

# 鉄道の研究開発における シミュレーション・スーパーコンピューターの活用



**高垣 昌和**  
Masakazu Takagaki  
鉄道総合技術研究所  
鉄道力学研究部  
計算力学研究室  
上席研究員

**中出 孝次**  
Koji Nakade  
鉄道総合技術研究所  
鉄道力学研究部  
計算力学研究室長

**加藤 千幸**  
Chisachi Kato  
東京大学生産技術研究所  
革新的シミュレーション研究センター センター長・教授  
(日本機械学会 会長)

**上半 文昭**  
Fumiaki Uehan  
鉄道総合技術研究所  
鉄道力学研究部長

## はじめに

**上半** 今年度の鉄道総研の機関誌RRRでは、鉄道総研の鉄道の将来に向けた研究開発のトピックをディスカッション形式で紹介しています。今回は、東京大学生産技術研究所教授・革新的シミュレーション研究センター長の加藤千幸先生と「鉄道の研究開発におけるシミュレーション・スーパーコンピューターの活用」についてディスカッションさせていただきたいと思っています。司会は私、鉄道力学研究部長の上半が努めさせていただき、実務担当として同研究部の計算力学研究室から室長の中出、上席研究員の高垣も討議に参加いたしますのでよろしくお願い致します。

**加藤** こちらこそ、よろしくお願いします。

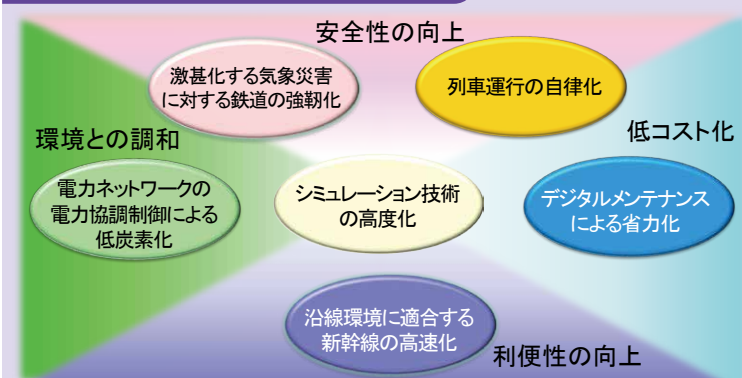
**上半** はじめに、鉄道の将来に向けた研究開発についてですが、**図1**に示すように鉄道総研は

4つの目標（安全性の向上、低コスト化、利便性の向上、環境との調和）に向けた6つの大課題を設定しています。そのうち、我々の研究部が主管している「シミュレーション技術の高度化」は、ほかの5つの大課題すべてに関連している要の技術開発と自負しています。

**加藤** 鉄道総研の組織構成上、シミュレーション部隊は一つに集約されているんですか？

**上半** さきほどごらんいただいたスパコン「究

図1 鉄道の将来に向けた研究開発



車両

- ・舟体構造がパンタグラフ追随性能に与える影響評価
- ・HILSを用いた車両特性評価システムの開発
- ・分散型リアルタイムシミュレータの開発
- ・編成車両モデルによる地震時の走行安全性解析
- ・まくらぎ偏位を考慮した地震時の新幹線車両の挙動解析
- ・地震時における新幹線車両の挙動解析
- ・車体弾性振動評価手法の開発
- ・複数モードを考慮した車体弾性振動のモデル化と低減手法
- ・数値解析に基づく地震時車両走行性に関する被害発生低減効果の定量的手法
- ・車両形式の違いを考慮した地震時走行安全性評価法の開発
- ・構造物～車輪間の大規模モデルの構築と統合法の研究
- ・路盤～車輪間の大規模並列計算モデルの開発
- ・架線・パンタグラフ3次元動的相互作用シミュレータの開発
- ・多様な衝突条件に対応できる衝突安全性評価手法
- ・ハイブリッドシミュレータによる滑走制御性能の評価手法
- ・バラスト軌道と車両、構造物との地震時連成メカニズムの解明
- ・しゅう動摩擦に対する架線・パンタグラフの安定性評価手法
- ・架線・パンタグラフシミュレータの詳細モデル化
- ・制御技術を適用したパンタグラフ性能評価システムの機能向上
- ・排雪時の抵抗力と車両運動の連成解析手法
- ・軸重移動に対応したブレーキ力配分のシミュレーション手法
- ・地震時の車両復元性能に着目した車両挙動の解明
- ・在来線パンタグラフの横風による揚力変化メカニズムの解明

軌道・施設

- ・レール継目部周辺の動的構造解析モデルの構築
- ・計算力学による混合モードき裂の解析
- ・バラスト軌道劣化モデルの開発
- ・線路方向に連続する構造物群の挙動評価に関する研究
- ・粒子法を用いた地盤の大変形解析に関する研究
- ・地盤・構造物のデータベース構築とコンピュータモデルの自動生成
- ・仮想鉄道路線の地盤・構造物群モデルの構築
- ・地震被害データ、観測データに基づく検証と解析モデルの構築
- ・車輪・レールの劣化を考慮した構成則の構築
- ・分岐器構造を考慮した走行シミュレーションの開発
- ・リアルタイム地震波形予測法を活用した高機能鉄道地震被害予測シミュレータ
- ・大規模粒子法解析による鉄道構造物に対する津波被害の再現
- ・河川橋脚におけるマルチスケール洗掘解析手法
- ・鉄道地震災害シミュレータの信頼性評価手法の開発

空力・騒音

- ・流れと音の数値シミュレーション法の開発
- ・浮上式車両の空力・騒音特性の研究
- ・横風を受ける車両周りの流れの数値シミュレーション
- ・車体空力騒音の音源解析評価手法の改良と低減手法の構築
- ・空気流及び空力音統合シミュレータの開発
- ・横風に対する実形状車両の空力特性シミュレーション
- ・トンネルにおける火災を想定した煙流動予測と避難・誘導時間算定
- ・新幹線パンタグラフ舟体の揚力特性変化メカニズムの解明
- ・局地気象数値シミュレーションモデルの開発
- ・編成車両に対応可能な空気流シミュレータの開発
- ・高湿度トンネルの温熱環境シミュレーション
- ・着雪量計算シミュレーションの作成
- ・窓開け等による車内換気効果の評価
- ・数値風洞の要素技術の開発
- ・数値風洞のリアルスケール化と機能拡張

その他

- ・車内安全性評価のための乗客挙動シミュレーション技術の開発
- ・列車走行に伴う電波雑音放射のシミュレーション手法
- ・旅客流動評価シミュレーションに関する研究
- ・事故時の乗客・乗務員の挙動シミュレーションシステムの開発
- ・列車事故時のサイババルファクター研究
- ・踏切保安設備の雷害対策の定量的評価
- ・データ伝送周波数帯域を考慮した通信誘導障害予測計算手法
- ・汎用ハイブリッド車両走行シミュレータ
- ・新供給システムの構築と運転電力シミュレータによる評価
- ・車内安全性評価のための衝突シミュレーション手法の研究
- ・無線式列車制御システム設計のための構成要素評価設定手法
- ・車両・地上設備の消費エネルギー予測に基づくエネルギーネットワーク制御手法の開発
- ・大規模駅の避難安全性評価シミュレーションプログラムの開発
- ・列車内旅客行動シミュレーション機能の開発
- ・微視的構造モデルシミュレーションによるすり板物性評価
- ・離線アーク発生前後の現象解明とシミュレータの開発
- ・離線アークシミュレータの開発
- ・材料開発のための微視的構造モデルシミュレーション
- ・既開発シミュレータと実現象との整合性向上

表1 鉄道総研のシミュレーション技術関連テーマの経緯

2] (図2) などを使った大規模なシミュレーションは計算力学研究室がおもに行っていますが、ほかの研究部でも実用的なシミュレーションの技術開発を行っています。大課題「シミュレーション技術の高度化」においては、対象とする現象や技術分野に基づいた子テーマが設定されており、さまざまな研究室の研究者が参画して

います。また、スパコンなどの実行環境の整備は総務部の情報基盤課と計算力学研究室が協力して行っています。

鉄道総研のシミュレーション研究テーマの経緯

上半 表1は、鉄道総研のシミュレーション主体の研究開発テーマについて、20年ほど遡って5年間の基本計画ごとに、おもなもの、特徴的なものを列挙したものです。大きな傾向としては、2010年くらいから各分野でシミュレーション研究が盛んになり、2015年くらいから大規模並列化や、個々のシミュレーションの連成といった取り組みが盛んになるとともに、エネルギーマネジメントなどの力学系以外の分野にも広くシミュレーションが適用されはじめて

図2 鉄道総研のスーパーコンピューター「究2」



います。最近になると、コロナ対策の窓開け換気や材料の微視的構造といった新しい応用に関するものはありますが、これまでに開発されてきた成果の多くがすでに実用的なツールとして応用されているため、シミュレーション自体のテーマは減少傾向です。これをごらんになって、先生のご感想はいかがでしょうか？

**加藤** 鉄道総研さんがシミュレーションでやりたいことを列挙されてるわけだから、それについて良いとか悪いとかいう筋ではないと思うけど、例えば、20年前と今と比較しても、シミュレーションでできることは全然違うわけで、20年前に投資してこれを開発したから今こういうことにつながっているとか、そういうヒストリカルな部分を、鉄道事業者とかエンドユーザーにわかりやすくアピールできるようにしたらいいんじゃないかと思います。

**上半** この表は、シミュレーション主体の研究開発テーマだけを抽出していて、この先に実用展開を目的とした各研究分野のテーマにつながっているものもあります。具体的に成果がどのように活用されているのか、今後はそれらも含めて分析してみます。

**加藤** 個々のテーマについては逐一申し上げることはないけど、コアコンピテンス（事業の核となるノウハウ・強み）は何かっていうのはすごく重要です。ちょっと例を申し上げると、流体解析でいわゆるNavier-Stokes (ナビエ・ストークス) 方程式<sup>⑤</sup>を解くとかやりはじめたのが1980年代で、その頃の重工メーカーとかは

すべてインハウス（内製）のコードを開発していたけど、結局維持できないので今は市販ソフトを使っているところがほとんどです。いろいろな領域にまたがるシミュレーションを展開していくと、カバーしなければならない現象がどんどん増えていってしまっていて、研究開発の收拾がつかなくなります。鉄道総研はどういうコアコンピテンスを伸ばしていったらいいかって、どこは買って来て、どこは外部と協力して開発する、とか、そういう戦略も必要だと思います。

**上半** 近年、力を入れているエネルギーマネジメントなんかは、鉄道は昔からやっている強みがあって、競争力はあると思います。

**加藤** 確かに、エネルギーマネジメントに関しては、鉄道はエネルギー効率が高いし、シミュレーションとも相性がいいでしょうから、カーボンニュートラルに向けてさらなる貢献が期待できる分野でしょうね。まあ、これだけの歴史がある研究所だから、これなら絶対負けないう技術はまだあると思うので、それをどう伸ばしていくかというところがもっとも重要だと思いますね。

#### ⑤ Navier-Stokes (ナビエ・ストークス) 方程式

流体解析における基礎方程式。土木技術者のナビエ(フランス)と物理数学者のストークス(イギリス)により約180年前に導出された、流体の運動を記述する方程式。

#### ⑥ 連成計算・解析

異なる複数の現象をそれぞれの相互作用を考慮して解析すること。解析結果のデータを一方的に伝達する「片方向連成」と互いにやり取りする「双方向連成」がある。

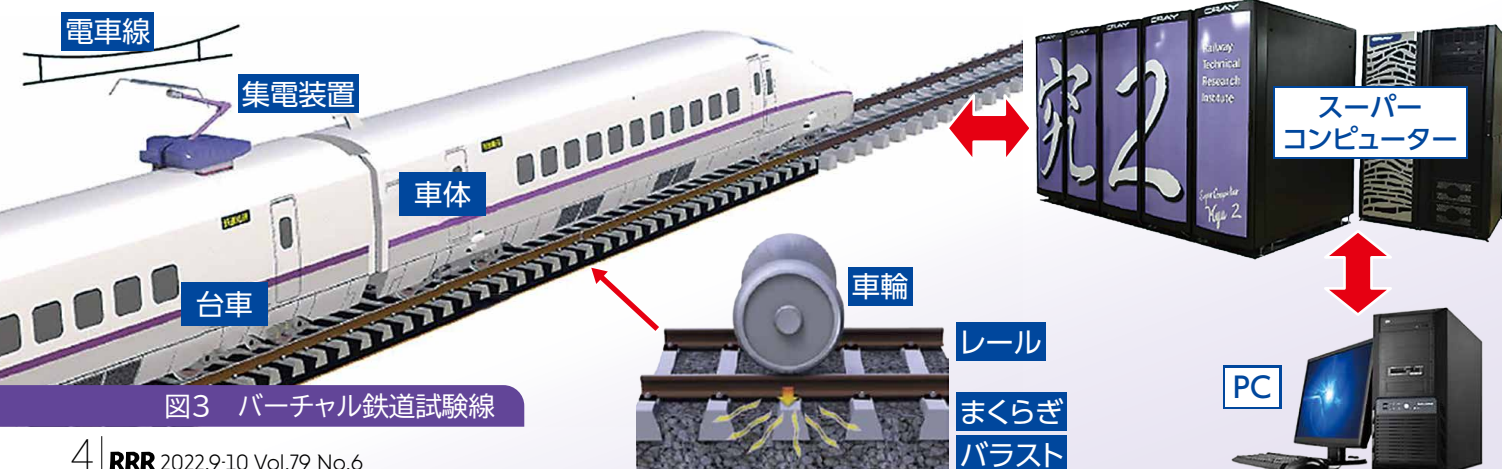


図3 パーチャル鉄道試験線

## 鉄道力学研究部のシミュレーション

上半 それでは、我々の研究部のシミュレーションについてお話しさせていただきます。鉄道力学研究部は分野横断的な基礎研究をおもに行っている研究部ですが、鉄道システムの最適化と複雑現象の解明に資するツールとして、鉄道シミュレーターの開発を計画的に進めておりまして、現基本計画においては、バーチャル鉄道試験線と数値実験室（風洞）が中心的なプロジェクトとなります。

バーチャル鉄道試験線（図3）とは、ダイナミクス系（列車走行系）シミュレーションの連成計算（連成計算・解析）<sup>®</sup>によって鉄道路線を仮想現実空間に再現して複雑な鉄道固有現象を解くもので、高垣が担当しています。また、空気流シミュレーションについては中出が担当していて、現在は米原の大型低騒音風洞を精密に再現する数値風洞（図4）の開発を主体に進めていますが、台車の着雪シミュレーター（RRR7・

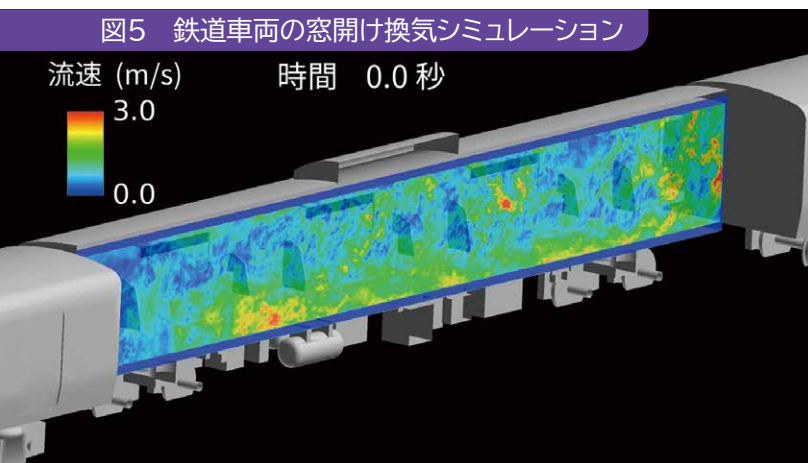
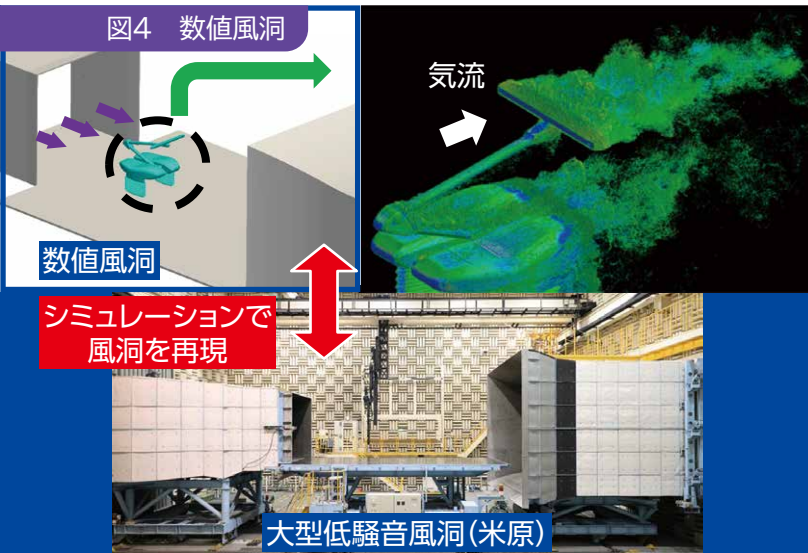
8月号の展望に掲載）や先ほど話題に出た窓開け換気のシミュレーション（図5）などの成果もその応用の一環になります。

加藤 ちょっと話を整理する

と、バーチャル試験線っていうのは、台車、車体、パンタグラフなどのマルチボディがあり、構造力学や集電、摩耗といったシミュレーションをマルチボディダイナミクス<sup>®</sup>に統合していくというイメージでいい？

高垣 イメージとしてはそのとおりです。バーチャル試験線では、マルチボディダイナミクスが中心にあって、それに付随して例えば車輪とレールの接触問題やパンタグラフと架線の接触問題といったところを連成しています。

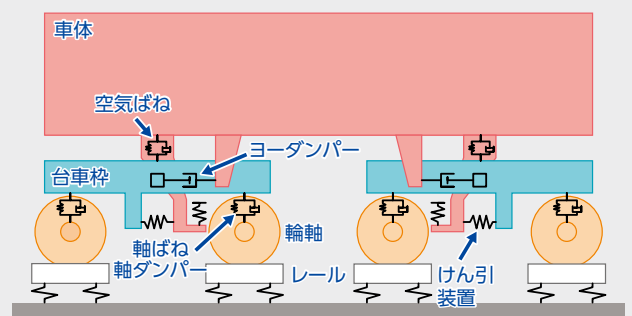
加藤 そこに空力も入ってくる？



## マルチボディダイナミクス (MBD)

空間に配置された複数の物体の間で働く互いの作用に応じて、それぞれの物体がどのように運動するか、またその運動の過程で各物体にどのような力が発生するかなどを数値計算によって求める手法です。この手法を用いることにより鉄道、自動車、ロボットをはじめとする複雑な機械などの運動シミュレーション解析が可能となります。

鉄道車両は、車体、台車枠、輪軸など多くの機械要素が、軸ばね、軸ダンパー、空気ばねなど作用力を与える接続部品により結合されています。MBDによる鉄道車両の運動シミュレーションでは、対象のすべての構成要素に働く力のつり合いやエネルギー収支から各要素の運動状態を求め、それらを連立させて系全体の運動方程式を立てます。この連立方程式の解を数値計算により求めることで車両の運動状態を再現することができます。



**中出** 今のところ空力は我々の計算環境にとっては規模が大きすぎて、連成させるのは現状ちょっと辛いところですが、いずれは入れていきたいと考えています。

**高垣** バーチャル試験線は、リアルな試験線を模擬して実現象を精度良く再現しなければならないわけですが、さまざまなケース・条件をやっていくなかでそれをどこまで求めるものなのか、どういう開発方針を考えていけばいいのか。先生はどのようにお考えになりますか？

**加藤** 高垣さんは必要なら何百ケース？だってシミュレーションをやるって言うてるのかもしれないけど、それをどんな風に進めていくのがこれからの時代、もっともクリティカルになります。

まず、シミュレーションっていうのはいわゆる演繹法<sup>えんえき</sup>で、基礎方程式があって、その基礎方程式が実際のどんな現象を押さえ、作り出すかを見るというアプローチ。一方、いわゆるデータサイエンス<sup>はや</sup>というか、今流行りの機械学習、人工知能もそうですが、基礎方程式があるわけじゃなくて、いろんなデータからなんか法則を見いだすといったアプローチ。さらに、もう一つ。やっぱり実験データがないと絶対ダメ。シミュレーションは、基本的にその法則のなかで出てくる現象でしかないが、実際には何が起きているかわからないことの方が多い。

まとめると、実験結果をどう使うか、シミュレーションをどう使うか、シミュレーション結果がものすごく膨大なデータを創出するのでそのデータをどう使っていくか、という3極を考えて、そのシミュレーションをどう展開するかということを考えた方がいい。

**高垣** そのあたりは重要なことだと理解しています。ただし、例えば、車輪とレールの接触

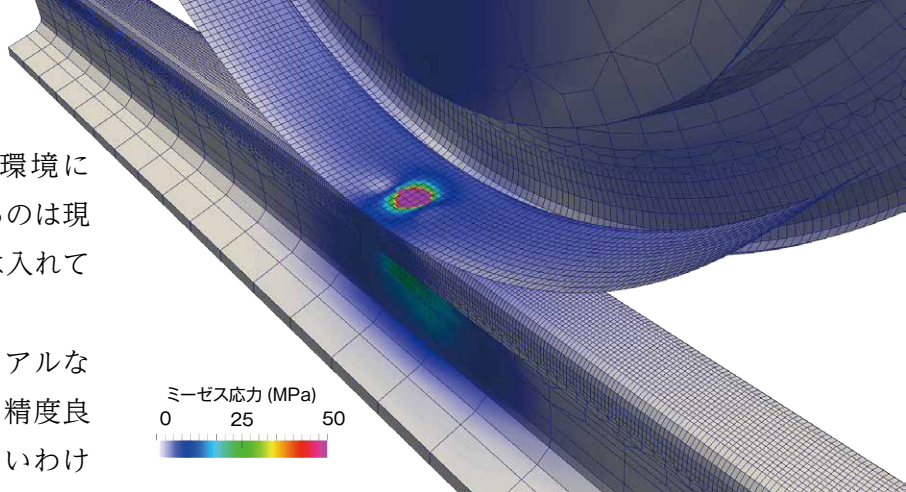


図6 車輪/レールの転がり接触シミュレーション

問題(図6)について、詳細な応力分布とかは、シミュレーションでは出せるけれども、実験ではせいぜい接触領域付近の平均的な荷重とか応力といったものしか測れないので、評価が難しいことが多いと思います。

**加藤** そもそも、実験で見たり測ったりできないことについて直接検証できないのは自明なんだから、計測可能なほかのいろんなデータと比較して辻褄<sup>つじつま</sup>があうかでしょうね。それすら矛盾するなら、やっぱりなんか違うという目で見るとしかない。

僕らが、音の研究をやっているときに、小型のファンから出るある周波数帯域の音がどうしても実験と計算で合わなかった。で、当初は空力音だけしかスコープになかったが、振動伝達音も考慮する必要があるのではないかと、といった感じでだんだん賢くなっていく。そういったことをしないんだったら、何かをその辺で買ってきた方が安いでしょうね。

**中出** そういったところって、やはり外部のシミュレーションの会社に投げて計算だけやってもらっても本当のゴールにはなかなか近づくかない場合があって、やっぱり実際の中身をちゃんとわかってないと……

**加藤** まあ、ここ(鉄道総研)で狙っているような話は外に出してもなかなか進まないでしょうね。外注したところで、はい何か月で何百万円掛かりましたっ



でお金取られるだけ。それは単に、ハードウェアやソフトウェアの問題じゃなくて、やっぱり知識を積み上げていくってのが、研究所で投資をしていく目的なんだから。

**中出** 数値風洞はまさにそれです。米原の低騒音風洞はやはりすごい設備で、そこで取れるデータは貴重で優良ですが、実験もすごく難しいので、シミュレーションによって実験を支援したり、ケーススタディーを増やしたりできればと考えています。最終目標は実車両、実空間ではありますが、当面の目標は米原風洞の完全な模擬です。

**加藤** 風洞実験の支援や補完を目的とするなら、現実的な計算リソースで何ができるか、あるいは再現したい現象をシミュレーションするとどのくらいのリソースがかかるのか、といったコストエスティメーションをしっかりとやることですね。現実的なコストでできないなら、そもそも僕らはコード開発をやらない。将来の計算機がどうなるかといったことも合わせて、研究計画や投資のマイルストーンを置いていった方がいいと思います。

### シミュレーションの将来に向けて

**上半** ちょうど将来の計算機の話も出ましたので、シミュレーションの将来に向けた展望でまとめたいと思います。これからのスパコンがどうなるかなどをふまえて、鉄道総研としてシミュレーションをどう展開していけばいいでしょうか。

**加藤** それについて、まずお話しておきたいのは、先日(7月26日付)、文部科学省の「次世代計算基盤に係る調査研究」という公募の採択が決まりました。これは、次世代計算機、いわゆるポスト「富岳」を作るための調査研究で、「京」のときも「富岳」のときもやっています。実は、私も含めてこの分野の人達はみな気をもんでいるところがあって、次の計算機がどうなってい

くかというところの明確なビジョンがまだ見えていません。もちろん、この調査研究以前からいろいろと議論されて来ているところではあるけれども、ハードウェアの構成がガラッと変わってしまうと、せっかくこれまでソフトウェアをいっぱい開発しても次世代では使えないということにもなりかねない。

だから、これは別に日本だけに限った話ではないけど、これから5年後、10年後もさっきの表のようにシミュレーション研究に投資をしていくということを

考えているのであれば、これまでの投資が無駄にならないように、計算機のビジョンがどうなっていくのかといったことを意識しておいたほうがいいでしょう。

**上半** 現状、鉄道業界は大変な時期にあって、鉄道総研も、次のスパコンにどれだけ投資できるのか、具体的な話はしにくい状況ではありますが、ご提言をふまえて、計算機のトレンドも注視しながら効率的な整備計画を検討したいと思います。

**加藤** 結局、シミュレーションでも何でもそうですが、本質的な競争力とはリードタイムです。難しいことを人よりも先にやって5年リードタイムを稼げば10年は耐えられる。だから、これからは、そのリードタイムを稼ぐために先読みして、それに見合った投資計画なり、研究開発計画を建てるということが重要だと思います。

**上半** 心強いご提言ありがとうございました。厳しい状況ですが、シミュレーションで将来の鉄道総研のリードタイムを稼げるように、研究員一丸となって研究開発を進めたいと思います。本日はお忙しいところありがとうございました。

