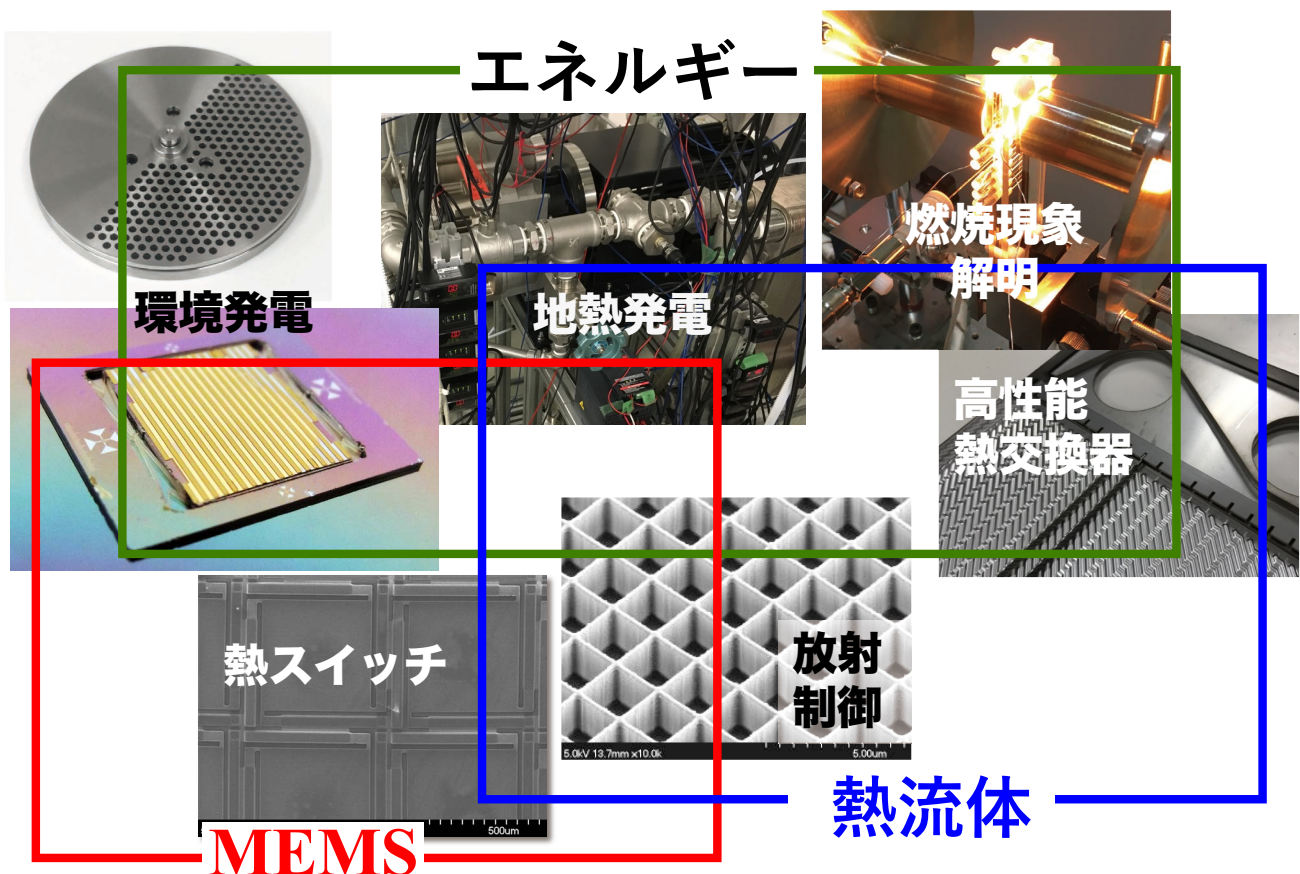


# 「燃焼」の新しい展開

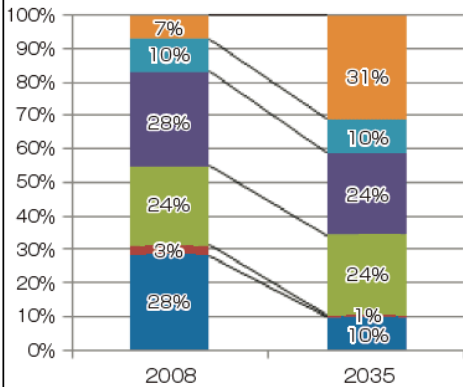
東京大学・大学院工学系研究科  
機械工学専攻  
鈴木 雄二  
ysuzuki@mesl.t.u-tokyo.ac.jp

## 熱流体工学研究室（鈴木教授・森本講師）



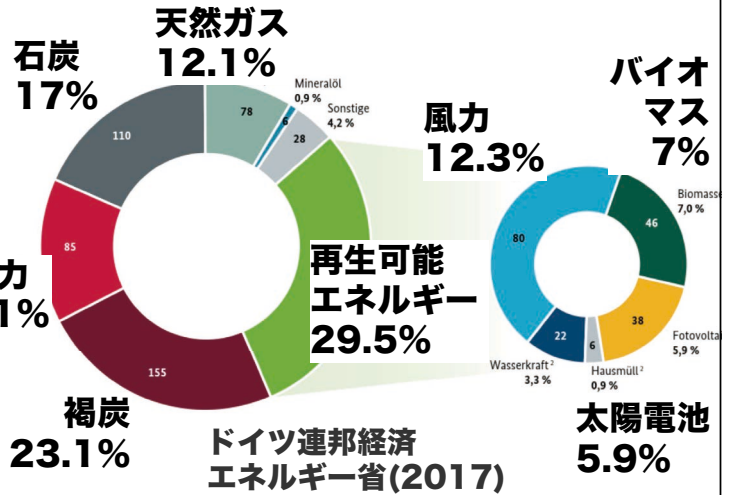
# 脱炭素？脱燃焼？

欧州の発電電力量構成見通し



IEA, World Energy Outlook 2010

ドイツにおける再生可能エネルギー電力

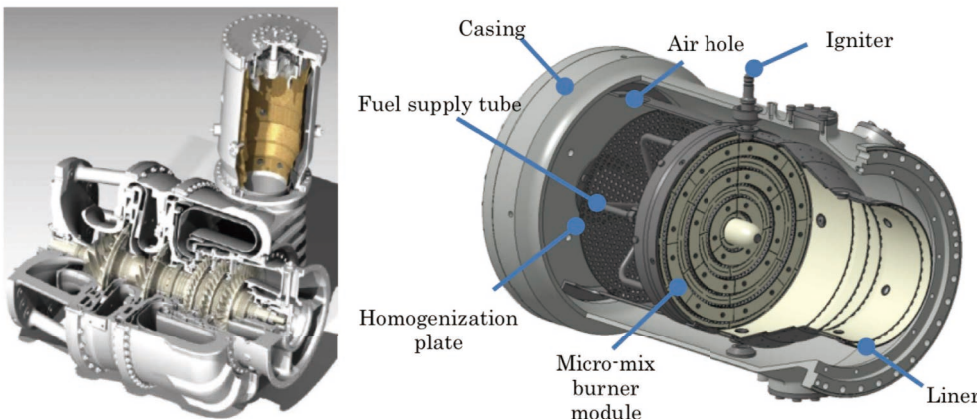


ドイツ連邦経済エネルギー省(2017)

- ✓ どれだけの再生可能エネルギーを導入できるか？  
(ドイツでは電力の1/3。変動吸収、コストが課題)
- ✓ 1次エネルギーのうち電力は日本で42.7%、ドイツでは17.6%
- ✓ 残りの部分のエネルギー変換の多くは、引き続き「燃焼」
- ✓ 燃焼プロセスでもエクセルギー損失を抑制可能 (高温空気燃焼)

## 水素基本戦略 (2017.12)

- エネルギーセキュリティ
- CO<sub>2</sub>排出制約 (2050年までに温室効果ガス排出を80%削減)
- ✓ 海外の未利用化石資源の水素化+CCS、海外の安価な風力・太陽光を用いた水素調達
- ✓ FCVに加えて、水素を大量消費する水素発電の導入
- ✓ エネルギーキャリア (メチルシクロヘキサン、アンモニア)  
(直接燃焼時のFuel NO<sub>x</sub>の課題は解決の目途)



ドライ低NO<sub>x</sub>水素専焼燃焼器  
(川崎重工業、岡田, 2017)

NO<sub>x</sub> 40 ppm 以下

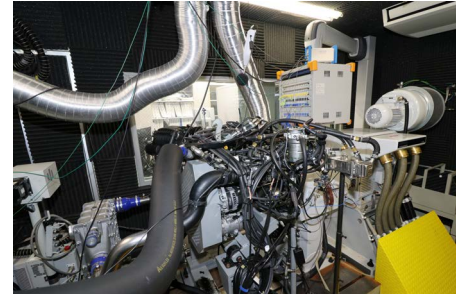
# エンジン燃焼のモデルベース制御

## 革新的燃焼技術の実現

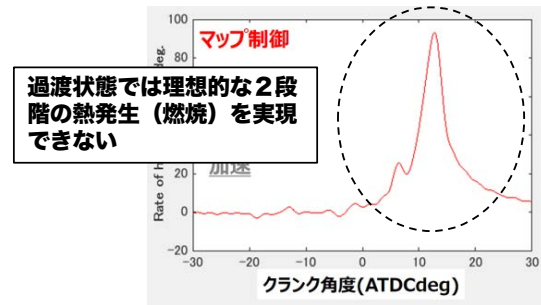
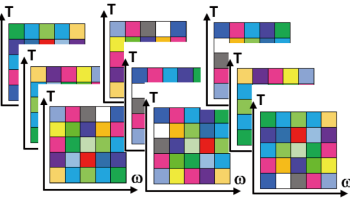
精密でロバスト性の高い制御手法の導入が必要

## 過渡性能の向上

ランダム加減速のある路上状態での性能向上



### 大量の実験をベースとした制御マップ (従来)



### モデルを利用した制御系設計と制御

$$L_{spray,PK} = 2.95 \frac{\rho_{commonrail} - \rho_{cyl}}{\rho_{cyl}} \frac{0.25}{P_{cyl}} \sqrt{d_{hole}^4}$$

$$\tan(\alpha_{spray,PK}) = \left\{ 3.0 + 0.28 \left( \frac{L_{spray,PK}}{d_{hole}} \right)^2 \right\}^{-1} 4\pi \frac{\rho_{cyl} \sqrt{3}}{\rho_{fuel} \sqrt{6}}$$

$$K = \int_{t_{inj}}^{t_{cyl}} A |Fuel| \rho_{cyl} \exp\left(-\frac{t}{RT}\right) dt$$

$$\theta_{swirl} = \theta_{swirl,0} + \frac{\omega_{spray} K}{A \left( \frac{V_{cyl1} + V_{cyl2} + V_{cyl3}}{V_{cyl1}} \right) \exp\left(-\frac{t}{RT_{cyl1}}\right)}$$

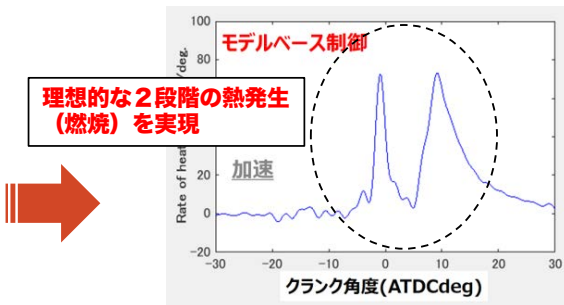
$$-\frac{d}{dt} [Fuel] = a [Fuel] \rho_{cyl} \exp\left(-\frac{t}{RT}\right)$$

$$\omega_{swirl} = C_{swirl} \omega_{engine}$$

$$-\frac{d}{dt} [Fuel] = a \left[ \frac{n_{r1} + n_{r2}}{V_{cyl1} + V_{cyl2} + V_{cyl3}} \right] \left[ \frac{n_{cyl1}}{V_{cyl1}} \right] \exp\left(-\frac{t}{RT}\right)$$

$$C_p \left\{ n_{gas} (T_{gas} - T_{ref}) + \frac{P_{boost}}{RT_{cyl}} (V_{cyl} - V_{exc} \frac{T_{cyl}}{T_{gas}}) (T_{inman} - T_{ref}) \right\}$$

$$= C_p \left\{ n_{gas} + \frac{P_{boost}}{RT_{cyl}} (V_{cyl} - V_{exc} \frac{T_{cyl}}{T_{gas}}) \right\} (T_{cyl} - T_{ref})$$

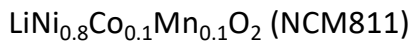


山崎由大 (東大)

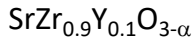
# 加熱用途以外の燃焼応用

## 燃焼合成

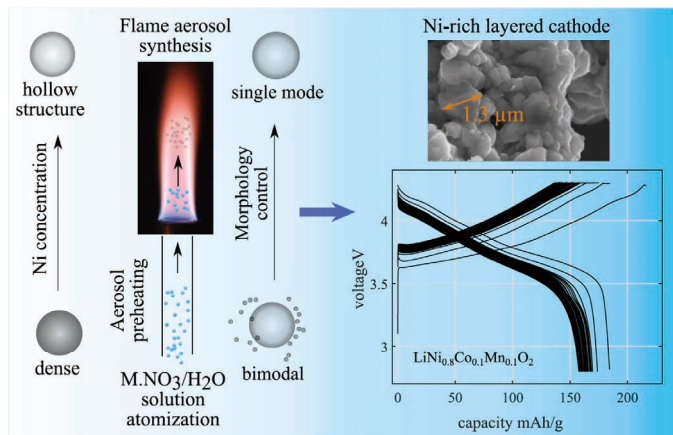
リチウムイオン電池用  
カソード材料



高温プロトン伝導体



など



C. Abram et al. (2019)

## 表面改質プロセス

樹脂材料の表面改質 (濡れ性、塗装改善) は工業的に多用

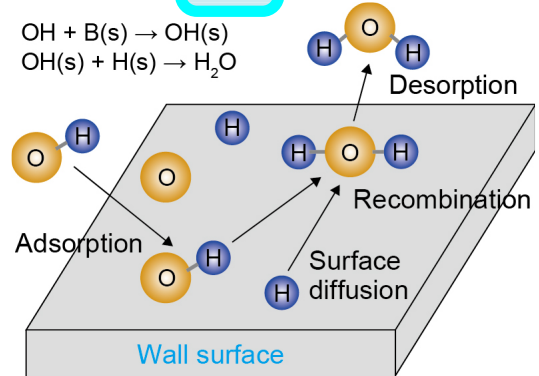
金属材料の表面改質 (脱脂、窒化、浸炭) など (従来は電気炉)



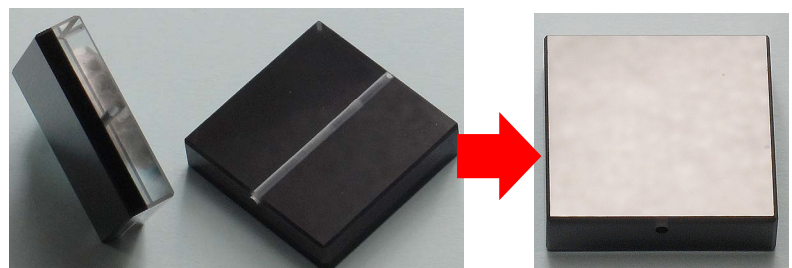
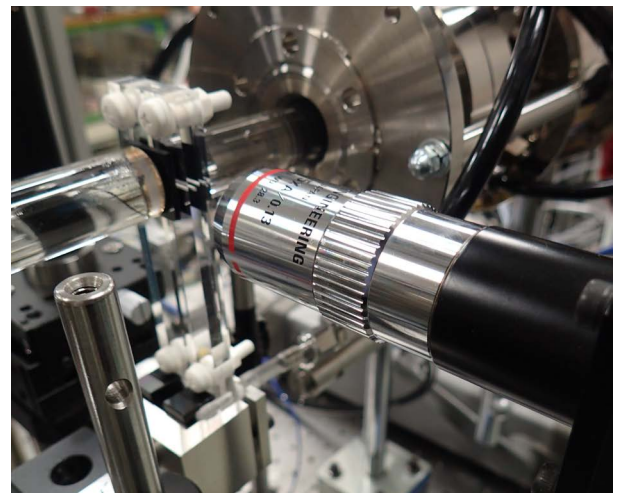
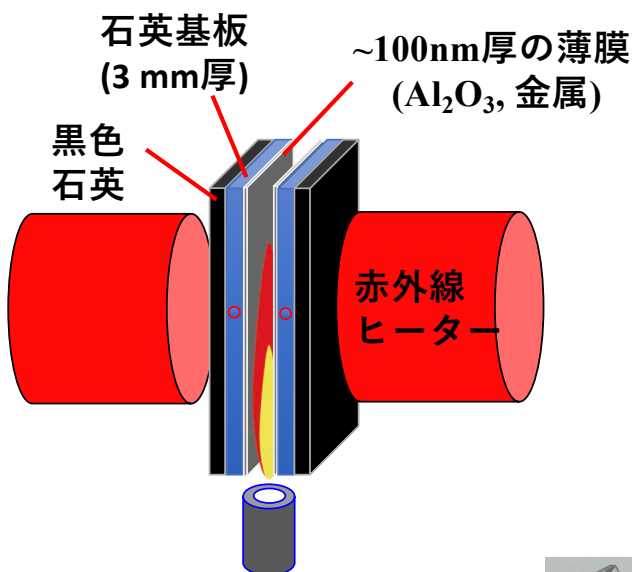
# 燃焼における壁面の化学的効果



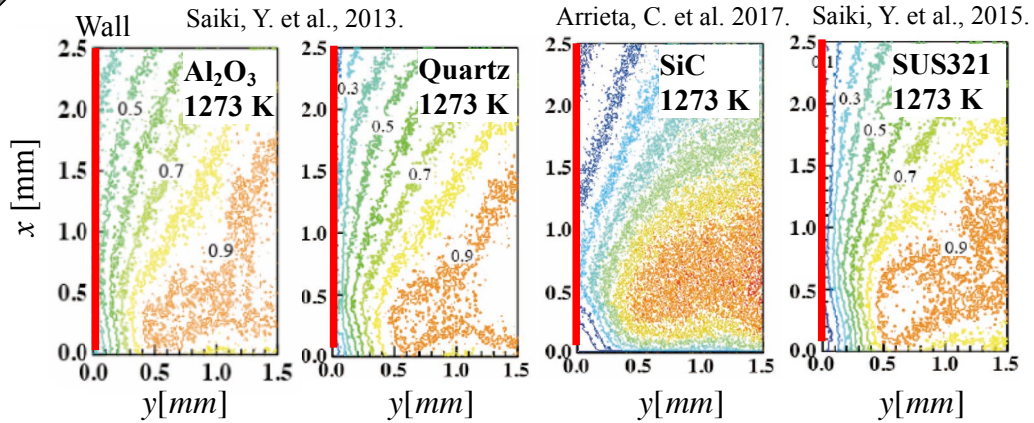
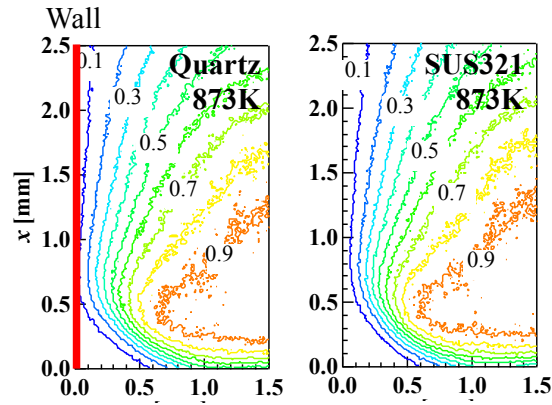
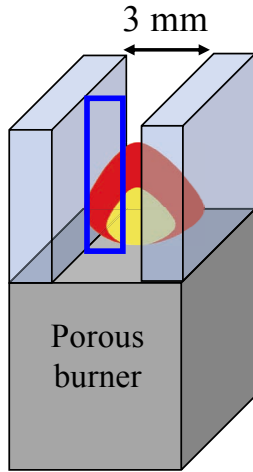
- 化学的消炎 → 排出ガス
- 逆火・誤着火防止
- 耐熱コーティングの減容  
(例：タービン翼)
- ラジカルによる表面改質



## 顕微レーザー誘起蛍光法 (LIF) を用いた壁近傍のラジカル計測



# メタン火炎での壁面の化学的効果 (OH分布)



# メタン火炎における初期吸着係数の推定

## Adsorption

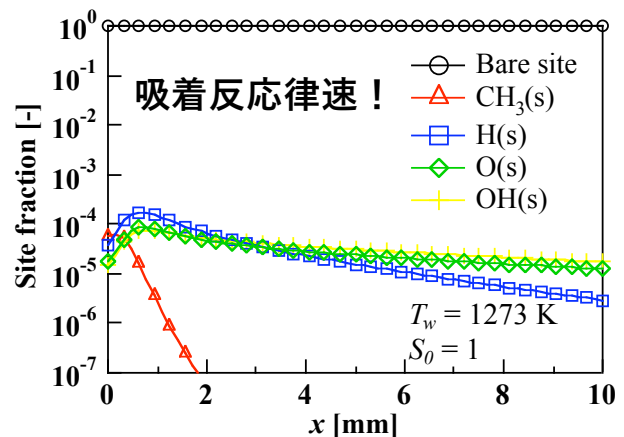
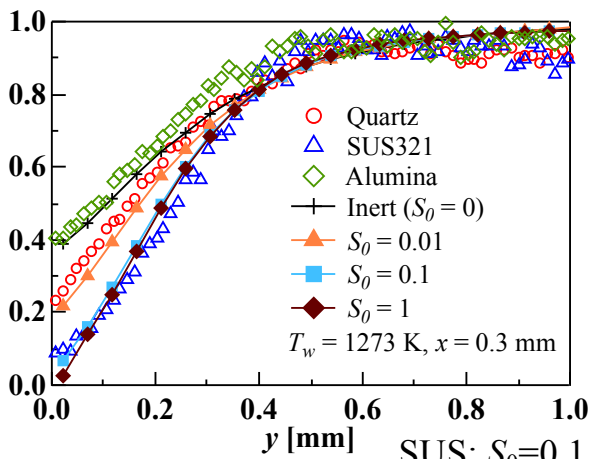
1.  $\text{CH}_3 + \text{B(s)} \rightarrow \text{CH}_3(\text{s})$
2.  $\text{H} + \text{B(s)} \rightarrow \text{H(s)}$
3.  $\text{O} + \text{B(s)} \rightarrow \text{O(s)}$
4.  $\text{OH} + \text{B(s)} \rightarrow \text{OH(s)}$

B(s): bare site

## Recombination & Desorption

5.  $\text{CH}_3(\text{s}) + \text{H(s)} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{B(s)}$
6.  $2\text{CH}_3(\text{s}) \rightarrow \text{C}_2\text{H}_6 + 2\text{B(s)}$
7.  $2\text{H(s)} \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{B(s)}$
8.  $2\text{O(s)} \rightarrow \text{O}_2 + 2\text{B(s)}$
9.  $\text{H(s)} + \text{OH(s)} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + 2\text{B(s)}$
10.  $2\text{OH(s)} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{O(s)} + \text{B(s)}$

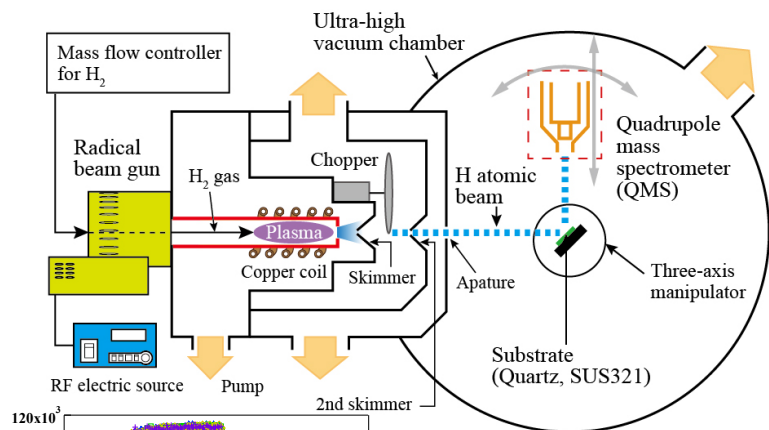
吸着速度 
$$W_a = \frac{P}{\Gamma \cdot \sqrt{2\pi MRT}} \cdot \theta_{B(s)} \cdot S_0$$
 (Raimondeau et al., 2002)



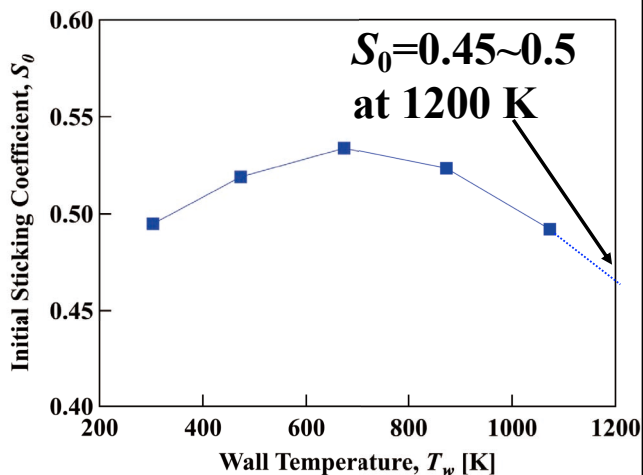
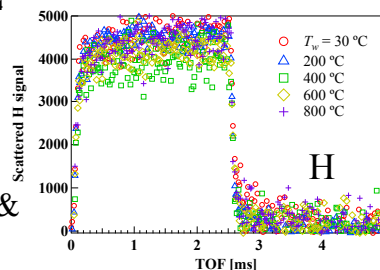
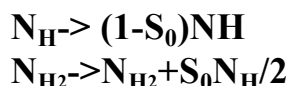
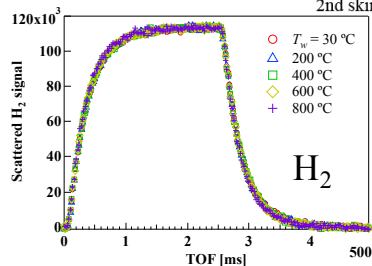
SUS:  $S_0=0.1 - 1$

Saiki, Fan & Suzuki, Combust. Flame (2015)

# 分子ビーム散乱計測を用いた初期吸着係数の直接計測



Pressure of UHV chamber	$\sim 10^{-9}$ Torr
Source gas	H <sub>2</sub> (99.99%)
RF power	250 W
Beam modulation	Square-waved
Ionization efficiency	17 %



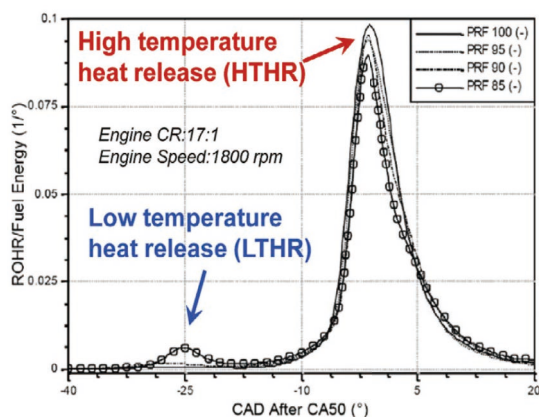
Saiki, Kinefuchi, Fan & Suzuki, ProCI, (2019)

# 冷炎 (Cool Flame)

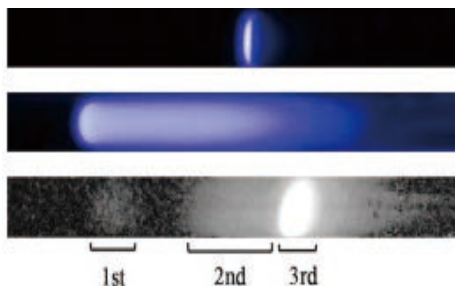
炭素数の多い炭化水素燃料で重要

高温 (>1050 K)

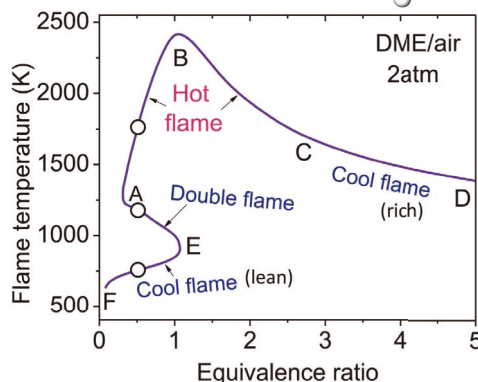
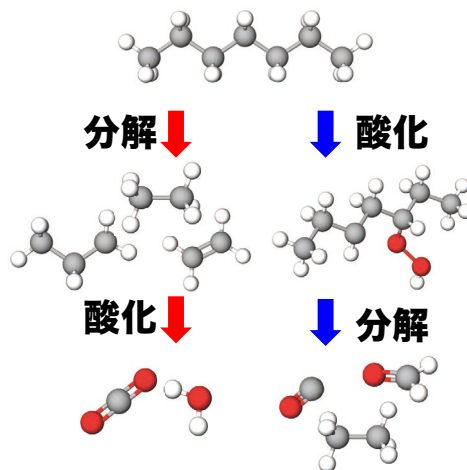
低温 (<700 K)



Dryer et al., ProCI (2015)

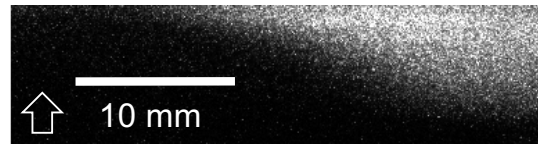
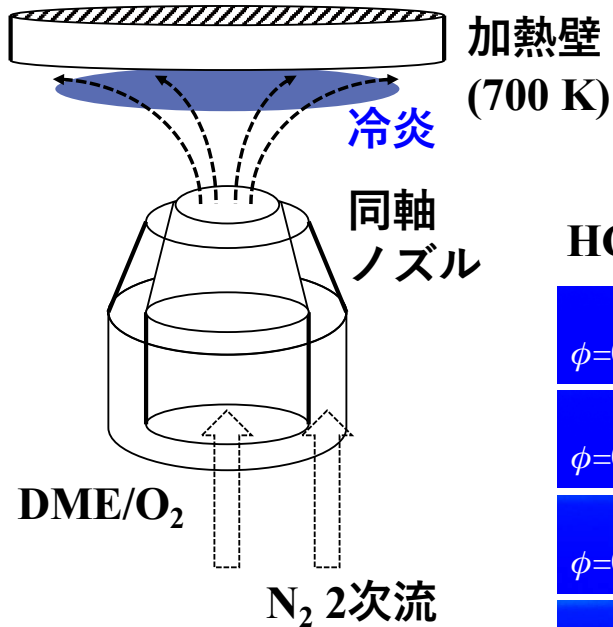


Yamamoto et al. ProCI (2011)

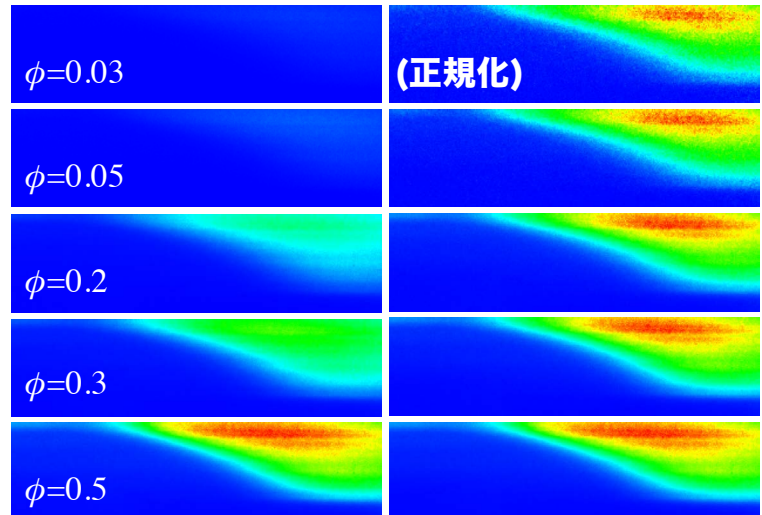


Ju, CNF (2017)

# 壁面で安定化された冷炎



HCHO分布 ( $v_0=50$  cm/s)



Lee, Fan, Reuter, Ju and Suzuki, ProCI, (2019)

## まとめ

- ✓ 低炭素化社会においても、燃焼は極めて重要
- ✓ メインストリームは
  - ✓ 水素燃焼 (低 $\text{NO}_x$ 、逆火防止)
  - ✓ 内燃機関のさらなる効率向上・高制御性
  - ✓ 代替燃料の燃焼メカニズム
- ✓ 材料・製造プロセスへの燃焼応用
- ✓ 燃焼における壁面の化学的効果
  - ✓ 排ガス特性改善
  - ✓ 逆火防止
  - ✓ 表面改質