

日産がマルチリンク機構の可変圧縮比エンジン(VC-Turbo、以下 VC-T)の量産を発表したのは2016年秋。走行中に圧縮比を変える機能だけでなく、マルチリンクの持つ新たな付加価値を加えて、革新的な新エンジンが誕生するに至った。ここでは「VC-T 量産化の鍵となった、新たな付加価値」を中心に、その発見の経緯も含め、筆者からの視点で誕生から量産化までの道のりを紹介する。

なお、この解説記事は、筆者の所属していた日産研究所 OB の小栗康文氏からの依頼により執筆した。

2024年4月 青山 俊一

1. はじめに

自動車生産が開始されて間もない頃から、圧縮比を変えたいという技術者の試行錯誤が続き、さまざまなアイデアに基づくコンセプトが数多く生まれた。しかし、いずれのコンセプトも量産化に辿り着く前に消え、実用には至らなかった。そのため、可変圧縮比は「エンジン技術者の夢の技術」と言われ、実現するのはまだ遠い将来と考えられていた。

しかし近年、日産はその実用化に成功、VC-T (Variable Compression Turbo) の量産を開始した。

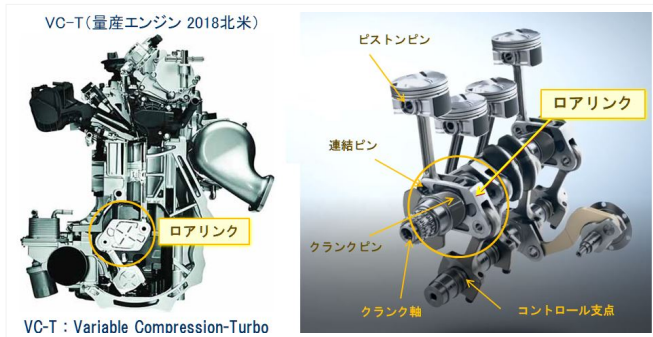


図1 世界初の量産可変圧縮比エンジン VC-T

図1に示すのは2018年に世界に先駆けて量産車に搭載された可変圧縮比エンジン VC-T である。

図2はその1気筒のみの構成図である。ピストンを駆動するのは、クランク軸に装着されるアップリンク、ロアリンク、コントロールリンクの3種類のリンクである。アクチュエータにより、コントロールリンクの支点位置を変えるとロアリンクの姿勢が変わり、ピストン上死点位置が5.3mm変化する。これがすなわち圧縮比の制御である。



図2 エンジン運転条件に対応した圧縮比制御

VC-T はマルチリンク方式で、過去の事例(付録1参照)をみても、敢えてこの方式をクランクに適用した例は少ない。その理由は、クランクはトン単位の大

荷重下で高速回転する主運動系であり、これを全面変更するとなれば、周辺部品への影響も甚大で、課題の山積が予想されるためである。しかし、マルチリンクに隠れたポテンシャルがあり、クランク機構の宿命的な問題を一挙に解決できる、となれば話は全く変わってくる。

2. これまでのクランク機構の問題

今日のレシプロエンジンのクランクは往復運動を回転運動に変える機構である(図3)。構成はシンプルであるが、爆発圧力を受けるコンロッドが、回転に伴い、大きく

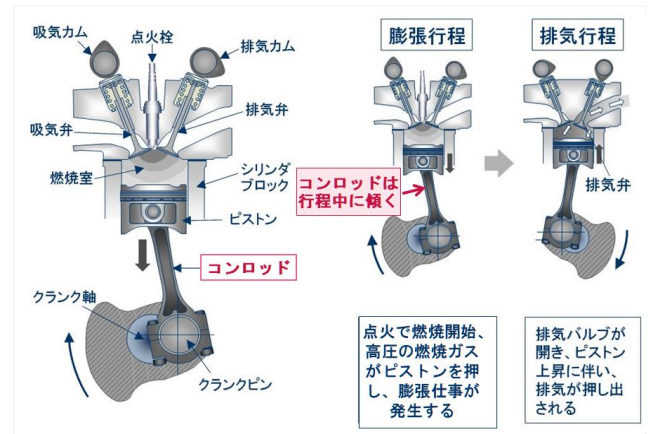


図3 回転時にコンロッドが傾くクランクの宿命

傾くという宿命がある。このコンロッドの傾きは後述するように、本質的であつ、重大な悪影響を引き起こす。

しかし、クランクの基本構成を変えずに、コンロッドの傾きをゼロに近づけるには、コンロッドを無限に長くしなければならない。船舶用のエンジンなどは実際、コンロッドがかなり長い。船舶はエンジンの搭載スペースに余裕があるため、そのような策がとれるが、自動車の場合、コンパクト設計は必須である。

VC-Tの開発着手にあたり、重点的に注目したのは、まさにこの問題の解決であった。

3. VC-T 開発着手の背景

(1) マルチリンク式可変圧縮比の取り組み例

近年、日産よりも数年早く、ドイツのエンジニアリング会社(FEV)がマルチリンク式の可変圧縮比を試みている。

FEVのコンセプト(図4)の公開(MTZ 2007.10)から間もなく、それを調査するため、筆者はアーヘンの FEV を訪ねた。しかしその時、彼らは既にこのマルチリンク方式に



図4 FEV Europe GmbHの可変圧縮比機構

見切りをつけ、撤退していた。その理由については、多くを語ってはくれなかったが、容易に想像がついた。FEVが設計したマルチリンク機構は、あらゆる意味で自動車用には適さなかったためである。

例えば、エンジンサイズが全幅&全高ともに増大する。ピストンストロークが複雑になり、設計試行を繰り返しても、容易には振動の増大を回避できない。リンク連結の軸受数も増え、梃子(てこ)の原理により、クランクに加わる荷重も激増するため、摩擦損失、耐久性などの基本素質が極端に悪化する。

つまり、マルチリンクは、レシプロエンジンのクランクに適用した場合、これまでの常識的なアプローチでは、なかなか切り込めない難しさがあったと言える。これではその先に進む気にはなれない。

(2) 探索研究に着手した当時の状況

マルチリンクを応用した可変機構は、可変圧縮比だけではない。当時筆者はバルブリフトと作動角を同時に可変制御する、可変動弁(VVEL)の開発に着手しており、これもマルチリンク方式であった(付録2参照)。このVVELの開発は竹村信一リーダーを中心に進められ、VC-Tに先行して10年程早く実用化され、スカイラインVQ370の最先端技術として商品化された。実はこのVVELも可変原理の根本はVC-Tと同じである。

このようにVVELのマルチリンクに手を染めていたこともあって、これをクランクに応用したFEVの可変圧縮比機構に興味を湧いたわけである。前述のようにFEVは早々にマルチリンクから撤退したが、この一見手に負えない複雑な挙動に、何か別の付加価値が隠れている可能性があるか考えた。

(4) 可能性の探索(机上トライアル)のスタート

筆者はマルチリンク式可変圧縮比の探索チームを立ち上げることにし、以下のような方針を決めた。

「クランクの大幅変更に見合うメリットとして、走行中に圧縮比を変えろという機能以外に、別の新たな効果の発見を追究したい」

筆者らが注目したのは、前述のようなクランク機構

の本質的な問題、すなわちコンロッドの傾きの悪影響を排除できる可能性であった。

筆者の部下から若手を4~5人集めて検討を開始した。リーダーは藤本博也氏であった。彼はピストン挙動解析の経験もあり、適役であった。もちろん最優先目標は可変圧縮比とは別の付加価値の発見である。まず第一歩として、クランクに組み込まれた各リンクが、回転に伴い幾何学的

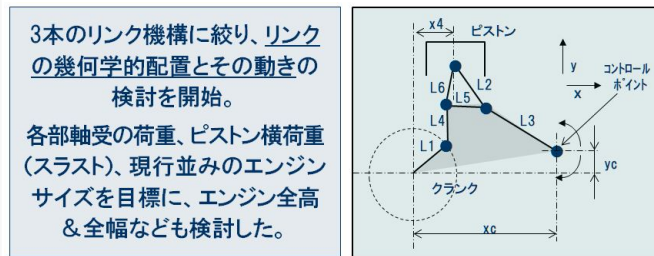


図5 リンクの幾何学的配置と挙動の解析モデル

にどのように動くのか、そのような解析ソフトが必要になり、この作成をトライボチームの茂木克也氏に指示した。

彼は精力的に取り組み、約1ヶ月の短期間でマルチリンクの機構解析ソフト(図5)が作成された。これはエンジン主運動系としての機構成立にかかわる項目(軸受荷重、ピストンスラスト荷重、エンジン全高・全幅など)への影響も検討でき、計算スピードも速い優れものであった。この渾身の作とも言える解析ソフトにより、可能性探求は順調なスタートを切ることが出来た。

4. 新たな付加価値の発見とその具体的効果

リンクジオメトリ(リンクの幾何学的配置)の組み合わせは無数にある。この解析ソフトを用いて、まずはピストンストロークを単振動に近づけ、可変圧縮比に加えて、慣性2次振動を低減できるリンクジオメトリ発見に狙いを定めた。

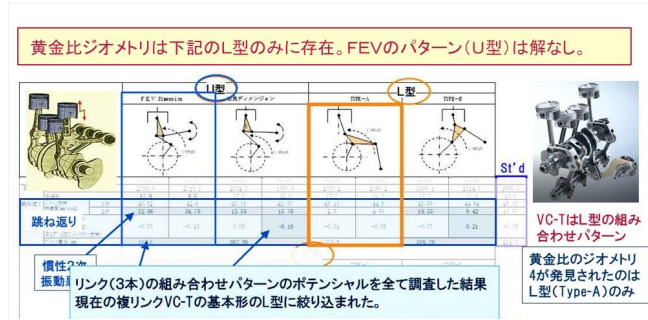


図6 現在のVC-Tの原型となるジオメトリ(L型)の発見

「夜空の星座」のように、数多くある組み合わせを幾つかのパターンに整理し、各リンクの寸法を小刻みに変えて計算した結果、特定のパターン(L型)の、かつごく限られた範囲に、現在のVC-Tの原型となるジオメトリが発見された(図6)。なお、FEVが試作したリンクパターンはU型(図6左)であり、改良の余地はあるものの、そのパターンでは解が無いことも判明した。このL型のジオメトリには、コンロッドの傾きによる諸問題の、根本的解消につながる両立解が見出されている。まさに黄金比とも呼ぶべきもの

であった。以下にその具体的な効果について述べる。

(1) 単振動に近いピストンストローク特性

マルチリンクの可能性として当初追究したのは、単振動(もっとも滑らかな動き)に近いピストンストロークが可能か、という1点であった。これは比較的早期にその存在が発見された。得られた結果は図7に示すように、ピストンの上下死点での加速度が等しくなり、慣性2次振動はほぼ消失することがわかった。

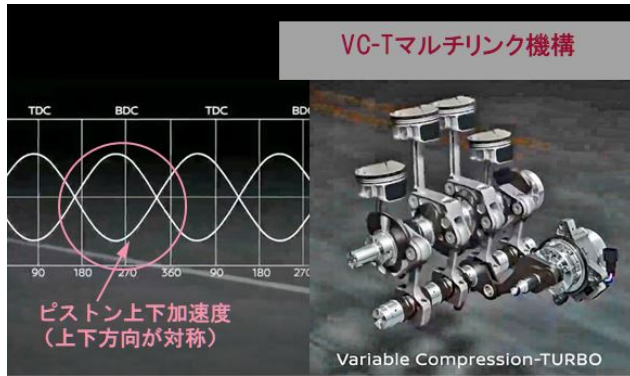


図7 単振動に近いピストンストローク特性

比較のために、これまで一般的だった従来クランク機構のピストンストロークを図8に示す。従来クランク機構はコンロッドの傾きの影響で、宿命的にピストンストロークの対称性が失われ、上死点の加速度は下死点側に比べ約2倍であることがわかる。

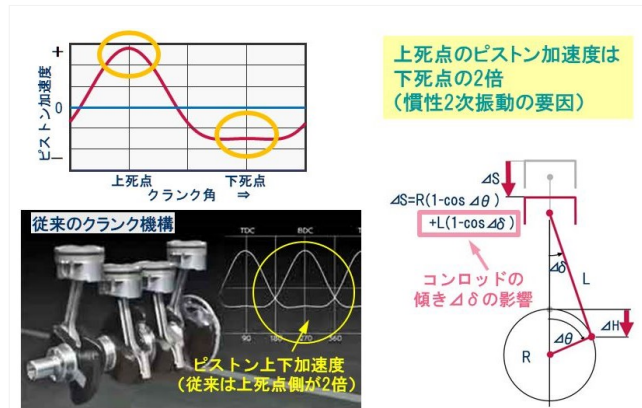


図8 クランクはピストン上死点加速度が下死点の2倍

これにより慣性2次振動が発生し、4気筒では相殺されない。この影響緩和のため、4気筒エンジンではバランスシャフトが装着されることが多いが、単振動に近いピストンストロークが得られたVC-Tでは、バランスシャフトは不要となり、その分の摩擦損失が低減できる。

(2) ピストンサイドスラストの大幅な低減

VC-Tのマルチリンクでは、アッパリンク(従来のコンロッド)が上死点からほぼ直立して下りてくる設定も可能である。このタイミングは爆発により、シリンダガス圧力が最も高い。しかし、アッパリンクを上死点後にほぼ直立を保

つ設定とすることにより、ピストンのサイドスラストは激減し、摩擦損失は40%低減された(図9)。

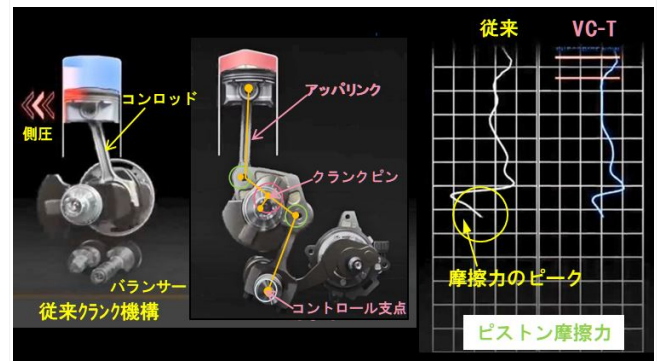


図9 爆発時のピストンサイドスラスト低減

さらにピストンスラップ(打音)の発生も少ないことがわかった。また、上死点後にアッパリンクが直立を保てば、その間、ピストンストロークは単振動となるため、サイドスラストと、慣性2次振動の低減の両立も可能である。

(3) 爆発加振力の緩和効果

コンロッドが傾く悪影響については、さらに大きな進展があった。それはクランクのトルク変動である。従来クランクでは、上死点のピストン加速度は下死点側に比べ約2倍であることは既に述べた。爆発のタイミングで、ピストン速度が大きければ、時間当たりのピストンの仕事量も大きくなり、クランク軸のトルクピークは、それに比例して増大する。

一方、黄金比ジオメトリ特有の、単振動に近いストローク特性の場合、上死点後の加速度が小さいため、爆発タイミングでは、従来クランク比でピストン速度は約三分の二と、劇的に小さくなる(図10)。

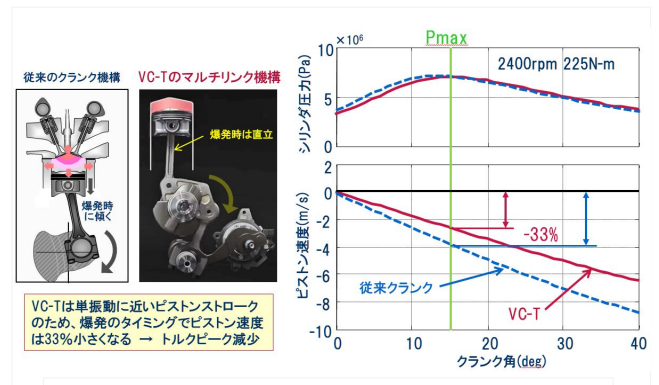


図10 VC-Tの爆発タイミングのピストン速度は小さい

このためVC-Tでは爆発時のトルクピークが小さくなり、一回転当たりの仕事量の積分値が同じであれば、その見返りとして、ストローク後半ではトルクが増大する。

図11はVC-Tのトルク振動特性である。エンジン一回転で、2回爆発する間のトルク特性を、従来クランクと比較している。VC-Tの場合、爆発時の最大のトルクピークが減少し、後半にもう一つの低い山が現れているのがわかる。このトルクピーク分散により、トルク変動は低減されモーターに近づく方向で、より滑らかな特性となる。

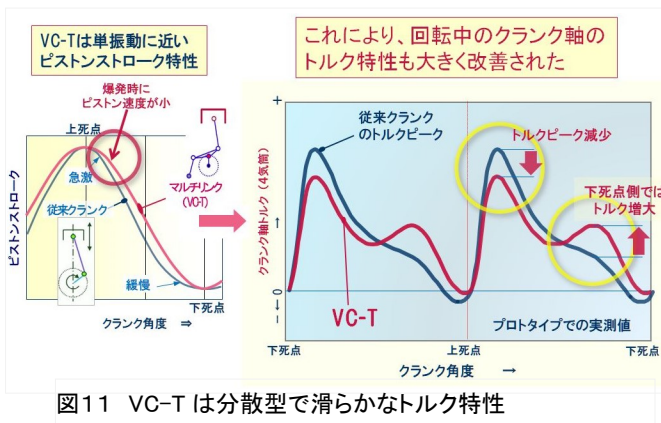


図11 VC-Tは分散型で滑らかなトルク特性

エンジンの排気量、および気筒数を減らす過給 Downsizing により、燃費向上を図る場合には、VC-T のトルクピーク分散による振動低減の効果は、大きなメリットになる。

以上が従来エンジンで諸悪の根源であった、「コンロッドの傾き」の悪影響を解決できる可能性として、研究所の原理開発段階で把握できた、マルチリンク機構の黄金比ジオメトリの特徴である。

(4) マルチリンク左右加振力の低減

VC-T の 3 本のリンクの慣性力の一部打消し合い、残った慣性力が左右加振力となり、これは従来のクランク機構には無かった加振力であるが、筆者はその問題に注目することなく、しばらく手付かずであった。



図12 ロアリンクの左右加振力の分析と低減策

この左右加振発生の問題は、金堂雅彦リーダーの音振基盤チーム若手の佐藤裕介氏の自発的な取り組みにより、解決されている。彼は原点に戻って機構学的な観点から対策案を練り上げ、筆者に提案してきた。ロアリンクの形を回転対称形に絞り込み、左右方向の慣性力による振動を解消する対策であり、その後の設計に反映された。以上述べたように VC-T の開発は、当初の想定以上の価値が認識され、プロジェクトの規模は大きく膨らんでいった。その一方で、クランクピン軸受への耐荷重性能の要求は、以下に述べるように、当初の予測をはるかに超えて、過酷なものとなり、ハードの成立が最大の課題となった。

5. マルチリンク最大の難課題(クランクピン軸受設計)

これまでに述べた VC-T のマルチリンク特有の効果は、それを具現化する機構ハードが成立して初めて、商品とし

て量産化できるものである。それが出来なければ、絵に描いた餅となり、過去の多くの挫折例の仲間入りをするだけとなる。以下に VC-T 機構の最大の課題となった、クランクピン軸受成立の取り組みについて述べる。

(1) 過酷な条件下にある VC-T のクランクピン軸受

マルチリンク中央に配置され、各リンクを繋ぐロアリンクは、ピストン側のアップリンクと、アクチュエータ側のリンクから爆発力レベルの荷重が加わり、これらの合力が梃子の原理でロアリンクに作用するため、ロアリンクのクランクピン軸受の荷重は約 2 倍に増える(図13)。

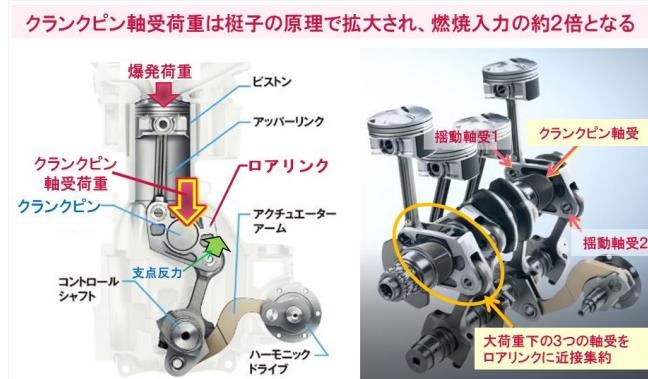


図13 ロアリンク軸受には拡大された大荷重が作用



図14 3つの大荷重軸受をロアリンクに集約

ロアリンクは回転と揺動が組み合わせられた複雑な挙動で、荷重方向の変化も大きく、VC-T のマルチリンクでは、はさらに困難な設計要因が加わった。

それは、これらの3つの軸受をロアリンクにコンパクトにまとめた点である(図14)。これらの軸受ハウジングの弾性変形は、数ミクロンであっても相互に影響を及ぼし、摺動面の形状は凸凹となる。もともと摺動面にはミクロン単位の粗さがあるが、大荷重下では潤滑油膜の厚さはミクロン以下となるため、ハウジング変形の潤滑膜形成への影響は、極めて大きい。

(2) 最先端の軸受解析ツールの完成と実務への活用

実は筆者グループのトライボの基盤チームでは、かなり前からこのような課題に対処可能な解析ツールの研究を地道に続けていた。それが漸く VC-T の難課題の克服

に役立つことになった。以下に述べる EHL 解析である。

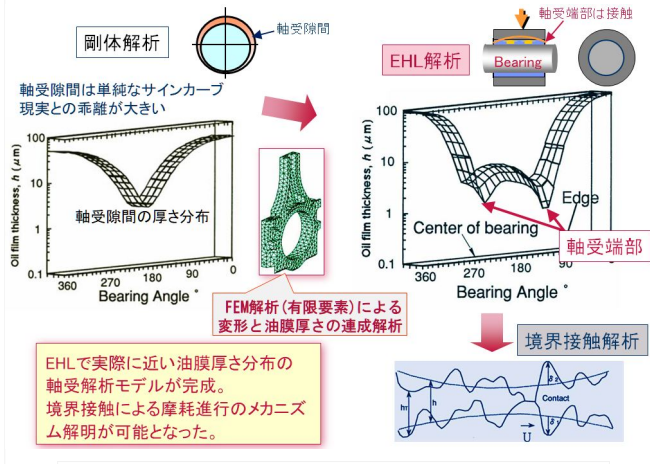


図15 摩耗解析に至る EHL 解析技術のステップ

この EHL 解析では、軸受変形の影響だけでなく、摺動面粗さや、摩耗進行の解析も段階的に加えた(図15)。

この解析の担当はトライボ基盤チームの牛島研史氏であった。彼はトライボのミクロな物理現象の解析と、数値計算の能力に秀でており、この時点で世界的に最も先進的な EHL 解析技術を創り上げている。

この EHL 解析で予測された(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)の状況を図16左に示す。このエッジ部が境界接触を起こし、摩耗が始まる(詳細は付録3参照)。

VC-T のクランクピン軸受の疲労強度の判断結果を図16右に示す。VC-T の軸受平均面圧は従来の限界を大幅に超えている。

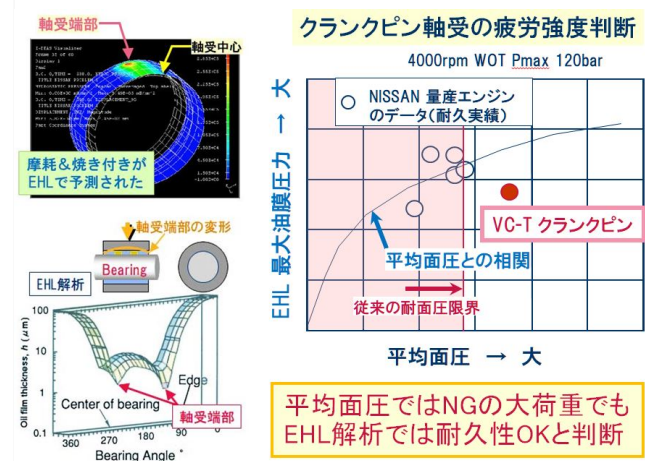


図16 EHL 解析による軸受の疲労強度の判断結果

しかし実績のある従来の量産エンジンの軸受も含め、EHL 解析で最大油膜圧力(疲労の目安)を算出し、これらと比較した結果は、VC-T の軸受は軸受摺動面の最大油膜圧力が、従来の量産軸受の実績範囲内に何とか収められたことがわかる。丹念に軸受のハウジング剛性を変え、油膜厚さの分布や、境界接触による摩耗などを EHL 解析で予測し、改良の方向を見出した結果である。

このようにして、VC-T 機構特有の軸受けの荷重拡大と、

コンパクトに3つの軸受けが集約されたハウジング設計の課題は、新たに設計ツールとなった EHL 解析で解決することが出来た。

なお、この EHL 解析については、当初は日産単独で研究を始めたが、途中からメタルメーカーの大同メタル工業、英国のグレイシアにも参加を呼びかけ、共同で研究を進めた結果、多数の論文(9件)も執筆され、自動車技術会論文賞を受賞した。大同メタル工業はサプライヤとして VC-T 量産時に、これらの軸受メタルを供給している。

(3) ルノーとの共同研究で活用された日産の EHL 解析

このような優れた特徴のある可変圧縮比であったが、原理開発が完了して設計部に技術移管された後、商品化の検討は遅々として進まなかった。あまりに大胆な新技術であった事もその理由の一つであろう。

そんな状況下で、日産の研究所は、ルノーとのアライアンスの一環として技術交流が始まっていた。筆者はルノーのテクニカルセンターに赴き、日産の可変圧縮比の取り組みを紹介することにした。このプレゼンは大きなインパクトを与え、その後のルノーの反応は早かった。

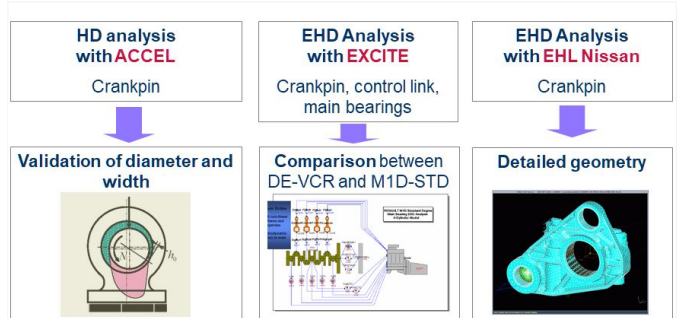


図17 ルノーの可変圧縮比ディーゼル Work Flow

プレゼンから一か月後には大挙して来日し、日産からさらに詳細な情報を提供した後、ルノーから日産の研究のトップに、可変圧縮比ディーゼル(DE-VCR)開発への協力打診があり、日産はこれを受諾した。

これはルノーの開発予算で VC-T の要素技術を磨ける貴重な期間となった。ルノーの DE-VCR の Work Flow を図17に示す。AVL のクランク連成解析と並び、日産の EHL 解析が主役であることがわかる。

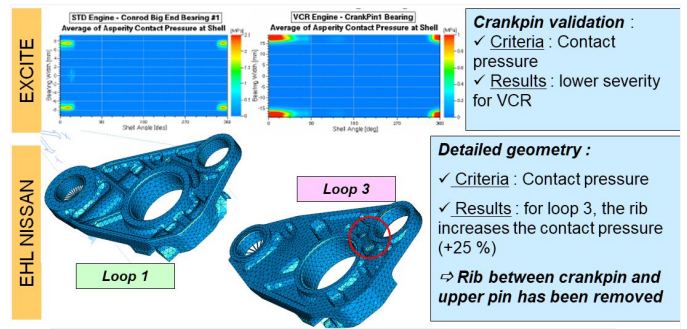


図18 ルノーでも日産の EHL 解析を設計に活用

DE-VCR は VC-T より燃焼荷重がさらに高い。そのクランクピン軸受成立のため、日産の EHL 解析が重要な設計

ツールとして活用され(図18)、クランクピン軸受のハウジング剛性も、シミュレーションによる設計改良を繰り返し、要素技術の設計ノウハウが蓄積された。EHLの解析精度もこの過程でさらに高めることが出来ている。

数年のルノーとの共同開発で、可変圧縮比ディーゼルのプロトタイプが完成し、共同研究の成果は、ルノーのD.Gérard氏がまとめ、「FISITA2006 World Automotive Congress Yokohama」で発表した。

9. あとがき

可変圧縮比の原理開発が完了し、日産の総合研究所の成果として、最初に記者発表を行ったのは2005年であった。しかし商品化は大幅に遅れて2018年となった。



図19 日経ビジネスの可変圧縮比紹介記事(写真は筆者)

それでも日産の可変圧縮比エンジンは世界初であったのは、他社においても可変圧縮比開発は難航したためと推測できる。

しかし、原理開発完了から商品化までの13年の遅れは記録的と言える。その理由の一つは、電動化が進む時期に、エンジンの基本構造の大胆な変更はハイリスク、と受け止められたことが大きかったと、筆者は考えている。

日産内の風向きを変えたのは、VC-Tを搭載した試乗車であった。それに試乗した関係者の多くが、VC-Tの滑らかな振動素質を絶賛し、これが追い風となった。

筆者はエンジン設計部の幹部から、「VC-Tは新しい価値のあるエンジン、商品性がある。しかも圧縮比が変えられる。」と言われた。可変圧縮比の機能実現よりも、新たな付加価値(滑らかさ)の方が喜ばれたわけである。当初の狙いが正しかった証であり、嬉しい一言であった。

しかしながら、VC-Tの商品化に際しては、経験したことのない多くの困難な課題が実際に山積し、設計、製造の各部門はこれまでの新エンジン開発に倍する取り組みが必要であった。

なお、この解説記事で使用した図やデータの大半は、VC-T量産エンジンの写真を除き、日産研究所での原理開発の段階で取得したものである。それらは技術論文、

解説記事として、対外発表したもので、参考文献にリストアップしてある。この文献リストに名を連ねているのは、筆者と共にこのVC-Tの原理開発に取り組んだメンバーである。

この場を借りて、VC-Tの原理開発と商品化に尽力した日産内外の多くの関連部署の方々にも感謝したい。

10. 参考文献

- 1) K. Moteki, S. Aoyama, K. Ushijima, R. Hiyoshi, S. Takemura, H. Fujimoto, T. Arai, "A Study of a Variable Compression Ratio System with a Multi-Link Mechanism", SAE paper 2003-01-0921
- 2) 牛嶋研史、小林誠、茂木克也、青山俊一、"複リンク機構を用いたエンジンの軸受潤滑解析"、日本機械学会2005年度年次大会講演論文集 vol13-93
- 3) N. Takahashi, S. Aoyama, K. Moteki, R. Hiyoshi, "A Study Concerning the Noise and Vibration Characteristics of an Engine with Multiple-Link Variable Compression Ratio", SAE Paper No. 2005-01-1134
- 4) S. Aoyama, K. Moteki, N. Takahashi, R. Hiyoshi, "Study of a Variable Compression Ratio System with a Multi-Link Mechanism and its Effect on Engine Performance", Aachen Kolloquium (Automobile and Engine Technology) 2006
- 5) H. Tsuchida, K. Hiraya, D. Tanaka, S. Shigemoto, S. Aoyama, M. Tomita, T. Sugiyama, R. Hiyoshi, "The Effect of a Longer Stroke on Improving Fuel Economy of a Multiple-Link VCR Engine", Society of Automotive Engineers Paper No. 2007-01-4004 (2007)
- 6) D. Gérard, S. Aoyama, K. Ushijima, K. Moteki, B. H. Hamouda, S. Croguennec, M. Thomine, D. A. Oisy, "Diesel VCR (Variable Compression Ratio) Engine Development using Multi-Link Mechanism", FISITA2006 World Automotive Congress Yokohama Transaction F2006P331T
- 7) Takanobu Sugiyama, Ryosuke Hiyoshi, Shinichi Takemura and Shunichi Aoyama, "Technology for Improving Engine Performance using Variable Mechanisms", Society of Automotive Engineers Paper No. 2007-01-1290 (2007)
- 8) Y. Okamoto, K. Kitahara, K. Ushijima, S. Aoyama, H. Xu, G. J. Jones, "A Study for Wear and Fatigue of Engine Bearings by Using EHL Analysis", JSAE Review 21pp. 189-196 自技会論文賞受賞
- 9) 青山俊一、"マルチリンクを応用したエンジン可変機構"、日経ATセミナー「Automotive Technology Day 2006 spring」
- 10) S. Aoyama, "Fourin 月報 T065_8-3 特集(VC-T)"