

# ロケット燃焼解析に必要な熱物性モデルと数値解析

清水 和弥

シンポジウム「ロケットエンジン解析技術の新展開」  
2010年9月28・29日 東京大学武田ホール

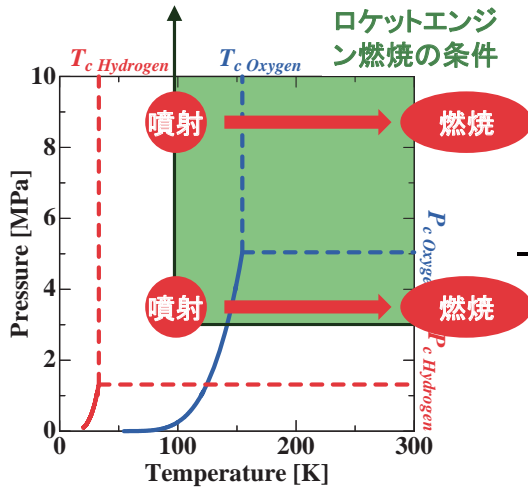
## ロケットエンジンシミュレーションに必要な熱物性・輸送物性推算精度の現状と課題

### 目的

- ▶ 各種推算式と計測データとの比較
  - ✓ 推算式の定量性を明示することで解析モデルが潜在的に持つ誤差要因を評価できるようにする.
  - ✓ 実験データの存在範囲を明らかにすることで、今後の研究の方向性を示す.
- ▶ 各種推算式の高精度化の試み
  - ✓ 汎用的な熱物性・輸送物性推算法は、水素・酸素に特化したものではないため、モデル定数を水素・酸素用に設定することで高精度化を図れる可能性がある.

# ロケット燃焼の概要

## 相図上で見る燃焼条件

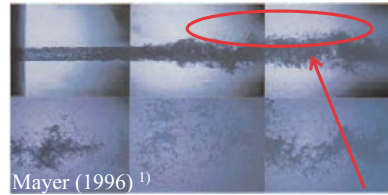


水素  $T_c = 33.2\text{K}$ ,  $P_c = 1.32\text{MPa}$   
 酸素  $T_c = 154.6\text{K}$ ,  $P_c = 5.04\text{MPa}$

超臨界圧燃焼 界面が連続



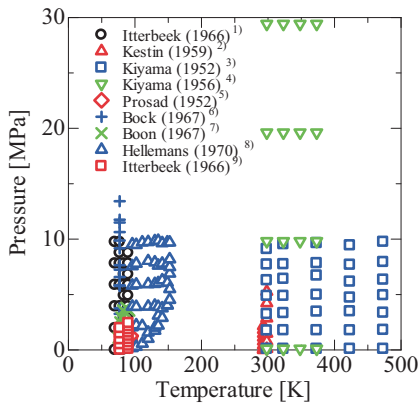
亜臨界圧燃焼 界面が不連続, 酸素液滴



1. Mayer, W., Tamura, H.: Propellant Injection in a Liquid Oxygen/Gaseous Hydrogen Rocket Engine, Journal of Propulsion and Power, 12(1996), pp.1137-1147.

# 酸素粘性係数

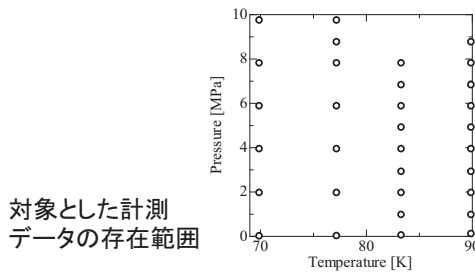
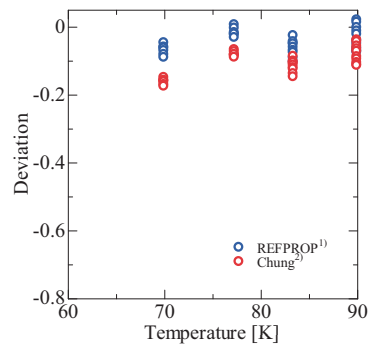
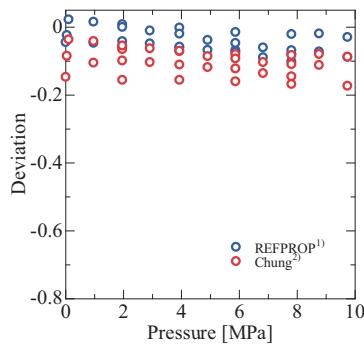
## 計測データの存在範囲



1. Van Itterbeek, A., et al.: Viscosity of Liquified Gases at Pressures above one Atmosphere, Physica, 32(1966), pp. 489-493.
2. Kestin, J., et al.: An Absolute Determination of the Viscosity of Eleven Gases over a Range of Pressures, Physica, 25(1959), pp. 1033-1062.
3. Kiyama, R., et al.: The Viscosity of Carbon Dioxide, Ammonia, Acetylene, Argon and Oxygen under High Pressures, The Review of physical chemistry of Japan, 22(1952), pp. 49-58.
4. Kiyama, R., et al.: An Improved Viscometer for Compressed Gases and the Viscosity of Oxygen, The Review of physical chemistry of Japan, 26(1956), pp. 70-74.
5. Prosad, S.: The Thermal conductivity of Liquid Oxygen, British Journal of Applied Physics, 3(1952), pp.58-59.
6. De Bock, A., et al.: Pressure Dependence of the Viscosity of Liquid Argon and Liquid Oxygen, Measured by Means of a Torsionally Vibrating Quartz Crystal, Physica, 34(1967), pp.49-52.
7. Boon, J.P., et al.: On the Principle of Corresponding States for the Viscosity of Simple Liquids, Physica, 33(1967), pp. 547-557.
8. Hellemans, J., et al.: The Viscosity of Liquid Nitrogen and Liquid Oxygen along Isotherms as a Function of Pressure, Physica, 47(1970), pp. 45-57.
9. Van Itterbeek, A., et al.: Viscosity of Liquified Gases at Pressures between 1 and 100 Atmosphere, Physica, 32(1966), pp. 2171-2172.

### 計測データとの比較

Itterbeek (1966)<sup>3)</sup> との比較

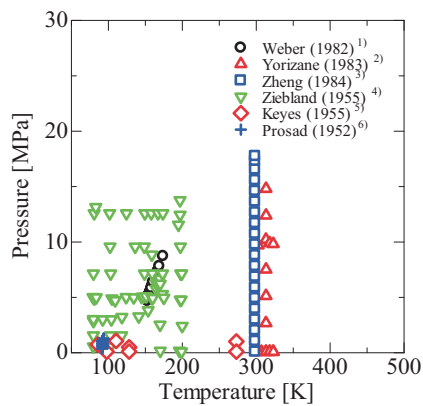


対象とした計測データの存在範囲

1. Lemmon, E.W., et al.: NIST Standard Reference Database 23, 2007. <http://www.nist.gov/srd/nist23.htm>
2. Chung, T.-H., et al.: Applications of kinetic gas theories and multiparameter correlation for prediction of dilute gas viscosity and thermal conductivity, Ind. Eng. Chem. Fundam., 23(1984), pp. 8-13.
3. Van Itterbeek, A., et al.: Viscosity of Liquified Gases at Pressures between 1 and 100 Atmosphere, Physica, 32(1966), pp. 2171-2172.

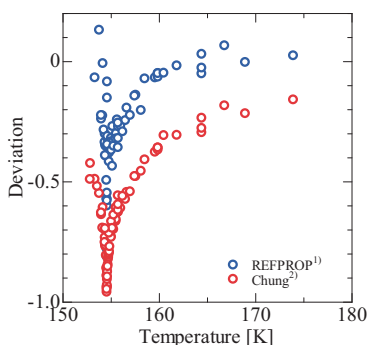
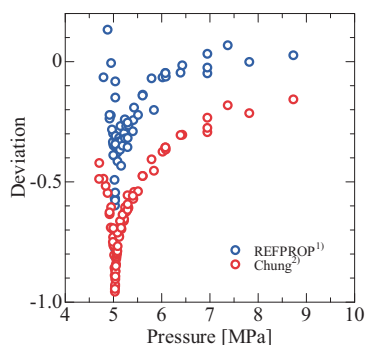
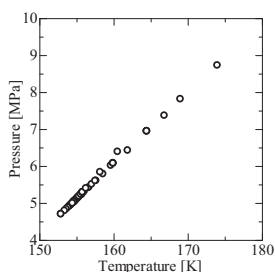
## 酸素熱伝導率

### 計測データの存在範囲



1. Weber, L.A.: Thermal Conductivity of Oxygen in the Critical Region, International Journal of Thermophysics, 3(1982), pp. 117-135.
2. Yorizane, N., et al.: Thermal Conductivity of Pure Gases at High Pressures by Use of a Coaxial Cylindrical Cell, Ind. Eng. Chem. Fundam. 22(1983), pp. 454-458
3. Zheng, X-Y., et al.: Measurement and Correlation of the Thermal Conductivities for Several Dense Fluids and Mixtures, Journal of Chemical Engineering of Japan, 17(1984), pp. 237-245.
4. Ziebland, H. et al.: The Thermal Conductivity of Liquid and Gaseous Oxygen, British Journal of Applied Physics, 6(1955), pp. 416-420.
5. Keyes, F.G., et al.: Thermal Conductivity of Gases, Transactions of the ASME, 77(1955), pp. 1395-1396.
6. Prosad, S.: The Thermal Conductivity of Liquid Oxygen, British Journal of Applied Physics, 3(1952), pp. 58-59.

## 計測データとの比較

Weber (1982)<sup>3)</sup> との比較対象とした計測  
データの存在範囲

1. Lemmon, E.W., et al.: NIST Standard Reference Database 23, 2007. <http://www.nist.gov/srd/nist23.htm>
2. Chung, T.-H., et al.: Applications of kinetic gas theories and multiparameter correlation for prediction of dilute gas viscosity and thermal conductivity, Ind. Eng. Chem. Fundam., 23(1984), pp. 8-13.
3. Weber, L.A.: Thermal Conductivity of Oxygen in the Critical Region, International Journal of Thermophysics, 3(1982), pp. 117-135.

## まとめ

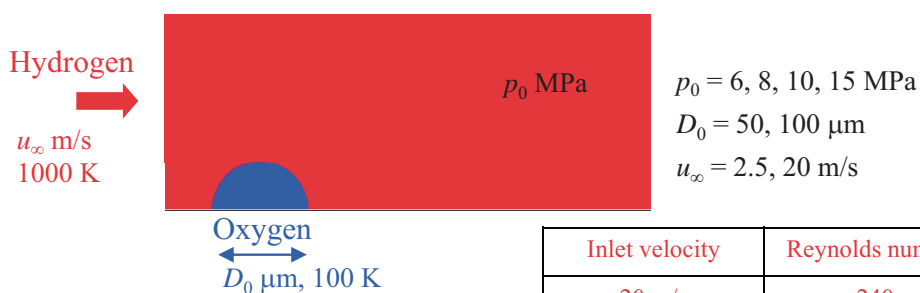
- ロケットエンジンシミュレーションに必要な熱物性・輸送物性の推算精度に関する検討について酸素の輸送係数をとり上げ述べた。
- 単成分の物性については、水素・酸素ともに必要となる温度・圧力範囲に対して概ね実測データは存在すると考えてよい。
- 酸素粘性係数について、2つの代表的な推算式の精度を検証すると、REFPROPで10%程度、Chungらのモデルで20%程度の誤差を持っている。
- 酸素熱伝導率について、2つの代表的な推算式の精度を検証すると、特に臨界点近傍ではその精度は極端に悪くなり、REFPROPで50%程度、Chungらのモデルで100%程度の誤差を持っている。
- 今後の予定・課題等
  - ✓ 計測データの整理、各種推算法との比較をさらに進め、ロケットエンジンシミュレーション用の熱物性・輸送物性推算式の推奨モデルを提示する。
  - ✓ 計測データが存在しない物性の推算精度をどのように評価するかが課題。

# 超臨界圧水素・酸素混合過程に関する数値解析

## 目的

- 超臨界圧燃焼現象の詳細理解
- ✓ 乱流等の影響がないような理想的な条件を想定することで、混合・拡散・燃焼現象の特に圧力依存について検討する。

## 計算条件



Inlet velocity	Reynolds number
20 m/s	240
2.5 m/s	30

$p_0 = 10$  MPa,  $D_0 = 100$   $\mu\text{m}$

### Numerical treatment

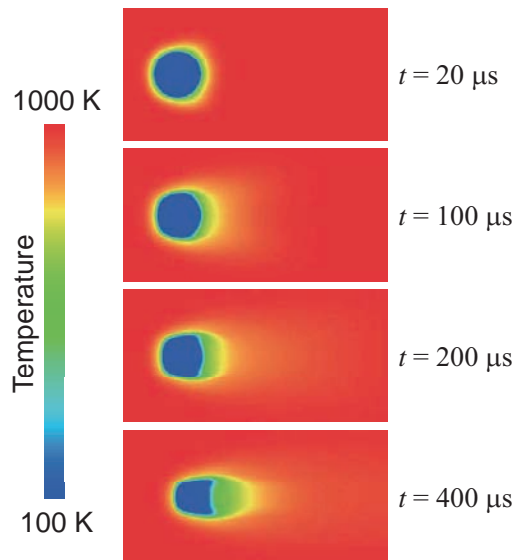
- Axisymmetric two-dimensional calculation
- Equation of state : Soave <sup>1)2)</sup>
- Viscosity : Chung et al. <sup>3)</sup>
- Thermal conductivity : Chung et al. <sup>3)</sup>
- Diffusivity : Riazi et al. <sup>4)</sup>

1. Soave, G., *Chemical Engineering Science*, **27**(1972), pp.1197-1203.
2. Soave, G., *Chemical Engineering Science*, **35**(1980), pp.1725-1729.
3. Chung, T-H. et al., *Industrial & Engineering of Chemistry Research*, **27**(1988), pp.671-679.
4. Riazi, M. R. et al., *Industrial & Engineering of Chemistry Research*, **32**(1993), pp.3081-3088.

## 結果と考察

### 液滴変形の経時変化

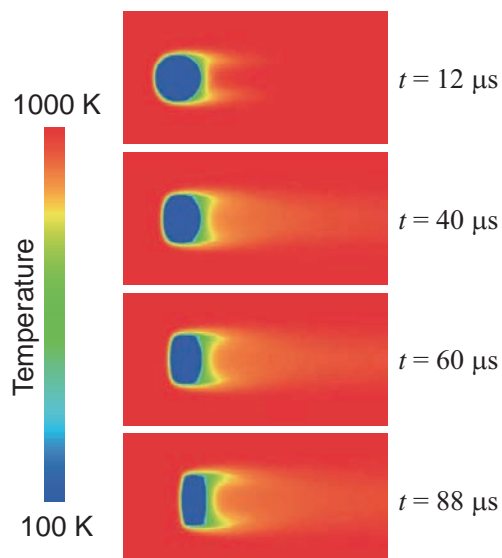
$$u_{\infty} = 2.5 \text{ m/s}, p_0 = 10 \text{ MPa}, D_0 = 100 \text{ }\mu\text{m}$$



- ✓ 変形は穏やか
- ✓ 流れ方向に伸びるように変形
- ✓ 温度勾配領域が厚い

### 液滴変形の経時変化

$$u_{\infty} = 20 \text{ m/s}, p_0 = 10 \text{ MPa}, D_0 = 100 \text{ }\mu\text{m}$$



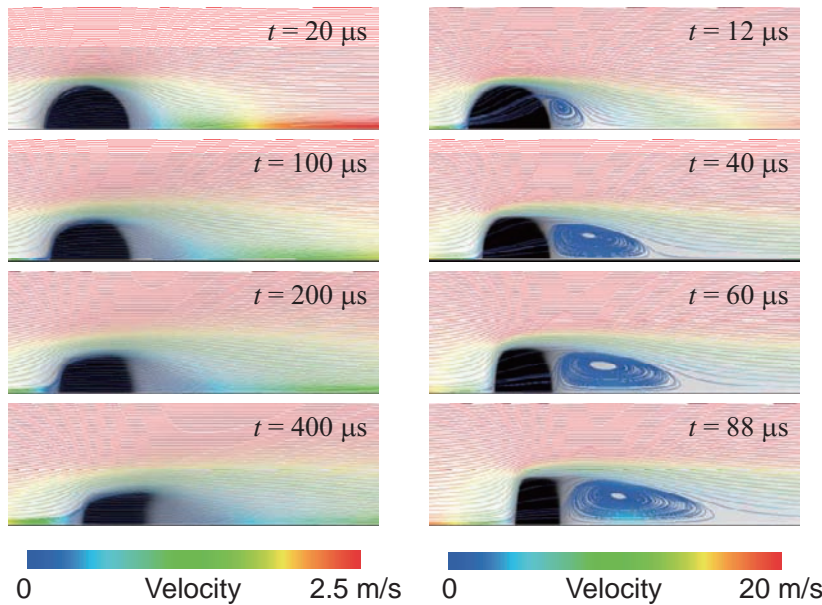
- ✓ 変形は激しい
- ✓ 流れと垂直方向に伸びるように変形
- ✓ 温度勾配領域は薄い

**流れ場の経時変化**

$p_0 = 10 \text{ MPa}, D_0 = 100 \mu\text{m}$

$u_\infty = 2.5 \text{ m/s}$

$u_\infty = 20 \text{ m/s}$



✓スムーズな流れ

✓剥離を伴う流れ

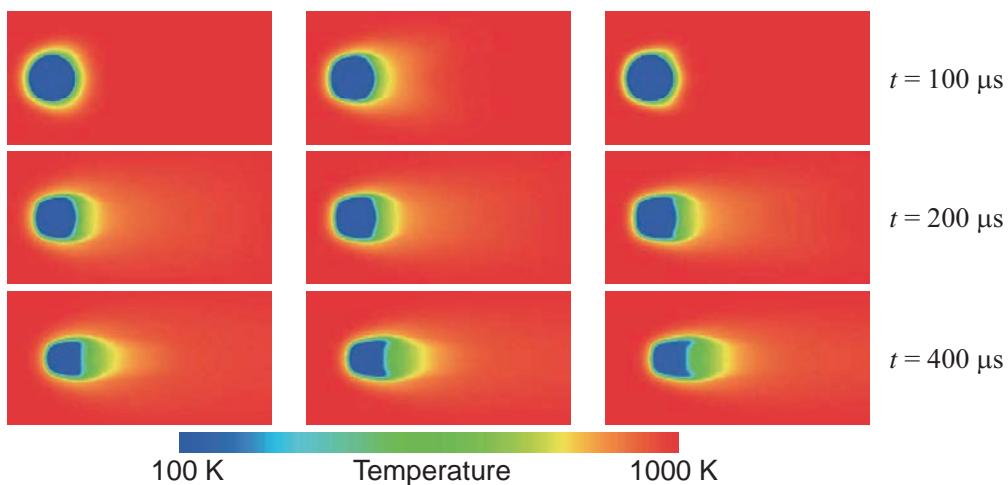
**変形の様子 of 圧力依存**

$u_\infty = 2.5 \text{ m/s}$

$p_0 = 6 \text{ MPa}$

$p_0 = 10 \text{ MPa}$

$p_0 = 15 \text{ MPa}$



圧力上昇



液滴の変形は大きくなる  
液滴の下流への移動速度が大きくなる



水素密度が上がり水素の運動量が大きくなる

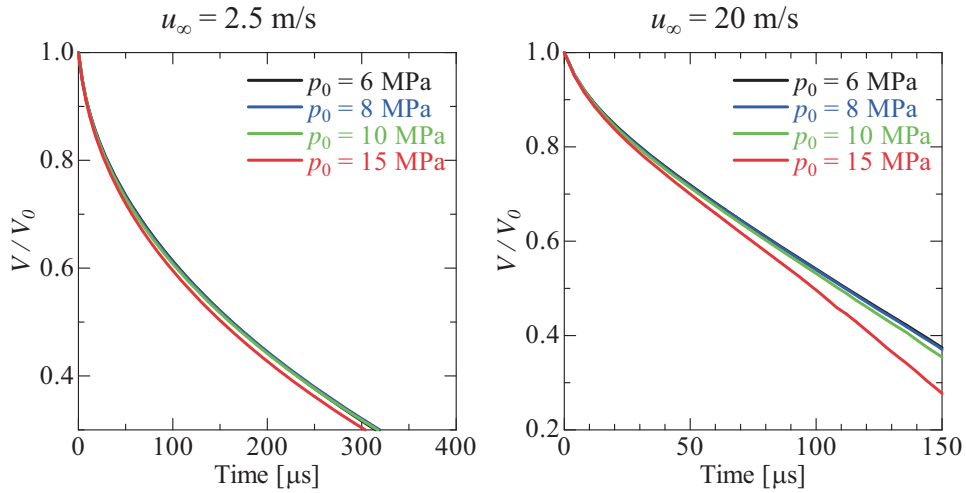




### 液滴寿命評価

$D_0 = 100 \mu\text{m}$

#### 圧力の影響(1)

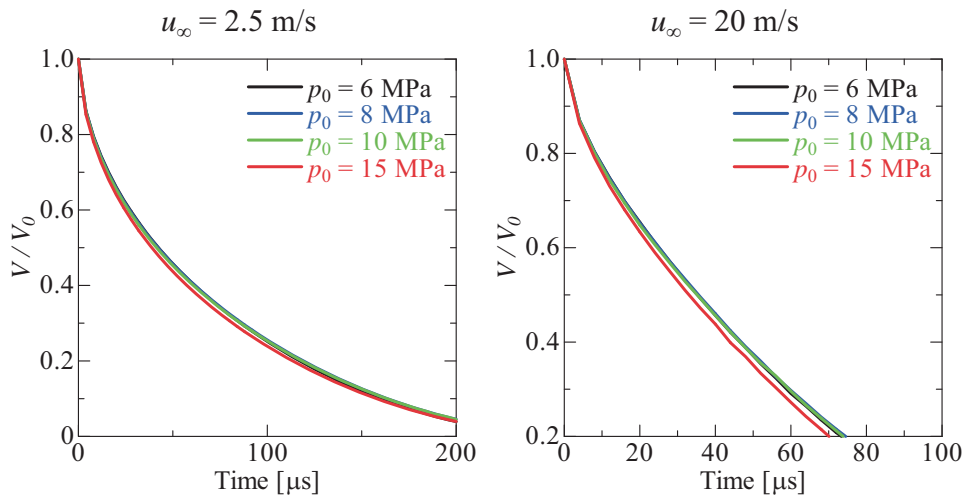


✓ 圧力が高くなると若干寿命は短くなるが、その影響は非常に小さい。

### 液滴寿命評価

$D_0 = 50 \mu\text{m}$

#### 圧力の影響(2)

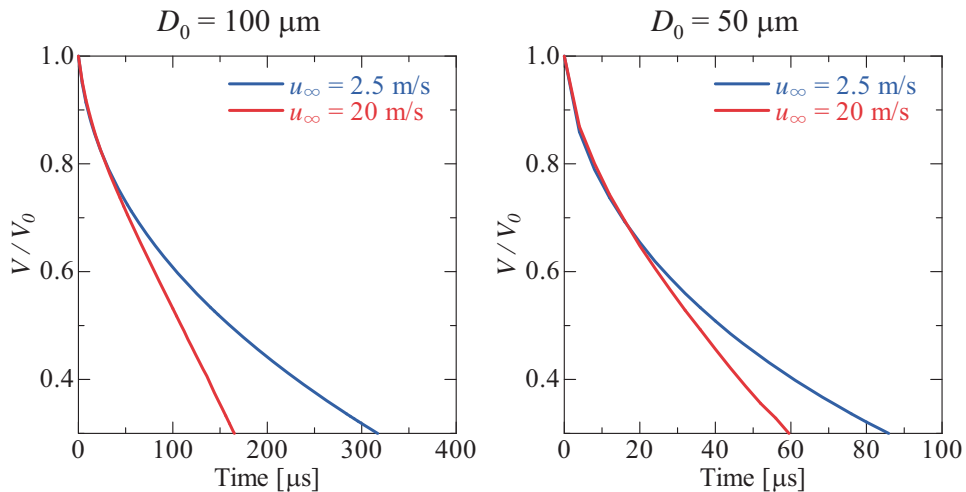


✓ 圧力が高くなると寿命は短くなるが、その影響は小さい。

### 液滴寿命評価

$p_0 = 10 \text{ MPa}$

#### 水素流速の影響

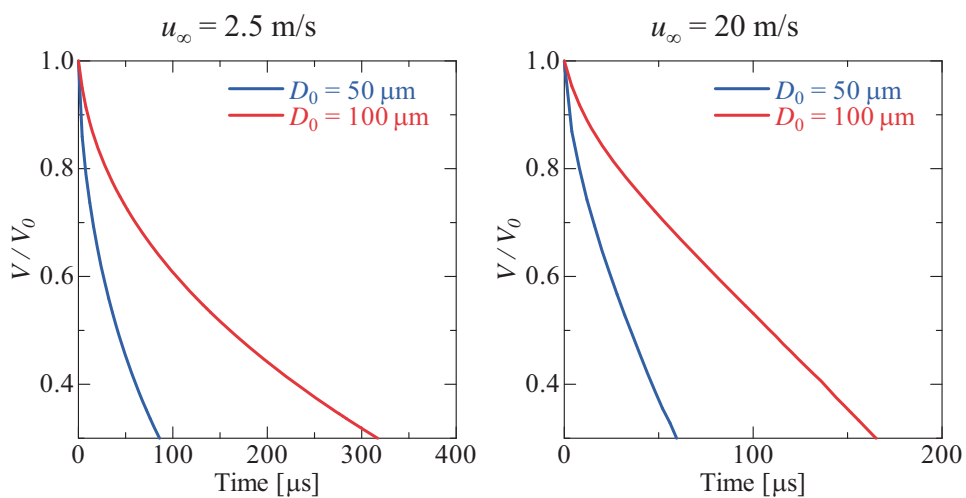


- ✓ 低速条件では、曲線状の寿命を示し液滴の減少速度は徐々に小さくなる。
- ✓ 高速条件では、直線状の寿命を示しほぼ一定割合で液滴が小さくなっていく。

### 液滴寿命評価

$p_0 = 10 \text{ MPa}$

#### 初期液滴径の影響



- ✓ 低レイノルズ数パターンでは、初期液滴直径が半分になると寿命はほぼ 1/4 なる。
- ✓ 高レイノルズ数パターンでは、初期液滴直径が半分になると寿命はほぼ 1/3 なる。

## まとめ

---

- 超臨界圧力条件を対象に高温水素流れ中に置かれた低温酸素液滴の変形・拡散の様子について数値的に検討した.
- レイノルズ数に応じて流れのパターンが大きく2種類に大別されることを示した.
- 酸素液滴の変形, あるいは温度拡散の圧力依存は, 水素の密度がほぼ圧力に比例することに起因するものと考えられる.
- 液滴寿命評価によると, 低レイノルズ数パターンでは現象が熱伝導支配であることを示唆し, 高レイノルズ数パターンでは移流の効果が顕在化することになることを示唆している.
- 今後の予定・課題等
  - ✓ 酸素臨界点に近い条件を解析対象とすることで, 特異な熱物性の振る舞いの影響を検討する.
  - ✓ 検討対象を燃焼時にまで拡張し, 最終的には非燃焼時の挙動と燃焼時の挙動を対応付ける.
  - ✓ 将来的には, 蒸発モデルの構築, 蒸発・燃焼を同時に考慮可能な解析手法の確立などを進め亜臨界圧条件までの拡張を目指す.