ディーゼル機関予燃焼室内のガス分析 (第2報)*

高 橋 和** 三 瓶 長 司***

The Analysis of Gases within the Pre-Chamber of the
Compression Ignition Engine (2nd Report)

by Hitoshi TAKAHASHI and Takeshi SANPEI

To discuss the concentration of CO_2 , CO , O_2 and H_2 in the pre-chamber, we adopted one plane that has co-ordinates of O_2 consumed and $\text{CO}+1.5\text{CO}_2-0.5\text{H}_2$ in mole ratio, then data of gas analysis are plotted straightly passing through the original point.

We introduced these co-ordinates from the kinetics of the paraffine series oxidization and water gas reaction.

Data of exhaust gases locate on the straight line that has an angle of inclination determined by the value of H_2/C in mole ratio of fuel.

The farther from the exhaust gas line mentioned, the lower the degree of combustion. But these co-ordinates can not determine the mechanics of incomplete combustion, namely whether the oxidization of paraffine side chains mainly occur or solid carbons are produced.

1. 緒 言

運転中に予燃焼室からガス採集弁を通じて出したガスの臭気は明らかに排気のそれと異なり、蒸気機関車の煙に似た刺戟臭を有する。

また採集弁から出るガスを水にくぐらせるとすすが水に浮くから固形炭素が生成されることがわかる。このように予燃焼室内の燃焼は不完全燃焼であるが、その度合を表わす方法として、縦軸に消費酸素量(%), 横軸に $(\text{CO})+1.5(\text{CO}_2)-0.5(\text{H}_2)$ [(.....)は.....の%を表わす]の座標でガス分析値を整理することを述べ、そしてその結果を報告する。

2. 実験方法と実験装置

(1) 実験方法

空気過剰率(λ): $1.5 \sim 4$, $\lambda > 4$ では長時間運転が困難であり, $\lambda < 1.5$ では煙限界がある。

ガス採集時期: 緒言で述べたように三つの期間を代表して $+3^\circ \sim +5^\circ$, $+22^\circ \sim +25^\circ$, および $+52^\circ \sim +54^\circ$ よりそれぞれ開弁する時期を選んだ。

サンプリング弁の開いている時間の長短はガス採集速度で見当がつく。前回は 10^{-3} 秒程度の開弁時間に注意したが、今回は後述のごとく採集速度を2倍以上に増しても、分析結果は測定値の散らばり程度の変動であったので、前回ほどは神経質にならなかった。

rpm: 500, 冷却水: 沸騰, 燃料噴射時期:

第 1 図

-9° , 燃料噴射継続角を第1図に示してある。燃料噴射開弁圧: 150 kg/cm^2 (第1報の 160 は誤り)

(2) 実験装置

エンジン: ヤンマー S6, 圧縮比: 19, 径×行程¹: 105×172 , 予燃焼室容積/燃焼室容積 ≈ 0.35 , ノズル面積/ピストン面積 ≈ 0.0067

ガス分析装置: 分析したガス成分は CO_2 , O_2 , CO , H_2 の4種である。前回はこの外に C_mH_n , CH_4 も分析したが予備実験で少量だったので略した。オルザートの装置を使い, CO_2 , O_2 , CO を吸収した。 H_2 分析のため別燃焼炉を付加した。第2図のごときガラス製の炉に 10 cc の CuO を封入する。 H_2 は $160 \sim 170^\circ\text{C}$ より酸化始め $250 \sim 300^\circ\text{C}$ で完了する。メタンは 300°C 以上で酸化始める⁽¹⁾ので, 250°C で30分加熱しその間試料を何回も炉中を通させた。この分析には時間がかかるので気温変化の補正をしなければならない。

* 昭和31年6月22, 23日, 内燃機関総合講演会において講演, 原稿受付 昭和31年3月30日。

** 正員, 岐阜大学工学部。

第 2 図 水素分別燃焼炉

燃料：日本鉱業特A重油である。第1表～第3表は岐阜大学工学部，工業化学科，油脂化学研究の指

導を得て行った分析結果である。

重質油分析はだいたい軽油までで，重油には一般に行わないようである。

第 1 表 化学分析法⁽²⁾ % (容積)

不飽和族	芳香族	ナフテン族	パラフィン族
15 Δ	25 Δ	5	55

第 2 表 環分析法⁽³⁾ % (重量)

不飽和族	芳香族	ナフテン環	パラフィン側鎖
20 Δ	20 Δ	15	45

Δ 印は硫酸法による。

第 3 表

試料	比重 (26.7°C)	屈折率 (26.7°C)	比屈折	アニリン点 °C	平均分子量	初留点 °C	50%点 °C
試料	0.885	—	—	—	—	170	310
80% H ₂ SO ₄ にて処理後	0.873	1.4857	0.3287	77.5	—	—	—
80, 96% H ₂ SO ₄ にて処理後	0.837	1.4609	0.3280	91.0	264*	—	—

* ベンゾールを溶剤として，氷点降下法⁽⁴⁾で求めた。

運転の安定度を見る目的で燃費，空気過剰率曲線を第3図に示す。摩擦馬力はモータリングで測定して図指燃費を採用した。少し運転の荒れたのが表われている。

第 3 図 図示燃費に及ぼす空気過剰率

3. 実験結果の考察

(1) ガス分析値の整理法 予燃焼室内の燃料空気混合気は均一でないから，エンジンに供給した燃料と，空気からガス採集した場所の混合比を決定できない。ゆえにガス分析値そのままは燃焼の度合を表わすことはできない。すなわち O₂ の分析値が少い方が必ずしも燃焼の度合がより進んでいるとは言えない。燃料1モル当りの O₂ 消費量が多いかどうかかわからないからである。

燃焼指数がわかっておればガス分析値から空気過剰率を計算することができる。これはガス採集場所の局

部の空気過剰率であるから，その燃焼状態を推定するのに有効である。λ<1 であれば不完全燃焼であることがわかる。しかし逆に λ>1 であれば完全燃焼するとは限らない。極端な例をあげると λ→∞ でも有煙燃焼することもありうる。

ガス分析値から求めた H₂/C (モル比) は有煙燃焼の度合をよく表わすはずである。固形炭素はガス分析値に含まれないから，ガス分析値から算出する H₂/C は燃料組成の H₂/C より大きくなるからである。

ところが，水蒸気はガス分析にかからないからその量を推定せねばならぬことは欠点である。第1報⁽⁵⁾では O₂ は CO₂，CO のほかは H₂O の生成にだけ消費されると仮定し，N₂ は不活性で量に変化がないものとして H₂O の量を推定した。第1報では予燃焼室内の燃焼期間は H₂/C>1 となっている。燃料の H₂/C ≒ 0.8 である。

パラフィン系炭化水素では，n を炭素数とすると，H₂/C=1+1/n である。ゆえに予燃焼室内では固形炭素の生成のため H₂/C が1より大きくなったのか，あるいは主としてパラフィン側鎖の酸化でとどまっているためなのかなどと燃焼機構が推定される。後者のときは高級アルデヒド RCHO の形で酸素が消費されるので，上記の方法で算出する H₂/C は見掛けの値となる。

Pope, Dykstra, Edgar は実験的に炭化水素の酸化に消費される O₂ のモル数を Δ(O₂) とし，生成された CO と CO₂ のモル数を (CO)，(CO₂) とすると，

$$\Delta(O_2) = 1 + (CO) + 1.5(CO_2) \quad [\text{モル}]/[\text{燃料モル}] \quad \dots\dots(1)$$

であるとし, n -RCHO の酸化に対しては

$$\Delta(O_2) = (CO) + 1.5(CO_2) \quad [\text{モル}]/[\text{燃料モル}] \quad \dots\dots(2)$$

としている⁽⁶⁾. そして次のように説明している.

Edgar は (5) は不均一表面反応としている⁽⁶⁾.

Walsh の機構も (1) の事実を満足している.

(1) の右辺第1項の1モルは (3), (6) の消費される O_2 を意味し, 第2項の (CO) は (4), (8) の O_2 のことである. また $1.5(CO_2)$ は (5) か $CO \rightarrow CO_2$ を考えると理解できる.

予燃焼室内の燃焼がパラフィン側鎖のみの酸化であれば (1) を満足すであろう.

縦座標に $\Delta(O_2)$, 横座標に $(CO) + 1.5(CO_2)$ [モル/燃料モル] の平面上では, パラフィン系炭化水素の同一段階までの酸化でとどまるガスはすべて同じ一つの点になる.

両軸とも燃料1モル当たりとすることをやめて, 単にモル数に変更すると, 同一の酸化段階にあるガス組成は, 採集したガス量が燃料1モル当りの量とは限らぬから, 原点を通る直線上にのることになる. さらに両軸とも採集したかわきガス全モル数で除してモル%で表わしても, 同一酸化段階のパラフィン炭化水素の燃焼ガスは, 原点を通る同一こう配の直線となる. 第4, 5図に OA で示す. ab は (1) 式の右第1項に当る. そして bc/ab は O_2 に蚕食された c 鎖の数を示すことになる.

第4図

第5図

一方, 燃料の分子式を C_mH_{2n} とし, (1) 式の右辺第1項を除いた両辺で角 α を次のように定義する.

$$\tan \alpha = \Delta(O_2) / \{ (CO) + 1.5(CO_2) \} \quad \dots\dots(9)$$

完全燃焼のときの α を α_0 として区別すると,

$$\tan \alpha_0 = \left\{ m + \frac{n}{2} \right\} / 1.5m = \frac{2}{3} + \frac{1}{3} \cdot \frac{n}{m} \quad \dots\dots(10)$$

となる. n/m は前述の H_2/C [モル比] である. 重油の $n/m \approx 0.8$ であるから $\tan \alpha_0 \approx 0.93$ であり, 45° 線の上部には入らない. しかし固形炭素を生じ見掛上 n/m が大きくなれば, $\alpha_0 > 45^\circ$ になることができる.

すなわちガス分析結果が 45° 線より上の範囲に入るには, パラフィン側鎖の酸化でとどまるとき, 固形炭素のようにガス分析にかからない炭素を生ずるときとが考えられる.

どちらの場合も燃料を定めたときは, こう配が1より大きいほど不完全燃焼度が大きいとすることができる.

また不完全燃焼の一形態に CO の多い場合がある. この影響を考察するのに完全燃焼の α_0 線上で $CO_2 \rightarrow CO + \frac{1}{2}O_2$ の変化を考えると, 第5図の1→2と横軸に対して 45° 方向に移動する. $\alpha_0 > 45^\circ$ のときも $\alpha_0 < 45^\circ$ のときも, いずれも 45° 線から離れる方向に移動する.

今までの考察には H_2 の存在には触れなかった. H_2 の生成経路は脱水素反応等もあり決して簡単でなからうが, 第1報で報告したように水性反応の可能性が強い. H_2 は水性反応で生ずると仮定すると (1) は次のように修正される.

$$\Delta(O_2) = 1 + (CO) = 1.5(CO_2) - 0.5(H_2) \quad \dots\dots(11)$$

これによると H_2 が存在する燃焼の不完全度も第5図の $CO_2 \rightarrow CO$ と同じように 45° 線より遠ざかることで表わすことができる.

$\Delta(O_2)$, $(CO) + 1.5(CO_2) - 0.5(H_2)$ 平面の特長をまとめてみると次のようになる.

(1) $\alpha_0 > 45^\circ$ (i) 完全燃焼のときは $\alpha = \alpha_0$ 一定線となる. (ii) パラフィン側鎖の酸化でとどまっているときは $\alpha > \alpha_0$ となる. H_2 が存在することと同等であることでもわかる. (iii) 固形炭素を生ずるときも $\alpha > \alpha_0$ である. (iv) パラフィン側鎖の酸化でとどまらずまた固形炭素も生じないが, CO や H_2 が存在するときも $\alpha > \alpha_0$ である.

つまり不完全燃焼の度合いの大きいほど, α が大きくなる.

(2) $\alpha_0 < 45^\circ$ (i) $\alpha > 45^\circ$ になれば, パラフィン側鎖の酸化にとどまるとき, 固形炭素を生ずるときおよびこれらの場合, さらに CO, H_2 の存在する場合である. (ii) $45^\circ > \alpha > \alpha_0$ の範囲は, 上記三つの不完全燃焼の形式の内, パラフィン側鎖の酸化でとどまる場合は除外せねばならない. 固形炭素を生ずるときは α は大きくなるが, CO, H_2 が存在すると逆に α は小さくなることは不都合である. しかし CO が存在してこの範囲に入るときは有煙燃焼である. (iii) $\alpha < \alpha_0$ 固形炭素を生ずことはなく CO や H_2 が存在する形式の不完全燃焼である.

(2) 第 1 報のデータの整理 第 6 図に示す。図中の一つの点は数個の分析値の平均を示す。直線状になるのが特長である。

第 6 図 第 1 報のデータ，各点は同一採集時期の平均値，採集したかわきガスのモル数を 100 とす。

○印は $\text{CO}, \text{H}_2 > \text{CO}_2$ を特長とする第 1 期間である。●印は $\text{CO}_2 > \text{CO}$ に逆転する第 2 期間である。○印は数%の H_2 を含むから (11) 式の $0.5(\text{H}_2)$ の項をはぶくと、 45° 線あるいはそれ以下の範囲に入るようになる。

重油の $\tan \alpha_0 \approx 0.93$ であったが、⊗印はほとんどそのこう配にある。

予燃焼室の上部のガスと考えている○は最も排気に近い燃焼をしている。

予燃焼室内の第 1, 2 期の燃焼がパラフィン側鎖の酸化の段階で止まっておると仮定すると、蚕食された炭素鎖の数は 6~6.5 になる。

(3) 噴射量を変更したデータの整理 第 7 図に示す。○印の第 1 期のガス採集時期がまずかったとみ

第 7 図 分析値の整理，採集したかわきガスのモル数を 100 とする。

え、生成%が少く精度が余りよくない。それでも平均をとれば第 6 図と非常によく似た結果が得られた。⊗印の排気も $\alpha_0 = 0.93$ 線上にならんでいる。

噴射量の影響は運転の荒れたことと、ガス分析本来の精度から分析結果が重なり合うが、しかし次のことは言えるようだ。

(i) 噴射量が少いものがかえって不完全燃焼している。第 7 図の ⊗ は $\lambda > 3$ のものである。逆に $\lambda < 2$ のもの(●印)の実験値が 45° 線に近いのは意外であった。

詳しくはわからないがどうやら噴霧状態が大きく影響しているように思われる。このデータもパラフィン側鎖の酸化の段階でとどまっていると仮定すると、それは 10 個ぐらいの炭素鎖になる。

(4) 第 6, 7 図でわかるように、この整理法の特長の一つは、直線状にデータが並ぶことである。今かりに横軸を $(\text{CO}) + (\text{CO}_2) - 0.5(\text{H}_2)$ にして第 6 図をプロットし直すと第 8 図のように直線性がすっかりくずれてしまう。 $0.5(\text{H}_2)$ の項をおとせばさらにくずれることがわかる。

第 8 図 第 6 図の横軸を変更したもの

(5) ガス分析結果の考察 予燃焼室容積は全燃焼室の 0.35 であるから、エンジンに供給する空気過剰率を λ とすると、予燃焼室内での空気過剰率は $\lambda' = 0.35\lambda$ となる。ゆえに $\lambda < 3$ でかえって燃焼が不活発になることを予想したが、結果は必ずしもそうでなく、 CO を生成して燃焼期間が延びていることを知った。

分析した成分のうち H_2 と CO の量の間にはほぼ比例関係がある。第 9 図に示す。第 10, 11 図には図面の複雑化を防いで記入していない。また第 12 図の実験では H_2 は少いと思い測定しなかった。

(i) $+3 \sim 5^\circ$ のデータ

$\lambda > 3$ ではガス組成が排気組成の変化に沿うが、 $\lambda < 3$ ではほとんど変化しない。このクランク軸の位相はある量以上の噴射量のときには噴射継続中にガス採集する。したがってある値以下の λ では、ガス組成がほ

第9図 組成COとH₂との関係

とんど変らないものと考えられる。

前回のデータと同様 $\text{CO} > \text{CO}_2$ であり, CO と同程度の H₂ が存在する。

第10図 クランク角3~5°における燃焼ガス組成に及ぼす空気過剰率の影響 (H₂ は記入していない)

(ii) +22~24° のデータ

前回と同様 $\text{CO}_2 > \text{CO}$ となっている。主燃焼室への噴出が弱まるので予燃焼室にたまる時間が長くなること, 空気過剰率も回復して, 燃焼の過程が進むようになる。

$\lambda > 3$ では主燃焼室内のガス組成と同じである。この関係は第1期間とよく似るが, 第1期間の場合は主燃焼室内組成の傾向に沿うものの, 主燃焼室より明らかに燃えていない。

$\lambda < 3$ で排気組成より離れる。そして CO_2 の量はほとんど変わらず, CO が λ の減少とともに増加し, $\lambda \approx 1.5$ では CO_2 と同じ量までになっている。

このように燃料噴射量が増したにもかかわらず, 燃焼の度合いが余り変らない理由を次のように考えている。燃料噴射量を増せば噴射継続角が長くなる(第1図)。ボッシュ型の噴射ポンプのように, 噴射率が一定で噴射継続角が長くなるときは, 燃焼開始後一定時間後では, ある量以上噴射量を増してもガス組成は変らないであろう。

このように考えると第11図で小さい λ で CO_2 が変らないのに CO が増して来ることが理解される。すなわち第1期間が長くなっていると解釈する。しかしながら第11図は λ が小さくなるに従って燃焼に参加

第11図 クランク角22~24°における燃焼ガス組成に及ぼす空気過剰率の影響 (H₂ は記入していない)

するCが増している。すなわち単調に燃焼期間が増加しただけでなく噴射率が増したと考えねばならない。

実験に使用した燃料噴射ポンプはデッケル型である。逃出口を絞って噴射量を増すので, 噴射率と噴射継続角がともに長くなるので矛盾しない。注意すべきことは, 予燃焼室内で燃料が増加した場合は, CO_2 より CO が増加する方式をとることである。すなわち主燃焼室には燃料のほか CO, H₂ が噴出することになる。

(iii) +52~54°

排気組成変化に平行して変化していることと, 排気よりも濃度の少いことが特長である。

予燃焼室内の燃焼は, 主として下部で進行することと, 主燃焼室へ流動するから, 予燃焼室の長さ方向に, ガス濃度のこう配ができる。

第12図 クランク角52~54°における燃焼ガス組成に及ぼす空気過剰率の影響 (H₂ は測定しなかった)

ピストンが下降し、上部に位置していたガスは膨張して予燃焼室を占めるようになる。このクランク軸位相ではそのガスを採集したものと考えている。

注意すべきことは、燃料噴射量が多いほど成分パーセントが多くなっていることである。

噴射量の多いほど燃焼期間が長くなるから、これよりも更に後のクランク軸位相では成分パーセントの差は縮まるかも知れないが、このように差のあるのは予燃焼室内では噴射量の多いほど多くの燃料が燃焼に参加していることになると考えている。

4. 結 論

(1) 消費酸素量(モル%)を縦軸に、横軸に(CO) + 1.5(CO₂) - 0.5(H₂) [(……) は …… のモル % を表わす] をとる平面にガス分析値をプロットすると、排気ガスは こう配 ± 0.93 の直線上にならぶ。こう配は燃料の炭水素できまる。

燃焼期間中のデータは、こう配 1.1 くらいの直線上にプロットされる。

(2) こう配が 1.1 くらいになるには、パラフィン側鎖の酸化でとどまっているため、固形炭素を生じた

ための原因が考えられる。

(3) パラフィン側鎖の酸化の初段階であるほど、固形炭素の量の多いほどこう配が大きくなる。

(4) 噴射量の少ない場合のこう配が大きく、噴射量の多い場合が小さいようである。そうであれば噴霧状態が原因であろうと考えている。

(5) 噴射量が多くなると、CO が増して燃焼期間が延びる。

最後に燃料分析を御指導下さった岐阜大学工学部平林助教授、ならびに在学中実験に御協力下さった酒向洋治(日本内燃機)、加納良長(大平洋工業)の諸氏に謝意を表します。

文 献

- (1) 舟阪, 燃料化学分析試験法, 639 ページ (昭 24).
- (2) 石橋, ディーゼル燃料, 共立社, 218 ページ (昭 19).
- (3) 文献 (1) 392 ページ.
- (4) 文献 (1) 266 ページ.
- (5) 高橋・下山, 機械学会論文集, 22 巻 120 号, 620 ページ (昭 31).
- (6) Lewis, Elbe, *Cmbustion, Flames and Explosion of Gases*, p. 174 (1951).

621.43.013.3

気 化 器 の 特 性 (第 1 報, 第 2 報)*

(噴出液の分布および微粒化について)

石 神 重 男** 田 中 義 弘***

The Characteristics of a Carburettor (1st and 2nd Reports)

(On the Liquid Distribution and Atomization)

by Shigeo ISHIGAMI and Yoshihiro TANAKA

On carburettors, to explain the distribution and the atomization characteristics of the discharged fuel, three horizontal flow pressure type carburettor models combined with three type discharge pipes are examined. And as a result the following have been obtained: —

The position of the discharge pipe with the best distribution of the liquid, and the droplet size diagram with the rectangular axes of the quantity of the flowing liquid and that of the air bled in the liquid, showing the concaved surface, from which the condition of the smallest droplet size is to be found.

1. 緒 言

ガソリン機関の気化器において燃料の一部分がガス化し、大部分は液状のままシリンダに送られてゆくこ

とが古くから知られているが、先に筆者の一人が研究した結果⁽¹⁾によっても吸気温度が 15°C のとき噴出ガソリンの 75% は液状のままであった。したがって混合ガスの一様な分配には、液状のままシリンダに送られてゆく燃料の模様が、重要な影響をもつと考えられる。

本研究は気化器の特性の一面として噴出燃料のうち液状のままシリンダに送られてゆく部分の吸気中への

* 昭和 30 年 7 月 15 日 九州支部講演会において第 1 報を講演、昭和 31 年 3 月 6 日 九州支部第 9 期総合講演会において講演、原稿受付 昭和 31 年 3 月 30 日。

、* 正員、鹿児島大学工学部。