

2021年度第14回宇宙科学奨励賞・受賞講演
令和4年3月8日、KKRホテル東京

革新的デトネーション制御手法の提案と デトネーションロケットエンジンのシステム実証

名古屋大学 航空宇宙工学専攻
松岡 健

背景写真：宇宙空間で作動する回転デトネーションエンジンと地球（JAXA/ISAS観測ロケットS-520-31号機）

デトネーション波（爆轟波）は最も激しい燃焼モード

自動車用スパークプラグ

デトネーション波
(衝撃波 + 燃焼)

爆発性予混合気



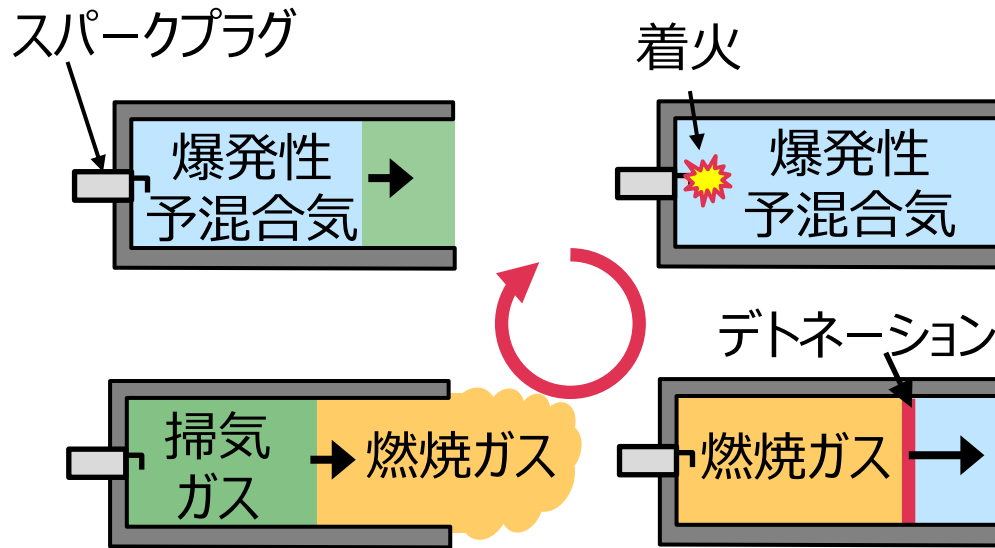
デトネーション波の開始点

- 伝播速度が**極超音速**（約2000m/s）
- 既存燃焼サイクルで**最高の理論熱効率**
- **高圧の燃焼ガス**を瞬時に生成



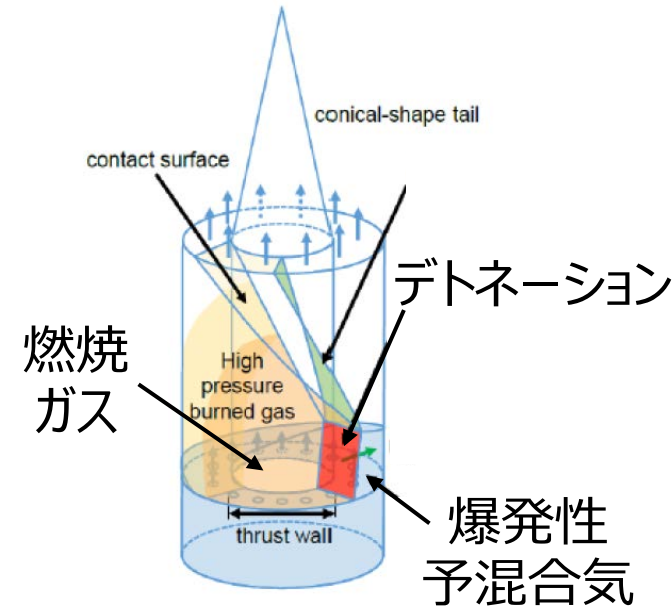
**簡素・小型・高性能な
推進エンジンの実現**

デトネーション波の宇宙推進器への応用



間欠的にデトネーション波を発生させる
パルスデトネーションエンジン(PDE)

⇒ 人口衛星の高精度な姿勢制御



連続的にデトネーション波を伝播させる
回転デトネーションエンジン(RDE)*

⇒ ロケットのメインエンジン

* K. Ishihara et al., 53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting (2015)

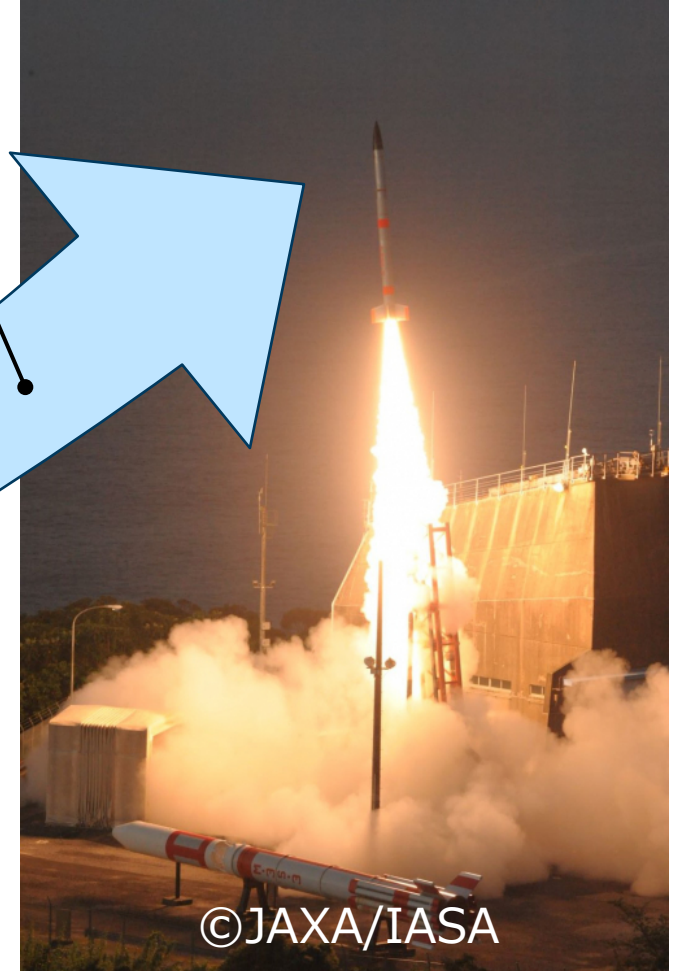
本発表の流れ

④ デトネーションエンジン宇宙実証 (2021年7月)

③ RDE内部流動の理解 (搭載用RDE設計則の構築)

② PDEの高周波数作動 (搭載用PDEの作動法確立)

① PDEの垂直飛行試験 (観測ロケットのきっかけ)



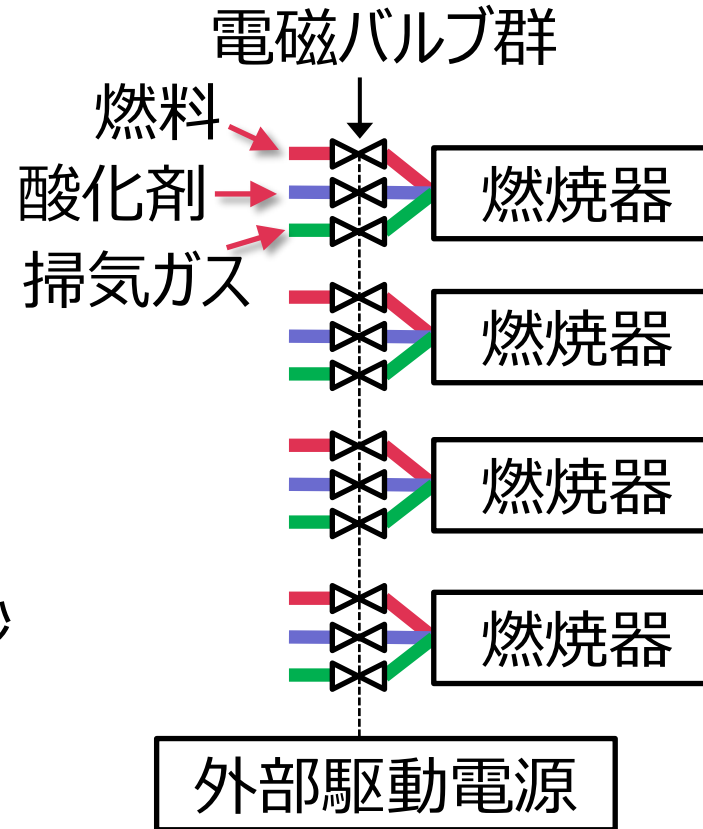
デトネーションエンジンで高い推力重量比の獲得

従来手法

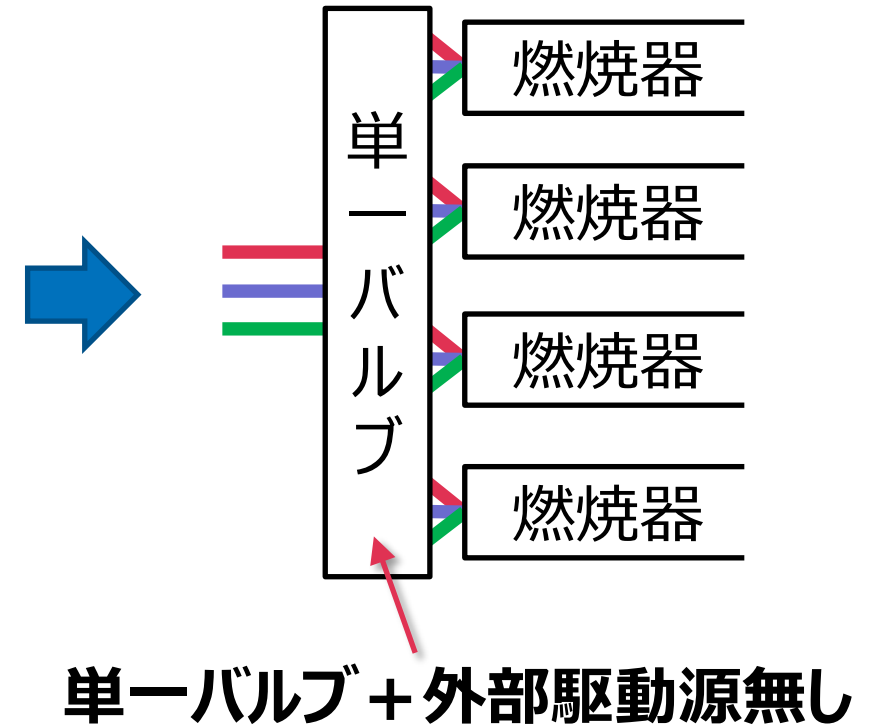


PDEの滑走試験 (2006年)*

- 作動周波数 : 7 回/秒
- 平均推力 : 35 N
- **推力重量比 : 0.15**

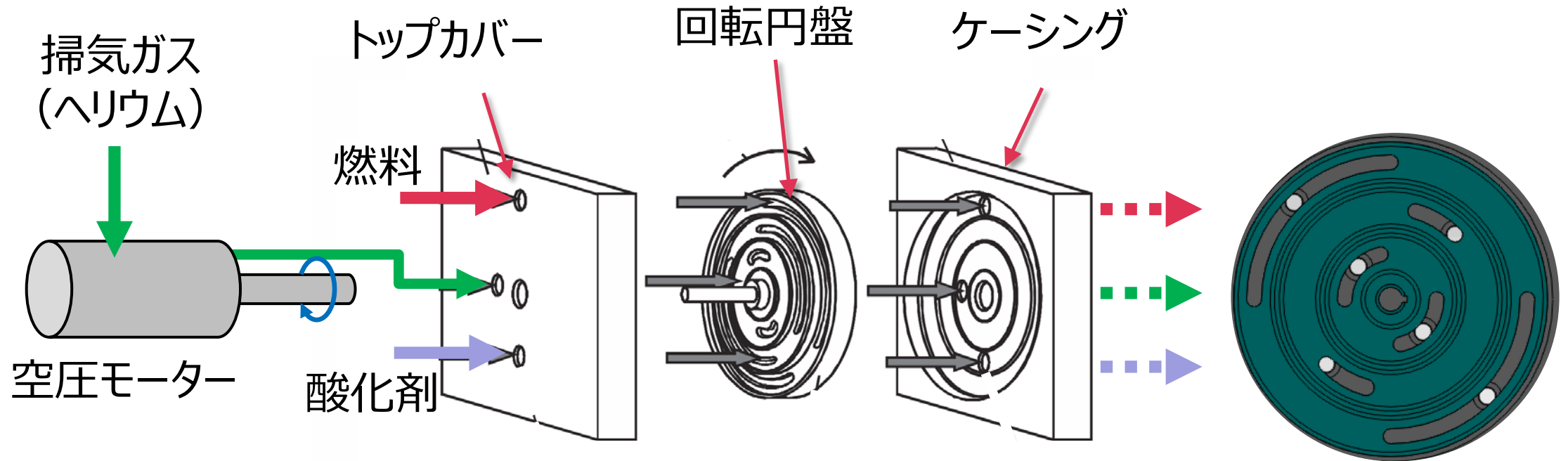


提案手法



* J. Kasahara et al., Journal of Propulsion and Power (2009)

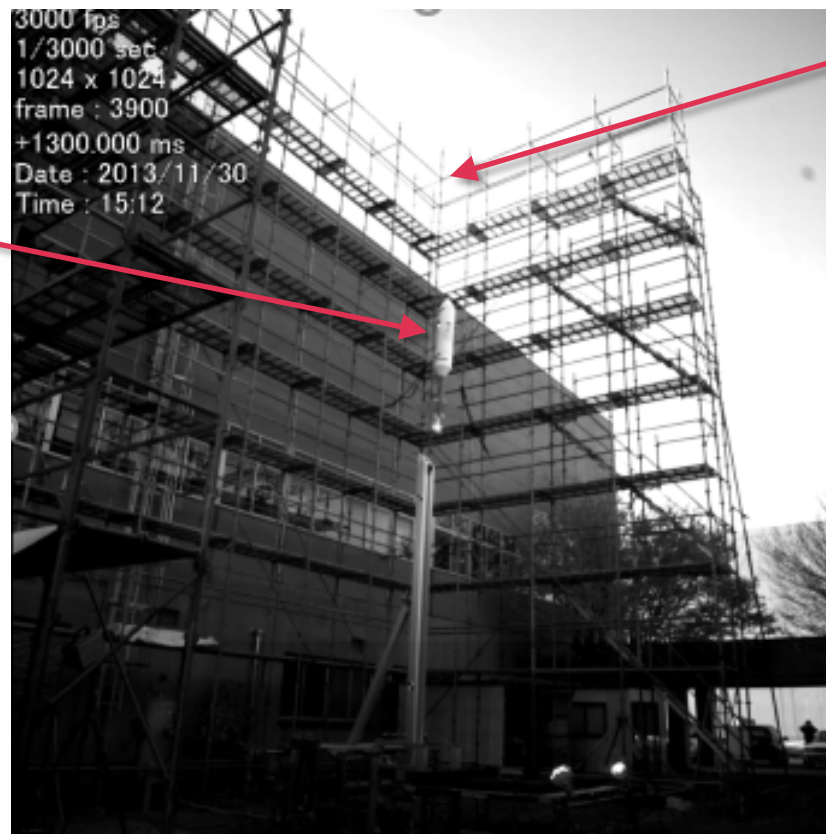
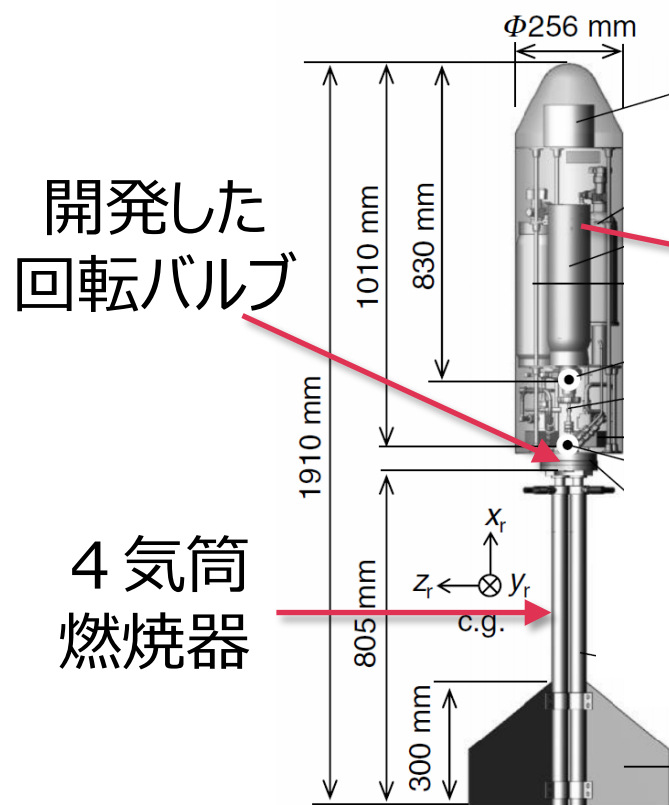
ガス供給のみで自立作動する回転バルブシステム



多気筒パルスデトネーションエンジン用として開発された回転バルブ*
(掃気用ヘリウムは空圧モーター駆動用にも使用)

* K. Matsuoka et al., Combustion and Flame (2012)

垂直飛行試験で推力重量比2.5を達成



空中で回収

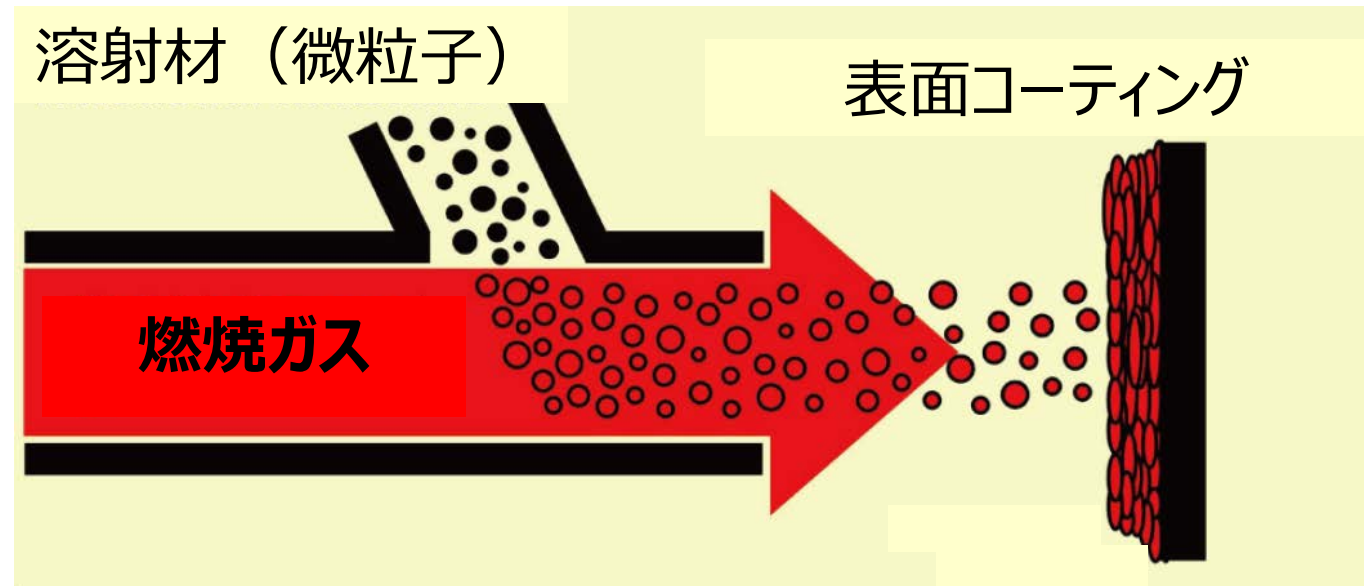
- 作動周波数 : 107 回/秒
- 平均推力 : 239 N
- **推力重量比 : 2.5-2.7**

PDEの垂直飛行試験 (2013年)*

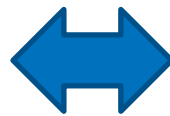
* K. Matsuoka et al., Journal of Propulsion and Power (2016)

JSPS研究員として広島大学へ

2012年当時、パルスデトネーション技術の**溶射装置**としての実用化を検討していた*



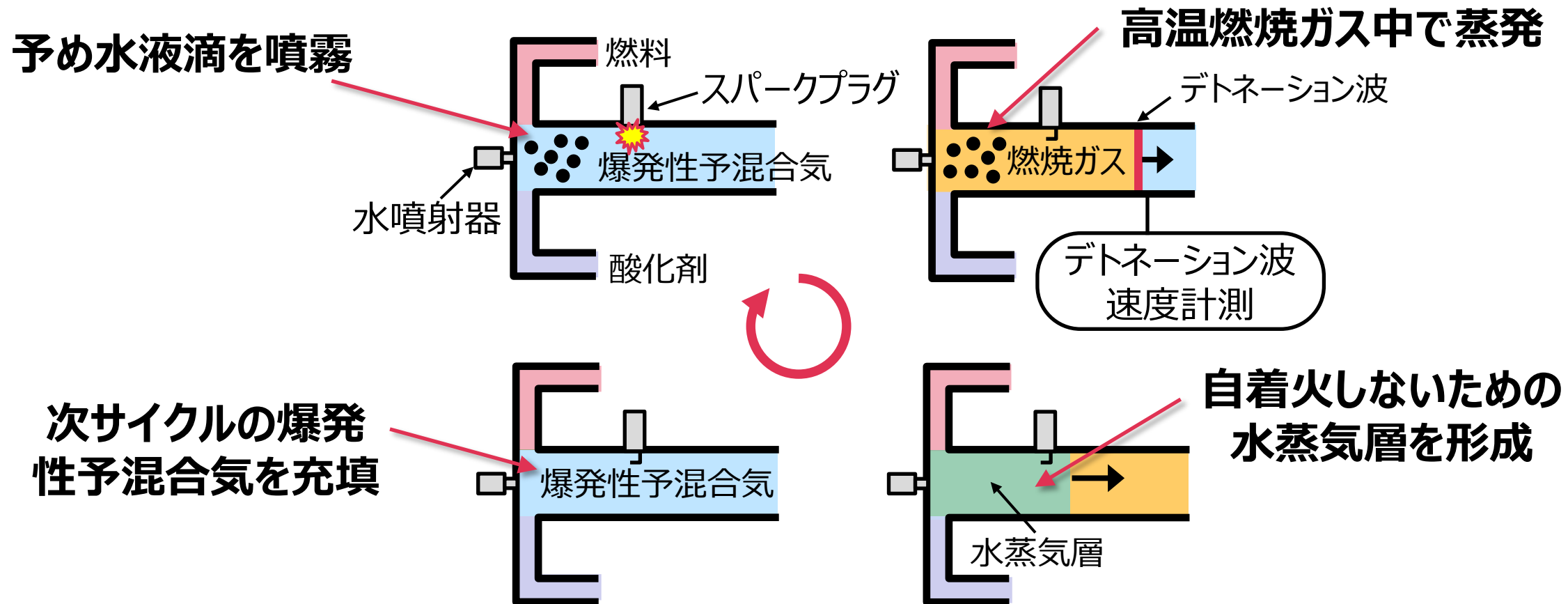
高融点材料を大量に溶射したい



大量の掃気ガス（混合気の希釈）による
⇒ 燃焼ガス温度の低下
⇒ 作動周波数の限界

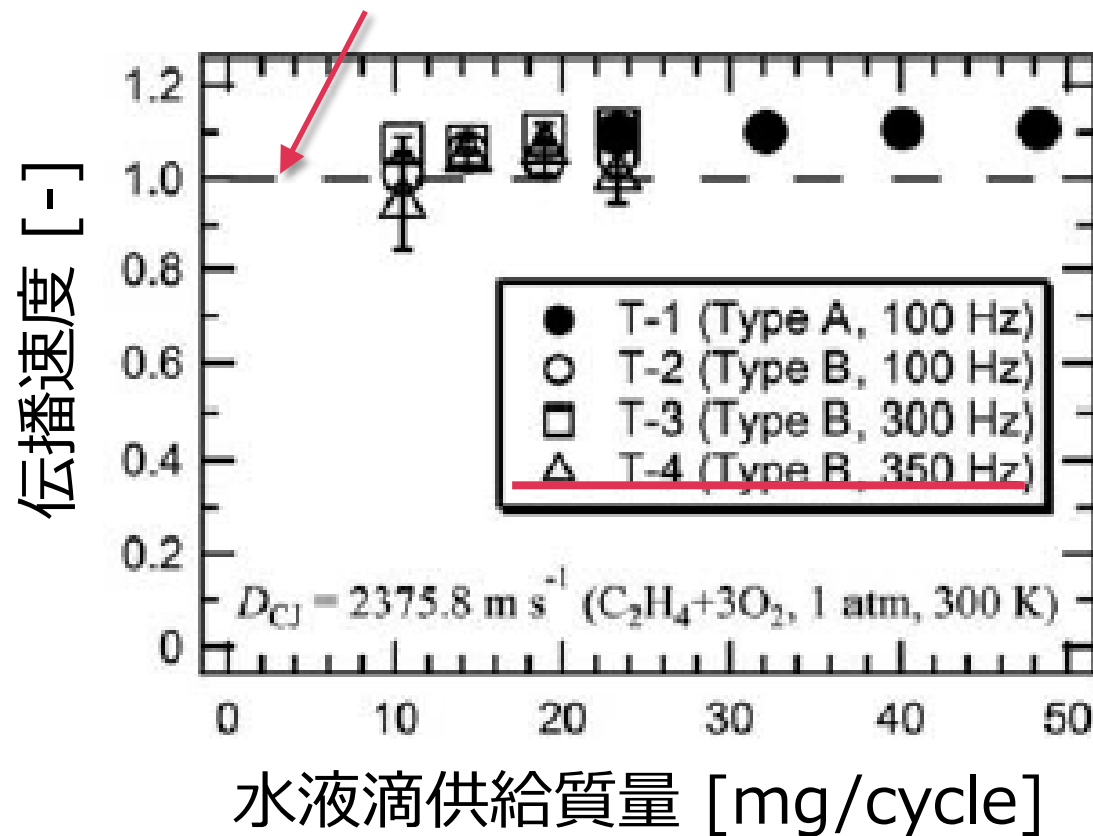
*遠藤琢磨, パルスデトネーション溶射, 日本燃焼学会誌 (2020)

液滴パージ法の開発に着手

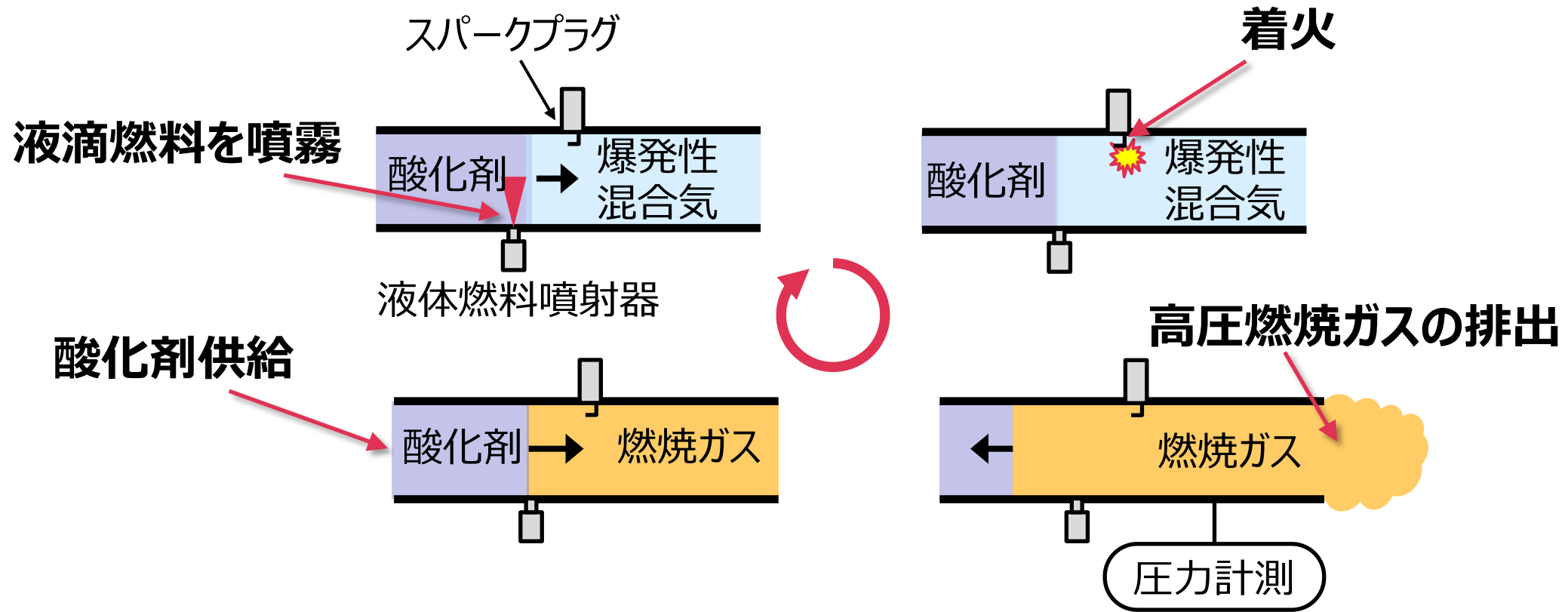


350回/秒のパルスデトネーション作動を達成

掃気ガスによる希釈がない理想的なデトネーション伝播速度
(高融点材料の溶射が可能に)



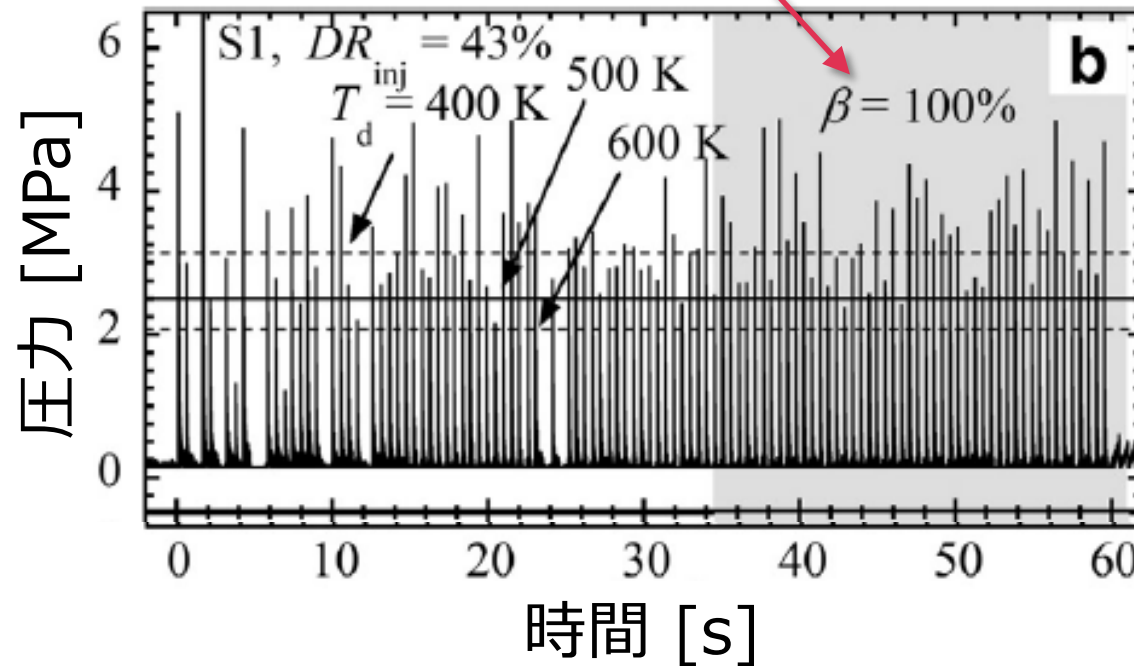
名大着任、最も単純なパルスデトネーション作動法の探求



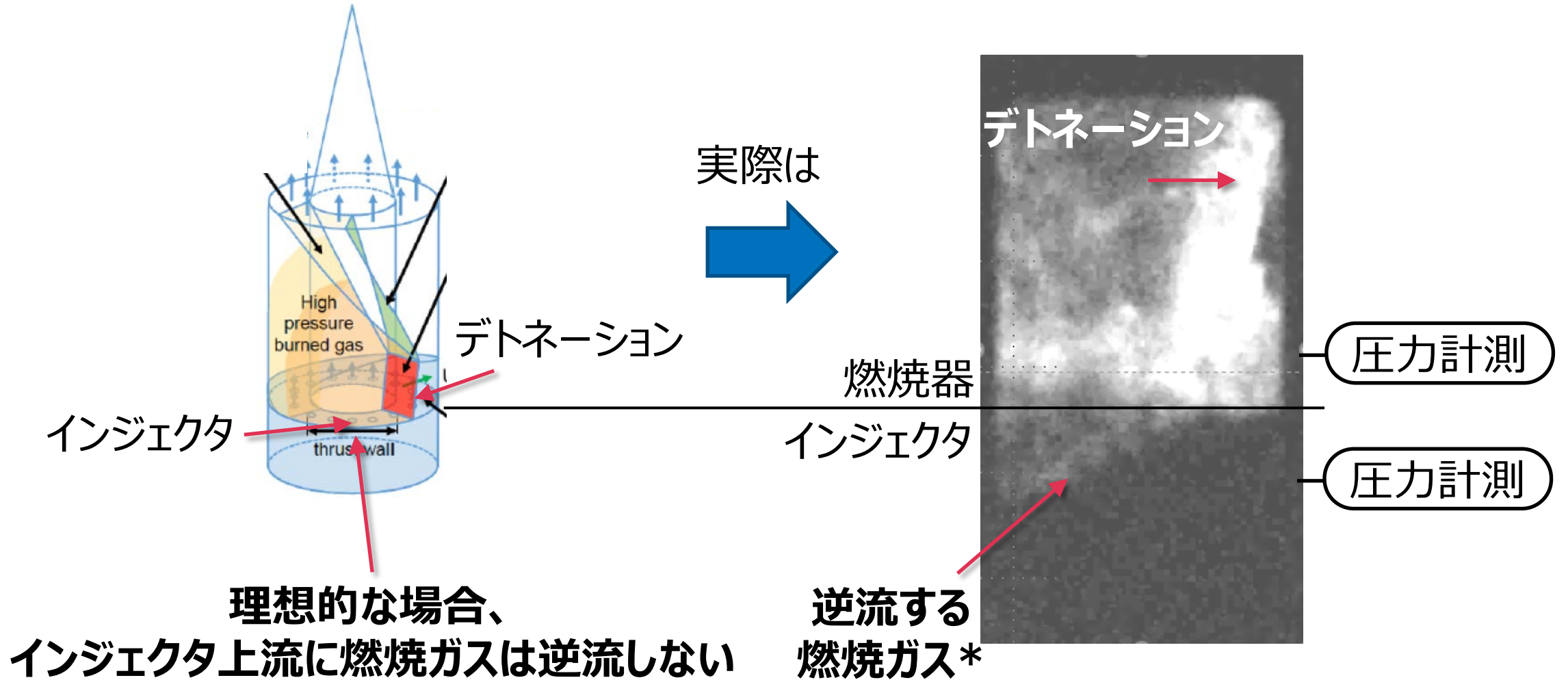
セミバルブレス法（流れの1次元化、液体燃料、掃気用物質の排除）を提案

本手法を観測ロケット実験PDEに採用

1916Hzでのパルスデトネーション作動を達成
(推力密度が1桁向上)

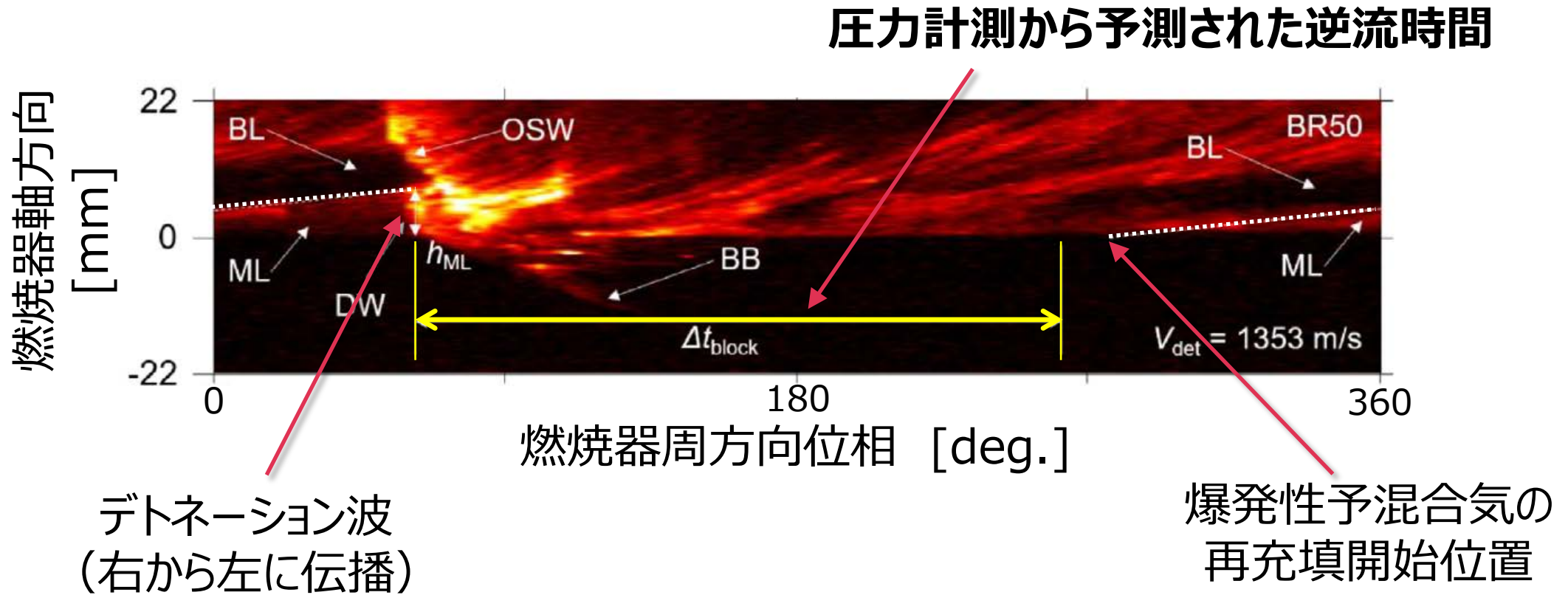


回転デトネーションエンジンにおける燃焼ガス逆流現象



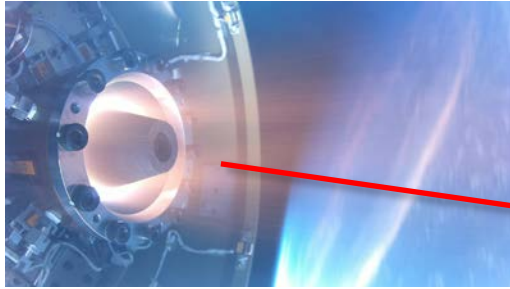
* K. Matsuoka et al., Combustion and Flame (2021)

観測ロケット用RDEのインジェクタ設計に反映

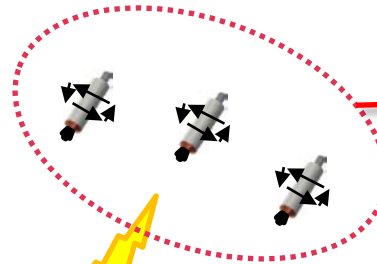


燃焼ガスの逆流度合いを定量的に評価することに成功

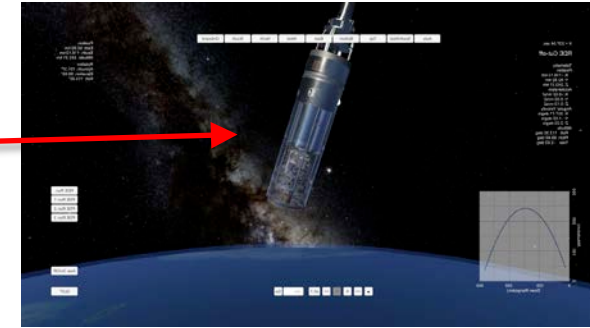
デトネーションエンジンを宇宙で作動させる



RDE作動 (6s)

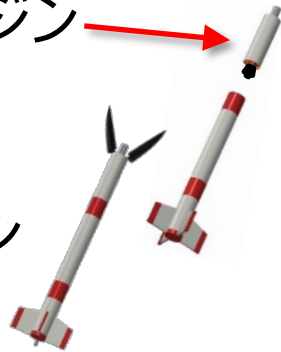


PDE作動で機体回転速度を減少



デトネーションエンジン
システム分離

ノーズコーン
展開



データ回収システム分離

高度100 km以上でのフライト時間 約30秒

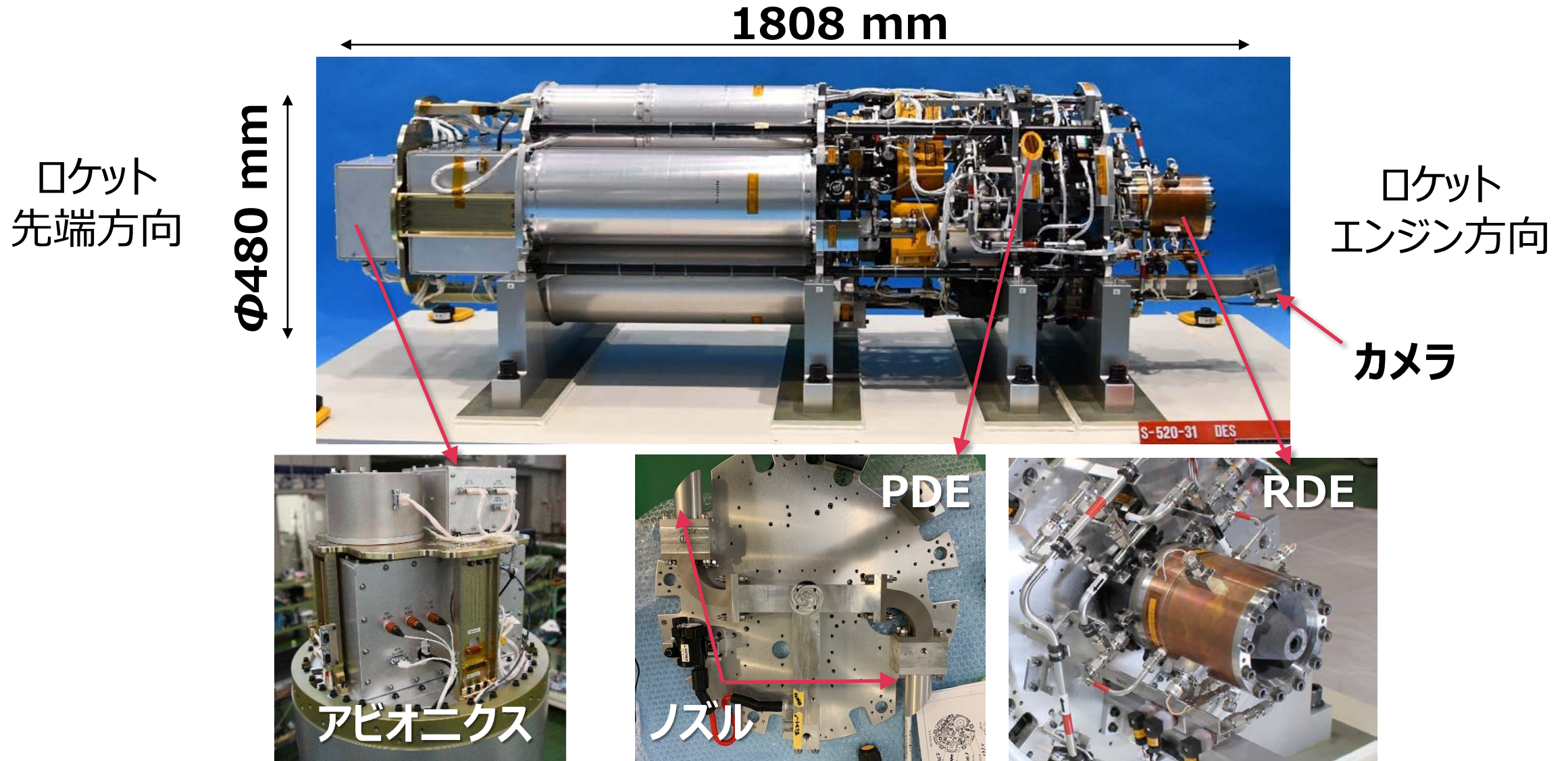
データ受信



着水・データ回収



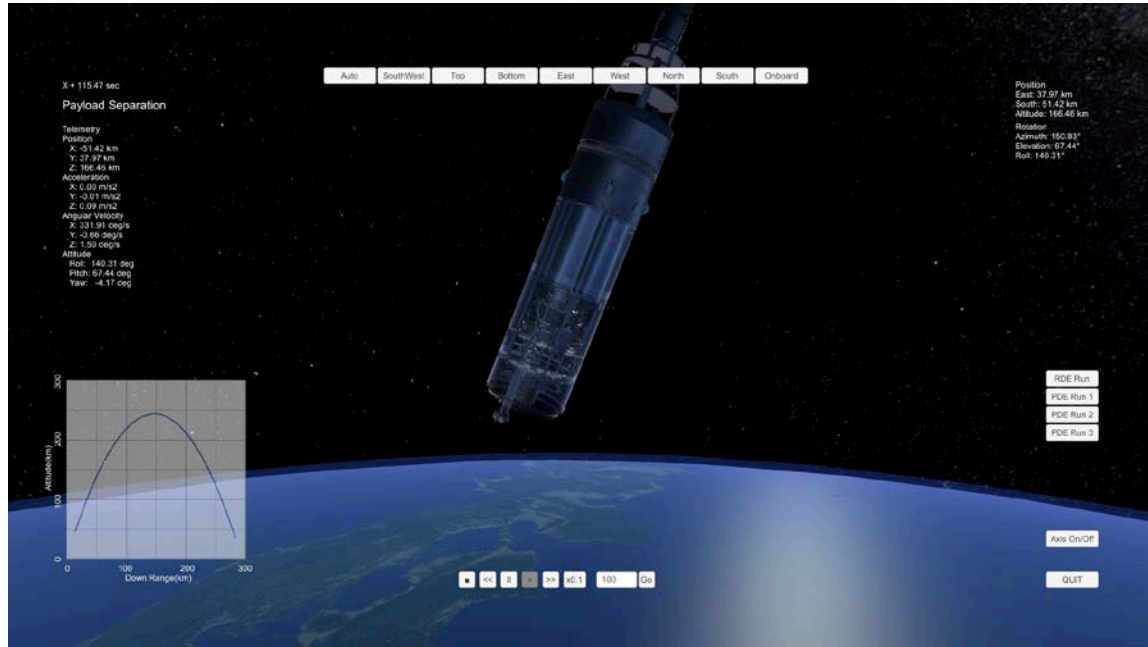
デトネーションエンジンシステム (DES)



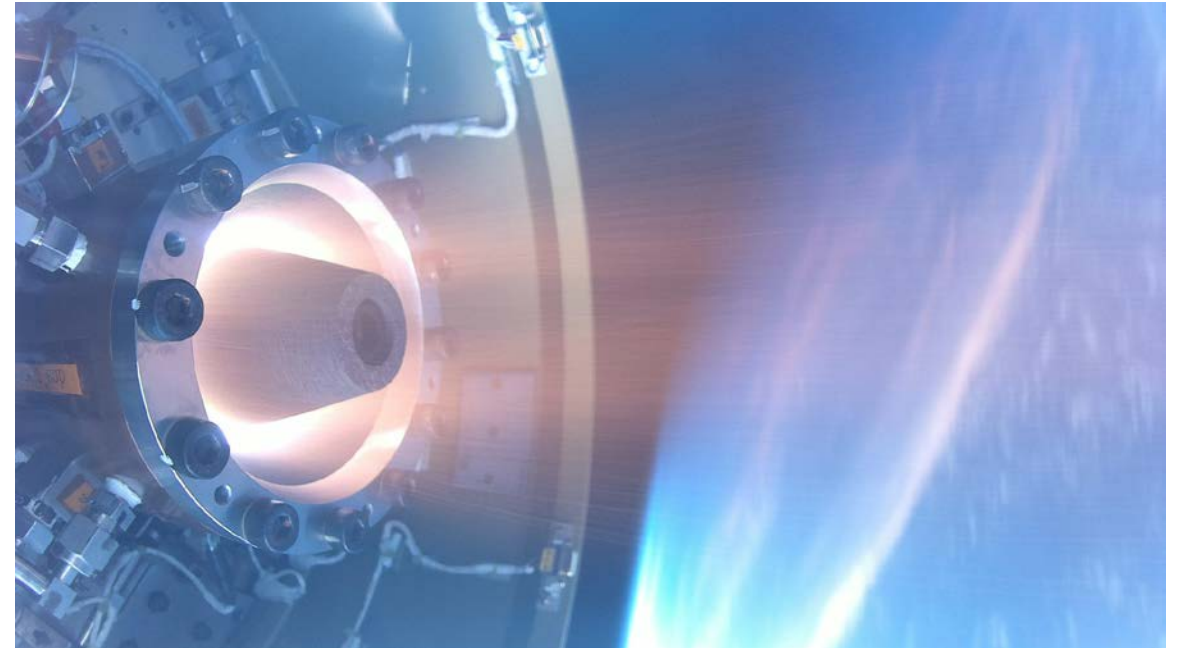
S-520-31号機、2021年7月27日5:30打ち上げ



6秒間のRDE作動に成功



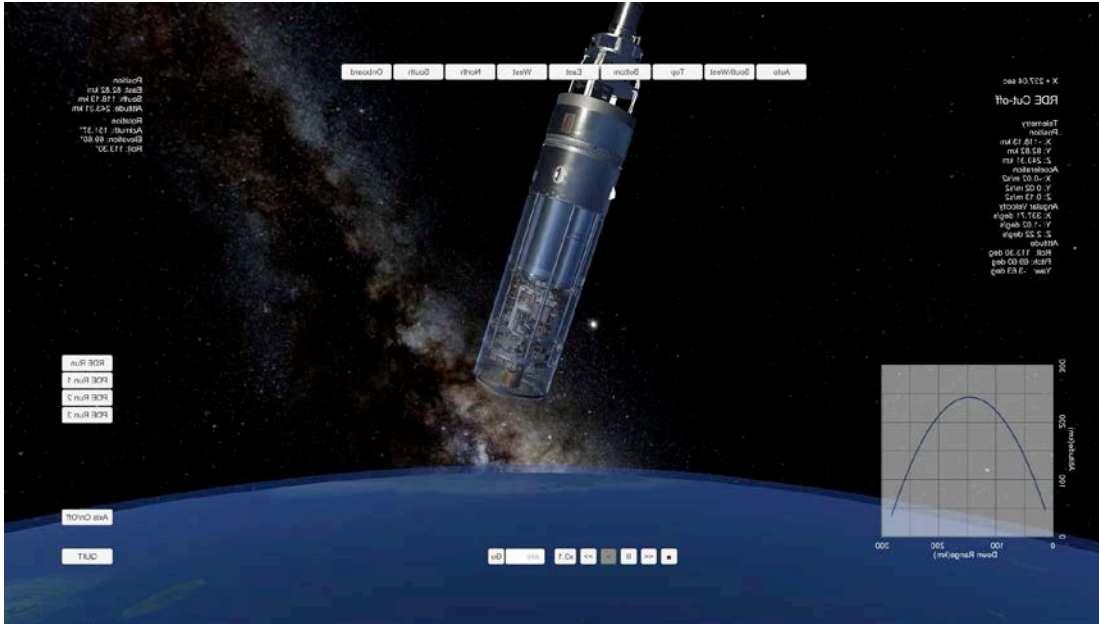
姿勢計測データによるCG



海上回収されたデジタルカメラ画像
(RDE作動と背景の地球)

目標推力500N以上を達成、RDE作動に伴う微小トルクの計測にも成功

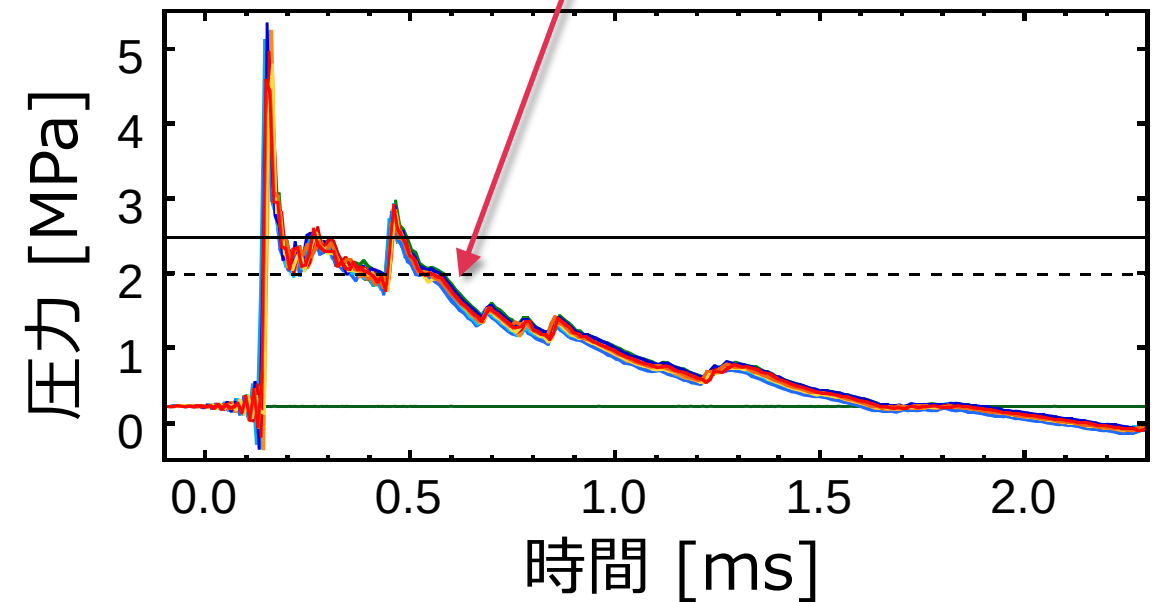
14回のPDE作動に成功



姿勢データによるCG

(PDE作動による回転速度低下が確認できる)

全てのパルスデトネーション作動時の
圧力履歴の重ね合わせ



PDE作動による機体の回転速度変化、推力の高い再現性を実証*

* V. Buyakofu et al., Journal of Spacecraft and Rockets (2022)

まとめ

2007年から約15年間、デトネーション制御手法の提案と実証を行ってきた。

- 回転バルブを提案し、垂直飛行試験にて**デトネーションエンジンが既存ロケットエンジンと同レベルの推力重量比を獲得**できることを示した。
- 液滴パージ法、セミバルブレス法によって**作動周波数を飛躍的に向上**させた。
- 回転デトネーションエンジンにおける**燃焼ガス逆流過程をモデル化**した。
- 基礎研究で築いたデトネーション制御技術を**観測ロケットS-520-31号機にて実証**した。

今後も、基礎研究、システム実証研究の両面から、
デトネーションエンジンの潜在的推進性能を示し、実ミッションにつなげていく。

謝辞

- 宇宙科学振興会、本賞選考委員およびご来賓の皆様
- 修士・博士過程から現在に至るまで研究・教育への姿勢をお教えいただいた名古屋大学・笠原次郎先生
- 自由な研究環境を与えていただき、デトネーション研究の基礎をご指導いただいた広島大学・遠藤琢磨先生
- 研究の進め方でいつもご指導いただいている慶応義塾大学・松尾亜紀子先生、ISAS・船木一幸先生
- システム実証プロジェクトの進め方を熱くご指導いただいた名古屋大学・松山行一先生、構想からフライト試験までの約5年、苦楽を共にした名古屋大学・観測ロケットグループの川崎央先生、渡部広吾輝先生、伊東山登先生、後藤啓介先生、石原一輝君、ブヤコフバレンティン君、サポートいただいた学生の皆さん
- DESを製作いただいた（株）NETS、明治電機工業（株）をはじめ多くの関係企業の皆様
- フライト試験に至るまでの数多くの実験をサポートいただいた室蘭工業大学・棚次亘弘先生、東野和幸先生、内海政春先生、中田大将先生、高野智之様、学生の皆さん
- フライト試験を支えていただいたJAXA/ISAS観測ロケット関係者の皆様、内之浦でお世話になった皆様
- これまで基礎研究とともに実施した筑波大学、広島大学、名古屋大学の学生の皆さん、事務補佐員の皆様
- これまで支えてくれた両親、兄弟、妻、娘

お力添えいただいた全ての皆様に、この場をお借りして厚く御礼申し上げます。