



名古屋大学最終講義
2015年3月6日
工学研究科2号館241講義室

教職員学生と歩んだ 伝熱・燃烧研究の38年

名古屋大学大学院 工学研究科
機械理工学専攻 機械科学分野
山下 博史

教職員学生と歩んだ伝熱・燃烧研究の38年

＜＜ 塑性力学 ＞＞ 学部4年・修士課程の時代 1971年4月～1974年3月

機械学科 材料力学講座

大橋義夫先生，川嶋紘一郎先生，徳田正孝先生

＜＜ 伝熱工学1 ＞＞ 博士課程・助手の時代 1974年4月～1979年3月

機械工学第二学科 内燃機関及びガスタービン講座

泉亮太郎先生，山口誉起先生，加賀定先生，木下祥次先生
大岩紀生先生，高橋俊夫技官

＜＜ 伝熱工学2 ＞＞ 講師・助教授時代 1979年4月～1988年3月

泉亮太郎先生，加賀定先生，櫛田玄一郎助手，早川正人技官

(高浜平七郎先生，藤田秀臣先生，河村鈞先生，藤城明男技官，西村新璽技官)

＜＜ 燃烧工学1 ＞＞ 助教授時代 1988年4月～1998年3月

機械工学科 機械エネルギー工学講座 → 機械情報システム工学科 環境情報システム講座

竹野忠夫先生，櫛田玄一郎講師，西岡牧人助手，早川正人技官

＜＜ 燃烧工学2 ＞＞ 教授時代 1998年4月～2004年3月

機械情報システム工学科 ヒューマンシステム工学講座 → 環境情報システム講座

趙黛青講師，中村祐二助手，早川正人技官，(新井紀男教授)

＜＜ 燃烧工学3 ＞＞ 教授時代 2004年4月～現在

機械理工学専攻 機械科学分野 環境・エネルギー工学講座 伝熱・燃烧工学研究グループ²

山本和弘准教授，林直樹助教，早川正人技術職員

学部4年・修士課程の時代

<< 塑性力学 >> 学部4年・修士課程の時代 1971年4月～1974年3月

機械学科 材料力学講座

大橋義夫先生，川嶋紘一郎先生，徳田正孝先生

- ・ 単純負荷により予ひずみを受けた軟鋼の降伏面と応力-ひずみ曲線：
山下博史(1972 卒業論文)
- ・ 塑性変形に対する偏差ひずみテンソルの第三不変量とひずみ経路の曲率の影響
山下博史(1974 修士論文)

固体の塑性力学 → 流体の伝熱工学

教職員学生と歩んだ伝熱研究(1)

<< 伝熱工学1 >> 博士課程・助手の時代 1974年4月～1979年3月

機械工学第二学科 内燃機関及びガスタービン講座

泉亮太郎先生, 山口誉起先生, 加賀定先生, 木下祥次先生
大岩紀生先生, 高橋俊夫技官

・ 直交流形熱交換器の伝熱性能向上に関する研究 :

山下博史(1978 博士論文), 伊藤浩一(1975卒)

1977年 4月 山下 助手 採用

・ 対向噴流火炎に関する研究 :

沢田和徳(1974修), 山田敏雄(1974卒), 伊藤昇平(1975卒),

飯尾博孝(1977修), 徳長幹恵(1979修), 河崎清宣(1981修), 舟橋眞(1982修)

・ 油冷却器の熱伝達 : 花房眞(1975修), 浅野一彦(1977修)

・ 冷媒の管内凝縮熱伝達 :

小沢通曜(1975修), 小椋健二(1976修), 川戸文郎(1977修), 稲生幸嗣(1978修)

・ 回転平板の物質移動に関する研究 : 児玉敏雄(1976修), 原直人(1978修)

教職員学生と歩んだ伝熱研究(1)

・直交流形熱交換器の伝熱性能向上に関する研究

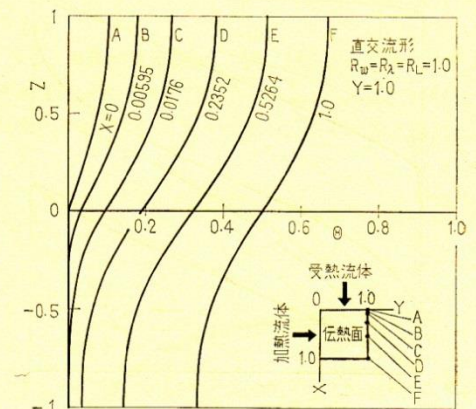
山下博史(1978 博士論文)

第1章 緒 論

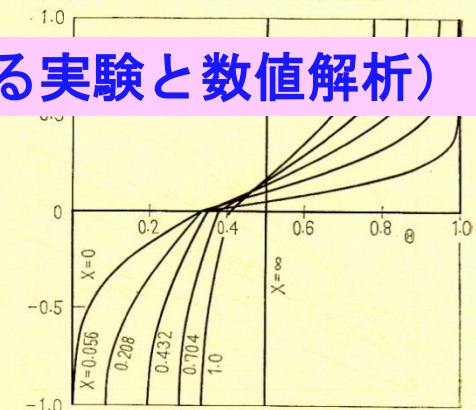
熱交換器は蒸気原動機を始め、火力発電所におけるボイラやそれに付属する装置、および各種の化学工業における熱交換装置など、工業上重要な機器であり、その性能向上に関する研究は各分野において強く要望されている。また、石油資

熱機器のシステム → 熱流体の物理現象（伝熱に関する実験と数値解析）

課題となっている新資源の開発および省エネルギー対策においても、広範囲で使用できる熱交換器の開発と性能向上が期待されている。たとえば、前者においては原子力発電の利用、太陽熱、海洋熱および地熱等の低密度あるいは小温度差エネルギーの有効利用、後者においてはあらゆるシステムの熱効率の改善、工場および空調排熱の回収などのための熱交換器の問題などがある。(1)



(a) 直交流形



(b) 並流形, $R_2=0.25$

図2 伝熱面に垂直な方向の温度分布

教職員学生と歩んだ伝熱研究(2)

<< 伝熱工学2 >> 講師・助教授時代 1979年4月～1988年3月

泉亮太郎先生, 加賀定先生, 櫛田玄一郎助手, 早川正人技官
(高浜平七郎先生, 藤田秀臣先生, 河村鈞先生, 藤城明男技官, 西村新璽技官)

1981年 4月 早川正人 技官 着任
1982年 4月 櫛田玄一郎 助手 着任

・ 固気混相流による伝熱促進, 流動層形熱交換器の研究 :

杉山邦生(1978修), 阿部眞一(1981修), 石丸明(1981卒),
牧田和久(1983修), 梶川吉治(1982卒), 伊藤登喜司(1984修),
山本敏博(1985修), 松本守聡(1986修)

・ ふく射フィンの解析 : 橋本英樹(1979修)

・ コンパクト形熱交換器の研究 : 野々村浩司(1980修)

・ 波形流路内の流動および熱伝達 :

布施博章(1978卒), 森伸雄(1980修), 平沢一範(1982修), 板倉正人(1981卒),
宮嶋則義(1982修), 親川兼勇(1982 博士論文),

・ 非円形断面直管内における流動および熱伝達に関する研究 :

青木昇(1983卒), 牧幹人(1983修)

教職員学生と歩んだ伝熱研究(2)

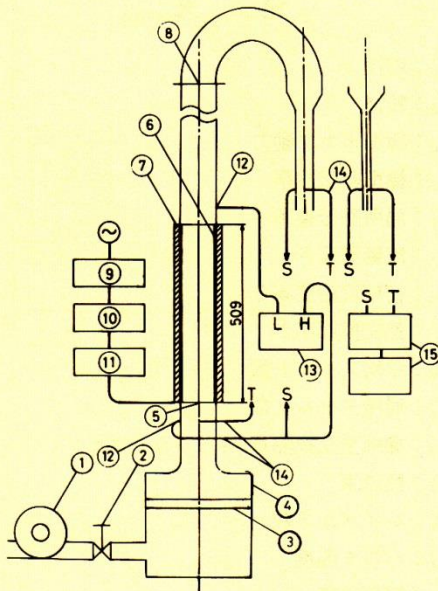
- ・ 回転かき取り形凝縮器，直接接触凝縮器に関する研究：
籠橋俊憲(1981卒)，杉浦靖彦(1983修)，太田基博(1982卒)，
水野宏幸(1985修)，前田隼(1985 博士論文)
- ・ 屈折管・プレートフィンチューブ形熱交換器における流動および熱伝達：
水野貴司(1984修)，加藤孝治(1985修)，米谷秀雄(1986修)，
二村仁志(1985卒)，横町尚也(1985卒)，奥村桂三(1986卒)，
芹沢祐司(1986修)，若杉勇(1987修)，櫛田玄一郎(1988 博士論文)
- ・ 二次元および軸対称対向噴流における流動および伝熱：
花崎裕士(1983卒)，山田浩之(1984卒)，西浦隆幸(1984修)，吉田尊彦(1985卒)，
畔柳佳正(1986卒)，王焱(1986修，1989 博士論文)，太田統之(1988修)，
志満津孝(1989修)
- ・ 非定常輸送方程式に対する各種差分解の相違に関する研究： 上原健(1988修)
- ・ 熱サイホンにおける流動および熱伝達： 杉山一弘(1989修)

1985年 3月

泉亮太郎先生 退官

教職員学生と歩んだ伝熱研究(2)

・ 固気混相流による伝熱促進，流動層形熱交換器の研究



1	Blower
2	Valve
3	Urethane Mat
4	Calming Box
5	Distributor
6	Stainless Foil
7	Cow Felt
8	Mesh
9	Automatic Voltage Regulator
10	Slide-contact Voltage Regulator
11	Precision Digital Voltage Meter
12	Static Pressure Tap
13	Manometer (Göttingen)
14	Pitot Tube
15	Displacement Micro Manometer

図 1 実験装置の構成図

3・1 流動状態 本装置のような内径 $D=60.1$ mm の垂直円筒における流動様式の状態図を，初期流動層高さ $L_0=100$ mm ($L_0/D=1.667$) の場合について図 2 に示す。ここで，記号 ●, △, □ および ▲ は各観察点を示し，それぞれ流動層の Bubbling, Slugging, Turbulent Fluidization およびこれらの中間的な状態に対応し⁽¹⁾，破線はこれらの各流動様式を本観察の範囲内で適当に区別したものである。このように流動様式は流速および粒径によって大きく異なる。他の L_0 の値についても同様な傾向となり，充てん層の範囲は

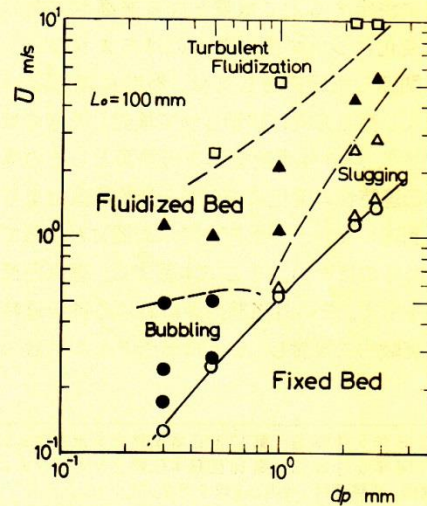
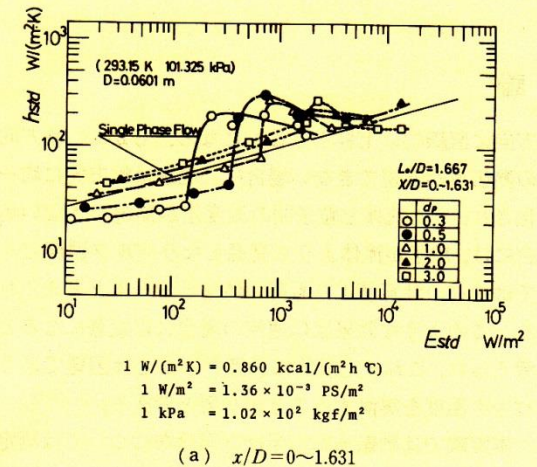
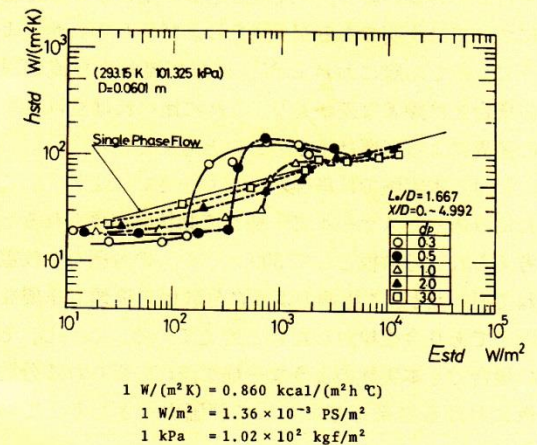


図 2 流動様式の状態図 ($L_0=100$ mm)



(a) $x/D=0\sim 1.631$



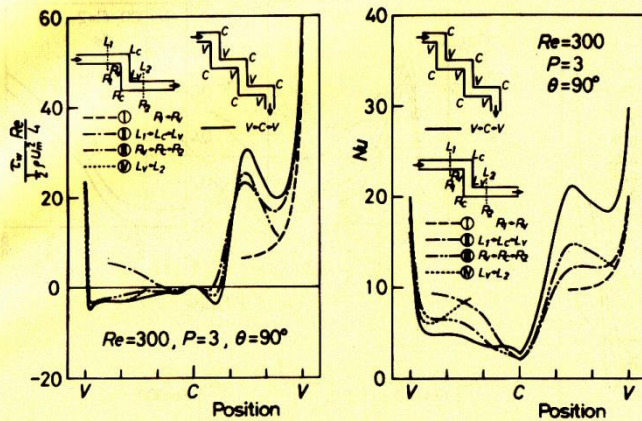
(b) $x/D=0\sim 4.992$

図 11 volume goodness factor ($L_0/D=1.667$)

教職員学生と歩んだ伝熱研究(2)

・ 波形流路内の流動および熱伝達

親川兼勇(1982 博士論文)



(a) 壁面せん断応力
(b) 局所ヌセルト数
 $Re=300, P=3, \theta=90^\circ$

図2 2度折れ曲がる場合との比較

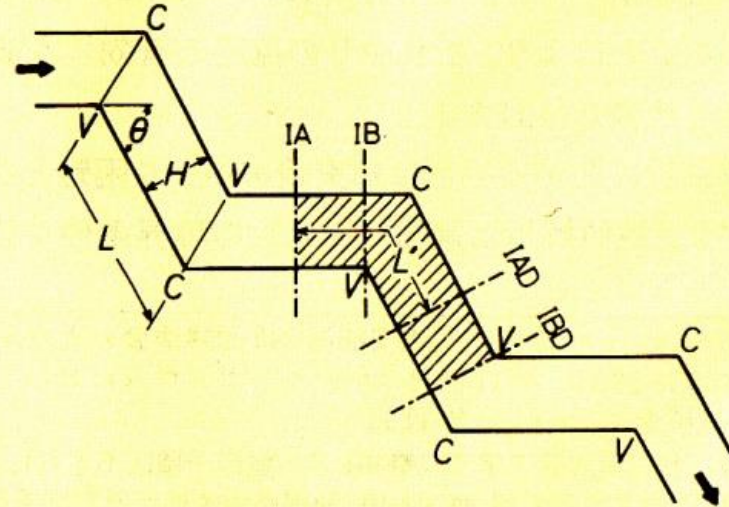


図1 解析モデル

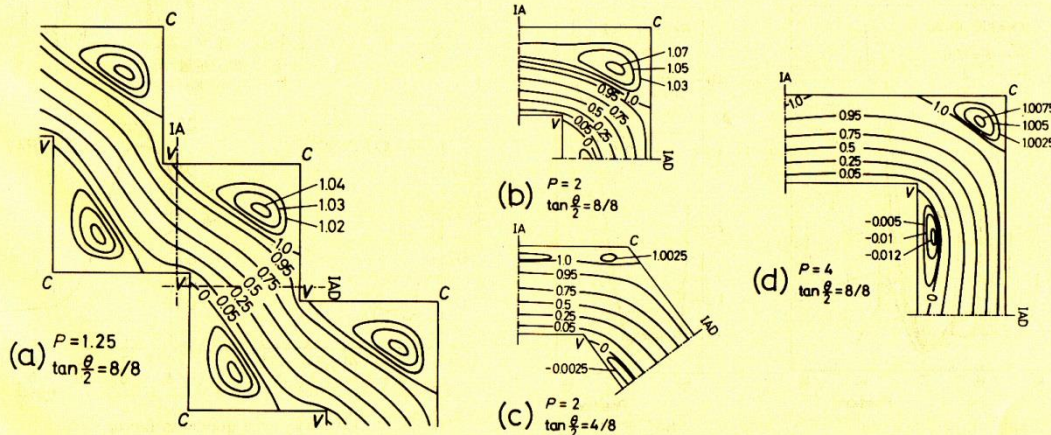


図3 流線 ($Re=300$)

[日本機械学会論文集,
48 (435), (1982), 2245-2254]

教職員学生と歩んだ伝熱研究(2)

・ 回転かき取り形凝縮器に関する研究

前田 隼(1985 博士論文)

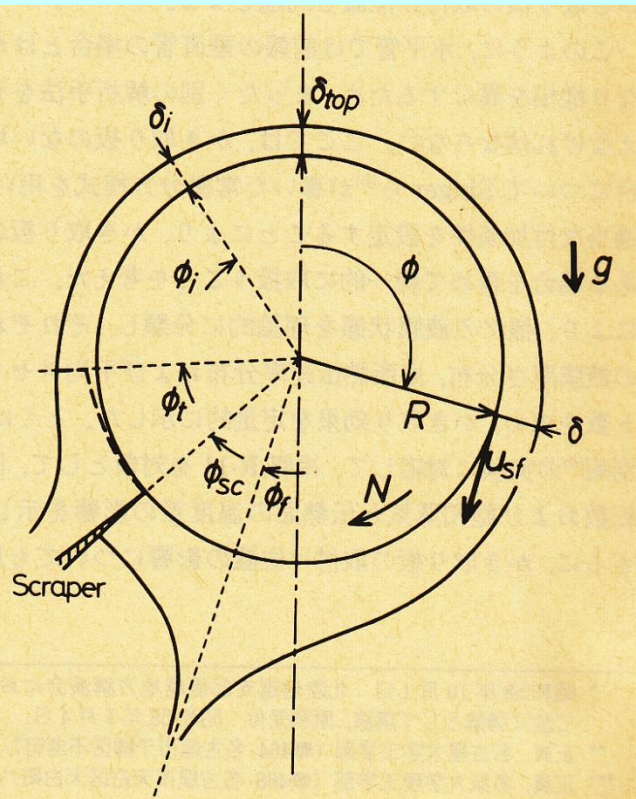
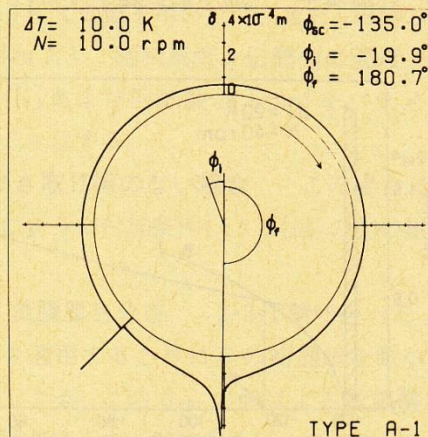
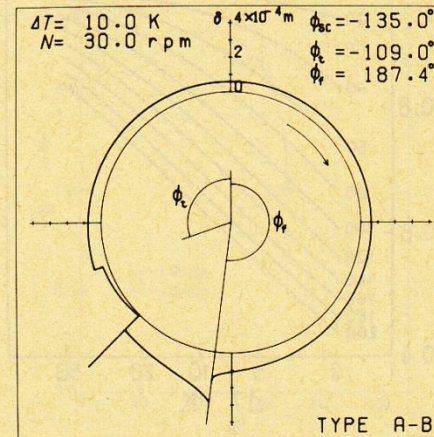


図 1 解析モデル

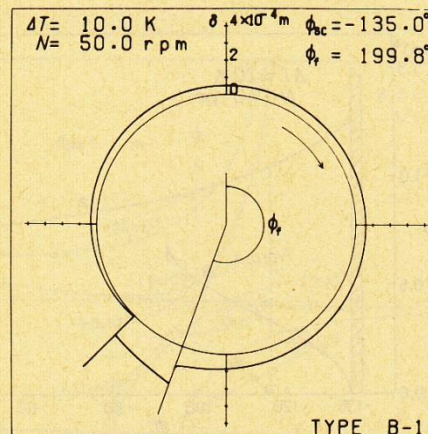
[日本機械学会論文集(B編), 50 (457), (1984), 2219-2227]



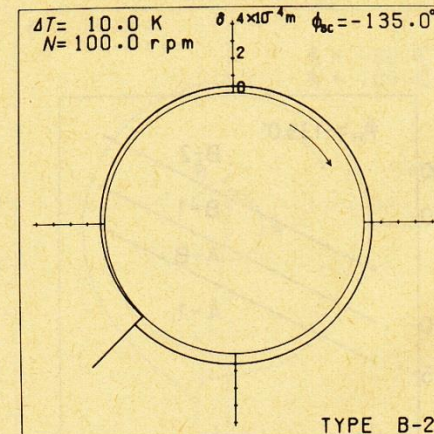
(a) A-1タイプ



(b) A-Bタイプ



(c) B-1タイプ



(d) B-2タイプ

図 9 液膜厚さ分布(かき取り板のある場合, $\phi_{sc} = -135^\circ$)

教職員学生と歩んだ伝熱研究(2)

・ 直接接触凝縮器に関する研究

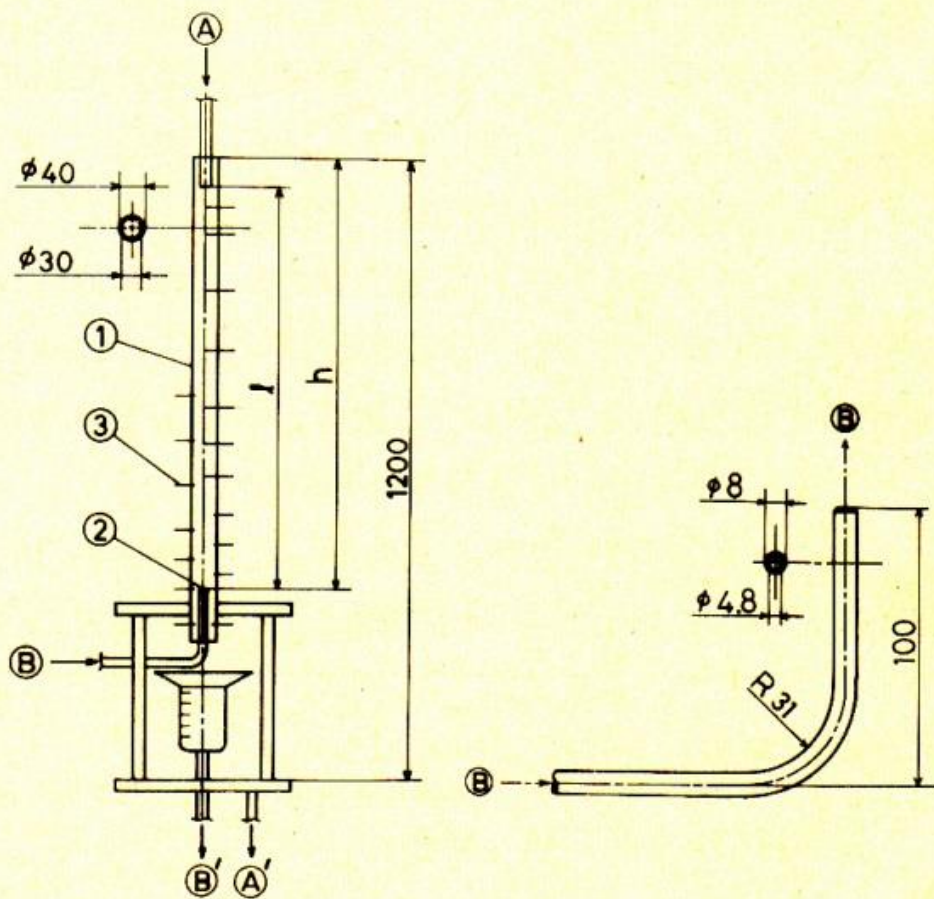
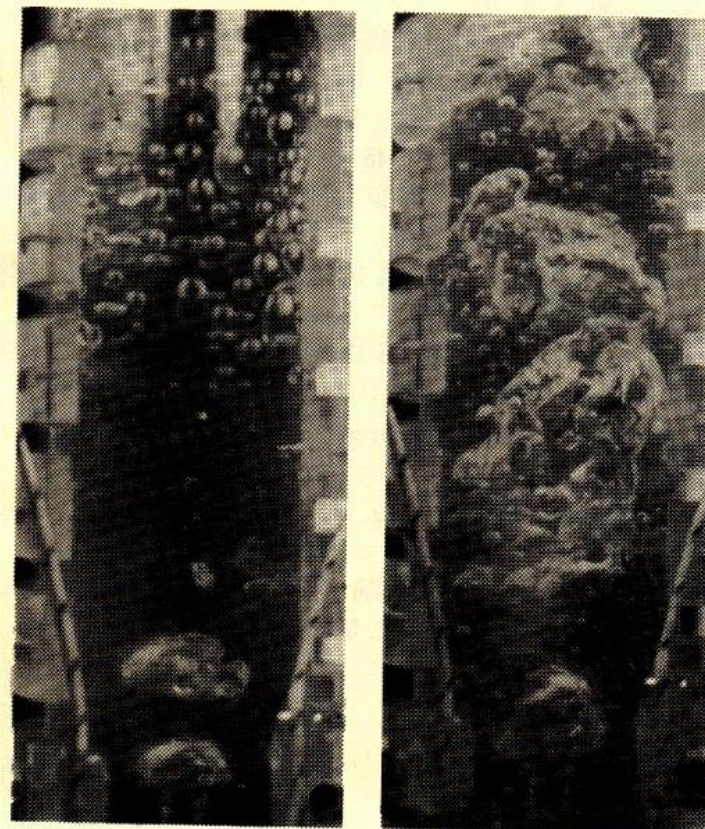


図 2 測定部

図 3 ノズル詳細



(a) $T_w=6^\circ\text{C}$
 $Q_w=10\text{ cm}^3/\text{s}$
 $Q_f=0.45\text{ cm}^3/\text{s}$
 $\Phi/\Phi_c=0.146$

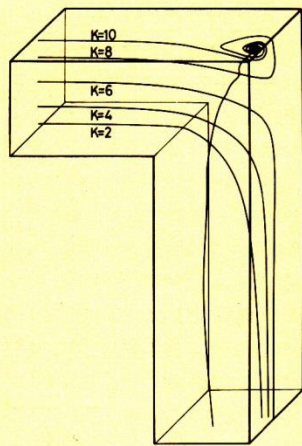
(b) $T_w=16^\circ\text{C}$
 $Q_w=5\text{ cm}^3/\text{s}$
 $Q_f=0.45\text{ cm}^3/\text{s}$
 $\Phi/\Phi_c=0.586$

図 8 凝縮状態の観察

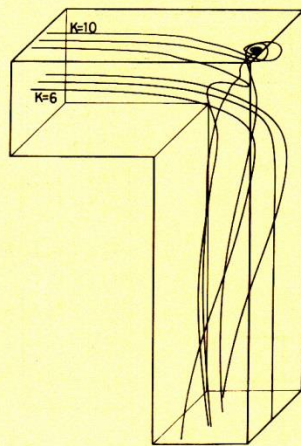
教職員学生と歩んだ伝熱研究(2)

・ 屈折管・プレートフィンチューブ形熱交換器における流動および熱伝達

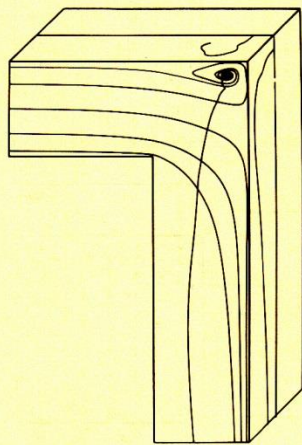
楡田玄一郎(1988 博士論文)



(a) 投象図

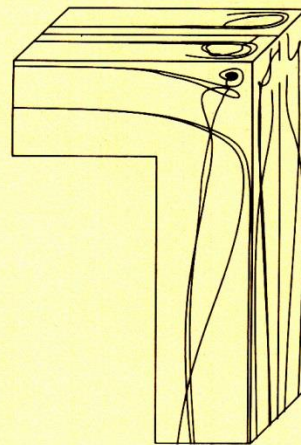


(a) 投象図



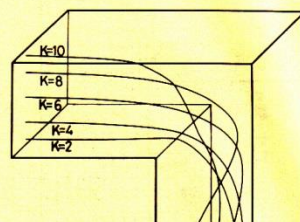
(b) 投影図

図 8 流跡線 (J=6)



(b) 投影図

図 9 流跡線 (J=5, 6 および 7)

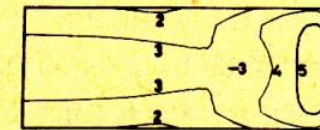


(b) 投影図

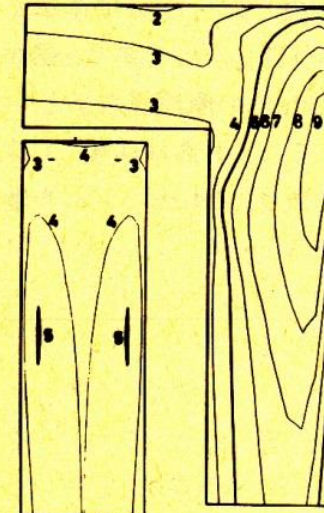
図 10 流跡線 (J=4)

$$N_u^* \equiv N_{uc} \left(\frac{N_{um}}{N_{ucm}} \right)_{in} = \frac{(q_w/\lambda) d_e (\overline{\theta_w - \theta_c})}{\theta_w - \theta_c} \left(\frac{\overline{\theta_w - \theta_b}}{\theta_w - \theta_b} \right)_{in}$$

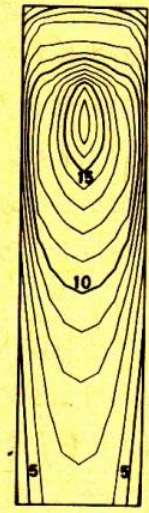
$$N_{um}^* \equiv N_{ucm} \left(\frac{N_{um}}{N_{ucm}} \right)_{in} = \frac{(q_w/\lambda) d_e (\overline{\theta_w - \theta_c})}{\theta_w - \theta_c} \left(\frac{\overline{\theta_w - \theta_b}}{\theta_w - \theta_b} \right)_{in} \dots$$



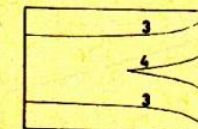
(d) K=11 (上流側)



(c) K=1 (下流側)



(e) K=11 (下流側)



(b) K=1 (上流側)

図 8 修正局所ヌセルト数分布

教職員学生と歩んだ伝熱研究(2)

・ 二次元および軸対称対向噴流における流動および伝熱

王焱(1989 博士論文)

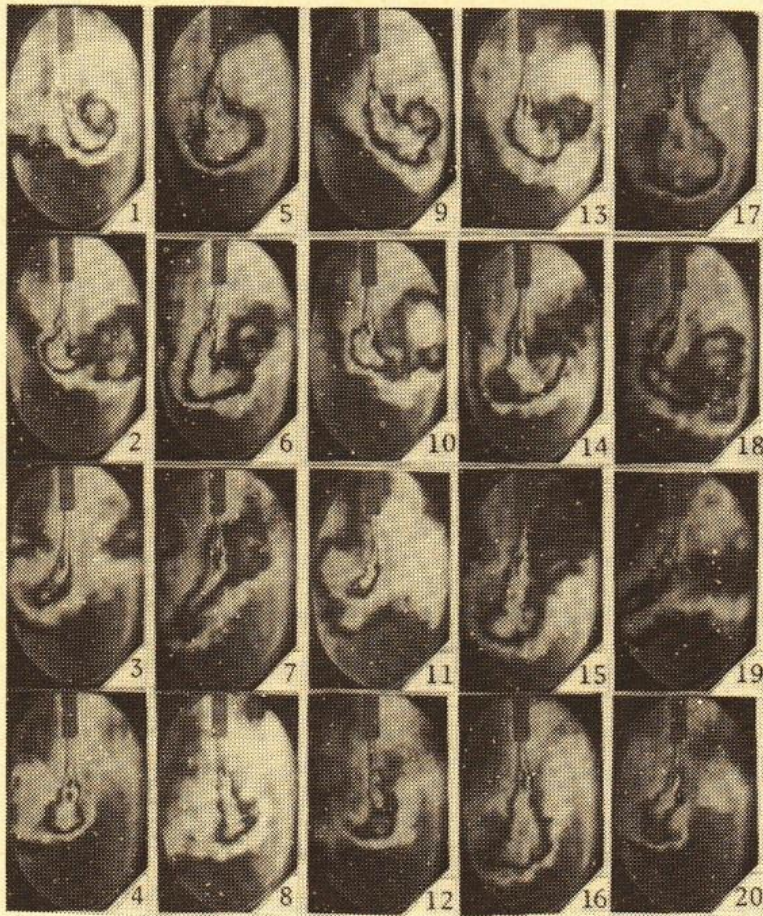
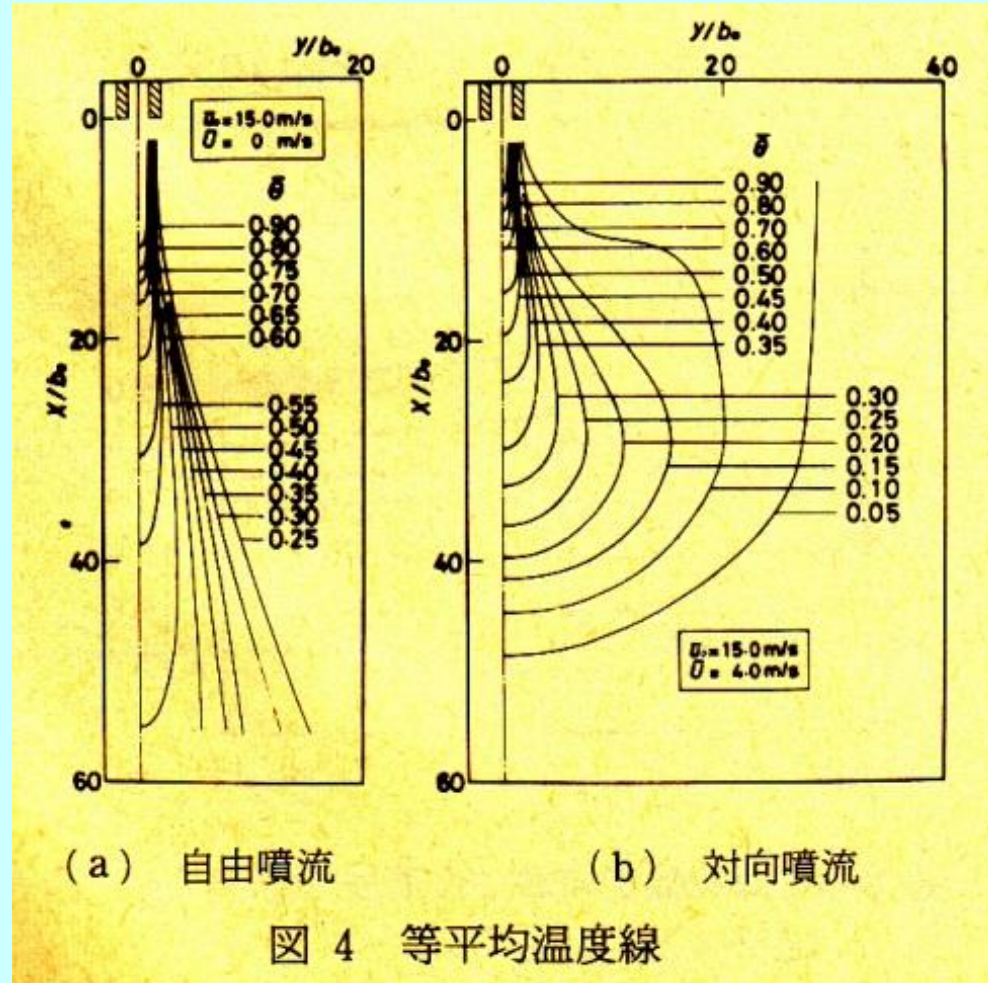


図 12 等密度干渉じまの連続写真
 [対向噴流, 時間間隔 10 ms, 2 000 こま/s, 1/2.5 開度シャッタ (シャッタスピード 0.2 ms)]



[日本機械学会論文集(B編), 53 (496), (1987), 3729-3736]

教職員学生と歩んだ燃焼研究(1)

<< 燃焼工学1 >> 助教授時代 1988年4月～1998年3月

機械工学科 機械エネルギー工学講座 → 機械情報システム工学科 環境情報システム講座

竹野忠夫先生, 櫛田玄一郎講師, 西岡牧人助手, 早川正人技官

1988年 4月 竹野忠夫先生, 西岡牧人助手 着任

伝熱工学に関する数値解析



反応性流体力学に基づく気相燃焼の数値解析

1991年 9月 米国NIST交換研究員(1年間)

Prof. T. Kashiwagi, Prof. H. R. Baum

1995年 4月 朱学雷助手 着任

1998年 4月 中村祐二助手 着任

2001年 3月 竹野忠夫教授 退官

教職員学生と歩んだ燃焼研究(1)

●竹野教授, 西岡助手

▪ 管状火炎の理論的・解析的研究 :

稲垣和久(1990修), 祖父江務(1991修), 西岡牧人(1993 博士論文),
朱学雷(1995 博士論文)

▪ 火炎中のサーモフレイシスの効果 :

内田伸宏(1991修), 田中宏茂(1993修), 湯浅英太郎(1995修)

▪ 乱流予混合火炎の非定常挙動および曲率分布 :

馬場直樹(1991修), 井上雄二(1993修), 幾老綾絵(1995修),
入江徹(1998修), 北村洋介(2000修), 坪根裕二(2001修)

▪ LIF法によるOH濃度の測定

水橋将(1992修), 大坪栄一郎(1994修), 伊藤昭(1996修), 堀江竜太(1998修),
安藤千博(2000修)

教職員学生と歩んだ燃焼研究(1)

- ・ 火炎中のPAHとすす生成 :

近藤健一(1992修), 土屋順久(1994修), 南野圭史(1995修), 田中邦博(1996修),
平岡直大(1997修), 齋藤健司(1998修), 小森晃(1999修), 酒井伸吾(2000修),
寺部保典(2001修), 橋場敏彦(2001修), 吉田康隆(2001修), 浅野剛生(2002修)

- ・ リバーニングによるNOxの還元効果 : 加藤滋久(1999修), 中村直樹(2001修)

- ・ 火炎中のNO生成 :

近藤雪水(1992修, 1996 博士論文), 森智章(1993修), 栗田敦(1994修),
竹本安伸(1996修), 江崎秀一郎(1997修), 近藤博是(1999修),
梅山智貴(2000修), 多武良友孝(2001修)

- ・ 外部放射熱により加熱される固体燃料の自然着火に関する数値解析 :

中村祐二(1995修, 1999 博士論文), 小林充(2000修), 片山博之(2000卒)

- ・ 濃度斑点に起因する予混合火炎の非定常挙動 : 和久智裕(1997 博士論文)

- ・ 旋回流中の火炎の挙動 : 内田正宏(2002修), 寄森一史(2002修)

教職員学生と歩んだ燃焼研究(1)

・ 外部放射熱により加熱される固体燃料の自然着火に関する数値解析

中村祐二 (1995 博士論文)

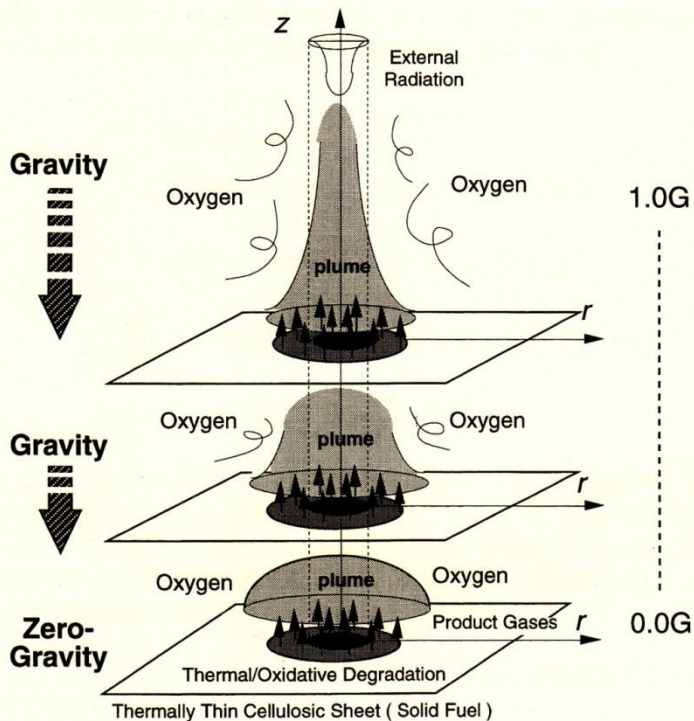


Figure 2.1: Schematic illustration of numerical model

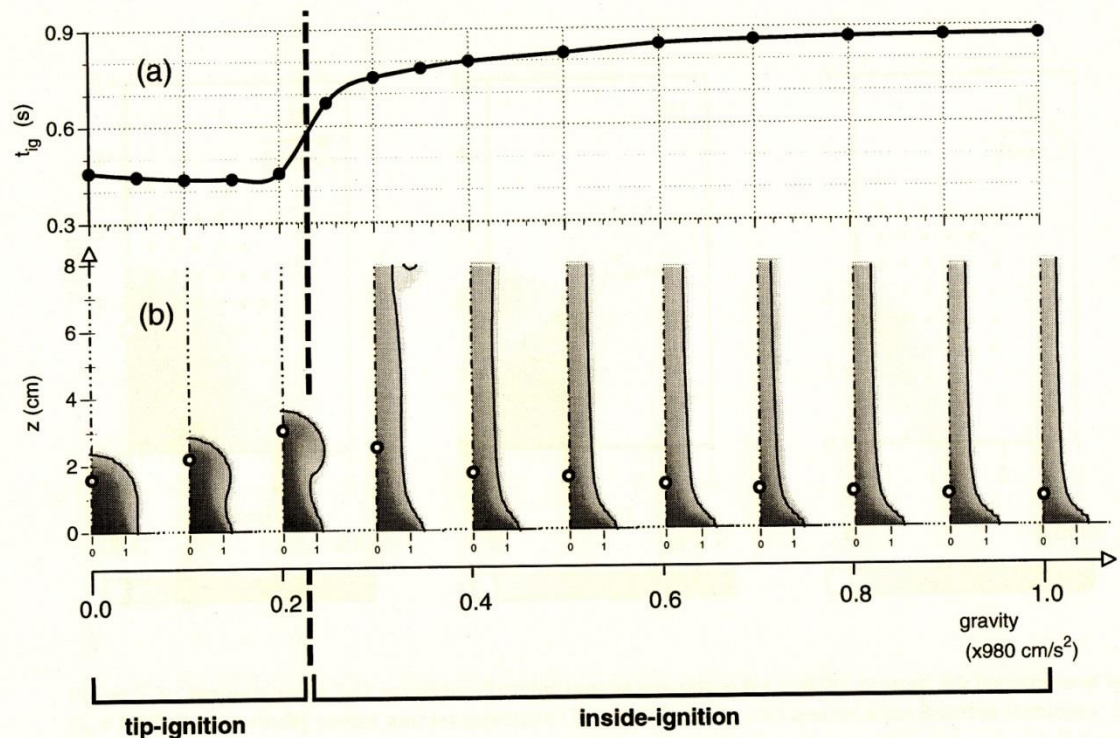


Figure 7.2: The variation of ignition delay time (t_{ig}) and ignition position (z_{ig}) with instantaneous plume shape at ignition in various gravities. Open circle shows the ignition position. Adopted ambient oxygen concentration is 0.4

教職員学生と歩んだ燃焼研究(1)

●山下助教授, 櫛田講師

・ LIF法による軸対称噴流の混合特性に関する計測 :

小林正佳(1990修), 町田幸則(1992修), 後藤尚紀(1994修), 赤尾剛(1997修)
中川雅樹(1996卒), 磯部裕之(1999修)

・ 水平角柱まわりの自然対流熱伝達に関する数値解析 : 杉村敏夫(1991修)

・ 二次元噴流拡散火炎の遷移と安定性に関する数値解析 :

李倩(1992修), 井戸田敏博(1993修), 児玉明広(1993修),
島田雅文(1996修), D. Djamrak(1997修)

・ 低レイノルズ数の微小重力場において輻射加熱された固体からの熱伝達 :

H. R. Baum, K. Nakabe, T. Kashiwagi (1993 米国NISTとの共同研究)

・ 三次元噴流拡散火炎の非定常挙動に関する数値解析 :

山崎義弘(1995修), 守口崇之(1998修)

・ 同軸噴流の安定性に関する数値解析 : 杉森洋一(1994修), 伊藤英俊(1996修)

教職員学生と歩んだ燃焼研究(1)

・ LIF法による軸対称噴流の混合特性に関する計測

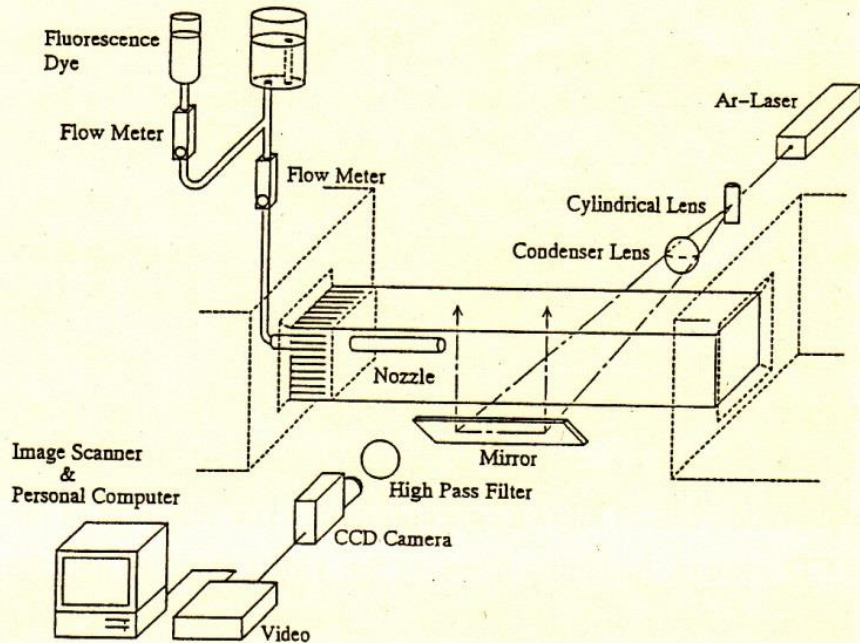
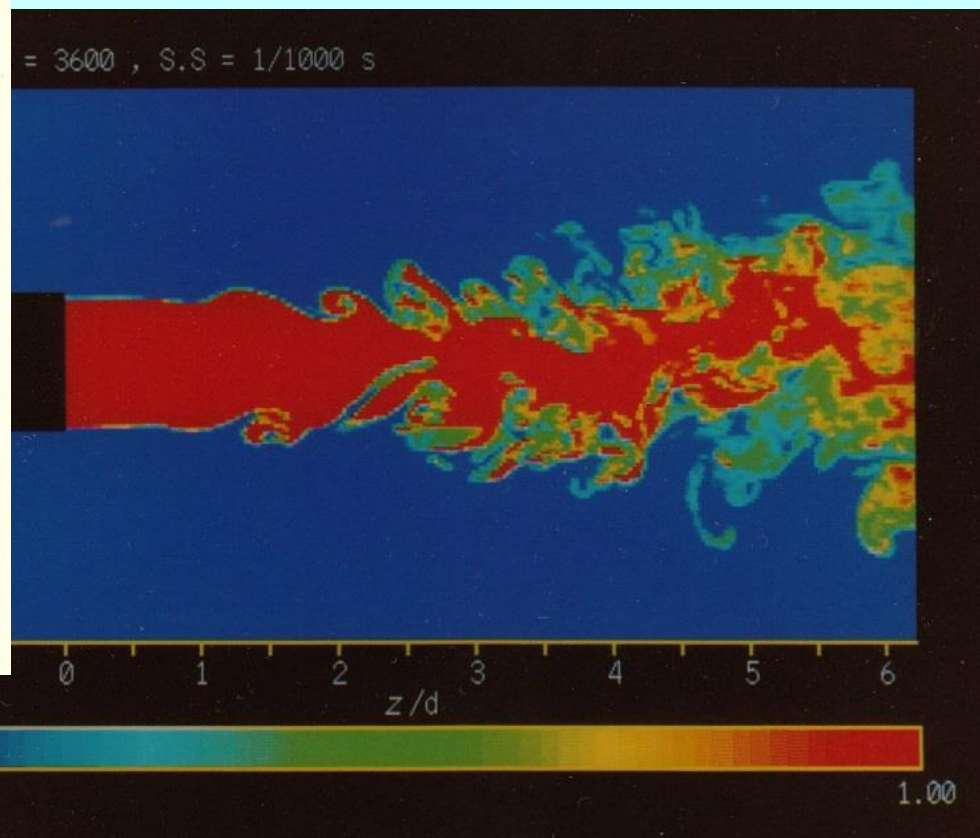


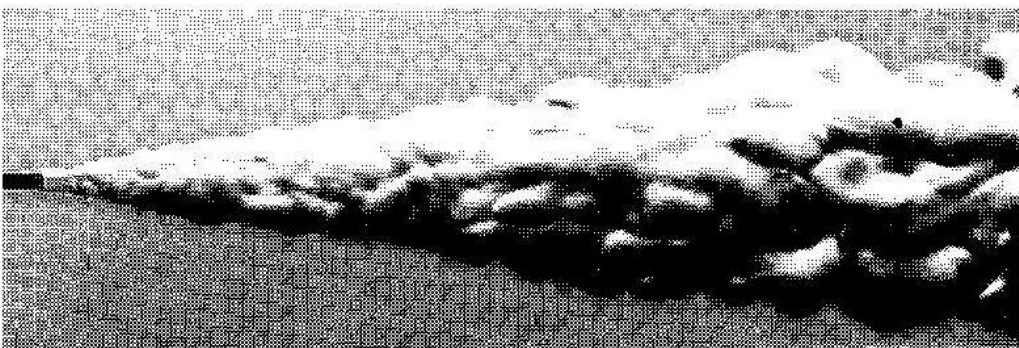
Fig. 1 (a) Schematic of experimental setup.



教職員学生と歩んだ燃焼研究(1)

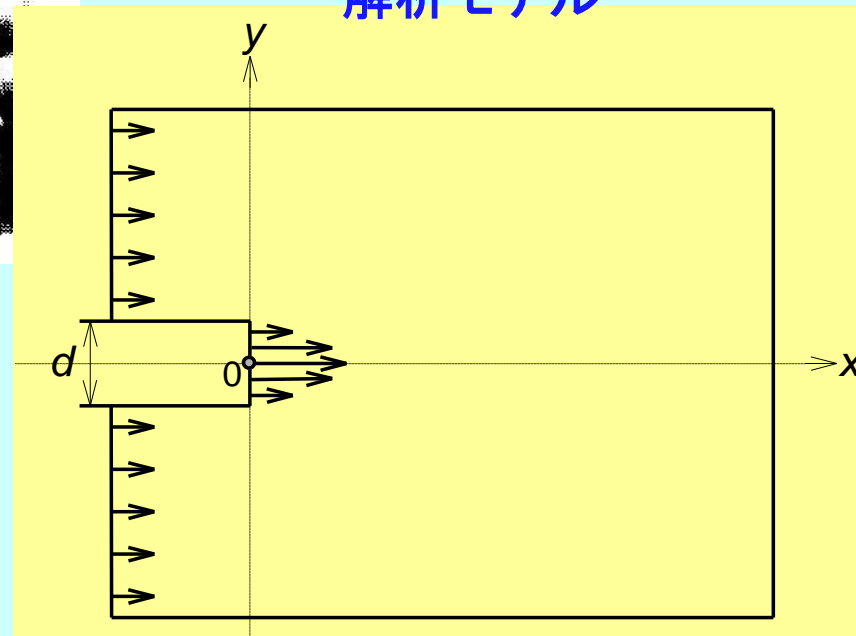
- ・ 二次元噴流拡散火炎の遷移と安定性に関する数値解析

水素の乱流噴流火炎の実験（シュリーレン法による可視化）
に対応する数値シミュレーションから燃焼研究を始めた



[Combust. Sci. Technol., 10 (1975), 45]

解析モデル

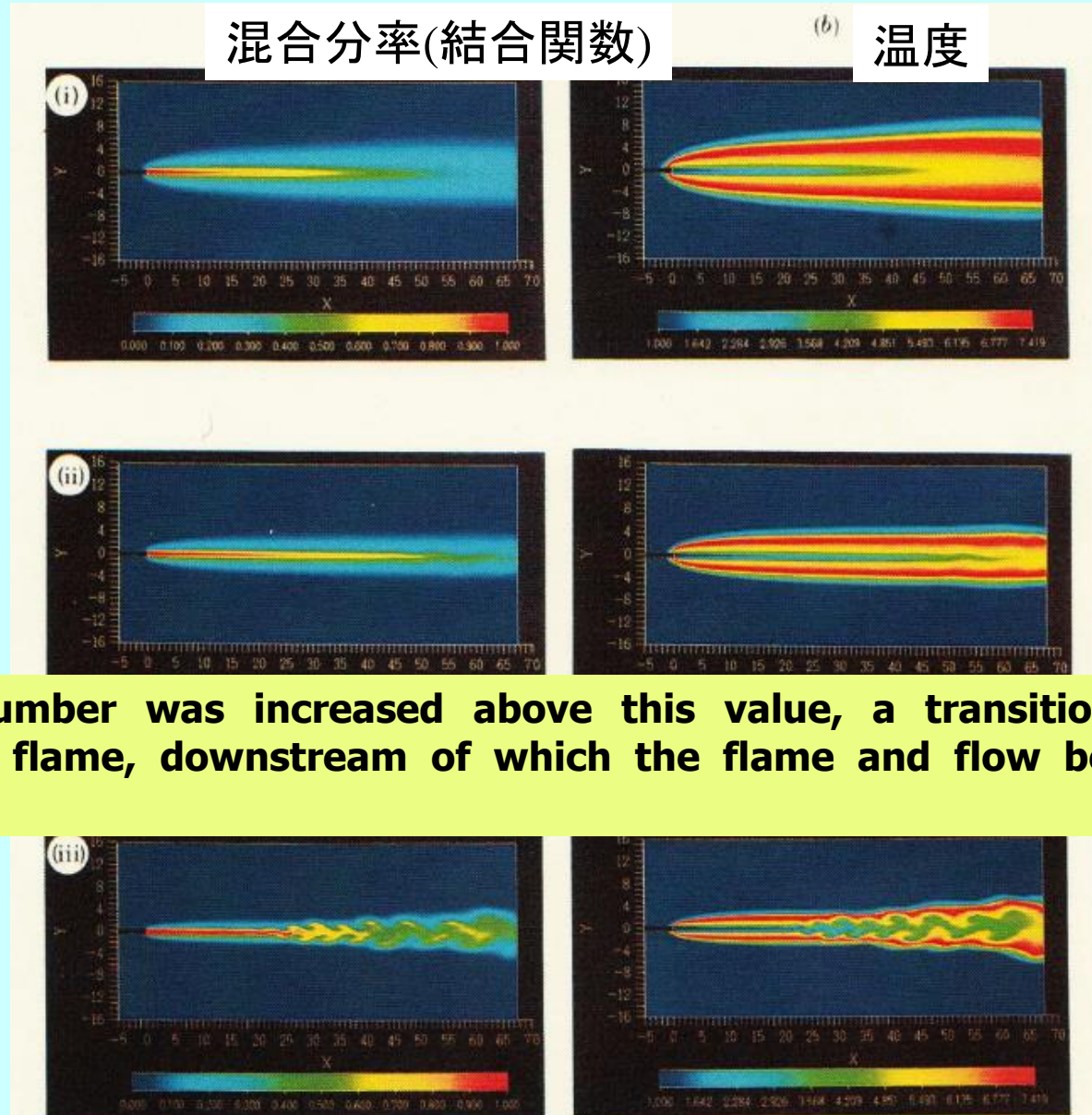


教職員学生と歩んだ燃焼研究(1)

$Re = 500$

$Re = 1000$

$Re = 2000$



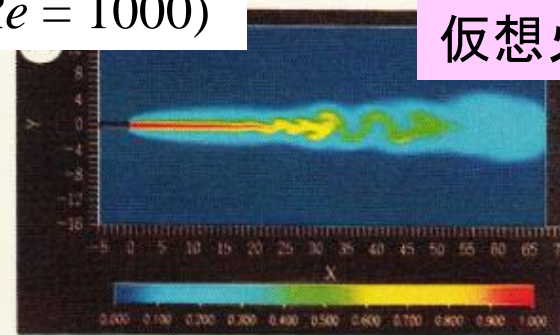
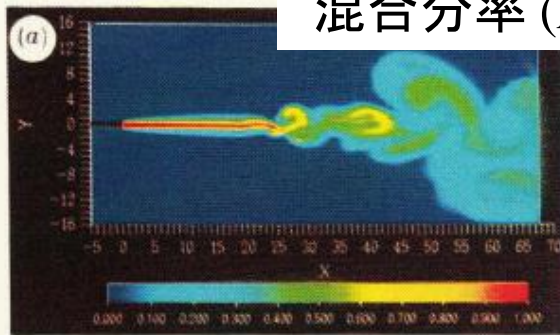
As the Reynolds number was increased above this value, a transition point appeared along the flame, downstream of which the flame and flow began to fluctuate.

教職員学生と歩んだ燃焼研究(1)

等密度噴流

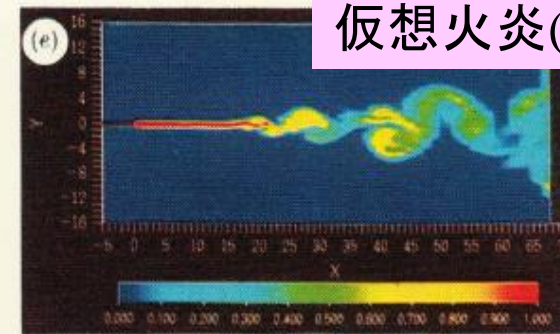
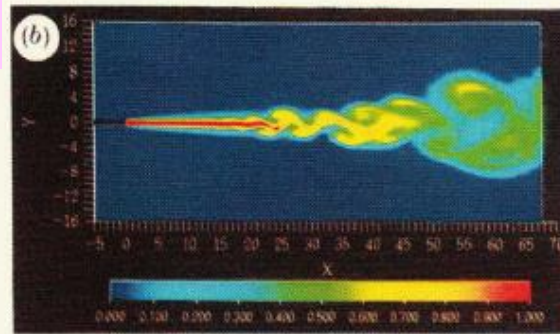
混合分率 ($Re = 1000$)

仮想火炎(粘度一定)



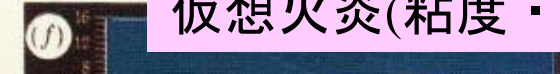
凍結噴流

仮想火炎(拡散係数一定)



通常火炎

仮想火炎(粘度・拡散係数一定)



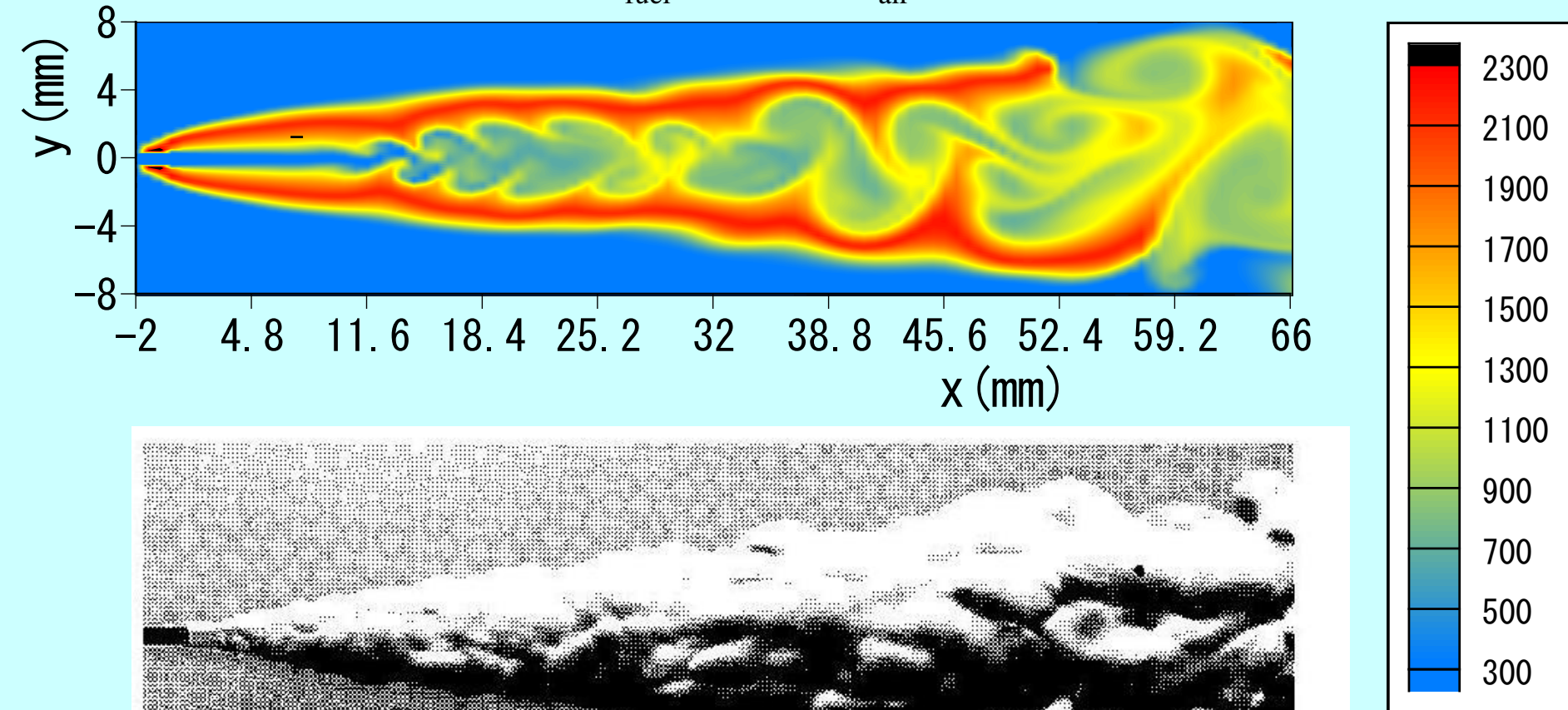
The radial distributions of density and transport coefficients were found to play dominant roles in this instability, and hence in the transition mechanism.

The decreased density in the flame accelerated the instability, while the increase in viscosity had a stabilizing effect. The most important effect was the increase in diffusion coefficient. The increase shifted the flame surface, where the large density decrease occurs, outside the shear layer of the jet and produced a thick viscous layer surrounding the jet which effectively suppressed the instability.

教職員学生と歩んだ燃焼研究(1)

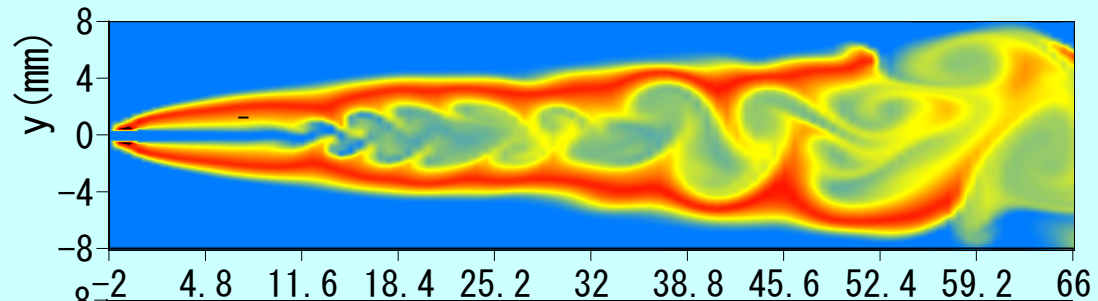
[日本機械学会論文集, 65 (630), (1999), 783-789]

温度分布 ($Re = 1911$; $u_{\text{fuel}} = 30$ m/s, $u_{\text{air}} = 4$ m/s, $d = 1$ mm)

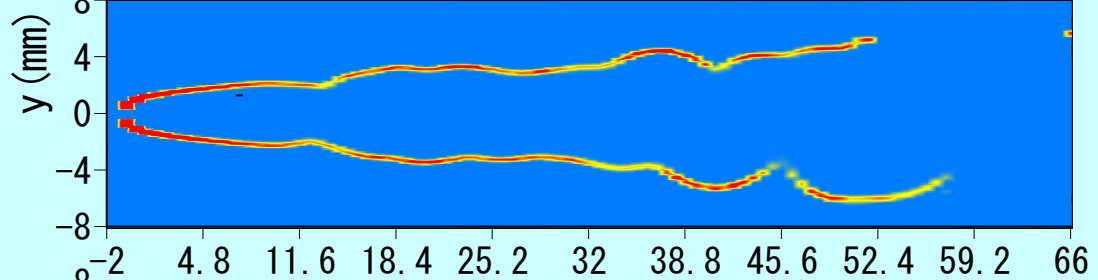


教職員学生と歩んだ燃焼研究(1)

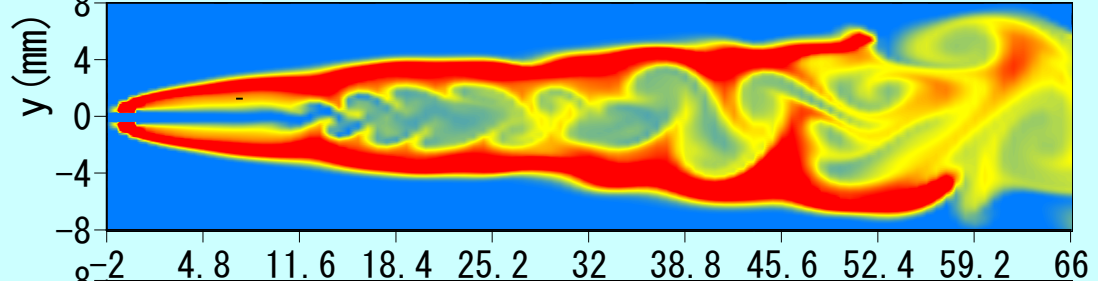
温度



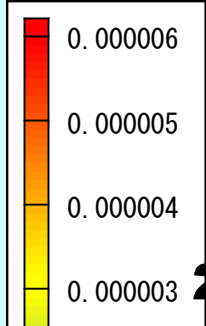
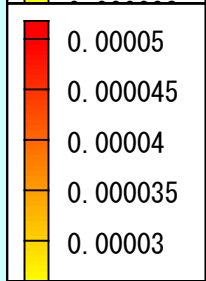
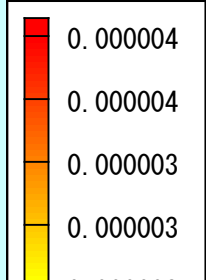
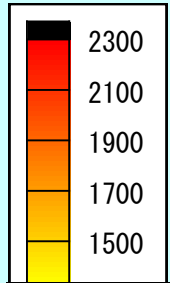
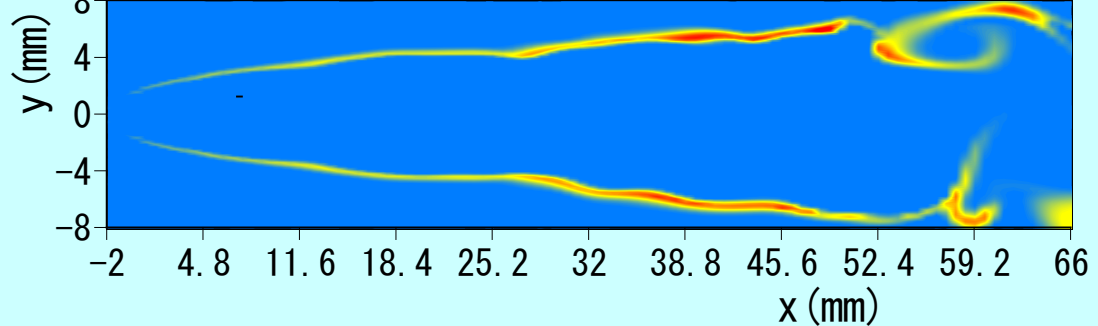
CH質量分率



NO質量分率



NO₂質量分率



教職員学生と歩んだ燃焼研究(1)

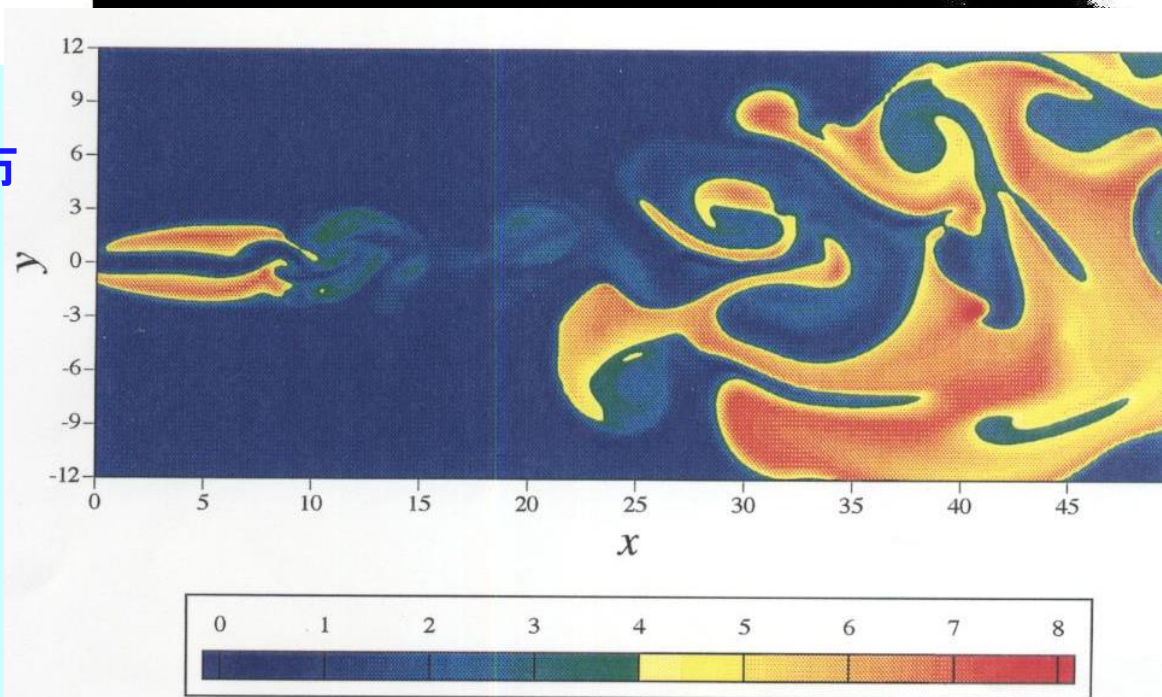
浮き上がり火炎の 可視化実験

[25th Symposium (International)
on Combustion, 1994, pp.1175-1181]



数値解析による温度分布 ($Re = 2000$; $Da = 1.4 \times 10^7$)

[26th Symposium (International)
on Combustion, 26, (1996), 27-34]



教職員学生と歩んだ燃焼研究(1)

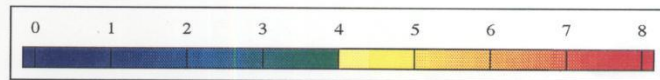
火炎構造の解明のための物理指標

Mixedness :

$$Z_{FO} \equiv \frac{Y_O}{j} \left(\frac{Y_O}{j} \leq Y_F \right) - Y_F \left(\frac{Y_O}{j} \geq Y_F \right)$$

Flame index :

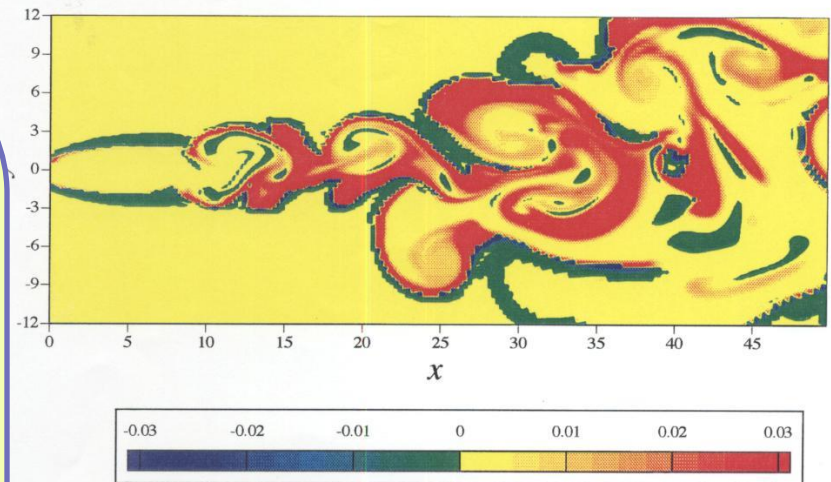
$$G_{FO} \equiv \text{grad } Y_F \cdot \text{grad } Y_O (q > q_c)$$



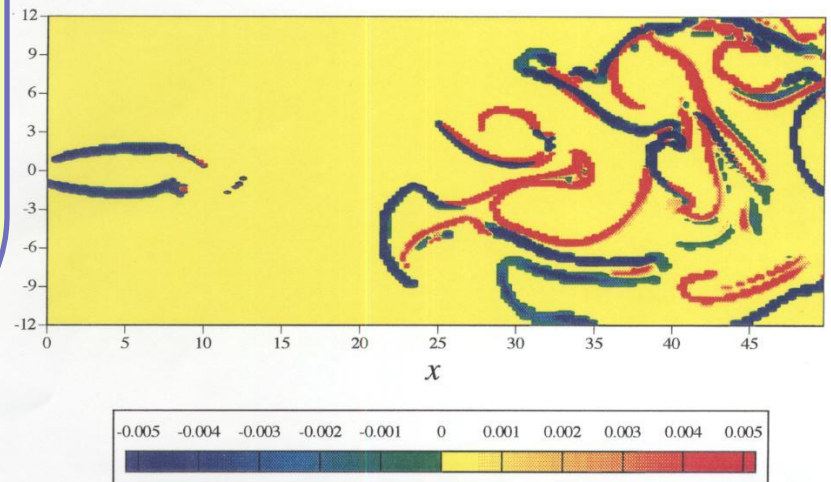
(b) Temperature

Fig. 6 Instantaneous distributions of reaction rate and temperature

for $Re_0=2000$ and $Da_0=1.4 \times 10^7$



(a) Mixedness



(b) Flame index

Fig. 7 Instantaneous distributions of mixedness and flame index

for $Re_0=2000$ and $Da_0=1.4 \times 10^7$

伝熱・燃焼研究のテーマ(2)

・ 低レイノルズ数の微小重力場において輻射加熱された固体からの熱伝達

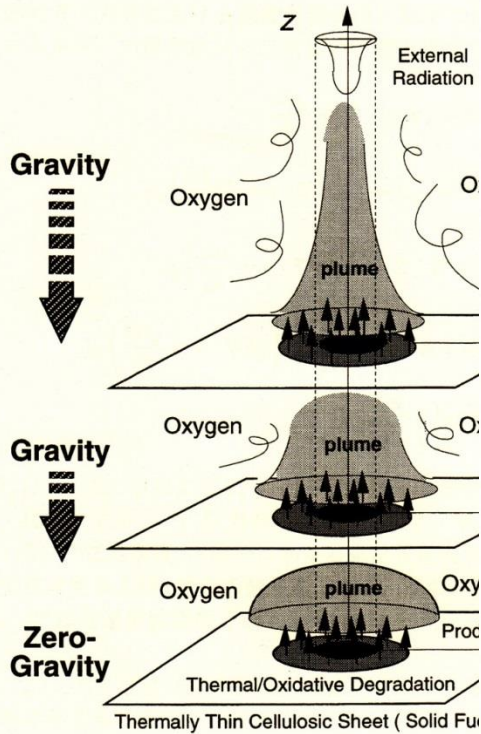


Figure 2.1: Schematic illustration of n

[Combustion and Flame, 98, (1994), 361-374]

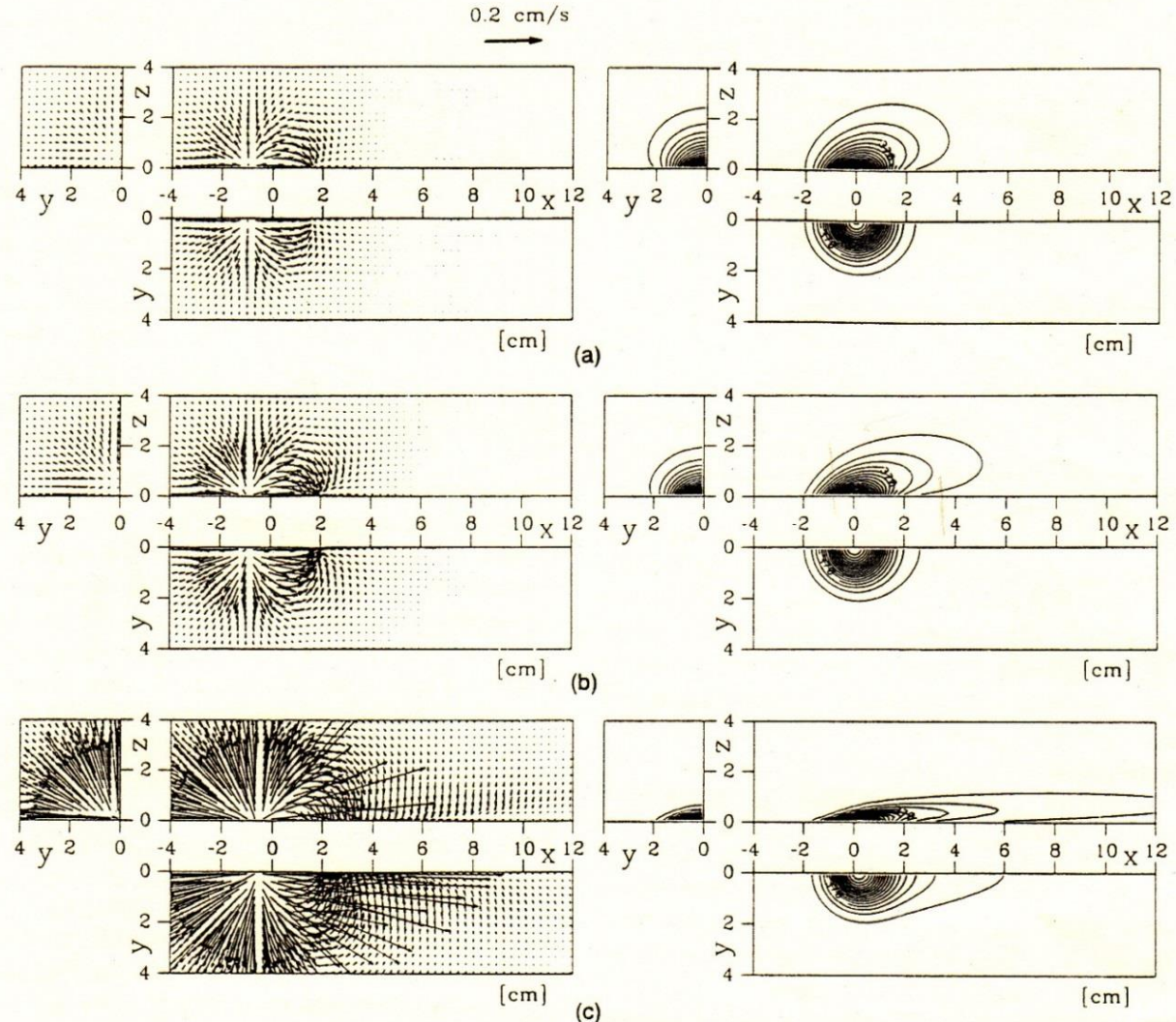


Fig. 5 Effects of ambient flow velocity on the distributions of velocity vectors relative to the ambient flow and the temperature contours (from 310 K at the interval of 20 K) at $t = 8$ s for $\dot{q}_0 = 4$ W/cm². (a) $u_\infty = 0.5$ cm/s (Pe = 2.27); (b) $u_\infty = 1.0$ cm/s (Pe = 4.55); (c) $u_\infty = 10$ cm/s (Pe = 45.5)

教職員学生と歩んだ燃焼研究(2)

<< 燃焼工学2 >> 教授時代 1998年4月～2004年3月

機械情報システム工学科 ヒューマンシステム工学講座 → 環境情報システム講座

趙黛青講師, 中村祐二助手, 早川正人技官, (新井紀男教授)

1998年 4月 機械情報システム工学科 ヒューマンシステム工学講座に
山下が教授として配置替

2000年 4月 趙黛青講師 着任

2001年 3月 竹野忠夫教授 退官

2001年 4月 機械情報システム工学科 環境情報システム講座に
山下が配置替で帰任

気相の噴流拡散火炎の数値解析



気相の予混合火炎・水蒸気添加・消炎, 触媒燃焼の数値解析

教職員学生と歩んだ燃焼研究(2)

- Vガッタに保持された予混合火炎の火炎構造と非定常挙動：
春日洋祐(1996卒)， 勘田将生(1999卒)， 福井傑(2001修)
- 予混合火炎の安定性および非定常挙動に関する数値解析：
阿久澤裕樹(1997修)， 大須賀達也(1999修)， 池田晃浩(2001修)，
竹崎大輔(2000卒)
- 乱流拡散火炎に対するLaminar flamelet model に基づくNO_x の予測手法の検証：
村松敦(1998修)， 寺田勝彦(2000修)， 清水昭博(2002修)， 後藤英之(2003修)，
高石良伸(2004修)
- Triple Flame の火炎構造に与える燃料および当量比の影響：
堤谷進也(1998修)， 崔洛挺(1999 研究員)， 吉見政史(2000修)，
多田章彦(2002修)
- リバーニング特性に関する数値解析： 森田智彦(2001修)
- 横風を受ける燃料噴流火炎に関する数値解析：
林秀幸(2002修)， 大塚裕史(2004修)

教職員学生と歩んだ燃焼研究(2)

- 酸素富化空気燃焼における火炎構造およびNO生成特性の解明：
岸本衛(2002修)，池田光芳(2004修)，齋木悠(2004卒)
- 旋回流中での予混合火炎の伝播に関する数値解析：
上田大輔(2002修)，永井英和(2005修)，近藤周司(2008修)，
篠田昌久(2008 研究員)
- Rich-Lean 二段燃焼システムにおけるNOx 生成に関する数値解析：趙黛青(2000)
- 燃料過濃予混合火炎中のNOx 生成および水蒸気添加の影響：趙黛青(2001)
- メタン-空気拡散火炎の燃焼限界に与える水蒸気添加の影響：喜多敦(2003修)
- 水素-酸素拡散火炎に与える磁場の影響に関する数値解析：山田英助(2002修)
- 固体壁の小円孔を通過する予混合火炎の消炎に関する数値解析：
藤田英之(2003修)
- 分光法による拡散火炎中の煤放射特性の解明：
鎌田祐一(2003 研究員)，高橋真一(2005修)

教職員学生と歩んだ燃焼研究(2)

- ・メタンハイドレートの熱分解に関する数値解析： 恵藤陽介(2005修)
- ・マイクロフレームの安定性と火炎構造に関する数値解析： 窪田充志(2005修)
- ・アセトン-OH同時LIF 法による乱流予混合火炎の火炎構造の測定：
山本典史(2003修)， 里見知彦(2004修)， 林直樹(2004修)， 馬目聡(2006修)
- ・拡散・部分予混合火炎中のPAHの生成特性に関する実験的検討：
山口智丈(2003修)， 長谷川義朗(2004修)， 石井大祐(2006修)
- ・水素あるいはメタン-空気予混合気の流路内触媒燃焼に関する数値解析：
佐多宏太(2003修)， 太田稔(2005修)， 松永秀一(2005 共同研究)，
高下峻一(2007修)
- ・メタン-空気混合気の三次元不均一濃度温度場での燃焼過程の数値解析：
山田真人(2004修)， 榎山由貴(2007修)

教職員学生と歩んだ燃焼研究(2)

- ・ Vガッタに保持された予混合火炎の火炎構造と非定常挙動：

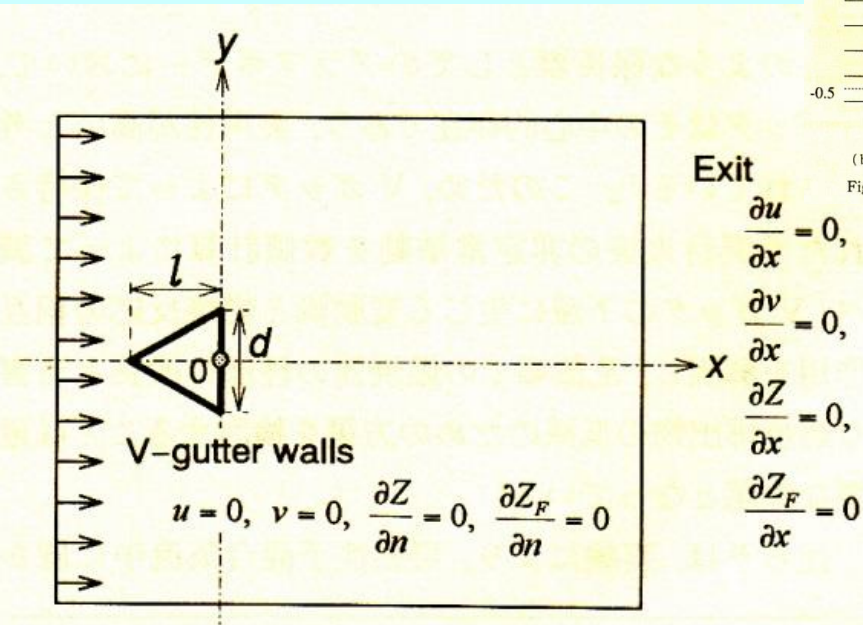
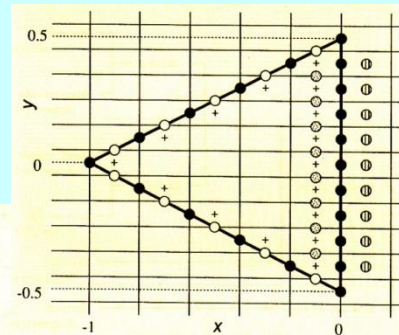
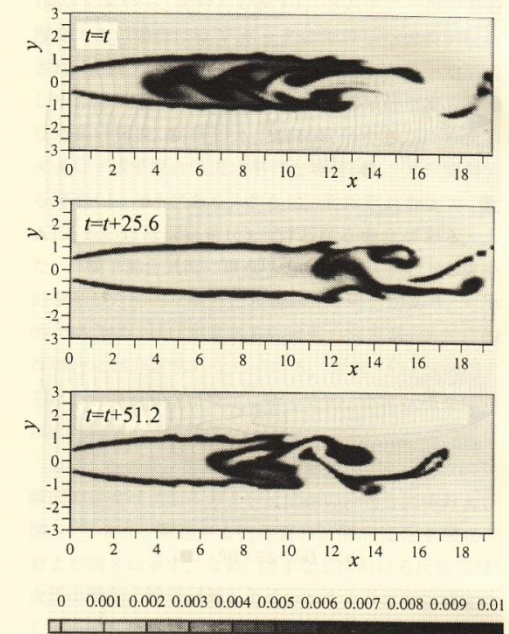


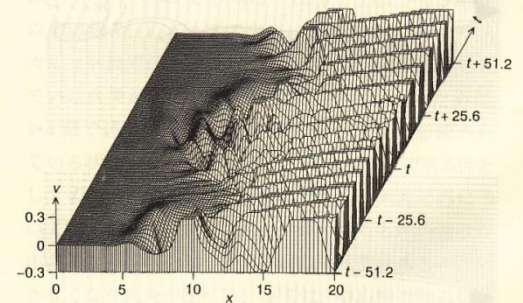
Fig. 1 Analytical model and boundary conditions



(b) Definition positions of dependent variables
Fig. 2 Computational Grid around V-gutter



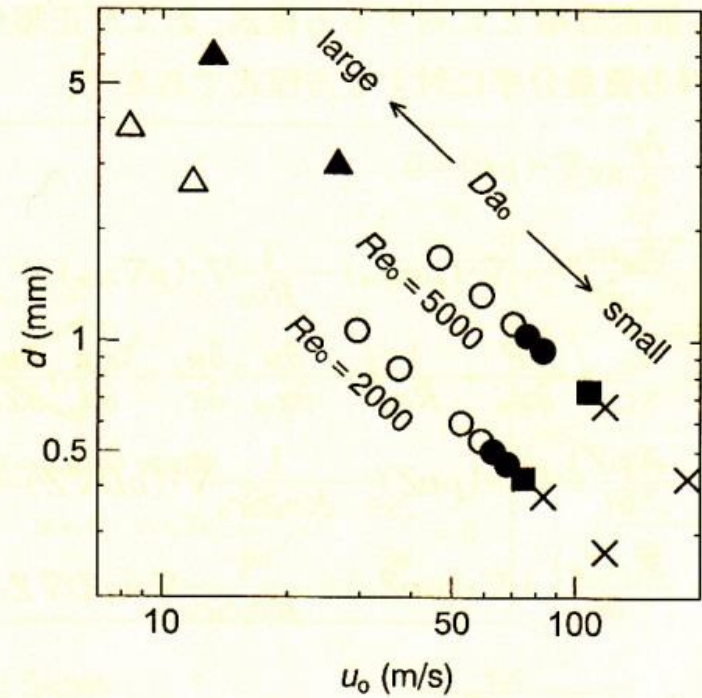
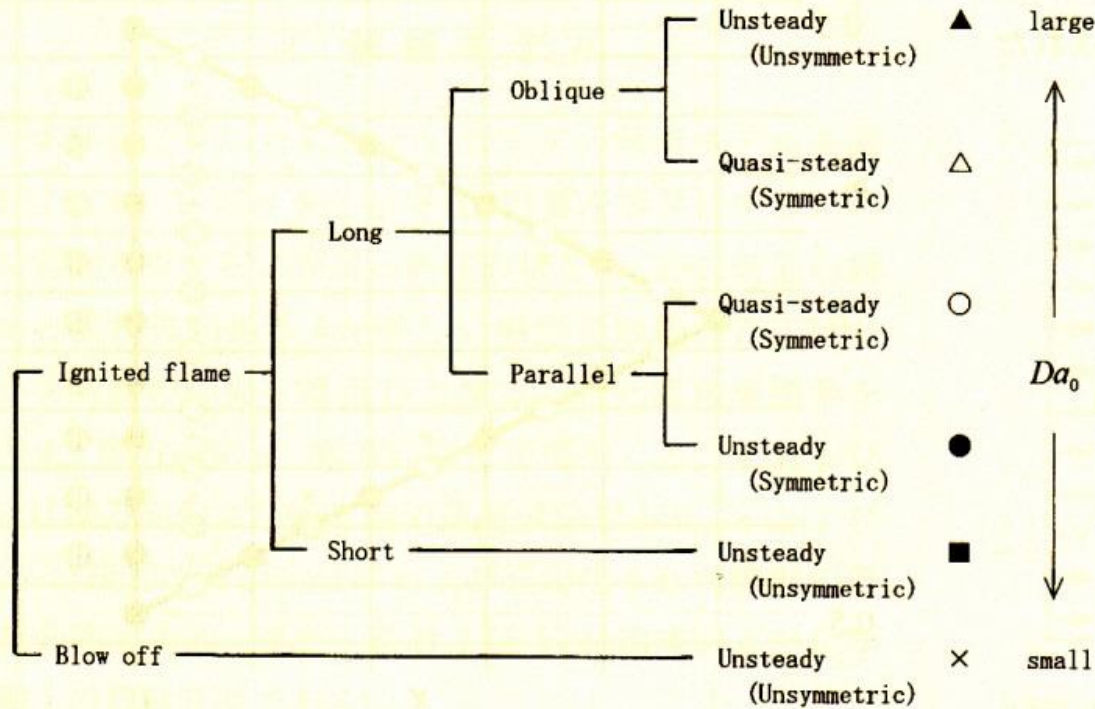
(a) Reaction rate distribution



(b) Transverse velocity on central axis

Fig. 8 Time-dependent behavior of reaction rate and transverse velocity ($Re_0=5000, Da_0=3.0 \times 10^8$)

教職員学生と歩んだ燃焼研究(2)



(a) Classification of flame configuration

(b) Relation between u_0 and d

Fig. 3

教職員学生と歩んだ燃焼研究(2)

・ 乱流拡散火炎に対するLaminar flamelet model に基づくNOx の予測手法の検証

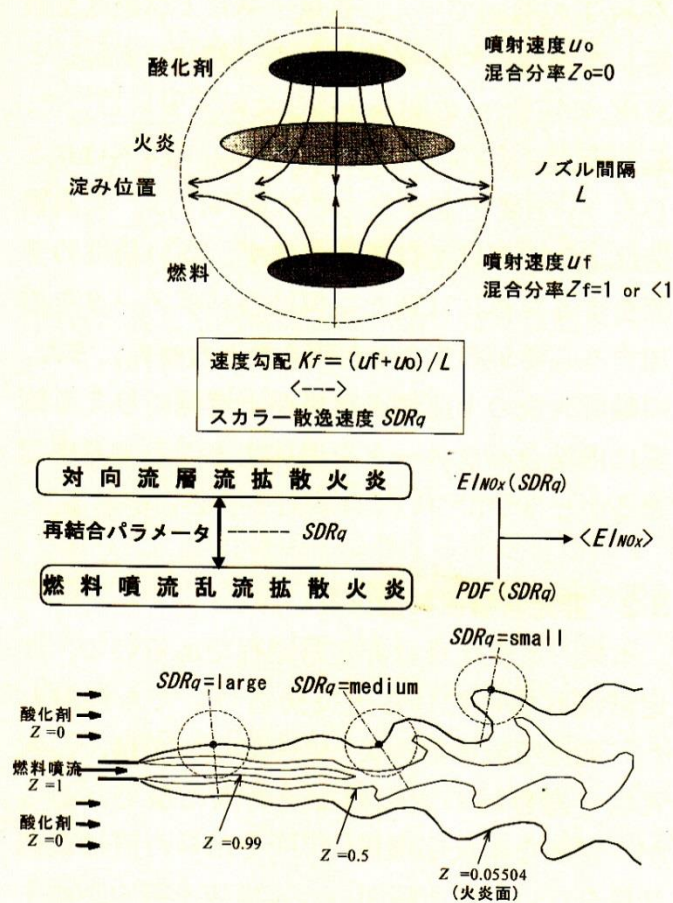


図1. Laminar Flamelet Model に基づく組合せ予測手法

三次元複雑形状, 乱流・非定常状態, 多様な燃料

★ 燃焼による発熱が流れに及ぼす効果
簡単な化学反応機構

★ NOx やすす等の有害大気汚染物質の生成機構
詳細な化学反応機構

燃焼場に適用できる乱流反応モデルが必要

現象論的モデル → 科学的モデル

層流火炎片モデルに基づく組み合わせ手法

教職員学生と歩んだ燃焼研究(2)

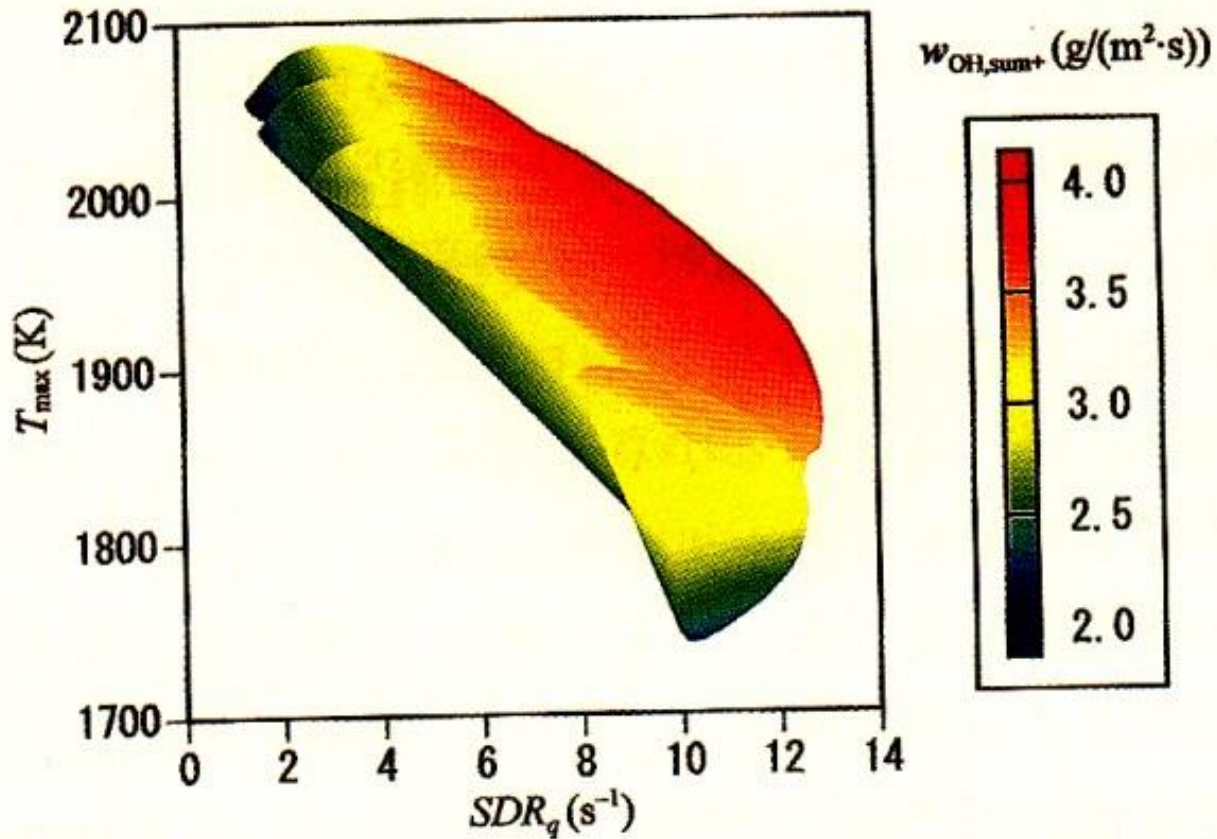
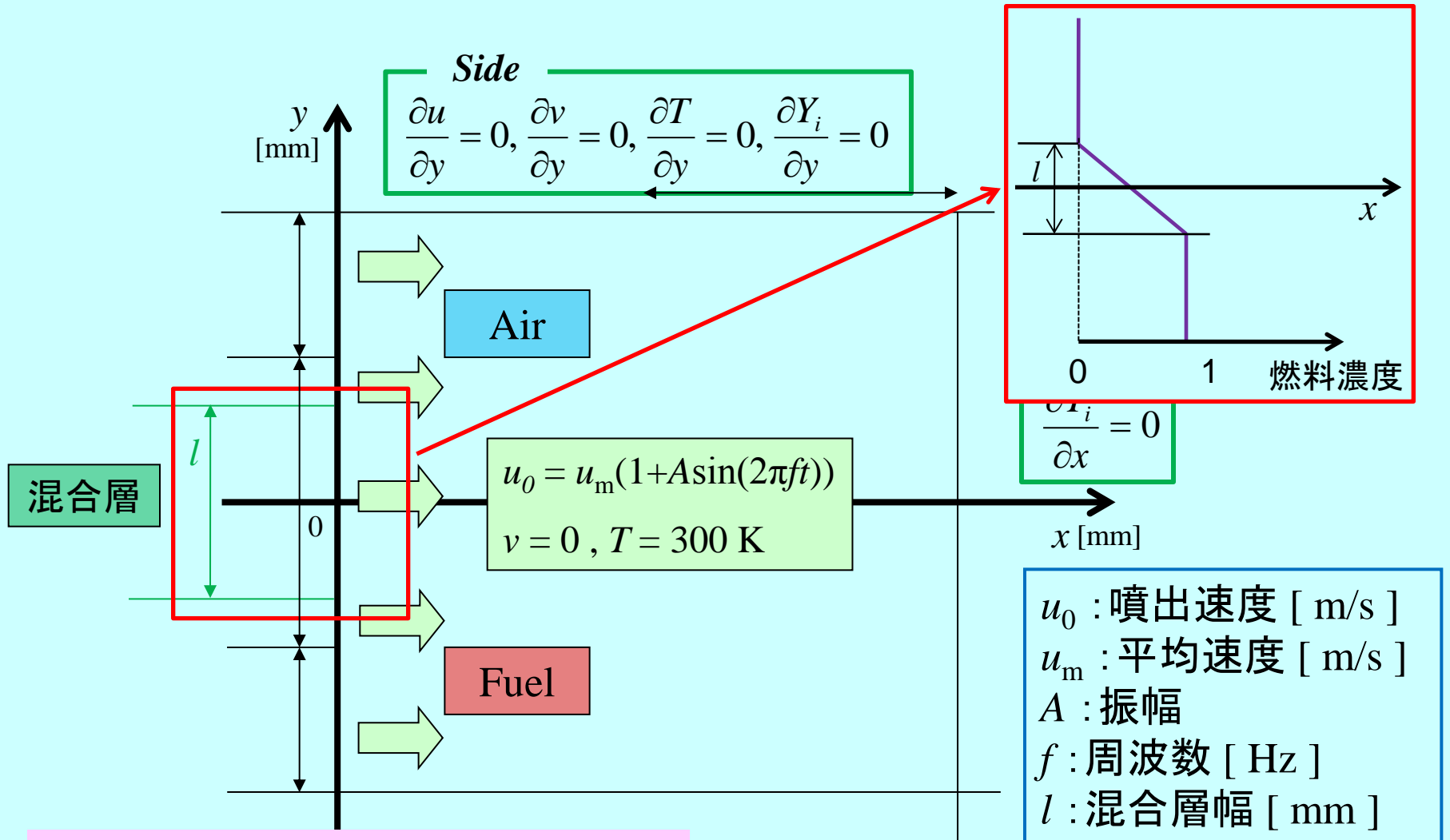


図 8. 非定常対向流拡散火炎における $w_{\text{OH,sum}+}$ と SDR_q および T_{\max} の関係

教職員学生と歩んだ燃焼研究(2)

・ Triple Flame の火炎構造に与える燃料および当量比の影響

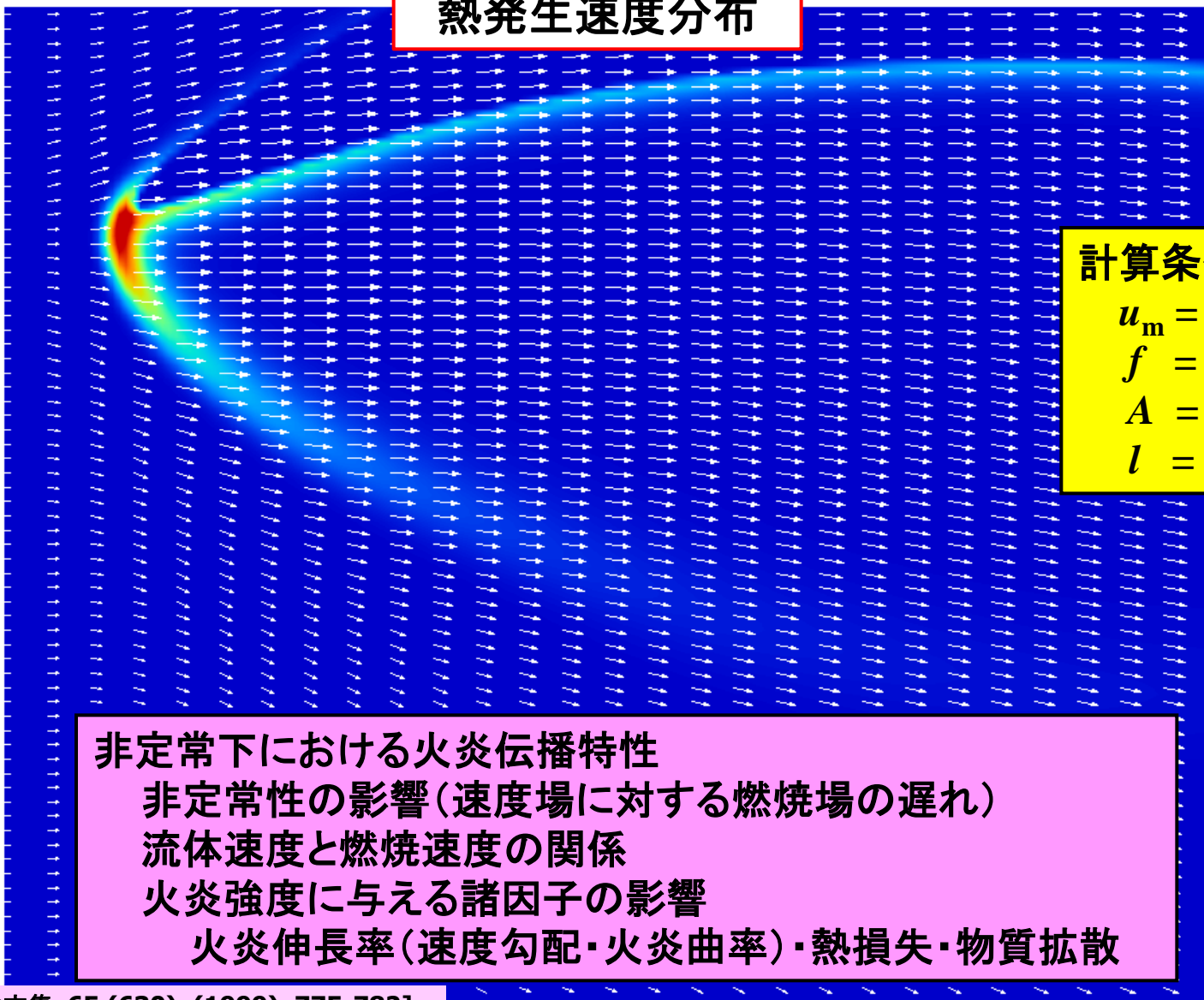


[日本機械学会論文集, 65 (630), (1999), 775-782]

[第51回伝熱シンポジウム講演論文集, (2014), CD-ROM]

教職員学生と歩んだ燃焼研究(2)

熱発生速度分布



計算条件

$$u_m = 0.7 \text{ m/s}$$

$$f = 100 \text{ Hz}$$

$$A = 0.8$$

$$l = 4 \text{ mm}$$

非定常下における火炎伝播特性

非定常性の影響(速度場に対する燃焼場の遅れ)

流体速度と燃焼速度の関係

火炎強度に与える諸因子の影響

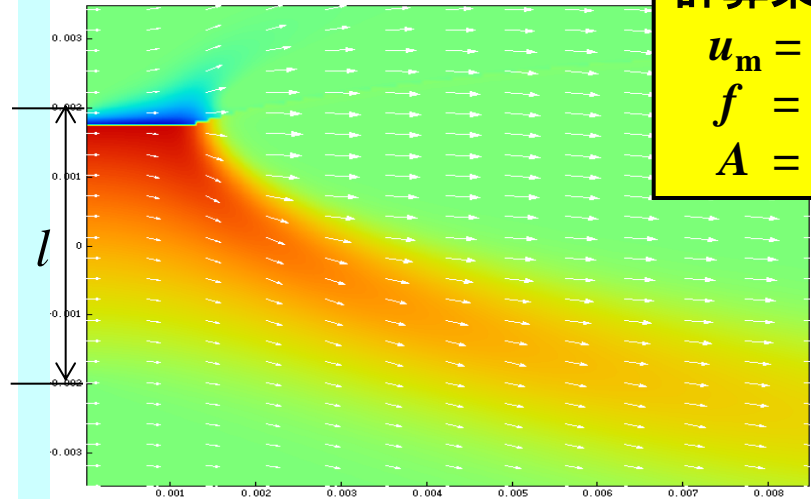
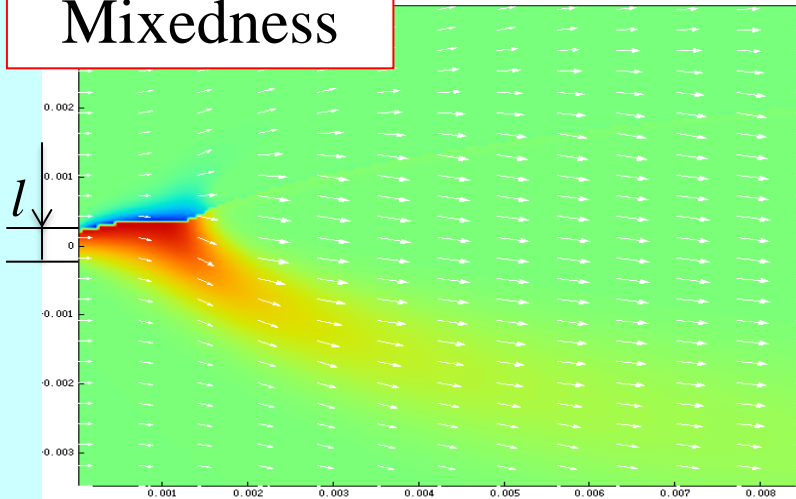
火炎伸長率(速度勾配・火炎曲率)・熱損失・物質拡散

[日本機械学会論文集, 65 (630), (1999), 775-782]

[第51回伝熱シンポジウム講演論文集, (2014), CD-ROM]

教職員学生と歩んだ燃焼研究(2)

Mixedness



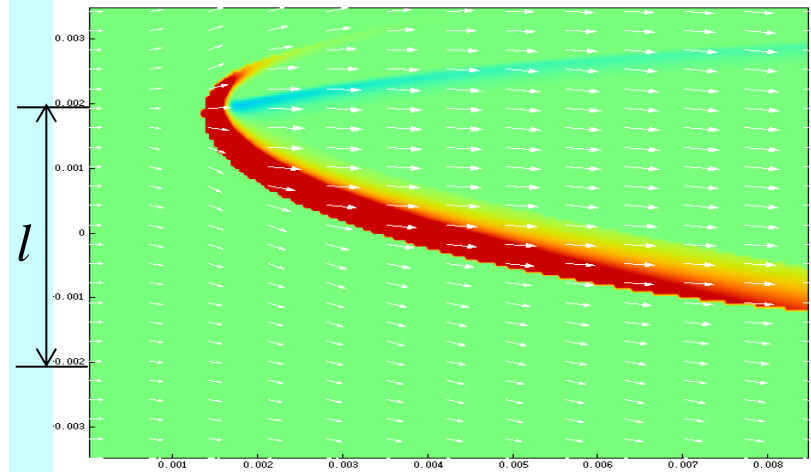
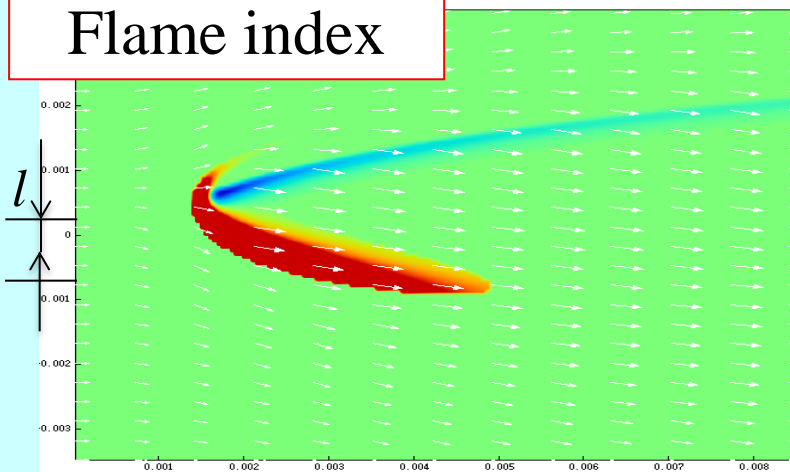
計算条件

$$u_m = 0.7 \text{ m/s}$$

$$f = 100 \text{ Hz}$$

$$A = 0.8$$

Flame index



$l = 0.5 \text{ mm}$

$[-]$
-10000 10000

$l = 4.0 \text{ mm}$

教職員学生と歩んだ燃焼研究(2)

酸素富化空気燃焼における火炎構造およびNO_x生成特性の解明

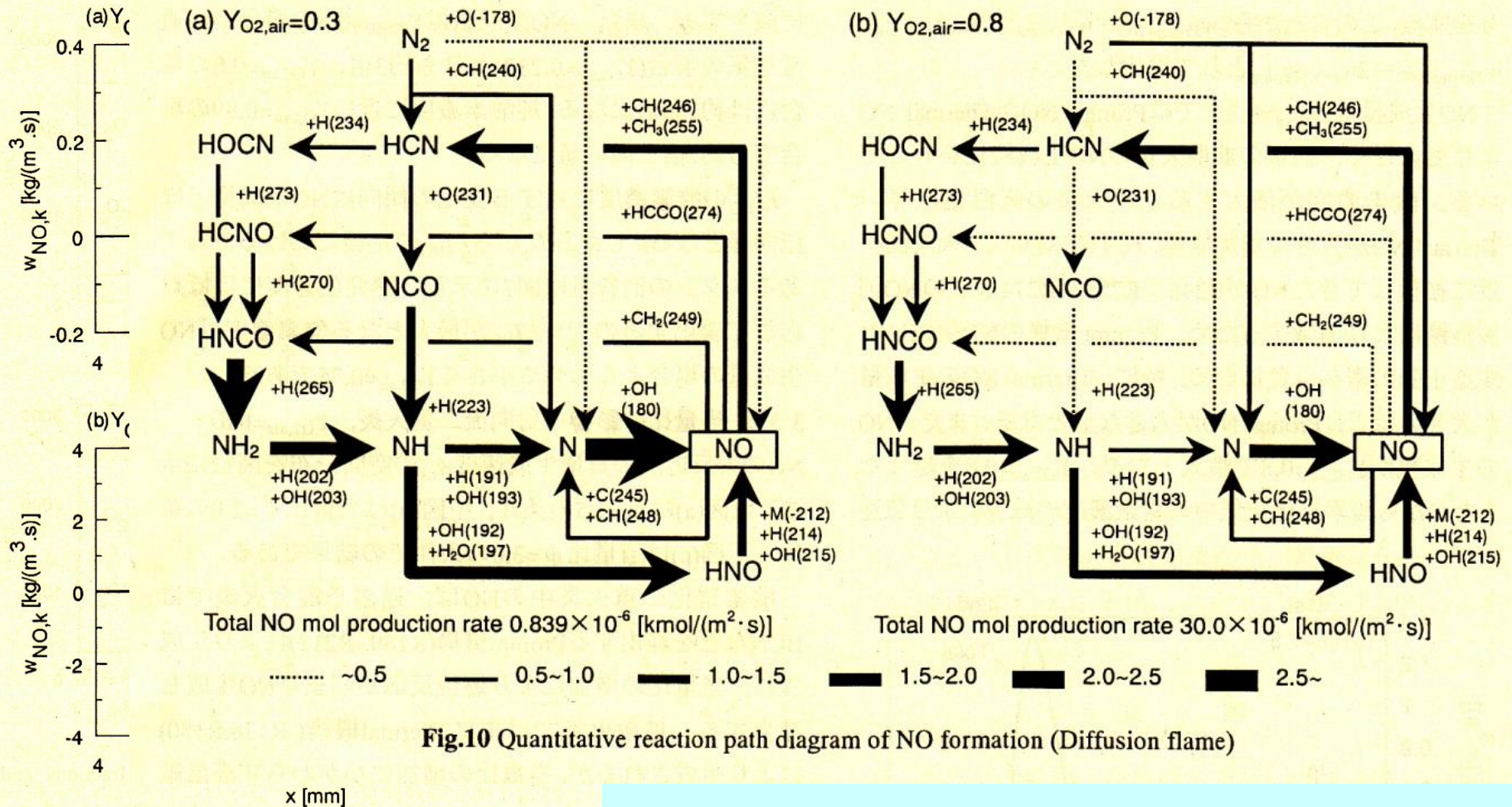
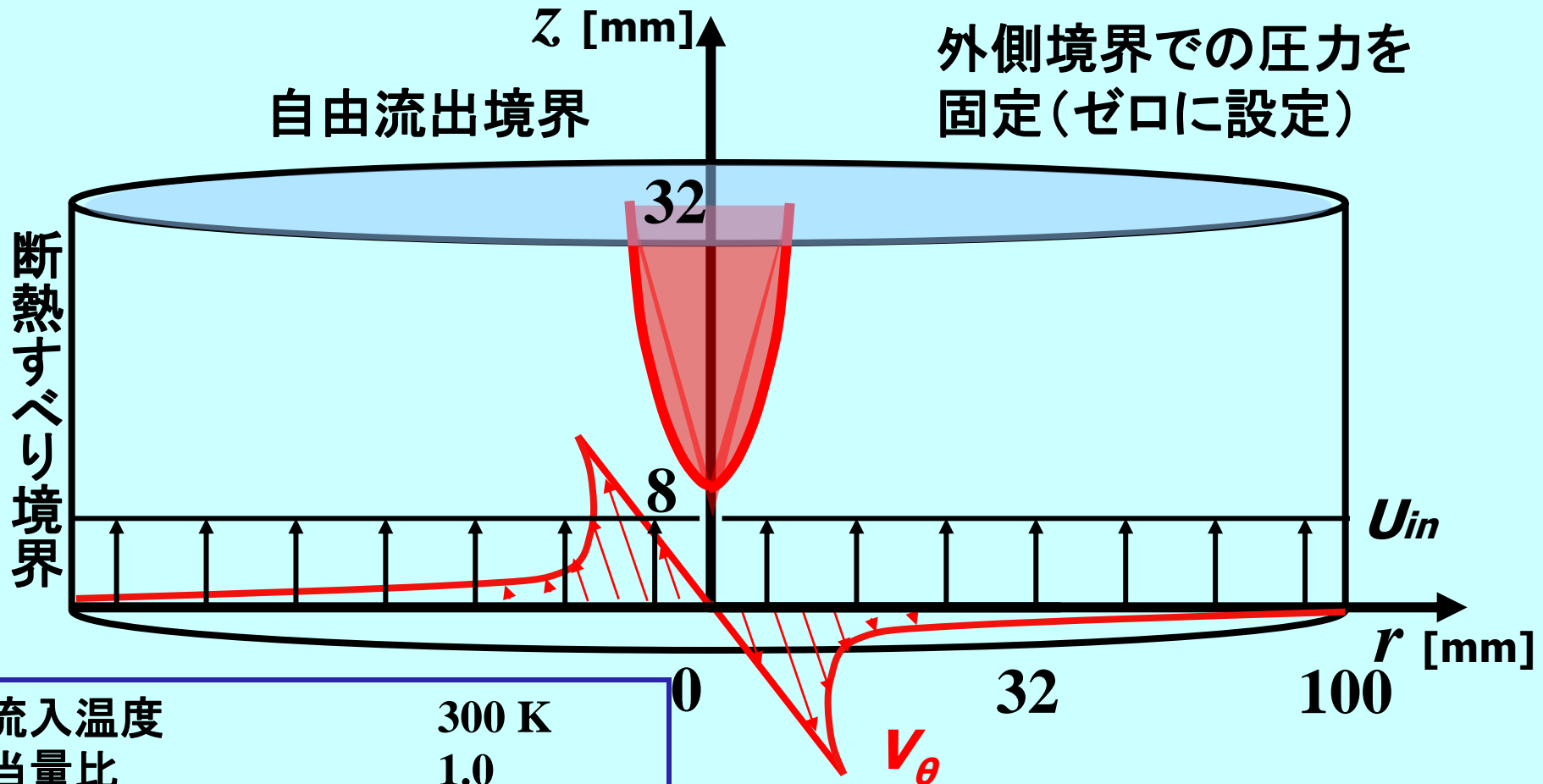


Fig.9 Distributions of NO mass production rates by various elementary reactions (Diffusion flame)

教職員学生と歩んだ燃焼研究(2)

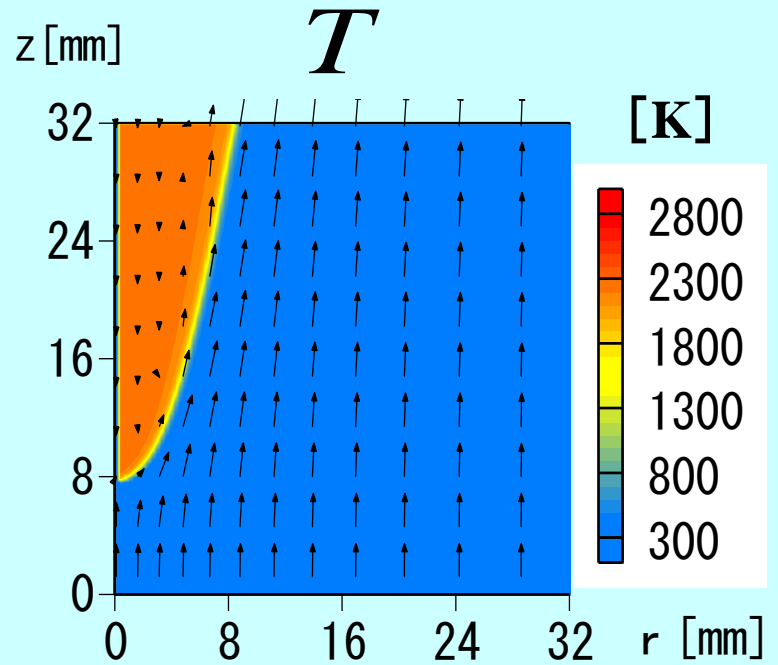
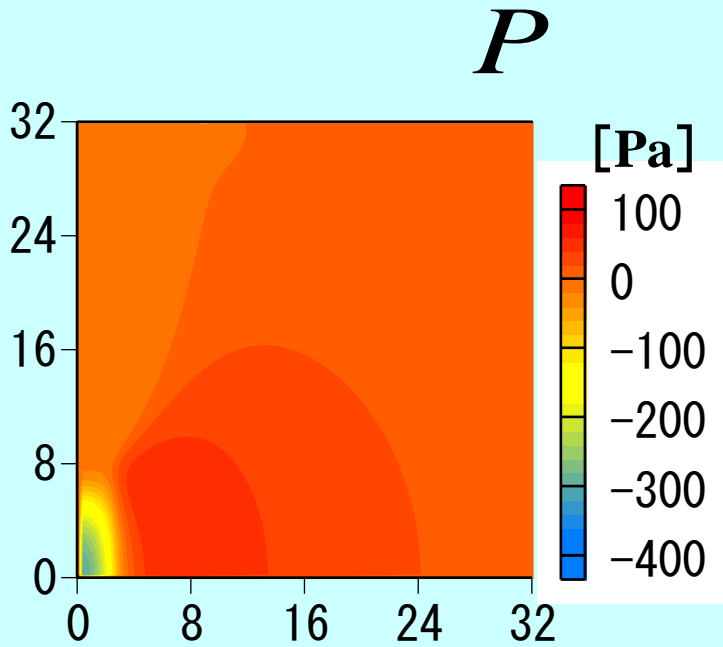
- ・ 旋回流中での予混合火炎の伝播に関する数値解析



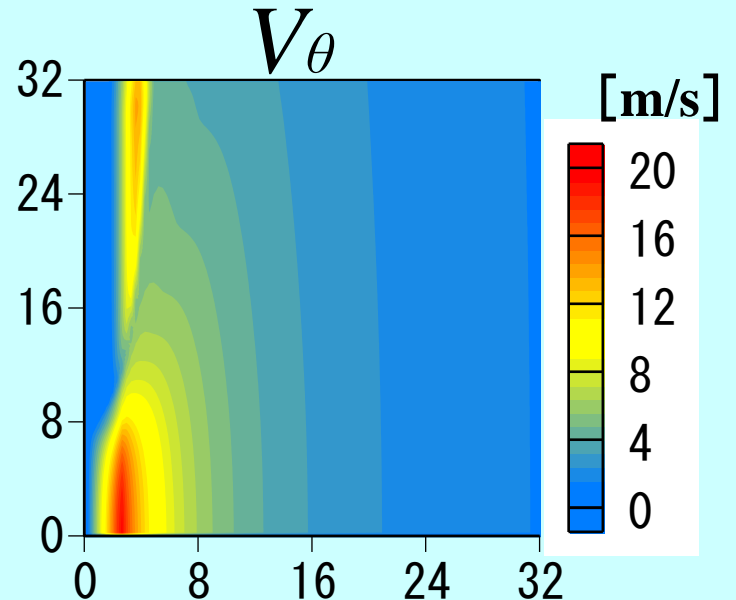
流入温度	300 K
当量比	1.0
層流燃焼速度	0.44 m/s
伝播速度 (=流入速度)	22.7 m/s

解析モデルおよび境界条件

教職員学生と歩んだ燃焼研究(2)



$$V_f = \sqrt{Su^2 + \left(1.226 + \frac{\sqrt{\rho_u/\rho_b - 2.8}}{32}\right) V_{\theta \max}^2}$$



[日本機械学会論文集, 67 (662), (2001), 2567-2573]

[日本機械学会論文集(B編), 71 (705), (2005), 1483-1489]

[日本機械学会論文集(B編), 71 (709), (2005), 2339-2344]

教職員学生と歩んだ燃焼研究(2)

- ・ 燃料過濃予混合火炎中の NO_x 生成および水蒸気添加の影響

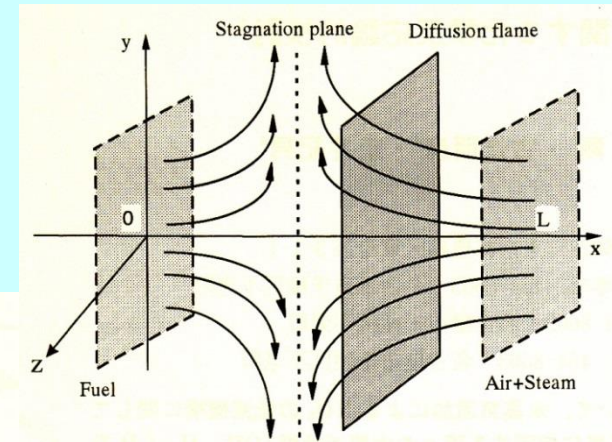


Fig. 1 Theoretical model of counterflow diffusion flame

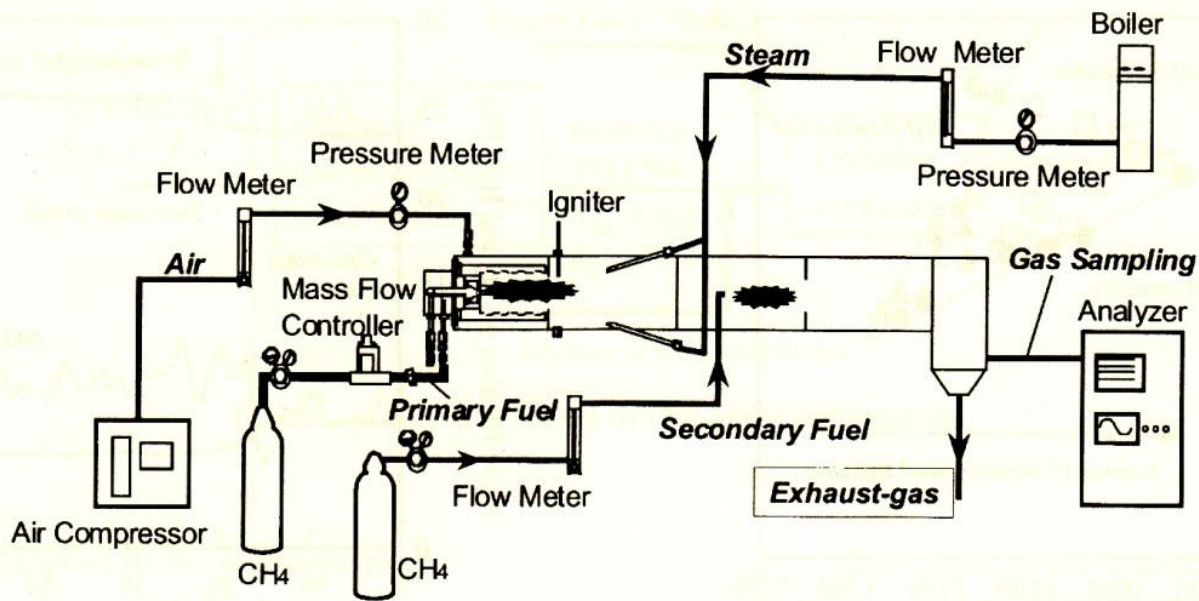


Fig. 3 Schematic diagram of experimental apparatus of two-stage diffusion combustion

教職員学生と歩んだ燃焼研究(2)

Because of the effect due to Le Chatelier's Principle, \rightarrow decreases of $-M_{CH_4}$ and M_{NO}
 the combustion reaction is suppressed

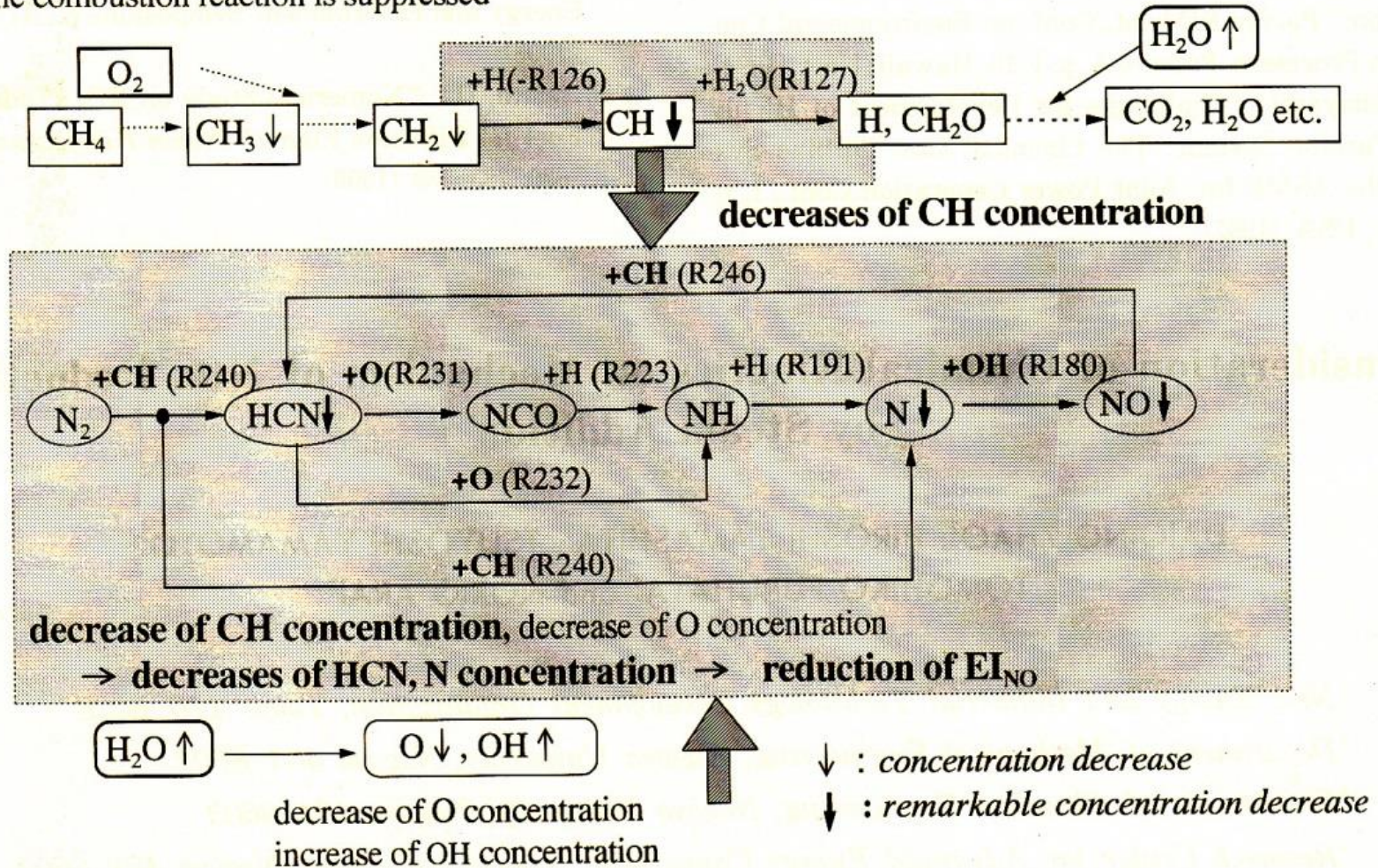


Fig. 13 Mechanisms of NO reduction by steam addition

教職員学生と歩んだ燃焼研究(2)

- メタン-空気拡散火炎の燃焼限界に与える水蒸気添加の影響

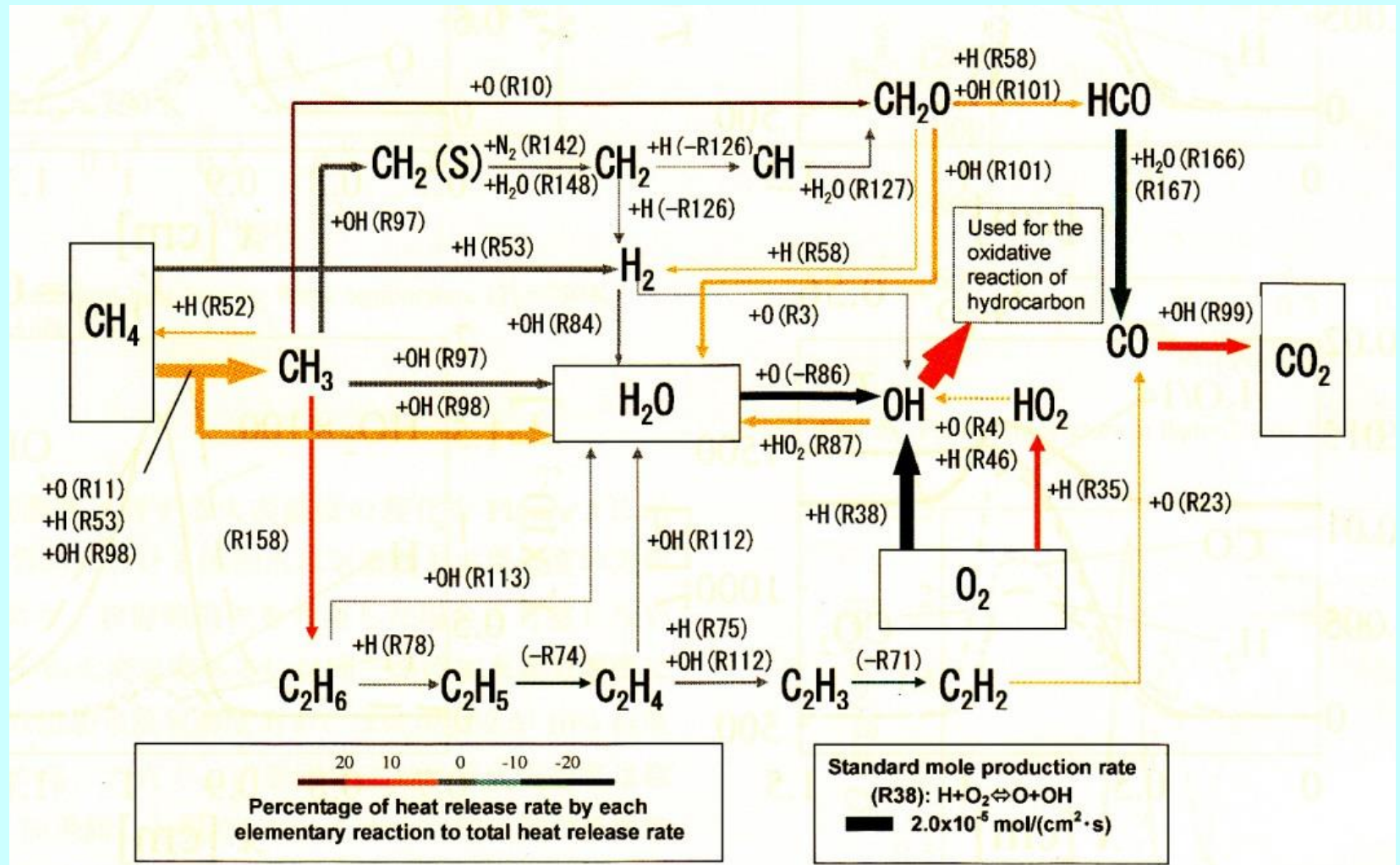


Fig. 8(b) Reaction pathway diagram of CH_4 oxidation for steam addition of $X_{H_2O,0} = 0.56$

教職員学生と歩んだ燃焼研究(2)

・ 水素-酸素拡散火炎に与える磁場の影響に関する数値解析

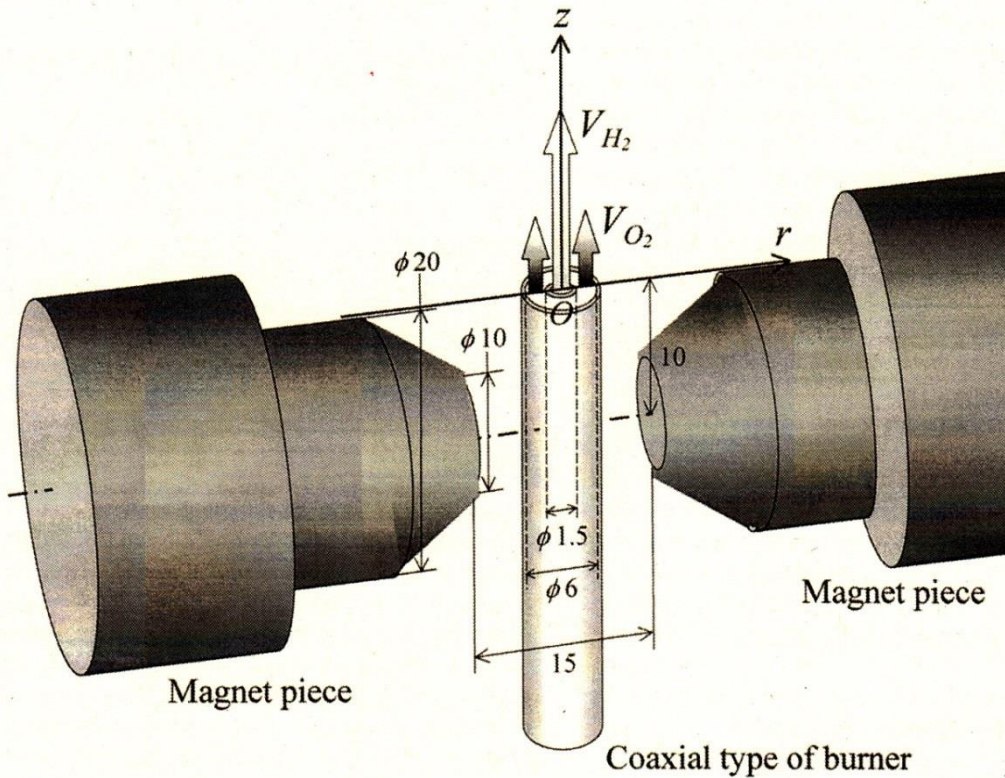


Fig. 1. Experimental apparatus (configuration of burner, magnet and cylindrical coordinate system, (r, θ, z)).

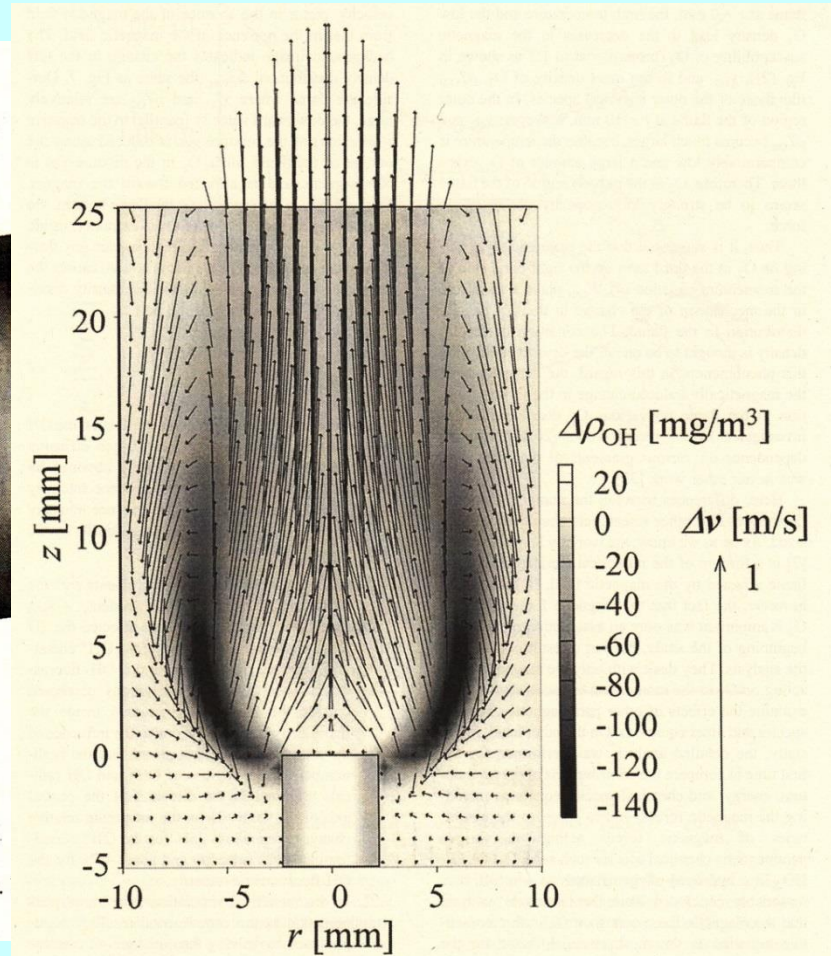


Fig. 11. Magnetic effect on mean velocity distribution calculated by numerical simulation. It was obtained by the same image processing as in Fig. 4.

教職員学生と歩んだ燃焼研究(2)

・ 固体壁の小円孔を通過する予混合火炎の消炎に関する数値解析

と、それに従って消火距離が小さくなることになる。これは、壁厚が薄くなることによって、円孔を通過する火炎が受ける円孔内壁からの冷却効果が小さくなるためである。

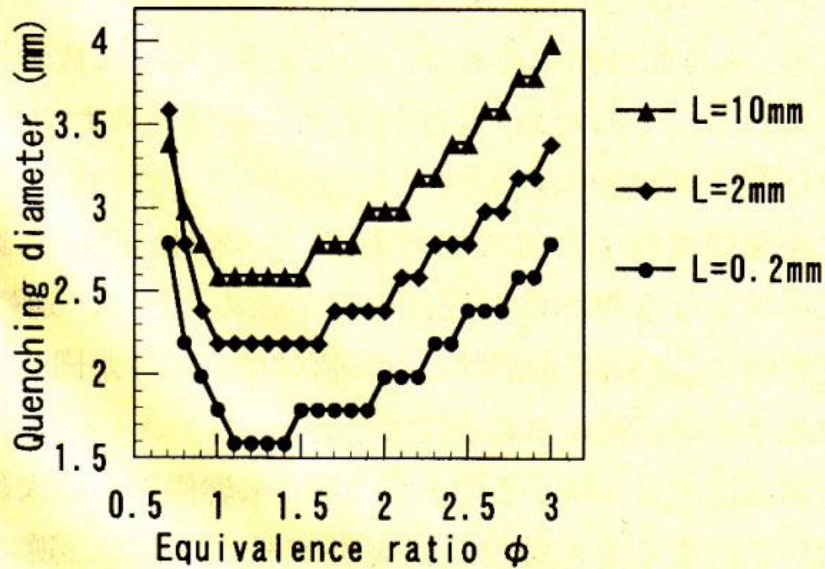


Fig. 2 Effect of equivalence ratio on quenching diameter

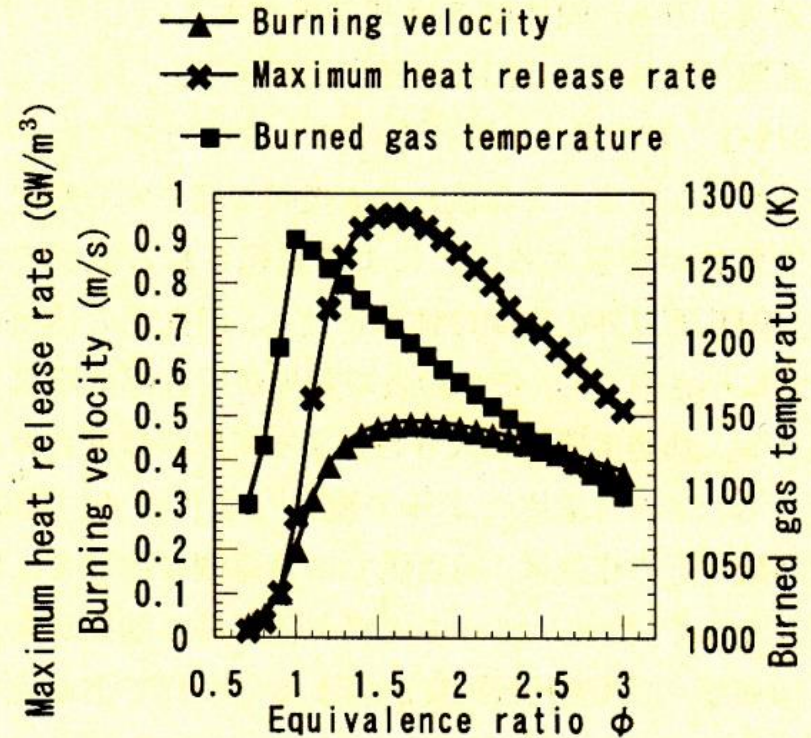
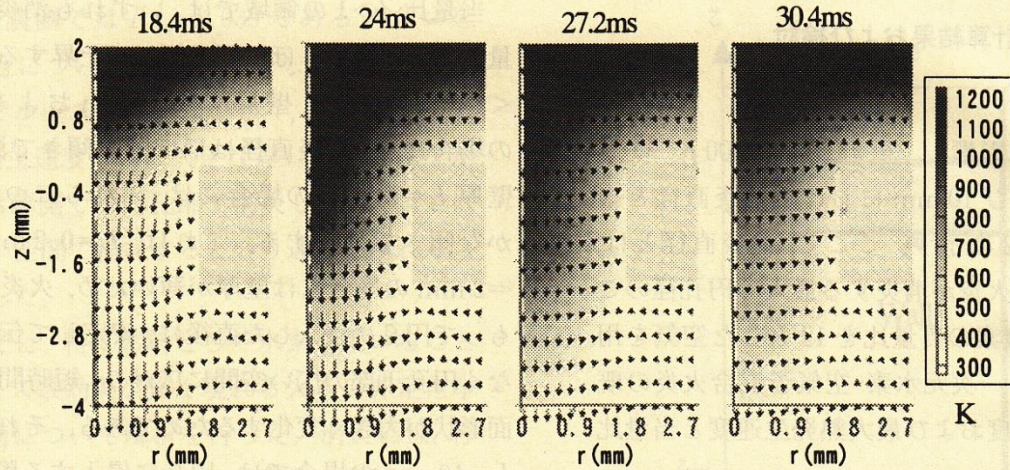
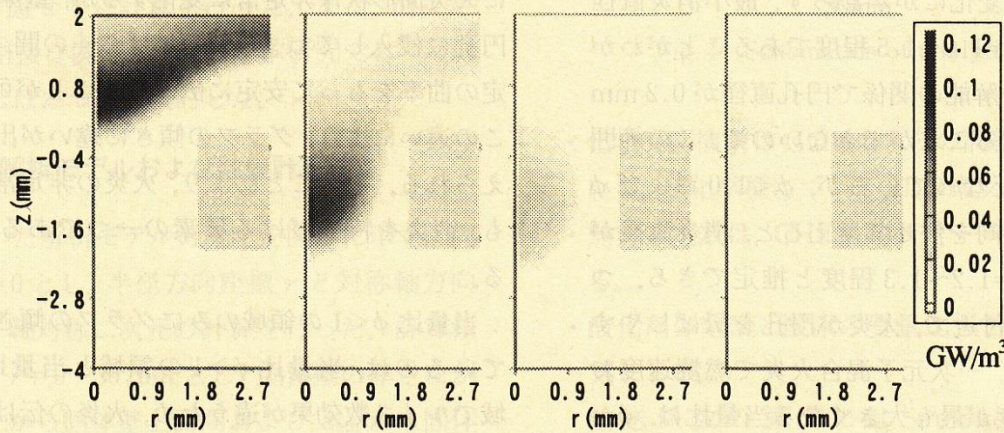


Fig. 3 Effect of equivalence ratio on burning velocity, maximum heat release rate and burned gas temperature

教職員学生と歩んだ燃焼研究(2)

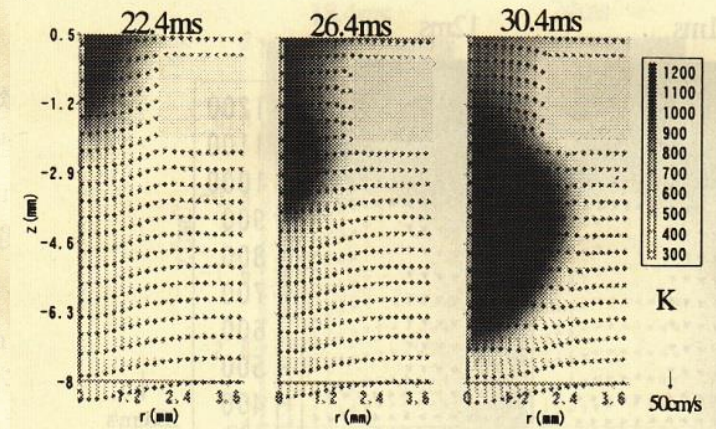


(a) Temperature

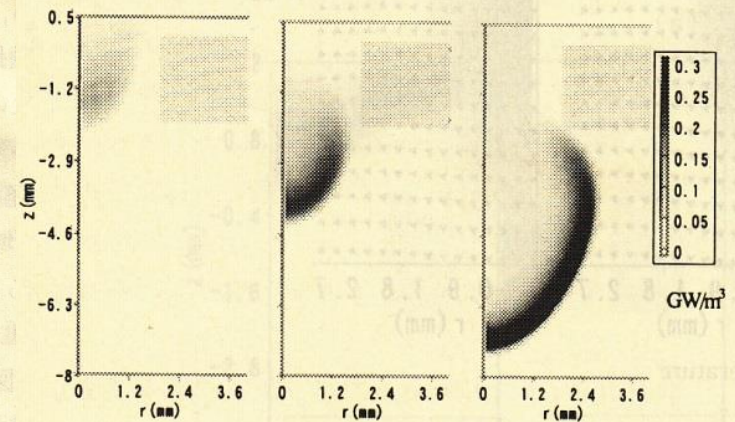


(b) Heat release rate

Fig. 4 Quenching process ($\phi=0.7$, $d=3.6$ mm)



(a) Temperature



(b) Heat release rate

Fig. 6 Passing process ($\phi=0.7$, $d=3.8$ mm)

教職員学生と歩んだ燃焼研究(2)

・マイクロフレームの安定性と火炎構造に関する数値解析

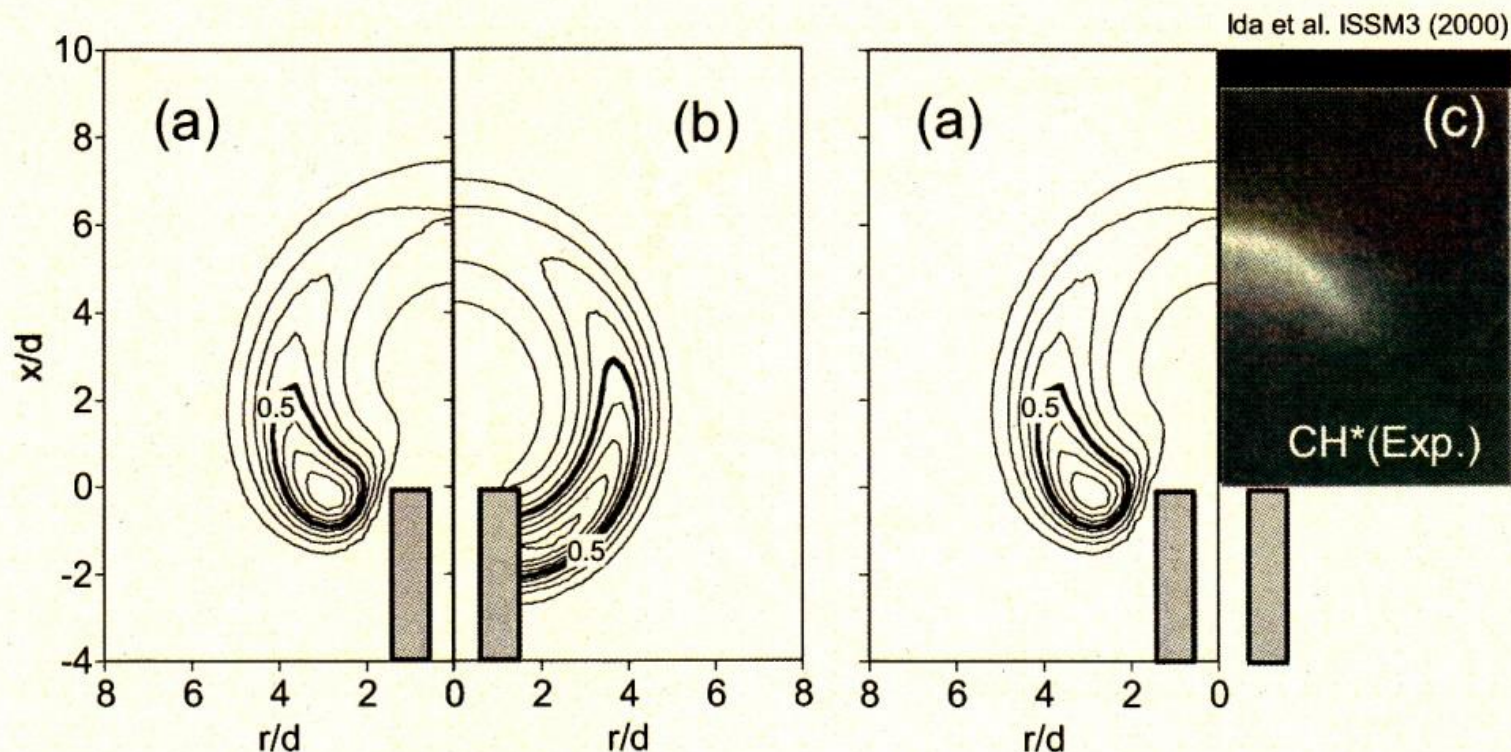
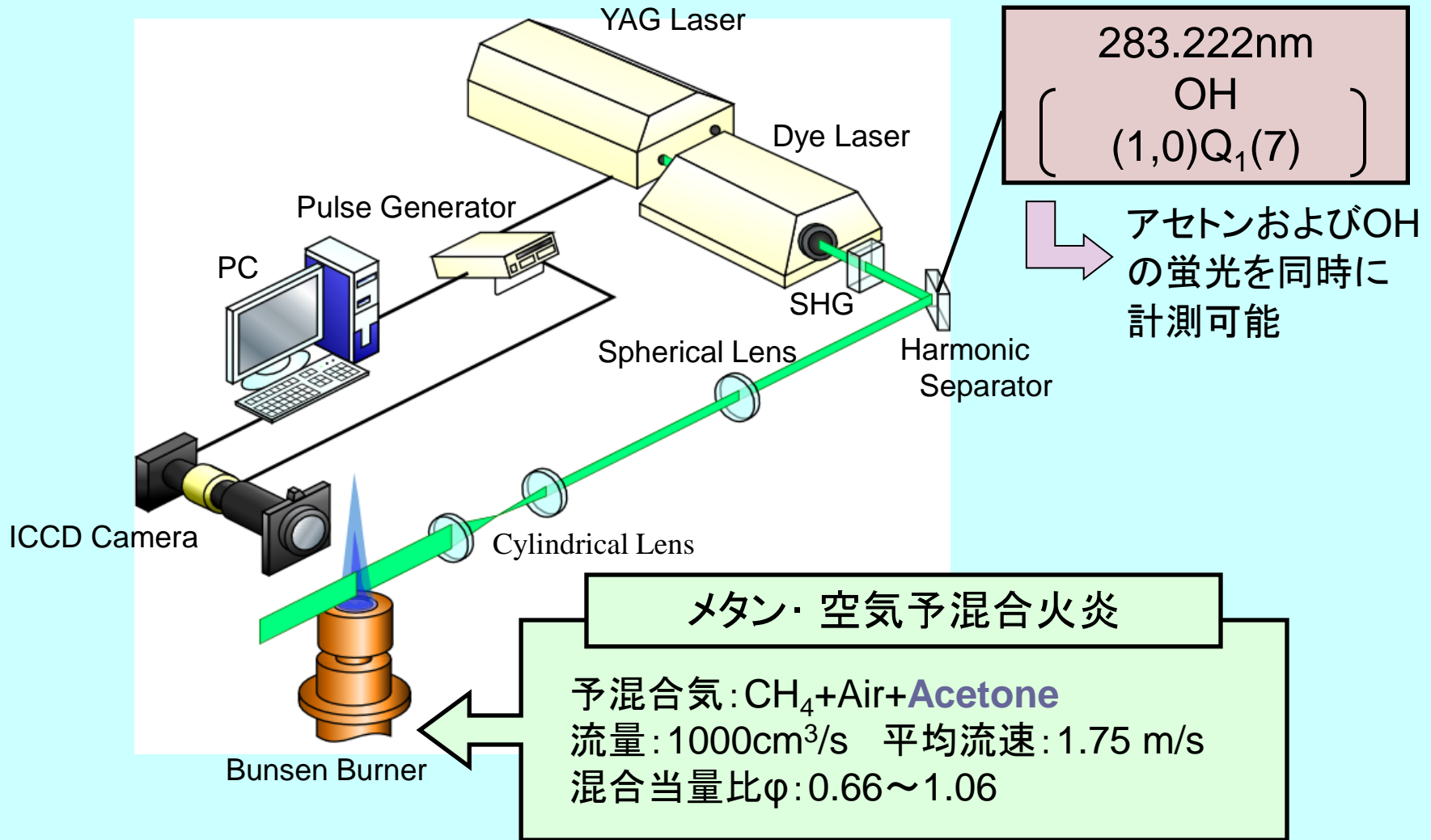


Figure 2. Effects of wall boundary condition on flame shapes ((a) (b) heat release rate contour [GW/m³], (c) experimentally observed CH* emission by Ref [4]): burner diameter, d , is 0.3mm and incoming methane velocity at the burner port, U , is 2.0 m/s. (a) 300 K wall condition (with one-step reaction model); (b) adiabatic wall condition (with one-step reaction model).

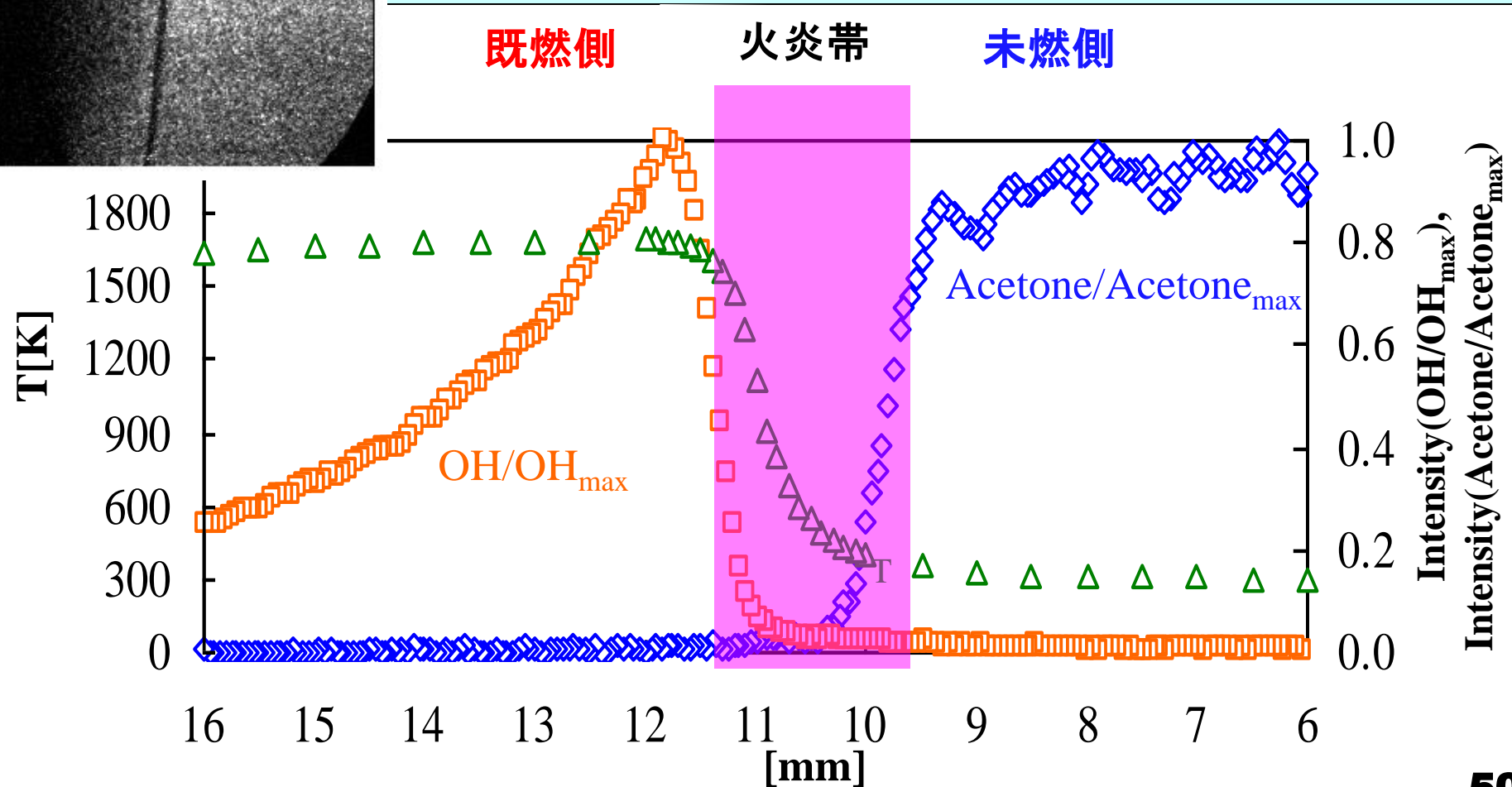
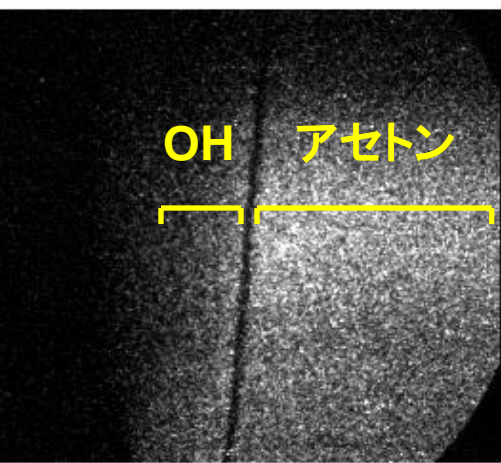
教職員学生と歩んだ燃焼研究(2)

・アセトン-OH同時LIF 法による乱流予混合火炎の火炎構造の測定

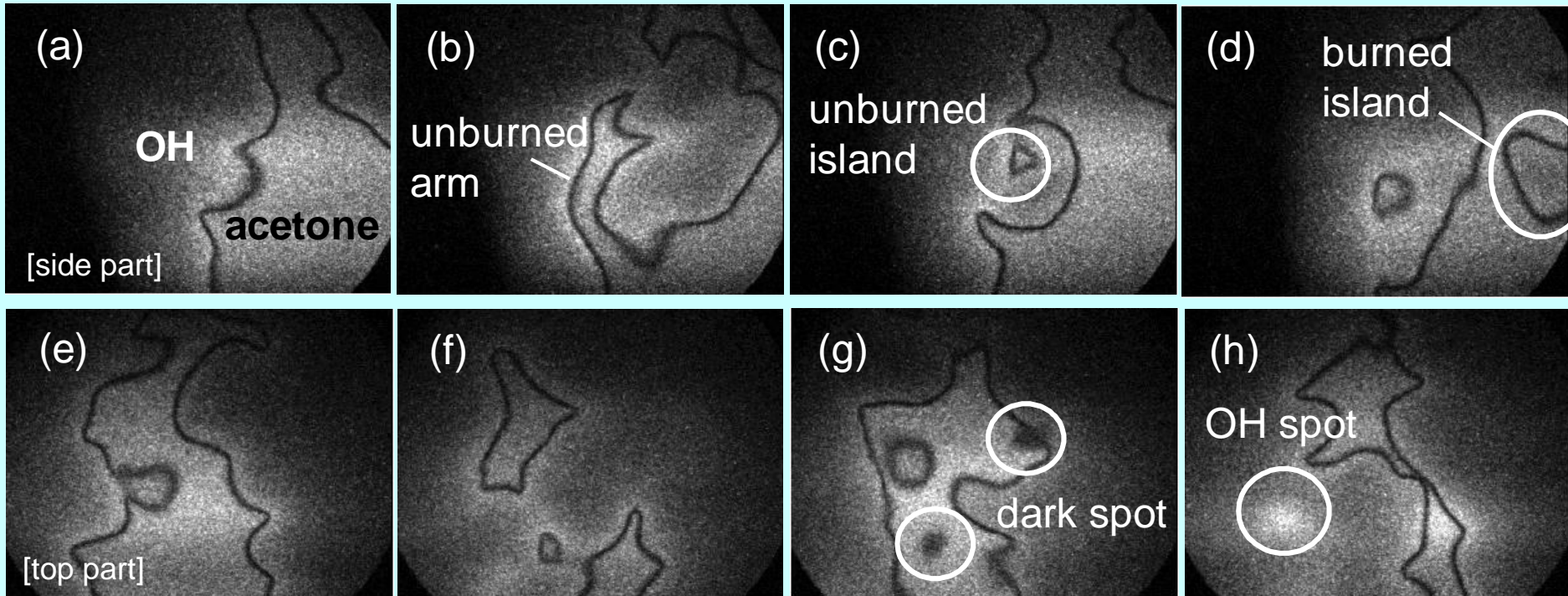


教職員学生と歩んだ燃焼研究(2)

予混合火炎の火炎帯領域の構造



教職員学生と歩んだ燃焼研究(2)



教職員学生と歩んだ燃焼研究(2)

・ 拡散・部分予混合火炎中のPAHの生成特性に関する実験的検討

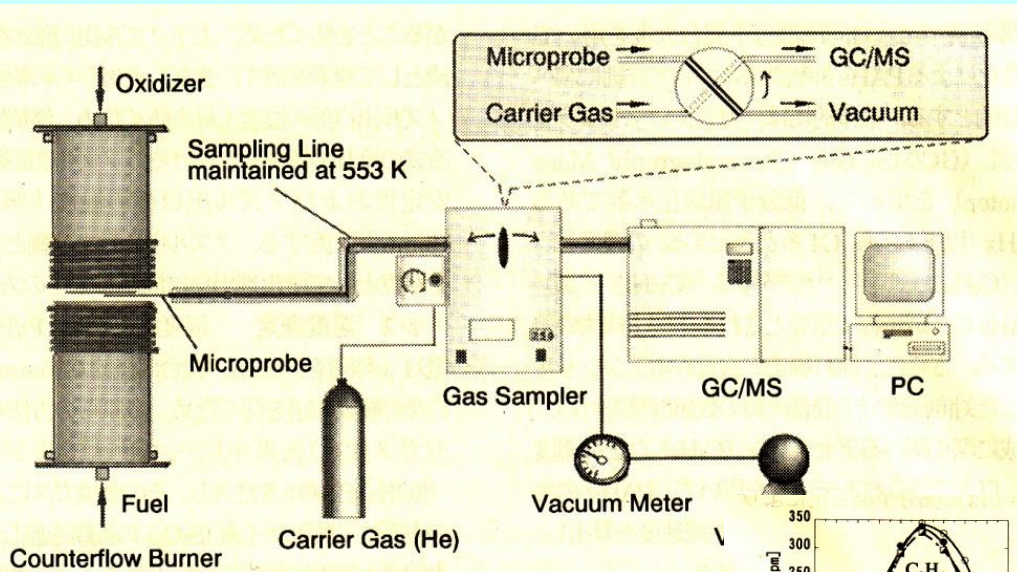


Fig. 2 Schematic of gas sampling system

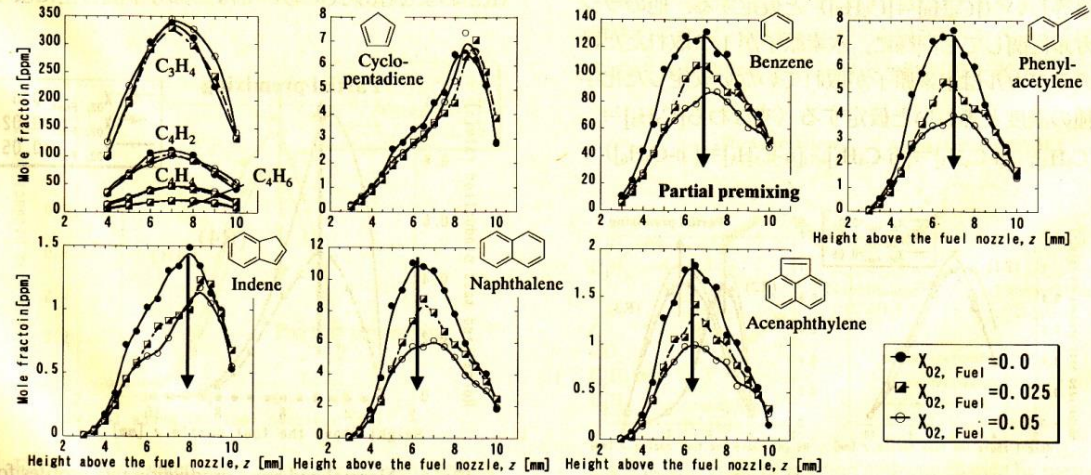


Fig. 4 Mole fraction profiles of C₃, C₄ hydrocarbons and PAHs

教職員学生と歩んだ燃焼研究(2)

- ・ 水素あるいはメタン-空気予混合気の流路内触媒燃焼に関する数値解析

解析モデル

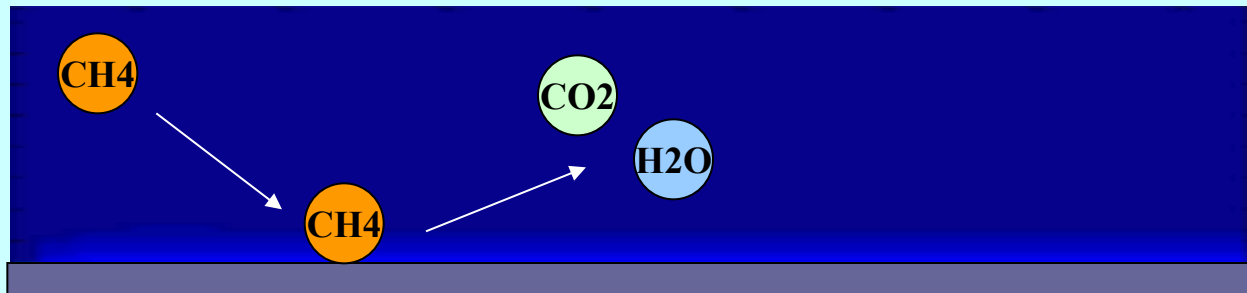
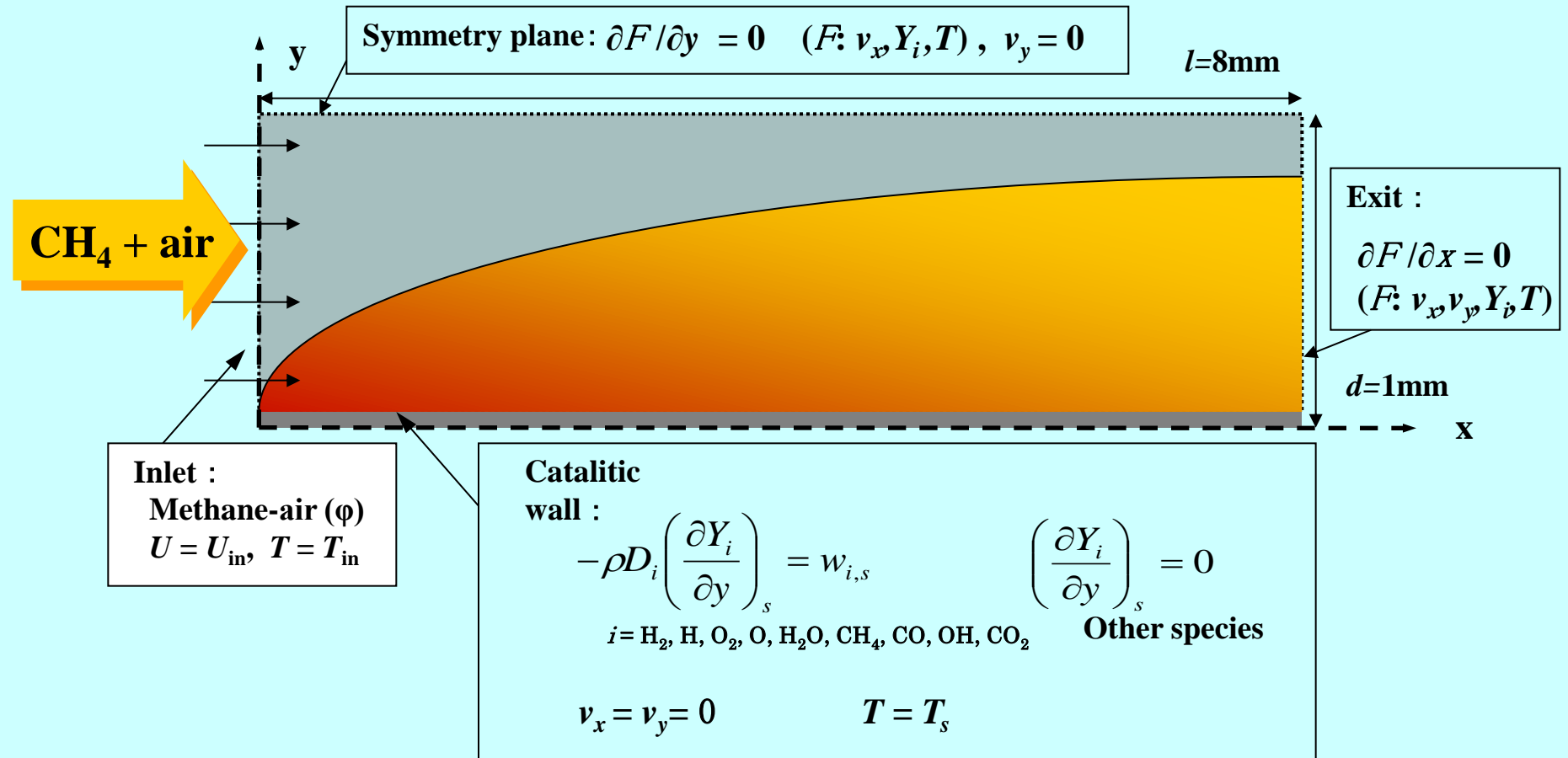
ハニカム内の一つの流路を考慮する

平行平板間流路で近似する

Pd

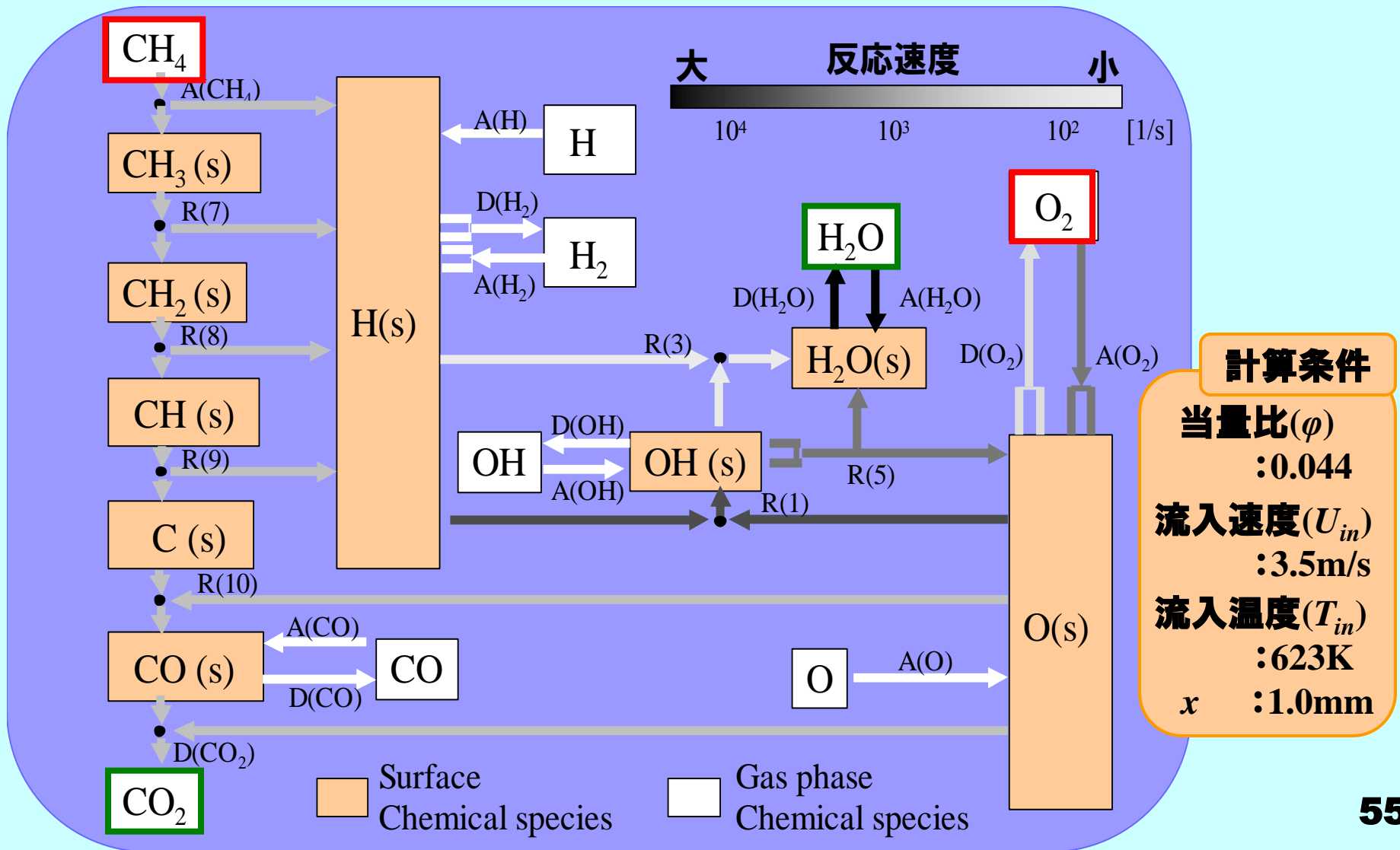
計算領域

教職員学生と歩んだ燃焼研究(2)

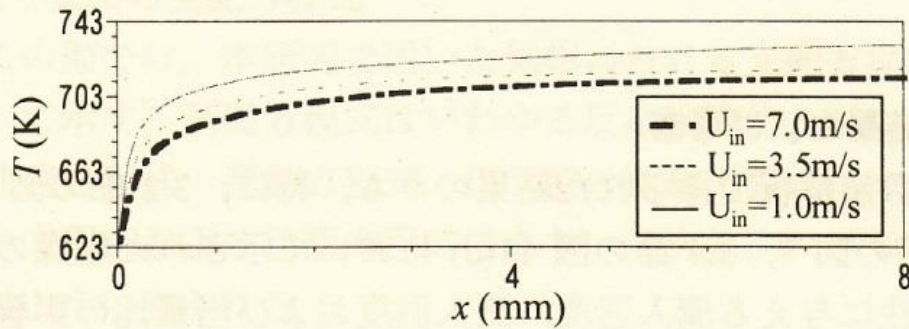


教職員学生と歩んだ燃焼研究(2)

触媒反応機構（吸着→表面反応→脱離） → 反応速度の大きさを評価



教職員学生と歩んだ燃焼研究(2)



(d) Temperature at catalyst

Fig. 5. Temperature in gas phase and at catalyst
($\phi = 0.044$, $T_{in} = 623$ K)

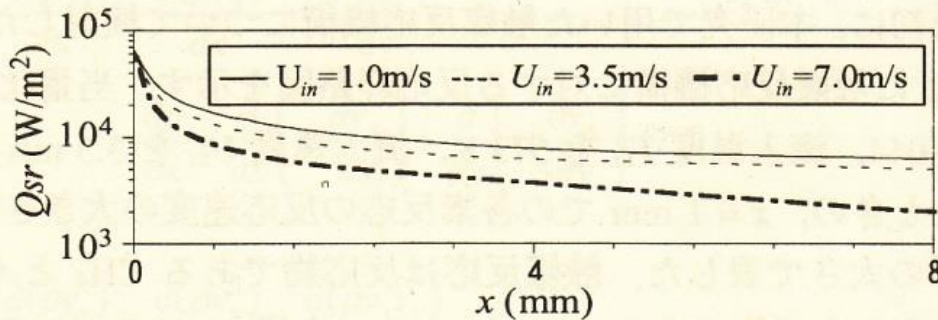


Fig. 6. Heat release rate at catalyst surface
($\phi = 0.044$, $T_{in} = 623$ K)

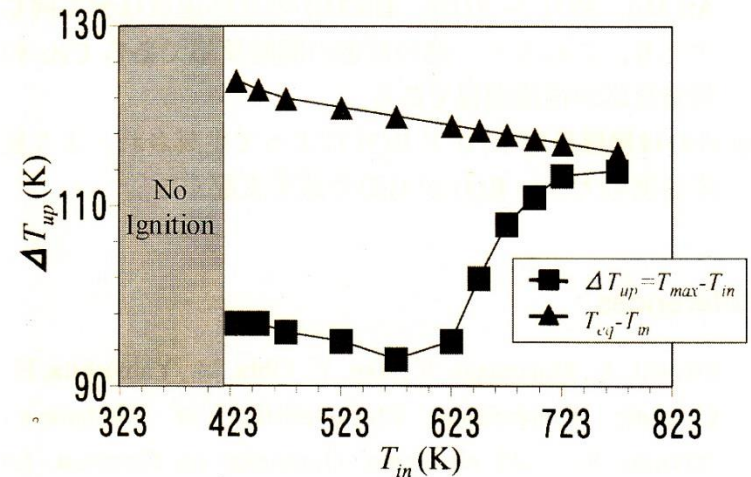


Fig. 8. Temperature increment

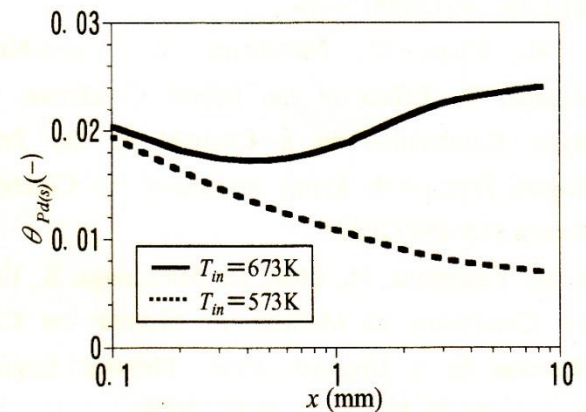


Fig. 9. Pd(s) at catalyst ($\phi = 0.044$, $U_{in} = 3.5$ m/s)

教職員学生と歩んだ燃焼研究(3)

＜＜ 燃焼工学3 ＞＞ 教授時代 2004年4月～現在

機械理工学専攻 機械科学分野 環境・エネルギー工学講座 伝熱・燃焼工学研究グループ

山本和弘准教授, 林直樹助教, 早川正人技術職員

2002年 4月 山本和弘助教 着任 (後に准教授)

2004年 4月 機械理工学専攻 機械科学分野 環境・エネルギー工学講座
伝熱・燃焼工学研究グループ に改組

2005年 4月 篠田昌久研究員 採用 (2007年10月まで)

2005年12月 林直樹助手 採用 (後に助教)

2011年 4月 韓基琳研究員 採用 (2014年3月まで)

反応性流体力学に基づく気相・液相・表面燃焼の数値解析
(噴霧燃焼, 表面反応, 超小型燃焼器)

輻射平衡の理論解析

2015年 3月 山下 定年退職

教職員学生と歩んだ燃焼研究(3)

●山本准教授

- ・ 格子ボルツマン法による転炉内2次燃焼の解析：古賀輝久(2006修)
- ・ DPFの格子ボルツマン法による数値解析：
越智文洋(2005修)，佐竹真吾(2007修)，大堀晋也(2008修)，松井健太(2009修)
中村匡統(2010修)，山内一樹(2011修)，酒井達也(2012修)，小見山亮(2013修)，
戸田祐輔(2014修)，庭田修平(2015修)
- ・ DPFの捕集と再生性能に関する実験的検討：
近藤真一(2012修)，鈴木一也(2013修)，加藤寛也(2015修)
- ・ NO₂によるすす酸化促進効果の実験的検討：金森陽平(2010修)
- ・ セルオートマンによる火災時の避難行動のシミュレーション：
小久保聡(2008修)，左高秀多(2011修)，竹内裕貴(2014修)
- ・ 対向流予混合火炎中のOH濃度と燃焼速度：伊佐山勉(2007卒)

教職員学生と歩んだ燃焼研究(3)

- ・ OH-HCHO同時PLIF法による乱流予混合火炎の可視化と火炎構造：
井上聡(2005修)，尾関賢宏(2006修)，水谷浩幸(2005卒)，
大西將博(2007修)，石井慎治(2009修)
- ・ 部分予混合雰囲気中の火炎の燃え拡がり解析：緒方佳典(2007修)
- ・ 旋回噴流燃焼器の燃焼特性と火炎構造の検討：
金川裕司(2007修)，鈴木啓夢(2013修)
- ・ LII法によるすす計測とディーゼル排気ガスへの適用：藤掛文裕(2008修)
- ・ 三重管バーナにおける燃焼排出物および浮上り火炎の挙動に関する研究：
大島久治(2008修)，竹本昌弘(2009修)，磯部佑介(2010修)，加藤慎也(2010修)
- ・ PIV/OH-PLIF同時計測による乱流予混合火炎の検討：
麻田泰生(2011修)，伊藤雄貴(2012修)，奥洋平(2014修)，森岡諒(2015修)
- ・ 純酸素を用いた燃焼現象のモデル化とバーナの開発：奥山悟郎(2010 博士論文)
- ・ 反応焼結SiCを用いたDPFとディーゼル後処理過程の研究：
常吉孝治(2012 博士論文)

教職員学生と歩んだ燃焼研究(3)

●山下教授, 林助教

- 二次元非定常予混合火炎に関する詳細素反応機構による数値解析 :
加藤敏宏 (2005修)
- 二段階吸引式バーナを用いた焼成炉の数値解析 :
企業との共同研究, 池ヶ谷智章 (2006修)
- メタンおよび水素-空気予混合気の着火特性に関する数値解析 :
松山竜佐 (2006修), 韓基琳 (2010 博士論文)
- 流路内触媒反応に関する素反応機構を用いた数値解析 :
相川司 (2007修), 家根弘好 (2009修)
- 非定常対向流予混合火炎の火炎構造に関する数値解析 : 野々村一樹 (2008修)
- 超小型燃焼器の開発に関する数値解析 :
鈴木新 (2008修), 加藤宏紀 (2010修), 上原翔 (2011卒), 加藤雄大 (2012修),
白崎洋平 (2013修), 白明蕊 (2013修), 木野雄介 (2014修)

教職員学生と歩んだ燃焼研究(3)

- ・ センターエアーバーナによる燃焼器の小型化に関する数値解析：
植田雄一郎(2009修)
- ・ 曲率を持つ水素-空気予混合火炎の火炎構造に対する支配パラメータの解明：
宮田智生(2008卒)， 荒井康(2013修)
- ・ 閉空間におけるふく射平衡に関する理論的考察および数値解析：
近藤良夫(2010 博士論文)
- ・ 超小型燃焼器における壁面でのラジカルクエンチングを考慮した数値解析：
今井俊幾(2010修)， 高鳥隼(2015修)
- ・ 先進的ディーゼル燃焼に関する革新的コンセプトおよびシミュレータの開発：
稲垣和久(2012 学位論文)
- ・ 噴霧燃焼の燃焼形態に関する数値解析：
萩原康太(2009修)， 宇野将成(2011修)， 山倉真二郎(2012卒)，
近藤聡介(2013修)， 丹羽雄基(2014修)， 小口和麻(2015修)

教職員学生と歩んだ燃焼研究(3)

- 噴霧燃焼の火炎伝播特性に関する数値解析 :

李加寧(2012修), 棚瀬利勝(2014修)

- 過濃予混合気の高温空気燃焼における燃焼特性および非定常挙動の数値解析 :

伊藤慎太郎(2011修), 近藤俊樹(2012卒), 木村旭宏(2015修)

- 予混合火炎の燃焼特性に与える火炎曲率・壁面の影響に関する実験的検討 :

鈴木裕介(2010修), 竹内啓介(2012修), 川本航平(2014修)

- 拡散火炎におけるすす生成特性の検討と組合せ予測手法の検証 :

森上拓也(2012修)

- 予混合火炎の燃焼特性に与える不活性ガス種の影響に関する検討 :

富田佑平(2013修), 橋岡司(2015修)

- 両側の空気流速が異なるスリット火炎の浮き上がり特性に関する数値解析 :

安田翔(2014修)

- 燃料希薄メタン-空気予混合火炎の火炎構造と支配パラメータの解明 :

林直樹(2015 博士論文 受理)

教職員学生と歩んだ燃焼研究(3)

- ・ 二次元非定常予混合火炎に関する詳細素反応機構による数値解析

解析モデル

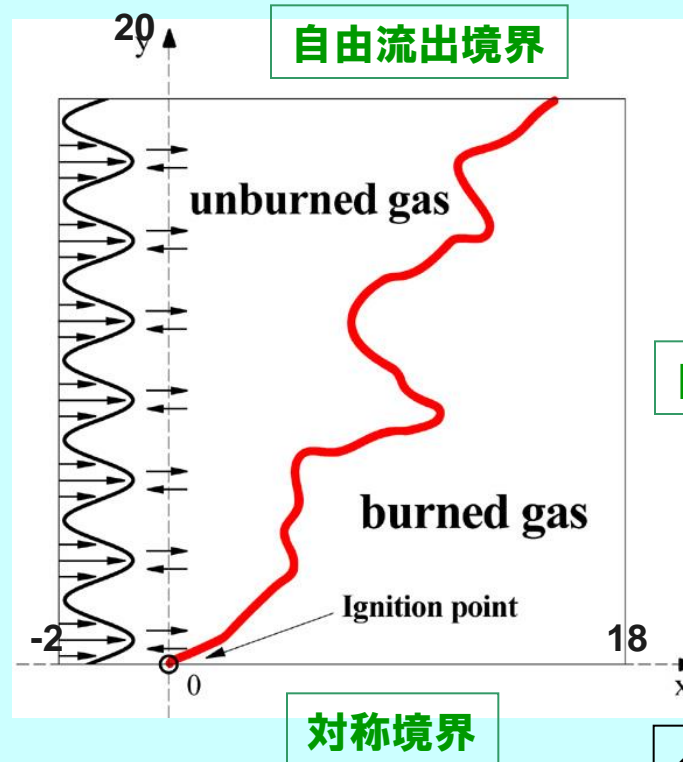
流入境界

Premixed gas

$\text{CH}_4 + \text{Air}$

$T_0 = 300\text{K}$

当量比 $\phi = 0.75$



自由流出境界

《 流入速度 》

$$u_0 = u_m \{ 1 + Amp \cdot \sin(2\pi ky) \cdot \sin(2\pi ft) \}$$

◆ u_m : 平均流入速度

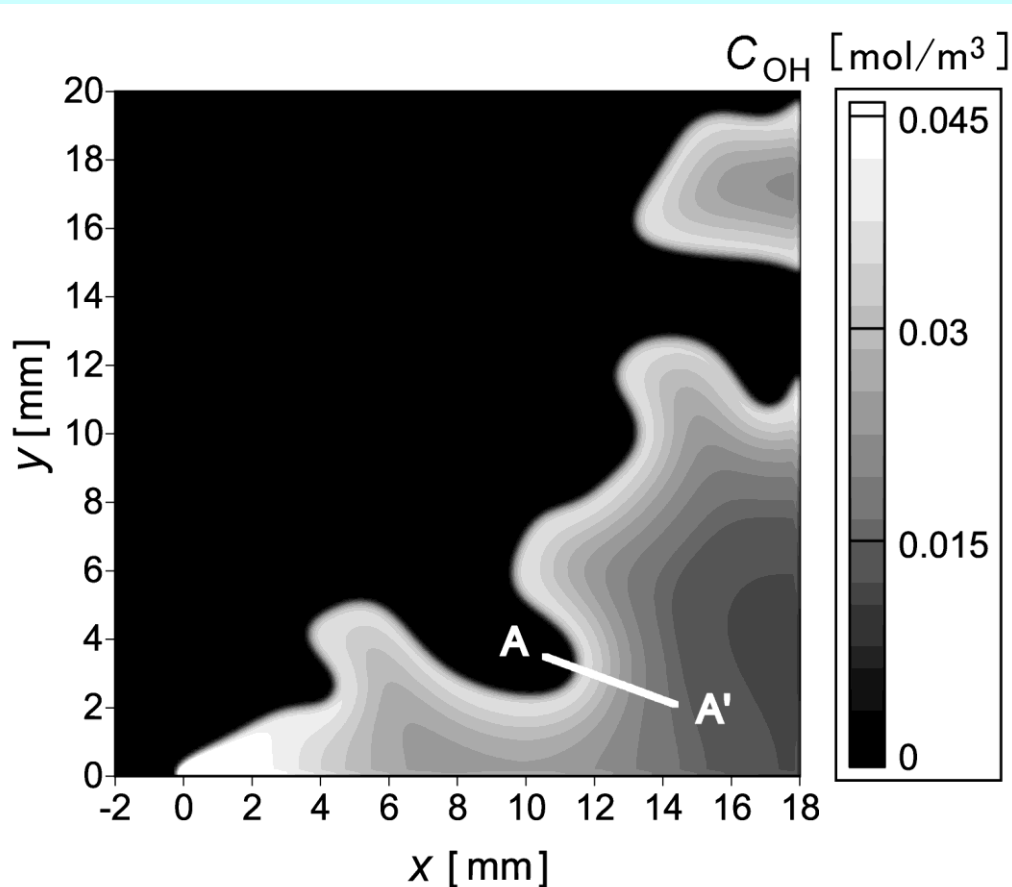
◆ Amp : 変動の強さ

◆ k : 波数

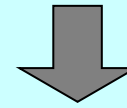
◆ f : 周波数

◆ t : 時間

教職員学生と歩んだ燃焼研究(3)



火炎の曲率や凸となる向きだけでなく、火炎の非定常的な動きによって、既燃ガス中のOH濃度が大きく変化している。



ある瞬間の現象だけでなく、時間的な変化を検討する必要がある！

★ 火炎面形状

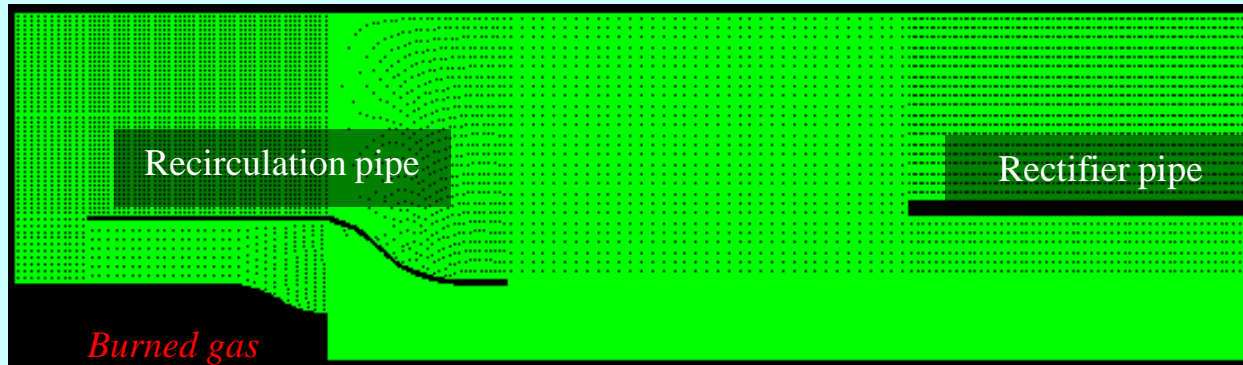
- ・火炎面曲率の大きさ
- ・火炎面曲率の正負
(火炎面が既燃側に凸か凹か)

★ 火炎面の伝播方向

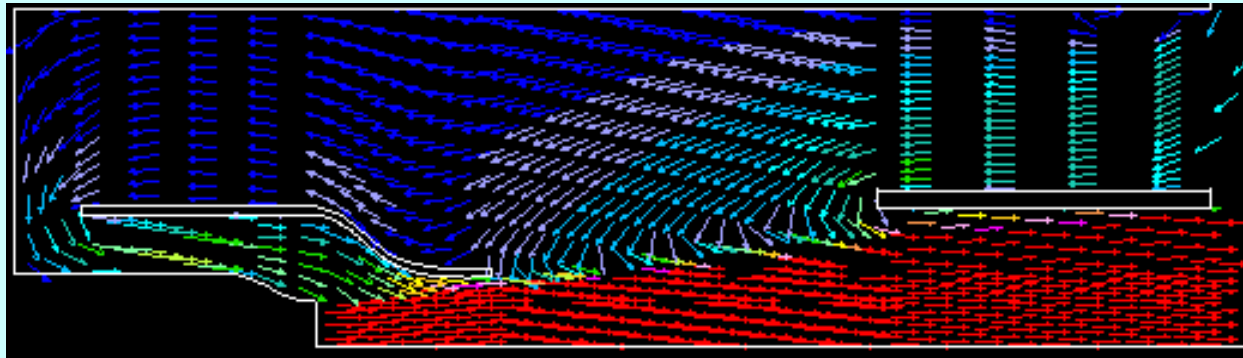
$$u_m = 2.0 \text{ m/s}, k = 0.3 \text{ mm}^{-1}, f = 500 \text{ Hz}$$

教職員学生と歩んだ燃焼研究(3)

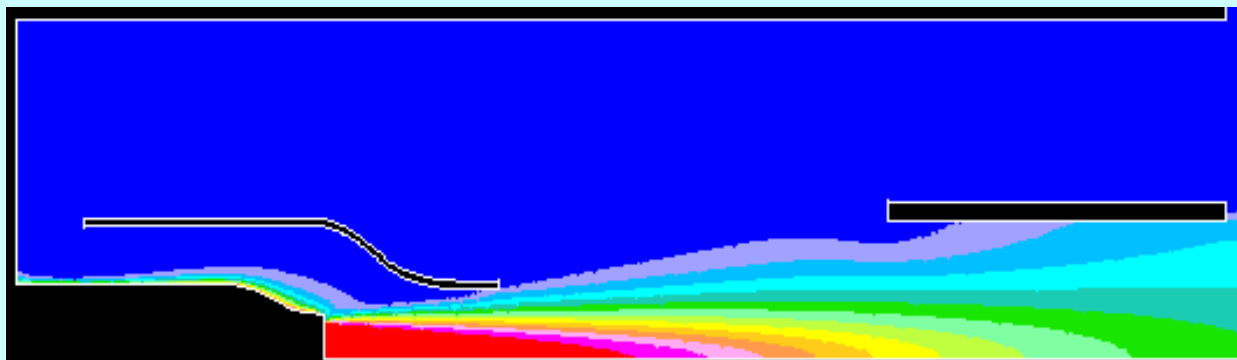
- ・二段階吸引式バーナを用いた焼成炉の数値解析（企業との共同研究）



解析モデル



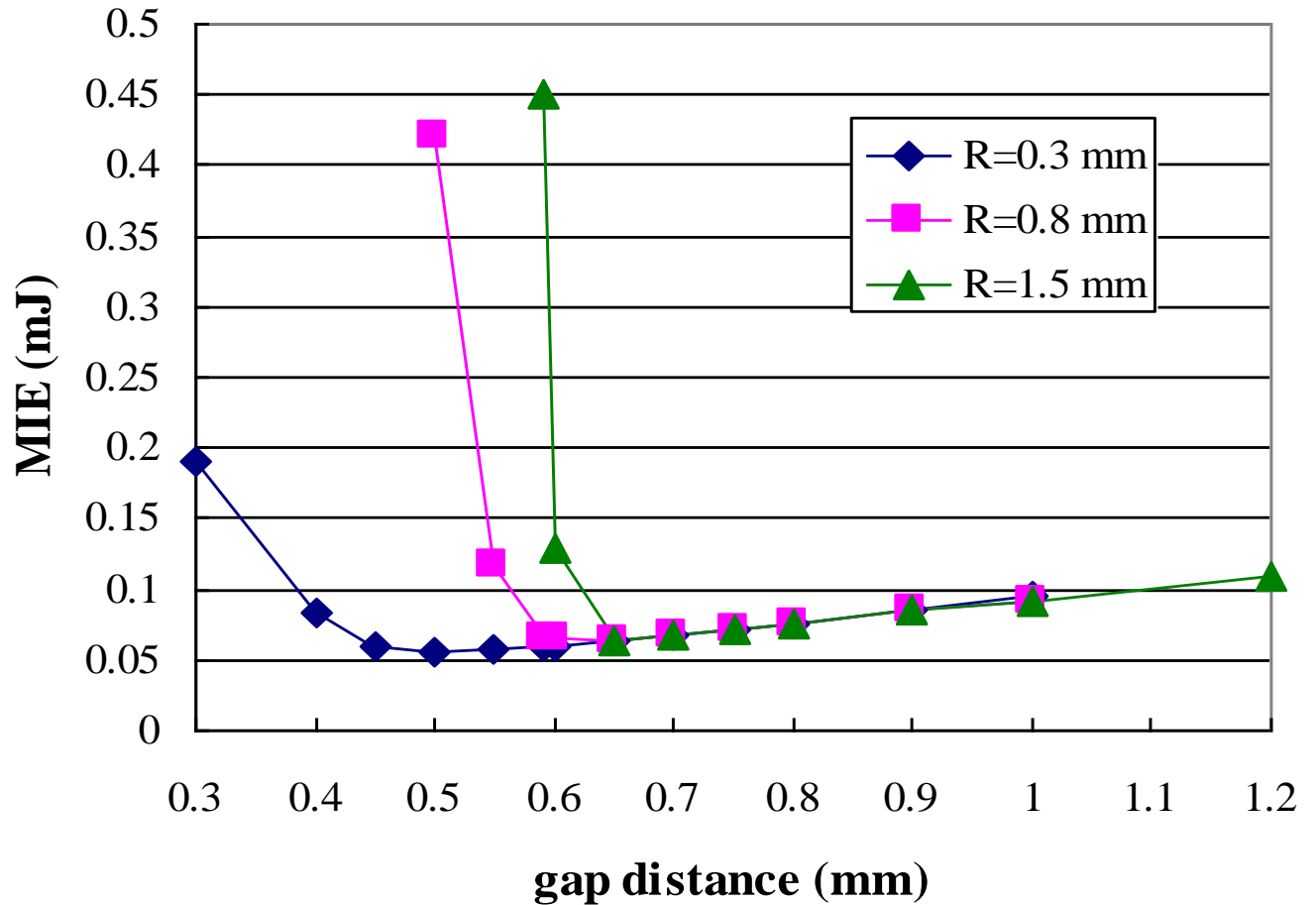
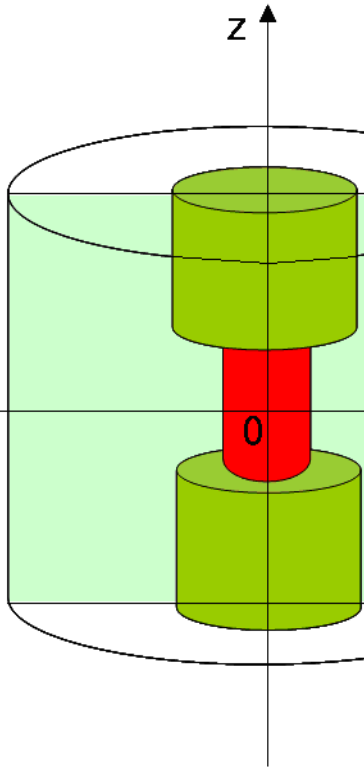
速度分布



温度分布

教職員学生と歩んだ燃焼研究(3)

- メタンおよび水素-空気予混合気の着火特性に関する数値解析



[Combustion and Flame, 157 (7), (2010), 1414-1421]

[International Journal of Hydrogen Energy, 36 (15), (2011), 9286-9297]

韓基琳(2010 博士論文)

教職員学生と歩んだ燃焼研究(3)

・ 流路内触媒反応に関する素反応機構を用いた数値解析

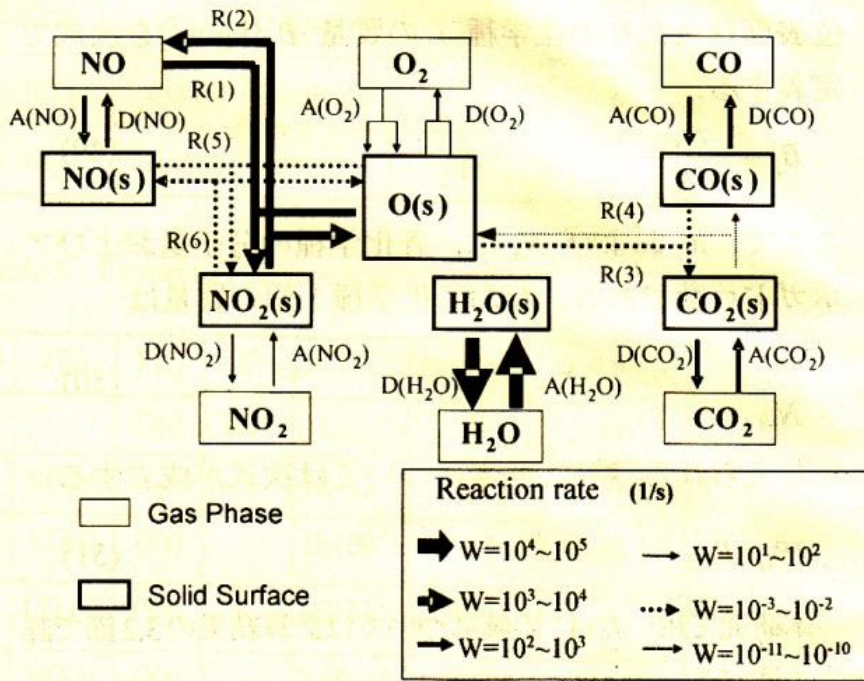


Fig.6 Reaction route of NO oxidation at $x=4$ mm
 ($U_{in}=1.0$ m/s, $T_{in}=650$ K, $X_{NO,in}=1000$ ppm, $X_{CO,in}=500$ ppm,
 $X_{O_2,in}=10$ %, $1/A^* = 0.05 \times 10^{19}$ m⁻²)

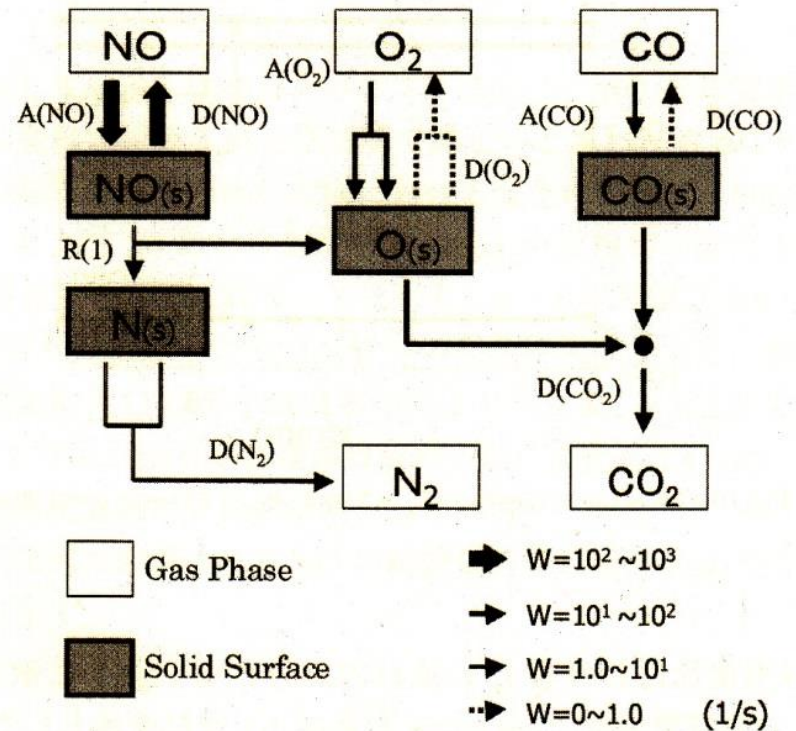


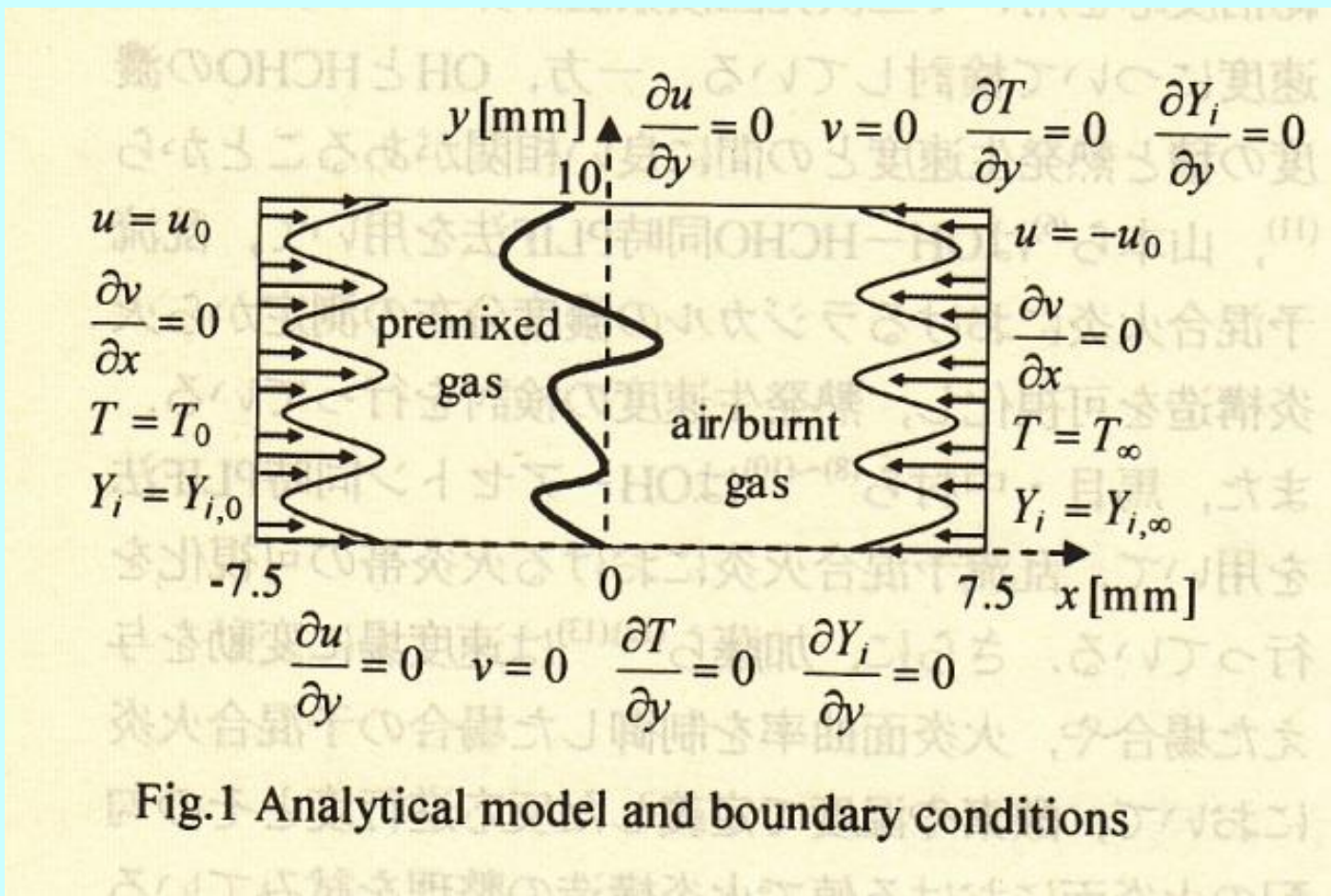
Fig.6 Reaction route ($T_{in} = 750$ K, $U_{in} = 1.0$ m/s, $\phi = 0.9$, $x = 1.0$ mm)

NOの酸化：白金Pt触媒

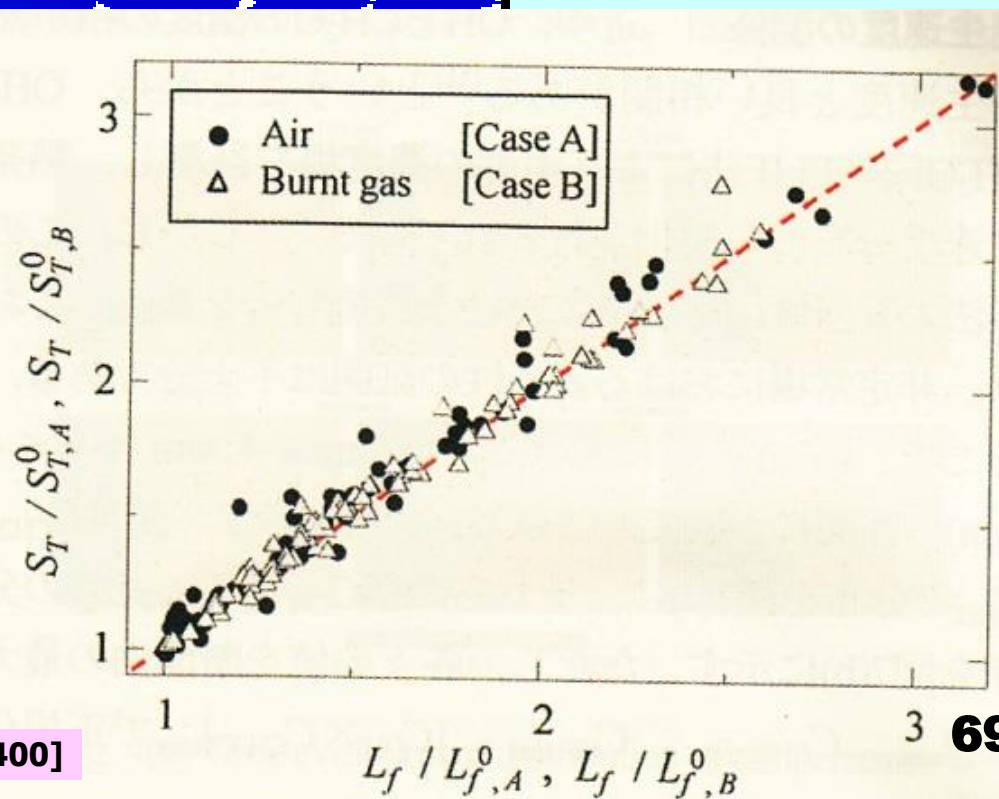
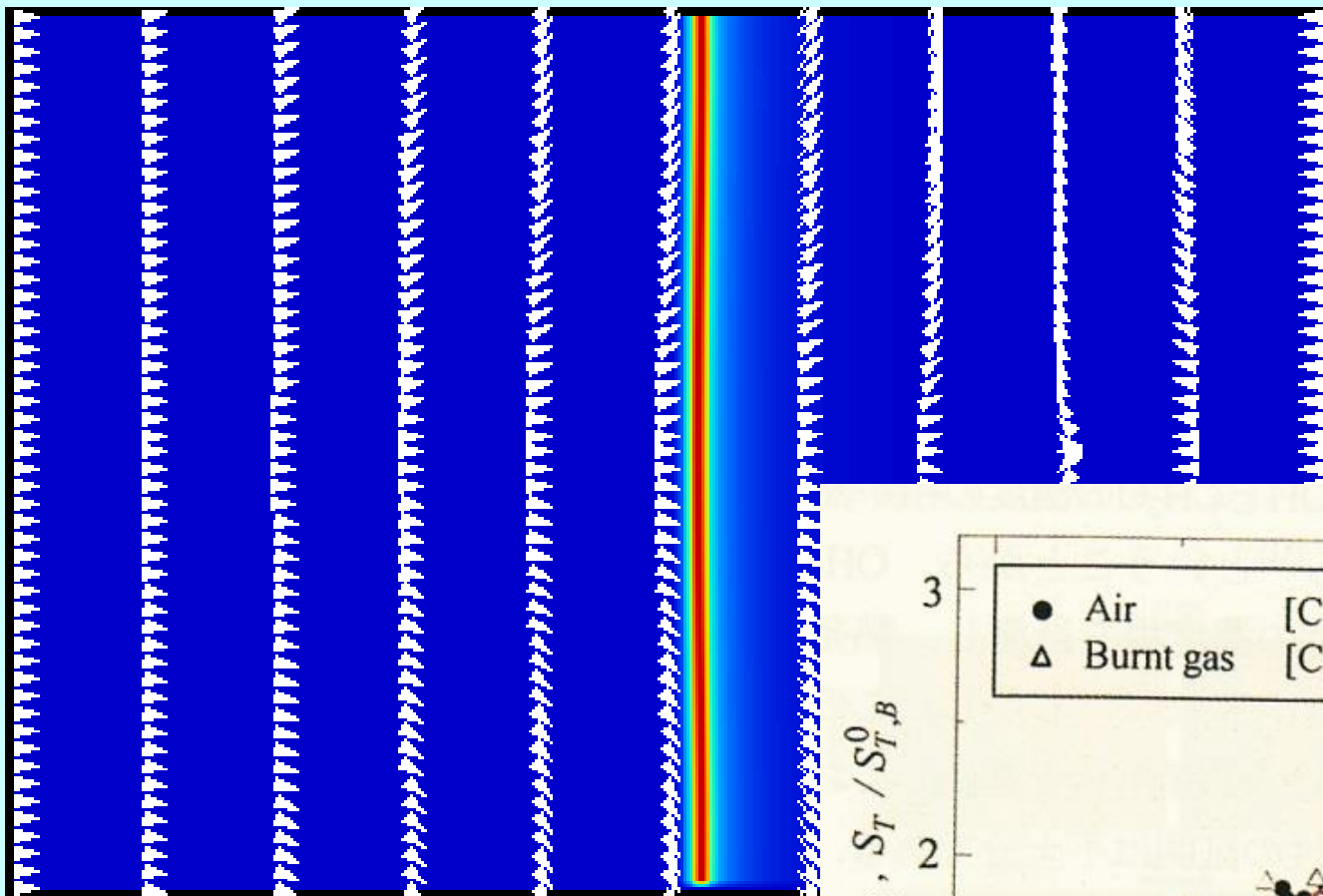
NOの還元：ロジウムRh触媒

教職員学生と歩んだ燃焼研究(3)

- ・ 非定常対向流予混合火炎の火炎構造に関する数値解析



教職員学生と歩んだ燃焼研究(3)



教職員学生と歩んだ燃焼研究(3)

- ・超小型燃焼器の開発に関する数値解析

戦略的国際科学技術協力推進事業 日本－中国 研究交流

研究課題:

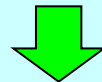
「革新的な超小型燃焼器を用いたマイクロパワーシステムに関する基礎研究」

研究交流期間 平成19年12月～平成22年11月

研究代表者: 山下 博史(名古屋大学大学院工学研究科、教授)
趙 黛青(中国科学院広州エネルギー研究所、副所長)

小型・高性能の携帯機器, ロボット等の開発が進み,
高いエネルギー密度のエネルギー源が必要

超小型化の問題点

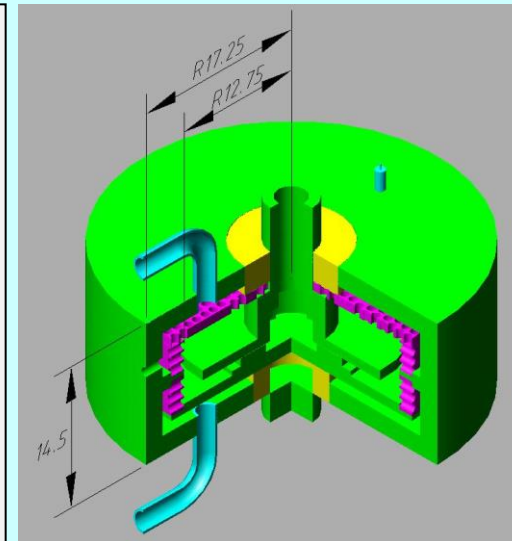
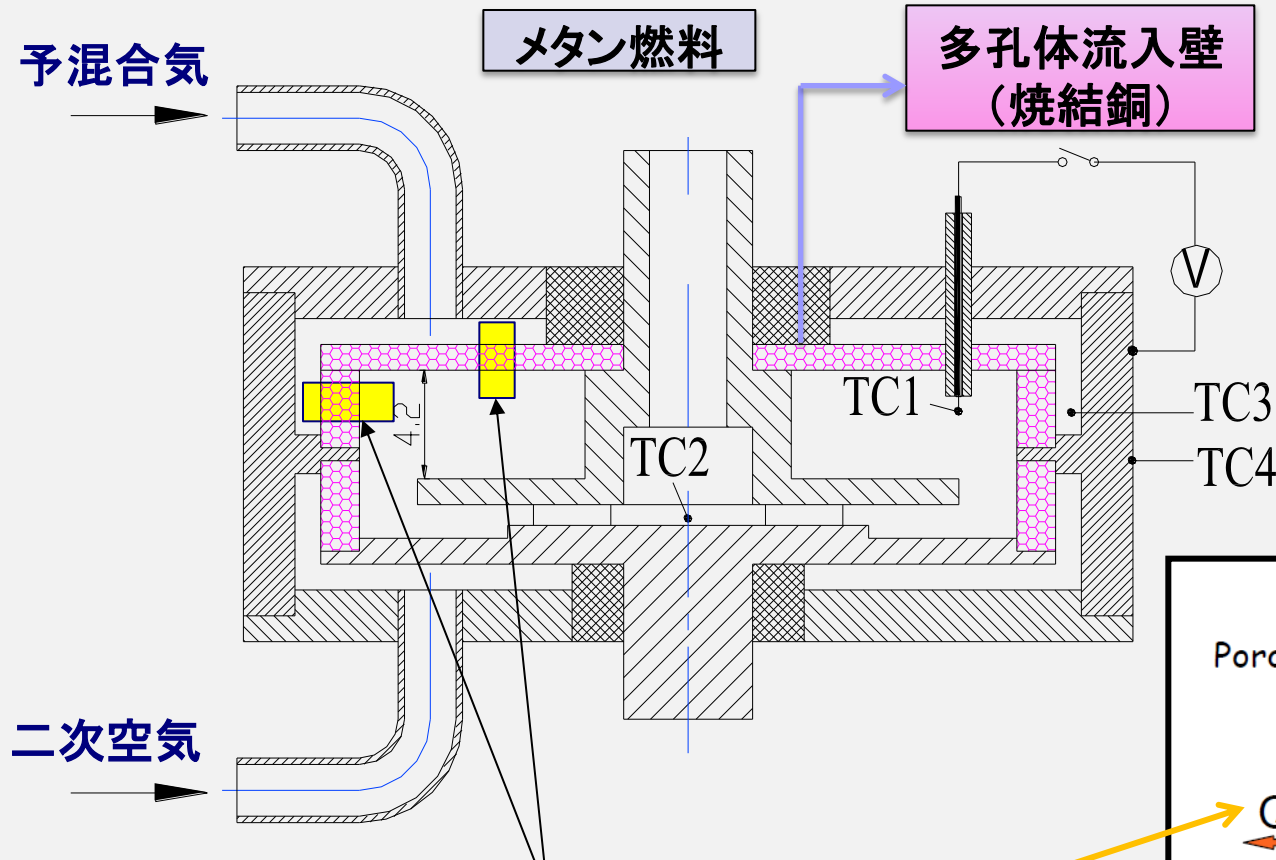


燃焼効率・燃焼強度・火炎安定性の低下・消炎の発生

教職員学生と歩んだ燃焼研究(3)

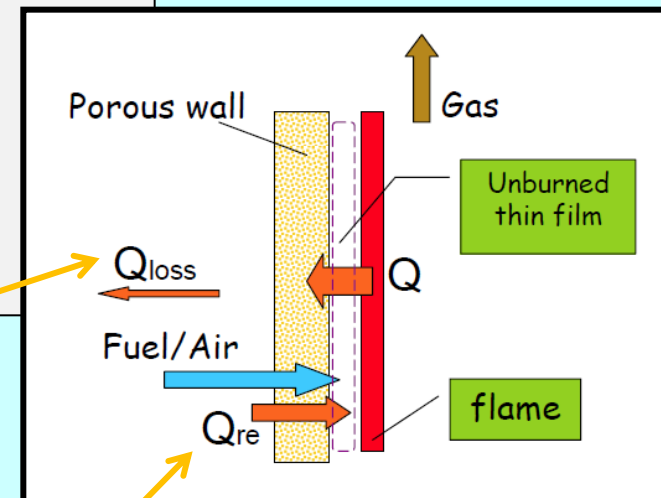
多孔体壁を有する超小型燃焼器の提案

[日本燃焼学会誌, 55 (172), (2013), 131-137]



燃焼器の壁面の大部分を多孔体壁とし、予混合気を流入させる →

壁面からの放熱を流入予混合気で回収(熱循環)

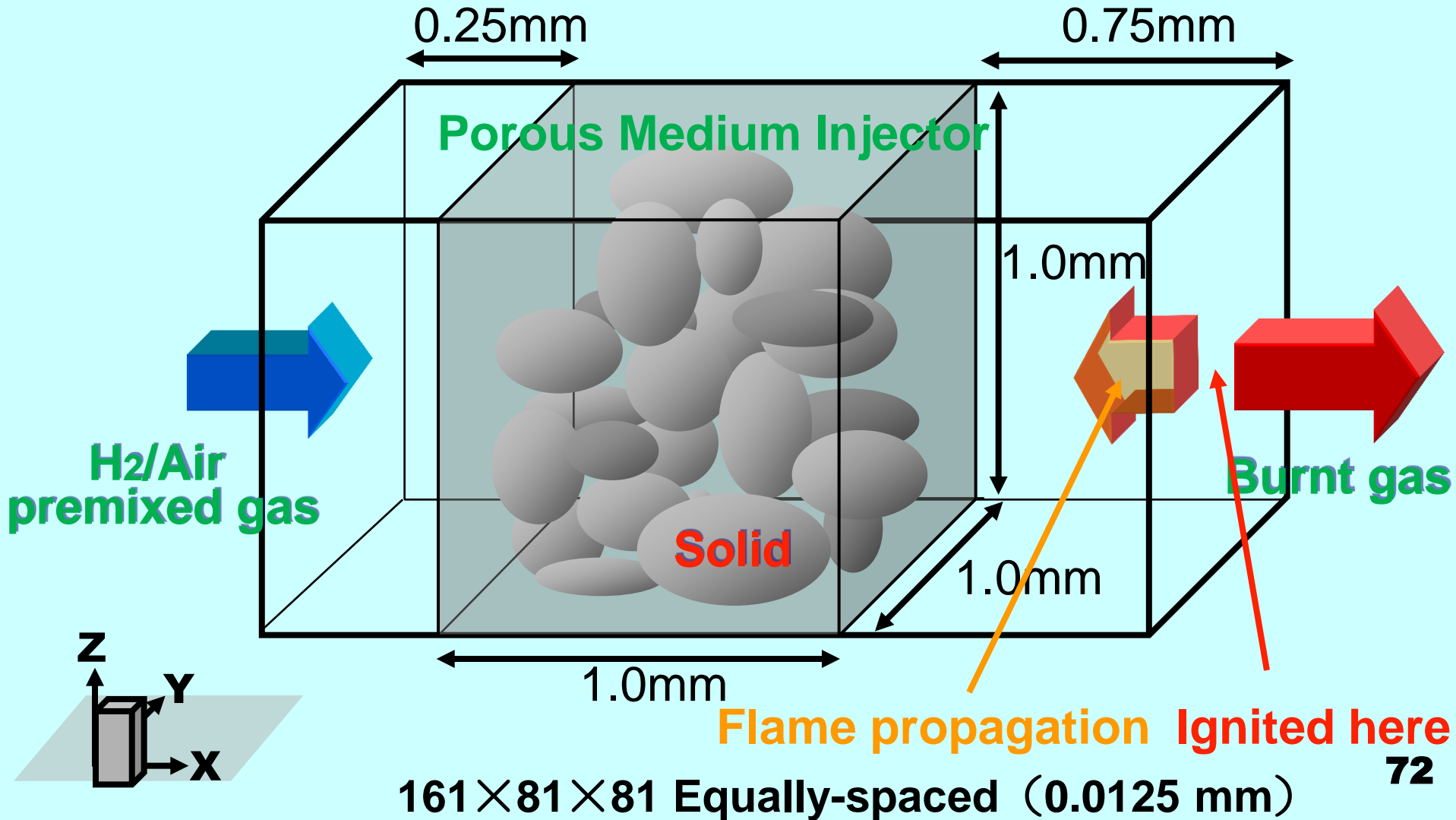


教職員学生と歩んだ燃焼研究(3)

[日本燃焼学会誌, 55 (172), (2013), 131-137]

解析モデル

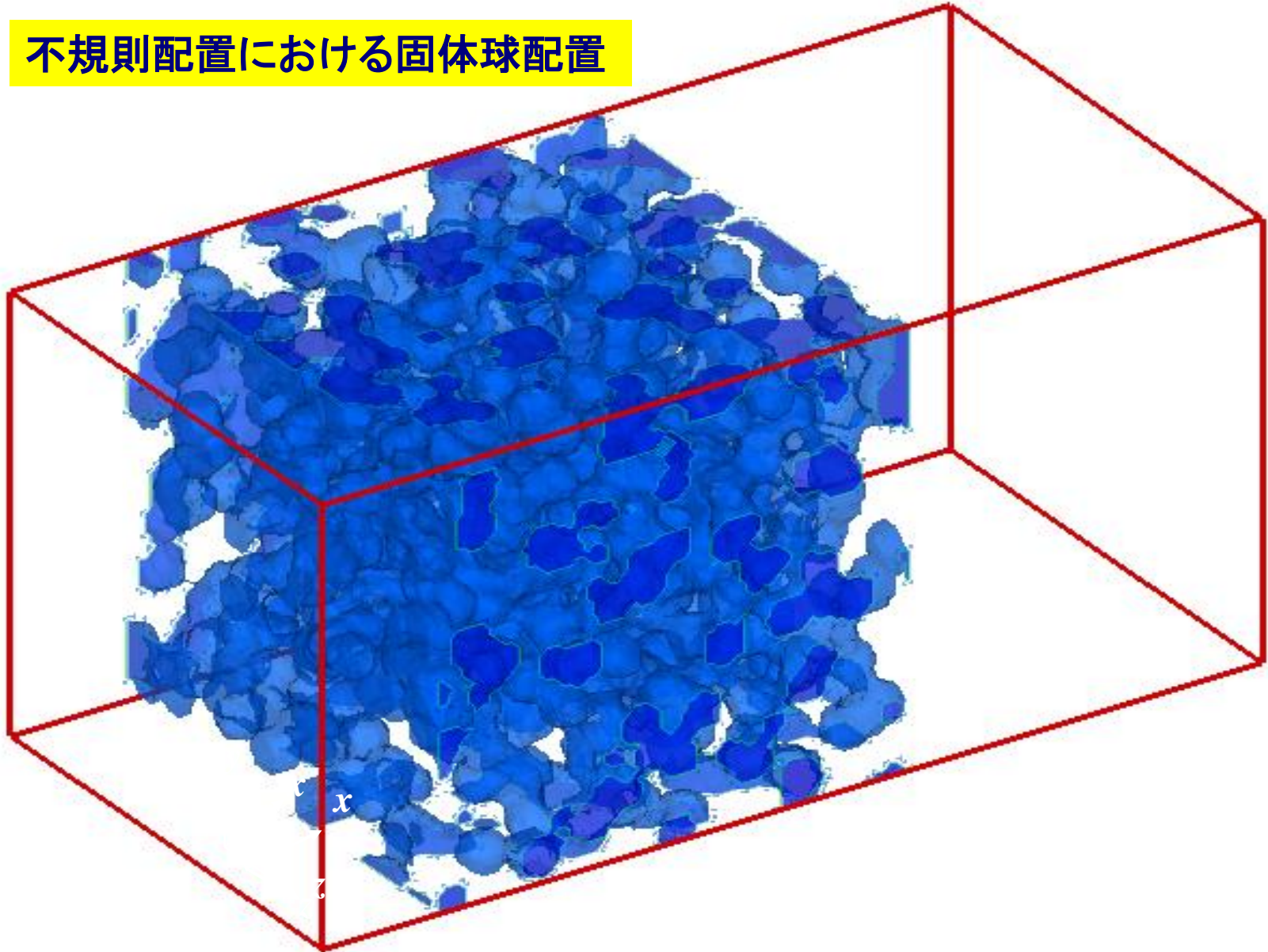
Cubic of 1 mm side length



教職員学生と歩んだ燃焼研究(3)

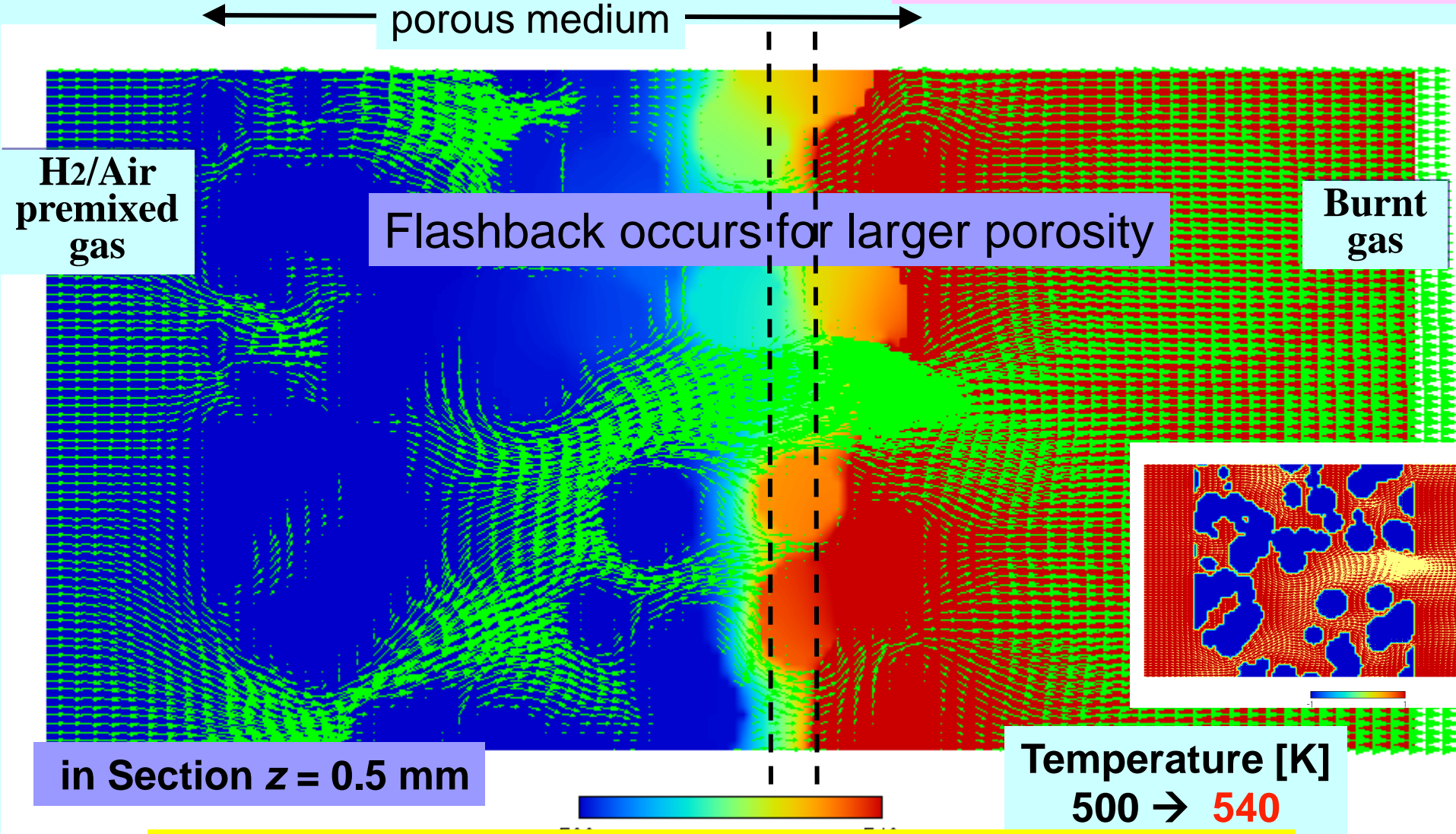
[日本燃焼学会誌, 55 (172), (2013), 131-137]

不規則配置における固体球配置



教職員学生と歩んだ燃焼研究(3)

[日本燃焼学会誌, 55 (172), (2013), 131-137]

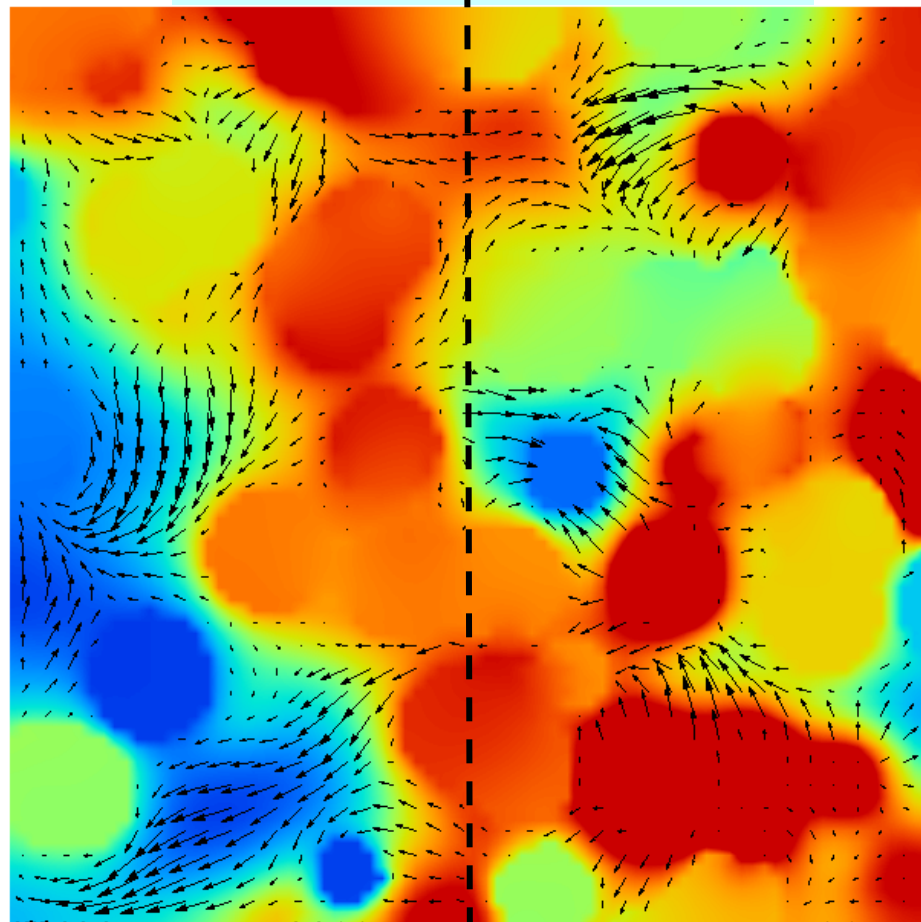
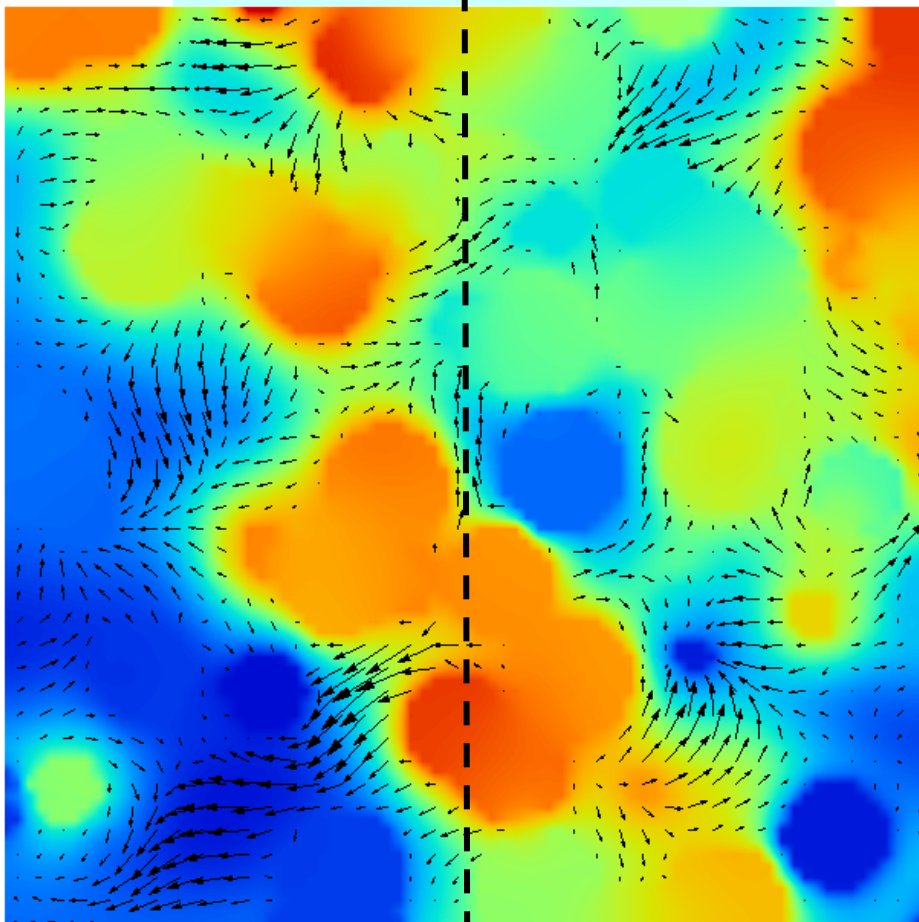


*Flame stands injector downstream edge at first.
Flame goes into porous medium injector gradually.*

教職員学生と歩んだ燃焼研究(3)

$x = 1.06875 \text{ mm (}l=87\text{)}$

$x = 1.11875 \text{ mm (}l=91\text{)}$



Temperature [K]

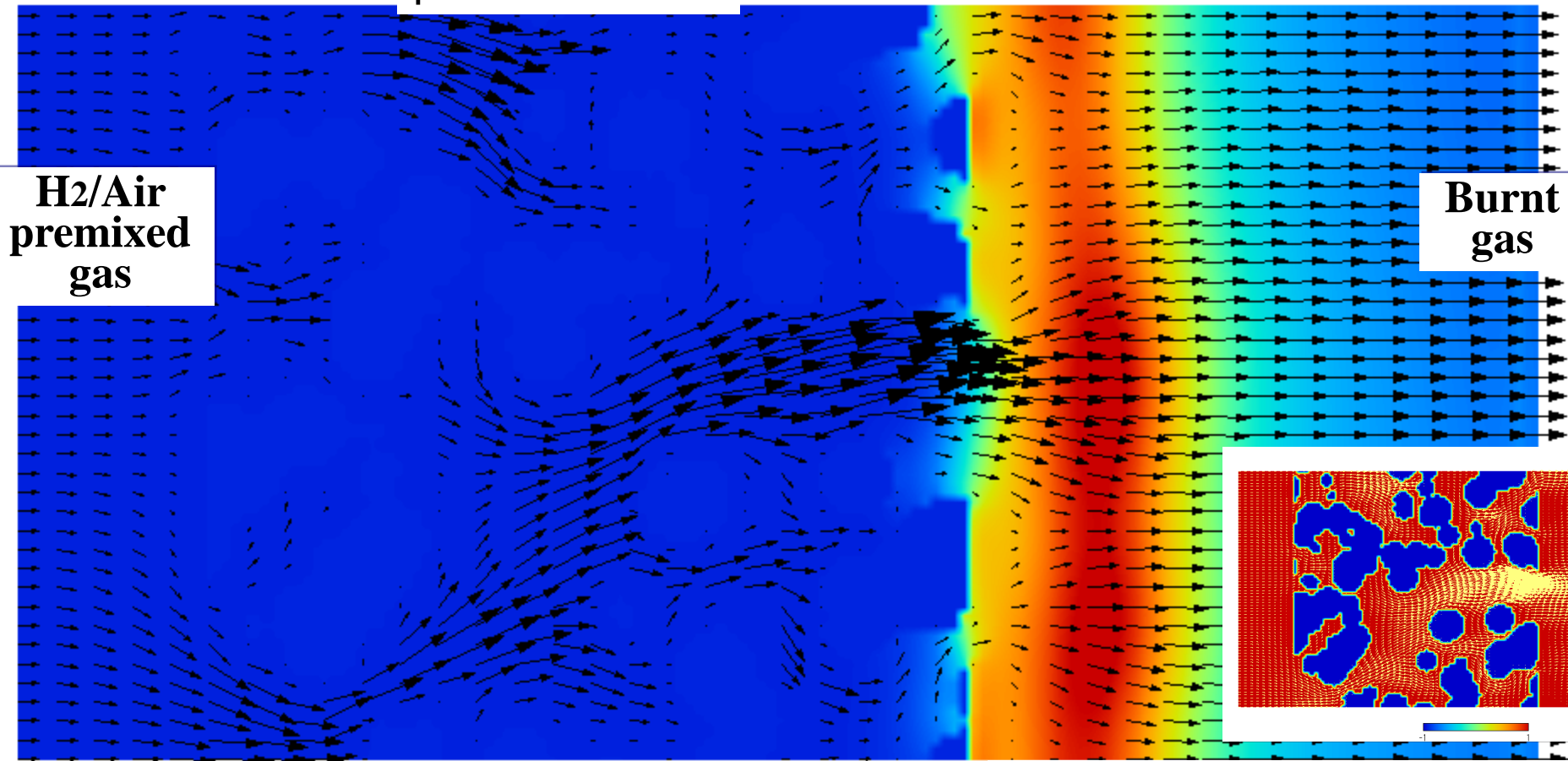
[日本燃焼学会誌, 55 (172),
(2013), 131-137]

Temperature is uniform in each microsphere, and increases gradually due to heat conduction from flame arrested at porous medium downstream edge

教職員学生と歩んだ燃焼研究(3)

[日本燃焼学会誌, 55 (172), (2013), 131-137]

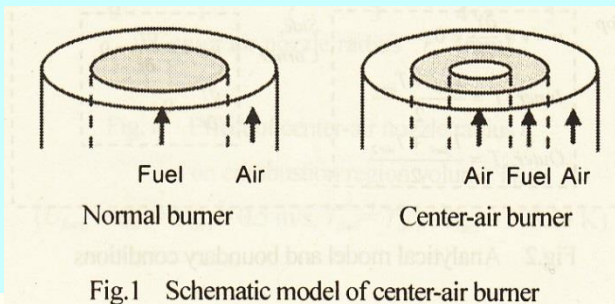
← porous medium →



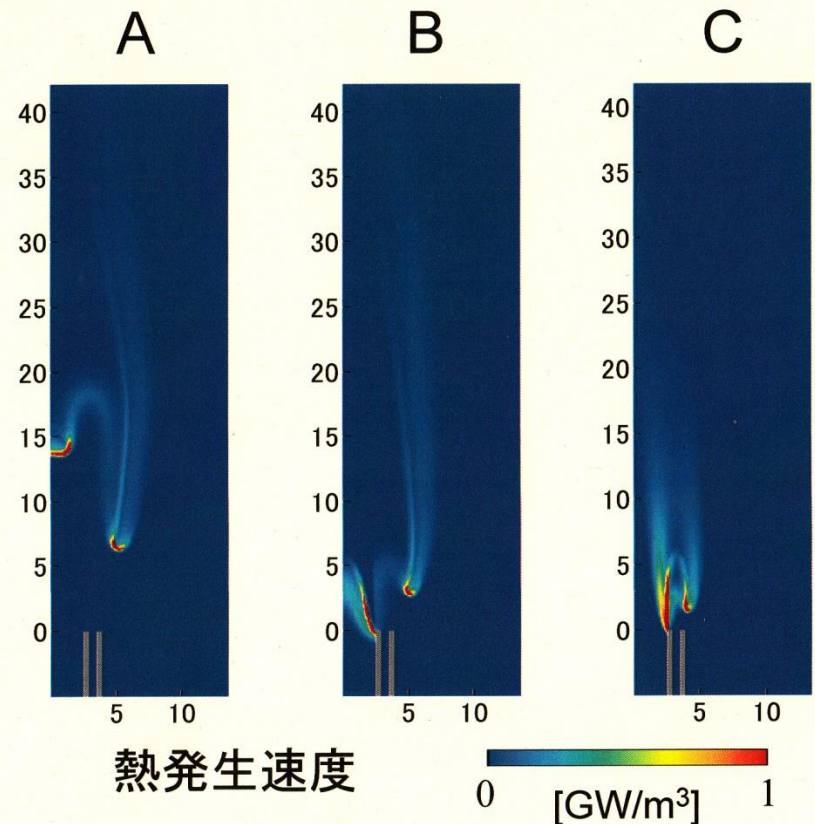
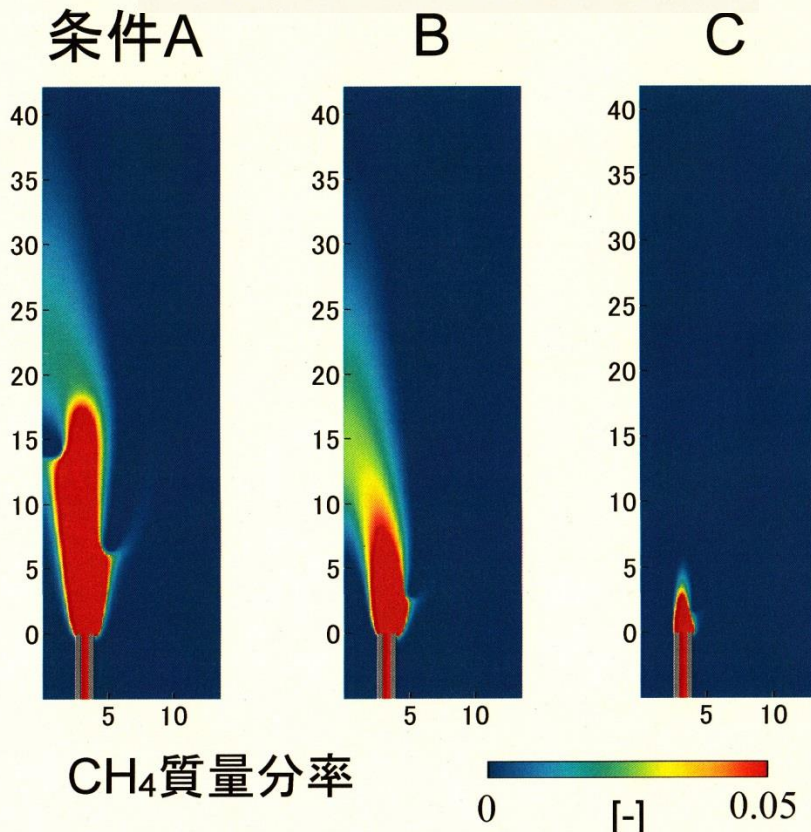
水の質量生成速度と速度ベクトル分布

教職員学生と歩んだ燃焼研究(3)

・センターエアーバーナによる燃焼器の小型化に関する数値解析



	T_{air1} (K)	U_{air1} (m/s)	ϕ
条件A	293.15	0.500	5.6
条件B	1500	2.558	5.6
条件C	1500	20.467	0.7

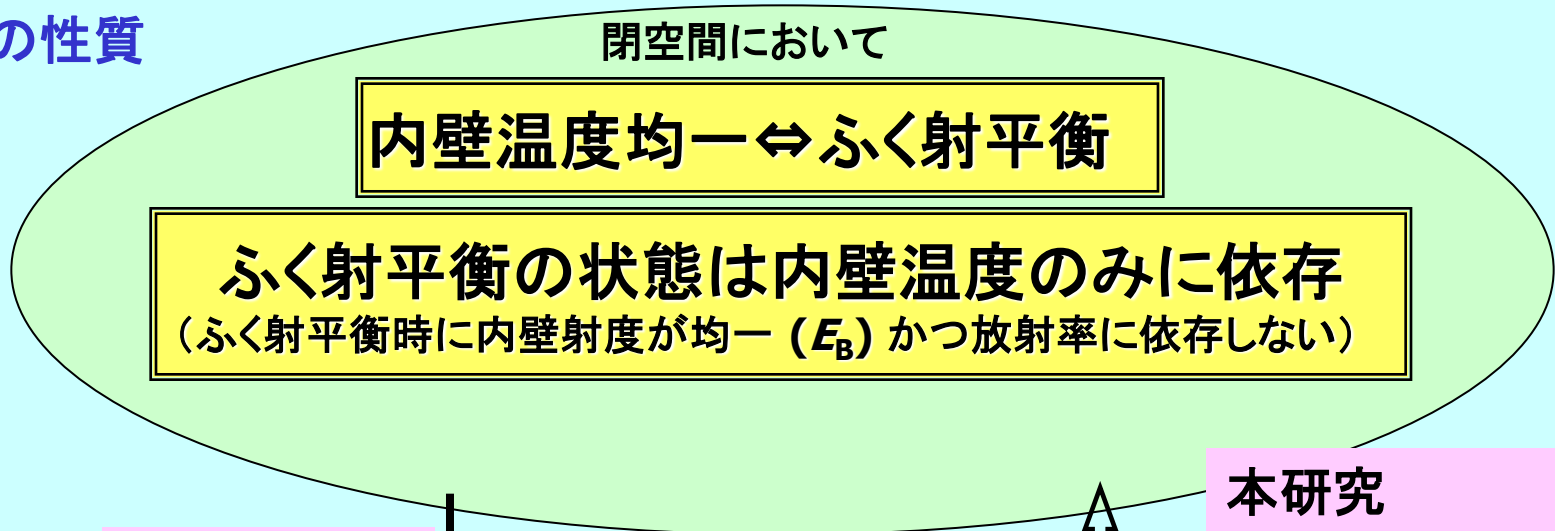


教職員学生と歩んだ燃焼研究(3)

・閉空間におけるふく射平衡に関する理論的考察および数値解析

近藤良夫(2010 博士論文)

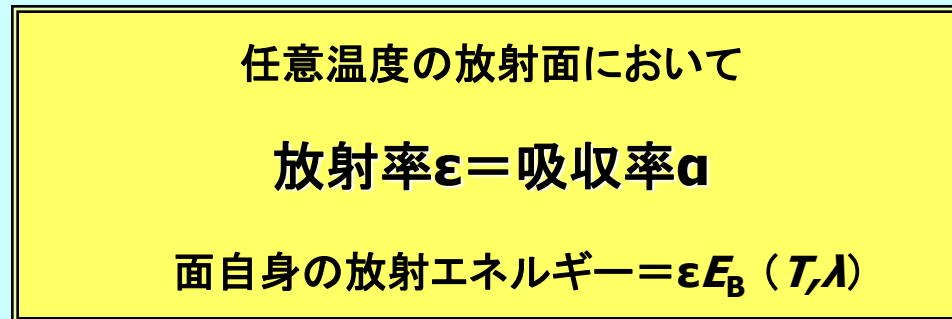
A: 空間の性質



G. Kirchhoff

本研究
完全拡散反射・
放射面の場合

B: 壁面(物質)の性質



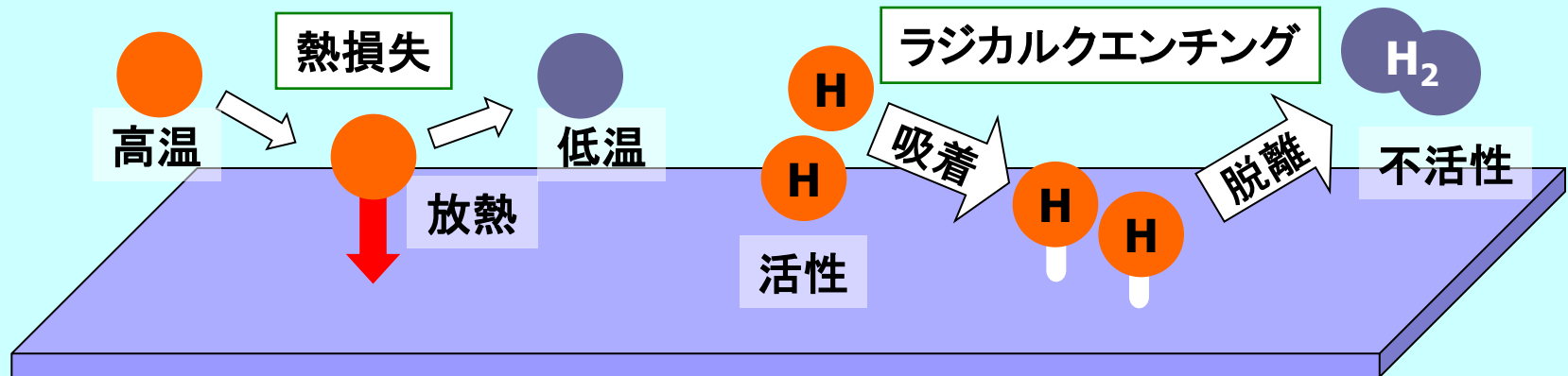
● A, Bの事象が同値であるという物理現象の見方を提案

教職員学生と歩んだ燃焼研究(3)

- ・超小型燃焼器における壁面でのラジカルクエンチングを考慮した数値解析

壁面におけるラジカルクエンチングの解明 表面反応の適用

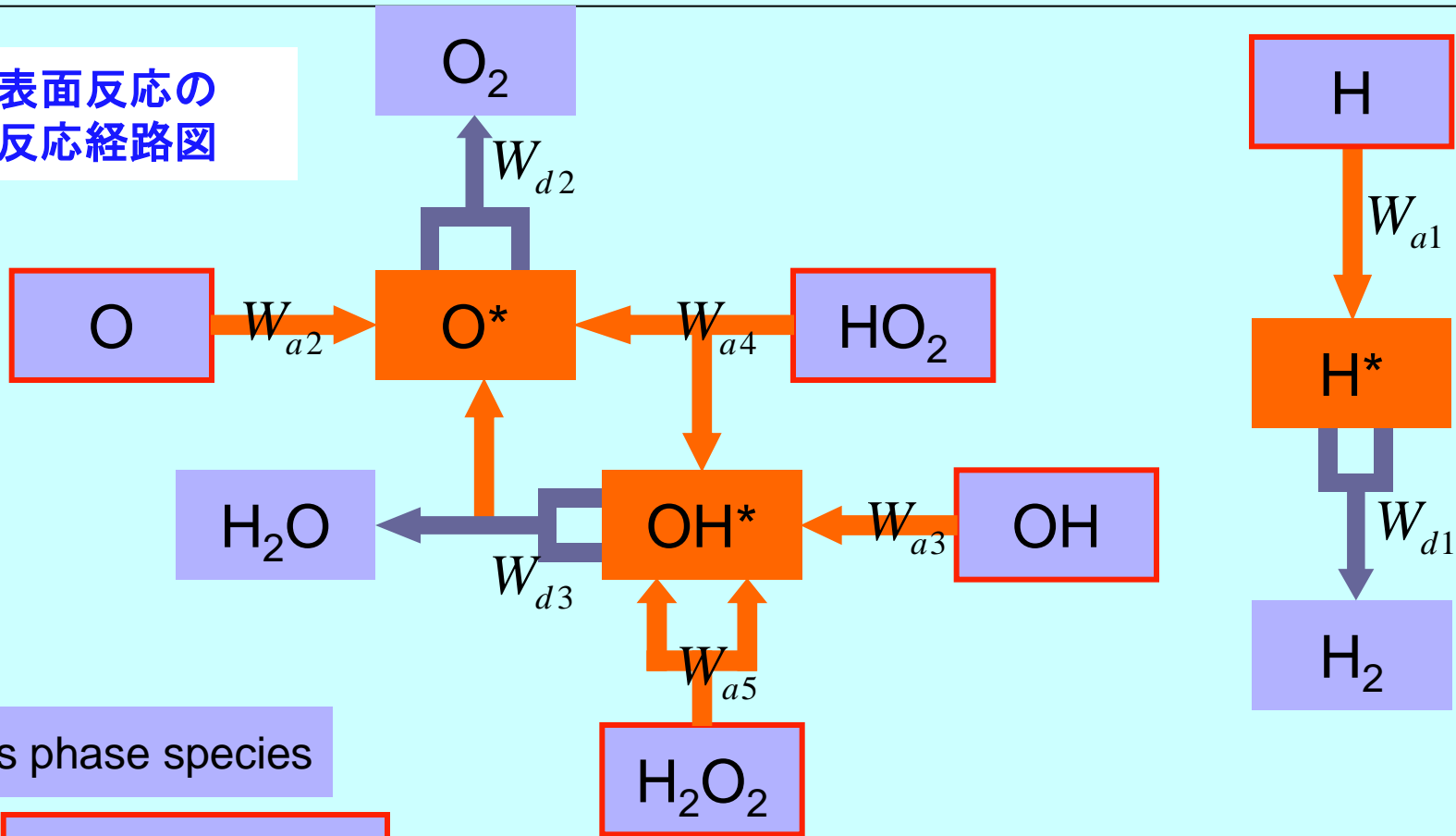
発熱速度が低下し、燃焼反応が抑制される



これまでの燃焼器の開発では無視

教職員学生と歩んだ燃焼研究(3)

表面反応の
反応経路図



Gas phase species

Radical species

Adsorbed species : *

Desorption

Adsorption

ラジカルクエンチング機構:

Adsorption of radical species

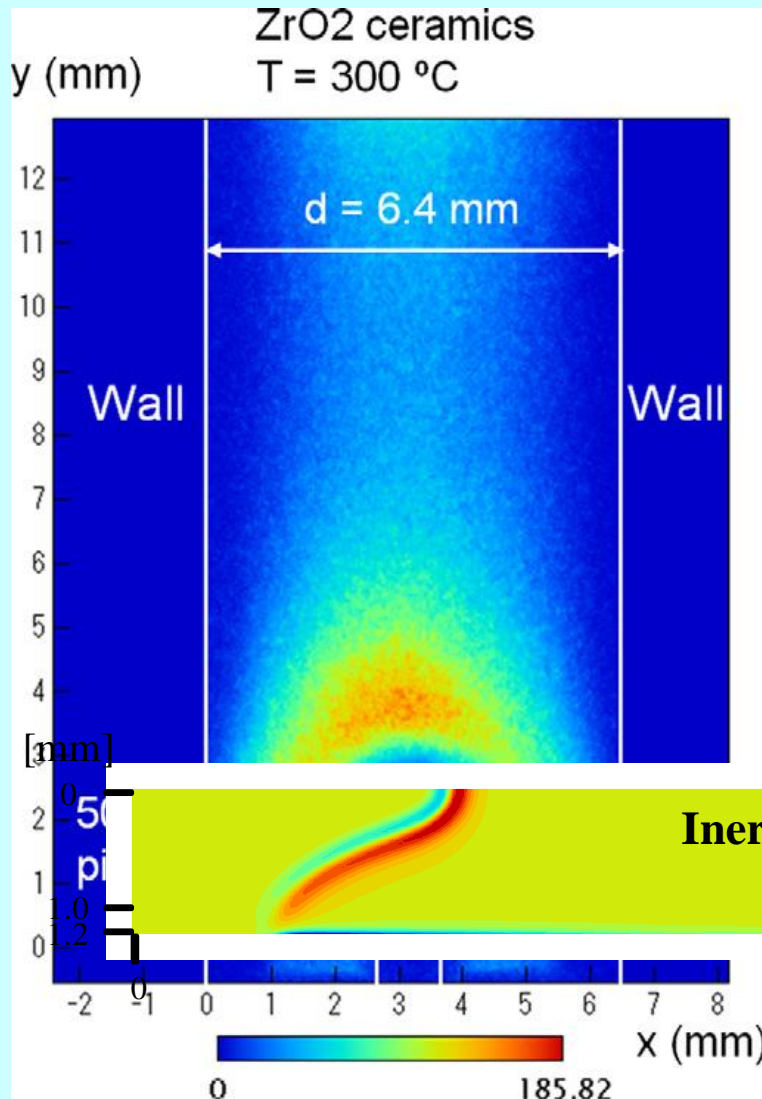
Surface reaction of adsorbed species

Desorption of stable species

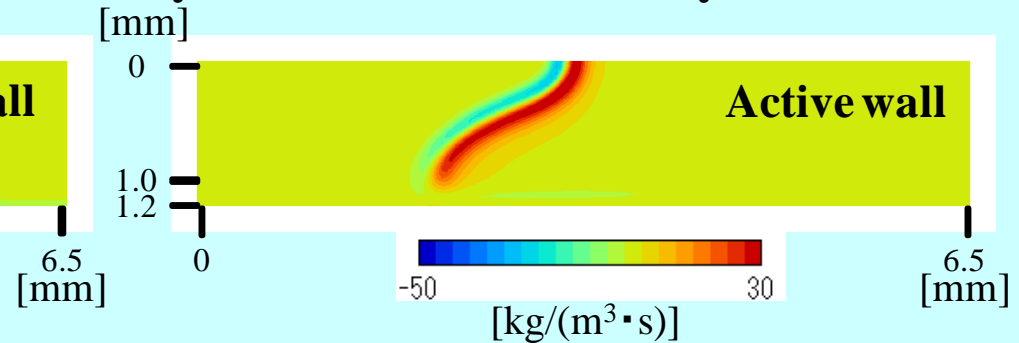
教職員学生と歩んだ燃焼研究(3)

[9th Asia-Pacific Conference on Combustion, (2013), CD-ROM]

[Proceedings of Power MEMS, (2014), 1]



Analytical model and boundary conditions



[Proceedings of the Combustion Institute, 34 (2), (2013), 3379-3386]

Distributions of OH mass production rate w_{OH}
for $T_w = 1200$ K, $y_w = 1.2$ mm **81**

教職員学生と歩んだ燃焼研究(3)

・噴霧燃焼の燃焼形態に関する数値解析

反応性流体力学の基礎方程式 (PSI-CELLモデルを適用)

連続方程式, 運動方程式, エネルギー方程式,

各化学種の連続方程式, 状態方程式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = Z_F$$

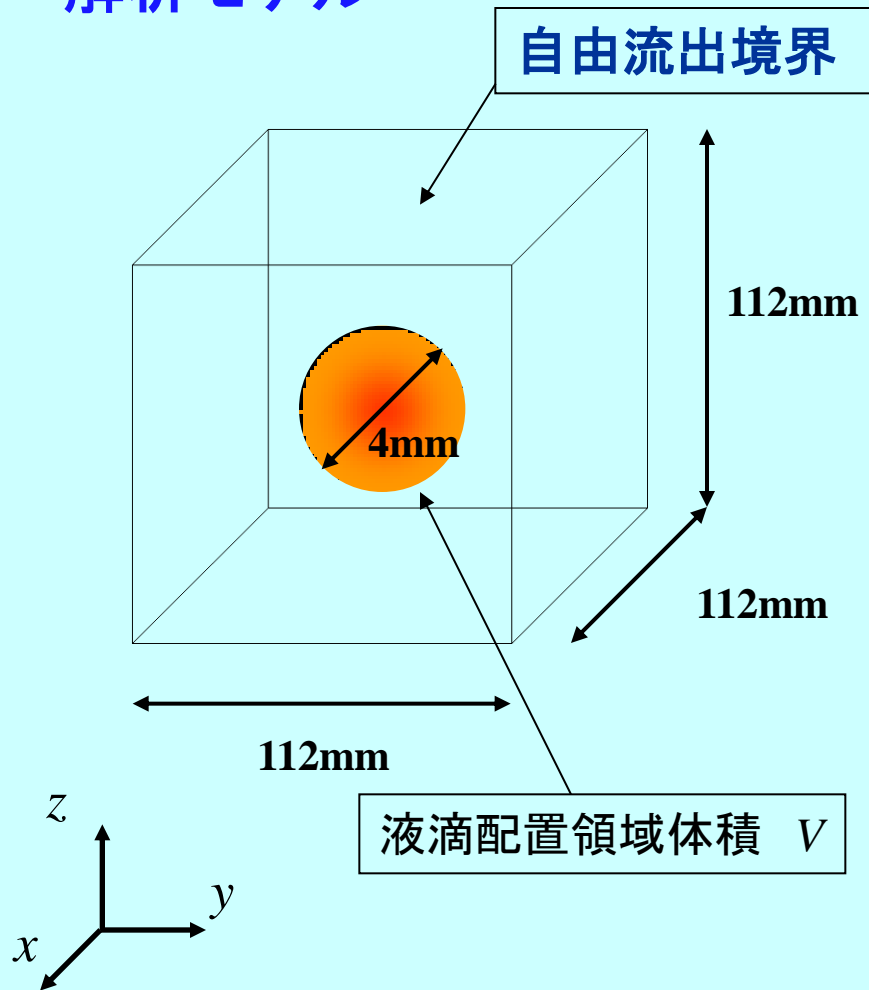
$$\frac{\partial (\rho u_m)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} u_m) - \nabla \cdot (\mu \nabla u_m) = -\frac{\partial \mathcal{P}^0}{\partial x_m} + (\rho - \rho_\infty) g_m + \left(-\frac{\partial \mu}{\partial x_m} \frac{\partial u_j}{\partial x_j} + \frac{\partial \mu}{\partial x_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_m} \right) + Z_{M,m}$$

$$\frac{\partial (\rho Y_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} Y_i) - \nabla \cdot (\rho D_i \nabla Y_i) = w_i + \delta_{Fi} Z_F \quad i = F(\text{CH}_4), \text{O}_2, \text{N}_2, \text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}$$

$$\frac{\partial (\rho T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} T) - \frac{1}{c_p} \nabla \cdot (\lambda \nabla T) = \frac{1}{c_p} \frac{Dp}{Dt} - \frac{1}{c_p} \sum_i h_i w_i - \frac{\rho}{c_p} \sum_i (c_{p,i} Y_i \mathbf{V}_i \cdot \nabla T) - \frac{q_{rad}}{c_p} + \frac{Z_T}{c_p}$$

教職員学生と歩んだ燃焼研究(3)

解析モデル



差分格子

格子数 $100 \times 100 \times 100$

中心部60格子 等間隔格子(0.1 mm)

外周部40格子 不等間隔格子(0.1~10.8 mm)

燃料液滴

蒸発前: 軽油(蒸発後: CH_4)

初期直径

$d_1 = 10 \mu\text{m}$, $d_2 = 20 \mu\text{m}$, $d_4 = 40 \mu\text{m}$

平均数密度 n_1, n_2, n_4

温度: 500 K(沸点)

酸化剤

空気

初期温度: 1000 K

初期当量比 ϕ

初期時刻に, 液滴配置領域体積において,

全燃料液滴質量

全酸素質量

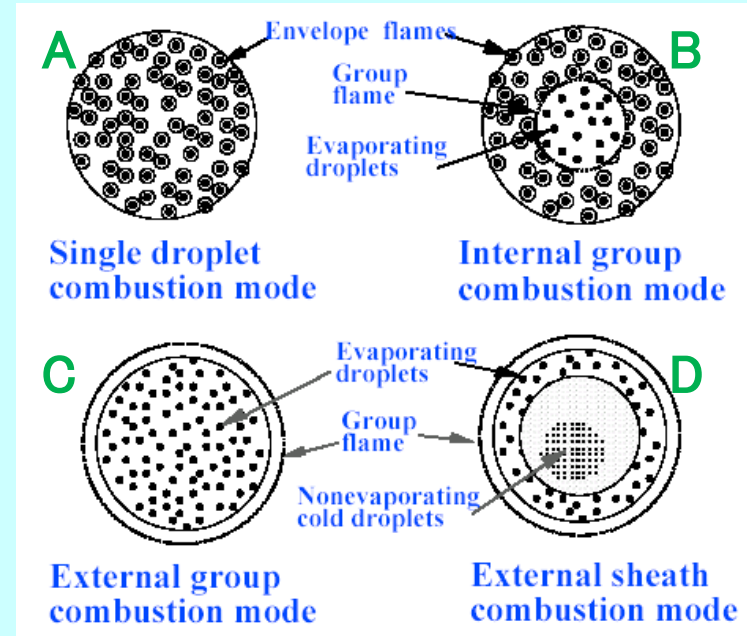
$$\phi \equiv \frac{\text{全燃料液滴質量}}{\text{全酸素質量}}$$

量論の場合の燃料・酸素質量比

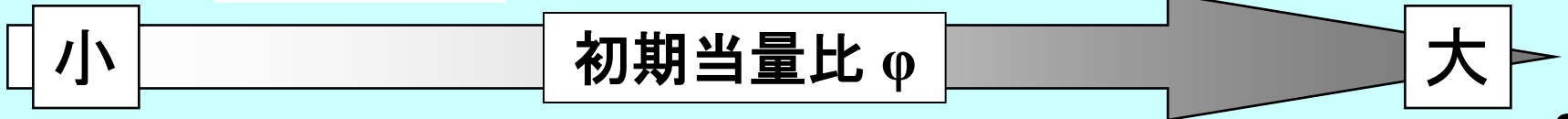
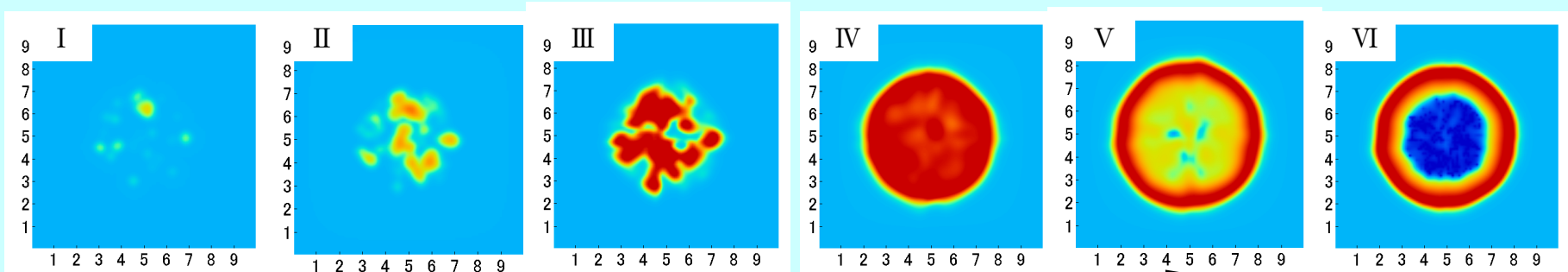
教職員学生と歩んだ燃焼研究(3)

燃焼形態の詳細な分類 [萩原ら, 2009]

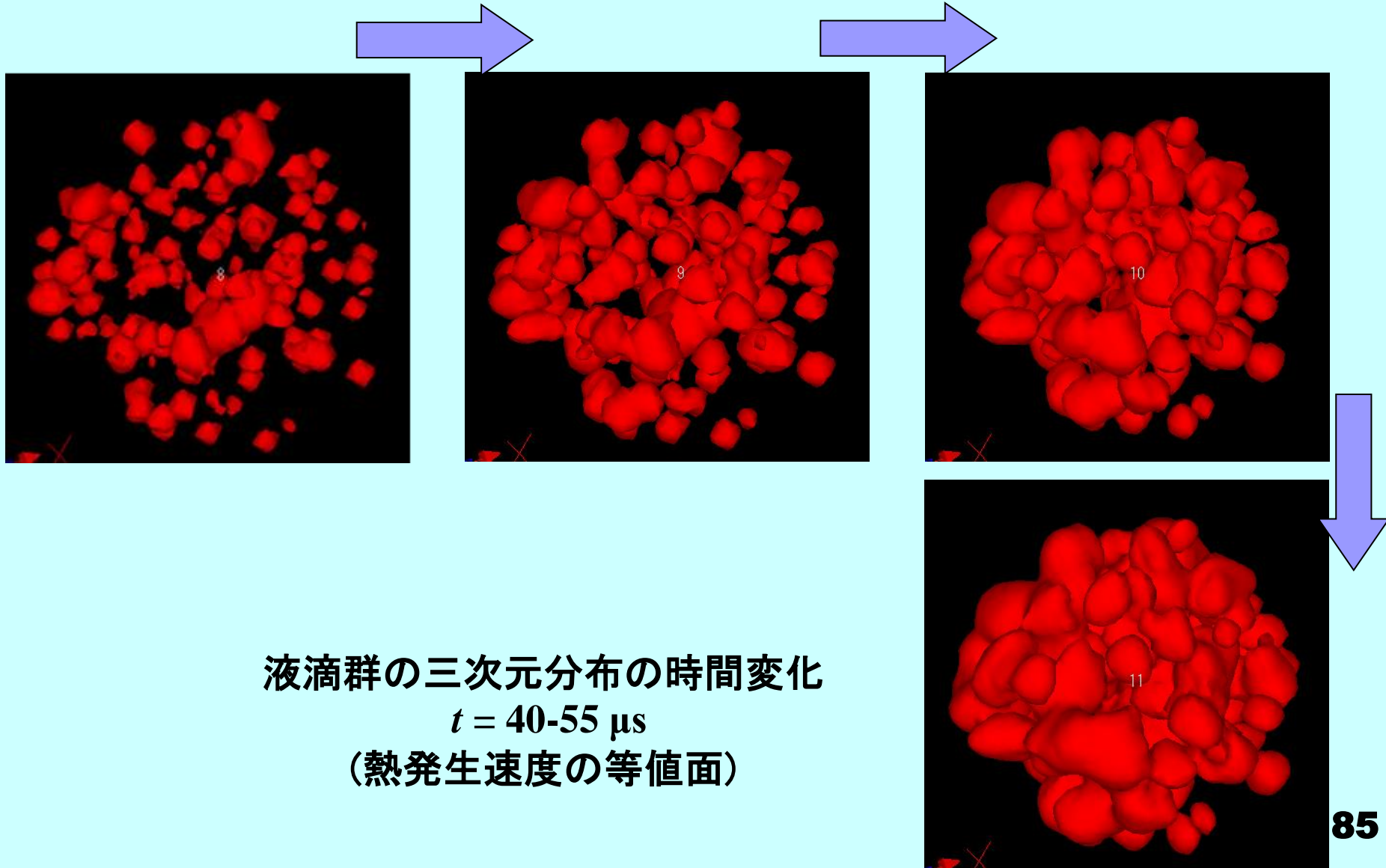
- モードⅠ：単滴着火・燃焼 A
- モードⅡ：一部連結着火・燃焼
- モードⅢ：内部着火・燃焼
- モードⅣ：内部着火かつ外周部着火・燃焼
- モードⅤ：外周部着火・燃焼 C
- モードⅥ：外殻燃焼 D



Chiuらの噴霧燃焼形態



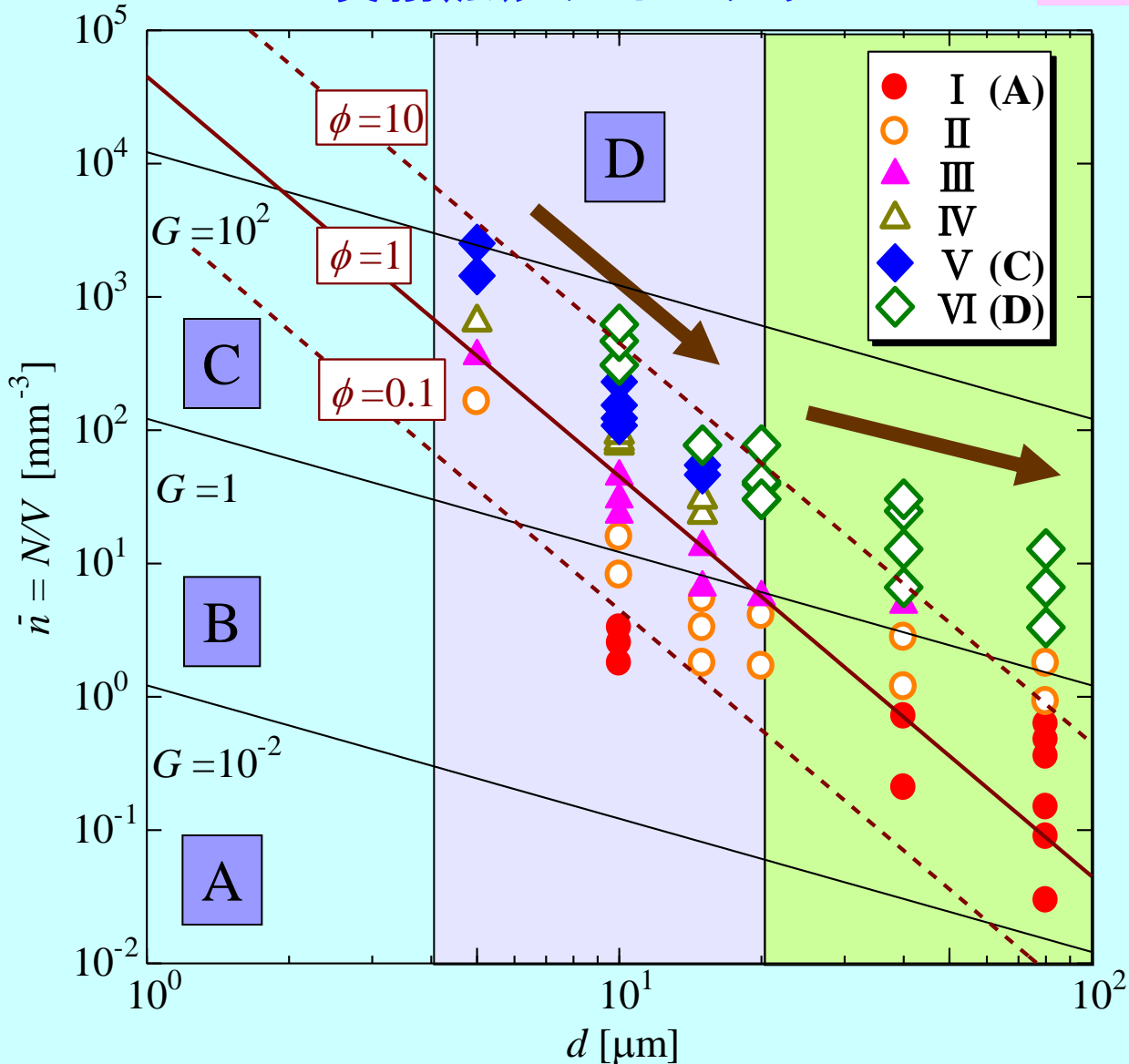
教職員学生と歩んだ燃焼研究(3)



教職員学生と歩んだ燃焼研究(3)

[日本燃焼学会誌, 51 (158),
(2009), 343-353]

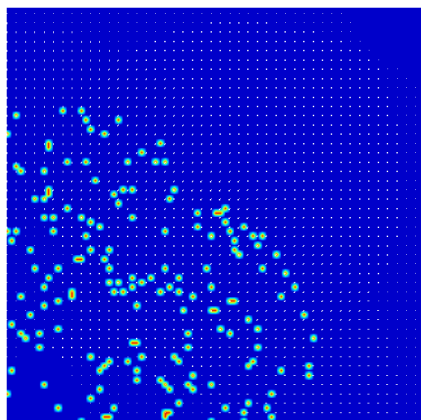
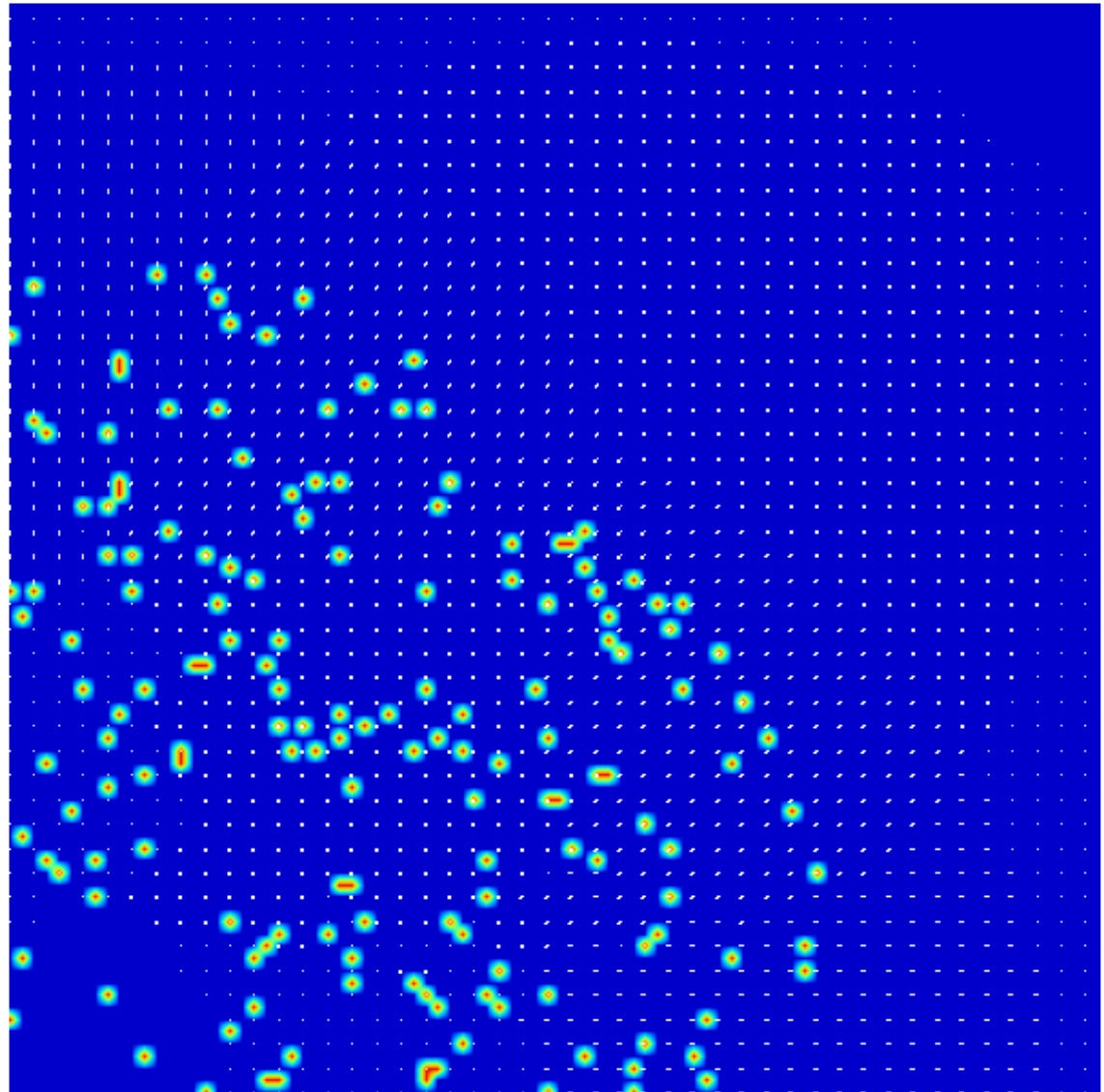
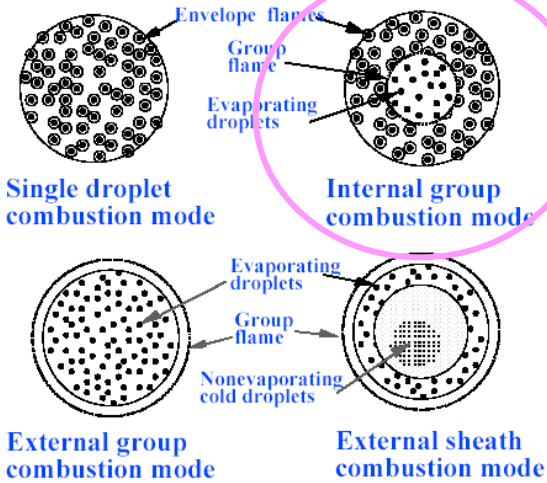
噴霧燃焼ダイアグラム



- A: 単滴燃焼
 $G < 10^{-2}$
- B: 内部群燃焼
 $10^{-2} < G < 1$
- C: 外部群燃焼
 $1 < G < 10^2$
- D: 外殻燃焼
 $10^2 < G$

教職員学生と歩んだ燃焼研究(3)

Chiuらの
「内部群燃焼」が
再現できていない



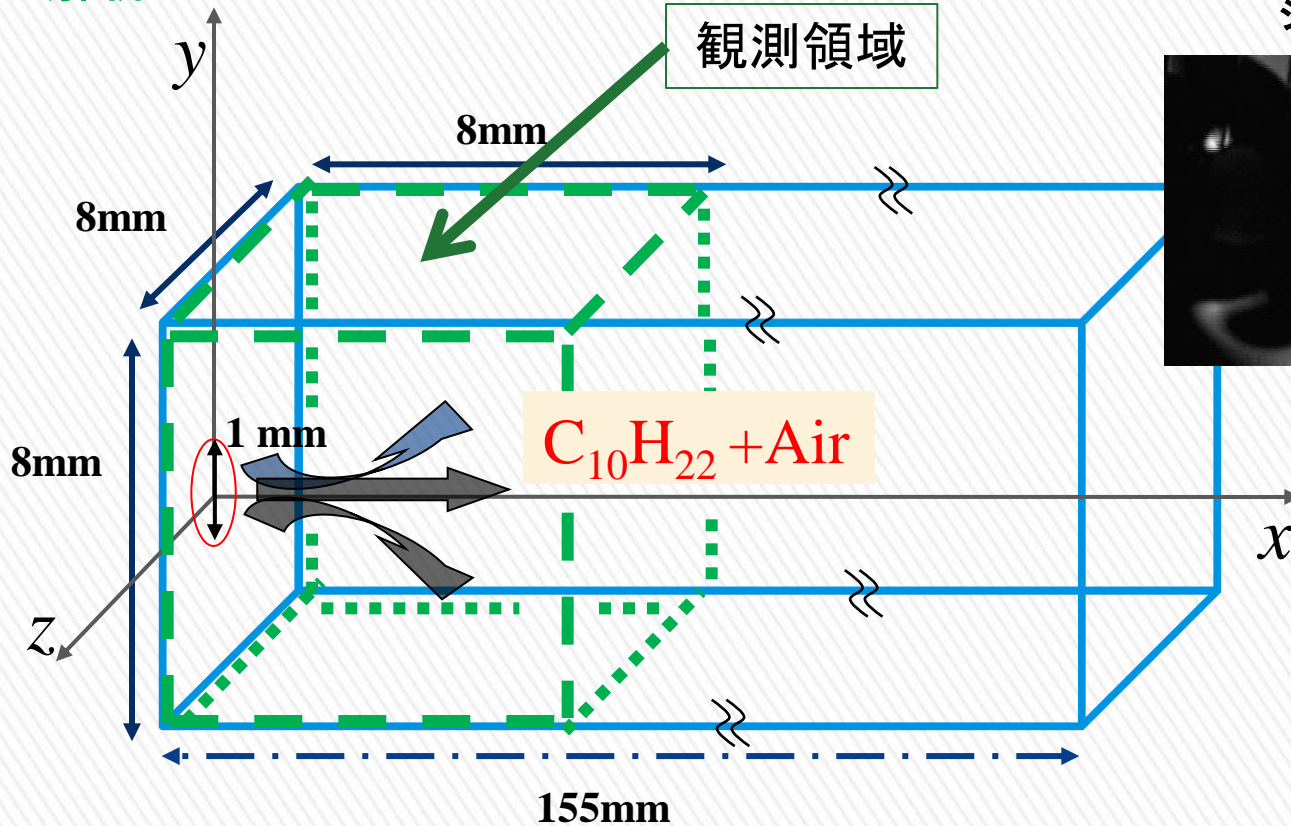
0 0.00002

0 0.00002

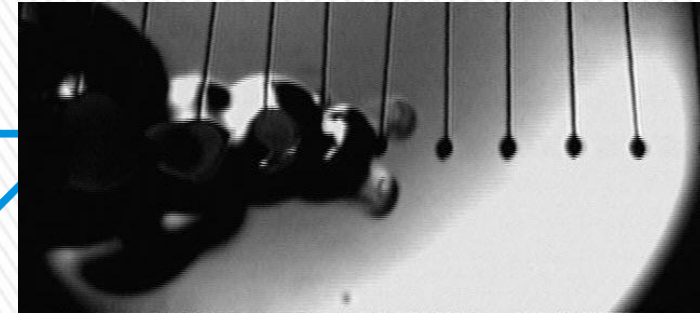
教職員学生と歩んだ燃焼研究(3)

・噴霧燃焼の火炎伝播特性に関する数値解析

解析モデル



液滴列燃焼の燃え拡がり過程におけるシュリーレン画像 (小林秀昭)



境界条件

入口境界 ($x = 0$)

噴射口: 燃料噴霧と周囲空気を初速度 U_0 で噴射

噴射口以外: すべりなし壁面

その他の境界: 自由流出

燃料液滴

燃料: デカン $C_{10}H_{22}$

温度: 447.35K (沸点)

霧囲気流体 (高温空気)

空気

大気圧

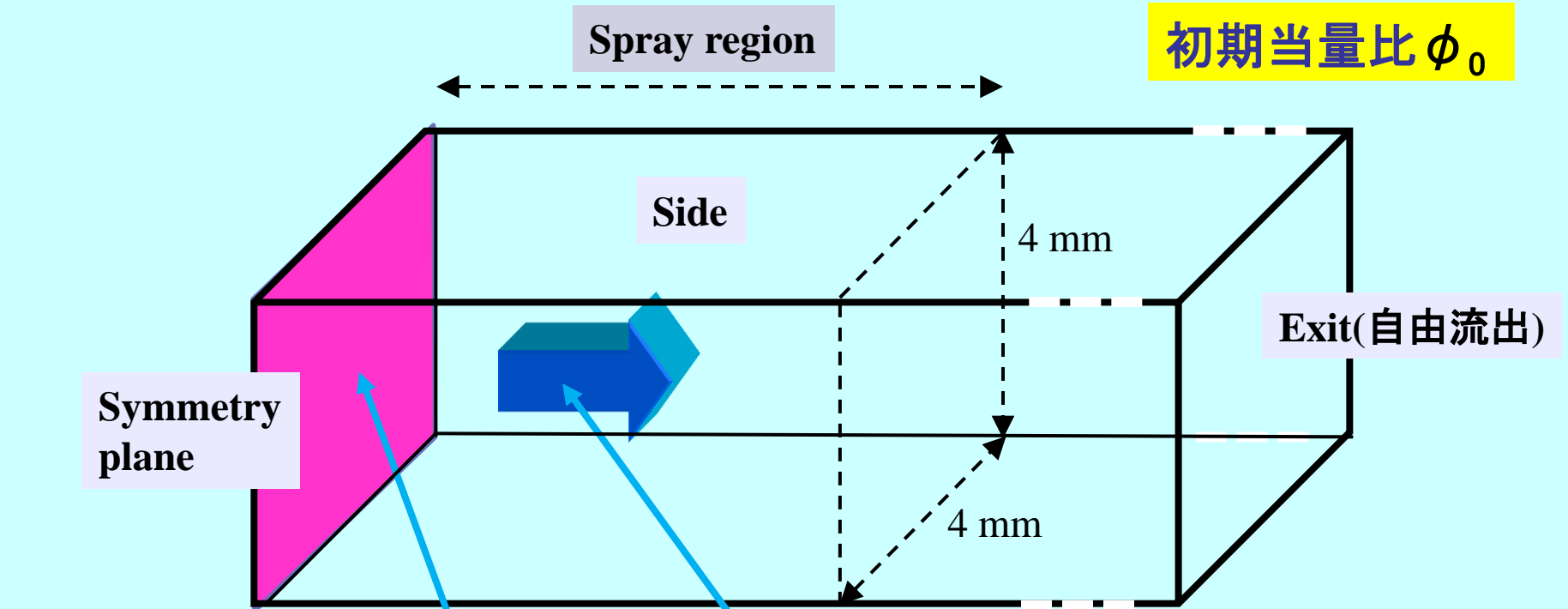
初期温度: T_a

教職員学生と歩んだ燃焼研究(3)

解析モデルおよび境界条件

初期液滴直径 d , 平均数密度 n

初期当量比 ϕ_0



Exit(自由流出)

Symmetry plane

Side

4 mm

4 mm

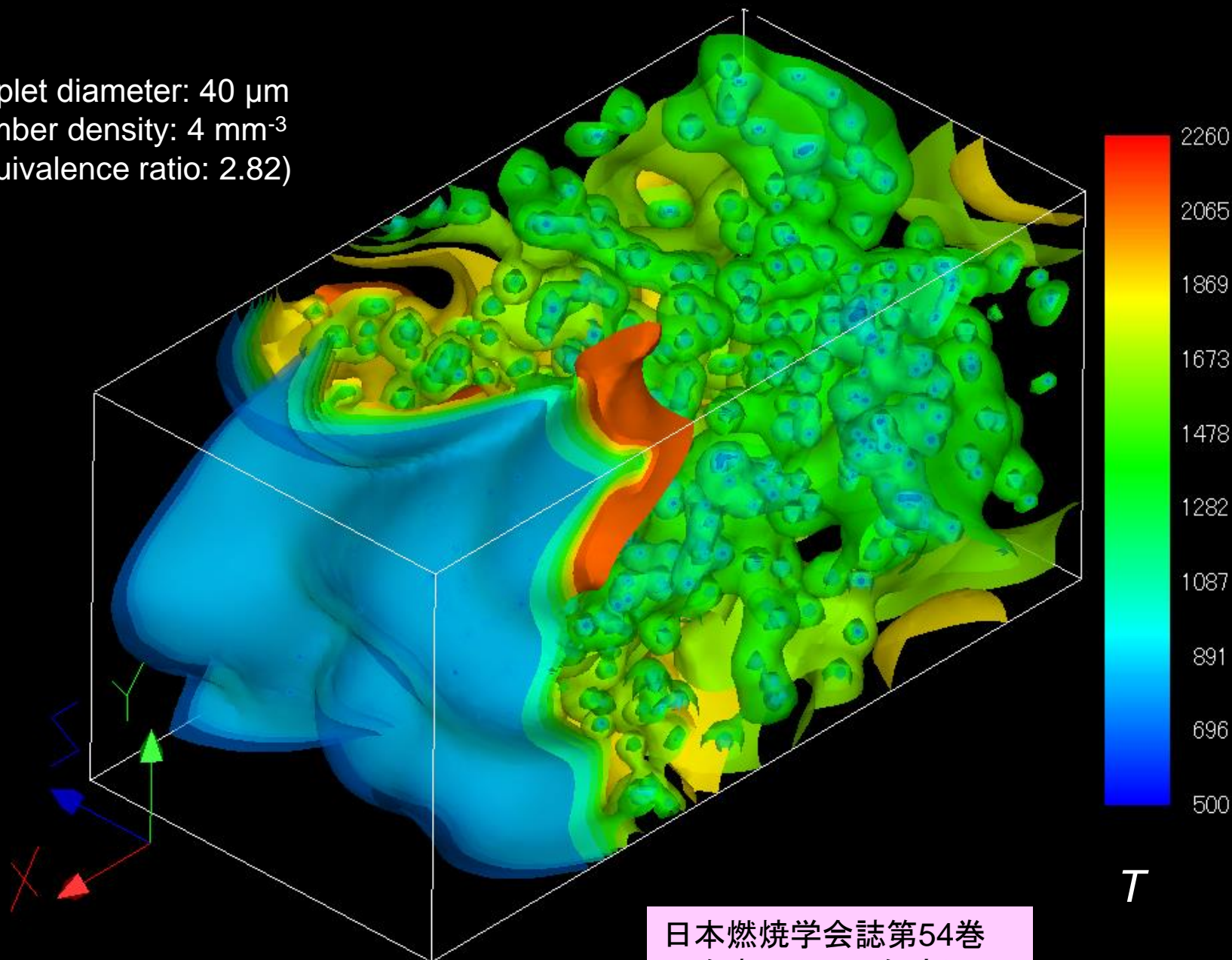
Ignited here (1500K) Flame propagation

燃料液滴
燃料: 軽油, デカン
温度: 沸点

周囲流体
空気
初期温度: 液滴と同じ

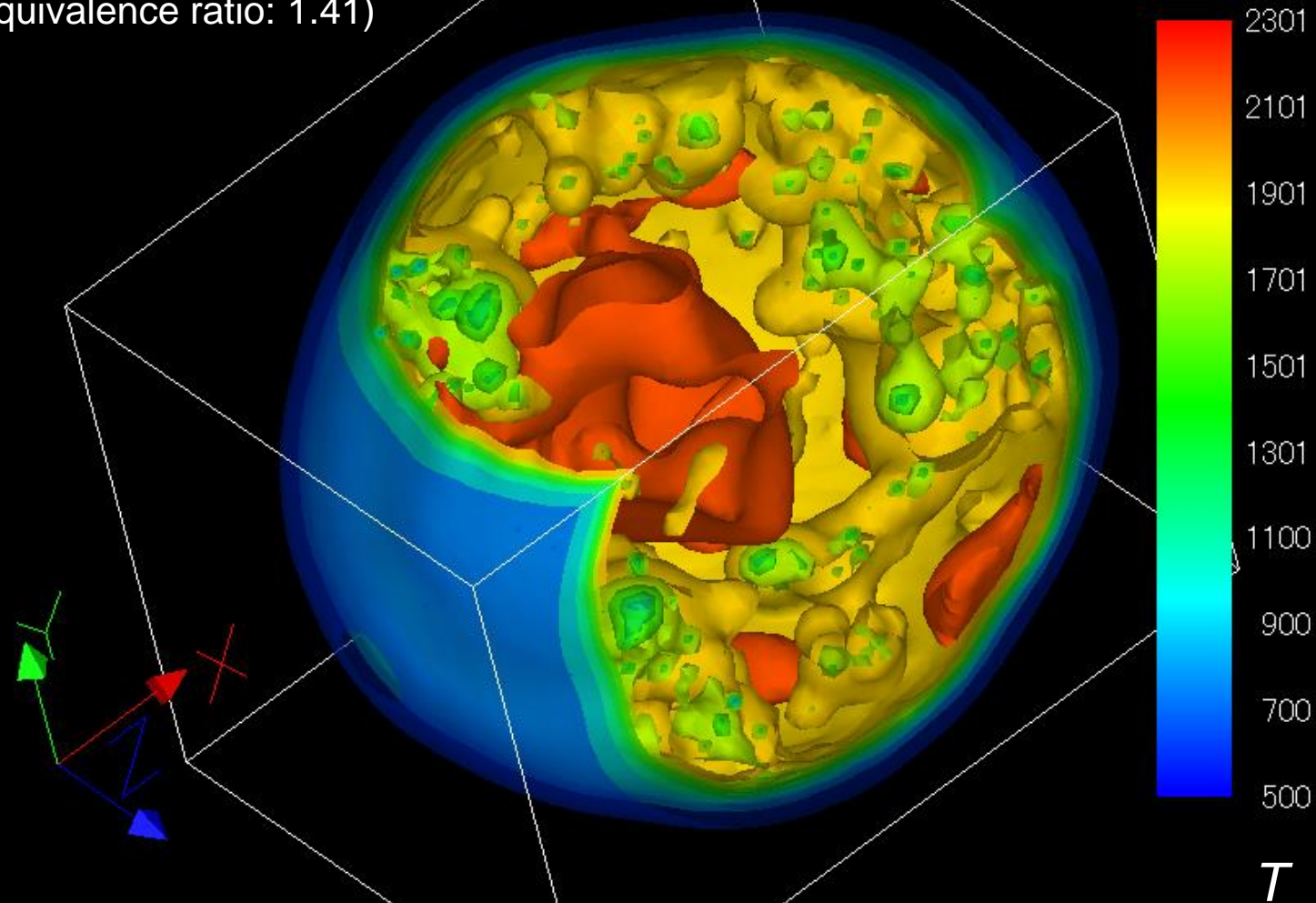
格子数 $121 \times 81 \times 81$
最小格子間隔 0.1 mm

Droplet diameter: 40 μm
Number density: 4 mm^{-3}
(Equivalence ratio: 2.82)



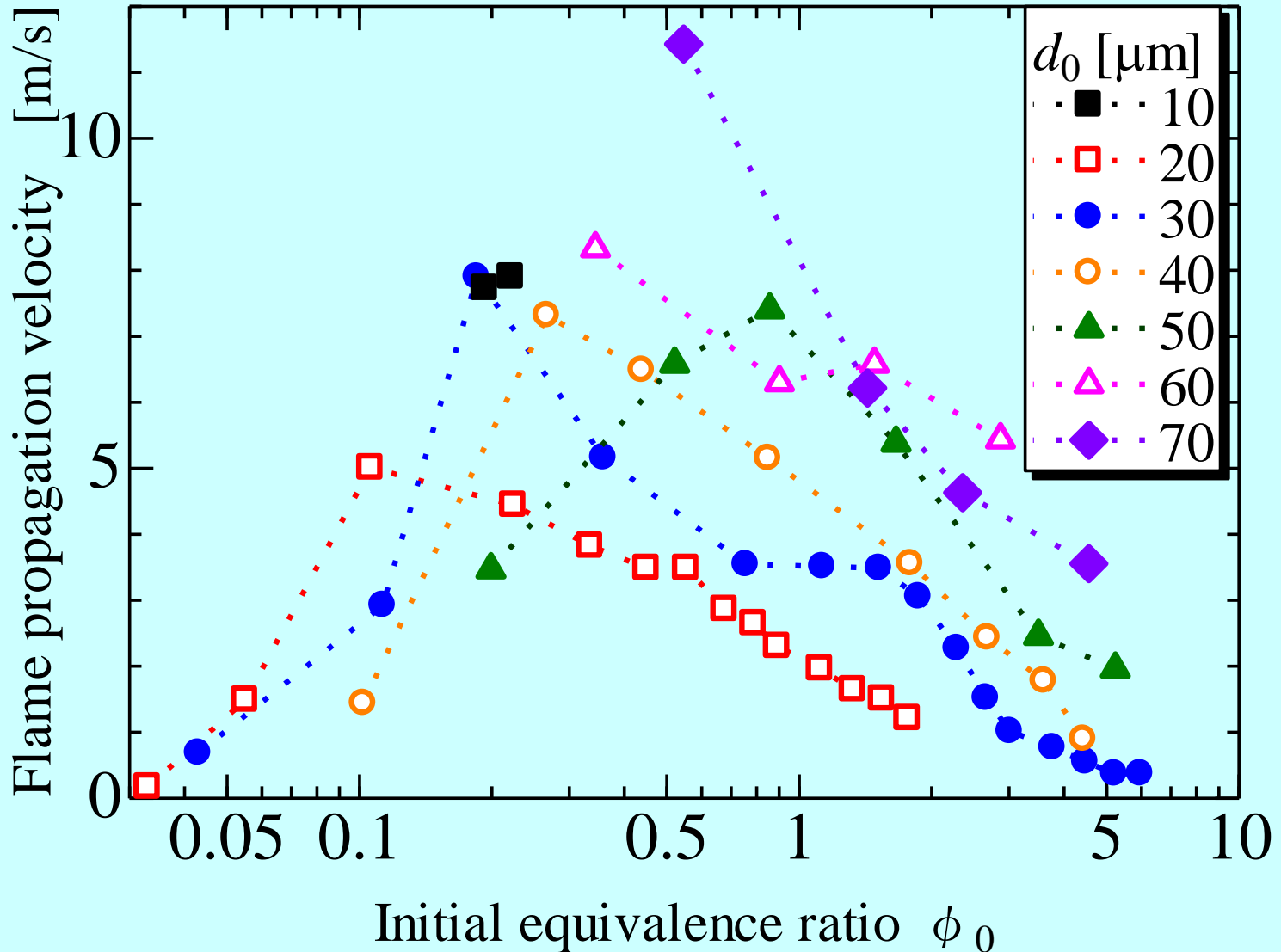
教職員学生と歩んだ燃焼研究(3)

Droplet diameter: 20 μm
Number density: 16 mm^{-3}
(Equivalence ratio: 1.41)



教職員学生と歩んだ燃焼研究(3)

火炎伝播速度と初期当量比の関係(燃料噴霧燃焼)



教職員学生と歩んだ燃焼研究(3)

- ・ 過濃予混合気の高温空気燃焼における燃焼特性および非定常挙動の数値解析

Flame Index : 総括反動的な火炎構造

→ 酸素の識別を含む素反応機構による火炎構造の解明

過濃予混合気を周囲空気流中に噴出するような燃焼場:

酸化剤としての酸素が予混合気と周囲空気の両方に存在

この酸素分子 O_2 を識別 $\rightarrow X_2, Y_2$

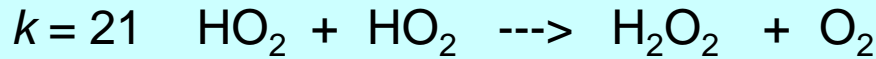
種々の化学種が酸素原子 X, Y のどちらで構成されているかで予混合火炎構造か, 拡散火炎構造かが解明できる.

- ・ 反応速度定数は同じとし, 「実現割合」という概念を導入
数学的(順列・組み合わせ) + 化学反応論的
- ・ 輸送係数, 熱力学データなどは全て一緒

教職員学生と歩んだ燃焼研究(3)

反応例)

実現割合



$W_{\text{O}_2} = k_{21} \cdot C_{\text{HO}_2}^2$



$W_{62} = 1/1 \cdot k_{21} \cdot C_{\text{HX}_2}^2$



$W_{63} = 2/2 \cdot k_{21} \cdot C_{\text{HX}_2} \cdot C_{\text{HXY}}$



$W_{64} = 2/2 \cdot k_{21} \cdot C_{\text{HX}_2} \cdot C_{\text{HXY}}$



$W_{65} = 2/3 \cdot k_{21} \cdot C_{\text{HX}_2} \cdot C_{\text{HY}_2}$



$W_{66} = 2/3 \cdot k_{21} \cdot C_{\text{HX}_2} \cdot C_{\text{HY}_2}$



$W_{67} = 2/3 \cdot k_{21} \cdot C_{\text{HX}_2} \cdot C_{\text{HY}_2}$



$W_{68} = 2/2 \cdot k_{21} \cdot C_{\text{HY}_2} \cdot C_{\text{HXY}}$



$W_{69} = 2/2 \cdot k_{21} \cdot C_{\text{HY}_2} \cdot C_{\text{HXY}}$



$W_{70} = 1/1 \cdot k_{21} \cdot C_{\text{HY}_2}^2$



$W_{71} = 1/3 \cdot k_{21} \cdot C_{\text{HXY}}^2$



$W_{72} = 1/3 \cdot k_{21} \cdot C_{\text{HXY}}^2$



$W_{73} = 1/3 \cdot k_{21} \cdot C_{\text{HXY}}^2$

3/3
0/3
3/3

0/3
3/3
0/3

$W_{\text{SUM}} = k_{21} \cdot (C_{\text{HX}_2}^2 + 2 \cdot C_{\text{HX}_2} \cdot C_{\text{HXY}} + 3 \cdot 2/3 \cdot C_{\text{HX}_2} \cdot C_{\text{HY}_2} + 2 \cdot C_{\text{HY}_2} \cdot C_{\text{HXY}} + C_{\text{HY}_2}^2 + 3 \cdot 1/3 \cdot C_{\text{HXY}}^2)$

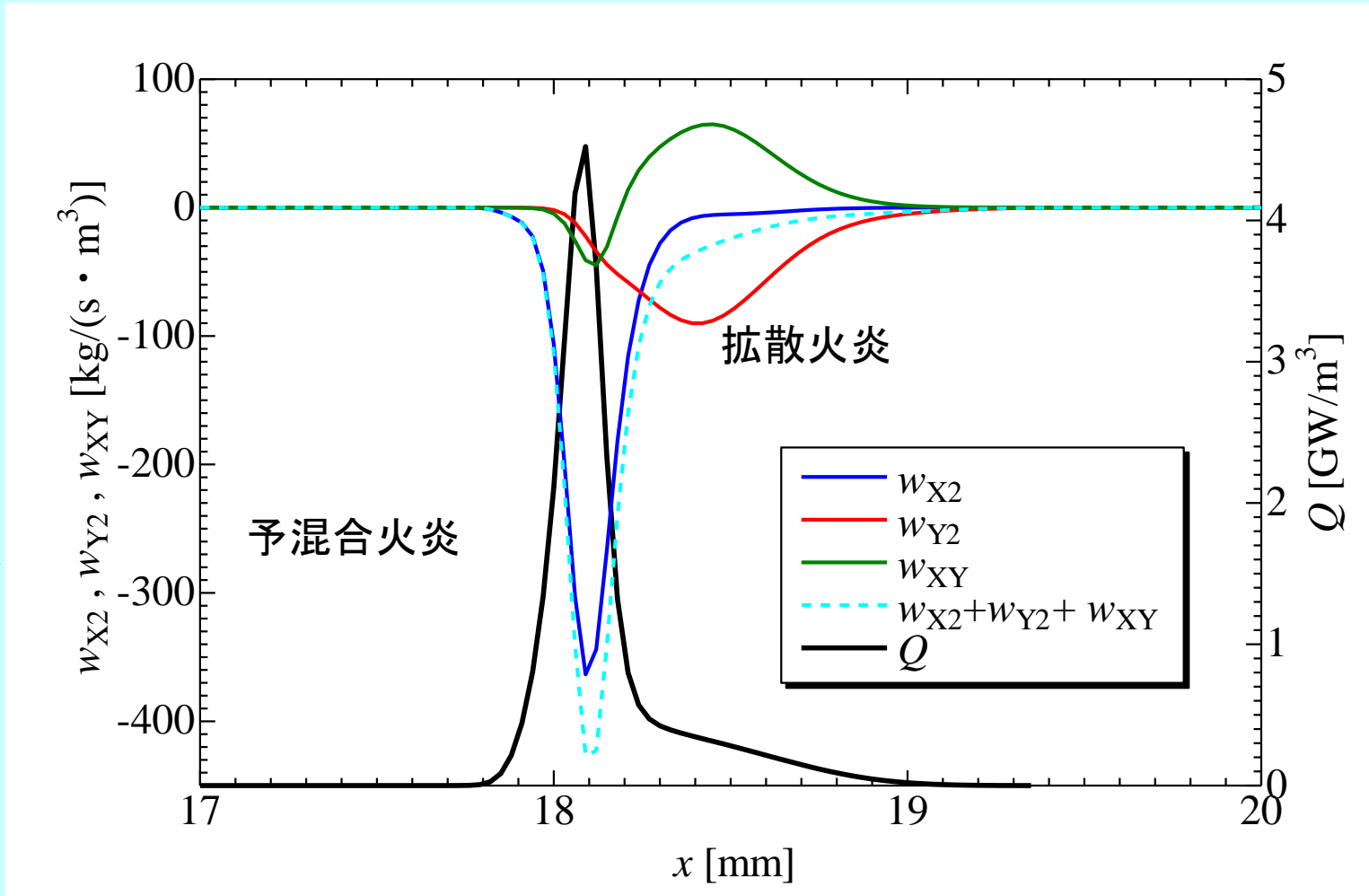
$C_{\text{HX}_2}^2 + C_{\text{HXY}}^2 + C_{\text{HY}_2}^2 + 2 \cdot C_{\text{HX}_2} \cdot C_{\text{HXY}} + 2 \cdot C_{\text{HX}_2} \cdot C_{\text{HY}_2} + 2 \cdot C_{\text{HY}_2} \cdot C_{\text{HXY}}$

$= (C_{\text{HX}_2} + C_{\text{HXY}} + C_{\text{HY}_2})^2 = C_{\text{HO}_2}^2$

教職員学生と歩んだ燃焼研究(3)

反応の強さ

 強



過濃予混合気側

周囲空気側

教職員学生と歩んだ燃焼研究(3)

- ・ 曲率を持つ水素-空気予混合火炎の火炎構造に対する支配パラメータの解明

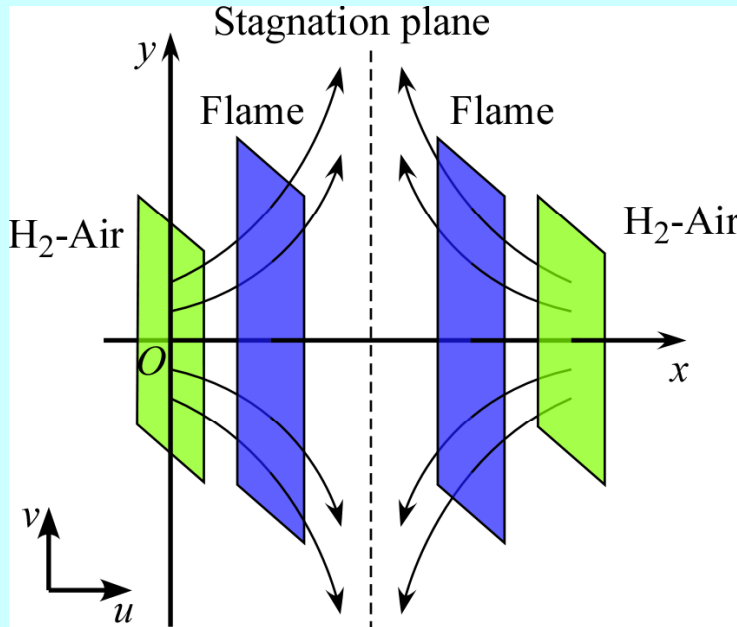


Fig.1 Analytical model of counterflow premixed-twin flame

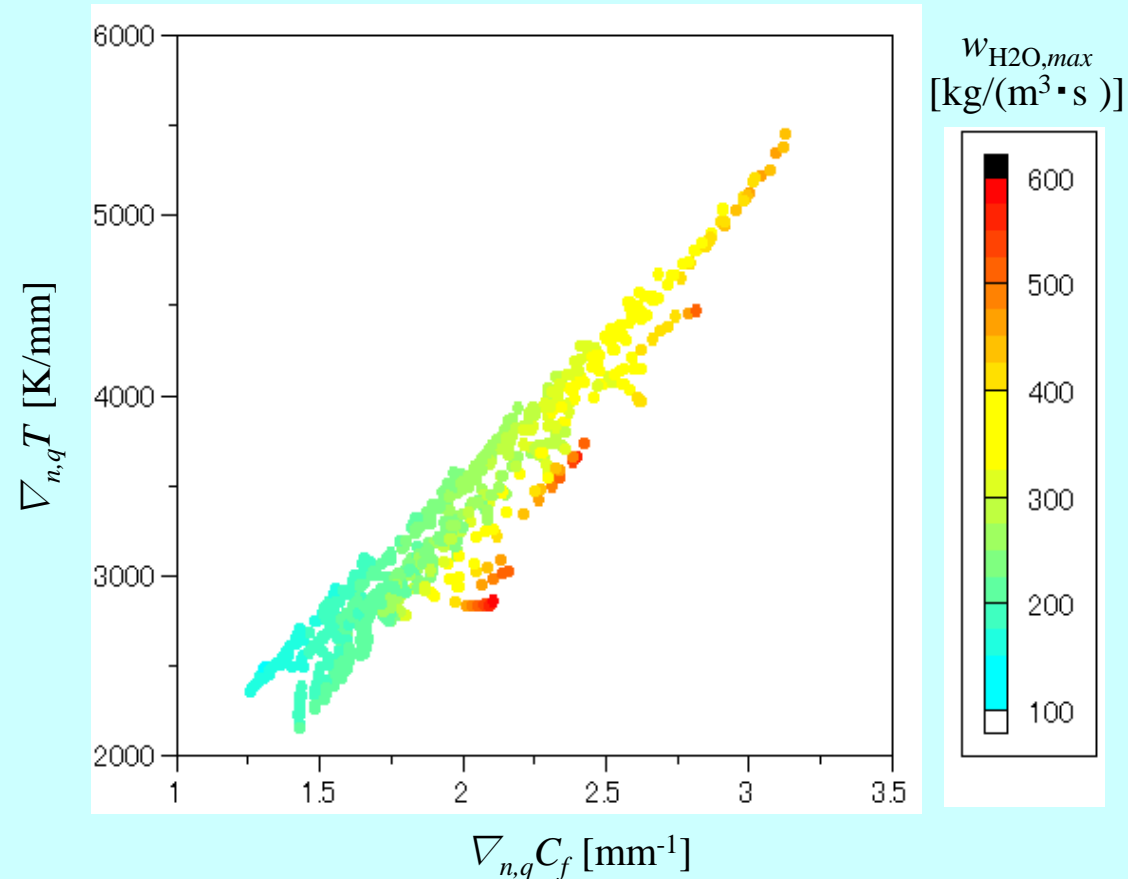


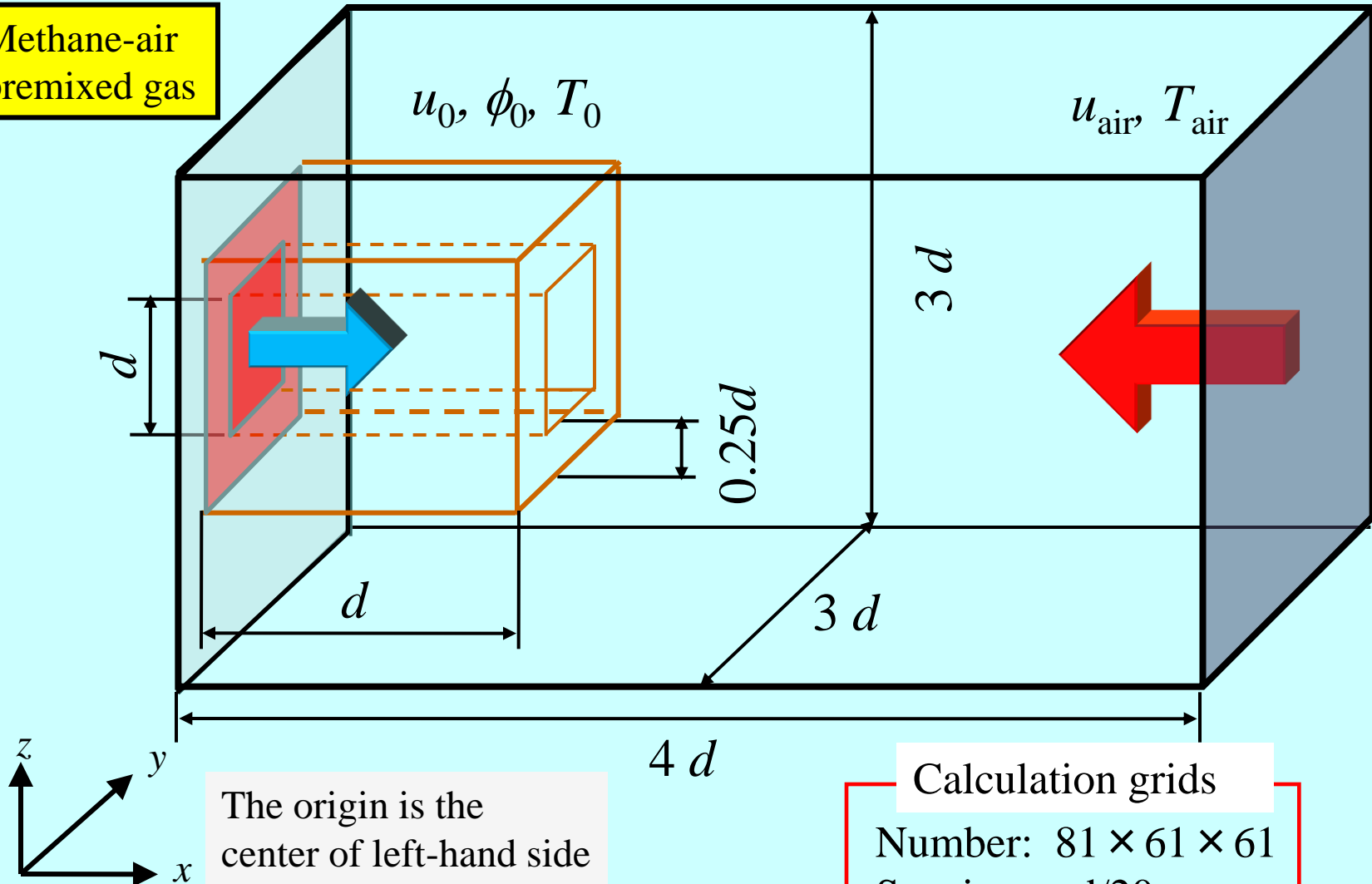
Fig.8 Relationship of $w_{\text{H}_2\text{O},\text{max}}$ to $\nabla_{n,q} C_f$ and $\nabla_{n,q} T$

教職員学生と歩んだ燃焼研究(3)

解析モデル

High temperature air

Methane-air premixed gas



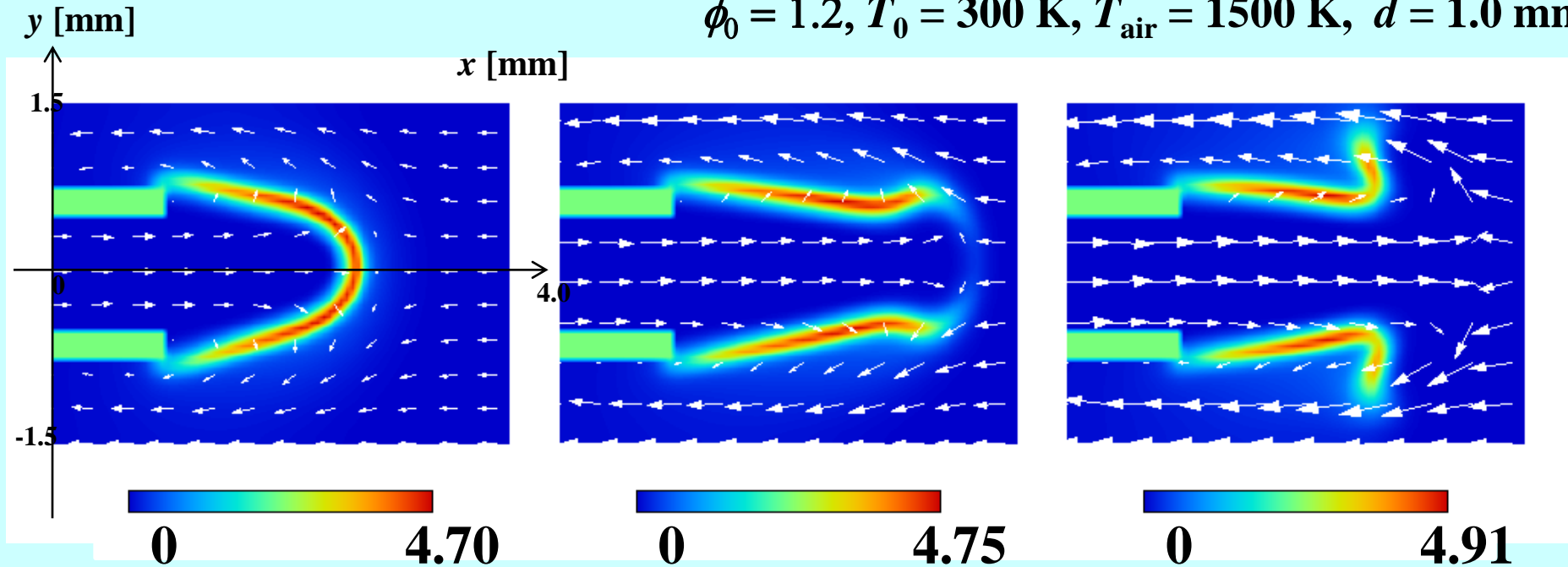
The origin is the center of left-hand side

Calculation grids
Number: $81 \times 61 \times 61$
Spacing: $d/20$

教職員学生と歩んだ燃焼研究(3)

Distributions of Q [GW/m³] ($z = 0$ mm section)

$$\phi_0 = 1.2, T_0 = 300 \text{ K}, T_{\text{air}} = 1500 \text{ K}, d = 1.0 \text{ mm}$$



(a) $u_0 = 3$ m/s

(b) $u_0 = 5$ m/s

(c) $u_0 = 7$ m/s

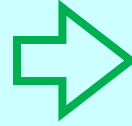
- Flame with curvature is formed on central axis. [第52回燃焼シンポジウム講演論文集, (2014), 1]
- With increase in u_0 , the flame tip moves to air side, the heat release rate becomes small, and then the flame is extinct on central axis.

In the following, we examine the behavior of various quantities on central axis.

教職員学生と歩んだ燃焼研究(3)

[第52回燃焼シンポジウム講演論文集, (2014), 1]

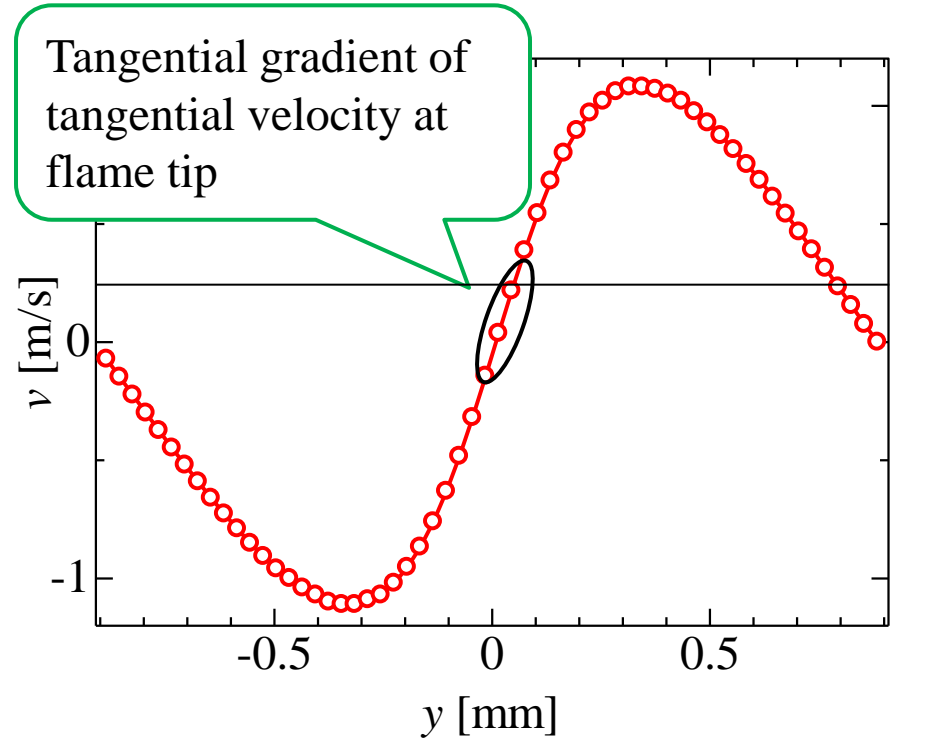
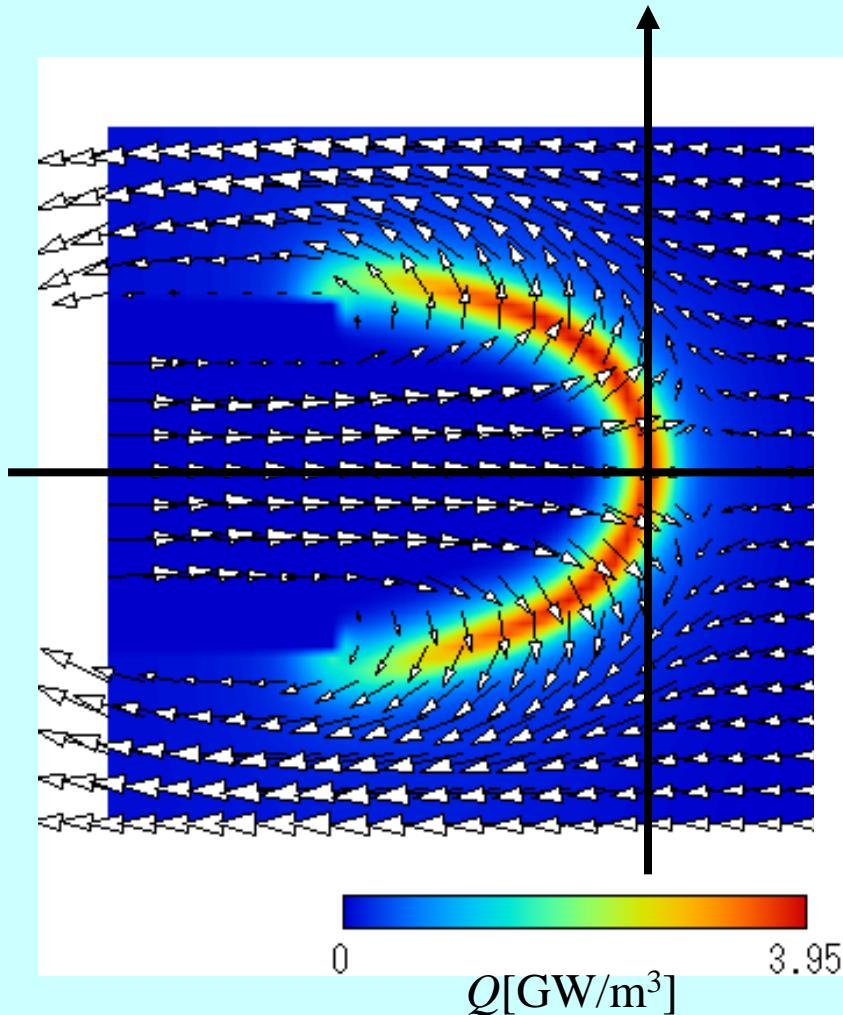
$$\begin{aligned} \kappa &\equiv -\mathbf{n}\mathbf{n} : \nabla \mathbf{v}_{flame} + \nabla \cdot \mathbf{v}_{flame} \\ &= \nabla \cdot \mathbf{v}_{fluid,t} + v_{flame,n}(\nabla \cdot \mathbf{n}) \end{aligned}$$



$$\kappa_1 = a_1 - \frac{2S_1}{R}$$

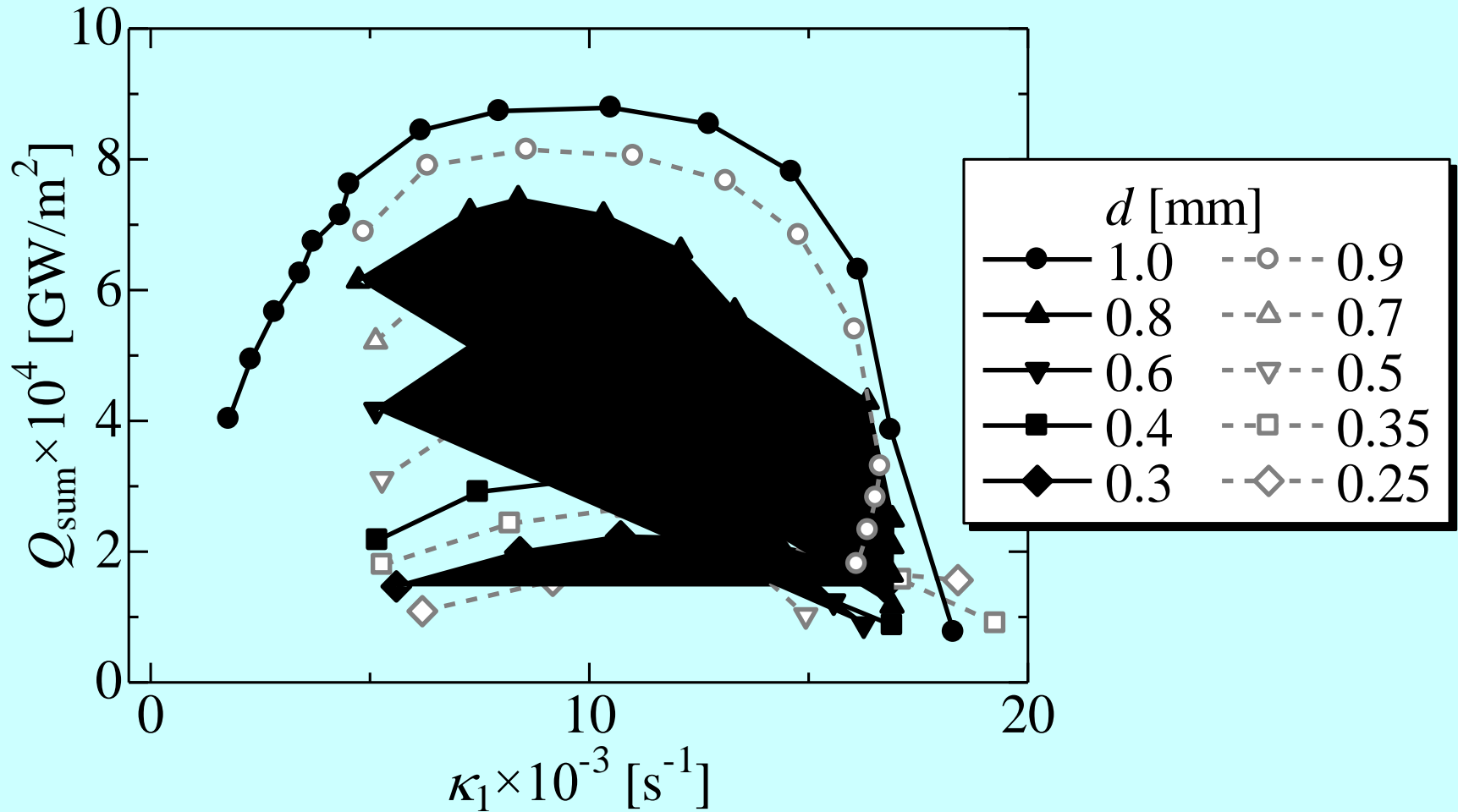
a_1 : Local velocity gradient
 S_1 : Local burning velocity
 R : Radius of flame curvature

$$\kappa_2 = \nabla \cdot \mathbf{v}_{fluid,t}$$



y direction distribution of tangential velocity for flame surface

教職員学生と歩んだ燃焼研究(3)



- κ_2 is almost proportional to u_0 , and its difference due to the scale of combustion field is small.
- The correlation is seen in Q_{sum} and κ_2 for different d near extinction.

教職員学生と歩んだ燃焼研究(3)

・ 予混合火炎の燃焼特性に与える火炎曲率・壁面の影響に関する実験的検討

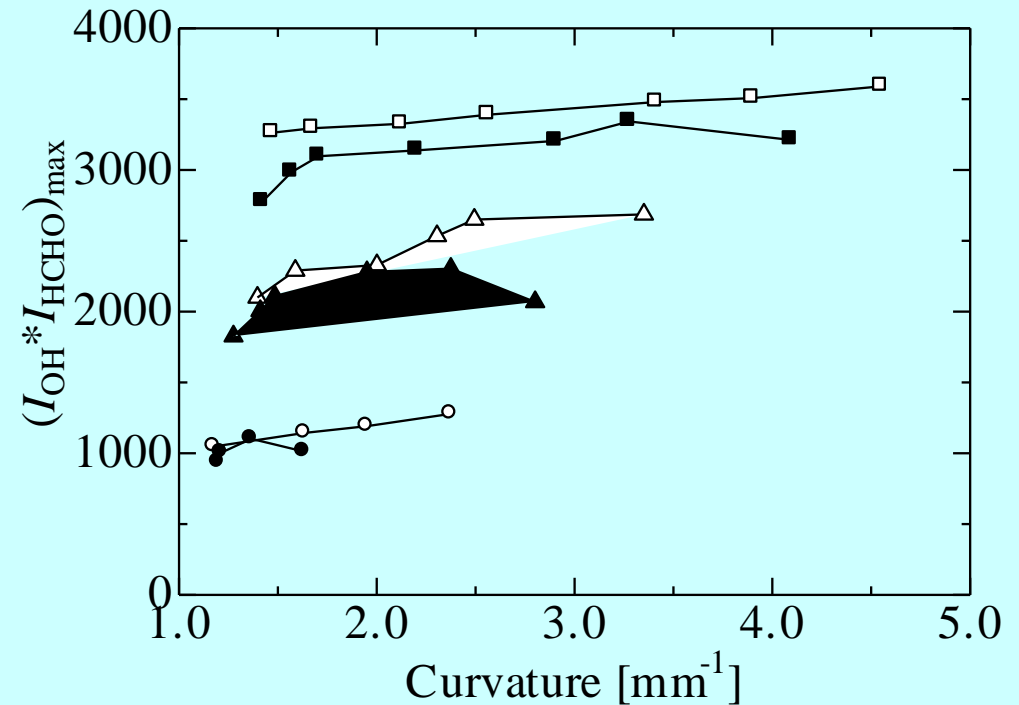
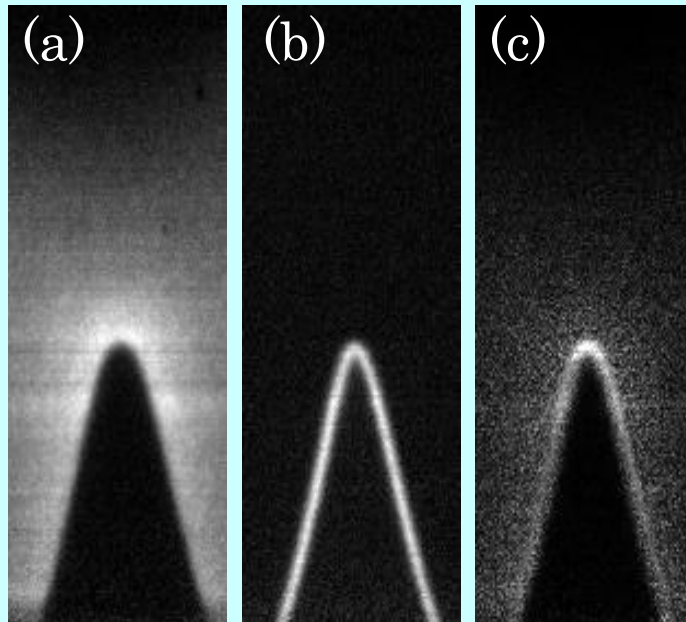


Fig.1 Pictures of PLIF
(a)OH, (b)HCHO, and (c)OH*HCHO

Fig.3 Relation between $(I_{OH} * I_{HCHO})_{max}$ and curvature of methane-air flame

教職員学生と歩んだ燃焼研究(3)

- ・ 拡散火炎におけるすす生成特性の検討と組合せ予測手法の検証

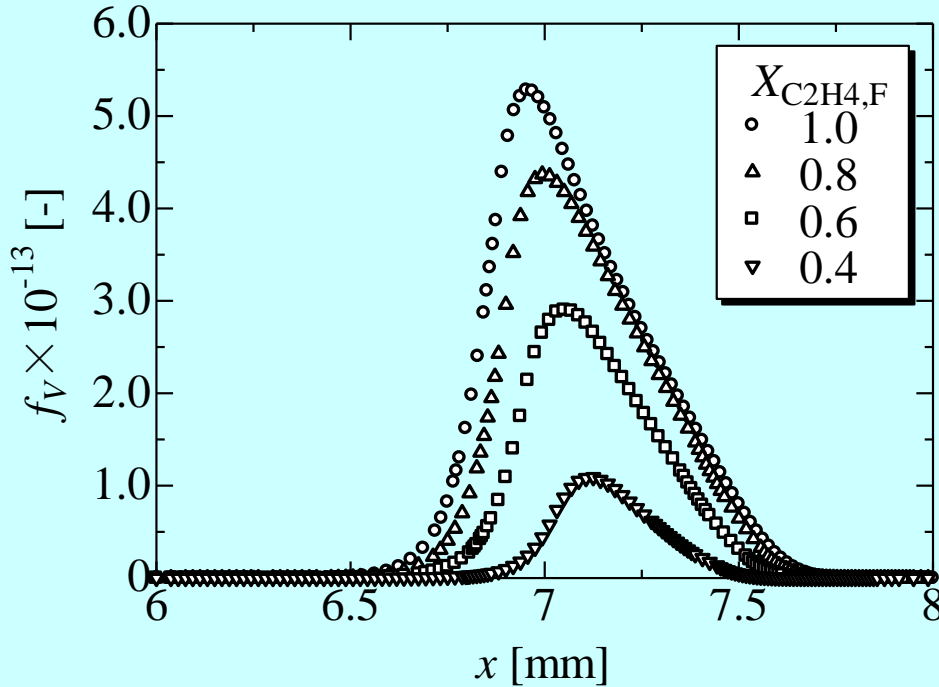


Fig. 1 Distributions of soot volume fraction

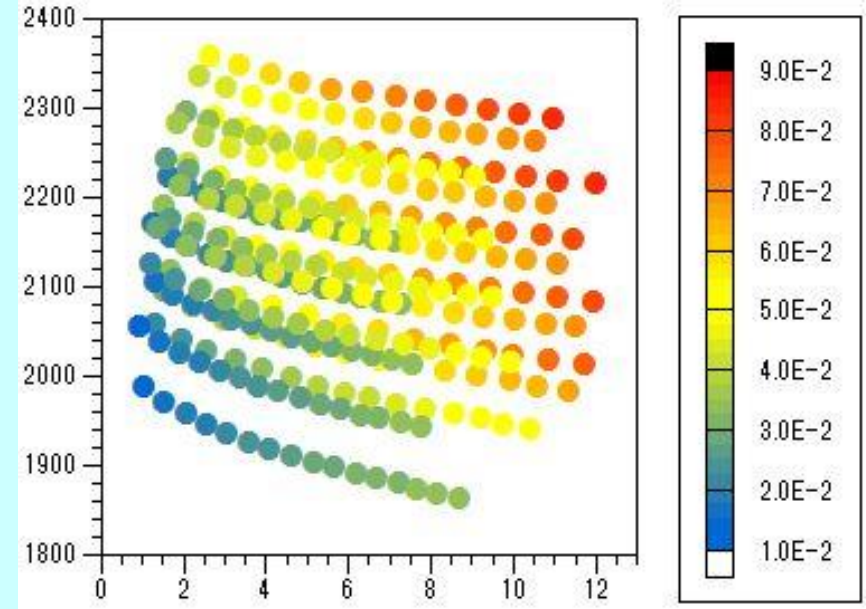


Fig. 2 Relationship of $\omega_{C_{16}H_{10},sum}$ to T_{max} and SDR_q

教職員学生と歩んだ燃焼研究(3)

・ 予混合火炎の燃焼特性に与える不活性ガス種の影響に関する検討

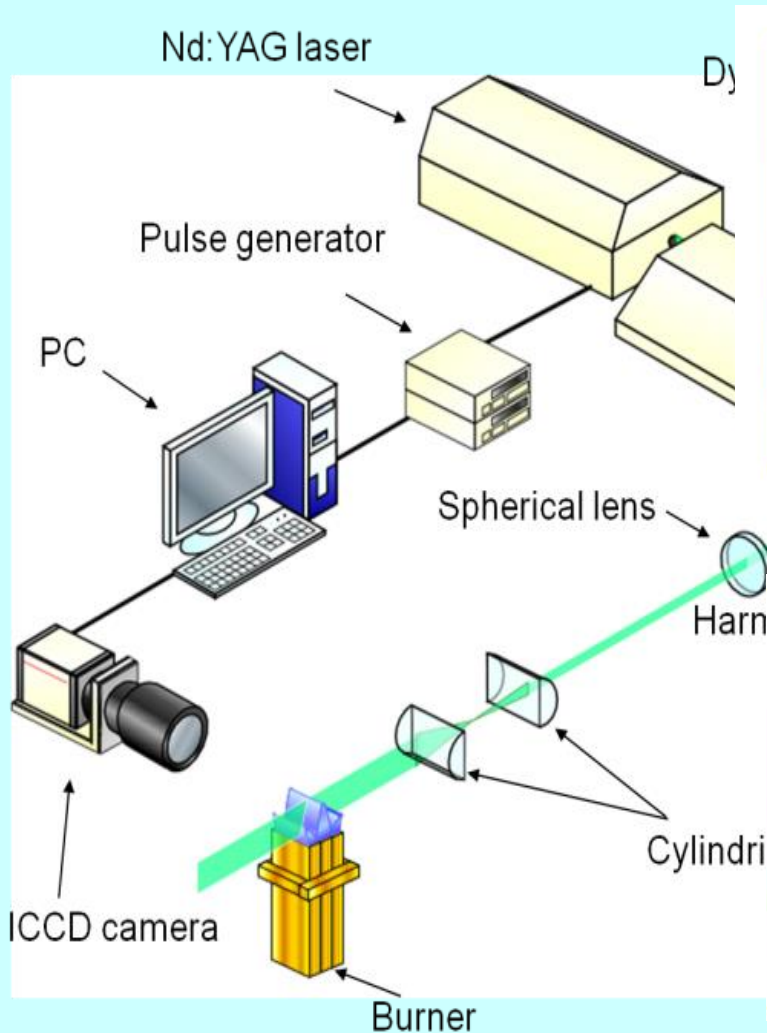
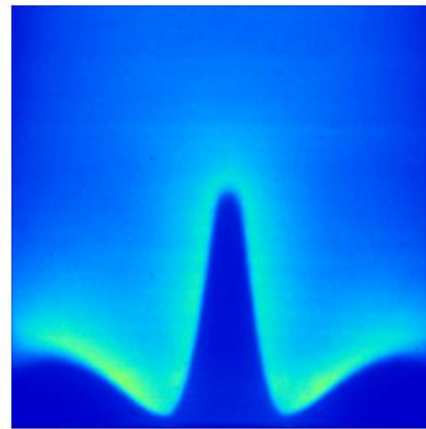
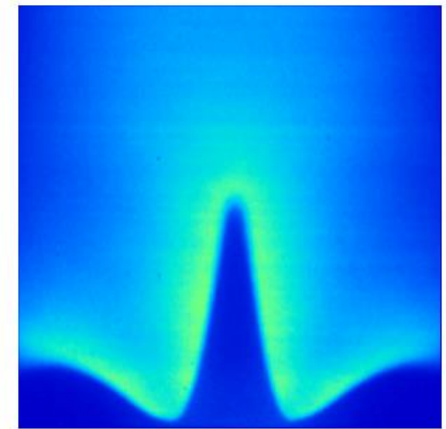


Fig.3 OH-PLIF system

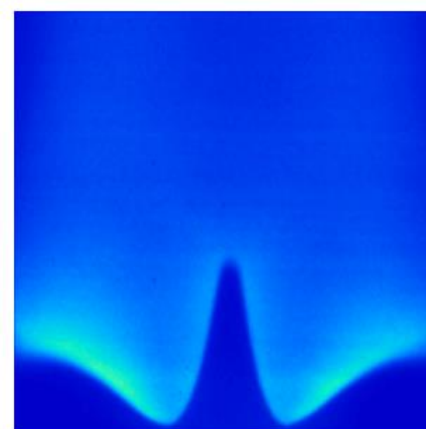
[第50回燃焼シンポジウム 158-159 2012]



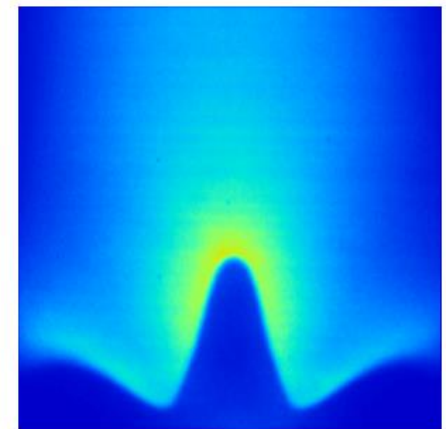
(a) N_2 , $\theta = 0.81$, $v_m = 0.8$ m/s



(b) Ar, $\theta = 0.85$, $v_m = 1.0$ m/s



(c) CO_2 , $\theta = 0.69$, $v_m = 0.6$ m/s



(d) He, $\theta = 0.83$, $v_m = 1.0$ m/s

Fig.5 Averaged OH fluorescence distributions

教職員学生と歩んだ燃焼研究(3)

- ・ 両側の空気流速が異なるスリット火炎の浮き上がり特性に関する数値解析

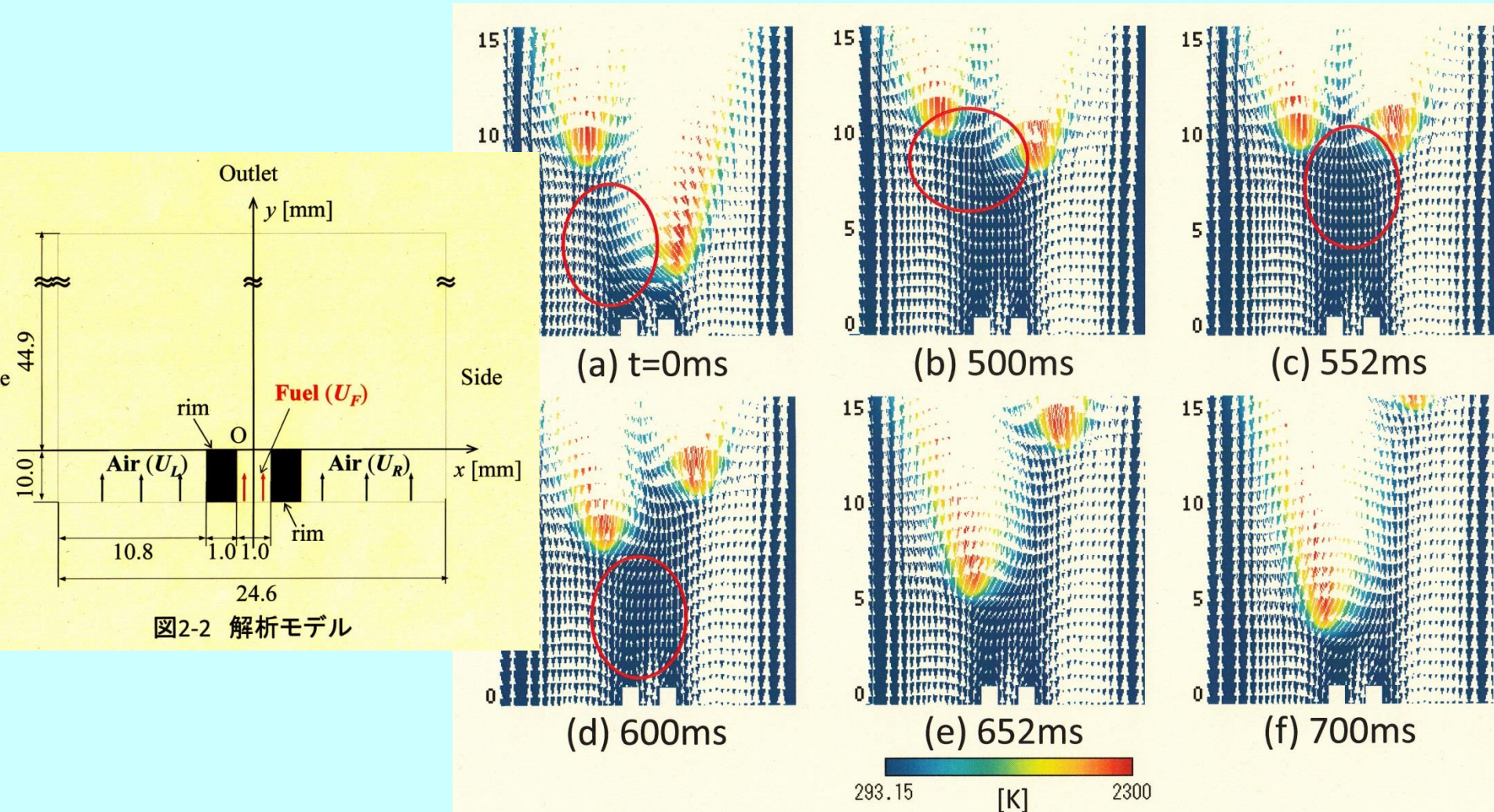


図3-16 左右の火炎の L_f が入れ替わる際の流れ場の変化

教職員学生と歩んだ燃焼研究(3)

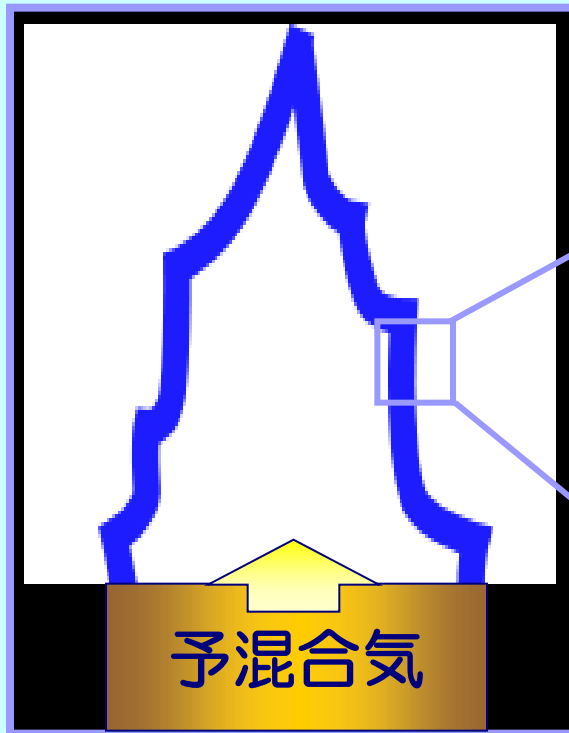
- 燃料希薄メタン-空気予混合火炎の火炎構造と支配パラメータの解明

林直樹 (2015 博士論文 受理)

実際の乱流火炎の局所・瞬間の火炎構造は層流火炎で模擬できる。

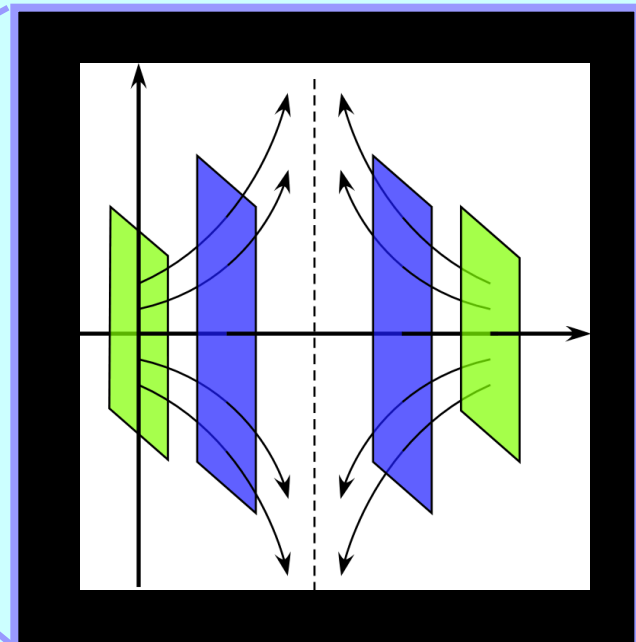
簡単な総括反応式

詳細な素反応機構



多次元の複雑な流れ場

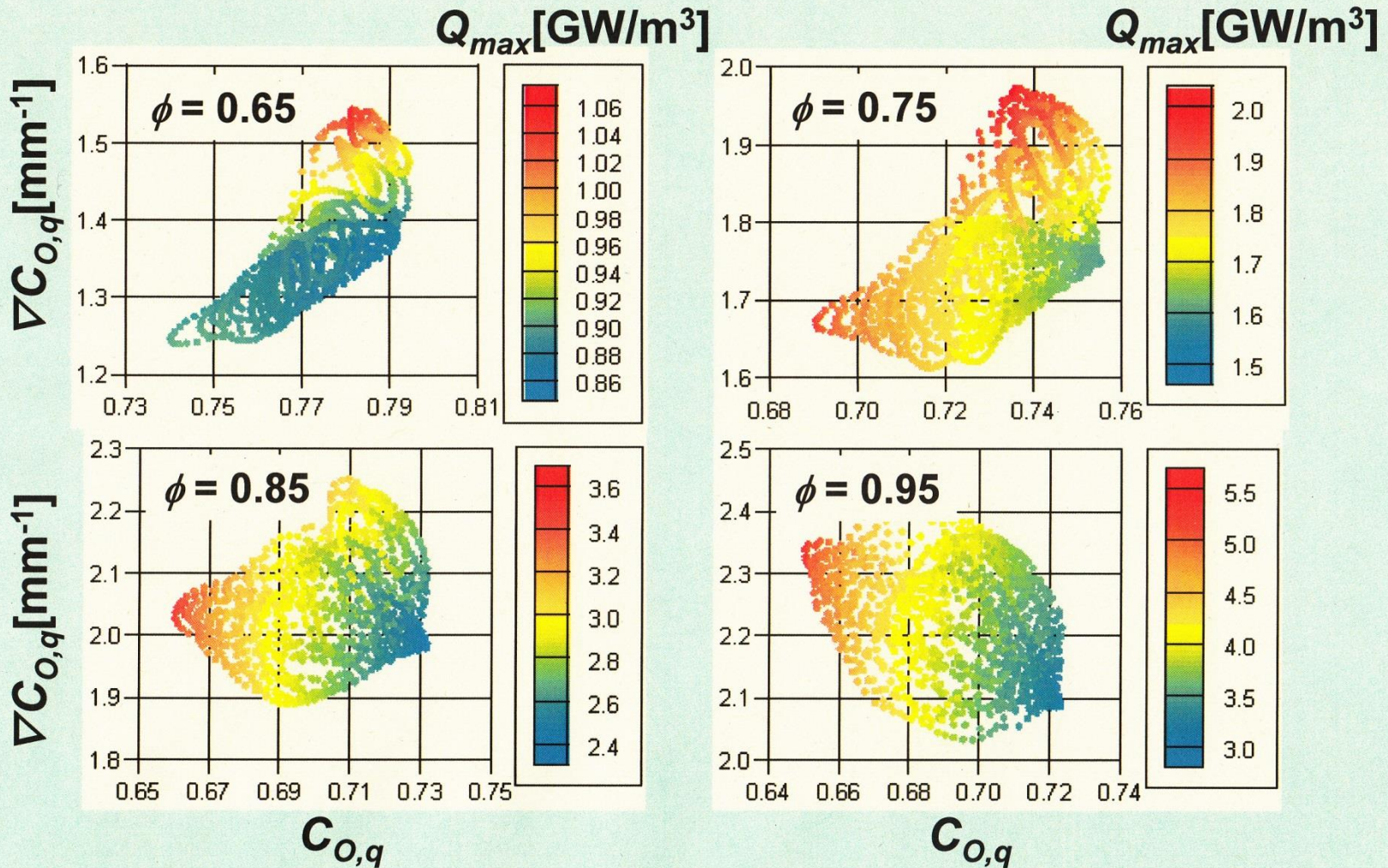
再結合パラメータ

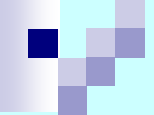


単純な流れ場：対向流

教職員学生と歩んだ燃焼研究(3)

熱発生速度最大値 Q_{max} の $C_{O,q}$ および $\nabla C_{O,q}$ による整理





謝 辞

この38年間の永きにわたり、名古屋大学で教育・研究に携わることができたのは、ひとえに一緒に学び、考え、躓きながらも歩み続けていただいた研究室の教職員、並びに大学院生208名、学部卒研究生308名の献身的な協力のおかげです。ここに心からの謝意を表します。

最後に私ごとながら、わがままな研究生生活を支えてくれた家族に感謝の意を表します。



永い間,

大変お世話になりました。

2015年3月6日

山下博史