

1

燃焼反応モデリングは 内燃機関を変えられるか

広島大学 大学院工学研究科 機械物理工学専攻

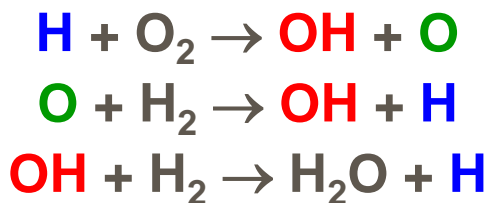
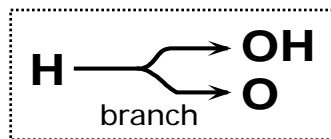
三好 明

自着火の連鎖反応

Chain Reactions of Autoignition

3 自着火の連鎖反応 — 分岐連鎖反応

H₂-O₂ (高温低压) — 分岐連鎖反応 / 連鎖着火



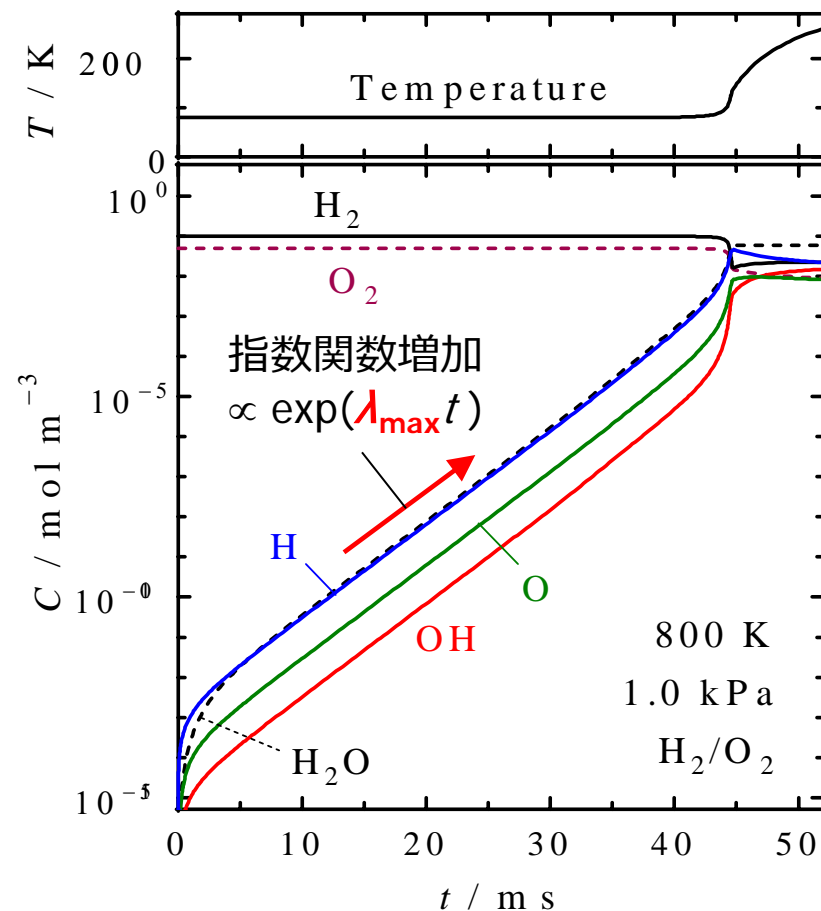
- 連鎖担体 (H, O, OH) は自己増殖
 → 自己加速 → 連鎖着火

$$\begin{aligned} x &= [\text{H}], y = [\text{O}], z = [\text{OH}], \\ R_1 &= k_1[\text{O}_2], R_2 = k_2[\text{H}_2], R_3 = k_3[\text{H}_2] \end{aligned}$$

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -R_1 & R_2 & R_3 \\ R_1 & -R_2 & 0 \\ R_1 & R_2 & -R_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{x} = \sum_i a_i \mathbf{s}_i e^{\lambda_i t}$$

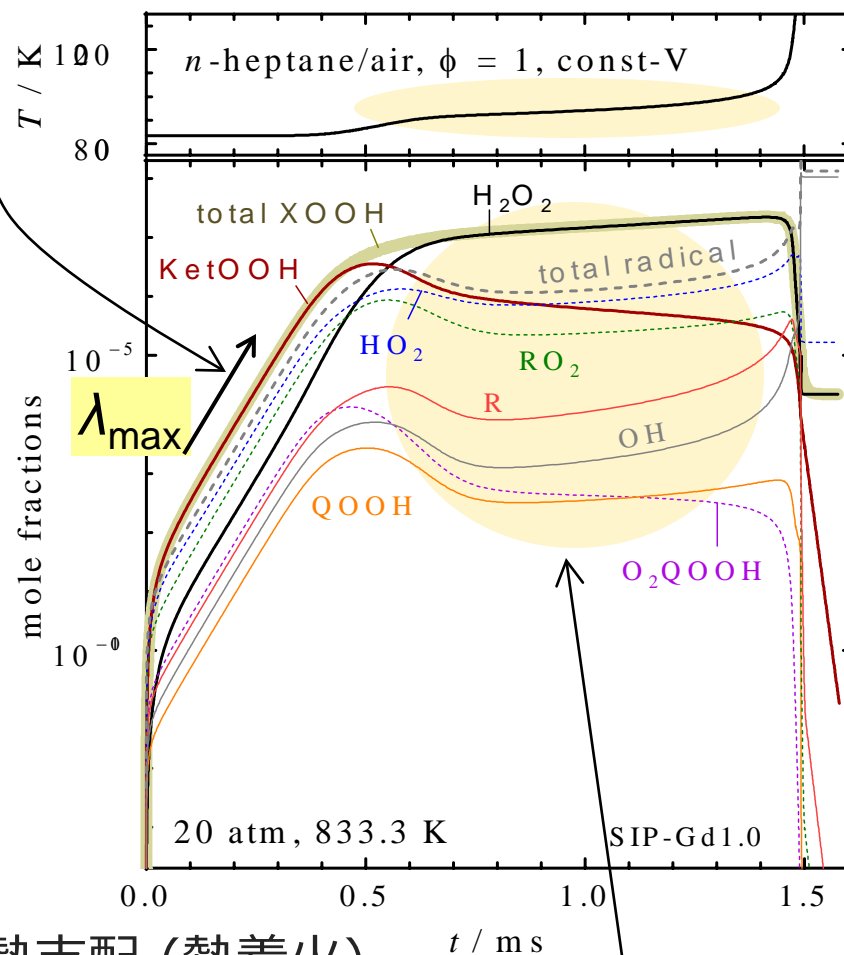
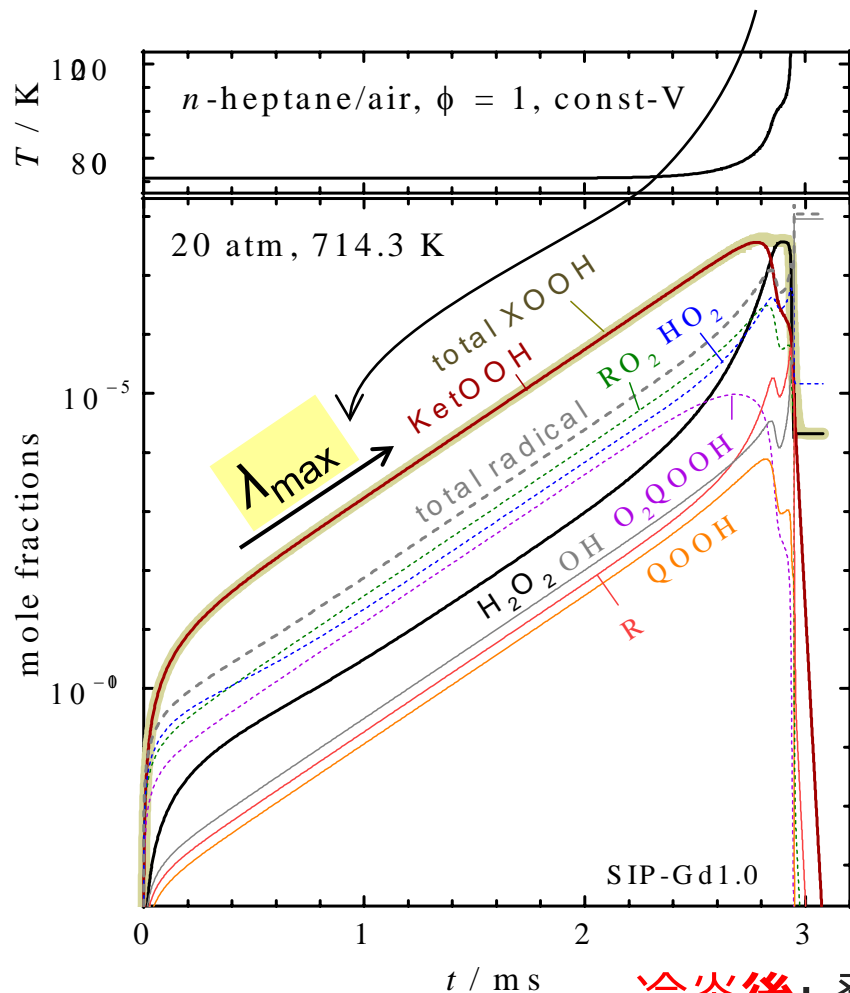
$\lambda_{\max} > 0 \dots$ 発散



炭化水素の自着火 — 低温高压では分岐連鎖反応支配

ヘプタン-空気 (低温高压) — 条件と冷炎前後で変化

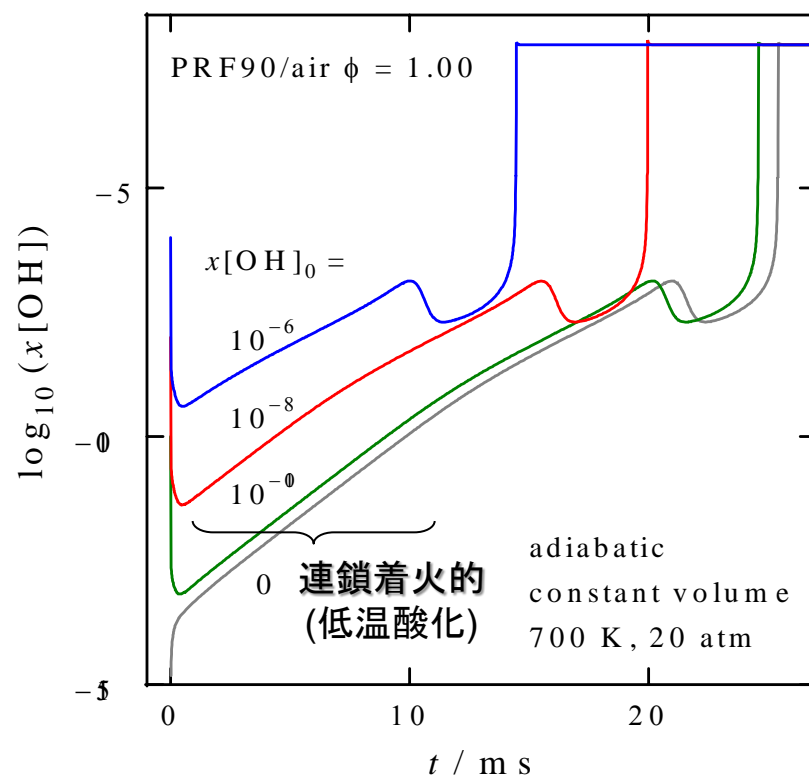
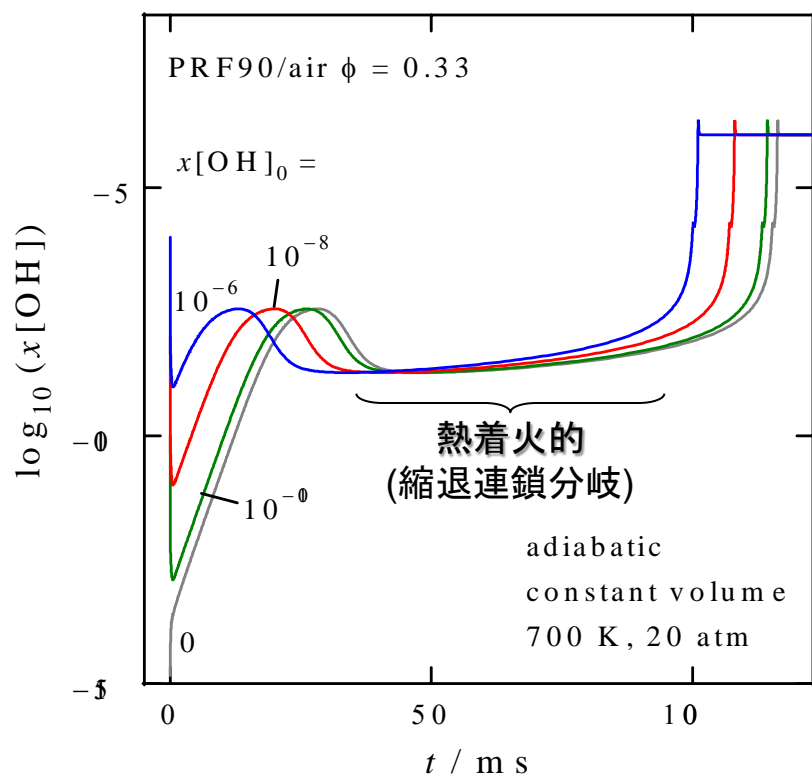
冷炎前: 分岐連鎖反応支配 (連鎖着火)



冷炎後: 発熱支配 (熱着火)

活性種添加の自着火への効果 (放電など)

- 添加効果は添加量の対数に比例



Livengood-Wu 積分

自着火(ノック)の半経験的予測

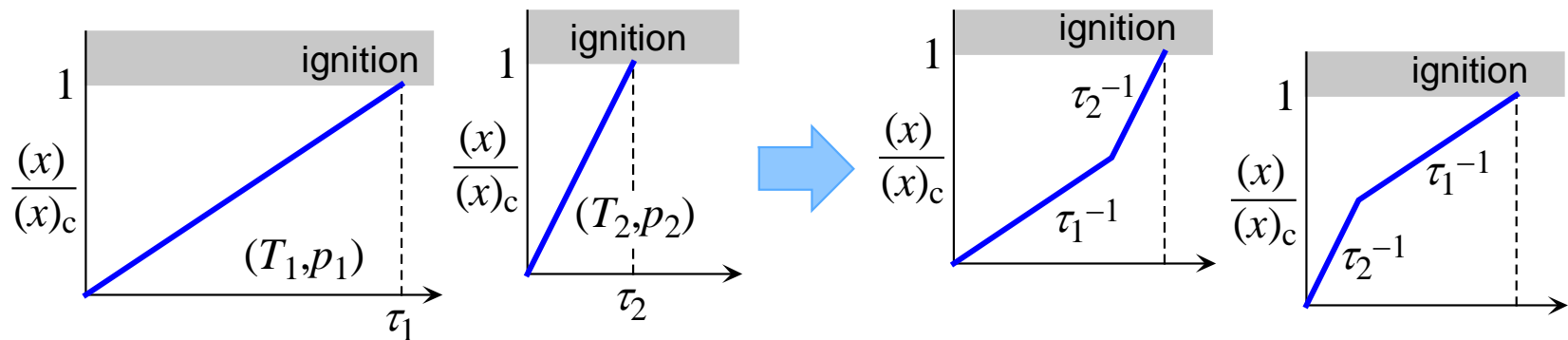
J. C. Livengood and P. C. Wu,
Proc. Combust. Inst., 5, 347–356 (1955).

$$1 = \int_0^{t_{\text{ign}}} \frac{dt}{\tau(T, p)}$$

仮定：

* pertinent reaction product

- "*(何か)適切な生成物" x の濃度が限界濃度 $(x)_c$ に達すると着火
- $(x)/(x)_c$ の増加速度は T, p の関数でこの条件の着火遅れ時間 $\tau(T, p)$ の逆数 $\tau^{-1}(T, p)$ になる
- ピストン圧縮・膨張で時々刻々変化する T, p においてこの関係が成立

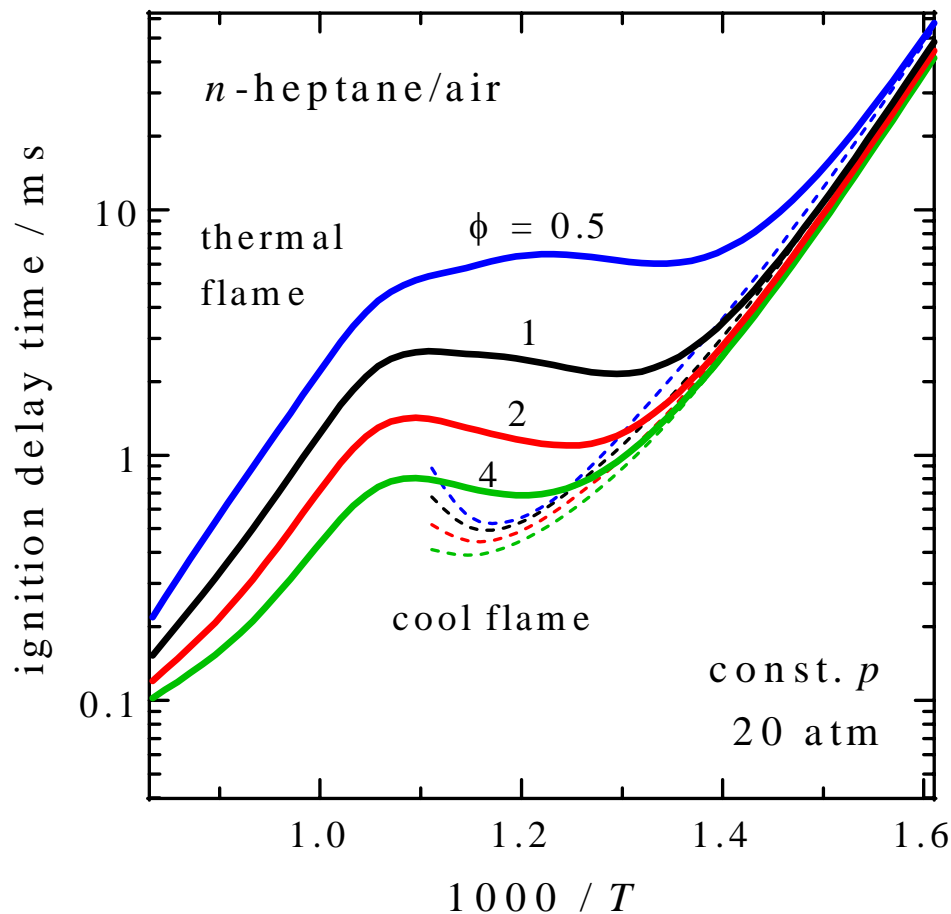


噴霧燃焼の0次元モデル

Zero-dimensional Model for
Spray Combustion

着火遅れ時間の当量比依存性

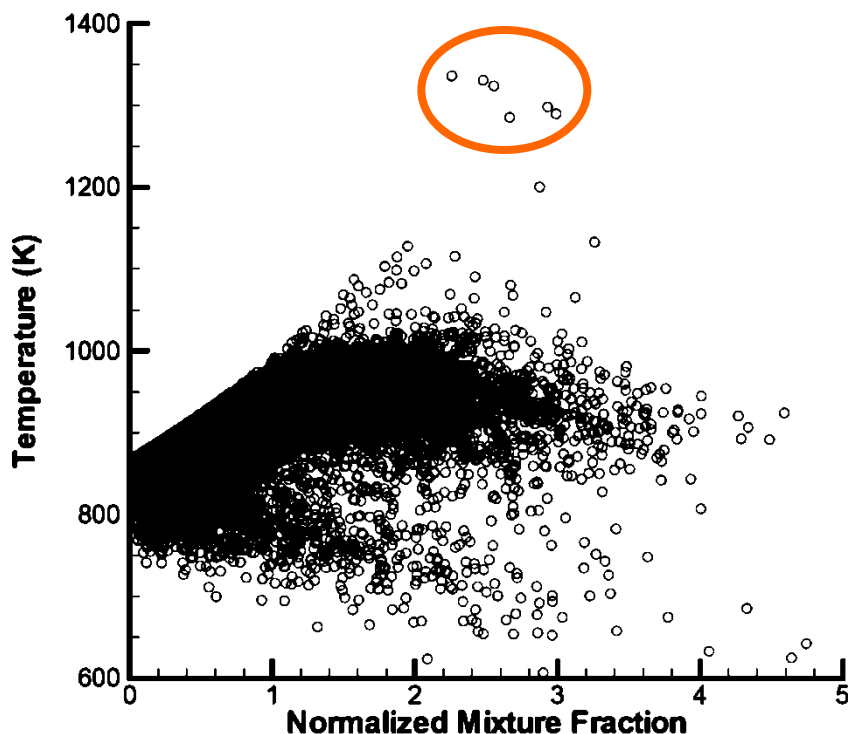
当量比が高いほど着火しやすい (?)



- τ_{cool} は当量比にほとんど依存しない
- τ_{thermal} は $\phi \rightarrow \infty$ で τ_{cool} に漸近

着火する局所当量比は？

着火は当量比 2~3 (?) で起こる？



IQT シミュレーション
(KIVA-3V ベース,
簡略化 *n*-ヘプタン)

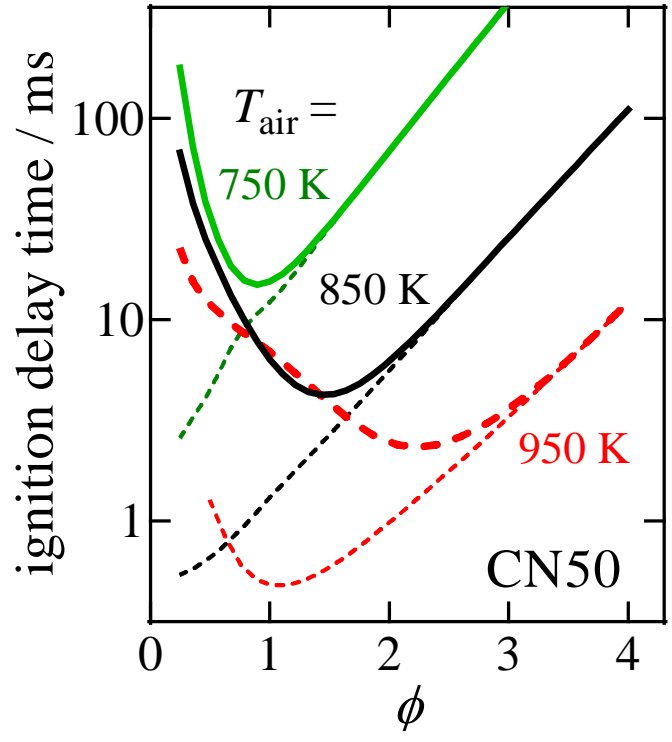
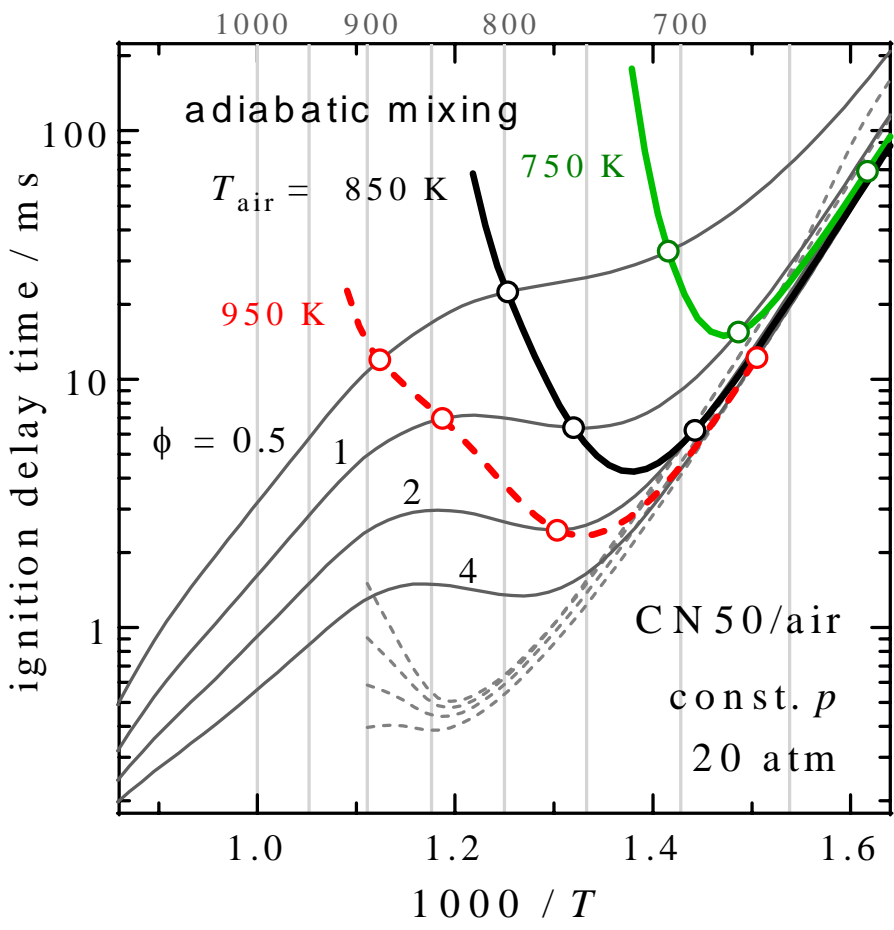
Figure 7 Computed temperatures of all cells versus normalized mixture fraction by the stoichiometric value (~ 0.065).

"Skeletal and reduced chemistry of *n*-heptane based on recent LLNL detailed mechanism and their applications to simulations of IQT," H.-L. Tsai & J.-Y. Chen, Proc. 9th ASPACC, 19-22 May 2013.

噴霧燃焼の断熱混合モデル

着火遅れ時間が最小となる局所当量比が存在する

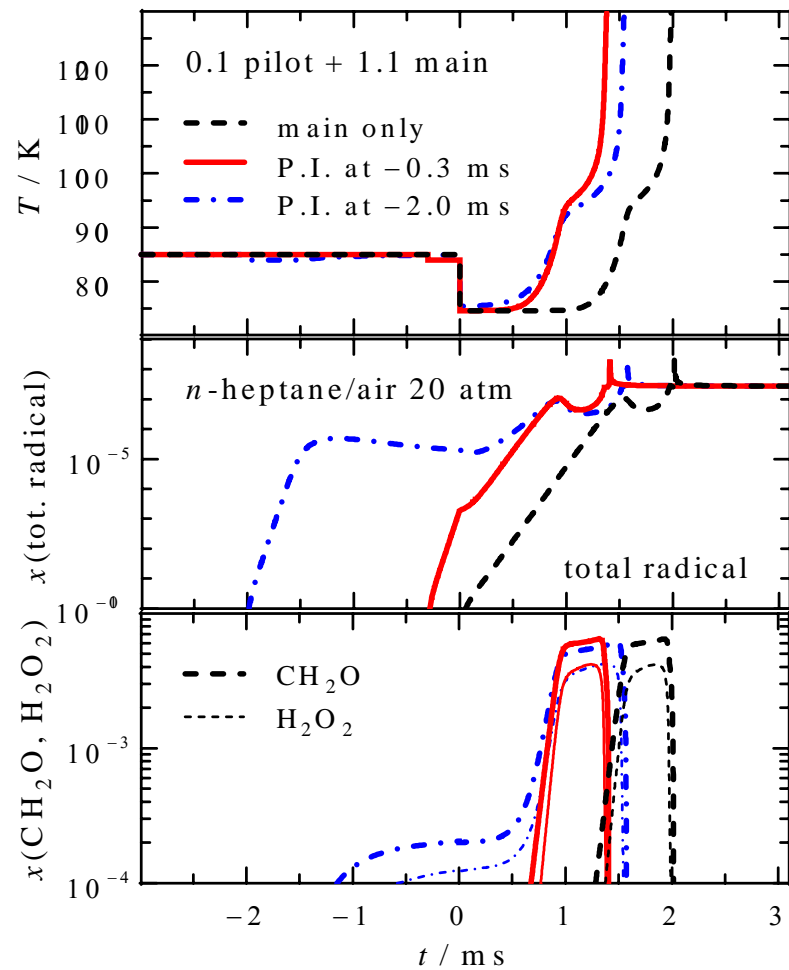
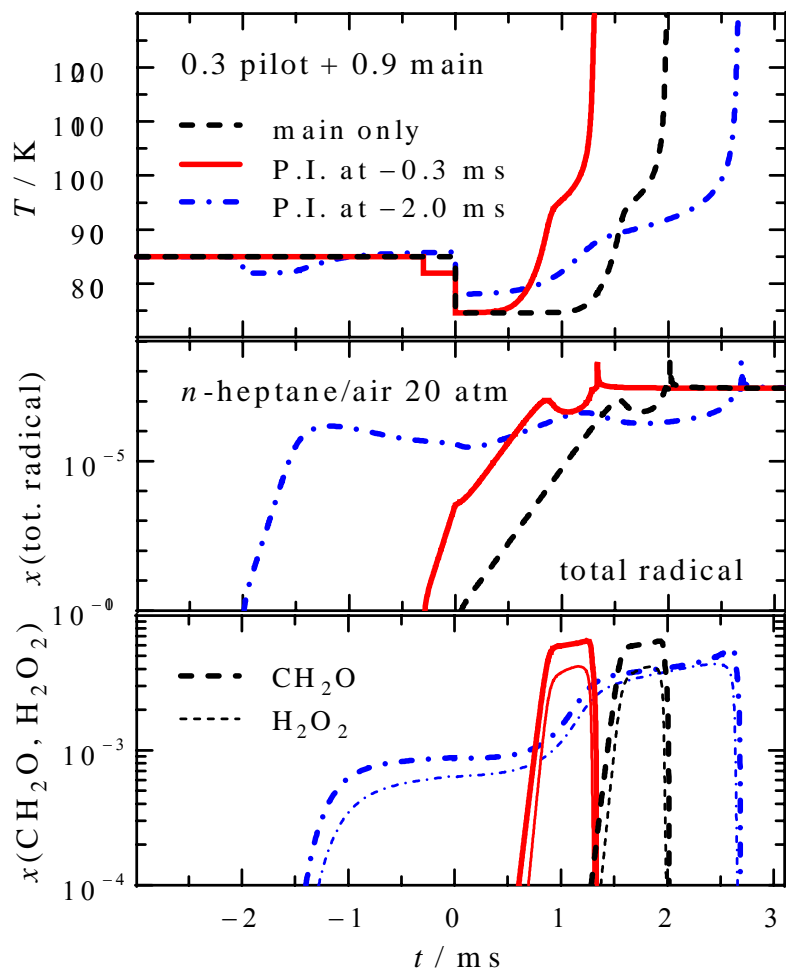
- 潜熱/顕熱による冷却の効果



噴霧過程における混合遅れ(予備噴射)

- 予備噴射量： **0.3** /1.2 (当量比換算)
冷炎が出てしまうと着火抑制

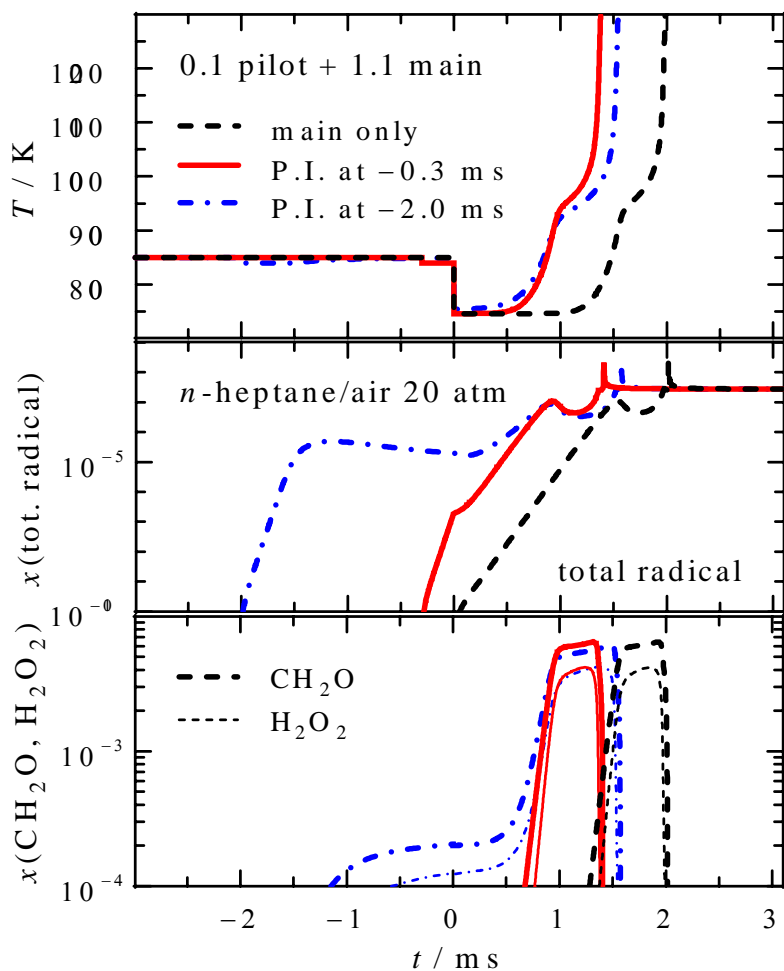
- 予備噴射量： **0.1** /1.2 (当量比換算)
冷炎後でも着火促進



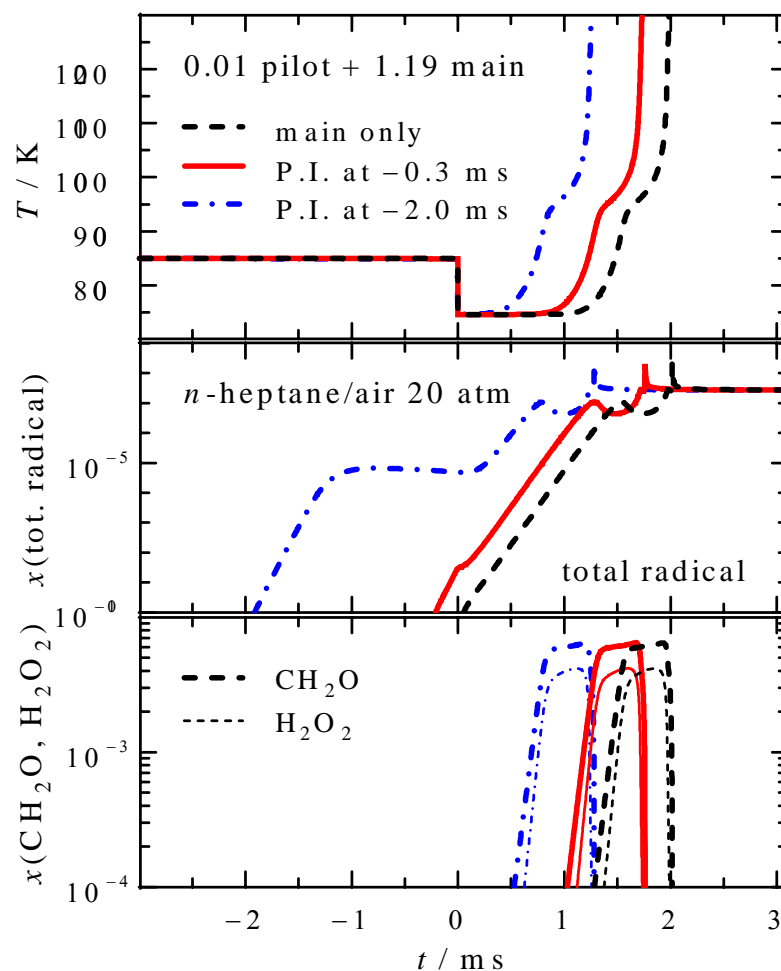
単噴射中の混合遅れ(予備噴射)の効果

混合遅れ(予備噴射)

- 予備噴射量： **0.1** /1.2 (当量比換算)
冷炎後でも着火促進



- 予備噴射量： **0.01** /1.2 (当量比換算)
早期の予備噴射で着火促進



単噴射中の混合遅れ(予備噴射)の効果

SKYACTIV-G 燃燒

SKYACTIV-G Combustion



http://swest.toppers.jp/SWEST16/data/keynote_proceeding.pdf

- なぜ、冷炎が出るのにノック限界が大きく遅角しないのか？

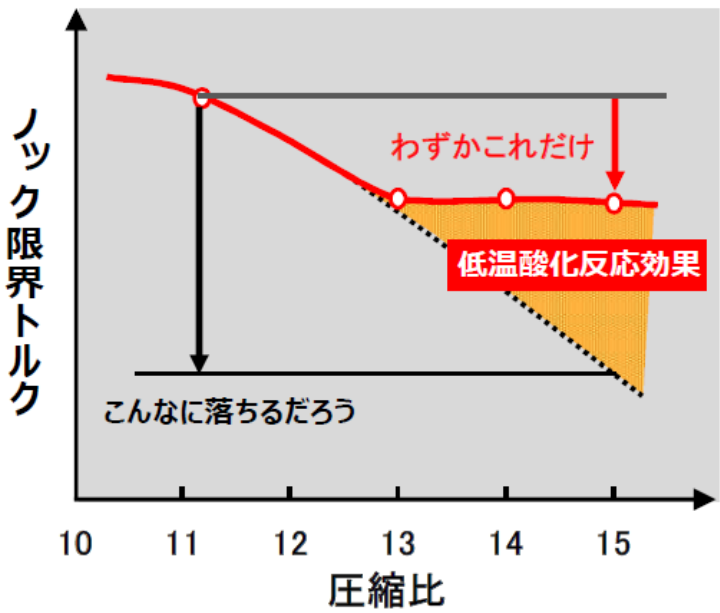
SKYACTIVエンジン開発

内燃機関の究極へのステップ SKYACTIVガソリン

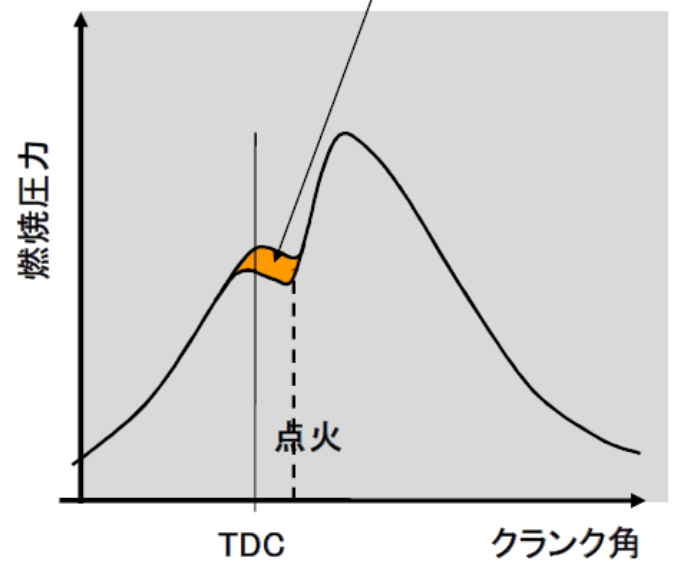
思い切って高圧縮比化すると？

探る時は大きく振ってみる！！
小さなステップでは発見がない！！

1500rpm WOT A/F=13.0 Ig.T=Knock Limit



何故か？ → 低温酸化反応

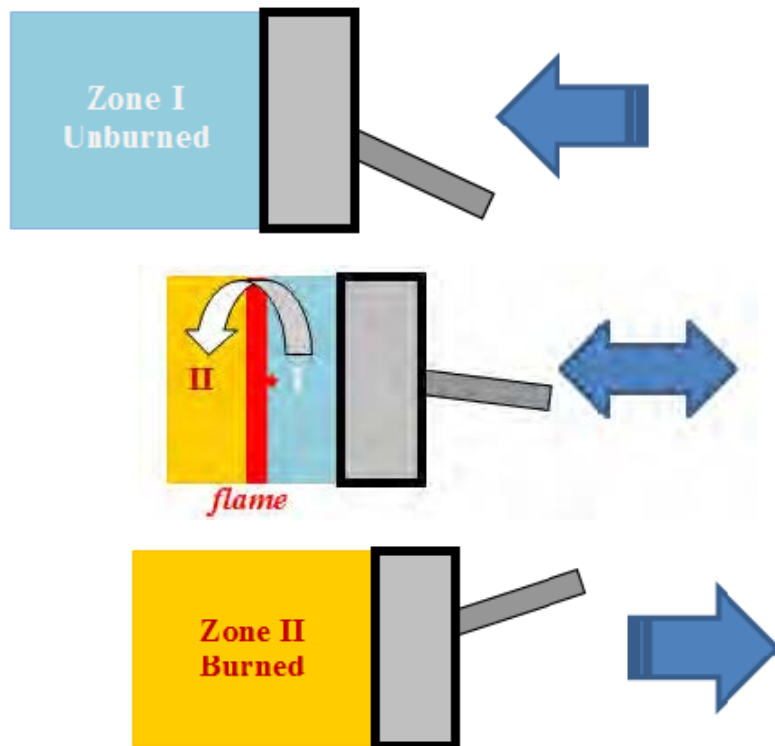


0次元エンドガスノックシミュレーション

— SI Engine Zonal Model

in Chemkin-Pro 15141 and later
(incl. 15151, ANSYS 17.0/1/2)

- ピストン圧縮体積変化・Woschni 熱損失
- 既燃ゾーン(燃焼平衡)の質量分率変化: Wiebe 関数
(クランク角のみの関数・回転数/圧力/当量比/EGR率などと連動しない)
- ゾーン間圧平衡

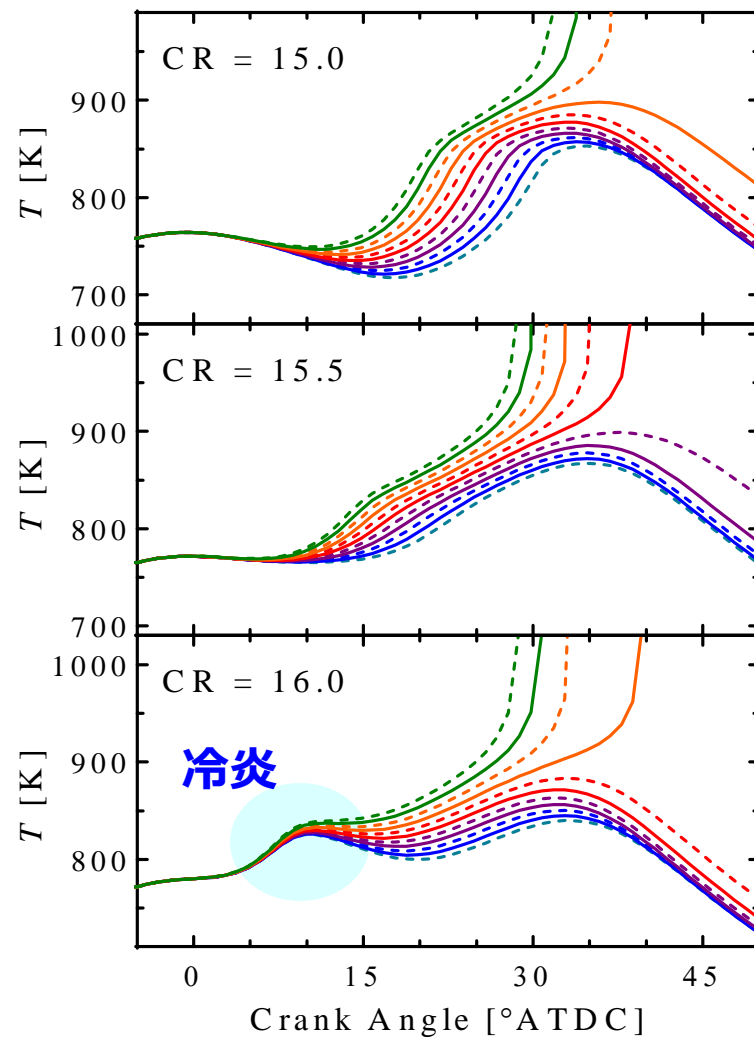
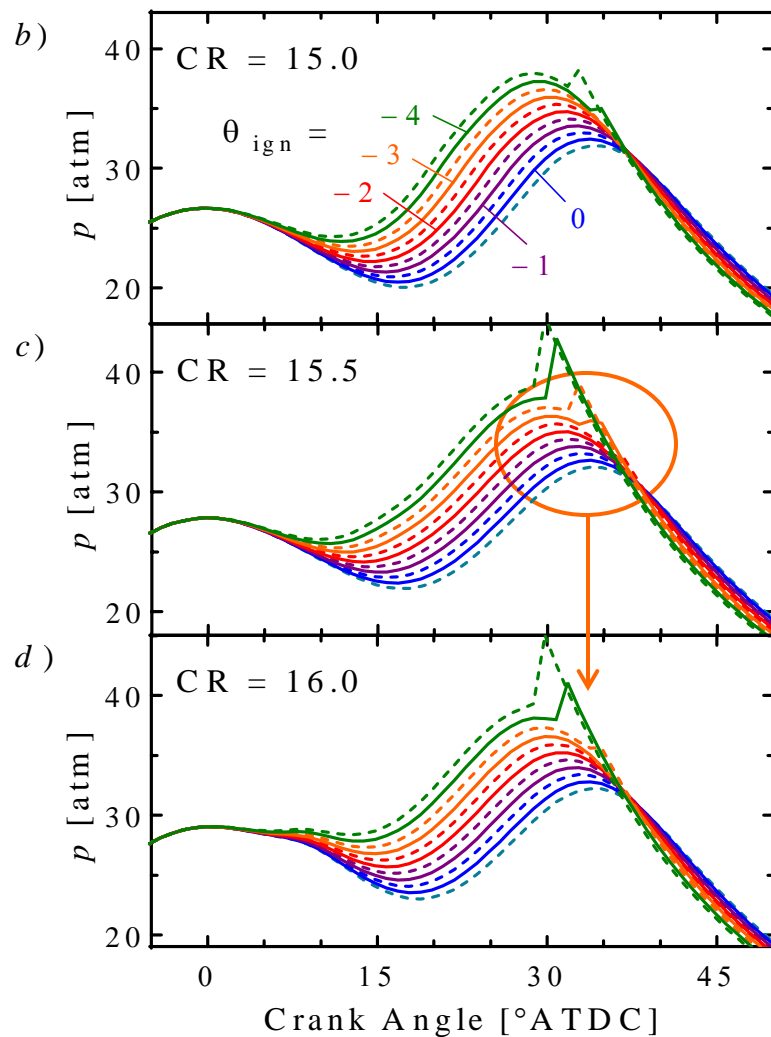


Model based on: T. Noda, K. Hasegawa, M. Kubo and T. Itoh, "Development of Transient Knock Prediction Technique by Using a Zero-Dimensional Knocking Simulation with Chemical Kinetics," SAE Technical Paper 2004-01-0618 (2004).

筒内圧力・エンドガス温度 (600 rpm)

点火時期を変えてノック限界を計算

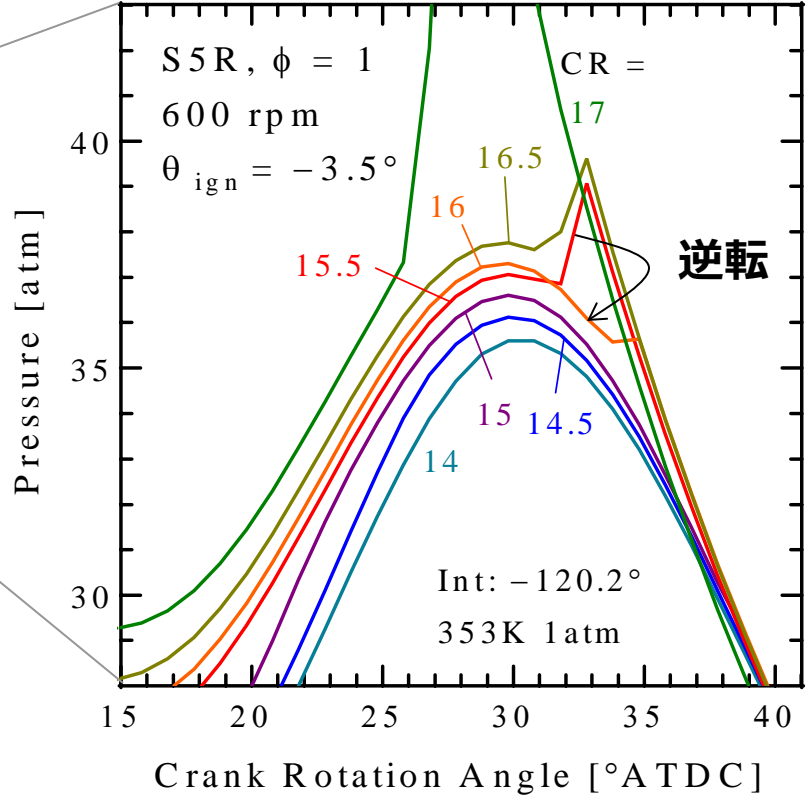
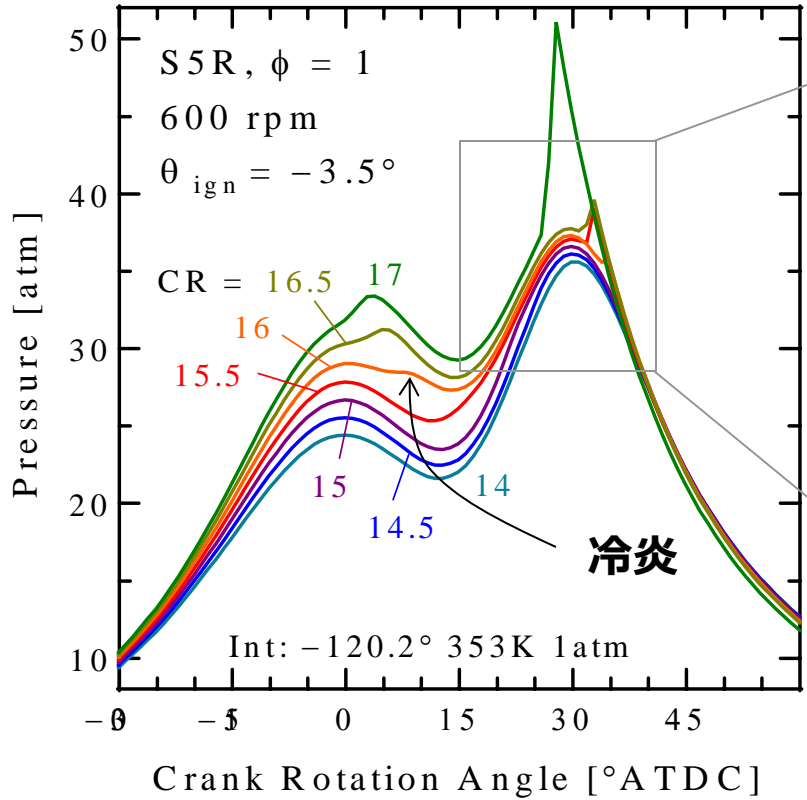
- 圧縮比 15.5 → 16.0 でノック限界が進角 !?



ノック限界付近の圧力履歴

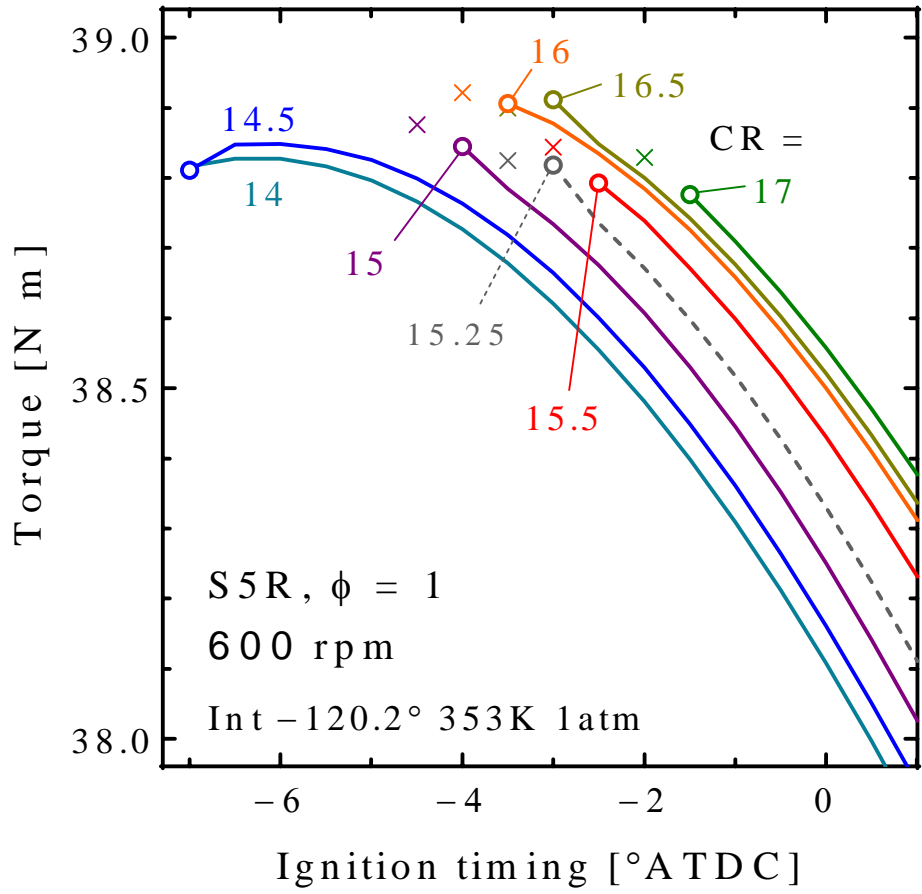
IGT=3.5 BTDC (ノック限界付近) 圧縮比に対する、圧力履歴の変化

- 冷炎がノックを抑制(?)
- 冷炎により等容度増加



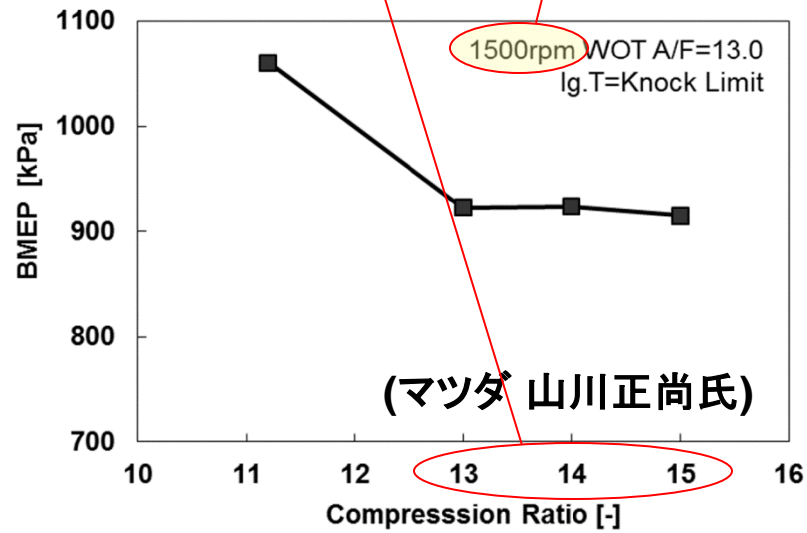
ノック限界着火時期 (600 rpm)

- 圧縮比 ↑ でノック限界が進角 CR15.5(-2.5°) → CR16(-3.5°)



SKYACTIV-G (マツダ)
と似ている

(圧縮比・回転速度は異なる)



まとめ

— 自着火の連鎖反応

- 自着火の本質は分岐連鎖反応
- Livengood-Wu 積分の (x) は $\log(XOOH)$

— 噴霧燃焼の0次元モデル

- 同じ温度の着火遅れは当量比大で短縮し冷炎着火遅れに漸近
- 潜熱と顕熱の効果により当量比 1.2~3 で着火遅れは極小
- 予備噴射/混合遅れは着火を促進するが
予備噴射量が多く予備噴射で冷炎が出ると着火を抑制

— SKYACTIV-G 燃焼

- 0 次元 5 成分サロゲートモデル計算
圧縮比増加でノック限界が進角 (600 rpm)
- 冷炎による等容度の増加 + 冷炎によるノック抑制
- 0 次元計算はそれなりに「使える」