

## ■原著論文/ORIGINAL PAPER■

## ノック振動を伴う HCCI 燃焼の自着火挙動及び周波数特性

## Autoignition Behavior and Frequency Characteristics in HCCI Combustion Accompanied by Pressure Oscillation

伊藤 直也<sup>1\*</sup>・島田 貴司<sup>1</sup>・山田 将徳<sup>1</sup>・飯島 晃良<sup>2</sup>・庄司 秀夫<sup>2</sup>ITO, Naoya<sup>1\*</sup>, SHIMADA, Takashi<sup>1</sup>, YAMADA, Masanori<sup>1</sup>, IJIMA, Akira<sup>2</sup>, and SHOJI, Hideo<sup>2</sup><sup>1</sup> 日本大学大学院理工学研究科 〒101-8308 千代田区神田駿河台 1-8-14  
Nihon University Graduate School, 1-8-14 Kanda-Surugadai, Chiyoda-ku, Tokyo 101-8308, Japan<sup>2</sup> 日本大学理工学部 〒101-8308 千代田区神田駿河台 1-8-14  
Nihon University, 1-8-14 Kanda-Surugadai, Chiyoda-ku, Tokyo 101-8308, Japan

2014年9月27日受付; 2015年3月7日受理/Received 27 September, 2014; Accepted 7 March, 2015

**Abstract** : Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) engines are being widely researched today, having attracted considerable interest for their low emissions and high efficiency. However, HCCI engines have a narrow range of stable operation owing to the occurrence of extremely rapid combustion at high loads and misfiring at low loads. Extremely rapid combustion at high loads is an especially large factor preventing expansion of the stable operating region. It is also known that abnormal combustion accompanied by in-cylinder pressure oscillations resembling those of knocking in a spark-ignition engine occurs in HCCI engines as well depending on the operating conditions. The purpose of this study was to identify the characteristics of pressure oscillations due to knocking in an HCCI combustion system. Using a two-stroke single-cylinder engine, pressure oscillations were investigated in detail on the basis of in-cylinder visualization/imaging of the combustion flame across the entire bore area, frequency analysis of the in-cylinder pressure waveform, and spectroscopic measurements. The results revealed that the maximum pressure rise rate,  $dP/dt_{max}$ , increased as the ignition timing advanced and the equivalence ratio increased and that in-cylinder pressure oscillations occurred under a condition of  $dP/dt_{max}$  higher than approximately 7 MPa/ms. The visualization results showed that HCCI combustion accompanied by in-cylinder pressure oscillations occurred in the latter stage of the combustion process due to rapid autoignition of the unburned end gas. Moreover, under a condition of a high equivalence ratio, a highly brilliant autoignited flame occurred over a wider area of the combustion chamber. The power spectrum of the in-cylinder pressure oscillations indicated that they possessed unique frequency components in high-frequency bands, in addition to the frequency components around 7 kHz.

**Key Words** : HCCI, Knock, Autoignition, Visualization, Frequency Characteristics, Spectroscopic Measurement

## 1. 緒言

近年、自動車用ガソリンエンジンの燃費低減への対応がより一層求められる社会的背景より、課題解決可能な次世代の内燃機関として、予混合圧縮着火 (Homogeneous Charge Compression Ignition 以下 HCCI) 機関が注目され、広く研究されている[1-12]。HCCI 機関は特性上、高圧縮比化かつ火炎伝播限界を超えた希薄燃焼が可能であり、シリンダ内局所での燃料濃度不均一性が小さいという特徴を持つ。これらの特徴から高効率であり、窒素酸化物 (NO<sub>x</sub>) 及び粒子状物質 (PM) を同時低減することができる。しかし、HCCI 機関は物理的着火起因が存在せず、着火及び燃焼は

混合気の化学反応に依存し、加えて燃焼が多点同時着火であるため、着火時期の制御が困難であり、運転領域拡大等の課題が存在する[13]。特に高負荷での急峻な燃焼が、運転領域拡大の妨げになっており、HCCI 機関においても、条件によっては SI 機関のノッキングのようにノック振動を伴う異常燃焼が起こることが知られている[14-16]。HCCI 機関の課題である運転領域拡大のためには、HCCI 燃焼における異常燃焼特性を把握することが重要である。

過去、著者らの研究では、単気筒エンジンを用いて、ノック振動を伴う HCCI 燃焼を観察した。また、着火時期の進角に対して、 $dP/dt_{max}$  の値が大きくなり燃焼が急峻になる結果を報告した[19-21]。本研究では、HCCI 燃焼時に生じるノック振動の特性を把握することを目的として、ノック振動を伴う HCCI 燃焼の様子を全ボア領域における筒内可

\* Corresponding author. E-mail: csno13004@g.nihon-u.ac.jp

視化撮影を行い観察すると共に, 筒内圧力の周波数解析, 分光学的手法である発光計測を用いて詳細に分析した結果を報告する. さらに, ノック振動の発生モードをより詳細に把握するために, 弱いノック振動から強いノック振動に遷移する過程に着目した. そこで, バンドパスフィルタを用いて特定の周波数成分を抽出し, 筒内可視化撮影より得られた自着火挙動と各振動モードとの関係を検討した.

## 2. 実験装置および実験方法

### 2.1. 実験装置

本研究で用いたエンジン諸元及び実験条件を表 1 に, エンジン概略図を図 1 に示す. 供試機関には構造的に光学測定などの自由度が高い 2 ストローク単気筒エンジンを使用した. シリンダヘッド上部に石英観測窓 ( $\phi = 84$  mm) を設けることが可能で, 全ボア領域においてハイスピードカメラでの直接撮影を行った. 撮影速度は 54000 fps (0.133 deg./frame), 解像度は  $256 \times 256$  pixels とした. 供試燃料には自己着火が容易な燃料である n-heptane (0 RON) を使用し, 有効圧縮比 14 : 1, 機関回転数 1200 rpm 一定, スロットル開度は全開で実験を行った. 筒内圧力はシリンダヘッド側部に取り付けた水晶圧力変換器 (Kistler type 6054 AR) により測定した. また, HCCI 燃焼の主燃焼時における発光挙動を観測するために分光学的手法である発光法を用いた. シリンダヘッド側部に石英製の観測窓を設けボア方向の筒内自発光を採取し, 光ファイバにより分光器へと導入し, 395.2 nm に分光した後, 光電子増倍管により透過光強度として検出した. 395.2 nm の発光波長は, 冷炎反応におけるホルムアルデヒド (HCHO) の発光波長であると同時に, 主燃焼で生じる CO と O の再結合反応による強い連続スペクトル発光 (CO-O 放射) の波長帯の一部である[17]. この際, 燃焼室内の自発光の光路を確保するために, また点火プラグの電極との干渉を防ぐため, ピストンクラウン上部に溝を設けている (図 1 (a)). このため, 後に示す可視化画像において, 溝の部分が明るく光って見える場合があるが, これは奥行き方向の厚みが明るく写っているためである.

### 2.2. ノッキング強度の定義

本研究では, 図 2 に示すように, 筒内圧力をカットオフ周波数 4 kHz のハイパスフィルタにて高周波成分を抽出し, 最大圧力振幅をノッキング強度  $P_{KI}$  [MPa] と定義し, ノック振動の強さの尺度とした.

## 3. 実験結果および考察

### 3.1. HCCI 燃焼におけるノック現象

本節では, ノック振動を伴う HCCI 燃焼の測定波形を示し, さらに筒内可視化結果より, 通常の HCCI 燃焼とノック振動を伴う HCCI 燃焼を比較した結果を示す. 燃料に n-heptane (0 RON) を用い, 有効圧縮比 14 : 1 一定の条件の

Table 1 Specifications of test engine and test condition.

2-Stroke Air Cooled Single Cylinder Gasoline Engine	
Scavenging Type	Schnürle
Bore $\times$ Stroke	72 mm $\times$ 60 mm
Displacement	244 cc
Equivalence Ratio	0.5, 0.6, 0.7
Effective Compression Ratio	14
Engine Speed	1200 rpm
Throttle	WOT
Test Fuel	n-heptane (0 RON)
Frame Rate	54000 fps (0.133 deg./frame)

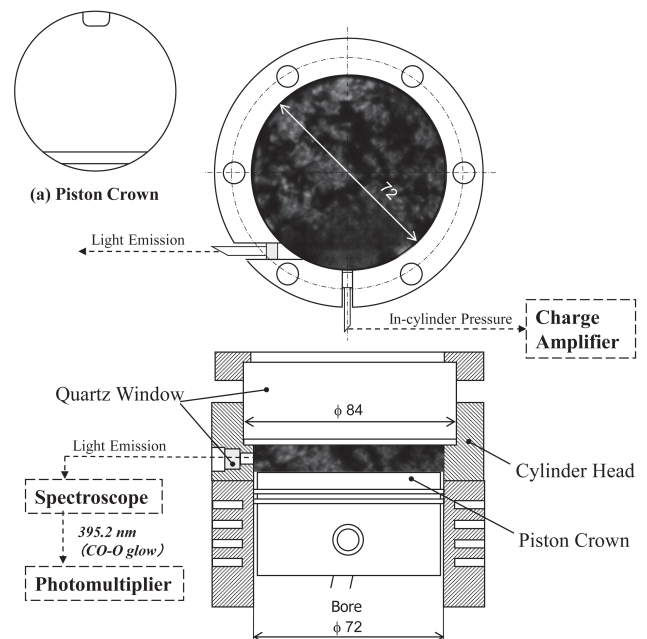


Fig. 1 Configuration of optically accessible engine and equipment.

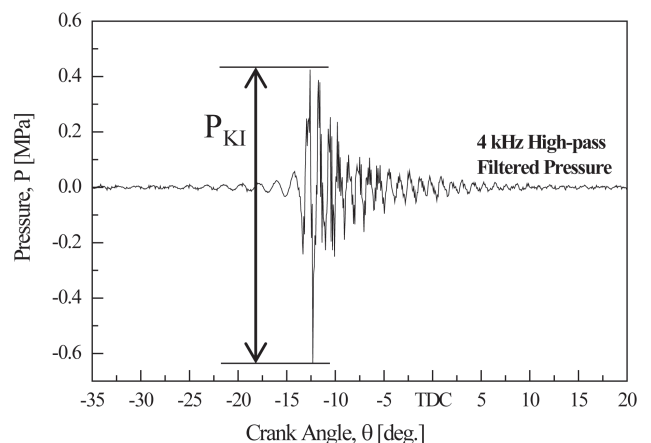


Fig. 2 Definition of knocking intensity,  $P_{KI}$ .

下, 当量比  $\phi = 0.5, 0.6, 0.7$  それぞれにおいての筒内圧力  $P$  [MPa], ノッキング強度  $P_{KI}$  [MPa], 発光強度  $E_{395.2}$  [A.U.] を図 3, 4, 5 に示す. まず, 筒内圧力に着目すると,  $\phi = 0.5$ ,  $T_{SC} = 313$  K の条件を除いたすべての波形で, ノック振動を生じていることが分かる. また, 掃気温度が高く燃焼位相

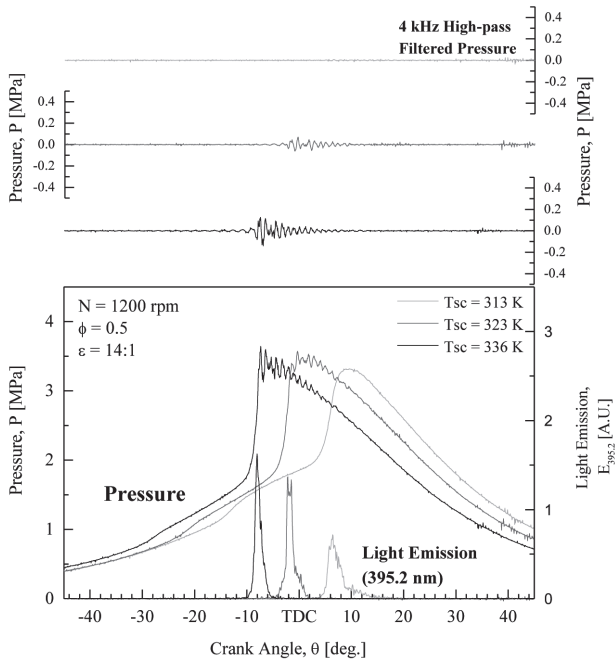


Fig.3 In-cylinder pressure, light emission and knocking intensity under different scavenging temperature ( $\phi = 0.5$ ).

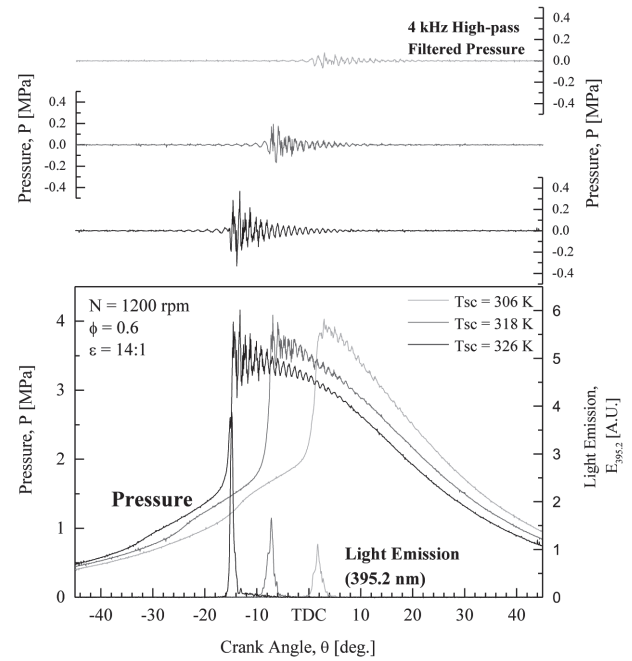


Fig.4 In-cylinder pressure, light emission and knocking intensity under different scavenging temperature ( $\phi = 0.6$ ).

が早期化するに伴い、ノッキング強度は上昇、加えて発光強度は急激な増加の挙動を示していることが確認できる。この傾向は、いずれの当量比においても同様である。以上の結果は、燃焼の主体が圧縮行程に遷移し、ピストン圧縮による筒内温度、圧力上昇効果が加わり、筒内の急速な燃焼が原因であると考えられる。そこで、可視化結果から考察する。

ノック振動を生じていない HCCI 燃焼とノック振動を生じた HCCI 燃焼の両条件が確認できた  $\phi = 0.5$  における  $T_{sc} = 313$  K, 336 K の可視化結果を図 6 に示す。ノック振動が生じていない  $T_{sc} = 313$  K は、最初の自着火炎の発現から燃焼後半過程にかけて徐々に、筒内全域に分散して自着火炎が発現している様子が観察できる。一方、ノック振動が生じた  $T_{sc} = 336$  K は、燃焼の前半過程 ( $\theta = -10.3$  deg. から  $-8.93$  deg.) では、徐々に自着火炎が発現する様子を観察できるものの、燃焼後半過程の未燃部において、非常に短い期間に、かつ比較的大きな領域で自着火炎が発生していることが観察できる (Region A)。さらに、壁面付近に輝度の高い自着火炎が発現していることが分かる (Frame A)。すなわち、SI 燃焼における末端ガスの自着火によるノック振動現象と似たように、HCCI 燃焼においても、燃焼室の温度、ガス組成等の斑による影響で、自着火しやすい領域から徐々に自着火炎が発現し、未燃部が燃焼前半過程で発現した自着火炎により圧縮されることで急速に自着火するため、ノック振動を生じたと推察される。

### 3.2. HCCI ノック振動周波数解析

前節の可視化結果で、ノック振動を伴う HCCI 燃焼では、

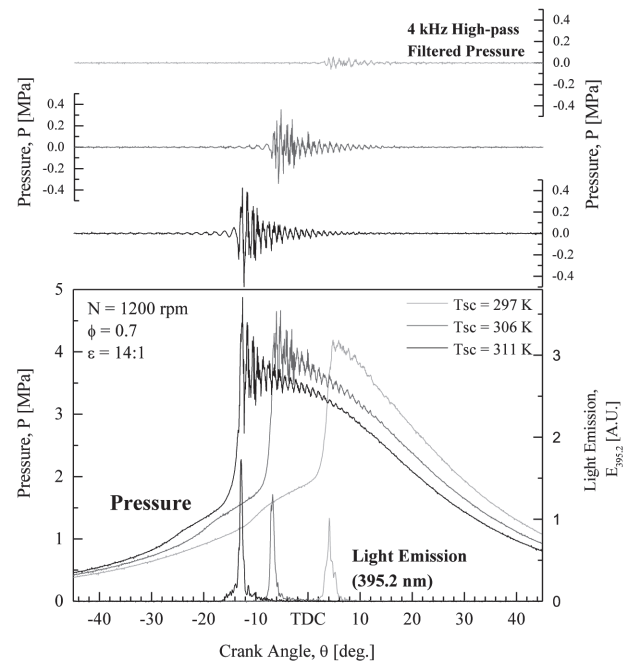


Fig.5 In-cylinder pressure, light emission and knocking intensity under different scavenging temperature ( $\phi = 0.7$ ).

未燃部が急速に自着火する様子が観察できた。本節では、HCCI 燃焼時に生じるノック振動の特性を把握するため、周波数解析を行った。図 3, 4, 5 で示した各当量比での筒内圧力を周波数解析した結果を、図 7, 8, 9 に示す。いずれの当量比においても、7 kHz 付近にパワースペクトルの明確なピーク値を示し、また、掃気温度が高く、かつ当量比が



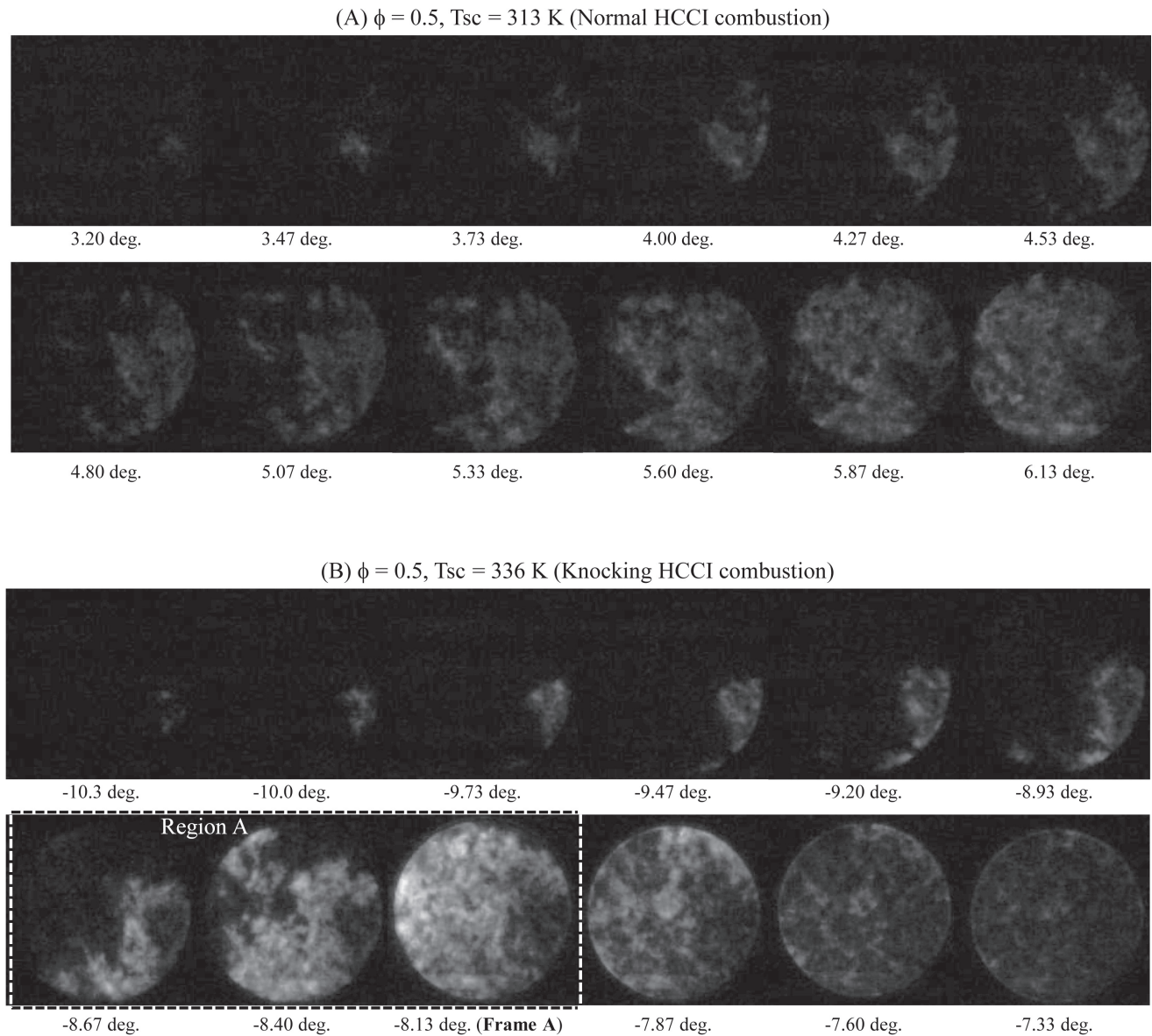


Fig.6 Visualization results of HCCI combustion given in Fig.3 (A) Normal HCCI combustion (B) Knocking HCCI combustion.

大きくなるほどピーク値が上昇する傾向が分かる。

図 8 の  $\phi = 0.6$  では, 7 kHz 付近に加え, 11 kHz 付近にピーク値を示し, また, 図 9 の  $\phi = 0.7$  では, 15 kHz 付近にピーク値が確認できる。すなわち, 当量比の増加に伴い, 高周波数帯に特有のノック振動周波数成分を持つ傾向が見られる。

ここで, Draper が提唱する式[18]を用いて各振動モードにおける共振周波数を算出し, 比較考察した。共振周波数は以下の式より与えられる。

$$f_{m,n} = \frac{\rho_{m,n} \cdot a}{\pi \cdot B} \quad (1)$$

ここで,  $f_{m,n}$ : 共振周波数[Hz],  $\rho$ : モード定数,  $m$ : 端面方向次数,  $n$ : 半径方向次数,  $a$ : 音速[m/sec],  $B$ : ボア径[mm]である。音速は以下の式より求めた。

$$a = \sqrt{\kappa RT} \quad (2)$$

ここで,  $\kappa$ : 比熱比,  $R$ : ガス定数[J/kg · K],  $T$ : 筒内ガス温度[K]である。本報では, 比熱比  $\kappa = 1.27$ , ガス定数  $R = 293 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ , 筒内ガス温度  $T = 1800 \text{ K}$  と仮定し, 式 (2) より求めた音速の値を, 式 (1) に用いた。算出した共振周波数を表 2 に示す。各振動モードの共振周波数は, 実験結果より得られたノック振動周波数と定性的に概ね一致した。これより, HCCI 燃焼時に生じるノック振動は, 特有の周波数成分を持ち, 圧力波の共振振動に起因する円筒モードに対応すると思われる。

さらに, 図 7, 8, 9 に,  $\rho_{1,0}$  モードに相当する 7 kHz 付近のパワースペクトル最大値時の周波数  $f_{\rho_{1,0}}$  [Hz] を併記する。なお, 明確なピーク値を確認された条件についてのみ

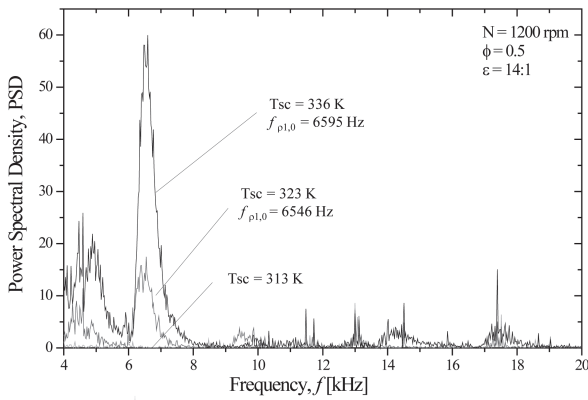


Fig.7 Power spectral density of the in-cylinder pressure given in Fig.3 under different scavenging temperature ( $\phi = 0.5$ ).

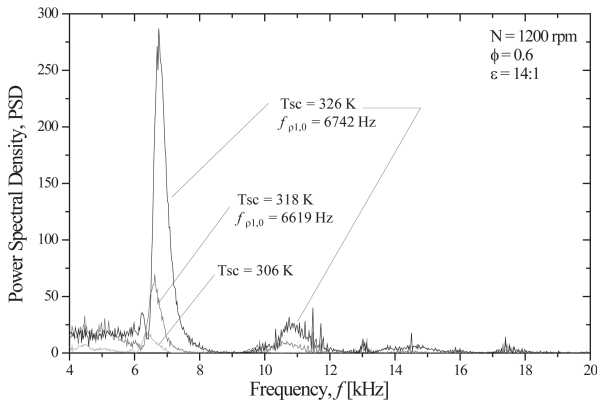


Fig.8 Power spectral density of the in-cylinder pressure given in Fig.4 under different scavenging temperature ( $\phi = 0.6$ ).

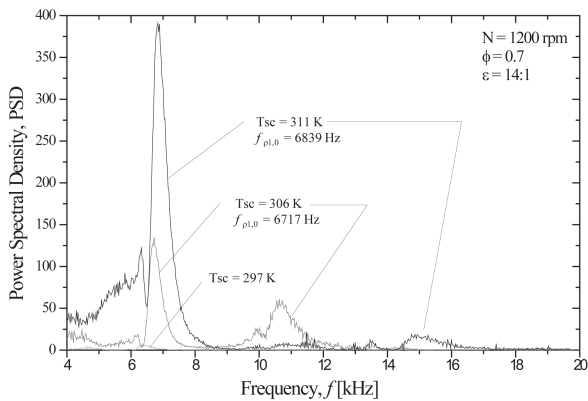


Fig.9 Power spectral density of the in-cylinder pressure given in Fig.5 under different scavenging temperature ( $\phi = 0.7$ ).

Table 2 Vibration modes and vibration mode factors.

Mode Shapes					
$m, n$	1, 0	2, 0	0, 1	3, 0	1, 1
$\rho_{m,n}$	1.84	3.05	3.83	4.20	5.33
$f_{m,n}$	6.66 kHz	11.0 kHz	13.9 kHz	15.2 kHz	19.3 kHz

表示する  $f_{\rho 1,0}$  は、掃気温度の増加及び当量比の増加に伴い、数百 Hz 程度増加していることが分かる。これは、掃気温度の増加及び当量比の増加により、筒内ガス温度が高まり、式 (2) より音速が上昇したためだと考えられる。

### 3.3. 振動モードとボア全域可視化結果

ここでは、 $\rho_{1,0}$  モード、 $\rho_{2,0}$  モードを対象に、相当する振動周波数 (4-9 kHz, 9-12.5 kHz) をバンドパスフィルタにて抽出し、ノック振動の発生モードについて検討する。なお、検討対象波形は 3.1 節で示した、ノック振動を伴う筒内圧力波形を選択し、燃焼位相が概ね同一の燃焼サイクルを用いた。図 10 に、当量比を変化させた際の筒内圧力 P [MPa]、バンドパスフィルタ処理後の筒内圧力 P [MPa] を示す。筒内圧力に着目すると、いずれの条件においても、ノック振動が観測され、当量比の増加に伴い、 $\rho_{1,0}$  モードに相当する振動成分の振幅は大きく、かつ継続時間が長くなることが分かる。特に、 $\phi = 0.6, 0.7$  では、 $\rho_{2,0}$  モードに相当する振動成分が明確に確認できる。さらに、 $\rho_{1,0}$  モードに相当する振動成分と比較すると、減衰が大きいことが分かる。一般に、高周波振動は減衰が大きくなることが知られている。すなわち、 $\rho_{2,0}$  モードでは粘性等のエネルギー散逸の影響を受け、早期に減衰したものと考えられる。

以上のノック振動周波数は、3.2 節で前述した通り、圧力波の共振振動に起因する円筒モードに対応することが考えられる。そこで、可視化結果より自着火挙動を観察し、考察を行う。図 11 に、図 10 の筒内圧力波形に対応する可

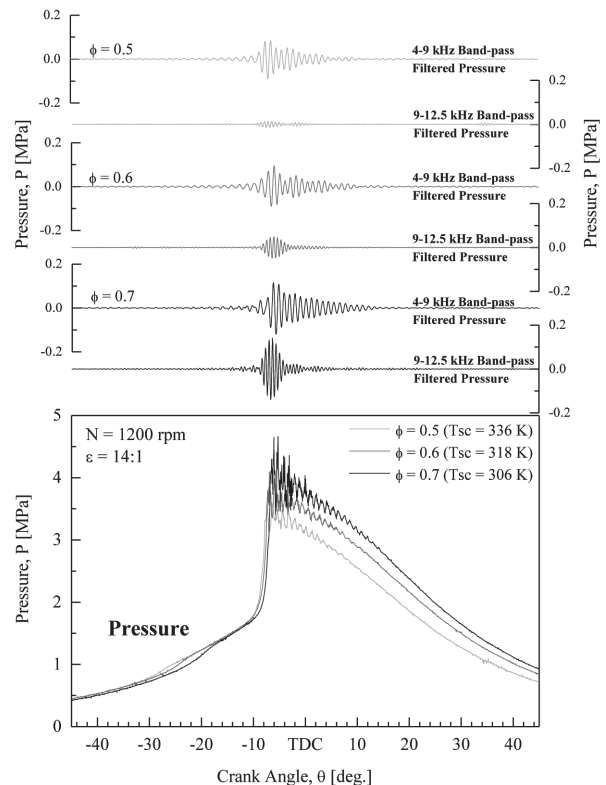


Fig.10 In-cylinder pressure and band-pass filtered (4-9 kHz, 9-12.5 kHz) pressure under different equivalence ratio.

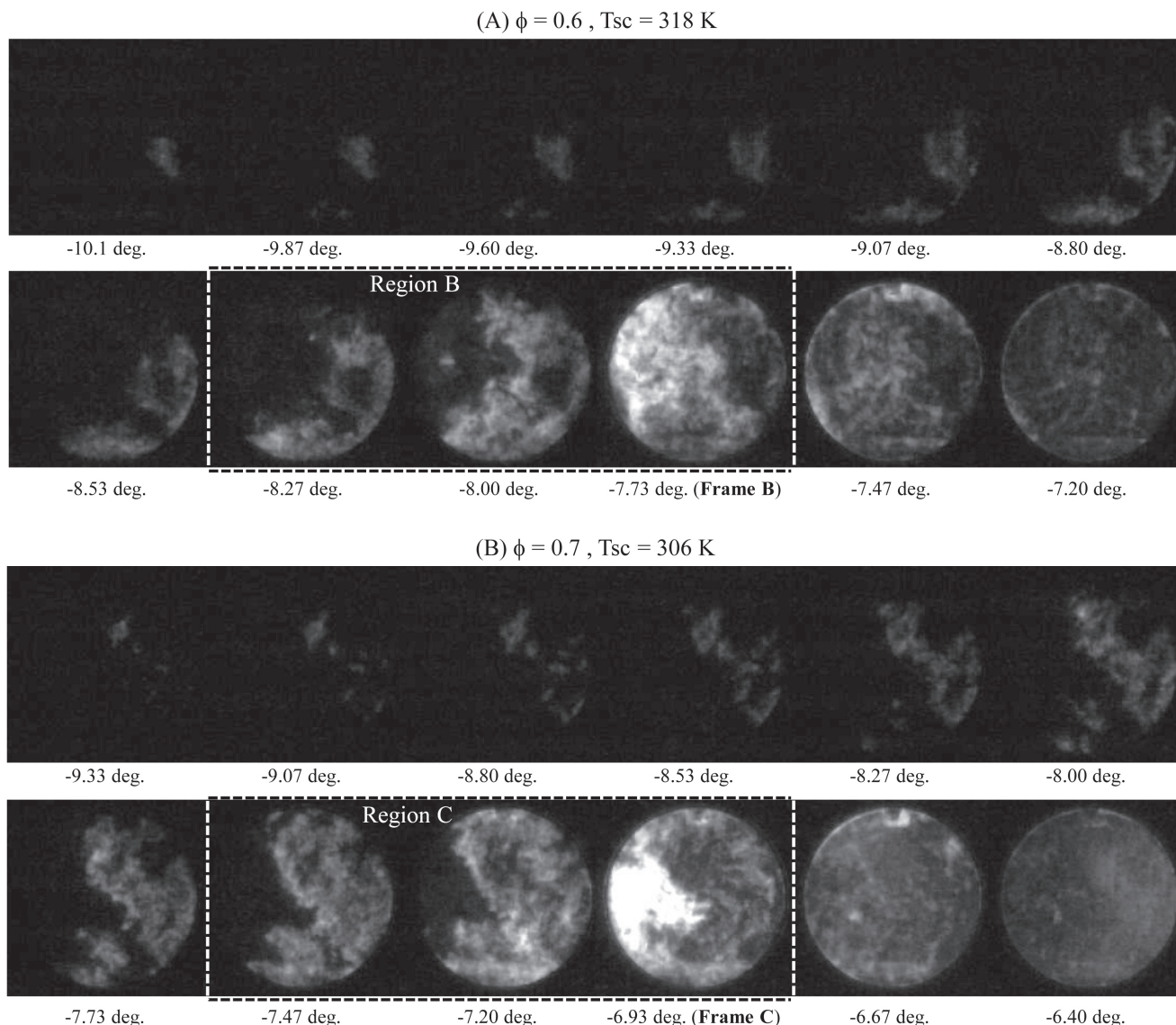


Fig.11 Visualization results of knocking HCCI combustion given in Fig.10 (A) equivalence ratio  $\phi = 0.6$  (B)  $\phi = 0.7$ .

視化結果を示す ( $\phi = 0.5$  の可視化結果は図 6 (B) を参照されたい). 3.1 節にて前述した, ノック振動を生じた条件の可視化画像での自着火挙動と同様に,  $\phi = 0.6, 0.7$  においても, 燃焼後半過程の未燃部において, 非常に急速に自着火炎が発現している様子が観察できる (Region B, Region C).

さらに,  $\phi = 0.5$  では, 燃焼室の壁面近傍で輝度の高い自着火炎の発現が観察できたが,  $\phi = 0.6, 0.7$  では, 発現する領域は拡大し, 燃焼室中央部付近にかけ大型化した輝度の高い自着火炎が発現する様子が分かる (Frame B, Frame C). すなわち, 現段階では詳細なメカニズムは解明できないが, ノック振動発生モードは, 燃焼後半過程での急速かつ局所的な自着火炎の発現の影響を受けることを示唆される.

### 3.4. 圧力上昇率とノッキング強度

本節では, 燃焼の急峻さの指標とされる最大圧力上昇率に着目し, ノッキング強度との関係について検討する. 前

節と同一条件の下, 各当量比における着火時期  $\theta_{IT}$  [deg.] と最大圧力上昇率  $dP/dt_{max}$  [MPa/ms] との関係を図 12 に示す. ここで, 本報では, 着火時期を熱発生率最大値の 10% 時のクランク角度と定義した. なお, 図 12, 13 のプロットは全て単一サイクルでの結果を示したものである. いずれの当量比の条件において, 着火時期の進角に伴い,  $dP/dt_{max}$  の値が上昇していることが確認できる. また, 同一着火時期で当量比の影響を見ると, 当量比が高い条件ほど,  $dP/dt_{max}$  の値が上昇していることが分かる. ただし  $\theta_{IT} > -15$  の範囲では, 同一着火時期に対する  $dP/dt_{max}$  の値がばらつき, 特に  $\phi = 0.7$  では, ばらつきが大きくなることが分かる. この範囲内では, 強いノック振動を伴う状態に対応し, そのような場合の可視化結果は, 図 11 (B) に示すように未燃部が急速に自着火する挙動である. つまり, サイクルごとの若干の空間的なガス組成の不均一性の違い等により, ノック振動を伴う未燃部の急速に自着火する状態に敏感に



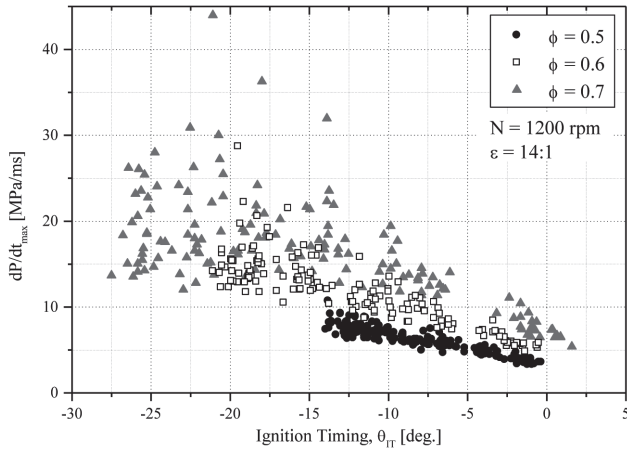


Fig.12 Influence of ignition timing on  $dP/dt_{max}$  under different equivalence ratio.

影響を与えたことが、 $dP/dt_{max}$  のばらつきが大きくなる要因であると考えられる。

つぎに、図 13 に、 $dP/dt_{max}$  とノッキング強度  $P_{KI}$  [MPa] との関係を示す。 $dP/dt_{max} = 5$  MPa/ms 程度を超えた条件において、 $dP/dt_{max}$  の増加に伴いノッキング強度が線形的に上昇する傾向が確認できる。しかし、 $dP/dt_{max} < 5$  MPa/ms では、ノッキング強度が増加する傾向は見られない。当量比を変えてもこの傾向に変化は見られない。同様に、 $dP/dt_{max} > 5$  MPa/ms よりノッキングが強まる傾向が Andreae らの実験でも得られている[14]。しかし、 $dP/dt_{max}$  そのものの基準値は、エンジン仕様及び実験条件等で異なる可能性があり、物理的意味については、今後更なる検討が必要である。以上の結果は、図 3, 4, 5 で示したように、燃焼位相の早期化及び当量比の増加によりノッキング振動が増加していることと対応している。すなわち、着火時期の進角及び当量比の増加により、 $dP/dt_{max}$  が上昇したことがノック振動を伴う HCCI 燃焼を引き起こす要因の一つだと考えられる。

#### 4. 結言

本研究では、HCCI 燃焼時に生じるノック振動の特性を把握することを目的として、2 ストローク単気筒エンジンを使用し、筒内可視化撮影、筒内圧力の周波数解析、分光学的手法を用いて詳細に調査した。得られた主要な結果を以下に示す。

- 筒内可視化結果より、ノック振動が生じていない HCCI 燃焼は徐々に筒内全域に分散して自着火炎が発現している様子が観察できた。一方、ノック振動を生じた HCCI 燃焼では、燃焼後半過程の未燃部が急速に自着火する様子が観察された。
- 筒内圧力の周波数解析より、7 kHz 付近に明確な最大ピーク値を示し、当量比が高い条件では、より高周波数帯 (11 kHz, 15 kHz 付近) に周波数成分を持つ傾向が確認

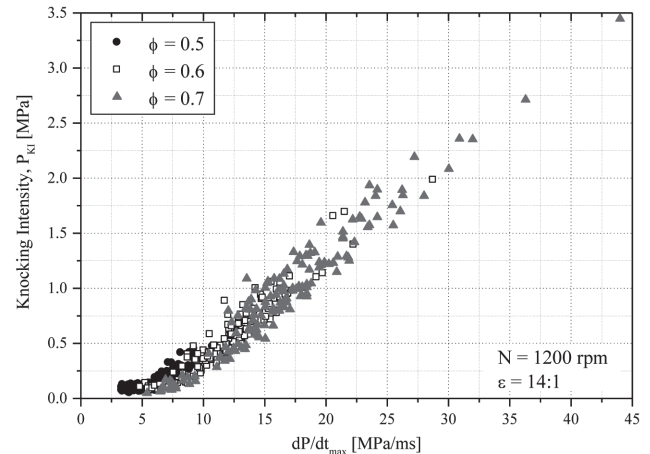


Fig.13 Correlation between  $P_{KI}$  and  $dP/dt_{max}$  under different equivalence ratio.

できた。

3. 自着火挙動と振動モードの比較検討により、 $\rho_{2,0}$  モードに相当する振動成分が確認できた高当量比の条件では、筒内中央部付近からも輝度の高い自着火炎が観察され、ノック振動時の発生モードは自着火炎の発現形態に影響を受ける可能性を示した。
4. 着火時期の進角及び当量比の増加に伴い、 $dP/dt_{max}$  は上昇し、 $dP/dt_{max}$  がある値以上になることで、ノッキング強度は上昇する結果が得られた。

#### 謝辞

本研究は、日本大学理工学部シンボリックプロジェクトの一環として実施された。

#### References

1. Thring, R. H., *SAE Technical Paper* 1989-09-01, (1989).
2. Onishi, S., Jo, S. H., Shoda, K., Jo, P. D., Kato, S., *SAE Technical Paper* 1979-02-01, (1979).
3. Kuboyama, T., Moriyoshi, Y., Hatamura, K., Suzuki, J., Takanashi, J., Yamada, T., Gotoh, S., *SAE Technical Paper* 2010-01-0845, (2010).
4. Iida, N., *SAE Technical Paper* 1994-03-01, (1994).
5. Yamasaki, Y., Takahashi, S., Iida, N., *JSAE Trans* (in Japanese), Vol. 34, No. 4: 75-80 (2003).
6. Shibata, G., Urushihara, T., *JSAE Trans* (in Japanese), Vol. 40, No. 6: 1527-1532 (2009).
7. Youso, T., Yamakawa, M., Hirose, T., Tanaka, S., Nakayama, R., Kusaka, J., *JSAE Trans* (in Japanese), Vol. 40, No. 1: 99-104 (2009).
8. Youso, T., Yamakawa, M., Tanaka, S., Kusaka, J., *JSAE Trans* (in Japanese), Vol. 41, No. 3: 623-628 (2010).
9. Konno, M., Chen, Z., *SAE Technical Paper* 2003-01-1826,

- (2003).
10. Iijima, A., Shoji, H., *JSAE Trans* (in Japanese), Vol. 38, No. 6: 83-88 (2007).
  11. Shimizu, R., Ishikawa, Y., Iijima, A., Yoshida, K., Shoji, H., *JSAE Trans* (in Japanese), Vol. 43, No. 2: 337-343 (2012).
  12. Abe, Y., Ishizawa, Y., Emori G., Asanuma, M., Iijima, A., Shoji, H., Misawa, K., Kiguti, Y., Kojima, H., Mori, S., Nakama, K., *SAE International Journal of Engines*, Vol. 6, No. 4: 2164-2170, (2013).
  13. Zhao, H. (Editor), *Woodhead Publishing and CRC Press*, (2007).
  14. Andraea, M., Cheng, W., Kenney, T., Yang, J., *SAE Paper* 2007-01-1858: 386-394 (2007).
  15. Eng, J., *SAE Technical Paper* 2002-01-2859, (2002).
  16. Vressner, A., Lundin, A., Christensen, M., Tunestål, P. et al., *SAE Technical Paper* 2003-01-3217, (2003).
  17. Gaydon, A. G., *London, Chapman and Hall Ltd*, (1998).
  18. Draper, C. S., *Journal of the Aeronautical Sciences*, Vol. 5, No. 6: 219-226 (1938).
  19. Iijima, A., Itoh, N., Terashima, A., Tojo, T., Suyama, K., Tanabe, M., Yoshida, K., Shoji, H., *JSAE Trans* (in Japanese), Vol. 45, No. 1: 49-54 (2014).
  20. Iijima, A., Tanabe, M., Yoshida, K., Shoji, H., Itoh, N., Terashima, A., Tojo, T., *SAE International Journal of Engines*, Vol. 6, No. 4: 2150-2163 (2013).
  21. Suyama, K., Ito, N., Terashima, A., Tojo, T., Iijima, A., Yoshida, K., Shoji, H., *JSAE Trans* (in Japanese), Vol. 44, No. 5: 1175-1180 (2014).