

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(付録参照)。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、量産を開始した。

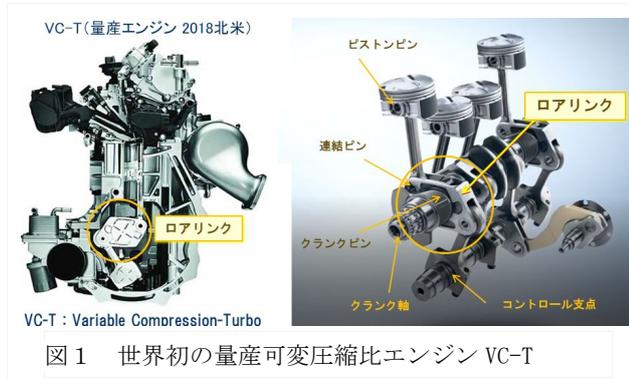


図1に示すのは2018年に世界に先駆けて量産車に搭載された可変圧縮比エンジン VC-T である。

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5.3 mm変化する。これがすなわち圧縮比の制御である。

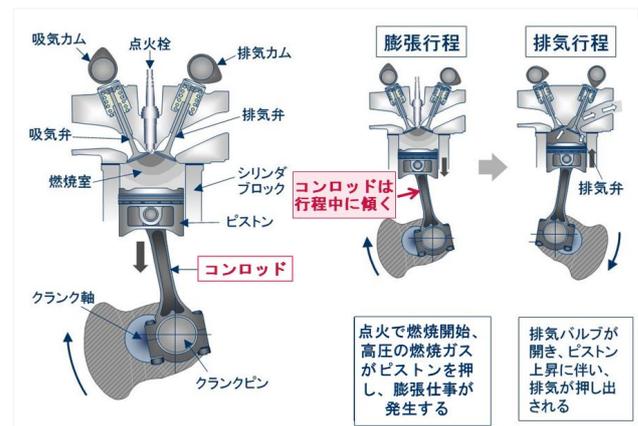


VC-Tはマルチリンク方式で、過去の事例(付録1参照)をみても、敢えてこの方式をクランクに適用した例は少な

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、以下に述べるクランク機構の宿命的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で一般的なクランクは、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、クランク機構には、回転に伴いコンロッドが大きく傾くという宿命



がある。このコンロッドの傾きは後述するように、本質的かつ、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、筆者らが注目したのは、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。



図4 FEV Europe GmbHの可変圧縮比機構

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、多くの意味で素質が良く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。FEVのマルチリンクは失敗例であったが、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ないかと考え始めた。

(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るとこの機能以外に、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

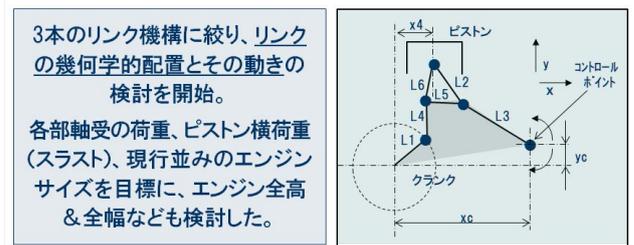


図5 リンクの幾何学的配置と挙動の解析モデル

れた各リンクが、回転に伴い幾何学的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、可能性探索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

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の可能性に狙いを定めた。

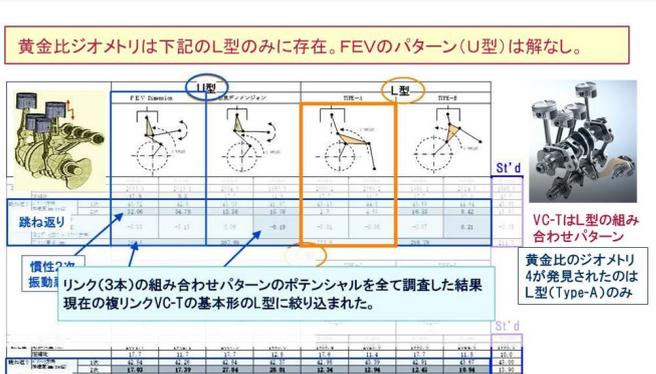


図6 現在のVC-Tの原型となるジオメトリ(L型)の発見

「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。以下にその要点を簡潔にまとめる。

(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次振動はほぼ消失した。

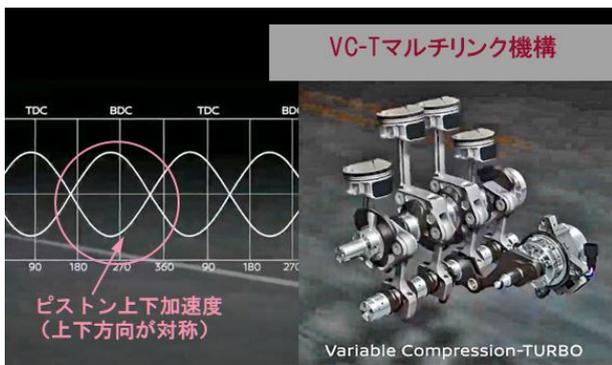


図7 単振動に近いピストンストローク特性

比較として、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

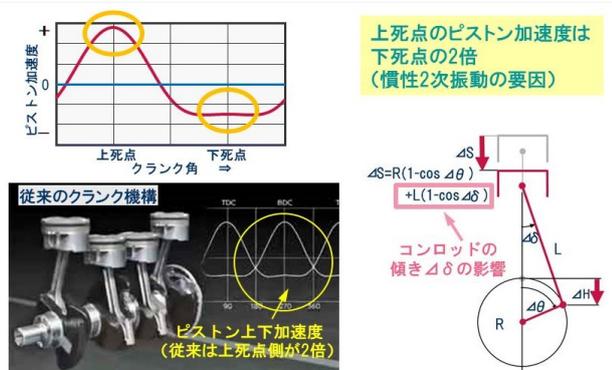


図8 クランクはピストン上死点加速度が下死点の2倍

がわかる。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

バラサ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、バラサ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(図9)。

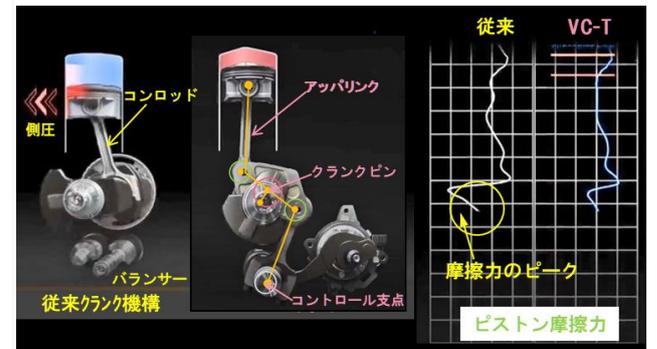


図9 爆発時のピストンサイドスラスト低減

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、アッパリンクは上死点後にほぼ直立を保つ設定が可能である。これによりピストンのサイドスラストは激減し、ピストンの摩擦損失は40%低減されている。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、サイドスラストの低減と、慣性2次振動の低減が両立する範囲が、比較的広いこともわかった。

(3) 爆発加振力の緩和効果

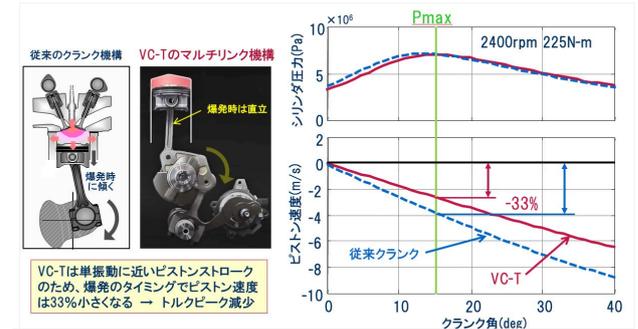


図10 VC-Tの爆発タイミングのピストン速度は小さい

コンロッドが傾く悪影響については続きがある。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、ピストン速度が大となっていれば、時間当たりのピストンの仕事量も大きい。クランク軸のトルクピークは、それに比例して増大する。

一方でVC-Tの単振動に近いストローク特性の場合、爆発タイミングでは、加速度が小さく、従来クランクに比べて

ピストン速度は約2/3と、劇的に小さくなる(図10)。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は変わらないため、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、

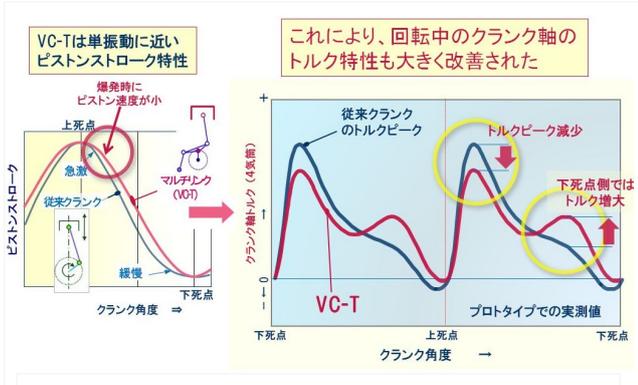


図11 VC-Tは分散型で滑らかなトルク特性

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、特性としてはモーターに近づく。エンジンの排気量&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効果は、低振動を維持しやすくなるため、商品性上のメリットとなる。

以上のように、従来エンジンの「コンロッドの傾き」は諸悪の根源であることが判明し、これを一挙に解決できる方策として、黄金比ジオメトリのマルチリンク機構の存在が明らかとなった。

(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



図12 ロアリンクの左右加振力の分析と低減策

く手付かずであった。この左右加振発生の問題は音振基盤チーム(金堂雅彦リーダー)の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。また、音振基盤チームはこの不平衡慣性力の低減だけでなく、アクティブトルクロッド(ATR)と言う新方式の技術を開発し、VC-T搭載車両の振動低減に貢献している。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行った。だが、その一方で、クランクピン軸受への耐荷重性能の要求は、当初の予測をはるかに超えて、過酷なものとなった。

5. マルチリンク最大の難課題(クランクピン軸受設計)

これまで述べてきた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、VC-Tも過去の多くの挫折例の仲間入りをするだけとなる。

ここではマルチリンク機構成立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、ロアリンク軸受(すなわちクランクピン軸受)の荷重は大幅に増える(図13)。ロアリンクは回転と揺動が組

クランクピン軸受荷重は梃子の原理で拡大され、燃焼入力約2倍となる

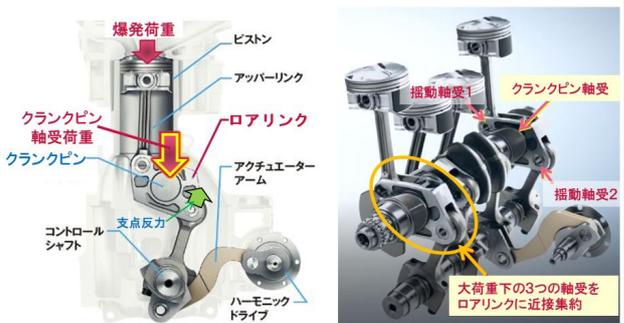


図13 ロアリンク軸受には拡大された大荷重が作用



図14 3つの大荷重軸受をロアリンクに集約

み合わされた複雑な挙動で、荷重方向の変化も大きい。VC-Tのマルチリンクでは、はさらに困難な要素が加わった。これらの3つの軸受はロアリンクにコンパクトにまとめて設計されている点である(図14)。これは従来のコンロッド軸受(単独)とは大きく異なる。軸受ハウジングの弾性変形は、相互に影響を及ぼし、摺動面の形状は凸凹となる。滑り軸受は摺動面の潤滑油が荷重変動により、軸受隙間から絞り出され、その流動抵抗による油圧上昇で油膜が形成される原理である。もともと摺動面にはミクロン単位の粗さがあり、これも無視できないが、大荷重下での変形の影響で、潤滑油膜の厚さはミクロン以下となるため、ハウジング変形の滑らかな油膜形成に与える影響は、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、かなり以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続けていたが、漸くVC-Tの難課題の克服に役立つことになった。

それが以下に述べるEHL解析である。

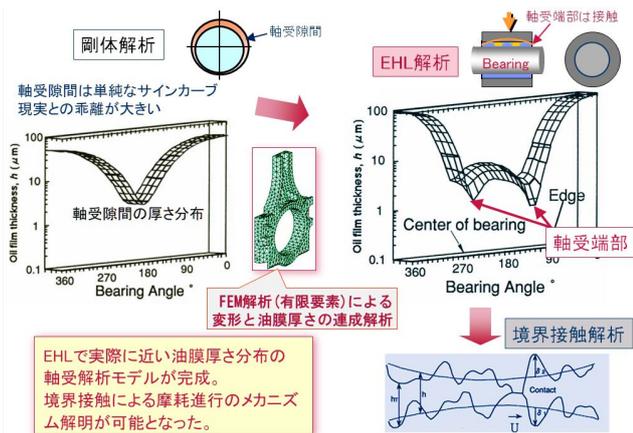


図15 摩耗解析に至るEHL解析技術のステップ

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、摩耗の進行の解析機能も段階的に加えている(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。彼は数値計算の解析能力に秀でており、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は図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。しかしEHL解析で従来のものも含め、最大油膜圧力(疲労の目安)で解析し、これらを比較した結果では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機構特有の梘子比の問題と、コンパクトな軸受設計の課題は、新たに設計ツールとなったEHL解析で

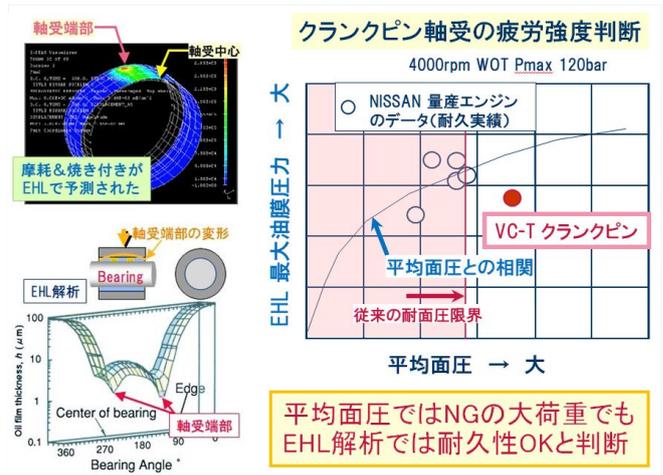


図16 EHL解析による軸受の疲労強度の判断結果

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。多数の論文(9件)も成果として共同で執筆、自動車技術会論文賞を受賞している。

(3)ルノーとの共同研究でEHL解析を活用

可変圧縮比は筆者の研究所の成果として、設計部に技術移管されたが、商品化の検討は遅々として進まなかった。そんな状況下で、日産の研究所も、ルノーとの技術交流が始まった。筆者は意を決して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した。ルノーの反応は早かった。

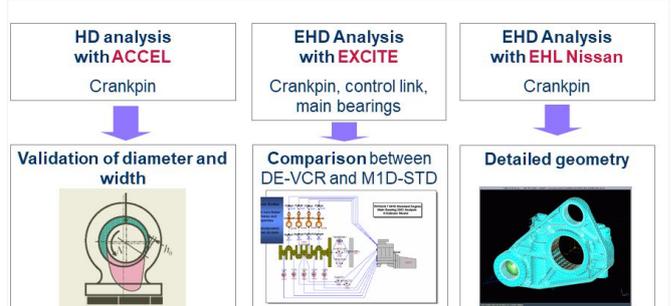


図17 ルノーの可変圧縮比ディーゼル Work Flow

その一か月後には大挙して来日し、その後に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った。これはルノーの開発予算でVC-Tの要素技

術を磨ける貴重な経験となった。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 解析が主役となっている。

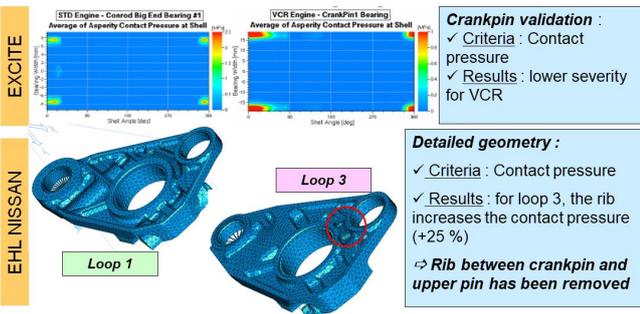


図 18 ルノーでも日産の EHL 解析を設計に活用

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ていった。EHL の解析精度もこの過程でさらに高めることが出来た。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ている。

この共同研究の成果は、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

日産の総合研究所の成果として、VC-T の最初の記者発表は 2005 年であったが、商品化は 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が、こ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。試乗した関係者の多くが、VC-T の振動素質を体感して絶賛し、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。」と言われたことを記憶している。可変圧縮比よりも、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。この場を借りて、VC-T の商品化に尽力した日産内外の多くの関連部署の方々に感謝したい。なお、この解説記事で使用した図やデータのもとは、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 の新技術創出に取り組んだ方々である。

筆者は VC-T の商品化開発の最中の 2007 年に定年を迎えた後も、囑託として 2012 年まで日産に在籍し、その後は社外アドバイザーとして、5 年近く特許活動のサポートを続けた。

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 vol3-93
- 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) 佐藤裕介、金堂雅彦、原雅之、"複リンク式可変圧縮比エンジンの不平衡慣性力に関する研究" JSAE Paper vol. 40 No. 2 March 2009
- 11) 金堂雅彦、谷村浩史、山内亮佑、小穴祐太、"世界初アクティブトルクロッドの開発" 164 日産技報 No. 87 (2021) 自技会賞 & 日本機械学会賞受賞
- 12) S. Aoyama, "Fourin 月報 T065_8-3 特集(VC-T)"