ローテーティングデトネーションエンジンの数値解析: 厚み方向の影響とスケール効果

図斉健太¹、桜澤歩¹、朝原誠¹、山田英助¹、林光一¹、坪井伸幸²

青山学院大学大学院 理工学研究科 理工学専攻 機械創造コース
九州工業大学大学院工学研究院

Numerical Analysis of Rotating Detonation Engine: Effect of Thickness direction and Scale effect

Kenta ZUSAI, Ayumu SAKURAZAWA, Makoto ASAHARA, Eisuke YAMADA, A.Koichi HAYASHI, Nobuyuki TSUBOI

ABSTRACT

The study about the detonation engine which is a high-performance pusher using a characteristic of the detonation is performed with many institutes. RDE is one of the detonation engines where detonation propagates to circumferential direction in annular combustion chamber. RDE can get a continuous thrust and can continue transmitting a detonation. However, there are many problems that should solve sustaining of the propagation. In this study, we consider detonation propagation mechanism of RDE, and the transverse wave dynamics and its radial direction mechanism are important to control detonation propagation. We focus on the transverse wave occurrence and propagation, and its detail of mechanism of radial direction by 3-D numerical analysis. We report the influence of a scale effect provided using a scale based on the actual machine size of the device of a past experiment.

1. はじめに

デトネーションとは、衝撃波と燃焼波が相互に干渉しな がら超音速で伝播する燃焼形態で、この特性を利用した高 性能の推進器であるデトネーションエンジンに関する研究 が、ここ15年程多くの機関で行われている[1-6]. その中 でも特に注目されているものは、管状の燃焼器の軸方向に デトネーションを伝播させて推力を得る Pulse Detonation Engine(PDE)と、二重円環状燃焼器の周方向にデトネーショ ンを伝播させ、軸方向の衝撃波から推力を得る Rotating Detonation Engine(RDE)の2つである.

RDE は、1960 年代に Nicholls ら[7]によって構想から実現 に向けた研究が行われたが、多くの技術的な問題を抱え、 当時はデトネーションの推進機関への応用が非現実的であ ると判断されていた.特に問題視されていた点は、推力の 断続的供給である.その後、精力的な PDE の研究が行われ、 アメリカで飛行試験が行われるまでに至っている.一方、 RDE は、1 回の点火でデトネーションの伝播が維持できる ため、連続的に推力を得ることができるという利点がある. また、高周波数で運転する際の効率が PDE よりも良く、現 実的なデトネーションの推進機関として期待されている. しかし、RDE は未だデトネーションを一方向に伝播させる 制御が困難であり、安定して伝播を維持する条件や燃料の 供給方法などの問題があり、実験や数値解析によって解決 すべき問題が多い.

これまでに著者らは、2次元数値解析による RDE の性能 や、曲管を伝播するデトネーションの波面構造に関する数 値解析を行い、RDE の詳細な伝播機構に関して多くの知見 を得ている.本研究では、3次元 RDE の数値解析を行い、 2次元では見られない燃焼器半径方向の伝播構造に注目し て、デトネーション伝播性能への影響を調査することを目 的とした.さらに、過去に行われた実験装置の実機サイズ に基づいて 1/5、1/10、1/15 の 3 つのスケールで 2次元数値 計算を行い、スケール効果について比較し、その性能への 影響についても報告する.

2. 数値計算法および計算条件

2.1 方程式と数値解析法

支配方程式に圧縮性 Euler 方程式と H₂, O₂, O, H, OH, HO₂, H₂O₂, H₂O, N₂の9化学種の質量保存式を用いた. 数値解法は生成項に Point implicit method, 対流項に AUSMDV scheme,時間積分に Strang-type fractional step method を用いた.化学反応モデルには, Petersen と Hanson [8]による9化学種18素反応の詳細反応機構を用いた.

2. 2 初期条件とモデリング

Fig.1 は左が 3 次元,右が 2 次元の計算モデルである.2 次元は半径方向の厚さを無視した,軸方向に切り開いた状態を計算対象とし,上下の境界を周期境界条件として計算 することによって円筒であることを再現した.左端に混合 気流入孔があり,流入側には着火前にデトネーションを伝 播させる方向に赤色の領域に予め混合気が充填され,残り の青色の領域は空気が充填されている.着火源として図中 水色の箇所に 1 次元のデトネーション計算結果を挿入し, 壁面は断熱壁とした.本解析では,3 次元の二重円環状燃 焼器の計算モデルに,流入と流出に関しての Zhdan ら[9] によって提唱された壁面条件が用いられた.



Fig.1 RDE modeling

3. スケール効果の影響 結果と考察

3.1 スケール効果 圧力履歴の比較

過去に行われた Wolanski らの実験[1]の装置に従い,実機 サイズの 1/5, 1/10, 1/15 サイズの 3パターンを用いて,2 次元 RDE の計算を行った.燃料混合気に H₂/O₂を用いた. Table 1 に実験条件,Table 2 に計算条件を示す.

	G 11.1	C	
l'able	Condition	ot	experimen
I aoic	Condition	OI.	experimen

	Experimental value	
Gas mixture	H_2/O_2	
Outer radius : d_z	46 mm	
Inner radius : d_w	38 mm	
Length : L	30 mm	
Initial temperature	298 K	
Initial pressure	0.1 MPa	

Table 2 Condition	n of 2D	numerical	simulation
-------------------	---------	-----------	------------

Scale	1/5	1/10	1/15	
Gas mixture	H_2/O_2			
Grid number θ-z	$1501\!\times\!751$	$301\! imes\!151$	151×101	
Grid size θ-z	$10 \times 100 \ \mu m$			
Manifold pressure	2.0 MPa			
Manifold temperature	298 K			
Micro nozzle area ratio	0.3			
Stoichiometric ratio	1.0			



Fig.2 Pressure distribution of 1/10 scale

Fig.2 は 1/10 スケールの圧力分布図である. 図の白線は グリッドの線であり,その交点を測定点としている. 図左 側の初期段階ではデトネーション波は形状が定まっていな く,定常にはなっておらず,形状や圧力は安定していない. しかし,時間が経過するにつれ,デトネーションが定常に なってきている事が確認できる.

Fig.3に1/5スケール,Fig.4に1/10スケール,Fig.5に 1/15スケールの圧力履歴を示す.測定点はFig.2で示した 位置で,スケールが異なっても位置はほぼ変わらないよう に測定を行うとした.縦軸をデトネーション圧力,横軸を 時間にしている.各スケールの場合を調べると,周期は異 なるが同様の波形を描いている事が確認できる.また,初 期段階では圧力のピークに乱れがある.これは,Fig.2でも 述べたように,デトネーションが安定しておらず,このよ うな波形になった.今回比較を行う際に用いた波形は,デ トネーションが定常になっている箇所で波形が安定してい る 50µs 以降のデータで比較されている.

Fig.6に各スケールの圧力履歴を比較する為、横軸に時間 tを周期t_{cycle}で割った値,縦軸にデトネーション圧力Pを デトネーションになる手前の圧力 P_nで割った無次元の値を 用いており、1/5、1/10、1/15 スケールと実験値が比較され ている. Fig.6 から分かるように,スケール別でほぼ値に差 は生じておらず、1/5スケールを基準に差をとると、最大 3%の差となる.この事から、スケールが変化しても圧力履 歴に影響は確認出来なかった.また実験値との比較では, 波形のピーク位置が異なるが、ピーク時の値の差は5%程 度と小さい値となった. 波形のピーク位置などが異なった 原因として、今回の数値計算では実験を厳密に模擬出来て いないことがあげられる.実験装置では酸素と水素を別々 に流入しているが、計算では予混合としているためである. 今回,厳密な模擬を行わなかったのは実験との比較をメイ ンとしているのではなく,スケール効果をメインとしてい るためである.



Fig.3 Pressure history of 1/5 scale



Fig.4 Pressure history of 1/10 scale





3.2 スケール効果 デトネーション速度の比較

Fig.7にスケール別のデトネーション速度と C-J 速度,実験でのデトネーション速度を示す.図は縦軸を速度 V,横軸は時間 tを周期 t_{cycle}で無次元化した値を用いた.実験値の幅が広いのは,実験データは一定値ではなく,図の広い範囲でデータが出力されている為,このようになった.図からも分るように,デトネーション速度はスケール効果で変化していない.また,値もほぼ一定であり,定常になっていると見なす事が出来る.



Fig.7 Detonation velocity [m/s]

ここで、実験での速度及び C-J 速度との比較を行う.ま ず実験値だが、実験値の最大が 3400m/s であり、最小が 2900m/s 程度である.今回の計算は 3300m/s 付近となり、 実験値ともほぼ一致した.次に C-J 速度だが、今回の計算 による C-J 速度と実験の C-J 速度は一致をせず、約 9%の差 を生じた.この理由として、実験値を厳密に模擬出来なか った結果ではないかと考えられる.実験では最小 2900m/s 程度となっており、C-J 速度と近い値が出ている.しかし ながら、実験データからも平均 3000m/s 以上のオーバード リブン状態の結果もあり、計算値もそれに近い値を出した 為、本計算を妥当だと判断した.

3.3 スケール効果 推力性能の比較

本研究室では H₂/O₂の数値計算において,比推力の計算 も行われている.そこで,スケールを変更して,比推力の 変化の傾向を調べた.計算条件は Table 2 と同様である. その結果を Figs.8,9,10 に示す.左から,1/15,1/10,1/5 スケールに対する比推力となっている.Fig.8 は燃料ベース の比推力で,Fig.9 は混合気ベースの比推力である.



Fig.8 Fuel based specific impulse [s]



Fig.9 Mixture based specific impulse [s]





Figs.8,9から分かるように、スケールが変化してもほぼ差 は生じていない.また、差が生じている箇所に関しても 0.1%と小さく、スケール効果はないと考えられる.比推力 は推進剤1kgで1Nの力を維持できる時間を示している. ここでスケールが大きくなるにつれ、推力が変化している のかを確認してみる為、Fig.10に単位面積当たりの推力を 示した.これにより、スケールが大きくなると得られる推 力は高くなる事が分かる.つまり、燃焼器が大きいほど得 られる推力も大きくなると言う事である.

この事から,スケールが大きくなるにつれ得られる推力 は大きくなる,しかしながら,燃料の量も増える為,比推 力は変化しない.つまり,スケールが異なっても,1kgで 得られる推力は同じという事であり,スケール効果の影響 は悪い方向には生じていない.

4.3次元計算による厚み方向への影響 結果と考察

RDEのデトネーション波面構造は、2次元数値計算の詳細な結果[3]において、デトネーション波面で横波が伝播し、 衝突、反射を繰り返すことにより安定することが分かっている。そのため、3次元計算結果を表したFig.11に見られ る厚み方向に対しても、同様に横波の干渉が見られること が考えられ、Table3の条件で行った3次元数値解析により 横波の挙動について考察する。

Table 3.	Condition	of 3D	numerical	simulati	or
10010 01	Condition	· · · · ·		CITTICTICT	~

Gas mixture		H_2/O_2		
Inner radius Outer radius		0.4 [mm]	0.45 [mm]	
Grid numb	er $r - \theta - z$	$21\!\times\!1201\!\times\!301$		
Grid size	r - Ө - z	2.5×2×2 [µm]		
Manifold	pressure	7.0 [MPa]		
Manifold te	emperature	300 [K]		
Micro nozzl	e area ratio	0.0657		
Stoichiom	etric ratio	1.0		



Fig.11 3D structure of detonation front



Fig.12 Propagation of transverse waves

Fig.12は、OHの質量分率で内径壁面を、熱放出係数の等 値面でデトネーション波面を表している.Fig.12(a)では、 内径壁面付近の白い点線で囲まれた所に、熱放出が高い箇 所が見られ、局所爆発によるものだと考えられる.局所爆発は横波同士の衝突により発生し、波面を右へ移動する横波と、デトネーション波面と接触面の接する点で衝突している.そして Fig.12(b-c)より、時間経過とともに外径側へ、熱放出の高い箇所が移動していることが分かる.このため、内径壁面で Fig.12 の画面右方向へ先行した横波の存在があることになる.

4.1 未燃ガスポケットの発生

未燃ガスポケットは, RDE では2次元の詳細な解析によ り,未燃ガスと既燃ガスの接触面とデトネーション波面の 干渉する領域で,周期的に発生することが分かっている. そして, RDE におけるデトネーション伝播維持に重要な役 割を果たしていることから,その3次元構造を詳しく解析 する必要がある.

Fig.13では、未燃ガスポケットの構造について3次元計算の結果から内径壁面を2次元的に示した.OH質量分率で燃焼器内径壁面を,白線で圧力の等高線を,左の白い縦線で燃料流入壁面を示した.図では、黒い点線で示したデトネーション波面と、白い点線で示した既燃ガスと未燃ガスの接触面が干渉する領域で、赤い点線で示した箇所に斜め衝撃波が発生する.そして斜め衝撃波後方に未燃ガスが流れ込み、水色の点線で示した溝が生成される.

Fig.14には、(a)内径壁面と(b)外径壁面での未燃ガスポケットの生成サイクルを、OHの質量分率を用いて表している.Fig.14(2)で横波がデトネーション波面から、斜め衝撃波に沿って図面右へ未燃ガスの溝を通過する.そして、Fig.14(3)で横波が通過する際に溝が閉じられ未燃ガスポケットが発生する.この際、未燃ガスポケットの発生と共に横波が発生し、デトネーション波面へ伝播することでデトネーションを安定に維持出来ていると考えられる.

外径壁面で生成される未燃ガスの溝は小さく,内径壁面 では大きい.これは,外径壁面で圧力が高いため,斜め衝 撃波が強くなり未燃ガスが燃焼して溝が大きくならないた めであると考えられる.そのため,外径壁面は横波の通過 により溝が消え,未燃ガスポケットが確認されない.





Fig.14 Unreacted gas pocket at outer and inner wall

Fig.15 では、OH の質量分率で内径壁面とデトネーション 波面を表していて、(a)~(e)で時間経過に従い3次元の未燃 ガスポケット生成サイクルになっている.Fig.15(a)では、 デトネーション波面と接触面の干渉する水色の点線で囲ん だ領域で、Fig.15(b)においては内径壁面から外径壁面にか けて、連続的に溝が発生していることが分かる.Fig.15(cd)で、横波が矢印方向へ伝播して溝を閉じることで未燃ガ スポケットが生成される.Fig.15(e)では波面後方に内径壁 面に接した形の未燃ガスポケットが確認できる.この一連 のサイクルは2次元的に表したFig.14と似ているが、異な る点として溝の傾きが見られる.内径と外径で半径方向に 傾いていることにより、発生する横波の形状に影響を与え る可能性があると考えられる(3次元効果).



Fig.15 Generation cycle of 3D unreacted gas pocket

4.2 横波の発生と伝播

斜め衝撃波後方で未燃ガスの溝が閉じられる際,局所爆 発が発生し横波が生成されることが2次元の詳細な計算に より分かっている.3次元における局所爆発の挙動または 強さを見るため,斜め衝撃波近傍の衝撃波強さを求め,比 較を行った.

デトネーション波面の衝撃波強さ S は Fig.16 に示される 衝撃波前方の圧力 P₀と後方の圧力 P₁により式(1)のように 表す.

$$S = \frac{P_1 - P_0}{P_0}$$
(1)

同様に,斜め衝撃波の強さ S'と既燃ガス領域の衝撃波強 さ S''も求め, Fig.17, 18, 19 で内径,中心径,外径の時間 履歴で,局所爆発による衝撃波強さの上昇を表した. 圧力 の数値計測点は内径,中心径,外径で斜め衝撃波などの波 面構造の位置が異なるため,それぞれ軸方向にずらして数 値計測を行った.



Fig.16 Measure points of pressure







Fig.17, 18, 19を比較すると,局所爆発により衝撃波強 さの急上昇が見られ,図の中心付近のt=3.311[µs]の時点で は3つのグラフのデトネーション波面の衝撃波強さで急上 昇が同時に確認できる.また,未燃ガスの溝を通過するよ うに伝播する横波は,それぞれの計測点をずらして計測し ているので,同様に半径方向に傾いた形状で伝播している ことが考えられる.また衝撃波強さの上昇がほぼ同時であ ることから,局所爆発は半径方向ではどこでも同時に発生 していることが分かる.t=3.316[µs],3.330[µs]で斜め衝撃 波と既燃ガス領域に局所爆発から発生した衝撃波の影響も 確認できる.この局所爆発から発生した衝撃波は,排気側 へ移動し既燃ガスの衝撃波強さを強めている.

衝撃波強さは内径では比較的弱く,外径では強くなって いる.斜め衝撃波強さでは,外径では局所爆発後の衝撃波 強さの急下降後も20以上と大きい値であることが原因で, 未燃ガスが入り込みにくい状態が維持されるため,外径側 で未燃ガスの溝があまり発生しないことが分かる.また, 局所爆発の影響がデトネーション波面の衝撃波強さで一番 早く表れていることから,未燃ガスの溝からデトネーショ ン波面に近い箇所での局所爆発の発生が考えられる.



Fig.20 Transverse wave propagation mechanism

横波の形状を見るため, Fig.20 にデトネーション波面の 圧力分布を後方から示した場合が描かれている. (a)から(d) へ時間が経過していて,図には4つの横波が確認でき,赤 が右へ,青が左へ伝播する.形状は半径方向に傾いて彎曲 している.また横波①に注目すると燃料流入孔のある壁で 反射し,反対方向へ伝播する横波になることが確認できる. 5. 結論

- スケール効果の影響
 - スケールサイズが小さくなるほど I_{spm} は高くなってお り,1/15 スケールで,I_{spm}=343[s]である.
- スケールサイズが小さくなるほど、I_{spf}は高くなって おり、1/15 スケールで I_{spf}=3033[s]である。
- 実機サイズに近くなるほど、単位面積当たりの推力は 高くなり、1/5 スケールで In=15.4[Ns/m2]となる.
- スケールサイズにより圧力履歴や比推力はほぼ変化していないため、スケール効果の影響はない

厚み方向の影響

- 未燃ガスポケットは内径側のみ発生が確認できた.
- 横波も未燃ガスの溝と同様に傾いていると考えられる.
- 斜め衝撃波強さは外径側では常に強いため未燃ガスが 後方へ入り込みにくい状態になっている。

2次元と3次元の比較

- 2次元で得られた未燃ガスポケット生成過程は3次元の内径壁面付近と類似している。
- 3次元だけに見られる特徴として、横波の湾曲が確認 でき、横波発生構造への影響が考えられる。

謝辞

本研究は大阪大学サイバーメディアセンターの大規模計 算機システムを利用して行われました.ここに記して,感 謝の意を表します.

参考文献

- J. Kindracki, P. Wolanski, Z.Gut, "Experimental Research on the Rotating Detonation in Gaseous Fuels-Oxygen Mixtures", Shock Waves, Vol.21, (2011), 75-84
- E.M.Braun, N.L.Dunn, and F.K.Lu, "Testing of a continuous Detonation Wave Engine with Swirled Injection", 48th AIAA2010 - 146, (2010)This is a simple example of the paper format for ANSS 2013
- Y.Uemura, A.K Hayashi, M.Asahara, N.Tsuboi and E.Yamada,"Transverse wave generation mechanism in rotating detonation" 34th International Symposium on Combustion, Warsaw, (2012)
- P.Wolanski, "Debelopment of the continuous rotating detonation engines", 6th Int, On Pulsed and Continuous Detonations, Moscow,(2008)
- M.Hishida, T.Fujiwara, P.Wolanski, "Fundamental of rotating detonations", Shock Waves, Vol. 19, (2009), 1-10
- D.Schwer, K.Kailasanath, "Numerical Investigation of the Physics of Rotating Detonation Engines", Proc. Combust. Inst, Vol.33,(2011)
- J.A. Nicholls, R.E. Cullen, K.W. Ragland, Journal of Spacecraft and Rockets 3, 6 (1966) 893-898.
- E.L.Petersen, and Hanson, R.K., "Reduced Kinetics Mechanism for Ram Accelerator Combustion" Journal of Propulsion and Power, Vol. 15, No.3, (1999),591-600
- S.A. Zhdan, A.M. Mardashev, V.V. Mitrofanov, Combustion, Explosion, and Shock Waves 26 (1990) 210-214.