

UTokyo Research

2016

UTokyo Research 2016 introduces the Feature Stories and striking images posted to the *UTokyo Research* website in 2015 and the major research news events of the year. We hope you will enjoy this sample of the broad range of research conducted at the University of Tokyo across the humanities and sciences.

Public Relations Office, The University of Tokyo

「*UTokyo Research 2016*」では、2015年に*UTokyo Research*のウェブサイトに掲載された特集記事をはじめ、ウェブサイトに掲載された印象的な画像、2015年の一大ニュースを通して、2015年に行われた東京大学の研究活動を紹介します。東京大学の人文社会科学系から自然科学系に及ぶ幅広い研究成果をお楽しみください。

東京大学本部広報室

Lifelong walkers

A cohort survey for a mobile old age

生涯歩き続けられる社会を目指して

地道で大規模な住民コホート調査から得た指針

How do we stay healthy and guard against disability so that we can enjoy our old age? This simple question is a major challenge for a rapidly aging Japan. A research project started nearly ten years ago is taking a novel approach to this question by looking at the musculoskeletal system as a whole with a large-scale cohort study that aims to identify the risks and factors leading to musculoskeletal diseases in senior citizens. Using data collected with cooperation from throughout Japan, the researchers hope to realize a society of "lifelong walkers."

幸せな老後を迎えるために、健康をどう維持し、障害をどう予防していくべきか。高齢化が進む日本が抱える大きな課題に、「運動器全体の問題として取り組む」という新たな切り口から挑む研究があります。高齢者が運動器疾患により要介護状態となる要因やリスクを把握するための大規模な集団追跡調査は、開始から間もなく10年。多くの人の協力で得られたデータから、「生涯歩ける社会」の実現を目指しています。

Interview/text: Akihiro Tani Translation: Alan Gleason
取材・文:谷明洋 翻訳:アラン・グリーソン

A research topic for life

Project Associate Professor Noriko Yoshimura, who works in the Department of Joint Disease Research at the University of Tokyo Hospital's 22nd Century Medical and Research Center, first came to the university in 2005. It was around this time that Professor Kozo Nakamura, a member of the hospital board and the Department of Orthopaedic Surgery, was preparing to introduce a new concept: locomotive syndrome (abbreviated as "locomo" in Japanese).

Locomotive syndrome refers to the condition of reduced mobility resulting from disorders of the locomotor system (the bones, joints, muscles and nerves), the progression brings with it a high risk of requiring nursing care (Figure 1). Locomotive syndrome research aims to develop strategies for preventing the loss of motor function and subsequent disability by enlisting all orthopedic specialties associated with the locomotor system. Yoshimura enthusiastically embraced the idea. "This was an innovative and eminently rational approach for dealing with an aging society."

Until that time, clinical research for the prevention of muscu-

運命的な出会い

医学部附属病院22世紀医療センターで関節疾患総合研究に携わる吉村典子特任准教授が東京大学にやってきたのは、2005年。附属病院の理事を務めていた整形外科学講座の中村耕三教授が口コモティビンドローム（運動器症候群、以下「ロコモ」）という概念を提唱する準備を進めていた頃でした。

ロコモとは、骨や関節、筋肉、神経などの運動器の障害のために移動機能の低下をきたし、進行すると介護が必要になるリスクが高い状態をいいます（図1）。整形外科の専門分野にとらわれず運動器にかかる分野全体ですみ、移動機能の低下や要介護の予防につなげることが研究の目的です。「これからの高齢化社会を見据えた、新鮮で理にかなった考え方だ」。吉村特任准教授は強く共感しました。

運動器障害の予防を目的としたそれまでの臨床研究は、骨粗しょう症や骨折、変形性関節症、リウマチ、腫瘍、外傷などといった専門分野ごとに進められることが多く、運動器全体からの分析がほとんどありませんでした。また日本では、腰や膝に多少の痛みがあっても、歩行困難や悪化傾向がなければ病院に行かない人が多く、定期診断

The locomotive syndrome cohort study ROAD (Research on Osteoporosis/Osteoarthritis Against Disability) research team.

ロコモのコホート研究ROAD (Research on Osteoporosis/Osteoarthritis Against Disability) のメンバー。

© 2015 The University of Tokyo.



でも骨や関節を詳しく調べるケースは稀。疾病の頻度、発生率、増悪率、合併率、それに関連する因子、など運動器障害の基本的な疫学データが不足していました。

吉村特任准教授の専門は予防医学。地元の和歌山医科大学の公衆衛生学教室で骨粗しょう症を研究する中で、運動器の障害に悩む多くの高齢者を目の当たりにしてきました。もともと内科医であったこともあり、整形外科医の中村教授とは専門が異なり面識もありませんでしたが、分野横断的に取り組むロコモの重要性、そして、地方で地道に研究を続けてきた自分の成すべきことがよく分かったのです。

予防はまず現状把握から。吉村特任准教授は現状を明らかにする手段としてコホート研究デザインを選びました。集団を対象に追跡調査を行い、疾患の有病、発生、その予後を継続的に調査する疫学調査の手法です。自らのライフワークとして取り組んできた経験がありました。「高齢者が生涯歩き続けられる社会の実現に役立てるなら」。今まで以上に大規模で地道な調査の遂行に、新たな一步を踏み出す決意をしました。

大規模な調査の結果が語ること

ロコモのコホート研究は2005年から、東京都板橋区と、和歌山県の山間にある日高川町と漁師町の太地町で始まり、Research on Osteoporosis/Osteoarthritis Against Disability、略してROADと名付けられました。「研究成果を発信する相手は、日本という国全体。結果を一般化するためには、生活スタイルの異なる都市と地方のデータをそろえれば、説得力が高まるはず」。和歌山時代の4倍となる3040人の対象者一人一人に病歴や生活習慣などを問診し、X線検査を含むさまざまな測定を行います。山村や漁村の調査では、それぞれの町に3~4カ月滞在し、毎日15人ぐらいずつ調査。これを3年、7年、10年目に繰り返し調査し、継続してデータを蓄積します。初回調査（2005年）で、予想より多くの人がロコモの範疇に入ることが分かりました。レントゲン写真の分析で、調査対象者の約5割が膝、そして7割以上が腰に、変形性関節症を患っていました。骨粗しょう症の数字を加えると、40歳以上の人口の約3分の2にあたる4700万人が、将来的にロコモが原因で支援が必要になる可能性があることになります。従来の試算値より、はるかに大きな数字でした（図2）。

Locomotive Syndrome ロコモティブシンドローム

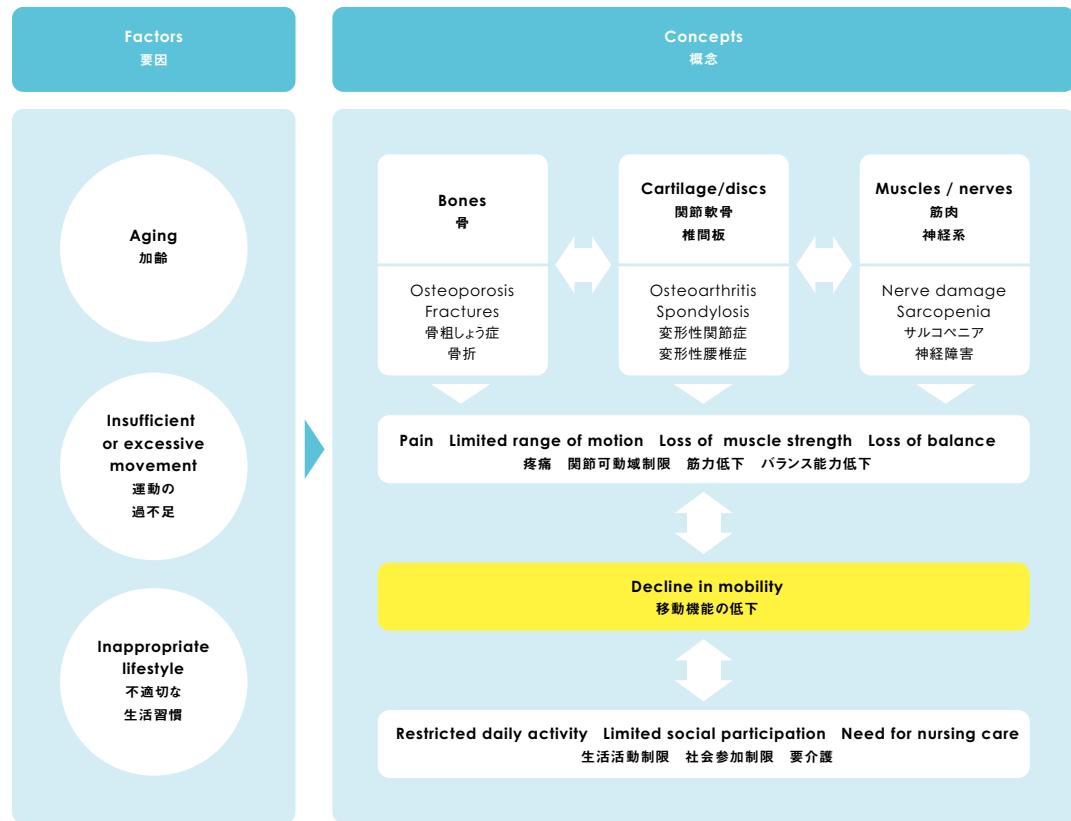


Figure 1: Conceptual overview of locomotive syndrome

The term "locomotive syndrome" was proposed in 2007 by the Japanese Orthopaedic Association to designate a condition of reduced mobility resulting from a disorder of the locomotive system. There is an increased risk of requiring nursing care with progression of the disorder. The Japanese Orthopaedic Association's active engagement with the issue has contributed to growing recognition of the syndrome in the medical community.

図1:ロコモティブシンドロームの概念図

ロコモティブシンドロームは、日本整形外科学会により2007年に提唱された概念で、運動器の障害のために移動機能の低下した状態を言います。進行すると要介護となるリスクが高くなります。日本整形外科学会による提唱以来の活動もあり、医学界での認知度が高まってきました。

(Adapted from *Locomotive syndrome 2013*, edited by Locomotive Challenge! Council, Japanese Orthopaedic Association, Tokyo, 2013.)

oporosis/Osteoarthritis Against Disability). "The audience for our research results was the whole of Japan. To convincingly translate our results to the whole country, we needed to collect data about the situation in urban and rural areas with different lifestyles." The cohort consisted of 3,040 people – nearly four times larger than her previous Wakayama study. The examination of the ROAD study consisted of an individually-administered questionnaire and a wide range of assessments and measurements, including X-rays, covering all aspects of medical history and lifestyle. Yoshimura's team spent three to four months in each location for the rural surveys, interviewing around 15 people a day. To accumulate follow-up data, this process would be repeated three, seven, and ten years after the initial survey.

The initial 2005 survey revealed an unexpectedly large number

2回目以降の継続的な追跡調査で明らかになるのは、発症率と疾患関連因子。健康状態からロコモになったり、ロコモから要介護状態になったりする患者の割合と、関連する要因などです。他地域の関連研究のデータも合わせると、全国で年間111万人が要支援・要介護状態に移行していること、やせと肥満のいずれもが要介護状態の移行に関連していること、運動能力の指標である歩行速度や握力がその危険因子となりうことなどが分かりました。

メタボリックシンドロームや認知症などの要介護となる他の要因とロコモに関連する複数の要因は互いに誘発し合うこともわかつきました。たとえば、高血圧と膝関節症はお互いに関連し合っていることがわかりました。つまり高血圧があれば膝関節症発生のリスクが上がり、逆に膝関節症があれば高血圧発生のリスクが上がります(図3)。それぞれの要因に因果関係があり、複雑な状況ですが、「関連要因を一つづつほぐしていくことで、疾病の連鎖を防ぎ、要介護の原

of people met the criteria for locomotive syndrome. X-ray analysis showed that around 50 percent of those surveyed suffered from knee osteoarthritis, and over 70 percent in the lumbar spondylosis (lower back pain). Adding cases of osteoporosis meant some 47 million people, about two thirds of Japan's population aged 40 and over, were at risk of requiring future support due to locomotive syndrome – a far higher rate than previous estimates (Figure 2).

The follow-up surveys provided data on incidence rate – the proportion of the population that progress to locomotive syndrome and the proportion that progress from locomotive syndrome to requiring nursing care – and associated factors. Including data of related studies in other regions, Yoshimura found that every year, 1.11 million people nationwide end up requiring support or nursing care; that being underweight and overweight are both associated with eventually needing care; and that walking speed and handgrip strength, both indicators of physical performance, might serve as risk indicators.

The study also revealed that factors associated with the need for care, such as metabolic syndrome and cognitive impairment, and multiple factors associated with locomotive syndrome, tend to trigger one another. For example, it was found that there is a mutual relationship between hypertension and knee osteoarthritis: patients with high blood pressure have a higher risk of occurrence of knee osteoarthritis, and vice-versa (Figure 3). Although these conditions are complicated and there are causal factors associated with each, Yoshimura says,

因を効率的に予防することを目指しています」と吉村特任准教授は話します。

地域との信頼関係が生んだ成果

貴重なデータと成果が得られた背景には、調査対象者や地域との深い関係がありました。継続と追跡がカギとなるコホート研究。初回に調査した3040人の82%が第2回調査にも参加。太地町に限れば、この数字は96%まで上がります。転出や高齢化によって協力が難しくなる人もいる中で、驚異的な数字です。

この太地町と吉村特任准教授の縁は1993年にまでさかのぼります。町役場から骨粗しょう症検診と健康指導を依頼されて以来、町の人たちの健康づくりに一役買なながら調査研究を進めています。かつてなく大規模な調査となった今回も町役場をはじめ町民の強力なバックアップがありました。山間の日高川町の調査も地元の継続的な協力があり、人口の流入が多く追跡調査が難しい都市部は東京都健康長寿医療センター研究所との共同作業で多くの人からデータを集めています。地元の協力は息の長いコホート研究に不可欠です。

だからこそ、吉村特任准教授は「結果をすべて、協力者に還元すること」を心がけています。調査結果に基づいた健康教室を現地で繰り返し開くばかりでなく、調査対象者からの個別の健康相談に応じ、重大な疾患の予兆を見つけて他科の医師を紹介したことありました

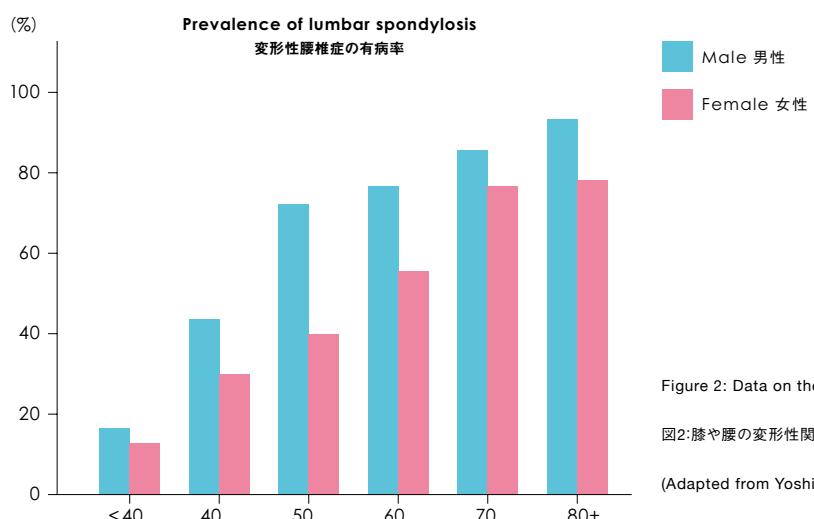


Figure 2: Data on the prevalence of knee osteoarthritis and lumbar spondylosis

図2:膝や腰の変形性関節症の有病率を示すデータ

(Adapted from Yoshimura N, et al. *J Bone Miner Metabol* 27, 620-628, 2009.)

"By unpicking the associated factors one by one and blocking the chain of disease progression, we aim to effectively block the factors that lead to the need for nursing care."

A bond of trust

It was thanks to close relations with the survey's participants and their communities that the study yielded such valuable data and findings. The success of a cohort study hinges on continuity and thorough follow-up. In this case, 82 percent of the initial 3,040 subjects participated again in the second survey. In Taiji alone, the figure was 96 percent. Considering that changes of residence and advanced age inevitably preclude continued participation by all subjects, this follow-up rate is nothing short of astonishing.

Yoshimura's connection with Taiji dates back to 1993, when the town hall asked her to conduct a bone mineral density survey and hold health education classes. Since then she has played a significant role in promoting the health of Taiji residents while also carrying out her survey research. Both the town hall and the townspeople themselves have provided robust support for the ROAD study, a project on unprecedented scale. The mountain town of Hidakagawa was also unstinting in its cooperation, while the Tokyo Metropolitan Institute of

(写真)。「高齢者の方が大好きだから」。駆け出しの内科医だったころから多くの高齢者と関わり、励まされながら自身が成長してきたからこそ、活動にも熱が入ります。

今後の展望

吉村特任准教授が今後、特に重要なと考えるのは、国や地方自治体といった行政への働きかけ。たとえば、定期健康診断で腰と膝のレントゲン写真を撮る制度や仕組みがあれば、障害の早期予防につながるでしょう。費用や手間などのデメリットもあるからこそ、それを凌駕するだけの社会的な価値があることを示したいのです。

今後は4回目の調査(2015年～)を行ってデータを詳しく解析していくとともに、調査対象者を拡大する計画です。2015年には初回調査から10年目となるコホート研究。初年度と今の、たとえば同じ50歳代の対象者のデータを比べることで、世代による相違点も見えるようになってくるはずです。

コホート研究は継続する時間が長くなるほど価値が上がっていきます。そう信じてゆかりのある和歌山と、研究の最先端の東京を行き来する吉村特任准教授。「コホート研究は研究者が死ぬまで続くものですから、コホート研究を始めたら長生きしないといけないんです」。東京大学へ来て10年。和歌山医科大学時代から貴くライフワークの道(ROAD)の歩みは、さらに加速しようとしています。



Photo: Professor Yoshimura explains the survey results to participants attending a health education class she initiated in Wakayama Prefecture

写真:和歌山県での調査で、健康教室を開いて協力者に調査の結果を説明する吉村特任准教授の様子

© 2015 The University of Tokyo.

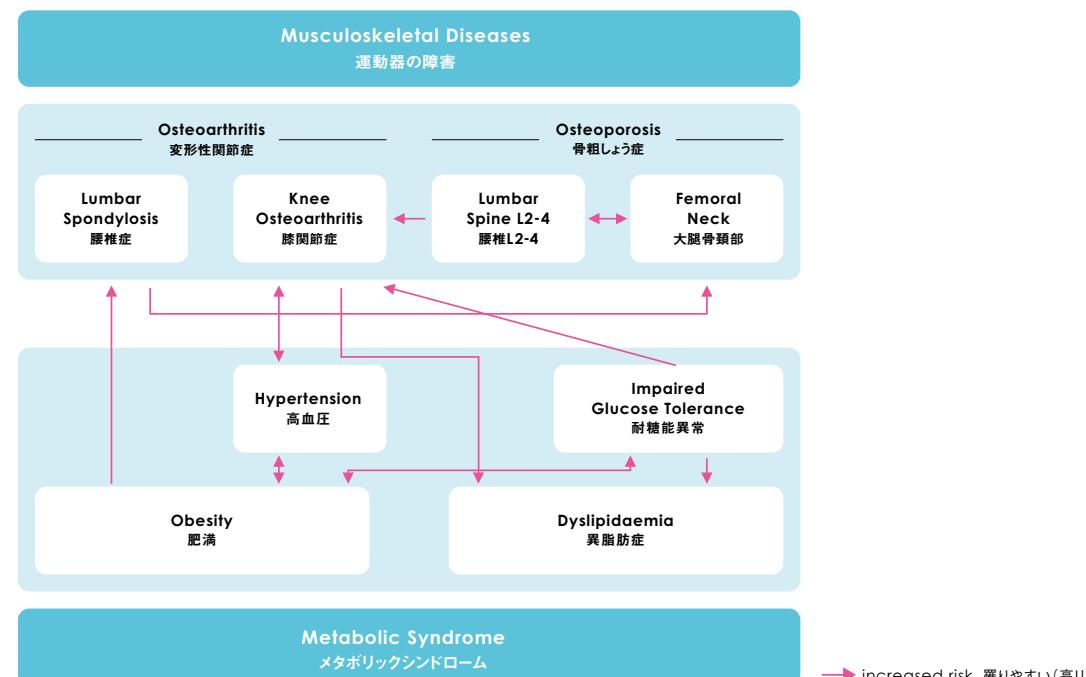


Figure 3: Conceptual diagram summarizing mutual associations among musculoskeletal diseases and metabolic syndrome components. Arrows linking two diseases and/or symptoms indicate the presence of the first condition increases the risk of the second occurring. Various factors are interrelated such that each may induce the symptoms of the other.

図3:運動器の障害とメタボリックシンドロームとの関連を示す概念図
矢印が結ぶ2つの疾患や症状には、一方を有していると他方が発生しやすくなるという関係がある。さまざまな要因が複雑に絡み合って、互いの疾病を誘発し合っている。

(Adapted from Yoshimura N, et al: *Mod Rheumatol*. 2014 Nov 20:1-11. [Epub ahead of print]).

Gerontology assisted in gathering data from many subjects in urban Tokyo, where high population turnover poses a great challenge to follow-up surveys. This kind of local support is crucial to the success of such a long-term cohort study. For that very reason, Yoshimura has committed herself to sharing the results of her survey work with those who helped make it possible. Not only does she hold frequent health education classes based on those results in the surveyed communities (Photo), she also offers health consultations with individual participants in the study. On occasion she has diagnosed serious health problems and referred participants to other specialists. "I love elderly people," she enthuses. The many senior citizens she has worked with since she was an inexperienced young intern have given her encouragement and helped her grow, she says, hence the passion she brings to her work today.

Future outlook

In Yoshimura's view, from this point on it is critical to enlist central and regional government in efforts to tackle locomotive syndrome. For example, the systematic inclusion of lumbar and knee X-rays in regular health checkups could contribute toward its early prevention. Since this will necessarily entail extra costs and labor, it is all the more important to demonstrate that this effort is outweighed by the benefits to society. With the fourth survey scheduled to begin in 2015, plans call

not only for more detailed analysis of the acquired data, but also for an expansion of the subject pool. The tenth anniversary of the launch of the cohort study also falls in 2015. Comparing data between first-year and current-year subjects in the same age range – for example, those in their fifties – should bring to light generational differences. The value of a cohort study increases the longer it continues. Yoshimura continues her research on her home turf of Wakayama and in Tokyo, a city at the cutting edge of research. "A cohort study lasts as long as the researcher lives, so they need to be as long-lived as possible," says Yoshimura. It has been ten years since she came to the University of Tokyo, but the lifework she began at Wakayama Medical University is far from over. If anything, the pace of Yoshimura's lifelong walk on the "ROAD" is accelerating.

Acknowledgements: Project Associate Professor Noriko Yoshimura (22nd Century Medical and Research Center, The University of Tokyo Hospital)
Published: 2015/03/16
<http://www.u-tokyo.ac.jp/url/vfb>



取材協力:吉村典子特任准教授(医学部附属病院22世紀医療センター)
掲載日:2015/03/16
<http://www.u-tokyo.ac.jp/url/vfa>

Starting a second decade of innovation and entrepreneurship

The Division of University Corporate Relations

イノベーションとアントレプレナーシップを推進する産学連携本部

次の10年の始まり

Like a hub on a modern-day Silk Road, the University of Tokyo is a major locus of innovation and the exchange of ideas. Pilgrims and merchants of knowledge and industry from around the world are drawn here in search of the latest concepts and devices—and the best collaborators. Opening the gates to this rich resource is the Division of University Corporate Relations (DUCR), tasked with promoting academia-industry collaboration. Via cross-fertilization of ideas, internationalization, and entrepreneurship, the DUCR is nurturing a new generation of dynamic leaders and problem-solvers to spread the University's wares throughout the world.

太古のシルクロード上の街が現代に移されたかのように、東京大学はアイデアが交換され、イノベーションが起きる中心地となっています。産と学の巡礼者と商人が、最先端の知識や装置、そして最高の共同研究者を探し求め、世界中からここに集まります。このような豊富なリソースへの門戸を開いているのは、東京大学産学連携本部です。その任務は学術界と産業界の連携を促進すること。アイデアの相互作用や国際化、起業化を通して、産学連携本部は東京大学から産まれた「行商の品」を世界中に広めるために、次世代の精力的なリーダーや問題解決者を育成しています。

Interview/text: John Amari
取材・文:ジョン・アマリ

Industry-academia collaboration for the benefit of society

Through its various organizations, programs, and collaborations the DUCR (Figure 1) ensures the fruits of the University's successes are shared with industry and society. "The DUCR connects the academic research community with industry. We aim to create a platform where researchers from the University of Tokyo, and from around the world, can work together to create new knowledge, contributing to new services and products for society," says Professor Shigeo Kagami, General Manager of the DUCR's Office of Innovation and Entrepreneurship (I&E). One of the DUCR's strengths lies in matching the ambitions of talented University researchers to the goals of industry, and creating a rapport between researchers and sponsor companies. This is no small feat in a university with over 5,800 researchers—not including graduate students—and over 1,600 joint-research projects, primarily with the private sector. "This

社会の利益のための産学連携

数多くの組織、プログラム、そして共同研究を通して、産学連携本部（図1）は東京大学から産まれた研究の果実が確実に産業や社会と共に共有されるよう努めています。「産学連携本部は、学術界と産業界をつなぎます。東京大学の研究者と世界中の研究者が、新しい知識を共に創造し、社会のための新たなサービスと製品に貢献できるプラットフォーム作りを目指しています」と語るのは産学連携本部イノベーション推進部長の各務茂夫教授。

産学連携本部の強みの一つは、才能溢れる大学研究者の野心と産業界のゴールを繋げ、研究者とスポンサー企業間の密な関係を築くことです。5,800人を超える研究者（大学院生を除く）と、その大半が民間セクターとの共同で行われている1,600以上の共同研究プロジェクトを抱える大学にとって、産と学を結びつけるのは決して容易ではありません。「1,600という数字は日本の大学全体における、産学共同の研究プロジェクトの約10%です」と、イノベーション推進部の第一



Figure 1: The UCR Plaza, where the DUCR and other University of Tokyo industry-related organizations reside

図1:産学連携本部プラザ。産学連携本部と東京大学の他の産業関連の組織が入居する

© 2015 The University of Tokyo.

彦博士は言います。「しかし人と人を繋ぐだけでは十分と言えません。Proprius21のような仕組みを通して、共同研究の成功を確実にするようにしています。Proprius21は、共同研究プロジェクトを作り上げるためのスキームです」。産学連携本部がアメリカの多国籍企業ボーイング社と東京大学の研究者を引き合わせたのもその一例です。

ボーイング社-東京大学のプロジェクトは2010年よりボーイング社の助成を受けて、プロジェクトの進捗を観察する博士や産学連携本部の職員が支え、指揮を石川正俊教授がとり、現場での日々の指導をカーソン・レンツ特任講師が行っていました。数ヶ月後、当時工学系研究科の大学院生でアメリカ出身のクリストファー・ラビ助教が加わりました。その後、2014年にはレンツ特任講師の後任としてスウェーデン人のニコラス・ペリストロム特任助教が加わりました。

彦博士は言います。「しかし人と人を繋ぐだけでは十分と言えません。Proprius21のような仕組みを通して、共同研究の成功を確実にするようにしています。Proprius21は、共同研究プロジェクトを作り上げるためのスキームです」。産学連携本部がアメリカの多国籍企業ボーイング社と東京大学の研究者を引き合わせたのもその一例です。

ボーイング社-東京大学のプロジェクトは2010年よりボーイング社の助成を受けて、プロジェクトの進捗を観察する博士や産学連携本部の職員が支え、指揮を石川正俊教授がとり、現場での日々の指導をカーソン・レンツ特任講師が行っていました。数ヶ月後、当時工学系研究科の大学院生でアメリカ出身のクリストファー・ラビ助教が加わりました。その後、2014年にはレンツ特任講師の後任としてスウェーデン人のニコラス・ペリストロム特任助教が加わりました。

自分の所在地を知っているロボットを作るには

ラビ助教は、工学系研究科の鈴木・土屋研究室に所属している制御研究の専門家で、ペリストロム特任助教は情報理工学系研究科の石川研究室に所属する、コンピュータ・ビジョンの専門家です。両グループは、それぞれの分野で世界を牽引する研究室です。ボーイング社のジョン・ヴィアン主任研究員、イマード・サード主幹研究員と共に、ラビ助教とペリストロム特任助教は、無人機研究という難題に取り組みました。それは、飛行用と陸上用のロボットに搭載可能な堅牢、正確かつ精密なナビゲーションと誘導システムをどのように創るか、という問題です。

これらの条件を満たすロボット制御のアルゴリズムを開発するという高い目標を設定しました。このアルゴリズムによって、ロボットに搭載されたセンサーと外部センサーから得られるロボットの動作の情報が統合できなければなりません。さらに、一つまたは複数の情報源が失われた場合でも、本体が操縦できるよう、このアルゴリズムは「堅牢」である必要があります。加えて、GPSシステムのように絶対座標系内で「正確」であり、同時に例えば、ロボットに搭載したカメラから得られたデータのような相対的な座標系内で「精密」である必要があります。さらに、環境中の素早い変化に反応し、応答すること、そして、飛行用と陸上用のロボットで動作することが必要です（図2）。

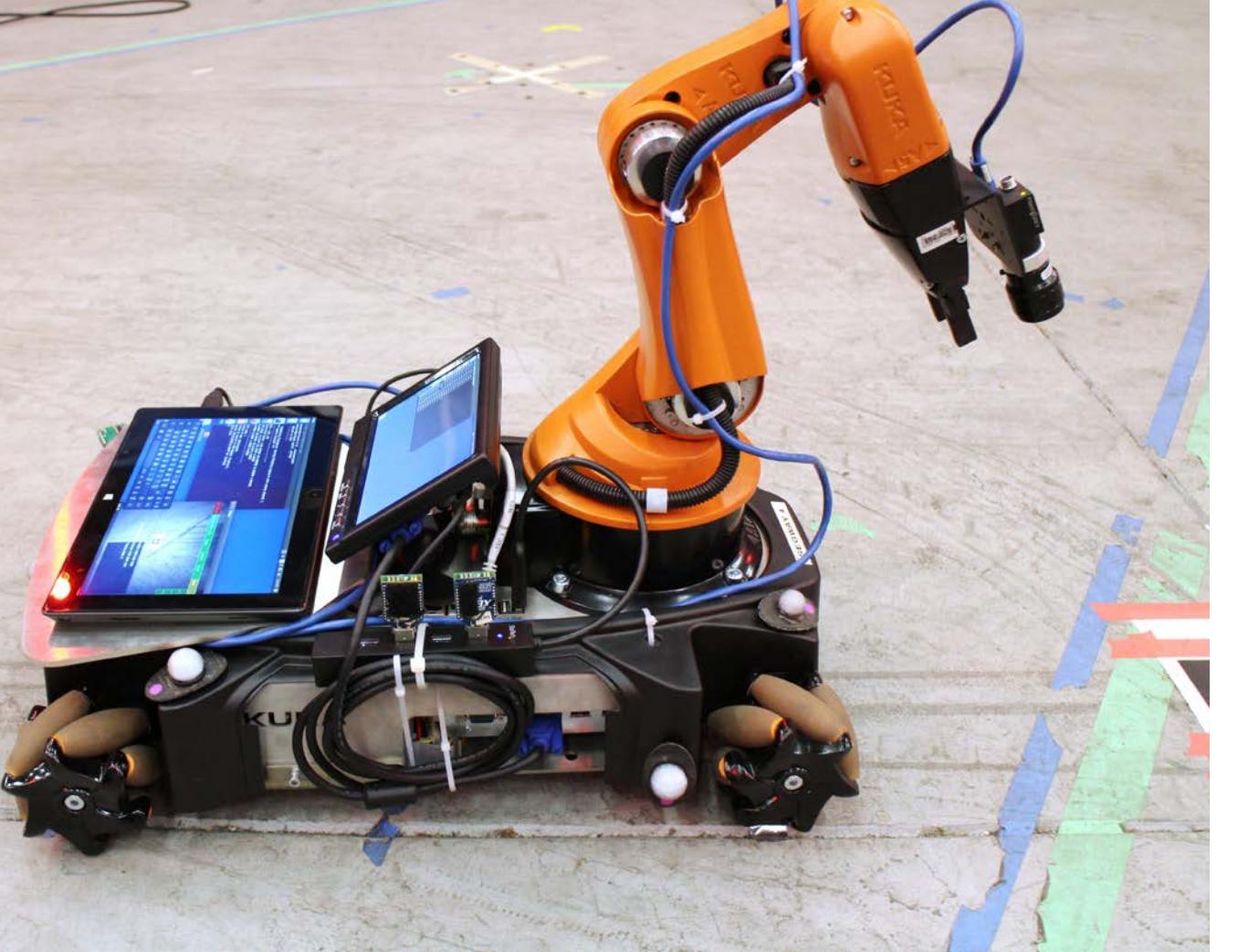


Figure 2: Kuka YouBot development platform

The group used standard development platforms such as the ground-based Kuka YouBot to test their system. Natural features in the environment are tracked with the arm-mounted camera while wheel encoders provide odometric data. White spherical markers on the body of the robot are tracked by external motion capture sensors. These multiple sources of on-board and off-board information are integrated by the on-board computer.

図2:Kuka YouBot開発プラットフォーム

開発したシステムを検証するため、グループは陸上のロボットKuka YouBotのような標準的な開発プラットフォームを用いました。車輪の速度検出装置によってロボットの走行距離が測定できる一方、ロボットのアーム部分に備え付けられたカメラで地形や景色を追跡します。ロボットの本体に付いている白い球体を目印に外部のモーション・キャプチャーセンサーがロボットの動きを追跡します。ロボットに搭載されたセンサーや外部センサーから得られる多様な情報は、ロボットに搭載されたコンピューターにより統合されます。

© 2015 Chris Raabe and Niklas Bergström.

Figure 3: The test facility at Boeing in Seattle
The red lights in the ceiling indicate where the cameras used by the external vision system are located.

図3:シアトルのボーイング社の試験施設
外部の視覚システムによって用いられているカメラの位置は、天井の赤い照明が取り付けられている場所。

© 2015 Boeing Company.



local frame of reference, as is data from an on-board camera. Finally, it had to be responsive and react to fast-changes in the environment and adaptable so that it could work with both ground-based and aerial robots (Figure 2).

More than the sum of its parts

Raabe, the controls and guidance specialist, says “The problem with a small, hovering helicopter (drone), is that disturbances—due to small gusts and turbulence, say—can lead to quite a large deviation from the desired position. You need a fast sensor that can detect those disturbances so that you can compensate. Otherwise, you are liable to crash the drone. The challenge was trying to fit the existing technology into a platform that could be carried on a small vehicle and still produce very fast measurements and compensate quickly.”

Bergström, the computer vision expert, faced a different but related problem: how to fuse position information from a vision sensor with other sources of position, and then make them work harmoniously to provide a reliable position to Raabe’s control system. “There were significant challenges,” Bergström says. “For instance, you might have vision and other sensors on-board the vehicle. But you might also employ external sensors that track the vehicle, so you have sensor information coming in from many different sources. Moreover, latency—delay between stimulus receipt and response—in the system leads to a significant reduction of controllability.”

In addition, each sensor has its own reference frame. An on-board camera can deduce position relative to natural features it sees, but it has no understanding of where those features are. It can detect a change in camera position that is precise to within a few centimeters, but relative to an unknown reference position. Meanwhile, an off-board sensor, a camera fixed in the room, say, can give an accurate global position, but lacking in precision. Guidance and navigation methods exist to fuse both on-board and external inputs to guide and control the robot.

However, what if this external sensor is blocked or lost, say when a ground robot drives under an obstacle like a bridge, or a sensor fails? Raabe says, “We were able to fuse these different kinds of position sources, so that in cases where one or more sensors suddenly become unavailable, we can rely on the remaining sensors with minimal loss in accuracy and precision. One major challenge that we worked on recently was creating a fusion algorithm that could quickly align position sensors with differing reference frames. We’ve tested it; it works; and we’ve published a paper.” The tests were carried out at Boeing in Seattle, U.S.A. Such tests would not have been possible without access to the company’s extensive research facilities (Figure 3).

Raabe and Bergström believe that there are many applications for their research—in manufacturing, consumer applications, or for civil uses such as post-disaster search-and-rescue activity—in a collapsed building requiring a robot to search for victims, for instance, while “working out” its position in a disturbed environment.

部分の総和に勝る

「上空で静止する小型無人ヘリコプター(ドローン)は、例えば、小規模な突風や乱流によって目的の位置とは遠く離れた場所に到着する問題があります。このような乱れを素早く検出できるセンサーが必要で、あれば、ドローンは位置を補正できます。さもなければ、ドローンを墜落させかねません。課題は、既存の技術を小さな乗り物にも搭載することのできるプラットフォーム上に実現しつつ、高速な測定と素早い補正も可能にすることでした」と制御と誘導の専門家であるラビ助教は話します。

コンピュータ・ビジョンの専門家であるベリストロム特任助教は、別のしかし関連のある課題に直面しました。それは、視覚センサーから得られる情報をその他の位置情報どのように統合して、調和させ、信頼性の高い情報をラビ助教が担当する制御システムに提供するでした。「いくつかの大きな課題がありました」とベリストロム特任助教は振り返ります。「例えば、視覚センサーやその他のセンサーが搭載されているとします。その他にもロボットを追跡するための外部センサーを用いるかもしれません。つまり、多くの異なる情報源から情報が入力されるのです。さらに、システム内の情報を受信してから反応するまでの時間の遅れは、ロボットの制御性を大きく損なうことにつながります」。

加えて、各センサーは独自の座標系を持っています。ロボットに搭載されたカメラは、カメラが捉えた地形や景色との相対的な関係を推

測することができますが、それがどこにあるのかを理解することはできません。カメラ位置の変化を数センチ以内の精度で検出できますが、それは絶対的な位置は不明な場所との相対的な関係にすぎないのです。一方、外部センサー、例えば、部屋に固定されたカメラによって、その部屋内でのロボットの正確な位置を検出できますが、精密さには欠けます。誘導やナビゲーションのアルゴリズムは、ロボットに搭載されたセンサーと外部センサーからの情報を統合することで、ロボットの誘導や制御を可能にします。

しかし、この外部センサーが遮断または失われた場合、例えば陸上用のロボットが橋のような障害物の下を通過するとき、あるいはセンサーが故障した時、どうなるのでしょうか?「異なる位置情報を融合することに成功したため、一つ、またはそれ以上のセンサーが突然利用できなくなったとしても、残りのセンサーからの情報を頼ることで、正確さと精密性の損失を最小限に抑えられます。最近取り組んでいた大きな課題は、異なる座標系を持っている位置センサーを素早く調整できる融合アルゴリズムを作ることでした。このアルゴリズムを試験し、動作することを確認し、その結果を論文として発表しました」とラビ助教は言います。アルゴリズムの試験は米国シアトルのボーイング社で行われました。ボーイング社のような大規模な研究施設の利用なくしては、このような試験は不可能でした(図3)。

これまでの成果は製造業、消費者向け製品、災害後の探索と救出活動(崩壊した建物など難しい環境でも、ロボットは自分のいる場所を“把握”できるので、例えば建物内に残る被災者の探索への応用を考えら

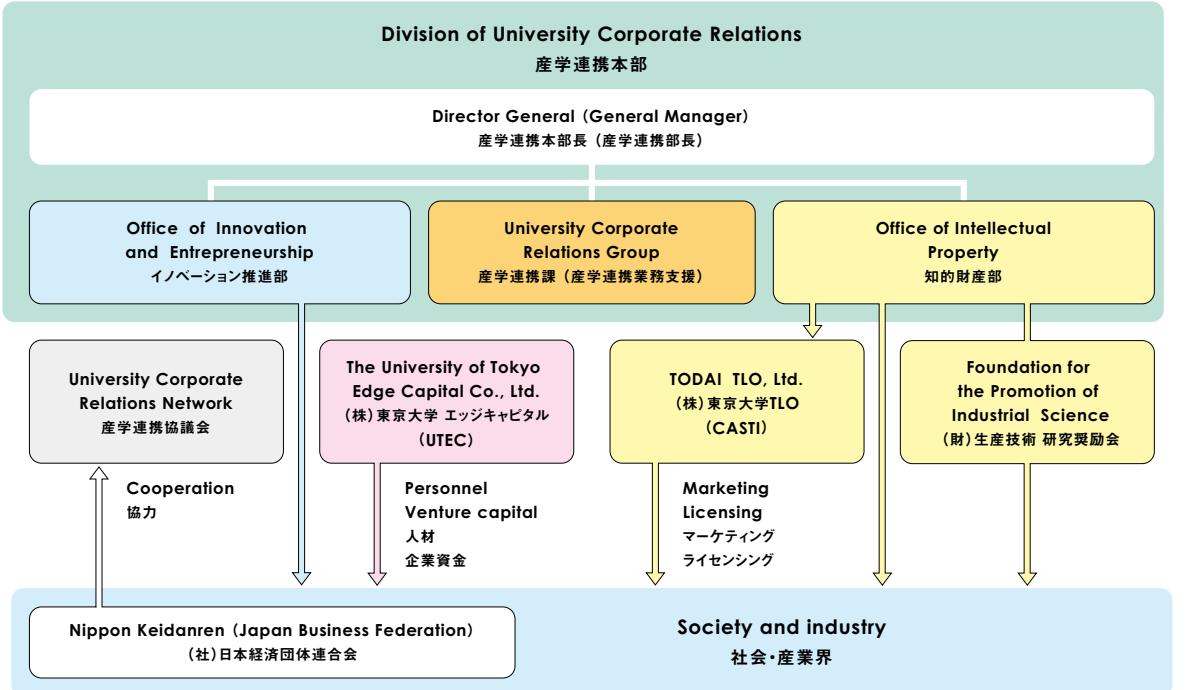


Figure 4: The organization of DUCR and its related entities
DUCR has a particularly close relationship with the University of Tokyo Edge Capital (UTEC),
and Todai Technology Licensing Organization (Todai TLO), forming a tripartite core.

図4:産学連携本部の組織およびその関係団体

産学連携本部は、東京大学エッジキャピタル(UTEC)、および東京大学TLOとりわけ密接な3種関係を築いています。

© 2015 The University of Tokyo.

From companies and universities to shop floors and households

In addition to fostering industry-academia joint research projects, the DUCR is also facilitating knowledge-sharing and contributing to society by fostering an environment of entrepreneurship where ideas born in labs and classrooms can take flight in business on their way to the rest of society.

"The DUCR," Kagami says, "is unique in Japan in that we also provide entrepreneurship education, including through the UTokyo Entrepreneurship Dojo since academic year 2005. We teach students how to create startups, how to write a business plan, build an entrepreneurial team and work with the venture capital community." Some 1,800 students have enrolled in the Dojo in the last decade, and over 70 are involved in creating new enterprises. UTEC, the venture capital arm dedicated to the University of Tokyo, has invested in scores of successful startups launched at the University.

Via a Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT) grant, the division manages the EDGE program, an education and mentorship scheme designed to encourage researchers to broaden their perspective, including thinking about launching their own startups using their own technology.

Many of the technologies resulting from DUCR initiatives lie

れます。)といった民間救助活動などさまざまな領域で応用できるとラビ助教とベリストロム特任助教は考えています。

企業や大学の連携の成果が身近なイノベーションに結実する

産業界と学術界の共同研究の育成に加え、産学連携本部は知識の共有を促進することや、研究室や教室から生れたアイデアを、ビジネスを通して社会へと届ける起業文化を育てるこによって、社会に貢献しています。

「教育機能を持たない本部組織の産学連携本部が、アントレプレナーシップ家教育を提供していることは国内の大学でも本学のユニークな点です。2005年度以来「東京大学アントレプレナー道場」を開講していますが、その一例です。起業の仕方、事業計画の書き方、起業に際してのチームビルディング、ベンチャーキャピタルとの付き合い方などを学生に教えています」と各務教授は話します。過去10年で約1,800名の学生が受講し、70名を超える卒業生が創業に参画しています。東京大学のためのベンチャー投資会社であるUTECは、東京大学から生まれた大学発ベンチャー数十社に投資してきました。

産学連携本部は、文部科学省の助成金によりEDGEプログラムも

deeply embedded within society in the form of patents, for instance, but its important achievements are the personal networks and ecosystem nurtured through activities such as the EDGE program and the Entrepreneurship Dojo. Recently, several University startups have been in the news, including SCHAFT, a robotics company that won the DARPA challenge in 2013 and was bought by Google, PeptiDream, a bioventure company listed on the Mothers Stock Exchange Market for emerging stocks, and Euglena, a biotech company listed in the first section of the Tokyo Stock Exchange. The latter two companies were incubated in a facility called the University of Tokyo Entrepreneur Plaza run by the DUCR.

DUCR — From Silk Road to superhighway

Established in 2004 following incorporation of the national universities system, the DUCR was restructured in April 2013 to make it a focused, innovation-driven organization comprised of two main sections: Office of Innovation and Entrepreneurship and the Office of Intellectual Property, with Mr. Tetsuo Ogama as General Manager (Figure 4). Kagami's I&E is a new organization created by integration of the former Office of Collaborative Research Development and the Office of Science Entrepreneurship and Enterprise Development (SEED).

Looking to the future, Kagami is optimistic that the DUCR ecosystem of entrepreneurship, risk-taking, and collaborative effort will nurture a new generation of forward-thinking young researchers, business leaders and social innovators. "Entrepreneurship education is like swimming," Kagami says. "When you learn, you first need to develop muscle memory by training. Then you can execute whatever you set your mind to and realize your dreams. That is where the Entrepreneurship Dojo comes in." Kagami's sentiments are in accord with former University President Junichi Hamada's views. "Entrepreneurship education," President Hamada said, "is basic education for everybody."

The DUCR celebrated its tenth anniversary in 2013. The division is able to look back with pride at its accomplishments in its first decade and forward to what is yet to be done in its second. In a world drawn closer by high-speed digital networks and international collaborations, the DUCR is opening the gates to the University's riches, establishing the University of Tokyo as a major hub on the modern-day Silk Road—a road that is rapidly becoming a superhighway of knowledge.

運営しています。これは、研究者が単に研究をすることを越えて視野を広げるように設計された教育とメンタリングからなるプログラムで、研究者が自ら開発した技術を用いて事業化構想を練り上げることを促します。

産学連携本部主導の試みによって結実した技術の多くが、例えば特許のような形で社会の奥深くに根付いています。しかし、重要なのは、EDGEプログラムやアントレプレナー道場といった活動を通して育まれた、個人間のネットワークやエコシステムです。近年、東京大学発の企業はニュースになっています。ロボティクスチャレンジで予選首位となり、後にGoogleに買収されたロボット企業のSCHAFT(シャフト)もその一つです。またマザーズ市場に上場しているバイオベンチャーのPeptiDream(ペプチドリーム)や東京証券取引所第一部市場上場会社となったバイオベンチャーのEuglena(ユーグレナ)です。この2社は、産学連携本部が提供するインキュベーション施設、アントレプレナープラザで育まれました。

産学連携本部 — 現代版シルクロードへ

国立大学制度の国立大学法人化に続き、2004年に設置された産学連携本部は2013年4月に、2つのセクションに編成されました。イノベーションに重きをおき、イノベーション駆動型の組織とするためです。各務教授率いるイノベーション推進部、小蒲哲夫部長率いる知的財産部によって構成されています(図4)。

将来に目を向けると、産学連携本部がこれまで養成してきたベンチャーマインド、リスク・テーキングの文化、協調の精神のエコシステムによって、先見性のある次世代の若手研究者やビジネスリーダー、社会起業家が育まれるだろうと各務教授は自信をのぞかせます。「アントレプレナーシップ教育は水泳と似ています」と各務教授。「まず、練習を通じて筋肉に記憶させる必要がありますが、体で一度覚えてしまえばあとは一生泳げるようになります。同様に、夢を実現する過程を手助けするのがアントレプレナー道場です」。各務教授の考え方方は、「アントレプレナーシップ教育こそ、すべての人が受けるべき基礎的な教育」という濱田純一前総長の見解と一致します。

産学連携本部は、2013年に10周年を迎えたこれまでの10年の足跡を胸を張って振り返ると同時に、次の10年で未達の課題に取り組みたいと考えています。高速デジタル・ネットワークと国際協力によって世界の距離が縮まる中、産学連携本部は大学のリソースへの門戸を開くことで、急速に知識の超高速道路となりつつある現代のシルクロードの主要な拠点として東京大学を確立しつつあります。

Acknowledgements: Professor Shigeo Kagami, Program Officer Kazuhiko Kakehi (Office of Innovation and Entrepreneurship, DUCR), Project Assistant Professor Niklas Bergström (Graduate School of Information Science and Technology), Assistant Professor Chris Raabe (Graduate School of Engineering)

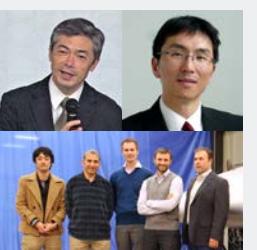
Published: 2015/05/29

<http://www.u-tokyo.ac.jp/url/vfd>

取材協力:各務茂夫教授、筧一彦プログラムオフィサー(産学連携本部 イノベーション推進部)、ニコラス・ベリストロム特任助教(情報理工学系研究科)、クリストファー・ラビ助教(工学系研究科)

掲載日:2015/05/29

<http://www.u-tokyo.ac.jp/url/vfc>



Building trust

20 years of the Laboratory

for Integrated Micro Electro Mechanical Systems

日仏で育んできた絆

LIMMS（集積化マイクロメカトロニックスシステム共同研究ラボ）20年の歩み

Successful international research collaborations are built on a solid foundation of trust, and trust is earned over time. This Franco-Japanese research partnership is a textbook example of how it's done.

信頼という強固な基盤があつてこそ初めて国際共同研究を成功に導くことができます。そして、信頼とは時間をかけて築くものです。その信頼構築のお手本となる日仏研究パートナーシップがここにあります。

Interview/text: Euan McKay Translation: Mieko Arai
取材・文:ユアン・マッカイ 翻訳:新井美恵子

Complementarity

MEMS, or Micro Electro Mechanical Systems, is the fabrication of micro- and nanoscale mechanisms on silicon using the processes of the integrated circuit industry. The products of this emerging field are behind many of the sensors and systems that make smartphones and other modern devices possible.

In the early 1990s, France's Centre national de la recherche scientifique (CNRS) was searching the world for partners in a new MEMS research collaboration. The University of Tokyo's Institute of Industrial Science (IIS) was just what they were looking for: an interdisciplinary institute, focused on collaboration, with world-class MEMS expertise.

After several visits by a team lead by Jean-Jacques Gagnepain, Director of the CNRS Engineering Science Department, CNRS chose the IIS as the home for a new joint laboratory based in Japan that would host French researchers for the two to three years it usually takes to complete a research project.

The laboratory focused on ensuring partnership from the beginning. "If you research exactly the same topic in the same way, it ceases to be collaboration and becomes competition. It's better to have complementarity, where each parties' strengths mesh." Professor Hiroyuki Fujita, the first Japanese co-director of LIMMS, sounds almost paternal as he recalls the beginnings of the laboratory he has been deeply involved

相補性

MEMS(微小電気機械システム、略してメムス)は、シリコンチップ上にマイクロやナノの大きさの機械を作る技術であり、集積回路の製造工程を利用します。この新しい製造技術は、スマートホン等の最先端デバイスで使われている多くのセンサや装置の製造に欠かせないものです。

1990年代の初頭、フランス国立科学研究所(CNRS)は、新しいMEMSの共同研究相手を世界中から探していました。東京大学生産技術研究所は、まさしく彼らが探し求めていた相手でした。生産技術研究所は学際的研究機関で、国際協力に積極的であり、卓越したMEMSの研究を行っていたからです。

CNRS工学研究部門のジャン・ジャック・ガニュバン部門長が率いるチームが数度の視察をした後、CNRSは、フランスの研究者を派遣する日本の共同研究施設として生産技術研究所を選びました。派遣期間は、ひとつの研究プロジェクトが完了するまでにおおよそかかる2~3年間です。

この国際研究ラボは当初から協力関係の確立を目的のひとつとして考えていました。「まったく同じテーマを同じようなやり方で研究した場合、協力ではなく競争になってしまいます。相手との協力関係を強めるには互いに補完する関係を持つほうが良いのです」と語るのは日本側の初代共同ディレクター藤田博之教授です。LIMMSの設立当初から20年間も深く関わっている藤田教授にとっては、LIMMSは

with for twenty years.

This matched French hopes. "One objective we had was to profit from the difference in the French and Japanese education systems," says Professor Dominique Collard, the French co-director of LIMMS. "In France, technology is not regarded as a science. In Japan it is. We hoped that new ideas would emerge from the confrontation of these two mindsets."

The University of Tokyo and CNRS signed a Memorandum of Understanding and LIMMS was born on 1 January 1995 (Figure 1). Dr. Michel de Labachelerie was the first French co-director, working mostly on administrative aspects. Research began in earnest when Collard took over and the co-directors started to discuss what to research, and how.

A critical mass of ten to twenty researchers from France would be hosted in the IIS and conduct research together with Japanese researchers. "LIMMS researchers are all hosted in various IIS labs, but it's no good to just have a French outpost here in Japan. We make sure that researchers are paired with an IIS researcher or PhD student and that they work together and are integrated," says Fujita.

"Obviously, even this wouldn't work without planning. So before a researcher even comes to Japan, the co-directors ensure that their project matches the interests of the host researcher," says Collard.

There is also strong support both before and after arriving in Japan. "A CNRS administrative staff member and three Japanese secretaries at the IIS ensure that visa applications, registration at city hall, finding accommodation and so on all go as smoothly as possible, so researchers can get started on research right away," says Fujita.

Milestones

An important milestone was achieved in 2004. "Due to our success, CNRS and IIS decided to upgrade the structure to an International Mixed Unit (UMI). This saw LIMMS established as a full laboratory, with two governing institutions," says Collard. LIMMS's continued excellent performance saw the renewal of

わが子のようなものです。

これはフランス側の希望と一致しました。「私たちの狙いの一つは、フランスと日本の教育システムの相違点がメリットをもたらす可能性を試すことでした。日本と違ってフランスでは技術は科学とはみなされません。このような物の見方の違いが新しいアイデアを生み出すと期待したのです」。そう語るのはLIMMSのフランス側の共同ディレクターでドミニク・コラール教授。

東京大学とCNRSは研究協力協定覚書を調印しLIMMSは1995年1月1日に誕生しました(図1)。フランスの初代共同ディレクターであるミシェル・ド・ラバシェルリー博士は、主に事務手続きに奔走しました。研究が本格的に始まったのはコラール教授が共同ディレクターを引き継いでからです。日本とフランスのディレクターは、何をどのように研究するかの意見を交わし始めました。

10~20名にもおよぶフランスの研究者が、生産技術研究所に受け入れられ、日本の研究者とともに研究を行うのです。「生産技術研究所の様々な研究室がLIMMSの研究者を受け入れています。しかし、こうした日本の研究室がフランスの研究者の単なる出向先というのではありません。私たちは、フランスの研究者が生産技術研究所の研究者や博士課程の学生とペアを組み、共に研究を行い、一体となるよう努めています」と藤田教授は話します。

「言うまでもありませんが、これさえも事前の準備なしでは機能しません。ですから、来日前に研究者たちのプロジェクトが受入側の研究者の興味と一致するように、私と藤田先生は努めています」とコラール教授は補足します。

来日前、そして来日後も強力なサポート体制があります。「ビザ申請、区・市役所への登録、宿泊施設の確保等ができるだけスムーズに行われるようCNRSの事務スタッフと生産技術研究所の3名の日本人秘書がサポートします。そのため、研究者は来日後すぐに研究を始められます」と藤田教授。

重要な節目

大きな節目は2004年でした。「私たちの成果により、CNRSと生産技術研究所は、LIMMSを国際混成ユニット(UMI)に昇格させるこ



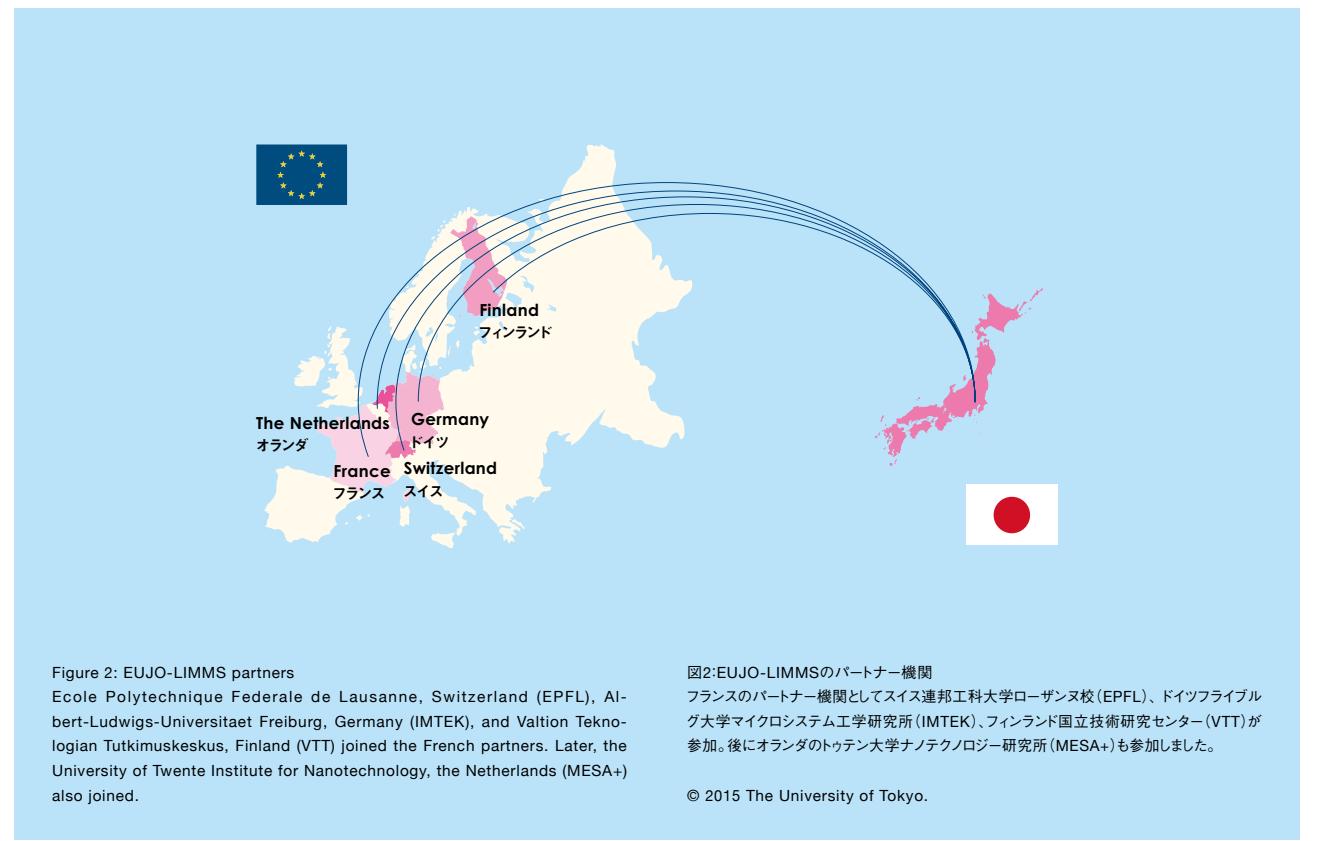


図2:EUJO-LIMMSのパートナー機関
フランスのパートナー機関としてスイス連邦工科大学ローザンヌ校(EPFL)、ドイツフライブルグ大学マイクロシステム工学研究所(IMTEK)、フィンランド国立技術研究センター(VTT)が参加。後にオランダのトゥーテン大学ナノテクノロジー研究所(MESA+)も参加しました。

© 2015 The University of Tokyo.

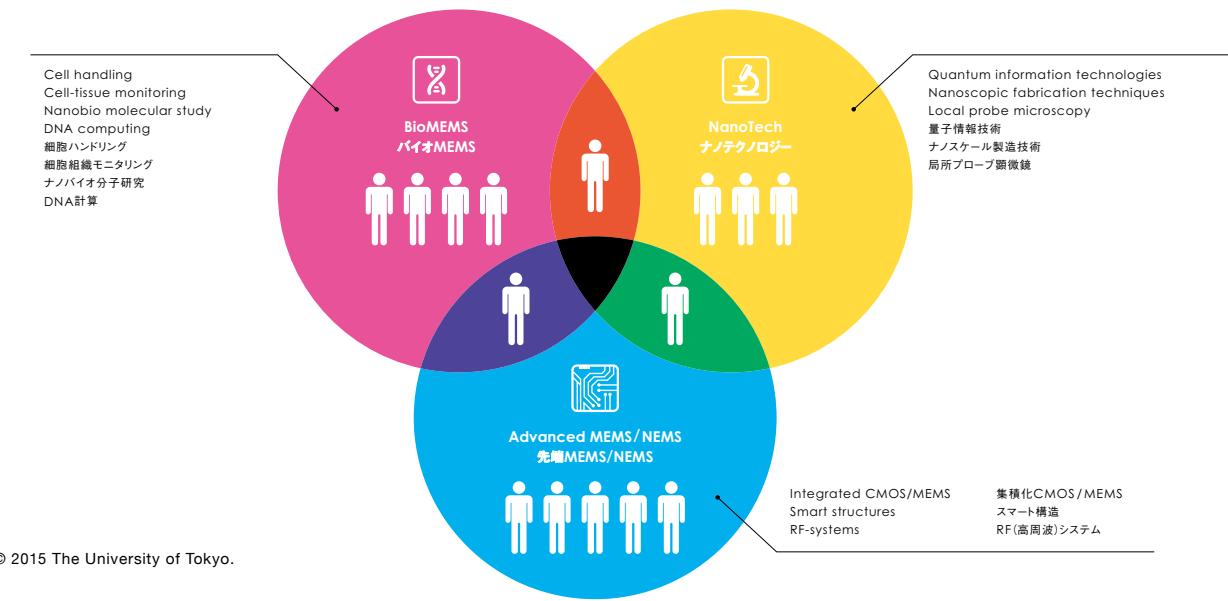


Figure 3: Areas of research
Research at LIMMS covers three core areas: the development of advanced integrations of MEMS and NEMS (Nano Electro Mechanical Systems), new nanotechnologies, and their biological applications (BioMEMS). Some research groups cover several of these areas.

LIMMSの研究は大きく3つの分野に分けられます。MEMSとNEMS(ナノ電気機械システム)の高度集積化、最新ナノテクノロジー、そしてこれらを生命科学に応用するBioMEMS(バイオ微小電気機械システム)です。中には複数の分野にまたがって研究しているグループもあります。

UMI status in 2008 and 2012.

In 2004, the Japanese Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology also recognised LIMMS as an International Collaborative Research Center, allowing researchers to apply for funding on an equal footing from both French and Japanese funding agencies.

In 2011, LIMMS was further recognised by the European Union (EU) when it received support under the EU's seventh Framework Programme for Research and Technological Development (FP7), becoming the EU's first international laboratory in Japan and one of six established globally. This required at least three EU states as member parties. The enlarged laboratory became known as the EU-Japan Opening of LIMMS or EUJO-LIMMS, pronounced to rhyme with the Japanese word *yūjō*, meaning friendship (Figure 2).

LIMMS is also growing in France, with the establishment in 2014 of a mirror institution, Seeding Microsystems in Medicine in Lille – European-Japanese Technologies against Cancer (SMMiL-E).

"SMMiL-E will synergize bio-MEMS research from LIMMS with the research against cancer performed in the Lille area," says Collard.

Université de Lille I, Collard's alma mater, has the largest medical campus in Europe, and the city is also home to Eurasanté, the second-largest bioincubator in France, offering further possibilities for developing industry relations.

These developments also mirror changes in LIMMS's objectives. "At the beginning our main aim was publishing journal papers. But it's now twenty years since we started back in 1995. After the initial research phase, we now also focus on applications for our research. We've been filing joint patent applications and I'd like to get more companies involved in our research," says Fujita (Figure 3).

Ecosystem in a test tube

Associate Professor Yannick Rondelez came back to LIMMS as a CNRS researcher in 2008 after completing his postdoctoral research at LIMMS in 2002 and 2003. Modestly, he doesn't offer the information himself, but his research has been recognized with a CNRS bronze medal. "Molecular programming is an emergent field using molecular and chemical reactions to make information processing systems. But you can also see them as models of what biological systems really do, which is mostly processing information, and also a tool for understanding biological processes," explains Rondelez.

Working in the Fujii Laboratory, one of Rondelez's projects was the recreation of a predator-prey ecosystem using molecular programming techniques. "In predator-prey cycles, the prey population grows by consuming food, then the predator population also grows and eats up the prey, the prey population collapses, then so does the predator population. Except a few of each survive and they grow again. We decided to recreate this particular process using DNA molecules, which allows you to encode information in the molecule." This kind of system was predicted to be possible nearly a century ago, but this is

とを決定しました。これでLIMMSは、独立した2つの機関による共同運営組織になりました」とコラール教授が説明します。LIMMSの相次ぐ優れた実績により、国際混成ユニットの地位は2008年と2012年の見直しの際にも、維持されることとなりました。

2004年には、文部科学省からもLIMMSは国際共同研究ラボとして認められ、LIMMSの研究者が、日本とフランスの助成機関に同じように研究費を申請できるようになりました。

2011年には、LIMMSは第7次欧州研究フレームワーク(FP7)の支援を受けることになり、欧州委員会に認められました。これによってLIMMSは、全世界で6つしかない欧州の国際研究ラボの1つとなり、かつ日本における初の欧州の国際研究ラボとなりました。このためには少なくともEU加盟国3か国以上がLIMMSのパートナーになる必要がありました。規模を拡大したこの組織は、EU-Japan Opening of LIMMSあるいはEUJO-LIMMSと名づけられました。(図2:EUJOは、「ユージョー」と発音し、日本語の友情と韻を踏んでいます。)

LIMMSはフランスでも規模を拡大しています。2014年にはLIMMSのフランス版、Seeding Microsystems in Medicine in Lille – European-Japanese Technologies against Cancer (SMMiL-E)が設立されました。

「SMMiL-Eは、リール地域で行われている癌研究とLIMMSのバイオMEMS研究の相乗効果をねらって作られました」とコラール教授は説明します。

コラール教授の母校、リール第1大学には、欧州最大の医療キャンパスがあります。またリールには、フランスで二番目に大きいバイオ・インキュベータであるユーラサンテがあり、医療産業との(産学)連携の発展にとっても更なる可能性があります。

こうした発展は、LIMMSの方針にも影響しています。「当初の主たる目標は学術雑誌への論文の発表でした。1995年のスタートから20年が経ち、初期段階が終わった今、応用研究も視野に入れています。そのため、特許の共同出願も行っていますし、今後、企業とももっと一緒に研究がしたいと思っているのです」と藤田教授は語ります(図3)。

試験管内の生態系

CNRSの研究者として2008年にLIMMSに戻ってきたヤニック・ロンデレーズ准教授は、ポストドク時代の2002~2003年もLIMMSで過ごしました。謙遜してか自分自身ではありませんが、ロンデレーズ准教授は、CNRSの銅メダル受賞者です。「分子プログラミングは、情報処理システムを作るため、分子と化学反応を用いる新しい分野です。一方で、分子プログラミングで作られた情報処理システムは、生体システムの活動を説明するモデルおよび生物学的な営みを理解するツールと考えることもできます」とロンデレーズ准教授は話します。

藤井研究室に在籍時のロンデレーズ准教授のプロジェクトの1つは、分子プログラミング技術を用いて捕食者と被食者の生態系を再現することでした。「捕食者と被食者の生態系では、被食者が餌を食べて数を増やします。すると捕食者の数もまた増え、その結果、被食者が捕食者に食べつくされ、被食者が全滅し、そして捕食者も全滅

the first time that it had been successfully implemented. The research was published in *ACS Nano* in 2013 (Figure 4). Another way of looking at this system, though, is as a form of oscillator circuit, with repeating waves of concentration of each type of DNA. Rondelez's group has put together a 'DNA toolbox' of circuit components, enabling the construction of more complex circuits and, perhaps one day, a biological computer.

Such systems can be shrunk so much that tens of millions can be created from a single drop of water. They also talk the same molecular "language" as cells do. The potential is enormous. "Think of a small computer that can be programmed to perform a variety of operations, but is a liquid!" says Rondelez.

Serendipity

CNRS engineer Laurent Jalabert also did his postdoctoral research at LIMMS from 2001-2003 hosted in the Masuzawa Laboratory and working in the Fujita Laboratory clean room, and he returned to LIMMS in 2007. A pragmatic engineer, he spends a two-thirds of his time supporting other researchers. Before Jalabert joined the Fujita Laboratory, a student had been trying to study tunnelling phenomena through a control-

lable gap between two MEMS opposing tips, all operated in a transmission electron microscope (TEM). "Ishida-san made an interesting mistake and he actuated the movable tip too much and it contacted the opposing one. When he moved them apart, a kind of nanostructure was formed," says Jalabert.

The lab too was pragmatic about the accident, and started a new research project. "Perhaps because I had been here before as a postdoc, Professor Fujita trusted me to take on a part of this project myself," says Jalabert.

Jalabert went on to examine heat transfer across such nanostructures. First, though, he had to learn the Japanese technique for creating the nanojunction. Implementing a micro-heater and sensor on the MEMS device, and applying cycles of heating and cooling, he could measure how heat transferred through the material. But not being an expert in heat transfer, he couldn't explain the high thermal conductivity observed in this experiment.

Serendipity helped again. "A new member of LIMMS, Sebastian Volz, was one of the top French researchers in thermal physics. We developed a new model based on ballistic heat transfer that was the best fit for our results," says Jalabert. The research advanced scientific understanding of heat transfer in nanodevices and was published in *Nano Letters* in 2012 (Figure 5).

In addition to the work by Rondelez and Jalabert, Collard's

します。ただし、捕食者も被食者もわずかだけ生き残ると再び数が増えるのです。私たちはこの過程を、DNA分子を用いて再現することにしました。DNAは情報を分子レベルでコード化することができるからです」。このように分子を用いて生態系を再現できると約一世紀前に予測されていましたが、実際に成功したのはロンドレーズ准教授たちが初めてです。成果は2013年に*ACS Nano*誌に掲載されました(図4)。

この一連の反応は各タイプのDNAの濃度が波として繰り返し振動する回路というように捉えることもできます。ロンドレーズ准教授のグループは、より複雑な回路、そして、将来バイオ・コンピュータを作り出せる可能性のある回路部品を集めた「DNAツールボックス」を開発しました。

こうしたシステムは非常に小さくすることができ、一滴の水から数千万も作り出せます。また、このシステムは、細胞が情報交換するのと同じ分子の言語を話します。可能性は計り知れません。「様々な操作を行うプログラムを組むことのできる小型コンピュータを考えてみてください。しかもそれは液体できたコンピュータなのです!」とロンドレーズ准教授は言います。

偶然の幸運

2001~2003年のポスドク研究をLIMMSの増沢研究室に所属しながら、藤田研究室の無菌室で実験に従事したCNRSのエンジニア、ローラン・ジャラベール博士も、2007年にLIMMSに戻ってきました。

実務派であるジャラベール博士は、他の研究者のサポートに自分の時間の2/3も費やしています。

ジャラベール博士が藤田研究室に加わる以前のことです。ある学生が、互いに向き合う2つのMEMS針によって生じる隙間通過する、トンネル現象を研究していました。この隙間はMEMSによって制御することができ、透過型電子顕微鏡(TEM)の下で操作していました。「石田さん(学生)は興味深い間違いをしました。彼が可動可能なMEMS針をもう一方の針に近づけすぎたため、もう一方の先端に接触してしまったのです。彼が針を離してやると、ナノ接点が形成されました」とジャラベール博士。

研究室は、この出来事をきっかけに新しい研究プロジェクトを始めました。「私がポスドクとしてここで研究したことがあったので、藤田先生は私を信頼して新規プロジェクトの一部を任せてくれたのだと思います」とジャラベール博士は言います。

ジャラベール博士は、このナノ構造の熱伝導を調べることにしました。しかし、まず、このナノ接点を作り出すための日本の技術を学ぶ必要がありました。MEMS装置にマイクロヒータとセンサを実装し、加熱と冷却を繰り返すことで、熱がどのようにナノ構造を伝わるかを測定しました。しかし、ジャラベール博士は熱伝導の専門家ではないため、実験から得られた高い熱伝導率の理由が説明できませんでした。

またも偶然が起きました。「フランスの熱物理学の研究者として有名なセバスチャン・ボルズ博士がLIMMSに新たに加わったのです。そのおかげで、私たちは、観測によって得られた熱伝導の結果に最も適した弾道的熱伝導の新しいモデルを提唱することができました」とジャラベール博士は話します。この研究は、ナノデバイスにおける

own research has led to the creation of a revolutionary tweezers system that can hold single strands of DNA. "He's too modest to say so himself, but it is excellent research," says Fujita warmly.

Trust

In twenty years, over 150 researchers have come to LIMMS, and between 25 and 30 researchers are now hosted at any one time. In total, more than 220 papers have been published in leading journals including *Nature*, *Nature Biotechnology*, *Nano Letters* and *Lab-on-a-Chip*, and over 330 conference presentations have been made. All of these were co-authored by French and Japanese researchers.

"France and Japan respect each other's literary and artistic culture," comments Fujita. For the last twenty years, CNRS and the IIS have built on that mutual respect to create a relationship of mutual trust. "We know that they'll do their part, which drives us to do ours."

Gagnepain's first visit to Japan, more than twenty years ago, started a new international collaboration. Gagnepain himself passed away several years ago; the laboratory he created still thrives on a solid foundation of trust built up over the years.

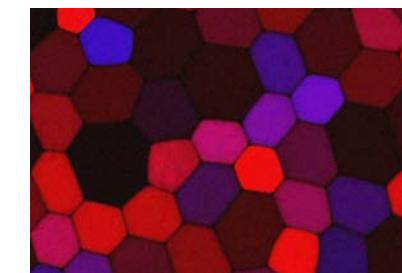


Figure 4: Predator-prey system
Predator, prey and substrate (food) DNA molecules are combined with enzymes that enable replication of prey from the substrate and creation of predators from prey. This image shows the reaction being performed simultaneously in thousands of small compartments.

図4:捕食者と被食者の関係
捕食者DNA分子、被食者DNA分子、基質(エサ)DNA分子が、酵素と一緒に混ざられます。被食者は基質によって複製が増え、捕食者は被食者から作り出されます。この画像は、何千もの小さな区画の中で反応が同時に進行している様子です。

© 2015 Yannick Rondelez.

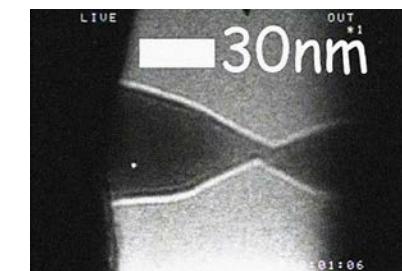


Figure 5: TEM image of a nanowire
TEM of a silicon nanojunction with a neck of 7 nanometers. The nanojunction stretches horizontally across the image. It was found that as the nanojunction extended a neck formed and it was possible to control the diameter of the neck using the electrostatic actuators, creating a narrower and narrower nanojunction.

図5:ナノ構造のTEM像
7ナノメートルの接点を有するシリコンのナノ接点を描いたTEM像。上記の画像ではナノ接点が水平方向に伸びています。ナノ接点が伸びて細い構造が形成されること、かつ静電気アクチュエータを使ってこの細い構造の径をさらに小さくできることが判明しました。

© 2015 Fujita Laboratory.

Acknowledgements: Professor Dominique Collard, Professor Hiroyuki Fujita, CNRS engineer Dr. Laurent Jalabert, Associate Professor Yannick Rondelez (Laboratory for Integrated Micro Electro Mechanical Systems, Institute of Industrial Science)

Published: 2015/07/15
<http://www.u-tokyo.ac.jp/url/vff>

取材協力:ドミニク・コラール教授、藤田博之教授、ローラン・ジャラベール博士、ヤニック・ロンドレーズ准教授(生産技術研究所・集積化マイクロメカトニクシス共同研究ラボ)
掲載日:2015/07/15
<http://www.u-tokyo.ac.jp/url/vfe>



Hierarchies in matter

Emergent matter science shapes a new future

物質の中の階層性

創発物性科学が切り開く新しい未来

A single neuron in isolation cannot be said to possess memory, feelings, or consciousness. However, group many neurons together and the type of advanced information processing that takes place in the human brain suddenly appears. This suggests that perhaps each level in the micro-macro hierarchy can only be understood with a different logic. Might such a hierarchy also exist in ordinary materials that appear on first glance to be more straightforward and less complicated than neurons?

神経細胞を一つだけ取り出してきて、そこに記憶や感情、意識がある、と言うことはできません。しかし、神経細胞が複数集まるごとに、私たちの脳が行っているような、高度な情報処理が立ち現れてきます。そこには異なるロジックでしか理解し得ないような断絶、階層があります。はたしてこのような階層性は、神経細胞よりもずっと単純だと思われるような、「ただの物質」にも見られるものなのでしょうか？

Interview/text: Naoto Horibe Translation: Tony Atkinson
取材・文:堀部直人 翻訳:トニー・アトキンソン

Emergent phenomena

Professor Yoshinori Tokura of the Graduate School of Engineering (also Center Director of the Riken Center for Emergent Matter Science) typically begins his undergraduate lectures in solid-state physics—the science of the characteristics of matter—in the following manner: “What gives things their color? Why are metals silvery and leaves green? The phenomenon of color is entirely due to the movement of electrons.” What does he mean by this?

“Due to the movement of electrons” doesn’t necessarily mean that individual electrons are responsible for the luster of a metal or the color of an object. The real significance is rather that it is the interactions between electrons that are important.

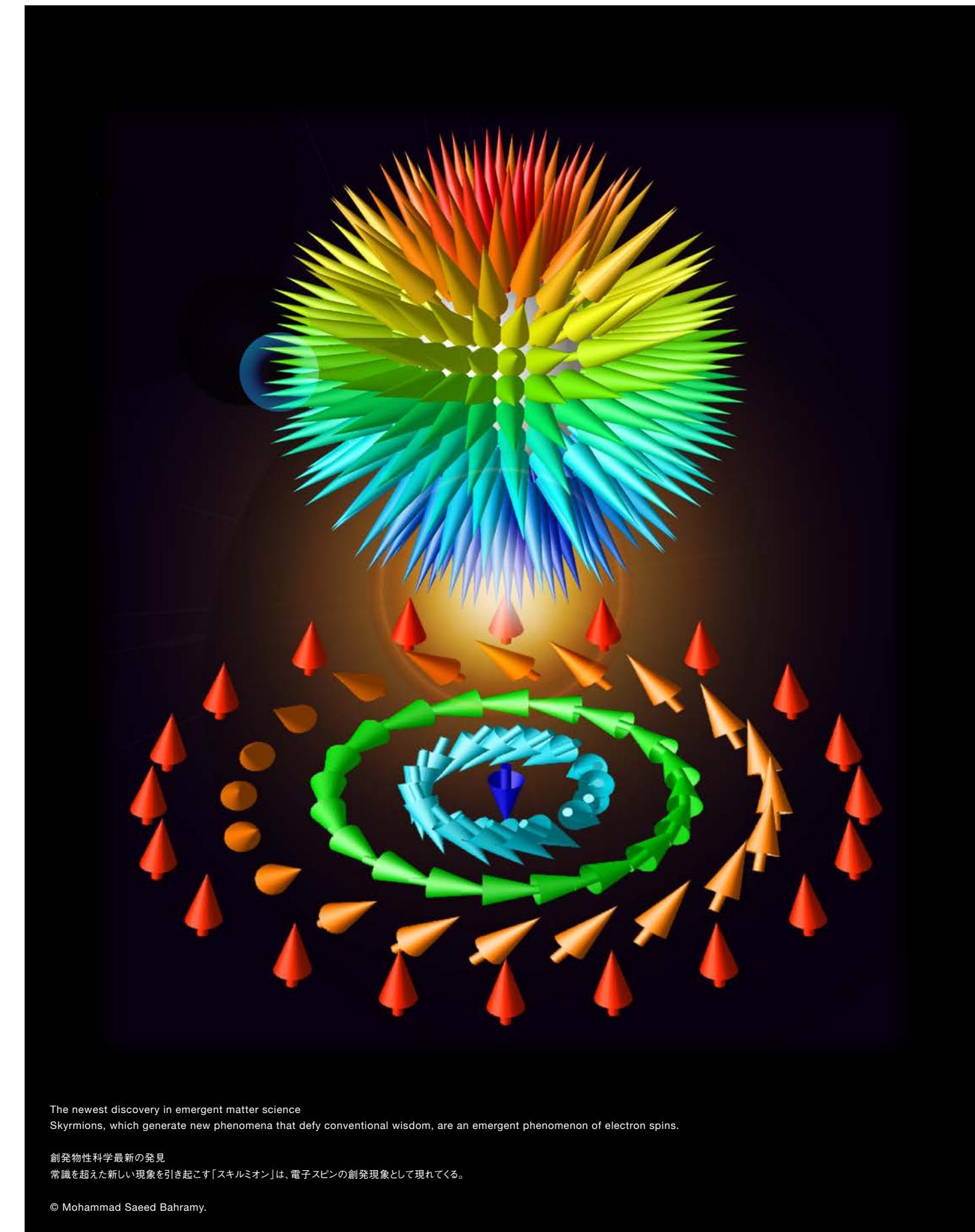
It may be tempting to think that a material’s macroscopic characteristics—for example, its mechanical, electrical, magnetic, optical or other physical properties—can be understood

創発物性

工学系研究科の十倉好紀教授(理化学研究所創発物性科学研究センター併任)は、大学学部生に向けた固体物理学(物質の性質を調べる分野)の授業を、「金属が鏡の光沢を示すのも、葉っぱが緑に見えるのも、そして、そもそもモノに色がつくということ自体が、すべて電子の動きのせいなのです。」という言葉から始めることにした、と言います。どういうことでしょうか？

「電子の動きのせい」と言っても、ひとつひとつの電子が金属光沢を示したり、モノに彩りを与えるたりするわけではありません。そうではなく、電子の相互作用こそが重要である、ということが、この言葉が本当に意味することです。

物質をバラバラにしていった先のミクロの状態(原子の配列や原子同士の結合の様子、原子まわりの電子の振る舞い)を理解することで、物性(力学的性質、電気的性質、磁気的性質、光学的性質など)というマクロの状態が理解できると考えたくなるかもしれません。し



by reducing it down to the microscopic state, focusing on aspects such as the arrangement of atoms, bonding between atoms, and the behavior of electrons around atoms. However, when emergent phenomena arise for a collection of individual parts, in which the characteristics of the whole surpass the sum of the parts, it is no longer reasonable to adopt this type of reductionist approach of trying to understand macroscopic properties by recourse to the microscopic level.

Using this concept, physical properties can be regarded as emergent phenomena of electrons. Bashfully admitting to his penchant for creating buzzwords, Tokura calls his own research field "emergent matter science" (that is, "emergent" plus "materials science"). Rather than slavishly following the reductionist approach to understanding physical properties, the term emergent matter science accurately reflects the fact that a different logic is required to understand each level in the hierarchy.

Electrical insulator one moment, high-temperature superconductor the next

Emergent materials are typified by the family of copper oxide

high-temperature superconductors, which also demonstrate a new logic at the macroscopic level (Figure 1). When electricity flows in a material, part of the energy is usually lost as heat. In a superconductor, however, no energy is lost; the electrical resistance is zero.

Tokura began his research into high-temperature superconductors in the latter half of the 1980s when he spent a year abroad at an IBM research center. The prevailing view at the time was that superconductivity was an extreme form of heightened electrical conductivity in metals. However, the state of superconductivity in the copper oxide superconductors that Tokura studied seemed to be an emergent phenomenon in a material that immediately beforehand was an electrical insulator and did not pass any electricity at all.

Let's examine this a little more closely. The strong interactions among electrons in copper oxide compounds mean that the electrons are firmly locked into the atomic lattice structure. The electrons in such a material are described as being "strongly correlated." In this state, the electrons are pinned and cannot move within the compound. As a result the material acts as an electrical insulator, with properties completely opposite to those of a superconductor. However, when some electrons are pulled out of one of these copper oxide compounds, the elec-

trons arranged systematically in the lattice structure "melt" as one, and the copper oxide insulator immediately becomes a superconductor. Removing just a few percent of the electrons from an insulator changes its physical properties completely. This is precisely what we mean by an emergent phenomenon; one that cannot be explained by reductionist thinking about individual electrons.

Colossal magnetoresistance and multiferroics

Working his way along the periodic table from titanium to copper, Tokura conducted a series of experiments adding or removing some electrons to or from a variety of compounds of each element. In experiments conducted in the 1990s, Tokura discovered an even more interesting phenomenon, that of colossal magnetoresistance. He found that the electrical resistance of an oxide compound with a structure known as perovskite changes by more than 1,000-fold in the presence of a magnetic field.

Apply an electric field to any solid and it becomes electrically charged overall and electrically polarized, with the ends of the material becoming positively and negatively charged. Ap-

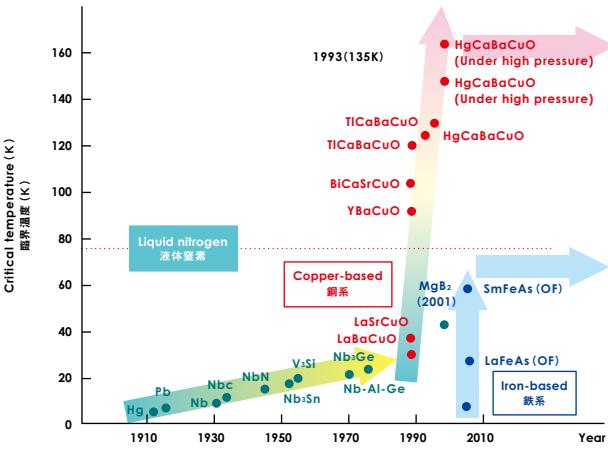


Figure 1: The revolution in superconducting transition temperatures
Superconductivity that occurs via a completely new mechanism was discovered in copper oxide compounds, and the critical temperature—the lowest temperature at which superconductivity is manifested—was raised dramatically.

図1: 超伝導転移温度に起きた革命
銅酸化物で、全く新しいメカニズムの超伝導が見つかり、臨界温度(超伝導を示す一番低い温度)が一気に高くなった。

© 2015 The University of Tokyo.

かし、個々の要素を集めた結果、全体として要素の総和以上の特性が現れる「創発」という現象が現れるとき、ミクロの状態に分解して理解していく還元主義的なアプローチはあまり有効ではなくなります。先の言葉にある通り、物性は、電子の創発現象です。流行りの言葉を創るのが得意なんです、とはにかみながら語る十倉教授は、自身の研究分野を「創発物性科学」(=「創発」+「物性科学」)と呼んでいます。物性調べるのに、還元主義的なアプローチのみに囚われることなく、階層ごとに異なるロジックで理解していく必要があることを的確に表す名称です。

絶縁体のすぐ側の高温超伝導体

創発物性の代表例であり、物性というマクロな階層についての新たなロジックを示すことになったのが、銅酸化物高温超伝導体です(図1)。一般に、電気が物質中を流れるとエネルギーの一部が熱として失われてしまします。しかし、超伝導体ではこのようなエネルギーの損失がゼロ(電気抵抗ゼロ)になります。

十倉教授が高温超伝導体の研究に取りかかったのは、1年間IBMの研究所に留学した1980年代後半のことでした。往時の通説では、金属が電気を流す性質を極限まで高めていった先に超伝導があると考えられていました。しかし、十倉教授の研究対象だった銅酸化物超伝導体では、電気をまったく通さない絶縁体のすぐ側で起こる創発現象として電気抵抗ゼロ(超伝導)が実現されるらしいことがわかつてきました。

少し詳しく見てみましょう。銅酸化物では、物質中の電子同士が強く相互作用した結果、電子が格子状の原子の上で固まっている状態にあります。物質がこのような状態にあることを指して、強相関電子系と呼びます。このとき、電子は身動きがとれず、物質中を移動することがたいへん困難であり、超伝導とは真逆の絶縁体の状態にあります。ところが、この状態の銅酸化物から電子を引き抜くと、規則正しく格子状に並んでいた電子が一気に溶け出し、ほぼ絶縁体だった銅酸化物が超伝導体になったのです。絶縁体から電子を少しだけ引き抜くことで物性がガラッと変わる。これは、少数の電子の状態に還元しても理解できない、まさに創発現象です。

超巨大磁気抵抗とマルチフェロイクス

その後十倉教授は、様々な物質から電子を引き抜いたり、逆に少しだけ加えたりという実験を、チタンから銅まで周期表の順番に試していく、さらにおもしろい現象である巨大磁気抵抗を見つけ出すことになります。実際、1990年代になって十倉教授は「ペロブスカイト」と呼ばれる特殊な構造の酸化物において、磁場をかけることで物質の電気の通しやすさが1000倍以上も変化すること、すなわち巨大磁気抵抗効果を発見しました。

さて、電場をかけると電気分極(物質の両端が正電荷と負電荷とに別れて電荷を帯びる現象)が生じ、磁場をかけると磁化(物質の両端がSとNとに別れて磁荷を帯びる現象)が発生するというのが固体物

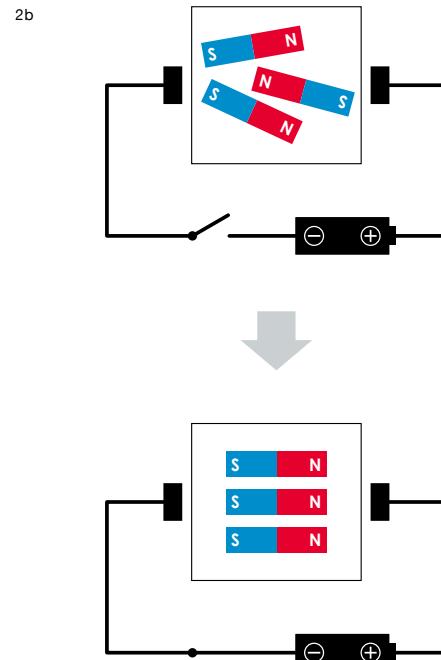
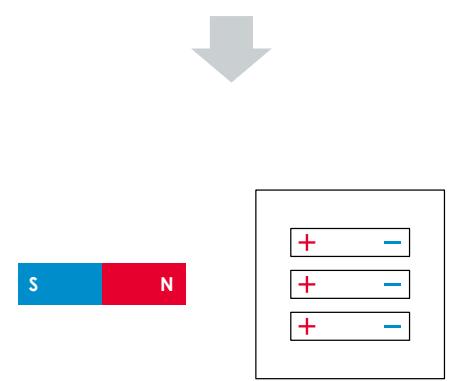
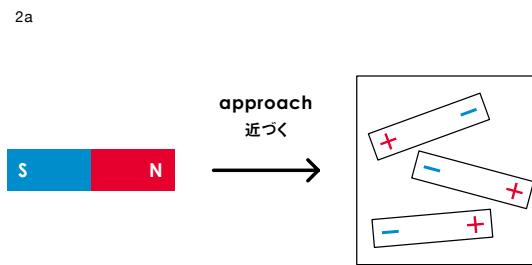


Figure 2: Conceptual diagram of a multiferroic material
The material becomes electrically polarized when a magnetic field is applied (2a) and magnetized when an electric field is applied (2b).

図2: マルチフェロイク物質の概念図
磁場をかけると電気分極が発生(2a)、電場をかけると磁化が発生する(2b)。

© 2015 The University of Tokyo.

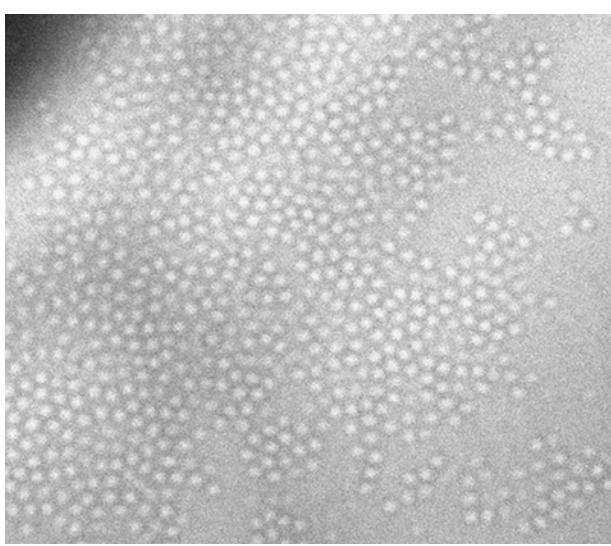


Figure 3: Direct observation of skyrmions
In a world-first, Tokura's research group successfully observed individual skyrmions using a specialized electron microscope.

図3:スキルミオンの直接観察
十倉教授の研究グループは特殊な電子顕微鏡を用いて、世界で初めてスキルミオン粒子一つ一つを観測することに成功しました。

© 2015 X.Z. Yu and Y. Tokura.

ply a magnetic field to any solid and it becomes magnetically charged overall and magnetized, with the ends of the material becoming south and north poles.

The scientist Pierre Curie, husband of the renowned French physicist Marie Curie, hypothesized the existence of materials that would become electrically polarized in the presence of a magnetic field and magnetized in the presence of an electric field.

The direction of magnetization in ferromagnetic materials such as permanent magnets, which can become magnetized in the absence of a magnetic field, and the direction of the polarization in ferroelectric materials, that can become polarized in the absence of an electric field, can each be reversed by tiny magnetic fields or electric charges. If a material is both ferromagnetic and ferroelectric, and if the magnetization and electrical polarization are interrelated, the material of Pierre Curie's imagination will become a reality.

Materials that concurrently have such properties—ferromagnetism, ferroelectricity, ferroelasticity, etc.—are known as multiferroics (Figure 2). Altering magnetization by the application of an electric field, non-obvious input-output relationships and the like are examples of emergent phenomena that result when multiple electrons demonstrate as a whole properties beyond those of individual electrons.

The skyrmion: a particle generated from multiple electron spins

In 2010, a completely new particle known as the skyrmion was observed, identified as an emergent phenomenon of electron spins (Figure 3). Tokura is vigorously pursuing this field of emergent matter science.

A skyrmion consists of a whirlpool-like collection of thousands of electron spins, but behaves as if it were a single particle. As you might expect, this too is an emergent phenomenon that cannot be explained by reduction to individual electron spins.

質に生じる普遍的な現象です。

そんな中、世の中には、磁場をかけると電気分極が発生し、電場をかけると磁化が発生する。そのような物質が存在するのではないか、と予言していた科学者がいました。著名なフランスの物理学者にしてマリー・キュリーの夫、ピエール・キュリーです。

磁場をかけなくても自発的に磁化が発生する強磁性体(磁石など)や電場をかけなくても分極する強誘電体の磁化の向きや分極の正負は、それぞれ小さな磁場や電荷で反転させることができます。一つの物質が強磁性体であり、なおかつ強誘電体であり、さらに磁化と電気分極とが結びついているとすれば、ピエール・キュリーの夢見た物質が実現されることになります。

このような、複数の性質(強磁性、強誘電性、強弾性など)を示す物質をマルチフェロイック物質と呼びます(図2)。このように、電場で磁化を変化させるなど、自明ではない入出力関係も、複数の電子が集まって全体として個々の電子の総和以上の特性が現れる、創発現象の例なのです。

多数の電子スピンから生じる粒子、スキルミオン

さらに2010年には、電子スピンからの創発現象として、スキルミオンと呼ばれるまったく新しい粒子の観察を行っています(図3)。これは、十倉教授が現在精力的に進めている創発現象研究の一つです。スキルミオンというのは、数千個もの電子スピンが渦巻状に集まつて、あたかも1個の粒子であるかのように振る舞うようになったものです。やはりこれも個々の電子スピンの状態に還元しても理解することのできない創発現象であり、「スキルミオン粒子」は、ほとんど電力を使わずに移動させることができたり、超巨大な磁場として電子の軌道を変えたり、さらには、単極の磁石のように働く可能性すらあるといいます。

「今の時代は、応用を見据えた実験が大事になってきています」と言う十倉教授は、スキルミオンの興味深い物性にただ魅せられているだけではなく、次世代エレクトロニクスへの大きな可能性があると考えています。ごくわずかなエネルギーで動作する非散逸型の量子回

The skyrmion “particle” can be moved with minimal electrical energy consumption, it can affect the trajectories of electrons as if it were a giant magnetic field, and even has the potential to act like a magnetic monopole.

Tokura is not only fascinated by the interesting physical properties of skyrmions, but also thinks about the significant potential for next-generation electronics, saying “In this day and age, experiments with practical applications are vitally important.” A non-dissipative quantum-electrical circuit that operates with negligible energy consumption could be the ultimate environmentally friendly device. Fantastic scenarios abound, but given the time taken for physics to yield innovations to date, Tokura believes that it may take a few decades to centuries for them to become a reality.

The future of emergent matter science research

Research into emergent matter science has yielded high-temperature superconductors, multiferroics, and skyrmions. Because they are all difficult to visualize in concrete terms, Tokura says “I am used to hearing that emergent matter science is difficult and incomprehensible.” On the other hand, it may look even to researchers in the same field that he is jumping from project to project.

“It may appear to lack consistency, but it does have an internal logic that makes sense,” stresses Tokura. “Because it is impossible to understand the world on the basis of a single principle,” Tokura’s motive is to pursue new phenomena that cannot be reduced to a single logic, instead weaving a new logic to explain them.

Emergent phenomena are those for which the whole cannot be explained by recourse to the individual parts. Because it is difficult to predict the phenomena that will emerge from the individual parts, phenomena that no one anticipated and innovations in the fields of science and technology may yet remain hidden. Emergent matter science is shaping the future by identifying emergent phenomena in the field of condensed matter physics.

路、つまり、究極のエコデバイスの可能性です。今はまだ夢のような話に聞こえますが、これまでに物理学が起こしてきたイノベーションを考えると、数十年から数百年のうちに可能になるだろうと十倉教授は語ります。

創発物性科学研究の未来

高温超伝導体からマルチフェロイクス、そしてスキルミオン。どれも具体的なイメージを描きにくいがゆえに「創発物性科学は難しくて理解できないと言われるのに慣れているんです」と話す十倉教授。一方で、同じ分野の研究者からも様々な研究テーマを渡り歩いているように見えてしまうようです。しかし、十倉教授本人は「一貫性がないと思われるかもしれません、自分の中では筋道が通っているんですよ」と語ります。「1つの原理だけで世界を理解することは難しい」からこそ、単一のロジックに還元することのできない新しい現象を探求し、そのロジックを紡いでいるというのがその真意です。

要素の総和以上の特性が全体として現れる創発現象。個々の要素からは、新しく現れる現象が予測しづらいからこそ、誰も予想しなかったような現象や科学技術分野でのイノベーションが隠れている可能性があります。創発物性科学は、物性物理学における創発現象をひとつひとつ明らかにしていくことで未来を切り開いています。

Acknowledgements: Professor Yoshinori Tokura (Graduate School of Engineering/ Director, Riken Center for Emergent Matter Science)
Published: 2015/09/17
<http://www.u-tokyo.ac.jp/url/vfh>



取材協力:十倉好紀教授(工学系研究科・理化学研究所創発物性科学研究センター兼任)
掲載日:2015/09/17
<http://www.u-tokyo.ac.jp/url/vfg>

2015 Nobel Prize in Physics awarded to Professor Takaaki Kajita

Institute for Cosmic Ray Research, The University of Tokyo

2015年ノーベル賞物理学賞受賞
梶田隆章 教授(東京大学宇宙線研究所)

Professor Takaaki Kajita is the eighth University of Tokyo researcher to be awarded a Nobel Prize and the fourth in Physics.

梶田先生は東京大学出身のノーベル賞受賞者では8人目の受賞者で、4人目のノーベル物理学賞受賞者です。



All photos: © Nobel Media AB 2015. Photo credits: Pi Frisk (top, bottom left), Claudio Bresciani/TT (bottom right).

For the discovery of neutrino oscillations, which shows that neutrinos have mass

ニュートリノ質量の存在を示すニュートリノ振動の発見

Neutrinos are an elementary particle of which there are three types, all so extremely light that they were thought to be massless for many years. They also almost never interact with matter, passing easily through the Earth.

One source of neutrinos is from cosmic rays striking the atmosphere. In 1998 Professor Kajita and his research collaborators discovered that the number of these atmospheric neutrinos created on the opposite side of the Earth and travelling to a sensor in Kamioka was only half that of atmospheric neutrinos raining down from directly above. This, they discovered, was a result of "neutrino oscillation," a phenomenon by which neutrinos change between types while in flight. Since muon neutrinos created on the other side of the earth had changed into tau neutrinos while travelling, there were less muon neutrinos arriving from below the detector than from above.

Neutrino oscillation can only occur if neutrinos have mass. For this reason the observation of neutrino oscillation was conclusive evidence that the neutrino's mass is non-zero.

The discovery of atmospheric neutrino oscillation turned the then-accepted theory of elementary particles on its head and opened the door to a new model of physics. Ultimately, the significance of this discovery was recognized with the 2015 Nobel Prize in Physics.

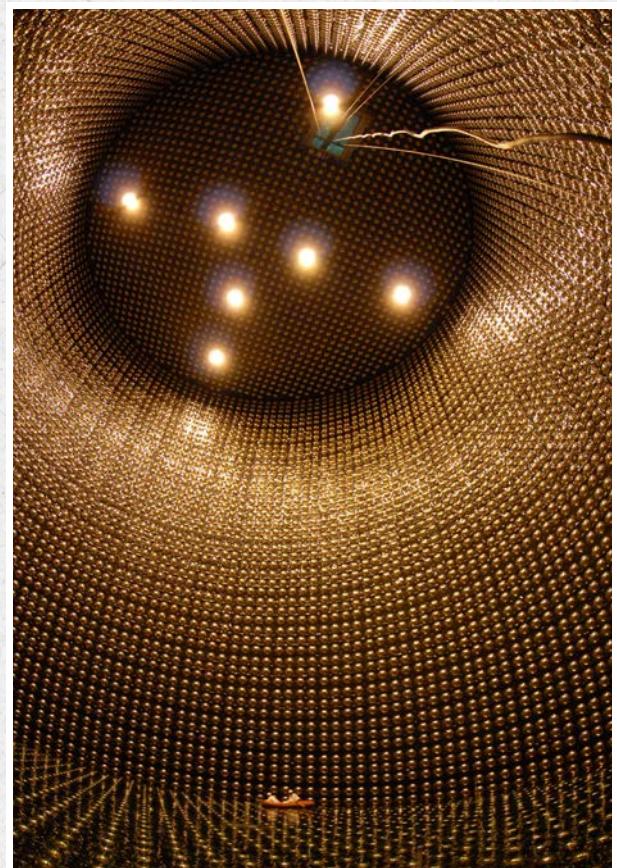
ニュートリノは素粒子の一種です。3種類あるニュートリノは非常に軽く、長い間その質量はゼロだと考えられていました。また、ニュートリノは物質と反応することがほとんどないため、地球を通過していきます。

ニュートリノには、宇宙線が地球の大気とぶつかることで発生する大気ニュートリノがあります。1998年梶田氏らは大気ニュートリノの観測から、地球の裏側で作られて長い距離を飛んできたニュートリノの数が、神岡の検出器のすぐ真上から降ってくるニュートリノの数に比べて、約半分しかないことを発見しました。

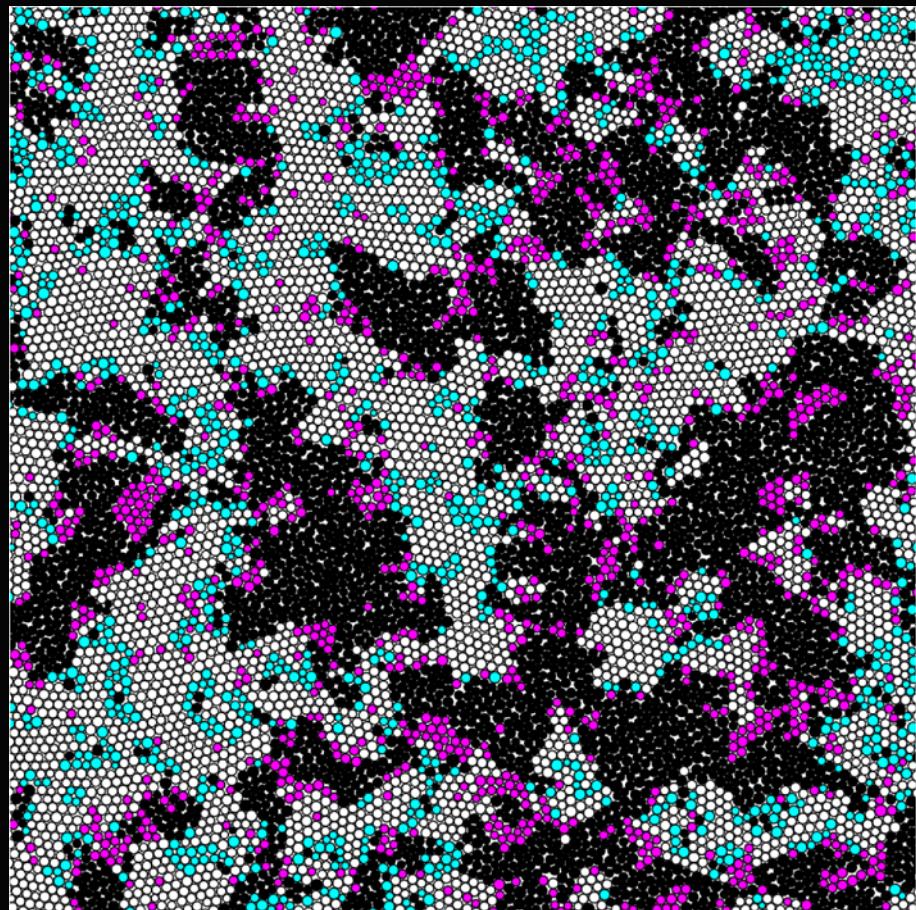
これは、ニュートリノが飛んでいる間に別の種類のニュートリノに変身してしまう「ニュートリノ振動」という現象によるものでした。地球の裏側で生まれたミュニュートリノが地球内部を走っている間に、タウニュートリノに変身してしまったため、ミュニュートリノが減っているようにみえていたのです。

ニュートリノ振動は、ニュートリノに質量があるときだけ起こる現象です。したがって、ニュートリノ振動の発見は、ニュートリノがゼロでない質量を持つという決定的な証拠となったのです。

大気ニュートリノ振動の発見は素粒子理論の定説を越え、新しい物理への扉を開きました。この成果が認められて2015年のノーベル賞受賞となりました。



Text: Institute of Cosmic Ray Research/Kavli IPMU, The University of Tokyo. Top photo: Kamioka Observatory, Institute of Cosmic Ray Research, The University of Tokyo. Bottom photo: © Hamamatsu Photonics K.K.



© 2016 John Russo, Hajime Tanaka.

From liquid to solid

液体から固体へ

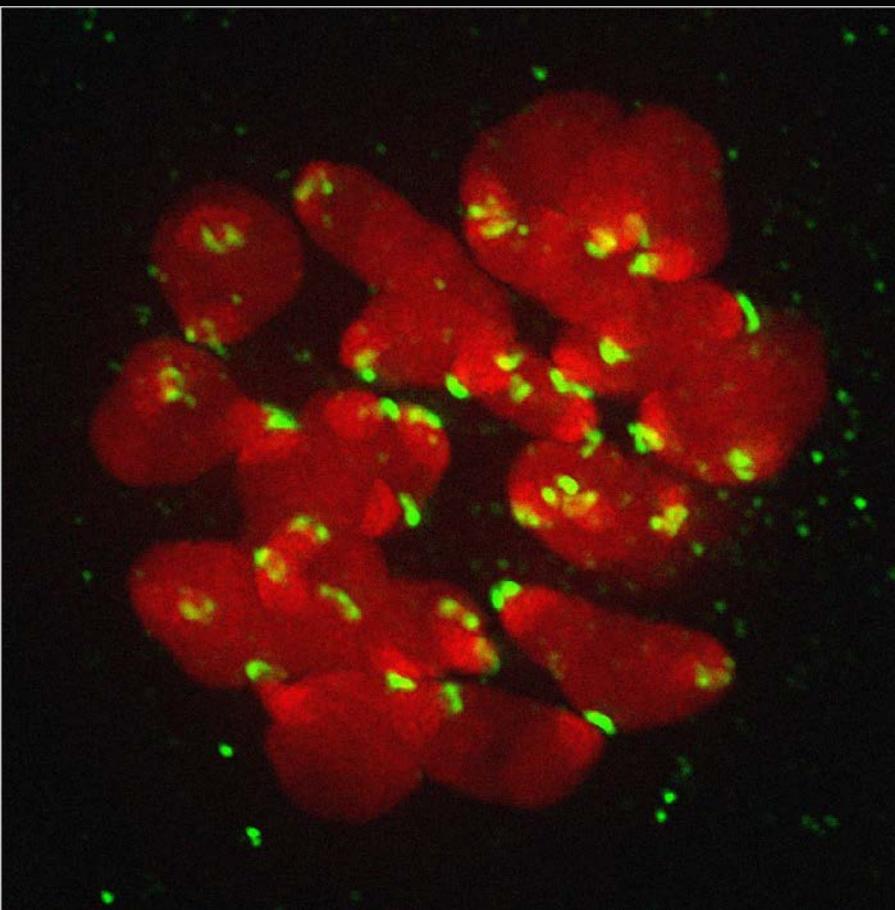
Glass transition is a term that describes the continuous transformation of a substance from liquid to solid below its freezing point. Computer simulations have revealed that the enhancement of structural fluctuations in the liquid plays an important role in the glass transition.

融点よりも低い温度で液体が連続的に固体へと変わるガラス転移と呼ばれる現象。ガラス転移には、液体の構造のゆらぎが発達することが重要であることを、コンピュータシミュレーションにより明らかにしました。

Structural origin of glass transition

▶ <http://www.u-tokyo.ac.jp/url/vfj>

ガラス転移の構造的起源に新たな視点

▶ <http://www.u-tokyo.ac.jp/url/vfi>

© 2016 Yoshinori Watanabe.

Dividing chromosomes

染色体を分ける

Through meiosis, the process of making germ cells such as sperm and eggs, the number of chromosomes in the cell is halved. A new protein that acts as a master regulator for the process regulating chromosome segregation during meiosis was identified in mouse germ cells and named "meikin."

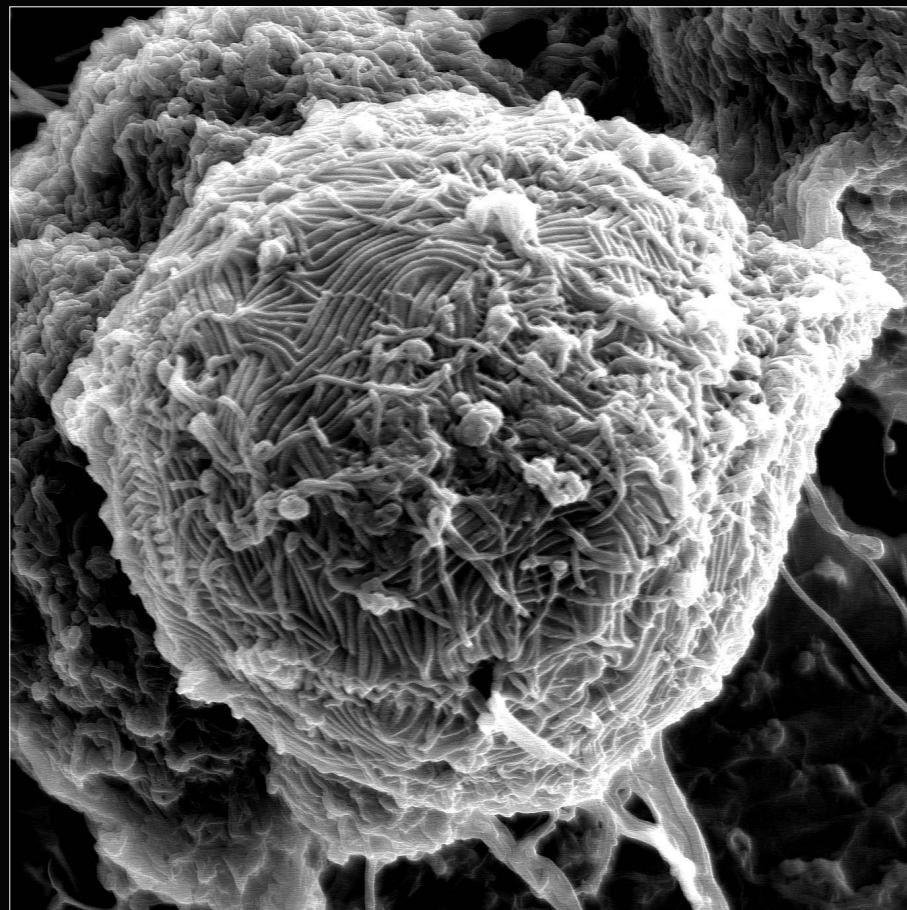
精子や卵子などの生殖細胞を作る過程で染色体数が半分に分配される減数分裂。この仕組みに特有な染色体の分配機構を制御し、司令塔としての役割を担うタンパク質をマウスの生殖細胞で発見して、マイキンと名付けました。

Discovery of master regulator of meiosis-specific chromosome segregation

▶ <http://www.u-tokyo.ac.jp/url/vfl>

生殖細胞の染色体分配様式をつくりだす要のタンパク質をマウスで発見

▶ <http://www.u-tokyo.ac.jp/url/vfk>



Fighting Ebola

エボラと戦う

A new vaccine against Ebola hemorrhagic fever has been developed that is safer than previous vaccines. When monkeys were inoculated with an inactivated form of the vaccine and then exposed to the Ebola virus, it was found that none of them developed Ebola hemorrhagic fever.

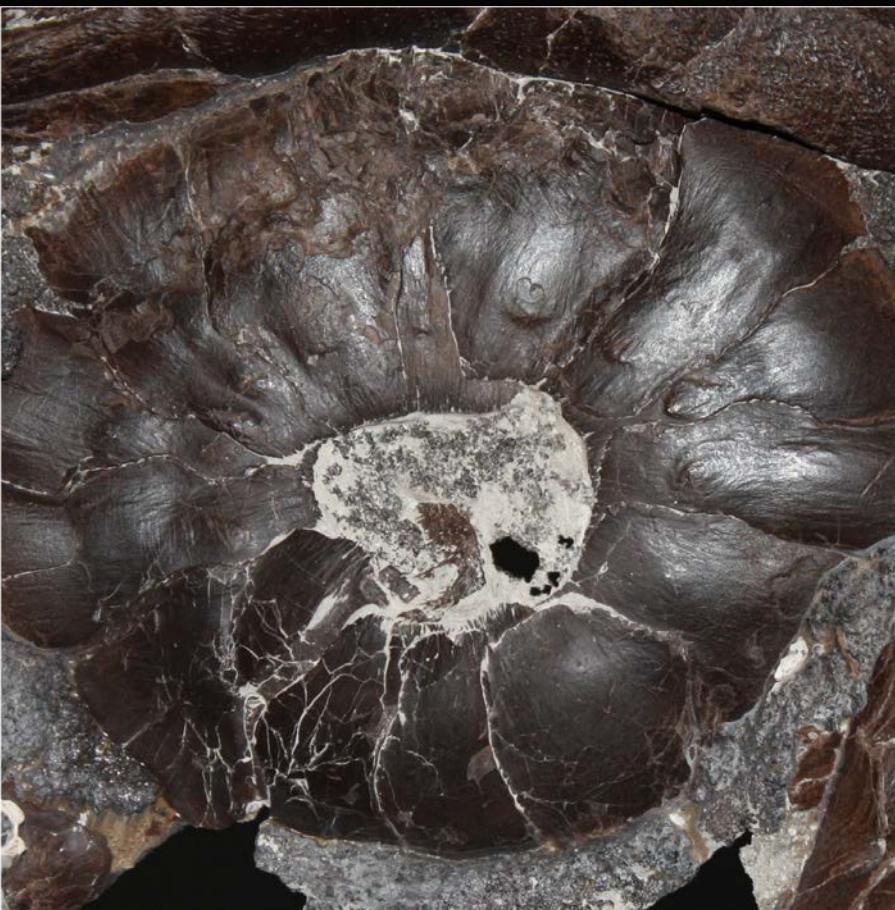
これまでのワクチンよりも安全性の高いエボラウイルスワクチンを新しく開発しました。このワクチンを不活化させ、サルに接種したところ、その後エボラウイルスにさらされてもサルはエボラ出血熱に感染しないことがわかりました。

A novel vaccine for Ebola hemorrhagic fever

▶ <http://www.u-tokyo.ac.jp/url/vfn>

新しいエボラワクチンの開発に成功

▶ <http://www.u-tokyo.ac.jp/url/vfm>



Seeing underwater

水中で見る

Mosasurs are a group of marine reptiles that lived in the Cretaceous period. Comparing the inner surfaces of bony structures from the eyes of mosasaurs and land-living lizards, only mosasaur bones have a rough inner surface. This suggests that mosasaurs may have been adapted to underwater vision.

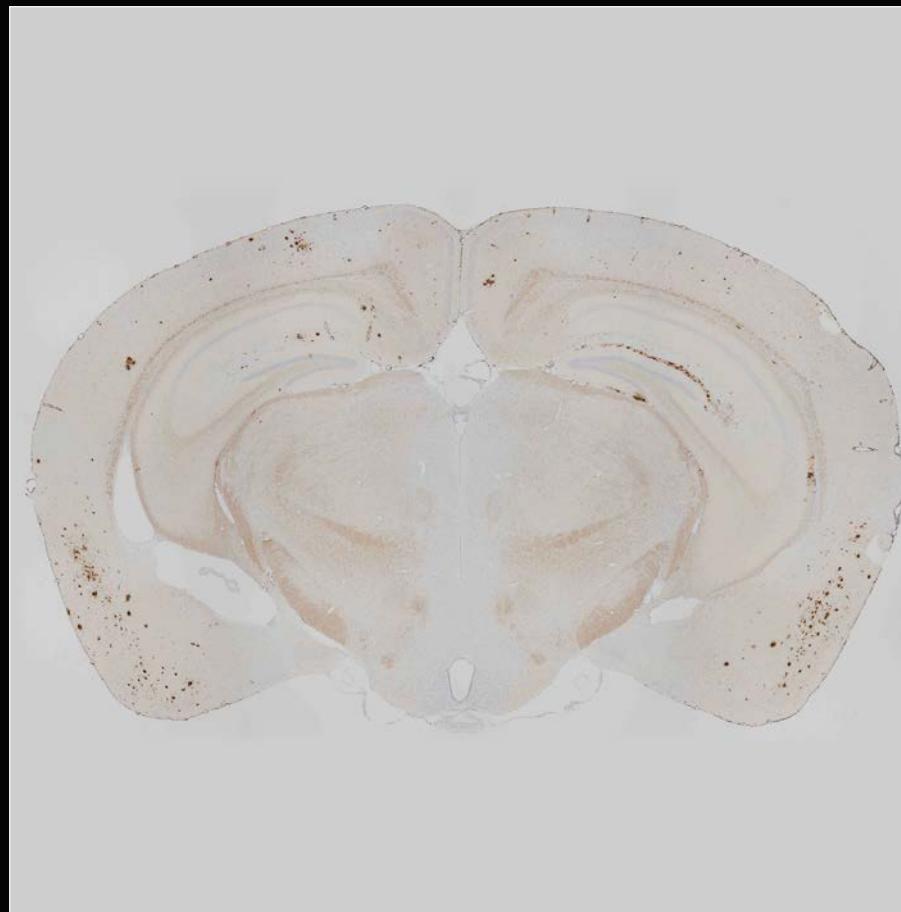
白亜紀の海生爬虫類モササウルス類。化石化した眼の中にある骨組織を陸上で生活する現在のトカゲ類と比べてみると、モササウルス類においてのみ内側の表面がざらついていました。これは、モササウルス類が水中でものを見るために適応した可能性を示唆する特徴です。

Evolution and aquatic adaptation of mosasaur eye

▶ <http://www.u-tokyo.ac.jp/url/vfp>

化石から探る海生爬虫類モササウルス類の眼の進化と適応

▶ <http://www.u-tokyo.ac.jp/url/vfo>



© 2016 Takeshi Iwatsubo et al.

Alzheimer's and nerve activity

アルツハイマー病と神経活動

Accumulated plaques of the protein amyloid beta are characteristic of the brains of Alzheimer's patients. Optogenetic techniques that allow control of the level of neural activity in the brains of mice showed that constant high-level activation of neurons increases accumulation of amyloid beta.

アルツハイマー病の脳の特徴として知られているアミロイド β タンパク質の蓄積。慢性的に高い神経活動によって、その蓄積が高まることを示しました。光を操作し、マウスの脳内の神経細胞の活動量を操作することにより明らかにしました。

Alzheimer pathology and neural activity

▶ <http://www.u-tokyo.ac.jp/url/vfr>

アルツハイマー病の病理と神経活動の関係を探る

▶ <http://www.u-tokyo.ac.jp/url/vfq>



© 2016 Haruhiko Fujinara.

Mimicking a poisonous butterfly

毒蝶に似せる

Two swallowtail butterflies, the Common Mormon and the Asian swallowtail, have had their full genomes sequenced. The molecular mechanism and genes required for the female Asian swallowtail to mimic the wing patterns of the Common Rose, an unpalatable butterfly, have also been elucidated.

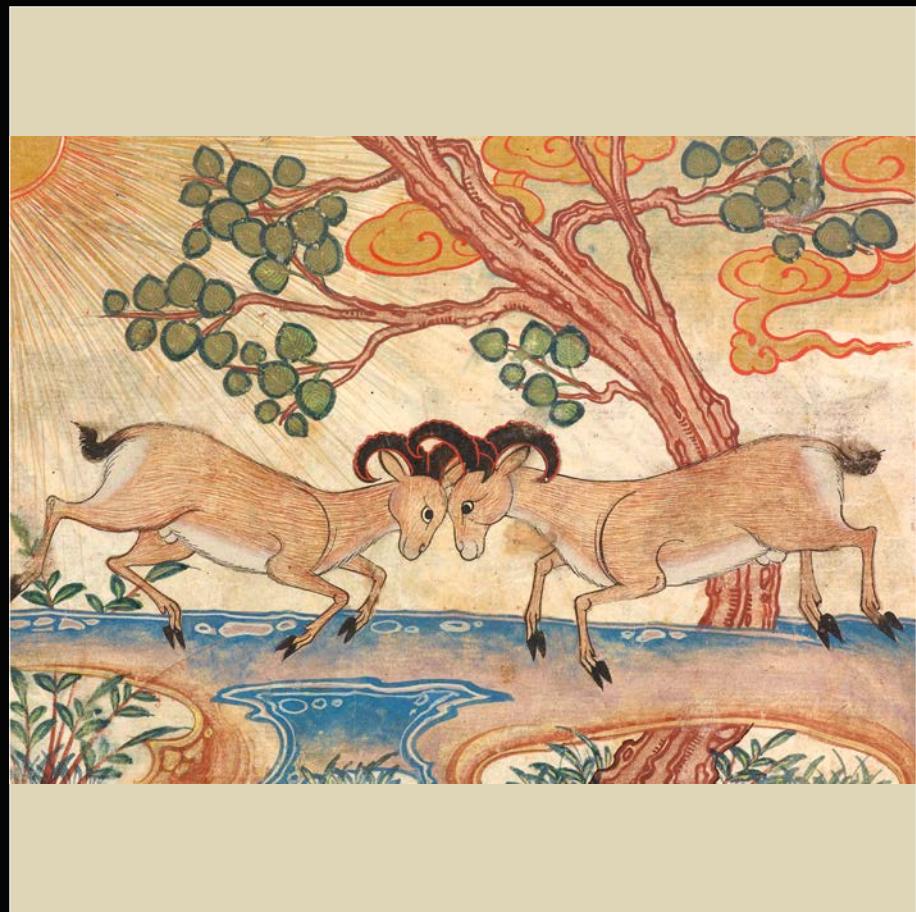
ナミアゲハとシロオビアゲハと呼ばれる2種類のアゲハチョウのすべてのゲノムを解読しました。そして、シロオビアゲハの雌が毒蝶のベニモンアゲハに羽の模様を似せるために必要な遺伝子と羽を似せるための仕組みを明らかにしました。

Riddle of mimicry of unpalatable butterfly

▶ <http://www.u-tokyo.ac.jp/url/vft>

毒蝶に似せる擬態の謎

▶ <http://www.u-tokyo.ac.jp/url/vfs>



Credit: The Pierpont Morgan Library, New York, MS M.500, fol. 37r. Purchased by J. Pierpont Morgan (1837-1913), 1912.

Islamic art

イスラーム美術

It was accepted that direct Chinese influence could be detected in Persian manuscript paintings from the Mongol period. The painter of this illustration employs Chinese pictorial elements but also exhibits incomplete understanding of the Chinese perspective and a lack of training in Chinese painting.

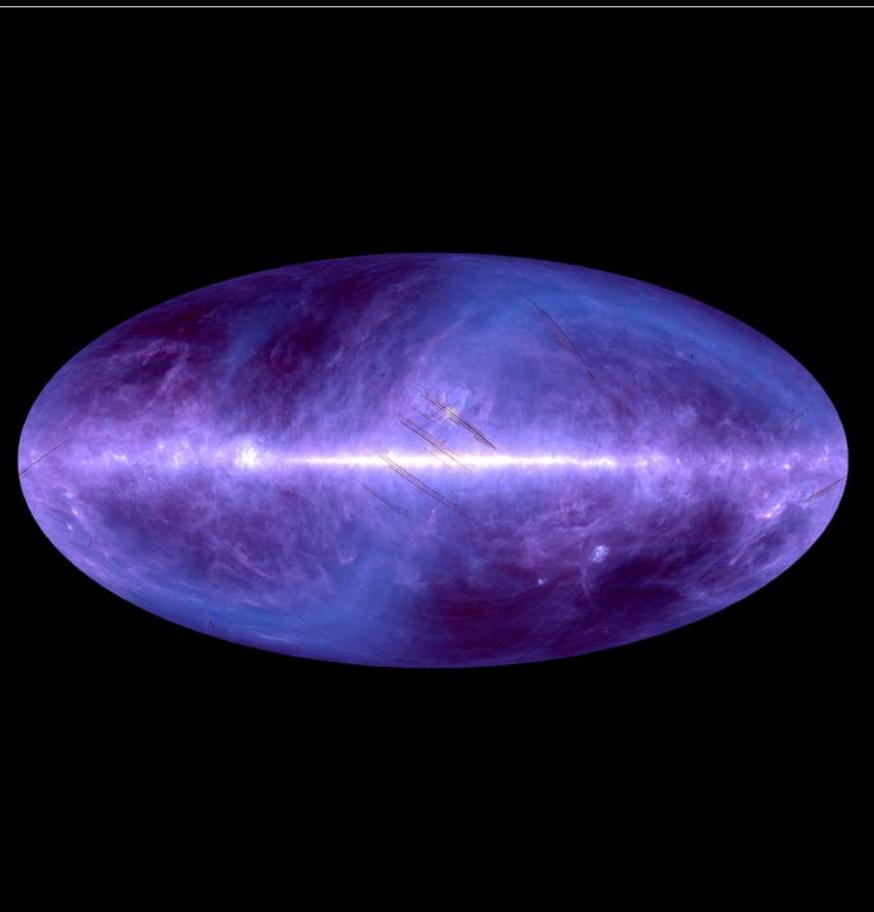
これまで直接の中国の影響が認められると考えられてきたモンゴル帝国時代のペルシアの写本挿絵。図の挿絵を描いた画家は、中国的な絵画要素を取り入れながらも完全には中国絵画の空間表現の基本を理解しておらず、実は中国絵画の修練を受けていないことがわかります。

Overcoming assumptions about Islamic Art

▶ <http://www.u-tokyo.ac.jp/url/vfv>

東アジアの研究者だからこそ正せた

▶ <http://www.u-tokyo.ac.jp/url/vfu>



New data from the sky

空の新しいデータ

A new all-sky far-infrared image has been created using data from the infrared satellite AKARI and released publically as a database. The resolution of the new image maps is about five times better than conventional far-infrared all-sky images, and data at longer wavelengths are also available.

High resolution far-infrared all-sky image data release

▶ <http://www.u-tokyo.ac.jp/url/vfx>

赤外線天文衛星「あかり」の観測データを用いて、新しい全天の遠赤外線画像を作り、データベースとして公開しました。従来の遠赤外線の全天画像と比べて解像度が約5倍向上し、長い波長の画像データが利用できるようになりました。

高詳細な遠赤外線全天画像データを公開

▶ <http://www.u-tokyo.ac.jp/url/vfw>

Rewinding the future of timekeeping

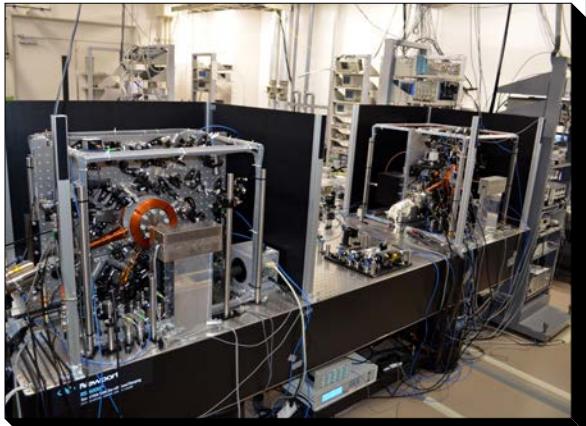
Beyond time with the optical lattice clock

Graduate School of Engineering / Faculty of Engineering
2015/02/10

時計の概念を巻き直す「光格子時計」

正確な時計の先に

工学系研究科・工学部
2015/02/10



To measure time accurately, humankind has sought to identify constant periodic phenomena in the natural world. Periodic phenomena such as the rotation or revolution of the earth were used in the past as "rulers" to measure time. These rulers, however, have each had their shortcomings: for example, the rotation of the earth is gradually slowed by tidal friction, and is therefore not constant.

[▶ http://www.u-tokyo.ac.jp/url/vfz](http://www.u-tokyo.ac.jp/url/vfz)

時間を正確に測ること。それは、自然界の中から、「不变な周期現象」を見つけ出す試みでした。かつては地球の自転や公転という周期現象が時間の「ものさし」に使われていました。ところが、たとえば、地球の自転は潮汐摩擦によってだんだん遅くなります。

[▶ http://www.u-tokyo.ac.jp/url/vfy](http://www.u-tokyo.ac.jp/url/vfy)

Understanding the origin of the Universe

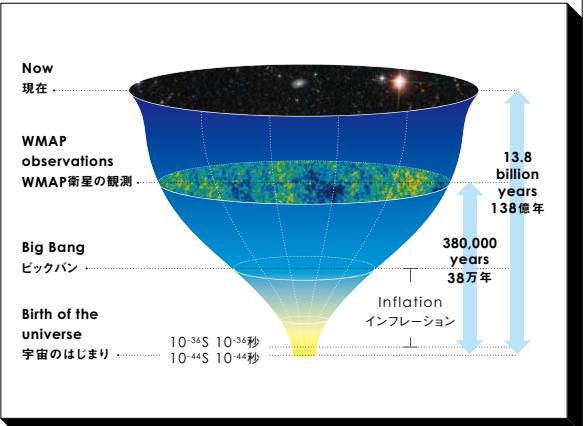
Explaining what happened before the Big Bang with inflation theory

Graduate School of Science / Faculty of Science
2015/05/14

見えてきた「宇宙のはじまり」

ビッグバン直前の一瞬を説く「インフレーション理論」

理学系研究科・理学部
2015/05/14



The universe came into being 13.8 billion years ago, born from the rapid expansion of an ultra-hot and ultra-dense ball of fire in an event known the Big Bang. But what brought about the Big Bang? The answer to that mystery may be found in inflation theory, which describes the origin of the universe immediately before the Big Bang.

[▶ http://www.u-tokyo.ac.jp/url/vgb](http://www.u-tokyo.ac.jp/url/vgb)

宇宙のはじまりは138億年前。超高温・超高密度の火の玉「ビッグバン」の急膨張により誕生したとされています。では、ビッグバンはどうやって起きたのでしょうか。その謎の答えだとされているのが、ビッグバン直前の“宇宙のはじまりの瞬間”をとらえた「インフレーション理論」です。

[▶ http://www.u-tokyo.ac.jp/url/vga](http://www.u-tokyo.ac.jp/url/vga)

Overcoming assumptions about Islamic Art

The advantages of an East Asian perspective

Institute for Advanced Studies on Asia
2015/08/26

東アジアの研究者だからこそ正せた

「イスラーム写本絵画」への先入観

東洋文化研究所
2015/08/26



Whether they understand the language or not, the traveler to a foreign country is likely to find their interest in the local culture pushed to new heights by everything their eyes see—from the faces of the people and how they dress, to the look of the buildings and neighborhoods, to the unfamiliar foods that appear in markets and restaurants. So too with objects of art that have deep roots in the culture, often going back many centuries.

[▶ http://www.u-tokyo.ac.jp/url/vgd](http://www.u-tokyo.ac.jp/url/vgd)

異国を訪れた際、言葉などわからずとも、目で見た現地のものを通してその国に対する興味がグッと立てられることがあります。人々の顔立ちや服装、建物や街並み、見慣れぬ食べ物……。現地で昔から息づいてきた美術作品もその一つでしょう。

[▶ http://www.u-tokyo.ac.jp/url/vgc](http://www.u-tokyo.ac.jp/url/vgc)

An indefatigable spirit of inquiry

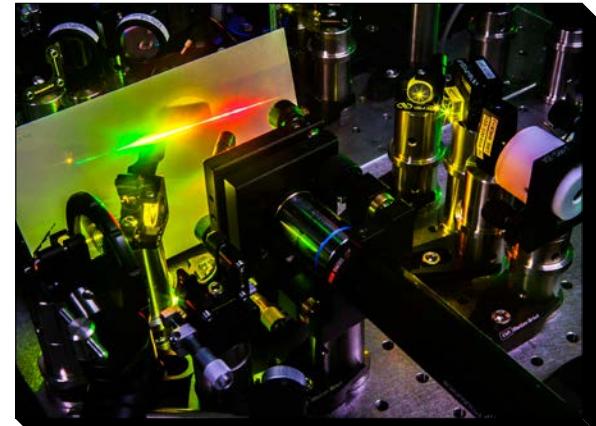
Manipulating light with matter and matter with light

Graduate School of Science / Faculty of Science
Graduate School of Engineering / Faculty of Engineering
2015/11/02

ないはずがない!

光操り探究心と忍耐力を体現

理学系研究科・理学部
工学系研究科・工学部
2015/11/02



His research guided by one over-arching principle, "To know more about light and matter that we can see before us," Professor Makoto Gonokami became president of the University of Tokyo in April 2015. Behind his glittering accomplishments in optical condensed-matter physics, through which he has sought to elucidate physical phenomena using light, lie a spirit of inquiry focusing on challenges immediately at hand and an indomitable perseverance.

[▶ http://www.u-tokyo.ac.jp/url/vgf](http://www.u-tokyo.ac.jp/url/vgf)

「目で見ることができる光や物質のことを、もっと理解したい」。そんな思いで、突き進んできました。2015年4月に東京大学の総長に就任した五神真教授。光を使って物理現象を解明する光物性物理を中心に重ねてきた輝かしい実績の裏には、目の前のこととことん向き合う探究心と、極限に挑む忍耐力がありました。

[▶ http://www.u-tokyo.ac.jp/url/vge](http://www.u-tokyo.ac.jp/url/vge)

About The University of Tokyo

東京大学について

The University of Tokyo is the oldest of the national university of Japan, established in 1877. The University is comprised of ten undergraduate faculties, 15 graduate schools, 11 research institutes, 13 university-wide centers, and two University of Tokyo Institutes for Advanced Study. In partnership with universities around the world, the University of Tokyo aims to be a base for research and education contributing to the advancement of all humanity.

東京大学は1877年に設立された日本最古の国立大学です。10の学部、15の大学院研究科・教育部、11の附置研究所、13の全学センター、そして2つの国際高等研究所からなります。世界の大学とともに、人類の英知に貢献するための教育と研究の拠点を目指しています。

Enrollment／学生数

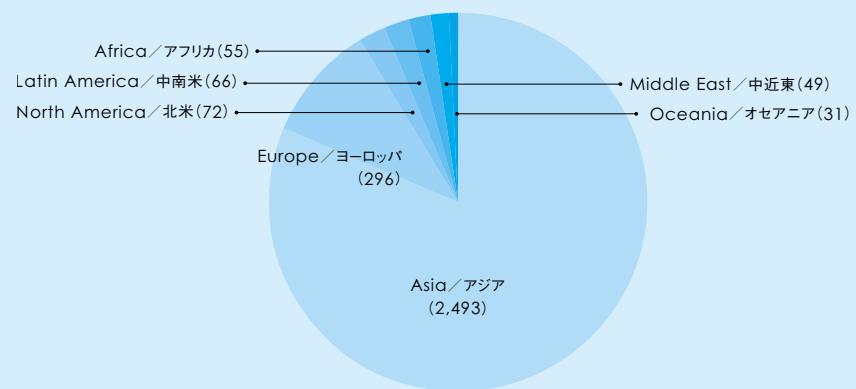
The University of Tokyo has 27,377 regular students, roughly evenly divided between undergraduate and graduate students. Graduate students themselves are divided almost evenly between MA and PhD programs. International students number 2,526 or 9% of the total, with most enrolled in graduate programs. Male students outnumber female students four to one among domestic students. Of international students, 57% are male and 43% are female.

東京大学の学生数は27,377名で、その約半数が学部学生で残り半数は大学院学生です。大学院の学生数は修士課程の学生と博士課程の学生が同数程度です。外国人留学生は、そのほとんどが大学院に在籍しており、全体の学生数の9%を占め、2,526名です。全体として、男子学生の学生数が多く、女子学生は5人に1人の割合です。一方、留学生の男女の割合は、男子学生が57%、女子学生が43%です。

Group	Undergraduate 学部学生	MA 修士課程 大学院学生	Professional 専門職学位 大学院生	PhD 博士課程 大学院学生	Total 計
Domestic students 国内の学生数	13,707	5,732	768	4,644	24,851
International students 外国人留学生数	253	990	100	1,183	2,526
Total 計	13,960	6,722	868	5,827	27,377

International students

外国人留学生



Academic staff／教員数

The University of Tokyo employs 5,914 academic staff. Excluding teachers and nursing staff, about two-thirds of academic staff are tenured while the remainder are on fixed-term contracts. Women account for some 17% of all academic staff.

東京大学の教員数は5,914名です。教諭・養護教諭を除く約3分の2の教員は、任期のない終身雇用で、その他は任期のついている特定有期雇用です。また、女性教員は全体の教員数の約17%を占めます。

Academic and administrative staff 教員数	
Professors 教授	1,391
Associate Professors 准教授	1,074
Lecturers 講師	401
Research Associates 助教	1,882
Research Assistants 助手	1,124
Teachers at attached schools 教諭・養護教諭	42
Total 計	5,914

2015-2016 Budgeted revenue／平成28年度(2016年度)収入予算

Nearly one-third of University income comes from government subsidies. Research grants and collaborative research with industry and government provide an additional one-third. The University Hospital is another major source of revenue, accounting for more than one-sixth of the total. Tuition fees account for approximately 8%.

東京大学の収入予算総額の30%以上は政府からの運営費交付金です。科学研究費等補助金や、産学連携等研究収入や寄附金収入等も収入予算総額の約30%を占めます。また東京大学の附属病院における収入は総額の6分の1、学費による収入は8%に相当します。

Budgeted revenue 収入予算	Amount (million yen)	%
Government subsidies for management expenses 運営費交付金	80,342	32.8
Collaborative research and endowment projects 産学連携等研究収入・寄附金収入等	61,691	25.2
University Hospital 附属病院収入	45,225	18.5
Research grants 科学研究費等補助金	25,655	10.5
Student tuition fees 学生納付金等	18,397	7.5
Subsidies for facilities construction/ maintenance 施設整備費補助金等	13,281	5.4
Total 計	244,591	100.0

Budgeted expenditure 支出予算	Amount (million yen)	%
Personnel 人件費	77,174	31.6
Collaborative research and endowment projects 産学連携等研究費・寄附金事業費等	61,691	25.2
Materials expenses 物件費	57,288	23.4
Research grants 科学研究費等補助金	25,655	10.5
Facilities construction and maintenance 施設整備費	13,281	5.4
Repayment of long-term debt 長期借入金償還金	5,051	2.1
Retirement stipends 退職手当	4,451	1.8
Total 計	244,591	100.0

2015-2016 Budgeted expenditure

平成28年度(2016年度)支出予算

Over one-third of the total expenditure is spent on research and research grants. Nearly another third goes to personnel costs. The remaining major expense is purchasing material items, which includes all research materials.

支出予算の30%以上が科学研究費等補助金や、産学連携等研究費や寄附金事業費等に当たれます。そして、約30%が人件費に、次に大きな支出予算は研究に必要な物品等を含む物件費です。



Intellectual property／知的財産

Since university incorporation in 2004, the University of Tokyo has increased the number of patents held by the University and by faculty members. Specialized licensing organizations (Todai TLO, CASTI) have been established to manage and monetize these patents. Other intellectual property including trademarks, software copyrights and other intangible assets provide income to the University.

2004年の国立大学法人化以降、東京大学や東京大学の構成員が保有する特許の件数は増えています。取得した特許の活用を促す組織(東京大学TLO、CASTI)が設立され、特許の管理や収益化を行っています。特許以外の東京大学が保有している知的財産には、商標やソフトウェア著作物、成果有体物等があり、これらの知的財産による収入もあります。

Patents held 特許	Domestic patents 国内保有件数	International patents 国外保有件数	Licensed patents 実施許諾及び譲渡契約		
			Licensed 実施許諾件数	Providing income 収入のあった件数	Income (000 yen) 収入(千円)
Total 計	1,386	1,101	3,142	1,440	5,411,621

UTokyo Research

Public Relations Office, The University of Tokyo
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8654 Japan
東京大学本部広報室
〒113-8654 東京都文京区本郷 7-3-1

utokyo-research@ml.adm.u-tokyo.ac.jp
+81 (0)3 5841 1045

English ► <http://www.u-tokyo.ac.jp/en/utokyo-research/>
Japanese ► <http://www.u-tokyo.ac.jp/ja/utokyo-research/>



English



Japanese

Editors: Euan McKay / マッカイ・ユアン
Ayumi Koso / 高祖歩美

Art Direction: Masami Furuta / 古田雅美 (opportune design inc.)
Design: Yuka Uchida / 内田ゆか (opportune design inc.)

UTokyo Research

English ▶ <http://www.u-tokyo.ac.jp/en/utokyo-research/>
Japanese ▶ <http://www.u-tokyo.ac.jp/ja/utokyo-research/>

© 2016 The University of Tokyo.