



紹介

ハイブリッドロケット打上実験(豊川市)

The Flight Test of a Hybrid Rocket(Toyokawa City)

関 啓亮¹, 相馬 健太¹, 大熊 拓児¹, 草川 裕¹, 松田 達也¹, 藤本 大海¹

¹社会人ロケット開発グループ TOKAI ROCKETEERS

社会人ロケット開発グループ「TOKAI ROCKETEERS」は、2011年から活動を始め、その後ハイブリッドロケットの開発/制作/実験を開始した。2012年10月13日に行われた“豊川流域下水道の下水道の日キャンペーン活動”でハイブリッドロケット“X100I-1B”の打上実験を行った。打上実験は無事に成功しロケット機体は損傷なく回収された。しかし、到達高度が想定よりも低く、また、その原因はロケットモータの性能ではないことが分かった。今後、機体に影響する空力的な調査が必要である。

キーワード：ハイブリッドロケット，ユニット，豊川，打上実験

1. はじめに

和歌山大学宇宙教育研究所の支援を頂き運営している社会人によるロケット開発を実施するグループ「TOKAI ROCKETEERS」(以下TR)は、2011年に社会人を中心に集まり、ロケットガール・ボーイ養成講座や缶サット甲子園などの和歌山大学宇宙教育研究所(以下IfES)の事業の支援を行ってきた。

昨年からは和歌山大学宇宙開発プロジェクト(以下WSP)の支援も始め、顧問の教員より、「社会人のものづくりの姿勢を学生に見せ、手取り足取り教えるのではなく、学生の興味を引くようなものづくりで自主性を育てるような指導をしてほしい」との依頼を受け、正式に社会人ロケット開発グループ「TOKAI ROCKETEERS」として2012年よりハイブリッドロケットの開発/制作/実験を開始した。

また、この技術開発の機会を利用し、TR独自で地域貢献や高校生指導としてのロケットペイロードの提供(主にCANSATの輸送など)を始めた。

2012年10月13日に行われた“豊川流域下水道の下水道の日キャンペーン活動”でのハイブリッドロケット打上実験は、その一環であり、また、愛知県でハイブリッドロケットが打上げられるのは初めてのため確実な打上実験成功が求められた。これらの目的を達成するために今回使用したX100I-1Bハイブリッドロケットの研究開発について以下にまとめる。

2. X100I-1Bハイブリッドロケット

2.1 開発概念

TRで初めて開発したハイブリッドロケットがX100である。機体コードである“X100I-1B”はXにおいては開発機を表しその後に機体内径(mm)、ロケットモータ使用タンクサイズ(300ccの場合はI)、号機番号、改修No.(-, A, Bと続く)を示しており、今回は3度目のフライトであった。

機体の諸元は図1のようになっており、過去2回のフライトよりもペイロード部を拡張し、輸送を主目的とした改修を行っている。(今回はロケット機体へ搭載依頼のあったぬいぐるみに合わせ改修を行った)また、ぬいぐるみの他にも、セニオ・ネットワークス株式会社様より提供していただいた小型モデルロケット用ア



図1. X100I-1B 機体諸元

ビオニクス“CANSATmini(仮称)”のプロトタイプを搭載し、フライトデータの取得も行った。

2.2 機体構造

X100系の機体は外装に肉厚1mmのGFRPパイプを使用し、モータマウントユニット、酸化剤タンクユニット、分離構造ユニット、ノーズフェアリングの4つのユニットで構成されており(図2参照)、各ユニットがそれぞれ別の作業場にて加工、組立ができるような作業性、効率性の良さや、使用するロケットモータの酸化剤タンクを変更する場合には酸化剤タンクユニットの機体外壁パイプの変更のみで済む簡易換装システムの有効性、また、ミッションの変更に伴い機体重心が変わった際に翼のみを制作すれば対応できる汎用性の3つを重視して開発した機体である。

2.2.1 機体各ユニット

2.2.1.1 モータマウントユニット

モータマウントユニット(図2参照)はロケットモータと翼を固定・搭載するユニットである。

構造としては、外装であるGFRPパイプの側面にアルミアングルを介して翼を固定している。内部にはハイブリッドロケットモータ(グレイン・インジェクタ部のみ)、アルミアングル、GFRPパイプを保持するアルミプレートが存在する。このアルミプレートは2枚のプレートを組み合わせており、モータの種類に合わせ、インジェクタと接する1枚のプレートを換装することで複数種のロケットモータを固定できる構造としている。

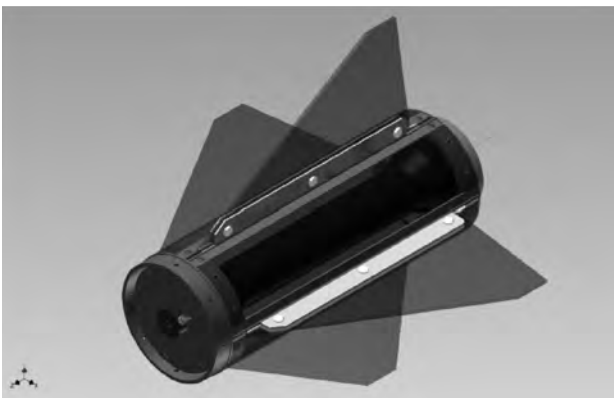


図2. モーターマウントユニット

2.2.1.2 酸化剤タンクユニット

酸化剤タンクユニット(図3参照)は、酸化剤タンクを搭載するユニットである。

構造としては、GFRPパイプの内部に酸化剤タンクを収納し、スタイロフォーム(発泡材)でタンク上部を保持している。あくまで保持しているだけなので、酸化剤タンクの変更が容易である。特に今回使用した(CTI) Hyper TEK® Hybrid Propulsion Systemでは酸化剤タンクの容量変更(サイズ変更)でトータルインパルスを変化させることから、1機の機体で複数のミッションを行うにはモータマウントユニットと合わせて非常に有効なユニット構造であると言える。

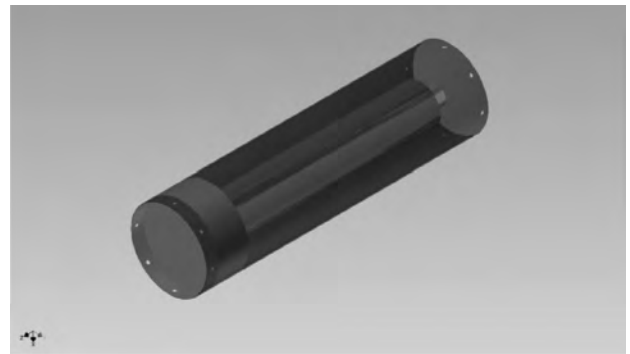


図3. 酸化剤タンクユニット

2.2.1.3 分離構造ユニット

分離構造ユニット(図4参照)はロケット打上時に機体の上昇が終了した時点でノーズフェアリングを切り離し(押し出し)、パラシュートや搭載物を放出して、ロケット機体を回収する駆動部を持ったユニットである。

構造としては、外装であるGFRPパイプの内部にスプリングを圧縮した機構があり、空圧機器用ジェットカップラでアッパープレートを介してスプリングを固定する。(図5, 6参照)

分離シーケンスとしてはこのカップラをスプリングリターン式空圧アクチュエータ(以下アクチュエータ)で保持し、タイマー回路でこのアクチュエータに直結する電磁弁を「開」にすることでアクチュエータがカップラの保持機構を解除する方向に稼働(内部に配置されたボールが移動する)ことでプラグのロックが外れ、圧縮されたスプリングの荷重でプラグと接続されたアッパープレートを高速で上昇させる。これにより本ユニット上部に差し込まれているノーズフェアリングを

押し出すことで分離を実現させるものである。

今回のユニットからは分離機構部の下に電池・制御回路を搭載できるテーブルを設け、内部構造の一体化を実施した。

その結果、分離機構と別に制御回路を搭載していたスペースの約1/3で済み、後述する小型モデルロケット用アビオニクス“CANSATmini(仮称)”のプロトタイプを搭載することが可能となった。

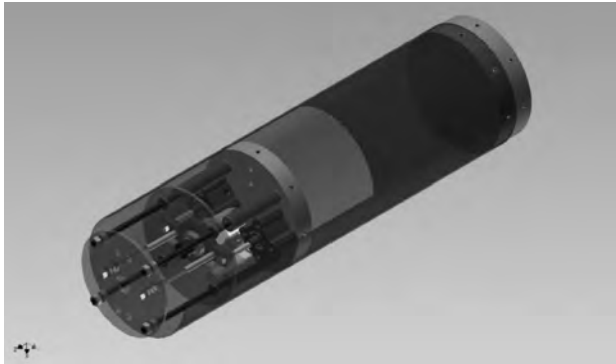


図4. 分離構造ユニット(制御回路部省略)

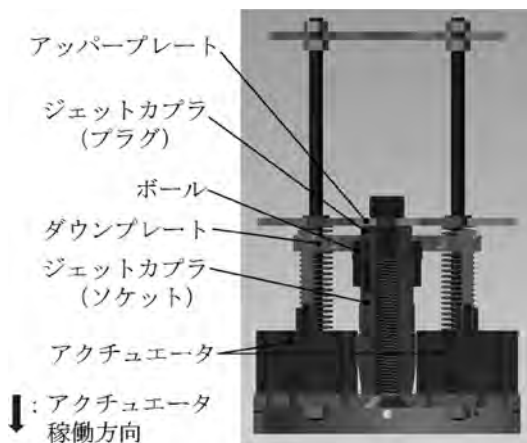


図5. 分離機構の構造(分離前)

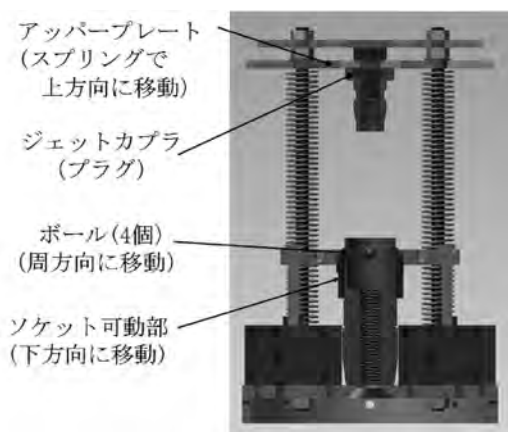


図6. 分離機構の移動部品(分離後)

2.2.1.4 ノーズフェアリング

ノーズフェアリング(図7参照)は、ロケットに搭載された放出する機材を打上時の空気抵抗から保護し、機材を上空で放出するカバーである。

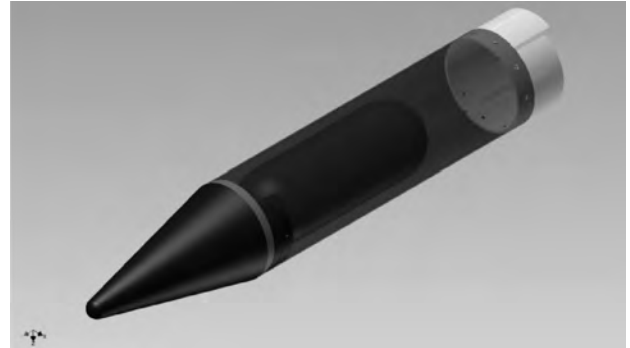


図7. ノーズフェアリング

構造としては他のユニットよりも簡単な構造で、縦に分割する外装に上部結合部は内径に合わせたアルミリングを差込む固定のみである。下部結合部も同様に、内径に合わせたアルミリングを分離構造ユニット側の外装内部に差込み固定する。分離時には、この下部結合部の差し込まれたアルミリングを押し出すことによってノーズフェアリングの分離を行う。

その際、上部に差込まれたアルミリングを分離してからノーズフェアリングを切り離さなければならない。そのために分離構造ユニット側の外装内部に差込まれたアルミリングに段差を設けることで、段差の無い側が先に分離機構のアッパープレートに押出され、続いて段差のある側が押出される構造とした。(この動作の途中で上部のアルミリングの固定が解除される)

今回の豊川浄化センター内打上実験では、マスコットキャラクターである“とっと君”のぬいぐるみ(図8参照)を搭載し、上空で放出を行った。



図8. 豊川浄化センターマスコットぬいぐるみ

2.2.2 ロケットモータ推進システム

本実験では、Cesaroni Technology Inc. HyperTEK[®] Hybrid Propulsion System I-205 (以下I-205)を使用した。

当時、TRではロケットモータの推力計測が可能な地上試験装置が開発中であったため、ロケットモータ推力は公称値(図9参照)を使用した。また、2012年5月には同タイプのロケットモータの地上燃焼試験を行っている。(図10参照)

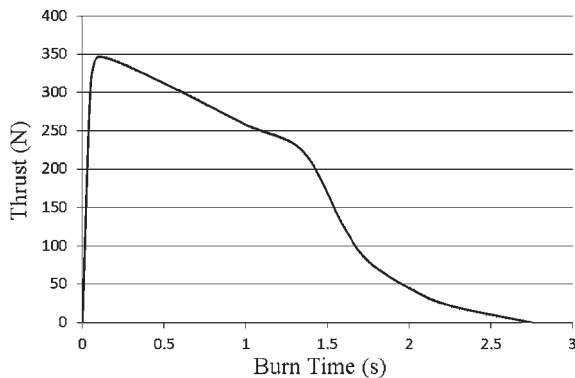


図9. I-205 公称推力グラフ



図10. 同タイプのロケットモータの地上燃焼試験の様子

このI-205を搭載し、2.2.1の全ユニットを結合して打上を行った場合の解析した各パラメーター時間のグラフを図11にまとめた。このグラフから最高到達高度は地表から250m付近であることがわかる。

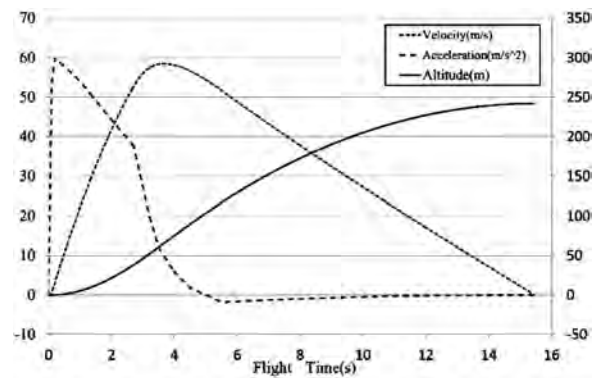


図11. ロケット飛翔時の時間一各パラメータの変化

2.2.3 搭載計測システム

本実験では、セニオ・ネットワークス株式会社より提供していただいた小型ロケット用アビオニクス CANSATmini (仮称)のプロトタイプを試験的に搭載した。

CANSATminiには、気圧、温度、3軸加速度、3軸角速度を計測できるセンサが搭載されており内蔵のメモリに保存が可能である。図12に搭載した実物の写真を示す。

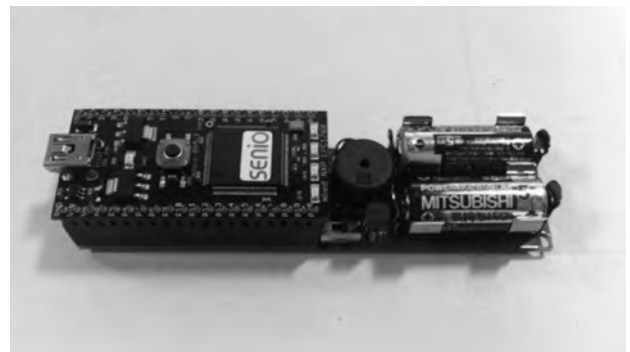


図12. 小型モデルロケット用アビオニクス CANSATmini(仮称)

3. 打上実験の様子

打上実験は2012年10月13日に愛知県東三河建設事務所豊川浄化センターで行われた。当日は“豊川流域下水道の下水道の日キャンペーン活動「豊川浄化センターでミニロケット・ミニ衛星の打ち上げを見よう！」”というイベントの一環で豊川浄化センター、IfES、PDエアロスペース株式会社(以下PDAS)の御協力により実現することができた。

ロケットの準備作業は豊川浄化センターの会議室をお借りし実施した。(図13, 14参照) 発射台の設置、

組立は同センター内の敷地中央部で行われた。(図15参照)



図13. ロケット機体組立の様子



図14. 分離実験の様子



図15. 発射台搬入の様子

打上実験は同日ポートメッセ名古屋で開催されたJA2012(国際航空宇宙産業展)からの来賓の到着を待ち、打上時間を15:50に設定した。また、イベントを見に来た親子連れも合わせて総勢100名以上の観客が集まった。

ロケットは当日のシーケンス通り、打上時間の1時間30分前に発射台に取付けられ、地上支援系のトラブルがあったものの順調に準備が整った。(図16参照)

打上実験は定刻通り実施され、15:50に点火(図17参照)、豊川の空へ発射された。(図18参照)

その後、最高到達点付近で分離機構が作動し“とつと君”を放出、やや遅れたが回収用パラシュートを展開した。(図19参照)ロケット機体は無事に発射台近くの保安区域内に軟着陸し、機体の破損等のないことが確認された。



図16. 発射台立上げの様子



図17. 発射の様子



図18. 豊川の空へ上昇するハイブリッドロケット



図19. パラシュートを展開したハイブリッドロケット

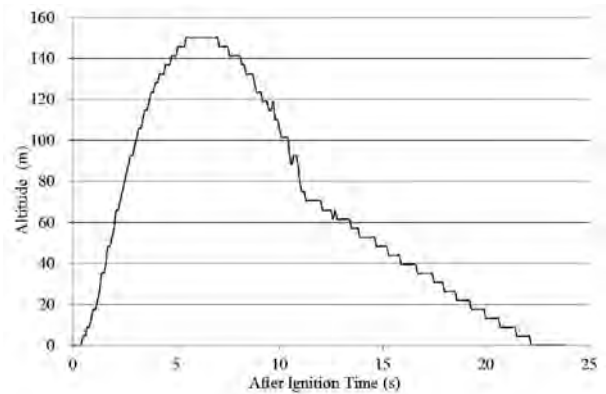


図21. 発射後の機体高度変化の様子

4. 打上実験の結果

本実験で搭載したCANSATminiの計測データはロケット機体回収後、無事取得できていることを確認した。図20にロケット発射～着地までの加速度・気温・気圧の変化の様子を示す。

時系列順に各計測データを見ていくと以下の表1のようになった。

表1. ロケット発射～着地までの時間及び判断基準

時間	パラメータ	波形変化	イベント情報
X+0付近	加速度	モーターに点火後、急激に機軸加速度が変化	発射
X+1.6s	加速度	機軸加速度がほぼ0まで低下した。	燃焼終了
X+6.6s	気圧	気圧が大気圧未満で比較的長い時間変化(ロケット側も発射6.5秒で分離指令を発信)	最高高度到達 約150m
X+11.0s	加速度 気圧	急激な加速度の変化とともに以降の機軸加速度・気圧の単位時間当たりの変化量が一定になった。	パラシュート 展開
X+22.7s	加速度	急激な加速度の変化とともに以降の3軸加速度・気圧の変化量がなくなった。	着地

※Xとは打上時間を表す

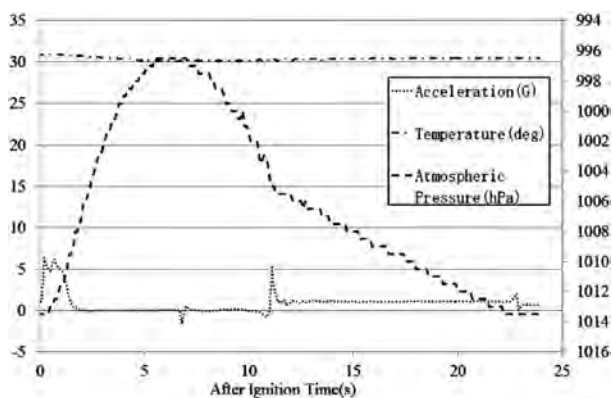


図20. ロケット発射～着地までの加速度・気温・気圧変化の様子

この結果から、解析された到達高度に達していないことがわかる。想定される原因として第一に考えられるのはロケットモータの推力異常、次いで翼などの共振による機体空気抵抗の増加¹⁾などが考えられるが、回収後の機体から構成部品に亀裂などの損傷が確認できなかったことからロケットモータの推力異常の可能性が高いと思われた。

豊川での打上実験からおおよそ2か月後の2012年12月22日に、TR独自開発中だった推力計測が可能な地上燃焼試験装置が完成した。よって、この原因を究明すべくI-205の推力計測^{2,3)}を行った。その結果を図22に示す。

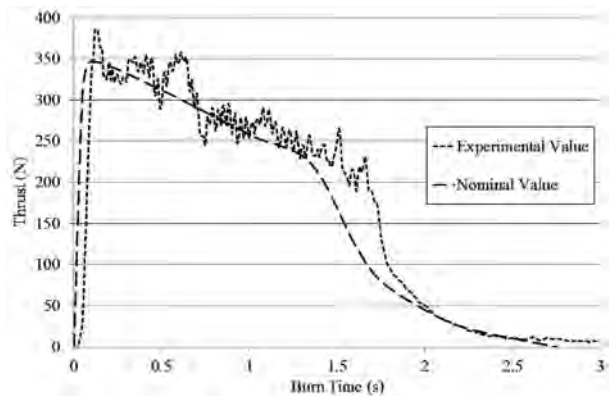


図22. I-205の公称値と実験値の比較

この結果からロケットモータの推力は公称値と大差のない十分な性能を発揮していることがわかる。

よって、現時点では解析できる手法はないが、根本的な空力設計値(抗力係数Cd値など)に問題がある可能性がある。

現在、Cd値は0.75一定として計算しているが実際は速度に応じて変化する値であり、現在のような固定

5. 打上結果の解析

図20で得られた気圧データから高度を計算した。その結果を図21に示す。

値ではない。今後、この値の正確性がどの程度飛行高度に影響を与えるパラメータなのかをロケット機体を風洞試験にかけて計測する必要があると考えられる。また、ピトー管などを用いて正確に機体獲得速度を計測することが出来ればより詳細な機体の状態を計算値と比較することが出来るため、今後の急務ともいえる。

6. 考察及び今後の展望

今回、豊川浄化センターにてX100I-1Bハイブリッドロケットの打上実験を実施し、到達高度は計算値より低いものの無事に搭載した“とっと君”を運び、放出、機体のパラシュートの展開に成功し、損傷なく機体回収、打上実験を成功することが出来た。

しかし、到達高度が計算よりも100mほど低く、モータ推力以外で今後の検証が必要である。

今後は、到達高度の正確性を高め、より高高度まで打上が可能なハイブリッドロケットの開発を目指し、高度なものづくり技術や計算を独自で学び学生にもものづくりの魅力を伝えて行けるよう仕事と両立しつつ努力を続けていく。

謝辞

社会人ロケット開発グループ「TOKAI ROCKETEERS」の創設から現在に至るまで、IfES職員の皆様には多大なるご理解とご支援を頂きました。また、ロケット機体の制作作業や実験機材の借用等では学生自主創造科学センター、WSP、和歌山大学ソーラーカープロジェクトに多大なるご協力を戴きました。

豊川での打上実験では、愛知県東三河建設事務所豊川浄化センター、IfES、PDASをはじめとしてセニオ・ネットワークス株式会社、JAXA宇宙教育センターの御厚意により的確な時間でのイベント運用や正確なロケット機体計測等の支援をして戴きました。

皆様の御理解、御協力で深く感謝し、社会人チームの在り方を常に考え、ものづくり社会の模範となれるよう今後も努力していきます。今後ともよろしく御願いたします。

引用・参考文献

- 1) 山下 洋一著「手作りロケット完全マニュアル(増補)」
- 2) 桑原 卓雄著「ロケットエンジン概論」
- 3) 瀧澤 美奈子著「ものをはかるしくみ」