ピストン圧縮低温度自着火炎の発現形態*

古谷正広^{*1}, 太田安彦^{*1}, 小松賢二^{*2}Onset Behavior of Autoignited Low-Temperature
Flames Caused by Piston Compression

Masahiro FURUTANI, Yasuhiko OHTA and Kenji KOMATSU

Compression-ignition processes of hydrocarbon/oxidizer mixtures are visualized using a combination of an image intensifier and a high-speed camera in wide range of temperatures. Onset images of cool-, blue- and final hot-flames are identified. Three typical regions of low-temperature ignition are classified and characterized. The cool flame onset followed by its degeneration is relatively homogeneous. Spatially nonuniform ignition is emphasized, though it does not always appear first in the vicinity of the cylinder wall as hitherto mentioned. Ignition in the blue flame dominant region, the highest temperature region of the low-temperature ignition, does not come under the category of the high-temperature thermal ignition usually obtained in shock tubes.

Key Words: Combustion, Internal Combustion Engine, Ignition, Preflame Reaction, Visualization

1. はじめに

火花点火機関でノックが起こる際には、未燃混合気の自着火はエンドガス全域で均一に生じるのではなく、伝ば火炎の反対側のシリンダ壁近傍で起こることが多いと言われている⁽¹⁾⁽²⁾。ノックを抑制する手法を探るには、まず自着火熱炎の前駆である低温度炎の発現に対して、その誘導期間を律速する要因が何であるかを知らねばならない。

著者らは実機よりも単純な場を用意して低温度自着火炎の発現について調べて、圧縮始めにおいて温度、圧力、組成がほぼ均一であっても冷炎や青炎の発現は、程度の差こそあれ、常に不均一であることを指摘してきた⁽³⁾⁽⁴⁾。不均一に発現することで、熱炎着火までの遅れ時間が短くなっているのであれば、そういう機構を繰り入れていく必要がある。不均一であることの意味が明らかになれば、前炎反応が空間的に均一に進むと考える素反応動力学計算が、不均一に発現してくる炎に対して意義のあるものなのかどうかということも明確になる。

一方、低温度炎の発現形態を知るのは必ずしも簡単なことではない。バーナや反応流管を使って低温度炎をある場所に停滞させれば低温度炎を見ることができ、容器内圧縮自着火の前にごく短いあいだ発現する低温度炎、特に冷炎の自発光を明確に高速度撮影したという報告はない。冷炎の発光は極めて弱く、直接撮影はもちろん、シュリーレン法でも冷炎をとらえることは容易ではなくて、技巧をこらさねばならない。文献(3)がシュリーレン法で冷炎をとらえた数少ない例である。青炎は比較的強く発光し、直接光でも高速度撮影できるが⁽⁴⁾、深い増感現象を必要とする。

このように、低温度炎の発現状況を把握するには困難が多く、広い温度範囲で調べることができなかったが、イメージインテンシファイアと高速度カメラの組合せで、急速圧縮機によるピストン圧縮自着火について、冷炎や青炎および熱炎の発現過程を広い温度域において比較的簡便に観察できたので、その映像とそれから得られた知見について述べる。

2. 実験装置および方法

ここで用いた急速圧縮機は以前から用いているもの⁽⁵⁾⁽⁶⁾と同じであるが、燃焼室を可視化するために、シリンダヘッドにガラス窓がはめ込まれている。シリ

* 原稿受付 平成4年6月5日。

^{*1} 正員、名古屋工業大学工学部 (〒466 名古屋市昭和区御器所町)。^{*2} 正員、ヤマハ発動機(株) (〒438 磐田市新貝2500)。

シリンダ径 $\phi 65$ に対してこのガラス窓の視界は $\phi 50$ である。シリンダ壁から 7.5 mm のところまでが遮られていて、壁の近傍での現象を撮影できないが、チャージの圧縮始めの温度均一性を優先させたためである。指圧計と石英窓が燃焼室側面に取付けられている。燃焼室内の発光はこの石英窓を透過し、色ガラスフィルタ（東芝化成 V-42：透過波長域 350～520 nm）を介して光電子増倍管（浜松フォトニクス 1P28：分光感度 180～640 nm）によって感知される。

燃焼室まわりの概略を図 1 に示す。熱炎前に発現する低温度炎（冷炎，青炎）の微弱な発光の経過を撮影するために、約 40 000 倍の光増強作用を持つイメージインテンシファイア（浜松フォトニクス Nighit Viewer C 2100，素子は V 1389 P）を用い、それによって輝度の増強された像を高速カメラ（HIMAC 16 HS）に入れる。フィルムは Kodak 7222 (ASA 200) であり、撮影速度は約 2 000 f. p. s. である。また、熱炎を同定するときにはイメージインテンシファイアと燃焼室の間に色ガラスフィルタ（東芝化成 R-62：透過波長域 590 nm）を取付け、赤色発光だけ⁽⁷⁾ を高速撮影した。このイメージインテンシファイアは残像が残る欠点があると言われているが、特に支障は見られなかった。ここで用いた光電子増倍管の分光感度、および色ガラスフィルタの透過率と波長との関係、イメージインテンシファイアの相対放射感度を図 2 に示す。

急速圧縮機の圧縮比は 8.5, 11.6, もしくは 18.1 に設定された。ここでは燃料として、*n*-ヘプタン、*n*-ブタン、メタンが採用され、酸化剤としては空気もしくは

はアルゴン/酸素の疑似空気が用いられた。

3. 低温度自着火の三つの温度領域

量論の *n*-ブタン/酸素/アルゴン予混合気を急速圧縮機で自着火させたときの着火遅れのアレニウスプロットを図 3 に示す。これは既報⁽⁶⁾⁽⁸⁾ をまとめたものである。圧縮が完了したときの温度で整理されており、温度の高い方が右に来るように描かれている。密度一定の条件ではなくて、圧縮終わりの圧力が 0.7 MPa と一定になっている。図 3 中の A の領域では、冷炎着火遅れ τ_1 が熱炎までの全着火遅れ τ_{total} の大部分を占めるので、この領域を「冷炎前反応が支配的な温度領域」(Cool-Flame Dominant Region) と呼ぶ。領域 B では通常の着火の傾向とは逆に、全着火遅れ τ_{total} 、つまりは青炎着火遅れ τ_2 が温度が高くなるにしたがって長くなる。この領域は「負の温度係数領域」(Nega-

図 2 イメージインテンシファイア、光電子増倍管、色ガラスフィルタの分光感度と透過率

図 1 可視化した急速圧縮機の燃焼室まわり（圧縮比 $\varepsilon=8.5$ の場合）

図 3 量論 *n*-ブタン/ O_2 /Ar 混合気の圧縮自着火の着火遅れについてのアレニウスプロットと圧縮自着火における三つの領域 A, B, C (τ_1 , τ_2 , τ_{total} ：それぞれ冷炎，青炎，全着火遅れ)

tive Temperature-Coefficient Region) と呼ばれていて、 $\tau_1 \cong \tau_2$ もしくは $\tau_1 < \tau_2$ である。さらに高い温度域 C では、着火遅れは再び温度に対して正の依存性を持つようになる。そこでは τ_1 , τ_2 を明確に定めることができず、着火遅れ期間に発光があったとしても先の二つの領域で出るような冷炎のそれとは異なるので、ここを「青炎が支配的な温度領域」(Blue-Flame Dominant Region) と呼ぶ。この領域での着火前反応の見掛けの活性化エネルギーは冷炎前反応支配域 A のそれより常に大きい。

これらの領域を分ける温度と圧力は、燃料や酸化剤の種類、混合比などによって変わるが、おおまかな性質そのものは変わらない。ふるくは冷炎前反応支配域 A が研究対象になっていたけれども、ディーゼル機関を含めて、内燃機関の着火では負の温度係数域 B、もしくは青炎支配域 C のほうが重要であることが認識されてきている。負の温度係数域 B の振舞いは着火としては通常の逆であるから特異な領域として扱われるが、単に冷炎前反応支配域 A から青炎支配域 C への遷移域にすぎない可能性もある。青炎支配域 C が衝撃波管で一般に得られているような高温熱着火と同じ領域のものであるのかどうかについてはまだ明確な結論が出ていない。

図4 冷炎前反応支配域(A)圧縮自着火の圧力・青色発光履歴と火炎の発現挙動
(n -ヘプタン/空気混合気 $\phi=0.7$, $\varepsilon=11.6$)

4. 結果および考察

4.1 冷炎前反応支配域ピストン圧縮自着火炎の撮影

まず最初に、 n -ヘプタン/空気の当量比 0.7 の予混合気を用意する。急速圧縮機で予混合気を圧縮自着火させる場合、希望する圧縮終わり温度、圧力は予混合気の初温度と圧縮比とを選ぶことによって得る。ここでの圧縮比でこの急速圧縮機において可能な圧縮終わり温度は、この混合気の場合 450~700 K である。 n -ヘプタンは冷炎の発光が強く、冷炎による圧力上昇の大きい燃料であって、この温度域を調べるのに都合がよい。

圧縮比 11.6 の場合の、熱炎に至る圧力履歴とそのときの高速度写真の例を図4に示す。横軸は圧縮終わりからの時間、縦軸は圧力と青色発光である。冷炎の発生と縮退とが発光の履歴から容易に知られ、冷炎反応に伴う圧力上昇が明確に見られる。 $\tau_1 \cong \tau_2$ となっているけれども、まだ $\tau_1 > \tau_2$ であって、冷炎前反応支配域のうちでも温度の高いところの典型的な着火例である。混合気が薄く、熱炎での熱発生が青炎のそれと違

わないほどにゆっくりとしているため、青炎と熱炎との境界がはっきりしない。このため青色発光の軌跡だけでは熱炎の同定はできないが、赤色発光を観察すれば判定できる⁽⁷⁾。圧力履歴の線上に記されているアルファベットと写真のほうのアルファベットとが対応している。写真にふられた数字は時間経過を表す。

B および C の時刻に冷炎が発現し、冷炎は燃焼室全域に均等に分布する数百の核から出てきている。これは先にシュリーレン写真でとらえられたモータリング機関での冷炎のそれ⁽³⁾と良く一致している。

D および E の時刻には冷炎特有の縮退があつて発光が見られなくなり、F、G の時刻に青炎へ移行する。青炎は、先にも指摘した⁽⁴⁾ように、ほんの数個の核から出てくる。青炎から熱炎への移行過程で青炎の輪郭だけが現れるような時期が存在する(時刻 G-2, G-3)。時刻 G-4 から H にかけてが熱炎の生成過程であり、核の数が青炎発現のそれより増えて 2 けたになっている。青炎と比べると冷炎発現の均一性ははるかに高く、熱炎ではやや不均一の程度が下がる。上述のように熱炎は強くなく、発光強度は青炎のそれより弱いくらいであつて、中心部からよりはシリンダ壁近くからのほうでやや早く現れる。

冷炎発現の端緒である時刻 A に、相当に明るい、壁近くと中心部とから不均一に発現する発光像が得られている。この発光は青フィルタを介した光電子増倍管にはとらえられていない。著者にも初めての経験である。光電子増倍管の視野から考えて、可視化窓の表面、もしくはピストン面のごく近傍での現象であることになるが、詳細はわからないのでこれについてはまた別の機会に検討する。

Taylor らがおよそ 40 年前に炭化水素系燃料の圧縮自着火を高速度カメラで撮影をしており⁽¹⁾、そこに *n*-ヘプタンの結果も含まれている。その圧力履歴を見ると、得られている自着火が冷炎前反応支配域のかなり温度の低い場合のものであることが知られる。燃料の種類によらず、圧力履歴からは冷炎が生じていると認識される時刻に、写真からはシリンダ壁近くのほんの一部分で発光が始まっていることが知られ、ここで得られた結果と大きく異なる。最初の発現がシリンダの全周にわたっているということがない。ここでのものと比べて、Taylor らの資料はずっと感度の低い撮影であることを考え合せると、おそらくその発光は燃焼室内に冷炎反応と同時に不均一に発現した初期熱炎の発光、もしくは青炎の後期の発光であると考えざるを得ず、そのことは圧縮予混合気の初温度の空間不均一を想起させる。熱炎そのものが、燃焼室中心部か

らではなく壁面近くから発光し始めるという事実については、そういう現象になることを否定しないが、上述のように低温度炎の発現挙動に不確定なところがあるから初温度の空間不均一が熱炎発現不均一の原因であることにもなり得る。あるいは、撮影されているのはすべて熱炎であり、圧力履歴と写真のこまとの位相がずれているという可能性もある。Taylor らが述べているような結果は現象の場を厳密に単純にしたときに再現されるものとは考えられない。さらに、用いられている燃焼室形状がパンケーキ形ではなくて深皿形であることや、ストッパの配置などにも問題があることも指摘しておきたい。

4・2 負の温度係数域ピストン圧縮自着火炎の高速度撮影 急速圧縮機で *n*-ヘプタン混合気を 700 K を超えるような高い温度まで圧縮しようとしても、圧力をかなり下げないかぎり、圧縮行程の途中で着火してしまつて、急速圧縮機の特徴を生かせない。そこで燃料を *n*-ブタンに替え、さらに酸化剤を空気から酸素/アルゴン混合ガスにして、そうした高い温度域の圧縮自着火を高速度撮影する。冷炎反応の強い 650 K 付近の温度域での結果を図 5 に示す。当量比は 0.7 であり、圧縮比 8.5 の結果である。 $\tau_1 < \tau_2$ となつていて負の温度係数域のうちの比較的温度の高いところのものである。

n-ブタンは市販のガソリンと良く似た着火挙動を示す燃料⁽⁸⁾であつて、iso-オクタンとも似ている。オクタン価が零の *n*-ヘプタンと比べて冷炎発光は非常に微弱である。しかし発光の検出感度を上げれば、図 5 からわかるように、時刻 A、B、C で現れ D で縮退している冷炎を見いだせる。その際、冷炎は燃焼室空間に広く分散して発現しているのが写真でわかる。E から F にかけては青炎であり、この場合の青炎の均一性は冷炎のそれよりも高いと見受けられる。しかし、F から G で出てくる熱炎だけはややシリンダ壁に寄った数箇所から発現していてやはり不均一である。G' は G を浅く焼き付けたものであるが、G'-3 のこまで熱炎がシリンダ壁近くから生じている様子が明確に示されている。

4・3 青炎が支配的な温度域でのピストン圧縮自着火炎の高速度撮影 *n*-ヘプタンを燃料したのではここでの装置で青炎が支配的な温度域の着火を実現できないので、まず初めに *n*-ブタンを使う。圧縮比を 18.1、圧縮終わり温度を 750 K 付近にして自着火させた結果を図 6 に示す。写真を見ると、最初にすでに A 列において熱炎とは別の、細かく分散した核からなる、比較的低輝度の炎が現れている。この低輝度の炎は燃

焼室中心から現れる、そして次第にその輝度が強くなり、炎がシリンダ壁面に向かって伝ばしてゆくかのごとく進んで青炎になる。それに合せて時間的な位相がずれて熱炎が出てきて、これもまた伝ばするかのように広がる。熱炎はまず中心部から出てきて、わずかな

図 5 負の温度係数域(B)圧縮自着火の圧力・青色発光履歴と火炎の発現挙動
(*n*-ブタン/ O_2 /Ar 混合気 $\phi=0.7$, $\varepsilon=8.5$)

図 6 青炎支配域(C)圧縮自着火の圧力・青色発光履歴と火炎の発現挙動(*n*-ブタン/ O_2 /Ar 混合気 $\phi=0.7$, $\varepsilon=18.1$)

遅れで壁に寄った数箇所から出る。つまり熱炎は壁近傍からのみ出ると言うことはできないが、シリンダ壁近くからは必ず出ると言うことができる。

青色発光履歴には急激な立上りが見られず、緩やかに上昇する。この発光履歴の裾野の光、つまり上述の低輝度の発光には OH や HCO バンドの光を含んでおらず、これを青炎と考えることはできない⁽⁷⁾。冷炎であると考えられるが、これには冷炎特有の自己縮退がない。

n-ブタンの結果からだけでは、青炎が支配的な温度域での着火における冷炎の寄与を見積もることができない。メタンの着火は冷炎を経ずして生じるとされている。量論のメタンの予混合気を同じく圧縮比 18.1 で自着火させてそれを高速度撮影した。その高速度写真を見ると、青炎の発現形態から熱炎の発現形態まで n-ブタンの場合と同じであることが容易にわかる。メタンの場合の圧縮終わり温度は約 870 K で n-ブタンの場合には約 750 K であるためか、全体的な発光強度はメタンの場合のほうが強くなっているが、温度がかなり違うにもかかわらず発現形態は変わらない。青色発光履歴が圧力履歴の立上りよりかなり前から緩やかに上昇することも同じである。この発現形態がこの領域での典型的な高温形の着火形態であると考えてよいであろう。

青炎が支配的な温度域での圧縮自着火では、熱炎が生じるまでの履歴において冷炎が生じる温度域を通過してくるけれども、「縮退を伴う冷炎」が途中で発現することはないことがここで知られる。このことはもちろんピストン圧縮にかかる時間が極端に長くなれば否定されるであろうが、火花点火機関やディーゼル機関などの実機で冷炎が観測されることがほとんどないということと同じ意味を持っている。この温度域は、低温度自着火の範ちゅうにあるものの、高温着火領域であり、A や B の温度域にあるような連鎖反応の多くは存在せず、燃料の急激な分解と酸化が主要な反応である。衝撃波管で一般に得られているような高温熱着火はここで得られるような発光形態を取らない。このようなことで、この青炎が支配的な温度域での着火はあくまでも低温度自着火に属するものであって、衝撃波管で得られているような高温熱着火領域とは一線を画するものであることがわかる。冷始動などの極低速時を除いて、実際の機関のシリンダで着火が起こるときにはこの温度域に入っている場合が多い。

4・4 炎の不均一な発現 ここでは低温度ピストン圧縮自着火では三つの領域のどこでもその発現は不均一であることが示された。Elsworth ら Shell のグル

ープは大きさが 10 nm 以上のほこりが混合気中にあるときに空間的に不均一な着火になると述べている⁽⁹⁾。逆に言うと、ちりが入っていなければ混合気全体で完全に均一な着火が得られると主張しているように見える。

著者らはメタンの着火において 1 点から発現して燃焼室内に伝ばするがごとくに進行する着火を経験している。しかし、同一ロットの混合気を用いても、このような着火形態と、ここに示したような比較的急激な着火とが混在する。不均一に発現することになる理由はちりだけではないと思われる。

図 5 に示した負の温度係数域の着火では冷炎のときよりも青炎のときのほうが均一性が上がっているのに、熱炎では再び不均一になっていて、化学反応そのものが本質的に不均一に進む性質を持っていることが示唆されている。圧縮自着火では、火炎伝ばが困難であるような希薄な予混合気の着火に際しても、すすが生成される⁽¹⁰⁾ ことも反応そのものが本質的に不均一に進むことを示している。

5. お わ り に

ピストン圧縮自着火低温度炎では与えられる場の温度によって着火の形態が異なり、大きく三つの領域に分類される。いくつかに分類される低温度炎でありながらその発現過程はこれまで極めて限られた条件の下で撮影されているにすぎない。急速圧縮機の燃焼室を可視化し、イメージインテンシファイアを使って、この 3 領域にわたるピストン圧縮自着火低温度炎の発現過程を高速度撮影することができた。ここで得られた結論は以下のようである。

(1) ピストン圧縮低温度自着火発現の不均一性の程度は冷炎、青炎、熱炎それぞれで大きく異なる。

(2) 縮退を伴う通常の冷炎の発現は燃焼室内に分散した数百の核から発生するものであり、比較的均一である。

(3) 青炎は燃焼室内に分散したわずかな数個の核から不均一に発生することが多い。しかし冷炎の発現以上に高い均一性を示すこともある。

(4) 熱炎の発現は燃焼室空間で常に不均一であり、数個ないし十数個の核から生じる。前駆の青炎がかなり均一な場合にも熱炎になるときには不均一になる。また、熱炎は常にシリンダ壁近傍だけから発現するというわけではないが、シリンダ壁近傍から発現しないということはない。

(5) 熱炎の前駆の低温度炎も常にシリンダ壁近傍だけから発現するという従来の概念は改められなけれ

ばならない。

(6) 青炎支配域の着火は縮退を伴う冷炎を発現させることなく開始される自着火形態であり、低温度自着火に属するものであって、衝撃波管で一般に得られているような高温熱着火の領域そのものとはいささか趣を異にする。

このような発現の形態を知ってもノックの抑制そのものに直接つながるわけではない。しかし、不均一に発現するということはそこで選択的な反応が起こっていることが示唆されているわけであるから、それがなぜ起こるかをつきとめれば抑制の手法がそこから生まれる。特にノッキングに直接関連する熱炎の発生が不均一であるということの意味は大きい。素反応動力学計算にも不均一性を導入する必要がある。

ここでは3種の圧縮比のうちの1つを選んで使っている。ある圧縮終わり温度・圧力の場合を別々の圧縮比・初温度の組合せで実現することができる。このときの着火形態は双方で全く同じであるとは言えないこの点については次の機会に述べることにしたい。

文 献

- (1) Taylor, C.F., ほか3名, Ignition of Fuels by Rapid

- Compression, *SAE Q. Trans.*, 4-2 (1950), 233.
 (2) Nakagawa, Y., ほか3名, Laser Shadowgraphic Analysis of Knocking in S. I. Engines, *SAE Paper*, No. 845001 (1984).
 (3) Ohta, Y. and Takahashi, H., Homogeneity and Propagation of Autoignited Cool and Blue Flames, *Progr. Astronaut. Aeronaut.*, **95** (1985), 236.
 (4) Ohta, Y., ほか3名, Effect of Turbulent Fluid Motion on Low-Temperature Autoignition of Fuel Air Mixture under Piston Compression, *Progr. Astronaut. Aeronaut.*, **131** (1991), 394.
 (5) Ohta, Y. and Takahashi, H., Consequence of Temperature Pressure Time History for Autoignition, *Progr. Astronaut. Aeronaut.*, **105** (1986), 93.
 (6) Ohta, Y. and Takahashi, H., *n* Butane Ignition in a Wide Range of Temperatures, *Progr. Astronaut. Aeronaut.*, **113** (1988), 225.
 (7) Ohta, Y. and Furutani, M., Identification of Cool and Blue Flames in Compression Ignition, *Archivum Combustionis*, 11 1 2 (1991), 43, Polish Academy of Sciences.
 (8) Ohta, Y., ほか3名, Effect of Mixture Dilution or EGR on Low-Temperature Autoignition under Piston Compression, *Proc. COMODA 90*, (1990), 111.
 (9) Elsworth, J.E., ほか2名, Non-Uniform Ignition Processes in Rapid compression Machines, *Combust. Flame*, **13** (1969), 437.
 (10) 古谷・太田・寺田・高橋, 予混合低温度圧縮自着火におけるすすの生成, 機論, **57**-537, B (1991), 1906.