

論文・解説

## 26 RX-8 ハイδροジェンRE デュアルフューエル制御システムの開発 Development of RX-8 HYDROGEN RE Dual-Fuel System

齊藤 智明\*<sup>1</sup> 松下 正典\*<sup>2</sup> 三津木 宏明\*<sup>3</sup>

Tomoaki Saito

Masanori Matsushita

Hiroaki Mitsugi

上田 貴之\*<sup>4</sup>

Takayuki Ueda

### 要約

RX-8ハイδροジェンREは、デュアルフューエルシステムを搭載し、水素とガソリンのいずれの燃料でも走行可能なことを特徴としている。この車には、高圧水素安全システム、水素RE制御システム、燃料自動切替システムなど新たに開発して採用した。

デュアルフューエルシステムを実現する上で、電子制御システム及び制御用組込みソフトウェアの果たす役割が重要である。このことから、電子制御システムとほとんどのソフトウェアを社内開発した。

本稿では、新開発した電子制御システムとソフトウェア開発技術について紹介する。

### Summary

The RX-8 Hydrogen RE features the dual-fuel system that enables driving with either hydrogen or gasoline as fuel. New systems for high pressure hydrogen safety, hydrogen RE control, and automatic fuel switching have been developed and adopted into the RX-8 Hydrogen RE.

A newly developed electronic control system and software programs for control have a key role in implementing a dual fuel system. Therefore, the electronic control system and most of the software programs were developed in-house for their importance.

This paper introduces the electronic control system and software development technology.

### 1. はじめに

RX-8ハイδροジェンRE (Fig.1) は、ガソリン、水素のどちらの燃料でも走行可能なデュアルフューエルシステムを採用している<sup>(1)</sup>。更に、走行中でも安全に水素燃料から



Fig.1 RX-8 Hydrogen RE

ガソリンへの切替えが可能であるという特長を持つ。

エンジン本体のハード構成 (Fig.2) としては水素インジェクタの追加以外は量産のRX-8のエンジンとほぼ共通している。

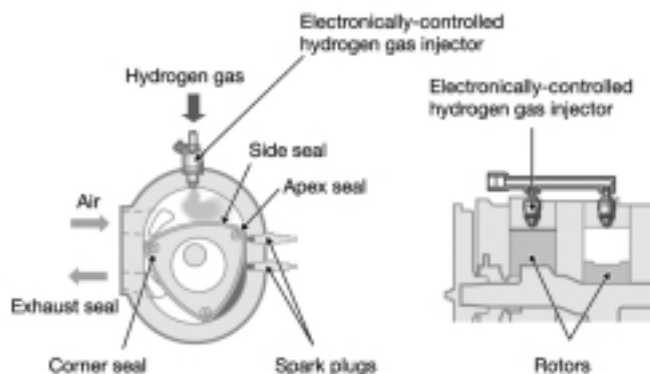


Fig.2 Hydrogen RE System

一方で、車両全体の制御システムとしては、以下の3つの制御システムとソフトウェアを新規開発した。

\*1~4 技術研究所  
Technical Research Center

- ① 高圧水素安全システム
- ② 水素RE制御システム
- ③ 自動燃料切替えシステム

## 2. 高圧水素安全システム

高圧水素安全システムとして、大きく分けてハード系（タンクの配置、漏洩水素が滞留しない構造など）と、電子制御系（水素センサに漏洩水素の検出、電磁バルブによる水素燃料供給路の遮断など）を開発した。このシステムは、2005年3月に国交省で制定された「圧縮水素ガスを燃料とする自動車の燃料装置の技術基準」を満足している。

ここでは、電子制御系について解説する。

### 2.1 安全システムの電子制御系の課題

水素燃料使用中に、万が一異常が起きても安全に走行するため、車両全体の安全システムとエンジン制御システムが高度な連携を保つ必要がある。

このため、水素燃料システムに関わる部品の故障や異常を検出し、安全を確保するフェールセーフ機能の採用が必要となる。

### 2.2 安全電子制御システム

安全電子制御システム（Fig.3）の機能として、

- ① 部品の故障などの異常を検出する機能
- ② 異常検出時に高圧タンクの元弁を遮断する機能
- ③ 燃料自動切替え機能（水素系の異常が起きた場合に、自動的にガソリンに切替える）

を開発した。

水素ガスセンサを車体内の6ヶ所に設置し、基準以上の濃度を検出した場合には、0.5秒以内に高圧水素タンクの元弁を閉弁して安全を確保する。閉弁と同時に、ガソリン運転に自動的に切替えることで、走行安全性も損なわないシステムを開発した。

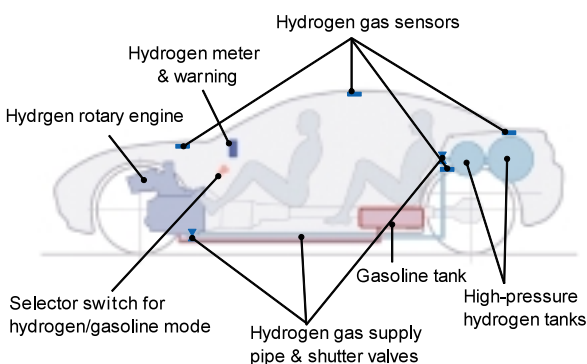


Fig.3 High Pressure Hydrogen Safety Electric Control System

## 3. 水素RE制御システム

走り（Zoom-Zoom）とクリーン化を両立するため、水素REシステムを新たに開発した。

### 3.1 水素RE制御システムの開発課題

#### (1) エンジンシステムの課題

水素ガスを内燃機関で燃焼させる場合、以下の3つの特徴がある。

- ① 燃焼速度がガソリンに比べて速く、水素ノック音と呼ばれる燃焼音が生じる。特にエンジン出力が高い領域で起きる。
- ② ガスのため体積あたりのエネルギー密度が低く、大流量の燃料噴射を必要とする。
- ③ 水素燃焼時は、ガソリンと同様に窒素酸化物（NO<sub>x</sub>）が生成される。一方で、水素混合気は燃焼範囲が広く、希薄混合、多量EGRの条件でも安定して燃焼する。

これらの特徴を踏まえて、音、出力、エミッションの改善を行うため、ロータ内への直接噴射だけでなく、ポート噴射とEGR（排気ガス還流）を追加した新しいエンジンシステム（Fig.4）を開発した。

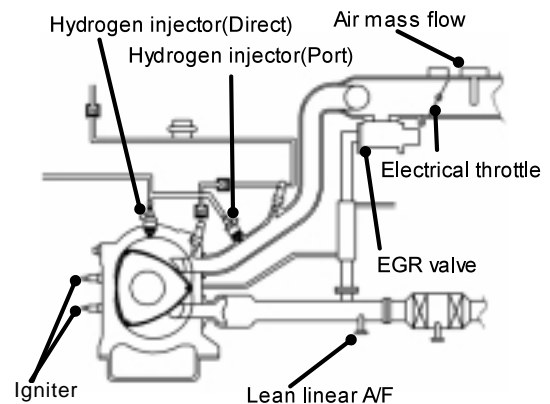


Fig.4 Hydrogen RE System

このエンジンシステムによって、3,000rpmまでの高出力領域では、空気過剰率  $\lambda$  を1にすることで、出力向上した。そして、窒素酸化物（NO<sub>x</sub>）を触媒で浄化する後処理制御と、大量EGRガス導入によって水素ノック音を解消する燃焼制御を開発した。

また、3,000rpm以上の高出力領域では、リーン運転+ポート噴射による混合ガスのミキシングを促進することで出力を改善しつつ、NO<sub>x</sub>発生を低減する燃焼制御を開発した。

更に、上記の異なる燃焼制御をエンジンの運転領域（Fig.5）に応じて切替える制御技術を開発した。

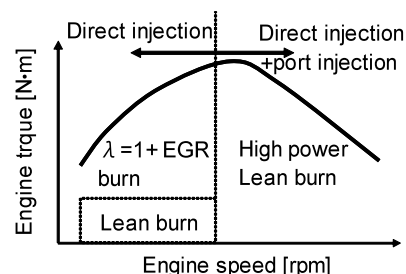


Fig.5 Hydrogen Burn Control

(2) 燃焼切替え制御の課題

各々の運転領域 (Fig.5) では、空燃比、点火タイミング、出力トルクが異なる。切替えをスムーズにするために、以下のような制御を開発した。

- ① エンジン出力のトルクベース制御
- ② 目標空燃比の変化に対応した噴射、点火、噴射タイミングの制御

3.2 水素RE電子制御

Fig.6に水素REの燃焼制御の制御ブロック図を示す。

水素RE特有としては、トルクベースの制御機能の追加と空燃比制御機能の改善である。

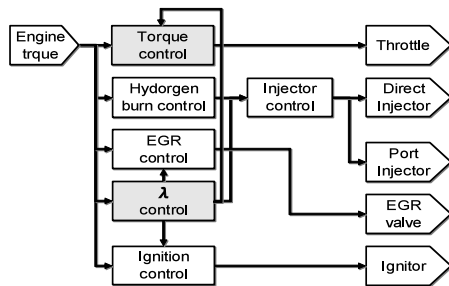


Fig.6 Hydrogen RE Control System Diagram

(1) トルクベース制御

運転領域によって空燃比やEGRの有無が異なるため、同一スロットル開度でも出力が大きく異なる。このため、従来のトルクベースの制御では、燃焼移行時にトルクショックが生じる。

そこで、エンジンの出力トルクを精密に管理し、最終的にトルクからスロットル開度に変換することでエンジンをコントロールするトルクベース制御を開発した (Fig.7)。

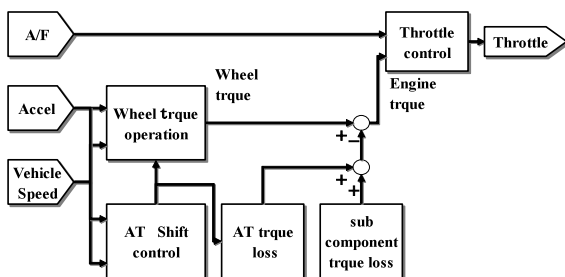


Fig.7 Torque Control (Model Driven Control)

Fig.7に示すように、走行に必要なトルク (Wheel torque) をまず演算する。並行して、自動変速機やエアコンなどの補機類での損失トルク (sub component loss torque) を演算する。この2つのトルクから最終的にエンジンが発生すべきトルク (Engine torque) を演算する。

次に、エンジン要求トルクに必要なスロットル開度を演算する。

最後に、制御コントローラが電子スロットルの開度を制御する。これにより、運転領域が変化し、燃焼移行した時

でも、トルクショックの少ないスムーズな運転を実現した。

(2) 空燃比制御

運転領域によってEGR量を大きく変化させたり、空燃比を変化させる必要がある。

そこで、EGR量の変化に応じ、必要な燃料を演算する機能を追加し、目標空燃比が変化したときの応答性を向上させる機能を改善した制御アルゴリズムを開発した。

EGR量の変化に応じ、エンジン内部の酸素量を演算するために、新たに吸気管負圧センサを追加した。

水素REの空燃比制御では、燃料噴射量演算の基本となる充填量をエンジン回転数、吸気流量、吸気管負圧などのセンサ信号を使って演算している。

また、目標の変化に実を追従させる場合、実際の排気の検出の応答性が問題になる。特にリーン領域では、酸素濃度が高いため応答性が悪化している。

そこで、燃焼室のを推定し、このを使って燃料噴射量を補正することで、実を目標に追従させるモデル駆動制御を採用した (Fig.8)。

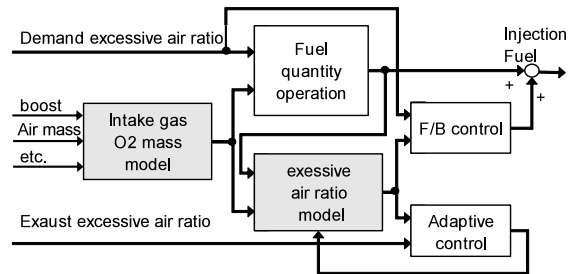


Fig.8 Control (Model Driven Control)

4. 自動燃料切替えシステム

水素燃料が切れたときや水素運転関連の部品に故障が起きた場合には、ガソリン燃料に自動的に切替え、走行安全性を確保した。また、運転者が手で燃料を水素 ガソリン、ガソリン 水素に切替えることを可能にし、お客様の利便性を損なわないようにした。

4.1 自動燃料切替えシステムの開発課題

水素からガソリンへの自動切替えでは以下の2つの課題がある。

- ① 乗員の安全を確保するために、重大な異常を検出した場合には、瞬時に水素燃料噴射を停止するとともに、高圧水素タンクを閉じる必要がある。
- ② 水素燃焼とガソリン燃焼では、要求点火タイミング、要求空燃比に大きな差がある。その結果、切替え時に、燃焼音やトルクの差が生じるため、この補正が必要である。

これらの課題を解決するため、燃焼のサイクル毎に燃料噴射、点火タイミング、補機類などの駆動を個別に切替える制御を開発した。

この結果、1ロータずつ噴射弁を異なる燃料に切替えながら、スロットルと燃料噴射量をトルク制御することで、

切替え時のトルクショックを解消した。

#### 4.2 デュアルCPU型の電子制御ユニットの開発

自動燃料切替えだけでなく、ガソリン運転の性能及び機能をそのままに、水素運転を可能にするため、CPUを追加したデュアルCPU型の電子制御ユニットを新規に開発した (Fig.9)。

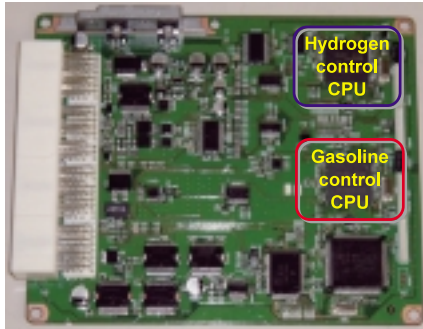


Fig.9 Hydrogen Electric Control Unit

ガソリンと水素の制御を別々のCPUで演算することで、水素制御ソフトウェアの開発をガソリン制御ソフトウェアと独立させ、効率化した。

#### 4.3 自動燃料切替え電子制御

Fig.10に新しく開発した電子制御コントローラのソフトウェア処理概要を示す。

ガソリンと水素で共通の部品 (点火プラグ、スロットルなど) を制御するために、別々のCPUからの制御信号を適切なタイミングで切替えるソフトウェアを新たに開発した。

ガソリンCPU側では、

- ① ガソリン運転制御ソフトウェア
- ② 共通部品 (点火プラグ、スロットルなど) への制御信号を切替えるソフトウェア

を開発した。

一方で、水素CPU側では、

- ① 水素燃料で運転をするための制御ソフトウェア
- ② 水素固有の電子部品 (水素ガスセンサ、水素インジェクタなど) の入力・出力信号演算ソフトウェア
- ③ 水素とガソリン燃料の切替えを判断するソフトウェアを開発した。

更に、ガソリンCPUと水素CPUは上記の処理を同時並行で実行する必要がある。このため、切替えのタイミングやセンサ情報の通信・同期処理を開発した。

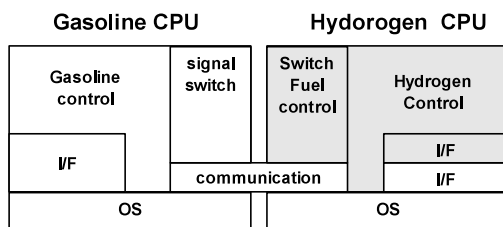


Fig.10 Dual CPU Processing

## 5. ソフトウェア開発技術

前述に用いたシステム設計技術とソフトウェア設計技術について述べる。

### 5.1 システム設計

#### (1) Matlab上での設計と評価 (機能設計)

システム設計上の漏れのリスクを低減するため、FMEA (Failure Mode & Effects Analysis, 故障モード影響解析), FTA (Fault Tree Analysis, 欠陥ツリー解析) 活動での机上設計だけでなく、Matlabを使って、設計したシステムを計算機上で評価した (Fig.11)。

まず、評価の対象になるシステムの機能をMatlabでモデル化した。次に、システムのモデルに対するコントロール機能をMatlab上で設計し、コントロールモデルとした。

このシステムモデルとコントロールモデルを使って、システム挙動のシミュレーションをMatlab上で行った。さまざまなシミュレーション条件で、システムとコントロールモデルを評価し、システム設計を修正した。

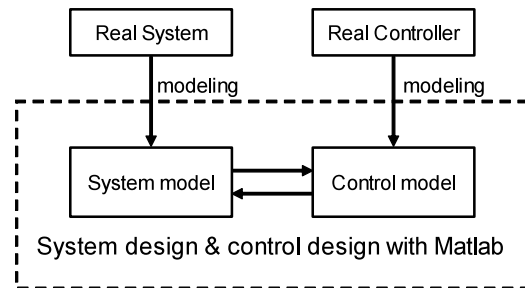


Fig.11 System Design with Matlab

#### (2) 実機を使った設計の評価 (システム設計)

Matlab上での評価後は、実際のセンサ、アクチュエータの精度、駆動力などの制約を考慮したシステム設計を行った。

このため、実際のエンジンや車両を使った試作システムとMatlabで設計したコントロールモデルを評価した。評価を行うには、主に 部品の入出力回路の試作、コントロール&評価用ソフトの試作が必要になる。

今回は新たに開発したラビッドプロトコントローラで入出力回路の試作期間を短期化し、評価用ソフトの試作期間をMatlabで短期化した (Fig.12)。

### 5.2 ソフトウェア設計

#### (1) ソフトウェア設計上の課題

システム設計が終了し、電子制御コントローラを開発した後に、Matlabで詳細ロジックの設計を行った。

詳細ロジックでは、複数の機能を詳細に設計し動作確認を行う。このとき、詳細ロジックの設計よりも、機能同士を接続して、実際の電子制御コントローラ上での動作検証工程に時間がかかっている。

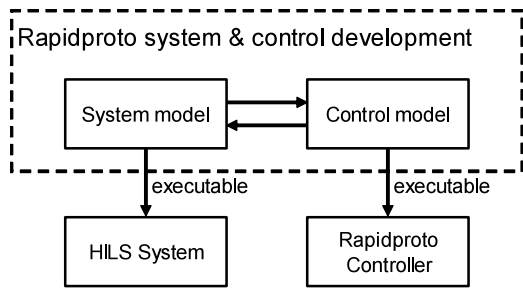


Fig.12 Rapidproto System Development

(2) 組み込みソフトウェア設計工程の自動化

そこで、動作検証工程のうち、共通の工程である組み込みソフトウェアの設計工程の自動化を行った。

このために、詳細ロジックを電子制御コントローラの組み込みソフトウェアに自動的に変換するツールDME (Direct Matlab model to Embedded code system) を新しく開発した (Fig.13)。

5.3 自動ソフトウェア生成ツール

Fig.13に開発した自動組み込みソフトウェア生成ツール (DME) の機能を示す。

- ① Matlabの設計データから処理周期や機能毎にソフトウェア部品としてC言語を自動生成する機能

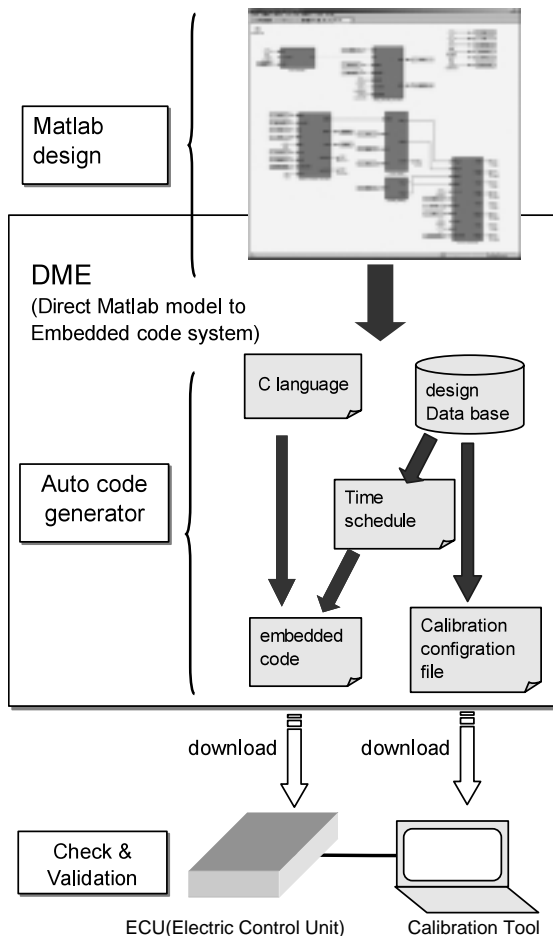


Fig.13 Process of Embedded Code Generation

- ② 生成したソフトウェア部品をMatlabで設計指示した処理周期、実行順序通りに、電子制御コントローラのOS上に組み込む機能
  - ③ キャリブレーションツール用の設定ファイルを自動生成する機能
- の3つから構成される。

この組み込みソフトウェアツール (DME) を使うことで、組み込みソフトウェア設計の自動化を実現した。

この結果、ソフトウェアの検証サイクル時間を大幅に短縮した。

6. おわりに

本稿では、RX-8ハイドロジェンREのデュアルフューエルの電子制御システムとソフトウェア開発技術を紹介した。

実際に組み込みソフトウェアを内製した結果、短期間に高度なデュアルフューエル制御システムを開発することができた。また、この経験を通じ、商品性の向上及び品質を確保する上で組み込みソフトウェアが果たす役割は非常に大きいことを経験できた。

最後に、電子制御コントローラの製作に関して、多大な協力を頂いた(株)デンソー殿をはじめ、社内の関係者の皆様に深くお礼を申し上げます。

参考文献

- (1) 森本ほか：RX-8ハイドロジェンREの紹介，マツダ技報，No.22，p.132-138 (2004)

著者



齊藤智明



松下正典



上田貴之