

M-3Cの飛しょう保安

籾田元紀・的川泰宣・塚本茂樹
中島俊・福田孝子

1. はじめに

M-3C型ロケットは科学衛星打上げ用の3段式固体燃料ロケットである。K-9Mをはじめとする通常の観測ロケットに比べて、飛しょう距離も長く重量も大きいので、その飛しょう実験における安全確保は、国内的・国際的に見てきわめて重要な課題である。この飛しょう保安の役割の大きさに鑑み、安全の確保のため可能な限りの努力が払われてきたが、とりわけM-3C-3号機においては「安全計画」が策定され[1]、今後のロケット実験に貴重な力を添えるものとなったことが特筆される。M-3Cは現在までに第1表に掲げた3機が打ち上げられており、衛星の成否を問わず、飛しょう保安としては本来の役割を遂行することができた、と言えるであろう。ここにそのM-3C型ロケットの3号機までの飛しょう保安の大略を述べる。

2. 飛しょう保安の任務とその戦略

飛しょう保安の基本的任務は、ロケットの飛しょうに伴って発生するおそれのある、人命・各種施設・船舶・航空機などに対する危険を未然に防止し、万一の場合でもその被害を最小限に抑えることである。したがって時間的に見れば、風プロフィールその他の諸条件を吟味して飛しょう保安の立場から発射を是認する時点から、最終段が点火するまでを、その守備範囲とする。

飛しょう保安の目標が、「ロケットの飛しょうに伴う被害を最小限に抑えること」にあることは論をまたないが、このような曖昧な表現では、個々のロケット実験の安全性について立場の異なる者それぞれに意見が分れる所となるので、万人を納得させる保安目標としては、このままでは一般的に過ぎる。そこで、ロケット実験を実施する例としては、社会常識的に見て万人の認め得る定量的な保安目標を設定することが望ましい。このような観点から、M-3C型ロケットについても、わが国内外の経験に鑑みて確率的な考え方を導入し、まず天災等による死亡率と同程度あるいはより小さめの或る危険率を設定し、ロケットの落下による危険の確率がこの設定危険率以下であれば「安全」とする立場をとった。宇宙開発や原子力開発によって定着してきたかに見えるこの基準は通常「許容危険率」と呼ばれている[2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11]。したがって、飛しょう保安の戦略は、飛しょうに伴う危険率を許容危険率以下にするように上記の守備範囲を守りぬくことにある、ということができる。

第1表 M-3C型ロケットの打上げ

号機	発射年月日	衛星名
1	1974. 2. 16.	たんせい2号
2	1975. 2. 24.	たいよう
3	1976. 2. 4.	—

3. 安全計画の策定

M-3C型ロケットに対し、その飛しょう実験が許容危険率以下で実施可能となるべく、多くの努力がなされた。おもなものを大別すれば次のようになる。

- (1) ロケットの特性に関する事前の十分な検討とこれに基づく発射警戒区域・各段落下予想区域の設定。
 - (2) 実施日における発射前の海上船舶の警戒体制の完備。
 - (3) 異常飛しょう時の保安措置機能。
 - (4) 飛しょう軌跡の監視方法ならびに体制の完備。
 - (5) 飛しょう保安作業実行上の判断基準の設定とその運用上の体制の完備。
- 以下に、これらについてそのあらましを述べる。

4. 発射警戒区域

ロケットがランチャ上で万一爆発をおこし、飛散物および爆風圧がその周辺に危害を及ぼすに到った場合を想定し、その場合にこの区域の外にある生命・財産などに対する危険が、許容危険率を大幅に下まわるような範囲として、円形の「発射警戒区域」を設定した。

爆風圧を、ロケットの推進剤の等価 TNT 換算量 W_{TNT} (lbs) および発射点からの距離 R (ft) の関数として表現したのものには、下記のような Sutton の式および Kingery-BRL 曲線が代表的なものとして知られている。

$$\text{Sutton: } p_s = \frac{39.5}{z} - \frac{105}{z^2} + \frac{4120}{z^3} \quad (1)$$

$$\text{Kingery: } p_s = 226.6 z^{-1.4} \quad (2)$$

$$\text{ここで, } z = R/W_{TNT}^{1/3} \quad (3)$$

p_s : 爆風圧 (psi: lbs/inch²)

アメリカの ETR (Eastern Test Range) では、1964 年以前は Sutton の式を、それ以降は Kingery の式を採用している。

なお、 W_{TNT} は、NASA のケネディ宇宙センターの基準に準拠すると、

$$W_{TNT} = 0.5 W_P \quad (\text{固体推進剤}) \quad (4)$$

$$= 0.1 W_P \quad (\text{液体推進剤}) \quad (5)$$

のようになる。ここで、 W_P は推進剤の重量である。

KSC (Kagoshima Space Center, 東京大学宇宙空間観測所) では, 1962年に発射直後爆発したK-8-10ロケットのデータおよび火薬類法令を考慮して, 発射警戒区域の半径 R_{LD} として次の式を採用している.

$$R_{LD} = 0.5 W_p^{1/3} \quad (6)$$

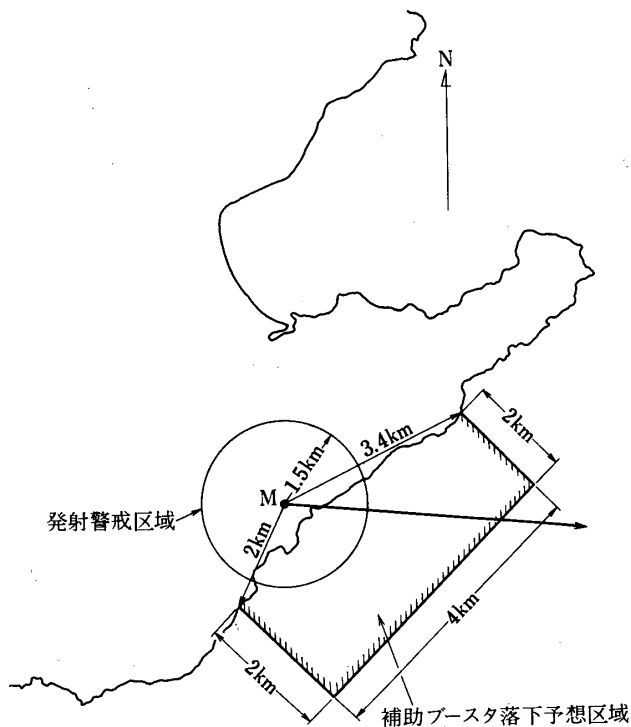
ただし R_{LD} : km, W_p : ton である. この式は, 破片に対する考慮を中心にして作られたものである [13] が, Kingery の式にあてはめて考えた場合, 警戒区域の境界線上の爆風圧が 0.015 kg/cm^2 になるので, 爆風圧の観点から見ても妥当なものと考えられる. (6)式によって, M-3C型ロケットの発射警戒区域の半径は,

$$R_{LD} = 1.5 \text{ (km)} \quad (7)$$

と定められた. なお, 耐爆措置を施していない建物について, 信頼度の高い実験データ [14] に基いて (6) 式と同様の式を導くと, 係数が0.3になるので, (6)式はかなりの余裕を見つけてられていることが分る.

発射場のある内之浦沿岸の地形と共に M-3Cの発射警戒区域を示すと, 第1図のようになる.

なお参考までに, 境界線上の基準爆風圧を 0.2 psi としたときの警戒区域の半径を, Sutt-



第1図 発射警戒区域および補助ブースタ落下予想区域

第2表 各種の方式に基づく発射警戒区域の半径

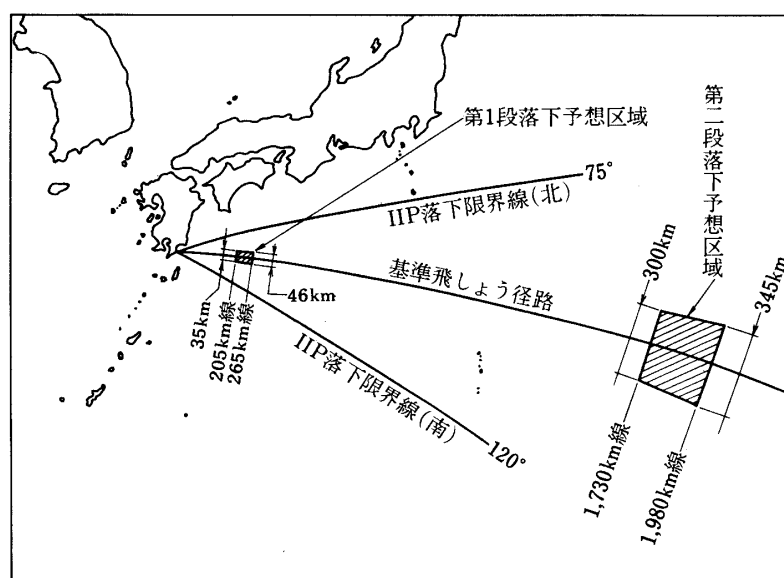
方式	R_{LD} (km)
Kingery	$0.59 W_{TNT}^{1/3}$
KSC	$0.63 W_{TNT}^{1/3}$
Sutton	$0.78 W_{TNT}^{1/3}$

on, Kingery, KSC の方式に基づいて比較したものを, 第2表に掲げておく. この表中 W_{TNT} の単位は ton に統一してある.

5. 各段の落下予想区域

正常な飛しょうの場合, 第3段は衛星軌道に入るので地表に落下してこない. 落下するのは第1段, 第2段および第1段推力増強のために用いられる補助ブースタであり, これらのそれぞれについて, 第1図, 第2図のような落下予想区域を設定した. 補助ブースタの落下予想区域は, 海上船舶に対する危険率を可能な限り下げるという方針に基づいて, 発射点を含む半径 1.5 km の発射警戒区域内の海面を含め, かなり大きめに設定してある.

なお, 各段の落下点分散域は楕円状である [15] が, 船舶・航空機への通報の便宜を考えて, 台形にしてある. この台形が落下点分散域としての楕円を含んでいることは言うまでもない.



第2図 第2段・第3段の落下予想区域

6. 海上船舶の警戒

通常時の船舶密度（単位海上面積あたりの船舶の総面積）は、陸地・島などから離れるにつれて小さくなり、陸地・島から100 km 以遠の公海上では船舶密度は $10^{-7} \sim 10^{-9}$ くらいになる。M-3Cの計画飛しょう径路は、落下予想区域が陸地・島から十分に離れた公海上にあるように決められており、加えて、発射の際は予めノータムを出すので、船舶密度は更に低くなることが確実である。

内之浦の場合、海岸から20海里までは、船舶密度は平均して 4×10^{-6} であり、100 km以遠の値に比して特別の注意が必要である [11, 16, 17]。このため、KSC 内の海上レーダ、光学観測によって船舶の発見につとめると共に、とりわけ補助ブースタの落下予想区域においては、巡視船によって警戒を行ない、落下予想区域内に船舶の無いことを確認してから発射を行なうシステムになっている。

7. 飛しょう安全装置

ロケットが飛しょうに異常を来した際の、モータ関係の飛しょう安全装置としては、第1段モータには、成形火薬によるケース破断装置が上段セグメントの両側面にとりつけてあり、第2段モータには、鏡板の中央部をセパレーションナットの作動によって取り除く方式の推力中断装置が装備してある。また、第2段以降はタイマを停止することによって点火をとめることができる。これらの飛しょう安全上の諸動作は、いずれも地上からの電波指令（コマンド）によって行なわれるが、モータ関係の飛しょう安全装置を作動させるコマンドと単にタイマを停止するコマンドとは別項目になっており、いずれを実行するかは状況に応じて決定できるようになっている [1, 12, 18]。

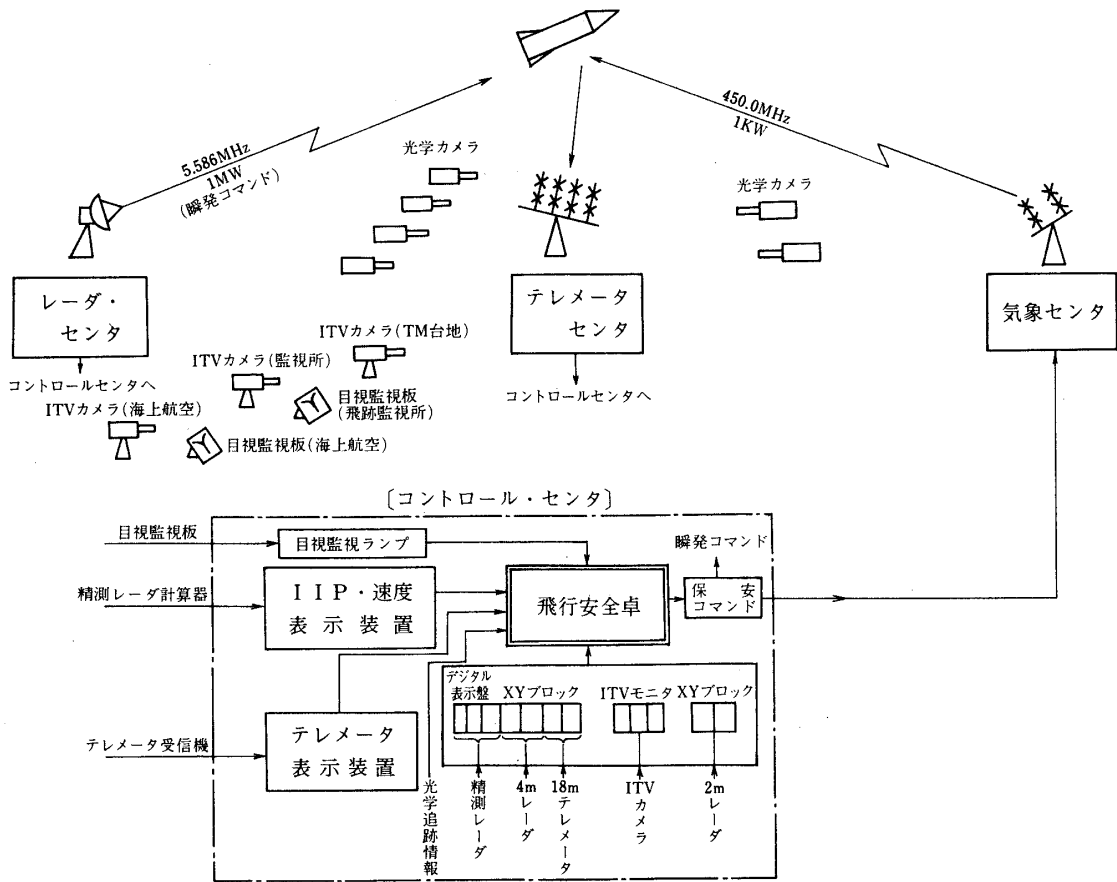
また、地上設備として IIP 装置（瞬時落下点予測表示装置）が設けられており、精測レーダに付属する電子計算機が、刻々の時点でロケットが推力を失なった場合の予想落下点を計算し、コントロールセンタ内の表示板に貼られた地図上に、その地点を表示するしくみになっている。この IIP 装置は、次項に述べるような、保安措置を講ずるための判断材料として、その重要な一翼を担うものとなる。

8. 飛しょう状況の監視と情報集中システム

飛しょう安全の総括者は、ロケットの飛しょう中、常にロケットの現在位置、姿勢についての正確な情報を把握しておかなければならない。そのため KSC では、いくつかのレーダ、テレメータ、光学装置によってこれらの情報を獲得し、コントロールセンタ内の飛しょう安全総括チーフのもとへ、表示板上へのプロットおよび指令電話による音声情報の形で送り届けるシステムを確立している。くわしくは [1] または [6] を参照されたい。ここには、それらを情報集中システムとして、一括して第3図に示しておく。

9. 保安措置の判断基準

保安措置をとるためのM-3Cにおける判断基準は、種々の保安解析から、あらまし次のように定められている [1, 19]。

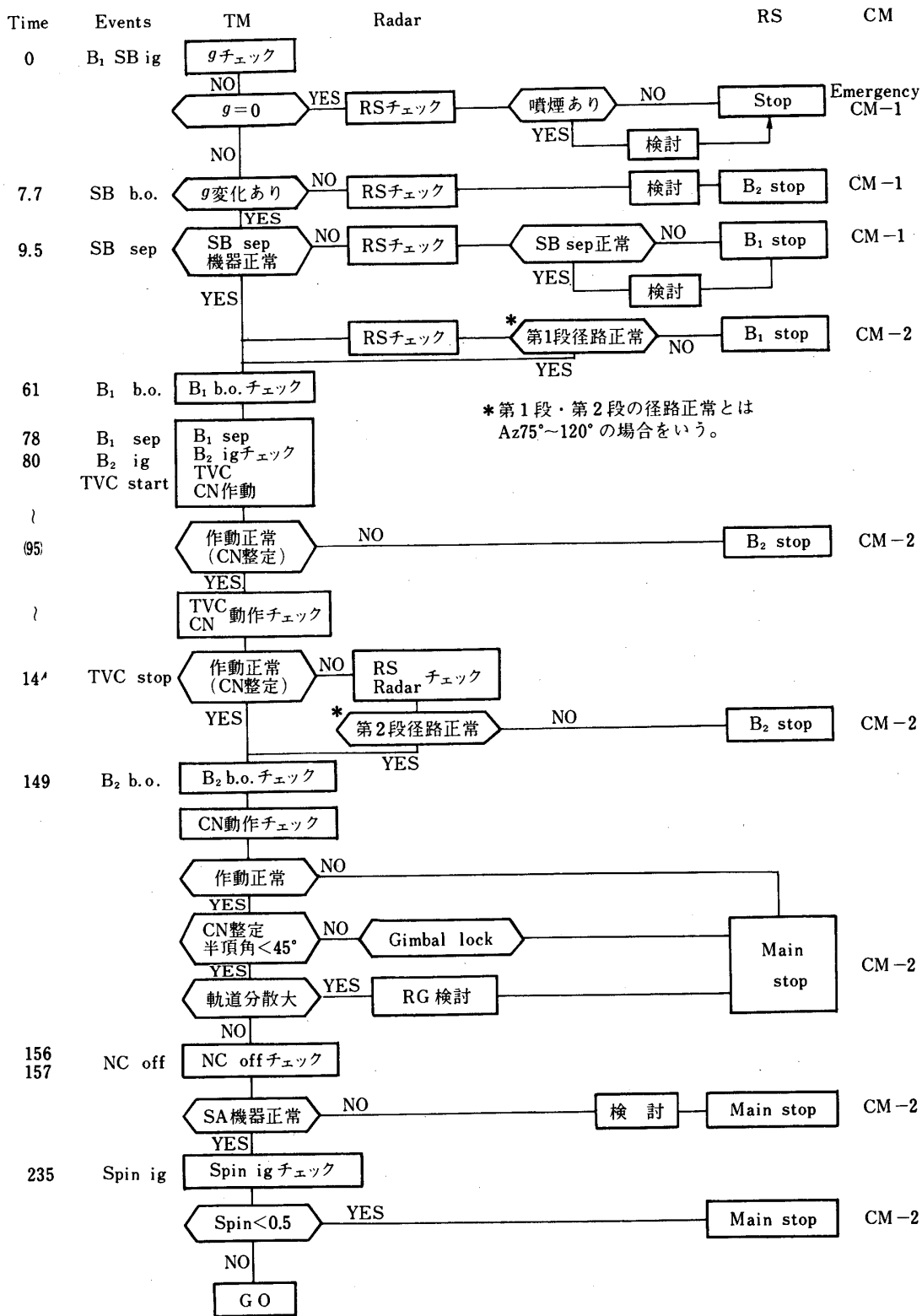


第3図 飛しょう保安の情報集中システム

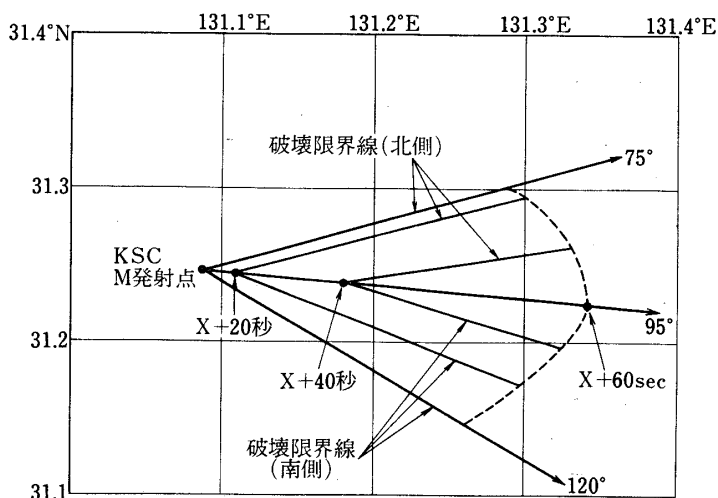
- (1) 第1段 (B_1), 補助ブースタ (SB)とも不点火のときは緊急停止.
- (2) SBのみ点火のときはSB 燃焼終了後30秒以内に B_1 を破壊.
- (3) B_1 のみ点火のときは確認後速やかに B_1 を破壊.
- (4) B_1, B_2 が方位角 $75^\circ \sim 120^\circ$ の外側へずれる場合は速やかに破壊または推力停止.
- (5) B_2 燃焼中に機軸の姿勢が予定より 30° 以上ずれた時は推力停止.
- (6) B_2 切離し後姿勢制御が十分でなければ, 最終段点火以前にタイマ停止.
- (7) B_2 切離し後の姿勢制御でスピンの 0.5 rps 以下のときは最終段点火以前にタイマ停止.
- (8) B_2 で姿勢のデータがとれないときは推力停止.

以上の判断基準に基づいて, 第4図のような保安作業フローチャートを用意しておき, これに沿って飛しょうの監視を行なう. また, その作業の便宜をはかるべく, 以下のような保安措置限界線を用いる.

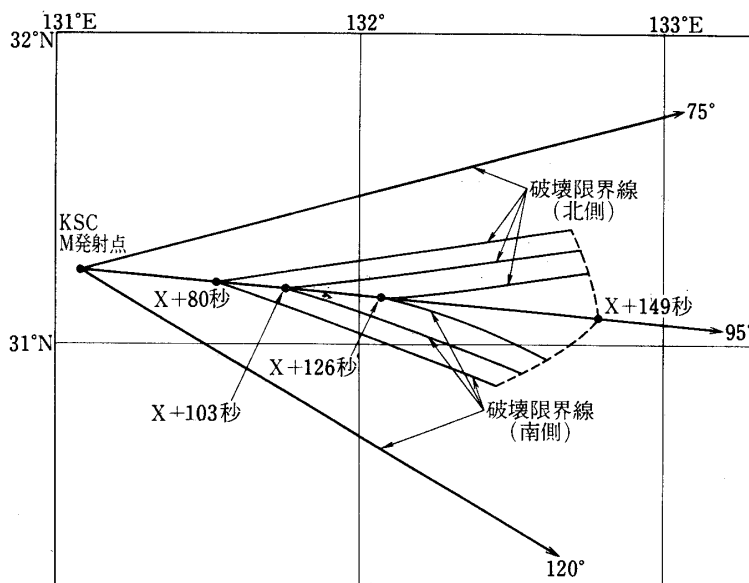
- (イ)破壊限界線: レーダ用X-Yプロッタには第5図(a), (b)のような破壊限界線を記入しておき, 飛しょう径路がこれを越えるとロケットを破壊する.



第4図 保安作業用フローチャート



第5図 (a)レーダ用第1段破壊限界線



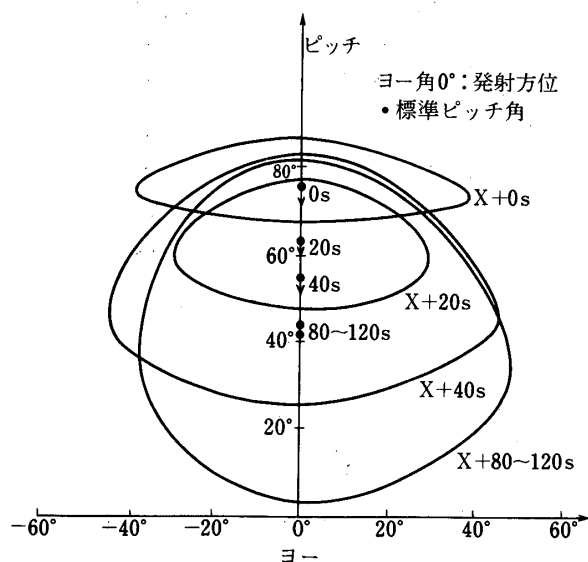
第5図 (b)レーダ用第2段破壊限界線

(ロ)落下限界線：IIPプロッタには第2図のような落下限界線を記入しておき、瞬時予測落下点がこれを越える恐れが生じると破壊する。また、レーダプロッタにもこの限界線を記入しておき、レーダの飛しょう方位がこれより外れると破壊する。

(ハ)姿勢限界線：姿勢プロッタに第6図のような姿勢限界線を記入しておき、姿勢がこれを越えると破壊する。

ロケットが異常飛しょうを行ない、これらの限界線を越えるに至った場合、飛しょう安全総

括弧ーフを中心にして、種々の飛しょうデータについて総合的かつ迅速な検討を加えた上で、保安措置を講ずるわけである。



第6図 姿勢限界線

10. おわりに

これまで3機の発射実験を終えたM-3C型ロケットの飛しょう保安についてその概略を述べた。各号機の実験結果については、それぞれの「実験報告書」[23, 24, 25]にくわしいので、ここではシステム上の骨組のみを記すにとどめた。なお、M-3Cの飛しょう保安にあたっては、その準備段階において、内之浦の風プロファイルの特徴の解析[20]とそれに基づくM-3C型ロケットの応答特性の検討、第3段の飛しょうが異常を来した時の落下危険率の算定[21, 22]など、ここに触れなかった多くの保安解析が遂行された。これらは、その理論的な骨組を全体としてまとめて、近いうちに報告する予定である。

1977年2月28日新設部(工学)

参考文献

- [1] 東大宇宙研：M-3C-3号機による科学衛星 CORSA の打上げ実験における安全計画，1975..
- [2] G. W. Braun: Flight Safety Procedures in Space Vehicle Launches at the Pacific Missile Range, Proc. 5th ISTS, Tokyo 1963, AGNE Corp., Tokyo, 1964.
- [3] L. C. Parker: Operational Range Safety for Solid-Propellant Sounding Rockets, J. Spacecraft, Vol. 5, 1968.
- [4] 玉木章夫：発射場保安，日本航空宇宙学会誌，第17巻，1968.
- [5] 玉木章夫・雛田元紀・寺田守男・的川泰宣・馬場康子：M-4Sの飛しょう保安，宇宙研報告第11巻第1号(B)，1975.
- [6] M. Hinada and Y. Matogawa : Flight Safety Procedures at Kagoshima Space Center,

- University of Tokyo, IAF- A-76 - 10, XXVIIth Congress of IAF, Oct., 1976.
- [7] F. D. Sowby : Radiation and Other Risks, Health Physics, Vol. 11, 1965.
 - [8] C. Starr : Radiation in Perspective, Nuclear Safety, Vol. 5, No. 4, 1964.
 - [9] E. E. Kovalev : The Reliability of Radiation Protection System and Space Flight Safety, J. of Astronautical Sciences, Vol. 22, No. 2, 1974.
 - [10] J.C. McMunn, J.D. Collins and B. Brown: A Hazards Model for Exploding Solid-Propellant Rockets, J. Spacecraft and Rockets, Vol. 6, No. 12, 1969
 - [11] F. Tamaki: Flight Safety Consideration at KSC, Uchinoura (Private Paper), 1968.
 - [12] D. Mori, M. Hinada, R. Akiba, Y. Matogawa and S. Tsukamoto : Destruction Test of Small Scaled Solid Propellant Motors (Private Paper), 1976.
 - [13] 森大吉郎・秋葉鏝二郎・雛田元紀：ロケット打上場の保安距離に関する検討，宇宙開発委員会技術部会検討資料，1975.
 - [14] G. F. Kinney : Explosive Shocks in Air, McMillan Comp., New York, 1962.
 - [15] Y. Matogawa, M. Hirada and K. Fukuda : Statistical Analysis of Impact Points of Rocket, ISAS Rept. No. 520, Dec., 1974.
 - [16] 玉本章夫・雛田元紀：内之浦におけるロケット実験の保安について (メモ)，1968.
 - [17] 雛田元紀・的川泰宣・福田孝子：KSC 沖合における船舶数の監視結果，SES. TN-75-053-SY, 1975.
 - [18] 倉谷健治・秋葉鏝二郎：ロケットエンジンおよび SO 装置，宇宙研報告第11巻第1号 (B)，1975.
 - [19] R. M. Montgomery : Range Safety on the Eastern Test Range, AIAA Paper No. 70-246, 1970.
 - [20] Y. Matogawa : Statistical Distribution of Wind at KSC, ISAS Rept. No. 519, 1974.
 - [21] 雛田元紀・的川泰宣・福田孝子：地球上の陸地密度分布モデル，SES TN-75-070-SY, 1975.
 - [22] 的川泰宣：世界の人口密度分布モデル，SES TN-75-071-SY, 1975.
 - [23] 東大宇宙研：「M-3C-1 実験報告書」，SES TN-74-035-SY, 1974.
 - [24] 東大宇宙研：「M-3C-2 実験報告書」，SES TN-75-054-SY, 1975.
 - [25] 東大宇宙研：「M-3C-3 実験報告書」，SES TN-76-001-SY, 1976.