

空冷小型汎用エンジンにおける 冷却風流れ場予測技術の研究

Research on Prediction of Cooling Air Flow in Small Air-cooled Utility Engines

木 浦 寿 朗*
Toshiro KIURA

櫛 引 敬 司*
Takashi KUSHIBIKI

塩 見 和 之*
Kazuyuki SHIOMI

要 旨

空冷エンジンの冷却風流れ場を数値流体力学 Computational Fluid Dynamics (CFD) を用いて予測する技術について研究をおこなった。出力性能、燃費、騒音、信頼性などへの影響が大きいエンジン冷却において、冷却風流れ場の設計は非常に重要である。しかし、空冷エンジンの流路中には多くの部品が配置され、さらに遠心ファンにより送風されるため、流れ場はたいへん複雑である。この流れ場の把握に CFD による計算と実際のエンジンの測定をおこなった。CFD の適用にあたっては計算時間、モデル化準備時間、CFD と計測の相関方法、データベース化など実用面での適用も視野に入れファンの圧力と流量の関係 (P-Q 特性) と冷却流れ場を個別に計算する手法を採用した。実機の流れ場の測定では粒子画像流速計測法 Particle Image Velocimetry (PIV) による可視化に加え、圧力計測、冷却ファンの性能計測もおこなった。これらの計測結果と CFD の相関性を調べた。その結果、ファン P-Q 特性の計算から得られた回転領域の境界面における P-Q 特性を冷却風流れ場 CFD 解析のファン境界条件として与えることにより、おおむね良好な計算精度での予測結果が得られることを示した。これにより空冷エンジンの冷却風流れ場の、定性的かつ定量的な予測を可能にした。

ABSTRACT

This report describes research on the prediction of the cooling air field for air-cooled engines using Computational Fluid Dynamics (CFD). The design of the cooling air field is very important for engine cooling, a factor which has a significant effect on engine performance, fuel consumption, noise, reliability, etc. However, the flow field is very complex because a large number of components are located in the flow passages and the cooling air is generated by a centrifugal fan. In order to understand this flow field, calculations were performed using CFD and measurements were taken in an actual engine. Given practical considerations such as computing time, modeling time, correlation between calculation and test results, formulation of a database, etc., the fan P-Q (pressure vs. volume flow rate) characteristics and the flow field were calculated separately when employing CFD. In addition to visualization using Particle Image Velocimetry (PIV) pressure measurements and measurements of the P-Q characteristics of the cooling fan were employed to measure the flow field in the actual engine. The correlation between the results of CFD calculations and measurements was studied. Almost suitable prediction results were achieved by setting the P-Q characteristics at the boundary surface of the rotational area, as obtained from the calculation of P-Q characteristics, as a fan boundary condition for CFD analysis of the cooling air field. This research has enabled the qualitative and quantitative prediction of the cooling air flow of air-cooled engines.

1. はじめに

小型汎用エンジンは建設機械、農業機械、産業機械などの動力源として使用され、ガソリンエンジンだけでも全世界で年間に推定約 3500 万台 (Honda 調べ) が生産されている。小型軽量で搭載性に優れることが要求され、その多くは空冷単気筒エンジンである。この分野においても、自動車や

モータサイクルのエンジンと同様に環境問題への対応がクローズアップされてきており、その結果 2 ストロークから 4 ストロークへの移行が浸透している^{(1)・(3)}。またバルブ駆動方式の主流は SV から OHV や OHC に進化し、排気量当りの出力が向上している。

このエンジンの冷却方式は、構造が簡単で軽量なことなどの理由から、クランク軸上に回転ファンを設けた強制空

*朝霞東研究所

冷方式が一般的に採用されている。しかしこの場合、必要な風量を適切に配分することは難しい。単に風量を増加させるためにファン寸法を拡大すると機械損失の増大を招き、出力や燃費の低下のみならず、空力騒音の増加をもひき起こす。したがって、効率の良い冷却系が求められている。

エンジンの冷却性、すなわち熱移動は、シリンダやシリンダヘッドなどの物性や構造による熱伝導、流れ場による熱伝達、表面からの熱放射などにより決定される非常に複雑な現象である。さらに、流れ場ひとつをとってもさまざまな形状の部品が配置された複雑な流路に、性能・デザインなどの制約をうける遠心ファンから冷却風が送られ、乱れの強い流れ場となっている。このように現象が複雑なため、新規のエンジン開発では経験的手法での設計や試作エンジンによる性能確認に依存する割合が高い。したがって、空冷エンジンの冷却性を設計段階で精度良く予測できれば、エンジン開発にきわめて有効な手段となる。

CFDを用いて、自動車用ウォータージャケットの冷却性⁽⁴⁾や、作業用車両のエンジンルーム内の冷却流れ⁽⁵⁾などを解明し、エンジン開発に役立てようとする試みがおこなわれてきている。CFDを適用するメリットは従来計測が困難であった場所の流れ場や熱移動を詳細に分析できること、予測技術として設計時の指針を与えられることなどがあげられる。しかし小型汎用エンジンの強制空冷における流れ場を、CFDにより予測する取り組みについての報告は比較的少ない。

そこで本研究では、冷却性を予測しエンジン構造を最適化できる設計手法の構築を目的に、空冷小型汎用エンジンの冷却風流れ場にCFDを適用し、定量的に予測する手法を検証するとともに、その予測の妥当性を計測により検証した。

2. 計算方法

2.1. ファン P-Q 特性計算

ファン P-Q 特性の計算をおこなうには、計算空間を離散化し各要素間で、運動量、質量の保存式を解き、さらに回転領域における移動境界問題を解く必要がある。これらの計

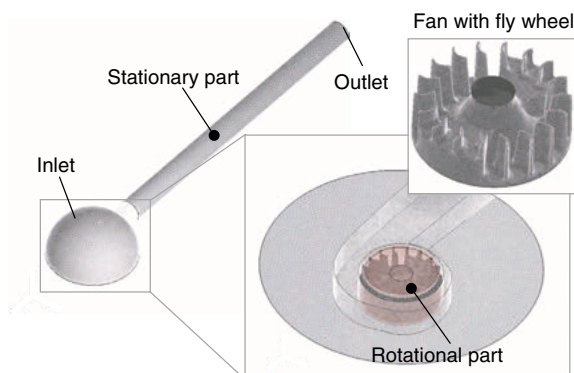


Fig. 1 Model geometry and mesh for calculation of fan P-Q characteristics

算には、有限体積法を用いる市販の3次元はん用熱流体解析コードである、SCRYU/Tetra(クレイドル社)を使用した。

解析モデルは Fig. 1 に示すとおり JIS 規格⁽⁶⁾に則った計測装置(3.1. 参照)の内部形状を3次的に模擬している。解析モデルが上記の計測装置と異なる個所は、流入側の開放空間を有限空間(ファンのサイズに対し、十分な領域を持つ半球形)でモデル化している点と管出口に設置した絞り機構を圧力境界条件に置き換えたため、絞り機構前までの形状としている点である。メッシュは表面の領域別に適当なサイズの三角形メッシュを作成し、表面近傍にはプリズムメッシュを、空間領域は非構造四面体メッシュ(テトラメッシュ)を適用している(Fig. 1)。このプリズムメッシュの適用は壁関数パラメータ(y^+ 値)のコントロールをおこなう事が目的である。メッシュ数は開発で適用する際の制限から100万要素以下で、かつできるだけ縮小するように決定した。

解析は定常とし、回転体の計算には移動メッシュ解析法 Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE)を用いてファンの回転運動を考慮する。そのためモデルは、静止領域と回転領域の二つの部分から構成される。また乱流モデルは、収束性の観点から乱れの運動エネルギー k と乱流消失率 ε を用いる標準 k - ε モデルと壁関数を採用している。入口及び出口は共に圧力境界を用いている。計測における P-Q 特性は出口の絞り機構により、ファン背圧を高めて測定するが、数値計算では出口圧力の値を大きくしていく事により背圧上昇を模擬している。

以上のモデル、メッシュ、及び境界条件により数値計算を実施した。またファン P-Q 特性計測により得られた計測結果との比較のため、計測位置と同位置の数値を直接比較し検証をおこなった。検証結果から、計算精度を考察し、壁関数パラメータ(y^+ 値)を変更することにより、計算結果を計測結果に漸近させる手法構築も同時におこなった。

2.2. 流れ場計算

流れ場計算をおこなうには、同様に離散化した要素間で運動量、質量の保存式を解く必要があるが、ここでは、市販の3次元はん用熱流体解析コードである、VECTIS(Ricardo 社)を使用した。これはエンジン開発で適用の際、設計時に作成する3次元モデルを解析に直接用いるため、モデルの読み込み易さと、形状修正のし易さが非常に重要になるためである。本ソフトは形状読み込み確率が他に比べ高く、直線直交格子を用いるため局所的なメッシュサイズのコントロールも容易である。

解析には実際のエンジンを3次的にモデル化したものを用いる(Fig. 2)。解析モデルが計測装置と異なる点は、外部開放空間を、有限区間(エンジンのサイズに対し十分な領域を持つ直方体)でモデル化している点である。メッシュはエンジン形状(板厚等)を十分表現できる、必要最低限のメッシュサイズで構成し、その他の外部空間は徐々に大き

なメッシュサイズを適用している。

解析は定常とし、ファン部にはファン P-Q 特性を入力することにより、適当な旋回流を作り出すファンモデルを使用した。このファンモデルへ、先の計算から得られた、回転領域の境界面における P-Q 特性を代入し計算をおこなった。乱流モデルは同じく標準 $k-\varepsilon$ モデルと壁関数を使用している。

以上のモデル、メッシュ、及び境界条件により数値計算を実施した。検証には粒子画像流速計(3.3. 参照)により可視化計測した結果と、全圧管により測定した圧力計測結果(3.4. 参照)の両方を用いておこなった。

3. 計測方法

3.1. ファン P-Q 特性計測

Fig. 3に計測装置の概要を示す。計測装置はモータ、ファン、スクロール部、パイプ、バタフライバルブ、流量計、圧力計測部から構成される。計測器の各仕様をTable 1に示す。

計測は回転数 3 000 rpm の一定でおこない、計測装置出口に設けられたバタフライバルブによって背圧調整をおこなった。圧力、流量が安定した状態でそれぞれの値を読み取り、ファンの P-Q 特性を測定した。

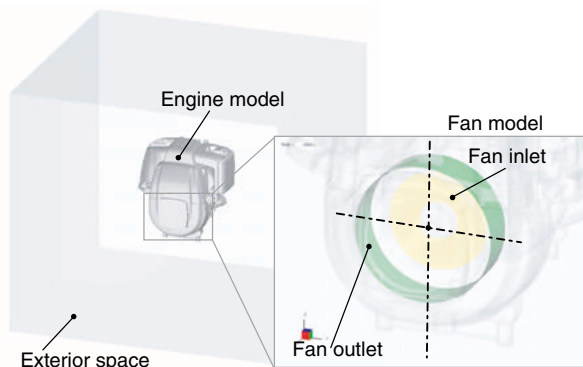


Fig. 2 Model geometry for flow field

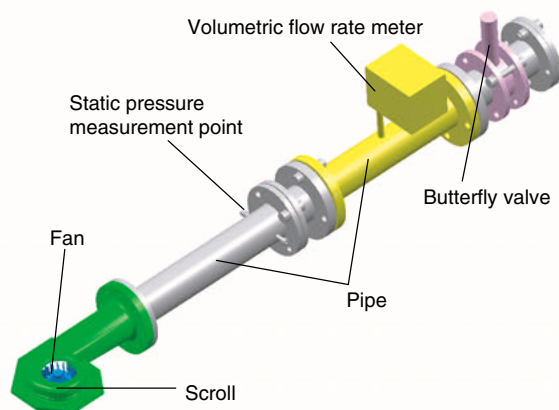


Fig. 3 System for measurement of fan P-Q characteristics

Table 1 Measurement system specifications

Measurement standard	JIS B 8330
Motor	ORIENTAL MOTOR VEXTA FBLM 5120
Pipe	JIS B2238 80A
Volumetric flow rate meter	Japan Flow Control FOX 10A (Range: 15 - 300 Nm ³ /h (Accuracy $\pm 2\%$))
Pressure meter	YOKOGAWA JP208

Table 2 Test engine specifications (GX22)

Engine type	4-stroke single cylinder (OHV) spark ignition
Bore $\times$ Stroke (mm)	33 $\times$ 26
Displacement (cm ³)	22.2
Dry weight (kg)	3.3
Dimensions L $\times$ W $\times$ H (mm)	210 $\times$ 251 $\times$ 249

3.2. 供試エンジン及び駆動装置

供試エンジンはGX22(Fig. 4)を使用した。本エンジンは、4ストロークガソリンエンジンとしては世界ではじめて360°自在傾斜を可能とするとともに、クリーンな排気と優れた経済性を実現したハンドヘルド作業機用動力源として開発されたものである。エンジン諸元をTable 2に示す。また計測装置をFig. 5に示す。本試験では、流れ場の計測が目的であるため、供試エンジンの出力軸をバッテリー電源のモータにより駆動することとし、レーザが通過する箇所に



Fig. 4 Test engine (GX22)

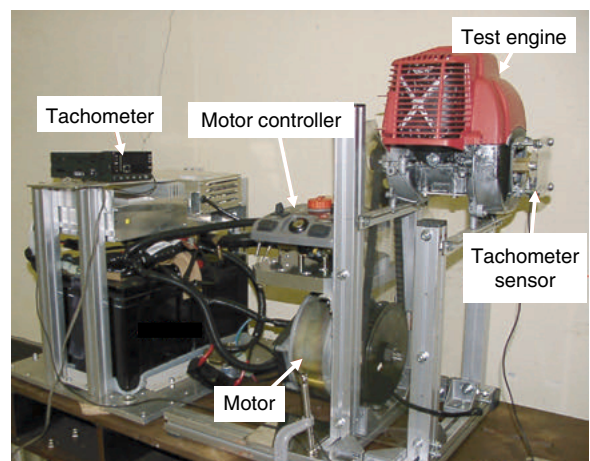


Fig. 5 Test engine bench

は透明な素材を使用した。駆動装置は駆動用モータ、制御装置、バッテリー及び光学式回転センサで構成される。

3.3. 流れ場計測

流れ場の可視化計測には PIV を使用した。PIV は非常に短い時間差で 2 回の流れ場撮影をおこない、その撮影によって得られた 2 枚の画像の相互相関を計算し、シーディング粒子の移動量と方向を解析するものである。2 枚の画像の具体的な計測には、2 台の独立したレーザ、CCD カメラ、シンクロナイザ、シーディングジェネレータを使用する。光源として 2 台のレーザを同軸上で使用する。そのレーザは発振口に設置したシリンドリカルレンズを介してシート状に広げられ、パルスセパレーション(ダブルパルスの間隔)をコントロールする事により 2 回パルス発振される。レーザの発振タイミングはシンクロナイザにより CCD カメラに同期され、フレイムストラドリング技術により非常に短い時間差で 2 枚の画像が撮影される。流れ場には上流で混入されたシーディング粒子が含まれており、2 枚の画像にはレーザ発振間隔分の粒子の移動が撮影される仕組みである。これにより撮影された 2 枚の画像を 1 組として、画像間の相互相関からシーディング粒子の移動量と方向を解析することにより、2 次元的に流速ベクトルの計測をおこなうことができる。本計測における装置の仕様を Table 3 に示す。

本実験では、エンジンカバー内部の流れを見るため、カバーの各部(ファン吹出し部、排気側)に可視化窓を設けた。計測断面(3 断面)を Fig. 6 に示す。計測はすべて回転数 3 000 rpm でおこない、計測枚数は 100 ペアとし、その結

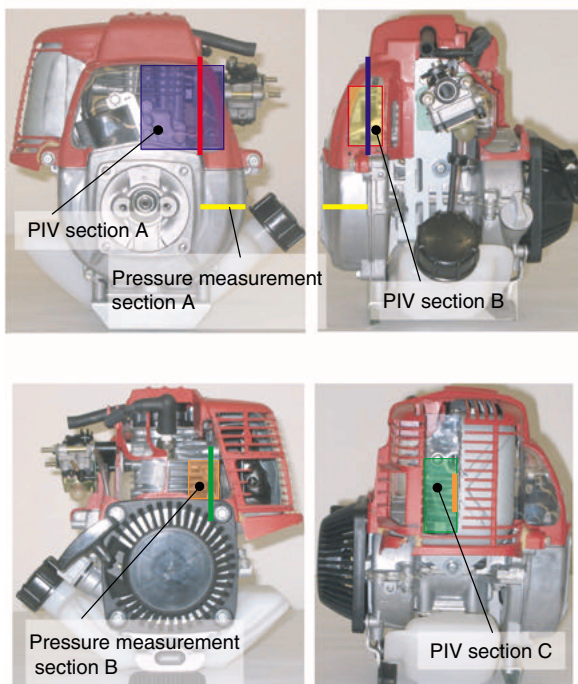


Fig. 6 PIV and pressure measurement sections

Table 3 PIV system specifications

Camera	
TSI PIVCAM 10-30 Cross/ autocorrelation CCD Camera	
Light sensitive pixels	1 008 (H) × 1 018 (V)
Frame rate (MAX) (frame/s)	30
Frame straddling time (MAX) (μs)	0.4
Optional system components	
TSI LASERPULSE™ Y12-15	
Energy (per pulse) (mJ)	12
Repetition rate (max.) (Hz)	15
Wavelength (nm)	532
Others	
Seeding generator	DLR Seeding Generator LSG-500 (Particle diameter 1μm)
Analysis software	INSIGHT™ TSI

Table 4 Pressure measurement system specifications

Pressure probe	
Diameter (internal/external) (mm)	0.8/1.2
Pressure transducer	
YOKOGAWA JP208	
Range (Pa)	0 - 100 (Accuracy ±1%)

果の平均処理をおこなった。フレイムストラドリング間隔は 10 μs、検査領域のサイズは 32 pixels でクロスコリレーションによる処理をおこなっている。また撮影領域によっては、領域分割をおこない平均化処理後に合成している。

3.4. 圧力計測

小型汎用エンジンの冷却風流れということもあり、PIV 計測が可能な場所が限られてくる。そのため、上述したとおり Fig. 6 に示す 3 断面について PIV をおこない、その補足としてスクロール出口と排気側フィン間の 2 箇所について圧力測定をおこなった。

計測には全圧プローブ、トラバース装置及び微差圧計を用いた。その仕様を Table 4 に示す。ここでエンジンの運転状態は流れ場計測時と同じである。

4. 結果

4.1. ファン P-Q 特性

回転数 3 000 rpm における、ファン P-Q 特性の計算及び計測結果を Fig. 7 に示す。図中の実線は Fig. 3 における計測位置で測定した静圧値と流量の関係を示し、赤は計測、黒は CFD の結果である。また破線は、回転と静止領域境界面における入口と出口の全圧差(位置は Fig. 8 参照)と、流量の関係をプロットしたものである。この結果を流れ場解析時

のファン P-Q 特性として使用する。P-Q 特性計算結果の一例として、背圧80 Pa時の羽根高さ中央断面における流速ベクトルと、境界面での圧力分布結果を Fig. 8 に示す。

Fig. 7 より低-中背圧域(圧力 0 - 90 Pa)は計算結果と計測結果が非常に良く一致している。これは本計算に使用したソルバにおける、壁関数パラメータ(y^+ 値)と壁面摩擦損失の関係を事前に計算し、計測結果に漸近するよう境界層メッシュ厚さのコントロールをおこなった結果である。具体的には y^+ 値は 30 - 100 を狙い、局所的に最適なプリズムメッシュの厚さを決定している。また本計算では全背圧条件下で同一メッシュを用いている。

同図内、高背圧域(低流量域)において差異が拡大していく傾向にあるが、これはファンが発生する圧力に対し、出口に設定する背圧が均衡してくる事によるものである。これら条件下においては、入口境界における流出と出口境界における流入が局所的に発生し、計算の収束性、安定性が悪化

し、精度低下を引き起こす。解析モデルの適用限界である。しかし一般的に遠心ファンの適用領域は、ファン効率が高い中-高流量域であり、本手法は十分適用可能である。

4.2. 流れ場可視化結果

ファンカバー内の2断面と、排気側フィンに垂直な断面(Fig. 6)における PIV 結果と、同条件下における数値計算結果を比較し Fig. 9 に示す。

Fig. 9 より各断面とも、計算結果が PIV によって可視化された流れ場を、定性的には非常に良く予測できている事がわかる。定量値を比較してみると、流速の絶対値で約10%の差異が生じる結果となった。これはファン P-Q 特性解析と、その結果を用いた流れ場解析におけるファンモデルで2度スクロール形状の影響を受けていることなどが原因と考えられる。これは本手法での解析をおこなう上では避けられない誤差であり、今後の課題である。

4.3. 流れ場圧力

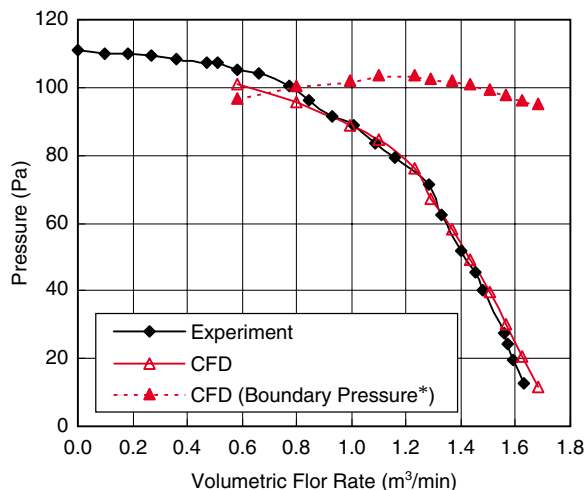
Fig. 6 で示した計測断面(ファン吹出し部及び排気フィン間)における全圧計測結果と数値計算結果をFig. 10, Fig. 11 にそれぞれ示す。

Fig. 10, Fig. 11 より、圧力場の比較においても、各断面とも、計算結果が全圧測定結果を非常に良く予測できている事がわかる。絶対値において、流れ場同様約10%の誤差が生じている。

5. 考察

供試エンジンの冷却ファンは、マグネットやそのカウンタウェイトが取り付けられているため、ファン翼ごとの周期対称形状になっていない。そのため冷却流れは非定常性が強く、回転角度ごとに周期性をもつ間欠流となる。また複雑な冷却風流路が、各部におけるはく離を誘起し、非常に強い乱流場を形成しているものと考えられる。この様に非定常性が強い乱流場を、PIV はその計測方法及び処理上、検査領域内での空間平均と一定時間の時間平均をおこなっている。また CFD においても定常流の仮定と Reynolds Averaged Navier-Stokes Equation(RANS)により時間平均化された方程式を用いて解いているため、今回の実験と計算の相関には繊細な問題を多く包含している事が容易に推測できる。しかしこの様な現象が数値計算において定性的、定量的におおむね良い相関が得られた意義は大きい。

一方、ファン P-Q 特性やファン周りの流れ、冷却通路内流れの詳細な分析や予測ができるようになったことにより、ファンの機械損失の低減、空力騒音の低減を探ることが可能になってきた。また、冷却性を予測するという観点からはさらに熱移動の問題も付加して考慮しなければならないことはいまでもない。今後は、エンジン内部熱伝達面にお



* Boundary pressure difference: Pressure difference between inlet and outlet of rotational boundary

Fig. 7 Results of calculation and measurement of P-Q characteristics curve (3000 rpm)

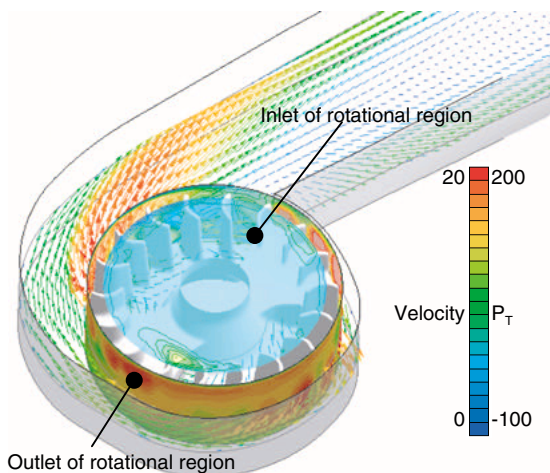
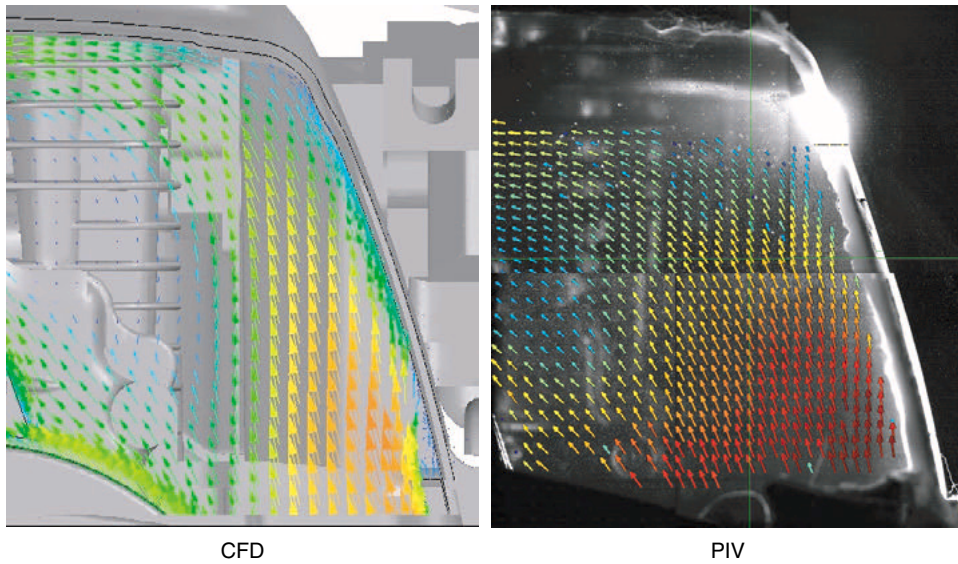
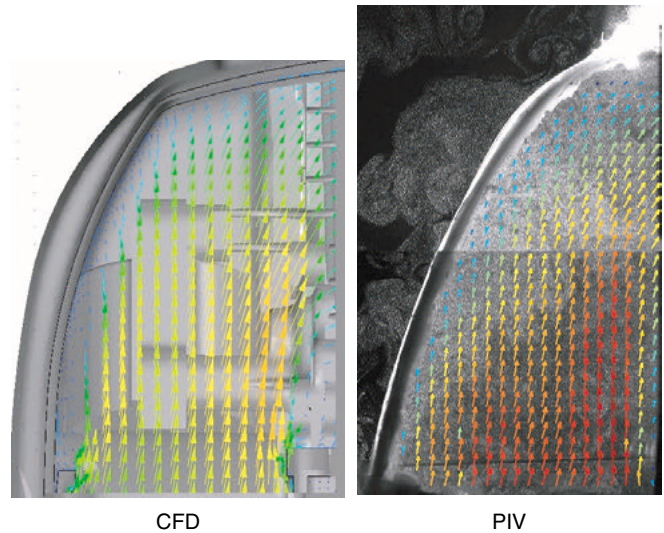
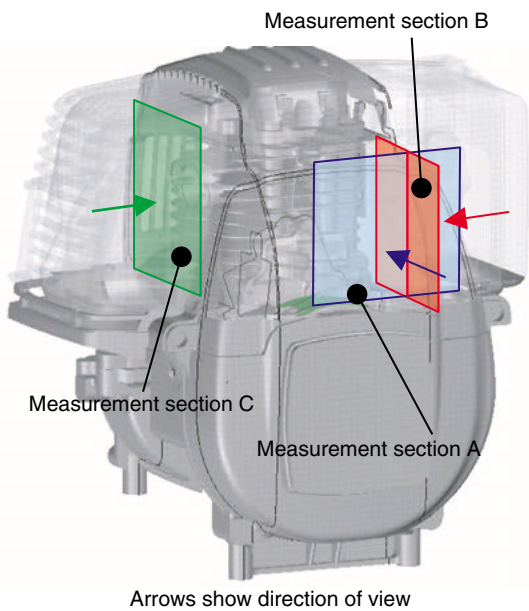


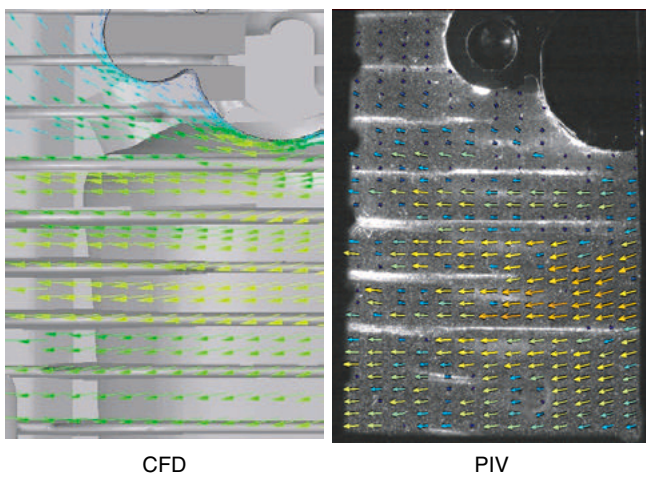
Fig. 8 Velocity vector at 80 Pa of back pressure



(a) Results on section A (velocity range 0-10 m/s)



(b) Results on section B (velocity range 0-10 m/s)



(c) Results on section C (velocity range 0-7 m/s)

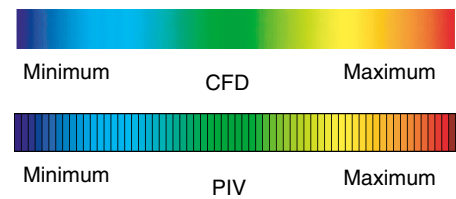


Fig. 9 Comparison of CFD and PIV results for cooling air flow

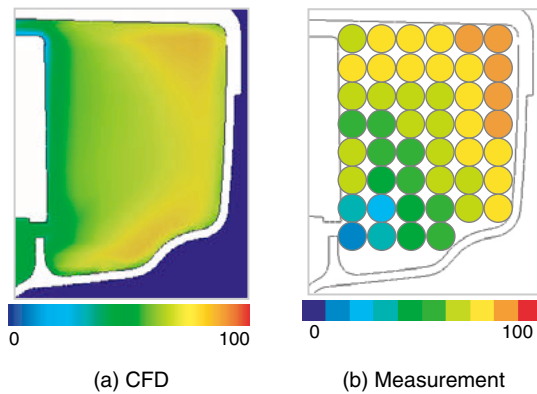


Fig. 10 Pressure distribution at pressure measurement section A (fan - scroll outlet)

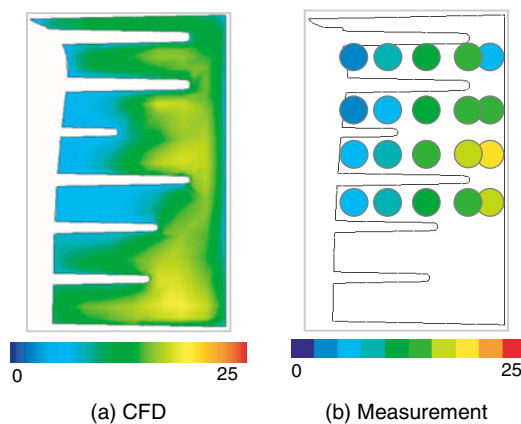


Fig. 11 Pressure distribution at pressure measurement section B (Exhaust fins)

る、入熱及び吸熱条件の構築をおこない、温度予測もおこなえる手法を目指す。

6. まとめ

本研究はエンジンの冷却性を予測し、エンジン構造を最適化できる設計手法の構築を目的としている。その第一歩としてハンドヘルド用小型汎用エンジンを供試エンジンとし、空冷小型汎用エンジンの冷却風流れ場に CFD を用い、定量的に予測できる手法の研究をおこなった。その結果、以下の知見を得た。

- (1) ファン P-Q 特性の計算では、計算結果を計測結果に漸近させる手法構築がおこなえた。これによりファン単体性能の検討も可能となった。
- (2) ファン P-Q 特性の計算から得られた回転領域の境界面における P-Q 特性を、冷却風流れ場計算のファン境界条件として与えることにより、CFD 解析の結果は可視化などの計測結果とおおむね良い一致が得られた。
- (3) 本研究により構築された手法により、冷却流れ場の定性的・定量的な予測計算が可能となった。

最後に、ここで構築した技術は設計段階での予測精度の

向上と開発品質の向上に寄与するなど、その後の空冷エンジン開発にいかされてきたことを付記する。

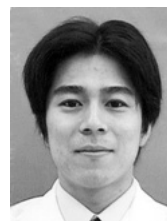
謝 辞

PIV による流れの可視化計測に協力を頂いた東北大学流体科学研究所 小濱泰昭教授、太田福雄技術職員、岐阜大学工学部 機械システム工学科菊地聡講師ならびに関係者の方々に対し心から感謝申し上げる。

参考文献

- (1) 志賀光男, 西田隆夫, 龍康武, 告川高則, 東健次: 自在傾斜小型 4 ストロークエンジンの開発, HONDA R&D Technical Review, Vol.9, p.44-50
- (2) 伊藤慶太, 龍康武, 米田新吾, 藁科誠, 枝松茂貴: ハンドヘルド用 4 ストロークエンジン「GX25」の開発, Honda R&D Technical Review, Vol.14 No.2, p.1-8
- (3) MAEDA, T., et al.: Development of All Position - Operatable Small Four-Stroke Engine, Small Engine Technology Conference 97, 972104(1997)
- (4) XIN, J., et al.: Theoretical Consideration to Improve Engine Cooling and Application of Coupling 3D Combustion Simulations with Heat Transfer in Water Jacket and Components, Honda R&D Technical Review, Vol.15, No.2, p.117-126
- (5) SAITO, M., et al.: Development of Low Noise Working Machine based on CFD Technique, Small Engine Technology Conference 2002, 20024295, 2002-32-1802 (2002)
- (6) JIS B 8330 送風機の試験及び検査方法(2000)

■ 著 者 ■



木浦 寿朗



櫛引 敬司



塩見 和之