非酸化雰囲気 排気シミュレータの開発

Development of Non-oxidation atmosphere Exhaust System Simulator

> 当社の排気シミュレータは,エンジン本体の開発後に実施されていた排気 系部品の耐久試験を,エンジン開発初期から排気系部品単体での無人耐久試 験を可能にし,開発期間の短縮に貢献している。しかし,従来の装置は燃焼 ガスに高圧の空気(二次エアー)を注入するため,多量の未燃酸素ガスを含 む酸化雰囲気となっている。このため,燃焼ガス中に酸素をほとんど含まな いガソリンエンジン実機の耐久試験結果と比較すると,より厳しい評価結果 となっていた。

> 今回,不活性ガスによる燃焼ガスの雰囲気調整法を考案し,従来の実機エンジンによる耐久試験と比較して,ほぼ同一精度の試験結果を短期間にかつ低コストで得られる非酸化雰囲気排気シミュレータの開発に成功した。

Hitachi's exhaust system simulator was developed as a new fatigue-evaluating apparatus for exhaust parts instead of using the actual engine. In recent years, the rapid rise in exhaust gas temperatures has affected the results of durability tests done by oxidation. We have now developed an exhaust system simulator in a non-oxidation atmosphere that has been able to generate temperatures and atmospheres similer to those of actual gasoline engines.

● 緒 言

近年,環境規制が厳しくなるに伴い,低燃費・低排出 ガスのガソリンエンジンへの要求は年々厳しくなってい る。図1にガソリン内燃機関における空燃比(空気と燃 料の比率)と燃焼ガス温度の関係を示す。理論空燃比で ある14.7に近づくにつれて燃料消費率は小さくなるが, 燃焼ガス温度は上昇する。現在,環境規制のもっとも厳 しい欧州においては,排気マニホールド入口部でのガス 温度(排気ガス温度)980 前後の自動車が市場に出て いる。そして,2005年以降を狙って1,050 の温度を目 標としたエンジンの開発が進んでおり,それに対応しう る排気系部品および材料の開発が急務とされている。し かしながら、このような過酷な環境において排気系部品 に生じる不具合は高温環境下における酸化膜や熱膨張お よび収縮による熱疲労によるき裂であることが多く,ま た,一般的に耐熱材料は1,000 を超えると急激な酸化 挙動の変化を示すことが経験的に知られている。このた め,高温の排気ガス温度環境下において実機をトレース できる単体台上耐久試験方法確立の重要性が増加してき ている。

このような状況下において,当社が開発した排気系部 品の単体評価試験装置(排気シミュレータ)は燃料にガ ソリンと比較して安全かつ安価なLPGを使用し,燃焼用 空気(一次エアー)との混合気に点火して完全燃焼させ, コンプレッサによって高圧の空気(二次エアー)を導入 することにより点火後30秒以内に1,000 を超える高



図1 空燃比と排気ガス温度の関係

Fig. 1 Relationships between A/F and exhaust gas temperature.

三宅正浩^{*} 伊藤賢児^{*}

Masahiro Miyake Kenii Itoh

^{*} 日立金属株式会社 素材研究所

Casting Technology Research Laboratory, Hitachi Metals, Ltd.

温・高圧の燃焼ガスを得ることができる。これにより, ガソリンエンジン実機による評価試験とほぼ同等の温度 分布と試験結果を得ることができ,これまでに多くの実 績を上げ,顧客より大きな信頼を得ている。

しかし,燃焼ガス中に二次エアーで供給される多量の 未燃酸素が残留することにより,1,000 を超える試験 条件では排気マニホールドやタービンハウジングに与え る酸化の影響がガソリンエンジン実機の場合より過酷に なり,実車試験に相当する試験結果を得ることが困難と なってきている。

そこで,この問題を解決すべく,燃焼ガス雰囲気を非酸化雰囲気に調整し,1,000 を超える高温環境下においてエンジン実機と同等の耐久評価試験が可能な装置の開発を行うこととした。

2 現行排気シミュレータ試験システム

現行排気シミュレータ試験システムを**図2**に示す。ま ず,燃焼室内に燃料となるLPGガスと燃焼用空気(一次 エアー)を注入し,混合気とする。混合気に点火するこ とで燃焼ガスを得るが,この状態では試験体に十分に熱 を伝達する圧力が不足しているため,二次エアーを導入 して増圧する。この方法は当社独自のものであり,点火 後30秒以内に1,000 を超える燃焼ガスを得ることがで きる。



図 2 現行排気シミュレータ試験システム構成図





図 3 エンジン試験パターン(加熱 - 冷却試験) Fig. 3 Durability mode of an actual engine (Heating and cooling mode).

また,図3に示すようなエンジン実機の加熱-冷却 (Go-Stop)耐久試験モードに対して,図4のように忠実 な再現が可能であり,さらに,図5に示すような欧州の アウトバーン走行を想定したモード(アウトバーンモー ド)もコントロールボックスにプログラム機能を組み込 むことにより,図6のように排気シミュレータでもさま ざまな試験モードの耐久試験を可能としている。

図7に排気シミュレータを用い,アウトバーンモード 耐久試験を実施した結果を示す。図8のエンジンベンチ 試験結果と比較して,き裂発生位置は良く一致している ことがわかる。



図4 シミュレータ試験パターン

Fig. 4 Durability mode of an exhaust system simulator (Heating and cooling mode).



図 5 エンジン試験パターン(アウトバーンモード) Fig. 5 Durability mode of an actual engine (Autobahn mode).



図 6 シミュレータ試験パターン(アウトバーンモード) Fig. 6 Durability mode of an exhaust system simulator (Autobahn mode).



図 7 排気シミュレータ試験結果(アウトバーンモード) Fig. 7 Results of the exhaust system simulator test(Autobahn mode).



図 8 エンジンベンチ試験結果(アウトバーンモード) Fig. 8 Results of the engine bench test(Autobahn mode).

S エンジン試験結果との比較

排気シミュレータを利用することにより,き裂発生位 置はエンジン試験結果と良く一致し,エンジンに代わる 耐久評価装置として大きな成果を発揮しているが, 1,000 を超える排気ガス条件における評価試験におい て,現行排気シミュレータとエンジン実機による耐久試 験結果の詳細な比較を実施した結果,下記のような相違 が見られるようになった。

図9および図10に燃焼ガス温度1,050 の条件にてア ウトバーンモード耐久試験を実施したエンジンベンチと 排気シミュレータ試験結果を示す。両者を比較すると, き裂発生位置は良く一致しているが,き裂の様相が異な る。



図 9 エンジン試験結果(アウトバーンモード) Fig. 9 Results of the engine bench test (Autobahn mode).



図10 排気シミュレータ試験結果(アウトバーンモード) Fig. 10 Results of the exhaust system simulator test (Autobahn mode).

次に,排気シミュレータの燃焼ガス雰囲気について測 定したところ,図11に示すように,燃焼ガス中の酸素 含有量は約10%前後であり,ガソリンエンジン実機 (1%以下)と比較すると酸素過剰の雰囲気であること が明らかとなった。すなわち,排気シミュレータと実機 エンジンとの燃焼ガス成分の相違に伴って,エンジン試 験結果よりも厳しい試験結果が生じたものと考えられ た。

排気系部品において生じる不具合は,図12(き裂様 相)および図13(メカニズム)に示すように,高温環 境下における酸化膜を起点とするき裂であることが多 い。また,耐熱材料は1,000 を超える温度範囲から急 激な酸化挙動の変化を示し,耐久試験における排気ガス 雰囲気についても考慮する必要がある。



図11 排気シミュレータ排気ガス中の酸素含有量の推移 Fig. 11 Change in oxygen content in the exhaust gas from exhaust system simulator.



図12 酸化膜を起点とするき裂様相 Fig. 12 Cracks starting from an oxidation layer.



図13 き裂発生・進展メカニズム Fig. 13 Mechanism of the crack initiation and propagation.

しかし,現行の排気シミュレータでは二次エアー(空気)によって燃焼ガスを増圧しているために,燃焼ガス 中に多量の未燃の酸素が残留している。したがって,こ の方法では排気マニホールドやタービンハウジングに与 える酸化の程度がガソリンエンジンの場合と異なるた め,実車相当の試験をトレースすることが困難である。

そこで,実車相当の耐久試験結果を再現できるような 耐久評価装置の開発を行うこととした。

技術的課題と解決策

新試験システムの構築にあたり,いくつかの技術的課 題に取り組んだ。まず,燃焼ガスは完全燃焼しているた め,ガス中の酸素量はほぼ0%であると考えられる。し かし,燃焼には寄与しない増圧用二次エアーを追加供給 するため,試験体に流入する燃焼ガス中の実測された酸 素濃度は10%前後となる。この酸素量を低減するため には,二次エアーの酸素含有量を極力低く抑えた非酸化 性ガスであることが望ましい。そこで,比較的入手の容 易な窒素ガスを二次エアーとして選定し,非酸化雰囲気 環境における燃焼試験を実施した。ここで,目標値は燃 焼ガス温度1,100 ,点火後30秒以内に1,000 を超える こと,の2点とした。図14および図15に窒素供給状況 と,図16に燃焼ガス中の成分測定状況を示す。ここで, 7m³の小容量窒素ガスボンベを試験室内に持ち込み,圧 力調整弁とホースを介して二次エアーに注入している。

図17に燃焼確認時の昇温パターンを示すが,所定時 間内に目標温度に達することを確認した。また,図18 の燃焼ガス中の酸素含有量測定結果から,酸素含有量は ほぼ0%の非酸化雰囲気を得ることができた。



図14 窒素ガスボンベ設置状況 Fig. 14 Set up of nitrogen gas container.



図15 窒素ガス注入状況 Fig. 15 Nitrogen gas injection into the simulator.



図16 燃焼ガス成分測定状況 Fig. 16 Measurements of combustion gas components.

しかし,燃焼ガス中の酸素含有量は減少したが,安定 燃焼とはいいがたいものであり,時として温度コントロ ール不能になるという事態が発生した。これは,一次エ アー中の酸素とLPGの混合気を着火することで燃焼ガス を生成しているが,従来試験においては二次エアーにも 空気を使用していたために未燃のLPGは増圧用の二次エ アーの一部と混合気を形成し,完全に燃焼していた。

一方,窒素注入方式では,燃焼ガス中のLPGは一次エ アーのみでは完全燃焼できず,未燃のLPGが温度コント ロールに影響を及ぼす原因となっていた。そこで,制御 システムにおいてLPGバルブ開度を最適な値に調整し, 一次エアーのみにて完全燃焼するようにLPG供給量を設 定し,完全燃焼したガスを二次エアーの窒素で増圧させ るシステムを開発した。その結果,図19に示すように 従来の試験方法と同等の昇温速度と安定燃焼が実現で き,かつ,不完全燃焼または失火に対する安全性の確保 と,従来試験と比較してLPGの消費量低減,ガソリンエ ンジン実機と同等の排気ガス雰囲気を得ることに成功し た。

さらに,24時間の連続無人運転による耐久試験が実施可能な制御システムの改良を行った。旧システムとの 違いは,エアー経路中に電磁バルブを設置し,加熱・冷 却時に注入する気体を切り替えるようにしたことであ る。これは,窒素ガスは比較的入手が容易なガスではあ るが,非常に高価であり,長時間にわたる耐久試験では 多額の試験費用を必要とする。

対策として,酸化の影響を受けやすい加熱時にのみ窒



図17 燃焼試験結果(温度変化)





図18 燃焼ガス中の酸素含有量測定結果 Fig. 18 Results of oxygen content measurements.

素ガスを流すこととし、冷却時には一次エアーと同様に 空気を注入することにした。その際、図20に示すよう に加熱終了直後ではなく、ある程度試験体が冷却される までは窒素ガスを注入し、遅延タイマーによってバルブ 切り替えを行うこととした。また、図21のような大容 量タンクを導入した結果、開発初期と比較して窒素ガス 単価を1/5以下に削減することができた。



図19 燃焼条件調整結果

Fig. 19 Results of combustion condition adjustment.



図20 冷却時の酸素ガス濃度

Fig. 20 Oxygen gas content during cooling.



図21 窒素ガス供給システム Fig. 21 Nitrogen gas service system.



図22 耐久試験状況 Fig. 22 Durability test condition.



図23 試験前供試体状況(W/G部) Fig. 23 W/G specimen area before test.



図24 試験後の供試体状況(酸化雰囲 気)

Fig. 24 W/G specimen area after test (Oxidation atmosphere).



- 図27 試験後の酸化状況(非酸化雰囲 気) Fig. 27 Surface oxidation layer after
- Fig. 27 Surface oxidation layer after test (Non-oxidation atmosphere).

_ <u>200μm</u>_.

図25 試験後の酸化状況(酸化雰囲気) Fig. 25 Surface oxidation layer after test (Oxidation atmosphere, oxidation layer thickness:100µm max.).



図26 試験後の供試体状況(非酸化雰 囲気)

Fig. 26 W/G specimen area after test (Non-oxidation atmosphere).

耐久試験状況を図22に示す。図23の試験前供試体の ウェイストゲート部(W/G部)の状況と比較して,図24 に示す従来手法による供試体は酸化による損耗が顕著で ある。また,図25に示すように酸化膜厚さも最大約100 µmであった。

一方,窒素注入による非酸化雰囲気条件下においては, 図26から明らかなように酸化による損耗(もう)はほ とんど見られず,酸化膜も図27に示すようにごくわず かであった。このことから,本試験装置を利用すること により,1,000 を超える高温環境下でもエンジン実機 と同等の試験結果を得ることができることを確認した。

6 結 言

本研究により以下の結言を得た。

(1) 非酸化雰囲気排気シミュレータの開発に成功した。

(2)本試験装置の実用化により,

ガソリンエンジン実機試験と同等の結果を得ることが期待される。 1,000 を超える高温環境下における耐熱材料開 発が可能となる。



三宅正浩 Masahiro Miyake 日立金属株式会社素材研究所



伊藤賢児 Kenji Itoh 日立金属株式会社素材研究所

