



DYNAMICS



機械力学・計測制御部門ニュースNo.67

Mar 19, 2021

自動車振動騒音技術の今日と明日

石濱技研プロフェッショナルエンジニア 石濱正男



1. はじめに

私は日産自動車で職業生活を1969年に始めた。最初の10年は、自動変速機の電子制御、耐熱問題、排気対策、ガスタービンやロータリーエンジン、オイルシールなど雑多な不具合対策をもっぱら実験的アプローチで実行した。その後やっと排気系脈動・噴流、エンジン騒音などの振動騒音技術に本格的な取り組みをする機会を得た。さらにアクティブ振動騒音制御と音質向上技術を軽量化、燃費向上に活用した開発を行い、約20年前に大学教員となってからはタイヤ・路面接触による振動発生現象などの現象解析を行ってきた。この中で、自動車関連企業・環境行政・各種研究機関との交流を通じて得た知識をもとに、一個人としての展望を以下に述べる。

2. CASE, MaaS, IoTからの視点

Connected, Autonomous, Shared, Electricという今後の自動車の姿から考えてみよう。

2.1 自動運転の影響

ドライバーは自動運転時にはアクセル、ブレーキ、ステアリングの操作をしないから、操作に応じた変化をエンジン音・排気音に期待しなくなり、意図せずに音の変化という刺激を受けざるを得ない。また、運転に使っていた注意力も減る。振動や音の変化には敏感になるであろう。また、力強いエンジン音質の創出という従来の試みに対する評価も変わるであろう。

2.2 シェアリングの影響

自分の所有する車だけの経験から、異なる複数の車の走行経験が増えるので、ユーザーは品質の違いを感じる能力が高まる。シェアをする車両の購買選択権を誰が持つのか、今の時点では予測がつかないが、自分に合った車両を選べる方式になることを筆者は期待する。そのような方式であればメーカーは技術開発競争に勝っていかなければならない。シェアリングで自動車の所有コストが下がり、一台当たりの価格は高くてもよくなれば、高級・高性能車の必要性が高まる。

2.3 電動化の影響

内燃機関車では停車中にも始動やアイドル時の低周波振動があるが、EVではなくなるから、走り出すときより路面から入る振動にさらされる。胸のすくようなエ

ンジン音や低周波の迫力感あふれる排気音の支配からは外れて、市街路や郊外路ではロードノイズ、高速道路では風音ばかりが聞こえる。周期的な入力から広帯域ランダム入力に替わり、かつ運転者の操作よりも路面の違いや自然風の変化により受動的に変化を受ける。入力点もややあいまいになり、解析・予測技術、感性評価技術、設計対象構造も異なってきた。

航続距離を重視するEVではバッテリー重量が大きくなり、同一の車内空間で比較すると車両重量が4割ほど増加している。そのために装着タイヤのサイズが大きくなり、タイヤ放射騒音が増加している。発進加速時の車外騒音は低減したものの、残念ながら電動化は巡航時の道路沿線騒音改善にはつながっていない。特に主要街道沿い、例えば東京の環状8号線沿いの高級住宅地、での夜間の騒音は政府の定めた環境基準を大きく超えた状態が続いている。[1]

2.4 IoTによる設備のOn-condition Monitoring

自動車産業での振動騒音技術の応用先は従来開発部門であったが、今日では生産現場に広がりつつある。生産設備の不具合は振動・騒音現象として気づくことが多い。加速度計やマイクロホンという廉価で精度の良いセンサーの存在や、成熟した計測システム・モード解析ソフトウェアの利用により、運転中の常時監視で故障の未然防止、生産の安定、経費の削減に役立っている。また、現場と技術陣間、ユーザーと工作機械メーカーのリアルタイムでの情報共有に役に立つので設計改善に進める。また、従来のように計測信号の特徴からだけの診断ではなく、対象物の動的特性を記述できる計算モデルを背後に走らせておき、両者の比較をして判断をくださる方法も使われている。政府が唱えているわが国の戦略”Cyber-Physical System”の一例である。振動騒音計測によるOn-condition Monitoringは、故障診断というよりも品質向上に使われ始めている。例えばドリルの駆動に伴うトルク変動や切削加工中の加工対象の振動から適切な加工条件制御をする。

3. 環境保護からの視点

欧米での大掛かりな調査によると、道路沿線の住民は騒音によって心臓疾患での死亡が、静かな場所よりも5倍多いことや医療費、生産性、不動産価格、固定資産税

などへの悪影響が数値化されている。適切な騒音制御技術や都市計画への投資は、経済的に見合うはずである。[2] 前項の状態に対して、環境省は規制を強める検討をしている。しかし当事者の一人である日本自動車工業会や日本自動車用タイヤ協会の説明では、安全性能・燃費・車両価格の大幅な犠牲なしに車外騒音をこれ以上下げる技術はないそうである。そうだとすると、この必要技術は機械工学的に開発の見込みがあるのだろうか。技術開発が進む必要条件是十分な資源、なかでも優秀な人材、の投入である。わが国の自動車産業には優秀な振動騒音技術者が少なからず存在する。この資源を車外騒音低減技術開発にどれだけ投入するのかは、経営者だけでなく本会会員を含む技術者の優先順位づけ判断による。筆者が産業界の技術者との会話のなかで、彼らのもつ優先順位判断基準として気になったことがある。それは「お客様は神様である。お客様は車外騒音の低減はそれほど求めていない。」というお言葉である。筆者は米国のPE(professional engineer)として登録しているが、PEの綱領に定められている優先順位7段階において第1は公衆の利益であり、お客様の利益は第5番目である。「お客様は神様」という有名な経営者の言葉をそのまま優先順序として使っている方が多いとすれば、環境問題の解決は難しい。さらに、環境保護費用を誰がどのような割合で負担するのかは、わが国の政治・行政で明確になっているとは言い難い。この面でも機械学会での検討や提言に期待をする。[2]

また、型式登録にデジタル認証を取り入れることも、データの安定・効率化・技術発展のために要請したい。

4. 車両形式の変化からの視点

セダン形式が減少し、車高の高いSUVやワゴン形式の車体が増えている。開口部の剛性確保、シートを含めた乗員姿勢、車両コンセプトと振動騒音性能目標との関係などの検討事項はあるが、従来技術の延長線上であろう。

5. 解析・予測・設計技術からの視点

前述したロードノイズ、風音という騒音現象をよく捉え、適切な設計をするには、これまでとは違う振動騒音技術を駆使する必要がある。この二つの現象に絞って要所を見る。[3, 4, 5]

1) 多点入力・多経路伝搬解析

路面から4輪に入る振動が、サスペンション機構・車体構造内の多数の経路のどこを伝達して乗員耳位置のロードノイズとして届くのかを設計者は知りたい。これにはTPA(Transfer Path Analysis)と呼ばれている実験解析技術が約20年前から多く使われている。それは、伝搬経路とおぼしき多数の点の振動信号の線形結合による回帰分析技術の一種であり、1960年代から相関分析として使われてきた技術の発展版である。発展の要因は、廉価・高速になったデジタル処理によって、入力経路間の相関によるエラーを線形数学の特異値分解により減少可能になったこと。伝達経路は多くても、一つの加振源からの周期入力現象であるエンジン騒音に比べて、4輪からの比較的独立したランダム入力によるロードノイズへのTPA応用は原理的に容易・有力である。しかし、この手法にもいくつかの限界がある。例えば、伝達

経路分析と言う名前から想像されるほどにはエネルギーの伝達を必ず分析できるわけではなく、測定部分の振動の寄与割合を与える手法である。また、特異値分解を行うと、得られる伝達経路での寄与分担をあずかるものは実体ではなく、仮想的な信号になるので、具体的な設計との結びつきが弱くなる。これらについては実験・理論両面から改良試行がなされているので、今後の発展に期待している。

2) ランダム加振

舗装路面には母材アスファルトから骨材である碎石の頭が突出していて、その間隔と高さの分布がロードノイズ波形生成の基本となる。この空間分布をフラクタル性は無視して観察するとある程度の周期性を持つランダム信号とみなせる。そして走行中には車両振動系の応答に比べればやや緩やかに特性が変化するSlowly Varying Time Signalでもある。

さらに、タイヤ転動時にトレッド溝で発生する空力音の発生には、路面表面近くの通気性が支配要因となるが、これも空間的にランダムな特性を持つ。新しい計測と流体解析によって、さらなる現象理解が進むであろう。

3) 波動伝搬解析

ロードノイズや風音は必ずしも共振現象が問題の中心とは言えない。もしそうであったとしても、対象周波数領域でのモードの数が極めて多いために、個別モードを扱う方法は手間がかかる。タイヤ構造では材料の減衰が大きいために、モードが見極めにくい。このような特性をもつ対象には、定在波ではなく伝搬する振動波として記述する解析法のほうが適している。しかし、多くの機械技術者はモード解析ばかりに依存をしがちである。波動伝搬解析に関する学校教育や適切なソフトウェアの充実が望まれる。

4) 接触問題

ロードノイズの加振源は、タイヤトレッドの路面との転がり接触であって、トレッドは路面から強制速度入力を受ける。踏み込み時に強制突き上げ、けり出し時にはトレッドの弾性復元力で原形に戻る運動である。わずかではあるが路面とのすべりも発生する。加振力の制御は振動問題解決の有力な方法であるから、この転がり接触現象のまともなモデリングが新たに必要であり、操縦安定性や乗り心地の解析で使われる路面摩擦モデルでは粗すぎる。しかし、モデル作成と使用には計測手法や考察能力の高さが要求されるので、世界的に見てもよく理解している技術者は少ない。

ロードノイズの固体伝搬成分は、玉軸受を使うホイールベアリングを通過する。この振動伝達特性も接触問題が関係することは考慮しておくべきであろう。

5) 非線形・異方性

接触面は路面上突起によって局所変形を受け、トレッドのゴムブロックにより応力分布がやや緩和されてスチールベルトに伝達される。カーカスなどによる繊維強化構造による異方性、ゴムの大変形、変形速度依存性、ヒステリシス減衰などの非線形性を理解して構造解析をする必要がある。

6) 張力構造・薄板構造問題

タイヤは内圧によって形状を保ち、車両を支えている。路面からの入力を受けるトレッドは、低周波・長波長の入力に対しては膜構造的な応答をし、高周波・短波長になると曲げ剛性の影響が入った応答をする。従って曲

がり梁や円筒シェルという単純構造モデルの応用には注意が必要。

車体構造を伝播する高周波振動については、薄板を使ったセミモノコック構造の特性の理解が欠かせない。主要構造メンバーにはねじりモーメントによるウォーピングが発生し、メンバーの接続点ではバイモーメントによってねじりと曲げの変形態様連成が起きる。また、断面内のシアーフローの非対称性から曲げ振動によってねじり振動が励起される。技術者は、こういう力学を熟知したうえで、FEM解析の結果から有用な情報を引き出さなければならない。

7) 分散系と群速度

タイヤ構造を伝わる波動は周波数によって伝搬速度が異なる。従って、加振源から離れるに従って波形が変化する分散(dispersion)が起きる。また、タイヤ空洞内を駆け巡る音響波動は、多くの回折・反射経路を並列に持つから、音響エネルギーは種々の速度で運ばれる。分散が生じている系でエネルギーを運ぶ群速度は、位相速度とは異なるのでインパクト加振など実験解析に注意が必要である。波動の基本的知識が技術者に求められている。

8) 回転体特有の現象

これは複数の事項により生ずる。一つは遠心力とコリオリの力の組み合わせである。遠心力によってタイヤトレッドの周方向張力が増すので、弦または膜振動の復元力が増す。次に、タイヤトレッドが半径方向に運動すると、コリオリの力によって周方向への力が働いて、半径方向と周方向の運動が連成する。これを無視した振動解析は、郊外路走行程度の速度以上では現象を的確に表現しなくなる。三つ目は、物体固定の回転座標系と車軸固定の併進座標の相対運動である。タイヤ・車輪に固定した回転座標上での回転面内振動は、車軸固定併進座標系には回転1次の周波数だけ高い周波数と低い周波数の二つの成分に分かれて伝わる。そして、この二つの成分の干渉でビート現象を起こすことが多い。

9) 空力騒音

走行中に車室内で問題となる風音の音源は、車体周辺の空気流中に次々に渦が発生して流れ去っていくときの圧力変動、あるいは圧力分布の空間的運動である。大気中のこのような圧力変動から音波が周囲に伝播するメカニズムは、最近のスーパーコンピューターによる計算流体力学(CFD)により数値解析で再現できるようになってきた。しかし、実際の車両運行時の自然風には速度と方向にゆらぎがある。これを含めた解析が目下の課題となっている。さらに、車体や窓を加振する機構を含めた空力・構造振動連成問題は、空調システムへの応用も含めて検討が進められている。

10) ドップラー効果

タイヤ構造では、路面との接触による加振位置が回転とともにタイヤの周上を移動する。つまりタイヤ構造と言う媒質に対して音源が運動するので、上流側では波長が短く周波数が高く、下流側では長く・低くなる。この二つが周上を駆け巡って干渉を起こす。風音では、音源(渦移動)、受信側(車体)それぞれが大気に対して相対速度を持つので、ドップラー効果がでる。タイヤ上端速度は車速の2倍にもなるから、入力と出力の相関分析を基礎としたTPAなどの実験解析には注意が必要である。

11) 感性評価からの視点

悪いロードノイズの音質的表現は「変動感」、「残響感」、悪い風音では「ばさばさ感」である。これらは現象の物理的特徴に由来する。振幅全般に漠然と対応するのではなく、感性に直結する設計が商品性向上の要点である。[4]ロードノイズの場合には、回転する車輪から伝わる回転次数±1次成分の干渉によるビート感発生、減衰の小さいタイヤ空洞内音響波動や質量が大きいシャーシ部材共振がそれに相当する。

12) 水・塵埃などの悪環境下での計測

エンジン性能解析での気筒内圧測定に対応する足回りの振動や車体周辺の空気流の走行中の計測には、水、泥、ほこりなどに強い計測系が必要である。タイヤ空洞内の車輪外周面にセンサーを取り付け、向かい合うトレッド内面の温度、振動を計測するシステム(Tire Cavity Thermometer, Accelerometer, Microphone)が活用されている。特に路面との接触部分については路面側からの計測手法も開発されつつある。

13) 室内実験施設の改善と使い方

操縦安定など低周波の水平面内解析については、フラットベルトタイヤ試験機が役立っているが、転動による上下振動現象は、室内設備・機器で再現することが難しい。ベルトの上下方向剛性を路面同様にすることが難しいので、ベルト上にプラスチック突起群を取り付けても完全な強制速度入力にはなりにくい。ただ、ローラー上に張り付けた凹凸路面よりも優れた点があるので、使い方の工夫が望まれる。

自然風を模擬する高速実車風洞が大企業で開発されつつあるので、研究の発展が期待される。

14) マルチフィジックス・トレードオフ

上述の諸現象の解析に使われる主たる学問は動力学であるが、転がり抵抗・路面との摩擦・空力的に発生する音などを総合的に見通し、自動車の運動性能・乗り心地・燃費各性能のトレードオフ問題を解決するには、トライボロジ・熱力学・流体力学までを含めた知識を駆使する必要がある。残念ながら、これらを広く扱う能力のある人材は少ない。ここが自動車技術の要であるとの認識に立って、組織的・システマ的な人材育成を自動車産業全体として行って欲しい。

15) 分子設計をも目指す高度材料技術

振動騒音設計にはゴム材料が欠かせず、その特性が性能限界を決めていることが多いのだが、物理学の対象としては非常に難解である。振動解析には、実験的に得られている非線形特性を「等価的」に表現する記述法が使われているが、現状では接触部などのマイクロな力学を記述できるとは言えない。また、新しい材料そのものを設計することはできない。しかし、在来材料とその解析技術のままでは、今日の製品の性能レベルを超えられない。分子とまではいかずとも、コンパウンドというミクロスケールの特性を記述できるように、機械工学が高度になることを期待する。

16) OEM・サプライヤーでのオープンイノベーション

前述のとおり、OEMでのシステム開発とサプライヤーの部品・材料開発が有機的に連携して行われる必要がある。特に振動騒音分野は解析・実験の両方が相当なレベルにまで成熟しているから、条件はかなり整っている。予測計算用モデルを仲介とした企業間活動の活性化が望まれるが、それほど進んでいかない。阻害要因としては機密保持・特許による囲い込みという古い知財活動概念、技術者個人の自己防衛意識などだと筆者は認識し

ている。解決の第一歩は、これによる国際競争力の低下に経営陣が気付くことであろう。そして標準化・モデル流通でのソロバン勘定や発明者利益の保護などの方策を編み出さなければならない。技術者の集まりである本会は、技術の流通や技術者の利害調整に関するマネジメントにもより積極的な貢献が求められる。

6. 自動車企業内の役割からの視点

1950年代以降、わが国の自動車産業は次のような市場からの要求変遷に対応してきた。初めは悪路での耐久性と乗り心地確保用足回り。60年代には米国市場での高速・長時間走行と衝突安全。70年代には排気清浄化。80年代には欧州市場での高速・高負荷運転や後輪操舵・4駆、90年代以後は燃費向上や音質などの高度な商品性、21世紀に入るとHEV、EVやダウンサイジングである。それぞれに対し、振動騒音技術はサッカーにおけるフォワードあるいはそれに近いプレイヤーとして活躍してきた。また、現時点では上述のような課題があってOEM各社の振動騒音技術者は多忙である。

しかし、いつまでも商品競争力の切り札を担う役割が続くとは思わない。筆者は英米独などへの出張時にはレンタカーを借りることが多い。そこでまず気になることは、スイッチやレバーの配置の分かりやすさである。駐車場を出て都市へのハイウェイに乗る頃には、ナビゲーションの分かりやすさが第一で、視界の良さが第二、ステアリングとブレーキへの車両の応答が第三である。その都市での運転事情に慣れてきたころにやっと騒音や振動が気になり始める。自分のつたない経験での判断ではあるが、ナビを代表とする情報系の機能・性能が商品性を決めるようになったと感ずる。もちろん、高級車では振動騒音性能は相変わらず重要な役割を果たすが、それ以外のコモディティ化した自動車では「当たり前性能」という位置づけになるだろう。後者では不具合や手直しがない効率的な開発が振動騒音技術の役割となる。そのためのシステム作りをし、人的資源の有効活用をすべきであろう。

7. 産業構造からの視点

日本のモノづくりを主題としたテレビ番組では、熟練技能者が経験と勘を駆使して、ロケットの頭部をヘラで絞り加工をしたり、手作業で機械表面の平滑加工をしたりする様子が紹介される。確かに素晴らしい技能ではあるが、現代は磨製石器時代ではないから、これが日本のモノづくりの柱とは言えない。筆者がかかわってきた自動車の振動騒音技術は、試作の繰り返し、実路走行、テストコース走行、シャシーダイナモや加振実験などの室内実験、CAEへと発展してきた。モノづくりと言っても、モノの機能・性能というソフト面の作り込みで、開発行為もどんどんとソフト化した。大量の工学部出身者を抱えるわが国の自動車産業は、薄利多売のモノづくり依存から、知識・知恵で稼ぐビジネスへ発展をしなければ、先進国としての地位は保てないだろう。欧米のソフト企業、コンサルタント企業にお金も情報も出し続けているように思える現状を抜け出す方策を考える必要がある。それには、自動車産業の開発行為、とりわけ振動騒音技術分野ではモノの完成が終結点ではなく、そこに至る途中で得られた知識をソフトウェアにし、それを材料としたエンジニアリングでの資金と情報収集というビジ

ネス概念での経営が必要だろう。

上記は、筆者自身の苦い経験をベースとしている。それは、排気ガス中の未燃成分やCO₂の酸化のために、排気管内の脈動を利用して外気を吸い込む装置の開発を手伝ったときの経験である。エンジン吸排気系を多数の熱力学・流体力学に基づく単純な有限体積要素に分割し、これを燃焼サイクルと結合して脈動の時系列計算をした。設計の方向付けには役立ったが、そのプロジェクトの終了後は論文を書いただけで、プログラムはそのまま放置した。ところが、その後に欧州の有名コンサルタント企業が、筆者のものと殆ど同じ手法のソフトウェアを発売し、現在でも世界中で使われている。

8. 人的資源からの視点

2020年は日本のモノづくりの弱点が見えた年であった。その一つは新型コロナウイルス用ワクチンの開発が外国頼みになっていたこと、もう一つは国産ジェット旅客機Space Jetの開発中断である。ある日本の大製薬会社の方の説明では、薬の研究開発の中心はボストン周辺と英仏の2か所に集約されているとのこと。新薬開発に必要な病理学、統計医学、バイオテクノロジー、化学、工業化学、臨床など多分野の世界トップレベルの頭脳のオープンイノベーションが、まだこれらの地域でしか動いていないとのこと。他方、旅客機開発は100万円以上の部品の設計監理、世界中の空港での整備体制作り、乗員訓練、型式証明取得、航空会社の資金繰り、保険などの大規模プロジェクトとなり、豊富な経験を持つ人々が必要。旅客機開発に長い空白期間があると、迅速な対応は負荷が大きかった。上記のような高度・大型の開発では、単一企業に縛り付けられた雇用形態で優秀な外国人技術者が少ない日本は不利になっている。これは知識集約的な方向へと活路を求めたいわが国の振動騒音技術の今後への警鐘である。

9. おわりに

「内容をご自由に」という執筆要請に甘え、いささか風呂敷を広げ過ぎたと自覚しているが、ともすれば狭く深くという方向に固まりがちな自動車の振動騒音技術論を出発点として、自由な空間を飛ぶ夢をみながら頭の体操をしてみた。

参考文献

- [1] 東京都環境局, 騒音振動の健康影響調査総合解析 (2006)
- [2] 金子成彦, 自動車騒音の社会的費用 (Social cost) について, 自動車技術会フォーラム・タイヤの将来を国際調和・社会負担・トライボロジから占う (2016年5月)
- [3] 石濱正男, 自動車の振動・騒音対策法, 日刊工業新聞社 (2018年1月)
- [4] 石濱正男, タイヤ振動騒音研究の焦点, 自動車技術 Vol.74, No.7, pp10-15(2020)
- [5] 石濱正男, 騒音低減を中心とするタイヤ諸性能向上技術開発の大局的な展望, 自動車技術会シンポジウム No.46-17(2017年5月)
- [6] 石濱正男, 音質エンジニアリングの全体像を概観する, 自動車技術会シンポジウム No.12-16 (2017年2月)

自分の能力に合った研究テーマを見つける



浅見敏彦
(兵庫県立大学特任教授)

1. まえがき

私は凡人である。日本機械学会の機械力学・計測制御部門において指導的立場に立ったこともないし、かといって傑出した研究業績を上げている訳でもない。本原稿の執筆依頼を受けたときに、果たして引き受けて良いものかどうか考えさせられたが、取り立てて才能のない人間がこの世界で生きていく処世術なるものを伝えて行くことも必要ではないかと思い、執筆を引き受けることにした。

私は、現時点で43年間もの間、大学に籍を置いている。周りを見渡すと、その期間に様々な人たちが大学に新規採用され、また去って行った。その中には輝かしい業績を上げている教員もいるが、芽が出ないまま失意のうちに退職していった人たちもいる。また、大学に籍を置いているが業績が全く出ていない教員も大勢いる。なぜこのような差がついてしまったのかについて考えてみた。

今は学位を取得していないと大学に新規採用されない時代である。その学位取得のために選ばれた研究テーマは、おそらくは当時の指導教員から与えられたものであるだろう。晴れて学位を取得したときに、その研究テーマをこれからも続けていくのが良いか、新しい研究に切り替えるのが良いのかは重要な分岐点である。私が言うのもおこがましいが、研究業績を上げられていない教員は、自分の学位取得時の研究テーマに固執し過ぎている人が多い。10年間その研究を続けても発展しなかったら、それはもう潮時と考えるべきであろう。もちろん能力のある人が、極めて難しい問題に取り組んでいるときには、20年後あるいは30年後に突破口を開いて研究を花咲かせることがあるかも知れないが、そのようなことのできる人は稀有である。

大学の教員となった人たちは、受験戦争を勝ち抜いてきた人たちであり、それゆえ自分という人間を過大評価しているように思えてならない。これまでの自分の生き方が誤っていないと思っているのか、柔軟性に欠けていて、同じ失敗を繰り返しているように思える。他人と比べてときに、自分は何が優れていて、何が劣っているのかを正しく判断できなければならない。自分の能力を見極め、その能力に見合った研究テーマを探し出すことが成功への第一歩であるだろう。

2. 学生時代

私は生まれも育ちも兵庫県姫路市であるが、大学は新潟大学に進学した。当時は一般教養の1年半の間は新潟市で受講し、専門課程は長岡市にある学舎で教育を受けた。この教養課程の間は「六花寮」という学生寮で生活をした。私は大学に入ったら勉強をするぞと意気込んで入学をした(実は機械工学科が第一志望であったが、第二志望の精密工学科に回されていたので、機械工学科の学生には負けてなるものかと思っていた)が、学生寮に入って愕然とした。当時は麻雀が大流行で、寮の中では毎日のように徹マンが続いていた。

その劣悪な環境の中で、一人だけヘッドホンをつけて

英会話の勉強をしている学生がいた。彼の名前は山口芳雄君で、電子工学科の1年生であった。寮内でも彼は有名な存在になった。私は陰ながら彼を目標にして大学生生活を送ることにした。山口氏は大学を卒業後、東京工業大学の大学院修士課程に進学し、修了後の1978年4月に母校の新潟大学に迎えられ、私と同じ2019年3月に大学を定年退職をした。その1年後の2020年3月に思い切って彼にメールを出した。そのとき、彼は私と同じように、新潟大学の特任教授をしており、週4日は無給で大学に通っているとのことであった。研究者の論文の引用数を表す指標にh-indexがある。ElsevierのScopusに入れば誰でも見ることができる。彼のh-indexは26であった(この数字の意味は26回以上引用された論文が26編あるということである)。この数値は私よりもはるかに多く、やはり自分には手の届かない人であったと思っている。大学1年生のときに彼のような人に巡り会えた幸運を喜んでいる。

3. 大学教員時代

1978年に大学院を修了したとき、就職口がなくて新潟大学の研究生となっていた。5月頃に掲示板に姫路工業大学の教員公募の掲示を見つけて応募した。幸いにも書類選考を通過し、8月には当該研究室の関口久美教授が新潟まで視察に来られた。9月には私が姫路工業大学において面接を受け、その日のうちに内定通知を頂いた。山口氏に遅れること7ヶ月で、私も11月に晴れて大学教員としてスタートすることになった。

私が関口教授から与えられた研究テーマは、オイルダンパ、磁気ダンパ、空気ダンパの各種減衰装置の特性解析と、動吸振器の最適設計であった。私にとって幸いなのが、これらが特定の機器を対象としたものではなく、普遍的な特性を明らかにするのが目標であったことである。そのため、これらのテーマで長く研究に取り組むことができた。私は電気の知識には疎かったので磁気ダンパの研究を進展させることは出来なかったが、オイルダンパと空気ダンパに関しては、有るレベルまでは研究を進展させることができた。ところが、ここで大きな壁が立ちだかった。それは、これらのダンパの減衰力は粘性流体の流れによって生じる現象であり、基本的には非線形であるということである。結局、数値流体力学を専門とする兵庫県立大学の本田逸郎教授の助けを借りて、これらのダンパの特性を数値解析で解明することはできたが、振動減衰現象を美しい式で表現するという私の最終目標は頓挫することになる。もう一つの動吸振器の研究については後述する。

大学教授の役割は新しい研究テーマを探し出すことにあると思うが、その意味では私は失格である。今から43年前に与えられた研究テーマが完結せず、新しいテーマを探し出すことも出来なかった。ただ、見方を変えれば、最初に与えられた研究テーマが奥深い故に、長く研究することができたとも言える。それは私にとって非常に幸運なことであった。

大学に着任する前は、大学の先生は皆勉強が好きな人たちだろうと思っていたが、実際に教員になって内側から大学を眺めると、勉強と研究が好きでない人が沢山いることに驚いた。さらに、一般社会から隔離されていることもあり、変人が多いことにも気づかされた。人間とは弱い生き物である。他人から良いところを学べば良いものを、悪いところを学んでしまう人たちを多く見てきた。そのような人たちは、助手から助教授にかけてはおとなしくしているが、教授になった途端に本性を現して大学発展の障害となっている。大学の教員が普段相手するのは学生であり、自分の言動が咎められることがほとんどない(ときどきパワハラで訴えられる教員はいるが・・・)。そのため、人格を磨くことが難しい環境に置かれていると言える。私も自分の授業が決して上手であるとは言えないが、他の教授の公開授業を聞いたときに、この人は40年間何を学んできたのだろうかと考えさせられた。毎日が修行の場であることを常に心がけておきたいものである。

4. ダンピング研究会

大学教員になったときに、私は普段は姫路の片田舎でひっそりと研究をし、講演のために年1、2回のペースで上京すればよい位に考えていた。私が論文を出し始めたとき、おそらくは誰も読まないだろうと思っていた。ところが、二人の人物が私の論文に注目していたのである。一人は当時の東京都立大学の鈴木浩平教授、もう一人は三和テッキ株式会社の子田勝昭氏である。鈴木先生には、1992年の10月に東京で第1回のダンピング研究会を開かれたときに私を講師として呼んで頂き、その後、その研究会の幹事、さらには後任の主査に任命して頂いた恩義がある。これらの役職は私には荷が重いと感じていたが、不思議と自分に馴染んできて、自信をつけるのに大いに役立った。この研究会を通して、自分にとって雲の上のような高名な先生方と知り合いになれたことは何にも代えがたい財産となった。2011年11月に開催された第50回ダンピング研究会を最後に、私は後任の佐伯暢人教授に主査を譲り、今は気楽な立場で研究会に参加している。

5. アメリカ留学

1999年8月から、私は東北大学の谷順二教授の紹介でアメリカのメリーランド大学に留学をさせて頂いた。そこでは1年間Baz教授の元で勉強と研究を行った。急に自由な時間ができたので、このときに2編の論文を執筆することができ、それらは今でも引用数で私の論文のベスト2を占めている。留学中に私が驚いたことは、研究室にアメリカ人がいなかったことである。Baz教授自身がエジプト人であることにもよるが、8人ほどの研究室メンバーはすべて外国籍のポスドク研究者であった。Baz教授は私よりも10歳位年上であるが、現在でも現役の教授として働いておられる。ポスドク研究者たちはすべて教授から生活費を支給されているので、教授が研究室に来られると雰囲気が一変する。このとき、私は日本に生まれて良かったとつくづく感じた。なんと、日本の学生たちは教員から見ると無報酬で働いてくれるのである。日本に帰ってからは、たとえ学生の研究が進んでいなくても決して怒らないでいようと思った。

6. 動吸振器の最適化研究との出会い

1969年から1971年にかけては大学紛争が吹き荒れていた時代であった。私が着任した姫路工業大学でもこの

3年間は通常の授業が行えない状況にあったらしい。この期間に、一人の助手の新規採用をめぐって大学の設置者である兵庫県と姫路工業大学機械工学科の間で争いが起こり、1971年8月1日に10人の教員が大量解雇された。その中に私の前任者である飯田一嘉氏が含まれていた。翌年から欠員教員の補充が始まり、私はその最後の空きポストに滑り込んだのである。同時に、飯田氏が行っていた動吸振器の最適化問題を私が引き継ぐことになった(飯田氏は「ランダム振動の防止に関する研究」というタイトルで1977年5月に京都大学から工学博士の学位を授与されている)。

飯田氏の行っていた研究を現代風に言うと「単一質量動吸振器の H_2 最適化」である。これは、主系の周波数応答関数の下の二乗面積(これを H_2 ノルムという)を最小化する問題である。関口教授からこの研究をするように言われてから9年後の1990年3月に日本機械学会に一つの論文を発表した。動吸振器の H_2 最適化の考え方は、1964年にCrandallとMarkによって提案されていたが、飯田氏も含めてこれまで誰一人としてその最適解に辿り着いた人はいない(と思っていた)。このとき、私はようやく飯田氏を超えることができたと自画自賛していたが、その後、東京都立大学の岩田義明助教授の日本機械学会の講演要旨No.820-8(1982年8月)を発見した。続いて、イギリスのWarburton教授が同じ1982年にJournal誌のEarthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.10に同じ式を発表しているのを知った。これほどシンプルで美しい式を世界初で発表するのは難しいとこのとき痛感した。

動吸振器において最も古く、代表的な最適化問題に H_{∞} 最適化がある。これを日本語で表現すると周波数応答関数の最大値(これを H_{∞} ノルムという)の最小化問題である。1990年代後半に京都大学の西原修先生と知り合い、この H_{∞} 最適化問題の厳密解法を教えて頂いた。その方法は、これまでDen Hartog著のMechanical Vibrationsに記された定点理論と呼ばれる近似解法しか知らなかった私には目から鱗の衝撃的な解法であった。同時に、主系の自由振動応答を最短時間で減衰させることを規範とする安定度最大化規範なるものもこのとき教えて頂いた。これ以降、私は上記の3種類の最適化規範(これらの規範の命名者はすべて西原先生である)で動吸振器の最適化問題に取り組んで行くことになった。Baz教授のもとで執筆した単一質量動吸振器の最適化に関する二つの論文は、その研究の集大成としてまとめた論文である。これ以降は、しばらく動吸振器の研究からは離れていくことになる。

定年退職5年前の2014年になって、最後にもう一度動吸振器の研究をしてみようと思った。単一質量動吸振器の最適化問題はすでに調べ尽くされていると思ったので、二重動吸振器の最適化問題に取り組むことにした。その研究成果は、2017年から2019年にかけてASMEのJournal of Vibration and Acousticsに発表した。私はこれまで再録論文を除いて41編の論文を書いてきたが、その中で一つだけ代表的な論文を挙げるとすれば、下記の論文[1]になる。

この論文が取り上げているのは、図1(b)に示される直列型二重動吸振器(DVA-AとDVA-B)の最適設計問題である(ここで、 $f(t) = f_0 \sin \omega t$)。これは線形の振動系であるので、振動系の応答(定常応答と自由振動応答)は次の9個の無次元パラメータによって完全に表現できる。

$$\left. \begin{aligned} \lambda &= \frac{\omega}{\omega_1}, \quad \tau = \omega_1 t, \quad \mu = \frac{m_2 + m_3}{m_1} \\ \mu_B &= \frac{m_3}{m_2}, \quad v = \frac{\omega_2}{\omega_1}, \quad v_B = \frac{\omega_3}{\omega_2} \\ \zeta_1 &= \frac{c_1}{2m_1\omega_1}, \quad \zeta_2 = \frac{c_2}{2m_2\omega_2}, \quad \zeta_3 = \frac{c_3}{2m_3\omega_3} \end{aligned} \right\} (1)$$

ここで

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{k_1}{m_1}}, \quad \omega_2 = \sqrt{\frac{k_2}{m_2}}, \quad \omega_3 = \sqrt{\frac{k_3}{m_3}} \quad (2)$$

上記の三つの最適化規範に従って、図1(b)に示された直列二重動吸振器の最適解を求めると以下ようになる。

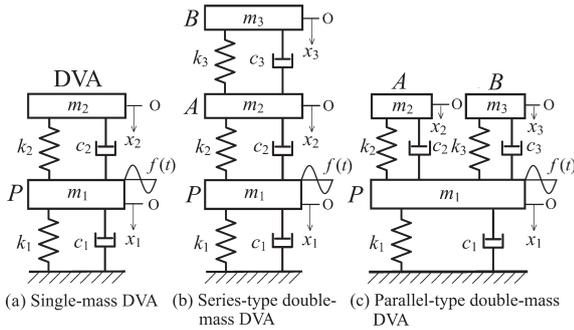


Fig. 1 Analytical models of a vibratory system with three different DVAs (Dynamic Vibration Absorbers)

無減衰系 ($\zeta_1 = 0$) に対する H_∞ 最適解は

$$\left. \begin{aligned} \mu_{\text{Bopt}} &= (1 + \sqrt{2})\mu, \quad v_{\text{opt}} = \sqrt{1 + (1 + \sqrt{2})\mu} \\ v_{\text{Bopt}} &= \frac{1}{1 + (1 + \sqrt{2})\mu}, \quad \zeta_{2\text{opt}} = 0 \\ \zeta_{3\text{opt}} &= \sqrt{\frac{1}{2} \frac{(1 + \sqrt{2})\mu}{1 + (1 + \sqrt{2})\mu}}, \quad h_{\text{min}} = \sqrt{\frac{1 + \sqrt{2}}{2\mu}} \end{aligned} \right\} (3)$$

同じく、 H_2 最適解は

$$\left. \begin{aligned} \mu_{\text{Bopt}} &= 2\mu, \quad v_{\text{opt}} = \sqrt{1 + 2\mu}, \quad v_{\text{Bopt}} = \frac{1}{1 + 2\mu} \\ \zeta_{2\text{opt}} &= 0, \quad \zeta_{3\text{opt}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{3\mu}{1 + 2\mu}}, \quad I_{\text{amin}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{3}{\mu}} \end{aligned} \right\} (4)$$

最後に、安定度規範に基づく最適解は

$$\left. \begin{aligned} \mu_{\text{Bopt}} &= 8\mu, \quad v_{\text{opt}} = \sqrt{1 + 8\mu}, \quad v_{\text{Bopt}} = \frac{1}{1 + 8\mu} \\ \zeta_{2\text{opt}} &= 0, \quad \zeta_{3\text{opt}} = \frac{3}{2} \sqrt{\frac{3\mu}{1 + 8\mu}}, \quad \Lambda_{\text{max}} = \frac{1}{2} \sqrt{3\mu} \end{aligned} \right\} (5)$$

ここに、 h_{min} は最小化された共振点高さ、 I_{amin} は周波数応答関数を二乗して $-\infty$ から ∞ まで積分し、それに定数 $1/(2\pi)$ を掛けた値の最小値、そして Λ_{max} は最も右側に位置する振動系の特性根と虚軸との水平距離の最大値を表す。ここに示された H_∞ 最適解はモビリティ伝達関数に対する最適解であるのに対して、 H_2 最適解はコンプライアンス伝達関数に対する最適解である (コンプライアンス伝達関数に対する H_∞ 最適解は代数解の形では求められない)。

これらの式を眺めると、全く異なる規範に従って最適解を導出しているにも拘わらず、その解には不思議な類似性

があることに気づかされる。すなわち、 H_2 規範、 H_∞ 規範、および安定度規範による最適解の大きさの関係は、この順に $2:1+\sqrt{2}:8$ の比率となっている。さらに、最適化された各パラメータ間にも以下の関係式が成立している。

$$\mu_{\text{Bopt}} = v_{\text{opt}}^2 - 1, \quad v_{\text{opt}}^2 v_{\text{Bopt}} = 1 \quad (6)$$

実は、式(3)の解は、先行して得られていた解の式(4)と(5)から式(6)の関係を見出し、その関係式が H_∞ 規範による数値解においても成立していることを発見したことによって得られた。数値解を細かく観察すると、新しい法則が見つかることがあるという一つの教訓である。式(3)から(5)は主系に減衰が存在しないときの解であるが、減衰のある系に対しても関係式(6)は成立しており、そのことによって、これらの解は主系減衰比 ζ_1 を含めた形で表現することができる (文献 [1])。なお、式(3)は、図1(a)に示された単一質量動吸振器に対する H_∞ 最適解の式 (文献 [2]) に比べてずっとシンプルな式である。この辺が数式解の不思議なところで、振動系が複雑になっても解が複雑になるとは限らない。

動吸振器の最適化の研究は、金の鉱脈を探すこととよく似ている。山を歩いていて金のかげらを見つけたら、近くに金の鉱脈があるに違いないと探索する人が多いであろう。その探索に使う道具が、動吸振器の場合には数式処理ソフトの Mathematica である。さらに、一つの鉱脈が見つかったら、近くにも鉱脈があるかも知れないと思うのは自然である。私はいま、図1(c)に示されるような並列型二重動吸振器の最適解を探索しているが、これは直列型に比べてはるかに難しい。直列型で上のような最適解が導出できたのは、動吸振器 A の最適減衰比 $\zeta_{2\text{opt}}$ がゼロになったことによる。並列型ではこれがゼロにならず、最適化すべきパラメータの数が直列型よりも一つ増えることで急に難しくなる。

いずれにしても、この動吸振器の最適化問題は興味があることがなく、この研究テーマに巡り会えたことは無上の喜びである。

7. あとがき

研究論文を発表することを生活の生業にしている人にとって、どのような研究をするかということはその人の死活に関わる問題である。私の場合には、たまたま自分の嗜好に合った研究テーマに出会うことができたが、それに巡り会っていない人はどうすれば良いのであろうか。志を同じくする多くの人と交流を持ち、それらの人たちから情報を得ること、ときには共同して同じ研究テーマに取り組むということが大事になって来るだろう。その意味で、私が永らくダンピング研究会の幹事と主査を務めさせて頂いたのは、交友を広めることと自分の研究の意義を知る上で大いに役立った。当時、酷い吃音癖で人前で話をすることを大の苦手としていた私をそのような重責に就かせて頂いた鈴木浩平先生には深甚の感謝の意を表する次第である。

[1] Asami, T., Exact Algebraic Solution of an Optimal Double-Mass Dynamic Vibration Absorbers Attached to a Damped Primary System, ASME Journal of Vibration and Acoustics, Vol.141, No.5 (2019), p.051013, DOI: 10.1115/1.4043815.

[2] Asami, T., Calculation of the H_∞ Optimized Design of a Single-Mass Dynamic Vibration Absorber Attached to a Damped Primary System, Bulletin of the JSME, Mechanical Engineering Journal, Vol.7, No.5 (2020), DOI: 10.1299/mej.20-00250.

No. 21-13
Dynamics and Design Conference 2021
総合テーマ：「共存共栄社会への回帰」

URL <https://www.jsme.or.jp/conference/dmconf21/index.html>

企 画 機械力学・計測制御部門
開 催 日 2021年9月13日（月）～17日（金）
会 場 オンライン開催 / 東京大学 駒場Ⅱキャンパス
(東京都目黒区駒場4丁目6-1)

協 賛 計測自動制御学会, システム制御情報学会,
自動車技術会, 情報処理学会, 人工知能学会, 精密工
学会, 電気学会, 電子情報通信学会, 土木学会, 日本
音響学会, 日本原子力学会, 日本建築学会, 日本工学
教育協会, 日本航空宇宙学会, 日本神経回路学会, 日
本スポーツ産業学会, 日本設計工学会, 日本船舶海洋
工学会, 日本鉄鋼協会, 日本トライボロジー学会, 日
本知能情報ファジィ学会, 日本フルードパワーシステ
ム学会, 日本ロボット学会, 農業食料工学会, バイオ
メカニズム学会, 日刊工業新聞社, 日本地震工学会

要 旨 Dynamics and Design Conference 2021
(D&D2021) は, 「共存共栄社会への回帰」を総合テー
マとして, 東京で開催されます。例年のように, 機械力学・
計測制御分野に関連したオーガナイズド・セッションの各

テーマについて研究発表を募集いたします。また特別講
演, 懇親会, 機器展示, フォーラム, 特別企画などの付随
行事も予定しております。優秀な講演発表者は, 学会 (若
手優秀講演フェロー賞) および当部門 (オーディエンス
表彰) の規定に従って表彰されます。D&D2021が皆様にと
って, 交流の場, 議論を深める場となり, ますますの発
展につながることを期待しております。多くの方々のご参
加を心待ちにしております。

講演申込締切 2021年3月19日（金）

申込方法・募集分野

上記のホームページにてご確認ください。

発表採択通知 2021年4月23日（金）

論文提出締切 2021年8月6日（金）

問合せ先

D&D2021 実行委員会 (dd2021@jsme.or.jp)

D&D2021 実行委員長 中野 公彦 (東京大学)

副委員長 富岡 隆弘 (秋田県立大学)

幹 事 竹原 昭一郎 (上智大学)

年間カレンダー

機械力学・計測制御部門講演会等行事予定一覧

- 2021 年度の開催予定行事について -

前年度より引き続き, 新型コロナウイルス感染症の拡大の影響に応じて, 各行事のスケジュールや開催形態に大きな
変更が予想されます。詳細につきましては, 部門ホームページまたは学会ホームページにて最新情報をご確認ください。

開催行事予定 (講演会)

開 催 日	名 称	実 施 場 所
2021年 9月 5日～ 8日	2021 年度年次大会	千葉大学 (オンライン開催)
2021年 9月13日～17日	Dynamics and Design Conference 2021	東京大学 (オンライン開催)
2021年11月頃	第 19 回評価・診断に関するシンポジウム	調整中
2021年12月頃	第 17 回「運動と振動の制御」シンポジウム (MoViC2021)	調整中

※情勢にあわせてオンライン開催となる可能性もございます。

開催行事予定 (講習会)

開 催 日	名 称	実 施 場 所
2021年10月頃	振動分野の有限要素解析講習会 (計算力学技術者 2 級認定試験対策講習会) (関西地区会場)	調整中
2021年10月頃	振動分野の有限要素解析講習会 (計算力学技術者 2 級認定試験対策講習会) (関東地区会場)	調整中
2021年12月頃	講習会 納得のロータ振動解析: 講義 +HIL 実験	オンライン (予定)
2022年 1月頃	講習会 回転機械の振動	オンライン (予定)
日程調整中	講習会 マルチボディシステム運動学の基礎	オンライン (予定)
日程調整中	講習会 マルチボディシステム動力学の基礎	オンライン (予定)
日程調整中	講習会 振動モード解析実用入門 - 実習付き -	オンライン (予定)

部門主催講習会情報

総務委員会 委員長 竹原昭一郎（上智大）
企画委員会 委員長 富岡隆弘（秋田県立大）

今年度は、本部門の主催講習会を以下のとおり開催してまいりました。

- 「振動モード解析実用入門-実習付き-」
（2020年12月15日、オンライン開催、受講59名）
- 「納得のロータ振動解析：講義 + HIL実験」
（2020年12月18日、オンライン開催、受講13名）
- 「マルチボディシステム運動学の基礎」
（2021年1月21日、オンライン開催、受講39名）
- 「マルチボディシステム動力学の基礎」
（2021年1月22日、オンライン開催、受講41名）
- 「回転機械の振動」
（2021年1月19-20日、オンライン開催、受講29名）

なお、「振動分野の有限要素解析講習会（計算力学技術者2級認定試験対策講習会）（関東地区会場）（関西地区会場）」は、残念ながら中止となりました。来年度も引き続き、各講習会の開催が企画中であり、詳細決定の後にご案内いたします。各講習会への積極的なご参加をお願い申し上げます。

ご希望の講習会テーマや、講習を聞きたい講師の方などがございましたら、企画委員会または総務委員会までお知らせ下さい。

広報委員会からのお知らせ

委員長 松岡太一（明治大）
副委員長 石川 諭（九州大）
委員（v_BASE担当） 矢部一明（東洋エンジニアリング）

広報委員会では、年二回発行している部門ニュースレターの編纂および部門Webサイトの管理運営を継続してすすめております。

是非、この機会に部門Webサイトをご覧くださいとともに、国内外の研究者への宣伝にご協力いただけますようよろしくお願い致します。

また、ニュースレターに限らず、Webの英語化に向けて、英文記事の執筆にご協力いただける方もいらっしゃいましたら、お気軽に広報委員会までご連絡いただけますと幸いです。今後とも広報委員会の活動にご協力いただけますようよろしくお願い申し上げます。

資格認定委員からのお知らせ

委員長 松村雄一（岐阜大）

前号のニュースレターでお伝えしたとおり、2020年度の計算力学技術者資格1級および2級の認定試験は、コロナ感染症の影響により中止となりました。この認定試験を統括する計算力学技術者資格認定事業委員会では、2021年度の試験実施を実現するために、様々な方策を検討していると聞いておりますが、この原稿を執筆している1月中旬現在、何も決まっておりません。最新の状況は、計算力学技術者資格認定事業委員会のホームページ (<https://www.jsme.or.jp/cee/>) でご確認ください。

また、計算力学技術者資格2級の受験をサポートするために、例年、機械力学・計測制御部門が開催しております講習会につきましても、2021年度の開催は未定です。講習会の開催が決定されましたら、機械力学・計測制御部門ホームページ内のイベントカレンダー (<https://www.jsme.or.jp/dmc/Lecture/index.html>) で案内いたしますので、ご確認ください。



編集室

日本機械学会機械力学・計測制御部門
〒160-0016 東京都新宿区信濃町35番地
信濃町煉瓦館5階
電話 03-5360-3500
FAX 03-5360-3508

編集責任者 松岡 太一（明治大学）
編集委員 石川 諭（九州大学）

部門ホームページ：<https://www.jsme.or.jp/dmc/>
発行日 2021年3月19日