

特集：ガスタービンサイクル－源流からフロンティアへ－

George Brayton とその時代

吉田 英生^{*1}

YOSHIDA Hideo

キーワード：ジョージ・ブレイトン (George Brayton), 熱力学サイクル (Thermodynamic Cycle), 内燃機関 (Internal Combustion Engine), ガスタービン (Gas Turbine)

1. 有名でありながら知られざるBrayton

Braytonの名は大学で機械工学を専攻した人なら、ガスタービンサイクルの原点として誰もが知っているだろう。しかし、そのファーストネームGeorgeを知る人は少なく、その出身国を知る人も少ないだろう。さらに、その顔を知る人にいたっては皆無に近いといえるのではなかろうか。もちろん、そういう筆者も例外ではなく、Braytonについては比較的最近になって知ったことが多い。

このように、古典的な概念や原理として確立して教科書に記述されていることは、その重要性とは対照的にその背景について意外に知られていないことが多いように思う。本稿では、Braytonが生きた時代背景を振り返るとともにあまり知られざるBraytonの仕事を紹介し、本特集全体の序論としたい。

2. 米国人George Brayton

まず大多数の方には初めての？と思われる写真を図1



図1 George Bailey Brayton

<http://www.wiley.com/college/schmidt/047114343X/thermonet/history/historybios.html>

に示そう。いかにも実直そうなエンジニアという雰囲気が漂っている。George Braytonは、ヨーロッパ中心の19世紀の科学技術界では珍しく、「自由エネルギー」の概念を導入したJosiah Willard Gibbsとともに数少ない米国人の一人である。そこでまず、ASMEのホームページからBraytonに関する記述を引用する。(以下は抜粋ではなく全てである。いかにBraytonに関する情報が限られているかがご理解いただければよい。)

Brayton, George (1830-1892), U.S. mechanical engineer and pioneer in the development of internal combustion engines, invented the continuous ignition combustion engine that later became the basis for the turbine engine. He is believed to be first in the United States to manufacture and sell gas turbines commercially (in the Providence, Rhode Island, area). He began working on internal combustion engines in the 1870s. His internal combustion engine contained a diaphragm

表1 Braytonの時代における熱機関の歴史 (内燃機関を中心に)

年	事 項
1769	James Watt (英) : separate condenserの特許で蒸気機関の効率を向上
1792	William Murdoch (英) : 石炭乾留によりガス燃料を製造
1824	Sadi Carnot (仏) : カルノーサイクル (Reflections on the Motive Power of Fire)
1830	George Brayton (米) : 誕生
1838	William Barnett (英) : 混合気を圧縮する内燃機関 (火焰点火)
1843	James Prescott Joule (英) : 熱力学第1法則
1859	"Colonel" Edwin Laurentine Drake (米) : Pennsylvaniaでの油田発見
1860	Jean Joseph Etienne Lenoir (仏) : 初の実用的内燃機関 (無圧縮電気点火)
1864	Nicolaus Otto・Eugene Langen (独) : フリー・ピストン機関
1865	Pierre Constant Hugon (仏) : Lenoirの機関を改良、火焰点火を導入
1872	George Brayton (米) : ガスエンジンに関する特許
1872	Franz Stolze (独) : 外燃式ガスタービン
1876	Nikolaus Otto・Gottlieb Daimler・Wilhelm Maybach (独) : 4サイクルエンジン
1879	Karl Benz (独) : 2サイクルエンジン
1883	Gottlieb Daimler (独) : 本格的なガソリン機関
1885	William Dent Priestman (英) : 本格的な石油燃料機関
1892	Rudolf Diesel (独) : ディーゼルエンジン
1892	George Brayton (米) : 没

原稿受付 2009年4月6日

* 1 京都大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻
〒606-8501 京都市左京区吉田本町
e-mail: yoshida@mbox.kudpc.kyoto-u.ac.jp

through which flame entered the water-cooled cylinder, creating poor combustion (George B. Selden later patented an engine identical to Brayton's except that it omitted the diaphragm). He was born Oct. 3, 1830, Rhode Island, and died Dec. 17, 1892, London, England.

http://www.asme.org/Communities/History/Resources/Brayton_George.cfm

ASMEによると「商用ガスタービンを製造して販売した」ことが強調されているが、表1を参照すると、これはあまりピンとこない。というのも、Braytonがガスエンジンに関する特許を得た1872年に、ドイツのStolzelによりガスタービンの原型が作られたとはいえそれは外燃式であったし、ガスタービンは20世紀になるまではほとんど実用にならなかったからである。むしろ、後述されるように爆発的に燃焼しないような内燃機関を実用化したということで、その名を定圧燃焼サイクルに残しているというのが、筆者の理解するところである。

3. 内燃機関の黎明期⁽¹⁾

時間が前後するが、当時を順に振り返ってみよう。19世紀前半は、18世紀からの産業革命が続いて蒸気機関全盛時であるが、1792年に英国のWilliam Murdochが石炭乾留によりガス燃料を製造したこともあり、内燃機関の開発が始動したときでもあった。まず1838年に英国のWilliam Barnettは混合気を積極的に圧縮するエンジンを考案し、火焰を利用した点火装置も発明した。しかし、最初の実用的な内燃機関として認められるのは、フランスのJean Joseph Etienne Lenoirが1860年に開発したエンジン（図2）で、Barnettとは異なって無圧縮、電気点火であった。

一方、1864年には、ドイツのNicolaus OttoとEugene Langenが、爆発力でピストンが上方に飛び上がった後に自重で落ちてくるいわゆるフリー・ピストン機関を実用化した（図3）。しかし、富塚⁽¹⁾によると、「ジジージャラジャラという騒音だけは、どうにもならなかったようである。」

4. 富塚清先生の「内燃機関の歴史」⁽¹⁾より

筆者はインターネットの恩恵に浴する時代にありながらも、Braytonの情報入手に限っては困難を極めた。しかし、今からちょうど40年前に富塚清先生（1893～1988）が刊行された「内燃機関の歴史」（三栄書房）にはBrayton機関につき驚くべき詳細な記述がある。第5版に続く「新改訂版 内燃機関の歴史」は94才の天寿を全うされた5年後の1993年に出版されたが、今では絶版となっているため、本書を所蔵する限られた図書館でしか閲覧できない。また、筆者が下手に要約して原著の貴重な情報が失われるのも誠に惜しい。そこで、出版社の

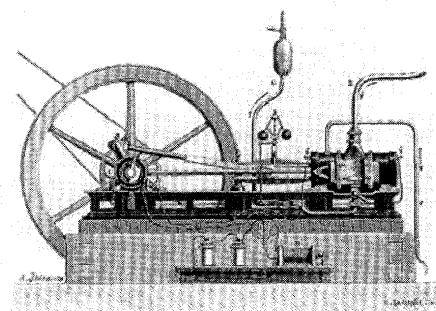


Fig. 515. — Moteur à gaz du système Lenoir.

図2 Lenoir機関

http://www.universalis.fr/encyclopedie/Z020126/MOTEUR_A_EXPLOSION.htm

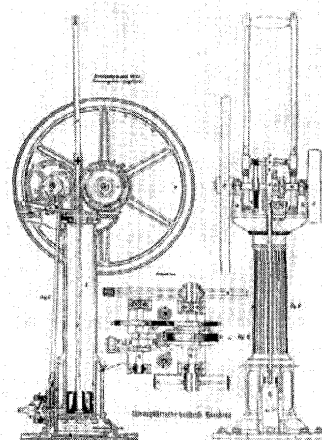


図3 Otto・Langen機関

<http://wgrenning.googlepages.com/historyoftheottoLangen>
<http://services.eng.uts.edu.au/~johnd/ICEngines/HISTORY%20OF%20THE%20OTTO.pdf>

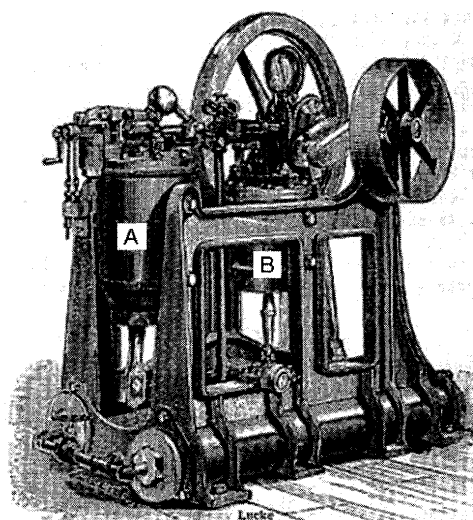


図4 Brayton機関

http://www.todayinsci.com/B/Brayton_George/BraytonGeorgeEngine.htm

ご許可を得て、Braytonに関する部分を以下にそのまま転載させていただく。なお、図番号は本文に合わせて変

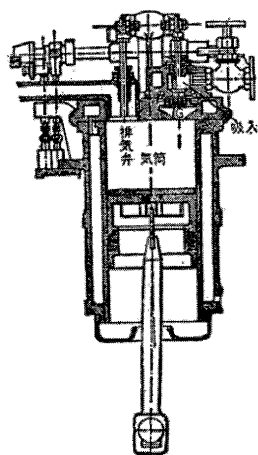


図5 Brayton機関の気筒

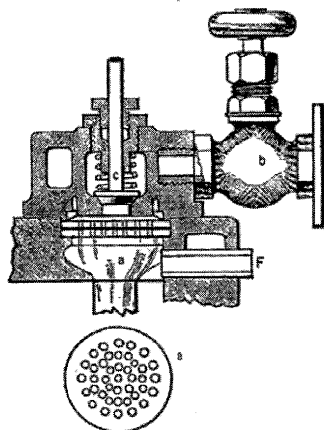


図6 Brayton機関の点火装置

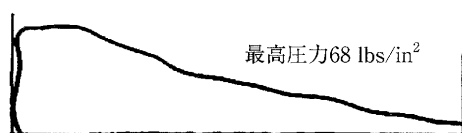


図7 Brayton機関の指圧図

更し、図4だけは模写画より鮮明なオリジナルの図に入れ替えた。

(以下、転載はじめ)

ルノワール以後10年の実用期間をすぎた1870年代には、エンジンの実用性は急速な向上を見るが、その初頭を飾る異色のあるのは、ブレイトン (Brayton) 式機関である。ブレイトンはアメリカ人で、1873年に新型を発表した。これはフリー・ピストン型よりも機械的設計においては高級で、ねらった出力も後者の約10倍の5馬力程度である。構造は30年も前のパーネットのものと似て、主気筒の他に、空気ポンプを備えた形式である。外観は図4に示される。

図中Aは主気筒で、Bが空気ポンプ、共に単働で、ピストンは現在もっぱら使われていると同様のトランク型。これらのコネクティング・ロッドは下方に水平におかれた揺腕の左右に連結されてある。揺腕の右端にクランクをまわすコネクティング・ロッドがついている。主気筒とポンプ筒とは同一直径であるが、後者の行程は前者のそのの半分になっている。弁を動かすカム軸は主軸から傘歯車で駆動されるが、回転速さは主軸と同一。弁は各気筒に2つずつ。共に茸弁である。これらの中、ポンプの送出口だけは自動弁であり、他は常例の如くカムとレバーによって駆動される。

そこまではなんらかわったところはないが、点火装置は独特である。図5のGがそれで、詳細は図6に示される。圧縮された混合気は入気弁cより入るが、その先にある一種の格子aを経て主気筒の中に入る。この格子の構造は図示のように穴のあいた真鍮の板で、格子板の間に金網をはさんである。Fは点火孔で、ここに恒久的に

パイロット・フレイムが保たれる。

こういう構造なので、予圧された混合気は主気筒に入るや否や点火されて高温ガスとなり、それから先の作用は、ちょうど蒸気機関中の蒸気と同じ静かさで、ピストンを押して行くのである。普通ガス機関のようなドカンと爆発を与えるものに比し、格段になめらかであり、この点については満足が得られた。しかし点火格子が弱点であり、しかも燃料消費の点でも到底ottoおよびランゲンのものに及ばず、後者に比肩する位置にまで到達しなかった。ただルノワールやユーゴンのものよりも熱効率は高かったというから、おそらくそれは、双方の中間(6%内外)とみればいいであろう。点火格子がどういうふうにいけなかったかという、要するにその保ちがわるく、いったん部分的に焼け切れてぬけると、そこを通して逆火が起り、貯室中の圧縮混合気を全部ボカンと爆発させてしまうのである。こうなると、エンジンの回転はとまってしまう。

これにはブレイトンもよほど手をやいたとみえて、しばらくの後、ガスを燃料として使うことは完全にあきらめ、石油を燃料とすることに転向した。軽質の石油がポンプを通じて、格子の上方に置かれたフェルト入り小溝の中に送られ、そこで気化して予圧空気と混合し、格子の先で燃焼するというわけである。

点火のための火は、空気の細い流れを格子のところに吹き送ることによって保持された。この方式になってから、逆火のおそれは完全になくなった。しかし煤が出て、気筒内部がよごれるという困難が新たに生じた。

しかし内部のよごれがない場合には運転が実になめらかで、蒸気機関のそのの如き印象であったという。普通のガス機関の場合には、主気筒の中にある相当量のガスに点火し、それが一気にもえてピストンに力が及ぶので、作用のごつごつすることが不可避だったと思われるが、ブレイトン式では、格子のところを通るとき逐次燃焼が起こるので、衝撃的な力の及ぶことがないわけである。

このエンジンの指圧図は図7の如くである。これは全力運転時のもので、最高有効圧力は4.8kg/cm² (68lbs/in²)。

ブレイトンは非常な努力家で、その生涯の大半を内燃機関の研究に捧げ、いくつか実地に動くものを作り上げた。そして、それを街路車や船にのせるべく企画したが、前者は失敗し、わずかに後者が実用となり、2艘が数年間働いただけだった。ともかく円滑にまわったのであり、馬力も今までのどれよりも高かったのだから、もう少し認められてもよかった観もあるが、やはり、効率の低いことが致命的だった(燃料消費がottoおよびランゲンのものの約55%増し)のかも知れない。着火格子の保ちのわるいこともマイナスであったろう。

ともあれこの流儀をつぐものはどこにもなく、彼の仕事は彼一代で終わってしまったのである。

(以上、転載おわり)

UNITED STATES PATENT OFFICE.

GEORGE B. BRAYTON, OF BOSTON, MASSACHUSETTS.

IMPROVEMENT IN GAS-ENGINES.

Specification forming part of Letters Patent No. 125,166, dated April 2, 1872.

To all whom it may concern:

Be it known that I, GEORGE B. BRAYTON, of Boston, in the county of Suffolk and State of Massachusetts, have invented certain new and useful Improvements in Gas-Engines; and I do hereby declare that the following specification, taken in connection with the drawing making a part thereof, is a full, clear, and exact description of the same.

Figure 1 is a side elevation. Fig. 2 is a vertical section on the line *x x* of Fig. 3. Fig. 3 is a horizontal section on the line *y y* of Figs. 2 and 4. Fig. 4 is a vertical section on the line *z z* of Figs. 2 and 3.

The drawing is made on a scale, with reference to the model, of six inches to the foot.

The invention hereinafter described relates to a means for making practically available, as a motive-power, those compounds which result from the mixture of gases obtained from light hydrocarbons with atmospheric air. It has for a long time been known that such compounds were capable of developing, upon ignition, an immense degree of force, and various attempts have been made to employ them as motive agents for working machinery. My invention is embodied in a structure which provides, first, for maintaining an accumulation of a limited quantity of the gaseous compound under considerable but uniform pressure in the reservoir, the supply to the reservoir being always proportioned to the consumption of the engine, and the gaseous compound mixed only as it is introduced to the reservoir; and, secondly, for introducing a jet of the mixed compound so under pressure, while in the act of changing its volume as the result of ignition, into a cylinder, to act with its expansive force upon a moving piston.

In the drawing I have represented a single-acting engine, arranged to exhibit my improvement. To construct a double-acting engine, operated by this motive-power, would require changes of arrangement, which any competent constructor would understand, but would not involve any change in principle.

Referring to Fig. 2, A is the cylinder proper of the engine, which is fitted with a piston, B. As the piston is exposed to the direct action of the ignited and heated gases it should be made of or protected by some material, as, for

instance, soap-stone, capable of sustaining, without injury, a high degree of heat. The cylinder itself should also be incased with a water-tight jacket of metal, and enough larger in diameter than the cylinder to allow of a water-space between the two, through which water should be made to circulate. A convenient way for effecting this will be to connect a tank of water, which may be located at any convenient place, with the water-space by two pipes, one entering near the top and the other near the bottom of the same, as in the common arrangement for establishing a water-circulation. The cylinder A is, in this instance, surmounted by an air-pump, the barrel of which is C. It is furnished with a piston, D, attached to the rod E, common to it and the piston B. This air-pump is supplied with a proper induction-valve, *a*, and eduction-valve, *b*, of any preferred construction and arrangement. F is a chamber, provided with two inlets, *c* and *d*. The former admits atmospheric air, and the latter, by means of any suitable tube or conducting-pipe, is connected with a supply of common illuminating gas or other carbureted hydrogen, as, for instance, the volatile constituents of petroleum oils. The capacity of these two inlets may be regulated by means of a screw-valve applied to each, so that the relative quantities of air and gas to be admitted at the same time to the chamber F may be varied at pleasure. In general the proper proportions will be found to be twelve parts of air, by volume, to one of carbureted hydrogen to make a compound, which upon ignition will be followed by a complete combustion; but, in practical operation differences in chemical constituents of the gas employed will probably require variations in the required proportions of atmospheric air. It is obvious that the movement of the piston D of the air-pump will, at each downward stroke, draw into the barrel C a charge of gaseous compound through the valve *a*, and that upon the upward-stroke of the piston the same charge will be forced through the eduction-valve *b* into the reservoir G. This reservoir should be constructed of strong boiler-plate, or of the best mixtures of iron used in casting ordnance. It should be made with reference to sustaining a constant internal pressure of at least sixty pounds to the

square inch. It should be furnished with a pressure-gauge, and with a safety-valve, arranged to open when the pressure from any cause exceeds the prescribed limit. It is not to be understood that any large volume of the gaseous compound is to be collected and retained within the reservoir G. Its interior capacity need not be more than twice the cubical contents of the cylinder A; but, nevertheless, of sufficient size to enable the air-pump (which should be properly proportioned to that end) to maintain within the reservoir a uniform maximum of pressure.

The arrangement of devices which I employ for applying the gaseous compound to work the engine are as follows: In a suitably-formed recess or chamber, H, formed at the bottom of the cylinder A, below the range of the down-stroke of the piston, I place any convenient number of wire-gauze diaphragms, *e*. These I call the "interceptors," because they serve to guard the passages through which the gas is supplied to the engine, and cut off the flame after the gas has been ignited from the supply which is flowing from the reservoir when the valve-connection is opened, and are so located that all gas consumed in working the engine must pass through them. It is a screw-valve, which, when opened, allows the gaseous compound to flow into the conducting-passage *f*, with which and the recess or chamber H, spanned by the interceptors, a communication is made, when the valve *h* is opened. The valve *h* is opened for every up-stroke of the piston B by means of the revolving-cam J on the main shaft, which causes the lever K to vibrate and work the valve-rod *h*, which is pivoted to such lever. The configuration of the cam J determines the length of time that the valve *h* shall remain open, and the spring *j* causes the valve to close upon the instant that the cam ceases to hold it open.

As previously indicated, I intend to apply the gaseous compound to work the piston while it is undergoing expansion after ignition. I have therefore to provide for maintaining a constant flame upon the upper surface of the interceptors which will serve to fire each charge of gas so soon as it passes through the diaphragms of wire-gauze, and upon its first entrance to the cylinder. For this purpose I make a small V-shaped channel, *m*, in the edge of the valve *h*, or, which would be better, make a vent through the valve-seat and regulate its area by a check-valve. This allows a small quantity of the gas to flow at all times to the interceptors, which, being ignited, will burn tranquilly and with a lambent flame upon the upper surface of the interceptors, and constitute a living torch at the entrance of the cylinder to fire each charge of gaseous mixture in succession.

Let it now be supposed that the engine is to be put into operation. The reservoir G should be filled with gaseous compound to the desired pressure. This may be done by revolv-

ing the balance-wheel by hand if the engine be of small capacity, or a separate air-pump for charging the reservoir may be used in case the engine is too large to be readily revolved by hand. The screw-valve I is now opened and a lighted taper is inserted through the exhaust-port L, Fig. 1. The small supply of gas admitted through the channel *m* in the valve *h* has struggled through the meshes of the gauze interceptors, and upon the taper being applied to it will burn quietly. The valve *h* is now opened by a starting-bar or other convenient means, and a charge of gas, under the pressure in the reservoir, rushes against the under side of the interceptors, and upon reaching the flame playing upon their upper surface is fired thereby. While in the state of expansion consequent upon ignition it exerts not a spasmodic or explosive force upon the piston, but a true pressure due to expansion on account of the fact that the piston is at the very commencement of its stroke when the expanding gas begins to act upon it, and the quantity of gaseous mixture during its period of admission is in proportion to the extent of the movement of the piston, and is put into the state of expansion upon passing the interceptors and entering the cylinder. The piston having completed its upward stroke, the momentum of the balance-wheel M, (Fig. 1,) which, by means of the common crank and links shown at Fig. 1, is connected in any convenient way with the piston, which causes the piston to descend again, the injection-valve *h* being now closed. While the piston is descending a cam on the main shaft, acting upon a lever (Fig. 1) similar to that which works the valve *h*, opens the exhaust-valve M (Fig. 3) in a well-understood way. The exhaust-passage in the several figures is indicated by a broad black-feathered arrow. It would naturally be supposed that the flame caused by igniting explosive gas under pressure upon the surface of the wire-gauze interceptors would be forced back through the interceptors and ignite the gaseous compound in the passage *f*, connecting with the reservoir, and explode the contents of the latter. Many months of experiment with a working-engine subjected to every variety of conditions likely to occur in daily use have proved to me that a series of wire-gauze diaphragms (six or more) perfectly intercept the flame and render danger from accident impossible; and that the flame has no tendency to turn backward is proved from the condition of the gauze after long use in showing no evidence of being even slightly burned. I have also repeatedly caused the gaseous compound in the reservoir to be fired, and the safety-valve in every instance has prevented the slightest injury to the apparatus. In case it is preferred to make use of any of the light hydrocarbons obtained from petroleum or other sources, as, for instance, naphtha, on account of the greater cheapness of the material over illuminating gas, it will be found most convenient to allow

the fluid having the necessary constituents to be dropped upon or absorbed by a sponge placed in a vessel so that it can readily vaporize, and in that state be pumped off from the vessel by the air-pump, in combination with atmospheric air, into the reservoir for supplying the engine.

I have described the reservoir G as containing the mixed gases. It is, however, entirely practicable to employ two reservoirs, one of which shall contain the carbureted hydrogen and the other atmospheric air, the contents of both being condensed by pressure and mixed only as the charge from each reservoir enters the chamber H. Such arrangement would be more complicated in the machinery necessary to be used than the one described, requiring, as it would, induction-valves appropriate to each reservoir; but it would insure nearly absolute safety in the use of such gaseous agents of force.

I do not limit myself to the construction or arrangement of the several parts of the engine

as described, inasmuch as the improvements which constitute my invention can be applied to engines of various forms.

What I claim as my invention, and desire to secure by Letters Patent, is—

The following apparatus or organisms, in combination: A pumping-engine, for condensing air and gas; a reservoir for containing such agents, either separated or when mixed, and a cylinder and working-piston, provided with suitable automatic valve-gear, operating induction and eduction valves, when such cylinder is furnished with a perforated partition whose office is to maintain a torch to fire the successive charges of gaseous mixture as they are entering the cylinder and prevent the back action of the ignited charge, substantially as described.

GEO. B. BRAYTON.

Witnesses:

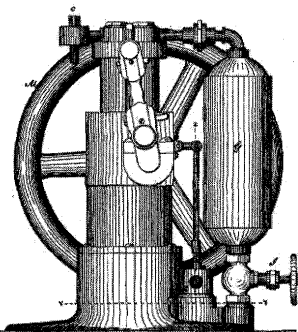
JOHN D. THURSTON,
PETER F. HUGHES.

GEORGE B. BRAYTON.

Improvement in Gas Engines.

No. 125,166.

Patented April 2, 1872.



WITNESSES

John D. Thurston
Peter F. Hughes

INVENTOR

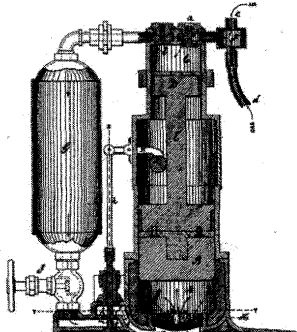
George B. Brayton

GEORGE B. BRAYTON.

Improvement in Gas Engines.

No. 125,166.

Patented April 2, 1872.



WITNESSES

John D. Thurston
Peter F. Hughes

INVENTOR

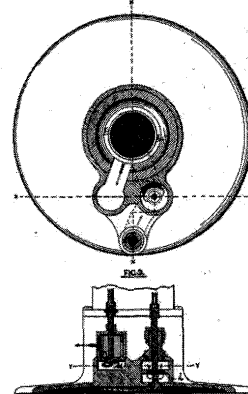
George B. Brayton

GEORGE B. BRAYTON.

Improvement in Gas Engines.

No. 125,166.

Patented April 2, 1872.



WITNESSES

John D. Thurston
Peter F. Hughes

INVENTOR

George B. Brayton

<http://www.google.com/patents?id=vWlxAEEBAJ&dq=george+brayton+1872>

<http://cgi.ebay.com.sg/ws/eBayISAP.dll?ViewItem&item=350132358309&indexURL=>

5. むすび

特集全体の序論ということで、Braytonに焦点を合わせながら、現代から150年前後遡った内燃機関の黎明期を垣間見ることができたのは幸いだった。それにしても、富塚先生の著書⁽¹⁾は現代のインターネット情報をはるかに凌ぐ広く深い内容であることに圧倒された。分量的にはかなり少なくなってしまうが、やはり富塚先生の貴重な関連書⁽²⁾が現在入手できるので紹介しておこう。

最後に、Braytonの特許を探し出すことができたので5ページ以下に紹介して、結びとさせていただく次第である。

参考文献

- (1) 富塚清, 新改訂版 内燃機関の歴史, 三栄書房, 1993.
- (2) 富塚清, 新装版 動力の歴史 (動力にかけた男たちの物語), 三樹書房, 2008.