49.2
SN-20	20	297.7	0.203	0.190	1.45	326.0	87.6
SN-26	32	658.5	0.237	0.150	1.30	707.9	202.9

* 第7図より

** 第8図より

第 2 表 火薬力, 薬量および SN 作動成功率

SN	必要火薬力平均 ($n=10$) \bar{x}_2 (kg)†	ばらつき許容値 ($n=10$) s_2 (kg)†	ピストン径受圧面積 d (mm), A (cm ²)	火薬力平均目標値 ($n=10$) μ_2 (kg/cm ²), μ_2 (kg)	ばらつき目標値 ($n=10$) σ_2 (kg/cm ²), (kg)	薬量 (g)	実測火薬力平均値 ($n=10$) (kg/cm ²)	実測ばらつき ($n=10$) (kg/cm ²)	SN 作動成功率 目標値 実測値 %
SN-8	245	25	12φ 1.131	450 509.0	20 22.6	0.14*	/	/	99.9999 以上 —
SN-12	465	40	15φ 1.767	450 795.2	20 35.3	0.23**	457.0	14.4	99.9999 以上 99.9999 以上
SN-16	610	55	20φ 3.142	330 1036.9	15 47.2	0.27**	/	/	99.9999 以上 —
SN-20	780	70	24φ 4.524	330 1492.9	15 67.9	0.64**	/	/	99.9999 以上 —
SN-26	1550	110	30φ 7.069	330 2332.8	15 106.1	1.09**	340.0	15.2	99.9999 以上 99.9999 以上

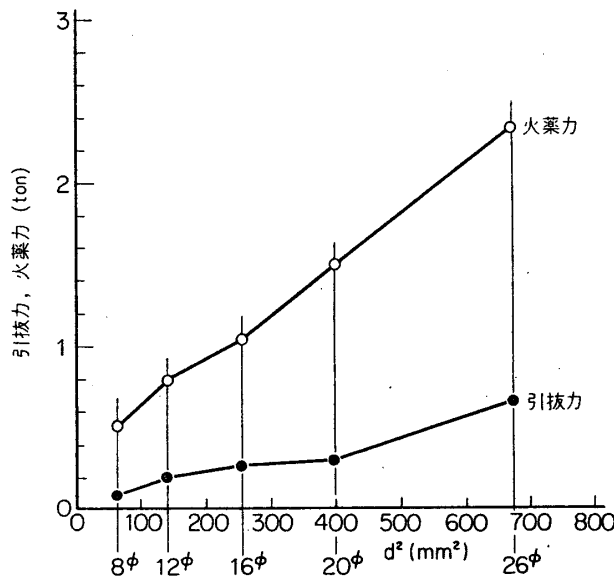
* 薬種 KTB-2(TiH₂+KClO₄+B)

** 薬種 TEK-2(TiH₂+KClO₄)+SZ-1(スティフネイト+ジルコニッケル)

† 作動成功率 99.473% を達成するために必要な火薬力の平均値とばらつき

める. 次に要求成功率を (5-12) 式に代入して得られる α, β の関係式と (5-11) 式から μ_2, σ_2 の関係式を求める. ここで実際に達成可能と思われる $\bar{\sigma}_2/\mu_2$ を仮定すれば, 火薬力試験を行なう際の目標値 (μ_2, σ_2^2) が得られるからこの値を満たすべく薬量を決定してやればよい.

この方式に従って各サイズの SN 薬量の決定が行なわれた.



第 10 図 引抜き力および火薬力

第 1 表に引抜きテストの結果および必要な火薬力の値を示した。この結果得られた各 SN の薬量および SN-12, SN-26 については火薬力試験の実測値、作動成功率等をまとめて第 2 表に示した。なお薬量の決定にあたり内圧平均 450 kg/cm^2 のものについては σ を 20 kg/cm^2 , 330 kg/cm^2 のものについては 15 kg/cm^2 を目標値とした。これより明らかなように作動成功率はいずれも 99.9999% 以上となっており、これを M-4S 型ロケットに用いた場合一機についての切断失敗の確率は 10^{-7} 以下であると考えられる。なお 8ϕ の SN だけは前述の理由により新開発の薬種 (KTB-2) を用いることとした。なお第 10 図に各サイズの SN における火薬力と引抜き力の関係を示した。

6. 点火玉の斉発性

ロケットの各切断点では数個の SN を用いる場合が多く、それらの主装薬に着火するためのイニシエータ (点火玉) は電氣的に直列に結線されている。点火玉には、それが一定の電流により点火するための必要最小限の通電時間 (励起時間) が存在し、この励起時間の通電により励起状態にもたらされた点火玉はある程度の時間おくれ (点爆時間) を経て必ず発火する。数個の点火玉を直列に結線したときすべての点火玉が発火する (すなわち回路が切断される以前にすべての点火玉が励起している) ことすなわち斉発性の問題は、切断を成功させるという意味では SN 作動成功率と同等以上の重要性を持っている。現在一応の規準としては、点火玉 2 個シリーズ結合の場合で斉発失敗率 0.0001 以下という条件がもうけられているが、実際にはどの程度であろうか。

斉発確率は次のようにして推定することができる。点火玉が励起してから発火するまでの時間 (点爆時間) τ および励起時間の分布密度関数をそれぞれ $h(\tau)$, $f(t)$ とすれば、2 個の点火玉が斉発する条件は

$$\begin{aligned} p_{SI} &\geq 2 \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) \left[\int f(t) dt d\tau \right] dt \\ &= 2 \left[\int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot H(t) dt - 0.5 \right] \end{aligned} \quad (6-1)$$

で与えられる。ただし

$$H(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) F(t+\tau) d\tau$$

新しい SN 開発計画においては、さらにイニシエータを鈍感なスクイブとするため 1 A 1 W の通電で発火せずという条件をもうけ、新たなイニシエータの開発を進めてきた。然るに開発経過の項で述べたようにこのスクイブでは斉発性が保証できず、その結果この 1 A 1 W NO Fire の条件をはげし、SN カートリッジ内に従来から用いられてきた点火玉を組込んで斉発性を保証することとなった。ここでこの点火玉についての励起時間および発火時間の分布から p_{SI} を求めてみる。[1] によれば 8 A 通電時における発火時間は正規分布とはやや異なるが、これを一応正規分布として近似すると

$$\mu_2 = 0.55 \text{ msec}, \quad \sigma_2 = 0.10 \text{ msec} \quad (n=79)$$

となる。また励起時間の分布を新たに測定した結果、やはり 8 A 通電時において

$$\mu_1 = 0.07 \text{ msec}, \quad \sigma_1 = 0.01 \text{ msec} \quad (n=79)$$

という結果が得られた。なお励起時間は正規分布としてよい。図 5-2, 図 5-3 を用いてこれら標本値からの推定値を求め (6-1) 式に代入すれば

$$\begin{aligned} p_{SI} &= 2 \left[\Phi \left(\frac{\alpha}{\sqrt{1+\beta^2}} \right) - 0.5 \right] \\ &= 2 \left[\Phi(3.863) - 0.5 \right] = 0.9999 \end{aligned}$$

ただし

$$\alpha = \frac{\mu_2 - \bar{\mu}_1}{\bar{\sigma}_1} = \frac{0.528 - 0.072}{0.0118} = 38.63$$

$$\beta = \frac{\bar{\sigma}_2}{\bar{\sigma}_1} = \frac{0.118}{0.0118} = 10.0$$

この値は要求斉発確率ぎりぎりであるが、この推定方法はもっともきびしい推定法であること、実際の点火玉では発火と同時に電橋の断線が起きる場合と発火後も断線しない場合が半々程度であることを考慮すれば、要求された斉発確率 99.99% は一応満足されているものと考えてよいだろう。

なお [I] において提示された斉発確率の推定式には若干の誤りがある。[I] では $f(t)$, $g(t)$ をそれぞれ励起時間、発火時間の分布密度関数、 $F(t)$, $G(t)$ をそれらの $-\infty$ から t までの積分としたとき、 n 個の点火玉の斉発条件を

$$p_{SI} \geq n \int_{-\infty}^{\infty} g(t) [1-G(t)]^{n-1} [F(t)]^{n-1} dt$$

としている。しかしながらこの式は励起時間と発火時間の分布をまったく独立に扱っているため、点火玉が未励起でありながらも発火しているという現実には起り得ない状態をも考慮していることになり、結果的には実際の斉発確率より大きな値を与えることになる。たとえば、 $n=2$ とすると

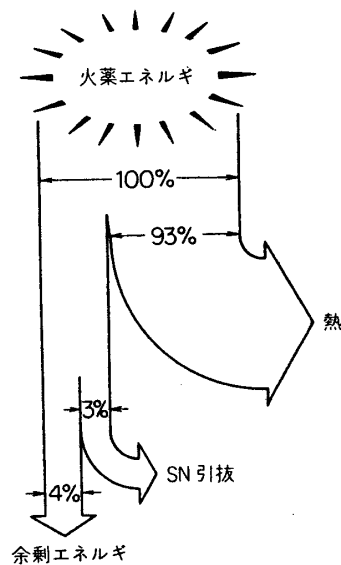
$$\begin{aligned} p_{SI} &= 2 \int_{-\infty}^{\infty} g(t) [1-G(t)] F(t) dt \\ &= 2 \left[\int_{-\infty}^{\infty} g(t) F(t) dt + \int_{-\infty}^{\infty} g(t) G(t) [1-F(t)] dt - 0.5 \right] \end{aligned}$$

すなわちこの式の第 2 項は 1 個の点火玉が発火したときにもう 1 個が未励起でかつ発火している確率を表わすことになる。したがって斉発確率を求める式としては (6-1) 式を用いるのが妥当である。

7. 余剰エネルギー試験

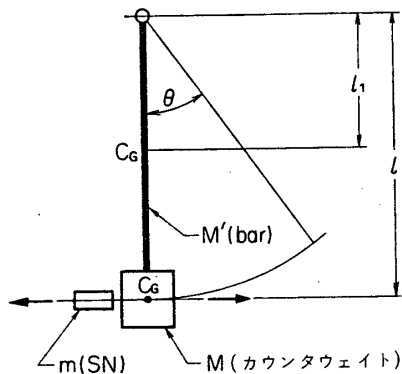
5. では火薬力を引抜きより十分大きくするという観点から薬量を決定する方法について述べたが、その結果装填された薬量が多すぎるために SN 作動時にロケット本体や搭載機器に悪影響を与えたりはしないかということをおらかじめ検討しておく必要がある。しかも新た

に採用した TiH₂ 系の主装薬は圧力の立ち上り時間が非常に短かいため、機体構造、搭載機器側からみれば従来の黒色火薬を用いた SN に比して条件が厳しくなっている可能性もある。機体に与える衝撃がどの程度までなら許されるかはそれぞれの機体によっても異なり、また定量的にもあらわしにくいいため、結局は実機を用いての切断試験等の際に確認するという形をとらざるを得ないが、われわれは機体への影響に対する目やすという意味で余剰エネルギー試験と呼ばれる試験を行なっている。火薬の爆発によるエネルギーは第 11 図に示したようにナットの引抜きに用いられるほか、大部分は熱として逃げるがさらに余ったエネルギーが SN が吹き飛ぶ際の運動エネルギーになると考えられる。これを薬量の異なる数種類の SN について測定することによって 5. の方法で決定した薬量が妥当なものであるかの検討が行なわれた。測定方法は当初高速度カメラによって SN が飛び出す際の速度を求める方式がとられたが、あとに第 12 図に示したように振子の先のカウンタウェイトに SN を組付け SN 作動後の振子の振れ角から余剰エネルギー E を次式によって算出する方式に改めた。

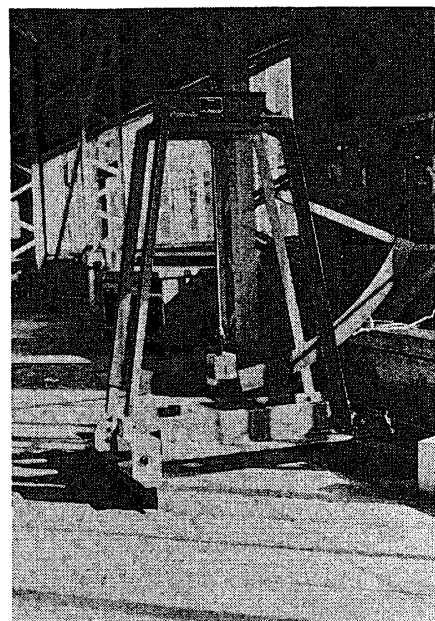


第 11 図 火薬の燃焼によるエネルギーの流れ

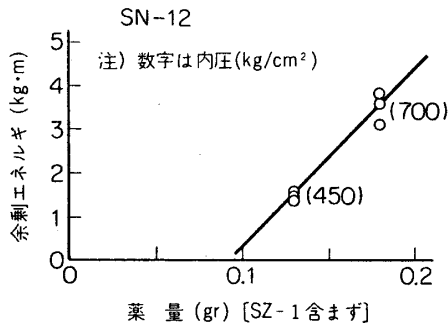
$$E = (Ml + M'l_1) \left[1 + \frac{1}{m} \frac{(Ml + M'l_1)^2}{(Ml^2 + \frac{1}{3}M'l^2)} \right] g(1 - \cos \theta) \quad (7-1)$$



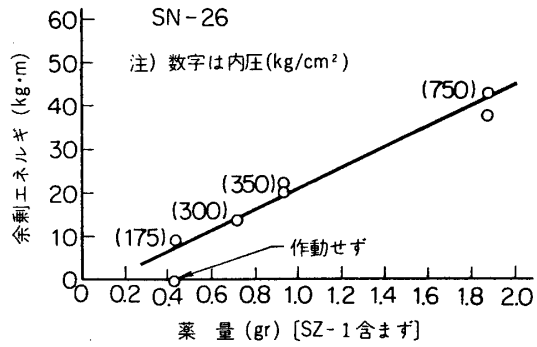
第 12 図 余剰エネルギーの測定



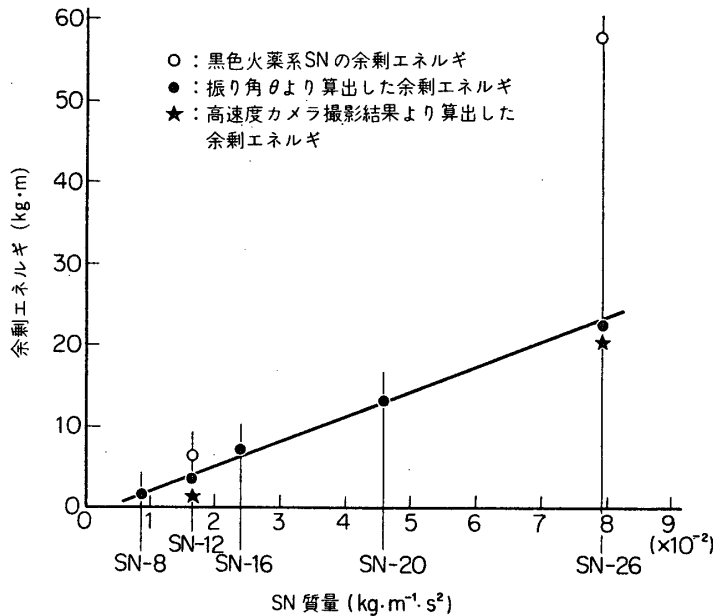
第 13 図 余剰エネルギーの測定装置



第 14 図 SN-12 余剰エネルギー



第 15 図 SN-26 余剰エネルギー



第 16 図 各 SN の余剰エネルギー

第 13 図に余剰エネルギー測定装置の外観を示した。第 14, 15 図にすでに開発を終了した SN-12, SN-26 について薬量を増減させた場合の余剰エネルギーの変化を示した。これを見ると余剰エネルギーは薬量に大体比例するものと考えられる。また第 16 図は現在開発中の SN-8, 16, 20 も含めて実際に使用している薬量での余剰エネルギーを示したものである。これによると SN の径が大きくなるにつれ余剰エネルギーは増加しているが、これは SN の質量にほぼ比例しており、したがって SN が飛び出す際の初速は大体一定であると考えられる。

さてこの新しい SN が、従来用いられてきた黒色火薬系の SN に比して火薬力が強く、余剰エネルギーが大きいのではないかと心配が持たれていたため従来の 12φ, 26φ の黒色火薬系 SN についても余剰エネルギー試験を行なってみた。その結果図 7-6 に示したように 12φ, 26φ いずれの場合も新型の SN の方が余剰エネルギーは小さく機体に与える

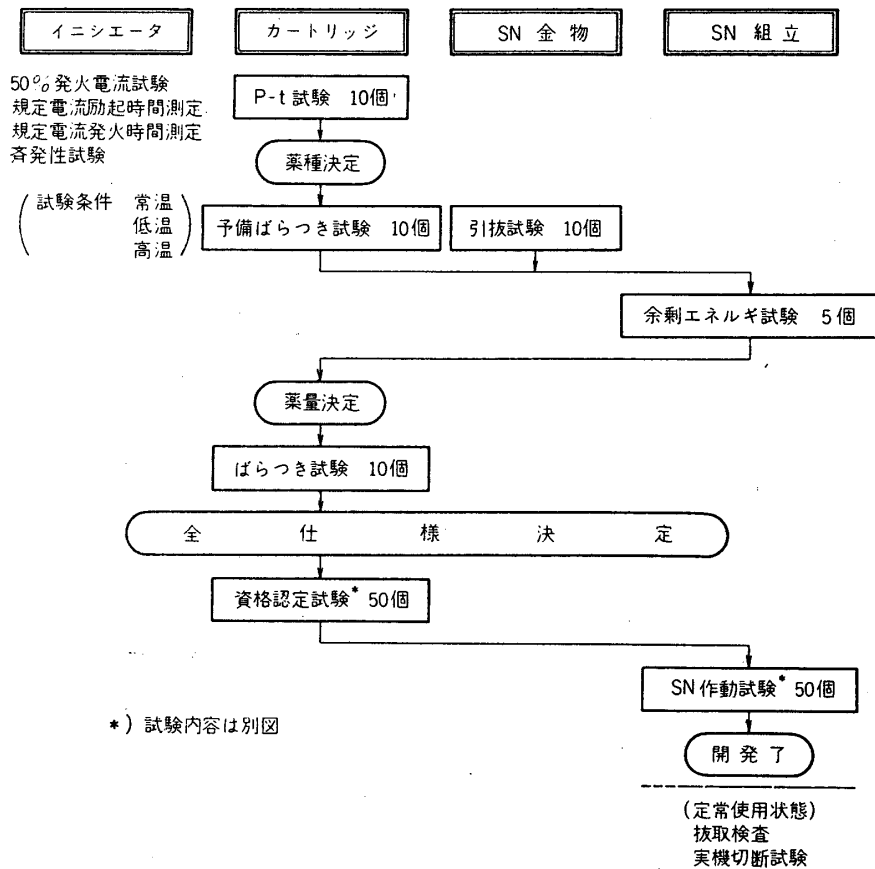
影響の小さいことが示された。

なお機体構造上からみればこの余剰エネルギーをできるだけ小さくすることが望ましいが、あまりに小さくしたのでは薬量、引抜き等のばらつきから SN 作動成功率が保証できなくなる。適当なところでの妥協が必要となるわけであるが、優先度はやはり SN 作動成功にあり、構造側に与える影響は、SN カバーを強化するとかゴムの緩衝材を入れるとかして小さくせざるを得ないことが多い。この点については 9. で再び述べることにする。

8. 各種試験

第 17 図に SN 開発中実施される各種試験の流れ図を示した。これらの試験は大きくわけてイニシエータ（主装薬に点火するためのスクイブ）、カートリッジ（イニシエータプラス主装薬）、SN 金物、SN 組立の四つに対して進められる。今回の SN 開発計画では当初イニシエータも含めて全部品を新規に開発する予定であったが、斉発性の問題からイニシエータは従来の点火玉を使用することとなったため、ここではカートリッジ、SN 金物、SN 組立の三つに関する試験について述べる。

まず使用するべき主装薬を決定するために何種類かの候補薬種にれいて、発火後の圧力特性を調べるための試験が行なわれる。圧力立上り特性がよく、ばらつきの少ないものがこの試



第 17 図 SN 開発時各種試験

験によって選択され、さらに真空着火特性、薬量対発生圧力などが考慮された上で薬種の決定がなされる。薬種の決定後、前述の火薬力試験、引抜き試験がカートリッジ、SN 金物についてそれぞれ行なわれる。なお火薬力試験で予備ばらつき試験とばらつき試験とがあるが、前者は引抜き試験の結果から出てくる火薬力にする要求（平均値、分散）を満足できるか、満足できるとすればそのときの薬量はどの程度かを予備的に検討するためのもので、この結果をみて薬量の決定がなされる。決定した薬量のものについて最終的にばらつき試験が実施され、この結果をみて薬量の決定がなされる。この結果と引抜き試験の結果を用いて SN 作動成功率の推定が成される。作動成功率が要求された値を上まわることが保証されると SN 金物にカートリッジが組付けられて余剰エネルギー試験の実施となる。この試験によって装填すべき薬量がロケット本体の構造上からも容認し得るものであるという確認が得られれば、SN の全ての仕様が決定されたことになる。

決定された仕様に従ったカートリッジができあがると資格認定試験と呼ばれる各種の環境試験が行なわれる。これは第 18 図に示したようにロケット搭載部品に対する宇宙研規格に沿って行なわれ、この試験に合格して初めてカートリッジは完成したことになり、SN 金物に組付けられて最終的な SN 作動試験が行なわれる。これは完成した SN の作動確認の意味で行なわれるもので、斉発試験、余剰エネルギー試験などの形で実施され、これを以って開発が完了する。

試験項目	試験条件	資料数
		50
振動試験	加振方向 X 軸 10~35Hz 片振幅3mm 35~200Hz 加速度15G 200~2000Hz 加速度30G 掃引時間 往復18分	20
ゆるみ試験	加振方向 X 軸 200Hz 5G 30分	5
衝撃試験	衝撃方向 X 軸 40G 10msec	20
静電気試験	3000V 500pF (pin-to-case)	10 5 5
湿度試験	40℃ 95%以上 7日間	20
高温作動試験	+60℃ 4hr	10
低温作動試験	-50℃ 4hr	10
常温作動試験		20 10

第 18 図 SN 資格認定および作動試験流れ図

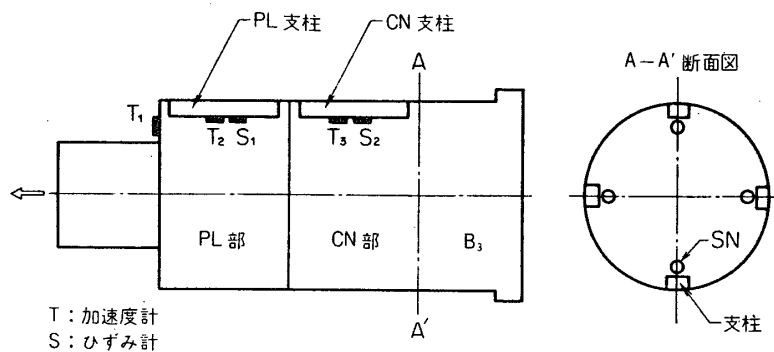
なおこの新型 SN が定常的に使用されていく場合、その品質をいかにして管理していくかが今後の問題である。規格化した以上、各ロケットの号機ごとに SN を製作するのではなく、あらかじめ製作され保管されている SN を抜取り検査等によって性能を確認した上で使用するというのが理想であるが、年間の使用量の推定、SN 性能の経年変化などの問題を今後解決しなければならないだろう。いづれにしろ抜取り検査で行なわれる試験項目としては、カートリッジについては $P-t$ 試験、金物については引抜き試験、SN 組立については余剰エネルギー試験などが実施されることになる。

8. 実機における使用

12φ と 26φ の SN については、すでに開発が完了しており、L-4 SC-1 号機（昭和 46 年 8 月 20 日）において使用されている。この機体では 1~2 段切断用に 26φ が 8 個（4 個ずつダブル）、 $B_3 \sim CN$ 段切断用に 12φ が 8 個（4 個ずつダブル）用いられた。以下に L-4 SC-1 の飛しょう前地上切断試験および飛しょう時における SN の使用状況を報告する。

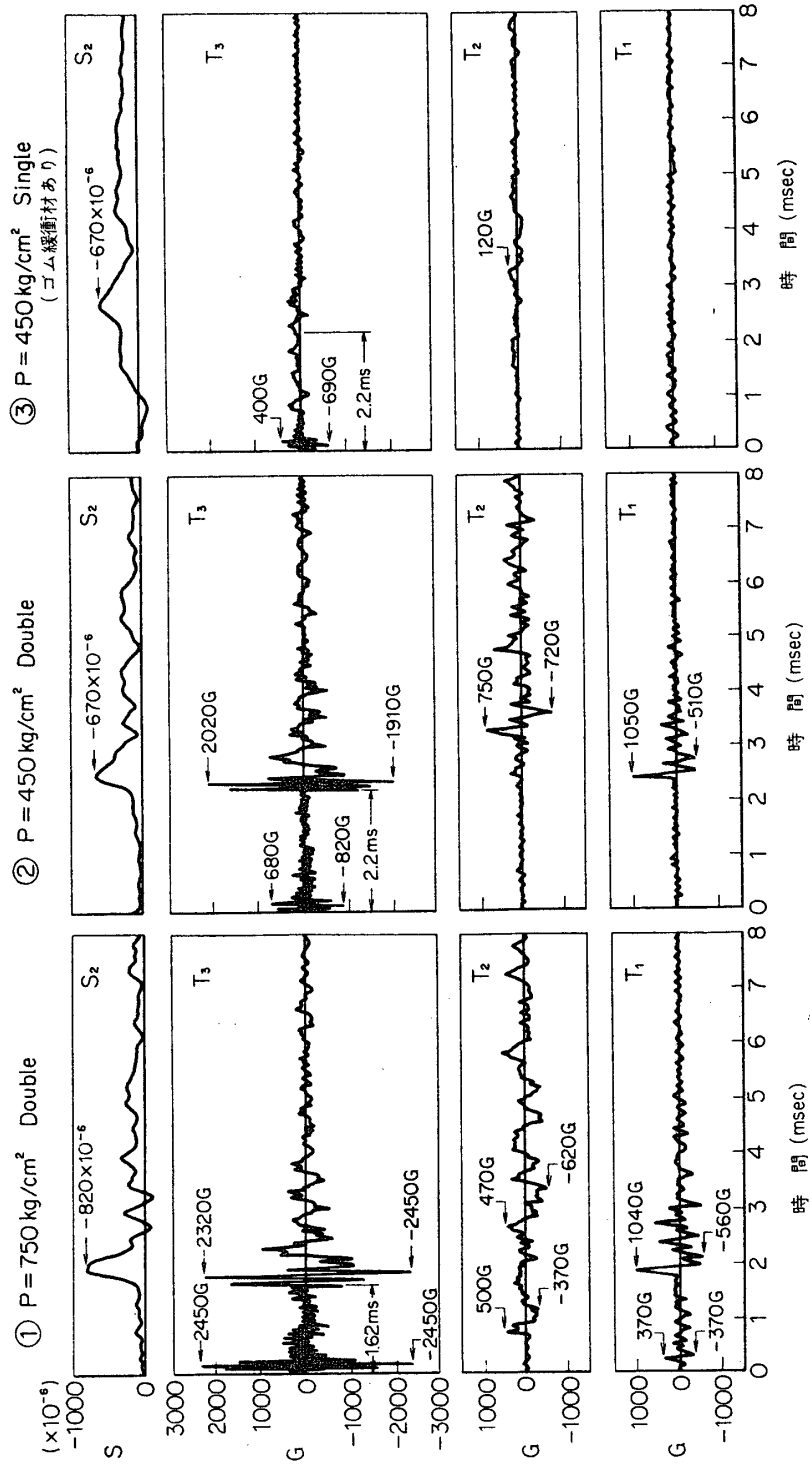
当初 SN-26, 12 は 6. で述べた薬量決定法から得られる値にさらに余裕をもたせた形で薬量が決められ、SN 作動時の内圧は SN-26 で 760 kg/cm^2 、SN-12 では 785 kg/cm^2 となっていた。ところがこれを L-4 SC-1 の切断試験に使用した際、1~2 段切断では SN カバーの破損、 $B_3 \sim CN$ 切断では上段への衝撃がかなり大きいという問題が生じた。これは当時まだ余剰エネルギーの概念が確立されておらず、火薬力と引抜き力の差をなるべく大きくするという観点で薬量が決定的ために起きた不具合であった。この対策として SN カバーを強くし、綾衝材のゴムを厚くするほかに、SN 本体に対しても前述の余剰エネルギー試験をとりいれて、機体への影響を可能な限り減ずる手段がとられることとなった。この試験の結果、薬量をさらに減少させ、SN-26 では内圧を 330 kg/cm^2 、SN-12 では 450 kg/cm^2 まで下げても十分作動の成功を保証し得ることが判明し、現在の薬量（第 2 表）に落ち着いたわけである。なおこの新しい薬量における余剰エネルギーは第 16 図に示したように従来の黒色火薬系 SN の値よりも小さくおさえることができた。

L-4 SC-1 の地上切断試験では CN エンジン部およびペイロード部に第 19 図に示したご



第 19 図 L-4 SC-1 $B_3 \sim CN$ 地上切断試験計測位置

第 20 図 L-4 SC-1 B₃~CN 地上切断試験データ



第 3 表 L-4 SC-1 B₃~CN 地上切断試験計測結果

		①P=750 kg/cm ² double (SN 12 4×2)	②P=450 kg/cm ² double (SN 12 4×2)	③P=450 kg/cm ² Single (SN 12 4×1) ゴム緩衝材あり
SN 作動時 のシ ョ ッ ク	T ₃	+2450 G t=0 ms -2450 G (12 kHz)	+680 G t=0 ms -820 G (12 kHz)	+400 G t=0 ms -690 G (12 kHz)
	T ₂	+500 G t=0.7 ms -370 G (10 kHz)	微 小	微 小
	T ₁	+370 G t=0.14 ms -370 G (10 kHz)	微 小	微 小
SN 機 構 衝 突 の シ ョ ッ ク	T ₃	+2320 G t=1.62 ms -2450 G (12 kHz)	+2020 G t=2.20 ms -1910 G (12 kHz)	+200 G t=2.20 ms -200 G
	T ₂	+470 G t=2.52 ms -620 G (10 kHz)	+750 G t=3.16 ms -720 G (10 kHz)	+120 G -150 G
	T ₁	+1040 G t=1.78 ms -560 G (7 kHz)	+1050 G t=2.36 ms -510 G (7 kHz)	微 小
	S ₂	820×10 ⁻⁶ t=1.6 ms (τ=0.8 ms)	670×10 ⁻⁶ t=2.3 ms (τ=0.9 ms)	620×10 ⁻⁶ t=2.3 ms (τ=1.0 ms)

第 4 表 L-4 SC-1 加速度計搭載位置

名 称	規 格	搭 載 位 置
Y ₁	±2.5 G ストレインゲージ型	第 2 段 尾翼筒
Z ₁	同 上	同 上
X ₁	-5~15 G ストレインゲージ型	第 3 段 計器部
Y ₂	±2.5 G ストレインゲージ型	同 上
Z ₂	同 上	同 上

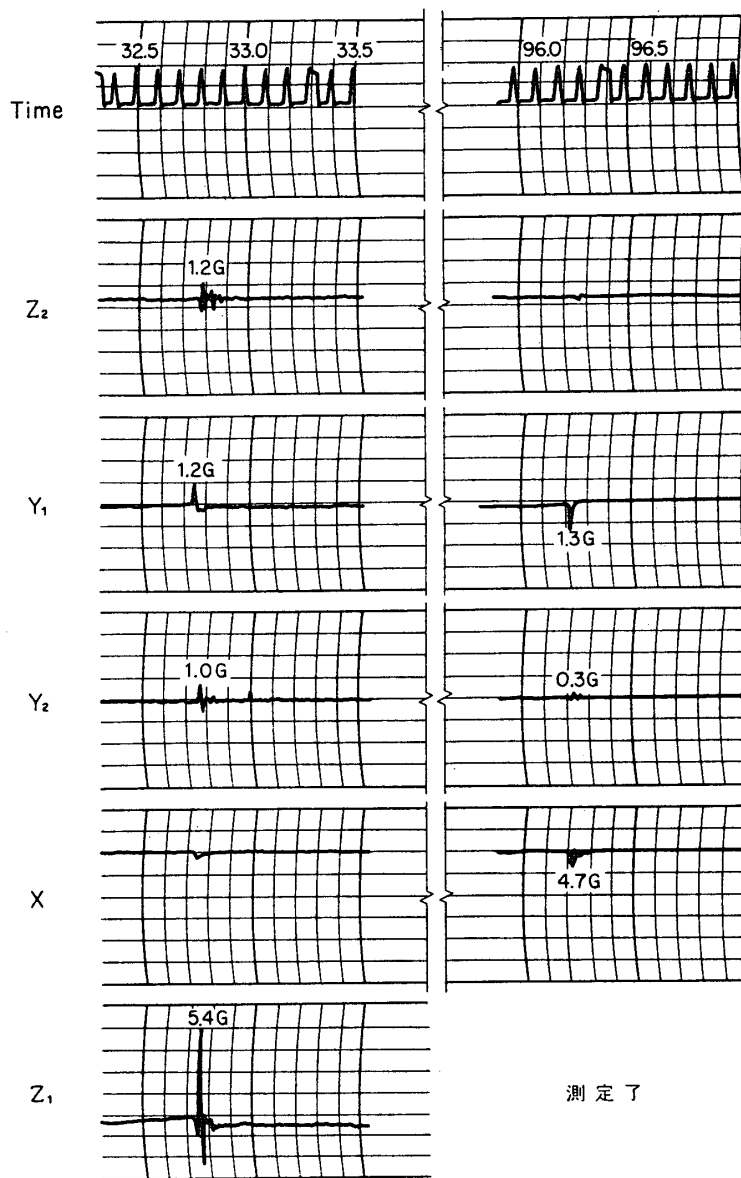
第 5 表 L-4 SC-1, L-4 S-5 切断時ショック

	L-4 SC-1		L-4 S-5	
	B ₁ 切断	B ₃ 切断	B ₁ 切断	B ₃ 切断
X	微 小	4.7 G 83 Hz	9 G	3.0 G
Y ₁	1.2 G 17 ms	1.3 G 15 ms	±0.5 G	微 小
Y ₂	1.0 G 40 Hz	0.3 G 43 Hz		
Z ₁	5.4 G 37 Hz	測定 3	±0.55 G	微 小
Z ₂	1.2 G 50 Hz	微 小		

* 成形火薬による切断方式

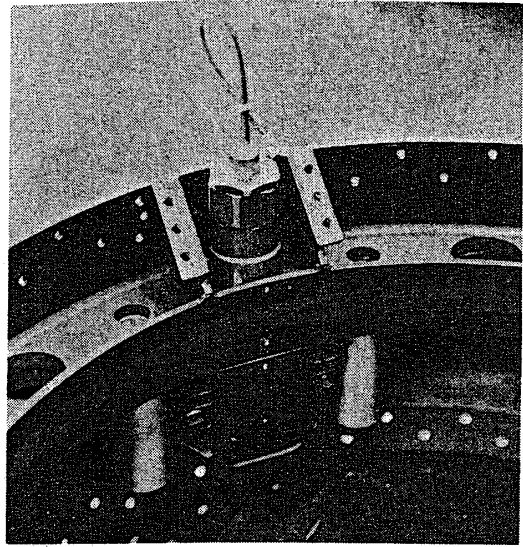
とく加速度計，ひずみ計をとりつけ， $B_3 \sim CN$ 切断時に上段に与える衝撃等の計測を行なった。第 20 図に記録データ，第 3 表に主な結果をまとめて示した。これらより明らかなように薬量を減少したことによりナットが抜ける際の衝撃加速度，SN の飛散速度（余剰エネルギー），SN がカバーに衝突する際の上段への影響が減少していることがわかる。

実際に L-4SC-1 が飛しようした際のテレメータによる加速度記録を第 21 図に示した。なお， $B_1 \sim B_2$ 切断は $X+32.8 \text{ sec}$ ， $B_3 \sim CN$ 切断は 96.2 sec であり，切断はいずれも正常に行なわれた。各加速度計の搭載位置は第 4 表のとおりであり，第 22 図に 1~2 段切断部に組付けられた SN-26 を示した。第 5 表は，第 21 図から各切断時における加速度を読み



第 21 図 飛しよう時テレメータ記録

とった結果および比較のため黒色火薬系の SN を用いた L-4 S-5 号機の B₃~CN 切断時における加速度をまとめたものである。(なお L 型ロケットの B₁~B₂ 切断は従来成形火薬による結合部焼切りの方法をとっていたため SN は用いていない) これをみると B₃~CN 切断時における加速度は X 方向 (機体軸方向), Y, Z 方向 (横方向) とともに小さく, L-4 S-5 とくらべても問題となる点はない。また B₁~B₂ 切断時については X 方向の g がほとんどなく横方向 (Z₁) にやや大きな g が認められる。本来 SN の取り付け方向 (機体軸方向) から考えると X の方が Y, Z より大きな g を示すのが普通であるが, この機体の場合 X は第 3, 4 段のペイロード部に搭載され



第 22 図 SN-26 (L-4 SC-1 1~2 段切断部)

ており, Z₁ は切断点に最も近い 2 段目尾翼筒に搭載されていたため比較的大きな g を示したものである。なおこの値も問題になるほどのものではなく, また同じ尾翼筒内にある Y₁ の値や上段の X の値が小さいことから機体, 搭載計器におよぼす影響をできるだけ小さくするという目標も十分達成できたと考えられる。

現在 SN-12, 26 に続いて 8φ, 16φ, 20φ の SN の開発が終了しようとしており, これらはすべて M-4 S-4 号機から使用が開始される。

謝 辞

本開発研究は, 当初の予想に反し比較的長期にわたり, このため技術面または予算面において, 観測ロケット研究班特に, 推進班, 構造班, および L, M 計画班には御迷惑をおかけすることが多かった。ここに改めて謝辞を呈する次第である。

また, 切断試験, 環境試験は, 森教授, 以下同研究室の今沢助手, 八坂助手, 平田技官の担当で実施されたものである。

1972年6月10日 新設部(工学)

参 考 文 献

- [1] 秋葉鎌二郎, 加勇田清勇「点火玉の発火特性」工業火薬協会誌, 1966年第27巻第6号, p. 349~354.