

東海大学式リーンバーンエンジンとル・マンカーの研究

林 義正^{*1}・中丸 直人^{*2}

Studies on the Tokai University System of Lean Burn Engine and a Racing Car for Le Mans

by

Yoshimasa HAYASHI, Naoto NAKAMARU

(Received on Sep.28,2001)

Abstract

A promising result was obtained with the preliminary test of a new type engine system that can clear away problems with stratified charge lean burn engine currently being commercialized and having a potential to improve fuel economy. This engine system centers round a brand new practical technology that provides stable ignition and fast burn of homogeneous pre-mixed air-fuel mixture and is composed of a super charged system that can achieve lean burn for full operating range and of a unique device to activate catalyst. This study is subsidized by the Kanagawa High-Technology Foundation.

On the other hand, as a measure to promote an education on actual "MONOZUKURI"(manufacturing), a prototype car, TOP'03 (Tokai Original Proto'03), is also being studied aiming to participate in the Le Mans 24 Hours in 2003. The car is installed with YR45 engine of which fundamental design was done by Tokai University under a research trust. This 4.5liter, V8, NA (Natural Aspiration) engine produces 600ps with an air restrictor that satisfies racing regulation. Fundamental chassis layout was completed as a graduation study of the students. The necessary fund will be provided by external sponsorship and advertising contracts. If this plan comes true it will make the first participant from the academic sector in 70 years history of the Le Mans 24 Hours.

Keywords: Lean burn engine, Homogeneous mixture, Fast burn, Multi point ignition, Gasoline engine, Racing car, Racing engine, Le Mans

1. はじめに

専門科目で学習した知的能力 (Ability) を活用して課題を解決する実現能力 (Competence) を涵養するため、新しい方式の卒業研究を実施している。学生達は真のもの作りにいきいきと取り組み、その状況はたびたび新聞や雑誌などで報道されている。その研究の一つは将来型リーンバーンエンジンであり、これに対し高度技術支援財団から助成金が交付された。このエンジンシステムの基本は現在実用化されている成層型のリーンバーンエンジンに代わる、燃料と空気を均質に予混合した希薄混合気を安定に点火し急速に燃焼させる技術である。さらに、高負荷時もリーン運転を実現して出力を確保する技術と酸化窒素の排気中で三元触媒を働かせる新しいシステムも合わせて考案した。これらの三つの技術を組み合わせ基本特許の出願を終了したが、ここでは均質希薄混合気の点火燃焼に関する手作りの基礎実験装置による希薄混合気の燃焼研究について紹介する。

一方、世界三大 24 時間自動車耐久レースの一つであるル・マン出場を目指したレーシングカーの研究を続けてきた。車両の

システムごとに開発担当グループを決め、責任を伴った真のもの作りを実践している。性能設計と車両の基本レイアウトを終了し、個々の部品の仕様を決定する段階に入っている。エンジンは研究委託を受けて設計を指導している(株)YGK 製を東海大学専用に改造して搭載する。なお、レーシングカーの開発費や出場費などはすべて外部から調達する。

2. 東海大学式リーンバーンエンジンシステム

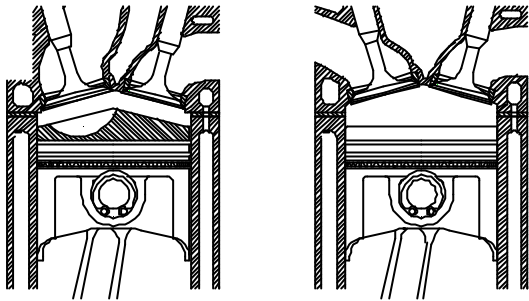
2.1 システムの構成

地球温暖化が深刻化しガソリンエンジンですでに規制されているCO₂,HC,NO_xに加え、CO₂の一層の排出低減が求められている。三菱自動車のGDIエンジン^{1,2)}の実用化以来、ガソリンエンジンの排気および燃費対策としてさまざまな自動車メーカーがリーンバーンエンジンを発表³⁾している。これらはいずれも Fig. 1 (a) に示すように頂面が湾曲したピストンを用いた成層燃焼によるリーンバーン方式を採用している。しかしこの従来型リーンバーンエンジンは混合気に濃い部分を作り周りを空気で囲む方式で、平均してみると希薄燃焼になっているに過ぎない。濃い混合気から燃焼するため、この部分での煤の発生や点火プラグやエンジンオイルの汚れが発生したり、また期待される程の燃費改善が得られないこともあった。

* 1 工学部動力機械工学科教授

* 2 工学研究科機械工学専攻博士課程前期

この従来型リーンバーンエンジンに代わる新しい方式として、Fig. 1 (b) に示すような頂面がフラットなピストンを用い均質に予混合した希薄混合気を安定に点火し急速に燃焼させる新方式のエンジンシステムを考案した。⁴⁾



(a) Current type (b) Tokai original type
Fig. 1 Combustion chamber configuration

2.2 均質な希薄混合気燃焼のコンセプト

Fig. 2 に新リーンバーンエンジンのコンセプトを示す。混合気を均質に希薄に予混合することで問題となる着火性および燃焼速度へのはね返りについては、新規に開発した多点同時点火システムを用い、高負荷時における出力不足は過給を行うことで全運転領域でのリーン運転を実現する。またリーン化だけでは十分に低減できない NO_x については専用の NO_x 触媒装置との組み合わせで対応する。

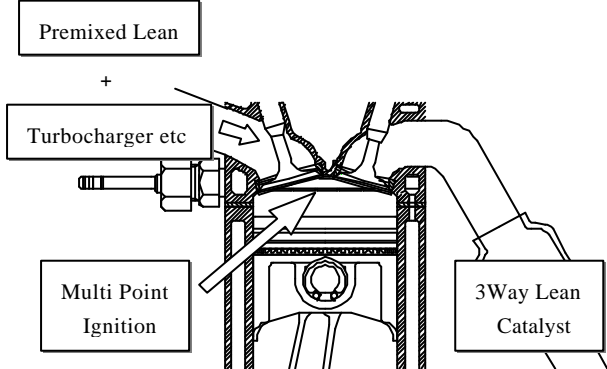


Fig.2 New concept of the lean burn SI engine

(1) 多点同時点火システム

リーンバーンエンジンにおける可燃限界は初期火炎核の形成と火炎伝播の状態によって決まる。初期火炎核の形成を容易にし急速燃焼を可能にするデバイスとして Fig. 3 に示すような高エネルギー多点同時点火システムを新たに開発した。

点火プラグに関しては新エンジンシステムを実現させるため、燃焼室の限られたスペース内に配置が可能であること、コストが安価であることおよび車両搭載時に問題を起こさないことが必須である。これら条件から Fig. 4 に示す点火ギャップを直列に配置したシリーズ式多点点火プラグを考案した。図の下方は点火プラグ単体での放電状態である。

また、空燃比をリーン化していくと点火時期と点火エネルギーがエンジンの安定度に大きく影響する。そこで従来の誘導放電式に比べ放電時間が約 1/10 であり、点火エネルギー供給の時間密度の大きいエネルギー可変式の C D I (Condenser Discharge Ignition system) を設計・製作し用いた。

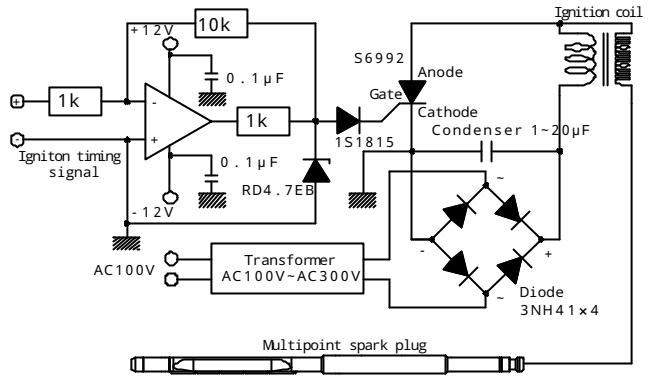


Fig. 3 Multipoint high energy ignition system

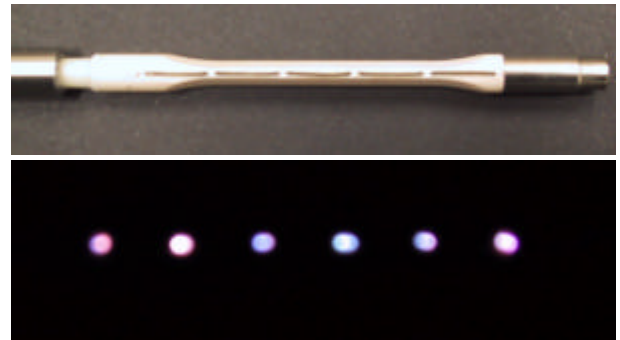


Fig. 4 Multipoint spark plug

(2) 過給による出力の確保

Fig. 5 に示すように、出力空燃比 (13.0) よりリーン側では空燃比 (A/F) が薄くなるほど軸トルクは低下する。従って、全運転領域でリーンバーンを実現しようとする高負荷時出力不足が問題となる。そこで、従来のリーンバーンエンジンでは高速高負荷時には空燃比を濃くして力不足を補っている。これに対し本システムでは高負荷時には過給を行うことでリーン運転を実現し出力を確保する。

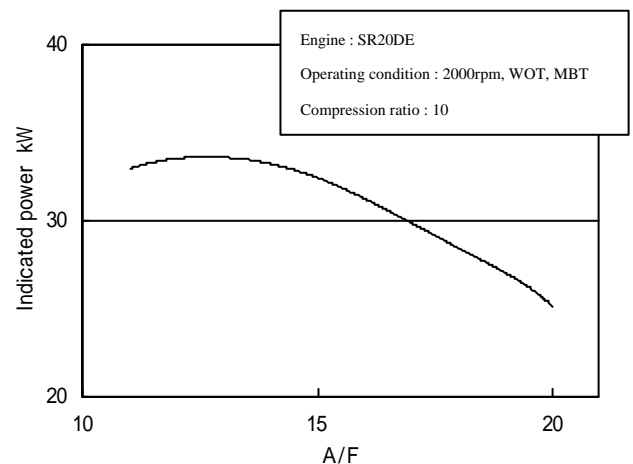


Fig. 5 Effect of A/F on indicated power

(3) リンバーン用触媒活性化装置

リーンバーンエンジンでは燃焼温度が通常に比べ低下するため、NO_xの排出量は減少するが、排気成分内の O₂ 濃度が増加す

るため従来の三元触媒では NO_x をほとんど還元することができない。そこで、酸化雰囲気中の排気中でも三元触媒を働かせる新しいデバイスを考案したが、特許出願が未了であるため詳細の紹介は割愛する。

2.3 実験装置

点火点数および燃焼室形状の影響を比較するため、5種類のシリンダーヘッドを試作した。また、シリンダーブロックやクランクシャフトなどについてはベースエンジンのSR20DEを改造したものをを用いた。Table 1 に基礎実験に使用したエンジンの主要諸元を、Fig. 6 に実験装置を示す。

Table 1 Engine specifications

Number of Cylinder	4
Combustion chamber	Pentroof
Displacement(cm ³)	1998
Compression ratio	10.4
Bore × Stroke(mm)	86 × 86
Number of ignition	6/Cyl

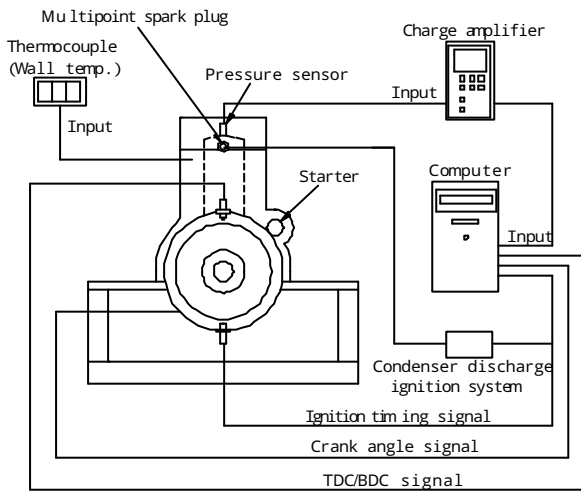


Fig. 6 Experimental apparatus for single shot combustion

2.4 実験方法

シリンダーブロックのウォータージャケット内側の壁温が 80 になるように電熱線で加熱する。ピストンを下降させ新気を吸入し下死点で一度止め、筒内圧センサーアダプター取付穴よりマイクロシリンジで計量したガソリンをシリンダー内に噴霧注入する。ただちに注入口を閉じ、燃料を十分に蒸発させた後、スプリングを用いた起動装置やセルモーターによってエンジンを急速にクランキングし、最初のストロークで点火・燃焼させる。その際、クランクシャフトに取り付けたクランク角度センサーによりクランク角度 1° 毎のシリンダー内圧力をピエゾレジスティブ圧力センサーで測定した。また、クランクシャフトは回転慣性を減らし、ピストンも専用のものをを用いた。

本実験に先立ちシリンダー内に注入したガソリンが完全に蒸発し濃度が均一になる時間を実験的に求めた。シリンダー内各部の炭化水素濃度の時間に対する変化を測定した。

測定方法は、点火プラグ取付穴より 20 μl のガソリンをマイクロシリンジでシリンダー内に注入した後 10 分間のガソリンの濃度の変化を測定した。シリンダー内の測定位置は Fig. 7 に示す上部、中央部、下部の 9カ所より一定量の混合気を採取し、ガスクロマトグラフ (HP 製 589

0型) で測定した。

実験結果の例を Fig. 8 に示す。横軸は時間、縦軸はシリンダー上部のガソリン濃度のクロマトグラムの面積値である。また、シリンダーの縦方向についても同様の結果が得られた。一方、ガソリンの濃度が均質化するために要する時間は、シリンダー下部、中央部、上部の順で遅くなる傾向がみられたので上部が均質化する約 3 分間でシリンダー内の混合気の均質化が完了すると判断した。

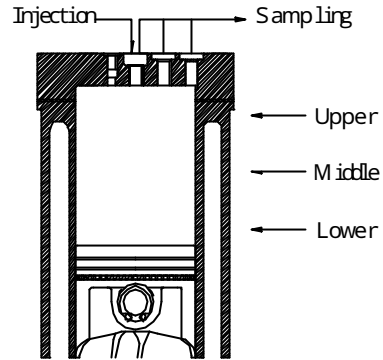


Fig. 7 Sampling position

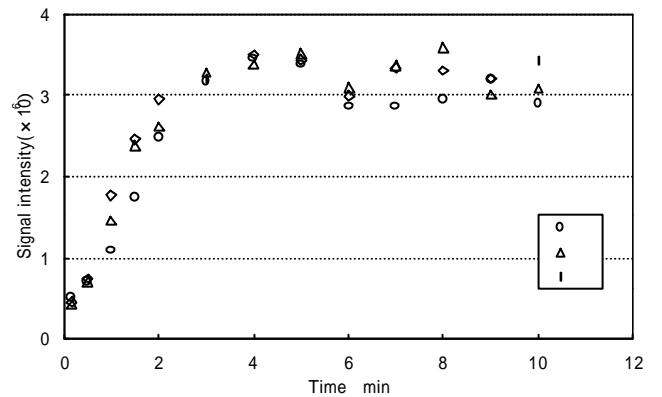


Fig. 8 Mixing characteristics in cylinder

2.5 実験結果

Fig. 9 に A/F = 29.9 における 2 点点火と 6 点点火の場合のシリンダー内ガス圧力特性の比較を示す。

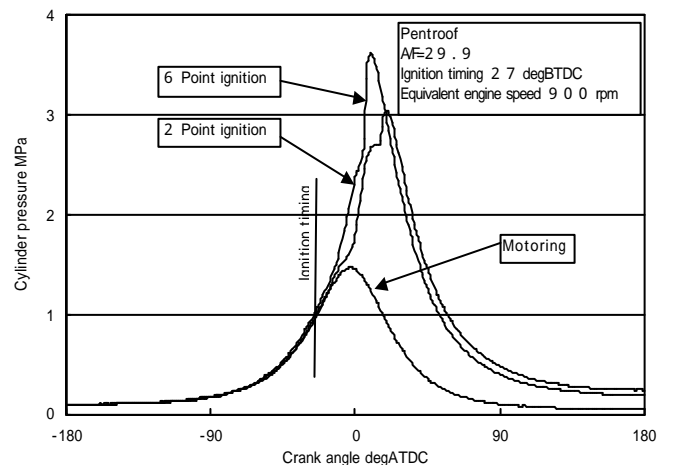


Fig. 9 Gas pressure characteristics in cylinder

モータリング時の波形と比較することにより、理論空燃比 (14.7) よりはるかに薄い均質な混合気においても点火が確認される。また、点火点数が2点の場合より6点の方が滑らかで急速な燃焼となっている。なお、このときの点火エネルギーはともに720mJである。このガス圧力特性から計算により熱発生率および燃焼質量割合を求め Fig. 10 に示す。2点点火に比べ、6点点火の燃焼質量割合の立ち上がりがりの勾配が急になっている。これは点火点数を増加させたことにより、各点でほぼ同時に初期火炎核が形成され火炎伝播したためであると推察される。この結果から個々の火炎伝播速度は希薄混合気のため低下しても、総合すると火炎伝播速度は向上しており、多点点火によりリーンバーンにおいて急速燃焼を実現できることが確かめられた。

また、燃焼期間後半においては初期燃焼期間にシリンダー内ガス温度が素早く上昇することにより火炎の伝播が容易な状態となったため、失火せず燃焼を完了できたと考えられる。

本実験ではピストンを下死点から始動する方式であったため吸排気に伴うスワールやタンブルフローなどのガス流動は燃焼に発生せず、ガス流動はピストンの上昇とスキッシュによるもののみである。この実験結果から吸排気に伴うガス流動の影響があればさらに燃焼速度が向上し、この結果以上の急速燃焼が得られると推察する。

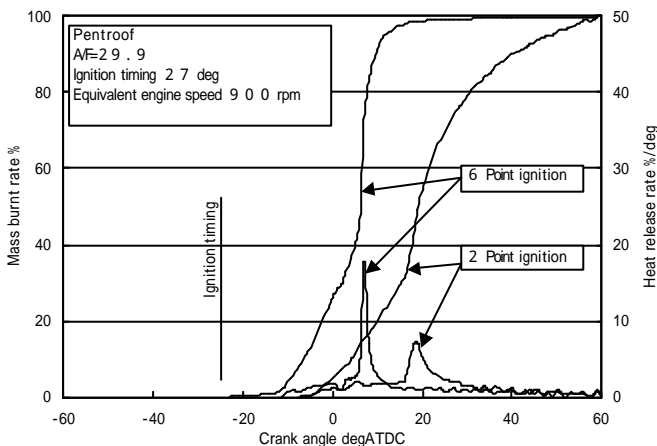


Fig. 10 Effect of multipoint spark on fast burn

2.6 本研究の今後の展開

この単発燃焼実験により、均質で希薄な予混合気確実に点火し急速燃焼を実現できることがわかった。しかし、実用エンジンにおいては運転条件によらず安定して燃焼することが必須あり、実機を用いた連続ファイアリング実験で燃焼の安定性について検討を行っている。

この実験に用いた点火プラグは量産すれば比較的安価になると考えられ、装着性および耐久性の問題を解決すれば、実用エンジンへの適用が可能である。また、多点点火による急速燃焼はレーシングエンジンなどにも有効で、その応用範囲は極めて広い。今後は過給機、触媒活性化装置と合わせ新リーンバーンエンジンシステムとして研究を進めていく。

3. ル・マンカーTOP'03の開発

既習の専門科目を駆使して課題を解決する題材として、19

95年より本格的なレーシングカーを卒業研究テーマの一つとして取り上げてきた。これは機械工学の4大力学に加え材料学や電子制御などの新技術を包含し、学生の実現能力を高めるためには最適であると考えたからである。当初は通常の卒業研究として出発したが、その後学生の人気は急速に高まり希望者が殺到したため開発コースとして学生数を増加した。また、毎年の卒業研究発表会には報道関係や企業からも多数の聴講者が詰めかけている。ちなみに卒業生たちの多くは自動車メーカーや関連の企業に就職し、社内でも課題突破力があると評価されている者もいる。2000年10月に行われた東海大学モータースポーツフォーラムで具体的な研究成果の発表の場として、2003年のル・マン24時間耐久レース参戦が公表され、研究がさらに活発化した。

3.1 TOP'03の目標性能

研究のターゲットは工学的に最高レベルの技術への挑戦に対し学生の意欲がきわめて大きいため、ル・マンカーとして最高のカテゴリーのLMP900とした。また、このレーシングカーはプロトタイプであるため、設計上の自由度が大きく製作台数の下限がないため費用的にも有利である。この研究は企業における研究開発と同様のプロセスでまず目標性能を設定した。次に、近年におけるラップタイムや周回数などを調査して、2003年のトップクラスの性能を予測した。そのときエンジンの吸入空気量を制限するエアリトリクターの径の縮小やハイテクシステムの導入緩和などのレース規則の変更も同時に調査し、不確定な条件については過去の傾向や技術の進歩などを基に予測した^{5,5)}。

Fig. 11にル・マンの一周13.6kmのサルテサーキットと、Fig. 12には最近の予選における最速記録を示す。

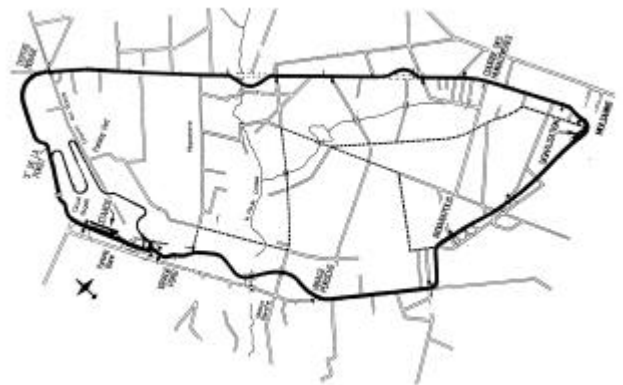


Fig. 11 Le Mans circuit

レーシングチームの大部分が学生であるので、教育的な観点から全競技時間を有効に使用してその後の研究に活かせるデータを蓄積することを最大の目標とする。従って、途中でリタイアすることなく完走することを目指し、余裕をもったラップタイムとした。Fig. 11のサーキットを全力で疾走する予選のラップタイムは2003年には、Fig. 12のように近年の傾向とレース規則の変更および有力チームの技術開発の動向から3分29秒台になると推察された。この図において1999年は特

殊な仕様の車両が参加したため予選のタイムは速いが、結局この車両は決勝レースでは完走できなかった。従って、これは特異な現象として取り扱った。ちなみに、レース規則は異なるが1990年に筆者らが樹立した予選のコースレコードはエンジン出力885kWで3分27秒02であった。

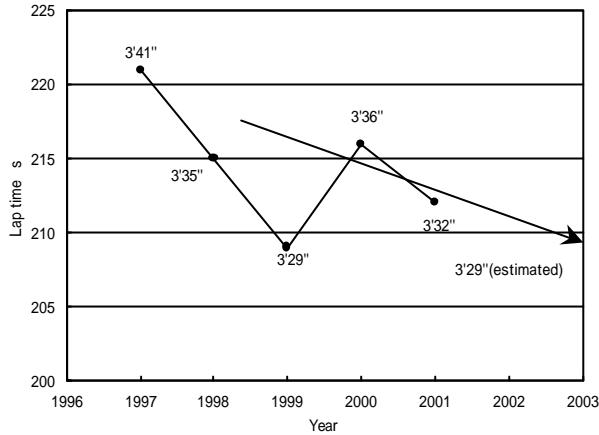


Fig. 1 2 Best lap time in qualify run

一方、決勝レースにおける1位の周回数も同様に考え Fig. 1 3より370周と予測した。この図において2001年は悪天候のため周回数が減っている。また、筆者は決勝レースにおいてラップタイムを10%遅くすると総合的な耐久・信頼性は約35%改善されることを経験した。また、これまでのレース結果では1位のラップ数に対し総合入賞範囲の6位は実力の差が顕著にやすい状態で約11%、実力が伯仲した場合は2.6~7.6%減である。

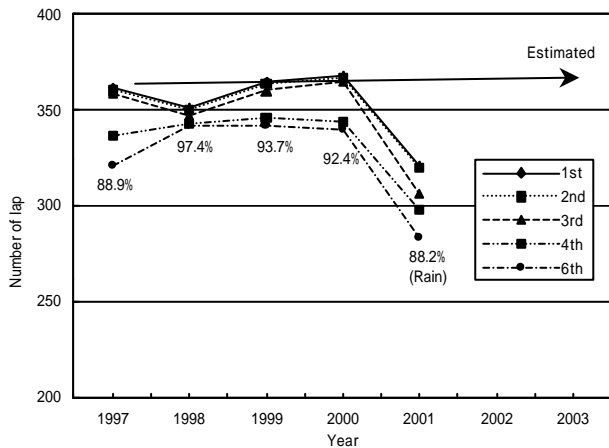


Fig. 1 3 Race result

また、勝つことより研究的なデータが多く得られ、しかもスポンサーからも満足いただけるレース展開を行い結果的には入賞圏内に入ることも可能な次の目標を設定した。

予選ラップタイム 3分45秒

決勝ラップタイム 3分51秒

これは1スティント(ピットアウトからピットインまで)が12ラップ、ピットイン回数28回、ピットインごとのロスタイム3分、不測のトラブルへの対応時間47分とし、周回数を340回として割りつけた結果である。

3.2 車両の特徴

学生が中心になり先に述べた目標性能を実現するレーシングカーの設計コンセプトをまとめた。まず、当研究室で研究してきたサーキット走行シミュレーション技術を駆使して、車両の構成要素の特徴が走行性能に与える影響を詳細に解析した。その結果、東海大学独自で開発するレーシングカーの設計の基本コンセプトを「低重心化と重量配分のバランス」とした。これに基づいて車両の各部分の仕様を決め車両全体をレイアウトした。その一部を Fig. 1 4にまた主要緒元を Table 2に示す。

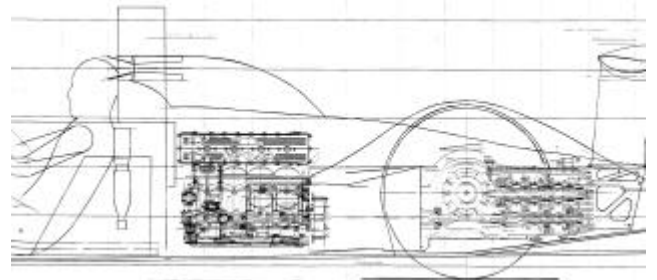


Fig. 1 4 The Layout of TOP'03

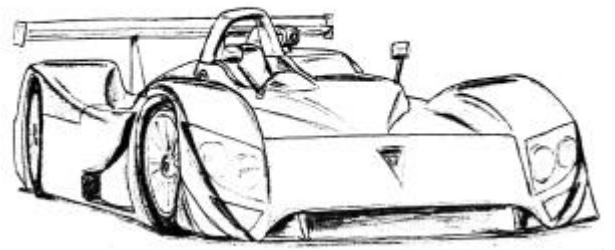


Fig. 1 5 TOP'03 designed by students

Table 2 Vehicle Specifications

Overall length	mm	4645
Overall width	mm	1996
Overall height	mm	1022
Wheel base	mm	2790
Tread	mm	1636
	mm	1604
Over hang	mm	900
	mm	955
Minimum road clearance	mm	50
Vehicle weight	kg	900
Weight distribution	F/R	45/55
Suspension	Front	Double wishbone, push rod
	Rear	Double wishbone, push rod
Steering		Rack and pinion
Tire size	Front	325/30R18
	Rear	375/30R18

この車両はハイダウンフォースのウイングカー仕様であるため空気抵抗係数 Cd の目標値を 0.45、逆揚力係数 -Cl を 1.75 としているが、これは風洞実験用の 1/3 スケールモデルを用い学外のムービングベルト風洞で実測する。

車両の前面投影面積を 1.52 m^2 、後述のエンジン出力を 440kW として最高速度を算出すると 350km/h となる。この速度は走行安定性の面からも、また最近の傾向から見ても妥当な値であると判断している。また、ダウンフォースによっても異なるがインディアナポリスコーナーのような高速コーナーを走行中の最大の横 G は 4G まで可能であると考えられる。

3.3 エンジンの特徴

エンジンは東海大学が研究委託を受けて基本設計をした(株)YGK 製の V 型 8 気筒の排気量を 500cc 増大して 4500cc とし、さらに吸気系と排気系をこれまでの基礎研究の結果に基づいて大きく変更して使用する。また、学生でも取扱い易いように排気ターボは用いずに自然吸気方式 (NA) とした。ここでレーシングカーの競争力を均衡化するために、ル・マンではレース規則により吸気量を制限するエアリストラクターの装着が義務づけられているが、その径がターボ仕様より NA エンジンの方が大きい。シミュレーションにより排気量とエアリストラクターの径とのバランスを検討しもっとも有利な組合せとした。

エンジンの詳細は、研究依頼元も基本的には同じエンジンを搭載した車両でル・マンに出場するため契約により割愛する。しかし、このエンジンは筆者らが設計しかって多くのレースを制覇し、海外から世界最強のエンジンと称された VRH35Z⁷⁾より小型・軽量でフリクションも小さくなるように設計されている。また、最高出力は直径 46.3mm のエアリストラクター一個を装着した状態で 440kW/7200rpm を発生させる。

4. おわりに

社会に出て即戦力となる創造性にすぐれ課題突破力を身に付けた学生を育成する卒業研究を二つ紹介した。これらの研究はマスコミにも何度も取り上げられ、世間の関心の高さがうかがわれる。しかし、新方式のリーンバーンシステムは基本特許は出願したが、サブシステムの特許出願が残っている。従って、ノウハウに関する部分は割愛したが、システム全体からこれを構成する三つの技術をご賢察いただければ幸いである。

一方、2003年のル・マン出場を目指したレーシングカーの研究は学生たちがエネルギーに取組んだ結果、試作を行うメーカーを選定する段階に達した。TOP'03に搭載予定のエンジンは研究委託を受けて設計を指導しており、委託元よりも先にエンジンの詳細について紹介するのは避けることにしたのでご容赦いただきたい。学生が新しい課題に挑戦するとき、想像以上の高い専門能力を発揮したり、個人個人が能動的に研究に取り組んでいるのが印象的であった。また、プロジェクト運営費はすべてスポンサーや寄付などの外部調達によるが、すでにいくつかの企業から協力を申し出ている。これらの研究を通じ学生が大きく成長していることを実感している。

なお、東海大学式リーンバーンエンジンシステムの紹介については現本田技研株式会社勤務の吉田知広氏の修士論文の一部を使用させていただいた。ここに厚く謝意を表します。

参考文献

- 1) T.Kume et al, Combustion Control Technologies for Direct Injection SI Engine, SAE Paper 960600 (1996)
- 2) Y.Iwamoto et al, Development of Gasoline Direct Injection Engine, SAE Paper 970541 (1997)
- 3) 米玉利 貞幸 他 3, QR20DD エンジンの開発, 自動車技術会 シンポジウム No. 20-01 (2001)
- 4) 吉田 知広, 均一希薄予混合気燃焼火花点火エンジンの研究, 東海大学工学研究科修士論文 (2001)
- 5) 林 義正, 車両高速化の極限と人間工学, 機械の研究 第47巻第3号 (1995)
- 6) 林 義正, 世界最高の性能と低燃費を両立させたマシンの開発, 第4回生産学術連合会議「ものづくりの変革を目指して」(2001)
- 7) 林 義正, レーシングエンジンの徹底研究, グランプリ出版 (1991)
- 8) 林 義正, レース用 NA エンジン, グランプリ出版 (1993)