

Fig. 3-9 Fully unstructured Large-Eddy Simulation for vehicle aerodynamics and comparison of the conventional simulation using 35 million elements (left) and the high-resolution simulation using 2.3 billion elements on the K-computer: above, grid resolution; middle, surface resolution

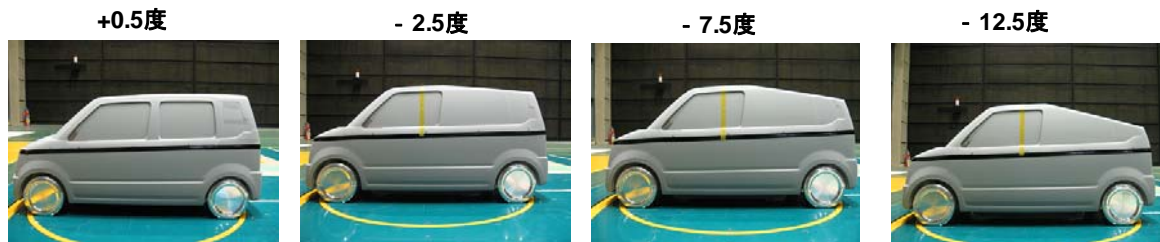


Fig.3-10 Reference models for the dependence of the aerodynamic drag on the rear slant angle (models provided by Suzuki)

本研究で開発したシステムの、定常空力抵抗予測における有用性をさらに検討するために、Fig.3-10 に示すような、リアスラント角を+0.5 度から-12.5 度まで変化させた場合の空気抵抗変化のシミュレーションを実施した。解析にあたっては、空間格子の自動生成が容易なテトラ格子に着目し、3500 万要素程度のフルテトラ格子(表面解像度 2~10mm)を手動で作成し、この格子をオリジナルとしてリファイン機能により「京」上で二度の自動細分化を行うことで 23 億要素数のフルテトラ格子(表面解像度 2~10mm)を自動で作成した。解析領域は長さ 25.0m×幅 10.0m×高さ 5.0m の直方体とし、解析モデルは入口から 5m 下流の場所に設置した。

流入風速は一様流で 200km/h とし、この時の車体高さに対するレイノルズ数は 2.68×10^6 となる。得られた空気抵抗とその風洞実験値を Fig.3-11 に示す。3500 万要素の結果は、スラント角を変化させた場合 2~8%程度、風洞実験値を過大評価する上、スラント角変化に伴う抵抗値の定性的な変化が捉えられていないことがわかる。これに対して解像度を 1/4 にした 23 億要素の結果では、風洞実験に対する誤差が 1~2%に抑えられるうえ、スラント角変化に伴う定性的変化も捉えられていることがわかる。Fig.3-12 に、3500 万要素と 23 億要素の瞬時流れ場を Q 値で可視化した結果を示す。

一般に現在、設計開発現場で用いられている非構造格子解析では、ハードウェア性能(数テラ~数十テラフロップス)の不足を補うために、車体表面にプリズム層等の境界層解像用の格子を作成し、これが計算安定性の悪化や格子作成工数の増加につながっているが、本解析の結果は、「京」クラスのペタフロップス計算機を活用すれば、格子作成が容易なテトラ格子を用いても解像度をサブミリメートルとすることで、良好な空気抵抗予測が可能となることを示している。尚、解析にかかった時間は「京」4096 ノード(32768 コア)で 100 時間程度であった。

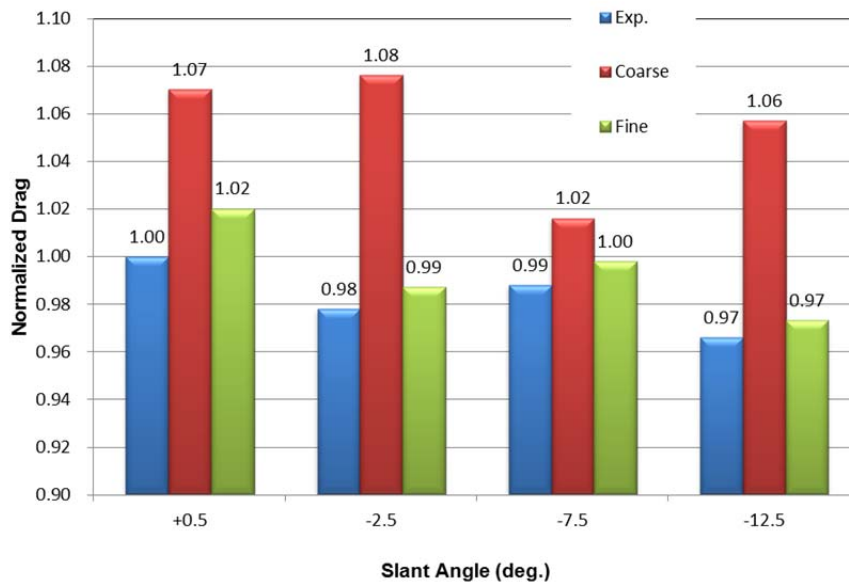


Fig.3-11 Aerodynamic drag predicted by coarse (35 million) and fine (2.3 billion) elements. All the drag is normalized by the experimental data at slant angle of +0.5 degrees.

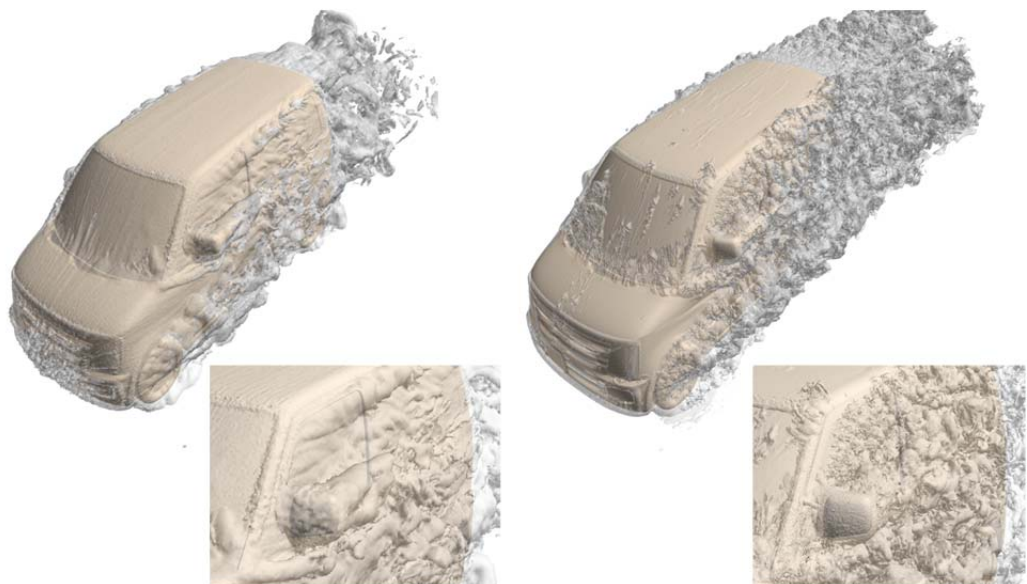


Fig.3-12 Flow structures predicted by coarse (left, 35 million) and fine (right, 2.3 billion) elements at the slant angle of 0.5 degrees (Q criteria)

本研究で開発したシステムの実車詳細形状での実用化評価のために、本田技術研究所から提供された実車 CAD データを対象に実車フルスケール空力解析を行う。ここでは風洞実験とのより詳細な精度検証のために、本田技研が保有する実車風洞形状も再現した風洞モデリングシミュレーションを行う。Fig.3-13 に対象とするムービングベルトシステムを備えた実車風洞を示す。この風

洞はテストセクションで主流方向にフラットな静圧分布を示すことで有名であり、本解析はまずムービングベルト前後での吹き出し・吸込み量のチューニングにより、実際の風洞と同等の静圧特性を得ることを試みた。Fig.3-14 の通り、本解析で得られた静圧分布は、実験とほぼ同等のフラットな特性を持っていることがわかる。

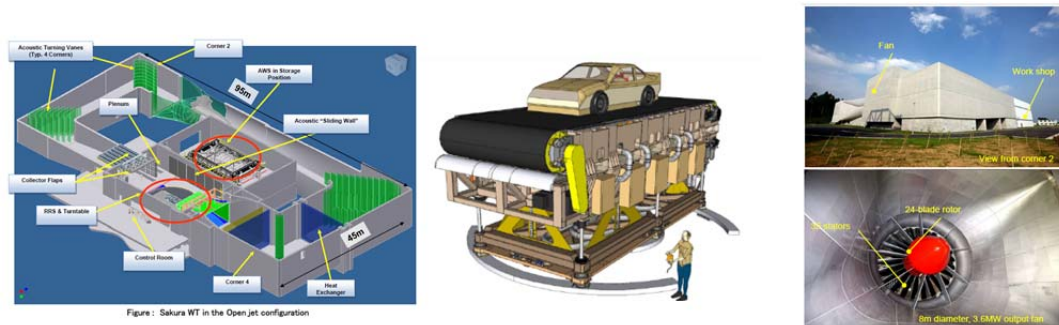


Fig.3-13 Target full-scale wind tunnel at Honda R&D

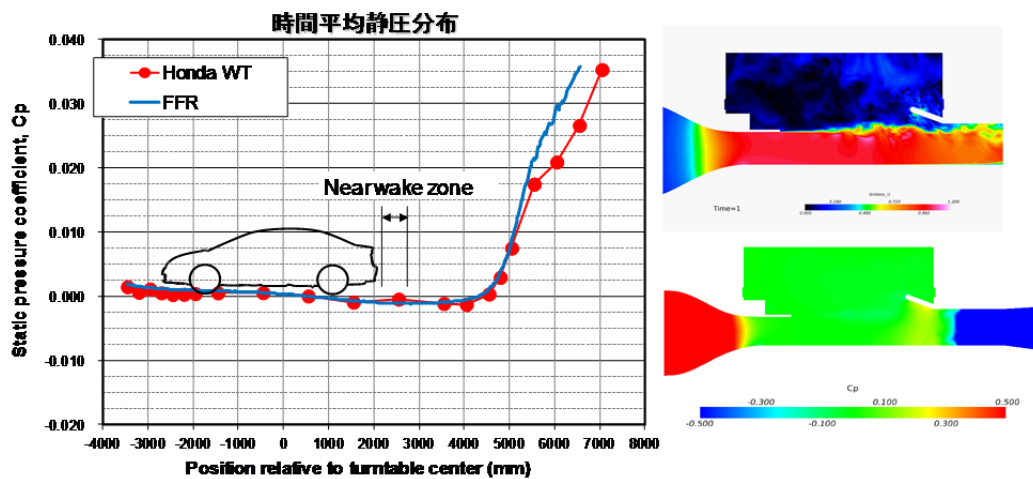


Fig.3-14 Reproduction of the static pressure distribution in the test section

本解析で対象とした車体モデルを Fig. 3-15 に示す。データは実際の開発に用いられている CAD データとして提供され、非構造格子による解析を行うために、データ間のギャップや重なり等に対して表面クリーニングを行った。この際、最終的な解像度を最小解像度 1mm 程度となるよう注意した。また風洞実験と精密な比較をするために、ムービングベルト稼働時のタイヤ変形((株)ブリジストンにより解析)や、揚力によるサスペンション変形等も考慮した。空間格子作成に対しては(1)で得られた知見を踏襲して、最終解像度が 1mm 程度、2~3 回程度の格子リファインを想定し、5000 万要素程度のフルテトラによる空間格子を作成した。Fig. 3-16 に格子リファイン前の 5000 万要素解析で流れ場を発達させた結果を示す。

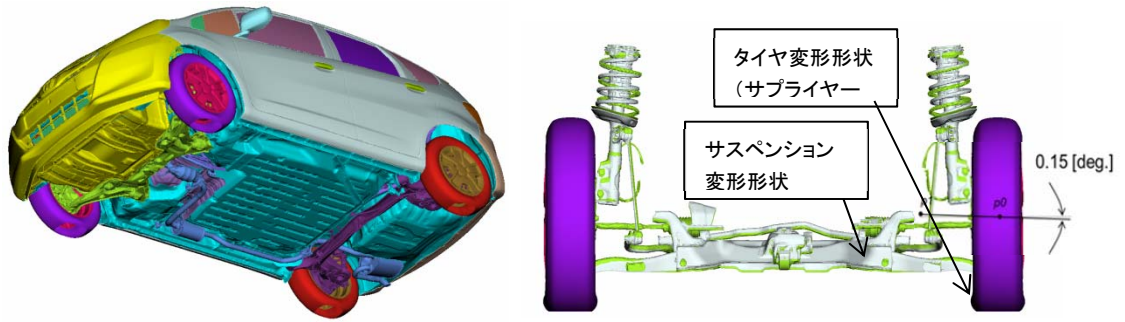


Fig. 3-15 Analysis model (left) and consideration of the tire and suspension deformation (right)

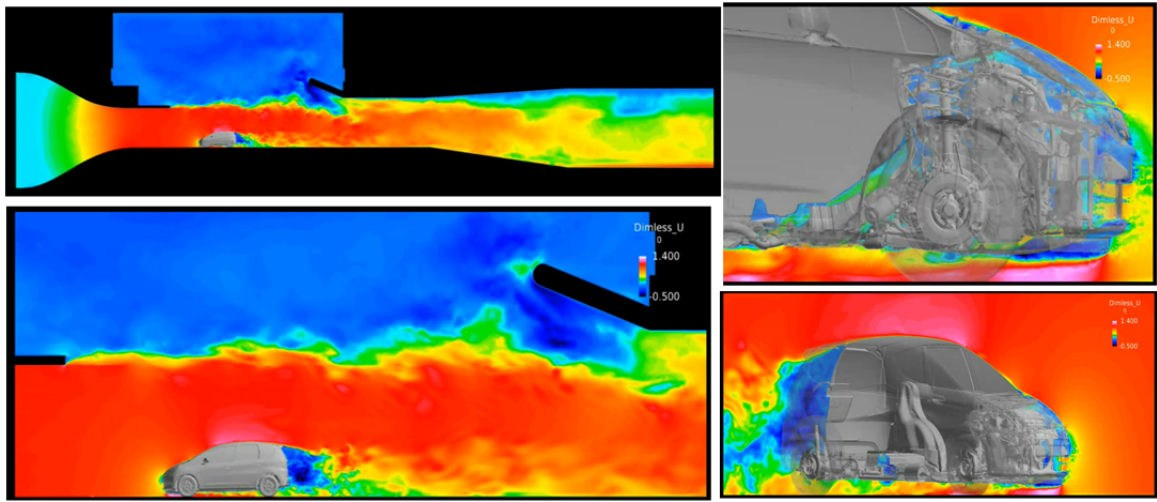


Fig. 3-16 Snapshot of the velocity magnitude in the coarse mesh case (50 million)

ここで開発したデジタル風洞モデルについては、最終的な総格子数は 48 億に達する。車体を含めた解析から得られた結果を自動車会社が所有する風洞実験データを用いて比較した結果、抵抗値で 1%以内、特に再現が難しいとされている揚力値においても 16 カウント(1 カウントは揚力係数 1/1000 単位)程度の誤差で予測を可能とした。



Fig. 3-17 Wind Tunnel full vehicle aerodynamics LES simulation using unstructured 4.8 billion elements. Top, vehicle geometry and suspension-tire configuration: middle, empty wind-tunnel pressure gradient(left) and a result example of velocity field(right) ; bottom, comparison of the conventional simulation using RANS model with 55 million elements (left) and the high-resolution simulation using LES with 3.5 billion elements on the K-computer(right).

(3-1-2) 実走行状態における気流・車両運動連成空力解析

自動車の次世代空力解析では、風洞実験の代替として、一様流下で車体に作用する空気抵抗や揚力の高精度予測が求められる一方、風洞では予測が難しいリアルワールドでの非定常空力シミュレーションに期待が集まっている。リアルワールドシミュレーションでは、実物理現象として10秒以上（風洞代替のシミュレーションの数十倍）の長時間解析が必要となり、京クラスの高性能スパコンを用いて初めて実設計での実用化が可能となる。システムとして現在までに、移動境界手法による車両運動再現と、車両運動モデルの導入が完了している。ここではその実証解析として、レーンチェンジ運動を対象として、再現時間10秒（通常の定常計算では1秒以下）にも及ぶ非定常空力解析を実現し、車体に付加した空力パーツが走行安定性に及ぼす詳細なメカニズムを解明した。Fig. 3-18に解析結果の一例を示す。

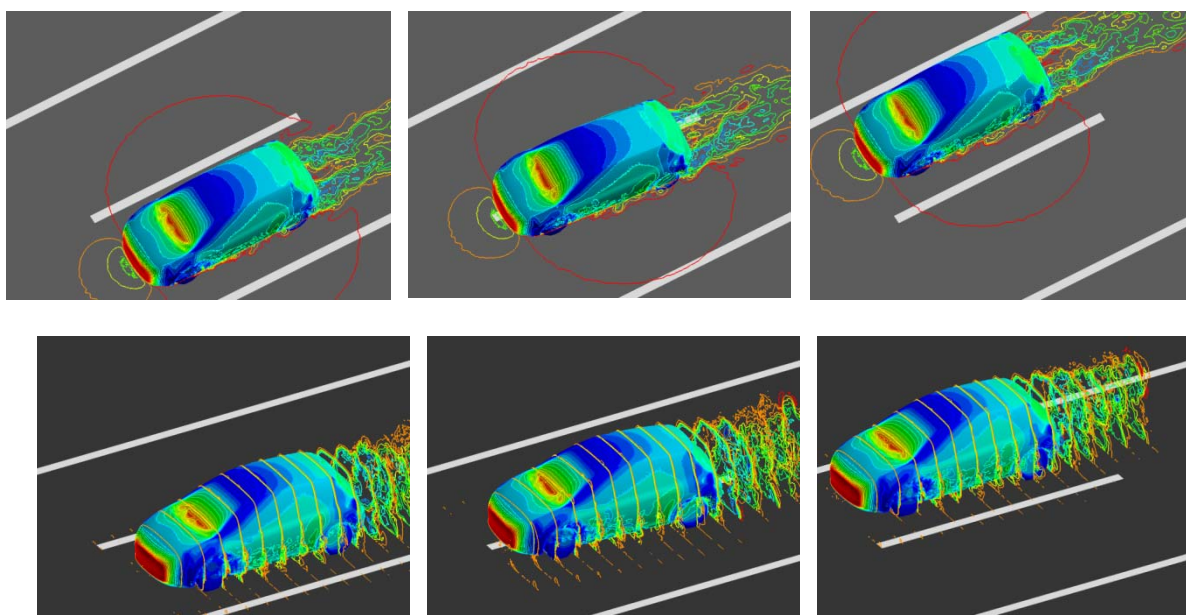


Fig.3-18 Unsteady aerodynamics simulation for a vehicle during lane-change maneuvering (surface pressure and velocity magnitude around the vehicle)

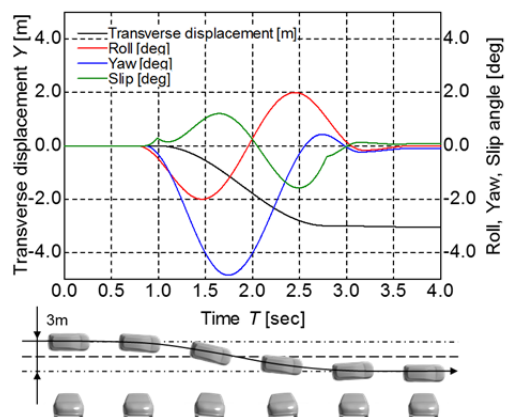


Fig. 3-19 Time series of angle and transverse displacement

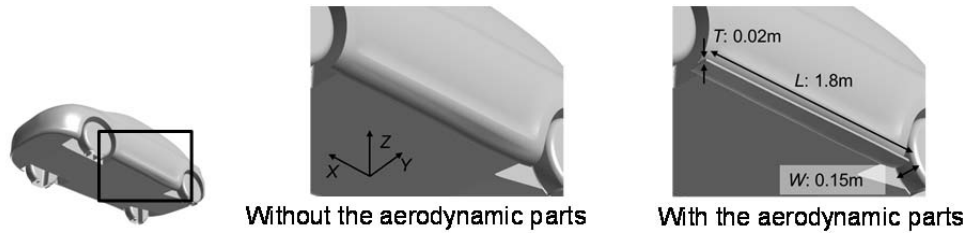


Fig.3-20 Aerodynamic devices for the stability of lane-change motion.

ここでは、運動解析ソフトウェアによって算出された軌跡を強制的に与えている。Fig.3-19 に、この際に与えた運動条件(横方向変位と、ロール、ヨー、スリップ角の時間変化)を示す。本解析では、車両側面下部に装着した空力デバイスに着目し、空力的減衰効果の差異と、その発生メカニズムについて検討した。

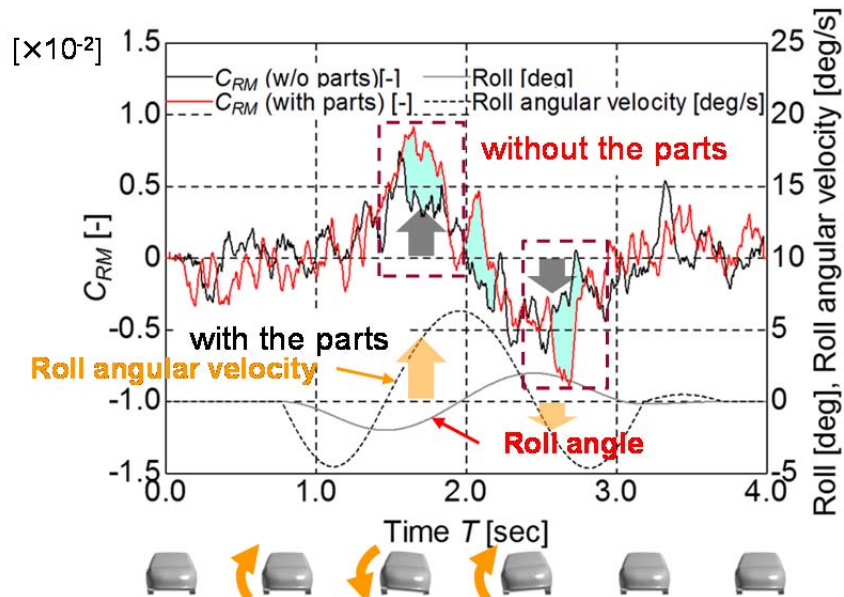


Fig. 3-21 Time series of the rolling moment during the lane change maneuvering.

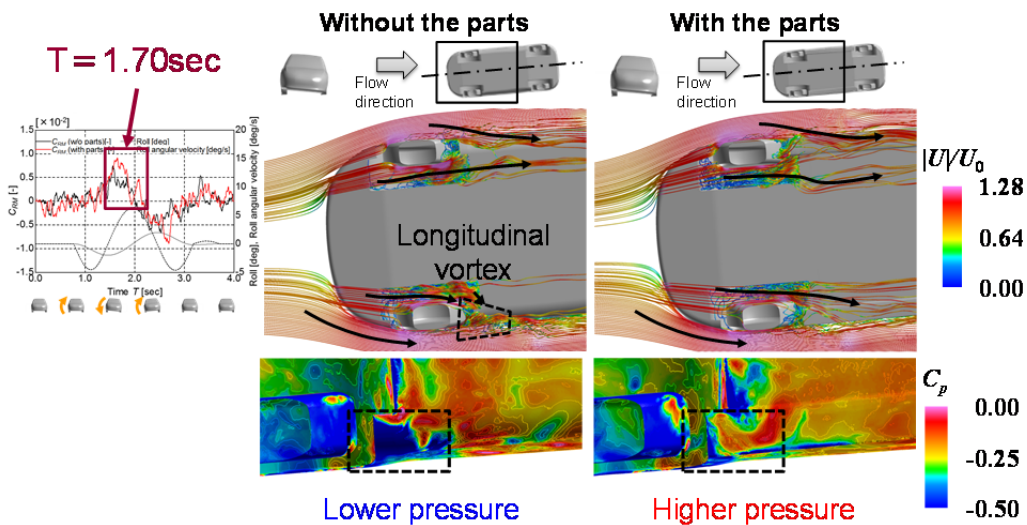


Fig. 3-22 Difference of flow structures with or without the aerodynamic devices during the lane change.

ここでは特に、事前に官能試験によってデバイスの効果が確認されているロール安定性について検討した。解析の結果、空力ローリングモーメントはロール角速度とは逆向きに働いていることから、ロール運動を減衰させる向きに作用している。さらに、空力デバイスを装着した車両の方が空力ローリングモーメントの振幅が大きくなっており、空力減衰効果は増大している。この原因として、フロントホイールハウス後方に生じる縦渦が挙げられる。元形状の車両では、この縦渦が生じることで、空力モーメントの振幅を小さくする圧力場が形成される。一方でデバイスを装着することによって、この縦渦の形成が抑制されることで、空力モーメントは元形状に比べ振幅が大きくなったと考えられる。本システムに実装された移動境界手法を用いることで多自由度の車両運動を再現した解析が可能となり、ロール・ピッチ運動時の安定性について解析が可能となった。

蛇行走行時の高速走行安定性解析 (Fig.3-23 上) や横風安定性解析 (Fig.3-23 下) をリアルワールド解析として実施し、システムの実証と高精度化を行った。

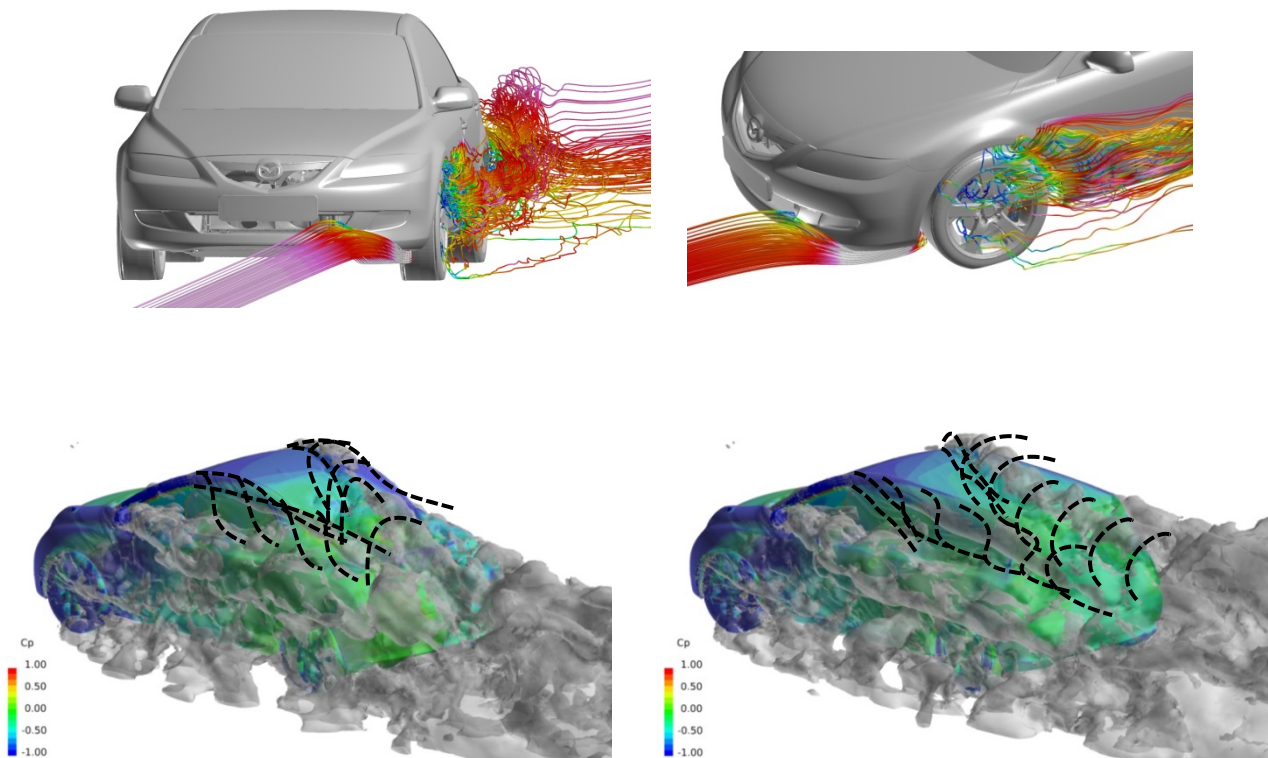


Fig. 3-23 “Real world” simulation for next-generation vehicle aerodynamics: Top, a sedan-type vehicle in meandering motion; bottom, crosswind-stability analysis of a sedan-type (left) and two-box (right) vehicles.

本研究で開発したシステムの、操舵走行時の過渡空力特性予測における有用性を検討するため、Fig.3-24 に示すような基準車両および空力パーツ付加による改良車両の2車両を対象に蛇行走行時の空力解析を実施した。対象 2 車両は、風洞条件における定常空力特性の差異は微小ながら、高速操舵走行時の官能評価には差異を生ずる車両空力・操安特性を有している。本解析では、5千万要素規模の解析格子を用いて、エンジンルームや車体局所の詳細形状までを再現し、車両周囲の流れ構造の再現性を確保しながら車両運動に伴って生じる非定常流体力の予測を行うことで、その有効性を実証することを目指した。

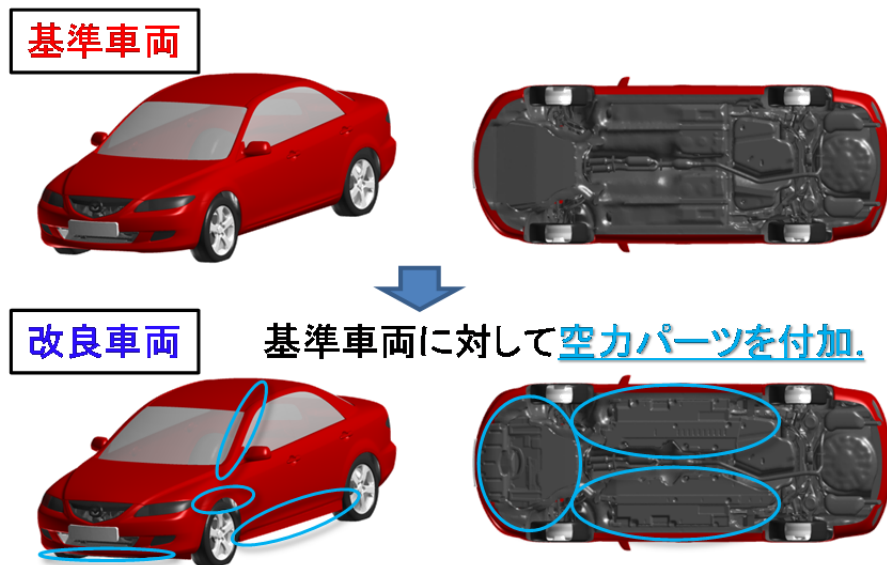


Fig. 3-24 Target models

また、本解析で対象とした車両運動である蛇行走行は、ISO13674-1 に定められた蛇行走行試験法に準ずるものとして、Fig. 3-25 に示す運動条件を設定した。

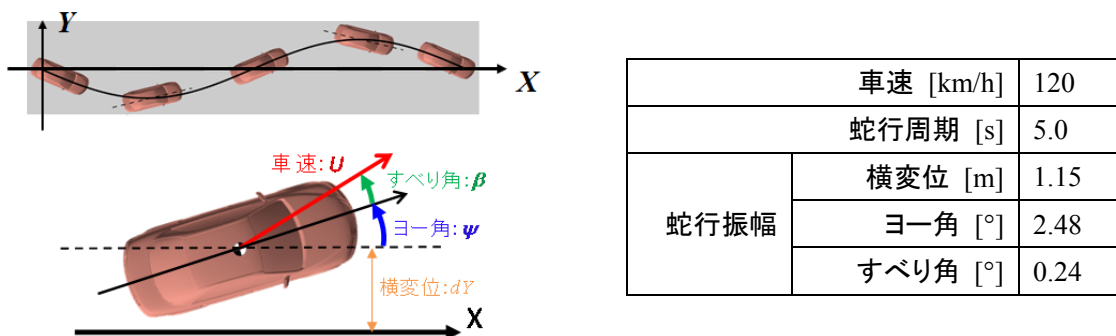


Fig. 3-25 Imposed meandering motion.

蛇行走行条件での解析に先立ち、車両横方向空気力の発生に強く関与すると考えられる車両側方の流れ構造について、その再現性を確認するための定常解析を実施した。風洞条件における車両周囲流れを風洞実験計測結果と比較し、Fig.3-26 に示すように良好な一致を確認した(図は基準車両における車両側方の鉛直断面総圧分布の比較)。

その後、同解析格子を用いて蛇行走行条件での解析を実施した。Fig.3-27 は、蛇行走行中の左旋回ピークにおいて2車両周りに生じる水平面内の総圧分布を示している。図中の比較から、空力パーツの付加によって、改良車両では車両側方の総圧欠損領域(サイドウェーク)が縮小しており、車両局所形状の差異に伴う車両周囲流れの特徴の差異が再現されていることがわかる。このように、車両詳細形状の再現により車両周囲の流れの特性が再現された状態で、車両運動に伴って発生する空気力の評価が可能となった。

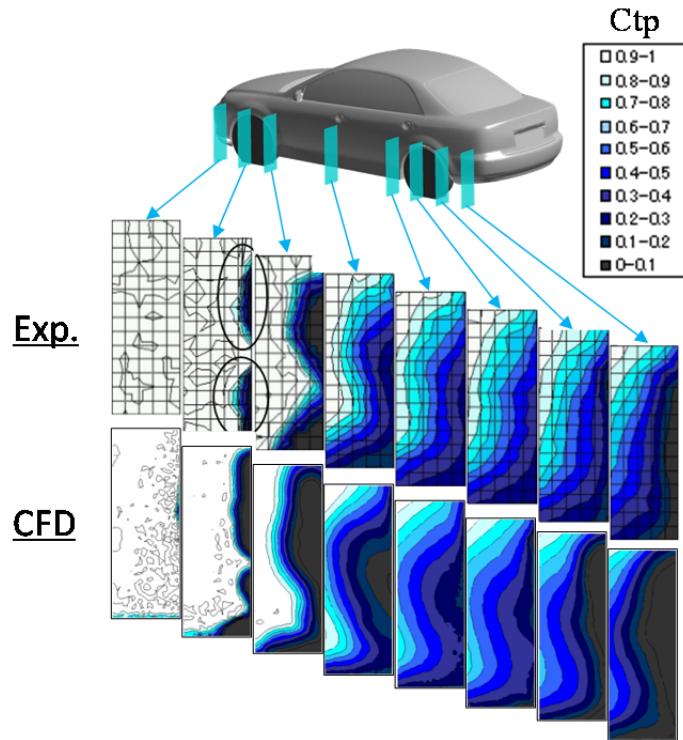


Fig.3-26 Total pressure distribution (CFD vs. Exp.)

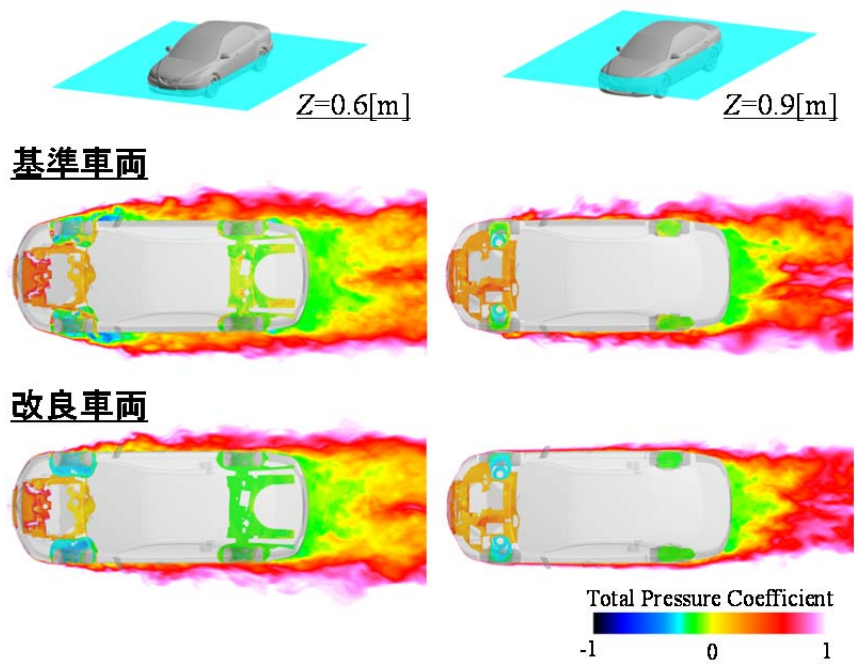


Fig.3-27 Total pressure distribution during the meandering motion.

また、上述の蛇行走行条件における空力解析の結果、Fig. 3-28 に示すような蛇行走行中の横力変化(位相平均)が得られた。横力の変動振幅は2車両間で異なっており、すべり角とほぼ同位相を示す基準車両の横力特性は、実車走行試験において車体表面圧から推定された横力特性と定性的に一致している。また、改良車両においてその横力特性が減少するという特性も、実走試験結

果の傾向と一致しており、本解析システムの有用性が示された。

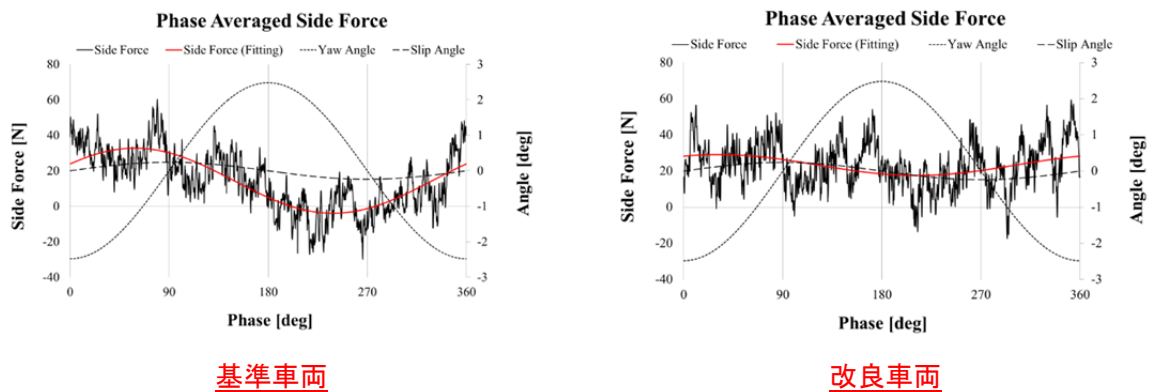


Fig.3-28 Phase averaged lateral force during the meandering motion.

(3-1-3) 空力・振動・音響連成解析による車室内騒音予測

本研究テーマでは、空力的な加振に起因する自動車車室内騒音の、シミュレーションによる予測手法およびその評価システムの開発を行っている。車室内騒音は騒音源としての空力加振源、構造物の振動、車室内への伝達経路、音場の予測など複合的な現象であるため、基礎方程式レベルから大規模並列計算で効率的な計算が可能な計算方法の検討が必要である。従来の周波数領域の音響計算は周期変動、定常状態を仮定しているため限られた条件では効率的な計算ができる。しかしながら、過渡的な音響特性や連成現象を扱うことは難しい。そこで、微小変位による弾性波伝播を扱うFDTD法(Finite-Difference Time-Domain method、時間領域差分法)と流動計算を基礎式レベルでカップリングする時間領域の音響計算手法についても検討した。弱連成解析としては、空力解析には FrontFlow/blue、音響解析には FrontFlow/blue-ACOUSTICS、構造振動解析には ADVC(Adventure-Cluster)、その他メッシュ作成システムには VCAD や REVOCAP を用いている。連成解析には音響振動解析にFDTD法を用いたFDTD-WAVEを用いている。本テーマで開発したプロトタイプシステムの概要とこのシステムを用いた、簡易形状車体に対する音響解析結果を Fig. 3-29 に示す。

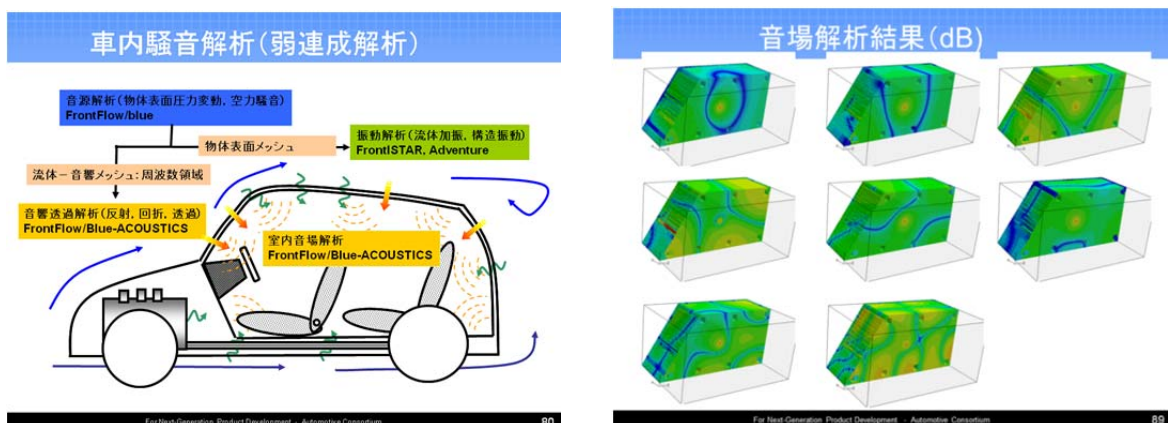


Fig.3-29 Prototype system for the cabin noise simulation (left) and results of the acoustics analysis for a simplified model as a benchmark test(right).

連成解析を行うためデータを受けとる側(流体解析→振動解析であれば、振動解析側)のフォーマットを基準にデータを受け渡す方式で統一したシステムを構築した。この方法をとることにより各解析の特色を活かせるようにした。Fig.3-30 にデータマッピングの一例を示す。

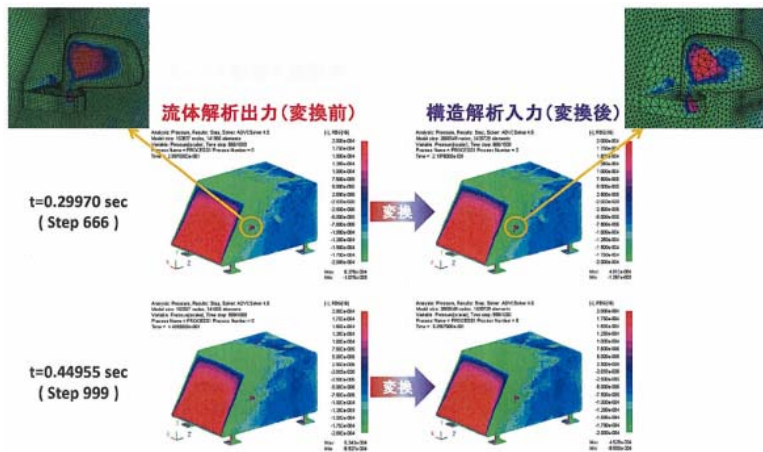


Fig.3-30 Sample of data mapping

構造振動・音響解析のための物性値データのフォーマット化

自動車の振動解析では薄板(厚さ1mm以下、長さ1m以上の非常にアスペクト比の大きな板)を扱うため、ソリッド要素が使えないことから解析規模が大きくなる。この点については大規模解析により対応可能であることを確認した。減衰を含む物性値のモデル化については振動解析における最も大きな課題である。この問題を解決するため、ハンマリング試験による簡易車両及び実車両の振動特性評価、スピーカー加振による音響特性評価を行い、数値モデルの構築を行った。また、部材の接触境界のモデルを複数作成(たとえば、面接触や点接触など)し、自動車の振動解析の最適化を図った。自動車会社が過去に行った実験データやノウハウも活用した。これらの結果を元に振動解析を行った結果、モード解析結果と実験結果が良く一致することを確認した。

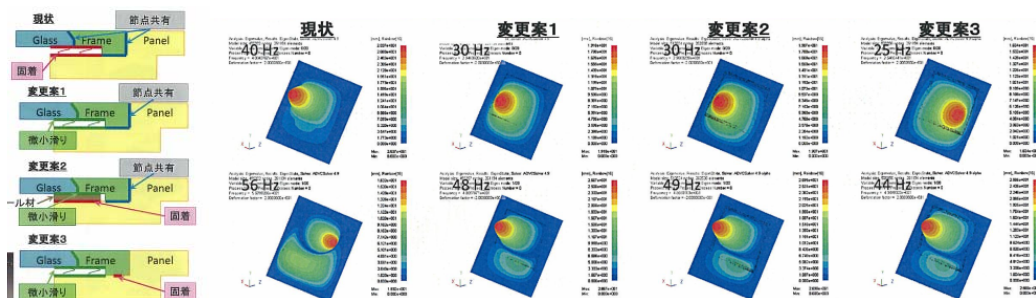
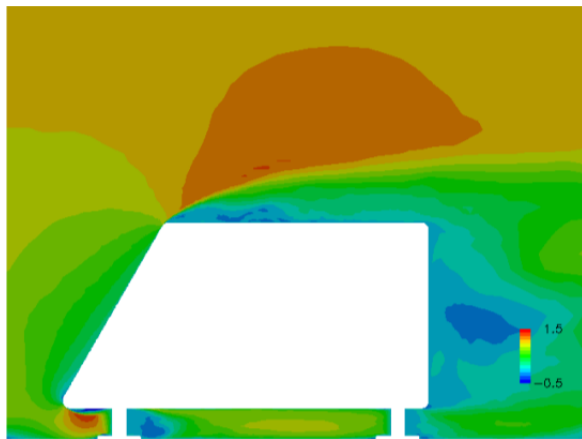
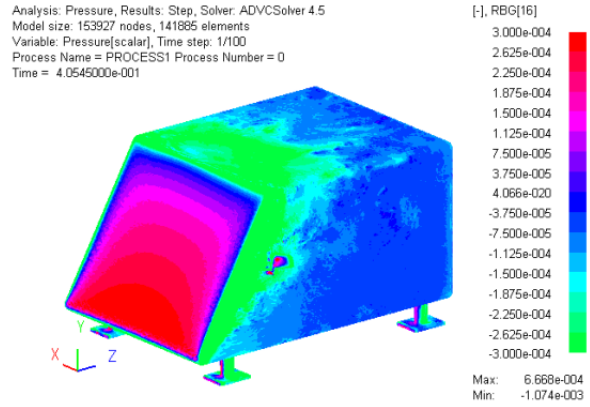


Fig.3-31 Effect of boundary condition on vibration analysis

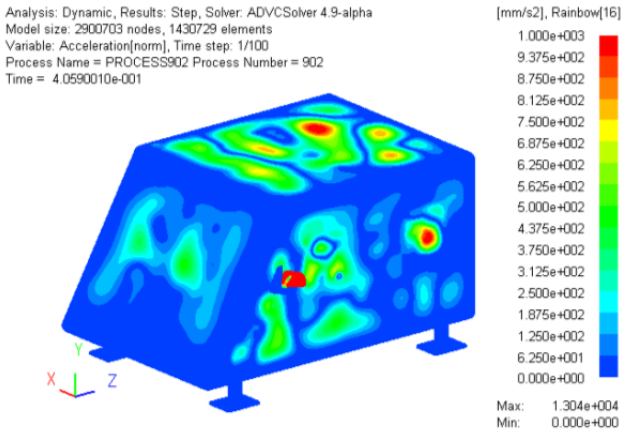
Fig.3-32 に簡易モデルを用いた車内騒音の解析事例を示す。連成解析システムを用いることにより、車内騒音の予測が可能であることを確認することができた。ただし、振動解析において減衰をモデル化することが重要であることも改めて確認された。



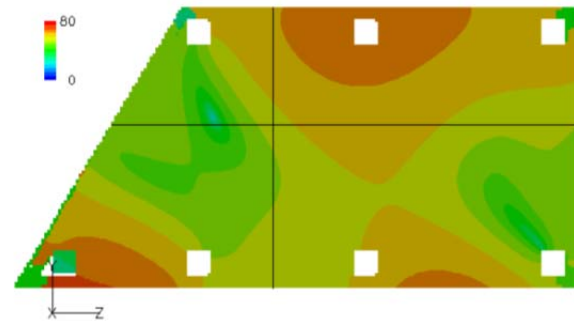
(a) Flow field



(b) Surface Pressure



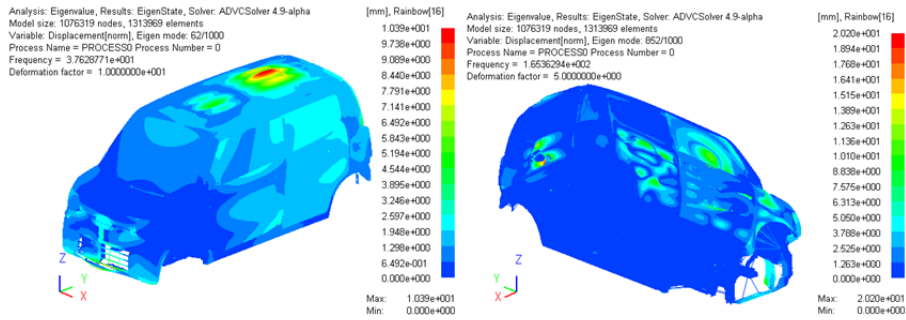
(c) Surface vibration



(d) Interior noise

Fig.3-32 Simulation results of interior noise of automobile

Fig.3-33 に実車の振動モードを解析した事例を示す。実際の車両は複雑な構造をしているため、これを精度よく解析するためには、自動車メーカーと協力して、詳細な車体構造データ、振動減衰データを求める必要がある。(a)(b)は振動加振実験結果とモード解析結果を比較したものであり、実験値と解析が良く一致することがわかる。また、(c)は風洞実験による流体加振データを再現したものであり、流体解析と振動解析のマッピングが可能となったことを示している。



(a) Roof(Sim. 38Hz / Exp. 37.8Hz) (b) Side body(Sim. 168Hz / Exp. 165Hz)

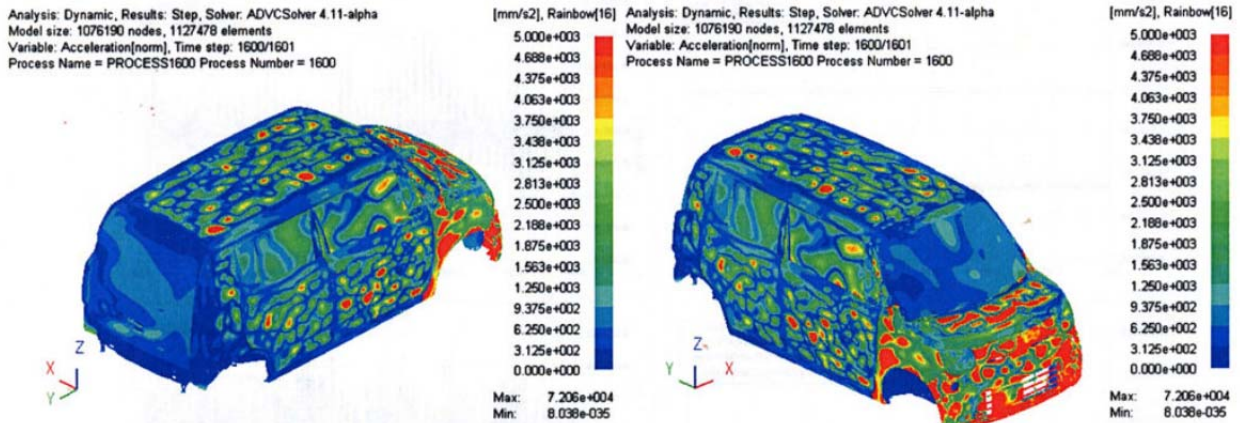


Fig.3-33 Results of the mode analysis (above and middle) and vibration acceleration on a vehicle surface caused by exciting force of fluid motion(below).

これらのシステムを用いて、流体解析、振動解析、騒音解析を連成させるシステムを構築し、実際の自動車の CAD データを用いて、車両周りの流れ解析、構造振動解析を実施し、数百 Hz までの車体構造振動が定量的に予測できることを示し、従来の解析では十分な精度が得られなかったのに対して、高い周波数までの解析が可能であることを示した。解析は流れ場、構造振動、騒音の相互作用はないものとして、流体解析→構造振動解析→騒音解析の一方方向連成を扱っているが、一方方向連成解析でも高い精度で車内騒音を予測できることがわかった。その一方で、いくつかの課題も明らかとなった。自動車の流体解析は空気抵抗の評価が最も重要であり、この分野の解析技術は非常に発達しているが、定常解析が一般的である。運動解析と空力の連成解析や空気抵抗の発生機構を検討する解析では、非定常解析が使われるようになっているが、車体周りの渦の解像度という点ではそれほど小さな渦まで扱っていないため、自動車周りの大規模渦の非定常性を議論するものがほとんどであった。しかし、自動車の車内騒音を議論するような場合は、境界層内の渦構造まで解像する必要があり、流体解析では解像度の不足、複雑な形状の格子生成が課題であることがわかった。構造振動解析では、自動車の鋼製部材が厚さ 0.4mm、長さ 1m 程度の非常に薄い板で構成されているため、振動解析の負荷が非常に大きいこと、これらの部材で作られた車体の構造減衰、特に高周波数帯域での減衰率がわからないことが解析精度に大きな影響を与えていることがわかった。構造減衰が課題となることは、大規模解析を行うまでもなく重要であることは自明であるが、実際に解析を行ってみると、高周波数帯域減衰のデータの不足は思った以上に深刻な問題であった。特に本解析では薄板の大規模解析を効率よく行うため、振動解析を時間

領域において直接解法で解いているため、減衰率を周波数帯域毎(実験データを用いて)に与えることが難しいという問題が生じた。

音響解析については、FrontFlow/blue-acoustics が 1 億メッシュを超える非構格子に対応したことから、市販の音響解析ソフトに比べて極めて大規模なデータを扱えるようになったため、車体の複雑な形状を数 kHz まで解析することが可能となった。音響解析では、音場を解くこと自体に大きな問題はないが、構造振動の場合と同じようにシートや内装パネルの吸音率データについては実験データを利用する必要があり、実験に依存せざるを得ない部分が残されている。また、パネルの吸音率などは素材(通常、一枚の板として計測される)の吸音率が実際に車両として組み立てた場合にそのまま扱えるのかという問題も残されている。また、現在、未解決の課題として、空力に起因する車内騒音解析の場合、たとえば、流体力によって振動するドアパネルは音に対する振動速度境界であるととともに、その内側に内装パネルが貼られているので、音響解析から見ると吸音境界となる。したがって、振動速度境界と吸音境界(インピーダンス境界)を同時に模擬しなければならない。この点については、複素音響インピーダンスを用いる方法、振動壁と音場を一つの方程式で解く方法などいくつか解決策はあるが、本研究ではこの点については未解決の課題として、実験車両の内装、シート等を全て外した状態で実験を行った。この点は車内騒音解析では非常に重要な課題であった。

本研究では、自動車車内騒音解析における減衰モデルとして、Fig.3-34 に示すような減衰モデルを構築し、高精度な予測を可能とした

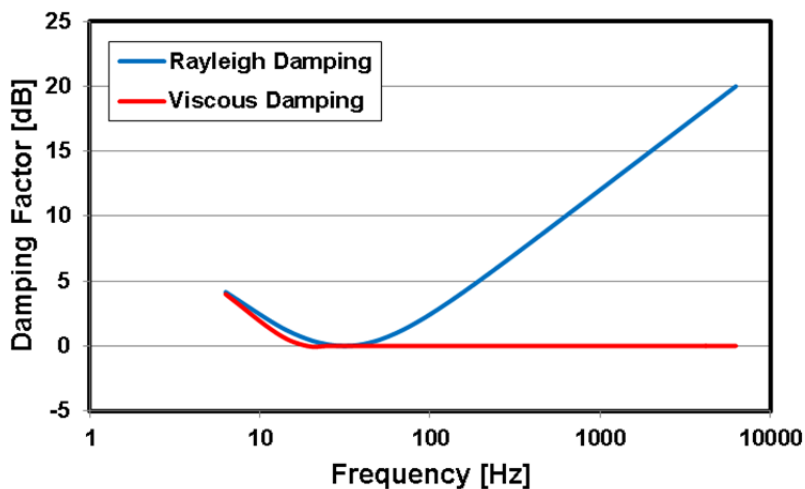


Fig. 3-34 Schematic diagram of the frequency dependence of the dumping function in Rayleigh model

従来の解析では、自動車会社にデータベースが存在するレイリー減衰の質量項のみを使って解析を行っていたが、本解析では剛性項も考慮した解析を行った。後述するようにこの対策が振動解析の精度向上に対して非常に重要であった。

流れ場の解析には、実車の CAD データから作成した実車形状を忠実に再現したモデルを使用した。ただし、本解析ではタイヤハウス、床下形状、フロントグリル及びエンジンについてはメッシュの依存性やメッシュ生成の時間短縮などを考慮して無視することとした。実験ではこれらの部位を滑らかにする処理を行い、実験と解析の条件をそろえた。流れの解析には FrontFlow/blue を用いた。解析規模は予備計算では格子数 8200 万点、大規模解析では 52 億点である。時速 100km で走行する自動車周りの境界層を完全に解像するには 300 億から 500 億程度の格子が必要であり、今回の

解析ではそこまでの解析を行うことができなかったため、コンピューターリソースを考慮して以下のよう格子点数を決定した。時速 100km/h で自動車が走行する場合、4kHz の音の周波数に対応する渦スケールは 1mm-1.5mm 程度と予測される。これはストローハル数を 0.1 程度と見積もった評価である。したがって、4kHz の音の周波数まで解析を行う場合、流れ場の渦の最少解像としては 1mm 程度となる。52 億点の解析では格子サイズは 0.1mm オーダーとなることから、1mm の渦であれば十分解像できると予想される。もちろん、音に起因する渦スケールのストローハル数が 0.1 であるというのは簡単なオーダー評価であるため、すべての部位で 4kHz までの渦が捉えられているという保証はないが、解析規模としてはほぼ妥当なものと考えている。解析には京コンピュータ 4096 ノードを使用し、実時間 1 秒分の解析を行うのに 22 時間必要であった。

振動解析には ADVENTURE-Cluster を使用した。流体解析と同様に車体形状は実車の CAD データを使って忠実に再現した。また、エンジン等の部材の振動は解析対象外としたが、集中質量を与え、車体の構造振動への影響を考慮した。解析規模は要素数 2500 万、1500 万自由度であり、シェル要素 (3/4 角形) とソリッド要素 (4/5/6 面体) を組み合わせたメッシュを使用した。最小メッシュサイズは約 4mm である。

解析時間は日立 CX1000 (96 ノード) で 6144step 計算するのに約 1 週間を必要とした。

音響解析には FrontFlow/blue-Acoustics を使用した。車室内のシートや吸音材の影響を取り除くため、風洞実験でも Fig.3-35 に示すように内装パネルを全て外した状態で実験を行った。解析は振動解析で使用した壁面データ形状を音響解析用のメッシュにそのままインポートして、振動解析と音響解析のメッシュのずれが極力小さくなるようにした。室内空間は最小メッシュサイズ 1mm、最大要素サイズ 4mm の非構造格子で分割した。要素数は 2900 万である。4kHz の音の波長は 85mm であることから、解析空間内は最小波長 85mm を 20 分割してあり、4kHz の音を捉えるのに十分な空間分解能を持つ。解析は音響解析のみ周波数空間で行っているため、振動解析データを FFT 処理して 512 バンド ($\Delta f = 9\text{Hz}$) に分割して解析を行った。流体解析及び振動解析から 7 周期分のデータ長のデータを取得して、各々のデータで音響解析を行い、それらの結果を平均化処理して最終的なデータを求めた。解析は周波数毎に行うため 512 に分割された全ての周波数について行った。解析には富士通 FX10 (96 ノード) を使用した。解析時間は 21 時間であった。また、得られたデータは 1/3 オクターブバンド毎にデータをまとめ、A 特性補正などの処理を行い、実験データとの比較をしやすいようにした。周波数領域の解析で、高い周波数までデータ処理する場合は、データ処理が膨大になるため、パラメータファイルなどを全て自動生成するスクリプトを作成して実施した。このような処理は実際の設計においてプログラムを利用する際に必要となるので、参考にさせていただきたい。