



Power of Computation to Empower Pioneers.

〒113-8658 東京都文京区弥生 2-11-16  
 2-11-16 Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8658, Japan  
 Phone:03-5841-2710 / Fax:03-5841-2708 (G3)  
<https://www.itc.u-tokyo.ac.jp/> (日本語)  
<https://www.itc.u-tokyo.ac.jp/en/> (English)



# 信頼できる情報社会

A Trustworthy Information Society

センサーによって得られたデータを解析して工場、医療現場などの安全性・生産性を向上する、観測データをシミュレーションと連携させて農漁業の収穫をあげるなど、データ活用型社会への期待が高まっています。一方で、個人情報を含むデータがごく少数の営利企業に独占され、暗黙の偏見や差別につながりかねない利用のされかたをすること、また権力機関によって不当な検閲に利用されることへの懸念・疑念なども広がっています。そのような時代において、大学に職を持つ我々がその公共的使命を強く自覚しつつ、データ処理やシミュレーションのための透明な情報基盤を自ら構築し、信頼に足るデータ活用型社会の実現に中心的な役割を果たす高い技術や倫理感を身につけた人材を育成し続けることは、これまでになく重要になっていると考えます。

情報基盤センターはその根幹を担う機関であり、4つの研究部門「情報メディア教育研究部門」「データ科学研究部門」「ネットワーク研究部門」「スーパーコンピューティング研究部門」が連携して研究をしています。そして、全学の研究・教育に欠かせない情報基盤を設計・導入し、安定運用することを重要な使命としています。また、全国8大学のセンターを連携させたネットワーク型拠点「学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点(JHPCN)」の中核拠点として機能しています。

国内有数の先進性と規模を持つコンピューターシステムを構築し、本学および全国の研究者に最先端の情報基盤を提供する。さらに、最先端の基盤であるがゆえに得られる知見や技術的課題を次世代の情報基盤の創出へと活かしていく。こうして継続的に、相乗的な効果を上げていく取り組み自体も、本センターにとっての重要な研究テーマとなります。

最先端の基盤を安定運用し続けることは大きなチャレンジです。そして、このチャレンジを続けることこそが、技術や人を育てるのだと確信しています。

Expectations for data utilization in society are rising, with applications such as improving security and productivity in factories and hospitals using data from sensors, increasing harvests in agriculture and fishery using simulations that assimilate data, and more. However, concerns and suspicions also abound. Among them is the fear that important data, including those which are private, are increasingly monopolized by a handful of for-profit corporations and used in a way that might lead to implicit biases and discrimination; there is also the fear that data may be used by authorities for unjust censorship. It has never been more important for us academics to recognize our public roles and transparently manage our own IT infrastructures for data processing and simulations. In doing so, we thereby take on the role of educational experts who are central roles to developing a trustworthy data-utilizing society with our strong technical backgrounds and high ethical standards.

The Information Technology Center at the University of Tokyo is an institution that acts as the foundation for this work. It has four cooperating divisions actively engaged in fundamental and practical research: the Campus-wide Computing Research Division, Data Science Research Division, Network Research Division, and Supercomputing Research Division. The Information Technology Center's mission is to design, procure, and stably operate the university- and nation-wide infrastructures critical for research and education. In addition, it acts as the core institute of the Joint Usage/Research Center for Interdisciplinary Large-scale Information Infrastructure (JHPCN), a network of eight academic centers that contribute massive computing resources extensively to Japan and the world.

We have been building cutting-edge computer systems that are among the largest in the world and making them available to researchers both inside and outside the university. We have been taking the problems we face and insights we draw along the way and carrying them on to the next development cycle. Such activities are possible only because we make an effort to stay on the cutting-edge of technology. Continuing this synergy between development and feedback from service operations is our important theme.

Operating large-scale, cutting-edge infrastructure is always a challenge, and we firmly believe it is our continued commitment to this challenge that allows us to develop future technologies and experts.

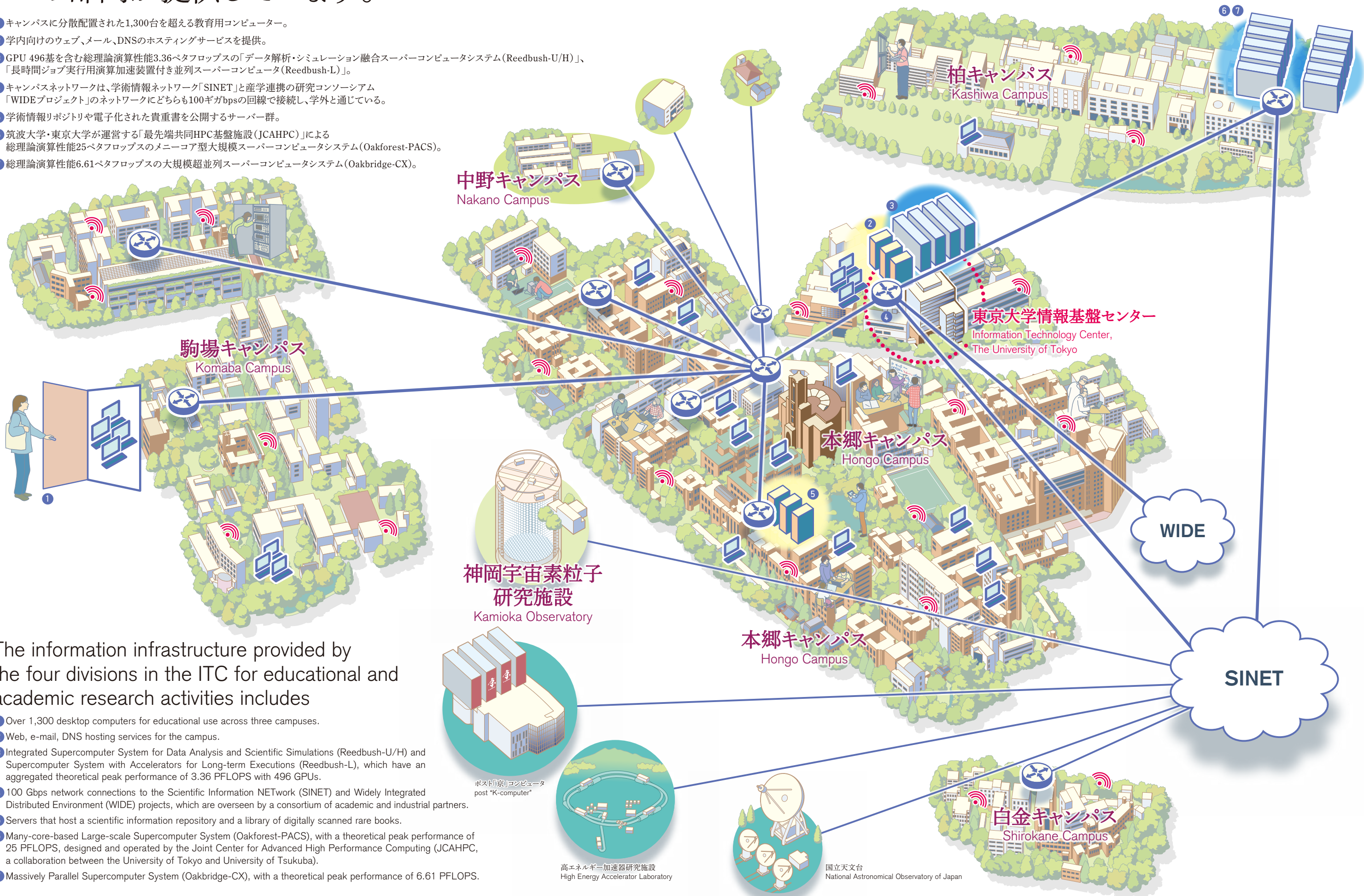
東京大学 情報基盤センター長 田浦健次郎

Professor Kenjiro Taura  
Director of Information Technology Center  
The University of Tokyo



# 教育と学内外の研究活動を支える情報基盤を 4つの部門が提供しています。

- ① キャンパスに分散配置された1,300台を超える教育用コンピューター。
- ② 学内向けのウェブ、メール、DNSのホスティングサービスを提供。
- ③ GPU 496基を含む総理論演算性能3.36ペタフロップスの「データ解析・シミュレーション融合スーパーコンピュータシステム (Reedbush-U/H)」、「長時間ジョブ実行用演算加速装置付き並列スーパーコンピュータ (Reedbush-L)」。
- ④ キャンパスネットワークは、学術情報ネットワーク「SINET」と産学連携の研究コンソーシアム「WIDEプロジェクト」のネットワークにどちらも100ギガbpsの回線で接続し、学外と通じている。
- ⑤ 学術情報リポジトリや電子化された貴重書を公開するサーバー群。
- ⑥ 筑波大学・東京大学が運営する「最先端共同HPC基盤施設 (JCAHPC)」による総理論演算性能25ペタフロップスのメニーコア型大規模スーパーコンピュータシステム (Oakforest-PACS)。
- ⑦ 総理論演算性能6.61ペタフロップスの大規模超並列スーパーコンピュータシステム (Oakbridge-CX)。



The information infrastructure provided by the four divisions in the ITC for educational and academic research activities includes

- ① Over 1,300 desktop computers for educational use across three campuses.
- ② Web, e-mail, DNS hosting services for the campus.
- ③ Integrated Supercomputer System for Data Analysis and Scientific Simulations (Reedbush-U/H) and Supercomputer System with Accelerators for Long-term Executions (Reedbush-L), which have an aggregated theoretical peak performance of 3.36 PFLOPS with 496 GPUs.
- ④ 100 Gbps network connections to the Scientific Information NETwork (SINET) and Widely Integrated Distributed Environment (WIDE) projects, which are overseen by a consortium of academic and industrial partners.
- ⑤ Servers that host a scientific information repository and a library of digitally scanned rare books.
- ⑥ Many-core-based Large-scale Supercomputer System (Oakforest-PACS), with a theoretical peak performance of 25 PFLOPS, designed and operated by the Joint Center for Advanced High Performance Computing (JCAHPC, a collaboration between the University of Tokyo and University of Tsukuba).
- ⑦ Massively Parallel Supercomputer System (Oakbridge-CX), with a theoretical peak performance of 6.61 PFLOPS.



人の活動にどのように情報基盤を活かすか？

# 情報メディア教育研究部門

3万人が利用する大規模な教育用システムを企画・構築するとともに、情報基盤をとりまく多彩なテーマを研究しています。

## Providing Information Infrastructure for the Students and Faculty

# Campuswide Computing Research Division

The Campuswide Computing Research Division designs and builds the educational computing infrastructure throughout the university campus. The division also conducts research on important information infrastructure topics.



[写真：駒場キャンパスの演習室]

本郷・駒場・柏キャンパスには、教育用計算機システムとして約1,300台のPCを配置。プログラミングなどの講義に使われているほか、日常的な道具としてワードプロセッサや表計算などにも使われている。また講義に合わせて、数式処理や統計処理、設計用のCADなどの専門的なソフトウェアパッケージが用意されている。

Photo: Educational Campuswide Computing System at Komaba campus

Over 1,300 personal computers are deployed across the Hongo, Komaba, and Kashiwa campuses. These computers are used for programming classes and for word processing and spreadsheet applications. In addition, mathematical and statistical analysis, computer-aided design, and other specialized software packages are also available.

### 人が力を発揮できる情報基盤をつくる

コンピューターの力を最大限に引き出して自らの活動に活かす——東京大学はこのための教育に力をいれ、教育に使用する情報基盤を1970年代前半から構築してきました。本郷・駒場・柏キャンパスには現在、1,300台を超えるPCからなる教育用計算機システム(ECCS: Educational Campuswide Computing System)が分散して配置され、登録されているユーザーはどこでも利用することができます。教養教育や専門教育で実施されるプログラミングの講義や演習に、数値計算やCADなどの専門的で多彩なアプリケーションを使った実習に、そして学生の自習の場として、ECCSは使われています。加えて、学内の情報発信や情報交換の基盤として、ウェブ、メール、DNSのホスティングサービスを提供しています。

広範にわたる研究分野と多彩な国籍の3万人の学生と教職員、そして地理的に離れている複数のキャンパス。その多様な利用者に、変化の激しいIT社会のなかでどのようなシステムをつくり、いかに効率よく安定して運用していくか。それを検討し、蓄えた知恵をオープンにしていこうことは、私たちの活動テーマのひとつです。

その一方で、人に寄り添い、コンピューターの性能を引き出せるように、情報基盤をめぐる多彩な研究を進めています。

### 研究テーマ

#### ・プログラミング言語処理系

ソフトウェアの信頼性、安全性、性能を高めるプログラミング言語処理系の技術を研究しています。プログラムの間違いを自動的に検出する手法は、その後、通信プロトコルの実装の正当性を検証する方法にも発展しました。

#### ・ゲームプログラミング

ルールがはっきりしていて評価しやすいゲームは、情報処理の題材としてよく取り上げられ、アルゴリズム、探索、機械学習など、多方面の技術を発展させてきました。2013年、共同研究してきたGPS将棋がトッププロ棋士に挑戦し、好成績を収めました。

#### ・システムソフトウェア

BitVisor——コンピューターのハードウェアとオペレーティングシステムの間に介在するハイパーバイザー（仮想マシンを制御するソフトウェア）を研究・開発しています。システムのセキュリティを高めるセキュアVM（仮想マシン）のほか、クラウド構築の要素技術の研究も始動しました。➡ p.18

#### ・教育支援システム

学習管理システムをはじめ、授業を支援するシステムを研究・開発しています。変わったところでは、学科のシラバスから機械学習の手法で教育の内容を抽出し、学科の教育の特徴を可視化する研究もしています。

#### ・エッジコンピューティングにおけるネットワーク技術の研究

端末により近い場所でサービスを提供する仕組みとしてエッジコンピューティング技術が注目されています。本部門では、エッジの計算機資源に効率よくトラフィックを誘導する仕組みなどを研究しています。

### Information Infrastructures that Empower Users

To enable everyone to utilize the power of computers to the maximum of their abilities, the University of Tokyo provides rich computer education and a large-scale information processing infrastructure on campus since the early 1970s. Currently, the Educational Campuswide Computing System (ECCS) comprises more than 1,300 personal computers distributed across the Hongo, Komaba, and Kashiwa campuses, which are also accessible to registered users from anywhere. The computers comprising the ECCS are used not only during programming and computer science classes, but also for computer-aided design and numerical processing applications, and by students studying on their own. The ECCS also provides web, e-mail, and DNS hosting services for publishing and exchanging academic information via the campus intranet.

With the ECCS providing computing power for a wide range of academic projects and a student body and faculty of over 30,000 individuals covering five campuses, maintaining an efficient, solid platform in a dynamically changing information technology environment provides various unique challenges. Therefore, one of the ongoing missions of the division is to review and assess solutions to these challenges and then share our findings with the general public. We also conduct research into various aspects of information infrastructure with the goal of providing enhanced computing performance with a more user-friendly interface.

### Research Subjects

#### ・Programming Languages

This division conducts research on how to design and implement software programming languages and on programming environments to improve the reliability, security and availability of programmed software. Developing testing and verification methods to confirm the completeness and correctness of secure networking communication protocols, is also another important area of our research.

#### ・Game Programming

Games that have a concrete set of rules, such as chess and shogi (Japanese chess), are ideal study topics for data processing. By trying to solve these games, we have contributed to improvements in algorithm design, search logic, and machine learning. In 2013, through a joint research project into computer shogi software, we produced GPS Shogi, which subsequently beat a human master-level shogi player in a tournament setting.

#### ・Systems Software

BitVisor is a hypervisor (computer software that creates and controls virtual machines between a computer's operating system and its hardware) that has been developed under the system software research group. In addition to Secure VM, a virtual machine that provides system security, additional research on fundamental VM technologies in building a cloud platform environment has recently been initiated. ➡ p.18

#### ・Education Support Systems

The division is currently developing learning management systems and various other education support systems. Our unique developments include systems that use machine learning methodologies to automatically extract the abstracts of what students can expect to learn in a specific division or major from the list of individual course syllabuses provided for that division.

#### ・Network Technologies for Edge Computing

This division conducts research on networking technologies for Edge Computing. Edge Computing aims to provide multiple services on the edge of mobile networks to improve user experiences.



## データに潜在している価値を取り出す

今日、天候や地震活動の自然観測データ、人や車の移動データ、商取引、医療などの社会活動データを含む、さまざまなデータが自然および人工の情報源から集められ、膨大な量のデジタルデータとして蓄積されています。

デジタルデータはまた、散逸の危険性がある歴史的な文書および記録をデジタルアーカイブすることによっても生成されます。そこではデジタル化そのものが貴重な財産を生み出し、物理的な距離に関係なくそれらをアクセス可能にすることによって、それらの価値を高めています。さらに、Webページ、ソーシャルネットワーク、学術論文など、初めからデジタルで生まれたデータもあります。

データ分析とモデリング技術、特に機械学習の発展により、データから、より意味があり解釈可能な情報を抽出することが可能になり、さらにネットワーク技術の発展によってさまざまな情報源からの情報を組み合わせることが可能になっています。データ科学は、数字の並びにすぎない生データから価値ある洞察や知識を抽出することについての広大な分野です。データ科学はまた、高性能プロセッサ、ストレージ、ネットワーク、大規模データ分析、深層学習を含む数値計算アルゴリズムなど、高性能計算技術の進歩とも深く関わっています。

データ科学研究部門は、旧学術情報研究部門を改め2018年末に設立されました。データ科学に関する研究に加え、データ科学研究コミュニティのための基盤を設計、構築するために、中心的な役割を果たしていきます。また、附属図書館と密接に協力し、デジタルアーカイブプロジェクトと学術データベースの運用サービスを遂行します。

## 研究テーマ

・デジタルアーカイブの構築と活用

学術研究資源に関するデジタルアーカイブの構築を推進するとともに、それらデータの作成、保存、提供に関する方法論を研究しています。また、人文学研究へのデジタルアーカイブや情報技術の活用により、新しい知識の創造に貢献することを目指しています。

・データ統合と機械学習による人の流れの予測

携帯機器の位置情報から得られる人の位置と、デジタル化された都市交通網データなどを統合、分析し、新世代の人工知能技術（深層学習、強化学習、アンサンブル学習など）と結び付けて、複数の交通手段を使用して刻々と移動していく人の流れを予測する研究をしています。予測情報は、交通システムの制御、緊急事態発生時の管理、災害発生時の支援、伝染病の拡大予防対策、医療資源配置の最適化などに役立てることができます。このような予測を実現するための、モデリングとシミュレーションの手法に力を入れています。

## Mining for Value Concealed within Data

Nowadays, a huge volume of digital data is gathered from natural as well as artificial sources, including weather and seismic monitoring data, human and vehicle mobility data, and social activity data including business transactions, medical care, and so on. Digitally archiving historic documents and records at risk of dissipation also produces digital data. In these cases, digitization secures and enhances the value of knowledge by making it accessible regardless of physical distance. There is also a lot of new digital data being created, including web pages, social networks, academic papers, and so on.

Advances in data analysis and modeling techniques, most notably machine learning, allow us to extract more meaningful and interpretable information from data and networking technology. This makes it possible to combine information from various sources. Data science is about turning raw data from a stream of digits into valuable insights and knowledge. Data science is also closely related to advances in high performance computing technologies, including high performance processors, storage and networking, big data analytics, deep learning numerical algorithms, and so on.

The Data Science Research Division was established at the end of 2018, replacing the Academic Information Science Research Division. In addition to research on data science, it will be taking a leadership role for designing and building a national infrastructure for data science research community. It will also continue to closely collaborate with the General Library on the digital archiving project and scholarly database services.

## Research Subjects

・Development and Use of Digital Archives

We develop digital archives for academic research resources and investigate methodologies for creating, preserving, and providing data. We also aim to contribute new knowledge by using digital archives and information technology for humanities research.

・Modeling and Predicting Human Mobility with Data Integration and Machine Learning

Our research integrates and analyzes people's locations, obtained from mobile phone location data, and digitized urban transportation network data. We combine these data with next-generation AI technology (deep learning, reinforcement learning, ensemble learning, etc.) to predict the flow of people who move moment by moment using numerous means of transportation. The prediction information can be useful for various purposes such as transportation system control, emergency management, aid in the event of a disaster, strategies for preventing the spread of infectious diseases, and determining the most appropriate arrangement of medical resources. We are particularly focused on modeling and simulation techniques that will enable this sort of prediction.

データを価値に、財産に

# データ科学研究部門

歴史的史料のデジタル化、データから価値ある知見を生み出す方法論を研究しています。

From data to values and human heritage

## Data Science Research Division

We research digital archives of historical materials and methodologies to identify valuable insights from data.

[写真]

東京都心を臨む。都市が生むビッグデータを分析し、新世代の人工知能技術と結び付ければ、交通の最適化、緊急事態への備え、伝染病の感染拡大防止に役立てられる。

Photo: A distant view of central Tokyo. Optimizing traffic, preparing for emergencies, preventing infectious diseases from spreading — analyzing the big data generated by our cities and linking it with the next generation of artificial intelligence technology can improve our lives.





## ネットワーク基盤の次のステージをつくる

日本のインターネットは、1986年、東京大学の情報基盤センター(当時大型計算機センター)、慶應義塾大学、東京工業大学の間を実験ネットワークでつなぐことから始まりました。その後、インターネットは膨大な数の人とモノ(機器)がつながる巨大なコミュニケーション基盤に成長し、いまやインターネットのない社会を考えることはできません。私たちは、その次のステージのネットワーク基盤に向けて、基礎から応用までの研究を進めています。

また、学内ネットワークシステムUTNETをプランニング・構築することも、私たちの役割です。本郷、駒場、柏を始めとする5つのキャンパスと国内各地に散らばる複数の研究施設、時間とともに変容していく組織。ネットワークに求められるものも、部門によって多様です。研究者や部門のさまざまな要求に対して、柔軟に対処できる仕組みがポイントです。

### 研究テーマ

・ネットワークの通信品質向上と応用

ネットワークを介した通信では、同時利用者数の増加や長距離伝送でのRTT増加など、さまざまな要因が通信品質に影響します。これらを解決するための基礎技術から応用までを研究しています。

・インターネットトラスト技術

インターネットにおける相互信頼の保証を目標として、運用ソフトウェアとプロトコルに数学的正当性検証の手法を適用した認証技術と異常検知技術、それらを基にしたセキュリティ監査とセキュリティ評価、さらに応用として社会インフラとして必要とされるトラストフレームワークの構築を研究しています。これらの研究の一部は、国内、国際的な研究の場で応用されています。

・日常生活の体験を拡張するユーザーインタフェース

現実と仮想を融合する拡張現実感技術、視聴覚だけでなく力触覚や味覚などさまざまな感覚を扱うマルチモーダルおよびクロスモーダル技術を活用して、人の生活を豊かにするインタラクション技術を研究しています。

・深層学習を利用したサイバーセキュリティ脅威の検知と対策のアシスト

深層学習を用いてインフラレイヤーからソーシャルレイヤーまでの多種のビッグデータセットを分析することにより、サイバー攻撃の検知と攻撃者の行動予測、およびインシデントレスポンスの支援を行う手法を研究しています。

・ネットワーク仮想化技術

クラウドなどの仮想環境におけるネットワーク技術を研究しています。特に、ソフトウェアによるネットワーク制御や、オペレーティングシステムのネットワークスタックの高速化に注力しています。

・ASANOシステム ➡ p.20

オーバーレイネットワーク技術(SD-WAN)を活用し、あらゆる場所で、必要とされるリソースとセキュリティ機能を備えたネットワークを即座に提供できるシステムを研究開発しています。

## Designing a Next-generation Networking Infrastructure

The Internet was introduced to Japan in 1986 as an experimental network connecting three universities—the University of Tokyo Information Technology Center (previously known as the University of Tokyo Computer Center), Keio University, and Tokyo Institute of Technology. Since then, the Internet has grown into a huge network of people and devices, which today we cannot imagine life without.

The Network Research Division conducts research into next-generation network infrastructure by examining both fundamental and advanced research topics. The division is also responsible for designing and implementing the university's intra-university network system, UUNET. This network connects the Hongo, Komaba, Kashiwa, Nakano and Shirogane campuses to the multiple research facilities spread all over Japan. There are frequent and random change requests to the network infrastructure. In addition to that, each campus, each research facility has their own special requirements, so the Network Research Division has to solve the complex issue of being both flexible and agile while keeping the infrastructure consistent and secure.

### Research Subjects

・Improving Communication Networks and their Applications

In network communication, various factors affect communication quality, such as an increase in concurrent users and an increase in RTT for long distance transmission. We are researching basic technologies for applications to improve networks.

・Internet Trust Technology

To ensure mutual trust on the Internet, we research authentication and security evaluation technologies, which are based on verifying the mathematical validity of operation software and protocol. We also use this technology to research anomaly detection and audits to create a trust framework that can serve as a part of our social infrastructure. We are applying some of our research to projects in the domestic and international fields.

・User Interface for Enhancing the Experience of Daily Life

We use augmented reality that merges real and virtual worlds to research and develop interaction technology, as well as multi-modal/cross-modal interfaces that use various senses such as visual, audio, tactile, and taste.

・Detecting Cyber Security Threats and Assisting Incident Responses with Deep Learning

We aim to establish methods for detecting cyber threats and attackers' behavior and assisting incident responses by using deep learning methodologies to analyze various types of big data datasets.

・Network Virtualization

We are researching and developing network technologies in virtual environments such as cloud computing. We are currently focused on software-defined networking and improving the network performance of general-purpose operating systems.

・The ASANO System ➡ p.20

We are researching and developing systems that can immediately provide the networks accessing the resources with security functions at any place using overlay network technology (SD-WAN).

## 社会の様相と密にリンクしている情報大動脈 ネットワーク研究部門

情報ネットワークの基礎技術から応用までを研究するとともに、5つのキャンパスと複数の研究施設を結ぶ学内ネットワークシステムを構築しています。

## The critical Link of Information between the University and Society Network Research Division

The Network Research Division conducts research into the fundamental aspects and advanced applications of network technologies. The division also manages the university's network infrastructure that connects several research facilities and five campuses.

### <情報セキュリティ研究体>

2018年10月1日、東京大学のネットワークの運用によって得られた知見を基に実践的なサイバーセキュリティを研究するため、情報基盤センターに情報セキュリティ研究体が設置されました。情報基盤センターでこれまで開発してきた、トラフィックの異常検知技術や、サイバー攻撃からの回復性のある多層的な防御技術を基に、サイバー攻撃の予兆を検知し、システム運用での早期警戒に役立てる研究に取り組みます。また、2019年2月1日に、情報理工学系研究科が責任部局となって情報セキュリティ教育研究センターが設立されました。情報セキュリティ研究体は連携研究機構として活動に参加しています。

### <Security Informatics Initiatives>

Security Informatics Initiatives (SII) was established in the Technology Center (ITC) on October 1st, 2018 to conduct practical cybersecurity research activities based on knowledge obtained through the UUNET. SII works to maximize the potential of the cybersecurity surrounding the research activities at the ITC by finding the signs of cyber-attacks and enabling an early warning. The ITC is also a founding member of the Security Informatics Education and Research Center, which was established as a collaborative research organization of the University of Tokyo on February 1st, 2019.

[写真:キャンパス内の建物に伸びる光ファイバ群]

基幹スイッチから伸びてキャンパス中に張り巡らされた光ファイバによって、東京大学のネットワーク(UUNET)が構成されている。研究と教育を支える重要なネットワークインフラである。

Photo: Bunches of optical fibers running through a building on campus

The optical fibers, which extend from the backbone switches and stretch all around campus, compose the University of Tokyo network, UUNET. It is important network infrastructure that supports research and education.



計算で「できない」を「できる」に変える

# スーパーコンピューティング研究部門

次世代のスーパーコンピューターの姿、科学技術計算の手法を研究し、日本の計算基盤の中核として大学・研究機関にスーパーコンピューターを提供しています。

Supercomputing—Making the Impossible Possible

## Supercomputing Research Division

The Supercomputing Research Division is conducting research on hardware, software, algorithms and applications on next-generation supercomputers. The division also provides supercomputing services as the core computing platform for universities and research facilities throughout Japan.

### グランドチャレンジの基盤をつくる

身の回りのPCの数百倍から数十万倍の計算性能を持つスーパーコンピューターは、建築物などの耐性設計や航空機の空気抵抗シミュレーションなどのようなエンジニアリング、分子レベルでのタンパク質と薬の相互作用の推測というように、大量の数値計算を必要とする多彩な問題の解決に使われています。また、数千億の星などからなる銀河が衝突したときに何が起るかシミュレーションし、実際の観測結果と照らし合わせれば、宇宙のなりたちの仮説理論を検証できます。スーパーコンピューターは、いまや現実の世界では不可能な実験場となり、シミュレーション計算は「理論」「実験」に次ぐ第三の科学といわれています。

私たちは、このようなコンピューターの次世代をどのように構築していくか、要素技術の検証を重ねながらプランニングするとともに、数値計算プログラムの開発手法やスーパーコンピューターセンターの運用に役立つ技術を研究しています。

情報基盤センターは、日本の学術研究の計算基盤の中核拠点としての役割を担っており、設置されているスーパーコンピューターは、大学・研究機関・企業の約2,000人のユーザーに利用されています（→ p.14）。現在のスーパーコンピューターは数百から数千ものコンピューターをつないで構成され、そこから性能を引き出すために専門的なプログラミング方法を用います。その手法の普及活動もたいせつにしています。

現在は筑波大学と共同で最先端共同HPC基盤施設を形成し、2016年12月から、ピーク性能25ペタフロップスのメニーコアベースのOakforest-PACSシステムを共同で運用しています。導入時にはTOP500で世界6位、日本1位にランクされ、汎用のシステムとしては我が国最大です。大気・海洋連成などこれまでのシステムでは不可能だった大規模なシミュレーションの実現が可能となり、新しい科学の発展に貢献しています。また、一部の計算ノードにSSDを搭載した「大規模超並列スーパーコンピュータシステム（Oakbridge-CX）」（総ピーク性能6.61ペタフロップス）、ゲノム科学、医療画像処理などの

大規模データ解析分野のユーザーの要望に応じて、GPUなどの演算加速器を搭載した「データ解析・シミュレーション融合スーパーコンピュータシステム（Reedbush-U/H）」「長時間ジョブ実行用演算加速装置付き並列スーパーコンピュータ（Reedbush-L）」（総ピーク性能3.36ペタフロップス）も運用しています。大規模データを扱うデータ科学は計算科学に続く「第4のパラダイム」として注目されています。同システムのユーザーとも協力して、新しい学際的融合科学分野の確立を目指していきます。

### 研究テーマ

・アプリケーション開発環境ppOpen-HPC → p.21  
大規模化していくスーパーコンピューターの能力を誰でも簡単に引き出せるように、数値計算ライブラリや自動チューニング機構を備えた、オープンソースのアプリケーション開発環境を研究・開発しています。

・次世代・次々世代スーパーコンピューターの検討  
次世代、次々世代のスーパーコンピューターの要素技術を検証し、機能や性能要件、実現の可能性を研究します。エクサスケール（「京」の100倍の性能）、ポストムーア時代のシステムを視野に、いれ、システムの特徴を活かしたアルゴリズム、プログラミングモデル、システムソフトウェアの研究を実施しています。

[写真:Oakforest-PACS]  
プロセッサコア68個を有するIntel Xeon Phi (Knights Landing) 8,208台で構成されている。総理論演算性能は25ペタフロップス、総主記憶容量は919テラバイト。

Photo: Oakforest-PACS  
The Oakforest-PACS supercomputer is composed of 8,208 Intel Xeon Phi (Knights Landing) computing nodes with 68 processor cores. Its theoretical peak performance is 25 PFLOPS, and it has a total memory capacity of 919 terabytes.

### The Foundation for “Grand Challenge” projects

Supercomputers with  $O(10^3)$ - $O(10^4)$  processors are being used to solve a variety of applications that require a high number of numerical computations, such as structural analysis, fluid dynamics, and protein and drug interactions on a molecular level. We can even examine theories about the origin of our universe by mapping observable results against simulations of galaxies containing several hundred billion stars colliding with each other. Supercomputers have become virtual arenas where we can perform experiments that are impossible in the real world. Computational simulation is now considered the third pillar of scientific inquiry behind theory and experimentation.

We take supercomputers to the next level by developing designs based on repeated verifications of fundamental technology, enhanced numerical processing program development techniques, and technology for maintaining and operating complex supercomputer architectures.

The Information Technology Center (ITC) is at the core of Japan's academic research computing infrastructure, and its supercomputers are used by almost 2,000 individuals from academia and industry（→ p.14）。Current supercomputers are configured from hundreds or thousands of computers (CPU cores or CPUs) connected together. They require specialized programming methods to harness their full potential. We foster these methods by taking part in projects that make programming skills available to every researcher.

Oakforest-PACS (OFF) is a manycore-based large-scale supercomputer that has a peak performance of 25 PFLOPS. It was installed by the Joint Center for Advanced High Performance Computing (JCAH-PC), a collaboration between the University of Tokyo and the University of Tsukuba. When OFF began operating in December 2016, it was ranked sixth in the TOP500 list, and it remains the largest general-purpose Japanese supercomputer system. Large-scale simulations, such

as ocean-atmosphere coupling, are now possible on the OFF. This is one example of how the OFF contributes greatly to advancing new scientific frontiers. We also operate the Massively Parallel Supercomputer System (Oakbridge-CX, with peak performance of 6.61 PFLOPS), which uses solid-state drives (SSDs) in a subset of compute nodes, the Integrated Supercomputer System for Data Analysis and Scientific Simulations (Reedbush-U/H), and the Supercomputer System with Accelerators for Long-term Executions (Reedbush-L), which has an aggregated peak performance of 3.36 PFLOPS and uses graphics processor units (GPUs) as accelerators. These systems are used by individuals who need to conduct large-scale data analysis, such as those in the fields of genomics and medical image recognition. Analyzing big data through data-centric science is emerging as the fourth pillar of science, with computational science as the third. Our goal is to develop a new interdisciplinary area of research by collaborating with the users of our supercomputers.

### Research Subjects

・Application Development Environment, ppOpen-HPC → p.21  
ppOpen-HPC is an open-source application-development environment with numerical processing libraries and auto-tuning feature sets, which allows programmers to easily benefit from the power of large-scale supercomputers.

・Next-generation Supercomputers  
We are involved in researching the element technologies used in supercomputer systems to investigate their features, performance, and feasibility for future generations of supercomputers. We are aiming for exascale performance (100 times the performance of the K-computer) and conducting studies on architecture and programming methods for utilizing accelerators and experimental deployments of system software optimized for many-core architecture processors.





# 学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点

スーパーコンピューティングの専門家ネットワークと異分野の研究者が協力して未踏領域の問題にせまる、共同研究の「場」を築いています。

## Joint Usage/Research Center for Interdisciplinary Large-scale Information Infrastructures

A forum where multi-disciplinary researchers can collaborate with a network of specialists in the field of supercomputers to examine unexplored areas.

情報基盤センターは、スーパーコンピューターが設置されている国内8大学のセンター群と研究者のコミュニティを結ぶ「JHPCN(学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点)」の中核として機能し、情報技術を活かした分野横断的な学術研究を目的として、国内の大学や研究機関の研究者に活用されてきました。

JHPCNに採択されたプロジェクトは、8大学センター群が有するさまざまなアーキテクチャの情報資源を利用できるだけでなく、情報基盤センターの研究者と共同研究を行うことを通して、大規模な情報資源を有効に利用する技術などを共有し、より大きな研究成果を目指すことができます。異なる分野の研究者がコミュニティを形成し、共同で研究できる環境を整えること。それがJHPCNの目指しているところです。

2012年からはさらに、日本のフラグシップ・スーパーコンピューターの「京」と、国内9大学の情報資源、大規模なストレージをネットワークで結んだ「HPCI(革新的ハイパフォーマンス・コンピューティング・インフラ)」が構築され、ここに情報基盤センターの情報資源も提供されています。これにより、数多くのJHPCNでの研究成果がHPCIでさらに発展してきています。

「学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点」

<https://jhpcn-kyoten.itc.u-tokyo.ac.jp/ja/>

「情報基盤センターのHPCIサービス」

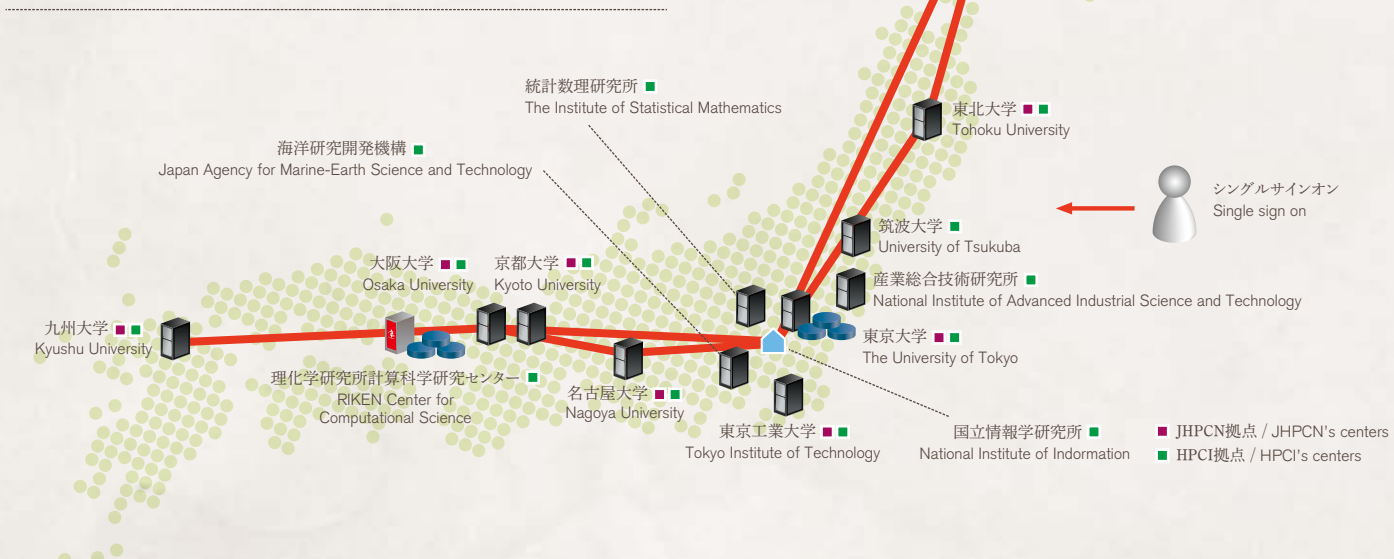
<https://www.cc.u-tokyo.ac.jp/other/hpci/>

Joint Usage/Research Center for Interdisciplinary Large-scale Information Infrastructure

<https://jhpcn-kyoten.itc.u-tokyo.ac.jp/en/>

HPCI

<https://www.hpci-office.jp/folders/english>



The Information Technology Center acts as the core of the JHPCN (Joint Usage/Research Center for Interdisciplinary Large-scale Information Infrastructures, aka Japan High Performance Computing and Networking plus Large-scale Data Analyzing and Information Systems), which connects computing centers from eight Japanese universities equipped with supercomputers. This platform's objective is to provide scientists throughout Japan with the information technology necessary for them to conduct complex interdisciplinary academic research projects.

Researchers whose projects are adopted by the JHPCN benefit primarily from the availability of various architectural designs in the eight universities' super-computing environments and secondarily from working side-by-side with research scientists of the Information Technology Center, sharing knowledge and technology to efficiently work with massive-scale computing resources. The JHPCN's goal is to create a community of scientists from various research backgrounds and provide an environment for them to collaborate.

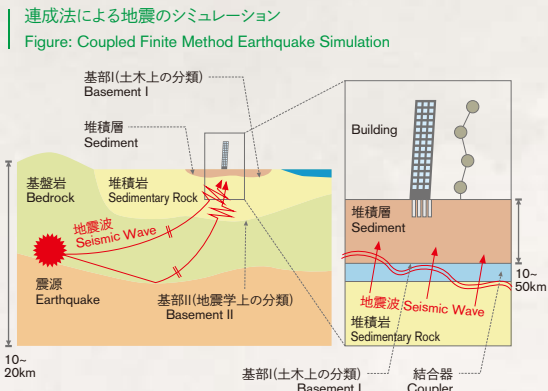
In 2012, the High Performance Computing Infrastructure (HPCI) was established. In it, Japan's flagship supercomputer, the K-computer, and two large-scale data storage systems were connected to a network of supercomputing resources established by nine Japanese universities. The centers in the JHPCN continue to provide their computing resources to the HPCI platform, which in turn has allowed the JHPCN to make many important discoveries for advancing to the next level of research results with the additional processing capabilities of the HPCI.

## スーパーコンピューターを使ったこんな研究 Examples of Supercomputing in Research

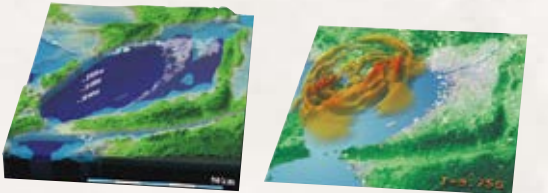
### 地震による建物の揺れをシミュレーションする Simulating Building Shaking due to Large Earthquakes

スーパーコンピューターを使った物理現象のシミュレーションに、異なる物理現象を組み合わせたマルチフィジックス・シミュレーションという手法が盛んに用いられるようになってきました。たとえば次の例では、震源から地震波が複雑な地下構造を伝播して増幅され、地表の軟弱地盤にある建物を揺らす様子を2つのシミュレーションの連成により評価しています。地震波の伝播にはFDM(有限差分法)を、地面の揺れから生じる建物の動きにはFEM(有限要素法)を使用し、両者の間でカプラーを通して計算経過を受け渡ししながらシミュレーションが進んでいきます。なお、このシミュレーションプログラムはppOpen-HPC(→ p.21)を利用して開発されています。

Multi-physics simulations, which combine various physical models, are a promising tool for simulating certain physical phenomena very efficiently. We see supercomputers used to their fullest to simulate complex physical phenomena in multi-physics simulations. For example, the coupled simulation analysis can be used to simulate seismic waves traveling from the hypocenter of an earthquake and amplifying as they move through complex underground structures and then to simulate the shaking of buildings that are built on soft-ground surfaces. The propulsion of the seismic waves is modeled by using the finite-difference method simulation of equations of motion, whereas the movements of buildings caused by the earthquake-induced ground motions are modeled by a finite-element method simulation. The complete simulation is achieved by coupling the two models across the points where the calculation results are shared. This simulation program was developed with the aid of the ppOpen-HPC (→ p. 21) libraries for massively parallel computing.



地形のみを対象とした地震の伝播シミュレーション  
Figure: Simulated Aerial View of Seismic Wave Propagation

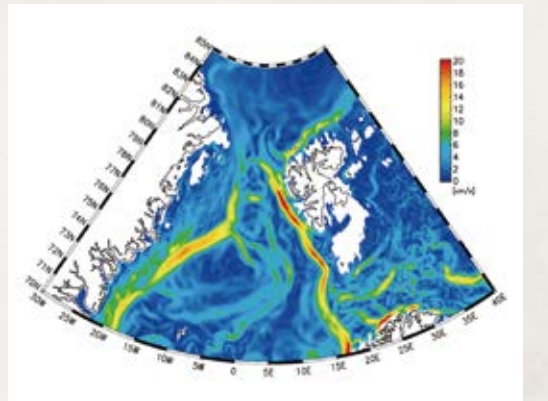


(Image courtesy of Takashi Furumura, Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

### 海洋循環のプロセスを解き明かす Elucidating the Ocean's Circulation

北太平洋や南極海で冷却や塩分濃度の増加によって沈み込んだ深層水は、海洋深層を地球規模で循環しながら表層へ徐々に上昇していき、極地沿岸の特定のポイントで再び深層に沈降していきます。このように、海洋現象には局所的な流れと地球規模の大きな循環の作用が働いています。そこで、微小スケールモデルと大規模循環モデルという観察対象の細かさも計算手法も異なる2つのモデルを組み合わせて両者の相互作用をシミュレーションする、これまでにない海洋モデルが編みだされました。カギは、これからのスーパーコンピューターに合う並列効率の高い数値モデルを開発したこと。最適化の検討には、ppOpen-HPCの自動チューニング(→ p.21)が活用されています。

Water deep in the North Pacific and Antarctic Oceans gradually ascends as it moves away from the polar regions and descends at distinct points as it moves toward them. These movements, the result of changes in temperature and salinity, produce the large-scale circulation of seawater that is known as the global conveyor belt. An unprecedented model has been constructed that simulates interactions between the global conveyor belt and localized currents by combining a large-scale circulation model and a small-scale localized model that have different observation targets and calculation methods. The key breakthrough in constructing the ocean model was the development of a numerical model with a high parallel efficiency that was suitable for use with a supercomputer. ppOpen-HPC automatic tuning (→ p.21) was essential for optimizing the numerical model.



グリーンランド海の海面流速。左端の白色部分はグリーンランド。メキシコ湾流からつながる速い海流(右側)がスヴァールバル諸島に沿って北上、一部は北極海に流入し、残りはグリーンランド沖を南下している。

Surface current velocity in the Greenland Sea. The fast current to the left of the Svalbard islands (the land on the right) is a branch of the Gulf Stream flowing north. The majority of the current slows down and flows into the Arctic Ocean, while the rest flows south past Greenland.

(Image courtesy of Hiroyasu Hasumi, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo)





研究紹介 Research at ITC



写真: ディスクストレージ装置

スーパーコンピュータの利用シーンでは、大量のデータを出力することが多いので、高速・大容量のデータストレージは不可欠である。このディスクストレージは、当センターだけでなく、全国の研究機関にあるスーパーコンピュータから共用ストレージとして使われている。ハードディスクドライブ1台の容量は10テラバイト、ディスクストレージには5,000台以上のハードディスクが収容され、40ペタバイト以上のデータを保存可能だ。点滅しているLEDのひとつひとつは、ハードディスクが間断なく動作していることを表している。

Photo: The Disk Storage

High-speed and large-capacity data storage is essential to supercomputers, which process massive amounts of data. This disk storage serves as shared storage for supercomputers not only in our center but also in research institutes nation-wide. A single hard disk drive can hold 10 terabytes of data, and the total capacity of the storage, which accommodating over 5,000 drives, exceeds 40 petabytes of data. Each blinking LED indicates a hard disk performing operation continually.



意外な応用に広がったセキュアな仮想化技術 — BitVisor

BitVisor—A Secure Virtualization technology that evolved beyond its Original Purpose

PCからの情報漏えいを防ぐ目的で開発された BitVisorは、コンパクトで柔軟な仕組みから新しい 応用に出合うことになった。

ハードウェアとOSの間の橋渡しをするように動くハイパーバイザーというソフトを、データセンターでサーバーを仮想化する技術として知っている方もあるでしょう。けれども、ここで紹介するBitVisorは、PCからの情報漏えいを防ぐ目的で開発された、たいへんコンパクトで軽量のハイパーバイザーです。

PCにBitVisorを組み入れ、OSからネットワークへの操作を組織内のサーバーにVPNを使って振り向ければ、サーバー側でウイルスなどによる情報漏洩を検知できます。また、ディスク入出力の過程でデータを暗号化すれば、盗難や紛失による情報漏洩を防げます。この方法には、上位で動作するOSを選ばないという利点があります。

さて、セキュアな仮想化技術として出発したBitVisorですが、いろいろな使途が広がってきました。追加機能と組み合わせて実行中のOSイメージの書き換えを防ぎ、OSの乗っ取りを防ぐこともそのひとつです。開発者向けにはデバイスドライバのテストに使用できます。意外なところでは、大規模システムのOSイメージを集中管理するための、効率の良いネットワークブートとインストールの仕組みとして活用されていることを挙げておきましょう。

(BitVisor project [www.bitvisor.org/](http://www.bitvisor.org/))

BitVisor was originally developed to prevent security vulnerabilities from being exploited on PC desktops. However, the compact, flexible program has resulted in further use cases.

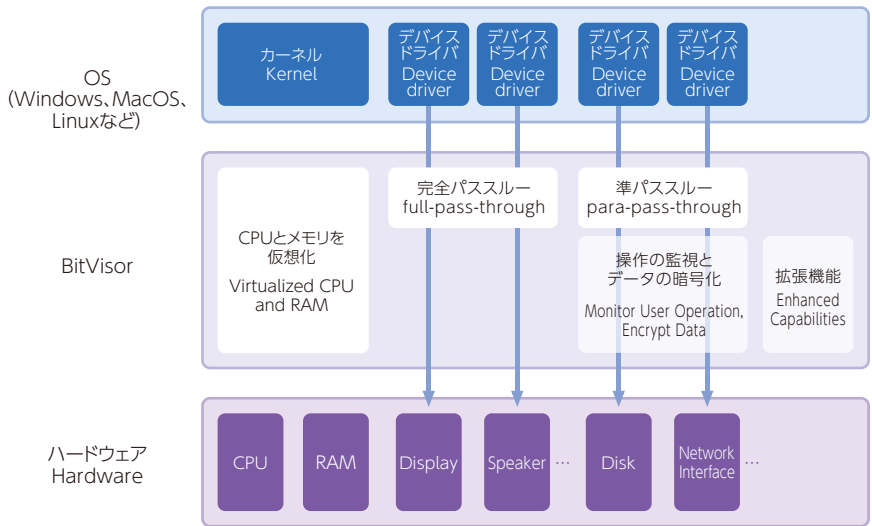
Hypervisors are pieces of software used to create virtual machine instances by running bridge function software between the hardware resource layer and the operating system (OS). BitVisor is a compact, lightweight hypervisor that prevents information from being stolen from a single personal computer (PC) OS instance.

When BitVisor is installed on a host personal computer, the network operation is redirected to a centralized departmental server over a Virtual Private Network where the server can detect data theft by viruses on the PC. The data is also encrypted at the I/O level on the storage device, which prevents unauthorized access to information stored on lost or stolen PCs.

Although BitVisor started as a desktop security application, its use has evolved beyond the original design. Additional features have been developed to allow users to protect OS images from being overwritten or tampered with, and it can now be used by developers to test device drivers. BitVisor has unexpectedly become an efficient centralized OS image installation and management solution for large network boot system environments. (BitVisor project: <http://www.bitvisor.org/>)

●BitVisorの仕組み

BitVisor Architecture



BitVisorは、必要な操作に絞ってOSとハードウェアの間の操作を橋渡しする、準パススルーという方法をとっており、動作が軽いことが身上だ。

The advantage of the BitVisor architecture is its fast response, which is achieved by using full-pass-through for devices that need no interception and para-pass-through for devices that need monitoring and encryption.

データ駆動型知能とアーバンコンピューティング

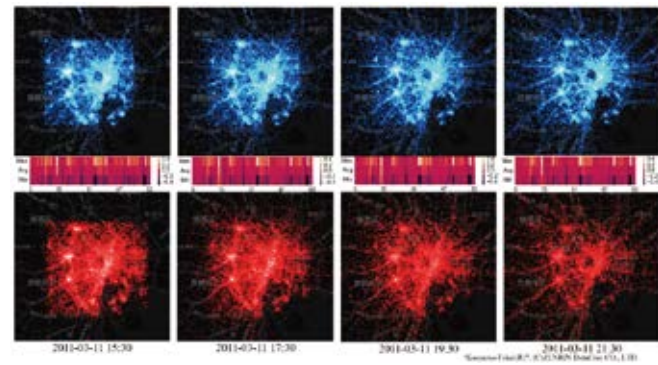
Data-driven Intelligence and Urban Computing

ビッグデータを前提としたデータ駆動型知能についての事例は急速に増加しています。そのなかの代表的なひとつとして挙げられるのは、大規模な人の移動軌跡データに基づいたアーバンコンピューティングです。

モノのインターネット(IoT)、ビッグデータ、人工知能技術の急速な発展に伴い、スマートシティは、社会を大きく進化させる研究分野として注目されています。シンガポールは複数のスマート交通システムを推進し、スウェーデンは「ビジョン2030」計画を立案し、中国のアリババグループは杭州で「都市大脳」を開始しました。

都市は人の活動とともに、スマートフォンの位置データ、携帯機器と基地局間の通信記録、救急車の出動記録、災害情報、感染症の発生状況などのデータを生んでいます。また、デジタル化された都市交通網データも整備されてきました。私たちはこれらのデータを統合、分析し、新世代の人工知能技術(深層学習、強化学習、アンサンブル学習など)と結び付けて、複数の交通手段を使用して刻々と移動していく人の流れを予測する研究をしています。このような予測は、交通システムの制御、緊急事態発生時の管理、災害発生時の支援、伝染病の拡大予防対策、医療資源配置の最適化などに役立てられます。

最近、都市の人の流れを分析する手法として、10万人規模の短期間の観測データから、30分後、あるいは1時間後の状況を高い精度で予測できるモデルを開発しました。正確な予測には大量の観測データが不可欠で、分析には膨大な計算が必要です。新しい方法では、従来のように数百人規模の1カ月もの長期間の観測データを対象にするのではなく、都市規模の短時間の観測データを対象にし、深層学習技術を駆使して人の流れのトレンドを抽出することにより、将来を予測できるようになりました。



Data-driven intelligence is based on real big data. A lot of real-world applications have rapidly emerged, and one of the representative examples is urban computing, which is based on city-scale human mobility data.

The rapid development of the Internet of Things, big data, and artificial intelligence has led to smart cities becoming highly significant research field as a new research field which would brings great social evolution. Singapore has developed several smart transportation systems, Sweden has formulated the Vision 2030 plan, and the Alibaba Group in China has launched the City Brain Project in Hangzhou.

Human activity in cities produces many kinds of data, such as smart phone location data, transmission records between mobile phones and base stations, ambulance dispatch records, disaster information, and data on infectious disease breakouts. Digitized urban transportation network data has also been developed. We integrate and analyze these various types of data. We then combine them with next-generation AI technology (deep learning, reinforcement learning, ensemble learning, etc.) to predict the flow of people who move moment by moment using various means of transportation. This kind of prediction can be used for many purposes such as transportation system control, emergency management, aid in the event of a disaster, strategies for preventing the spread of infectious diseases, and determining the most appropriate arrangement of medical resources.

Recently, as a technique for analyzing the flow of people in a city, we developed a model that is able to use a short period of observation data of 100,000 people to predict where they will be 30 minutes to an hour later with high precision. A large amount of observation data is essential for making accurate predictions, and analysis requires extensive calculations. Unlike previous methods, this new method does not use month-long long-term observation data of hundreds of people; rather, given city-scale short-term observation data, the new method can still achieve accurate forecasting for the future by making excellent use of deep learning technology to extract the trend of instantaneous human mobility.

東日本大震災後の最初の6時間の東京中心部における人の移動の流れを視覚化。予測結果は青(上)、対応する時間帯の実測による状況は赤(下)、中央は各時点での深層学習により抽出された64次元の潜在的な表現。

Visualization of human mobility in central Tokyo during the first six hours after the Great East Japan Earthquake. The prediction results are in blue at the top, and the corresponding ground truths are in red at the bottom. The 64-dimensional latent representations, which were developed by using deep learning at each timestamp, are in the middle.



## 学術の多様性を支えるネットワーク構築:ASANOシステム Flexible Network Management System to Support Academic Diversity: the ASANO System

必要な資源、必要なネットワーク環境をどこでも即時に利用できるようにする。

キャンパスネットワークは研究と教育を支える重要なインフラであり、研究のための自由度と攻撃から機密情報を守るセキュリティを両立する必要があります。そこでネットワーク研究部門では、研究者や学生が安全かつ便利に利用できるネットワークを柔軟に提供するシステムを研究しています。

たとえば、研究者が集まって会議をする場合に、その会議室にいる人だけが会議資料にアクセスできるようなネットワークを即時に提供できます。また、学内外の公共無線や会議室の公共ネットワークを利用する場合にも、研究室にあるファイルサーバーや実験機器に安全にアクセスできるネットワーク環境を即時に提供できます。複数キャンパスにまたがったネットワーク構築も即時に可能です。

この柔軟なネットワーク環境は、SD-WAN (Software Defined Wide Area Network) という技術を利用して研究開発された、ASANO (Advanced Service and Network Orchestration) システムによって実現されました。

ユーザーは、クラウド上で稼働するASANOシステムコントローラーにWebブラウザもしくはスマートフォンアプリでアクセスし、利用したい資源があるネットワークを選択するだけで、即時にそのネットワークが利用可能となります。複数の拠点を連結した閉域網を形成することも可能です。

ASANOシステムは、学内ネットワークをより生産的に、柔軟に、かつ安全に利用することを可能とする次世代キャンパスネットワークの管理モデルです。

(ASANOシステム <https://asano.nc.u-tokyo.ac.jp/>)

Providing necessary resources and network environments anywhere, immediately.

Campus networks are important infrastructures that support research and education. They are necessary for balancing the freedom required for research and the security required for protecting confidential information from attacks. Because of this, the Network Research Division is developing a system that can provide safe, flexible, and easily accessed networks for researchers and students.

For example, when researchers gather for a meeting, this system can instantaneously provide a network that can only be used to access the meeting materials by people in the conference room. The system can instantly provide a network environment that allows secure access to file servers and equipment in the laboratory, even on a public network when meetings are held outside the university. It is possible to construct a network that connects multiple locations among different campuses.

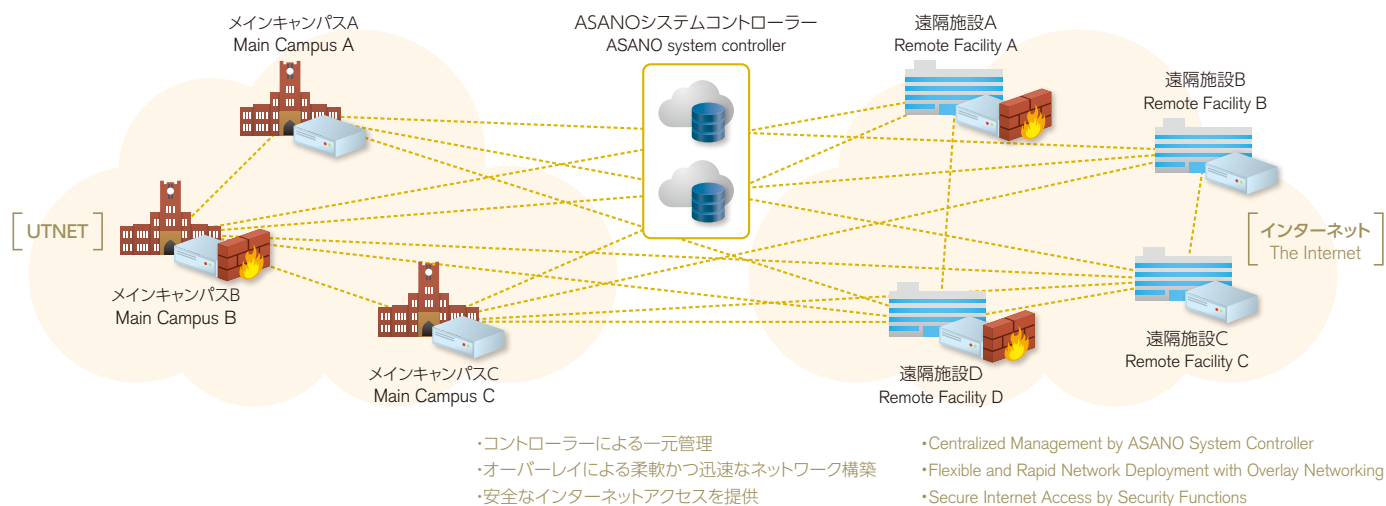
We call this flexible network system the Advanced Service and Network Orchestration (ASANO) system. It was designed and developed using software-defined wide area network technology.

A user can access resources immediately by selecting the network by using a web browser or a smartphone application with the ASANO System Controller on the cloud.

The ASANO system is a model for next-generation campus network management, and it makes university networks more productive, flexible, and secure.

(ASANO System: <https://asano.nc.u-tokyo.ac.jp/>)

### ●ASANOシステム概念 ASANO system concept



## 誰でも科学技術計算プログラムをつくれるようにする ppOpen-HPC – Making it possible for every Researcher to Program Scientific Calculations

「匠のワザ」を埋め込み、自動チューニングの仕組みを備えた、オープンソースのアプリケーション開発・実行環境ppOpen-HPC。それはどのようなものか？

多数のコンピューターが集積され、複雑さを増している現在のスーパーコンピューター。その性能を最大限に引き出した科学技術計算プログラムの開発は、思いのほか複雑です。そして、最適な高速化の方法は、メモリの量、計算性能を加速するアクセラレータの有無など、ハードウェア構成ごとに変わります。では技術者や科学者は、新しい問題に挑戦するたびに、あるいは使うコンピューターが変わるたびに、プログラムづくりにたくさんの時間を費やさなくてはならないのでしょうか？

ppOpen-HPCは、このような問題を解消し、スーパーコンピューターの規模がどんどん大きくなるこれからの時代にも気軽にシミュレーションなどの数値計算ができるように、開発が進められています。

科学技術計算の多くが使う代表的なアルゴリズムは5つ。「その道の専門家」の手法でつくったアルゴリズムを部品として用意し、うまく連携動作する仕組みがあれば、プログラムの開発はぐっと容易になります。数値計算プログラム開発者の願いだったプログラムの自動チューニングには、実行状況の観察に基づくダイナミックな手法も研究が進んでいます。また、コンピューターの協調動作をネットワーク上の近いもの同士になるように調整して高速化したり、大規模化で故障率が高くなるのに備えて中間結果を退避する仕組みも、かかせません。

(ppOpen-HPC <http://ppopenhpc.cc.u-tokyo.ac.jp/>)

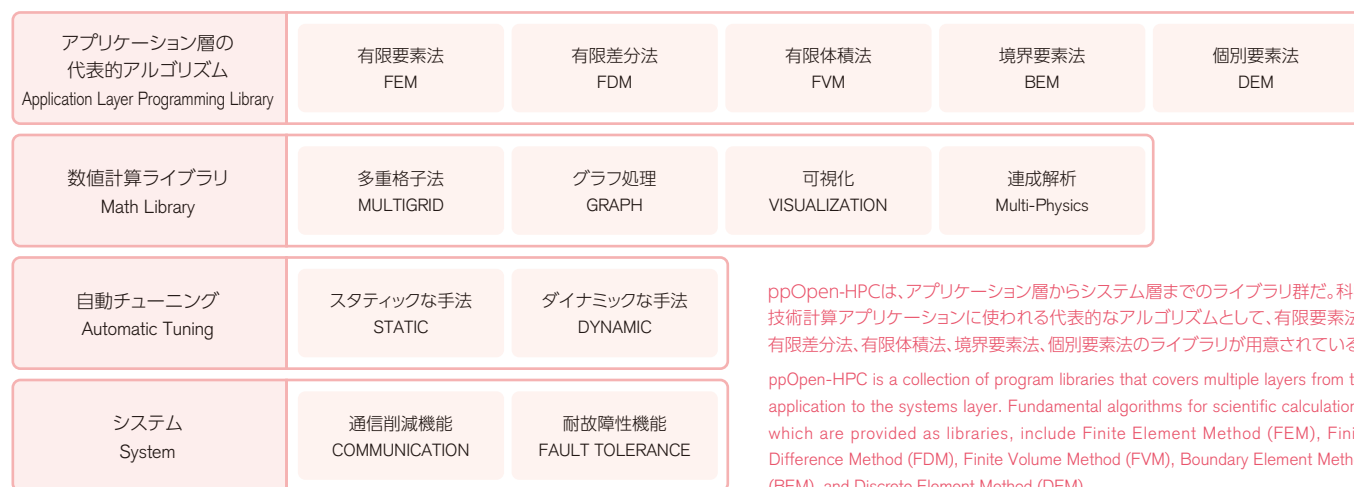
ppOpen-HPC is an open-source infrastructure for the development and execution of large-scale scientific application programs. It has Takumi no Waza (Craftsmanship of the Master) pre-programmed into the library for widely used scientific algorithms and can provide automatic performance optimization technology at runtime.

Modern-day supercomputers are very complex and comprise numerous integrated processor nodes. It is a challenge to develop a scientific computation program that harnesses the full potential of these massive parallel systems. Optimization parameters such as memory allocation vary depending on hardware configurations or if there is a numerical process accelerator available on the processor. To free scientists and engineers from having to spend time reprogramming every time they examine a new problem or when there is a change in the computing environment, the ppOpen-HPC infrastructure has been developed so that computational simulation and other advanced numerical processing tasks can be easily performed, even with the growing complexity of today's supercomputers.

There are five major algorithms commonly adopted by researchers for scientific calculations. We have programmed the expertise of specialists in the field into reusable algorithm libraries that are capable of interacting with each other and have made the program development process far simpler to conduct. Research is ongoing into monitoring real-time instruction execution and dynamically processing automatic program tuning, which has long been a dream for numerical computation programmers. Performance optimization by coordinating the computers at the nearest network node and backing-up intermediate results to avoid data loss due to the increased potential for failure as a consequence of the larger number of nodes are two things vital to post-peta-scale supercomputing.

(ppOpen-HPC: <http://ppopenhpc.cc.u-tokyo.ac.jp/>)

### ●ppOpen-HPCの構成要素 Components of the ppOpen-HPC



ppOpen-HPCは、アプリケーション層からシステム層までのライブラリ群だ。科学技術計算アプリケーションに使われる代表的なアルゴリズムとして、有限要素法、有限差分法、有限体積法、境界要素法、個別要素法のライブラリが用意されている。

ppOpen-HPC is a collection of program libraries that covers multiple layers from the application to the systems layer. Fundamental algorithms for scientific calculations, which are provided as libraries, include Finite Element Method (FEM), Finite Difference Method (FDM), Finite Volume Method (FVM), Boundary Element Method (BEM), and Discrete Element Method (DEM).



「計算できない」を「計算可能」に変えるアルゴリズム

Algorithms to Make the

Incalculable Calculable

## 行列近似の技芸

The Art of Matrix

Approximation

## ものの相互作用を表している行列

この世界で起きる現象は、この世を構成する「もの」と「もの」の間の相互作用だと捉えることができます。刻々と移り変わる気象、星雲の動き、熱や電磁波はどう伝わっていくか。このような自然現象をコンピューターでシミュレーションするとき、「行列」という手段がよく用いられます。

現象は微分方程式や積分方程式で表されますが、コンピューターは加減乗除のような単純な計算しかできません。そこで、シミュレーションしようとする対象を細かい格子や粒子に区切って、行列に対応させ、要素のそれぞれに微積分方程式の数値を乗せて、格子間の関係を計算することにしたのです。行列は、もののある状態と別の状態を結び付けているものだといえます。現象をどのような方法で行列に表すかは、現実的な機材と時間で計算できるかどうかに直結していることから、これまで多くの研究がなされてきました。

現在のスーパーコンピューターが扱う行列のサイズは数百万～数億。より大きな現象を扱いたい、より細かい格子に区切ってシミュレーションの精度を上げたいという巨大な行列への果てしない希求がある一方で、実質的にコンピューターが計算可能な行列の大きさはメモリーに収容できるまでなので、情報量が少なくならないかぎり、計算の都合では行列はできるだけ小さくしておきたいところです。情報基盤センターで研究されている階層型行列法(H-行列法)はその方法のひとつです。

## まとめられる情報はまとめてしまえ！

重力や電磁気力など、遠くまで伝わるものの距離が大きくなるにつれて影響が弱くなるような相互作用は、比較的サイズの小さな「密行列」で表現できます。密行列は、値「0」の要素がない、現象を表現するために必要な情報だけで構成された行列です。しかし実は、この行列の順番を入れ替えたり適度なところで区切ったりすると、それぞれの小さな行列(部分行列)がそのサイズに見合うだけの情報を含んでいない可能性があり、その部分はぎゅっと小さく縮められるのです。そのからくりは……。

たとえば、地球と月の動きを計算するとしましょう。本当なら、ここにある空気の1原子と月にある砂粒の1原子には相互作用が働いているはずですが、その調子ですべての相互作用を行列に配置すればとてつもない要素数になってしまいます。でも実は、月と地球の運動を考えるのに原子1つ1つの相互作用の情報はいりません。両者は十分に離れているので重力の及ぼす作用は小さく、どの原子間の相互作用も力が働く方向はほとんど同じなので、地球全体と月全体の相互作用にまとめても(近似しても)実用上はかまわないのです。

このような原理のもとで、アルゴリズムを駆使して、H-行列法は現象を表す元の方程式から直接、近似行列を作り出します。現在のコンピューターは、プログラムを多数のコンピューターで並列動作させることによって高速化しているため、部分行列を効率よく分散して計算できるように考慮することがこの研究のもうひとつのポイントです。

## Matrices express the interactions between objects

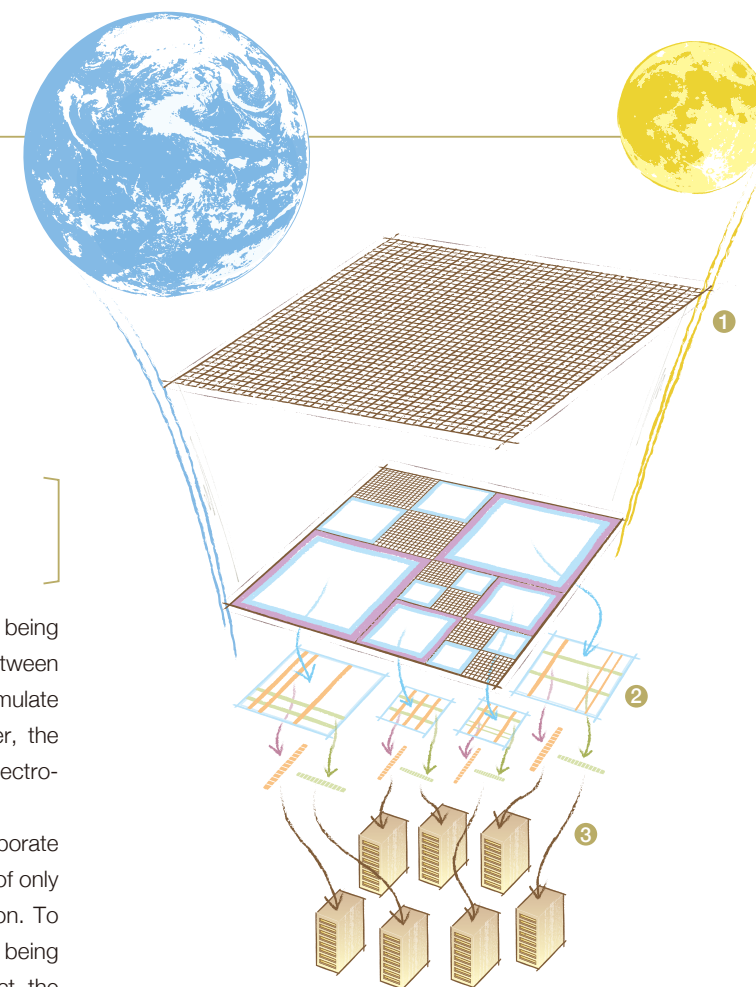
The various phenomena around us can be thought of as being the results of an integrated series of interactions between objects. By using computer-based matrices, we can simulate complex phenomena such as the ever-changing weather, the movement of galaxies, or the transmission of heat and electromagnetic waves.

Although phenomena can be described by using elaborate differential and integral equations, computers are capable of only very simple calculations such as addition and multiplication. To conduct a simulation using a matrix, we place the objects being simulated into detailed grids (or particles) and construct the matrix by digitizing dominant integrodifferential equations for the objects in the grids. Matrices can therefore be thought of as tying one state of an object to another state of the same object.

Exactly how phenomena are expressed as matrices is directly related to whether or not they can be simulated within a realistic time frame by using today's computing power, and much research has been conducted regarding this issue. Today's supercomputers are capable of handling matrices comprising several million to several tens of billions of elements. Although it is tempting to continue to create ever-larger matrices to simulate ever-more complex phenomena, or to improve the resolution of our simulations by further subdividing phenomena into smaller and smaller elements, in practical terms, the size of the matrices we can construct is limited to what can be stored in a computer's memory. Therefore, unless the amount of information can be reduced, the best course of action is to reduce the size of the matrices we use. The hierarchical matrix (H-matrix) method being researched at the Information Technology Center is one method for managing matrix size.

## Consolidating information that can be consolidated

Forces that are transmitted over long distances, but whose influence decays with distance, such as gravity or electromagnetism, can be expressed by using dense matrices that are relatively small in size. Dense matrices do not have elements with a value of zero and therefore consist entirely of elements containing necessary information. However, the permutations and partitions

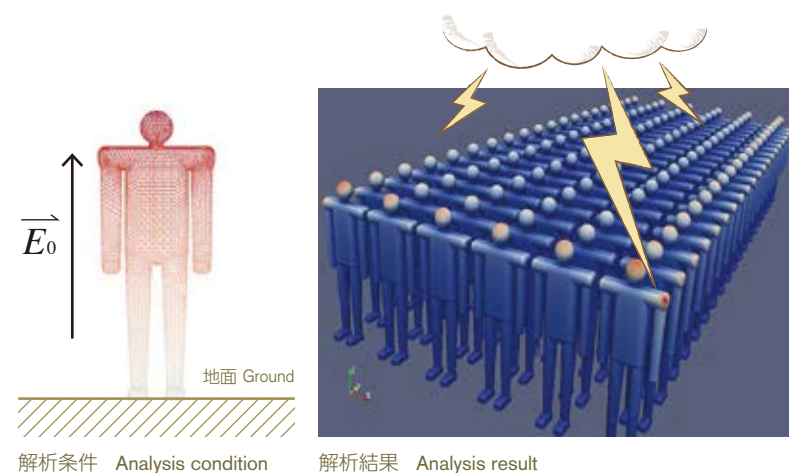


- ① 「もの」と「もの」の間の全相互作用を表す密行列
- ② H-行列法の置換、分割に基づき近似された圧縮行列
- ③ 効率よく計算できるように部分行列をコンピューターに分散配置

in the matrices are such that submatrices produced by approximation will contain less information relative to their size and therefore take up less space. This is the principle underlying H-matrices.

For example, imagine that we are trying to calculate the interaction between the Earth and the Moon. Strictly speaking, each atom of the Earth interacts with each atom of the Moon; however, if we were to create a matrix representing each and every interaction between each atom, the number of entries in the matrix would soon become too large to calculate. In reality, however, we do not need information about all of the interactions between atoms to calculate the movements of the Moon and the Earth. The two bodies are far enough apart that the influence of gravity is minimal, and the direction of interaction between each pair of atoms is essentially the same. Thus, in practical terms, we can approximate the interactions between the individual atoms and consider the interaction between the Earth as a whole and the Moon as a whole.

Compared with using dense matrices, larger simulations can be conducted by using H-matrices created directly from dominant equations. To conduct these larger simulations, the H-matrices program developed at the ITC exploits cutting-edge parallel computer systems. One of the key characteristics of this program is how it assigns submatrices to individual processors to increase the speed of calculation.



H-行列法を用いて計算された静電場解析の例

電荷の集積度により落雷の危険を予測するために、人の体表を約235万要素に分割して計算。密行列では約42.380ギガバイト必要なメモリーが、H-行列法では約179ギガバイトに圧縮された。解析結果(右)は、集団の隅に電荷が集積し、落雷しやすい状態になっている。

Figure: Analysis of a static electric field by using H-matrices  
To examine the risk of an individual within a group being hit by lightning, we divided the surface of the human body into approximately 2.35 million discrete elements. Whereas a dense matrix would require 42,380 gigabytes of memory, the H-matrix method reduced the memory requirement to 179 gigabytes. The simulation results (right) show that electrical charge accumulates at the corners of the group, indicating that individuals standing at the corners are at the greatest risk of being struck by lightning.