

M-V型ロケットの飛翔保安システム

中島 俊, 森田泰弘, 平木講儒

1. 概 要

M-V型ロケットになってロケットの直径が2.5mに拡大されることに伴い、地上保安距離を全面的に見直した。4号機からは、新たに固体推進薬破片の2次爆発の影響も考慮して保安距離を算出している。また、M-V用に更新された飛行安全システムについても述べる。

2. 警戒区域の設定

2.1. 保安距離の算定

観測所への推進薬等の搬入から打上げに至る間の各フェーズで保安距離を算定する。数字はM-V-4号機のものでここでは掲載する。

i) 推進薬保管時 (固体推進薬のみ)

火取法規則第4条4の表(い)のうち、(三の二)「過塩素酸を主とした火薬の危険工室 …… ロケットの危険工室」の保安距離を適用する。

表中の停滞量としては、推進薬の量に火薬の係数(1/2)を乗じた値を用いるのでM-V-4号機の場合は、

$$114.3 \text{ (ton)} \times 1/2 = 57.2 \text{ (ton)}$$

射点の近傍には民家等が無く推進薬庫は補強されている。従って道路上の自動車を保護すれば良いため、同表のうち第4種保安物件(国道、県道等)の距離を適用すると

$$R = 97\text{m}$$

ii) 整備作業期間 (M台地)

宇宙開発委員会・安全評価部会で策定した「安全評価基準」に基づき、ロケット組立時の各段階において保安距離を算定する(表1参照)。M-V-4号機の場合、算定結果は以下のとおりである。

a. 固体推進薬のみ存在する場合

$$R = 161\text{m (Max.)}$$

b. 固体推進薬及び液体推進薬(ヒドラジン類, NTO)が共存する場合

b-1 射点区域におけるカウントダウン及びロケットへの衛星結合作業などの危険性の高い作業時

$$R = 381\text{m (Max.)}$$

b-2 上記以外の比較的危険性の低い作業及び保管時

R=229m (Max.)

表1 整備作業期間中の警戒区域

オペレーション	期間(予定)	作業場所	対象モータ及び薬量(kg)	保安距離(m)	警戒区域の設定
第1組立 オペレーション	1999年 10月23日 ～10月26日	M組立室	第1段第2セグメント : 35,950	131	M発射整備塔 を中心として 半径700mの 区域を警戒区 域とする。 (五運橋で規制)
	10月27日 ～10月28日	同上	第1段第2セグメント : 35,950 第2段 : 31,300 計 : 67,250	161	
	10月29日 ～10月30日	同上	第2段 : 31,300	125	
第2組立 オペレーション	11月20日 ～11月25日	同上	第1段 : 71,900 同SMRC : 167 計 : 72,067 ヒドラジン : 20	229	
	11月26日 ～12月8日	同上	第1段 : 71,900 第2段 : 31,300 第3段 : 10,800 SMRC/SMSJ : 230 計 : 114,230 ヒドラジン : 20	229	
	12月9日 ～12月11日	M発射整備塔	同上	381	
	1999年 12月12日	同上	第1段 : 71,900 第2段 : 31,300 SMRC/SMSJ : 230 計 : 103,430 ヒドラジン : 20	229	
	～2000年 1月18日	M組立室	第3段 : 10,800	88	
フライト オペレーション	1月19日 ～1月30日	M発射整備塔	第1段 : 71,900 第2段 : 31,300 SMRC/SMSJ : 230 計 : 103,430 ヒドラジン : 20	229	
		M組立室	第3段 : 10,800	88	
	1月31日 ～2月8日	M発射整備塔	第1段 : 71,900 第2段 : 31,300 第3段 : 10,800 SMRC/SMSJ : 230 計 : 114,230 ヒドラジン : 120	229/381	

iii) 打上げ時（発射整備体制に入った後）

発射準備体制に入った後は、同「安全評価基準」に基づき、爆風、飛散物、ファイアボールによる放射熱それぞれに対する保安距離を個別に算定し、それらのうち最大のものを保安距離として設定する。M-V-4号機の場合、個別の算定結果は以下のとおりである。

a. 爆風に対する保安距離

$$R = 1,054\text{m}$$

b. 飛散物に対する保安距離（固体推進薬と液体推進薬が共存）

$$R = 1,350\text{m}$$

c. ファイアボールによる放射熱に対する保安距離

$$R = 780\text{m}$$

2.2. 警戒区域の設定

前項の保安距離の算定に基き、下記の警戒区域を設定する。（図1）

i) 推進薬庫保管時

推進薬庫を中心とする半径100mの区域を警戒区域とし、一般の立入りを規制する。

ii) 整備作業期間

警戒区域としては発射点を中心とする半径381mとする事で良いが、警備（管理）の容易さを考え、M台地入口の五運橋（国道との接点）で一般の立入りを規制する。

$$(\text{射点}) \sim (\text{五運橋}) \text{間の距離} = 700\text{m}$$

iii) 発射準備体制が整った時点（打上げタイムスケジュールに入り、ランチャ角度が設定される発射約2時間前）以降は、発射点を中心とする半径1,360mの区域を警戒する事で良いが、発射直後の異常飛行に対して十分な余裕をもって保安処置が執られた際の固体推進薬破片の2次爆発に対する保安距離に対し、円滑な打上げ運用を確保するための距離として2.1kmを設定し（表2）、区域内の国道を規制すると同時に、一般人には退避壕あるいは警戒区域外への退避を依頼する。（図2）

また、発射点近傍の海上警戒に関しては、発射直後の保安処置に伴う破片の落下確率がM-3SII型の場合と同程度となる海域を警戒する事とする。（図3）

警戒に際しては、第10管区海上保安部と相談の上、宇宙研の備船により行う。

表2(a) 2次爆発による保安距離

発射後の秒時 (秒)	10	20	30
最大破片重量 (ton)	2.3	1.7	1.1
着地速度 (m/s)	136	124	106
爆風に対する保安距離 (m)	460	420	360
飛散物に対する保安距離 (m)	430	400	360

○爆風に対する保安距離 $R = 59 \times (M \times 0.2)^{1.3}$

○飛散物に対する保安距離 $R = 0.35 \times M^{2.9}$

表2(b) 警戒区域

破片の飛散距離 (m) (発射後 10 秒)	2次爆発に伴う 保安距離 (m)	必要保安距離 (m)	警戒区域 (m)
1,580	460	2,040	2,100

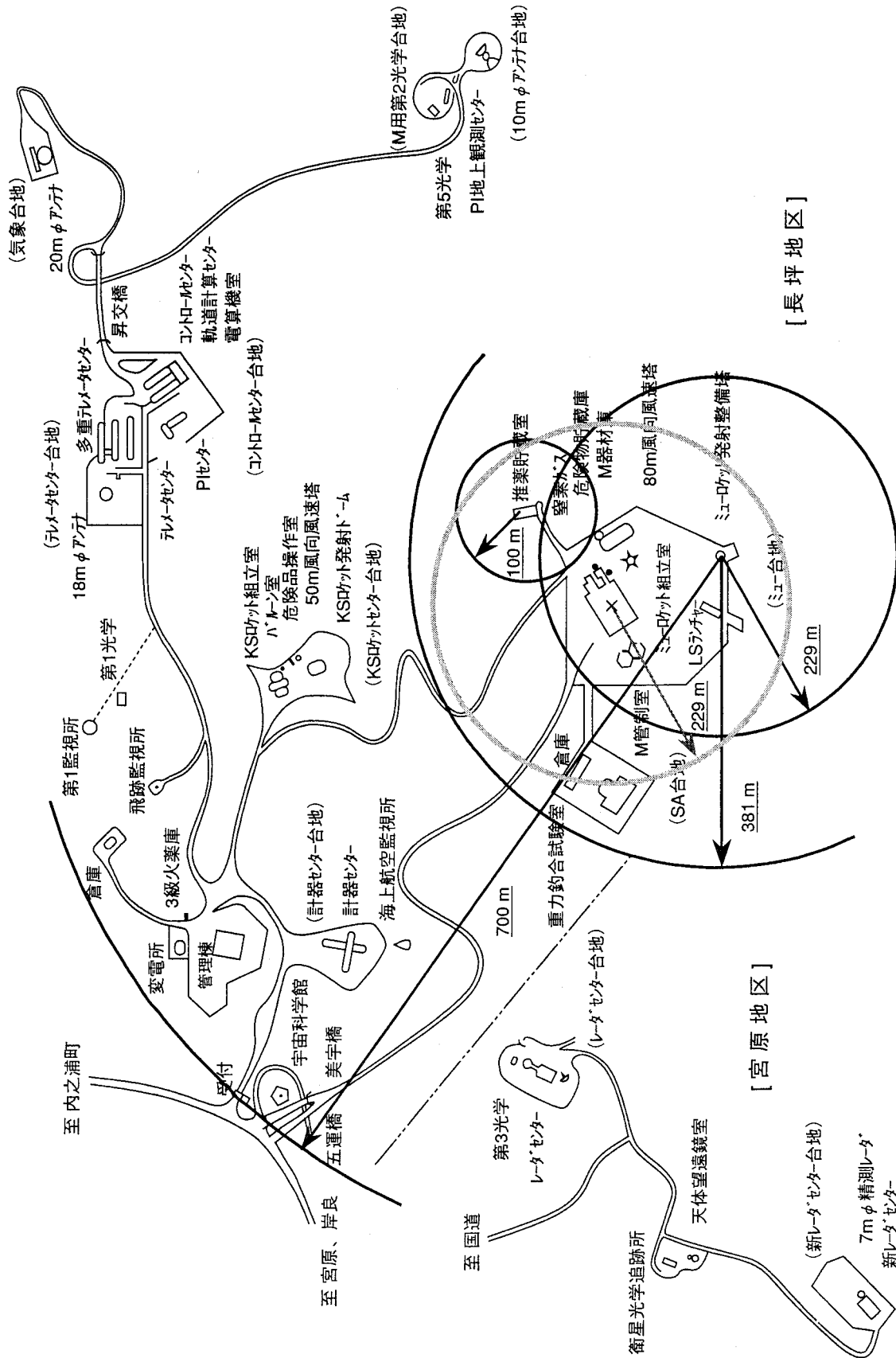


図1 保安区域

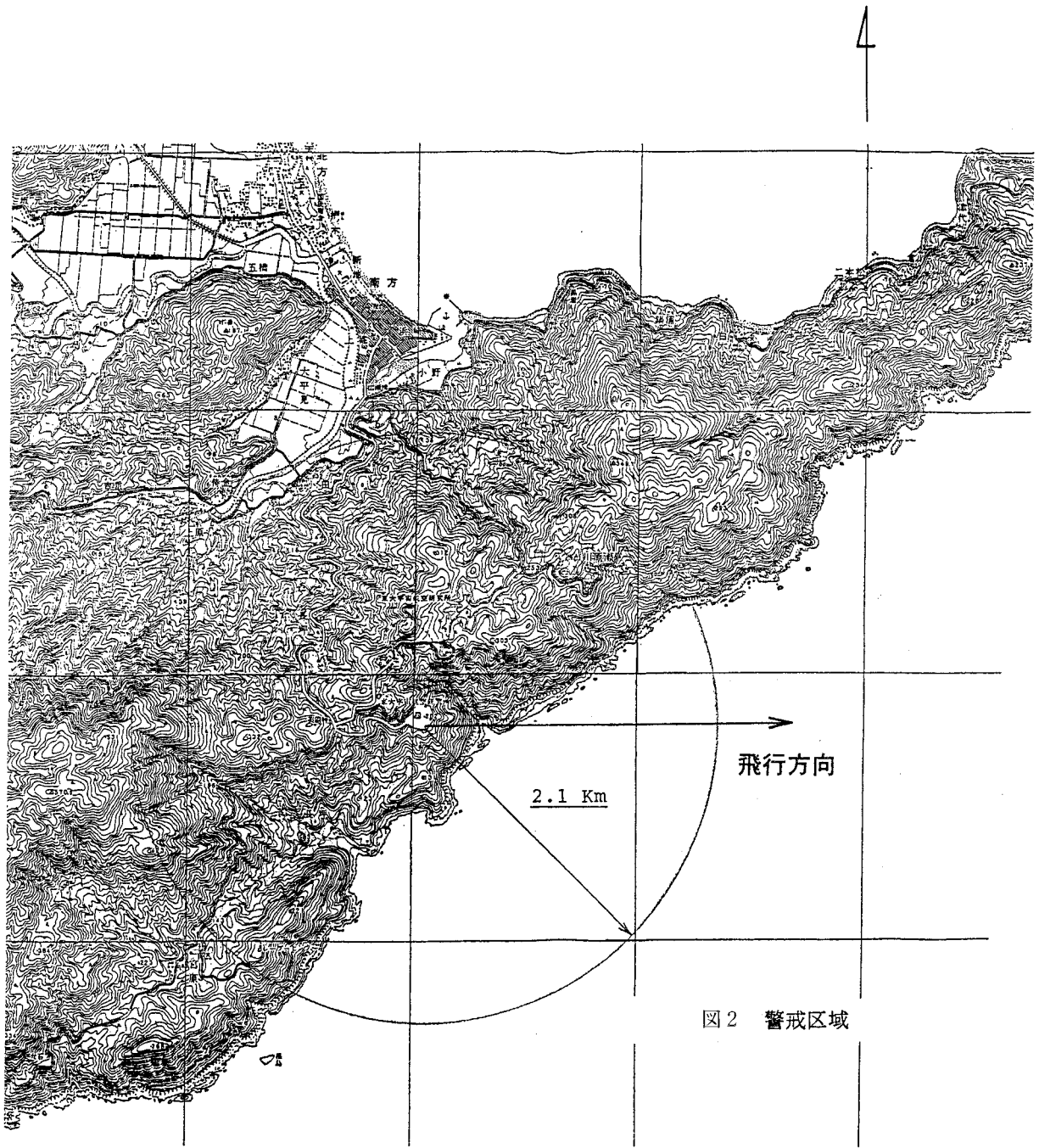


図2 警戒区域

図2 警戒区域

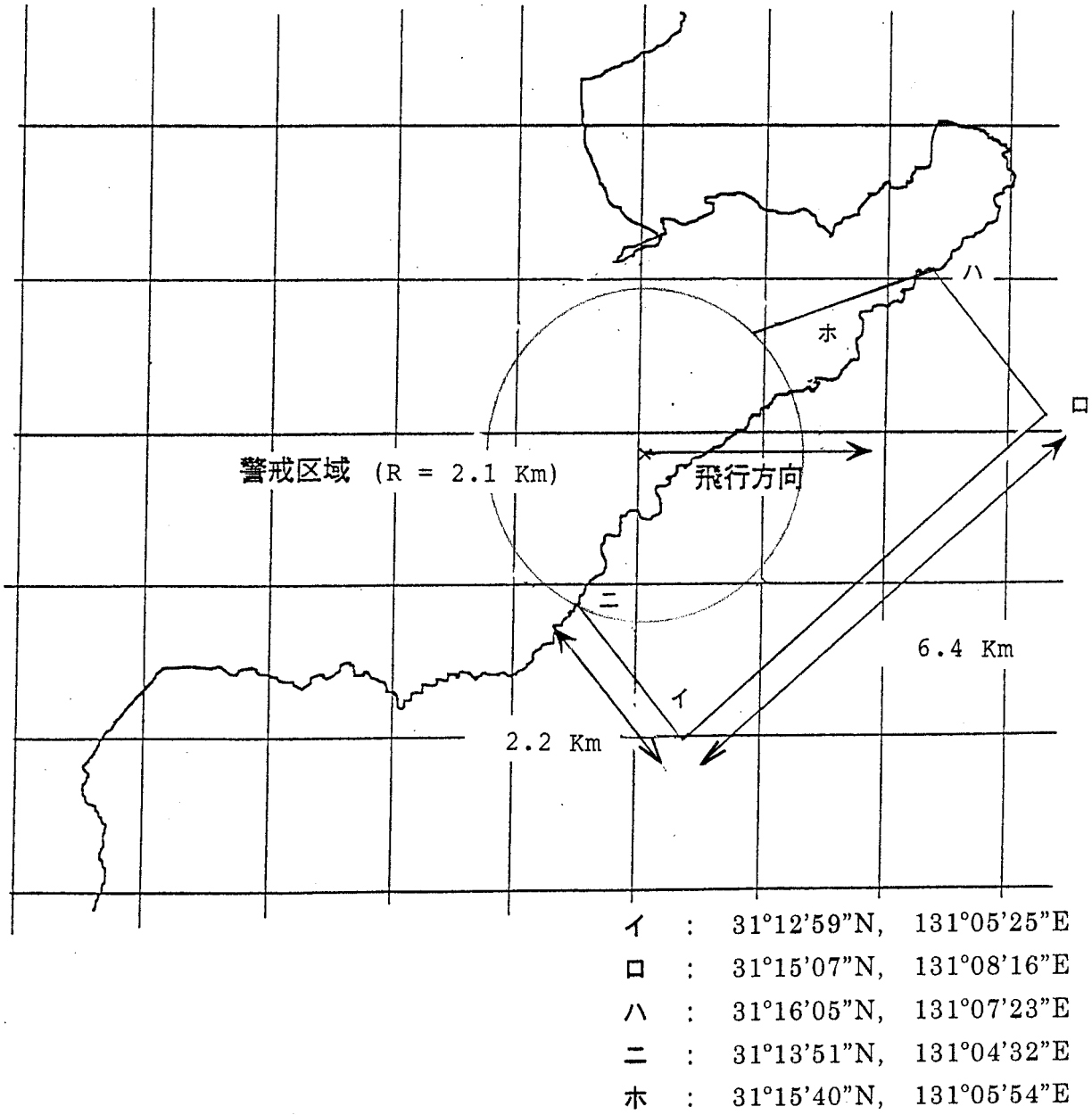


図3 海上警戒区域

3. 飛行安全体制

3.1. 飛行安全の目的と範囲

ロケットが飛翔する際は、燃焼終了後の各段ロケットの分離、各種付属物の切り離し、あるいは万一の場合における指令破壊などによって各種の物体が地表に落下するが、これに伴って発生するおそれのある地上の各種施設・人命・海上船舶・航空機などに対する危険を未然に防止し、かつ万一の場合においてもそれらに対する被害を最小限に止めるように図ることが飛行安全の目的である。

飛行安全はロケットの飛翔に伴って生じる可能性のある危険の全てをその対象と考え、発射直後から最終段軌道投入までをその取扱うべき範囲とする。そして飛翔計画において、安全性の確保、飛翔軌跡の確認、異常飛行の際の措置方法の樹立などを図るものである。

3.2. 飛行安全上の原則

ロケットの飛行計画の策定に際して飛行安全の立場から考慮すべき原則は以下のようである。

第一に、落下物体が地上の人命・施設・海上船舶・航空機などに与える危険を最小のものにするため、正常飛翔において各段が地表に落下する区域（落下予想区域）が陸地及び諸外国に近接する海域外にあり、また主要航空路と船舶航路をできるだけ含まないことである。第二には、異常飛翔の場合に、落下物体が陸地・航空機・海上船舶に与える危険をできるだけ少なくすることで、そのためには計画飛翔径路が陸地・主要航空路・船舶航路をできるだけ避けていることが必要である。これらの原則の下に飛行計画が策定されるが、通常時の船舶密度（単位海上面積あたりの船舶の総面積）が陸地、島などから離れるにつれて小さくなり、100km 以遠の海域では船舶密度は $10^{-7} \sim 10^{-9}$ に下がることを考慮して、計画飛翔径路を陸地と島から100km 以上離れた海域にとり、かつ落下予想区域も陸地、島などから十分離れた海域にあるように飛行計画をたてることが最も安全な方法である。加えて、発射の際は予め水路通報を出すので、船舶への落下危険率はさらに低くなることが確実である。ただし、発射の直後については、さきの要件を満たし得ないことは明かであるので、別の配慮（警戒区域の設定）が必要である。内之浦の場合、船舶の監視結果によれば、海岸から20海里までは、船舶密度は平均として 4×10^{-6} であり、100km 以遠の値に比して特別の注意が必要であるが、現実には後述するように KSC 内のレーダ、光学観測による海上警戒を行い、安全の確保につとめている。

3.3. 飛翔計画

M-V-4 号機の場合を例にとると、正常飛翔時の落下物は、第1段モータ、第2段モータ、ノーズフェアリング、及び、第3段モータである。ただし、第2段モータとノーズフェアリングは同じ区域に落下する。各々に対して設定した落下予想と航空路との位置関係を図4に示す。なお、発射直後の飛行安全確保のため発射点近傍に図3のような警戒区域を設定する。飛翔経路が航空路を横切るので運用上注意を要する。

飛翔経路あるいは落下予想区域にかかわる航空路に関しては関係機関と緊密な連絡を取りつつ実験を実施することとしている。

なお各段の落下点の分散区域は楕円状であるにもかかわらず、図4の各段落下予想区域が台形になっているのは、船舶・航空機等への通報の便宜を考慮したものである。なおこの台形が、落下点分散域としての楕円をその内部に含んでいることは言うまでもない。

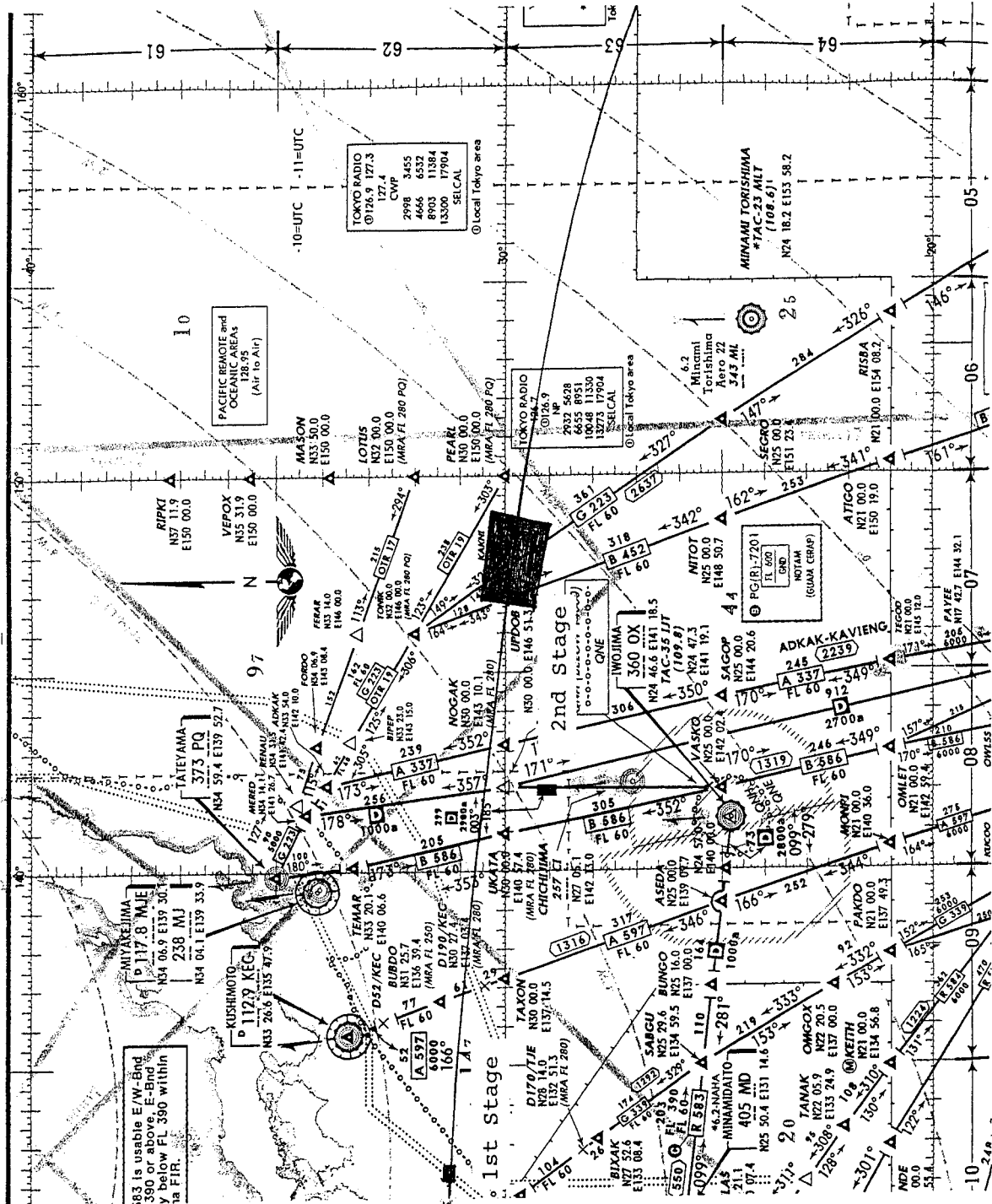


図 4 M-V-4 号機第1, 第2 段落下予想区域と航空路

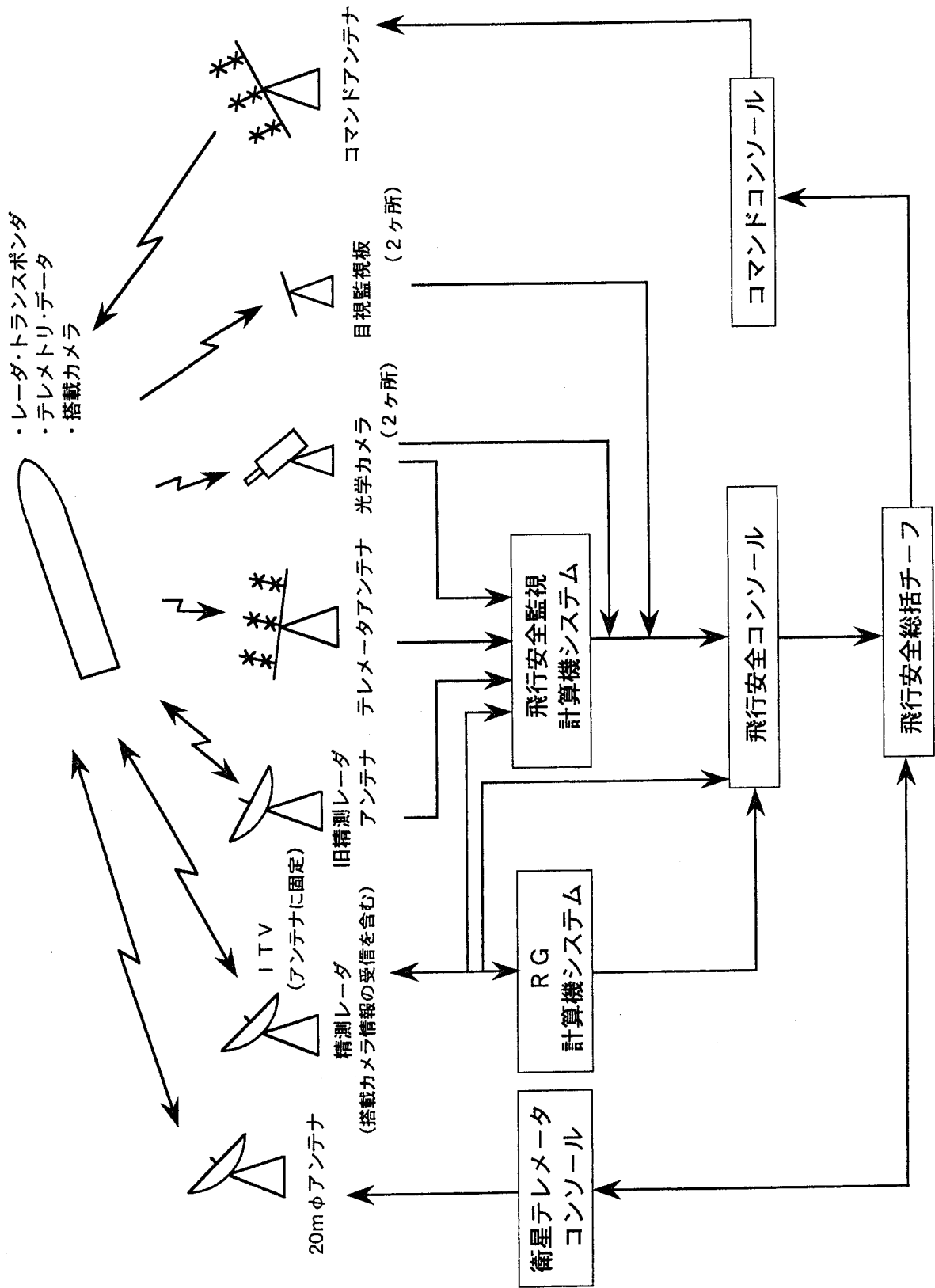


図5 飛行安全体制

3.4. 飛行安全システム

飛翔時において異常が発生したときは他に及ぼす危険を未然に防ぐため、的確に状況を把握し、迅速に適切な保安措置を講じる必要がある。このためには刻々の飛翔状況を監視し、万一の場合には迅速に保安措置を講じる体制を整えておくとともに、保安措置に必要な諸機能を整備しておくことが必要である。

3.4.1. 飛翔状況の監視及び保安措置体制

飛翔状況を監視するため、コントロールセンタ飛行安全卓を中心に図5のような体制が敷かれ、レーダ・テレメトリ・光学監視等より取得される情報は電気信号あるいは音声によって飛行安全卓に伝達される。これらの情報及び伝達方法は下記の如くである

- i) 光学監視：4箇所ある光学観測点のうち、通常は発射方位によって選択された2箇所から、光学カメラによってロケットが追跡される。また2箇所固定ITVとアイスクリーン板（目視監視板）を用いて飛翔状況が監視される。光学追跡情報は架台の方位、仰角データあるいは直接画像が、アイスクリーン板情報は指令電話とランプ表示器によって、固定ITV画像情報は直接コントロールセンタ飛行安全卓にそれぞれ送られる。光学的監視は主として発射点から比較的近い第1段燃焼中がその対象である。
- ii) テレメトリ：飛翔状況を知るために種々のテレメータ情報が取得される。タイムシーケンスに沿った各イベントの確認データ、ブースタの燃焼状況を見るための機軸方向加速度計（チャンバ圧力計）、段間切離しの状況を見るための機軸及び横方向加速度計などのデータ、制御の状況を見るための姿勢制御部（CN）、推力方向制御部（LITVC）、可動ノズル制御部（MNTVC）、固体モータールール制御部（SMRC）などの作動データ、あるいはこれに関連した姿勢の状況を見るためのジャイロ角・スピンの姿勢データ等の各種の情報が、指令電話あるいは表示装置でコントロールセンタ飛行安全卓に送られる。またこれらテレメトリデータは飛行安全監視計算機システムに伝送される。
- iii) レーダ：ロケットの飛翔径路を観測するため、精測レーダ及び旧精測レーダによってロケットが追尾される。各レーダで得られた現在位置（PPI）情報が指令電話で飛行安全卓に伝えられるとともに各レーダデータは誘導制御計算機システムに伝送され、集中的に管理処理された後、より精密で信頼性の高い飛翔径路のPPI及び各種の予測数値が要求に応じ瞬時に提供されるとともに、グラフィックディスプレイ（GD）にも表示され、飛行安全のための監視に利用される。また、各レーダデータは直接飛行安全監視計算機システムに伝送される。
- iv) IIP：IIPはロケットの推力をある時点で瞬時に停止した時のロケットの落下予想点を表すもので、飛翔径路の正常・異常を瞬時に判断するのに適している情報である。IIP及び対地速度は、伝送されたレーダデータに基づき飛行安全計算機システムにより計算される。
- v) 飛行安全監視計算機システム：このシステムは、飛翔状況を迅速かつ的確に判断するために、レーダデータ、テレメトリデータ、ITV光学追跡データなどを集中管理し、時々刻々に最も適当なデータを選択、組合せてカラーのグラフィックディスプレイ（GD）に表示することを目的としたものである。

このシステムでは表示装置に2台のGDが用いられ、表3に示すNo.1～No.8までの8種類の画面の中から2画面が選ばれ予め設定されたタイムシーケンスに従って、あるいはGDの前におかれた画面切換えスイッチによる割込みによってGDに表示、監視される。

飛行安全監視計算機システムを主とした監視体制のもとで、飛行安全卓では飛行安全総括チーフを中心に指令電話系統によって、各関連部署と緊密に連絡を保ちながら状況を適確に把握し、万一異常が発生した時には迅速に保安措置（保安コマンド送信）を講ずる。

表3 飛行安全監視計算機システム GD 画面

画面 No.	内容
1	精測レーダからの現在位置情報の垂直面および水平面投影 (PPI), 速度ベクトルの表示 (FINE 表示)
2	画面 No. 1 と同じ (Coarse 表示)
3	精測レーダに基づく IIP 情報 (FINE 表示)
4	画面 No.3 と同じ (Coarse 表示)
5	光学架台データに基づく PPI 情報
6	テレメータデータによるピッチ/ヨー角およびロールレートの表示
7	加速度および対地速度の表示
8	テレメータデータによるモータ内圧の表示
9	テレメータデータによるピッチ/ヨー角誤差とピッチレート/ヨーレートの表示
10	精測レーダに基づく方位角のずれ情報とテレメータからのヨー情報の表示
11	姿勢情報, 加速度, モータ内圧, 高度, 対地速度, スラントレンジ情報に基づく信頼性評価画面

3.4.2. 保安措置機能

M-V 型ロケットでは, ロケットが異常をきたしたとき保安措置を講じるため次のような保安機能を有している。

- i) 保安用コマンド: 保安用コマンドには7種類ある。これらの主な機能分担を表4に示す。
- ii) SO 点火系: SO 点火系の概略系統図を図6に示す。保安用電子機器としてのコマンド受信機, これを受けて保安上の機能を実行する中樞となるタイマ, 点火ボックスなどは第2段計器部及び第3段計器部に搭載されている。保安上の実行機能はタイマの停止と第1段から第3段までのSO装置の作動である。第1段SO装置は下部セグメントの両側を成形爆薬で破壊する方式, 第2, 第3段SO装置はコニカルシェードチャージを用いたケース破断方式である。

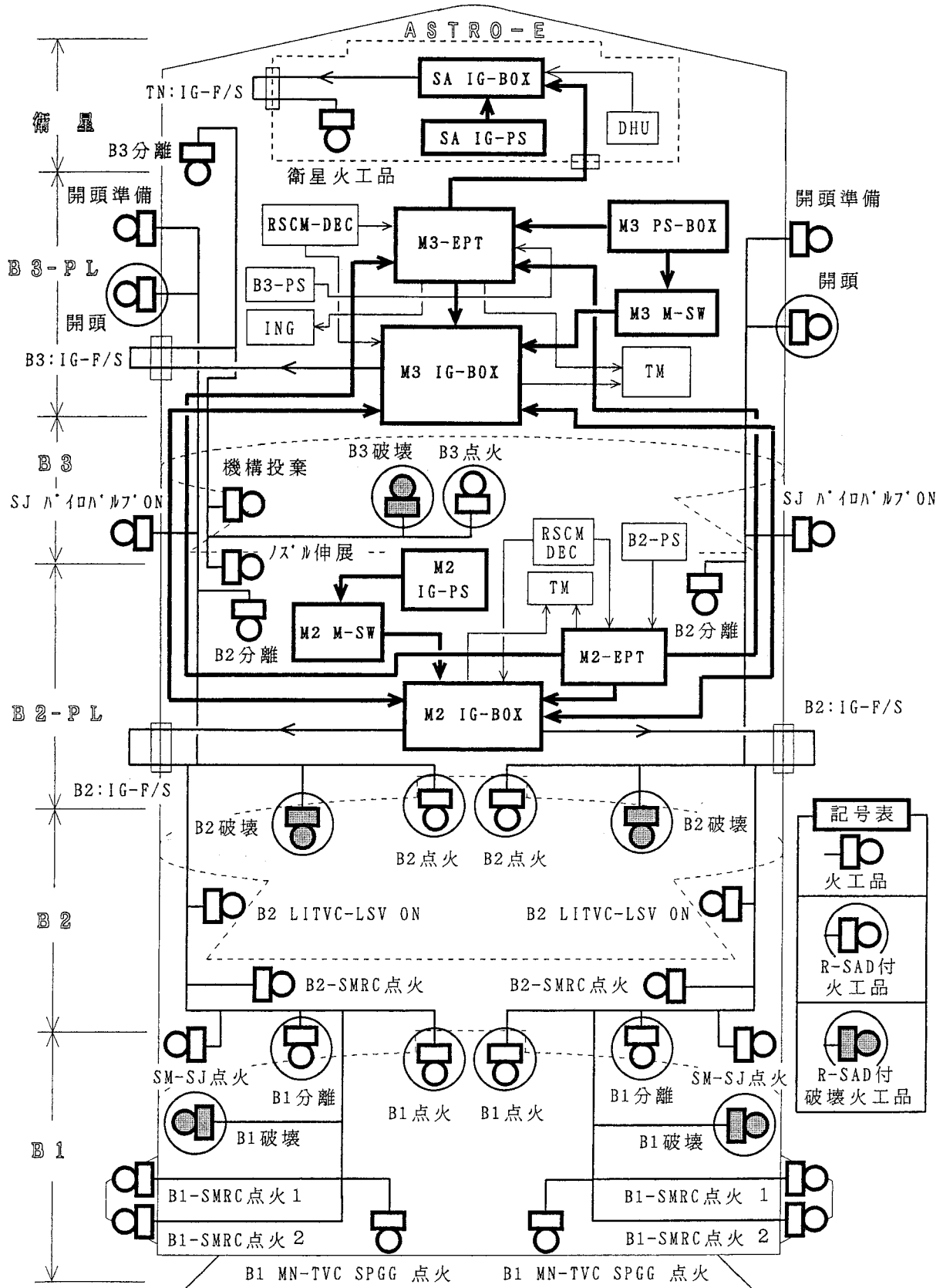


図6 M-V-4号機点火系・SO系系統図

表4 保安コマンドの機能分担およびアーミングのタイミング

コマンドの名称	機能	アーミング	搭載場所
CM-A 1	第2段タイマ停止	X-48s	第2段
CM-A 2 A	第1段SO作動、タイマ停止	X+5s	第2段
CM-A 2 B	第2段SO作動、タイマ停止	X+5s	第2段
CM-A 3	SMRC停止 (第1段、2段飛翔中) SMS J停止 (第2段飛翔中)	X+5s	第2段
CM-A 4	MNTVC停止 (第2段飛翔中) SMS J停止 (第2段飛翔中)	X+5s	第2段
CM-B 1	第2段タイマ停止	X+70s	第3段
	第3段タイマ停止	X+188s	
CM-B 2	第2段SO作動、タイマ停止	X+70s	第3段
	第3段SO作動、タイマ停止	X+188s	

3.5. 飛行安全システムの運用

3.5.1. 保安措置判断基準

保安措置をとるためのM-V型ロケットにおける判断基準は、種々の保安解析を基にして、基本的には次のように定められている。

- i) 第1段(B1)不点火の時は緊急停止、点火管制装置停止、コマンドCM-A1送信。
- ii) B1が落下限界線を越えて落下する恐れが認められる場合には速やかに破壊、コマンドCM-A2-A送

信.

- iii) 第2段(B2)が落下限界線を越えて落下する恐れが認められる場合には速やかに推力停止. コマンド CM-A2-B 送信.
- iv) B1, B2 の飛行制御(推力方向制御, ロール制御, 3軸制御)において異常が認められた時は, 速やかに飛行制御を中止. コマンド CM-A3 又は CM-A4 送信.
- v) B3 の飛行制御(推力方向制御, ロール制御, 3軸制御)において異常が認められた時は, 速やかにタイマ停止. コマンド CM-B1.
- vi) i) ~ iv) の判断に必要なデータが得られない場合は速やかに破壊(B1), 推力停止(B2, B3). コマンド CM-A2-A, CM-A2-B 又は CM-B2 送信.

M-V-4号機に適用される保安コマンドの種類と機能, 及びアーミングのタイミングを表4に, 制御モードと保安コマンドの関係を図7に示す.

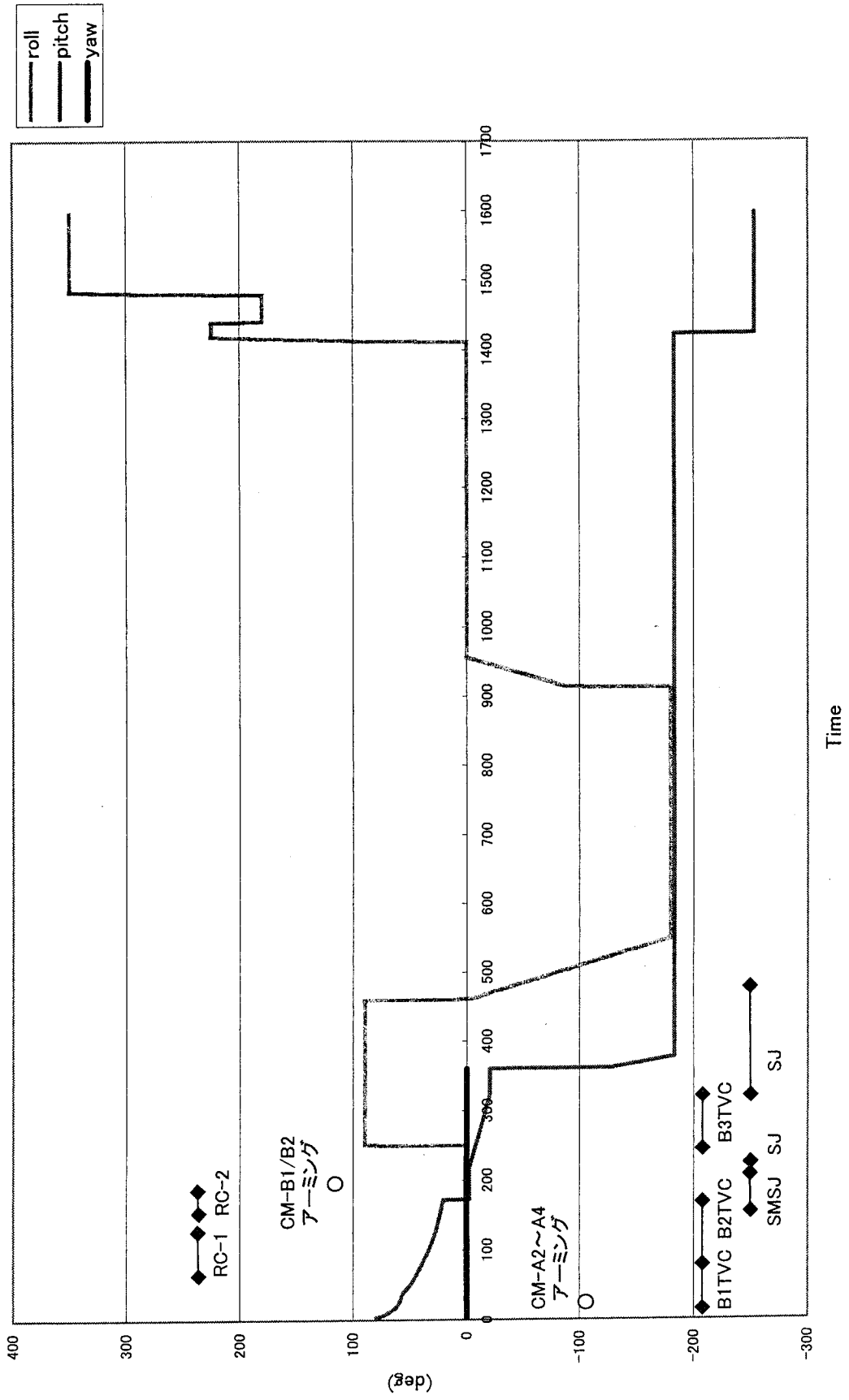


図7 制御モードと保安コマンドの関係

3.5.2. 運用

前述の判断基準に基づいて、飛翔状況のチェック項目及び異常飛翔時の保安用コマンド送信までの手順については、保安作業用フローチャートを予め用意しておき、これに沿って、飛行安全システムを運用するが、飛行安全を確保するため、以下のような各種の限界線を用いる。

i) 落下限界線

保安措置が講じられた場合に、ロケット及び破片の海面における落下域がその外に出ないことを保証する限界線で、発射点近傍より約70km までの近距離落下限界線と、それ以遠の遠距離落下限界線とにわけて用意される。

遠距離落下限界線は、図8に示したようなものと定める。発射点の近傍においては、ランチャ方位角の設定が風による軌道分散修正のため基準方位角に対し、 $+15^{\circ}$ ～ -15° までずらされるものとし、且つその方向に飛翔しつつあるロケットが刻々の時点で急に 20° 姿勢角を変えてそのまま5秒間飛翔して破壊された場合の風による漂流を考慮した落下物の飛散範囲の外側包絡線を落下限界線にとっている。5秒という時間は、異常の徴候に対して判断を下し、保安措置を講ずるまでの余裕時間に相当するものである。

発射点近傍の落下限界線の延長が、発射点から約70km のあたりで滑らかにつながるように近距離落下限界線が定められている。

以上のようにして定められた落下限界線を、図8 (a), (b) に示す。

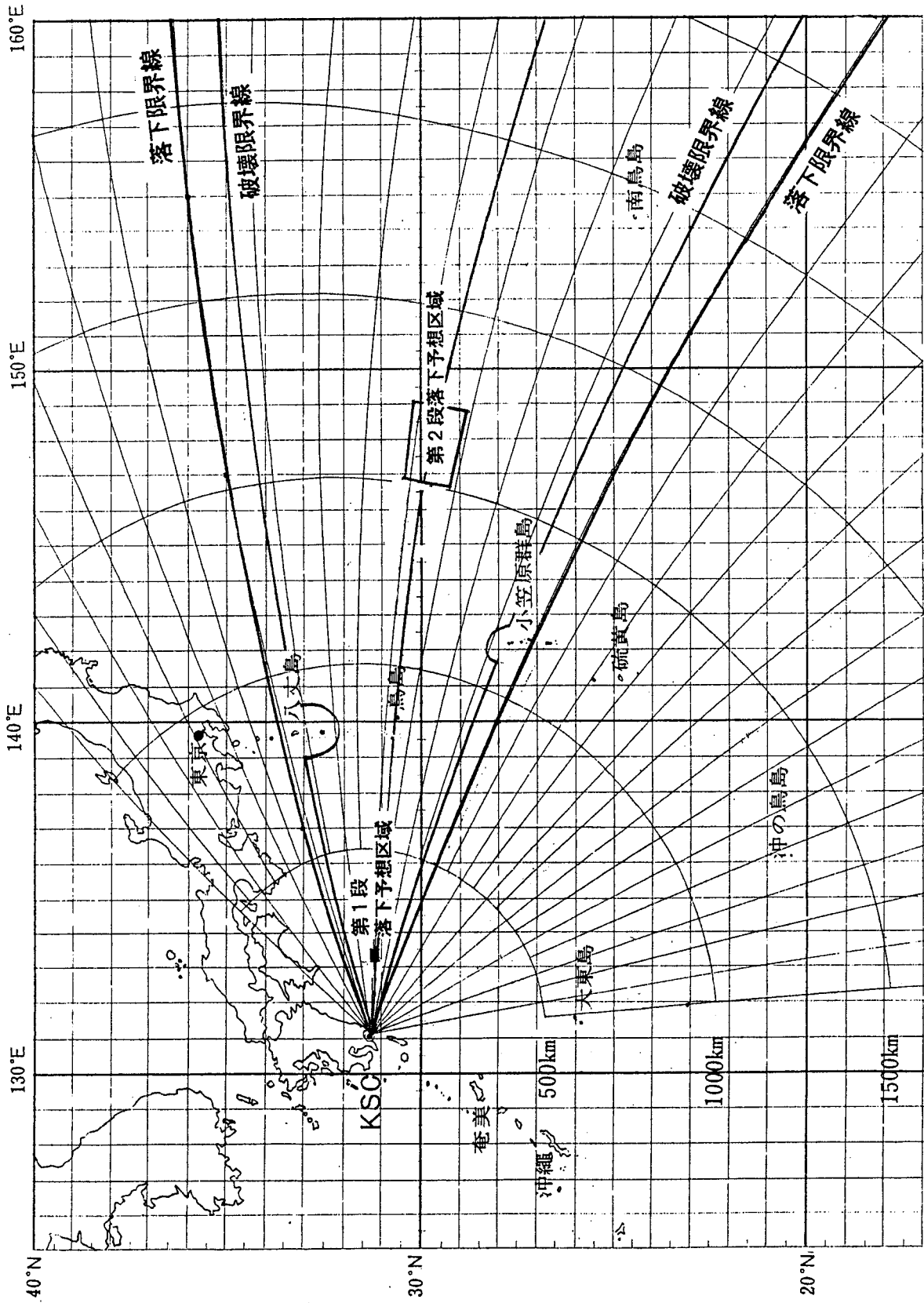


図 8 (a) 落下限界線及び IIP 破壊限界線 (M-V-4)

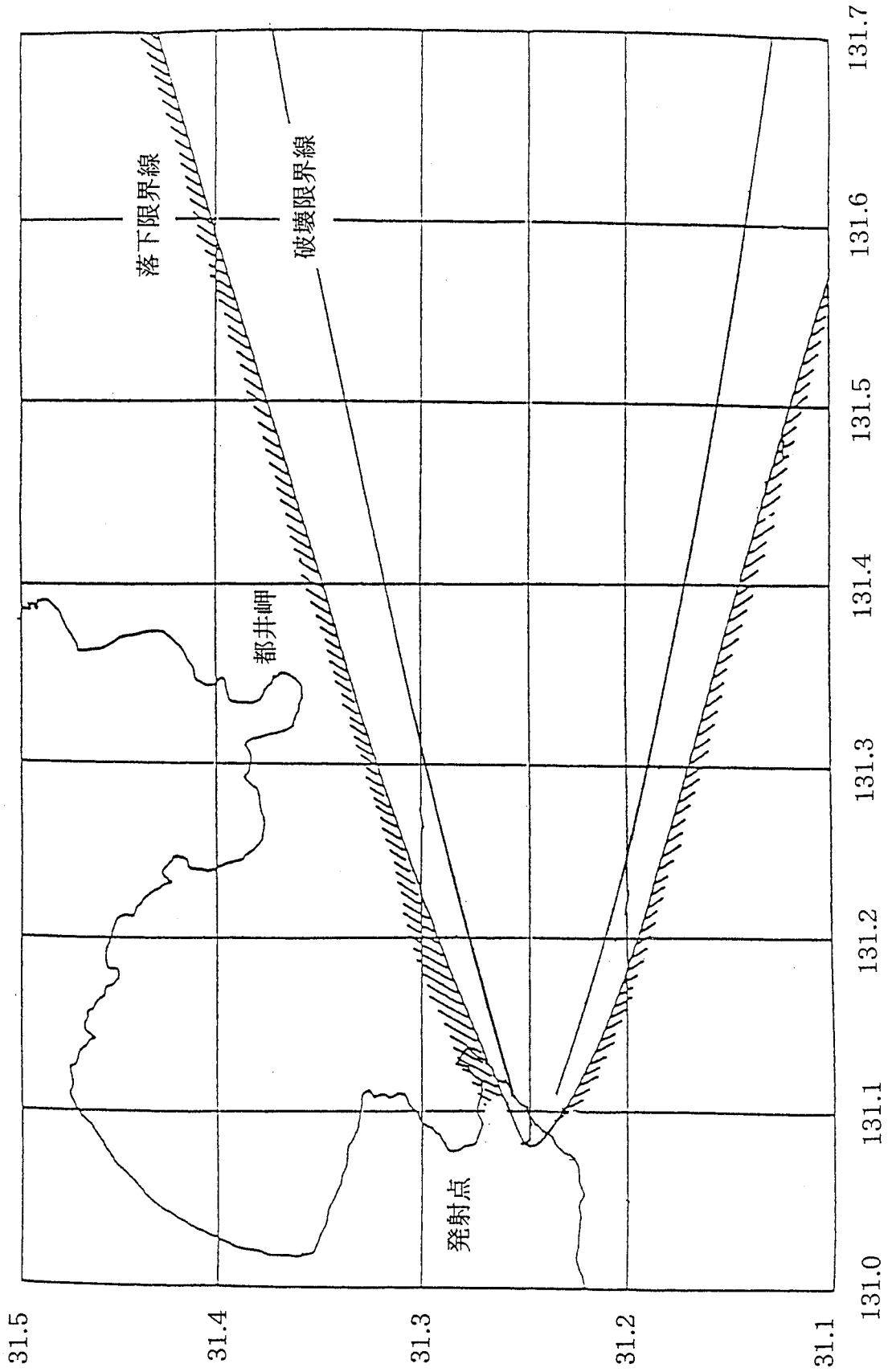


図 8 (b) 発射点から70km までの範囲の落下限界線

ii) IIP 破壊限界線

遠距離限界線は第2段の異常飛翔に対する保安措置に対するものであるが、落下物の落下範囲を落下限界線内に限定するため、IIP表示画面にIIP軌跡がこれを侵す時点までに保安措置を講ずれば、落下物が落下限界線の外に落下することのないIIP破壊限界線を設ける。IIP破壊限界線は、第2段燃焼中の任意の時点で異常を生じロケットが任意の方向に姿勢を変えてそのまま5秒間飛翔した時点で推力停止が行われた時の落下物分散域が落下限界線に接するような場合に対応する異常発生時のIIP軌跡である。5秒間はIIP表示の遅れ、異常検知より保安措置を講ずるまでの時間遅れ等に対する余裕時間である。

遠距離落下限界線の内部には小笠原群島及び伊豆諸島の一部が含まれるためこれらの周囲にも沿岸30kmの海域を落下限界線とし、これに対し上記と同様の考え方でIIP破壊限界線を設ける。しかし、運用に際し、これら諸島に対して上記の破壊限界線を無条件に適用することになるとミッションの達成を著しく困難にするため、IIP軌跡がこれらに近づく直前までの飛翔状況が正常であることを条件とし、破壊限界線の適用を見合わせる。

以上のようにして定められたIIP破壊限界線を図8(a)に示す。

3.5.3 海上警戒

発射点近傍の海上警戒に関しては、発射直後の保安措置に伴う破片の落下確率が合理的な値以上となる海域を警戒する事とする(図3)。警戒に際しては従来通り宇宙研が備船し、発射2時間00分前より監視が行われ、発射時に同区域に船舶の無い事が確認される。

3.5.4 発射直後の保安

発射直前までは安全上の理由から、保安コマンドにより作動するSO装置は安全側にされており、発射後 $x+5$ 秒でアーミングの状態にされる。アーミングの時刻が $x+5$ 秒に選ばれている理由は発射直後以上が生じたとしても異常を確認するのに若干の秒時が必要であること、また万一異常が生じても $x+5$ 秒でSO装置を働かせれば、破片の分散を警戒区域内に抑えることができることなどによる(図9)。

$x+5$ 秒以後において、異常発生に伴いSO装置を作動させるとき、弾道係数が $15\text{kg}/\text{m}^3$ 以上の飛散物の落下点分散範囲の一例を図9に示す。この例は異常発生までの飛翔径路が標準径路に沿っており、かつ風分布に比較的厳しい分布を想定した場合のものである。実際の打上げに際しては風観測に基づきランチャ設定角の修正が行われるため、飛翔径路は発射直前には標準径路からはずれており、秒時が進むにつれて徐々にこれに近づいていく。このような場合、打上げ初期においてはSO装置作動による飛散物の分散範囲は一般に修正方位側にずれてくる。図9で想定した程度の風分布の場合は略図中の分散範囲を修正方位角だけ回転したものとなる。打上げ時には風観測に基づき、風修正を含めた飛翔径路及び弾道係数 $15\text{kg}/\text{m}^3$ 以上の飛散物の分散範囲がチェックされ、その範囲が陸上の警戒区と落下限界線内におさまるような時にのみ、打上げ実験が行われる。なお、発射直後においては、万一姿勢が 10° 以上ずれるような場合にロケットが垂直ないし後方に飛翔する可能性が生じるため、機体姿勢用データ(ピッチ、ヨー角)特にピッチ角データが重要で、これが許容範囲であるか否かの監視が重視される。

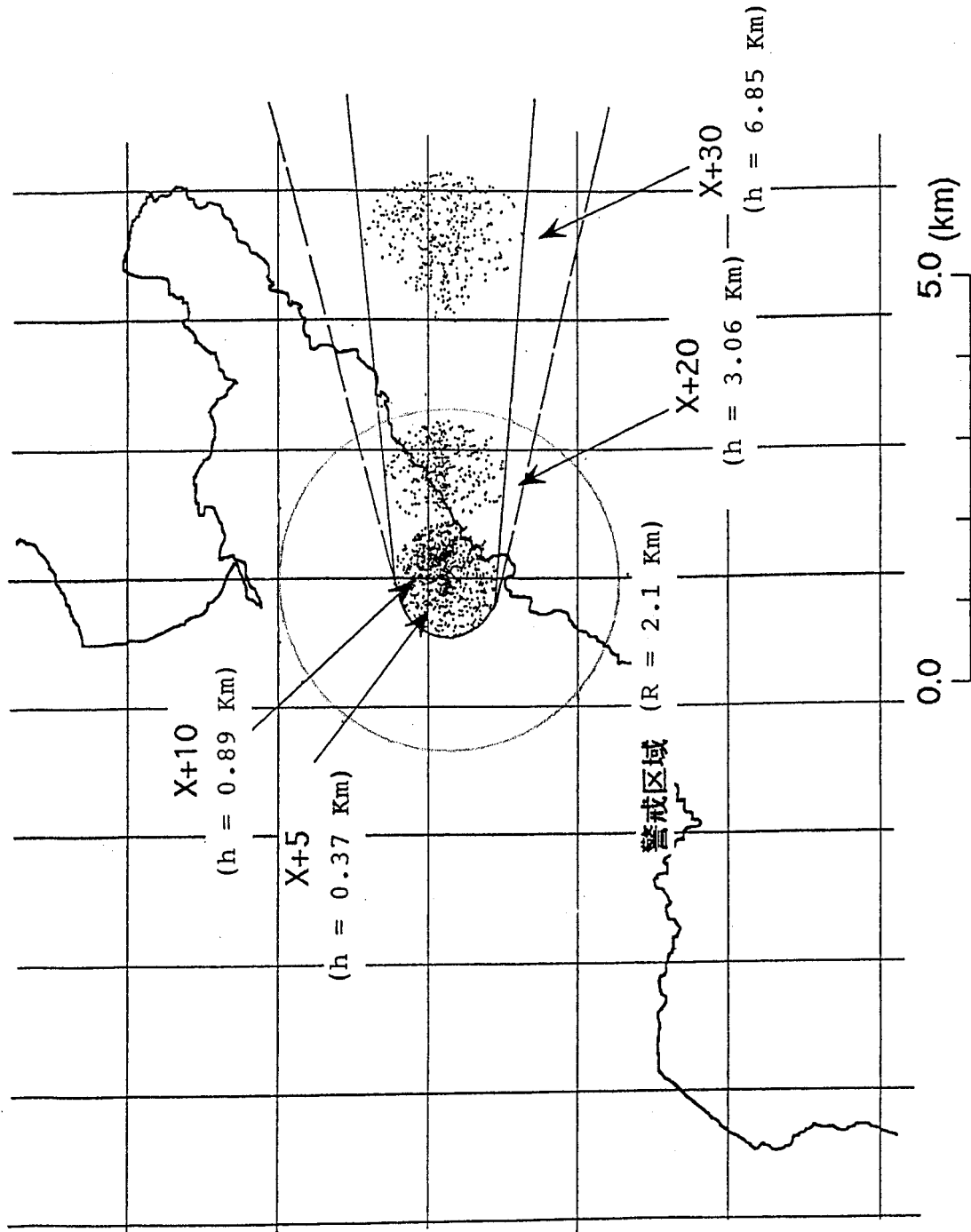


図9 M-V-4号機異常飛翔時の爆破による破片の分散 ($\beta=150\text{kgm}^2$, $\Delta V=150\text{m/s}$, $x+30\text{sec}$.迄)

4. まとめ

これまで打ち上げられた3機のM-V型ロケット(1, 3, 4号機)の飛翔では、4号機の1段目燃焼後半でノズルスロート部破損に伴う姿勢異常が生じたけれども、幸いにして保安措置を講ずることはなかった。4号機で生じた姿勢異常についても、飛翔方位角の点では十分許容範囲内に入っていたため、措置を講ずる必要がなかった。今後も、万全の体制で打上げに臨んでいきたい。