

# 水素燃焼について

九州大学大学院 工学研究院 機械工学部門  
燃焼科学講座 反応性ガス力学研究室  
北川 敏 明

Tel: 092-802-3148 Email: toshi@mech.kyushu-u.ac.jp

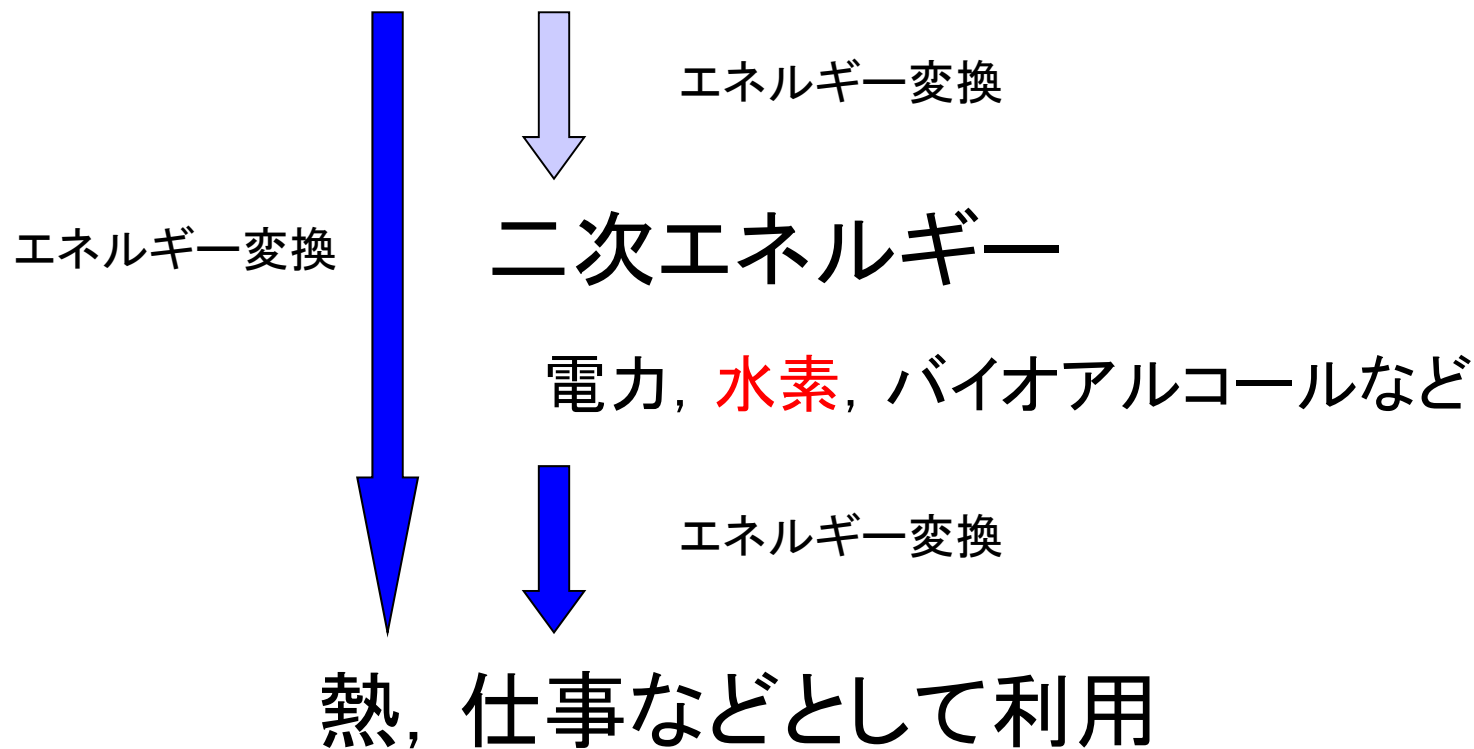
# 水素燃焼について

- エネルギーと水素
  - エネルギー変換と水素, 水素の利用
- 水素および水素燃焼の特徴
- 水素燃焼の研究紹介
  - 層流および乱流火炎
  - 乱流燃焼速度モデル
  - ガスタービンでの天然ガスとの比較
  - 水素添加による燃焼特性の改善
  - 水素火炎の不安定性
  - 水素火炎の消炎特性
- まとめ

# エネルギー変換と水素

## 一次エネルギー

石油, 石炭, 天然ガス, 原子力, 水力, 地熱, 風力, 太陽光, バイオマスなど



水素: 多様なエネルギーより水素を製造し, 貯蔵, 供給, 利用できる.

例: 電気エネルギーや太陽光エネルギーを水素として貯蔵

# 水素エンジン

## 水素エンジン自動車

- ・高圧水素, 液体水素

## 水素ディーゼルエンジン

- ・比熱比の大きい単原子ガスによる熱効率向上, 窒素酸化物排出抑制

## ロケットエンジン

- ・液体水素・液体酸素を推進薬

# 分子拡散

## フィックの法則

$$J = -D \left( \frac{\partial n}{\partial z} \right)$$

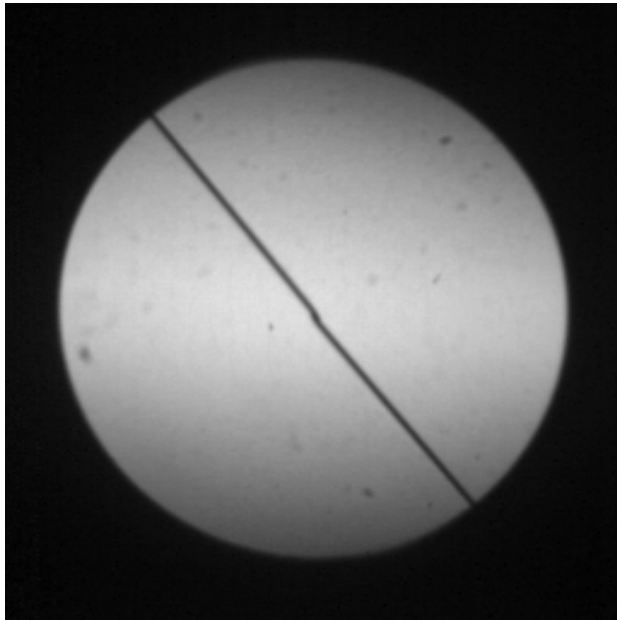
$J$ : 分子拡散輸送量,  $n$ : 濃度

$D$ : 分子拡散係数

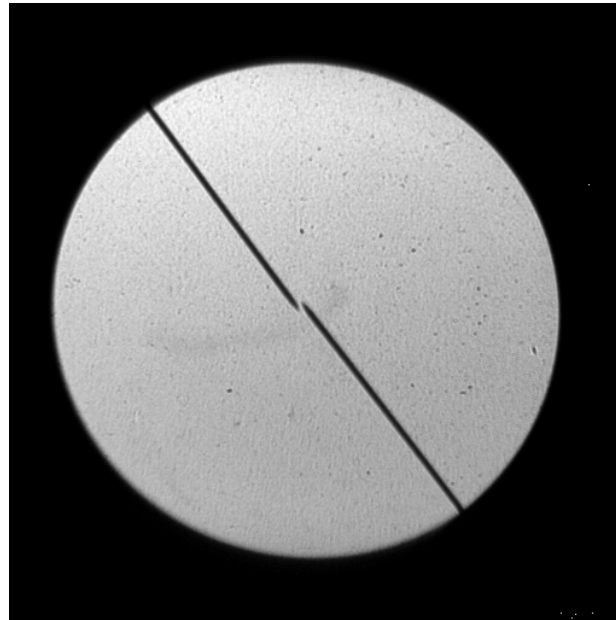
	$D[\text{cm}^2/\text{s}]$
He	1.56
Ne	0.516
Ar	0.178
<b>H<sub>2</sub></b>	<b>1.47</b>
N <sub>2</sub>	0.21
O <sub>2</sub>	0.232
CO <sub>2</sub>	0.113

at 0.1013MPa 298K

# 層流火炎傳播

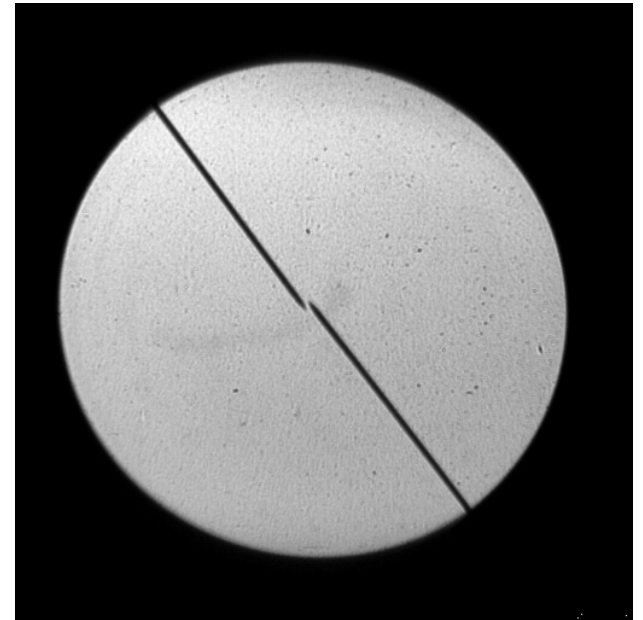


Hydrogen



Methane

0.10MPa,  $\phi=1.0$



Propane

# 水素火炎の特徴

- 層流燃焼速度が大きい
  - 198cm/s (化学当量, 30% of H<sub>2</sub>)  
(cf. 33cm/s for methane)
  - 270cm/s (最大時, 45% of H<sub>2</sub>)

# 水素火炎の特徴

- 可燃範囲が広い 4.0 – 75.0%  
(cf. 5.3 – 15.0% for methane)  
(cf. 2.1 – 9.5% for propane)



# 可燃範圍

希薄

化学当量

過濃

$\phi < 1$

$\phi = 1$

$\phi > 1$

	希薄可燃 限界濃度 %(v/v)	理論濃度 %(v/v)	過濃可燃 限界濃度 %(v/v)
H <sub>2</sub>	4.0	29.6	75
CH <sub>4</sub>	5.0	9.5	15.0
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	2.1	4.0	9.5

水素  $\phi = 0.1 \sim 7$

炭化水素  $\phi = 0.5 \sim 2$

# 水素火炎の特徴

- 必要点火エネルギーが小さい

0.02mJ (cf. 0.33mJ for methane)

- 発熱量が最小, 最大

10.8MJ/m<sup>3</sup> cf. 35.8MJ/m<sup>3</sup> for methane  
91.2MJ/m<sup>3</sup> for propane

120MJ/kg cf. 50MJ/kg for methane

# 水素火炎の特徴

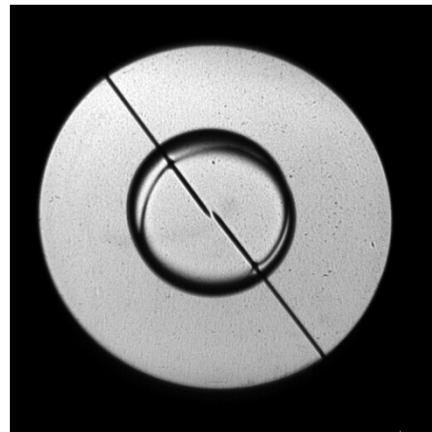
- H, OHラジカルが主な反応  
火炎からの発光が微弱

# 水素火炎の特徴

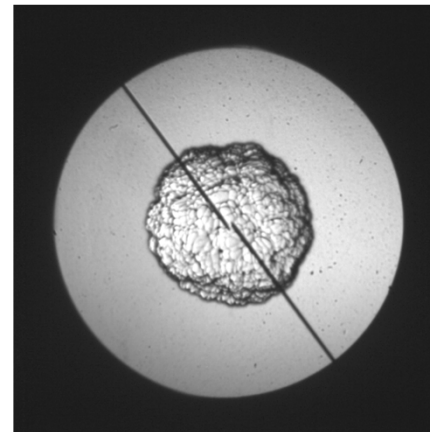
- 熱-拡散効果

Lewis数が小さい

火炎の不安定性



プロパン(安定)

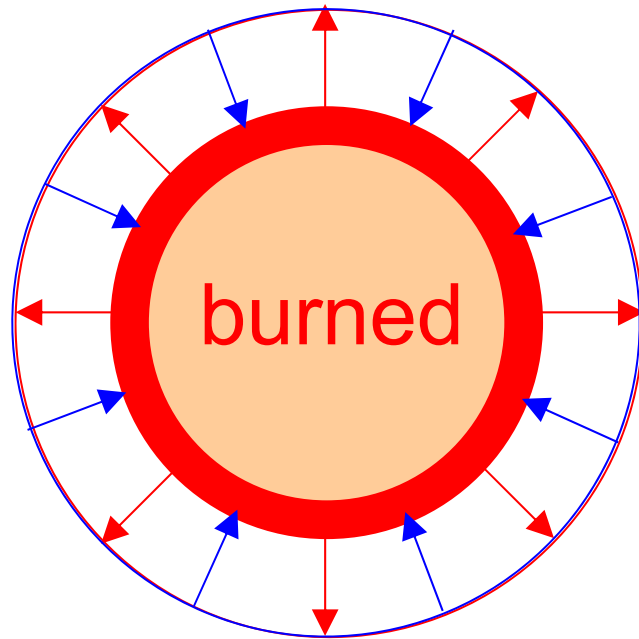


水素(不安定)

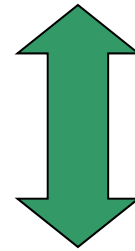
水素火炎の不安定性

# 熱 - 拡散効果

火炎伸長を受けた火炎には、熱 - 拡散効果が作用する。



Thermal diffusion  
to the unburned mixture



It shifts the balance

Molecular diffusion  
into the flame

The thermo-diffusive effects

Thermal diffusivity,  $a$   
Molecular diffusivity,  $D$

change in flame temperature  
burning velocity

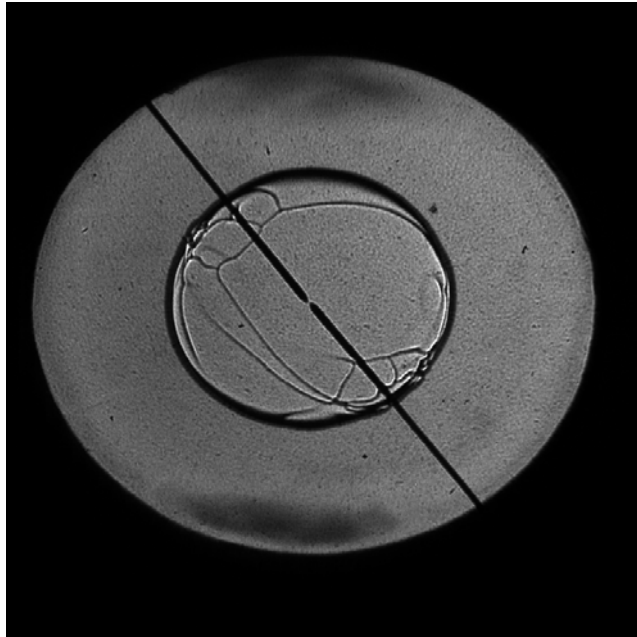


Lewis number,  $Le = \frac{a}{D}$

# Lewis 数

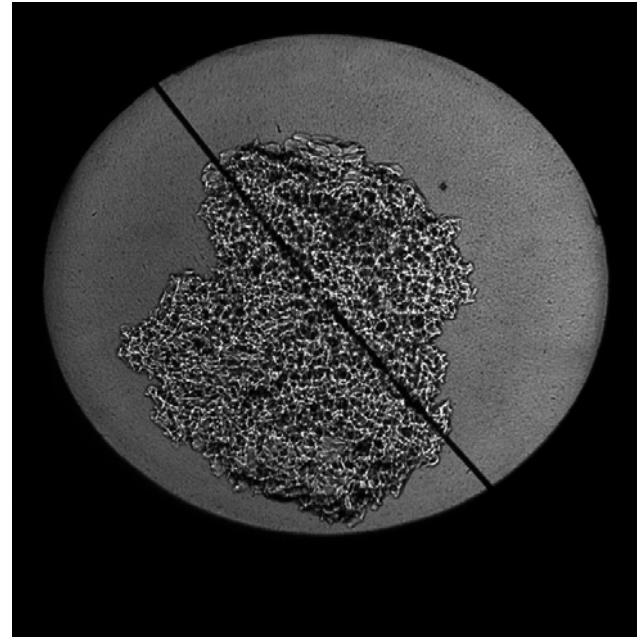
当量比 $\phi$	Lewis Number, $Le$ $Le = \frac{a}{D}$			
	Hydrogen	Methane	Propane	Iso-octane
0.8 (燃料希薄)	0.57	1.01	1.81	3.04
0.9 (燃料希薄)	0.60	1.01	1.79	3.01
1.0 (化学当量)	—	—	—	—
1.1 (燃料過濃)	2.38	1.08	0.97	0.94
1.2 (燃料過濃)	2.47	1.08	0.97	0.93

# 火炎と流れ場



## 層流火炎

燃料に固有な基本的燃焼特性



## 乱流火炎

燃焼器内流動に依存  
乱流燃焼させる実機の性能に  
直接結びつく

# 水素を含む合成ガスの乱流燃焼速度モデル

エンジン, ガスタービンの性能, 設計に影響する乱流燃焼速度モデルを開発.

乱流燃焼速度を決定する主因子

- 火炎面積の増大
- 局所燃焼速度の変化

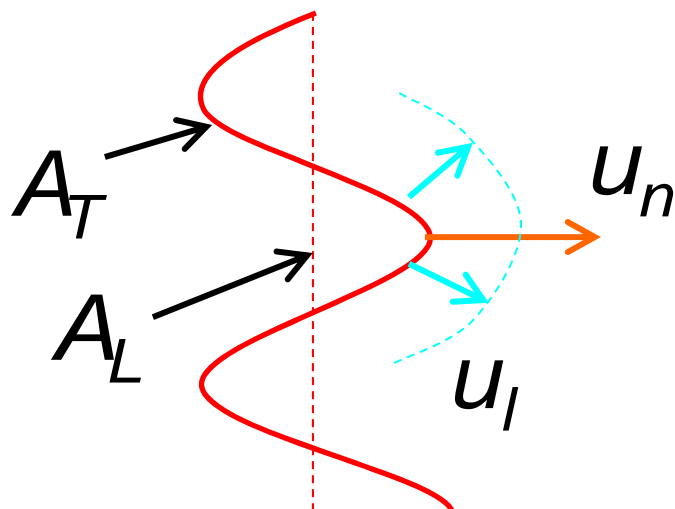
$$\frac{u_{tn}}{u_l} = \frac{A_T}{A_L} \cdot \frac{u_n}{u_l}$$

火炎面積の増大

局所燃焼速度の変化

火炎の断層写真撮影により解析

Lewis数により推定

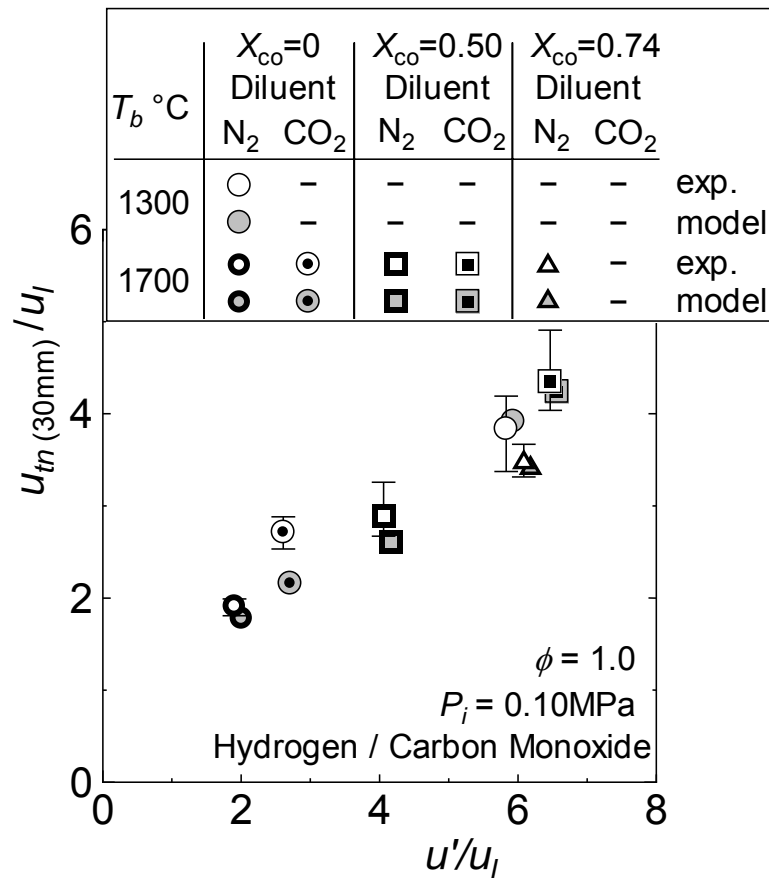


$A_T$ : 乱流火炎面積  
 $A_L$ : 層流火炎面積  
 $u_n$ : 局所燃焼速度  
 $u_l$ : 層流燃焼速度  
 $Ka$ : 乱流Karlovitz数





# 水素を含む合成ガスの乱流燃焼速度モデル\*



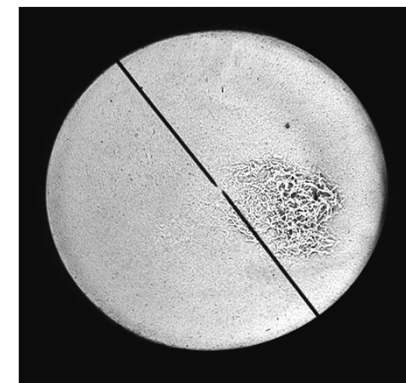
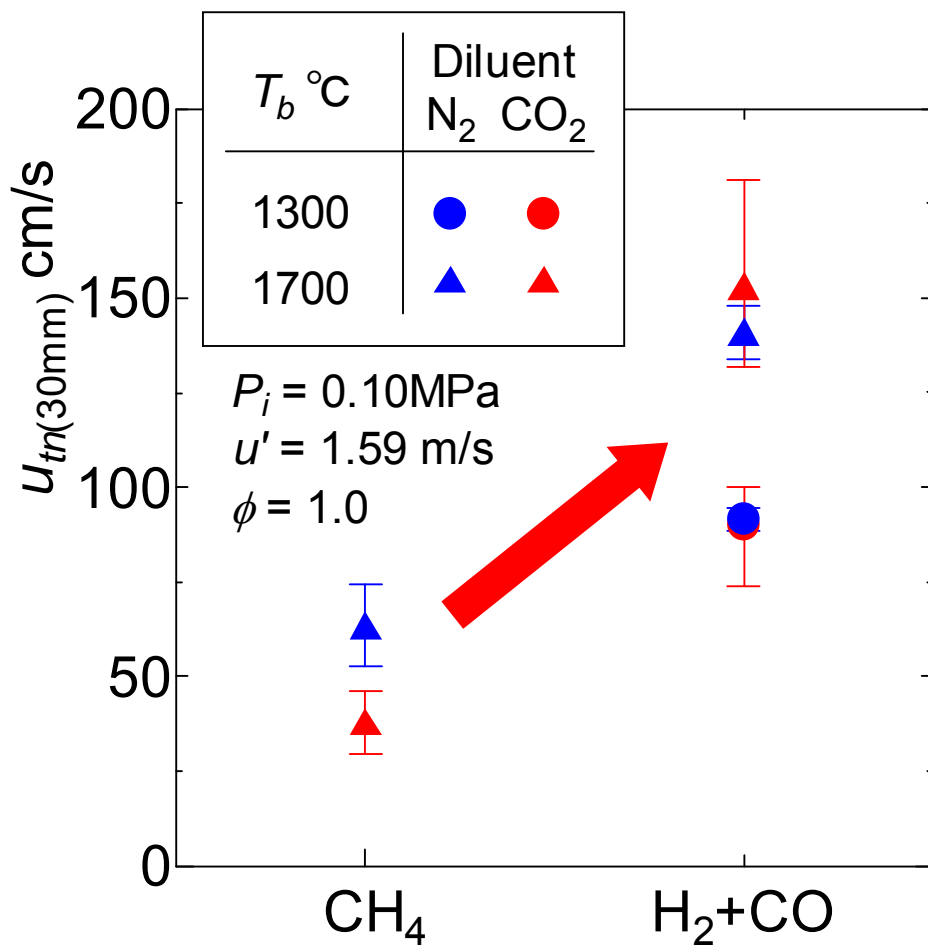
$$\frac{U_{tn(30mm)}}{u_l} = \left( 1 + 0.428 \frac{u'}{u_l} \right) (1 - 0.353 Ka \cdot Ma)$$

↑  
火炎面積の増大

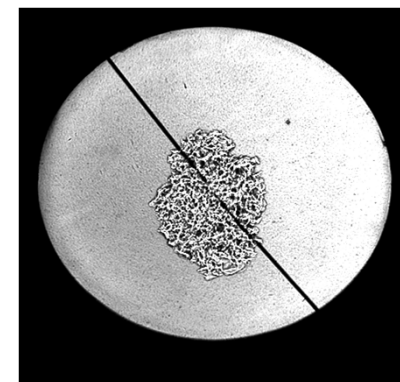
↑  
局所燃焼速度の変化

\*永野幸秀, 泊圭一郎, 鶴留裕之, 津田晃弘, 北川敏明, 第22回日本エネルギー学会大会, 222, (2013).

# ガスタービンの燃焼制限温度での天然ガスと水素を含む合成ガスの燃焼特性の比較\*\*



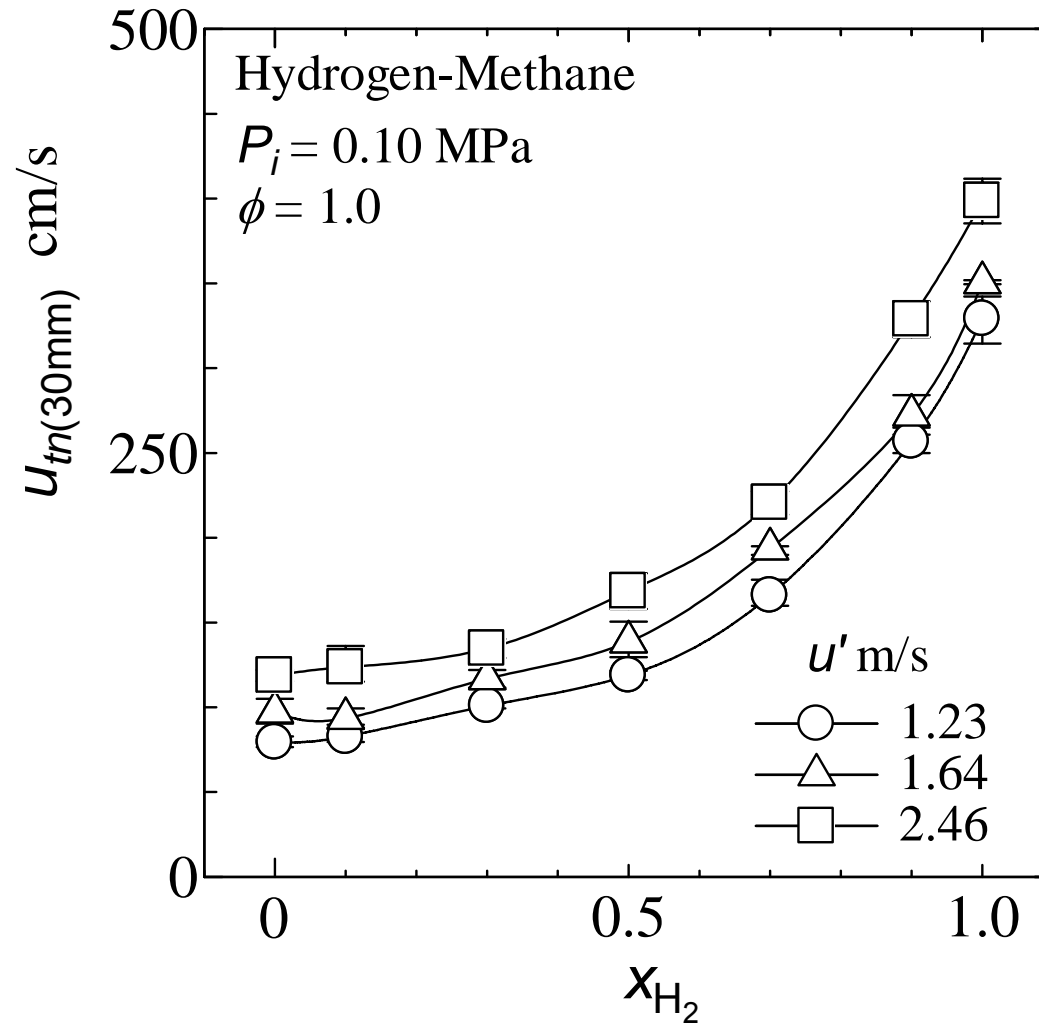
CH<sub>4</sub> Flame



H<sub>2</sub>/CO Flame

\*\*永野幸秀, 竹尾友宏, 泊圭一郎, 鶴留裕之, 北川敏明, 第17回動力・エネルギー技術シンポジウム講演論文集, 403, (2012).

# 天然ガスへの水素添加による燃焼特性の改善\*\*\*



$$X_{H_2} = \frac{n_{H_2}}{n_{H_2} + n_{CH_4}}$$

\*\*\*Ekenechukwu C. Okafor, Yukihide Nagano, Toshiaki Kitagawa, SAE/KSAE 2013 International Powertrains Fuels & Lubricants Meeting, 2013-01-2563, (2013).

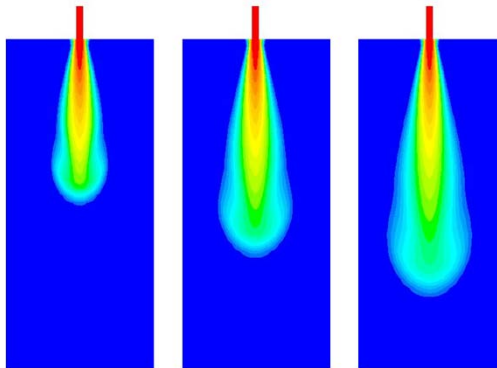
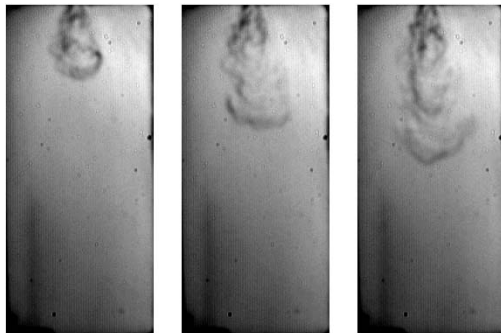
# 水素非定常噴流の燃焼について\*\*\*\*

水素直噴式のエンジン, ガスタービン

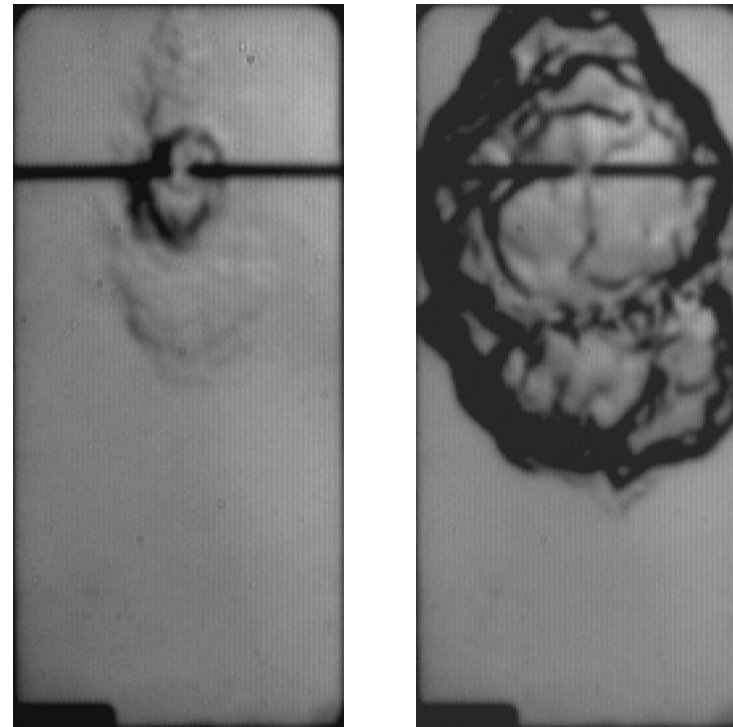
水素漏洩時



水素噴流の燃焼特性を明らかにした.



水素噴流とその数値解析



水素噴流内の火炎伝播

\*\*\*\*Toshiaki Kitagawa, et al., International Journal of Hydrogen Energy, Vol.30, Issues 13-14, pp. 1457, (2005).

# 球状伝播水素火炎の不安定性

1ms

2ms

3ms

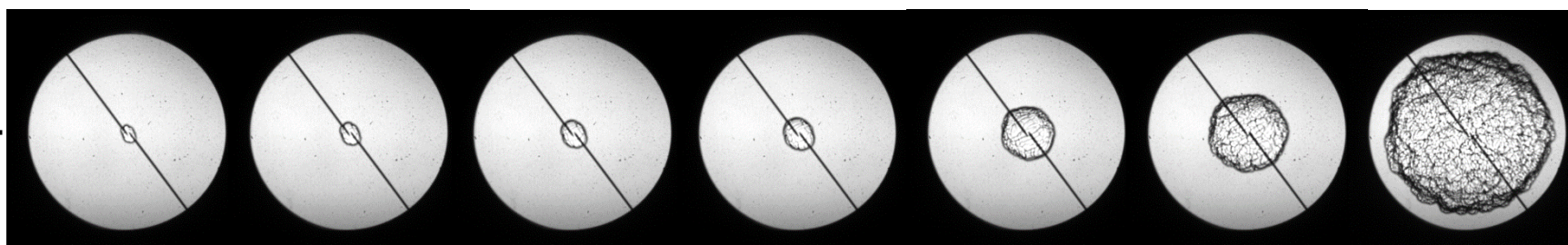
4ms

8ms

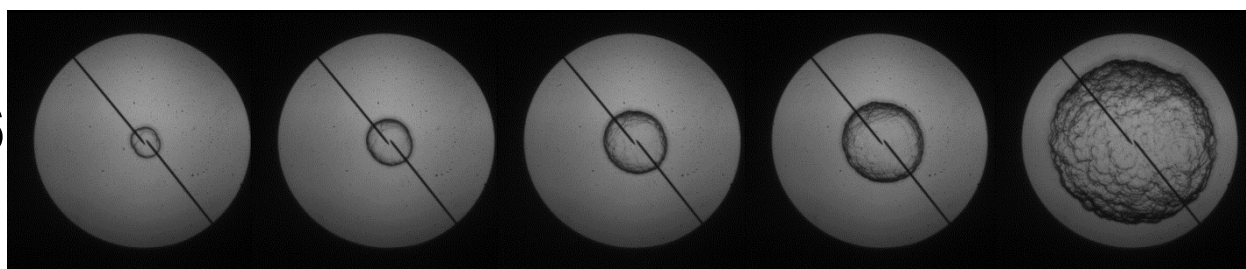
12ms

24ms

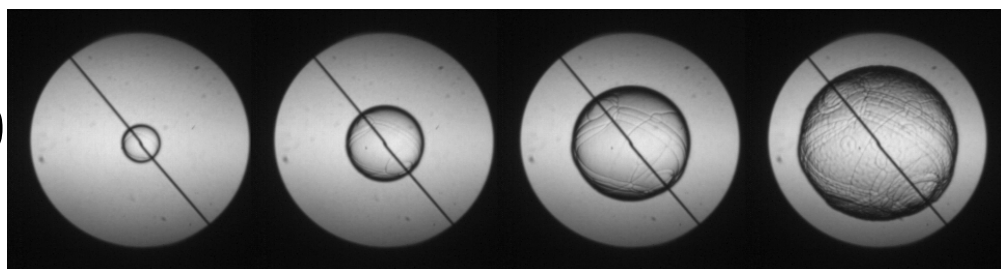
$\phi=0.4$



$\phi=0.6$

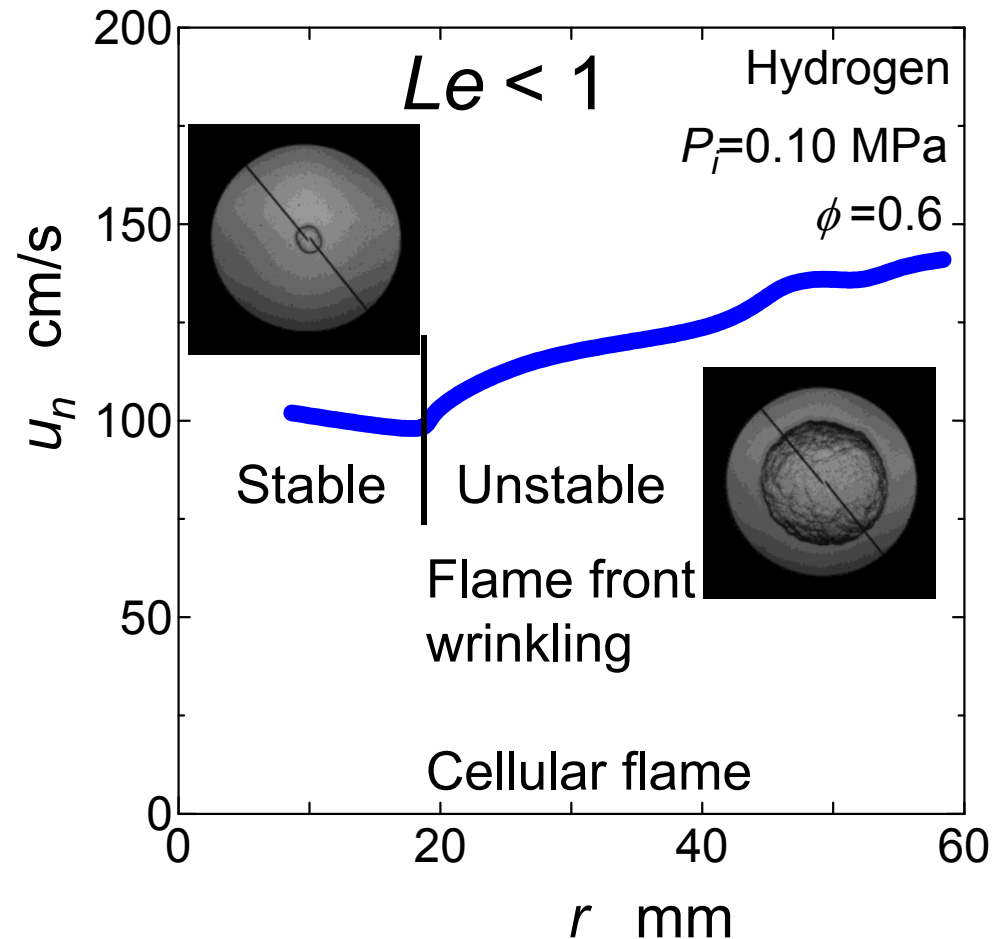


$\phi=1.0$



Hydrogen, 0.10MPa, Laminar

# 伝播中の層流火炎の燃焼速度変化\*\*\*\*\*



水素爆発時の火炎伝播速度は水素火炎の強い不安定性に支配されている。

\*\*\*\*\* Andrew Smallbone, Toshiaki Kitagawa, Transactions of Society of Automotive Engineers of Japan, Vol.37, No.6, pp.155-160., (2006).

# 水素火炎の消炎

火炎伝播の阻止

火炎伸長率,  $\alpha$

$$\alpha = \frac{1}{A} \frac{dA}{dt} = \frac{2}{r_{sch}} \frac{dr_{sch}}{dt} = \frac{2}{r_{sch}} S_n$$

$\alpha$ : 火炎伸長率 1/s

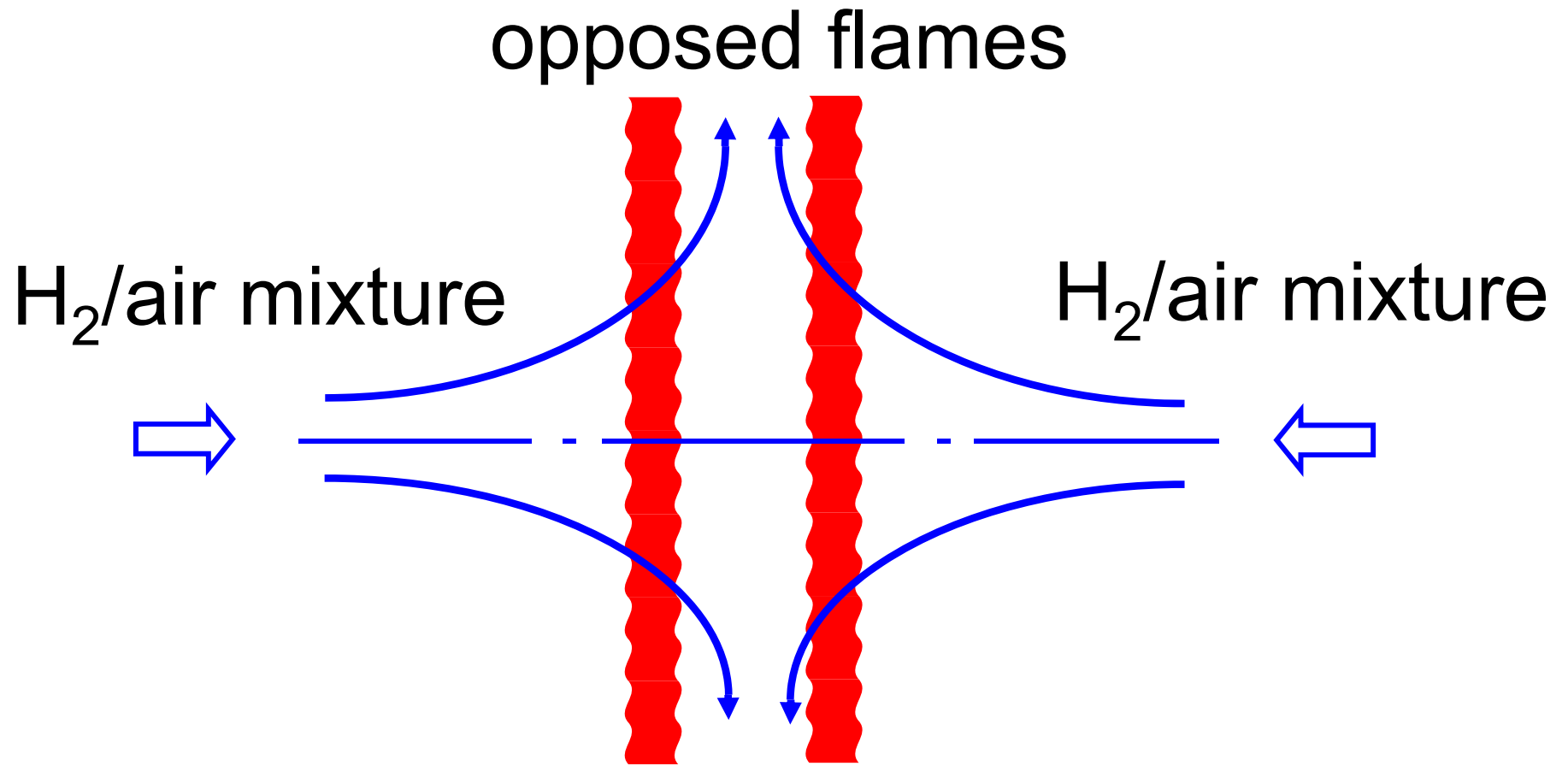
$A$ : 火炎面積  $m^2$

$r$ : 火炎半径(球状火炎の場合) m

$t$ : 時間 s

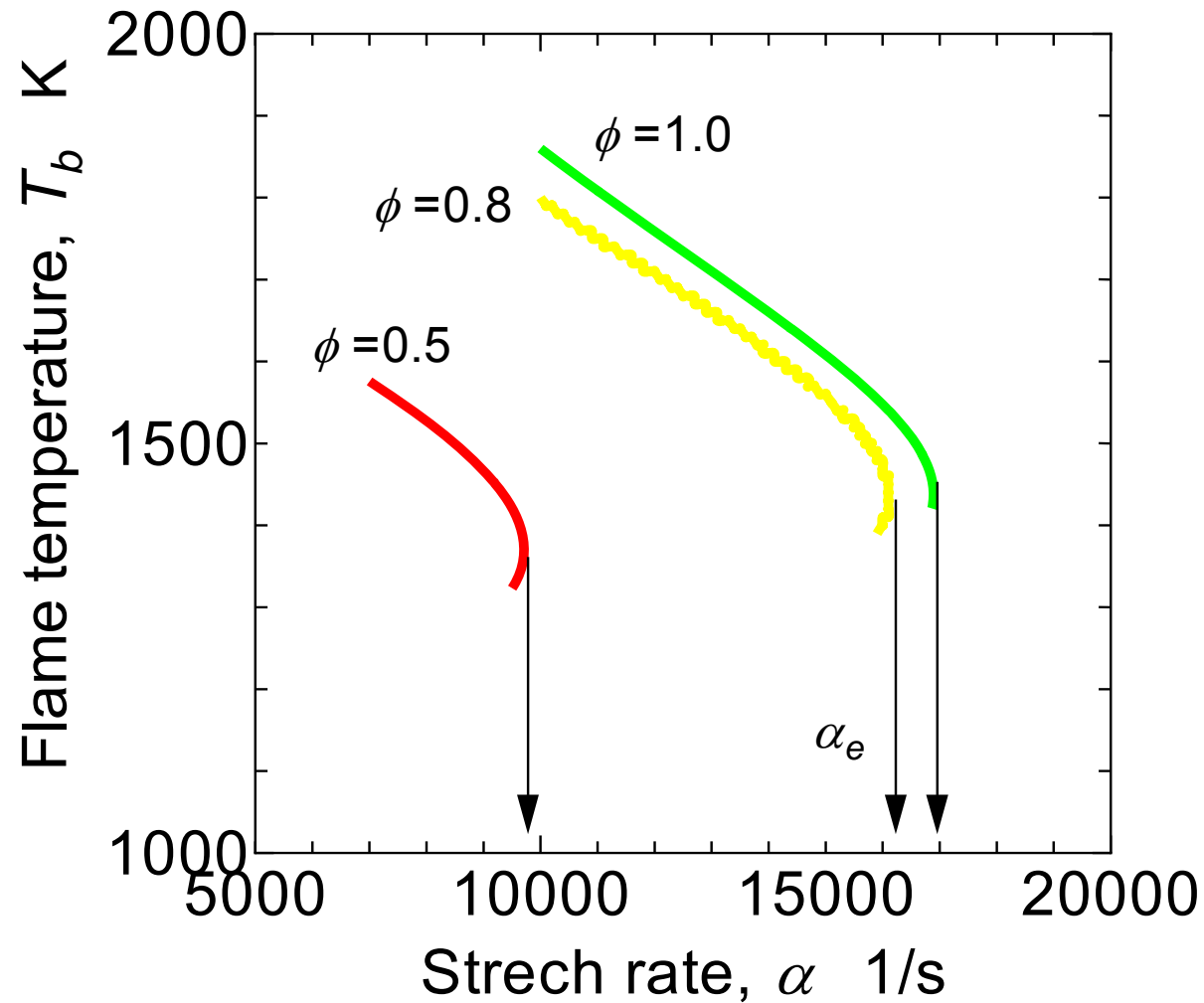
$S_n$ : 火炎伝播速度(球状火炎の場合) m/s

# 对向流予混合火炎





# 対向流予混合水素火炎の消炎\*\*\*\*\*



\*\*\*\*\*北川敏明,永野幸秀,平成23年度「産学官地域連携による水素社会実証研究」報告(2012).

# 予混合水素火炎の消炎のメカニズム

流れ場のひずみ



火炎伸長



熱-拡散効果 / 化学反応未完結



火炎温度の低下



化学反応速度の低下



火炎の消炎

まとめ

Each manner for each fuel!