

究極効率のエンジンを生む新圧縮燃焼原理を発見！

エンジン(Engine)からフュージン(Fugine)への大進化：自動車・発電・航空機などのエンジン単体の熱効率を 60%以上とし、ハイブリッドシステム自動車の燃費を凌駕か？

早稲田大学 理工学術院 基幹理工学部 機械科学・航空学科 教授 内藤 健
Ken Naitoh, Waseda University

要点：エンジン排気ガスの熱エネルギーを再利用する補助機器によって効率をあげる複合システムとはせず、エンジン単体で、サイズによらず、従来の 2 倍以上の熱効率ポテンシャルを生む画期的なエネルギー変換原理（新圧縮燃焼原理）を見だしました。この圧縮燃焼原理のエンジンは低騒音化・冷却機構不要化などの可能性をも有しています。

この新圧縮燃焼原理は、新たな熱流体力学理論を構築し、それを駆使した思考実験とスーパーコンピュータシミュレーション（計算機実験）と高速空気流実験によって考案したものです。実際の燃焼試験で実証されれば、新たな軽量高性能航空宇宙機の扉を切り開くだけでなく、自動車用次世代高性能エンジンを生む可能性があります。殆どの自動車用ガソリンエンジンの熱効率は最大で 30—35%程度と考えられます。ですので、あらゆる運転条件で単体熱効率 60%以上の「究極効率エンジン(Fugine)」を搭載した自動車となれば、現在のハイブリッドシステム自動車を凌駕する実質燃費も可能となります。さらに、この高効率エンジンを搭載した自動車を使って各家庭で発電すれば、社会全体のエネルギー総合効率を向上させる可能性もあります。

1 現状と新たな新基軸

近年、自動車エンジンでは直噴化などにより、モード燃費が大幅改善されていますが、従来のほとんどのガソリンエンジンの熱効率は未だに最大 30—35%程度で、アイドリングに近づくにつれて 15%レベルにまで下がると思われます。燃料の半分以上を捨てているということです。よって、エンジン単体の熱効率にはまだまだ改善シロがあり、あらゆる運転条件で 60%以上（粗い表現ですが、中高速で 2 倍以上で、低速で 4 倍以上）になれば、CO2 排出量も半分以下となって、当面の環境問題を解決する新機軸となり得ます。（注 0）

2 究極効率エンジンのための新圧縮燃焼原理 [2-11]

エンジンの固体壁が断熱壁であると仮定した理想サイクル論の熱効率 η は、圧縮比 ε （密度比）を用いて

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

と近似的に書くことができます。[1] (比熱比 κ は 1.2~1.4 程度。)

この式から、基本的には、圧縮比 ε を大きくすればするほど、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ります。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す。(注1)

図1は新たな圧縮原理の基本概念図です。まず、従来型の始動用セルモーターなどで燃焼室内部を減圧 (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生成します。次にその高速気流の噴流群を、燃焼室中心部の極微小領域内で多重衝突することにより、気体を封鎖・自己圧縮させて高温高压状態にして燃焼させ、それをパルス状に繰り返して超高効率・高出力を得るものです。(燃料は燃焼室に直接噴射する形態であれば、中心部にコンパクトに供給できる。)

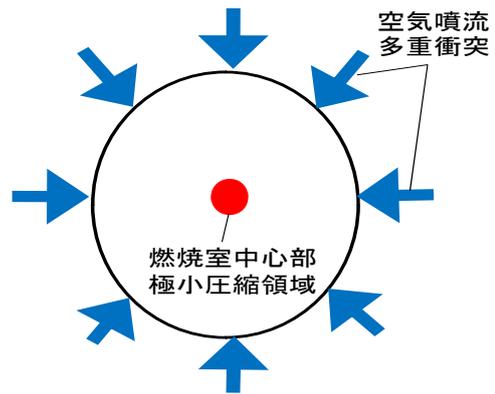


図1 多重衝突噴流圧縮の基本概念

エンジンの発明以来 100 年が経過していますが、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るもの) のエンジンを、今までの研究開発者は提示してきませんでした。(注2)

流体力学の理論解析とスーパーコンピュータシミュレーションによって、音速レベルの速度を持つ気体噴流 16~30 本程度を衝突させれば、10 倍~30 倍程度の圧縮比が可能、との知見を得ています。なお、音速レベルの噴流衝突に相当する場合の圧縮度合を実験的に計測したところ、理論やスーパーコンピュータシミュレーションの予測結果が妥当であることも得られました。(注3) [4-10]

ですので、“断熱条件を満たせば、シミュレーションから求めた圧縮比を式 (1) の理論に代入して得られる熱効率の値は現実的なものであり、その値は 60% を超えています。”

3 断熱化

図1の多重衝突噴流において、燃焼室中心部に向かう噴流群は、燃焼後の高温ガスを包み込んで燃焼室中心の極微小領域に閉じ込めることも意味します。

実際のエンジンについてのスーパーコンピュータシミュレーションによる燃焼後の圧力・温度分布 (図3) をみると、燃焼後の高温ガス (緑色のオムスビ形部分) が中心部にとどまり、

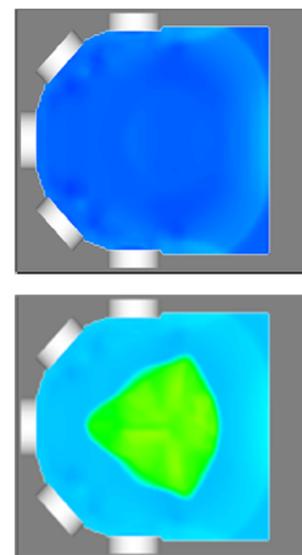


図3 圧力・温度分布 (上: 圧力, 下: 温度)

エンジン側壁に接触していないことがわかります。[3-10] このことは、エンジン側壁の断熱化が可能で、冷却機構が不要となるとともに、従来、エンジン側壁から冷却水に逃げていた熱が出力（動力）になって、熱効率が上がることを示唆しています。さらに図 3 が示す重要な点は、右端のピストン表面にも、燃焼後の高温ガスが接触しないことが起こりうることで、その理由もわかりました。[10] 以上の結果から、エンジン壁面で断熱を仮定した式（1）が適用でき、先に示した 60%を超える熱効率ポテンシャル、が説得力あるものとなります。

4 騒音・振動の低減効果

効果は他にも見つかりました。「高圧縮比化すると騒音も増大する」というのが従来エンジンの常識で、その騒音の増大が高圧縮比エンジンの商品化を阻んできましたが、新たな圧縮燃焼方式では、「圧縮すればするほど、騒音が増えない」ことがわかったのです。騒音が増加しない第一の理由は、先に述べた「空気の閉じ込め効果」です。燃焼室中心部で発生する燃焼騒音も閉じ込めて、外部に出にくくするためです。言い換えると、燃焼室中心部の微小領域だけが高圧縮状態で、その周囲（エンジン壁付近）は大気圧レベルのままになりやすいので、エンジン側壁に騒音や振動は伝わりにくく、結果として、「高圧縮で比較的的低騒音（従来エンジンの騒音振動レベルの維持）」が可能になるのです。

「多重衝突噴流原理」に基づくエンジンは、上記以外の騒音・振動の低減効果も有しています。従来のディーゼルやパルスデトネーションのような自己着火型エンジンは、燃焼室内の「多点同時」自己着火であったのですが、この方式では、中心部「一点だけでの」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ので、比較的ゆっくりと徐々に燃焼が進むことになり、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のです。さらに、始動時のような低速条件で、壁面での振動・騒音を抑える「別の効果」がいくつもあることがわかってきました。（エコー効果など。[10]）

5 具体的なエンジン構成

図 4 には、地上発電・地上走行・超音速航空宇宙機用という多様な用途で利用できるエンジン構成の一例（比較的わかりやすい構成例）を示します。図 1 に示した多重衝突パルス噴流装置に加えて、新たなピストンなどを有しています。[2-10] 図 5 は、音速付近における多重衝突噴流のみに依存する飛行と超音速飛行時のラムスクラム運転の概念図です。

この構成のエンジンは、静止状態での発電や一般道路での高効率な地上走行の可能性とともに、高速道路から離陸可能な「エアカー」という新たな移動形態をも生みだします。多段のターボファン機構の代わりに付加した多重衝突噴流とピストンの構成は比較的軽量で、しかも、エンジン中央部が空洞に近いために、音速を超えた後、極超音速飛行に適したラムスクラムエンジンの形態にスムーズに移行することが可能になるなどのメリットが

あるからです。

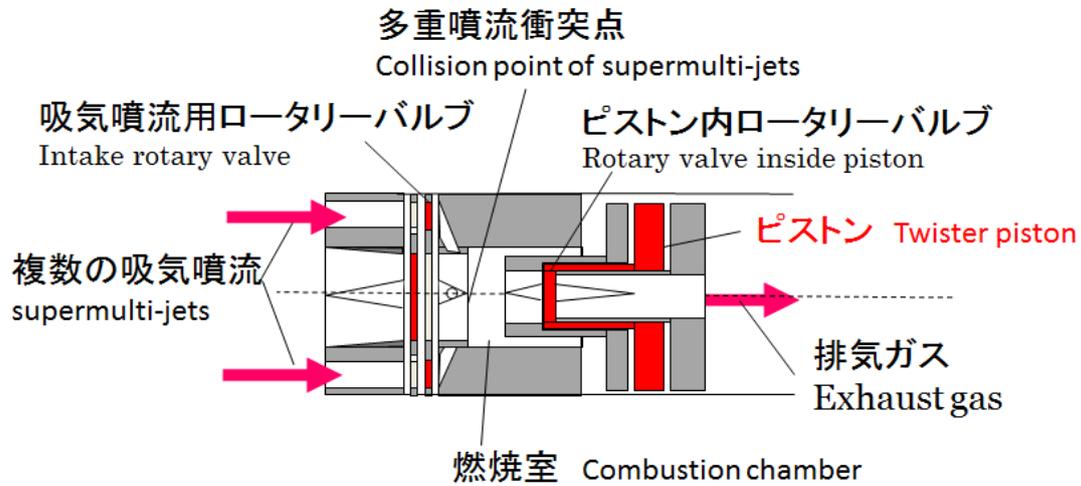


図 4 ロータリバルブを有するピストンを付加して地上走行も可能としたエンジン [2-10] (グレーのピストンは左右の往復運動だけだが、中央の赤いピストンは左右だけでなく、回転運動もしており、それによって、ピストン中央部の排気管を開閉する。)

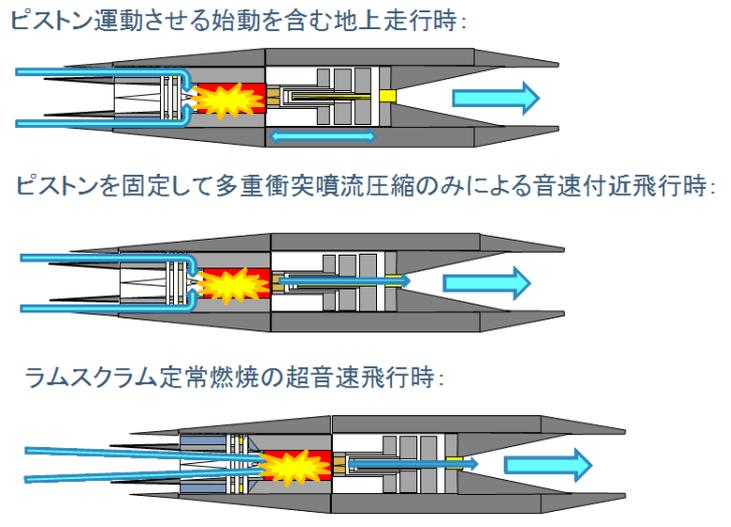


図 5 地上での始動・走行から超音速飛行までの動作シナリオ [2-10] (個人の位置情報を GPS で管理できる時代になりつつあるので、高速道路から飛び立つ自動車群を 3 次元管制できるのは遠い未来のことではないと思われる。)

図 4 の構成のエンジンについて得られたスーパーコンピュータシミュレーション結果から、式 (1) を用いずに直接、熱効率を得ることもできます。まだ、エンジンの詳細スペック・形状の最適化を十分にはしていない段階ですが、従来エンジンよりも熱効率が高くなるとの予測結果も得ています。(注 3) なお、図 4, 5 の構成以外にも、数種類の構成案があります。

6 まだまだ出てくるメリットと新たな用途

従来エンジンでは、エンジンサイズが小さくなればなるほど、エンジン側壁に逃げる熱量が相対的に増大して、熱効率が低下することがよく知られています。

前述したように、我々が提案している新たなエンジンは、エンジン側壁に逃げる熱が少ないというポテンシャルを有しているわけですので、小さくても大きくても熱効率は高く、この点でも汎用性があるのです。

よって、以上のことから、この安価な「究極の低燃費・高熱効率の小型エンジン」を積んだ自動車が実現すれば、それで各家庭で発電することによって、社会全体のエネルギー総合効率を向上させることが可能になると考えられます。

また、先に述べたように、本圧縮燃焼方式の小型エンジン単体の自動車は、低速（低負荷）走行時に、従来ガソリンエンジンの2倍以上の効率上昇が可能と考えられるため、非常に粗い試算ですが、現在のハイブリッド自動車を凌ぐ燃費も現実的になります。さらに言えば、ハイブリッド自動車に搭載されているエンジンをこの小型エンジンにすることでさらに高効率・低燃費を目指せます。

従来型エンジン・原子力発電設備の改良を確実に積み重ねることや高性能電池の研究開発などは大変重要ですが、エンジン「単体」の究極効率追求による環境対応技術の研究開発が求められているときだと考えています。「単体」ということをあえていうのは、その効率がまだまだ改善の余地があり、エンジンの排気ガスの熱を再利用する補助機器を付加した従来型複合システムは大きく・重くなるため、自動車や航空機に搭載しにくいからです。

7 多重衝突噴流による圧縮の安定性

式(1)で述べたように、「高い圧縮比が、毎サイクル得られるのであれば、高い熱効率は得られる」わけですが、このエンジンの圧縮が安定に得られるかどうか心配になります。

そこで、非燃焼の空気流実験で調べました。図6は16本の多重衝突噴流をエンジン中心で衝突させた後の可視化（密度勾配分布）の一例ですが、軸対称を維持した噴流衝突が確認できています。これは、安定な圧縮が可能なことを示しています。[6-10] 何故、安定になるのかについてもある程度の説明が可能です。

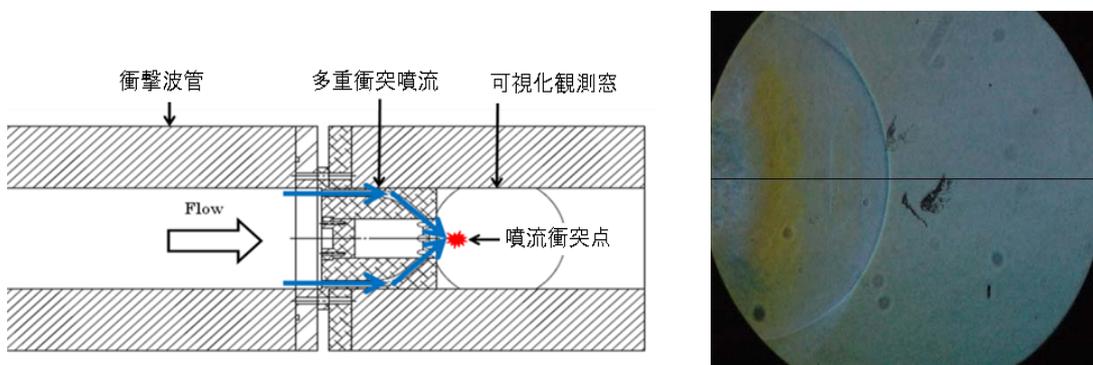


図6 実験装置と可視化写真[6-10]

8 プロトタイプエンジンの基礎燃焼実験

プロトタイプエンジン二機（図 7、8）を独自に制作し、ガソリンを用いた場合の新圧縮燃焼原理確認実験を開始したところです。図 7 は、発電・自動車専用であり、図 8 は、音速レベルから極超音速での航空機用専用のプロトタイプエンジンです。[10]

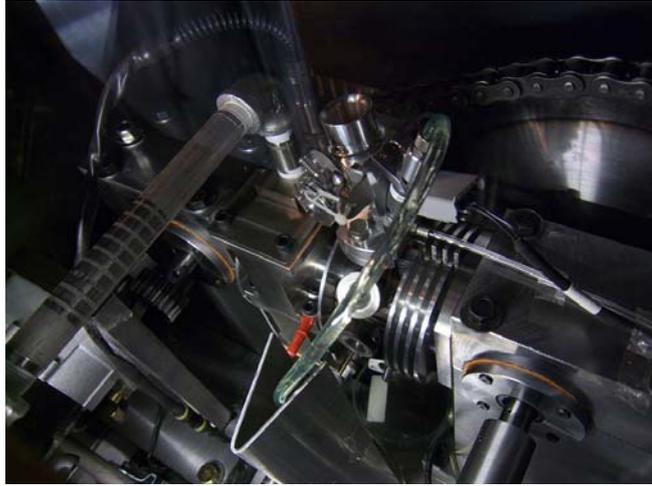


図 7 自動車・家庭発電用プロトタイプエンジン（排気量 50 cc程度）[10]

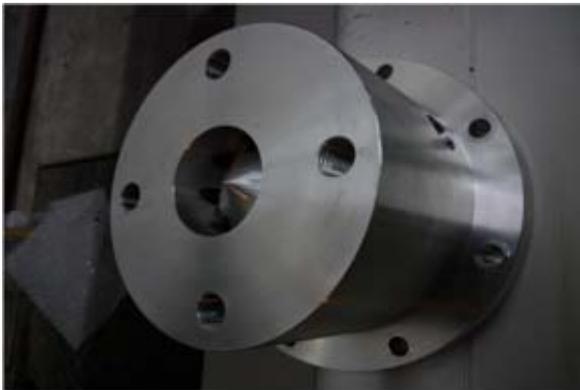


図 8 航空宇宙機用小型プロトタイプエンジン[10]

9 今後

より安価で現実性の高い具体的なエンジン構成案は上記以外にあり、ここに書ききれていない重要事項やさらなる性能向上のアイデアが多々ありますが、まずは、図 7、8 の2つの一次プロトタイプエンジンの燃焼試験によって、その素質評価を行う予定です。

謝辞

本研究は、科研費助成金（課題番号 25630072）を得て進めている。

文 献

- (1) 内藤 健. 生命のエンジン. シュプリンガー・ジャパン. (2006)
- (2) Naitoh K. submitted as Patents. (2010, 2011). (PCT 出願済みで審査請求中.)
- (3) Naitoh K, Nakamura K, Emoto T. A New Cascade-Less Engine Operated from Subsonic to Hypersonic Conditions. J. of Thermal Science, 19-6, pp. 481-485. (2010).
- (4) Naitoh K, Nakamura K, Emoto T, and Shimada T, A Wide-range Single Engine:operated from startup to hypersonic. AIAA paper 2011-2316. (2011)
- (5) Naitoh K et al. An ultimate engine: designed by computational fluid dynamics. SAE paper 2011-01-2027, (2011).
- (6) Naitoh K et al. The fifth compression strategy for hypersonic aircar. AIAA paper 2012-3314. (2012).
- (7) Naitoh, K., et al. Supermulti-jets colliding for the ultimate engine. Proceedings of COMODIA, Hakata, (2012).
- (8) Naitoh K , et al. Stability limit of supermultijets convergence engine from startup to extremely hypersonic conditions: revealed by shocktube experiments. AIAA paper 2012-5923. (2012).
- (9) 内藤健. 究極エンジン. OHM. Vol.99, No.11, (2012).
- (10) Naitoh K, et al. Simultaneous attainment of light-weight, high efficiency, and low noise: by supermulti-jets-twister engine working from startup to hypersonic scram mode. AIAA paper 2013-3011. (2013).
- (11) Shinmura N, Kubota T, Naitoh K. Cycle-resolved computations of stratified-charge turbulent combustion in direct injection engine. JSME International Journal. Journal of Thermal Science and Engineering. Vol. 8, No.1. (2013).
- (12) Naitoh K and Shimiya T, Japan J. of Industrial and Applied Mathematics, (2009).
- (13) 中島ら編：改訂・自動車用ガソリンエンジン、山海堂、(1999)

注 0：なお、従来のガソリンエンジンの熱効率・燃費が低速度（低負荷）で悪化するの、吸気管に取り付けられたスロットルバルブ付近の流動の粘性摩擦によるエネルギーロスに起因しています。ですが、この新たなエンジンでは、スロットル不要と考えています。

注 1：断熱仮定のオットーサイクルとブレイトンサイクルに対する初等熱力学の理論式です。ただし、圧縮比の適用範囲がある近似式です。圧縮比が 1.0（つまり大気状態のまま圧縮せず、ライターの燃焼のような場合で、燃焼後に温度だけ上昇し、圧力、密度は増加しないケース）では、熱効率は 0.0 となって動力を取り出せません。なお、図示熱効率はエンジンピストンから取り出せる動力であり、実際の動力として取り出せる分を表す正味熱効率は、ピストンと燃焼室シリンダー間の摩擦等を引いた値で少し差があります。

少し補足説明すると、低速低負荷では、希薄燃焼・希薄燃料混合気での自己着火の形態であり、その場合の比熱比 κ は大体、1.3–1.35 程度と考えられるため、60%を超える熱効率が可能です。[13] なお、本文ではわかりやすくするためにオットー・ブレイトンサイクルで説明していますが、この新たな原理のエンジンでは、Atkinson サイクルのように、「膨張比を圧縮比以上にすること」を付加することが容易ですので、更に熱効率を上げるポテンシャルがあります。従来エンジンで膨張比を大きくすることは、相対的に吸気量

が減って最高出力（カタログ値）が下がることを意味しますが、この新たな原理のエンジンでは、負圧の最適化などによって、吸気行程体積以上の空気を引き込むことができる可能性があります。（究極の慣性過給効果を誘因する可能性等があるのです。）

注2：本圧縮燃焼方式が過去に提案されてこなかったのは、空気噴流の衝突によって、安定で十分な圧縮ができると思わなかったことがあげられます。無意識に近い日常生活の中では、「空気は軽いもの」とみなしており、それを衝突させても大きな動力になるとは想像しにくいかもしれません。ですが、例えば、音速の10分の1程度の台風の突風が家屋を壊すことなどを思い起こせば、音速レベルの多数の空気噴流をパルス状に衝突させることによって、高圧力・高圧縮可能なことはご理解いただけると思います。

また、高速気流の噴流を燃焼室中心で衝突させるためには、噴出する気流が吸気管の軸線方向に真っすぐ噴出が必要ですが、従来の自動車・バイク用4ストロークレシプロエンジンでは、吸気噴流の噴出方向に傘つきバルブ（ポペット弁）があるために、気流が四方に飛散してしまい、燃焼室中心部で安定に衝突させることができなかったことが、今までなされてこなかった理由のひとつだと考えられます。

注3：非定常圧縮性流体力学を土台にした独自の考察によって、音速レベルの衝突噴流によってえられる圧縮比レベルを明らかにしました。また、統計流体力学に基づいて、独自の数値流体力学理論を提示しています。この理論に基づくスーパーコンピュータシミュレーションにより、エンジンの内部流れや燃焼の不安定性をある程度、予測可能となっています。[11, 12]

著者（研究開発代表者）略歴

内藤 健（ないとう けん）

1987年3月、早稲田大学理工学術院 機械工学専攻 修了。

1987年4月－2000年3月、日産自動車（株）勤務。

2000年4月－2005年3月、山形大学工学部 機械システム工学科 助教授。

2005年4月－2007年3月、早稲田大学理工学術院 理工学部 機械工学科 教授。

2007年4月から、早稲田大学 基幹理工学部 機械科学・航空学科 教授。

この間、1987－1988年文部省宇宙科学研究所受託研究員（併属）。

1992年、早稲田大学 博士（工学：論文博士）取得。

1994年、独国アーヘン工科大学空気力学研究所客員研究員（招聘・短期）。

日本機械学会論文賞（1993年）や自動車技術会論文賞（1994年）などを受賞。

代表著書に「生命のエンジン（シュプリンガー・ジャパン、2006）」。

（2013年7月22日改訂版）