

動弁系におけるバルブ変位のレーザ計測技術の確立

Establishment of Valve Displacement Measurement by Laser Equipment

神田 久* 田中 求来*
Hisashi KANDA Motoki TANAKA

要 旨

エンジンにおける動弁系の挙動を詳細に解析するため、従来の境界追尾型光学式変位計に比べ、高精度で低ノイズであると言われるレーザ変位計での計測を試みた。その際、被測定部周囲壁面での乱反射ノイズ、レーザ変位計特有のデジタル変換ノイズの課題が生じた。そこで、これらを低減させる周囲壁面、被測定面の形状変更や入力電圧ゼロ点シフトなど、測定法の改善を行った。

その結果、上記ノイズが低減でき、バルブ挙動を詳細に解析する事が可能となり、ロッカアーム慣性による遅れを伴ったバルブへの再衝突現象を明らかにする事ができた。更に従来の測定法よりもコンパクトなレーザ変位計により、多気筒同時計測も可能となった。

ABSTRACT

To analyze valve behavior at automobile engine valve train precisely, we tried to measure on laser displacement meter, it says that laser is higher precision and lower noise compare with conventional meter. On that occasion, the problems took place that irregular reflection at device round wall and digital translational noise that laser displacement meter has it appropriately. And it faces, we did action to reduce these noise.

At that result, we could to reduce above noise, it became possible to analyze valve behavior precisely, and we did it clear that rockerarm re-collision to valve with delay of rockerarm inertia. In addition to, for the compact laser compare with conventional method, made it possible to measure multi-cylinder simultaneously.

1. まえがき

エンジンの性能向上のために、動弁系の挙動安定化は不可欠であり、その要求される限界回転数もより高くなっている。動弁系も Fig.1 に示す DOHC ローラー同軸 VTEC ロッカアームに代表される高機能なものになってきた⁽¹⁾。

それに伴い、高回転での動弁系挙動もさまざまであり、詳細な解析による技術課題の克服が必要となってきた。

このためには、成立性の限界を見極める精度の高い計測技術と性能予測による開発期間短縮が要求されている。

特にバルブリフトに関しては、Fig.2に示すバウンスと呼ばれる閉弁時の飛び上がり現象が 100 ~ 300 μm 以上になると、動弁系は破壊に至る場合があり、その現象がエンジンの回転限界を決定している。数百 μm のバウンス現象を解析するのに必要な精度は、数百 μm をフルスケールとする場合、本計測においては 3 %、すなわちノイズレベルが 10

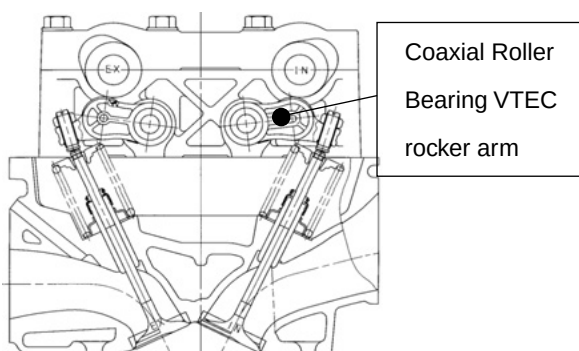


Fig.1 Cylinder Head & Valvetrain

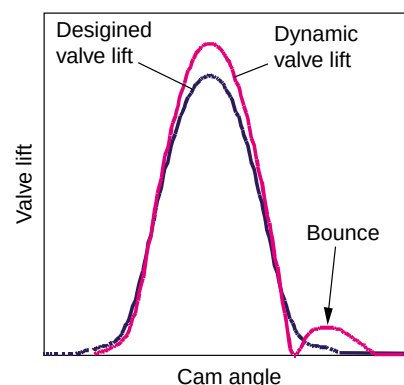


Fig.2 Valve bounce phenomenon at high speed

μm 以下である必要がある。しかしながらバルブリフトが 10mm 以上も変位する中で、 $10\mu\text{m}$ という高精度計測は非常に難しく、報告例はない。(2)~(6)

筆者らも従来は一般的な境界追尾型光学式変位計を用いて計測を行っていたが、ノイズが多いため、現象解析や、挙動予測シミュレーションの検証を困難にしていた。

そこで、レーザ三角法式変位計に着目し、境界追尾型光学式変位計の持つ課題を克服しようとした。その際、乱反射ノイズやデジタル変換ノイズが発生し、新たな課題となった。それらの新たな課題に対し、各種の対策を行った。その結果レーザ変位計の利点を生かした精度よいバルブ変位の計測が可能となり、現象解析や、シミュレーション検証にも十分な条件を満たす事ができた。以下にその内容について述べる。

2. 概要

境界追尾型光学式変位計(以後光学式と略す)に対して半導体レーザ三角法式変位計(以後レーザ式と略す)は以下の利点がある。

- (1) バウンス現象解析のための要求ノイズレベルは $10\mu\text{m}$ 以下である。光学式は実測ノイズレベルが $50\mu\text{m}$ である。それに対しレーザ式では $10\mu\text{m}$ 以下であり要求精度を満たす。
- (2) 多気筒間の連成挙動の影響を解析、検証する多バルブ同時測定のための要求センサヘッド幅は 30mm 以下である。しかし、光学式はカメラの大きさからくる多バルブ同時測定が不可能であるのに対し、レーザ式は要求を満たすために、多バルブ同時測定が可能である。
- (3) カメラセッティング時間が毎回 $30 \sim 40$ 分必要であるため、実験回数も制限される。
それに対し、レーザ式は取付けだけのため、5分でセッティングが終了する。

しかしながら、レーザ式をエンジンの動弁系挙動計測に適用してみると、以下の2つの課題が発生しこれらを克服する必要があった。

2.1. 三角法でのレーザ乱反射ノイズ

バルブ下方すなわちシリンダ内から測定するため、閉空間でレーザ散乱光の反射ノイズが発生した。

- (1) センサヘッドと被測定面の間の壁面形状による反射ノイズ
- (2) 被測定面の凹面形状による反射ノイズ
- (3) その他の壁面からの反射ノイズ

2.2. 変位計デジタル処理によるゼロクロスノイズ低減

- (1) 最大桁である土の符号が切り変わる際、全ビットの変化を DA 変換する事で発生するノイズ

これらを後に述べる手法で解決し、バルブ挙動を詳細に解析する事ができた。2つの手法を直接的に比較するために製作した装置を Fig.3 に示す。

Fig.4に2つの手法を比較したバルブリフトを示す。レーザ式で測定されたバウンスは光学式で測定された波形に比べ、明らかに低ノイズで計測される事が分かる。

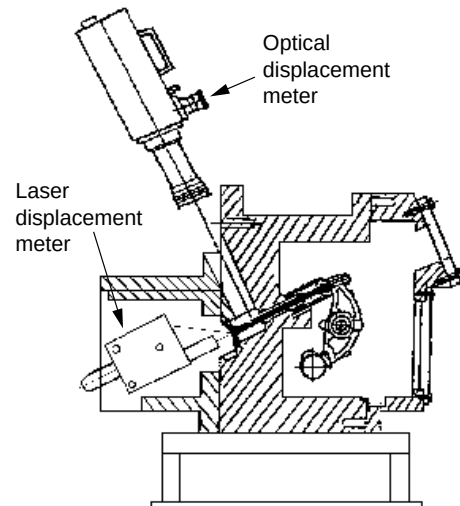


Fig.3 Comparison of optical and laser meter

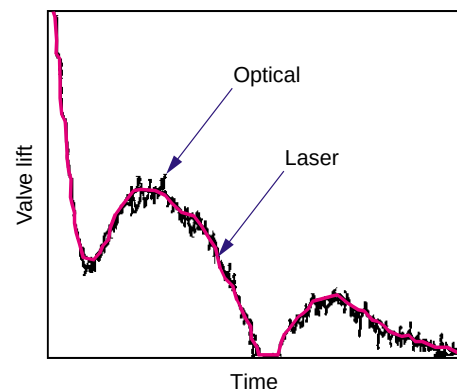


Fig.4 Simultaneous measurement result of optical and laser meter

3. 変位計測諸問題の解決手法

3.1. レーザ乱反射ノイズの低減

3.1.1. レーザ三角法計測の基本原理

Fig.5 にレーザ式の測定原理を示す。

まず最初に、半導体レーザから照射された光が対象面に当たる。その散乱光の一部を結像レンズで集光し、焦点位置の受光部上で結像する。対象面が照射光軸方向に変位する時、受光部上での結像位置が変化する。その位置変化を受光素子で検知するものである。

したがって、エンジンにおいてバルブ下方、すなわち燃焼室のような閉空間にセンサヘッドが設置される場合、対

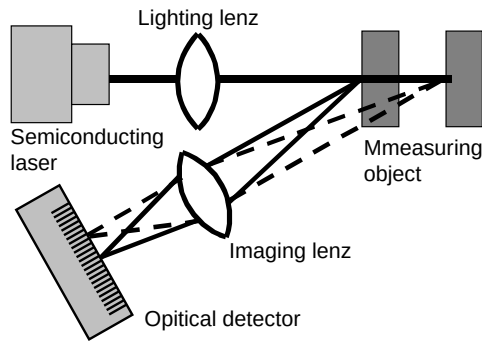


Fig.5 Locational detection of triangular method

象面の反射光以外にも周囲壁面で発生する2次反射光も結像レンズに進入してくる。この2次反射光も受光素子に当たり、乱反射ノイズとなるという問題がある。

Fig.6 は未対策状態でのレーザ変位計の計測データである。被測定面とレーザセンサヘッドの間に狭路部が存在すると、変位で $400\text{ }\mu\text{m}$ に相当するノイズが発生した。

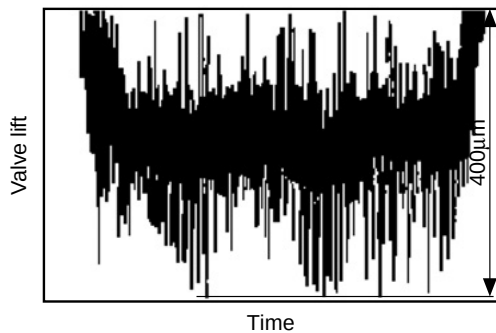


Fig.6 Measured data by laser method (Initial data)

そこで、次項に述べる乱反射ノイズを低減する対策を行った。

3.1.2. 被測定面周囲の乱反射低減

要因として、測定対象面であるバルブからの散乱光が狭路部壁面に反射し、結像レンズを通して受光部に入る。そのため、対象面とは異なる受光素子の位置に照射され、ノイズとなるためと考えた。そこで、対策として、周囲壁面形状を Fig.7 から Fig.8 に示すような凹面形状への変更を行った。

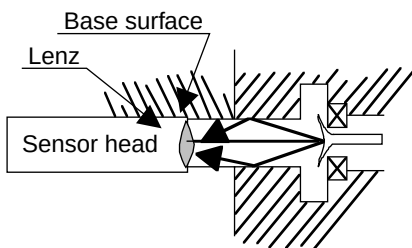


Fig.7 Wall reflected in narrow channel

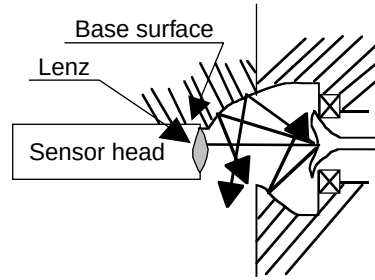


Fig.8 Wall reflection in wide channel

その結果、Fig.9 に示すように、ノイズは約半分の $230\text{ }\mu\text{m}$ 相当に低減したが、これでは、 $10\text{ }\mu\text{m}$ 以下の目標精度に達していない。同時測定した光学式の結果(Fig.10)に比べても約5倍以上のノイズレベルであり、実用レベルにない。

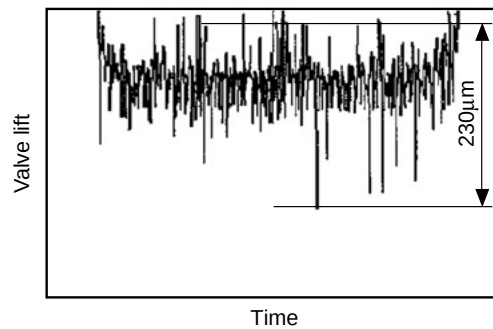


Fig.9 Measured data by laser method (Wall shape refined)

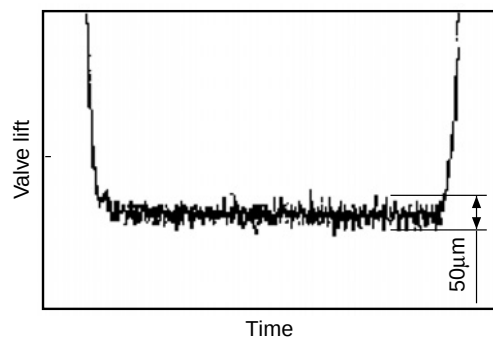


Fig.10 Measured data by optical displacement meter

3.1.3. 被測定面の凹面形状の廃止

被測定面がくぼんだ位置にあると、くぼんだ底部周囲の円弧形状部でレーザスポットの色が丸く反射しているのが確認できた。このことから、底周囲円弧部においても、反射が発生しノイズを増加させると考えられた。そこで、Fig.11 に示すようにくぼみ形状を廃止した。それによって、Fig.12 にあるようにノイズが $25\text{ }\mu\text{m}$ まで低減した。

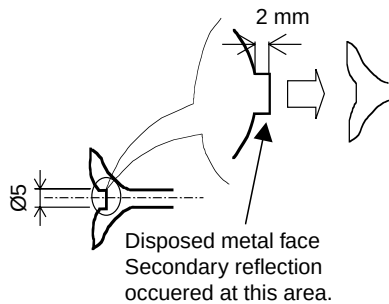


Fig.11 Abolishment of concaved shape

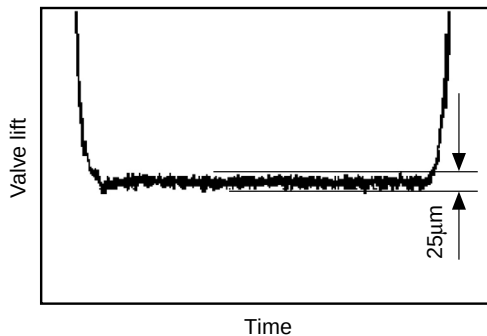


Fig.12 Measured data by optical method

3.1.3 までの対策を行っても、依然として $10\ \mu\text{m}$ 相当以下のノイズに下がらない。要因として、その他の周辺壁面での乱反射光の混入が考えられる。そこで対策として Fig.13 に示すようにレンズ外形とターゲット点を結ぶ円錐状の空間領域以外から外乱反射光が入らないように、円錐形の筒とその内側に反射防止の非反射形状加工を施した。

その結果、Fig.14 に示すように $15\ \mu\text{m}$ までノイズレベルが低減された。しかし、まだ、スパイク状のノイズが時々発生している。この問題は次の 3.2 項による手法で、解決した。

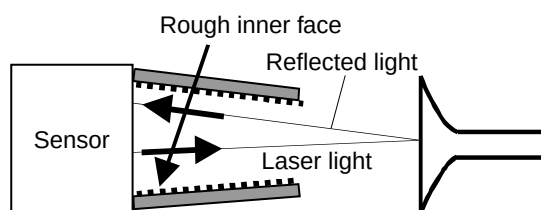


Fig.13 Non-reflected pipe

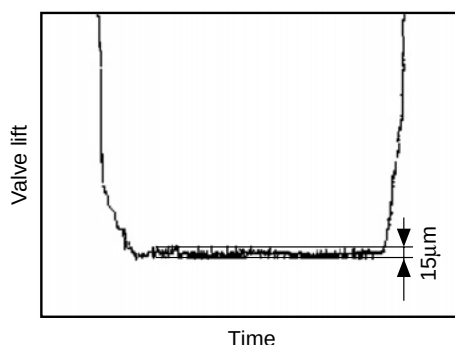


Fig.14 Measured data by laser method (Non-reflected pipe)

3.2. ゼロクロスノイズの低減

三角法をデジタル回路を使って計測する場合、以下の Fig.15 に示すように、受光部アンプで増幅された電圧出力を AD 変換し、それを校正マップで換算し、再び DA 変換して出力する。従って出力されるアナログ出力は受光部アンプで発生しているノイズを増幅する事なく、電圧出力のノイズを最小限にしている。

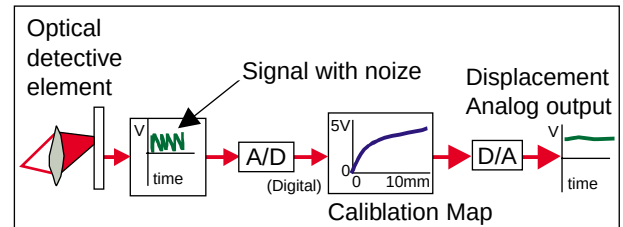


Fig.15 Block diagram of semiconducting laser amplifier

しかしながら、デジタル計測にはゼロクロスノイズという現象が存在する。変位がマイナスからプラスになる時に、正負の符号が変わる。符号(±)の桁はデジタル表現では最大桁になっており、それが切り変わる事になるため、Fig.16 に示すように、全ビットが 0 から 1 に切り変わる。それを DA 変換するため、大きな電圧変化が一瞬起こり、グリッチノイズと呼ばれるスパイク状のノイズが発生する。したがって、ゼロ付近で変位が測定され続けるような場合は、始終スパイク状のノイズが波形に載る。対策として、ゼロ付近の測定精度が必要である場合は、Fig.17 に示すように、ゼロ点をシフトさせた状態で計測し、校正処理時にシフト分戻す事で、ノイズを低減させた。

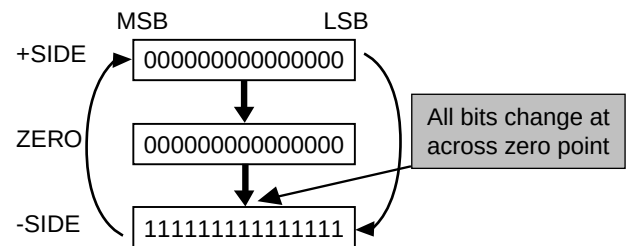


Fig.16 Figure of "Zero cross noise"

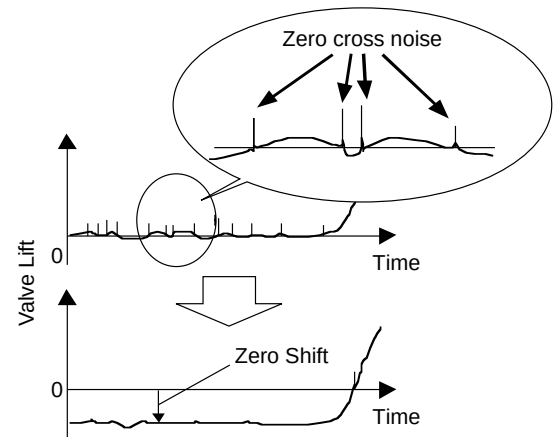


Fig.17 Improved pulse shape of "Zero cross noise"

以上4項目の対策を施した結果として、Fig.18 に示す通り $10\ \mu\text{m}$ 以下のノイズまで下げる事ができた。

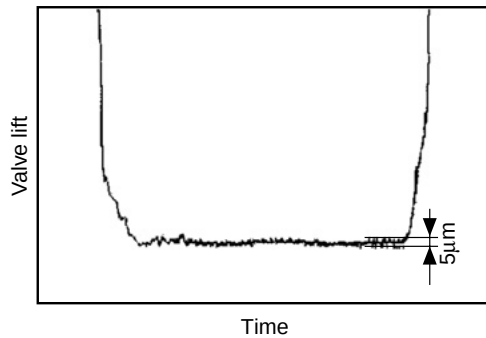


Fig.18 After reduced zero cross noise (final)

3.3. ノイズ低減結果のまとめ

以上までの改善において、Fig.19 に示すとおり、光学式に比べ、バウンスを表現するに十分なノイズレベルまで低減する事を確認した。

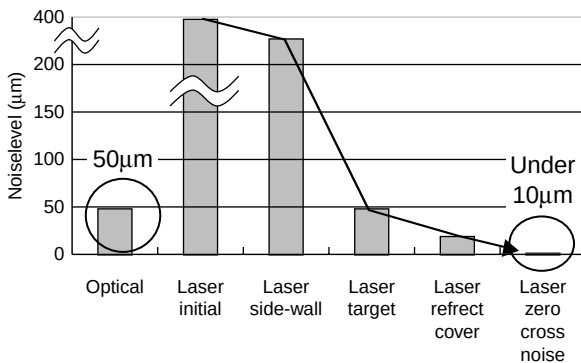


Fig.19 Transition of noise reduction

4. 本測定手法の効果

4.1. 高回転時の挙動解析能力の向上

Fig.20 に示す結果は、光学式で測定したバルブ閉弁時のバウンス現象であるが、何故、この測定条件において、大きなバウンスが発生するのか、このデータでは詳細には分からない。

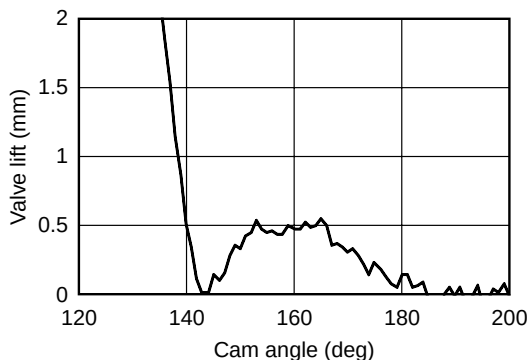


Fig.20 Valve bounce measured by optical method

しかし、本研究の成果であるレーザ式を用いると Fig.21 に示すように、わずかな息付きのような動きを確認する事ができる。

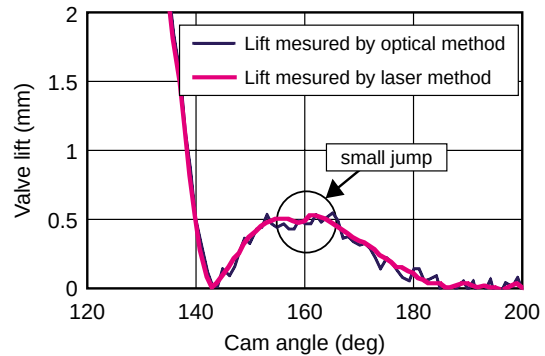


Fig.21 Valve bounce measured by optical & laser method

この動きから、何か別の部品との衝突がこの時点において発生したであろうと考え、シミュレーション計算を行い、Fig.22 に示すように、同様の息付き現象が再現する事を確認した。

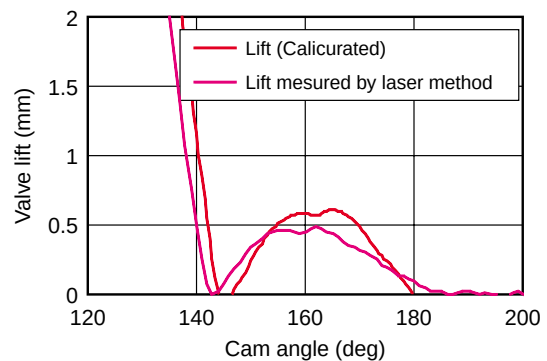


Fig.22 Bounce measured by laser & simulated result

さらにシミュレーションモデルで、近接部品の挙動も解析した結果、息付きの原因は Fig.23 に示すようなロッカアームの慣性による遅れを伴ったバルブへの再衝突によって、バルブが後ろから跳ね上げられている現象が発生している事が判明した。

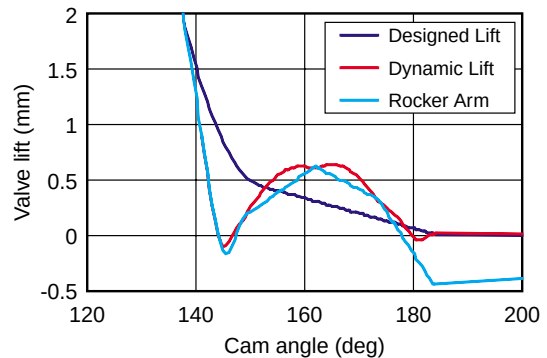


Fig.23 Valve simulation analysys

このようにバルブは高回転において、開弁から閉弁に至るまでに僅かな衝突を繰り返しながら作動するため、挙動の詳細な原因解析をする際において、10 μm 以下の挙動の変化を捉える本レーザ計測手法は必要不可欠な技術である。

4.2. 多気筒同時測定

レーザ変位計は1気筒に2個ずつ装着できるため、Fig.24に示すように8バルブ同時測定を達成する事ができた。それにより、気筒間の挙動差の比較が可能となり、多気筒連成した挙動を解析するためのシミュレーションモデル構築の際に、気筒間のカムのねじれや曲げ剛性、ロッカーシャフト曲げ剛性の影響度合いの確認テストに必要な情報を得る事ができた。又、Fig.25に示すような変動が同時に計測でき、多気筒連成による異常現象の原因解析にも活用できるので効果は大きい。

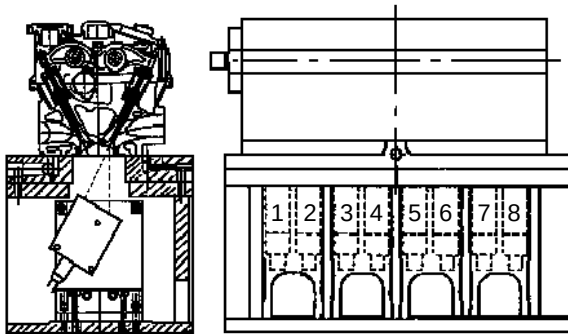


Fig.24 Position of laser sensor heads

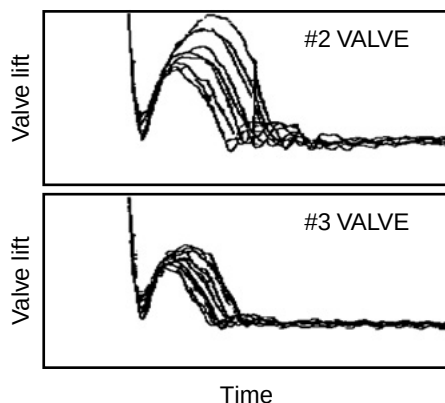


Fig.25 Multi cylinder simultaneous data

5. まとめ

動弁系挙動を三角法によるレーザ変位計で測定する場合課題になる、

- (1) 壁面での乱反射ノイズ
- (2) AD 変換時のゼロクロスノイズ

を解決する事により、要求される 10 μm 以下の計測

精度を確保する事ができた。

これにより高回転時に発生する動弁系の詳細な衝突現象の抽出や、多気筒同時計測による連成問題の解析等を高効率に行う事が可能となった。

この技術を用いて、今後も他部品計測への応用を図って行きたい。

参考文献

- (1) 明本禧洙ほか：S2000 用高出力低エミッション DOHC-VTEC エンジンの開発，HONDA R&D Technical Review, Vol.11 No.1, p.32-35 (1999)
- (2) 末広祥三ほか：二輪車用エンジン動弁系の動力学シミュレーション，内燃機関，Vol.28, No.355, p.46-53 (1989.5)
- (3) 酒井宏ほか：内燃機関弁運動の研究，日本機械学会，35 巻，237 号，p.1084-1092 (昭 44-5)
- (4) 秋葉機四郎ほか：弁系振動の新しいシミュレーション，いすゞ技報，67 号，p.1-4 (昭和 46-4)
- (5) 佐藤晃ほか：高速内燃機関用カムの設計法，トヨタ技報，第 18 巻，第 4 号，p.333-341 (昭和 42 年)
- (6) Kosugi,T., Seino,T. : Valve Motion Simulation Method for High Speed Internal combustion Engines, SAE Paper 850179

■ 著 者 ■



神田 久



田中 求来