

単体熱効率 60%超の究極エンジン(Fugine)実現に向けて！

第二報：多数ノズルからの一点集中衝突噴流圧縮エンジンの基礎燃焼実験結果

早稲田大学 理工学術院 基幹理工学部 機械科学・航空学科 内藤 健

要旨： 独自に提案してきた、多重パルス噴流衝突圧縮によるエンジン（図 1-3 と文献[1-3]：基本原理理論プレスリリース済）について、熱流体物理学に基づく理論やスパコンシミュレーションによる検討を行うとともに、並行して3つのプロトタイプエンジンの基礎燃焼実験を行なったところ、「圧縮と燃焼」を示す圧力・温度上昇データが得られた。サイズによらず、自動車やロケット等の多用途で、原理的ではあるが、燃焼騒音レベルを維持したままで、従来エンジンを凌駕する高熱効率の見

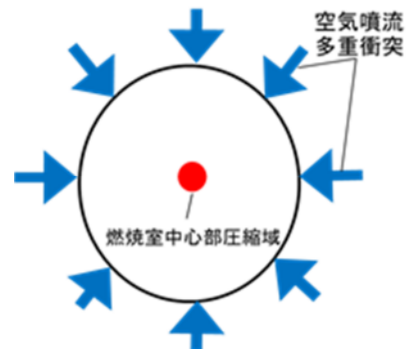


図 1：一点集中衝突噴流圧縮原理
(燃焼後の高温ガスと燃焼騒音も中央に封鎖)

通しを得た。[図 4 と文献 4-13] なお、利用可能なレベルの圧力上昇が得られるとともに、100年以上の間、実現されてこなかった「ほぼ完全な壁面断熱効果」の可能性を示唆する結果（燃焼室壁温が大気レベルのままで上昇しないデータ等）も得られはじめています。以下にその詳細と今後の計画を示す。

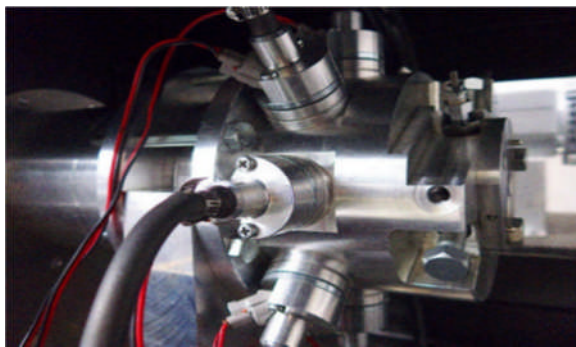


図 2 航空宇宙用プロトタイプエンジン（一号機）

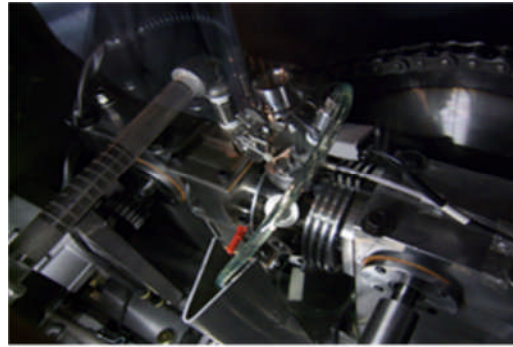


図 3 地上用プロトタイプエンジン（二号機）

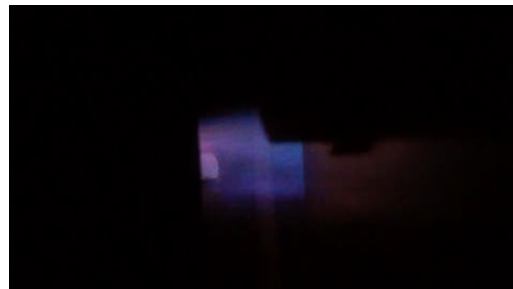


図 4 航空宇宙用プロトタイプエンジン始動時の燃焼発光例

(0) はじめに：

私が若い頃から意識してきたエンジンの大きな問題は二つある。ひとつの問題は、従来のバイクや自動車用等のガソリンエンジンの熱効率は最大で 40%位までで、アイドリングから低速では 20%程度まで下がっており、また、航空用ジェットエンジン、ラムスクラムエンジン、パルスデトネーションエンジン等でも、エンジン単体のエネルギーの有効利用率（熱効率）は、ほとんどが半分レベル以下であり、残りの半分は捨てられている。特に小さなエンジンでは燃焼室壁面からの放熱による損失が大きくなり、更に効率低下している。ロケットエンジンでもやはり、地上からの発射後しばらくの間（一段目）では、有効利用されずに捨てられているエネルギーがかなりある。

従来の常識的なシナリオで今後数十年の限界熱効率を考えてみると、自動車用ピストンエンジンの熱効率は、仮に「更なる高圧縮比化をしつつ、燃焼室側壁での完全な断熱ができたとしても」、60%よりも少し低い値が理論的な限界だと言われている。これは、高圧縮比化すれば騒音・振動が増加し、断熱化によって熱を燃焼室にとどめようとしても、排気ガスに逃げてしまっていて仕事になりにくいことが理由の一つである。

もうひとつの問題は、地上から航空宇宙用までの広い速度範囲で利用できる単体のエンジンがなかったことである。地上から宇宙かそれに近い高高度に行くには、二つ以上の異なるエンジンを搭載せざるを得ず、その信頼性・安全性確保のために必要な尽力は 2 倍を超えた値であろう。複数のエンジンを積んでロケットが上がっていく姿は「たくましい」が、「息切れしそうでつらそう」でもある。

(1) 理論：

従来エンジンで、その燃焼室壁が断熱であると仮定した理想サイクル論の図示熱効率 η は、粗い試算だが、圧縮比 ε （密度比）を用いて

$$\text{図示熱効率 } \eta = \frac{\text{得た動力}}{\text{投入エネルギー}} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} \dots\dots\dots (1)$$

と近似的に書くことができる。（空気と燃料の混合気では、比熱比 κ が 1.3 程度。）

この式から、基本的には、この圧縮比 ε を大きくすればするほど、図示熱効率 η は向上し、出力（取り出せる動力）も大きくなることがわかる。圧縮比を上げるほど、排気ガスに捨てていた熱エネルギーが出力に変わるためである。ただし、従来エンジンでは、圧縮比をあげると燃焼騒音が増大するために限界があり、圧縮比 $\varepsilon=20$ 程度が限界とされ、これを式 1 に入れると図示熱効率は 60%位になる。機械摩擦等のロスを引いた実質的熱効率（正味熱効率）はそれより低くなり、最大で 55%程度と思われる。[1]

新たな圧縮原理（図 1）では、まず、従来型の始動用セルモーターなどで短い時間の間、燃焼室内部を減圧（真空に近づけた状態に）し、外部大気との圧力差によって、大気と燃

料を燃焼室に急速吸引し、これによって燃焼室内に音速レベルの高速気流を多数生成させる。次にその高速気流の噴流群を、燃焼室中心部の一点（小領域内）でほぼ同時に衝突させることにより、気体を燃焼室中央部のみに封鎖・自己圧縮させて高温高压状態にしてから燃焼させ、それをパルス状に繰り返して出力を得るものである。この原理では、燃焼後の高温ガスをも燃焼室中央部に封鎖でき、燃焼室壁面に到達しにくいために、燃焼室壁面から外部に放出する熱エネルギーを少なくすること（空気断熱）が可能で、結果として、熱効率が飛躍的に向上するポテンシャルを有している。

エンジンの発明以来 100 年が経過しているが、意外なことに、私の知る限り、この単純な原理（負圧燃焼室内中心付近の微小領域において多重パルス噴流を直接衝突圧縮させ、燃焼領域を包み込むようにするもの）のエンジンは、今まで試されてこなかった。

この新たな圧縮原理（図 1：多重パルス噴流の燃焼室中央部での一点衝突圧縮）では、理論的に、式 1 に従う従来エンジンよりも高い熱効率が得られる効果があることが見いだされた。^(注 0) これは実質的熱効率（正味熱効率）がエンジン単体で 60%を超える可能性を示唆している。[文献 4,5,10]

なお、圧縮比よりも膨張比を大きくとるアトキンソンサイクル化をすれば、上記よりももう少し熱効率向上が見込める。

（注 0：式 1 中の比熱比 κ の値は、燃料のない常温空気では 1.4 程度であり、燃料と混合すると、その燃料割合が増えるほど、小さな値（ $\kappa=1.25\sim 1.3$ 程度）になっていくが、式 1 を見ると、この κ が小さくなると、熱効率 η が大きくなりにくいことがわかる。しかし、新たな圧縮燃焼原理では、式 1 そのままには従わず、 κ が 1.4 から小さくなくても η が式 1 の値よりも若干大きくなる傾向を示す。

例えば、噴流衝突直前の圧力を p_2 、衝突直後を p_3 とすると、最も単純な二本の正面衝突によって得られる最大圧力比は、理論的に、

$$\frac{p_3}{p_2} = \frac{3\kappa - 1}{\kappa - 1}$$

で決まるが、比熱比 κ が小さくなるにつれて、圧力比 p_3/p_2 が大きくなることがわかる。これは従来型エンジンの理論とは異なる性質であり、熱効率を上げる効果を持っている。[5,10]（ただし、燃焼後の膨張行程では、従来エンジンと同様の可逆断熱膨張に近い。）

（2）三次元シミュレーション：

現在までに行った非燃焼シミュレーションでは、多重パルス噴流衝突圧縮によって、圧縮中心における圧力が外気の 200 倍レベル、温度は 7 倍程度が可能^(注 1) であることがわかった。燃焼シミュレーションでは非燃焼時よりも圧力・温度が上昇するとともに、燃焼室のほぼ全面（ピストン表面を含む）で断熱化ができる見通しも得られた。多重パルス噴流によって中央部の高圧縮比が可能だけでなく、その噴流群で燃焼後の高温ガスを包み込

んで燃焼室中央に閉じ込め、燃焼室外部に放出しにくいいためである。(空気断熱：図 5) [6, 9, 12, 13]

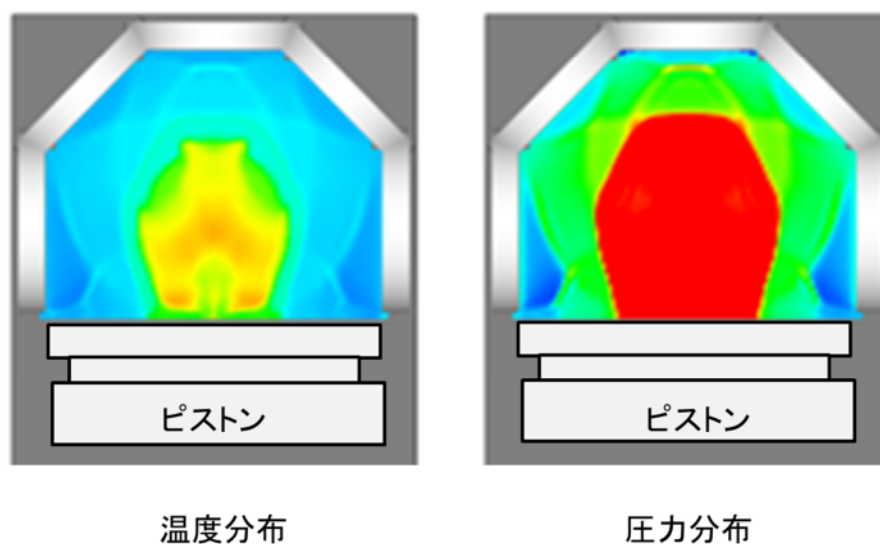


図 5 シミュレーションによる燃焼後の温度・圧力分布（左：燃焼後のオレンジ色・黄色の高温領域はピストンや燃焼室側壁に接触していない。右：赤色で示した高圧力領域はピストンに接触し、ピストンを押下げて動力を取り出せることがわかる。）

このシミュレーションによって、過給機を付加した場合、地上用の広範囲の運転速度領域で、かなりの高熱効率が得られる可能性を見出した。[4,6,9,23] なお、強い多重パルス噴流衝突圧縮のみの場合だけでなく、弱めの多重パルス噴流衝突圧縮+ピストンによる機械圧縮の場合でも断熱化の可能性はある。自己着火燃焼によって発生した圧力波が燃焼室の壁で反射して戻り、燃焼ガスを中央部に押し戻す効果もあるためである。[12, 13]

しかも、この多重衝突パルス噴流は、ガスだけでなく、燃焼によって発生した騒音も中央部に封鎖して、燃焼室側壁から外部に放出しにくくする。そして、従来のディーゼルやパルス detonation のような自己着火型エンジンは燃焼室内の「多点同時」自己着火であったが、この新たな方式では、中心部の「一点だけの」自己着火であり、着火点数が少ないため、単位時間あたりの発熱量もそれに比例して少ない。したがって、圧力上昇も穏やかで、従来エンジンの騒音レベルにとどめられるポテンシャルがあることもわかってきた。

よって、この新原理では、過給機や遷音速域のジェットエンジンとの相性が良いこともわかってきた。過給機付きの従来型ピストンエンジンでは、過給圧力をあげるとノッキングしやすくなって、燃焼騒音振動が増大してしまう傾向があるのだが、この新原理のエン

ジンでは、過給圧力を従来以上にあげても騒音振動を低めにできる可能性があり、しかも、空気断熱効果で熱効率上がるからである。

さらに、図 1 に示した多重パルス噴流衝突による圧縮燃焼原理は、地上や航空用途だけでなく、ロケットまでを含む広い速度範囲で適用可能性があり、その検討も進めている。これは、この原理がエンジンの新方式というより、燃焼室内の圧縮・燃焼の基本的な新方式だからである。

(注 1 : 例えば、大気をある程度、過給圧縮した後、燃焼室に導入させて噴流群にして衝突させた場合、圧縮中心部の最大圧力は 1000 気圧程度、最大温度 2000K 程度という結果が得られている。なお、燃焼室側壁やエンジン出口の平均圧力・温度は燃焼室中央部より低い、そのため、燃焼騒音・振動が低く抑えられる。)

(3) 3つの試作小型エンジンの実験結果 :

まず、3つの差異と狙いについて要点を述べる。一つめ(図 2、図 7 の 1 号機)は、14 本のパルス噴流の一点衝突圧縮のものであり、ピストンはない。これは、複数のパルス噴流衝突で圧縮・燃焼がどの程度なされるかを調べるという基本的かつ重要な役割を担っているとともに、ロケットを含む航空宇宙用途の基礎実験用という位置づけである。二つめ(図 3 の 2 号機)は、8 本のパルス噴流の弱めの一点衝突圧縮で若干のホットスポットを生成後に、強非対称な動作をするダブルピストンで機械圧縮を加えたものであり、従来の地上用途のガソリンエンジンと同等の価格・燃焼騒音・エミッションのままで、ディーゼルレベルの熱効率を狙ったものである。三つめ(図 8 の 3 号機)は、24 本のパルス噴流で強力な一点衝突を行って、限界熱効率を目指すものであり、ピストンは一つのみで、吸気排気はロータリーバルブで行う。

以下に、それぞれのエンジンについての実験結果の要点を述べる。

- ・ まず、2 号機(図 3) から説明する。安価な自動車用の低燃圧ガソリン用噴射弁を吸気管内に設置した(準)予混合燃料気状態のプロトタイプエンジン(図 3: 強非対称ダブルピストン+8 本のパルス噴流の一点衝突+ピストン機械圧縮の構成)でガソリン自己着火が確認され、原理的ではあるが、使用頻度の高い部分負荷運転条件で、ディーゼルレベル(同価格帯燃料噴射系を用いた従来ガソリンエンジンの 1.3 倍程度)の熱効率、かつ、従来ガソリンエンジン程度の燃焼騒音を示唆する実験データが得られた。[図 6 と文献 7,8,11-13] 2000rpm の部分負荷条件でスロットルがない状態での予混合(あるいは、準予混合)における一点自己着火コンセプトの希薄燃焼実験データである。燃料を投入しない非燃焼実験では 7 気圧程度の圧縮後圧力だが、燃焼実験では 20 気圧以上に上昇しており、圧縮行程終了後にそのピークを迎えていることも確認している。このような圧力の時間履歴データと各時刻のピストン位置から、取り出せる動力エネルギー量を求め、(取り出せる動力エネルギー量)/(投入した燃料等のエネルギー)が図示熱効率となるが、その値が従来ガソリンエンジンレベルを超え、ディーゼルレベルとなる場

合が見出された。[文献 7,8,11-13]

まだ、燃焼安定度が不十分だが、実用化レベルになれば、このタイプのエンジンでは燃料を予混合状態 [文献 11-13] に近づけやすいため、エミッションも従来のガソリンエンジンレベルが期待できると考えられる。この原理では、多数の高速空気噴流が液体燃料の微粒化・気化を促進する効果もあり、比較的低燃圧にすることが期待できるため、コスト増加を抑えたままで、ディーゼルエンジンのような低 CO₂ 排出レベルを維持しながら、エミッションの問題も対処しやすい可能性があるのである。

また、この図 6 から、その圧力上昇度、つまり、圧力上昇の勾配(単位時間当たりの圧力上昇率)も従来の火花点火ガソリンエンジンと同等レベルの小ささになっていることがわかる。[文献 7,8,11-13] この図 6 の圧力上昇がディーゼルエンジンや従来型ガソリン自己着火エンジンのように急激でないことは、燃焼騒音が抑えられることを意味している。なお、高負荷条件で、より高圧、かつ、穏やかな圧力上昇になるデータも得られている。

しかも、多数の空気噴流で燃料を包み込むことによって、燃焼室中央は予混合で燃焼室壁付近は空気層という二領域状態(準予混合) [文献 11-13] にしやすい効果もあり、これは、ピストンによる機械圧縮比が比較的高い場合でも、燃焼室側壁付近での急激なノックを避け、燃焼室中央部だけでの穏やかな自己着火をさせやすくする可能性もある。

なお、図 2、図 6 のプロトタイプエンジンでは、従来型のクランク・ピストンを利用しているが、より広範囲の条件で 60% レベルを超える熱効率を目指すために、従来のダブルクランクのような形態とは異なる新たな要素も提案している。(特許出願済。)

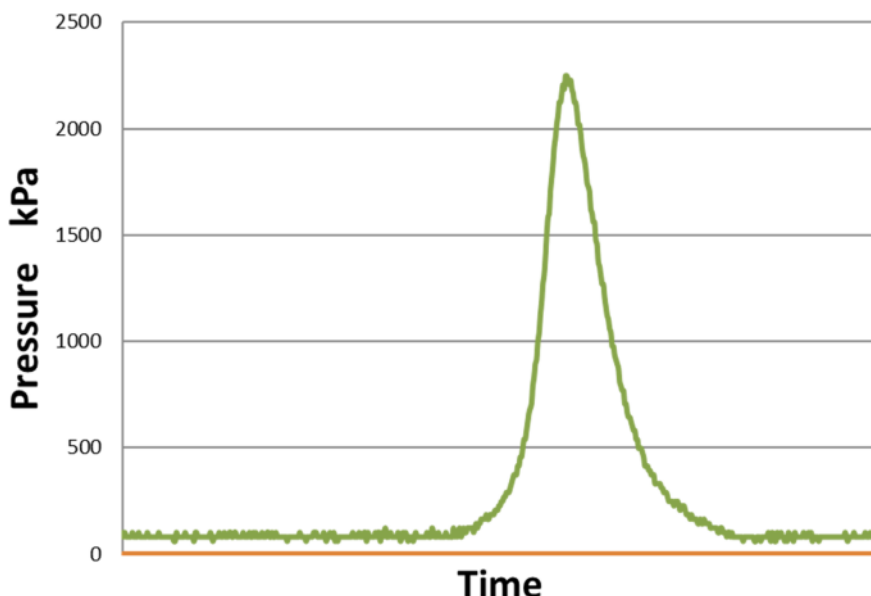


図 6 地上用プロトタイプエンジンでのガソリン自己着火燃焼時圧力の時間履歴の一例(一定回転数で燃焼実験中の一サイクルのデータ)

- ・ ロケットを含む航空宇宙用プロトタイプエンジン（1号機：図2、図7）でも圧縮と燃焼が確認された。[図4と文献4-13を参照]
- ・ 3号機（図8）では、24本の噴流をロータリーバルブによってパルス状にしつつ、それらを燃焼室中央部で衝突させて圧縮する機構とシングルピストンを有するプロトタイプエンジン（図8）であるが、この燃焼実験も開始した。
- ・ 更に重要なことは、これらのうちの一つのプロトタイプエンジンでは、燃焼後に、燃焼室側壁でのほぼ完全な断熱効果（燃焼室壁温度が大気レベルのまま）、かつ、かなりの圧力上昇の可能性を示唆するデータも得られ始めた点である。これは、原理的に、図5のシミュレーション結果を裏付けるもので、飛躍的な高熱効率^(注2)の可能性を示唆している。しかもこれは、自動車用エンジンにおいては水冷機構を不要化し、重量の低減・余剰スペース拡大をできるポテンシャルを意味するとともに、ロケットでは耐熱性における信頼性向上の可能性を示している。^(注3)

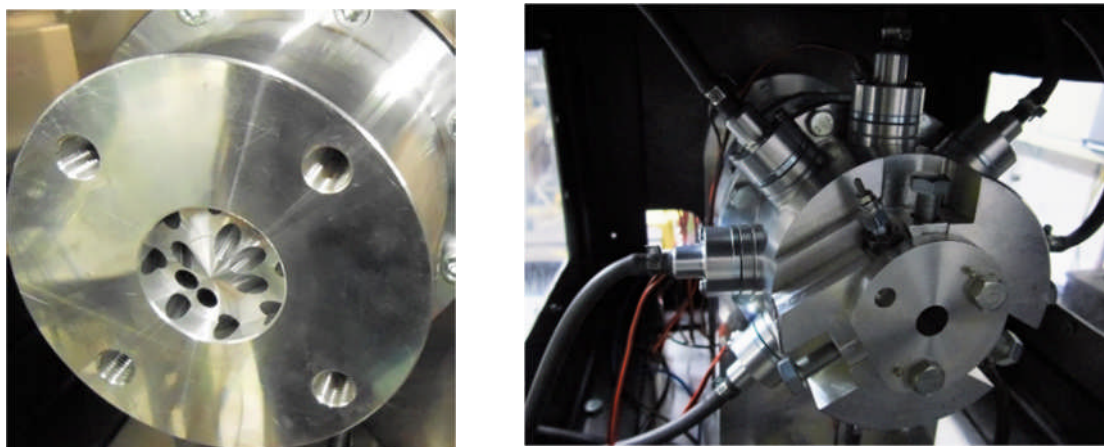


図7 航空宇宙用プロトタイプエンジン（一号機）のインテークと排気部

図8 24本の衝突パルス噴流+吸排気用ロータリーバルブ+シングルピストンの構成のプロトタイプエンジン（三号機：このエンジンで用いる高速噴流生成のためには、従来のピストンエンジンに用いられるポペットバルブは適していない。吸気管から燃焼室に空気を入れる際、ポペットバルブ先端の傘部が邪魔をして直進する噴流を形成しにくいためである。なお、この構成では、従来のポペットバルブを用いたピストンエンジンよりも部品点数が少なくなる可能性がある。ポペットバルブやそれを駆動するためのカム機構がなくなり、また、かなりの断熱化ができれば、水冷機構が排除できるからである。ロータリーバルブからの気体の漏れや耐久性の問題は、実用化しているロータリーエンジンを考えると、クリティカルな問題ではないのではないかと考えている。)

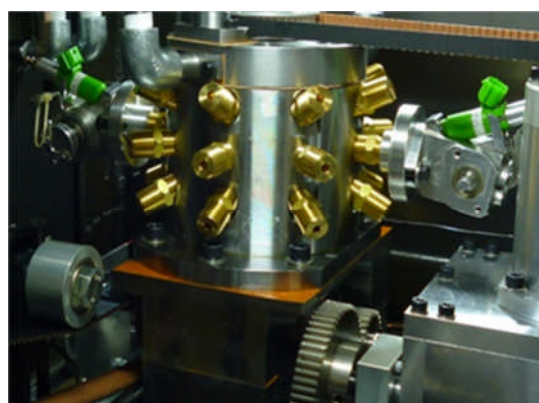


図8 24本の衝突パルス噴流+吸排気用ロータリーバルブ+シングルピストンの構成のプロトタイプエンジン（三号機：このエンジンで用いる高速噴流生成のためには、従来のピストンエンジンに用いられるポペットバルブは適していない。吸気管から燃焼室に空気を入れる際、ポペットバルブ先端の傘部が邪魔をして直進する噴流を形成しにくいためである。なお、この構成では、従来のポペットバルブを用いたピストンエンジンよりも部品点数が少なくなる可能性がある。ポペットバルブやそれを駆動するためのカム機構がなくなり、また、かなりの断熱化ができれば、水冷機構が排除できるからである。ロータリーバルブからの気体の漏れや耐久性の問題は、実用化しているロータリーエンジンを考えると、クリティカルな問題ではないのではないかと考えている。)

(注 2: バイク・自動車用等の小型エンジンでは排気量が小さくなるほど、燃焼室側壁から捨てる熱エネルギーが大きいので、断熱化できるとその効果は大きい。よって、高圧縮比で完全断熱がなされれば、これらの小型エンジンの部分負荷条件では従来型エンジンの 2 倍レベルの熱効率 (60%程度) になりうる。<http://www.nedo.go.jp/hyoukabu/articles/201301mazda/index/html> 等を参照。)

(注 3: ロケットでは燃焼後の高温ガスが燃焼室側壁に接触する際、その熱エネルギーを燃料に戻して利用していると言われているが、その全てを推力・動力に変換するのは難しく、エンジン出口から排気されるガス温度も上昇させて捨てているはずである。よって、本エンジン原理で騒音振動は従来レベルに抑えたままで圧縮比を高めながら、燃焼後の高温ガスを燃焼室側壁に接触する量を減らすことは、排熱低減で効率上昇に寄与するとともに、燃焼室側壁の耐熱性問題を緩和する効果もある。)

(4) まとめと今後の計画:

地上用途の小型ガソリンエンジンの熱効率について考えると、上記の複数のプロトタイプエンジンの研究結果は、「原理的ではあるが、我々は今、従来の 1.3 倍レベルから 2 倍レベルの間のどこかにいる可能性」を示している。よって、この意味で「究極熱効率エンジン」実現に向けた一つ目の大きなステップ (基本実験による原理確認の段階) を超えたと考えている。

だが、実用化に向けてまだやらなければならないことがいくつもある。まず、ハード・ソフトウェア両面における更なるアイデア (一部は特許出願済) を組み込んで、燃焼安定度の大幅向上や信頼性確保などの諸課題を解決する必要がある。また、従来型エンジンの最新要素技術も取り入れつつ、用途ごとに最適なエンジン構成を明確にしていくことも重要だと考えている。また、より丁寧に詳細な理論・シミュレーション・実験検討を行い、各用途 (各速度領域) で、断熱かつ高圧縮比化による限界熱効率の値を明確にする。また、エンジンという名前は共通だが、本研究はかなり離れたいくつかのエンジンシステム分野にまたがっており、実用化に向かうために、いくつかの組織とのやりとりを確実に進めていく必要もある。

なお、エンジンの効率や出力性能を支配する第一因子は、「燃料」と「空気」の流れ方によって決定される両者の混合状態であり、その混合状態に応じた「燃焼」が起こる。この「燃料」の流れ、「空気」の流れ、「燃焼反応」の 3 つの理論モデルと計算機シミュレータをも独自に構築し、上記の新エンジン(Fugine)の性能確認・性能向上検討を進めてきたわけだが、この 3 つの理論モデルは、新たな高次元の科学技術をも生み出しつつある。

「液体燃料」は燃焼室に噴射されると、「分裂」して小さな液体粒子になってから気化して空気と混合するのだが、この「分裂」現象は、原子核という粒子の「分裂」現象と相似である可能性が見出されている。原子核が液体粒子と同じように柔らかな粒子と考えると、どちらも、新たな統計熱流体力学理論で説明できる部分があるのである。[14, 20, 21] 「素粒子から天体レベルに至る様々な粒子の分裂・崩壊現象という自然現象を引き起こす原動

力 (宇宙のエンジン)」の解明につながる可能性がある。なお、この研究から、60%レベルを更に超える高熱効率化の別のアイデアを見出していることも付記しておく。(特許出願済)

自動車用ピストンエンジン内の「空気」の流れの解析方法が、多細胞生物の複雑な形態の発生過程をほぼ確実に引き起こす「原動力 (生命のエンジン)」を巨視的に説明できる可能性も見出している。[22] ピストンエンジンの吸気行程と受精卵が個体まで成長するという現象はどちらも「膨張する袋に吸引管が接続されている」という点で、幾何学的に相似で、しかも、生命の70%をしめる水の流れと空気の流れは同じ偏微分方程式によって記述されるからだ。この発生過程を含む生命諸活動中の細胞分裂時の染色体配置パターンを見ている頃に、上記の新たなエンジン構造もその配置パターンと同じようにしたらどうかというアイデアを思いついたことは私にとって重要である。

「燃焼反応」の理論モデルを骨格にしなが、分子生物学の様々な知見を組み合わせ、論理的に考えることで、生命分子群の基幹反応ネットワークを記述できる可能性も見出した。[15-19]これは、「多細胞生物が心身の病気から復活・再生するための原動力 (生命のエンジン)」を解明するだけでなく、「社会が経済危機から復活するための原動力 (経済のエンジン)」までも説明する可能性がある。企業や社会も人間という生命の集まりだからだ。

私は、「エンジンの中に宇宙の諸現象をみることが出来る。(エンジンは宇宙の縮図。)」と考えてきており、上記を含めた「6つの究極エンジンの研究」を加速して、理・工・経・医学分野を横断しながら「エンジン宇宙学(Engineverseology)」を構築し、未来の青写真をつくりたいと考えている。現在の政治・経済の混沌と先行不安解消の一助となれば幸いである。

(5) このエンジンが実用化された場合の波及効果や社会的影響：

まず、上記の究極エンジン(Fugine)が実用化されれば、地上や航空宇宙用エンジンのかなりの高熱効率化がなされ、環境問題解決の一助となる。

例えば、この高効率な単体エンジンを搭載すれば、電池とエンジン両方を搭載したハイブリッド自動車の効率を更に上げるとともに、それを使って各家庭で発電すれば、大型発電所からの送電・変電ロスをも削減し、エネルギー総合効率を実質的に向上させることも期待される。

航空宇宙用機体の総重量に対する燃料重量の割りあいは50%~90%程度と言われており、そのエンジンの熱効率向上は機体重量の低減をも可能にする。

更に、今まで想像もできなかった豊かな新世界がもたらされる。例えば、沖縄・北海道のような美しい自然と新鮮な食材あふれる地域に住み、その道路から離陸して、都会の高速道路に数十分で着陸する超音速エアカーでの通勤が可能になる。従来のジェットエンジンはその中央部に大きな回転軸等があるのだが、このFugineの燃焼室中央部には機械部品がないため、超音速飛行では従来型の定常ラム・スクラム燃焼の形態をとりやすいからである。(図9) 地上の2次元平面上の道路よりも、広い3次元空間の空の方が衝突事故確率

も少なく、最近の GPS 技術も、安全なエアカー飛行に寄与するかもしれない。

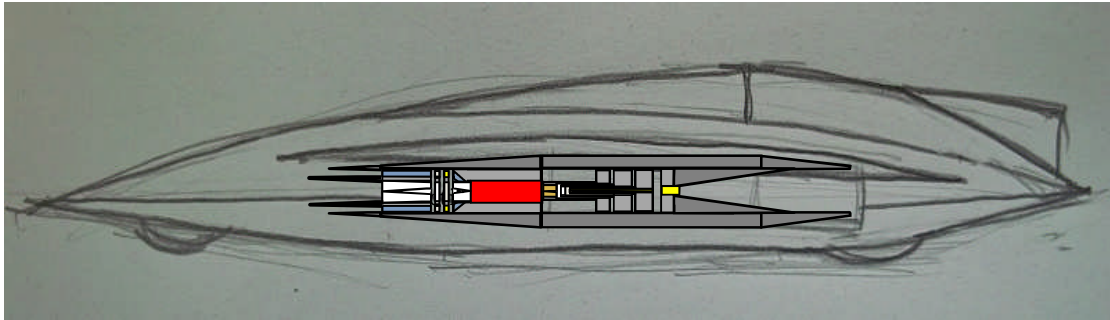


図9 超音速小型エアカーのイメージ図（搭載しているエンジンは、多重パルス噴流の一点衝突圧縮に加えてロータリーバルブや特殊なピストンを併用した最終形態案のひとつ [3-9]）

謝辞

本研究は、科学研究費補助金（課題番号 25630072）の助成を受けて遂行した。また、本研究に対してご支援くださった方々に深謝する。

文献（研究成果）

- (1) 早稲田大学ホームページ (http://www.waseda.jp/jp/news13/130709_engine.html)
- (2) Naitoh K, Nakamura K., Emoto T. A New Cascade-Less Engine Operated from Subsonic to Hypersonic Conditions. *J. of Thermal Science*, 19-6, (2010) pp.481-485.
- (3) 内藤健、特願 2012-519298、特願 2013-528045、(権利化済) .
- (4) Naitoh K, et al. Fugine: The supermultijet-convergence engine working from startup to hypersonic scram mode and attaining simultaneously light-weight, high-efficiency, and low noise. AIAA paper 2014-3960, (2014).
- (5) Naitoh K, Kojima K, et al.: Physical theory of the single-point auto-ignition engine based on supermulti-jets colliding with pulse: leading to thermal efficiency over 60% at various engine speeds and loads of automobiles. SAE paper 2014-01-2640, (2014).
- (6) Naitoh K, Yamagishi K, et al.: Unsteady three-dimensional computational experiments of the single-point auto-ignition engine based on semispherical supermulti-jets colliding with pulse for automobiles. SAE paper 2014-01-2641, (2014).
- (7) Naitoh K, Hasegawa K, et al.: Development of Fugine based on supermulti-jets colliding with pulse: leading to stable plug-less start and improvement of HCCI with satisfactory strength of structure. SAE paper 2014-01-2639, (2014).
- (8) Naitoh K, Ikoma D, et al.: Two small prototype engines developed based on pulsed supermultijets colliding: having a potential of thermal efficiency over 60% with satisfactory strength of structure.

SAEpaper2014-32-0099, (2014).

(9)Naitoh K, Okamoto T, et al.: Design guidelines of the single-point auto-ignition engine based on supermulti-jets colliding for high thermal efficiency and low noise: obtained by computational experiments for a small strongly asymmetric double-piston engine. SAEpaper2014-32-0100, (2014).

(10) Naitoh K, Tanaka Y, et al.: Fugine cycle theory: predicting high efficiency of the supermultijet-convergence engine working from startup to hypersonic scram mode. AIAApaper 2015-2968, (2015).

(11) Naitoh K, Shirai T, et al.: Fugine as single-point compression engine based on supermulti-jets colliding with pulse: combustion test of second prototype engine with strongly-asymmetric double-piston system. SAE 2015-01-1964 (2015).

(12) 木原、山岸、内藤: 多重衝突噴流圧縮エンジンの燃料噴霧と混合気形成過程の数値解析研究. 第26回内燃機関シンポジウム講演論文集 (2015) .

(13) 内藤ら、多重衝突パルス噴流による高効率プロトタイプエンジンの開発 (第4報). 自動車技術会講演会予稿集 (2016年5月) .

(14) Naitoh K. Spatiotemporal structure: common to subatomic systems, biological processes, and economic cycles. J. of Physics. C.S. 344. 1-18. (2012).

(15) Naitoh K. Morphogenic economics. Japan J. of Industrial and Applied Mathematics. 28. 15-26. 2011.

(16)内藤健、生命のエンジン、シュプリンガー・ジャパン (2006) .

(17)内藤健、生命の基本分子を貫くパターン、日経サイエンス、(2005) .

(18)Naitoh, K. and Inoue H, Catastrophic chaos theory: predicting recovery of health or death. Artificial Life and Robotics、 (2013) .

(19) 内藤健、特願 2014-148370.

(20) Naitoh K and Shimiyama T: Stochastic determinism. Japan J. of Industrial and Applied Mathematics, 28. 3-14. (2011).

(21) Shinmura N, Kubota T, Naitoh K.: Cycle-resolved computations of stratified-charge combustion in direct injection engine. JSME Int. Journal. Vol.8,1. (2013).

(22) Naitoh K. Engine for cerebral development. Artificial Life and Robotics, (2008)

(23) Tsuru K. Naitoh K. et al. Computational experiments for improving the performance of Fugine based on supermulti-jets colliding working for a wide range of speeds from startup to hypersonic condition. AIAApaper 2016-4709 (2016).

等

以上

(2016年8月29日版)