

容積型熱機関における膨張比について： アトキンソンの業績を尋ねて

坂上 茂樹

Citation	LEMA. 537 号
Issue Date	2019-10
Type	Journal Article
Textversion	Author
Rights	この記事は、私的な目的でのみ使用することができます。 その他の使用には、著作権者に事前の許可が必要です。

Self-Archiving by Author(s)
Placed on: Osaka City University Repository

容積型熱機関における膨張比について

—— アトキンソンの業績を尋ねて ——

On the Expansion Ratio of Piston Engines

—— In search of the Achievements of James Atkinson ——

最終更新 2014 年 12 月

『LEMA』誌 2019 年 10 月号に掲載後、リポジトリ登載

坂上茂樹

はじめに

世間では一時、ミラー・サイクルが流行ったかと思えば今度はアトキンソンだと喧しくなったりする。しかし、流行りがどうあれ、また騒がしい時代相なればこそ、容積型熱機関における膨張とか膨張比とかいったモノがどのように処理されて来たのかについて今一度、マトモに考え直してみる必要があるように思えてならない。以下は蒸気機関の時代からガス機関全盛時代に亘る本件の回顧であり、とりわけ James Atkinson の業績を尋ねようとする試みである。

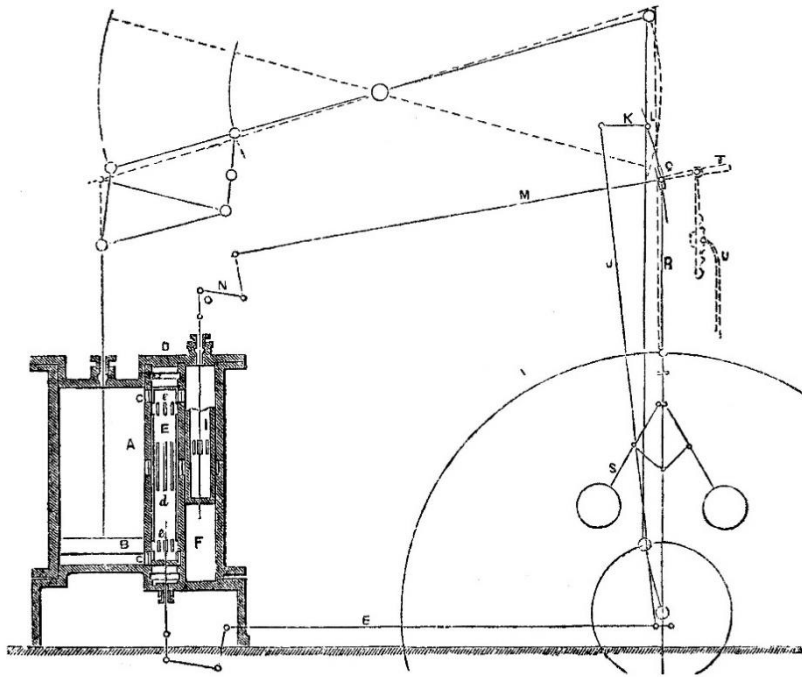
1. 蒸気機関における Variable Expansive Gear

James Watt(1736~1819)亡き後、レシプロ蒸気機関においては気筒への蒸気供給を行程の途中で遮断＝“cut off”し蒸気を断熱膨張させる膨張機関および回転式機関および複動機関という彼によって定められた盤石の 3 点基礎に立脚しつつ、より高い蒸気圧の実用化を目指した小刻みな改良が施されて行った。

やや時代が下るとこれらの要素を統合し、運転中、締切り比を随意に変更し、低い回転速度では蒸気供給を長く設定して大きな回転力を得、高い回転速度では小さな回転力を発揮しつつサイクル当り蒸気消費量を節約するような可変膨張式弁装置(Variable Expansive Gear)実現へ挑戦が本格的に行われるようになる。

次の図は回転式複動ビーム機関において可変締切り比＝可変膨張比を実現しようとした最初期の試みの一つであり、据付機関らしくワットの遠心式調速機が組込まれており、しかも、それがスロットルではなくこの弁装置に連動せしめられている。つまり、ここには一定の回転数を保つシカケとしてスロットルの加減ではなく締切り比の調節を用い、給気絞りに因る損失の発生を回避して熱効率を高めようとする狙いが観取される。

図 1 Richard Roberts による可変膨張式弁装置のアイデア(1832 年)



Zerah Colburn, *Locomotive Engineering and the Mechanism of Railways*. London, 1871, Vol.I, p.40
Fig.41.

やがて、この種の制御技術は蒸気機関車において弁装置と総称される決定的に重要な制御機構へと成長を遂げて行く。勿論、蒸気機関車において调速機は排除され、弁装置は自動車における変速機(変速・逆転装置)に相当する役割を担って行くことになる。翻って言えば、定速運転を本旨とする機関や変速機(とクラッチと)とのユニットの格好で用いられる場合、かくも複雑な制御機構は要らぬということでもある。

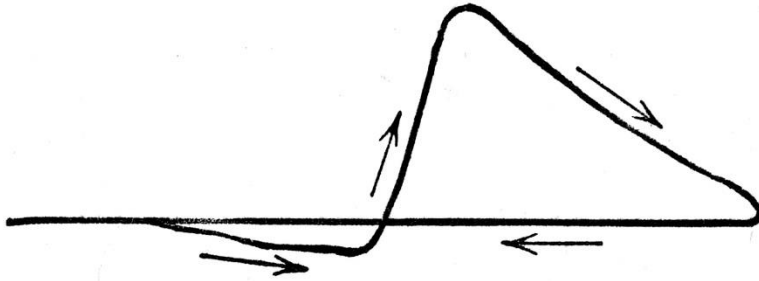
2. 内燃機関における膨張比

1) 圧縮を伴わない Lenoir ガス機関、圧縮を伴うガス機関、アトキンソンの提案

Jean Joseph Etienne Lenoir(仏：1822-1900)の2サイクル・ガス機関は蒸気機関にソックリの横型機関で作動も通常の蒸気機関と同様に複動であった。そのサイクルに圧縮行程は無く、ガスは空気と共に退行しつつあるピストンによって吸い込まれ、吸気弁が閉ざされた後に高圧電気火花によって点火された¹。

¹ ルノアール機関の点火系については宮田忠礼「電気点火一点火栓」 富塚・澤藤・宮田『内燃機関史・電気点火』 共立社、内燃機関工学講座、第1巻、1936年、339頁、松井憲紀『電気点火』 有象堂出版部、1943年、3、372~373頁、参照。点火栓の磁器破損、絶縁不良に因る多湿時の不調等がその持病であった。同機関については Friedrich Sass, *Geschichte des Deutschen Verbrennungsmotorenbaues von 1860 bis 1918*. Berlin et. al., 1962, SS.11~15 や Lyle Cummins, *Internal Fire*. Oregon, 1976, pp.104~110 にもかなり

図2 ルノアール・ガス機関のインジケータ線図



J.,A., Ewing, *The Steam-Engine and Other Heat-Engines*. 2nd. ed., Cambridge, 1897, p.412 Fig.194.

弁装置は蒸気機関と同工の滑り弁で、上図のサイクルなら謂わば 60%カットオフに相当しようか。但し、蒸気機関なら線図の上部＝膨張曲線は“ $\neg$ ”となるところであるが、ルノアール機関のそれにおいては左側の水平部分を完全に欠くワケであるからサイクル当りの仕事は応分少なくなる。

また、ルノアール機関においては弁やポートなど各部の熱負荷が大きく大排気量化が困難であった上、比出力が小さいため機関出力自体も低レベルに留まった。勿論、そのサイクルにおいては吸気抵抗が相当計上されていたことも手伝って $P_{\max}$ が低く膨張比も小さいため T_1 と T_2 との落差は僅少となり低い熱効率は当然のことであった。

続いて圧縮を伴うガス機関の時代が訪れる。Nikolaus August Otto(1832~91)のフリーピストン・ガス機関、オットーの4サイクル機関、Dugald Clerk(1854~1932)の2サイクル機関がその主役であった。Gasmotorenfabrik Deutz の下にオットー・サイクルの特許が帰属していた 1886 年まで、特許回避の必要からケルチングやベンツを含む多くの事業家が2サイクルの製造に注力したが、ここではその経過やオットー・サイクルやクラーク・サイクルそのものについては立ち入らない。

2) アトキンソンの提案

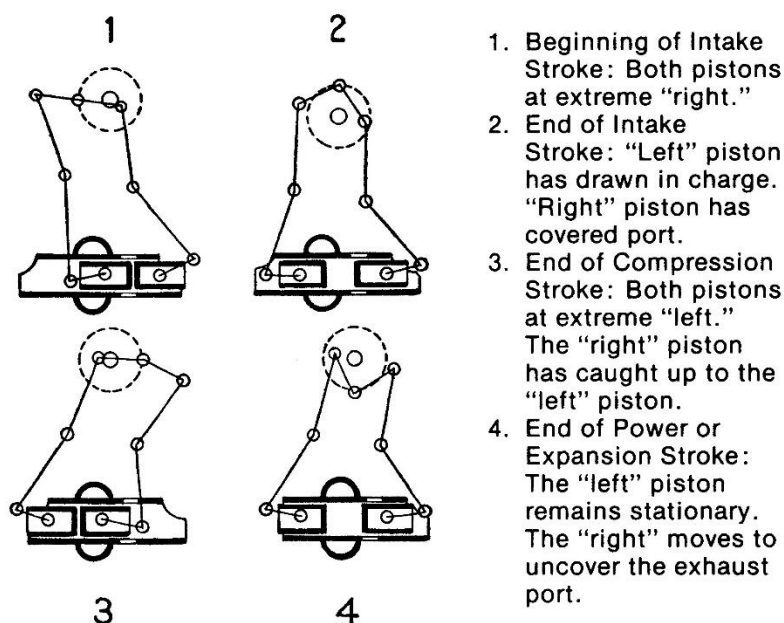
1885 年、かねてよりオットー・サイクルの熱効率改善を志していた機械技術者ジェイムズ・アトキンソン(英: 1846~1914)は 1883 年に彼を専務取締役として迎えた British Gas Engine and Engineering Co.に在って4サイクル対向ピストン型にして膨張・排気行程が吸入・圧縮行程より長く、その際のピストン速度が大きい“*Differential Engine*”を開発した。

このエンジンにおいては膨張比>圧縮比が実現しているため、 T_2 の引き下げに有利である他、膨張行程のピストン速度が大であることに因り気筒壁面への熱損失も抑制されるという触れ込みであった。図に示されているように4サイクルではあるが吸・排気はポートに

詳しく紹介されているが点火栓の図解は何れにおいても与えられていない。

依っていた。理屈は良いが関節部のヤタラに多いことがその実用上の欠点であった²。

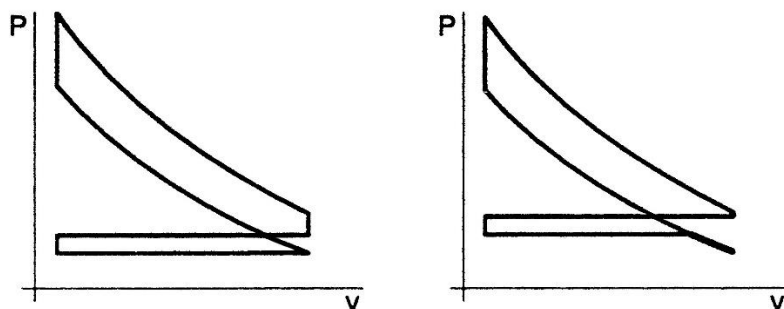
図3 アトキンソンの *Differential Engine*



Cummins, *ibid.*, p.220 Fig.11-16.

膨張・排気行程＝吸気・圧縮行程のオットー・サイクルと膨張・排気行程＞吸気・圧縮行程のアトキンソン・サイクルのインジケータ線図がイメージとして次図のようになることは勿論である。

図4 オットー・サイクル(左)とアトキンソン・サイクル(右)

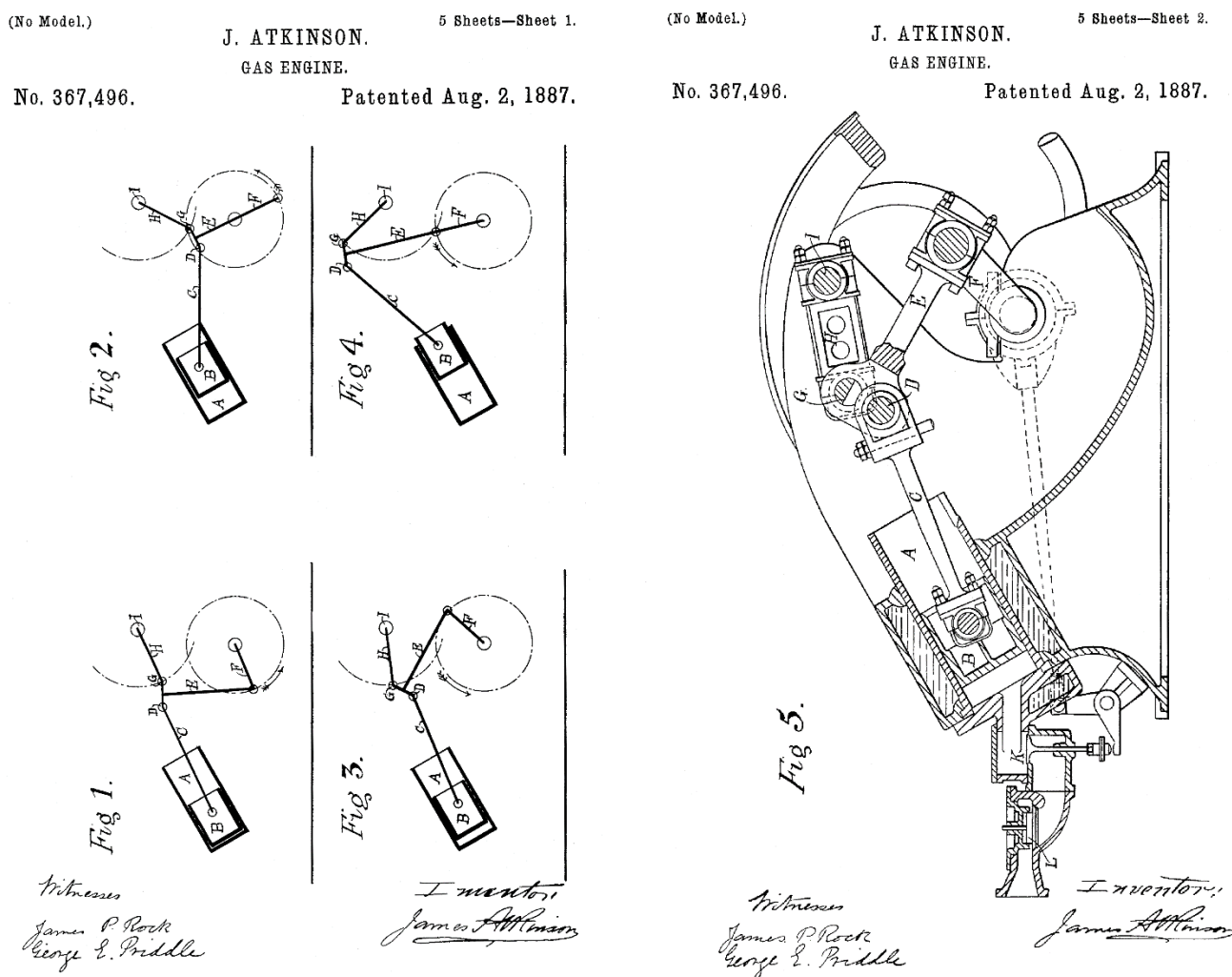


1886 年頃、アトキンソンは同じ状況を対向ピストン方式から膨張・排気行程を吸入・圧縮行程の約 2 倍の長さとした単一ピストン方式の “*Cycle Engine*” に切替えて現出させることに成功した。The Society for the Encouragement of Arts, Manufactures and Commerce

² cf., Ewing, *ibid.*, p.418, 430~431, 433, C., Cummins, *ibid.*, pp.219~221.

に依って 1888 年に主催された比較試験において彼のエンジンは Crossley Brothers., Ltd. の 4 サイクル機関の 21% に比して 2% ポイント高い 23% の正味熱効率を記録した。Cycle Engine は British Gas Engine and Engineering Co. から一千基以上、更に英米のライセンスに依っても幾許かが製造された。しかし、その僅かな熱効率上の利得に数倍する構造的複雑さはそれ以上の商業的成功に対する障害となった³。

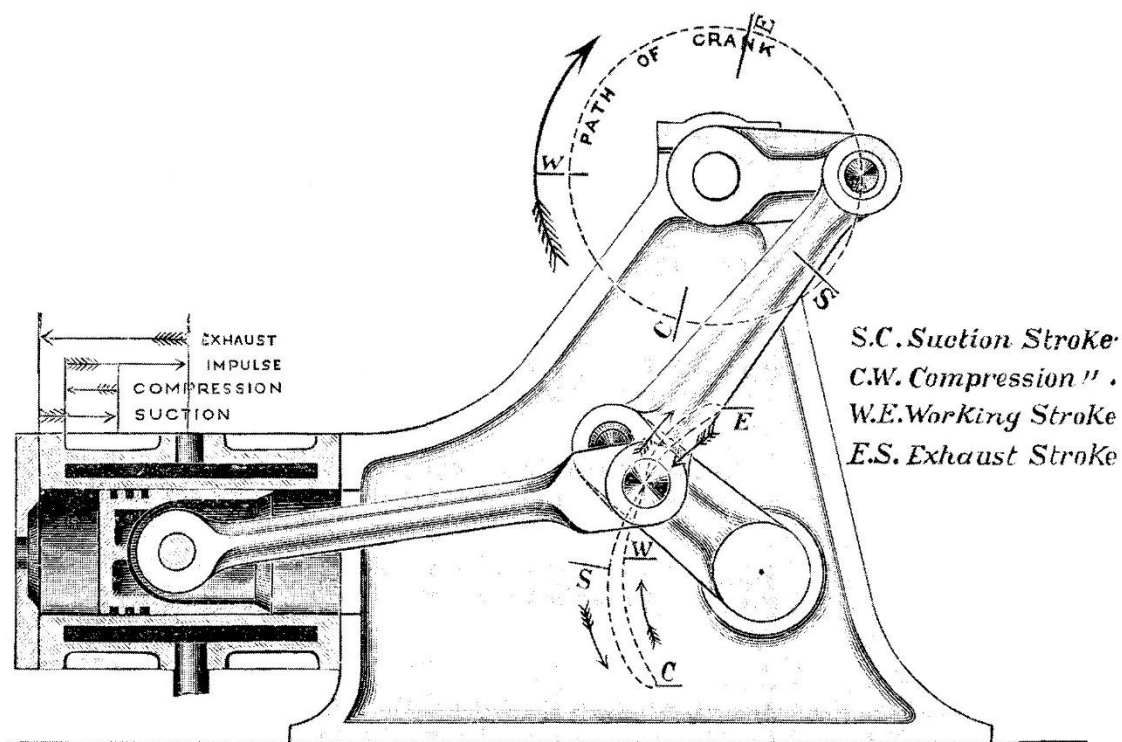
図 5 アトキンソン Cycle Engine 特許の作動解説図と縦断面図



From U.S. Patent No. 367496.

図 6 アトキンソン Cycle Engine の実体側面図

³ cf., Ewing, *ibid.*, p.418, Cummins, *ibid.*, pp.221~223. 邦語文献では富塚 清「内燃機関史」富塚・澤藤・宮田前掲『内燃機関史・電気点火』所収、45~49 頁、同『内燃機関の歴史』第 6 版、三栄書房、1993 年、44~47 頁、参照。



Cummins, *ibid.*, gravure Fig.11-15.

British Gas Engine and Engineering Co.が1893年に廃業した時、アトキンソンはかのクロスレイ社に主任技師として招聘された。彼は同社においても様々な技術的貢献を重ねた。それらはカデナシー効果を想わせる4サイクル機関におけるダイリューション・ガスの排気慣性に依る吸出し方式⁴、クロスレイ式出力調整法(governing : 後述)、などである⁵。

3. 4サイクル・ガス機関の進化と Governing の諸様式

1) Governing の基本的3様式

容積型熱機関の膨張比、あるいは短縮された吸入・圧縮行程に注目する本稿において殊更、大きな問題となるのはその後、内燃機関の主流にのし上がった“ごく普通の”4サイクル・ガス機関において^{ガバナニング}調速の諸様式である。この問題についてはやや時代が下り事態

⁴ cf., Ewing, *ibid.*, pp.426, 432, Cummins, *ibid.*, p.223. 石川亮治『新式瓦斯機関取扱法』航盛館、1910年、32頁、参照。カデナシー効果については拙稿「Petter 機関について」(大阪市立大学学術機関リポジトリ登載)、参照。

⁵ 彼は2サイクル高速ガス機関開発においても足跡を残したし、磁器製のクロスレイ式着火管も(磁器製というのは同社に限られた技術ではなかったが)彼の主導下で開発されたものであるように想われる。しかし、今はこれ以上の言及を控えざるを得ない。彼の2サイクル機関については富塚「内燃機関史」49~50頁、同『内燃機関の歴史』第6版、47頁、参照。なお、同書62~63頁を見れば、富塚がアトキンソンをクロスレイとは無縁の発明家のように見做していたと知れる。

が鎮静化してから泰斗に依って下された総括に依拠しつつ必要に応じて同時代の書物から劣敗した技術に係わる情報の引証を試みるのが無難である。Harry R., Ricardo の書物はかような作業におけるガイドラインとして最も適当である⁶。

リカードに拠れば、ガス機関のガバナリングは3つの主要な様式に分かれた。それは：

[A] Hit and Miss governing

[B] Quantitative or throttle governing

[C] Qualitative governing

である。これら3様式の概要を縦覧すれば：

[A]のヒット&ミス方式とは過回転が生じた時、これを慣性力ないし遠心力を拾うガバナに依って検出し、ガス弁を突くペッカーを空振りさせてガス弁の開き回数を間引く調速法である。ガス弁のリフトは多くの場合変化させられない。我国においては漁船用発動機として永らく用いられた焼玉機関にこの方法で間引き噴射を行わせるガバナが用いられて来たから、漁船界においてこのヒット&ミス方式は馴染み深い技術であった。

[B]の方式は混合比を一定とし、ガバナを介した吸気絞り等によって圧縮初めの圧を落して出力制御を行う技術である。こちらは気化器式ガソリン機関において最も普通に採られて来た手法である。勿論、消防ポンプ車用機関でもない限り、自動車機関においてはガバナではなく人間がスロットル操作を行うのが常例であった。

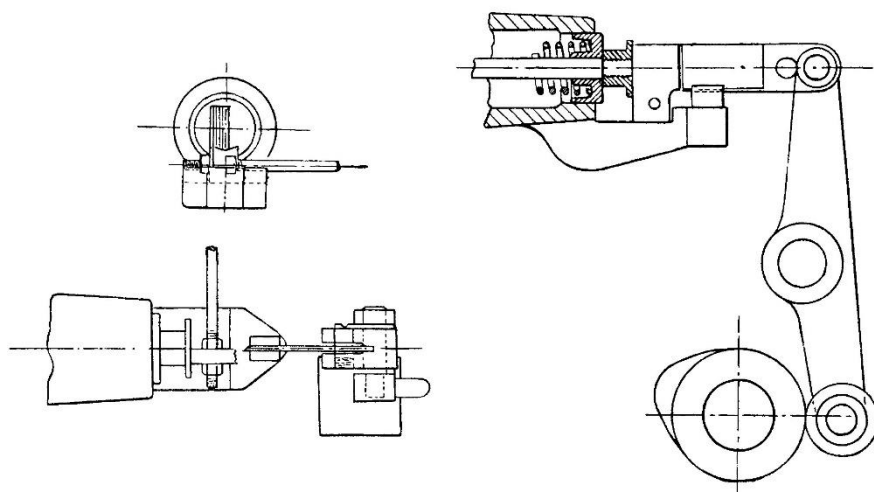
[C]の方式はガバナに依ってガス弁の開度を可変制御する方式で、空気絞りは補助的にしか行われないから通常運転状態において混合比は若干変化せしめられた。それ故、常用出力域においてはある種の希薄燃焼が行われたことになる。元論、ディーゼル機関における出力制御はこれの極致であり、オーバーオール空燃比を大幅に変動させる制御が常套となっている。

2) ヒット&ミス方式

以下、3方式のそれぞれについて往時のガス機関がらみでやや詳しく見て行こう。ヒット&ミス制御においては間引きでの空転時、ダイリュションガスの徹底的な追い出しがなされることに因り実作動サイクルの線図係数が高くなる反面、空転は動力の純然たる浪費をなすからトータルの正味熱効率は低下する。また、トルク変動と振動が甚だしく軸受最大負荷も常に大きい。次図はクロスレイ機関におけるヒット&ミス式制御機構の一部で、左図下=平面図のロッドをガバナの腕と連結して進退させ、ペッカーとガス弁ステム・キャップとの間に位置するガバナ・ブロックを出し入れし、ヒット&ミス=on/off 制御を演出する。構造単純で小形機関にしばしば見受けられたが、精緻な調速には不向きである。ガバナ・ブロックの受動面にはペッカーを受けるためのセレーションが刻まれている。

⁶ cf., Harry R., Ricardo, *The Internal-Combustion Engine Vol.I Slow-Speed Engines*. London, 1922, Ch.XXV The Governing of Gas-Engines(pp.376~384).

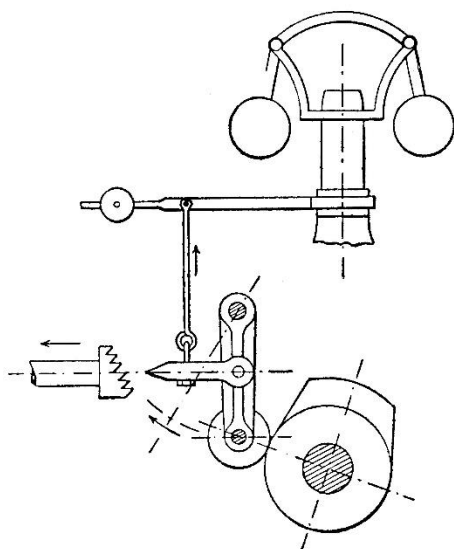
図7 クロスレイのヒット&ミス式制御機構主要部



Ricardo, *ibid.*, p.377 Fig.164.

なお、小細工としてガバナ・ブロックを傾斜段付きとし、ガス弁のリフトを可変とする次図の如きヒット&ミス+質的制御併用方式も出現している。

図8 傾斜段付きガバナ・ブロックを用いたヒット&ミス+質的制御併用機構



R.,E., Mathot(translated from French by W.,A., Tookey),*The Construction and Working of Internal Combustion Engines*. London, 1910, p.211 Fig.XI.-7.

2) 量的制御方式

量的制御方式は一般に、3つの様式に細分類される。

i) スロットル弁によって吸気絞りを行うもの

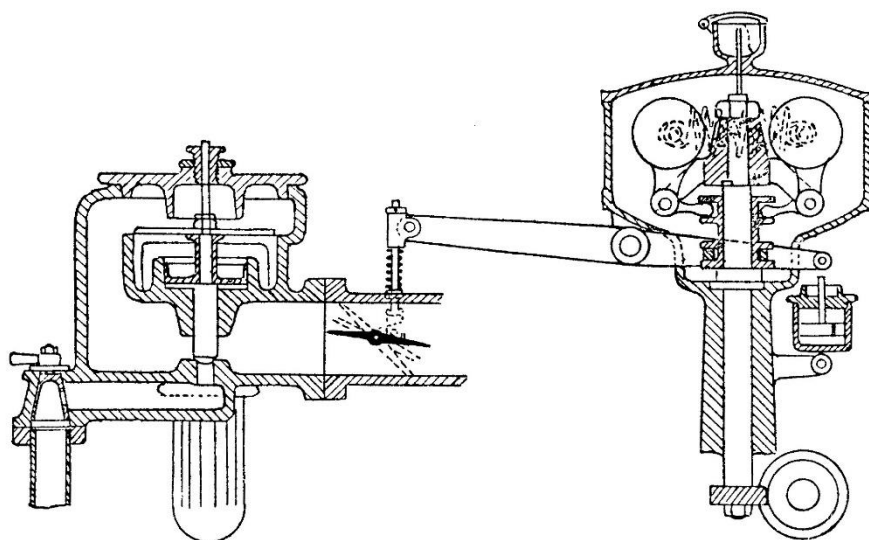
- ii) 主吸気弁(ガス弁を従えた空気弁)のリフト変更に依り吸気絞りを行うもの
- iii) カットオフを行うもの(主吸気弁開き時間変更ないし別個に締切弁を使用)

i) スロットル弁方式

この方式は都市ガス機関ないし清浄度の高いガスを焚く機関において汎用された。タール分に富むガスを扱うとスロットル弁に膠着を生じたるからである。次図はクロスレイ機関において採用された巧妙なスロットル方式であり、ガバナは空気のみを絞り混合比は下流に位置する混合弁に依って制御された。

この場合、吸気の絞り損失の発生は避けられない。しかし、多くの陸用据付機関はそうやたらに軽負荷運転を続けるような遣い方に供されはしなかったから、絞り損失に殊更、目くじら立てられる謂れは無かったようである。

図9 クロスレイ機関に採用されたスロットル弁方式



Ricardo, *ibid.*, p.317 Fig.124.

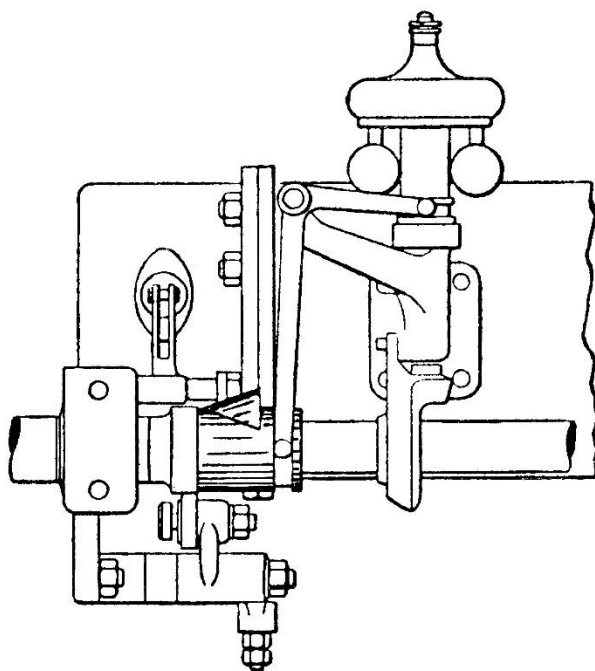
ii) 可変リフト型吸気弁

可変リフト型吸気弁方式は全然新しい技術などではなく、清浄度の低いガスを焚く大形機関のほとんどにおいて常用されていた月並みの技術である。その機構は多様を極め、中には極度に複雑なモノもあり、円錐カムや楔などを用い、ガバナに大きな負荷をかけハンチングを惹起させるようなシステムも提案、実用されていた⁷。

⁷ 過度に複雑な機構の得失とその将来性を早々と見切ったためか、自ら内燃機関製造会社を領導した Hugo Güldner はその大著 *Das Entwerfen und Berechnen der Verbrennungskraftmaschinen und Kraftgas Anlagen* の少なくとも 1905 年の第 2 版、'13 年の第 3 版においてガス機関の調速機構について多くの頁を割いていない。

開発の疾風怒濤時代に登場した機構の例として次のような装置があった。これは実のところ混合吸入弁ではなく、ガス弁のリフトを可変制御する質的制御機構なのであるが、そのメカ的趣向は混合吸入弁のリフトを可変とする量的制御の場合と同じである。

図 10 円錐カムを用いてガス弁のリフトを変更に質的制御を行う装置

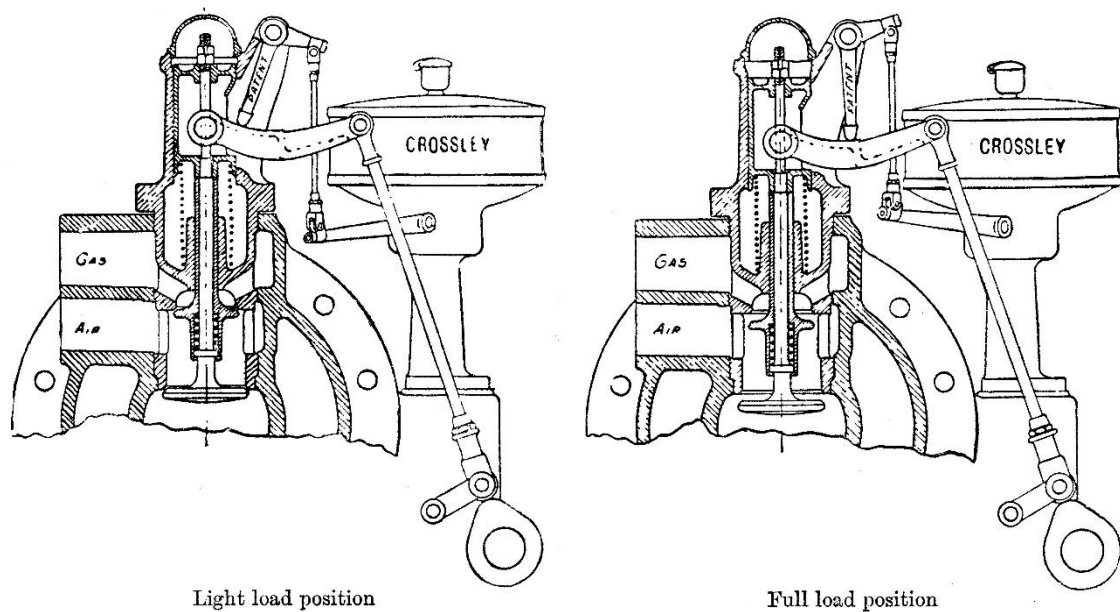


Mathot, *ibid.*, p.211 Fig.XI.-6.

内丸最一郎『改訂 瓦斯及石油機関』前編、丸善、1915 年、125 頁、第八十七圖はこれの焼き直し。

最も典型的な混合吸入弁リフト制御機構の例としてリカードはクロスレイ大形ガス機関に採用された可変支点方式を示す次図を掲げている。ガバナに対して大きな負荷をかけないこの方式は非常にシンプルかつ賢明な遣り方であるが、これなどはアトキンソンの指導下に開発された技術であったと思われる。

図 11 クロスレイ大形ガス機関に採用された可変リフト型混合吸気弁方式



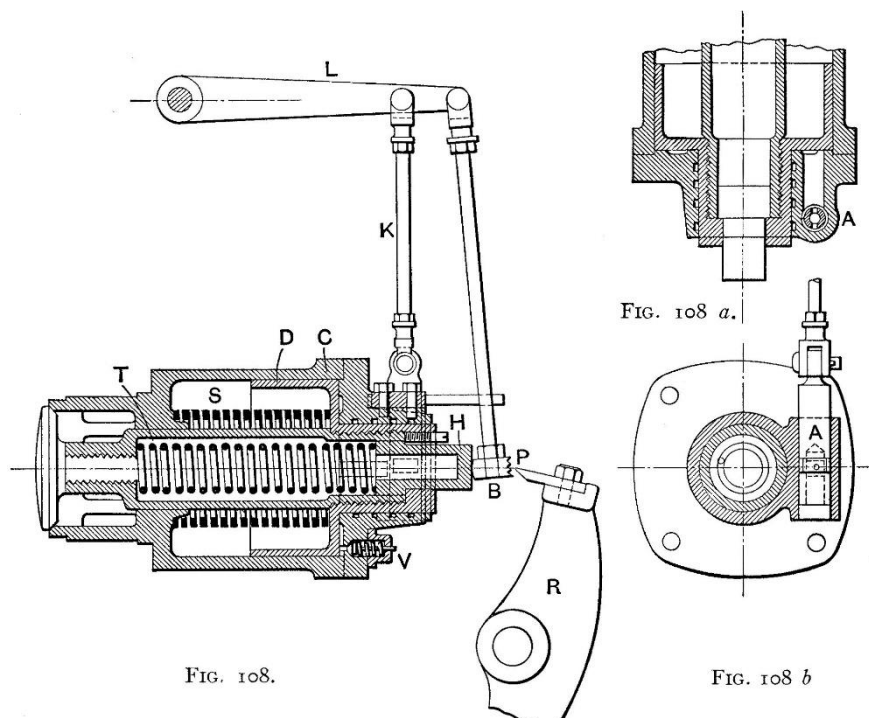
Ricardo, *ibid.*, p.341 Fig.137.

また、別の古い書物には間違い無くアトキンソンその人によって開発されたクロスレイ・ガス機関の制御方式としてヒット&ミスと吸気弁リフト抑制に依る吸気絞りとを連動させる方式が紹介されている。それは次図のような機構で、負荷率 50%までは絞り调速、それ以下になるとヒット&ミスが動員されるシカケであった⁸。

ガバナの腕 L がある程度以下の軽負荷においてブロック B を引抜き、ペッカー P を空振りさせる仕組みについては自明であろう。

図 12 クロスレイの吸気弁リフト制御+ヒット&ミス併用方式

⁸ ガス弁ないし混合機構についての説明は出典文献の何処にも見当たらない。



A.,M., Levin, *The Modern Gas-Engine and the Gas-Producer*. N.Y., 1909, p.311 Fig.108.

C と D との引出し線を修正。

吸入弁の方はその太いステムが中空となっており、真空室 C 内のダッシュポット・プランジャ D と結合されている。S は吸気弁を閉塞すると共にダッシュポット・プランジャ D を真空室 C の底に圧着させるためのスプリングを兼ねる。V は弁の閉塞を速やかに行わせるための外開きの漏し弁である。開弁力は $R \rightarrow P \rightarrow B \rightarrow H \rightarrow T$ と伝達される。

A は K に依ってガバナの腕 L と連動せしめられた空気弁で、腕の位置が水平になる重負荷運転時には空気を自由に通し、D の動きを拘束しないため、吸入弁は自由に全開に至る。軽負荷運転時には L は傾斜し K を引上げ、A の位置をシフトさせて空気流入路を絞り、C 内には部分真空を生じて吸入弁のリフトは小さくなる。

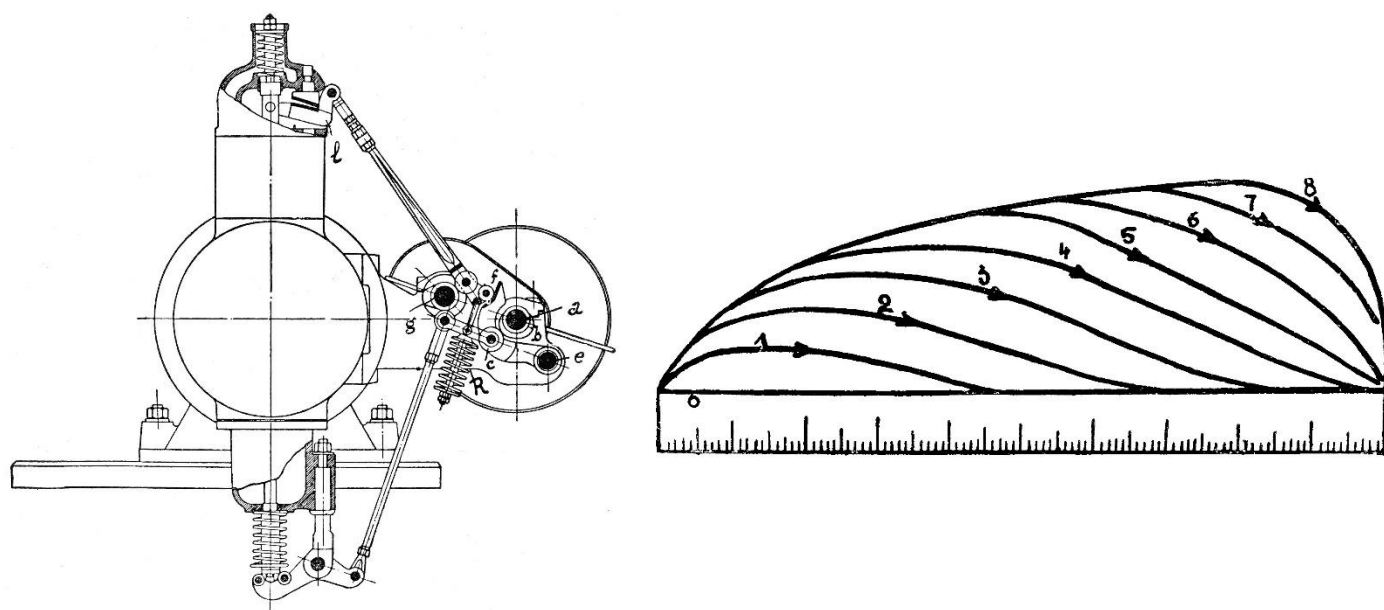
iii) カットオフ方式

蒸気機関における用語である“カットオフ”などという用語を持ち出したのは勿論、リカードである。カットオフ方式の実体は主吸気弁の啓開時期を変化させるシステムや補助カットオフ弁を用いるシステムであった。それらに共通する狙いは吸入行程におけるフルード・ロス流動損失を低減させることに向けられていたが、機構的錯雑化に見合う程の利益は得られないため、それらはリカードに拠れば事実上、全滅した。

リカードの総括のような結果に至ったのはガス機関、とりわけ大形のそれが比較的定常的な負荷・速度条件の下で使用されたことにも因っていると考えられる。無論、逆のケース

においてかかる可変機構を成立させるのは当時としては将に至難の課題であったろう。円錐カムの場合と同様、疾風怒濤時代の書物から可変リフト/カットオフ方式の具体例を引いてみよう。次図左とマトーに依るその解説のみから本機構の作動メカニズムを理解することは困難であるが、取り敢えず次図右は混合吸入弁のリフトと開弁時間、所謂時間面積の変化を表す線図となっており、1~8 によって負荷増大と共にカットオフが長くなって行く制御パターンが表現されている。モノサシはピストン位置(上死点からの距離)である。

図 13 Zweibrücken の Dingersche Maschinenfabrik の可変リフト&カットオフ方式



Mathot, *ibid.*, P.247 Fig.XI-43, Fig.XI-44.

左図の **a** はクランク軸と同一速度で回る補助側軸、同 **g** はクランク軸の半速回る通常の側軸である。それらの連動によって右図に示されるような吸入弁の可変リフト/カットオフが実現せしめられたワケである。

3) 質的制御

質的制御方式は混合比を変化させる方式である。リカードに拠れば、軽負荷で希薄燃焼させることが出来れば理論空気サイクルに近い熱効率が得られ、圧縮比 6.0、全負荷熱効率 35%の機関を軽負荷時に 47%の効率で運転させることが出来ることになる。しかし、混合気を着火限界を超えて希薄化させれば燃焼速度は低下し、遂には失火へと至る。

このため、質的制御を行っていたガス機関の多くは安定した負荷状況で運転する個体であるか、軽負荷時には他の制御方式を併用するシステムを有するモノであるかに限られた。負荷変動率が 50%を超える場合、量的制御を単独で貫徹させることは事実上、不可能であった。

質的制御を行っている 4 サイクル・ガス機関においてはほとんど全て、ガバナが空気弁とガス弁とを適当に連動制御し、吸気の始めには空気だけを吸い込ませ、その後から負荷状況に係わりなく一定濃度の混合気を吸い込ませる仕掛けが施されていた。この切替え点の制御をガバナに司らせるワケである。無論、その狙いは吸気絞りに起因するポンピングロスを可及的に抑えつつ、ピストンヘッド側に空気を、着火機器側に可燃混合気を偏在させて層状給気の下でオーバーオール希薄燃焼を実現させることにあった。

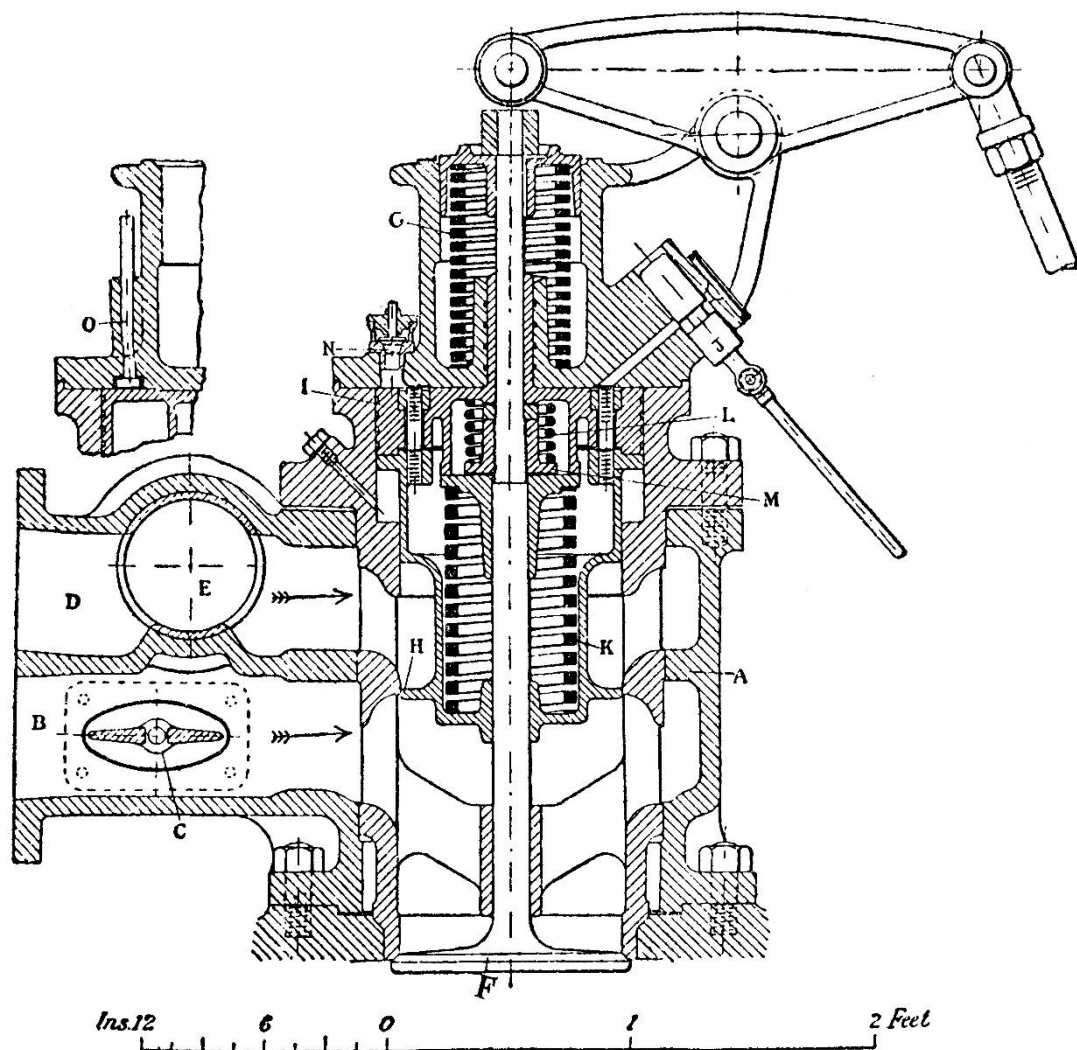
かような機構においては機関負荷が全負荷から減少して行く場合、最初にガス弁のみが着火限界の許す範囲まで絞られ、その後、空気弁が絞られ、爾後、両者は連動して絞られて行く。つまり、質的制御(希薄化)→量的制御というリレー方式の制御が行われたワケである。質的制御が終わるのは $\frac{3}{4}$ 負荷ポイント付近で、陸用据付機関の常用出力はこの辺りに設定されることが多く、そこに熱効率のピークを設定してやろうという理屈である。この方式で制御されている機関が通常の混合気の可燃範囲を確実に超える希薄域を実用していることからすれば、非常に限定された程度においてではあれ、ある種の層状化が幾らか実現されていることに疑いは無かった。

また、この方式は燃料ガスの発熱量の変化に対応し易いだけでなく、多気筒機関においてはマニフォールドの特性に因る混合気分配の不均一を補償する手立てとしても有効であった。しかし、ガバナに対しては大きな出力が要求されるため制御はやや大雑把となりがちであり、それを回避したければ空気圧ないし油圧サーボ機構の併設が要請された。

とは言え、希薄化に起因する燃焼遅れや不完全燃焼は理論的に得られる筈のヨリ高い効率を相殺していたため、質的制御は量的制御に比してほとんど、ないし少しも効率的となっておらず、かつ、明らかにヨリ繊細で調子を保つのが面倒であった。

そうした中であっても、1907 年頃、クロスレイからリリースされた串型単動の 500~600 馬力機関は前掲、アトキンソンのヒット&ミス+可変リフト方式のそれに似た巧妙かつシンプルな機構に依って質的→量的制御方式を採用する方式であり、かつ、良好な使用実績が記録されたが故に特筆に値する技術と認められた。

図 14 クロスレイ機関に採用された質的制御方式の混合吸入弁



Mathot, *ibid.*, p.255 Fig.XI-50.

以下、リカードの書には肝心な処に図面トレース上のミスがある他、記号が振られていないため説明自体も判り辛いので、フランスの技術コンサルタント、マトーのより古い書物の図と説明に頼ることとする。因みに、マトーに拠れば、この吸気弁もまた、クロスレイの「著名な主任技師、J. Atkinson 氏」の手で設計された機構である⁹。

A は各気筒端に取付けられる弁のケーシング、B は空気流入路、C は手動スロットル、D はガス流入路、E はガスコック。F は吸気弁で上方の G が吸気弁のスプリングである。

H はガス弁で、その上端 I は真空ピストンとなっている。このピストンの背後(上部)の空間である真空シリンダが空気によって完全に満たされるか、部分的に満たされるか、あるいはそこから空気が排除されるかはガバナに連動する小さな筒状プラグ J の位置によって定められた。

⁹ cf., Mathot, *ibid.*, pp.254~256. リカードはこの点について黙過している。

吸気弁 F のステムにネジ込まれたナット M に載ったバッファ・スプリング L は F が閉じている時には真空ピストン I をその最上位に押し上げている。

内部スプリング K は吸気弁 F が閉じている時は中立の状態にあり、F が開けばその力は M から K を経てガス弁 H を開かせた。

制御用プラグ J が真空ピストンの背後に空気が自由に入り込めるような位置にあれば H は K に押されて開き、F が閉じればそれに追随し、吸入行程全体を通じて均一リッチな混合気が吸入され全力運転が行われた。

J が真空ピストンの背後への空気流入を許さない位置に在れば、真空ピストン背後の部分真空は K の圧力に依ってガス弁が開くのを妨げるに十分な力を発揮し、ガス弁の啓開は妨げられるため、空気のみが吸入された。

通常の運転状態において J は中間的な、真空ピストンの背後に幾許かの部分真空が生じ、ガス弁の啓開時期と開き速度を多かれ少なかれ遅らせるような位置を採る。このため、Nürnberg 機関等におけると同様、吸入行程の始めには空気のみが、その後、混合気が吸入された¹⁰。

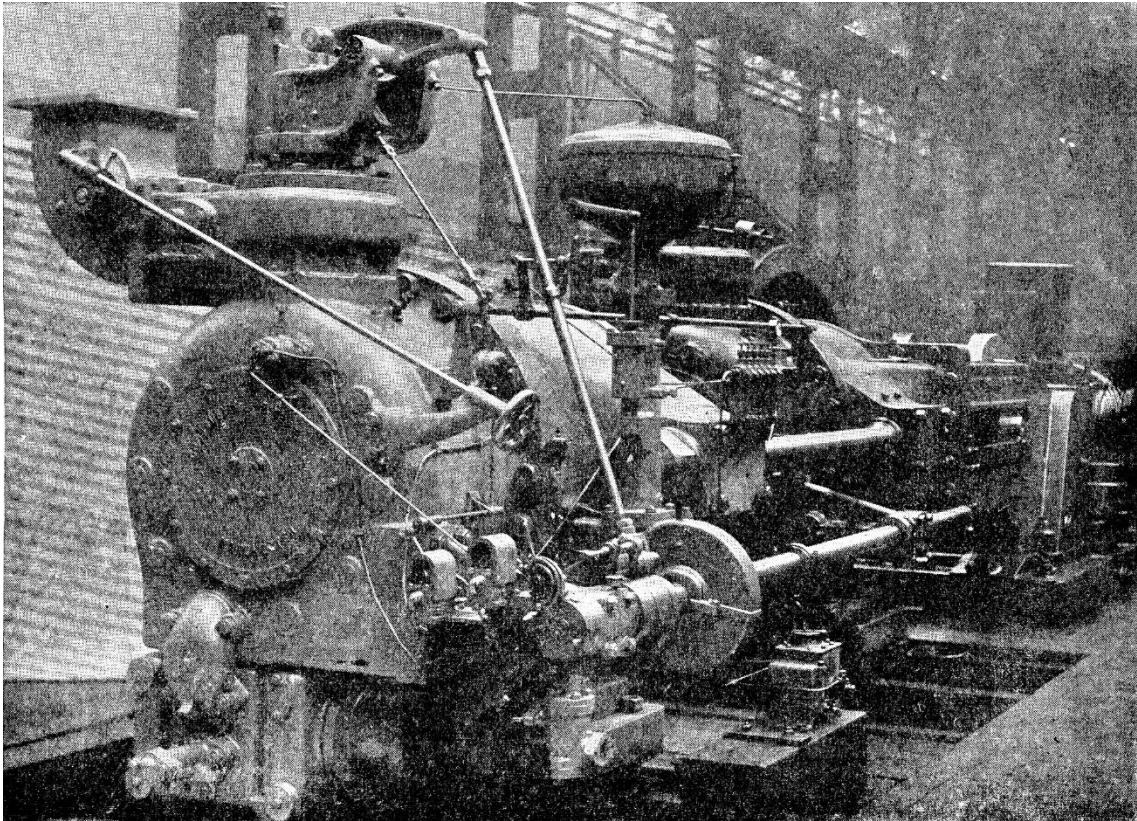
小さな漏し弁 N は真空シリンダから外向きを開いて吸気弁 F の速やかな閉塞を保証するシカケであった。添え図に見える O はインジケータ・ロッドであり、管理者が真空ピストンの作動状況を視認可能なように設置されていた。

ガバナに対する負荷は至って僅少であり、この吸入弁の可動部分は外気や燃焼生成物から遮断されていた。最初の負荷試験においてこの制御装置を備えた機関はその負荷が 600 馬力から 50 馬力へ、更に 600 馬力へと急変動せしめられた際にも総速度変動率 1.65% という極めて正確な制御性を発揮した。

リカードは何故かこの時の速度変動率について 1.66% という数値を紹介している。彼はまた「軽めの負荷の下における本機関の効率に関する数値は与えられていないが、平均有効圧 55.6lb/in²、即ち約 60% 負荷におけるインジケータ線図はやや遅れ気味ではあるが規則的な燃焼を表示している」と述べている(強調引用者)。希薄かつ遅れ気味の燃焼が辛うじて安定的に持続せしめられていたワケである。そして、これには吸入弁通過に際してガス流れに与えられる乱れが寄与してもいたのであろう。次図は本機関要部の外観写真である。

図 15 クロスレイの串型単動 500~600 馬力機関

¹⁰ ニュルンベルク大形ガス機関については拙稿「三井鉱山 三池ならびに田川瓦斯発電所について(訂正補足版) — 日比勝治の回想とデータ集から — 付・補論. 低圧電気点火システムについて」(大阪市立大学学術機関リポジトリ登載)、参照。



Ricardo, *ibid.*, p.384 Fig.166.

むすびにかえて—— アトキンソンの業績に対する回顧と位置付け、そして現代

以上の行論を通じてアトキンソンの業績に直接・間接に係わる幾つかの事実が明らかにされた。第1に：アトキンソンは決して富塚 清の有益ではあるが偏った記述だけを頼りにした場合に抱かれがちであるような“巧妙ではあるが珍奇な内燃機関を捻くり出すことに拘泥した好事家的技術者”などではなかった。好事家どころか、彼はメカ倒れに立てこもることなく、質的→量的制御法の洗練を通じて層状給気と希薄燃焼を幾分なりとも実現し、併せて吸気絞りに因る損失を低減させようと志向した。吸気絞りに因る損失の抑制こそは彼が一貫して追求した課題である。その成果は決して突出したと形容し得るレベルに届いてはいなかったが、彼こそは外部点火型内燃機関の改良における全き王道を征く先駆的技術者であった。

第2に：彼が目指した途よりも直截に吸気絞り損失の追放を目指す企てであった量的調速法の一つ、即ち可変カットオフ方式の途は残念ながら今一つのメカ倒れに落着した。ナノ粒子の有害性に関して目下、如何なる実験結果が明らかにされつつあるのか、当外野席まで一向に聞こえて来ぬことは最も気懸りとせざるを得ぬものの、筆者としては同時代人達が目指した吸気絞りに起因するポンピングロス追放と高膨張比化とを二つながらに実現した Rudolf Diesel(1858-1913)の偉業の本質は以上のような歴史的脈絡を踏まえてこそ理解さ

れ得ると主張しておきたい。

第 3 に：当今、アトキンソンとかミラーとか称されている手口の主流はこの可変カットオフ方式に真の起源を有する技術であった。現代技術が高速機関の一部において件のカットオフ方式に依ってであれ *Cycle Engine* 方式に依ってであれ、膨張比>圧縮比を実現していること自体は偉とされるに足るとしても、両者は明確にかつて劣敗した可変カットオフ方式の焼き直しそのものである。それで別段、悪いというワケではないが、問題は可変カットオフ技術の淵源が正しく認識されていないことにある。

富塚 清はガソリン機関改良の方策は既に窮め尽されており、それらは往時の航空発動機技術の洗い直しを通じて再発見されるとのスタンスを終始、掲げていた。しかし、傍観者としては“21 世紀に間に合う”時点において実勢はこれを遥かに通り越し、20 世紀初頭の低速機関において試みられていた可変カットオフに類する所作を高速機関に摂り込む段階に達していたことを自覚させられざるを得ない。

それにしても、当今、無過給ガソリン機関に係わってアトキンソン・サイクルとかミラー・サイクルとか呼ばれている手口の主流は本質的に部分負荷時、吸気を絞る代りに実質の吸気行程をある範囲でカットオフして短縮することに依り平均有効圧を低下させつつ吸気絞りに因るポンピングロス発生を回避し、燃費悪化を防ぐ技術である。13.5 前後の膨張比ならガソリン機関としては確かに高めと言えるが、そもそも ϵ を抑えることで $P_{\max}$ 、 $T_{\max}$ を下げにかかっている以上、膨張終端圧力は自ずと低くなるのであって、得られる利得＝インジケータ線図への付け足りは小さく、現に正味熱効率上のマージンも精々、かの *Cycle Engine* における程度となっている。これ位のコトを根っから膨張比が大きく熱効率が高い新技術であるかのように喧伝するのは、仮令、技術史に係わる理解云々を措くとしても、牽強附会に過ぎよう。

他方、過給ディーゼル機関においてもアトキンソンないしミラー・サイクルは一向に勢がなく、ブローダウン・エネルギーの回生を行い、実質的な膨張比をより徹底的に高める手立てとしてより有効である筈のターボ・コンパウンドでさえ常用負荷率の高い陸船用機関ならいざ知らず、自動車機関のように負荷変動幅が大きく、平均負荷率の低い分野では今一つその効果を期待し難い¹¹。

果たしてアトキンソンだミラーだといった当世風可変制御の途は内燃機関という動力技術の実質的進化と見做されるべきモノなのか、逆にそれは再び劣敗の途に分け入ろうとす

¹¹ 序でながら、Nordberg のミラー方式ターボ過給ディーゼル機関の効率に関する長尾博士の記述もこの点では誤りである。同機関にその膨張比に等しい圧縮比を持つ原型(非ミラー)機関に対する熱サイクル的効率における優位性など無い。長尾不二夫『第三次改訂 内燃機関講義』上巻、養賢堂、1967 年、458 頁、参照。

因みに、その出典文献に掲げられた *be* は非ミラー・ターボ過給機関の 169.875g/BHP-h に対してミラー版のそれは 167.157g/BHP-h であり正味熱効率が向上しているかのように見える。しかし、これは出力増強に因って機械効率が 83.2%から 85.4%へと改善されたことの副産物と見做されるべき現象である。cf., Nordberg's "Supairthermal" Engine. *Diesel Power and Diesel Transportation*. Aug., 1951.

る一過的局面と見做されるべきなのか……即断は困難である。しかし、少なくとも乗用車用ガソリン機関なら小排気量・高平均負荷率化と後処理に、商用車用ディーゼルなら余り奇を衒わず過給と後処理に頼るのが最も自然な、つまり無難で長持ちする技術であるとは見做してかかる方がまだしも大過無いのではなかろうか？