

〔論 文〕

ガソリン機関によるベンチテスト装置の開発

藤松 裕也^{*1}・高山 敦好^{*2}・立道 悟^{*1}・益本 広久^{*2}

Development of Bench Test Equipment for Gasoline Engines

Yuya FUJIMATSU^{*1}, Atsuyoshi TAKAYAMA^{*2}, Satoru TATEMICH^{*1}, Hirohisa MASUMOTO^{*2}

Abstract

Technologies that enable gasoline engines to operate at a net thermal efficiency greater than 40% owing to improved combustibility and reduced friction losses have been reported. In recent years, HCCI combustion has attracted attention; like the diesel engine, HCCI uses autoignition while increasing the compression ratio and avoiding ignition delay. Laboratory experiments using bench tests are necessary to verify this performance, but gasoline engines are generally evaluated by simulation; university research facilities are not typically equipped to perform bench tests of gasoline engines. Therefore, we constructed bench test equipment using an L15B-NA engine manufactured by HONDA and a water dynamometer manufactured by FUCHINO. For the selection of the propeller shaft, the member was observed under a microscope, a hardness test was carried out, and the allowable stress was calculated. On the basis of the aforementioned experiments, the following conclusions were obtained. By calculating the torsional stress from the shaft torque, we succeeded in safely connecting the EUT with the dynamometer. H-steel and I-steel were used for the bench, the strength provided by two-point support was sufficient, and the safety design was improved by the addition of vibration holding by the absorber. We achieved an NOx concentration of 3.4 g/kWh with fuel consumption of 252.1 g/kWh at 25% load and an NOx concentration of 5.5 g/kWh and fuel consumption of 341.2 g/kWh at 50% load.

Key Words : Gasoline Engine, Bench Test Equipment, Hardness Test, Safty Designining

1. 緒 言

ガソリン機関は、燃焼性及びフリクションロスの改善により、正味熱効率が40%を超えた技術が報告されている。近年の環境規制が強化され、かつ燃料電池や電動化が進む中で、SIP（Strategic Innovation Promotion Program）事業による正味熱効率50%を超える技術の構築を目指している¹⁾。これは、総合科学技術、イノベーション会議が、科学技術イノベーション創造のために省庁の枠や旧来の分野を超えて創設した「戦略的イノベーション創造プログラム」であり、産学官連携により、基礎研究からその出口までをつなぎ、科学技術イノベーションを戦略的且つ強力に推進している。

内燃機関は、ガソリン機関とディーゼル機関があり²⁾、それぞれ燃料としてガソリンと軽油が用いられている。ディーゼル機関では圧縮比を高くし、燃料を高圧化することで温度を上昇させ、自然発火を促す燃焼方法となっており、ガソリン機関に必要な点火コイルやプラグが不要である。ガソリン機関の開発は、パソコン上の設計ソフト内での実験が主であり、シミュレーションが重要となる。しかし、燃料の改質や吸入空気の改善は実機によるテストが重要である。近年、シャーシダイナモが多く開発され、車両に積まれたエンジン自体を計測することが可能であるが、燃焼圧のモニタリングなど、クランク角度と吸排気圧力による推定値でしかなく、明確な実験データを得るためには、ガソリン機関のベンチテストシステムを構築する必要がある。しかしながら、ガソリンは揮発燃料であり爆発の恐れがあることから、大学等の研究機関においてはベンチシステム自体の設置を取りやめる傾向にあり、その安全性を考慮する必要がある。

近年ではガソリンエンジンにおいて HCCI 燃焼^{3), 4), 5), 6)}を導入する動きが活発化しており、マツダ社においては2019年度に実用化することが決定している。HCCI 燃焼は、圧縮着火燃焼であり、ディーゼル機関と同様の燃焼手法である。ガソリン機関では、圧縮比、燃焼温度が低いことから着火性を確保することが難しい。そこで、ディーゼルエンジンと

^{*1} エネルギーシステム工学専攻, ^{*2} 機械システム工学科
平成30年11月19日受理

同様に圧縮比を高くすることで着火遅れを回避し、圧縮比12～14の高圧縮機関が誕生することになっている。しかし、他の自動車メーカーでは、HCCI 燃焼を導入する傾向にはなく、ピストン形状やシリンダ壁面温度の管理に重点が置かれている。HCCI 燃焼は、自己着火が必要となることから、多段噴霧、副室着火など、様々な研究がなされている。しかしながら、安定的な自己着火は難しく、研究途上であるといえる。そこで、ガソリンエンジンの自己着火現象を加速させる為には、ベンチテストによる実験室実験による多種多様な手法を試行錯誤することが重要となる。

本研究は、供試機関にホンダ製 L15B-NA、直接噴射式 4 サイクルエンジンを用い、水動力計を用いることで負荷実験可能なベンチテストシステムを設計・開発するものである。

2. 設計理論および実験概要

2・1 許容応力

構造物は、各部において複数の荷重を受ける応力を解析する必要があるが、単一の回転軸においては、ねじり応力に対する許容応力を算出する必要がある。これは、材料によって定まる許容応力以上が求められる。部材の許容応力を算出するためには、降伏点応力の 2/3 とすればよい。また、表 1 に示す安全率を取ることで、破壊または不当な変形等を防ぐことが可能である。式(1)に、出力、式(2)、(3)に断面係数を示す。これらを式(4)に代入することで、ねじり応力が算出できる。

$$T = \frac{60Ps}{2\pi N} \dots\dots\dots(1)$$

$$Z_p = \frac{\pi d^3}{16} \text{ (中実の場合)} \dots\dots\dots(2)$$

$$Z_p = \frac{\pi(d_2^4 - d_1^4)}{16d_2} \text{ (中空の場合)} \dots\dots\dots(3)$$

$$\tau = \frac{T}{Z_p} \dots\dots\dots(4)$$

Ps：出力 (W)

N：回転数 (rpm)

π ：円周率

T：トルク (Nm)

τ ：中実のせん断応力 (N/m²)

Z_p ：極断面係数 (m³)

d：直径 (m)

τ ：せん断応力の許容応力 (N/m²)

d_2 ：中空の外径 (m)

d_1 ：中空の内径 (m)

2・2 供試機関および動力計

表 2 および図 1 に供試機関を示す。ホンダ製 L15B-NA、4 サイクル直接噴射式ガソリンエンジンである。ボア 73.0 mm、ストローク 89.4mm の排気量 1496cc である。最高出力は回転数 6600rpm で 97kW である。

動力計は蒸気機関、内燃機関、水車などの原動機の発生動力、及び圧縮機、ポンプなどの作業機械の消費動力の測定を行う装置である。測定原理より、吸収動力計と伝達動力計である。吸収動力計は原動機の動力を制動することで熱または電気に変換し、その際の回転モーメントを直接測定して動力を求めるものであり、固体摩擦動力計、水動力計、空気動力計、電気動力計、歯車ポンプ動力計などがある。伝達動力計は動力が伝えられている途中で間接的に回転モーメントを測定して動力を求めるものであり、使用中の回転モーメントが測定できる。ねじり動力計、歯車動力計、ベルト動力計などがある。本研究に用いた図 2 の動力計は、フチノ製水動力計で最大 200PS の計測が可能である。

Table 1 Safety Character⁷⁾

	Static	Repeated Static		
		Angle	Repetition	Impact
Cast iron	4	6	10	15
Steel	3	5	8	12

Table 2 Engine spec

Engine name	L15B
Type	Direct ignition 4 cycle
Displacement	1496cc
Bore×Stroke	73.0mm×89.4mm
Horsepower	97kW/6600rpm

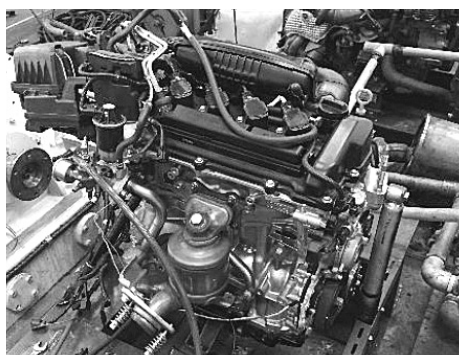


Fig.1 Engine

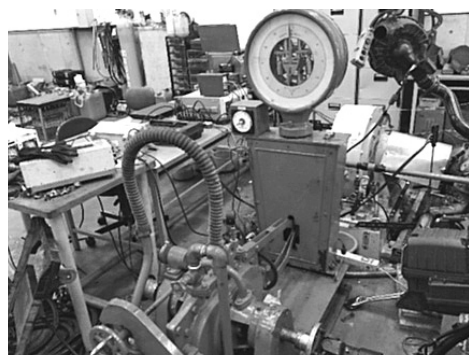


Fig.2 Dynamometer

3. 構造計算および測定結果

3・1 プロペラシャフトの選定

本研究において、図3で示すマツダ製ボンゴ用プロペラシャフトを採用した。一般的なプロペラシャフトは2分割式が採用されている。中央部がスプライン形状になっており、左右がユニバーサルジョイントとなっている。図3のボンゴ用プロペラシャフトは、スプライン（中実）と軸（中空）の二つが組み合わさっていた。スプラインの直径は23mmであり、軸の外径は65mm、内径62mm、厚みは1.5mmであった。

図4に5%硝酸アルコール（ナイトール）により腐食したスプラインの外周と内周の硬さ及び組織をマイクロビッカース硬さ試験及び光学顕微鏡で観察した結果を示す⁸⁾。硬さ（HV）は平均231.5であり、スプライン部はニッケル・クロム強靱鋼 SNC 2 相当材と考えられる。また、図5は軸部の部材の観察結果を示すが、硬さ（HV）は平均149であり、鋼（S35C）相当材と考えられる。

3・2 セン断応力

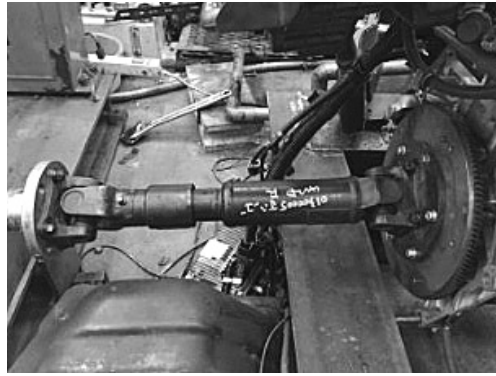
鉄鋼の顕微鏡写真と解説の文献から SNC 2 の降伏点応力が686.4N/mm²、S35C の降伏点応力が302N/mm²であるため、許容応力は以下の式(5)で求まる⁸⁾。繰り返し応力であることから、安全率を6とした。

$$\tau_0 = \beta \times \frac{2}{3} \div S \cdots \cdots (5)$$

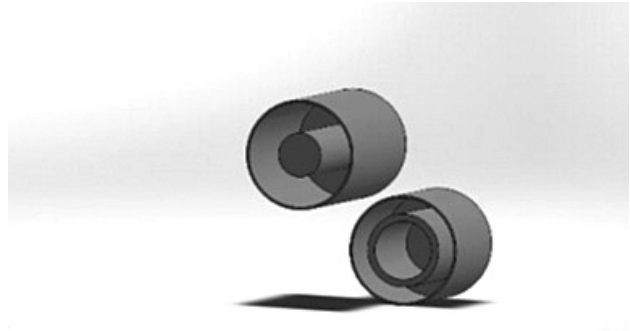
β ：部材の降伏点応力（N/mm²）

τ_0 ：部材の許容応力（N/mm²）

S：安全率

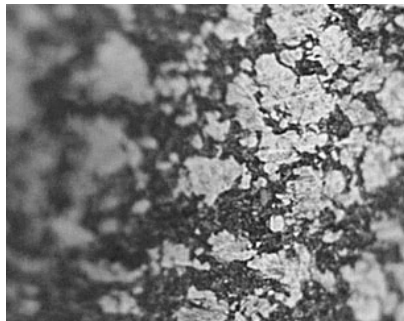


(a) Real



(b) 3D model

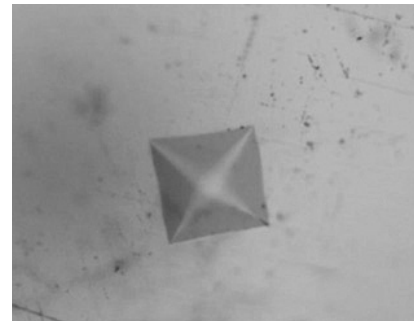
Fig. 3 Propeller shaft for Bongo made by Mazda



(a) Outside of spline

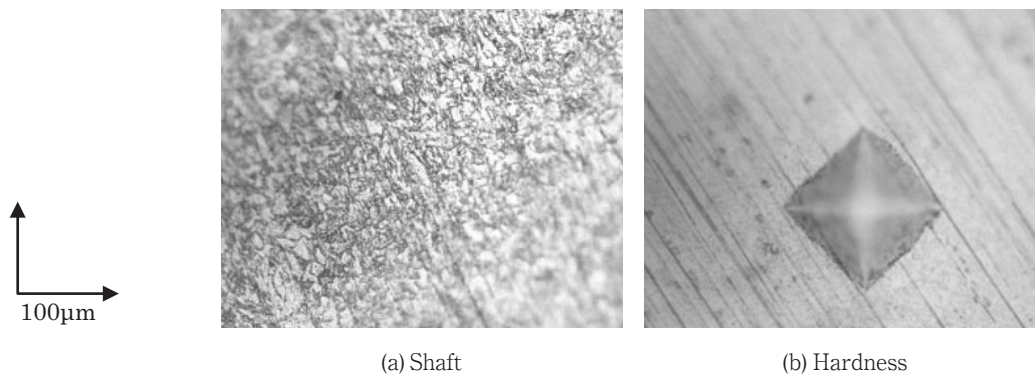


(b) Inside of spline



(c) Hardness

Fig. 4 Analysis of material by propeller shaft spline



(a) Shaft

(b) Hardness

Fig. 5 Analysis of material by propeller shaft pipe

以上から、SNC 2 の許容応力が 77.78N/mm^2 、S35C の許容応力が 34.37N/mm^2 であった。最高トルクは 155Nm である。3.1節の結果から、スプライン部の極断面係数が $2.39 \times 10^{-6}\text{m}^3$ 、軸部の極断面係数が $9.29 \times 10^{-6}\text{m}^3$ であるので、スプライン部の許容応力が 64.88N/mm^2 、軸部が 16.69N/mm^2 と算出できた。これらは、部材許容の許容応力を下回っており、供試機関の出力に十分耐えられることが分った。

3・3 ベンチの設計および製作

供試機関の重量が約 120kg である。図9に示すように、2点支持にはマツダ製ボンゴ用エンジンマウントを採用し、H鋼とI鋼を組み合わせてエンジンマウントを作成した。後方にはショックアブソーバを流用し、振動による立て揺れを抑制する狙いがある。

エンジンマウントには片側 60kg 、H鋼中心から 180mm の位置に搭載したことから、モーメントは 105.91Nm であり、

ねじり応力が 2.42N/mm^2 となる。H鋼の降伏点応力が 400N/mm^2 であることから、許容応力が 22N/mm^2 となり、装置が耐えうるものである。

燃料の供給は、最低でも 4kg/cm^2 の圧力が必要であることから、スズキ製ジムニー用燃料ポンプを用いて加圧供給させた。燃料消費量は、キーエンス製流体コリオリ流量計（FD-SS02A）を用いて計測可能である。排気ガスの計測は、testo製 testo350XL を用い、 O_2 、 NO 、 NO_2 を計測した。

3・4 考察

ガソリンエンジン用ベンチシステムの構築を行った。安全率を用い、各部材の許容応力とねじり応力を算出することで、装置の耐久性を鑑みた。動力軸自体も出力に絶えうる構造にあり、供試機関の基礎データを算出した。プロペラシャフトは、メーカーから材質の開示がなく、許容応力を算出する上で重要な要素であることから、部材の一部を切り取り、顕微鏡による組成の確認と硬度により、判定できたと言える。

図12にガソリンエンジンの基礎データを示す。負荷25%で、 NO_x 濃度が 3.4g/kWh 、燃料消費が 341.2g/kWh 。負荷率50%で、 NO_x 濃度が 5.5g/kWh 、燃料消費が 252.1g/kWh であった。負荷50%で問題なく稼動しており、HCCI燃焼や吸気改善技術など、実機による実験が可能となった。

4. まとめ

本研究は、ガソリンエンジン用ベンチシステムを設計開発し、以下の結論を得た。

1. 軸トルクからねじり応力を算出することで、供試機関と動力計の安全な接続に成功した。
2. ベンチはH鋼とI鋼を用い、2点支持にて十分な強度を有し、かつアブソーバによる振動保持を加えることで安全性を向上できた。
3. ベンチテスト装置が完成し、ガソリンエンジンの基礎データを習得できた。負荷25%で、 NO_x 濃度が 3.4g/kWh 、燃料消費が 252.1g/kWh 。負荷率50%で、 NO_x 濃度が 5.5g/kWh 、燃料消費が 341.2g/kWh であった。

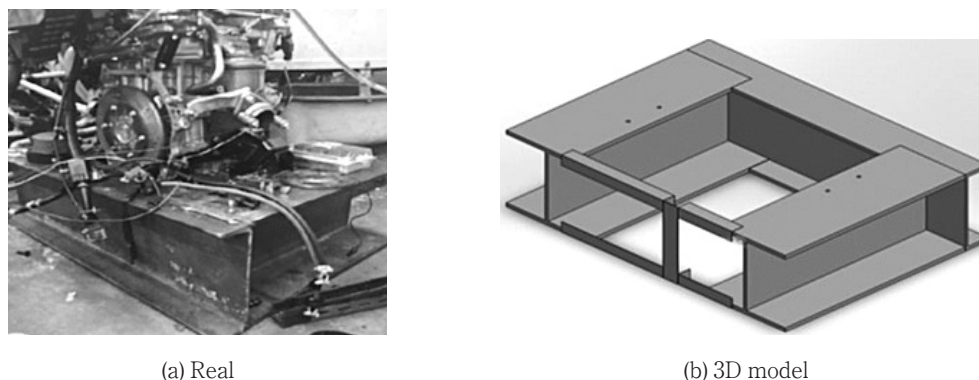


Fig. 9 Engine bench

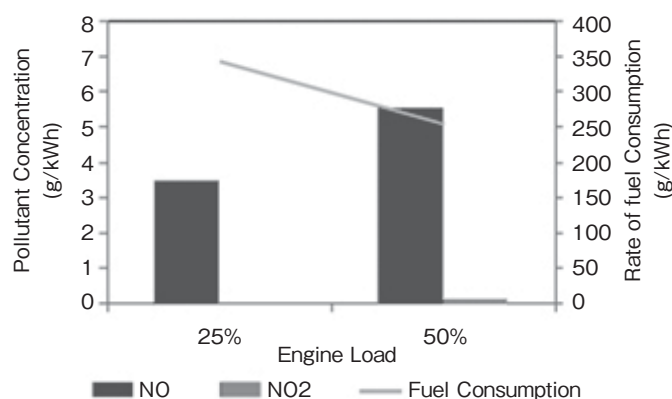


Fig. 10 Basic data

文 献

- 1) 中別府修, 土屋智洋, 中村優斗, 長坂圭輔, ” 燃焼場の壁面熱流束を計測する薄膜抵抗センサに関する研究”, 日本機械学会論文集, 82巻, 840号, pp. 16-00083, 2016.
- 2) 森康夫, ”熱力学概論”, 養賢堂, pp235-237, pp. 239-240, 1993,
- 3) 養祖隆, 山川正尚, 廣瀬敏之, 田中重行, 中山竜太, 草鹿仁, ” ガソリン HCCI 機関における燃料特性と自己着火に関する検討 (第1報)”, 自動車技術会論文集, 40巻, 1号, pp. 99-104, 2009.
- 4) 偉昭, 吉澤廣昭, ゴンザレスファン, 荒木幹也, 志賀聖一, ” HCCI 燃焼に及ぼす超過膨張サイクルの影響要因の検討”, 自動車技術会論文集, 46巻, 6号, pp. 1051-1056, 2015.
- 5) 五十嵐正博, 佐々木洋士, 美濃輪直樹, 大友和臣, 佐藤敏史, 石丸裕喜, ” 分割式燃焼室による予混合圧縮着火機関の燃焼の多段化”, 日本機械学会関東支部総会講演会後援論文, 23巻, 2017.
- 6) 村瀬英一, ”革新的燃焼技術による高効率内燃機関”, 新日本, pp273-282, 2015.
- 7) <http://d-engineer.com/zairiki/anzenritu.html/>, 安全率, 平成30年11月1日参照.
- 8) 佐藤知雄, ” 鉄鋼の顕微鏡写真と解説”, 丸善, pp(25), pp. 127, 1968.