混合気希釈がノック強度に及ぼす影響

大友 光彰^{*1}, 山本 征治^{*1}, 宮川 浩^{*1}

Effect of fuel-air mixture dilution on knock intensity

Mitsuaki OHTOMO^{*1}, Seiji YAMAMOTO^{*1} and Hiroshi MIYAGAWA^{*1}^{*1} Toyota Central R&D Labs. Inc.,
41-1 Yokomichi, Nagakute-shi, Aichi 480-1192, Japan

Received 20 April 2016

Abstract

Effect of fuel-air mixture diluted by inert gas on knock intensity was investigated by using a rapid compression and expansion machine. Dilution of fuel-air mixture decreased knock intensity. As the dilution ratio became high, increase in input heating value did not affect knock intensity too much although it shortened auto-ignition delay. Knock intensity is assumed to correlate with the pressure rising rate when the auto-ignition occurs. Knock intensity was shown as a function of the maximum pressure and the maximum temperature which affect the high temperature oxidation reaction rate.

Key words : Ignition, Chemical reaction, Internal combustion engine, Knock, Pressure rising rate

1. ま え が き

近年、自動車からのCO₂排出低減競争が激しさを増しており、エンジンの熱効率向上をねらいとした様々な研究が行われている。火花点火式エンジンにおいては、ノックの抑制が長年の大きな課題である。ノックは、燃焼室内において火花点火による火炎伝播燃焼途中にエンドガスが自着火し、それによって圧力振動が発生する現象である。この圧力振動は燃焼室にダメージを与える可能性があり、そのためにノックの発生を抑制する必要がある。多くの場合、点火時期を遅らせる、圧縮比を下げるなどの方法でノックを抑制している。しかしながら、これらは熱効率を低下させる要因でありエンジンにとっては望ましくない。

点火時期の遅延や圧縮比の低下は、未燃混合気の圧力や温度を下げるのが目的であり、それによってエンドガスを自着火させず、圧力振動の発生を防いでいる。一方、HCCIなどの圧縮自着火燃焼では、燃料の自着火を積極的に利用している。例えば、図示平均有効圧 1MPa を超える条件においても、ノックを発生せずに燃焼させることが可能であることが示されている (Inagaki et al., 2006, Splitter et al., 2010)。また、火炎伝播を用いた燃焼においても、エンドガスが自着火してもノックが発生しない条件が存在することが知られている (Azimov et al., 2011)。ただし、負荷を増大させたり、燃焼時期を進角させると容易にノックに移行するため、その成立条件は限定されていると考えられる。

このように、混合気が自着火しても必ずノックが発生するわけではないものの、その条件についてはいまだ不明な点が多い。いずれの自着火を用いた燃焼においても、混合気が EGR や空気によって希釈された条件で燃焼していることから、混合気希釈が自着火時のノック発生に影響を及ぼしていると考えられる。

そこで本研究では、特に EGR を想定して、不活性ガスによる混合気の希釈が、自着火時のノック強度に及ぼす影響を調べ、ノック強度の支配因子を明らかにすることを目的とした。

2. 混合気自着火に伴う圧力上昇率の変化

局所的な熱発生により空間的に圧力分布が生じるのは、自着火による圧力上昇が、周囲への膨張によって緩和されない場合であると考えられる。この場合に燃焼室内で圧力波が発生し、ノックに至ると考えられる。すなわち、自着火による圧力上昇がノックを発生させる加振力になる。圧力上昇率 (dP/dt) は、次の式であらわすことができる。

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\kappa - 1}{V} \frac{dQ}{dt} - \frac{\kappa P}{V} \frac{dV}{dt} \quad (1)$$

ここで、 κ , V , Q はそれぞれ比熱比、体積、発熱量を示す。

したがって、自着火時の反応、すなわち高温酸化反応による発熱速度を低下させることで、圧力上昇率が低下し、その結果ノック強度も低下すると考えられる。よって、従来のノック発生の有無は、自着火発生の有無で議論されているが、圧力上昇率を下げることで自着火が発生してもノックの発生を抑制できる可能性がある。

本研究では、初めに混合気の自着火計算を実施した。燃料のオクタン価や混合気希釈が高温酸化反応による圧力上昇に及ぼす影響を基礎的に調べ、自着火発生の目安となる自着火遅れと比較した。次に、急速圧縮膨張装置 (RCEM) を用いて、自着火発生時のノック強度について調べ、その支配因子を考察した。

3. 自着火に伴う圧力上昇

3・1 計算方法及び条件

本章では、CHEMKIN II の SENKIN を用いた 0 次元計算を行った。反応スキームには、PRF (Primary Reference Fuel, ノルマルヘプタン、イソオクタンの混合燃料) のモデル (Lawrence Livermore National Laboratory, 2014) を使用した。計算は定容条件で行い、初期温度を 800K、当量比を 1 とした。図 1(a) に、初期圧 2.0MPa、希釈率 0% のイソオクタン (iC_8H_{18} , RON100) - 空気混合気を自着火させたときの圧力、温度の時間履歴を、(b) に (a) の一部を拡大した圧力及び圧力上昇率 (dP/dt) の時間履歴を示す。計算開始後、約 32ms で急激に圧力と温度が上昇した。 dP/dt は単調に上昇し、最大値をとった後、単調に減少した。この dP/dt の最大値 ($(dP/dt)_{max}$) を各種混合気で比較した。また、反応により温度が 1200K を超えたタイミングを混合気の自着火遅れ (τ) とした。

Fig.1 History of Calculated Pressure and Pressure Rising Rate (iC_8H_{18} /Air Mixture without dilution)

3・2 計算結果

初めに、イソオクタンに加え、ノルマルヘプタン (nC_7H_{16} , RON0), メタン (CH_4 , RON130) をそれぞれ燃料として、燃料による τ や $(dP/dt)_{max}$ の違いを比較した。次に、イソオクタン-空気混合気を N_2 または CO_2 により希釈し、希釈の影響を調べた。いずれの条件でも、混合気の総発熱量を図1に示す条件と同一になるように、初期圧を調整した。すなわち、希釈率を増加させるにしたがって、初期圧を高くした。

図2に、各燃料での τ と $(dP/dt)_{max}$ の関係を示す。 τ は $nC_7H_{16} < iC_8H_{18} < CH_4$ の順に大きくなった。この順番は、燃料のオクタン価の順と一致する。一方、 $(dP/dt)_{max}$ は燃料による違いはみられず、オクタン価は影響していない。図3に、燃料が iC_8H_{18} の場合の dP/dt と合わせて iC_8H_{18} 及び CO_2 の時間変化を示す。 iC_8H_{18} は初期状態に対する消費率、 CO_2 は反応終了時の割合に対する生成率として表す。 $(dP/dt)_{max}$ のタイミングは、 CO_2 割合が急激に増加している時期とほぼ一致し、反応の後期であることが推察される。 iC_8H_{18} はこれよりも早い時期に消費されている。したがって、酸化が進み燃料が低分子化している時期に dP/dt が最大になるため、炭化水素燃料ではオクタン価が異なっても $(dP/dt)_{max}$ は変化しないと考えられる。次に、イソオクタン-空気混合気を N_2 または CO_2 で希釈した。希釈率 (vol.%) に対する τ 及び $(dP/dt)_{max}$ の変化を図4に示す。希釈率と共に τ は長くなる傾向がみられる。 N_2 と CO_2 では τ への影響に大きな違いはない。一方、 $(dP/dt)_{max}$ は希釈率と共に小さくなる。 CO_2 希釈の方が N_2 希釈よりも $(dP/dt)_{max}$ が小さい。希釈をしていない場合と比較して、 N_2 希釈では40%, CO_2 では20%希釈した場合に $(dP/dt)_{max}$ が約1/10に低下しており、混合気の希釈は圧力上昇率に大きな影響を及ぼす。以上のことから、 $(dP/dt)_{max}$ は、自着火発生の目安となる τ とは異なる変化をすることがわかった。

Fig.2 Effect of Fuel on τ and $(dP/dt)_{max}$

Fig.3 History of dP/dt , Consumption Rate of iC_8H_{18} , Production Rate of CO_2 (iC_8H_{18} /Air Mixture without dilution)

Fig.4 Effect of Dilution Ratio on τ and $(dP/dt)_{max}$ (Fuel: iC_8H_{18}) Fig.5 Relationship between $1000/T_{(dP/dt)_{max}}$ and $(dP/dt)_{max}$

そこで、 $(dP/dt)_{max}$ の支配因子を調べるために、希釈により $(dP/dt)_{max}$ が小さくなる原因を考察した。今回の計算は定容条件であり、総発熱量が等しいことから、式(1)より発熱速度、すなわち反応速度、もしくは比熱比が $(dP/dt)_{max}$ に影響していると考えられる。反応速度は温度の関数であることから、 $(dP/dt)_{max}$ をその際の温度($T_{(dP/dt)_{max}}$)に対し、アレニウスプロットにより整理し、図5に示す。混合気の種類によらず、温度が低いほど、 $(dP/dt)_{max}$ が小さくなる傾向がみられ、両者はほぼ1対1の関係を示した。混合気希釈は、反応温度を低下させるため、反応速度が低下し、その結果 $(dP/dt)_{max}$ が低下したと考えられる。また、 CO_2 希釈と N_2 希釈では、前者の方が比熱比が大きいため、反応温度が低く、反応速度が遅くなり、 $(dP/dt)_{max}$ が小さかったと推察される。式(1)に示したように、 CO_2 希釈による比熱比の低下自体も圧力上昇率を低下させるが、希釈による比熱比の違いは数%であり、この違い自体が数十倍の圧力上昇率の違いに及ぼす寄与は小さいと考えられる。

次に、希釈による反応時の圧力上昇率の低下が、燃焼室内で発生するノック強度に及ぼす影響について、急速圧縮膨張装置を用いた実験により調べた。

4. 自着火時のノック強度

4・1 実験方法及び条件

急速圧縮装置による均質予混合気の圧縮自着火は、自着火遅れの計測手段として用いられる。その時の筒内の圧力計測結果を図6(a)に示す。自着火発生時には圧力振動がみられる。これは、均質混合気といえども壁面への熱の流出などによる温度不均一が原因で局所的な自着火が生じていることに起因すると考えられる。図6(b)に計測圧力をフーリエ変換した結果を示す。特に6kHz前後で強い振幅が確認された。本燃焼室内で発生するノック

周波数を, 基本振動モード (Hickling et al., 1982) からモード毎に算出した結果を表 1 に示す. A のモードの周波数が 6.5kHz であり, 図 6(b)で振幅の強い周波数とほぼ一致した. したがって, この周波数はエンジンのノックと類似した圧力振動と考えられる. 今回は, この圧力振動の大きさをノック強度として検討を行った.

図 7 に実験装置を示す. ピストンが BDC にある状態で燃焼室内を真空ポンプにより減圧した後, 予混合タンク内に作成しておいた所定の混合気を導入した. その後, 油圧シリンダにより接続されたコンロッドを動かし, ピストンにより燃焼室を圧縮した. 圧縮終了後, ピストンを TDC で停止させることで高温高压を維持し, 混合気を自着火させた. 燃焼室に取り付けた指圧計で計測 (サンプリング周波数 100kHz) した燃焼室内の圧力から, 混合気の τ 及びノック強度を算出した. 燃焼室はボアが 85mm のパンケーキ型で, 圧縮比は 10 とした. 圧縮時間は 25ms とした. 燃料にはイソオクタンを用い, 当量比は 1, 初期温度は 120℃とした. 燃料-空気混合気は, EGR を想定した体積比 $N_2/CO_2=85/15$ のガスにより希釈した.

図 8 に, 図 6 に示した計測圧力の処理の一例を示す. ノック成分を抽出するため, 2.5kHz で計測圧力をハイパスフィルタ及びローパスフィルタにより処理した. その結果が図 8(a)及び(b)である. ハイパスフィルタで処理すると自着火が発生したタイミングで振幅が確認された. この振幅の最大値と最小値の差をノック強度 (KI) と定義した. またローパスフィルタで処理した波形における最高圧力を P_{max} と定義し, P_{max} から状態方程式により求めた平均温度を最高温度 T_{max} と定義した. 図 8(c)は(b)から熱発生率を求め, 着火時期付近を拡大した図である. 前章の計算結果と異なり燃焼室内に温度分布があるため, 熱発生率から自着火遅れを定義し, 熱発生率が 70J/ms

Fig.6 Example of (a) Measured Pressure and (b) Result of FFT using RCEM

Table 1 Relationship between Oscillation Mode and Knock Frequency in RCEM

Oscillation Mode	Frequency [kHz]
A	6.5
B	10.8
C	13.6
D	14.9

を越えた時間を自着火発生時期, 圧縮終了後から自着火発生時期までの時間を τ とした.

実験では, 各投入発熱量において希釈率 (vol.%, D) が τ や KI に及ぼす影響を調べた. 投入発熱量は初期圧によって調整した. 以下では, 各条件における投入発熱量 (Q) は, 希釈率 0%, 初期圧 0.10MPa の場合の投入発熱量 (Q_{std}) で正規化した値 (投入発熱量比 $Q^* = Q/Q_{std}$)で示した.

Fig.7 Experimental Apparatus

Fig.8 Example of Pressure Analysis (a) Pressure through High-Pass Filter (b) Pressure through Low-Pass Filter (c) Rate of Heat Release calculated using (b))

4・2 実験結果

図9に投入発熱量比 0.75 で希釈率 0%と 60%, 及び投入発熱量比 1.0 で希釈率 60%での計測圧力及びハイパスフィルタ処理後の圧力を示す. 投入発熱量比 0.75 の条件で, 希釈率を 0%から 60%にすると, 混合気のガス量が多いために着火前の圧力は高くなるものの, τ は長くなり, KI は小さくなった. 希釈率 60%の条件で, 投入発熱量比を 0.75 から 1.0 にすると, τ が短くなり, KI は増加した. この時の τ と KI を投入発熱量比 0.75, 希釈率 0%の結果と比較すると, τ が短くなるにもかかわらず, KI が低下した. 図 10 に, 希釈率 0%, 40%, 60%で投入発熱量を変化させたときの τ と KI の変化を示す. τ については, いずれの希釈率でも投入発熱量が増加すると短くなった. KI については, 希釈率 0%, 40%では, 投入発熱量が増加すると大きくなったものの, 60%では増加は極めて小さかった. 同投入発熱量では, 希釈率が高いほど KI は小さくなり, 特に発熱量が高い条件で KI の違いが大きかった.

他の希釈率でも実験を行い, 希釈率, 投入発熱量比に対する等 τ 線と等 KI 線を求めた結果を図 11 に示す. 破線で示す 3 本の等 τ 線はほぼ直線であり, その傾きに大きな違いはなかった. すなわち, 投入発熱量が大きいほ

Fig.9 Comparison of τ and $(dP/dt)_{max}$ ((a) Measured Pressure (b) Pressure through High-Pass Filter)

Fig.10 Effect of Ratio of Input Heating Value on τ and KI

ど、また希釈率が低いほど、 τ が小さくなる傾向を示していた。特に、投入発熱量の増加による τ の低下が大きかった。一方、実線で示す3本の等 KI 線は傾きが一定ではなく、条件により変化していた。おおよそ希釈率30%以下では、投入発熱量を増加させると KI が大きくなり、希釈率を増加させても KI はあまり変化しなかった。しかしながら、希釈率30%以上では、希釈率を増加させると KI が大きくなり低下するが、投入発熱量を増加させても KI の変化は小さく、わずかに増加した。すなわち、高希釈率では高負荷条件でも、 KI を抑制しながら混合気を自着火させることが可能であることがわかった。

前章で示した自着火計算結果から、不活性ガスによる混合気の希釈は、着火反応時の温度を下げ、高温酸化反応による発熱速度を低下させることにより、 KI を低下させたと推察される。また、投入発熱量を変化させると混合気の密度も変化するため、高温酸化反応速度は、反応時の温度のほかに、圧力も大きく影響していると考えられる。そこで圧力と温度を P_{max} と T_{max} で代表し、 P_{max} 及び T_{max} を KI 毎に記号により分類した結果を図12に示す。 P_{max} または T_{max} が大きくなるほど、 KI が大きくなる傾向がみられた。図中に、実験結果から求めた KI の等値線を合わせて実線にて示す。2000K以上では圧力影響が強く、それ以下の温度では温度低下と共に急激に KI が低下した。図中の破線は、等投入発熱量で希釈率を増加させた場合、及び等希釈率で投入発熱量を変化させた場合の P_{max} と T_{max} の変化を示す。希釈率を変化させると T_{max} の変化が大きく、一方、投入発熱量を変化させると P_{max} の変化が大きくなる。低希釈率では温度が高いため、 KI の圧力影響が大きい。そのため、投入発熱量が増加すると図11に示したように KI が大きくなる。一方、高希釈率では温度が低いため、 KI の温度影響が大きく、圧力影響が小さい。そのため、投入発熱量を増加させても KI の増加が小さかった。従来から、 τ は未燃混合気の圧力と温度履歴により予測する方法が試みられている。今回の結果から、 KI は τ とは異なり、燃焼後の圧力と温度により記述できる可能性があることがわかった。

本論文では、圧縮自着火で発生する圧力振動をノックとして実験を行った。火花点火を用いた燃焼プロセスでは、火炎伝播の途中にエンドガスが自着火し、ノックが発生する。すなわち、本実験とは混合気の自着火発熱量割合が異なる。自着火発熱量割合はノックを誘発する加振力と相関があると考えられ、大きいほどノック強度に影響を及ぼす可能性がある。また、同一混合気において自着火発熱量が大きいことは、着火領域が大きいことを示す。着火領域が大きいほど、式(1)の第2項である膨張による圧力上昇の緩和が小さくなり、ノック強度が大きくなると考えられる。実際に、今回解析したノック強度は、火花点火エンジンで発生するノック強度に比べて大きい。これはノックを誘発した自着火発熱量割合が多いことが原因と考えられる。したがって、今後は、火花点火エンジンを用いた燃焼実験を行い、火炎伝播燃焼するエンジンにおける KI に及ぼす希釈の影響や、 KI と P_{max} や T_{max} の関係を明らかにする予定である。

Fig.11 Effect of Input Heating Value and Dilution Ratio on τ and KI (Isogram)

Fig.12 Effect of P_{max} and T_{max} on KI

5. 結 言

不活性ガスによる希釈が混合気自着火時のノック強度に及ぼす影響とノック強度の支配因子を調べた。その結果、次のことがわかった。

- ・混合気が自着火した際のノック強度は不活性ガスの希釈により低下した。希釈率を高めると、投入発熱量の増加とともに自着火遅れは短くなるものの、ノック強度はあまり変化しなかった。
- ・ノック強度は、 P_{max} と T_{max} で整理され、 P_{max} もしくは T_{max} が大きくなった場合に大きくなることがわかった。
- ・ T_{max} が 2000K 以下ではノック強度の温度感度が大きく、圧力感度は小さかった。そのため、高希釈条件ではノック強度が大きく低下し、投入発熱量を増加させてもノック強度はあまり増加しなかったと考えられる。

References

- Azimov, U., Tomita, U., Kawahara, N. and Harada, Y., Premixed mixture ignition in the end-gas region (PREMIER) combustion in a natural gas dual-fuel engine: operating range and exhaust emissions, International Journal of Engine Research, Vol.12, No.5 (2011), pp.484-497.
- Hickling, R., Chen, F. H. K. and Feldmaier, D. A., Pressure pulsations in engine cylinders, engine noise: excitation, vibration, and radiation, Plenum Press (1982), pp.3-37.
- Inagaki, K., Fuyuto, T., Nishikawa, K., Nakakita, K. and Sakata, I., Dual-fuel PCI combustion controlled by in-cylinder stratification of ignitability, SAE Technical Paper 2006-01-0028 (2006).
- Lawrence Livermore National Laboratory, Reaction Mechanism of Primary Reference Fuels (online), available from <<https://combustion.llnl.gov/archived-mechanisms/surrogates/prf-isooctane-n-heptane-mixture>>, (accessed on 28 May, 2014).
- Splitter, D., Reitz, R. and Hanson, R., High Efficiency, Low emissions RCCI combustion by use of a fuel additive, SAE International Journal of Fuels and Lubricants, Vol.3, No.2 (2010), pp.742-576.