

平成23年度戦略的基盤技術高度化支援事業（平成23年度補正予算事業）

「低燃費、低排気ガスを実現する次世代D I（直噴）エンジンの研究開発」

研究開発成果等報告書

平成24年12月

委託者 中国経済産業局

委託先 公益財団法人岡山県産業振興財団

目 次

第1章 研究開発の概要

- 1－1．研究開発の背景・研究目的及び目標
- 1－2．研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）
- 1－3．成果概要
- 1－4．当該プロジェクト連絡窓口

第2章 本論

- 2－1．エンジン本体の研究開発
 - 2－1－1．特殊アルミニウム合金による超軽量ピストンの開発
 - 2－1－2．高強靱鋼による超軽量コンロッド等の開発
 - 2－1－3．シリンダーヘッド関連の研究開発
 - 2－1－4．シリンダーブロック関連の研究開発
 - 2－1－5．カムシャフト関連の研究開発
- 2－2．関連部品の研究開発
 - 2－2－1．電装品の研究開発
 - 2－2－2．エキゾーストとマフラーシステムの研究開発
- 2－3．開発したエンジンのベンチマークテストと実走行テスト
 - 2－3－1．ベンチマークテストの実施
 - 2－3－2．実走行テストの実施

最終章 全体総括

第1章 研究開発の概要

従来のインマニ噴霧式エンジンと比較して燃焼室の燃焼コントロールが容易な DI (直噴) エンジンに特殊アルミニウム合金や高強靱鋼などの新素材を採用し、軽量化・簡素化することにより、低燃費・低排ガスを実現する次世代 DI (直噴) エンジンの開発を目指す。

(株)戸田レーシングのオリジナルエンジンをベースに、高度化された切削加工技術を用い次世代 DI (直噴) エンジンを試作し、燃費を従来より 8~10%向上させ、排出ガス(CO₂ 及び NOx)を 8~10%削減する。

低燃費、低排ガスを実現する DI (直噴) エンジン確立のために必要な、以下のようなエンジン部品のアップグレード及びエンジンを正確に制御するための各種センサー類、ECU(エンジン制御装置)を目標として開発を実施する。

I. エンジン部品について

- ①ピストンの軽量化 (特殊アルミニウム合金採用により 20%~30%の軽量化)
- ②コンロッドの軽量化 (高強靱鋼採用により 30%以上の軽量化)
- ③シリンダーヘッドのインジェクター位置、燃焼室の最適化
- ④シリンダーブロックの薄肉化・軽量化
(特殊アルミニウム合金採用により 30%の軽量化)
- ⑤カムシャフトのプロフィール、リフト量の最適化

II. センサー・制御装置について

- ①インジェクターの噴霧パターン・噴霧量の最適化
- ②エキゾーストマニホールド、マフラーシステムの最適化

また、上記内容について開発し、ベンチマークテストを行った DI (直噴) エンジンをレーシングマシンに搭載し、実走行テストを行い、得られる数値的データとドライバーのコメント等よりトータルバランスで最適な DI (直噴) エンジンを決定する。

研究開発の流れ 【イメージ図】

ステップⅠ：エンジン部品の開発

1-1. 特殊アルミニウム合金による超軽量ピストンの開発



1-2. 高強度鋼による超軽量コンロッド等の開発



1-3. 4 シリンダーブロック・ヘッド関連の開発



2-1. 電装品の研究開発



2-2. エキゾーストとマフラーシステムの研究開発



ステップⅡ：エンジンの組み立て

ステップⅠで開発した様々なエンジン部品を組み付け、DI(直噴)エンジンを完成させる。



ステップⅢ：ベンチマークテスト

完成した DI(直噴)エンジンを社内のベンチマークテスト施設で実際に稼働させ、燃費、排ガス、馬力測定、トルク測定等のエンジン性能評価



ステップⅣ：レーシングマシンに実装

ベンチマークテストを経て、最適化された DI(直噴)エンジンをレーシングマシンに実装する。



ステップⅤ：実走行テスト

岡山国際サーキットを使用し、一般公道では出来ない実走行し、性能テスト、耐久テスト、操作性テスト等を行う。



1-1. 研究開発の背景・研究目的及び目標

温暖化や大気汚染に対応する地球環境の負荷低減問題、石油資源枯渇や原油高騰に対応した省エネルギー問題、3Rによるリサイクル問題は喫緊に解決すべき課題であり、方策の一つとして自動車における低燃費化と低排ガス化への取り組みが挙げられる。

環境対応が進んでいるヨーロッパ諸国では、排ガス規制の一つであるユーロ5が施行され、次のユーロ6が近年中に義務付けられる。日本においても新長期規制が迫っており、低燃費と低排ガスを両立するDI(直噴)エンジンが再び注目され、採用車種の拡大や搭載を検討している自動車メーカーが急増している。

本研究開発では、(株)戸田レーシングが培ってきたエンジン製造における切削加工技術の高度化により、新しい素材である特殊アルミニウム合金や高強靱鋼を用い、軽量化・複雑形状化し、また燃焼コントロールを行い、燃焼条件を最適化することで低燃費、低排出ガスを実現可能なレーシング用DI(直噴)エンジンの開発・試作を行う。

開発したエンジンについては、ベンチマークテストを経て、実際にレーシングマシンに搭載し実走行によるテストまでを実施し、実走行により得られた各種データをもとに最適なDI(直噴)エンジンを製造し、これらの研究過程で得られる成果を市販車へのDI(直噴)エンジンの搭載に繋げる計画である。

これらの内容について平成24年度研究開発事業としては以下の達成目標を設定し、研究開発を行なった。

I. エンジン部品について

- ① 特殊アルミニウム合金による超軽量ピストンの開発
 - 1) ピストンリング溝のうねりを前年実績4ミクロンから3ミクロンまで抑制
 - 2) 特殊アルミニウム合金で開発したピストンのトップ形状の確立
- ② 高強靱鋼による超軽量コンロッド等の開発
 - 1) 高強靱鋼で開発したコンロッドの最終形状の確立
- ③ シリンダーヘッド関連の研究開発
 - 1) シリンダーヘッドのIN側吸気ポートの形状確立
- ④ シリンダーブロック関連の開発
 - 1) シリンダーブロックヘギアドライブ装着、耐久テストの実施
- ⑤ カムシャフト関連の研究開発
 - 1) 4次作以降として開発したカムシャフトをエンジンへ装着、順次テストの実施
 - 2) DI(直噴)エンジンに適したカムシャフト形状の確立

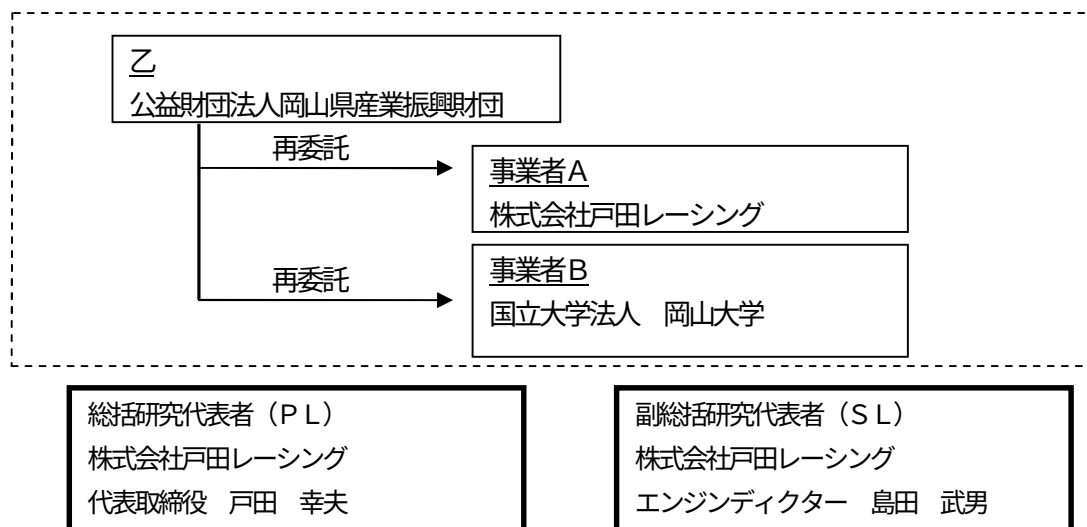
II. 関連部品の研究開発

- ① 電装品の研究開発
 - 1) ベンチマークテスト及び実走行テストによるインジェクター仕様の最終決定
- ② エキゾーストとマフラーシステムの研究開発
 - 1) 低燃費、低排出ガスに有効なマフラーシステムの開発、最終形状の確立
 - 2) 目標馬力、目標トルクに有効なマフラーシステムの開発、最終形状の確立

1-2. 研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）

（1）研究組織及び管理体制

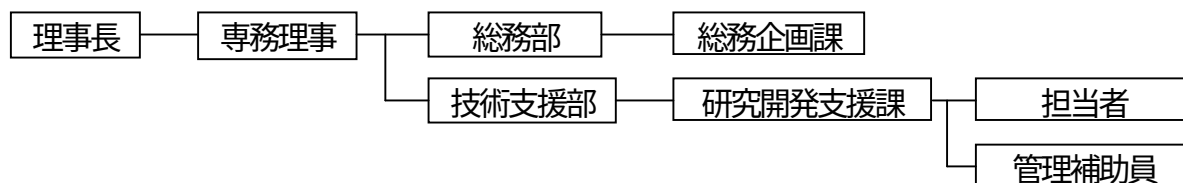
1) 研究組織（全体）



2) 管理体制

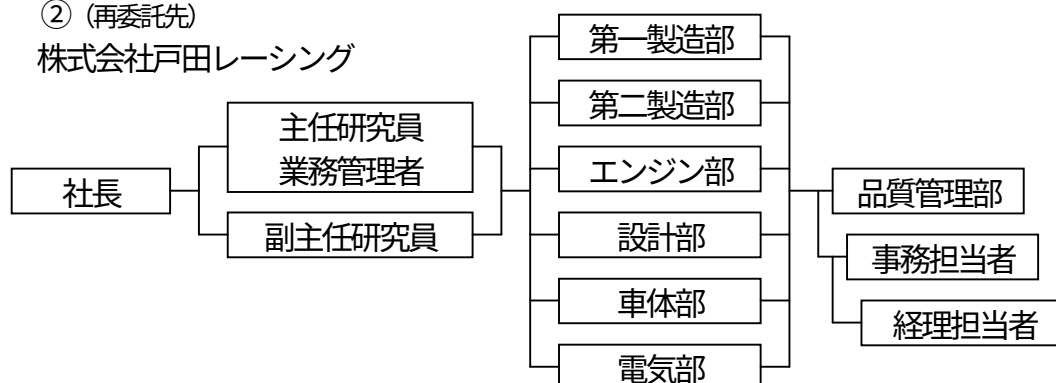
①事業管理機関

公益財団法人岡山県産業振興財団

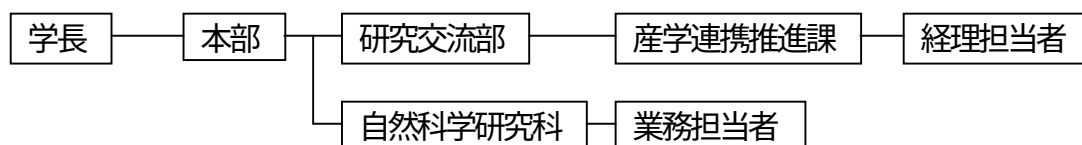


②（再委託先）

株式会社戸田レーシング



国立大学法人岡山大学



(2) 管理員及び研究員

管理員：【事業管理機関】公益財団法人岡山県産業振興財団

氏 名	所属・役職
深井 康光	技術支援部長
横田 尚之	技術支援部 研究開発支援課長
赤木 佑衣	技術支援部 研究開発支援課 主事
田辺 健太郎	技術支援部 研究開発支援課 主事
喜井 敏恵	技術支援部 研究開発支援課 主事

研究員：【再委託先】株式会社戸田レーシング

氏 名	所属・役職
戸田 幸夫	代表取締役
島田 武男	(エンジン部)エンジンディレクター
小林 修	(第一製造部)ゼネラルマネージャー
谷本 晃	(第一製造部)リーダー
黒住 宏美	(第一製造部)サブリーダー
国塩 浩詞	(第二製造部)特殊加工チーフエンジニア
池田 始	(設計部)テクニカルアドバイザー
David Jackson	(設計部)設計担当
小西 慶治	(設計部)チーフデザイナー
戸田 憲吾	(設計部)設計担当

研究員：【再委託先】国立大学法人 岡山大学

氏 名	所属・役職
富田 栄二	国立大学法人岡山大学 大学院自然科学研究科 教授
河原 伸幸	国立大学法人岡山大学 大学院自然科学研究科 准教授

1-3. 成果概要

【エンジン本体の研究開発】

1. 特殊アルミニウム合金による超軽量ピストンの開発

【目 標】

1) ピストンリング溝のうねりを前年実績4ミクロンから3ミクロンまで抑制

(実施内容)

- ① ピストンリング溝そのものへエアロラップ処理を実施
- ② ピストンリング溝切削に使用する専用刃物へエアロラップ処理を実施

(評価方法)

- 目視/顕微鏡による表面の状態変化の検証
- ピストンリング溝切削加工後のうねり数値にて最終判断
(今年度から導入新設備であるエアロラップマシンを使用し、①及び②の処理を実施)

(実施結果)

- ① ピストントップの面粗度・・・処理前=Ra0.81 処理後=Ra0.81
- ② ピストンリング溝専用刃物面粗度・・・処理前=Ra0.035 μm 処理後=Ra0.042 μm

【目 標】

2) 特殊アルミニウム合金で開発したピストンのトップ形状の確立

(実施内容)

- PC 上での応力解析を実施、要求値を満たすピストン仕様
- 掲げた目標数値達成を目指す処理及び加工
- エンジンに組み付け、ベンチマークテストの実施

(評価方法)

- ベンチマークテストにおける性能数値にて最終判断

(実施結果)

開発ピストンの最終仕様

- ・ 重量=240 g (従来品=368 g / 約-35%軽量化)
- ・ 圧縮比=15 : 1 (MAX 値=18 : 1)
- ・ 各ピストンリング溝幅=1ST=1.0 mm / 2ND=1.2 mm / OIL=2.0 mm
- ・ ピストンピン仕様=外径=19 mm 長さ=50 mm
- ・ ピストンリング溝うねり数値=4 μm (従来品=15 μm / 従来品より約 74%向上)
- ・ ピストンリング溝表面面粗度= Rz0.8 (従来品=Rz3.2 / 従来品より約 300%向上)

2. 高強靱鋼による超軽量コンロッド等の開発

【目 標】

1) 高強靱鋼で開発したコンロッドの最終形状の確立

(実施内容)

- 掲げた目標数値達成を目指すエアロラップ処理及び切削加工
- エンジンに組み付け、ベンチマークテストの実施

(評価方法)

- ベンチマークテストにおける性能数値にて最終判断

(実施結果)

開発コンロッドの最終仕様

- ・ 重量=420 g (従来品=608 g / 約-31%軽量化)
- ・ Oil 穴加工の有無=安定的達成 (改造ガンドリルマシン)
- ・ コンロッド表面面粗度 小端部=Rz0.306 (従来品=Rz0.457 / 約 34%向上)
- ・ コンロッド表面面粗度 側面部=Rz4.543 (従来品=Rz5.902 / 約 28%向上)
- ・ コンロッド表面面粗度 大端部=Rz0.373 (従来品=Rz0.505 / 約 26%向上)

3. シリンダーヘッド関連の研究開発

【目 標】

1) シリンダーヘッドのIN側吸気ポートの形状確立

(実施内容)

- フローベンチテストを用いた IN 側吸気ポートの形状加工
- フローベンチテストを用いた IN 側吸気ポートの数値的検証

(評価方法)

- フローベンチテストにおける性能数値確認
- ベンチマークテストにおける性能数値にて最終判断

(実施結果)

- ・ 数種類のポート形状を開発し、フローベンチテスト及びベンチマークテストにて目標性能を満たした IN 側吸気ポートの確立達成

4. シリンダーブロック関連の研究開発

【目 標】

1) シリンダーブロックヘギアドライブ装着、耐久テストの実施

(実施内容)

- ギアトレイン仕様に必要な各ギアの開発
- 開発した各ギアをエンジンへ組付け
- ギアトレイン仕様エンジンにてベンチマークテストの実施

(評価方法)

- ベンチマークテスト上での稼働確認
- ベンチマークテスト上での耐久確認

(実施結果)

- ・ 性能面はもちろん、様々なトラブル回避に寄与出来ると考えギアドライブ化の研究開発を推し進め、初期目標であった、各ギア装着でのベンチマークテスト及び実走行テストの実施の達成

5. カムシャフト関連の研究開発

【目 標】

1) 4次作以降として開発したカムシャフトをエンジンへ装着、順次テストの実施

2) DI (直噴) エンジンに適したカムシャフト形状の確立

(実施内容)

- これまで開発してきたカムシャフトを含め、最終仕様としてのカムシャフト開発し、ベンチマークテストを実施及び検証する

(評価方法)

- ベンチマークテストにおける性能数値にて最終判断

(実施結果)

- ・ カムシャフト仕様の決定

【関連部品の研究開発】

1. 電装品の研究開発

【目 標】

- 1) ベンチマークテスト及び実走行テストによるインジェクター仕様の最終決定

(実施内容)

- これまで開発してきた特注インジェクターの再検証

(評価方法)

- ベンチマークテストにおける性能数値にて最終判断

(実施結果)

- ・ 最終仕様エンジンに近い仕様を比較検証の基本として、同一条件下により、3種類の特注インジェクターでのベンチマークテストの数値データを比較検証した。
本研究開発用として特注開発した3種類のインジェクターの内、最終的にはNR03 インジェクターの性能数値が最も良好と言える結果

2. エキゾーストとマフラーシステムの研究開発

【目 標】

- 1) 低燃費、低排出ガスに有効なマフラーシステムの開発、最終形状の確立
- 2) 目標馬力、目標トルクに有効なマフラーシステムの開発、最終形状の確立

(実施内容)

- ベンチマークテスト上でのテスト数値を基に、低燃費、低排出ガス及び目標馬力、目標トルクに有効なマフラーシステム仕様を模索する。

(評価方法)

- ベンチマークテストにおける性能数値にて最終判断

(実施結果)

最終目標数値

- ・ 燃料使用量=194.24g/psh (従来品比較=14%向上)
- ・ Co=4.128% (従来品比較=約 19%向上)
- ・ HC=440.5ppm (従来品比較=約 11%向上)
- ・ Nox=2010ppm (従来品比較=約 12.8%向上)

【開発したエンジンのベンチマークテストと実走行テスト】

1. ベンチマークテストの実施【担当：(株)戸田レーシング、岡山大学】

【目 標】

- 1) ベンチマークテスト上で、ポート式エンジン対比燃費の10%向上達成
- 2) ベンチマークテスト上で、ポート式エンジン対比排出ガスの10%抑制達成

(実施内容)

- ベンチマークテスト上でのテスト数値を基に、低燃費、低排出ガス及び目標馬力、目標トルクを満たしたエンジン仕様にて実走行テストを実施する。

(評価方法)

- ベンチマークテストにおける性能数値にて最終判断

(実施結果)

最終目標数値

- ・ 燃料使用料=194.24g/psh (従来品比較=14%向上)
- ・ Co=4.128% (従来品比較=約 19%向上)
- ・ HC=440.5ppm (従来品比較=約 11%向上)
- ・ Nox=2010ppm (従来品比較=約 12.8%向上)
- ・ 実走行テスト実燃費=4.6 km/L (従来 F3 エンジン比較=約 21%向上)

2. 実走行テストの実施【担当：(株)戸田レーシング、岡山大学】

【目 標】

- 1) 実走行用エンジンでの耐久実走行テストの実施
- 2) 実走行テスト結果、ドライバーの意見等の各項目へのフィードバック

(実施内容)

- 岡山国際サーキット場での実走行テストの実施
- 鈴鹿サーキット場での実走行耐久テストの実施

(評価方法)

- 各サーキット場での実走行後にエンジンを分解し、各部品の検証をもって判断

(実施結果)

- ・ 本研究開発事業における実走行テストは地元岡山にある、岡山国際サーキット場を舞台に行ってきた。本年度はギアトレイン仕様での実走行テストもおこなう経緯から、耐久テストを踏まえ、鈴鹿サーキット場での実走行テストを実施し、両サーキット場での実走行テストでも大きなトラブルなどは発生せず、無事にテストメニューを消化達成

1-4. 当該プロジェクト連絡窓口

管理法人：公益財団法人岡山県産業振興財団

〒701-1221 岡山市北区芳賀 5301 テクノサポート岡山3F

連絡担当者名・所属役職：技術支援部 研究開発支援課 課長 横田 尚之

TEL: 086-286-9651 FAX: 086-286-9676

E-mail: nyokota@optic.or.jp

第2章 本論

2-1. エンジン本体の研究開発

2-1-1. 特殊アルミニウム合金による超軽量ピストンの開発

【目 標】

- 1) ピストンリング溝のうねりを前年実績4ミクロンから3ミクロンまで抑制
- 2) 特殊アルミニウム合金で開発したピストンのトップ形状の確立

開発初年度から重要事項と掲げているピストンリング溝のうねり低減について、これまで様々な手法を考案し研究を進めて来た。従来品と位置づけているピストンのピストンリング溝のうねり数値は約15ミクロンであり、本研究開発事業で掲げているピストンリング溝うねり低減目標数値は3ミクロン以下としている。これまでの研究開発成果として、ピストンリング溝のうねり数値は4ミクロンまで低減させる事を達成している。

ピストンリング溝のうねり数値3ミクロン以下とは単純な切削加工だけでは達成出来る数値ではないと研究開発を通じ感じている。対象となるピストンの形状やピストンリング溝の幅寸法にも左右されるが、本研究開発事業での開発エンジンはあくまでレース仕様である事を前提にしている。したがって軽量化及び薄肉化を達成した上でのピストンリング溝うねり数値の目標達成は容易ではない。また、本研究開発事業初年度から、これまでの研究開発内容を踏まえても同様の事が言える。

昨年度の研究開発を通じ、本研究開発のアドバイザーから、現状のピストンリング達成数値4ミクロンでも十分に成果と言えると助言、アドバイス頂いたが、高いレベルでの低燃費及び低排出ガスの大目標を掲げている事、また、これら目標数値にピストンリング溝のうねり低減が寄与出来る事を踏まえ、本年度も継続的に研究開発課題とする事を決めた。研究開発期間にも限りがある事を踏まえ、他の研究開発内容、研究開発スケジュールに支障が出ない事を前提に研究開発を進めた。

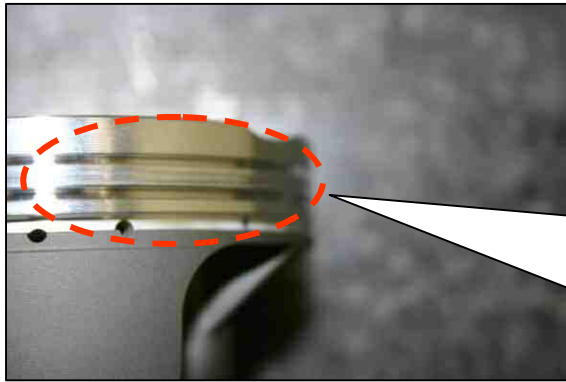
ピストンリング溝低減について、本年度に新設備として導入したエアロラップマシンを使用し、本年度は新たに2項目を設け研究開発を進めた。まず、①ピストンリング溝そのものへエアロラップ処理を実施し、次に②ピストンリング溝切削に使用する専用刃物へエアロラップ処理を実施した。これらエアロラップ処理前と処理後の部品状態を目視/顕微鏡による表面の状態変化の検証を行い、ピストンリング溝のうねり数値にどの様に変化を及ぼすのかを確認する。また、ピストンリング溝専用切削刃物へエアロラップ処理を行い、処理刃物と未処理刃物でのピストンリング溝切削加工後のピストンリング溝うねり数値にて最終判断する事とした。

【エアロラップマシンの特性】

- ・ ウェットブラスト研磨処理
- ・ マルチコーン使用/表面高速滑走工法
- ・ 細部部品箇所にも研磨加工を実現
- ・ 表面処理前の処理として有効
- ・ リサイクル可能なメディア



エアロラップ処理時



ピストンリング溝への更なるうねり
低減に有効と思われる手法を実施

○目視/顕微鏡による表面の状態変化
の検証

○ピストンリング溝切削加工後の
うねり数値にて最終判断

ピストンへ使用している材料はアルミニウム材のため、母材硬度がスチール系材料と比較しても低いと言える。そのためアルミニウム母材への攻撃性が強く、鍛造とは言えピストン表面面粗度が若干荒れる状態になり、梨地状になる。また、本研究開発事業で開発しているピストンのピストンリング溝は1mm程度の溝である事から、直接エアロラップマシンのメディアが予想以上に細部まで届かなかった。

本研究開発事業において、顕微鏡での拡大画像撮影は岡山大学の協力の下行っている。研究開発ピストン全てに実施しているデフリックコートとは、ピストンをエンジンに組付けた際に、初期なじみを向上させる事を目的として行っている処理である。初期なじみの状態として、ピストンスカート部とシリンダーブロック内壁が摺動する際に、片当たりせず、面と面で接触している事が望ましい。これらはピストンプロフィールやピストンの加工精度が影響する内容である。また、エンジン稼働時はもちろん、停止時にも常にシリンダーブロック内壁と干渉し、エンジン稼働時には非常に高いスピードで摺動し続ける部位となる事から、ピストンスカートの表面面粗度向上は低フリクションに寄与する事と言って良い。

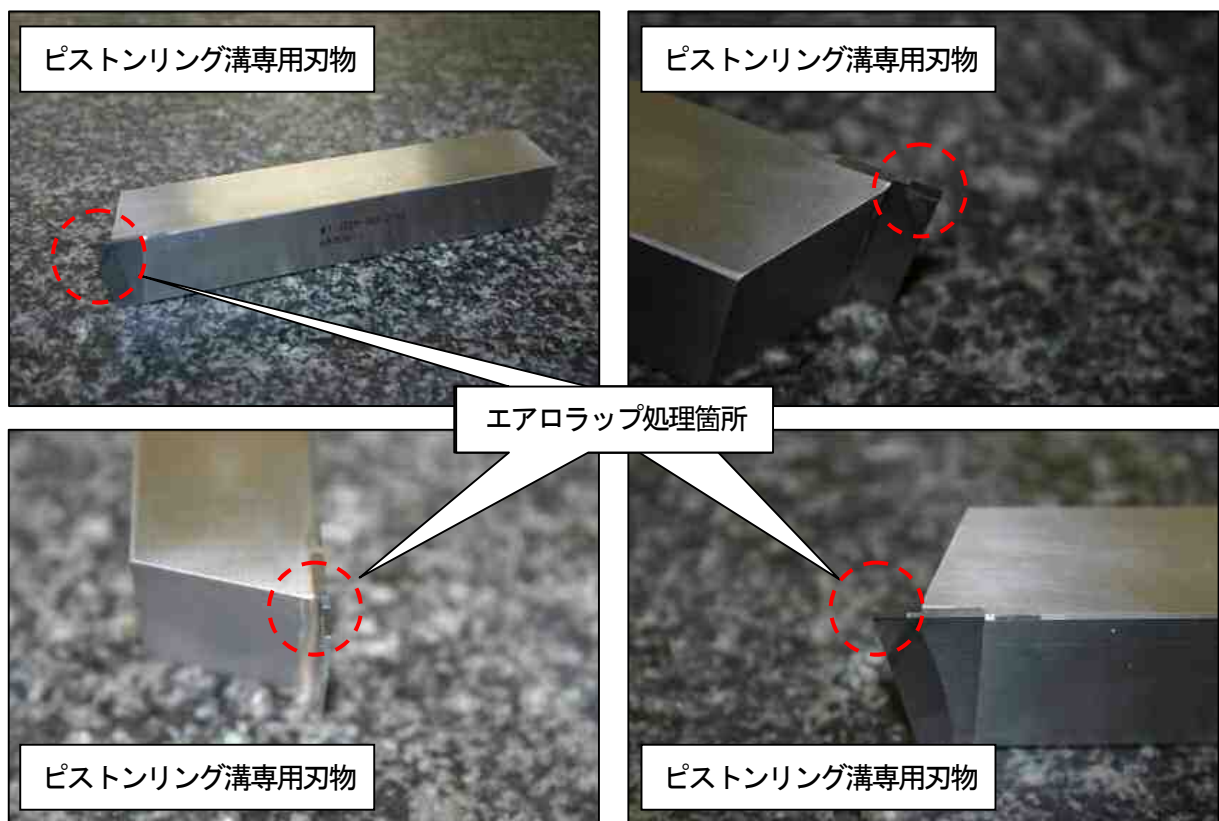
研究開発初年度、昨年度の研究開発では行っていなかったが、本年度から導入したエアロラップマシンを使用し、デフリックコート処理している部分へもエアロラップ処理を実施し、これらを顕微鏡にて確認すると、処理前と処理後では単純に黒色部の画像の明るさが違う。下記に示す表面面粗度の数値を見ても分かる様に、明るさの違いは表面の面粗度の違いと判断して良い。これらの判断は、岡山大学の助言によるところで、明るい方が表面面粗度が向上していると考えて問題ないとの見解を示している。したがって、処理前と処理後では処理後の方が画像も明るく、測定数値的にも表面面粗度が向上していると判断出来る。目視と測定数値が比例している結果と言える。

○ ピストントップ側面部 エアロラップ処理前=Ra3.758

○ ピストントップ側面部 エアロラップ処理後=Ra3.578

エアロラップ処理前と処理後では目視でも分かる様にピストン各部の表面に違いは出ている。ピストントップ側面部は条痕と呼ばれる機械加工のツールマークが残る部分となる。これらツールマーク、機械加工痕の条痕部分はエンジンのならし稼働により凹凸部がならされ、なめらかな面となる。これら一連のならし作業を行った状態と同様の効果が期待出来る事が今回の研究開発で判明した。

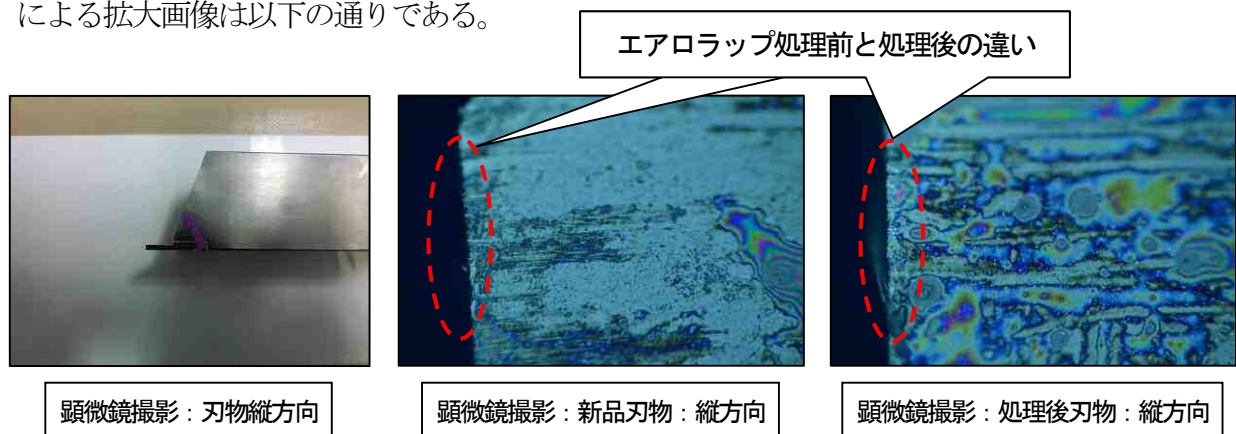




本研究開発事業で開発したピストンリング溝専用刃物の刃先部分へエアロラップ処理を行った。従来以上の切れ味を期待し、ピストンリング溝へおこなう切削加工時の切削状態の向上を目的としたエアロラップ処理となる。

開発したピストンリング溝専用刃物は切れ味の状態として決して悪くはない。むしろ非常に切れ味の良い状態である事はこれまでのピストン開発におけるピストンリング溝のうねり数値をみてもわかる。現状ではピストンリング溝のうねり数値は4ミクロンを達成しており、これら数値は本研究開発事業のアドバイザーに昨年度事業で助言された様に高いレベルであると考えている。しかし、本研究開発の目標値として掲げている3ミクロン以下を達成するため、更なるピストンリング溝専用刃物の切れ味向上を意図とし処理を実施した。

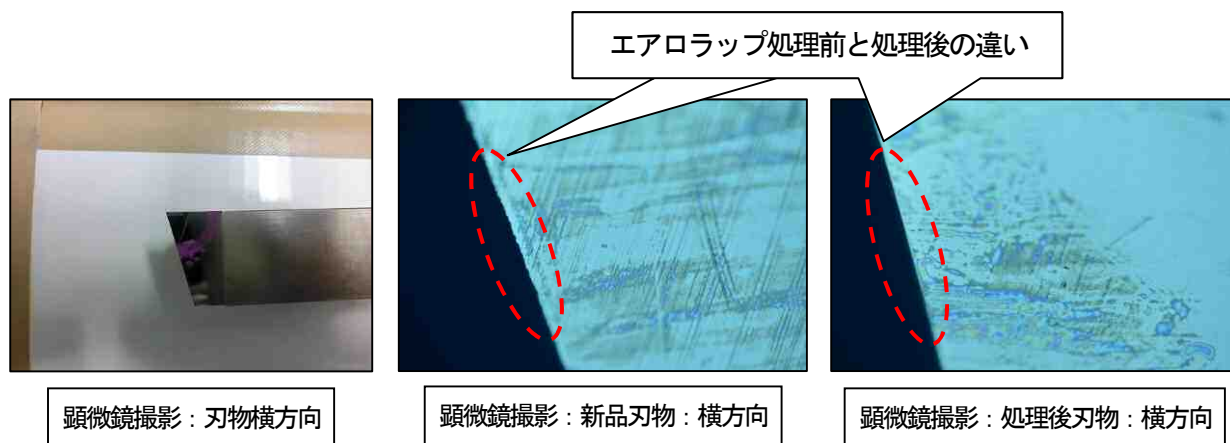
エアロラップ処理後の状態が期待している通りの結果であれば、ピストンリング溝専用刃物の切削状態はこれまで以上に良好となり、ピストンリング溝のうねり数値の低減に繋がると考えている。これらピストンリング溝専用刃物へのエアロラップ処理前と処理後の刃物画像及び顕微鏡による拡大画像は以下の通りである。



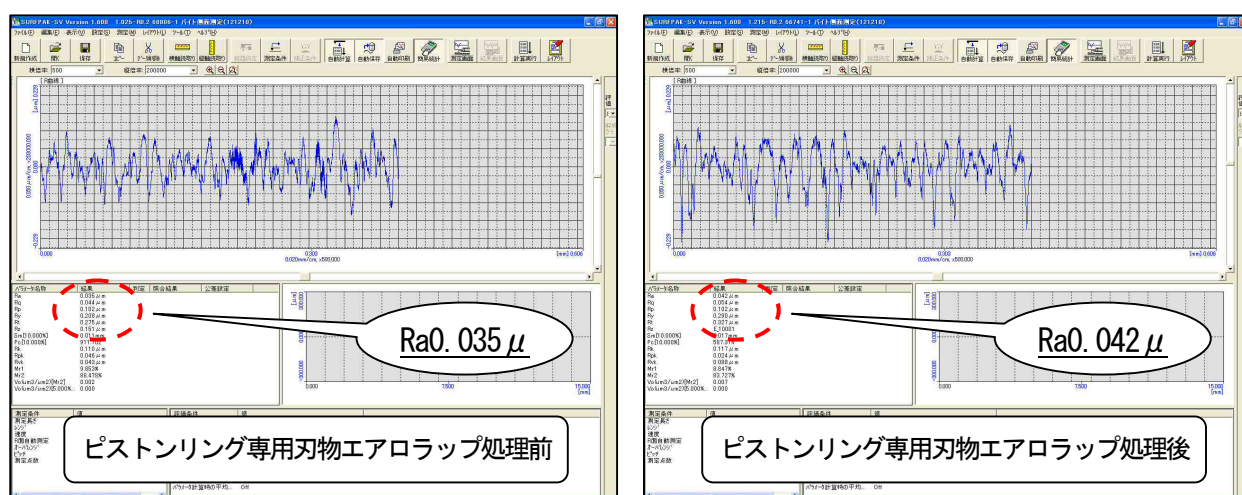
顕微鏡撮影：刃物縦方向

顕微鏡撮影：新品刃物：縦方向

顕微鏡撮影：処理後刃物：縦方向



ピストンリング溝専用刃物へのエアロラップ処理前、処理後の拡大画像を見ると、処理前と比較し、処理後の方が刃先のビビリ状の線が改善されている様に見て取れる。あくまで目視や顕微鏡の拡大画像によるものだが、粗さ測定器にて数値的な観点から検証すると次の様な結果となった。

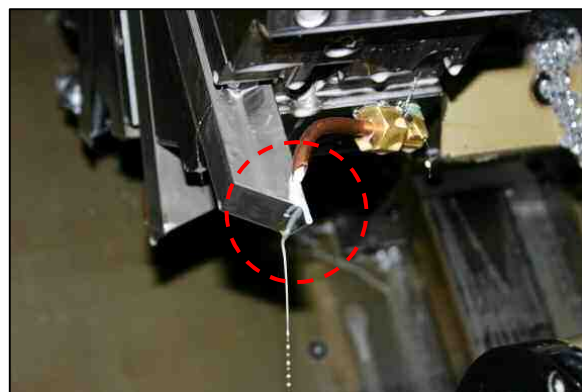


エアロラップ処理したピストンリング溝専用刃物の刃先を粗さ測定器にて数値的検証を行ったところ、エアロラップ処理前がRa0.035 ミクロン、エアロラップ処理後がRa0.042 ミクロンとなり、当初の予想とは違い、ピストンリング溝専用刃物の刃先表面面粗度は低下している。表面面粗度の数値として、同等、もしくは向上していると考えていただけに、ピストンリング溝専用刃物の刃先の表面面粗度低下は想定外と言える。結果的に表面面粗度が低下している状態だが、実際の切削加工の加工後状態をもって結論付ける事とした。

エアロラップ処理によって、ピストンリング溝専用刃物の刃先は従来品より荒れている状態と言えるが、これまでピストンリング溝を加工してきた条件はそのままに、実際の加工を行い、ピストンリング溝そのもののピストンリング溝うねり数値を測定した。

- エアロラップ処理前の刃物使用 = 4 μ m
- エアロラップ処理後の刃物使用 = 6~7 μ m

実際のピストンリング溝加工を実施後に測定した結果を見ると、ピストンリング溝専用刃物の刃先の荒れ様と同様に顕著にうねり数値が低下している。加工条件はこれまで良好としてきた条件をそのままに変更していない事から、単純にピストンリング溝専用刃物の切れ味低下、もしくは切れ味低下による加工ビビリが発生していると考えられる。



エアラップ処理したピストンリング溝専用刃物の刃先状態について、粗さ測定器による数値的データを踏まえると、ピストンリング溝専用刃物の切れる刃物をわざわざ切れ味を落とす状態に変化させた結果と言える。ピストンリング溝専用刃物の刃先表面面粗度数値はもちろん、ピストンリング溝加工後に測定した、ピストンリング溝のうねり数値を見てもピストンリング溝専用刃物へのエアラップ処理は有効な手段とは言えない。

新品のピストンリング溝専用刃物へエアラップ処理を実施し、処理後に実際のピストンリング切削加工を行い、うねりに対する影響を検証した結果、ピストンリング溝のうねり低減に何らかの寄与があると考え進めた処理だったが、ピストンリング溝のうねり数値は悪化する結果となった。エアラップ処理後のピストンリング溝専用刃物の表面面粗度数値を考慮しても分かる様に、刃物の切れ味が低下した結果と言える。結果的に、新品時の研ぎ澄まされた刃先状態を壊した結果となった。

本年度の研究開発事業では2本のピストンリング溝専用刃物へエアラップ処理を実施し、数値的な検証を行ったが、現状ではピストンリング溝専用刃物の切れ味向上に寄与する事は出来なかった。しかし、エアラップ処理の時間や処理箇所のエアラップメディアの研磨方向など、処理方法自体を検討により最終的な結果が変わる可能性もある。

本研究開発で開発してきたピストンは数種類に及ぶ。エンジン性能に直接影響する部品であり、燃焼状態に深く影響する事から、低燃費及び低排出ガスにも影響する。最終年度である本年度はピストン形状の最終仕様をこれまでの研究開発データを踏まえ、最終決定する。



上記図のピストンはこれまで開発してきたピストンの内、最終仕様の候補の一例となる。ピストンプロフィールの違いやピストントップ形状の違いによる圧縮比の違い、ピストン往復運動時のバルブの逃げ幅を確保するリセス部の違い、様々な違いのあるピストンをベンチマークテストでの数値的検証にて最終仕様を決定した。

また、最終仕様の形状及びピストン仕様は、本研究開発エンジンのターゲットカテゴリーの一つである、フォーミュラ3のレギュレーションに副う各項目が前提としている。様々な場合を想定し、継続的にピストンを開発した経緯も事業化を見据え、限られた範囲、規制の中でも対応出来る様に開発を進めた。

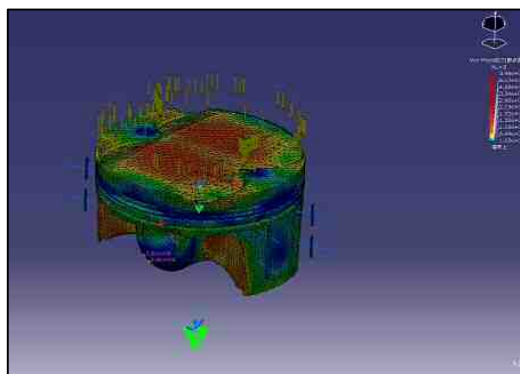


ピストンの開発において、ベンチマークテスト及び実走行テスト後に必ず行ってきたエンジン分解検証での各部品の状態確認は非常に重要な意味を持つ。部品自体が問題なく機能している事の確認はもちろん、各部品の耐久性の確認、部品同士の接触部や摺動部の状態確認など、ベンチマークテスト、実走行テスト後でなければ分からない事も多くある。これら地道な作業を繰り返し行い、馬力及びトルクの性能面、低燃費及び低排出ガスに有効なピストン形状を模索し開発を進めた。



各ピストン仕様を開発し、エンジンに組付け、ベンチマークテスト及び実走行テストを経て、エンジンを分解する。これらの過程において、これまで大きなトラブルは発生していない。ピストン材料へ採用した特殊アルミニウム合金が予定通りの性能を発揮していると言える。また、ピストンの細部にわたる各所の加工精度の向上がトラブル回避に大きく貢献していると考えている。非常に細かく、高いレベルでの加工技術が研究開発初年度より向上している事は、完成ピストンの数値的精度に表れている。

本研究開発エンジンの重要な部品と言えるピストンについて、各部の仕様、加工方法など様々な小変更も含め、多くの時間を開発に必要とし、3カ年の研究開発事業の重要項目と位置づけ継続的研究開発を進めて来た。ピストン形状はもちろん、圧縮比やピストンプロフィールなど、仕様違いごとにそれぞれのピストンに設計変更を掛ける場合、応力解析も随時行い、様々な視点から最終仕様のピストンを決定した。



上記右図は研究開発初年度から用いている応力解析はPC上の答えとなる傾向と実際の部品状態とでは多少の誤差も生じる。

ある程度の方向性やターゲットを決める事は十分可能で、開発スピードを向上させるに大きな役割を果たしている。軽量化の必須条件である薄肉化の切削範囲を決める際には非常に有効に活用出来た。本研究開発事業当初より、特殊アルミニウム合金を採用し、可能な限りの軽量化、薄肉化を推し進め、軽量化と高剛性、各部の精度向上の両立を図った。性能面はもちろん、低燃費、低排出ガスに有効なピストン形状を目標とし、フリクションの低減、圧縮比の向上、ピストンリング溝のうねり抑制など様々な視点から開発を進めた。下図のピストン画像は本研究開発事業において最終形状と決定したピストンとなる。掲げている各目標の数値的達成を前提に、性能面はもちろん、低燃費及び低排出ガスに有効なピストン形状を研究開発過程において模索し続けた着地地点となる。

開発ピストンの最終仕様

- ・重量 → 240 g (約35%軽量化) (従来品=368 g)
- ・圧縮比 → 15 : 1 (MAX値=18 : 1)
- ・各ピストンリング溝幅 → 1ST=1.0mm → 2ND=1.2mm → OIL=2.0mm
- ・ピストンピン → 外径=19mm → 長さ=50mm
- ・ピストンリング溝うねり数値 → 4 μ m (従来品=15 μ m) (従来品より約74%向上)
- ・ピストンリング溝表面面粗度 → R z 0.8 (従来品=R z 3.2) (従来品より約300%向上)

最終的に決定された仕様は全ての目標項目を達せしている訳ではない。また、将来的な事業化を踏まえ、2013年のF3レギュレーションの要望内容を満たす仕様が基本となっている。研究開発過程では圧縮比は18 : 1までテストしているが、あくまで規制の範疇を無視せず、15 : 1のレギュレーションに則り開発を進め、各目標項目の達成を目指した。最終的に掲げた目標や数値に悪影響が出るほど振り回されると、将来展望としての事業化の大きな足かせとなる可能性もあり、ターゲットカテゴリーである2013年のF3レギュレーションを着地地点と見据え、最終的なピストン形状を決定した。

2-1-2. 高強靱鋼による超軽量コンロッド等の開発

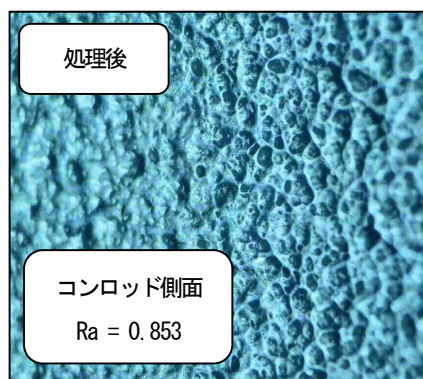
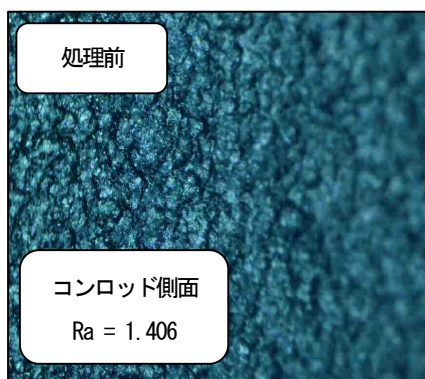
【目 標】

1) 高強靱鋼で開発したコンロッドの最終形状の確立

本研究開発事業では、ピストン同様に可能な限りの軽量化及び薄肉化を狙い、コンロッド使用材料に高強靱鋼採用している。本研究開発当初より、開発段階での軽量化や薄肉化に伴う大きなトラブルは発生しなかったが、耐久性の向上を更に確実な部品とするため、エアロラップ処理をコンロッド全体に実施し、破断/亀裂の元となる、コンロッド表面の凹凸の低減を意図とし、これら要因を出来るだけ低減させるためエアロラップ処理を実施した。エアロラップ処理後の状態は、目視でも見分けられる程違いが出ており、コンロッド全体はもちろん、各部の表面面粗度も向上している。数値上での判断でも、目視及び顕微鏡での状態をみても、破断/亀裂の要因となる凹凸は従来品よりも低減されていると言える。

エアロラップ処理は破断及び亀裂の回避のため、コンロッド全体に実施している。その中で、大端部と小端部にも同様に処理を行っている。大端部及び小端部共にコンロッド表面と同様

に目視でも面粗度向上が確認でき、表面には光沢が出ている。特に小端部はピストンピンと直接接触する部分であり、エンジン稼動時には常に摺動し、摩擦を発生する部位にもなるため、表面面粗度の向上は低フリクション化にも有効な働きをしていると判断している。



コンロッドに採用している高強靱鋼はスチール系の材料である事から、エアラップ処理の向き不向きを踏まえると、非常に相性は良いと言える。本研究開発で開発して来たコンロッドは高強靱鋼の無垢材からの総切削加工にて開発されているだけに、問題が発生するほどの表面面粗度が悪い訳ではない。しかし、レースエンジンでの使用を踏まえると、トラブル回避の可能性が高まるのであれば、信頼性や安定性も含め、向上させておく、または向上する事が可能な処理内容は積極的に進める事が重要と言える。信頼性の向上は将来的な事業化への道筋も立て易いと判断している。

レースエンジンと言う範囲の中で要求される部品要求値は非常に高い。軽量化のため薄肉化されたコンロッドには、可能な限り破断及び亀裂の要因となる事項は低減させたい意図がある。

トラブル回避、トラブル低減を前提に考えた場合、エアラップ処理の実施は非常に有効な結果と考えている。粗さ測定器による数値的データだけで判断する事は難しいが、Ra 数値で約 40%の表面面粗度向上は部品精度、部品状態の向上と言える内容である。



エアラップ処理は破断及び亀裂の回避のため、コンロッド全体に実施している。その中で、大端部と小端部にも同様に処理を行っている。特に小端部はピストンピンと常時接触する部分であり、エンジン稼働時には常に摺動する部位にもなるため、表面面粗度の向上は低フリクション化に有効な働きをしていると判断している。上記の画像を見ても分かる様に、エアラップ処理前と処理後では明らかに小端部の光沢が違う。粗さ測定器による数値的データを踏まえると、Ra 数値はさほどではないが、Rz 数値に大きく変化が見られる。Rz 数値の変化は、局地的な表面面粗度向上はもちろん、全体的な凹凸部分が高いレベルで改善されている事を示す値となる。

レースエンジンの仕様及び要求値を満たすコンロッドとして苦労も多かった部位と言える。軽量化目標を達成すると同時に、ベンチマークテストや実走行テストでもトラブルの起きない、起こさなかった高剛性のコンロッドを開発する事が出来た。

(開発コンロッドの最終仕様)

- ・ 重量 (従来品=608 g) → 420 g (約31%軽量化)
- ・ 0IL穴加工の有無 → 達成 (ガンドリルマシン)
- ・ コンロッド表面面粗度
 - 小端部=Rz0.306 (従来品=Rz0.457) (約34%向上)
 - 側面部=Rz4.543 (従来品=Rz5.902) (約28%向上)
 - 大端部=Rz0.373 (従来品=Rz0.505) (約26%向上)

2-1-3. シリンダーヘッド関連の研究開発

【目 標】

1) シリンダーヘッドのIN側吸気ポートの形状確立

シリンダーヘッドを開発する工程として、複数個のシリンダーヘッド素材を用い、燃焼室形状やポート形状を数種類に渡り変更を実施し検証する。

性能面はもちろん、低燃費及び排出ガス低減に有効な形状を模索した。もちろん、IN側吸気ポート形状の開発において、細かな動弁系部品なども繰り返し組付け、最終的にはベンチマークテストを行い性能面での数値的状态を踏まえ進めて行く。IN側吸気ポート形状の開発工程は根気と時間が必要とされる内容と言える。



複数のシリンダーヘッドを開発

本研究開発初年度からシリンダーヘッド開発には苦労が絶えなかった部位でもある。燃焼室の状況が性能面に直結する事や、ウォーターラインの最適状態を模索する事も重要であり、難しい開発過程であったと言える。本年度の開発事業では最終仕様のシリンダーヘッドを決定している。これまでの経験や知見はもちろん、研究開発を通じウォーターラインの設定など、改めて重要部位であると同時に幾重にも存在する仕様パターンに開発の難しさや終わりが無い様に感じた部品と言える。



フローベンチテスターを使用し、繰り返しテストを実施、ポート形状を模索する。

エンジン性能の要とも言えるポート形状、何度も何度もフローベンチテスターを使用しテストを実施した。IN 側吸気ポート形状のパターンは、良し悪しを別にすると無限にあると言っても過言ではない。全くの知見及び経験がない状態での開発は皆無である。これまで行ってきたレース業務の中で必ず発生する加工工程となり、レースエンジン特有の性能面の追及には必須と言える項目である。

エンジンの排気量、レースカテゴリーごとに許される吸気部の直径など、エンジンの仕様によって変化する要求値であるだけに、最適値と判断出来る IN 側吸気ポート形状に辿り着くまでには、粘り強い根気と長年培われた経験が必要とされる工程。エンジン性能が向上すれば必ずエンジン、または車両として扱い易くなる訳ではない。ピークパワーだけの性能面だけでなく、エンジン回転数の全域をもって扱い易さを考慮する、エンジン全体のバランスも重視する事が重要と言える。

IN 側吸気ポート形状のテスト工程と併行して、吸気ファンネルの形状も様々な形状パターンが存在し、IN 側吸気ポート形状同様に形状違いで考えると相当数の形状が存在する。これら吸気ファンネル形状も、これまでのレース業務で培った経験やノウハウが生かされる事となる。吸気ファンネルの穴径の違い、吸気ファンネルの吸入口角度の違いなど多数のテストピースを用意しテストした。

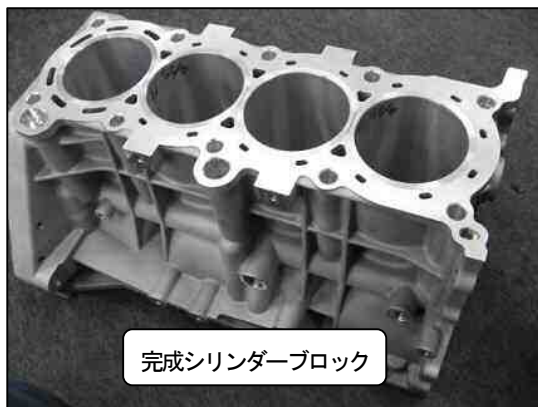
フローベンチテスターにて数値的に表される吸入量、吸入効率を踏まえ、最終的な形状を決定するが、これらエンジン性能に直結する部品は、ほとんどのレースカテゴリーでレギュレーションが存在する。決められたルール、レギュレーションの中で競う事から、許される範囲を有効に使用する事は重要と言える。本研究開発事業において、掲げた各項目の目標達成は重要な位置を占めていると認識している。しかし、将来的な事を踏まえると、本研究開発内容の事業化は無視出来ない。現状でターゲットカテゴリーと見据えている F3 レギュレーションを前提に、性能面に大きく影響する吸気関連のテスト結果を、実際のエンジン部品やエンジン仕様にフィードバックさせ、性能向上を図り、最適と思われる IN 側吸気ポート形状及び吸気ファンネルの形状を決定する。IN 側吸気ポート形状の開発過程を考えた場合、何度も何度も繰り返す、反復作業の連続と言って良い。本来必要とされる形状とシリンダーヘッド部の変更可能な許容範囲を考慮し、より吸入効率の良いポート形状を探る。フローベンチテストとは、シリンダーヘッドやエアファンネルなどをフローベンチテスト設備にセットし、一定の空気量を決め、同一条件内で最適な形状を探る設備である。これら設備を使用した数値結果とベンチマークテスト結果を踏まえ、馬力及びトルクの目標値を達成し、燃費向上及び低排出ガス低減に有効な IN 側吸気ポート形状を確立した。空気吸入量の絶対値はそのままエンジン性能に影響するため、これらテストにより数値化されたデータを基に最終仕様を決定した。

2-1-4. シリンダーブロック関連の研究開発

【目 標】

1) シリンダーブロックヘギアドライブ装着、耐久テストの実施

本研究開発当初より順調にエンジン性能面を伸ばす事が実現出来ている背景は、各製品の精度向上の積み重ねが寄与している結果と考えている。その中で、性能面はもちろん、様々なトラブル回避に寄与出来ると考え、推し進めてきたギアドライブ化を行って耐久テストを行った



各部品の開発、各部品の組付けなど、エンジンを構成している部品は多品種におよぶ。これらの各部品をベンチマークテスト後、実走行テスト後に繰り返し分解、組立てを行い、分解時の使用後状況や組付け時の装着状態を把握する。何気なくおこなうこれらの作業も最終的な性能に影響する事もあり、大切な工程と言える。

本研究開発事業で取組むギアドライブ化について、従来の駆動方式であるチェーンドライブ化からギアドライブ化に変更する理由は幾つかある。チェーンドライブ仕様から、ギアドライブ仕様に変更する事で全体的な低フリクション化はもちろん、チェーンであるためのトラブル（チェーンの緩み及び伸び、チェーンのギア山飛び、チェーンテンショナーの消耗など）を回避すべく開発を進めた。エンジン全体を踏まえても、ギア類の低フリクション化を実現する事で、油圧及び油温の安定も図れると考えている。

また、チェーンドライブ仕様であっても、ギアドライブ仕様であってもクランクシャフトやカムシャフトの各部品仕様が大きく変わる訳ではない。チェーンドライブ仕様が発生するバルブタイミングのズレ、または正確性の低下などは、ギアドライブ化が安定的に実現すると、多くの問題を解消出来る可能性がある。

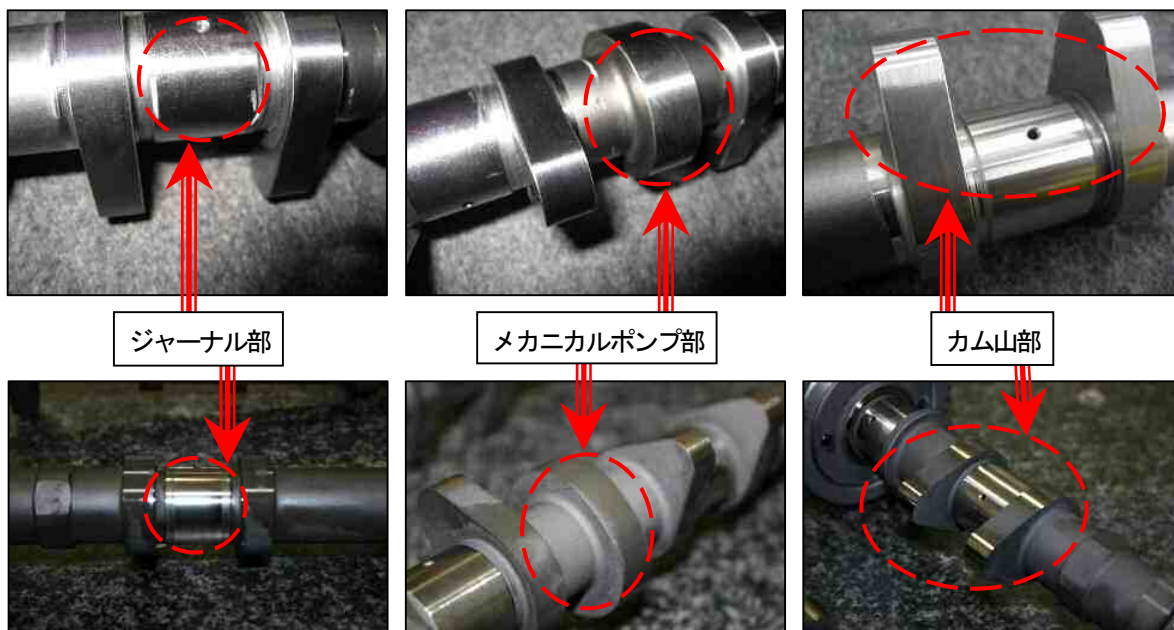
エンジンの点火時期やカムシャフトの進角、遅角など、ギアドライブ化が実現した場合、各ギア間のバッククラッシュのみのズレとなり、チェーンドライブ仕様にある、チェーンのバッククラッシュ、伸び、またはチェーンテンショナーの消耗など、解消すべき、または解消出来る事が良好である事項は多く存在する。

2-1-5. カムシャフト関連の研究開発

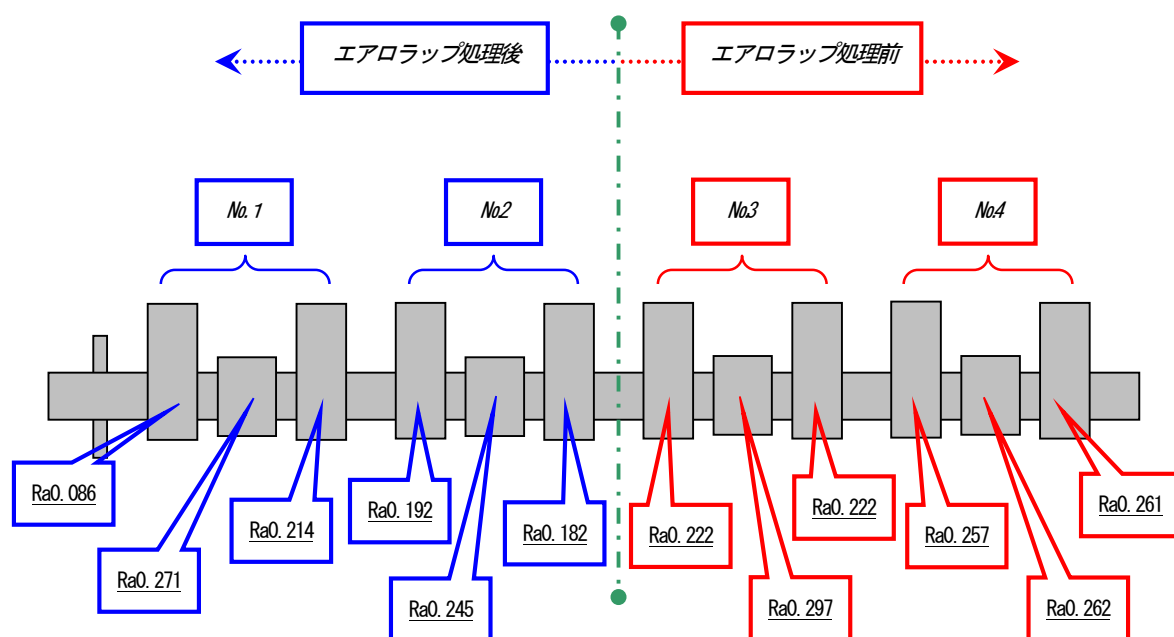
【目標】

- 1) 4次作以降として開発したカムシャフトをエンジンへ装着、順次テストの実施
- 2) D I (直噴) エンジンに適したカムシャフト形状の確立

カムシャフトはエンジンの研究開発初段階より、仕様違いの各カムシャフトを数パターン開発してきた部位となる。数パターン開発し、ベンチマークテストをおこなう事で比較検討する事が可能となる。これまで培ってきた知見や経験を生かし、ある程度のターゲット値を定め、リフト量やカムプロファイルを変更/修正し最終仕様のカムシャフトを開発した。下図はカムシャフト各部に分けた画像となる。カムシャフトには装着初期時のなじみ向上を意図とした表面処理を実施している。カムシャフト自体はもちろん、干渉相手の各部品への攻撃性も低下させる事は耐久性の向上や低フリクション化の両面に影響している。



カムシャフトのジャーナル部、メカニカルポンプ部、カム山部いずれにおいても、研磨面とは言え表面面粗度が良好である事は重要である。エンジン稼動時には常に摺動している代表的な部品でもあり、初期なじみが完了する前に何らかの磨耗トラブルが起きた場合、予想以上の速さでカムシャフトとして成り立たなくなる場合がある。



開発してきたカムシャフトはエアロラップ処理を他の部品同様に行っており、エンジン稼動時初期のなじみ向上を狙い表面処理も行っている。エアロラップ処理の実施は、カムシャフト摺動部の面粗度を向上させ、低フリクション化に大きく寄与したと考えている。エアロラップ処理後の状態は、従来品のカムシャフトと比較し、カムシャフトプロフィール部、ジャーナル部は約45%表面面粗度向上を達成している。

下図の画像はエアロラップ処理した前後の顕微鏡拡大画像となる。他の製品同様に、エアロラップ処理後の方が画像を確認しても明るい。明るい状態の画像は表面面粗度の状態が非常に良好である証と言え、低フリクション化により、低燃費及び低排出ガスに有効に影響していると考えられる。同時に低フリクション化による磨耗耐久性も向上していると考えている



リフト量やカムプロフィールの変更を繰り返し、各カムシャフトをエンジンに組み付けベンチマークテストを実施し、研究開発過程において、時にはベンチマークテスト後にクラックチェックを行い、磨耗状況、摺動面の耐久性などのカムシャフト状態の検証を実施した。最終的には性能面はもちろん、燃費及び排出ガスに有効と言えるカムシャフト仕様を他の製品とバランスを踏まえ選定した。



本研究開発当初から予定していた事ではあるが、エンジン各部品を交換または、変更すると同様にカムシャフトも随時仕様変更を行い、開発を進めた。単純にカムシャフトの仕様だけで考えると、想定する数値までは届かなかった実情もあり、周辺部品の仕様はもちろん、エンジン全体のバランスを踏まえ、最終仕様を決定した。



2-2. 関連部品の研究開発

2-2-1. 電装品の研究開発

【目標】

1) ベンチマークテスト及び実走行テストによるインジェクター仕様の最終決定

本研究開発事業初年度は一般的に手配可能な市販品のインジェクターから検証テストをスタートさせ、本年度研究開発では昨年度から3種類の特注インジェクターによる研究開発をメインに比較検証テストを行っている。ピストンやコンロッド、カムシャフトやシリンダーヘッド、シリンダーブロックなど、多種多様にエンジン仕様、エンジン要求値が変わる中で、ベンチマークテストでの性能評価では、最終的に優位に立ったのはNR03 インジェクターであった。

比較検証を進め、最終的な仕様を決定するインジェクターは、岡山大学の協力のもと、実際のインジェクターがどの様に噴霧されているかの検証を行っている。通常はエンジン燃焼室のクローズドな状態で噴霧しているインジェクターも、可視化を可能する設備を用い、想定、もしくは予定している噴霧パターンとの比較を実施した。



最終的に最適としたNR03 インジェクターは、同様に特注開発した他の2種類のインジェクターと比較して、圧倒する程の差は出ている訳ではない。しかし、結果的に同様のエンジン仕様で数馬力の差が出ている状況を踏まえると、NR03 インジェクターを選択する事が最適と言える。しかし、各レースカテゴリーによってはインジェクターの仕様、種類等を規制される事も少なくない、よって、これまで行って来た研究開発は、その際の対処や傾向を掴む事に有意義なテストと言える。

今回、最適であるとの判断を下したNR03 インジェクターは、あくまで最終仕様と位置付けた現状のエンジン仕様を基本とした場合となる。現状の仕様とはF3 レギュレーションを満たす仕様を指しており、これらエンジン仕様が変更された場合は、要求値により再検証も必要と考えている。

最終仕様エンジンに近い仕様を比較検証の基本とし、同一条件下のエンジンへ各インジェクターを変更させた時のベンチマークテストの数値データを比較検証した。現存する市販車用インジェクターに始まり、本研究開発用として特注開発した3種類のインジェクターが含まれる検証内容になる。これまでの研究開発過程において、エンジン仕様の違いにより、多少の前後は認められるが、最終的にはNR03 インジェクターの性能数値が最も良好と言える結果であった。

2-2-2. エキゾーストとマフラーシステムの研究開発

【目 標】

- 1) 低燃費、低排出ガスに有効なマフラーシステムの開発、最終形状の確立
- 2) 目標馬力、目標トルクに有効なマフラーシステムの開発、最終形状の確立

本研究開発事業において、幾度となくおこなうベンチマークテストは、様々な状況を想定し、エキゾーストシステムは開発される。実際の開発工程は全て手加工となり、職人的な要素を多く含む工程となる。ベンチマークテストにて良好とされた形状をそのまま再現し、機能美も合わせて追及する。あくまで、ベンチマークテストでの数値的データを優先するが、実走行テストでの状態も重きに捉え考慮する。また、ドライバーから寄せられるコメントや、実負荷を掛けた時の音量及び音質なども含め、現状エンジン仕様でのエキゾーストシステムの最終仕様を決定した。



最終仕様の決定

下図はエンジンの最終仕様の状態での燃費に係わる燃料消費量を示す数値をデータ化した資料である。項目ごとに設けた目標数値結果は下記の通りとなった。

- ・ 燃料使用料=194.24g/psh (従来品比較=14%向上)
- ・ Co=4.128% (従来品比較=19%向上)
- ・ HC=440.5ppm (従来品比較=11%向上)
- ・ Nox=2010ppm (従来品比較=12.8%向上)

最終的に全ての項目について数値的達成する事が出来た。現状に満足する事なく、更に次のステージを目指す。

研究開発途中で吸気ポッドの吸入径の変更など、ターゲットカテゴリーであるF3 レギュレーションの変更があったが、性能面の両目標とも達成する事が出来た。本研究開発事業で開発するエンジンはあくまでレース用エンジンである事から、馬力及びトルクで現される性能面は無視出来ない。もちろん、世界的なエコブームを受け、レースと言った枠組みの中でも低燃費、低排出ガスは重要視され、これら数値が良好である事はレースエンジンでも優位に立てる要因と言える。

現状の仕様はF3 レギュレーションに準じた内容を基本としているが、将来的な事業化を見据えての研究開発となるだけに、低燃費、低排出ガスの数値目標達成だけで判断せず、性能面とレースエンジンとして今後の派生も念頭に置いている。

2-3. 開発したエンジンのベンチマークテストと実走行テスト

2-3-1. ベンチマークテストの実施【担当：(株)戸田レーシング、岡山大学】

【目 標】

- 1) ベンチマークテスト上で、ポート式エンジン対比燃費の10%向上達成
- 2) ベンチマークテスト上で、ポート式エンジン対比排出ガスの10%抑制達成

本研究開発事業での燃費や排出ガス、馬力及びトルクなどの各数値は、あくまでベンチマークテスト上での数値を研究開発結果の数値とするが、実際に車両搭載して使用出来なければ机上でのエンジンと言えるため、各目標値を満たしたエンジン仕様にて実走行テストを行った。限られた時間内におこなう実走行テストだけに、テストメニューを事前検討し、何らかのトラブル発生時にも対応出来る準備も併行して進めた。



新規のエンジンを開発する事を目的とし進めて来た本研究開発事業も、当然の事ながら各項目の目標はもちろん、低燃費、低排出ガスなどの大目標を掲げて進めている研究開発となる。馬力だけ、またはトルクだけの追求であれば目標達成は容易だったかもしれない。本研究開発では、性能面である馬力、トルクはもちろん、低燃費、低排出ガスに有効なエンジンとしているだけに、全体的なバランスと、各目標の数値的達成の両立は非常に難しく、繰り返しの開発工程が必要であった。

【最終目標数値】

- ・ 燃料使用料=194.24g/psh (従来品比較=14%向上)
- ・ Co=4.128% (従来品比較=約19%向上)
- ・ HC=440.5ppm (従来品比較=約11%向上)
- ・ Nox=2010ppm (従来品比較=約12.8%向上)
- ・ 実走行テスト実燃費=4.6 km/L (従来F3 エンジン比較=約21%向上)

2-3-2. 実走行テストの実施【担当：(株)戸田レーシング、岡山大学】

【目 標】

- 1) 実走行用エンジンでの耐久実走行テストの実施
- 2) 実走行テスト結果、ドライバーの意見等の各項目へのフィードバック

本研究開発事業における実走行テストはこれまで、地元岡山にある、岡山国際サーキット場を舞台に行ってきた。本年度はギアトレイン仕様での実走行テストもおこなう経緯から、耐久テストを踏まえ、鈴鹿サーキット場での実走行テストを実施した。岡山国際サーキット場と比較し、直線距離、総走行距離共に過酷な条件下での実走行テストと言える。本年度行った両サーキット場での実走行テストでも大きなトラブルなどは発生せず、無事にテストメニューを消化する事が出来た。



基本的な性能面や燃費及び排出ガスに関連する数値はベンチマークテストを基本として開発を進めているが、ベンチマークテスト上では計り知れない面を実走行テストで確認した。車両の振動に対する問題、熱害、長距離での負荷全開性能など、実走行テストでしか分からない事も十分に行った。将来的な事業化を踏まえると、尚更、実走行テストの結果や対応能力が重要となってくる。数値上の内容はベンチマークテストで測る事が出来ても、実際の車両へ搭載し、戦闘力がないレースエンジンは成り立たない。事業化を見据え、実走行テストでの検証は有効なテストであった。

【実走行テスト：ドライバーコメント】

- ・ 3年前の実走行テストから、実走行テストを重ねるごとにトルク感が向上していた。
- ・ 実走行初期段階より、振動の少ないエンジンと感じている。
- ・ エキゾーストの音質が非常に良好である。
- ・ アクセルのオン/オフの応答性が非常に良い。
- ・ アクセルの応答として、遅れや息継ぎ、ミスファイヤーが一切無い。
- ・ 低速時のトルクが非常に強く、中古タイヤだと車両がスライドする。

ベンチマークテストを経て、実走行テストを実施する事となるが、ベンチマークテストの数値的結果をそのまま反映する事が殆どである。ベンチマークテストで性能が出ていれば、ラップタイムにも好影響が出る、逆にベンチマークテストの状態が数値的に悪い状態では、実走行テストの結果は同様に影響し、ラップタイムも伸びない事が多い。

また、ドライバーから寄せられる、エンジンの扱い易さやエンジンの音質など、各事項への指摘、アドバイスは、数値では表されない面も、実走行テストを通じ、ベンチマークテストでの性能面と比例していると感じている。各実走行テスト後に調査するドライバーからのコメントは、性能向上を着実に進めて来た結果と言える内容になっており、将来的な事業化を含め、非常に重要な工程と位置づけている。

【戦略的基盤技術高度化事業の三ヵ年について】

開発事業初年度は、開発から完成、または目標まで非常にタイトな開発スケジュールであったことは間違いない。戸田レーシングのように小さな企業でもレーシングエンジンをゼロから設計、開発、組み付け、テストまで一貫しておこなえる証明としては十分と言えるが、実際の業務としては過酷であった。ゼロからのものづくりであることから、設計者、加工者など、本研究開発事業に携わった全ての者が生みの苦しみは感じていたと考えている。もちろん、これまでに業務として行ってきた様々な「ものづくり」の経験とノウハウが生かされ、実を結んだ結果であるとも考えている。

初年度の開発状況については、各部品の調査や検証、設計段階での事前検証など順をおって効率的に開発出来た。PC 上での機構解析や応力解析などを駆使し、これまでは経験に大きく占められていた「勘」または「感」頼りとせず、各項目で示される数値データや画像データを持って開発を進める事ができ、これらの手法は高効率と言える。また、開発期間だけでなく各部品、エンジン全体のコストダウンにも繋がったと考えている。

H23 年度研究開発事業では、重要な数値目標である、従来エンジンとして位置付けているポート噴射式エンジンと比較して燃費を 5%~8%向上させ、排出ガスを 5%~8%削減する目標数値は成果報告書通り達成出来ている。燃費数値の指標事項は燃料消費率（燃料利用率）をベースとして判断しており、本研究開発事業で開発しているエンジンは紛れもなくレースエンジンであることから、一般車両に見られる燃費条件とは異なっている。

レースエンジンは全開時での性能や燃費を重視する事から、高出力状態をより少ない燃料で発生出来るエンジン、もしくはエンジン仕様パターンが最良と位置付けている。したがって、燃料消費率が下がる事は使用されている燃料が減少している事であり、同様の馬力及びトルクを発生しているならば、燃費は向上している。これらの思想はレースエンジンだけに当てはまる訳ではなく、市販車も全開稼働時が存在する事から割合は違うが、無視する事は出来ない、また考慮するデータとしては有効と言える。

一般的に排出ガスと言っても、排出ガスの中には色々な成分が数種類存在する事から、燃焼効率を向上させても単純に数値が減少するものばかりではない。燃料を燃焼させエネルギーに変換している背景から、単純に減少する事は不可能である成分も存在する。しかし、使用される燃料が減少する事に着目し、燃料対比で考えた場合、排出ガスも燃料同様に減少している。現に燃焼効率を向上させると減少傾向にある排出ガス成分などは、当初の目標値を大きく上回る数値結果、成果を挙げている。

レースエンジンの研究開発である事から、馬力及びトルクに見られるエンジン性能は非常に重要であり、これら性能向上は必須項目と言える。H23 年度研究開発事業で開発したエンジン、エンジン仕様パターンにて、数値に表れる最高出力だけでなく、エンジン回転数の全域に無駄な落込みをなくす事を念頭に、ピストンやカムシャフトの仕様を選定して開発を進めた。

開発された各部品をエンジンパッケージとしてコントロールするエンジン制御装置もエンジン性能はもちろん、燃費向上や排気ガス低減に大きく寄与したと言える。将来的な事業化を念頭に、研究開発後の事業化構想の一つであるフォーミュラ 3 用エンジンとして考えた場合、開発スピードや実際に具現化した DI（直噴）エンジン導入は日本では初となり、世界的に見ても先陣を切る状態である。

何事も周囲に先駆けて開発をおこなう事は失敗の連続や予想外の事を数多く招き、トラブルも多いが、勉強させられる事、改めて知りうる事の多さも同じく大きいと言える。ベンチマークテストでは想定した通りに性能向上した訳ではなく、繰り返し、繰り返し開発とテストを行った結果の産物と言える。実走行テストではドライバーコメントから考えられる点をエンジン開発にフィードバックさせると共に、DI(直噴)エンジンの将来性とメリットに強く大きな手応えを感じている。

本研究開発事業の最終年度では、開発事業当初より掲げてきた大目標を達成するため、これまでの研究開発の集大成と言える。開発初年度より取組んできたピストン開発について、各項目の目標値は達成しているが、唯一達成出来ていないピストンリング溝のうねり低減について、本年度も積極的に取組んだ。本研究開発事業のアドバイザーから、H23年度末に現状まで達成しているピストンリング溝うねり数値である、4ミクロンでも十分な成果であると助言頂いているが、本研究開発事業当初からこれらうねり数値の低減は重要な目標と位置付けていた経緯もあり、最終年度である本年度も継続的な開発を行った。

ピストンリング溝うねり低減を達成するため、本年度新たに導入した新設備である、エアロラップマシンを使用し、ピストンそのものへのエアロラップ処理、ピストンリング溝専用刃物へのエアロラップ処理など様々な角度からアプローチしたが、予想していた結果には届かず、最終年度及び本研究開発事業としてのピストンリング溝うねり低減数値は4ミクロンが最高低減値となった。

これまで切削加工の条件設定や専用刃物の開発、ピストン加工時に使用する専用治具など様々な観点から、ピストンリング溝うねり数値低減を進めたが、あと一步のところで足踏みした形となる。しかし、全く手が無い状態とは考えておらず、これまでおこなってきた各開発項目を精査し、各項目のレベルアップを図れば、ピストンリング溝のうねり数値3ミクロン以下は可能と考えている。可能であればこれら項目を開発課題として継続的な研究を進め、最終的には目標値達成まで進めたいと考えている。

H24年度は新たに導入した新設備であるエアロラップマシンを使用し、様々な部品へエアロラップ処理を実施した。エアロラップマシンによる処理は、細かな研磨加工に近い処理となり、特徴と言える事は対象物への攻撃性が低い事、あくまでも仕上げ処理としての活用が有効である事と言える。ピストンに始まり、ピストンピン、ピストンリング、色々な刃物、コンロッド、カムシャフト、各種ギア、シリンダーヘッドにまつわる各種動弁系部品など多品種にわたり実施した。エアロラップ処理後の状態は、ピストンを除けばいずれも良好と言え、性能面はもちろん、低燃費及び低排出ガスに有利に働く低フリクション化に非常に有効と考えている。

これら研究課題の一例としてチェーンドライブ化からギアドライブ化の変更がある。一見、チェーンドライブ仕様からギアドライブ仕様に変更すると、ギア関連の部品点数の多さを踏まえ、軽量化とは結び付かない様にも感じるが、各ギアの薄肉化、無駄肉の除去により、チェーンドライブ仕様と遜色ない重量比まで開発出来ている。また、各ギアへエアロラップ処理する事で低フリクション化も実現しており、想定通りの開発となった。しかし、本年度研究開発中に、破損トラブルにも見舞われ、今以上に詰めて研究開発する余地は大いにあると考えている。更なる低フリクション化、ギアドライブ仕様の確立を進めて欲しいとの提案も頂いており、これらも継続的な研究を進めたい事項と言える。

本研究開発において、改めて部品精度や加工精度を問われる、あるいは試される機会を設けた意味は非常に大きいと感じている。社内設計、社内加工、社内検査と一貫体制を敷いているだけに、間違えば自己満足で終わる危険性もある。

社外からの指摘や大学機関の知見など、様々な観点から受ける助言は大変意義深い内容と言える。戸田レーシングとしてのオリジナル部品開発時やオリジナルエンジン開発時はもちろん、他社からの各委託業務でのものづくりで、本研究開発事業で培った技術的向上を感じ取れる。事前検証に始まり、数値的データの収集や活用など、これまで出来ていなかった手法も多く取り入れ、高効率の開発、高精度のものづくりが可能となった研究開発は非常に有意義であったと考えている。

【今後の展望と事業化について】

3年間にわたり進めて来た研究開発も各目標項目達成と言う形で終了した。これら研究開発内容を生かし、次ステップとなる事業化を進めたいと考えている。本研究開発事業のはじめに提案、提唱した様に、研究開発において向上させた技術を生かし、事業化として3つの事項を考えており、これらの進め方、提案内容はとしては研究開発が完了した現在も変わっていない。事業化への可能性として下記3項目を考えている。

① 開発したレースエンジンを各レースカテゴリーへ供給

3年間の研究開発事業の成果と言えるオリジナルレースエンジンを対象とした、各レースカテゴリーへの展開を考えている。研究開発当初から考えていた内容となるが、各レースには各レギュレーションが存在し、これら規則であるレギュレーションを満たさなければレースエンジンとして手を挙げる事さえ出来ない。

紆余曲折あったものの、あくまで開発したレースエンジンは汎用性を持たせたもので、これら汎用レースエンジンの派生として、現状では全日本F3選手権をターゲットとしている。2013年から大きく変更されるF3レギュレーションに対応すべく、早期から国際自動車連盟 (Federation Internationale de l'Automobile) であるFIA関係者とコンタクトを取り対応して来た。日本国内のカーメーカーの意向だけでなく、欧州カーメーカーの意見、意向を多く取り入れる事から、二転三転したF3レギュレーションも2012年後半によりやく落ち着き、方向性や決定事項も明確になった。これらFIA関連の対応は開発内容とリンクさせなければならぬ事から、時間軸を考えても、困難を極めたが、何とか2013年のF3レギュレーションを満たせたエンジン仕様として開発を終える事が出来ている。

研究開発過程において、オリジナルエンジンの取材など専門誌からを受けており、少ない告知情報ではあるが現在までに少しずつ実を結んでいる。また、F3レースは全世界共通ルールでおこなわれるカテゴリーである事から、供給先としては全世界であると言える。一歩ずつ進めなければならない内容ではあるが、2013年の全日本F3選手権で好成績を収められれば、マーケットは全世界に広がる可能性を秘めている。

これらF3レースカテゴリー同様に、開発レースエンジンで対応出来る範囲となるが供給先の模索を進めたい。開発したレースエンジンはあくまで汎用性を含めた内容である事から、ベースとなるエンジン仕様から、排気量の変更、燃料供給方法の変更など、依頼先からの要望はもちろん、コストに見合った仕様にも変更可能としている。現状では全日本F3選手権へ供給する開発レースエンジンを問題なく供給する事を優先するが、幅広い対応を基本とし、レース界での事業化を進めたい。

② 特別仕様車への展開

レース用エンジンはレースでしか使用出来ない訳ではない。現状のエンジン状態に困っている人、更なる何かを求める人など様々である。本研究開発当初に提案、提唱してきた事業化内容の一つとなるが、高級車やスポーツカー愛好者向けにエンジン供給する事を踏まえ、DI(直噴)エンジンを搭載した特別仕様車用として市場拡大を見込んでいる。世の中には様々な車種、車両が存在し、様々な用途で使用されている。その中で、スポーツカーとして車を使用している方々も存在する。それら愛好者をターゲットとして事業展開を考えている。

市販車をターゲットにする場合、法規制など色々なハードルも存在する。これらハードル内容は一概には言えず、随時対応する必要もある。特別仕様車としての枠組みは市販車に限ってはいない。本研究開発事業で開発したレースエンジンはエンジン搭載時に関係するエンジン取り付け方法など、フォーミュラ仕様が基本となっている。これらの仕様では市販車に対応出来ないのではなく、汎用性を持たせている経緯から、変更は可能である。また、フォーミュラ仕様のままで、フォーミュラ車両への展開も視野に入れている。レースに参戦する事を目的とせず、趣味の範囲でフォーミュラ車両を保有している人、したい人は意外にも多く存在する。

実際にフォーミュラ車両を購入したい人が存在しても、走行可能状態にするには大きな問題がある。現状でフォーミュラマシンに搭載されて、レース参戦している車両の各エンジンは大手カーメーカーが手掛けたエンジンが多くを占める。これらは国内、海外を問わず同様である。レース車両は年々更新され、アップグレードされている。フォーミュラ車両がアップグレードされると、古いフォーミュラ車両は市場へ転売される事も少なくない。

これら転売車を狙い買い求める愛好者も沢山存在するが、多くの場合、フォーミュラ車両はあるが、エンジンは搭載されていない状態の車両が多い。大手カーメーカーが手掛けたエンジンはある意味ブラックボックスとなり、ノウハウ流失を避けるため、市場はおろか社外に出る事は異例である。フォーミュラマシンはエンジンと車両が一体となって車両形状を成り立たせている事から、エンジンがなければ走行すら不可能となる。また、市販車エンジンを改造して搭載するには高額な改造費が必要であり、改造自体を請け負える企業も少ないのが現状である。

簡単に言えば、フォーミュラマシンのシャシーである車両は多く市場に存在するが、搭載しなければならないレースエンジンが存在していない、または少ないと言える。これらのケースへ本研究開発事業で開発したレースエンジンを事業化として進める事を考えている。市場のニーズを踏まえ、価格面や対象となるフォーミュラ車両の状態により、様々な対応を考慮しなければならないが、想定範囲内と考えている。

③ 切削加工技術の高度化による受託業務展開

本研究開発事業では開発部品製作において、加工精度向上を狙い、様々な取り組みを行ってきた。多くの部品の集合体であるエンジン開発にともない、ピストン、コンロッド、カムシャフトなど多くの切削部品を手掛けてきた。各部品に共通して言える事は、レースエンジンの部品として成り立たせる形状の一方で、それら要求値を満たしている加工精度が前提となる。例えば、ピストンリング溝のうねり数値3ミクロン以下は研究開発期間で達せする事が出来なかった。目標値とした数値は決して低い訳ではなく、非常に高い目標と考えている。しかし、これら高い目標も、レースエンジンに使用するピストンと前置きを付け加えると非常に困難な数値目標に変化する。

レースエンジンに使用する場合、可能な限りの軽量化が必要となり、程度は様々だが、軽量化のため薄肉化される場合が殆どである。本研究開発事業で開発し、目標値の対象としたピストンも薄肉化された状態のピストンとなっている。薄肉化された状態であるからこそ精度維持が困難となっており、薄肉化されていないピストンであればピストンリング溝のうねり数値も3ミクロン以下の達成は容易に完結していると考えている。これらを踏まえ、本研究開発事業で進めたピストン切削加工、切削条件の設定検証は非常に高いレベルであると認識している。

本研究開発事業ではレースエンジンを開発する内容であることから、量産ではなく単品での開発が多くを占める。単品開発の場合、殆どを切削加工にて進めることから、切削条件はもちろん、ものづくりの経験として多くの経験値を積み上げたと考えている。これら切削加工技術を各カーメーカーや部品メーカーの試作部へ技術アピールし、先行試作品としての受託業務を事業化の一つとして考えている。

多くの各カーメーカー試作部が求める内容は、短納期、低コスト、幅広い対応、部品としての知見、一貫体制の有無などとなる。戸田レーシングでは、設計業務から加工、製造業務、組付け業務、測定/検査業務と、ものづくりに必要な一連の工程全てを網羅している。機密事項を多く含む先行試作品開発には有利な点と言える。また、短納期対応として、本研究開発事業でも発揮した、高効率の開発体制を軸に、車に限らず幅広く対応する事が可能と考えている。

長年に渡り培ったレース業務、レースエンジン開発及びレースエンジン部品開発の経験やノウハウを生かし、本研究開発事業でレベルアップされた切削加工技術をアピールし、部品単品からトータル開発の受託業務請けを事業化への柱とさせたい。

