

4.6 社会科学

人々の社会活動がどのように営まれているか、よりよい社会とはなにか、それはどうすれば実現できるのか、これらは人間の歴史を通してもっとも基本的・根源的な課題であり続けている。しかしながら、社会の複雑化が加速する一方で、今日に至るまでこうした課題の解決は現象論的・対症療法的な段階にとどまっていた。その原因は、そもそも人間の社会的振る舞いについての根源的な理解が確立されていないためと考えられる。

自然科学では、物質世界をまず原子・分子に還元し、それぞれの個性や履歴によらない普遍的な諸性質を確立する。更に必要に応じて、素粒子・時空へと要素還元を推し進めると同時に、こうした構成要素の集団としての諸現象を理解することに成功している。今日の京級計算機では、こうした理解に基づいて物質の複雑な振る舞いを精密にシミュレートし、複雑なシステムの理解・設計に大きく貢献している。しかし、社会科学分野では個々の人間についての基礎的な原理に関する理解が欠如している。

計算機の性能向上にともなって高度化し続けている科学技術においても、その成果を人々に還元するためには社会的に解決すべき多くの課題がある。社会の運営における計算機の利用が浸透し始めてすでに半世紀、個々人にまで情報通信インフラと計算機が浸透しはじめて四半世紀が経過するが、われわれの社会はいまだに情報ネットワークにおける課題を抱えたままである。課題を克服するためには、新たな技術が社会に与える影響に対する効率的で信頼できるアセスメントが必要となるが、これには社会を大きく変える技術であればあるほど困難がともなう。

科学技術にとどまらず、事故・災害・疫病といった非日常的な事象に社会的に対応するうえで、社会科学への期待は大きい。しかし、現実の問題として相次ぐ地震や異常気象、原発事故への防災対応は後手に回っており、社会がどのように機能しているのかをより一層理解することは、喫緊に取り組むべき課題である。

これに対して、近年の研究の結果、社会活動にも一定の普遍性があることが解明され、社会現象を科学的に扱うための原理・基礎理論として注目されている。これは、情報通信技術の進展により、定量性をもって蓄積された社会活動の諸記録を計算機で分析することによる成果である。あたかも社会現象を自然科学的な実験の対象としたかのように扱うことができるようになったことによる、社会科学の進歩と言える。1990年代以降、顕著な成果を挙げてきたこうした手法は、今日ではすでに確立しており「ビッグデータ解析」などと呼ばれて広く使われている。

更に、社会活動の示す普遍性を人などの社会現象の構成要素に基づいて理解する研究も始まっている。いわゆるエージェントモデルによる社会シミュレーションである[1]。

社会科学への計算機の応用は、大きく分けて交通・経済・人間関係の3分野に分類することができる。今日の計算科学は、これらを物理現象への応用と統合することにより社会全体を取り扱うことを目指している。

(1) 現在行われている課題

(i) 交通

交通とは人や物の物理的な移動であり、特に道路網・歩行者群を対象とした研究が進められている。定期運行が主である鉄道・航空・船舶は、もともとエージェントモデルにより記述されており、精密な研究が個々の工学分野で進められている。一方、自動車や歩行者は、個々が自由に、しかし一定の規則に則って移動することにより、自動車交通流・歩行者流が自律的に形成されており、その機構の解明および応用が注目されている。

道路にどれだけの自動車が走行できるかは、道路網を設計する際の基本であり、かつて自動車交通流は、流体方程式を応用して設計されていた。こうした扱いは、各道路は交通容量と呼ばれる台数の自動車まではスムーズに走行できるが、交通容量以上の自動車が走行しようすると渋滞が発生するという描像に基づく。しかしこの描像では、交通容量を超えないところで発生する渋滞や、交通容量以上でも場合によってはスムーズに走行するといった現実の交通流を再現しない。こうした欠陥は、1990年代以降に個々の自動車が前の自動車に衝突しないように走行する運動規則を持つ、というエージェントモデルによって克服された[2]。

現在では、GPSを使った自動車誘導装置（カーナビゲーションシステム）のデータに基づいて、1都市の交通を分析するデータマイニングおよび交通流の基礎モデルの精緻化や、交通センサスデータに基づいたシミュレーションによる交通予測・道路網設計・信号制御が行われている。数万台規模の自動車を扱う地方都市から、数百万台規模の自動車を扱う首都圏や近畿圏といった範囲までを対象とした分析・シミュレーションである。

歩行者の場合は、運動の自由度が自動車よりも大きいため、そのシミュレーションには自動車よりも少し手間がかかる。群衆を撮影した動画を解析する他、携帯電話などの端末からのGPSデータにより、個々人の動きを記録し分析することができるようになっている。これまでに、駅や商業施設など人の出入りの多い施設の設計や、人出の予測や避難計画の設計などが行われている。また、事故・災害などにより歩行移動せざるを得ない場合の群衆の振る舞いを可視化し、有効な誘導方法をシミュレーションにより立案する試みが都市規模で行われている（図4.6-1参照）。

ガスや石油のパイプラインや電力・ガス・上下水道網なども、資源を物理的に移動させる手段という意味で交通の一種と考えられる。これらは、これまでにそれぞれの専門分野で研究が進められてきた歴史が長い。しかし人口の増加や経済成長にともない、資源開発にともなう環境負荷から、末端の受給者の消費行動まで含めた研究が必要となっており、社会全体を扱う必要性が高まっている。

特に近年では、電力の交通網である電力網のシミュレーションが行われている。この背景には、マイクロタービンや太陽電池等の普及による発電施設の多様化や福島原発事故などで露見した既存電力供給体制の課題、インバータ制御の普及による需要特性の強非線形化への対応、発送電自由化などのため電力網再検討の機運の高まりなどが挙げられる。電力網シミュレーションでは、非線形振動子系を数値計算することが必要になるが、結合ネットワークの構造が複雑であり、かつ需要側・供給側ともに離散事象性が強いことも解析を複雑なものとしている。これまでに、基幹部分や都市レベルでの解析が試みられている。

津波から避難する群衆のシミュレーション

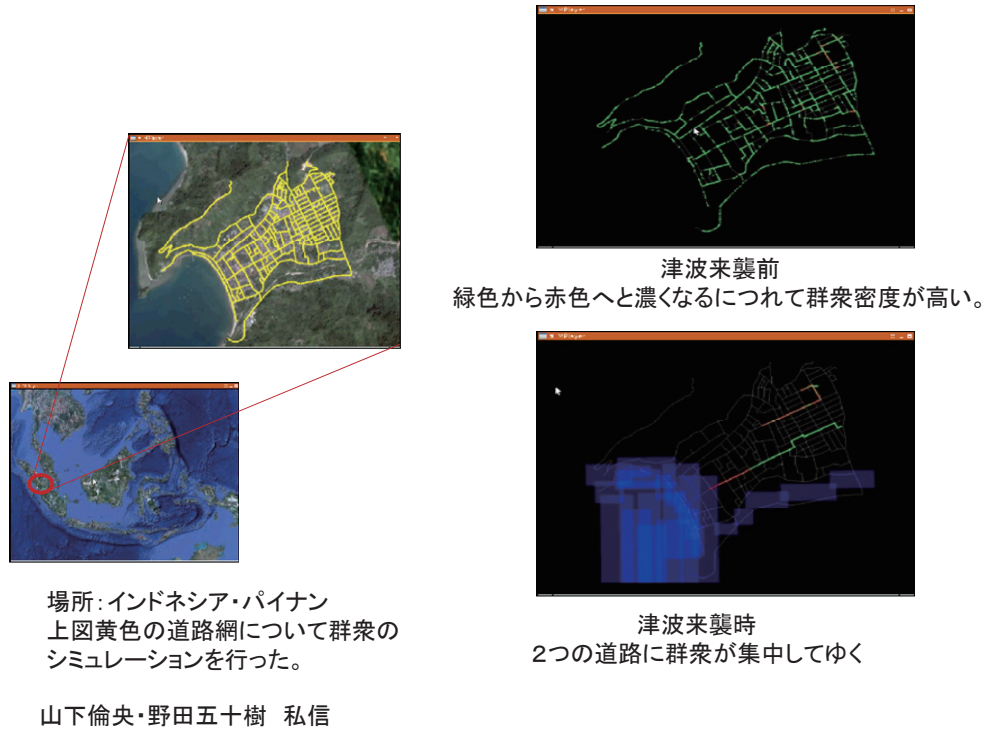


図 4.6-1 津波から避難する群衆のシミュレーション

(ii) 経済

社会活動の広域化にともない、資源を適切に配分することの重要性が高まってきた。低開発国・発展途上国の多くの国民が中開発国・先進国へと進もうとしている今日において、資源は天然資源に限らず、人的・資本的・生産財的・制度的資源といった社会的資源も注目されている。

資源の適正な配分を実現することは、経済制度の大きな目的である。これに対し、配分資源の質・量を整え、安定で持続可能な取り引き制度を用意したうえで、時々刻々の最適化は自由な取り引きにゆだねるという方法が有効であることが、これまでの歴史からの教訓であった。しかし資源と取り引き内容の多様化は著しく、また信頼性の高い制度設計自体も数学・計算科学の高度な課題となっている。例えば、金融オプションの値付けに、モンテカルロシミュレーションが使われていることはよく知られている。

経済分野では計算機の応用が進んでおり、オンライン取り引きは普遍化し、詳細なデータの蓄積が進んでいる。こうした「ビッグデータ」の解析から、1990年代には株価や為替の変動の実像が明らかとなり、伊藤解析に基づく金融工学理論の根本的な誤りも明らかとなった[3]。これを転換点とし、その後、今世紀の経済は計算機とともに急展開している。その最たるものが為替取り引きである。

東京・ニューヨーク・ロンドンに設置された取り引きサーバを核として展開されている為替取り引きは1000分の1秒（ミリ秒）を争う情報戦であり、取り引き参加者は、取り引きサー

バから物理的距離の近いすぐ隣に自分の発注用のサーバを設置しているほどである。取り引き戦略・戦術の立案自体、計算機に依存している。

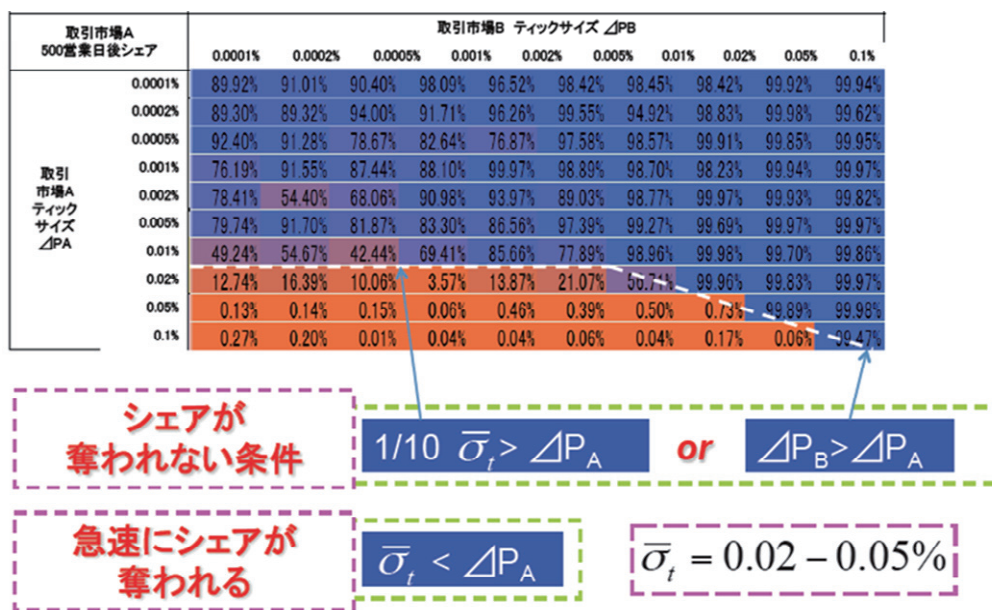
一方、取り引き制度自体は未だ完全なものとは言えず、瑣末な理由で暴騰・暴落し、経済システムの根幹を揺るがす事態を招いた事例は多い。これに対し、市場取り引き全体のシミュレーション解析による制度設計や経済活動の実時間監視システムが研究されている。

経済取り引きへの計算科学の応用は証券市場に限らず、魚市場などの現物市場でも進められている。

取り引きエージェントによる市場シミュレーションでは、個々の銘柄のレベルでの解析が進められている。例えば、株価の刻み幅（ティックサイズ）の最適化研究などが進められ、株式取り引き制度の改善に寄与している。また、為替取り引きのデータから現在の値動きの動向とゆらぎを分離し、大きな変動を予測する試みも成果を挙げている（図 4.6-2 参照）。

銀行間取り引き・企業間取り引きのネットワークの解析から、倒産のシステミックリスクを評価する研究も行われている。取り引き関係のネットワークから、ある会社が倒産した際に連鎖倒産する可能性がある企業を推定する試みであり、連鎖倒産する会社が少数に限られるのか、あるいは無視できない規模に広がるのかに注目する一種のパーコレーション（浸透）問題である。

社会科学で扱うネットワーク構造は、連続系に対する離散近似による数値解析や物性シミュレーションで現れる、簡単で一様な構造ではないことが一般的である。よく現れるのは、ランダム・スモールワールド・スケールフリーといったネットワーク構造である。このため計算機で扱う際に、いわゆるステンシル処理とはならず、記憶装置上のデータ配置や並列処理での負荷分散が重要となる。



株式取引シミュレーション

株価の最小変動価格(ティックサイズ)の異なる2つの取引所の競争を予測

水田 孝信, 早川 聡, 和泉 潔, 吉村 忍

人工市場シミュレーションを用いた取引市場間におけるティックサイズと取引量の関係性分析
日本取引所(JPX)ワーキングペーパー, vol 2, 2013.

<http://www.tse.or.jp/about/seisaku/wp/>

図 4.6-2 株式取引シミュレーション

(iii) 人間関係

社会は、言うまでもなく人間関係を基礎としている。人間関係がどのように形成され、どのように発展するかをエージェントモデルおよび人間関係の「ビッグデータ」から解明する研究も進んでいる。

どのようなエージェントが人間の社会集団を形成するのかについては長い研究があるが、最近、数理的進化論的手法により集団の離散集合を記述するモデルも提唱されている[4]。

2000 年代後半以降、数百万台規模の携帯電話の数週間にわたる通話記録を解析した研究から、人間関係の構造が明らかとなってきた(図 4.6-3 参照)。また、ブログ(インターネット上の公開日誌)やツイッター(短いブログ)といった文字情報から、社会的事象の状況を分析する研究も進められており、自然言語処理へのブレークスルーとなっている。これらは、文章から作った個々の単語のネットワーク、また文章や発言の引用関係のネットワークを解析する作業である。

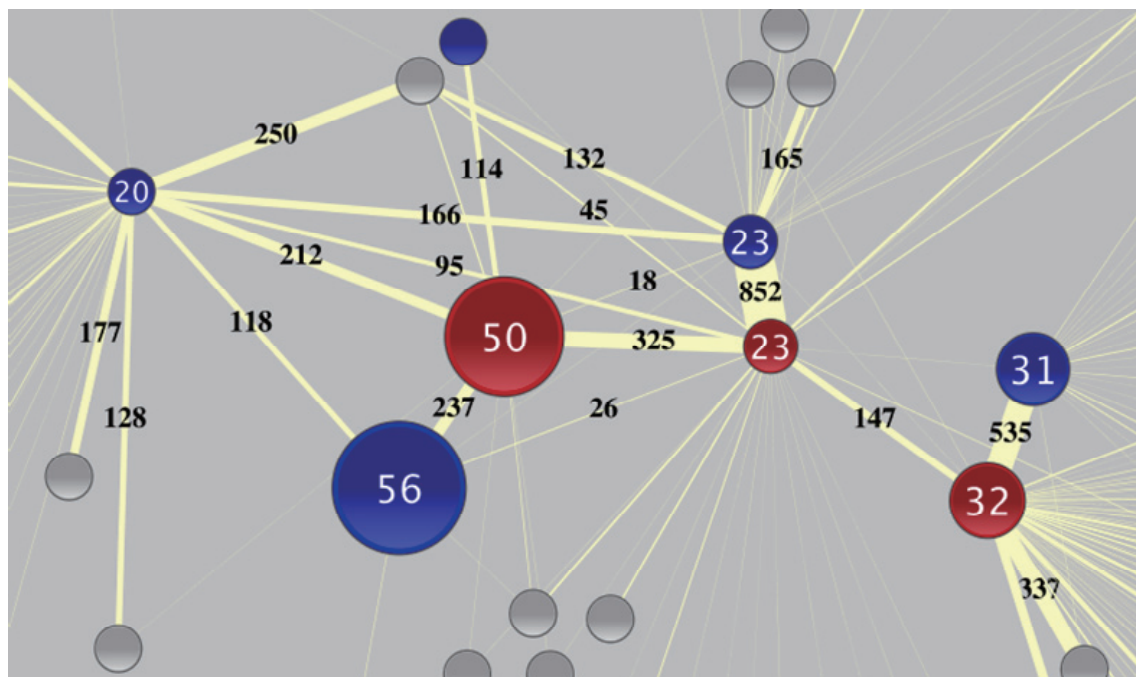


図 4.6-3 携帯電話の通話記録の解析結果¹ [5]

(2) 長期的課題

計算機による社会科学は、今のところ社会を構成する各要素の範囲内に限られている。長期的には、交通・経済・人間関係を物理地球と統合することが見込まれる。そして、防災・減災といったリアルタイム処理から、制度設計といった莫大な社会実験シミュレーションまで、幅広く展開する社会基盤となると考えられる。こうした応用を実現するためには、計算機の性能向上のみならず、社会的なデータの収集・活用が不可欠であるにもかかわらず、現在、社会データの収集には制約が大きい。戸籍・住民票等の個人情報に関わるデータや、徴税・警察公安をはじめする行政が収集したデータの活用には厳格な制約が課せられているからである。その一方で、ネットショップをはじめとするネットサービスプロバイダは、ユーザーとの契約に基づいて種々の情報を集め、分析・活用を進めている。社会シミュレーションとその利用技術の黎明期である現在にあってのこうした動きは、データの抱え込みを通して、将来の利用技術まで囲い込もうとする動きでもある。実際、企業が集めたデータを研究者が研究のために購入することが常態化している。

こうした動きは、自由で生産的な研究を阻害するものであり、公共の福祉の追求とは相いれないものである。公共の目的に積極的に活用することを目標とした場合には、社会的なデータを効率的かつ容易に収集できる体制を整えることが緊喫の課題である。

また、社会科学に現れるネットワーク（グラフ・離散構造）の解析には、組み合わせ論的な計算量がつきまとい、うまく回避する必要がある。人間関係のエージェントモデルでも、自分

¹人間関係のネットワーク記述する離散グラフ。青丸は男性、赤丸は女性を表わし、丸の中の数字は年齢である。丸をつなぐ辺の数字は関係の親密さを表わすインデックスである。

の行動を決める際には組み合わせ論的な、あるいはそれ以上の計算量が必要となることも指摘されている。相手が自分をどう理解しているかを評価する際に、すべてのエージェントにわたる相互参照が繰り返されるためである。

組み合わせ論的な計算量が必要となる処理、特に NP 完全問題では、完全な探索により真の解を求めることは期待できない。求めることができる解は、常によりよい解である。より高性能の計算機からよりよい解が得られるため、計算機の不断の高性能化が求められるのである。

(3) 次世代に解決すべき課題

社会シミュレーションの特徴は、基礎法則が多様であり、またモデルパラメータも多いことである。更に、典型的な複雑（複合）系であり、交通・経済・人間関係といった種々のシステムシミュレーションを統合する必要がある。このため、個々のシミュレーション自体の規模は大きくなくとも、全体として必要となる処理能力は大きくなる。

また、防災・減災のリアルタイム処理では、莫大な試行を瞬時に処理し、次の瞬間への最適解を提示することも期待される。

更に、現実の社会からリアルタイムで情報を収集し続ける必要があるため、ネットワーク性能・データベース処理も大規模となる。

現在、社会科学が直面している計算科学上の課題は、こうした大規模かつ離散事象的パラメータ探索を効果的に実行することである。「京」コンピュータをはじめとする現在のスーパーコンピュータは、数十万台から数十万台規模の計算ノードからなる超大並列型計算機であるが、その全体を統合し効果的に活用する技術は発展途上である。莫大な数の計算ノードのそれぞれで、ノードのオペレーティングシステム (OS) が基本ソフトウェアとして動いており、更に個々の OS をまたいで情報をやり取りする通信システムソフトウェアと複合してベンチマーク性能の向上が続けられている。本来は計算機全体を見据えたプロセスの管理・実行が必要であるが、そうした超大並列型計算機の OS は存在しないに等しい。次世代のスーパーコンピュータでは、この課題の解決が望まれる。

(4) 課題を解決するために必要なアプリケーション群

(1)に記述した、交通・経済・人間関係を、地球全体でシミュレートするには、アプリケーションおよび(3)に記述した大規模な実行管理システムが必要となる。

交通シミュレーションでは 10^9 台の自動車、 10^{10} 人の群衆の動きを、エージェントモデルとして扱う。経済シミュレーションでは 1000 分の 1 秒単位の為替・証券取引から、10 年単位のインフラ整備を扱う。これら個々のシミュレーション自体は京速級のスパコンでも実現できるものも多い。しかし社会シミュレーションの常として、不断のデータ同化が必要である。更にシミュレーションモデルも単一のものでは一面的となるため、多数のモデルによるシミュレーションの比較検討が不可欠となる。これらを束ねる実行管理システムと合わせて、エクサフロップスの演算能力、毎秒ペタバイトの外部入出力のスーパーコンピュータが期待される。

人間関係シミュレーションにおいては、 10^{10} 人程度の集団が、集団の規模に応じて異なる規則に従う課題を扱うことを想定しているが、現時点においては大規模な人間関係のネットワー

クを記述するモデルそのものが研究段階にある。大規模な人間関係をシミュレーションするための解法および数値モデルはまだ存在せず、現時点で本課題を解決するために必要な計算性能は見積もることは出来ない。しかしながら、本分野の研究は近年の「ビッグデータ」などの背景のもと今後数年のうちに急速に進展すると期待され、数年後には大規模な人間関係のシミュレーションを行うアプリケーションが開発されると考えられる。その実行には、高い性能のスーパーコンピュータが必要となることが想定される。

課題	要求性能 (PFLOPS)	要求メモリ バンド幅 (PB/s)	メモリ量/ ケース (PB)	ストレージ/ ケース (PB)	計算時間/ ケース (hour)	ケース 数	総演算量 (EFLOP)	概要と計算手法	問題規模	備考
自動車交通流のリアルタイムシミュレーション	1000	100	0.00011	0.001	0.0000000028	1000		地球上の全自動車交通規模 (10億台、道路総延長400万Km)、エージェントモデルによるシミュレーション (実際に計算対象となる稼働している車の台数は 10^8 台と推定)	10^8 台 \times 10^3 演算 \times 10^3 step \times 10^3 ケース (10秒分のシミュレーション) これを0.1 secで計算する	要求ストレージおよびその演算量は1日あたり、とする。
株式取引所ルールの最適化	2100	0.0001	0.00000001		0.0024	10000	180000	1取引所の1000銘柄について、1日分の取引をトレーダーエージェントモデルでモンテカルロシミュレーション	総演算量 5時間 \times 3600秒/時間 \times 1000 注文機会/秒 \times 10^4 演算/注文機会 \times 10 トレーダー \times 10^4 サンプル \times 10^3 銘柄 $= 1.8 \times 10^{19}$ 演算。これを24hで 10^4 ケース計算する	整数演算が中心 「要求性能」「総演算量」はインストラクション数
人間関係シミュレーション								10^4 人程度の集団が、集団の規模に応じて異なる規則に従うエージェントシミュレーション		現時点において、問題を記述するモデルおよび数値計算モデルが確立していないため、要求計算リソースを見積もることが出来ない

※本見積もりは未だ精査中である。より精度の高い数値はWeb版 (→「1.2. 本文書の構成」) を参照のこと。

(5) 他分野との連携

(3)に挙げた社会科学の次世代の課題では、以下の他分野との連携が必要と考えられる。

(i) 地球物理・宇宙科学

天気シミュレーションや太陽活動データと社会シミュレーションとの連携により、交通・経済活動の最適化が期待される。例えば天気の変化にともなう自動車交通や鉄道運行の効率化や、電力需給予測、農業・漁業生産の調整などが挙げられる。

(ii) 防災減災

地震・津波・火山噴火といった激甚災害の予測、あるいは予測は無理でも初動現象の観測に基づく災害予測と対策とが期待される。何秒後にどのような地震波・津波が到達するかを、到達する前に予測し、人的社会的被害を極小化する対策を実行することが期待される。

(iii) ものづくり

現在の社会経済でどのような新商品や新技術が期待されているのかを予測する技術の確立が予測される。これにより無駄な生産・消費を抑制するとともに、消費者にとって価値の高い商品の供給・普及を促進することが期待される。

(6) 公的な意見交換とそのサマリー

日本における社会科学へのスーパーコンピュータの応用は黎明期であり、その中核となる研究者組織も立ち上げの準備の段階である。今後、公的な場を早急に整備する必要があるという点で、多くの研究者の意見は一致している。

また現行の法体系の解釈・運用を、公共の目的のための社会シミュレーションに必要なデータの効率的活用の観点から再検討する必要がある。

(7) ロードマップ

年代 課題	2012 ～	2014 ～	2016 ～	2018 ～	2020 ～	2022 ～
交通シミュレーション	地域規模のシミュレーション		交通渋滞緩和への応用研究			
			走行状況のリアルタイムデータ同化の実証研究			
			1国から世界規模のシミュレーション			
経済シミュレーション	1取引所規模のシミュレーション		取引制度設計・監督への応用研究			
			取引所データのリアルタイム同化の実証研究			
			世界規模のシミュレーション			
人間関係シミュレーション	村規模(数千人)のシミュレーション		人間集団の生成・管理への応用			
			人間関係のリアルタイムデータ同化の実証研究			
			1国から世界規模のシミュレーション			
複合シミュレーション実行管理システム	100万並列・100万パラメータ規模のシステムの実現		社会最適化への応用研究			
			1億スケールのシステムの実現			

図 4.6-4 社会科学ロードマップ

参考文献

- [1] 横断型基幹科学技術研究団体連合: "分野横断型科学技術アカデミック・ロードマップ報告書", 経済産業省平成 20 年度技術戦略マップローリング委託事業, 2009H. Kamada et al., Phys. Rev. C 64, 044001 (2001); E. Hiyama, Prog. Theor. Exp. Phys. 2012, 01A204 (2012).
- [2] M. Schreckenberg, A. Schadschneider, K. Nagel and N. Ito, "Discrete stochastic models for traffic flow", Physical Review E 51 (1995) p.2939.
- [3] Rosario N. Mantegna and H. Eugene Stanley, "Introduction to Econophysics: Correlations and Complexity in Finance," (Cambridge University Press, 2000)

- [4] J.-P. Onnela, J. Saramaki, J. Hyvonen, G. Szabo, D. Lazer, K. Kaski, J. Kertesz, and A.-L. Barabasi, "Structure and tie strengths in mobile communication networks", Proceedings of National Academy of Science (PNAS) 104, 7332-7336, 2007
- [5] Vasyl Palchykov, Kimmo Kaski, Janos Kertesz, Albert-Laszlo Baraba, Robin I.M. Dunbar, "Sex differences in intimate relationships", Scientific Reports vol.2 (2012) p.370