



Title	内燃機関に後付けで燃費を改善する気筒休止装置の電動スロットル適用と評価
Author(s)	高田, 裕佳
Citation	令和元 (2019) 年度学部学生による自主研究奨励事業研究成果報告書. 2020
Version Type	VoR
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/75996">https://hdl.handle.net/11094/75996</a>
rights	
Note	

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

2019年度大阪大学未来基金【住野勇財団】学部学生による自主研究奨励事業研究成果報告書									
ふりがな 氏名	たかた ゆたか 高田 裕佳	学部 学科	工学部 電子情報工学科	学年	2年				
ふりがな 共同 研究者名	いかがわ ひろゆき 五十川 弘行	学部 学科	基礎工学部 電子物理科学科	学年	2年				
	まつもと かい 松元 開		工学部 応用理工学科		2年				
アドバイザー教員 氏名	石原 尚	所属	知能・機能創成工学専攻						
研究課題名	内燃機関に後付けで燃費を改善する気筒休止装置の電動スロットル適用と評価								
研究成果の概要	後付け可能な気筒休止システムと電動スロットルを統合制御するシステムの開発と、それらが燃料消費量及びドライバー操作に与える影響の評価								
<h3>1. 緒言</h3> <h4>1.1 研究背景</h4> <p>自動車用エンジンは要求される特定の出力を得るために、スロットルバルブの開度(以下 TPS)でエンジンへの流入空気量を調整する。筒内への新気導入はエンジン出力の一部を要する。これをポンピングロスという。低 TPS 状態ではポンピングロスが大きくなりエンジン出力と同程度の損失が生じ、熱効率低下の一要因となっている。</p> <p>そこで、本研究グループはエンジンの出力調整をスロットルバルブだけでなく、同時に燃料噴射量の制限で行うことで TPS の低下を抑えポンピングロス低減が可能と考えた。この制限を行う装置が気筒休止システムである。</p> <p>2017 年度の気筒休止システムを実装した先行研究<sup>[1]</sup>ではシステムを搭載した小型車両を、1 周約 470m の周回路を走行させ燃料消費量を測定し、実走行条件で燃料消費量が約 2.56% 低減され熱効率向上を実現した。しかし当システムは大衆車に普及している電動スロットルバルブ(以下 ETC)に対応していないことや、制御自由度に問題があった。また、当システムの熱効率向上には依然として改善の余地があった。</p> <h4>1.2 研究目的</h4> <p>本研究では 17 年度の研究で開発したシステムを ETC に対応させたものとし、さらに先行研究で見られたポンピングロス低減効果をさらに向上させることを目指す。</p> <p>前者を達成するために 17 年度におけるシステムをベースとして ETC のコントロールユニットとも接続可能な形式で開発する。また後者を実現するために、実験走行を行う車両に搭載されたエンジンの出力特性をより詳細に解析し、その上で気筒休止システムの具体的な制御パラメータの決定方法を改善する。</p> <h4>1.3 研究概要</h4> <p>今回の研究では、本研究グループが学生フォーミュラ日本大会に出場するために開発した小型</p>									

フォーミュラレーシングカーOF-19(以下 OF-19)に対して、開発したシステムを搭載することでその効果を検証する。

上記の目的を達成するためには TPS を大きく保ったまま燃料噴射量を制限すること必要がある。そこで市販のマイコンモジュールとリレー回路を用いて、燃料をエンジンに噴射するインジェクターへの信号(以下 INJ)を調整することができる回路を作成する。また実走行においてドライバーへのヒアリングを通して、ETC の制御パラメータを気筒休止システムに対応するように調整する。

このシステムを OF-19 に搭載し、周回路を走行することでその燃料噴射量と周回のラップタイムを調べる。気筒休止を行わなかった場合、気筒休止を行った場合、気筒休止を行いかつそれに合わせて ETC の挙動を調整した場合、の 3 パターンに分けて走行しそれぞれ評価する。

## 2. システムの開発

### 2.1 システムの仕様の決定

本システムの開発目標は燃料消費量の低減に加えレーシングカーの代表的な性能指標であるラップタイムを低下させない、の 2 点とした。以上を実現するためにシステム構成を以下のようにした。

- 1) TPS とエンジンの回転数(以下 RPM)に応じて燃料噴射量を減らす割合を決定できる。
- 2) 既存の車両に対して後付けが可能である。
- 3) ETC を制御するコントロールユニットに信号を送れるようにし、信号を送った際にスロットルの挙動を変化させられるようにする。
- 4) ドライバーが容易に操作できる位置にスイッチを設置し、システムを作動させるかどうかの切り分けが可能である。

### 2.2 制御ユニットの製作

システムを後付けした際の車両の大まかな回路を以下の Fig.1 に示す。Fig.1において AP, APPS, ETC Ctrl, INJ, Relay はそれぞれアクセルペダル、アクセルペダル開度、ETC の制御ユニット、開発した気筒休止システムに用いたリレー回路を表す。マイコンモジュール(Arduino Uno)には RPM と TPS が入力される。また Relay は ECU からエンジンに INJ を送信する信号線の間に挿入される。Arduino Uno から RPM と TPS に応じて設定した duty 比の出力がリレー回路のコイル側に行われることで ECU からの信号がカットされる。

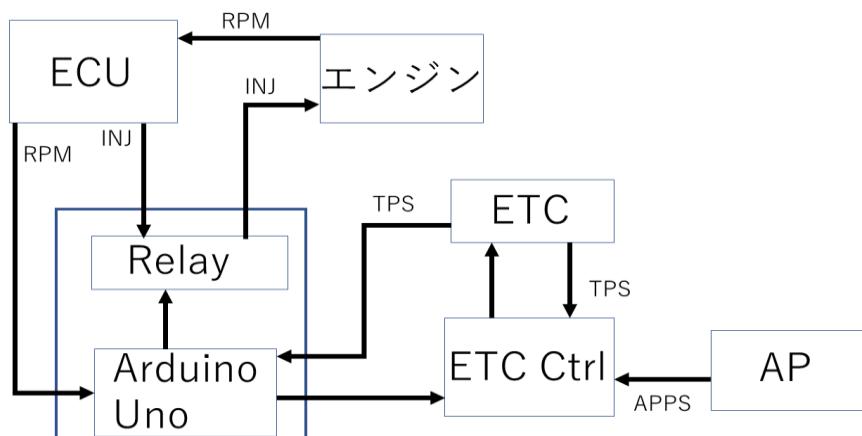


Fig. 1 システム全体概要

### 2.3 燃料噴射量のパラメータの決定

燃料をカットする気筒についていくつかのパターンを試し、直列 4 気筒のうち中央 2 本の気筒に対して燃料噴射量のカットを行った際に最も車両の振動が小さかったので、この 2 本に対して操作を加えることに決定した。

次に RPM と TPS に応じた具体的な燃料カット率の決定を行った。そのためには OF-19 に搭載されているエンジンの RPM と TPS に応じた出力を、エンジンの出力特性に関する解析用ソフトである GT-SUITE にて解析を行った。この解析において燃料カットを行わず 4 気筒が全て通常通り稼働している場合と、中央 2 気筒の燃料を 100% カットして両端の 2 気筒のみが通常通り稼働している場合の 2 パターンに分けてそれぞれの値を出した。その結果を以下の Table.1, Table.2 にそれぞれ示す。

Table.1 4 気筒稼働時のエンジンの出力

単位(735.5W)		TPS(%)													
RPM(/min)	90	86.2	74.4	65	55.6	47.7	40.6	33.6	28.1	23.4	20.1	17.8	14.7	12.3	10.3
		72.8	72.8	55.9	48.7	36.1	22.6	10.2	0.147	-6.46	-11.2	-14.5	-16.9	-20.1	-22.7
14000	74.6	74.6	57.9	50.8	38.1	24.5	12.1	2.01	-4.92	-9.73	-12.9	-15.2	-18.3	-20.9	-23.1
13500	76.2	76.2	60.2	53.1	40.2	26.6	14.1	3.84	-3.42	-8.40	-11.6	-13.8	-16.8	-19.2	-21.4
13000	77.9	77.9	62.3	55.3	42.5	28.7	16.1	5.68	-1.93	-7.25	-10.5	-12.5	-15.4	-17.7	-19.8
12500	80.3	80.3	64.8	57.8	44.9	30.9	18.1	7.58	-0.146	-5.83	-9.29	-11.4	-14.1	-16.3	-18.3
12000	81.9	81.9	66.7	59.8	46.9	32.7	19.8	9.43	1.79	-4.15	-7.98	-10.3	-13.0	-15.1	-16.9
11500	83.0	83.0	67.9	61.1	48.3	34.1	21.3	11.1	3.58	-2.30	-6.40	-9.05	-11.9	-13.9	-15.7
11000	83.1	83.1	68.3	61.7	49.1	35.3	22.7	12.6	5.23	-0.516	-4.68	-7.54	-10.8	-12.9	-14.6
10500	80.1	80.1	67.3	61.2	49.5	36.4	24.2	14.1	6.83	1.12	-2.90	-5.84	-9.35	-11.8	-13.5
10000	94.7	74.7	64.4	59.2	49.0	37.1	25.7	15.7	8.49	2.91	-1.09	-4.09	-7.71	-10.4	-12.4
9500	68.6	68.6	60.3	55.8	47.3	37.3	26.9	17.3	10.1	4.62	0.768	-2.18	-5.97	-8.71	-10.9
9000	61.2	61.2	54.3	50.7	44.3	36.4	27.6	18.8	11.6	6.11	2.39	-0.325	-4.16	-7.13	-9.33
8500	58.0	58.0	51.7	48.6	42.9	35.9	28.0	19.9	12.9	7.34	3.68	1.11	-2.44	-5.34	-7.76
8000	56.2	56.2	50.6	47.6	42.3	35.6	28.3	20.8	14.2	8.59	4.83	2.30	-0.987	-3.71	-6.06
7500	53.1	53.1	48.9	46.4	41.8	35.5	28.5	21.4	15.3	10.0	6.19	3.47	0.244	-2.29	-4.50
7000	47.6	47.6	44.1	42.1	38.3	33.3	27.5	21.5	16.0	11.2	7.67	5.00	1.52	-0.981	-3.08
6500	44.0	44.0	41.3	39.6	36.1	31.3	26.1	20.9	16.2	12.0	8.88	6.44	3.00	0.307	-1.82
6000	41.0	41.0	39.1	37.9	35.2	30.9	25.6	20.1	15.8	12.3	9.54	7.35	4.25	1.50	-0.799
5500	35.9	35.9	34.7	33.9	32.2	29.5	25.5	21.0	16.8	12.8	10.0	7.96	5.10	2.58	0.362
5000	30.6	29.8	28.1	26.2	23.6	20.3	17.0	13.6	10.8	8.64	5.61	4.18	3.01	2.08	0.73
4500	26.2	26.2	25.5	0.00	24.3	22.9	21.0	18.5	15.9	13.1	10.8	8.96	6.27	4.05	2.00

Table.2 2 気筒停止時のエンジン出力

単位(735.5W)		TPS(%)													
RPM(/min)	90.0	86.2	74.4	65	55.6	47.7	40.6	33.6	28.1	23.4	20.1	17.8	14.7	12.3	10.3
14000	18.1	18.1	11.4	8.31	2.93	-3.05	-8.83	-13.9	-17.5	-20.1	-21.9	-23.2	-25.0	-26.5	-27.7
13500	20.8	20.8	14.0	10.9	5.51	-0.498	-6.16	-11.0	-14.8	-17.7	-19.7	-21.0	-22.9	-24.3	-25.6
13000	22.5	22.5	15.8	12.8	7.40	1.40	-4.33	-9.19	-12.7	-15.4	-17.5	-19.0	-20.8	-22.4	-23.7
12500	23.0	23.0	16.5	13.6	8.26	2.25	-3.47	-8.36	-11.8	-14.3	-16.2	-17.4	-19.3	-20.8	-22.2
12000	24.4	24.4	17.3	14.2	8.72	2.56	-3.23	-8.05	-11.5	-14.0	-15.6	-16.6	-18.2	-19.5	-20.7
11500	25.5	25.5	18.5	15.4	9.45	3.12	-2.86	-7.70	-11.0	-13.4	-15.0	-15.9	-17.2	-18.3	-19.4
11000	27.3	27.3	20.7	17.7	11.8	4.89	-1.48	-6.49	-9.92	-12.4	-13.9	-14.9	-16.1	-17.1	-18.1
10500	29.1	29.1	22.9	20.0	14.1	7.05	0.51	-4.60	-8.16	-10.8	-12.5	-13.6	-14.9	-15.9	-16.8
10000	29.5	29.5	24.0	21.2	15.8	8.96	2.48	-2.75	-6.40	-9.08	-10.9	-12.2	-13.7	-14.7	-15.6
9500	28.3	28.3	23.7	21.3	16.5	10.4	4.42	-0.86	-4.74	-7.51	-9.33	-10.6	-12.3	-13.6	-14.5
9000	27.1	27.1	23.3	21.3	17.0	11.4	5.96	1.03	-2.77	-5.80	-7.75	-9.05	-10.7	-12.1	-13.2
8500	26.1	26.1	23.0	21.3	17.6	12.7	7.77	3.27	-0.36	-3.27	-5.49	-7.06	-8.99	-10.4	-11.6
8000	25.3	25.3	22.7	21.3	18.4	14.1	9.49	5.18	1.65	-1.15	-3.17	-4.73	-6.92	-8.64	-10.1
7500	24.9	24.9	22.6	21.4	19.0	15.3	10.9	6.68	3.18	0.47	-1.45	-2.89	-4.91	-6.67	-8.23
7000	22.7	22.7	20.9	19.9	18.0	15.1	11.5	7.73	4.43	1.64	-0.21	-1.54	-3.43	-5.05	-6.54
6500	19.0	19.0	17.5	16.6	15.0	12.7	9.94	7.05	4.38	2.01	0.28	-0.94	-2.52	-3.92	-5.24
6000	16.2	16.2	14.7	13.9	12.5	10.7	8.81	6.91	5.06	3.18	1.57	0.29	-1.38	-2.70	-3.87
5500	14.2	14.2	13.0	12.3	11.1	9.42	7.64	5.97	4.48	3.11	1.97	0.99	-0.58	-1.99	-3.20
5000	14.6	14.6	13.5	12.9	11.7	10.2	8.52	6.79	5.26	3.87	2.73	1.80	0.34	-1.00	-2.24
4500	13.0	13.0	12.4	12.0	11.2	10.1	8.76	7.18	5.61	4.18	3.01	2.08	0.73	-0.51	-1.63
4000	12.1	12.1	11.8	0.00	11.0	10.2	9.03	7.76	6.48	5.19	4.22	3.46	2.31	1.11	1.00

17 年度の先行研究では 2 気筒の動作を完全に停止させた場合の出力は 4 気筒を全て稼働させた

場合のおよそ半分の値になるという想定の下でパラメータを決定していた。しかし今回の解析の結果2気筒を停止させた時の出力は半分よりも大きく下まわることが判明した。これは2気筒を停止させると燃料の燃焼が起こらずエンジンが空転する時間が長くなり、機械的損失が大きくなるからであると思われる。その結果17年度と同様の計算方法で決定した値を用いると多くの場合で出力が不十分であると想定した。

あるTPSとRPMでの2気筒時の出力を $P_2$ [W]、目標の出力を $P_4$ [W]とする。燃料噴射量の減少率をCUTRATE[%]とする。

$$\text{CUTRATE} = (1 - \frac{P_4 - P_2}{P_2}) \times 100 \quad (1)$$

上式によりカット率の決定を行っていた。しかしこの方法では上記の通り $P_2$ が想定よりも大きく下回る場合となっていたので、上式をそのまま適応した場合0を下回る、もしくは1を上回る値が数多く算出される結果となった。

そこで大きな出力が必要なTPSが86.2%を超える場合はカット率を0%とし、上式の演算の結果が1%を上回るような箇所は、燃料をカットさせた場合の損失が非常に大きいと判断しカット率を100%とした。100%とした箇所よりもTPSが小さく、かつRPMが小さい場合のカット率も実走行ではあまり使われない領域と想定し100%とした。その他の箇所のカット率を、急激にエンジンの出力特性が変化しないように、TPSに沿って線形になるようにカット率を決定した。Table.3にその結果を記す。その後ドライバーからの実走行を経たレスポンスや実走行中のカット率の時間変化のデータによりパラメータの微調整を行った。

Table.3 燃料噴射量のカット率

単位(%)		TPS(%)											
		90	86.2	74.4	65	55.6	47.7	43.6	40.6	37	33.6	30.2	28.1
	14000	0	0	20	40	60	80	100	100	100	100	100	100
	13500	0	0	20	40	60	80	100	100	100	100	100	100
	13000	0	0	20	40	60	80	100	100	100	100	100	100
	12500	0	0	20	40	60	80	100	100	100	100	100	100
	12000	0	0	25	50	75	100	100	100	100	100	100	100
	11500	0	0	25	50	75	100	100	100	100	100	100	100
	11000	0	0	17	33	50	67	83	100	100	100	100	100
	10500	0	0	14	30	44	58	72	86	100	100	100	100
	10000	0	0	14	30	44	58	72	86	100	100	100	100
	9500	0	0	13	25	38	50	63	75	88	100	100	100
	9000	0	0	13	25	38	50	63	75	88	100	100	100
	8500	0	0	11	22	33	45	56	67	78	89	100	100
	8000	0	0	11	22	33	45	56	67	78	89	100	100
	7500	0	0	11	22	33	45	56	67	78	89	100	100
	7000	0	0	11	22	33	45	56	67	78	89	100	100
	6500	0	0	11	22	33	45	56	67	78	89	100	100
	6000	0	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
	5500	0	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
	5000	0	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
	4500	0	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
	4000	0	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100

## 2.4 ETCの制御パラメータ調整

気筒休止システムに対応させたETCの制御を行う。気筒休止システムを作動させた場合、エンジンの出力とAPPSの関係が変化し、あるAPPSに対して得られるエンジンのパワーは小さくなる。そこで同様のAPPSでより大きなTPSが得られるようにAPPSとTPSの対応関係を変化させると、APPSとエンジンの出力関係が極力変わらず、ドライバーのアクセルペダル操作への

気筒休止の出力変化の影響を抑えることが可能である。

本システムはTPSを向上させることで燃費の改善を図るものであるから、ドライバーはTPSを向上させるためにAPPSを増加させるのは自明である。そこで上記の補正を行い同様のAPPSでもより大きなTPSが得られるようにこれらのパラメータの対応関係を変化させるとドライバーの操作に加わる変化は小さくなると考えられる。

### 3. 性能評価

#### 3.1 評価方法

以下の3段階に分けた走行を行う。

- 1) 走行①・・・システムを全く動作させない本来のOF-19の性能による走行
- 2) 走行②・・・燃料噴射量のカットは行うがETCの制御パラメータは変化させない場合の走行
- 3) 走行③・・・燃料カットを行い、かつETCの制御パラメータを気筒休止システムに対応させたものに変化させた場合の走行

燃費の計量は、システムを搭載したOF-19に最大まで燃料を給油し周回路を10周周回走行した後に、残った燃料を全て吸い出しその質量を測定することで得られる。給油できる燃料の質量の最大値は予め明らかになっているので、その最大値と測定した質量の差分を燃料消費量として評価する。

#### 3.2 燃費の性能評価結果

周回路(1周約550m)を10周走行させた際に得られたデータを以下に記す。

気筒休止システムによるTPSの変化の様子を以下のヒストグラムFig.2, Fig.3に示す。

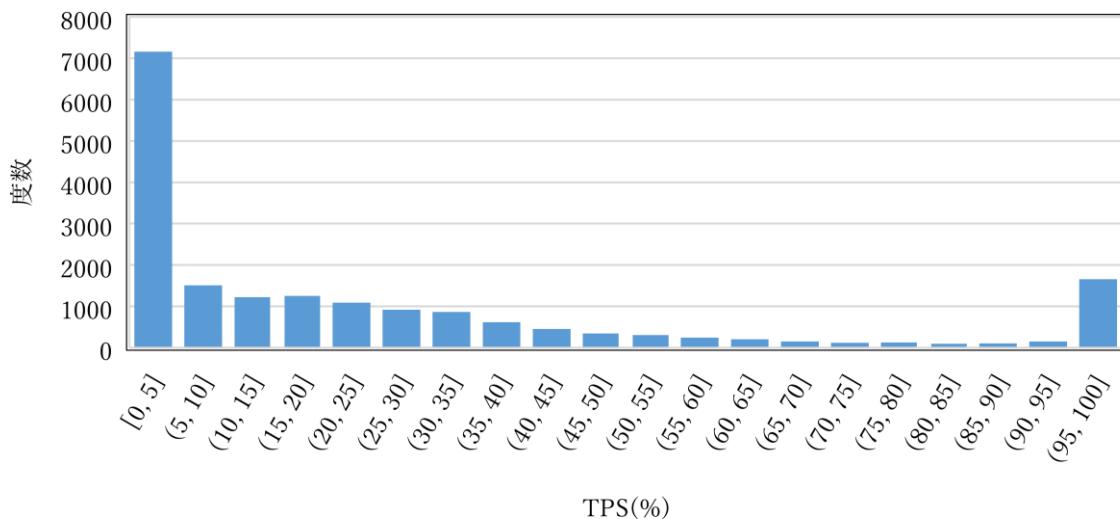


Fig.2 走行①でのTPSのヒストグラム

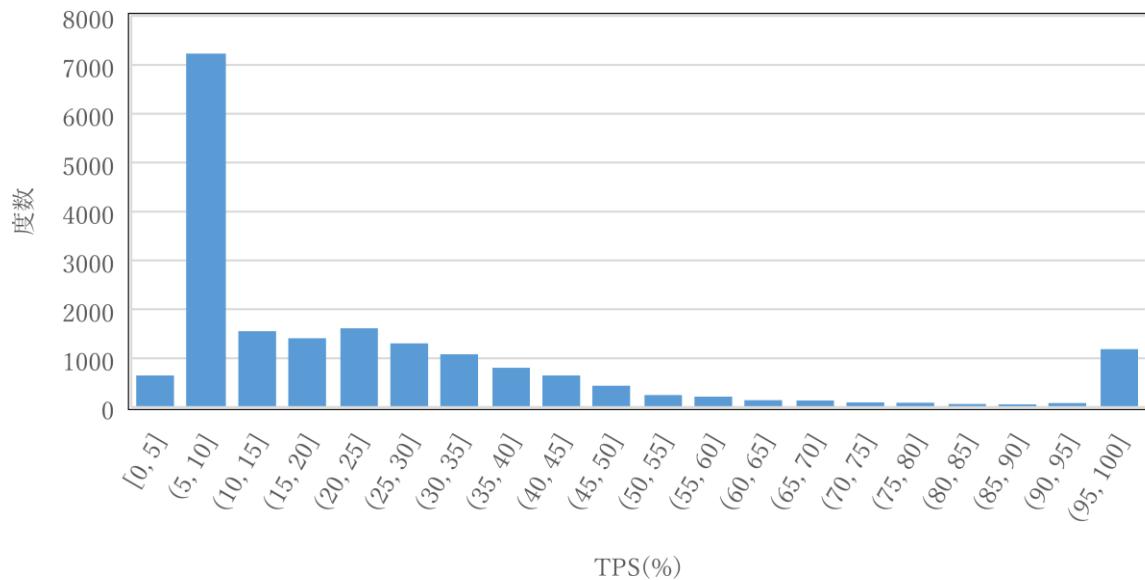


Fig.3 走行②での TPS のヒストグラム

TPS の中央値は Fig.2 では 13.0%, Fig.3 では 15.4% となっている。以上により気筒休止システムにより TPS が全体的に大きな値となっていることが分かる。よってポンピングロスが小さくなつたと考えられる。走行①, 走行②での燃料消費量と平均ラップタイムの比較を Table.4 に示す。

Table.4 平均ラップタイムと燃料消費量の比較

	走行①	走行②	備考
平均ラップタイム(s)	39.64	39.74	
燃料消費量(ml)	831.08	790.54	4.88%減

Table.4 からラップタイムの大幅な増大を抑え燃料消費量の低減を達成したことが分かる。さらに先行研究では燃料消費量の低減率は約 2.26% であったので、その研究を上回る成果を得た。

### 3.3 ドライバーへの影響の性能評価

燃料消費量の測定のための走行とは別に、気筒休止システムがドライバーに与える影響を明らかにするため走行①, ②, ③を行った。

これらの走行における APPS の平均値を以下に記す。

Table.5 各走行における APPS の平均値

	走行①	走行②	走行③
平均 APPS(%)	7.96	10.3	7.62

Table.5 よりパラメータに補正を加えた走行③は加えなかった②に比べ気筒休止を行う前の状態である走行①からの変化が少ない。よって気筒休止がドライバーに与える影響を軽減することができたと考えられる。

#### 4. 今後の展望

今回は時間の都合上緻密なパラメータの設定が困難であった側面があるが、実測を多数重ねていくことが可能であればより燃料消費量を削減することが可能である。さらに ETC のパラメータも厳密に設定できるのならば、燃料消費量を削減した上でドライバーの運転にほとんど影響をもたらさない制御も可能であると思われる。

#### 5. 結論

ポンピングロス低減を目的とした。

- 1) 燃料噴射量のカット率の決定方法を改善することで先行研究に比べ燃料消費量の低減率を向上し高い熱効率を得た。
- 2) ETC の制御パラメータに気筒休止システムに対応した補正を加えることでシステムがドライバーの運転に与える影響を軽減することができた。

#### 6. 謝辞

本研究におけるアドバイザー教員である石原尚先生及び事務職員の山田佳美さんには本件へのアドバイス、予算執行及び本研究グループが取り組む学生フォーミュラプロジェクト全般への多大なご協力をありがとうございました。本当にありがとうございます。また本学工学研究科機械工学専攻修士一年生の北野裕太郎さん、機械工学専攻学部生の小林義典さん、基礎工学部システム科学科機械科学コース学部生の松井太一さん、基礎工学部システム科学科知能システム学コース学部生の義田遼太郎さんには、システムの仕様決定及び実測の全面的なご協力をありがとうございました。本当にありがとうございます。

#### 7. 参考文献

- [1] 北野裕太郎(2017) 市販エンジンに後付け可能な熱効率向上システムの開発と実践 『平成 29 年度学部学生による自主研究奨励事業研究成果報告書』