

日本機械学会 計算力学部門



CMD Newsletter

COMPUTATIONAL MECHANICS

計算力学部門ニュースレター No.51

December, 2013

目次

- 特集：振動・騒音・音響 1
- 計算力学技術者認定試験（振動分野）実施までの道のり 安田仁彦
 - 流れに起因する振動や騒音の数値解析 加藤千幸
 - 空力に起因する自動車の室内騒音予測技術の開発 飯田明由
 - 周期構造の音響・弾性振動問題と境界要素法 松本敏郎
 - ロケット射点形状の空力音響多目的設計探査 大山 聖
 - CAEにおける実験の役割 望月隆史
 - 空力騒音と熱流体解析ソフトウェアPowerFLOW 甲斐 寿
 - 音響解析ソフトウェアActranのご紹介 平林朋之
 - LMS Virtual.Lab, LMS Imagine.Lab AMESim および

- LMS Test.Lab を用いた振動・騒音ハイブリッド プロセスソリューション 浅野俊二
- 弊社での音響解析例 株本貴之
- 全周波数帯域向け 統合振動音響解析 ソフトウェア VA One 新関 浩

部門からのお知らせ 27

- テキサス大学オースティン校 計算工学・科学研究所所長 J. Tinsley Oden教授「固体力学・流体力学分野での計算力学の創設と発展に貢献」の業績により2013年度本田賞受賞!! 吉村 忍
- 2014年度年次大会の部門企画について 高橋直也
- 第27回（2014年度）計算力学講演会のご案内 船崎健一
- 日本機械学会新学術誌創刊のお知らせ

†

特集：振動・騒音・音響



計算力学技術者認定試験（振動分野）実施までの道のり

安田仁彦
名古屋大学 名誉教授

1. 始まり

4年前、2009年のことである。この年の8月、機械力学・計測制御部門の講演会D&D2009が北海道で開催された。夏の北海道に惹かれて講演会に参加し、中日に講演を終えた。明日からいよいよ北海道を満喫しようと、足

取り軽く、その日開かれた懇親会会場に向かった。そこで待ち構えていたのが、当時の部門長と部門関係者である。「計算力学技術者認定試験の振動分野を立ち上げたい。立ち上げのリーダーをやって欲しい」とのことであった。何で私が！とびっくりした。確かに「振動工学」

や「機械音響学」などの拙著のいくつかの章で有限要素法を解説してはいるが、実務経験はない。丁重にお断りしたが、「有能な委員数名の内諾を得てあります。先生はでんと構えていただくだけで結構です」と、すでにまわりは固められており、引き受けざるを得なかった。その後確かに有能な委員と仕事をしてきているので、口説きの前半は正しかったが、認定試験という仕事の内容から、いつまでもでんと構えていることは許されず、口説きの後半は間違っていた。さわやかな夏の北海道は、その日を境に気の重い北海道に変わった。

名古屋に帰って、まず、計算力学技術者認定試験とは何かを調べた。この試験は、計算力学技術者の質の保証、社会的地位や認知度の向上を目的に、2003年の固体力学分野2級の試験から始められたこと、その後、固体力学、熱流体力学と分野が広げられ、レベルも初級、2級、1級、上級アリストとして拡充されたこと、そしてそのときのデータで、前年2008年までの資格取得者が2000人を超えていたことを知った。5年でここまで拡充され、これだけの実績があるということは、この資格が多くの人には価値を認められ、重要視されていることを示している。実際、解析する本人にとって資格取得は励みと自信になるだろうし、解析を依頼する立場からは安心材料となる。参考までに、最新の2012年のデータによる全分野全レベルの資格所得者数を紹介すると、その数は4500人を超えていた。

これらの事実を突きつけられると、認定試験が固体力学と熱流体力学の分野に限られ、振動分野が無いことは、機械工学の学問体系から見て、バランスを欠くといわざるを得ない。ようやく重い腰を上げ、すでに内諾を表明している委員のほかに、実務経験の豊かな委員を加えて、振動分野の認定試験の開始に向けて準備委員会を立ち上げた。

2. 振動分野認定試験の実施計画の立案

準備委員会で最初に議論したことは、試験の内容とレベルの設定である。どの分野も同じであるが、振動分野の範囲は広い。計算力学の立場から、どの範囲の内容を、どの級に振り分けて試験を実施するかは慎重に議論する必要がある。

振動を専門としない技術者から、振動工学は、固体力学に時間という独立変数が加わったもので、時間的変化を考慮すればすむ学問であると言われることがある。数式的にはその通りであるが、現象から見たらそれほど単純ではない。一つの例は、振動とそれを引き起こしている要因とが相互に影響しあうという連成振動の発生であ

る。もう一つの例は、非線形性がわずかであっても、外力の条件によっては、線形振動とまったく異なる特性を示す非線形振動が発生し得ることである。実は、こういった現象にこそ振動解析の難しさと面白さがある。有限要素解析に入る前に、このような現象の発生メカニズムを理解することが振動解析では重要である。これらのことを見定試験としてどこまで取り入れるか、準備委員会で熱っぽい議論が交わされた。最終的には、2級試験では、線形振動の基礎の理解と、それにもとづく有限要素解析の技術を、1級試験では、音響連成振動、流体連成振動などを含めて、線形振動に限定しない非線形振動までの理解と、それにもとづく高度な有限要素解析技術を問うこととした。このような検討は、分野の発展に合わせてこれからも続けていく必要があると考えている。

準備委員会としては、こうした学問的な検討のほかに、経理面での検討も必要である。収支見込み書を作成するに当たって困ったのが、どのくらいの受験者を見込めるかということである。検討しているちょうどその頃に実施された固体力学分野、熱流体力学分野の認定試験の際に、振動分野の認定試験の受験希望についてアンケート調査をしてもらった。しかし回答数が少なく、これだけでは受験者を予測することは難しかった。必然的に受験者数を少なめに見積もらざるを得なかった。この少なめの受験者数をもとに収支を計算すると、試験開始から数年間は振動分野の認定試験事業は赤字になるとの計画となった。日本の工学、工業に貢献する事業だから、学会の目的に照らして、立ち上げの数年くらい赤字で構わないではないか！こう考える一方で、学会という組織が持続されるために、最初から甘い考えではまずからう！理事会からも懸念を示された。

揺れ動く気持ちの中で、委員の間で知恵を出し合った。振動分野の認定試験を開始することができるだけ多くの人に知っていただく方策、受験の有資格者増につながるCAE公認技能講習会を多くの団体に実施いただく方策など、いろいろな方策を努力項目として計画書に盛り込み、それらに基づいて、赤字を極力抑えた計画書を作成した。それでも赤字を免れないように思えたが、極力赤字を出さないという委員の間での決意を示して理事会を説得し、計算力学技術者資格認定事業委員会の事業として試験実施に進んだ。

3. 初年度の認定試験実施

計画書では、初年度の2012年には、2級の認定試験を、関東地区と東海地区で実施することになっていた。認定事業委員会としての試験実施が認められると、準備

委員会をそのまま振動分野ワーキンググループに切り替え、すぐに準備を始めた。初年度はゼロからの出発であるから、準備が大変である。計画書に盛り込んだ多くの努力項目を実施しながら、一方で試験問題に直接関わる仕事を進めた。仕事の苦労の一端を紹介したい。

主要な仕事として標準問題集の作成がある。標準問題集は、受験者がこれを学ぶことによって、計算力学技術者として要求される範囲を理解し、内容を正しく効率よく学び、あわせて受験要領を学ぶためのものでなければならない。各委員が標準問題の原案を持ち寄って、何時間もかけて討論し、全体の構築を進めた。この議論は、教育研究のみに熱中できた自身の若い頃に戻ったようでは楽しかった。議論の後、その結果にもとづいてひとりずつ担当問題を推敲し、また集まって全員でチェックするという作業を繰り返した。委員のひとりは、推敲のため、その年の夏休みが一日もなかったと言っていた。各委員のおかげで、予定通り9月下旬に標準問題集を発行することができた。

こういった実施までの準備を進めている最中の8月に受験申請の受け付けが始まった。振動分野の申請者はどのくらいいるだろうか？ 機械学会の事務担当者が気を利かせて、数日ごとに申請状況を知らせてくれた。日を追うごとに受験者数は増えた。最終的には理事会の懸念を払拭できそうな受験者数となった。心の中で万歳を叫んだ。

12月に試験日を迎えた。大学の入学試験のように、関東地区と東海地区の2会場での連絡網を確認し、試験場事務室でそれぞれ担当者が待機し、質問やトラブルに備えた。1時間、2時間、特別の連絡は無い。試験終了の時間を迎えた。無事終了だ！このときも心の中で万歳を叫んだ。

試験実施の翌年2月に合否判定会議が開かれ、無事終了した。気がかりであった収支についても、黒字になることがデータで示された。慣れない初年度をトラブル無しで乗り切れたとの思いで、判定会議終了後に開かれた慰労会でのビールが実においしかった。

4. 2年目の認定試験実施予定

初年度の試験が終わって、今年2013年は振動分野の2年目である。今年度には、2級と同時に1級の試験も実施されることになっている。実は初級も今年度から実施さ

れているが、こちらは技能講習修了を前提として申請書類によって審査されるので、ワーキンググループとしての作業は少ない。また上級アナリストの試験は、CAE解析の実務経験やプロジェクト企画の実績などに関する申請書類と、プレゼンテーションおよび面接によって審査されるので、こちらもワーキンググループとしての作業は少なく、時期的にも2015年度開始予定で、すぐの実施ではない。したがって2級と1級の認定試験の一連の作業が軌道に乗ったとき、北海道で課せられたノルマをいちおう果たしたことになる。

初年度の2級の認定試験のときと同じように、1級の標準問題集をゼロから始めて作成し、2級の標準問題の改訂と合わせて、各委員の尽力のもと、10月初旬に両標準問題集とも発行にこぎ着けた。今年度は試験会場を関東、東海、関西、九州の4地区にして、事務的な試験準備も進めている。

この原稿を書き始める前の8月に、機械学会事務局から、本年度の受験申請者の数が知らされた。まだ他分野には及ばないが、計画書で見込んだ2年目の数を十分超えている。今年度の判定会議を無事終了できれば、こんどこそ夏の北海道を満喫したいと考えている。

5. 終わりに

多くの方々にお礼を申し上げたい。まずは今まで一緒に仕事を進めてくれたワーキンググループのメンバー。各メンバーともすばらしい仕事をし、また議論を通して筆者に計算力学に関する多くのことを教えてくれた。将来、拙著を改訂する機会があったら、有限要素法に関する章をいまよりはるかに内容のあるものにできると思う。つぎにこの仕事に携わるきっかけを与えてくれた当時の部門長と部門関係者。この拙文の初めに恨みがましいことを書いたが、この仕事に携わっていろいろ新しいこと、楽しいことを経験したので、いまではお礼を申し上げたいと思っている。最後に、今までご指導、ご助力いただいた計算力学技術者資格認定事業委員会ならびに機械学会事務局の方々にお礼を申し上げたい。

拙文で、振動分野の認定試験実施に至る今日までの道のりを紹介した。拙文が、振動分野の認定試験を理解し、受験を考えていただくのに少しでも役立てば、筆者のこの上ない喜びである。



流れに起因する振動や騒音の数値解析

加藤千幸
東京大学 生産技術研究所

1. はじめに

スーパーコンピュータの性能向上には目覚ましいものがあり、昨年9月には約8万2千個のCPU、64万個の演算コアを搭載したスーパーコンピュータ「京」の本格運用が開始された。京の計算能力は10ペタ・フロップスを超えており、「京」を利用すればターボ機械の翼面や自動車の車体表面に発達する乱流境界層内の微細な渦構造の解像が可能になる見込みであり、5、6年以内には、数10億格子から最大1,000億格子を用いて境界層中の微細渦まで解像するLarge Eddy Simulation (LES) が実用化されるものと期待されている⁽¹⁾。流れの計算が大規模高精度化するのに伴い、流れに起因した振動や騒音の定量的な予測の実現にも大きな期待が集まっている。そこで、本稿では流れに起因して発生する振動や騒音の数値計算に関して、特に留意すべき点を具体例を示しながら解説する。

2. 振動や騒音解析の留意点

流れに起因して発生する振動や騒音は全て流れの変動から発生する。したがって、流れの中の振動源や騒音源を推定し、それを正確に予測できるような流れの計算方法を選択する必要がある。この際、発生した振動や騒音が流れに対してフィードバックを掛けているかどうかも同時に検討する必要がある。もし、参照できる実験データがあるのであれば、振動速度や騒音の周波数スペクトルに強いピーク性成分が見られる場合は何らかのフィードバックが掛かっていることを疑った方が良い。

構造物の変位が小さい場合は構造振動から流れへのフィードバックは無視できる場合が多いが、たとえば、構造物まわりの流れにカルマン渦が発生しており、構造物の固有周波数とカルマン渦の放出周波数が近い場合、構造物の振動がカルマン渦放出の位相を揃えるために、構造物の固有周波数において、流速変動や振動加速度の強いピークが現れる。いわゆる、ロックイン現象である。このような場合には例え構造振動の変位が小さくとも振動から流れへのフィードバック効果を無視することはできない。ロックイン現象を予測するためには強連成問題として流れと構造振動とを同時に解くか、あるいは、ALE (Arbitrary Lagrangian and Eulerian) 法などを用いて、交互に解く必要がある。

フィードバックを伴った典型的な流体音としてはエッジトーンやキャビティトーンが挙げられる。これらの音は何れも流れの変動により発生した音が流れのせん断層の振動を引き起こし、強いピーク性の音を発生させる。つまり、音はせん断層の初期擾乱を大きくすると共に、位相を揃える作用をしている。このような音の予測に対して、音から流れへのフィ

ードバック効果をモデル化する研究も行われているが、基本的には圧縮性ナビエ・ストークス方程式により、音も含めて計算するいわゆる直接計算が用いられることが多い。たとえば、比較的浅いキャビティから発生する音を直接計算により求めた例を図1に示す⁽²⁾。音の直接計算では、音源となる流れの変動を正確に求めるに加えて、音の伝播計算における振幅誤差や位相誤差を極力低減する必要があり、一般には6次精度以上の差分法が用いられる場合が多い。また、解析領域の外部境界における音の非物理的な反射を防ぐことも重要であり、境界を通過する前に音を減衰させるためのスポンジ領域と境界における反射を防止するための無反射条件を組み合わせて用いることが多い。なお、流体構造連成振動にしても、流体音にてもフィードバック効果により振動や音の強度が大きくなる理由は流れの変動スケールに対して、構造振動や音のスケールが大きく、発生した振動や音が流れの変動の位相を揃えるからである。

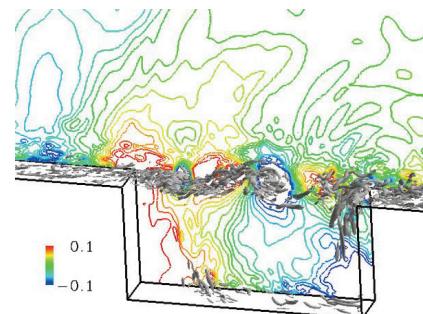


図1 キャビティ音の直接数値計算

上記のような振動や音から流れに対するフィードバックがない、あるいは、あっても無視できるほど小さい場合は、まず基本的には流れの変動を求めて、次いで、構造振動や音を計算することになる。流れを計算する場合、上述のように、主要な変動を推定するとともに、変動の空間的なスケールと発生する振動や音の周波数との関係を把握しておく必要がある。たとえば、ファンやタービンなどにおいて、動静翼干渉による圧力変動や流速変動が卓越する場合があるが、必ずしもこれが主要な振動源や騒音源になるとは限らない。動静翼干渉では動翼ピッチ、ならびに、動翼通過周波数 (Blade Passing Frequency, BPF) が基本的な空間スケールや周波数となる。たとえば、羽根車外径300 mm、羽根枚数3枚、回転数900 rpmのプロペラファンにおいて動翼通過周波数は45 Hzであるが、動翼通過周波数に対する音は人の可聴特性

¹ 一般に人の可聴特性から、100 Hz程度から4 kHz程度の周波数帯域における騒音の予測が実用上重要となる。

を考慮するとほとんど問題にはならない¹。一方、振動や強度に対してはこのような周波数の流れの変動も重要となる場合がある。というのは、振動上重要となる構造物の低次の固有周波数は低い場合が多いからである。このようなファンから発生する騒音の場合、実用上問題となるのは動翼通過周波数よりもはるかに高い周波数の騒音である乱流騒音となる。したがって、このようなターボ機械から発生する音の騒音源を計算するためには動翼表面上に発達する境界層中の渦の変動や後流の渦の変動を正確に予測しなければならない。

流れから発生する音の計算方法としてCurleの式が用いられることが多い³⁾。Curleの式は、流れの中に置かれた物体から発生する音を物体に作用する流体力の変動から求める式であり、流れの解析により流体力の変動が求まつていれば解析的に音場を計算することができる。しかし、この式を適用して音場を求める場合には式の導出に伴う仮定に注意を払う必要がある。つまり、Curleの式は音源がコンパクトであること²、つまり、音源や物体は波長に対して無視できるほど小さいこと、また、音を発生している物体の周りには音を反射したりするものが無いということを仮定している。ファンなど多くのターボ機械においてはケーシングや配管などにおける音の散乱、反射、放射などの効果は無視できない場合が多く、このような効果を考慮するためには音響計算を実施する必要がある。たとえば、小型の軸流ファンから発生する音を非圧縮性流れのLES計算と音響計算とを組み合わせることにより求めた結果を図2に示すが、実験値と良く一致する騒音スペクトルが得られている⁴⁾。

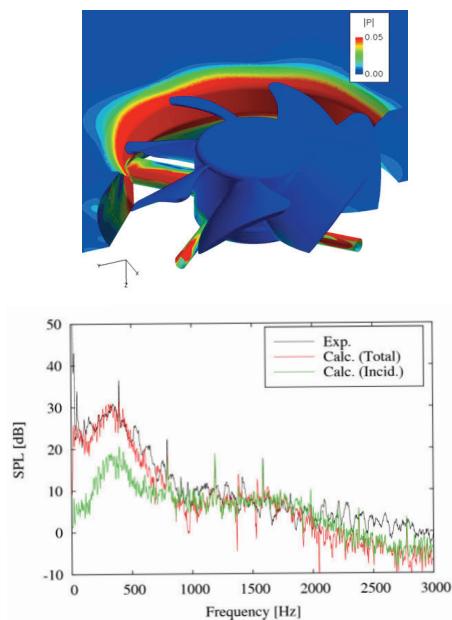


図2 小型のボックスファンから発生する流体音の予測

振動や音の伝播経路に関しては、低圧や中圧のファンなどの場合は発生した音の空気中での伝播を考慮すれば十分であるが、ポンプや水車などの水力機械や圧縮機などの高圧の空気機械では水中や空気中を伝播する音だけではなく、ケーシングや配管などの構造物中の振動伝播音（縦波成分と横波成分）も考慮しなければ遠方場音の予測はできない。また、自動車の車内騒音の予測に対してはボディの振動を考慮する必

要がある。たとえば、多段の遠心ポンプから発生する流体騒音の予測結果を図3に示す⁵⁾。この計算では非圧縮性のナビエ・ストークス計算により求まった物体表面の圧力変動を荷重データに変換してケーシングの振動解析を実施し、構造物の中を振動伝播する音を計算した。水力機械のマッハ数は 10^{-3} オーダーであるため、音波の反射における位相差は考慮する必要はないが、振動計算において流体の付加質量を考慮する必要がある³。このような計算により、構造物の外表面、すなわち、ポンプのアウター・ケーシングの振動速度を求め、それを音響解析における粒子速度の境界条件として空気中を伝播する音の音響解析を実施することにより、遠方場音の音圧レベルを予測した。このような手法により騒音の定量的な予測が可能であることが確認されている。

3. おわりに

流れに起因して発生する振動や騒音の予測にとって最も重要なことは、それらの原因となっている流れの変動、つまり、主要な振動源や騒音源を推定し、それを精度良く計算するための流れの解析手法を検討することである。また、流れにより発生した振動や騒音が流れに対してフィードバックを掛けているかどうかを見極めることも重要である。振動解析や音の解析に関しては振動や音の主要な伝播経路を推定し、それに見合った解析手法を選択する必要がある。特に、非圧縮性の流れから発生する音であっても、高周波数の音に関しては物体（構造物）の表面における音の位相が重要となる場合があるので注意する必要がある。

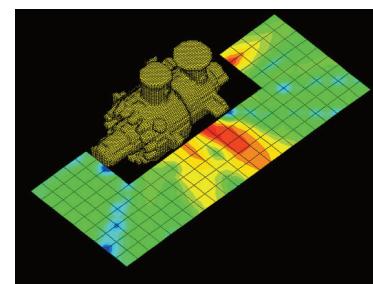


図3 多段の遠心ポンプから発生する騒音の解析

参考文献

- (1) 加藤千幸, ターボ機械, 37-7, pp. 387-393, (2009).
- (2) Yokoyama, H. and Kato, C., Physics of Fluids 21, 105103 (2009).
- (3) Curle, N., Proc. Roy. Soc., London, Series A, 231, pp. 505-514 (1955).
- (4) 高山了, 「低マッハ数のファンから発生する流体騒音の数值計算」, 東京大学博士論文, 2011.
- (5) Takano, Y., 他8名, Proceedings of The 12th International Congress on Sound and Vibration, No. 731 (2005).

² 圧縮性ナビエ・ストークス方程式により、位相差も含めて物体表面の圧力変動が求まつていればコンパクト音源の仮定は不要である。ただし、この場合はCurleの式のオリジナルの形を用いる必要がある。

³ 振動変位を考慮した双方向の流体構造連成解析を実施する場合は付加質量の考慮は不要である。



空力に起因する自動車の室内騒音予測技術の開発

飯田明由
豊橋技術科学大学 大学院 機械工学専攻

自動車の快適性を向上させるために、車室内騒音を小さくする技術の開発が望まれている。自動車の車内騒音を伝達機構により分類するとエンジン等の駆動機器の騒音が直接音として伝わるもの（空気伝播）と、車体の構造振動を介して車内に伝わるもの（固体伝播）に分けられる。また、音源によって分類すると、エンジンや動力伝達機構、タイヤやサスペンションなどの振動のほかに、車両各部の流れの剥離などに起因する空力加振や空力騒音によるもの、空調機器からの騒音に分類することができる。近年、エンジン音や動力伝達機構からの騒音は各種の対策がなされ大幅に低減していることに加え、今後、電気自動車が普及するとともにさらに減ることが予想される。一方、燃費を向上させるためと、対人事故における被害の軽減なども考慮して、車体の大幅な軽量化が進められていることから、遮音や吸音などの対策は難しくなり、音源そのものを小さくする努力がさらに求められるようになる。先に述べたようにエンジン音やロードノイズの対策が進んでいることから、空力騒音及び空力加振に起因する騒音の寄与が今後増加すると考えられる。このことから、空力騒音の対策が自動車の静粛化において重要な課題となってきている。このため、車内騒音の小さな自動車を開発するには、空力に起因する車内騒音を予測し、その対策方法を検討する必要があるが、空力騒音や車体表面の空力的な圧力変動は動力系のように加振点がはっきりとしないため、音源を同定し、その対策を行うことが難しい。そこで、大規模な数値解析により、車体周りの流れ場とその圧力変動を加振力とした構造振動解析を行い、さらに壁面の振動を元に車室内騒音を直接解析する技術の開発が必要となっている。本報告は文部科学省HPCI戦略プログラム「分野4次世代ものづくり」の課題の一つとして、東京大学加藤千幸教授、吉村忍教授と共に進めているものである。実車風洞実験、振動実験には、スズキ株式会社 橋爪 祥光課長、飯田圭一郎氏に多大なる協力をいただいた。振動解析には株式会社アライドエンジニアリング秋葉博氏・恩田邦藏氏にご協力いただいた。みずほ総研山出吉伸氏には流体解析及び音響解析を実施していただいた。工学院大学石浦ユミ氏には解析メッシュの作成、テストプログラムの実施などにご協力いただいた。豊橋技術科学大学横山博史助教には、解析環境の構築や解析データの分析について協力していただいた。

図1に解析概要を示した模式図を示す。解析には文部科学省次世代IT基盤構築のための研究開発「イノベーション基盤シミュレーションソフトウェアの研究開発」により開発されたソフト群を使用した。流体解析にはFrontFlow/blue（3次元非定常非圧縮流れ解析：有限要素法、乱流モデルLES）、振動解析にはADVENTURE Cluster（シェル及びソリッドモ

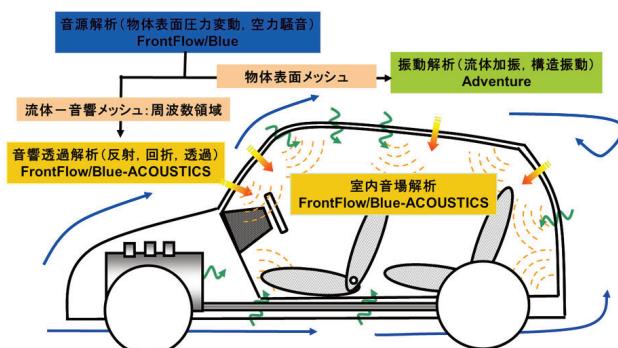


図1 車外の流れに起因する車内騒音予測手法の概要

デル）、音響解析にはFrontFlow/blue-Acoustics（3次元波動方程式、有限要素法、解析ドメイン：周波数空間）を用いた。解析に利用したメッシュはそれぞれソフト毎に作成し、各メッシュ間のデータはREVOCAPを介して交換した。このように各ソフトを用いて独立に解析を行うことにより、個々のソフトの機能を十分に発揮しながら連成解析を行うことができる。なお、音響解析のみ周波数領域で解析を行っているため、流体解析及び振動解析データを周波数空間にマッピングしてから音響解析を行った。



図2 車内騒音評価用簡易車両モデル

図2に検証に用いた実車スケールの簡易車両モデルを示す。自動車の車体構造は非常に複雑であり、溶接やボルトによる締結だけでなく、ゴムによる保持やはめ込みによる接合など様々な構造を持っている。また、材質も様々であり、同じ材質でも厚さなどが異なるため、図2に示すような簡単な構造のモデルを作成し、プログラムの動作確認を行った。車体は板厚4mmの鉄板で作成し、ガラス面のみ実際の車両と同じものを使用した。このモデルをスズキ（株）の自動車用風洞に設置し、流れ場、壁面振動及び騒音計測を行った。解

析は風洞実験と同じ条件で実施した。

図3及び図4に簡易車両モデルの表面圧力と流体の圧力変動を加振源として計算した壁面の振動加速度を示す。車体上部とドアミラー部で流れがはく離しており、その圧力変動によって車体表面が振動していることがわかる。圧力変動と振動加速度の周波数解析を行った結果、流体解析結果は実験と解析結果が良く一致していることを確認した。振動解析については、低周波数域（100Hz）で不一致がみられたが、500Hz程度まで解析結果と実験結果が一致することを確認した。事前に行ったハンマリング試験結果とモード解析結果から低周波数域での不一致は、部材の接合部のモデル化が不十分なことが原因として考えられる。この点については今後も実験データを参考にしながら修正していく必要がある。

図5に音場の解析結果を示す。今回の試験では内部に吸音材などを設置していないため、特定のモードが生じており、実際の車の音場とは異なるものであるが、開発したシステムにより流れから構造振動、室内音までが解析できることが確認された。今後、実際の車のように内部に吸音材を設けたモデルを作成し、風洞実験、振動実験及び数値解析を行っていく予定である。

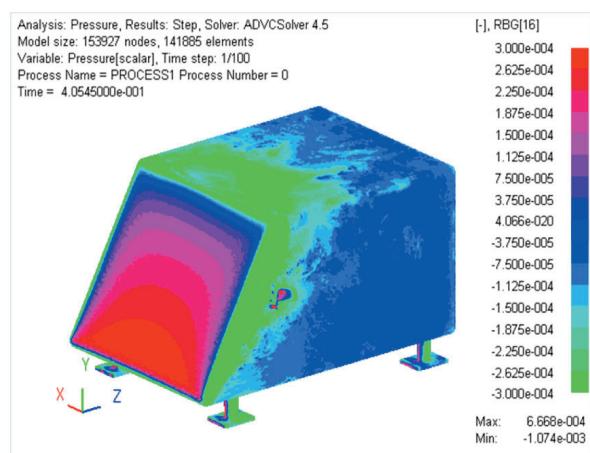


図3 簡易車両モデル周りの流れによる表面圧力分布

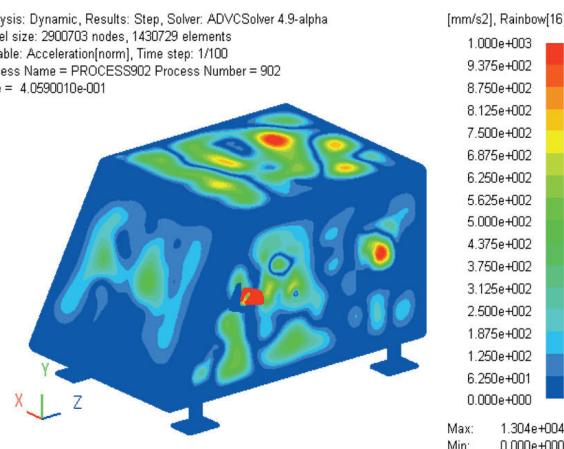


図4 簡易車両モデル表面の振動加速度分布

図6は本システムを実際の車両に適用し、車体表面の加速度を予測した事例である。現在、振動解析まで終了してお

り、実験結果は低周波数域を含めて非常に良い精度で一致することを確認している。簡易車両よりも実験との比較結果が良好な結果が得られたのは解析規模を大きくしたことに加え、振動解析のモデル化において自動車メーカーの豊富な経験とデータベースを利用できた点が大きい。このように実際の設計に数値解析技術を適用していくには、自動車メーカーとの連携が不可欠であり、大学と企業が連携することにより、使いやすく実践的なシステムを構築することができるものと考えられる。

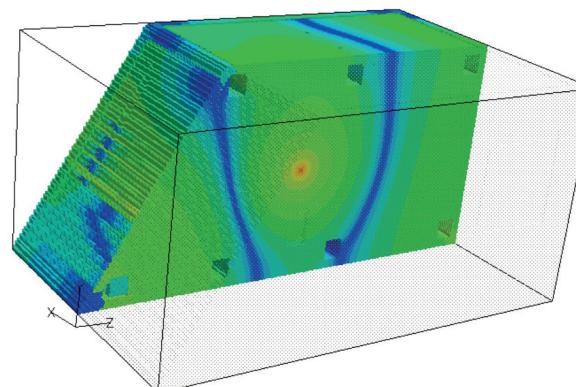


図5 簡易車両モデルの音場解析結果

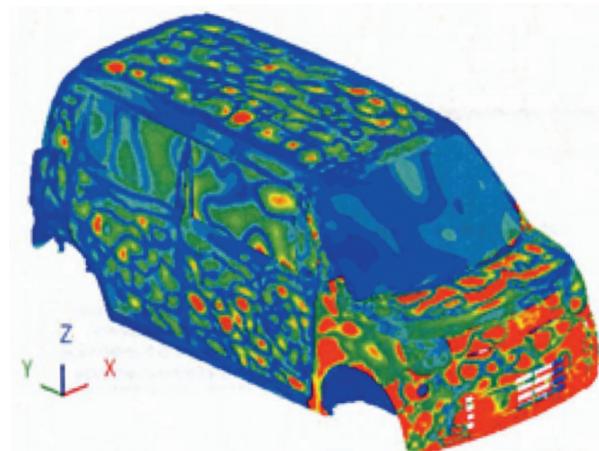


図6 空力加振による実車表面の振動加速度分布

空力に起因する自動車の車内騒音を予測するため、流体・構造振動・音響連成解析プログラムを開発し、その実証計算を行った。相互干渉のないワンウェイの解析ではあるが、車両周りの流れ解析結果から構造振動、音響解析が実車規模で行えることを確認した。これらの解析結果から実際の車両周りの流れに起因する車内騒音（5kHz程度まで）を解析するには、流体解析、振動解析、騒音解析にはそれぞれ200億要素、1000万要素、10億要素規模の解析が必要となることが明らかになった。大規模な解析ではあるが、京を用いることにより実現可能な規模であり、現在、予備解析及び解析のための準備を進めている。近い将来、京による成果を報告し、将来は自動車の設計に貢献できると確信している。



周期構造の音響・弾性振動問題と境界要素法

松本敏郎
名古屋大学 工学研究科（機械理工学専攻）

1. はじめに

屈折率が周期的に変化するナノ構造体（フォトニック結晶）では、その中を伝播することができない電磁波の波長帯域（バンドギャップ）があることが広く知られている[1]。このような現象は、結晶の格子振動や弾性波、音波などでも生じる。したがって、ヤング率や密度が異なる構造物や音波の散乱体を周期的に配置した構造（フォノニック結晶あるいは構造）では、特定の周波数帯の弾性波や音波を遮断することができるはずである。実際、スペインのマドリッドに直径2.9cmのステンレス製のパイプを10cm四方の長方形領域に立てたものを多数並べた彫刻があり、この彫刻のパイプの隙間を透過する音波のエネルギーが、特定の周波数帯において減衰すると報告されている[2]。この現象を好ましい振動遮断特性を持つ構造の開発に利用できれば興味深いということで、盛んに研究が行われている。

このような構造を作り出すには、様々な形状の材料の組み合わせに対して数値実験を行うことが有用であることは言うまでもない。計算手法としては、フォトニック結晶の解析で用いられていた平面波展開法やFDTD法（時間領域差分法）[1]がフォノニック構造においてもよく用いられていた。平面波展開法は電場を平面波の重ね合わせとして展開し、展開係数の固有値問題に帰着させて解く方法であり、FDTD法は空間と時間軸を差分近似して時間領域の解を計算し、フーリエ変換によりスペクトルを計算する方法である[3]。平面波展開法では、解の収束のために大きな展開項数が必要とし、計算量が増大してしまう。一方、FDTD法では高精度な解析には細かい空間メッシュが必要となるが、時間メッシュも空間メッシュに応じて細かくする必要がある。通常の弾性振動問題や音響問題では有限要素法や境界要素法を用いることが普通であり、これらの解析法を周期構造の解析に用いようという研究が盛んになっている。本稿では、それに関連して、あまり知られていない境界要素法を用いた固有振動数の計算法とフォノニック周期構造のバンドギャップの計算法について簡単に紹介する。

2. 境界要素法による固有振動数の解析法

有限要素法では固有方程式は

$$([K] - \omega^2 [M])\{x\} = \{0\}$$

の形をしており、振動数 ω が行列の外に陽に現れる一般固有値問題を解いて固有振動数を求めることができる。ここで周期構造においては、その単位構造に周期境界条件を課すこと

で係数行列の対称性は崩れてしまう。これに対して、境界要素法では基本解の計算に振動数が含まれているために、固有方程式は

$$[A(\omega)]\{x\} = \{0\}$$

の形となり、振動数 ω が係数行列に陰に含まれる非線形固有値問題となる。従来はこの点が固有振動数を求める上での境界要素法の難点であったが、近年、波数の複素平面上の経路積分を評価することにより、積分経路内の固有値を計算する方法が提案され[4]、境界要素法によって簡単に固有値が計算できるようになった。境界要素法は、開空間を厳密に扱うことができる所以、音響問題の周波数応答解析ではもともと最も有効な方法であった。しかも、従来は係数行列の作成に時間がかかり、非対称行列の連立方程式を解く必要があったが、現在は高速多重極法[5]を反復法によるソルバーと組み合わせて用いることにより記憶容量、計算量とも $O(N) \sim O(N(\log N)^a)$ ($a > 0$) 程度で計算できるようになっている。また、行列の圧縮法であるACA (Adaptive Cross Approximation) [6]を適用すれば $O(N)$ 程度の記憶容量と計算量が実現できるようになっている。さらに固有振動数の計算ができるようになったことから、開空間における散乱周波数の計算も可能となっている。

さて、固有振動数の計算では、経路積分を台形公式などで評価するために波数の複素平面上に積分経路上に点を取る。したがって、計算量としてその点の個数の分（通常は数10回）だけ、波数を変えて境界要素法の連立方程式を解く必要が生じる。しかしながら、これらはすべて振動数に対して独立な計算であるので、完全に並列化が可能である。

一例として図1 (a)に示すような立方体キャビティ内の中間に剛体の球形散乱体がある音場に対して境界要素法により固有振動数を求めた結果を示す。固有振動数（波数）7.5648に対して得られた振動モードを図1 (b)に示す。

このように、境界要素法で固有モードの計算も可能となっている。境界要素法では構造物の領域を離散化する必要がないので、固有振動数に対する離散化誤差も小さくなると考えられる。

弾性振動問題の例として、図2に示す様な両端がローラー支持された正方形版の固有振動数を有限要素法 (COMSOL) と境界要素法で計算した。7次と8次の固有振動数の誤差を要素分割数に対して比較した結果を図3に示す[7]。要素分割は、境界要素法では一定要素、有限要素法では線形要素で行っているが、有限要素は境界で境界要素法の要素分割と一致

するように分割している。図3から分かるように、一定要素にも関わらず境界要素法でははるかに精度良く固有振動数が得られている。その理由として、境界要素法では領域の離散化誤差が一切入らない点が考えられる。

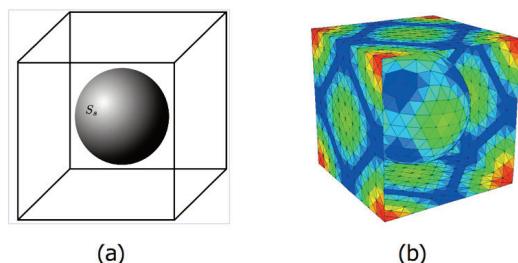


図1 剛体球を有する立方体形状の音場と振動モードの例

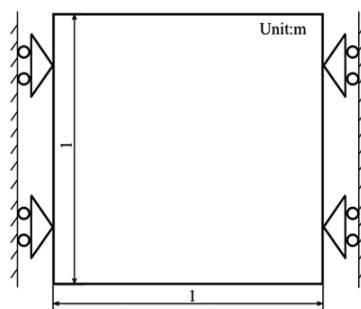


図2 両端をローラー指示された正方形板

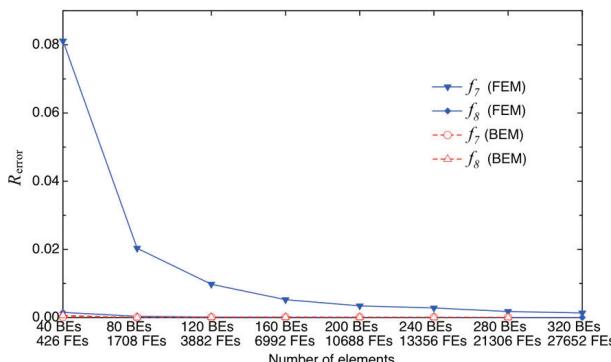


図3 有限要素法(COMSOL)と境界要素法で得られた固有振動数(7次と8次)の誤差の比較

3. 境界要素法によるバンドギャップの解析

境界要素法による高精度な固有振動数の解析法はそのままフォノニック構造のバンドギャップの計算に用いることができる。

図4のような円形の散乱体を中心にはする正方格子の周期構造について、境界要素法を用いて計算したバンド構造を図5に示す。正方格子の方向によって材料の分布の周期性が異なることに注意する。横軸は第1ブリルアンゾーンにおける波数ベクトルであり、周期境界条件を満足させるための量である。図5には、すべての波数ベクトルに対して存在することができない固有振動数の範囲 (band gap) が、グレーに

塗りつぶされた範囲として得られている。また弾性振動の例として、図6のように母材と同じ材料をヤング率が1/160、密度が1/8の薄い材料で包んだ場合のバンドギャップを図6の右側に示す[8]。

ところで、このような周期単位構造は波の波長程度の大きさになってしまるために、振動や騒音を遮断する単位構造としては大きすぎて実用的ではない。これに対して、文献[2]では質量が大きく固い材料を柔らかい材料で包んだ固体を単位周期構造の中に埋め込むと、従来よりもはるかに低い位置にバンドギャップが生じることが論じられており、振動・騒音の遮断構造として今後期待されている。

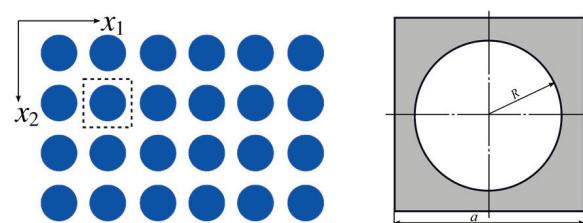


図4 円形の散乱体を有する正方格子と単位構造

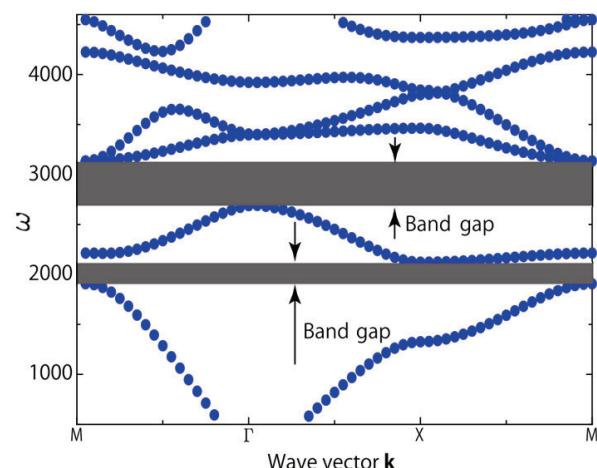


図5 円形の散乱体を有する正方格子と単位構造

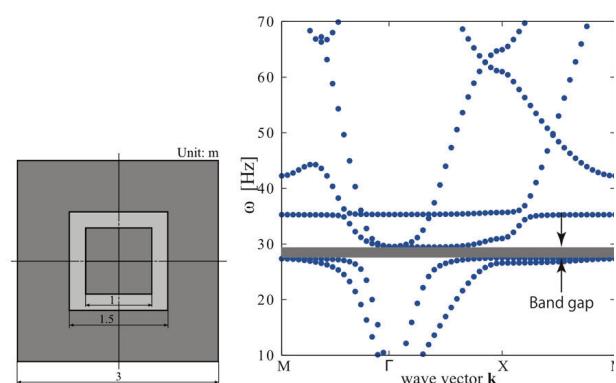


図6 円形の散乱体を有する正方格子と単位構造

参考文献

- [1] 追田和彰, フォトニック結晶, 森北出版, (2004)
- [2] R. Martínez-Sala, J. Sancho, J.V. Sánchez, V. Gómez, J. Llinares, Sound attenuation by sculpture, Nature, Vol.378,

- p.241, (1995)
- [3] Z. Liu, X. Zhang, Y. Mao, Y. Zhu, Z. Yang, C.T. Chan, P. Sheng, Locally resonant sonic materials, *Science*, Vol.289, pp.1734–1735, (2000)
- [4] T. Sakurai and H. Sugiura. A projection method for generalized eigenvalue problems using numerical integration. *J. Comput. Appl. Math.*, Vol.159, pp.119–128, (2003)
- [5] N. Nishimura, Fast multipole accelerated boundary integral equation methods, *Applied Mechanics Review*, Vol.55(4), pp.299–324, (2002)
- [6] M. Bebendorf, Hierarchical Matrices: A Means to Efficiently Solve Elliptic Boundary Value Problems, Springer-Verlag, (2008)
- [7] H.F. Gao, T. Takahashi, H. Isakari, T. Matsumoto, A study on eigensolutions of 2D elastic problem by using BEM and FEM, *Transactions of JASCOME*, Vol.13, Paper No. 09-131129, (2013.11), (accepted)
- [8] H.F. Gao, A study on numerical analysis based on boundary element method for wave propagation properties of phononic periodic structures, Doctoral Dissertation, Nagoya University, (2013)



ロケット射点形状の空力音響多目的設計探査

大山 聖

宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 宇宙飛翔工学研究系

2011年度より、HPCI戦略プログラム分野4「次世代ものづくり」において、「多目的設計探査による設計手法の革新に関する研究開発」に取り組んでいる。この研究課題では、大規模多目的設計最適化問題に適用可能な多目的進化計算手法、応答曲面近似法、データマイニング手法を開発し、スーパーコンピュータ京[1]を用いることで、これまで不可能だった分野に多目的設計探査を導入し、その有効性を実証することで、産業界で「京」クラスのコンピュータが利用可能になる2020年代の設計手法の革新への道筋を示すこと目的としている。

ここでは、研究成果の1つであるロケット射点形状の空力音響多目的設計探査について紹介させていただく。本研究成果はラージエディシミュレーション(LES)と大域的な多目的設計最適化手法（ここでは多目的進化計算）を用いて空力音響設計最適化問題を解いたという点でマイルストーンとなるものであると考えている。

ロケットが打ち上げられる時、ノズルから噴出されるブルームから強い音響波が発生し、その音響波がロケット射点で反射するなどしてロケットフェアリング内にある衛星などの宇宙機を強く振動させてしまう問題がある。このため、宇宙機は高い耐振性を要求され、宇宙機の開発コスト増につながっている。

そのため、これまで世界的に行われてきた経験則に頼る音響振動予測法を抜本的変えることを目指し、7年ほど前から高度な数値シミュレーションによる音響振動の予測性能向上の活動がJAXAで進められてきた[2]。この活動の短期的な成果として、射点の改修による音響振動の低減があり、H-II打上げ時の射点改修等に貢献してきた。2013年9月に打上げに成功したイプシロンロケットにおいても、この空力音響問題が解決すべき大きな課題の1つとなっており、射点の

改修が行われた(図2)。この射点の基本設計はCFDに基づいて行われているが[3]、射点の空力音響レベルを精度よく見積もるためにには大規模高解像度な計算が必要とされるため、計算ケースが限られてきた。そのため、イプシロンロケットではM-Vロケットに比べ音響環境が大きく改善したが、さらなる改善の可能性があると考えられる。



提供 JAXA

図1 イプシロンロケットの打ち上げ

「多目的設計探査」は多目的設計最適化手法により得られたパレート最適解データベースから設計に役立つ知見を引き出す次世代の設計支援ツールである（詳細についてはCMD Newsletterの記事[4]~[6]などを参照）。この手法は、三菱リージョナルジェットの主翼の設計、電化製品の開発、タイヤの開発などに使われその有用性が示してきた。しかしながら、目的関数（設計指標）の評価が多数必要であることなどから、その適用範囲が限られてきた。

ここでは、ロケットの空力音響環境のさらなる改善にむけ

て射点形状設計に関する知見を得るために、LESと多目的進

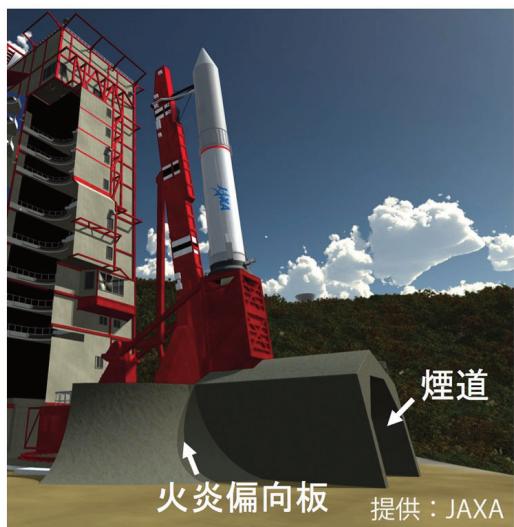


図2 イプシロンロケットの射点。音響環境をよくするため、ロケットの下に火炎偏向板（斜面）と煙道がついている。

化計算を用いて射点の火炎偏向板形状（図2）の空力音響多目的設計探査を行った結果を報告する（手法などの詳細については文献[7]をご参照いただきたい）。

はじめに設計問題を定式化する。ここでは、打ち上げ直後の音響環境を改善するための指針を得る事を目的として、ロケットが射点からロケット直径Dの5倍の距離にあると仮定する。設計目的は

(1) ロケットフェアリング付近での全音域音圧レベルの最小化

(2) 火炎偏向板壁面上の時間平均圧力値の最大値の最小化

(3) 45度斜め平板からの形状変化量の最小化

の3つである。前述の通り、ロケットフェアリング付近の音圧レベルが低いほうが宇宙機の開発コストが低減できる。また、火炎偏向板壁面上の最大圧力を最小化すれば火炎偏向板の損傷が低減できる。また、3つめの目的関数は火炎偏向板形状がなるべく単純なほど、改修コストを小さくできることを意図している。火炎偏向板の形状は図3に示すように奥行き方向に一定の断面形状を持っていると仮定し、その断面形状をBスプライン曲線を使ってパラメータ化した。設計変数はこのBスプライン曲線の5つの制御点の座標値（計10個）である。ここでは、火炎偏向板形状の音響環境改善への効果を見るため、煙道はないものと仮定する。

この問題を解くため、50個体×50世代=2,500の形状の目的関数値を評価した。それぞれの形状の音圧レベルと壁面最大圧力はLESを使って評価した。つまり、2,500ケースのLES計算を行った。高次精度スキームの導入によりLESの高速化が図られたが、それでも京コンピュータの6,500ノード（京システムの7%）を利用して2週間以上の計算時間を要している。

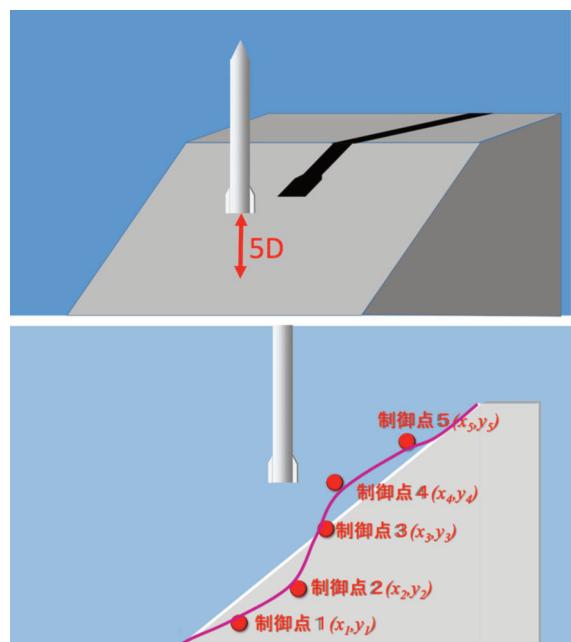


図3 射点形状のモデル化（上図）と設計パラメータ（下図）。奥行き方向に射点形状は同じであると仮定し、射点形状をBスプラインでパラメータ化した。

この計算により、147個の非劣解（パレート最適解）が得られている（図4）。評価を行った2,500個の火炎偏向板形状の目的関数空間での分布を図5に示す。設計目的が3つであるため、3次元のプロットになる。この図からは目的関数間の関係が把握しにくいため、散布図行列の形でこれを可視化する（図6）。散布図行列は散布図を行列の形に並べたものであり、ここでは上三角行列に散布図、下三角行列に相関係数を示す。この図から、形状変化量最小化と他の2つの設計目的の間に強いトレードオフがあることと、音圧レベル最小化と最大壁面圧力最小化の間には強いトレードオフはない、ということがわかる。

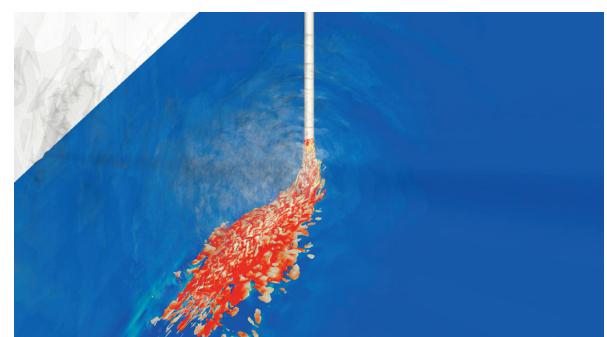


図4 非劣解の1つの流れ場の様子。ヘリシティ密度の等値面に速度の絶対値で着色。壁面上の色は圧力。煙状のものは音波。

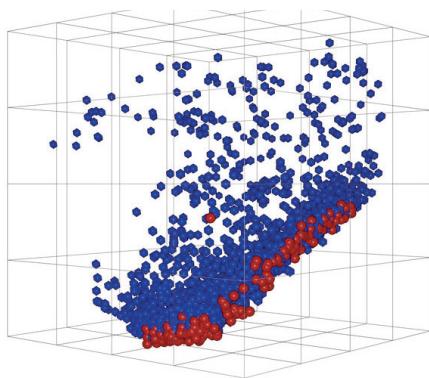


図5 非劣解（赤表示）と劣解（青表示）の設計目的空間分布。

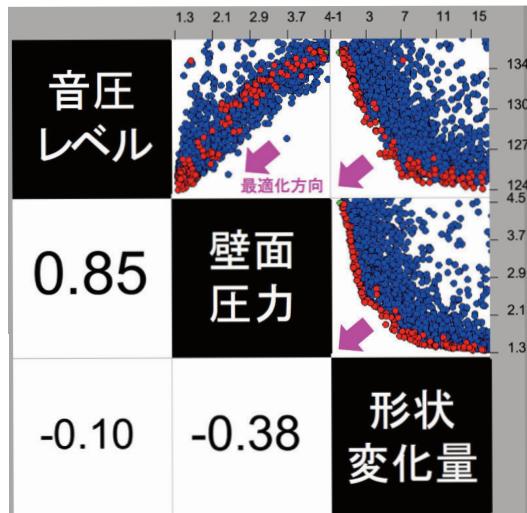


図6 非劣解（赤）と劣解（青）の分布。形状変化量最小化と他の2つの設計目的の間に強いトレードオフが見える。

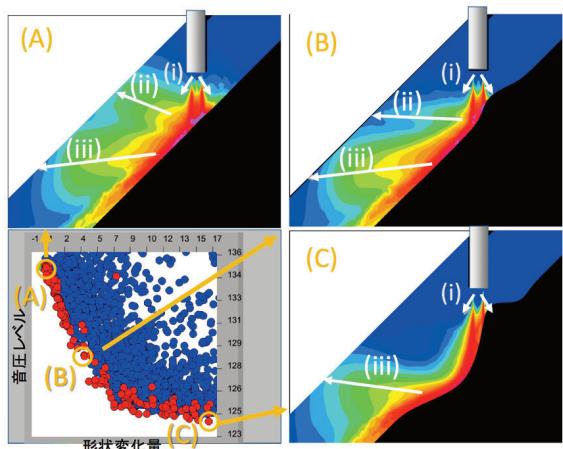


図7 代表的な非劣解の形状と全音域音圧レベルの分布

代表的な非劣解の形状とその全音域音圧レベルの分布を図7に示す。形状変化量が最小の形状（左上の図）は、ほぼ斜め平板になっており、形状は単純であるが、プルームジェットの衝突点付近から指向性を持った強い音波(i),(ii),(iii)が発生していることがわかる。これらはそれぞれ主流ジェットの剪断層から発生するマッハ波、衝突点周りから発生する音響波、衝突点から後流側の超音速流れの剪断層から発生するマ

ッハ波である。全音域音圧レベル最小の形状（右下の図）は、衝突点付近に強い勾配をつけることで衝突点付近から発生する音波を抑制していることがわかる。また、全音域音圧レベルと形状変化量の両方がほどほどに小さい形状（右上の図）は下流側の形状をあまり変化させずに、上流側にバンプをつけることで衝突点付近に勾配をつけ、衝突点付近からの音波を弱めるとともにその指向方向を変えている。このことは、ロケットが比較的射点に近い時には、衝突点付近の勾配を大きくすることが全音域音圧レベルの低減に重要であり、下流側の壁面形状を工夫することでさらに音響環境を低減することができるこことを示唆している。

本稿での研究成果の報告はここまでさせていただくが、散布図行列を使った設計空間の可視化（図8）や火炎偏向板形状の固有直交分解などにより、ここで紹介した以外にもいくつかの知見が得られている([7][8])。この研究で得られた知見はイプシロンロケットの射点形状の改修やH-IIIロケットの射点形状の設計に活かされていくと期待される。

以上、ロケット射点形状の多目的空力音響設計探査の結果を紹介した。著者らが旧・航空宇宙技術研究所の数値風洞を使って、世界で初めて3次元RANSと進化計算を組み合わせた大域的な空力設計最適化（翼の空力設計最適化）を行ったのが1995年である。今までこそ、3次元RANSと進化計算を使った設計最適化/設計探査の例は多く見られるようになったが、そこからほぼ20年を経て、LESと進化計算を組み合わせた大域的な設計最適化が可能になり、新しい時代に移ったと言えるであろう。今後ますます重要になってくる空力音響問題に対しても、「京」レベルのコンピュータが産業界で利用できるようになってくる2020年代には多数のLESを利用した大域的な最適化や設計探査ができるようになると期待される。

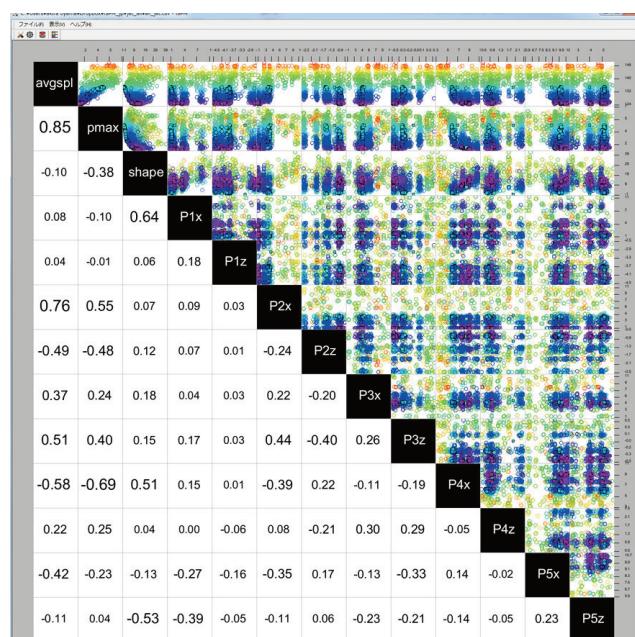


図8 iSPMによる設計空間の可視化

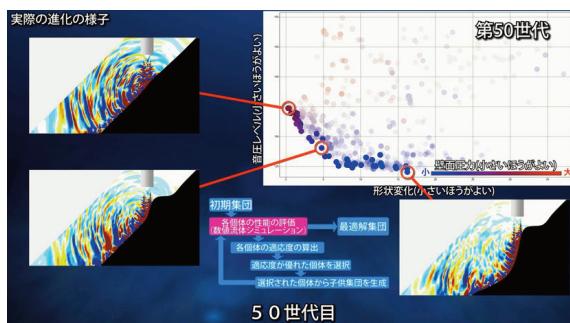


図9 動画の1シーン

なお、本稿で紹介した散布図行列の図はこの研究課題で開発したiSPMというソフトウェアで作成されている。ウェブサイトからダウンロードできるのでぜひご活用いただきたい。

<http://flab.eng.isas.jaxa.jp/monozukuri/mode/>

また、本稿の研究内容をわかりやすくまとめた動画をyoutubeにて公開している（図9）。本稿にご興味をもたれた方はこちらもぜひご覧いただきたい。

<http://www.youtube.com/watch?v=Nmo269EBBhQ>

参考文献

- [1] 横川三津夫：京速コンピュータ「京」の現状、CMD Newsletter No.47、2011.

[2] K. Fujii, T. Nonomura, and S. Tsutsumi, Toward accurate simulation and analysis of strong acoustic wave phenomena – A review from the experience of our study on rocket problems, International Journal for Numerical Methods in Fluids, Vol. 64, pp. 1412-1432, 2010.

[3] 堤誠司、福田紘大、高木亮治、宇井恭一：イプシロンロケット打上げ時の音響レベル予測と低減化、第51回航空原動機・宇宙推進講演会、2011.

[4] 大林茂：次世代設計理論・多目的設計探査の考え方、CMD Newsletter No.43、2009.

[5] 杉村和之：設計者に役立つ設計探査とは？、CMD Newsletter No.43、2009.

[6] 小石正隆：設計知見獲得に向けたCAEの活用、CMD Newsletter No.38、2007.

[7] 立川智章、長田裕樹、山本誠、野々村拓、大山聖、藤井孝藏：ロケットの射点設計に向けた空力音響最適化問題多目的探査、日本機械学会2013年度年次大会、W121002、2013.

[8] 立川智章、長田裕樹、山本誠、野々村拓、大山聖、藤井孝藏：ロケット射点形状に関する空力音響多目的設計問題の非劣解データベースの分析、日本機械学会第26回計算力学講演会、1909、2013.



CAEにおける実験の役割

望月隆史
株式会社エステック 技術部

1. はじめに

CAEの黎明期では、宇宙開発などのコスト的な問題や実験環境の整備の難しさなどの要因により、実験が極めて難しい領域の検討にCAEが利用されてきました。その後、コンピューターの性能向上と価格低下、及びCAE適用のノウハウの蓄積などにより、計算のコストと精度が実用的な領域が拡大し、製品開発のツールとして定着してきました。こうした状況の中、製品開発期間の短縮の手段として、「実験」を「CAE」に置き換えるということをよく耳にするようになっています。

一方、CAEの適用が難しい領域もあります。例えば、音色や乗り物の乗り心地、快適性などのような人間の官能評価により製品の良し悪しを決める部分です。こうした分野でも、測定あるいは計算可能な数値に置き換える検討や、人体をモデル化して、この応答を評価する試みが行われています。これとは別に、現象自体はシミュレーションで再現し、これを

あたかも実際の製品がそこにあるようにシミュレーターを通して感じさせ、評価自体は人間が行うという取り組みもされています。こうした技術の成果によって、今後、CAEが適用される領域は益々増えていくでしょう。

こんな話をすると「実験」と「CAE」は二者択一のように思えます。確かによくわかっている現象で、ある基準を満たしているかどうかの決まった評価をするのであれば、大きな差はないかもしれません。しかし「実験」には「実験」の、「CAE」には「CAE」の長所があり、実際にはお互い補完しあう部分が少なくありません。そこで振動・騒音問題における問題解決の手順を通して、「CAE」における「実験」の役割について考えたいと思います。

シミュレーションの目的は実現象を再現することです。しかし、最初からうまくいくことはなかなかありません。その結果シミュレーションはどうせ合わない、などと言われることがあります。しかし、多くの場合は不適切なモデル化や入

力が原因です。

式を展開して解析的に結果を求められるのは非常に単純な形状や境界条件に限られており、実際のシミュレーションでは、何かしらモデル化の段階で離散化しており、所詮近似値であるとう事実があります。こうしたイメージが先行するため、単純な入力ミスであるにも関わらず、見過ごしてしまうことが起こるのだろうと思います。シミュレーションの欠点の一つとしてヒューマンエラーを起こしやすく、見つけにくいということもあるのではないかでしょうか。試作品を作るのであれば多くの人が携わるので、結果としてチェック機能が働きます。シミュレーションモデルの作成はごく少数の人員でできるという、本当は利点である特徴が、この原因の一つになっているように思います。また、実物であれば見たり触ったりする感覚によって不具合を見つけられる場合でも、バーチャルのモデルでは見落としてしまうため、実験結果に比較して信頼性が低いことにつながっているように思います。やはり最終的な確認は実物で行う必要があります。

2. シミュレーションに必要不可欠な実験

材料特性や寸法を正しく入力したかという以外に、モデル化の考え方、方針などに問題がある場合もあります。シミュレーションではモデル化した範囲の影響しか現れません。例えばケーブルが主な振動伝達経路であるにも関わらず、このケーブルをモデル化しないければ、もちろん現象は再現できません。まず、問題となる現象を丹念に測定し、これを分析してメカニズムを推定する必要があります。多くの場合、問題となる現象は製品を実際に稼働した状態で起こっていて、いろいろな加振力が同時に作用しています。また、動力源のような既知の起振力だけでなく、風の影響や、製品を設置している基礎の暗振動などの外乱のように、その大きさや作用点さえわからないこともあります。主となる起振力を特定し、他の影響と切り分ける実験が必要になります。これには対象物に応じていろいろな分析方法を使い分けます。例えば、回転機械であれば稼働回転数を変化させ、回転次数分析をすれば、どの回転数で回る部位の影響が大きいのか、どの周波数に共振があるのかがわかります。評価点を含む部品が、少ない結合点で他部品とつながっているならば、どの点からの入力による振動が支配的なのか、伝達経路分析を行うこともあります。その他、部分的な影響を撤去するなどして各種の寄与分析を行ったりします。

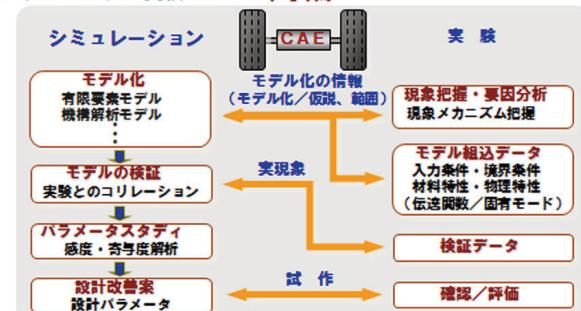
これとは別に、製品自体がどのような動特性を持っているのかの調査も必要になります。より特性を明確にするために、測定結果をモード分析してどの周波数にどのようなモードがあるのかを調査することもあります。

現象の把握を行って、要因分析から導き出されるメカニズムを考えます。場合によっては絞り切れず複数の可能性が残る場合もあるかもしれません。いずれにせよ、ここで得られるメカニズムを再現するために必要なモデル化、範囲、境界

条件を決めます。このとき、実稼働すべての現象を再現するのではなく、問題を解決・改善するための必要最低限の現象に着目します。場合によっては実際の評価に代わる代用特性を設定し、問題やモデルの規模ができるだけ小さくするのが望ましいと考えます。

なお実験では、計測するために行う加工により、多かれ少なかれ製品の特性が変化してしまいます。この影響が大きい場合には非接触の計測を考えますが、計測できる部位は限られます。センサーの大きさが問題となることもあります。例えばある特定点のデータを取得したくても、歪ゲージやマイク、加速度ピックアップは大きさがあり、実際にはその点ズバリのデータではありません。また実験では完全なフリーや拘束の境界条件を作ることもできません。特に問題となりやすいのは再現性の問題で、毎回同じデータが計測できるのではなく、温度などの実験環境を整えたり、ノイズ対策などが必要となります。精度の高い測定は非常に難しいのです。

シミュレーションと実験はCAEの両輪



シミュレーションモデルの構築には実験の役割が重要

現象を再現するためには、モデルパラメータを決定するための実験も必要です。特に摩擦力（係数）や減衰などは、現在のCAEでは現実的な計算コストで妥当な精度を得ることはできません。実験に頼ることになります。

3. シミュレーションによる改善検討

計算結果が得られた後、実現象を再現するようモデルを修正するプロセスをコリレーションと言います。モデル化に際し、省略した形状の影響はないか、メッシュサイズは適当か、実物がモデルや図面通りにできているかなど、部品単位で調査します。また、それぞれの部品はボルトや溶接、接着剤などで結合されていますが、結合範囲や結合剛性など、どのようなモデル化が妥当かを検討します。この作業の繰り返しにより解析精度は向上します。こうしたノウハウの蓄積が進むと、仕様の異なる製品でも同様の現象であれば、コリレーションを行わなくとも、高精度のモデルを構築できるようになります。特に自動車産業では、早くからCAEに取り組んできたことと、基本構造が大きく変化することではなく、試作品による検証を繰り返してきたため、バーチャルな開発が最も進んでいる業界の一つです。

ひとたび実現象を再現するモデルが完成すれば、シミュレ

ーションによって様々な分析・検討が可能です。実験で計測できるのは非常に限られた情報です。これに対し、シミュレーションでは細部の変形や歪、直接計測するのが難しいエネルギーなどを、こと細かに調査することができます。また、シミュレーションの中で寄与分析や部分的な撤去を行うなどすれば、現象メカニズムがより明確になります。

この段階までくれば、いくつかの明確な設計改善案を出すことができます。シミュレーションの利点は、現象の可視化という部分が大きく、結果として、試作と確認実験を繰り返すよりも、優れた改善案を素早く確認できるようになります。

4. 実験とシミュレーションの連携

ここまででは、実験とシミュレーションと同じ条件で実施し、結果を比較するという部分について紹介してきました。ここからは実験とシミュレーションを組み合わせる手法について紹介します。考え方としては二つあります。実験結果をシミュレーションの中に取り込んで計算する方法と、ある部分をリアルタイムのシミュレーションに置き換えて実験する方法です。

まず前者についてですが、これはFEMの代わりに実験データによるモデル化をします。FEMを作成する必要がないという部分が大きな長所で、実物はあるが、FEMを作成するのが難しい、例えば構造が非常に複雑であったり、他社の部品であったりする場合に利用できます。測定誤差が計算精度に大きく影響するため、精度の高い実験が要求されます。この考え方にはさらに二種類の手法が存在し、一つは実験モード解析の結果を利用してモデル化する不拘束モード法です。モーダルパラメータを実験的に抽出するカーブフィットが必要になり、モード数の少ない低周波での利用に限られます。この手法を利用する場合には、他部品と結合する部分の局所剛性を考慮して計算精度を確保する工夫が必要です。もう一つは、結合点間のすべての動剛性を実験的に準備して、これをコンポーネントの特性とする手法です。モード密度や減衰が

高い領域で、カーブフィットが難しい場合にも利用できます。一般的には力加振の加速度応答データからその逆特性として動剛性を求めるため、反共振など測定データのレベルの低いところの精度が重要で、計算結果にノイズの影響を受けやすいという問題点があります。また、結合点間の特性を全て測定する必要があり、計測すべきデータ量が多いことが欠点です。

後者は、主に電子制御を行うコントローラーの開発に利用され、実物を取り込んだシミュレーションということでHILS (Hardware-In-the-Loop Simulation)と呼ばれます。このHILSにも二種類の使われ方があります。

一つは制御対象であるプラントを、リアルタイムシミュレーションに置き換える方法です。例えば自動車のブレーキを制御しようとしたとき、自動車の挙動をシミュレーションに置き換えられれば、仮想的に、濡れた路面や雪道、さらにはいろいろな速度での検証が可能になります。危険を伴うものや、環境の整備が難しい条件でも、実際のコントローラーが問題なく機能するかを効率的に確認できます。要求精度を確保しつつ、リアルタイムで挙動を計算が必要で、現象を再現する必要最低限のモデル化と、これを高速に計算するコンピューターの組み合わせがカギになります。なお、これに人間とのインターフェースを加えれば冒頭に述べたような官能評価が可能になります。

もう一つのHILSの考え方とは、制御対象のプラントに実物を利用する方法で、単に制御コントローラーを汎用PCに置き換えたものです。ただし、ブロック線図で書かれた制御モデルが利用できるので、ロジックの修正、比較、デバッグが非常に簡単に行えるようになります。

5. おわりに

CAEの適用範囲は今後ますます広がっていくと思われます。新しく適用する分野では、これを軌道に載せるために多くの実験が必要になります。効果的なCAEの実践には、実験の役割は重要です。





空力騒音と熱流体解析ソフトウェアPowerFLOW

甲斐 寿
エクサ・ジャパン株式会社

1. 空力騒音と熱流体解析ソフトウェアPowerFLOW

空力騒音が発生する製品の低騒音化のためには、流体现象、及び流体現象の結果である音響現象そのものを正確に把握して、音響現象と流体现象との関連性を取得し、低騒音化のための有益な対策を見つけることが必要である。このために、数値シミュレーションには、時間や空間に融通性がある事を利点として、実験では取得困難と思われる物理量そのものや可視化表現を容易に得られる事が期待される。流体现象だけでなく音響現象をも高精度に把握するには、シミュレーション手法には非常に高度で且つ多くの能力が要求される。現実的なハードウェアや時間、人工などのリソースの使用という条件下を考慮すると、シミュレーション手法には、次の2点の能力が必須であると考えられる。

- 1) 高精度な音波伝播を得るために数値粘性が極めて小さい
- 2) 高周波数の音波を取得し、分析にも対応可能な十分な時間解像度による非定常計算

弊社で開発した熱流体解析ソフトウェアPowerFLOW [1] [2] は、今日、CFDという分野で最も多用されている、NS方程式を有限体積法で解くという数値解法と一線を画し、格子ボルツマン方程式を支配方程式とした、非常にユニークな流体計算手法「格子ボルツマン法」を用いている熱流体解析ソルバーであるが、上記した、これら2点の高度な能力を持っている数少ないソフトウェアである。一般的にも格子ボルツマン法は、ここ10年ほどで利用者や開発者が急激に増え用途も広がり、飛躍的に開発が進んでいるが、弊社でも様々な大規模且つ複雑形状に対する熱流体現象への適応が急激に増えてきている。

こうした状況の理由として、次のようなPowerFLOWの大きな利点が挙げられると考えられる。

- 1) 立方体形状の空間格子生成の容易さを維持しながら、複雑な形状を持つ物体でも、正確に物体表面の境界条件を考慮できる手法であること
- 2) 行列解法を使用せず、時間発展解法であること
- 3) 支配方程式が数学的に裏付けされた計算安定性による計算のロバスト性を持っていること
- 4) 格子ボルツマン法の並進機能から、数値粘性が極めて微小で、音波のような微小な圧力波でも遠方場まで伝播現象を高精度に捕捉できること
- 5) 格子ボルツマン法により並列化性能が高いこと

本記事では、格子ボルツマン法を基礎として弊社で独自に開発した「Digital Physics」と呼ばれる、巨視的な粒子の動きを追跡し流体の流れをシミュレートする技術を取り入れたPowerFLOWと、上記1)～5)の特徴を生かした大規模且

つ複雑形状に対して実施した、流体騒音問題への解析事例を紹介する。

2. PowerFLOWによって得られる流体解析結果

最初の例として、図1にPowerFLOWによる軸流ファンの流体解析結果を示す。本図には、軸流ファン周りの圧力変動及び渦度変動の瞬時の様子を示す。本図に示す通り、PowerFLOWは、流体现象（速度、渦度や圧力分布）と音響現象（音波）を同時に取得する直接法である。音響場を評価する際、PowerFLOWによるすべてのシミュレーション計算は、極めて短い時間のタイムステップを刻む非定常計算である。所定の短い時間のタイムステップで圧力などの物理量が計算・出力されるので、圧力であれば、十分な時間解像度で詳細な時刻歴圧力を得ることができる。また、この非定常解析から得られた時刻歴圧力データは、流体運動による圧力変動（いわゆる疑似音）と、音波による微小な圧力変動が加算された値となる。つまり、実験で風防カバーを外したマイクで計測をしている事に等しい。

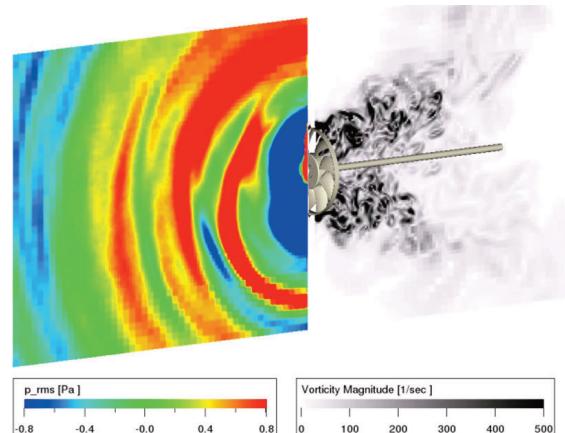


図1 軸流ファン周りの瞬時圧力変動及び渦度変動

本図は、圧力分布と渦度分布時刻歴の、ある瞬時の様子を示しているが、負圧面側の赤色は疎密波の密の部分、青色は疎の部分と考えられる。この結果の圧力にはすべての周波数が含まれていて、純音である一つの周波数の圧力波であれば、赤色と青色の縞が周波数と音速から得られる波長で等間隔に規則的に分布しているはずであるが、すべての周波数が含まれていることから、この図からは正確に音波の存在を知ることは難しい。つまり、低騒音化のための更なる分析を行うのであれば、周波数毎に圧力変動を抽出し、圧力波の波長を計測することで音波かどうかの判断が可能である。また、周波数毎の圧力変動を見ることが可能となれば、時間や空間ではなく、音波の可視化にとって最も都合の良い周波数とい

う指標で物理量が表現でき、周波数毎の音源探査や音波発生のメカニズムを解明することが可能になると考えられる。この分析手法は低騒音化を最終目標とする設計用途には都合の良い手法になるとと考えられる。

3. パンタグラフ周りの流体騒音 [3]

図2にPowerFLOWを用いて流体解析を行い、弊社流体音響分析ソフトウェアPowerACOUSTICSで分析した、新幹線パンタグラフ周りの流体騒音分析結果を示す。

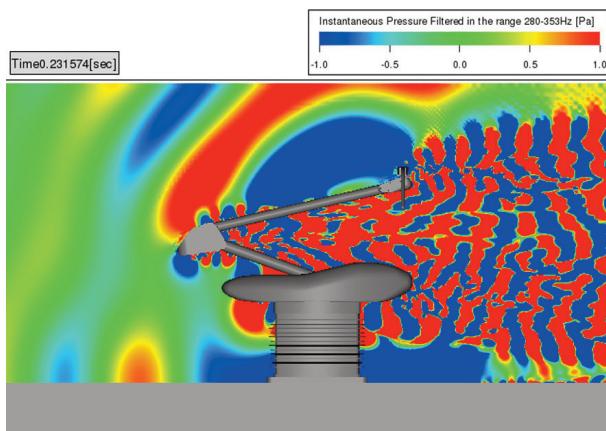


図2 パンタグラフ周りの周波数フィルタリング圧力変動

図中、左側から右側に流体が流れ、パンタグラフにより流体変動が生じている事を示している。ここでは、周波数300[Hz]前後で変動する圧力波だけを抽出し瞬時の状態を示した結果である。本図に示すように、赤色と青色で一波長分の疎密波がパンタグラフ周りに得られているが、本図内の圧力波は、皆、周波数は同一で波速が異なる圧力波が疎密波として可視化されていることになる。パンタグラフの周りには、短波長と長波長の二つの波に大別されていることも容易にわかる。長波長の波（図中中心から左上方向に伝播する縞）の波長を本図から計測すると、この圧力波が音波である事が判断できる。この音波は円弧状にパンタグラフから離れて行く様子から、音源位置はこの円弧の中心付近と考えられる。本図では、流体中の圧力変動のみを表示しているが、この音源が二重極音という仮定を設ければ、パンタグラフ表面の圧力変動を見ることで更なる音源位置の正確な位置同定が可能である。音源は周波数毎に異なることから、通常の流体解析結果にはすべての周波数が含まれるため圧力変動を表示してもそれを詳細分析して音源探査することは困難である。従って、圧力変動を周波数によってフィルタリングして音波を可視化する事は非常に重要と考えられる。

4. 車体周りの風切音評価

図3に車両サイドガラス周囲に発生する圧力変動分布を示す。

前述の二つの事例からもわかる通り、シミュレーション計算によって時刻歴圧力を得る事ができれば、評価目標の周波数で変動する圧力波だけをFFTを用いてフィルタリングして抽出し、空間位置・時間に依らずに圧力波である音波を取得し、音圧レベルや音波伝播の様子、音源探査などを評価することは容易と思われる。ただ、ここで問題となるのは、一般

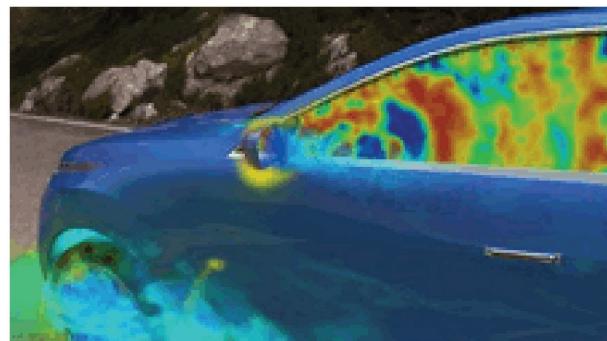


図3 車両サイドガラス表面の波数フィルタリング圧力変動

的に疑似音と呼ばれる流体の運動による圧力変動の寄与であり、この変動レベルは音波のそれと比べ非常に大きいため、特に物体近傍では、疑似音の影響で音波が埋もれてしまうことが多い。つまり疑似音が存在する領域では、多くの場合、疑似音が優位となるため音波だけを可視化する事は困難であった。

この問題を解決すべく、弊社では、ある二次元面内に分布する圧力波から、波数分析により音波だけを抽出する手法を開発した。ある一定範囲の周波数でフィルタリングを行えば、単位長さ当たりの波の数は、疑似音部分と音波部分では異なる。低速の現象であれば、通常、音波による波長の方が長いため、波数は少ないとなる。波の数によって更にフィルタリングを行えば、音波だけを取り出すことが可能である。この機能を用いれば、真の音源である音波発生点をピンポイントで見つけ出しが可能で、このときの流場を見ることで音波発生のメカニズムを解明することも可能であろう。図3は、そうした状況を示す図である。疑似音が本図に可視化されていれば、サイドガラスに分布している赤色と青色の縞の幅は短いが、波数分析による処理を行うと、本図のようにサイドガラス面に縞（波長）の長い圧力波、つまり音波が伝播していく様子を可視化できる。音波のみが可視化できれば、音波発生の位置を同定することは容易であり、音波発生のメカニズムも解明が可能である。更に、メカニズムが解明できれば、低騒音化の設計が可能であろうことは予想できる。

5. さいごに

紙面の都合のため、PowerFLOWが使用している技術や事例の詳細説明は割愛させて頂いた。弊社でも、PowerFLOWの流体騒音への適用は、ここ数年で飛躍的に増えていて市場の需要は多いことを感じる。ただ、予測や音源探査の精度が上がれば上がるほど低騒音化の要求レベルは高まるので、更なるシミュレーション解析手法や分析手法に於ける技術開発が必要である。今後も、更に利用しやすく、高精度なシミュレーション手法として対応を進めていきたい。

6. 参考文献

- [1] <http://www.exajapan.jp/>
- [2] F. Perot, S. Moreau S, M. Henner, D. Neal: "Direct aeroacoustics predictions of a low speed axial fan", 16th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 2010
- [3] B. Crouse, D. Freed, S. Sivapalan: "Fundamental

Aeroacoustic Capabilities of the Lattice-Boltzmann Method", 12th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, May 2006

[4] Y. Kikuchi, Y. Wakabayashi, F. Mizushima, T.



音響解析ソフトウェアActranのご紹介

平林 朋之

エムエスシーソフトウェア株式会社 ビジネスデベロップメント

1. はじめに

近年、製品の音性能の要求が高まっています。一昔前は、試作品のテストにて音の問題が発覚し、音を下げる（多くは異音）改善を試行錯誤的に実験にて対応していたと思います。製品開発における最後の問題児として扱われていたかと思います。

しかしながら、最近では、その製品らしい音とはなにかを製品企画段階に定義し、積極的な音造りをされている製造メーカー様がいらっしゃいます。開発初期段階から音の造り込みを想定した開発を行います。このような開発初期段階では、当然、どのような音がするのか見当もつかない反面、設計としては製品音を造るための仕様に自由度があると言えます。試作前にどのような音がするのか事前に予測を立て、その現象を理解し、事前に対策をうつ。このような開発フローではCAEが有効なツールとなります。

今回、弊社が開発・販売している音響解析ソフトウェアActran（以下、Actranと示す）を紹介させて頂きます。

2. 音響解析ソフトウェアActranの紹介

Actranは有限要素法をベースとした音響解析ソフトウェアです。従来、有限要素法では、内部音響と言われる閉じた空間が計算対象となっていましたが、Actranでは無限要素という放射空間の境界条件を定義することで、有限要素法でも外部放射音の解析ができます。これにより、境界要素法では困難であるモデル規模でも、現実的な時間で解くことが可能になっています。また、有限要素法をベースとしていることから、構造FEモデル、音響FEモデルを共通のモデルとして計算することができ、従来の構造FEモデルを用いた周波数応答解析を用いて、弱連成で放射音を解析することができます。また、Actranに構造モデルを取り込んで、音響一構造の強連成解析も可能です。強連成解析ではモデル規模が大きくならないように、構造モデルはモーダル座標、音響は物理座標というように、組合せたモデル条件での解析が可能です。（図1）



図1 弱連成と強連成

Kurita "Numerical Simulation of Aerodynamic Noise from High-Speed Pantographs Using Lattice Boltzmann Method", STECH2012

このような解析からどのような情報が得られるか、代表的なものを以下に示します。

- ・音圧スペクトル/音響放射パワー/消散パワー/透過損失/寄与率
- ・音圧分布/音響インテンシティ など

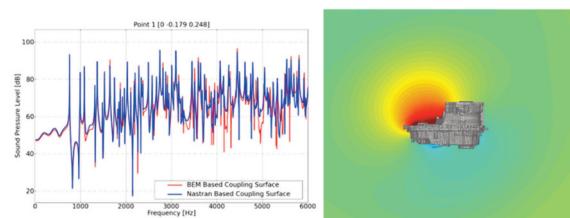


図2 解析結果例

図2に示したように評価点での音圧スペクトルはもちろん音圧分布や音響インテンシティの表示により、音がどのような部位から発生しているか、どのようなエネルギーの流れがあるかを視覚的に理解することができます。また、評価点の音圧に対して部位、要素、モードの寄与が高いを知ることができます。このような情報から音をどう改善し、その効果がどの程度のものなのかを予測します。

Actranのユニークな要素として、多孔質材モデルがあります。従来、吸音材を表現する場合、その配置面にAdmittanceというエネルギーを吸収する特性を定義していました。Actranでは従来のAdmittance定義のほか、Biotモデルと呼ばれる吸音材そのものの機械的性質及び音響的性質を定義するモデルを採用しており、吸音特性を再現します（図3）。形状や板厚違い毎に実験的に取得していた特性を定義するのではなく、吸音材そのものの特性を持ったFEモデルを作成します（図4）。もし、吸音材の形状・板厚を変えた時の効果は？という時は、吸音材のFEモデルの形状・板厚を変更します。また、事前に材料特性が同一のグループに分けたFEモデルを用意し、材料パラメータを空気・吸音材というよう

に入れ替えるだけで、共通のモデルで吸音材の適切な配置を検討することができます。Biotモデルのパラメータも日本国内での計測が可能ですので、比較的容易に吸音材のモデル化が可能です。

Source : Doutres, O., Dauchez, N., Génevaux, J.M., Dazel, O., "Validity of the limp model for porous materials: A criterion based on the Biot theory", in JASA 122, Oct 2007, pages 2038-2048

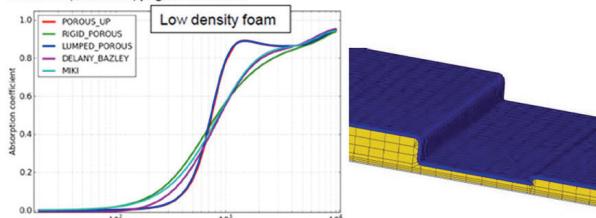


図3 吸音材特性

図4 積層モデル

Actranのもう一つの特徴として、流体騒音があります。流体騒音は媒体（通常、空気）が流れる中で、その空間から生み出される音が伝播して聞こえる音です。Actranでは、非定常流体解析結果を読み込み、Lighthill Analogyを適用した音源作成を行い、その音源の伝播を解くことで流体騒音を求めます。この時、空間上の音の伝搬だけでなく、構造振動との強連成解析を行うことで、流体音が構造を介して透過する現象を解くことができます。たとえば、自動車のドアミラー周りの流れによる音が窓ガラスを介して車室内に侵入する、掃除機の中の気流音がケースを介して外で聞こえてくるなど（図5）

この他、音響解析を短時間で解く機能や半自動で音響解析モデルを作成・実行・ポスト処理を行う機能など、音響解析を行う上で様々な要素・機能を用意しております。

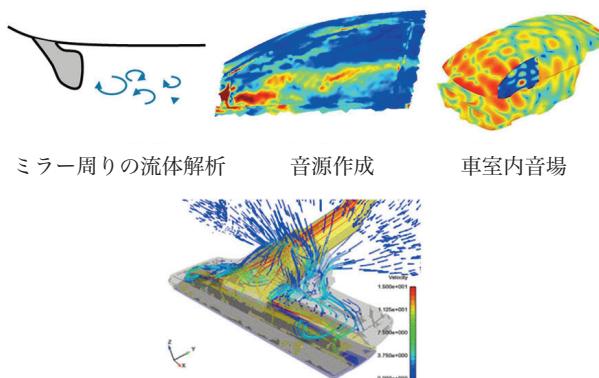


図5 流体騒音適用例 (Volkswagen 様、LG電気様)

3. 新しい音響解析の方向性

弊社では、現在の音響解析の精度向上、使い勝手向上、新たな機能の開発を進めております。その中で現在の音響解析の問題点を解決する取り組みをご紹介いたします。

流体騒音

先にも紹介いたしましたが、流体騒音を解く上で、非定常流体解析結果が必要となります。非定常流体解析は非常に多くのマシンリソース・計算時間が需要です。これは流体騒音

を求める上で必要な解析ですが、設計初期段階や複数の形状案がある場合など、早期に設計の方向性が決められないことになります。

ActranではSNGR (Stochastic Noise generation and radiation) という音源作成機能を開発しております。このSNGRでは、定常流解析結果を使用します。定常流解析は非定常流解析に比べ計算負荷は少ない解析です。非定常流解析結果を用いた音源作成に比べ、精度は若干下がる傾向はあるものの、流体解析の計算負荷の少ない本手法の適用により、早期の検討、方向性の決定に有用であると考えております。

高周波大規模対応

Actranでは、ジェットタービンの音響解析に特化したDGM (Discontinuous Galerkin Method) というソルバがあります。このソルバは高周波大規模モデルを少メモリで解くソルバです。このソルバを汎用的な外部放射音解析に適用できるように開発を進めています。通常の有限要素法音響解析では、計算対象とする最大周波数の波長の1/4～1/6の要素サイズが必要となりますが、DGMでは要素単位で16次までの高次近似をソルバが自動的に行います。例えば、従来の上限2kHzターゲットのモデルでもメッシュサイズを変更せずに10kHzの解析が可能になります。

要素数が増えないことにより、データの取り扱いは従来と変わらず、高周波数を対象とすることが可能です。

また、並列処理のスケーラビリティに優れていることもあり、数千コアのマシン環境で数百倍の計算時間の短時間にも成功しています。

音響解析に関連した複合領域解析

弊社では2006年より、複合領域解析をキーワードにお客様に複数の解析を連携した解析ソリューションをご紹介しております。音響解析についても同様、弊社、汎用構造解析ソフトウェアMSC Nastran、機構解析ソフトウェアAdams、非線形構造解析ソフトウェアMarcとの連携を可能にしています。お客様のノウハウを含んだ各ソルバでの解析結果から音響解析の実行をサポートしております。

また、MSC NastranではActranの一部の機能を導入し、MSC NastranでもActranと同様な高精度の音響解析が実施できます。

4. おわりに

もの作りにおける音響解析のニーズは非常に高く、普段、音の問題に困られている方は多々いらっしゃると思います。

音響解析により、定量的且つ視覚的に現象を理解することができます。音響解析を皆様の製品開発にご活用頂けるよう、弊社もActranの製品機能向上に努めてまいります。今回ご紹介した新しい手法も早期にご提供できるよう進めてまいります。

最後に、弊社の音響解析Actranをご紹介いただく機会を頂き、感謝しております。



LMS Virtual.Lab, LMS Imagine.Lab AMESim および LMS Test.Lab を用いた振動・騒音 ハイブリッドプロセスソリューション

浅野俊二
エルエムエスジャパン株式会社

1. ハイブリッドプロセスソリューション

メカトロニクス製品開発において、年々増大する開発要件を満たしつつ出来るだけ早い段階で振動・騒音に関する諸問題を予測し解決する製品開発力が求められています。即ち“機能・性能開発”フェーズが先行し、続いて“品質・信頼性開発”に進む従来からのアプローチでは、後者にあたる振動・騒音評価は必然的に開発の後半に追いやられ（前者から後者への時系列的な開発プロセスに起因）、抜本対策の欠如や開発のやり直し等、製品・開発コストの増大を招くリスクを常にはらんでいます。

LMSでは従来の振動・騒音開発におけるこれらのリスクを回避すべく、開発プロセスにおいて種々の理論解析と実験解析を融合し、パラレルに開発を進めるハイブリッドプロセスソリューションを提案しています。

振動・騒音評価では大きく分けて次の2つの特性同定がキーポイントとなります。一つは問題現象を引き起こす源となる加振力の同定、もう一つは加振力の影響を構造部内あるいは音場空間に伝達・伝播する伝達系（伝達関数）の同定となります（両者は互いに連成する場合もあります）。これらの特性において最適な理論解析と実験解析ツールの組み合わせにより、効率的・高精度で問題を予測し事前に対策するアプローチが、LMSが提唱するハイブリッドプロセスソリューションです。

2. 加振力の同定

高度に複雑化した昨今のメカトロニクス製品においては、その振動・騒音特性を励起する加振力は多岐に及びます。純粋なメカニカル現象に起因するものから、電磁界・流体・波動・熱等様々な現象が単独にあるいは連成して発動します。またこれらの加振力は、衝撃力であったり、周期的あるいは非定常等、様々な負荷特性を有します。一般的にこれら加振力の発生過程においては非線形性を無視出来ない場合が多く、線形をベースとしたソリューションアプローチではその同定予測に限界があります。

これら様々な加振力の同定手段として、LMSではLMS Virtual.Lab (以下 Virtual.Lab), LMS Imagine.Lab AMESim (以下 AMESim)、およびLMS Test.Lab (以下 Test.Lab) を用いたアプローチを提供しています。

Virtual.Labではメカニカルな加振力同定にフォーカスします。メカトロニクス製品の主要パーツは、メカニカルなコンポーネントとそれより構成されるいくつかのサブシステムであり、これらから発生する加振力も直接的・間接的にメカニカル現象に深く関連しており、これらの現象を的確に予測

することは振動・騒音問題の基本プロセスと考えられます。Virtual.Lab でのこの分野を担当するモジュールがVirtual.Lab Motion です。マルチボディダイナミクス (MBD) ソリューションツールを、剛体ベースを前提とする第一世代、各ボディの微小変形・弾性振動を有限要素法ベースを用いたスーパーエレメントとして考慮する第二世代と定義すれば、Virtual.Lab Motionは各ボディの大変形・塑性変形までを考慮する第三世代MBDツールとして位置づけることが出来ます。即ち、メカニカル現象における機構非線形性、形状非線形性、材料非線形性、及び接触非線形性全てをカバーできるツールであり、殆ど全てのメカニカル問題に対応出来るソリューションを提供します。

AMESimは集中定数系パラメータをベースとするシステムソリューションツールです。その最大の特徴はマルチフィジックス問題に柔軟に対応出来ることにあります。即ち様々な物理現象が連成して発動する昨今のメカトロニクス製品において、その振動・騒音モデル（特に加振力発生過程）を1つのシミュレーションモデルとして容易に表現出来ることです。

従来においてもこの種のツールによる製品開発への適用（歴史的にはむしろ有限要素法やマルチボディシミュレーションが出現する以前から存在）は試みられてきましたが、実際の製品を高精度で忠実に表現するプラントモデルの作成には豊富な経験と専門性、および（従来のツールでは）多大な労力が要求され、実際の製品開発に適用するには大きな障害となっていました。AMESimではこれらの障害をクリアすべく、様々な実機プラント（油圧系、メカニカル系、燃焼系、流体系、電気・電子系、化学系等）に対応する数千にも及ぶプラントモデルデータベースが提供され、これらを組み合わせることにより、容易に意図するサブプラント・システムプラントを高精度で構築することが出来ます。

更にこのツールは前述のVirtual.Lab Motionと容易にインテグレーションが可能です。Virtual.Lab Motionは言い換えれば3D（ジオメトリ&メッシュ）ベースのメカニカルシステムシミュレーションであり、1D（パラメータ）ベースのマルチフィジックスシステムシミュレーションであるAMESimと統合することでメカトロニクス製品において相互に関連し、発生する様々な物理現象に起因する加振力を高精度で表現することが出来ます。

更にこの統合（Co-Sim）モデルにおいて、Virtual.Lab Motionをマスターとしてすることでモデルの振動・騒音評価の効率性は格段に向上します。振動・騒音の最終評価は3Dベースが必須条件ですが（理由は後述する伝達系モデルが1D

ベースでは振動・騒音問題に対して十分に対応出来ないことに起因します)、Virtual.Lab Motion (3D) を加振系マスターとすることは同時に後述する3D構造系の伝達系モデルをも包含することを意味します。即ちVirtual.Lab Motionが構造系に関する加振力と伝達系を統合した振動・騒音問題に関する最終評価モデルとなることです。

一方物理プロトタイプや量産品プロダクトが既に存在する場合には、実験解析を用いて加振力・音源を同定するアプローチも有効となります。このアプローチの最大のメリットは同定精度の信頼性です。LMSでは高精度なTPA(伝達経路解析)、ASQ(音源同定解析)の実現を、解析ツールTest.Labを通してその豊富な経験と解析ノウハウと共に提供しています。

3. 伝達系(伝達関数)の同定

一般的な振動・騒音問題では、伝達系は(前述の加振系同定プロセスとは異なり)線形モデルを前提として対応できるケースが多くあります(むしろほとんどがこの例に相当します)。LMSではこの前提に基づいて実験解析と理論解析を融合して高精度な構造系伝達モデルの同定アプローチを提供します。

このプロセスで用いられる解析ツールは実験解析のTest.Lab EMA(Experimental Modal Analysis)モジュールと理論解析を担当するVirtual.Lab Correlation & Updatingモジュールです。ここでの全体のプロセスフローは次のようにあります。

- 1) コンポーネントレベルでの実験モデルとシミュレーションモデルの相関解析&モデルアップデーティング
- 2) システムレベルでの相関解析&モデルアップデーティング

システムレベルでの同定プロセスでは後述するシステムシンセシスのアプローチが同時に用いられます。

コンポーネントレベルでは有限要素で記述された固有値解析モデルを対応する実機モデルのEMA結果と比較(固有モードの相関性指標となるMAC(Modal Assurance Criteria)と固有周波数の乖離値)し、多目的最適化手法を用いて有限要素モデルを逐次アップデートするAutomatic Iteration手法が採用されます。

このプロセスでは実験モデルがリファレンスとして最適化的ターゲットとして採用されます。Virtual.Lab Correlationモジュールでは、実験解析のエキスペートでなくとも高精度で信頼性の高いEMAが実現出来るよう有限要素モデルを用いて最適なワイヤフレームの作成や加振ポジション・方向の同定が可能です(Pre Test機能)。またEMAの実施においてはLMSの豊富な経験とノウハウが織り込まれた固有モードのカーブフィッティング機能(PolyMaxモジュール)もTest.Labを通して提供されます。

システムレベルの構築では2つの要因が重要なポイントとなります。コンポーネントシミュレーションモデルの縮退アプローチとシステム構築における各インターフェースポイント(自由度)に関する局所剛性モード(Residual Modes)の

考慮です。

前フェーズで同定された各コンポーネントの内部自由度(インターフェース自由度以外)はモーダル縮退され、インターフェース自由度とその結合自由度(締結ボルト、リベット等)のみが残されます。この際インターフェース自由度に関する局所的剛性モードを無視すると、システムモデルの伝達特性同定精度を著しく低下させる要因となります。

LMSではこの影響を高精度で考慮する手法が理論解析(Virtual.Lab)および実験解析ツール(Test.Lab)の両者から提供されます。通常コンポーネントレベルでは対象パーツは不拘束条件(Free-Free condition)で計算または実験計測されますが、このモデルからインターフェースポイントの局所剛性を考慮・同定するアプローチとして、Virtual.LabではCraig-Bampton法あるいはMacNeal-Rubin(RESVEC)法が、Test.LabではDriving Point Dynamic StiffnessによるResidual Modeの同定法が提供されます。これらの手法を用いることでシステムレベルにおけるインターフェース結合剛性(ボルト、リベット等)同定に的を絞った(これらを設計変数とする)最適化によるモデルアップデーティングが低コスト・高精度で実現されます。

4. システムシンセシス

システムシンセシスにおいては各コンポーネント間でのシミュレーションあるいはEMAモデルの違いはありません。両者はそれぞれ一つの物理モデルとしてVirtual.Lab System-Level NVHモジュールを用いてSystem synthesisが実行されます。これらのシステム応答はモーダルベースのみならずFRF(周波数応答関数)ベースにおいても全く同様なプロセスで実現することができます。

更にここで同定された伝達系システムモデル(有限要素振動モデル)はスーパー元素(Craig-Bampton, MacNeal-Rubin)を介して、あるいは非縮退モデルとしてそのまま前述したVirtual.Lab Motionに渡すことが可能です。即ち高精度で信頼性の高い加振系・伝達系統合振動評価モデルがVirtual.Lab Motionで実現されることとなります。そしてこれから得られたシステムの構造振動条件は、そのままVirtual.Lab Acousticsに渡され直ちに騒音評価が行われます。

以上、これまでに紹介したLMSが提供する理論・実験解析統合環境とこれらを用いたアプローチは、メカトロニクス製品開発における振動・騒音評価プロセスのクローズドループソリューションとして有効に活用することが期待されます。



弊社での音響解析例

榎本 貴之
サイバネットシステム株式会社 メカニカルCAE事業部

1.はじめに

目を閉じて耳を澄ます。すると、実に様々な音が聞こえてくる。心地よい音も多いが、そうではない音もある。心地よい音は気分をリラックスさせてくれるが、そうではない音からは不愉快な感情だけではなく、身の危険すら感じることもある。今の世の中、様々な機械に囲まれて生活をしているのだが、残念なことに、機械から発せられる多くの音には、一部の趣向家以外の人間にとっては、不快な音が多い。例えば本稿は、10月のある夜、都内某所で執筆している。少し肌寒くなってきたが、衣替えでおろしたばかりの上着を羽織りながら、外気を室内に取り入れつつ作業をしていると、虫の音が心地よい。一方で、すぐ戸外の駐車場に設置された飲料用自動販売機からは、不快な音が絶え間なく放射されていることにも気付いてしまう。この先、執筆作業の進展が滞ると、きっとこの音が気になってしまい、残念ながら窓を閉めることになるのだろう。

自動販売機からの放射音は恐らく圧縮機の運転音であろうが、近年は、圧縮機に限らず様々な機械に対して騒音対策が施されるようになってきた。製品の性能が充分に高まってきた昨今、静肃性が製品の競争力を高める重要な因子の一つとして認識されるようになったためであろう。しかしながら騒音対策は、機能や性能、意匠性の観点からの設計が終了したのちに検討されることが多く、対策の自由度が少ない。このような状況を回避するためには、設計の上流工程で騒音を予測し、対策を提案することが重要である。その目的を達成するための、音響数値解析の活用例が増えてきている。

弊社では、予測精度の高い手法である有限要素法（FEM）や境界要素法（BEM）を通して、音響解析関連のサービスを実施している。本稿では、これら手法の特徴を示し、弊社のサービスの一端を紹介させていただく。

2.音響解析手法の分類

人間の耳は大変に感度が良く、20 Hzから20 kHzの範囲を聞けるといわれる。1000倍の波長を、聞き出せるのである。構造解析でいえば、1 mの梁から1 kmの梁までを解析する必要があるのである。このような広範囲の周波数帯域を取り扱い、効果的な解析を実施するためには、適材適所で手法を使い分ける必要がある。解析手法は大別すると“音の波動

性を考慮したアプローチ”と“音をエネルギーの流れとして取り扱うアプローチ”がある。これらの使い分けは、解析対象となる音場に存在する“構造物のサイズ”と“音波の波長”的関係で判断する。

波長と比較して構造物のサイズが充分に大きい時、音はエネルギーの流れとして取り扱える。この場合、後述の波動性を考慮した手法よりも、少ないコストで解析できる。しかし波としての記述をしないため、干渉や回折などの現象は表現しにくい。

一方、構造物のサイズが波長と比して充分に大きくない場合は、音の波動性を考慮した解析を実施する必要がある。このアプローチでは波動方程式やヘルムホルツ方程式が、差分法やFEM, BEMなどの手法を用いて近似的に解かれる。中でも、モデル化の自由度の高さや実績などの観点から、FEMとBEMの適用例が多い。

3. FEMとBEMの選択について

FEMを用いる際は、解析対象空間を有限サイズの要素に離散化したメッシュと呼ぶデータを用意する必要がある。またBEMを用いる際には、解析対象空間の境界面を離散化したメッシュが必要となる。図1に、同じ空間（二次元解析の例）を解析するために必要な、FEM用メッシュとBEM用メッシュを示す。

	内部空間	外部空間
FEM		
BEM		

図1 FEMとBEMで必要なメッシュの比較

FEMでの離散化対象は解析対象空間自体であり、BEMは対象空間の境界である。そのため、解析対象空間が3次元で複雑な形状になると、FEMのメッシュ作成コストは増大する。

解析の精度を保つためには、対象周波数における波長に対して1/6倍サイズの要素を使用する必要があると一般的に言われる。このことを考慮すると、対象空間の長さや周波数が2倍になると、FEMでは8倍、BEMでは4倍に自由度数が増加する。このようにFEMでモデル化した場合の自由度数は、BEMでモデル化した場合よりも多い一方、同じ自由度数で計算コストを比較するとFEMが圧倒的に少ない。これら要因のため、FEMとBEMの最終的な計算コストはモデルに依存して変化する。

機能面での差もある。FEMでは対象空間内の音響媒質が分布している場合（温度分布などにより音速や密度が分布している場合）のモデル化は大変に有利である。BEMでは対象空間を複数個のBEMモデルに分割して表現する手段（領域分割法）を用いるため、分布を表現する自由度は限られる。更に、音場解析では周波数応答解析を用いることが多いが、調和状態ではない音場を評価する場合には、FEMを用いれば過渡応答解析を実施することもできる。BEMでの過渡応答解析も理論的には実施可能だが、誤差を生じやすい解析となるため実施例は少ない。逆に外部空間を解析する際には、境界のみを離散化するBEMを用いた方が、モデル化は容易である。また外部空間の解析にFEMを用いるための機能も開発され、この適用例も増えている。

更に近年は、高速多重極アルゴリズムを3次元BEMに適用した解析手法が開発され（FMBEM）、適用例が増加している。FMBEMでは必要メモリ量や解析時間が、ほぼ線形増加にまで抑えられる。そのため、波動性を考慮したアプローチでは解析不可能だった音場が、FMBEMを用いることで初めて解析されるようになり、新たな知見が見出され始めてきた。

以上のようにFEMとBEMでは多くの長所短所があるため、限られたコストの中で最大の恩恵を得るために、メッシュデータの作成コスト、解析に要するコスト、モデル化機能を充分に検討し、適切な手法を選ぶ必要がある。以降では、FEMやBEMを用いて実施した、弊社のサービスの一例を紹介する。

4. 弊社での音響解析実施例

弊社では、FEMとBEMを用いて音響解析のサービスを実施している。FEMを用いる場合は、米国のANSYS Inc.社が開発した汎用有限要素法解析プログラムANSYSを用い、境界要素法を用いる場合は、弊社が開発した境界要素法プログラムWAONを用いる。ANSYSもWAONもANSYS Workbenchという統合された操作環境内で作業を実施することができるため、操作面からは同一プログラムとして考えることができる。

4.1. モーターからの放射音

モーターからの放射音は、①磁場により励起された吸引力が②構造物の振動を励起し③構造表面より放射音が発生する現象である。この現象をCAEで表現するためには、電磁場解析、構造解析、音響解析と、本来であれば3つの解析プログラムを連携して使用する必要がある。CAEの統合環境であるANSYS Workbenchを用いれば、これらを同一環境下で実施することができる。

図2は、電流波形を入力として電磁場解析を実施し電磁力を得て、これを加振源とした構造解析を実施し表面変位を得て、FEMやBEMで音場解析を実施した例を示す。

4.2. 構造-音響連成解析

音場解析のニーズには、“構造から音場への影響”と“音場から構造への影響”を同時に考慮して解析しなければならない場合も存在する。例えば透過音や、スピーカーの振動板に代表される柔らかな構造物を取り扱う場合である。この場合もANSYS Workbenchの統合環境下で作業を完結することができる。

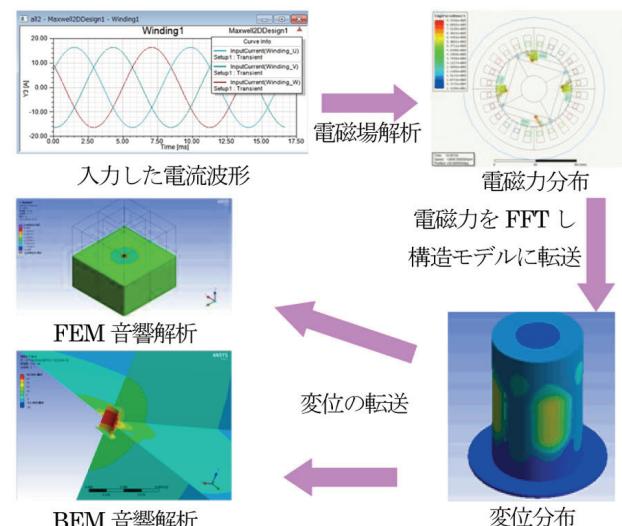
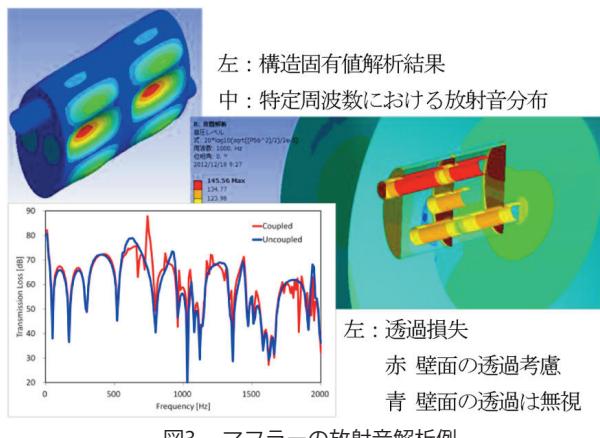


図2 モーターからの放射音解析例

以下は、マフラーの音響特性を評価した例である。上流側の管から入力された音波は、幾つかの膨張室を経由して外部空間に放射される。その過程で音波は構造壁を内面から加振して、壁面の振動を励起する。励起された振動は、透過音として外部音場に放射される。



4.3. 大規模解析の例

FMBEMを用いると、数十万?数百万要素のBEMモデルを解析することができる。図4は、頭部伝達関数（HRTF）を可聴域全体で得るために用いた境界要素メッシュである。20 kHzまでを解析対象としたので、要素サイズは約2mmと設定した。その結果、自由度数は36万強となった。このモデルを従来のBEMで解析すると1TBを超えるメモリ量が必要だが、FMBEMを用いることで13GBで解析ができ、各周波数の平均解析時間は約20分で解析できた。

4.4. その他の解析例

他には、コンサートホールなどの大空間や車室内空間、圧

電体からの超音波放射指向性解析や流体音などの解析例があり、適用範囲は、弊社内だけでも増え拡大している。

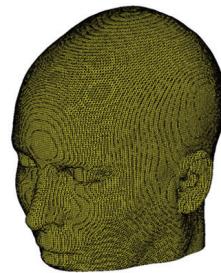


図4 HRTF計算で使用したメッシュ

5. 立ち上げ支援について

CAEツールの操作が簡便になるにつれ、今や解析専任者以外のエンジニアもCAEを活用し、現象把握や設計の効果確認作業を行っている。しかしこれは、かつて専門家が担っていた数値解析に関する専門的な知識や技量が不要になったことは意味しない。むしろCAEが広く浸透するにつれ、忘れられがちになるという観点から、その伝達の重要度は増しているといえる。

弊社では、お客様へのヒアリングを通して、適切な解析手法を提案し、ご要望があれば解析例を作成してCAEツールを納品している。更には期間毎に目標を定めて解析技術を伝達し、CAEを活用するに当たり有用と考える数学的な知識の講義を実施する等、CAEを導入していただくお客様側での早期立ち上げのためのあらゆる手段を、音響解析の範疇にとらわれず実施している。必要があれば、お問い合わせいただきたい。

さて、夜も更けて、だいぶ肌寒くなってきたので、今晚は窓を閉めて（虫の音は聞こえないが）PCを閉じることとする。



全周波数帯域向け統合振動音響解析ソフトウェアVA One

新関 浩
日本イーエスアイ株式会社 技術本部

1. はじめに

VA Oneは、「Vibro-Acoustic in One tool」から名前がつけられており、低周波から高周波までひとつのソフトウェアで解析することが可能な唯一のソフトウェアである。

搭載している解析手法は、低周波向けとして構造FEM（有限要素法）、音響FEM、BEM（境界要素法）、高周波向けとしてSEA（統計的エネルギー解析法）、さらにVA One独自の手法である中周波向けのFE-SEAハイブリッド法が搭載されている。

さらに、従来のBEMソルバーに加えて、数百万節点の大規模モデルでも標準的なPC上で計算ができる高速多重極法BEM（FMM BEM）ソルバーや、FEMによる吸遮音材モデル

化機能（Poro-Elastic Material; PEM）が実装されている。

2. VA One最近のアップデート

オプションモジュールとして、設計最適化モジュールが実装された。このモジュールにより、外部最適化ソフトを必要とせず、VA One上の簡単な操作で最適化問題を解くことが可能になった。具体的な対象例としては、SEAモデルにおける防音材の質量や室内騒音レベルの最適化が挙げられる。

BEMなどの低周波向けモジュールでは、積分点数を周波数とメッシュサイズから自動的に調整する機能（Adaptive機能）を実装し、標準BEMソルバーの計算速度が大幅に改善された。

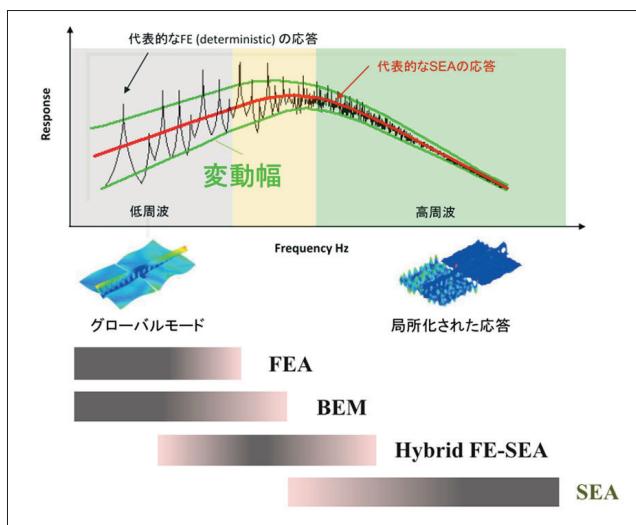


図1 VA Oneの解析手法と適用周波数帯

さらに、標準BEMソルバーを並列化するためのGrid BEM Solverモジュールが追加された。これにより、例えば、BEM計算を周波数毎に並列計算させることで、並列数にほぼ線形比例した計算速度を得ることが可能となる（例：8並列→1/8の計算時間）。

BEMモジュールに含まれる大規模BEMモデル用ソルバーの高速多重極法（FMM）BEMソルバーも改良されており、収束性（計算時間）が大幅に向上した。

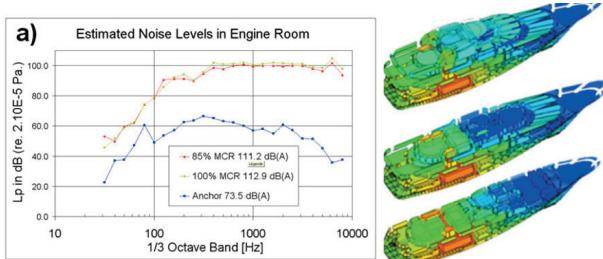


図2 左) エンジンルーム内の騒音レベルカーブプロット、右) デッキごとのパネル速度コンタープロット

3. SEA手法を用いた船舶の振動音響解析

船内で長時間を過ごす船員にとって居住区の環境は、健康確保および忌避要因に大きな影響を与える。したがって、船内の騒音レベルは、騒音規制値によって厳しく規定されているが、2014年7月1日以降の建造船に対しては、より強化された騒音規制値の遵守が義務付けられるようになる。

船体のような大きく複雑な構造を比較的簡単な板要素、梁要素および空間でモデル化できるSEAを用いた解析手法は、個体伝播音の解析と評価に非常に有効な手段とされている。SEAでは、隣接する要素間の振動エネルギー流れからパワー平衡方程式を作成し、連立方程式を解くことによって各要素の振動エネルギーを求めることができる。これにより、振動エネルギーの伝達経路を明らかにするとともに、対策による

効果を設計にフィードバックしやすい形で得ることが可能である。

また、VA Oneのモデル作成機能として、2次元図面を基に3次元SEAモデルの作成を支援するツールが存在する。このツールを有効に活用することにより、3次元のCADデータが存在しないようなケースにおいても、実際の構造を再現したSEA解析モデルを作成することができる。

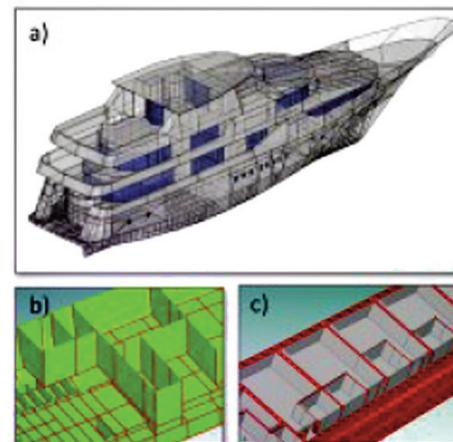


図3 a) 2次元図面から自動生成されたSEAモデル, b) パネル（緑）間に自動生成されたラインジャンクション（赤）、c) パネル間に自動生成されたエリアジャンクション（赤）と音響キャビティ（グレー）

4. FE-SEA Hybrid手法を用いた列車内の構造伝播騒音解析

最新の鉄道車内における振動および騒音を低減して高いレベルの乗員快適性を保証するには、まず振動エネルギーの伝達経路を明らかにしなければならない。

従来、鉄道構造における振動および騒音の伝達経路シミュレーションには、FEMやSEAが用いられてきた。しかし、FEの解析手法では、大規模構造の中高周波数応答に対して、システムレベルのモデル作成が困難であるという問題がしばしば発生する。一方、SEAは計算効率が高く高周波数応答に対するシステムレベルのモデル作成に適しているが、複雑な接合部やサブシステムの詳細なモデルを作成するには向いていない場合がある。

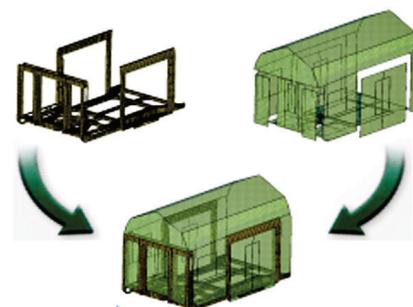


図4 2階建て車両端部のFEおよびSEAのコンポーネント

鉄道車両は、面積の大きな床や壁などのパネル部分とそれらを支えるフレームとその結合部分からなる。このような複雑な構造を正確に表現し広い周波数帯に渡って予測可能な解析モデルを構築するため、Bombardier社ではVA OneのFE-SEA Hybrid計算手法を選択した。

これにより、広い周波数範囲を網羅した予測精度の向上と計算時間の短縮を両立する解析モデルの作成を実現することができた。この検討では、浮床設計の振動伝達特性を支配する物理的なパラメータの特定に成功し、さまざまな振動絶縁設計を評価するという実績が得られた。

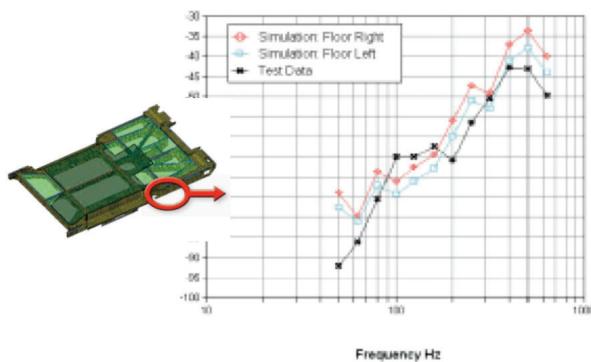


図5 車内床の振動レベル：実験と解析の比較

5. 自動車室内のBSR異音解析

近年、販売台数が増加しているEVやHVなどの車両では、車室内の騒音が比較的小さいため、Buzz（ブーン）、Squeak（キーキー）およびRattle（ガタガタ）などの異音が目立つようになってきている。特に、コックピットやドアトリムの場合には重要な問題とされており、設計初期段階において異音の発生リスクを予測する手法の開発は、品質の向上と対策コストの削減に大きく貢献するといわれてきた。

部品における打音は、まず路面入力によってトリム部品が振動し、次に振動した部品同士が衝突することによって発生する。特徴的とされているのが、路面入力による部品振動が低周波である一方、発生現象は数kHzまでの高周波である点である。

日産自動車は、周波数の異なるこの現象を的確にとらえるため、部品の振動予測にFEの解析手法を、打音の予測にSEAの解析手法を適用した。

コックピットモジュールを対象に行われた検証では、実験で打音が検出された2つの箇所が、解析でも同じように検出

されている。また、コックピットモジュールから1m離れた場所で計測した打音の周波数特性も、実験と解析で良い整合性が確認できたと報告されている。

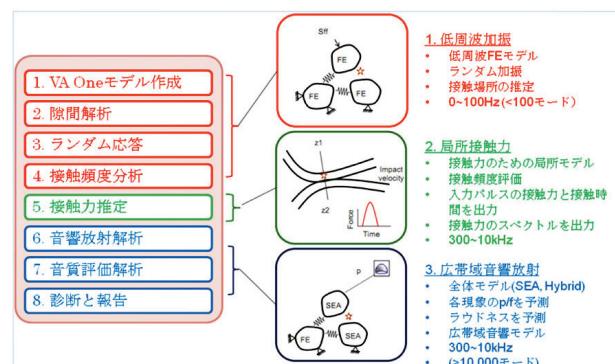


図6 異音解析の流れ

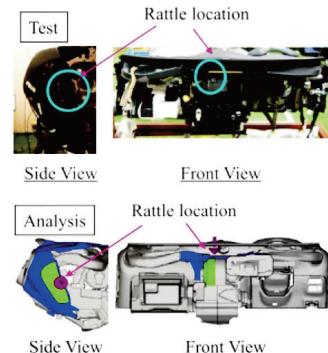


図7 打音の発生位置：実験と解析の比較

参考文献

- 1) 財団法人日本船舶技術研究協会, 一般財団法人日本海事協会: 船舶居住区の騒音低減に関する実証研究報告 2012年2月
- 2) 平川真一: 船舶の騒音、放射音予測システム, テクニカルレビュー No.2 2008年7月
- 3) D. Blanchet, A. Caillet : Predicting underwater sound radiation and directivity pattern of vibrating structures in deep and shallow water
- 4) U. Orrenius, V. Cotoni, A. Wareing : ANALYSIS OF SOUND TRANSMISSION THROUGH PERIODIC STRUCTURES TYPICAL FOR RAILWAY CARBODIES AND AIRCRAFT FUSELAGES, NOVEM 2009
- 5) 塩川直樹, 島田博, アルノ・シャルパンティエ, 藤原仁, 佐藤貴一, 川端一充 : 車室内の打音予測技術の開発, 2013年自動車技術会春季学術講演会



部門からのお知らせ



テキサス大学オースティン校計算工学・科学研究所所長J. Tinsley Oden教授「固体力学・流体力学分野での計算力学の創設と発展に貢献」の業績により2013年度本田賞受賞!!

吉村 忍
東京大学

この秋、世界の計算力学界にとって大変大きな喜ばしい出来事があった。それは、米国テキサス大学オースティン校計算工学・科学研究所 (Institute for Computational Engineering and Sciences (ICES) at The University of Texas at Austin) 所長であるジョン・ティンズリー・オーデン教授 (Prof. J. Tinsley Oden) の2013年度本田賞受賞である。2013年11月18日(月) 15:30より、帝国ホテル東京「孔雀の間」において、在外公館経済科学担当者、政策担当者、学識者、報道関係者など230名を招き、2013年度(第34回)の本田賞の授賞式が厳かな雰囲気の中で開催された。また、翌19日には、オーデン教授とバーバラ夫人を囲み、日本の旧友や計算力学の研究者・技術者による、「ジョン・ティンズリー・オーデン博士の本田賞を祝う会」が、シェラトン都ホテル東京の醍醐西において開催された。私は妻とともにこの2つの会に参加することができた。本稿では、その様子を報告し、計算力学部門の皆様とともに、計算力学分野における歴史的な喜びを共有したい。

11月19日の本田賞授賞式には、オーデン教授とバーバラ夫人が出席され、計算力学関係としては、矢川元基国際計算力学会長(東京大学名誉教授)ご夫妻、菊池昇ミシガン大学教授、川井忠彦東京大学名誉教授ご夫妻、川原睦人中央大学名誉教授、増田陳紀東京都市大学教授ご夫妻、樺山和男中央大学教授(日本計算工学会会長)と筆者と妻が参加した。

本田財団の石田寛人理事長からのご挨拶、内田裕久選考副委員長からの選考経過報告に続いて、石田理事長と中島邦夫副理事長から賞状とメダルがオーデン教授に手渡された。

(写真1、2)その後、カート・トン駐日米国臨時代理大使、矢川元基IACM会長、池史彦本田技研工業(株)代表取締役会長よりご祝辞があり、その後、オーデン教授より、「The Third Pillar : The Computational Revolution of Science and Engineering (第3の科学～計算力学がもたらす科学技術革新～)」と題する記念講演が行われた。

(写真3)この記念講演では、古代から現代にいたる科学の大きな歩みについて触れられた後、計算力学の第3の科学としての位置づけを述べられ、その後ご自身の研究の歩みに関連付けながら、モデリングとアルゴリズムの重要性、誤差評価・アダプティブ解析に言及された後に、ものづくりや防災、医療分野の解析等の最新の研究成果について述べられた。最後に、同僚、ご家族、計算力学コミュニティー、本田

財団関係者への謝意を述べられて、講演を締めくくられた。この講演内容は、本田財団のHP (<http://www.hondafoundation.jp/project/hondaprize/report.html>)において見られるようになるということなので、是非ご覧いただきたい。また、記念講演の後、記念レセプションが和やかに行われた。(写真4)

本田賞は、本田財団(設立者: 本田 宗一郎・弁二郎兄弟、理事長: 石田 寛人)が1980年に設立した科学技術分野における日本初の国際褒賞である。本田財団は、利益と効率の追求でない、自然や社会環境と調和する科学技術「エコテクノロジー」という概念をはじめて提唱し世界に訴えるべく努力しており、エコテクノロジーの観点から、世界中の人々の生活に貢献する優れた業績を上げた科学技術者を毎年1件選び顕彰している。このため、本田賞は「技術分野のノーベル賞」とも言われている。本田賞の特徴は、いわゆる新発見や新発明といった狭義の意味での科学的、技術的成果にとどまらず、エコテクノロジーに関わる新たな可能性を見出し、応用し、共用していくまでの全過程を視野に、そこに関わる広範な学術分野を対象としているところにある。本年度は世界の45か国、450件の候補者がノミネートされ、その中からオーデン教授が選ばれた。

オーデン教授は、数学・コンピューター科学・物理学・応用数学を統合し、科学技術分野での諸問題を解明する「計算力学」を確立した草分けであり、連続体の非線形現象のコンピューター解析手法および広範かつ強力な数学的計算手法である「有限要素法」のエキスパートとしても知られている。さらに、コンピュータシミュレーションにおける誤差の数学的評価と体系的管理手法を確立した。また、オーデン教授の活動は、世界30ヶ国以上の計算力学研究組織を束ねる国際計算力学連合(IACM)の創設につながり、計算力学の世界的な発展にも寄与した。ものづくりから医療に至るまで、コンピュータシミュレーションによって高効率な開発、精度の予測が可能となり、多くの生活者に計算力学の恩恵が広がっている。人間の幸福のために成し遂げることができたこれらの功績は、まさに本田賞の理念に合致すると評価された。

ここで、オーデン教授の受賞のことばの一部を以下に引用したい。

「……学際的な環境で研究に打ち込むうち、私は自分が科学技術史的一大転機に立ち会っているのではないかと感じる

ようになりました。当時デジタルコンピュータの登場で組めるようになった、桁違いに強力で新しいアルゴリズムが、科学的発見や工学解析・設計の風景を永遠に変えてしましました。それはいわば、空前の規模で起こった歴史的特異点でした。私は当初、この新たな学際的分野を「計算力学」と名付けましたが、その後瞬く間に科学や工学の全領域に広がっていきました。そのため、現在は、もっと広義の「計算工学・科学」という呼称が定着しています。

計算工学・科学の誕生は科学研究の既存の枠組みを大きく押し広げ、未知の展望を切り開いたという意味で、人類史上最も重要な科学的発見と言えるのではないかと思います。

……中略……

この重要な学問の発展は、科学や現代工学の多くの分野に影響を与えたが、その先駆を担えたことは実に幸運でした。……」

さらに、翌19日には、オーデン教授とバーバラ夫人を囲み、日本の旧友、オーデン研究室への留学経験者、計算力学の研究者・技術者による、「ジョン・ティンズリー・オーデン博士の本田賞を祝う会」が、70名弱（奥様方15名）の参加を得て、シェラトン都ホテル東京の醍醐西において開催された。この祝賀会は、矢川元基教授と菊池昇教授が発起人となり、樋山和男日本計算工学会会長、山本誠日本機械学会計算力学部門長（東京理科大学教授）と私（日本計算力学会長）の3名が事務局を務め、準備が進められたものである。この祝賀会には、川井忠彦東大名誉教授ご夫妻、山田嘉昭東大名誉教授、川原睦人中央大学名誉教授、松澤聰本田財団専務理事、菊地文雄一橋大学教授、西脇慎二京都大学教授（JACM副会長）、岡田裕東京理科大教授、樋山和男教授ご夫妻、山本誠教授ご夫妻、越塚誠一東京大学教授ご夫妻、山村和人日本計算工学会副会長（新日鉄）、永井亨氏（エムエスシーソフトウェア）、平野徹氏（ダイキン工業）、石井恵三くいんと社長、小林卓哉メカニカルデザイン社長、秋葉博アライドエンジニアリング社長、綾目正明アルテアエンジニアリング社長、和久井伸栄ニュートンワークス社長ら68名が参加された。紙面の都合上、参加者全員のお名前を挙げられないことを何卒ご容赦いただきたい。また、この他、海外出張や講義などの理由により残念ながらご参加いただけなかった方々が100名以上おられることも記しておきたい。

オーデン教授の本田賞受賞のお祝いという、計算力学界全体にとってもたいへん喜ばしいイベントということで、大変和やかな中、参加者一人一人が晴れやかな気持ちで3時間の祝賀会を楽しんだ。はじめの1時間ほどは、立食形式で軽く飲みながら、参加者が次々とオーデン教授ご夫妻を囲みお祝いを述べたり、最近なかなかお会いする機会のなかった、計算力学の歴史を作ってきたシニアな先生方と現役・若手の方々があちこちに小さな輪を作り、そこに奥様方も加わり会話を楽しんだ。（写真5、6）その後、大きな丸テーブルに着席した。

後半部では、矢川教授が20代最後にアラバマ大学ハンツビル校のオーデン教授の元に留学された頃の思い出話も交えた開会挨拶（写真7）に引き続いて、松澤理事のご挨拶、菊池昇教授によるご挨拶・乾杯の後に、菊池教授指定によるフルコースの食事と会話を楽しんだ。その後、川井教授（写真8）、山田教授（写真9）、川原教授からそれぞれご挨拶をいただいた。続いて菊池教授より、パワーポイントを使って、オーデン先生の業績紹介をしていただいたが、その中で、オーデン教授、バーバラ夫人はもとより、今回ご出席いただいたシニアな先生方の若いころの写真がいくつも飛び出し、計算力学の歴史を実感するとともに、計算力学黎明期の研究者たちの熱気が伝わってきた。（写真10）その後、菊池教授より、オーデン教授ご夫妻に、記念品として、柿右衛門のペアのマグカップと花束の贈呈が行われ（写真11、12）、最後に全体の集合写真（写真13）をとって、散会となつた。

オーデン教授は、76歳になられるいまも現役で活躍されており、大学での講義があるため、翌20日に、「人生の中で最高の時間を過ごすことができた」との言葉を残され、帰国された。

この2日間、妻と参加させていただいたが、オーデン教授の本田賞受賞は、同じ分野で研究する者として大変大きな喜びであった。また、本田財団より説明のあった受賞理由、松澤理事からの祝賀会でのご挨拶等を通して、改めてオーデン教授のご業績と、多くの諸先輩方が育てられてきた計算力学分野の学術的意義、社会的意義が、参加者のみならず、社会に伝えることができたと改めて認識している。

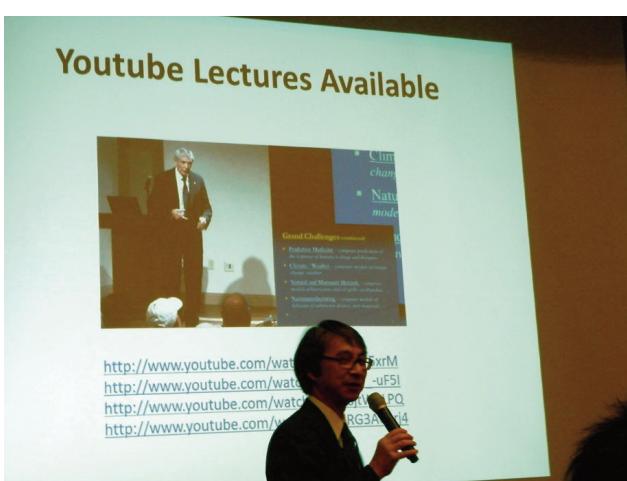
最後に、オーデン教授の受賞報告記事は、テキサス大学オースチン校ICES研究所のHP

（<https://www.ices.utexas.edu/about/news/262/>）にも掲載されているので、そちらも是非ご覧いただきたい。



写真1：賞状とメダルを受け取られたオーデン教授・バーバラ夫人
と本田財団の石田理事長、中島副理事長







2014年度年次大会の部門企画について

高橋直也
東京電機大学 工学部 機械工学科 機械工学コース

2014年9月7日（日）を市民開放行事にあて、9月10日（水）まで、東京電機大学 千住キャンパス（120-8551 東京都足立区千住旭町5）において、2014年度年次大会が開催される予定です。2014年度の大会では、「持続可能な日本の技術を支える産官学の連携」—今、求められている、産学人材交流と人材育成とは？—をキャッチフレーズとし、「次世代モビリティ」、「グローバリゼーション」、「減災・災害防止」の3つをテーマとして企画を進めています。この現行の執筆時（2013年10月）において、計算力学部門では、以下のオーガナイズドセッションを実施する予定であります。

オーガナイズドセッションとオーガナイザー覧

○印は、代表オーガナイザ、連絡オーガナイザ

・解析・設計の高度化・最適化

Innovation and Optimization of CAE and Design

(計算力学部門/設計工学システム部門)

下田昌利（豊田工大）、長谷川浩志（芝浦工大）、山本崇史（工学院大）、○西脇眞二（京都大、FAX 075-383-3601、shinji@prec.kyoto-u.ac.jp）

・交通の安全・環境シミュレーション

Simulation for traffic safety and environment

(計算力学部門/設計工学システム部門)

吉村忍（東京大）、酒井譲（横浜国立大）、森田和元（交通安全環境研究所）、藤井秀樹（東京大）、○北栄輔（名古屋大、FAX 052-789-4722、kita@is.nagoya-u.ac.jp）

・生命体統合シミュレーション

Integrated Simulation of Living Matter

(バイオエンジニアリング部門/計算力学部門/流体工学部門/材料力学部門/マイクロ・ナノ工学部門)

○井上 康博（京都大、FAX 075-751-4125、inoue@frontier.kyoto-u.ac.jp）、杉山 和靖（理化学研究所）、田原 大輔（龍谷大）、坂本 二郎（金沢大）、和田 成生（大阪大）、高木 周（東京大）

・電子情報機器・半導体デバイス・電子部品の強度信頼性・冷却技術

Structural Reliability and Cooling Technology for Electronic Appliances, Semiconductor Devices or

Electronic Devices

(材料力学部門/計算力学部門/熱工学部門)

○川上崇（富山県立大、FAX 0766-56-6131、kwkm@pu-toyama.ac.jp）、池田 徹（鹿児島大）、于強（横浜国立大）、石塚勝（富山県立大）

・工業材料の変形特性・強度およびそのモデル化

Deformation properties and strength of engineering materials and these modeling

関連テーマ 次世代モビリティ

(機械材料・材料加工部門/材料力学部門/計算力学部門)

○金子堅司（東京理科大、FAX 03-5228-8363、kaneko@rs.kagu.tus.ac.jp）

・省・創エネルギー材料システムのマルチフィジックス現象評価と力学設計

Multiphysical phenomena evaluation and mechanical design of energy saving/creation material systems

(材料力学部門/計算力学部門/熱工学部門/マイクロ・ナノ工学部門/機械材料・材料加工部門)

○水野 衛（秋田県立大、FAX 0184-27-2188、mizuno@akita-pu.ac.jp）、萩原世也（佐賀大）、大徳忠史（秋田県立大）、成田史生（秋田県立大）

・流体機械の研究開発におけるEFD/CFD

EFD/CFD for research and development of fluid machinery

(流体工学部門/計算力学部門)

○吉川 雅人（九州大、FAX 092-802-3117、furu@mech.kyushu-u.ac.jp）、船崎健一（岩手大）、山本 悟（東北大）、松井 純（横浜国立大）、渡邊 聰（九州大）

・燃料電池・二次電池におけるナノ・マイクロ現象とマクロ性能

Nano-Micro Phenomena to Macro Performance in Fuel Cells and Batteries

(熱工学部門/流体工学部門/計算力学部門/動力・エネルギー部門/材料力学部門/マイクロ・ナノ工学部門)

○花村克悟（東京工業大、FAX 03-5734-3705、hana-

mura@mech.titech.ac.jp)、近久武美（北海道大）、大島伸行（北海道大）、鹿園直毅（東京大）、橋田俊之（東北大）、徳増 崇（東北大）

また特別行事として、先端技術フォーラム、ワークショップ、新技術開発リポート、新企画行事、部門同好会なども考えております。現在、それらについてはメーリングリストにより部門登録者の皆様に企画の御提案をお願いしているところです（期限: 2013年12月6日（金））。申し込み先は以下の通りです。多数のご提案をお待ちしております。

申し込み先・問合せ先

高橋 直也（東京電機大学 工学部 機械工学科）
TEL 03-5284-5462、n.takahashi@mail.dendai.ac.jp



第27回（2014年度）計算力学講演会のご案内

船崎健一（実行委員長）
岩手大学 工学部 機械システム工学科

2014年11月22日（土）～11月24日（月）の3日間に岩手大学工学部（岩手県盛岡市）におきまして第27回計算力学講演会を開催することになりました。東北地方としては2004年の仙台大会以来ひさびさの開催となります。大変名誉なことですが、同時に身の引き締まる思いです。これまでの講演会と同様に、一般講演、OS及び特別講演などを予定しておりますが、「盛岡ならでは」の企画も検討中です。今回ニュースレターの場をお借りして、開催時期が寒い時期になりますが、多くの部門の皆様に講演の申し込み、講演会へのご参加をお願いしたく、来年度の講演会のご案内をさせて頂きたいと思います。

岩手大学工学部がある岩手県盛岡市は、岩手県のほぼ中央、北上盆地内に位置し、市内中心部に北上川、零石川及び中津川という川が流れ、市内から北西方向には名峰岩手山、北東には姫神山、また、南東方向には高山植物等で有名な早池峰山と、山々に囲まれた歴史と文化の町です。岩手県は、県としては国内最大であり、四国4県よりも大きな面積を有しています。県の東側は三陸地域であり、南は沈降型のリアス海岸、北は隆起型のリアス海岸となっており、風光明媚な名所が数多く存在します。三陸の北端に近いところには、NHK朝ドラ「あまちゃん」で有名になった久慈市（ドラマ内では「北三陸市」）があり、なじみになった方も多いでしょう。三陸沖は世界三大漁場の一つに数えられ、豊かな海洋資源にも恵まれた地域でもあります。

盛岡市（及びその近郊）が歴史上に明確に現れてきたのは、征夷大将軍坂上田村麻呂が築いた志波城のようですが、その後安倍一族に端を発し、前九年・後三年の役を経て奥州藤原氏4代がこの地を治めました。藤原氏の栄華の様を今に残すものが、2011年6月に世界遺産に登録された中尊寺に代



図 岩手大学構内（手前は図書館、後ろ側に工学部があり、遠くに岩手山が霞んでいます）

表される平泉の建築物や庭園などです。藤原氏滅亡の後陸奥州（岩手県など）の統治の形は多くの変遷を経ましたが、甲斐源氏の流れを受ける南部氏が南北朝の後に北から南進する形で現在の盛岡周辺を統治し、結果として現在の盛岡が始まったとされています。

旧盛岡藩の城下町として栄えた盛岡市は、現在人口30万人を超える北東北地方の中核都市として発展を続けています。盛岡市へのアクセスは、東北新幹線で東京から約2時間20分程度、空路では大阪（伊丹）、新千歳、名古屋及び福岡からいわて花巻空港を経由してお越し頂くことができます。岩手大学は盛岡駅から2km程度の距離にあり、会場である工学部までは駅前または市内のホテルからバスでご来場可能ですが、徒歩でも十分可能です。

大学構内は、キャンパス全体がミュージアム、という方針

日本機械学会新学術誌創刊

NEW

日本機械学会では、機械工学の全分野をカバーした下記の総合誌(4誌)を創刊いたします。

質の高い論文を掲載し、国際的にも存在感を有する学術誌の実現を目指します。

NEW

英文レビュー誌 | 編修委員長:花村 克悟(東京工業大学)
Mechanical Engineering Reviews

2014年1月発刊予定
年1~2回発行予定

NEW

和文誌 | 編修委員長:岡崎 正和(長岡技術科学大学)
日本機械学会論文集
*Transactions of the JSME
(in Japanese)*

2014年1月発刊予定
毎月発行予定

NEW

英文誌 | 編修委員長:浅野 等(神戸大学)
Mechanical Engineering Journal

2014年2月発刊予定
隔月発行予定

NEW

英文速報誌 | 編修委員長:板橋 正章(諏訪東京理科大学)
Mechanical Engineering Letters

2015年1月発刊予定
随時公開予定
【投稿募集は、2014年9月1日から】

投稿募集

最新の研究成果を積極的に
ご投稿下さいますようお願い申し上げます。

2013
9/2^M
ON

から投稿受付開始!

カテゴリ(募集分野)一覧

- ・材料力学、機械材料、材料加工
- ・流体工学、流体機械
- ・熱工学、内燃機関、動力エネルギー・システム
- ・機械力学、計測、自動制御、ロボティクス、メカトロニクス
- ・マイクロ・ナノ工学
- ・計算力学
- ・設計、システム、製造
- ・生体工学、医工学、スポーツ工学、人間工学
- ・環境工学、産業・化学機械、システム安全
- ・交通・物流
- ・宇宙工学
- ・法工学、技術史、工学教育、経営工学など

電子投稿にて随時受け付けます。下記URLをご参考にご投稿をお願いします。

□ <http://www.jsme.or.jp/bulletin/index.html>

お問い合わせ先



一般社団法人

日本機械学会

出版・販売G

〒160-0016 東京都新宿区信濃町35番地 信濃町煉瓦館5階
☎ 03-5360-3502 ■ journal@jsme.or.jp

で、植物園や農業教育資料館（宮澤賢治の卒業論文などもあります）など、それだけでも十分楽しめる施設が整備されています。市内には、盛岡出身の石川啄木が青春の一時を過ごした盛岡城跡公園、盛岡地方裁判所の中にある樹齢300年超の石割桜、東京駅設計士の辰野金吾も係わった岩手銀行中の橋支店、彫刻家舟越保武、萬鐵五郎などの作品が常設展示されている岩手県美術館、また、盛岡出身の偉人先人関係の展示がある先人記念館（石川啄木、金田一京助、原敬、新渡戸稲造、米内光政、...）などがあります。市内からは、小岩井牧場（零石）が手軽な観光スポットです。バス、JR等での移動手段で、宮澤賢治記念館（花巻）、カッパ淵等でも有名な遠野、平泉などへも足を伸ばすことができます。北限の”あまちゃん”には盛岡発からバスで2時間ほどで会いに行くことができます。

さて、冒頭次回の講演会が東北地方では2004年以来と述べました。即ち、2011年3月11日の東日本大震災以後初めての東北開催となります。震災はいろいろな教訓を私たちに残し、知の限界も思い知らされました。一方で、知の有効性、重要性が再認識されたことも忘れてはならないと思いま

す。特に、次の震災到来に向けて防災、減災など、計算力学が果たすべき役割は増加する一方となっております。東北大をはじめ近隣の大学等からのご協力を頂きながら、次回の講演会ではこれらに関する企画にも取り組めればと考えております。

震災以後、ボランティア活動やその間いろいろな機会に東北地方を訪れた方も多いと思いますが、岩手、宮城、福島が近強く復興を遂げつつあることも次回講演会前後で見て頂ければと思います。東北に来て見て海の幸山の幸を堪能して頂くことも復興推進に繋がります。多くの皆様のご来盛を心よりお待ちしております。

連絡先

実行委員長 舟崎健一

岩手大学工学部機械システム工学科

〒020-8551 盛岡市上田4丁目3-5

Tel/Fax 019-621-6422

funazaki@iwayate-u.ac.jp

《各行事の問い合わせ、申込先》

日本機械学会計算力学部門担当 川島礼二郎 E-mail: kawashima@jsme.or.jp

〒160-0016 東京都新宿区信濃町35番地 信濃町煉瓦館5F TEL 03-5360-3501 FAX 03-5360-3508

計算力学部門ニュースレター No. 51 : 2013年12月16日発行

ニュースレターのカラー版（No. 41～）につきましては、日本機械学会計算力学部門の下記URLをご覧下さい。

<http://www.jsme.or.jp/cmd/Newsletter/index.html>

編集責任者：広報委員会委員長 滝沢研二

ニュースレターへのご投稿やお問い合わせは下記の広報委員会幹事までご連絡ください。

なお、各記事の文責は著者にあります。

広報委員会 幹事 永井亨

エムエスシーソフトウェア株式会社

〒60-0023 東京都新宿区西新宿1-23-7 新宿ファーストウエスト8F

TEL : 03-6911-1220 FAX : 03-6911-1221 E-Mail : toru.nagai@mscsoftware.com