ウェーブレット解析を用いたエンジンのモニタリング*
(第1報, バルブクリアランスの評価方法の提案)川合忠雄^{*1}, 野々村 真人^{*2}
二村正徳^{*3}, 伊藤正弥^{*4}Diagnosis of Automobile Engine by Wavelet Analysis
(1st Report, Estimation of Valve Clearance)Tadao KAWAI^{*5}, Makoto NONOMURA,
Masanori FUTAMURA and Masami ITO^{*5} Nagoya University, Dept. of Mechanical Engineering, Furo-cho, Chikusa-ku Nagoya, Aichi 464-8603 Japan

In this paper, we attend to propose the new method based on the Wavelet analysis to estimate the clearance between the cam and the valve spring in the automobile engine. At first, we measure the acceleration of the engine valve and the sound emitted from the engine to check the dynamic characteristics of the engine valve. Next, the new data processing technique based on the Wavelet analysis is applied to estimate the deviation of the valve clearance from the desired value. Finally, our experimental results show the proposed technique can evaluate the excess of the valve clearance quantitatively.

Key Words: Diagnosis, Engine Sound, Valve Clearance, Wavelet Analysis

1. 緒 言

近年、自動車の走行性能は顧客の満足できるレベルに達してきたので、車を選択する上で乗り心地や車内・車外騒音等の商品性に対する要求が高くなってきている。そのため異音の解析およびその改善に対する要求が高く、これに関する研究⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾が多く行われるようになった。特に、エンジンの信頼性や音質は自動車の品質に直結するので、要求が特に強い。

エンジンの組立てラインでは、エンジンバルブのクリアランスの調整を人間が手作業で行っているために、クリアランスにばらつきが発生しやすい。また、検査ラインでは、騒音が高い中で長時間にわたって検査を行うために、作業員への負担が大きいとともに、作業員間および作業員の体調によって検査の基準がばらつきやすい。このため、これらの作業を自動化し、信頼性の高いシステムを構築することが強く求められている。

一方、装置の故障診断の分野では、近年ウェーブレット解析に基づく診断手法が提案されるようになってきた⁽⁴⁾⁽⁵⁾。この手法によって、従来から行われてきたフー

リエ解析に基づく手法ではできなかった非定常な現象の解析が可能となったので、適用できる故障診断の分野が拡大した。

本研究では、設定値が設計値から大幅にずれるとエンジンの性能および耐久性を損ない、不快なエンジン異音を発生させるエンジンバルブのクリアランス設定の問題を取り上げ、エンジン音の解析からバルブのクリアランスを定量的に評価する手法について検討した。評価の目標としては、ある程度車に詳しい人で0.1mmのクリアランスの違いを認識できるという実際の検査ラインにおける経験から、0.1mmのクリアランスの違いを認識できることをめざした。評価をする上での問題点としては、自動車用エンジンが多気筒から構成されるので、検査すべきバルブ数の多いことやバルブ以外から発生するノイズの多いことが挙げられる。したがって、注目するバルブのクリアランスを定量的に求めるためには、種々雑多な信号が混在している中から注目すべきバルブからの音を取り出す必要がある。バルブから発生する音はバルブの振動によって生じると考えられるので、(1)バルブ振動とバルブ打音との対応関係を求め、(2)バルブの振動特性に合わせたマザーウェーブレットを選択し、(3)エンジン音からバルブ打音のみを抽出するウェーブレットを利用したノイズ低減手法を開発するという手順で研究を行なった。

* 原稿受付 1998年10月21日。

^{*1} 正員, 名古屋大学大学院工学研究科 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)。^{*2} 名古屋大学大学院。^{*3} 日本ガイシ(株) (〒467-0871 名古屋市瑞穂区須田町2-56)。^{*4} 正員, 松下電器産業(株)生産技術研究所 (〒571-8502 門真市松葉町2-7)。

E-mail: kawai@mech.nagoya-u.ac.jp

2. 解析方法

ウェーブレット解析⁽⁶⁾では、低い周波数の情報を得るときには時間的に長い区間をとり、高い周波数の情報を得るときには時間的に短い区間をとって、自動的に最適な時間と周波数の分解能を与えるという特性以外に次のような特長を持っている。

(1) 他の信号解析では見落とされがちなトレンド、ブレイクポイント、高次の微係数の不連続性、自己相似性に関する情報等を取り出すことができる。

(2) マザーウェーブレットに類似した信号を抽出することができる。

したがって、ウェーブレット解析において適切なマザーウェーブレットを選べば、雑音の中に含まれている注目すべき信号を取り出し、その特性を調べることが可能となる。本研究では、ウェーブレット解析が持っているこの特長を利用してエンジン音の解析を行った。

図1に示すように、ある信号に対してそのウェーブレット変換を行う手順は次のようになる。与えられた信号 S をマザーウェーブレットによって決まるlow-pass filterとhigh-pass filterによって低周波成分 $A1$ と高周波成分 $D1$ に分解する（実際には、ウェーブレット変換によって得られる係数 $cA1, cD1$ を再構成することにより、成分 $A1, D1$ が求まる）。次に、低周波成分 $A1$ を次のレベルのlow-pass filterとhigh-pass filterによって低周波成分 $A2$ と高周波成分 $D2$ に分解する。これを順次行うことにより任意のレベルまでのウェーブレット変換を行うことができる。フィルタのレベルはウェーブレットのスケールによって規定され、離散ウェーブレットの場合にはレベルが1つ上がるごとに時間スケールが2倍（サンプリングタイムが2倍になることに相当）になる。

3. 実験装置

本研究では、自動車用の4気筒16バルブ4サイクルDOHCエンジン（排気量1500cc）を対象にした。このエンジンでは図2に示すように、カムで直接バルブを

Fig.1 Wavelet Decomposition Tree

動かす直接駆動式の動弁系を採用しており、カムとバルブとのクリアランスはシム板の厚みを変えることによって調整する。本研究では、このクリアランスを適正値からずらした実験を行い、クリアランスの違いをエンジン音から求める手法について検討した。

実験では、エンジンのクランクシャフトをACサーボモータで回転させることにより、点火させずに機械的に一定回転数（900rpm）で回し、バルブの加速度、エンジン音を測定した。また、各気筒の動作状態と発生するエンジン音等との対応関係を明確にするために、エンジンの回転に同期して1サイクルに1回発生するREF信号も測定した。REF信号に合わせてデータを整理することにより、条件の異なる実験において得られたデータを同一のエンジンサイクル上で比較することができ、注目しているバルブから発生する信号とクリアランスの変化量とを一对一に対応付けることができる。測定は0.025[ms]のサンプリング間隔で1.25[s]間行い、データはA/D変換器によって直接コンピュータに取り

Fig.2 Valve installed in Cylinder Head

Fig.3 Measuring System

込んで処理した。実験に用いた測定系を図3に示す。

4. ダイナミクス

4.1 バルブ加速度実験 バルブはカムに押されることによって開閉し、適切なタイミングでシリンダー内への給排気を可能とする。ここでは、(a)バルブからのタイミングで音が発生するのか、(b)バルブクリアランスを変えた場合に音が発生するタイミングやその強さがどのように変わるのか、を明らかにするために、排気バルブを取り上げ、その運動方向(以下、軸方向と呼ぶ)とそれに対して90°方向(以下、たわみ方向と呼ぶ)

Fig.4 Setup of Accelerometer

Fig.5 Acceleration (Axial direction)

(a) V.C. = 0.54mm (b) V.C. = 0.45mm (c) V.C. = 0.36mm
(d) V.C. = 0.26mm (e) V.C. = 0.16mm

の加速度を測定した。実験では加速度計を図4に示すようにバルブに直接取り付けで加速度を測定した。また、バルブの加速度と発生するエンジン音を同時に測定することによってバルブの振動と発生するエンジン音との対応関係も明らかにした。

本研究に用いたエンジンでは、吸気側のバルブクリアランスの標準値は冷間で $0.29 \pm 0.04\text{mm}$ 、暖気時で $0.38 \pm 0.03\text{mm}$ 、排気側は、冷間で $0.36 \pm 0.04\text{mm}$ 、暖気時で $0.40 \pm 0.03\text{mm}$ となっている。

実験では、第3気筒の排気側バルブのクリアランスを以下のような値に設定して行った。(バルブクリアランスは冷間時に測定)

- (a) 適正值 シム2.42mm (Valve Clearance=0.36mm)
- (b) ± 0.1 シム2.33mm (V.C.=0.45mm),
(公称) シム2.52mm (V.C.=0.26mm)
- (c) ± 0.2 シム2.24mm (V.C.=0.54mm),
(公称) シム2.62mm (V.C.=0.16mm)

4.2 実験結果

4.2.1 軸およびたわみ方向のバルブの加速度 図5(a)(b)(c)(d)(e)、図6(a)(b)(c)(d)(e)にバルブクリアランスが0.54, 0.45, 0.36(適正), 0.26, 0.16mmのときのバ

Fig.6 Acceleration (Bending direction)

(a) V.C. = 0.54mm (b) V.C. = 0.45mm (c) V.C. = 0.36mm
(d) V.C. = 0.26mm (e) V.C. = 0.16mm

ルブの軸およびたわみ方向の加速度を示す。

図5には、バルブが軸方向に運動するために生じる加速度の変化が、 $t=12, 50$ [ms] 付近にはっきりと現れている。さらに、バルブが閉じるとき(図5(a)では $t=52$ ms 付近)に強い振動が現れている。この振動が発生する位置は、クリアランスを変えることによって変化し、クリアランスの変化量と振動が発生する位置のずれ量が明確に対応していることが分かる。

図6に示したたわみ方向の加速度の図から、たわみ振動はバルブが閉じるとき(図6(a)では $t=52$ ms 付近)に顕著に現れ、その発生位置は図5で軸方向の振動が発生する位置と一致していることが分かる。また、振動はクリアランスが広いほうが大きい。

以上のことから、バルブ打音はバルブが閉じるときに発生し、その強さはバルブクリアランスが広い場合に強くなることが予想される。

4. 2. 2 ウェーブレット解析 バルブが閉じるときの振動の特徴を調べるために、図7(a)(b)(c)(d)にバルブクリアランスが0.45mmの時(図6(b)のデータ)のバルブのたわみ方向の加速度(図7(a))とそのウェーブレット解析の結果を示す。図には、排気バルブが閉じる付近3msを拡大し、レベル4までの離散ウェーブレット変換の結果を示す。今回はマザーウェーブレットに、スプラインウェーブレットの内から局在性に優れ、その形状が1周期分の正弦波に近いbior1.3(図8)を選んで解析に用いた。図7ではD3(レベル3)にバルブの振動に相当するような規則的な変化が見られる。バルブの1次および2次の固有振動数はインパルスハンマーにより2kHz、6kHzであることが分かっているので、D3はこのバルブの1次モードの振動をよく表現しているものと考えられる。D2(レベル2)にも振動的な特徴が現

れているが、D2はデータによるばらつきが激しく、また対応する周波数がバルブの固有振動数と対応していないので次章では、D3に注目したモニタリング手法を検討した。

4. 3 バルブの振動と発生するエンジン音との関係

図9(a)(b)(c)には、バルブクリアランスが適正な場合の

Fig.8 B-spline Mother Wavelet

Fig.9 Relation between Engine Sound and Vibration (V.C. = 0.36mm)

(a) Engine Cycle (b) Bending Acceleration
(c) Engine Sound

Fig.7 Valve Acceleration and its Wavelet Transform (V.C. = 0.45 mm)

Fig.10 Relation between Engine Sound and Vibration (V.C. = 0.54mm)

(a) Engine Cycle (b) Bending Acceleration
(c) Engine Sound

エンジンサイクル、バルブのたわみ方向の加速度および発生するエンジン音を示し、図10(a)(b)(c)にはバルブクリアランスが適正な値よりも大きい場合を示す。図中のT.D.Cは上死点を表す。なお、エンジン音には強い排気ノイズが含まれるために、5章で述べるハイパスフィルターによる処理を行ったエンジン音を示した。

図9の場合には明確ではないが、図10を見るとバルブが閉じるときにバルブに強いたわみ振動が発生し、それがエンジン音にも現れていることがわかる。したがって、エンジン音の解析からバルブが閉じるタイミングを求めることが可能であると考えられる。

5. モニタリング

5.1 検出方法 この章では、4章で得られた知見に基づいて、エンジン音からバルブクリアランスの大きさを定量的に求め、それが適正値であるかどうかを判断する手法について検討した。

4章の結果から、バルブ打音からクリアランスの大きさを定量的に求めるためには、バルブ打音の発生するタイミングを求めるか、または発生する打音の強さを

を求めることが適当であると考えられる。そこで、本研究ではエンジンから発生する音をウェーブレット変換し、4章で述べたレベル3のデータD3を用いて下記の手順で評価を行った。

(1) フィルター処理

測定したエンジン音に含まれる排気音(周波数約100Hz)をハイパスフィルター(カットオフ周波数1500Hz)により除去する。図11(a)(b)には生のエンジン音とそれをフィルター処理した後のエンジン音を示す。

(2) デノイズ1

(1)で得られたエンジン音に対してウェーブレットを利用したデノイズを行う(図11(c))。デノイズは、ウェーブレット変換して得られる係数の内であるしきい値よりも小さいものを零におき、得られた係数を用いてデータを再構成することによってノイズを低減する手法である⁽⁶⁾。これによりマザーウェーブレットと相関の低い成分を除去することができる。本論文では文献⁽⁶⁾に従い、しきい値を $\sqrt{2\log(n)}$ とし、さらにこのしきい値分の値を全体から差し引くソフトスレッショールド処理を行なった。ここで、 n はエンジンの1サイクル分のデータ数である。

(3) デノイズ2

(2)で得られたウェーブレット係数に対してさらに

Fig.11 Engine Sound

(a) Raw Data (b) Filtered Data (c) Denoised Data 1
(d) Denoised Data 2 (e) Average

Fig.12 Processed Engine Sound

(1st Intake Valve Close Position)

(a)V.C.=0.50mm (b)V.C.=0.45mm (c)V.C.=0.40mm
(d)V.C.=0.30mm (e)V.C.=0.20mm (f)V.C.=0.10mm

ウェーブレットを利用したデノイズを行う(図11(d))。突発的に発生するようなノイズは、ノイズが発生した時刻においてウェーブレット変換したときの係数が大きくなる。一方、バルブ打音はある時間継続して発生するために、これをウェーブレット変換したときの係数は、ある時間範囲にわたって大きな値を持つ。したがって、(3)のディノイズを行なうことにより突発的に発生するノイズを除去することができる。しきい値の決め方は(2)になった。

(4) 平均化処理

データの信頼性を高めるために、(3)で得られたD3のデータに対して数周期分にわたる平均化処理を行う(図11(e))。

5. 2 実験

5. 2. 1 実験方法 エンジンから実際に発生する音に対して本論文で提案した手法を適用し、どの程度定量的にバルブのクリアランス量を求めることができるのかを検討した。エンジン音は、第1気筒または第3気筒エンジンブロック上部から30mmの距離に設置したマイクロホン(B&K社製4165型)を用いて測定した。また、エンジンのサイクルと発生するエンジン音との関係を明確にするために、エンジンの1サイクルに1回発生するREF信号も同時に測定した。

5. 2. 2 実験結果 実験では、まず最初に、第1気筒の2つある吸気バルブの内の1個のクリアランスを以下に示すように変えて測定を行った。なお、第1気筒吸気バルブの適正なシム板の厚みは2.56mmである。

- (a) 適正值 (Valve Clearance = 0.30mm)
- (b) クリアランス小 (V.C.=0.20, 0.10mm)
- (c) クリアランス大 (V.C.=0.40, 0.45, 0.50mm)

図12(a)(b)(c)にクリアランスが適正值より0.20,

0.15, 0.10mm大きいとき、図12(d)にV.C.が適正值、図12(e)(f)にはV.C.が適正值より0.10, 0.20mm小さいときの第1気筒の吸気バルブが閉じる付近のエンジン音を、提案した手法を用いて解析した結果を示す。データはREF信号を基準にして整理してあるので、すべてのデータの時間原点はエンジンサイクルに対して同じである。

吸気バルブ2個の内の1個のみのクリアランスを変えているので、変えていないバルブ側では、打音を示すピークが適正值である図12(d)と同様の時刻 $t=4\text{ms}$ に現れている。変化させたバルブから発生する打音の位置は、クリアランスが広くなるほど早くなり、打音の強さは、クリアランスが適正值より大きくなると強くなることが分かる。なお、図12(d)では、2つの吸気バルブが同時に閉じるので、発生する打音の強さは相対的に大きくなっている。

図13には、適正なバルブクリアランス(0.30mm)のときを基準(横軸 $\Delta t=0$, 縦軸=1)として、クリアランスを変えたバルブから発生する打音の相対的な発生位置(ずれ量 Δt)と相対的な強さを示す。図中の数字は適正值からのバルブクリアランスの差を示す。図から、バルブ打音の強さはクリアランス量が適正值から大きくなるほど大きくなっていることが分かる。時間のずれ量 Δt はクリアランスの変化量に定量的によく対応している。クリアランスが大きくなる場合には、バルブ打音が正常な場合よりも大きくなるが、クリアランスが小さくなる場合には適正な場合との違いがほとんどないという結果は、実際のエンジン検査ラインで、作業者が経験する内容と一致している。

同様の処理を第3気筒の排気バルブに適用した結果を図14に示す。この場合にも、第1気筒の吸気バルブについて得られた結果と同様の結果が得られる。

Fig.13 Relationship between Time Shift of Close Position and Relative Sound Intensity (1st Intake Valve)

Fig.14 Relationship between Time Shift of Close Position and Relative Sound Intensity (3rd Exhaust Valve)

したがって、本論文で提案した手法によって、任意の吸排気バルブに対して、そのクリアランスのずれ量を0.1mm程度の精度で測定可能であることが示された。

6. 結 論

本研究では、エンジン音からバルブクリアランスを推定し、それが適正な設定になっているかどうかを求める手法について検討し、以下の結論を得た。

- (1) バルブが閉じるときにバルブが振動し、これがバルブ打音となる。
- (2) 本論文で提案した手法を用いてエンジン音の解析を行った結果、バルブが閉じるタイミングおよびその時発生する打音の強さをほぼ定量的に求めることができた。
- (3) (2)の結果に基づいて、適正なバルブクリアランスからのずれ量を0.1mm程度の精度で検出できた。

参考文献

- (1) 児玉、山本、珠玖、“エンジン騒音とその改善”、自動車技術、Vol.47、No.6、1993,p.p.24-29.
- (2) 前田、“エンジン異音の定量的評価”、内燃機関、Vol. 27、No. 343、1988, p. p. 36-42.
- (3) 村上、水野、飯田、松永、“振動・騒音源寄与別伝達特性解析法と車への応用”、自動車技術、Vol. 37、No. 12、1983、p. p. 1389-1396.
- (4) Paya B.A.,Esat I.I. and Badi M.N.M., "Artificial neural network based fault diagnostics of rotating machinery using wavelet transform as a preprocessor", Mechanical Systems & Signal Processing, Vol.2, No.5, 1997, p.p.751-765.
- (5) Lin S.T. and McFadden P.D., "Gear vibration analysis by B-spline wavelet-based linear wavelet transform", Mechanical Systems & Signal Processing, Vol.2, No.4, 1997, p.p.603-609.
- (6) 榎原進、ウェーブレットビギナーズガイド”、東京電機大学出版局、1995
- (7) 自動車工学ハンドブック（自動車技術会編）、図書出版、1970、p. p. 4・36-4・43.
- (8) D.L.Donoho, "De-noising by soft-thresholding", IEEE, Transaction on Information Theory, Vol41, No.3, 1995, p.p.613-627.