ロケットの安全について

原　宣一

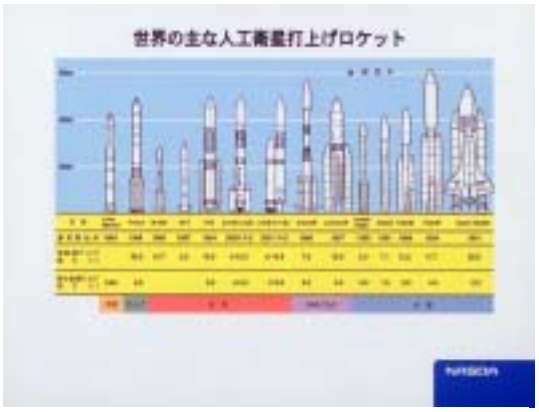
はじめに

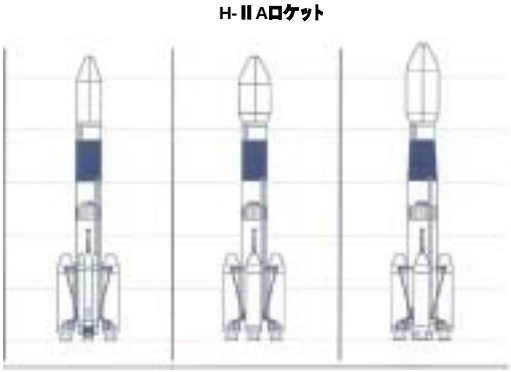
ロケットの安全という標題でいくつかの話題をお話いたします。決して、全てを網羅しているわけではありません。世界のロケットの現状、種子島の打ち上げ射場、Ｈ２ロケット８号機を指令破壊したとき、そしてロケットの部品として特徴的な火工品についてお話いたします。

ロケットの安全と言いながら、ロケットを破壊することもあるのですから標題から少し矛盾があります。安全と言う言葉を漠然と聞き流すのでなく、この当りにピンと来るようになっていただくのが目的です。

1．世界のロケット

今日世界で使われている主なロケットにどんなものがあるのか見てみます。右から米国のスペース・シャトル、タイタン、アトラス、デルタ、それから欧州のアリアン、日本のＨ２Ａです。





日本のミューはもう終わりました。それからロシアのプロトンと絵にはありませんがソユーズ、そして中国の長征（ロングマーチ）があります。この図はＮＡＳＤＡ作成のものですから、もう少し古くなっています。

こちらの図はＨ２Ａロケットです。1段の下部に付けられた固体ロケットモータの大きさや数を変えて打ち上げ能力を変えています。

一番右側のロケットを良く見ると1段が太くなっているのに気づかれるでしょう。直径４ｍが５ｍに大きくなっているのです。そしてメイン・エンジンのＬＥ７が2機装備されています。

このロケットはＨ２Ｂロケットと言う名前が付けられて現在開発中です。順調であれば来年にも完成し9月頃ＨＴＶという補給機を打ち上げます。補給機は国際宇宙ステーションに実験装置などを届ける宇宙機です。

プロトン

それでは、少しロケットの写真を見て頂きましょう。

ロシアのプロトンは射場まで横にしてレールの上を移送します。

スペース・シャトルの打ち上げの模様です。茶色の部分は外部タンク（ＥＴ）です。液化水素と液化酸素のタンクで、この部分は使い捨てで、インド洋に落ちています。アルミニウム合金で出来ていますので、海水に溶けてしまっているでしょう。

ＥＴが茶色なのは断熱剤を表面に吹き付けてあるからです。断熱材の色が茶色なのです。最初の2機はさらに白色塗装がされていましたが、必要ないと判断されて3号機以降は茶色のままです。

ついでに、塗装の目的は何かを尾考えてみてください。

外観を美しくするため、表面の材料特性を改善するため、表面を保護するための3点です。

ＥＴの場合は太陽光の反射率を上げたかったのです。

軌道上のオービタ

9

シャトルの着陸

10

こちらは軌道上のオービタと着陸の様子です。

軌道に乗ると直ぐにカーゴベイ（荷物室）のトビラを開くのは放熱のためです。

スペース。シャトルの帰還時には通常の飛行機と違って急激な角度で降りてきます。まず、バン、バンと2回の音が聞こえます。機体の前縁で作られる圧縮波と後縁から出来る膨張波です。そして遠くで見えたと思うまもなく着陸態勢に入ります。

最後は機体を引き起こして滑走路に着陸します。シャトル・オービタは三角翼機ですので着陸時には迎え角を大きく取る必要があります。操縦席では水平線が見えなくなりますがどの飛行士も上手く着陸するものです。

世界で最初に液体ロケットを飛ばしたのは米国のゴッダードです。液体と言うのは燃料と酸化剤の両方が液体だという意味です。

推力を出すノズルの部分が上のほうにあります。わざわざ上に持ってきたのは何故でしょうか。炎が地上にかからないようにということではありません。

これは弥次郎兵安定の効果を狙ったものなのです。とにかく上に向けて飛ばしたかったのです。

しかし、このロケットは弥次郎兵安定を得られるようになっていません。理由はお分かりでしょうか。この写真は有名なのですが、実はノズル部分を上に持って来たのは無意味であったと書いてある本はないのです。

構造的に機軸が倒れても復元モーメントが出て来ないのです。ゴッダードは勘違いしたか、改良を次号機以降に持ち越したかで

しょう。

2．種子島宇宙センター

この挿絵は種子島宇宙センターにＨ２ロケットの打ち上げ射点を作っているときのものです。

整備棟から射点までちょうど５００ｍ離れています。

Ｎロケット時代のブロック・ハウスは地上に建てて土をかぶせたものでしたが、現在のブロック・ハウスは地下室です。

ブロック・ハウスは射点の近くにあってロケットの打ち上げ整備をモニタしております。

フロリダのＫＳＣでは地下施設はありません。射点までわざわざ盛り土をして高くしてあります。お気づきでしたでしょうか。発射台にロケットを据えるには坂を昇らなければならないのです。

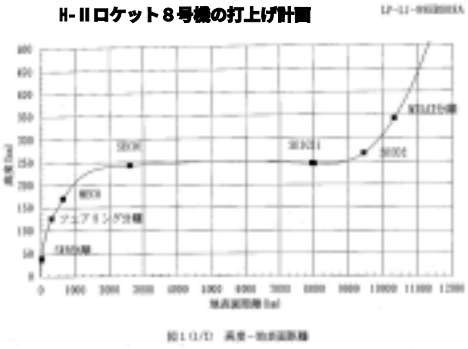
ＫＳＣで地下施設を作れないのは地下水の関係でしょう。

3．Ｈ２ロケット８号機の指令破壊

ロケットの打ち上げでは安全を確保するため、地上安全と飛行安全に分けて安全を確認します。地上安全は工場内の安全確保と変わりません。飛行安全がロケットの打ち上げに特有なことでしょう。

飛行安全とは、ロケットを破壊しますというもので、滅多に行なわないものですがＨ２ロケット８号機の打ち上げで行なった

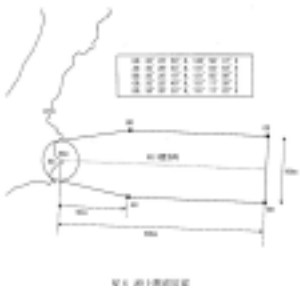
のです。そのときの様子をお話します。



この図は８号機の飛行計画です。種子島から打ち上げて東の方向に機首を向けていきます。８号機のミッションはＭＴＳＡＴで静止衛星ミッションでした。高度２００Ｋｍまで達したときに既に衛星速度である秒速８Ｋｍを得ています。

慣性飛行を続けて赤道上空にきたときにもう一度２段ロケットを点火して加速します。所定の速度に達したら、もう静止軌道への遷移軌道に入っていますから、エンジンを止めて衛星を分離します。

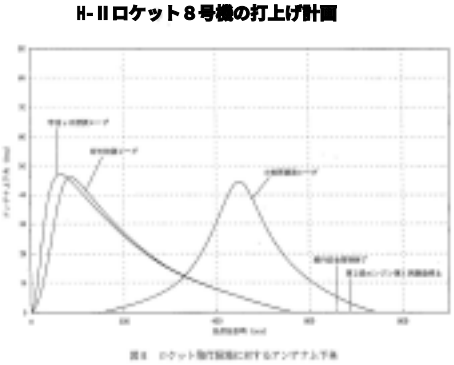
さて、安全確保の第一歩は「君子危うきに近寄らず」です。



いわゆる立ち入り規制を行ないます。この写真は、内之浦の射点のものですが、種子島宇宙センターでもどこでも、ロケットの打ち上げ時には必ず同じように立ち入り規制を致します。

内之浦

８号機は垂直に打ち上げられて少しずつ頭を東に向けて飛ばします。射点まわりではこのような線を地図上に引いて立ち入り規制を行ないます。もちろん海の上ですから、船や飛行機に対しての規制です。



太平洋上に燃えのりの固体ロケットモータや1段機体、衛星フェアリングを分離して落としていきますので、それらの落花予想区域にも船や飛行機が入らぬよう注意を促します。

航空機にはＮＯＴＡＭというものを航空局から発行して貰います。

この富士山を書いたような図は地上からロケットの打ち上げを電波で追うときにどのくらいの高さに見えるものかを示したものです。アンテナの上下角といいます。

種子島のアンテナは急激に高くなり、だんだん水平線まで下がります。

赤道に近いクリスマス島からは水平に近い角度で待ち受けていて、だんだん高くなり富士山のような形で再び水平線に消えます。

電波は上下角5度あれば受かります。しかし、電波は海面反射等があり、電波だけで追っかけても精度がでません。

ロケットの打ち上げで面白い安全監視の方法にスカイスクリーンという方法がありました。これは米国の打ち上げを見てきた先輩が取り入れたもので、Ｎロケットの時代からＨ２ロケットの８号機まで実行していました。

ロケットの打ち上げ場所からそれほど遠くない場所の空間に紐を張るのです。そしてその紐で仕切られた空間を通してロケットの打ち上げを肉眼で監視するのです。

同じようなもの違う方角で別の場所に設定し、2方向から監視します。

見ている人は、ヘルメットは被りますが、決死の形相で打ち上げを見守りながら常時「グリーン・グリーン」と連絡を入れます。紐で設定した枠から外れたら「レッド」または「爆破」と叫ぶ訳です。

この監視要員は事前にリハーサルをやって訓練をするのです

が、本番で本当に「爆破」と叫べるのか疑問でした。場合によっては自分が逃げることに追われるでしょうから。

８号機でモニタ・カメラでも同等のことができることを確認しています。

スカイスクリーンの近代化

27

H-IIAの打上げ

32

ロケットが飛行ルートから外れた場合は、被害が広がらないように指令破壊をかけることになっています。

有人のスペース・シャトルでも指令破壊装置は取り付けてあります。米国の場合、ＮＡＳＡが打ち上げるスペース。シャトルでも指令破壊の権限は米空軍が持っています。

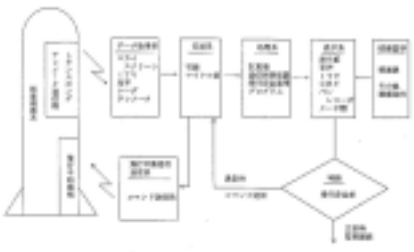
スペース・シャトルが発射直後に飛行ルートを反れて人口密集地、例えばディズニー・ワールドのあるオーランドのようなところに落ちそうな場合は指令破壊されます。その線引きは公開されていませんが、指令破壊のコマンドを発する人が迷わぬように、あらかじめ決められています。

スペース・シャトルの打ち上げ後の飛行中止モードは４種類が設定されています。ＲＴＬＳは射点に戻るもの。ＴＡＬは大西洋の反対側に降りるもの。ＡＯＡは地球を１周して射点に戻るもの。そして、ＡＴＯは低い高度でも周回軌道に入ってしまうもの。

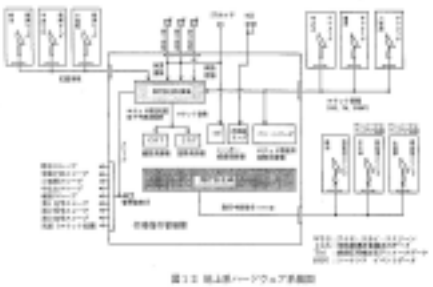
チャレンジャーの事故は、不具合を感知する時間もありませんでしたからＲＴＬＳを取れませんでした。

８号機に戻ります。

H-Ⅱロケット８号機の打上げ計画



H-Ⅱロケット８号機の打上げ計画

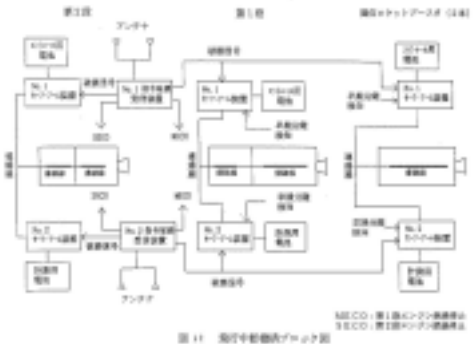


打ち上げ時にはテレメータでロケットの情報を入手するだけ

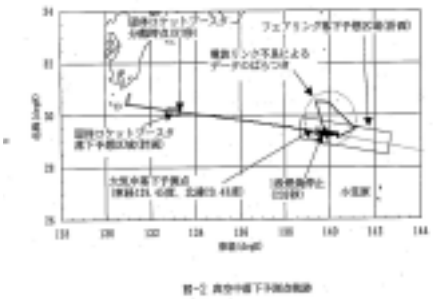
でなく、スカイスクリーンや光学観測から情報を飛行安全管理棟に集めます。そして飛行状況などをプロッターで描かせながらモニタします。

異常を確認したら、最終的に指令破壊コマンドを発します。テレメータはロケットから送られてくる電波を受けるものです。光学望遠鏡も数ヶ所で監視しています。指令破壊のコマンドを送るアンテナも数箇所用意されています。

H-IIロケット８号機の打上げ計画



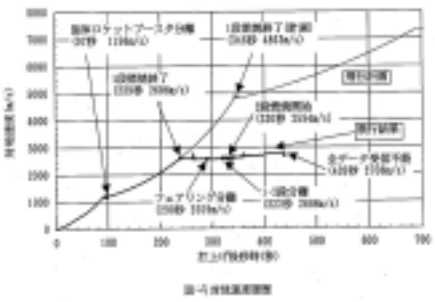
H-II８号機の飛行データ



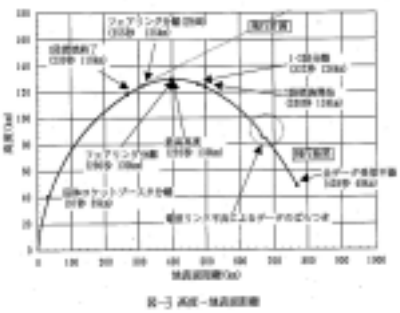
ロケットの方も指令破壊コマンドを受けたら確実に壊せるように冗長系を取って爆破線を貼り付けてあります。

次の図3枚は8号機が実際にどのように飛んだかの記録です。

H-II８号機の飛行データ



H-II８号機の飛行データ



飛行計画と比べて発射後２３０秒あたりから外れています。平面図にはデータ不良でプロッターがあり得ない動きをして悩むところですが、速度データも高度も外れていますから、異常が起こったことは直ちに判りました。

指令破壊をかけるまでに時間がかかっていますが、これは直ちに地上に危険が及ぶ状態ではなかったので、何とか軌道を修正できないものかと粘っただけです。

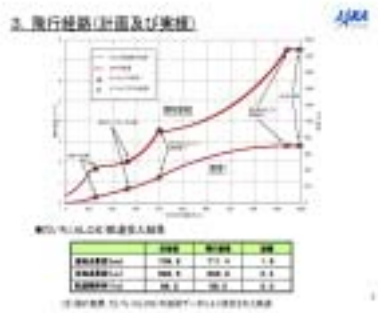
最終的には指令破壊のコマンドを打っております。

８号機の不具合の原因はその後の調査で、ターボポンプのインペラの疲労破壊であったことが判り設計変更をしています。

ロケットは失敗無く飛ぶと飛行計画に対してぴったり一致す

るものである例として、「だいち」を打ち上げたときの例をお見せします。衛星を分離した時点で位置と速度が合っていれば良いのですが、最終時点を合わせるためには必然的に途中も合うことになります。最終の姿勢は狂ったとしても衛星が自分自身で直せるでしょう。

世界中のロケットで指令破壊は決して珍しいことではありません。



表－参1　最近のロケット指令破壊の例

4．火工品

次に宇宙機で多用する部品に火工品があります。これらには、起爆管、セーフ・アーム装置、延時起爆管、導爆線、隔壁型起爆管、カッタ組み立て、破壊用火工品、フランジブル・ナット、等。いろいろなものがあります。

一般に火工品は作動すべきときに作動しないと困るのは当然ですが、作動してはいけないときにノイズぐらいで作動しては絶対にいけない場合が多いのです。

1W1A鈍感型起爆管はこの電力でも作動しないものです。

セーフ・アーム装置も、作動してはいけないときに確実に作動回路を遮断する装置です。セーフ位置、アーム位置、点火のポジションを信号で制御します。

延時起爆管は比較的短い時間の後に作動させる導火線です。Nロケットでは2段を分離して数秒後に3段モータを点火させるときに使いました。

導爆線は電線の代わりに火で伝えるようなものです。爆破線に火を伝えるのに使います。

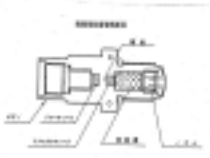
隔壁型起爆管は点火部分からガスが抜けては困るような場合に使います。衝撃波が壁を伝って点火させます。

カッタ組み立ては火薬の力で鏨をアンビルに動かせで瞬時に電線やロープを切断します。

破壊用火工品は火薬を包む形を工夫してエネルギーが衝撃的に一方に集中するようにしたものです。この工夫はノイマン効果と名前が付けられています。円錐型は戦車の壁を突き抜けるように工夫されたものです。分離ボルトなど、最近の宇宙用は作動後

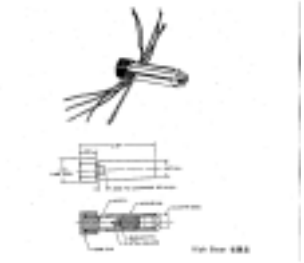
も破片が飛び散らないように工夫されています。

隔壁型起爆管概要図



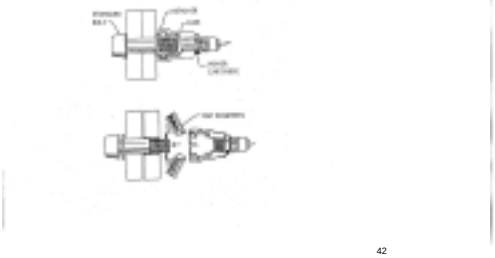
40

ケーブル及びワイア・カッタ



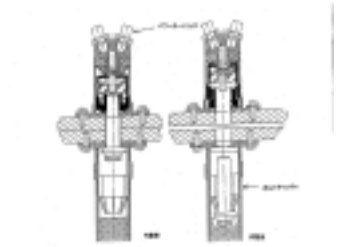
41

分離ナット（デブリ飛散防御なし）



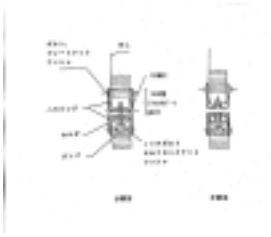
42

分離ナット（ボルトキャッチャ付）



43

フェアリング分離機構（曲分離機構）



44

火工品のキーワード

ノイマン効果

高信頼度
高エネルギー密度

爆薬と発射薬

黒色火薬：木炭、硫黄、硝石
（塩素酸カリでは）

無煙火薬

火薬類取扱主任（甲、乙）

45

火工品の特徴は高信頼度で高エネルギー密度であることと言えるでしょう。小さいながら大きな仕事を確実にこなすということです。

火薬には爆薬と発射薬があります。爆薬は燃焼速度が速いものです。ライフル銃の発射に間違えて爆薬を使うと弾は飛び出すにしてもライフル銃も壊れてしまいます。

私は子供の頃、黒色火薬を作ろうとしたことがあります。硝石が手に入らなかったので代わりに分子式が似ている塩素酸カリを使ったのです。粘土に入れて作ったかんしゃく玉は上手く出来たのですが、何年か後に黒色火薬で硝石を塩素酸カリに置き換えたものは爆薬であるということを書いてある本を見て冷や汗をかいた覚えがあります。知らないことは危ないのです。

5．安全解析

最後に安全解析についてお話いたします。ロケットだけでなく全ての安全確保に共通なことです。

まず、ハザードという用語の意味を正しく掴むことが必要です。ハザードはＮＡＳＡの定義で「事故の要因が潜在的または顕在的に存在する状態をいう」ということになっています。ＪＡＸＡの定義も同じです。

よく考えてみれば、潜在的または顕在的には不要です。どちらにせよ、存在するということを知らなければどうしようもありません。ハザードとは事故の要因が存在することで良いでしょう。

存在するということを認識することが大事です。英語ではidentifyを使います。宇宙分野では「識別」という言葉を使っています。原子力分野では「同定」です。

ハザードは「危険要因」と訳されたことがありました。しかし、ハザードであると認識したものが直ちに危険なのではないのです。

ハザードであると認識する場合でも、対処の方法によって安全にも危険にもなり得るのです。ガソリンは誰もがハザードと認識する物資ですが、安全に使えるから自動車の燃料に使っているのです。

しかし、困ったことに消防法でハザーダス・マテリアルの訳として「危険物」という用語を当てているのです。私達は危険物を危険でないように扱うということをしています。舌を噛みそうですが。

安全解析の第一歩はハザードを識別することです。次にそのリスクを評価します。もし、そのリスクが許容できなければ、設計で対処します。このことをリスクの制御またはコントロールと言っています。リスクが許容できると安全であるとして合格です。

安全とはリスクが許容できるほど小さいことを言います。

おわりに

ロケットの安全についてという標題でＨ2号機を指令破壊した状況を中心に最後は安全解析の大筋をお話いたしました。

最後にリスクという用語が出てきましたが、これも世間ではあいまいに使われていますので別にお話いたします。

また、リスクに必要な用語の概念で確率がありますが、確率についても、世間での誤使用と混乱がありますのでそのことも別にお話します。

（平成20年6月3日）