実機による多気筒ディーゼルエンジンの 不燃気筒の判定に関する研究*

川村 洋平¹ 氏平 増之² 桐本 賢太³
緒方 純俊⁴ 中村 祥一⁵ 樋口 澄志⁶

Study on the Detection of Misfiring Cylinder in a Multi-Cylinder Diesel Engine Loaded on the Practical Machinery

by Youhei KAWAMURA^a, Masuyuki UJIHIRA^b, Kenta KIRIMOTO^c,
Sumitoshi OGATA^c, Shouichi NAKAMURA^d and Kiyoshi HIGUCHI^b

a. Student of Graduate School of Engineering, Hokkaido University, Kita-ku, Sapporo 060-8628, Japan

b. Dept. of Mineral Resources Engineering, Graduate School of Hokkaido University

c. Dept. of Information Science, Graduate School of Kyushu Institute of Technology

d. Machinery Div. of Yamazaki Construction Co., Ltd.

As a motive power in heavy construction machineries including mining and various construction works, a multi-cylinders type of diesel engine is very often used because of its high cost performance. Steady maintaining of diesel engine's operation is substantial in view of economic demands and environmental concerns. To realize this, a practice of early diagnosis and early repair are essential.

In our previous study using a V-12 type of diesel engine installed on a bench, we demonstrated that a misfiring cylinder could be detected by statistical analysis method using rms value of the acceleration waveforms measured on a single point of the engine block.

In this paper, the same experimentation and analyses as in the previous study were conducted for two practical machineries that loaded the same type engine of the previous study. Even though the engine was loaded on a practical machinery, it was found that a misfiring cylinder could be detected by the same way as in the previous study. In addition to the analyzing method in the previous study, in this study, we employed a wavelet transform method with the Gabor function as a window, and analyzed the acceleration waveforms. The results of wavelet analysis revealed that a misfiring cylinder could be detected visually from time-frequency charts. With the aid of statistical analysis using rms value, a misfiring cylinder in a multi-cylinder diesel engine can be doubly checked by wavelet analysis.

KEY WORDS : Multi-Cylinder Diesel Engine, Combustion Diagnosis, Misfiring Cylinder, rms Value, Wavelet Transform

1. はじめに

鉱山機械や建設機械用のディーゼルエンジンにおいては、電気系統、燃料ポンプ・インジェクタ等の燃料系統、ターボチャージャー・吸排気バルブ等の吸排気系統、メタル軸受け・ピストンリング等の摺動部など様々な個所で故障が起きる。これらの故障原因の一つにオイルの劣化が挙げられる。オイルに金属粉や岩粉が混入するとピストンとシリンダ間で摩耗を引き起こし、オイルパンへの燃料の漏れやオイル粘度の低下を招く(仁木, 1997)。オイルパン中のオイルはエンジン全体を循環しているため、オイルの劣化はエンジンに致命的損傷を与える恐れがある(鈴木ら, 1994, 1996)。作業現場においてエンジンに不燃の気筒が発生した場合、

検査・修理中に大気中の岩粉がオイルへ混入する可能性がある(伊与木, 1997)。これを最小に抑えるには、不燃気筒を確実に判定しオイル循環部の開放個所数と開放時間を最小限に抑える必要がある。ディーゼルエンジンの異常診断で広く採用されている方法はオイル分析である(中村, 1997; 吉長ら, 1998)。オイル分析法では、月単位でオイル中の微量金属成分量を分析し、経時変化を追って異常個所を判定する。この方法は有効であるが、即時性に欠ける欠点を持っており、より簡易で確実かつ迅速に判定できる実用的判定法の開発が望まれている。

著者等は重機の使用環境を考慮した場合の計測法として、計測が簡便な加速度計の利用が適切と考える。これまでの研究において、溝型鋼(SS400製)で組まれたベンチ(台座:幅700mm×長さ1,500mm×高さ545mm)に載せたエンジンに対しては、エンジンブロックの2個所で測定した加速度波形の自己相関分析、rms値の統計解析を行うことで重機用多気筒ディーゼルエンジンの不燃気筒の判定が可能であることを確認している(川村・氏平ら, 2001)。本研究ではエンジンの所定の位置に最少必要数の加速度計を常時固定しておき、波形信号データを携帯電話等で解析の専門技術者がいる事務所へ伝送し、不燃気筒を判定するシステムの構

* 2002年1月7日受付 4月1日受理

1. 学生会員 北海道大学大学院生 工学研究科環境資源工学専攻

2. 普通会員 工博 北海道大学大学院助教授 工学研究科環境資源工学専攻

3. 工博 九州工業大学大学院助手 情報工学研究科

4. 工博 九州工業大学大学院教授 情報工学研究科

5. 山陽建設(株)機械部長

6. 普通会員 工博 北海道大学大学院教授 工学研究科環境資源工学専攻

[著者連絡先] FAX 011-706-6319 (北大工・資源)

キーワード: 多気筒ディーゼルエンジン, 燃焼診断, 不燃気筒, rms 値, ウェーブレット変換

策を進めている。したがって実際の計測はエンジンが車両に搭載された状態で行う必要がある。本論文では前報で用いたエンジンと同型のエンジンを搭載した2台の実機に対し、前報と同様の実験および解析を行った。実機状態のエンジンの振動波形とベンチテストの状態の振動波形を比較した結果を述べると共に、前報の解析方法により実機状態であっても不燃気筒の判定が可能であることを述べる。また、前報の解析手法に加え、加速度波形のウェーブレット解析法を用い、振動波形の特徴および不燃気筒を判定できるかどうかを調べた。その結果に基づき、ウェーブレット変換値の時間一周波数表示によっても、不燃気筒を視覚的に判定できる可能性があることを述べる。

2. 実験方法

本実験はエンジンが車両に搭載された通常の使用状態で行った。図1に実機を用いたディーゼルエンジンの加速度測定法概念図、図2に測定状況の写真を示す。実験では前報のベンチテストによる実験に用いたV型12気筒ディーゼルトーボエンジン(CAT-3412型)と同型のエンジンを搭載した45tダンプトラック(CAT-773B)2台を使用した。表1に使用したダンプトラックの諸元を示す。以後、2台のダンプトラックは「実機Ⅰ」、「実機Ⅱ」として区別する。また、前報のベンチテスト状態での計測結果は「ベンチテスト」として比較に用いる。図3(A)(B)に実機Ⅰおよび実機Ⅱの個所別修理・故障度数のヒストグラムを示す。実機Ⅰのダン

プは新車購入時からエンジンのオーバーホールを行わずに約1万7千時間(12年7か月)使用した機械であり、実機Ⅱは1万時間使用後オーバーホールを行い、その後7千時間(9年1か月)使用した機械である。エンジンに関しては、修理回数が実機Ⅰは31回、実機Ⅱは20回であり、使用時間も修理回数も少ない実機Ⅱのエンジンの方が劣化は少ない。また図3(A)(B)からエンジン部と足廻り部がともに修理・故障度数が多いことがわかる。エンジン部の修理・故障の原因は、オイル循環部への燃料混入や噴射ノズルの目詰まり等である。実験ではエンジン表面の7番気筒および6番気筒燃焼室側面の2個所に加速度計を取り付けることにより振動測定を行う。エンジンをアイドリング状態にし、不燃気筒のない正常な状態および1番気筒から順に12番気筒までを1気筒ずつ人為的に不燃気筒にして振動測定を行った。各気筒の不燃状態は噴射ポンプから高圧パイプで送られてくる燃料を噴射ノズル手前でカットすることにより発生させた。加速度計はTEAC社製708LF(外形寸法15mmφ×27mm、可測範囲±1,470m/s²、周波数特性40kHz)を使用した。加速度計用増幅器の増幅率は10倍とした。これにより1.02mV/(m/s²)の出力感度が得られる。気筒の配置は図1右下に示すように奇数番気筒と偶数番気筒の6気筒ずつが65°の角度で抱き合わされた構造となっており、燃焼順序は実機Ⅰ、Ⅱとも1-4-9-8-5-2-11-10-3-6-7-12である。なお、加速度計の取り付けには耐熱性瞬間接着剤を使用した。加速度計により測定された出力信号はデータロガに取り込み、パーソ

図1 実機を用いたディーゼルエンジンの加速度測定法概念図

図2 測定状況の写真

表1 実験に使用したダンプトラックの機械仕様(CAT-773B)

全 装 備 重 量	38,850kg
全 長	9,120mm
全 幅	4,065mm
全 高	4,230mm
バッセル	平 積 26m ³ 山 積 31.4m ³
型 式	CAT-3412
定格出力	659ps (2000rpm)
重 量	2587kgw
前 後	1800mm
幅	1000mm
高 さ	1600mm
シリンダ配列	65° V-12
シリンダ内径(ボア)	137.2mm
行程(ストローク)	152.4mm
総排気量	27023cc
噴射方式	直接噴射

図3 実験に使用したダンプトラックの個所別修理・故障度数

図4 測定された加速度波形例(7番気筒燃焼室側面の加速度計による)

ナルコンピュータ上で波形解析を行った。

3. 解析波形と波形スペクトルの特性

図4に本研究で計測した加速度波形を示す。図4に示す3つの加速度波形は7番気筒燃焼室側面に取り付けた加速度計で計測したものであり、不燃気筒のない正常状態の加速度波形である。図4(A)はベンチテスト、同図(B)は実機I、同図(C)は実機IIの加速度波形を示している。3つの図の横軸は時間(s)、縦軸は加速度(m/s^2)である。エンジン回転数はベンチテスト状態では約1,000rpm、実機Iおよび実機IIでは約700rpmである。図4からどの波形も 200m/s^2 を超える大きな振幅が確認できる。この周期的なスパイク状の振幅部分は加速度計を7番気筒燃焼室側面に取り付けていることから、7番気筒の燃焼振動に対応している。図4(B)および(C)から実機状態の計測による加速度波形の振幅の大きさと周期は類似していることがわかる。図4(A)のベンチテスト状態での加速度波形は他の2つの加速度波形と比べ、込み入った、周期の短い波形になっている。しかしこれはベンチテスト状態と実機状態で振動の特徴が変化したわけではなく、エンジン回転数の違いによるものである。少なくとも実機に搭載しているエンジンが車両のフレームやエンジン連結部の影響を受けて特異な振動をしているとはみられない。

図5は図4に示した加速度波形にFFT処理を施した結果を示している。図5(A)はベンチテスト、同図(B)は実機I、同図(C)は実機IIの加速度波形のフーリエスペクトルである。3つの場合とも、卓越周波数は約3.3kHz付近にみられる。実機I、実機IIの場合の回転速度700rpmは秒単位でみると11.7rpsである。3つのエンジンはそれぞれ12気筒ではあるが、クランクシャフト1回転で6気筒が燃焼している。したがって1s当たりの燃焼回数は約70回である。ピストン-コンロッド-クランクシャフト-エンジンブロックの経路をたどって伝播する振動を加速度計が捕捉しているのであれば、少なくとも11.7Hzあるいは70Hz付近の周波数成分が大きく表れるはずであるが、フーリエスペクトルでは顕著に表れていない。3.3kHz付近の周波数成分は燃焼衝撃で直接エンジンブロックに生じた振動成分と推定される。ベンチテストと実機では1k~2kHzのスペクトル強度に若干の違いがみられるが、測定された加速度波形の周波数成分は3つとも約1k~6kHzの範囲内に収まっており、大きな違いはみられない。これは3つの場合の波形に4.で述べるウェーブレット解析を施すと同様の周波数帯に変化が表れることを示唆している。

4. 連続ウェーブレット解析

エンジンの燃焼振動は周期性があり、気筒ごとの受け持つ燃焼

図5 加速度波形(図4)のフーリエスペクトル

時間帯が存在する。このことから、不燃気筒の判定には時間領域を含む解析法が有用と考えた。その一つはウェーブレット解析による時間-周波数解析であり、もう一つはrms値を用いた時間-振幅解析である。本章ではウェーブレット解析を適用した解析結果を述べる。

エンジンの異常燃焼をウェーブレット解析により検出した事例は少ない。菊池ら(1992)は、自動車用8気筒ガソリンエンジンのノッキング信号に対しガウス型マザーウェーブレットを用いたウェーブレット解析を行い、この発生を診断できる見通しを得たとしている。ただし、点火時刻がわかるガソリンエンジンについてである。回転機械の異常診断に関しては土屋ら(1998)はポンプの音響故障診断システムにウェーブレット変換を用いた診断法を組み込み、軸受が損傷したポンプの振動音を正常な振動音と比較することで故障原因を推定できたと述べている。吉田ら(1998)は粉末焼結歯車の制振特性をウェーブレット解析により評価している。増田ら(1998)は稼働中の機械が発生する仮想的な異常信号のディコンボリューション処理に関する研究を行っており、雑音からの異常信号の抽出を実現している。しかし、本研究で得られたようなディーゼルエンジンの加速度波形にウェーブレット変換を適用し、不燃状態を解析したという研究事例は見当たらない。

本章では測定された加速度波形に連続ウェーブレット変換を施し、時間-周波数解析を行った結果を示す。

4.1 連続ウェーブレット変換

ウェーブレット変換は、測定した振動波形にある周波数と振幅を持つ局在する波形を重ね合わせ、両者の積を求める解析方法である(榊原, 1995)。これにより、時間-周波数解析を行うことができる。具体的には測定した振動波形にマザーウェーブレットと呼ばれる局在波形を重ね合わせて積を求める解析方法である(金ら, 1997)。図6に本解析で用いたマザーウェーブレット(ガボール $\sigma=8$)を示す。この図で見られるように、マザーウェーブレットは一定の周波数を持つが波形の両端が減衰する関数で表される。

4.2 加速度波形の連続ウェーブレット解析結果

連続ウェーブレット変換によって得られる結果は、ウェーブレット変換値の時間-周波数マップとして出力する(以後、単に

図6 解析で用いたマザーウェーブレット (ガボール $\sigma=8$)

時間一周波数マップと呼ぶ)。時間一周波数マップとは横軸に時間(s)、縦軸に周波数(kHz)をとり、信号に含まれる周波数成分の相対的な大きさを明度値で与える図である。図7は7番気筒燃焼室側面の加速度波形の時間一周波数マップである。同図の(A),(B),(C)はそれぞれ正常状態のベンチテスト、実機I、実機IIの各時間一周波数マップである。各図上部の数字は燃焼気筒(奇数番気筒)を示している。この場合、7番気筒燃焼室側面で測定しているため、奇数番気筒の燃焼振動をより明瞭に捉えており、同じ列に属する奇数番気筒の燃焼時間に着目する。どの図も加速度計取り付け気筒である7番気筒の燃焼時間帯に特に明度の高い縦縞が見られている。一方、加速度計から遠い気筒の振動は暗くなる。これは加速度計から遠い気筒で発生した振動はエンジンブロックを伝播し

図7 正常状態における各個体の時間一周波数マップ (7番気筒燃焼室側面)

加速度計に届く間に減衰することを示している。しかし、程度の差はあるがどれも奇数番気筒の燃焼時間帯に明度の高い縞が見られる。実機状態である図7(B),(C)とベンチテスト状態である同図(A)を比較しても、目立った変化はなくどちらも各気筒の燃焼時間帯の約3k~4kHzの間に特に高明度の縦縞が集中している。

4・3 連続ウェーブレット変換による不燃気筒の判定

図8は実機Iの加速度波形の時間一周波数マップの例を示している(加速度計は7番気筒燃焼室側面に取り付けている)。同図の(A),(B),(C)はそれぞれ不燃気筒のない正常状態の、7番気筒不燃状態のときの、11番気筒不燃状態のときの各時間一周波数マップである。周波数軸方向に明瞭な縞模様が見られる。図8(A)では程度の差はあるが奇数番気筒の燃焼時間帯に明度の高い縞が見られる。図8(B),(C)では同図(A)と比較して、不燃状態にした気筒の燃焼時間帯が暗く現れており不燃気筒発生を判定できるといえる。図9(A),(B),(C)に示している実機IIにおける時間一周波数マップにおいても全く同様のことがいえる。以上のように、加速度波形に対しガボール($\sigma=8$)マザーウェーブレットを用いた連続ウェーブレット解析では、FFT処理結果に比べ時間一周波数マップ上に時間情報も含まれるため、不燃気筒の判定が可能であることを示した。しかし、周波数帯によっては不燃状態のときも比較的高明度の高い縞が残ることがあるため、不燃気筒の判定は若干あいまいになる。

本研究では、エンジンの加速度波形を解析することにより、簡易、確実、迅速に不燃気筒を判定するシステムの確立を念頭に置いている。著者等はrms値の統計解析による方法と本研究のウェーブレット解析法を併用することが望ましいと考えている。ウェー

図8 実機Iで計測した加速度波形のウェーブレット解析結果 (7番気筒燃焼室側面)

■は不燃気筒を示す

ブレット解析法を用いた不燃気筒の判定法は統計的な判定ではないため、燃焼状態のパラツキにより判定の正確さが多少失われるという短所が存在する。しかし、rms 値の統計解析による方法と比べ、解析波形の時間区切りがあいまいであっても解析が行え、視覚的に不燃気筒を判定できる長所があるため、不燃気筒の判定に併用すべき有用な手段の一つとみなせる。

5. rms 値を用いた統計的解析による不燃気筒の判定

本章では前報で提唱した rms 値を用いての統計的解析法を実機に適用した結果を示す。

5・1 rms 値を用いた統計的解析方法

加速度計取り付け気筒の燃焼から始まり再度取り付け気筒が燃焼する 1 周期の時間を 12 等分して各気筒の燃焼時間帯を決め、分割された時間帯別に加速度波形の rms 値を算出する。rms 値の計算は下式に従った。ここで、右辺根号内の a_n は 1 m/s^2 で除することで rms 値を無次元化して表すものとする。

$$\text{rms 値} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{n=1}^m a_n^2} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし、

a_n : 時間の関数 (時刻 $n\Delta t$ での加速度)

n : 時刻番号

続いて 1 つの振動波形から 1 ~ 12 気筒までを 1 サイクルとして 10 サイクル分の 10 個の rms 値を算出する。振動測定による不燃気筒の判断は、不燃気筒の rms 値が正常状態の rms 値より下回っているかどうかで調べる。しかしある気筒が不燃状態になったこ

図 10 rms 値に関する分布が重なる確率概念図

とで他の気筒の rms 値が減少あるいは増加傾向を示す場合もあり、統計的判定が必要である。正常状態の rms 値と不燃状態の rms 値が正規分布に従うことは既報で確認しているため、2 つの分布が重なる確率を尺度として不燃気筒の判定を行うことができる。

図 10 の概念図に示すように、正常状態の rms 値の正規分布曲線を $g(x)$ 、不燃状態の rms 値の正規分布曲線を $h(x)$ とする。ここで注目気筒が正常状態の正規分布を A 、不燃状態のときの正規分布を B と見立てると、 $(A \cap B^c) \cup (B \cap A^c)$ の面積 R は次の式 (2) で求められる。

関数 $g(x)$ および $h(x)$ を離散化して (2') の形にすると、数値積分ができる。

$$R = \int_0^\infty |g(x) - h(x)| dx \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\equiv \sum_{k=0}^\infty |g(x_k) - h(x_k)| \Delta x \quad \dots\dots\dots (2')$$

A 、 B どちらの面積も 1 なので、共通部分 $A \cap B$ の面積 P は $P = 1 - R/2$ により求められる。実際の解析結果ではそのまま P を 100 倍し、パーセントで表示する。

5・2 不燃気筒の統計的判定結果

ここでは、気筒の正常、不燃状態の判定を rms 値の正規分布を用い全気筒にわたって行った結果を示す。

表 2 および表 3 はそれぞれ実機 I、実機 II における P の値を % で表示したものである。表中の (A)(B) はそれぞれの 6 番気筒と 7 番気筒に取り付けた加速度計による解析結果である。表中の太枠で示した値はある特定気筒を不燃状態にしたときのその気筒の P の値を示している。それぞれの最上段には不燃気筒がない場合の P の値を示している。表中の*がついた値はある気筒を不燃状態にしたときの rms 値の正規分布の平均値が、基準となる正常状態のときの rms 値の正規分布の平均値を上回っていたときの重なり合う確率値である。今回の実機を用いた実験では、実機 I、実機 II ともに不燃状態ではない気筒の rms 値の平均値が、正常状態の正規分布の平均値をかなり上回り正規分布の重なり合う確率が小さくなる現象が多くみられた。図 11 は基準となる正規分布の平均値 (全気筒正常状態) をかなり上回った正規分布の例である。つまり不燃気筒のない正常状態の 9 番気筒の rms 値の正規分布と、7 番気筒が不燃状態になったときの 9 番気筒の rms 値の正規分布の重なり具合を示したものである。

ベンチテストの結果でも、同様の現象は見られたが、正規分布の重なり合う面積が大きく、不燃気筒の判定には支障がないと判断した。しかし、実機にエンジンを搭載した今回の場合は不燃気筒発生時の rms 値の正規分布の平均値が、正常状態の rms 値の正規分布の平均値を上回る度合いが大きいため、重なり合う確率が

図 9 実機 II で計測した加速度波形のウェーブレット解析結果 (7 番気筒燃焼室側面)

表2 実機Iにおける正規分布の重なり具合の確率 (*はrms値の分布が原点と反対側にシフトした場合の確率値)

(A) 測定点6番 (単位 %)

気筒番号 不燃 にした気筒	1番	2番	3番	4番	5番	6番	7番	8番	9番	10番	11番	12番
不燃なし	48.9	64.7	51.3	48.0	31.3	56.3	62.4	82.5	73.6	83.6	72.6	71.9
不燃1番	60.2	22.9	*16.6	56.4	*21.6	*42.6	*43.3	88.9	*70.6	76.1	*0.2	71.0
" 2番	65.7	36.0×10 ⁻³	22.5	*23.6	*10.6	*52.9	*4.2	*38.5	10.9	40.8	43.0	74.1
" 3番	46.2	16.4	25.9×10 ⁻³	*35.8	*3.3	39.5	*25.8×10 ⁻³	*24.8	19.4	*2.8	*7.9	*32.0
" 4番	36.7	22.0	11.2	13.2×10 ⁻¹²	*0.1	26.2	*7.3	*27.1	9.0	30.9	*41.9	87.9
" 5番	35.7	*25.3	7.4	38.1	28.4×10 ⁻³	74.9	*1.5	*17.6	*18.7	90.3	8.2	*65.5
" 6番	48.5	22.1	8.1	51.1	*24.8	16.9×10 ⁻¹²	*10.5	*55.3	11.5	69.2	*27.9	*61.3
" 7番	17.1	38.4	13.5	*29.4	6.1	*15.5	23.9×10 ⁻³	*28.4	16.8	*30.1	*8.8	17.8
" 8番	34.6	22.2	6.3	24.7	*2.9	*58.3	*2.1	41.5×10 ⁻¹²	8.9	72.5	*5.6	*69.8
" 9番	64.0	63.4	29.0	*18.9	*6.8	*49.5	*0.1	*23.9	97.8×10 ⁻³	*40.7	*16.9	*47.1
" 10番	58.9	26.4	56.8	41.9	*3.7	4.1	*22.5	*37.6	29.6	79.4×10 ⁻³	*43.8	66.5
" 11番	49.3	26.2	1.7	12.3	*1.1	34.5	*19.9×10 ⁻³	*25.3	43.5	*41.6	40.6×10 ⁻³	*58.6
" 12番	47.2	14.9	9.7	45.1	*4.5	*68.8	*9.7	79.8	2.2	*69.1	*41.9	28.3×10 ⁻³

(B) 測定点7番 (単位 %)

気筒番号 不燃 にした気筒	1番	2番	3番	4番	5番	6番	7番	8番	9番	10番	11番	12番
不燃なし	83.2	35.4	51.5	77.7	58.5	78.4	81.9	69.7	57.9	33.0	80.4	53.8
不燃1番	10.2×10 ⁻³	29.9	85.5	34.0	94.9	*43.2	*47.6	*61.9	*21.1	*27.7	*0.2	*24.2
" 2番	*13.4	80.3×10 ⁻⁴	*61.4	44.8	*76.8	*28.6	*88.2	27.9	*10.8	*58.9	*63.6	*70.0
" 3番	*67.9	*18.8	11.6×10 ⁻³	28.0	79.4	61.9	*91.5	*15.6	*13.5	*16.9	*26.6	*6.7
" 4番	*55.3	23.6	*73.3	14.9×10 ⁻¹²	*82.7	*59.1	*64.8	23.9	*84.4	*9.4	*59.4	*0.6
" 5番	*47.1	1.2	*69.7	7.2	18.5×10 ⁻¹²	*43.5	*55.1	*62.9	*14.1	*48.7	*43.1	*35.5
" 6番	72.5	*4.9	*76.1	0.7	*76.3	1.9	*67.2	19.9	*75.9	*6.1	39.0	*23.6
" 7番	47.3	*44.4	*39.7	0.3	*64.5	*25.5	30.3×10 ⁻³	*70.2	*9.1	*8.7	*9.9	23.8
" 8番	*73.8	*10.5	*46.2	13.9	80.3	*76.9	*41.1	70.7×10 ⁻³	*46.3	*7.8	*47.5	*48.4
" 9番	75.3	*12.8	*1.7	13.1	*39.7	*47.8	*50.4	63.8	13.8×10 ⁻¹²	29.9	*45.4	*51.6
" 10番	*86.8	*23.5	*39.8	23.5	*38.7	*36.9	*78.4	46.4	*40.2	1.8	*35.4	18.6
" 11番	*82.8	*54.8	74.2	0.4	*64.8	*65.2	*65.4	19.3	*17.6	23.3	18.9×10 ⁻¹²	*86.4
" 12番	*48.6	*38.1	*41.5	0.7	*79.6	57.7	*99.3	3.7	*50.3	86.5	91.9	5.1

表3 実機IIにおける正規分布の重なり具合の確率 (*はrms値の分布が原点と反対側にシフトした場合の確率値)

(A) 測定点6番 (単位 %)

気筒番号 不燃 にした気筒	1番	2番	3番	4番	5番	6番	7番	8番	9番	10番	11番	12番
不燃なし	82.7	65.9	74.2	68.9	71.8	84.2	24.8	83.6	90.5	72.1	84.5	60.1
不燃1番	47.0×10 ⁻³	*19.7	*36.6	*40.6	*59.5	*6.2	*38.5	*85.3	*56.1	*32.1	*69.9	83.1
" 2番	70.7	16.0×10 ⁻¹²	*35.6	*35.8	*77.4	*3.4	46.5	*99.4	*9.8	60.3	*51.1	*95.0
" 3番	32.5	*19.8	11.0×10 ⁻⁴	*25.17	74.3	*31.6	51.7	*58.5	*24.9	*33.2	*51.1	80.5
" 4番	51.9	31.2	*21.9	10.9×10 ⁻⁴	58.8	*44.6	60.5	25.1	*35.4	55.2	*36.8	84.3
" 5番	*54.0	16.2	60.8	*19.5	15.1×10 ⁻¹²	*63.9	38.8	*39.4	*27.8	*42.9	*58.1	87.1
" 6番	59.1	*60.4	88.3	*8.3	73.3	24.9×10 ⁻³	82.1	*78.4	*47.6	*43.3	*41.8	71.7
" 7番	34.5	*46.6	*39.2	*12.1	65.4	*43.2	37.1×10 ⁻⁴	*54.4	*41.9	*25.0	*15.2	60.3
" 8番	*76.3	*54.9	*40.9	*40.9	76.9	*71.2	*47.2	31.4×10 ⁻⁴	*60.4	*34.6	*59.9	*48.3
" 9番	*55.4	*50.7	*39.2	*15.8	*58.3	*61.5	78.7	*56.8	4.3	*66.1	*63.1	*78.4
" 10番	*70.1	*59.8	89.4	*23.1	73.8	*67.5	*25.2	60.7	*56.7	15.7×10 ⁻³	*46.7	*69.6
" 11番	*55.2	30.6	*44.9	*16.9	*88.0	*53.3	72.6	*62.1	*14.2	*39.0	72.1×10 ⁻⁴	*71.5
" 12番	46.1	68.7	48.5	*27.1	39.5	*62.8	19.4	79.3	91.1	*63.9	*64.9	3.6

(B) 測定点7番 (単位 %)

気筒番号 不燃 にした気筒	1番	2番	3番	4番	5番	6番	7番	8番	9番	10番	11番	12番
不燃なし	88.8	74.9	80.6	60.0	91.5	53.2	75.9	66.6	82.7	47.9	72.5	77.6
不燃1番	75.6×10 ⁻³	*33.5	*37.2	10.1	*55.9	*2.5	*44.2	17.8	*31.6	*62.6	*63.9	*58.6
" 2番	*72.9	0.9	*60.7	*19.3	69.2	*0.4	*14.5	*19.6	*3.7	*74.4	*93.7	8.1
" 3番	55.8	*21.0	20.5×10 ⁻³	*93.3	*81.7	71.4	*26.7	*53.8	*47.6	*59.1	*22.3	*51.1
" 4番	*60.4	*38.4	*47.1	75.5×10 ⁻⁴	72.9	*11.1	*18.5	*0.4	*71.5	*15.4	36.8	21.1
" 5番	*19.8	31.0	*45.3	*30.6	21.8×10 ⁻⁴	*1.2	*35.9	*9.7	*87.3	*77.1	*31.3	45.6
" 6番	*84.7	*0.1	*45.5	*35.2	96.9	0.1	*67.5	82.5	*29.7	*33.4	*50.1	53.3
" 7番	67.5	*0.9	*12.5	*73.5	*28.9	99.7×10 ⁻³	31.2×10 ⁻³	*0.9	*48.1	*39.6	*12.8	*1.6
" 8番	*72.3	*0.5	*16.5	*21.2	*66.3	*0.1	*66.8	41.5×10 ⁻³	*59.1	72.6	*27.8	5.5
" 9番	*13.3	*13.9×10 ⁻³	*52.2	*16.1	*58.61	*1.2	*31.9	9.6	15.8×10 ⁻¹²	*44.9	*64.3	*42.3
" 10番	*38.8	*0.2	*43.5	*18.9	*44.4	*1.8	*55.3	40.5	*44.0	65.6	*35.3	*44.6
" 11番	*29.6	*0.6	*83.6	*31.3	*60.9	*3.4	*29.0	91.5	*28.0	38.5	33.5×10 ⁻³	60.7
" 12番	*26.4	*28.4×10 ⁻³	*11.1	*6.5	*50.4	*37.3×10 ⁻³	*70.4	58.3	*62.5	*35.7	*65.7	5.5

小さくなりベンチテストの場合と同じ処理では正常状態の気筒を不燃状態と誤認する可能性がある。ベンチテストでは基準となる正常状態時の正規分布曲線に対し、不燃気筒発生時のrms値の正規分布が右に上回る状態は約23%の燃焼時間帯に見られたが、実機を用いた場合では約61%の燃焼時間帯において見られた。これは不燃気筒の発生により他の気筒の燃焼振動の振幅が正常状態の燃焼振動の振幅を上回っていることを意味する。実機状態においてこのような現象が多く起こる原因としては、燃料噴射量を制御しているガバナの動作結果にあると判断される。安定したエンジンの運転を行うためには、負荷変動に対して安定した回転数を維持することが必要である。ディーゼルエンジンの場合、吸入空気

量がエンジン回転数にかかわらずほぼ一定のため、発生トルクは、燃料噴射量により決定している。ガバナはエンジンの回転を安定的に維持し、エンスト、オーバーランにならないよう制御するためにエンジン回転数を検知して目標回転数との差を検出する機能、目標回転数との差分に応じた噴射量制御を行うためのコントロールラックを動かす作動力を発生させる機能を持っている(大久保, 1979; 宮下ら, 1994)。本実験の場合、1気筒が不燃状態になるため、その気筒はエンジン全体の負荷となり、回転数が減少する。そこでガバナが機能し他の気筒への燃料噴射量を増加させる。結果として不燃気筒の発生により他の気筒の燃焼振動の振幅が正常状態の燃焼振動の振幅を上回る状態が出現する。ベンチテ

図 11 基準となる正規分布を上回る正規分布の例 (7 番気筒不燃状態時の 9 番気筒の正規分布)

ストと実機状態においてその割合が異なるのは、どちらも無負荷ではあるが、実機状態ではクランクシャフトにかかる負荷がベンチテスト状態よりも大きくなっていることによるものである。

ここで、正常状態の rms 値の正規分布の平均値を上回る分布になる場合は、確実にその気筒は不燃状態ではないため、この後に続く計算では表中の*のついた値を 100 に置き換え、重なり合う確率を 100% として取り扱うこととする。

実機 I の解析結果である表 2(A),(B) の対応するマス目の確率の値を掛け合わせた P^2 を求め、式 (3) で (dB) 表示して描いたものが図 12 である。図 13 は実機 II の解析結果である表 3 の値を用いて同様に (dB) 表示したものである。

$$(P^2 \text{ の相対強度 }) = 20 \log_{10}(P^2 / P_{100}^2) (\text{dB}) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ただし、

P : 正常状態と不燃状態の rms 値の分布が重なり合う確率 (%)

P_{100} : 正常状態と不燃状態の rms 値の分布が同じであるとみなしたときの 2 つの分布が重なり合う確率 (100%)

図 12、13 に示した実機 I、実機 II の結果は、ともにベンチテストの結果と同様にエンジンに不燃気筒がない同図左最上段では、ほぼ横ばいの一直線になっている。その他の、不燃気筒がある場合の 12 個の図では、いずれも不燃気筒に対応する燃焼時間帯での確率の相対強度が小さくなっている。図 12 の実機 I では不燃状態ではない気筒の相対強度にも窪みが見られるが、不燃状態になった気筒の窪みは非常に大きく表現されている。図 13 の実機 II でも実機 I と同様に不燃状態になった気筒の窪みは大きく、不燃状態でない気筒の窪みがほとんど見られない。これにより、全 12 気筒すべての不燃状態を判定することが可能である。

以上のように、rms 値の統計的解析法により、エンジンを車両に搭載した実機の状態であっても、またエンジンの劣化程度が異なっても、全 12 気筒すべての不燃気筒を判定できることを確認した。今後は稼動中に突発的に起こった不燃気筒に対し、計測・解析を行い、本不燃気筒判定システムの信頼性を確かめていきたいと考えている。

6. ま と め

本研究ではエンジンの決まった位置に最少必要数の加速度計を常時固定しておき、波形信号データを携帯電話等で解析の専門技術者がいる事務所へ伝送し判定する不燃気筒判定システムの構築を目指している。本論文では前報で用いたエンジンと同型のエン

図 12 実機 I における確率 P の積の相対強度

図 13 実機 II における確率 P の積の相対強度

ジンを搭載した2台の実機に対し、同様の実験および解析に加え、加速度波形のウェーブレット解析を行い、次の点を明らかにした。

1) 測定波形のFFT解析、ウェーブレット解析を行い、エンジンを車両に搭載した実機の状態の計測であっても、エンジン燃焼室側面に取り付けた加速度計から得られる振動波形成分はベンチテスト状態の計測による振動波形成分と変化がないことを確認した。

2) ディーゼルエンジンには電氣的な点火信号はないが、加速度波形をデータ列の任意の位置から連続ウェーブレット変換し変換値を時間一周波数マップ上に表示することで、マップ上の縦縞模様から各気筒の燃焼時間帯を特定できる。

3) ウェーブレット解析法を用いた不燃気筒の判定法は統計的な判定ではないため、燃焼状態のパラツキにより判定の正確さが多少失われるという短所が存在する。しかし、rms値の統計解析による方法と比べ、解析波形の時間区切りがあいまいであっても解析が行え、視覚的に不燃気筒を判定できる長所があるため、不燃気筒の判定に併用すべき有用な手段の一つといえる。

4) rms値の統計的解析法により、エンジンを車両に搭載した実機の状態であっても、またエンジンの劣化程度が異なっても、全12気筒すべての不燃状態を判定できることを明らかにした。

引用文献

芦野隆一・山本鎮男(1997): ウェーブレット解析(誕生・発展・応用), 共立出版, p. 124-196

チャールズ K. チェウイ著, 桜井 明・新井 勉共訳(1994): ウェーブレット入門, 東京電機大学出版局, p. 1-98

伊与木善・山口政房(1997): 建設機械の整備上, ユーザーに望むこと, 建設機械, 7月, p. 11-17

川村洋平・氏平増之・樋口澄志・中村祥一・駒崎征明・伊藤史人(2001): 多気筒ディーゼルエンジンの不燃気筒の判定に関する研究-加速度波形のrms値を用いた場合-, 資源と素材, Vol. 117, No. 6, p. 485-493

川村洋平・氏平増之・樋口澄志・桐本賢太・駒崎征明・伊藤史人(2001): Wavelet解析を用いた建設機械エンジンの異常診断に関する研究, 土木学会北海道支部論文報告集, No. 57(A), p. 42-45

菊池久和(1992): 異常燃焼のウェーブレット解析, 数理科学, No. 354, p. 44-51

金泰九・清水久二(1997): ウェーブレット変換を用いた歯車の異常診断, 安全工学, Vol. 36, No. 5, p. 289-295

増田 新・山本鎮男・曾根 彰(1998): ウェーブレット変換を用いた時系列信号のディコンボリューション(ウェーブレットパケットおよびしきい値処理の導入と最適化ウェーブレットの生成), 日本機械学会論文集(C編), Vol. 64, No. 621, p. 104-111

宮下直也・黒木秀雄(1994): 自動車用ディーゼルエンジン, 山海堂, p. 196-214

中村祥一(1997): 海外工事における建設機械の管理, 建設機械, 7月, p. 35-39

仁木正明(1997): 建設機械の整備上ユーザーに望むこと, 建設機械, 7月, p. 18-23

大久保義雄(1979): 燃料噴射装置入門, 山海堂, p. 143-286

榎原 進(1995): ウェーブレットビギナーズガイド, 東京電機大学出版局, p. 1-28

鈴木政治・細谷哲也・中村和夫・曾根康友(1994): 油中摩耗粉分析によるディーゼルエンジンの故障診断, 鉄道総研報告, Vol. 8, No. 11, p. 11-16

鈴木政治・細谷哲也・中村和夫・曾根康友(1996): 油中摩耗粉分析法によるディーゼルエンジンの異物混入故障の診断, 鉄道総研報告, Vol. 10, No. 8, p. 17-22

土屋雅弘・高木亨之(1998): 回転機械の振動音響診断技術(ウェーブレット変換による回転機械の故障診断), 日本機械学会論文集(C編), Vol. 64, No. 618, p. 85-92

吉田 彰・大上祐司・木脇祐二(1998): ウェーブレット変換による歯車動的性能の評価, 日本機械学会論文集(C編), Vol. 64, No. 618, p. 318-326

吉長重樹・岩井善郎・本田知己・鈴木 拓(1998): 潤滑油中の摩耗粉のリアルタイム形状解析としゅう動面劣化診断への応用, 日本機械学会論文集(C編), Vol. 64, No. 618, p. 282-288