

論文の内容の要旨

論文題目 ハイブリッドロケット推進薬に係る保安距離の定量評価に関する研究
Research on the quantitative evaluation of safety distance for hybrid rocket propellants

氏 名 高橋 晶世

宇宙輸送システム長期ビジョン等によって宇宙輸送システムの抜本的な安全性の向上が求められているのを背景に、非爆発性のハイブリッドロケットの採用が安全性向上に有効である可能性を定性的に示した上で、爆風の既往実験データを使ってハイブリッドロケット推進薬の爆発ハザード時の爆心状況を評価するためのモデルパラメータを同定し、さらにそれらを用いて爆風に対する保安距離の定量的な評価法を構築することを目的として研究を実施する。定量的な保安距離の評価とは、具体的には、非爆発性ハイブリッドロケット推進薬に対する(1)整備期間(2)打上げ時の爆風に対する警戒区域の計算方法に相当する保安距離の評価であり、さらには、保安距離を定めるためのTNT換算率の評価である。先行研究 (Wilton, C., “Investigation of the Explosive Potential of the Hybrid Propellant Combinations N_2O_4 /PBAN and CTF/PBAN”, AFRPL-TR-67-124, 1967) や、既存評価基準 (“EXPLOSIVES SAFETY STANDARDS”, Air Force Manual 91-201, 2011) による保安距離の成果が四酸化二窒素や三フッ化塩素の酸化剤とPBAN (polybutadiene-acrylic acid-acrylonitrile) +Al燃料に限られているのに対し、本研究ではハイブリッドロケットで多く用いられている液体酸素とHTPB、ワックス、ポリエチレン等の燃料の場合の評価を行う。先行研究は上記推進薬を用いた実験の実施と実験結果に基づくTNT換算率評価であったが、本研究は、その既往実験データに基づいて数理モデルを構築した上での、新たな、かつ既往の知見に矛盾しない評価である。

保安距離の評価を行うには、推進薬の燃焼が周囲大気に及ぼす圧力変動を、燃焼地点からの距離の関数として評価する必要がある。インシデント発生から推進薬の燃焼・圧力伝播に至る一連の物理現象を表す事故シナリオを複数設定して、シナリオに沿った数理モデルを構築する。シナリオには平面壁衝突・孔施工壁衝突・燃料近傍爆破・酸化剤近傍爆破があり、それらに共通する物理現象として推進系へのエネルギー印加、推進薬を保持するタンク類の破壊と酸化剤の漏洩・燃料の破碎、酸化剤と燃料粉塵の混合・混合気の着火・燃焼ガスの生成、燃焼ガスによる周囲の空気内の圧縮波の伝播を抽出する。この現象に沿

って印加エネルギー、燃料破碎、可燃性粉塵雰囲気形成、燃焼現象、大気中への圧力伝播、実在気体効果、TNT換算率、保安距離についてモデリングする。燃料破碎モデリングでは粉塵の大きさを500 μm 以下とする。圧力伝播、実在気体効果のモデリングでは流体解析を実施する。流体解析によって、燃焼地点からの複数の地点におけるピーク過圧と過圧インパルスを求める。それらの値と、Wiltonのピーク過圧・過圧インパルスデータとの相対誤差から求める二乗平均和が、ある指定範囲に収まるようなモデルパラメータを各シナリオについて定める。パラメータは印加エネルギーの分配にあたってのエネルギー効率を表すもので、推進薬の種類に拠らない。自作した流体解析のプログラムの健全性および論理エラーの有無は、衝撃波解析の理論値との合致、実在気体効果のNISTデータとの合致によって確認する。そして、Sachs' scaling lawに従って、ピーク過圧からTNT換算率を求める。流体解析結果から得られたピーク過圧値を許容過圧値と比較することで保安距離の設定が既に可能であるが、本研究では先行研究結果との比較のためTNT換算率を求める。TNT換算率からも保安距離を求めることができる。数理モデルの有効性は、パラメータ設定に用いた試験結果とは酸化剤や衝突速度が異なるケースの試験結果との比較により確認する。このようにして、プログラムが健全であり、かつ既往研究の成果と矛盾せず有効である数理モデルを構築した。その数理モデルを用いたハイブリッド推進薬の保安距離の評価の方法と手順を構築した。

この方法と手順に則り、非爆発性ハイブリッドロケット推進薬（ LO_2/HTPB 、 $\text{LO}_2/\text{ワックス}$ 、 $\text{LO}_2/\text{ポリエチレン}$ ）のTNT換算率をシナリオ毎に算出した。Wiltonの試験コンフィギュレーションに合わせた計算では、 LO_2/HTPB 、 $\text{LO}_2/\text{ポリエチレン}$ は衝突シナリオで0.001~0.002（TNT換算率の単位[-]、以下同）爆破シナリオで0.012~0.015と、いずれもAFMANの値より小さくなった（AFMANは高速衝突シナリオで0.05、爆破シナリオで0.15という数字を示している）。一方 $\text{LO}_2/\text{ワックス}$ （FT-0070）の値は平面壁衝突で0.003、孔施工壁衝突で0.043、燃料近傍爆破で0.628、酸化剤近傍爆破で0.581と、爆破シナリオでAFMANの値を上回る結果が得られた。FT-0070は引張強度が低く破断歪の小さい、脆い材料である。このような材料では粉塵が形成されやすく、燃焼質量が増加することでTNT換算率が高まる。つまり材料の脆さが結果的に高TNT換算率に結びつくことがわかった。次の式に推進薬質量 w_p 、TNT換算率 T_e を代入すると、保安距離 R を計算できる。

$$R = 62.5 \times (T_e \times w_p)^{1/3} \text{ [m]}$$

また数理モデルを過去の非爆発性ハイブリッドロケットの打上げ事例や燃焼試験事例に適用して必要な保安距離を算出し、過去の運用上の問題の有無を指摘した。例えばFT-0070等の脆い材料で、着火方法に火薬類を用いると、推進薬質量の小さいラボスケールの試験でも保安距離が比較的大きくなる。推進薬質量が100gに満たない事例でも、燃料爆破シナリオでは保安距離がワックス（FT-0070）では20m以上になり、ロケットエンジンを中心に

直径40m以上の保安距離が必要になってくる。このように脆い材料のハイブリッドでは保安距離に注意が必要であることがわかった。