

蠕動運動型ラバー混合器を用いた  
コンポジット推進薬捏和技術の研究

岩崎 祥大

博士（工学）

総合研究大学院大学

物理科学研究科

宇宙科学専攻

平成30（2018）年度

# 蠕動運動型ラバー混合器を用いた コンポジット推進薬捏和技術の研究

総合研究大学院大学 物理科学研究科  
宇宙科学専攻 後藤研究室

岩崎 祥大  
学籍番号 20131153

## 目次

第 1 章	序論	6
1.1	はじめに	6
1.2	小型宇宙機を用いた宇宙産業の隆盛	7
1.2.1	小型人工衛星を用いた宇宙利用の拡大	7
1.2.2	活発となる小型ロケット開発	9
1.2.3	小型ロケットの打ち上げコスト低減に向けた取り組み	12
1.3	固体推進系の製造技術	14
1.3.1	固体ロケットモータ・コンポジット推進薬	14
1.3.2	コンポジット推進薬製造プロセス	16
1.3.3	コンポジット推進薬捏和技術開発	17
1.3.4	SRM・コンポジット推進薬の製造量と製造コストの関係	21
1.4	コンポジット推進薬連続捏和技術への期待と課題	24
1.4.1	バッチ式推進薬製造プロセスの課題	24
1.4.2	推進薬連続捏和技術の長所と短所	25
1.5	安全な推進薬捏和が可能な連続式ミキサの調査	26
1.5.1	安全な連続式推進薬ミキサの条件	26
1.5.2	誤着火源の無い連続捏和機構の探索：腸管蠕動運動による捏和	28
1.5.3	消化管蠕動運動の生体模擬ロボティクスに関する先行研究	32
1.5.4	腸管規範の安全な連続式ミキサの着想	35
1.6	蠕動運動型ポンプを用いた捏和試行実験	37
1.6.1	試行実験目的	37
1.6.2	実験	37
1.6.3	蠕動運動型ラバーミキサ (PRM) による捏和の可能性	39
1.7	PRM の推進薬ミキサ適用に向けて検討すべき事項	40
1.7.1	検討内容	40
1.7.2	各章の構成	41
1.8	本章のまとめ	42
第 2 章	推進薬捏和に向けた PRM の装置改良	43
2.1	熱交換機構の具備	43
2.1.1	PRM セグメント接続式熱交換ディスク	44
2.1.2	熱交換ディスク加温性能評価実験	44
2.1.3	熱交換ディスクの加温性能	46

2.2	内側ゴムチューブ素材改良による組成安定性の向上 .....	48
2.2.1	可塑剤の内側ゴムチューブへの移行 .....	48
2.2.2	内側ゴムチューブの素材候補 .....	48
2.2.3	内側ゴムチューブ素材候補の物性試験・耐油試験 .....	49
2.2.4	内側ゴムチューブ素材候補の SP 値比較 .....	50
2.2.5	内側ゴムチューブ素材の選定 .....	50
2.3	内側ゴムチューブひずみ特性向上による PRM 耐久性の向上 .....	51
2.3.1	内側ゴムチューブ閉塞と内側ゴムチューブひずみの幾何学的相関 .....	51
2.3.2	引張試験による内側ゴムチューブ材料のひずみ特性取得 .....	53
2.3.3	PRM 耐久試験 .....	56
2.3.4	内側ゴムチューブ材料の選択 .....	58
2.4	本章のまとめ .....	59
第 3 章	PRM の推進薬捏和機構に関する検討 .....	60
3.1	PRM の捏和機構検討の手順 .....	60
3.2	PRM セグメントの蠕動収縮動作 .....	60
3.2.1	蠕動収縮動作によるポンプ機能に関する先行研究 .....	60
3.2.2	蠕動収縮による押し出し .....	64
3.2.3	PRM セグメント蠕動収縮実験 .....	65
3.2.4	試料の物理特性と押し出し率の相関 .....	68
3.2.5	圧縮空気チャンバ膨張による試料の圧縮 .....	70
3.3	捏和時に PRM 蠕動運動が与える作用 .....	72
3.4	PRM 蠕動運動による推進薬捏和進行の実証 .....	73
3.4.1	実証実験 .....	73
3.4.2	PRM 蠕動運動による推進薬の様子の変化 .....	75
3.4.3	試料の X 線 CT スキャン画像 .....	75
3.4.4	PRM 蠕動収縮による推進薬捏和の進行 .....	77
3.5	本章のまとめ .....	78
第 4 章	適正捏和条件の抽出 .....	79
4.1	効率良く捏和を行う条件 .....	79
4.2	適正な印加圧縮空気圧の検討 .....	79
4.2.1	セグメント蠕動収縮による押し出しと印加圧縮空気圧の相関 .....	79
4.2.2	捏和実験 .....	80
4.2.3	捏和した試料の粘度分散と印加圧縮空気圧との相関 .....	81
4.2.4	適正な印加圧縮空気圧に関する考察 .....	82

4.3	適正な推進薬仕込み量の検討 .....	83
4.3.1	適正な推進薬仕込み量の推測 .....	83
4.3.2	実推進薬捏和実験 .....	84
4.3.3	プラネタリミキサを用いた比較用推進薬の製造 .....	86
4.3.4	X線非破壊検査 .....	87
4.3.5	ストランド燃焼試験 .....	87
4.3.6	各仕込み量における捏和後の PRM 内部・硬化後の推進薬の様子 .....	88
4.3.7	X線非破壊検査結果 .....	90
4.3.8	仕込み量と燃焼速度の関係 .....	92
4.3.9	推進薬の適正仕込み量に関する考察 .....	94
4.4	本章のまとめ .....	94
第5章	PRM による推進薬捏和の実証 .....	95
5.1	推進薬グレイン製造に要する捏和時間の探索 .....	95
5.1.1	実推進薬捏和実験 .....	95
5.1.2	X線非破壊検査 .....	96
5.1.3	ストランド燃焼試験 .....	96
5.1.4	各捏和時間における捏和後の PRM 内部・硬化後の様子 .....	96
5.1.5	X線非破壊検査結果 .....	98
5.1.6	捏和時間と燃焼速度の関係 .....	100
5.1.7	推進薬捏和に要する時間に関する考察 .....	103
5.2	推進薬グレインの製造 .....	103
5.2.1	推進薬グレイン製造実験 .....	103
5.2.2	プラネタリミキサを用いた比較用推進薬グレインの製造 .....	106
5.2.3	X線非破壊検査 .....	106
5.2.4	ストランド燃焼試験 .....	106
5.2.5	製造した推進薬グレインの形状 .....	106
5.2.6	X線非破壊検査結果 .....	107
5.2.7	ストランド燃焼試験結果 .....	108
5.3	PRM の推進薬捏和性能 .....	110
5.4	本章のまとめ .....	110
第6章	総括 .....	111
付録	113	
A.1	固体推進薬 .....	113
A.1.1	推進薬原料 .....	113

A. 1. 2 推進薬の製造性 .....	114
A. 2 PRM の蠕動運動と収縮動作間隔の関係 .....	115
A. 2. 1 収縮動作間隔の設定 .....	115
A. 2. 1 急速排気弁による収縮動作間隔の高速化 .....	115
A. 3 コンポジット推進薬の X 線 CT スキャン .....	118
A. 2. 1 X 線 CT スキャンの原理 .....	118
A. 2. 1 X 線 CT 画像の輝度と推進薬原料成分の関係 <sup>[81]</sup> .....	119
引用	120
謝辞	132

# 第1章 序論

---

## 1.1 はじめに

2010年以降、急速に民間企業による宇宙機器開発および宇宙利用ビジネスが盛んとなり、異業種メーカやベンチャー企業の参入が相次いでいる。幾度も失敗続きであった民間新規参入企業による宇宙開発（いわゆる New Space）が近年再び急激に隆盛してきた素地には、小型衛星（衛星重量数 100 kg～数 kg）の製造・運用技術の発展がある。十分ビジネスを担うデータ取得・通信が可能となった小型衛星の観測・通信技術発展はもちろんであるが、近年のビッグデータ活用技術および AI・IoT 技術の発展と結びつき、新たな宇宙ビジネス形態を生み出していることが大きい<sup>[1]</sup>。投資や政策整備も進んでいる。投資では当初の出し手は起業家の自己資産・エンジェル投資・ベンチャーキャピタルが主流であったが、宇宙開発と関わりの小さかった機関投資家・異業種企業が投資に動いている。政策としてもこの小型衛星による宇宙利用は宇宙機の民需を拡大しうるものとして、宇宙活動法の施行や活発な宇宙産業支援が行われている。

小型衛星の民間開発・商業利用化が進む中、ロケットによる宇宙輸送の変化に目を向けてみたい。特筆すべきは New Space の発展に呼応し、小型衛星を主衛星とした打ち上げを行う小型ロケットに新たな需要が生まれたことである。今後発展が期待される小型ロケットによる新しい衛星打ち上げ需要を巡って、新規のロケットメーカが続々と参入してきている。2018年初頭はついに小型ロケットの試験的な打ち上げが始まった。2018年1月21日には Rocket Lab 社の小型ロケット Electron が小型衛星の軌道投入に成功した。2月3日には宇宙航空研究開発機構が SS-520-5 号機による超小型衛星衛星打ち上げ実験を行い、衛星「たすき (TRICOM-1R)」の打ち上げに成功した。2019年以降も複数の小型ロケットの打ち上げが計画されている。

これら新規参入のロケットメーカに多く共通するのは、規模の小さいロケットを開発するに留まらず、最新技術、特に最新量産技術を積極的に導入して製造コスト低減に取り組まれている点である。ビジネス向けの小型衛星をより安く、また希望の軌道へ、そして時として大量に打ち上げなければならないため、打ち上げコスト低減に向けた開発競争は激化すると考えられる。このような中でサプライチェーンマネジメントも考慮した製造プロセスの技術刷新はその解決策として有効である。

一方で、製造コスト低減に向けて例え現行の最新技術を導入したとしても、商業として小型ロケットによる衛星打ち上げサービスを民需中心で成立させるためにはまだ不十分である。更なるコスト低減を生み出すには、ロケット製造コストが嵩む原因を抜本的に解決策するような技術であり、かつ一般産業での応用範囲も広いものを新規に提案していくことが重要となる。例えば固体ロケットの推進薬（固体推進薬）でいえば、固体推進薬が火薬類の一つであるがゆえに製造は効率よりも安全性が優先される。推進薬製造プラントの安全性を劇的に向上させつつ、同じようなプラント規模でも製造量も向上しうるような新しいアイデアが実現すれば、既存の技術に拘らずとも十分製造コスト低減が期待できる。

本研究は推進薬製造プロセスの中でも厳しい安全管理が求められる操作の一つである酸化剤粒子とバインダの捏和（以下推進薬捏和）において、根本的に安全な推進薬捏和ができるミキサを新たに見出し、実際に適用しうるかを検証したものである。もちろん適切な推進薬取り扱いが絶対であるが、不具合があろうとも推進薬誤着火には至らない、加えて効率よく推進薬を製造できるようなミキサを用いれば、推進薬製造コストを大きく低減させることができる可能性がある。

## 1.2 小型宇宙機を用いた宇宙産業の隆盛

### 1.2.1 小型人工衛星を用いた宇宙利用の拡大

人工衛星は静止軌道や地球周回軌道など様々な高度の軌道に投入され、宇宙空間において情報通信や地球観測などを担う。人工衛星を利用した宇宙産業は今やインフラとも強く結びついており、今後もさらなる発展が期待される。その人工衛星の中でも近年打ち上げ数が急速に増加しているのは小型衛星である。図 1.1 は 2000 年から 2016 年における 600 kg 以下の小型衛星の年間打ち上げ数である<sup>[2]</sup>。2013 年から打ち上げ数は急増しており、またその内多くは CubeSat と呼ばれる数 kg の人工衛星である。

Janovsky らは人工衛星の軌道・用途ごとに 2020 年から 2030 年における人工衛星の重量と年間打ち上げ数を予測した（表 1.1）。打ち上げ数の成長が見込まれたのは、低軌道への 700 kg 以下の小型衛星である。用途としては地球観測衛星や通信衛星群コンステレーションなどであり、その中でも特に 100 kg 以下の人工衛星は打ち上げ数の大きな増加が予測された<sup>[3]</sup>。Janovsky だけでなく、宇宙機産業界では概ねこのように近年急増した小型衛星の打ち上げ数が今後も同等の打ち上げ数を維持すると予想している。

この背景には、既に一定の産業規模を持つ通信や測位技術が存在している上に、ビッグデータ・IoT などの活用が商業としての新たな宇宙利用を生み出しているためと考えられている。例えば数 10 kg の超小型衛星を用いた数 10 基の衛星群コンステレーションによる地球観測や通信、Cubesat による通信技術実証などが挙げられる<sup>[4]</sup>。



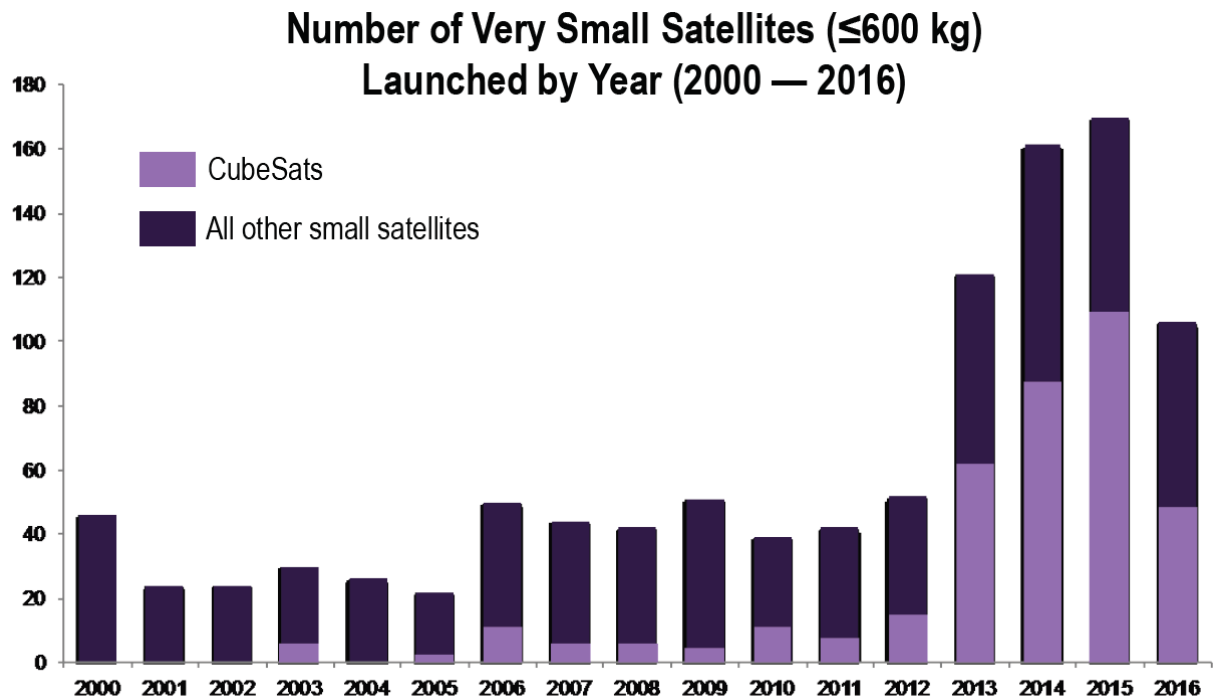


図 1.1 2000 年から 2016 年における小型衛星 ( $\leq 600$  kg)の年間打ち上げ数<sup>[2]</sup>

表 1.1 人工衛星の規模・年間打ち上げ数の予測 (2020-2030 年) <sup>[3]</sup>

軌道	用途	規模 [kg]	年間打ち上げ数 [機]
深宇宙	深宇宙探査	—	1 ~ 2
静止軌道	通信・放送 (商用)	3500 ~ 6000	~ 25
	地球観測		
中軌道	測位	800 ~ 2500	8 ~ 16
低軌道	地球観測	100 ~ 500	35 ~ 48
	通信	100 ~ 1500	~ 50
低軌道 (< 100 kg)	通信, 測位 地球観測など多様	< 100	150 ~ 235

## 1.2.2 活発となる小型ロケット開発

現在、小型衛星、特に超小型衛星はほとんどが大型主衛星の相乗り衛星として打ち上げられている。これによって打ち上げコストの削減を行っているが、主衛星の投入される軌道や打ち上げ時期が優先されるため制約も大きい。そこで、小型で安価ながら小型衛星を主衛星として打ち上げるロケットが求められている。

表 1.2 は低軌道 (Low earth orbit, 以下 LEO)・太陽同期軌道 (Sun synchronous orbit, 以下 SSO) へ 2000 kg 以下の重量の人工衛星の打ち上げを行うロケット (名に\*印があるロケットは開発中のもの) である。運用中および 2018 年に打ち上げ成功したロケットは 12 種類、開発中 (2015 年に打ち上げ失敗した Super Strypi を含む) のロケットは 27 種類ある。また、打ち上げの予定はまだ無く表 1.2 に記載していないものの、エンジンの地上燃焼試験など開発が行われているロケットも Skyrora XL など複数存在する。

運用中のロケットには Minotaur や Pegasus, Vega, Soyuz, PSLV といった打ち上げ実績の豊富なロケットに加えて、イプシロン、長征 6 号といった近年着実に成功を重ねるロケットが続く。また小型ロケットの運用・開発は世界的に行われており、開発中のロケットメーカーはほぼ新規参入のベンチャー企業となっている。信頼性の高いロケットが運用されている中で、さらに数多く新規参入が促されており、小型ロケット開発市場の高い注目度が分かる。

表 1.2 における運用中のロケット (\*印がついていないもの、また実験機である SS-520-5 号機を除く) の推進系に注目すると、Vega・イプシロンなど 11 種類中 7 種類のロケットに固体推進系が採用されている (PSLV-XL に関しては第一段・第三段が固体推進系)。これは、固体推進系の特徴が小型衛星を輸送する小型のロケットに適しているためである。実用化されているロケットの推進系は固体推進薬を用いる固体推進系、液体推進剤を用いる液体推進系の 2 つに分けられる。2 つの推進系の一般的な特徴比較を表 1.3 に示す。固体推進系は比推力  $I_{sp}$  が液体推進系と比較して低く、推力制御が難しい、モータ (エンジン) の再着火ができない、フライトモータの試験ができないなどの点はあるが、短い期間と少ないコストで開発を行うことができる。加えて、推力密度・推進薬密度も大きく、モータ構造も簡素であり、構造効率が良い。そのため、固体推進系は小型衛星を輸送する小型ロケットの推進系に適している。また、高い推進薬貯蔵性と簡単な打ち上げ前点検は、衛星打ち上げの大量受注に適している。

表 1.2 小型衛星打ち上げロケット

ロケット名	開発国	組織	打上能力 [kg]	推進系
Minotaur IV <sup>[4]</sup>	アメリカ	Orbital ATK	LEO: 1827	固体
PSLV-XL <sup>[5]</sup>	インド	ISRO	700 km SSO: 1750	液体/ 固体
Rokot <sup>[5]</sup>	欧州	Eurockot	700 km LEO:1580	液体
Vega <sup>[6]</sup>	欧州	Ariane Space	LEO: 1500	固体
Soyuz-2.1v <sup>[5]</sup>	ロシア	TsSKB	LEO: 1400	液体
長征 6 <sup>[5]</sup>	中国	SAST	SSO: 1000	液体
*Minotaur C <sup>[7]</sup>	アメリカ	Orbital ATK	400 km LEO: 1458	固体
*Athena IIc <sup>[5]</sup>	アメリカ	Orbital ATK	700 km LEO: 1450	固体
イプシロン <sup>[8]</sup> (強化型)	日本	IHI エアロスペース	SSO: 570 (250 km×500km)	固体
Shavit	イスラエル	IAI	LEO: 800	固体
Minotaur I <sup>[4]</sup>	アメリカ	Orbital ATK	LEO: 584	固体
Pegasus XL <sup>[9]</sup>	アメリカ	Orbital ATK	LEO: 450	固体
*Super Strypi <sup>[5]</sup>	アメリカ	Aerojet Rocketdyne, Sandia, Univ. Hawaii	400 km LEO: 250 (※失敗)	固体
Electron <sup>[10]</sup>	アメリカ	Rocket Lab	LEO: 150	液体
SS-520-5	日本	JAXA	LEO: 4	固体
*Athena Ic <sup>[11]</sup>	アメリカ	Lockheed Martin	500 km LEO: 760	固体
*M-OV <sup>[5]</sup>	アメリカ	Mishaal Aerospace	LEO: 454	ハイブ リッド
*Firefly Alpha <sup>[5]</sup>	アメリカ	Firefly	LEO: 454	液体
*SOAR <sup>[5]</sup>	スイス	Swiss Space Systems	LEO: 250	液体
*Tronador <sup>[5]</sup>	アルゼンチン	CONAE	LEO: 250	液体
*LauncherOne <sup>[5]</sup>	アメリカ	Virgin orbit	LEO: 225	液体
*Demi-Sprite <sup>[5]</sup>	アメリカ	Scorpius Space Launch	LEO: 160	液体
*Blooster <sup>[5]</sup>	スペイン	Zero 2 Infinity	600 km SSO: 75	液体
*Neutrino I <sup>[11]</sup>	カナダ	Open space orbital	LEO: 50	ハイブ リッド
*NEPTUNE N5 <sup>[12]</sup>	アメリカ	Interorbital Systems	310 km SSO: 50	液体
*Sagittarius Space Arrow <sup>[11]</sup>	スペイン	Celestia Aerospace	600 km LEO: ~40	固体
*GO Launcher 2 <sup>[5]</sup>	アメリカ	Generation Orbit	425 km LEO: 40	液体/ 固体

(次ページに続く)

*Nanosat Launch Vehicle <sup>[11]</sup>	アメリカ	Garvey Spacecraft Corp.	450 km LEO: 20	液体
*Taymyr <sup>[11]</sup>	ロシア	Lin industrial	LEO: 9	液体
*CubeCab <sup>[11]</sup>	アメリカ	CubeCab	400km LEO: 5	ー
*LS-1 <sup>[13]</sup>	中国	Landspace	500 km SSO: 400	固体
*Eris <sup>[14]</sup>	シンガポール	Gilmour space launch services	LEO: 400	ハイブリッド
*Intrepid-1 <sup>[15]</sup>	アメリカ	Rocket crafters	500 km SSO: 376	ハイブリッド
*Star Lord <sup>[16]</sup>	アメリカ	RocketStar	LEO: 300	液体
*Kuaizhou	中国	CASIC	LEO: 300	固体
*Vector-H <sup>[17]</sup>	アメリカ	Vector space	LEO: 150	液体
*Hass 2C <sup>[18]</sup>	ルーマニア	ARCA Space Corp.	LEO: 100	液体
*Vector-R <sup>[19]</sup>	アメリカ	Vector space	LEO: 66	液体
*North Star <sup>[20]</sup>	ノルウェー	Nammo	650 km LEO: 10	固体

表 1.3 推進系の比較

項目	固体	液体
エンジン構造	簡素	複雑
比推力 $I_{sp}$	小さい (~285 s)	大きい (350 ~ 450 s)
推進薬密度	大きい	小さい
推力密度	大きい	小さい
推力制御	難しい	可能
エンジンの停止・再着火	不可能	可能
フライトエンジンの試験	不可能	可能
推進剤の貯蔵性	長い	短い (一部除く)
打ち上げ前点検	簡単	難しい
開発期間	短い	長い
開発コスト	小さい	大きい

### 1.2.3 小型ロケットの打ち上げコスト低減に向けた取り組み

小型衛星に関してはコンステレーション運用などを見据え衛星機体の量産・規格化が進んでおり、これによってコスト低減が進んでいる。2016 年における、世界全体の民需（政府・大学からの官需以外）の衛星製造利益は 139 億ドル、小型衛星を含む衛星打ち上げ数は 126 基、ロケットによる民需の打ち上げ利益は 55 億ドル、ロケット打ち上げ数は 64 基であった<sup>[2]</sup>。この場合、衛星 1 基当たりの製造利益平均が 1.10 億ドルに対して、ロケット 1 機当たりの打ち上げ利益平均は 0.86 億ドルとなった。また 2010 年から 2016 年まで衛星 1 基当たりの製造コストは概ね減少傾向にある一方で、ロケット 1 機当たりの打ち上げコストは概ね横ばいの傾向であった<sup>[21]</sup>。衛星の製造コスト低減が進む中、ロケット打ち上げコスト低減がさらに求められると予想される。

新規参入のロケットメーカーが開発中のロケットは、既に通常運用されているロケットと比較すると今後もコスト面で改善に努めなければならない現状となっている。表 1.4 に Electron（※2018 年 1 月 21 日に打ち上げ初成功）・LauncherOne・GO Launcher・Demi-Sprite と打ち上げ実績の高い運用中のロケット、PSLV-XL・Rokot・Vega の衛星単位重量当たりの LEO 打ち上げコストを示す<sup>[5]</sup>。開発中の 4 つのロケットはすべて、運用中のロケット 3 つと同等程度かそれ以上となっている。

当然、各メーカーはそれぞれ打ち上げコスト低減に向けて様々な取り組みを行っている。コスト低減への取り組みを二つに大別すると、ロケット製造技術の革新・ロケットの再使用化に分けられる。Space X 社の Falcon 9・Falcon Heavy のような大型で液体推進系のロケットの場合、ロケットの再使用化が近年活発となっている。一方、表 1.2 で取り上げたような小型ロケットはロケット 1 機の製造に係るコストを当然大型ロケットよりもある程度低く抑えることができるが、さらに製造工程を減らす、部品に量産品を用いるなど製造コストを抑える取り組みに積極的である。特に Electron・Skyrora XL は機体本体に炭素繊維強化プラスチックを用いて軽量化し、エンジンの製造を 3D プリンタで行っている。3D プリンタを用いることでエンジンシステムの部品数を減らし、さらに製造の自動化・量産化が可能となる。

小型ロケットに向いているとされる固体推進系では、構造上ロケットの再使用化は難しい。スペースシャトルブースタの外殻の一部が打ち上げ後に回収され、何度か再使用された程度である。それよりも製造技術、特に推進系の核である固体ロケットモータの製造においてコスト低減を図ることが有効であるが、3D プリンタによる液体ロケットエンジン製造などといった革新的なコスト低減技術は未だ実用化されていない。これは、モータが固体推進薬と一体化しており、推進薬製造・成形加工に厳しい安全管理を要するためである。強いせん断・摩擦、不意の通電などで推進薬の着火が懸念される推進薬の製造・成形加工では、厳しい管理の元、効率よりも安全を第一に信頼性の高い工程を着実に進めることが優先されるため、推進薬や火薬製造の業界以外からの革新的な製造技術の導入が難しい。

逆に捉えればこのような安全が第一の推進薬製造において、大幅に製造安全性を向上でき、合わせて効率よく推進薬を製造もできる技術が実用化されれば、抜本的な推進薬製造

コスト低減が期待できる．そのためには，推進薬製造の安全性という要点を抑えつつも，改めて広く工学技術を見直す必要がある．

表 1.4 衛星単位重量当たりの打ち上げコスト比較<sup>[5]</sup>

		衛星単位重量当たりの 打ち上げコスト [\$ / kg]
	ロケット	
開発中	Electron	49,00
	LauncherOne	44,444
	GO Launcher 2	62,500
	Demi-Sprite	22,500
通常運用中	PSLV-XL	14,285 – 20,000
	Rokot	16,304 – 25,926
	Vega	24,476 – 33, 834

## 1.3 固体推進系の製造技術

### 1.3.1 固体ロケットモータ・コンポジット推進薬

固体ロケットモータ (Solid rocket motor, 以下 SRM) は固体推進薬グレイン・モータケース・ノズル・イグナイタ等で構成されている。図 1.2 に一般的な SRM を示す。固体推進薬グレインはモータケース内部に積載されており、モータケースとインシュレータ・ライナを介して接着されている。また、推進薬グレインには内孔が空けられており、この内孔が燃焼室の役割を果たす。イグナイタによって内孔表面及び推進薬グレイン端面が着火、モータ内で高圧の燃焼ガスを発生させてノズルから排出させることで SRM は推進する。推進薬グレインの内面を燃焼させることで、推進薬の高い積載率を達成することができ、SRM 燃焼時のモータケースを保護することができる。宇宙輸送にはこれらの長所が重要となる。

推進薬グレイン内面燃焼型の SRM には、SRM 燃焼時の燃焼圧力や SRM 貯蔵時のひずみによってグレインにクラックが生じないように、モータケースインシュレータ/ライナとの良好な接着性とグレインの良好な機械特性が必要となる。固体推進薬にはニトロセルロースとニトログリセリンを基材としたダブルベース推進薬と酸化剤粒子をポリマバインダで粘結させたコンポジット推進薬の 2 つが実用化されているが、それらの理由から現在はコンポジット推進薬が主流となっている。コンポジット推進薬はポリマバインダによって、良好なモータケース接着性と機械特性を達成できるためである。特に現在の宇宙輸送用 SRM にはすべてコンポジット推進薬が用いられている。

現在、ほとんどのコンポジット推進薬において、バインダには液状ゴムの末端水酸基ポリブタジエン (Hydroxyl terminated polybutadiene, 以下 HTPB), 酸化剤粒子には過塩素酸アンモニウム (Ammonium Perchlorate, 以下 AP) が採用されている。酸化剤粒子と可塑剤を添加した液状のポリマバインダ (プレポリマ) を捏和し、スラリ状の推進薬をポリマの硬化反応によって固めて用いる。可塑剤にはアジピン酸ジオクチル (Diocetyl Adipate, 以下 DOA), 硬化剤にはイソホロンジイソシアネート (Isophorone diisocyanate, 以下 IPDI) などが汎用されている。性能向上のため、さらに金属粉の他、燃焼速度調整剤やボンディング剤等が添加されるのが一般的である。金属粉にはアルミニウム (Al) 粉末が汎用されている。燃焼速度調整剤には酸化鉄粉などが、ボンディング剤には MT-4 (2 モル MAPO, 0.7 モルアジピン酸, 0.3 モル酒石酸の付加体) などが用いられる。表 1.5 に固体推進薬に求められる条件を示す。推進薬にはもちろん良好な推進性能であることが好ましいが、実際はある程度良好な推進性能・燃焼特性の範囲内において、むしろ製造性 (推進薬製造の容易性), 貯蔵性, 感度や原料入手性が重視されている。

コンポジット推進薬は原料を捏和し、得られた推進薬スラリを直接モータケースに注型・モータケース中で硬化させる製造方式 (モータケース直填式) が一般的である。この製造方式によって推進薬の高い積載率と良好なモータケース接着を得ることができる。硬化した推進薬グレインにノズル・イグナイタ等を取り付けることで SRM は製造される。

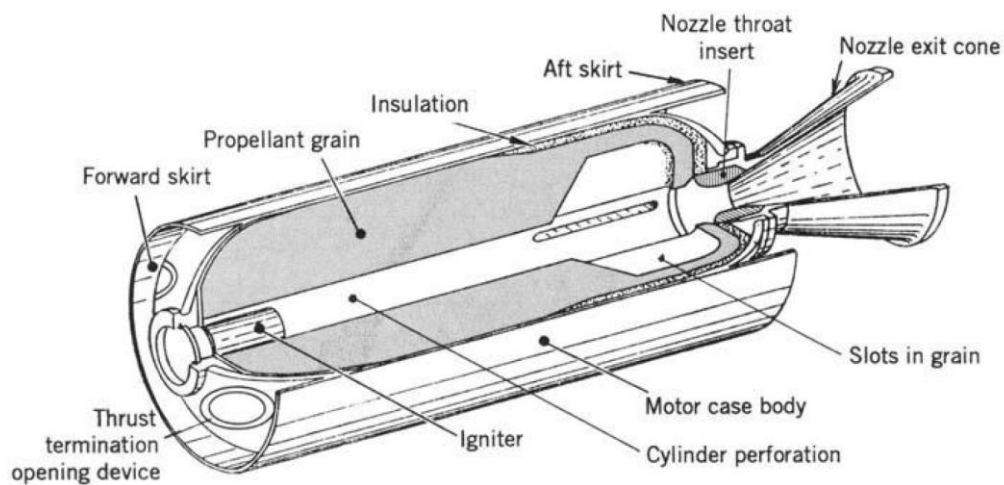


図 1.2 固体ロケットモータ (SRM)<sup>[22]</sup>

表 1.5 固体推進薬に要求される条件

特性	条件
推進性能	高比推力・高推進薬密度
燃焼特性	適切な燃焼速度・適切な燃焼温度 低い圧力指数・高い燃焼安定性
感度	熱・衝撃・摩擦他からの低い感度
機械特性	貯蔵時・SRM 燃焼時の良好なひずみ耐性
モータケース接着性	良好な接着性
貯蔵性	良好な安定性・良好な老化耐性
製造性	未硬化推進薬の低い流動性 適切な硬化時間
原料入手性	良好なコスト性，継続的な入手性



### 1.3.2 コンポジット推進薬製造プロセス

製造プロセスフローは表 1.6・図 1.3 の通りであり、大きく 6 つの操作から構成されている<sup>[22]</sup>。推進薬グレインに内孔を空けるため注型するモータケース内には中子を取り付けられており、推進薬硬化後に中子は引き抜かれる。図 1.3 中に\*印で示される操作は安全管理を要する操作となっており、安全を最優先に進める必要がある。\*印の操作では、効率向上と共に安全性も向上するようなプロセス変更，すなわち工程数の削減および自動遠隔操作化が製造効率向上，製造コスト低減につながる。

コンポジット推進薬製造の中でも特に重要となる単位操作が捏和である。酸化剤粒子と予捏和スラリを混和し推進薬スラリを製造する捏和操作はプラントの推進薬製造効率を左右する。また、捏和によって得られた推進薬スラリの分散状態は最終製品である SRM の燃焼特性にも大きく影響する。さらに、乾いた酸化剤粒子を取り扱う・ミキサによって推進薬に仕事量を与えるため、安全管理を第一に操作を行う必要がある。乾いた酸化剤粒子粒子は推進薬よりも危険性が高く、ミキサの不具合によって誤着火した場合、重大なプラント損失に至ることが懸念される。

また、ミキサの操作方式が基本的にプロセス全体の操作方式も決定している。主にコンポジット推進薬捏和に用いるミキサの操作方式はバッチ式・連続式に分かれ、その操作方式によって、プロセス全体の操作もバッチ式・連続式に分かれる。バッチ式プロセスとは表 1.6・図 1.3 に示すプロセスフローを順番に処理する方式であり、連続式プロセスとはそれを連続的に処理する方式である。現在の主流は、容器軸が垂直方向で固定されたバッチ式のプラネタリミキサを用いたバッチ式プロセスである。

注型に関しては、真空環境下のモータケース内へ推進薬スラリを流し込み、脱気を行う手法が現在の主流である。またスクリュウエクストルーダを用いたダイ式注型手法の検討も過去になされている<sup>[23]</sup>。

表 1.6 コンポジット推進薬製造プロセスフロー

順	項目	操作内容
1	原料準備	酸化剤粒子・金属粉・バインダ・可塑剤等添加薬・硬化剤をそれぞれ品質検査し，計量と前処理を行う。
2	予捏和	金属粉と酸化剤粒子が乾いた状態で接触すると感度が上がり危険となるため，予め金属粉をプレポリマで十分濡らしスラリにする。
3	捏和	予捏和スラリと酸化剤粒子，硬化剤を捏和し，推進薬スラリとする。
4	注型	推進薬スラリを脱気し，モータケースへ注型する。
5	硬化	注型した推進薬を静置し推進薬を硬化させる。
6	成形	硬化した推進薬から中子を引き抜き，推進薬を成形する。

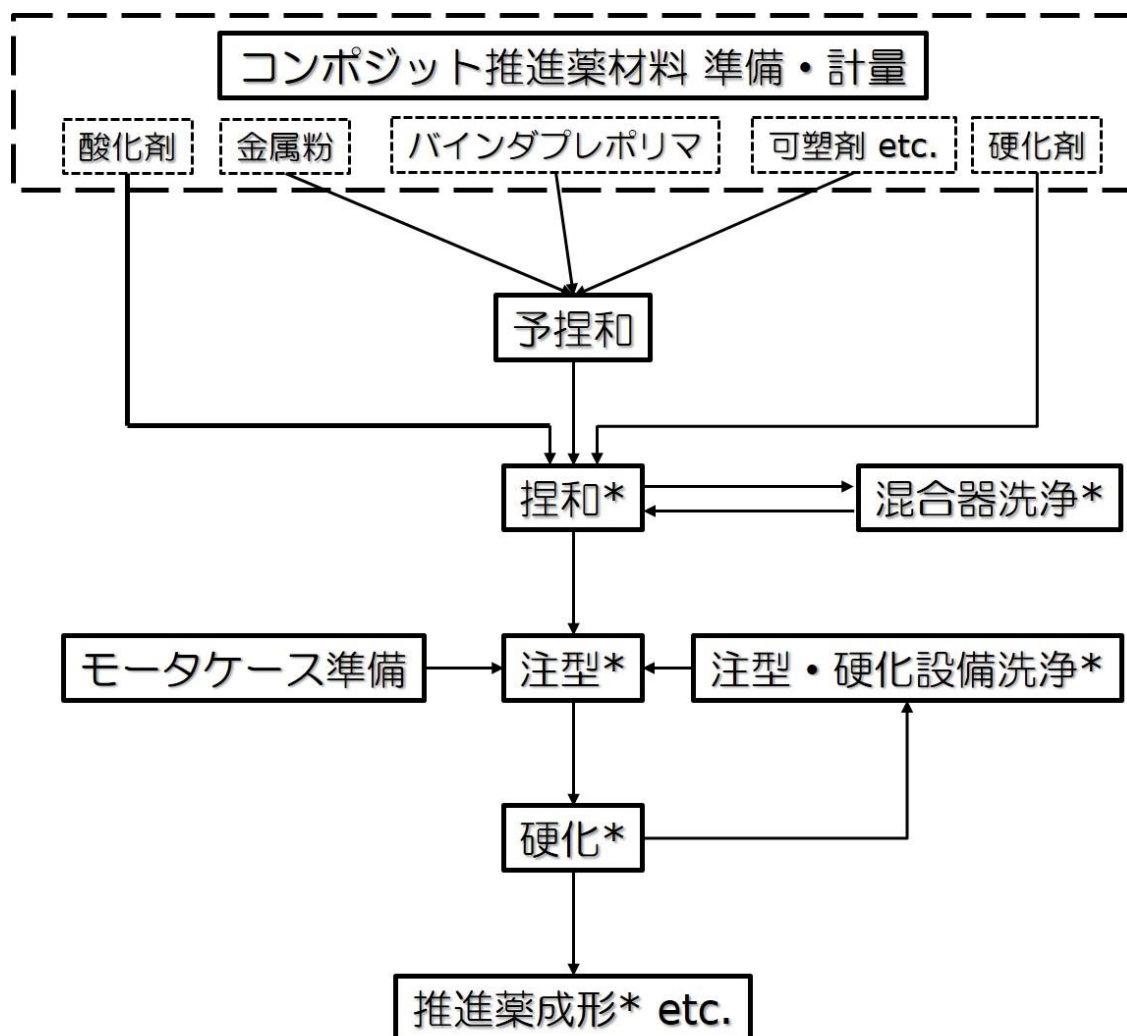


図 1.3 コンポジット推進薬製造プロセス<sup>[22]</sup>

### 1.3.3 コンポジット推進薬捏和技術開発

現在主流のコンポジット推進薬捏和に用いられるミキサは、容器軸が垂直方向で固定されたバッチ式のプラネタリミキサである。過去には他のバッチ式ミキサも用いられた。また連続式は実用化にまでは至っていないものの、1970年代以降欧米で幾度かプリプラント開発が検討されてきた。ここではまず産業全般で捏和に用いられるミキサを紹介し、バッチ式・連続式それぞれのミキサを用いた推進薬捏和技術に関して、先行研究開発を挙げる。

#### 捏和に用いられるミキサ

上ノ山がまとめた捏和混練装置に関する報告<sup>[24]</sup>を参考とすると、捏和に用いられるミキサは基本的に表 1.7 に示すような一般的なミキサから選択される。ミキサは攪拌羽根の軸方向によって二つ（水平攪拌軸・垂直攪拌軸）に大別され、水平攪拌軸のミキサはさら

に操作方式がバッチ式・連続式に分かれる．垂直攪拌軸のミキサの操作方式はバッチ式となっている．

水平攪拌軸バッチ式ミキサには双腕式ミキサ・バンバリーミキサが挙げられる．双腕式ミキサは二つの平行な半円筒槽内でひねりがつけられた 2 本の攪拌羽根（シグマ型など様々な形状）が互いに逆方向に回転することで捏和を行う．バンバリーミキサも基本的に双腕式ミキサと同様であるが，捏和チャンバが密閉され，混合物が加圧されている．

水平攪拌軸連続式ミキサにはスクリューストルーダ・ピンミキサ・パグミル・コニーダ・エクストルーダが挙げられる．スクリューストルーダ・ピンミキサ・パグミルに関しては，攪拌羽根がスクリューストルーダ・螺旋状ピン・パドル型とそれぞれ違いはあるものの，混合物は攪拌羽根によって軸方向に押し出されながら，せん断・圧縮・引き伸ばしの作用を受ける．コニーダはスクリューストルーダと構造が似ているものの，スクリューストルーダが 1 回転する間に同時に軸方向に 1 回往復運動を行う．捏和チャンバ内には固定歯が取り付けられており，より固定歯とスクリューストルーダの間の混合物に圧縮・せん断に加えて折りたたみ作用を与える．エクストルーダは大半が二軸であり，軸が同一方向・等速に回転することで混合物の押し出しと捏和を行う．

垂直攪拌軸のミキサの中でも，特にプラネタリミキサは攪拌羽根が遊星運動，すなわち自転と公転しながら捏和混練を行う．この攪拌羽根の遊星運動によって効率の良い捏和を行うことができる．また攪拌羽根の回転による移動とせん断だけでなく，攪拌羽根と捏和チャンバ壁面とのクリアランスにおいて効率よく混合物に圧縮（ヘラ撫で効果）を与えることができる．

挙げた以外にも容器転動式ミキサなどが存在するが，汎用されている捏和用ミキサは基本的に水平軸方向もしくは垂直軸方向の攪拌羽根の回転によって捏和，すなわち混合物へのせん断・圧縮・移動等を行うことが特徴である．

表 1.7 捏和用ミキサの種類<sup>[24]</sup>

攪拌羽根軸方向	操作方式	装置
水平	バッチ式	双腕式ミキサ バンバリーミキサ
	連続式	スクリューストルーダ ピンミキサ パグミル コニーダ エクストルーダ
垂直	バッチ式	シンプソンミックスマラー アイリッヒミル クラッチャー プラネタリミキサ

## バッチ式推進薬捏和技術

まず、現在の主流であるプラネタリミキサを用いた推進薬捏和技術に関して述べる。プラネタリミキサは遊星運動する攪拌羽根で効率的に捏和することができる上に、攪拌羽根の遊星運動を支えるベアリング部分が推進薬と触れずに安全に捏和することができる。アメリカでは1960年に初めて300・420ガロン容量のプラネタリミキサでコンポジット推進薬が製造されたが、その後、推進薬の需要が高まるとともに、1800ガロン（コンポジット推進薬12t分）容量の巨大なプラネタリミキサに変わったことが記録されている<sup>[25]</sup>。フランス・日本でもこのような巨大なプラネタリミキサを用いて、宇宙輸送用のSRMを製造している。

プラネタリミキサが主流となる以前、コンポジット推進薬が開発された当初には、様々なミキサが試されてきた。コンポジット推進薬が開発された当初は、水平軸ミキサであるシグマブレードミキサ（双腕式ミキサの一つ）が用いられた。図1.4の写真は1957年のものである<sup>[26]</sup>。シグマブレードミキサに関しては1000～2500Lスケールのものまで開発されたが、水平軸ミキサに共通する問題である推進薬とブレードのベアリング部が接するため、推進薬の摩擦等が懸念されたと記されている<sup>[25]</sup>。Lamierによる推進薬捏和装置調査<sup>[27]</sup>では、他に1968年における40ガロン級のコーンバーティカルミキサ（図1.5）も開発されたことが記されている。このミキサは推進薬が自重とロータ回転によって下方に排出できる仕組みとなっており、容器固定型でありながら原料供給と排出を連続的に行うことも想定された。

結局のところ、推進薬捏和時の安全性の観点から、攪拌羽根のベアリング部が推進薬と接触しない垂直軸ミキサが選択され、またその中でも効率の良いプラネタリミキサに落ち着いたと考えることができる。

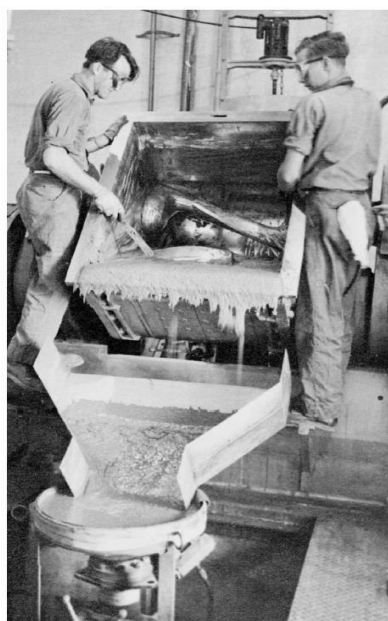


図 1.4 シグマブレードミキサによるコンポジット推進薬の捏和<sup>[26]</sup>

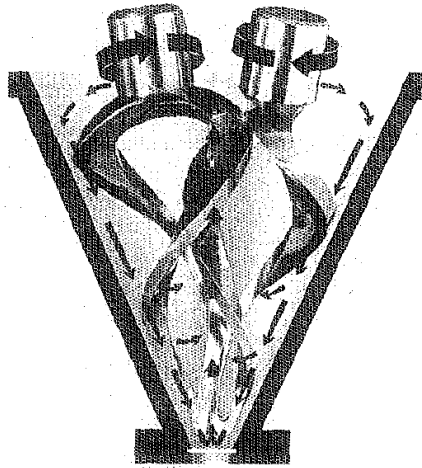


図 1.5 コーンバーティカルミキサ<sup>[27]</sup>

### 連続式推進薬捏和技術

コンボジット推進薬連続捏和技術に関する初めての大きな開発は 1960 年代である。Aerojet 社 (現 Aerojet Rocketdyne 社) では、Baker-Perkins 社のコニーダ (UK-150 および UK-200) を用いてポラリスミサイル用のコンボジット推進薬の連続捏和が行われた。この開発は一度中止となり、1990 年代にスペースシャトル用ブースタの性能・コスト性向上を狙った Advanced Solid Rocket Motor (ASRM) 計画の一つとして再度検討がなされた。ミキサには Baker-Perkins 社の二軸コニーダ “UK-400” を使い、圧縮空気による AP 粒子の供給システム・Rotofeed 脱気装置と合わせて連続捏和システムを構築し、実用品質のコンボジット推進薬を 4.5 t 連続試製造することに成功した<sup>[28]</sup>。この開発は連続捏和プリプラント設置まで進められたが、1993 年に経済的な理由から ASRM プロジェクトそのものが終了してしまい中止となった<sup>[25]</sup>。

フランスの SNPE 社 (現 SAFRAN herakles 社) では 1995 年から二軸エクストルーダを用いたコンボジット推進薬連続捏和プラントの開発が 2015 年まで続けられた。図 1.6 に SNPE 社が用いた二軸エクストルーダの攪拌ロータを示す。連続捏和を行うと共に、捏和した推進薬の排出部付近ではロータの回転方向を調整して脱気処理を行うことができるようエクストルーダの捏和機構の開発が行われた。2012 年には Ariane 5 ブースタ規模のロケットモータの連続製造プラントイメージが示された。2010 年には 3-5 t の推進薬が製造されたと報告された<sup>[29-31]</sup>。

1991 年にはイギリスの Royal Ordnance 社によって二段式パグミルでコンボジット推進薬が連続捏和された。この連続捏和技術は 1950 年代にイギリスで開発されたシグマブレードミキサ-エクストルーダの出口に二段式パグミルを設置し、連続的に捏和と脱気を行うものであった。推進薬量 90 kg の SRM が 7 機試製造された<sup>[32]</sup>。

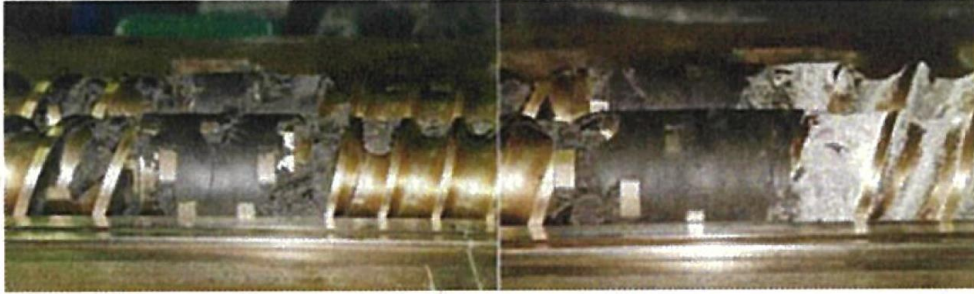


図 1.6 推進薬連続捏和用二軸エクストルーダ (攪拌ロータ部)<sup>[29]</sup>

### 1.3.4 SRM・コンポジット推進薬の製造量と製造コストの関係

#### SRM 製造数と製造コストの関係

固体ロケットにおいて、一般的に打ち上げコストの 46–60%が SRM 製造コストである。また打ち上げコストには推進系開発の償却費も含まれており、SRM 製造コストと SRM 開発償却コストで打ち上げコストの多くを占めている。

D. Kollé<sup>[33]</sup> によって、推進薬コストを含めた SRM 製造コスト  $C_M$  は次の式(1.1)で予測されている。

$$C_M = 2.42 \cdot f \cdot M_{NET}^{0.395} \quad (1.1)$$

$f$  は量産・製造技術習熟による補正係数で 0~1 の間の値を取る。 $M_{NET}$  は推進薬以外の SRM 重量である。また、コストパラメータ  $C$  に関しては貨幣価値を元に、ドル・ユーロ・円など様々な通貨、国や年代の違いに寄らずに比較評価できるように補正したパラメータとして定義されており、単位は MYr (Man-Year) とされている。 $f$  はさらに製造技術習熟パラメータ  $p$  とフライト品製造数  $n$  を用いて、次の式(1.2)で表される。

$$f = \frac{1}{n} \sum_{1}^n n^{\ln p / \ln 2} \quad (1.2)$$

式(1.2)より、あるモータ設計のものを量産する、すなわち  $n$  を大きくすることで  $f$  を小さくすることができる。これが SRM 量産による製造コスト低減である。また製造技術習熟パラメータ  $p$  が大きいほど、技術習熟しやすいことを示している。例えば Atena II, Taurus などの一般的な SRM では  $p$  は 0.85 とされている<sup>[24]</sup>。

実際に Athena I, Athena II, Taurus のブースタと広く用いられた Orbital ATK 社の Castor 120 を例に取って、予測式を元に SRM 量産によるコスト低減の効果を計算した。計算に用いた Castor 120 の SRM 重量と推進薬重量を表 1.8 に示す<sup>[34]</sup>。

製造技術習熟パラメータ  $p$  を 0.85 とし、表 1.8 の値を式(1.2)・(1.3)に代入して製造コストを計算すると、製造数  $n$  による技術習熟補正係数  $f$ 、製造コスト  $C_M$  の変化は図 1.7 の通りとなった。製造数が 55 機で、モータ製造コストは 1 機目の半分となった。

以上の通り、SRM の量産による製造コスト低減が示された。また、適切なモータ設計とモータ量産計画によって SRM 一機当たりの開発償却コストも低減させることができる。一方、SRM の製造の核は推進薬の製造であり、切り分けることは難しい。これまで述べたように SRM と推進薬は一体化しており、モータケースに捏和した推進薬スラリを注型して製造する。そのため、SRM の量産には安定した推進薬製造・供給は必須である。さらに、ロケット打ち上げコスト低減が求められる現在、推進薬製造効率向上のみならず、プラントの安全性を高めることでモータ重量の約 9 割を占める推進薬製造コストを低減させることが重要となる。すなわち、プロセスの安全と効率向上を可能とし、かつ SRM の量産にも対応できる推進薬製造技術に関する研究開発が重要である。

表 1.8 Castor 120 の SRM 重量・推進薬重量<sup>[34]</sup>

SRM [kg]	推進薬 [kg]	推進薬以外 [kg]
53068.0	48949.8	4118.2

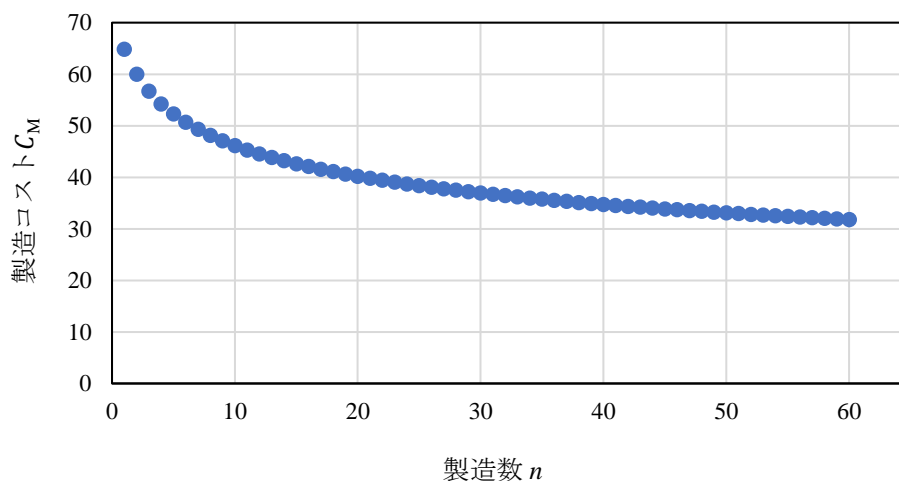


図1.7 モータ製造数と製造コストの関係

## コンポジット推進薬製造量と製造コストの関係

図 1.8 にコンポジット推進薬年間製造量と推進薬単位重量当たりのコストの相関を示す。年間推進薬製造量が増加するに従い、フランスの BPD・SNPE 社 (現 SAFRAN herakles 社) の単位重量当たりの推進薬コストは下がっている。ユーロ換算では 750 ユーロ/kg (1999 年当時) から 13 ユーロ/kg に下がった。しかしながら、アメリカの Hercules 社, Thiokol 社 (両社とも現 Orbital ATK 社) とも 1999 年の時点で推進薬コストは年間製造量によらずほぼ一定 (9 \$/kg) となっている。また, SRM 充填推進薬重量にと推進薬コストに関しては, ヨーロッパでは SRM のスケールに依存して推進薬コストが低下した一方で, アメリカでは“Castor IV”, “Castor 120”, “Titan-SRM” および “Shuttle-SRM” の推進薬重量の違う SRM で比較しても, 推進薬コストが SRM スケールに依存せずほぼ一定のコストであった。Koelle は「*The propellant cost in the US are almost constant since the small motors are using apparently propellants from the large-scale production established for the Space Shuttle and Titan IV Boosters.*」としている<sup>[33]</sup>。すなわち, モータごとの推進薬を共通化し, 量産することで推進薬製造コスト低減を可能としたと捉えられる一方で, 現在の需要にある程度見合った量産ができていると考えることができる。

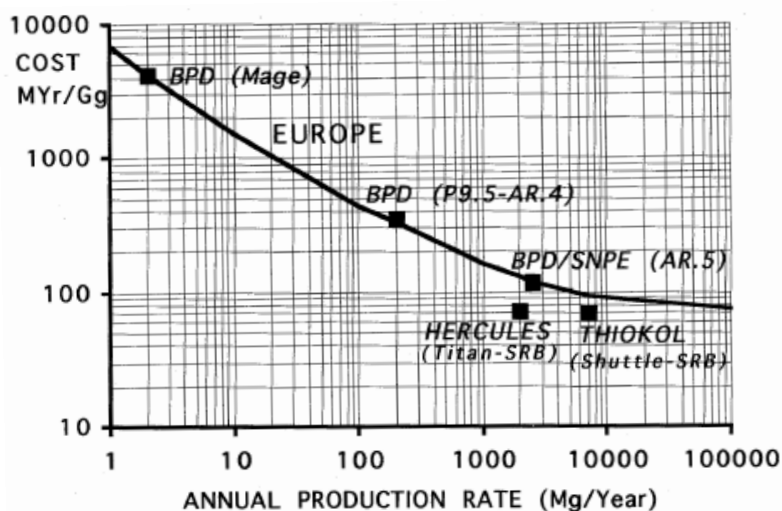


図 1.8 コンポジット推進薬年間製造量と推進薬単位重量当たりのコスト<sup>[33]</sup>



## 1.4 コンポジット推進薬連続捏和技術への期待と課題

連続式ミキサを用いたコンポジット推進薬連続捏和技術は、未だ宇宙輸送用のコンポジット推進薬では実用化には至っていないものの、推進薬の製造コスト低減に有効な技術として実用化が期待される捏和技術である<sup>[35]</sup>。一方でその連続式プロセスの中心である推進薬連続捏和技術には、推進薬製造における長所があると同時に短所もある。

本節では現在の主流であるバッチ式推進薬製造プロセスの課題及び、推進薬連続捏和技術に関する先行研究開発の評価を踏まえた推進薬連続捏和技術の長所・短所を述べる。

### 1.4.1 バッチ式推進薬製造プロセスの課題

現行のバッチ式推進薬製造プロセスでは、製造需要の高まりに従ってミキサが大型化してきた。例えば先述のようにアメリカでは1960年に300・420ガロン容量のプラネタリミキサで製造が行われていたが、その後、1800ガロン（コンポジット推進薬12t分）容量に変わった。大型のミキサを用いて製造量を増加させ、また別製品モータに用いる推進薬を共通化させることで1.3.4項に示す通り、コスト低減を達成した。一方でこのままプラントを大型化するだけではこれ以上の抜本的なコスト低減は望みにくい。

さらにバッチ式の推進薬製造プロセスではミキサバッチごとに推進薬の信頼性が担保されているが、それゆえに各工程の管理が厳格であり、部分的な製造工程変更が認められにくいことも課題の一つである。捏和工程では、1回の捏和によって得られた推進薬は容器壁面や攪拌ブレードに付着した部分は除いて、同等の品質であるよう操作パラメータを設定する。このバッチ操作に信頼性を担保し、ミキサバッチごとに品質を管理している。実際は製造時の気温湿度や原料ロットの違いなどの外乱もあり、メーカーのノウハウ/経験則に基づくところが大きく、ロケットに求められる高い信頼性を相まって、このミキサバッチ管理による推進薬の信頼性担保が厳格となってしまう。

ロケットに求められる高い信頼性は、ロケット飛翔の不具合が即ペイロード損失や予定軌道投入失敗へ繋がる現在のロケット設計・打ち上げ技術に起因する。その中でも、ロケット打ち上げで不具合が起こりやすいのは駆動しているエンジンおよびその制御系であり、特に燃焼を止めることが不可能なSRMは容易に宇宙機の損失を招く。Sojourner<sup>[36]</sup>らは1959年から2014年までのアメリカにおけるSRMの失敗に関してまとめている。彼らの論文では、観測ロケット用SRMの失敗の内、36%が品質や製造工程によるものであり、またSRM開発が落ち着くにつれてそれらに基づく失敗が増えていくことが分かる。また、彼らの打ち上げロケット用・観測ロケット用SRMを合わせた失敗例調査では、推進薬による失敗が14.8%で2番目に多い要因となっていると示されている。

以上から、これまで世界的に大型バッチ式ミキサを用いて推進薬の量産・モータごとの推進薬共通化によるコスト低減が行われたがそのコスト低減にも既に限界が見えている点、バッチごとの信頼性担保が厳格で部分的な変更が認められにくい点の二点が課題として見えてくる。

## 1.4.2 推進薬連続捏和技術の長所と短所

### 先行研究開発事例の評価

1.3.3 項で述べた推進薬連続捏和技術の先行研究開発に対する評価を述べる。先行研究開発で共通する点は、ダブルベース推進薬の押し出し製造方法に基づいている点である。前述のアメリカ・フランス・イギリスのそれぞれの研究開発はすべてダブルベース推進薬製造のノウハウを基礎としたことが述べられている<sup>[28, 29, 32]</sup>。ダブルベース推進薬製造に用いられたプラント・ミキサを転用することで、ダブルベース推進薬の製造ノウハウを生かすことができるなど、製造安全性担保も含めた既存の技術基盤を応用してコストを抑えつつ、コンポジット推進薬の連続捏和プラントを開発することができるためである。ダブルベース推進薬の押し出し製造方法を応用したコンポジット推進薬の押し出し製造技術に関する研究も報告されている<sup>[37]</sup>。

一方、先行研究開発で用いられたミキサ（コニーダ・スクリュエクトル・パグミル）はすべて水平軸攪拌羽根で攪拌する方式であり、推進薬誤着火の危険性が潜在している。1.3.3 項で述べたように、開発当初は水平軸攪拌羽根のシグマブレードミキサが使われていたものの、軸のベアリング部付近で酸化剤粒子の噛みこみ、摩擦が懸念されることから垂直軸のプラネタリミキサ取って代わった。管型捏和チャンバと攪拌羽根が金属製である点も、不具合時に接触した場合に生じる火花が誤着火源となる。捏和に用いられる既存の連続式ミキサにも推進薬捏和時に同様のことが懸念される。

以上、先行研究開発事例に共通することは、ダブルベース推進薬の押し出し製造方法を基盤としてコストを抑えながら開発を進めた一方で、ミキサに潜在する誤着火源を排除できていなかったと捉えることができる。

### 長所

推進薬連続捏和の長所は、効率向上と安全性向上である。捏和プラントの連続稼働によってミキサ単位体積当たりの製造効率が向上し、ミキサを小型化させることができる。小型ミキサの連続稼働はプラント内滞留推進薬量の低減とミキサ開始/終了時に生じる廃棄推進薬量の削減にもつながる。プラントが安全で小型になることで製造効率が向上し、安全管理区域が小さくなる<sup>[29]</sup>。さらに、安全管理が必要な作業工程が削減され、環境への付加も低減することで、総合的に製造コストを下げるることができる。すなわち、小型の連続式ミキサによる効率良く安全な推進薬製造が可能となる。

### 短所

推進薬連続捏和の短所は、既存のミキサを用いた場合、金属製の水平軸攪拌羽根で攪拌する方式であるために推進薬誤着火の危険性が潜在している点である。水平軸攪拌羽根の回転というミキサの捏和機構上の問題によって酸化剤粒子の摩擦や装置不具合時の推進薬誤着火が懸念される。

## 安全な推進薬連続捏和ミキサの必要性

推進薬連続捏和技術は製造コストを低減し、また安全性を高めることが期待できる。しかしながら、既存ミキサの水平軸攪拌羽根による捏和機構では推進薬誤着火が懸念される。これでは、そもそも推進薬製造において最優先とすべき製造の安全性が担保できず、例え連続捏和によって製造効率・安全性向上が期待できたとしても、ミキサの構造がゆえに板挟みとなってしまふ。既存のミキサに拘ることなく、ミキサの捏和機構が根本的に安全な連続式ミキサを適用する必要がある。

### 1.5 安全な推進薬捏和が可能な連続式ミキサの調査

捏和混練に用いる既存の連続式ミキサは電気によって駆動し、金属製の攪拌チャンバと水平軸攪拌羽根を持つがゆえに、推進薬誤着火源を排除できない。そこで、既存のミキサや実用化されている捏和機構に拘らず、推進薬誤着火源が無く、かつ連続的に捏和ができるような機構を探索することとした。産業機械としては実用化されていない捏和機構も含めて検討するため、まず改めて捏和操作やそれを行う動作そのものに関して具体的にまとめることとした。これらを元に連続捏和機構を探索したところ、腸管蠕動運動による食物・消化液攪拌が相当すると考えた。

また、腸管蠕動運動を規範とした生体模擬ロボティクスの研究は圧縮空気によって駆動する人工筋肉（空気圧人工筋肉）の登場によって、近年急速に研究が進んでいることが分かった。このような先行研究を基盤として安全かつ連続的に捏和が可能なミキサの着想に至った。

#### 1.5.1 安全な連続式推進薬ミキサの条件

ミキサの不具合時に想定される推進薬誤着火源を改めてまとめると以下の3つに分類される。結局のところ、電気系の不具合や金属間の衝撃・摩擦が原因となる。

- ・電気火花（スイッチの開閉、短絡など）
- ・金属間衝撃火花
- ・異常高温（電気機器の故障、金属間の摩擦による発熱）

これらを元にして、安全な連続式推進薬ミキサとして求められる条件を以下に挙げる。条件は大きく分けて2つ、要求される性能・機能と安全性に分かれる。これら2つの条件を両立しなければならない。

まず要求される性能・機能に関しては、高粒子濃度の推進薬スラリを捏和できる性能および適切な捏和効率は当然ながら必要である。またポリマバイндаは加温によって粘度が下がり推進薬の製造性が向上するため、効率よく推進薬の捏和を行うためには熱交換機構による推進薬加温が重要となる。加えて、金属製の捏和チャンバ・捏和機構であれば議論されることは少ないが、連続的な装置駆動を可能とする装置耐久性も必要である。ミキサ

であるから内部の推進薬の組成に影響を及ぼす（組成が変わるなど）も避けるべきである。ミキサの安全性に関しては、不具合時に誤着火源を発生させない装置構成・捏和機構・駆動方法が必要である。また捏和時の安全管理区域をできる限り小さくするよう装置規模を小さくする必要がある。この条件を元にミキサとして実用化されていない捏和機構も焦点に当てて探索することとした。

表 1.9 にある通り、既存の水平軸攪拌羽根の連続式ミキサは要求される性能や機能を満たしつつも特に不具合時の安全性担保が難しいと考えられる。先行研究開発では水平軸攪拌羽根の回転による酸化剤粒子の摩擦・破砕が確認されたものの、どれも数 t レベルの試製造を行っていることから要求される性能・機能に関しては概ね条件を満たしている。一方、これまでに述べた通り、金属製捏和チャンバ内で金属製の水平軸攪拌羽根を回転させているために安全性に関しては装置規模以外条件を満たしていない。ミキサ中のモータを駆動させるためにミキサを電源につなぐことも安全管理で懸念される点である。装置規模に関してはミキサ連続稼働によってバッチ式ミキサよりも小さくできることが期待できるためプラントの安全性向上に寄与しうる。

表 1.9 安全な連続式推進薬ミキサの条件

項目		条件	先行研究開発	
要求される性能・機能	捏和性能	実用推進薬スラリを捏和できる性能	○	
	捏和効率	推進薬需要を満たす適切な効率	△	実用化検討途中
	熱交換機構	推進薬の粘度を十分低減できる加温性能	○	
	装置耐久性	連続的な装置駆動が可能な耐久性	○	
	組成安定性	推進薬の組成に影響を与えない機構	△	一部の先行研究で酸化剤粒子が破砕
安全性	装置構成	不具合時に火花等誤着火源を発生させない構成	×	不具合時の金属製捏和機構の接触
	捏和機構	酸化剤粒子に強いせん断・摩擦を与えない機構	×	攪拌羽根ベアリング部での摩擦
	駆動方法	不具合時に推進薬へ通電することがない駆動方法	×	モータ駆動
	装置規模	安全管理区域ができる限り小さい装置規模	○	

## 1.5.2 誤着火源の無い連続捏和機構の探索：腸管蠕動運動による捏和

### 一般的な捏和操作・捏和を行う動作

安全な推進薬捏和が可能な連続式ミキサを調査するにあたり，産業全般における捏和操作および捏和に用いられるミキサに関して文献調査を行った．

捏和及び混練はあらゆる製造産業で最終製品の性能・品質を左右する重要な役割を持っている．活用されている産業は化学工業全般・医薬品・セラミックス・食料品・金属など多様である．そもそも捏和という言葉の定義であるが，例えば世界大百科事典 第2版では「粘稠で変形に対する抵抗の大きな物質をかくはん(攪拌)する操作。〈こねまぜ〉ともいう。捏和操作は単に配合成分の混合にとどまらず，物質の内部構造に関連した物性の変化，あるいは単一成分にはみられない混合系としての新しい性質の発現を目的としている場合が多い。」とされている<sup>[38]</sup>．ここで述べられているように，捏和操作では一般的に粉体濃度が高い混合物が粉体表面の濡れが進んでいない「ぼそぼそ」の状態から流動性のあるスラリーもしくは塑性のあるペーストへと物性変化する．そのため，捏和操作では混合物中の気液固の物理・化学特性が大きく影響する（表 1.10）<sup>[39]</sup>．

また，橋本<sup>[40]</sup>は粉体（湿式粉体）の攪拌操作を表 1.11 のように大別している．橋本は表 1.11 の分類において対象とする粉体の粒径や充填状態に関しても区別しているが，実産業の操作としては線引きが曖昧となってしまうため割愛した．推進薬製造においても同一の操作を“混和”としている文献もある<sup>[41]</sup>が，本論文ではほぼ同義として捏和に統一する．

実際には捏和操作は高粒子濃度の粘稠な混合物をせん断・圧縮・伸張・摩擦・曲げ・折り畳み・切断を作用させることによって行う．これらの作用は Lacey<sup>[42]</sup>によって分類された分散（個々の成分が小さく入れ替わって均一化していく）・分配（混合器内で大きく入れ替わって攪拌が進む）・せん断（強いせん断力で凝集塊を解砕する）の要素の内，2 つもしくは3つの複合として捉えることができる．

表 1.10 捏和操作に影響する主な性質<sup>[39]</sup>

成分	性質
粒子	粒子表面特性（親・疎水性，表面反応性），結晶構造など物理的性質
液体	化学構造，流動特性，相溶性
気体	空隙率
その他	界面活性剤・表面改質剤の化学的性質

表 1.11 粉体攪拌操作の分類<sup>[40]</sup>

操作	操作内容
混合	2 種類以上の粉粒体を乾いた状態あるいはごく少量の液体が入った状態で均一に分布させる
混練	粉粒体のまわりへの液体あるいはペーストの必要最低限のコーティング操作
捏和	粉体をほぐしながら、そのまわりに液体をコーティングあるいは液体でぬらす操作
分散	粉体をほぐしながら、液体で濡らし、液体中に均一に分布させる操作

### 消化管（腸管）蠕動運動による攪拌

攪拌羽根に寄らず粘稠な混合物を搬送しながら捏ねる操作を行う装置を探索すると、消化管蠕動運動がそれに相当すると思に至った。

Penry ら<sup>[43, 44]</sup> は動物の消化管を化学反応器によってモデル化し、実際に消化管が栄養成分の物質移動・腸内混合に関して内容物滞留時間を最適とするように動くことを明らかにした。その中でも大腸と小腸は管型反応器（Plug-flow reactor, 以下 PFR）でモデル化された。Bornhorst<sup>[45]</sup> らは人間の消化器官（口、胃、小腸、大腸）をプロセス構成装置として捉え、それぞれの器官が行う単位操作に関してまとめた。消化器官の内の中でも、混合器・搬送器のどちらの役割も担っている（すなわち連続的に食物を混合している）器官は小腸と大腸としている。ここで、小腸や大腸を流通する混合物について考えると消化途中の便（解砕され消化途中の食物と消化液、水分の混合物）のような粘稠な混合物であり、消化吸収が進むにつれて排泄されるような塑性・流動性のある便に変化する。つまり、小腸や大腸の蠕動運動による攪拌動作は粘稠な混合物を対象とした捏和操作であり、対象とする混合物の流動特性は広いと考えられる。

具体的に消化官の構造と動作を説明する。消化管とは動物において食物の摂取・運搬・貯蔵・消化・吸収・排泄を行う主要器官（咽頭・食道・胃・小腸・大腸）である。消化管壁は図 1.9 で示す通り漿膜（serosa）・縦走筋層（longitudinal muscle）・輪状筋層（circular muscle）・粘膜（mucosa）から構成されている。縦走筋層は筋繊維が消化管の軸方向に配置されており、この筋肉の収縮により消化管は軸方向に収縮する。輪状筋層は筋繊維が環状に配置されており、この筋肉の収縮により消化管は環状に閉塞する。この二つの筋層が収縮することで、消化管は軸方向に収縮し、また内腔を閉塞させている。消化管はこの収縮動作を伝播させる（蠕動運動を行う）ことで内容物を混合し、搬送している。蠕動運動はさらに推進蠕動運動・分節運動・振子運動に分類される。推進蠕動運動は、蠕動運動の中でも唯一の搬送運動であり、内容物、特に柔らかい食塊付近の消化管後方の輪走筋が収縮し、前方で縦走筋が収縮およびそれによって消化管内が拡張されることで食塊が押し出さ

れる．分節運動は輪状筋が互い違いに収縮・緩和し，またそれらが律動的に入れ替わることで内容物の分割・再結合を繰り返し，混合を行う運動である．また内容物付近の消化管前方における縦走筋の収縮・消化管内拡張によって，内容物に押し出しや摩擦による変形を加えて混合しながら往復搬送する運動を振子運動と呼ぶ<sup>[47]</sup>．図 1.10 にそれぞれの運動イメージを示す．

消化管の蠕動運動による内容物の混合，特に小腸や大腸における便の捏和に関しては未解明な部分も多い．生理学分野では，1990 年代になるまで消化管の蠕動混合・搬送のモデル化は食塊もしくは流動体を対象とするものがほとんどであった．しかし，実際には消化途中の食物や大便の物理特性を考えた場合，これらは粉体や繊維と水分の比率，動物の食性によってペンデュラ域・ファニキュラ域に相当する様々な充填構造および物理特性を示す．また消化管内で消化・水分吸収が進むに従い物理特性は変化する．

近年になって，消化管での消化や排せつにおける腸管の内容物の水分の粘結<sup>[48, 49]</sup>，繊維質や粉体の影響<sup>[50, 51]</sup>を考慮に入れた内容物の物理特性（粘度や粘弾性）変化に関する研究が行われた．さらに，内容物の物理特性によって消化管の蠕動運動も変化することが明らかとなった．流動性内容物の場合，消化管壁の輪状筋が収縮して管内の圧力を上げることで押し出し<sup>[52]</sup>，圧力上昇に追従してその圧力を緩和するように内容物が移動する<sup>[53, 54]</sup>．この内容物の粘度が高い場合輪状筋収縮による押し出し流れは層流となり，また管内閉塞が完全ではないため管壁に沿って逆流が生じる<sup>[52]</sup>．この逆流に関しては蠕動運動の中でも縦走筋の収縮によるものであり，このように縦走筋と輪状筋両方の収縮によって混合が進む<sup>[54]</sup>．さらにシミュレーション技術の向上によって，Miyagawa<sup>[55]</sup>らは詳細な胃の三次元形状と蠕動運動を再現し，重要な胃壁の収縮長さなど詳細な蠕動運動パラメータに関して考察した．

まとめると腸管による粘稠な混合物を対象とした連続的な捏和のメカニズムに関しては研究途中であるものの，腸管内では腸管壁の筋肉の蠕動収縮によって粘稠な混合物の捏和搬送が行われていることは確かと考えられる．

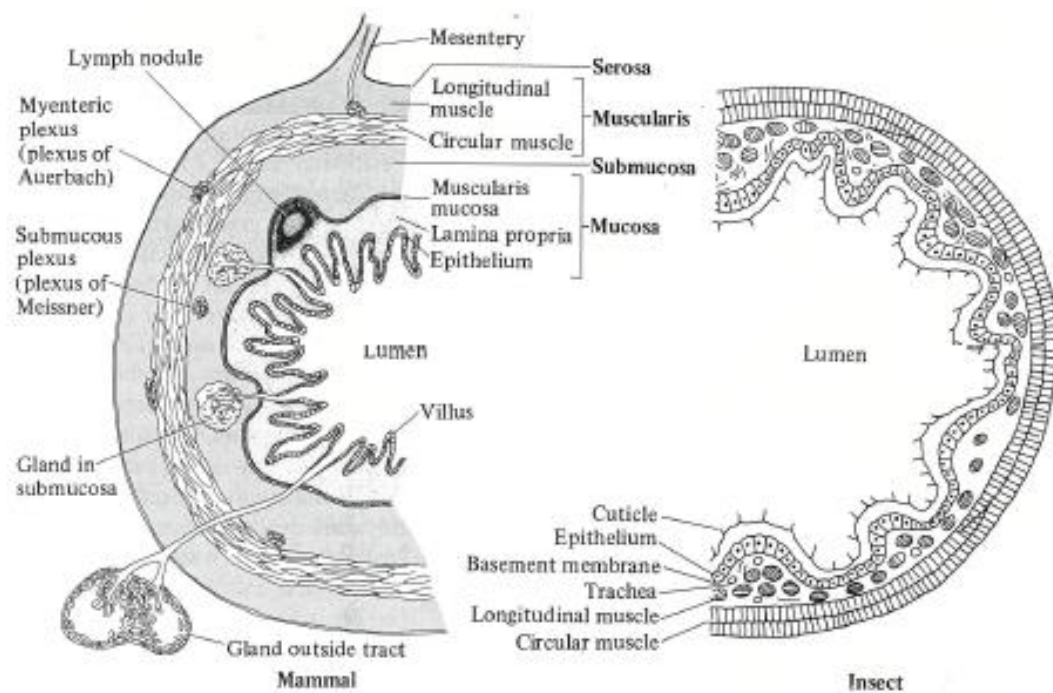


図 1.9 消化管壁の構造<sup>[46]</sup>

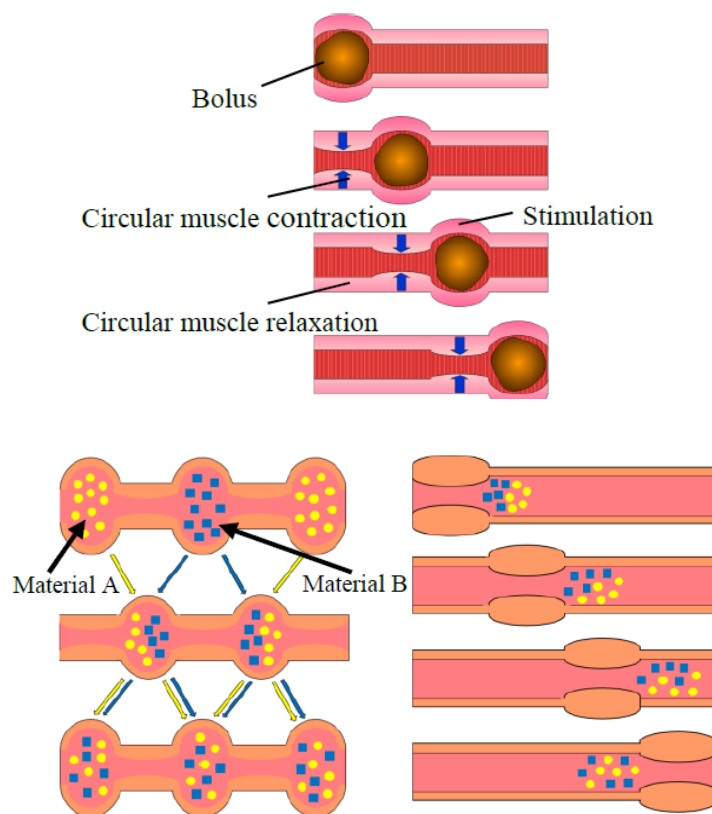


図 1.10 蠕動運動の分類: (上) 推進蠕動運動, (下左) 分節運動, (下右) 振子運動



### 1.5.3 消化管蠕動運動の生体模擬ロボティクスに関する先行研究

この腸管蠕動運動に相当する動作を行う産業機械は実用化されていないものの、消化管蠕動運動の生体模擬ロボティクスには、多彩なソフトアクチュエータ（いわゆる人工筋肉）を用いた先行研究がある。また、空気圧駆動のゴムチューブ人工筋肉（以下、空気圧人工筋肉）に注目が集まった 2000 年、生体の蠕動運動を模擬する研究は加速していることが分かった。

Spillman<sup>[56]</sup> は 1978 年にゴムチューブとローラを用いた蠕動運動型搬送器を開発した。ローラが回転し、ゴムチューブを狭窄させることで搬送を行う蠕動運動型搬送器は実用化が進んでいる。Mangan ら<sup>[57]</sup> はウミウシの餌食行動を規範として空気圧駆動マッキベン型人工筋肉を用いた蠕動運動グリッパを開発した。マッキベン型人工筋肉とは、非伸縮性のメッシュで覆われたゴムチューブであり、圧縮空気を印加することで駆動する。Miki ら<sup>[58]</sup> は形状記憶合金で製作した人工食道で液体の搬送に成功した。Watanabe ら<sup>[59]</sup> はニッケルチタン形状記憶合金アクチュエータによる人工食道を人体内で駆動させ、食塊を搬送することに成功した。

以上に挙げたアクチュエータの中でも、空気圧人工筋肉による蠕動搬送器に関しては特に注目を集めている。空気圧人工筋肉はゴムが主構成材料のため軽量かつ安価でありながら、出力密度が高い。また柔軟性があり、生体の筋肉と同様の特性を持っている<sup>[60]</sup>。そのため、空気圧人工筋肉を用いることで、より消化管に動きに近い蠕動運動を生体模擬する装置を安価に作製することができるためである。

2007 年に Nakamura<sup>[61]</sup> はマッキベン型人工筋肉よりも低圧の圧縮空気で高出力密度を達成する軸方向繊維強化型人工筋肉を開発した。この軸方向繊維強化型空気圧人工筋肉はゴムチューブ内に軸方向に配向させたカーボンロービング繊維シートを組み込んでいる。圧縮空気を封入させると、ゴムチューブの軸方向のみが繊維によって伸張が制限され軸方向に収縮力を生む。Suzuki ら<sup>[62]</sup> は、このチューブ状の軸方向繊維強化型人工筋肉（以下人工筋肉チューブ）の内側にさらにゴムチューブを配置した二層ゴムチューブを用いて腸管を規範とした蠕動運動による搬送器（以下、蠕動運動型ポンプ）を開発した（図 1.11）。この蠕動運動型ポンプは複数セグメントを連結して用いる。基本的な蠕動運動型ポンプセグメントの概形を図 1.12 に示す。フランジに固定された人工筋肉チューブと内側のゴムチューブの間の空間（以下、圧縮空気チャンバ）にフランジに開けられた通気口を通じて圧縮空気を印加できるようになっている。基本構成は至って簡単であり、大きなパーツは人工筋肉チューブと内側ゴムチューブ、フランジのみである（図 1.13）。

この蠕動運動型ポンプセグメントに数 10 kPa の圧縮空気を印加すると、外側の人工筋肉チューブは軸方向に収縮し、内側ゴムチューブは狭窄する（図 1.14）。このセグメントの軸方向収縮と内側ゴムチューブ狭窄は消化管の縦走筋・輪状筋による蠕動収縮に見立てることができる（この圧縮空気印加による蠕動運動型ポンプセグメントの動作を以下セグメント蠕動収縮動作と呼ぶ）。そのため、図 1.11 のように複数セグメントを連結させ、電磁弁等を用いて圧縮空気の印加を制御、セグメント蠕動収縮動作を連動させると見た目にはゴムチューブでありながら、消化管、特に腸管を規範とした蠕動搬送を行うことができる。

Hirayama ら<sup>[63]</sup> は蠕動運動型ポンプによる水搬送において、効率良く搬送するためには適切な収縮動作間隔（あるセグメントに印加圧縮空気が印加され始めてから、次のセグメントに印加圧縮空気が印加され始めるまでの時間間隔）を設定する必要があることを見出した。適切な収縮動作間隔を設定した場合、蠕動運動型ポンプによる水の排出圧力は印加した圧縮空気圧と近い値を示した。また水と樹脂ビーズの混合物であっても適切な収縮動作間隔を設定すると垂直上方向に搬送できることを示した。Saito<sup>[64]</sup> らは内側ゴムチューブに閉塞ガイド溝と突起をつけることで、内側ゴムチューブが完全に閉塞するように改良をほどこし、水を垂直方向に搬送する際の蠕動運動型ポンプ吸い上げ圧力を計測した<sup>[64]</sup>。

以上のように、マッキベン型空気圧人工筋肉に続き、新たに軸方向繊維強化型空気圧人工筋肉が開発されたことで、簡便なゴムチューブ構造と数 10 kPa 程度の圧縮空気を用いてより柔軟な腸管の蠕動運動を生体模擬することが可能となり、さらに水中のビーズであっても重力に逆らって搬送できる性能を達することが確認された。



図 1.11 蠕動運動型ポンプ

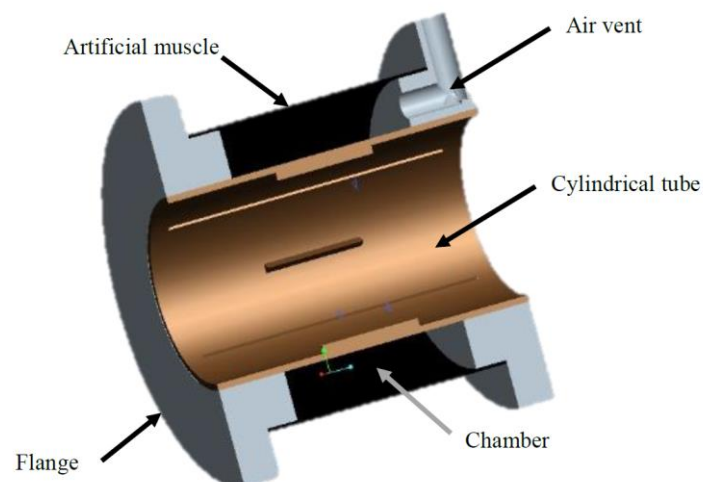


図 1.12 蠕動運動型ポンプセグメント

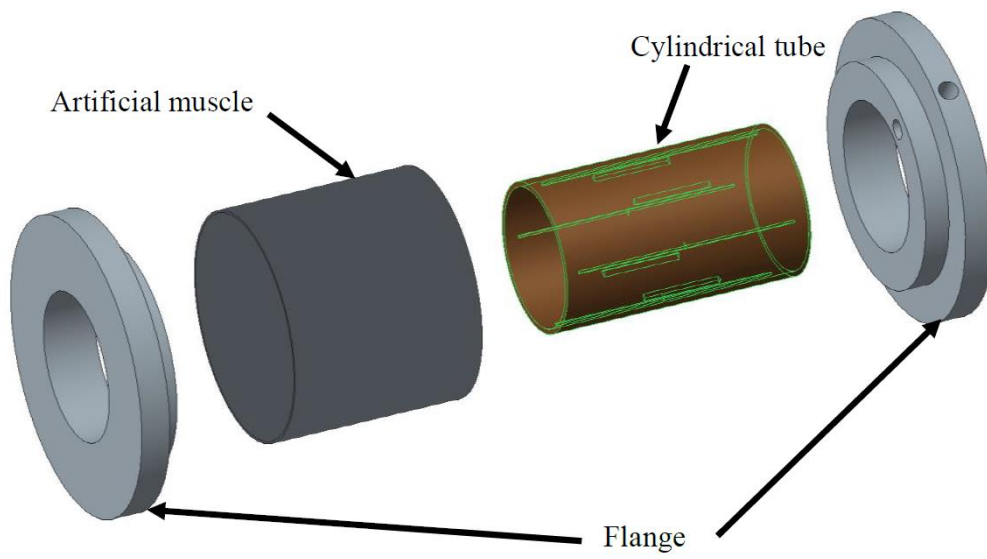


図 1.13 蠕動運動型ポンプセグメントの基本構成

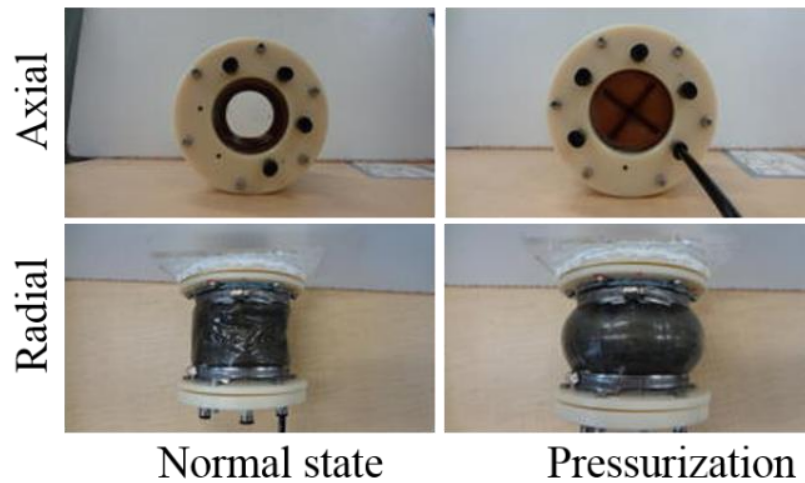


図 1.14 蠕動運動型ポンプの軸方向収縮と内側チューブ閉塞

#### 1.5.4 腸管規範の安全な連続式ミキサの着想

先述の通り、食物と消化液の粘稠な混合物を対象としてはメカニズムが完全には明らかになっていないものの、消化管内では確かに蠕動運動による捏和が行われており、特に腸管内では連続的な捏和が行われている。さらに、近年になって軸方向繊維強化型空気圧人工筋肉の開発によって、より柔軟な腸管の蠕動運動生体模倣が可能となり、蠕動運動型ポンプのようなラバーポンプが登場した。

これらの調査を元に、蠕動運動型ポンプを基盤とした腸管規範のラバーミキサ、蠕動運動型ラバーミキサ (Peristaltic rubber mixer, 以下 PRM) を新たに見出し、それによって推進薬を連続捏和するとの着想に至った。この PRM は推進薬捏和における高い安全性が期待できる。表 1.11 の安全な連続式推進薬ミキサの条件、特に安全性の項目に照らし合わせると表 1.12 の通りとなった。図 1.12, 図 1.13 を参考として、PRM は基本的にゴム製であり、さらに推進薬は内側ゴムチューブのみと接触する。金属製ではないため、不具合時も火花等への懸念を排除できる。捏和機構もゴム (内側ゴムチューブと人工筋肉チューブ) の伸縮による蠕動運動であるため、既存の連続式ミキサのような攪拌羽根がそもそも存在せず、強い機械せん断や摩擦を推進薬に与えない。駆動方法に関しても、空気圧人工筋肉をアクチュエータとしているため、電気ではなく空気圧で駆動する。装置規模に関しては現時点では捏和性能・捏和効率が未評価のため評価することができないが、装置構成・捏和機構・駆動方法とも安全である。

空気圧人工筋肉を用いて腸管蠕動運動を生体模倣したミキサは全くの新しい装置でありながら、推進薬ミキサとして注目した理由は安全な推進薬捏和が期待できるためだけではない。ロボティクスと学際的に融合することで、PRM の実用化、推進薬ミキサへの適用検討も素早く行うことができると考えた。またロボティクス研究開発が実用化へ進むスピードは非常に早く、PRM も広く一般に産業機械適用検討・量産技術研究が展開されることも期待できる。実際に一般産業へも広く応用することまで見据えると推進薬製造プラントのコスト低減に貢献できる発想は安全な推進薬連続捏和の他にも様々挙げられる。例えば、人工筋肉チューブは安価に製造できるため、PRM セグメントを安価に量産、消耗品として使用できることが考えられる。セグメントはゴム製で軽量であり、カートリッジ式でセグメント接続ができるようにフランジに工夫を施すことで、簡単・大量に安価な PRM を設置することも期待できる。

表 1.12 推進薬捏和における PRM の安全性

項目		条件	PRM	
安全性	装置構成	不具合時に火花等誤着火源を発生させない構成	○	ゴム製，推進薬は内側ゴムチューブのみと接触
	捏和機構	酸化剤粒子に強いせん断・摩擦を与えない機構	○	ゴム伸縮による蠕動運動
	駆動方法	不具合時に推進薬へ通電することがない駆動方法	○	空気圧駆動
	装置規模	安全管理区域ができる限り小さい装置規模	—	捏和性能・捏和効率を未評価

## 1.6 蠕動運動型ポンプを用いた捏和試行実験

### 1.6.1 試行実験目的

蠕動運動型ポンプを基盤とした PRM を開発し、推進薬ミキサへ適用するとの着想に至った。本節では PRM の適用検討に先立ち、そもそも腸管規範蠕動運動によって粘稠な粉体混合物の捏和できるか、試行実験を通じて検証した。

蠕動運動型ポンプ内に試料を仕込んで駆動させ、得られた試料の平均組成が仕込んだ試料組成と同等であれば、蠕動運動型ポンプによって粘稠な湿式粉体混合物の捏和が可能と判断できる。

### 1.6.2 実験

#### 実験試料

実験試料には、ガラスビーズ（篩通過 80% 粒度分布 425-300  $\mu\text{m}$ : J-46, ポッターズ・バロディーニ社）とポリアクリル酸ナトリウム（Sodium polyacrylate, 以下 SPA）水溶液を用いた。水溶液は 16-19 Pa $\cdot$ s となるように調整した。成分重量比はガラスビーズ: SPA = 50: 50 とし、全量を 500 g とした。この成分比はコンボジット推進薬のような高粒子濃度コンパウンドを想定した。

#### 実験装置・実験系

6 セグメントを連結させた蠕動運動型ポンプ（図 1.15）を軸が水平方向にして用いた。セグメントの設計は、内側チューブ内径を 60 mm, フランジを含めた軸方向長さを 90 mm とした。内側チューブの厚さは 1.5 mm であり、天然ゴムを用いた。実験系を図 1.16 に示す。蠕動運動型ポンプにはコンプレッサから電磁弁を介して圧縮空気を供給した。電磁弁を制御することで、ポンプの蠕動運動を制御した。比例電磁弁によって圧縮空気圧力は 60 kPa に調整した。蠕動運動型ポンプの運動パターンに関しては、2 セグメントを同時に閉塞させ、蠕動波進行方向側のセグメントは閉塞させたまま、進行方向逆側のセグメントを開放、同時に進行方向側のセグメントを閉塞させることで蠕動波を伝達させた。蠕動波がポンプの一端に来ると反対方向に折り返して、繰り返し蠕動波を往復させた。これはより混合性能を高めるために、振子運動の要素も追加させたためである。電磁開閉弁に関しては開放させてから 12 秒間開放を維持させた。すなわち、セグメント収縮動作間隔は 6 秒間隔とした。

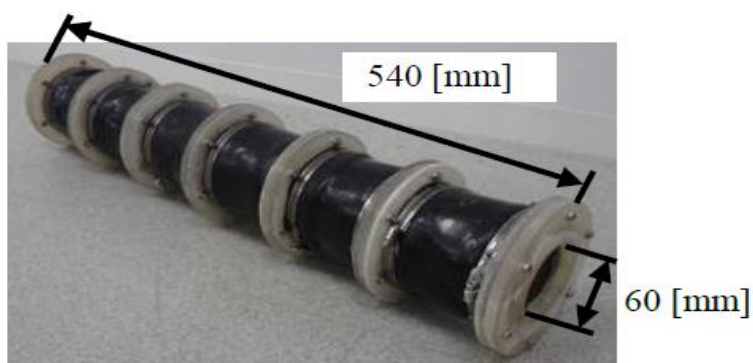


図 1.15 蠕動運動型ポンプ

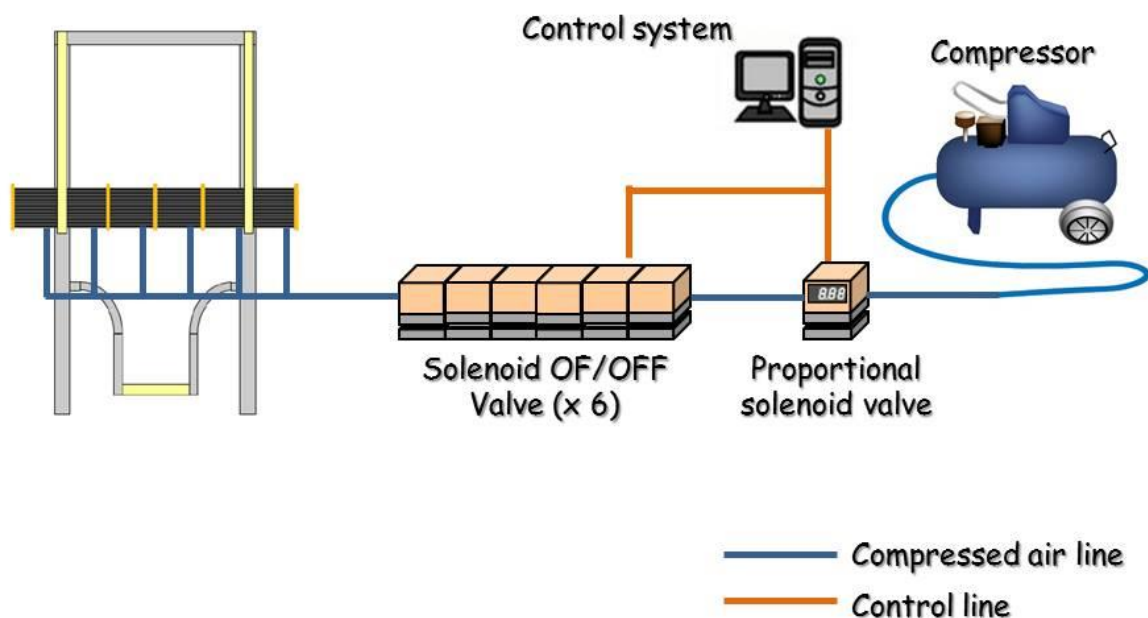


図 1.16 蠕動運動型ポンプによる試行捏和実験系

## 実験手順

蠕動運動型ポンプに SPA 水溶液 250 g, ガラスビーズを 250 g を全量投入した. 投入後, 蠕動運動型ポンプを 3 時間駆動させた. 蠕動運動型ポンプ駆動終了後, 得られた内容物から無作為に 10 点サンプルを少量採取し, 重量を計測した. サンプルの重量計測の後, SPA 水溶液を水で洗い流しガラスビーズのみの重量を計測, 各サンプルのガラスビーズ質量パーセント濃度を算出した.

### 1.6.3 蠕動運動型ラバーミキサ (PRM) による捏和の可能性

蠕動運動型ポンプ駆動によって、SPA 水溶液とガラスビーズが分散した混合物が得られた (図 1.17, 18). 10 点のサンプルにおけるガラスビーズの平均質量パーセント濃度は 53.0 wt%, 標準偏差が 2.21 wt%であった. ポンプ内に投入した試料全体の質量パーセント濃度は 50 wt%であるため, ほぼ均質にガラスビーズが分散していると考えられる. また, ポンプ内にガラスビーズの凝集塊なども見られなかった.

この結果は, 蠕動運動型ポンプによってポリマ水溶液とガラスビーズで構成される粘稠なスラリーが捏和できたことを示している.

今回の試行実験結果から, 蠕動運動型ポンプを基盤として推進薬ミキサに必要な機能を具備した PRM を開発, 適切な操作条件で駆動させることで推進薬を捏和しうる可能性が示された.



図 1.17 蠕動運動型ポンプ駆動後の試料

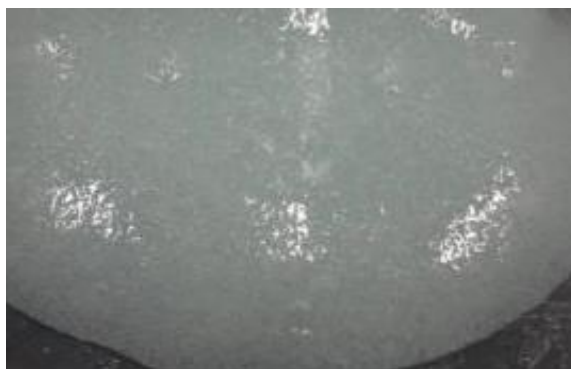


図 1.18 得られた試料の拡大



## 1.7 PRM の推進薬ミキサ適用に向けて検討すべき事項

### 1.7.1 検討内容

表 1.12 に示した通り，攪拌羽根を用いることなくゴムの伸縮によって PRM は推進薬を捏和する安全性は高い．一方，新しく見出したばかりの捏和機構であるため，そもそも推進薬を捏和できる性能を持っているか，捏和効率を評価する必要がある．また推進薬ミキサとして備えるべき熱交換機構は PRM の基盤となる蠕動運動型ポンプでは備えておらず，ミキサとしての装置耐久性や組成安定性も評価されていない．

まずは PRM に熱交換機構を具備させ，ミキサが十分な耐久性と組成安定性を持つよう装置改良を行う．改良検討を行った当該 PRM を用いて，推進薬を捏和できる性能を持っているか検討を行う．この捏和性能・捏和効率検討には，さきがけて PRM の推進薬捏和機構を検討した上で，適正に捏和を進めることができる条件を抽出することも求められる．

表 1.13 PRM の推進薬ミキサ適用に向けて検討すべき事項

項目		条件	PRM	
要求される 性能・機能	捏和性能	実用推進薬スラリを捏和できる性能	—	新たに見出したため 未評価
	捏和効率	推進薬需要を満たす適切な効率	—	
	熱交換機構	推進薬の粘度を十分低減できる加温性能	×	
	装置耐久性	連続的な装置駆動が可能な耐久性	△	ゴムの伸縮耐久性を 未評価
	組成安定性	推進薬の組成に影響を与えない機構	△	PRM 構成部品と推進薬成分の移行を未評価

## 1.7.2 各章の構成

### 第二章

第二章では、装置改良として熱交換機構の具備とミキサの耐久性・組成安定性向上を行った。まず PRM に熱交換機構機構を具備させる。今回は PRM セグメントに加工は行わず、簡易的にセグメント間に挟むディスク形状の熱交換機構（熱交換ディスク）を中央大が考案、安全のために電気をを用いることなく、温水を熱交換ディスク内に流通させて内部を加温させることとした。中央大の製作した熱交換ディスクによって内部が適切に加温されていることを確認した。

また捏和中の推進薬組成を安定させるには、PRM 構成部品の中でも推進薬と接する内側ゴムチューブの素材が推進薬成分と適合性に優れる、すなわち移行が生じないことが求められる。複数の候補の中から内側ゴムチューブの素材の選定を行った。

さらに内側ゴムチューブは人工筋肉チューブのような繊維強化が行われていない上に、PRM 駆動時には繰り返し伸縮するため機械的負荷が大きい。PRM が十分な耐久性を持つためには、適切なひずみ特性のゴムを内側ゴムチューブに適用させる必要がある。推進薬成分との適合性の観点からゴムの素材が選定されている中で適切なひずみ特性のゴム材料を適用し、十分な PRM 耐久性が得られたことを示した。

### 第三章

第三章では、PRM の捏和機構に関して検討を行った。消化管規範の蠕動運動による粘稠な混合物の捏和が進行する機構には未解明な部分が多い。加えて、推進薬の捏和が進行するに従って変化する推進薬の物理特性も捏和機構の理解を複雑にしている。まずは様々な物理特性を示す複数組成の模擬推進薬を用いて、実験的に PRM セグメントの蠕動収縮動作と混合物物理特性との相関を考察した。この考察を元に、PRM の蠕動運動によって推進薬の捏和が進行する機構を推察した。推進薬を実際に捏和し、X 線 CT によって充填構造の変化を可視化することで、捏和機構の推察が妥当であることも検証した。

### 第四章

第四章では、印加圧縮空気圧と仕込み量に関して適正に捏和が進行する条件の抽出を行った。第三章で検討した捏和機構を元に PRM セグメントが適切に駆動する印加圧縮空気圧の検討を行い、また推進薬全体に捏和機構を作用させられる仕込み量の検討を行った。それぞれの検討に対して、実際に PRM による捏和実験を行って妥当性を検証した。

### 第五章

第五章では、実際に推進薬グレインを製造し、PRM の捏和性能に関して検討を行った。まず、抽出した印加圧縮空気圧・仕込み量の条件下、当該 PRM 装置構成で推進薬捏和に要

する時間の探索を行った．探索した捏和時間で推進薬グレインを製造し，X 線非破壊検査によって得られた推進薬グレインの評価を行った．

## 1.8 本章のまとめ

本章では固体ロケット量産・製造コスト低減の要求を背景として，コンポジット推進薬の連続捏和技術に関する調査を行った．調査の結果，推進薬連続捏和は小型のプラントで製造効率良く捏和でき，かつ安全管理区域を小さく抑えられることが特長であることが分かった．一方で，過去の推進薬連続捏和プラント開発事例を評価したところ，既存の推進薬連続ミキサは水平軸攪拌羽根で捏和を行うため，結局推進薬製造の安全性に懸念が残っていると考えられた．

そこで，既存のミキサに拘らず攪拌羽根によらない連続捏和機構を探索し，消化管の蠕動運動による捏和に注目した．消化管規範の蠕動運動を行う産業機械は未だ実用化されていないが，近年に空気圧人工筋肉を用いた蠕動運動型ポンプがロボティクス分野で見出され，実用化検討も素早く行うことができると考えた．さらに，この空気圧人工筋肉を用いた蠕動運動型ポンプはゴムで主に構成されており，空気圧で駆動するため推進薬の安全な捏和が可能である．そこで，この蠕動運動型ポンプを基盤として蠕動運動で推進薬捏和を行うラバーミキサ，PRM の着想を得た．

実際に，蠕動運動型ポンプによってガラスビーズと SPA 水溶液の捏和を行う試行実験に成功したため，本研究において推進薬ミキサへの PRM 適用検討を行うこととした．

## 第2章 推進薬捏和に向けた PRM の装置改良

### 2.1 熱交換機構の具備

効率よく捏和を行うためには、熱交換機構によって推進薬に加温を施すことでポリマバインダ粘度を下げ、推進薬の製造性を上げることが望ましい。図 2.1 は HTPB の見かけ粘度の温度依存性<sup>[65]</sup> であり、確かに温度が高くなると HTPB の見かけ粘度は小さくなる。一方、推進薬を硬化させるために硬化剤を添加させた場合、硬化剤の架橋反応が進み、推進薬の粘度は増加する。この架橋反応は推進薬の温度が高いほど早く進む (図 2.2)。

以上より、捏和時に硬化速度の変化が小さい温度範囲 (図 2.2 より 60°C 以下) で推進薬を加温できる熱交換機構が必要となる。

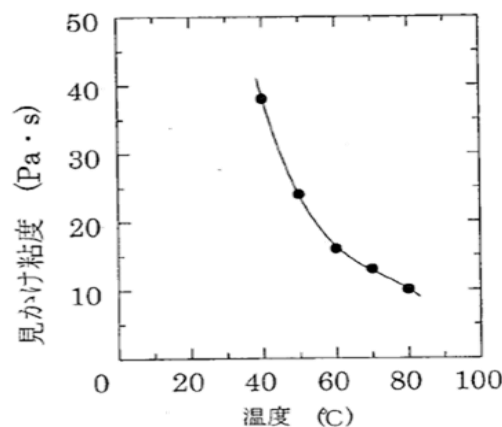


図 2.1 HTPB の見かけ密度の温度依存性<sup>[65]</sup>

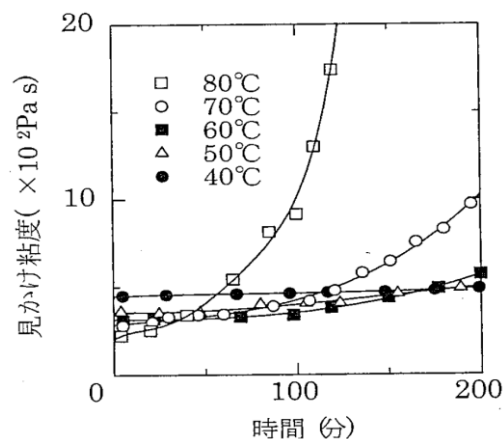


図 2.2 AP/HTPB 系未硬化推進薬の硬化特性<sup>[65]</sup>

### 2.1.1 PRM セグメント接続式熱交換ディスク

今回は PRM セグメントに加工は行わず，簡易的にセグメント間に挟む図 2.2 のようなディスク形状の熱交換機構（熱交換ディスク）を中央大が考案した．ディスクの厚さは 10 mm とし，ディスクに内側ゴムチューブ内径と同じ内径（内径 60 mm）の内孔が空け，内孔表面は内側ゴムチューブと同じ材料のゴムで被覆した．内孔表面で PRM 内部と熱交換を行う．安全のために電気をを用いることなく，100°C 以下の温水を内部流路に熱交換ディスク内に流通させて内部を加温させることとした．本節では，この熱交換ディスクによる加温性能を評価した．

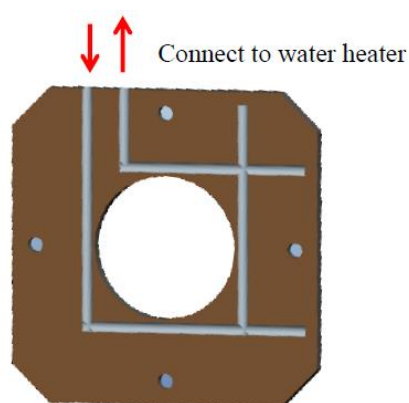


図 2.3 熱交換ディスク

### 2.1.2 熱交換ディスク加温性能評価実験

#### 実験装置

セグメント間に熱交換ディスクを挟んで 2 セグメントを連結させた PRM (図 2.4) を用いた．PRM セグメントの内側ゴムチューブ内径は 60 mm，内側ゴムチューブ軸方向長さ 90 mm，フランジの厚さは 10 mm とした．

#### 実験系

実験系は図 2.5 の通りとした．熱交換ディスクへ供給する温水はサーキュレータ（サーキュレータ設定温度 80°C）から供給した．PRM にはレギュレータと電磁弁を通じてコンプレッサよりの圧縮空気を供給した．圧縮空気圧力はレギュレータにおいて 60 kPa に設定した．また，PRM の片端には熱電対を内部に 2 mm 差し込み，温度計測をできるようにした．熱電対の計測データはマイコンを通じて 1 分毎に記録できるようにした．

## 実験試料

試料には水および模擬コンポジット推進薬を用いた。模擬推進薬の原料には HTPB (P-41, JSR), DOA (和光特級, 和光純薬), Al 粉末 (メディアン径  $5\text{ }\mu\text{m}$ ; TFH-A05P, 東洋アルミニウム) およびガラスビーズ (篩通過 80%粒度分布  $425\text{-}300\text{ }\mu\text{m}$ ; J-46, ポッターズ・バロディーニ社) を用いた。模擬推進薬は全量を  $400\text{ g}$  とし, 組成は HTPB: DOA: Al: ガラスビーズ = 12: 1: 18: 68 とした。

## 実験手順

PRM によって模擬推進薬の捏和を行った。PRM のセグメント収縮動作間隔は  $6\text{ 秒}$  とした。模擬推進薬捏和においては予め HTPB と DOA, Al 粉末をプラネタリミキサ (ACM-0.8TVJ, 愛工舎製作所) で  $15\text{ 分}$  捏和した。予捏和時のプラネタリミキサ攪拌ブレードは公転速度  $7.8\text{ rpm}$ , 自転速度  $15.0\text{ rpm}$  とした。プラネタリミキサの熱交換ジャケットには  $65^{\circ}\text{C}$  の温水をサーキュレータより導通させ, 内部の加温を行った。その後, 得られた予捏和スラリとガラスビーズを PRM で捏和した。

模擬推進薬捏和中に熱電対より得られた内部の温度変化を記録した。また, 模擬推進薬捏和時は捏和を  $90\text{ 分}$  行った後, 内部の模擬推進薬温度を赤外線サーモカメラ (FLIR-E63900, FLIR) で取得した。

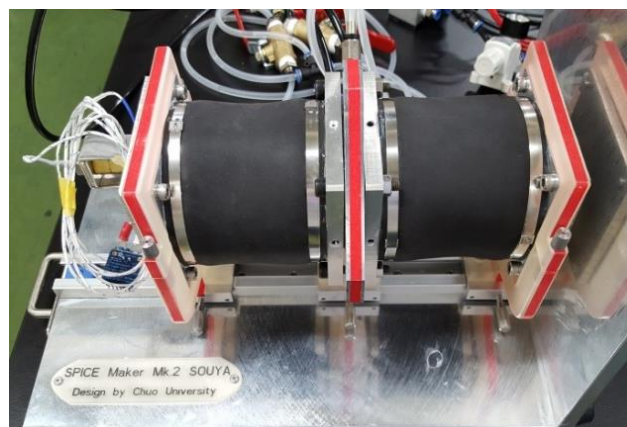


図 2.4 2 セグメント連結 PRM と熱交換ディスク

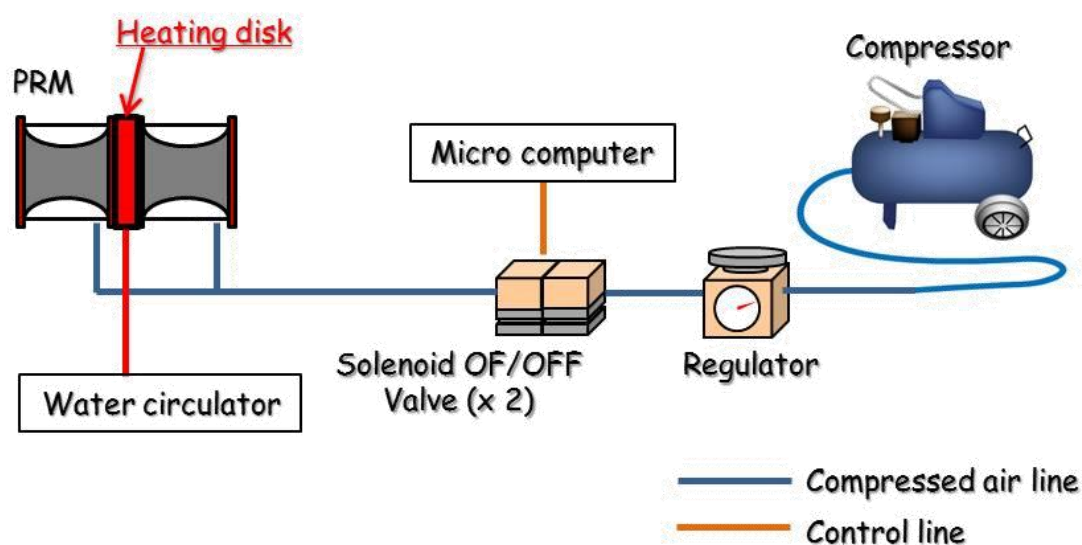


図 2.5 熱交換ディスク加温性能評価実験

### 2.1.3 熱交換ディスクの加温性能

模擬推進薬材料捏和時, PRM 駆動開始から 30 分の温度変化は図 2.5 の通りである.  $24.0^{\circ}\text{C}$  から  $37.0^{\circ}\text{C}$  まで温度上昇が確認された. またサーモカメラで取得した画像 (図 2.6) を見ると, PRM 中心部の熱交換ディスク周辺の模擬推進薬は  $40 \sim 60^{\circ}\text{C}$  に加温されていることが分かった. 熱電対が測定している部分は PRM 内部の雰囲気温度もしくは PRM 内面に付着した模擬推進薬温度を測定していると考えられる.

実験結果より, 熱交換ディスクによって水や模擬推進薬を加温できていることが確認された. 模擬推進薬の加温に関しては, PRM への試料仕込み量を調整することで, さらなる熱交換効率の向上も期待できる.

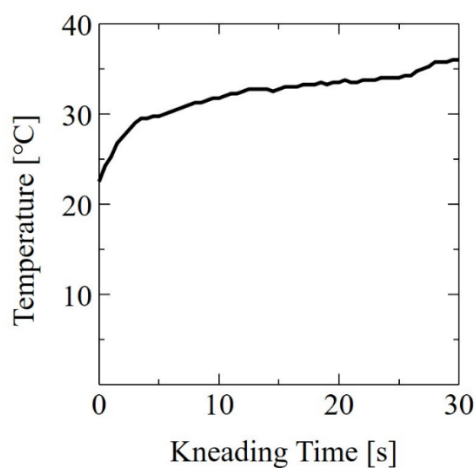


図 2.7 熱電対計測温度の変化

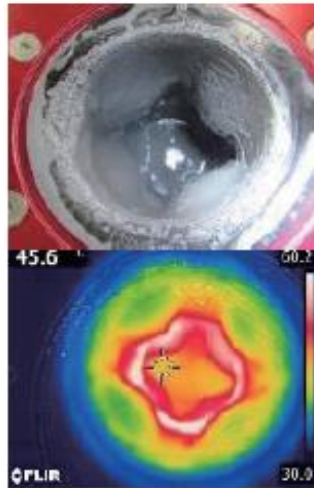


図 2.8 模擬推進薬捏和時の PRM 内部のサーモカメラ画像



## 2.2 内側ゴムチューブ素材改良による組成安定性の向上

### 2.2.1 可塑剤の内側ゴムチューブへの移行

PRM で捏和する場合，コンポジット推進薬構成成分のうち，特に可塑剤が内側ゴムチューブに移行することが懸念される．内側ゴムチューブに移行した場合，捏和中に推進薬の組成が変化，物理特性が安定しないという問題が生じる．また，可塑剤が内側ゴムチューブに移行した場合，内側ゴムチューブの物性変化・PRM の耐久性低下も問題となる．

既存のミキサでは金属製捏和チャンバを用いているためこのような推進薬構成成分の移行は考えなくとも良いが，PRM は主にゴムで構成されるミキサであるがゆえに生じる問題である．蠕動運動型ポンプの内側ゴムチューブ素材には天然ゴム (Natural rubber, 以下 NR) が使われていたが，実際にコンポジット推進薬捏和において NR 素材のゴムチューブでは脆化が確認された．この脆化は可塑剤が内側ゴムチューブに移行したことで，内側ゴムチューブが膨潤したためと考えられる．

コンポジット推進薬材料の内，捏和時において液体成分であるバインダ・可塑剤・硬化剤それぞれの天然ゴムへの浸漬を調べた．蠕動運動型ポンプに用いた NR 材料 (厚さ 1.5 mm) を 10 mm 四方に切り出し，HTPB・DOA・IPDI にそれぞれ 24 時間浸漬した．静置後，天然ゴム切片の縦横の長さを測定すると，表 2.2 の通り DOA に浸漬した場合，試料の大きさが大きく膨張した．この結果は，実際に確認された内側ゴムチューブの脆化・膨潤の要因がバインダ・可塑剤・硬化剤のうち可塑剤であることを示唆している．推進薬捏和時に内側ゴムチューブへの可塑剤移行が懸念されることから，PRM の内側ゴムチューブ素材を NR から可塑剤が移行しにくい素材，すなわち推進薬捏和に適合する素材に変更する必要がある．

表 2.2 NR への浸漬の有無

成分	浸漬後の大きさ	変化の有無
HTPB	10 mm x 10 mm	無
DOA	21 mm x 22 mm	有
IPDI	10 mm x 10 mm	無

### 2.2.2 内側ゴムチューブの素材候補

内側ゴムチューブ素材に求められる条件を挙げると表 2.3 の通りである．PRM はミキサとしての実用化を見据えているため，安価かつ汎用されている素材でありながら，PRM の駆動に耐える十分な物性を持っていることが条件である．また，可塑剤の移行を抑えるため，耐油性が高く，素材の相溶 (Solubility parameter, 以下 SP) 値と可塑剤の SP 値との差

が大きいことが条件となる．二つの SP 値の差が大きければ，その分相溶しにくい，すなわち移行が起きにくいとされている．

今回，明治ゴム化成㈱の試料提供の下，素材の候補として表 2.3 の条件を満たす素材として 3 種類，アクリロニトリルブタジエンゴム (Acrylonitrile-butadiene rubber, 以下 NBR)・クロロプレンゴム (Chloroprene rubber, 以下 CR)・水素化アクリロニトリルブタジエンゴム (Hydrogenated acrylonitrile-butadiene rubber, 以下 HNBR) を挙げた．この候補素材および比較対象の NR に関して，物性試験・耐油試験を行い，SP 値の比較を行った．

表 2.3 内側ゴムチューブ素材に求められる条件

項目	条件
入手性	安価で汎用される素材であること
物性	PRM の駆動に十分な物性であること
耐油性	可塑剤のような油状物質に対して良好な耐油性を持つこと
SP 値	可塑剤との SP 値の差が大きいこと

### 2.2.3 内側ゴムチューブ素材候補の物性試験・耐油試験

物性試験としてそれぞれの材料の硬さ・伸びを測定し，また破断までの繰り返し伸縮回数を測定した．また耐油試験として試験用潤滑油 IRM901 を用いて JIS K 6258: 2010<sup>[66]</sup> に定められる浸漬試験を行い，体積変化率を計測した．これらの結果を表 2.4 に示す．NR は他のゴムと比較して，体積変化率が 68%と顕著な差が見られた．NR は繰り返し伸縮に最も耐えうるが，耐油性を考慮すると不適切である．一方，NBR は 4 つの候補の内，最も耐油性に優れている．また NBR・CR・HNBR とも物理特性は PRM の駆動には十分である．

表 2.4 素材候補の物性試験・耐油試験結果

	NBR	CR	HNBR	NR
硬さ	64	45	59	35
伸び [%]	540	700	600	720
繰り返し伸縮 [回]	19224	22988	42495	80232
体積変化率 [%]	-7	-12	-12	68

## 2.2.4 内側ゴムチューブ素材候補の SP 値比較

井上の論文<sup>[67]</sup>を参考に、推進薬に汎用される可塑剤の DOA・DOP (フタル酸ジオクチル) と NBR・CR・NR の SP 値を表 2.5 に示す。可塑剤の SP 値と最も差の大きい素材候補は NBR であった。

表 2.5 素材候補と可塑剤の SP 値

		SP 値
素材候補	NBR	8.7 - 10.5
	CR	8.2 - 9.4
	NR	7.9 - 8.4
可塑剤	DOA	8.50
	DOP	8.90

## 2.2.5 内側ゴムチューブ素材の選定

物性試験・耐油試験・SP 値比較の結果から、内側ゴムチューブには耐油性に優れる NBR を素材としたゴム材料を用いることとした。これは内側ゴムチューブへの可塑剤移行を防ぐことを優先したためである。NBR は物性試験では 3 つの候補の内、最も硬く、伸びが小さい結果となったが、PRM の駆動を適切に行うことができる範囲内の物性と判断した。

## 2.3 内側ゴムチューブひずみ特性向上による PRM 耐久性の向上

内側ゴムチューブは人工筋肉チューブのような繊維強化が行われていない上に、PRM 駆動時には繰り返し伸縮するため機械的負荷が大きい。PRM が十分な耐久性を持つためには、適切なひずみ特性のゴムを内側ゴムチューブに適用させる必要がある。前節で選定した NBR 素材の内側ゴムチューブでひずみ特性の違うものを用い、PRM 耐久試験を行った。耐久試験から、十分なひずみ特性の内側ゴムチューブを用いることで、推進薬捏和に十分な耐久性を持つ PRM を得ることができた。

### 2.3.1 内側ゴムチューブ閉塞と内側ゴムチューブひずみの幾何学的相関

PRM に圧縮空気が印加されると、内側ゴムチューブは伸長しながら 4 つの凸形状を形成して狭窄する (図 1.18)。さらに、圧縮空気印加によって軸方向に収縮する人工筋肉チューブによって、内側ゴムチューブも軸方向に収縮する。図 2.9 は圧縮空気印加による内側ゴムチューブの軸方向収縮のモデルである。内側チューブ内径を  $d$ 、軸方向長さを  $l$  とし、また圧縮空気印加時の人工筋肉の軸方向収縮長さを  $x$  とする。また、狭窄によって凸形状が接触することで内側ゴムチューブは閉塞する。凸形状が接触するまで、理想的には図 2.10 のように内側ゴムチューブの凸形状は円弧形状であると考えられている<sup>[63]</sup>。

ここで内側チューブが伸長し、ちょうど閉塞した、すなわち PRM が向かい合う凸形状と 1 点で接している状態 (図 2.11) を考える。内側チューブの伸びを  $\Delta l$ 、閉塞時のチューブ凸形状をある半径  $r_1$  と中心角  $\theta_1$  の円弧とする。図 2.11 の凸形状の弦長・弧長・矢高に関して次の関係式が成り立つ。

$$l + \Delta l_1 = r_1 \theta_1 \quad (2-1)$$

$$l - x_1 = 2r_1 \sin \frac{\theta_1}{2} \quad (2-2)$$

$$\frac{d}{2} = r_1 \left(1 - \cos \frac{\theta_1}{2}\right) \quad (2-3)$$

これらの式において、PRM セグメントの現行設計である内側チューブ軸方向長さ  $l = 90 \text{ mm}$ 、内径  $d = 55 \text{ mm}$  を代入する。また、伴らの研究において、内側チューブが完全に閉塞した場合のセグメントの軸方向収縮長さは  $10 \text{ mm}$  であった<sup>[68]</sup>。 $x_1$  に  $10 \text{ mm}$  を代入し、(2-1) ~ (2-3) の連立方程式をニュートン・ラフソン法によって計算すると、内側ゴムチューブの伸び  $\Delta l_1$  は  $13.2 \text{ mm}$  (ひずみ  $1.14 \text{ mm/mm}$ ) となった。これが現行設計の PRM セグメント内側ゴムチューブに求められる最低限の伸びであると考えられる。

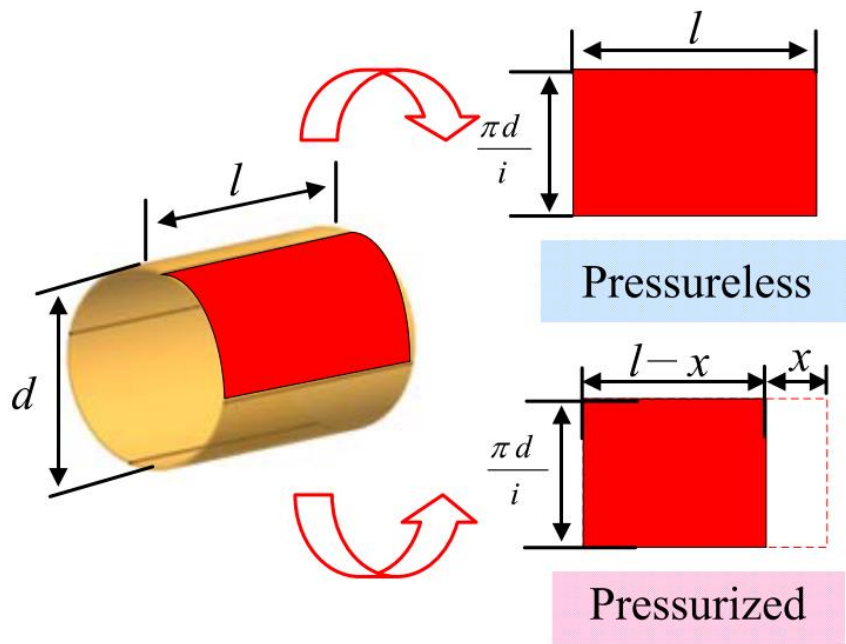


図 2.9 内側ゴムチューブの軸方向収縮モデル<sup>[63]</sup>

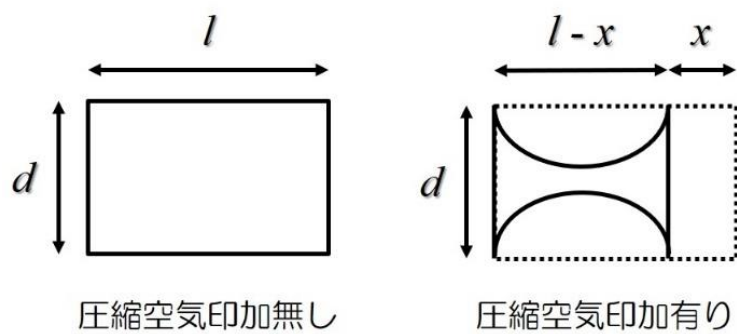


図 2.10 PRM 蠕動収縮による内側チューブの狭窄・伸長

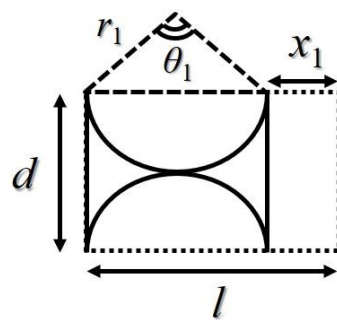


図 2.11 内側ゴム閉塞時のモデル

### 2.3.2 引張試験による内側ゴムチューブ材料のひずみ特性取得

内側ゴムチューブに用いる NBR 素材の材料を 2 種類用意し、ひずみ特性を引張試験によって取得した。

#### 実験試料

NBR 素材であり組成も同等であるが、製造時の混練り等加工プロセスの変更によってひずみ特性を変えた 2 種類の試料を用意した（以降、試料 A・B とする）。それぞれ厚さ・内径は PRM 内側チューブと等しい内径 60 mm，厚さ 1 mm とし，幅 10 mm のリング形状（図 2.12）とした。

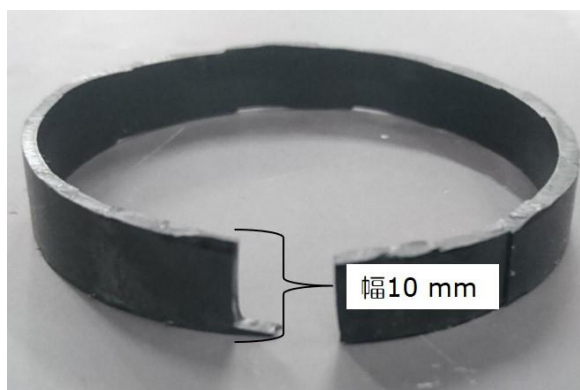


図 2.12 ゴム引張試験試料

#### 引張試験

引張試験の実験系は図 2.13 の通りである。引張試験機にはオートグラフ AGS-J（島津製作所）を用いた。引張速度は 200 mm/min とした。また，熱交換ディスク使用時の熱負荷を想定し，常温条件（室温 24℃）試験に加えて，試料をヒートガンで加温しながら引張を行う加温条件試験も行った。サーモカメラを用いて試料の温度をモニタし，75- 85℃ となるよう調節した。試験は試料 A・B それぞれに対して常温・加温各条件で 2 回ずつ行った。



図 2.13 引張試験の様子

## 引張試験結果

図 2.14 に常温条件，図 2.15 に加温条件における試料 A，B の応力－ひずみ線図を示す．どの試料もひずみ増加に従って応力が増加していき，試料が破断に至るひずみになると応力が 0 MPa 以下となった．各試料，各条件における破断時のひずみを表 2.6 に示す．加温条件下では試料 A・B とともに破断時のひずみが低下している．これはどちらの試料でも加温条件下では機械特性が低下し，小さな伸びで破断に至ることを示している．また，常温・加温条件共に試料 B は試料 A よりも低いひずみで破断したことが分かる．

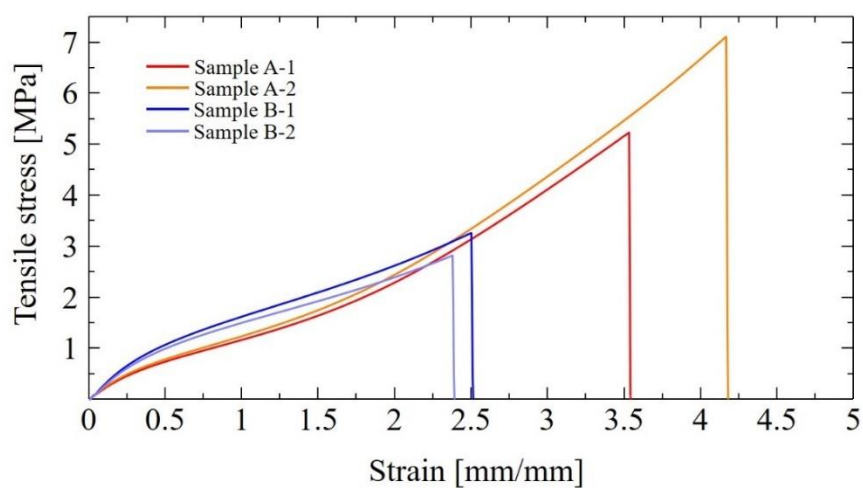


図 2.14 応力－ひずみ線図 (常温)

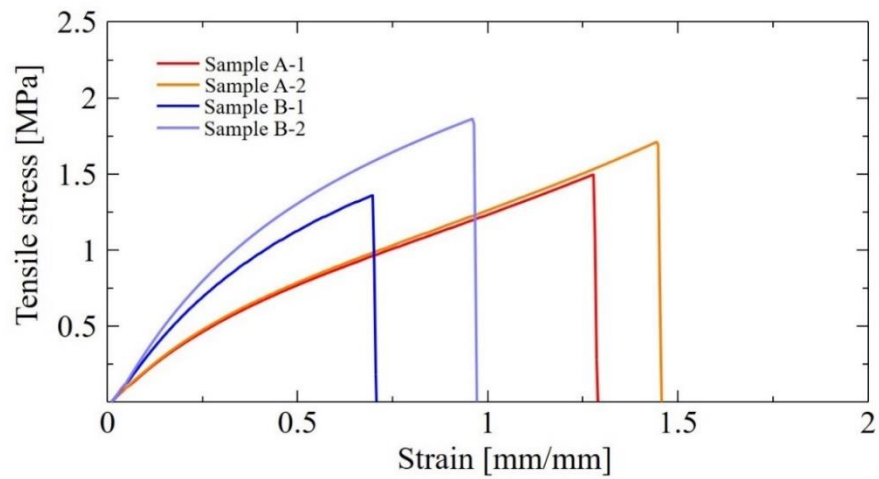


図 2.15 応力－ひずみ線図（加熱条件）

表 2.6 各試料破断時のひずみ

試験	試料	ひずみ
		[mm/mm]
常温条件	A	3.54
		4.17
	B	2.50
		2.38
加温条件	A	1.28
		1.44
	B	0.70
		0.96



### 2.3.3 PRM 耐久試験

試料 A・B それぞれのゴム材料を用いて内側ゴムチューブを製作した．各内側ゴムチューブを用いて PRM セグメントを 2 つずつ製作し，同一内側ゴムチューブ材料のセグメント同士を連結させた．これらの PRM を駆動させ，耐久試験を行った．

#### 内側ゴムチューブの形状

内側ゴムチューブは両端がフランジ形状となっており，鋳型によって一体成形されて製作される．この内側ゴムチューブのフランジ部分を PRM のセグメントフランジ間に挟みこむことで内側ゴムチューブを固定している．そのため，特に内側ゴムチューブのフランジは PRM 駆動時に応力が集中しやすい．また，熱交換ディスクも PRM セグメント間に挟んで用いるため，熱交換ディスクと接している内側ゴムチューブのフランジ部付近は熱負荷も集中する．

#### 実験装置

セグメントの内側ゴムチューブは内径 60 mm，チューブ軸方向長さ 90 mm とした．図 2.16 のように 2 セグメント連結式 PRM のセグメントそれぞれ片端に熱交換ディスク（厚さ 10 mm）を取り付け，PRM を駆動させた．圧縮空気印加圧力はレギュレータにおいて十分に内側ゴムチューブが閉塞する 60 kPa に設定した．熱交換ディスクに供給する温水はサーキュレータにおいて 80°C とし，実験環境の温度は 22.8°C であった．PRM の収縮動作間隔は 3 秒とした．

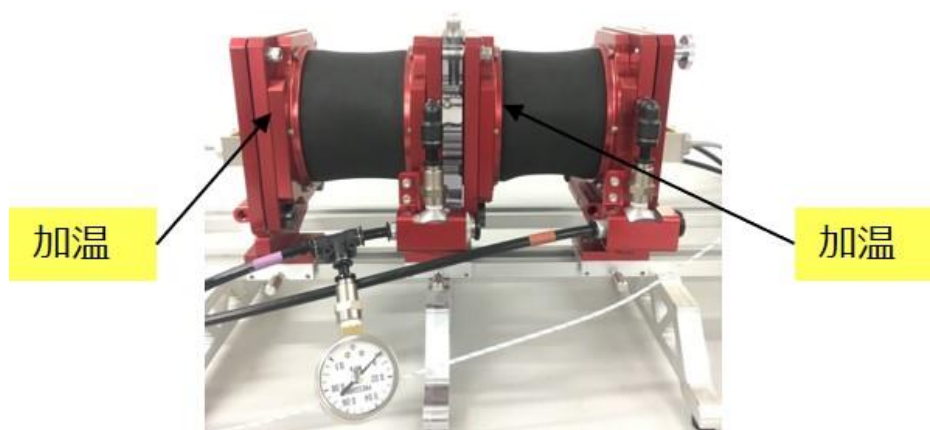


図 2.16 PRM の耐久試験

## 耐久試験結果

試料 B を内側ゴムチューブ材料に用いた PRM は駆動開始から 18 分および 19 分 40 秒で熱交換ディスク側の内側ゴムチューブが破断した (図 2.17)。また破断箇所はどちらもフランジ固定用に取り付けられたネジ付近であった (図 2.17 の黄色枠)。もう一方の試料 A を用いた PRM は 120 分間駆動させても破断・裂け等は視認できなかった。試料のひずみ特性と耐久試験の結果を対応させると、表 2.7 の通りとなった。耐久試験において熱交換ディスク側で破断に至った試料 B の内側ゴムチューブは、加温条件下での引張試験では破断時平均ひずみが  $0.83 \text{ mm/mm}$  であった。2.3.1 項で算出した PRM の正常な駆動に求められる内側ゴムチューブのひずみ特性の条件が  $1.14 \text{ mm/mm}$  以上であったが、加温条件下の試料 B の破断時平均ひずみはこの  $1.14 \text{ mm/mm}$  よりも小さかった。

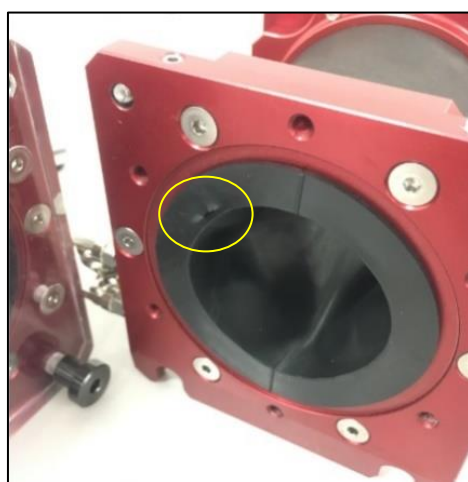


図 2.17 PRM 駆動による試料 B を用いた内側ゴムチューブの破断

表 2.7 引張試験と耐久試験の結果

試料名	引張試験結果		耐久試験結果	
	破断時平均 ひずみ (常温)	破断時平均 ひずみ (加温)	破断の有無	破断箇所
	[mm/mm]	[mm/mm]		
A	3.86	1.36	無し	—
B	2.44	0.83	有り (18 分, 19 分 40 秒)	熱交換ディスク側

### ゴムチューブ破断の推定メカニズム

試料のひずみ特性や耐久試験から、表 2.8 の通りゴムチューブ破断のメカニズムを推定した。熱負荷がかかって機械特性が低下しているゴムチューブが PRM 駆動で伸縮することで、特に機械負荷の集中するフランジ部で破断が生じると考えられる。

表 2.8 ギムチューブ破断の推定メカニズム

順	内容
1	熱交換ディスク側を中心に熱負荷によって ゴムチューブの機械特性が低下
2	PRM 駆動時、内側ゴムチューブフランジ部に 機械的負荷が集中
3	PRM 駆動によって、PRM フランジと内側 ゴムチューブが干渉
4	ネジとの接触などをきっかけに破断

#### 2.3.4 内側ゴムチューブ材料の選択

2.1 節で示した通り、推進薬の製造性を向上させるために熱交換機構によって推進薬を加温することは必要である。そのため、PRM・内側ゴムチューブにかかる熱負荷を考慮した上で PRM 駆動時の機械負荷に十分耐えうる、特に内側ゴムチューブの十分な狭窄に求められるひずみ特性を持つよう内側ゴムチューブ材料を選択せねばならない。今回は十分なひずみ特性を持つ試料 A を選択した。

## 2.4 本章のまとめ

本章では，熱交換ディスクの有用性評価と内側ゴムチューブの材料変更によるミキサの耐久性・捏和時の推進薬組成安定性向上を行った．内側ゴムチューブは推進薬組成が安定するように可塑剤移行の少ない NBR 素材に変更した．さらに，NBR 素材の内，PRM セグメントの内側ゴムチューブ狭窄に十分なひずみ特性を持つ材料に変更することで，PRM 耐久性を向上させた．

これらの装置改良によって，表 2.9 で示すように推進薬連続ミキサに要求される性能・機能の内，熱交換機構・装置耐久性・組成安定性を PRM は獲得した．次章以降，捏和機構を検討し，その上で捏和性能の評価を行う．

表 2.9 PRM 改良の結果

項目		条件	PRM (改良前)	PRM (改良後)
要求される 性能・機能	捏和性能	実用推進薬スラリを捏和 できる性能	—	—
	捏和効率	推進薬需要を満たす 適切な効率	—	—
	熱交換機構	推進薬の粘度を十分低減 できる加温性能	×	○
	装置耐久性	連続的な装置駆動が 可能な耐久性	△	○
	組成安定性	推進薬の組成に影響を 与えない機構	△	○

## 第3章 PRM の推進薬捏和機構に関する検討

---

### 3.1 PRM の捏和機構検討の手順

本章では PRM の推進薬捏和機構に関して検討を行う。PRM は空気圧人工筋肉を用いた消化管規範の蠕動運動によって捏和を行う初めてのミキサである。粘稠な混合物の捏和が進行する機構には未解明な部分が多く、操作パラメータも印加する圧縮空気の圧力など独特である。加えて、推進薬の捏和が進行するに従って変化する推進薬の物理特性も捏和機構の理解を複雑にしている。

そこで、まずは様々な物理特性を示す複数組成の模擬推進薬を用いて、実験的に PRM セグメントの蠕動収縮動作と混合物物理特性との相関を考察した。この考察を元に、PRM の蠕動運動によって推進薬の捏和が進行する機構を推察した。推進薬を実際に捏和し、X 線 CT によって充填構造の変化を可視化することで、捏和機構の推察が妥当であることも検証した。

### 3.2 PRM セグメントの蠕動収縮動作

#### 3.2.1 蠕動収縮動作によるポンプ機能に関する先行研究

図 3.1 に PRM セグメントの蠕動収縮動作のモデルを示す。PRM および蠕動運動型ポンプのセグメントの圧縮空気チャンバに圧縮空気が印加されると、圧縮空気チャンバは膨張する。これに従い、人工筋肉チューブは軸方向に収縮し、内側ゴムチューブは 4 つの凸形状を形成しながら狭窄する。また、圧縮空気の圧力が十分である場合、内側ゴムチューブは完全に閉塞する。

先行研究では、このセグメント蠕動収縮動作を利用したポンプ機能に関する研究が行われていた。セグメント内に粉体・流体・固液混相流体が充填されている場合、セグメントが蠕動収縮動作を行うと、圧縮空気チャンバ膨張によってそれらがセグメント外に押し出される。セグメント蠕動収縮による押し出しを適切な収縮動作間隔で複数セグメント連動させることで、ポンプ機能を発現させることができる。Suzuki ら<sup>[62]</sup> は水や菜種油の搬送、Hirayama ら<sup>[63]</sup> は適切な収縮動作間隔で水の搬送を行った場合、その搬送圧力は印加した圧縮空気圧と近い値を示すことを明らかにした。さらに水と粒径 6 mm のポリプロピレン樹脂ビーズの混相流体の搬送に成功した。Yoshihama ら<sup>[69]</sup> はプリンタのインクトナー（粒径 5  $\mu\text{m}$ ）およびそのキャリア（粒径 35  $\mu\text{m}$ ）からなる乾式粉体の搬送に成功した。

蠕動収縮によるセグメントの狭窄率 $r_L$ は、軸方向から見た圧縮空気印加前のセグメント開口面積に対する、圧縮空気を印加した場合の開口面積の比 [%](式(3.1)) で定義されている。また圧縮空気チャンバ膨張による粉体や流体のセグメント外部への押し出し率 $r_E$ は圧

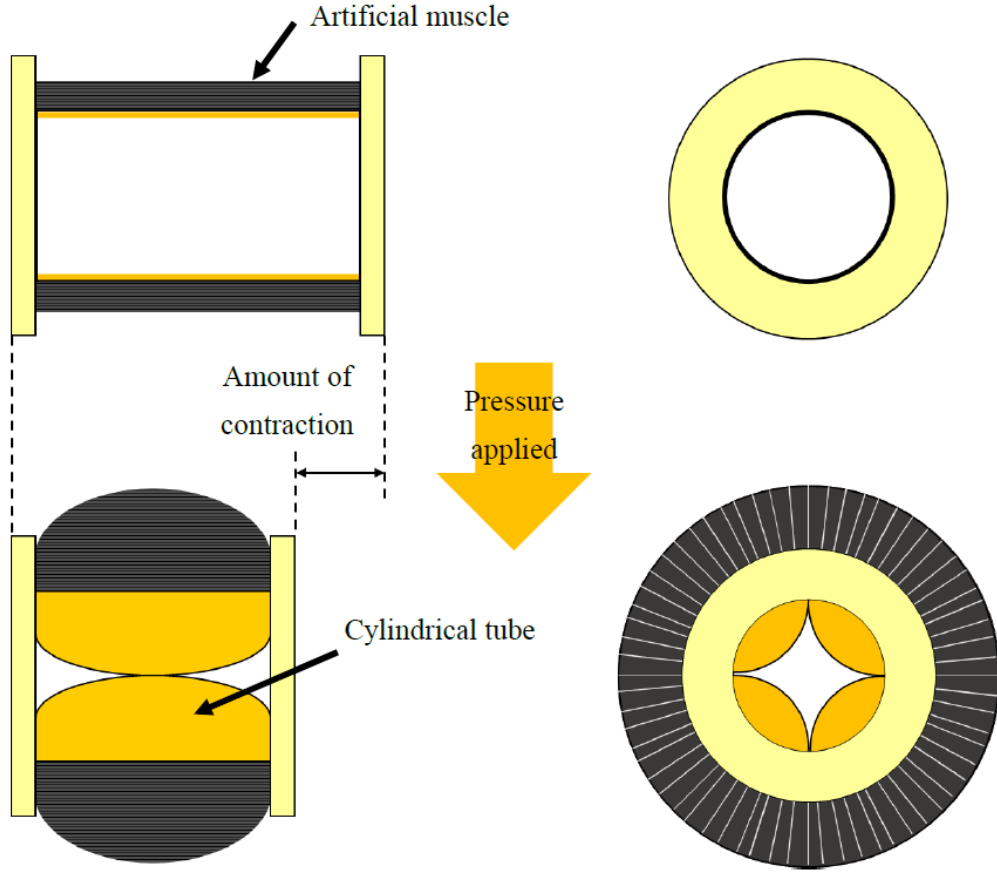


図 3.1 PRM セグメント蠕動収縮動作のモデル

縮空気印加前におけるセグメント内の内容物体積に対するセグメント外部へ押し出された内容物体積の比率 [%] (式(3-2)) で定義されている。

$$r_L = \frac{S_0 - S_C}{S_C} \times 100 \quad (3-1)$$

$$r_E = \frac{\Delta V_E}{V_{\text{Seg}}} \times 100 \cong \frac{M_E}{M_0} \times 100 \quad (3-2)$$

ここで、 $S_0$ は圧縮空気印加前のセグメント開口面積、 $S_C$ は圧縮空気印加後のセグメント開口面積、 $\Delta V_E$ は圧縮空気印加後にセグメント外に押し出された内容物体積（押し出し体積）、 $V_{\text{Seg}}$ は圧縮空気印加前のセグメント内の内容物体積である。押し出された内容物の密度が変化しない場合、押し出し率 $r_E$ はセグメント内の内容物重量に対するセグメント外部へ押し出された内容物重量の比率でも表すことができる。 $M_E$ は圧縮空気印加後にセグメント外に押し出された内容物重量、 $M_0$ は圧縮空気印加前のセグメント内の内容物重量である。

また、押し出し体積 $\Delta V_E$ に関して、セグメントの片端をフランジで閉塞し軸を鉛直方向に設置した状態では次の式(3-3)が成立する．人工筋肉の収縮とチャンバ膨張による体積排除の二つのメカニズムが複合して押し出しが行われるため、押し出し体積 $\Delta V_E$ はこれらの和となる（図 3.2）． $\Delta V_C$ はチャンバ膨張による排除体積、 $\Delta L$ は人工筋肉収縮による軸方向収縮長さ、 $d$ は内側ゴムチューブ内径である．

$$\Delta V_E = \Delta V_C + \Delta L \cdot \frac{d^2}{4} \pi \quad (3-3)$$

Saito ら<sup>[64]</sup> の研究では、印加圧縮空気圧 40 kPa で狭窄率 $r_L$ が 100% (完全閉塞) となるよう内側ゴムチューブの物性、内側ゴムチューブの改良を施した．伴<sup>[68]</sup> はセグメント内部が大気圧開放されている場合と内部に水が充填されている場合の狭窄率 $r_L$ の違いを取得した（図 3.3）．印加圧縮空気圧 5 kPa では水の有無によって狭窄率に違いが生じたが、それ以上空気圧では狭窄率に水の有無の影響はわずかであった．また、セグメント内部に高粘性流体の SPA 水溶液（温度 20°C で粘度 19 Pa・s）が充填されている場合、完全閉塞する印加圧縮空気圧は 40 kPa より高い 60 kPa であった．さらに伴は、セグメントの片端をフランジで閉塞し軸を鉛直方向に設置した状態で、セグメント内部に水が充填されている場合の押し出し率 $r_E$ を取得した（図 3.4）．圧縮空気圧増加に従い、完全閉塞する圧力である 40 kPa を超えても押し出し率 $r_E$ は増加した．これは水の押し出しが圧縮空気チャンバ膨張による体積排除に依存しているためである．

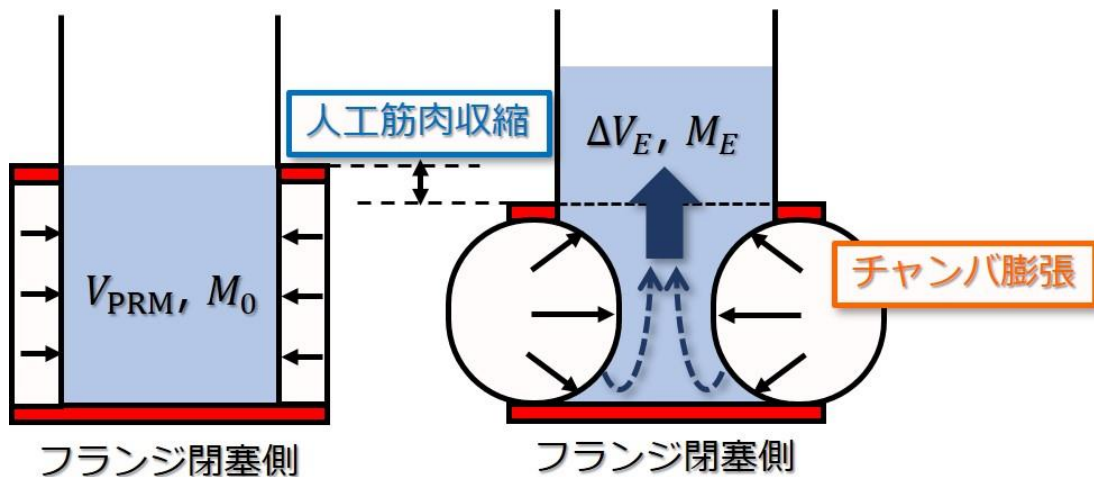


図 3.2 内容物押し出しと人工筋肉収縮・圧縮空気チャンバ膨張の関係

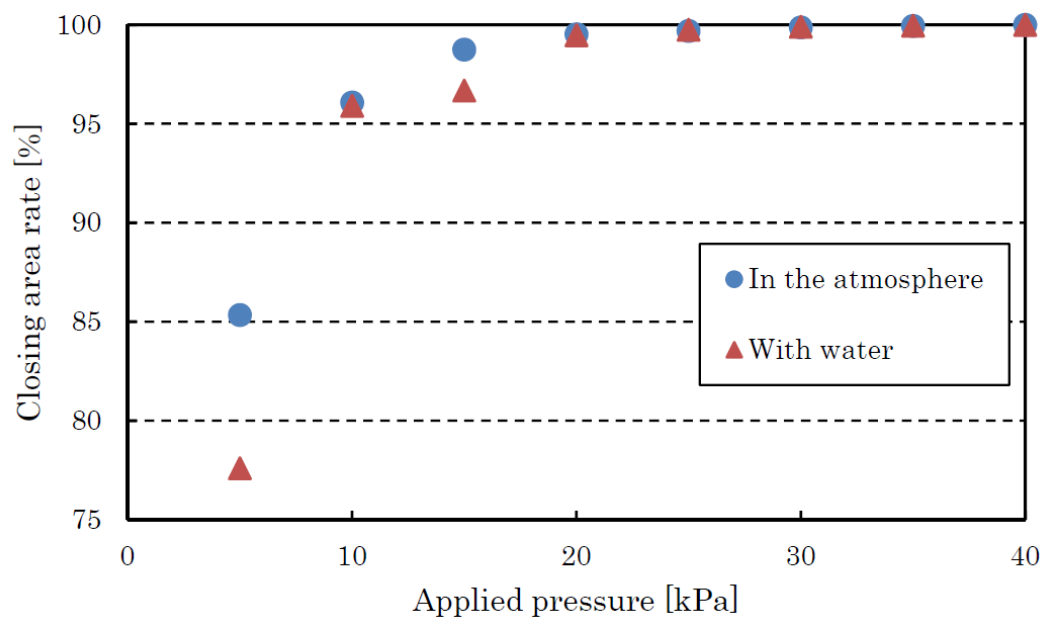


図 3.3 印加圧縮空気圧と狭窄率の相関<sup>[68]</sup>

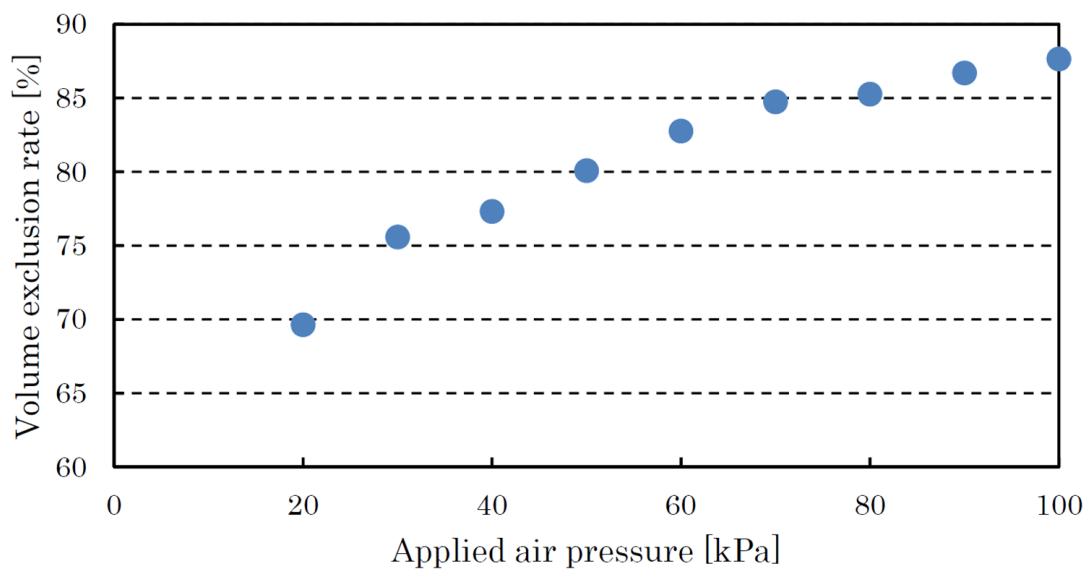


図 3.4 印加圧縮空気圧と押し出し率の相関<sup>[68]</sup>



### 3.2.2 蠕動収縮による押し出し

#### 非圧縮性流体の押し出し

図 3.2 の様に非圧縮性流体が押し出される場合，膨張するチャンバ内の圧縮空気圧がセグメント内部の非圧縮性流体全体に伝播し，チャンバ膨張に従ってフランジ閉塞側の流体もフランジ開放側へ流動して流体が外部に押し出されると考えられる．この考察に関しては，図 3.2 の様に水が押し出される場合の押し出し圧力がほぼ圧縮空気圧に一致している（図 3.5）<sup>[70]</sup> ことから，妥当と考えられる．

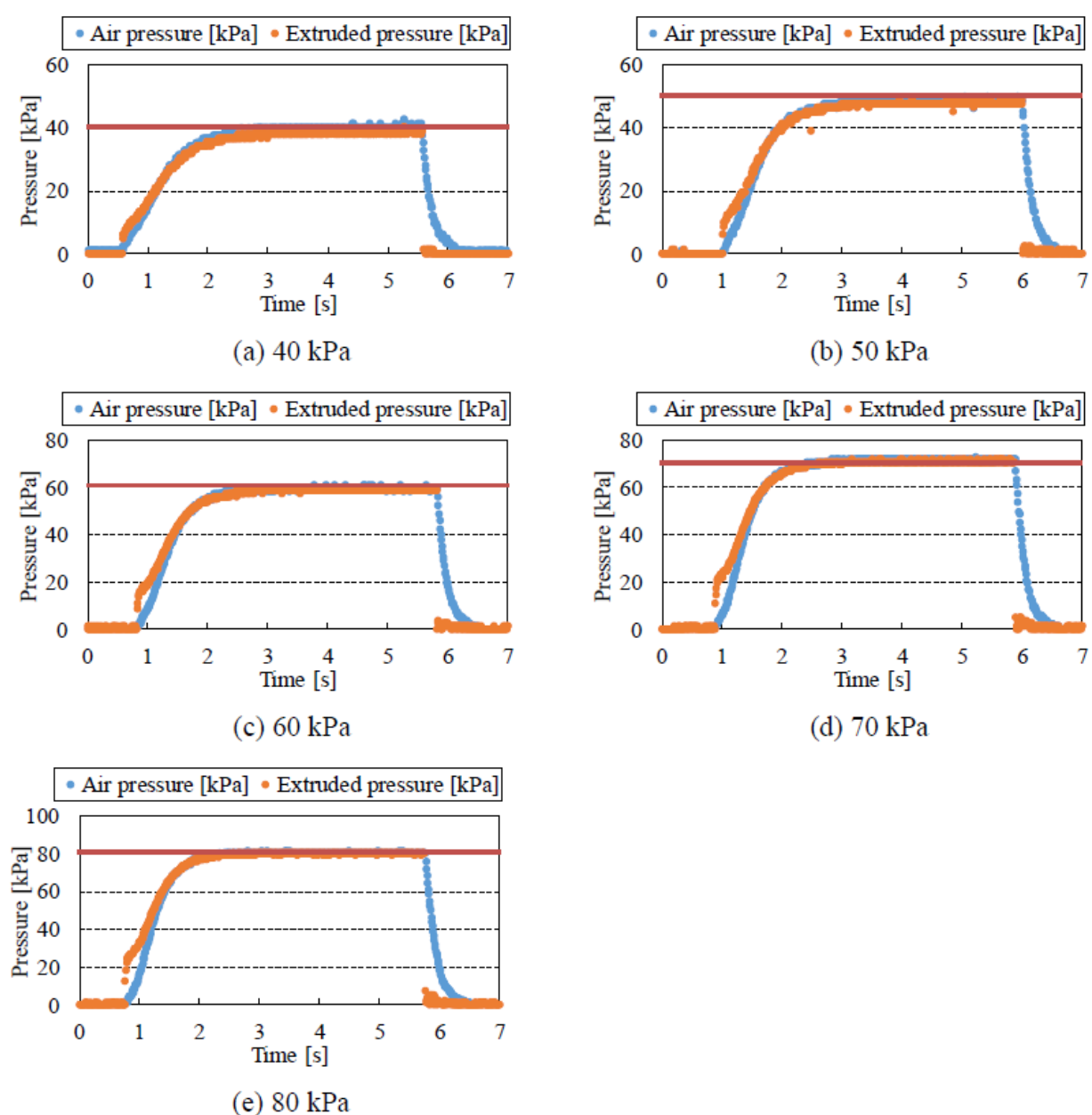


図 3.5 印加圧縮空気圧と水の押し出し圧力の相関<sup>[70]</sup>

## 粉体やペーストの押し出し

セグメント内部に粉体やペーストといった流動性のない内容物が充填されている場合、フランジ閉塞側への圧縮空気チャンバ膨張に対して内容物による抵抗が予想される。一方、流動性はなくとも内容物の変形やフランジ開放側へのチャンバ膨張によって、流体よりは少ない押し出し率ながら押し出しが行われると考えられる。

推進薬の捏和を考える場合、このような粉体・ペーストに対するセグメントの蠕動収縮動作を把握することが重要となってくる。そこで、この粉体・ペーストに対する押し出しに関しては実際に実験を行い、上記の予想を検証することとした。

### 3.2.3 PRM セグメント蠕動収縮実験

複数組成の模擬推進薬試料を PRM セグメント内に充填し、セグメントを蠕動収縮させた。蠕動収縮による模擬推進薬試料の押し出しから、試料の物理特性と押し出し率 $r_E$ の相関に関して考察を行った。

## 実験試料

実験試料には AP (密度 1.95 g/cm<sup>3</sup>) を KCl (密度 1.99 g/cm<sup>3</sup>) に置き換えた模擬コンポジット推進薬を用いた。原料に HTPB (密度 0.89 g/cm<sup>3</sup>; P-41, JSR), Al 粉 (メディアン径 5  $\mu$ m; TFH-A05P, 東洋アルミニウム), 塩化カリウム (以下, KCl) を用いた。KCl は篩にかけ、目開き 425  $\mu$ m を通過し目開き 300  $\mu$ m の篩上に残るものを用いた。これらの試料原料の組成を変えることで試料の物理特性を変化させた。各原料を 60°C 設定の恒温槽内で 15 分真空脱気処理し、HTPB と Al 粉末をプラネタリミキサ (ACM-0.8TVJ, 愛工舎製作所) で 10 分真空予捏和した。その後得られた予捏和スラリに KCl を投入し、さらに 30 分真空捏和して模擬推進薬を作製した。プラネタリミキサの攪拌ブレードの設定は公転速度 7.8 rpm, 自転速度 15.0 rpm とした。プラネタリミキサの熱交換ジャケットには 65°C の温水をサーキュレータより導通させ、内部模擬推進薬の加温を行った。

作製した試料の組成と物理特性、密度を表 3.1 にまとめる。HTPB と Al の重量比はどの実験試料でも一定とした。SP-1 は予捏和スラリが KCl 粒子の周りを被覆しており、SP-2 がペースト、SP-3 がスラリであった。また、SP-1・SP-2・SP-3 の試料の様子を図 3.6 に示す。

表 3.1 模擬推進薬試料の組成・物理特性・密度

試料名	組成 [wt%]			物理特性		密度 [g/cm <sup>3</sup> ]
	HTPB	Al	KCl	流動性	塑性	
SP-1	4	6	90	無	無	0.918
SP-2	12	18	70	無	有	1.414
SP-3	20	30	50	有	有	1.768

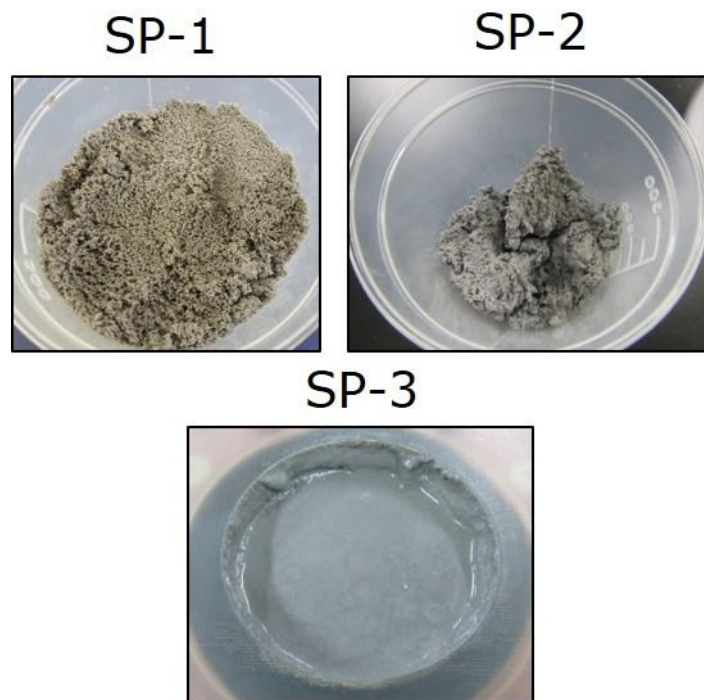


図 3.6 模擬推進薬試料の様子

## 実験系

PRM セグメントを垂直に置き，下端をフランジで閉口，上端を内側ゴムチューブ内径と等しい内径 55 mm のアクリル樹脂円筒と接続した (図 3.7)．垂直に置いた際のフランジ間の人工筋肉軸方向長さは 71.3 mm であった．また PRM セグメント内体積は 253.1 cm<sup>3</sup> であった．セグメントにはコンプレッサからレギュレータ・二方弁を通じて圧縮空気回路を接続した．圧縮空気圧の調整はレギュレータによって行った．実験系を図 3.8 に示す．

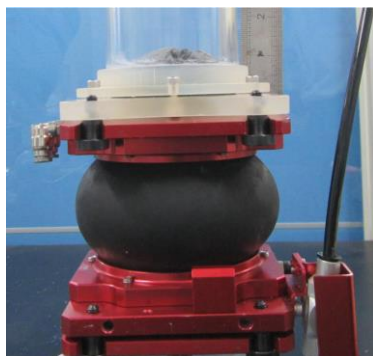


図 3.7 PRM セグメント

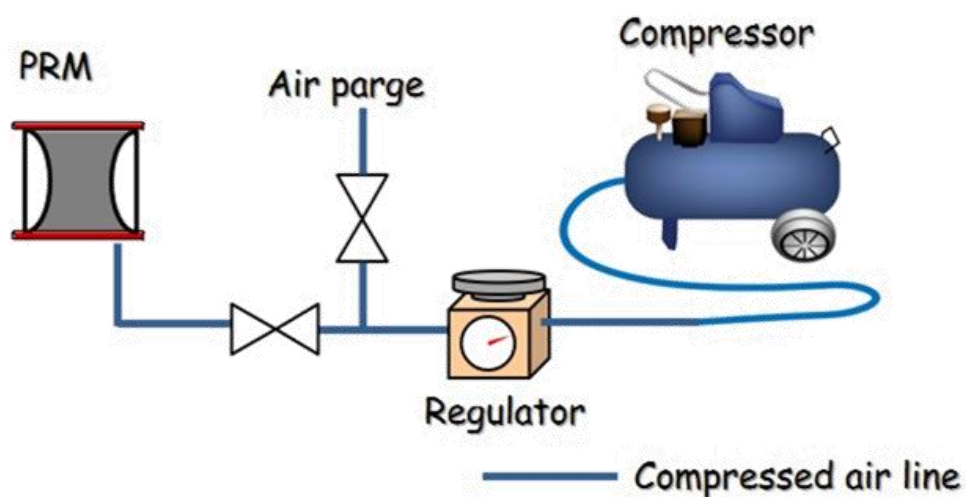


図 3.8 PRM セグメント蠕動収縮実験

## 実験方法

実験は、5つの試料（3つの模擬推進薬と KCl 粒子、HTPB プレポリマ）をそれぞれ用いて、印加圧縮空気圧 10 ～ 80 kPa の範囲で 10 kPa ごとに 8 基準行った。試料をセグメントに摺り切りで投入した。二方弁を開いて圧縮空気を印加、PRM セグメントを蠕動収縮させた。セグメント収縮させたままセグメントを 5 分間静置した後、圧縮空気印加時の人工筋肉軸方向長さおよび収縮によってセグメントから押し出された試料の重量を測定した。重量測定では、KCl 粒子・SP-1・SP-2 の場合、押し出された試料を匙で回収し重量を秤で測定した。SP-3・HTPB の場合、アクリル円筒内の液面高さを測定し、試料密度から重量を算出した。人工筋肉長さは各試料の実験 1 回につきノギスで 3 回計測した。実験は各試料で 3 回ずつ行った。

### 3.2.4 試料の物理特性と押し出し率の相関

#### 試料の押し出し率

各試料の印加圧縮空気による押し出し率 $r_E$ の変化を図 3.9 に示す。流動性の有無で押し出し率 $r_E$ に大きな違いが見られる。液状ゴムの HTPB やスラリの SP-3 は押し出し率 $r_E$ が大きく、印加空気圧増加に従って増加した一方で、流動性の無い粉体の KCl 粒子や SP-1・SP-2 は押し出し率 $r_E$ が小さく、印加圧縮空気圧が大きくなるにつれて押し出し率の増加が小さくなった。

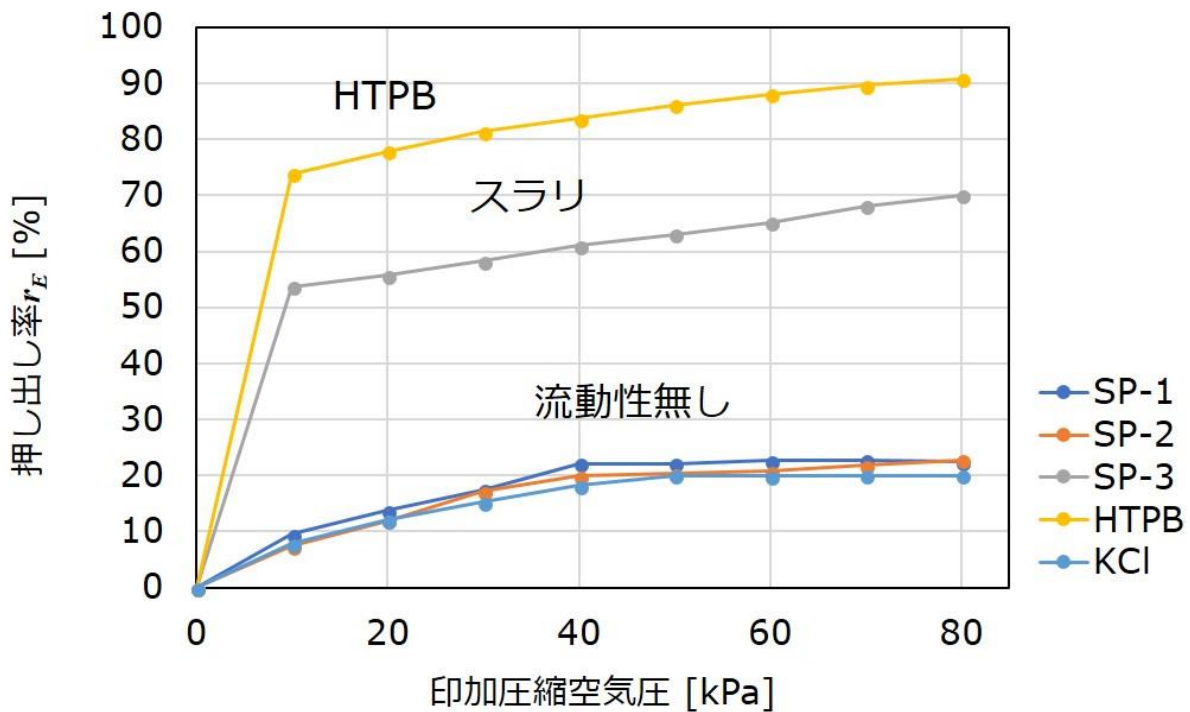


図 3.9 印加圧縮空気圧による押し出し率 $r_E$ の変化

#### 人工筋肉の軸方向収縮長さの変化

図 3.10 に印加圧縮空気圧による人工筋肉の軸方向収縮長さ $\Delta L$ の変化を示す。試料によらず同様の傾向であり、圧力上昇に従って収縮長さ $\Delta L$ の変化は小さくなった。これは人工筋肉の収縮特性とも同傾向であり、試料によらず人工筋肉の特性を示していると考えられる。

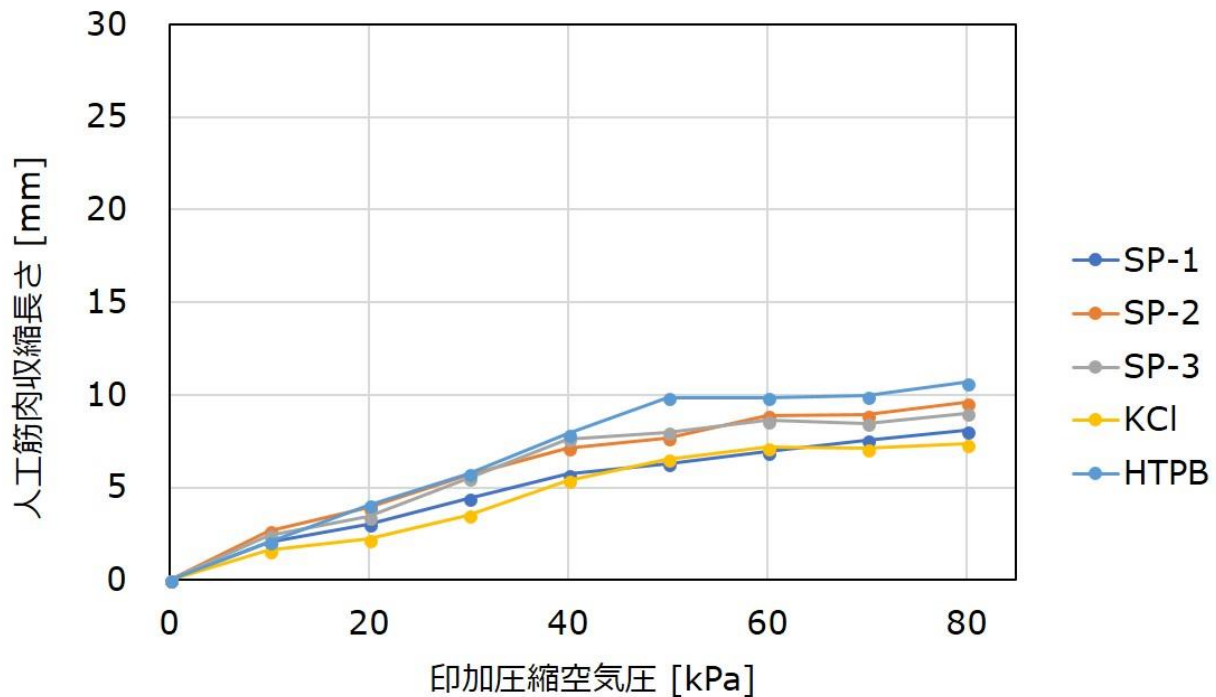


図 3.10 印加圧縮空気圧による人工筋肉収縮長さの変化

### 押し出し率の比較

印加圧縮空気圧 60 kPa における各試料の押し出し率 $r_E$ を比較すると図 3.11 のようになった。SP-3・HTPB の押し出し率 $r_E$ は 60%以上である一方で、KCl 粒子・SP-1・SP-2 の押し出し率 $r_E$ はいずれも約 20%となっている。

さらに、図 3.11 では各試料の押し出し率 $r_E$ を圧縮空気チャンバ膨張による押し出し（橙）、人工筋肉の収縮による押し出し（青）で分けて示した。人工筋肉の収縮による押し出し率は計測した人工筋肉の軸方向収縮長さ $\Delta L$ から算出した。人工筋肉の収縮による押し出しは各試料でほぼ変わらず、6.5～9.2%の範囲であった。

人工筋肉の収縮は図 3.10 でも示した通り試料の影響が小さく、圧縮空気チャンバ膨張は試料の流動性有無の影響が大きいことが分かる。流動性の無い試料では、3.2.2 項での推察の通り、フランジ閉塞側への圧縮空気チャンバ膨張に対して試料の抵抗が発生するため、圧縮空気チャンバの膨張が進まず、試料は PRM セグメント内に残っていると考えられる。

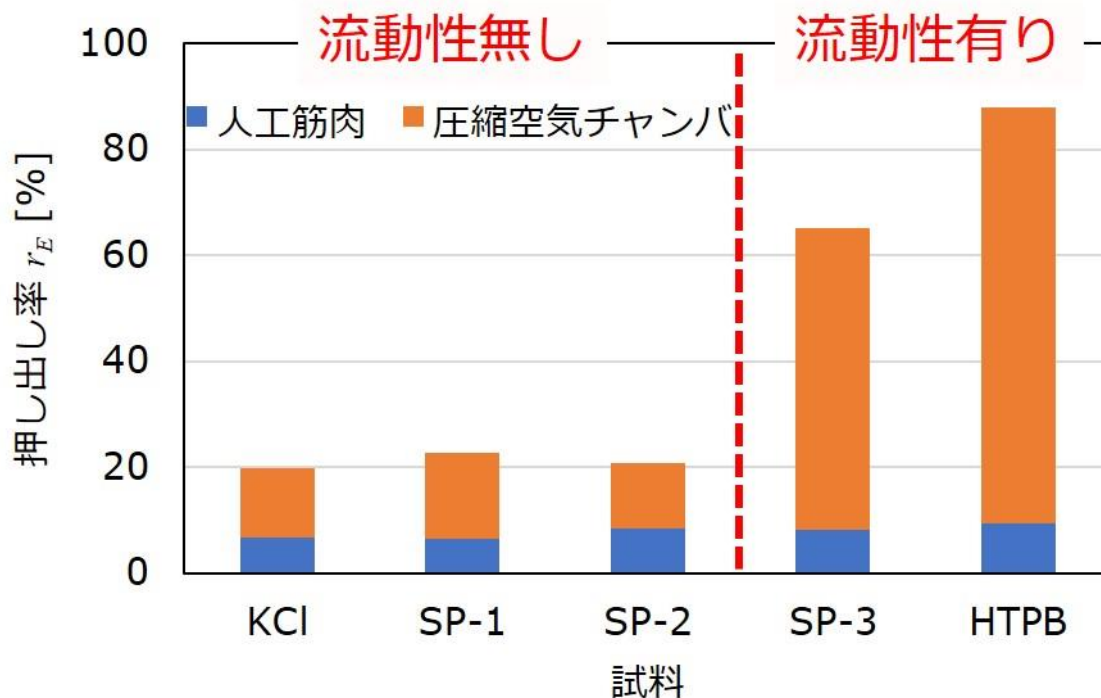


図 3.11 各試料の押し出し率  $r_E$  の比較

### 3.2.5 圧縮空気チャンバ膨張による試料の圧縮

3.2.2 項の通り，非圧縮性流体の押し出しでは圧縮空気チャンバ内の空気圧と試料の押し出し圧が同等であったため，試料には印加した空気圧が伝達され，PRM セグメント内に残った試料は，圧縮空気チャンバ内の空気圧に圧縮されると考えられる．そこで，流動性・塑性は無いが，KCl 粒子の周りを予捏和スラリが被覆しているため，バインダの接着力によって凝集塊の結合力は強い SP-1 を用いて，試料の圧縮を検証した．

印加圧縮空気圧 60 kPa で PRM セグメント蠕動収縮実験を行った後，セグメント内部に残った試料 SP-1 の形状・体積・重量を測定した．形状・体積の測定には三次元測定機 VL-300 (キーエンス) を用いた．

形状測定した結果を図 3.12 に示す．また図 3.12 中の赤線部に示す水平面での試料外周を図 3.13 に示す．図 3.13 の通り，試料 SP-1 には 4 方向から狭窄する内側ゴムチューブの跡が残っていた．計測した試料 SP-1 の体積と重量からかさ密度を算出し，蠕動収縮前と比較した (表 3.2)．蠕動収縮前後でかさ密度は  $0.918 \text{ g/cm}^3$  から  $1.060 \text{ g/cm}^3$  に増加した．

この密度増加および形状変化から，PRM セグメント内に残った試料は圧縮空気からの圧力によって圧縮されると考えられる．

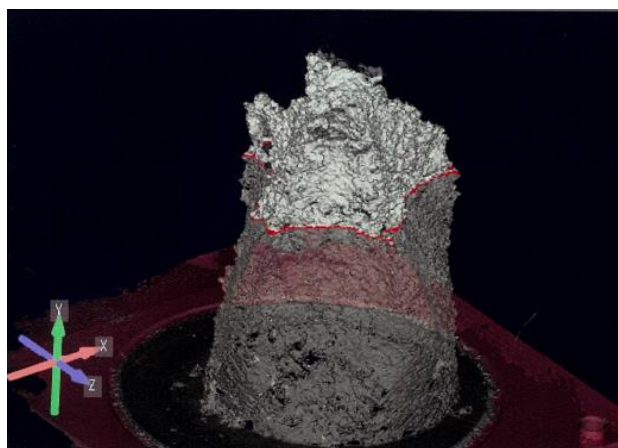


図 3.12 試料の形状計測結果

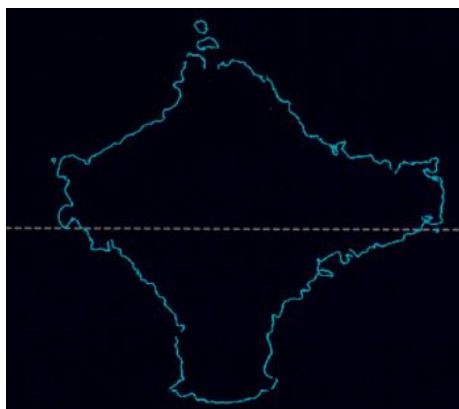


図 3.13 水平面での試料外周

表 3.2 蠕動収縮による試料 SP-1 の密度変化

蠕動収縮前 [g/cm <sup>3</sup> ]	蠕動収縮後 [g/cm <sup>3</sup> ]
0.918	1.060



### 3.3 捏和時に PRM 蠕動運動が与える作用

3.2 節より PRM セグメントの蠕動収縮によってセグメント内の内容物はセグメント外に押し出され、また蠕動収縮の中でも主に圧縮空気チャンバの膨張によって圧縮されることが分かった。PRM で推進薬を捏和する場合は、セグメントを複数連結させ、軸方向を水平にして用いる (図 3.14)。PRM のセグメント蠕動収縮を連動させ、すなわち PRM を蠕動運動させて捏和する場合、セグメント蠕動収縮による圧縮によって粒子間隙に予捏和スラリを押し込む作用が考えられる。さらに、セグメントの蠕動収縮によって推進薬を押し出し、隣のセグメントへの搬送する作用も働くと考えられる。

1.5.1 項で述べた通り、一般的に捏和操作は高粒子濃度の粘稠な混合物をせん断・圧縮・伸張・摩擦・曲げ・折り畳み・切断のうちいくつかを作用させることによって行う。また、これらの作用は移動・拡散・せん断の要素およびその複合で分類できる。そこで、PRM の蠕動運動が混合物に与える圧縮・搬送作用とその要素を挙げると表 3.3 の通りとなる。圧縮は分散要素、搬送は分配要素と捉えることができる。

また、3.2.4 項で示した通り、圧縮空気チャンバの膨張は流動性の有無に大きく影響される。セグメント蠕動収縮実験において、流動性の無い試料は押し出し率が小さい一方で、セグメント内部で圧縮される試料量が多い結果となった。逆に流動性の有る試料は押し出し率が高い結果となった。この結果から、捏和時に混合物の流動性によって、蠕動運動が与える圧縮・搬送作用が変化すると考えられる。また、推進薬の捏和が進行するに従い AP 粒子は予捏和スラリ (バインダ) に粘結され、全体的に流動性を持ち始めることを考慮に入れると、推進薬に流動性が無い状態では圧縮が主であり、推進薬が流動性を持ちスラリになると搬送が主になるように変わっていく (図 3.15)。

以上の推察から考えると、主に圧縮によって AP 粒子間隙に予捏和スラリ (バインダ) が浸透していくことで推進薬は全体的に流動性を持つていくと予想できる。すなわち、捏和進行には圧縮が重要であると考えることができる。次節では蠕動運動によって予捏和スラリが AP 粒子間隙に浸透することで確かに捏和が進行していくことを検証した。

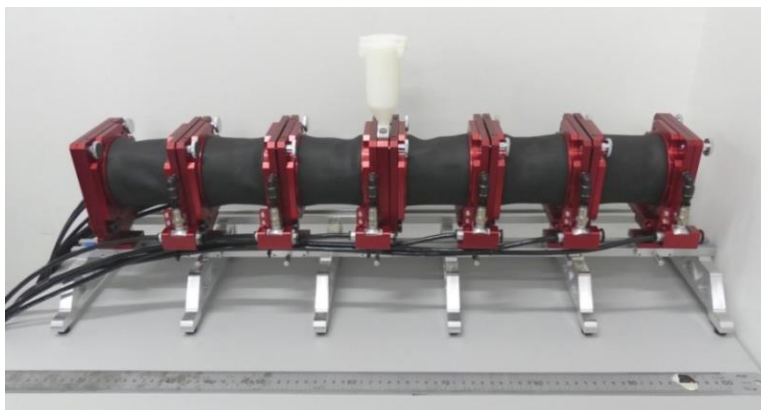


図 3.14 6 セグメント連結式 PRM

表 3.3 PRM 蠕動運動が与える作用とその要素

作用	作用詳細	要素	流動性を得る	
			前	後
圧縮	圧縮空気チャンバ内空気圧によって AP 粒子間隙に予捏和スラリを押し込む	分散	○	△
搬送	人工筋肉の収縮と圧縮空気チャンバ膨張 によって PRM 内で大きく動かす	分配	△	○

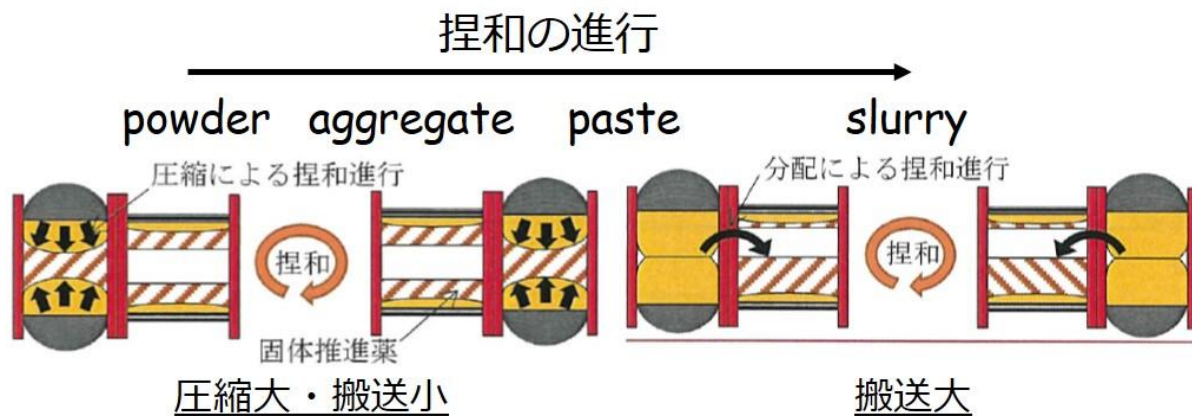


図 3.15 捏和進行に従って変化する蠕動運動の作用

### 3.4 PRM 蠕動運動による推進薬捏和進行の実証

#### 3.4.1 実証実験

##### 実験試料

実験には実コンボジット推進薬を用いた。原料には HTPB (P-41, JSR), Al 粉末 (TFH-A05P, 東洋アルミニウム), 3 粒度分布の AP 粒子 (粒径 400・200・50  $\mu\text{m}$ , 日本カーリット), DOA (和光特級, 和光純薬) を用いた。原料は全量で 400 g とし, 重量比率は HTPB: DOA: Al: AP = 12: 1: 18: 68 とした。各粒度分布の AP の重量比率は粒径 400  $\mu\text{m}$ : 200  $\mu\text{m}$ : 50  $\mu\text{m}$  = 60: 15: 25 とした。

PRM で捏和を行う前に, HTPB・DOA・Al 粉末はプラネタリミキサ (愛工舎) で予め捏和した。予捏和では 15 分間真空捏和を行った。プラネタリミキサの熱交換ジャケットに温水 (65°C) を流し, 熱交換を行った。

## 実験装置

PRM セグメントの設計は内側チューブ内径 60 mm, 内側チューブ軸方向長さ 90 mm とし, 2 セグメントを連結させて用いた. セグメントの間には熱交換ディスクを挟み, ディスク内に温水 (サーキュレータ設定温度 80°C) コンプレッサからの圧縮空気はレギュレータと電磁弁を通じて PRM に印加された. 実験系を図 3.16 に示す. PRM の収縮動作間隔は 6 秒, 印加圧縮空気圧は 50 kPa とした. 圧縮空気圧の調節はレギュレータを用いて行った.

## 捏和実験手順

予捏和スラリと AP 粒子を全量投入し, 混合開始から 10 分毎に PRM 内部を観察した. 捏和時間 30・70・150 分ではさらに少量試料を採取し, X 線 CT スキャンを行った.

## 捏和試料の X 線 CT スキャン

採取した推進薬試料は内径 12 mm のアクリル樹脂チューブに詰めて測定を行った. 捏和時間 150 分の試料は流動性が有り, 常温脱気処理を行った後にチューブに詰めた. X 線 CT スキャナには TOSCANER 32300 $\mu$ FPD (東芝) を用い, スキャン条件は管電圧 130 V, 管電流 300  $\mu$ A, スライス厚 0.099 mm, ピクセル数は 1024  $\times$  1024 pixel とした. 画像の輝度値のダイナミックレンジは 16 bit とした.

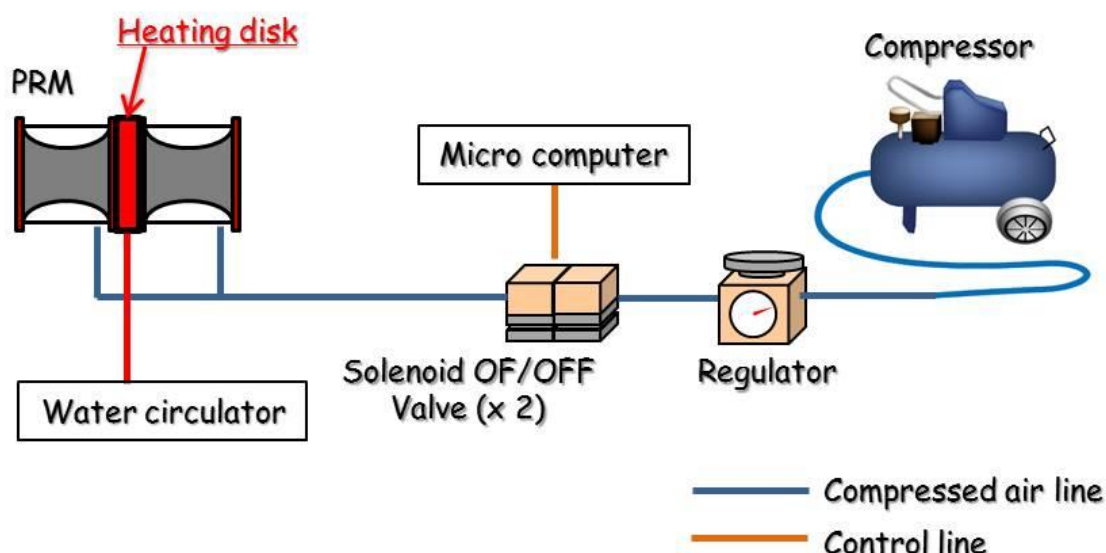


図 3.16 PRM による推進薬捏和実験

### 3.4.2 PRM 蠕動運動による推進薬の様子の変化

図 3.17 に捏和時間 10 分から 100 分までの PRM 内部の推進薬の様子を示す．捏和時間 10 分では AP 粒子表面への予捏和スラリの濡れが進んでおらず，白い粒子表面が確認された．捏和時間 30 分から予捏和スラリと AP 粒子の凝集塊が確認され，捏和時間 60 分では凝集塊がまとまり塑性のあるペースト状となった．凝集塊が生じ，まとまっていくに従い，目視で確認できる AP 粒子の白い表面は少なくなっていく．その後，捏和時間 80 分以降，混合物は流動性のあるスラリとなった．









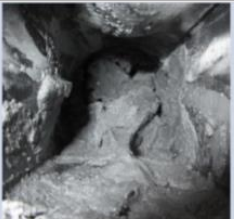

Mixing time [min]				
10	20	30	40	50
				
Powder + Wetting powder agglomerates	Powder + Wetting powder agglomerates	Powder + Wetting powder agglomerates	Powder + Wetting powder agglomerates	Powder + Paste
60	70	80	90	100
				
Paste	Paste	Slurry	Slurry	Slurry

図 3.17 PRM 蠕動運動による推進薬の様子の変化

### 3.4.3 試料の X 線 CT スキャン画像

図 3.18 は捏和時間 30 分の試料，図 3.19 は捏和時間 70 分の試料，図 3.20 は捏和時間 150 分の試料のそれぞれ X 線 CT スキャン画像である．表 3.3 と同様，AP 粒子の輝度が高く，予捏和スラリの輝度が低くなった．

図 3.18 の(a)，(b)は捏和時間 30 分の同一試料中の別々の位置をスキャンした断層画像である．空隙が多く，(b)では大きなクラックが確認できた．図 3.18 の(c)，(d)はこれらの画像における特徴的な部分を拡大した画像である．(c)では輝度の低い予捏和スラリが多く凝集した部分，(d)では輝度の高い AP 粒子が多く凝集した部分が見られた．捏和時間 30 分では，予捏和スラリも AP 粒子も互いに凝集しており，AP 粒子間隙を満たして粒子を粘結す

る予捏和スラリが少ないと考えられる．図 3.19 の(a), (b)は捏和時間 70 分の同一試料中の別々の位置をスキャンした断層画像である．(a)のように予捏和スラリが多く凝集し，大小の空隙も多い領域が見られる一方，(b)のように試料内の別の場所では，粒子間隙を予捏和スラリが埋め，AP 粒子を粘結している部分も確認された．図 3.20 では捏和時間が 150 分となり，試料もスラリ状となっている試料の X 線 CT スキャン画像である．全体的に AP 粒子間隙に予捏和スラリが浸透し，AP 粒子を粘結している．CT スキャンで得られた断層画像を全て確認しても，空隙は確認できなかった．

以上のように，捏和時間が長くなる従い，凝集していた予捏和スラリが AP 粒子の表面に濡れていき，AP 粒子間隙に浸透していく様子が確認された．

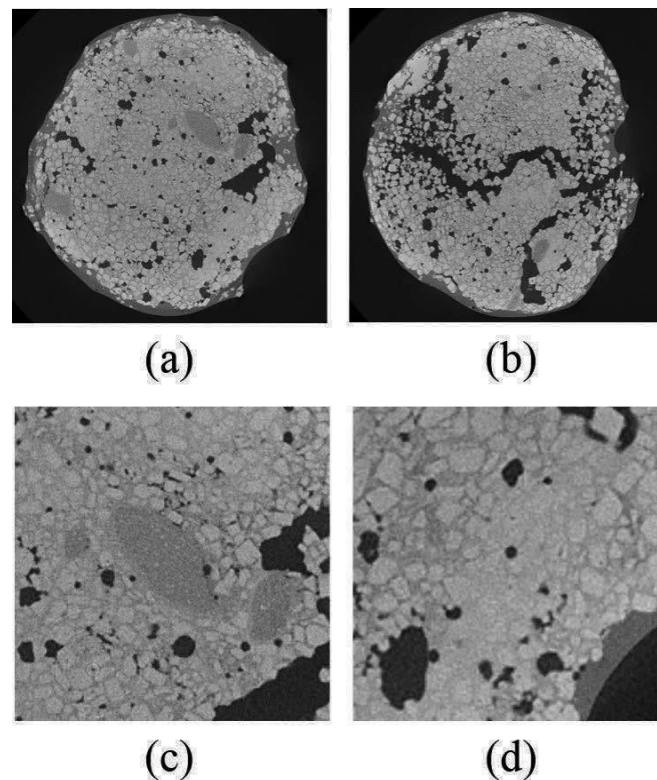


図 3.18 捏和時間 30 分のコンポジット推進薬の X 線 CT スキャン画像

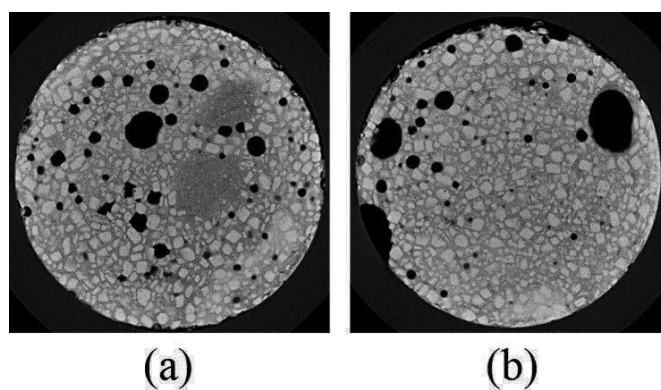


図 3.19 捏和時間 70 分のコンポジット推進薬の X 線 CT スキャン画像

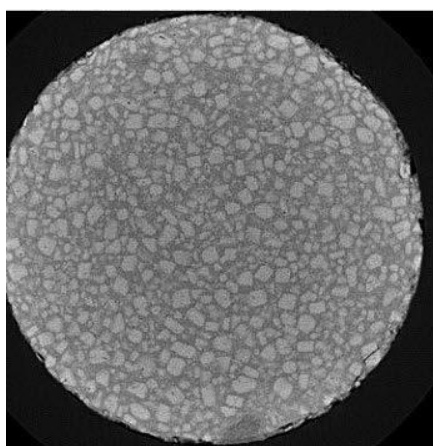


図 3.20 捏和時間 150 分のコンポジット推進薬の X 線 CT スキャン画像

#### 3.4.4 PRM 蠕動収縮による推進薬捏和の進行

推進薬の様子の変化や X 線 CT スキャン画像から，PRM の蠕動運動によって AP 粒子間隙に予捏和スラリが浸透していることが確認された．また，実際に推進薬スラリが得られていることから，確かにこの予捏和スラリ浸透を主として捏和が進行していると考えられる．



### 3.5 本章のまとめ

本章では、PRM の捏和機構に関して検討を行った。まず、PRM セグメントの蠕動収縮によってセグメント内容物はセグメント外に押し出され、また内部に残った内容物は圧縮されることを実験的に明らかにした。さらにこの蠕動収縮による押し出しは内容物の流動性の有無に影響を受け、流動性の有るものは高い押し出し率、流動性の無いものは低い押し出し率であった。

これらの結果から、PRM で推進薬を捏和する場合、推進薬が流動性を持つまでは圧縮が主であり、AP 粒子間隙に予捏和スラリが浸透することで主に捏和が進行すると推察された。また、推進薬がスラリとなると PRM 内を大きく搬送されることで主に捏和が進行すると考えられた。特に推進薬の捏和進行に重要な圧縮による予捏和スラリの浸透が行われていることを実推進薬捏和実験によって実証した。

## 第4章 適正捏和条件の抽出

---

### 4.1 効率良く捏和を行う条件

効率良く捏和を行うためには第3章における考察に基づき、PRM 蠕動運動が推進薬に与える作用（圧縮及び搬送）を高めることができるように捏和条件を整えることが重要である。特に AP 粒子間隙へのバインダ浸透が進んでおらず、まだ流動性が無い推進薬に対して適正に圧縮・搬送を作用させることで、推進薬を効率よく捏和することができる。

表 3.3 で示したように、推進薬に流動性が無い場合、蠕動運動によって与えられる作用は圧縮が主であり、搬送作用は小さい。まず、効率良く捏和を行うためには、十分な圧力の圧縮空気を印加することで蠕動運動による圧縮作用を高めることが有効である。しかしながら、十分な印加圧縮空気圧で PRM を駆動させたとしても、流動性の無い推進薬では搬送作用が小さく隣のセグメントへ推進薬が搬送されず、結果的に推進薬全体に蠕動収縮を与えることができない場合も考えられる。このような状態を回避するためには、PRM へ適切な仕込み量を投入することが有効である。

そこで本章では、印加圧縮空気圧および仕込み量に関して適正な条件を実験的に検討した。

### 4.2 適正な印加圧縮空気圧の検討

#### 4.2.1 セグメント蠕動収縮による押し出しと印加圧縮空気圧の相関

3.2 節の PRM セグメント蠕動収縮実験において、液状ゴムの HTPB やスラリの SP-3 は押し出し率 $r_E$ が大きく、印加空気圧増加に従って増加した一方で、流動性の無い粉体の KCl 粒子や SP-1・SP-2 は押し出し率 $r_E$ が小さく、印加圧縮空気圧が大きくなるにつれて押し出し率の増加が小さくなった。ここで、特に流動性の無い KCl 粒子・SP-1・SP-2 に注目すると、40 kPa 以上の印加圧縮空気圧では押し出し率 $r_E$ が約 20%から変化が小さい（図 3.9、以下に再掲）。これは印加圧縮空気圧 40 kPa 以上では試料が十分圧縮され、これ以上試料が変形しない状態になっているためと考えられる。

また 3.2.1 項で述べた通り、セグメント内部が大気開放されている場合、印加圧縮空気圧 40 kPa でセグメントは完全に閉塞する（図 3.3）。そのため、40 kPa 以上では圧縮空気チャンバの膨張は閉塞に十分と考えられる。これもセグメント蠕動収縮実験において、印加圧縮空気圧 40 kPa 以上では試料が十分圧縮されていると推測する根拠となる。

以上より、PRM で推進薬を捏和する場合も、推進薬を十分圧縮するためには印加圧縮空気圧 40 kPa 以上が必要であろうと考えられる。そこで、実際に捏和実験を行い、印加圧縮空気圧の影響を考察した。



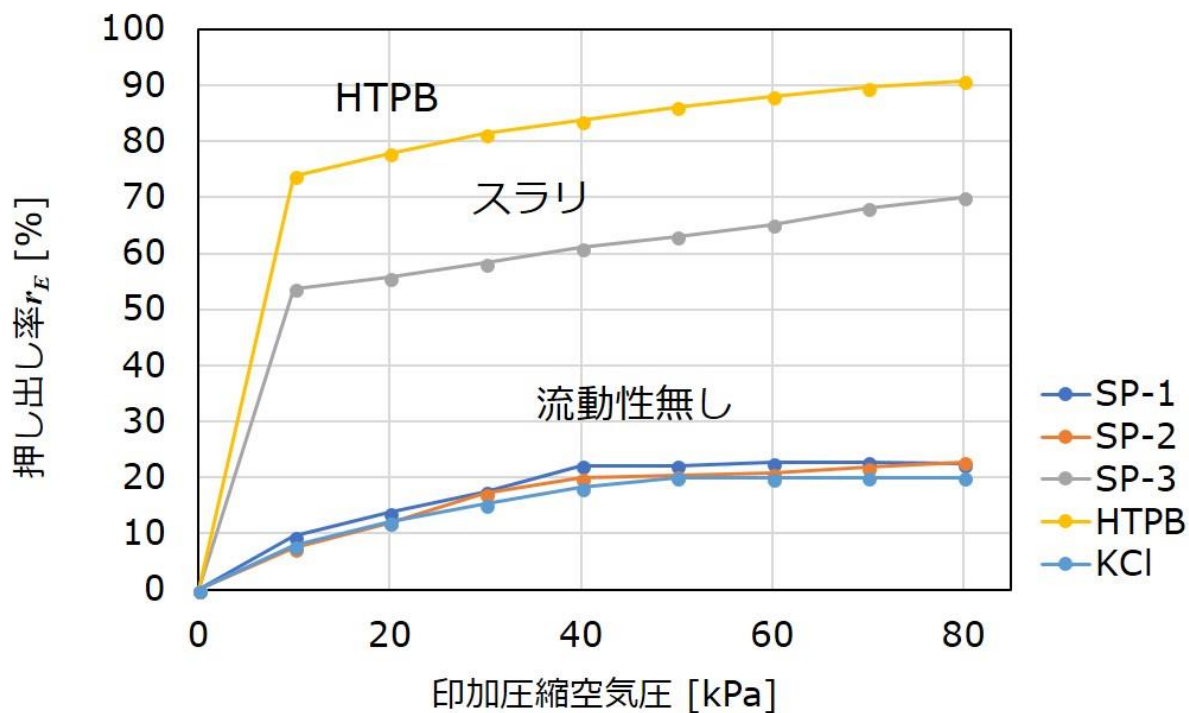


図 3.9 印加圧縮空気圧による押し出し率  $r_E$  の変化 (再掲)

## 4.2.2 捏和実験

### 実験試料

実験試料には HTPB (LBP2000, Cray valley) と 3 つの粒度分布のガラスビーズ (篩通過 80 % 粒度分布 425 ~ 300  $\mu\text{m}$ : J-46・篩通過 80 % 粒度分布 250 ~ 180  $\mu\text{m}$ : J-70・篩通過 80 % 粒度分布 75 ~ 38  $\mu\text{m}$ : J-320, すべてポッターズ・バロティニー) を用いた. 試料全量は 350 g とし, 試料の重量比は HTPB: ガラスビーズ = 40: 60 とした. ガラスビーズそれぞれの重量比は J-46: J-70: J-320 = 60: 15: 25 とした. 試料を十分混和させた混合物は粘度 55.6 Pa $\cdot$ s のスラリとなった.

### 実験装置

PRM セグメントの設計は内側チューブ内径 60 mm, 内側チューブ軸方向長さ 90 mm とし, 2 セグメントを連結させて用いた. コンプレッサからの圧縮空気はレギュレータと電磁弁を通じて PRM に印加された (図 4.1). 圧縮空気圧の調節はレギュレータを用いて行った. 印加圧縮空気圧をパラメータとして, 10 ~ 70 kPa で動作させた. PRM の収縮動作間隔は 6 秒とした.

## 実験手順

実験試料を全量 PRM に投入し，各圧縮空気印加圧力でそれぞれ 36 分駆動させた．その後，得られたコンパウンドの様子を確認し，コンパウンドのうち，スラリ状態の部分を PRM 中央部から 3 点，端部から 3 点抽出し，振動式粘度計（VM-10A-H，セコニック）で粘度を測定した．

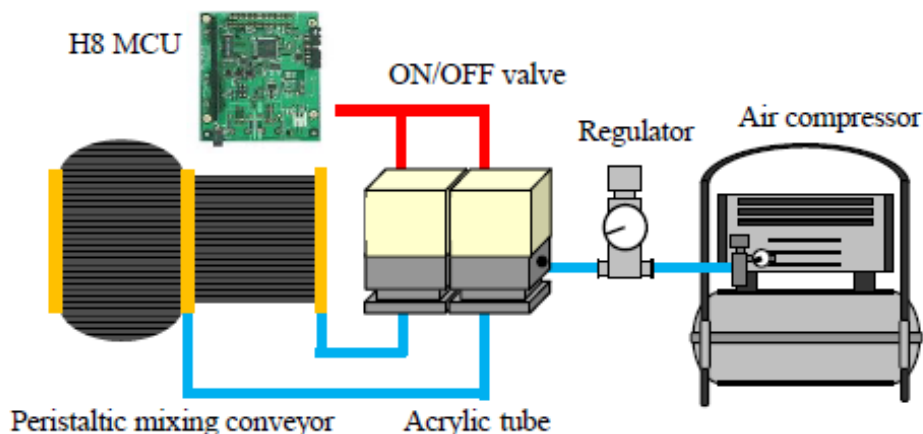


図 4.1 HTPB とガラスビーズの捏和実験

### 4.2.3 捏和した試料の粘度分散と印加圧縮空気圧との相関

実験結果を図 4.2 に示す．縦軸は測定した 6 点の粘度の標準偏差である．偏差が大きいほど，成分分散に偏りがあることを示している．圧縮空気印加圧力の増加に伴って，粘度の標準偏差が低下している．印加圧力 10 kPa では標準偏差は 162.4 Pa・s であったが，50 kPa では 10.2 Pa・s，70 kPa でもあまり変化のない 13.4 Pa・s であった．印加圧力増加によって，ある値付近まで標準偏差は低下するが，その先はあまり変化しない．この経過を 2 本の近似直線で表し，交点を求めるとその 2 直線は印加圧力 38.9 kPa において交わった．この印加圧力付近が捏和効率の大きく変わる閾値であると考えられる．

また，10 kPa で捏和した後の試料（図 4.3）を確認すると，ガラスビーズへの濡れが進んでいなかった．内側ゴムチューブの閉塞が不十分であり，試料への圧縮が不完全であったと考えられる．

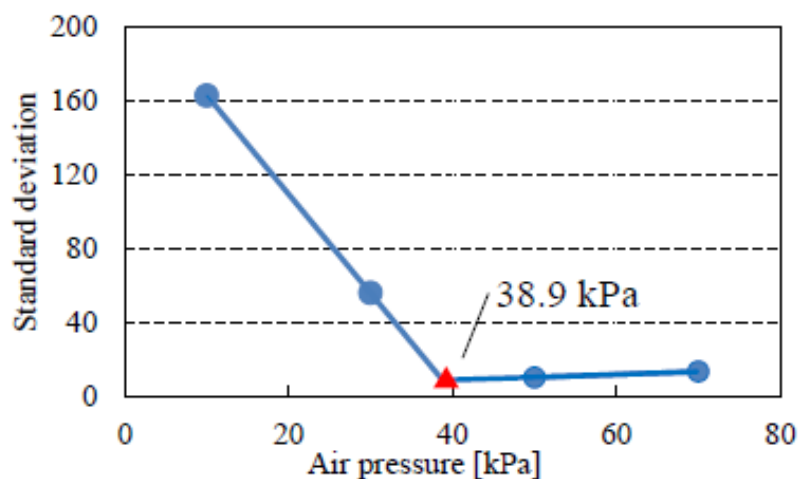


図 4.2 粘度偏差と印加圧縮空気圧の相関

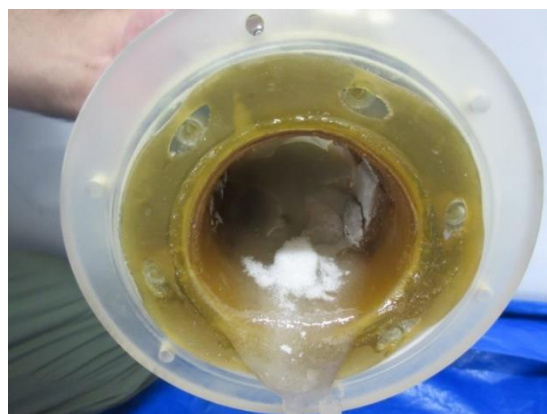


図 4.3 印加圧縮空気圧 10 kPa における試料の様子

#### 4.2.4 適正な印加圧縮空気圧に関する考察

捏和実験結果では、効率よく捏和を行う圧縮空気圧力の閾値が 38.9 kPa 付近にあると考えられ、圧縮空気圧が低いと確かに試料の圧縮が不完全であった。これはセグメント蠕動収縮実験に基づく、印加圧縮空気圧 40 kPa 以上では試料が十分圧縮されるという 4.1.1 項での推察とも一致する。

圧縮空気の圧力は内側ゴムチューブを介して試料に伝わるため、圧縮空気圧を上げるに従い、試料の圧縮圧も大きくなる。印加圧縮空気圧を上げると捏和効率向上が期待できるものの、PRM では 90 kPa 以上の圧縮空気を印加すると、急激に内側ゴムチューブ破断の懸念が高まる。PRM が消費する駆動エネルギー (圧縮空気) も大きく非効率的である。以上から、PRM の適正圧縮空気印加圧力は 40 ~ 70 kPa とした。

## 4.3 適正な推進薬仕込み量の検討

### 4.3.1 適正な推進薬仕込み量の推測

十分な圧力の圧縮空気を印加して推進薬を圧縮することに加えて、効率よく捏和を行うためには推進薬全体にセグメントの蠕動収縮を作用させることが重要となる。PRM 内部には捏和機構が良く作用する領域と捏和機構の作用が小さい領域が生じるため、仕込み量を調整することで、流動性が無い状態の推進薬であっても PRM 内を動かすことが有効である。本項では 2 セグメント連結式の PRM に関して、PRM の捏和機構と内体積から適正な推進薬仕込み量の推測を行う。2 セグメント連結の PRM では、図 4.4 のように

- (a) PRM 端部と狭窄する内側ゴムチューブに挟まれて圧縮作用が強い領域
- (b) セグメント中央部の狭窄する内側ゴムチューブの狭窄によって分配作用が強い領域、
- (c) PRM 中央部の PRM の蠕動収縮を受けづらく、捏和機構の作用が小さい領域

に分けて考えることができる。またセグメント間には熱交換ディスクや PRM に原料を投入するために作製した原料投入ディスクを挟むため、領域(c)はこれらのディスク分の体積を考慮したセグメント接続部に相当する。

2 セグメント連結式の PRM で確実に推進薬のセグメント間移動を起こすためには、推進薬をセグメント 1 つ分とセグメント接続部の内体積の和よりやや多い、すなわち式(4-1)の不等式を満たすように仕込むと良いと推測される。

$$V_{\text{prop}} (= \frac{M_{\text{prop}}}{\rho_{\text{prop}}}) > V_{\text{seg}} + V_{\text{other}} \quad (4-1)$$

ここで  $V_{\text{prop}}$  は推進薬仕込み体積、 $M_{\text{prop}}$  は推進薬仕込み量、 $\rho_{\text{prop}}$  は推進薬密度、 $V_{\text{seg}}$  は PRM セグメント内体積、 $V_{\text{other}}$  はセグメント接続部内体積である。今回、推進薬密度  $\rho_{\text{prop}}$  を 1.85 g/cm<sup>3</sup> とする。 $V_{\text{seg}}$  は設計値 253.1 cm<sup>3</sup>、 $V_{\text{other}}$  は原料投入ディスク内体積 23.76 cm<sup>3</sup> を代入すると、

$$M_{\text{prop}} > 512.9 \text{ g} \quad (4-2)$$

となる。この推測に関して、実推進薬捏和実験によって検証を行った。

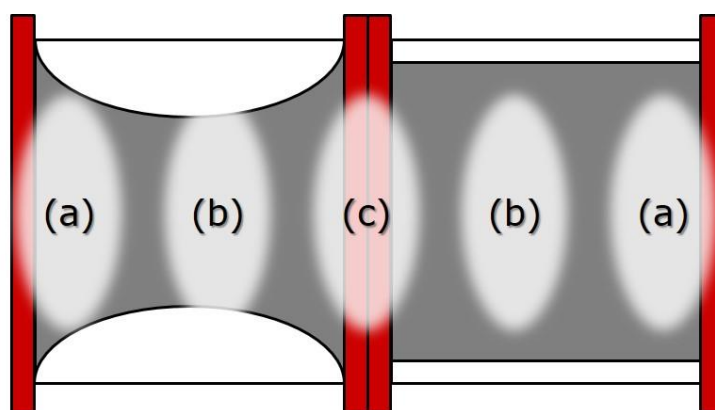


図 4.4 捏和機構が与える作用の領域分布

### 4.3.2 実推進薬捏和実験

#### 実験試料

実験に用いたコンポジット推進薬の原料および組成を表 4.1 に示す. AP に関しては事前に 100°C の真空恒温槽中で 1 日乾燥させた. PRM で捏和を行う前に, HTPB・DOA・IPDI・Al 粉末はプラネタリミキサ (2L 容量防爆型小型万能混合機, 愛工舎) で予め捏和した.

また推進薬仕込み量をパラメータとして 500, 550, 600 g で実験を行った.

表 4.1 用いたコンポジット推進薬原料と組成

原料	役割	組成 [wt%]
HTPB (P-41, JSR)	バインダ	12.0
DOA (和光純薬)	可塑剤	1.0
IPDI (東京化成)	硬化剤	1.0
Al 粉末 (メデリアン径 5 $\mu\text{m}$ ; TFH-A05P, 東洋アルミニウム)	金属燃料	18.0
AP (日本カーリット)	酸化剤	
粒径 400 $\mu\text{m}$		40.8
粒径 200 $\mu\text{m}$		10.2
粒径 50 $\mu\text{m}$		17.0

## 実験装置

図 4.5 に示す 2 セグメント連結式 PRM を用いた。PRM セグメントの設計は内側ゴムチューブ軸方向長さ 90 mm，内側ゴムチューブ内 55 mm，PRM 内体積を  $253.1 \text{ cm}^3$  とした。セグメント連結部中央には予捏和スラリと AP の投入口を備えたアクリル樹脂製の原料投入ディスク（内径 55 mm，厚さ 10 mm）を挟み，迅速な予捏和スラリと AP の投入を可能とした。また，PRM セグメントのフランジ部を熱交換ディスクと同様の構造として，推進薬の加温を行った。

PRM の収縮動作間隔は 2 秒とし，熱交換フランジに  $80^\circ\text{C}$  の温水を流した。PRM へは圧縮空気供給口からレギュレータ・電磁弁を通じて圧縮空気を供給した。印加圧縮空気圧はレギュレータで適正空気圧範囲（40 ～ 70kPa）内である 60 kPa に設定し，セグメントの圧縮空気印加チャンバ入り口直前に設置した圧力計にて正常に印加されていることを確認した。電磁弁とその制御系は安全のため，与圧ボックス（ボックス内加圧 50 kPa）内に設置した（図 4.6）。

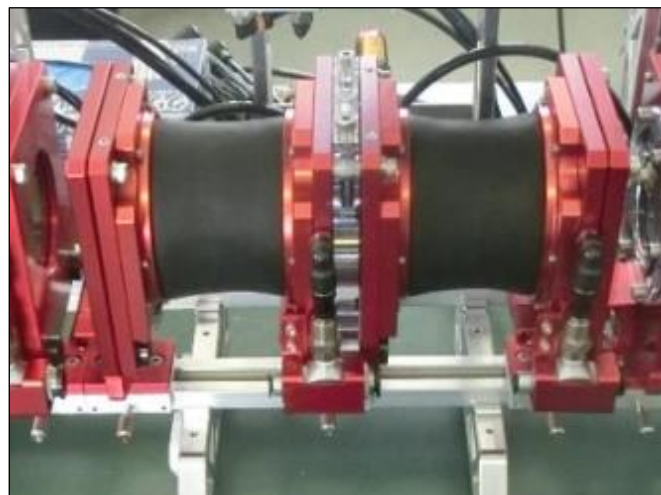


図 4.5 実験に用いた PRM

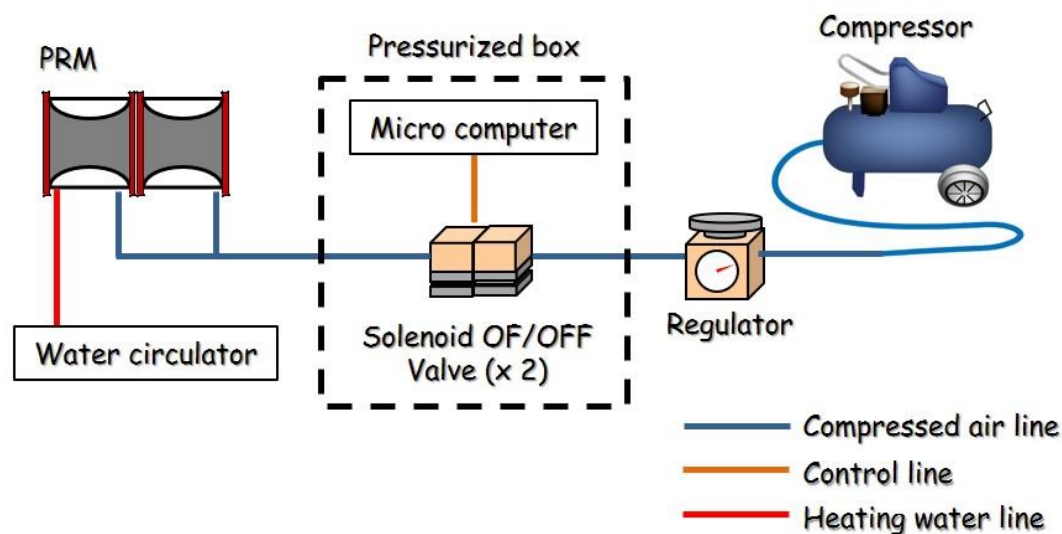


図 4.6 推進薬捏和実験系

### 捏和実験手順

以下の手順に従って捏和実験を行った。得られた推進薬は X 線非破壊検査（透過）を行い、燃焼試験サンプルを切り出してストランド燃焼試験を行った。

1. プラネタリミキサ（2L 容量防爆型小型万能混合機，愛工舎）で HTPB・DOA・IPDI・Al の予捏和を行った。1 分間低速で捏和したのち，5 分間真空捏和を行った。プラネタリミキサ捏和容器のジャケットに温水（70℃）を流し，熱交換を行った。
2. 予捏和スラリを PRM に投入し，5 分間駆動させ，PRM 内部に予捏和スラリを十分分散させた。
3. AP を投入し，60 分捏和を行った。
4. テフロンシートを敷き詰めたスチロールケースに得られた推進薬スラリを注型した。
5. 推進薬を真空恒温槽（60℃ 設定）内で 1 時間真空脱気処理した（真空度-0.095 MPa 程度）。
6. 恒温槽（60℃ 設定）内で推進薬を 7 日間常圧硬化させた。

### 4.3.3 プラネタリミキサを用いた比較用推進薬の製造

プラネタリミキサ（2L 容量防爆型小型万能混合機，愛工舎）を用いて，比較用推進薬を製造した。推進薬組成は PRM で捏和した推進薬と同じ組成（表 4.1）とした。プラネタリミキサの熱交換ジャケットに温水（60℃）を流し，熱交換を行った。捏和容器へ仕込む推進薬総量は 800 g とした。製造手順は次の通り。

1. プラネタリミキサ (2L 容量防爆型小型万能混合機, 愛工舎) で HTPB・DOA・Al の予捏和を行った. 1 分間低速で捏和したのち, 5 分間真空捏和を行った. プラネタリミキサ捏和容器のジャケットに温水 (70°C) を流し, 熱交換を行った.
2. AP を投入し, 捏和 (低速で 3 分間捏和の後, 15 分間捏和) を行った.
3. IPDI を投入し, 5 分間捏和の後, 5 分間真空捏和を行った.
4. テフロンシートを敷き詰めたスチロールケースに得られた推進薬スラリを注型した.
5. 推進薬を真空恒温槽 (60°C 設定) 内で 1 時間真空脱気処理した (真空度-0.095 MPa 程度).
6. 恒温槽 (60°C 設定) 内で推進薬を 7 日間常圧硬化させた.

#### 4.3.4 X線非破壊検査

硬化させた推進薬は X 線非破壊検査でボイド形成状態を確認した. X 線非破壊検査の測定条件は電圧 50 kV, 電流 2.3 mA, 撮影時間 10 秒とした.

#### 4.3.5 ストランド燃焼試験

チムニ型ストランド燃焼器 (図 4.7) 中で硬化させた推進薬を燃焼させ, 推進薬の線燃焼速度を測定した. 燃焼させるサンプルは推進薬を 7 x 7 x 40 mm の角柱状に切り出し, 表面にエポキシ樹脂を薄く塗布してレストリクタ処理して作製した. サンプル上部に着火薬を塗布し, ニクロム線抵抗に通電させてサンプルを着火させた (図 4.8). 窒素ガスで燃焼チャンバ内を加圧し, 燃焼をビデオカメラで撮影, 燃焼時の燃焼チャンバ内圧力を圧力計で測定した. 各条件につき, 約 7・5・3 MPa のチャンバ内圧力の場合で 3 回ずつ測定を行った. 上部下部それぞれ 10 mm 分の結果は除外し, 中央部 20 mm の燃焼速度を画像解析によって算出した.



図 4.7 ストランド燃焼器



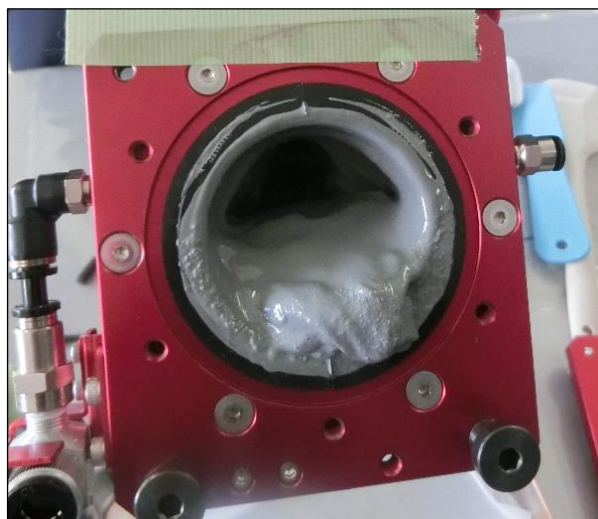


図 4.8 ストランド燃焼試験サンプル

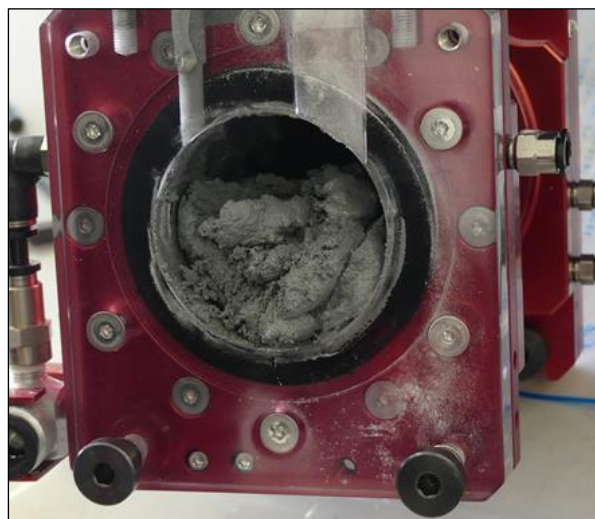
#### 4.3.6 各仕込み量における捏和後の PRM 内部・硬化後の推進薬の様子

図 4.9 に各仕込み量で 60 分捏和した後の PRM 内の様子を示す。仕込み量 500 g の場合、端部に予捏和スラリが偏在しており、中央部には流動性の低い推進薬が形成および AP 粒子の偏在が確認された。内部の推進薬スラリの成分分散不均一さが視覚的にも確認できる。中央の投入ディスクから投入された AP の分散が進んでいないためと考えられる。一方、仕込み量 550 g および 600 g の場合は、見た目には比較的均一なスラリが形成されていた。ただし、600 g の場合は端部に AP 粒子の偏在が若干確認された。

図 4.10 に各仕込み量で捏和し、硬化させた推進薬の外観を示す。いずれの仕込み量であっても、推進薬表面にスラリ注型性の違いを示すようなボイドなどの欠陥は確認されなかった。



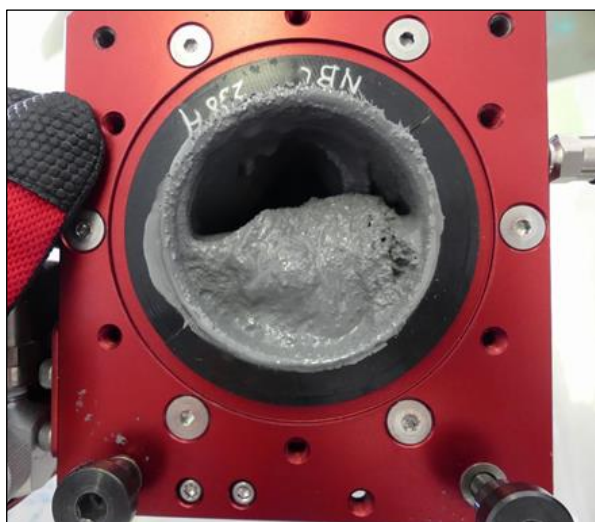
(a) 500 g (端部)



(b) 500 g (中央部)



(c) 550 g



(d) 600 g

図 4.9 各仕込み量における捏和後の PRM 内部

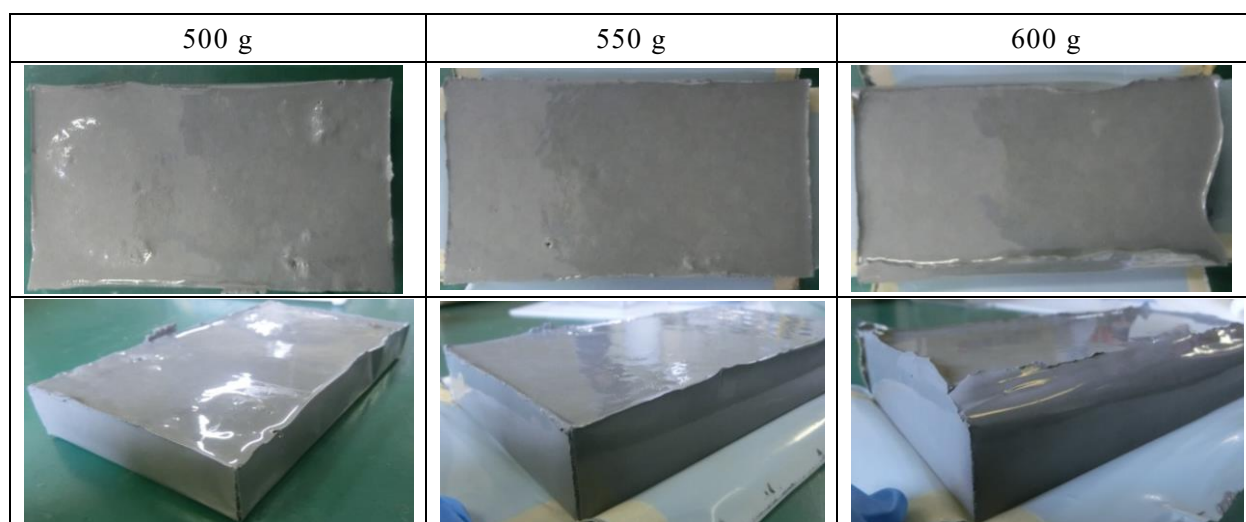


図 4.10 各仕込み量における硬化後の推進薬

#### 4.3.7 X線非破壊検査結果

図 4.11 に各仕込み量での X 線非破壊検査の結果を示す．仕込み量 500 g の場合，内部に多数の欠陥が確認された．推進薬コンパウンドの成分分散が不均一であり，AP 粒子が偏在している部分の流動性が局所的に悪く，十分な注型性が無かったためと考えられる．仕込み量 500 g の場合の推進薬切断面（図 4.12）を見ても，内部に欠陥が確認できる．仕込み量 550 g，600 g では内部に画像分解能以上の大きさのボイドは確認されなかった．これらの仕込み量での推進薬スラリは十分な注型性を持っていたと考えられる．

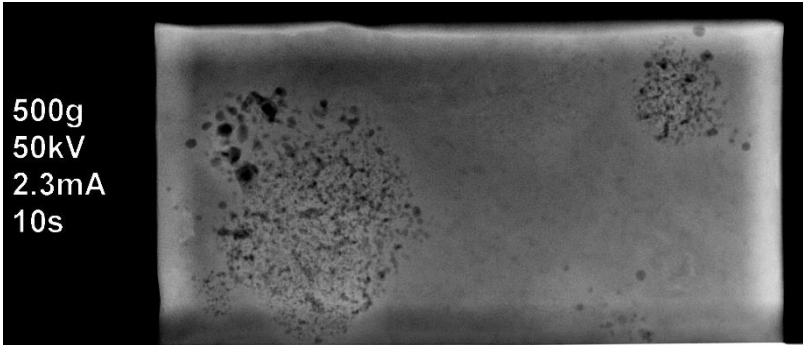
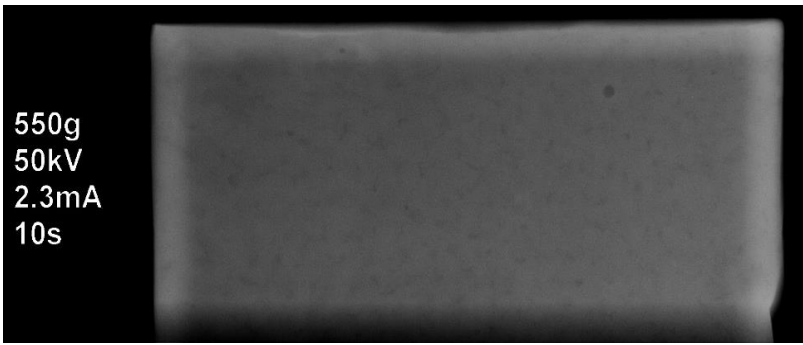
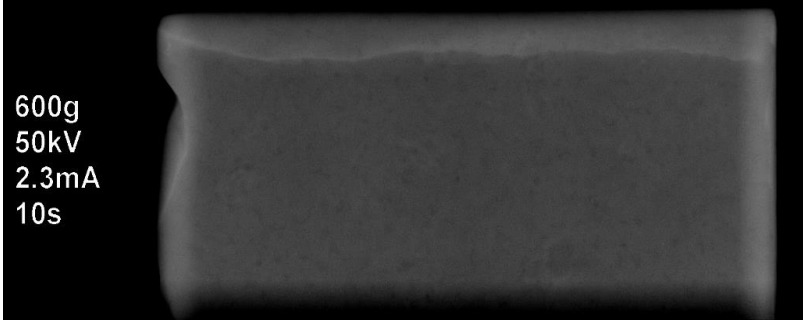
500 g	
550 g	
600 g	

図 4.11 各仕込み量における推進薬 X 線非破壊検査結果



図 4.12 仕込み量 500 g の推進薬断面

#### 4.3.8 仕込み量と燃焼速度の関係

推進薬の燃焼速度と燃焼圧力に関しては次に示す Vieille の式 (4-3) が成立する.

$$r_{\text{prop}} = ap_c^n \quad (4-3)$$

$r_{\text{prop}}$  は推進薬の燃焼速度,  $p_c$  は燃焼圧力,  $a$  は初期薬温に依存する定数であり,  $n$  は圧力指数と呼ばれる. ストランド燃焼試験では,  $r_{\text{prop}}$  に燃焼試験で測定した線燃焼速度,  $p_c$  に燃焼チャンバ内圧力 (絶対圧力) を用いる.

ストランド燃焼試験結果をプロットし (図 4.13), プロットの近似直線と式(4-3)から圧力指数  $n$ , 定数  $a$  を算出した. またプロットとプロット近似直線の相関係数  $R^2$  も算出した. 表 4.3 にストランド燃焼試験結果と圧力指数  $n$ , 定数  $a$ , 相関係数  $R^2$  を示す.

プラネタリミキサで捏和したものは相関係数も 0.99 と 1 に近く, 圧力指数も 0.44 と適切であった. PRM で捏和した推進薬の燃焼特性に関しては, 仕込み量 500 g の場合, 相関係数が 0.74 と低く, 燃焼速度のバラつきが大きいと考えられる. また仕込み量 550, 600 g の場合, プラネタリミキサで製造した推進薬と比較すると, どちらも相関係数は同程度である. 一方, 圧力指数を比較すると, 600 g のものは圧力指数が高かったが, 550 g のものはプラネタリミキサとほぼ一致していた.

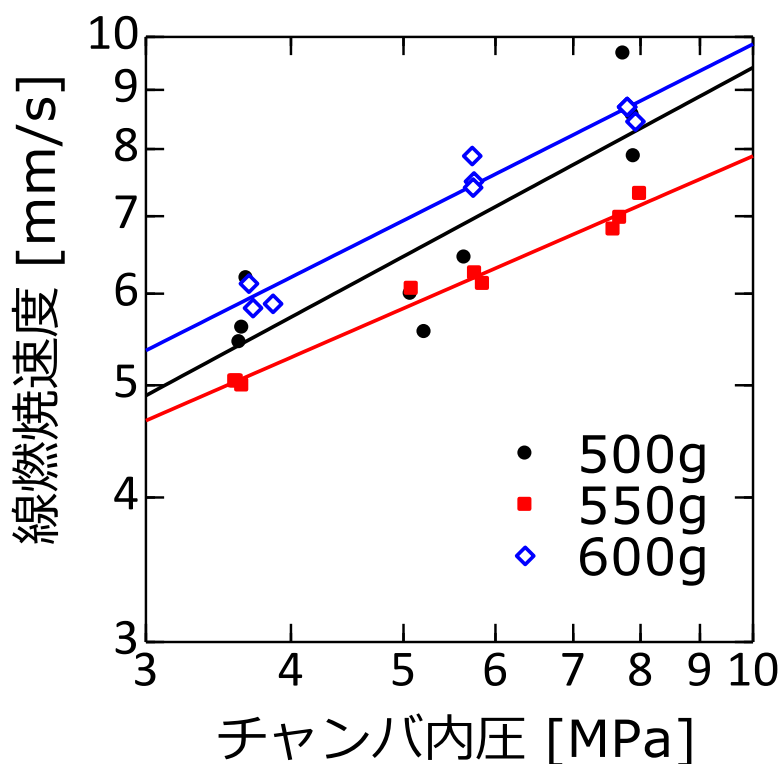


図 4.13 各仕込み量における燃焼速度

表 4.3 ストランド燃焼試験結果

仕込み量 [g]	燃焼チャンバ内圧力 [MPa]	線燃焼速度 [mm/s]	圧力指数 $n$	定数 $a$	$R^2$
500	7.87	8.57	0.54	2.70	0.74
	7.73	9.68			
	7.89	7.89			
	5.21	5.56			
	5.07	6.00			
	5.64	6.45			
	3.61	5.45			
	3.63	5.61			
	3.66	6.19			
550	7.99	7.32	0.44	2.88	0.98
	7.68	6.98			
	7.58	6.82			
	5.85	6.12			
	5.76	6.25			
	5.08	6.06			
	3.58	5.04			
	3.59	5.04			
	3.63	5.00			
600	7.79	8.70	0.51	3.08	0.97
	7.92	8.45			
	7.79	8.70			
	5.75	7.50			
	5.73	7.89			
	5.74	7.41			
	3.86	5.88			
	3.71	5.83			
	3.68	6.12			
(プラネタリ ミキサ)	7.71	7.41	0.44	3.05	0.99
	7.80	7.69			
	7.66	7.50			
	5.67	6.59			
	5.64	6.45			
	5.70	6.59			
	3.71	5.61			
	3.65	5.31			
	3.65	5.36			

#### 4.3.9 推進薬の適正仕込み量に関する考察

実験結果から 550 g が適正な仕込み量と判断した。仕込み量 550 g の場合、目視で成分の偏在が確認されず、捏和したスラリの注型性も十分であった。また、推進薬の圧力指数が低く、相関係数も小さかったためである。

500 g では分散が不十分であり、仕込み量が少なかったと考えられる。捏和機構の圧縮・搬送とも受けにくい中央部 (図 4.4 の領域(c)) で流動性の悪い大きな推進薬の塊が形成されていた。これによってスラリの搬送が阻害されていたと考えられる。

600 g では仕込み量が多かったと考えられる。捏和後の PRM 内部の推進薬の様子から、550 g の場合と同様、捏和機構の圧縮・搬送によって捏和は進行したと判断できるが、仕込み量が多く PRM 端部のフランジ閉塞部付近で推進薬が滞留してしまったと考えられる。

### 4.4 本章のまとめ

本章では、印加圧縮空気圧と仕込み量に関して適正に捏和が進行する条件の抽出を行った。第三章で検討した捏和機構を元に捏和時に推進薬に十分な圧縮を与える印加圧縮空気圧は 40 kPa 以上であると推察し、捏和実験によって検証を行った。装置破損の懸念も考慮して、適切な印加圧縮空気圧は 40 ~ 70 kPa であるとした。

また、推進薬全体に捏和機構を作用させることのできる仕込み量の検討を行った。推進薬全体に捏和機構を作用させるには、推進薬に流動性の無い段階であってもセグメント間の移動が起きるよう仕込み量を調整することが有効である。実推進薬捏和実験によって検証を行い、適正な仕込み量を 550 g とした。



# 第 5 章 PRM による推進薬捏和の実証

## 5.1 推進薬グレイン製造に要する捏和時間の探索

第 4 章で抽出した適正な印加圧縮空気圧・仕込み量の条件下, 実推進薬捏和実験を行い, 当該 PRM 装置構成で推進薬捏和に要する時間の探索を行った.

### 5.1.1 実推進薬捏和実験

#### 実験試料

実験に用いたコンポジット推進薬の原料および組成を表 5.1 に示す. 仕込む推進薬の全量は 4.3 節より 550 g とした. AP に関しては事前に 100°C の真空恒温槽中で 1 日乾燥させた. PRM で捏和を行う前に, HTPB・DOA・IPDI・Al 粉末はプラネタリミキサ (2L 容量防爆型小型万能混合機, 愛工舎) で予め捏和した. 予捏和では 1 分間低速で原料を捏和したのち, 5 分間真空捏和を行った. プラネタリミキサ捏和容器のジャケットに温水 (70°C) を流し, 熱交換を行った.

また, 比較用の推進薬として 4.3.3 項に示すプラネタリミキサで捏和した推進薬を用いた.

表 5.1 用いたコンポジット推進薬原料と組成

原料	役割	組成 [wt%]
HTPB (P-41, JSR)	バインダ	12.0
DOA (和光純薬)	可塑剤	1.0
IPDI (東京化成)	硬化剤	1.0
Al 粉末 (メディアアン径 5 $\mu\text{m}$ ; TFH-A05P, 東洋アルミニウム)	金属燃料	18.0
AP (日本カーリット)	酸化剤	
粒径 400 $\mu\text{m}$		40.8
粒径 200 $\mu\text{m}$		10.2
粒径 50 $\mu\text{m}$		17.0



## 実験装置

実験装置は 4.3.2 項の実推進薬捏和実験と同じものを用いた。PRM の収縮動作間隔，印加圧縮空気圧，温水温度の設定も同じとした。

## 捏和実験手順

以下の手順に従って捏和実験を行った。得られた推進薬は X 線非破壊検査（透過）を行い，燃焼試験サンプルを切り出してストランド燃焼試験を行った。

1. プラネタリミキサ (2L 容量防爆型小型万能混合機，愛工舎) で HTPB・DOA・IPDI・Al の予捏和を行った。1 分間低速で捏和したのち，5 分間真空捏和を行った。プラネタリミキサ捏和容器のジャケットに温水 (70°C) を流し，熱交換を行った。
2. 予捏和スラリを PRM に投入し，5 分間駆動させ，PRM 内部に予捏和スラリを十分分散させた。
3. AP を投入し，捏和時間をパラメータとして 30・40・60・80 分捏和を行った。
4. テフロンシートを敷き詰めたスチロールケースに得られた推進薬スラリを注型した。
5. 推進薬を真空恒温槽 (60°C 設定) 内で 1 時間真空脱気処理した (真空度 -0.095 MPa 程度)。
6. 恒温槽 (60°C 設定) 内で推進薬を 7 日間常圧硬化させた。

### 5.1.2 X 線非破壊検査

硬化させた推進薬は X 線非破壊検査でボイド形成状態を確認した。X 線非破壊検査の測定条件は電圧 50 kV，電流 2.3 mA，撮影時間 10 秒とした。

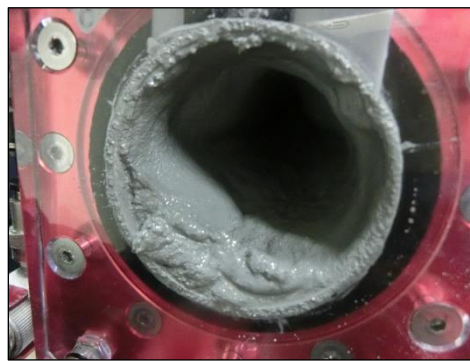
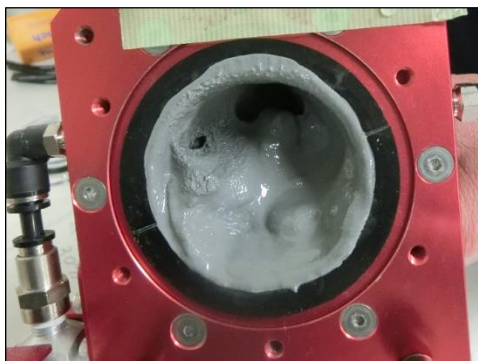
### 5.1.3 ストランド燃焼試験

硬化させた推進薬から燃焼サンプルを切り出し，ストランド燃焼試験を行った。ストランド燃焼試験の詳細は 4.3.5 項と同じである。

### 5.1.4 各捏和時間における捏和後の PRM 内部・硬化後の様子

捏和時間を変えて捏和した後の PRM 内の様子を図 5.1 に示す。捏和時間 30 分では端部に予捏和スラリに濡れていない AP 粒子は確認されなかったものの，予捏和スラリが若干偏在していた。捏和時間 40 分では目視観察の範囲では成分の偏在は見られなかった。捏和時間 80 分では 40 分の場合と同様，目視観察で成分偏在は確認されなかったが，スラリの流動性が低下していた。捏和時間が長く，捏和中に推進薬の硬化が進んだと考えられる。

図 5.2 に各捏和時間における硬化後の推進薬を示す。いずれも推進薬表面にスラリ注型性の違いを示すようなボイドなどの欠陥は確認されなかった。



(a) 捏和時間 30 分 (左: 端部, 右: 中央部)



(b) 捏和時間 40 分 (左: 端部, 右: 中央部)



(c) 捏和時間 60 分 (中央部)



(d) 捏和時間 80 分 (左: 端部, 右: 中央部)

図 5.1 各捏和時間における捏和後の PRM 内部

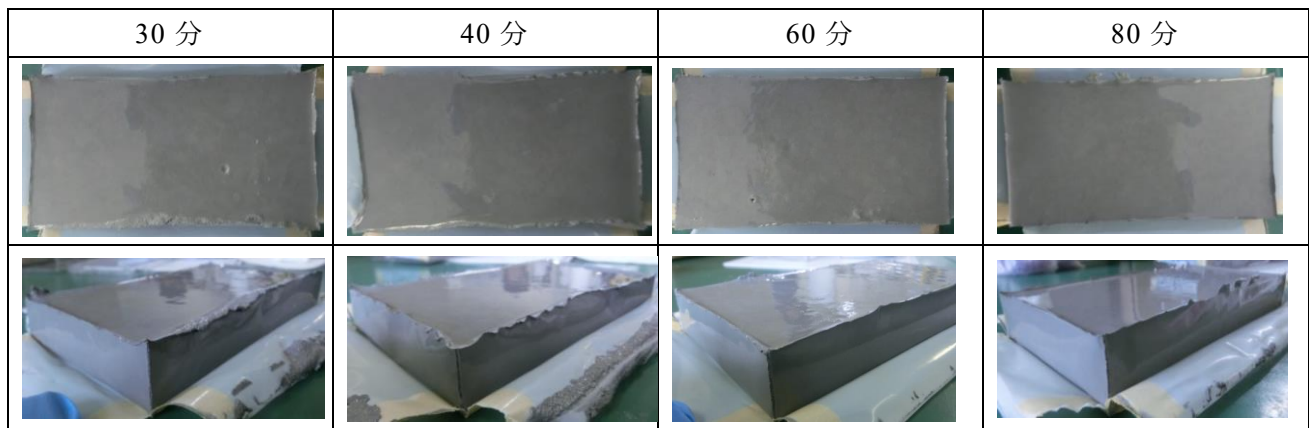


図 5.2 各捏和時間における硬化後の推進薬

### 5.1.5 X線非破壊検査結果

図 5.3 に各捏和時間での X 線非破壊検査結果を示す。捏和時間 30 分のもは内部に多数の欠陥が確認された。目視はできなかったものの、AP 粒子が偏在している部分の流動性が局所的に悪く、十分な注型性が無かったためと考えられる。捏和時間 30 分の場合の推進薬切断面（図 5.4）を見ても、確かに内部に欠陥が見受けられる。捏和時間 40 分以上では内部に画像分解能以上の大きさの欠陥は確認されず、十分な注型性のある推進薬スラリが捏和できたと考えられる。

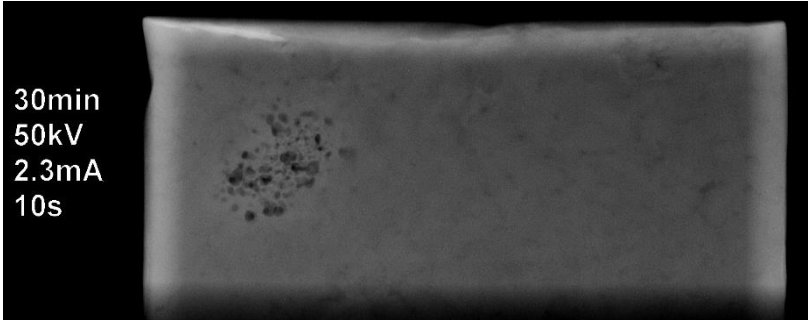
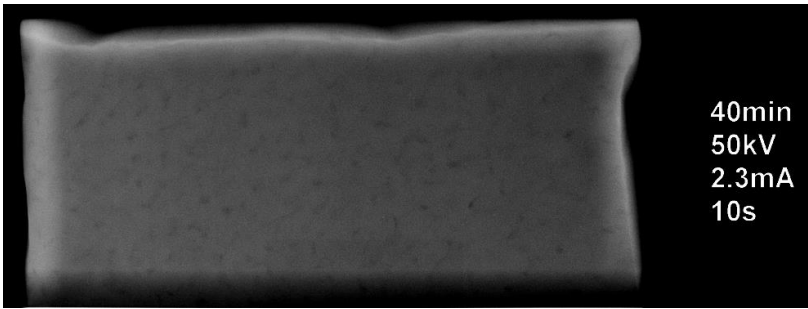
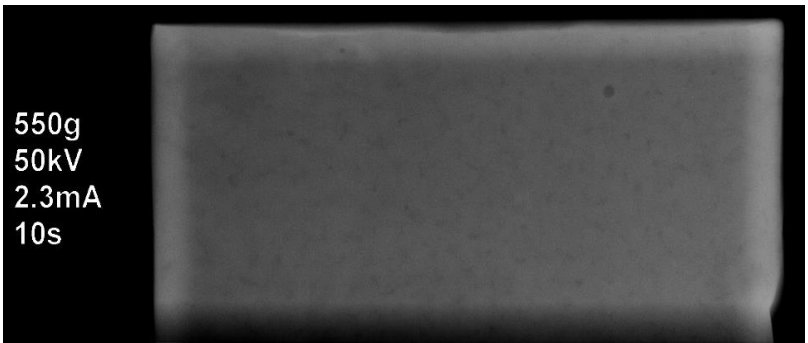
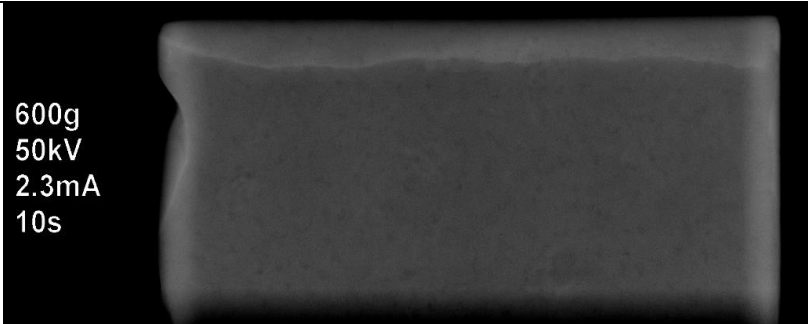
30 分	 <p>30min 50kV 2.3mA 10s</p>
40 分	 <p>40min 50kV 2.3mA 10s</p>
60 分	 <p>550g 50kV 2.3mA 10s</p>
80 分	 <p>600g 50kV 2.3mA 10s</p>

図 5.3 各捏和時間における推進薬 X 線非破壊検査結果



図 5.4 捏和時間 30 分の推進薬断面

### 5.1.6 捏和時間と燃焼速度の関係

ストランド燃焼試験結果をプロットし (図 5.5), プロットの近似直線と式(4-3)から圧力指数  $n$ , 定数  $a$  を算出した. またプロットとプロット近似直線の相関係数  $R^2$  も算出した. 各捏和時間のストランド燃焼試験結果を表 5.2 に示す. 比較対象として, 4.3 節においてプラネタリミキサで製造した推進薬の燃焼試験結果を用いた. 捏和時間が 30 分から長くなるに従い相関係数も 1 に近づいたが, 捏和時間が 80 分となると逆に相関係数は 0.98 から 0.91 に下がった. 圧力指数に関しては, 捏和時間 40 分以上のものがプラネタリミキサで製造した推進薬と比較して同等であった.

得られた圧力指数と定数  $a$  から算出した, 燃焼絶対圧力  $7.0 \cdot 5.0 \cdot 3.0$  MPa における換算燃焼速度を表 5.3 に示す. 捏和時間 80 分のものが最もプラネタリミキサと換算燃焼速度が近く, どの燃焼絶対圧力においても差が 1 %以下であった. 捏和時間 40 分・60 分のものも 5.0 MPa の燃焼絶対圧力において同等程度の換算燃焼速度であった.

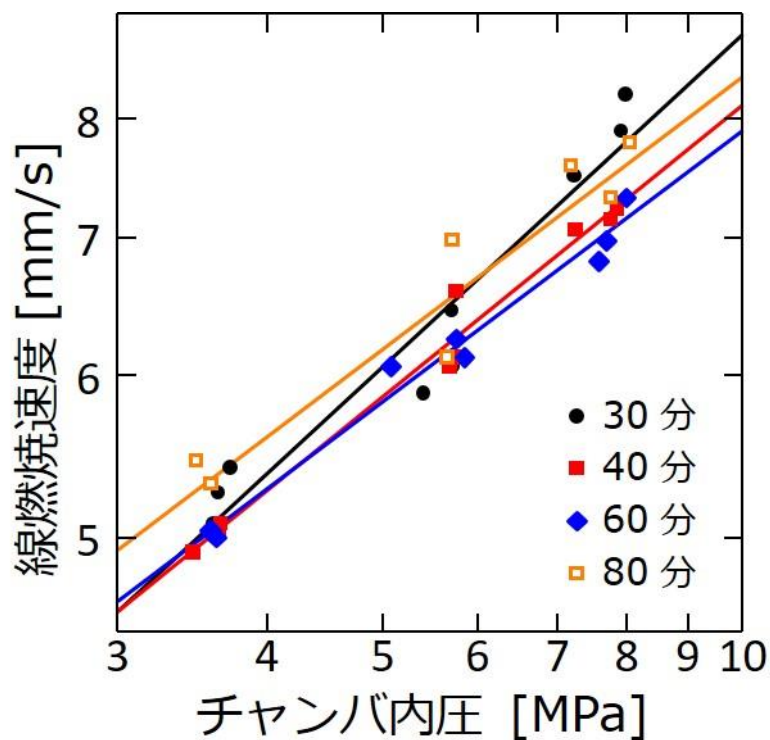


図 5.5 各捏和時間における燃焼速度

表 5.2 ストランド燃焼試験結果

捏和時間 [min]	燃焼チャンバ内圧力 [MPa]	線燃焼速度 [mm/s]	圧力指数 $n$	定数 $a$	$R^2$
30	7.98	8.22	0.54	2.56	0.94
	7.23	7.50			
	7.91	7.89			
	5.41	5.88			
	5.72	6.06			
	5.71	6.45			
	3.61	5.08			
	3.73	5.41			
	3.64	5.26			
40	7.76	7.14	0.47	2.75	0.98
	7.25	7.06			
	7.86	7.23			
	5.74	6.12			
	5.69	6.06			
	5.76	6.59			
	3.47	4.92			
	3.65	5.04			
	3.66	5.08			
60	7.99	7.32	0.44	2.88	0.98
	7.68	6.98			
	7.58	6.82			
	5.85	6.12			
	5.76	6.25			
	5.08	6.06			
	3.58	5.04			
	3.59	5.04			
	3.63	5.00			
80	8.05	7.79	0.44	2.89	0.91
	7.18	7.59			
	7.76	7.32			
	5.72	6.98			
	5.66	6.12			
	5.66	6.12			
	3.59	5.31			
	3.49	5.45			
	3.59	5.31			

(続き)					
(プラネタリ ミキサ)	7.71	7.41			
	7.80	7.69			
	7.66	7.50			
	5.67	6.59			
	5.64	6.45	0.44	3.05	0.99
	5.70	6.59			
	3.71	5.61			
	3.65	5.31			
	3.65	5.36			

表 5.3 各捏和時間の換算燃焼速度

捏和時間 [min]	換算燃焼速度	
	燃焼絶対圧力 [MPa]	燃焼速度 [mm/s]
30	7.0	7.27
	5.0	6.07
	3.0	4.61
40	7.0	6.87
	5.0	5.86
	3.0	4.61
60	7.0	6.75
	5.0	5.83
	3.0	4.67
80	7.0	7.17
	5.0	6.18
	3.0	4.94
プラネタリ	7.0	7.21
ミキサ	5.0	6.21
	3.0	4.96



### 5.1.7 推進薬捏和に要する時間に関する考察

推進薬捏和後の様子や X 線非破壊検査結果から、捏和時間 30 分では捏和が不十分であったと考えられる。また燃焼特性に関しては捏和時間 80 分がプラネタリミキサで製造した推進薬と最も近いが、捏和後の様子や線燃焼速度の相関係数を考慮すると、捏和時間が長くなってしまいポットライフの観点から適正とは言い難い。捏和時間 40 分と 60 分の推進薬は注型性も高く、物理特性に関しても同等である。また燃焼特性もプラネタリミキサのものと同等程度であり、相関係数も 1 に近い。以上のことを考慮し、捏和効率も考えると 60 分よりも適正な捏和時間は 40 分であると判断した。

## 5.2 推進薬グレインの製造

第 4 章で抽出した適正な印加圧縮空気圧・仕込み量、前節で探索した捏和時間の下、推進薬グレイン製造実験を行った。製造した推進薬グレインは X 線非破壊検査によって評価を行った。また、捏和した推進薬スラリの内、グレイン製造に用いなかったものも別途硬化させ、ストランド燃焼試験に用いた。

### 5.2.1 推進薬グレイン製造実験

#### 実験試料

実験に用いたコンポジット推進薬の原料および組成を表 5.1 に示す。PRM 1 台あたりに仕込む推進薬量は 4.3 節より 550 g とし、PRM を 3 台 (推進薬総量 1650 g) 稼働させた。AP に関しては事前に 100°C の真空恒温槽中で 1 日乾燥させた。PRM で捏和を行う前に、HTPB・DOA・IPDI・Al 粉末はプラネタリミキサ (2L 容量防爆型小型万能混合機、愛工舎) で予め捏和した。予捏和では 1 分間低速で原料を捏和したのち、5 分間真空捏和を行った。プラネタリミキサ捏和容器のジャケットに温水 (70°C) を流し、熱交換を行った。また、比較用の推進薬として 4.3.3 項に示すプラネタリミキサで捏和した推進薬を用いた。



表 5.1 用いたコンポジット推進薬原料と組成

原料	役割	組成 [wt%]
HTPB (P-41, JSR)	バインダ	12.0
DOA (和光純薬)	可塑剤	1.0
IPDI (東京化成)	硬化剤	1.0
Al 粉末 (メディアン径 5 $\mu\text{m}$ ; TFH-A05P, 東洋アルミニウム)	金属燃料	18.0
AP (日本カーリット)	酸化剤	
粒径 400 $\mu\text{m}$		40.8
粒径 200 $\mu\text{m}$		10.2
粒径 50 $\mu\text{m}$		17.0

## 実験装置

図 5.1 に示す通り、2 セグメント連結式 PRM を 3 台並列に稼働させた。PRM セグメントの設計は内側ゴムチューブ軸方向長さ 90 mm、内側ゴムチューブ内 60 mm、PRM 内体積を 253.1  $\text{cm}^3$  とした。セグメント連結部中央には予捏和スラリと AP の投入口を備えたアクリル樹脂製の原料投入ディスク (内径 60 mm、厚さ 10 mm) を挟み、迅速な予捏和スラリと AP の投入を可能とした。また、PRM セグメントのフランジ部を熱交換ディスクと同様の構造として、推進薬の加温を行った。

PRM の収縮動作間隔は 2 秒とし、熱交換フランジに 80°C の温水を流した。PRM へは圧縮空気供給口からレギュレータ・電磁弁を通じて圧縮空気を供給した。印加圧縮空気圧はレギュレータで適正空気圧範囲 (40 ~ 70 kPa) 内である 60 kPa に設定し、セグメントの圧縮空気印加チャンバ入り口直前に設置した圧力計にて正常に印加されていることを確認した。電磁弁とその制御系は安全のため、与圧ボックス (ボックス内加圧 50 kPa) 内に設置した (図 5.2)。

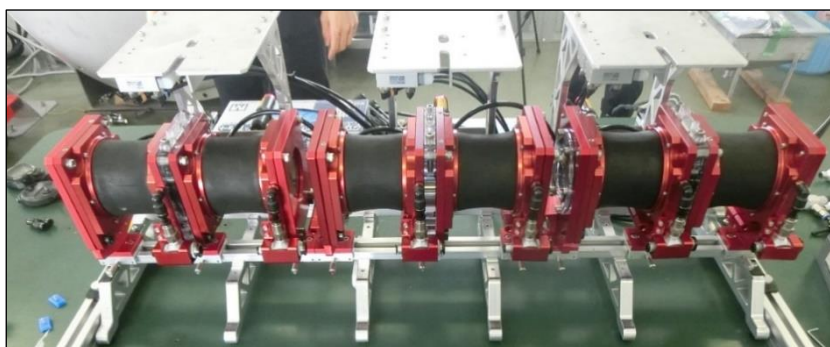


図 5.1 実験に用いた PRM

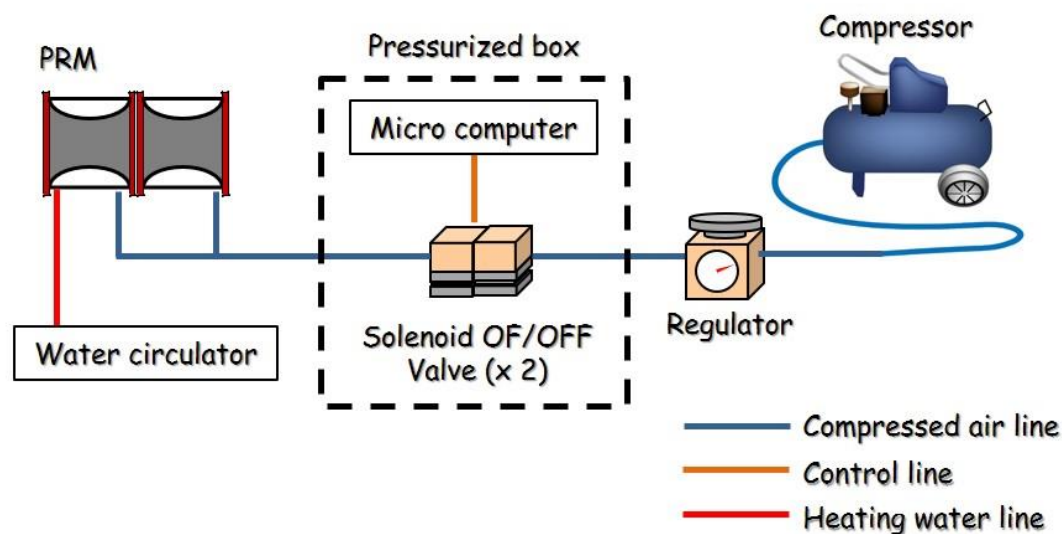


図 5.2 推進薬グレイン製造実験系

### グレイン製造実験手順

以下の手順に従ってグレイン製造実験を行った。得られた推進薬グレインは X 線非破壊検査（透過）を行った。

1. プラネタリミキサ (2 L 容量防爆型小型万能混合機, 愛工舎) で HTPB・DOA・IPDI・Al の予捏和を行った。1 分間低速で捏和したのち, 5 分間真空捏和を行った。プラネタリミキサ捏和容器のジャケットに温水 (70°C) を流し, 熱交換を行った。
2. 予捏和スラリを PRM に投入し, 5 分間予捏和スラリを PRM 内に分散させた。
3. AP を投入し, 60 分間捏和を行った。
4. 中子を有するベークライト製円筒インシュレータ (インシュレータ外径 87.5 mm, 内径 78.0 mm) に捏和した推進薬スラリを注型した。
5. 推進薬を真空恒温槽 (60°C 設定) 内で真空脱気処理 (真空度 -0.095 MPa 程度) を行った。
6. 恒温槽 (60°C 設定) 内で推進薬を 7 日間常圧硬化させた。
7. 硬化後, 中子を引き抜いた。

また, グレイン製造に用いなかった同一ロットの推進薬スラリを 5.1.1 と同じ手順でスチロールケースにも注型・硬化させた。この推進薬を用いてストランド燃焼試験を行った。

### 5.2.2 プラネタリミキサを用いた比較用推進薬グレインの製造

PRM で製造した推進薬の比較用にプラネタリミキサ (2 L 容量防爆型小型万能混合機, 愛工舎) で推進薬グレインを捏和した. プラネタリミキサの熱交換ジャケットに温水 (60°C) を流し, 加温を行った. 捏和容器へ仕込む推進薬総量は 1400 g とした. 手順は次の通り.

1. HTPB, DOA, Al 粉末を捏和容器に入れ, 予捏和した (低速で 1 分間捏和の後, 3 分間捏和).
2. AP を投入し, 捏和 (低速で 3 分間捏和の後, 15 分間捏和) を行った.
3. IPDI を投入し, 5 分間捏和の後, 5 分間真空捏和を行った.
4. 中子を有するベークライト製円筒インシュレータ (インシュレータ外径 87.5 mm, 内径 78.0 mm) に捏和した推進薬スラリを注型した.
5. 推進薬を真空恒温槽 (60°C 設定) 内で真空脱気処理 (真空度 -0.095 MPa 程度) を行った.
6. 恒温槽 (60°C 設定) 内で推進薬を 7 日間常圧硬化させた.
7. 硬化後, 中子を引き抜いた.

5.2.1 項と同様, グレイン製造に用いなかった同一ロットの推進薬スラリを 5.1.1 と同じ手順でスチロールケースにも注型・硬化させた. この推進薬を用いてストランド燃焼試験を行った.

### 5.2.3 X線非破壊検査

PRM・プラネタリミキサそれぞれで製造した推進薬グレインとケースに注型した推進薬 (以下, ケースサンプル) の X 線非破壊検査を行った. 測定条件は電圧が 60 kV (ケースサンプルは 50 kV), 電流 2.3 mA, 撮影時間 10 秒とした.

### 5.2.4 ストランド燃焼試験

スチロールケースに硬化させた推進薬から燃焼サンプルを切り出し, ストランド燃焼試験を行った. ストランド燃焼試験の詳細は 4.3.5 項と同じである.

### 5.2.5 製造した推進薬グレインの形状

製造した推進薬グレインは内孔 (上面内孔径 39.72 mm, 下面内孔径 40.00 mm, 内容積 494.3 cm<sup>3</sup>) を有する形状であった. これは比較用にプラネタリミキサで製造した推進薬グレインも同様であった. 図 5.3 に PRM で製造した推進薬グレインの外観を示す.

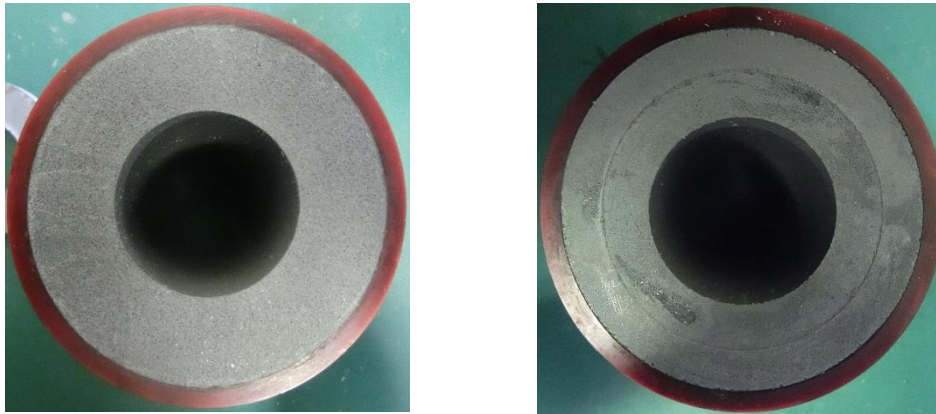


図 5.3 PRM で製造した推進薬グレインの外観

#### 5.2.6 X線非破壊検査結果

図 5.4 に PRM で製造した推進薬グレインの X 線透過画像，図 5.5 にプラネタリミキサで製造した推進薬グレインの X 線透過画像を示す．PRM で製造した推進薬グレインには 1 ヶ所ボイドが確認されたが，ロケットモータとして燃焼させる際にこのボイドが与える影響は小さいと判断した．

ボイドが 1 ヶ所存在するものの，プラネタリミキサで製造した推進薬グレインを比較して，PRM で製造した場合も推進薬の注型性は十分であり，ロケットモータの燃焼に影響を及ぼすような空隙は確認されなかった．

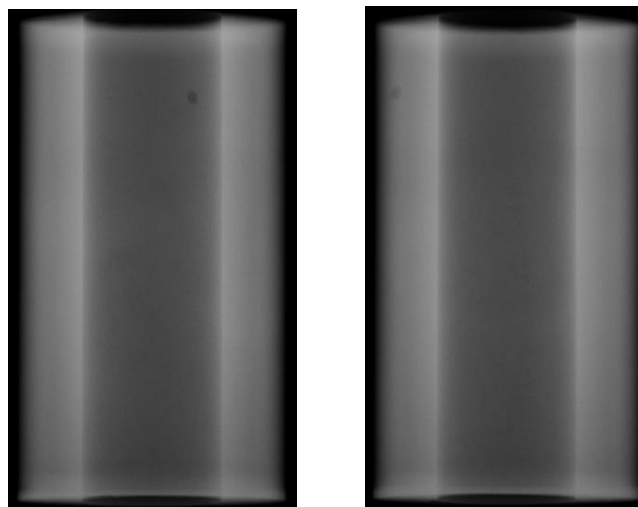


図 5.4 PRM で製造した推進薬グレインの X 線透過画像  
(左: 位相 0°, 右: 位相 90°)

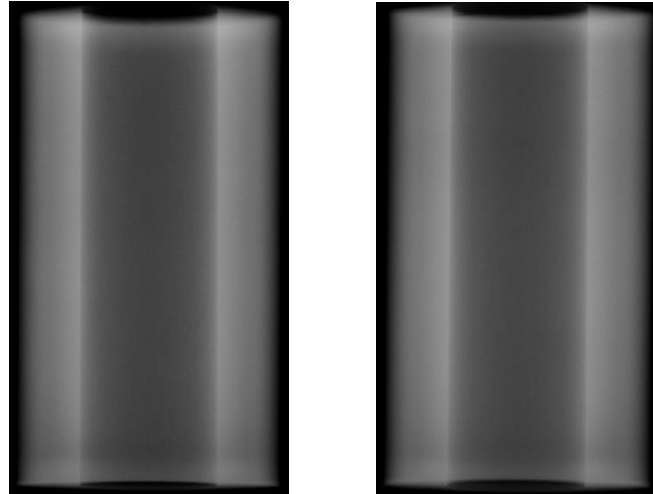


図 5.5 プラネタリミキサで製造した推進薬グレインの X 線透過画像  
(左: 位相 0°, 右: 位相 90°)

### 5.2.7 ストランド燃焼試験結果

ストランド燃焼試験結果をプロットし、プロットの近似直線と式(4-3)から圧力指数  $n$ 、定数  $a$  を算出した。またプロットとプロット近似直線の相関係数  $R^2$  も算出した。表 5.2 にストランド燃焼試験結果を示す。どちらの推進薬も相関係数は 1 に近く同等であった。また圧力指数  $n$ 、定数  $a$  ともに同等程度であった。

表 5.3 に燃焼絶対圧力 7.0・5.0・3.0 MPa における換算燃焼速度を示す。2 つの推進薬の換算燃焼速度を比較すると、燃焼絶対圧力 7.0 MPa において換算燃焼速度の差は 0.3 %、燃焼絶対圧力 5.0 MPa において換算燃焼速度の差は 0.5 %、燃焼絶対圧力 3.0 MPa において換算燃焼速度の差は 1.7 %となった。いずれの圧力でも換算燃焼速度の差は小さかった。

表 5.2 ストランド燃焼試験結果

	燃焼チャンバ内圧力 [MPa]	線燃焼速度 [mm/s]	圧力指数 $n$	定数 $a$	$R^2$
PRM	7.98	6.90	0.42	2.96	0.96
	7.72	7.23			
	7.88	6.82			
	5.78	6.19			
	5.81	6.32			
	5.62	6.32			
	3.68	4.92			
	3.64	5.04			
	3.53	5.17			
プラネタリ ミキサ	7.71	7.23	0.44	2.84	0.98
	7.80	7.08			
	7.76	6.87			
	5.67	5.89			
	5.64	6.23			
	5.70	6.15			
	3.71	5.10			
	3.65	5.15			
	3.65	4.95			

表 5.3 換算燃焼速度

捏和時間 [min]	換算燃焼速度	
	燃焼絶対圧力 [MPa]	燃焼速度 [mm/s]
PRM	7.0	6.70
	5.0	5.82
	3.0	4.70
プラネタリ ミキサ	7.0	6.73
	5.0	5.80
	3.0	4.62

### 5.3 PRM の推進薬捏和性能

捏和した推進薬グレインの X 線非破壊検査結果およびストランド燃焼試験結果から、PRM で捏和した推進薬はグレイン注型に十分な流動性を持っており、また捏和した推進薬の燃焼特性はプラネタリミキサで捏和したものと同等であると考えることができる。これらによって、PRM は実推進薬を十分捏和できる捏和性能を有することが示された。

### 5.4 本章のまとめ

本章では、まず第 4 章で抽出した印加圧縮空気圧・仕込み量の条件下、当該 PRM 装置構成で推進薬捏和に要する時間を実推進薬捏和実験によって探索した。

探索した捏和時間で推進薬グレインを製造し、X 線非破壊検査を行った。またグレイン製造と同一ロットの推進薬に関してストランド燃焼試験を行った。X 線非破壊検査結果から PRM で捏和した推進薬はグレイン注型に十分な流動性を持っており、ストランド燃焼試験結果から、PRM で捏和した推進薬の燃焼特性はプラネタリミキサで捏和したものと同等と考えられた。これらは PRM が実推進薬捏和に十分な捏和性能を有していることを示している。

## 第6章 総括

---

第1章では、固体ロケット量産・製造コスト低減の要求を背景として、コンポジット推進薬の連続捏和技術に関する調査を行った。調査の結果、推進薬連続捏和は小型のプラントで製造効率良く捏和でき、かつ安全管理区域を小さく抑えられることが特長であることが分かった。推進薬製造コスト低減のため、既存のミキサに拘らず安全かつ連続式のミキサを探索し、空気圧人工筋肉を用いた蠕動運動で捏和を行うラバーミキサ、PRMの着想を得た。そこで本研究ではPRMの推進薬ミキサへのPRM適用検討を行うこととした。

第2章では、PRMが推進薬捏和に要求されるミキサの機能を満たすよう、熱交換ディスクの有用性評価を行い、内側ゴムチューブは推進薬組成が安定するように可塑剤移行の少ないNBR素材に変更した。さらに、NBR素材の内、PRMセグメントの内側ゴムチューブ狭窄に十分なひずみ特性を持つ材料に変更することで、PRM耐久性を向上させた。

第3章では、PRMの捏和機構に関して検討を行った。推進薬がスラリとなるまでは主に蠕動収縮による圧縮で捏和が進行し、スラリとなるとPRM内を大きく動きながら捏和が進行することを明らかにした。主に圧縮によって推進薬スラリが得られることを実証した。

第4章では、印加圧縮空気圧と仕込み量に関して適正に捏和が進行する条件の抽出を行った。捏和時に推進薬に十分な圧縮を与え、かつ装置破損の恐れのない適正印加圧縮空気圧を40~70 kPaであるとした。また推進薬全体に捏和機構を作用させることのできる仕込み量の検討を行った。実推進薬捏和実験によって検証を行い、適正な仕込み量を550 gとした。

第5章では、当該PRM装置構成で推進薬捏和に要する時間を実推進薬捏和実験によって探索し、推進薬グレインを製造した。X線非破壊検査・ストランド燃焼試験の結果から、PRMで捏和した推進薬はグレイン注型に十分な流動性を持っており、プラネタリミキサで捏和したものと同等の燃焼特性であった。これらより、PRMは実推進薬捏和に十分な捏和性能を有している考えられる。

本研究によって、PRMは推進薬捏和に要求される捏和性能を有することが示され、装置改良によって熱交換機構・装置耐久性・組成安定性を獲得した。ラボスケール以上の試作には成功したが、スケール効果は未評価であるため製造効率や装置規模に関しては条件を満たす程度か判断が難しい。しかしながら、表6.1の通り、PRMは安全な推進薬ミキサとしての条件の多くを満たしている。今後製造効率を高め、またPRMで製造した推進薬の品質向上に取り組むなど本研究を基盤とした応用研究が展開されることで、PRMを用いた推進薬の安全な連続捏和プラントが実用化され、固体ロケットのコスト低減に貢献することが期待できる。



表 6.1 PRM が満たす安全な連続式推進薬ミキサの条件

項目		条件	PRM	
要求される 性能・機能	捏和性能	実用推進薬スラリを捏和 できる性能	○	実推進薬グレインの 製造を実証 (第 5 章)
	捏和効率	推進薬需要を満たす 適切な効率	△	ラボスケール以上 の試作
	熱交換機構	推進薬の粘度を十分低減 できる加温性能	○	熱交換ディスク (第 2 章)
	装置耐久性	連続的な装置駆動が 可能な耐久性	○	内側ゴムチューブの 改良 (第 2 章)
	組成安定性	推進薬の組成に影響を 与えない機構	○	
安全性	装置構成	不具合時に火花等誤着火源 を発生させない構成	○	ゴム製の装置構成
	捏和機構	酸化剤粒子に強いせん断・ 摩擦を与えない機構	○	ゴム伸縮による捏和
	駆動方法	不具合時に推進薬へ通電 することがない駆動方法	○	圧縮空気駆動
	装置規模	安全管理区域ができる限り 小さい装置規模	—	スケール効果未評価

# 付録

## A. 1 固体推進薬

### A. 1. 1 推進薬原料

#### バインダ

汎用されているバインダはテレキリーリック液状ゴムの一つである HTPB である．図 A.1 は推進薬用に使われている HTPB, Poly bd™ R-45HT の化学構造である<sup>[71]</sup>．推進薬燃焼性能向上のため，HTPB からグアシジルアジドポリマなど高エネルギーポリマへ転換する研究も行われている<sup>[72]</sup> が，現時点では燃焼特性・入手性の観点から実用化にはしばらくの時間を要する．

Parson ら<sup>[73]</sup> によってコンポジット推進薬が見出された当初はバインダにアスファルトが用いられていたが，モータケース接着性を高めるために 1943 年より液状ゴムのポリサルファイドを用いたコンポジット推進薬が開発された．その後，複数のポリブタジエン系液状ゴムが検討された<sup>[26]</sup>．ポリブタジエン系液状ゴムの中でも，ポリブタジエン-アクリル酸やポリブタジエン-アクリル酸-アクリロニトリル三重合体 (Polybutadiene acrylic acid acrylonitrile terpolymer, 以下 PBAN)<sup>[74]</sup> を用いたコンポジット推進薬が検討された後，現在の主流はテレキリーリック液状ゴムの HTPB となっている．また PBAN を用いたコンポジット推進薬も引き続き NASA SLS 用ブースタに採用されている<sup>[75]</sup>．

テレキリーリック液状ゴムは分子量数 1000 ~ 4000 の鎖状ポリブタジエンの末端が官能基修飾されたものである<sup>[76]</sup>．室温下，液状で成形加工性に優れる上に，硬化剤により末端官能基を架橋点としてゴム網目構造を形成することができる．末端官能基には水酸基のほかカルボキシル基・クロロ基・フルオロ基のものがあるが，反応性が高いとコンパウンド加工時に問題が発生しやすく，また極性や会合性が高いと増粘効果が高い<sup>[77]</sup>．現在のコンポジット推進薬には製造性の観点から，粘度の低い HTPB が選択されている．

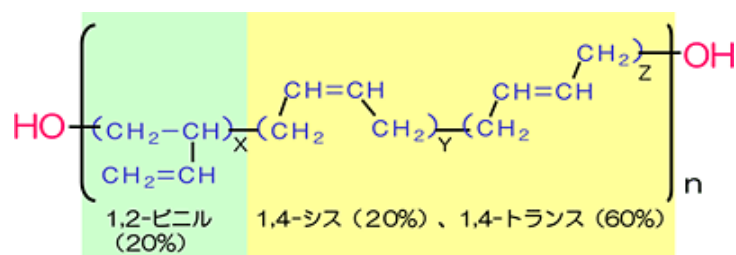


図 A.1 Poly bd™ R-45 HT の化学構造<sup>[71]</sup>

## 酸化剤

良好な燃焼特性と化学安定性を持ち，入手性に優れる過塩素酸アンモニウム (Ammonium perchlorate, 以下 AP) が汎用されている．未だ研究段階ではあるが，燃焼特性に優れ，燃焼ガスの環境負荷が低いアンモニウムジニトラミド<sup>[78, 79]</sup> は近年注目を集めている．硝酸アンモニウムは入手性に優れるが吸湿性が高く，貯蔵性に問題が残る．

## 金属燃料

燃焼温度向上，振動燃焼の抑制，推進薬密度向上のために，実用コンポジット推進薬には金属粉が約 20wt%程添加される．酸化被膜によって高い化学安定性を持つアルミニウム (Aluminum, 以下 Al) が汎用されている．Al 以外の候補としてボロンやベリリウム，マグナリウム，水素化アルミニウムなどが挙げられるが，実用推進薬では Al がほとんどである．

## 硬化剤・可塑剤<sup>[80]</sup>

HTPB の中でも，コンポジット推進薬には優れたゴム弾性を得るためにブタジエン主鎖は 1,4 結合を多く持ち，また 2 官能イソシアネート硬化剤で 3 次元構造体を構築できる末端水酸基官能度が 2 以上となるラジカル重合型が用いられている．ラジカル重合型 HTPB の硬化剤には IPDI やトルエンジイソシアネートが一般的である．

可塑剤はポリマと相溶することで製造性を向上させる．可塑剤には DOA や DOP が一般的に用いられている．

### A. 1. 2 推進薬の製造性

推進薬の製造性は原料の組成・物性に影響される．また，原料組成・物性が同じであっても，製造手順やミキサの種類など製造手法によっても製造性は変化する．このように製造性には多くの要素が関係しており，各製造メーカーで経験的に求められているのが実情である．本論文第 2 章では製造性へのバインダの影響を述べたが，他には酸化剤粒子の粒子配合や粒子特性 (粒径，粒度分布，粒子形状，粒子表面状態など)，その他金属燃料粉などの粒子特性が挙げられる．

酸化剤粒子が多いと推進性能が向上するが，過剰となると製造性・機械特性が悪くなる．AP/Al/HTPB 系コンポジット推進薬の場合，バインダ分率 (可塑剤や硬化剤などを含む) が 10~11wt% の場合に理論比推力  $I_{sp}$  が最大となるが，このバインダ分率では注型に十分なコンポジット推進薬スラリー粘度および硬化後の機械特性を得ることが難しい．できる限りバインダ分率を低く抑えつつ (12~14wt%)，注型性の十分なコンポジット推進薬スラリーを捏和する必要がある．そのため，粗粒細粒 AP を一定の配合比でブレンド，することで重量分率にして 70% 弱という高充填密度を達成している<sup>[80]</sup>．

## A. 2 PRM の蠕動運動と収縮動作間隔の関係

### A. 2. 1 収縮動作間隔の設定

PRM の蠕動運動によって内容物を適切に捏和・搬送するためには，セグメントの狭窄・開口が正常に行われるよう適切な収縮動作間隔を設定する必要がある．収縮動作間隔の設定が長いと，PRM 内容物の平均滞留時間が長くなってしまい，搬送や捏和の効率が低くなる．一方，あまりに短いとセグメント圧縮空気チャンバ内の圧縮空気給排気が正常に進まず，適切に内容物に蠕動収縮動作を伝えることができない．

セグメント収縮動作間隔時間は圧縮空気供給電磁弁の開閉によって制御される．基本構成の PRM (従来の蠕動運動型ポンプ) では，圧縮空気の給排気速度を調節する仕組みが付与されておらず，収縮動作応答性は装置設計，特に圧縮空気チャンバ容量に依存していた．過去の研究でチャンバに圧縮空気が印加され，内側チューブが閉塞するまでに 0.8 秒であった一方で，その印加圧縮空気の排出に 3.0 秒以上かかっていることが分かっている<sup>[76]</sup>．そのため，圧縮空気供給電磁弁の制御では収縮動作間隔の高速化に限界があり，基本構成ではセグメント収縮動作間隔は少なくとも 4.0 秒以上に設定しなければならない．

### A. 2. 1 急速排気弁による収縮動作間隔の高速化

高効率な推進薬捏和を行うためには，セグメント収縮動作間隔の高速化が重要となる．圧縮空気チャンバの給排気口に急速排気弁 (図 A.2) を付与させ，圧縮空気排気効率を高めることでセグメント収縮動作間隔の高速化を行った．

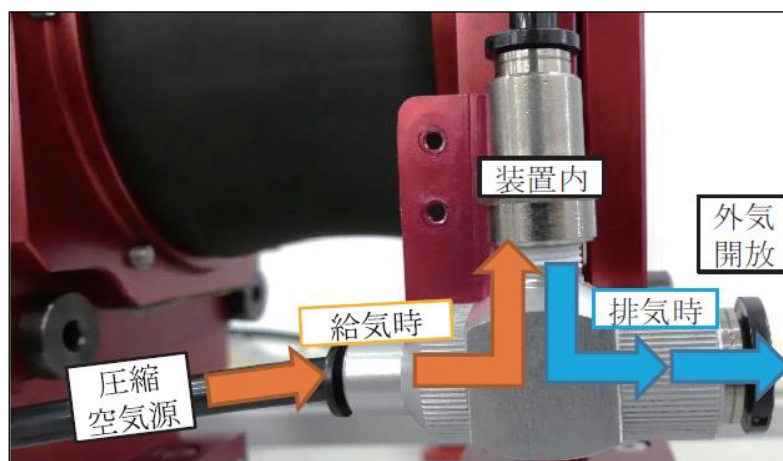


図 2.18 急速排気弁

## 実験装置

急速排気弁を追加していない基本構成の PRM セグメント (Mark I), 急速排気弁を 1 つ追加したセグメント (Mark III – one valve 型), 急速排気弁を 2 つ追加したセグメント (Mark III – two valves 型) の 3 セグメントを用いた. 各セグメントの内側ゴムチューブは材質・厚み共に同等のものを用いた. PRM セグメントの内側ゴムチューブは内径 55 mm, チューブ軸方向長さ 90 mm とした.

実験系は図 A.3 の通りである. PRM セグメントへコンプレッサからレギュレータを通じて圧縮空気 (50 ~ 100 kPa) を印加した. 圧縮空気印加・排気による内側チューブ閉塞・開放の様子を軸方向からデジタルカメラ (DMC-FZ300, Panasonic) で動画撮影した. カメラのフレームレートは 240 fps とした. 得られた動画はモーションキャプチャソフト (Motion analyzer VW-H2MA, キーエンス) で解析した.

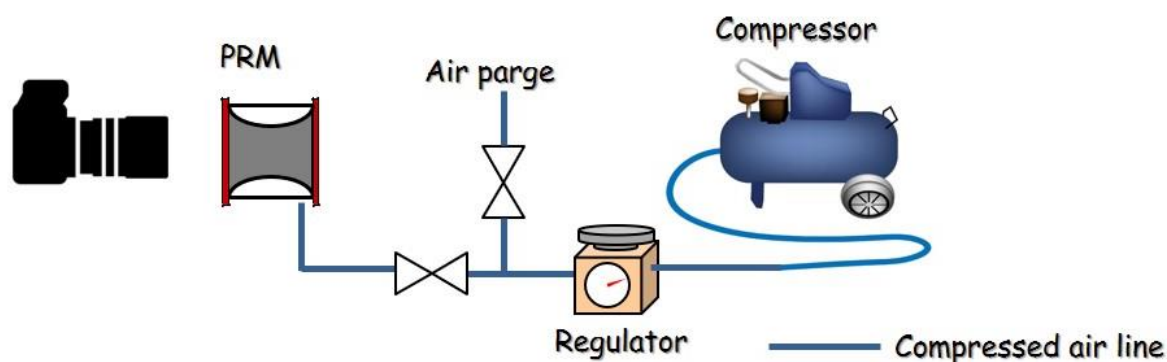


図 A.3 圧縮空気排出の計測ライン

## 急速排気弁による収縮動作間隔の短縮

PRM 収縮動作において、内側チューブは 4 つの凸形状を形成する. 圧縮空気を印加していない初期状態を基準として、基準から凸形状頂点までの半径方向の長さの時間変化を測定した. 各印加圧縮空気圧力において、完全に内側チューブが閉塞した後、コンプレッサからの圧縮空気印加を止めて圧縮空気の排出を開始し、初期状態に戻るまでの時間を Mark I と Mark III – one valve type で比較した (図 A.4). 急速排気弁を追加することで、各印加圧力において排気時間を約半分からそれ以上削減することができている. 例えば、60 kPa の印加圧力では、急速排気弁によって排出時間は 3.82 秒から 1.71 秒へ 55.2 %削減された.

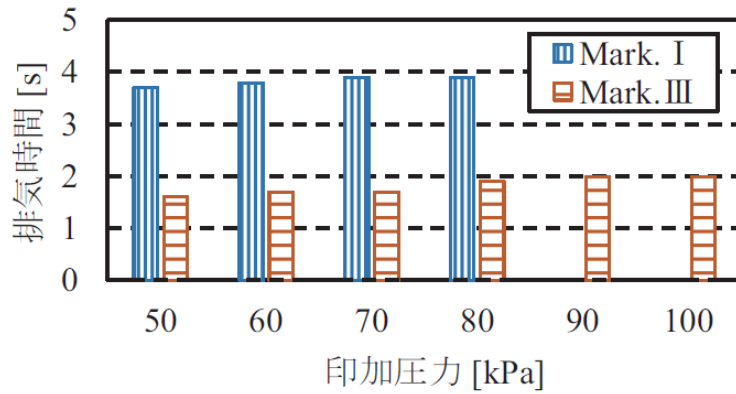


図 A.4 急速排気弁による排出時間の変化

さらに、印加圧力 60 kPa における急速排気弁の数による排出応答性の変化を図 2.21 に示す。急速排気弁 1 つでは、初期状態に戻るまでに 1.39 秒要したが、2 つでは 0.67 秒となった。PRM に急速排気弁を 2 つ追加することで、これまで基本構成では PRM が収縮するにかかる 0.8 秒と合わせて収縮動作間隔を 4.6 秒以上に設定せざるを得なかったが、間隔を 1.5 秒でも正常に PRM を駆動できるよう改良できた。これによって、捏和効率を 3.1 倍に高めることができる。

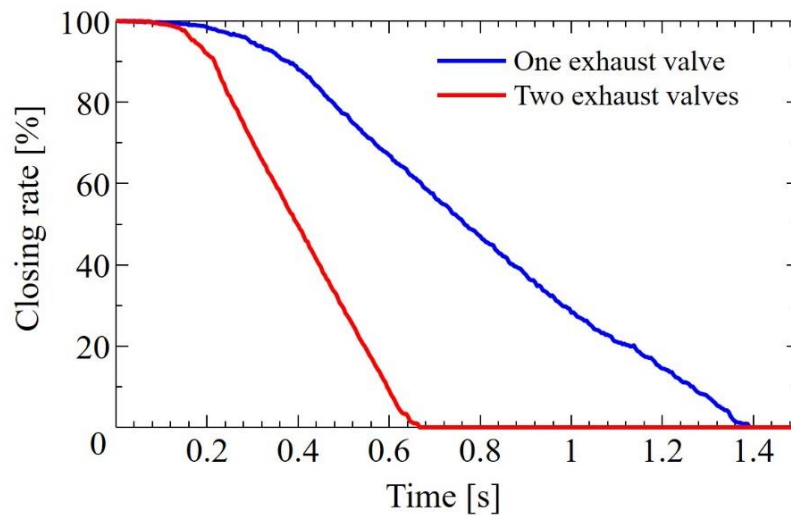


図 A.5 急速排気弁数による排出応答性の変化

### A. 3 コンポジット推進薬の X 線 CT スキャン

X 線 CT (Computed tomography) は X 線などを用いて物体をスキャンし，コンピュータを用いて X 線吸収量の空間分布を計算することで，物理量の空間分布を計測する技術である．X 線 CT スキャナは 1970 年代初頭に実用化されて以来，観察対象を非破壊でその内部構造を観察する装置として医療，工業用途に普及してきた．

#### A. 2. 1 X 線 CT スキャンの原理

工業非破壊検査用 X 線 CT スキャナでは，ファンビーム状に X 線を対象物に照射し，検出器で透過 X 線強度（投影データ）を測定する．X 線中の対象物を回転させることにより，対象物の全周囲方向の様々な角度から X 線を照射した場合のものと同等の投影データを得ることができる．図 A.6 はファンビーム状の X 線を観察対象物に照射した様子を略図で示したものである．得られた投影データから，コンピュータを用いて対象物内部の X 線線吸収量 $\mu$ を計算，画像として再構成している．CT スキャンによって得られるデータは対象物のある厚みを持った断層部分の平均的な断層構造を計測したものであり，画素（ボクセル）の輝度は X 線線吸収量 $\mu$ を画像フォーマット用に変換した値である．

入射強度 $I_0$ の X 線が一边の長さ $\Delta x$ のボクセル中を透過し，透過後の強度 $I$ となった場合，X 線線吸収量 $\mu$ は次の式(A-1)で表される．

$$\mu = \frac{\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)}{\Delta x} \quad (\text{A-1})$$

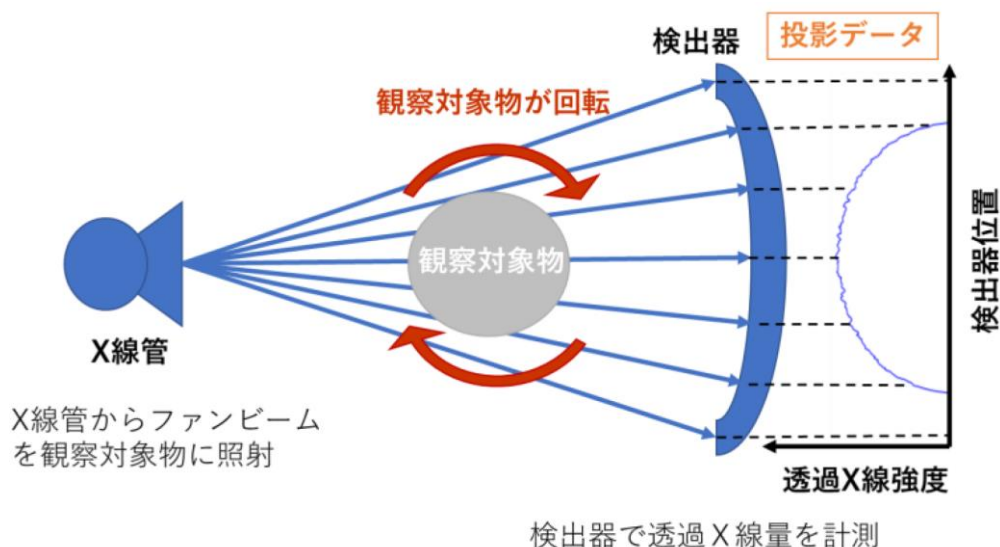


図 A.6 X 線 CT スキャナの仕組み



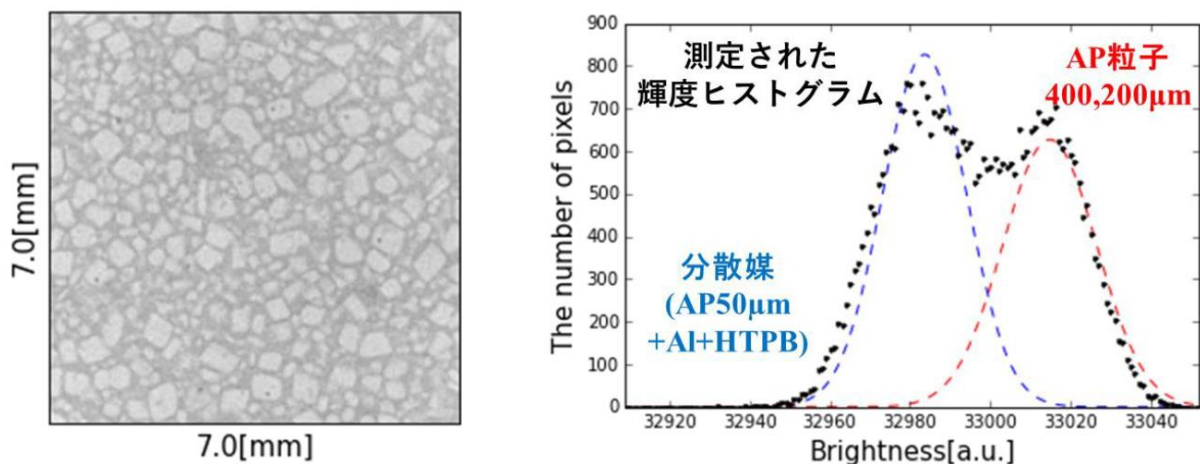
### A. 2. 1 X 線 CT 画像の輝度と推進薬原料成分の関係<sup>[81]</sup>

X 線 CT スキャナで計測されるデータは X 線吸収量であり，観察対象物の密度計測や物質測定が行われているわけではない．一般的に，X 線 CT を用いた物質の同定は困難である．しかし，AP/HTPB コンポジット推進薬のようなコンポジット材料を対象とした場合，各原材料の X 線吸収特性が異なるため，観察対象物の密度計測や物質測定をすることができる．

コンポジット材料の X 線 CT 断層画像では，ボクセルに含まれる材料の体積分率と X 線吸収特性に応じて，そのボクセルが示す X 線吸収量は決まる．すなわち，図 A.7 のように推進薬の材料体積分率に応じた平均輝度が各ボクセル数値データとして表示される（これを部分体積効果と呼ぶ）．AP/Al/HTPB コンポジット推進薬の場合，ボクセルの平均 X 線線吸収量 $\bar{\mu}$ は，各原料の X 線吸収量 $\mu_i$ ，ボクセル中の体積分率 $\rho_i$ を用いて，式(A-2)のように表される（ $i$ : AP, Al, HTPB）．

$$\bar{\mu} = \mu_{AP}\rho_{AP} + \mu_{Al}\rho_{Al} + \mu_{HTPB}\rho_{HTPB} \quad (2-1)$$

3.4 節における推進薬の X 線 CT スキャン実験では，得られた X 線 CT 断層画像の輝度ヒストグラムを取ると粒径 400, 200  $\mu\text{m}$  の AP 粒子の輝度（高輝度側）と Al/HTPB 予捏和スラリと粒径 50  $\mu\text{m}$  の AP の輝度が部分体積効果によって平均された輝度（低輝度側）の二つのピークを持っていた（図 A.7）．これは，3.4 節の X 線 CT スキャン条件における分解能（ピクセル長さ）が 44.3  $\mu\text{m}$  であったためである．Al は AP よりも分子量が大きいため輝度が高くなるが，部分体積効果によって輝度の低い HTPB や粒径 50  $\mu\text{m}$  の AP の輝度とピクセル内で平均化されていると考えられる．





# 引用

---

- [1] 宇宙ビジョン 2030, 内閣府宇宙政策委員会, 2017 年 5 月 29 日策定.
- [2] State of the satellite industry report 2017, Satellite industry association, 2017.
- [3] R. Janovsky, F. Gamgami, P. Perczynski, M. Scheper, N. Voigt, R. Ernst, S. Larch, F. Venditti and G. Ruy, Advanced launcher concepts for a future market –An analysis, *the proceedings of the 67<sup>th</sup> international astronautical congress*, 2016, IAC-16-D2.4.1.
- [4] Minotaur Space Launch Vehicles fact sheet, Orbital ATK, 2017.
- [5] T. Wekerle, J. Filho, L. da Costa and L. Trabasso, Status and trends of smallsats and their launch vehicles – an up-to-date review, *Journal of aerospace technology and management*, 2017, 9, 3, pp. 269-286.
- [6] Vega fact sheet, ESA, 2016.
- [7] Minotaur-C fact sheet, Orbital ATK, 2017.
- [8] [http://www.jaxa.jp/projects/rockets/epsilon/index\\_j.html](http://www.jaxa.jp/projects/rockets/epsilon/index_j.html)
- [9] Pegasus fact sheet, Orbital ATK, 2015.
- [10] J. Tulp and P. Beck, Rocket Lab: Liberating the small satellite market, *the proceedings of the 31<sup>st</sup> Annual AIAA/USU conference on small satellites*, 2017, SSC17-IV-04.
- [11] C. Niederstrasser and W. Frick, Small Launch Vehicles – A 2015 state of the industry survey, *the proceedings of the 29<sup>th</sup> Annual AIAA/USU conference on small satellites*, 2015, SSC15-II-7.
- [12] <http://www.interorbital.com/Launch%20Vehicles>
- [13] <http://www.landspace.com/w36447.jsp>
- [14] <https://www.gspacetechn.com/launch-vehicles>
- [15] <http://rocketcrafters.space/products-services/intrepid-launcher-family/intrepid-1/>
- [16] Star-lord payload user's guide, <http://rocketstar.nyc/starlord-payload-users-guide.pdf>
- [17] <https://vector-launch.com/vector-h/>
- [18] <http://www.arcaspace.com/en/haas2c.htm>
- [19] <https://vector-launch.com/vector-r/>
- [20] <https://www.nammo.com/what-we-do/technology/hybrid-propulsion/>
- [21] 国内外の宇宙機器・利用産業の市場構造及び動向について（1）, 内閣府宇宙開発戦略推進事務局, 2016 年 7 月 28 日
- [22] G. Sutton and O. Biblarz, Rocket propulsion elements, 8<sup>th</sup> edition, John Wiley & Sons Inc., 2010.
- [23] A. Davenas, Solid rocket propulsion technology, 1<sup>st</sup> edition, Pergamon press, 1993.
- [24] 上ノ山 周, 混練・捏和装置, *色材*, 2004, 77, 11, pp. 517-523.
- [25] A. Davenas, Development of modern solid propellants, *Journal of propulsion and power*, 2003, 19, 6, pp.1108-1129.

- [26] L. Caveny, R. Geisler, R. Ellis and T. Moore, Solid rocket enabling technologies and milestones in the United States, *Journal of propulsion and power*, 2003, 19, 6, pp. 1038-1066.
- [27] M. Larimer, S. Rakes and J. Sides, Evaluation of a unique mixer design for processing solid propellants and comparison to mixers standard to the industry, *AIAA paper*, 1968, 68-539.
- [28] C. Cervenka, The development of a continuous mix process for ASRM propellant production, *AIAA paper*, 93-2056.
- [29] P. Cloutet, C. Marraud, V. Marchetto, E. Robert and N. Cesco, Continuous twin-screw technology for the manufacture of large solid propellant grains for next generation, *the proceedings of the 61<sup>st</sup> international astronautical congress*, 2010, IAC-10-D2.5.
- [30] J. Guery, G. Chounet, M. Gaudre, J. Tauzia and P. Greco, A new continuous mixing facility for the demonstration of solid propulsion technologies of future ELV, *the proceedings of the 56<sup>th</sup> international astronautical congress*, 2005, IAC-05-C4.2.02
- [31] S. Martin, F. Bruni, C. Marraud, P. Cloutet, V. Ambit, E. Robert, A. Jarry and S. Guedron, Twin screw progress demonstration technology activities for solid propulsion in new generation launcher applications, *the proceedings of the 63<sup>rd</sup> international astronautical congress*, 2012, IAC-12-C4.2.5.
- [32] E. Cooke, Recent developments in extrudable composite propellant technology, *AIAA paper*, 91-1946.
- [33] D. Koelle, Handbook of cost engineering for space transportation with TRANSCOST 7.0, TransCostSystems, 2000.
- [34] Propulsion products catalog, Orbital ATK, 2016, p. 30.
- [35] J. Guery, I. Chang, T. Shimada, M. Glick, D. Boury, E. Robert, J. Napior, R. Wardle, C. Perut, M. Calabro, R. Glick, H. Habu, N. Sekino, G. Vigier and B. d'Andrea, Solid propulsion for space applications: An updated roadmap, *Acta Astronautica*, 2010, 66, 1-2, pp. 201-219.
- [36] T. Sojourner, D. Richardson, B. Allen, K. McHenry and B. Goldberg, Solid rocket booster reliability and historical failure modes review, *AIAA paper*, 2015-3873.
- [37] C. Haff Jr., Extruded composite propellant technology development, *AIAA paper*, 83-1272.
- [38] 平凡社, 世界大百科事典, 第2版 (改訂新版), 2007.
- [39] 粉体工学ハンドブック, 粉体工学会 編, 初版, 朝倉書店, 2014/
- [40] 橋本 建次, 混錬技術, 産業技術センター, 1978
- [41] 中原 正二, 蓮江 和夫, 甲賀 誠, 伊達 新吾, 新編 火薬学概論, 初版, 産業図書, 2014
- [42] P. Lacey, Developments in the theory of particle, *Journal of applied chemistry*, 1954, 4, pp. 257-268.
- [43] D. Penry and P. Jumars, Chemical reactor analysis and optimal digestion, *Bioscience*, 1986, 36, 5, pp. 310-315.
- [44] D. Penry and P. Jumars, Modeling animal guts as chemical reactors, *The American naturalist*, 1987, 129, 1, pp. 69-96.

- [45] G. Bornhorst, O. Gouseti, M. Wickham and S. Bakalis, Engineering digestion: multiscale processes of food digestion, *Journal of food science*, 2016, 81, 3, pp. R534-R543.
- [46] P. Withers, *Comparative animal physiology*, 1992, pp. 905-907.
- [47] M. Eastwood, J. Robertson, W. Brydon and D. MacDonald, Measurement of water-holding properties of fibre and their faecal bulking ability in man, *British journal of nutrition*, 1983, 50, 3, pp. 539-547.
- [48] T. Takahashi and E. Sakaguchi, Role of the furrow of the proximal colon in the production of soft and hard feces in nutrias, *Myocastor coypus*, *Journal of comparative physiology B*, 2000, 170, 7, pp. 531-535.
- [49] T. Takahashi, T. Sakata, Viscous properties of pig cecal contents and the contribution of solid particles to viscosity, *Nutrition*, 2004, 20, 4, pp. 377-382.
- [50] C. Dikeman and G. Fahey, Viscosity as related to dietary fiber: a review, *Critical reviews in food science and nutrition*, 2006, 46, 8, pp. 649-663.
- [51] K. Schulze-Delrieu, Visual parameters define the phase and the load of contractions in isolated guinea pig ileum, *American journal of physiology*, 1999, 276, 6, pp. G1417-1424.
- [52] H. Gregersen and G. Kassab, Biomechanics of the gastrointestinal tract, *Neurogastroenterology and motility*, 1996, 8, 4, pp. 277-297.
- [53] R. Lentle, P. Janssen, P. Asvarujanon, P. Chambers, K. Stafford and Y. Hemar, High definition mapping of circular and longitudinal motility in the terminal ileum of the brushtail possum *Trichosurus vulpecula* with watery and viscous perfusates, *Journal of comparative physiology B*, 2007, 177, 5, pp. 543-556.
- [54] P. Janssen, R. Lentle, P. Asvarujanon, P. Chambers, K. Stafford and Y. Hemar, Characterization of flow and mixing regimes within the ileum of the brushtail possum using residence time distribution analysis with simultaneous spatio-temporal mapping, *Journal of physiology*, 2007, 582, 3, pp. 1239-1248.
- [55] T. Miyagawa, Y. Imai, S. Ishida and T. Ishikawa, Relationship between gastric motility and liquid mixing in the stomach, *American journal of physiology-gastrointestinal and liver physiology*, 2016, 311, 6, pp. G1114-1121.
- [56] J. Spillman, peristaltic conveyors, *J. Chartered Mechanical Engineering*, 1978, 25, 5, pp. 55-57.
- [57] E. Mangan, D. Kingsley, R. Quinn, G. Sutton, J. Mansour and H. Chiel, A biologically inspired gripping device, *Industrial Robot*, 2005, 32, 1, pp. 49-54.
- [58] H. Miki, T. Okuyama, S. Kodaira, Y. Luo, T. Takagi, T. Yambe and T. Sato, Artificial esophagus with peristaltic motion using shape memory alloy, *International journal of applied electromagnetics and mechanics*, 2010, 33, pp. 705-711.
- [59] M. Watanabe, K. Sekine, Y. Hori, Y. Shiraishi, T. Maeda, D. Honma, G. Miyata, Y. Saijo and T. Yambe, Artificial esophagus with peristaltic movement, *Future medical engineering based on bionanotechnology*, 2006, pp. 577-583.
- [60] 中村 太郎, 図解 人工筋肉 日刊工業新聞社, 2011.

- [61] T. Nakamura, Experimental comparisons between McKibben type artificial muscles and straight fibers type artificial muscles, *the proceedings of SPIE smart structures, devices and systems III*, 2007, 6414, p. 641424.
- [62] K. Suzuki and T. Nakamura, Development of a peristaltic pump based on bowel peristalsis using for artificial rubber muscle, *the proceedings of the 2010 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems*, 2010, pp. 3085-3090.
- [63] Y. Hirayama, K. Suzuki and T. Nakamura, Development of a peristaltic pump based on bowel peristalsis -verification of the basic characteristic considered change of motion patterns, *the proceedings of the 2011 IEEE/ASME international conference on advanced intelligent mechatronics*, 2011, pp. 748-753.
- [64] K. Saito, Y. Hirayama, Y. Kimura and T. Nakamura, Development of a Peristaltic Pump Based on Bowel Peristalsis -Improvement of closing area rates and suction pressure measurement, *the proceedings of the 4<sup>th</sup> IEEE RAS/EMBS international conference on biomedical robotics and biomechatronics*, 2012, pp. 949-954.
- [65] M. Kohga and Y. Hagihara, Experimental study on processability of ammonium perchlorate/hydroxyl terminated polybutadiene composite propellant (I) –Influences of operating temperature on viscosity of uncured propellant-, *Kayaku Gakkaishi*, 1998, 59, 1, pp. 1-5.
- [66] JIS K 6258: 2010 「加硫ゴム及び熱可塑性ゴム－耐液性の求め方」
- [67] 井上 徹裕, 可塑剤, *日本ゴム協会誌*, 1977, 50, 10, pp. 672-680.
- [68] 伴 遼介, 人工筋肉を用いた蠕動運動型ポンプの多機能化についての研究, 修士論文, 2014.
- [69] S. Yoshihama, S. Takano, Y. Yamada, T. Nakamura and K. Kato, Powder conveyance experiments with peristaltic conveyor using a pneumatic artificial muscle, *the proceedings of the 2016 IEEE international conference on advanced intelligent mechatronics*, 2016, pp. 1539-1544.
- [70] 吉浜 舜, 粉体搬送を目的とする腸管動作を規範とした蠕動運動型コンベアの開発, 修士論文, 2016.
- [71] [http://www.idemitsu.co.jp/ipc/products/poly1/poly\\_bd.html](http://www.idemitsu.co.jp/ipc/products/poly1/poly_bd.html) (出光興産株式会社 製品紹介)
- [72] N. Kubota, T. Sonobe, A. Yamamoto and H. Shimizu, Burning rate characteristics of GAP propellants, *Journal of propulsion*, 1990, 6, 6, pp. 686-689.
- [73] G. James and F. Winter, Early educator-supervised student rocketry the GALCIT rocket research project, 1936-39, *Acta Astronautica*, 1983, 10, 5-6, pp. 231-249.
- [74] T. Moore, Assessment of HTPB and PBAN propellant usage in the United States, *AIAA paper*, 1997, 97-3137.
- [75] J. Redden, SLS booster development, *the proceedings of the 51<sup>st</sup> AIAA/SAE/ASEE joint propulsion conference*, July, 2015, Orlando.
- [76] C. Ura-neck, H. Hsieh and O. Buck, Telechelic polymers, *Polymer chemistry*, 1960, 46, 148, pp. 535-539.

- [77] E. Collins, T. Mass and W. Bauer, Influence of chemical nature on flow behavior of polymers I. Shear rate and temperature dependence, *Rubber chemistry and technology*, 1970, 43, 5, pp. 1109-1115.
- [78] S. Chakravarthy, J. Freeman, E. Price and R. Sigman, Combustion of propellants with ammonium dinitramide, *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2004, 29, 4, pp. 220-230.
- [79] K. Fujisato, H. Habu, H. Hori, H. Shibamoto, X. Yu and A. Miyake, Combustion mechanism of ADN-based composite propellant, *the proceedings of the 43<sup>rd</sup> international annual conference of ICT, 2012*, pp. 26/1-26/9.
- [80] プロペラント・ハンドブック, 火薬学会, 2005.
- [81] N. Hosomi, K. Otake, N. Uegaki, A. Iwasaki, K. Matsumoto, H. Habu, S. Yamaguchi, Analyzing dispersion of particles and void in AP/HTPB composite propellant by X-ray computed tomography, *the proceedings of the 31<sup>st</sup> International symposium on space technology and science*, 2017, 2017-a-29.

# 発表論文

---

## [1] 投稿論文及び IEEE refereed proceedings

1. Kyota Ashigaki, ○Akihiro Iwasaki, Daiki Hagiwara, Kai Negishi, Kotaro Matsumoto, Yasuyuki Yamada, Hiroto Habu and Taro Nakamura, “Considering Mixing Process of Rocket Solid Propellant using Mixing Transport Device Simulating Peristaltic Movement of Intestinal Tract”, *Proceedings of the 7<sup>th</sup> IEEE/RAS/EMBS international conference on biomedical robotics and biomechatronics*, 2018, WeB1.11 (August 26<sup>th</sup>-29<sup>th</sup>, 2018, the Grolsch Veste, Enschede, The Netherlands).
2. Kyota Ashigaki, Shun Yoshihama, ○Akihiro Iwasaki, Kengo Tagami, Yasuyuki Yamada, Hiroto Habu and Taro Nakamura, “Study of an Automatic Material Input Method for the Continuous Production of Solid Propellant by a Peristaltic Mixer”, *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan* (採録決定済み).
3. Naomasa Hosomi, Kana Otake, Natsuyo Uegaki, ○Akihiro Iwasaki, Kotaro Matsumoto, Hiroto Habu, Makoto Asakawa and Soichiro Yamaguchi, “Analyzing dispersion of particles and void in AP/HTPB composite propellant by X-ray computed tomography”, *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan* (採録決定済み).
4. ○岩崎 祥大, 芦垣 恭太, 松本 幸太郎, 山田 泰之, 中村 太郎, 羽生 宏人, “蠕動運動型ラバー混合器の分散捏和効率に関する検討”, 宇宙航空研究開発機構開発報告書高エネルギー物質研究会平成 29 年度研究成果報告, 2018, JAXA-RR-17-008, pp.51-56.
5. 芦垣 恭太, 山田 泰之, ○岩崎 祥大, 松本幸太郎, 羽生 宏人, 中村 太郎, “固体推進薬の捏和へ向けた蠕動運動型混合搬送機 Mark. III の開発と性能評価”, 宇宙航空研究開発機構開発報告書高エネルギー物質研究会平成 29 年度研究成果報告, 2018, JAXA-RR-17-008, pp.57-60.
6. 寺嶋 寛成, 細見 直正, ○岩崎 祥大, 松本 幸太郎, 羽生 宏人, 山口 聡一郎, “X 線 CT を用いたコンポジット推進薬捏和における充填構造の可視化”, 宇宙航空研究開発機構開発報告書高エネルギー物質研究会平成 29 年度研究成果報告, 2018, JAXA-RR-17-008, pp.61-66.
7. 山田 泰之, 吉浜 舜, ○岩崎 祥大, 芦垣 恭太, 松本 幸太郎, 羽生 宏人, 中村 太郎: “蠕動運動型混合搬送機による固体推進薬連続製造の検討”, 日本機械学会論文集, 2017, 83, 850, p.16-00576.
8. ○岩崎 祥大, 吉浜 舜, 松本 幸太郎, 中村 太郎, 羽生 宏人, “蠕動運動型人工筋肉混合器による AP 系コンポジット推進薬の捏和”, 宇宙航空研究開発機構開発報告書高エネルギー物質研究会平成 28 年度研究成果報告, 2017, JAXA-RR-16-006, pp.53-62.
9. 細見 直正, 大竹 可那, 上垣 那津世, ○岩崎 祥大, 松本 幸太郎, 羽生 宏人, 山口 聡一郎, “X 線 CT を用いた AP/HTPB 系コンポジット推進薬の混合度測定”, 宇宙航空研究

開発機構開発報告書高エネルギー物質研究会平成 28 年度研究成果報告, 2017, JAXA-RR-16-006, pp.63-68.

10. ○Akihiro Iwasaki, Kotaro Matsumoto, Ryosuke Ban, Shun Yoshihama, Hiroto Habu and Taro Nakamura, “The Continuous Mixing Process of Composite Solid Propellant Slurry by the Artificial Muscle Actuator”, *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan*, 2016, 14, ists30, pp. Pa\_107-110.
11. ○岩崎 祥大, 吉浜 舜, 松本 幸太郎, 中村 太郎, 羽生 宏人, “蠕動運動ポンプを用いた固体推進薬連続捏和に関する研究”, 宇宙航空研究開発機構開発報告書高エネルギー物質研究会平成 27 年度研究成果報告, 2016, JAXA-RR-15-004, pp.41-48.
12. ○岩崎 祥大, 細見 直正, 大竹 可那, 松本 幸太郎, 山口 聡一郎, 羽生 宏人, “X 線 CT を用いた固体推進薬中の AP 粒子 /ボイドの分散評価”, 宇宙航空研究開発機構開発報告書高エネルギー物質研究会平成 27 年度研究成果報告, 2016, JAXA-RR-15-004, pp.49-54.
13. Shun Yoshihama, Ryosuke Ban, Taro Nakamura, ○Akihiro Iwasaki, and Hiroto Habu, “Mixing of Solid Propellant by Peristaltic Pump Based on Bowel Peristalsis”, *Proceedings of the 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent and Systems*, 2015, WeFT8.1, pp. 3862-3868 (September 28<sup>th</sup>-October 2<sup>nd</sup>, 2015, Congress Center Hamburg, Hamburg, Germany).
14. ○岩崎 祥大, 伴 遼介, 吉浜 舜, 中村 太郎, 羽生 宏人: “人工筋肉アクチュエータによる固体推進薬の連続捏和”, 宇宙航空研究開発機構開発報告書高エネルギー物質研究会平成 26 年度研究成果報告, 2015, JAXA-RR-14-005, pp.41-47.

## [2] 国際会議発表 (IEEE international conferece を除く)

1. ○Akihiro Iwasaki, Kyota Ashigaki, Kotaro Matsumoto, Yasuyuki Yamada, Taro Nakamura and Hiroto Habu, “Composite Propellant Kneading by Peristaltic Rubber Mixer and Improvement of Its Efficiency”, The 6<sup>th</sup> International Symposium on Energetic Materials and their Applications, P-24, Tohoku University, Sendai, Miyagi, Japan, November 6<sup>th</sup>-10<sup>th</sup>, 2017 (Poster).
2. Kotaro Matsumoto, ○Akihiro Iwasaki and Hiroto Habu, “Agglomeration characteristics of metal particles in AP composite propellants”, The 6<sup>th</sup> International Symposium on Energetic Materials and their Applications, Tohoku University, Sendai, Miyagi, Japan, November 6<sup>th</sup>-10<sup>th</sup>, 2017.
3. Kotaro Matsumoto, ○Akihiro Iwasaki and Hiroto Habu, “High Density Composite Propellants for the Upper Stage Rocket Motor”, The 31<sup>st</sup> International Symposium on Space Technology and Science, a-25, Himegin Hall, Matsuyama, Ehime, Japan, June 3<sup>rd</sup>-9<sup>th</sup>, 2017.
4. ○Akihiro Iwasaki, Shun Yoshihama, Naomasa Hosomi, Kyota Ashigaki, Kana Otake, Kotaro Matsumoto, Yasuyuki Yamada, Soichiro Yamaguchi, Taro Nakamura and Hiroto Habu, “Continuous Kneading of AP Composite Propellant Slurry by an Peristaltic Artificial Muscle

Mixer”, The 31<sup>st</sup> International Symposium on Space Technology and Science, a-26, Himegin Hall, Matsuyama, Ehime, Japan, June 3<sup>rd</sup>-9<sup>th</sup>, 2017.

5. Kyota Ashigaki, Shun Yoshihama, ○Akihiro Iwasaki, Kengo Tagami, Yasuyuki Yamada, Hiroto Habu and Taro Nakamura, “Study of an Automatic Material Input Method for the Continuous Production of Solid Propellant by a Peristaltic Mixer”, The 31<sup>st</sup> International Symposium on Space Technology and Science, a-27, Himegin Hall, Matsuyama, Ehime, Japan, June 3<sup>rd</sup>-9<sup>th</sup>, 2017.
6. Naomasa Hosomi, Kana Otake, Natsuyo Uegaki, ○Akihiro Iwasaki, Kotaro Matsumoto, Hiroto Habu and Soichiro Yamaguchi, “Analyzing Dispersion of Particles and Void in AP/HTPB Composite Propellant by X-ray Computed Tomography”, The 31<sup>st</sup> International Symposium on Space Technology and Science, a-29, Himegin Hall, Matsuyama, Ehime, Japan, June 3<sup>rd</sup>-9<sup>th</sup>, 2017.
7. ○Akihiro Iwasaki, Shun Yoshihama, Kana Otake, Naomasa Hosomi, Natsuyo Uegaki, Kotaro Matsumoto, Yasuyuki Yamada, Soichiro Yamaguchi, Taro Nakamura and Hiroto Habu, “Performance Evaluation of Composite Propellant Slurry Mixing by Peristaltic Continuous Mixer”, The 67<sup>th</sup> International Astronautical Congress, 2016, IAC-16.C4.2.7, Expo Guadarrajara, Guadarrajara, Mexico, September 26<sup>th</sup>-30<sup>th</sup>, 2016.
8. ○Akihiro Iwasaki, Ryosuke Ban, Shun Yoshihama, Taro Nakamura and Hiroto Habu, “The Continuous Mixing Process of Composite Solid Propellant Slurry by the Artificial Muscle Actuator”, The 30th International Symposium on Space Technology and Science, 2015-a-03, Kobe Convention Center, Kobe, Japan, July 4<sup>th</sup>-10<sup>th</sup>, 2015.

### [3] 国内学会発表

1. 芦垣 恭太, 萩原 大輝, ○岩崎 祥大, 若松 康太, 松本 幸太郎, 山田 泰之, 羽生 宏人, 中村 太郎, “蠕動運動型捏和装置を用いた固体推進薬混合メカニズムの検討”, 第 62 回宇宙科学技術連合講演会, 3H16, 久留米シティプラザ, 久留米市, 福岡県, 10 月 24-26 日, 2018 年.
2. 寺嶋 寛成, 村田 駿介, ○岩崎 祥大, 羽生 宏人, 山口 聡一郎, “AP/HTPB 系コンボジット推進薬における粒子間隙とスラリー粘度特性の相関”, 第 62 回宇宙科学技術連合講演会, P09, 久留米シティプラザ, 久留米市, 福岡県, 6 月 2-5 日, 2018 年 (ポスター).
3. 山田 泰之, 芦垣 恭太, ○岩崎 祥大, 萩原 大輝, 根岸 海, 吉浜 舜, 松本 幸太郎, 野副 克彦, 羽生 宏人, 中村 太郎, “「固体推進薬の安全かつ連続的製造のための蠕動運動型混合搬送装置」実用組成推進薬の製造試験及び地上燃焼試験の報告”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2018, 2A2-A07, 西日本総合展示場新館, 北九州市, 福岡県, 10 月 24-26 日, 2018 年 (ポスター).
4. ○岩崎 祥大, 芦垣 恭太, 萩原 大輝, 松本 幸太郎, 田上 賢悟, 山田 泰之, 中村 太郎, 羽生 宏人, “蠕動運動型ラバー混合器を用いたコンボジット推進薬捏和技術の研究”,



2018 年度火薬学会春季研究発表会，講演番号 20，機械振興会館，港区，東京都，5 月 22-23 日，2018 年．

5. 村田 駿介，寺嶋 寛成，細見 直正，○岩崎 祥大，羽生 宏人，山口 聡一郎，“高濃度スラリーにおける粒子間隙パラメータの提案”，第 65 回応用物理学会春季学術講演会，18a-P3-5，早稲田大学西早稲田キャンパス，相模原市，神奈川県，3 月 17-20 日，2018 年（ポスター）．
6. 村田 駿介，寺嶋 寛成，細見 直正，○岩崎 祥大，羽生 宏人，山口 聡一郎，“コンポジット固体推進薬の設計パラメータに関する提案”，平成 29 年度宇宙輸送シンポジウム，STCP-2017-004，JAXA 宇宙科学研究所，新宿区，東京都，1 月 18-19 日，2018 年．
7. 芦垣 恭太，○岩崎 祥大，松本 幸太郎，山田 泰之，羽生 宏人，中村 太郎，“腸管の蠕動運動を模擬した混合搬送装置によるロケット固体推進薬の混合プロセスの検討”，第 18 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会，1A2-03，仙台国際センター，仙台市，宮城県，12 月 20-22 日，2017 年．
8. 松本 幸太郎，○岩崎 祥大，羽生 宏人，“固体ロケット推進薬における金属燃料の燃焼可視化に関する研究”，可視化情報全国講演会 2017，OS7-2-8，室蘭工業大学，室蘭市，北海道，11 月 3-4 日，2017 年．
9. 芦垣 恭太，○岩崎 祥大，松本 幸太郎，山田 泰之，羽生 宏人，中村 太郎，“蠕動運動型捏和装置による固体推進薬製造の連続化に向けたプロセスの検討”，第 61 回宇宙科学技術連合講演会，3K01，朱鷺メッセ，新潟市，新潟，10 月 25-27 日，2017 年．
10. 寺嶋 寛成，細見 直正，○岩崎 祥大，山本 博文，松本 幸太郎，山縣 雅紀，羽生 宏人，山口 聡一郎，“AP/HTPB 系コンポジット推進薬の捏和過程における粒子集塊・空隙の X 線 CT 画像分析”，第 61 回宇宙科学技術連合講演会，P18，朱鷺メッセ，新潟市，新潟，10 月 25-27 日，2017 年（ポスター）．
11. 松本 幸太郎，○岩崎 祥大，羽生 宏人，“AP/HTPB 系コンポジット推進薬燃焼表面近傍での集塊 Al 粒子の燃焼特性”，火薬学会 2017 年度春季研究発表会，講演番号 36，青山学院大学 青山キャンパス，渋谷区，東京，5 月 25-26 日，2017 年．
12. ○岩崎 祥大，松本 幸太郎，山田 泰之，中村 太郎，羽生 宏人，“蠕動運動型混合器によるコンポジット推進薬捏和における可塑剤の効果”，火薬学会 2017 年度春季研究発表会，講演番号 39，青山学院大学 青山キャンパス，渋谷区，東京，5 月 25-26 日，2017 年．
13. 芦垣 恭太，吉浜 舜，○岩崎 祥大，山田 泰之，羽生 宏人，中村 太郎，“固体推進薬連続混合に向けた加温機構の検討”，ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017，2A1-C06，ビックパレットふくしま，郡山市，福島県，5 月 10-13 日，2017 年（ポスター）．
14. 打海 将平，細見 直正，大竹 可那，上垣 那津世，○岩崎 祥大，松本 幸太郎，羽生 宏人，山口 聡一郎，“X 線 CT 画像を用いた固体燃料ロケット推進薬の混合度測定”，第 64 回 応用物理学会春季学術講演会，16p-P9-65，パシフィコ横浜，横浜市，神奈川県，3 月 19-22 日，2017 年（ポスター）．
15. 寺嶋 寛成，細見 直正，大竹 可那，上垣 那津世，○岩崎 祥大，松本 幸太郎，羽生 宏人，山口 聡一郎，“X 線 CT 画像による AP/HTPB 系コンポジット推進薬の混合度評価”，

平成 28 年度宇宙輸送シンポジウム, STCP-2016-012, JAXA 宇宙科学研究所, 相模原市, 神奈川県, 1 月 19-20 日, 2017 年.

16. ○岩崎 祥大, 細見 直正, 吉浜 舜, 大竹 可那, 上垣 那津世, 芦垣 恭太, 松本 幸太郎, 山田 泰之, 山口 聡一郎, 中村 太郎, 羽生 宏人, “コンポジット推進薬蠕動捏和における酸化剤粒子分散状態の変化”, 平成 28 年度宇宙輸送シンポジウム, STCP-2016-013, JAXA 宇宙科学研究所, 相模原市, 神奈川県, 1 月 19-20 日, 2017 年.
17. ○岩崎 祥大, 吉浜 舜, 芦垣 恭太, 松本 幸太郎, 山田 泰之, 中村 太郎, 羽生 宏人, “蠕動運動型混合器を用いて捏和した AP 系コンポジット推進薬の燃焼特性”, 火薬学会 2016 年度秋季研究発表会, 講演番号 11, セントヒル長崎, 長崎市, 長崎県, 11 月 10-11 日, 2016 年.
18. 松本 幸太郎, ○岩崎 祥大, 羽生 宏人, “レーザを用いた固体推進薬燃焼面近傍の可視化”, 火薬学会 2016 年度秋季研究発表会, 講演番号 19, セントヒル長崎, 長崎市, 長崎県, 11 月 10-11 日, 2016 年.
19. 大竹 可那, 細見 直正, 上垣 那津世, ○岩崎 祥大, 松本 幸太郎, 羽生 宏人, 山口 聡一郎, “AP/HTPB 系コンポジット推進薬における粒子分散の統計的分析”, 第 60 回 宇宙科学技術連合講演会, 2A01, 函館アリーナ, 函館市, 北海道, 9 月 6-9 日, 2016 年.
20. 上垣 那津世, 細見 直正, 大竹 可那, ○岩崎 祥大, 松本 幸太郎, 羽生 宏人, 山口 聡一郎, “AP/HTPB 系コンポジット推進薬における粒子間結合モデル”, 第 60 回 宇宙科学技術連合講演会, 2A02, 函館アリーナ, 函館市, 北海道, 9 月 6-9 日, 2016 年.
21. ○岩崎 祥大, 吉浜 舜, 松本 幸太郎, 山田 泰之, 篠原 裕和, 寺嶋 隆史, 中村 太郎, 羽生 宏人, “蠕動運動型混合器のコンポジット推進薬スラリ捏和性能”, 火薬学会 2016 年度春季研究発表会, 講演番号 2, 青山学院大学青山キャンパス, 渋谷区, 東京都, 5 月 26-27 日, 2016 年.
22. 松本 幸太郎, ○岩崎 祥大, 羽生 宏人, “上段高性能コンポジット固体推進薬に関する研究”, 火薬学会 2016 年度春季研究発表会, 講演番号 3, 青山学院大学青山キャンパス, 渋谷区, 東京都, 5 月 26-27 日, 2016 年.
23. 大竹 可那, 細見 直正, 上垣 那津世, ○岩崎 祥大, 松本 幸太郎, 羽生 宏人, 山口 聡一郎, “固体燃料ロケット推進薬における X 線 CT の統計的分析法”, 第 63 回 応用物理学会春季学術講演会, 21p-P12-52, 東京工業大学大岡山キャンパス, 目黒区, 東京都, 3 月 19-22 日, 2016 年 (ポスター).
24. 上垣 那津世, 細見 直正, 大竹 可那, ○岩崎 祥大, 松本 幸太郎, 羽生 宏人, 山口 聡一郎, “固体燃料ロケット推進薬における酸化剤粒子の規則配列”, 第 63 回 応用物理学会春季学術講演会, 21p-P12-51, 東京工業大学大岡山キャンパス, 目黒区, 東京都, 3 月 19-22 日, 2016 年 (ポスター).
25. ○岩崎 祥大, 吉浜 舜, 松本 幸太郎, 山田 泰之, 中村 太郎, 羽生 宏人, “コンポジットロケット推進薬の連続捏和装置”, 化学工学会第 81 年会, B305, 関西大学千里山キャンパス, 吹田市, 大阪府, 3 月 13-15 日, 2016 年.
26. ○岩崎 祥大, 吉浜 舜, 大竹 可那, 細見 直正, 上垣 那津世, 松本 幸太郎, 山田 泰之, 山口 聡一郎, 中村 太郎, 寺嶋 隆史, 小島 明寛, 羽生 宏人, “固体推進薬連続捏和シ

システムに関する各要素研究概況”，平成 27 年度 宇宙輸送シンポジウム，STCP-2015-034，JAXA 宇宙科学研究所，相模原市，神奈川県，1 月 14-15 日，2016 年．

27. 松本 幸太郎，○岩崎 祥大，羽生 宏人，“AP 系コンボジット推進薬の燃焼速度に及ぼす Mg-Al 混合比の影響”，平成 27 年度 宇宙輸送シンポジウム，STCP-2015-030，JAXA 宇宙科学研究所，相模原市，神奈川県，1 月 14-15 日，2016 年．
28. 吉浜 舜，○岩崎 祥大，松本 幸太郎，山田 泰之，羽生 宏人，中村 太郎，“加温機能を備えた蠕動運動型ポンプによる固体推進薬捏和”，平成 27 年度 宇宙輸送シンポジウム，STCP-2015-035，JAXA 宇宙科学研究所，相模原市，神奈川県，1 月 14-15 日，2016 年．
29. 大竹 可那，細見 直正，上垣 那津世，○岩崎 祥大，松本 幸太郎，羽生 宏人，山口 聡一郎，“AP 系コンボジット推進薬における X 線 CT の輝度ヒストグラム分析”，平成 27 年度 宇宙輸送シンポジウム，STCP-2015-036，JAXA 宇宙科学研究所，相模原市，神奈川県，1 月 14-15 日，2016 年．
30. 上垣 那津世，大竹 可那，細見 直正，○岩崎 祥大，松本 幸太郎，羽生 宏人，山口 聡一郎，“AP 系コンボジット推進薬における粒子配列解析の検討”，平成 27 年度 宇宙輸送シンポジウム，STCP-2015-037，JAXA 宇宙科学研究所，相模原市，神奈川県，1 月 14-15 日，2016 年．
31. ○岩崎 祥大，細見 直正，大竹 可那，松本 幸太郎，山口 聡一郎，羽生 宏人，“X 線 CT を用いた固体推進薬中の AP 粒子 / 微小ボイドの分散評価”，火薬学会 2015 年度秋季研究発表会，講演番号 14，豊泉荘，別府市，大分県，12 月 10-11 日，2015 年．
32. 松本 幸太郎，○岩崎 祥大，羽生 宏人，“TiO<sub>2</sub> を添加した AP 系コンボジット推進薬の燃焼速度”，火薬学会 2015 年度秋季研究発表会，講演番号 29，豊泉荘，別府市，大分県，12 月 10-11 日，2015 年．
33. 吉浜 舜，○岩崎 祥大，松本 幸太郎，羽生 宏人，中村 太郎，“空気圧人工筋肉を用いた蠕動運動型ポンプによる固体推進剤の連続捏和プロセスに関する検討”，第 59 回宇宙科学技術連合講演会，P08，かごしま県民交流センター，鹿児島市，鹿児島，10 月 7-9 日，2015 年（ポスター）．
34. ○岩崎 祥大，吉浜 舜，中村 太郎，羽生 宏人，“固体推進薬連続捏和に関する研究”，火薬学会 2015 年度春季研究発表会，講演番号 28，慶應義塾大学日吉キャンパス，横浜市，神奈川県，5 月 28-29 日，2015 年．
35. 吉浜 舜，伴 遼介，○岩崎 祥大，羽生 宏人，中村 太郎，“固体推進剤製造のための蠕動運動型ポンプによる混合機能に関する検討”，ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015，1P2-V04，京都国際会議場，京都市，京都府，5 月 17-19 日，2015 年（ポスター）．
36. 伴 遼介，吉浜 舜，中村 太郎，羽生 宏人，○岩崎 祥大，“空気圧人工筋肉を用いた腸管構造を模した蠕動運動ポンプによる高粘性流体およびマイクロ粒子混合実験”，平成 26 年度宇宙輸送シンポジウム，STCP-2014-003，JAXA 宇宙科学研究所，相模原市，神奈川県，1 月 15-16 日，2015 年．
37. ○岩崎 祥大，伴 遼介，吉浜 舜，中村 太郎，羽生 宏人，“蠕動運動ポンプを用いた固体推進薬の連続捏和プロセス”，平成 26 年度宇宙輸送シンポジウム，STCP-2014-004，JAXA 宇宙科学研究所，相模原市，神奈川県，1 月 15-16 日，2015 年．

38. ○岩崎 祥大, 羽生 宏人, 中村 太郎, 堀 恵一, “人工筋肉アクチュエータによる固体推進薬の混合”, 第 58 回 宇宙科学技術連合講演会, IS14, 長崎ブリックホール, 長崎市, 長崎県, 11 月 12-14 日, 2014 年.

# 謝辞

---

本研究は著者が総合研究大学院大学 物理科学研究科 宇宙科学専攻に在籍し，宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 宇宙科学研究所にて行ったものです．また本研究の一部は，総合研究大学院大学物理科学研究科のプロジェクト研究指向教育プログラムの一環として行われました．

研究を進めるにあたり，宇宙科学研究所 羽生准教授には実験考察の細かなご指導を頂きました．さらに多数の研究協力者の方々と研究を作り上げる後押しまでして頂き，今でも非常に心強く感じております．内之浦宇宙空間観測所における SS-520-5 号機打ち上げ運用にも私を引率して頂きました．打ち上げ成功に沸くプロジェクトメンバーの方々の笑顔を見て，私も元気を頂くと共に自身の将来像を考えるきっかけとなりました．

宇宙科学研究所 堀教授・森田教授・小川教授・後藤准教授には研究を進めるにあたり，貴重なご助言を頂きました．また，M-35-1 TVC 真空地上燃焼試験など，様々なロケット地上燃焼試験へ引率して頂きました．これらの経験も本研究を進める貴重な知見の一つとなっております．

ご多忙の中，防衛大学校 甲賀誠教授，宇宙科学研究所 徳留真一郎准教授，曾根理嗣准教授には論文審査にお時間を割いて頂きました．

また，本研究は多数の大学研究室，企業の協力無しには成し得ませんでした．

中央大学 理工学部 中村研究室の中村太郎教授，山田泰之助教には PRM の開発を行って頂き，ロボティクスの観点から研究のご助言を頂きました．また，中村研究室の小島明寛研究員，芦垣恭太君，萩原大輝君，若松康太君，OB の伴遼介君，吉浜舜君とは実験を共に進めて頂きました．皆様のおかげで実用化に向けて PRM は常に改良が施され，デザインも洗練されていきました．

関西大学 システム理工学部 山口研究室の山口准教授には X 線 CT スキャン実験のご指導および粉体攪拌に関するご助言を頂きました．山口研究室の寺嶋寛成君，村田駿介君，OB の大竹可那さん，細見直正君，上垣那津世さんには X 線 CT スキャン実験を共に進めて頂きました．皆様と少しずつパラメータ検討を行いながら，研究を進めていくことで推進薬充填構造に関する理解が進みました．また大竹さんは後にご紹介するカーリットホールディングスにご就職され，ご就職後も PRM による捏和実験を共に進めて頂きました．

京都大学 基礎物理学研究所 早川尚男教授，理化学研究所 計算科学機構 吉岡直樹研究員には蠕動運動による推進薬捏和に関して，粉体シミュレーション技術を初めとした広い知見を元に研究のご意見を頂きました．

日本カーリット赤城工場に PRM を設置して頂き，カーリットホールディングス・日本カーリットには PRM による実推進薬の捏和および推進薬燃焼実験を行って頂きました．特に野副克彦様，久保田一浩様，岩井啓一郎様，伊藤正則様，笠原直人様，高塚悠矢様，大竹可那様には捏和実験を行って頂きました．寒い冬での実験でもあり，慣れない PRM での実験は体力的にもご負担お掛け致しましたことと存じます．有難うございました．

プログレステクノロジー社の田上賢悟様には PRM の製作を担当して頂きました。日本カーリット赤城工場での実験にも何度も参加して頂き、PRM 組み立て指導を行って頂きました。体力的にもご苦労お掛け致しましたが、実推進薬捏和実験に向けた試行錯誤の中で田上様の落ち着いた作業姿が大変心強く感じました。

関西大学 化学生命工学部 山縣雅紀准教授、山本博文研究員には、関西大学千里山キャンパスで所有されている X 線 CT 装置 nano3DX を用いた実験指導を頂きました。

JAXA 航空技術部門 構造・複合材技術研究ユニット 杉本直様には、X 線 CT 装置 TOSCANER 32300 $\mu$ FPD (JAXA 調布航空宇宙センター 飛行場分室に設置) を用いた実験指導を頂きました。

明治ゴム化成 寺嶋隆史様、篠原裕和様には PRM の内側ゴムチューブ材料検討にご協力頂きました。ゴム材料サンプルのご提供および物性・薬品耐性評価試験を行って頂きました。

本研究を通じて分野横断の学際研究と産学連携を行うことができ、多くの方々にご協力を賜りました。本研究をまとめることができましたのは、皆様のご協力の賜物です。皆様とスピード感のある PRM の開発を進め、並行して何度も推進薬捏和に関してご意見を頂いたからこそ、PRM を見出してからたった 4 年で行政の認可を受け、理化学研究の範疇を超える薬量の推進薬捏和実験を行うに至りました。私の至らぬ点も多く、幾度となくお手数お掛け致しましたことと存じますが、心より深く感謝申し上げます。

宇宙科学研究所の職員・学生の方々、横浜国立大学・長岡技術科学大学・福岡大学の高エネルギー物質研究会の皆様には 5 年間の研究生生活を支えて頂きました。

堀羽生研究室の松本幸太郎研究員には、細かな実験技術指導や丁寧な解析指導を頂きました。プライベートから私を支えて頂き、時に厳しく、また丁寧に研究のご意見を頂きました。Rachid Amrousse 元研究員、三輪良則元研究員、和田明哲研究員には推進薬とその燃焼計測に関する広い知見を頂きました。秘書の久保田光恵様、杉山由香様、元秘書の三吉利沙様には研究に関する沢山の手続きを行って頂き、時には楽しくお茶の時間を過ごさせて頂きました。

堀羽生研究室学生の伊東山登君、OB の勝身俊之先生、和田豊先生、堤明正様、藤里公司様、二星陽帥様、Chang Pojul 様、Akshay Garg 様、富吉正太郎様、石鍋弘太様、嶋田研 OB の小澤晃平先生、徳留研 OB の井出雄一郎様のおかげで活発な研究生生活を送ることができました。戸端佑太君、大里智樹君 (以上後藤研)、武藤智太朗君 (稲谷研)、木村永翔君 (嶋田研)、坂岡恵美さん (森田研) とはロケット推進系の文献の輪読会を行い、研究対象への理解を深めることができました。

最後となりましたが、宇宙科学研究所で学びたいと突然飛び出した私を長く支えてくださった大阪の母と家族、そして幼少期から宇宙開発の夢を教えてくださった亡き父に感謝申し上げます。