

ピストンピン打音発生時の潤滑油挙動可視化

Visualization of Oil Behavior when Piston Pin Noise Occurs

近 藤 孝*
Takashi KONDO

大 林 寿 行**
Hisayuki OHBAYASHI

要 旨

セミフローティング支持方式で顕著なピストンピン打音発生時におけるピストンピン挙動計測とピストンピン周りの潤滑油挙動可視化をおこなった。

ピストンピン挙動はギャップセンサを用いたリンク法で計測した。これにより打音発生時のセミフローティング支持方式のピストンピン挙動が明確となった。

潤滑油挙動の可視化は光ファイバを用いたリンク法でおこなった。高速度カメラにて撮影された潤滑油滴の粒子画像を PTV 処理することでエンジン内潤滑油挙動のベクトル化に成功した。

ABSTRACT

Piston pin behavior was measured on occurrence of conspicuous piston pin noise when using a semi-floating support system, and oil behavior around the piston pin was visualized.

Piston pin behavior was measured by the linkage method using a gap sensor. This clarified the behavior of the piston pin using a semi-floating support system when the noise occurred.

Visualization of the oil behavior was performed by the linkage method using optical fiber. Particle images of oil droplets were captured with a high-speed camera. Processing those images with particle tracking velocimetry (PTV) successfully vectorized the oil behavior inside the engine.

1. まえがき

ハイブリッドや燃料電池などの新パワープラントの開発が急速に進む中、従来のガソリンエンジンについてもさらなる性能向上のため開発が進められている。小型で軽量、低燃費かつ高出力で高信頼性といった性能に加え静粛性や低コストへの要求も高い。特に主運動系部品はそれら性能に直接影響を与える重要部品であり、ピストンはその最たるものである。またその支持方式についてはフルフローティング支持方式（以下フルフローティング）とセミフローティング支持方式（以下セミフローティング）に大別されるが、コストメリットから軽自動車や小型車ではセミフローティングが採用される場合が多い。しかし一方で、この支持方式はピストンピン打音が発生しやすいという課題がある。

この課題は支持方式による各部クリアランスの差によると考えられるが、潤滑条件も打音に影響を与えることが経

験として知られている。よってピストンピン打音低減のためにピストンピン打音発生メカニズムを把握し、影響因子と考えられる潤滑油挙動を把握することが重要である。

2. 研究のねらい

ピストンピン打音低減のためメカニズム解明が重要である。その第一歩として、これまで明確にされていないピストンピン打音発生時の現象把握のため以下をおこなった。

- (1) ピストンおよびピストンピン挙動計測
- (2) 潤滑油挙動可視化

3. 供試エンジン

供試エンジンの基本諸元を Table 1 に示す。セミフローティングを採用している 1.5L エンジンを使用した。ピストンピン打音現象を明確化するためピストンピンクリアラ

* 四輪 R&D センター

** 本田金属技術株式会社

Table 1 Engine specifications

Item	Specifications
Engine type	In-line 4-cylinder
Injection type	Port injection
Bore × stroke (mm)	73 × 89.4
Displacement (cm ³)	1497
Compression ratio	10.4
Valve train	SOHC i-VTEC
Number of valves	4 per cylinder
Valve diameter (mm)	IN: $\phi 28 \times 2$ EX: $\phi 23 \times 2$
Gasoline	Regular (RON91)
Max. power (kW/rpm)	88/6600
Max. torque (Nm/rpm)	145/4800

ンスをピストンピン打音が発生しやすい設定とした。運転はピストンピン打音が発生している状態とし、その代表として熱間時のエンジン回転数 1850 rpm の無負荷の条件で試験をおこなった。

4. ピストン支持方式とピストンピン打音

Honda の四輪車に採用されているピストン支持方式を Fig. 1 に示す。フルフローティングとセミフローティングの二通りであるが、ピストンピン打音は主にセミフローティングで発生する事象である。フルフローティングはともに鋼製であるピストンピンとコンロッド間でクリアランスを持つが、セミフローティングはアルミ合金製のピストンと鋼製のピストンピン間でクリアランスを持つ。よってセミフローティングの方が線膨張係数差により特に熱間時にクリアランスが広がってしまいピストンピン打音が出やすいとされている。

ピストンピン打音は二通りのエンジン運転状態で発生する。各特徴を表したのが Table 2 である。ピストンピン打音およびそれに伴うピストンピン挙動について多くの研究や計測事例が報告されている^{(1), (2)}。

本研究ではまず定常状態 [Table 2 (a)] で発生するピストンピン打音に注目し、その打音発生時における各現象について計測解析をおこなった。

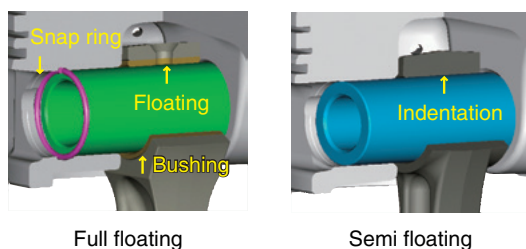


Fig. 1 Two types of floating support

Table 2 Occurrence conditions of piston pin noise

	(a) Steady operation	(b) After snap
Frequency	2-3 kHz	2-3 kHz
Engine load	No load, Light load	No load
Timing	Around BTDC20°	Not only BTDC20°
Expansion stroke	With combustion	Without combustion
Imitative sounds	“Kata”, “kara”	“Jyara”, “Jya-”

5. ピストンおよびピストンピン挙動計測

5.1. 計測システム概要

Fig. 2 に本計測システムの全体図を示す。ピストンピン挙動はピストンピンボス部に直交に取り付けられた二つのギャップセンサ〔(株)電子応用 PU-02A 型〕で計測した。センサは渦電流式でピストン取り付け後にピストンピン穴に沿った R 加工が可能なように先端に削り代のセラミック部を設けた仕様とした。

ピストンとピストンピンそれぞれの速度と振動加速度については加速度センサ〔PCB 社 型式 352C22〕で計測した。なおピストンピンはコンロッドに圧入されているため、計測はピストンピン近傍のコンロッドでおこなった。計測した出力信号はリンク機構により外部に取り出した⁽³⁾。リンクはコンロッド大端部より三つの節を持ち一端はコンロッドに、もう一端はエンジンに取り付けられたケースに固定した。各計測点からの配線取り出し経路を矢印で示す。

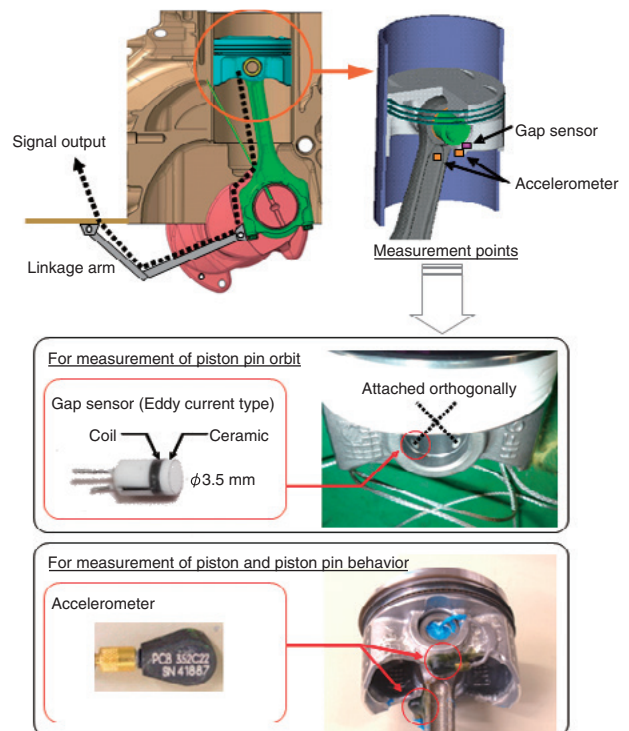


Fig. 2 Configuration of measurement system

5.2. 各種挙動計測

5.2.1. ピストンおよびピストンピン上下方向挙動

ピストンピン打音発生時の筒内圧、ピストンおよびピストンピン速度と加速度の上下方向成分を Fig. 3 に示す。Table 2 で示したように、ピストンピン打音は BTDC20° 付近で発生するのでこの付近に注目する。

まず筒内圧は、無負荷運転のためおよそ BTDC40° 付近で負圧から正圧に推移し燃焼によりさらに増加する。

この時ピストンには筒内圧増加による上昇への制動力が働く。一方で相対速度の大きくなったピストンピンが上昇しピストンに追いつく。結果として BTDC30° から BTDC20° にかけてピストンとピストンピンが衝突する。この衝突現象は加速度のグラフからも読み取れる。

5.2.2. ピストンピン軸心挙動

次にピストンピン打音発生時のピストンピンの動きを明らかにするため、ピストンピン穴内のピストンピン軸心挙動の計測をした。その結果を Fig. 4 に示す。図中の BTDC90° から TDC までの実線軸心挙動上に書かれた白丸はクランクアングル 1° ごとの軸心位置を示している。

前項での確認結果からは、ピストンピン打音は筒内圧上昇に伴うピストンとピストンピンの上下方向の衝突現象と考えられる。しかしながらピストンピン軸心挙動計測の結果、ピストンピンは単純な上下挙動をしているだけではないことが明らかとなった。

ピストンピンは打音発生タイミングである BTDC20° にかけてピストンピン穴内を大きく反スラスト側に回り込む

ような動き（以降この動きを旋回と呼ぶ）をしながら急激に上方向に移動している挙動が確認された。ここまでの知見をフローチャートにまとめたものが Fig. 5 である。ピストンおよびピストンピン挙動は明らかになったが、それらの部品間に介在する潤滑油の状態は明らかとなっていないので次章で明らかにする。

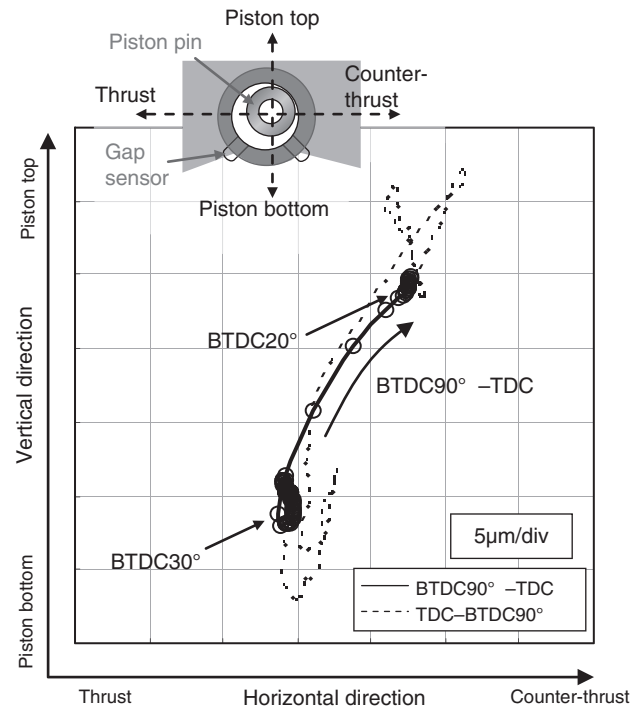


Fig. 4 Piston pin center orbit of semi floating system at steady operation (1850 rpm, No load)

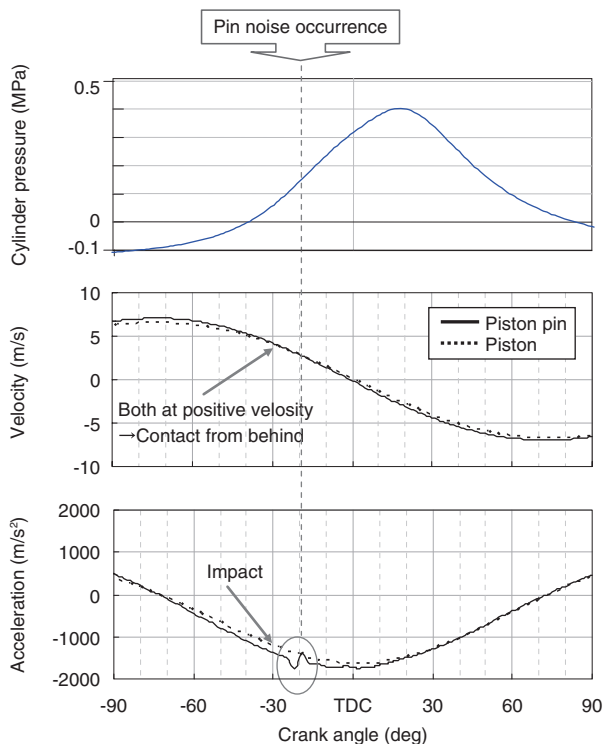


Fig. 3 Vertical behavior of piston and piston pin (1850 rpm, No load)

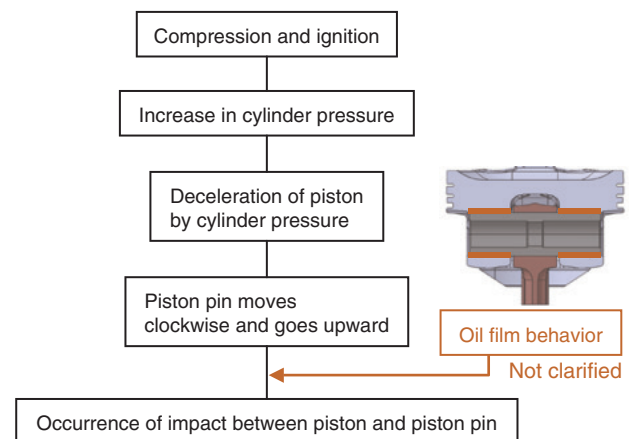


Fig. 5 Flow of piston pin noise phenomena

6. 潤滑油挙動可視化

ピストンピン打音発生時の潤滑状態を明らかにする。ピストンピン穴内の潤滑油を直接視するのが理想だが手法がないため、ピストンピン穴に流入流出する潤滑油の状態を可視化観察することで、ピストンピン穴内の潤滑状態を推定した。

Table 3 Comparison of oil behavior visualizations

Method	Developed method	Conventional methods	
	Direct view by fiber scope PTV	Direct view (fluorescent paint)	Neutron radiography
Observation point	Inside of engine Moving with linkage Very near to target	Outside of engine View from static point Visible via quartz/sapphire glass port	Outside of engine View from static point Permeation by neutron beam
Difficulty	Easy	Easy	Difficult
Cost	Low cost	Low cost	Expensive
Safety consideration	None	None	Radiation exposure
Advantages	• Viewable from moving point • Viewable inside/reverse side of parts • No influence for flow • PTV possible by oil mist	• Easy to install	• Viewable wide area
Disadvantages	• Depends on fiber scope spec (because of mass product model)	• Expensive fluorescent paint • Difficult to view inside/reverse side • Different deformation at window from actual engine	• Limited equipment only • Significant cost • Significant safety considerations • Depends on permeability of parts

6.1. 計測システム概要

潤滑油挙動の計測には PTV (Particle Tracking Velocimetry) を用いた。潤滑油挙動の可視化および PTV のシステムを Fig. 6 に示す。

リンク機構に取りつけたファイバースコープによりエンジン内部を観察した。そこで観察された様子を高速カメラ〔(株) nac MEMRECAM fxK5〕で撮影し PTV 用粒子画像とした。

今回適用したファイバースコープリンク法による計測および PTV 解析とこれまで報告されているエンジン内部潤滑油可視化事例とを比較したものが Table 3 である^{(4), (5)}。

今回適用した手法は以下の特徴を有している。

- (1) ファイバースコープをリンクに設置することで可視化対象が動いていても、追従しながら常に同一距離を保ったまま可視化が可能であること
- (2) 潤滑油滴を可視化した画像は PTV 処理によって速度ベクトル化が可能でありエンジン内部の潤滑油挙動把握が可能であること
- (3) シリンダブロック等エンジン外壁部に設置された観

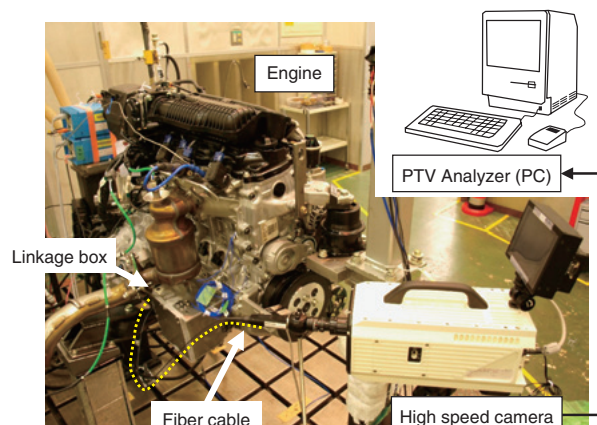


Fig. 6 Visualization and PTV system

Table 4 Specifications of fiber scope

Consideration		Fiber specifications	Requirements
(1) Oil proof		OK	Need oil proof
(2) Heat resisting		-10 to 80°C	Up to 80°C
(3) Minimum radius of curvature		R19 mm	Less than R25 mm
(4) Imaging area		60°	Enough to visualize
(5) Size	Diameter	φ2.4 mm	Less than φ5 mm
	Length	1170 mm	More than 450 mm

察窓からでは可視化が不可能な部品裏側などの領域でも可視化可能であること

- (4) トレーサが不要なので潤滑油変質や異物混入によるエンジンへのダメージが避けられること
- (5) 一般的に PTV などで用いられるレーザや光学系などが不要で、システムとして簡易であること

なお本手法はこれまで報告例がない計測手法のため、装置の適不適の検討をおこなった。

6.2. ファイバースコープおよび光源の検討

可視化のためファイバースコープを実稼動中のエンジン内にリンクを介して設置する必要があるが、初の試みであるため計測環境にファイバースコープが適合するか検討をおこなった。

検討しなければならないのは以下の点であり、その結果が Table 4 である。

- (1) 耐油性
- (2) 耐熱性
- (3) 耐屈曲性
- (4) 撮像範囲 (視野角)
- (5) サイズ (直径, 長さ)

Table 5 Specifications of light source

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

検討の結果、各要求を満足しているのでファイバ스코プは適用可能と判断した。なお使用したファイバ스코プは工業用市販品である。

次に光源について検討した。ファイバ스코プと同軸で設置される250Wメタルハライド光源を用いた。これについてはエンジン内部に設置した状態で撮影するフレームレートにて画像確認しPTVに耐えうる明るさを有していることを確認し採用した。Table 5にその諸元を示す。

6.3. ピストンピン穴への潤滑油流入流出状態可視化

6.3.1. ピストンピン穴への流入状態

まず潤滑油流入状態について観察する。リンクに取り付けたファイバ스코プによる可視化画像のPTV(速度ベクトル化)によりおこなった。ピストン内側のオイルについてはクランクからはねかけやコンロッドやオイルジェットからの強制給油などの影響も受けるため、今回はピストンピン外側からの飛沫による自然給油による潤滑状態に注目した。

本手法で得られた可視化画像およびベクトル画像、それをもとに判明した潤滑油挙動がFig. 7である。結果は動画で得られ、時々刻々の潤滑油飛沫挙動のベクトルが明らかである。これにより以下の結果が得られた。

- (1) 外部からの静的可視化では不可能なピストンピン近傍の潤滑油挙動を明らかにできたこと
- (2) ベクトル化することで、より潤滑油の挙動が明確になったこと
- (3) その様子から、実際にはピストンランド裏を伝って流れてきた潤滑油がピストンピン穴まで到達せず途中で落下していること

本結果により外側からの飛沫による自然給油状態が明らかとなり、改善手法の検討が可能になった。

この可視化手法を用いることでピストンピン内側の潤滑油挙動の把握も可能である。さらにはオイルジェットなどによる強制給油時の潤滑油挙動把握と定量的流量判断にも利用できる。またトレーサを使用すれば各部クリアランス内の潤滑油流動が定量的に把握できる。

このように、本可視化技術はさまざまなエンジン内部の潤滑油挙動把握に利用できる可能性のある技術である。

6.3.2. ピストンピン穴からの流出状態

次にピストンピン穴からの潤滑油の流出状態について明

らかにした。本現象についてはピストンピン打音発生時の状況を擬似的に再現したエンジンで可視化をおこなった。可視化は高速度カメラによる直接観察である。その時の潤滑油挙動をFig. 8に示す。

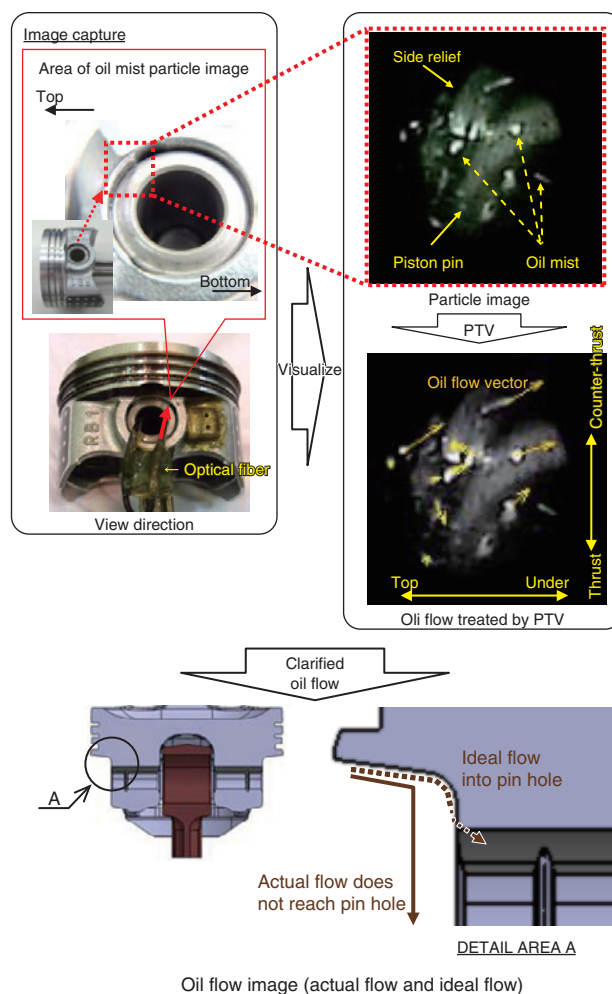


Fig. 7 Visualization of oil flow from piston pin hole (Particle image: 640×560 pixel, 5000 fps)

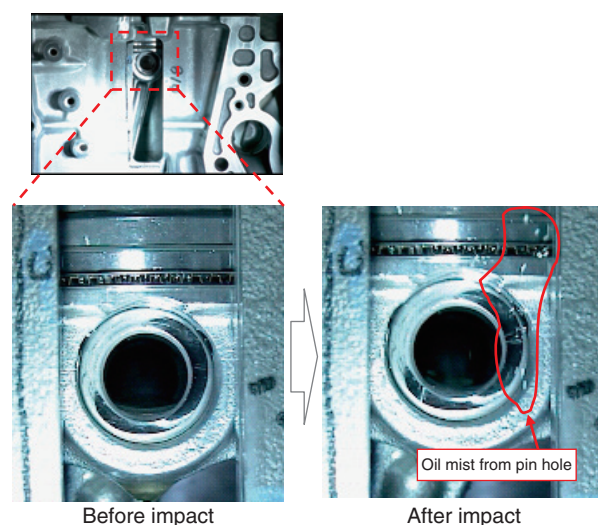


Fig. 8 Visualization of oil flow from piston pin hole to outside

可視化画像から明らかなように、ピストンとピストンピン衝突後サイドリリーフから潤滑油が噴出している様子が観察された。これはピストンとピストンピン間の潤滑油が漏れ出ていることを意味している。

ピストンピン挙動をきっかけに潤滑油が噴出するまでの推定経路を Fig. 9 に示す。ピストンピンの旋回挙動によって押された潤滑油がピン穴内部円周溝を通路として流れ、最終的にサイドリリーフから排出されていることが推定される。

6.4. 潤滑状態まとめ

流入流出状態の可視化により、ピストンピン打音が発生している状態でピストンランド裏の潤滑油はピストンピン穴内に入らず途中で落下しサイドリリーフ部からは噴出していることが明らかになった。この時ピストンピン穴内は潤滑油が少なくピストンピン衝突時の緩衝効果が減少し、衝撃が増加していることが推定できる (Fig. 10)。これは今後のピストンピン打音メカニズム解明と対策の検討に重要な知見である。また、実際は充填されることと噴出することは相互関係があるため、これについても明確にすることが今後の課題である。



Fig. 9 Oil transfer path in piston pin hole

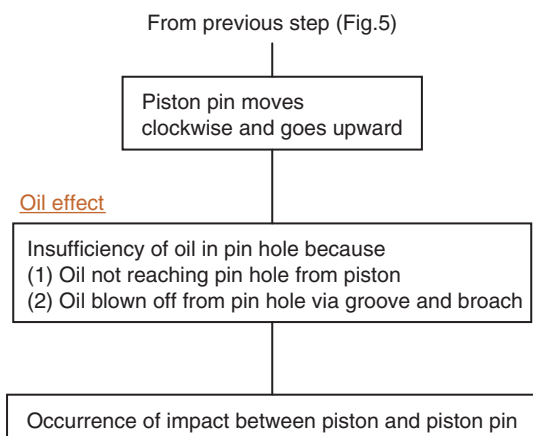


Fig. 10 Flow of piston pin noise phenomena with oil effect

7. まとめ

- (1) セミフローティング支持方式でピストンピン打音発生時のピストンピン挙動を明らかにした。
- (2) ファイバ스코ープを適用したリンク法によるエンジン内部潤滑油挙動可視化および潤滑油液滴の PTV によるベクトル化の手法を確立した。
- (3) エンジン運転中のピストンピン打音発生時のピストンピン穴周りの潤滑油挙動を明らかにした。

本研究で確立した可視化技術は各部の潤滑油挙動把握のため利用可能と考えられ、潤滑に関する諸元決定のための手法として将来性がある。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、試験装置製作にご協力いただいた日本ピストンリング(株)一杉英司、仲田文浩の両氏に対し、誌面を借りて厚く御礼申し上げます。

参考文献

- (1) 瀧口雅章, 青木佑介, 安西新市: ピンボス軸受の潤滑状態とピン打音の関係, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.50-02, p.5-8 (2002)
- (2) 河野佳介, 末誠一, 石田博之: ピストンピン軸受部打音の実験的メカニズム解析, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.148-08, p.5-10 (2008)
- (3) 神谷満好, 小林利彰, 嶽和秀, 高橋幸敬, 三原雄司, 染谷常雄: ピストン打音発生時のピストンスカート面圧測定, Honda R&D Technical Review, Vol.19, No.1, p.149-155
- (4) 臼井美幸樹, 村山克己, 佐藤和希, 吉田秀樹: ピストンリング周りのオイル流れと可視化観察に関する研究, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.7-06, p.5-8 (2006)
- (5) 日産自動車株式会社ホームページ, http://www.nissan-global.com/JP/NEWS/2008/_STORY/081110-03-j.html

■ 著 者 ■



近 藤 孝



大 林 寿 行