

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

Study on the Diagnosis of Diesel Engine for Construction Machinery using Wavelet Analysis

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 駒崎征明

(株) エヌ・ティ・ティドコモ北海道 正会員 伊藤史人

1. はじめに

土木建設現場においては、全仕事量に対する建設機械に行わせる仕事量の比重が大きい。この意味では建設機械の効率的な利用が必要であり、かつ故障による作業の中断は避けなければならない。建設機械が深刻な故障を起こす前に異常を検知し修理することと迅速な修理が重要である。重機用多気筒エンジンについてみた場合、もし不燃気筒が発生したとき、これを判定できる簡易で確実な実用的方法は確立されていない。不燃気筒が発生した場合、それがどの気筒であるかを簡易、確実、迅速に判定する技術の開発が望まれている。

本研究では、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できるかどうかを調べた。

波形解析では自己相関分析によりクランクシャフト回転数を求め、各気筒の正確な燃焼時間帯を算出した。その区間の rms 値を統計的に処理することで、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明らかにした。

また、本文では Wavelet 解析を用いた不燃気筒の判定も試みている。Wavelet 解析は信号を時間と周波数の 2 つの領域で解析する手法であり、時間分解能が高いことから異常信号の検出などに利用される。Wavelet 変換による時間-周波数表示により、ほとんどの気筒の不燃状態を判別できたことを述べ、Wavelet 変換の振動波形解析への有効性を示す。

2. 実験方法

本実験では中大型建設機械に対し多く採用されている V 型 12 気筒ディーゼルターボエンジン (CAT-3412 型) を使用した。使用エンジンはオーバーホールを行った直後の状態である。表-1 にエンジンの諸元を示す。実験用エンジンの構造は 65° の角度で 6 気筒ずつ 12 気筒が抱き合わされた構造になっている。

実験ではエンジン表面の燃焼室側面に加速度計を取り付けることにより振動測定を行う。図-1 に本実験装置の概念図を示す。エンジンはベンチテストの状態に設置した。日常の定時的な測定でも、また重機オペレータが異常を感知した時でも、アイドル状態でも振動を測定するという想定で、無負荷、回転数約 1000rpm の実験条件とした。この状態でエンジンを起動し、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。研究の目的からすると、噴射ノズルを一部目詰まりさせ燃料が燃焼室に残留する状態の不燃気筒を発生させることが理想的で

表-1 使用エンジンの緒元

重量	2587kg
前後	1800mm
幅	1000mm
高さ	1600mm
シリンダの数および配列	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

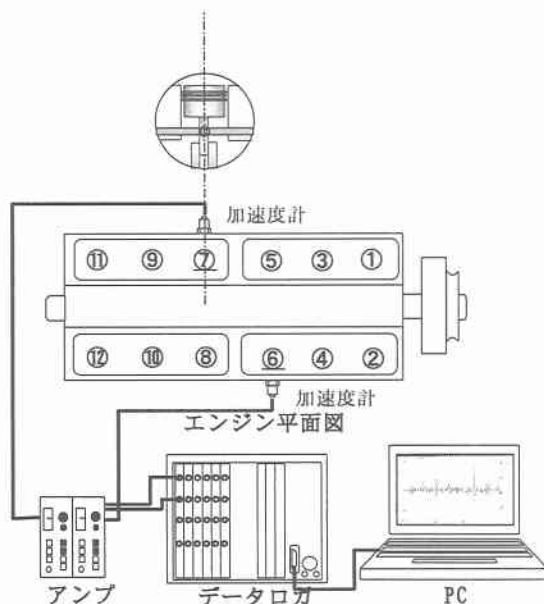


図-1 実験装置の概念図

あるがエンジンを損傷させる恐れがあるため、各気筒の不燃状態は噴射ポンプから高压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。なお、実際上は初期段階で同時に2気筒以上が不燃状態になることはほとんどないため、1気筒に対する判定が重要である。加速度計はTEAC社製708LF（外形寸法15mmφ×27mm、可測範囲±150g、周波数特性40kHz）を使用した。エンジンに取り付ける加速度計の使用個数は、計測の簡易性からいえば1個であることが理想的である。しかし、1個で12気筒分の波形を判別することは困難と予想し、最少使用数を2個とした。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サンプリング周波数20kHzでデータロガに取り込み、パーソナルコンピュータ上で波形解析を行った。

3. rms 値の統計的解析

3.1 各燃焼時間帯の rms 値の算出

測定波形から12気筒すべてが燃焼する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値を算出した。rms値の計算は(1)式にしたがった。

$$rms \text{ 値} = \sqrt{\frac{1}{m\Delta T} \sum_{n=1}^m a^2(n\Delta t)} \quad (1)$$

ただし、

$a(n\Delta t)$: 時刻 $n\Delta t$ での加速度
 n : 時刻番号

ΔT : データのサンプリング間隔

図-2にrms値による数値化を行うための波形例を示す。図-2(A)および(B)はそれぞれ不燃気筒のない正常状態および4番気筒を不燃状態にした6番気筒での振動波形である。図-2(B)においては、不燃状態の4番気筒燃焼時間帯の振幅は同図(A)の同じ区間の振幅に比べ小さくなっている。

3.2 rms 値に関する分布が重なる確率

rms値の分布が重なり合う確率の計算は3.1で求めたrms値を各燃焼時間帯ごとに10個ずつ求めて行った。正常および不燃状態のそれぞれの平均値による判定においては、全12気筒中10気筒の不燃状態を判定できた。更に不燃気筒判定の精度を上げるため、10個ずつのrms値の平均値および標準偏差から正規分布を求め、正常および不燃状態の2つの分布が重なる確率を尺度として不燃

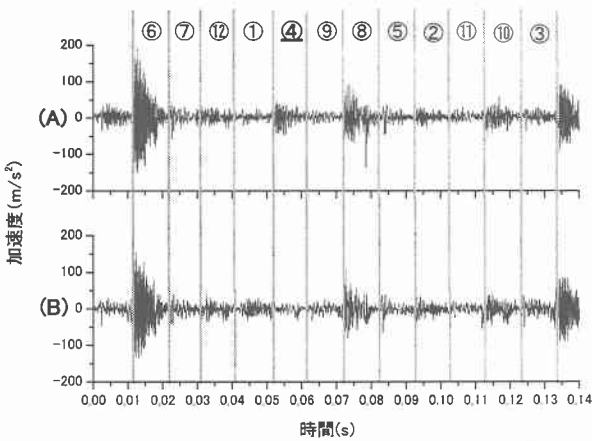


図-2 rms 値による数値化を行うための波形例
 気筒の判定を行うこととした。

図-3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、 $(A \cap B) \cup (B \cap A^c)$ の面積 R は次の(2)式で求められる。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。

A, B どちらの面積も1なので、共通部分 $A \cap B$ の面積 P

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

$$\approx \sum_{k=1}^m |g(x_k) - h(x_k)| \Delta x \quad (2')$$

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、パーセントで表示している。

この P は不燃状態になった気筒における加速度波形の振幅の減少率が大きいほど値が小さくなる。

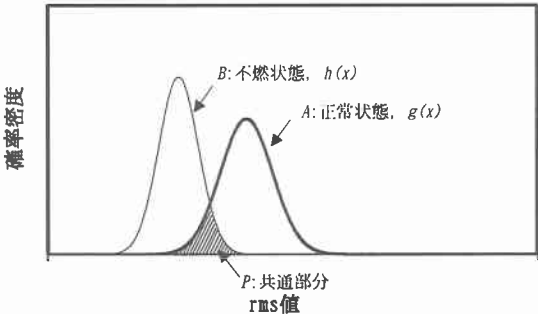


図-3 rms 値の正規分布曲線の概念図

3.3 不燃気筒の統計的判定結果

ここでは、気筒の正常、不燃状態の判断を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。

3.2の手法により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、(3) 式に従って (dB) 表示して描いたのが図-4 である。(3) 式における比較の基準には P_{100}^2 を用いている。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。同図の1番気筒と12番気筒の左右には不燃気筒が無い場合の平均値-5dB を与え、データ間をスプライン近似して滑らかに描いている。

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

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-4 ではかなり厳しい-40dB (実際の値では1/100) に判定ラインを設けているが、この付近に判定レベルを設定することで過誤のない確実な判定が可能といえる。この rms 値の統計的解析により、全12気筒すべての不燃状態を判定することができた。

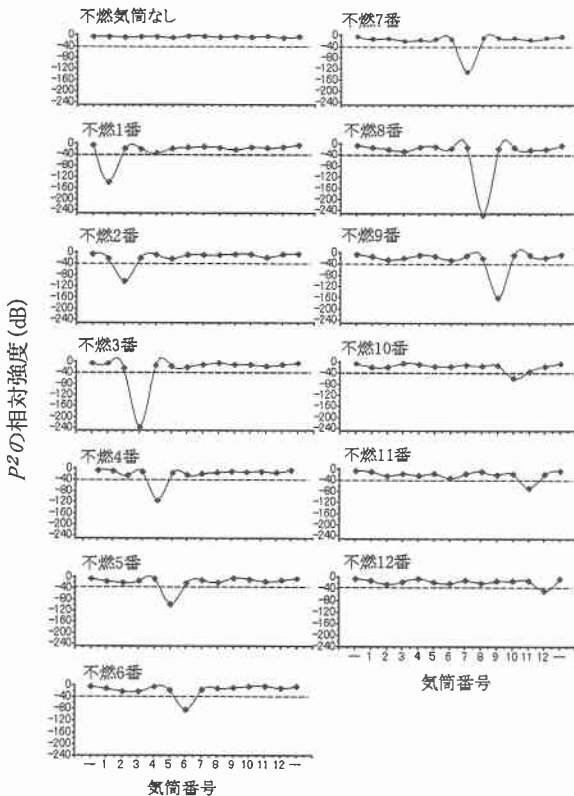


図-4 P^2 の相対強度

4. Wavelet 解析による不燃気筒の判定

4.1 Wavelet 変換

Wavelet とは局在した波の総称であり、信号を時間と

周波数の両面から同時にとらえる時間一周波数解析で信号の部分を取り出す単位となるものである。本研究ではマザーWavelet $\psi(x)$ として Gabor-Wavelet を用いる。Gabor-Wavelet は連続 Wavelet 変換を用いて時間一周波数解析を行う場合に適した関数であり、次式(4)に示す。

$$\psi(x) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} e^{-jx} \quad (4)$$

図-5 に本解析で用いた $\sigma=8$ の Gabor-Wavelet の形状を示す。このとき、関数 $f(t)$ の Wavelet 変換は式(5)、(6)のように示される。

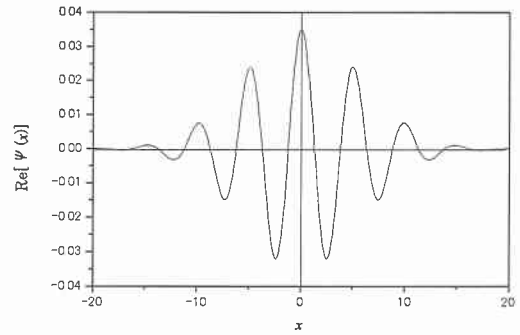


図-5 $\sigma=8$ のGabor-Wavelet

$$\hat{f}(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) f(t) dt \quad (5)$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{|a|}} \frac{1}{2\sqrt{\pi}\sigma} e^{-\frac{(t-b)^2}{2\sigma^2 a^2}} e^{-j\frac{t-b}{a}} f(t) dt \quad (6)$$

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。 a に対応して $\psi(t)$ の幅は a 倍されることから $1/a$ は周波数を表しており、 $1/a=2\pi f=\omega$ である。

実際には有限な離散データを用いて解析するため、(6) 式を計算可能な状態に書き換える必要がある。Wavelet 変換により得られる値 W_n を複素フーリエ変換と同様に実数部 $\text{Re}[W_n]$ と虚数部 $\text{Im}[W_n]$ とにわけて求める。(7) 式は $\text{Re}[W_n]$ を求めるための式であり、(8) は $\text{Im}[W_n]$ の式を表している。

$$\text{Re}[W_n] = \sum_{i=0}^{2k} \frac{1}{\sqrt{|a|}} \frac{1}{2\sqrt{\pi}\sigma} e^{-\frac{(i-k)^2 \Delta t^2}{2\sigma^2 a^2}} \cdot \cos\left(\frac{(i-k)\Delta t}{a}\right) \cdot f\{(n+(i-k))\Delta t\} \cdot \Delta t \quad (7)$$

$$\text{Im}[W_n] = \sum_{i=0}^{2k} -\frac{1}{\sqrt{|a|}} \frac{1}{2\sqrt{\pi}\sigma} e^{-\frac{(i-k)^2 \Delta t^2}{2\sigma^2 a^2}} \cdot \sin\left(\frac{(i-k)\Delta t}{a}\right) \cdot f\{(n+(i-k))\Delta t\} \cdot \Delta t \quad (8)$$

ここで、 f : 周波数、 n : 解析波形のデータ番号、 Δt : 解析波形の時間サンプリング間隔、 $a: 1/(2\pi f)$

実際に求める値 W_n は $\text{Re}[W_n]$ と $\text{Im}[W_n]$ を用いて以下の

式(9)により求められる。

$$|W_n| = \sqrt{(\text{Re}[W_n])^2 + (\text{Im}[W_n])^2} \tag{9}$$

4.2 フーリエ変換による周波数解析結果

図-6 は振動波形のフーリエ解析例として図-2 の振動波形に FFT 処理を施したものを示している。同図(A)は測定点 6 番気筒で不燃気筒のない正常状態のフーリエスペクトル、同図(B)は測定点 6 番気筒で 4 番気筒を不燃状態とした時のフーリエスペクトルをそれぞれ示している。どちら図も 3300Hz 付近に卓越周波数をもっていることがわかる。また、4 番気筒が不燃状態になると 3300Hz 付近の周波数成分が減少していることがわかる。しかし、振動波形のフーリエ解析では、不燃気筒の存在は確認できるが、どの気筒が不燃状態にあるかは判別できない。よって、周波数と同時に時間もとらえる時間一周波数解析が重要になると考えられる。

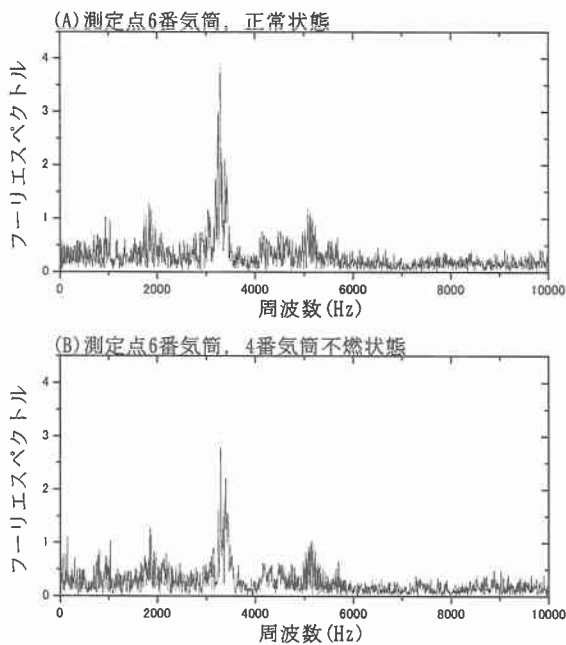


図-6 振動波形のフーリエスペクトル

4.3 連続 Wavelet 変換による時間一周波数解析結果

図-7 に 6 番気筒で測定された振動波形の連続 Wavelet 変換による時間一周波数解析の結果を示す。横軸に時間、縦軸に周波数を取り、輝度値に信号に含まれる周波数成分の大きさを表わす。明るい部分はその周波数成分をもつ振動が強く現れていることを示している。図-7(A)は不燃気筒のない正常状態の振動波形の時間一周波数マップであり、同図(B)、(C)はそれぞれ 6 番気筒、4 番気筒を不燃状態にした時の振動波形の時間一周波数マップである。今の場合、6 番気筒と 7 番気筒で加速度を同時測定しているため、6 番気筒の振動波形からはエンジンの構

造上、偶数番気筒の不燃状態を判定できればよい。図の上の番号は燃焼時間帯にある気筒番号を示している。図-7(A)から偶数番気筒の燃焼時間帯に周期的に明るい部分が現れており、各気筒で正常な燃焼が起きていることがわかる。図-7(A)と同図(B)および(C)を比較すると不燃状態にある気筒の燃焼時間帯が暗く表示されており、不燃状態と判定することができる。

以上のように、振動波形に対し Wavelet 変換を用いて時間一周波数解析を行うことで不燃気筒の判定を容易に行うことができる可能性がある。

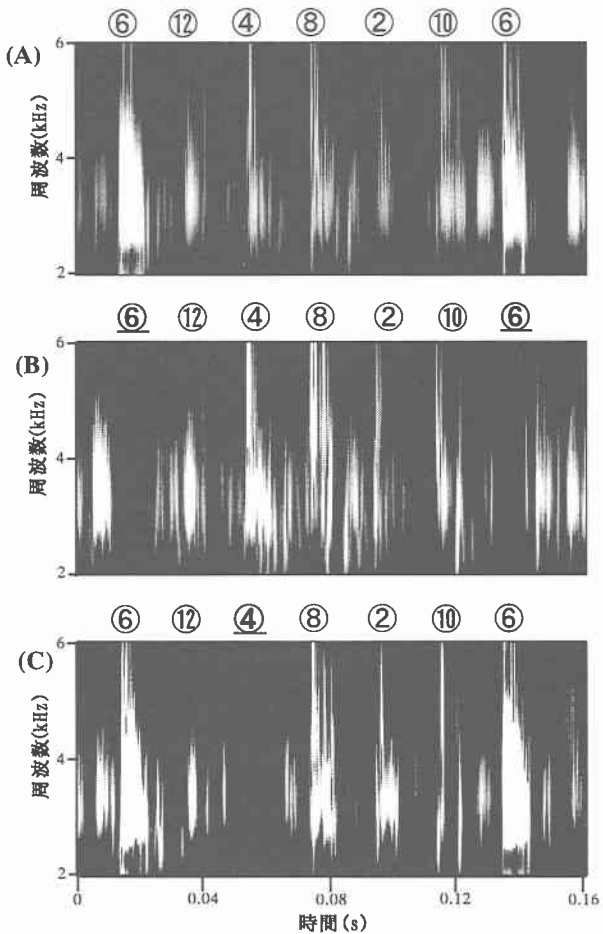


図-7 振動波形の Wavelet 変換例

5. まとめ

- (1) rms 値の統計的解析により、全 12 気筒すべての不燃状態を判定することができた。
- (2) フーリエ解析により不燃気筒の存在を知ることが可能である。
- (3) Wavelet 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容易に行える可能性がある。

参考文献

1) 榑原 進:ウェーブレットビギナーズガイド,東京電気出版局, (1995)