

短時間フーリエ変換法を用いたパターン認識による ノッキング検知ロジックの構築

Construction of Knock Detection Logic by Pattern Recognition Using Short-time Fourier Transform

秋 元 賢 治*
Kenji AKIMOTO

小 松 弘 崇*
Hirotaka KOMATSU

倉 内 淳 史*
Atsushi KURAUCHI

要 旨

ノッキングとメカニカルノイズの判別手法の改善のために、両者の周波数減衰特性の違いに着目した。この特性を解析する手法として、周波数の時間的変化をとらえることのできる短時間フーリエ変換法 (Short Time Fourier Transform: STFT) の検討をおこなった。ノッキングの振動継続時間はクランクアングルで 80-90 deg となり、複数発生する振動モードの周波数は時間経過とともに低下し、高周波数の振動モードの減衰が大きく、最終的に 1, 0 モードのみが残る。メカニカルノイズは発生周波数帯が広く、減衰が速い。以上の結果を検討し、周波数の減衰をとらえるため時間の概念を導入し、パターン認識でノッキングの判定をおこなうノッキング検知ロジックを構築することで、ノッキングとメカニカルノイズのタイミングと周波数が一致する場合であっても、高精度な判別が可能となった。その結果、従来の発生周波数の強度で判定するノッキング検知システムに対して、メカニカルノイズの発生時においてもシステムが安定的に機能するロバスト性の向上の達成が可能となった。これにより、従来よりもノッキング判定しきい値を下げて設定することが可能となり、ノッキング音の低減に寄与できることとなった。

ABSTRACT

The project discussed in this paper focused on the frequency attenuation characteristic of knock and mechanical noise in order to develop a more accurate method of distinguishing between the two phenomena. Short-time Fourier transform (STFT), which makes it possible to identify changes in frequency over time, was studied as a method of analyzing this characteristic. The duration of knocking is 80-90 deg in terms of crank angle. The frequencies of the multiple vibration modes that knock generates decline as time elapses, with attenuation greater in the high-frequency vibration modes, until finally only the 1, 0th mode remains. Mechanical noise occurs over a wide frequency band, and its attenuation is rapid. Based on these results, the concept of time was introduced in order to help enable the attenuation of the frequencies to be identified, and a knock detection logic that judges knock on the basis of pattern recognition was developed. This logic is able to distinguish knock and mechanical noise with a high degree of accuracy even when the timing and frequency of the two phenomena match. As a result, it has been possible to increase robustness in relation to mechanical noise in comparison to conventional knock detection systems that judge knock based on the intensity of the frequency at which it occurs, helping to ensure stable functioning of the system even when mechanical noise occurs. This has made it possible to set the threshold value for judgment of knock lower than is the case in conventional systems, contributing to the reduction of knock noise.

1. まえがき

近年、ガソリンエンジンにおいては、燃費向上のため高圧縮比化が進みノッキング領域が広がると同時に、多様なデバイスが使用されるようになってきている。これらの多くはメカニカルノイズを伴うため、振動センサを用いた

ノッキング検知システムには高精度なメカニカルノイズ判別手法が要求されている。従来のノッキング検知システムは、メカニカルノイズとノッキングの周波数と強度、タイミングが一致した場合、両者の判別が困難になるという課題が残されていた。この対応としてノッキングを解析した研究⁽¹⁾⁻⁽⁷⁾は多くみられるが、これまでのノッキング検知

*四輪 R&D センター

システムは、メカニカルノイズの影響を回避するように検出区間を限定する手法⁽⁸⁾や、ノッキングの無い状態の移動平均との偏差で判定する非ノッキング信号ベースの手法、統計的手法⁽⁹⁾やセンサ出力変化の傾向を利用する手法⁽¹⁰⁾などで対応してきた。しかし、バルブ着座ノイズに代表される多様なデバイスのメカニカルノイズは、さまざまな周波数や強度、タイミングを有するため、従来の手法でノッキングを検知することが困難になっている。

本稿では、ノッキングとメカニカルノイズの判別手法の改善を目的として、新たに時間の概念を導入しパターン認識を採用したノッキング検知ロジックの概要とその検知精度向上手法、および実機での確認結果について報告する。

2. ノッキング検知の課題

Fig. 1 にノッキング発生時とメカニカルノイズ発生時の非共振ノッキングセンサ出力を高速フーリエ変換の処理をし、周波数とスペクトル強度の特性を比較した結果を示す。グラフの丸く囲まれた部分のように、ノッキングとメカニカルノイズの周波数とスペクトル強度が一致するものが同一タイミングで発生した場合、従来のバンドパスフィルタ式ロジックでは両者の判別が不可能となる。したがって、周波数とスペクトル強度の一致でノッキング判定を実施するのではなく、他の手法を用いてノッキング検知ロジックを構成する必要がある。

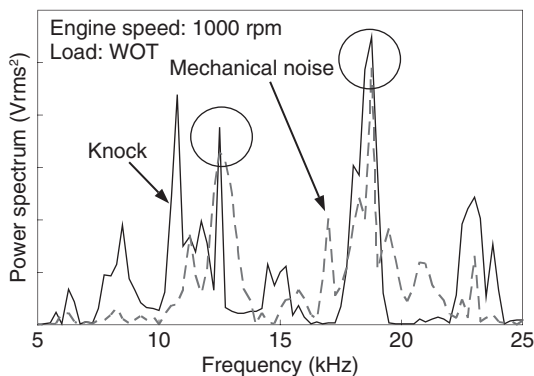


Fig. 1 Comparison of FFT processing results for knock and mechanical noise

3. ノッキングとメカニカルノイズの特性

ノッキングとメカニカルノイズの判別手法の改善のために、両者の周波数減衰特性の違いに着目した。この特性を解析する手法として、周波数の時間的変化をとらえることのできる短時間フーリエ変換法 (Short Time Fourier Transform: STFT) の検討をおこなった。ノッキングとメカニカルノイズ発生時の非共振ノッキングセンサ出力を STFT 処理し解析をおこなった結果、両者の差異を明確にすることが可能となった。以下にそれぞれの解析結果を述べる。

Table 1 Comparison of knock vibration duration for three different types of engine

Engine specifications	Displacement (cm³)	1,339	1,799	2,354
	Bore x Stroke (mm)	73 x 80	81 x 87.3	87 x 99
Engine speed (rpm)	Intake manifold pressure (kPa (G))	Knock vibration duration (deg)		
1000	0 (WOT*)	95	82	90
	-20	90	85	92
2000	0 (WOT)	92	80	84
	-20	90	85	90
3000	0 (WOT)	89	90	91
	-20	89	83	89

* Wide-Open Throttle

3.1. ノッキング解析結果

3.1.1. ノッキングの振動継続時間

Fig. 2 にノッキング発生時の非共振ノッキングセンサ出力を示す。このようにノッキング波形は、時間の経過に従って徐々に振幅が減少する。Fig. 3 にノッキング発生時の非共振ノッキングセンサ出力に STFT 処理した結果を示す。図の X 軸はクランクアングル、Y 軸は周波数を示す。スペクトル強度は色の濃淡で表され、濃度の濃いほうはスペクトル強度が強いことを示す。

Fig. 3 より、ノッキング振動はノッキング発生開始点から約 90 deg ATDC まで継続していることがわかる。これはノッキングの圧力波によって気柱振動を繰り返していることが原因であると考えられる。Table 1 に排気量の異なるエンジンで計測したノッキングの振動継続時間をクランクアングルで示して比較したものを示す。ノッキングの振動は排気量や負荷に関係なく、ノッキング発生開始点から約 80-90 deg の間、継続するということが明らかとなった。

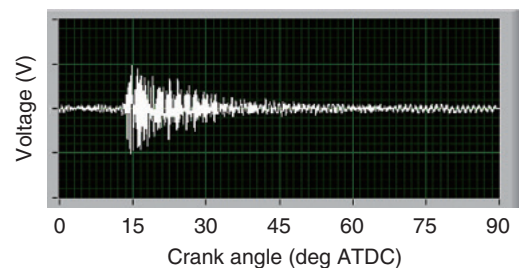


Fig. 2 Non-resonance knock sensor output when knock occurs

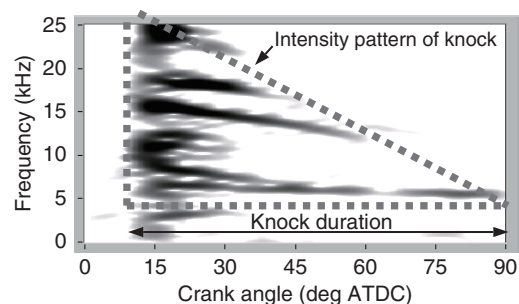


Fig. 3 STFT results when knock occurs

3.1.2. 振動モードの周波数低下現象

Fig. 4 にノッキングによって発生する筒内の振動モードを示す。式 (1) にドレーパの式⁽¹¹⁾を示す。Fig. 5 にノッキング発生時の非共振ノッキングセンサ出力を STFT 処理した結果と、式 (1) より算出した周波数 (破線) を示す。Fig. 5 は、ノッキング発生時の非共振センサ出力を STFT 処理した結果、Fig. 4 に示した複数の振動モードが発生していることを示している。Fig. 5 のノッキング発生時の音速は筒内圧力から状態方程式で算出したところ約 1000 m/sec である。この値から式 (1) より各振動モードの周波数を求めた結果を Table 2 に示す。Table 2 に示した各振動モードの周波数は、Fig. 5 のノッキング発生時の STFT 処理結果の周波数と高い相関関係があることがわかる。また、STFT 結果の各振動モードの周波数は、膨張行程の進行と共に低下する傾向を示している。これは式 (1) より、音速が低下することにより各振動モードの周波数が低下したと推察した。そこで、膨張行程中の指圧センサ出力から音速を求め、式 (1) より周波数を算出したところ、STFT 結果と同様の傾向を示すことがわかった。以上の結果より、膨張行程の進行と共に音速が低下するため、ノッキングにより発生した複数の振動モードの周波数は低下する特徴を持つと判断した。

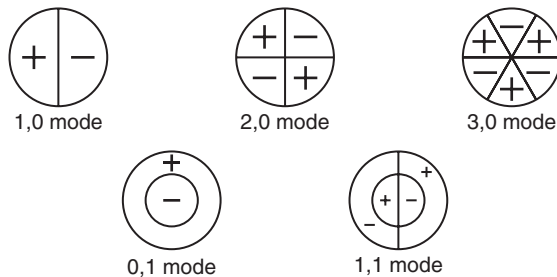


Fig. 4 In-cylinder vibration modes

$$f_{m,n} = \beta_{m,n} \frac{C}{\pi D} \quad (1)$$

ここで、

$f_{m,n}$: Frequency

$\beta_{m,n}$: Vibration mode coefficient

C : Speed of sound

D : Bore

である。

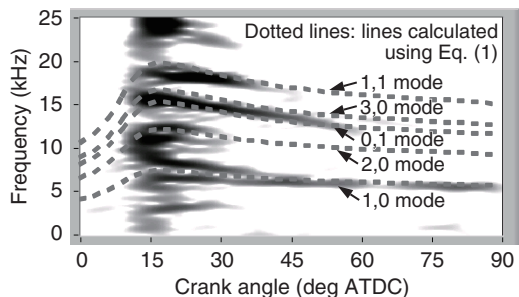


Fig. 5 Comparison of STFT results and curves calculated using Draper's equation

Table 2 Vibration mode frequencies immediately after knock occurs

Calculation condition: C=1000 m/sec D=87 mm					
	1,0 mode	2,0 mode	0,1 mode	3,0 mode	1,1 mode
Frequency (kHz)	6.8	11.3	14.2	15.6	19.8

3.1.3. 各振動モードの減衰特性

各振動モードの周波数は膨張行程進行と共に減衰し、クランクアングル 90 deg 付近まで残るのは 1,0 モードのみである。これは高周波数の振動モードの圧力波が、シリンダ内での反射や干渉によって波形合成され、減衰したためと考えられる。

3.2. メカニカルノイズ解析結果

多くのメカニカルノイズは、打撃が主要因である。代表的なものとして、吸気バルブと排気バルブが閉じる際に発生するバルブ着座ノイズがある。Fig. 6 にバルブ着座時の非共振ノッキングセンサ出力を示す。また、Fig. 7 にバルブ着座ノイズの STFT 処理結果を示す。バルブ着座ノイズは幅広い周波数帯で発生していることがわかる。バルブ着座ノイズは減衰が速く、振動継続時間は前述したノッキングの約 5 分の 1 程度である。これはバルブ着座ノイズの振動源であるバルブの閉弁が、動弁系機構によって強制的に収束させられているためである。このため、バルブタイミング連続可変機構の作動により、バルブ着座ノイズの発生位置に変化が生じてても、この特徴に変化はない。

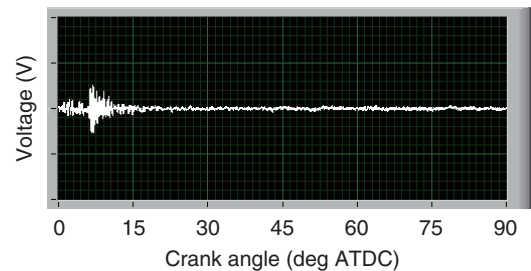


Fig. 6 Non-resonance knock sensor output when valve-seating noise occurs

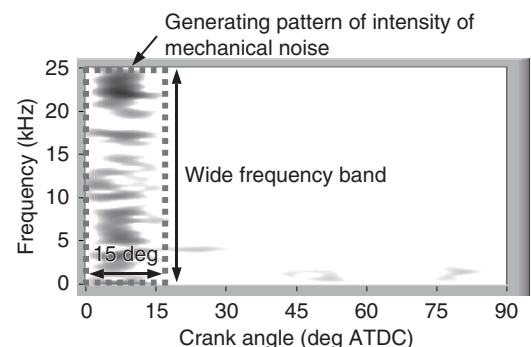


Fig. 7 STFT processing results for valve-seating noise

4. ノッキングとメカニカルノイズの判別手法

ノッキングとメカニカルノイズの特徴をもとに、周波数の減衰をとらえるため時間の概念を導入し、パターン認識でノッキングの判定をおこなう新しいノッキング検知ロジックを構築した。

Fig. 3 で示すように、ノッキング発生時の STFT 結果は、高周波数の減衰が大きく 1,0 モードがクランクアングルで 90 deg 程度の継続時間を有するため、三角形のようなスペクトル強度分布となる。また、Fig. 7 より、メカニカルノイズ発生時の STFT 結果は、幅広い周波数帯を有し、スペクトル強度の減衰が速いことから、長方形のようなスペクトル強度分布となる。以上の結果より、STFT 結果におけるノッキングやメカニカルノイズのスペクトル強度分布をパターン化し、その違いによって両者を判別することが可能であると考えた。Fig. 8 にノッキングとメカニカルノイズのスペクトル強度分布をパターン化した模式図を示す。

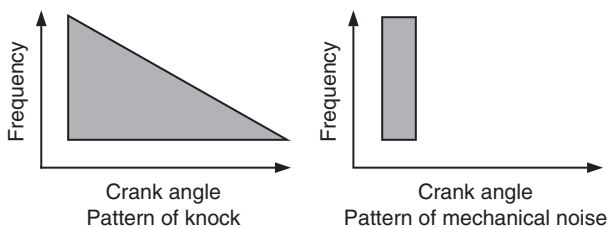


Fig. 8 Knock and mechanical noise intensity patterns

5. ノッキング検知ロジック

Fig. 9 に STFT ノッキング検知ロジック (STFT ロジック) の処理順序を示す。

(1) ノッキングセンサ出力に時間の概念を導入するため STFT 処理をし、(2) 周波数とクランクアングルのマップに格納する。(3) ここからノイズ成分を除去してノッキングのみを表すマップとした後、(4) ノッキング判定しきい値と比較して二値化処理する。(5) ノッキングのパターンと比較し、相関性が 50% 以上でノッキングと判定する。(6) ノッキング判定をした場合は適合率に応じて点火時期リタードを実行し、(7) ノッキングと判定されない場合にはメカニカルノイズを学習し、次サイクルで使用する。以下に各処理の詳細を説明する。

5.1. STFT 処理

ノッキングが発生する 12-78 deg ATDC の区間の非共振ノッキングセンサ出力に、STFT 処理を実行する。解析する周波数からサンプリング定理より、サンプリングは 50 kHz 以上とし、1 kHz ごとの周波数解析を実行する

ため時定数を 1 msec に設定して、6 deg ごとに周波数成分を算出する。この STFT 処理結果は Fig. 10 に示す、周波数を 5-23 kHz を 6 のグループに、クランクアングルを 12-78 deg を 6 deg ずつの 11 のグループに分けた 66 個のマスキュラからなる STFT マップに格納する。また、ノッキングのスペクトル強度分布をパターン化したものをマスタマップと呼称し、Fig. 10 に網かけ部分で示す。マスタマップ内の数値は後述するノッキング判定しきい値の持ち上げ係数を示している。

5.2. 振動モード抽出

時間の進行と共に低下する振動モードの周波数をとらえるため、1 kHz ごとに算出された STFT 処理結果に対し、Fig. 10 の STFT マップに示すように周波数をグループ分けし、各グループで最大値となるスペクトル強度を選別する。この処理を実施することで、ノッキングによって発生した各振動モードの周波数の低下現象をとらえることができる。算出した結果を最大値マップと呼称する。

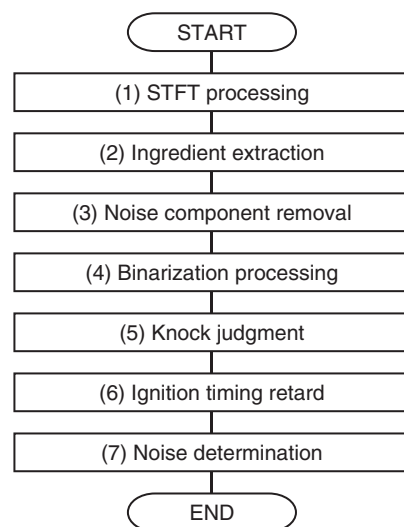


Fig. 9 Knock detection logic processing flow

		Crank angle (deg ATDC)										
		12	18	24	30	36	42	48	54	60	66	72
Frequency band (kHz)	20 - 23	1	1									
	17 - 19	1	1	1								
	14 - 16	1	1	1	1							
	11 - 13	1	1	1	1	1						
	8 - 10	1.25	1.5	2	2	1.5	1.25					
	5 - 7	1.25	1.5	2	2	1.5	1.25	1	1	1	1	1

Master map
Numbers in the master map show coefficient of boosting knock judgment threshold value

Fig. 10 STFT map, master map, coefficient of boosting knock judgment threshold value

5.3. ノイズ成分除去

ノッキングと判定されない場合に、あらかじめ連続的に発生するメカニカルノイズを学習してノイズ学習マップとし、各格子点で最大値マップとの差分を算出する。この処理によりノッキングのみを表すマップとなり、これを強度分布マップと呼称する。

5.4. 二値化処理

強度分布マップの値をノッキング判定しきい値と比較して、その値がノッキング判定しきい値以上の場合は[1]、小さい場合は[0]と変換する。この処理を実施することで、強度分布マップは強度発生パターンを示すマップに変換される。これをパターンマップと呼称する。

Fig. 11 にノッキング判定しきい値を示す。ノッキング判定しきい値はトレースノッキングで検知できる値に設定する。また、マスタマップの中でノッキング発生時に強度の強くなる周波数帯や、ノッキングの減衰特性を考慮し、Fig. 10 に示すノッキング判定しきい値の持ち上げ係数をかけることにより、部分的なノッキング判定しきい値の持ち上げをおこなっている。これにより、メカニカルノイズの発生時においてもシステムが安定的に機能するロバスト性の向上を図っている。ほかにも、低水温時にはピストンスラップをはじめとする不連続なメカニカルノイズが発生するため、ノッキング判定しきい値を持ち上げ、低水温時のメカニカルノイズに対するロバスト性を向上させている。

5.5. ノッキング判定

二値化処理にて算出されたパターンマップの強度発生パターンと、あらかじめ規定したノッキングの強度発生パターンとを比較し、相関性を算出する。算出した値を適合率と呼ぶ。適合率 50% 以上でノッキングと判定させている。

ノッキングの発生タイミングは点火時期や燃焼速度によって変化する。Fig. 10 では、マスタマップは 12 deg より始まっているが、点火時期、排気再循環 (EGR) によってマスタマップの開始位置を調整している。Fig. 12 に点火時期、EGR とマスタマップ開始位置の関係を示す。

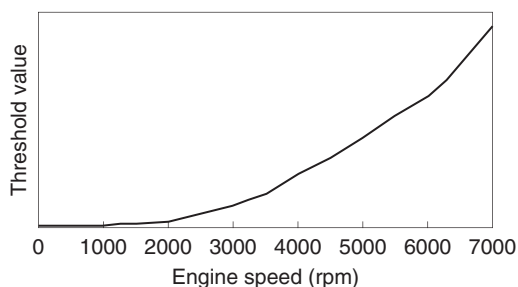


Fig. 11 Knock judgment threshold value

5.6. 点火時期リタードの実施

ノッキングと判定された後、ノッキング強度を示す適合率に応じて、必要最小限の点火時期リタードを実施する。Fig. 13 に適合率と点火時期リタード量の関係を示す。従来のシステムではノッキングと判定すると一定量リタードしていたが、本システムでは適合率に応じて最適リタード量を規定する。これにより、過度なりタードやリタード不足がなくなり、燃費を低下させることなく、ノッキング音の低減を図っている。

5.7. ノイズ学習

メカニカルノイズの代表的なものとしてバルブ着座ノイズがあるが発生頻度が高く、またバルブ本体の質量やバルブスプリングのばね定数でエネルギーが決まるため安定している。ノッキングと判定されない場合は、各格子点にて連続的に発生するメカニカルノイズの学習をして、次サイクルのノイズ学習マップとして使用する。ノイズ学習マップはエンジン回転数変化の補正をおこない、過去値との加重平均にて算出する。

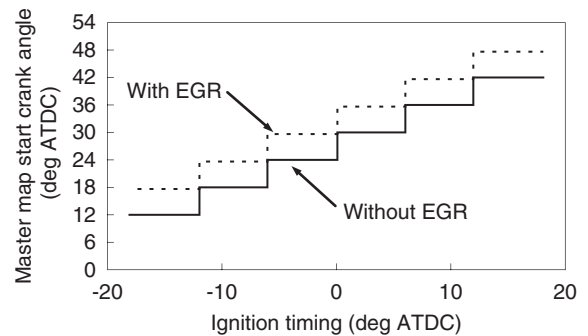


Fig. 12 Start timing of master map

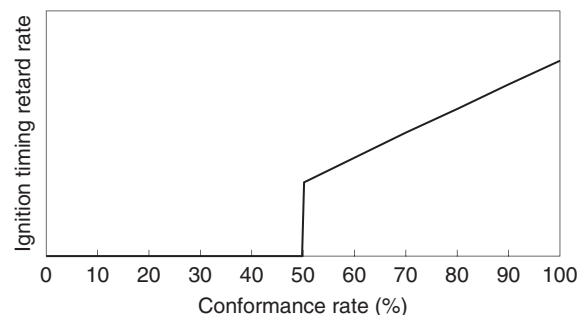


Fig. 13 Knock retard for conformance rate

6. STFT ロジックの検証

6.1. 供試エンジン

供試エンジンには、バルブタイミングリフト可変機構 (VTEC) および吸気弁用カムシャフトに連続可変バルブタイミングコントロールを備える 2.4L DOHC-VTEC-L4 エ

Table 3 Engine specifications

Cylinder configuration	In-line 4-cylinder
Bore x Stroke (mm)	87 x 99
Displacement (cm ³)	2354
Compression ratio	10.5
Valve train	DOHC (inlet: valve timing control)
Number of valves	4 valves / cylinder
Fuel injection system	Port injection

Table 4 Operating conditions

Engine speed (rpm)	Intake manifold pressure (kPa (G))
1000	-20
1000	0 (WOT)
3000	-20
3000	0 (WOT)
6000	-20
6000	0 (WOT)

ンジンを使用した。エンジンの諸元を Table 3 に示す。

6.2. ノッキング検出時の STFT ロジックの確認

Table 4 に本テストのエンジン回転数と負荷の条件を示す。STFT ロジックの動作確認として、各テスト条件で、ノッキングが発生したサイクルの STFT ロジックの結果を解析した。

Fig. 14 にノッキングが発生した際の STFT 処理結果を示す。図の X 軸はクランクアングル、Y 軸は周波数を示す。スペクトル強度は色の濃淡で表され、濃度の薄い方がスペクトル強度が強いことを示す。

Fig. 14 の白い部分がノッキングによるスペクトル強度であり、Fig. 5 で示した結果と同様のノッキングの各振動モードの発生、およびその周波数低下を確認することができる。また、膨張行程の進行と共に高周波数の振動モードの減衰がより大きいという特徴も示していることがわかる。この結果より、STFT ロジックがノッキングの特徴を捉えていると判断した。Fig. 14 の STFT 処理結果より STFT ロジックが算出した強度分布マップを Fig. 15 に示

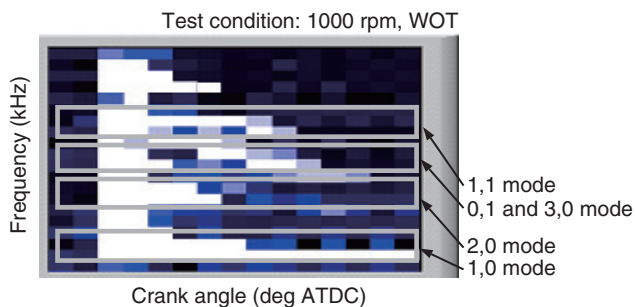


Fig. 14 STFT calculation results

す。算出された強度分布マップは、Fig. 14 の STFT 算出結果から、時間方向で低下するノッキングの振動モードを抽出できていることがわかる。Fig. 16 に、ノッキング発生時のパターンマップ算出結果を示す。ノッキング発生時の強度分布マップは二値化処理され、Fig. 8 に示すノッキングの特徴を有したパターンに変換されている。Fig. 16 の適合率を算出すると 93% となり、適合率 50% を超えノッキングと判定される。以上の結果から、STFT ロジックにより、ノッキングのパターン化が正常におこなわれていると判断した。

6.3. ノッキング検知精度の検証

エンジンに指圧センサを設置し、STFT ロジックの検知精度を指圧センサ出力と比較して検証した。指圧センサ出力のノッキング判定は、指圧センサ出力をバンドパスフィルタ (5 kHz-10 kHz) にて処理し、算出された値をノッキング判定しきい値と比較する手法を用いた。Fig. 17 に計測システムの構成を示す。

Fig. 18 に、ノッキングがほぼ連続的に発生している条件での指圧センサによるノッキング出力と、STFT ロジックによって算出された適合率のタイムチャートを示す。いずれのノッキング検知ロジックも、同一のサイクルでノッキ

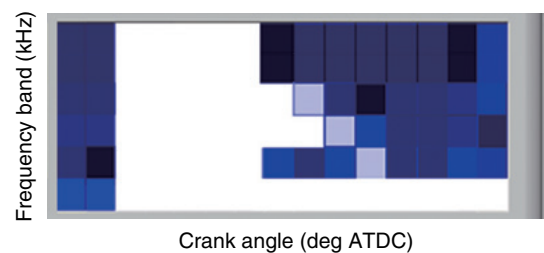


Fig. 15 Knock energy calculation results

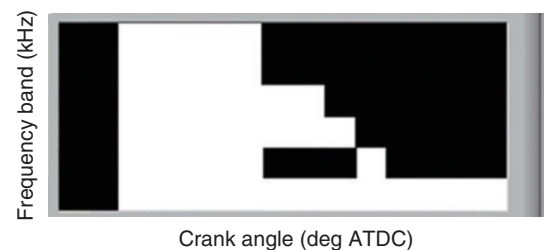


Fig. 16 Pattern map calculation results when knock occurs

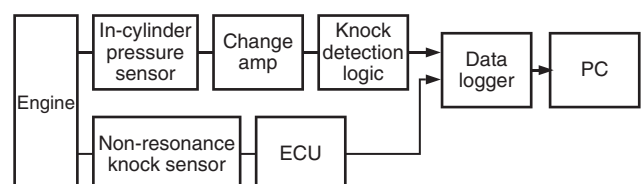


Fig. 17 Measuring system configuration

Table 5 Comparison of knock detection logic detection count for varying conditions

Engine speed (rpm)	Intake manifold pressure (kPa (G))	Number of times of knock detection in 50 cycles	
		STFT logic	In-cylinder pressure logic
1000	-20	6	6
1000	WOT	8	8
3000	-20	8	8
3000	WOT	7	7
6000	-20	11	11
6000	WOT	8	8

ングを検知していることが確認できる。Table 5 に異なるエンジン回転数と負荷条件における、各ロジックでのノッキング検知回数を示す。異なるエンジン回転数、負荷条件においても、両者のノッキング検知ロジックは同等の検知性能を示した。したがって、STFT ロジックは、ノッキングを正常に検知できていると判断した。

6.4. メカニカルノイズに対するロバスト性の確認

STFT ロジックの、メカニカルノイズの発生した場合においてもシステムが安定的に機能するロバスト性を検証するため、ノッキング検知ゲート内にバルブ着座ノイズを発生させ、ノッキング検知を実施した。

Fig. 19 の上のグラフに、バンドパスフィルタ式ロジックのノッキング出力とノッキング判定しきい値を示す。また、Fig. 19 下のグラフに STFT ロジックの適合率およびノッキングと判定する適合率 50% の値を示す。

バンドパスフィルタ式ロジックでは、バルブ着座ノイズがノッキング検知ゲート内に発生すると、非発生時に対してノッキング出力が増加し、ノッキング判定しきい値を超

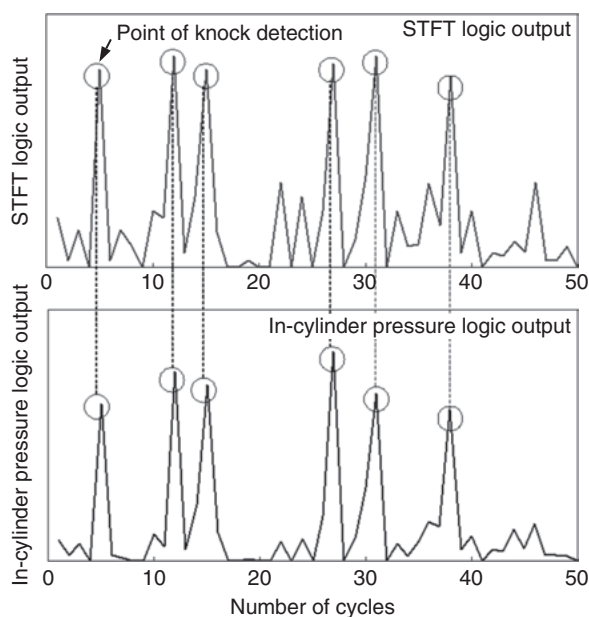


Fig. 18 Comparison of in-cylinder pressure sensor knock output and conformance rate

える点が発生している。これは、バンドパスフィルタ式ロジックが、メカニカルノイズをノッキングと誤判定していることを示している。一方、STFT ロジックは、バルブ着座ノイズがノッキング検知ゲート内に発生しても適合率の大幅な上昇は無く、メカニカルノイズをノッキングとして誤判定していないことがわかる。

Fig. 20 にバルブ着座ノイズ発生時に STFT ロジックが算出したパターンマップを示す。バルブ着座ノイズは、STFT ロジックにより、幅広い周波数帯をもったパターンを示していることがわかる。ノッキングは Fig. 16 で示すパターンであるのに対して、バルブ着座ノイズのパターンは明らかに異なる。したがって、STFT ロジックでは、適合率が上昇することなく、ノッキング誤判定に至らなかった。以上の結果から、STFT ロジックは、パターン化処理を実施することで、従来の発生周波数の強度で判定するノッキング検知システムに対して、メカニカルノイズに対するロバスト性を有していると判断する。

以上により、ノッキングとメカニカルノイズのタイミングと周波数が一致する場合であっても高精度に判別できていることが確認できた。また、メカニカルノイズに対するロバスト性の向上により、従来よりもノッキング判定しきい値を下げて設定することが可能となり、ノッキング音の低減に寄与できることとなった。

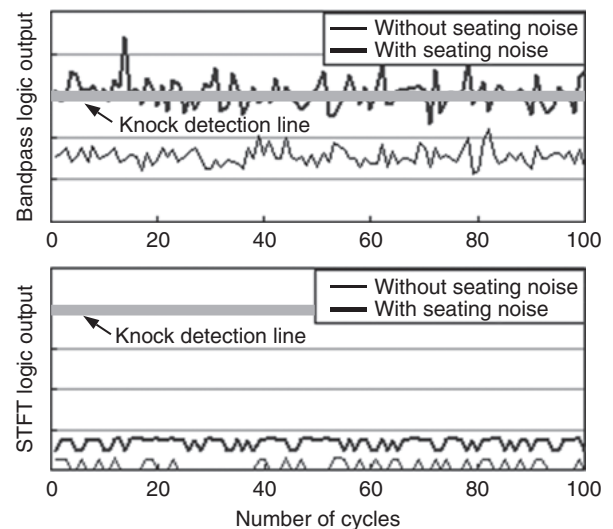


Fig. 19 Knock judgment output results for each logic when seating noise occurs

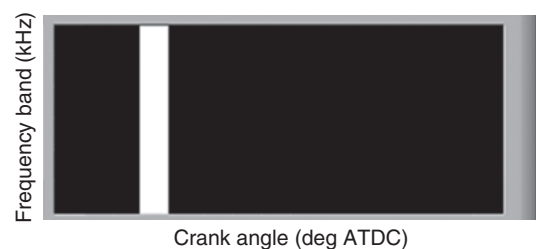


Fig. 20 Pattern map when valve-seating noise occurs

7. まとめ

ノッキングとメカニカルノイズを高精度に判別するノッキング検知ロジックを構築した。その結果を述べる。

- (1) STFT を用いて周波数の減衰をとらえるため時間の概念を導入し、パターン認識でノッキングの判定をおこなうノッキング検知ロジックを構築することで、ノッキングとメカニカルノイズのタイミングと周波数が一致する場合であっても高精度な判別が可能となり、従来の発生周波数の強度で判定するノッキング検知システムに対して、メカニカルノイズに対するロバスト性の向上の達成が可能となった。
- (2) メカニカルノイズに対するロバスト性の向上により、従来よりもノッキング判定しきい値を下げて設定することが可能となり、ノッキング音の低減に寄与できることとなった。

参考文献

- (1) Zadnik, M., Vincent, F., Vingerhoeds, R., Galtier, F.: SI Engine Knock Detection Method Robust to Resonance Frequency Changes, SAE Paper, 2007-24-0054(2007)
- (2) Lonari, Y., Polonowski, C., Naber, J., Chen, B.: Stochastic Knock Detection Model for Spark Ignited Engines, SAE Paper, 2011-01-1421(2011)
- (3) Ham, Y. Y., Chun, K. M., Lee, J. H., Chang, K. S.: Spark-ignition engine knock control and threshold value determination, SAE Paper, 960496(1996)
- (4) Borg, J. M., Cheok, K. C., Oho, S. T., Saikalas, G.: Knock Signal Analysis Using the Discrete Wavelet Transform, SAE Paper, 2006-01-0226(2006)
- (5) Zhang, Z., Tomita, E.: Diagnostic of Knocking by Wavelet Transform Method Utilizing Real Signal as Mother Wavelet, SAE Paper, 2001-01-3546(2001)
- (6) Zhang, Z., Tomita, E.: A New Diagnostic Method of Knocking in a Spark-ignition Engine using the Wavelet Transform, SAE Paper, 2000-01-1801(2000)
- (7) Xiaofeng, G., Stone, R., Hudson, C., Bradbury, I.: The detection and quantification of knock in spark ignition engines, SAE Paper, 932759(1993)
- (8) Kearney, M. J.: Knock Signal Conditioning Using the Discrete Fourier Transform and Variable Detection Window Length, SAE Paper, 2007-01-1509(2007)
- (9) Wu, G.: A Real Time Statistical Method for Engine Knock Detection, SAE Paper, 2007-01-1507(2007)
- (10) Samimy, B., Rizzoni, G.: Engine knock analysis and detection using time-frequency analysis, SAE Paper,

960618(1996)

- (11) Draper, C. S.: The physical effects of detonation in a closed cylindrical chamber, N.A.C.A., p. 493(1934)

■ 著 者 ■



秋元 賢治



小松 弘崇



倉内 淳史