

# 重機用エンジンの失火気筒検出に対する ウェーブレット解析の適用

川村洋平<sup>1</sup>・氏平増之<sup>2</sup>・青島伸治<sup>3</sup>・伊藤史人<sup>4</sup>・アクメトフ ダウレン<sup>5</sup>

<sup>1</sup>工博 筑波大学講師 第3学群機能工学系 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1)

E-mail:kawamura@kz.tsukuba.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 工博 北海道大学大学院助教授 工学研究科 (〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目)

<sup>3</sup>工博 筑波大学教授 第3学群機能工学系 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1)

<sup>4</sup>(株) エヌ・テイ・テイ・ドコモ北海道 (〒060-0002 札幌市中央区北2条西1丁目)

<sup>5</sup>工博 (株) エヌ・テイ・テイ・ドコモ北海道 (〒060-0002 札幌市中央区北2条西1丁目)

ダンプトラックやパワーショベルといった重機は土木建設現場や資源開発現場において不可欠な存在である。現在、簡易で確実かつ迅速に失火気筒を判定できる実用的判定法の開発が望まれている。本研究ではエンジンブロックの2箇所から計測した加速度波形をウェーブレット解析することにより簡易、確実、迅速に失火気筒を判定できるかどうか調べた。実験の結果、エンジンをベンチに設置した基礎実験により人為的に発生させた12気筒すべての失火状態を時間一周波数マップから読み取ることが可能となっている。実際に不調が認められている実機の実条件下でのフィールド実験においても、その失火気筒の判定が可能であったことを示す。

*Key Words : construction machinery, diesel engine, diagnosis, misfiring cylinder, wavelet analysis*

## 1. はじめに

土木建設機械や資源開発機械用ディーゼルエンジンにおいて、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ー間で摩擦を引き起こし、オイルパンへの燃料の漏れやオイル粘度の低下を招く<sup>1)</sup>。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<sup>2)・3)</sup>。作業現場において、エンジンに失火している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<sup>4)</sup>。これを最小に抑えるには、失火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。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<sup>5)・6)</sup>。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、経時変化を追い異常箇所を判定する。この方法は有効である。ただし、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。

この要望に応えるべく、著者等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、失火気筒を判定するシステムの構築を進めている。

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、エンジンブロックの2箇所ま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失火気筒の判定が可能であることを確認している<sup>7)・8)</sup>。本研究では、エンジンをベンチに設置した状態での基礎実験およびエンジンを車両に搭載した実機による計測・データ伝送を含めたシステム全体の実験を行い、得られた加速度波形のウェーブレット解析を用いて多気筒ディーゼルエンジンの失火気筒を判定できるかどうかを調べた。ウェーブレット解析は、処理時間が短く、視覚的に概要を把握できるので、有用な方法のひとつとして可能性がある。

## 2. 基礎実験の実験方法

図-1に実験装置の概略図を示す。表-1にエンジンの諸元および測定機器の仕様を示す。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（キャタピラー社製V3412型）はベンチテストの状態に設置した。アイドリング状態で振動を測定するという想定で、無負荷、回転数約1,000rpmを実験条件とした。この状態でエンジンを起動し、失火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気筒ずつ失火気筒にし振動測定を行った。各気筒の失火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/s<sup>2</sup>、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/s<sup>2</sup>)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100kHzで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。

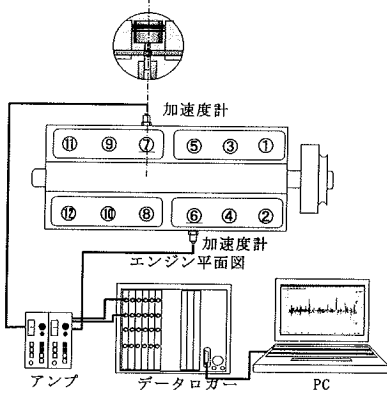


図-1 実験装置の概略図

表-1 エンジンの諸元および測定機器の仕様

重量	2,587 kgw
前後	1,800 mm
全幅	1,000 mm
全高	1,600 mm
シリンダの数および配列	65° V-12
総排気量	27,000 cc
燃料噴射方式	直接噴射
加速度計	TEAC: 708LF
測定点	出力電圧: 1.02 mV/(m/s <sup>2</sup> )
アンプ増幅率	6, 7番気筒燃焼室側面
サンプリング周波数	10倍
エンジン回転数	100 kHz
	1,000 rpm

## 3. 連続ウェーブレット解析法

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<sup>9)</sup>。これにより、時間一周波数解析を行うことができる。具体的に測定した振動波形を重ね合わせて積を求める局在波形はマザーウェーブレットと呼ばれている<sup>10)</sup>。図-2に本実験にもちいたマザーウェーブレット（ガボール、 $\sigma=8$ ）の概念図を示す。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。マザーウェーブレットを関数 $\psi(x)$ で表すことにする。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 $\psi(x)$ の変数 $x$ を $(t-b)/a$ と置き換える。これにより、関数 $\psi(x)$ は $\psi((t-b)/a)$ のように表される。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。図-2の波形に示すようにマザーウェーブレットは周期関数であるため、 $\psi((t-b)/a)$ の $t-b$ は時間の単位をもち、 $1/a$ は角速度の単位を持つ。したがって、 $1/a=2\pi f=\omega$ であり、 $\psi(x)$ の時間幅が $a$ 倍される。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 $\psi((t-b)/a)$ を用いて式(1)のように定義されている<sup>11), 12)</sup>。ただし、\*は複素共役を表す。

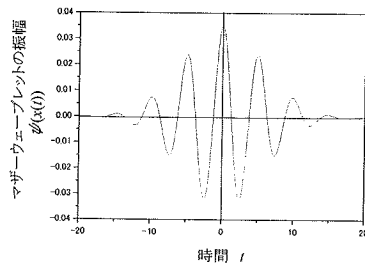


図-2 マザーウェーブレットの概念図

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

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、式(1)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 $W_n$ は式(2)で示される。ウェーブレットは局在する波であるため、 $-\infty$ から $+\infty$ まで積分を行う必要がない。よってウェーブレットを構成できるだけの十分な積分区間を与えることにより $W_n$ を計算できる。

$$W_n = \sum_{i=0}^{2k} \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi^* \left( \frac{(i-k)\Delta t}{a} \right) F \{ (n+(i-k))\Delta t \} \Delta t \quad (2)$$

ここで、 $f$ : 周波数

$n$ : 解析波形のデータ番号

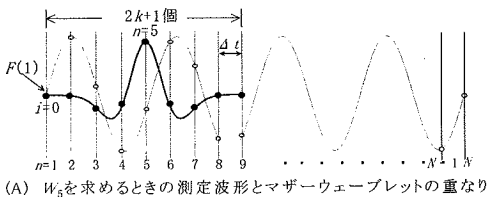
$i$ : 離散化されたマザーウェーブレットのデータ番号

$k$ :  $i=0 \sim 2k$  の中間のデータ番号 (マザーウェーブレットが最大振幅になるデータ番号)

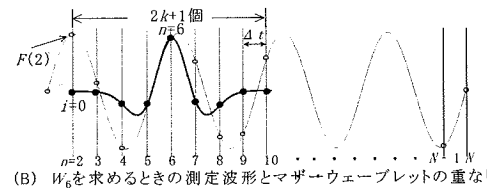
$\Delta t$ : 解析波形の時間サンプリング間隔

$a$ :  $1/(2\pi f)$

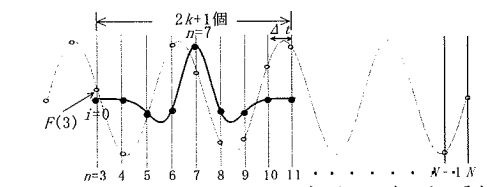
図-3 は  $W_n$  算出法の概念図を示している。同図(A)~(C)の  $n$  は測定波形を構成する数値データの番号である。 $i$  はマザーウェーブレットに与えているデータ番号である。3つの図中では、測定波形 ( $F(t)$ ) の代わりに余弦波を用いており、これを細線で描いてある。同図の太線はマザーウェーブレットである。ここでは簡単のため  $k=4$ ,  $\Delta t=1$  として表示している。図-3(A)で  $W_5$  を求めるには、同時刻の白丸と黒丸を掛け合せて  $2k+1$  の区間で加算する。 $W_5$  は  $n=5$  に対して与えられる値である。同図(B)の  $W_6$  はマザーウェーブレットを一刻みだけ時間軸に沿ってシフトし同様の乗算と加算を行い、計算値を  $n=6$  の点の値として与えたものである。同図(C)の  $W_7$  はさらにマザーウェーブレットを時間軸に沿い一刻みシフトして同様の計算を行い計算値を  $n=7$  の点に与えたものである。



(A)  $W_5$  を求めるときの測定波形とマザーウェーブレットの重なり



(B)  $W_6$  を求めるときの測定波形とマザーウェーブレットの重なり



(C)  $W_7$  を求めるときの測定波形とマザーウェーブレットの重なり

図-3 ウェーブレット変換値  $W_n$  の算出法概念図

このように、同時刻の白丸と黒丸を掛け合せて  $2k+1$  の区間で積算することにより、一つの  $W_n$  が求まる。続いてマザーウェーブレットを  $\Delta t$  平行移動して、次の変換値  $W_{n+1}$  を求める。特定周波数のマザーウェーブレットを用いて振動波形のウェーブレット変換  $W_{N-2k}$  ( $N$  は波形を構成する最後のデータ番号) を計算した後、マザーウェーブレットの周波数を変化させて同様の計算を行う。

現在、マザーウェーブレットには 10 種類以上の波形が提案されている<sup>13)</sup>。連続ウェーブレット変換に用いるマザーウェーブレットには代表的なものとしてメキシカンハットとガボールのマザーウェーブレットがある。一般に  $\sigma=8$  のときのガボールのマザーウェーブレットが信号周波数の探り出しに適していると言われている<sup>14),15)</sup>。以上のことから、本研究では加速度波形の連続ウェーブレット変換にマザーウェーブレットとしてガボール ( $\sigma=8$ ) のマザーウェーブレットを用いることとした。ガボール ( $\sigma=8$ ) のマザーウェーブレットは式(3)で表される。

$$\psi_G(x) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{\sigma^2}} e^{-jx} \quad (3)$$

式(3)を用いた場合、ウェーブレット変換値  $W_n$  は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。式(4)が  $\text{Re}[W_n]$  であり、(5)が  $\text{Im}[W_n]$  の式である。式(4)、(5)中の記号は式(2)で用いている記号と同様である。

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

$$\text{Im}[W_n] = \sum_{i=0}^{2k} -\frac{1}{\sqrt{|a|}} \frac{1}{2\sqrt{\pi}\sigma} e^{-\frac{(i-k)^2 \Delta t^2}{\sigma^2 a^2}} \cdot \sin\left(\frac{(i-k)\Delta t}{a}\right) \cdot F\{(n+(i-k))\Delta t\} \cdot \Delta t \quad (5)$$

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(6)式により求められる。

$$|W_n| = \sqrt{(\text{Re}[W_n])^2 + (\text{Im}[W_n])^2} \quad (6)$$

#### 4. 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る。図-4

(A) は失火気筒のない正常状態の、同図 (B) は 7 番気筒が失火状態のときの、同図 (C) は 11 番気筒が失火状態のとき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。図-4 (A) (C) の正常状態と 11 番気筒失火状態の波形では  $200 m/s^2$  を超える大きな振幅がみられた。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。同図 (B) の 7 番気筒が失火状態のときの加速度波形では他の 2 つの波形に比べ、大きい振幅の出現頻度が減少しており、同一の計測条件では、どこかエンジンに不具合が生じていることがわかる。図-4 のような波形を比較しただけでは失火気筒を判定するのは難しい。

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) は失火気筒のない正常状態の、同図 (B) は7番気筒を失火状態としたときの、同図 (C) は11番気筒を失火状態としたときのフーリエスペクトルである。3つの場合とも、測定された加速度波形の周波数成分は約1~6kHzの範囲内に収まっている。これまでの研究により、3.0~4.0kHz付近にみられる卓越部が失火気筒の発生に伴い減少することを確認している<sup>7),8)</sup>。この約1kHz幅に対し5章以降で連続ウェーブレット解析を行うこととする。また程度は異なるが約1.5~約2.5kHz、約4.5~約5.5kHzの帯域にもスペクトルのピークがみられることから、比較のために条件を合わせて(1kHz幅)解析帯域を定めた。図-5に示すように、本研究では、1.5~2.5kHzの帯域をバンド I、3.0~4.0kHzの帯域をバンド II、4.5~5.5kHzの帯域をバンド IIIと呼ぶことにする。

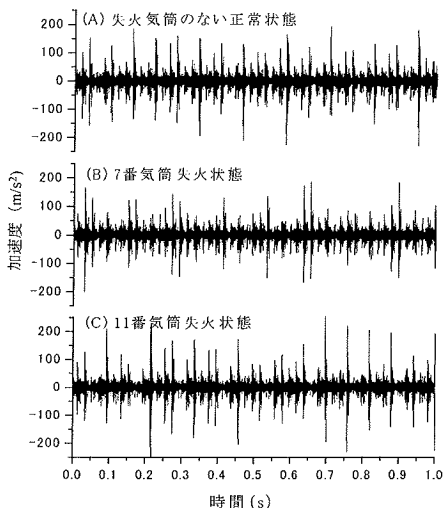


図-4 測定された加速度波形

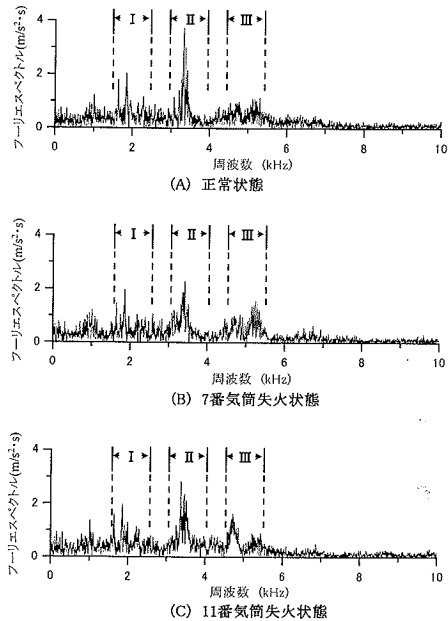


図-5 加速度波形のフーリエスペクトルとバンド分け

スペクトルが最も卓越している部分はバンド II の約 3.3kHz 付近にある。しかし、加速度波形のフーリエ解析では、失火気筒の存在は確認できるが、どの気筒が失火状態にあるかは判別できない。このため、周波数と同時に時間もとらえる時間-周波数解析を行うこととした。

## 5. 連続ウェーブレット変換による時間一周波数解析結果

前述したとおり、本解析波形の周波数成分は 1~6kHz の間に集中しているため、この周波数帯域の連続ウェーブレット変換を施し、時間一周波数解析を行った。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。

### (1) ウェーブレットと燃焼時間帯の対応関係

図-6 (A), (B) はそれぞれ加速度計を取り付けた 6 番気筒および 7 番気筒燃焼室側面の加速度波形に連続

ウェーブレット変換を施した結果の図である。解析のもとになる2つの加速度波形は同時に測定されている。加速度波形の自己相関分析によりエンジンの回転数(各気筒の燃焼周期)が算出できるため<sup>7)</sup>、加速度計取り付け気筒の燃焼時間帯がわかれば各気筒の燃焼時間帯を特定できる。今の場合、エンジンの燃焼順序と燃焼周期から7番気筒は6番気筒の燃焼から0.01s後に燃焼すると算定できる。当然、加速度計を取り付けている気筒の燃焼時間帯では他の気筒よりも振幅の大きい強い振動がみられるため、連続ウェーブレット変換を施すと強く明度の高い部分が現れる。図-6(A)の0.015sに強く明度の高い部分がみられ、その0.01s後の0.025sに同図(B)において同様の明度が高い部分がみられる。前者の明度の高い部分は6番気筒の燃焼、後者の明度の高い部分は7番気筒の燃焼に対応していることがわかる。2つの図の上の番号は加速度計取り付け気筒の燃焼時間帯を特定した後、燃焼順序と燃焼サイクルから割り振った気筒番号を示している。6番気筒と7番気筒の加速度波形を同時測定しているため、6番気筒の加速度波形からは偶数番気筒、7番気筒の加速度波形からは奇数番気筒の失火状態を判定できればよい。加速度計を取り付けた気筒が2箇所とも失火状態になった場合も、例えば図-6(A)の④、⑧番気筒の縦縞、図-6(B)の⑨、⑤番気筒の縦縞の位置関係から気筒の燃焼時間帯を判別することができる。

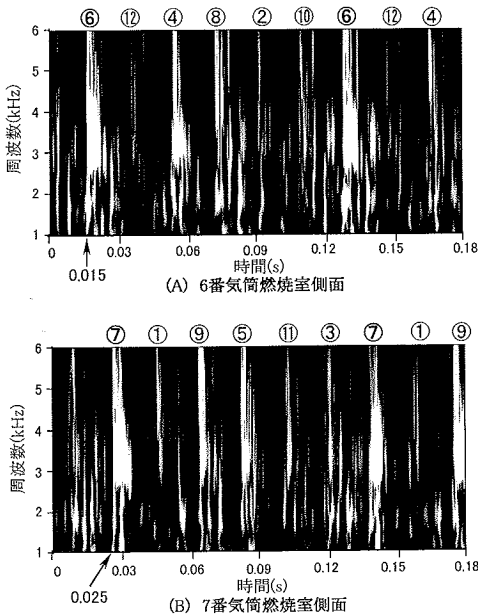


図-6 2つの測定点の加速度波形に対するウェーブレット変換値の時間-周波数マップ

(2) 連続ウェーブレット解析による失火気筒の判定

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)はそれぞれ失火気筒のない正常状態の、7番気筒失火状態のときの、11番気筒失火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-7(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-7(B), (C)では同図(A)と比較して、失火状態にした気筒の燃焼時間帯が暗く表れている。しかし、周波数帯によっては失火状態のときも明度の高い部分が存在しているため、失火気筒の判定は複雑となる。この結果から、燃焼に起因する振動は3.0kHz以上の周波数成分に現れることが予想される。そこで、4章で述べた周波数バンドI、バンドII、バンドIII別に切り出して表示する。図-8はバンドI、II、III別に図-7の時間一周波数マップを切り出した図である。それぞれの周波数バンドにおいて、上から正常状態、7番気筒失火状態、11番気筒失火状態の順で表示している。図-8のバンドIでは7番気筒の失火状態は判定できるものの、11番気筒の失火状態は判定できない。また、注目している奇数番気筒の燃焼時間帯

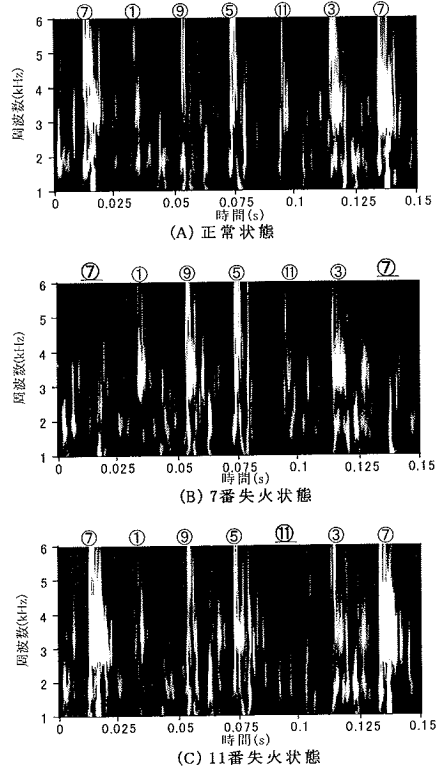


図-7 7番気筒で計測した加速度波形のウェーブレット解析結果

以外の時間帯にも明るい部分が現れており、明確な判定は難しい。バンドⅡ、Ⅲにおいてはどちらも奇数番気筒の燃焼時間帯に明度の高い部分が集中しており、奇数番気筒の燃焼状態を把握できる。失火状態にある7番気筒、11番気筒の燃焼時間帯は基準となる正常状態の時間一周波数マップと比較して、大幅に明度が低下しており、失火状態を判定することができる。バンドⅢの時間一周波数マップはバンドⅡに比べ、奇数番気筒の燃焼時間帯に集中して高明度の部分がみられ、一見非常に判定しやすい図に見えるが、1番気筒や11番気筒といったエンジンの構造上測定位置から離れている気筒の燃焼時間帯での振動が小さい。このため、連続ウェーブレット変換結果を時間一周波数マップにするときの表示レベルの選定が難しくなるという短所がある。したがって、失火気筒の判定にはバンドⅡの周波数帯を切り出して比較することが望ましいといえる。バンドⅡの周波数帯域は、波形のスペクトル解析で前述したとおり失火気筒が発生した時に、変化が生じる帯域であることから、一般的にはスペクトル解析で変化の現れる帯域をウェーブレット解析の利用帯域とするのが望ましい。

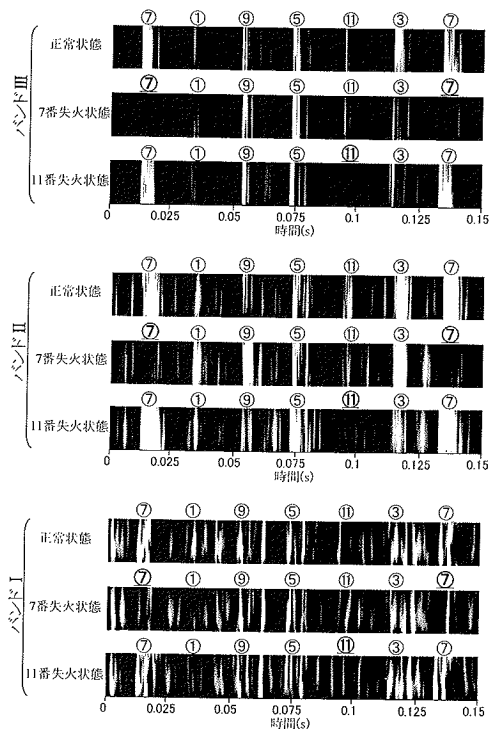


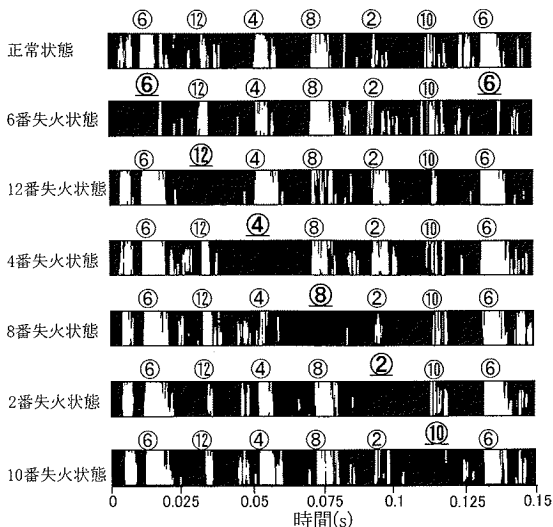
図-8 バンド毎の時間一周波数マップ

### (3) 2値化処理を行った時間一周波数マップによる失火気筒の判定

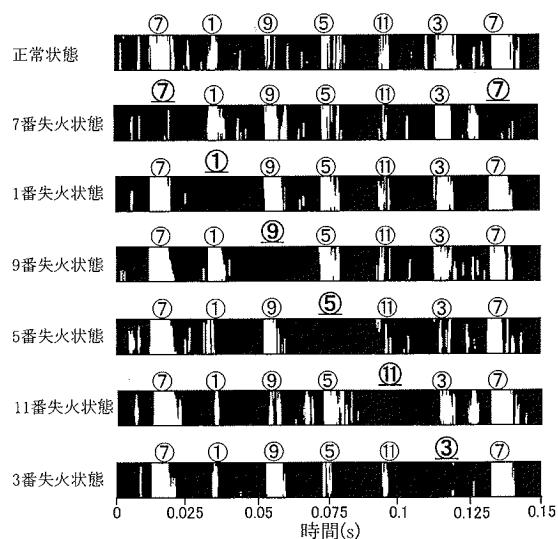
図-9は全気筒を1気筒ずつ失火状態にしたときの時間一周波数マップを示している。どの図もバンドⅡの周波数帯で切り出されており、2値化処理が施されている。2値化の閾値は、正常状態で全気筒の燃焼時間帯に白い縞が現れる値を試行錯誤的に求めている。今回の場合、明度値256段階中の100を閾値とした。図-9(A)の7つの図は6番気筒燃焼室側面で計測した加速度波形から作られた時間一周波数マップ、図-9(B)の7つの図は7番気筒燃焼室側面で計測した加速度波形から作られた時間一周波数マップである。偶数番気筒の正常・失火状態は6番気筒燃焼室側面で計測した加速度波形、奇数番気筒の正常・失火状態は7番気筒燃焼室側面で計測した加速度波形から判定を行う。各図上部の数字は燃焼時間帯の気筒番号を表しており、太字(下線あり)で示された気筒番号はその気筒が失火状態にあることを表している。2値化処理によって白く表示された部分は図-7や図-8において、一定値以上の明度を持つ部分であり加速度の大きい部分に対応する。

図-9(A)の最上段はエンジンに失火気筒がない場合の時間一周波数マップである。このマップをみると明度の差はあるが各気筒の燃焼時間帯に白い縞が

現れている。この白黒のパターンを正常状態の基本パターンとみなす。これに対し図-9(A)の上から2段目は⑥番気筒を失火状態にしたときの時間一周波数マップを示している。2段目の時間一周波数マップによると⑥番気筒の部分の縦縞が消失し、最上段の時間一周波数マップの太い白色部と明らかに異なる。次に、図-9(A)の3段目は⑩番気筒を失火状態にしたときの時間一周波数マップを示している。3段目の時間一周波数マップによると⑩番気筒の部分の縦縞が消失しており、明らかに⑩番気筒は失火状態になっていると判定できる。以下、図-9(A)の上から4, 5, 6, 7段目の各時間一周波数マップにおいても、それぞれ失火状態にした気筒の燃焼時間帯の縦縞が、最上段の正常状態の時間一周波数マップと比較して消失の仕方が著しい。このように6番気筒燃焼室側面で計測した加速度波形を連続ウェーブレット変換した時間一周波数マップからV型12気筒ディーゼルエンジンの片側偶数番目失火気筒を視覚的に判定できるといえる。一方、図-9(B)は加速度計を奇数番目の気筒側に取り付け、計測波形を連続ウェーブレット変換し、同図(A)と同様、正常状態の時間一周波数マップを最上段に示したものである。また、2段目から7段目までは奇数番気筒失火状態の時間一周波数マップを順に示したものである。図



(A) 6番気筒燃焼室側面での測定波形による



(B) 7番気筒燃焼室側面での測定波形による

-9(B)は同図(A)と同様に⑦, ①, ⑨, ⑤, ⑪, ③番気筒が失火状態になったとき、時間一周波数マップの失火気筒燃焼時間帯の白い縦縞が消失し、失火気筒発生を判定できることを示している。

2値化処理による判定法は明確な失火気筒の判定ができる反面、閾値の選択が困難であり解析に時間を要するという短所も存在する。解析技術者が得られた振動波形の性質を十分に把握している場合には非常に有効な手段となり得る。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て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失火気筒の判定が可能であることを示した。

## 6. 実機による連続ウェーブレット解析法の有効性の検証

前章までにエンジンをベンチに設置した状態での基礎実験結果によりウェーブレット解析法の有効性を示した。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、失火気筒を判定するシステムの構築を目的としている。そのため、本章ではエンジンが車両に搭載された実条件下での測定、データ伝送、ウェーブレット解析を行い、基礎実験で確立した連続ウェーブレット解析法の有効性を検証する。

### (1) 実機計測の実験方法

実機の振動測定は群馬県沼田市下発知町でおこなわれ、データ伝送先は約750km離れた北海道札幌市にある北海道大学の研究室とした。図-10に本実験の概念図を示す。本実験では基礎実験で使用したエンジンと同型のV型12ディーゼルエンジン(CAT-3412型)を搭載したダンプトラック(CAT-773B)を使用した。なお、このダンプトラックは実際にエンジンに不調が認められおり、急遽、計測に至ったものである。表-2に使用したダンプトラックの諸元を示す。使用した加速度計および加速度計取り付け位置は基礎実験と同様である。加速度計により測定された出力信号は送り側の専用データログに取り込まれ、携帯電話により伝送され、750km遠方の受け側携帯電話を通してパーソナルコンピュータに取り込まれ波形解析を行った。なお、データログのサンプリング速度は20kHz、分解能は12bitである。

### (2) PDC方式によるデータ伝送時間の計算と結果

本システムではコスト、汎用性、通信エリアの観点からPDC方式(Personal Digital Cellular)を採用している。図-11にPDC通信方式の概念図を示す。本方式では、1チャンネル当たり11.2kbpsの伝送帯域が割当てられ、携帯電話機と基地局がTDMA(Time Division Multiple Access)方式で結ばれて

表-2 ダンプトラックの諸元

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)
ベッセル	平 積	26m <sup>3</sup>
	山 積	31.4m <sup>3</sup>

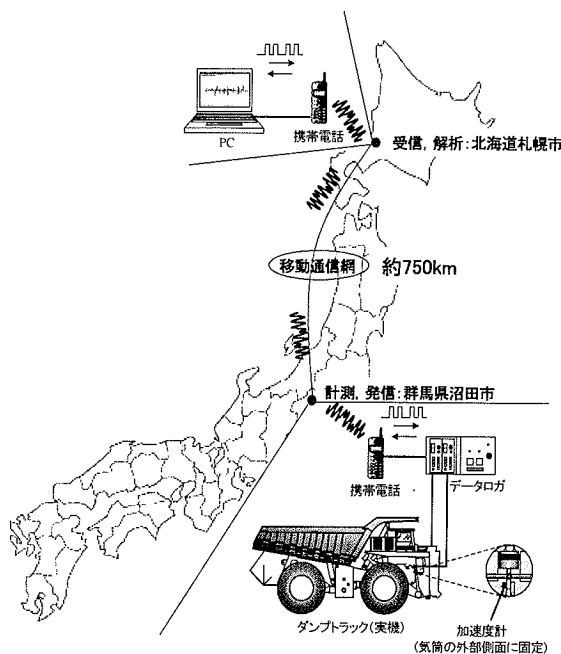


図-10 実条件下フィールド実験の概念図

いる。図-11 に示すように、この TDMA 方式では、224bit を 1frame として 20ms 間隔で 1 秒間に 50frame を送る。この 224bit のうち 32bit を誤りチェックや制御信号として使い、残りの 192bit でデータを送る。よって実データ伝送速度は  $192\text{bit} \times 50\text{frame} = 9600\text{bit/s}$  となる。PDC 方式では、800MHz 帯の搬送波を使う。図-11 に示されているような 1 つの基地局に割当てられた周波数帯域を 50kHz 間隔で分割し、1 チャンネル当たり 14kbps のデジタル信号を 3 チャンネル時分割多重化した 42kbps のデジタル信号を伝送する。本実験では 1 データが 5 桁の値で表わされる。また、1 データに

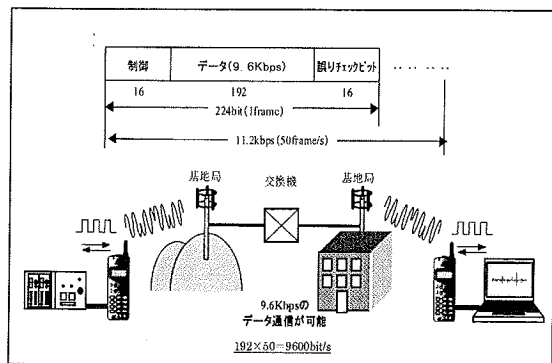


図-11 PDC 通信方式の概念図

つき 2byte のストップビットが付属するため、1 データは 7byte のデータ量となる。実験では計測時間 2.5s、2 チャンネルのデータを伝送している。データログのサンプリング速度が 20kHz であるため、1 回のデータ伝送の総データ量は 700kbyte である。データを通信により送信する処理時間はデータの正味の送信時間に送達確認の処理時間が加わることに、一般的に実効伝送速度（スループット）は回線速度の約 70%程度に低下する。よって本実験の場合のデータ送信時間の計算値は  $700\text{kbyte} / (1.2\text{kbyte} \times 0.7) = 833\text{s}$  (約 13min53s) である。合計 10 回の伝送試験の結果、データ伝送時間は 14min07s ~ 15min29s (平均 14min32s) であった。データの伝送時間は最大で 96s の計算値とのずれがあるが、ほぼ妥当な結果が得られた。

### (3) 実機計測により得られた波形の解析結果

図-12 に実際に計測後データ伝送された波形を示す。5 桁の DA 値データを加速度に換算した値を縦軸にとっている。図-12 の上図は 6 番気筒燃焼室側面に取り付けた加速度計による振動波形、下図は 7 番気筒燃焼室側面に取り付けた加速度計による振動波形を示している。これまでのベンチテスト状態による基礎実験結果の加速度波形と同様にどちらも  $150\text{m/s}^2$  を超える振幅が見られており、これまでに行ってきたデータ伝送をしない計測で得られた波形と類似の波形が得られることが確認された。

前述したように、本実験のダンプトラックに搭載されているエンジンには何らかの不調が認められている。図-13 は得られた加速度波形（測定点は 6 番気筒燃焼室側面）にウェーブレット解析を行った結果の時間一周波数マップである。図上の数字は気筒の燃焼時間帯を示している。図から 2 番気筒を除く偶数番気筒の燃焼時間帯に明瞭な縦縞が現れていることが確認できる。2 番気筒の燃焼振動に対応する部分に明瞭な縦縞はみられず、当該エンジンの不調は 2 番気筒の失火が原因であることが判定できた。

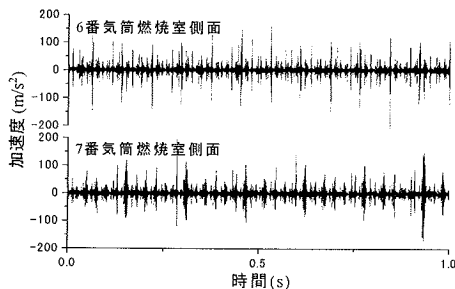


図-12 データ伝送された加速度波形例



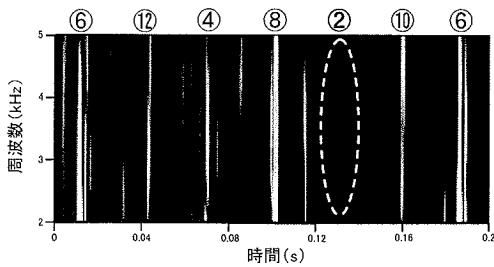


図-13 ウェーブレット解析結果

ここで、さらに2番気筒の燃焼状態を確認するため、これまでに確立しているrms値の統計的解析を行うこととした。本手法は、その解析車両の確実な正常状態時の燃焼振動レベルと解析波形の燃焼振動レベルとの比較により失火を判定するシステムである。しかし、本実験の場合、突発的な重機の不調を聞きつけて、計測に向かったため、このダンプロックに対するデータの蓄積は行っていない。そこで、今回の実験に関しては、2番気筒を人為的に確実に失火状態にして改めて計測・データ伝送を行い、はじめに正常状態として計測した波形(2番気筒は失火状態である可能性が高い)との比較により解析を行う。つまり、はじめに計測した波形と人為的に失火状態にした時の波形の変化を相対強度で表すこととなる。これにより、rms値の統計的解析による相対強度曲線は、2番気筒がはじめから失火状態であったなら、窪みは見られないことになる。図-14にrms値を用いた統計的解析結果を示す。図-14(a)は2番気筒を、(b)は例として5番気筒を人為的に確実に失火状態にした時の加速度波形をはじめに計測した加速度波形と比較した、それぞれの相対強度曲線である。図-14(b)より、5番気筒に対応する部分が相対的に窪んでおり、5番気筒は人為的に失火状態にする前は正常状態であったと判定できる。図-14(a)より、2番気筒に対応する部分はほぼ横這いであり、人為的に失火状態にする前と後で変化が現れていないことがわかる。つまり、2番気筒は

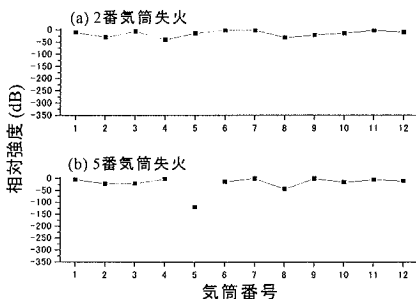


図-14 rms値を用いた統計的解析結果例

やはりはじめから失火状態であったと判定できる。このように、あくまで視覚的な判定ではあるが、ウェーブレット解析からも2番気筒は、はじめから失火状態にあったことが判定された。

これまでの研究により、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値の統計的解析を行うことで重機用多気筒ディーゼルエンジンの失火気筒の判定が可能であることを確認している<sup>7)</sup>。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、确实、迅速に失火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値の統計的解析による方法と本研究の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。ウェーブレット解析法を用いた失火気筒の判定法は統計的な判定ではないため、燃焼状態のバラツキにより判定の正確さが多少失われるとう短所も考えられる。しかし、rms値の統計的解析による方法と比べ、処理時間が短く、また、解析波形の時間区切りが曖昧であっても解析が行え、視覚的に失火気筒を判定できる長所があるため、失火気筒の判定に併用すべき有用な手段であるとみなしている。本研究のようにウェーブレット解析の重機用ディーゼルエンジンへの適用を研究した事例はなく、いち早く概要をつかむのに役立つ可能性がある。

## 7. まとめ

土木建設や資源開発作業で使用する重機の多気筒ディーゼルエンジンに失火気筒が発生した場合は、失火気筒の判定と早期の修理が必要である。今日まで、失火気筒を簡易、确实、迅速に特定する実用的方法は確立されておらず、実用的方法の確立が望まれている。このため、著者等は失火気筒の判定に、加速度波形のウェーブレット解析法を適用できるかどうかについての研究を行った。本研究で明らかにした事項をまとめると次のようである。

- 1) 計測した時系列的データの何番目からウェーブレット変換を開始した場合においても、各気筒の燃焼時間帯を特定できる。このためウェーブレット解析法では解析前のデータ加工が不要であり、長所の一つといえる。
- 2) 時間一周波数マップ上のどの周波数バンドで失火気筒を判定するのが最適かについて検討した。その結果、失火気筒判定に適する周波数バンドは、

失火気筒が発生した場合フリースペクトル強度が最も変化する周波数バンドであることを明らかにした。

- 3) ウェーブレット変換値の時間一周波数マップを一定の周波数バンドで切り出し、かつウェーブレット変換値の縦縞模様を一定明度で2値化することで視覚的な失火気筒判別の確実性を高め得る。
- 4) 本実験の12気筒V型ディーゼルエンジンの場合、奇数番気筒側と偶数番気筒側の両側面に一個ずつ加速度計を取り付けて加速度波形を計測、ウェーブレット解析を行うことで全12気筒の失火状態を判定できることを示した。ウェーブレット解析法による判定方法は、rms値による統計的な判定法とともに有用な失火気筒の判定手段といえる。
- 5) 実際に不調が認められている重機に対し、実条件下での計測・データ伝送・波形解析処理を行った結果、視覚的な判定ではあるがウェーブレット解析を用いることにより失火気筒を判定することができた。ウェーブレット解析による失火気筒判定法は、いち早く概要をつかむのに役立つ可能性がある。

#### 参考文献

- 1) 仁木正明：建設機械の整備上ユーザーに望むこと，建設機械，7月，pp.18-23，1997。
- 2) 鈴木政治，細谷哲也，中村和夫，曾根康友：油中摩耗粉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，pp.11-16，1994。
- 3) 鈴木政治，細谷哲也，中村和夫，曾根康友：油中摩耗粉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，pp.17-22，1996。
- 4) 伊与木善，山口政房：建設機械の整備上、ユーザーに望むこと，建設機械，7月，pp.11-17，1997。
- 5) 中村祥一：海外工事における建設機械の管理，建設機械，7月，p.35-39，1997。6) 吉長重樹，岩井善郎，本田知己，鈴木拓：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，pp.282-288，1998。
- 7) 川村洋平，氏平増之，樋口澄志，中村祥一，駒崎征明，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，pp.95-103，2001。
- 8) 川村洋平，氏平増之，桐本賢太，緒方純俊，中村祥一，樋口澄志：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，資源と素材，Vol.118，No.5，6，pp.399-406，2002。
- 9) 榎原進：ウェーブレットピギナズガイド，東京電気出版局，pp.1-28，1995。
- 10) 金泰九，清水久二：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，pp.289-295，1997。
- 11) チャールズK.チュウイ著，桜井明・新井勉共訳：ウェーブレット入門，東京電機大学出版局，pp.1-98，1994。
- 12) 吉田彰，大上祐司，木脇祐二：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，pp.318-326，1998。
- 13) 芦野隆一，山本鎮男：ウェーブレット解析（誕生・発展・応用），共立出版，pp.124-196，1997。
- 14) 菊池久和：異常燃焼のウェーブレット解析，数理科学，354，pp.44-51，1992。
- 15) 土屋雅弘，高木亨之：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，pp.85-92，1998。

(2003.5.27 受付)

# APPLICABILITY OF WAVELET ANALYSIS FOR THE DETECTION OF MISFIRING CYLINDER OF THE DIESEL ENGINE FOR CONSTRUCTION

Youhei KAWAMURA, Masuyuki UJIHIRA, Nobuharu AOSHIMA, Fumito ITO and Daouren AKHMETOV

Big scale construction machinery is absolutely necessary for the mineral resources development and various construction works. Troubles of the machinery give serious losses in the efficiency of operations and also in financial proceeds. From a practical point of view, we employed a wavelet transform with Gabor function as a window and analyzed the acceleration wave curves data to detect a misfiring cylinder from the multi-cylinders diesel engine. The results by wavelet analysis revealed that the misfiring cylinder could be detected visually in time-frequency maps. With the aid of statistical analysis using rms value, the misfiring cylinder of multi-cylinders diesel engine can, therefore, be doubly checked by wavelet analysis.