

噴霧火炎の数値計算法

燃焼工学講座
赤松 史光

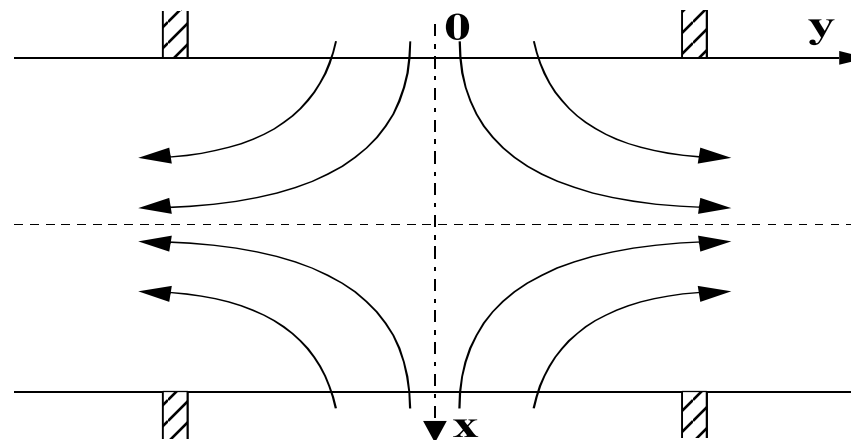
噴霧火炎の複雑構造



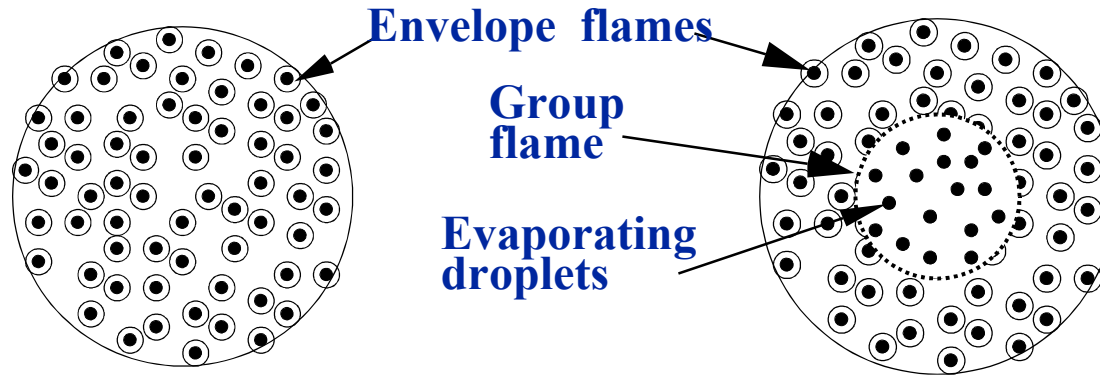
気体燃料火炎



噴霧火炎

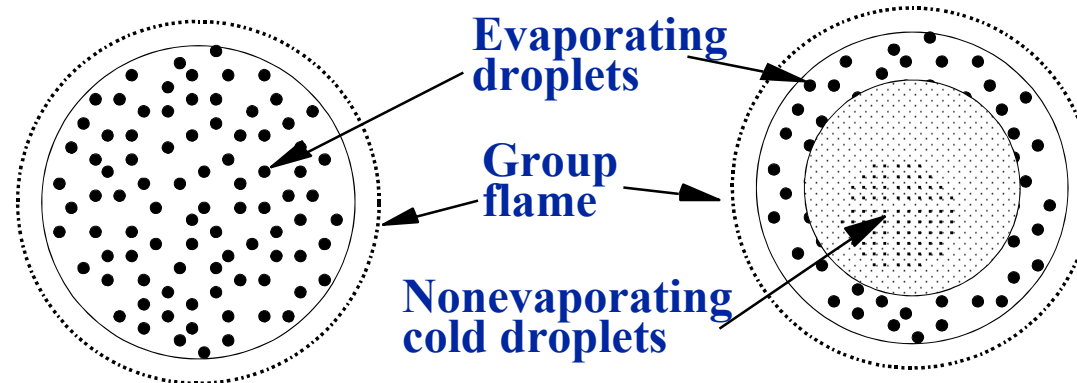


油滴群燃烧



**Single droplet
combustion mode**

**Internal group
combustion mode**

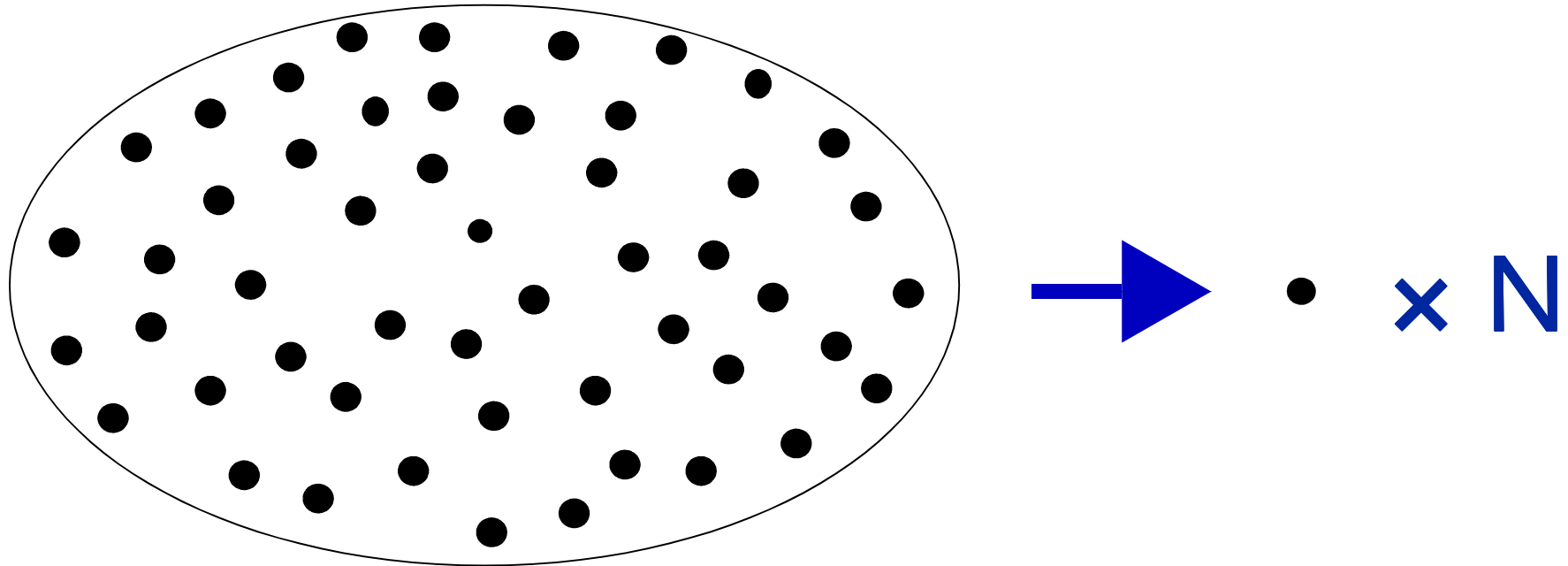


**External group
combustion mode**

**External sheath
combustion mode**

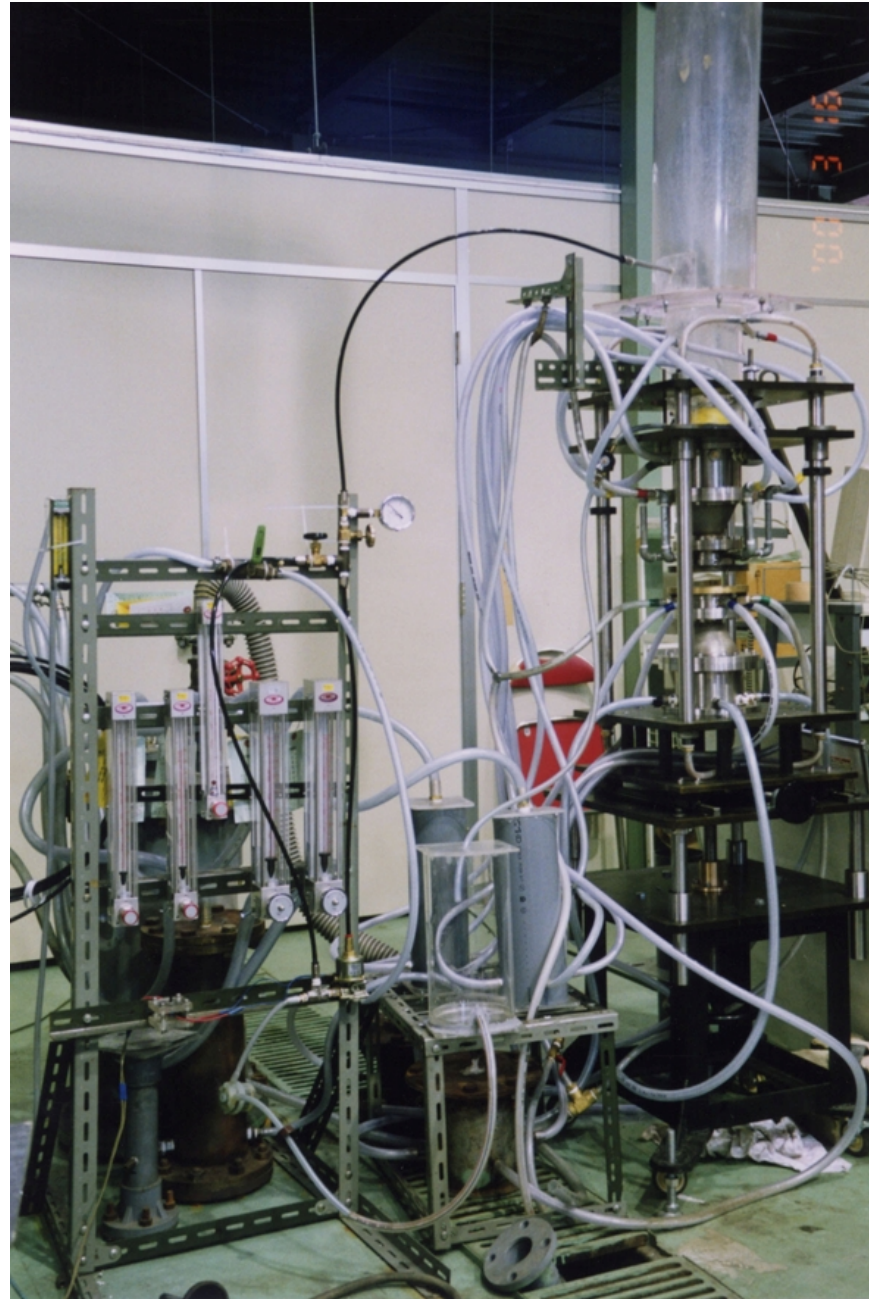
油滴パーセルとは

燃料 $1cc \rightarrow 20\mu m$ の油滴 2.4億個

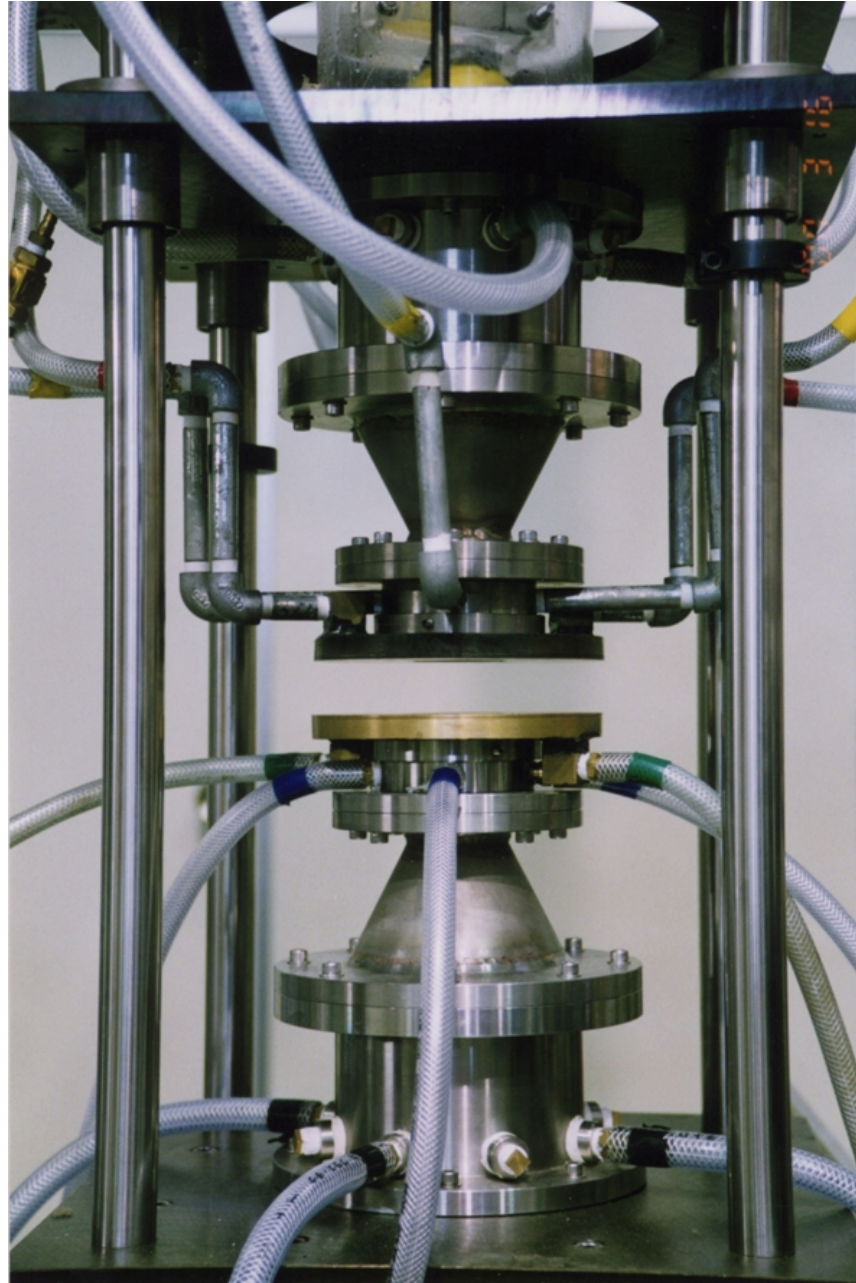


N個の油滴

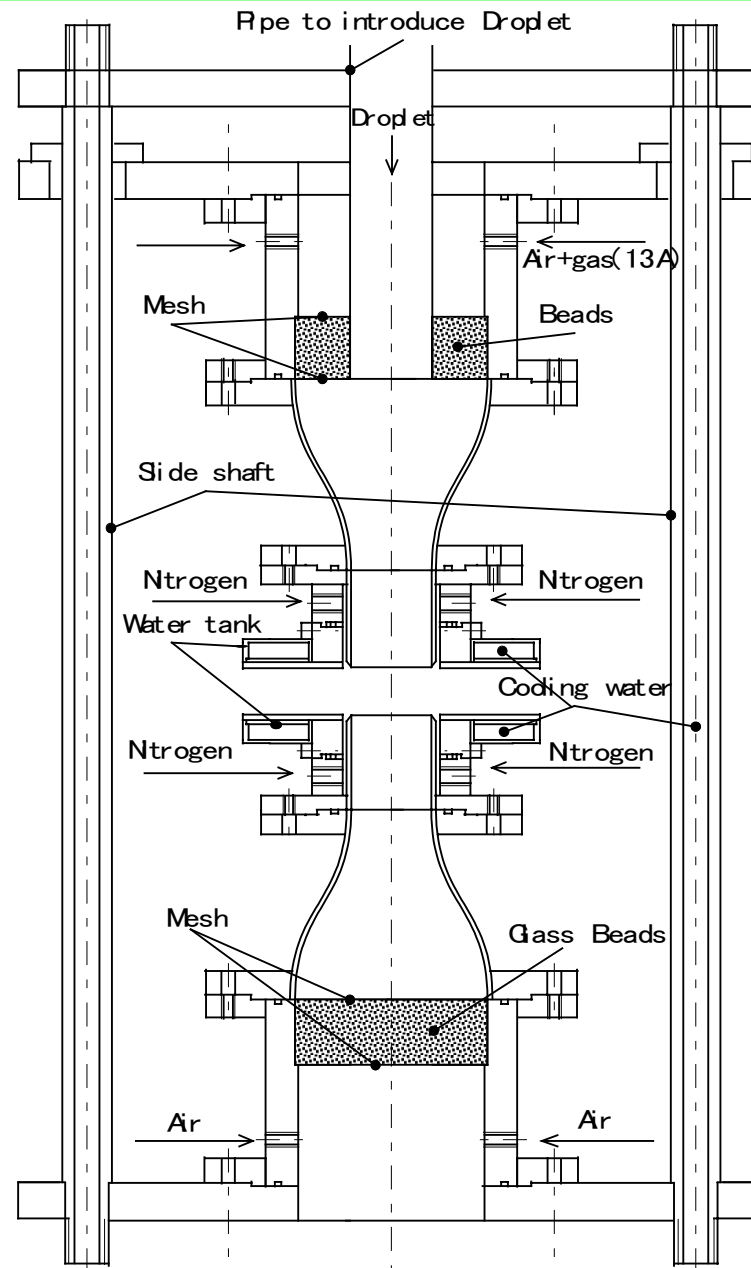
実験装置の概観



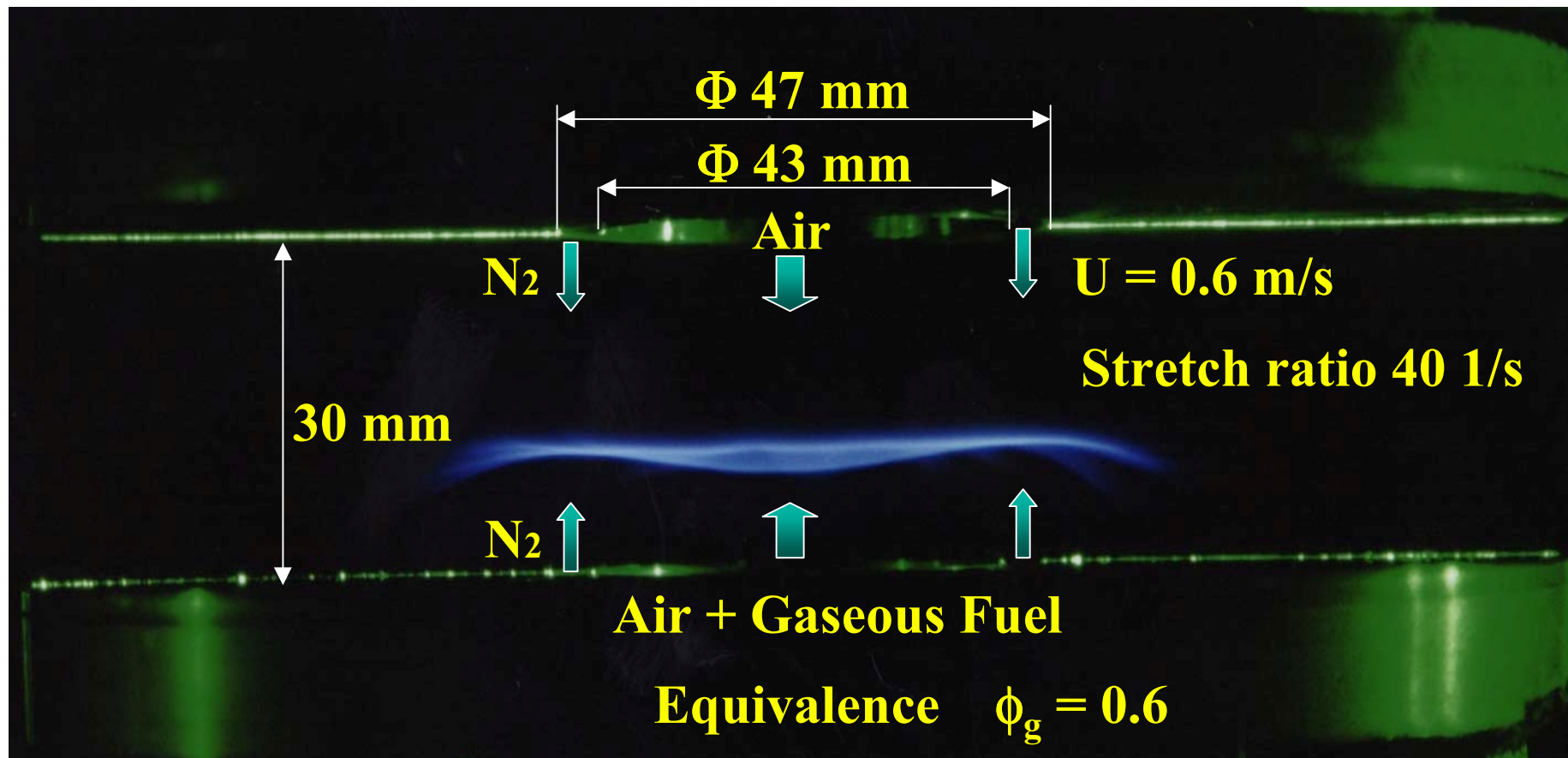
層流対向流火炎バーナの概観



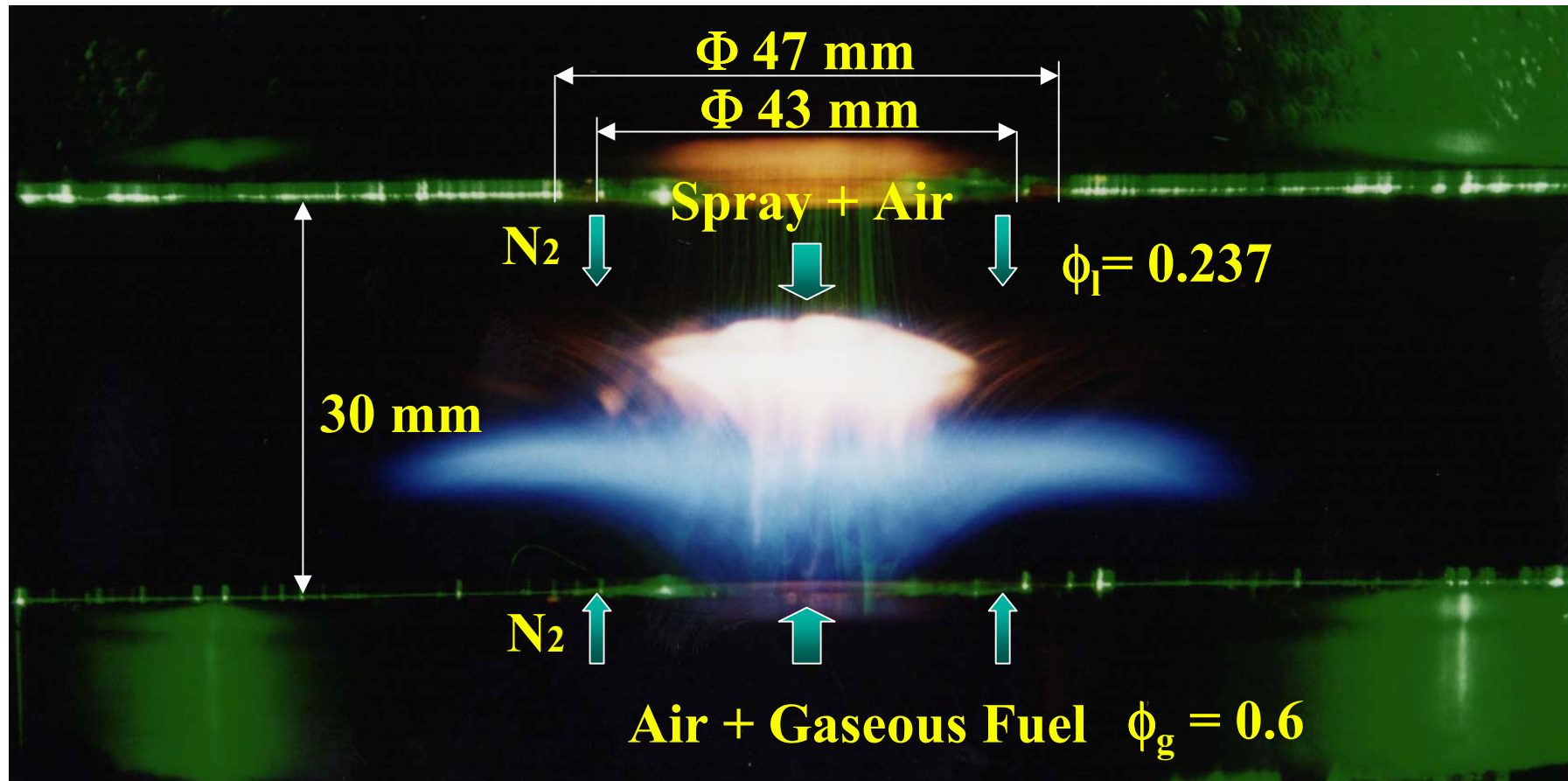
層流対向流火炎バーナの構成



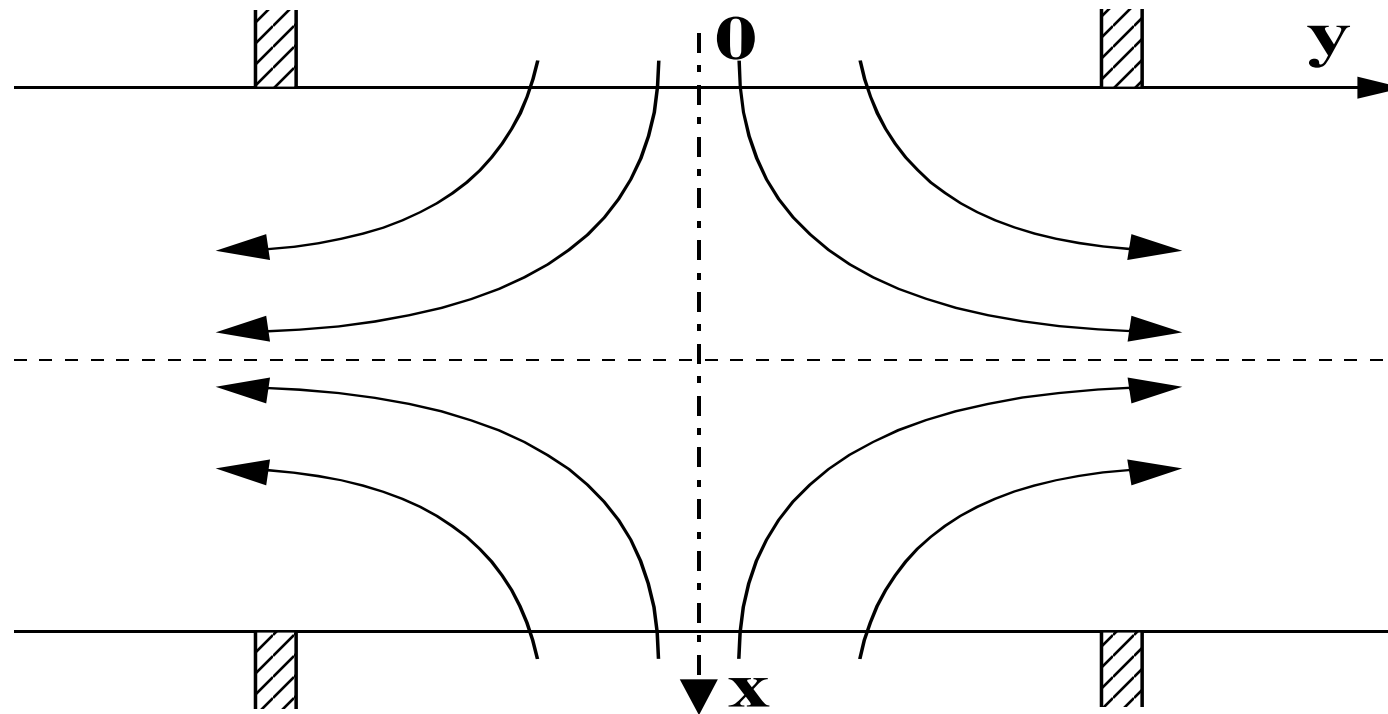
気体燃料の対向流平面火炎



噴霧添加後の火炎



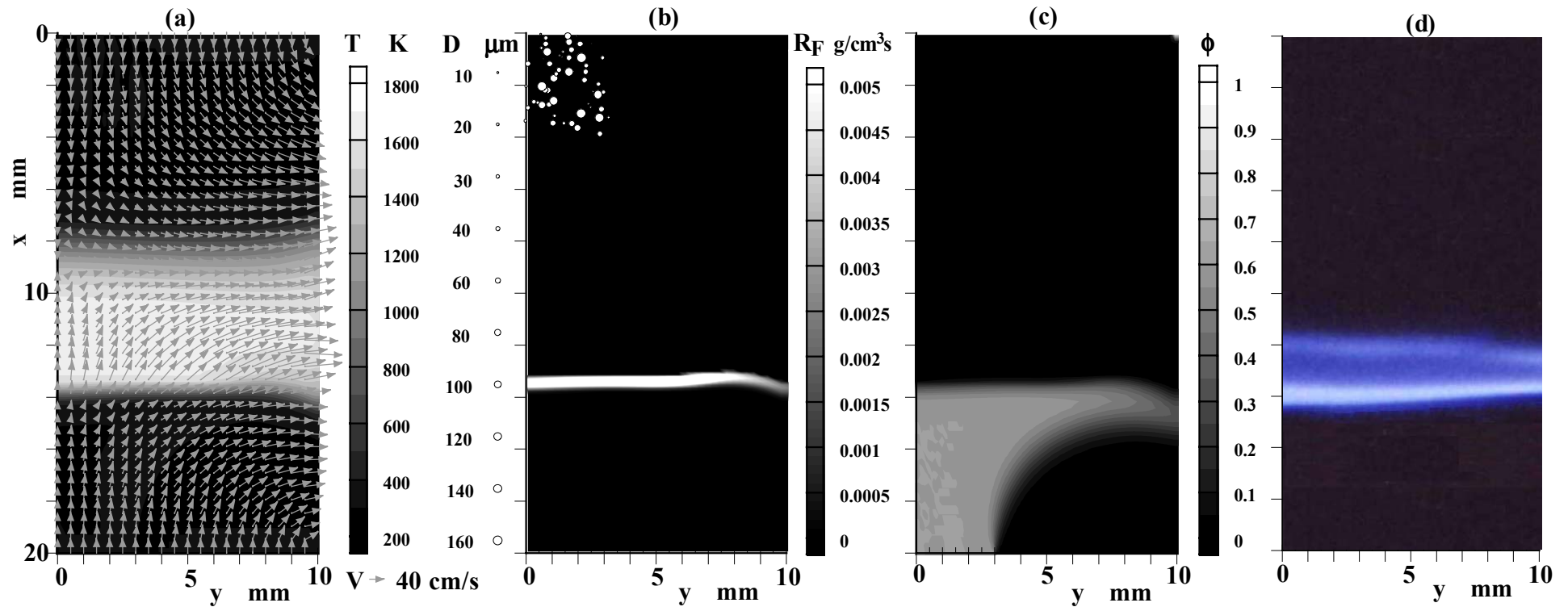
計算領域とコントロールボリューム



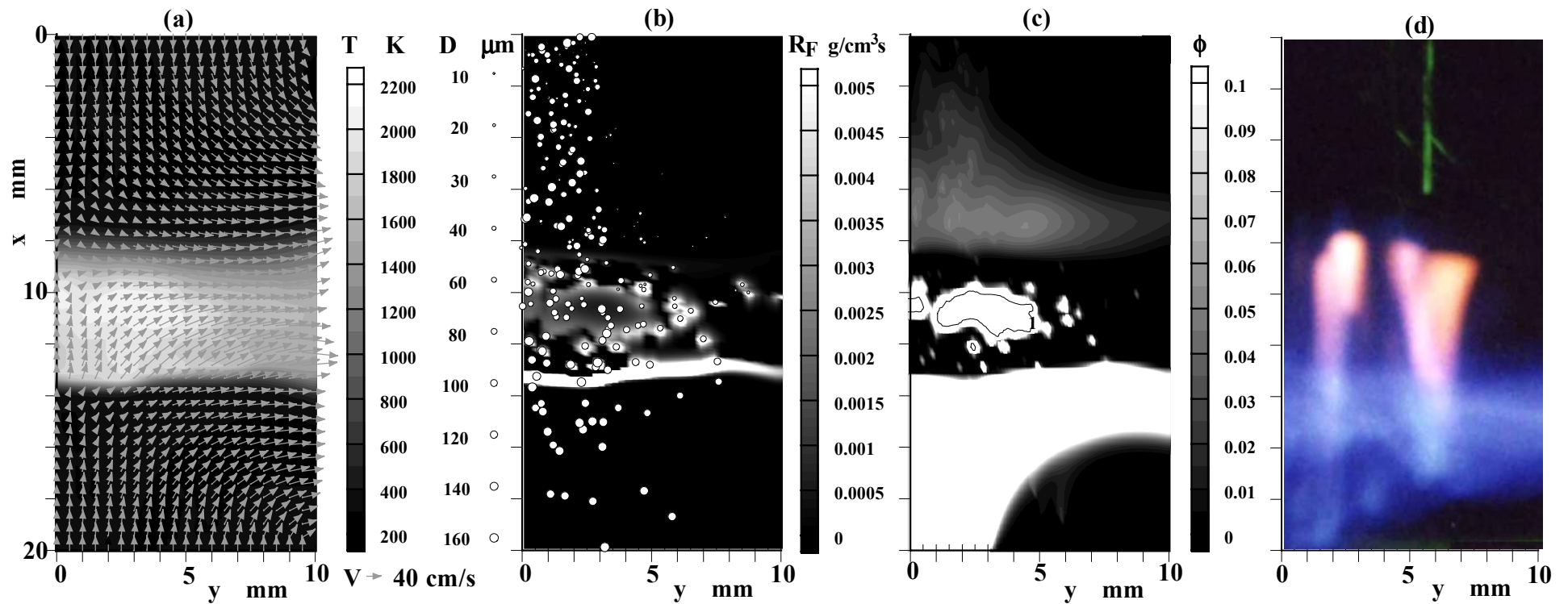
ポート幅 20 mm, ポート間隔 20 mm

面対称を仮定 $20 \times 10 \text{ mm}$ 領域 157×77 の等間隔格子
(コントロールボリューム実寸法 $130 \mu\text{m} \times 130 \mu\text{m}$)

計算結果の一例 (t=5ms)



計算結果の一例 (t=30ms)



数値計算手法

Eulerian-Lagrangian手法

Navier-Stokes方程式

パーセルではなく全油滴を追跡

有限体積法

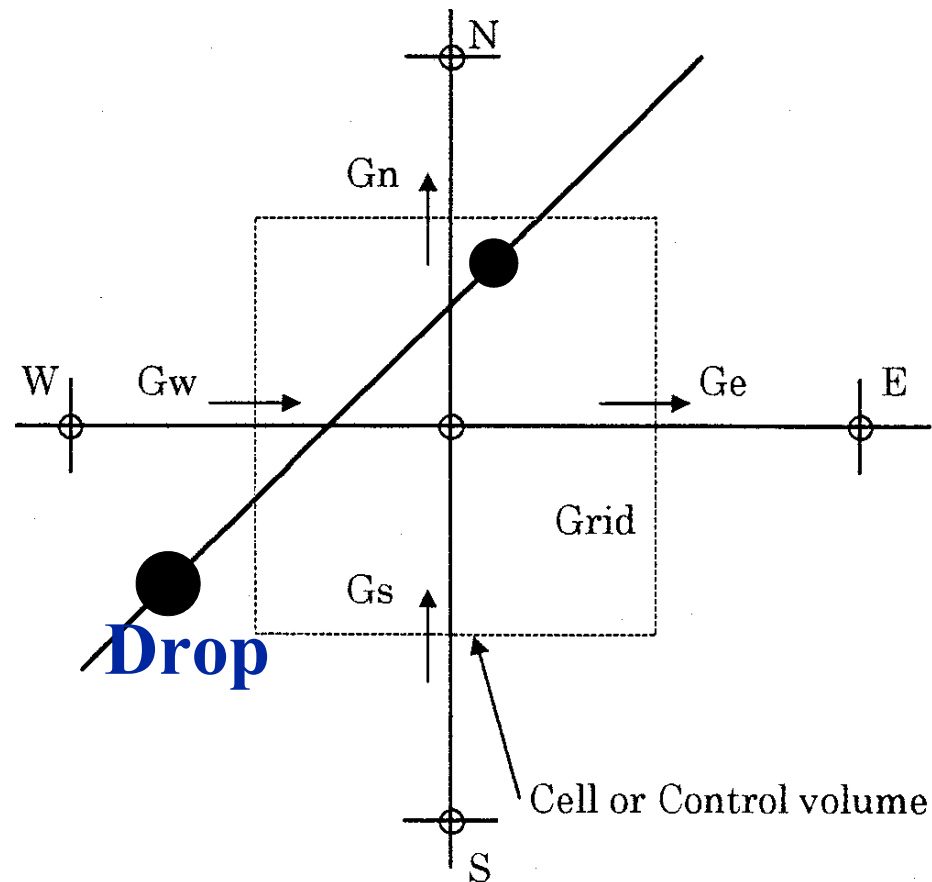
SIMPLEアルゴリズム

CHEMKIN

数値計算手法（続き）

相間干渉モデル *PSI-Cell*モデル

（気相計算格子点を囲むコントロールボリュームを単位として，油滴と気相間の熱・物質・運動量が交換）



**t 間の油滴と気相
の相互干渉項は移動
後の位置で考慮**

気相に対する支配方程式

質量保存式

x 方向運動量保存式

y 方向運動量保存式

エネルギー保存式

化学種保存式

(O_2 , N_2 , CO_2 , H_2O , $\text{C}_{10}\text{H}_{22}$)

気相の支配方程式（ガス火炎）

質量保存式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} = 0$$

x方向運動量保存式

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho u u - \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho v u - \mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \mu \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu \frac{\partial v}{\partial x} + \rho g$$

y方向運動量保存式

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho u v - \mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho v v - \mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \mu \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \mu \frac{\partial v}{\partial y}$$

エネルギー保存式

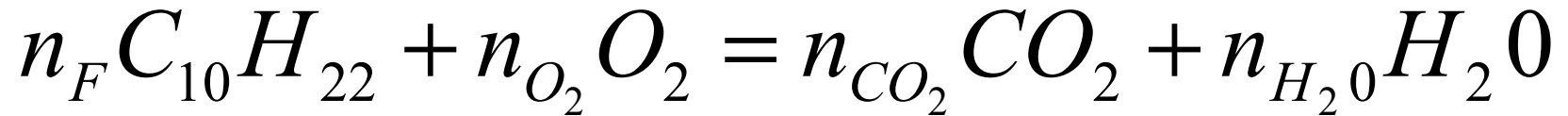
$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho u h - \rho a \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho v h - \rho a \frac{\partial h}{\partial y} \right) = 0$$

化学種保存式

$$\frac{\partial \rho Y_k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho u Y_k - \rho D \frac{\partial Y_k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho v Y_k - \rho D \frac{\partial Y_k}{\partial y} \right) = \underline{S_{combu, k}}$$

燃焼反応モデル

n-decaneの一段総括反応



単位時間・単位体積あたりの反応量 R_F [g/(cm³s)]

$$R_F = 4.85595 \times 10^8 \cdot \rho^{1.75} \cdot \exp\left(-\frac{15098}{T}\right) Y_F^{0.25} Y_{O_2}^{1.5} \times 10^3$$

各化学種の質量分率保存式の生成項

$$S_{combu,k} = -\frac{n_k}{n_F} \frac{W_k}{W_F} R_F$$

気相の支配方程式（噴霧火炎）

質量保存式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} = \underline{S_{l,m}}$$

x方向運動量保存式

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u u - \mu \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v u - \mu \frac{\partial u}{\partial y}) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \mu \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu \frac{\partial v}{\partial x} + \rho g + \underline{S_{l,u}}$$

y方向運動量保存式

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u v - \mu \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v v - \mu \frac{\partial v}{\partial y}) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \mu \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \mu \frac{\partial v}{\partial y} + \underline{S_{l,v}}$$

エネルギー保存式

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u h - \rho a \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v h - \rho a \frac{\partial h}{\partial y}) = \underline{S_{l,h}}$$

化学種保存式

$$\frac{\partial \rho Y_k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u Y_k - \rho D \frac{\partial Y_k}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v Y_k - \rho D \frac{\partial Y_k}{\partial y}) = \underline{S_{combu,k}} + \underline{S_{l,Y_k}}$$

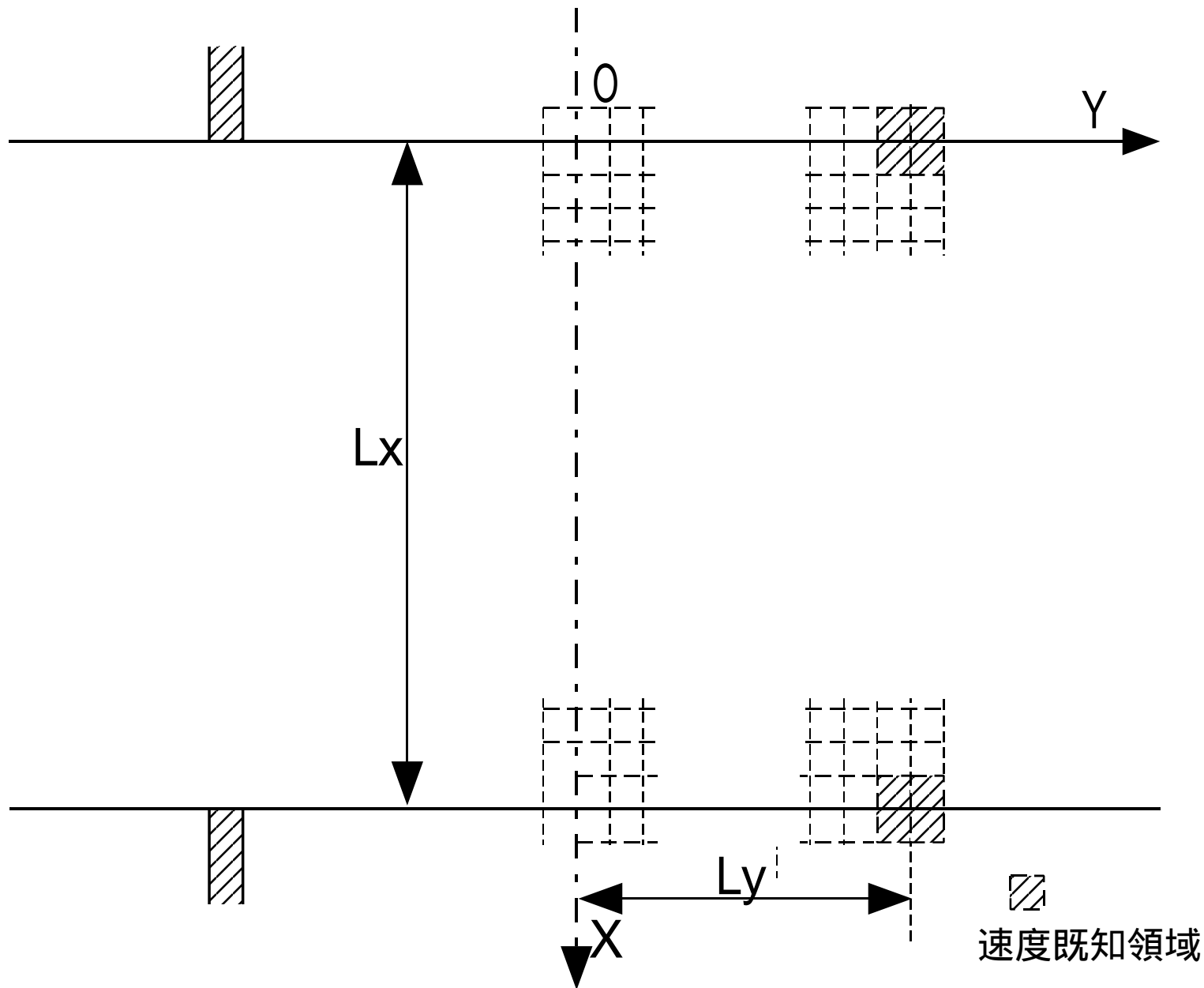
一般形保存方程式

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u \phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v \phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y}) = S_\phi + \underline{S_{l,\phi}}$$

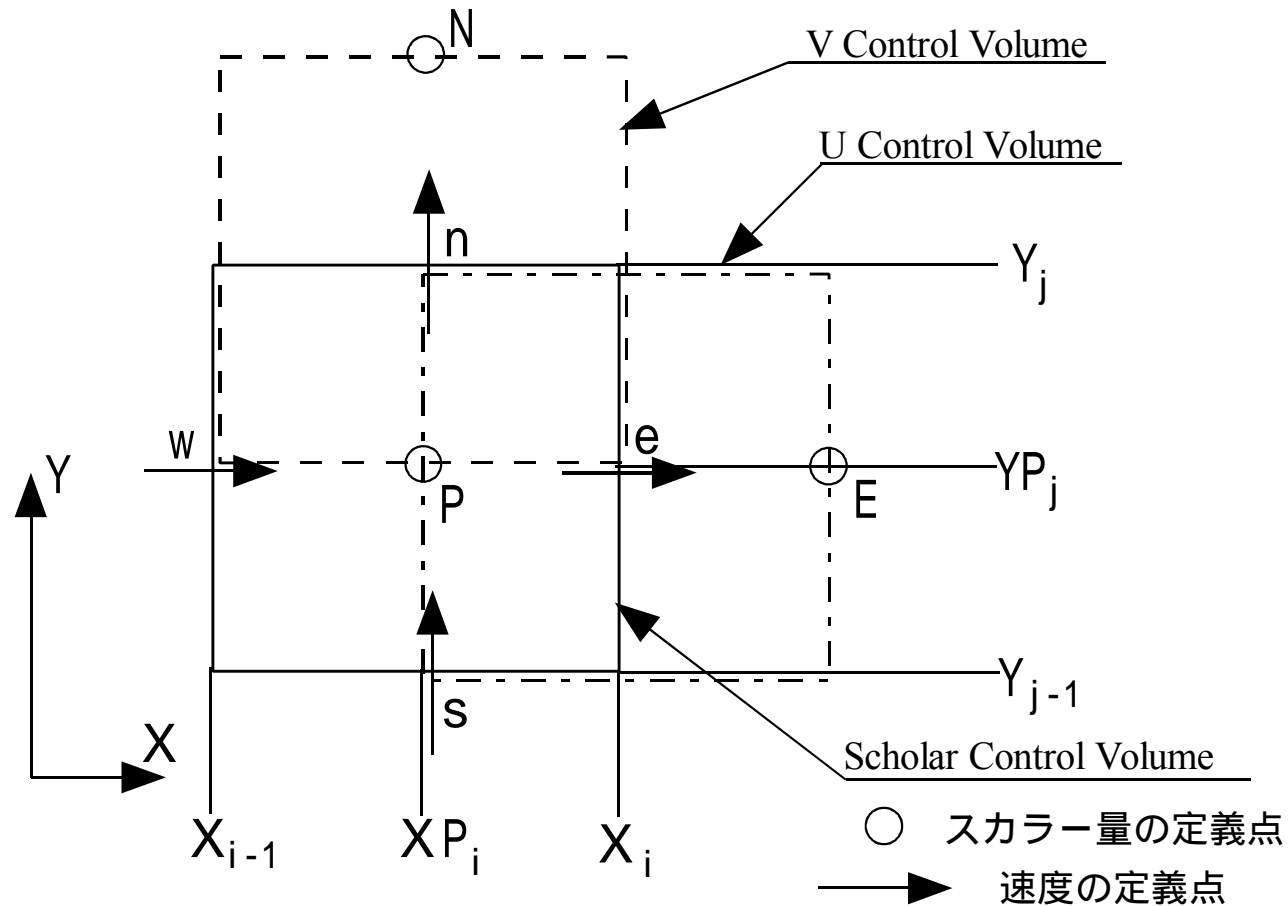
各支配方程式の拡散係数および生成項

	ϕ	Γ	$S_\phi + \underline{S_{l,\phi}}$
質量保存式	1	0	$\underline{S_{l,m}}$
x方向運動量保存式	u	μ	$-\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \mu \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu \frac{\partial v}{\partial x} + \rho g + \underline{S_{l,u}}$
y方向運動量保存式	v	μ	$-\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \mu \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \mu \frac{\partial v}{\partial y} + \underline{S_{l,v}}$
エネルギー保存式	h	ρa	$\underline{S_{l,h}}$
化学種保存式	Y_k	ρD	$\underline{S_{combu,k}} + \underline{S_{l,Y_k}}$

気相の計算コントロールボリューム



コントロールボリュームでの積分



$$\begin{aligned}
 & \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} \int_s^n \int_w^e \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} dx dy dt + \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} \int_s^n \int_w^e \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\rho u \phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho v \phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) \right] dx dy dt \\
 & = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} \int_s^n \int_w^e (S_\phi + S_{l,\phi}) dx dy dt
 \end{aligned}$$

油滴挙動の定式化

運動（位置, 速度）

粒径変化

温度変化

油滴に関する仮定

- 1) 油滴の衝突・分裂はない。
- 2) 油滴は球形で内部の組成,温度,物性値には分布がなく一様。
- 3) 油滴の占める体積は無視できる。

油滴の運動に関する定式化

$$m_l \frac{d\mathbf{V}_l}{dt} = \mathbf{F} + m_l \cdot \mathbf{g}$$

$$\mathbf{F} = \frac{1}{8} \pi d_l^2 \rho (\mathbf{V} - \mathbf{V}_l) |\mathbf{V} - \mathbf{V}_l| C_D$$

$$C_D = \frac{24}{Re_d} \left[1 + \frac{Re_d^{2/3}}{6} \right]$$

$$Re_d = \frac{\rho |\mathbf{V} - \mathbf{V}_l| d_l}{\mu}$$

油滴の粒径 & 温度変化 をどうやって求める？

油滴の蒸発率 \dot{m}_l

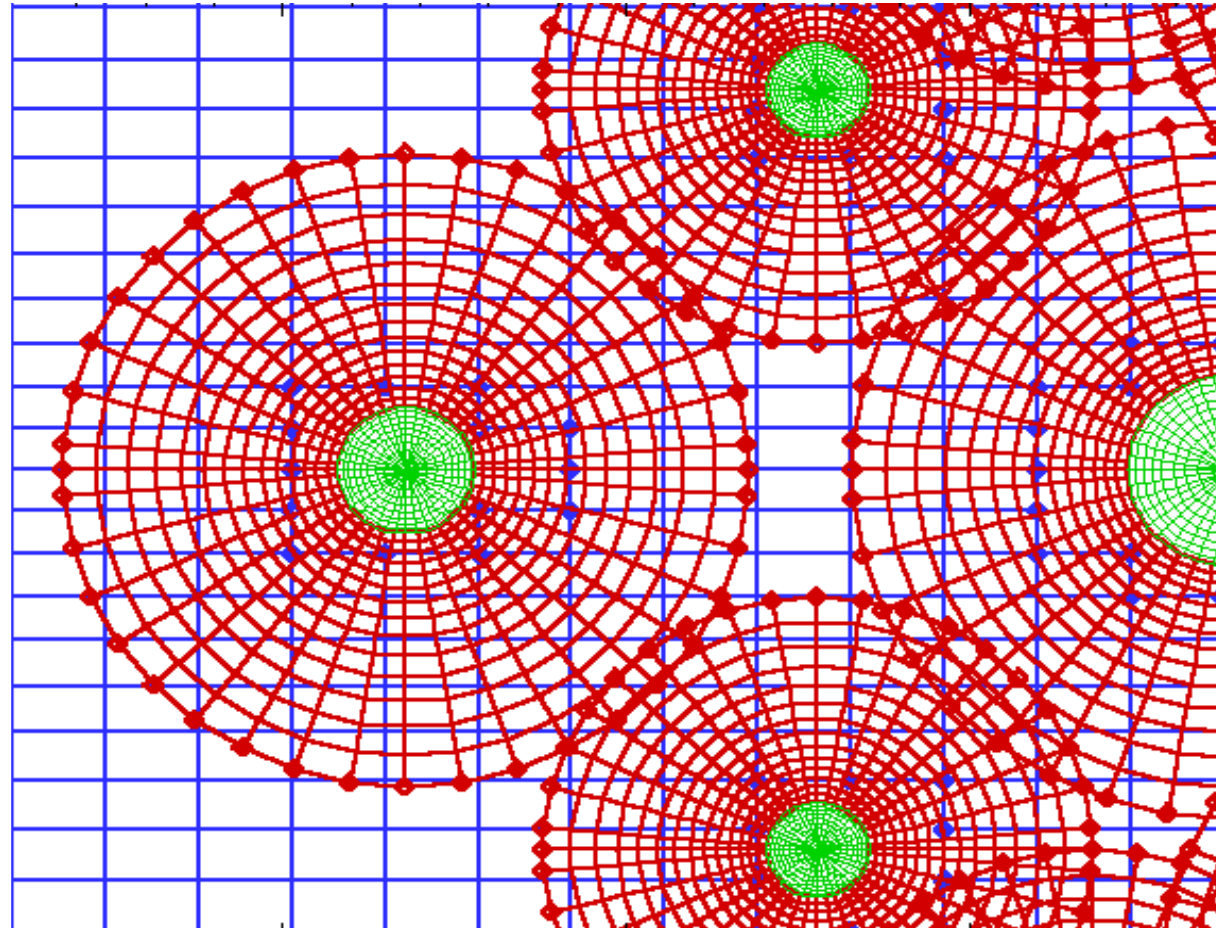
油滴内部への熱移動量 Q_l

理想は.....

T

Y_F

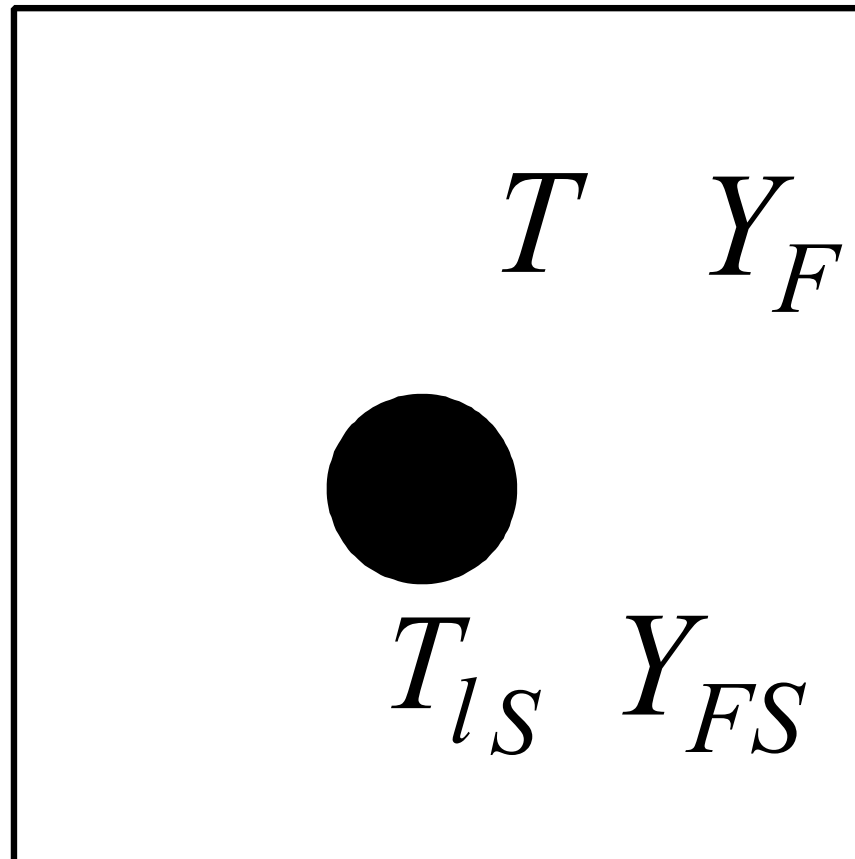
T_l



現実はきびしい....

20×10mm領域 157×77=12089の等間隔格子

130 μm



厳密な計算手法

Fourierの法則

$$Q_l = 4\pi r_s^2 \lambda_l \left(\frac{dT_l}{dr} \right)_{r_s}$$

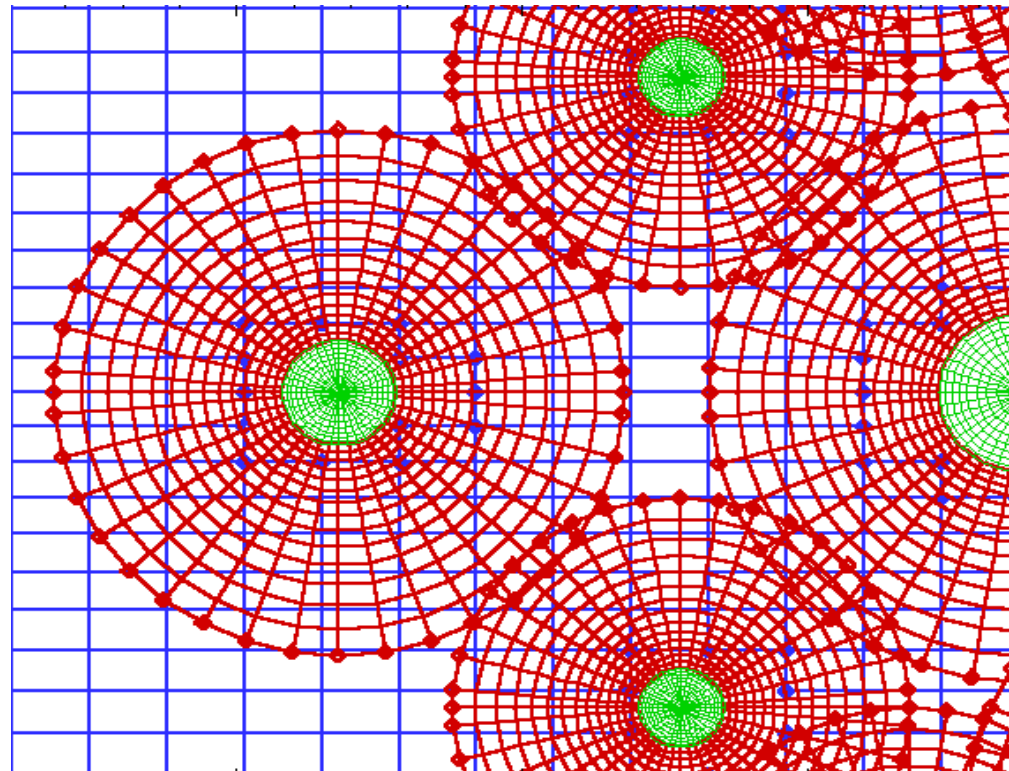
Clapeyron-Claisius式

$$\frac{dP_F}{dT} = \frac{L}{T(v_g - v_l)}$$

T

Y_F

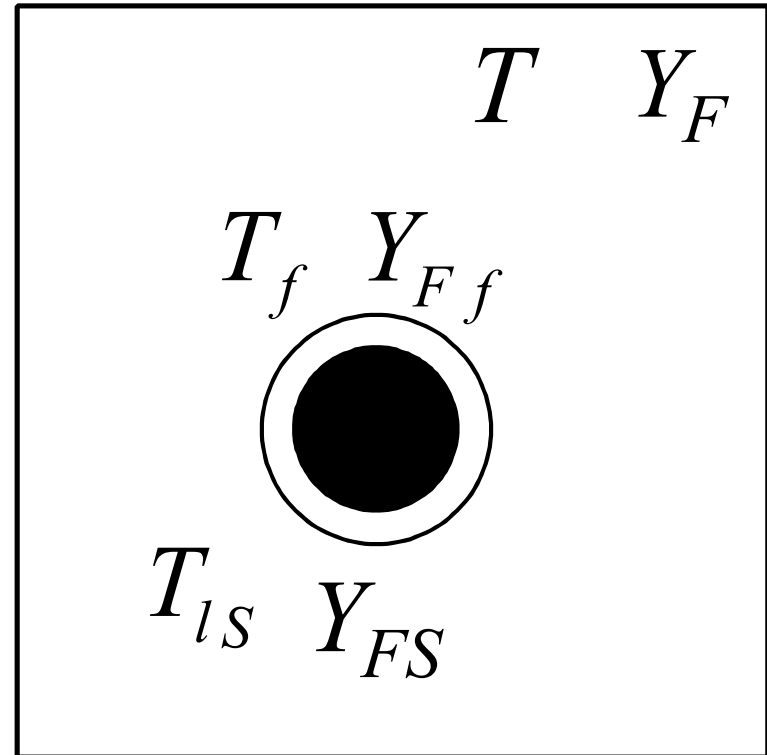
T_l



簡略化した計算手法の一例

フィルム理論

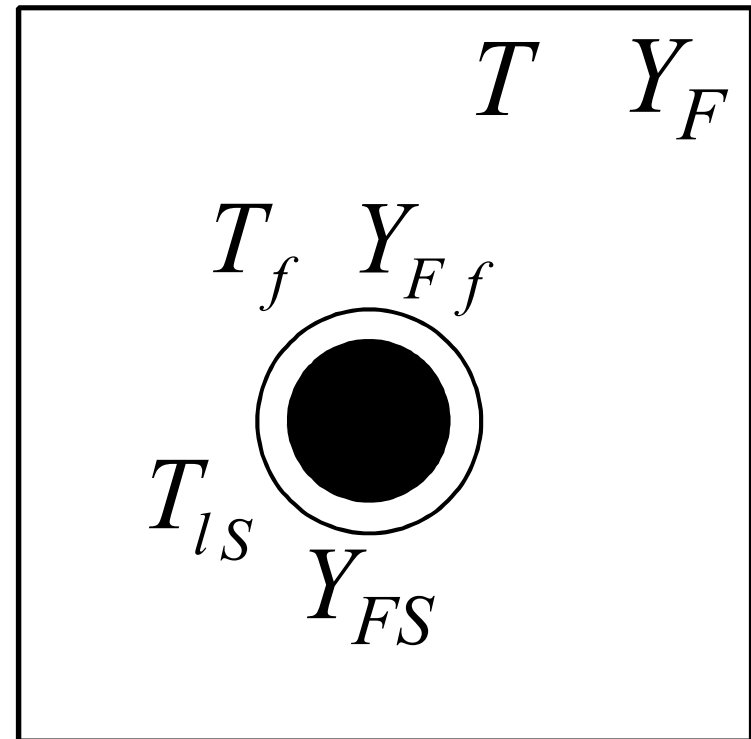
油滴の蒸発過程を油滴表面と気相との熱・物質輸送過程とみなし、その抵抗をフィルムに集中させて考える。



1/3 ルール

$$T_f = A \cdot T_g + (1 - A) \cdot T_{ls}$$

$$Y_{Ff} = A \cdot Y_{Fg} + (1 - A) \cdot Y_{FS}$$

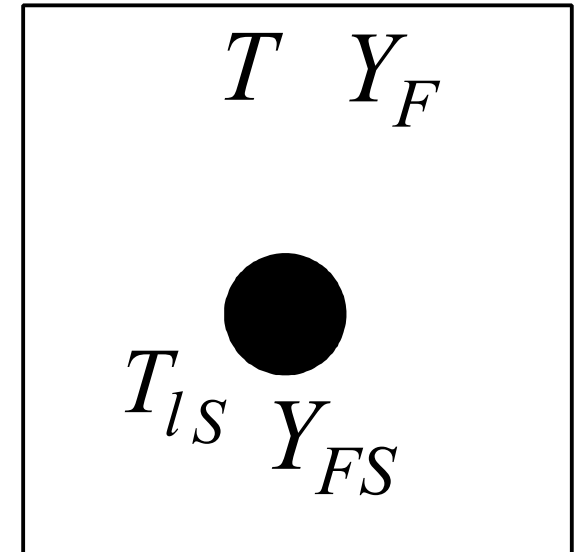


重み係数 $A=1/3$

油滴の粒径 & 温度変化

フィルム理論

油滴の蒸発率



$$\dot{m}_l = \pi d_l \rho_f D_f Sh^* \Gamma (1 + B_M)$$

油滴内部への熱移動量

$$Q_l = \dot{m}_l \left[\frac{C_{pFf} (T - T_l)}{B_T} - L(T_l) \right]$$

油滴の運動, 粒径, 温度変化の定式化

$$m_l \frac{d\mathbf{V}_l}{dt} = \mathbf{F} + m_l \cdot \mathbf{g} \quad \frac{\mathbf{F}}{m_l} = (f_x, f_y) \quad \frac{du}{dt} = f_x + g$$

$$\frac{dv}{dt} = f_y$$

$$S_l \frac{d(d_l/2)}{dt} = -\frac{\dot{m}_l}{\rho_l} \quad \frac{dd_l}{dt} = -\frac{2\dot{m}_l}{S\rho_l} \quad \frac{dd_l}{dt} = -\frac{2\dot{m}_l}{\pi d_l^2 \rho_l}$$

$$\frac{d(m_l C_{pl} T_l)}{dt} = Q_l \quad \frac{dT_l}{dt} = \frac{Q_l}{m_l C_{pl}} \quad \frac{dT_l}{dt} = \frac{Q_l}{(1/6)\pi d_l^3 \rho_l C_{pl}}$$

気相の支配方程式（噴霧火炎）

質量保存式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} = \underline{S_{l,m}}$$

x方向運動量保存式

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho u u - \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho v u - \mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \mu \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu \frac{\partial v}{\partial x} + \rho g + \underline{S_{l,u}}$$

y方向運動量保存式

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho u v - \mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho v v - \mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \mu \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \mu \frac{\partial v}{\partial y} + \underline{S_{l,v}}$$

エネルギー保存式

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho u h - \rho a \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho v h - \rho a \frac{\partial h}{\partial y} \right) = \underline{S_{l,h}}$$

化学種保存式

$$\frac{\partial \rho Y_k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho u Y_k - \rho D \frac{\partial Y_k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho v Y_k - \rho D \frac{\partial Y_k}{\partial y} \right) = \underline{S_{combu,k}} + \underline{S_{l,Y_k}}$$

気相と油滴との干渉項

質量保存式

$$S_{l,m} = \sum_N \dot{m}_l / \Delta V$$

運動量保存式

$$S_{l,u} = -\sum_N F_x / \Delta V \quad S_{l,v} = -\sum_N F_y / \Delta V$$

エネルギー保存式

$$S_{l,h} = \sum_N (\dot{m}_l h_F(T) - Q_l - \dot{m}_l (C_{pF}(T - T_l) + L(T_l))) / \Delta V$$

化学種保存式

$$S_{l,Y_k} = \delta_{F,k} \sum_N \dot{m}_l / \Delta V$$

計算条件

ポート幅 20 mm

ポート間隔 20 mm

面対称を仮定

20×10mm領域 157×77の等間隔格子

(C V 実寸法130 μm ×130 μm)

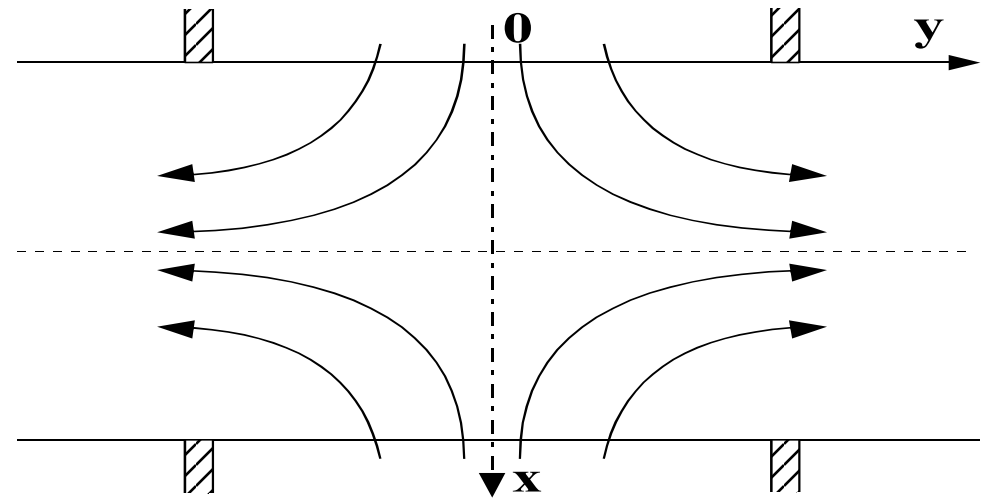
タイムステップ 0.1 ms

常温常圧の空気 0.4m/sで流入

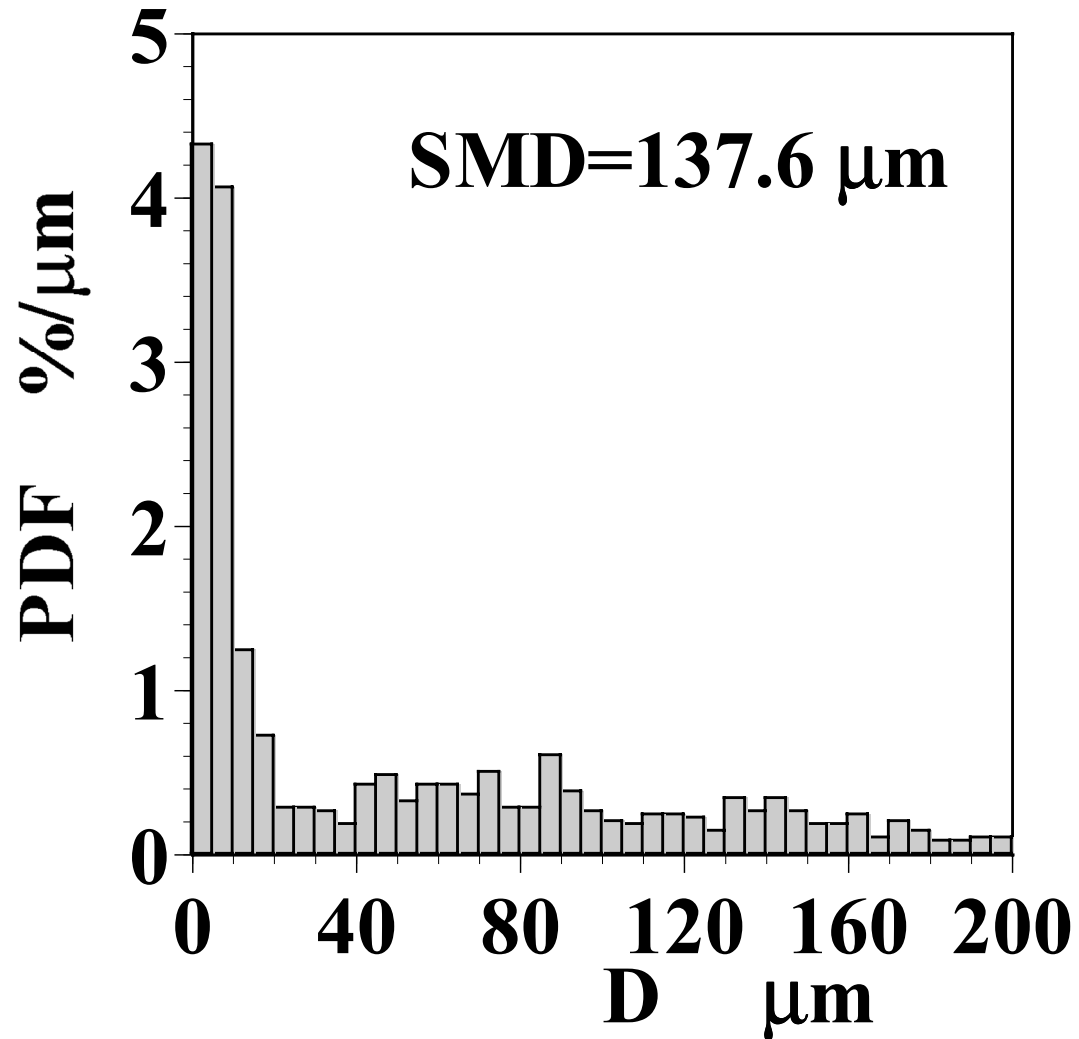
噴霧 y 0.3cm領域に一様供給

燃料-空気質量流量比 0.014 $\text{kg}_{\text{fuel}}/\text{kg}_{\text{air}}$

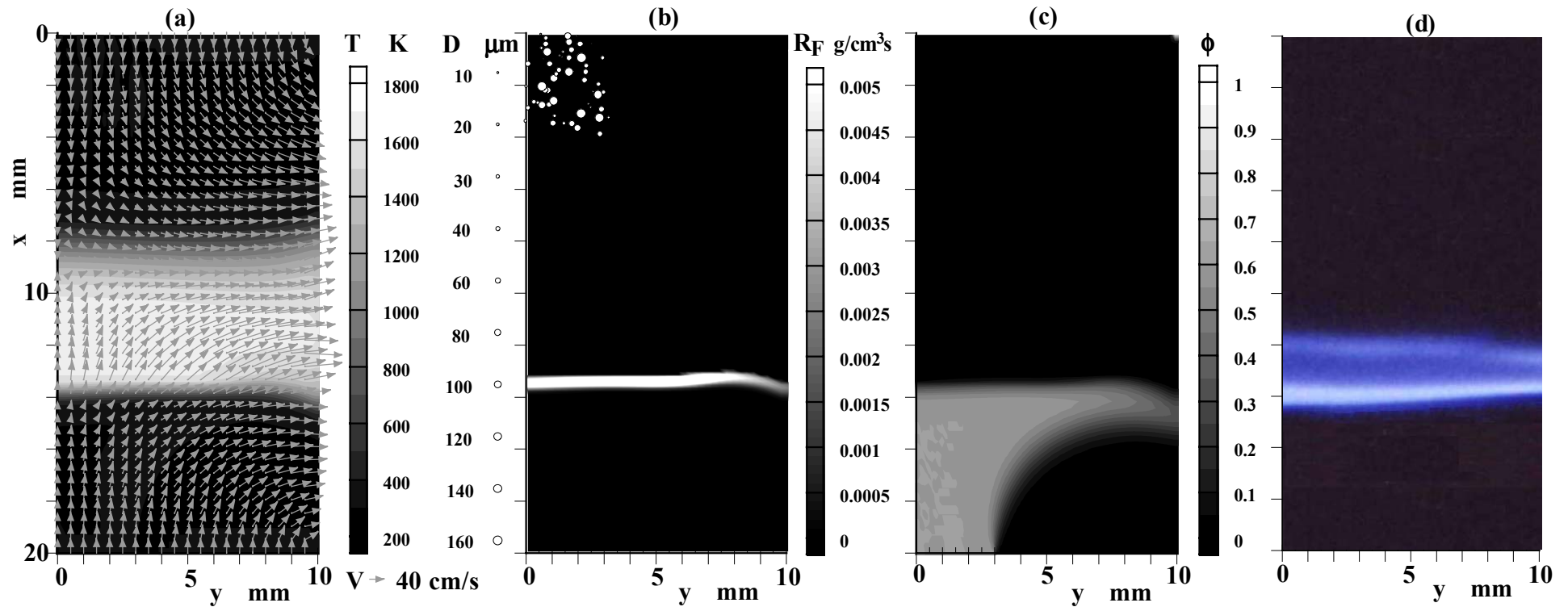
(供給当量比0.237に相当)



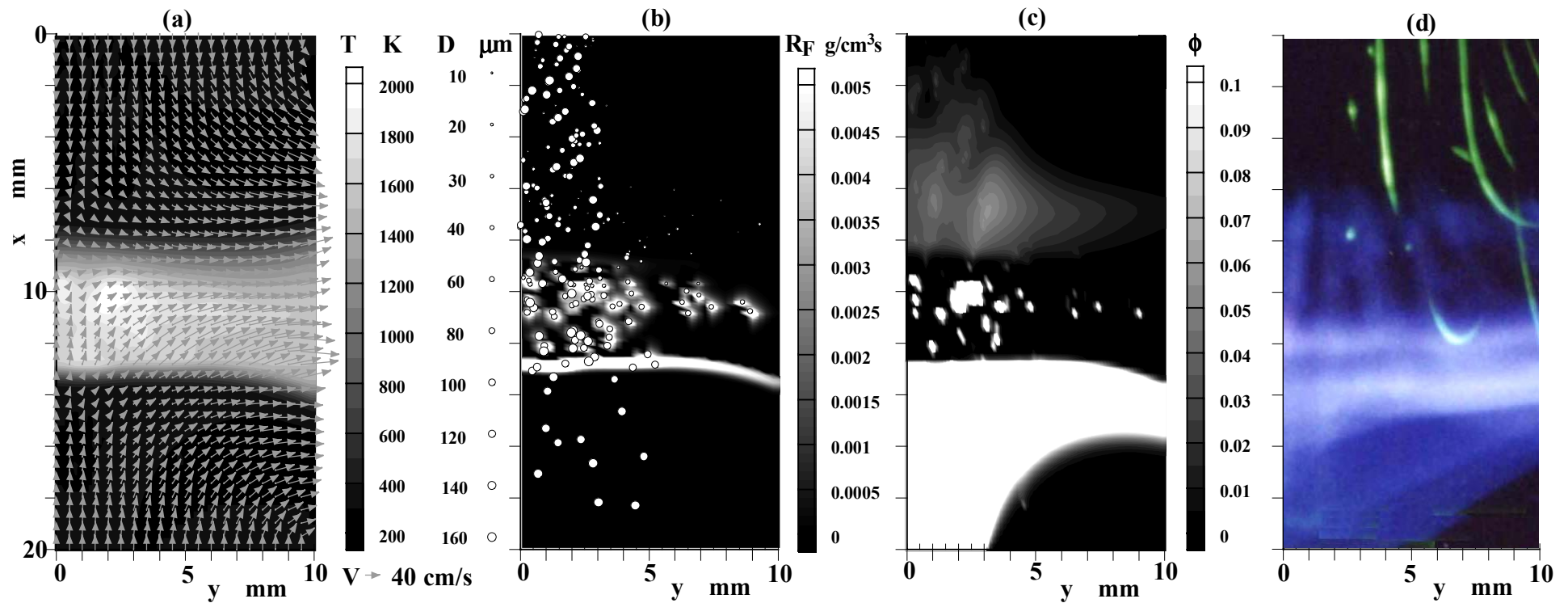
計算に用いた粒径分布



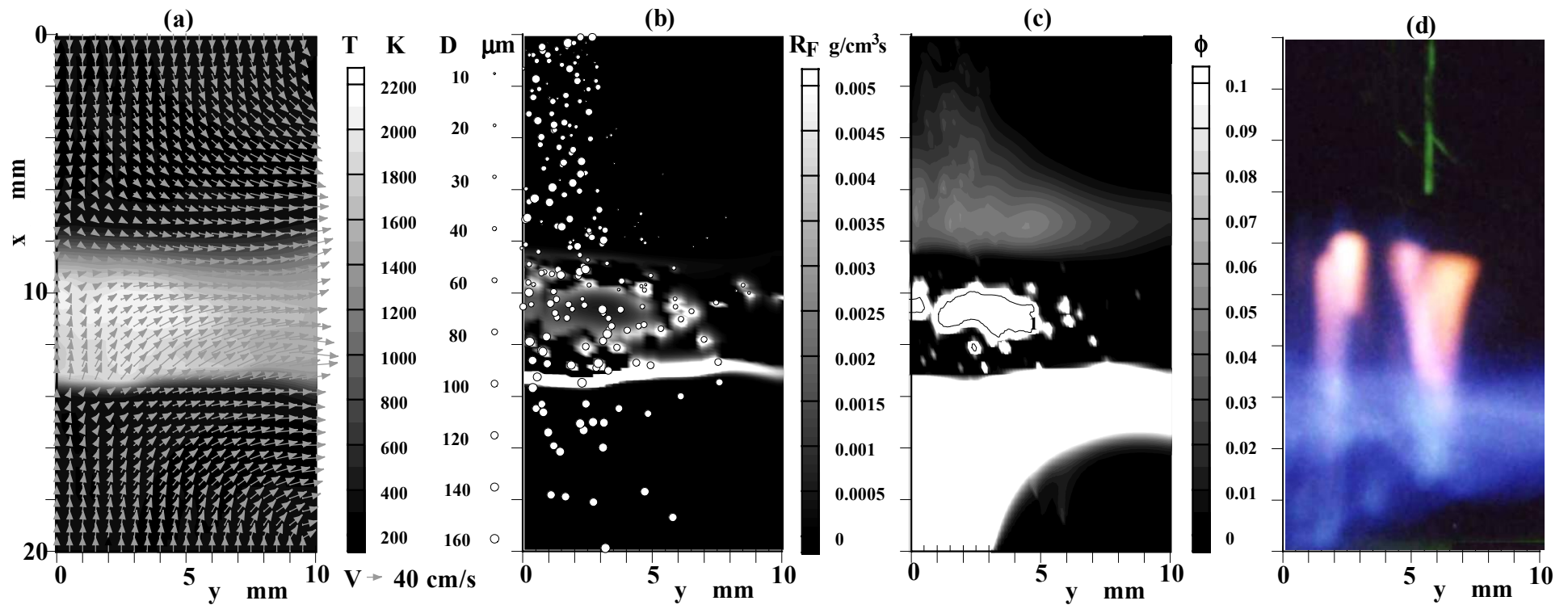
計算結果の一例 (t=5ms)



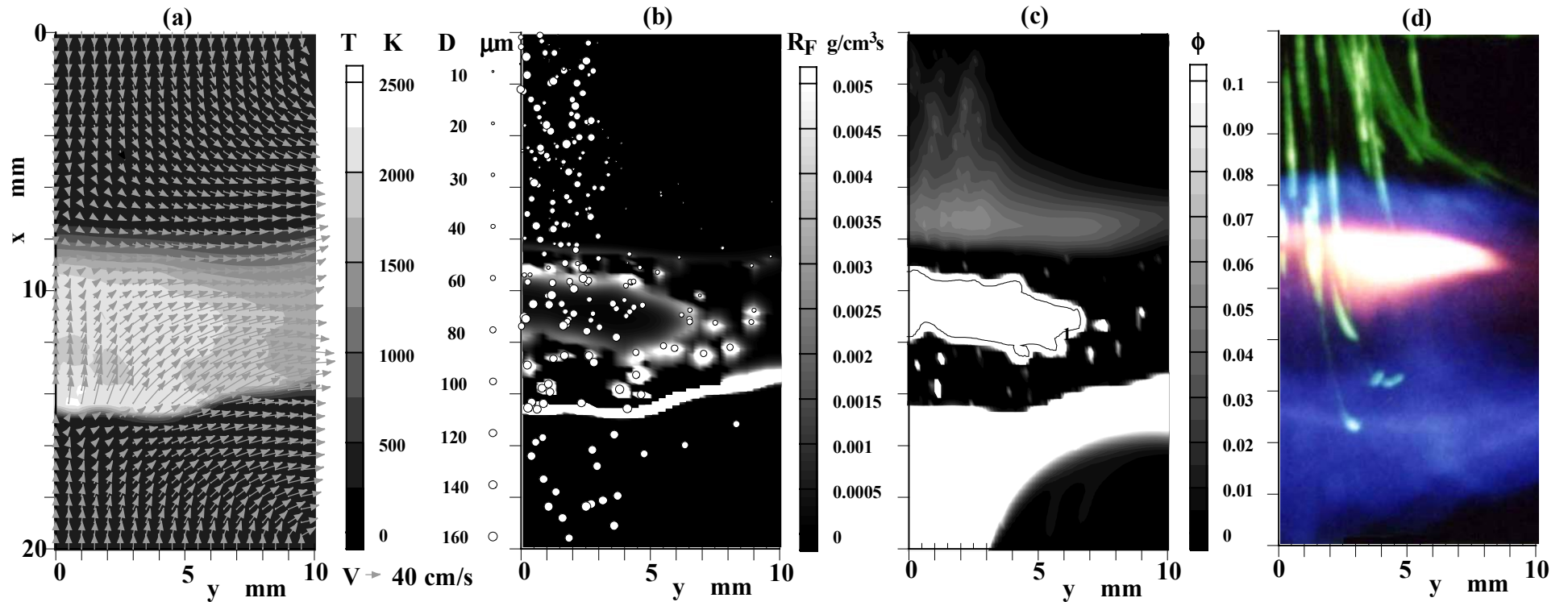
計算結果の一例 (t=25ms)



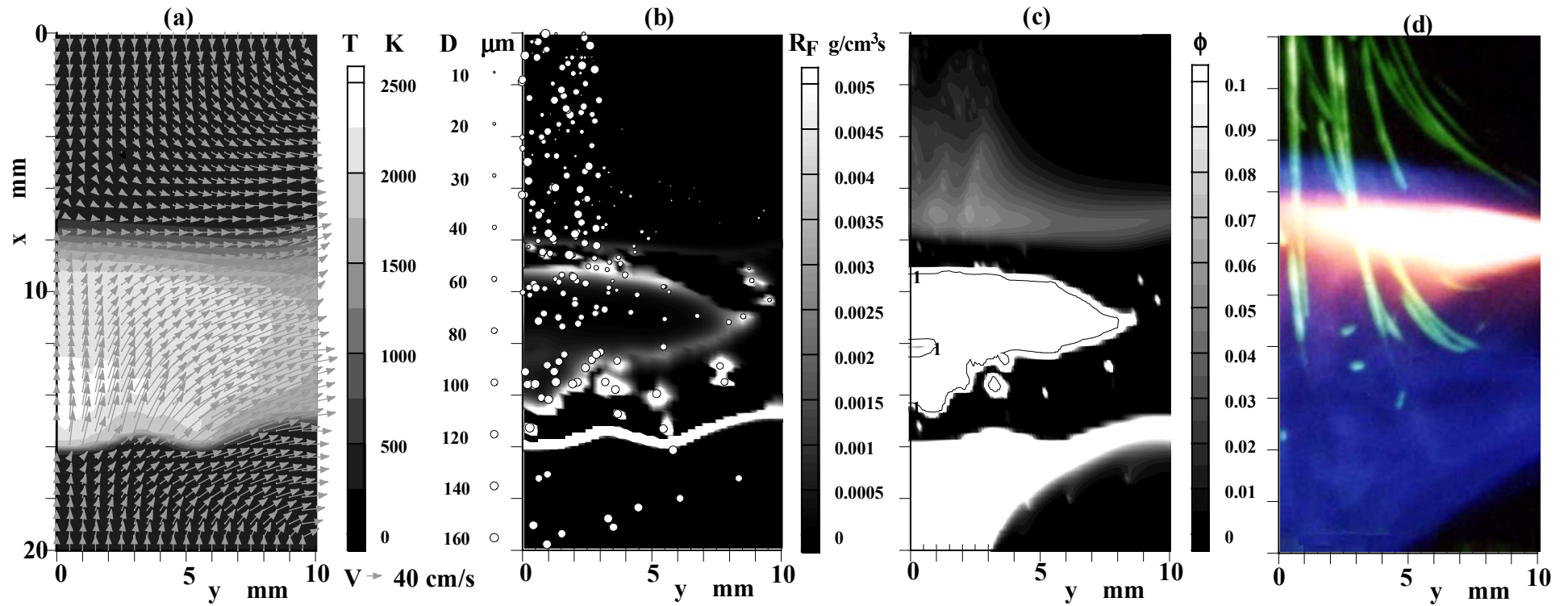
計算結果の一例 (t=30ms)



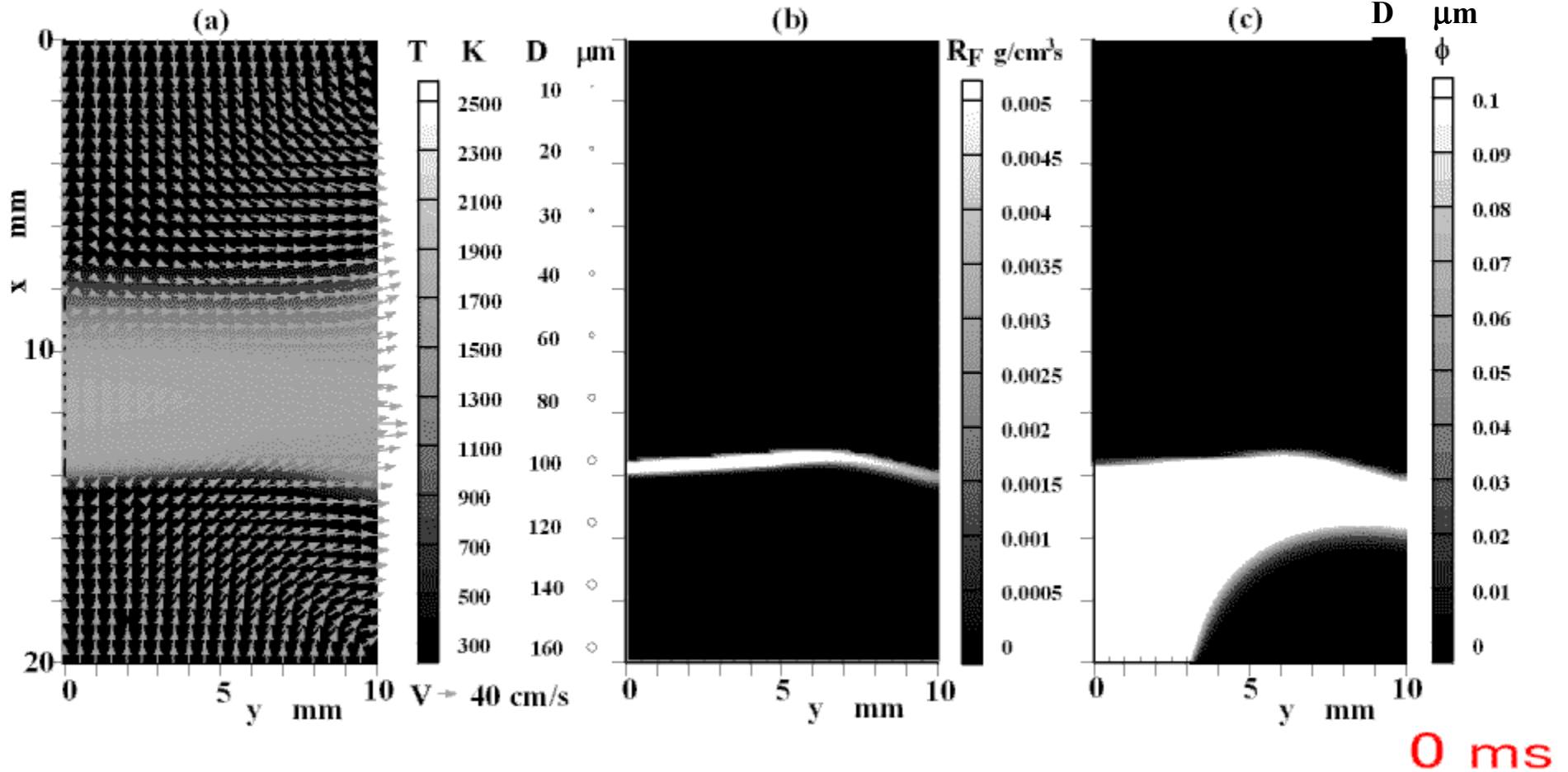
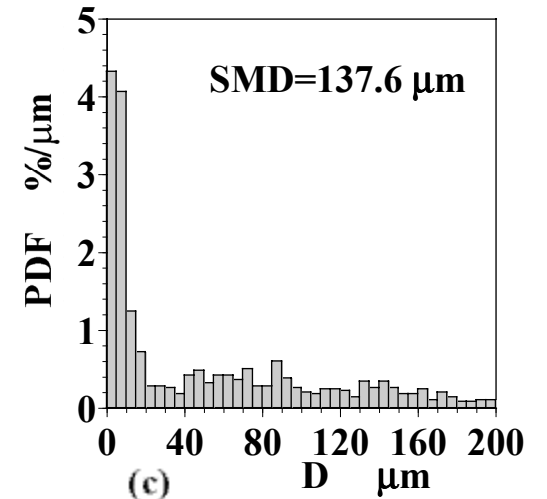
計算結果の一例 (t=35ms)



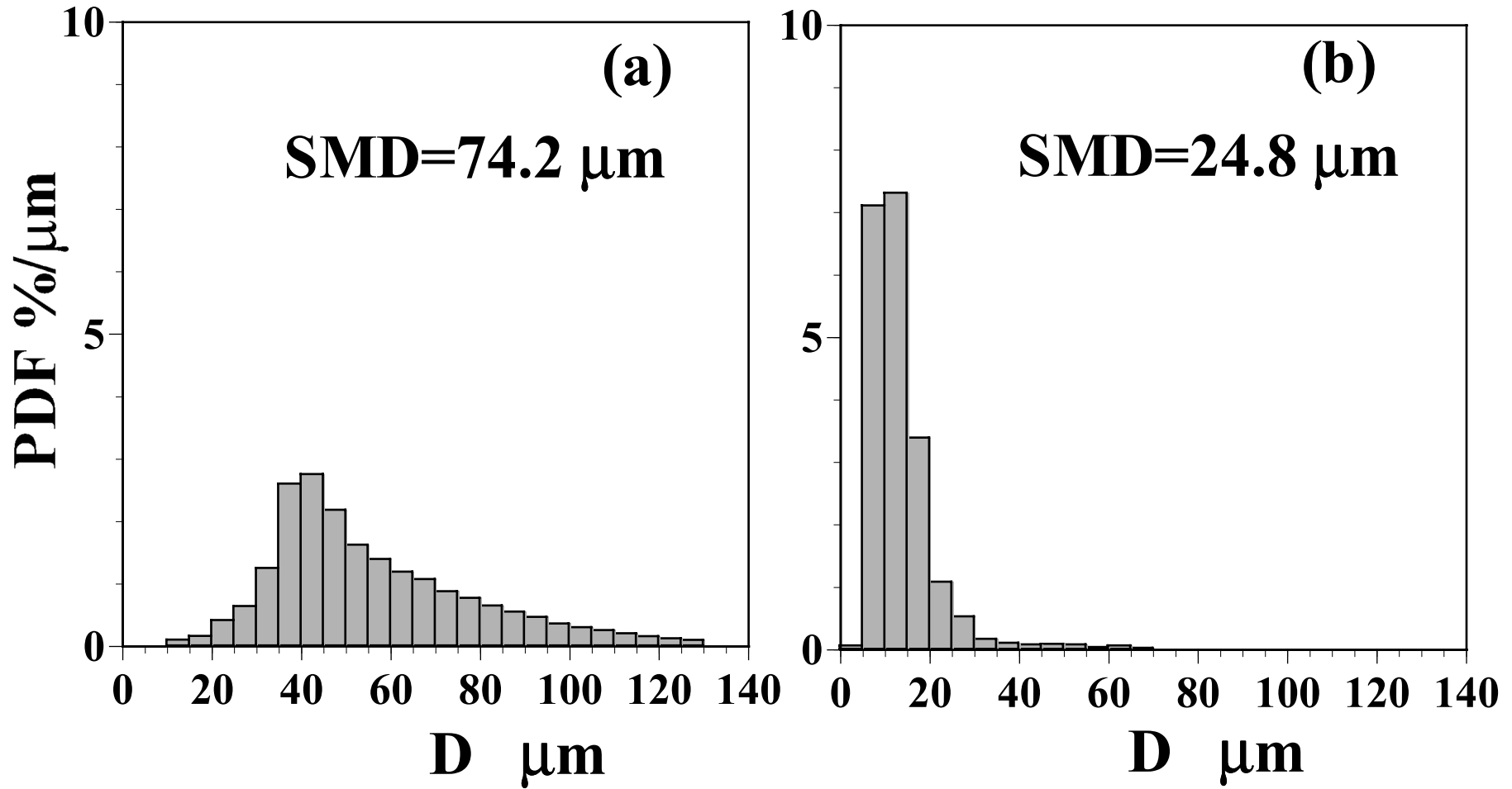
計算結果の一例 (t=40ms)



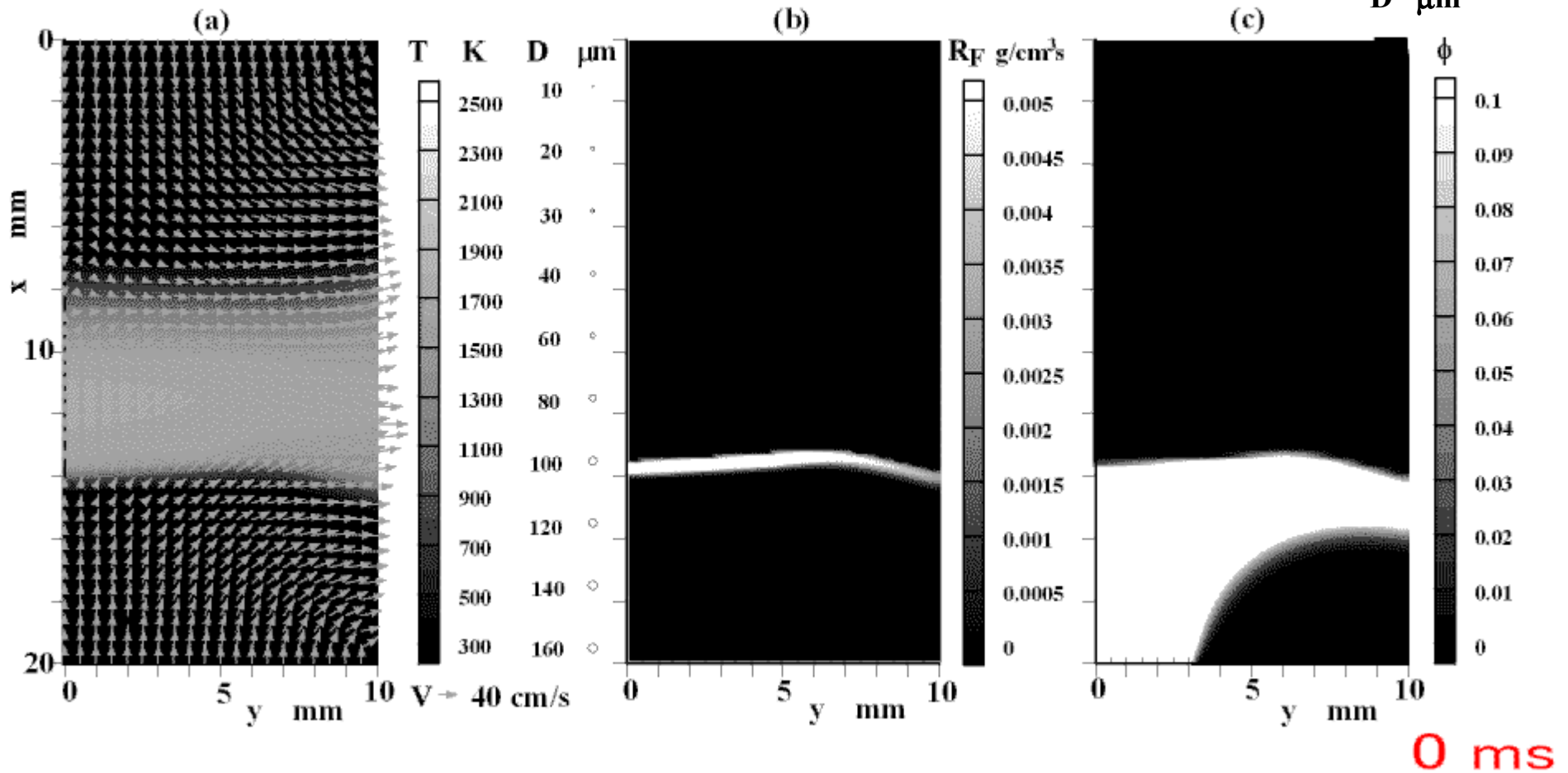
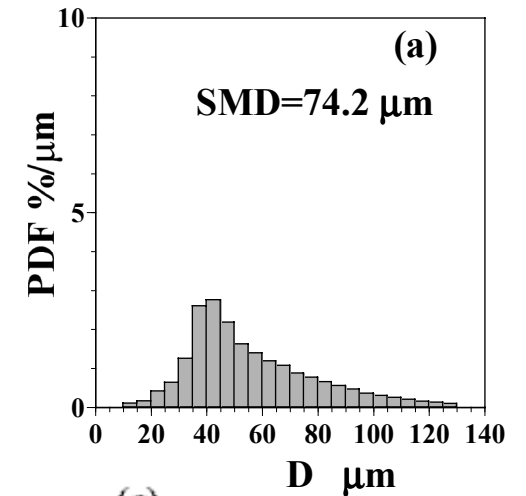
計算結果の時系列表示



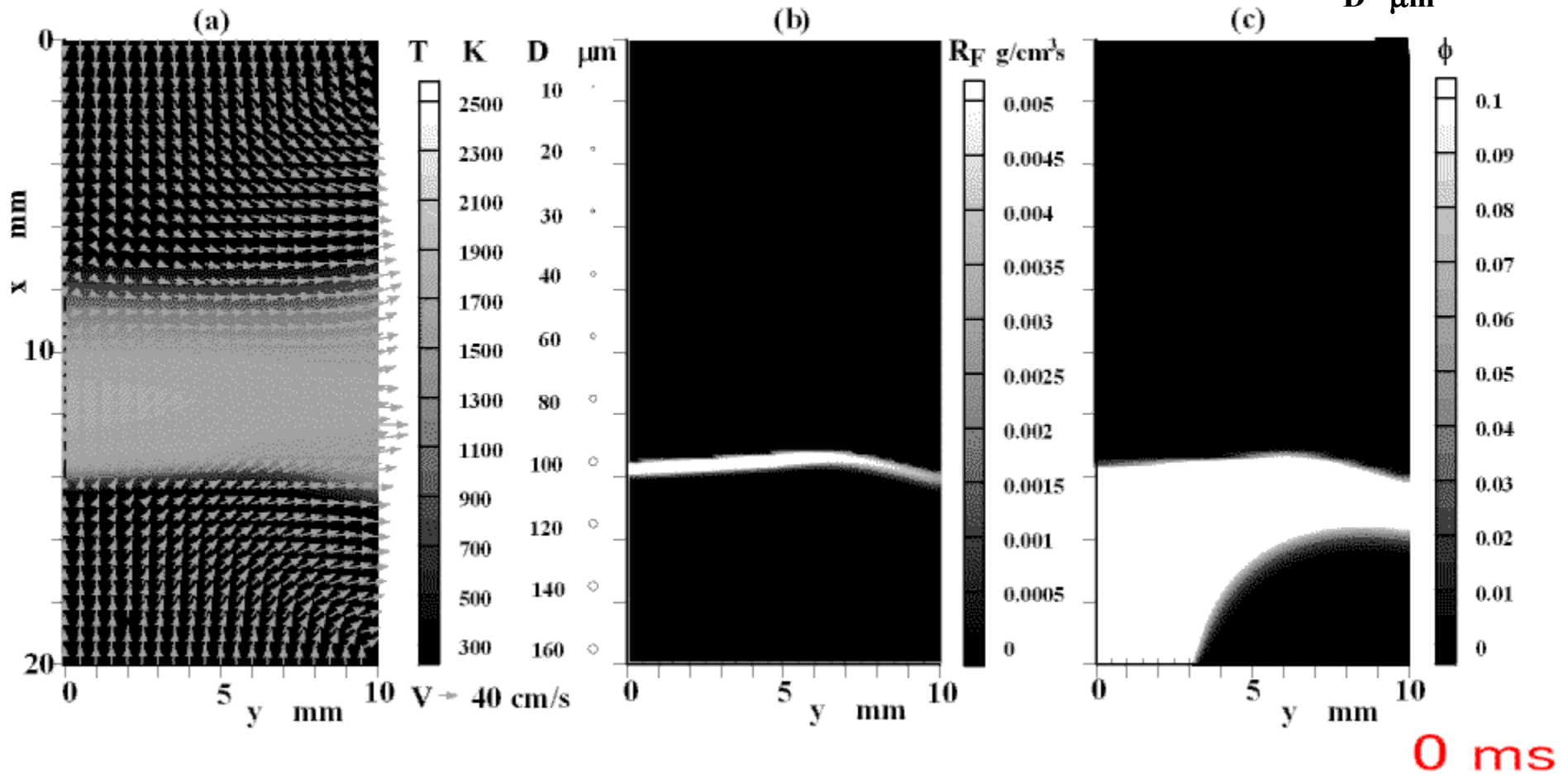
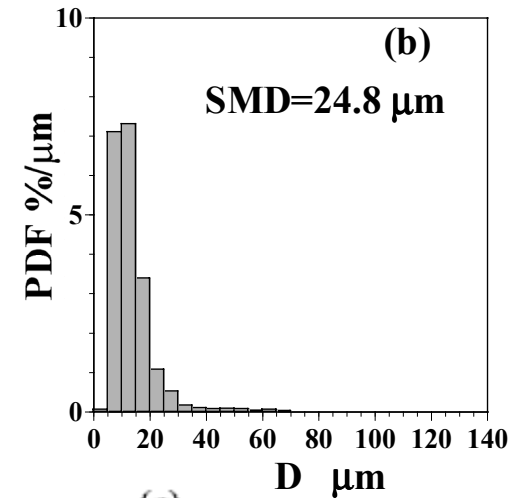
計算に用いた粒径分布



計算結果の時系列表示



計算結果の時系列表示



噴霧専焼火炎の計算



計算条件

ポート幅 20 mm

ポート間隔 20 mm

面対称を仮定

20×10mm領域 157×77の等間隔格子

(C V 実寸法130 μ m×130 μ m)

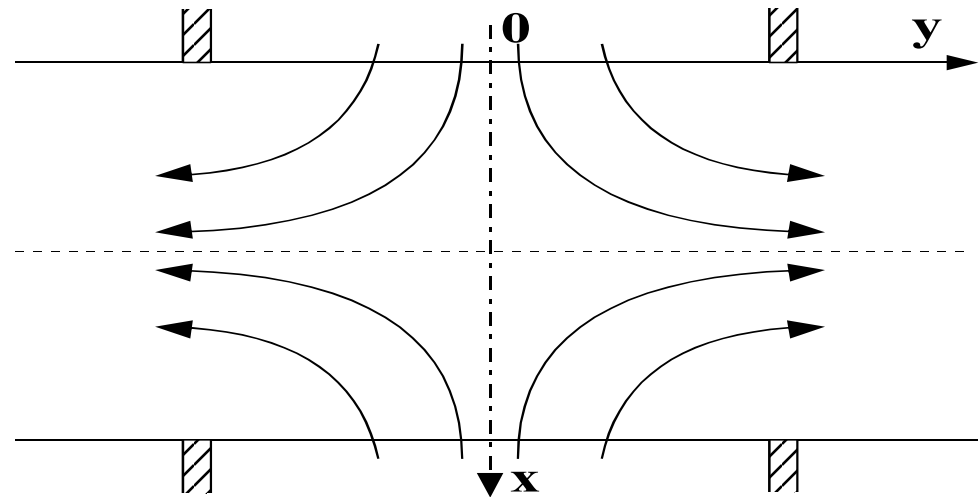
タイムステップ 0.1 ms

常温常圧の空気 0.4m/sで流入

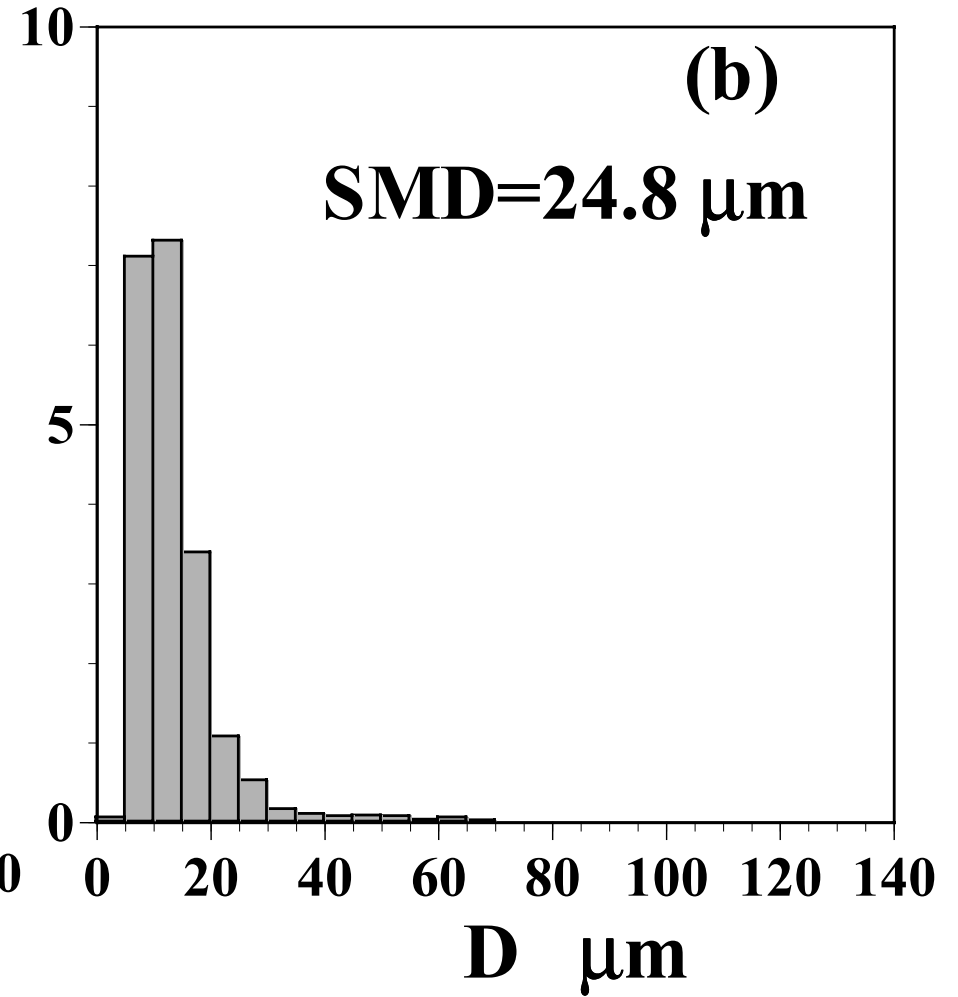
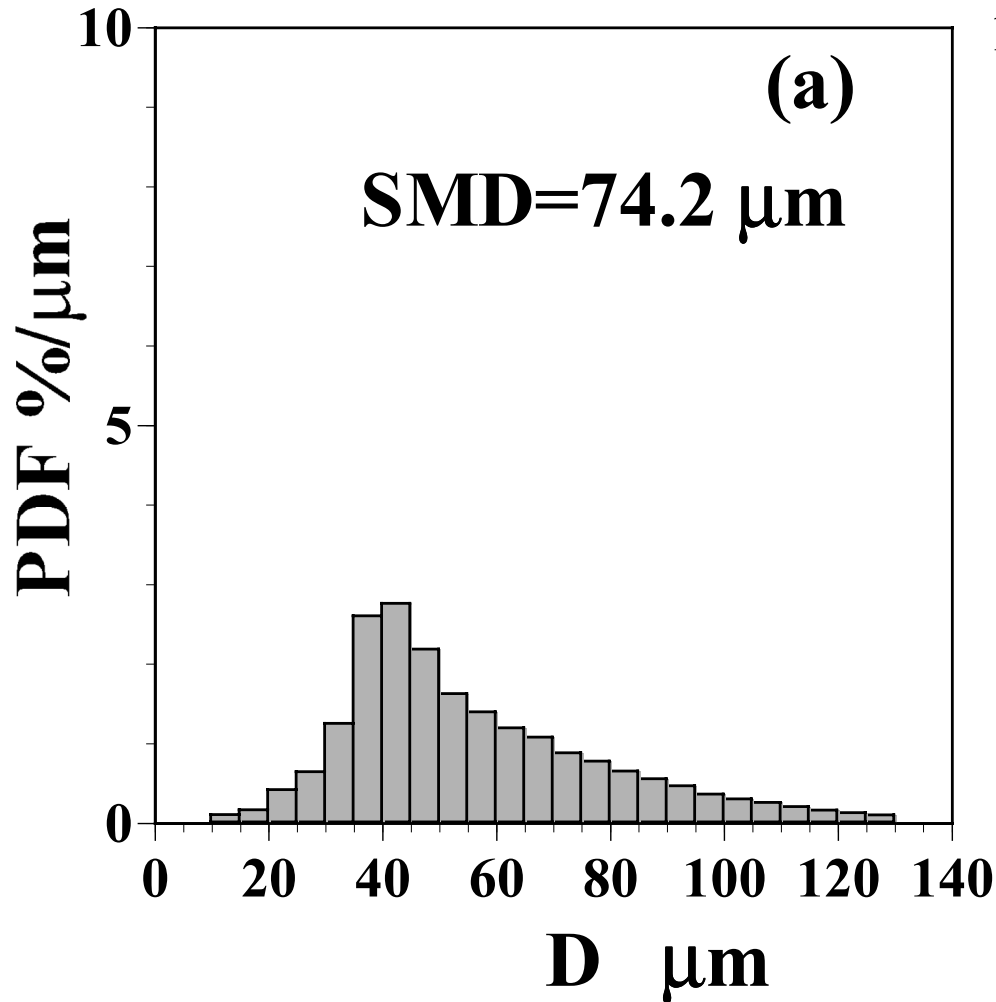
噴霧 y 0.3cm領域に一様供給

燃料-空気質量流量比 0.045 kg_{fuel}/kg_{air}

(供給当量比0.75に相当)

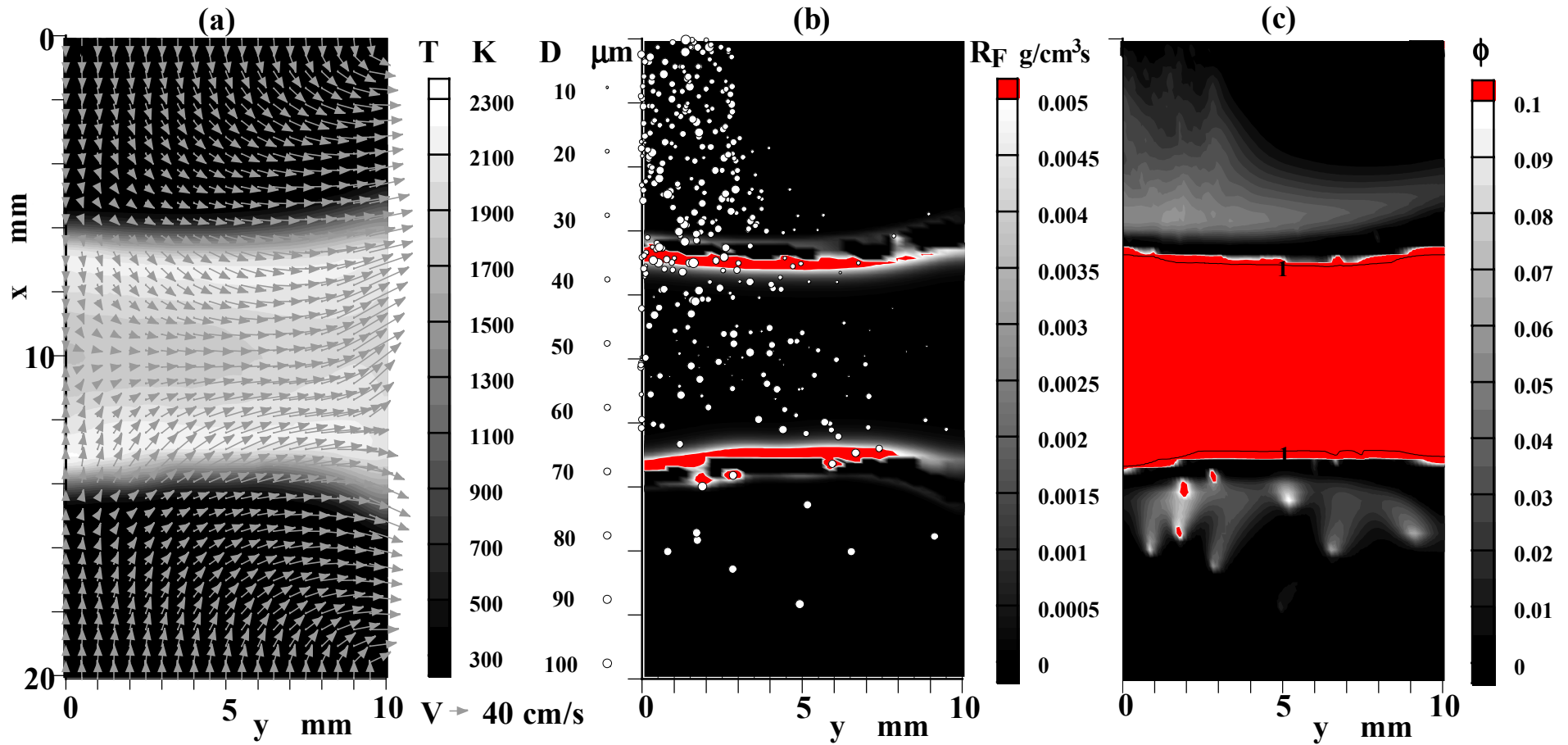


計算に用いた粒度分布



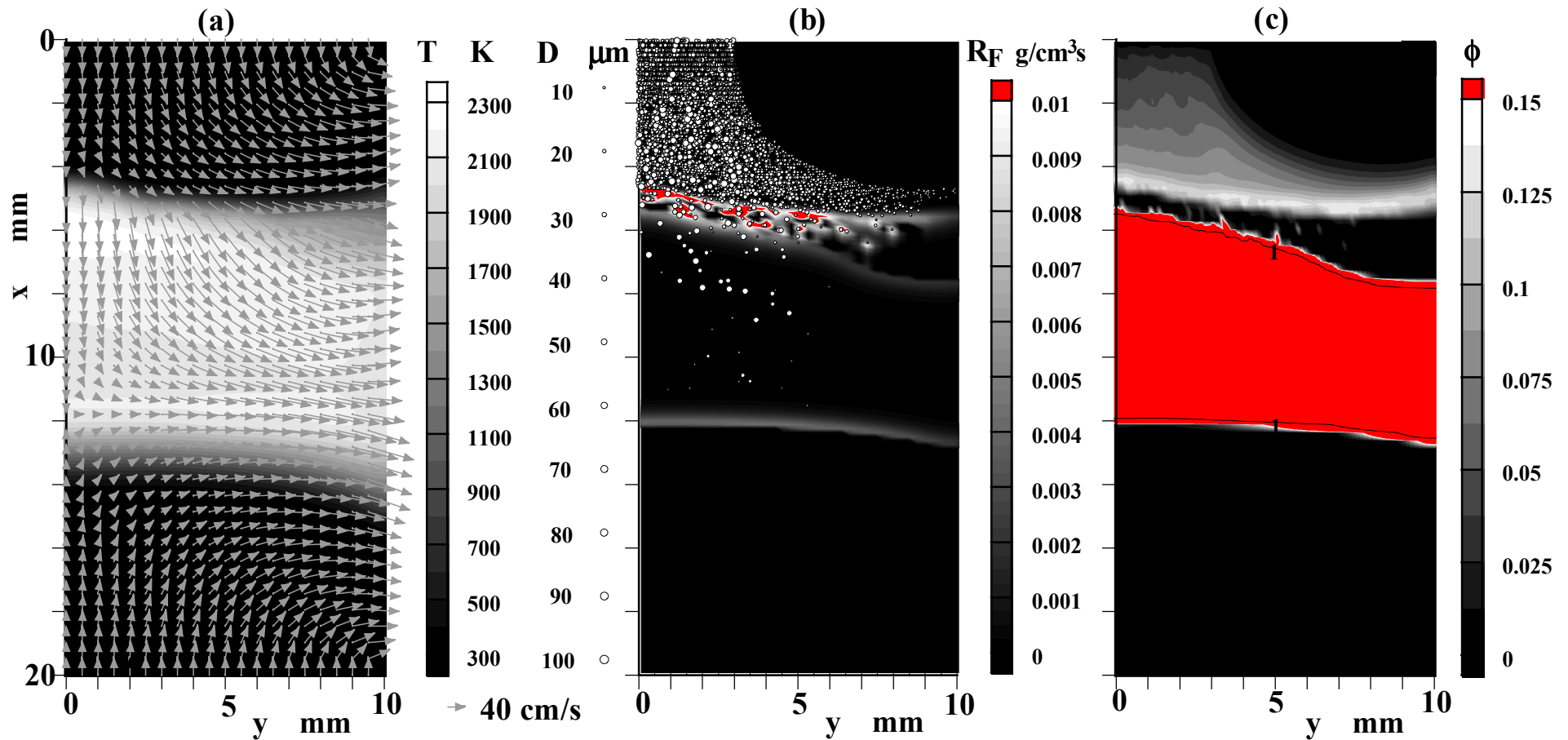
計算結果

SMD=74.2 μm

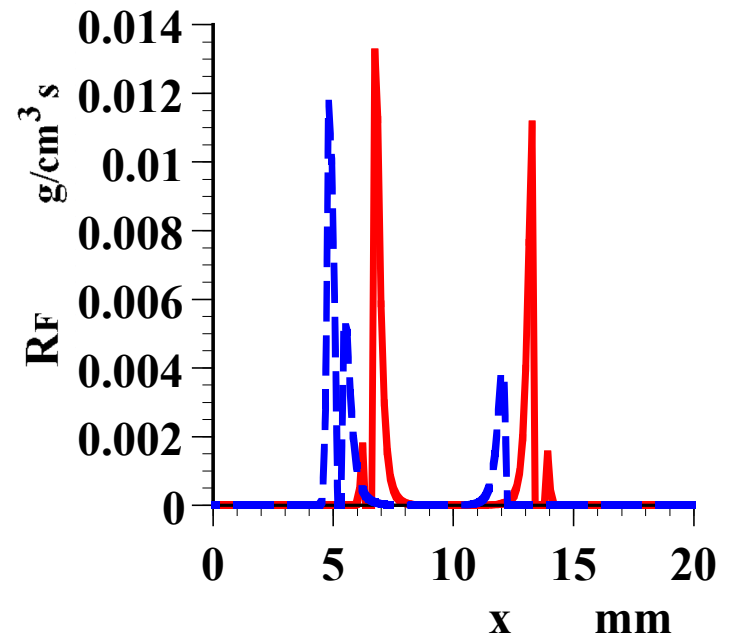
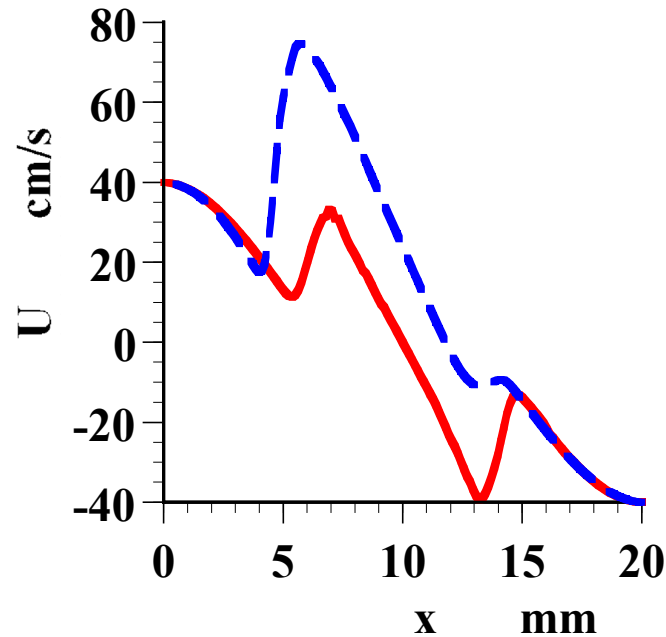
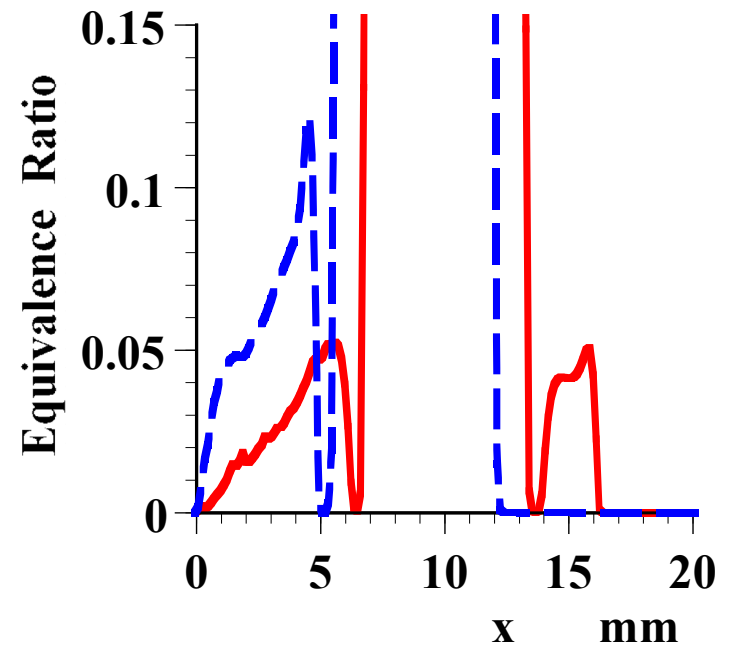
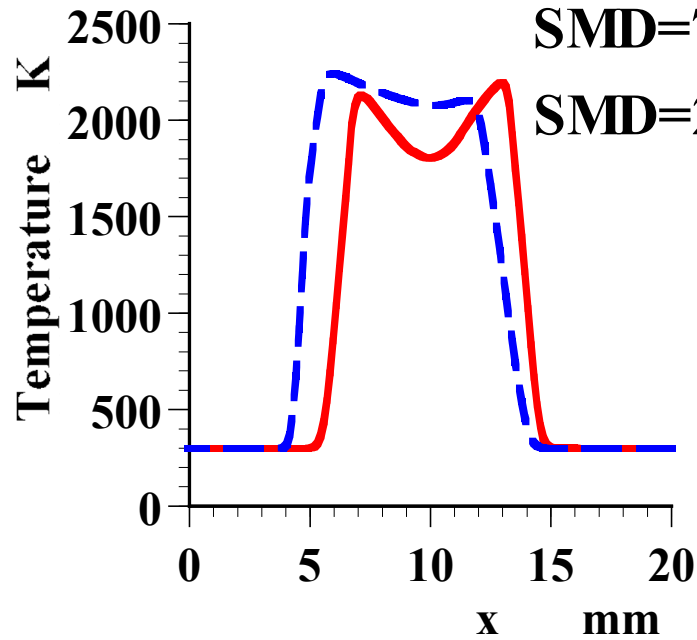


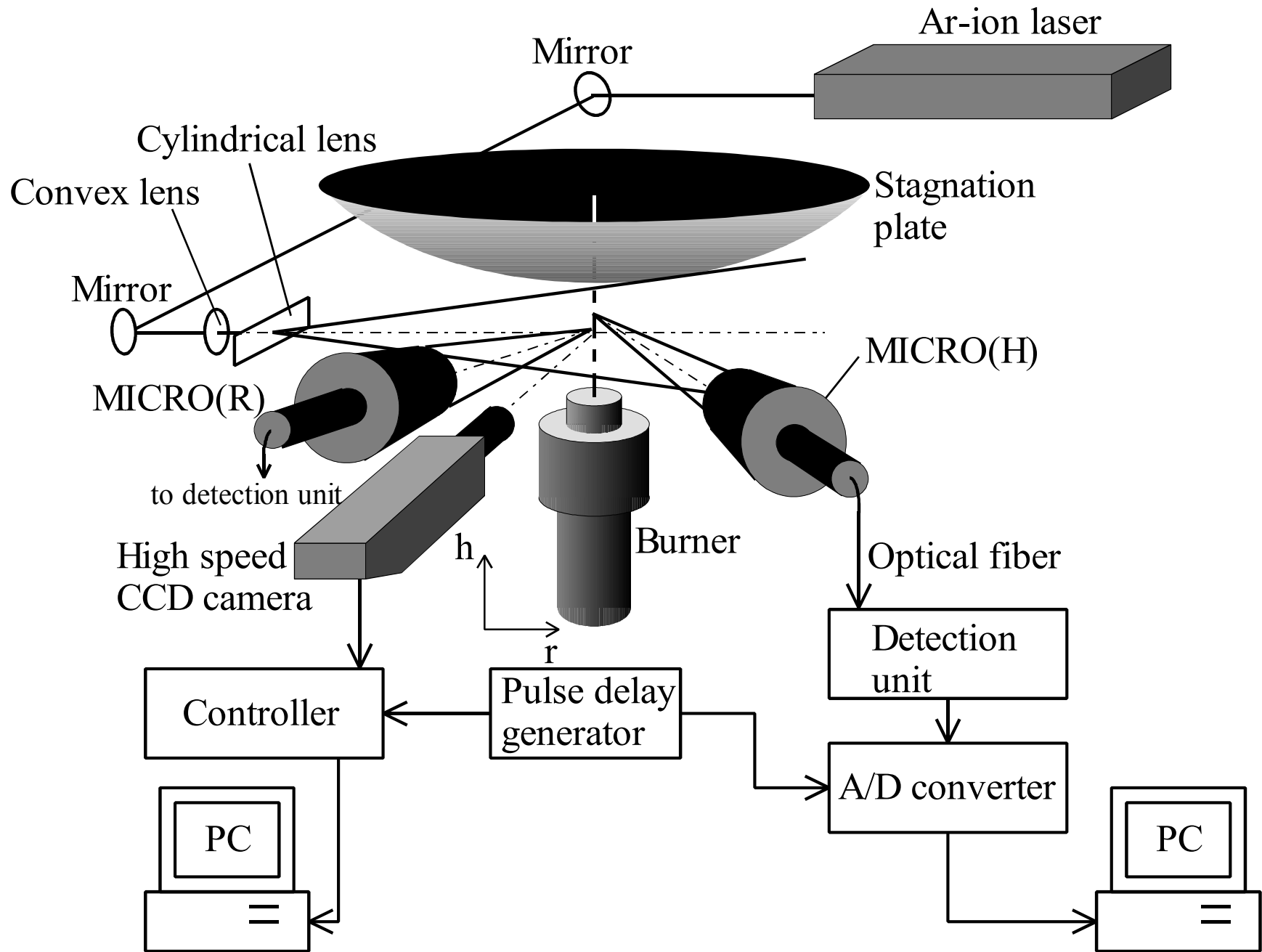
計算結果

SMD=24.8 μm



諸量の軸方向分布





13mm × 13mmの噴霧拡大像

