

LES 詳細化学反応計算による高回転過給
ノッキング解析

High-Speed Supercharging Knocking Analysis by LES Detailed Chemical Reaction Calculation

田中 大二郎 高須 康嗣 大村 亮介

本稿は、公益社団法人自動車技術会 2019年春季大会 学術講演会予稿集 No.86-19 20195411に掲載された論文を同会の許可を得て転載したものです。本論文の著作権は公益社団法人自動車技術会に属し、無断複製・転載を禁じます。

Abstract

In order to improve the performance, in-cylinder combustion calculation was carried out as part of knock counter-measure. Since knocking occurs due to cycle fluctuation, calculation was performed by a combination of LES that can calculate cycle fluctuation and detailed chemical reaction calculation that can perform self-ignition calculation. As a result, the knock corresponding to the octane number and the ignition timing was calculated, and new suggestion was given about the knock mechanism.

1 まえがき

ノッキング対策が、ガソリンエンジンの永遠のテーマであることに議論の余地はない。熱効率向上にダイレクトにつながる圧縮比アップにはノッキング対策が不可欠であり、圧縮端温度低減が効果的ではあるが、それ以外の特にノック発生基点でのピンポイント対処方法、さらには高回転ノック計測については、報告が乏しいのが現状である^{[1][2][3][4][5]}。今回、高回転最大出力向上を目的として、圧縮端温度低減以外のノック低減手法により、それを達成させる手法を模索した。そのためにはまずは実際のノック現象解明が求められるが、実機の特に高回転高負荷でのノック計測は困難であるため、計算での実機再現を試みた。ノッキングは毎サイクル起きるのではなく、サイクル変動中の高IMEPサイクルにて起きる。よって、サイクル変動計算が可能なLES計算を採用した。さらには、ノックの本質とされる自着火現象も再現させるべく、詳細化学反応計算と組み合わせた。

その結果、運転条件に応じたノック振幅が計算された。また、高回転におけるノックメカニズムについて、新たなメカニズムが示唆される結果も得られた。

2 解析方法

2-1. 解析ソルバー

AVL社のFIRE Version: R2017fを使用した。

まずは点火までの筒内流動計算として、Smagorinsky LESをECFM乱流モデルで解いた。点火時期からは、詳細化学反応計算を行なうのに、TABKIN™/FGM燃焼モデルを使用した。TABKIN™/FGMを採用した理由としては、事前に詳細化学反応計算を解いてルックアップテーブルを作成しておき、実際

の燃焼計算では、そのテーブルを参照するだけで済むことで、従来の数十分の一の計算時間まで短縮できるからである。これにより、膨大な計算時間で敬遠されがちであったLES詳細化学反応計算が、RANS計算並と実用化に近づいた。

2-2. 実験および計算条件

今回の実機評価および計算に当たり、高回転高負荷ノック評価に供試したエンジン諸元を表1に、運転条件を表2に、計算条件を表3に示す。

Table 1 Engine specification

Inline-4cylinder Turbocharged	
Displacement	2.0
Bore × Stroke, mm	87.5 × 83.0
Compression ratio	10.0
Fuel injection type	Direct injection

Table 2 Engine operation condition

Engine speed, rpm	5600
Volumetric efficiency, %	206.5
Air fuel ratio	12.7
Power, kW	222
Intake pressure, kPa abs	213

Table 3 Calculation condition

Mesh Resolution mm	0.4
Number of Cells	4 million
Time Step deg.CA	0.02
Number of Chemical Species	1387
Number of Reaction Formula	5739

計算は、図1の形状をモデル化した。吸気ポート上流に吸気管およびサージタンクを設置し、表2の体積効率になるような過給圧をサージタンク上流面に定常的に与えている。また、排気側は、今回、排気行程は計算せず、オーバーラップ時相当の圧力を排気ポート出口端面に与えている。メッシュ生成状況を図2に示す。



Fig. 1 Engine geometry

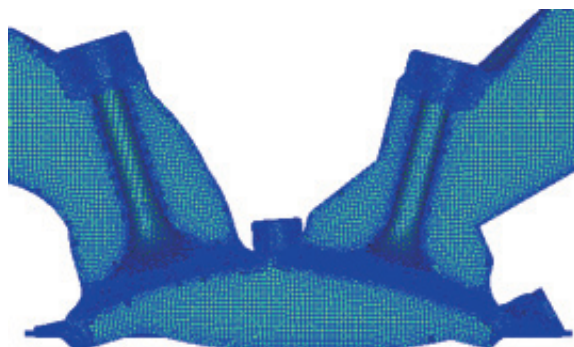


Fig. 2 Generated Mesh

2-3. 計算手順

計算手順は、2-1.でも紹介したが、図3の通り、まずは点火までの筒内流動計算として、ECFM乱流モデルで解き、点火時期からは、詳細化学反応燃焼計算を行なうのに、TABKIN™/FGM燃焼モデルに切り替えて計算した。

クランク角の表示として、720deg.CAを点火上死点とする。

この一連の計算で多サイクル計算を行ない、実機相当のノックサイクルを抽出し、以後は、そのサイクルを使い、点火時期、オクタン価等を変えて、ノックへの影響を確認した。

なお、参考までに計算時間を記すと、吸気上死点から点火までが、48時間(68コア)、点火から740deg.CAまでが、13時間(24コア)であった。

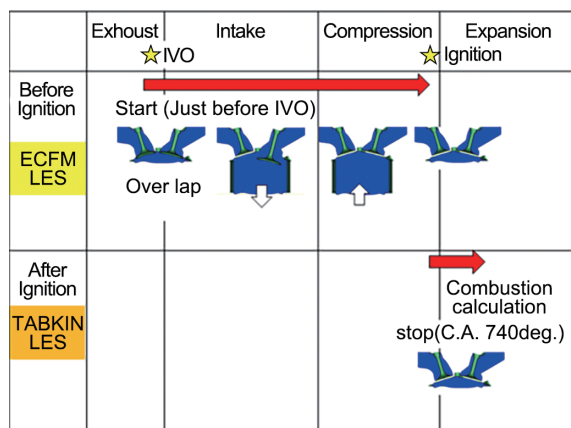


Fig. 3 Calculation Procedure

3 解析結果

3-1. ノック計算検証

図4に、100RONトレースノック点火時期の条件において、計算結果と、実機でのサイクル変動の中での筒内圧が高いサイクルと低いサイクルとの比較を示す。

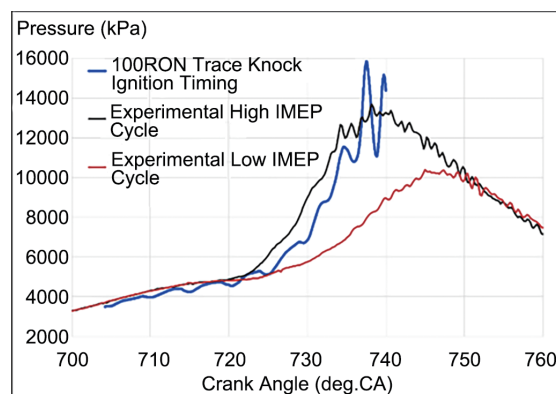


Fig. 4 Comparison of the Results of Experimental and Calculation

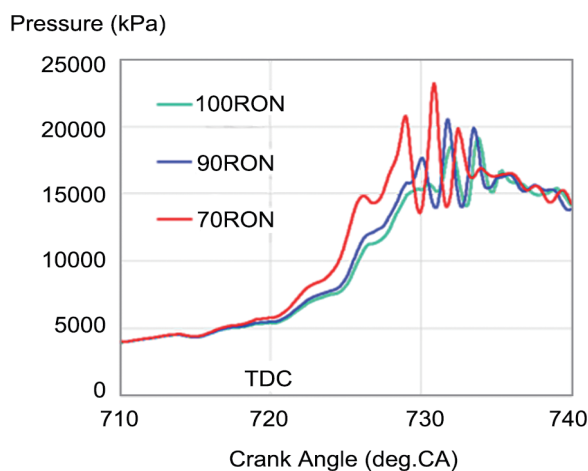


Fig.5 Comparison of Octane Number

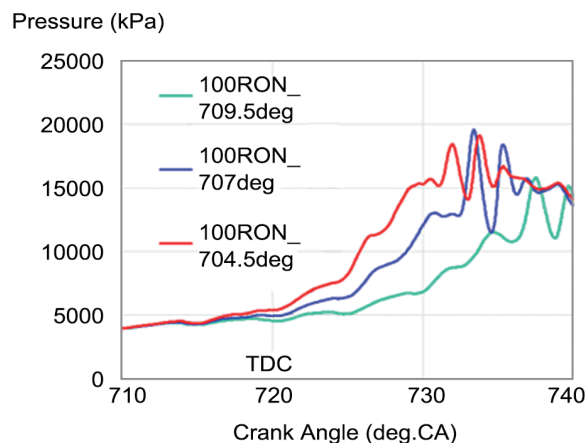


Fig.6 Comparison of Ignition Timing

この計算結果にて、実機でのノックサイクルが再現できていると判断した。

また、さらにオクタン価を変えて計算したものを図5に、点火時期を変えたものを図6に示す。

いずれも、それぞれの条件に応じたノック振幅とノック発生タイミングが計算できているため、今回の手法でノッキングそのものが計算できていると考える。

3-2. ノック発生箇所とタイミング

以上より、ノックは計算できていることがわかった。では次に、それらのノックの発生場所について、考察する。

なお、以後の計算は、特に記載がない限り、ノック現象がわかりやすいように、70RONかつ、点火時期に強制的に温度・圧力を1.1倍にして計算したものとする。

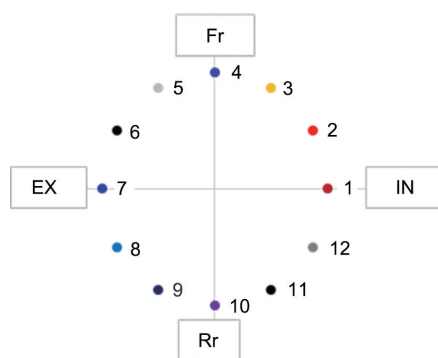


Fig.7 Pressure Sensor Location

ノック発生箇所を探索するために、図7のように、シリンダーヘッド燃焼室壁面近傍に、解析上の圧力センサーを設置し、それぞれの位置の違いによるノック振幅と発生タイミングの違いを確認した。

図8に、12カ所のうち、5カ所のセンサーでの筒内圧比較を示す。7番のみ、ノック振幅が明らかに大きくなっているが、これはスキッシュに位置しているための影響が考えられる。

これらのノック振幅の立ち上がりが一番早いところがノック基点と考え、図9にFFT処理したものを示す。なお、3番の結果は、設定不良のため、除外した。

立ち上がりが一番早いのは、1番であるが、最初の立ち上がり以降は、目立った振幅が無く、次の10番も同様である。よって、さらに次の9番はその後の振幅も大きく、ここがノックの基点と仮置きしておく。

次に、その他のセンサーの立ち上がりタイミングをプロットしたものを図10に示す。9番センサーから、圧力が伝播していく様子が見られ、やはり9番がノック基点と考えられる。いずれにせよ、ノック発生タイミングは、721~722deg.CAと考えられる。

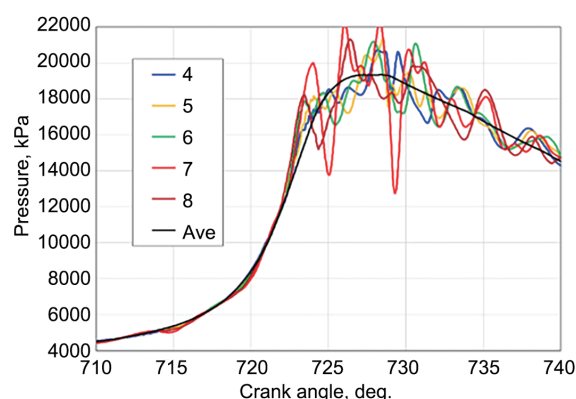


Fig.8 Comparison of Sensor Location

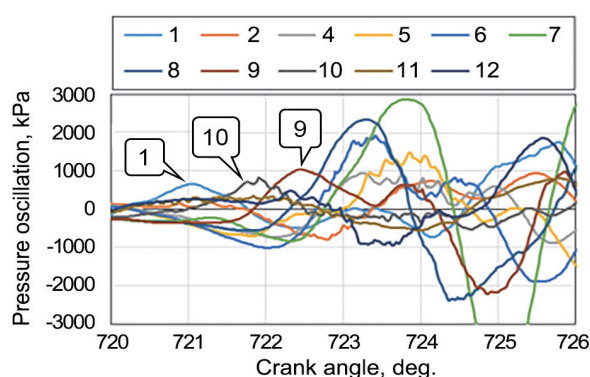


Fig.9 Comparison of FFT Analysis

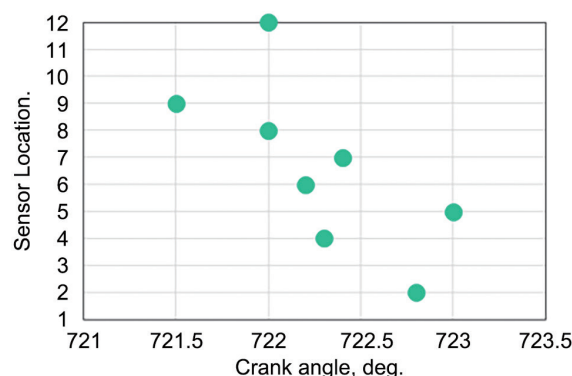


Fig.10 Rising Point difference of Sensor Location

3-3. ノック振幅発生メカニズム仮説

次に、このタイミングで、何が起きているか、調査する。図11

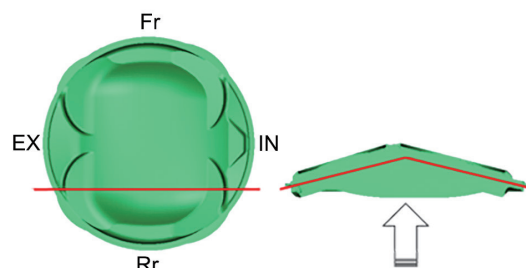


Fig.11 Monitoring cross section

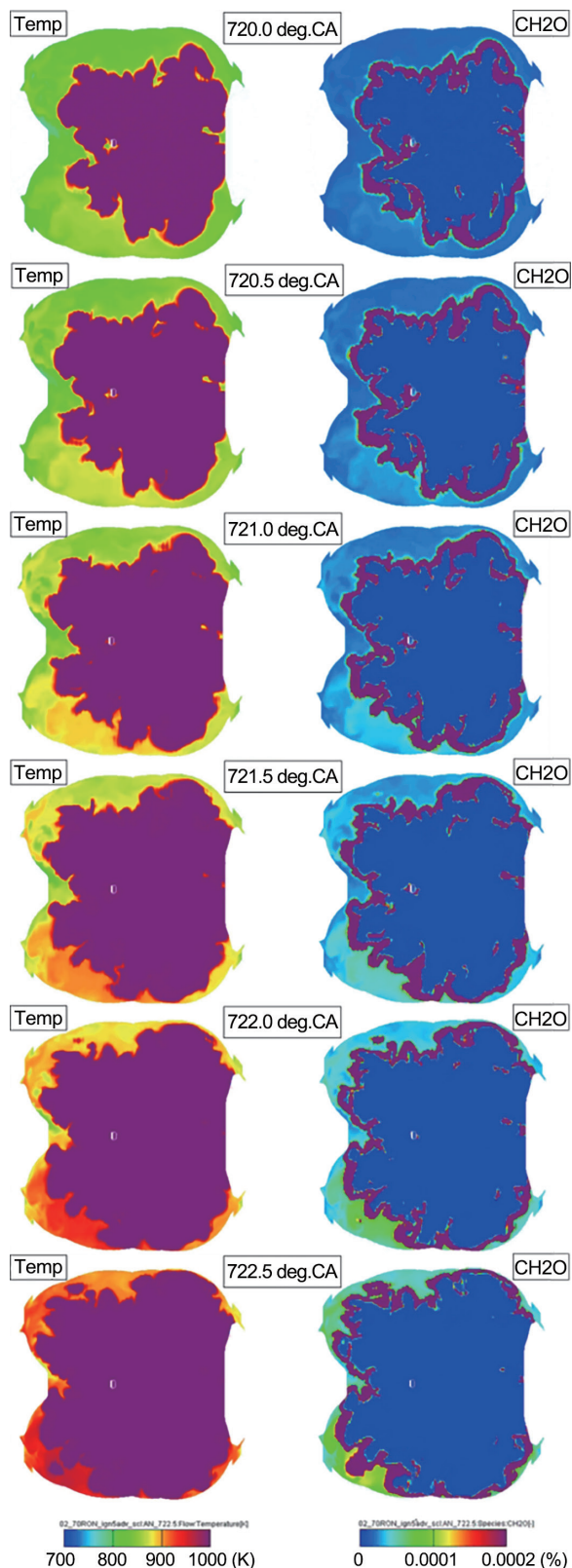


Fig.12 Temperature and CH2O Behavior around Knock Timing

に示すベントルーフ断面にて、図12に前述のノックが起きていると推定された721～722deg.CAの前後における筒内温度

と、代表的な中間生成物としてCH2O濃度を示す。

排気リア側に、CH2Oの発生が見られ、温度も冷炎反応が起きるとされる900K前後になっており、冷炎反応が起きていると考えられる。

しかし、ノック現象としての急激な自着火現象は認められず、先の筒内圧振幅発生メカニズムが説明できない。

ここで、図13に、2018年アーヘン・コロキウムでのIAV論文資料^[6]を引用する。この資料によると、副室式燃焼により、ノックが起きていなくても、筒内圧振幅が発生している。よって、以下の仮説を立てた。

「低回転ノックは、冷炎反応の後に急峻な自着火反応が起き、それがノックの源となるが、高回転では、冷炎反応自体が、ノック振幅の源となる」

これを確かめるために、図14に示すベントルーフ断面上の赤星印の1点について、解析を行った。

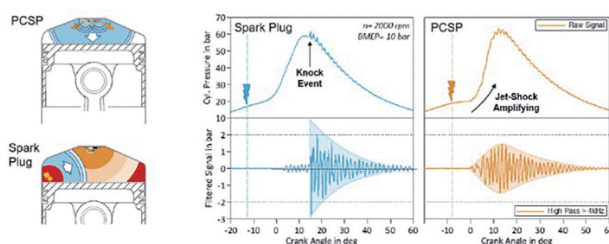


Fig. 31: Physical principle of PCSP specific pressure oscillation compared to knock (left) and corresponding raw and filtered pressure traces of striking cycles at medium load for spark plug and PCSP (right)

Fig.13 Knock Oscillation by Jet from Pre-Chamber

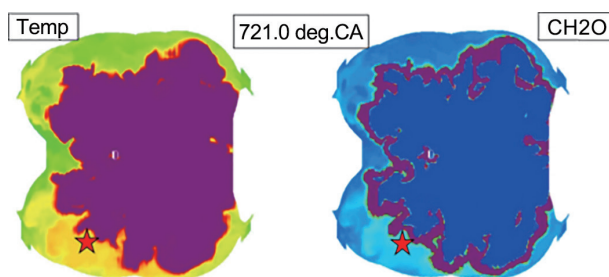


Fig.14 Monitoring Point

図15に、前述の点火時期に強制的に温度・圧力を1.1倍したケースも含めて、筒内圧力、温度、CH2O濃度のオクタン価比較を示す。赤星印のように、温度・圧力を1.1倍したケースでのノック振幅立ち上がりタイミングを仮置きすると、その時の温度は885Kであり、その温度であれば、オクタン価の違いに依らず、CH2O濃度は3.5E-5と同一であるが、図12の考察同様、明確な屈曲点は認められず、定量的な値でノック立ち上がり位置を判断せざるを得ない。なお、中間生成物として、他に、

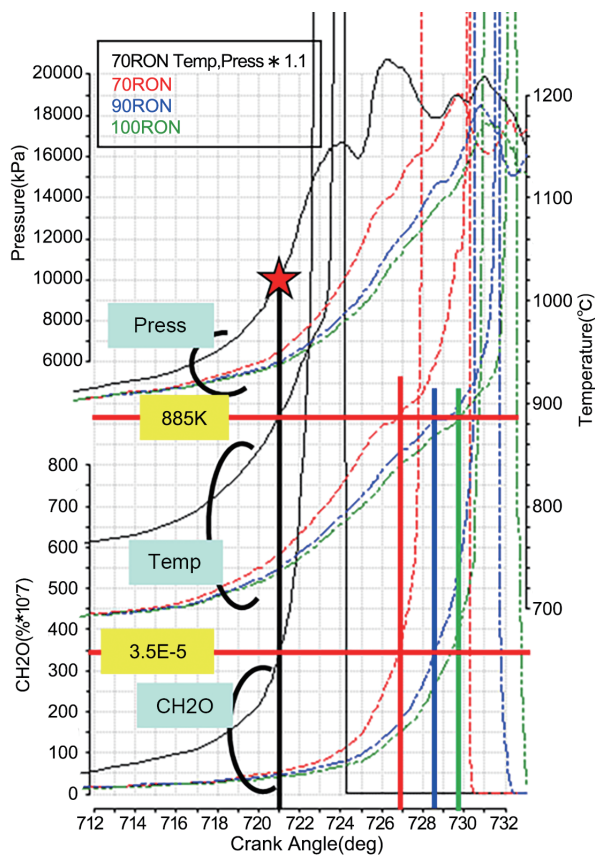


Fig.15 Octane Number Comparison

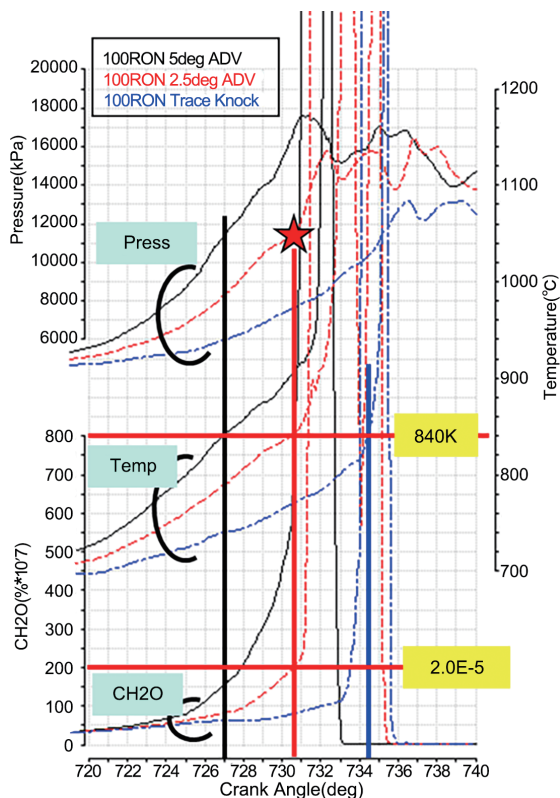


Fig.16 Ignition Timing Comparison

C₂H₂, H₂O₂, OHの挙動も確認しているが、同様に屈曲点は認められないため、今後はCH₂Oを代表させる。

次に100RONでの点火時期比較を図16に示すが、ノック振幅立ち上がりが明確な2.5deg進角から同様の作業を進めると、その時の温度は840Kに低下し、CH₂O濃度も2.0E-5までに低下することから、CH₂O濃度絶対値では、ノック立ち上がり指標にはならない。

3-4. 筒内A/F分布および温度の影響

次に、なぜ排気リア側でノックの起源となる冷炎反応が起きるのか、解析を行った。

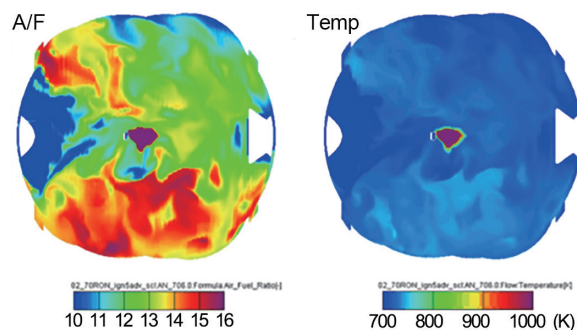


Fig.17 A/F and Temperature before Ignition Timing

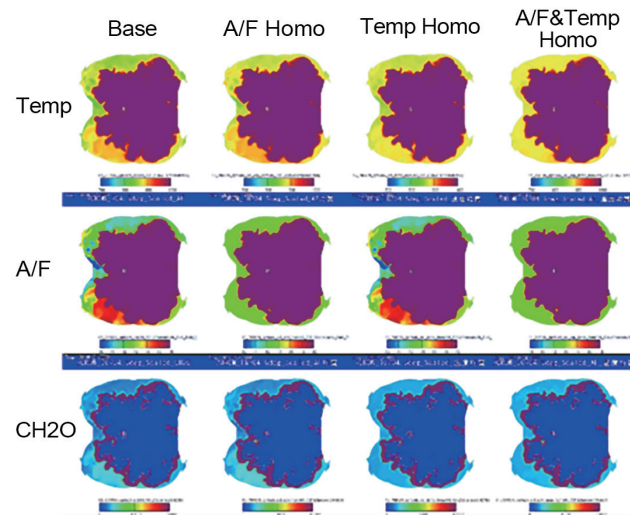


Fig.18 Effect of A/F and Temperature Homogeneity

図17に点火前におけるA/F分布と温度分布を示す。フロント側に対しリア側は、概して約 Δ A/F=2リーンに、または数十℃高くなっている。それぞれの分布の模様、グラデーションは一致しており、燃料濃度不均質による気化熱違いにより、温度分布違いが生じていると思われる。よって、これらの影響を分離するために、点火時期から強制的に筒内全体を、①A/F均質化 ②温度均質化 ③A/Fと温度両方を均質化した計算を行なった。721.0degCAにおけるそれらの結果比較を図

18に示す。

- ① A/F 均質化の影響：排気リア側は、CH₂O 増加が見られる。これは、出力 A/F に近づき、燃焼が速くなったことによるものと思われる。
- ② 温度均質化の影響：排気フロント側は、温度上昇し、CH₂O 増加し、リア側は逆に温度低下し、CH₂O 減少。
- ③ A/F と温度両方を均質化した影響：排気リア側では、出力 A/F 化よりも、温度低下の影響が勝り、CH₂O 減少。

よって③より、A/F と温度両方の均質化により、ノックを抑制できる可能性があることがわかった。

4 まとめ

本研究では、LES詳細化学反応計算にて、高回転高負荷での計算を実施し、ノック発生箇所とタイミングの解明を試みた。

- (1) TABKINTM/FGMにて、高回転ノックは計算できており、ノック解析に有効である。
- (2) 低回転と高回転とのノックのメカニズムは異なり、今回の高回転での計算では、未燃部の自着火はなく、冷炎発生が、ノック振幅の基点になっていると考える。
- (3) ただし、ノック基点、発生タイミングについては、筒内の温度、中間生成物等生成挙動に、明確な屈曲点が無く、現状は、適切な閾値で判定せざるを得ない。
- (4) さらなる筒内A/F分布の均質化が、ノック抑制につながる可能性がある。

■謝辞

本計算では、エイヴィエルジャパンのスタッフに多大なるご協力をいただきました。ここに厚く御礼申し上げます。

■参考文献

- [1]田中 大二郎 ほか：吸排気バルブ表面を含むイオンプローブによる筒内噴射ガソリンエンジンにおける火炎伝播計測とノッキング挙動解析，自動車技術会 春季大会学術講演会前刷集，20075024 (2007)
- [2]Y.Suzuki et al.: S.I. engine combustion flame propagation measurement and knocking analysis by ion current probes including moving intake and exhaust valve faces, SAE 2007-01-1420 (2007)
- [3]M.Kowada et al.: Study of Knocking Damage Indexing Based on Optical Measurement, SAE 2015-01-0762 (2015)

[4]H.Ando et al.: Heat Release Rate and Cylinder Gas Pressure Oscillation in Low and High-Speed Knock, SAE 2015-01-1880 (2015)

[5]松浦 勝也 ほか：局所熱伝達促進によるノック限界改善手法の提案、自動車技術会 秋季大会学術講演会前刷集，20166141 (2016)

[6]M.Sens et al.: Pre-Chamber Ignition and Promising Complementary Technologies, 27th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology 2018 p.32 fig.31(2018)

■著者



田中 大二郎

Daijiro Tanaka

マリン事業本部
マリンエンジン統括部
機能開発部



高須 康嗣

Kouji Takasu

AM事業部
AM第1技術部



大村 亮介

Ryosuke Omura

AM事業部
AM第1技術部