

# 競技用低燃費車両の開発 – エンジンシステムの改良 –

山口 大造\* 石川 雄基\*\* 見當 豊\*\* 鳥取 涼太\*\* 岡田 遥輝\*\* 西本 幸平\*\*  
花崎 由歩\*\* 佐藤 礼汰\*\* 大矢 涼司\*\* 山本 有真\*\* 桑原 大地\*\* 金佐 勇人\*\*  
赤木 裕太朗\*\* 北郷 拓巳\*\* 江草 太一\*\* 河原 みほ\*\*\* 川村 純司\*\*\*  
中島 哲史\*\*\* 関 一郎\* 佐伯 文浩\*

## Development of higher-mileage car – improved engine system –

YAMAGUCHI Daizo\*, ISHIKAWA Yuki\*\*, MIATARI Yutaka\*\*, TOTTORI Ryota\*\*, OKADA Haruki\*\*,  
NISHIMOTO Kohei\*\*, HANASAKI Yua\*\*, SATO Reita\*\*, OHYA Ryozu\*\*, YAMAMOTO Yuma\*\*,  
KUWAHARA Daichi\*\*, KANASA Hayato\*\*, AKAGI Yutaro\*\*, KITAGO Takumi\*\*, EGUSA Taichi\*\*,  
KAWAHARA Miho\*\*\*, KAWAMURA Junji\*\*\*, NAKASHIMA Tetsushi\*\*\*,  
SEKI Ichiro\*, SAEKI Fumihiko\*

An internal combustion engine vehicle which has been invented for 120 years is absolutely imperative for our life. Green action and resource-saving are the key technologies for automobile engineering. Hybrid car, hybrid electric vehicle, electric vehicle, and clean diesel have been developed. New diesel and petrol cars and vans will be banned in the UK from 2040 in a bid to address air pollution, the government has announced in July 2017. However, an internal combustion engine vehicle will maintain holding a key position at least 20 years. The competition for gasoline mileage “Honda eco-mileage challenge” is held since 1981. Here we show the improved engine system for the developed experimental production vehicle. Gasoline mileage has been optimized by response surface methodology and artificial neural network models.

*Key Words:* Higher-mileage car, Engine system, Response surface methodology, Artificial neural network models

### 1. 結 言

既報<sup>1,2)</sup>の通り、Honda エコマイレージチャレンジ（本田技研工業株式会社 主催）への出場を念頭に置いた競技用低燃費車両の開発においては、燃費を向上させる主な車両に関する因子として、エンジンシステム・車両重量・空気抵抗が挙げられる。エンジンシステムでは、燃料の燃焼状態が重要であると考えられており、燃費競技に適した燃料噴射・吸排気を行う必要がある。大会に参加し、各チームの現状を視察した結果、現在は、エンジンの高圧縮化による燃焼効率の向上やエンジンの保温技術、エンジン内部の摩擦抵抗低減技術など、様々な最新技術が用いられていると拝察できた。車両重量は、タイヤ

転がり抵抗にも直接関係しており、この抵抗係数のみで燃費の5%を占めると言われている<sup>3)</sup>。競技車両は、3輪の競技専用タイヤを用いることで路面との接地面積を減らし転がり抵抗を低減させている。また、自動車においては100[kg]の軽量化で燃費が1[km/L]向上することが知られており、エンジン出力の小さい競技用エンジンにおいては重量の影響がより顕著に表れると考えられる。そのため、近年はフレームにカーボンを使用した燃費競技車両が増えてきている。また、燃費競技大会では燃焼効率の最も良いと考えられる「エコラン走法」<sup>4)</sup>が用いられている。

一方で、現在販売されている自動車のほとんどが燃料噴射の自動制御が施されているのに対し、燃費競技大会では多くのチームがアナログのキャブレター式で大会に出場している。このことは、競技用車両の開発におけるエンジンシステムの最適化を困難にしている。本研究では、電子制御燃料噴射装置を採用し、簡潔に最適化を実現することで、車両

原稿受付 令和2年9月30日

\* 総合理工学科 機械システム系

\*\* 専攻科 機械・制御システム工学専攻、機械システム系

\*\*\* 技術部

開発を実施している<sup>1,2)</sup>。本稿では、AA01E 式エンジンを採用したエンジンシステムの改良(断熱処理、エンジンオイルのドライサンプ方式化、ピストン部の WPC 処理<sup>®</sup>)と最適化結果について報告する。

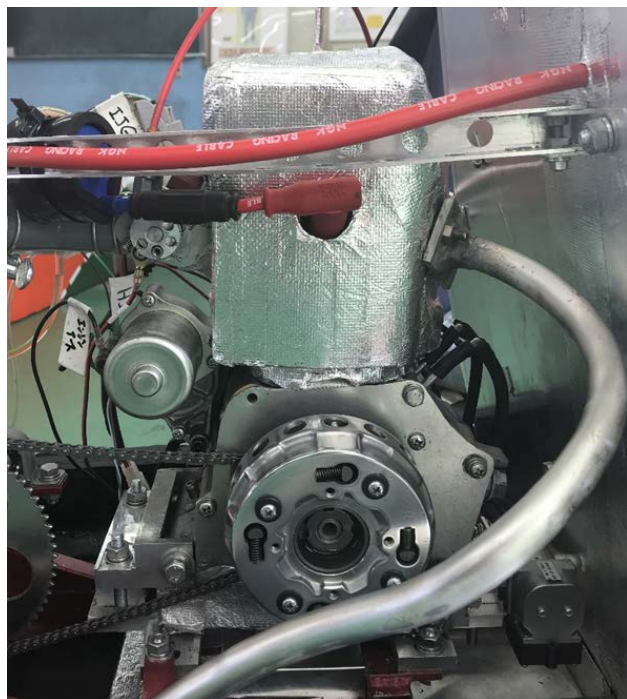


図1 AA01E 式エンジンの断熱処理

## 2. エンジンシステムの改良および実験方法

### 2. 1 エンジンの断熱処理

通常、エンジンはオーバーヒートしないように冷却性能が求められる。しかし競技ではエコラン走法により走行するため、エンジンを ON にして走行する時間は非常に短く、ほとんどがエンジンを OFF にした状態での惰性走行である。そのためエンジンの温度は上がりにくく、オーバーヒートの心配は少ない。しかしながら、エンジンの熱効率を高めるには、できるだけエンジンを冷やさず、温度を高い状態で保つことが重要である。

図1に示すように、エンジンに断熱処理を施した。エンジンの放熱器部分をすべて除去した部分に断熱材(ガラス繊維をアルミテープで補強したもの)を直接被せている。

### 2. 2 エンジンオイルのドライサンプ方式化

エンジンオイルはエンジン各部の円滑化、気密化、燃焼熱の冷却、燃焼による汚れの清掃分散、防錆などの機能を発揮するが、燃費の観点からは抵抗となる。この問題を解決するために、ドライサンプ方式を採用した。

主に、クランクシャフトに生ずる流体摩擦抵抗とオイルポンプに生ずる機械損失を低減・除去するた

め、オイルポンプを除去し、バッテリーを動力源としたモーターポンプ(図2)を設置した。このことで、機械損失を除去し、モーターポンプを任意のタイミングで作動させることにより、必要な量をクランクウェイト部分に噴射することが可能となり、流体摩擦抵抗を低減できた。モーターポンプは、ドライバーの判断により、ハンドル付近に設置したボタンにより作動する。エンジンオイルはエンジン下に設置した容器に充填した。



図2 エンジンオイルドライサンプ方式

### 2. 3 ピストン部の WPC 処理<sup>®</sup>

ピストン、ピストンリング、ピストンピン、シリンダー、カムに WPC 処理<sup>®</sup>を施した(株式会社不二 WPC の登録商標)。機械部品等の表面に圧縮残留応力を付与して疲労強度を向上する技術、いわゆるショットピーニングは広く普及している。一方、WPC 処理<sup>®</sup>は従来のショットピーニングよりも格段に微細な直径数十  $\mu\text{m}$  程度の粒子を 100 [m/s] 以上の高速で投射する一種のショットピーニングである。ただし、微粒子を用いることから、従来のショットピーニングでは顕在化しなかった様々な現象が部品等の表面近傍で起こる。このことが、WPC 処理<sup>®</sup>が従来のショットピーニングとは異なり一種の表面改質プロセスと位置づけられる理由である。表面改質により、大きな圧縮残留応力の付与、表面粗さの微細な制御、基材表面へのコーティング、基



材表面近傍の高硬化化、ナノ結晶化、基材表面近傍の複合組織化が達成される<sup>4)</sup>。

処理後の部品を図3に示す。処理によって表面は均質で滑らかなディンプル面（ゴルフボール様）を形成する。そのため、切削加工による直線的な引き目はオイルを逃がすように働くが、形成されたディンプルは、オイルホールやエアホールとなり、大幅にフリクション（摩擦力）を改善することができ、摩耗も最小限に留めることができる。オイルは表面張力によって盛り上がった状態となり金属同士の衝突、摺動する際にコーティング効果を発揮し、フリクションロス軽減により低燃費化に貢献する。また、虫食いカジリ防止、オイルの汚れが少なくなるなどの効果もあり、強度も耐久性も向上するため、競技中のエンジン保護にも繋がる<sup>5)</sup>。



図3 WPC 処理®を施したエンジン部品

表1 実験計画と結果

#	パターン	実験条件				実験結果	
		噴射量 [msec]	吸気管長 [mm]	回転数 [rpm]	燃費 (WPC処理®前) [km/L]	燃費 (WPC処理®後) [km/L]	
1	0++	6	60	5000	715.031	714.711	
2	0-+	6	0	5000	814.581	768.098	
3	--0	3	0	4700	1384.882	1372.056	
4	++0	9	60	4700	593.560	548.584	
5	0+-	6	60	4400	818.414	759.446	
6	+0-	9	30	4400	577.784	575.871	
7	-0+	3	30	5000	1303.569	1278.023	
8	+0+	9	30	5000	460.396	583.119	
9	000	6	30	4700	826.845	734.327	
10	0--	6	0	4400	770.663	788.825	
11	--0	3	60	4700	1292.268	1341.232	
12	000	6	30	4700	737.962	742.161	
13	000	6	30	4700	785.752	746.408	
14	000	6	30	4700	725.646	773.869	
15	+ - 0	9	0	4700	567.886	586.066	
16	- 0 -	3	30	4400	1257.203	1452.345	
17	0 0 0	6	30	4700	665.484	816.493	

## 2. 4 実験方法

Box-Behnken 計画<sup>6)</sup>により作成した実験計画(表

1)に従い実験を行った。全開時の燃料噴射時間、吸気管長、エンジン回転数を因子として<sup>7)</sup>先行研究結果より、排気管長の寄与が低く、またエンジン回転数の寄与が大きいことが明らかになっている。そのため、排気管長に変えて吸気管長を採用した。吸気管長の水準は、先行研究結果<sup>7)</sup>から 30 [mm]付近に最適値があると考え決定した。燃料噴射時間の水準は、予備実験の結果から 6 [msec]付近に最適値があると考え決定した。エンジン回転数は、競技規則による周回規定時間の項目より、速度は減速比・タイヤ外径および回転数に起因するため、事前走行実験結果より最低回転数 4400 [rpm]、最大回転数 5000 [rpm]と決定した。実験は室内で実施し、気温は 20℃に保ち、測定前にエンジン温度を 50℃まで暖気運転した。



図4 測定の概要

測定方法は、停止状態でシャシーダイナモ（FC-design 社製可搬式シャシーダイナモ 3PS 型 DA3HR<sup>1)</sup>）に載せ、時速 40 [km/h]までフルスロットルで加速しエンジンを停止、20 [km/h]まで惰性走行する。20 [km/h]に到達すると同時にエンジンをかけフルスロットルで 40 [km/h]まで加速を行う。このエコラン走法を、ツインリンクもてぎ スーパースピードウェイ 1 周の距離 2.4 [km]到達まで行った。2.4 [km]を超えてタイヤが空転した場合は、燃費計算に影響を及ぼすため、2.4 [km]到達と同時にエンジンを停止し、ブレーキをかけ、シャシーダイナモも停止させた。燃費の測定は、2.4 [km]到達時に燃料制御装置のモニターに表示された値を測定した。本研究では、シャシー台を製作し動力計と車体を固定した（図 4）。また WPC 処理®前後で実験を行うことで比較検討した。適用した二次モデル関数<sup>8)</sup>を次に示す。

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^3 \beta_i x_i + \sum_{i=1}^3 \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1, j \neq i}^3 \beta_{ij} x_i x_j \quad (1)$$

ここで、 $y$ ：燃費または空燃比、 $x_i$ 、 $x_j$ ：標準化された実験因子、 $\beta_0$ 、 $\beta_i$ 、 $\beta_{ii}$ 、 $\beta_{ij}$ ：それぞれ切片、一次項の回帰係数、二次項の回帰係数、交互作用項の係数で

ある。コード化された実験条件を上式に当てはめることにより  $\beta_0=0$  となり、各実験因子  $x_i, x_j$  の  $y$  に与える影響の度合いが相対的に議論できる。

標準化は、式 (2) により行った。

$$x_n = \frac{2(x - \bar{x})}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (2)$$

ここで、 $x_n$  : 標準化後の実験因子、 $x$  : 標準化したい実験因子である。 $\bar{x}$  : 因子における水準の平均値、 $x_{\max}$  : 水準の最大値、 $x_{\min}$  : 水準の最小値である (表 1 中においては、それぞれ、0、+、- で示す)。燃料噴射制御装置は FCdesign 社製 Fi-M digital を用いた。

表 2 因子解析結果 (WPC 処理®前)

regression coefficient <sup>a</sup>			燃費 [km/L]	
	$\beta$		$\beta$	p-value
liner	$\beta_1$	(噴射量)	-1.37346	0.0009**
liner	$\beta_2$	(吸気管長)	-0.42994	0.1309
liner	$\beta_3$	(回転数)	-0.34545	0.4996
interaction	$\beta_{12}$	(噴射量 × 吸気管長)	0.05154	0.2436
interaction	$\beta_{13}$	(噴射量 × 回転数)	-0.44307	0.1213
interaction	$\beta_{23}$	(吸気管長 × 回転数)	-0.39856	0.1568
quadratic	$\beta_{11}$	(噴射量 × 噴射量)	0.29717	0.0002**
quadratic	$\beta_{22}$	(吸気管長 × 吸気管長)	0.08183	0.0837
quadratic	$\beta_{33}$	(回転数 × 回転数)	-0.30631	0.548
coefficient of determination $R^2$ of the model			0.974	
P-value <sup>b</sup>			<.0001***	

<sup>a</sup> See the Response Surface Methodology section.

<sup>b</sup> Observed significance level of the test; significance levels of 0.5% (\*), 0.1% (\*\*), 0.01% (\*\*\*) in two-side t test.

表 3 因子解析結果 (WPC 処理®後)

regression coefficient <sup>a</sup>			燃費 [km/L]	
	$\beta$		$\beta$	p-value
liner	$\beta_1$	(噴射量)	-0.46389	0.0034*
liner	$\beta_2$	(吸気管長)	-0.10568	0.3277
liner	$\beta_3$	(回転数)	0.12472	0.5489
interaction	$\beta_{12}$	(噴射量 × 吸気管長)	-0.00277	0.868
interaction	$\beta_{13}$	(噴射量 × 回転数)	0.46918	0.0032*
interaction	$\beta_{23}$	(吸気管長 × 回転数)	-0.06204	0.5547
quadratic	$\beta_{11}$	(噴射量 × 噴射量)	0.35570	<.0001***
quadratic	$\beta_{22}$	(吸気管長 × 吸気管長)	-0.00148	0.9293
quadratic	$\beta_{33}$	(回転数 × 回転数)	0.19379	0.362
coefficient of determination $R^2$ of the model			0.996	
P-value <sup>b</sup>			<.0001***	

<sup>a</sup> See the Response Surface Methodology section.

<sup>b</sup> Observed significance level of the test; significance levels of 0.5% (\*), 0.1% (\*\*), 0.01% (\*\*\*) in two-side t test.

### 3. 結果と考察

因子解析結果と人工ニューラルネットワークによりモデリング (A one-hidden layer first-stage-logistic and second-stage-identity model in an unsupervised-learning type feed-forward neural network) <sup>8)</sup>した燃費に関するパフォーマンスマップを表 2・3 および図 5・6 に示す。因子解析結果より、いずれの場合においてもモデル関数の決定係数が十分大きく、また、P 値も十分小さいことからモデル関数の信頼性は高い。標準化回帰係数の値とその P 値より、燃料噴射量とエンジン回転数が燃費に大きく寄与していることが分かった。パフォーマンスマップより、WPC 処理®前において、燃費は回転数の増大とともに大きくなり 4771 [rpm] で最大に達し、さらに回転数を上昇させると燃費は減少した。吸気管長は、先行研

究 <sup>7)</sup> の下限 25 [mm] を下回った吸気管長 0 [mm] で燃費が最大となることが分かった。今回実験を行った範囲では、吸気管長 0 [mm]、燃料噴射量 3 [msec]、エンジン回転数 4771 [rpm] が WPC 処理®前の燃費最適条件であると分かった。この条件の場合、1384.033 [km/L] の燃費を得ることが予測される。また、WPC 処理®後については、燃費は回転数の下限値である 4400 [rpm] で最大に達した。吸気管長については WPC 処理®前の結果と同様であった。今回実験を行った範囲では、吸気管長 0 [mm]、燃料噴射量 3 [msec]、エンジン回転数 4400 [rpm] が WPC 処理®後の燃費最適条件であると分かった。この条件の場合、1462.424 [km/L] の燃費を得ることが予測される。パフォーマンスマップより、燃料噴射量の設定値の下限が燃費の最大値となっていることが分かる。このことから、さらに噴射量を小さくすることで燃費を向上できる可能性が示唆される。また、WPC 処理®後の予測燃費は処理前と比べ、約 5.7% 向上しており、WPC 処理®の大きな効果が確認できた。

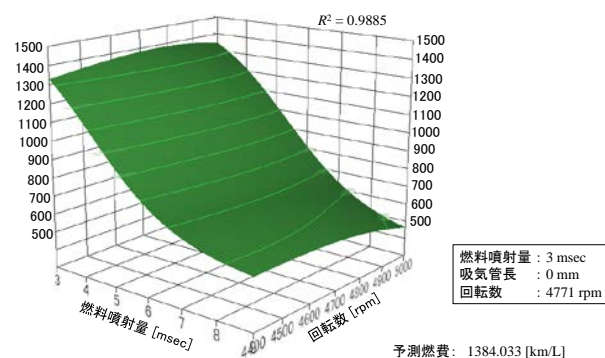


図 5 パフォーマンスマップ (WPC 処理®前)

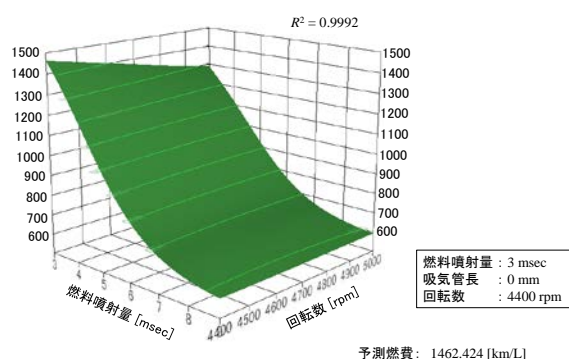


図 6 パフォーマンスマップ (WPC 処理®後)

実験結果を検証するため、栃木県芳賀郡茂木町にあるツインリンクもてぎ スーパースピードウェイにて開催された第 39 回 本田エコマイレージチャレンジ 全国大会に出場した。天候に恵まれ、完走することができた。表 4 に本大会結果及び、前年度 (2018 年度) 大会結果 <sup>9)</sup> を示す。練習走行はトラブルもなく順調に周回を重ね、完走することができた。

決勝走行では練習走行の結果を踏まえ、減速比と走行時間の調整を行い、燃費記録を伸ばすことに成功した。

規定の走行時間は 39 分 20.11 秒であるが、練習走行では約 4 分も早くゴールしている。つまり、エンジンを ON にする回数を減らし、惰性走行の時間を長くすることで、さらに燃費記録を伸ばすことができるため、決勝では規定時間直前にゴールできるように、惰性走行割合を増やし、減速比を変更した。このことにより大幅に燃費記録を伸ばすことができた。また、前年度大会からは燃費が約 2 倍（同じドライバー）と大幅な改善を果たしており、本研究で行ったエンジンの改良、および、システムの最適化に大きな効果があったことを確認できた。しかしながら、空気抵抗について未検討であるカウルを装着し、約 60 kg のドライバーが乗車した状態での実走行においては、燃費は、予測された値（1462.424 [km/L]、図 6）の半分程度に留まった（表 4）。今後の技術的課題は、車両重量の低減とカウル形状の検討（空気抵抗の低減）が最優先である。また、ドライバーの選任、走行時間を意識した走行方法、そして、それを支える走行支援方法とスタッフの配置など、チームとしての熟練度の維持も重要な課題である。

表 4 全国大会の結果

	燃費 [km/L]	燃料消費量 [cc]	走行時間
2018年度 決勝 <sup>(18)</sup>	376.356	43.55	37分16.269秒
2019年度 練習	606.361	27.03	35分20.171秒
2019年度 決勝	748.181	21.91	38分47.353秒

## 謝 辞

本研究の一部は、平成 30 年度、令和元年度校長裁量経費（ものづくり活動経費「低燃費競争車両の開発（内燃機関部）」・プロジェクト経費「エコラン支援プロジェクト」）により実施した。

## 参 考 文 献

- 1) 山口大造 他：競技用低燃費車両の開発 -エンジンシステム-, 津山工業高等専門学校紀要, 第 60 号, 19-24 (2018) .
- 2) 山口大造 他：競技用低燃費車両の開発 -車両構造-, 津山工業高等専門学校紀要, 第 60 号, 25-30 (2018) .
- 3) 酒井秀男：走りやささえる タイヤの秘密, 裳花堂, 98 (2000).
- 4) 株式会社不二 WPC：WPC の技術,  
<https://www.fujiwpc.co.jp/industry-service/doc/wpc.pdf> （参照 2020-09-25） .
- 5) エヌイー有限会社 WPC 事業部：WPC とは,  
<https://www.ne-jp.com/wpc/page/1towa/index.html> （参照 2020-09-25） .
- 6) Box GER, Behnken DW：Some new three level designs for the study of quantitative variables. Technometrics, 2 (1960) 455-475.
- 7) 桑原諒也 他：競技用低燃費車両の開発, 2018 年度津山工業高等専門学校卒業論文集, (2019).
- 8) D. Yamaguchi et al.: Hydrolysis of Cellulose by a Solid Acid Catalyst under Optimal Reaction Conditions, J. Phys. Chem. C, 113 (8) (2009), 3181-3188.
- 9) 本田宗一郎杯 Honda エコマイレージチャレンジ 2019 第 39 回 全国大会 リザルト：  
[https://www.honda.co.jp/emc/history/national/result2018/pdf/180929Result\\_Gr3.pdf](https://www.honda.co.jp/emc/history/national/result2018/pdf/180929Result_Gr3.pdf) （参照 2020-09-25） .