

計算科学の世界

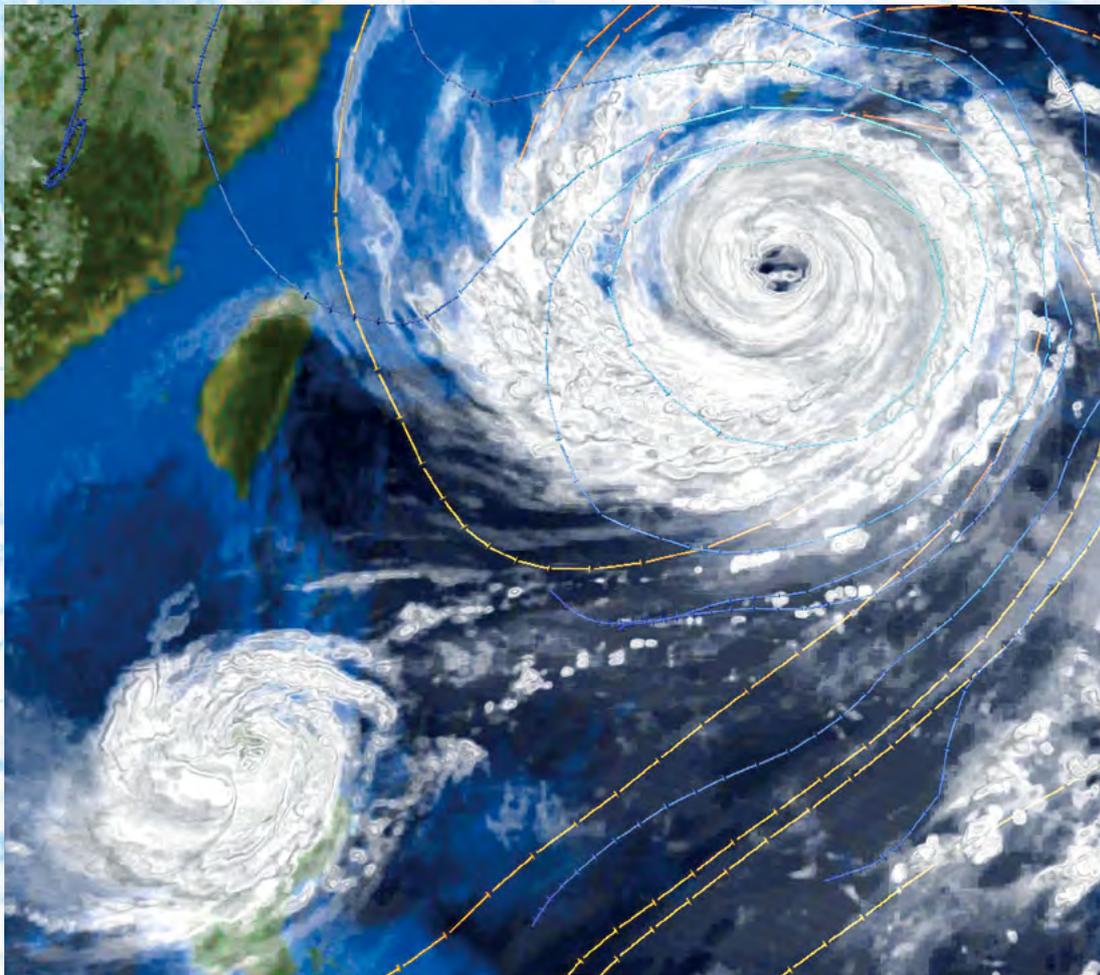
京
K computer

京がつくる時代

K computer Newsletter
March 2015 | No.10

Interview

「京」の中で成長する台風 細かい格子で積乱雲をリアルに再現



研究者に聞いてみよう!

藤田 航平 訪問研究員

RIKEN
Since 1917

理化学研究所
計算科学研究機構

870m格子の全球シミュレーションで再現された台風をアレンジ

「京」の中で 成長する台風

細かい格子で積乱雲をリアルに再現

Interview

複合系気候科学研究チーム 基礎科学特別研究員

宮本 佳明 **Yoshiaki Miyamoto**

観測データを収集することが難しい台風の研究では、古くから計算機によるシミュレーションが活用されてきました。今回、宮本さんのグループでは「京」を使い、870mという高い空間解像度で地球全体の大気をシミュレーションすることに成功しました。台風を構成する積乱雲の一つひとつまで表現でき、地球全体の大気の中で成長する台風の渦が精度よく再現されています。台風のメカニズム解明にも画期的な進展がもたらされると期待されています。

台風の予測は難しい

気象学は、計算科学の中でも最も歴史が古い分野です。大気の状態を数値計算で予測しようという世界最初の試みは1920年に行われましたが、まだコンピュータもない時代で、失敗に終わりました。しかし、40年代にコンピュータが登場すると、実験が成功し、以後、理論の進歩とコンピュータの発達があいまって、次第に数値計算が天気予報に利用されるようになり、予報の精度も向上してきました。

台風についても、80年代からの30年間で、進路の予報はよくなってきました。しかし、中心気圧や風速といっ

た強度の予報は、一向にようになっていません。これは、予報のための数値計算をするモデルに、台風の強度に影響する重要な物理現象が含まれていないためではないかと考えられています。それが何なのかはまだ突き止められていません。

宮本さんたちのシミュレーションは、天気予報のためのものではありませんが、台風の成長のメカニズムを深く知る手がかりを与えてくれます。そうした成果が天気予報に生かされれば、台風の強度をもっと正確に予測できるようになると期待されます。

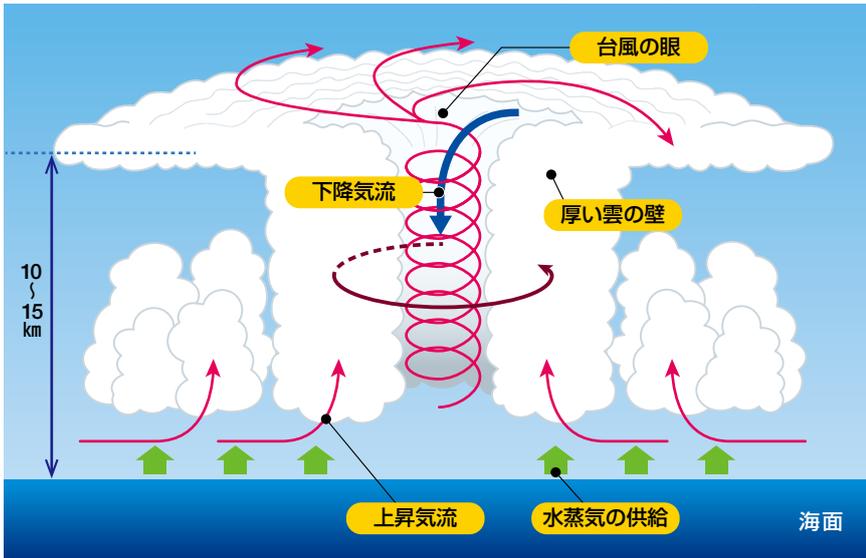
Check it!

大気全体の中で 成長する台風を 再現したい

夏から秋にかけ、日本には多くの台風がやってきます。大雨や暴風を伴う台風は、時に深刻な災害をもたらすため、より正確な予報が求められてきました(「Check it!」参照)。そのためには台風を詳しく調べる必要があります。しかし、嵐の中での観測は難しく、データを十分に収集できないのが現状です。そこで、**コンピュータを使って台風を再現し、そのメカニズムを解明しよう**とする研究が進められています。

宮本さんは「私はもともと、“過保護”な台風の計算に取り組んでいました」と話します。“過保護”というのは、その計算の条件です。例えば、水蒸気が豊富な温かい海上で、台風の卵となる渦を壊そうとする風は吹かないなど、台風が育つのに理想的な条件を設定し、台風1個について、細かな構造まで再現します。この手法では、より厳密に台風の物理メカニズムを考察することができますが、実際の気象条件とは異なる上、複数個の台風を同時に扱うことが難しいという欠点もあります。

一方、地球大気全体をシミュレーションして複数の台風を再現するとい



台風は直径1000kmほどで、多くの積乱雲を含む。台風のエネルギー源は、海面から供給される水蒸気である。熱帯の海上に空気の流れが発生すると、水蒸気の上昇気流が発生する。水蒸気を多く含んだ空気が上空で冷やされると、凝結して液体の水になる。このときに放たれた熱でまわりの空気が温められ、さらに上昇気流が強まる。上昇気流によって下層で空気が不足するため、それを埋める中心への流れが生じる。このとき外から渦を回す力が働いて、速い回転が生まれる。すなわち台風は成長する。その際に重要な役割をもつのが、台風の眼を囲むドーナツ状の厚い雲である。上陸した台風が急速に衰えるのは、水蒸気の供給が絶たれ、この雲を維持できなくなることが一因と考えられている。

※実際の台風はもっと平べったい。この図は、わかりやすくするために、縦方向を引き延ばしてある。

うアプローチの研究もあります。しかし、計算機の能力には限界があり、台風の細かな構造まで再現されてはいませんでした。このような背景から宮本さんは「両者の足りないところを埋めるような研究を」と考え、「京」の能力を活かして、地球の大気全体の中で台風の詳細な構造を再現する研究に取り組んでいます。

子の間隔は狭いほど気象現象を詳細に再現できます。積乱雲は、温かく湿った空気が強い上昇気流に乗って垂直方向に10～15kmも発達した雲で、強い雨を降らせたあと衰えます。「積乱雲1個の広がりや1km程度なので、それより狭い水平方向870mの格子間隔で地球全体の大気をシミュレーションすることにしました(図2)」と宮本さん。これまでの最高解像度は3.5kmでしたが、「京」を利用して、これを大幅に上回るシミュレーションに挑戦しました。

結果は驚くべきものでした。2012年8月25日00時(世界標準時)の気象データを初期値として12時間の変化をシミュレーションした結果は、実際のデータと比較しても、地球全体の大気の流れを精度よく再現しました。しかも、台風15号が発達するようすや、積乱雲の一つひとつまでを再現できたのです(図3)。宮本さんは「実際の台風15号は、バウムクーヘンのように眼が3重になっている珍しいものですが、シミュレーションでも2重の眼が確認できました」と語ります。このように、“過保護”台風でも表現されていないレベルの詳細な結果を得ることができました。

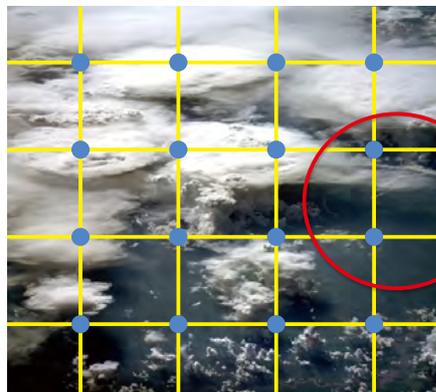
積乱雲の一つひとつまで表現

台風は、直径がおよそ1000kmもある巨大な渦です(図1)。この大きな渦の中に小さな雲がたくさんあり、これらが影響しあう中で台風が成長していきます。成長の鍵となるのが、中心の「眼」とその周りを囲むドーナツ状の厚い雲です。この雲の大部分が積乱雲と似た性質をもつ雲でできているといわれています。そこで、宮本さんたちは「積乱雲1個を再現できるまでシミュレーションの解像度を高めれば、台風の渦全体をより正確に表現できる」と考えました。

連続的に動く大気をシミュレーションする場合、空間を格子状に分割します。各格子に温度や風の強さなどの初期値を与え、これらが時間とともにどう変化していくのかを、モデル(「スパコンのことは」参照)とよばれる物理学の方程式系に従って計算します。格

図2 大気シミュレーション

1. 大気を格子状に分割
2. 格子に温度などの値を配置
3. コンピュータ上で方程式を積分



http://www.cisl.ucar.edu/nar/2006/

表現したい気象現象のスケールに応じた、格子間隔が必要

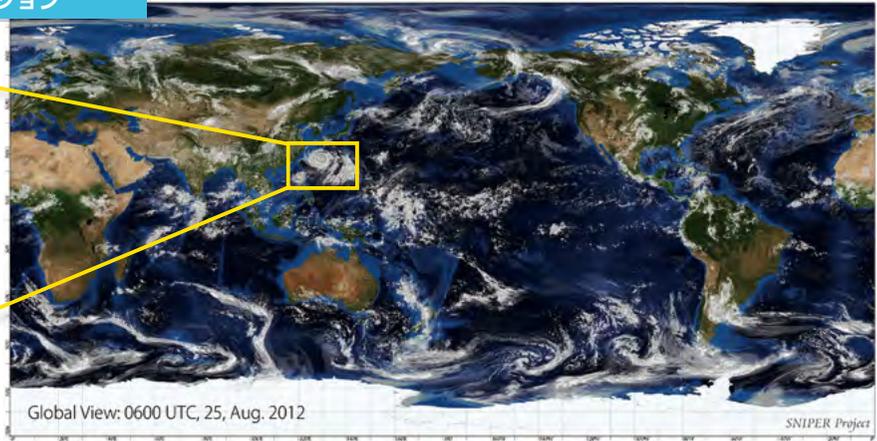
空間を格子状に分割し、各格子の交点に温度などの値を置き、方程式に従って時間変化を計算する。このため格子間隔より小さいスケールの現象は、うまく表現できない。今回は、1km程度の広がりをもつ積乱雲に焦点をあてるため、地球表面を870m間隔に区切って計算した。垂直方向は30km上空まで計算しているが、格子間隔は、細かな現象がたくさん起こる地表付近では20～50m、最上層では9km程度として、計算の効率化を図っている。

図3 格子間隔 870mでの全球シミュレーション

格子間隔：870m



格子間隔：3.5 km



2012年8月25日00時の気象データを初期値としてシミュレーションした結果（6時間後）。大気の流れ、台風15号の成長などが、精度よく再現されている。台風の部分を、格子間隔3.5kmでのシミュレーション結果と比較すると、870mでは雲の詳細がずっとよく再現されているのがわかる。

シミュレーションの質を変える 解像度をめざす

しかし、地球全体について870mという高解像度で、1秒ごとの変化をシミュレーションすることは、容易ではありません。宮本さんたちは、「京」の82,944の計算ノードのうち約20,000ノードを使用しました。

「12時間の変化を再現するための『京』での実計算時間は60時間程度ですが、シミュレーション完了までには9ヵ月かかりました」と宮本さん。初期の段階ではデータやプログラムの不備を修正する必要もあり、また、計算途中でデータが消えてしまうリスクを低減するため、12時間を2時間ごとに区切って計算するなど、苦労したそうですが、現在では2日間分の変化のシミュレーションにも成功しています。

さらに、宮本さんたちは、シミュレーションで計算された積乱雲について、詳細な解析もしました。例えば、台風、温帯低気圧、前線などの特徴的な現象（雲擾乱）に含まれる積乱雲を一定の基準で取り出して比べたところ、温帯低気圧や前線に比べ台風の積乱雲は背が高いなど、雲擾乱の種類によって積乱雲の性質が異なることが明らかになりました（図4）。

また、別の解析から、これまでのシ

ミュレーションでは積乱雲の中の上昇気流が1点のデータで表現されていたのが、今回は複数の点で表現されることがわかりました。格子間隔が積乱雲より小さく、1個の雲をきちんと捉えているためと考えられました。そこで何通りか格子間隔を変えて調べてみると、約2km以下なら複数の点で表現されることがわかりました。積乱雲1個を再現するのに最低限必要な格子間隔は、研究者の間でも関心の高い点でしたが、明確な基準を示すことができました。

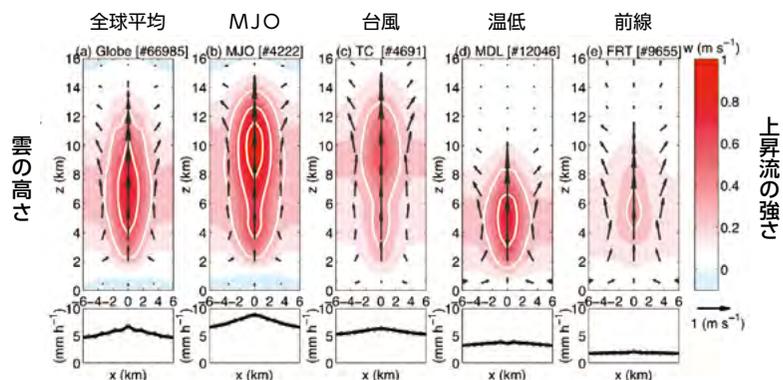
このように、「京」によって実現した地球大気全体の詳細なシミュレーションは、これまでとは質を異にするものでした。しかし宮本さんは「**台風**の**眼**がどのように形成され保持されるかなど、科学的な問題はまだまだ山積み

です。メカニズムの解明にはさらなる知見と詳細な計算が必要なのです」と語ります。例えば、台風の中心部分だけを取り出して“過保護”なシミュレーションを行い、成長の鍵である台風の眼を削るような大気の流動を確認した先行研究などもあります。「我々のチームではこれまでの経験と将来の発展のスピードから、ポスト『京』ではさらに細かな解像度の計算も可能になると期待しています」と宮本さん。さらに高い解像度のシミュレーションによって、新たなブレイクスルーをもたらすことが期待されます。

「京」をどのように使ったか説明する宮本さん



図4 シミュレーションで発生した積乱雲の分析



MJO、台風、温帯低気圧、前線といった雲擾乱中の積乱雲（対流）を抽出し、それぞれについて合成（重ねあわせた図を作成）したところ、上昇気流の強さや雲の高さといった性質の違いを示すことができた。各グラフは積乱雲を横から見たもので、赤い色のところは上昇流（雲の広がり）を示し、赤の色が濃いほど速度が速い。黒い小さな矢印は風向と風速を表す。下段は1時間あたりの降水量（mm）。

※ MJO：マッデン・ジュリアン振動の略。おもにインド洋で発生する大気変動で、巨大な積乱雲群（水平規模が数千km）が赤道に沿って東に進む。地球全体の気象に影響を及ぼす。

モデル = 方程式系

自 然現象を計算で再現するためには、その現象に関わる物理学や化学の法則を理解し、それらの法則を方程式の形で表す必要があります。しかし、現象に関わるすべての法則を方程式にして解こうとすると、計算量が膨大になってしまい、現実的ではありません。そのため、重要なものを基本に据え、どのようなものを付け加えるかを取捨選択します。こうしてできあがった方程式の集まり(方程式系)を「モデル」と呼んでいます。方程式系を解くためのプログラムまでを含めてモデルと呼ぶのが普通です。

大気シミュレーションの場合には一般に、大気の流れを、熱流体が従うべき質量保存則・運動方程式・エネルギー保存則の方程式で表すほか、水の相変化(氷、水、水蒸気間の変化)、太陽の放射による熱流入などを方程式で表します。そして、これらの方程式から、ある時点における各格子点の気温、気圧、湿度、風速・風

向などを求める方程式を導くのです。

今回、宮本さんたちが用いたモデルは、全球雲解像モデル(NICAM)というシミュレーションプログラムです。例

えば気温を表す方程式には、移流(気温が流れて移ること)と拡散(気温が周りに広がること)に加え、太陽の熱による放射、雲の凝結という水の相変化の項が含まれています。

現在、宮本さんたちのチームではポスト「京」に向け、新たなモデルの構築が始まっています。実は、現在のモデルのままで、より高い解像度のシミュレーションを行うと、格子間隔870mでは省略できた作用を無視できなくなることがわかっています。そこで、拡散に係る作用の項を新たにモデルに追加することが検討されてい

ます。「京」で得られた高解像度計算の結果が示すように、シミュレーションの精度が上がることで、自然現象への理解が深まるとともに、モデルも高度化されていくのです。

大気シミュレーションの方程式系

質量保存則

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

運動方程式(ナビエ-ストークス方程式)

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} = -u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} - g\delta_{i3} + K_{u_i}$$

エネルギー保存則

$$\frac{\partial e}{\partial t} = -u_j \frac{\partial e}{\partial x_j} + Q + K_e$$

方程式系の一例。上から、大気が移動しても質量は不変であること、大気が運動方程式に従って運動すること、エネルギーの出入りがあっても総和は不変であることを示す方程式。このほかに、水が相変化しても物質量は変わらないことなどの方程式を加えてモデルを構築する。これらの方程式から、気温などを求める方程式が導かれる。



「ベンチマークプログラム」



さまざまなランキングで上位を獲得している「京」。スパコンの性能はどのように評価されているのでしょうか？

スパコンの性能をはかるためのプログラムを、「ベンチマークプログラム」と呼びます。ベンチマークとは、英語で「基準」という意味です。スパコンの開発が進む中、「どんなシステムをつくればいいのか?」「どのスパコンが一番速いのか?」を知りたい、比べたいというニーズから、いろいろなベンチマークがつくられ、性能測定に使われています。

「LINPACK(リンパック)」はスパコンの演算性能をはかるものです。年2回、このベンチマークによる上位500位までのランキング「TOP500」が発表されており、1993年の開始から20年以上経つ現在でも、主要なベンチマークの一つとなっています。「京」は2011年6月と11月に世界一となりました。しかし、スパコンで科学計算を行う際には、演算性能だけで

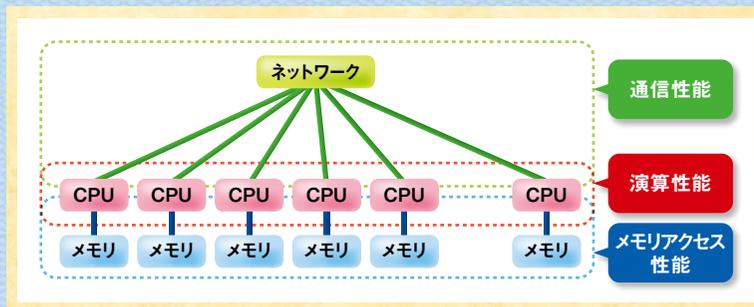
なく、ほかのCPUとの通信性能や、メモリからデータを読み込む際のスピード(メモリアクセス性能)などのバランスがとれていることも重要であり、LINPACKではそうした性能を十分に評価できていないという声がありました。

そこで、新しいベンチマークが次々に提唱されています。「HPC チャレンジ」は2005年に誕生しました。実際に科学技術計算で多用される計算パターンから選ばれた4つのプログラ

ムで高い性能が得られたスパコンが、毎年11月に表彰されています。2014年、「京」は2つの項目について世界1位、残り2つについても2位と、今も総合能力の非常に高いスパコンであることが示されました。

「HPCG」はおもに産業界で活用されるシミュレーションによく使われる数学的解法に関するベンチマークで、2014年に提唱され、ランキングが始まっています(「京」は2位にランクイン)。ほかにも、1ワットあたりの計算量から省エネ性能をランク付けする「Green500」(2007年開始)、グラフ解析に用いられるグラフ計算の性能を競う「Graph500」(2010年開始)などがあります。

多様なベンチマークの出現は、スパコンが進化し、計算できる対象がどんどん広がっていることのアかしでもあるのです。



スパコンは、通信性能、演算性能、メモリアクセス性能の3つがバランスしていることが重要

藤

田さんは地震工学の分野に携わる研究者で、その中でも計算地震工学のスペシャリストです。「京」を使って都市をそのまま丸ごと再現し、地震が起きたときにどの建物がどのように壊れるのか、また地震による津波で水がどのように都市に流れ込むのかなどについて計算による数値シミュレーションを行い、地震による被害をどう減らせるかを考える研究を行っています。数値シミュレーションには計算プログラムと計算モデルの2つの要素が必要です。藤田さんは計算プログラムの専門家です。藤田さんにいろいろな質問をしました。(神戸市立六甲アイランド高校有志)

プロフィール

神奈川県立湘南高校卒業。東京大学工学部社会基盤学科卒業後、同大学院工学系研究科社会基盤学専攻に進学。博士課程修了後、現職。



総合防災・減災研究ユニット 藤田 航平 訪問研究員

神戸市立
六甲アイランド高校の
皆さん



研究者に聞いてみよう!

第2回

Q なぜ地震について研究をしようと思ったのですか?

A 計算をするのが好きだったからです。論理的なことが好きなので、論理の塊である数値シミュレーションをしたいと思っていました。地震は複雑な問題で数値シミュレーションが役に立つので、このテーマを選びました。

Q 高校時代の得意科目や苦手科目、勉強方法を教えてください。

A 得意科目は数学と物理、苦手科目は国語でした。暗記が苦手でしたが、世界史や日本史は情勢を追っていくのが面白かったので苦手じゃなかったですね。あまりいい方法じゃないかもしれないけど、得意科目を伸ばして苦手を補う戦法をとりました。

Q 大学に入って驚いたことはありますか?

A あんまりないかな。でも、高校では教科書を読めば勉強ができたのですが、大学に入ると必ずしも教科書に答えが載っていないことには驚きました。だから図書館を活用するなどして、判断をするための基礎力と、文献を調べる力を鍛えました。考え方も変わり、ものを疑ってみるようになりました。

Q 何か国話することができますか?

A 日本語と、ちょっと英語を話せます。僕は実は帰国子女で、小学生の時にアメリカにいましたから、英語は大丈夫です(笑)。それじゃなかったら受験の時に相当大変でした。学会では英語で話します。



インタビューを終えて

実際に研究者に直接インタビューするのはめったにない機会だったので、ほんとうに貴重な経験ができました。藤田さんの研究内容はもちろんのこと、日常生活についてもお聞きすることができました。研究内容の説明をはじめ、インタビューを通して、「論理的」や「合理的」といった言葉を何度も聞きました。地震に限らず、ある物事に対して筋道を立てて、論理的に考えることの大切さを藤田さんから教わりました。現在は科学が世界的に進歩して、なくてはならないものになっているので、なおさらそういうことが重要視されるのではないかと思います。最後になりましたが、お忙しい中、このような機会を設けて下さり、ほんとうにありがとうございました。(佐野 舞太、上田 悠大、岩尾 大輝、稲田 晃大、飯田 庸太郎、西田 和馬)



Q 趣味は何ですか?

A 山登りです。今は世界中どこでもインターネットや電話で連絡をとれるけど、山では電波が届かず、自然の中で生きていることを実感できます。それに、ただただ登るので、いろいろなことを忘れられる。一人の時間も大切だと思います。

Q 高校生の時にこんなことをしておけばよかったなということはあるますか?

A もっと友達をつくっておけばよかったなと。歳を取るにつれて接する人が同じ分野に限られてくるので、高校の時にいろんな人と仲良くなっているといいと思います。

Q 会ってみたい有名人はいますか?

A アインシュタインです。20代からすごい論文を書き続けてきた人。同じ年齢のアインシュタインに会って、何が自分と違うのかをみたいですね。

Q 藤田さんにとって研究とはなんですか?

A すごく熱中できるもの。何か月も集中して研究をしている間に、今までわからなかったことがわかって、今までできなかったことができるようになる。そんなところが好きです。

Q 今の夢は何ですか?

A 計算機の進歩で、細かい計算や大きい計算ができるようになっていく。従来から解いている問題を細かく、大きく解くだけでなく、この力を使って、今まで解いてきた問題とは質的に違う新しい計算をすることが夢です。



計算が
好きだったんですね



計算科学の世界

京がつくる時代

No. 10
March 2015

発行日 平成27年3月13日

編集発行 理化学研究所 計算科学研究機構 広報国際室
〒650-0047 兵庫県神戸市中央区港島南町7-1-26
TEL: 078-940-5555 (大代表) FAX: 078-304-4964
E-mail: aics-koho@riken.jp

「京」のもっと詳しい情報はこちら! ▶ <http://www.aics.riken.jp>

ホームページ版「計算科学の世界」はこちら ▶ <http://www.aics.riken.jp/newsletter/>

