

自己加圧式ハイブリッドロケットの推力一定制御

岡野裕^{*1}, 中田大将^{*1}, 夢田卓也^{*1}, 江口光^{*1}, 内海政春^{*1}

^{*1} 室蘭工業大学

Constant Thrust Control of Self-Pressurized Hybrid Rockets

Hiro Okano^{*1}, Daisuke Nakata^{*1}, Takuya Tada^{*1}, Hikaru Eguchi^{*1}, Masaharu Uchiumi^{*1}

^{*1} Muroran Institute of Technology

ABSTRACT

Experiments on constant thrust control of a self-pressurized hybrid rocket using a PID control system with combustion chamber pressure feedback were conducted. The transfer function model was identified from open-loop control combustion tests, and PID gains were determined by simulation. As a result, the thrust could be kept constant.

Keywords: Hybrid rocket, Throttling, PID control, Self-pressurization

概要

燃焼室圧をフィードバックする PID 制御系を使用し、自己加圧式ハイブリッドロケットの推力制御を行った。制御系の設計は開ループ制御の燃焼試験から伝達関数モデルを同定し、シミュレーションを行うことで PID ゲインを決定した。PID 制御系を使用した閉ループ制御の燃焼試験では振動を繰り返すハンチング現象が発生した。そのため試行錯誤的にゲイン条件を変更し、複数の燃焼試験を行った結果、推力を一定傾向とすることに成功した。

1. はじめに

酸化剤に液体を使用するハイブリッドロケットは酸化剤流量の制御により推力制御が可能となる。推力制御を行うことでハイブリッドロケットを使用した探査機や小型ロケットの軟着陸、再使用のほか、ロケットスレッドへの応用が可能となる。図 1は室蘭工業大学航空宇宙機システム研究センター白老実験場で運用されているロケットスレッドであり、酸化剤に亜酸化窒素を用いた自己加圧式のハイブリッドロケットが推進系に使用される。ロケットスレッドにおいて推力制御を行うことで加速度や速度の制御、宇宙機の着陸を模擬した実験が可能となり、実験条件の選択肢が広がるメリットがある。しかし、これらの実験系は構築難易度が高く、また自己加圧式ハイブリッドロケットの推力制御に関する研究はあまり行われていないのが現状である。そのため本研究では自己加圧式ハイブリッドロケット単体の燃焼試験を行い、推力制御について実現可能性を検討する。



図 1 白老実験場ロケットスレッド概観

先行研究として、山岸らはインジェクタ上流圧をフィードバックする制御系を用いて自己加圧式ハイブリッドロケットの推力制御を試みた¹⁾。フィードバックパラメータとしてインジェクタ上流圧を採用することで酸化剤の流し試験からゲインを決定できるメリットがあり、制御系の基本設計が確立された。しかし、インジェクタ上流圧一定条件下では燃料後退による燃料流量増加の影響を受け推力が増加するため、これを補償する必要がある。

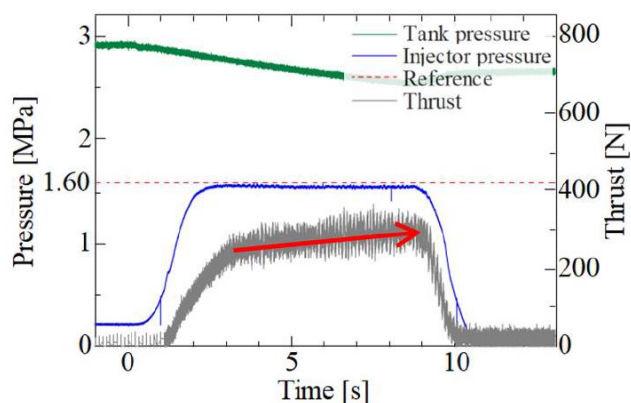


図 2 インジェクタ上流圧フィードバックによる推力制御の結果¹⁾

一般にロケットの推力は式(1)で表される。本研究で使用するノズルはグラファイト製でありノズルエロージョンの影響を受けにくく²⁾、また燃焼時間が4~10秒程度と比較的短いことからノズルスロート面積 A_t はほぼ一定だと考えられる。さらに推力係数 C_F が一定と仮定すると推力 F と燃焼室圧 P_c は比例する。

また推力を直接フィードバックする制御系と比較するとプリロードが必要なロードセルが不要であり、スペースの限られるロケットスレッドや宇宙機での使用を想定するとこの特徴は利点となる。

$$F = C_F A_t P_c \quad (1)$$

以上の背景から、本研究では燃焼室圧フィードバックを用いたPID制御により自己加圧式ハイブリッドロケットの推力制御を行った。制御系設計のための基礎試験として、開ループ制御(流調弁開度固定)の燃焼試験を行い、伝達関数モデルを求めた。さらに伝達関数モデルを使用し、制御シミュレーションを行い、ゲインを決定した。そのうえで閉ループの推力制御を燃焼試験において実施し、ゲイン調整に試行錯誤を経たものの、推力を一定傾向とすることに成功した。

2. 試験設備と制御系

2.1. 試験設備

図 3に試験装置の系統図を示す。酸化剤流量の制御には主弁(MOV)下流に設置した流量調整弁(CV)を用いる。流調弁の特性は表 1 に示す。

通常の燃焼試験ではMOVが開となると同時に亜酸化窒素が供給され燃焼を開始する。しかし、本実験シリーズでは流調弁開度の入力と燃焼室圧の応答をステップ応答とみなすため、MOVを事前に開け、流調弁開度0%の状態から制御を開始することで燃焼を開始した。

Run TankにはVent, Dump弁がついており、充填後もタンク内圧力の調整ができる。また必要に応じてGN₂を用いた外部加圧も可能である。そのほか系統図に示した圧力計や温度計の出力は常時モニターしており、試験時にはデータロガー(EDX-100A)を用いて5 kHzでデータの収録をしている。

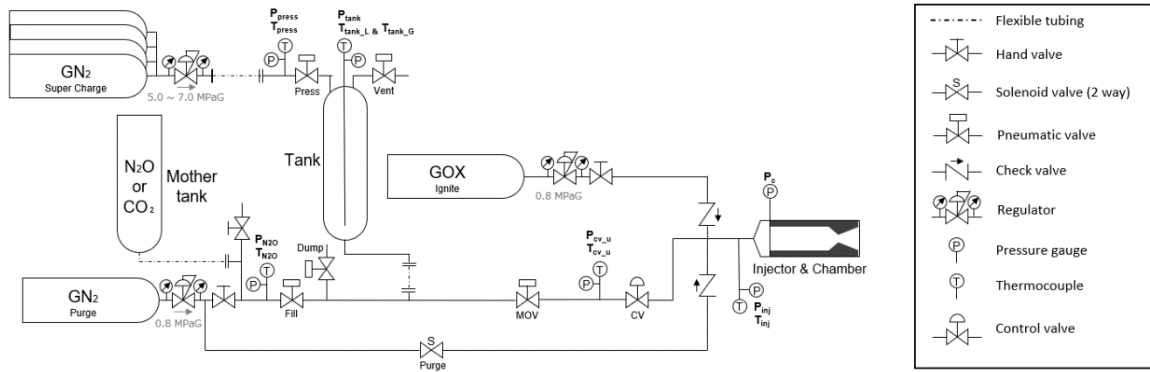


図 3 試験装置系統図

表 1 流調弁特性値

メーカー・型番	Fujikin AR-2000
Cv値	0.7
流量特性	リニア
入力電圧 [V]	1~5 (開度0~100%)

続いて、本実験で使用した燃焼器の概念図を図 4 に示す。燃料グレインは市販の亚克力パイプであり、内径60 mm、肉厚10 mmのものを使用している。またインジェクタはφ2.8 mm×8穴、ノズルにはスロート径28 mmのものを使用した。

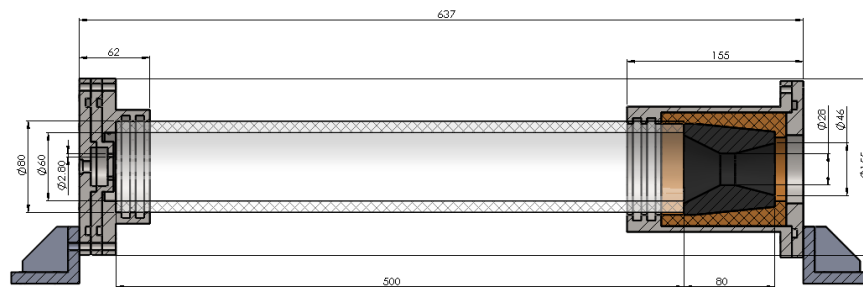


図 4 燃焼器概念図

2.2. 制御系

図 5 に試験で用いた制御系のブロック線図を示す。PID制御には計測制御ソフトLabVIEWを用いた。EDXで収録した燃焼室圧のデータを電圧に変換しLabVIEWへ入力することで燃焼室圧のフィードバックを行った。制御系は20 Hzで動作し、燃焼室圧は5点平均をとることで燃焼振動の制御系への影響を小さくしている。

PID controllerの出力は流調弁ドライバへの入力電圧範囲(1~5 V)を超える可能性がある。入力範囲を超えることによる流調弁ドライバの破損や流調弁が閉まりきることによる試験中の失火を避けるため、出力が開度10~100%にあたる1.4~5Vとなるようにリミッタを設けた。

積分動作や微分動作についてはLabVIEW上で積分時間、微分時間(単位:分)で指定する。そのため式(2)により積分ゲイン、微分ゲインを変換した値を入力した。なお試験により制御系の一部を変更しているが変更点については3章で示す。

$$T_i = \frac{K_p}{K_i} \div 60$$

$$T_d = \frac{K_d}{K_p} \div 60$$
(2)

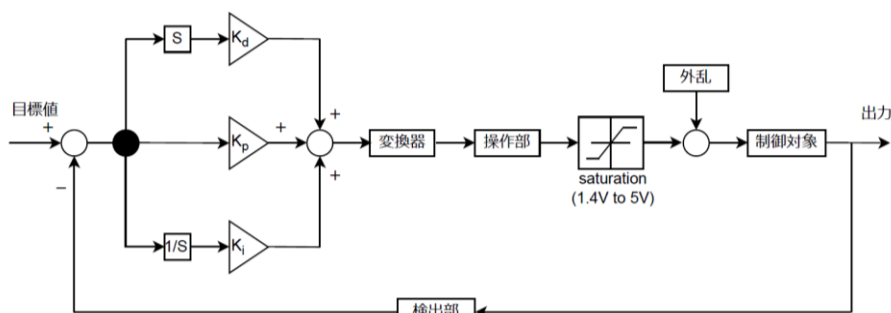


図 5 制御系のブロック線図

3. 制御系設計と基礎試験

3.1. 変換器の設計

3.1.1. 出力変換器

PID controllerの出力を電圧に変換するため、燃焼圧に対する流調弁入力電圧の関係を求める必要があり、これが図 5 の変換器にあたる。流調弁開度を複数種類設定し燃焼試験を行うことで関係式を求める。

3.1.2. 試験条件

流調弁開度が一定であったとしてもタンク内圧力の大きさにより燃焼圧は変動する。PID制御を行う本試験と制御系設計を行う予備試験の間でタンク内圧力を揃えるため、酸化剤充填後にベント操作を行い、供給圧力を3.0MPaに統一した。各試験での流調弁目標開度は表 2 に示す通りである。

表 2 基礎試験の試験条件

試験名	目標開度, %	供給条件
Fire42	100	外部加圧, 3.0 MPaG
Fire43	75	外部加圧, 3.0 MPaG
Fire45	100 → 50	外部加圧, 3.0 MPaG
Fire46	90 → 62 → 45	外部加圧, 3.0 MPaG

3.1.3. 結果と出力変換器の設計

各試験の燃焼圧の履歴を図 6 に示す。この結果から燃焼圧の平均値と入力電圧をプロットし、回帰計算を行った結果が図 7 である。R² 値が 0.95 を超えていることからこの式を採用し変換器とした。

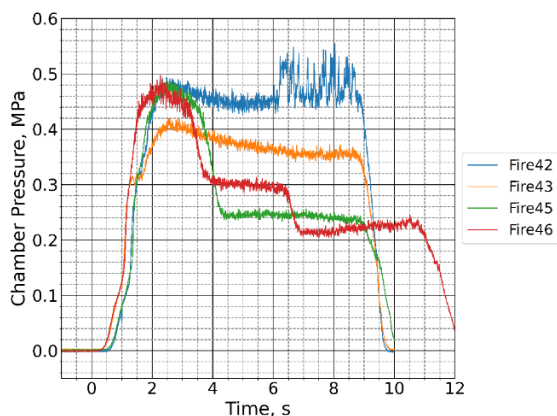


図 6 基礎試験の燃焼室圧履歴

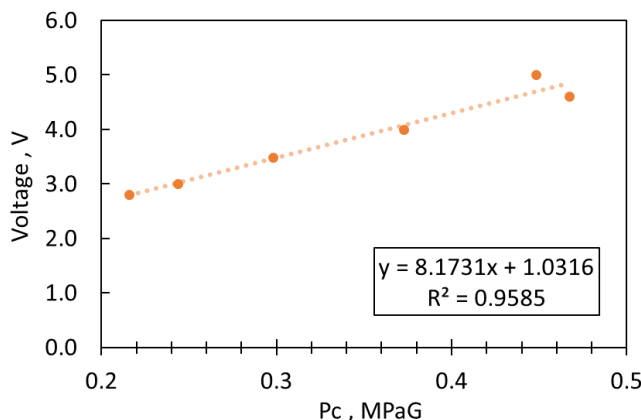


図 7 燃焼室圧と流調弁入力電圧の関係

3.2. 伝達関数の同定と PID ゲインの決定

3.2.1. 伝達関数

一般にPID制御系のブロック線図は図 8で表されるが、図中の伝達関数 $P(s)$ が分かっている場合には閉ループ伝達関数に対しシミュレーション上でステップ応答が計算できる。すなわち、シミュレーション上で系の安定余裕や応答を見ながらPIDゲインの設計が可能となる。そのため流調弁開度に対する燃焼室圧の伝達関数を開度75%試験(Fire43)のデータを用いてステップ応答法により求めることとした。伝達関数モデルは2次遅れ系+むだ時間系に近似する。なお、ステップ応答の計算にはPythonのControl Systems Libraryを用いた。

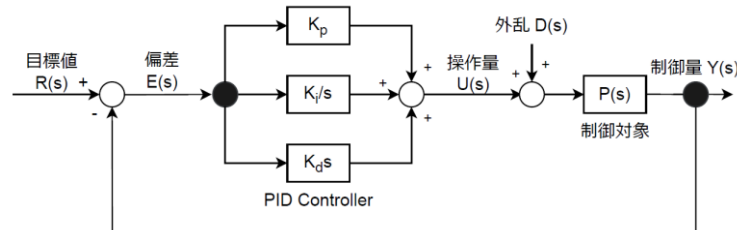


図 8 PID 制御系のブロック線図

3.2.2. フィットting

図 9にFire43のデータを正規化した燃焼室圧履歴と、パラメータを変化させフィッティングした伝達関数のステップ応答を示す。これにより固有角周波数 ω_n は1.45, 減衰比 ζ は0.5, むだ時間 L は0.3となり, 伝達関数が式(3)のように求まる。

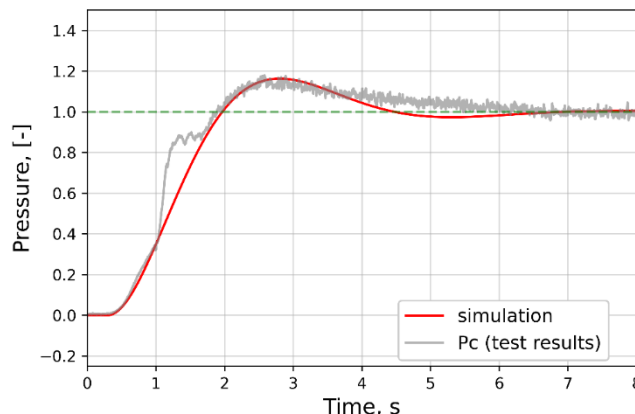


図 9 伝達関数のフィッティング

$$G_{43}(s) = \frac{2.1025}{s^2 + 1.45s + 2.1025} e^{-0.3s} \quad (3)$$

3.2.3. PID ゲイン

3.2.1 で求めた伝達関数を使用し, PID 制御系(図 8)のステップ応答をシミュレーションで求める。本試験で用いる制御系はプロセス制御に分類され, 安定余裕について指標が提案されており, ゲイン余裕については 3~10 dB 程度, 位相余裕については 20 deg 以上が目安とされている³⁾。シミュレーションで位相余裕, ゲイン余裕も同時に求めることで, 安定余裕に関する条件を満たし, 可能な限り整定時間の短いゲインを採用することとした。

PID ゲインの選定については, 試行錯誤的にシミュレーションを行うことで指針を満たすゲインを見つける。図 10 に選定した PID ゲインにおけるステップ応答を示す。安定余裕や整定時間, オーバーシュート量については表 3 に示すとおりとなった。

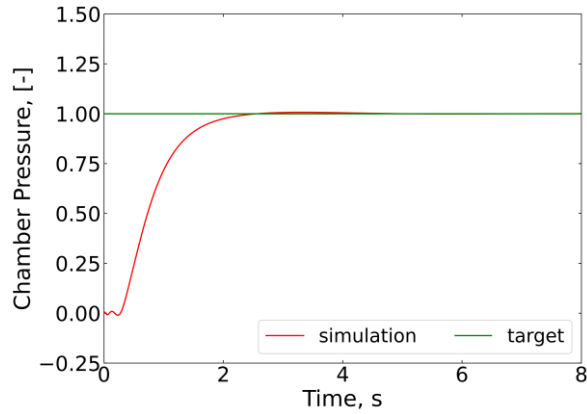


図 10 PID 制御系ステップ応答の計算結果

表 3 制御系設計の概要

	単位	数値
比例ゲイン K_p	-	0.8
積分ゲイン K_i	-	1.2
微分ゲイン K_d	-	0.57
Phase margin	deg	69.2
Gain margin	dB	4.4
予想整定時間	sec	1.8
予想オーバーシュート量	%	2

4. 結果

4.1. Fire48

3.2.3 で決定したゲインを用いて燃焼試験(Fire48)において、燃焼室圧をフィードバックした PID 制御による推力一定制御を行った。試験条件と結果について以下に示す。

4.1.1. 試験条件

制御系に関する試験条件は表 4 に示す。安定余裕に関するシミュレーション結果は表 3 と同様である。本試験のみ制御周期は 10 Hz である。酸化剤供給条件は自己加圧とし、充填後にベントを行うことで 3.0 MPaG のタンク内圧力で供給を開始した。

表 4 Fire48 試験条件

	単位	数値
比例ゲイン K_p	-	0.8
積分ゲイン K_i	-	1.2
微分ゲイン K_d	-	0.57
制御周期	Hz	10
目標燃焼室圧	MPaG	0.4
制御開始タイミング	-	燃焼開始時

4.1.2. 試験結果

図 11 に推力の時間履歴とその 50 点移動平均, 図 12 に圧力, 流調弁入力電圧 (V_{in} , 流調弁開度に対応させパーセント表示) の時間履歴を示した. 推力履歴を見ると時間とともに推力が低下していることとハンチングのような振動が発生していることが読み取れる. 図中の V_{in} が 100%付近で推移しているのに対し, タンク圧が減少を続けていることから, 操作部(流調弁)で制御が飽和し, 推力減少の原因になったと考えられる. またハンチングが発生した原因として, 燃焼室圧の傾きが変化するとき V_{in} が大きく変化していることから, 微分ゲインが過大であると考えた.

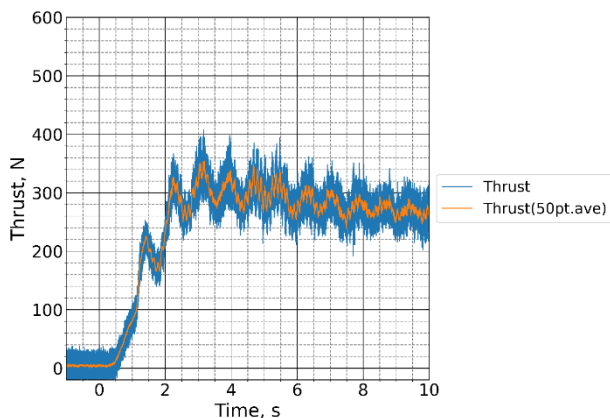


図 11 Fire48 推力履歴

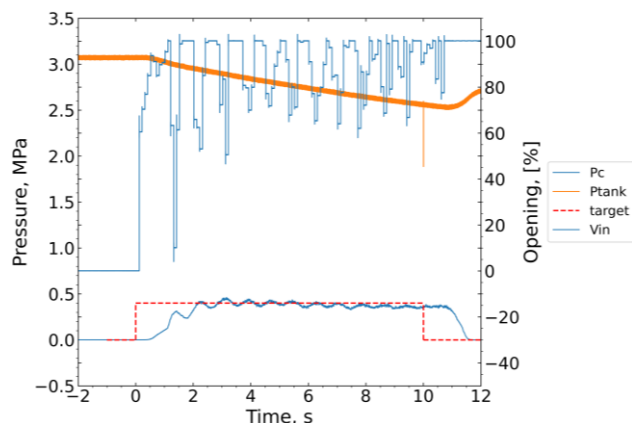


図 12 Fire48 圧力と入力電圧の履歴

4.2. Fire49

Fire48 の燃焼試験の結果から目標燃焼室圧, 微分ゲインを小さくすることが有効であると考えたため, Fire49 として再度 PID 制御による燃焼試験を行った.

4.2.1. 試験条件

制御系に関する条件は表 5 の通りであり, Fire48 と比較して微分ゲインと目標燃焼室圧が小さい条件下で試験を行った. 酸化剤供給条件については変更せず, 自己加圧条件で供給開始時のタンク内圧力が約 3.0 MPaG となるように調整した.

表 5 Fire49 試験条件

	単位	数値
比例ゲイン K_p	-	0.7
積分ゲイン K_i	-	0.69
微分ゲイン K_d	-	0.12
制御周期	Hz	20
目標燃焼室圧	MPaG	0.28
制御開始タイミング	-	燃焼開始時

4.2.2. 試験結果

図 13~図 15 に Fire48 の試験結果を示す. 推力履歴を見ると試験後半で推力が一定化していることが分かる. Fire48 の試験結果と比較し, 推力の単調上昇, 減少が発生していないことや, 流調弁入力電圧 V_{in} が 60%前後で推移していることから操作部は飽和していないことが分かる. そのため, 推力一定化に対しては推力が犠牲になるものの, ある程度目標燃焼室圧を下げるのが有効だと考える. またハンチング現象についても試験後半でおさまっており, 振幅も Fire48 より小さくなっているが, 微分ゲインを小さく設定したことが有効に働いた可能性がある. しかし, 燃焼開始後約 5 秒間 ON-OFF 制御のような出力をしていることから比例ゲインについてもさらに小さく設定する必要があると考える.

図 15 はシミュレーションと実験値の比較であるが、これを見るとハンチングの有無やオーバーシュート量が一致していないことが分かる。原因として伝達関数モデルの精度不足が考えられる。

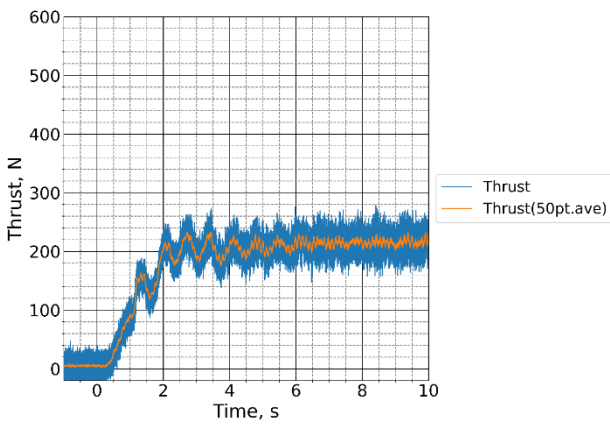


図 13 Fire49 推力履歴

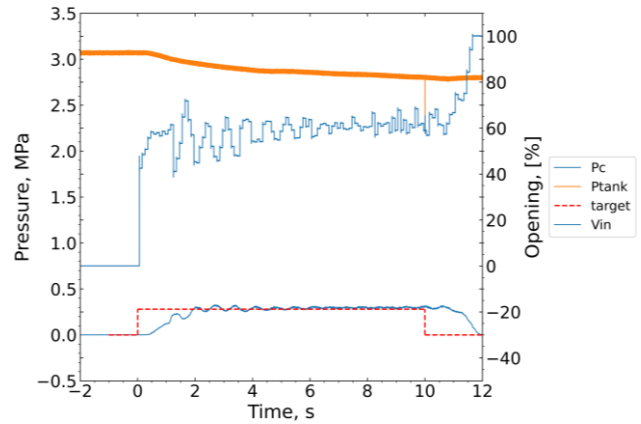


図 14 Fire49 圧力と入力電圧の履歴

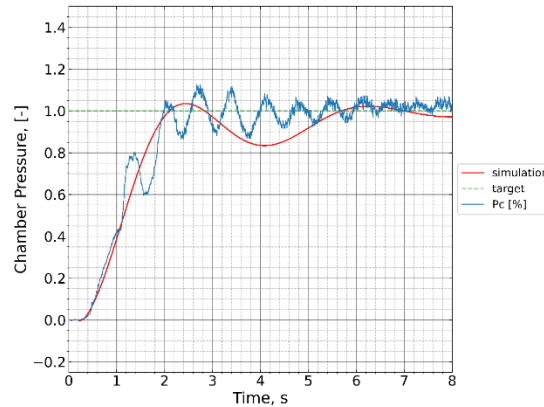


図 15 Fire49 試験結果とシミュレーションの比較

4.3. Fire55

Fire48 試験において、操作部の飽和が制御結果に影響を及ぼす可能性が判明した。そのため、Fire49 とは別に操作部の飽和対策をとった試験を Fire55 として行うこととした。また Fire49 の試験結果から比例ゲインを小さくすることがハンチング対策に有効だと考えたためゲイン条件も変更した。

4.3.1. 試験条件

表 6 に Fire55 試験の制御系に関する試験条件を示す。操作部の飽和対策のため、PID 制御系の一部を変更し、図 16 に示すような制御系を用いた。積分動作は偏差の積分値に対する出力をするため、操作部が飽和したときや飽和状態から解放されるときに制御性能が低下する⁴⁾。この試験では、飽和時に小さな積分ゲインを使用し積分動作を弱めることで飽和特性の改善を試みた。また、PID 制御開始のタイミングを燃焼開始と同時にすると偏差が大きく制御部の飽和につながるため、燃焼開始から 1 秒経過した時点で PID 制御を開始するように設定した。

酸化剤供給条件は外部加圧を使用し、タンク内圧力は 3.0 MPaG とした。外部加圧を使用したのは外気温が低下し、自己加圧では十分なタンク圧を得られなかったためである。なお、外部加圧を使用しても燃焼室圧が減少することを制御系設計の基礎試験(図 6)で確認しており、本試験の目的を果たすには影響がないと判断した。

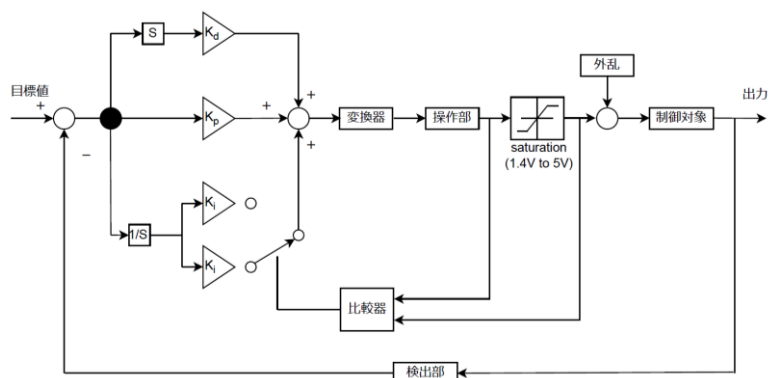


図 16 Fire55 に使用した制御系

表 6 Fire55 試験条件

	単位	数値
比例ゲイン K_p	-	0.55
積分ゲイン K_{i1}	-	0.71
積分ゲイン K_{i2}	-	0.35
微分ゲイン K_d	-	0.1
制御周期	Hz	20
目標燃焼室圧	MPaG	0.28
制御開始タイミング	-	燃焼開始 1 秒後

4.3.2. 試験結果

Fire55 の試験結果を以下に示す。推力(図 17), 燃焼室圧履歴(図 18)を見ると後半の約 5 秒間で安定し, 目標値付近で一定となっていることが読み取れる。偏差を小さくするため燃焼開始後 1 秒までは 100%の電圧を入力したが, 狙い通り PID 制御開始時の偏差はほぼ 0 MPa であった。しかし, PID 制御開始後, 大きなアンダーシュートが発生した。これは流調弁の実際の開度が入力電圧 V_{in} に追いついていないことから発生した現象だと考える。また燃焼開始 3 秒以降, V_{in} が細かく振動し, ジッターのような出力をしている。ジッターと推力の細かな振動との関係は不明だが, 燃焼振動により偏差の微分の符号が細かく変化したことによる現象だと考えられる。そのため, 燃焼振動を伴うハイブリッドロケットの推力制御では PID 制御より微分ゲインをカットした PI 制御のほうが適切である可能性がある。

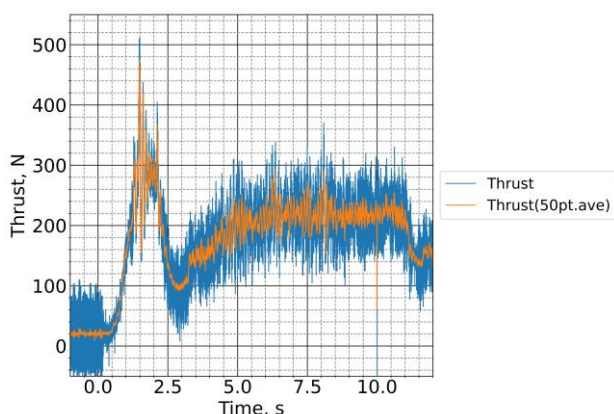


図 17 Fire55 推力履歴

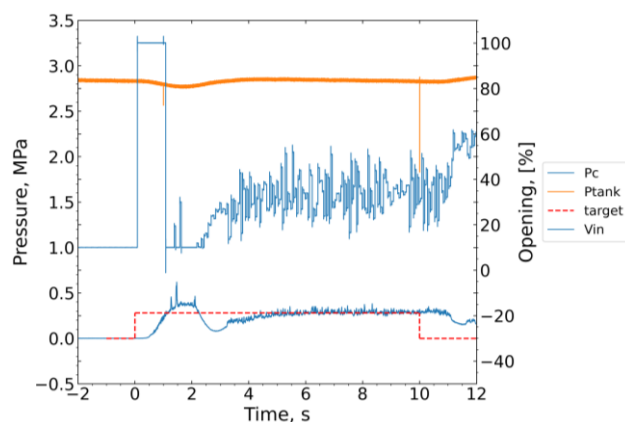


図 18 Fire55 圧力と入力電圧の履歴

5. まとめと今後の課題

酸化剤に亜酸化窒素を用いた自己加圧式ハイブリッドロケットにおいて燃焼室圧をフィードバックする PID 制御系を用いて推力一定制御を行った。ハンチングの発生など課題が残るものの、自己加圧供給による推力低下を補償し、推力を一定傾向とすることができた。また、制御系の設計について比例・微分ゲインを小さめに設定することや操作部を飽和させないような工夫が必要であることが分かった。ジッターの発生を抑えるため PI 制御を行うことや PID 制御の始め方の工夫など今後取り組むべき課題も見つかった。

将来ロケットスレッドや着陸機での使用を想定した推力制御を行うにあたり、シミュレーション精度の向上も求められる。シミュレーションを実施するにあたり、ステップ応答法による伝達関数モデルの同定をしたが周波数応答を取り入れるなど、伝達関数モデルの精度向上も欠かせない。

参考文献

- 1) 山岸晃己, 中田大将, 安田一貴ら, “自己加圧式ハイブリッドロケットの PID 制御によるスロットリング,” 第 4 回ハイブリッドロケットシンポジウム, 2022.
- 2) 田原鴻一, 諸星宏樹, 鎮目夢玄ら, “低損耗・低コストノズルの開発,” 平成 29 年度宇宙輸送シンポジウム, 2018.
- 3) (社)実践教育訓練研究協会, “機械の制御-理論と実際-”, 工業調査会, 1999.
- 4) 須田信英, “第 4 回 PID 制御,” EICA 第 9 巻第 3 号, 2004.