

# ウェーブレット変換によるエンジンのノッキング診断

古 厩 秀 行\*・白 山 裕 也\*\*・付 景 順\*\*\*  
栗 原 伸 夫\*\*\*\*

## Knock Detection for SI Engine Using Wavelet Transform

Hideyuki FURUMAYA\*, Yuuya SIRAYAMA\*\*, Jingshun FU\*\*\*  
and Nobuo KURIHARA\*\*\*\*

### Abstract

Knock control has been spread through spark-ignition engines, in order to keep ignition timing the optimal for fuel economy. However, there is a problem that performances will fall at the time of acceleration and air-fuel ratio changing. The reason is in the delay of knock detection. In a lean-burn engine, the influence is large. In this paper, wavelet transform was applied to processing knock signals. Moreover, a new method was proposed and the scale-power spectrum was compared in plural resonant-vibration modes at the same crank angle. The pressure signal was measured with a 4-cycle engine and it was sampled at high speed and taken in by PC. As results of carrying out off-line analysis, the prospect which knock can be detected knock in one- combustion cycle was acquired.

**Key words:** SI engine, Knock detection, Combustion diagnosis, Wavelet transform

### 1. 緒 言

地球環境の改善と省エネルギーのために、より高燃焼効率かつ排気抑制なエンジンが求められている。それに対応しつつ、ガソリンエンジンでは、筒内直噴エンジン搭載者、ハイブリット車等の低燃費車の技術研究開発が進められている。エンジン技術の向上に伴い、エンジンの燃焼状態をきめ細かく診断、制御する手段が重要である。ガソリンエンジンでは、点火時期を最適化する手法として、ノッキング制御が広く普及している。ノッキングは点火からの火炎伝播に

対して、シリンダ内壁近傍での局所的な自然発火による燃焼であり、高温で高圧力な燃焼ガスが発生するためにエンジンを損傷してしまう恐れがあるが、燃焼状態が良いほどノッキングが生じやすい。言い換えれば微小なノッキング状態を保つよう点火時期を調整することで、燃焼効率を最大にできるわけである。これは、ガソリンエンジンのトルク向上あるいは燃費低減にとって有効な方法である。筒内直噴エンジンでは、低燃費、排気性能の良好など燃焼効率向上のため、高圧縮比や超リーンバーン燃焼が望ましい。圧縮比が高くなると点火時期のわずかな偏差がトルクの低下に繋がり易くなる。また、超リーンバーン燃焼を行うことにより燃焼室内の燃料の濃度分布が異なることや、微粒化された燃料の大きさが異なるために、ノッキング自体が起こりにくく、シリンダブロックに取り付けられているノックセンサからのノッキング検出が難しくなる。こうした場合、より高精度なノッ

---

平成 15 年 12 月 19 日受理

\* 大学院工学研究科機械システム専攻博士前期課程・1年

\*\* 大学院工学研究科機械システム専攻博士前期課程・2年

\*\*\* 大学院工学研究科機械システム専攻博士後期課程・3年

\*\*\*\* 大学院工学研究科機械システム専攻・教授

キング制御が必要とされるので、ノッキング発生を微小な段階で精度良く検出する技術が必要とされる。従ってエンジンの燃焼状態を細かく診断、制御する手段が重要である。また、燃焼状態をオンボードで検出し制御する技術が求められている。

ノッキングの検出は、通常、筒内圧力の共鳴振動を利用する。この共鳴振動は、振動エネルギー及び変化率の大きさが異なるので、これらを利用してノッキングの判別をすることになる。従来の検出法は、検出感度を向上させるために、連続した複数の燃焼行程にわたる平均値からの変化率でノッキングの発生を判断している。このため、検出に数回転の遅れがあることから、加速時での性能向上が課題となる。それに対して、筒内圧力センサや多種成分排気センサとアドバンス制御アルゴリズムを駆使することで燃焼を制御して燃費低減と排気抑制を両立させる新制御システムが研究されている。

本論文では、ノッキングの検出遅れを解消することを目的に、筒内圧力センサを用い、ウェーブレット変換により燃焼圧力信号をオンボードで診断して、一燃焼行程内でのノッキング検出方法を提案する。

## 2. 実験及び信号処理システム

本研究の実験システムを図1に示す。

ノッキング検出の信号処理システムは、直列4気筒のリーンバーンエンジン・スパークプラグ内蔵型筒内圧力センサ・差動アンプ・A/D変換機(NR2000)・パソコン・ECUで構成される。実運転時を想定し、負荷のある加速時にて、サンプリング周期  $20 \mu\text{s}$  で点火時期を進角させて、測定する。エンジンの燃焼圧を検出するためにスパークプラグ内蔵型の筒内圧力センサを取り付けた。筒内圧力センサで採取した筒内圧力信号を差動アンプで増幅し、エンジンのクランク角度センサからの回転パルスに同期させてA/D変換機でデジタル信号に変換し、デー

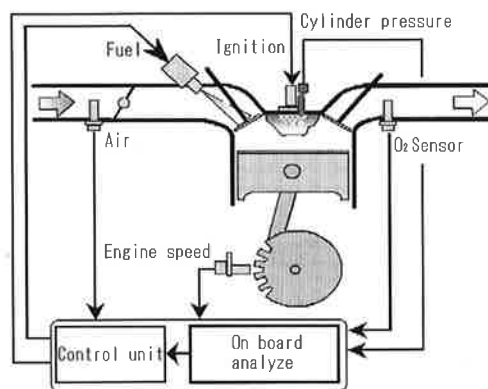


Fig. 1 Experimental system

タをパソコンに取り込み、そのデータをパソコンで解析を行う。

## 3. 燃焼診断のためのウェーブレット変換

ノッキングが発生すると筒内でいくつかの共鳴振動モードに応じた圧力振動が発生する。最近の Scholl 等が報告し、また筆者等も実験的に確認していたが、ノッキングの共鳴振動周波数はクランク角度に応じて連続的に変化するものと考えられる。共鳴振動成分を抽出するには、時間一周波数関数解析法が必要となる。これに適した分析法として、従来のFFT(Fast Fourier Transform)ではなく、燃焼行程内にわたって局所的な周波数特性を捉えるのに有利とされるウェーブレット変換が考えられる。ウェーブレット変換は次の(1)式のように定義される。

$$WT(a,b) = 1/\sqrt{a} \int_{\mathbb{R}} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \dots (1)$$

ウェーブレット変換による時間・周波数分析は、周波数に応じて時間分析能及び周波数分析能を変化させる事ができるので、それにより時間軸上に局在するノッキングによる圧力変化の波形を適切に検出でき、周波数に変化する解析にも高い分解能で特徴抽出することが可能となる。ノッキング検出のために、まずマザーウェー

レット関数の選定を行う。マザーウェーブレット関数  $\psi(t)$  はスケールを周波数分野で定義できる特徴を持つ Morlet 関数を用いた。Morlet 関数は、次の (2) 式のようになる。

$$\psi(t) = e^{-\frac{t^2}{2}} \cos(5t) \dots\dots\dots(2)$$

図2に Morlet 関数の Wavelet Function を示す。

ここで、 $T_a$  はピーク周期である。局在して左右対称であるということが分かる。次に、ノッキング信号の局所的な発生や急激な変化を検出するうえで、Morlet 関数をスケール  $a$  を用いて自由に変化させられるようにする必要がある。ここで連続ウェーブレット変換を離散化すると、次のようになる。

$$W(a, k) = \sum_n f(n) \psi_a(n-k) \dots\dots(3)$$

ここで、 $f(n)$  は信号のサンプリング序列、 $n=0 \sim N-1$ 、 $N$  は標本数である。 $n < 0$  または  $n \geq N$  の場合  $f(n) = 0$  とする。任意のスケール  $a$  において、 $\psi_a(n-k)$  は、基底  $\psi_{a,b}(t)$  の時間軸上での同期サンプリング序列である。 $k$  はシフト  $b$  のサンプリング序列、 $k=0 \sim N-1$  である。ウェーブレット変換係数を式 (3) で演算処理する場合、 $N^2$  回の乗算、 $N(N-1)$  回の加算を必要とする。ノッキングの検出は一燃焼過程のうちに処理することになるので、このウェーブレット変換が機器組込型のマイクロコン

ピュータにとって大きな負荷となる。

筆者らは、ウェーブレット変換をリアルタイム処理するための実用的な演算法を以下にて提案する。まずノッキング検出など実用上では、マザーウェーブレット関数  $\psi(t)$  は時間軸上で領域全体ではなく  $-MA$  から  $MA$  まで領域限定できることに着眼する。従って、 $n-k > MA$  の場合  $\psi_a(n-k) = 0$  とする。式 (4) は、式 (5) となる。

$$W(a, k) = \sum_{n=k-MA}^{k+MA} f(n) \psi_a(n-k) \dots\dots(4)$$

ここで、各々  $W(a, k)$  は、 $-MA$  から  $MA$  までの積和演算を行うことになるので、計算回数は  $N(2MA+1)$  回の乗算、 $N(2MA)$  回の加算となる。一般に  $(2MA+1) < N$  であるので、式 (3) のウェーブレット変換係数を求める方法に比べて演算処理の低減がはかれる。さらに、Morlet 関数は左右対称であるという特徴を利用すると、片側の演算を省略することができる。すなわち、 $j = n-k$  とすると、式 (4) により、次の式が導かれる。

$$\begin{aligned} W(a, k) &= \sum_{j=-MA}^{MA} f(k+j) \psi_a(j) \\ &= \sum_{j=-MA}^{-1} f(k+j) \psi_a(j) + \sum_{j=0}^{MA} f(k+j) \psi_a(j) \\ &= \sum_{j=1}^{MA} f(k-j) \psi_a(-j) + \sum_{j=0}^{MA} f(k+j) \psi_a(j) \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 $\psi_a(\cdot)$  は左右対称関数で、 $\psi_a(-j) = \psi_a(j)$  となる。さらに、 $p(k, j) = f(k+j) \psi_a(j)$  で定義すれば、 $f(k-j) \psi_a(-j) = p(k-2j, j)$  となる。そして、式 (5) は次のようになる。

$$W(a, k) = \sum_{j=1}^{MA} p(k-2j, j) + \sum_{j=0}^{MA} p(k, j) \dots\dots(6)$$

ここで、 $p(k-2j, j)$  は、 $k-2j$  の場合に  $p(k, j)$  がすでに計算されているので、そのまま利用できる。つまり、 $j=0$  から  $MA$  だけであるので、 $-MA$  から、 $-1$  までの計算を省略して、式 (4) の約半分の計算量に低減できることが分かる。つまり Morlet 関数の左右対称性を利用し

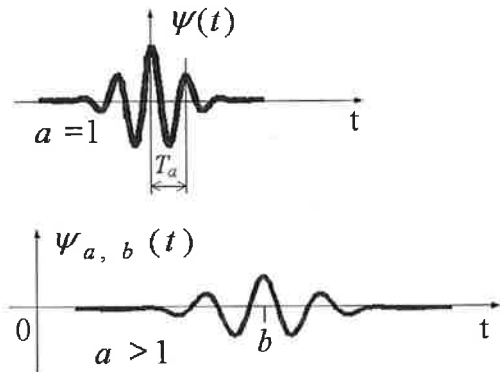


Fig.2 Morlet wavelet

て片側を省略することで、計算回数は  $MA/(2MA+1)$  倍に縮約される。

またノッキング検出の場合、複数の共鳴周波数ならびにその周辺だけに解析範囲を絞ることが出来る。すなわち演算処理するスケール領域を限定できる。実験結果では25スケールのうち共鳴振動モードとして、図3に示すようにA1, B1, C1という3種類に限定して判定が可能であった。共鳴振動の周波数領域は5~20 kHzである。共鳴振動周波数領域に対応するスケールで、実測データによるノッキングの診断を行う。

以上で述べたとおり、(1) マザーウェーブレット関数  $\psi(t)$  の領域限定、(2) Morlet関数の左右対称性を利用、(3) ノッキング判定の解析範囲限定、によってウェーブレット変換のリアルタイム化をはかることができる。

A1は1次元周方向モード、B1は2次元周方向モードとして対になっている。C1は1次元ラジアルモードである。それぞれの周波数特性が示すように共鳴振動A1, B1, C1ともにクランク角度に応じて周波数が低下する。Scholl等の報告に従いB1, C1は途中で急速に低下させた。

Morlet関数を用いてシミュレーションした結果を図4に示す。ここで、スケール  $a$  が1から20までの範囲で結果が得られた。スケール

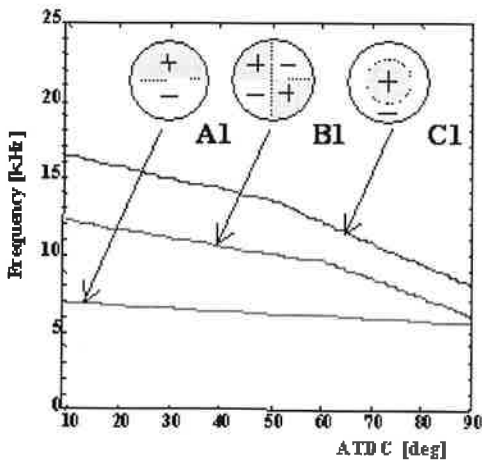


Fig. 3 Resonance modes and simulation signals

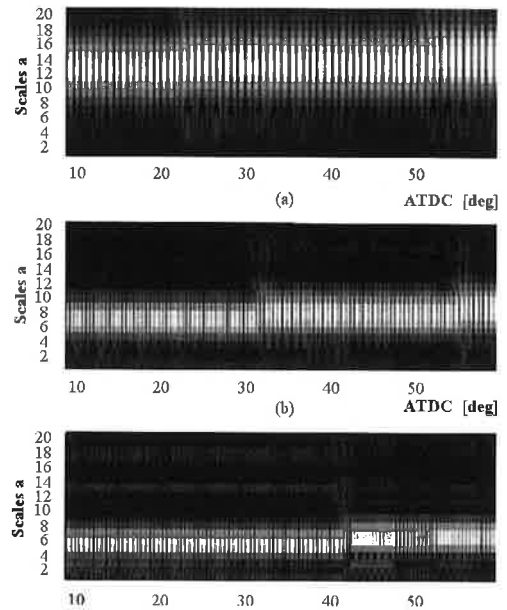


Fig. 4 Wavelet transform of simulation signal

$a=1$  のとき、周期  $T_a$  はサンプリング周期の2.5倍に相当する。Fig. 4 (a), (b), (c) は、それぞれ共鳴振動A1, B1, C1に対応する。共鳴振動の周波数がクランク角度の変化に伴い減少していく様子が、共鳴振動成分の大きさを示す白い帯状の部分の変化で示される。クランク角度ATDC 10度からATDC 30度の区間で、A1はスケール10~14, B1はスケール6~9, C1はスケール4~7の間で周波数の変化に応じた変化を示している。これらから、共鳴振動モードとスケールとの対応関係が明らかにされた。共鳴振動モードの周波数は、白い帯状のスケールの中心に相当する。また図4から、低周波数領域ほどウェーブレット変換のスケール分解能が低下することが分かる。このスケール分解能はサンプリング周波数に依存するが、ノッキング検出に周波数分析を用いる場合と同程度で良いと判断される。

#### 4. 一燃焼行程内でのノッキング判定法

エンジン実験結果から、ウェーブレット変換を用いて単独で発生する共鳴振動モードを時々刻々と捉えることがノッキング検出に有効であることがわかった。周波数共鳴振動は局所的にそれぞれ単独で発生しており、複数の共鳴振動が同時には発生していないことが分かる。このことは筆者らによる多数の実験結果から、一般的な特徴であると判断される。また、異なる共鳴振動モードがそれぞれでスケールと対応する。共鳴振動モードとスケールとの対応関係が明らかにした。この知見を踏まえて、一燃焼行程内でのノッキング判定法を提案する。図5に提案するノッキング判定の考え方を示す。

判定に用いる要件として、(1) 共鳴振動モード(本論文では、 $P_A$ ,  $P_B$ ,  $P_C$ )の周波数に対応するスケール(Fig.5の例では、12, 8, 6)に限定してウェーブレット変換係数の絶対値(スケール・パワースペクトル)を求める。(2) 同じ時点においては単独の共鳴振動モードのみ発生するというノッキングの特徴を利用する。これらの要件から、同じクランク角度において、共鳴振動モード  $P_A$ ,  $P_B$ ,  $P_C$  の周波数に対応するウェーブレット変換係数を相互に比較することによってノッキングが発生するかどうかを直接に判断できる。提案するノッキング判定方法は

次の通りである。燃焼毎にクランク角度に対応したノッキングが発生する領域とされるクランク角度 ATDC 0 度から、ATDC 50 度まで、筒内圧力信号を高速サンプリングし、5~20 kHz の周波数領域でフィルタリングする。次に、クランク角度に対応した共鳴振動モード  $P_A$ ,  $P_B$ ,  $P_C$  に対応するスケール  $a$  が 12, 8, 6 で、ウェーブレット変換係数の絶対値を求める。それから、式(7)のように共鳴振動モード  $P_A$  に対応するウェーブレット変換係数の絶対値がほかの  $P_B$  と  $P_C$  和の比を求めて、ノッキング強度を示す指標  $P_{NA}$  とする。

$$P_{NA} = \frac{P_A}{P_B + P_C} > P_N \dots\dots\dots (7)$$

同じ方法で、ノッキング強度指標  $P_{NB}$ ,  $P_{NC}$  を求める。ノッキング指標が一つだけ域値 ( $P_N$ ) を超えた場合、ノッキングが発生する判定をし、ノッキング指標が域値を超えなかった場合、ノッキングが発生しない判定する。ここでノッキング判定の域値を 1.5 とする。この域値の大きさは、燃焼バラツキによる誤判定を防ぐように設定する。この提案の方法を用いて、エンジンにて測定したデータを用いてノッキングの状態を診断した。

#### 5. 実験結果及びまとめ

2章で述べた通り、実験は実運転時を想定し、負荷のある加速時にて、サンプリング周期 20  $\mu$ s で点火時期を進角させて、測定した筒内圧力の波形を図6に示す。これは、アイドル回転(1山目約 850 rpm)加速しており、3山目では、約 3,000 rpm である。

ウェーブレット変換の結果を図7・8に示す。図7の時には、ノッキングの特徴が捉えられていない、図8の時には、クランク角度9度から13度範囲においてノッキングの特徴が捉えられている。スケールは7~10で白い帯状の大きなパワー成分があり、ノッキングが発生してい

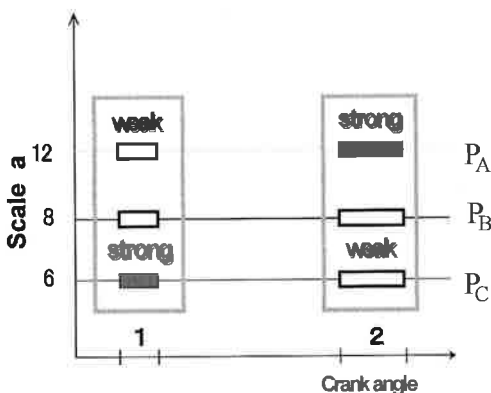


Fig.5 Concept of knock judgment

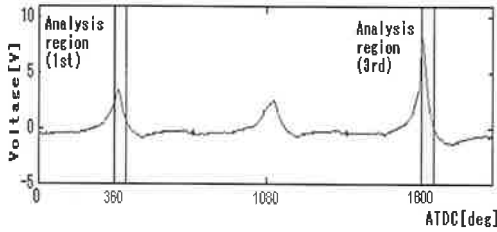


Fig. 6 Trend of in-cylinder pressure at the time of acceleration

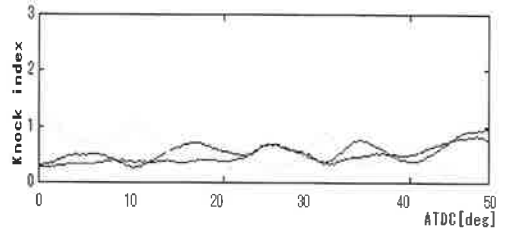


Fig. 9 The comparison of scale power spectrum of 1st hill

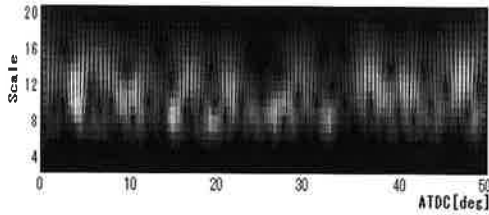


Fig. 7 WT analyzed results of 1st hill

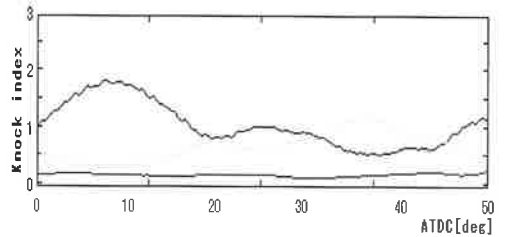


Fig. 10 The comparison of scale power spectrum of 3rd hill

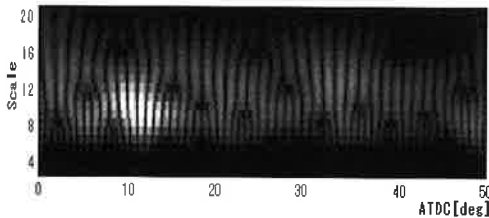


Fig. 8 WT analyzed results of 3rd hill

と言える。しかし、この判定は過去の燃焼などと比べる必要があり、また正常な燃焼とノッキングが起きている燃焼の判断がつきにくい。

提案したノッキング判定法の結果を図9・10に示す。図9に示す指標は1.5以下であるので、ノッキングが発生しない判定をする。図10に示す指標は1.5以上になるので、ノッキングが発生すると判断できる。これらの結果から、一燃焼行程内においてクランク角度に応じたノッキングを検出することができることが明らかとなった。

## 6. 実験結果及びまとめ

エンジンのノッキング制御において、検出の

性能向上をはかるために、ウェーブレット変換を取り上げて、筒内圧力信号により一燃焼行程内で検出法を確立していく。ウェーブレット関数の領域限定および対称性を利用することで、高速化をはかり、着眼点を明らかにした。エンジン燃焼実験でノッキングが、クランク角度に応じて異なるモードの共鳴振動の度に生成消滅する現象を明らかにした。共鳴振動モード間のノッキング強度指標を比較する方法を提案した。一燃焼行程内でエンジンの異常燃焼の一つであるノッキング検出が可能となるので、加速時における制御性能の向上が期待できる。

## 参考文献

- (1) 付, 栗原, ウェーブレット変換によるエンジンのオンボード燃焼診断, 日本機械学会講演論文集, (2002.9).
- (2) 五十嵐, 筒内圧力センサによるエンジン燃焼診断に関する研究, 修士学位論文, (2001).
- (3) 自動車エレクトロニクス, 笹山隆生, 山海堂.
- (4) D. School, C. Davis, et.al, The volume acoustic modes of spark-schematic diagram of some of the acoustic modes of a ignited

internal combustion chambers, SAE paper  
980893 (1998).

(5) Wavelet Toolbox User's Guide, (1996), 6-72,  
The Math Works. Inc.