

2004年型 YZF-R1用エンジンの開発

Development of the 2004 Model YZF-R1 Engine

藤原 英樹 Hideki Fujiwara
● MC事業本部 技術統括部

技術紹介



2003 年モデル



2004 年モデル

図1 YZF-R1

The first supersport model YZF-R1 (1998 model) created a sensation when it debuted in September 1997 as a 1000cm³ "big bike" developed to be the "fastest on twisting roads" by achieving light handling equivalent to a mid-class bike and a body weight even less than the mid-class machines of the day. The 2004 model YZF-R1 represents the fourth revision of the R1 since its debut and the first full model change. While retaining the first YZF-R1 concept, the 2004 model was developed with the following aims:

- (1) To achieve the best engine performance in class and an outstanding power-weight ratio;
- (2) To have good, precise response and handling with quick left-right banking switch-over capability;
- (3) To achieve precise power output in response to throttle opening;
- (4) To achieve compactness that belies the 1000cm³ size and a riding position that provides excellent hold;
- (5) To design styling that retains the YZF-R1 image while adding fresh new elements;
- (6) To provide a frame-engine layout that is effective for circuit use.

In this report, we present and outline of the engine specification and describe the actual measures taken in response to the different development goals to achieve the desired balance of light weight, compactness and performance.

1 はじめに

セカンダリーロードでの最速をキーワードにリッターバイクでありながらミドルクラス並みのハンドリングとそれ以下の車重を目標に開発されたスーパースポーツモデル、初代YZF-R1(1998年モデル)は、1997年9月に衝撃的にデビューした。2004年型 YZF-R1(以下2004年モデル)は初代から数えて4代目であり、初のフルモデルチェンジを受けた(図1)。

従来のYZF-R1のコンセプトは継承しつつ2004年モデルの目標には以下の項目を設定した。

- (1) クラス最高のエンジンパフォーマンスと優れたパワーウェイトレシオの達成
- (2) 正確で応答性がよく、切り返しがはやいハンドリングの達成
- (3) スロットル開度に対し、正確にパワーが取り出せること
- (4) リッターバイクとは思えないコンパクトでホールドしやすいポジションの実現
- (5) YZF-R1イメージ+新規性のある外観
- (6) サーキットユースでも有効なフレーム・エンジンレイアウト

以下、2004年モデルのエンジンの仕様概要、開発項目と目標に対する具体的な達成手段について紹介する。

2 主要諸元とエンジン性能

2.1 主要諸元

表1にエンジンの主要諸元を、図2にフィーチャーマップを、図3にエンジン断面図を示す。高回転・高出力化に対応するため2003年モデルに対しボアを3mm拡大してショートストロークタイプとした。ボア間肉厚を従来の9mmから、ヘッドガスケットが成立する限界寸法である5mmとしエンジン幅を最小とした。シリンダー前傾角は30°から40°とした。これはフレームの縦剛性を確保するため、フレームがヘッドシリンダーを抱えるような従来のレイアウトから、スロットルボディ幅ぎりぎりまでタンクレールを内側に寄せたフレームの下にエンジンを吊り下げのようなレイアウトにしたためである(図4)。フレームの縦剛性の増加は、直進安定性や急減速時の車体の安定性などに代表される、操縦安定性の向上につながる。またタンクレール幅を狭くすることでライダーの操作(動き)の自由度が増すため、車体のコントロール性が向上する。本レイアウトを採用することで2004年モデルのフレームは従来モデルに対し2.5倍の縦剛性

表1 主要諸元

モデル	2004 YZF-R1	2003 YZF-R1	
シリンダー配置	並列 4 気筒	並列 4 気筒	
ボア×ストローク(mm)	77.0×53.6	74.0×58.0	
総排気量(cm ³)	998	998	
圧縮比	12.4	11.8	
バルブ配置	DOHC 5バルブ	DOHC 5バルブ	
最大出力(過給なし) (kw/rpm)	126.4 / 12,500	111.8 / 10,500	
最大トルク(過給なし) (N・m/rpm)	106.6 / 10,500	107.0 / 8,500	
エンジン重量(kg)	66.7	67.7	
車両乾燥重量(kg)	172	174	
パワーウェイト レシオ	(kg/kw)	1.36	1.56
	(kg/ps)	1.00	1.15

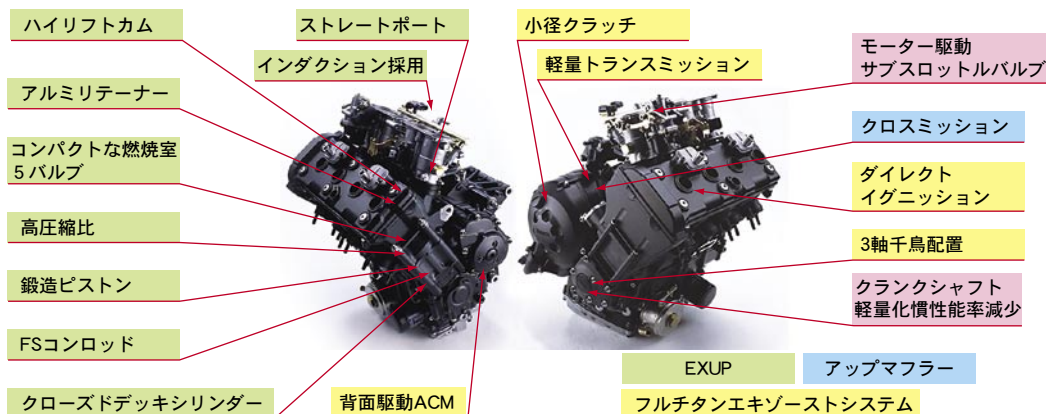


図2 フィーチャーマップ

を確保することが可能となり、ニーグリップの幅については50mm狭くできた。

吸気系ではサクシオンピストンで吸入空気量の制御を行う従来の方法に対し、電子制御のサブスロットルを設けた。これにより従来のサクシオンピストンよりも自由度の高い吸入空気量の制御を可能とした。

駆動系では従来同様トランスミッションをクロスレシオの6速としたがL/T(1速のギヤ比と6速のギヤ比の比。数値が小さくなるほどクロス傾向が強いことを示す)を2.24から2.00にすることでよりスポーツライディングに対応した。クラッチは従来に対しフリクションプレートの枚数を増やし小径化した。

バンク角を確保した上でエンジン重心位置を極力低く車体に搭載するため従来はクランクシャフト軸上左端にレイアウトされていたACM(発電機)を廃止、エンジン背面に独立したACM軸を設けた。これによりエンジン幅(クランクシャフト軸上)は従来よりも57mm短縮できた。

2.2 軽量・コンパクト設計の成果

ボアを拡大し高回転・高出力化したにも関わらず2003年モデルに対しエンジン前後長で19mm、全高で40mmの短縮を達成した。これらは2003年モデルに対して、ヘッドシリンダーのコンパクト化、軸間距離の短縮、クランクシャフトのウェブ小径化、大端ピンの小径化等により達成している(詳細は3.軽量・コンパクト設計参照)。4気筒水冷エンジンの進化の過程で、従来までのYZF-R1は軽量・コンパクト化において劇的な進化を遂げたモデルであるが、2004年モデルは軽量・コンパクトを継承しつつ、さらに最高出力においても劇的に飛躍したモデルであることが分かる(図5)。

表2に主要軽量化部品と2003年モデルに対する効果を示す。

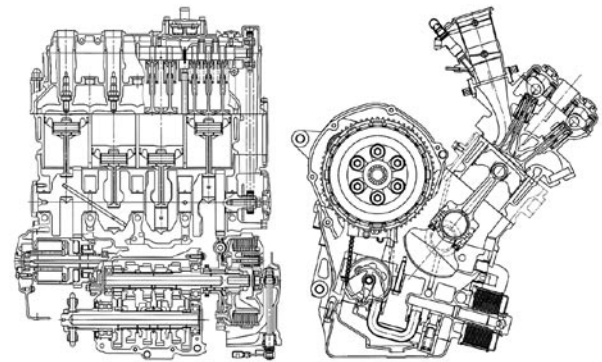


図3 エンジン断面図

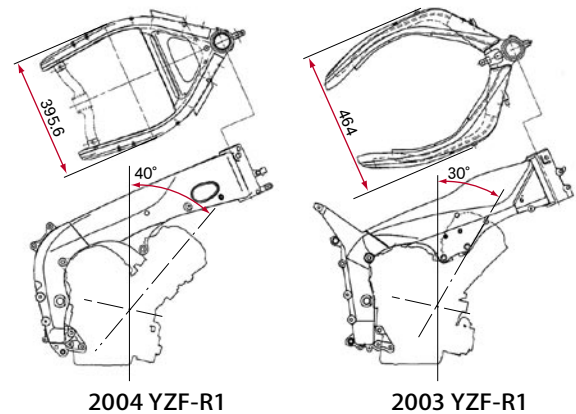


図4 エンジンレイアウト

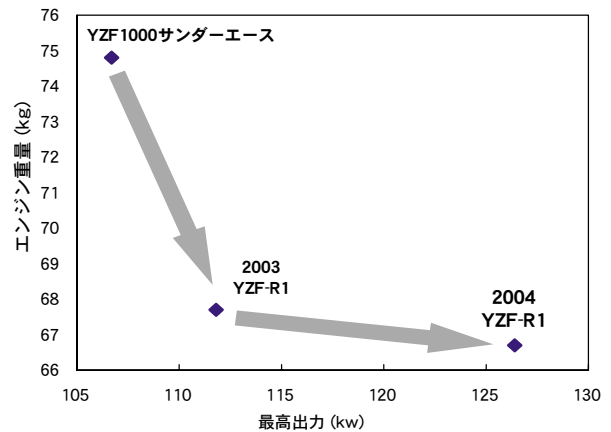


図5 エンジン重量と最高出力比

表2 主要軽量化部品と従来モデルに対する効果 (g)

	2004 YZF-R1	2003 YZF-R1
カムシャフト(吸排)	1,511 -8%	1,648
クランクシャフト	7,220 -16%	8,620
ACMローター+ステーター	1,904 -20%	2,390
スロットルボディ	2,704 -20%	3,360
排気系	8,652 -5%	9,136
始動系(ファンウェイ、ギヤ)	180 -73%	667
クラッチアセンブリ	4,301 -7%	4,613
トランスミッション	6,517 -9%	7,154

2.3 エンジン性能

図6にエンジン性能曲線を示す。出力はリッターあたり126.4kwを発生する(過給なしの状態)。

3 軽量・コンパクト設計

3.1 軸配置

きめられたホイールベースの中でスイングアーム長さをできる限り確保するためクランク軸のすぐ後ろにドライブ軸を配置する従来の3軸レイアウトを踏襲した。従来に対しクランク軸-メイン軸間を4mm、メイン軸-ドライブ軸間を2mm小さくしている。

3.2 ヘッドシリンダー

ヘッドシリンダーは2003年モデルと同様にDOHC、5バルブである。従来に対しカム軸ピッチを2.8mm、全高を3mm小さくしている。またカムジャーナル径は吸排ともに従来より2mm小さくした。

3.3 背面ACM

2.1で記したとおり従来クランク軸上に配置していたACMはボディシリンダー後方に別軸を設けたレイアウトとし、クランク軸のウェブに設けられたドリブンギヤによって駆動する方式を採った。コンロッド軌跡を避けるためローター外径はφ80mmとした。小径化による発電量の低下は軸方向にステーターコイルを伸ばすことと、ACM軸をクランク軸に対して増速することで補った。

3.4 始動装置

2003年モデルでは始動用のワンウェイとギヤをメイン軸上に配置しエンジン幅を抑えるレイアウトとしていた。2004年モデルではACM軸上に始動用のワンウェイとギヤを配置した。減速したメイン軸から増速したACM軸に移したことでワンウェイの伝達トルクを小さくできるため従来に対しワンウェイのサイズを2ランク小さくすることが可能となり、またギヤサイズも小さくできた(図7)。

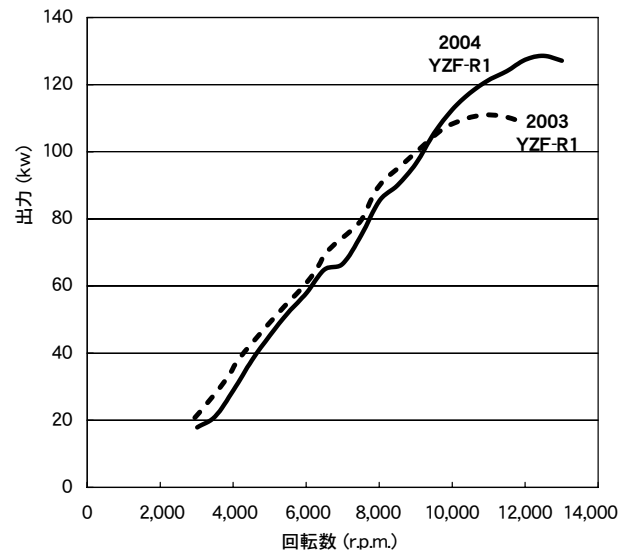


図6 エンジン性能曲線

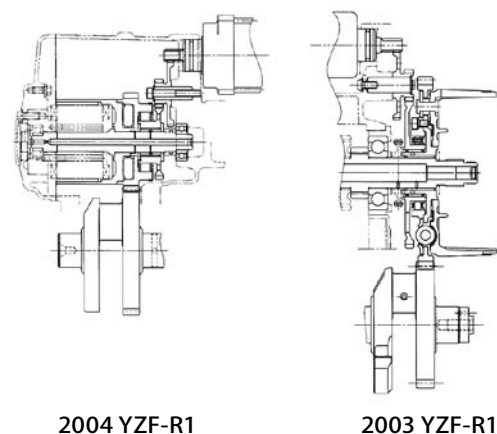


図7 始動装置

3.5 材料置換

軽量化のもっともオーソドックスな手法であるが2004年モデルは2003年モデルに対して更に多くの部品を材料置換した。樹脂化した例では、サーモハウジングアセンブリ、ダンパーチェーン、マグネシウム化した例では、クラッチカバー、ブリーザーカバーが挙げられる。動弁系のリテーナーはアルミ製であり、

排気系においては触媒コンバーター以外、EXUP(排気制御バルブ)ボディ、EXUPバルブに至るまで、すべてチタン製である。

4 性能向上

4.1 性能開発の方向性

126.4kwの目標性能を達成するため、ショートストローク化、バルブの大径化による高回転・高出力化を基本方針とした。これは性能向上の常套手段であるが、中低速域での性能低下とレスポンスの悪化を招いてしまう。

2004年モデルでは電子制御サブスロットルバルブと排気デバイス、EXUPにより中低速域の性能の落ち込みをカバーしている。またレスポンス向上についてはエンジン内の回転物の慣性モーメントを小さくすることで対応した。

4.2 ヘッドシリンダーまわり

ヘッドシリンダーは従来からヤマハ発動機(株)が大排気量スポーツ系モーターサイクル用エンジンに採用しているDOHC、5バルブである。プラグサイズは従来同様10mmである。カム軸間をつめ、バルブ挟み角を狭角化して燃焼室を浅く、容積を小さくすることで高圧縮比を確保した。高回転・高出力化に対応しバルブ径及びスロート径は吸排ともに0.5mm大径化した。さらに2003年モデルに対し、より高いバルブリフトとすることで吸入空気量を確保している。図8にヘッドシリンダー断面図を、表3に各寸法の比較を示す。

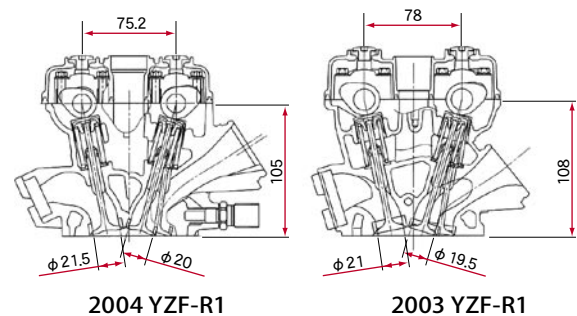


図8 ヘッドシリンダー断面図

表3 ヘッドシリンダ比較

	バルブ傘径		バルブステム径		スロート径		バルブ挟み角		
	IN	EX	IN	EX	IN	EX	IN-C	IN-LR	EX
2004 YZF-R1	23.5	25.0	4.0	4.5	20.0	21.5	8°45'	15°45'	11°
2003 YZF-R1	23.0	24.5	4.0	4.5	19.5	21.0	9°30'	16°45'	11°30'

4.3 ボディシリンダー

2003年モデルのアップパーケース一体構造に対して2004年モデルは別体とした。別体化の最大の理由はクローズドデッキ化によるシリンダー剛性の確保である。スリーブ内面には高速メッキ処理にてNi-P-SiCメッキを施す。

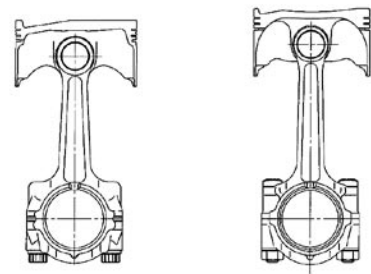
シリンダー前側に冷却水のギャラリーを設けた。一旦ギャラリーに入った冷却水は各気筒に設けられた水通路からボディシリンダーのウォータージャケットに送られる。これにより各ボア及び各気筒の排気バルブシートまわりを均一に冷却することを可能とした。水通路の考え方と冷却効果についてはシミュレーションと実機確認の両方で検証を行った。

4.4 ピストン、コンロッドまわり

通常、ピストンは、高出力・高回転化に対応する場合、強度確保のため各部の肉厚を厚くせざるを得ず、結果的に重量増を招くことになる。ましてボアサイズを大きくした2004年モデルの場合、重量面ではさらに厳しい条件となる。2004年モデルのピストンは従来と同じくアルミ鍛造製とし、FEM(Finite Element Method)解析による各部応力の最適化を実施し最も軽量な形状を追求した結果、2003年モデルに対し、ボア径の拡大、高回転高出力化したにも関わらず、従来モデルとほぼおなじ重量に作り込むことができた。ピストンピンの径は2003年モデルと同じくφ17mmとした。

コンロッドは2003年モデル同様クロムモリブデン鋼の浸炭焼入れであるがFS(Fracture Splitting)タイプを採用した。FSコンロッドの詳細については後述する。大端部の締付け構造は軽量化と加工の簡素化を図りナットレスタイプとした。ピストン同様、FEM解析による最適化の結果、2003年モデルに対し最高出力回転数を2,000rpm高く設定したにも関わらず重量アップは11%にとどめることができた。

大端ピン径、クランクジャーナル径は軽量化とロス馬力の低減を目的とし、従来モデルからそれぞれ直径で2mm小さくしている(図9)。



2004 YZF-R1 2003 YZF-R1

図9 ピストン、コンロッドまわり

4.5 スロットルボディ

スロットルボディはメインスロットル上流に電子制御のサブスロットルを持つタイプで口径は従来のφ40mmに対してφ45mmとした。サブスロットルはエンジン回転速度、メインスロットル開度により制御されたDCモーターによって駆動される。吸入空気量をエンジンの要求にあわせてコントロールすることで、「スロットル開度に対して正確にパワーを取り出せる」というコンセプトを具現化した。インジェクターは高ダイナミックレンジのロングノズルタイプである。

冒頭で記した車両のコンセプトである「リッターバイクとは思えないコンパクトでホールドしやすいポジションの実現」のためスロットルボディの幅は最小に抑える設計とし、具体的手法としては次の項目による。

- (1) 1 ボディ2 バレルタイプのボディ構造とする
- (2) サブスロットル駆動用のDCモーターをサブスロットル軸の端に配置せず前方にオフセットさせ駆動はリンクを介して行う

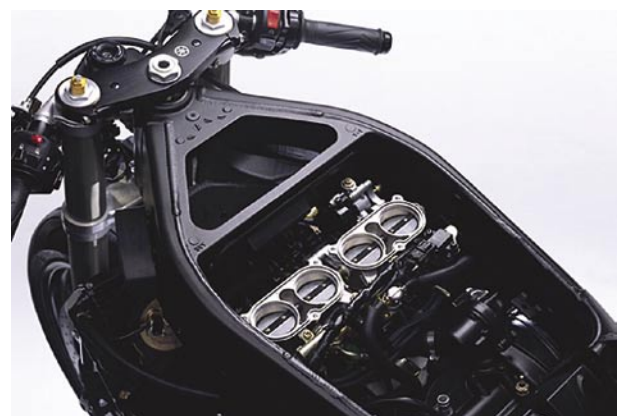
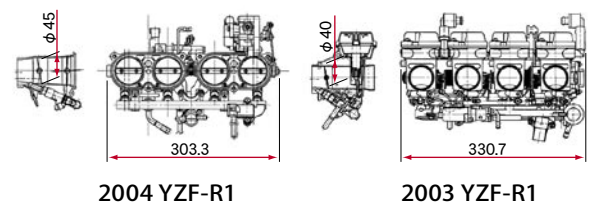


図10 スロットルボディ

(3) スロットルプーリーもメインスロットル軸上に配置せずリンクを用いる

この結果、スロットルボア径を従来から5mm拡大したがスロットルボディの全幅は27mm短縮することができた(図10)。

5 FS コンロッド

5.1 FSコンロッドとは

2004年モデルのコンロッドにはFSコンロッドが使われている。FSとは「Fracture Splitting」の略であり文字通りロッドとキャップを破断分割するものである(図11)。

自動車エンジンでは既に採用されており工法自体は珍しいものではない。しかし、クロムモリブデン鋼の浸炭焼入れで破断面に母材組織が残ったまま破断したものは本コンロッドが世界初である。

5.2 FSコンロッドのメリット

破断分割の一番のメリットは、大端真円度が向上することであり、焼付き等のトラブルに対する安全率の向上につながる(図12)。2004年モデルのように高回転・高出力エンジンにとってその恩恵は大きい。次にコストダウンがメリットとして挙げられる。FSコンロッドは、合わせ面の加工がいらす、また、破面そのものが精度の高い位置決めになるので、大端真円度を確保するために位置決めピンを設ける必要はない。その分加工費、部品代、組立工数を省くことができる。

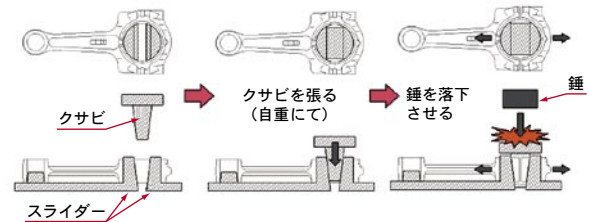


図11 FSコンロッド

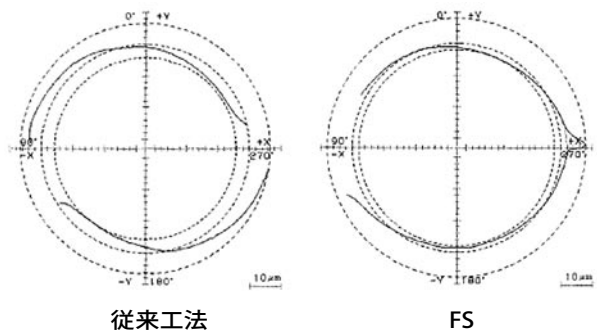


図12 大端真円度

6 排気系

6.1 排気系の課題

2004年モデルの排気系に与えられた課題は次のとおりである。

- (1)2003年モデル同様、EXUPを採用すること
- (2)新規性のある外観とすること
- (3)2003年モデルよりも軽量であること

6.2 課題に対する具体的施策

- (1) トルク特性改善のためEXUPは不可欠であるが、車両に低く搭載されたエンジンレイアウトとバンク角を確保するため、エキゾースト毎にバルブを配した従来方式に代えて、2004年モデルでは、4本のエキゾーストパイプを2本に集合させた部分にバルブを配置した(図13)。1・2番、3・4番気筒それぞれの排気を合流させた上で脈動を制御する方式により、EXUP本体の大きさは従来の半分にすることができた。このレイアウトを採用するにあたり、性能シミュレーション及び実機で効果の確認を実施した。
- (2) 新規性のある外観のため2004年モデルではアップマフラーを採用した。マフラーは消音に必要な容量を確保し、リヤタイヤの可動範囲を避けなければならないため、結果的に重量面では不利な2本出しの楕円形状のマフラーをシート下に配置したが、外観上のメリットは非常に大きく、2004年モデルとしての全く新しいテールデザインの重要なキーとなっている(図14)。
- (3) 前述したとおり、軽量化のため、徹底的な材料置換を実施した。テールエンドキャップまでもがチタンの深絞り品である。これにより、2本出しのアップマフラーという重量的には不利なレイアウトとしながら、2003年モデルに対し排気系で484gの軽量化を実現している。

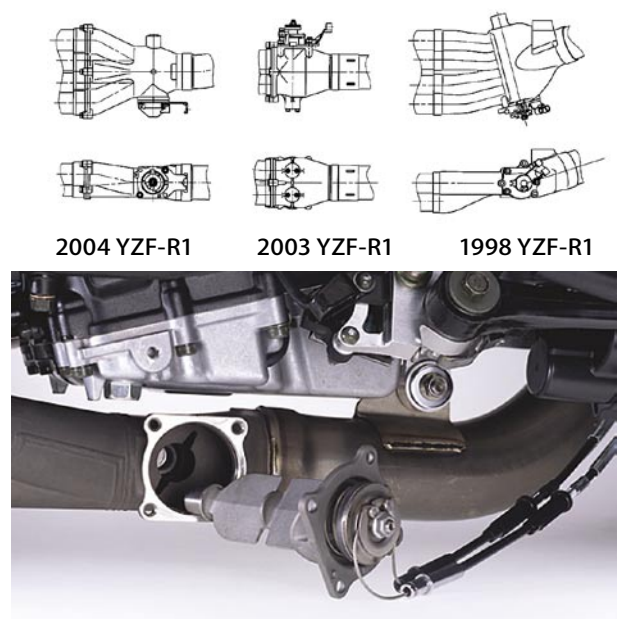


図13 EXUP



図14 アップマフラー

7 おわりに

2004年モデルは今までのYZF-R1の基本コンセプトを踏襲しつつより高次元でバランスさせるべく目標を掲げ開発した。結果的にすべての目標を満足する車両に仕上がっており、年々高まるお客様の期待を上回る感動を提供できるものと確信している。

2003年モデルに対し2004年モデルは明らかな進化を遂げている。特にエンジン出力については飛躍的に向上させた。言うまでもないが向上しているのはエンジン性能だけではない。数字では表現できないYZF-R1の進化をひとりでも多くのライダーに感じていただきたい。

最後に本エンジンの開発にあたりご協力をいただいた関連会社の方々に深く感謝する。

■著者



藤原 英樹（後列左端）と
2004年YZF-R1のエンジン設計者たち