OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	回転デトネーションエンジンにおける2次元及び3次元数値解析
Author(s)	吉田, 悠佑; 佐野, 拓海; ジェミンスカ, エディータ
Citation	サイバーメディアHPCジャーナル. 2021, 10, p. 69-72
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/83294
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

回転デトネーションエンジンにおける2次元及び3次元数値解析

吉田　悠佑、佐野　拓海、ジェミンスカ　エディータ
上智大学　大学院理工学研究科　機械工学専攻

1. はじめに

デトネーションエンジンは近年多くの研究者から注目されている。まず、デトネーションとは超音速で伝搬する圧縮波である。その前面は衝撃波となっており、それによって圧力と温度が不連続的に上昇する。結果、化学反応が活性化されてデトネーションが持続される。このデトネーションが持つ熱サイクルはガソリンエンジンに使われるブレイトンサイクルと比較して、熱効率が20%以上も向上することがわかっている[1]。

二重円筒燃焼器内をデトネーションが周方向に伝播することで推力を得るエンジンを回転デトネーションエンジン(RDE)と呼ぶ。RDEは一度の着火で、燃料を軸方向に供給し続ける間、デトネーションを燃焼器内で持続することが可能である。また、複雑な機構を必要としないので小型化が容易である。これらの理由から RDE は様々な分野への応用が期待されている。

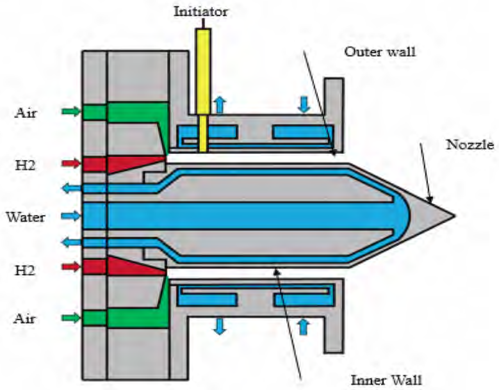
本研究では、2次元及び3次元での数値解析を行い、RDEの性能評価や燃焼器内でのデトネーションの振る舞いと構造を調査した。

2. 計算手法

一般的なデトネーション計算における支配方程式は粘性や熱拡散の影響を無視できるため、オイラー方程式が用いられている。しかし、本研究では将来的に水冷機構を導入するため、粘性と熱拡散の影響を考慮できるナビエストークス方程式を使用している。また、対流項にはAUSUMDVスキームと2次精度の MUSCL を使用し、非定常項には 3 次精度の TVD Runge-Kutta 法、生成項には部分陰解法を用いた。デトネーションは化学反応を伴って伝播するため、化学反応モデルが必要となる。今回は、詳細反応モデルである UT-JAXA モデルを使用した。これらの方程式はすべてFortran上でコード化され、坪井ら[2]によって検証されている。

計算領域は図 1 の上側に示す RDE の燃焼室部分を図1の下側のメッシュとして作成した。計算コストを考慮して、作成したモデルは実機の1/10サイズとなっており、燃焼室後方のノズル部分は定義されていない。これは今後の課題である。燃焼領域の厚さは1 mmである。メッシュの赤色部分は気体の供給口を表し、緑色の場所は気体の排出口を示している。

図2は、図1（下）の3次元の円筒型計算領域を軸方向に切り開き、厚みを考慮しない2次元の計算領域での初期状態を示している。デトネーションは図の下側から上方へ伝搬する。上下の境界は周期的である。左端は燃料供給のインレットで、右端はアウトレットとなる。図中の灰色の部分に段差を設けているのは、伝搬方向を一方向に起こしやすくするためである。橙色の部分は着火領域であり、1 次元デトネーションの計算結果を外挿することで表現している。これは実験を行う際に、デトネーションを燃焼器の外側から挿入することを想定している。



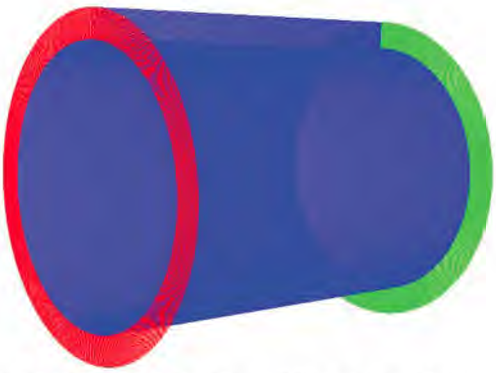


図 1 RDE の断面図（上)、計算モデル（下）

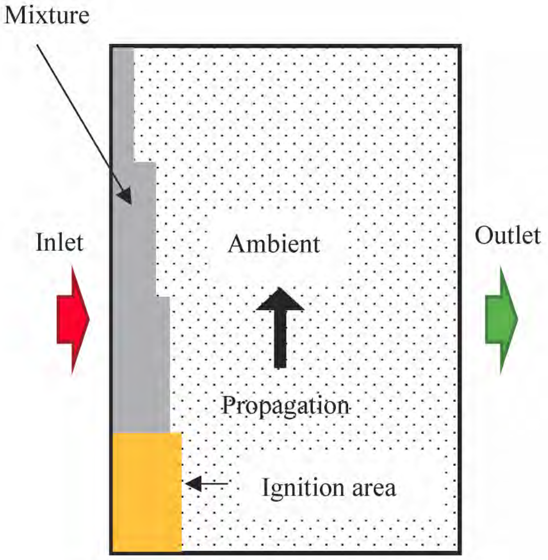


図 2 初期状態

3. 計算結果

今回は比較のために、当量比を 0.8~1.4 の間で表 1 のように変化させ計算を実行した。燃料の供給圧力はすべての条件で 2.0 MPa に設定してある。このシミュレーションにおける燃料は、反応の起こりやすい水素—酸素混合気を使用した。

表 1 計算条件

Number	Mixture type	Equivalence ratio
1.	H_2-O_2	0.8
2.	H_2-O_2	1.0
3.	H_2-O_2	1.2
4.	H_2-O_2	1.4

図 3 は、当量比 1.0 の場合で、3 次元領域における圧力分布を示している。目の粗い等高線は外壁での圧力分布を示し、もう一方は内壁での圧力分布を示している。0.33μs のときと 4.51μs のときを比較すると、内壁と外壁の波前面のギャップが広がっていることがわかる。また、波面の形状が時間経過とともに、直線状態から皺のよった状態に移り変わっていることが確認できた。

図 4 は、外壁の一点での圧力分布を時間経過で当量比ごとにプロットしたグラフである。このグラフから、当量比の変化でデトネーション伝播の傾向に変化がないことがわかる。ピーク値の間隔を比較すると、当量比が高いほど間隔が狭く、低いと間隔が広くなっている。このことから、当量比がデトネーションの伝搬速度に関係していることがわかる。

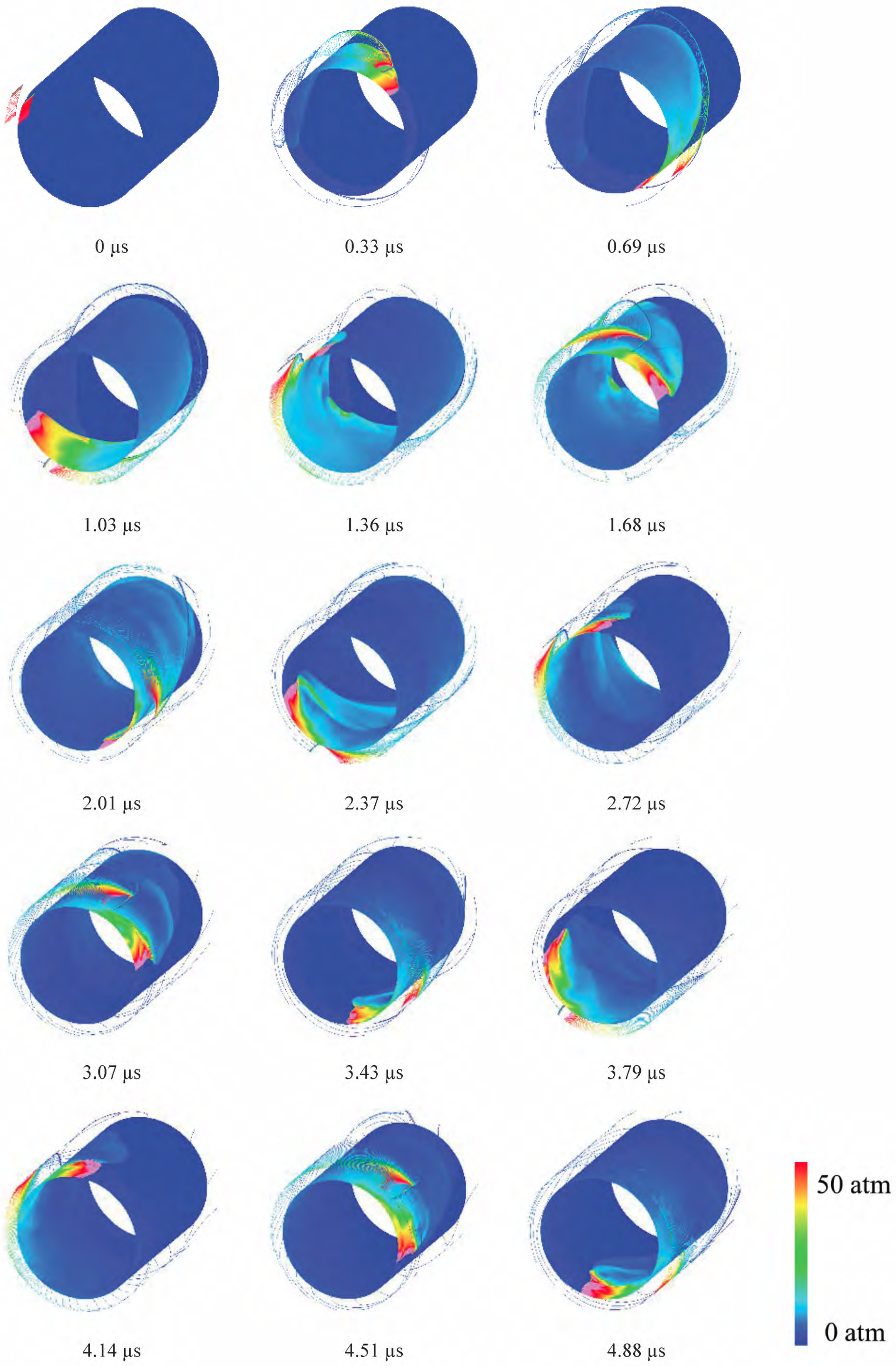

0 μs
0.33 μs
0.69 μs
1.03 μs
1.36 μs
1.68 μs
2.01 μs
2.37 μs
2.72 μs
3.07 μs
3.43 μs
3.79 μs
4.14 μs
4.51 μs
4.88 μs
50 atm
0 atm

図 **3** 圧力分布(φ= 1)

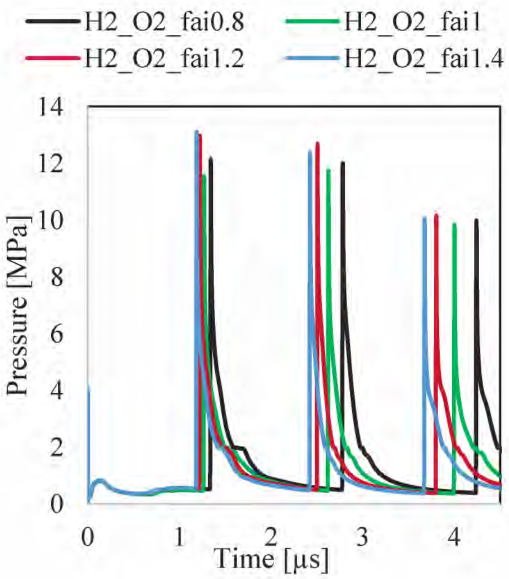


図 4 各当量比の外壁での圧力分布

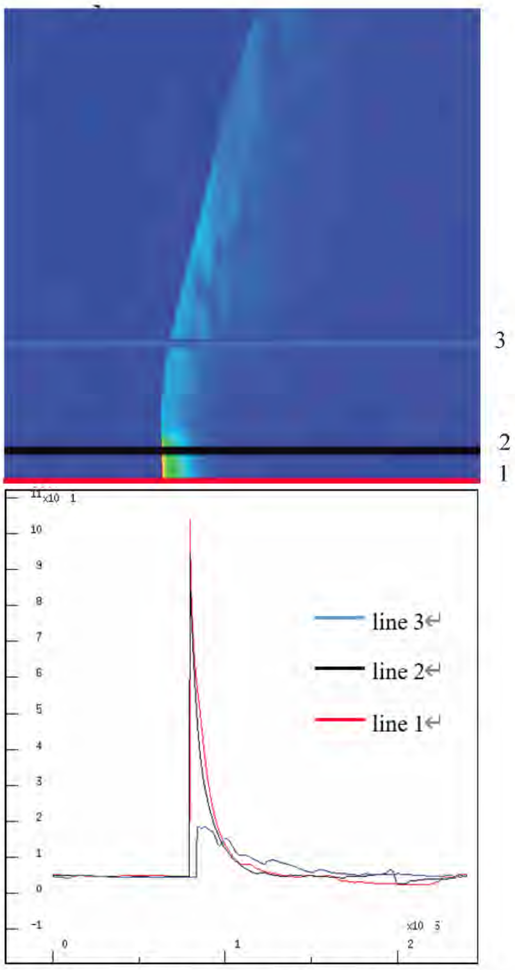


図 5 定義した線の位置（上）、圧力履歴（下）

図 5 は 2 次元解析で圧力履歴を測定した結果である。図 5 の上側では、任意で定義した三本の線の位置を表し、図 5 の下側では、その線上での圧力履歴を示している。赤線(Line 1)はインレット付近での線で、黒線(Line 2)はデトネーション波前面の中央付近を通る線で、青線(Line 3)は斜め衝撃波を通過するように定義した。図 5（下）から、デトネーション波を通過する位置で Line 1 と Line 2 が急増するのに対して、斜め衝撃波を通過するときの Line 3 の上昇率が著しく低いことがわかる。

4. おわりに

今回は、3 次元及び 2 次元領域でのデトネーション計算を行った。将来的には 3 次元領域にノズル部分を取り付け、実機サイズでの解析を行う予定である。さらに、RDE に冷却システムを導入し、熱の影響を考慮した計算も行いたい。

5. 参考文献

[1] P. Wolanski, “Detonative Propulsion,” Proceedings of the Combustion Institute, 34, pp. 125-158, 2013.

[2] N. Tsuboi, A. K. Hayashi, Y. Matsumoto, Three-dimensional parallel simulation of cornstarch-oxygen two-phase detonation, Shock Waves, Vol. 10, Issue 4, pp. 277-285, 2000.