

# シミュレーション技術とその未来展望

山崎 憲<sup>\*1</sup> · 大石 進一<sup>\*2</sup> · 小山田 耕二<sup>\*3</sup>

## Simulation Technology and its New Vista of the Future

Ken YAMAZAKI<sup>\*1</sup>, Shinichi OISHI<sup>\*2</sup>, and Koji KOYAMADA<sup>\*3</sup>

**Abstract**– This paper describes the summary of the academic roadmap discussed by the working group. It is anticipated that the region of the simulation will expand infinitely and the simulation will be used for the extensive research. Thus, it was examined a vista of the future by dividing into eight regions.

**Keywords**– simulation, enlargement, diversification, higher precision, high reliability, high availability, high applicability, super safety, engineering creation, low environmental loading, acquisition of the natural science knowledge

### 1. はじめに

横断型基幹科学技術研究団体連合（以下、横幹連合と略称）では、2007年度に経済産業省の委託事業を受託し、我が国で初めての学会横断型アカデミック・ロードマップを作成した。この活動では4つのワーキンググループWG 1～WG4を設置して計4種の課題に対して検討が進められたが、本稿は、そのうちのWG2の活動として行ったシミュレーション技術に関する成果をまとめたものである。このWG2の検討課題は「シミュレーション技術が先導する未来社会」であり、Table 1に示すように、横幹連合の会員学会から選ばれた11名の委員が担当した。その検討風景がFig. 1である。本稿は、これらの委員を代表し、著者らが執筆することとした。

### 2. シミュレーション技術

シミュレーションとは「模擬すること」であると素朴には考えられる。「模擬する」ことは、現象のもたらす結果を予知する手段を与えるが、非常に複雑な現象を、巧みに予知できる「熟練工の技」もこれに当たるともいえる。「人間の知」とは何か、あるいは「知」を得る過程

Table 1: 「シミュレーション技術が先導する未来社会」アカデミック・ロードマップ検討WG委員

	所属学会	氏名	所属
主査	日本シミュレーション学会	山崎 憲	日本大学
幹事	日本シミュレーション学会	大石 進一	早稲田大学
幹事	可視化情報学会	小山田 耕二	京都大学
委員	可視化情報学会	宮地 英生	(株)ケイ・ジー・ティ
	日本計算工学会	山田 貴博	横浜国立大学
	日本コンピュータ化学会	長嶋 雲兵	産業技術総合研究所
	日本リモートセンシング学会	笠 博義	ハザマ
	応用統計学会	原 尚幸	東京大学
	プロジェクトマネジメント学会	木野 泰伸	筑波大学
	日本信頼性学会	山本 正宜	長岡技術大学
	日本シミュレーション学会	中谷 祐介	早稲田大学



Fig. 1: 検討風景

である「認識」とは何かという問への答の一つとして、「複雑なものをシンプルに模擬すること」あるいは「それが可能となること」もあり得る。模擬が「自在」にて

\*1 日本大学生産工学部 千葉県習志野市泉町 1-2-1

\*2 早稲田大学理工学部 東京都新宿区大久保 3-4-1

\*3 京都大学 京都市左京区吉田本町

\*1 Nihon University, 1-2-1 Izumicho, Narashino, Chiba, Japan

\*2 Waseda University, 3-4-1 Okubo, Shinjuku-ku, Tokyo, Japan

\*3 Kyoto University, Yoshida Honmachi, Sakyo-ku, Kyoto, Japan

Received: 1 July 2008, 17 August 2008

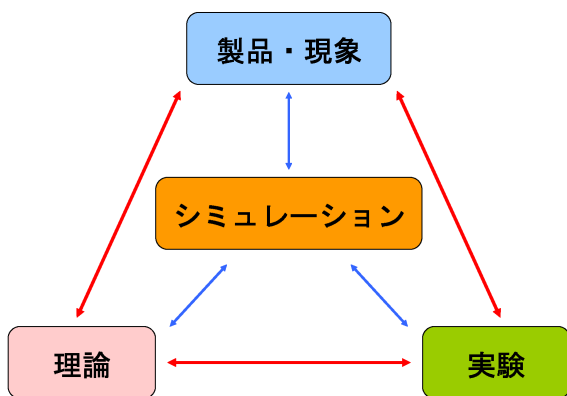


Fig. 2: これまでのシミュレーション技術

きれば、自然の理に従って自由に「もの」が造れることになる。

これまでのシミュレーションは、Fig. 2で示されるように理論、実験、製品・現象（情報、サービスを含む）の三者とは独立した存在で、これら三者を繋ぐものとして位置付けられていた。例えば、理論に基づくシミュレーションにより実験結果や現象の検証を行うことなどがあげられる。しかし、近年ではシミュレーション自体が実験となっている場合や、シミュレーションの結果がそのまま現実の製品に使われている場合（ゲーム等）が見受けられるようになってきた。

科学技術の対象とする現象は年々大型化・複雑化・高精度化しており、それに伴い実験のコストは指数関数的に増大している。また、社会のニーズは多種多様化の一途を辿っている。一方でシミュレーションを支えるコンピュータ環境は価格が線形的な上昇に対し、性能は指数関数的に進歩していくように予想される。このことから、実験を全面的あるいは大幅に取りやめてシミュレーションのみで検証を行う分野が多数現れている（例えば、超高速車両設計、原子力、核融合、宇宙工学など）。したがってシミュレーションが上記三者もしくはその一部と一体化すると共に、シミュレーションが担う、もしくは担うことのできる領域が拡大している。これにより、ほとんどの場合、Fig. 3に示すようにシミュレーションが三者間をほぼ直接に仲介する形態になってきていると考えられる。

また、シミュレーションが高精度化すると“模擬”を超えた段階になる場合もある。その例として以下のようなものがある。

カーボンナノチューブの発見に触発された理論家が、グラファイトと同様の層状物質である窒化ホウ素によるナノチューブを思いつき、構造安定性の計算を行うと想像した物質は安定に存在することが示された。今日では、窒化ホウ素ナノチューブは実験的に生成されており、その物理的性質の研究は、実験による測定とシミュレーションによる予測がタイアップして続いている。（1993

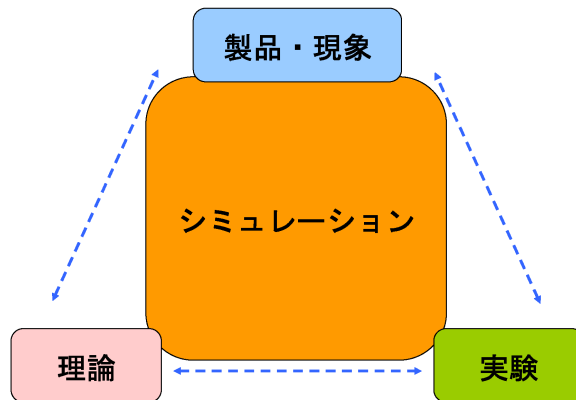


Fig. 3: シミュレーション技術の将来

年頃)

もうひとつの例は、かつて世界を騒がせた捏造論文、強電界によるキャリア注入でフラレン膜の高温超伝導が実現するとして実験的報告を、シミュレーションが否定したことである。実験で報告された超伝導を説明しようとした日米の大学の研究室で、正孔を多量に注入するシミュレーションを行うと、計算の過程でフラレンが対称性を下げ、超伝導を実現するのに必要な高い電子の状態密度が達成できない、という結果が出ており、現在では計算結果は当然のこととして受け入れられている。（2003年頃）

このように実験を長年続けるだけでは得がたい知見をシミュレーションにより先んじて得ることがある例を、過去に見ることができる。

さて、現代におけるシミュレーションにおいて、「計算機によるシミュレーション」は非常に大きなウエイトを占める。Fig. 4に示すように計算機の発明以来、「10年間で5倍」という指数関数的な性能向上を計算機は示してきた [1]。

現代の人間生活における計算機の発展に対する要望の高さは維持されるであろうから、今後50年間はこのような計算機性能の指数関数的な発展は継続されると仮定できそうである。「計算機によるシミュレーション」の特徴は、危険な材料や、廃棄物を生み出すことなく、さらには、ものを実際に造るという実験のコストも人的あるいは社会的なリスクも伴うことなく、「自然科学の知」とそれに基づく「工学的創造」を生み出すことができる点にある。「計算機によるシミュレーション」は持続可能な社会の基となる、低環境負荷の「自然科学知」と「工学的創造」のための仕組みを達成する手段と成り得る。

この度作成した「シミュレーション技術のアカデミック・ロードマップ」の目的は、今後50年間、計算機性能の指数関数的な発展は継続すると仮定した上で、「計算機によるシミュレーション」に重点をおいて、低環境負荷の「自然科学知」と「工学的創造」のための仕組みを

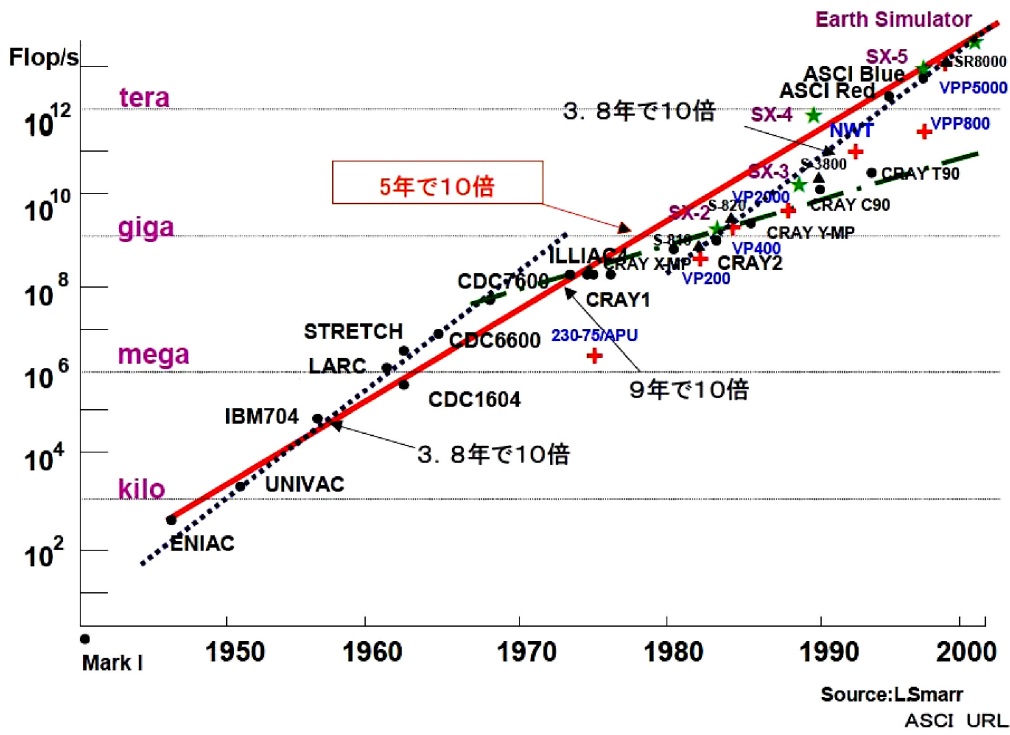


Fig. 4: 計算機性能向上のトレンド

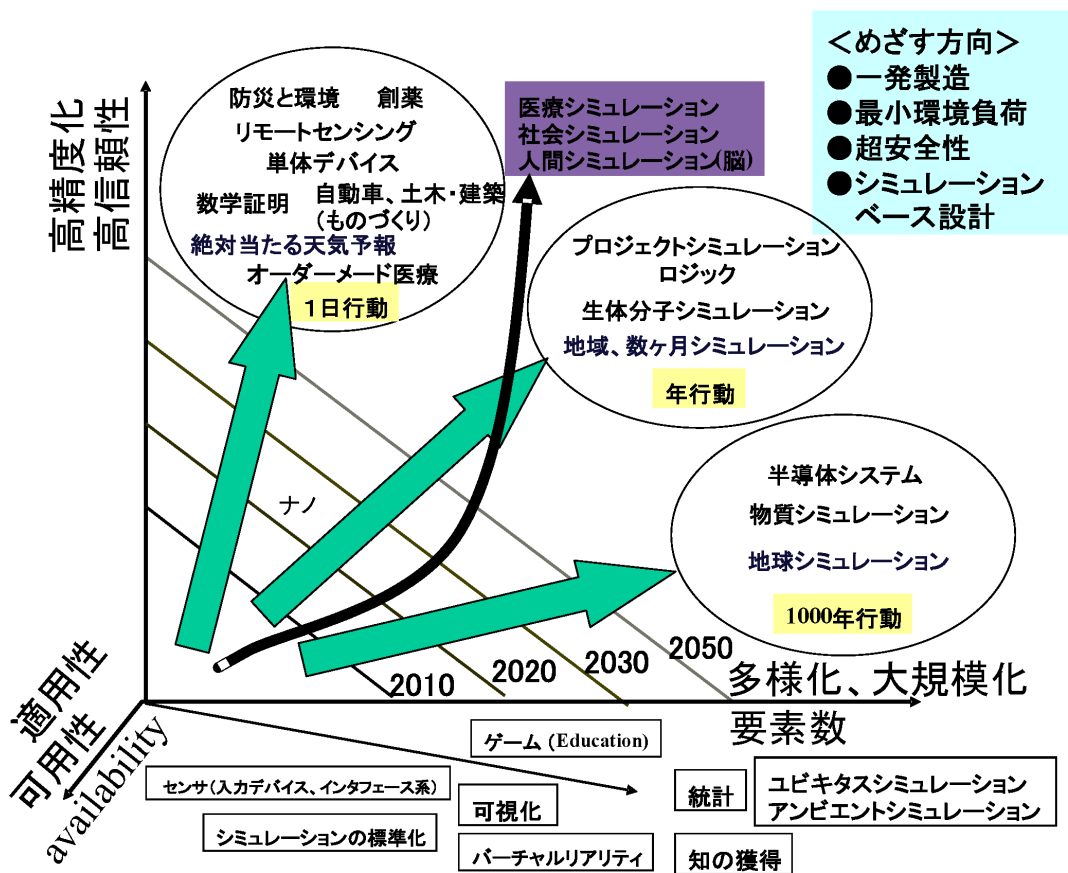


Fig. 5: シミュレーション技術 (アカデミック・ロードマップのイメージ)



達成する手段としてのシミュレーションについて、今後の50年間にわたる研究レベルでの課題と目標をサーベイすることであった。Fig. 5に示すように将来予測の議論を、

- (1) 「大規模化し多様化される方向性」
- (2) 「高精度化され、高信頼度を得る方向性」
- (3) 「可用性、適用性が増大する人間に優しい技術となる方向性」

の3次元的に論じていることも今回作成したアカデミック・ロードマップの特徴である。

### 3. アカデミック・ロードマップ

以下に、アカデミック・ロードマップに示した項目ごとと要約を述べ、最後に全体にわたる総括を述べることにする [2].

#### 3.1 知識創造社会を支える未来デザイン技術

本節での統計科学と予測シミュレーションでは、「シミュレーションによる知識創造」のための学問体系構築の課題について議論している。「自然科学知」は帰依する点を「これ以上は分解できない自明の公理」や「実験事実」から出発して万物を説明する「演繹知」の構築であると考え。これは古代ギリシャの人々の環境・特性に基づく少なくとも2000年強の伝統であり、その上に現代の高度な科学技術が構築されてきた。「演繹知」パラダイムに対する他のパラダイムの「共存」として、自然科学的「帰納知」パラダイム構築のための課題が今後50年間にわたって研究され続けられるであろう。また、「実験」の設計において鍵をなすのは「原理」を抽出するための巧みなトリックであるのに対し、「計算による知の創出」においてのそれは、容易に実質的に計算不可能となる計算複雑性の壁を破って「意味ある」結果を出力することである。帰納モデリングにおける不確かさは「統計的モデル」あるいはパラメータに含ませる「幅」によって表現される。「平均値」や「分散」のようなスカラー量は巧みに計算する手法を創出できる可能性が高いが、統計モデルはより高次の統計量の総体から成る「無限次元」的な統計量によって「知」の方向を指し示すことがある。これからどうやって「単純性」を基本的属性とする「知」を創出するかが課題となる。一方、パラメータの「幅」は、計算を進めるに当たって分解能を減少させ、「意味ある結果」の創出を困難にする。また、解の集合を計算するのにNP完全性以上のより高い計算複雑度をもたらすこともある。このような困難をうまく回避して、「意味ある結果」を創出するための「統計的手法」や「区間解析的手法」の研究がずっと続けられるであろう。一方、工学的には、不確実性が存在しても、不確実性を減少させるためのコントロールを施し、所望の目的値

を達成することを可能としてきた。このような「工学的創造」のための「帰納的方法」論も多く研究されるであろう。さらに、「人的」不確実性、「社会的」不確実性が大きくクローズアップされてくるであろうと言うのも本節の結論である。

#### 3.2 未来デザイン技術としての物質科学と分子・物質シミュレーション

本節では、支配方程式からのまるごと製品創造を目標とする研究の課題について議論している。計算機は、「需要の方向性に基づく汎用性」をもっている。それは「科学的知の創出」のための観点とは異なった方向性であることもある。例えば、シミュレーションの基礎となる浮動小数点数計算も1985年までは、メーカーごとにばらばらに設計され、その値と数学的な「実数」の計算との関係は単純な四則演算（加減乗除）ですら明示されていなかった。1985年になって、「IEEE754 2進浮動小数点数規格」が制定され、semi-morphism という数学的な原理によって単精度浮動小数点数（32bit）、倍精度浮動小数点数（64bit）とその四則演算が標準化された。これによって、浮動小数点数演算と「実数」の四則演算に「不等式で与えられる数学的に厳密な関係」が成立し、数値計算誤差の計算が飛躍的に容易になった。この標準に基づき、数値計算のすべての誤差を把握して、実用的な計算時間で数値計算の誤差を厳密に計算するための「精度保証付き数値計算」の研究が大きく進展を開始した。そして、現代では線形計算においてはこれが実用的なレベルに研究が進展している。このような正しい結果を導く数値計算の理論の確立が今後の50年間の大きな課題となる。本節では、物理現象の支配方程式から現象の再現までを、支配方程式の近似モデリングの精度による計算量と結果の精度という一貫した観点で論じている。「有効な近似モデリングを創出する課題」と「モデルに基づきどのような現象が出現するかを計算する技術」が主要な論点である。「有効な近似モデリングを創出する課題」は自然科学の基本的な問題であることとそれが工学的な創造において鍵となることが豊かな例により記述されている。一方、「モデルに基づきどのような現象が出現するかを計算する技術」には、「自然科学知」を得るための計算機の創出の課題から、要求された精度での解を出力するための計算メカニズムの研究課題まで、独創的な研究を要求する課題が山積することを指摘している。それらの課題のブレークスルーを得るためには、課題を果敢に研究する若手研究者の育成の課題に取り組むことが重要であると指摘している。

#### 3.3 エレクトロニクスシミュレーション

本節では、まず、材料の作成・評価・性能達成までのプロセスをシミュレーションで擬似的に行えることが求め

られるようになるであろう。そのために、従来は陽的に取り込まれていなかった「量子力学に基づくシミュレーション」が模索されるようになるであろう。そして、デバイスシミュレーションでは、想定したデバイス構造における性能を、材料シミュレーションから取り出した物質情報をもとに予測し、実際に複数個のデバイス(素子)に、電界をかけて連立して動作させた場合のパフォーマンス予測が精度良く行われること、さらには、デバイス加工時の条件ばらつきによる性能ばらつきの値もシミュレーションされることが要求されるであろうことが指摘されている。

そして、ロジック・システム回路のシミュレーションは、材料シミュレーション、デバイスシミュレーション技術の発展のもとに、どんなに複雑なシステムでも設計したとおりに、実際に作ったものが動くという、信頼性の高いものにするための研究課題が述べられている。

### 3.4 ものづくりを支えるシミュレーション技術

本節では、数値計算技術と計算環境の飛躍的向上によって、構成要素のみならず、工学的製品や「もの」をまるごとシミュレーションする方向での課題についてサーベイしている。ものづくり支援のためのシミュレーション技術は、設計時シミュレーションと製造シミュレーションの2つに大別できる。

設計時シミュレーションは、設計プロセスにおいて設計者が機器、構造物の挙動を予測するものであり、信頼性、ロバスト性ととも、設計プロセスの進行を阻害しない計算時間でシミュレーションが実行可能であることが要求される。したがって、基本的に研究レベルで開発、利用された各種の技術が、計算機性能の向上によりパソコンなどのユーザーレベルの計算機環境で十分高速に実行可能となった段階で、CAD等のツールに組み込まれ、実現するものとなる。現在の計算機の性能では、応力解析に関しては非線形問題まで既にCADに組み込まれており、今後、連成問題等が設計時シミュレーションとして利用されるようになって考えられる。また、その次の段階では、上述のまるごとシミュレーションや全スケールシミュレーションも設計時シミュレーションに取り込まれていくであろう。

製造シミュレーションは、金型設計などの製造技術者が製造工程のシミュレーションを行い、現在、経験や試行、試作に頼っている製造プロセスの設計、計画を効率的に行うものである。製造シミュレーションは製造プロセス特有の物理現象が対象となることから、通常のシミュレーション技術を利用しつつ、独自の改良や問題に特化した方法なども必要となる。現在、プレス成形加工や樹脂成形などの分野に関しては、シミュレーションがある程度実用化されている。今後は、切削のような切除加工や溶接、熱処理のような相変態現象等を含む加工技術に

関するシミュレーションの開発、実用化が行われると考えられる。

さらに、すべての製造工程をコンピュータの中で再現するシミュレーション技術すなわち仮想製造が設計時シミュレーションと一体となって実現することで、出荷される製品の製造までの過程で一切の試作が行われない真の試作なし製造である「一発製造」が可能となる。

計算量の爆発によって、どんなに進んだ計算機環境を用意しても、それによっては計算できない問題が出現しうるが、この50年間の計算機の指数関数的発展を前提として、どのような研究課題が克服されると、「まるごとシミュレーション」が現実的となるかが詳細に議論されている。

### 3.5 プロジェクトマネジメントにおけるシミュレーション

本節では、プロジェクトという「人的な要素」が色濃く反映するプロセスにおける、シミュレーション技術の研究課題について議論した。プロジェクトにおいて何をシミュレーションするのかという観点から、大きく次の二つの課題に分類して議論した。一つは、プロジェクトの最終成果物である製品やサービスについてのシミュレーションの課題である。そしてもう一つは、プロジェクトの作業工程に対するシミュレーションの課題である。

### 3.6 信頼性とシミュレーション - 人間・社会とのかかわり -

本節では、信頼性や安全性に関わるシミュレーション技術の研究課題について鳥瞰している。信頼性の分野では、システム全体の信頼性を議論するための尺度であるアベイラビリティの議論から、デペンダビリティと呼ばれる単に信頼性のみではなく安全性も対象とする尺度が論じられるようになってきている。これは、信頼性の対象であるアイテムに人間がかかわるようになり、サービス・医療・社会システムの信頼性等、人間を対象とする事例が出てきていることによる。本章では、危険を現在より少なくするためには、人間環境のあり方を基本的に検討することが重要であり、信頼性・安全性の概念を地球規模で考える必要があることを指摘している。その際、実際のシステムで実験できない環境や莫大な費用を必要とする状況や、システムが複雑でサブシステムに分解して評価をしなければならない状況では、シミュレーションが絶対的に必要となり、その方向での研究課題について議論した。

### 3.7 地球観測技術と防災・環境分野でのシミュレーション

本節では、防災・環境分野におけるシミュレーション技術の中から、主として「リモートセンシング」を初め



とする地球観測技術とシミュレーション技術に関わる研究課題を述べた。

具体的には、幅広い防災・環境分野のうち、①自然災害予測、②気象予測、③地球環境予測の3項目についてまとめた。

### 3.8 人間回帰としての可視化技術

本節では、シミュレーションから「知」を得たり、「シミュレーション技術の応用」を行う際に、「可視化」を行うことが鍵となる研究課題について将来展望を行った。「知」とは「見えるようになる」ことであるという理解の仕方がある。見えなかったものを見るようにすることも含めて、「可視化技術の高度化」、「可視化技術の効能の明確化」、「可視化効能の適用」という観点から研究課題を整理した。

以上が「シミュレーション技術のアカデミック・ロードマップ」の概要である。ここではシミュレーション技術に関わる研究課題を

- (1) 「大規模化し多様化される方向性」
- (2) 「高精度化され、高信頼度を得る方向性」
- (3) 「可用性、適用性が増大する人間に優しい技術となる方向性」

の3次元から立体的に俯瞰した。このアカデミック・ロードマップで提示された諸課題等の追求と、そのための研究者の人材育成を行うことにより、「シミュレーション」を「自然科学知獲得」と「工学的創造」のための低コスト・超安全かつ低環境負荷な技術として持続的、かつ、飛躍的に発展させることが望まれる。

### 3.9 今後の課題

理論科学、実験科学に次ぐ第三の科学として位置づけられる計算科学、特に計算機によるシミュレーション技術は、様々な産業分野において広く活用されている。近年では、そのシミュレーション技術は複雑高度な問題を解決する糸口を与えるものとして期待がますます大きくなっている。たとえば、地球規模の大気循環・環境変動の予測、次世代モノづくりの支援、効率的な創薬プロセスの実現、そして個人毎に最適な薬剤や治療法を見出す医療の実現などがあげられる。これらを支援するシミュレーション技術は、計算科学技術の進歩に伴い高精度・高分解能化されていく傾向があり、そのシミュレーション結果もそれらに伴って大規模化しているが、科学技術分野においては、コンピュータの効果対経費が下がっていることから着実にシミュレーション技術はその利用分野を拡大している。

これに対して、人文社会科学分野におけるシミュレーション技術は長年に亘る膨大な蓄積データを持ちながらシミュレーション技術の利用は一部の経済予測に留まる

など鈍い現状がある。今後、人間の行動を組み込んだ広範な社会システムのシミュレーション技術を構築することは健全な人間社会を発展させる上で極めて重要である。たとえばシミュレーション結果の利用法として参加型の学習・体験シミュレーションも考えられる。このような応用は教育機関における学習教育の場だけで無く、たとえば災害時にどのような行動をとったらよいかを体験しながら学ぶというような社会システムにおける利用がある。このようなシミュレーションシステムを構築するには、ハザードマップ的な静的情報だけでなく、人間の心理や行動の研究成果も必要となる。すなわち、特定の日に多くの人に参加してもらうような市民参加型のシミュレーションによって人間の行動を解析することも課題のひとつにあげられる。これら観点から人文社会科学系におけるシミュレーション技術のロードマップを作成し、社会活動を喚起することは極めて重要な課題であると考えられる。

### 参考文献

[1] [http://acc.riken.jp/hpc/HimenoPresen/mechanobio2008\\_himeno3.pdf](http://acc.riken.jp/hpc/HimenoPresen/mechanobio2008_himeno3.pdf)

[2] 各節ごとの参考文献は、横幹連合 学会横断型アカデミック・ロードマップ 第5章 KRI(2008.3)または、シミュレーション Vol.27 巻2号 日本シミュレーション学会(2008.6)に示してあるので参考にしていただきたい。

#### 山崎 憲



日本大学大学院生産工学研究科修士課程修了。現在同大学教授、生産工学部勤務。工博(岡山大学)。平1~4 英国 Southampton 大客員研究員。音場の可視化と数値シミュレーション、音源と物体の同定シミュレーション、快適な音空間の創造等に従事。日本シミュレーション学会総務担当理事、横断型基幹科学技術研究団体連合理事、日本音響学会会員、米国音響学会会員。

#### 大石 進一



1981年早稲田大学大学院博士後期課程修了。現在同大学教授、理工学術院応用数理学科所属。工博(早稲田大学)。数理工学特にソリトン、数値解析、精度保証付き数値計算の研究に従事。日本シミュレーション学会事業担当理事、日本応用数理学会理事、文部科学省科研費特別推進研究「精度保証付き数値計算学の確立」の研究代表者。平成19年度電子情報通信学会基礎境界ソサイエティ会長、同学会フェロー。

#### 小山田 耕二



京都大学大学院工学研究科修了。現在同大学教授、高等教育研究開発推進センター勤務。工博(京都大学)。1985~1988 日本 IBM 西日本事業本部、1988~1998 同東京基礎研究所。科学技術計算の可視化、設計最適化。日本シミュレーション学会理事、可視化情報学会理事、システム制御情報学会理事、情報処理学会会員、IEEE CS 会員。