

終 了 報 告 書

S I P (戦略的イノベーション創造プログラム)

課題名「エネルギーキャリア」

研究開発テーマ名「水素エンジン技術開発」

研究題目「水素噴霧の数値計算の研究」

研究開発期間：平成26年7月1日～平成30年3月31日

研究担当者：内藤 健

所属研究機関：早稲田大学(理工学術院基幹理工学部 機械科学・航空学科)

目次

1. 本研究の目的	1
2. 研究開発目標とマイルストーン	2
3. 研究開発実施内容	3
3-1. 水素と窒素噴流の数値解析モデルの検証	
3-2. マイルドな成層状態におけるエンジン燃焼安定度向上の実験データの解釈	
3-3. 過給の付加を想定した場合の事前検討	
3-4. ノズル径の影響度の解析	
3-5. ノズル長さの影響度の解析	
3-6. ボアサイズの影響度の解析	
3-7. バルブ開口速度の影響度の解析	
3-8. マイルド成層状態によるエンジン NO _x 低減メカニズムの解析	
3-9. まとめ	
3-10. 今後の課題	
4. 外部発表実績	21
5. 特許出願実績	22
6. 参考文献	22

図表一覧

図1. 噴流の数値解析によって得られた濃度の可視化結果 (a) 水素、(b)窒素	
図2. 貫徹距離 (上:水素、下:窒素)	
図3. 時間平均した濃度の空間分布	
図4. 濃度の空間分布の計算例	
図5. 窒素噴霧の数値解析結果と可視化実験結果の比較	
図6. 濃度の時間変動の計算値と燃焼変動低減される時期の関係	
図7. 過給付き条件での計算結果 (上:濃度の空間分布例、下:濃度の時間変化の例)	
図8. ノズル径の影響の計算結果	
図9. ノズル長さの影響度	
図10. ボア径の影響度	
図11. バルブ開口速度の影響度	
図12. 水素マイルド成層化による NO _x 低減機構	

1. 本研究の目的

ガソリンや軽油を用いたエンジンの燃焼・排気性能の研究開発には過去 100 年程の間に膨大な投資がなされ、その熱流体工学的なノウハウ・設計指針の蓄積は日本の貴重な財産と考えられるが、それに比べて、今後、需要が拡大されるであろう水素エンジンの燃焼系技術の蓄積は基本的な知見も含めて不足していると言える。

例えば、水素の燃焼速度は、ガソリンや軽油に比べて桁違いに大きく、それに比例して膨張流速が増大しているが、それによる燃焼室壁面での冷却損失量の増大の程度のレベルはよくわかっていない。

また、水素噴流は気体でもあるために、液体燃料固有のエミッションの課題のいくつかについては問題が大きくならないが、周囲の空気との混合がしにくい可能性もある。

気体噴流の数値解析も過去になされてはきているが、吐出される気体と外気が同じ気体の場合が多い。本研究では、吐出される気体が水素で外部は空気であるため、その二種類の気体の密度差が大きく、しかも、高速であるという独特な難しさがあり、以外なことに、この数値解析はあまりなされてきていない。そのこともあって、水素噴流の貫徹距離や拡散混合状態の理解が進まず、水素の燃焼器やエンジンの今後の更なる改善のための設計指針・アイデアに行き詰まり感がある。

密度差が大きく、しかも、超音速である噴流の定量的数値解析を実現するために、我々が、それまでに考案してきた数値解析方法が有効である可能性を見出した。

本方法は、従来の Large Eddy Simulation (LES) や Direct Numerical Simulation (DNS) であいまいにされてきた課題事項を、理論化 (Naitoh and Shimiya, JJIAM, 2011, Shinumra and Naitoh, JSME International Journal, 2013 等) し、それを土台としてきている。わかりやすい事例で言えば、従来の LES や DNS で Karman 渦を計算してきた多くの研究報告では、形状は上下対称なのにも関わらず、上下非対称な渦が計算される理由を説明できてこなかったが、本手法・理論では、数値誤差論・確率論的微分方程式論・統計物理学の基礎理論に立ち返って、それを解明したものである。

そこで、水素と窒素について、東京都市大学が試作・実験している実機・実寸の噴射弁と定容器での計算を進めてきたが、熱流体物理学的な視点からエネルギー生成機構のメカニズムの解明を実施し、更なる熱効率向上とエミッション低減に関するチーム全体の目標を達成するための具体的な構成改良の提案を行い、更に設計指針を提示する。

2. 研究開発目標とマイルストーン

2.1 平成27年度末マイルストーン

- ・目標 1. 高じょう乱場で水素の拡散を伴う高圧噴射水素噴流と空気の混合の数値計算により、水素噴流の貫徹距離、水素噴流の燃焼室内への拡散状況と燃焼室壁面との干渉状況、噴流の水素濃度分布を明らかにできるようにする。
- ・目標 2. 噴流可視化実験結果と比較し数値計算結果の妥当性を明らかにする。

2.2 平成28年度末マイルストーン

- ・目標. 燃焼室圧力、噴射弁の噴孔数や径、噴射期間、などの条件のバリエーションの内、重要度の高いものについて計算を行い、実験における因子最適化の先行計算を行い、研究開発効率化の支援を行う。

2.3 平成29年度末マイルストーン

- ・目標：H28年度に行った因子最適化の計算結果と、東京都市大学で実施されたエンジン燃焼実験の結果を総合的に検討して、その燃焼実験結果のメカニズム分析を行う。特に、熱効率が向上した燃焼実験については、エミッションデータや圧力上昇度のデータも見ながら、比熱比向上、冷却損失低減、排熱低減などの中でのどの要因が効いているのかについて解明するための分析データを提示する。なお、前年度に見出した噴射弁最大リフトタイミングが燃焼安定度等に与える影響についても、実験と対比しながら、性能向上策を探る。また、燃焼室圧力、噴射弁の噴孔数や径、噴射期間だけでなく、噴孔方向、ボア径などの条件のバリエーション検討も進めて計算を行い、チームの熱効率目標達成の一助とする。

3. 研究実施内容

3-1 水素と窒素噴流の数値解析モデルの検証

3-1-1 シミュレーションの基本的様相

水素と窒素で、貫徹距離に大きな差異はない。これは、従来の実験研究によって知られている事実と定性的に附合している。また、噴霧広がり角（噴流噴射方向と垂直な方向への拡散の程度）は若干異なり、水素の方が拡散しやすいという結果をえた。（図1）この点でも過去の実験データと一致した。

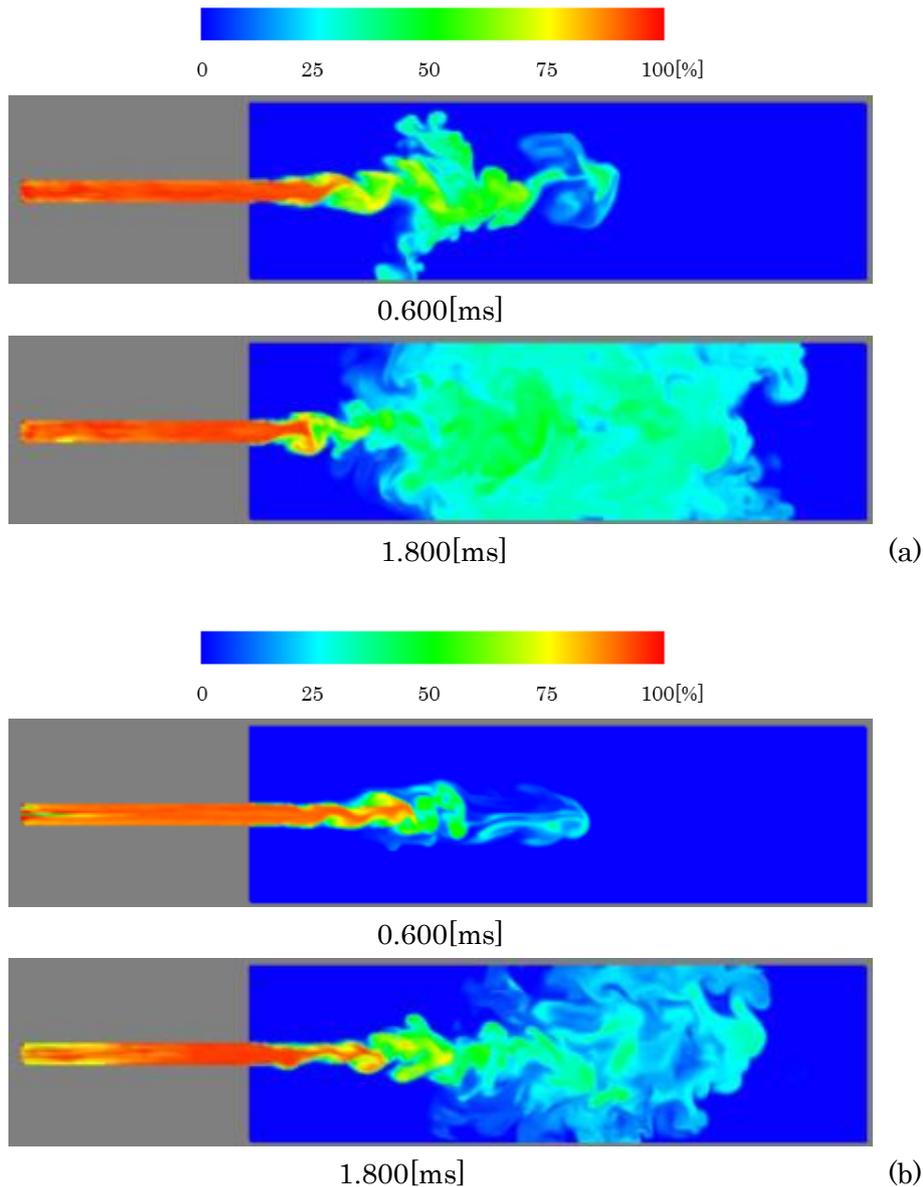


図1 噴流の数値解析によって得られた濃度の可視化結果 (a) 水素、(b) 窒素

3-1-2 水素濃度の空間分布に関する実験検証

密度が大きく異なる気体（水素、窒素）の噴流について昨年度に行った計算から得られた貫徹距離と広がり角度については、浜本らの実験結果とよく一致することが確認でき、論文（SAEpaper）として公

開した。(図2: 計算格子点数は500万点程度ではあるが、燃料濃度が乱流によって変動にことがある程度、計算できているといえる。)

なお、本チームの辻村らが過去に行った実験で得られている「濃度の空間分布」についても、追加で検証を行ったところ、実験データと良い一致が得られた。(図3)

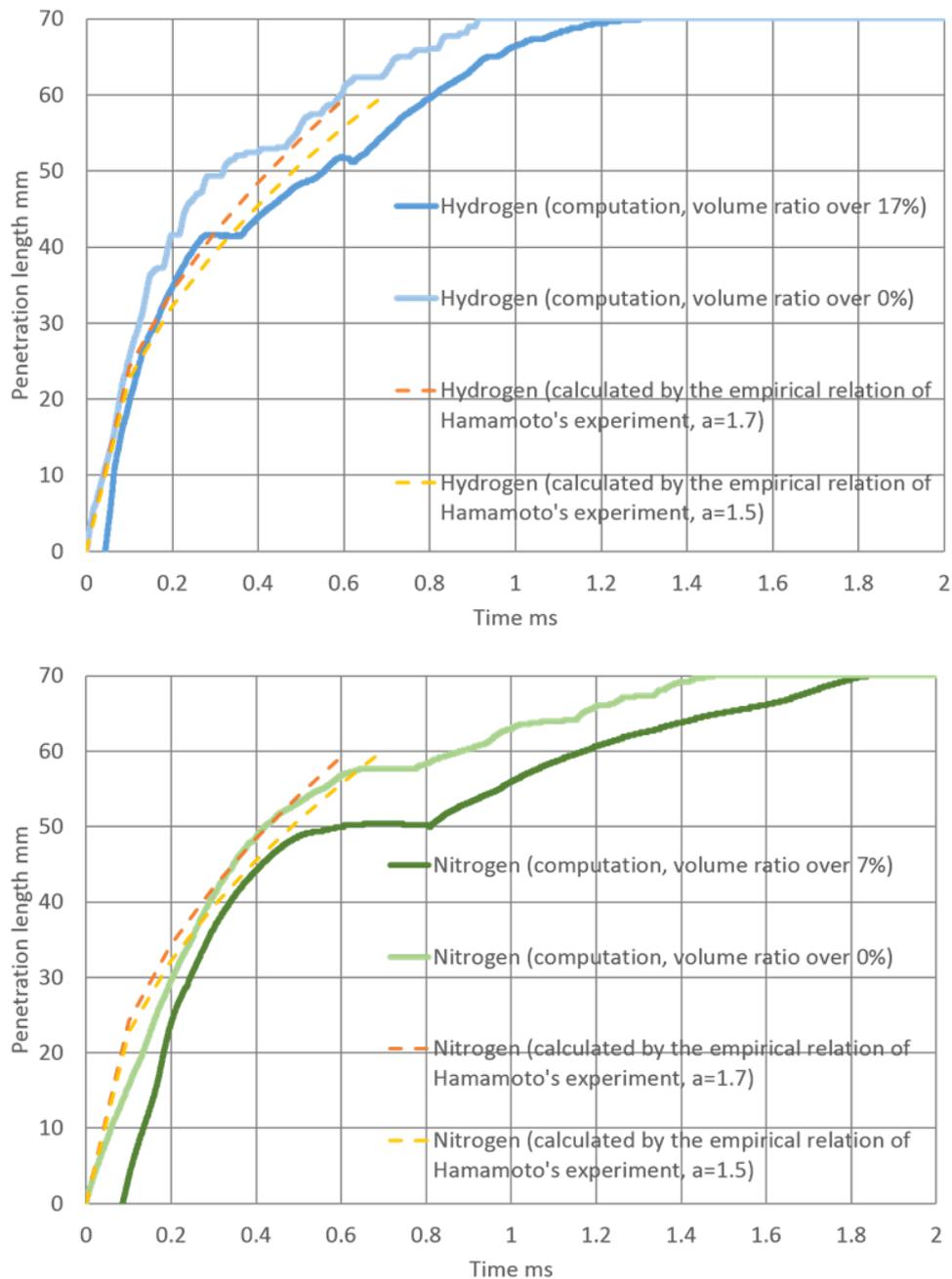


図2 貫徹距離 (上: 水素、下: 窒素) [実験: Hamamoto, Y., Sakane, A., and Ikeda, K., Study of penetration of transient gas jet, Transactions of Japan Society of Mechanical Engineers, 87-0746B, Vol. 53-496 (1987), pp. 3810-3813.]

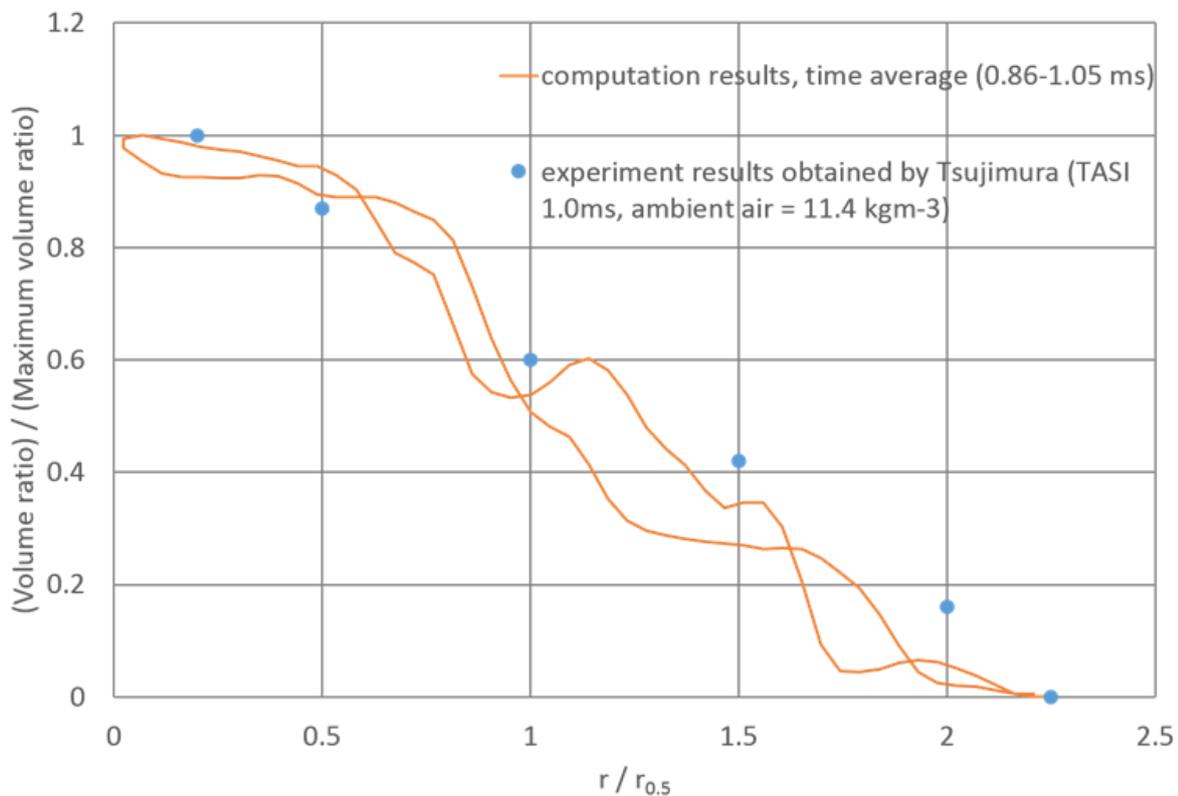


図3 時間平均した濃度の空間分布

3-1-3. 密度の異なる噴流の間欠距離の差異に関する解釈

窒素と水素の密度は、10倍以上異なっている。直観的には、軽い水素噴流は貫徹力が小さいので、貫徹距離（到達距離）が短く、空気と混合しにくいのではないか、と思われる。しかし、にも関わらず、これを、燃焼室内の空気に噴射した場合、噴霧広がり角はある程度変わり、水素の方が噴射方向に垂直な方向に拡散しやすいのにも関わらず、貫徹距離（噴霧到達距離）はほとんど同じ（か、むしろ、水素の方がわずかに長い）ことが、観測事実として知られていた。実験でできる条件範囲は限られており、しかも、高度な計測方法による計測研究でも、この理由は明確にはされてこなかった。

よく研究がなされているガソリン等の液体燃料の噴霧を考えると、燃圧が高い場合には、液粒の平均粒径は小さく、軽くなり、その場合、貫徹距離（到達距離）が小さくなることはよく知られている。

そこで、我々は、液体、気体の噴流の計算の可視化結果を調べた。その結果、液体噴流と気体噴流の大きな違いのひとつは、液体では、噴出した液柱は小さな液粒の群に分裂するので、その液粒どうしは互いに接触しておらず、液体粒子間の運動量の授受はほとんどなされないことに気が付いた。液粒どうしの間には軽い空気しかないためである。これに対して、本研究で行った気体噴流の可視化結果は、噴射された水素の先端面は、乱流渦のために、皺状にはなるものの、噴射後、かなりの時間が経過しても、気体水素は一体化したままで、液体の場合のように、分裂しないことを確認した。（図4）（ブラッコらの報告では、乱流燃焼の皺も島状にはなっていないだろう、という報告もある。）よって、水素が存在する領域は全てひとつに繋がっており、噴射入口の水素噴流の運動エネルギーが、下流まで影響することがわかった。つまり、噴霧広がり角の差異が若干はあるものの、燃料塊がひとつであるために、上流・

下流の圧力差が貫徹距離を決める主要因であるといえる。また、液粒はミクロンレベルであることが多いが、気体の皺の曲率はコルモゴロフスケールに支配されているので、0.1 mm程度である。よって、表面積からみても、液粒の方が大きいので、液粒の方が周囲の空気との摩擦ロスが大きく、失速すると考えられる。

なお、燃焼室圧力が自然吸気の場合で、しかも、噴出穴出口でチョークした条件では、上記のことが言えるが、そうではない場合は調査が必要である。

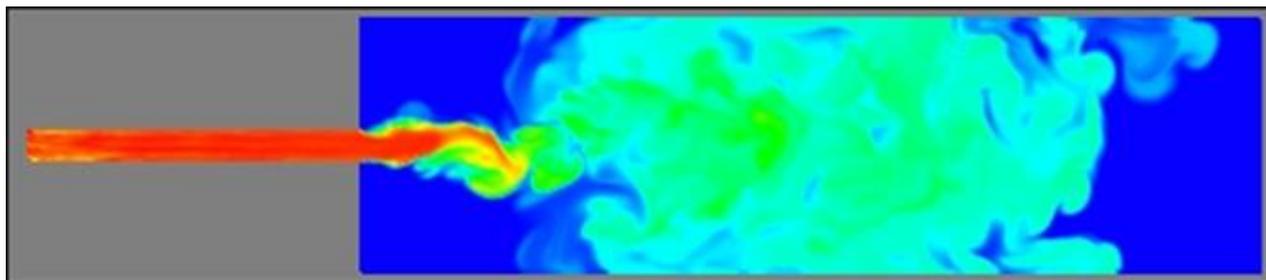


図4 濃度の空間分布の計算例

3-1-4 窒素噴流に関する数値解析と可視化実験の比較検証

窒素噴流の貫徹距離と広がり角について、数値解析と可視化写真（エンジンの圧縮行程終了時付近）は定性的に良い一致を示した。（図5）

窒素噴流の数値解析と実験の比較（数値計算は早大の内藤健ら、 実験可視化写真は東京都市大学の高木靖雄・三原雄司先生ら）

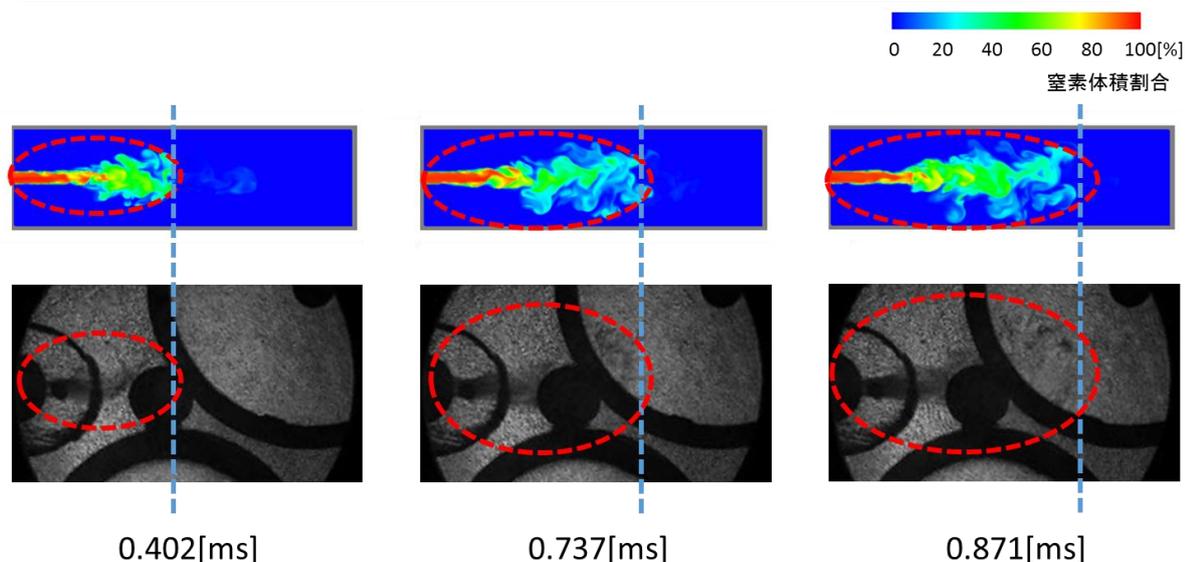


図5 窒素噴霧の数値解析結果と可視化実験結果の比較（上段：数値解析、下段：実験（東京都市大学）

3-1-5 まとめ

水素噴流と窒素噴流の両方について、数値解析を実施し、可視化処理を行った。また、窒素噴霧については、貫徹距離・拡散混合状態を把握し、東京都市大学で実施して得られている可視化写真との比較検証を行った。その結果、シミュレーションが実験とある程度の一致を示すと思われることが分かり、エンジン性能検討を行うという目的に利用できると判断した。

3-2 マイルドな成層状態におけるエンジン燃焼安定度向上の実験データの解釈

東京都市大学が行ってきた燃焼実験データでは、ある噴射時期・点火時期の領域で、急に、燃焼安定度が増し、そこでは、熱効率とNO_xが更に改善できる可能性が見いだされている。

我々の行った数値計算結果と、その燃焼実験データを比較してみたところ、実験で燃焼安定度が増す領域は、燃料噴射開始時期よりも、燃焼噴射中間時の噴射弁開口部面積が最大になった時刻が重要であること示唆することが得られた。(正確に言うと、噴射開始・終了時期ではなく、燃料噴射中期の噴射弁最大開口時刻と噴射終了時刻が、重要であることがわかった。)(図6)

これは、噴射弁の最大開口時期よりも前では、バルブ開口面積が徐々に大きくなるので、上流と燃焼室圧力の差は大きく、噴流は加速しているため、渦や乱流を多く生成するが、噴射弁開口面積が最大時から閉じるまでは、面積が徐々に狭くなっているため、噴流は減速しており、渦や乱流の生成は少なくなつて流動ばらつきがおさまるため、燃焼が安定化される。もっと正確に言うと、噴射開始から、バルブ面積最大時まで生成された渦、乱流は、開口面積が最大時以降は、散逸して急激に消滅する。これは、アンサンブル平均型の乱流モデルをみても、定性的に明らかなことである。また、レシプロエンジン内のLDV,PIV計測を見ると、圧縮行程は乱流が増加する傾向があるのに対し、膨張行程では急激に乱流強度が減衰して、ほとんど、層流に近くなっていくことから理解できる。

重要なことは、この噴射弁開度が最大時から閉時期までの気流の減速(圧力差の大幅な減少)が、貫徹距離に影響するのは、気体噴流の場合のみで、液体噴流ではあまり影響しないことである。そのため、今まで、液体燃料噴霧では、バルブ開口面積が最大になる時刻を管理していない。この知見を裏づける事実をもう一度、述べると、液体噴霧では、液粒に分裂するので、噴射弁内外の圧力差、つまり、噴流の加速・減速状態は、噴射された噴霧に影響しないのであろう。

以上をまとめると、

(a)気体噴霧が連続していることが貫徹距離に大きな影響を及ぼしていること

(b)噴射弁の開口面積が最大になる時以降は圧力差が激減するために乱流強度が弱まることの両者が連動している。

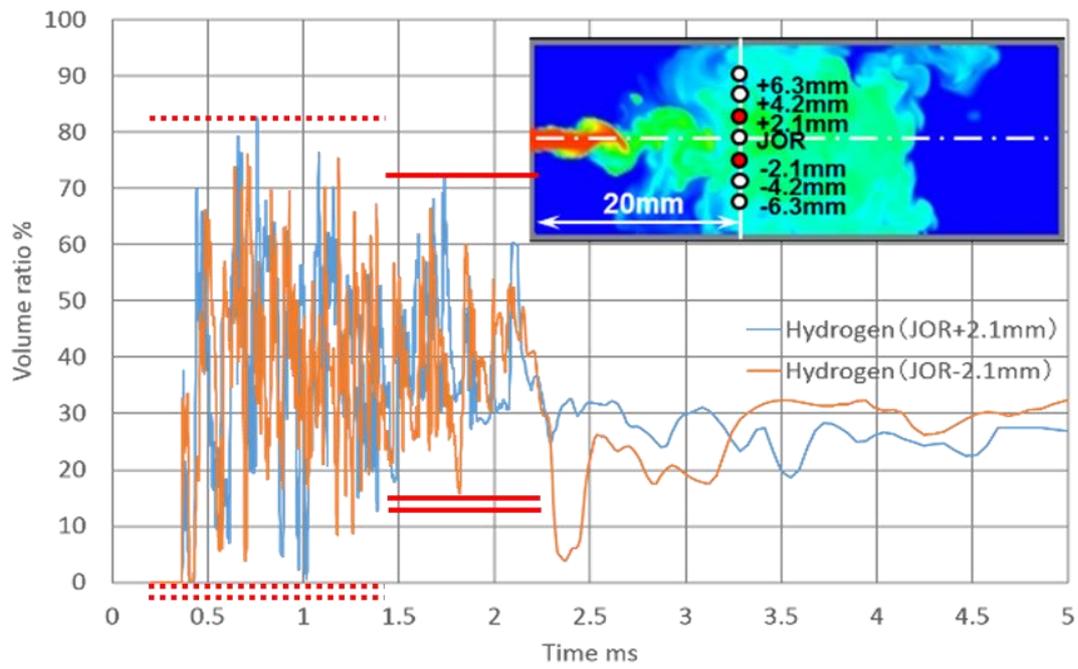


図6 濃度の時間変動の計算値と燃焼変動低減される時期の関係

3-3 過給の付加を想定した場合の事前検討

過給機を付加した燃焼実験の実施前に、過給による燃焼室圧力上昇を加味した数値解析を行い、貫徹距離や混合状態への影響についても検討を行なった。その結果、過給付きの水素直噴エンジンの場合でも、東京都市大学等が見出している「熱効率向上とエミッション低減ができる可能性の噴射時期が存在すること」等が見いだせた。(図7: 2msから3msあたりで急激に濃度の時間変動がおさまっている。)

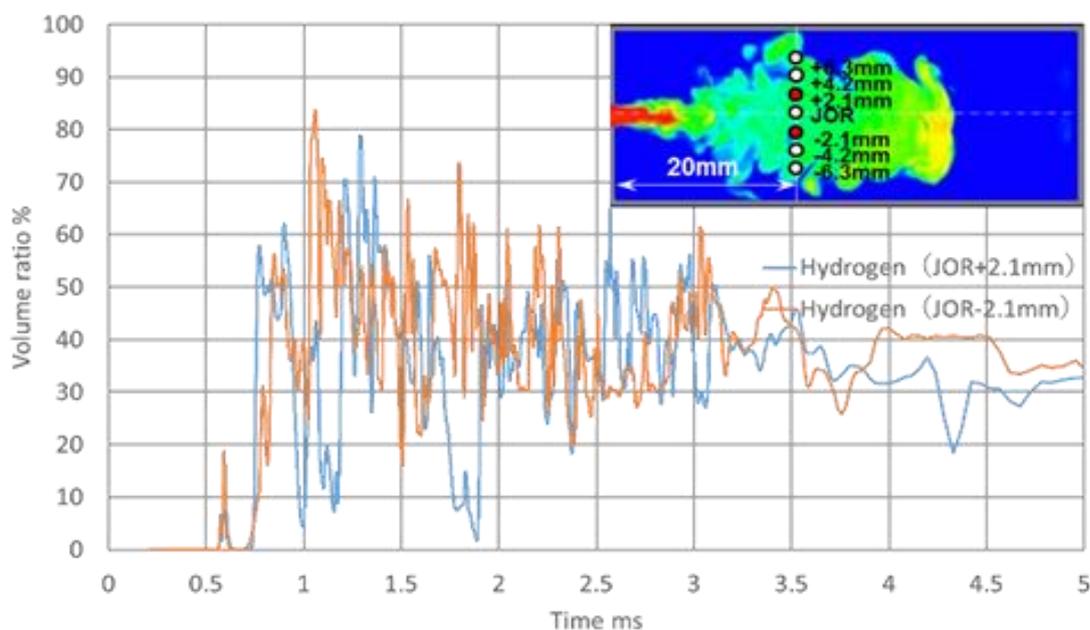
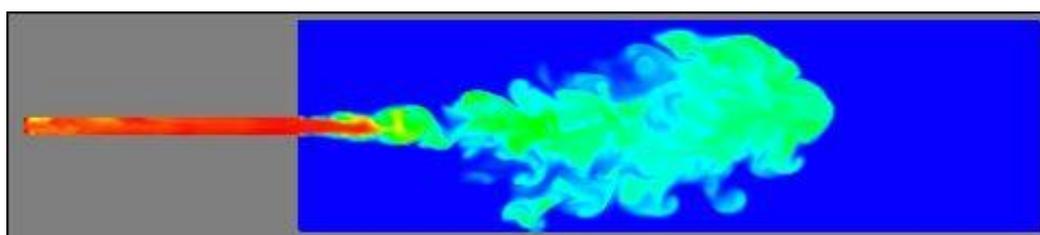
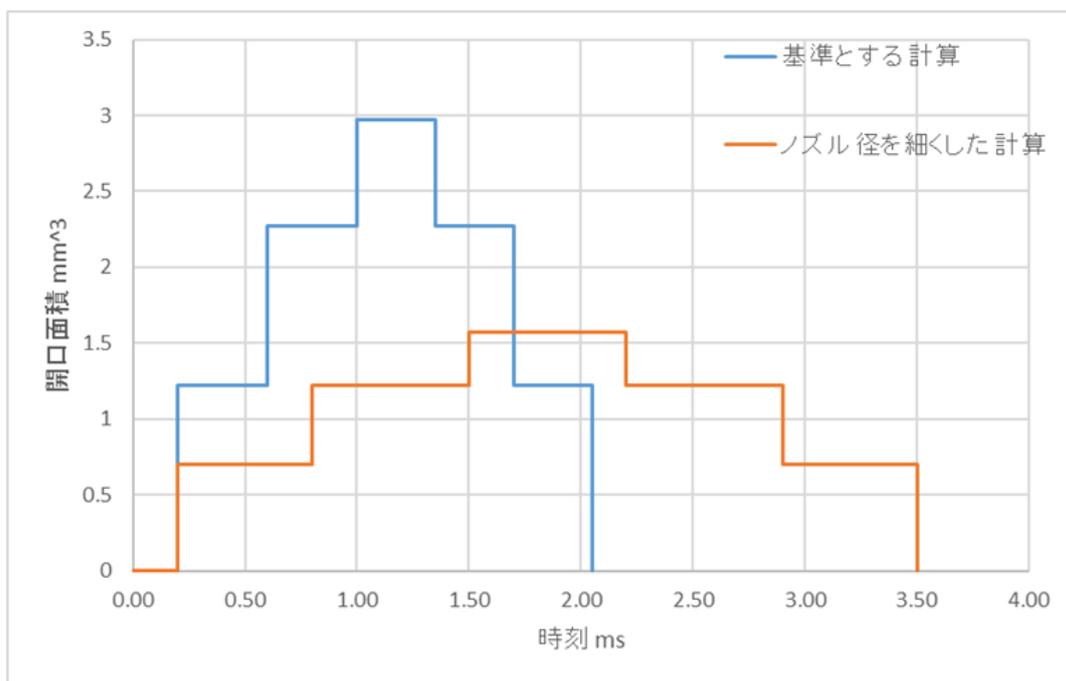


図7 過給付き条件での計算結果（上：濃度の空間分布例、下：濃度の時間変化の例）

エンジンでは、燃料噴流が生成する乱れ以外に、燃焼室内で吸気行程中に生成された乱れ、流れも存在するが、従来の液体噴霧に比べて噴流速度が格段に大きいため、本モデルが有効であると考えられる。この知見も踏まえて、更なるエンジン性能向上策を検討したい。

3-4 ノズル径の影響度の解析

ノズル直径を、基準は2.3mm（上記のケース）、小径化したものは、1.46mmで行った。浜本らの定常噴流の実験では、小径の方が貫徹距離が短くなる傾向があるが、本解析のように、非定常解析では、噴流全体としては、間欠距離は短い、先頭は大きな変化がないことが得られた。(図8)



1.200[ms]

図 8-1 ノズル径の影響の計算結果

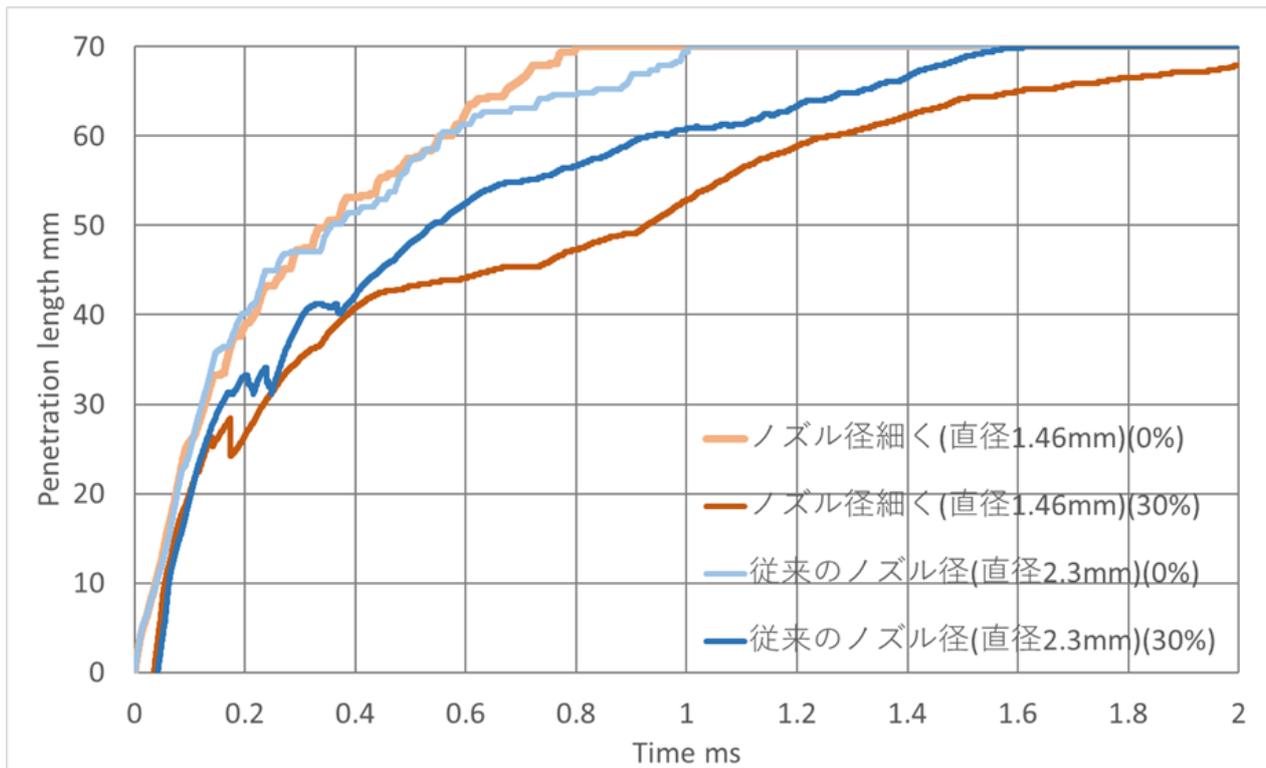
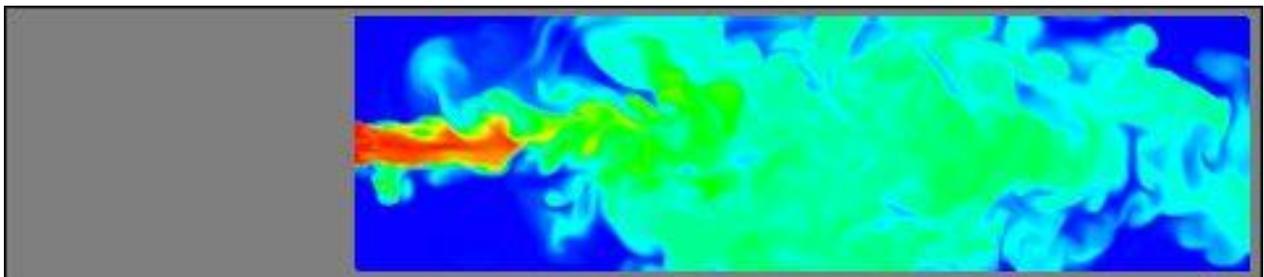


図 8-2 ノズル径の影響の計算結果

3-5 ノズル長さの影響度の解析

基準はノズル長さが 25.9 mm（上記）であるが、ノズル長 0 mm についても解析を行った。その結果、0.2 msec. あたりまでは、貫徹距離に変化はなかったが、それ以後、ノズルありの方が貫徹距離が短くなるのがわかった。（図 9）これは、バルブを閉じていく過程で、ノズル内に負圧が形成され、それが、燃焼室からの逆流を促すためである、と考えられる。この結果から、ノズル部分は短くする方がよいのではないかと考えられる。ただし、この負圧領域は同時に低温部分でもあるので、燃焼室内に低温部分を生成して低 NO_x 効果を助長するためには、価値があるかもしれない、（ノズル内の負圧や逆流は、吸排気系の慣性過給効果として知られている現象であるが、噴射弁内での様相はまだ、あまり、解明されていない。）



1.490[ms]

図 9-1 ノズル長さの影響度

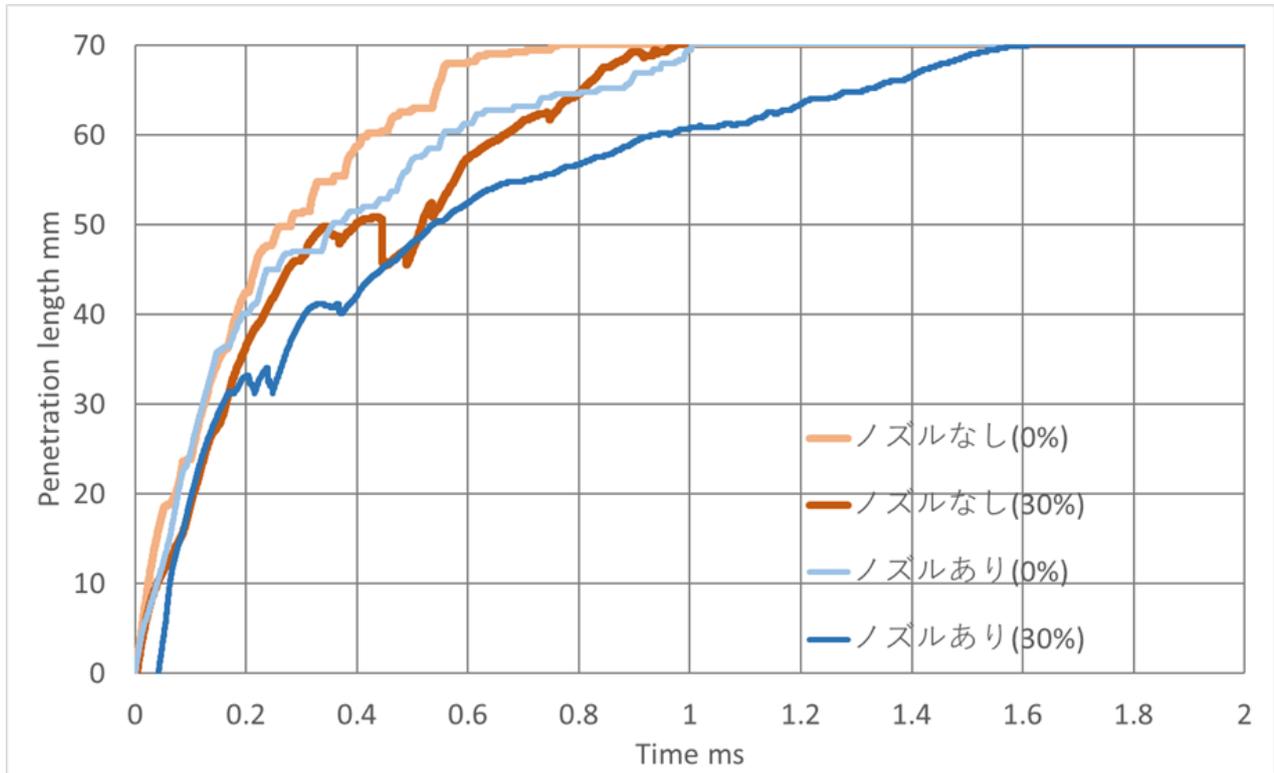
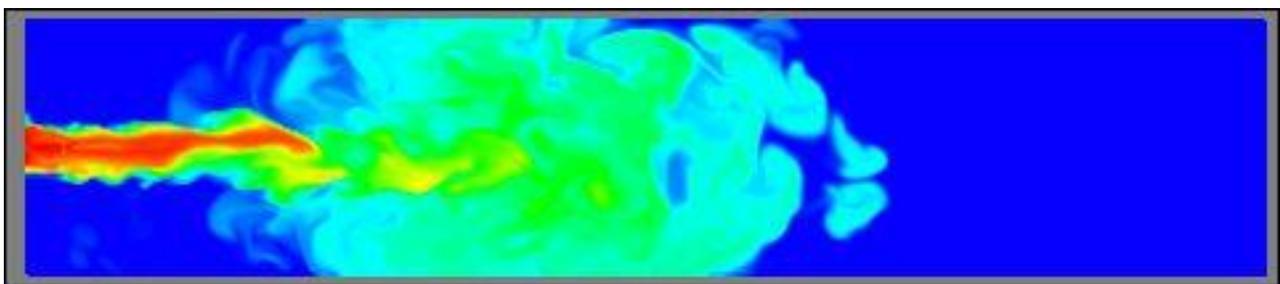


図 9-2 ノズル長さの影響度

3-6 ボアサイズの影響度の解析

今後、大ボア径化を進める可能性があるため、その解析も行った。基準は 70 mm、大ボア径化したものは 100 mm である。70 mm までは貫徹距離に大きな差異は見られなかった。このことは、燃焼室壁の影響が小さいことを意味している。(図 10)



1.200[ms]

図 10-1 ボア径の影響度

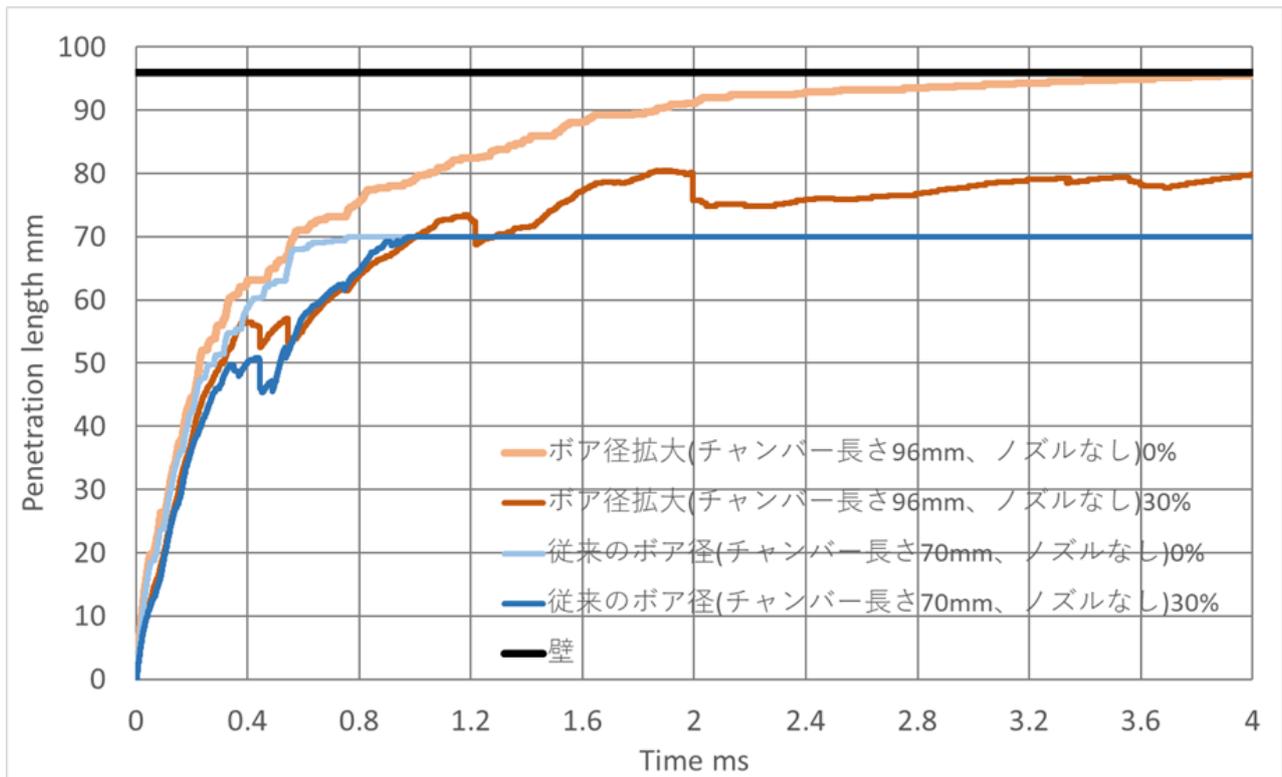


図 10-2 ボア径の影響度

3-7 バルブ開口速度の影響度の解析

バルブを瞬間的に開口した場合の解析も行った。その結果、貫徹距離にたいしては大きな影響は見られなかった。(図 11)

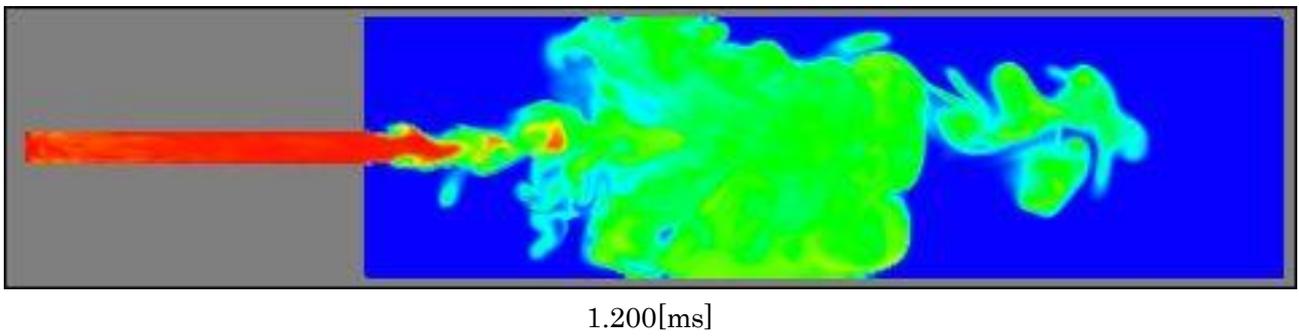
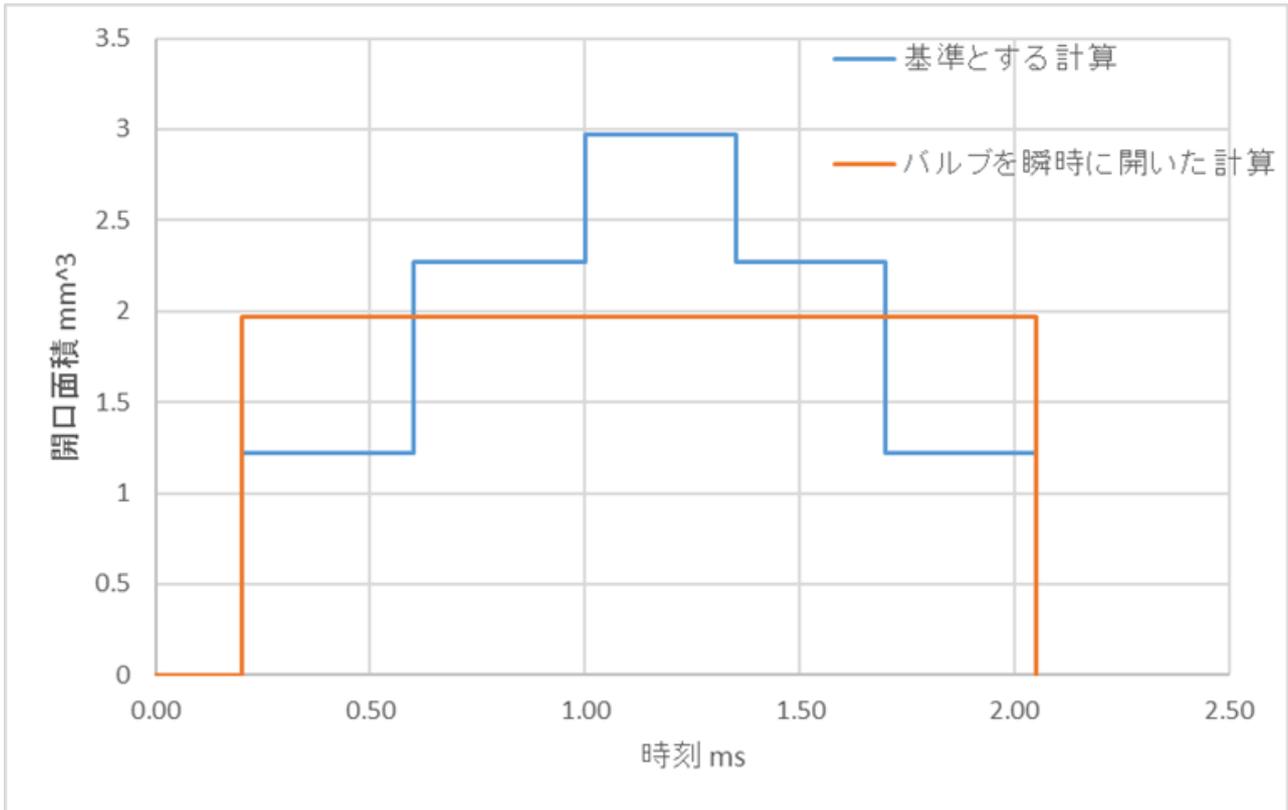


図 11-1 バルブ開口速度の影響度

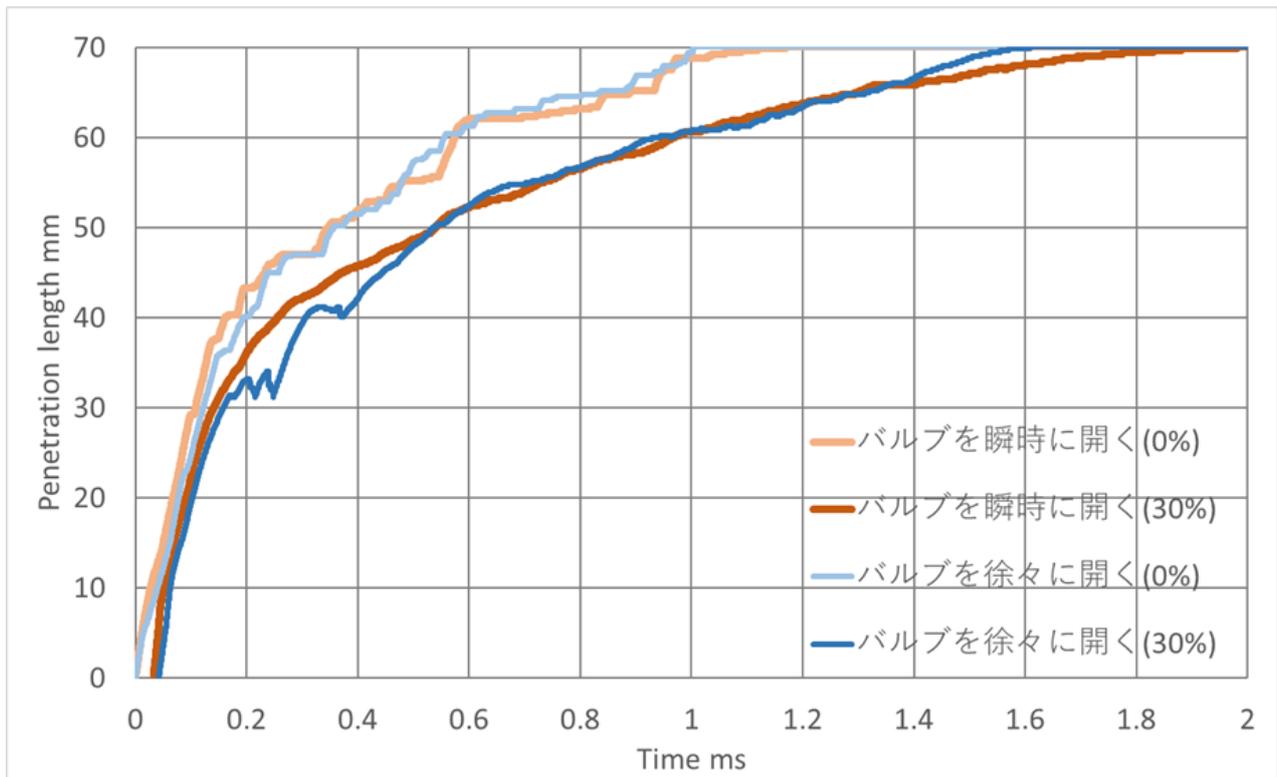


図 11-2 バルブ開口速度の影響度

3-8 マイルド成層状態によるエンジン NO_x 低減メカニズムの解析

数値解析の空気過剰率 λ の空間頻度分布を、よく知られた λ に対するNO_x排出量に関するデータ[村山ら、山海堂]と重ね、NO_x排出量削減のための燃料噴射条件と点火タイミングを検討した。

高木らの水素エンジン実験においても、燃焼時の λ が1~2程度の範囲では、NO_xが大量に生成されるが、それ以上にリーンでは急激にNO_x生成量が低減することが得られた。設定 λ を3.0, 1000rpm, 噴射開始時期 30° BTDC とした実験 (Sato, R., Kojiya, Y., Takagi, Y., Mihara, Y., Tomita, E., Kawahara, N., Improvement of Thermal Efficiency and NO_x Reduction by Controlling Jet Geometry and its Combustion Characteristics in Direct Injection Hydrogen Engines, pp. 1697.2017) では、NO_x排出量が400ppmと非常に低く抑えられることが分かっている。

本シミュレーションの解析結果を使って、横軸 λ 、縦軸に頻度のグラフを、時刻ごとにかいてみると、ほぼ同じ結果が得られ、上記の高木らのマイルド成層化は低NO_x効果があることが確認できた。(図12) なお、先に述べたように、燃料濃度の不安定性もなくなるタイミングであるので、燃焼安定度も確保できると考えられる。

したがって、この計算は同エンジンにおいて運転条件を変更したときのNO_x排出量の簡易予測に適用でき、同エンジンの今後の開発に寄与することが期待できる。

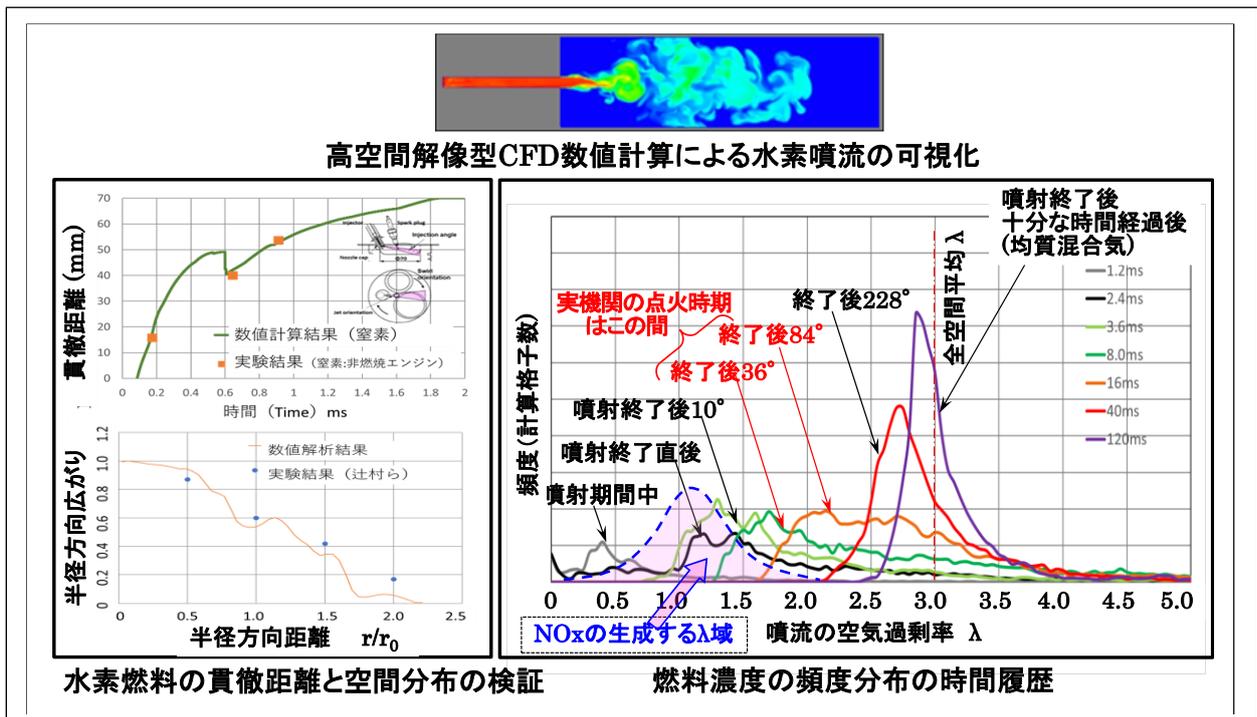


図12 水素マイルド成層化によるNO_x低減機構

3-9. まとめ

(1) シミュレーションモデルの検証

従来の定常噴流の実験データやエンジン内噴流の可視化データを用いて、10倍以上の密度が異なる気体噴流・2倍以上の燃焼室圧力変化・噴流ノズル径・ボア径等について、高精度シミュレーションを行い、貫徹距離について比較したところ、良い一致を得た。(なお、水素の一回の総噴射質量をほぼ一定にして行った。)

また、高木らの水素エンジンの燃焼実験結果(燃焼安定度と低NO_x性)を、かなり定量性を持って説明することもできた。

本シミュレーションモデルは、従来の Large Eddy Simulation (LES)や Direct Numerical Simulation(DNS)であいまいにされてきた問題を、新たな理論(Naitoh and Shimiya, JJIAM, 2011, Shinumra and Naitoh, JSME International Journal, 2013等)で解決し、それを土台としてきている。わかりやすい事例で言えば、従来の LES や DNS で Karman 渦を計算してきた多くの研究報告では、形状は上下対称なのにも関わらず、上下非対称な渦が計算される理由を説明できてこなかったが、本手法・理論では、数値誤差論・確率論的微分方程式論・統計物理学の基礎理論に立ち返って、それを解明したものである。

したがって、この計算は同エンジンにおいて運転条件を変更したときのNO_x排出量の簡易予測に適用でき、同エンジンの今後の開発に寄与することが期待できる。

3-10. 今後の課題

今後も、東京都市大学や産総研等と連携を取って、研究を進めていく。残る大きな課題のひとつは、大幅な断熱化であろう。

4. 外部発表実績

(1) 論文発表

<査読付き> 2件

Remi Konagaya, Ken Naitoh, Kohta Tsuru, Yasuo Takagi, Yuji Mihara, “Unsteady three-dimensional computations of the penetration length and mixing process of various single high-speed gas jets for engines”, SAE Technical Paper 2017-01-0817, pp.1-18. 2017. (査読有り, トリプルレフェリー)

※SAE World Congress Experience 2017, Detroit, MI, 2017.4 で口頭発表

Remi Konagaya, Ken Naitoh, Takuma Okamoto, Kohta Tsuru, Yasuo Takagi, Yuji Mihara, “Computation of Turbulent Mixing Process of Single High-Speed Hydrogen Jets”, APISAT 2016, Proceedings of the 2016 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology F1-1, Toyama, 2016.10. (軽い査読有り)

(2) 学会、展示会等発表

<招待講演> 国内0件、海外0件

<口頭発表> 国内1件、海外1件

Remi Konagaya (発表登壇者), Ken Naitoh, Takuma Okamoto, Kohta Tsuru, Yasuo Takagi, Yuji Mihara, “Computation of Turbulent Mixing Process of Single High-Speed

Hydrogen Jets” , APISAT 2016, the 2016 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology F1-1, Toyama, 2016.10

Remi Konagaya (発表登壇者) , Ken Naitoh, Kohta Tsuru, Yasuo Takagi, Yuji Mihara, “Unsteady three-dimensional computations of the penetration length and mixing process of various single high-speed gas jets for engines” , SAE World Congress Experience 2017, Detroit, MI, 2017.4.

<ポスター発表> 国内0件、海外0件

<展示会、ワークショップ、シンポジウム等> 国内0件、海外0件

(3) プレス発表

・2018年5月18日「大型発電用、高出力・高熱効率・低NO_x水素エンジンの燃焼技術を開発 ～地球温暖化など大気環境保全への貢献も期待～」

(4) マスメディア等取材による公表

なし

5. 特許出願実績

	出願番号	発明の名称	出願年月日	出願人
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				

6. 参考文献

Sato, R., Kojiya, Y., Takagi, Y., Mihara, Y., Tomita, E., Kawahara, N., Improvement of Thermal Efficiency and NO_x Reduction by Controlling Jet Geometry and its Combustion Characteristics in Direct Injection Hydrogen Engines, pp. 1697.2017.

