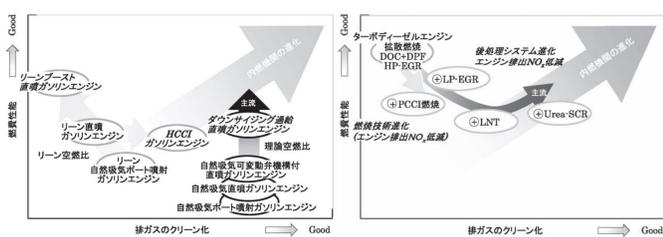


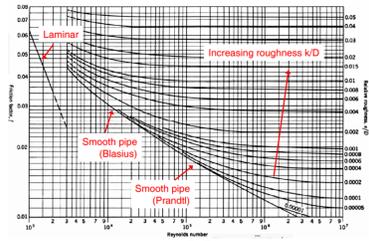
# 可燃性予混合気の熱面発火における金属表面粗さの影響

## 背景

近年、内燃機関はダウンサイジング化が求められており、それに伴い異常燃焼が発生し易い環境になっている<sup>[1]</sup>。



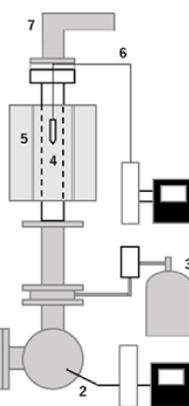
表面形状が流れに及ぼす影響は無視できないためmoody線図といった円管内の摩擦損失係数、レイノルズ数、相対粗度を関連性を調査した実験結果が得られている<sup>[2]</sup>。  
しかし平板上における低レイノルズ数の流れで表面形状が速度境界層にどのように影響し発火に至るかを調査する研究は確認されていない。



本研究では、低レイノルズ数域の流れ場に対し粗さが速度境界層に影響を及ぼす熱面を使用し、発火温度特性が変化するメカニズムの解明を目的とする。

## 実験装置と試料熱面

- Hot air generator
- Thermocouple for premixed air
- Propane cylinder
- Metal plate
- Heating system
- Thermocouple for a metal plate
- Exhauster



Experimental conditions	Value
Premixed gas velocity $u_g$ [m/s]	0.30-0.45
Premixed gas temperature $T$ [°C]	263
fuel	Propane-air
Equivalence ratio $\phi$ [-]	0.4-1.5

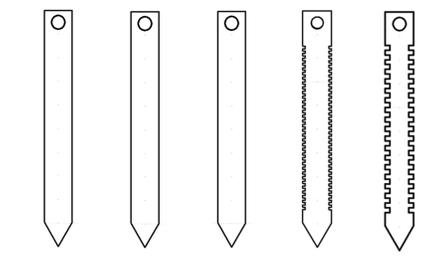
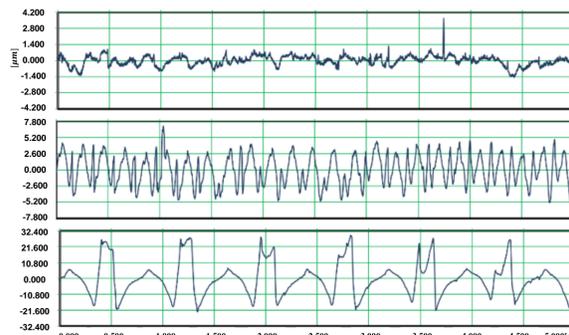
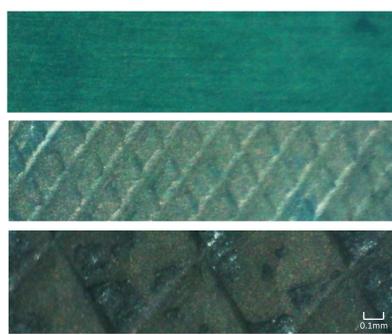
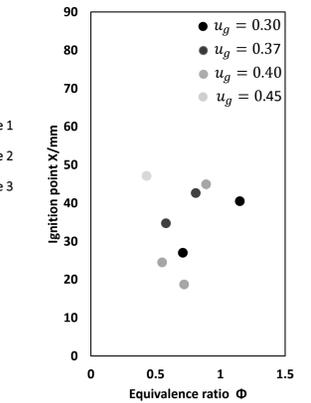
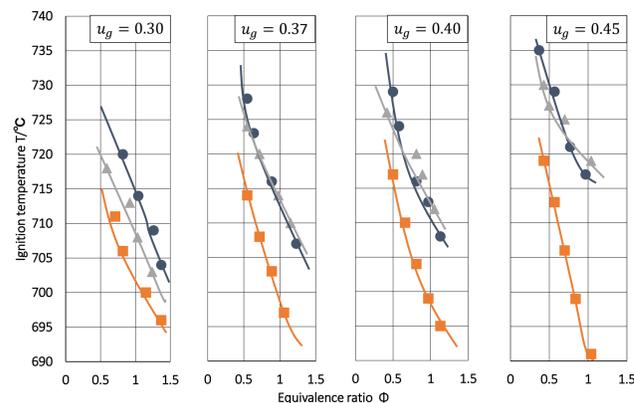


Table 6 Surface 1-5 details and experimental conditions

	Surface 1	Surface 2	Surface 3	Surface 4	Surface 5
Processing method	Surface grinding	Milling	Milling	Electric discharging	Electric discharging
Arithmetic mean roughness [ $\mu\text{m}$ ]	0.28	1.55	8.32	-	-
Surface shape [mm × mm]	-	-	-	1.0 × 1.0	2.0 × 2.0

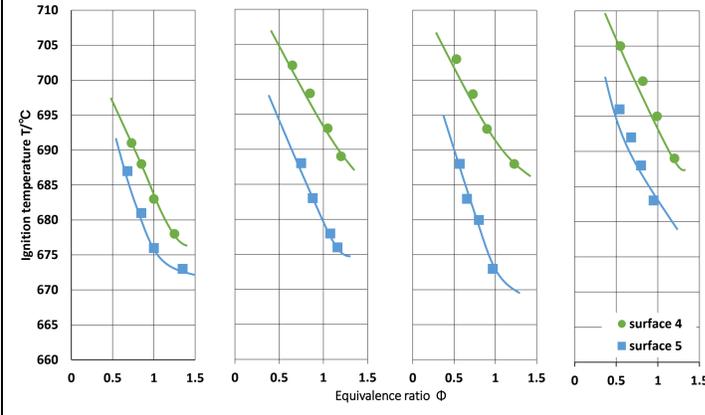


## 熱面形状に対する発火温度の変化①



- 予混合気の流れに関わらず当量比が大きくなるにつれて発火温度は低下
- surface 1,2の発火温度は予混合気流速が大きくなるにつれて発火温度が上昇、つまり発火しにくい
- 予混合気の流れに関わらずsurface 1,2の発火温度は同様の値をとった
- surface 3の発火温度はsurface 1,2よりも低く発火し易いと言える
- 金属面の形状が予混合気に熱伝達する時間を増加させると考える
- イオンプローブを用いた発火位置の特定により熱面近傍で発火を確認

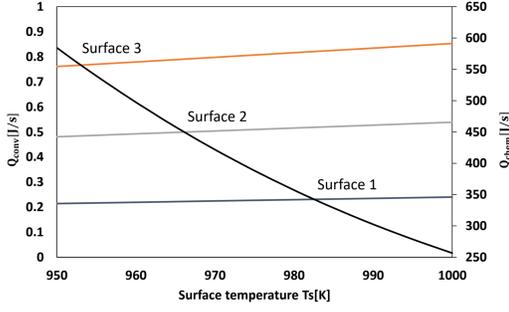
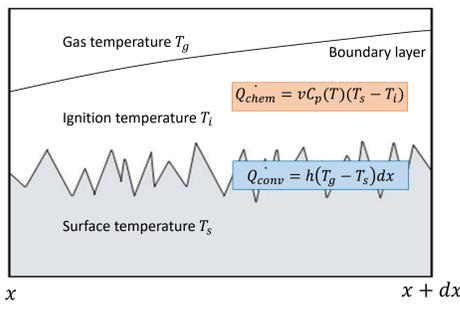
## 熱面形状に対する発火温度の変化②



- 表面粗さを施した熱面の発火実験と同様に当量比が大きくなると発火し易くなる
- 予混合気の流れが大きくなると発火しにくくなるという傾向がみられる
- 発火温度については1.0mm矩形溝のほうが2.0mm矩形溝よりも発火しにくい
- 予混合気の流れが小さくなるにつれて発火温度の差が小さくなるのは表面粗さを施した熱面の発火実験と同様な傾向である
- 粗さが最も小さいsurface 1とは約20-40°C程度も発火温度に差がある

## 伝熱から発火に至るまでのモデル化

高温な平板から熱伝達により受け取る熱量を  $Q_{conv}$   
予混合気が発火に至るまでに必要な熱量を  $Q_{chem}$   
 $Q_{conv} \geq Q_{chem}$  が成立するとき発火すると仮定

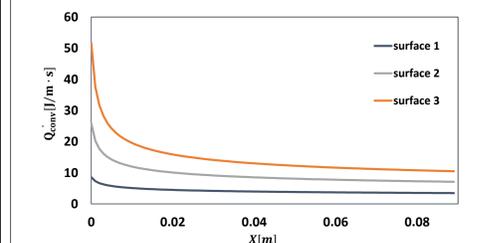


### $Q_{conv}$ の考察

$$dQ_{conv} [J/m \cdot s] = h(T_s - T_g) dx$$

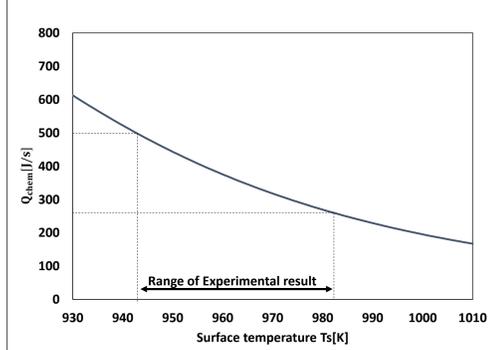
・  $h$  の算出  
平板における強制対流の局所抵抗係数  $c_{fx}$ <sup>[3]</sup>  
 $c_{fx} = (2.87 + 1.58 \ln \frac{x}{k_s})^{-2.5}$  ( $10^2 < l/k_s < 10^6$ )  
コルバートのアナロジーが成立  
 $Nu_x = \frac{1}{2} c_{fx} Re_x Pr^{1/3}$  ( $0.7 < Pr < 1000$ )  
上の2式より  
 $Nu_x = \frac{1}{2} (2.87 + 1.58 \ln \frac{x}{k_s})^{-2.5} Re_x Pr^{1/3} = \frac{h x}{k}$   
局所熱伝達率  $h$  は  $x$  の関数で表せる  
 $dQ_{conv} = (2.87 + 1.58 \ln \frac{x}{k_s})^{-2.5} Pr^{1/3} \frac{k U_{\infty}}{\nu} (T_s - T_g) dx$  ..... (I)

- $k_s$ : 相対粗度
- $Re_x$ : 局所レイノルズ数
- $Pr$ : プラントル数
- $h$ : 局所熱伝達率
- $k$ : 予混合気の熱伝導率
- $U_{\infty}$ : 主流流速
- $\nu$ : 気体の動粘度
- $T_g$ : 予混合気温度
- $T_s$ : 熱面温度

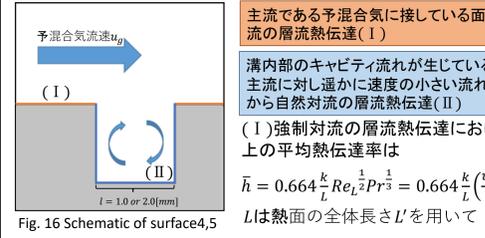


### $Q_{chem}$ の考察

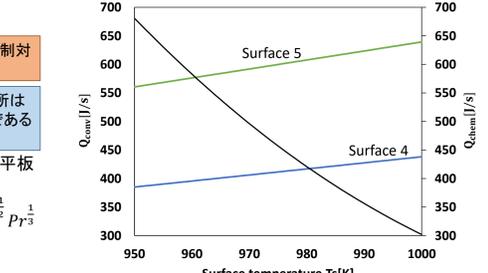
$n$  [mol] の  $C_3H_8$  が発火温度まで  $\Delta T$  増加するとき必要な熱量は  
 $Q_{chem} [J] = m C_p \Delta T = n C_3H_8 C_p' \Delta T$   
 $C_p'(T_e)$  は  $C_p'(T_e) = a_0 + a_1 T_e + a_2 T_e^2 + a_3 T_e^3$  と表す  
 $T_e = (T_g + T_i)/2$  で定義した膜温度、係数  $a_0, \dots, a_3$  は文献値<sup>[4]</sup>  
・ 発火したときの熱面温度  $T_s$  を変数とした  
・ 予混合気が発火したときの温度  $T_i$  は定数とした



### mmオーダーの熱面における熱伝達のモデル化



(I) 強制対流の層流熱伝達における平板上の平均熱伝達率は  
 $\bar{h} = 0.664 \frac{k}{L} Re_L^{1/2} Pr^{1/3} = 0.664 \frac{k}{L} (\frac{u_g L}{\nu})^{1/2} Pr^{1/3}$   
 $L$  は熱面の全体長さ  $L'$  を用いて  
 $L = \begin{cases} L' - 1[\text{mm}] \times 35[\text{個}] & (\text{surface 4}) \\ L' - 2[\text{mm}] \times 18[\text{個}] & (\text{surface 5}) \end{cases}$   
(II) 一つの溝に対し3面から自然対流の層流熱伝達による熱の授受がある層流熱伝達の平均ヌセルト数、レイリー数は  
 $\bar{Nu}_l = \frac{\bar{h} l}{k} = 0.80 Ra_{dg}^{1/4} \left( \frac{Pr}{1 + 2.005 \sqrt{Pr} + 2.033 Pr} \right)^{1/4} Ra_l = \frac{g \beta (T_s - T_g) l^3}{\nu^2} Pr$   
ここで  $l$  は  
 $l = \begin{cases} 1.0[\text{mm}] & (\text{surface 4}) \\ 2.0[\text{mm}] & (\text{surface 5}) \end{cases}$   
 $l$ : 溝の辺長さ  $g$ : 重力加速度  
 $\nu$ : 気体の動粘度  $\beta$ : 体膨張係数



- 矩形溝の辺の長さを大きくさせると平板から熱伝達により受け取る熱量は大きくなり発火温度が低くなる事が確認できた
- また平板から熱伝達により受け取る熱量が  $\mu\text{m}$  オーダーの表面粗さよりも顕著に大きくなっている

## 結論

- 実験  
・ mmオーダーの熱面の形状に留まらず、 $\mu\text{m}$ オーダーの表面粗さでも発火特性に差異が見られるが相対粗度が小さくなれば影響が出なくなる
- 考察  
・ 予混合気が発火に至るまでに必要な熱量に対し、予混合気の流れ、表面粗さがどの程度影響するのかを式 (I) によって確認した  
・  $10^2 < l/k_s < 10^6$  の相対粗さの上限は、表面粗さが発火温度に与える影響を無視できる範囲であると考えられる

[1] 安井 裕司, エンジン制御の最新動向 53 (8) : 659-668 (2014)  
[2] Moody, L. F. (1944). Friction factors for pipe flow. Transactions of the ASME 66 (8): 671-684  
[3] Schlichting, H. (1979). boundary layer theory, 7th ed.  
[4] R. C. Reid, J. M. Prausnitz and B. E. Poling. The Properties of Gases and Liquids, 4th ed. (1987)