

付 録

(1) これまでの可変圧縮比の試み

可変圧縮比の機能だけについて言えば、すぐに色々な案が考えられ、さほどの困難は無いように見える。そのため、これまでに登場した可変圧縮比コンセプトは無数にあり、原理的に可能なあらゆる方策が試されている。それらを基本的な仕組みで分類したのが図 A-1 である。

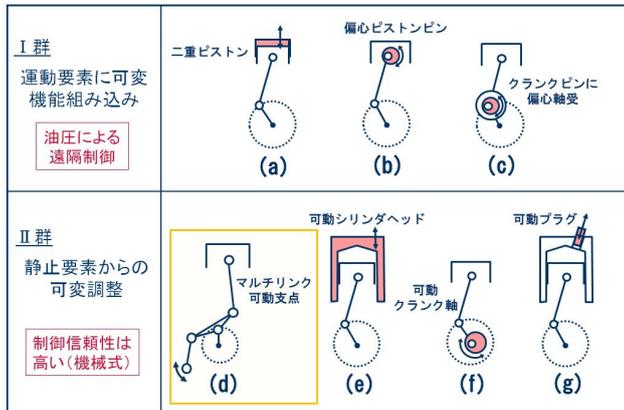


図 A-1 各種の可変圧縮比機構

これらの方式を見ると、既存のクランク機構はそのままにして、ピストンとコンロッドなど、小変更で済ませ、既存システムにアドオンして、最小限の設備投資で済ませることを狙ったものも多く、このようなコンセプトは現在も多くのメーカーで開発が試みられている。日産の VC-T は (d) で、クランク機構をマルチリンク化したものである。

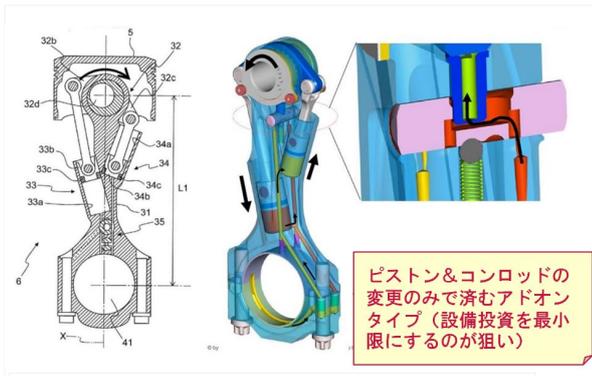


図 A-2 偏心ピストンピン方式の例(2段階制御)

近年では図 A-2 に示すように、コンロッドに油圧機構を内蔵させ、ピストンピンの偏心カラーを回転させる方式などが試みられている。油圧で遠隔操作し、コンロッドに組み込まれた油圧機構の制御による方式は、コンロッドを取り替えるだけで済む一方で、耐久信頼性や気筒間の長さ(すなわち圧縮比)のバラツキの抑制も課題であろう。筆者は VVEL に至る可変動弁の開発で、このような油圧による遠隔操作の課題について苦労した経験がある。また圧縮比可変の機能以外の新たな付加価値について、言及したものはなく、やはり商品化は難しいと思われる。

(2) 可変動弁 VVEL について

VVEL (Variable Valve & Event Lift) は燃費、出力、運転フィーリングを大幅に向上できる最先端技術として、VQ370 で採用された可変動弁機構の略称。VVEL はコントロールシャフトの角度制御で、全気筒のバルブリフト・開閉タイミングを精度よく可変にできる機構である。



図 A-3 リフト&作動角連続可変動弁 VVEL

図 A-3 において、コントロール軸には偏心軸受が設けられていて、これを回すと揺動カムの揺動開始角度が変わり、吸気弁のリフト・作動角が連続的に変化する。これにより得られるエンジン性能向上効果は図 A-4 に示

- ▶ 動弁作動の可変制御の効果は多岐にわたり、適用するエンジンの特性によって得られる効果も異なる(高回転エンジンでは効果大)。
- ▶ 冷機スタート時の排気浄化の効果も得られる。

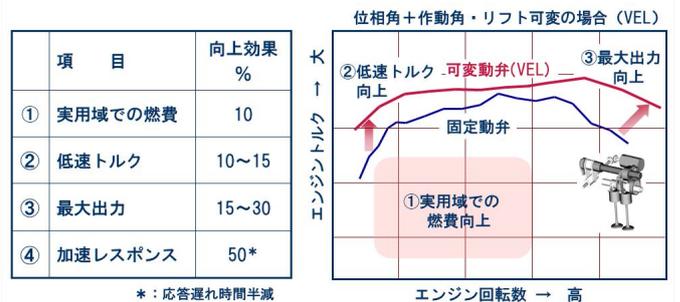


図 A-4 VVEL により得られる性能向上効果

すように多岐にわたる。しかし、この VVEL の開発当時は折悪しく、ディーゼルと同様の成層燃焼による燃費技術として、三菱の直噴 GDI が発売され、VVEL は燃費技術の主流とは見なされなかった。また可変動弁としても、当時前述の FEV より、次世代の可変動弁技術として EMV (Electromechanical valve train) が発表され、これが世界的な話題となっていた。そのため、VVEL はしばらくの間、採用の計画が決まらなかった。

しかし、GDI は原理的に NOx の発生が多いため、その後の排気対策の規制強化に対応できなくなり、EMV も振動騒音など、本質的な技術課題が解決できず、いつの間にか流行は下火になっていった。

そこで、VVEL が日の目を見ることになったわけである。量産着手が遅れたため、世界初とはならなかったが、スカイライン VQ370 に最先端技術として搭載された。

(3) 軸受の最新の設計ツールとなった EHL 解析

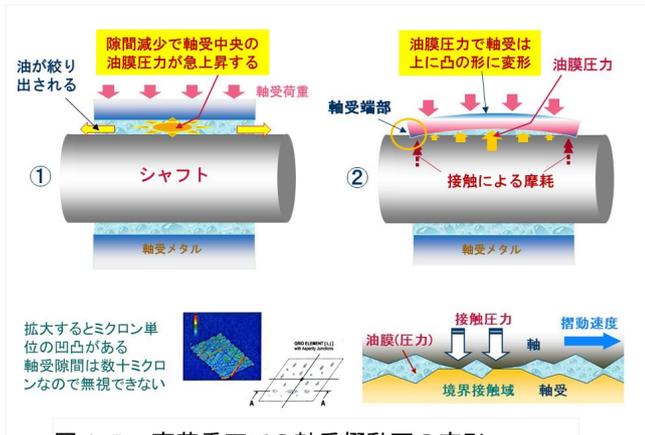


図 A-5 高荷重下での軸受摺動面の変形

ここでは EHL 解析について、理解を深めるために、補足として、さらに掘り下げた技術解説を追加する。

高荷重下で軸受のハウジングは弾性変形し、油膜を介した摺動面形状は、中央付近の油圧が大きくなる。このため、ミクロン単位で見れば図A-5の②のように上に湾曲した変形形態となる。一方で軸受端部(エッジ)は大気開放であり、油圧の支えは無いため、エッジはシャフト面に近づき、大荷重下では境界接触が発生する。

このような潤滑摺動面の現象解析は基本的に2次元座標に展開可能であり(図A-6)、次元の数では3次元の燃焼解析より単純となる。



図 A-6 EHL 解析における 2 次元軸受面への展開

筆者は学生時代に、当時の先端解析である有限要素法と、潤滑解析のレイノルズ方程式を連立させ、弾性変形下の滑り軸受の挙動解析が解けないかと考えたことがある。その基本構想を指導教授(故染谷常雄氏)に提案し、修士論文で取り組んだ。これは今日の EHL 解析に通ずる新しい試みであったが、当時はコンピュータの能力が低く、無謀な取り組みで、設計活用などはとても無理であった。

その数十年後、時代は大きく変わった。VC-T と並行して設計に適用できる、解析ソフトとして開発した日産の EHL 解析では、軸受変形の影響だけでなく、摺動面粗さや、摩耗の進行も解析できる機能を段階的に加えている。これで実機摩耗との比較検証ができる日産独自の本格的な設計ツールが漸く完成の域に達し、VC-T の開発に

活用できた。

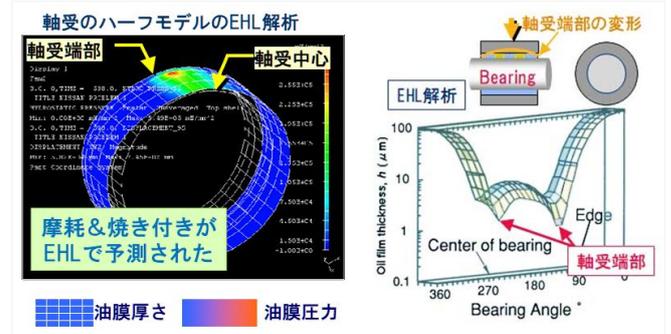


図 A-7 EHL 解析の油膜圧力分布と軸受面変形形態

図A-7は実際に EHL で計算された荷重ピーク付近のクランク角における油膜厚さ、圧力、および変形による軸受端部(エッジ)の状況である。このエッジ部が境界接触を起こし、エッジ部から摩耗が始まる。

適度な摩耗なら「なじみ効果」で油膜形成に有利となるが、過大な軸受負荷の条件では、軸受中央部の油膜に発生する油圧だけでは支えきれず、摩耗進行が止まらずに「焼き付き」に至る。軸受摺動面の変形特性は軸受ハウジングの剛性によって大きく変わるため、その剛性設計に EHL が活躍する。

「なじみ」によって、適度に摩耗し、ちょうど良い形状の摺動面になれば、油膜が構成されやすくなり、流体潤滑性能が大幅に向上する。EHL でこの摩耗予測が初めて可能となった。

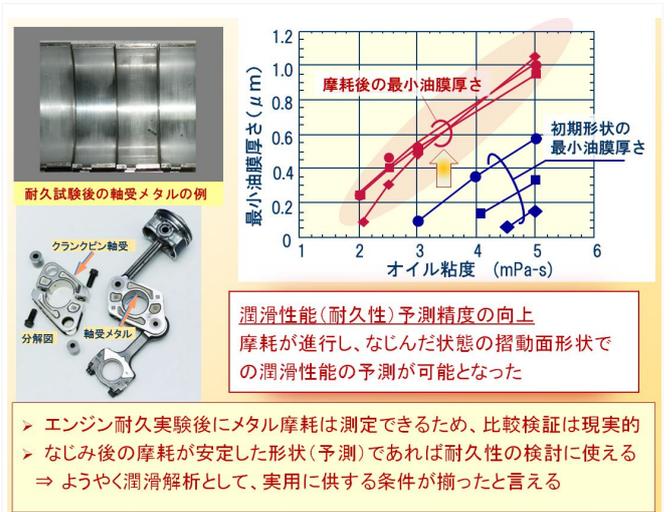


図 A-8 EHL 解析による摩耗予測値と実際の摩耗の比較

さらに、実機で耐久実験後の使用された軸受メタルの摩耗形状を測定し、これを EHL 解析の摩耗予測値と比較することにより、予測解析の結果の定量的な比較検証ができる(図 A-8)。解析の信頼性も高まり、一石二鳥であった。EHL 解析に基づき軸受ハウジングの肉厚分布や、ハウジングに用いる締め付けボルトの位置、締め付けトルクなどの影響も考慮した改善効果の予測を繰り返し迅速に行うことで、短期間に油膜形成に適したハウジング剛性分布を得ることが出来た。

(4) コンパクトなロングストローク化のポテンシャル

マルチリンクにはエンジン全高を変えずに、燃費に有利なロングストローク化を、コンパクトに設計できるポテンシャルがある。

ボア径Dを変えずにピストンストロークLのみ拡大(+20%)した場合、冷却損失がピークとなる、上死点直後の燃焼室の表面積と容積の比は約17%減少する。

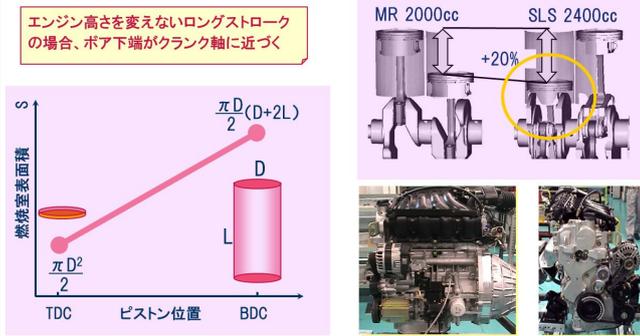


図 A-9 ロングストローク(SLS)の構想

図 A-9 にロングストローク化の最初の構想を示す。

VC-Tはリンクのストローク拡大機能があるため、コンパクトにロングストロークが可能かもしれないと考えたのが始まりであった。当時は VC-T の採用計画が停滞していたため、筆者はこの構想を膨らませ、設計の先行開発の二宮部長に相談し、プロトタイプを試作支援として、2億円近い予算を頂いた。図 A-9の右下は SLS(Super Long Stroke)と名付けられたプロトタイプエンジンの外観写真である。ベースは2000ccのMRエンジンであるが、中身はエンジン高さ&幅を変えずに、マルチリンク機構を組み入れ、さらにロングストローク化で2400ccに排気量を拡大している。ロングストローク化は図 A-9 左に示すように、特に上死点近傍の燃焼室の表面積を減らすわけで、幾何学的にも確実に冷却損失を低減できる。SLSでは20%のロングストローク化で約5%の燃費向上効果が得られた。これは実車に搭載して試乗も行ったが、過給 Downsizing とは真逆の方向でもあり、そこから先に進むことは無かったが、ロングストローク化による燃費向上はVC-Tにも生かされている。

(5) 可変圧縮比適用のエンジンコンセプト

最後に筆者らが可変圧縮比研究の過程で実証した、エンジン性能向上効果について述べる。可変圧縮比は多くの適用コンセプトが考えられる。ルノーのDE-VCRの狙いはトルクの向上であった。VC-Tはターボガソリンエンジンへの適用で、ゴーンCEO提案の結果、約6億円の予算を得たが、筆者にはコミットメントとして、燃費、出力共に、二桁の効果達成が求められた(それぞれ10%の向上が目標となった)。この過給コンセプトは、VC-Tとして設計移管後もそのまま受け継がれ、圧縮比の可変幅の8~14も変わっていない。

以下は研究段階でまとめられた可変圧縮比による、エンジン性能(燃費、出力)向上効果である。

(a) 燃費性能向上の効果

可変圧縮比による燃費向上の効果进行分析したのが図 A-10 である。なおこのデータは研究段階のものであり、現在のVC-Tではさらに改善が進んでいると思われる。

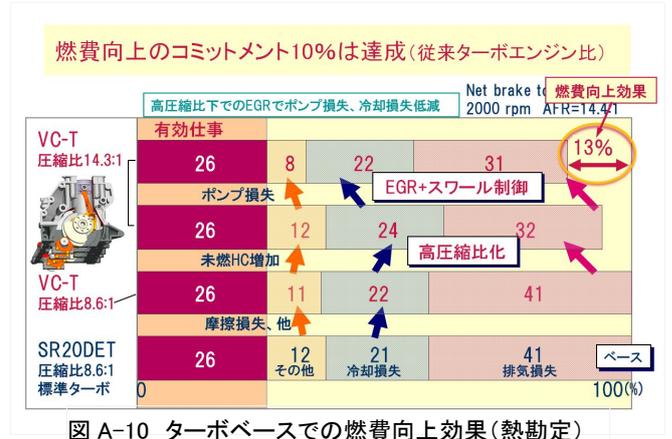


図 A-10 ターボベースでの燃費向上効果(熱勘定)

図 A-10 は燃料消費の内訳を分析した熱勘定図であり、例えば図中下のベースの圧縮比8のSR20DETは燃料の熱エネルギーのうち、有効仕事になったのは26%で、冷却損失(21%)、排気損失(41%)、その他の摩擦損失などが12%となっている。VC-Tで圧縮比を同じ8.6に合わせて、熱勘定をみると、ほぼ同じ内訳となっている。ここから圧縮比を上げ(14.3)、さらにEGR、スワールなど燃焼改善を加えることで、燃費向上効果13%を得ている。これでゴーンCEO提案のコミットメントのうち、燃費目標は達成したが、エンジンはターボだけではないため、さらに別の角度から検討を行った。

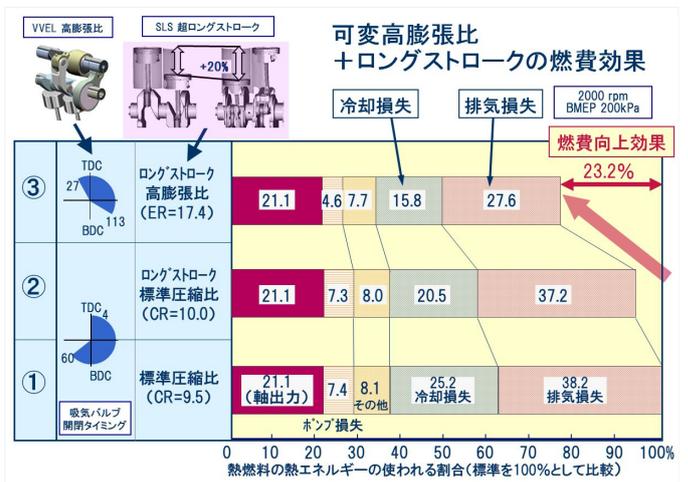


図 A-11 NA(自然吸気)ベースでの燃費向上効果(熱勘定)

これは自然吸気(ノンターボ)エンジンでの燃費向上を想定した検討である。図 A-11 に示すようにVVELと組み合わせ可変高膨張比とし、さらにマルチリンクの梃子の仕組みを生かし、ピストンストロークを20%拡大したロングストローク化(付録4参照)を加えたシステムである。これで23.2%の燃費向上効果を達成している。VVELとの組み合わせは採用されなかったが、高膨張比の考え方は生かされ、ロングストローク化もVC-Tでは反映されている。

(b) 出力性能向上の効果

ゴーン CEO 提案のもう一つのコミットメントは出力 10%向上であった。比較のベースエンジンがターボ仕様であり、圧縮比が既に 8.6 と低く、また高回転 (6000rpm) での実験評価となる。マルチリンクの強度も確保することが前提であり、約束した 2 年間でこの目標を達成するのは実にハードルが高かった。

事実、10%の出力向上の目途が得られるまでに、多くの貴重な試作機がエンジンブローで失われている。得られた出力向上効果を図 A-12 に示す。

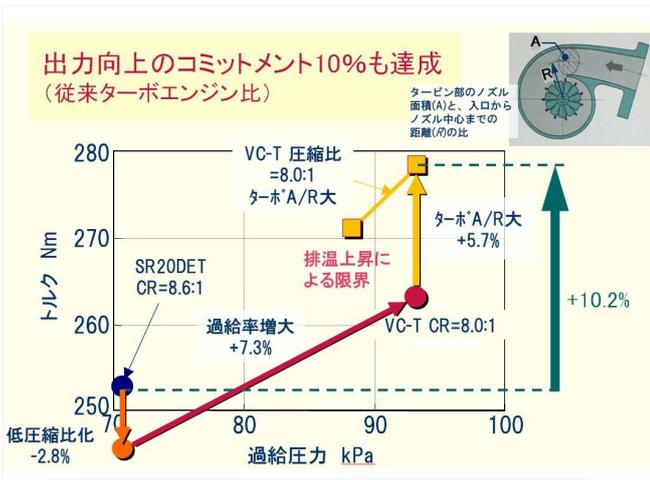


図 A-12 低圧縮比化 (8.6→8.0)による出力向上効果

圧縮比を下げただけでは、熱効率が低下するため、出力は下がってしまう。しかし、そこから過給率を高め、さらにターボチャージャの A/R を高過給化に適したサイズとして、排圧上昇を抑えることで何とか 10% 以上の出力向上効果を確認できた。

駆け足の説明となったが、以上が可変圧縮比によるエンジン性能向上効果の概要である。

(6) エクストレイルに搭載された VC-T についての所感

2022 年 7 月に国内で VC-T 搭載車が初めて発売された。筆者も真っ先に購入する予定だったが、諸事情もあり、オーナーになるのは 2024 年 4 月となった。この解説記事の執筆締め切りが 3 月末なので、微妙なタイミングであるが、当然エクストレイルは試乗しているので、筆者の感想を述べたい。



図 A-13 入手予定のエクストレイルとそのエンジンルーム

日産のハイブリッドは現在、e-Power という独特のシリーズ方式に一本化してきている。e-Power ではエンジン

は発電専用で、エクストレイルは 4 輪全てモーター走行 (e-4orce) であるため、VC-T は運動性の面では表に出ることはない。駆動、運転フィーリングに関しては、完全に電気自動車 (EV) である。遮音対策が徹底されていることもあり、車内は静かである。

エクストレイルに採用された新技術の目玉は幾つもあり、その一つは e-4orce である。前後輪をモーターで独立に素早く駆動できるため、運転すれば誰でもその快適さを実感できるし、その原理説明もわかりやすい。

それでは筆者のライフワンの VC-T は、どのような存在感かという、エクストレイルの車体に VC-T のロゴは見当たらない。また、徹底的に遮音対策をしていることもあって、車室内でエンジンの気配を感じることは少ない。

筆者がゴーン CEO 提案で、可変圧縮比のプロトタイプをまとめた後に、設計部にバトンタッチした相手は木賀新一氏であり、彼によると「エクストレイルでは VC-T は黒子に徹している。」との事であった。また、「当初のプロトタイプでは、エンジンのロッカーカバーに VC-T のロゴが貼られていたが、量産車ではそれも外された。」との事であった。エンジンのロッカーカバーに張られているのは、図 A-13 に示すように、車体後部にも張られている e-Power のロゴであり、VC-T ではない。

100年に一度の世界初の新技術がこの扱いである。VC-T はエンジン最後の革新だが、その時代はもう終わるといメッセージなのかもしれない。しかしエクストレイルは、エンジンの気配は消されているものの、e-4orce の完成度は高く、車としても魅力がある。しかもガソリンで走る EV となれば、充電インフラの問題も無く、コストパフォーマンスは純粋の EV に比べても非常に高い。

将来、EV化の流れがさらに加速した場合、VC-T の代わりに大容量のバッテリーを搭載すれば、そのまま EV にもなる。EV で先行してきた日産としては、そのノウハウも生かせるため、エンジンから EV への移行期においては商品性も高く、最も現実的に将来を見据えた選択肢であると感じている。

筆者はここで紹介した VVEL のスカイライン 370 クーペを 18 年も愛用し、走行距離は 25 万キロにも達するが、まだエンジンは健在で、当面これを手放すつもりはない。

この VC-T を搭載した国内初の e-Power、e-4orce のエクストレイルが愛車に加わり、カーライフがさらに充実することを期待している。