予混合圧縮着火エンジンにおける *n*-Butane 燃料の
自己着火・燃焼過程*

(内部 EGR が着火および燃焼に及ぼす影響)

酒井 学^{*1}, 飯田 訓 正^{*2}Autoignition and Combustion of *n*-Butane/Air Mixtures
in Homogeneous Charge Compression Ignition Engine
(Effects of Internal EGR on Auto Ignition and Combustion)Manabu SAKAI and Norimasa IIDA^{*3}^{*3} Department of System Design Engineering, Keio University,
3-14-1 Hiyoshi, Kohoku-ku Yokohama-shi, Kanagawa, 223-8522 Japan

In this study, effects of internal EGR ratio on the ignition and the combustion of homogeneous charge compression ignition (HCCI) engine are investigated experimentally. At first, using single cylinder test engine, relation between exhaust valve close timing and internal EGR (Exhaust Gas Recirculation) ratio is clarified. Effects of an internal EGR gas on autoignition timing, combustion duration and knocking limits are discussed. As a result of an experiment, it became clear the following facts; with advancing exhaust valve close timing, i) internal EGR ratio is increasing, ii) both knocking limits at high load and misfiring limits at low load are expanding, iii) ignition timing is advancing, iv) combustion duration is decreasing and v) combustion efficiency is increasing.

Key Words: Internal Combustion Engine, Premixed Combustion, Gaseous Fuel, EGR, Knocking, Auto Ignition, Combustion Duration, HCCI, *n*-Butane, Low Temperature Reaction, High Temperature Reaction, Variable Valve Timing

1. はじめに

火花点火機関に比べ高効率での運用が可能なディーゼル機関は、窒素酸化物 (NOx) および微粒子状排出物の排出が問題となっている。そこで高効率でありながら、NOx, すすの同時低減を狙った機関の1つの方向として希薄予混合気の圧縮着火燃焼の研究が行なわれている^{(1)~(14)}。予混合圧縮着火機関における燃焼は従来のディーゼル噴霧による拡散、混合過程に律速される燃焼とは異なり、噴霧の予混合化、希薄化を促進した圧縮着火燃焼である。これまでの研究結果から予混合圧縮着火燃焼では、従来の希薄燃焼限界の超越が可能であり、さらに NOx およびすすの排出量が極めて低いことが明らかになっている⁽⁷⁾。しかし同時に希薄予混合気の圧縮による自己着火現象に機関の運転を頼っていることから、高負荷域においてはノッキング、高機関回転速度域 (高速度域) においては失火が起こるため、機関の運転領域が低負荷、低速度域に制限される。またそのほかにも燃焼を圧縮上死点付近の最適な時期に行わせるために、着火時期の制御手法を確立することや、高濃度の THC の排出を抑制することなど、実用化においてはいくつかの課題を残している。

反応速度を抑制しノッキングを回避するには、予混合気を多量の残留ガス、または EGR ガスで希釈することが有効であることが知られている⁽⁸⁾⁽¹¹⁾。予混合圧縮着火機関における外部 EGR 効果についての実験的研究によれば⁽⁹⁾、外部 EGR の持つエンタルピーによる圧縮開始温度上昇効果および不活性ガス (CO₂, H₂O) 混入による予混合気の希釈効果の両効果が確かめられている。前者により低温度自着火の熱発生率に現れる低温酸化反応 (LTR) および高温酸化反応 (HTR) の発現時期は早期化する⁽⁹⁾が、逆に後者の効果により LTR および HTR 発現時期は遅延化⁽⁸⁾することが明らかになっている。そこで本研究では予混合圧縮着火機関に対し、圧縮開始温度の上昇および不活性ガス混入の両効果を同時に併せ持つ内部 EGR の導入を提案し、その効果について実験的に調査・検討を行った。本研究では圧縮開始時に燃焼室内に残留する前サイクルの燃焼ガスを、供試機関のカム軸 (カム STD) をバルブタイミングの異なる4種類のカム軸 (カム A~D) に交換し、排気行程中に排気バルブを早閉じすることで変化させた。そこでバルブタイミングが、特に排気弁閉時期と吸気弁閉時期が混合気中の内部 EGR 率に与える影響について明らかにし、混合気中の内部 EGR 率の変化が運転領域、着火時期および燃焼期間などに与える影響について調査したので報告する。

* 原稿受付 2000年4月3日。

*¹ 学生員, 慶應義塾大学大学院。*² 正員, 慶應義塾大学理工学部 (☎ 223-8522 横浜市港北区日吉3-14-1)。

E mail: iida@sd.keio.ac.jp

Table 1 Engine specification

YANMAR TS230R	
Engine Type	4stroke Single Cylinder
Bore × Stroke	112mm×115mm
Displacement	1132cc
Combustion Chamber	Disc type
Compression ratio	16.1

Fig.1 Experiment system

2. 実験装置および実験条件

2.1 供試機関および実験システム

希薄な予混合気を単気筒機関内に供給，断熱圧縮し燃焼室内で自己着火燃焼を生じさせる．供試機関として用いた YANMAR 製 4 ストロークエンジン TS230R の諸元を表 1 に，実験システムの構成を図 1 に示す．供試機関を直流動力計を用いて設定回転数までモータリング運転を行った後，吸気管内に燃料の常時投入を行う．燃料投入口は吸気弁より 400 mm 上流の吸気マニホール内に設け，燃料の拡散による空気との混合促進を図るためにノズルの向きを吸気の流れる方向と逆方向に設けた．供試燃料は NTC 領域が存在し，低温酸化反応，高温酸化反応が発現する炭素数 4 のアルカン系炭化水素である *n*-Butane を用いた．*n*-Butane の物性値⁽¹⁴⁾を表 2 に示す．

2.2 内部 EGR 実験用カム

予混合圧縮着火エンジンにおける内部 EGR を導入した場合の混合ガス (Mixed Gas) の概念図を図 2 に示す．本研究では燃焼室にトラップされた EGR ガス (Internal EGR Gas) と吸入した予混合気 (Premixed Gas) を総称して混合ガス (Mixed Gas) と呼ぶ．混合ガス中の排気残留ガス (Internal EGR Gas) の割合，すなわち内部 EGR 率を変化させるためにバルブタイミングの異なるカム A~D を製作した．カム A~D およびディーゼル運転用の純正カム STD のバルブタイミングを表 3 に示す．カム A~D は排気弁開および吸気弁閉時期を同一としたまま排気弁閉 (吸

Table 2 Properties of *n*-Butane⁽¹⁴⁾

	Unit	<i>n</i> -Butane
Chemical Structure		C ₄ H ₁₀
Molwt.	g/mol	58.12
Boiling Point	°C	-0.5
Low Calorific Value	MJ/kg	45.72
Specific Heat	kJ/kg·K	1.67
Auto Ignition Temp.	°C	365
Min. Ignition Energy	mJ	0.305
Octane Number	[RON]	91.8

Fig.2 Conceptual figure of internal EGR

気弁開) 時期を早期化 (遅延化) したカムであり，A から D へとカムを変化させることにより内部 EGR 率を増加させることが可能である．カム A~D のバルブタイミングとピストン位置の関係を図 3 に示す．例えばカム D では排気行程中の③において排気バルブが閉じ，燃焼室内にトラップされた残留ガスは上死点まで圧縮され，その後③と同じピストン位置④まで膨張し，同時に④で吸気弁が開き予混合気を吸入する．なお内部 EGR 率を変化させる直接的な要因は排気弁閉時期の早期化であり，吸気弁閉時期の遅延化は吸気マニホール内への残留ガスの逆流を防ぐためである．表 3 中に示した幾何学的内部 EGR 率の推定値は，バルブタイミングから静的なガス交換を仮定し，排気弁閉時のシリンダ内ガス体積を次サイクルに残留する内部 EGR ガス体積と仮定し，以下の式を用いて混合気中の幾何学的内部 EGR 率を推定・算出したものである．

$$\text{Geometric EGR Ratio } \gamma_{\text{InEGR(geo)}} = \frac{V_r}{V_f} \cdots (1)$$

V_r : 排気弁閉時のシリンダ内ガス体積 (m³)

V_f : 吸気弁閉時のシリンダ内ガス体積 (m³)

2.3 測定項目

実験時にはシリンダヘッドに設置したピエゾ式圧力センサにより筒内圧力を，層流式流量計により燃料および空気流量を測定した．測定した 64 サイクル平均の筒内圧力履歴より，熱発生率，筒内温度履歴を算出し燃焼解析を行った．また排気を前処理装置により冷却しダスト等を除去した後，NO_x，CO，CO₂，THC の体積濃度を測定した．また実験時における実際の内部 EGR 率については，カム STD では

Table 3 Valve timing of test cam

	STD	A	B	C	D
O.V. OPEN deg[ATDC]	132	132	132	132	132
O.V. CLOSE deg[ATDC]	374	360	332	306	278
I.V. OPEN deg[ATDC]	351	360	388	414	442
I.V. CLOSE deg[ATDC]	-133	-132	-132	-132	-132
EGR ratio γ InEGR(geo)	0.000	0.071	0.147	0.333	0.594

① I.V.Close ② O.V.Open
③ O.V.Close ④ I.V.Open

Fig.3 Valve timing diagrams and positions of piston

Fig.4 Internal EGR ratio with various equivalence ratios

Fig.5 Internal EGR ratio with various engine speeds

吸気弁および排気弁が同時に開いているオーバーラップがあり、その間に残留ガスは十分に新気の予混合ガスに入れ替わる。この場合、実際に次サイクルへ残留するガス量は上死点容積の約半分程度(40cc)と推算している。しかしこの量はカム A~D に比べて微量であるので、本研究においてはカム STD を用いた場合の内部 EGR 率をゼロとみなし、カム STD を用いた場合との吸入空気量の変化から以下の式を用いて内部 EGR 率を定義した。

Internal EGR Ratio

$$\gamma_{InEGR(exp)} = \frac{Vair(s) - Vair(egr)}{Vair(s)} \times 100 \dots (2)$$

$Vair(s)$: カム STD を用いた時の吸入空気量(m^3/s)

$Vair(egr)$: カム A~D を用いた時の吸入空気量(m^3/s)

2.4 記号 本研究で用いた記号についてまとめる。

I.V. : 吸気バルブ

O.V. : 排気バルブ

$\gamma_{InEGR(exp)}$: 実験時における内部EGR率

$\gamma_{InEGR(geo)}$: 静的なガス交換を

仮定した場合の内部EGR率

vr : 排気弁閉時のシリンダ内ガス体積 (m^3)

Vf : 吸気弁閉時のシリンダ内ガス体積 (m^3)

$Vair(s)$: カム STD を用いた時の吸入空気量(m^3/s)

$Vair(egr)$: カム A~D を用いた時の吸入空気量(m^3/s)

Fig.6 Rate of heat release with various equivalence ratios

Fig.8 Rate of heat release with various compression speeds

Fig.7 Auto ignition map with various equivalence ratios

Fig.9 Auto ignition map with various compression speeds

2・5 実験条件 内部 EGR の実験においては新たに製作したカム軸を用い排気弁閉時期を $360\sim278^\circ$ [ATDC], 吸気弁閉時期を $360\sim442^\circ$ [ATDC] の範囲で変化させた。それに伴い表 3 に示すように混合気中の幾何学的内部 EGR 率 (Geometric EGR Ratio) は 0.07, 0.15, 0.33, 0.59 の 4 通りに変化する。予混合気の供給温度 T_{in} (吸気マニホールド内で測定) は $300\text{K}\pm3\text{K}$ で一定とし、当量比 ϕ を $0\sim1.60$, 機関回転速度 N_e を $800\sim2200\text{rpm}$ の範囲で変化させた。

3. 実験結果および考察

3・1 排気弁閉時期と内部 EGR 率の関係 幾何学的内部 EGR 率の推定値と、実際の内部 EGR 率との関係について以下に示す。予混合気の当量比をパラメータとした場合を図 4 に示す。図 4 より実際の内部 EGR 率は排気弁閉時期が早期化することにより増加する。また排気弁閉時期が同じでも混合気が燃焼することにより (当量比 1.0 以上) 実際の内部 EGR 率は低下する。これは燃焼により排気ガスの温度上昇が起こるためと考えられる。次に機関回転速度をパラメータとした場合を図 5 に示す。排気弁閉時期が同じでも機関回転速度が増加すると実際の内部 EGR 率は増加する。これは

Fig.10 Auto ignition timing of *n*-Butane/air mixture with various Internal EGR ratios

Fig.11 Heat release of LTR with various conditions of compression start

機関回転速度が増加すると吸気バルブが開いている時間が短くなるために予混合気を吸入する時間が短くなるためと考えられる。以上より実際の内部 EGR 率は幾何学的内部 EGR 率より高い数値を示すことが明らかになった。

3.2 当量比をパラメータとする内部 EGR の影響

内部 EGR 導入による圧縮着火燃焼への影響について当量比 ϕ をパラメータとして図 6 に示す。図 6 の上側の図はカム STD すなわち実際の内部 EGR 率がゼロの場合の熱発生率履歴である。カム STD の場合、当量比 0.20 付近から熱発生が始まり、0.30 以上の当量比で自立運転が可能となる。この時熱発生率履歴には低温度自着火特有の 2 つの山が現れる。圧縮上死点前のわずかな熱発生は低温酸化反応 (LTR)，圧縮上死点後の大きな熱発生は高温酸化反応 (HTR) である。カム STD の場合は 0.35 を超える当量比ではノッキングが発生したため運転が不可能となった。図 6 の下側の図は内部 EGR を導入したカム D の場合を示す。当量比 1.0

Fig.12 NO_x, THC, CO, CO₂ emission with various Internal EGR ratios

から自立運転が可能となり、その後当量比の増加とともに熱発生のピークの早期化、発生熱量の増加が見られ、当量比 1.60 を超えた所でノッキングが生じた。図 7 に内部 EGR 導入時の当量比に対する運転領域の変化を示す。図 7 より内部 EGR 率の上昇に伴い運転可能な領域が高当量比側へスライドするとともに、内部 EGR 率 50% 付近までは領域そのものが拡大し、50% 以上ではほぼ一定の領域幅となる。これは内部 EGR 導入による不活性ガス混入の効果により高負荷域におけるノッキングが抑制されたためと考えられる。

3.3 回転速度をパラメータとする内部EGRの影響 内部 EGR 導入による圧縮着火燃焼への影響について機関回転速度をパラメータとして図 8 に示す。上側の図は実際の内部 EGR 率がゼロの場合の熱発生率履歴である。内部 EGR 率がゼロの場合、機関回転速度 800rpm では燃焼が起こり運転が可能なものの、機関回転速度の上昇に伴い熱発生ピークが遅延化し、発生熱量が減少、失火する。内部 EGR 率がゼロの場合、機関回転速度 1000rpm 以上では運転が不可能である。それに対し下側の図は内部 EGR を導入したカム D の場合を示す。機関回転速度の増加とともに、熱発生のピークの遅延化、および発生熱量の減少が起こるものの、その度合いはカム STD の時よりも小さく、機関回転速度 1250rpm までは運転が可能であった。

内部 EGR 導入時の機関回転速度に対する運転領域の変化を図 9 に示す。図 9 より内部 EGR 率の上昇に伴い運転可能な領域が高速度側へ拡大している。これは内部 EGR 導入により混合気の温度が上昇し、高速度域においても予混合気の燃焼が生じさせるのに必要な高温保持時間が、十分に確保されたためと考えられる。

3.4 内部EGRが着火・燃焼に及ぼす影響 図 10 に各実験条件における LTR 発現時期 θ_L 、HTR 発現時期 θ_H 、および燃焼終了時期 θ_{end} について示す。内部 EGR 率の増加とともに LTR が減少し、やがて消滅する。図 11 に示すように圧縮開始圧力が一定の場合、LTR の発生熱量は温度上昇に伴い減少してやがて消滅し^{(7),(8)}、また圧縮開始温度が一定で圧力が上昇すると増加する⁽¹²⁾ことが報告されている。また著者らの素反応数値計算によると、圧縮行程で LTR の出現温度(約 850K)に到達した時点における密度(圧力)の大小が LTR の熱発生量の大小を生じさせることが明らかになっている⁽¹³⁾。したがって本研究において観測された LTR の消滅は内部 EGR による圧縮開始温度上昇の効果によるものと考えられる。また LTR の消滅により HTR 発現時期は一旦遅延化するが、内部 EGR 率がさらに増加すると HTR 発現時期は早期化する。さらに内部 EGR 率の増加に伴い HTR の反応期間は短期化する。

3.5 各種排出物濃度に対する内部EGRの影響 機関回転速度 800rpm で一定とし、予混合気の当量比をパラメータとした場合の内部 EGR 率に対する各種排出物濃度の変化を図 12 に示す。実際の内部 EGR 率が一定の場合、当量比 $\phi=0.9$ の場合を除き、当量比の増加に伴い THC、CO は減少し、CO₂ は増加する。また内部 EGR 率の増加に伴い CO₂ 濃度は一旦減少し、その後増加する。同時に THC 濃度および CO 濃度は一旦増加し、その後減少する。内部 EGR により十分な熱量

を供給すると燃焼効率が向上する。NO_x 濃度は全条件を通じて 12ppm 以下であった。

4. 結 論

4 ストローク予混合圧縮着火(HCCI)機関において排気弁閉時期を変化させることにより混合気中の内部 EGR 率を変化させ、内部 EGR 率が圧縮着火燃焼特性に与える影響について実験的研究を行った。そして単気筒ディーゼル機関を用いて *n*-Butane 空気予混合気を供給した場合の、内部 EGR 導入時における、当量比・機関回転速度依存性および、着火時期・燃焼期間・各種排出物特性について比較・検討を行った。その結果、以下の知見が得られた。

- 1) 4 ストローク機関においてはバルブタイミングを変化させることにより内部 EGR 量を制御することが可能であり、排気弁閉時期の早期化および吸気弁閉時期の遅延化により内部 EGR 率は増加する。
- 2) 内部 EGR 率は燃焼による排気ガスの温度上昇に伴い低下し、機関回転速度の上昇に伴い増加する。
- 3) HCCI 機関においては内部 EGR 率の増加に伴い、ノッキングの抑制効果、および失火限界の拡大効果が得られ、運転領域は高負荷・高速度域へ拡大する。
- 4) 内部 EGR 率の増加により低温酸化反応に伴う熱発生は減少し消滅する。低温酸化反応の消滅により高温酸化反応の発現時期は一旦遅延化する。しかし内部 EGR 率がさらに増加すると高温酸化反応発現時期は早期化する。
- 5) 内部 EGR 率の増加により高温酸化反応の反応期間は短期化する。
- 6) 内部 EGR 導入により、量論比の予混合気でも運転が実現でき、内部 EGR 率の増加に伴い十分な熱量が供給されると燃焼効率が向上し、排気の HC および CO 濃度は減少する。NO_x 濃度は全条件を通じて 12ppm 以下であった。

謝 辞

本研究の実験を行うにあたり奥山博昭君、石井和明君、および田大秀君(慶大院)の協力を得た。また実験装置の製作にあたりヤンマーディーゼル(株)志賀健治氏、および大阪ガス(株)守屋浩二氏の協力を頂いた。ここに深く感謝の意を表す。

文 献

- 1) R.H.Thring, Homogeneous-Charge Compression-Ignition (HCCI) Engines, *SAE Paper* 892068, (1989)
- 2) 武田好央, 中込恵一, 新村恵一, 早期燃料噴射による希薄予混合ディーゼル燃焼の排出物特性, 機論, 62-599, B (1996), 347-354.
- 3) 古谷正広, 川島一仁, 辻英和, 戸田真, 太田安彦, 超希薄予混合圧縮着火機関試案, 機論 62-595, B (1996), 408-414.
- 4) Yanagihara, H., Sato, Y., Mizuta, J., A study of DI dies

- el combustion under uniform higher-dispersed mixture for
mation, *JSAE Review* 9733675, 18, (1997), 247-254.
- 5) 茨木康充, 飯田訓正, 分子構造の違いが予混合圧縮自己
着火の低温酸化反応に及ぼす影響, 日本機械学会講演論
文集, 984-2, (1998), 15-16.
 - 6) Shinji Kojima, "Detailed Modeling of *n*-Butane Autoigniti
on Chemistry", *Combustion and Flame*, 99, (1994), 87-13
6.
 - 7) 五十嵐哲也, 飯田訓正, 予混合圧縮着火エンジンにおけ
る DME および *n*-Butane 燃料の自己着火・燃焼過程, 機
論, 64-618, B (1998), 605-612.
 - 8) 高津戸理恵, 五十嵐哲也, 飯田訓正, 予混合圧縮着火エン
ジンにおける *n*-Butane 燃料の自己着火・燃焼過程 (外部 EG
R が着火および燃焼に及ぼす影響), 機論, 65-638, B (199
9), 261-265.
 - 9) 奥山博昭, 高津戸理恵, 飯田訓正, 予混合圧縮着火エン
ジンにおける給気予混合気の不均一性が着火および燃焼
に及ぼす影響, 日本機械学会講演論文集, 99-1, (1999),
321-322.
 - 10) Jurgen Willand, Rolf-Gunter Nieberding, Guido Vento,
Christian Enderie, The Knocking Syndrome -Its Cure an
d Its Potential, *SAE Paper* 982483, (1998)
 - 11) Iida, N., Combustion Analysis of Methanol Fueled Activ
e Thermo-Atmosphere Combustion (ATAC) Engine Usin
g a Spectroscopic Observation, *SAE paper* 940684, (199
4)
 - 12) 浅海晴男, 原田明, 青柳友三, 橋詰剛, 予混合圧縮着
火期間の運転領域の拡大, 自動車技術会学術講演会前刷
集, No. 38-00, 162, (2000), 5-8
 - 13) 山崎由大, 小山崇, 宮崎富夫, 飯田訓正, 予混合圧縮
着火機関における *n*-Butane 空気予混合気の自己着火およ
び燃焼の素反応数値計算, 第16回内燃シンポジウム講演
論文集 No21, 2000, 127-132
 - 14) TNO report, 12 of 76, Table 2.1, 14, June, (1996)
 - 15) 小山崇, 茨木 康充, 飯田訓正, ジメチルエーテル空気予
混合気の圧縮着火燃焼過程の素反応数値計算, 機論, 67-
657, B (2001-5), 1267-1273.
 - 15) 小山崇, 茨木 康充, 飯田訓正, 予混合圧縮自己着火エン
ジンにおけるジメチルエーテル空気予混合気の着火燃焼
の素反応数値計算, 機論, 67-657, B (2001-5), 1274-128
1.