



ISSN 1349-1121
JAXA-RM-10-019

宇宙航空研究開発機構研究開発資料

JAXA Research and Development Memorandum

小型固体モータを用いたロールトルク計測技術の開発

北川 幸樹, 嶋田 徹, 安田 誠一, 吉田 裕二, 富澤 利夫
鈴木 直洋, 加藤 洋一, 尾澤 剛, 二宮 一芳, 矢島 卓

2011 年 3 月

宇宙航空研究開発機構
Japan Aerospace Exploration Agency

小型固体モータを用いたロールトルク計測技術の開発

北川 幸樹^{*1}, 嶋田 徹^{*1}, 安田 誠一^{*2}, 吉田 裕二^{*3}, 富澤 利夫^{*4}
鈴木 直洋^{*4}, 加藤 洋一^{*5}, 尾澤 剛^{*6}, 二宮 一芳^{*6}, 矢島 卓^{*6}

Development of Measurement Method of Roll Torque with Small Solid Rocket Motor

Koki KITAGAWA^{*1}, Toru SHIMADA^{*1}, Seiichi YASUDA^{*2}, Yuji YOSHIDA^{*3}
Toshio TOMIZAWA^{*4}, Naohiro SUZUKI^{*4}, Yoichi KATO^{*5}, Takeshi OZAWA^{*6}
Kazuyoshi NINOMIYA^{*6} and Takashi YAJIMA^{*6}

ABSTRACT

In previous study, results of measurements of roll torque at horizontal motor position in combustion ground tests showed that roll torque occurred during the combustion and it was caused by swirling flow of combustion gas generated in the solid rocket motor. However, because the shift of the propellant mass was large and the effect of weight of the motor was large, accuracy of measurement was not enough high to evaluate the roll torque minutely. In this study, the measurements of roll torque with a small solid rocket motor at vertical motor position by using an air bearing are conducted. Methods of measurements are measuring compressive loads or measuring tensile load. At the measuring compressive loads method, roll torque was confirmed, however, quantitative data of the roll torque was not obtained. On the other hand, at the measuring tensile load, the quantitative data of roll torque was obtained. The obtained data of the roll torque was compared with the characteristics of roll torque of other past solid rocket motors and it was confirmed that obtained data is proper value. This results shows that the new measurement system for roll torque is useful to measure roll torque of a solid rocket motor.

Keywords: Roll Torque, Solid Rocket Motor, Ground Test, Measurement

概 要

これまでに実施された地上燃焼試験でのロールトルクの計測は、モータを横置きにした状態で実施され、燃焼中にロールトルクが発生し、燃焼室内で発生している燃焼ガスの旋回に起因していることを示唆する結果が得られたが、推進薬自重の変化が大きいことやロールトルクに対してモータ自重の影響が大きいことなどが原因で、詳細な評価が可能な計測レベルには達していない。そこで、本研究では、小型固体モータを用い、モータ自体を縦置きにした状態でエアベアリングを用い、押付方式および引張方式によるロー

^{*1} 宇宙科学研究所 宇宙輸送工学研究系 (Department of Space Transportation Engineering, ISAS)

^{*2} 宇宙科学研究所 宇宙科学技術・専門技術 (Space Science and Disciplinary Engineering, ISAS)

^{*3} 宇宙科学研究所 観測ロケット実験室 (Research and Operation Office for Sounding Rocket, ISAS)

^{*4} 宇宙科学研究所 基盤技術グループ (Test and Operation Technology Group, ISAS)

^{*5} 宇宙科学研究所 推進系グループ (Propulsion Group, ISAS)

^{*6} (株) IHI エアロスペースエンジニアリング 開発部 (Development Department, ISE Co., Ltd.)

ロールトルク計測実験を実施した。押付方式では、ロールトルクの発生は確認できたものの、その定量データは取得できなかった。一方、引張方式では精度は高くないがロールトルクの定量データが取得できた。得られたデータを過去の固体ロケットのロールトルクの特性と比較し、その値が妥当であることを確認し、エアベアリングを用いた引張方式によるロールトルク計測装置が、ロールトルクの計測に有効であることを確認した。

1. はじめに

固体ロケットの燃焼によって機軸周りのロールトルクが発生することは、近代的なロケット開発の初期段階より認識され報告されている¹⁾。国内では、図1に示すようにM-Vロケットの全7回の打ち上げにおいて、第1段ロケットモータ(M-14)の燃焼時に比較的大きなロールトルクの発生が認められた²⁾。また、小型モータを用いた地上燃焼試験においてもロールトルクと燃焼ガスの旋回流が確認されている。この種のロールトルクは空力や推力不整で考えられるより一桁大きなトルクであり、その発生メカニズムの特定は容易ではない。そのため、設計者の立場から現実的な分類が提案されている³⁾が、個々のモータの原因を特定する技術が確立されているわけではない。

最近の数値解析による結果では、グレインに軸スロットがあつてノズルのサブマージが顕著な場合には、モータ内の燃焼ガス流がサブマージノズルのインレット部に作る流れが旋回流を形成し、それとグレインのスロットから流れ出る燃焼ガスが干渉して、スロット内部側壁に圧力差が生じ、それが大きなロールトルクの原因となっていることが示唆されている^{2),4)-7)}。また、音響流効果によってポート内に縦渦が発生し、ロールトルクが発生することが知られている^{1),8),9)}。

現在開発中のイプシロンロケットの1段目にはSRB-Aモータの流用が計画されているが、この11フィンを後方に持つグレインの場合のロールトルクの発生量を予測することが重要であり、また将来の別のロケットにおいても同様である。しかし現状ではロールトルク発生に関する知見が不足しており、これを今後深めていく必要がある。

これまでに、地上燃焼試験でのロールトルクの計測は、2006年12月の能代多目的実験場でのTM-500Mモータ（外径 $\phi 500\text{mm}$ ）と2008年3月の能代多目的実験場でのM24-2モータ（外径 $\phi 2.5\text{m}$ ）の二回実施されている^{2),10)}。これらは、モータを横置きにした状態で、モータ支持方式はそれぞれ二点支持方式と四点支持方式が採用されている。いずれの試験でも燃焼中にロールトルクが発生し、燃焼室内で発生している燃焼ガスの旋回に起因していることを示唆する結果が得られた。しかし、推進薬自重の変化が大きいことやロールトルクに対してモータ自重の影響が大きいことなどが原因で、詳細な評価が可能な計測レベルには達していない。大型モータの燃焼試験においてロールトルクを計測することは、現状の計測器精度を考えると非常に困難であるため、小型モータを用いた実験計測技術を確立し、それによって数値解析の検証を行うことで、大型実用モータのロールトルクの予測技術を今後深めていく必要がある。

そこで、本研究では、小型固体モータ（ $\phi 80\text{mm}$ ）を縦置き状態で燃焼させ、エアベアリングを介して推力計測を行うことによって、モータのロール回転を自由にしたいうえで、板ばねの歪測定により偶力を計測して中心軸周りのモーメントを算出する方式を考え、より精度の高いロールトルクの計測が可能な計測技術の確立を目的とした。

2. 実験装置

本実験での小型固体モータは能代多目的実験場・真空燃焼試験棟内のモータ支持用汎用門型フレームの柱の部分に、ノズルを下向き状態で取付ける。その外観を図2に示す。

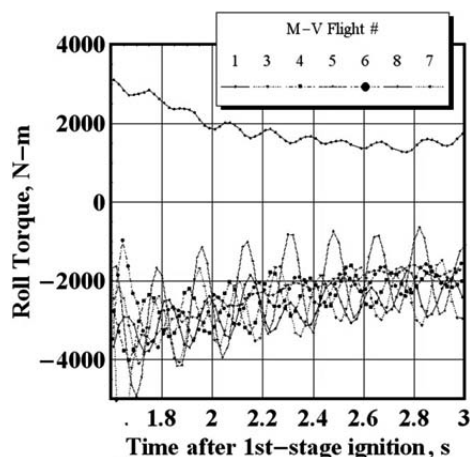


図1 M-Vロケット打ち上げ直後に発生したロールトルク²⁾

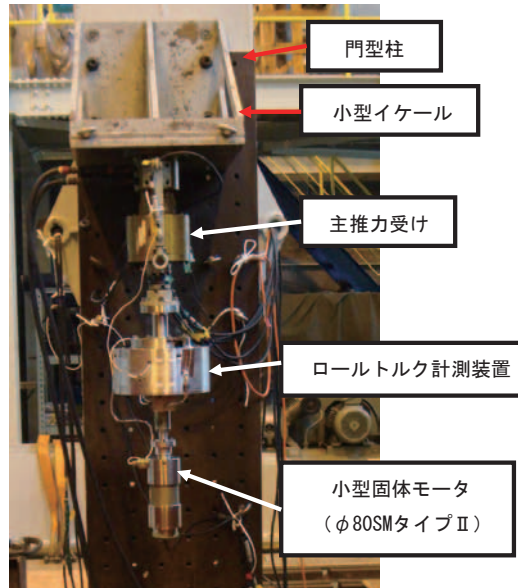


図2 験装置全体外観

2.1 小型固体モータ

小型モータは推進薬直径 $\phi 80\text{mm}$ のサンプリングモータ（通称 $\phi 80\text{SM}$ タイプⅡ）であり，推進薬製造時の性能保証（燃焼速度検定）に使用することを目的に設計されたものを使用した．小型固体モータ概略図を図3に，主要諸元を表1に示す．

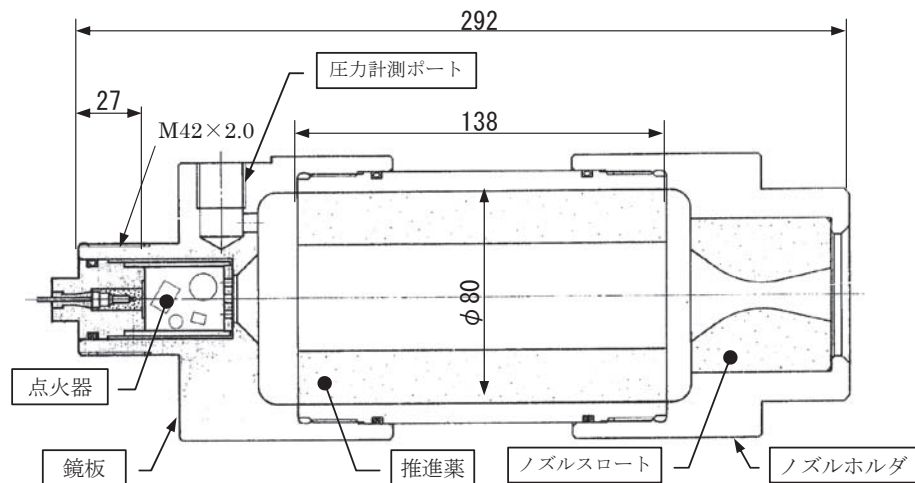


図3 小型固体モータ概略図

表1 小型固体モータ主要諸元

項 目	単 位	諸元値
寸法諸元	代表径（グレイン外径）	mm $\phi 80$
	グレイン全長	mm 138
	ノズルスロート径	mm $\phi 11.5$
	ノズル出口径	mm $\phi 23.0$
燃焼特性	燃焼時間	s 2.7
	最大燃焼圧力	MPa 5.5
	最大推力	N 850
質量特性	モータケース	kg 8.7
	推進薬	kg 0.92
	合計（アダプタ類は除く）	kg 9.6

推進薬グレインは、後記モータケースに直填成形されたものであり、丸穴内端面燃焼型である。推進薬は SRB-A に採用されているものと同じ BP-207J である。その基本特性を表 2 に示す。

ノズル部は、ステンレススチール製のノズルホルダと、グラファイト製のスロートインサートで構成される。グラファイト製スロートインサートはスロート径 ϕ 11.5mm、出口径 ϕ 23.0mm、半頂角 12.5° のコニカル形状である。

点火器は、A 型点火玉と NAB 火薬によるものであり、カートリッジ型である。

表 2 BP-207J 推進薬の基本特性

項目	数値	備考
組成 HTPB AP AL Fe ₂ O ₃	14[wt%] 68[wt%] 18[wt%] 約 0.1[%] (外割)	
断熱火炎温度	3368[K]	平衡凍結理論値 (@5[MPa])
平均分子量	27.86[g/mol]	平衡凍結理論値 (@5[MPa])
平均比熱費	1.175	平衡凍結理論値 (@5[MPa])
燃速 (@8.9[MPa])	8.7[mm/s]	規格中央値
n 指数	0.3	
密度 (@20[°C])	1.77[g/cm ³]	

2.2 ロールトルク計測装置

ロールトルク計測装置の外観を図 4 に示す。本装置は、エアスピンドルを搭載することにより、モータの主推力を受けた状態でモータ機軸回りの回転を拘束しない構造となっている。表 3 にエアスピンドルの仕様を示す。発生したロールトルクは装置内に搭載されている 4 コのロードセルにより偶力として計測される。計測される偶力は装置内のみで反力を受けるようになっているので、装置を取付ける設備側の剛性等に影響されない。本研究では、モータ回転軸周囲に取り付けたピン（ステンレス棒 ϕ 7mm）を計測用ロードセルに押し当て、その押付荷重値を取得することで

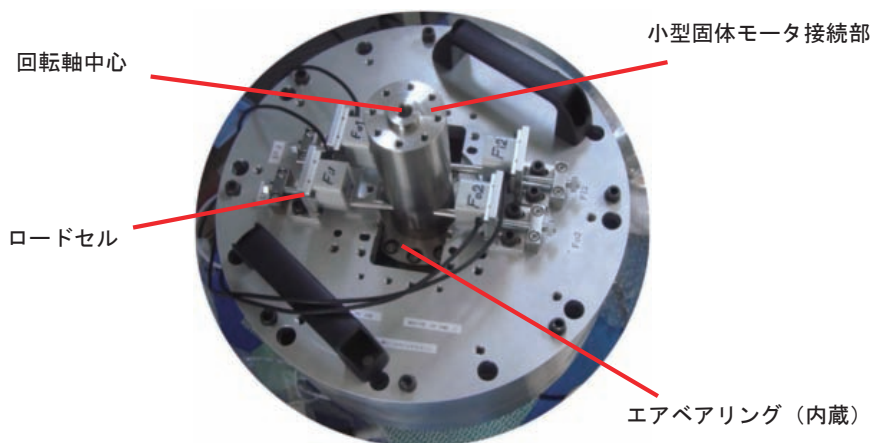


図 4 ロールトルク計測装置外観

表 3 エアベアリング仕様

重量	8.5kg
供給ガス	気体窒素
供給圧力	0.8 ～ 1.0MPa
供給ガス量	55L/min 以下
許容軸力	±1780N 未満
許容ラジアル荷重	±440N 未満
許容モーメント	±45Nm 未満

ロールトルクを計測する形態（押付方式）と、モータ回転軸周囲に取り付けたワイヤ（φ1mm 程度）で計測用ロードセルを引っ張り、その引張荷重値を取得することでロールトルクを計測する形態（引張方式）の二通りの方法でロールトルクの計測を実施した。燃焼実験はそれぞれ2回ずつ実施した。以下にそれぞれの計測装置の詳細を述べる。なお、本研究では、荷重およびロールトルクに関して反時計回りの方向を正とする。データは、200Hz で取得した。

2.2.1 押付方式ロールトルク計測装置

図5に押付方式ロールトルク計測装置外観、図6に荷重計測部詳細を示す。ピンはモータ回転軸中心から18mm離れた位置に接線方向に4本取り付けられている。中心線からロードセルまでの距離は、向かい合うピン同士で異なり、対角同士のピンで等しく、それぞれの距離は54mmと42mmである。初期設定として、それぞれのピンはロードセルに対して約5Nの力で押し付けている。モータ燃焼時に発生したロールトルクは、これらのピンを介して押付荷重の増減としてロードセルで計測される。ただし、押付方式の場合、ピンとロードセル間で摩擦が発生するため、見かけ上ロールトルクが減少した状態で荷重が計測される。そのため、計測値を補正する必要がある。摩擦を考慮した実際のロールトルクは、計測値を用いて以下の式で換算できる。

$$T = T' + T_{\text{loss}} = (\Delta F_1 + \Delta F_2 + \Delta F_3 + \Delta F_4) \times L + T_{\text{loss}} \quad (1)$$

ここで、 T_{loss} は摩擦による抗トルクであり、以下の式で表わされる。

$$T_{\text{loss}} = \mu_1 F_1 H_1 + \mu_2 F_2 H_2 + \mu_3 F_3 H_1 + \mu_4 F_4 H_2 \quad (2)$$

ここで、 $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4$ はそれぞれのロードセル計測部とピンとの間の静摩擦係数である。

T', T_{loss} の値を得るために、ロールトルク計測装置に強制的にトルクを与え、出力されるトルクを計測する予備試験を実施した。予備試験は、入力トルクを掛ける方向が時計回り、反時計回りと異なる2回ずつ計4回実施した。入力トルク（ $=T$ ）に対する出力トルク（ $=T'$ ）の結果を図7に示す。入力トルク（燃焼実験では発生トルク）に対して出力トルク（ロードセルの計測荷重から算出するトルク）は約40%程度であり、摩擦による抗トルクは入力トルクの約60%であることが分かる。この時の静摩擦係数は、 $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4$ が等しく、 μ であると仮定すると、計測範囲の最大入力トルク0.07Nmの時、静摩擦係数は最大値をとり、 $\mu=0.03$ であった。一般的な鉄どうしの最大静摩擦係数は

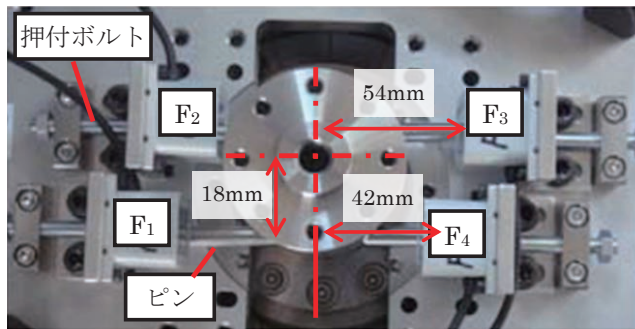


図5 押付荷重計測方式ロールトルク計測装置

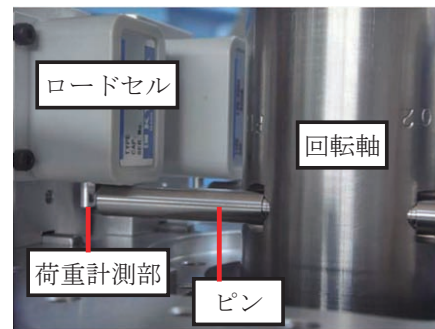


図6 荷重計測部詳細

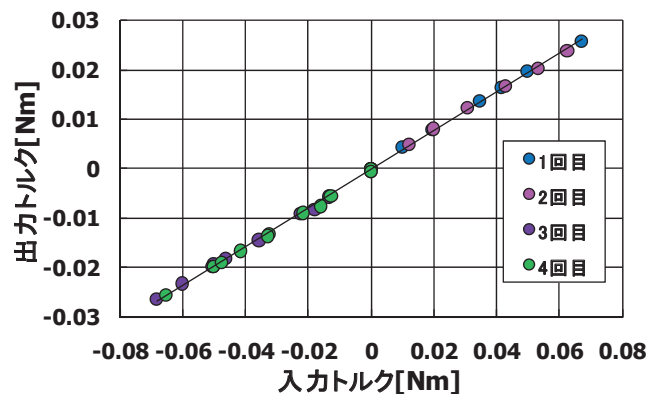


図7 押付方式の予備試験結果

0.52 程度であり、その値より十分小さいことから、ピンとロードセル荷重計測部間の接点にズレは生じず、押付方式での入力トルクに対する出力トルクの損失はピンとロードセル荷重計測部間の静摩擦力によると判断できる。燃焼実験時には、毎燃焼実験前後に同様の校正試験を実施し、

$$T' = aT \quad (3)$$

となる補正係数 a を取得し、計測値から実際の発生トルクを算出した。2 回の燃焼に対応する補正係数 a は、実験 No.1 では 0.39、実験 No.2 では 0.43 であった。

2.2.2 引張方式ロールトルク計測装置

荷重伝達部に摩擦を発生させず、入力（発生）トルクに対する出力トルクの応答精度を上げるために、押付方式のピンをワイヤに変えて引張荷重を計測する方式を採用した。図 8 に引張方式ロールトルク計測装置外観を示す。ワイヤはモータ回転軸中心から 20mm 離れた位置に接線方向に 4 本取り付けられている。中心線からロードセルまでの距離は、全て等しく取っている。初期設定として、それぞれのワイヤはロードセルに対して約 5N の力で引っ張っている。モータ燃焼時に発生したロールトルクは、これらのワイヤを介して引張荷重の増減としてロードセルで計測される。

押付方式の場合と同様に、ロールトルク計測装置に強制的にトルクを与え、出力されるトルクを計測する予備試験を実施した。入力トルクをノズル側から見て時計周り方向に掛ける試験を計 4 回実施した。入力トルク（ $=T$ ）に対する出力トルク（ $=T'$ ）の結果を図 9 に示す。補正係数 a は 1.01 であり、損失はなく、入力トルクに対する出力トルクはほぼ 1 対 1 である。燃焼実験時には、押付方式の場合と同様毎燃焼実験前後に同様の校正試験を実施し、補正係数 a を取得し、計測値から実際の発生トルクを算出した。2 回の燃焼に対応する補正係数 a は、実験 No.3 では 1.02、実験 No.4 では 1.03 であった。

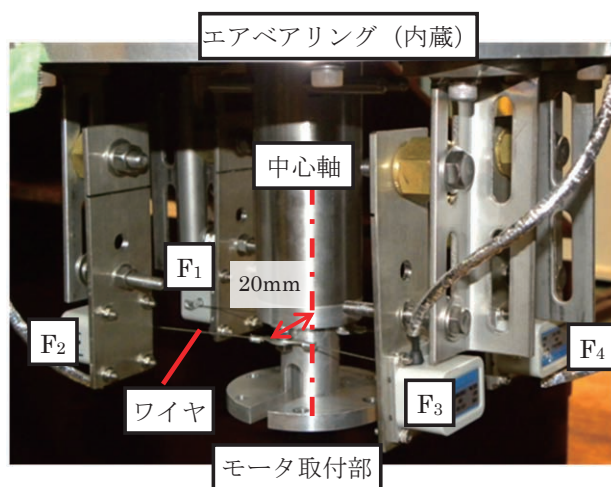


図 8 引張方式ロールトルク計測装置外観

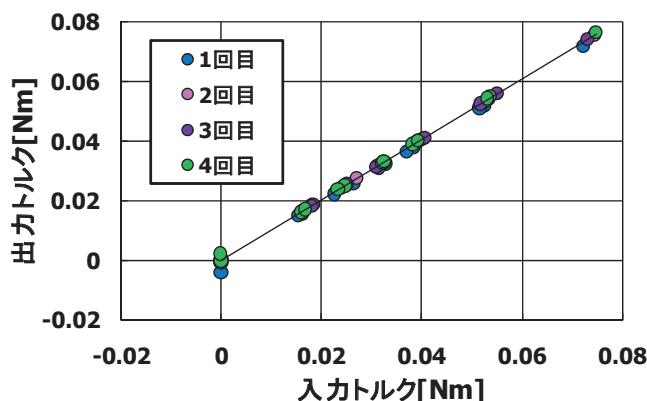


図 9 引張方式の予備試験結果

3. 実験結果および考察

3.1 押付方式ロールトルク計測実験

2.2.1 項で示した押付方式ロールトルク計測装置を用いて、2 回 (No.1, No.2) の燃焼実験を行った。小型モータの燃焼によって得られた燃焼室圧力と推力の時間履歴を図 10 に示す。着火は良好であり、グレイン内孔および両端面燃焼の特徴である燃焼中間点で燃焼室圧力が凸となる履歴が得られていることから、燃焼は良好であったと判断できる。推力には振動が見られるが、燃焼室圧力には振動が発生していないことから、この推力の振動は推力計測装置を含んだ小型モータシステム全体の振動に起因していると判断できる。特に 1.5 秒付近の最も大きな振幅は、時間とともに推進薬質量が減少することによってモータシステムの固有振動数が変化し、ある推進薬質量の時に一時的に共振したものである。本研究では、データを分析する上で、前後 0.1s の移動平均値を用い、この振動を平滑化した推力値を用いる。

図 11 に実験 No.1 のそれぞれのロードセルで得られた荷重の変位およびそれらから算出したロールトルクの前後 0.1s の移動平均値を示す。ロールトルクの計測値は正の値に増加しており、ノズル側から見て反時計回りにロールトルクが発生したことが分かる。しかし、本来、燃焼終了後の荷重の変位値およびロールトルクは初期値の 0 に戻るはずであるが、本試験結果では 2 回とも 0 に戻らず、燃焼終了時に最大値を取る結果となった。つまり、ロールトルクを受けて回転した小型固体モータが、何らかの原因で変異したまま元に位置に戻らず、残留トルクが発生したのである。その原因を以下に考察する。図 12 に実験 No.1 のロードセル F_1 の変位値の移動平均値に対する変位値の実際の計測値 (生データ) の比を示す。図 12 からロードセルによる計測値は非常に振動が激しいことが分かる。全体的に概ね移動平均値の ± 3 倍程度の大きな振幅が発生しており、着火直後および 1 秒後、1.5 秒後には移動平均値の ± 10 倍を超える非常に大きな振幅が発生している。この振動が起因して、ピンとロードセルの接触部にズレが発生したと考えられる。接触部のズレを元に戻す外力はないため、接触部のズレは積分される形で蓄積され、ロールトルクの計測位置が増加していったと推測される。このズレは、押付荷重が大きい方が発生し難いと考えられる。初期のそれぞれのロードセルの押付荷重は No.1 の実験では約 4.6N であり、No.2 では約 7.7N であった。図 11 に示すように、No.2 の方が燃焼中

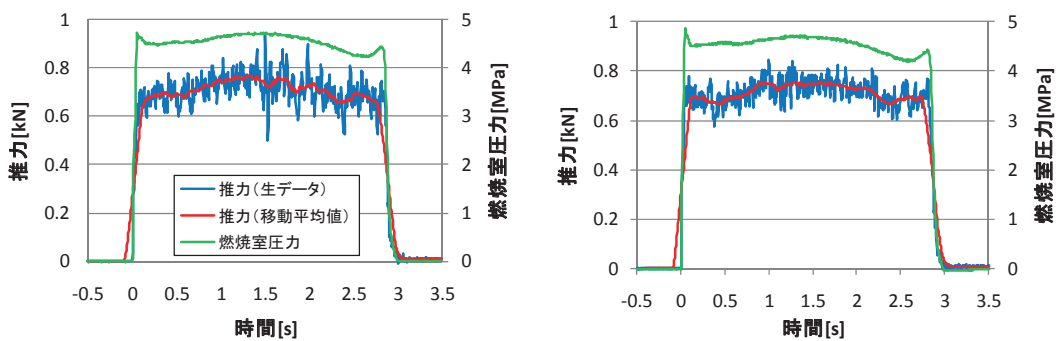


図 10 エンジン性能履歴 (左: No.1, 右: No.2)

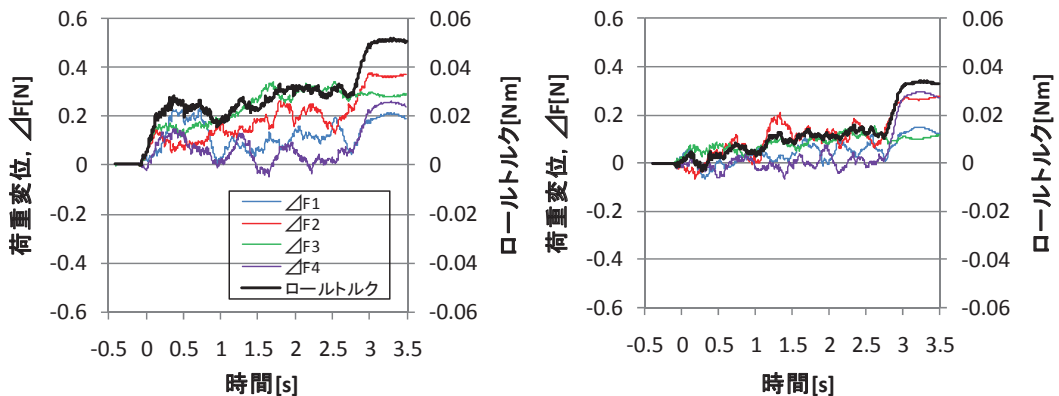


図 11 荷重の変位およびロールトルク履歴 (左: No.1, 右: No.2)

に蓄積されたズレが小さいことは、残留トルクが発生した原因がピンとロードセルの接触部のズレであることを示唆する結果である。このズレは、燃焼中に発生しており、現状ではその詳細を知ることができないため、ロールトルクの定量データを得ることはできない。

本実験結果では、ピンとロードセルの接触部にズレが発生したことからロールトルクの定量データは得ることはできなかったが、ロールトルクが2回ともノズル側から見て反時計回りに発生したことが確認できた。また、押付方式の問題点として、摩擦が発生するため補正が必要となり精度が落ちること、ピンとロードセルの接触部にズレが発生するため定量データを得ることが難しいことが明確になった。

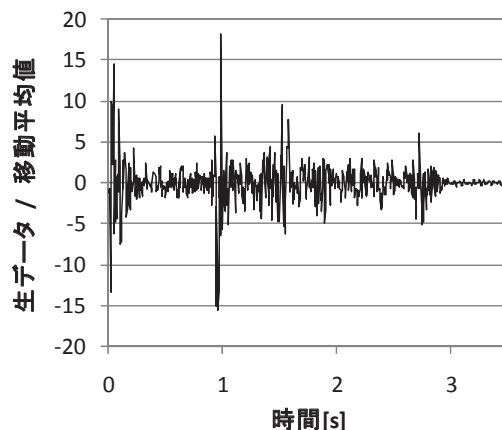


図 12 F_1 の変位値の移動平均値に対する生データの比 (No.1)

3.2 引張方式ロールトルク計測実験

2.2.2 項で示した引張方式ロールトルク計測装置を用いて、

2 回 (No.3, No.4) の燃焼実験を行った。小型モータの燃焼によって得られた燃焼室圧力と推力の時間履歴を図 13 に示す。3.1 項の押付方式での燃焼実験と同様に、着火および燃焼は良好であった。

図 14 にそれぞれのロードセルで得られた荷重の変位およびそれらから算出したトルクの前後 0.1s の移動平均値を示す。トルクの計測値は概ね負の値に振れており、時計回りのロールトルクが発生したことが分かる。燃焼終了後にはトルクはほぼ 0 に戻っており、残留トルクは発生しなかったことが分かる。これは、押付方式とは異なり、ワイヤが直接ロードセルと接続されており、ズレが発生する部分がないためであり、押付方式と比較して信頼できるデータが取得できたと言える。一方で、荷重の変位値は 0 に戻っていない、また、時計回りロールトルクが発生しているにも

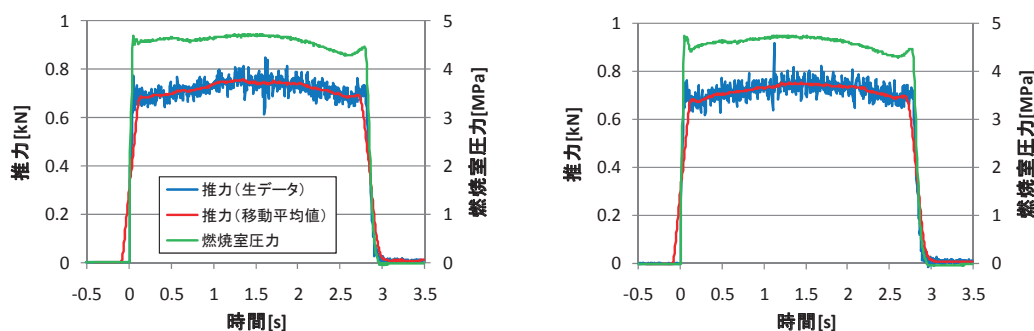


図 13 エンジン性能履歴 (左: No.3, 右: No.4)

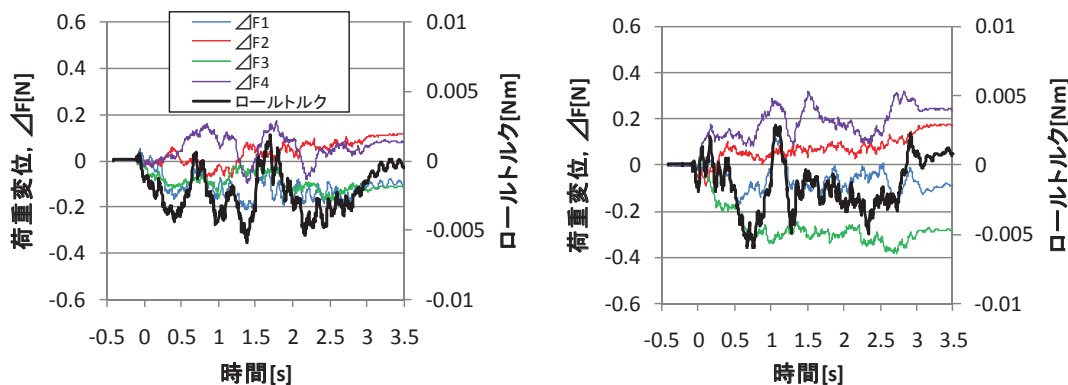


図 14 荷重の変位およびロールトルク履歴 (左: No.3, 右: No.4)

表4 ロールトルク発生事例と本実験結果の比較^{2),3)}

モータ名	直径 [mm]	最大推力 [kN]	最大トルク [Nm]	サンプル数	グレイン形状	k_{nf} $\times 1000$
Hercules ABL X-254	762	62.3	36.59	4	Five slot	0.7708
Thiokol Castor I	787	290.0	169.38	21	5 point star	0.7421
M-V M-14	2500	3753	3000	7	7 slots	0.3197
Hercules HP-X-259	762	146.8	23.04	3	X-slot	0.2060
Thiokol Star 31	762	83.0	4.74	12	Smooth	0.0749
Star 37 rosette Nozzle	940	68.0	4.20	13	8 point star	0.0657
Star 37 early Nozzle	940	47.0	2.71	8	8 point star	0.0613
Poseidon second stage	2108	1335	121.95	9	12 fin	0.0433
Thiokol Castor II	787	267.0	6.78	78	Smooth	0.0323
UTC FW-4S spin	508	28.9	0.27	12	Smooth	0.0184
Thiokol Star 20A spin	508	29.4	0.27	20	Smooth	0.0181
$\phi 80$ SM タイプII	80	0.76	0.005	2	Smooth	0.0822

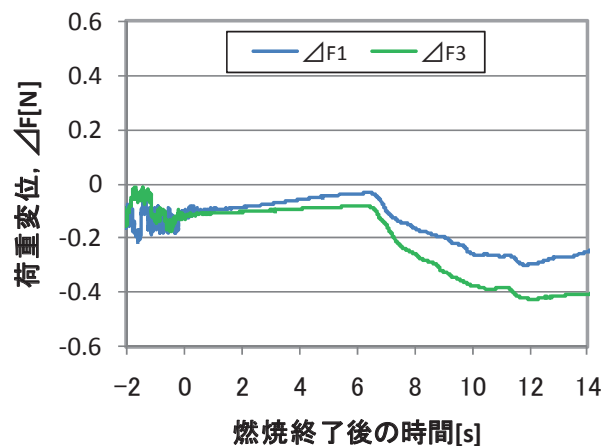


図15 燃焼終了後の荷重変位履歴 (No.3)

かわらず、 F_2 と F_4 は反時計回りのロールトルクが発生しているような変位値となっているという問題点がある。この原因としては、トルク発生時の衝撃や燃焼ガスからの熱放射などの影響でワイヤ自体が伸びたことが推測されるが詳細は不明である。また、計測値に対して計測器の精度が低い（計測値最大0.3N（移動平均値）に対して計測器の計測最大値は10N）ことも一つの要因として考えられる。これらの点は、今後の課題である。

本実験で得られたロールトルクは時計回りに最大でおよそ0.005Nmであった。最大推力は、0.76kNであった。表4に過去の各種固体モータで得られたロールトルクに関するデータ^{2),3)}と本実験で得られたデータを合わせて示す。この表には、モータの直径、推力、発生ロールトルク、サンプル数、グレイン形状、無次元量 $k_{nf}=(\text{最大トルク})/(\text{直径}\times\text{最大推力})$ を記載している。表から、明らかに k_{nf} の大小でグループ分けできることが分かる。 k_{nf} が大きいグループにはスロットを有するモータが多く、 k_{nf} が小さいグループには丸穴型のモータが多い。本実験で用いた $\phi 80$ モータは k_{nf} が小さいグループに属しており、他の丸穴型モータと同様の特性を示していることが分かる。このことから、本実験で得られたロールトルクは妥当なオーダーであり、エアベアリングを用いた引張方式のロールトルク計測装置は、誤差を発生する要因はいくつかあるが、計測方法としては有効な方法であったと言える。

さらに、燃焼終了後に明らかになった問題点を以下に記す。図15にNo.3の燃焼終了後の荷重計測値の履歴を示す。燃焼終了後の約6秒後までは荷重が若干上昇しており、その後は急激に減少していることが分かる。ワイヤによる引張荷重を計測しているため、荷重の上昇はワイヤの収縮を示しており、荷重の減少はワイヤの膨張を示している。これは、燃焼終了直後は、燃焼中の燃焼ガスからの輻射熱によって温度が上昇していたワイヤが冷えることによって収

縮しており、約6秒後には高温になったロケット本体から熱伝導によってワイヤに熱が伝えられ、ワイヤが膨張しているためであると考えられる。実際、燃焼終了後にワイヤ付近を直接手で触り、熱くなっていることを確認している。今後、本方式で長時間の燃焼時のロールトルクを計測する上での注意点として、燃焼ガスの輻射とエンジン本体からの熱伝導による熱の輸送には十分な対策が必要であることをここに記しておく。

4. まとめ

小型固体モータのロールトルクを計測するために、エアベアリングを用いた押付方式および引張方式によるロールトルク計測実験を実施した。押付方式では、ロールトルクの発生は確認できたものの、その定量データは取得できなかった。一方、引張方式では精度は高くないがロールトルクの定量データが取得できた。得られたデータを過去の固体ロケットのロールトルクの特性と比較し、その値が妥当であることを確認した。以上のことから、エアベアリングを用いた引張方式によるロールトルク計測装置は、ロールトルクの計測に有効であると言える。

謝辞

本研究は、先進的固体ロケットシステム技術実証WGの「固体モータに発生するロールトルクの研究」の一環として実施したものである。また、本実験の実施に際して多くの方々にご協力頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Flandro, G.A., Roll Torque and Normal Force Generation in Acoustically Unstable Rocket Motors, AIAA Journal, Vol.2, No.7 (1964), pp.1303-1306.
- 2) 嶋田徹, 固体ロケット内部流によるロールトルク発生, 平成18年度宇宙輸送シンポジウム講演集(2007), pp.13-16.
- 3) Knauber, R., Roll Torques Produced by Fixed-Nozzle Solid Rocket Motors, J. Spacecraft and Rockets, Vol.33, No.6 (1996), pp.789-793.
- 4) 嶋田徹, 関野展弘, 福永美保子, 固体ロケット内部旋回流と発生トルクの数値解析, 平成19年度宇宙輸送シンポジウム講演集(2008), pp.103-106.
- 5) T. Shimada and N. Sekino, Roll Torque Induced by Star-Perforated Motor Internal Flow, 58th International Astronautical Congress, IAC-07-C4.2.07 (2007).
- 6) T. Shimada, N. Sekino and M. Fukunaga, Numerical Investigation of Roll Torque induced by Solid Rocket Motor Internal Flow, 44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, AIAA 2008-4891(2008).
- 7) T. Shimada, N. Sekino and M. Fukunaga, Numerical Investigation of Roll Torque Induced by Solid Rocket Motor Internal Flow, Journal of Propulsion and Power 25 (6) (2009), pp.1300-1310.
- 8) 嶋田徹, 固体ロケット内部流とアブレーション, 平成17年度宇宙輸送シンポジウム講演集(2006), pp.13-16.
- 9) T. Shimada, Unique Phenomena Resulting from Three-Dimensional Flows inside Solid Propellant Rockets, 57th International Astronautical Congress, IAC-06-C4.3.02 (2006).
- 10) 嶋田徹, 安田誠一, 鈴木直洋, 富澤利夫, 二宮一芳, 菊地原清澄, 矢島卓, 尾澤剛, 固体ロケットに生じるロールトルクと旋廻流の計測, 第52回宇宙科学技術連合講演会, (2008), 1J12.