

パーソナルウォータクラフト用ターボチャージャ付き 4 ストロークエンジンの開発

Development of a Four-stroke Engine with Turbocharger for Personal Watercraft

黒 崎 隆 晴*
Takaharu KUROSAKI

岡 田 和 典*
Kazunori OKADA

横 谷 仁*
Hitoshi YOKOTANI

要 旨

近年、米国においてマリンエンジンにエミッション規制を適用する動きがあり、環境対応はより厳しくなっている。Honda は環境適応性と市場の将来性を考慮して4ストロークエンジンを搭載した三人乗り Personal Watercraft(PWC)を開発した。エンジンは二輪車 CBR1100XX の直列4気筒、排気量1100ccをベースとし、PWCとして要求される性能・機能および耐蝕性を満足するマリン用途のエンジンとして仕様を変更した。さらに、2ストロークエンジンを搭載したPWCと同等以上のパワーウェイトレシオとするため、排気ターボチャージャを採用し、従来の2ストロークエンジンを搭載した PWC を凌ぐトップレベルの走行性能と耐久性を達成した。エミッション性能は EPA2006 年規制および CARB2004年規制をクリアし、実走燃費も従来の2ストロークモデルに対して 16%向上できた。

ABSTRACT

Recently, there is a movement to apply emission control in marine engines in the United States. Environmental measures for marine engines have become severe. Honda has developed a personal watercraft of three-seater that installed 4-stroke engine considering the environmental suitability and the future. Using the motorcycle CBR1100XX engine of 4-stroke, in-line 4-cylinder, and displacement of 1100cc as the base engine, the specifications were modified for marine engine to satisfy such as engine performance, function, and corrosion resistance, as PWC engine. Moreover, the turbocharger was employed to obtain the power/weight ratio more than that of PWCs installed 2-stroke engine. The driveability and the durability exceeding conventional PWCs installing 2-stroke engine were achieved. Emission performance of the engine satisfied EPA2006 and CARB2004 regulations, fuel economy also improved by 16 % compared to conventional 2-stroke engine model.

1. まえがき

パーソナルウォータクラフト(以下、PWCという)は米国や日本などで手軽なマリンレジャーとして普及している。しかし、米国において1994年頃から環境問題への関心の高まりから船外機や PWC などのマリンエンジンにもエミッション規制を適用する動きがでてきた。PWCの将来を考慮し、エミッション規制を先取りした PWC 用4ストロークエンジンを開発することとした。以下にマリンエミッション規制の動向とエンジンコンセプトについて述べる。

1.1. マリンエミッション規制の動向

米国におけるマリンエミッション規制は、比較的に総台数が多い船外機市場において主流であり出力当りの排気エミッションが多い船外機と、総台数は小さいが船外機と同様に出力当りの排気エミッションが多い PWC からの推進が決定された。

1.1.1. EPA(U.S Environmental Protection Agency) マリンエミッション規制

米国 EPA マリンエミッション規制は、Fig. 1 のように1998 年の規制値を100%とし、2006 年までに段階的に削減

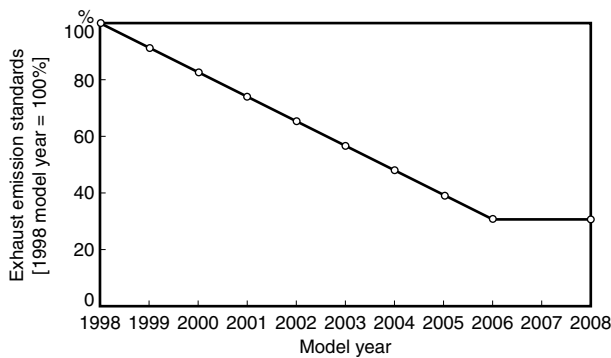


Fig. 1 EPA exhaust emission standards

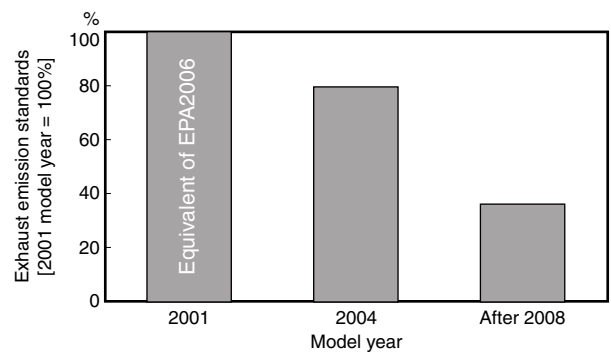


Fig. 2 CARB exhaust emission standards

され、最終年度の2006年には75%削減となる。エミッション測定モードとその重み付けは Table 1 に示すように ICOMIA (International Council of Marine Industry Associations) が設定した出力ピークを基準とした5モードであり、アイドルから全開最大出力点まで網羅されており、実走時の航走抵抗点とほぼ合致する。対象エミッションは HC+NOx の合算値で CO は対象外である。また、エミッション劣化保証として PWC は5年または 350Hr が必要とされる。エミッション測定モードにスロットルを全開とするポイントがあり、しかも排気後処理技術が確立されていないマリンエンジンにとっては既存の2ストロークエンジンの改良では達成が困難なため、直噴化等のデザイン変更までが必要となる非常に厳しい規制値となった。

1.1.2. CARB (California Air Resources Board) マリンエミッション規制

カリフォルニア州はマリン商品にとって非常に重要な市場であるが、そのカリフォルニア州の CARB が EPA よりさらに厳しい規制値を公表した。Fig. 2 に示すように 2001 年規制値を EPA2006 年規制値とし、2004 年規制値を EPA2006 の 80%、2008 年規制値を EPA2006 の 35% と設定した。この 2008 年規制値は現行の比出力 50kW/L 程度の 4ストローク船外機がクリアできるレベルであり、既存の 2ストロークエンジンには達成が困難である。同時期にカリフォルニア水質資源局 (California Department of Water Resources) がマリン商品の水質に与える影響、特に 2スト

ロークエンジンの混合潤滑による未燃オイル汚損に注目し、水質分析などの調査を開始した。

1.2. エンジン開発のコンセプト

Honda は 2ストローク直噴一層状掃気エンジン、4ストロークエンジンなど種々のエンジンタイプを研究していた。しかし、マリンエンジンの環境対応はより厳しいものへと変化しており、環境適応性と将来性を考慮して 4ストロークの PWC 用エンジンを開発することにした。4ストロークエンジンを選択することで、EPA2006 年規制レベルのエミッション適合と混合オイルの燃焼による水質汚染は防げる。しかし、PWC 用エンジンの主流である 2ストロークエンジンに対抗しうる 4ストロークエンジンとするため、商品コンセプトを以下のようにした。

- (1) 環境適応性が高くスポーティさと扱い易さを提供すること
- (2) トップレベルの出力性能を達成するために比出力とパワーウェイトレシオは 2ストロークエンジンより優れること
- (3) 新商品でもコスト上昇を極力抑え、妥当な価格でユーザーに提供できるように量産エンジンをベースとして既存生産設備が活用できること
- (4) 2ストロークエンジンよりマリンエンジンとしての耐久信頼性に優れるものであること

2. エンジン技術

2.1. エンジン仕様の検討

エンジンは、二輪車用、四輪車用および船外機用の各種エンジンタイプの中から、既存市場の 2ストロークエンジンと対抗できる軽量、コンパクトで高出力を達成するため、二輪車 CBR1100XX 用エンジンをベースにストロークを 5mm 伸ばし 1235cm³ とした。Fig. 3 に CBR1100XX 用エンジンを、Fig. 4 に PWC 用本エンジンの透視図を示す。また、Table 2 にそれぞれの各主要諸元を示す。一般的に 4ストロークエンジンは 2ストロークエンジンに比べ、数々の

Table 1 Test procedure specified in ICOMIA

Mode number	Engine speed as a percentage of engine rated speed	Engine torque as a percentage of maximum torque at rated speed	Mode weighting factor
1	100	100	0.06
2	80	71.6	0.14
3	60	46.5	0.15
4	40	25.3	0.25
5	IDLE	0	0.40



Fig. 3 Based motorcycle model

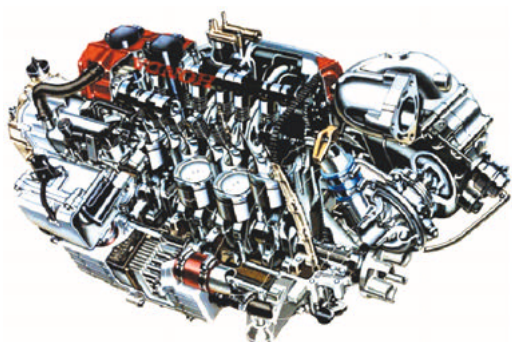


Fig. 4 Developed turbocharged model

利点はあるものの比出力に劣る。本エンジンでは、高出力の達成手段として、高回転化、過給、大排気量化の3仕様を検討した。エンジン常用回転数を高くすると、ウォータージェットポンプのキャビテーション発生によりポンプ効率が著しく低下する。そこで、インペラの使用限界回転数を超えないようにするため、リダクション付きを検討したが、回転数のうわずり感があり、4ストロークエンジンの静粛性を犠牲にするため採用しなかった。大排気量化は、重量増によりパワーウェイトレシオで不利となる。最終的に、目標性能とパワーウェイトレシオの両立を可能とする排気ターボチャージャ付きエンジンの開発に決定した。

2.2. モータサイクル用エンジンのマリン用途への仕様変更

PWCエンジンはウォーターポンプやミッションを持たないシンプルな構造であるが、マリン用エンジンとして必要不可欠の要求があり、二輪車用エンジンに対し以下に述べるような仕様および構造変更を行った。

2.2.1. 潤滑系

一般的に PWC はジェットポンプとクランク軸はダンパのみを介した直結構造とし、クランクセンタを極力低い位置にレイアウトすることでジェットポンプを船底に近づけ、ポンプ効率を向上させる。本エンジンではクランクケース下部は薄いオイルパンのみとするドライサンプ潤滑方式としてエンジン最下面からのクランクセンタ位置をベースエンジンに対して 93mm 低くレイアウトとした。オイルタンクはフロントカバー前方に位置する一体型とし、オイルポンプを内蔵した。オイルポンプは ACG フライホイールボスよりセミオルダムカップリングによる直接駆動とし、

Table 2 Specification of based motorcycle model and developed turbocharged model

Items	Based motorcycle model	Developed turbocharged model
Engine type	4 stroke inline 4 cylinder	4 stroke inline 4 cylinder
Valve train	DOHC 16 valve	DOHC 16 valve
Displacement (cm ³)	1 137	1 235
Bore × stroke (mm)	79 × 58	79 × 63
Compression ratio	11.0	8.5
Cooling system	Liquid cooled, closed loop	Water cooled, open loop
Lubricating system	Wet sump	Dry sump
Fuel supply system	Programmed fuel injection	Programmed fuel injection
Intake system	—	Turbocharger and intercooler
Balancer shaft	Applied	Applied
Max. power / ne (kW/rpm)	105.6 / 9 500	121.4 / 6 100
Max. torque / ne (N·m/rpm)	111.9 / 7 250	191.8 / 5 500

チェーンや駆動ギヤを廃止したシンプルな構造とした。

PWCはジャンプやスピン時に非常に大きい加速度が発生するため、エンジンオイルの油面のあばれによる空気混入が発生する。その対策として、上下方向に縦長のオイルタンクとして油面を高く設定した。オイルタンク内部はメタルガスケットを利用して前後に分離し、後室はスカベンジングポンプの吐出位置がありその消泡室、前室は4段のバフフルプレートを用意し油面のあばれを防いでいる。さらにオイルポンプの吸込み口はタンクの最下部に設けたことにより、ハードスピン時やエンジンで 400m/s^2 を超える衝撃加速度が発生するジャンプ着水時にもエア噛みによる油圧変動の全くない潤滑系とすることができた。

また、油圧警報のスイッチは高・低圧の2種類を用い、高圧用スイッチは通常走行時のエンジン回転数で必要油圧を下回ると警報を発してエンジン回転数を抑えてユーザにオイルチェックを促す。低圧用スイッチはオイルが全くない、または転覆と判断してエンジンを停止させる。これによりオイルチェック忘れなどによるオイル量の減少時にエンジントラブルが起こる前に警報を発することが可能となった。

PWCは走行中の転覆を考慮して、エンジンオイルの流出を防ぐようにしなければならない。特に4ストロークエンジンでは転覆時のブリーザシステムからのオイル流出対策が必要となる。そこで Fig. 5 に示すように縦長オイルタンク内に同様の縦長ブリーザ室をエンジン側とオイルタンク側に設け、転覆時のオイル油面が両ブリーザ室のセパレータ高さより低くなるように設計した。このため転覆状態で放置してもブリーザホースにオイルが流出せず、また特別な補機を用いないシンプルな構造のため信頼性も確保できた。

2.2.2. 冷却系

PWCはウォーターポンプを持たずジェットポンプ水圧を利用した直接冷却方式が一般的である。本エンジンも同様のレイアウトとし、ジェットポンプの冷却水取り出し口後に分岐オリフィスを設け、オイルクーラからのエンジン系とインタクーラからの排気系という2系統とした。Fig. 6にその系統図を示す。ジェットポンプの水圧は最高速時に 490kPa にも達するため、エンジン冷却水出口にサーモス

タット等があると、サーモスタットが開弁していない間は冷却系統がほぼそのジェットポンプ圧力に達してしまう。そのため船外機では、スプリングによるリリーフ機構を併設するのが一般的であるが、サーモスタットによる水温コントロールとしては機能しなくなる。また海での使用後、水道水などによるフラッシング時に水圧が低いと十分な水量が確保し難くなってしまう。そこで本エンジンではジェットポンプ水圧がエンジン回転数に比例していることに着眼し、サーモスタットなしでオリフィス径を最適化することにより水量を調整し、低速ブレーニング状態から最高速時まで目標とする温度範囲に収めた。また冷却系統の内面処理は船外機で実績のあるクロメート処理に樹脂系トップコーティングを施し耐蝕性を向上させた。

2.2.3. 排気系

排気ターボチャージャー以外の排気系は水冷ジャケットをもったアルミ製としコスト低減と軽量化を図った。エキゾーストマニホールドはターボチャージャーへの排気エネルギーロスを極力抑えるよう、最短長での略等長集合エキゾーストマニホールドとした。アルミ製のエキゾーストマニホールドは冷却水が極端に不足すると溶損につながりやすいため、ボデーの温度を感知する接触式サーモスイッチを設けた。これによって冷却系統のつまりやフラッシング時に、オーバヒート前に警報を発しトラブルを未然に防ぐことが可能となった。また多くのマリンエンジンでは排気系内部に冷却水を噴射して冷却を図っているが、PWCではその逆流対策が必要となる。本エンジンの転覆時の冷却水

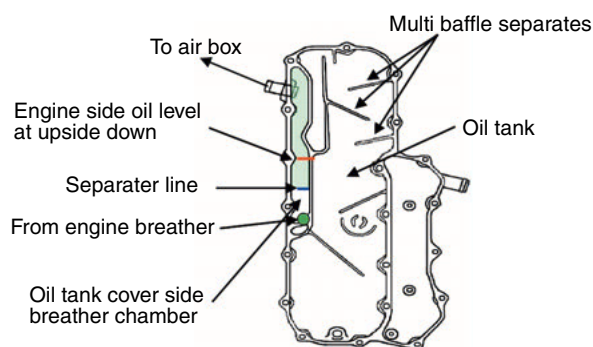


Fig. 5 Engine breather system

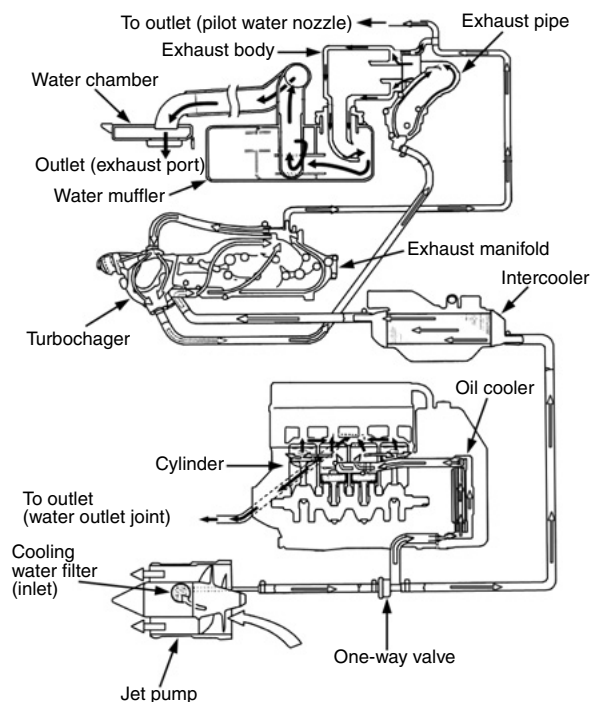


Fig. 6 Cooling system

逆流対策を Fig. 7 に示す。ウォーターマフラー内の水位を転覆時にも排気口より下とし、それを乗り越えて逆流したわずかな水もエキゾーストポデー上部のウォータートラップボリュームによって逆流を防ぎ、排気ターボチャージャやエンジン内への水浸入を防いだ。

2.3. エンジン性能

2.3.1. 出力性能

本エンジン搭載の PWC はコンセプトをモータサイクルと同様のリーンアングルを伴う自然な旋回性能とし、それを得るために船底形状にディープVハルを採用した。このハル形状は航走抵抗が大きいいため、要求出力は既存の2ストロークエンジン PWC の最大出力より高くなり、達成する手段として排気ターボチャージャ付きエンジンとした。二輪車 CBR1100XX 用エンジンを仕様変更した PWC 用ターボチャージャ付きエンジンの出力を Fig. 8 に示す。その図示平均有効圧を Fig. 9 に示す。比出力で 98.3kW/L 、パワーウェイトレシオはエンジン単体で 0.78kg/kW 、完成艇としても 2.77kg/kW と三人乗りモデルとしてはトップレベルを達成した。さらに最大出力発生回転数を 6100r/min と低く抑えたことにより、全開連続最高速時にエンジン回転数が高いことからくる緊張感を感じさせず、ターボが効いている加速感を達成できた。

2.3.2. ターボチャージャ仕様

排気ターボチャージャは石川島播磨重工業(株)製の専用新開発品でこのサイズとしては世界初のウェストゲート付き直接冷却水冷ターボチャージャを採用した。その構造図を Fig. 10 に示す。タービンハウジングは耐海水腐蝕性能に優れたニレジスト鋳鉄製としメンテナンス可能なアノードを設けて電蝕を防止した。タービンハウジングは高温排気ガスにさらされるが、水冷によって全開出力下において

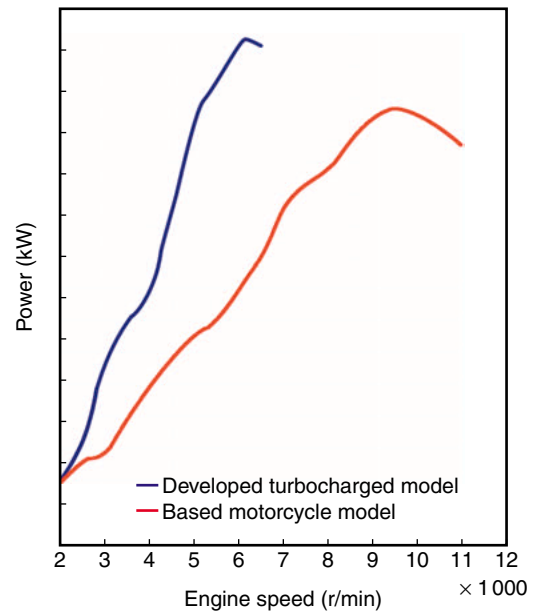


Fig. 8 Engine performance of based motorcycle model and developed model

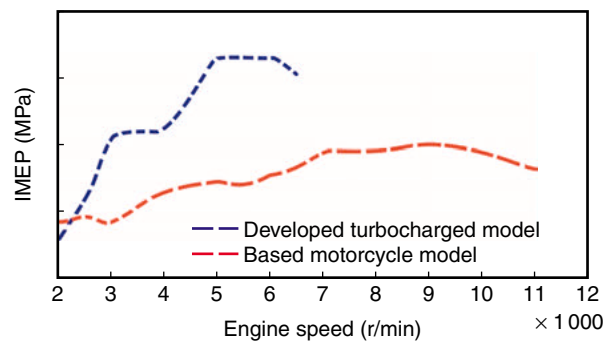


Fig. 9 IMEP of based motorcycle model and developed model

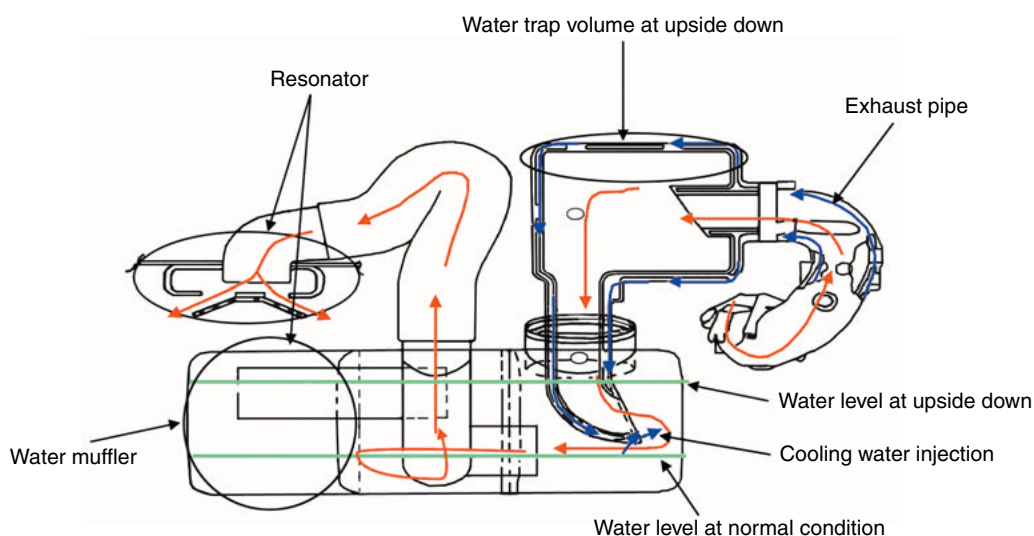


Fig. 7 Layout of exhaust system

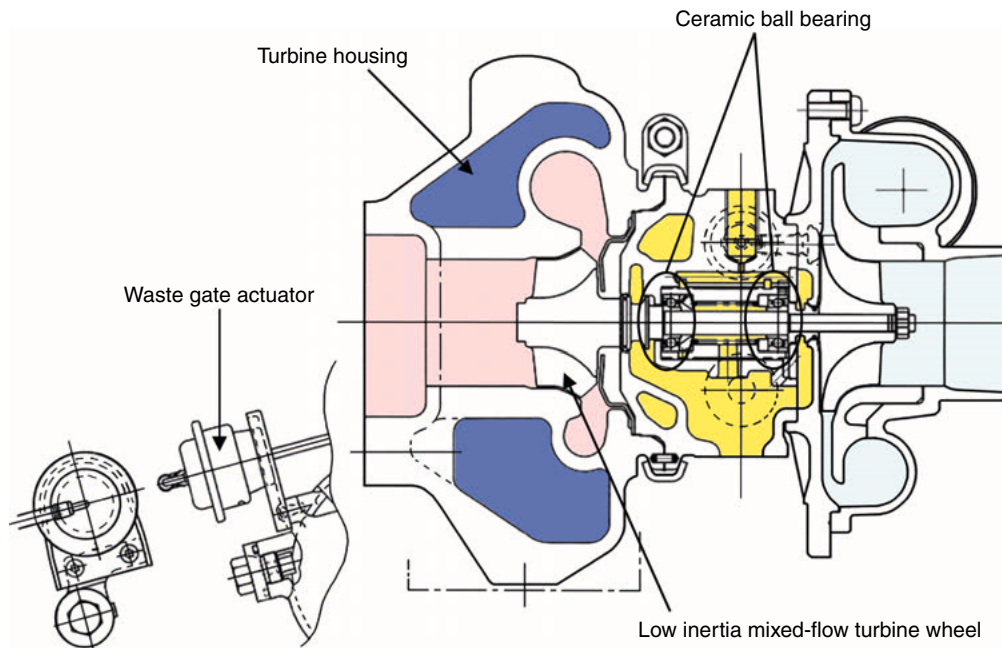


Fig. 10 Layout of the turbo charger

も表面温度は85℃以下に保たれる。PWC用エンジンには、高いスロットルレスポンスが要求されるので、タービンブレードには慣性力の小さい斜流式を採用した。これにより、Fig. 11 に示すように、タービン重量が22%減少し、タービン回転上昇の加速性能で20%の向上効果が得られ、ターボラグを極力小さくすることができた。このターボチャージャとマッチングしたトルク特性とすることにより独特の加速感が得られた。また、ターボ特有の排気パルスの細かさにより発進加速騒音は Fig. 12 に示すように無過給モデルに対して21%低くなり、静粛で快適なクルージングを達成することができた。

一般的に排気ターボチャージャは高地において気圧が下がるとタービン回転が上昇するが、その対策として平地でのタービン回転を下げて設定しオーバランを防止している。

本排気ターボチャージャシステムでは、始動時の気圧より検出した高度により目標過給圧を設定し、所定の高度までは一定の目標過給圧とし、タービンのオーバランが想定される高度を上回っていると判断すると目標過給圧設定を下げた。これにより1500m程度の高地においても低地と同等の出力・最高速度を維持でき、気圧によって出力の下がる他の無過給エンジン搭載艇との速度差が大きくなり、ターボチャージャモデルならではの性能を維持できた。

2.3.3. エンジンパーツの高出力対応

エンジンはターボチャージャの付加により、無過給エンジンに対して40%以上にも達する図示平均有効圧力の上昇に対応するため、以下のような仕様変更を行った。ピストンは冷間鍛造製法とし、ピストン裏へのオイル噴射冷却により温度を下げ、高負荷連続使用時の信頼性を向上させた。ま

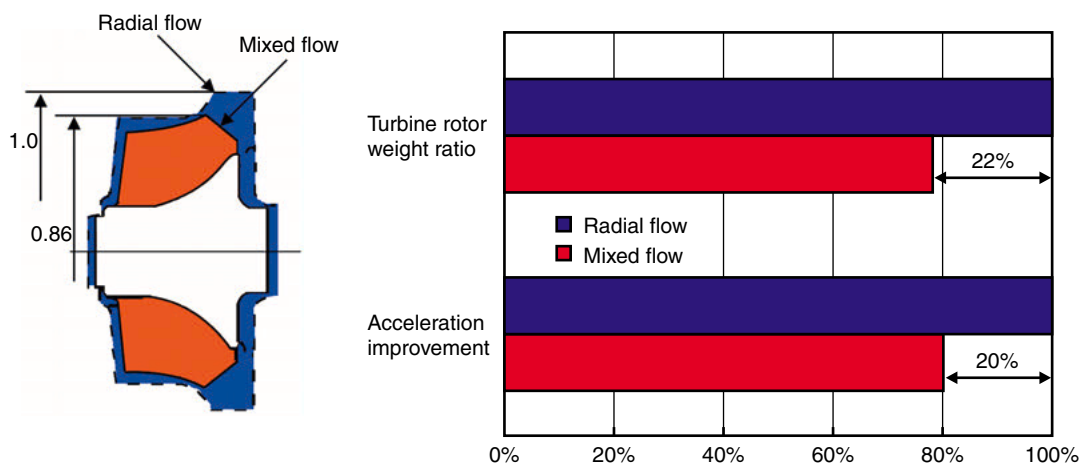


Fig. 11 Improvement of acceleration

た形状は剛性の高いフルラウンドタイプとし、変形によるフリクション増加や温度上昇を防いだ。コンプレッションハイトを極力高く取りランド厚を確保してリング溝の温度を低減させた。さらにリング溝に硬質アルマイト処理を施した。二輪車用ピストンとの比較を Fig. 13 に示す。コネクティングロッドは太く短い高強度タイプとし、使用エンジン回転が低いのでコンロッドラムダも小さくし、エンジン高を低くしてシート高を下げた。二輪車用エンジンのコネクティングロッドとの比較を Fig. 14 に示す。ピストンピンは径および長さの変更により剛性を上げ、表面処理を施した。これらによりピストンピンボスも含め、高荷重下で

の耐久信頼性を向上させた。

本ターボチャージャ付きエンジンでは吸入体積効率が180%を超え、排気ガス容量、排気温度ともに排気バルブには過酷な条件となった、そのため排気バルブ材質を耐熱性の高い SUH751 として耐高温酸化性能を向上させバルブシートの吹き抜けを防いだ。さらにエンジン振動を低減させて快適なクルージングを図るため、二軸二次バランスを装着したため、ターボチャージャ軸受の耐久信頼性も向上した。

3. エミッション性能

Fig. 15 に CARB2004 年エミッション規制値と出力から換算されるファミリーエミッションレベル(以下、FEL という)に対しての本エンジンとテスト用2ストローク3気筒1200ccエンジンの比較を示す。ターボエンジンではバルブタイミングや燃料噴射時期などの検討により、高出力を達成しながら CARB の 2004 年規制を満足し無過給エンジンとともに2スターラベルを取得した。

4. 実走燃費

ベンチテストによる EPA マリンエミッションモード測定時の各負荷ポイントでの比燃費を Table 3 に示す。テスト用2ストローク3気筒1200ccエンジンと比較すると大幅な向上が認められた。しかし実走行燃費は船艇抵抗により変化する。本エンジンを搭載した PWC はハルとしてはドラッグが大きく、それを出力増加により補っているため、エンジンの比燃費向上分ほどは実走燃費向上を得られず全開最高速時は既存2ストロークモデルとわずかな差でしかない。しかし、アイドルや引き物などのトーイング、一般走行などを約一か月間走行したときの実走燃費は Fig. 16 に見られるように 16%の実走燃費の向上が得られ、ユーザーモードにおいても同様の効果が得られると考える。

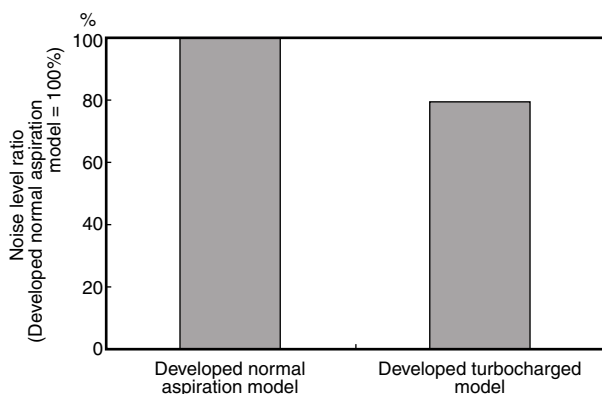


Fig. 12 Noise level of acceleration

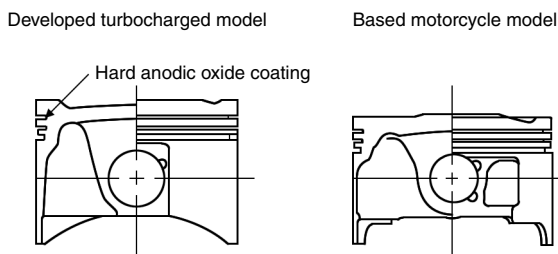


Fig. 13 Shapes of piston

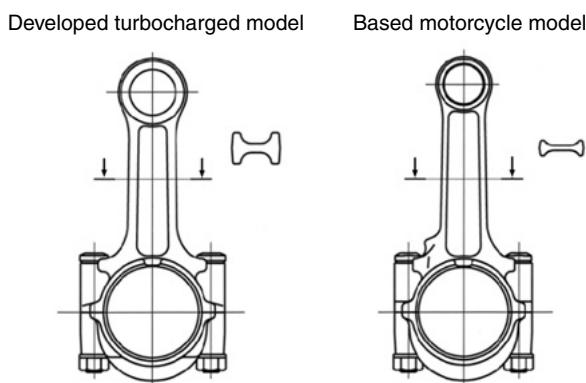


Fig. 14 Shapes of connecting rod

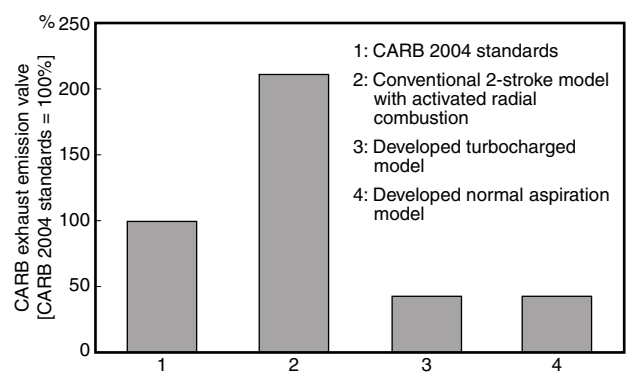


Fig. 15 CARB exhaust emission values

Table 3 Specific fuel consumption of emission test mode

(g/kW h)

ICOMIA Mode Number	Conventional 2-stroke model with activated radical combustion	Developed turbocharged model	Developed normal aspiration model
1	389	310	286
2	343	307	305
3	330	329	341
4	350	418	421
5	(No load)	(No load)	(No load)

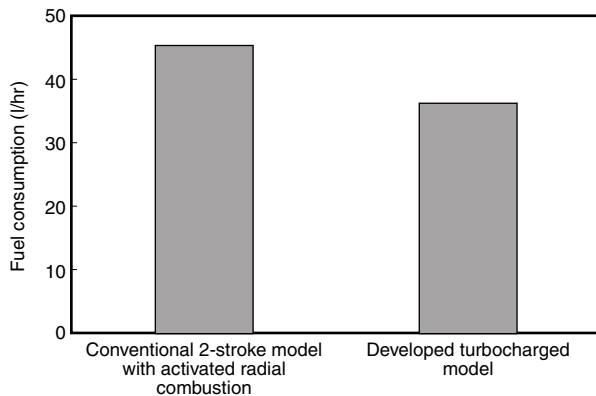


Fig. 16 Fuel consumption of actual riding

(4)ターボチャージャによる排気パルスの縮小と最高出力回転数を抑えたことにより排気騒音も低減でき、静かさと速さを両立できた。また最高出力回転数を低くしたことにより加速感も向上し、マリンレジャーを楽しむことができるようになった。

6. 謝辞

本 PWC 専用排気ターボチャージャの開発にあたり、石川島播磨重工業(株)の皆様が開発メンバと共に困難なハードルを乗り越えて世界初にチャレンジして頂きました。この場をお借りして心からお礼申し上げます。

参考文献

- (1)勝賀瀬 元ほか：4ストロークパーソナルウォータークラフト AquaTrax F-12/F-12X の紹介, Honda R&D Technical Review, Vol.14, No.1, p.1-10 (2002)

5. まとめ

本エンジンは二輪車用エンジンをベースとし、マリン用エンジンとしての種々の変更、および排気ターボチャージャの付加により、既存の2ストロークモデルを上回る性能を達成した。それによりスポーティさと扱い易さを両立し、優れた機動性を有する4ストロークエンジン PWC を実現した。

- (1)二輪車用エンジンを転覆対策や海水直接冷却などの PWCに要求される仕様に変更することによってマリン用4ストロークエンジンとすることができた。
- (2)EPA2006 年規制および CARB2004 年規制をクリアし、2ストロークエンジンのように未燃オイルの排出による水質汚染を無くし、実用燃費も向上し環境負荷の軽減に貢献する仕様を実現した。
- (3)排気ターボチャージャを付加することによって2ストロークに劣らない比出力およびパワーウェイトレシオを達成し、また過給圧のコントロールにより高度差の影響が少ないなどの常に最適な出力特性が得られ、エンジン開発のコンセプトを実現できた。

■ 著 者 ■



黒崎 隆 晴



岡田 和 典



横谷 仁