車両分野におけるシミュレーション技術

Simulation for Automotive and Railway Vehicles

合田 憲次郎 Kenjiro Goda
助川 義寛 Yoshihiro Sukegawa
平工 賢二 Kenji Hiraku
阿部 行伸 Yukinobu Abe

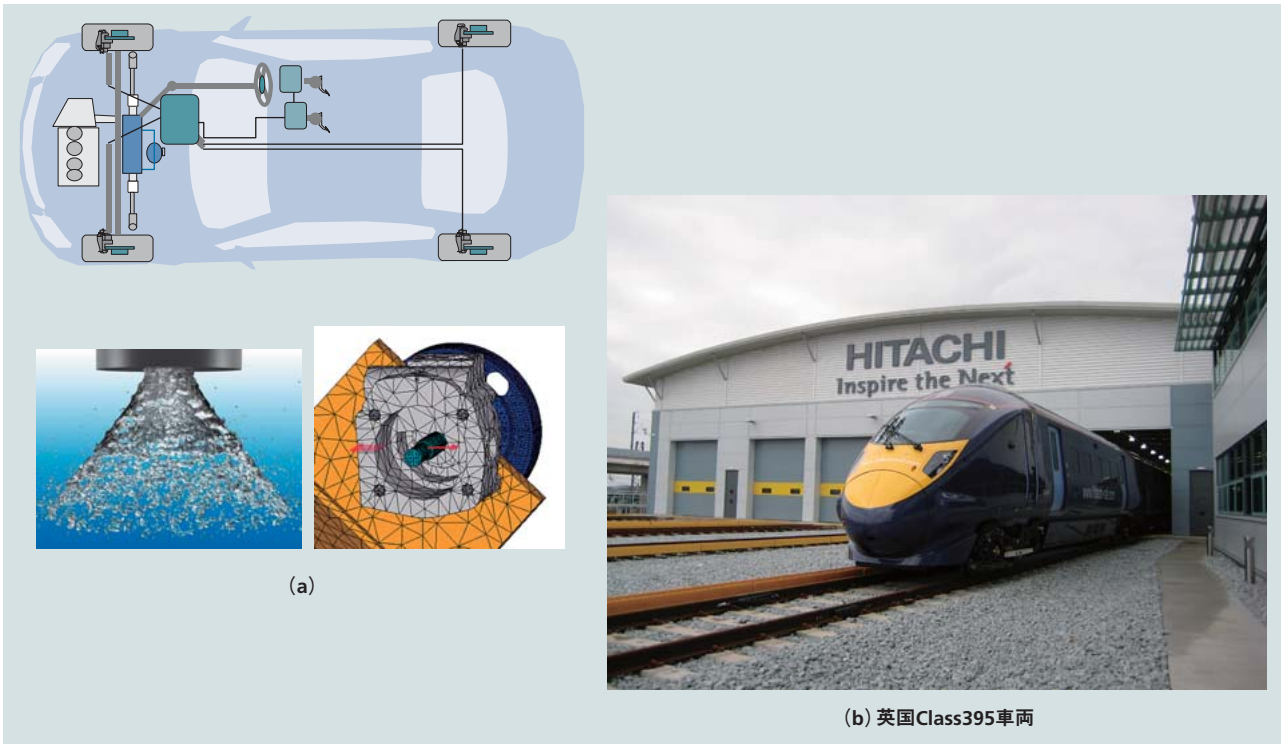


図1　自動車機器のシミュレーションの例(a)と，英国鉄道向け高速鉄道車両「Class395」(b)
日立グループは，最新のシミュレーション技術を駆使して，エンジン制御機器，走行制御機器，エレクトリックパワートレイン機器を開発している。日本で培った高速化技術・シミュレーション技術を基に，英国のロンドンとドーバー海峡を結ぶ海峡連絡用の高速車両を開発し，納入している。

日立グループは，自動車と鉄道車両の車両分野において，環境負荷が少なく，快適で安全性の高い輸送・交通システムをめざした技術開発を進めている。

この分野では，規制や顧客のニーズに対応して開発期間を短縮することや，快適で信頼性の高い車両を実現するための設計・開発ツールとして，シミュレーション技術が不可欠である。

自動車分野では，環境性能に直結するエンジン制御機器の開発に燃焼・噴霧生成シミュレーション技術が，快適な車内空間を実現する自動車機器の開発にNVH(騒音・振動・乗り心地)シミュレーション技術が活用されている。

鉄道車両分野では，快適な客室空間の開発に騒音予測シミュレーション技術が，トンネル微気圧波が小さく環境負荷が少ない先頭形状の開発に流体シミュレーション技術が活用されている。また，安全かつ快適な車体・台車の開発のために，ダイナミクスシミュレーション技術，および衝突シミュレーション技術も必須となっている。

1. はじめに

近年，地球温暖化をはじめとする環境問題が世界的にクローズアップされ，環境負荷の低い輸送手段の開発が重要となってきている。また，人を運ぶ輸送手段として，安全性，快適性向上に対するニーズがさらに高まっている。

このような社会のニーズに応え，日立グループは，自動車と鉄道車両の車両分野を中心に，環境負荷が少なく，快適な輸送・交通システムをめざした技術開発を進めている(図1参照)。

ここでは，自動車と鉄道車両の車両分野における製品設計・開発対応のシミュレーション技術への日立グループの取り組みと，製品への適用事例について述べる。

2. 自動車分野におけるシミュレーション技術

自動車の開発は，環境負荷低減，安全性，快適性の向上を求めて競争が激化しており，短期間で高品質な製品を提供するために，シミュレーション技術の高度化と活用が不可

欠となっている。自動車機器向けに日立グループが開発しているシミュレーション技術の一例として，環境性能に直結する自動車のエンジン制御機器関連のシミュレーション技術と，静かで快適な車両を実現するためのNVH（Noise，Vibration and Harshness）技術について，シミュレーションの取り組みと適用事例を以下に述べる。

2.1　エンジン制御機器のシミュレーション技術

（1）エンジン制御機器開発の流れ

地球温暖化防止の観点から，現在の自動車動力源の中核であるエンジンの燃費向上は急務であり，そのためには環境性能を大きく決定づけるエンジン制御機器のいっそうの高度化が必要である。

エンジン制御機器の開発は，燃焼コンセプト開発，コンポーネント開発，システム開発の3段階に分けられる（**図2**参照）。日立グループは，これらの各開発段階において，シミュレーションを活用することで，より高い環境性能の実現と開発のスピードアップを図っている。

（2）シミュレーションの適用事例

燃焼コンセプト開発においては，エンジンシリンダ内の燃料挙動や燃焼を詳細に解析する必要がある。エンジン内は，気体と液体の相互干渉，化学反応，乱流，移動境界などを伴う複雑な非定常現象となる。これらを精度よく取り扱うため，原子力や火力プラント分野で培った二相流や燃焼の数値解析技術をベースにさまざまな改良を加え，エンジン解析に適用している[1)]。

エンジン内の燃料挙動のシミュレーション例を**図3**に示す。希薄な混合気を燃焼させる，いわゆるリーンバーンによってエンジンの燃費効率を向上することができる一方，リーンバーンでは燃焼が不安定になりやすいという課題がある。そこで，シミュレーションによってインジェクタや点火プラグの配置，噴霧形態，燃焼室形状を最適化し，点火プラグ周りに可燃混合気を形成することで燃焼の安定性向上を図っている。

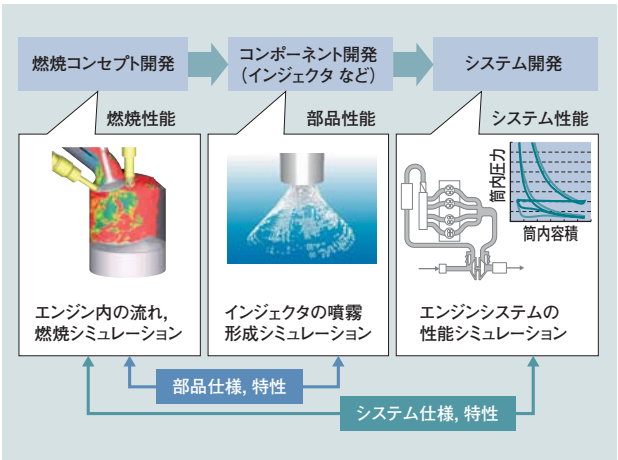


図2　エンジン制御機器開発の流れ
燃焼コンセプトの創出からシステム性能評価までシミュレーションを適用することで，より高い環境性能の実現を追求している。

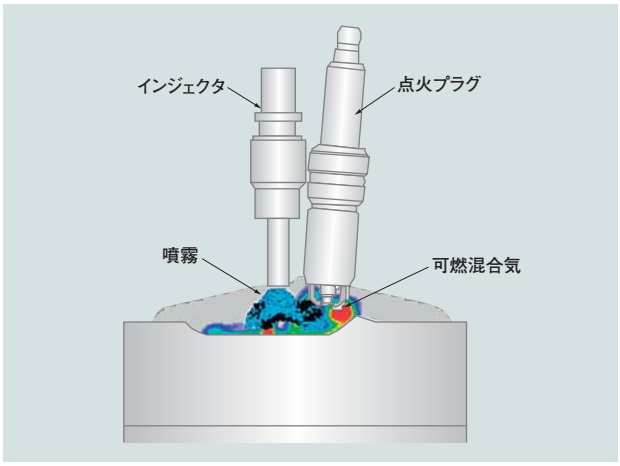


図3　エンジン内燃料挙動シミュレーションの例
噴霧形態と燃焼室形状を最適化することにより，希薄な混合気を安定に燃焼させ，燃費を向上する。

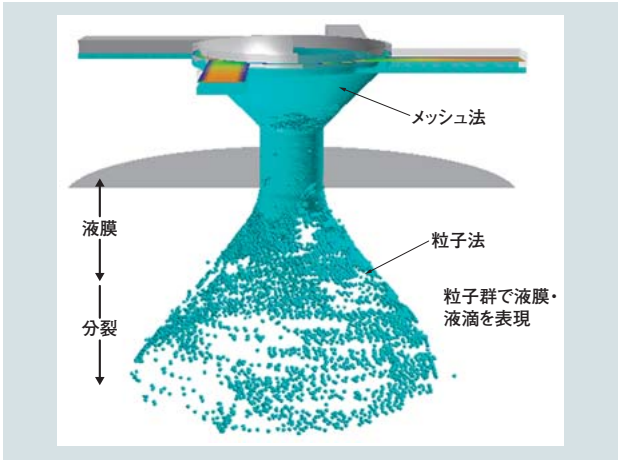


図4　インジェクタ噴霧形成シミュレーションの例
燃料の分裂過程を詳細に解析することで，噴霧形状や微粒化性能を評価する。燃焼コンセプトを実現するインジェクタ仕様を短期で決定する。

燃料インジェクタの開発においては，ノズル内の液体流れ，液膜形成，液滴への分裂過程を統一的に解析できる噴霧形成シミュレーション技術を適用している（**図4**参照）。ミクロな気液界面の追跡にメッシュフリー法の一つである粒子法を適用することで，比較的少ない計算負荷でインジェクタからの微粒化現象を解析できるように工夫している[2)]。このシミュレーションの活用により，燃焼コンセプトを実現するためのインジェクタ仕様を短期間で決めることができる。

最終段階であるシステム開発では，エンジンシステム全体の性能をシミュレーション解析し，燃費，出力，排気性能を評価している。このシミュレーションは，シリンダ内や配管内の流体シミュレーション，車両やコンポーネントの機構系シミュレーション，エンジン制御や診断などの制御系シミュレーションなどから構成される。得られた評価結果は燃焼コンセプト開発へフィードバックされ，さらなるコンセプト改良のために活用される。

2.2 自動車NVHシミュレーション

(1) NVHシミュレーションの目的

NVHとは，車両の振動，騒音，乗り心地を表す言葉であり，とりわけ自動車分野で多く用いられている。近年，静かで快適な車両が求められており，NVHは製品品質として重要性が増している。

自動車における騒音の形態を図5に示す。例えば，インジェクタでは弁の開閉に伴って発生する放射音が車外騒音となり，油圧パワーステアリングポンプではポンプの圧力脈動や振動が車体を伝播(ぱ)して車内騒音となる。これら自動車機器の騒音は，車両伝達系の影響を強く受け，実車搭載後に顕在化して手戻り開発となることが多いため，シミュレーションによる設計上流での検討が求められる。

(2) NVHシミュレーションの適用例

油圧パワーステアリングポンプを対象に行った油圧振動解析の例[3]を図6に示す。まず，油圧解析ではMATLAB/Simulink※)を用いたシミュレータにより，ポンプをゴム配管まで含めて精密なモデリングを行い，圧力脈動を高精度に解析する。パワーステアリングポンプは11枚のベーンの回転に伴い，ベーン枚数の倍数成分の脈動ピークが発生する。同図左下のグラフに示すとおり，解析は圧力脈動の次数ピークを精度よく再現できていることがわかる。次に，この圧力脈動からポンプへの加振力を求め，ポンプのFEM(Finite Element Method)構造解析モデルへ入力する。これにより，ポンプの振動を同図右下のグラフに示すように求めることができる。実測と解析はおおむね一致しており，例えば，ポンプのポート形状やシャフト径を変えた際に，脈動や振動がどの程度変化するのかを机上で検討することが可能である。

放射音解析の例として，モータの電磁音解析を行った事例[4]を図7に示す。モータにはロータとステータ間に作用する電磁力の高調波成分によって加振力が発生し，ステータコアが振動して放射音を発生する。したがって，モータのFEM構造解析モデルと電磁力を用い，同図上に示した手順で解析が可能である。

同図下にステータから100 mm離れた位置での騒音レベルを示す。実構造を忠実にモデル化した詳細モデルと，モータのティース部を省略した簡易モデルのいずれも，実測とよく一致する結果を得ている。

以上の技術を用い，モータ設計段階で騒音を予測して設計にフィードバックし，低騒音のモータを開発することに役立てている。

※) MATLAB/Simulinkは，The Mathworks, Inc.の登録商標である。

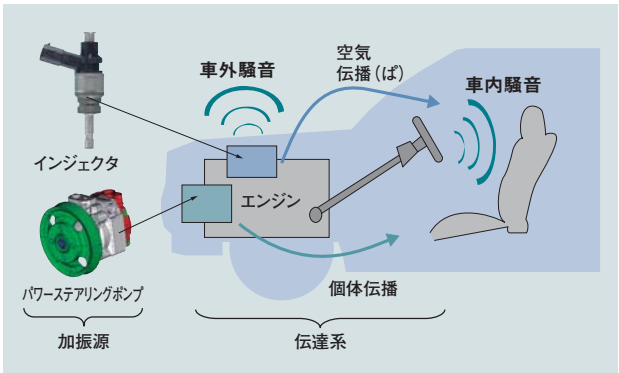


図5 自動車における騒音
自動車機器の騒音は車両伝達系の影響を強く受け，実車搭載後に顕在化することが多いため，設計上流での検討が求められる。

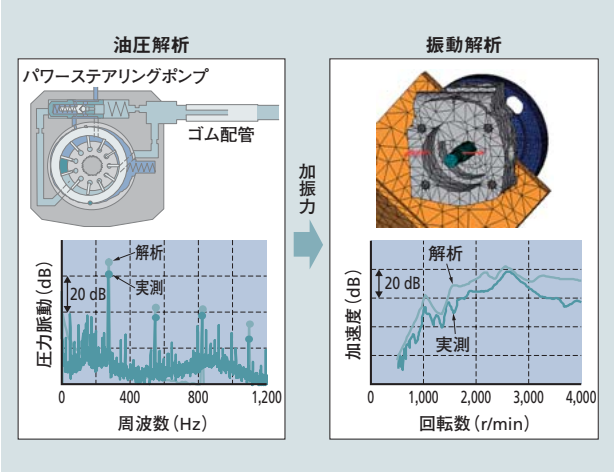
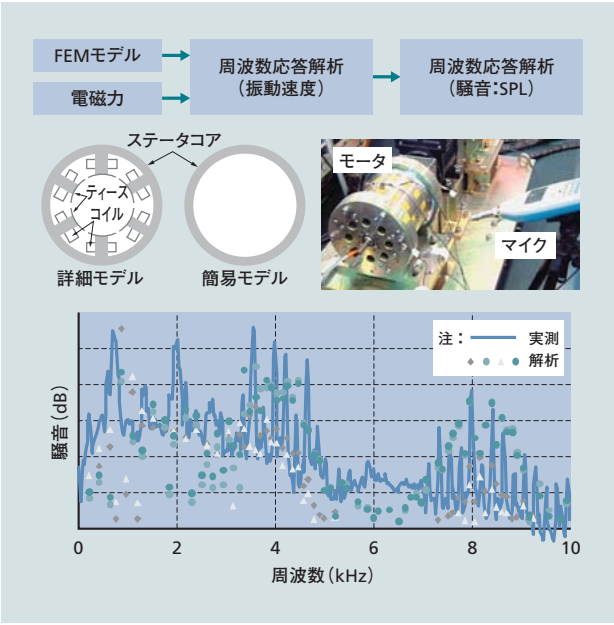


図6 油圧振動解析の例
油圧解析によって求めた圧力脈動から加振力を計算し，ポンプのFEM(Finite Element Method)モデルに入力して振動までを求められるため，振動騒音の小さいポンプ仕様を短期で決定することができる。



注:略語説明 SPL(Sound Pressure Level)

図7 モータ電磁音解析の例
電磁加振力をモータFEMモデルに入力してモータ表面の振動速度とそれによる放射音を評価することにより，試作前にモータ騒音を予測し，低騒音のモータを提供する。

3. 鉄道車両分野におけるシミュレーション技術

鉄道車両はその大きさから，設計･開発時に実物車両を用いてすべての性能を確認することが困難である。このため，シミュレーションによって事前に車両性能を予測し，設計に適用することが重要である。また，製品が規格･規制を満足することを示す手段としてもシミュレーションは活用されている。

鉄道車両向けに開発しているシミュレーション技術として，車内騒音，流体，ダイナミクス，衝突関連のシミュレーション技術の概要と，これらのシミュレーション技術を国内の高速車両，および英国向け高速鉄道車両に適用した事例について以下に述べる。

3.1　騒音シミュレーション技術

鉄道車両は車両の車内騒音を事前に予測し，快適性を評価して車両を設計･開発する必要があることから，車内騒音予測モデルを用いて，車室内の内装材の配置や必要分量など，音響設計に適用している（**図8**参照）。

また，ますます高速化する新幹線の低騒音化や海外規格への対応のために，騒音解析技術を適用している。その適用事例として，新幹線の騒音寄与度の予測結果と実測結果の比較[5]を**図9**に示す。計算値と実測値がよく合致していることがわかる。この騒音寄与度の予測結果を基に，新規車両開発の際には車体各部の遮音性や吸音性能を見直し，構造を変更して低騒音化を実現している。

3.2　流体シミュレーション技術

新幹線をはじめとする高速車両の走行に伴う課題の一つとして，トンネル微気圧波の問題がある。微気圧波は，鉄道車両が高速でトンネルへ突入する際に，トンネル突入によって生じた圧力波がトンネル内を伝搬して，トンネルの出口に到達した際に抗口から外部に放射される圧縮波であり，これがトンネル出口部分で大きな振動や騒音を発生させ，環境問題を引き起こす。微気圧波はトンネルの出入口形状や車両の先頭形状と関連が深く，新型の高速車両を開発する際には，微気圧波を考慮した先頭形状設計が必要である。そのため，流体シミュレーション技術を活用し，精度よく微気圧波を予測して，高速車両の先頭形状の最適設計を行っている。

ここでは，シミュレーションの適用事例として，トンネル走行時の微気圧波に関して，車両模型の打ち込み試験と流体シミュレーションを比較した結果を紹介する。

打ち込み試験は，新幹線先頭形状を模擬した車両模型をトンネル模型に打ち込むことで実施した。打ち込み試験は$\frac{1}{30}$スケールで実施し，トンネル内圧力は入口から60 m（実車換算）の位置で圧力センサーを用いて計測した。打ち込み試験を模擬した流体シミュレーションには，日立製作所が開発したTVD（Total Variational Diminishing）法による非構造格子系の三次元圧縮性解析プログラムを用い，非粘性の条件で解析した。解析には日立製超並列計算機「SR11000」を使用し，解析に用いた要素数は約400万，計算の時間刻みは6.67×10^{-6} sで，車両のトンネル突入に関する解析に要する計算時間は約1日である。

トンネル突入直後のトンネル壁および車両壁面の圧力の分布を**図10**に示す。トンネル内部の圧力が車両先頭部分から高くなっており，圧力波が形成されている様子が解析されて

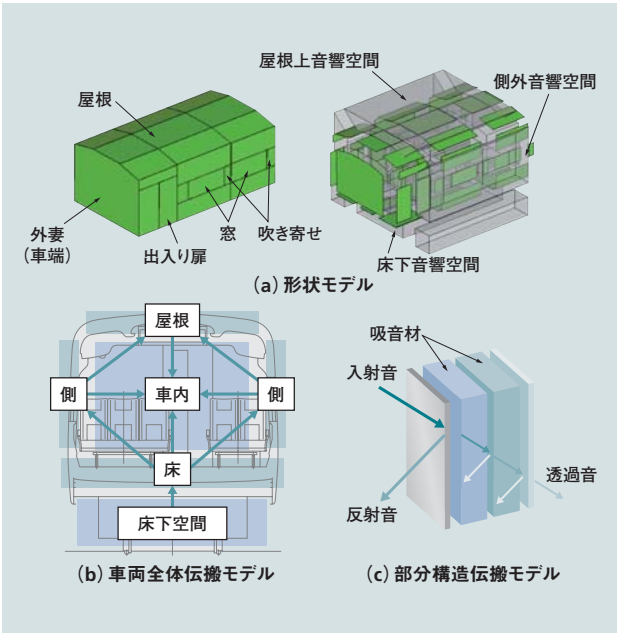


図8　車内騒音予測用振動騒音伝搬モデル
各モデルを用いて車内騒音を予測し，車室内の内装材の配置や必要分量など，音響設計に適用している。

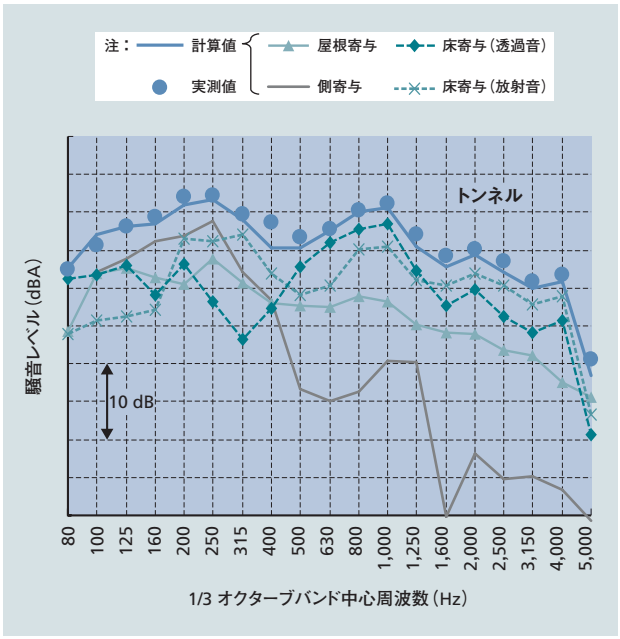


図9　トンネル内の騒音寄与度の予測結果と実測結果
予測結果と実験結果がよく一致しており，この解析によって騒音の寄与度を予測することができる。

feature article

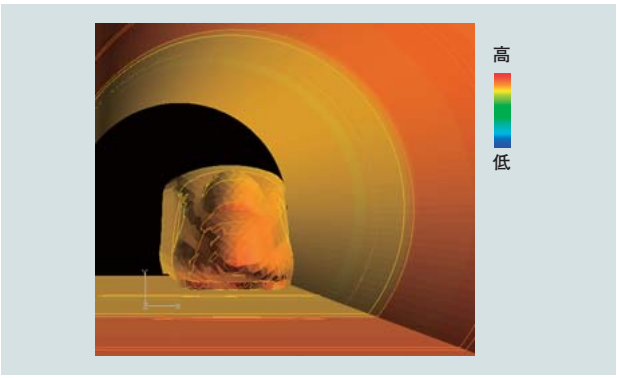


図10　解析によるトンネル突入時のトンネル壁および車体表面における圧力分布
トンネル内部に圧縮波が形成される様子を解析によって再現している。

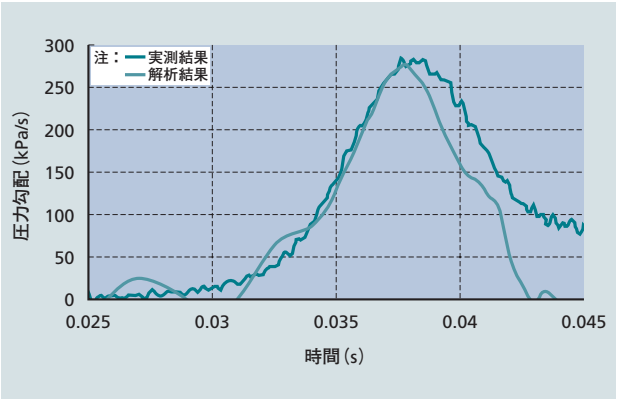


図11　トンネル内圧力勾配の時間変化の実測結果と解析の比較
実測された圧力勾(こう)配と解析結果はよく一致している。

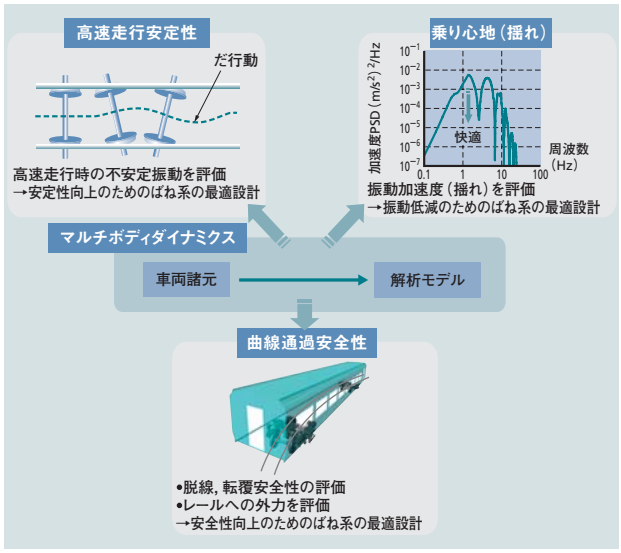


図12　ダイナミクスシミュレータ
鉄道車両の運動・挙動を解析することにより，安全性や乗り心地を予測，評価することが可能なシミュレーション技術である。

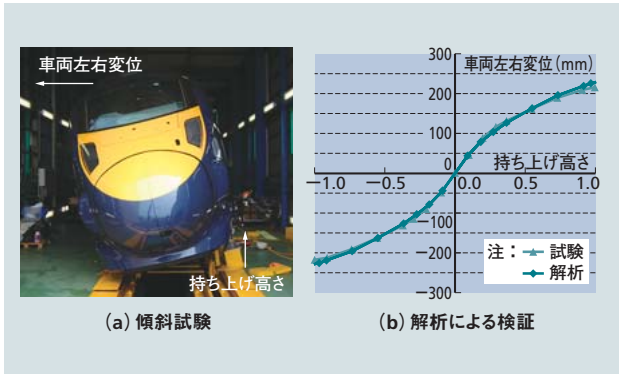


図13　英国特殊試験対応の解析
試験での大変形・非線形状態を解析により模擬しており，解析結果は試験結果とよく一致していることがわかる。

いる。車両模型をトンネルに打ち込んだ際のトンネル内圧力勾(こう)配の時間変化について，実測結果と解析結果の比較を**図11**に示す。実測結果と解析結果がよく一致している。

以上のように，流体シミュレーションにより，トンネル微気圧波を十分な精度で予測できていることがわかる。流体シミュレーション技術を用いることにより，微気圧波の問題を最小化できる先頭形状を開発することが可能となる。

3.3　ダイナミクスシミュレーション技術

鉄道車両では，車両の挙動を事前予測して，安全性・乗り心地などの車両運動性能を評価して，車両を設計する必要がある。日立製作所は，ダイナミクスシミュレータを開発し，高速走行時の安定性，揺れなどの乗り心地，曲線を走行する場合の安全性を評価して，車両・台車の設計・開発に適用している(**図12**参照)。

ここでは，英国向け高速鉄道車両の開発にダイナミクスシミュレーション技術を適用した事例[6]を紹介する。英国向け高速鉄道車両では，英国独自の規格に適合すること，および走行性能として特殊な定置試験を実施することが要求されている。英国向けClass395形式車両の特殊な定置試験状況を**図13**(a)に示す。傾斜試験では車両を傾斜させた場合の車両変位に関して，試験とシミュレーション結果の比較検証をすることが求められている。持ち上げ高さと車両左右変位の関係を**図13**(b)に示す。試験での大変形状態で試験結果と解析結果はよく一致しており，解析による車両変位の予測精度は十分に高いことがわかる。

3.4　衝突シミュレーション技術

欧州では，鉄道車両が万一衝突した際の衝突安全性を確保することが規格で要求されている。規格を順守しつつ，低コストの車両を開発するためには，衝突解析技術によって衝突時の挙動を事前に予測し，衝突緩和構造を設計することが有効である。そこで，スーパーコンピュータを活用した大規模構造物の衝突大変形解析技術を開発し，英国・欧州規格に対応した衝突緩和構造の設計に活用している[7]。

先頭車両の正面衝突に関して準静的に圧縮してつぶす試験〔圧潰(かい)試験〕とそのシミュレーション結果を**図14**に示す。シミュレーション結果は試験の荷重レベル，および変形状

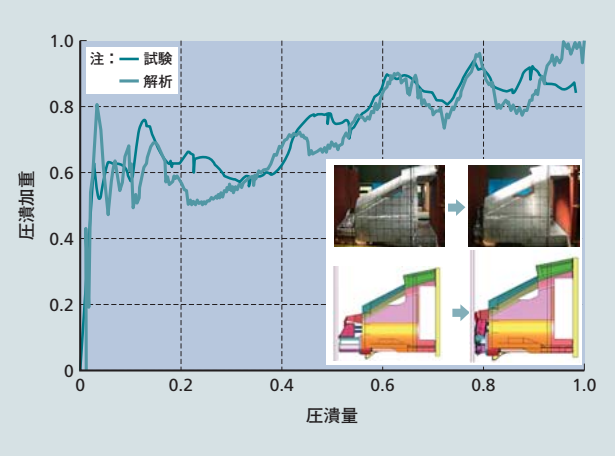


図14　車両端部構造の準静的圧潰試験と解析
圧潰（かい）量と圧潰荷重の特性グラフ，および圧潰状態の図は試験と解析でよく一致している。

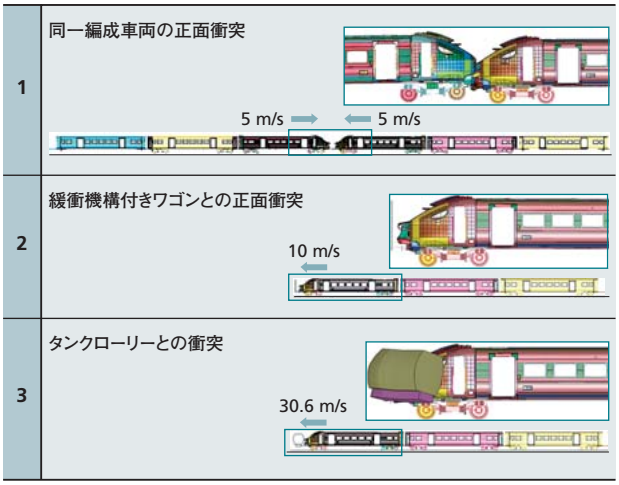


図15　編成車両の衝突シミュレーション結果
車両の先端部に配置した衝突緩和構造だけがつぶれ，運転席や客室の生存空間は守られている。

態をよく表しており，衝突時の挙動を十分な精度で予測できていることがわかる。

欧州規格に規定されている3種類の衝突条件に従った編成車両（6両）の衝突シミュレーション結果を**図15**に示す。3種類の衝突条件に対しても，衝突緩和構造がつぶれ，運転席や客室のサバイバルスペースは確保されているのがわかる。

4. おわりに

ここでは，自動車と鉄道車両の車両分野における製品設計・開発対応のシミュレーション技術への日立グループの取り組みと，製品への適用事例について述べた。

自動車と鉄道車両の車両分野において，シミュレーション技術は開発期間の短縮，製品の信頼性確保，グローバル化製品対応のために必須となっている。

今後，各シミュレーション技術を組み合わせて複雑な現象を解明すること，および高度計測技術と連携して解析精度を向上することにより，自動車と鉄道車両の車両分野のシミュレーション技術のさらなる高度化に取り組んでいく考えである。

参考文献

1）Y. Sukegawa, et al.:In-cylinder Airflow of Automotive Engine by Quasi-direct Numerical Simulation, JSAE Review, Vol.24, No.2（2003.4）
2）石井，外:粒子法とグリッド法の結合によるマルチスケール気液界面解析，Thermal Science & Engineering, Vol.14, No.3（2006）
3）吉澤，外:可変容量型ベーンポンプの油圧振動解析，平成19年秋季フルードパワーシステム講演論文集，p.142（2007）
4）高野，外:モータ電磁振動音の解析手法の検討，日本音響学会講演論文集，p.747～748（2005）
5）武藤，外:実験と数値解析を用いた高速鉄道車両の車内静音化，日本機械学会第14回環境工学総合シンポジウム2004 講演論文集，p.96～99（2004）
6）干鯛，外:英国向け高速鉄道車両の定置試験，J-RAIL2007（2007.12）
7）川崎，外:欧州鉄道向け車両技術，日立評論，**89**，11，872～875（2007.11）

執筆者紹介

合田 憲次郎
1995年日立製作所入社，機械研究所　車両システム研究部　所属
現在，鉄道車両の台車の研究開発に従事
日本機械学会会員

平工 賢二
1991年日立製作所入社，機械研究所　車両システム研究部　所属
現在，車両のNVH技術の研究開発に従事
日本機械学会会員，自動車技術会会員

助川 義寛
1984年日立製作所入社，日立研究所　情報制御第三研究部　所属
現在，エンジン燃焼制御システムの研究開発に従事
日本機械学会会員，自動車技術会会員

阿部 行伸
1995年日立製作所入社，機械研究所　車両システム研究部　所属
現在，高速車両の空力関連問題の研究開発に従事
工学博士
日本機械学会会員