

ノック解析(1) CARSによるエンジン筒内未燃ガス温度の高精度測定と自着火反応モデルの評価

秋濱一弘, 中野道王, 久保修一

Analysis of Knock Phenomena (1) Unburned Gas Temperature Measurement by Accurate CARS Thermometry and Validation of a Reduced Chemical Kinetic Model for Auto-ignition

Kazuhiro Akihama, Michio Nakano, Shuichi Kubo

要 旨

エンジン筒内未燃ガス温度測定のため、CARS温度測定の高精度化が行われた。ポンプ光の単一縦モード化、偏光法による非共鳴成分の除去、および検出系のスペクトル分解能向上の装置改良によって、温度測定精度は、積算平均法で $\pm 100\text{K}$ から $\pm 20\text{K}$ に、シングルショット法で $\pm 150\text{K}$ から $\pm 40\text{K}$ に各々大幅に改善された。

高精度CARS温度測定によって試験用単筒エンジンの未燃ガス温度が測定された。その結果、未燃ガスコア部は筒内圧力の上昇に伴って断熱圧縮されることを実験的に確認した。またノック・非ノックサイクルの温度差及び未燃ガス中の反応によ

る発熱が明確に測定できた。

Cowartらの自着火反応モデルをノック発生時期に加えて未燃ガス温度の観点から評価した。モデル中の異性化反応の活性化エネルギーを調整した結果、ノック発生時期及び未燃ガス温度の計算値を共に実測と一致させることができた。ただしモデルから計算される自着火時の温度上昇率が低い問題がある。さらにサイクル毎のノック発生時期も 2.5deg .クランク角の精度で予測可能であった。このことから未燃部の温度・組成の不均一性がノック発生に及ぼす影響が検討された。

Abstract

Accurate CARS thermometry was developed in order to measure the unburned gas temperature in an engine. CARS system was modified by using single-longitudinal-mode pump beam, by eliminating nonresonant components with polarization technique and by improving the spectral resolution of the detection system. This modification greatly improved the accuracy of temperature measurement of the averaged and single-shot CARS from $\pm 100\text{K}$ to $\pm 20\text{K}$, from $\pm 150\text{K}$ to $\pm 40\text{K}$, respectively.

Unburned gas temperature in a single-cylinder engine was measured by accurate CARS thermometry. As a result, it was experimentally proved that the unburned core gas was compressed adiabatically. The temperature difference between the knock and non-knock cycles, and

the heat release due to end-gas reactions were measured exactly.

The reduced chemical kinetic model for auto-ignition, developed by Cowart et al., was investigated in terms of not only knock onsets but also the unburned gas temperature. The adjustment of the isomerization reaction in their model was required to give agreement between the predicted and observed knock onsets and temperature. However, the model calibrated in this study was not able to represent a steep temperature rise at auto-ignition. Knock onsets on a cycle-by-cycle basis was predicted within the accuracy of 2.5 deg . crank angle using the calibrated model. Finally, the effects of non-uniformity of the unburned gas temperature and the mixture for knock occurrence were discussed.

キーワード

CARS, 窒素, 温度測定, レーザ, 分光, ノッキング, 未燃ガス, 温度, 火花点火エンジン, 化学反応

1. はじめに

火花点火ガソリン機関の効率向上のための高圧縮比化や点火時期の進角（点火タイミングを早くする）において、ノッキング（以下ノックと略す）の発生は大きな障害となっている。ノックは圧力波の伝播を伴う未燃ガス中の自着火現象であることは広く認められており、ノックの原因となる自着火の発生は炭化水素燃料の1000K以下における酸化反応によって支配されていると考えられる。この自着火の反応を扱う自着火反応モデルは幾つか提案されており¹⁻³⁾、さまざまな観点からモデルの評価が試みられている。ここで妥当な自着火反応モデルを用いれば、さまざまな条件下での自着火発生すなわちノック発生が予測でき、ノック発生に影響する要因や自着火発生を効果的に回避できる条件を検討するノック解析が可能になると考えられる。その自着火反応モデルの評価は、ノック解析研究の第一ステップである。この評価に必要な物理量の1つは自着火反応が進行している時の未燃ガス温度であり、この観点からエンジン筒内の未燃ガス温度測定が望まれてきた。

種々の温度測定法の中でCARS（Coherent Anti-Stokes Raman Spectroscopy）は、指向性を持った強い（ラマン散乱の 10^5 倍）信号光が得られる等の特徴により、光学測定にとって苛酷な条件下のエンジン内での有力な温度測定法である。このためCARSを用いた未燃ガス温度測定が試みられている^{4, 5)}が、高圧下で1000K以下の圧力・温度領域を対象とする未燃ガス温度測定では、高精度な測定が難しいため、自着火反応モデルの評価に寄与しうる信頼性の高いデータは得られていないのが現状である。

以上を背景に本報では、まず未燃ガス温度測定のために改良した高精度CARS温度測定法・装置とその基本性能について報告する。次に試験用単筒エンジン内の未燃ガス温度を高精度で測定し、その測定結果を用いて自着火反応モデルを評価した結果を報告する。さらに未燃部の温度・組成の不均一性がノック発生時期に及ぼす影響について検討する。

2. 高精度CARS温度測定法と装置

2.1 測定法と装置の概要

CARS温度測定法は、対象分子のCARSスペクトルを測定し、そのスペクトル形状から温度（対象分子の振動および回転温度）を求める方法である。

Fig. 1にCARS装置を示す。対象分子は、エンジンなどの測定場に最も多く存在し、反応にもほとんど関与しない窒素である。ポンプ光にはNd:YAGレーザの第2高調波（波長532nm）、ストークス光には532nm励起の広帯域発振の色素レーザを用いた。中心波長は、ポンプ光とストークス光の周波数差が窒素のラマン遷移周波数 2330cm^{-1} に共鳴する607nmとした。またバンド幅は、窒素の多数の振動回転準位を同時に励起させるため、 100cm^{-1} に設定した。なお色素はローダミン640を用いた。本装置はストークス光に広帯域発振レーザを用いているため、1パルスのレーザでCARSスペクトルが測定できる（シングルショット法が可能）。

ポンプ光とストークス光は、位相整合を満足するように同軸上に重ねて測定点に集光した。集光点で発生したCARS光をダイクロイックミラーで入射光と分離した後、分光器に入射した。CARS光は分光器でスペクトル分散され、ダイオードアレイ

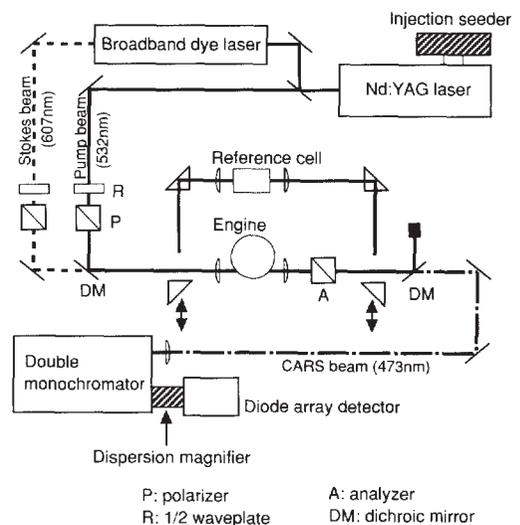


Fig. 1 Schematic diagram of CARS set-up.

検出器でスペクトルとして受光される。また図中の光路を切り換えることで、非共鳴ガス(プロパン)を充填した参照セルから参照スペクトルを測定し、実測CARSスペクトルを参照スペクトルで割ることで色素レーザのスペクトル形状補正を行った。

2.2 装置の高精度化

Fig. 1のCARS装置は、主に光源、光学系および検出系から構成されている。本装置は通常のCARS装置に比べて、以下に述べる高精度温度測定を目的とした幾つかの改良点・特徴を有する。

2.2.1 光源⁶⁾

光源の特徴はFig. 1のYAGレーザにインジェクションシーダを付加し、単一縦モード発振(線幅 0.003cm^{-1})を得ている点である。それに伴い発振出力の時間プロファイルも滑らかなガウス型となり、YAGレーザ励起色素レーザの広帯域スペクトル形状の再現性が向上する。特にシングルショットで温度測定をする場合、色素レーザスペクトルのショットごとの再現性が必要となる。本装置では従来の多モード発振YAGレーザで励起した場合に比べて色素レーザスペクトルのショットごとの再現性が約50%向上しており、色素レーザスペクトル形状の揺らぎに起因する温度測定誤差を最小限に止めている。さらに理論計算からCARSスペクトルの温度変化率も、YAGレーザの単一縦モード化によって約15%上昇することが明らかになっており、温度測定上有利になっている。

2.2.2 偏光光学系^{7, 8)}

発生するCARS光には、対象分子(本研究では窒素)からの共鳴成分と非共鳴成分(測定場に存在する全ガス成分から発生)とが含まれる。ここで非共鳴成分は温度決定に用いるCARSスペクトルの形状に影響し、その値の見積りを誤ると大きな温度誤差を招く⁴⁾。しかしエンジン内では、その値は未知な場合が多く、仮定せざるを得ない。そこで本装置では、非共鳴成分を除去できる偏光法を用い、非共鳴成分に由来する温度誤差を除いた。このためFig. 1の装置で、入射光の偏光方向を規定する偏光子、検出側に非共鳴成分を除去する検光子を設置した。この偏光法によって非共鳴成分を1/1000程度に除去できた。

2.2.3 検出系⁹⁾

高压で1000K以下の圧力・温度領域では、CARSスペクトルの温度変化率が低下するために高精度な測定が難しくなる。この対策として検出系のスペクトル分解能を向上させ、スペクトルの温度変化を詳細に測定することで温度測定精度を向上させた。Fig. 1において、分光器出口のスペクトル像をカメラ用レンズを用いて拡大(3.6倍、Fig. 1中のdispersion magnifier)して、分解能を約4倍改善し 0.37cm^{-1} のスペクトル分解能を実現した。

2.3 温度決定法

温度は実測スペクトルと理論スペクトルの比較により決定した。理論スペクトルは、圧力ナローイング効果、レーザ線幅、検出系分解能および偏光を考慮した⁹⁾。温度決定は以下の手順に従った。

実測スペクトルと同圧力で200~1200K、25Kごとの理論スペクトルを用意し、実測と理論スペクトルとの残差を計算する。200~1200、25Kごとに求められた残差を4次関数で補間し、残差が最小となる温度を求める。この残差最小温度を実測スペクトルが示す温度とした。本方法の温度決定誤差は、実測スペクトルの代わりに理論スペクトルを入力し、理論スペクトルの温度を求めさせる事で見積った。その結果、温度決定誤差は $\pm 5\text{K}$ 以内と十分な精度を有した。

2.4 装置の基本性能

2.4.1 実測CARSスペクトル

Fig. 2に実測CARSスペクトルを示す。横軸はダイオードアレイ検出器のダイオード番号であり、同図(a)は改良前、同図(b)は2.2節で述べた装置改良後の観測CARSスペクトルを示す。観測されるCARSスペクトルは大幅に改善され、同図(a)の改良前のスペクトルに比べてFig. 1の装置で得られるスペクトル[同図(b)]の温度変化は格段に大きく、温度変化に敏感な微細なスペクトル構造(窒素分子のQ枝振動回転遷移)も明瞭に測定可能であることが分かる。

2.4.2 温度測定精度

温度測定精度は、温度が既知の高温・高压炉中の温度測定によって求めた。

Fig. 3は300パルスの積算平均法の各温度・圧力条件での温度誤差(CARS測定温度と炉の温度との

差)を示す。図中 とエラーバーは、各々誤差の平均値と誤差の最大・最小範囲を示す。図から温度誤差は約20K程度であり、本装置の積算平均法の温度測定精度は $\pm 20\text{K}$ と考えられる。Fig. 4は積算平均法で得られたCARSスペクトルの一例を示す。図中の理論スペクトルは炉の温度にて計算したものであるが実測スペクトルと良く一致しており精度 $\pm 20\text{K}$ は妥当と考えられる。

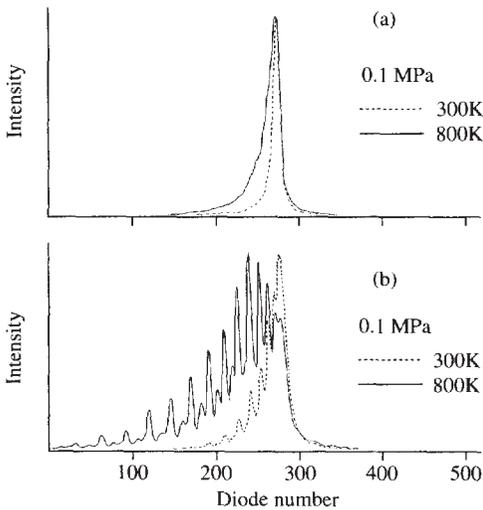


Fig. 2 Measured CARS spectra of N2 Q-branch. (a) Spectra before improvements of CARS system. (b) Spectra after improvements of CARS system (Fig. 1).

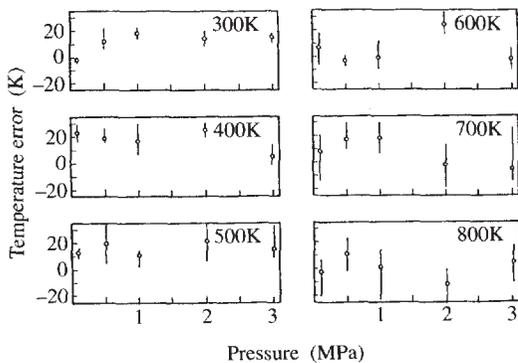


Fig. 3 Temperature error for various temperatures and pressures.

Fig. 5は炉の温度600Kにおいてシングルショット法で求めた温度の頻度分布を示す。また同図には平均温度と標準偏差 σ も並記した。シングルショット法の温度測定のバラツキを 2σ と考え、さらに平均温度と炉の温度との差を考慮すると、シングルショット法の温度測定精度は $\pm 40\text{K}$ 程度と考えられる。Fig. 6には、典型的なシングルショット

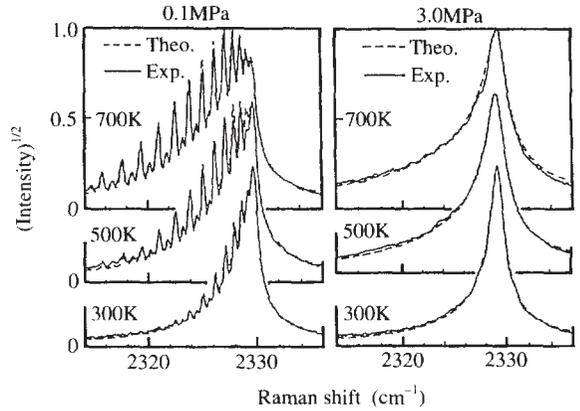


Fig. 4 Average CARS spectra (300 laser shots).

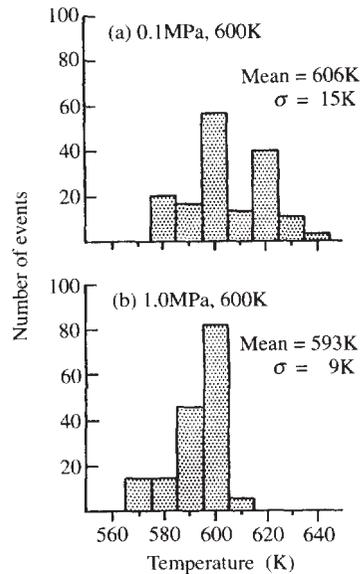


Fig. 5 Histogram of measured temperature by single-shot CARS.

CARSスペクトルを示す。検出器ノイズおよびショットごとのストークス光のスペクトル変動のため、スペクトルの質は積算平均法に劣るものの理論スペクトルとは良く一致しており、検出器ノイズおよびショットごとのストークス光のスペクトル変動は大きく影響していないことがわかる。

Table 1には装置改良前後の温度測定精度をまとめた。

3. エンジン筒内の未燃ガス温度測定

3.1 エンジンと運転条件

エンジンは試験用単筒機関（豊田中央研究所製TRE-II型）を改造した4サイクル機関を用いた。Table 2に主な仕様、Table 3に運転条件を示す。

Fig. 7に燃焼室の概略を示す。CARS温度測定のため

の石英窓を取り付けられるスペーサをヘッドとシリンダブロックの間に挿入し燃焼室を形成してある。燃料は自着火反応解析との対応を考え、イソオクタンとした。ノック強度は指圧波形をハイパスフィルター（5kHz以上）を通し高周波成分のみを取り出し、その圧力振幅最大値とした。ノック強度が0.025MPa以上をノックサイクルと定義したが、これはトレースノック以上に相当する。また点火時期はノック発生確率が50%程度となるように25deg.BTDC（Before Top Dead Center：上死点前）に設定した。

Table 1 The accuracy of temperature measurement of averaged and single-shot CARS in the temperature range of 300-800K for pressures of 0.1-3.0 MPa.

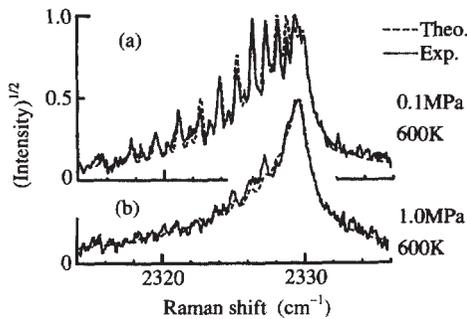


Fig. 6 Single-shot CARS spectra.

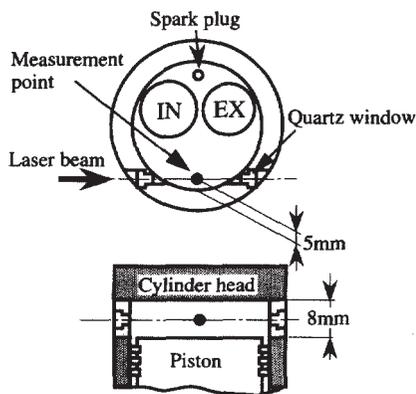


Fig. 7 Schematic of the measurement geometry and location of the CARS measurement point.

Method	Accuracy	
	Before improvements	After improvements (Fig. 1)
Average (300 shots)	±100K	±20K
Single-shot	±150K	±40K

Table 2 TRE-II engine specifications.

Type	Single cylinder, SOHC 2valve, Oil-less
Chamber	Pancake type
Fuel delivery	Port injection
Bore	83.0 mm
Stroke	85.0 mm
Compression ratio	9.2

Table 3 Operating conditions.

Speed	1200 rpm
Fuel	PRF RON100 (isooctane)
Equivalence ratio	1.0
Intake air temperature	33°C
Ignition timing	25 deg BTDC
Throttle lever	Wide open throttle

3.2 CARS温度測定¹⁰⁾

50%のノック発生確率の運転条件下でFig. 1のYAGレーザを測定クランク角に同期して発振させ、ノック・非ノックを含む約300サイクルのシングルショットCARSスペクトルを測定した。それと同時に各スペクトル測定サイクルの筒内指圧を測定した。その後、Fig. 1中の参照セル側に光路を切換え、300回積算平均の参照スペクトルを測定し規格化に用いた。規格化したシングルショットCARSスペクトルから、サイクルごとに温度を決定した。その後、ノックと非ノックサイクルの平均温度と平均圧力を求めた。

4. 未燃ガス温度測定結果

4.1 点火時期の温度

点火時期(25deg.BTDC, 平均圧力1.1MPa)での温度は、後述の熱力学的温度計算あるいは自着火反応計算を行う際の温度の初期値として用いられる。

Fig. 8に点火時期でのシングルショットCARSスペクトル例を示す。実線が実測、破線がスペクトルから決定した温度[Fig. 8(a)の場合は650K]の理論スペクトルである。図から検定実験時のシングルショットスペクトル(Fig. 6)と同程度の実測と理論スペクトルの一致が得られていることが分かる。このことは検定実験時の精度が、本実験においても確保されていることを裏付けているものと考えられる。

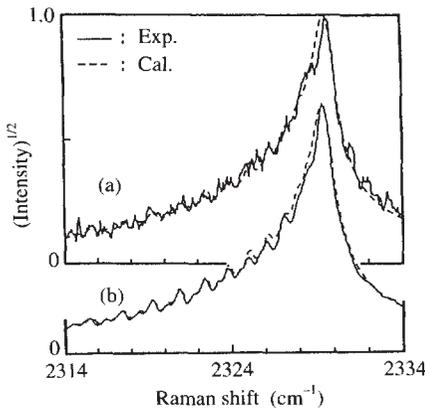


Fig. 8 CARS spectra at 25 deg. BTDC.
(a) Single-shot. (b) 300 shots average.

点火時期の筒内圧力のサイクル変動は小さい(±1%程度)ため、積算平均法による温度測定も実施した[Fig. 8(b)]。Fig. 9は点火時期において、シングルショットにより求めた200サイクルの温度バラツキを示したものであるが、平均値639K、その標準偏差は48Kであった。一方Fig. 8(b)の積算スペクトルからは650Kが求まり、平均値の差は10Kであった。本CARS装置の300ショットの積算法の精度はTable 1から±20Kである。従って検定実験での積算法の誤差を考え合わせると、本実験におけるシングルショット法の温度の平均値の誤差は最大±30K程度と見積もられる。

4.2 平均圧力と温度履歴

Fig. 10にノック・非ノックサイクルの平均圧力と、シングルショット法より求めた約200サイクルの平均温度を示す。なお7deg. ATDC (After Top Dead Center: 上死点後)以後は、測定点に火炎が到達するため未燃ガス温度測定ができなかった。

図の平均圧力履歴(実線はノックサイクル、破線は非ノックサイクルを示す)から、同一運転条件(ノック発生確率50%)におけるノックと非ノックサイクルの違いとして、平均的に圧力上昇率が高い(燃焼速度が早い、あるいはプラグ点火における着火遅れが短い)サイクルでノックが発生している事がわかる。またノックの有無による筒内圧力履歴の違いに対応して、ノックサイクルの温度(図中)は、非ノックサイクル()に比べて

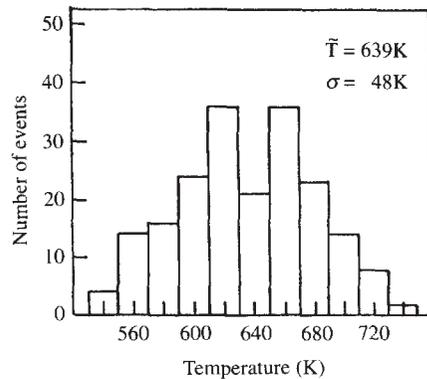


Fig. 9 Histogram of temperature at 25 deg. BTDC measured by single-shot CARS.

未燃ガス温度も高いことが分かるが，その差は7deg.ATDCで約60K程度であり，従来の精度（約100K）ではその測定が難しい。しかし本研究では高精度CARS温度測定によってノック・非ノックサイクル間の温度差を明確に測定できた。

4.3 断熱圧縮を仮定した熱力学的温度との比較

本実験の測定点は，燃焼室壁面より5mm，ヘッド下面より4mm離れ，また圧縮上死点ではピストン頂面より4mm離れた点である（Fig. 7）。Lyford-PikeとHeywoodのシュリーレン写真を用いた温度境界層厚さの測定結果¹¹⁾を参考にすれば，圧縮行程中の境界層の厚さは2mm以下である。したがって本実験では温度境界層のさらに内側のコア部分の未燃ガス温度を測定しているものと考えられる。この未燃ガスのコア部分は筒内圧力の上昇にともなって断熱的に圧縮されると考えられており，この仮定を用いるのが一般的である¹²⁾が，未燃ガスが断熱的に圧縮されていることを実験的に確かめた例はない。

そこで本実験の実測の平均圧力履歴（Fig. 10）から，コア部分の未燃ガス温度を求め，測定温度と比較した。未燃ガスコア温度を計算する際の仮定として

- 未燃ガスは理想気体とする，
- 未燃ガス領域の温度の空間分布は均一とする，
- 未燃ガスは筒内圧力の上昇にともなって断熱圧縮される，

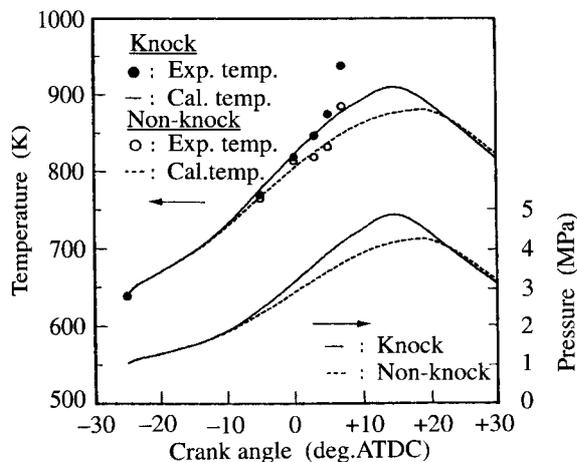


Fig. 10 Mean pressure and temperature histories for knocking and non-knocking cycles.

を用いた。上記仮定から未燃ガスコア温度は次式で計算した。

$$T = T_0 \left(\frac{P}{P_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (1)$$

T : 未燃ガス温度

P : 筒内圧力

γ : 未燃ガスの比熱比

初期値の T_0 と P_0 は点火時期のCARSによる実測平均温度と実測平均圧力（639K, 1.1MPa）を用いた。

Fig. 10の実線と破線は，式(1)から求めたノックおよび非ノックサイクルの温度計算結果である。図から圧縮TDC（上死点）付近までは測定値と断熱圧縮を仮定した計算温度は良く一致している。一方TDC以後では，測定温度が断熱圧縮温度以上に上昇している。この実測と計算の温度差は，式(1)で考慮していない未燃ガス中の発熱すなわち着火反応の発熱による温度上昇と解釈するのが妥当と考えられる。

さらにFig. 10から，未燃部の温度の不均一性に関する検討を加えることができる。4.1節のFig. 9が示す温度バラツキは，シングルショット法自体のバラツキ（Fig. 5）より大きく，CARS測定位置の温度はサイクル間で変動していることを示している。点火時期での圧力のサイクル間変動は $\pm 1\%$ と小さく，筒内温度が空間的に均一であると仮定すると圧力変動から温度変動は説明できない。このことからFig. 9の分布は，点火時期におけるエンジン筒内温度の空間分布の存在を示唆している。しかし未燃ガス温度の平均値は，温度分布が存在しないと仮定した計算結果と良く一致した。

以上から次の事が結論される。

- (1) コア部の未燃ガスが筒内圧力に伴なって断熱的に圧縮されていることが，実エンジンの場で実証された。
- (2) エンジン筒内には温度の空間分布（温度の不均一性）が存在していると考えられるが，サイクル平均温度には温度分布が無いとした解析が適用できる。
- (3) TDC以後では断熱圧縮温度以上の温度上昇すなわち未燃ガス中の発熱反応による温度上昇が明

瞭に測定された。この温度上昇をもたらす反応は、自着火反応と考えられ、測定結果を用いた自着火反応モデルの温度面からの評価が可能である。

5. 自着火反応モデルの評価

4章では、自着火反応による発熱を測定できた事を述べた。本章ではその測定データを用い、自着火反応モデルを評価した結果を述べる。

5.1 自着火反応モデルの概要

本研究では、Cowartら¹⁾の自着火反応モデルを評価した。実験で用いたイソオクタンなどの炭化水素燃料は、ある条件のもとで二段着火 (two-stage ignition) を起こすことが知られている。二段着火は、いわゆる自着火すなわち熱炎 (hot flame) の発現の前に冷炎 (cool flame) が発現する現象である。Table 4に評価した自着火反応モデルの詳細をまとめた。本モデルは定容燃焼器と急速圧縮装置の実験結果に基づいて、二段着火が表現できるモデルとして作り上げられたものである^{1,3)}。Table 4のモデルは、飽和炭化水素をRHと表現し、燃料や中間生成物などを総括的に取り扱かうことで、17化学種と19の反応で自着火反応を表現したReducedモデルである。

5.2 温度計算と予測ノック発生時期

自着火反応を考慮した未燃ガス温度の計算では、以下の仮定を用いた。

コア領域の未燃ガスは理想気体とする。

コア領域の未燃ガスの温度分布は均一とする。

コア領域の未燃ガスは筒内圧力の上昇にともなって断熱圧縮される。

自着火は未燃ガスコア領域で発生する。

コア領域の未燃ガス中の化学種分布は均一とする。

残留ガスの化学的活性は無視できる。

上記 ~ の仮定は、4.3節の反応を考慮しない温度計算で用いたものであり、すでにその妥当性が明らかになっている。ここでは自着火反応を考慮するため、さらに ~ の仮定を加えた。これらの仮定から未燃ガスコア部の温度は次式のエネルギー方程式によって計算した。

$$\left(\frac{\gamma}{\gamma-1}\right)\frac{1}{T}\frac{dT}{dt}=\frac{1}{P}\frac{dP}{dt}+\frac{1}{RT}\frac{dq}{dt} \quad (2)$$

γ : 未燃ガスの比熱比

T : 未燃ガス温度

P : 筒内圧力

q : 自着火反応に伴う発熱

R : ガス定数

式(2)の時間積分は、点火時期25deg.BTDCから開始し、計算開始初期温度はCARSによる測定値 (639K) を用いた。また残留ガス割合は実測から5.5vol%とした。予測ノック発生時期は、式(2)によって計算される温度が1200Kに到達した時点と定義した。

5.3 未燃ガス温度とノック発生時期

Fig. 11に実測ノック発生時期の頻度分布を示す。この分布から平均ノック発生時期として16deg.ATDCが得られる。Fig. 12は未燃ガス温度の測定値と計算値の比較を示す。同図(a)点線はCowartら¹⁾が用いた反応速度定数を用いた計算値であるが、二段着火過程の温度ジャンプ時期が早く、予測ノック発生時期も実測と一致しない。そこで着火遅れ時間に敏感なalkylperoxyラジカルの異性化反応のforward活性化エネルギーを実測ノック発生時期に合うように変更した (Table 4の反応3, $E_3^+ = 21.2$ kcal)。その結果、Fig. 12(a)の実線が示すように温度も実測値と良く一致した。同様の比較を非ノックサイクルで行ったのが同図(b)であるが、この場合も温度は良く一致した。このことから活性化エネルギー E_3^+ を変更した反応モデルは、ノック発生時期のみならず二段着火発生時期も実測と良く一致するモデルであることが分かった。

5.4 自着火反応モデルの評価・問題点

前節で示したように、Cowartらの自着火反応モデルは二段着火現象を良く表現し、基本的には妥当なモデルであると考えられる。ただし、彼らの示した反応速度定数は最適とは言えず、Fig. 12に示した様な反応速度定数の変更が必要であった。本報では、着火遅れ時間に敏感な異性化反応 (Table 4の反応3) の活性化エネルギーの変更のみが検討された。しかしこれだけでは十分とは言い難

い。すなわちFig. 12において、モデルから計算される自着火時の最大温度上昇率が低い（温度1100K付近で約 5×10^5 K/sec）という問題が考えられる。高回転域で自着火反応が時間的に早く進行する条件下でのノック発生時期予測において、温度上昇

率が低いことは予測遅れを生じさせる原因となる。したがってノック発生時期の予測精度の観点から、自着火時の温度上昇率の改善のための反応モデルの改良がさらに必要と考えられる。

Table 4 Reduced chemical kinetic model¹⁾.

(a) 17 species

RH (fuel),	O ₂ (oxygen),	\dot{R} (alkyl fuel radical),
$\dot{H}O_2$ (hydro peroxy radical),	$\dot{R}O_2$ (alkylperoxy radical),	$\dot{R}OOH$ (hydro peroxy alkyl radical),
\dot{O}_2RO_2H ,	OROOH (hydro peroxide),	$\dot{O}H$ (hydroxyl radical),
H ₂ O (water),	OR \dot{O} ,	C=C (olefin),
HOOH (hydrogen peroxide),	R'CHO (aldehyde)	R"O,
$\dot{R}'CO$ (acyl radical),	Epox (epoxide).	

(b) 19 reactions

Arrhenius parameters of equilibrium constants $K = A \exp(-E/RT)$ and rate constants $k^\pm = A^\pm \exp(-E^\pm/RT)$ are for isooctane oxidation at $700 < T < 1300$ K. (Units : cc, mole, sec, kcal)

	Reaction	ΔH_{300°	Log A	E	Log A ⁺	E ⁺	Log A ⁻	E ⁻
1	$RH + O_2 \rightleftharpoons \dot{R} + \dot{H}O_2$	46.4	1.5	46.0	13.5	46.0	12.0	0.0
2	$\dot{R} + O_2 \rightleftharpoons \dot{R}O_2$	-31.0	-1.4	-27.4	12.0	0.0	13.4	27.4
3	$\dot{R}O_2 \rightleftharpoons \dot{R}OOH$	7.5	0.0	9.8	11.0	20.8	11.0	11.0(*)
		7.5	0.0	10.2	11.0	21.2	11.0	11.0(**)
4	$\dot{R}OOH \rightleftharpoons \dot{O}_2RO_2H$	-31.0	-1.9	-27.4	11.5	0.0	13.4	27.4
5	$\dot{O}_2RO_2H \longrightarrow OROOH + \dot{O}H$	-26.6			11.3	17.0		
6	$RH + \dot{O}H \longrightarrow \dot{R} + H_2O$	-23.5			13.3	3.0		
7	$OROOH \longrightarrow \dot{O}H + OR\dot{O}$	43.0			15.6	43.0		
8	$\dot{R} + O_2 \rightleftharpoons \dot{H}O_2 + C=C$	-13.5	0.0	-13.5	11.5	6.0	11.5	19.5
9	$\dot{H}O_2 + \dot{H}O_2 \longrightarrow HOOH + O_2$	-38.5			12.3	0.0		
10	$HOOH + M \longrightarrow 2\dot{O}H + M$	51.4			17.1	46.0		
11	$OR\dot{O} \longrightarrow R'CHO + R''O$	8.5			14.0	15.0		
12	$\dot{R}O_2 + \dot{H}O_2 \longrightarrow ROOH + O_2$	-38.5			12.0	0.0		
13	$\dot{R}OOH \longrightarrow \dot{O}H + R'CHO + C=C$	-3.0			14.4	31.0		
14	$\dot{R}O_2 + R'CHO \longrightarrow ROOH + \dot{R}'CO$	-0.6			11.45	8.6		
15	$\dot{H}O_2 + R'CHO \longrightarrow HOOH + \dot{R}'CO$	-0.6			11.7	8.6		
16	$C=C + \dot{H}O_2 \longrightarrow Epox + \dot{O}H$	-0.23			10.95	10.0		
17	$\dot{H}O_2 + RH \rightleftharpoons \dot{R} + HOOH$	8.0	0.9	8.0	11.7	16.0	10.8	8.0
18	$\dot{R}O_2 + RH \rightleftharpoons \dot{R} + ROOH$	8.0	1.1	8.0	11.2	16.0	10.1	8.0
19	$\dot{R} + \dot{R} \longrightarrow RH$	-85.0			13.2	0.0		

(*) Cowart et al.¹⁾

(**) This work

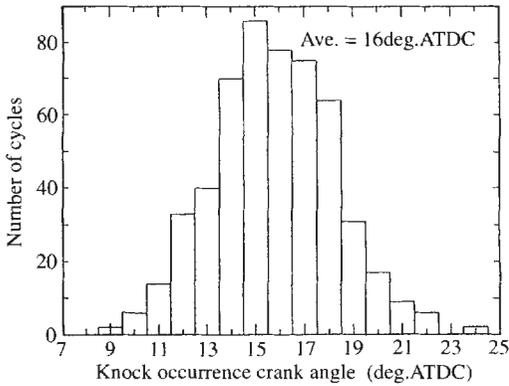


Fig. 11 Individual-cycle knock occurrence crank angle distribution.

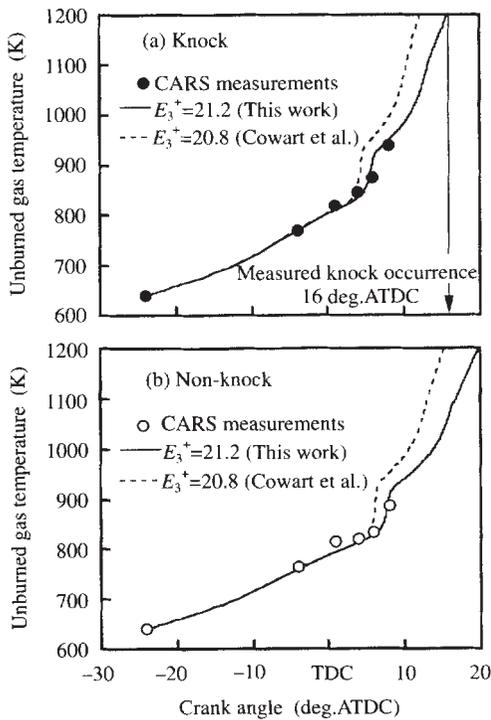


Fig. 12 Comparison between the measured temperature by CARS and the calculated temperature by reduced model listed in Table 4.
(a) Knocking cycle. (b) Non-knocking cycle.

5.5 サイクル毎のノック発生時期予測

5.3節で変更した活性化エネルギーの値 ($E_3^+ = 21.2$ kcal) を用い、式(2)において圧力 P としてサイクルごとのデータを入力する。これにより各サイクルごとの圧力データに基づくノック発生時期予測を行った。

約200のノックサイクルについて上記予測を実施し、実測ノック発生時期と比較した。結果をFig. 13に示す。サイクルごとのノック発生時期の予測と実測の差は ± 2.5 deg.クランク角以内であることが分かる。したがって、5.2節の仮定と5.3節の着火反応モデルを用いることで、サイクルごとのノック発生時期もある程度予測可能と考えられる。

5.6 未燃部の不均一性がノック発生時期に及ぼす影響

エンジン内の複雑な現象によって生じる未燃部温度の空間的な不均一性がノックの発生に大きく影響する可能性が報告されている^{14,15)}。4.3節で述べたように、本研究の結果からも温度の不均一性の存在は明らかである。この不均一性は、未燃部で局所的に着火を発生させ、その着火位置を変動させていると考えられる¹⁵⁾。しかし不均一性がノック発生時期にどの程度影響するかは定量的に評価されていない。

Fig. 13は、前述の不均一性がノック発生時期に及ぼす影響を検討する上で重要な示唆を与えている。

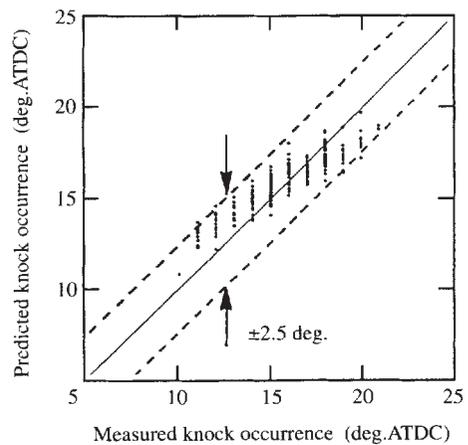


Fig. 13 Measured versus predicted knock occurrence crank angles.

Fig. 13における予測誤差 ($\pm 2.5\text{deg}$. クランク角) の原因としては予測で考慮していない現象, すなわち未燃部の温度の不均一性, 組成の不均一性と残留ガスの反応性が考えられる。しかしそれ以外にも着火反応モデル自体の問題 (5.4節), さらに予測計算で全サイクル一定とした吸入空気量, 燃料量, 残留ガス量および初期温度のサイクル変動なども影響している。この内, 初期温度 (点火時期温度) が点火時期の圧力変動1%に応じて変化する影響は, 計算によって容易に見積もる事ができ 0.7deg . クランク角であった。この初期温度変動の影響を除いた残りの要因の影響は実質 $\pm 1.8\text{deg}$. クランク角程度となる。したがって種々ある要因の中で未燃部の温度・組成の不均一性のみの影響は必然的に $\pm 1.8\text{deg}$. クランク角よりさらに小さい事が分かり, 未燃部の不均一性がノック発生時期に大きく影響しているとは考えられない。ただしこの結論の一般性は, 本実験の結果からだけでは明らかにすることはできず, 種々のエンジン及び運転条件での検討が必要と考えられる。

6. まとめ

本報では, CARS温度測定の高精度化と未燃ガス温度測定, さらに着火反応モデルの評価を実施し, 以下の結論を得た。

- (1) CARS装置に対してポンプ光の単一縦モード化, 偏光法による非共鳴成分の除去, および検出系のスペクトル分解能の向上の改良を行った。その結果, 温度測定精度は, 積算平均法で $\pm 100\text{K}$ から $\pm 20\text{K}$ に, シングルショット法で $\pm 150\text{K}$ から $\pm 40\text{K}$ に各々大幅に改善された。
- (2) CARSでエンジン内の未燃ガス温度の高精度測定を行い, 未燃ガスコア部が断熱圧縮されることを実証したと共に, ノック・非ノックサイクルの未燃ガス温度差および着火反応の発熱を明確に測定することができた。
- (3) 未燃ガス温度測定データを用いて着火反応モデルをノック発生時期に加えて未燃ガス温度の観点から評価した。その結果, ノック発生時期及び未燃ガス温度の計算値が共に実測と一致するためには, モデル中の異性化反応の活性化エネルギーの調整が必要であることが分かった。こ

の調整された反応モデルは, 2.5deg . クランク角の精度でサイクルごとのノック発生時期の予測が可能であった。ただしモデルから計算される着火時の温度上昇率は低く, さらにモデルの改良が必要と考えられる。

- (4) サイクルごとのノック発生時期予測から, 予測で考慮していない現象, すなわち温度・組成の不均一性はノック発生時期に大きく影響しないことが示唆された。ただし種々のエンジン及び運転条件での検討がさらに必要と考えられる。

次報のノック解析(2)^{1,6)}では, 本報告で明らかにした着火反応モデルの問題点を解決し, さらにイソオクタン以外の種々の燃料へ適用するための反応モデルの改良・適用範囲の拡張が行われる。また4気筒エンジンにおける未燃部の温度・組成の不均一性と残留ガスの反応性がノックの発生に及ぼす影響および着火反応モデルのエンジン性能予測への応用が検討される。

参考文献

- 1) Cowart, J. S., et al. : Twenty-Third Symposium (International) on Combustion, (1990), 1055
- 2) Westbrook, C. K. and Pitz, W. J. : Lawrence Livermore National Laboratory report UCRL-JC-112696, (1993)
- 3) Cox, R. A. and Cole, J. A. : Combustion and Flame, 60 (1985), 109
- 4) Lucht, R. P., et al. : Combustion Science and Technology, 55(1987), 41
- 5) 中田, ほか2名 : 第9回内燃機関合同シンポジウム講演論文集, (1991), 63
- 6) 秋浜, ほか2名 : 日本機械学会論文集(B編), 59-566(1993), 3249
- 7) Akihama, K. and Asai, T. : Appl. Opt., 29-21(1990), 3143
- 8) 秋浜, 浅井 : 日本機械学会論文集(B編), 56-521(1990), 200
- 9) Akihama, K., and Asai, T. : JSME Int. J., Ser. B, 36-2(1993), 364
- 10) 秋浜, ほか5名 : 第10回内燃機関合同シンポジウム講演論文集, (1992), 283
- 11) Lyford-Pike, E. J. and Heywood, J. B. : Int. J. Heat and Mass Transfer, 27-10(1984), 1873
- 12) Dimpelfeld, P. M. and Foster, D. E. : SAE Tech. Pap. Ser., No.860322, (1986)
- 13) Hu, H. and Keck, J. : SAE Tech. Pap. Ser., No. 872110, (1987)
- 14) 中田, ほか2名 : 第10回内燃機関合同シンポジウム講演論文集, (1992), 289

- 15) Bäuerle, B., et al. : Twenty-Fifth Symposium (International) on Combustion, (1994), 135
 16) 中野, ほか3名 : 豊田中央研究所R&Dレビュー, 31-2 (1996), 27

著者紹介



秋濱一弘 Kazuhiro Akihama

生年：1959年。
 所属：反応制御研究室。
 分野：CARS, LIF等のレーザー分光法を用いた反応解析。
 学会等：日本機械学会，日本分光学会会員。
 工学博士。



中野道王 Michio Nakano

生年：1963年。
 所属：反応制御研究室。
 分野：化学反応モデルを用いた燃焼及び大気反応シミュレーション。
 学会等：日本機械学会会員。



久保修一 Shuichi Kubo

生年：1963年。
 所属：反応制御研究室。
 分野：炭化水素の燃焼化学および赤外レーザー分光法による反応解析。
 学会等：日本分光学会，自動車技術会会員。