

I-60

建設機械のエンジンの異常診断に関する基礎研究

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
山崎建設(株)		中村祥一
NTT 北海道移動通信網(株)	正会員	駒崎征明
NTT 北海道移動通信網(株)	正会員	伊藤史人

1. はじめに

今日、土木建設現場や採石、採鉱といった資源開発のための作業現場では地盤、岩盤の採掘運搬用として日常的に大型建設機械を用いている。機械化施工には、工事規模の大型化、工期の短縮、工事の質の向上、工事単価の減少、労働力の節減、工事の安全化等がはかれるという特長がある。一方、建設機械は非常に高価であり、故障などにより休車させることは施工関係者にとって大きな損失となる。建設機械が深刻な故障を起こす前に異常を検知し対処する早期異常診断が重要である。近年、排気ガスのクリーン化、エンジンの高効率化等の観点から燃料噴射ポンプの精密制御化と高圧化が進んでいる。このことによっても噴射ノズルの目詰まり等による不燃気筒の発生は未解決の問題として残されている。不燃気筒を放置しておくと最終的にはエンジンの焼付き等の重大な故障を引き起こし、エンジン全体に致命的な損傷を与えることとなる。

本研究ではエンジン表面の燃焼室付近に加速度計を取り付けて振動を測定し、人為的に設けた不燃気筒を判別できるかどうかを調べた。加速度波形や音響波形を用いた異常診断法に関する研究は長年行われているが、未解決の問題も残されている¹⁾²⁾³⁾。本論文では幾つかの解析項目のうち周波数分析結果および rms 値による振動波形の分析結果を示す。rms 値による振動波形の数値化により全 12 気筒中 10 気筒までの不燃気筒を判別することが可能になっている。

2. 実験および解析方法

本実験に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（キャタピラー社製 3412 型）を使用し、加速度計により振動測定を行った。図-1 に本実験装置の概念図、図-2 に測定状況の写真をそれぞれ示す。エンジンはベンチテストの状態に設置し、運転条件はアイドリング状態を想

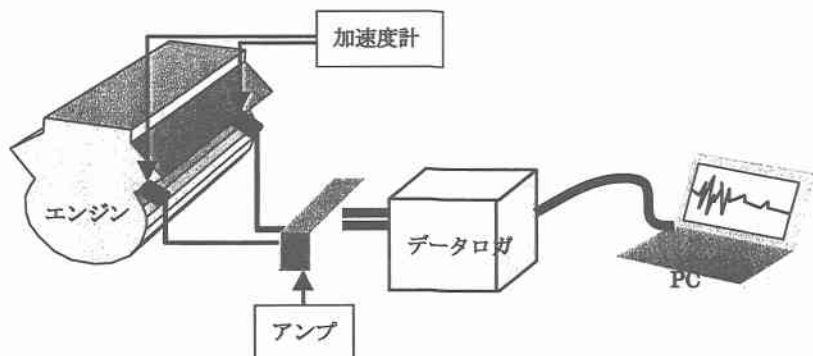


図-1 実験装置概念図

Fundamental Study on the Diagnosis of the Diesel Engine of Construction Machinery.

By Youhei KAWAMURA, Masuyuki UJIHIRA, Kiyoshi HIGUCHI, Syouichi NAKAMURA,
Masaaki KOMAZAKI, Fumito ITO.

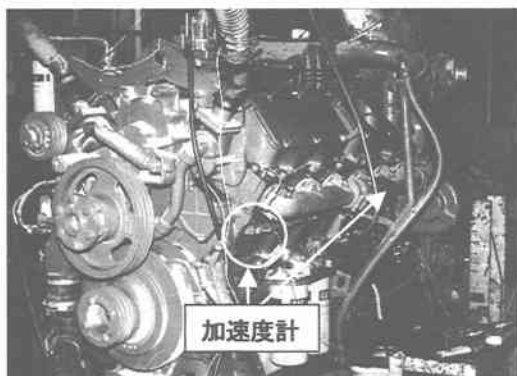


図-2 測定状況の写真



図-3 エンジンの模式図（上部）

定し、無負荷、回転数約 900rpm 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 1 気筒づつを不燃気筒にし振動測定を行った。図-3 はエンジンの気筒の配置を上部からみた模式図であり、数字はそれぞれの気筒番号を示している。不燃気筒のない正常な状態の振動を測定した後、1 番から 12 番気筒まで順番に 1 気筒づつを不燃状態にしてそれぞれの振動測定を行った。加速度計は TEAC 社製 7081F（可測範囲 $\pm 150G$ 、周波数特性 40kHz）を 2 個使用し、1 番気筒および 11 番気筒燃焼室付近の 2 個所に取り付けた。各シリンダーの着火順序は 1-4-9-8-5-2-11-10-3-6-7-12 になっており、1 番気筒および 11 番気筒は位相差が 360° となるので解析の便宜上この 2 つのセンサ配置を上記の 2 個所とした。なお、加速度計の取り付けには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 のデータログを用いて取り込み、パーソナルコンピュータ上で波形解析を行った。

振動波形の解析方法としては FFT 処理による周波数分析法を用いて行った。また、不燃気筒のない正常な状態の振動波形と各気筒が不燃状態の時の振動波形の比較には rms 値による比較法を用いた。

3. 測定結果

(1) 振動波形と FFT 処理

図-4 に測定した振動波形例（不燃気筒なし）を、図-5 に図-4 の振動波形に FFT 処理を施した結果を示す。別途測定したエンジンの回転数から 8.3Hz（注目する気筒の爆発の周波数）、16.7Hz（クランクシャ

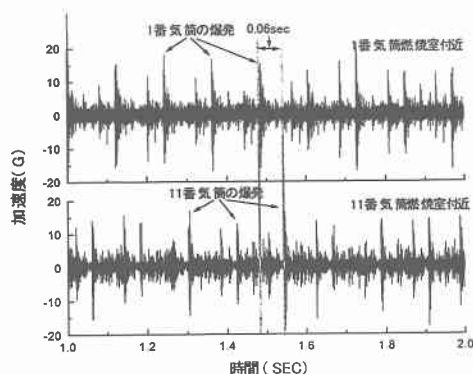


図-4 振動波形例（不燃気筒なし）

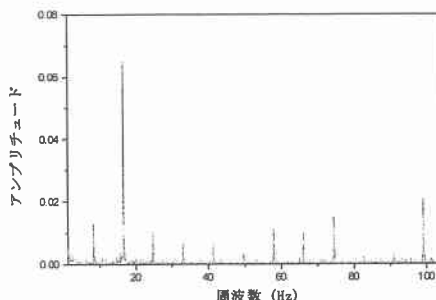


図-5 振動波形の周波数分析例

フトの回転の周波数) および 100Hz (全気筒の爆発の周波数) に周波数のピークが見られると予想されたが、図-5 によると予想された周波数の位置にスペクトルのピークがみられることがわかる。これは、加速度波形を測定した場合、波形中に有用な情報が欠けることなく含まれていることを意味している。

図-4 をみると、1 番気筒の燃焼室付近の振動に 15G を超える大きな値がみられた 0.06sec 後に 11 番気筒の燃焼室付近の振動に同様の大きな値が測定されている。エンジンの回転数から、1 番気筒と 11 番気筒の燃焼のずれは 0.06sec と判定されるため、この 15G を超える大きな値はそれぞれ 1 番気筒と 11 番気筒の爆発振動を示していることがわかる。

図-6 (A) に 1 番気筒の正常な状態の振動、図-6 (B) に 1 番気筒が不燃状態の時の振動を示す。図-6 における (A) および (B) の各気筒の燃焼時刻は一致させてある。図-6 (B) における 1 番気筒の燃焼時刻は同時に測定している 11 番気筒の爆発から割り出している。図-6 (A) にみられる 15G を超える 1 番気筒の爆発による振動が、1 番気筒を不燃とした図-6 (B) では約 5G まで低下していることがわかる。このことから、ある気筒の燃焼室付近に加速度計を取り付けることにより、その気筒の燃焼、不燃状態が判断できることがわかる。

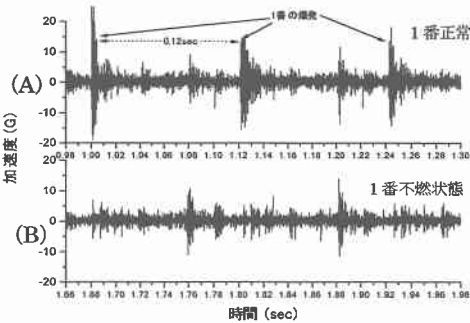


図-6 振動波形の正常、不燃状態の比較 (1 番気筒)

(2) 振動波形の rms 値による数値化

エンジンの回転数から、12 気筒それぞれの燃焼時刻が判断出来るため、それぞれの気筒が爆発してから次の気筒が爆発するまでの振動を分別することが出来る。その状態を図-7 に示す。図-7 は不燃気筒がない正常な状態の 1 番気筒燃焼室付近の振動を示しており、1 番~12 番の番号は各気筒の燃焼時刻を示している。そこで、各気筒の爆発振動の強さを数量化、つまり直線で挟まれた区間の振動を数値化し、不燃気筒がある状態とその気筒の正常な状態の爆発振動の強さの比較を行う。

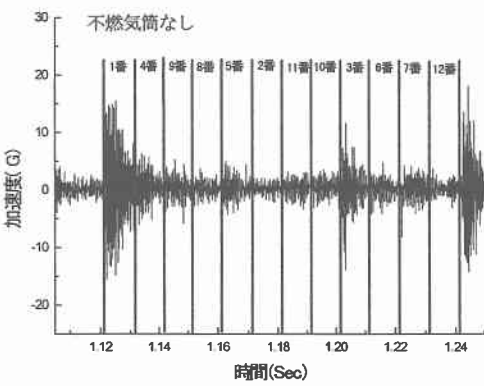


図-7 各気筒の燃焼時刻 (測点 1 番気筒)

振動波形の数値化には以下の式に示す rms 値を用いて行った。

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

$a(n\Delta t)$: 時刻 $n\Delta t$ での加速度振幅
 n : 時刻番号
 ΔT : データのサンプリング間隔

図-8(A) (B) は不燃気筒がない正常な状態と 1 気筒から 12 気筒までを不燃にした状態の rms 値をプロットしたものである。縦軸に rms 値、横軸に気筒番号を示している。図-8(A) は測点が 1 番気筒燃焼室付近 (測点 1 番) で 3 番気筒を不燃気筒にした場合の rms 値を示す図であり、図-8(B) は同じく測点が 1 番気筒燃焼

室付近（測点 1 番）で 5 番気筒を不燃気筒にした場合の rms 値の分布を示す。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 値を算出した。●は測点 1 番で測定した各気筒が正常な状態の時の rms 値を示しており、○は注目気筒における●の平均値を示している、▲は測点 1 番のとき、どこかの気筒が不燃状態になった時の rms 値を示している。△は、注目気筒における、▲の平均値を示している。振動測定による不燃気筒の判断は、不燃気筒の rms 値（▲）が正常な状態の rms 値（●）より下回っているかどうかで判断する。図-8(A)の 3 番気筒を不燃状態にした場合には明らかに○と△に差があり、3 番気筒が不燃状態になっていることがわかる。また、図-8(B)の 5 番気筒を不燃状態にした場合においても明らかに○と△に明瞭な差がみられ、5 番気筒が不燃状態になっていることがわかる。

全体的にみて、加速度計を測点 1 番と測点 11 番に取り付けると 2 番気筒と 8 番気筒の不燃状態以外の全 12 気筒中 10 気筒は爆発振動の rms 値で不燃気筒を判断出来ることがわかった。今後の課題としては加速度計を取り付ける位置を変化させ、全部の気筒の不燃状態を判断できる取り付け位置を探すことである。

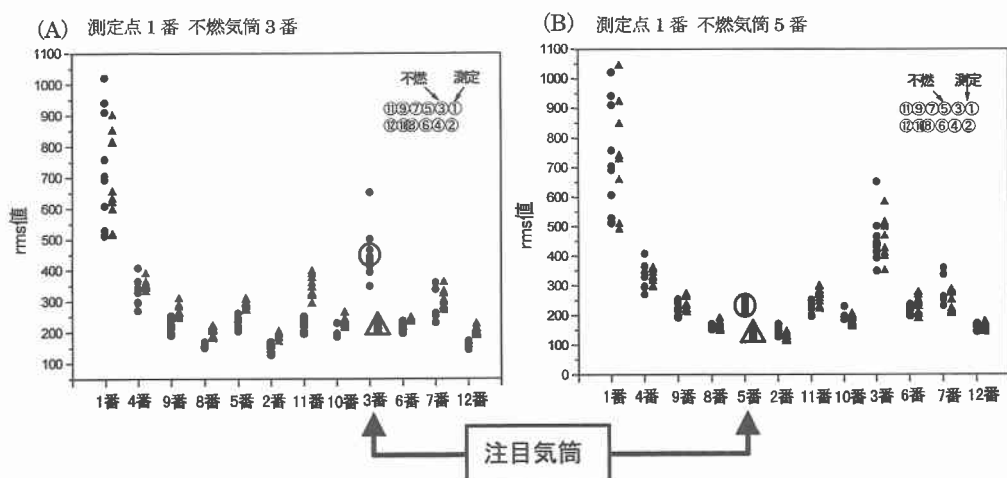


図-8 rms 値のプロット図

4. まとめ

- (1) 加速度計により測定されたエンジンの振動波形には少なくともクランクシャフトの振動数等の重要な周波数成分が含まれている。その他の情報に関しては現在分析中である。
- (2) 燃焼室付近に加速度計を取り付けるとすれば、その気筒の燃焼、不燃状態が判断できる。
- (3) 加速度計を 2 つの測点に取り付けることにより、現在のところ 12 気筒中 10 個所の不燃気筒を判別出来ることがわかった。センサーの配置を改善することにより全気筒の不燃状態を判別出来る可能性がある。

参考文献

- 1) 黎子椰・秋下貞夫・佐藤俊輔・加藤利彦：ウェーブレット基底関数とエンジン異常診断ための音響信号特徴の抽出、第 41 回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集、Vol. 41、p. 217～218、(1997)
- 2) 木村隆一・寺嶋航・中井昇・山田哲男・武田象：2 サイクルディーゼル機関の振動信号による機関の診断法について、日本船用機関学会・第 59 回学術講演会講演予稿集、Vol. 59、p. 214～221、(1997)
- 3) 高石武夫・米田健一・斉藤宏・宮野弥明・井上究：KU30 機関異常診断システムの開発、三菱重工技報、Vol. 30、No. 1、p. 1～5、(1993)