

スロットル急開における異音発生時の気流の可視化

Visualization of Air Current when Noise Occurs with Throttle Rapidly Opening

山 岸 仁*
Jin YAMAGISHI

若 松 健*
Takeshi WAKAMATSU

要 旨

エンジン実動時の、スロットル急開における異音が発生する事象の全体像を把握するために、インテークマニホールド（インマニ）内部の圧力計測と気流の可視化をおこなった。インマニの樹脂化と Drive By Wire (DBW) 採用により顕在化した異音について、音源探査をおこなった結果、インマニの表面から音が放射していることがわかった。また、インマニ内部の気流挙動の計測については、近年性能が向上してきた高速度カメラと特殊なライトを用いて開発の現場で活用が可能な、エンジン実動時の可視化をおこなった。その結果、高速気流の衝突が異音の原因であることを明らかにした。

ABSTRACT

Pressure measurements were conducted and airflows were visualized inside the intake manifold to help enable an overall understanding to be obtained of the phenomenon of noise occurring under conditions of rapid throttle opening during engine operation. The use of plastic intake manifolds and drive-by-wire (DBW) has made this noise more conspicuous. The results of attempts to identify the sound source showed that the noise was radiated from the surface of the intake manifold. For measurements of the behavior of the airflows inside the intake manifold, airflows were visualized while the engine was in operation using a high-speed camera (taking advantage of recent performance enhancements) and a special lighting system in a method that can be applied during the development process. The results of these measurements demonstrated that noise resulting from the collision of high-speed airflows is the origin of the noise under study.

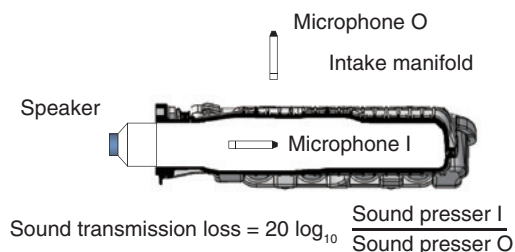
1. はじめに

軽量化、モジュール化がエンジン部品に要求され、樹脂化、薄肉化が推進されて久しい。インマニも 15 年程前から樹脂化が図られ、現在では多くのエンジンに樹脂製インマニが採用されている。一方、DBW 採用によりスロットル制御の自由度が拡大したことで、走行特性の向上や、環境性能要求の対応としてピストン停止位置を制御するために、スロットルを急開する要求が高くなってきている。

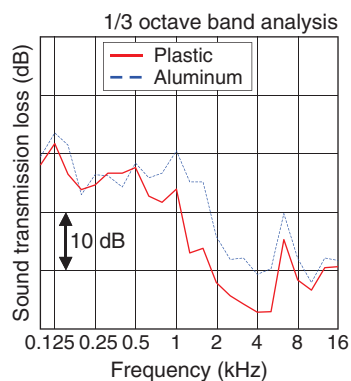
これらにより、アルミ製インマニやメカニカル制御のスロットル仕様では聞こえなかったスロットル急開時の異音が顕在化するようになった。

Fig. 1 にインマニ材質違いの透過音周波数特性と音圧の計測結果を示す。

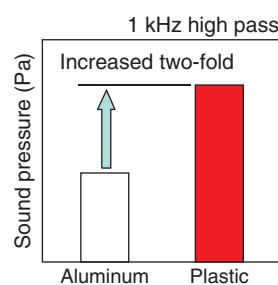
同一形状のインマニの材質をアルミから樹脂に変更することで、音響透過損失が低下し、結果として異音が増加することがわかっている。スロットル急開時における異音を低減する研究については、各社が 10 年以上前から進めており⁽¹⁾、網等による低減技術が提案され⁽²⁾、量産車に幅広く適用されている。



(a) Measurement system



(b) Sound transmission loss



(c) Sound pressure

Fig. 1 Comparison of sound transmission loss and noise

*四輪 R&D センター

従来の研究は、インマニ管内音の計測と Computational Fluid Dynamics(CFD)を用いた解析であり、実際の管内における気流挙動を計測し、報告した事例は少ない⁽¹⁾。

エンジン実動時の異音が発生しているときの気流の挙動を、可視化により把握することで、異音対策につなげる足がかりとする。

2. 研究のねらい

本研究では、エンジン実動時の

(1) 異音発生部位の特定

(2) 管内気流挙動可視化

をおこなうことで、異音に対する気流挙動と管内圧力変動の関係性を確認し、異音発生現象を把握する。

3. 異音発生部位の特定

試験にあたり、樹脂製インマニを採用している 2.4 L のエンジンを使用した。諸元を Table 1 に示す。

最も異音が顕著な、レーシング時のエンジン回転数が 1000 rpm に低下してきたときにスロットルを急開する操作を 1 レーシングサイクルとし、これの繰り返し試験をおこなった。開速度の設定は、事象が顕在化した条件と同一にした。

スロットル急開時の気流挙動は、過渡現象であり、安定した結果が得難いため、音と圧力の計測については 1 レーシングサイクル中の最大値を数十回以上計測し、平均した値にて表現した。

3.1. 音源探査装置によるテスト

スロットルを急開したときの異音に対し、非定常音源探査として一般的な、多点マイクロフォンによる探査装置を用いた。Fig. 2 に計測装置と結果の一例を示す。異音はここに示されるようにインマニ表面から放射されていることを確認した。

3.2. インマニ詳細解析

インマニにおける、異音の発生部位をより明らかにするため、詳細解析をおこなった。

3.2.1. インマニ近接音、表面振動および内部圧力計測

Fig. 3 に供試インマニを示す。

インマニをスロットルボデー近傍部、チャンバ部、ポート部の三つのセクションに分割し、近接音、表面振動に加え、インマニ内部の圧力を計測した。

エンジン実動時にスロットルを急開するときのインマニ内の圧力は、負圧状態から瞬時に大気圧まで上昇するため、大きな圧力変化とともに、高周波の変動成分を有する。そのため、ダイナミックレンジが高周波まで広い計測機器

Table 1 Engine specifications

Item	Specification
Engine type	4-stroke gasoline engine
Cylinder configuration	In-line 4-cylinder
Bore x stroke (mm)	87 x 99
Displacement (cm ³)	2354
Compression ratio	10.5
Valve train	16-valve DOHC i-VTEC
Intake manifold	Plastic with glass fiber
Max. power (kW [PS] / rpm)	142 [193] / 7000
Max. torque (Nm [kgm] / rpm)	220 [22.4] / 4400

が望ましい。従来はブローブマイクロフォンを用いて音圧変動成分の計測をおこなっていたが、今回は気流の挙動に影響が少なく、高周波まで計測が可能な圧力センサを用いることとした。

Fig. 4 に示す計測結果から以下のことがわかった。

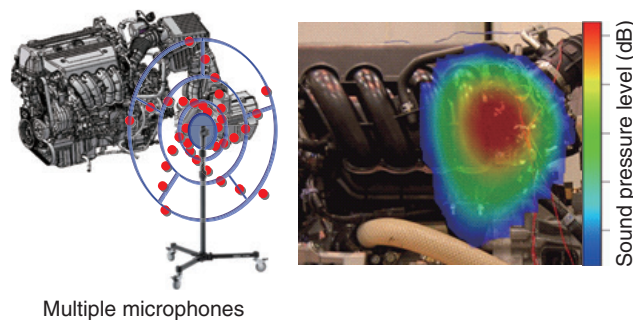


Fig. 2 Sound source investigation analysis

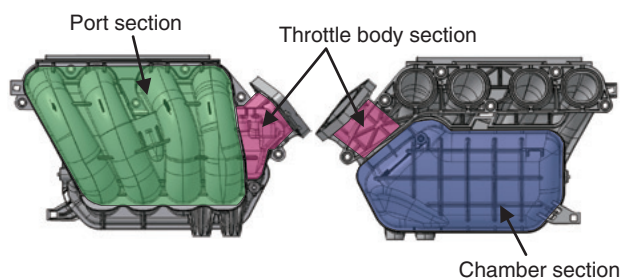


Fig. 3 Measurement intake manifold

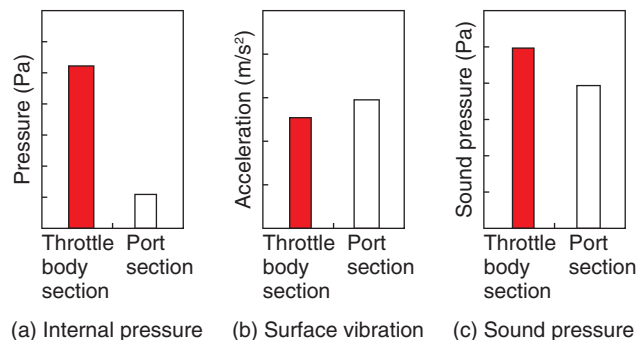


Fig. 4 Sectional analysis of sound source

- (1) (a), (c)より圧力変動が大きいスロットルボデー近傍の音は大きい.
- (2) (a)よりインマニ内部の圧力変動は、ポート部に対し、スロットルボデー近傍部が約5倍大きい.
- (3) (a), (b), (c)より内圧変動が小さいポート部にインマニ表面振動が大きい部位が存在し、近接音も大きい.

3.2.2. インマニモーダル解析

内圧の小さいポート部に、インマニの振動と近接音が大きい部位があることから、構造による振動伝達影響も考えられるため、モーダル解析をおこなった. 計測条件はファイアリング実動時と同じ、インマニはエンジン結合状態、エンジンはエンジンマウント支持状態にて計測した. 1 kHz 以上の高周波領域で、振動が大きい部位に膜面のモードが存在する. モードの一例を Fig. 5 に赤丸で示す.

3.3. 異音発生部位明確化まとめ

以上の結果から、異音はスロットルボデー近傍の圧力変動が、インマニを透過し音となる成分とインマニを内部から加振し振動伝達されモード発生部位から放射される成分による気流音であると考えられる.

このことから、異音発生源の特定には、スロットルボデー近傍の気流挙動を把握することが重要である.

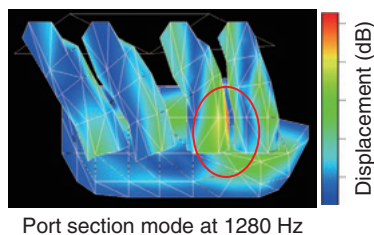


Fig. 5 Modal analysis result

4. 管内気流挙動可視化

4.1. 可視化手法検討

3章の結果から、スロットルボデー近傍のインマニ内部の気流挙動が音の要因と考えられるため、インマニ内部の気流の可視化を検討した.

気流全体の可視化をおこなうには以下の方法が考えられる.

- (1) 同一形状の透明インマニを用いる方法
- (2) 気流挙動発生部に透明な円筒を追加する方法

(1)の方法については、気流の挙動は同一と考えることができるが、可視化するためには、光源設定、計測位置、形状による像のひずみ、光の透過度等、多くの課題が存在するため今回は採用しないこととした.

(2)の方法については、上記の課題を解決できる計測であると考えられるが、気流の挙動が異なる可能性があるた

め、確認をおこなった. 透明な延長管の追加による、内部の気流挙動の違いを確認するため、管内圧力を計測し、影響を確認した.

計測結果を Fig. 6 に示す. スロットルボデーから同一の距離で比較すると、ほぼ同値の内圧変動が得られたため、透明な延長管を用いてもオリジナルと同様の気流挙動が発生していることが確認できた.

以上から、(2)の方法にて計測をおこなった.

4.2. 可視化計測概要

Fig. 7 に可視化計測システム全体図を示す.

可視化するためのオイルミストを、スロットルボデーの上流部より導入し、透明管部の高速度カメラ映像と A/D ボードを経由し音や圧力等の信号を同期させ PC に取り込むことで、気流音が発生しているときの気流の挙動を把握することができる.

高速度カメラを用いて撮影をする場合、一般的なライトでは外部から表面を連続的に照射するため、高速で撮影す

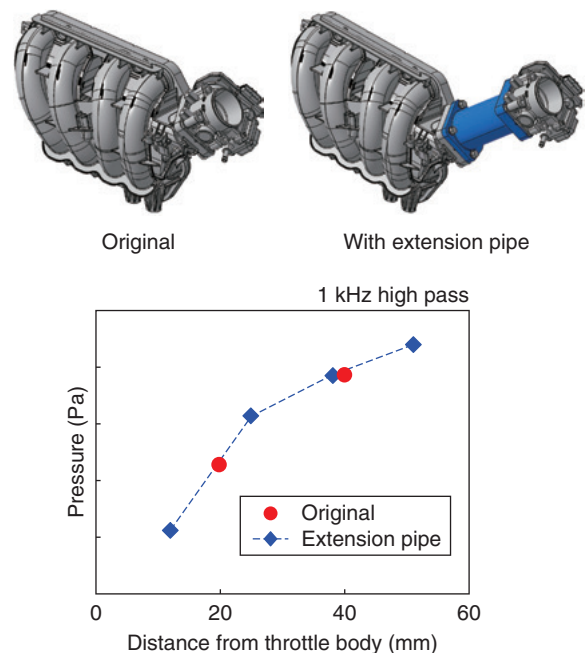


Fig. 6 Comparison of internal pressure

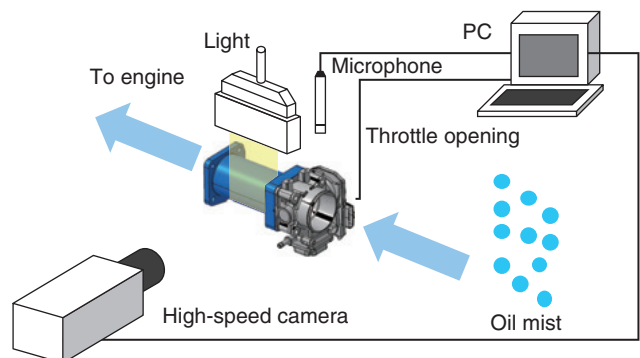


Fig. 7 Visualization system

Table 2 Specifications of light source

Light	250 W metal halide
Power consumption	290 W
Voltage	100 V 50/60 Hz
Filter	UV, IR cut
Shutter	Continuously mechanical type
Cooling	Fan

るほど像はより暗くなる。

透明管内の気流挙動を計測する場合、暗さに加えて表面反射、内部反射によるノイズにより、計測したい気流を抽出することが困難になる。

そのため、強力な光エネルギーを高速カメラに同期させて照射が可能で、レーザシート光を用いた Particle Image Velocimetry (PIV) 計測があるが、大がかりな設備と高度な技術が必要となり、開発の現場でエンジンが稼働している状態での計測に適さない。

メタルハライドライトを光源とした光ファイバを線上に配置し、シリンドリカルレンズを介することで拡散する光を集光し、光シートを作ることができる特殊ライト〔(株)ナックイメージテクノロジー製〕を用いることで、エンジン実動時の気流の可視化をおこなうことが可能となった。

この特殊ライトの諸元を Table 2 に、構造を Fig. 8 に示す。

4.3. 管内圧力分布計測

はじめに管内の圧力分布計測をおこなった。

Fig. 9 に計測に用いた延長管の断面図を示す。管のスロットル上側および下側線上の内壁面に等間隔に 10 点ずつ計 20 点に圧力センサを配置した。計測については 3 章と同様に、1 レーシングサイクル中の最大値を数十回以上計測し、平均値にて表現した。

Fig. 10 の結果から以下のことがわかった。

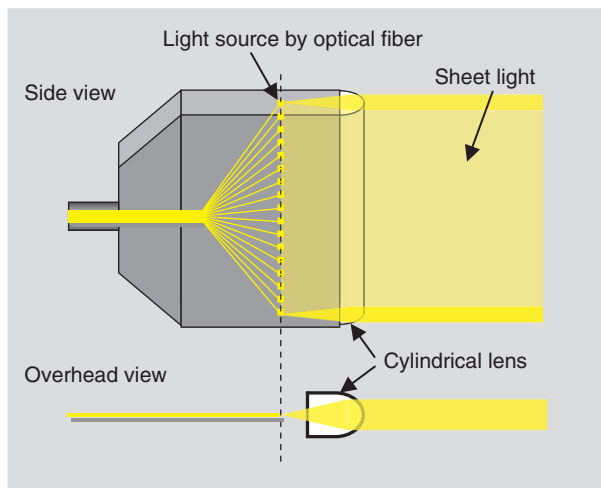


Fig. 8 Special light system

(1) スロットルボデー近傍の圧力変動量は、上側よりも下側の値が大きい。

(2) スロットルボデーからの距離が 40 mm から 90 mm の領域で圧力変動量が最大となる。

気流音が発生したとき、スロットルボデーの近傍で激しい圧力変動が発生していることがわかる。

4.4. 気流の可視化

高速カメラの計測条件は、解像度を 448×368 pixel、フレームレートを 10000 fps に設定し、1 レーシングサイクルを動画にて撮影した。カメラに同期させて音とスロットル開度を計測し、音の平均に近い値の可視化結果を用いた。

静止画像は、一連の動画の中で気流音が最大になったタイミングで切り出しをおこなった。

計測面を Fig. 11 に示す。気流の挙動が最も激しいと考えられるスロットルバルブ軸に対し垂直方向かつ、延長管の軸方向の中央部断面 (Vertical plane) にて計測をおこなった。切り出した条件を Fig. 12 に、結果を Fig. 13 に示す。

ライトの位置を撮影方向 20 mm 手前側にオフセット (Offset plane) して計測した可視化結果を Fig. 14 に示す。またスロットルバルブ軸中心を通る水平断面 (Horizontal plane) で計測した可視化結果を Fig. 15 に示す。

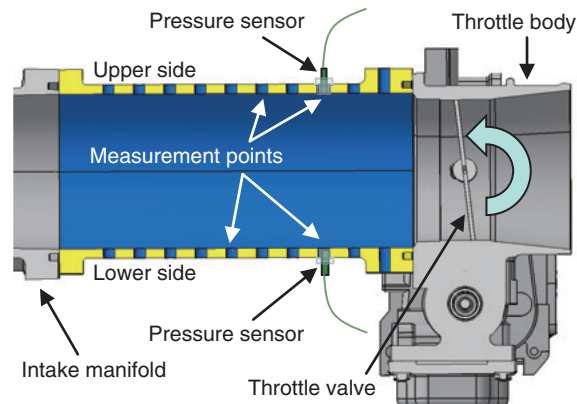


Fig. 9 Measurement extension pipe

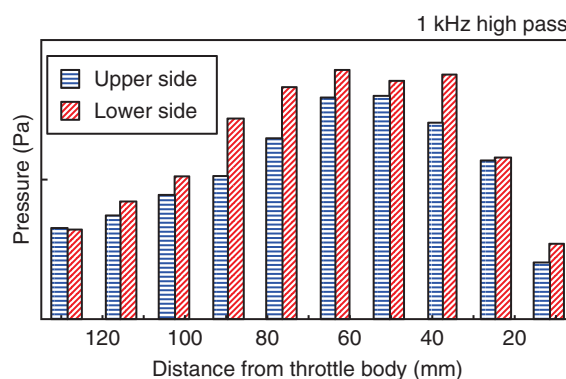


Fig. 10 Inner pressure distribution of extension pipe

各断面を計測することで、簡易に管内気流の挙動を三次元的に把握することが可能となった。

これにより以下の結果が得られた。

- (1) Fig. 13 TimeA から E を見ると、スロットルバルブが開くとスロットルバルブ下側から流れる気流が、スロットルボデーから離れた奥側から斜め上方に立ち上がり、音が最大になるタイミングで 40 mm から 90 mm の位置において、上側内壁面およびスロットルバルブ上側を直進する気流と衝突する様子がわかる。
- (2) スロットルバルブ上側を流れる気流には、Fig. 13 TimeE に見られる管内上側に沿って直進する高速気流と、Fig. 14 に見られる管内壁面に沿って斜め下方に向かう高速気流がある。
- (3) スロットルバルブ上側から管内壁面に沿って下方に向かう気流 (Fig. 14) は、スロットルボデーより 40 mm から 90 mm の位置でスロットルボデー下側からの気流と衝突する (Fig. 15)。

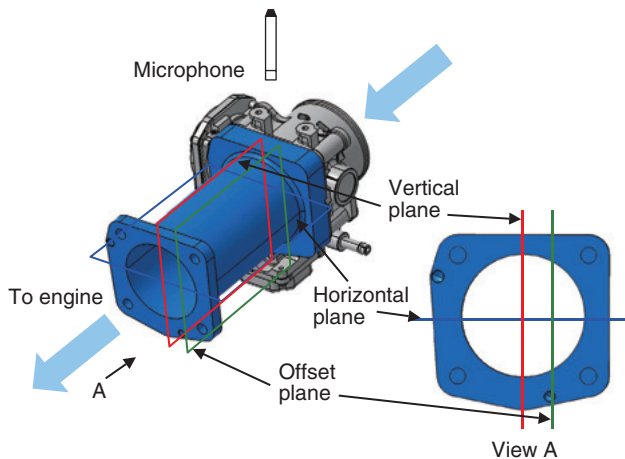


Fig. 11 Visualization planes of air flow

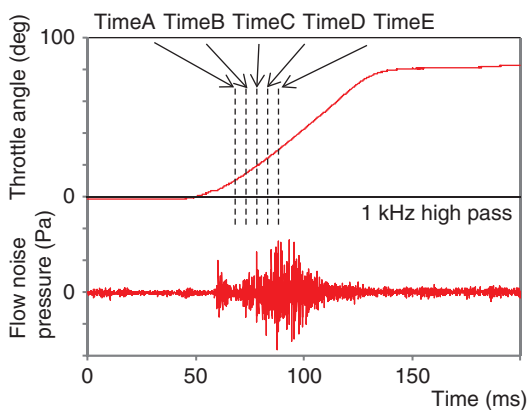


Fig. 12 Condition of visualization of air flow at vertical plane

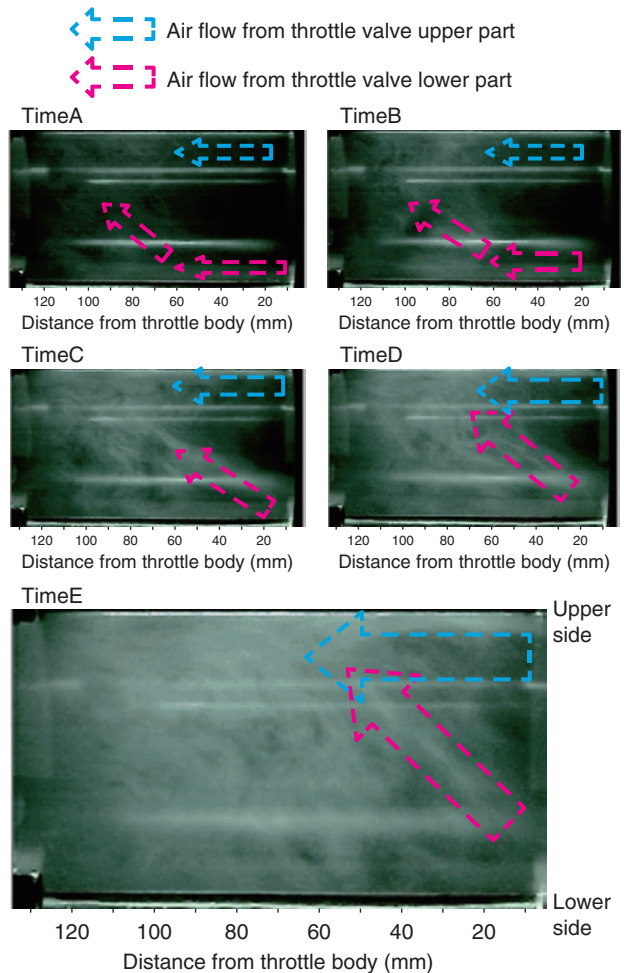


Fig. 13 Visualization of air flow at vertical plane

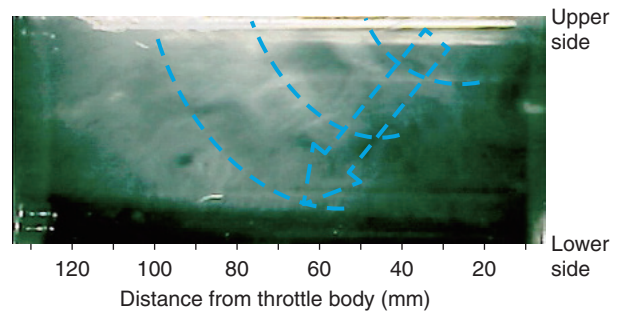


Fig. 14 Visualization of air flow at offset plane

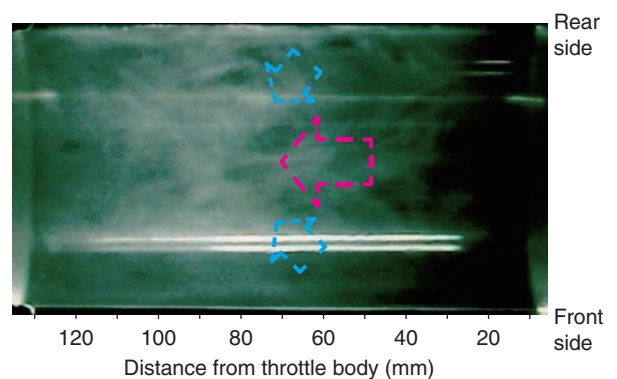


Fig. 15 Visualization of air flow at horizontal plane

4.5. 開速度を遅くした場合の気流挙動の変化

気流を変化させた場合の挙動を計測するために、スロットル開速度を遅くし計測をおこなった。可視化結果を Fig. 16、気流音の結果を Fig. 17 に示す。

Fig. 13 と比較すると、スロットル開速度を遅くした結果、流入する気流の挙動が穏やかになった。それによって音圧が低減した。

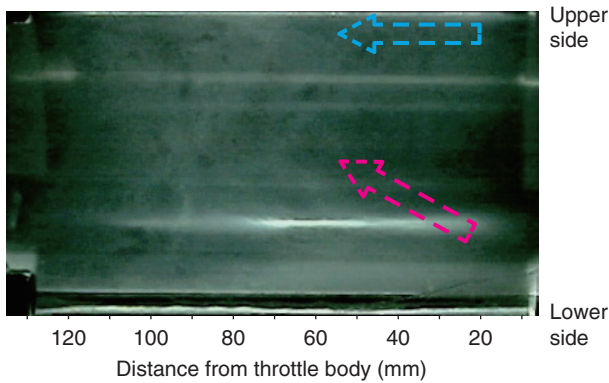


Fig. 16 Visualization of air flow at vertical plane when decreasing throttle speed

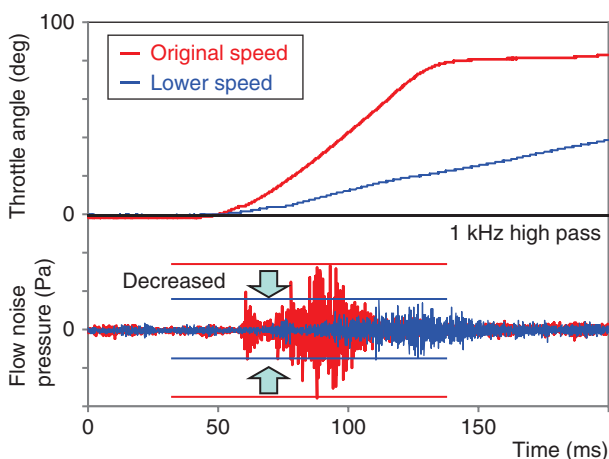


Fig. 17 Comparison of flow noise when decreasing throttle speed

5. 気流音低減検討と可視化まとめ

5.1. 気流音低減検討

気流の衝突を低減するために、延長管内を上下に分割する分流板を設置して計測をおこなった。可視化結果を Fig. 18、気流音の結果を Fig. 19 に示す。

Fig. 13 と比較すると、分流板により流入する気流の衝突が防がれ、音圧が低減した。

5.2. 管内気流挙動可視化まとめ

管内圧力計測と可視化計測結果から、スロットルバルブ下側から斜め上方に吹き上げる気流と、管内上側壁面およ

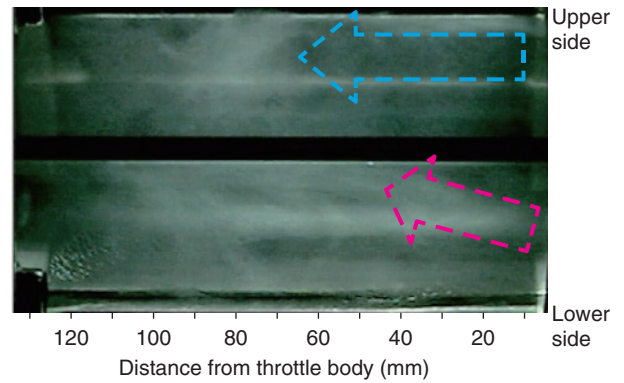


Fig. 18 Visualization of air flow at vertical plane when appending separator

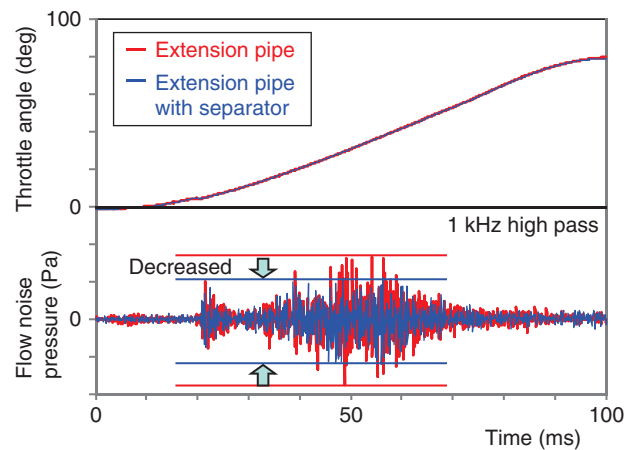


Fig. 19 Comparison of flow noise when appending separator

び上側を直進する気流との衝突が発生している領域で、管内における最大の圧力変動が発生し、同じタイミングで気流音が発生していることから、気流の衝突が音の主要因と考えられる。

これは、スロットル開速度を遅くした計測と分流板を追加した計測の結果、音圧が下がったことから裏付けられる。

6. まとめ

- (1) スロットル急開時の異音が、インマニ内気流に起因し、インマニ表面から放射される気流音であることがわかった。
- (2) エンジン実動時のインマニ内スロットルボデー近傍において、高速気流が衝突する現象を明らかにし、気流音に影響を与えていることがわかった。
- (3) 透明管と特殊ライトにより、エンジン実動時の管内気流挙動を計測し、結果から要因を明らかにすることができた。開発の現場で活用できる、有効な可視化手法であることを確認できた。

本研究結果から、気流音が発生しているときの管内部の

気流挙動が明らかとなり、気流音を改善する足がかりをつくることができた。

参考文献

- (1) 中瀬善博, 金原賢治, 大原康司, 山本憲一, 宮地義博:
スロットル急開時における気流音の低減, 自動車技術
会学術講演会前刷集, No.12-00, p.13-16(2000)
- (2) Nakase, Y., Kanehara, K., Ohara, K., Yamamoto, K.,
Miyaji, Y.: Flow Noise Reduction upon Quick Opening
the Throttle, SAE Paper, 2001-01-1429(2001)
- (3) 特許第 3337630 号

■ 著 者 ■



山 岸 仁



若 松 健