

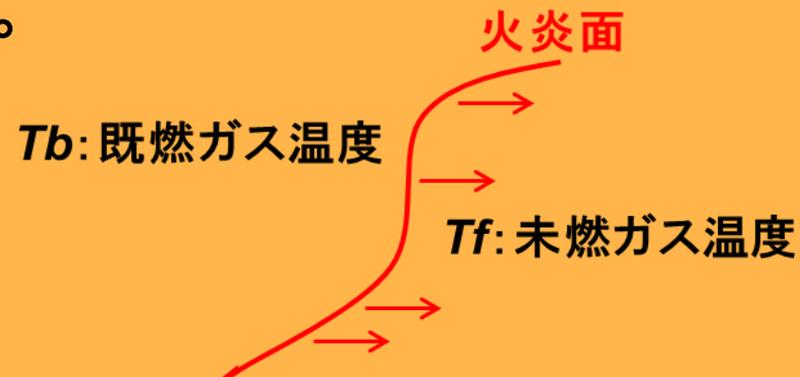
XiFoamによる球形容器内での メタン空気予混合火炎解析

TM

OpenCAE勉強会

はじめに

- ・予混合層流および乱流火炎の解析にはXiFoam(グザイフォーム、クシーフォーム)が適切な場合がある。
- ・予混合火炎は未燃ガスを伝搬していくので燃焼速度が分かれば解析できる。一様な静止混合気中を伝搬する層流燃焼速度は既知のものとして、**流れの伸長・曲率**や**乱れ**の効果をモデル化できれば一般的な予混合火炎の解析ができる。
- ・XiFoamは層流燃焼速度 S_u と乱流燃焼速度 S_t の比 X_i をモデル化したものである。
- ・XiFoamの使い方と球形容器内のメタン空気予混合火炎の伝搬について解析結果を紹介。



XiFoamの主要式

既燃割合

$$c = \frac{T - T_f}{T_b - T_f}$$

未燃割合

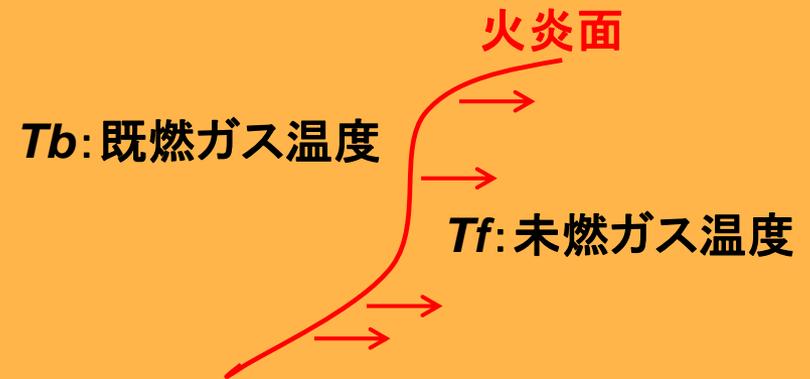
$$b = 1 - c$$

未燃割合の輸送方程式

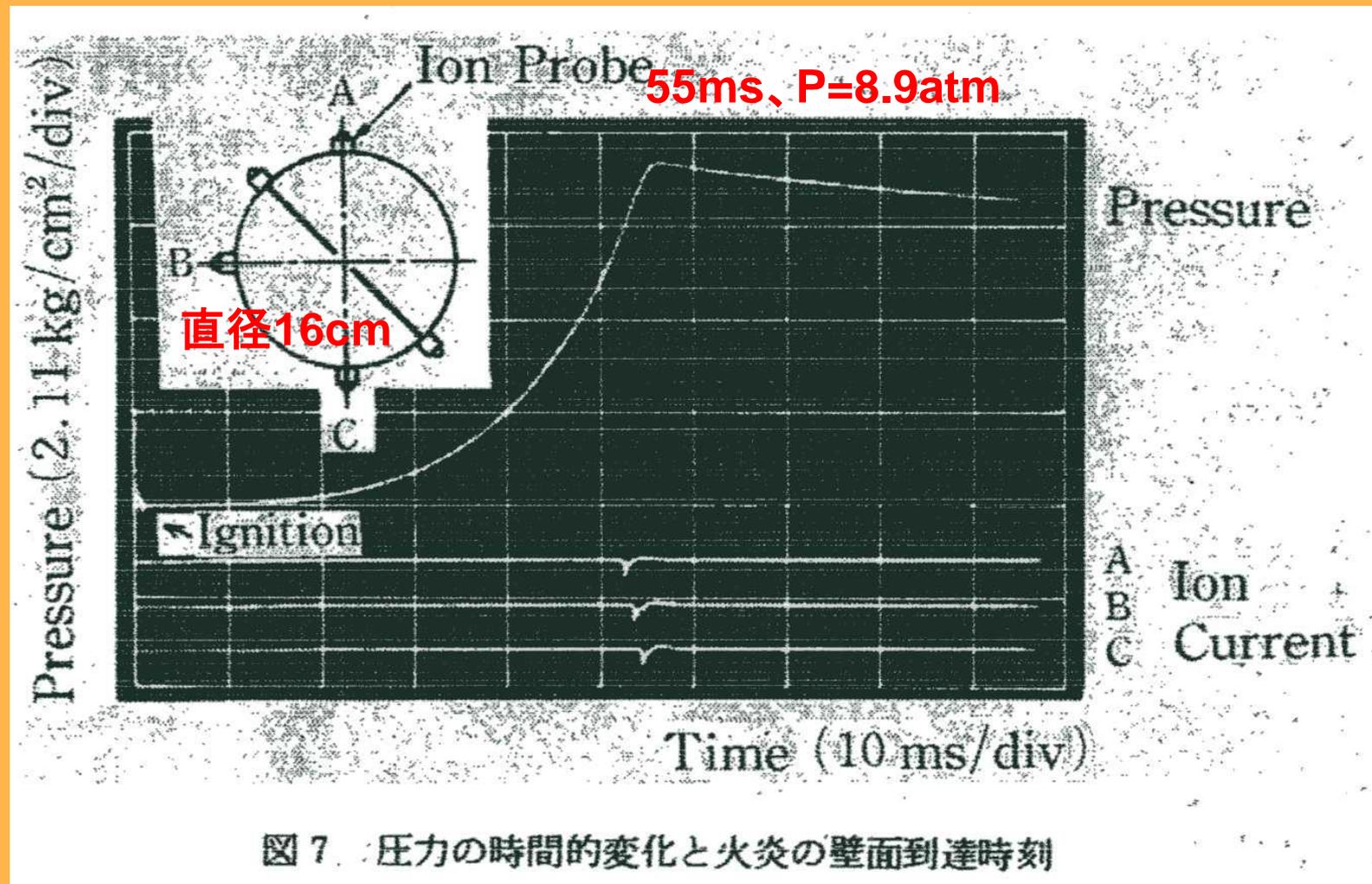
$$\frac{\partial(\rho b)}{\partial t} + \nabla(\rho u b) - \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{Sc_t} \nabla b \right) = \rho_u Su \cdot Xi |\nabla b|$$

$$Xi = \frac{St}{Su}$$

層流燃焼速度Suに対する乱流燃焼速度St



竹野らの研究(解析対象)



XiFoam

≡ OpenFOAM ver.2.1x

/tutorial/combustion/XiFoam/ras/moriyoshiHomogeneous
をベースに改造。

≡ 時間ファイル

U, T, Tu, p, μ_t , α_t , k, ϵ , b, Su, Xi (11個)

≡ 乱流モデル

初期条件: 乱れ無し $k=\epsilon=0$

rasモデル: LaunderSharmaKE

低レイノルズ数モデル。Laminarで試したが発散した
のでdefaultを使用

Combustion Properties1

≡ Laminar Flame Speed Correlation Gulders;

層流燃焼速度式 (Su式) の選定。

①Gulders ②GuldersEGR ③constant

≡ fuel Methane;

燃料はメタン。Su式のパラメーター指定。

≡ Su Su [0 1 -1 0 0 0 0] 0.400

層流燃焼速度が一定の0.40m/s

Laminar Flame Speed Correlation が③constantの
場合に反映

Su (実験)

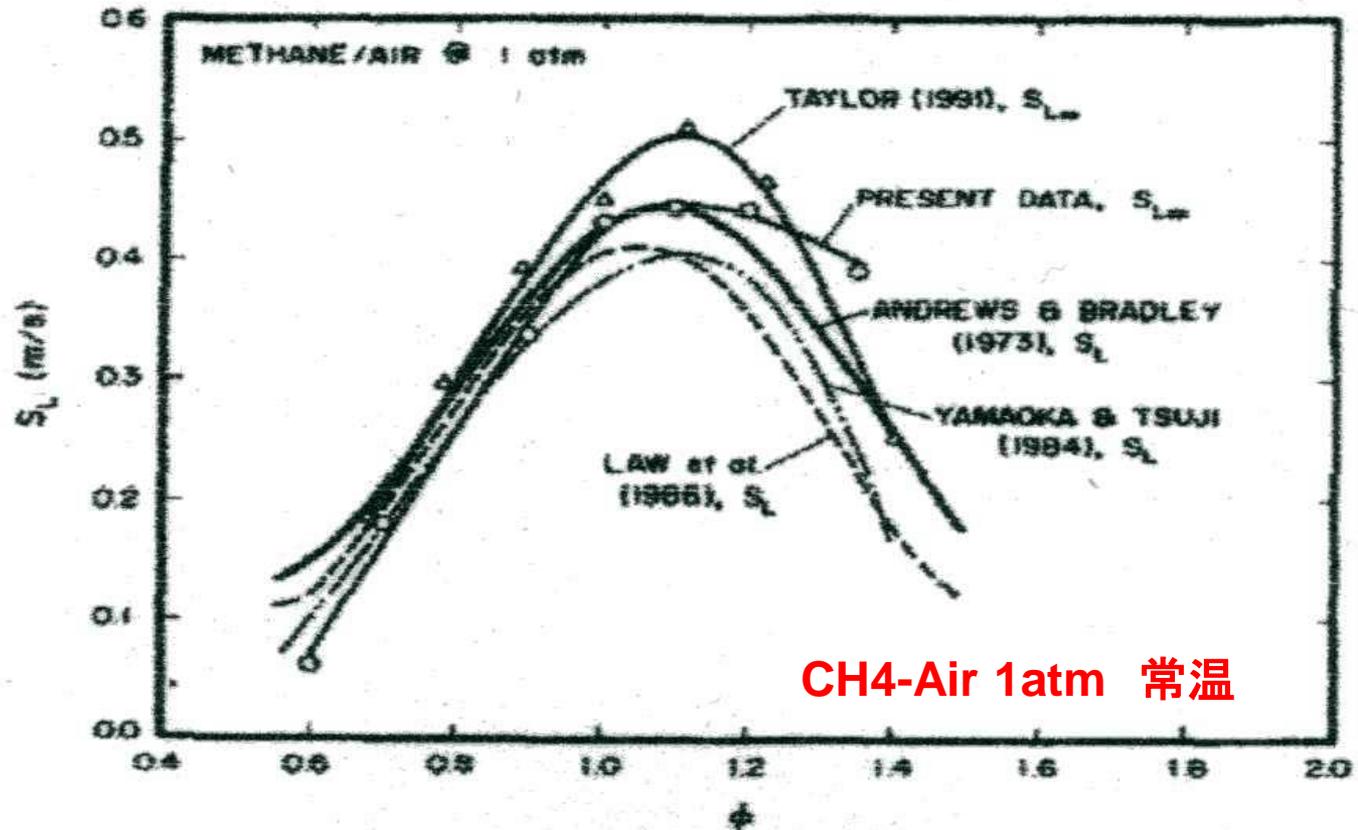


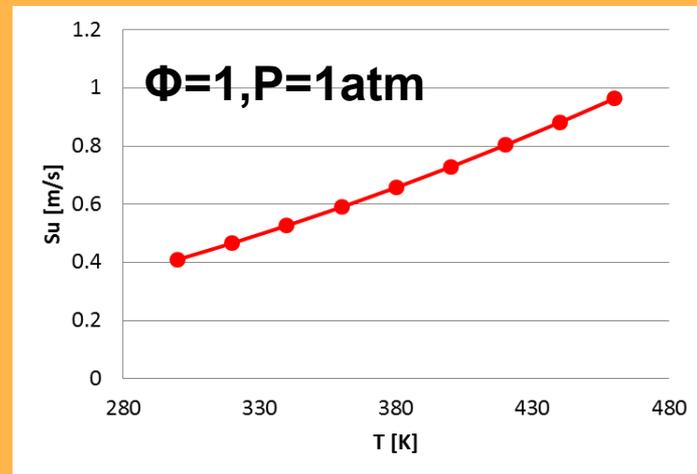
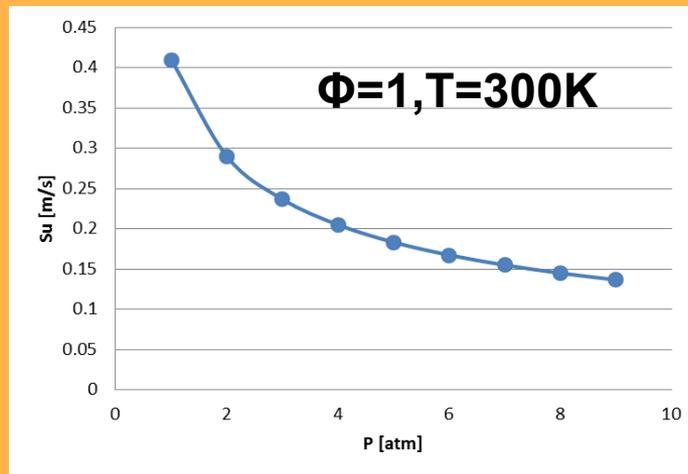
Fig. 4. Laminar burning velocity as a function of fuel-equivalence ratio for methane/air mixtures. Measurements of Taylor [9], Law et al. [13], Yamaoka and Tsuji [18], Andrews and Bradley [25], and the present study.

Su: Gulderson式

$$Su = W\phi^\eta \exp[-\xi(\phi - 1.075)^2] \left(\frac{T}{T_0}\right)^\alpha \left(\frac{P}{P_0}\right)^\beta$$

Methaneの場合

W 0.422;
eta 0.15;
xi 5.18;
alpha 2;
beta -0.5;
f 2.3;



Combustion Properties 2

≡ Su Model unstrained;

層流燃焼速度に対する流れの伸長モデル
以下のモデルを選ぶ。

① unstrained: 伸長影響なし

② equilibrium: 後のスライドで説明

③ transport: Suに関する輸送方程式を解く。

≡ Equivalence Ratio equivalence Ratio [0 0 0 0 0 0 0] 1;

$$\text{当量比 } \phi = \frac{\frac{m_{fuel}}{m_{oxidizer}}}{\left(\frac{m_{fuel}}{m_{oxidizer}}\right)_{stoich}}$$

Suへの伸長率の効果

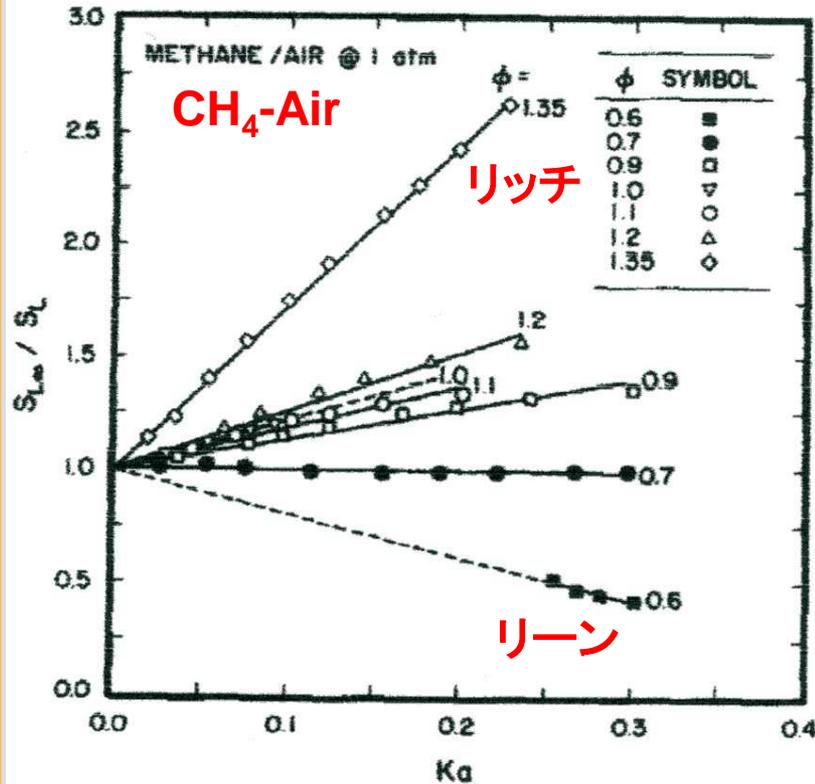


Fig. 8. Laminar burning velocity as a function of Karlovitz number and fuel-equivalence ratio for methane/air mixtures.

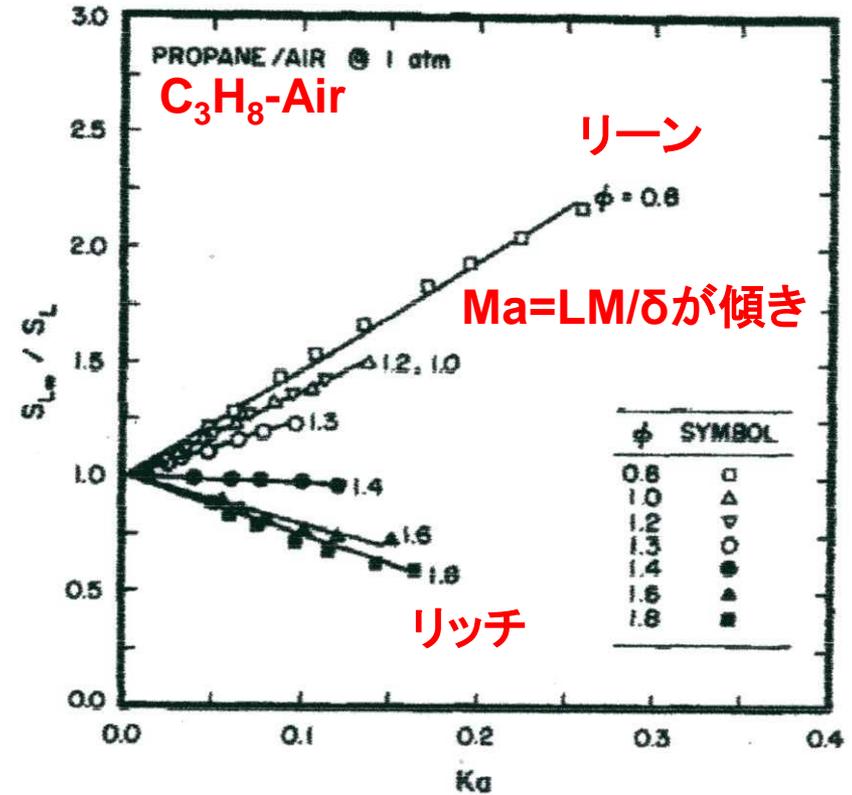


Fig. 7. Laminar burning velocity as a function of Karlovitz number and fuel-equivalence ratio for propane/air mixtures.

$$Su' = Su - LM * (Ka / \delta)$$

δ : 火炎帯厚み

$$Ka = (\delta / \sigma_{Ext})$$

Combustion Properties3

≡ `sigmaExt sigmaExt [0 0 -1 0 0 0 0] 100000;`

流れの伸長率係数。Su modelが②の場合に使う。

$$Su' = Su(1 - \text{sigmas} / \text{sigmaExt})$$

(sigmas:伸長率、LM=1/sigmaExt:Markstein長さ)

今回は反映しない。

≡ `Xi model transport;`

Xi=St/Suのモデルで以下の3つがある。

①fixed : 固定値

②algebraic : 代数モデル

③transport : Xiの輸送方程式を解く

Combustion Properties4

≡ XiCoef XiCoef [0 0 0 0 0 0 0] 0.62;

Xiの代数モデル係数A

$$Xi = 1 + (1 + 2A(0.5-b)) \left\{ 1 + 2A(0.5 - b) * B * \sqrt{\frac{u_p}{(Su - Su_{Min})}} \right\} * R_\eta$$

R_η :Kolmogorov Reynolds number

≡ XiShapeCoef XiShapeCoef [0 0 0 0 0 0 0] 1;

Xiの代数モデル係数B

≡ uPrimeCoef uPrimeCoef [0 0 0 0 0 0 0] 1;

$$u_p = uPrimeCoef * \sqrt{\frac{2}{3}} turbulence \rightarrow k$$

thermophysicalProperties

```
17
18 thermoType      hhuMixtureThermo<homogeneousMixture<sutherlandTransport<specieThermo<janafThermo<perfectGas>>>>>>;
19
20 stoichiometricAirFuelMassRatio stoichiometricAirFuelMassRatio [ 0 0 0 0 0 0 0 ] 17.17;
21
22 reactants
23 {
24   specie
25   {
26     nMoles      1;
27     molWeight   27.62;
28   }
29   thermodynamics
30   {
31     Tlow        200;
32     Thigh       5000;
33     Tcommon     1000;
34     highCpCoeffs ( 3.51012 0.00297541 -1.0275e-06 1.62786e-10 -9.61704e-15 -2458.74 3.18618 );
35     lowCpCoeffs  ( 3.05416 0.00375721 -2.4267e-06 2.26282e-09 -1.03622e-12 -2246.94 5.81032 );
36   }
37   transport
38   {
39     As          1.67212e-06;
40     Ts          170.672;
41   }
42 }
```

当量比=1の混合気として分子量、
Cp等の熱力学物性値を計算(モル分率平均)
GRIMECH3のthermodatを利用
CH4:O2:N2=0.095:0.190:0.7149

空気の輸送係数

thermophysicalProperties

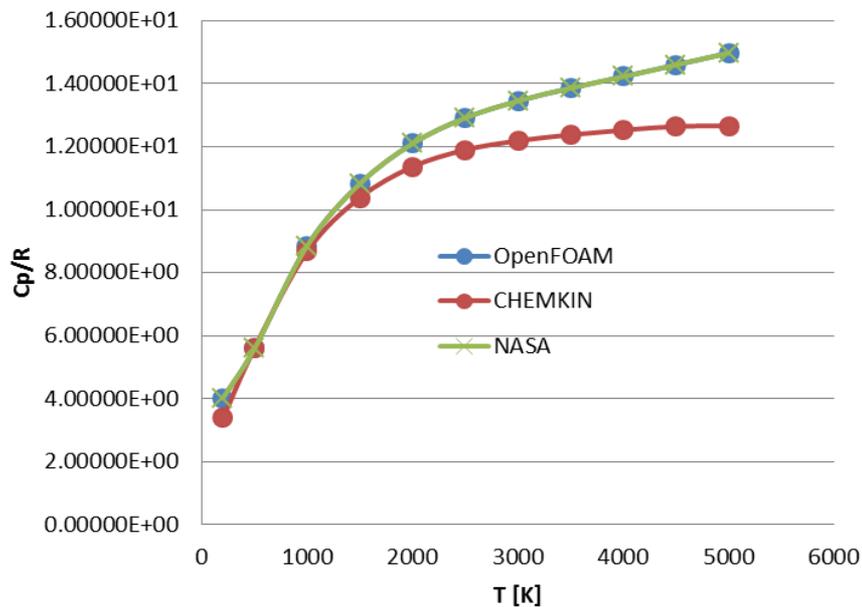
```
44 products
45 {
46     specie
47     {
48         nMoles          1;
49         molWeight      28.55;
50     }
51     thermodynamics
52     {
53         Tlow           200;
54         Thigh         5000;
55         Tcommon       1000;
56         highCpCoeffs  ( 3.02337 0.0019430 -6.93814e-07 1.17760e-10 -7.62884e-15 -10994.9 5.48913 );
57         lowCpCoeffs   ( 3.21823 0.0026100 -5.03022e-06 6.01014e-09 -2.42546e-12 -11067.3 4.28465 );
58     }
59     transport
60     {
61         As             1.67212e-06;
62         Ts             170.672;
63     }
64 }
65
```

当量比=1の生成物として分子量、Cp等の熱力学物性値を計算(モル分率平均) GRIMECH3のthermodatを利用 CO2:H2O:N2=0.095:0.190:0.7149

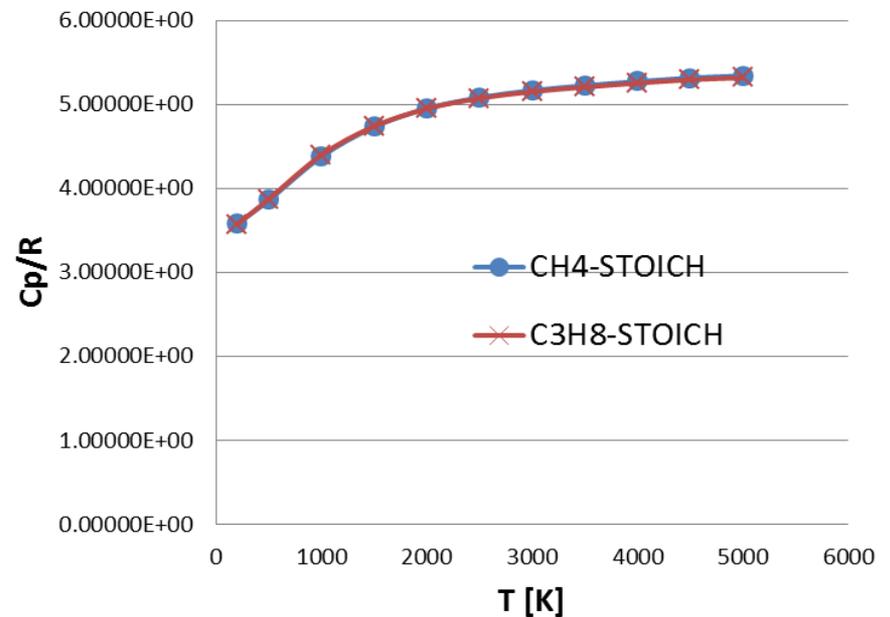
空気の輸送係数

Cp/Rの温度依存性

CH4のCp/Rの温度依存性

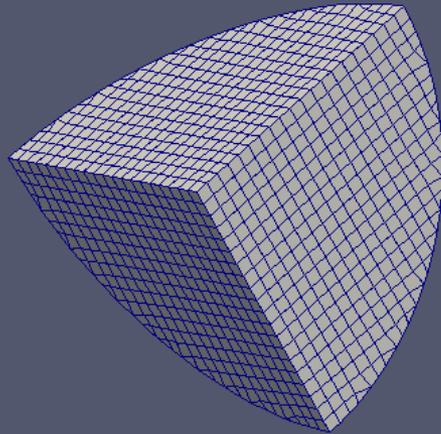


ProductのCp/Rの温度依存性



CH4についてはNASAとCHEMKINデータベースが異なる。

メッシュ



4046Cells

<平面>

`symmetryPlane`

<球面>

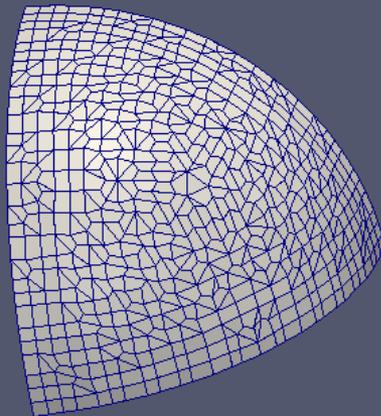
Uは粘着条件。

k: `compressible::kqRWallFunction`

ϵ : `compressible::epsilonWallFunction`

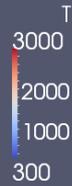
他は`zeroGradient`

低レイノルズ数モデルにも関わらず壁関数を使用⇒影響は今後検証

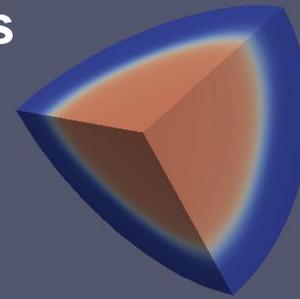


Tの時間変化

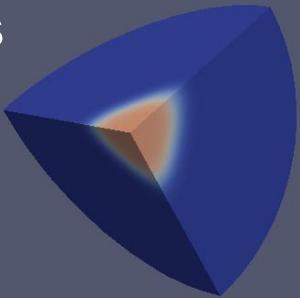
t=0ms



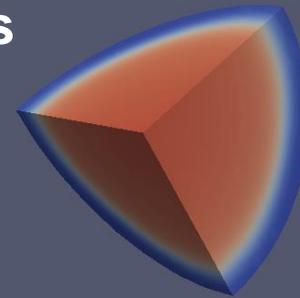
t=30ms



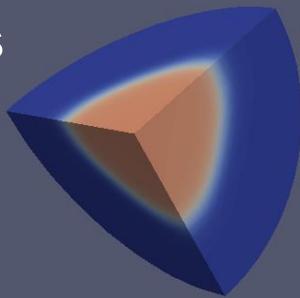
t=10ms



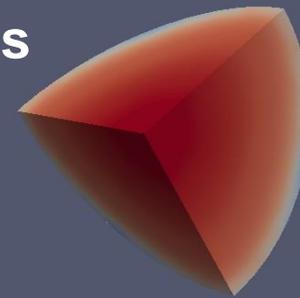
t=40ms



t=20ms

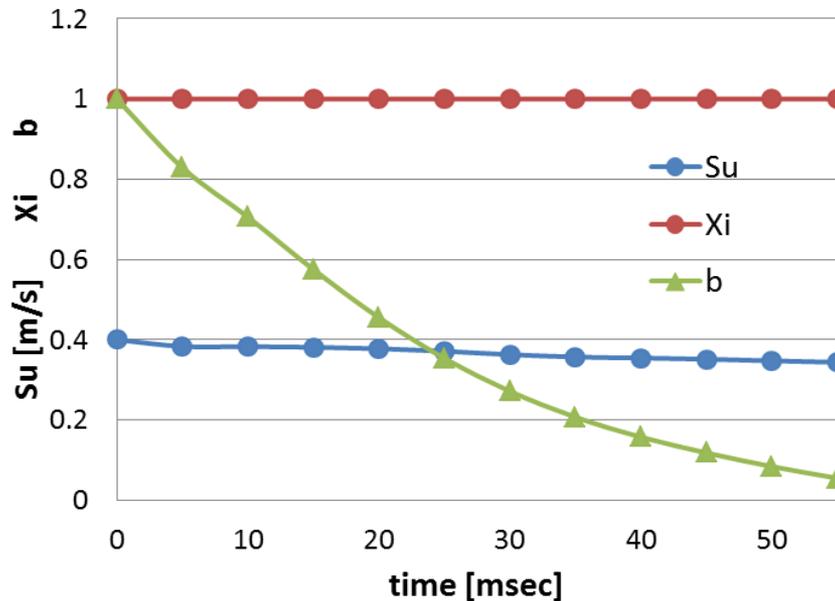


t=55ms

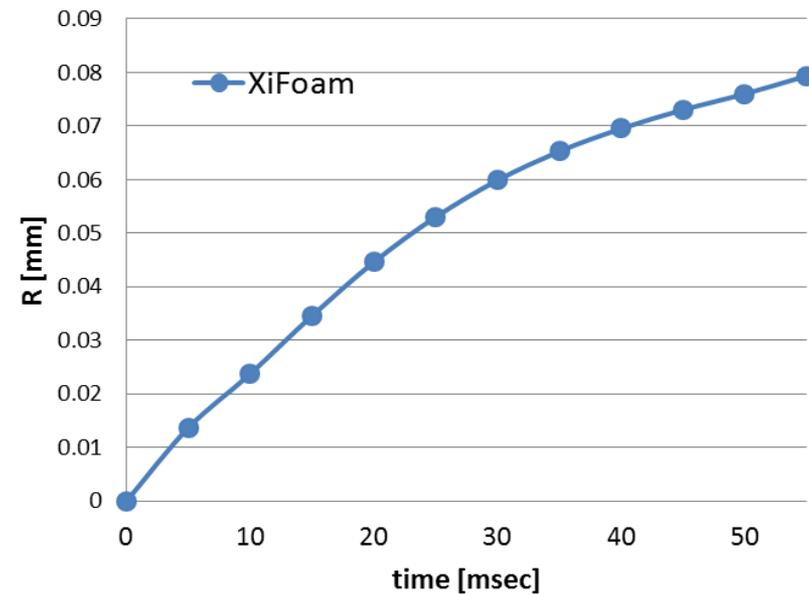


計算結果

CH4-Air stoich



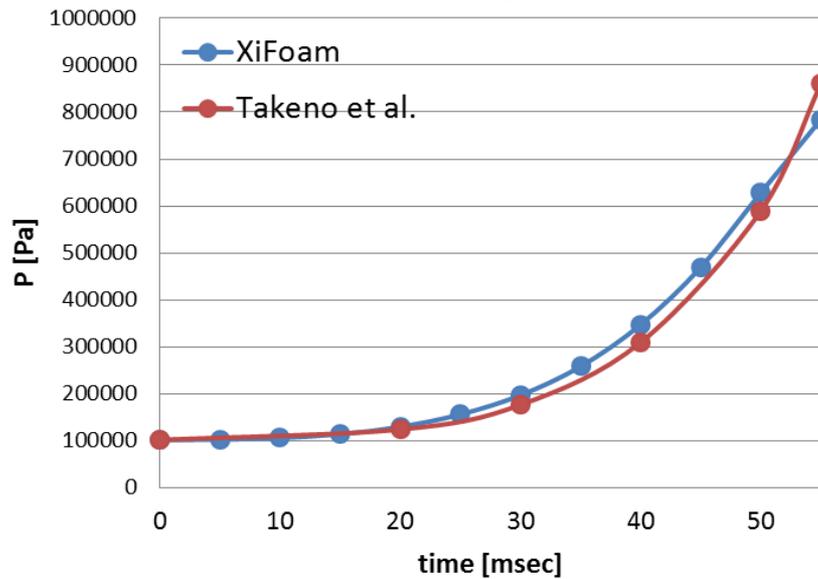
CH4-Air stoich



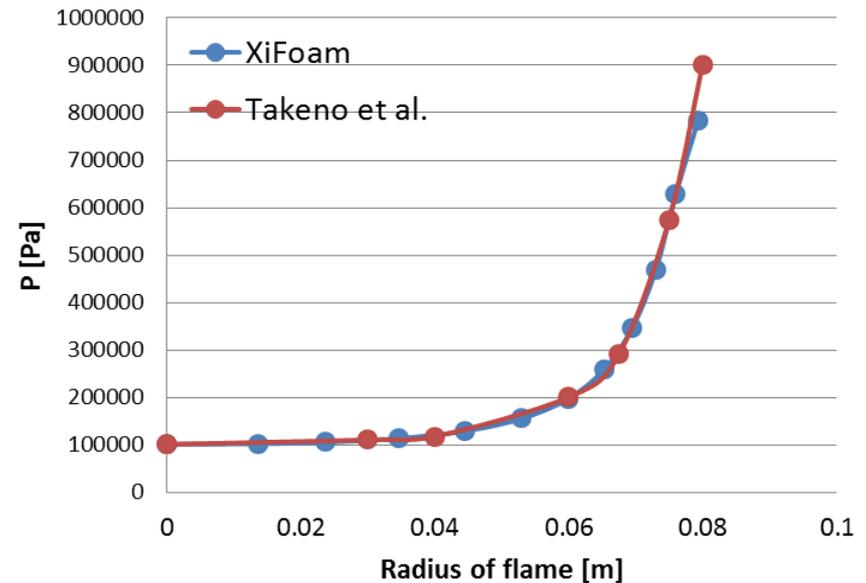
- Xiは1と一定。乱れの効果なし。
- Suは徐々に減速。火炎面(火炎半径)の進展も後半ほど遅くなる。

実験との比較

CH4-Air stoich



CH4-Air stoich



- ・計算のPはx軸の平均値
- ・計算のRはx軸上の $b=0.5$ の地点
- ・圧力履歴は中盤から実験より高く、壁面近くでは逆転するが概ね良好
- ・火炎面はほぼ一致

参考文献

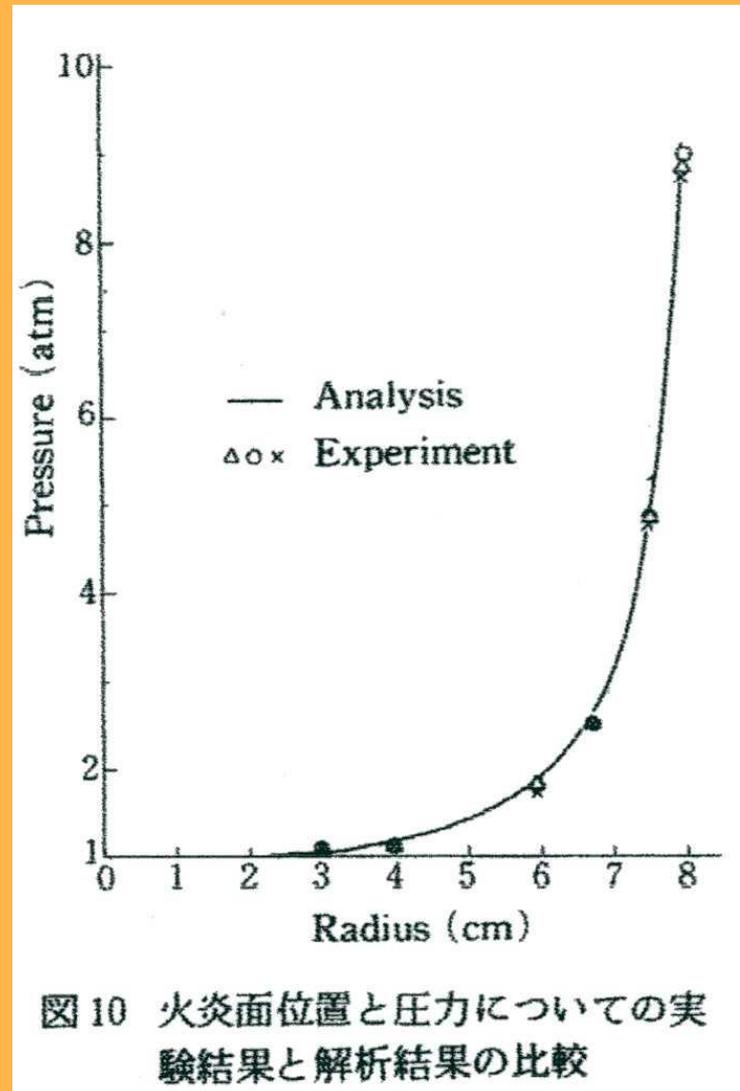
**Ehsan Yasari: Applied Mechanics Department Chalmers University of Technology
「Tutorial XiFoam」 (2010)**

竹野、飯島、球形容器法による燃焼速度の測定、東京大学宇宙航空研究所報告、第17巻第1号B、(1981)、261-271

Bonnie J. McBride, Coefficients for Calculating Thermodynamic and Transport Properties of Individual Species, NASA Technical Memorandum 4513, 1993

L. K. TSENG, M. A. ISMAIL and G. M. FAETH, Laminar Burning Velocity and Markstein Numbers of Hydrocarbon/Air Flames, COMBUSTION AND FLAME 95 410-426 (1993)

竹野らの研究



残差履歷

