

液体燃料噴霧における乱流微粒化・ 蒸発混合・初期着火現象

新城 淳史

宇宙航空研究開発機構 研究開発本部

Sep 27, 2012

乱流噴霧燃焼のスケール



現象理解の重要性

- 実エンジンシミュレーションはDNSでは不可能
⇒モデル計算
- モデル:何を再現、何を無視?
⇒分かっている取捨選択している場合
⇒そもそも現象が分かっていない場合
- 現象の理解が精度向上に重要
 - 噴霧燃焼は乱流・多相・蒸発・反応流れで分かっていない現象が多いが...
 - ⇒ここでは、そのなかでも特に...(次ページ)

濃い噴霧(一次微粒化)領域

© Convergent Science

- ノズル直下の濃い噴霧領域
- これまでその困難さからあまり正面から取り組まれず現象理解・モデル化が進んでいない
 - 高速小スケール、ラグランジュ的扱い不可
- 一方で、実スケール解析の流入境界条件であるので、この精度が実スケール燃焼器解析の精度に大きく効く

まず、物理過程を詳細に理解しなければならない

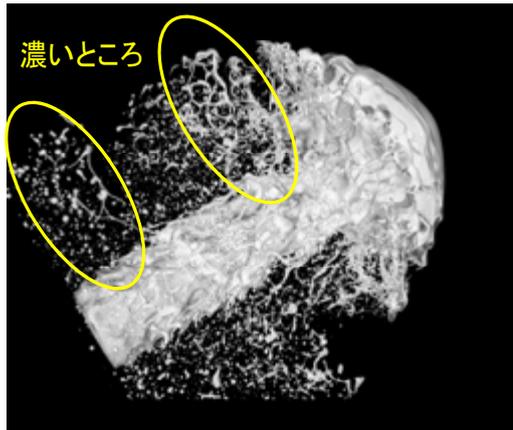
Ligaments
Primary Breakup
Secondary Breakup
Droplets
 $We = \frac{\rho U^2 l}{\sigma}$

$We \gg O(1)$ | $We \sim O(1)$ | $We \ll O(1)$

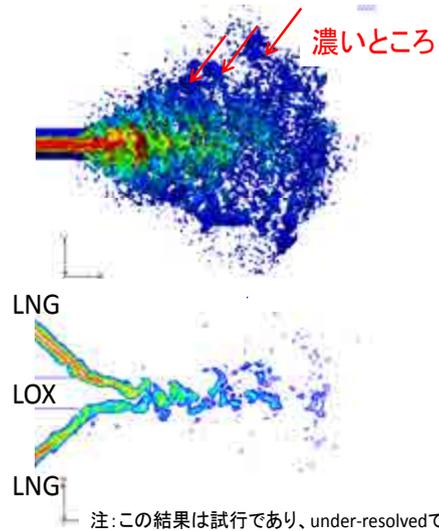
現象の特徴

- 液滴空間分布の非一様性(局所の液滴径や液滴数密度の違い)
- 流れ場の構造
 - その後の蒸発・混合・燃焼はこの履歴に影響される

⇒微粒化機構が決定。各噴霧形態での機構の理解が必要



後ほど議論します



過去の研究例 (下流の薄い噴霧or気相反応)

- Euler-Lagrange計算
- 乱流スケール >> 液滴径

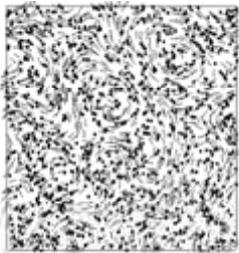


Fig. 1. Initial gas velocity vectors and distribution of droplet locations (only 5% of the velocity vectors are shown for clarity).

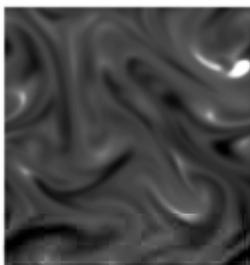


Fig. 2. Temperature contour at $t = 0.001$ ms for the $T = 1300$ K case (black = 1300 K, white = 2000 K).

Wang & Rutland
 (PCI 2005)

- 気相のみの自着火
- 低散逸率のところで着火

Viggiano (CNF 2010)

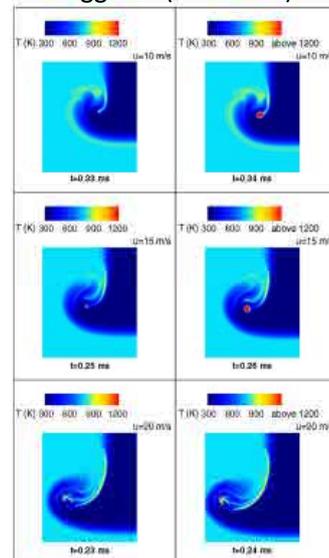


Fig. 12. Temperature fields by using the 3D-step model for different values of fuel stream velocity, as the case at $T_{in} = 500$ K and $T_{in} = 300$ K, at distances where T_{min} is equal to 1200 K (on the left) and to 1700 K (on the right).

過去の研究例 (単液滴)

熱・物質輸送

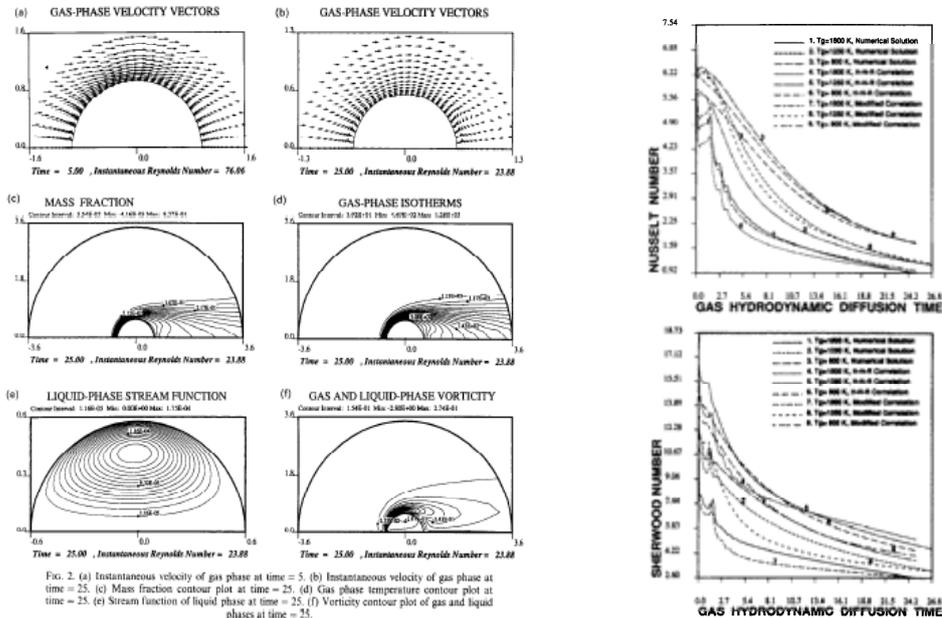


FIG. 2. (a) Instantaneous velocity of gas phase at time = 5. (b) Instantaneous velocity of gas phase at time = 25. (c) Mass fraction contour plot at time = 25. (d) Gas phase temperature contour plot at time = 25. (e) Stream function of liquid phase at time = 25. (f) Vorticity contour plot of gas and liquid phases at time = 25.

気相が燃焼器条件に近い単液滴

Chiang, Raju, Sirignano (Int. J Heat Mass Transfer 1992)

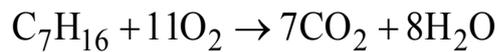
*この時間変化は液滴の減速によるレイノルズ数の低下による

目的とアプローチ

- これまでの研究ではノズル直下の直接の現象理解が抜けているので...
 - 乱流微粒化のメカニズムを解明する
 - さらに蒸発・混合・反応現象を解明する
 - 燃焼への道筋
 - 実スケールへモデルとしてフィード
 - 詳細数値計算による
 - 恣意的モデルを導入しない
 - ただし計算機資源の制約から依然として小スケールに限定

計算手法

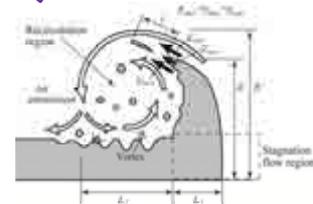
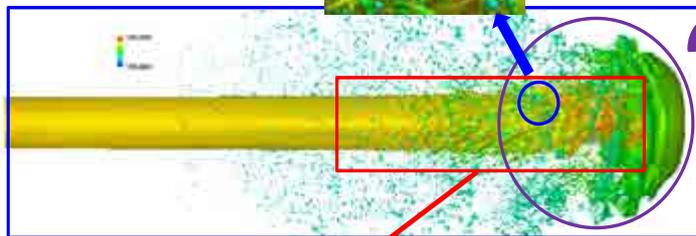
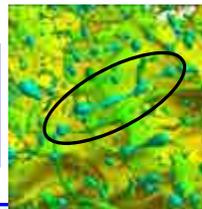
- 3次元Navier-Stokes方程式
 - 密度、速度、温度、各化学種
 - 移流はCIP法
- Level-set界面追跡
- 蒸発
 - 平衡モデル
 - 界面での跳び条件
- 化学反応
 - n-heptane総括一段反応*



*Westbrook & Dryer, Combust. Sci. Technol. 1981

(1) コールドフロー結果

噴霧の全体挙動と液糸・液滴生成 (Shinjo & Umemura, IJMF 2010)



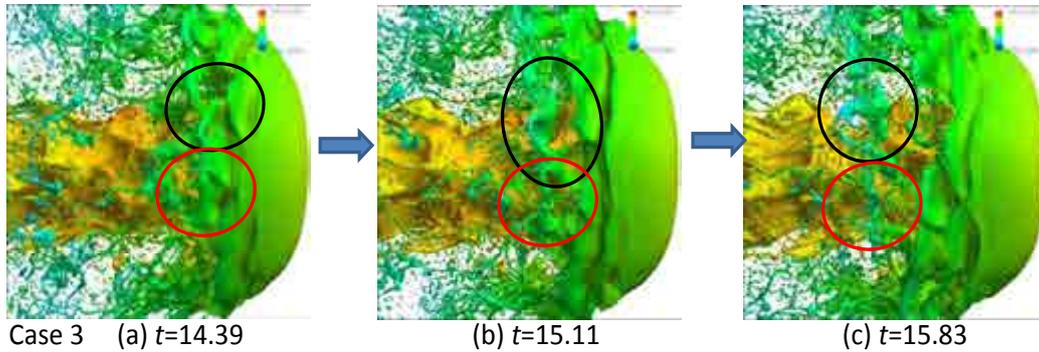
液柱コアの表面不安定と微粒化 (Shinjo & Umemura, IJMF 2011)

先頭部のはたらき (Shinjo & Umemura, PCI 2011)

Case	Nozzle diameter $D=2a$	Ambient pressure p	Gas density ρ_g	Liquid density ρ_l	Liquid viscosity μ_l	Surface tension coefficient σ	Liquid velocity $U_l=U$	Gas velocity U_g	Bulk liquid Reynolds number	Bulk liquid Weber number
3	0.1mm	3MPa	34.5kg/m ³	848kg/m ³	2870e-6 Pa·s	30.0e-3 N/m	100m/s	0m/s	1470	14100

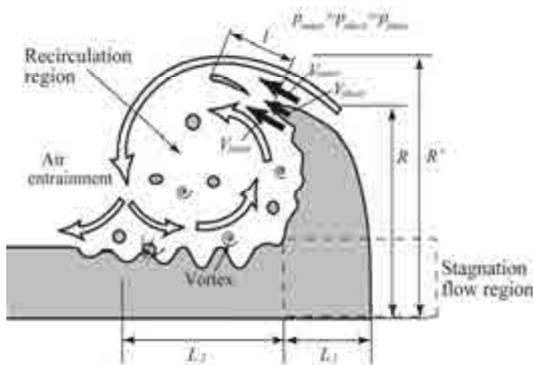
最小解像度0.35μm 格子点数60億点

先頭部の渦挙動と微粒化



- 軸対称渦の定期的放出と液糸の形成
- これにより液滴分布の空間ムラができる
- 乱流化するため、渦間には縦渦も形成

先頭部での微粒化ループ



From theoretical consideration,

$$l = [(V_{outer(inner)} + V_{sheet}) / 2] \tau$$

$$(V_{sheet} - U_c) \tau = (V_{sheet} - \sqrt{\sigma / \rho_l a_{sheet}}) \tau = \lambda$$

CFD result satisfies the above relations

$$\begin{aligned} \hat{V}_{outer(inner)} &= 1.0, & \hat{V}_{sheet} &= 0.5, \\ \hat{\lambda} &= 0.37, & \hat{l} &= 0.6, & \hat{a}_{sheet} &= 0.04, \\ \hat{\tau} &= 0.8 \end{aligned}$$

V_* : Edge velocity (fixed on spray front)

a_{sheet} : Thickness at edge

l : Spatial interval

σ : Surface tension

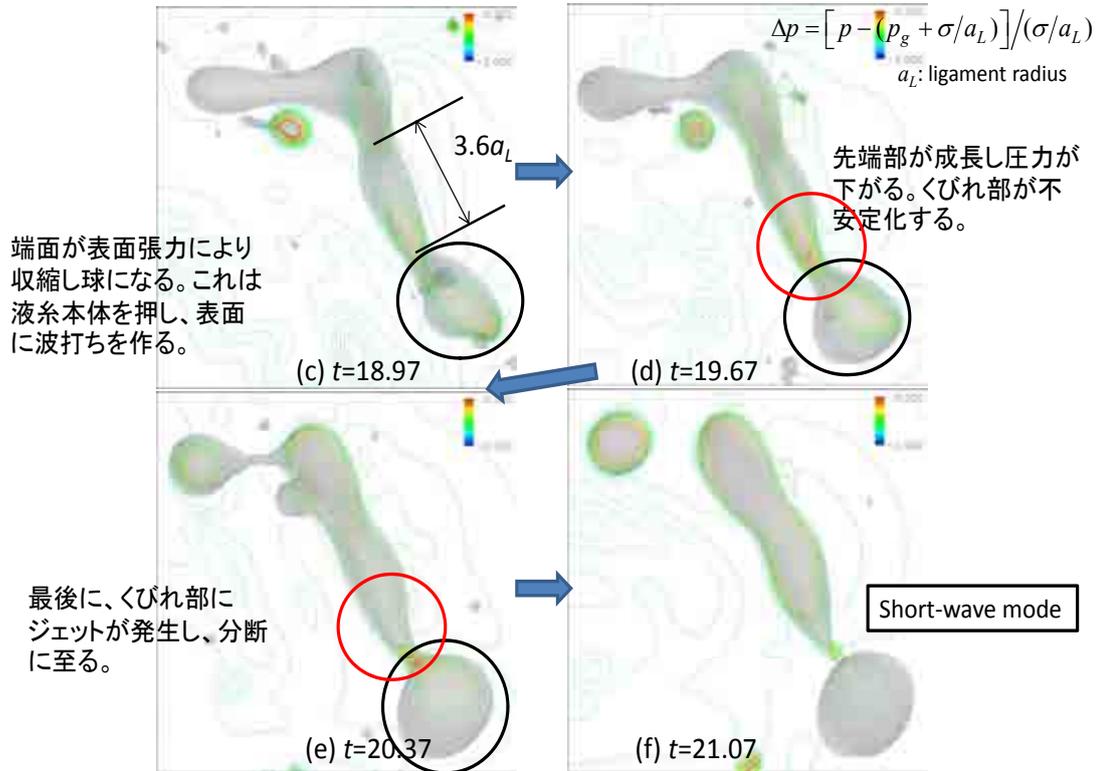
λ : Wavelength on edge

R : Edge radius

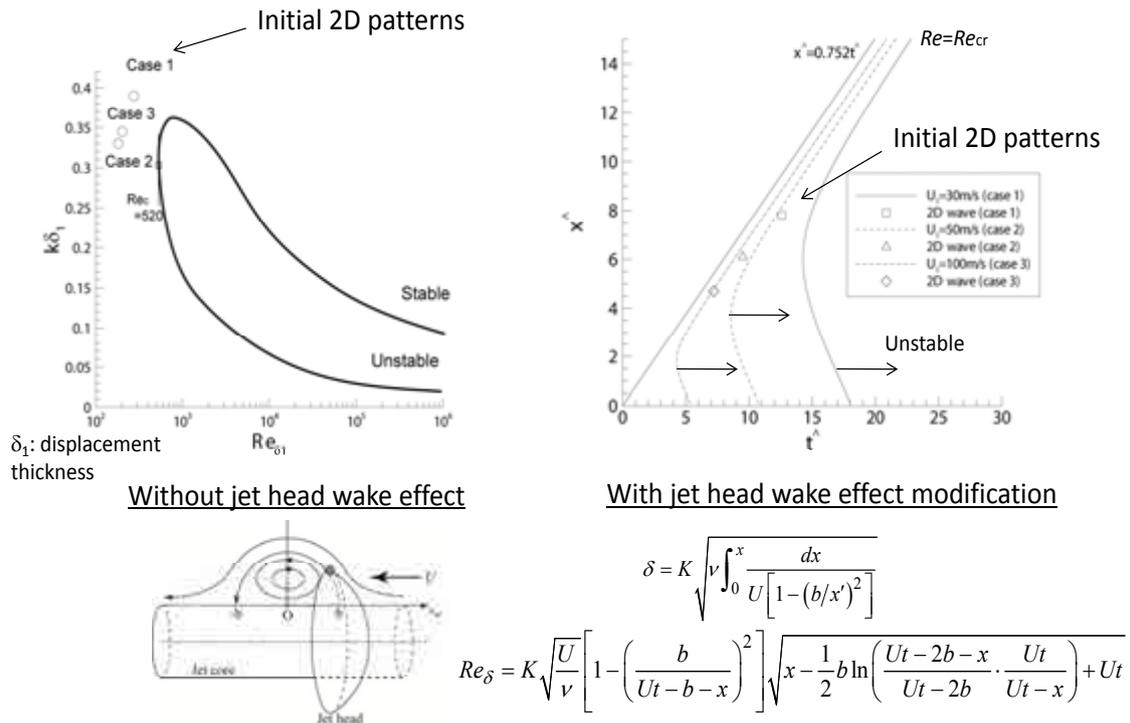
L_2 : Recirculation zone length

τ : Time interval of atomization

液系からの液滴生成



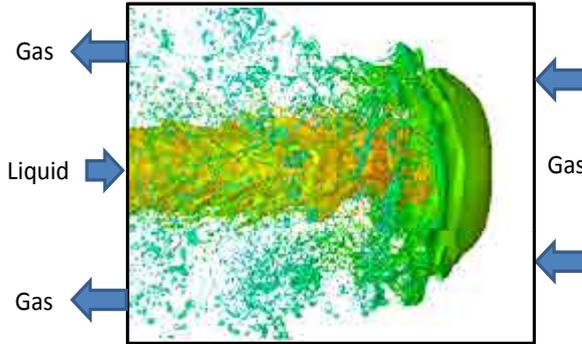
表面不安定性とTSモード



高速液噴射では、初期不安定波は気相境界層のTS不安定である

(2) 蒸発・反応計算

- コールドフローの結果を利用
 - スケールの制約で火炎の完全発達には追えない
 - それでも初期挙動は追える



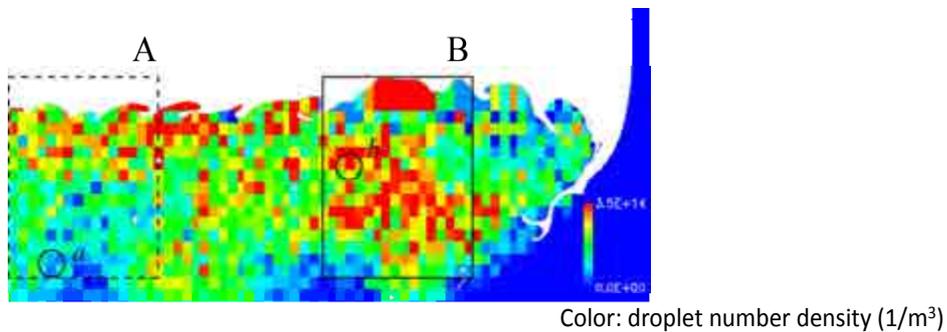
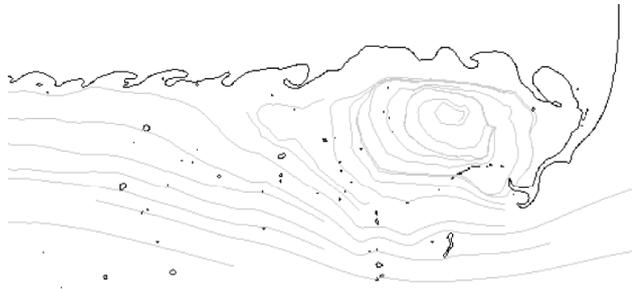
- 900K空気 (時刻 $\hat{t}=15.47$)
- 30atm
- 平衡蒸発
- n-heptane (C_7H_{16}) 総括一段反応 (Westbrook & Dryer, CST 1981)
- NISTデータによる物性値
- 22億点格子

Nozzle diameter D_N	Ambient pressure p	Air density ρ_g	Liquid density ρ_l	Air temperature T_g	Liquid temperature T_l	Liquid injection velocity $U_l=U$	Air initial velocity U_a	Liquid viscosity μ_l	Air viscosity μ_g	Surface tension coefficient σ
0.1mm	3MPa	11.5kg/m ³	848kg/m ³	900K	300K	100m/s (Lab frame)	0m/s (Lab frame)	2.87e-3 Pa·s	3.90e-5 Pa·s	30.0e-3 N/m

15

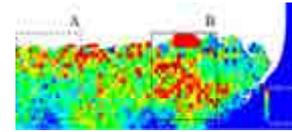
流れ場

- 再循環背後の液滴分布
 - 先ほどの空間ムラ

Color: droplet number density (1/m³)

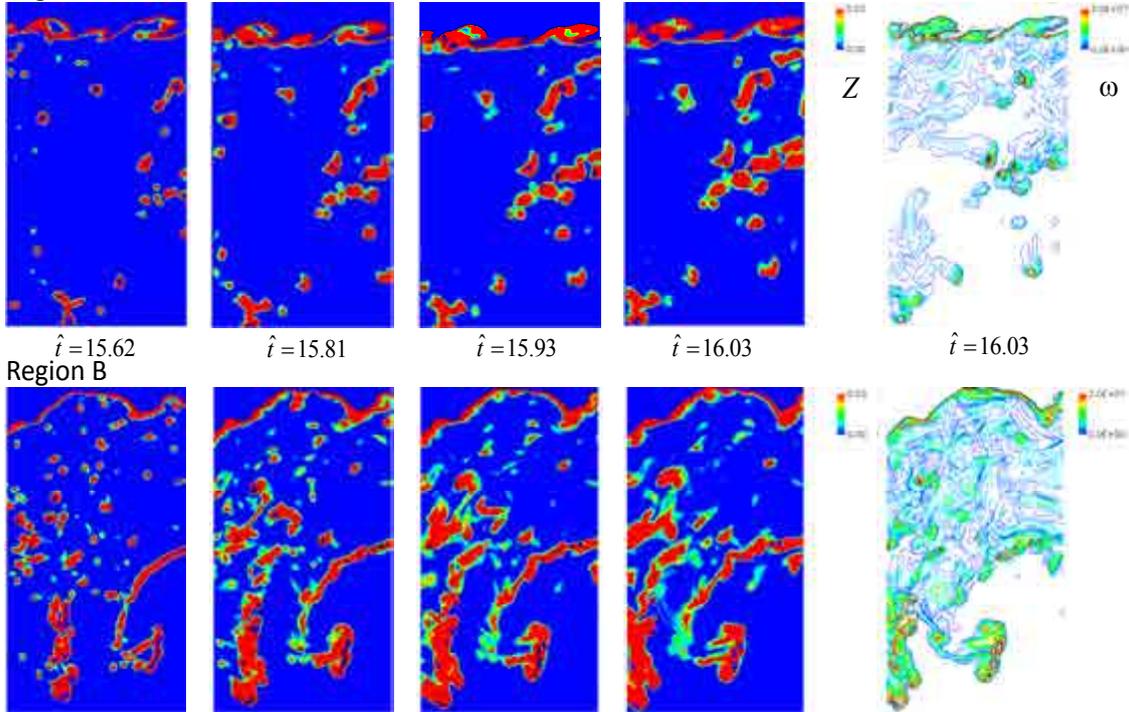
*2次元スライスには液滴が少ない印象を与えるが3次的には多数存在している

燃料蒸気の混合



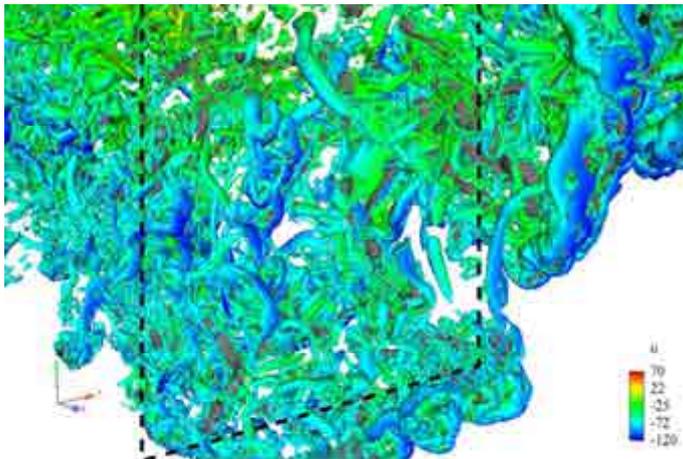
Region A • 数密度が高い(B)と混合がクラスター化

*Evaporation starts at $\hat{t} = 15.47$

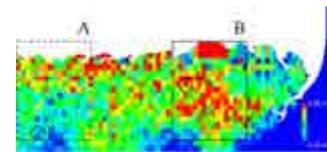


液滴/気相干渉

• 液滴/乱流スケール



Droplets (gray) and eddies (Q-isosurface) near region B



Kolmogorovスケール

$$\eta = (v^3 / \varepsilon)^{1/4} \quad \varepsilon = \overline{v u'_{i,j} u'_{i,j}}$$

$$\eta \sim 1 \mu m = 0.23 D_{32}$$

D_{32} : Sauter mean diameter

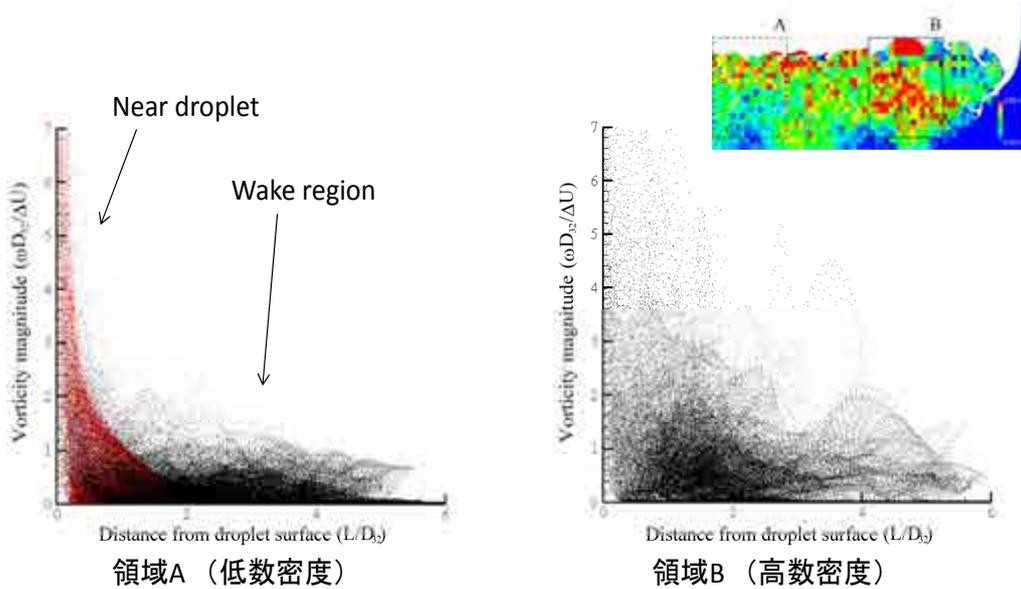
液滴Stokes数

$$S_t = \rho_l D_{32}^2 U / 18 \mu_g L$$

$$S_t \sim 22$$

- まだ気液で相対速度がある。
- 渦度を生成する (eddy diameter $\sim 8-12 \eta$): 次スライド

液滴周り渦度



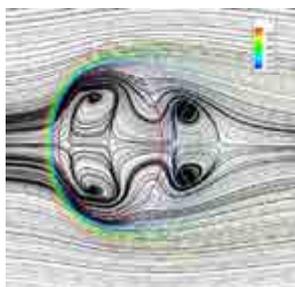
*Red scatter points are from single droplet simulation of the similar Re (~40) with evaporation and reactions.

- 領域Bのほうが、ウェイクの干渉が大きい
- 平均液滴間距離 : (A) $l=7.9D_{32}$ and (B) $l=3.3D_{32}$ $l \sim n^{1/3}$

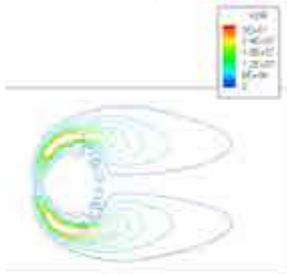
単液滴計算

- 「一様流」中に置かれた個々の液滴の蒸発

例: $Re=40, T_{air}=900K$



Streamlines in liquid C.G. frame



Vorticity magnitude

*この液滴は少しずつ変形しています

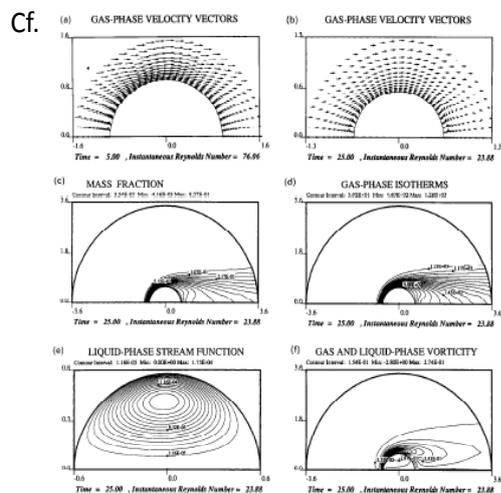
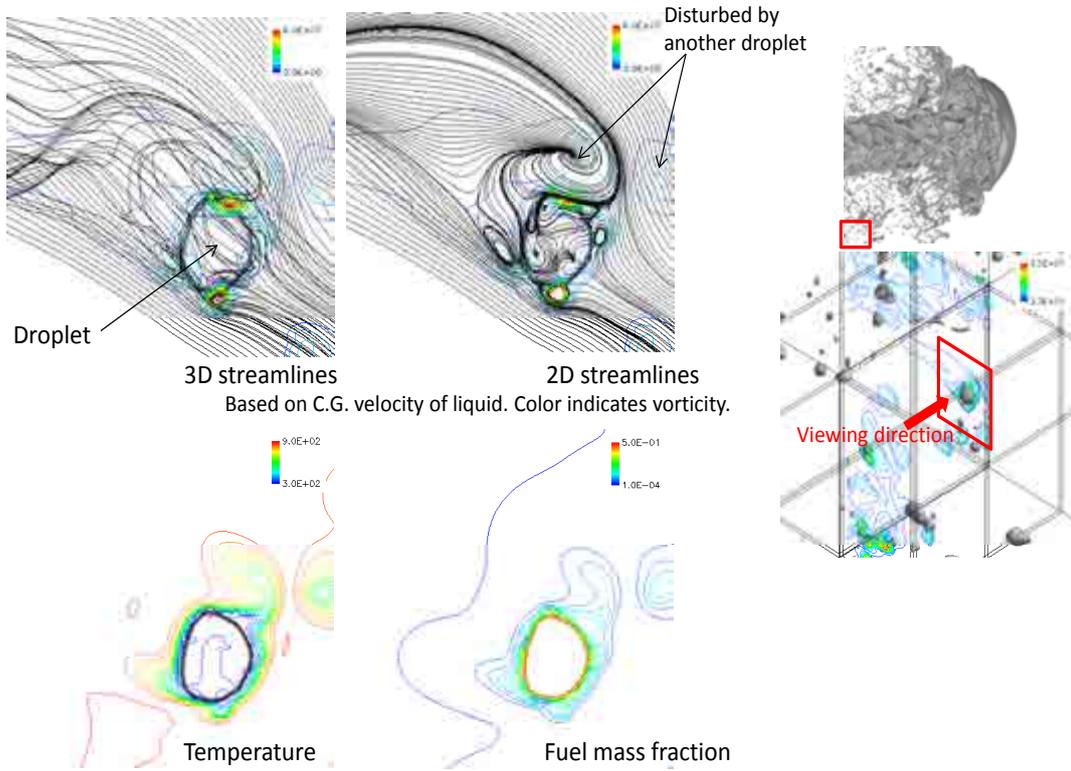


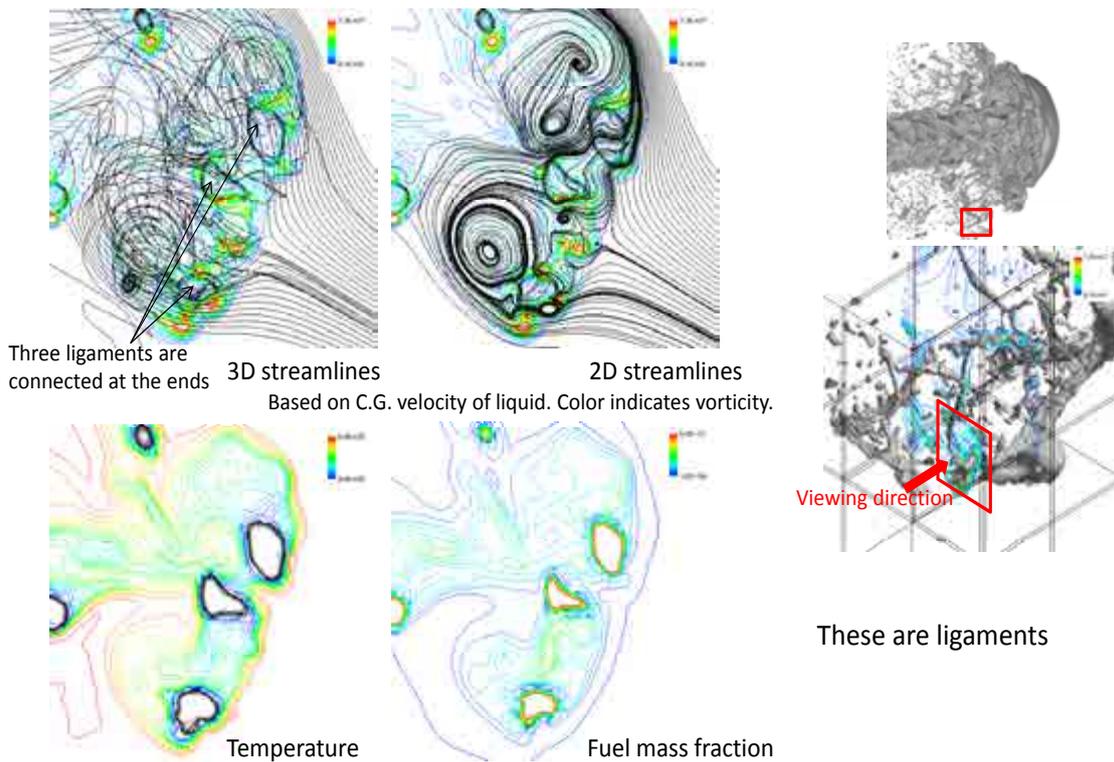
FIG. 2. (a) Instantaneous velocity of gas phase at time = 5. (b) Instantaneous velocity of gas phase at time = 25. (c) Mass fraction contour plot at time = 25. (d) Gas phase temperature contour plot at time = 25. (e) Stream function of liquid phase at time = 25. (f) Vorticity contour plot of gas and liquid phases at time = 25.

Chiang, Raju, Sirignano (Int. J Heat Mass Transfer 1992)

液滴数密度: 低



液滴数密度: 高

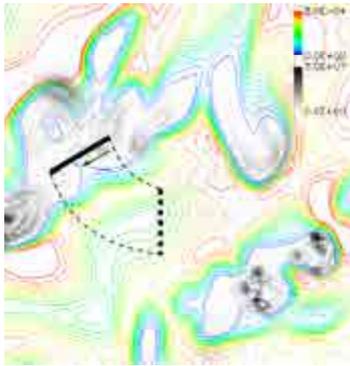


燃料蒸気クラスタの形成

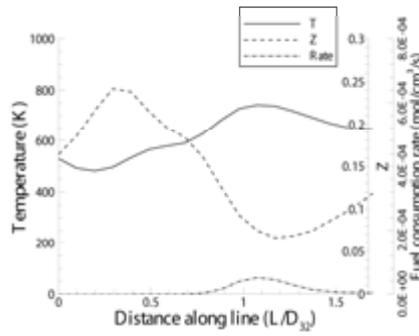
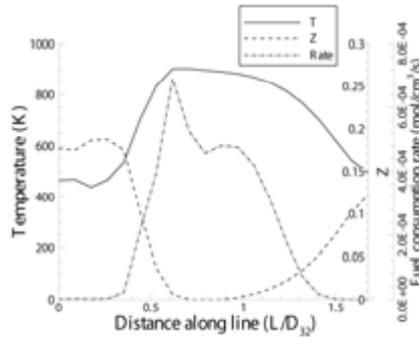
Color: reaction rate
Black-white: vorticity



$\hat{t} = 15.71$



$\hat{t} = 16.03$



Molecular diffusion τ_d

$$\tau_d = L^2 / D_{dif} = 5.4e-6 \text{ s}$$

$$\text{Or } \Delta \hat{t} = 5.4$$

With

$$D_{dif} = 3.4e-6 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$L = D_{32} = 4.3 \mu\text{m}$$

Eddy turnover τ_e

$$\tau_e = 4\pi / |\omega| = 3.6e-7 \text{ s}$$

$$\text{Or } \Delta \hat{t} = 0.36$$

With

$$|\omega| = 3.5e7 \text{ s}^{-1}$$

Actual time difference

$$\Delta \hat{t} = 0.32$$

すでに結合しており、渦による近傍の混合促進が分かる

群燃焼数

数密度の高い領域Bでは、おおざっぱに

$$G = 2\pi n D_{32} R_c^2 = 5.7$$

With

$$R_c = 0.25 D_N$$

$$n = 3.4e14 \text{ m}^{-3}$$

$$D_{32} = 4.3 \mu\text{m}$$



External Group Combustion

- 相対速度による液滴周りの輸送
- 液滴間の干渉

液滴数密度が高いときの熱・物質輸送の修正モデルを現在構築中

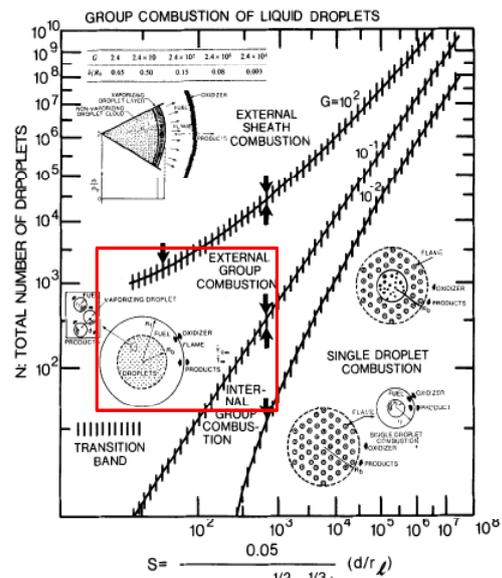


FIG. 1. Four group combustion modes of a droplet cloud.

