

エンジンノッキング現象における

末端ガス圧力波発生メカニズムの解明:

大規模詳細化学反応機構を用いた多次元流体解析

佐藤 伴音

北海道大学大学院工学院機械宇宙工学専攻

1. 緒言

火花点火ガソリンエンジンにおけるノッキング現象は、強い圧力波を伴う異常燃焼の1つとして知られている。ノッキング現象の抑制は、エンジン高効率化へとつながるため、長年多くの研究が実施されてきた[1]。しかし、エンドガス自着火に起因する圧力波発生過程が、時間的かつ空間的に非常に小さなスケールで生じるため、実験、計算いずれにおいても、詳細な現象理解が困難であった。それに対して、近年では大規模詳細反応機構を用いた直接的流体解析が実施されるようになり、その利点を活かすことで、エンドガス自着火と圧力波発生に関する詳細メカニズムの解明が進められている[2]。

エンジン燃焼におけるノッキング現象を抑制する手段として、様々な手法が考えられてきた。例えば、燃料を多段噴射し、エンジン筒内に当量比の空間分布を形成することで、ノッキング強度の軽減が可能であることが報告されている[3,4]。近年のガソリンエンジンの燃料噴射装置の高機能化に伴い、多段噴射のタイミングや回数、噴射量などの燃料噴霧の制御は比較的自由度が高く、当量比の空間分布を精密に制御できる可能性がある。しかし、これまでの研究では、当量比の空間分布制御によるノッキング強度低減の可能性が示されている一方で、その詳細なメカニズムは曖昧なままである。

したがって、本課題では火花着火ガソリンエンジンにおけるノッキング現象の抑制手法の創出を目的として、自着火現象を精度よく評価できる大規模な詳細化学反応機構を用いたノッキング現象の反応-流体連成解析を実施した。特に、本課題は燃料としてノルマルヘプタンを用いているため、373化学種1071反応を考慮する非常に大きな反応機構を使用しており、1次元モデルであっても大規模な計算となる点が特徴である。

2. 数値計算法及び計算モデル

本課題における支配方程式は各化学種の質量保存式を加えた圧縮性ナビエ-ストークス方程式と熱的に完全な状態方程式である。数値解析手法の詳細は、文献[2]を参照いただきたい。

本課題ではノッキング現象を1次元空間でモデル化した。Figure 1にその概要図を示す。領域の大きさは $L=4\text{ cm}$ で、右境界を断熱壁条件、左境界を対称境界条件とした。初期圧力は 5 atm とし、初期温度は 550 K から 850 K まで変化させた。左境界から $L/40$ の領域に 1400 K の高温源を配置し、その自着火により伝播火炎を生成させた。計算領域の左から右へと火炎が伝播し、右壁と伝播火炎

の間にエンドガスが形成される。その後、エンドガスが自着火することによりノッキング現象がモデル化される。格子幅は $22.1 \mu\text{m}$ で、格子依存性は先行研究にて確認済みである。

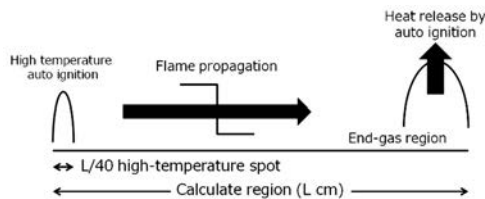


Fig. 1 A modeling of knocking combustion by using a one-dimensional constant volume reactor

さらに本課題では壁面の影響や流動の影響を考慮するため、ノッキング現象2次元空間にモデル化することを試みた。Figure 2 にその概要を示す。なお、格子点数は 1811×453 である。



Fig. 2 A modeling of knocking combustion by using a two-dimensional constant volume reactor

本課題では燃料としてノルマルヘプタンと水素の2種類、酸化剤として空気を用いた。また、ノルマルヘプタンの詳細反応機構は KUCRS[5]を用いて生成し、373 化学種 1071 反応が考慮される。水素の詳細反応機構は Westbrook[6]らによって開発されたものを用いた。

3. 結果

3.1. 燃料濃度分布によるノッキング抑制手法の提案

初期燃料濃度分布を変化させた1次元のノッキング解析を実施した。このとき初期燃料濃度分布は Fig.3 のように与えた。

Case A	$\Phi = 1.0$		
Case B	$\Phi = 1.2$	$\Phi = 0.8$	
Case C	$\Phi = 0.8$	$\Phi = 1.2$	
Case D	$\Phi = 1.2$	$\Phi = 1.0$	$\Phi = 0.8$

Fig. 3 Initial condition of equivalence ratio

ケース A は比較のために示す当量比が 1 で均一分布を初期条件として与えたケースである。ケース B, D では自着火が起こると考えられる右壁面付近に当量比が低い部分を配置することによって、ノッキング強度の軽減を図ったケースである。このような当量比配置は燃料の多段噴射により可能であることが示されている[3,4]. さらにケース C についてはケース B の当量比の配置を逆にしたケースである。

Figure 4 に各ケースにおけるノッキング強度を示す。なお、ここで示したノッキング強度は領域内での最初の最大圧力ピークを平衡圧力で割った値である。

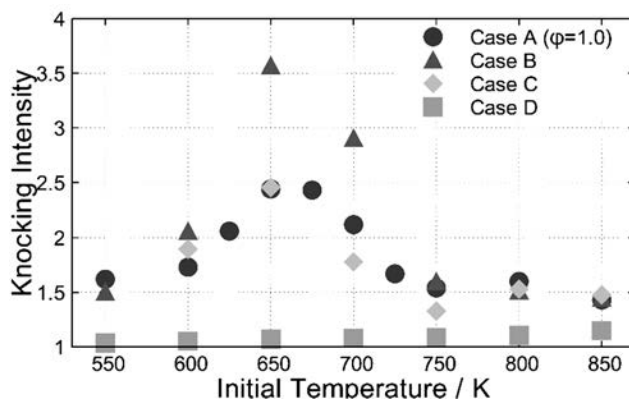
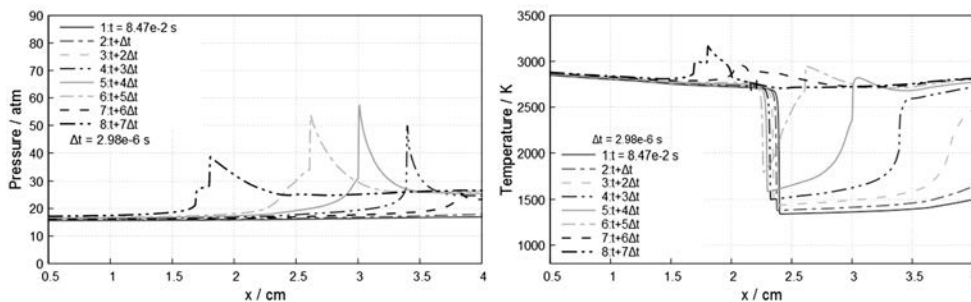
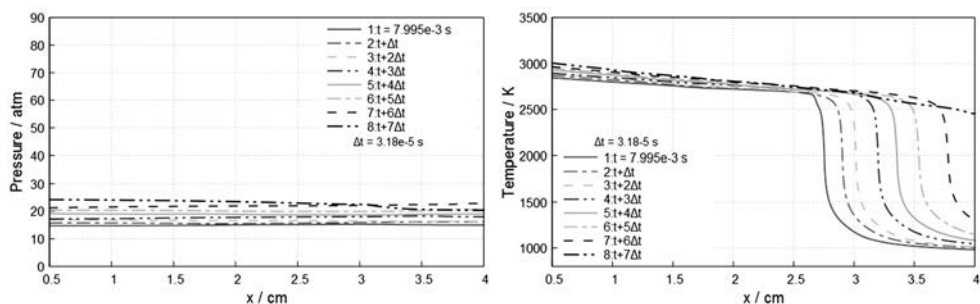


Fig. 4 Knocking intensity of distributed equivalence ratio cases against initial temperatures

Case B では初期温度 650 K 付近で Case A よりも大きなノッキング強度が観察され、ケース D ではすべての初期温度領域で極めて低いノッキング強度を示した。ケース B の初期温度 650 K 付近では 2 度の自着火が起こることにより、ノッキング強度が大きくなった[7]. Figure 5 にケース A と D の初期温度 650 K における温度と圧力の空間分布の履歴を示す。



(a) Case A



(b) Case D

Fig. 5 A temporal sequence of pressure and temperature profiles for initial temperature of 650 K

ケース A では壁面から自着火が起こり、圧力波と反応が連成することで圧力波が大きくなる
ことがわかる。これと比較して、ケース D は火炎面が通常の熱拡散による燃焼から Bradley
らが示した亜音速自着火モード[8,9]に遷移することにより、非常に小さい圧力ピークを持つ燃
焼が起こった。

本課題においてはケース D のような滑らかな当量比分布を強い圧力振動が回避できる可能
性のある当量比分布として提案することができた。

3.2. 壁面条件の影響

前節での右端の境界条件は断熱条件であった。しかし本課題の先行研究である Terashima
ら[2]は等温壁条件の計算例を示しており、ノッキング強度に影響を与えることを示した。本課
題でも、等温壁条件を与え、壁面温度がノッキング現象に与える影響を調査した。このとき当
量比は 1.0 の均一分布とした。また壁面温度は 500 K と 600 K の 2 条件を設定した。Figure
6 に壁面温度を変化させたときのノッキング強度を示す。

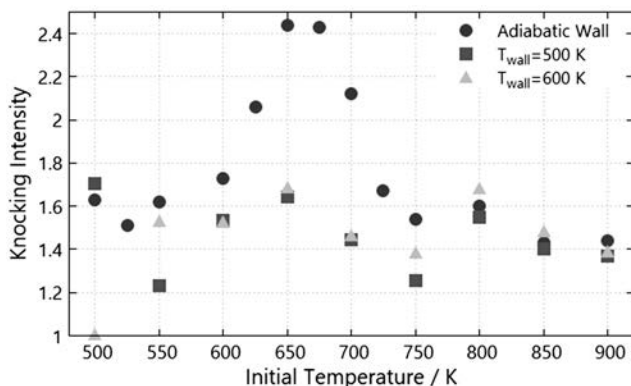


Fig. 6 Knocking Intensity of isothermal wall condition

壁面が等温壁の場合 650 K 付近に形成されるノッキング強度のピークがなくなることがわか
る。断熱壁条件において 650 K 付近に形成されるノッキング強度のピークは高温源により火炎

が形成されるときに発生する小さな圧力波が壁面反射することによって起こる現象であることが示唆されており[10]、等温壁にするとこの効果が小さくなるため、ノッキング強度のピークが消えたと考えられる。また壁面温度が変化してもほとんどノッキング強度が変化しないことがわかる。

3.3. 反応機構の簡略化

1次元計算では KUCRS(373 化学種 1071 反応)で生成した反応機構を用いたが、2次元の計算でこの反応機構を用いると、384 並列の計算を行ったとしても計算には 2~4 か月程度かかる見込みであった。また、計算時間の 9 割が化学種の輸送方程式や反応の計算であり、これらの計算時間は反応機構の大きさに依存する。したがって少しでも計算時間を短縮するためにも反応機構の簡略化を行い、計算を短くすることは非常に重要である。

本課題での反応機構の簡略化は越光男東大名誉教授のご協力をいただき、DRGEP 法[11]にて行った。この手法により KUCRS で生成した 373 化学種 1071 反応のノルマルヘプタンの反応機構を 204 化学種 687 反応まで簡略化した。さらに 1次元の当量比 1.0 の均一ケース(Fig. 3 Case A)について簡略化を施した反応機構を用いて計算し、簡略化した反応機構の妥当性を検証した。Figure 7 に簡略化前の反応機構と簡略化を施した反応機構の 2つの計算で得られたノッキング強度を示す。

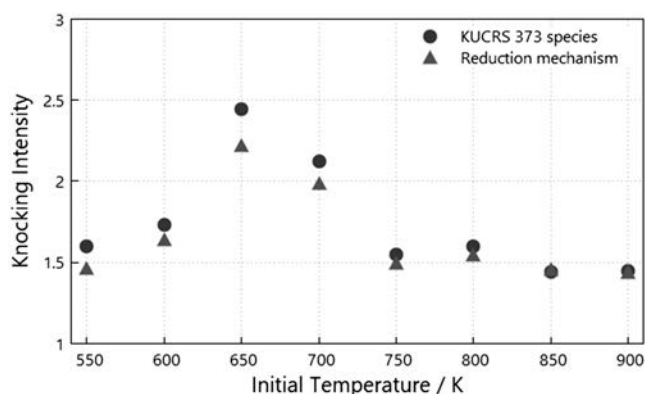


Fig. 7 簡略化モデルのノッキング強度

簡略化した反応機構は簡略前のノッキング強度の傾向をよくとらえており、十分な精度を有することを確認した。次節におけるノルマルヘプタンの二次元計算には簡略化した反応機構を用いた。

3.4. 二次元計算への適用

本課題ではノルマルヘプタンでの計算量が見積もりよりも非常に大きかったため、ノルマルヘプタンでの計算を試みたものの、すべての計算を完了させることができなかった。しかし、計算条件の確認のために行った水素を燃料、酸化剤を空気とした当量比 1.0、初期温度 900 K のケースではノッキングが起ることが確認できた。Figure 8 にそのケースの温度分布を示す。

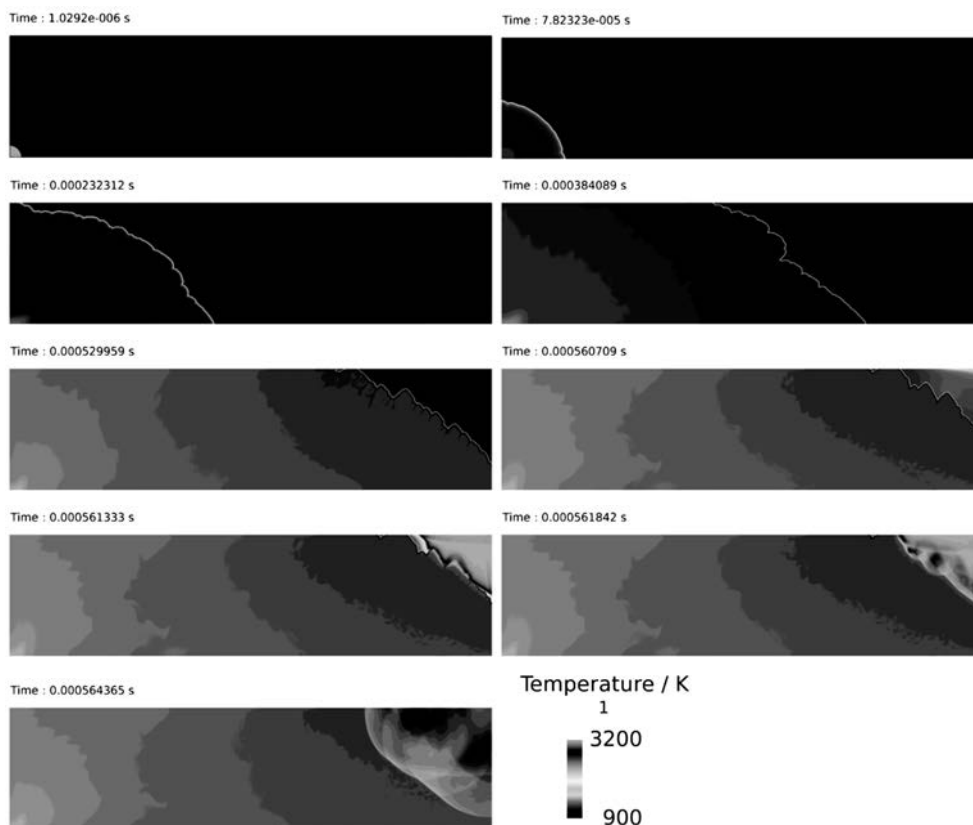


Fig. 8 Temperature distribution in case of H₂-Air mixture at initial temperature of 900 K

これらの温度分布の履歴は高温源から火炎が進展し、エンドガスが形成されて自着火が断熱壁面から局所的に起こったことをとらえており、Terashima らが主張するノッキング壁面での不均一生成のメカニズム[10]が 1 次元のみの現象ではなく 2 次元の解析でも起こりうることが示唆された。

4. まとめ及び今後の課題

1 次元解析により、当量比分布を滑らかに配置することにより強い圧力振動を伴わない燃焼ができる可能性があることを示した。また、2 次元計算に向けノルマルヘプタンの反応機構の簡略化を行い、精度の検証を 1 次元計算で行った。さらに 2 次元のテスト計算を水素 - 空気の混合気で行い、1 次元の計算と同様に自着火が壁面から起こることを示した。

今後は本課題では完了できなかったノルマルヘプタンの 2 次元計算を引き続き実施するとともに、1 次元計算において滑らかな当量比分布の傾きを変化させ当量比分布によるノッキング強度低減の可能性を検討する。また、燃料特性の影響を調査するため燃料を変化させた場合どのような現象が起こるかを調査していく予定である。

謝辞

本課題では北海道大学の寺島洋史准教授から非常に有意義な助言を多数いただいた。また、本課題の一部はマツダ株式会社の支援のもとで実施された。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- [1] Z. Wang, H. Liu, R.D. Reitz, *Prog. Energy Combust. Sci.* 61 (2017) 78–112.
- [2] H. Terashima, M. Koshi, *Combust. Flame* 162 (2015) 1944–1956.
- [3] L. Liang, L. Liang, R.D. Reitz, R.D. Reitz, C.O. Iyer, C.O. Iyer, J. Yi, J. Yi, *Sae* 2007-1-1 (2007) 776-0790.
- [4] Y. Bai, Z. Wang, J. Wang, *SAE Tech. Pap.* (2010).
- [5] A. Miyoshi, (2011).
- [6] M. Ó Conaire, H.J. Curran, J.M. Simmie, W.J. Pitz, C.K. Westbrook, *Int. J. Chem. Kinet.* 36 (2004) 603–622.
- [7] T. Satoh, H. Terashima, N. Oshima, (2017) 1–6.
- [8] D. Bradley, G.T. Kalghatgi, *Combust. Flame* 156 (2009) 2307–2318.
- [9] X.J. Gu, D.R. Emerson, D. Bradley, *Combust. Flame* 133 (2003) 63–74.
- [10] H. Terashima, A. Matsugi, M. Koshi, *Combust. Flame* 184 (2017) 324–334.
- [11] T. Lu, C.K. Law, *Combust. Flame* 146 (2006) 472–483.