



ハイブリッドロケットエンジンの ABS樹脂製固体部の内壁厚減少の解析手法の確立 ～HyperTEK社製ハイブリッドロケットエンジンを使用して～

Analysis Method of Used Hybrid Rocket's Fuel Grains

貴島 政親¹，井上 真求²

¹和歌山大学宇宙教育研究所，²和歌山大学大学院教育学研究科

和歌山大学では高校生・大学生・社会人・企業と連携して、ハイブリッドロケットによる人材育成手法に関する研究を行なっている。既製品ロケットエンジンは、ロケットを教材活用する際に大きく貢献している。しかし一方で、燃焼について公称値通りの推力が得られているのか、等方的な燃焼がなされているかなどについて、使用実績と使用手法の改善を行なうことが必要であると考えている。本稿では、使用済み固体燃料の消費厚の測定法を確立し、消費厚と重量について予想通りの関係が得られたこと、非等方燃焼が確認できたことを報告する。さいごに固体燃料使用記録書の様式を提示した。

キーワード：ハイブリッドロケット，HyperTEK，燃料グレイン

1. はじめに

北海道大樹町にて2001年から国内の学生によるロケット打上実験が始まった。2005年からは秋田県能代市で新しい実験場^[1]の開拓が行われ、現在に至るまで毎年日本全国から多くの高校生・大学生が集まり、打上実験を行うまでに成長している。宇宙開発に活用されているロケットを教材化できた要因は、ロケットエンジンの既製品購入ができるようになった点が最も大きい。

和歌山大学では、学生プロジェクトである和歌山大学宇宙開発プロジェクト^[1]が2008年に発足して以来、現在まで年間約3～6回のハイブリッドロケット打上実験を経験してきた^{2,3)}。これらの実験は、アメリカのHyperTEK社製のハイブリッドエンジン^[2]を用いて行ってきた。

本エンジンは、特別な資格等が必要ないため比較的取り扱いやすいという利点がある。そのため、和歌山大学以外の学生団体や高校生を対象とした「ロケットガール&ボーイ養成講座^[3]」等でも利用されている。他方、本エンジンの品質および性能は十分に保障されているとはいえず、当該団体の実験においてエンジン

爆発等のトラブルが発生している。爆発については、ABS樹脂製固体部（以下、グレインと呼ぶ）の破損が確認されており、また断面を見ると気泡が確認できたことからグレインの品質問題も懸念される。また、当該企業が明示しているエンジン性能に関しても、管見の限りその整合性が実証された例がない。特にイグナイターワイヤーを使用した着火の火着きにバラつきがみられ、エンジン推力や燃焼時間についても著しく性能が発揮されない場合がある。それらが原因と考えられるロケットの到達高度不足による実験失敗につながったケースも少ないながらも発生している。

以上から、当該企業のエンジン推力等の測定などエンジン性能に関わる検証やグレイン個々の品質のバラつきについて評価する必要があると考えられる。本研究では、和歌山大学が使用したグレインの内壁厚の測定する手法を確立し、その燃焼後消費厚を推定し、個々のグレインの個体差や燃焼特性の検証を試みた。

2. 測定方法

今回測定したグレインはHyperTEK社製「HT-J-FG (HyEFX J Fuel Grain)」である。エンジンはグレイン

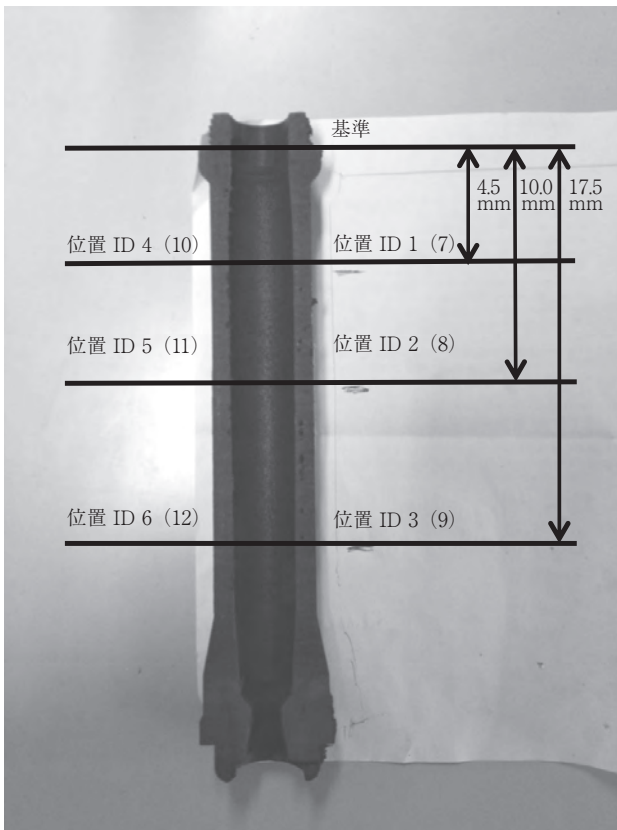


図1：グレインの断面と測定位置IDの定義
 ※カッコ内は他方のグレインの場合。
 ※バリは取り除いてから測定を行なった。

ンと酸化剤タンク及び酸化剤流量を調節するオリフィスの3つの部品により性能が決定される。和歌山大学では、300cc (HT-300-T) と440cc (HT-440-T) の酸化剤タンク及び、4種のオリフィス (HT-440ORF-MSC, 0.076, 0.098, 0.125, 0.172インチ径) を用いることで、推力ランクでいうI型とJ型エンジンとして使用してきた。使用回数は1~2回である。グレインの複数回使用は、使用マニュアルにおいて性能保証はなされていないが使用不可能ではないと記述されている。

測定は、グレインを長手方向に切断して行なった。切断はコンタマシン(一方向にノコギリ刃が送られる)で行ったため、切断面の両端(内壁と外壁)にバリが発生する。バリについては、手で左右に倒すなどしてとりのぞいた。一部、棒やすりを使用した場合もあり、内壁厚の測定に影響が懸念される。そのため、棒やすりによるバリ取りは、なるべく避けるようにした方がよい。

測定位置と測定IDの位置は図1のように定義した。よって切断前に接していた断面は測定ID 1とID 10というようになる。測定位置は、グレイン上部の座面を基準面とした。

内壁厚測定を簡便にするために、グレイン内径が一定と思われる領域から測定点を選択した。測定位置の同定を簡便にするために、グレインをかたどった紙に測定位置の目印をつけ、グレインを紙の上に載せて目印をたよりにした。測定位置は±10 mm程度の範囲とした。

グレイン内壁厚の測定はノギスを用いて行った。グレイン内壁が曲面であるため、なるべく切断面に近い場所にノギスをあてられるように、ノギスを浅く噛ませたり、断面に平行になるよう寝かせたりするなど試行した。結果、測定軸方向及び垂直方向(ノギスに対して左右方向)へ傾きを変えながら、最小値を測定するように努める測定方法とした。さらに複数回測定することで再現性のある値を測定値とした。測定値の再現性(誤差に相当)は最大±0.05 mm程度である。これは、ノギス測定の再現性だけでなく測定位置付近のグレイン内壁の凹凸の影響も含まれると考えられる。

3節で述べる補正のためにグレインの断面高の測定もノギスで行った。前述の厚みの測定同様、ノギスの傾きを変え最小値を探し、複数回測定することで再現性のある値を測定値とした。測定値の再現性(測定誤差)は厚み同様に最大±0.05 mm程度である。

以上のようにして測定したグレイン内壁厚と断面高は表1にまとめた。測定箇所が6個以下のグレイン(グレインIDが7~19)は切断された片方のグレインがすでに廃棄されたものである。また、グレインID 18, 19のグレインは長手方向切断だけでなく、短手方向にも切断されていたものである。

したがって測定位置はグレインIDと測定位置IDによって決まる。今後の表記では、グレインID 1の測定位置ID 2であれば、ID 1-2と表記することにする。

3. 解析方法と検証

3.1 真の内壁厚の推定

2節のようにして測定される内壁厚は、切断面がグレインの中心軸を通るときが最小となり、本測定で得たい量である。しかしながら、切断の工作精度や他目的での切断により、断面が中心軸を通らない場合もあるため、測定された内壁厚を補正して、真の内壁厚を推定する必要がある。

補正については図2のように、切断面の外壁からの距離 h (断面高と呼ぶこととする) を測定すれば、測

表1：グレイン測定

グレインID	位置ID	重量 使用前 [g]	重量 使用后 [g]	計測 内壁厚 [mm]	断面高 [mm]	推定 内壁厚 [mm]	消費厚 [mm]
1	1	379	352	9.06	24.15	8.99	0.51
	2			9.33	23.27	9.30	0.20
	3			9.63	23.15	9.61	-0.11
	4			8.91	24.15	8.84	0.66
	5			9.00	23.27	8.97	0.53
	6			9.40	23.15	9.38	0.12
	7			9.05	19.36	8.94	0.56
	8			9.02	20.06	8.96	0.54
	9			9.60	20.06	9.53	-0.03
	10			9.22	19.36	9.11	0.39
	11			9.42	20.06	9.36	0.14
	12			9.71	20.06	9.64	-0.14
2	1	380	351	9.21	21.02	9.19	0.31
	2			9.55	19.87	9.47	0.03
	3			9.43	19.85	9.35	0.15
	4			9.03	21.02	9.01	0.49
	5			9.00	19.87	8.93	0.57
	6			9.44	19.85	9.36	0.14
	7			9.05	23.35	9.02	0.48
	8			8.85	23.00	8.83	0.67
	9			9.32	22.35	9.32	0.18
	10			8.88	23.35	8.85	0.65
	11			9.14	23.00	9.12	0.38
	12			9.18	22.35	9.18	0.32
3	1	382	325	7.32	23.13	7.31	2.19
	2			7.60	23.63	7.57	1.93
	3			7.66	23.11	7.65	1.85
	4			7.87	23.13	7.85	1.65
	5			7.26	23.63	7.23	2.27
	6			7.68	23.11	7.66	1.84
	7			7.97	20.30	7.93	1.57
	8			7.50	19.95	7.45	2.05
	9			7.79	20.03	7.74	1.76
	10			7.42	20.30	7.39	2.11
	11			7.60	19.95	7.55	1.95
	12			7.70	20.03	7.65	1.85
4	1	380	328	7.93	22.76	7.92	1.58
	2			7.79	23.10	7.77	1.73
	3			8.29	22.65	8.28	1.22
	4			7.63	22.76	7.62	1.88
	5			7.88	23.10	7.86	1.64
	6			8.23	22.65	8.22	1.28
	7			7.63	20.42	7.60	1.90
	8			7.90	20.16	7.86	1.64
	9			8.41	20.59	8.38	1.12
	10			7.89	20.42	7.86	1.64
	11			7.78	20.16	7.74	1.76
	12			8.11	20.59	8.08	1.42
5	1	-	335	8.77	16.43	8.30	1.20
	2			8.47	18.82	8.33	1.17
	3			8.72	21.09	8.71	0.79
	4			8.02	16.43	7.61	1.89
	5			7.90	18.82	7.77	1.73
	6			8.23	21.09	8.22	1.28
	7			7.65	26.94	7.35	2.15
	8			7.76	24.43	7.69	1.81
	9			8.23	21.88	8.23	1.27
	10			8.10	26.94	7.78	1.72
	11			8.26	24.43	8.18	1.32
	12			8.54	21.88	8.54	0.96
6	1	-	326	7.52	20.55	7.50	2.00
	2			7.85	20.37	7.82	1.68
	3			8.47	20.70	8.45	1.05
	4			7.78	20.55	7.75	1.75
	5			7.94	20.37	7.91	1.59
	6			8.46	20.70	8.44	1.06
	7			7.63	22.86	7.62	1.88
	8			7.88	22.85	7.87	1.63
	9			8.33	22.59	8.33	1.17
	10			7.65	22.86	7.64	1.86
	11			7.81	22.85	7.80	1.70
	12			8.42	22.59	8.42	1.08

グレインID	位置ID	重量 使用前 [g]	重量 使用后 [g]	計測 内壁厚 [mm]	断面高 [mm]	推定値 内壁径 [mm]	消費厚 [mm]
7	1	380	343	8.45	22.76	8.44	1.06
	2			8.55	23.07	8.53	0.97
	3			8.82	23.72	8.78	0.72
	4			8.59	22.76	8.58	0.92
	5			8.80	23.07	8.78	0.72
	6			8.93	23.72	8.88	0.62
8	1	-	344	9.02	19.46	8.92	0.58
	2			9.02	17.76	8.74	0.76
	3			9.49	15.34	8.73	0.77
	4			8.91	19.46	8.81	0.69
	5			9.22	17.76	8.93	0.57
	6			9.76	15.34	8.96	0.54
9	1	-	345	8.48	20.60	8.45	1.05
	2			9.05	21.22	9.04	0.46
	3			9.02	21.04	9.01	0.49
	4			8.61	20.60	8.58	0.92
	5			8.98	21.22	8.97	0.53
	6			9.11	21.04	9.10	0.40
10	1	-	340	8.02	22.76	8.01	1.49
	2			7.90	23.44	7.87	1.63
	3			8.33	22.34	8.33	1.17
	4			8.21	22.76	8.20	1.30
	5			8.59	23.44	8.56	0.94
	6			8.76	22.34	8.76	0.74
11	1	-	338	7.83	22.43	7.83	1.67
	2			8.26	23.55	8.23	1.27
	3			8.60	23.42	8.57	0.93
	4			7.73	22.43	7.73	1.77
	5			7.99	23.55	7.96	1.54
	6			8.61	23.42	8.58	0.92
12	1	-	-	8.20	20.89	8.18	1.32
	2			8.10	19.83	8.04	1.46
	3			8.70	19.76	8.63	0.87
	4			8.02	20.89	8.00	1.50
	5			8.58	19.83	8.51	0.99
	6			8.92	19.76	8.84	0.66
13	1	-	-	8.11	22.09	8.11	1.39
	2			8.22	22.55	8.22	1.28
	3			8.71	22.84	8.70	0.80
	4			7.97	22.09	7.97	1.53
	5			7.72	22.55	7.72	1.78
	6			8.32	22.84	8.31	1.19
14	1	-	-	8.47	20.69	8.45	1.05
	2			8.45	20.25	8.41	1.08
	3			8.76	21.39	8.75	0.75
	4			8.10	20.69	8.08	1.42
	5			7.99	20.25	7.95	1.55
	6			8.29	21.39	8.28	1.22
15	1	-	-	8.96	21.08	8.95	0.55
	2			8.96	20.32	8.92	0.58
	3			9.27	19.62	9.18	0.32
	4			8.40	21.08	8.39	1.11
	5			8.64	20.32	8.60	0.90
	6			8.90	19.62	8.81	0.69
16	1	-	-	7.67	21.14	7.66	1.84
	2			7.68	21.26	7.67	1.83
	3			8.27	20.83	8.25	1.25
	4			8.08	21.14	8.07	1.43
	5			8.12	21.26	8.11	1.39
	6			8.61	20.83	8.59	0.91
17	1	-	-	8.21	16.13	7.74	1.76
	2			7.52	16.84	7.20	2.30
	3			7.72	18.45	7.56	1.94
	4			7.76	16.13	7.33	2.17
	5			7.68	16.84	7.35	2.15
	6			7.63	18.45	7.48	2.02
18	1	-	-	9.05	23.37	9.02	0.48
	2			8.90	22.21	8.90	0.60
	3			-	-	-	-
	4			8.80	23.37	8.77	0.73
	5			9.04	22.21	9.04	0.46
	6			-	-	-	-
19	1	384	-	-	-	-	-
	2			-	-	-	-
	3			9.39	27.94	8.80	0.70
	4			-	-	-	-
	5			-	-	-	-
	6			8.79	27.94	8.26	1.24

定した内壁厚 d から下式を用いて真の内壁厚 D を推定することができる。外半径 R と内半径 r は今回の測定位置のすべてで等しいように測定位置を選択している(2節)。したがって $d \leq h \leq (2R-d)$ で下式が成立する。

$$D = R - \sqrt{(\sqrt{R^2 - (R-h)^2} - d)^2 + (R-h)^2}$$

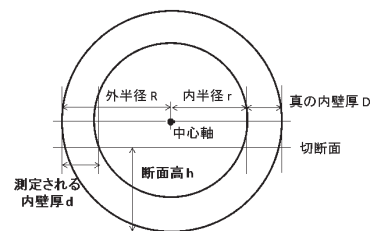


図2：グレインの測定値と規定値

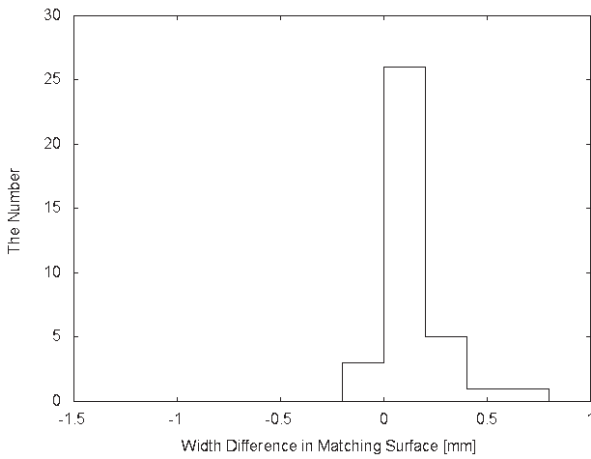


図3：計測厚の合わせ面での整合性

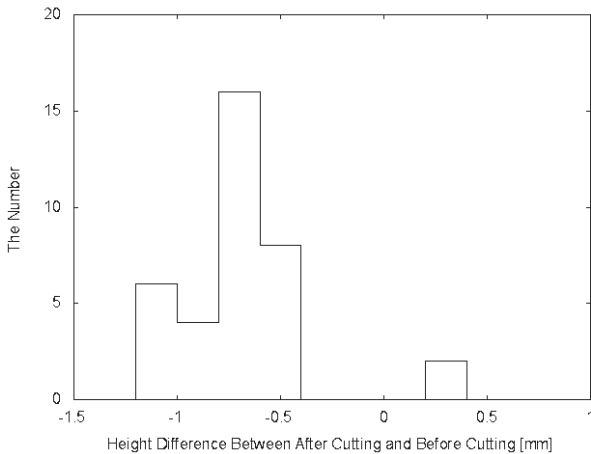


図4：計測高の合計と外径との整合性

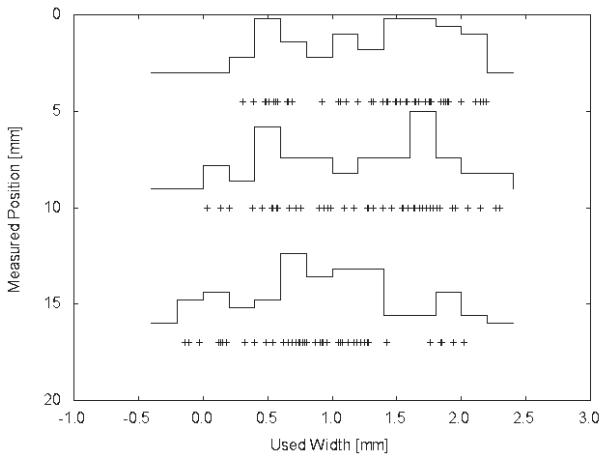


図5：消耗厚のグレイン位置依存
3つのヒストグラムのデータ数は各48個である。

3.2 合わせ面の整合性

切断工作精度及び測定精度の確認のために、合わせ面の内壁厚と断面高の整合性を確認した。

まず内壁厚についてだが、切断前に接していた合わせ面の内壁厚は等しくなるはずである。たとえば表1よりID 1-1の測定内壁厚は9.06 mm、ID 1-10は9.22 mmであり、測定内壁厚の差異は0.16 mmである。この差異は測定誤差（2節より、 ± 0.05 mm、よって最

大0.1 mm）と切断工作による変形やバリの影響と考えられる。確認の結果、7割のデータについて差異0.2 mm以下で整合性がとれていることがわかった（表2、図3）。一方で、0.2 mm～0.5 mmの差異については、測定誤差かバリの除去方法に問題があった可能性がある。しかし切断も計測も手仕上げであるためこれ以上の改善は見込めないだろう。

次に断面高について、合わせ面の断面高の和は外径に等しくなるはずである（これを再現外径とよぶことにする）。たとえば表1よりID 1-1の測定断面高は24.15mm、ID 1-10は19.36 mmであり、加算すると45.51 mmになる。グレインの外径は44 mmであるため、差異は0.49 mmである。確認の結果、7割のデータは差異1.0 mm以下に整合している（表2、図4）。測定内壁厚にくらべて大きいのが、切断の際にノコ刃によって切り落とされた分のためと考えられる。

4. 考察

4.1 上下非対称性

推定された内壁厚とグレインの測定位置との関係は図5である。グレインの上流が下流よりも内壁厚が薄くなっていることがわかる。これが真であるとする、グレイン上流の方がよく燃焼していることになる。

また下流において、さすが内壁に付着していることが考えられるが、計測にて確認したことはない。または、上流の方が反応していない酸化剤が多いために良く燃焼することを意味している可能性もある。

4.2 左右非対称性

燃焼の左右非対称性を調べるために、推定された内壁厚が中心軸挟んで対面にある位置での燃焼差異について調べた。たとえば表1によるとID 1-1の推定消耗厚は0.51 mm、ID 1-4は0.66 mmであり、消耗厚差異0.15 mmである。このように測定位置ID 1と4、2と5、3と6について消耗厚の差をとり表3の2列目にまとめた。また、グレインID 1～6については切断双方のグレインがあるため、測定ID 7と10、ID 8と11、ID 9と12についての消耗厚の差を表3の3列目にまとめた。大方が0.3 mm以上の非対称がみられるのが分かる。（図6の細線）

特にID 1～6グレインは切断双方のグレインで計測しているため信頼がおける。たとえば、ID 1-1と1-4

表2：測定値の整合性確認

各グレインにおいて表の上から、測定位置ID1と10、2と11、3と12、4と7、5と8、6と9の計測内壁厚の差、計測断面高の差を記述した。

グレインID	整合	
	内壁厚 [mm]	断面高 [mm]
1	0.16	-0.49
	0.09	-0.67
	0.08	-0.79
	0.14	-0.49
	0.02	-0.67
	0.20	-0.79
2	0.33	0.37
	0.41	-1.13
	0.25	-1.80
	0.02	0.37
	0.15	-1.13
	0.12	-1.80
3	0.10	-0.57
	0.00	-0.42
	0.04	-0.86
	0.10	-0.57
	0.24	-0.42
	0.11	-0.86
4	0.04	-0.82
	0.01	-0.74
	0.18	-0.76
	0.00	-0.82
	0.02	-0.74
	0.18	-0.76
5	0.67	-0.63
	0.21	-0.75
	0.18	-1.03
	0.37	-0.63
	0.14	-0.75
	0.00	-1.03
6	0.13	-0.59
	0.04	-0.78
	0.05	-0.71
	0.15	-0.59
	0.06	-0.78
	0.13	-0.71

表3：グレインの非等方燃焼

各グレインにおいて表の上から、測定位置ID1と4、2と5、3と6の推定内壁厚の差を記述した。グレインID1～6については測定位置ID7と10、8と11、9と12について右列にまとめた。

グレインID	考察	
	左右比較	
	[mm]	[mm]
1	-0.15	0.17
	-0.33	0.40
	-0.23	0.11
2	-0.18	-0.17
	-0.54	0.29
	0.01	-0.14
3	0.55	-0.55
	-0.34	0.10
	0.02	-0.09
4	-0.30	0.26
	0.09	-0.12
	-0.06	-0.30
5	-0.69	0.42
	-0.55	0.49
	-0.49	0.31
6	0.26	0.02
	0.09	-0.07
	-0.01	0.09
7	0.14	
	0.25	
	0.11	
8	-0.11	
	0.19	
	0.23	
9	0.13	
	-0.07	
	0.09	
10	0.19	
	0.69	
	0.43	
11	-0.10	
	-0.27	
	0.01	
12	-0.18	
	0.47	
	0.22	
13	-0.14	
	-0.50	
	-0.39	
14	-0.37	
	-0.46	
	-0.47	
15	-0.56	
	-0.32	
	-0.36	
16	0.41	
	0.44	
	0.34	
17	-0.41	
	0.15	
	-0.09	
18	-0.25	
	0.14	
	-	
19	-	
	-	
	-0.54	

の差異は-0.15mm（ID 1-4の消耗厚が大きく、ID 1-7と1-10の差異は+0.17mm（ID1-7の消耗が大きい）である。ID 1-4と1-7が切断前の同一部位である。したがって、消耗厚差異の正負が異なり、かつ絶対値も0.2 mmで一致しているため、より確実に非対称燃焼を裏付けている。内壁厚の測定誤差が±0.05 mmと考えると、消耗厚の左右差の誤差は最大±0.2 mmと考えられる。表3をみると、0.2 mmより大きい左右非対称燃焼は5割あり（図6の細線）、最大0.5～0.6 mm程度の非対称性が出る場合があることが分かり、非対称燃焼をしていることが分かった。逆に5割のデータは0.2 mm以下で左右対称に燃焼しているともとれる。

非対称の判断においては、切断後のグレイン双方に

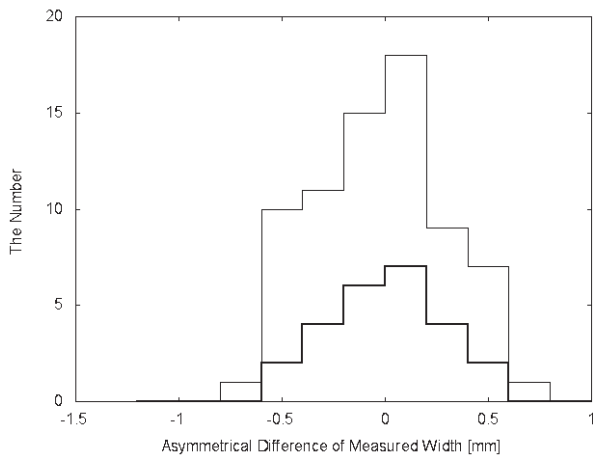


図6：計測厚の左右非対称性

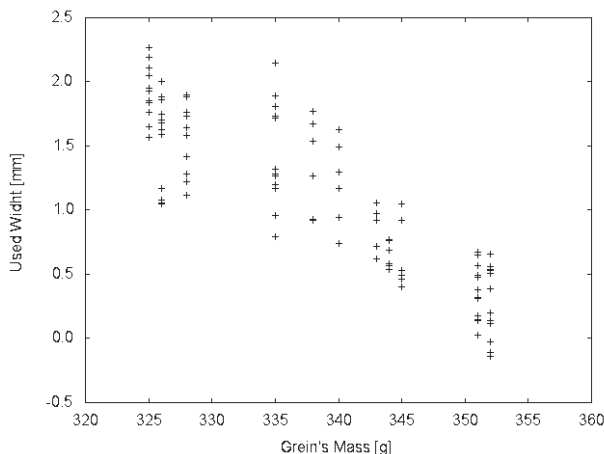


図7：消費厚と使用後重量の関係

ついて計測を行うことが重要である。合わせ面について内壁厚の整合性がとれた（0.2 mm 以下）計測について、左右非対称性（0.2 mm 以上）を判断すべきである。グレイン ID 1～6 について、内壁厚整合がとれた（表2にて0.2mm 以下）ものについての内壁厚の左右差を調べた。たとえば、ID1-1と1-4の内壁厚差（表3より0.15 mm）が有効かの判断は合わせ面内壁厚整合性が有効であるかで判断する。表2より ID1-1の合わせ面内壁厚差異は0.16 mm，ID1-4は0.14 mm であり、共に0.2 mm 以下であるため有効とし、したがって内壁厚左右差0.15 mm は有効とした。以上のようにして、有効と判断した内壁厚左右差のヒストグラムを図6（太線）に載せた。左右非対称が0.2 mm 以上のものは48%であった。結論は変わらず、0.2 mm～0.6 mm の大きい非対称は現れることは確認できた。

今回分かった非対称燃焼の原因として、着火のためのスパークを生成するイグナイターワイヤーの非等方設置があるのではと考える。つまり、イグナイターワイヤーが近い内壁面がよく燃焼するため、非対称な消

耗が生じているという可能性である。今後、イグナイターワイヤーの設置方向の記録もとるようにすると良い。

また計測についても中心軸に対して一方方向の断面しか計測しておらず、断面に垂直な面についての消費圧も計測すべきである。今回非対称性が証明できなかったグレインに関して、切断面を変えれば非対称性を検出する可能性がある。

4.3 消費重量と消費内壁厚の相関

推定された内壁厚 D と新品の内壁厚を用いれば、燃焼で消費した内壁厚が算出できる。また、使用後グレインの重量を測定し、算出された消費内壁厚との関係を図7にまとめた。結果、消費内壁厚が大きいほど消費重量が大きいことがわかった。また内壁厚が最終的に約7.5mm あれば燃焼の圧力と熱に耐えられることが分かった。ちなみに新品グレインは380 g（誤差 ± 2 g 程度）である。

グレインの重量と消費厚の関係について考えてみる。消費厚は $(R-D)$ であるから使用後の内半径は $r+(R-D)$ ，燃焼する内壁の長さを l とすれば、グレインの消費体積が分かる。またグレインの密度を一定値 ρ とすれば、消費重量 W は下記式のようなになる。

$$W = \rho \int_r^{r+(R-D)} 2\pi r l dr = \pi \rho l [r^2]_r^{r+(R-D)}$$

よって、図7について、消費重量が消費厚について2次関数の様相になることは理屈にあう。

5. 結論と今後

使用済みグレインを長手方向に切断することでその切断面を利用し、内壁厚の測定を行った。切断面から内壁厚を測る際の曲面への考慮は、測定方法を工夫し、複数回測定することで行った。また、切断面がグレインの中心軸を通過していないことについては、断面位置（本文では断面高）を測定することで補正し、真の内壁厚を推定するようにした。測定誤差についても推定し、更に合わせ面の内壁厚及び再現外径を確認することで、切断及び測定が適切に行われていることが確認できた。したがって、本測定手法は確立された。

消費内壁厚について、グレイン上流が良く燃えていることが分かった。また左右非対称燃焼していることもわかった。消費内壁厚と消費重量とは予想通り相関があることがわかった。また燃焼に耐えうる内壁厚が

