

大型ダンプトラックのディーゼルエンジンの異常診断に関する研究

Study on the Diagnosis of Diesel Engine for Haul Trucks

北海道大学工学研究科

○学生会員 川村洋平

北海道大学工学研究科

正会員 氏平増之

北海道大学工学研究科

樋口澄志

九州工業大学情報工学部

桐本賢太

(株) エヌ・ティ・ティドコモ北海道 正会員 駒崎証明

(株) エヌ・ティ・ティドコモ北海道 伊藤史人

1. はじめに

作業現場において、ダンプトラックや油圧ショベルといった大型建設機械のエンジンに不燃の気筒が発生した場合、オイル循環部を開いての検査・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。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箇所数と開放時間を最小限に抑える必要がある。現在、簡易で確実かつ迅速に不燃気筒を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、ベンチテストの状態に設置されたエンジンに対しては、エンジンブロックの2箇所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¹⁾。また、ウェーブレット解析法を用い、不燃気筒の判定を視覚的にも判定ができる可能性を示している²⁾。さらに、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。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。ここではベンチテストで用いたエンジンと同型のエンジンを搭載した実機に対し、前報¹⁾と同様の実験及び解析を行った。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、違いを述べると共に、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ったことを述べる。

2. 実験方法

本実験はエンジンが車両に搭載された実機の状態で行った。図-1に実験装置の概念図を示す。本実験ではベンチテストによる実験に用いたV型12気筒ディーゼルターボエン

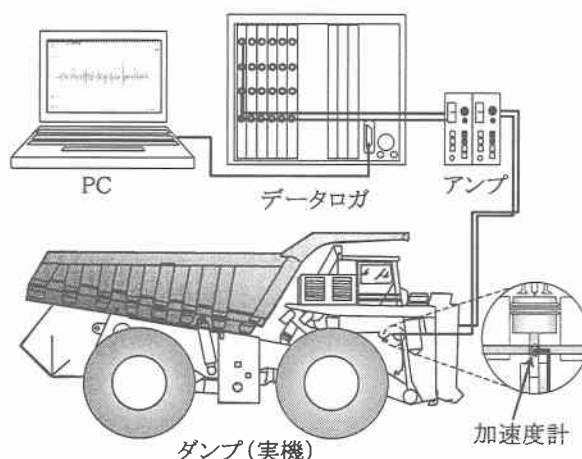


図-1 実験装置の概念図

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)を使用した。表-1に使用ダンプトラックの諸元を示す。図-2に実機の個所別修理・故障度数のヒストグラムを示す。

表-1 使用したダンプトラックの仕様(CAT-773B)

全	装	備	重	量	38,850kg
全			長		9,120mm
全			幅		4,065mm
全			高		4,230mm
エンジン	型	式	CAT-3412		
	定	格	出	力	659ps (2000rpm)

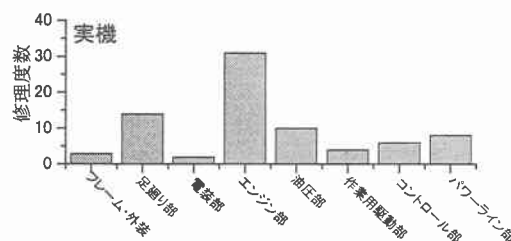


図-2 使用したダンプトラックの個所別修理・故障度数

実機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1万7千時間使用した個体である。図-2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・故障では、オイル循環部への燃料

混入や噴射ノズルの目詰まり等が挙げられた。実験ではエンジン表面の燃焼室側面の2箇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気筒ずつ不燃気筒にし振動測定を行った。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15mm φ×27mm、可測範囲±1470m/s²)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。各シリンダの燃焼順序は1-4-9-8-5-2-11-10-3-6-7-12となっている。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ーに取り込み、パーソ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-3に本研究で計測した加速度波形を示す。図-3に示す2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である。図-3(A)はベンチテスト、同図(B)は実機の加速度波形を示している。どちらも横軸は時間(s)、縦軸は加速度(m/s²)である。エンジン回転数はベンチテスト状態では約1000rpm、実機では約700rpmである。図-3からどの波形も200m/s²を超える大きな振幅が確認できる。このスパイク状の振幅は加速度計を7番気筒燃焼室側面に取り付けていることから、7番気筒の燃焼振動を捉えているとみなせる。図の時間領域による比較では、ベンチテスト状態と実機状態の違いは見られない。

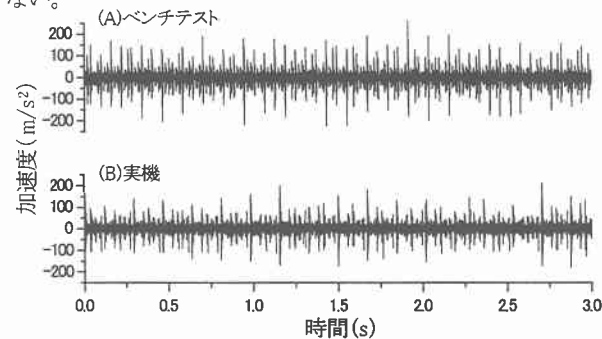


図-3 測定された加速度波形例

図-4は図-3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-4(A)はベンチテスト、同図(B)は実機の加速度波形のフーリエスペクトルである。2つの場合とも、卓越周波数は約3.3kHz付近にみられる。この周波数成分は燃焼衝撃で直接シリンダ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1kHz～2kHzのスペクトル密度に若干の違いが見られるが、測定された加速度波形の周波数

成分はどちらも約1kHz～6kHzの範囲内に収まっており、大きな違いはみられない。

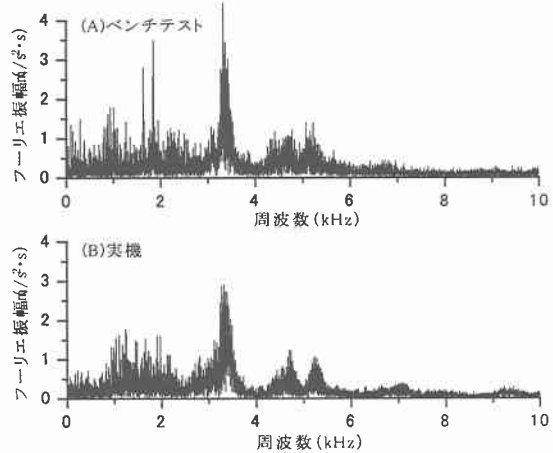


図-4 加速度波形のフーリエスペクトル

上記のように、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はベンチテスト状態の計測による振動波形と変化がないことを確認した。

4. 連続ウェーブレット解析

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(マザーウェーブレット)を重ね合わせ、両者の積を求める時間一周波数解析方法である。本解析ではマザーウェーブレットとしてガボール($\sigma=8$)を用いた。マザーウェーブレットを関数 $\phi(x)$ で表すことにする。ガボール($\sigma=8$)は(1)式で表される。

$$\psi(x) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{\sigma^2}} e^{-jx} \quad (1)$$

測定した波形にマザーウェーブレットを乗じた場合には、測定波形の一部だけが切り出されたことになり、切り出された局所のウェーブレット変換値が算出される。切り出す部分を作るには、ウェーブレット $\phi(x)$ の変数 x を $(t-b)/a$ と置き換える。ここで a はスケールパラメータ、 b はシフトパラメータである。時間関数 $F(t)$ のウェーブレット変換 $\hat{F}(a, b)$ はマザーウェーブレット $\phi((t-b)/a)$ を用いて式(2)のように定義されている。

$$\hat{F}(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) F(t) dt \quad (2)$$

この積分値は、概念的には信号の“振幅の大きさ”を表している。 b (時間)を横軸、 $1/2\pi a$ (周波数)を縦軸とする信号平面上に積分値をプロットすることで、時間一周波数解析が可能となる。つまり(2)式のウェーブレット変換値を信号平面上へ幾何学的に表示ことができ、視覚的に波形の特徴を評価できる。

実際には有限な離散データを用いて数値計算を行うため、

(2)式を離散化する必要がある。離散化されたウェーブレット変換 W_n は (1)式を用いた場合、複素フーリエ変換と同様に実数部 $\text{Re}[W_n]$ と虚数部 $\text{Im}[W_n]$ とにわけて求められる。(3)式が $\text{Re}[W_n]$ であり、(4)が $\text{Im}[W_n]$ の式である。

$$\text{Re}[W_n] = \sum_{i=0}^{2k} \frac{1}{\sqrt{|a|}} \frac{1}{2\sqrt{\pi}\sigma} e^{-\frac{(i-k)^2 \Delta t^2}{\sigma^2 a^2}} \cdot \cos\left(\frac{(i-k)\Delta t}{a}\right) \cdot F\{n + (i-k)\Delta t\} \cdot \Delta t \quad (3)$$

$$\text{Im}[W_n] = \sum_{i=0}^{2k} -\frac{1}{\sqrt{|a|}} \frac{1}{2\sqrt{\pi}\sigma} e^{-\frac{(i-k)^2 \Delta t^2}{\sigma^2 a^2}} \cdot \sin\left(\frac{(i-k)\Delta t}{a}\right) \cdot F\{n + (i-k)\Delta t\} \cdot \Delta t \quad (4)$$

ウェーブレット変換値 W_n は $\text{Re}[W_n]$ と $\text{Im}[W_n]$ を用いて下の(5)式により求められる。

$$|W_n| = \sqrt{(\text{Re}[W_n])^2 + (\text{Im}[W_n])^2} \quad (5)$$

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一周波数マップとして出力する(以後、単に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。明るい部分はその周波数成分の振幅が大きく現れていることを示している。図-5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)はそれぞれ正常状態のベンチテスト、実機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を示している。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部分がみられている。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が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

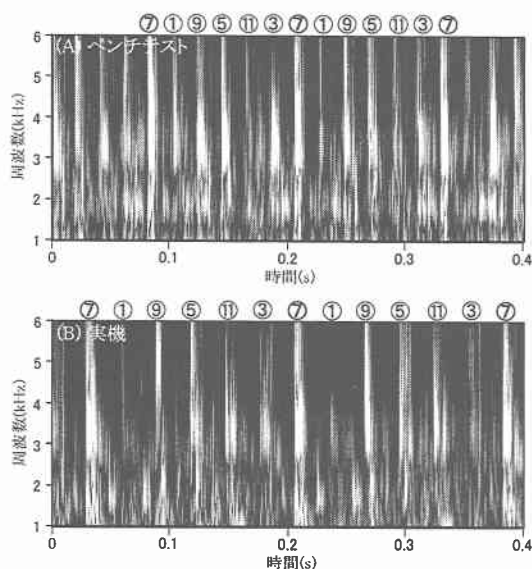


図-5 正常状態における各機械の時間一周波数マップ (7番気筒燃焼室側面)

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部分がみられる。実機状態である図-5(B)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 3kHz~4kHz に特に高明度の部分が集中している。

4.3 連続ウェーブレット変換による不燃気筒の判定

図-6 は実機の加速度波形の時間一周波数マップである(加速度計は 7 番気筒燃焼室側面)。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。周波数軸方向に色の明瞭な濃淡がみられる。図-6(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部分がみられる。図-6(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表れており不燃気筒発生を判定できることを示している。以上のように、エンジンが車両に搭載された状態である実機であっても加速度波形に対し連続ウェーブレット解析を行い、得られた時間一周波数マップから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明度の高い部分が存在しているため、不燃気筒の判定は複雑となる。

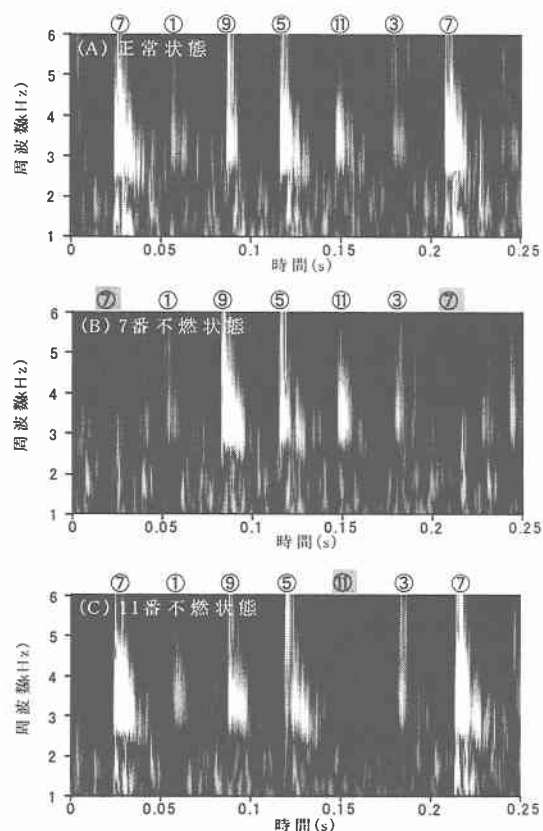


図-6 実機で計測した加速度波形のウェーブレット解析結果(7番気筒燃焼室側面)

5. rms 値を用いた統計的解析による不燃気筒の判定

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(6)式にしたがった。

$$rms \text{ 値} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{n=1}^m a_n^2} \quad (6)$$

ただし、 a_n : 時間関数(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気筒～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とで他の気筒の rms 値が減少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前報¹⁾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。この重なり合う確率を P とし、100 倍しパーセントで表示する。各気筒が不燃状態になったときの P を測定点6番気筒と7番気筒についてそれぞれ算出し、お互いの対応する P の積をとった。これにより6番気筒と7番気筒の測定データを同時に扱い、不燃気筒の判定することが可能となる。

積をとることによって得られた値を P^2 とし、(7)式に従って (dB) 表示して描いたのが図-7,8である。図-7はベンチテストの結果、図-8は実機での結果を示している。このように P の積の相対強度をとることで、不燃気筒部の窪みが相対的に強調され明瞭になっている。

$$(P^2 \text{ の相対強度}) = 20 \log_{10} (P^2 / P_{100}^2) (\text{dB}) \quad (7)$$

ただし、

P^2 : 6番気筒および7番気筒の正常状態と不燃状態の rms 値の分布が重なり合う確率(%) P の積

P_{100}^2 : 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時の2つの分布が重なり合う確率(100%)の2乗値

図-7,8ともに不燃気筒のない図左最上段では、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時間帯での確率の相対強度が明らかに小さくなっており、不燃気筒を判定することが可能である。図-7,8より相対強度の特徴をみると、エンジンの程度が悪くなると不燃状態ではない気筒のパラツキは大きくなり、また不燃状態の気筒の窪みは大きくなると言える。この rms 値による統計解析方法により、実機状態であっても12気筒すべての不燃状態を判定するに至った。

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。工学的には2重、3重の確認が必要と考えられるため、著者等は rms 値の統計解析による方法とウェーブレット解析法を2重に行うことが望ましいと考えている。

ベンチテスト

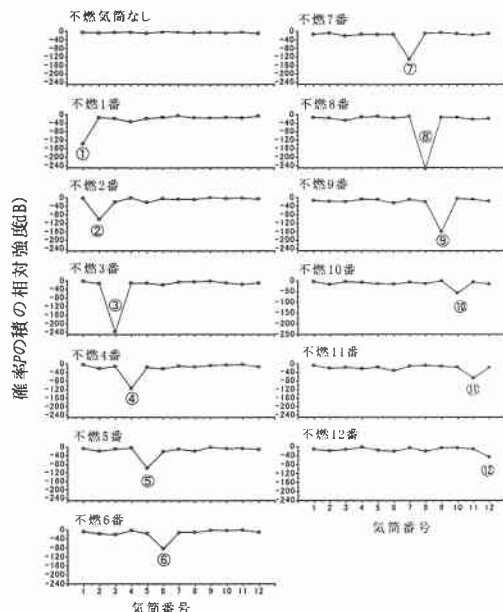


図-7 ベンチテストにおける確率 P の積の相対強度

実機

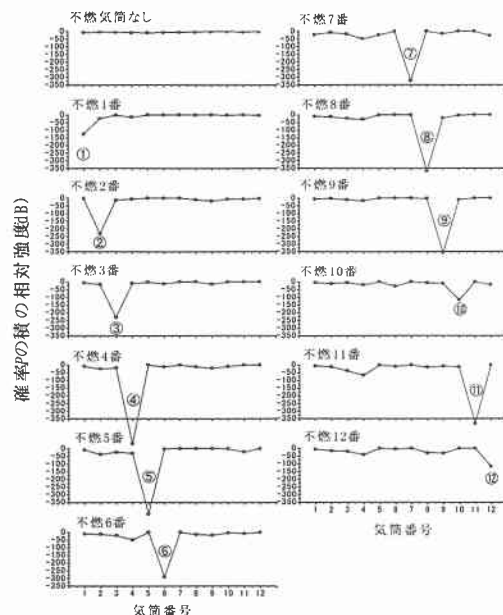


図-8 実機における確率 P の積の相対強度

6. まとめ

- (1) rms 値の統計解析により、実機状態においても全12気筒すべての不燃状態を判定することができた。
- (2) 実機状態であってもウェーブレット変換を用いて時間一周波数解析を行うことによって不燃気筒の判定を視覚的に行える可能性がある。

参考文献

- 1) 川村洋平・氏平増之・樋口澄志・中村祥一・駒崎証明・伊藤史人: 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.95-103, (2001)
- 2) 川村洋平・氏平増之・樋口澄志・桐本賢太・駒崎証明・伊藤史人: 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, 第57号, p.42-45, (2001)