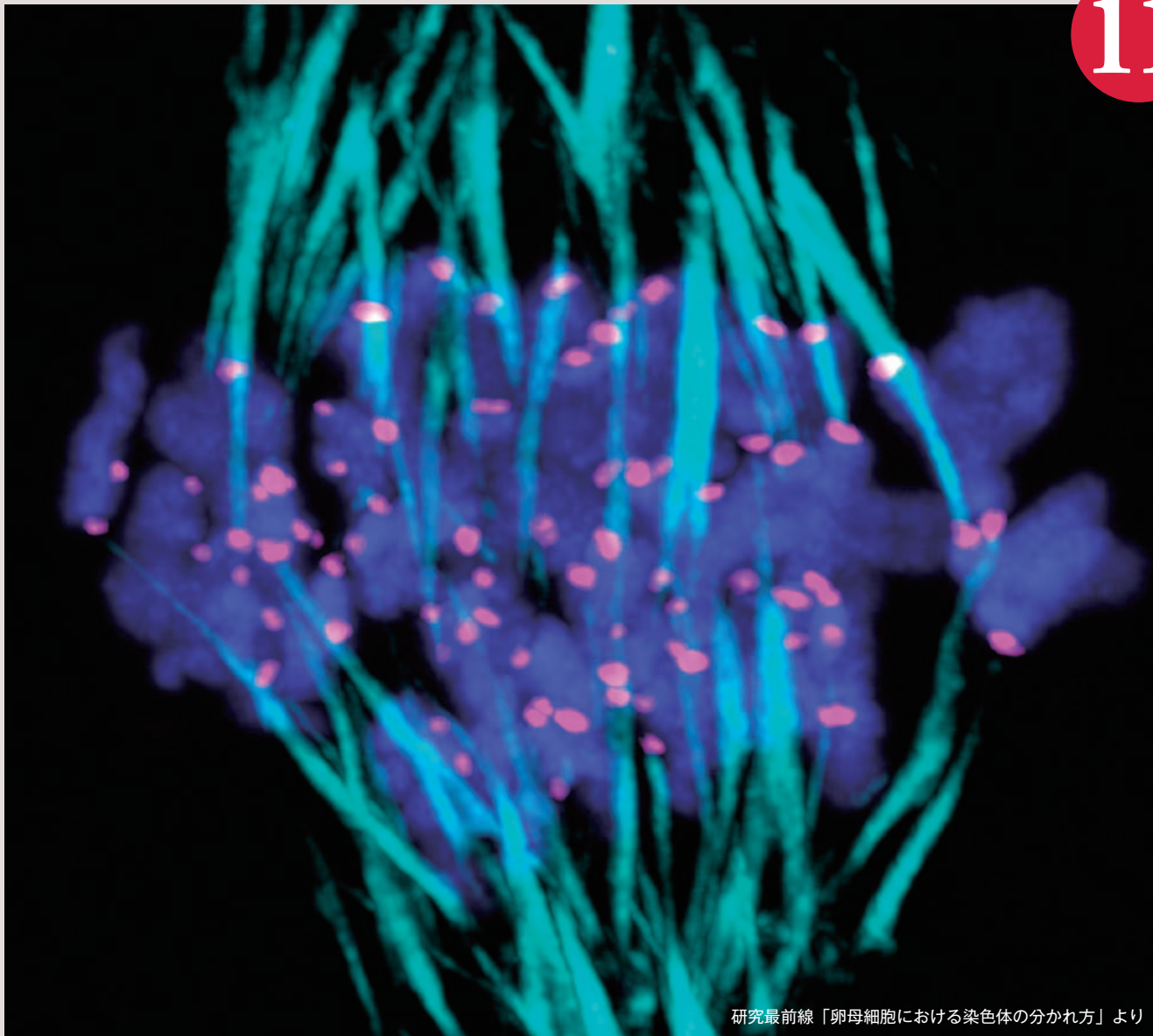


# RIKEN

# NEWS

No.413 November 2015

11



研究最前線「卵母細胞における染色体の分かれ方」より

研究最前線 ②

## 「京」がGraph500で世界1位を奪還!

研究最前線 ⑥

## 卵母細胞における染色体の分かれ方

特集 ⑩

## 新規PET診断薬、臨床研究へ

TOPICS ⑬

- ・ 新監事に松尾康博氏
- ・ 統合生命医学研究センター長に山本 雅氏
- ・ 理化学研究所計算科学研究機構  
2015年度「スパコンを知る集い」  
開催のお知らせ

記念史料室から ⑭

理研の宇宙線研究(後編)

原酒 ⑯

Post-historic doodles on clay  
粘土に描いた有史後のいたずら書き

マーケティングや金融、サイバー攻撃からの防御、医療診断や生命科学、脳科学など、さまざまな分野において、ビッグデータを解析することのニーズが高まっている。ビッグデータ解析で重要なグラフ処理の計算速度を競うスーパーコンピュータ（スパコン）の国際的な性能ランキングGraph500において、2015年7月に「京」が1年ぶりに世界1位に輝いた。王座奪還をどのようにして成し遂げたのか。理研計算科学研究機構 プログラム構成モデル研究チームの丸山直也チームリーダー（TL）と上野晃司 研修生（東京工業大学大学院博士課程）に聞いた。

## 「京」がGraph500で世界1位を奪還!

### ■ Graph500はモノコグランプリ

スパコンの国際的な性能ランキングでは、1993年に始まったTOP500が有名

だ。「TOP500で競われる課題は、足し算や掛け算を順番に行っていくというコンピュータが得意な問題です。自動車

レースに例えれば、直線コースで最高速度を競うようなもので、ハードウェアの最高性能が反映されやすいという特徴

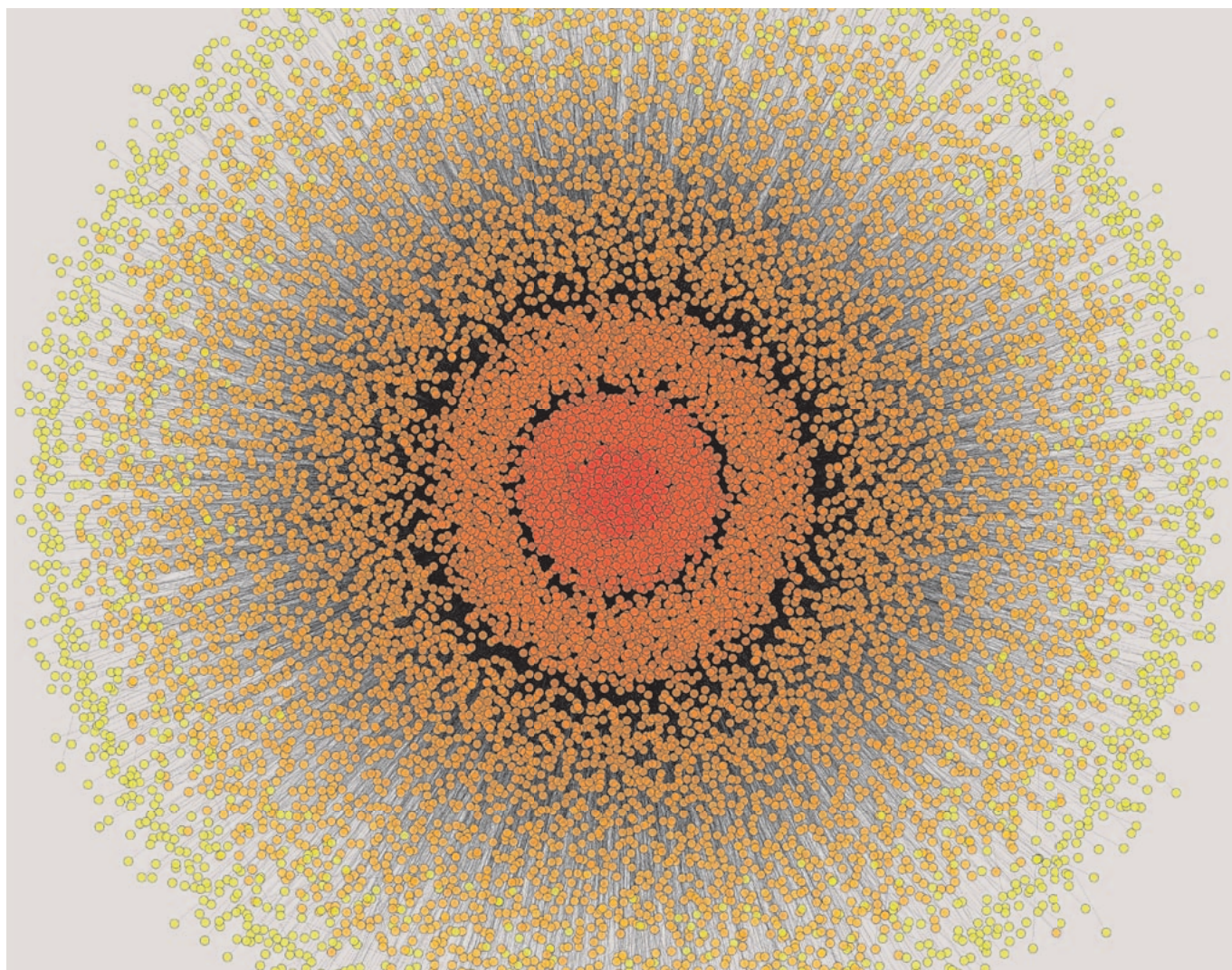


図1 巨大なグラフ

上図は枝が約1万6000本のグラフ。Graph500の課題は、枝が16兆本もある巨大なグラフである。丸山TLと上野さんたちは、その巨大グラフに対する幅優先探索問題を0.45秒で解くことに成功した。

### 丸山直也 (まるやま・なおや)

計算科学研究機構  
プログラム構成モデル研究チーム  
チームリーダー

1979年、茨城県生まれ。博士（理学）。東京工業大学大学院数理計算科学専攻博士課程修了。東京工業大学学術国際情報センター助教を経て、2012年より現職。東京工業大学学術国際情報センター客員准教授を兼務。



があります」と丸山TLは解説する。

TOP500において、「京」は2011年6月と11月に1位となり、2015年7月発表のランキングでは4位となっている。

一方、Graph500は2011年に始まったスパコンの新しい性能評価だ。「その課題はグラフ処理における幅優先探索と呼ばれる問題を解くことで、それは市街地を走るF1モナコグランプリのようなものです。複雑なコースを走るため、ハードウェアの性能とともに、ドライビング技術が求められます」

グラフとは、友人関係を表したような図だ。図2左の例では、0番は1・2・3番と友達、さらに2番は0・4・5・6番と友達だ。その関係をグラフでは、頂点と枝で表現する。幅優先探索問題は、ある頂点を始点に、そこから枝でつながった隣接する頂点をたどり、それぞれの頂点で同様に隣接する頂点をたどる。これを繰り返して、枝でつながったすべての頂点をどれだけ速くたどることができるかを競う。Graph500の課題は、頂点が1兆個、枝が16兆本もある巨大なグラフだ(図1)。幅優先探索問題を解くことで、ある人を始点に、例えば友人関係を3ステップたどったときに、何人が関係しているのかが分かる(図2右)。

なぜ、幅優先探索はスパコンにとって難問なのか。「この問題は、まだたどっていない頂点はどれかを調べながら探索する必要があります。そこが足し算や掛け算を順番に行うTOP500の課題と異なる難しい点です」と丸山TL。

スパコンは、ノードと呼ばれるたくさんのコンピュータをつないで計算を分担

することで、高速に計算を行うことができる。「1台で10秒かかる計算を、10台つないで1秒で計算できるようにすることが理想ですが、実際にはそれは難しいことです。特にGraph500の課題では、それぞれのノードが、自分が今どの頂点をたどっているのか、ほかのノードと頂点の番号などをやりとりしながら進めなければ、探索の重複が起きて計算速度

が大きく低下してしまいます」

### ■ データ量を減らす

グラフの情報は、スポーツにおけるリーグ戦表に似た2次元の行列表で表すことができる(図3)。頂点同士が枝で結ばれていれば「1」、結ばれていなければ「0」で示す。Graph500の課題は頂点が1兆個あるので、1兆×1兆の巨大な行列

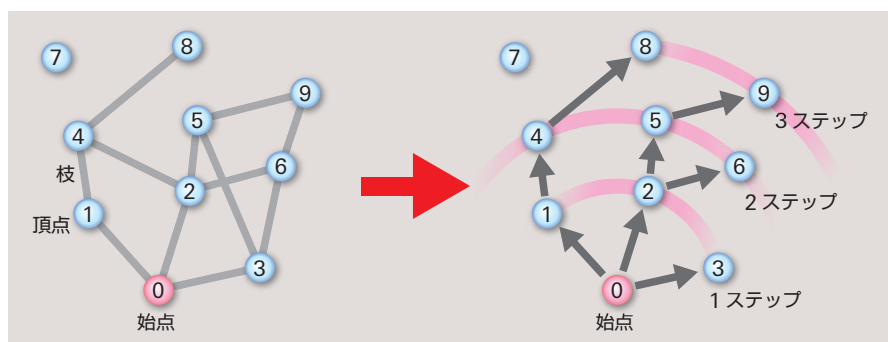


図2 グラフと幅優先探索問題

左のグラフの始点から枝でつながったすべての頂点をたどる幅優先探索問題を解くことで、右のように何ステップでいくつの頂点が関わっているかを知ることができる。

頂点番号	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0		1	1	1	0	0	0	0	0	0
1	1		0	0	1	0	0	0	0	0
2	1	0		0	1	1	1	0	0	0
3	1	0	0		0	1	1	0	0	0
4	0	1	1	0		0	0	0	1	0
5	0	0	1	1	0		0	0	0	1
6	0	0	1	1	0	0		0	0	1
7	0	0	0	0	0	0	0		0	0
8	0	0	0	0	1	0	0	0		0
9	0	0	0	0	0	1	1	0	0	

図3 グラフ情報を表した行列表

図2左のグラフを行列で示した。1は頂点同士が枝でつながり、0はつながっていないことを示す。この場合でも、0の情報が多いことが分かる。

頂点番号	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0		1	1	1	0	0	0	0	0	0
		32ビット	32ビット	32ビット						96ビット
		1ビット	1ビット	1ビット	1ビット	1ビット	1ビット	1ビット	1ビット	9ビット

図4 32ビット整数とビットマップ

図3の1行目(番号0)において、情報が1の3頂点の情報を32ビットで表すには96ビットが必要だが、9頂点の情報が0か1かを1ビットで表すビットマップを使うと9ビットで済む。ただし、頂点の数が増えると、ビットマップの方がデータ量が大きくなる場合がある。

順位	システム名称	設置場所	ベンダー	国名	ノード数	プログラム スケール	GTEPS
1	K computer	理研 計算科学研究機構	富士通	日	82,944	40	38,621
2	Sequoia	ローレンス・リバモア研	IBM	米	98,304	41	23,751
3	Mira	アルゴンヌ研	IBM	米	49,152	40	14,982
4	JUQUEEN	ユーリッヒ研	IBM	独	16,384	38	5,848
5	Fermi	CINECA	IBM	伊	8,192	37	2,567
6	天河 2A	国防科学技術大学	NUDT	中	8,192	36	2,061
7	Turing	GENCI	IBM	仏	4,096	36	1,427
7	Blue Joule	ダースベリー研	IBM	英	4,096	36	1,427
7	DIRAC	エジンバラ大学	IBM	英	4,096	36	1,427
7	Zumbrota	EDF 社	IBM	仏	4,096	36	1,427
7	Avoca	ビクトリア州 生命科学計算イニシアティブ	IBM	豪	4,096	36	1,427

図5 Graph500の上位ランキング (2015年7月発表)

表右端のTEPS (テップス) は、Graph500の幅優先探索問題で1秒間あたりに調べ上げた枝の数を示す。単位 (G) は10億。「京」は2014年11月の19,582GTEPSから38,621GTEPSへと約2倍の性能向上を実現して、王座を奪還した。

表となる。「京」ではその行列表を縦288・横288の合計8万2944ノードに分割して計算を行う。

1個の頂点からは、平均して32本の枝が出ている。行列表でいうと、1行中の1兆個の升目の中で1があるのは平均32個で、それ以外の情報はすべて0ということになる。従って、割り当てられた情報がすべて0になるノードがたくさんできる。計算速度を高速化するには、そのような無駄を省き、計算やノード間の通信に使うデータ量を減らすことがポイントだ。

「そのために、ビットマップという方法を用いています」と上野さんは言う。

通常、プログラム内で頂点の番号を表す場合は、頂点の個数にもよるが、「32ビット整数」というデータ型が用いられる。これは、0か1の値を取るビット (情報の最小単位) を32個用いて、0から $2^{32}-1$  (約40億) までの整数値を表現するものだ。枝でつながった頂点の番号をノード間でやりとりする場合も、そのまま32ビット整数で通信されるのが一般的である。

図3の1行目で考えてみよう (図4)。ここでは0番の頂点に、1番、2番、3番の頂点3個が繋がっている。「3個の頂点番号を32ビット整数でノード間通信すると $3 \times 32 = 96$ ビットを使います。しかし、ノード間通信では、繋がっている

か、繋がっていないかだけを表現すればよい場合があることが分かりました。それなら番号1~9の頂点ごとに1ビットずつ割り当てたらどうかと考えました。これでノード間通信すれば、 $96 - 9 = 87$ ビット分のデータ量を削減できます。それが『ビットマップ』という方法です」

ただしGraph500のグラフには1兆個の頂点がある。その情報がすべて必要なケースでは、それぞれに1ビットを割り当てると1兆ビットになってしまう。1個の頂点につながっている頂点数は平均32個なので、それぞれに32ビットを割り当てれば $32 \times 32 = 1,024$ ビットで済む。このような場合は、ビットマップでなく32ビット整数を用いる方がデータ量を減らすことができる。

「二つの方法をケース・バイ・ケースで適切に切り替えることで、計算やノード間通信におけるデータ量を減らし、計算の高速化を図りました」と上野さんは解説する。

### ■ 枝の多い順に並べ替えて王座奪還

丸山TLや上野さんたちは、2014年6月のGraph500で1位を獲得した。しかし同年11月には米国ローレンス・リバモア研究所のSequoia (IBM製) に王座を奪われてしまった。

「そこで私は、新しいアイデアを試してみることにしました。枝の数の多い頂

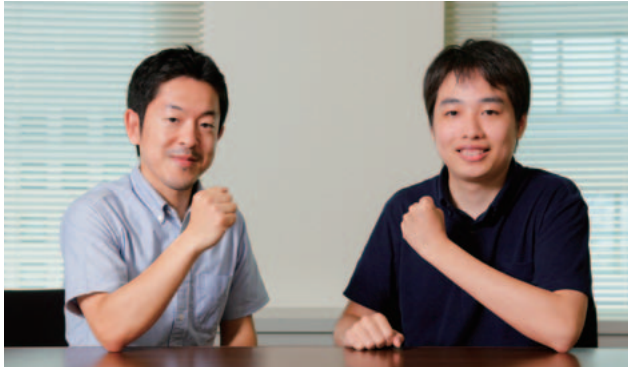
点の順に並べ替えて計算を行うという手法です。主にその手法によって、前回よりも2倍近くの性能向上を実現して、1位に返り咲くことができました」と上野さんは王座奪還のポイントを語る (図5)。

なぜ、大幅な性能向上を実現できたのか。「それぞれのノード内では、CPU (中央演算装置) がメインメモリーにアクセスして必要な情報を取り出しながら計算を進めます。ただし現在のコンピュータは、CPUの高速化に伴いメインメモリーの処理速度がCPUに追い付かなくなっており、メモリーへのランダムなアクセスも苦手です。その問題を解消するため、CPUとメインメモリーの間に、容量は少ないもののメインメモリーより処理速度に優れたキャッシュメモリーという装置を備えて、参照頻度の高いデータや実行頻度の高いプログラムを記憶させるようにしています。グラフの行列表を枝の多い順に並べ替えておくことで、頻繁にアクセスする頂点の情報がキャッシュメモリーに記憶されやすくなり、計算の効率が良くなったのです」と上野さんは解説する。

さらに、「ノード間通信も効率化することができました」と上野さんは続ける。「実は、Graph500の課題のグラフには、枝のない頂点が全体の7割もあります。枝の多い順に並べ替えることで、枝のない頂点の情報をすべて捨てることができようになり、通信のデータ量も大きく減らすことができたのです」

### ■ 「京」の高い汎用性を証明

TOP500のランキングで上位でも、



丸山直也チームリーダー（左）と上野晃司 研修生

Graph500ではランキングに入っていないか、下位に甘んじたりしている機種がある。「それは、計算手法などのソフトウェアだけでなくハードウェアの特徴も影響しています」と丸山TLは説明する。

「TOP500の上位には、CPUのほかに、アクセラレータと呼ばれる演算処理を高速化するプロセッサを搭載している機種があります。プログラムの中で同種の演算を大量に行う部分などでアクセラレータを使い、計算時間を短縮するのです。そのアクセラレータを搭載した機種の中には、TOP500のような課題は得意でも、Graph500では計算効率が大きく低下してしまうものがあります。最高速度は速いけれど、そこに至るまでの加速に時間がかかります。そのような機種は直線コースには強くても、市街地コースでは性能を十分に発揮しにくいのです」

「京」は、最新のTOP500のランキングでも第4位だが、アクセラレータは搭載していない。「『京』は加速性能に優れていて、直線コースでも市街地コースでも性能を発揮できます。『京』はさまざまな分野・タイプの課題を効率よく計算できるように設計されました。Graph500で世界1位を獲得できたことは、その設計思想が実現されていることの証です」と丸山TL。

### ■ 多分野に応用可能な計算手法

幅優先探索問題のようなグラフ処理を高速に計算できるようになることで、従来は扱うことが難しかった巨大で複雑なグラフを解析できるようになったり、

グラフの形が変化したときの影響をすぐに分析したりすることが可能になる。

例えば、Twitterなどのソーシャル・ネットワーク・システム（SNS）における膨大な数の人間関係をグラフで表現しておけば、枝が密集しているところを探し出すことで、最も発言力のある人を見つけることができるだろう。そのようなオピニオンリーダーにターゲットを絞ることで、効果的なマーケティングなどが可能となる。

私たちの体の中の細胞では、まず細胞膜に埋め込まれたタンパク質が、外部からの情報を受け取る。その情報は、細胞内のたくさんのタンパク質が相互作用して次々と受け渡されていき、細胞核まで伝えられる。すると、特定の遺伝子が発現してタンパク質が合成され、細胞の増殖や分化、分泌などさまざまな現象が起きる。そのようなタンパク質の複雑な相互作用のネットワークをグラフで表現して解析することで、治療効果が高く副作用が少ない薬のターゲットとなるタンパク質を見つけ出すことができるだろう。

ヒトの脳では、1000億を超える神経細胞が互いに連絡し合い複雑なネットワークをつくり、情報をやりとりすることで、学習・記憶や思考・判断など高度な機能を実現している。今まで扱うことが難しかった巨大で複雑な神経ネットワークの分析にも、スパコンによるグラフ処理の解析が有効だ。また、脳の学習の仕組みをまねた情報処理技術である人工知能の研究にも、グラフ処理は大きく貢献すると期待される。

「Graph500で開発した計算手法は、

### 関連情報

- 2015年7月14日トピックス  
スーパーコンピュータ「京」がGraph500で世界第1位を奪還

さまざまな応用研究の土台となります。例えば、枝の多い順に並べ替える手法は、ノード内のメモリアクセスの効率化やノード間通信のデータ量の低減ができるので、1台のパソコンでも、『京』のような多数のノードから成るスパコンにおいても、グラフ処理の高速化を実現できます。今後、私たちが開発した計算手法を、さまざまな分野の人たちが使いやすい形にして提供していきたいと思えます」と丸山TL。

### ■ スパコンを生かす計算手法を開発

「アイデアを練り、計算手法を改良することで計算の高速化が実現できるGraph500の研究は、とても魅力的です」と上野さんは語る。しかも、ライバルはコンピュータ界の巨人、IBMの研究グループだ。

「2015年7月のランキングで、私たちは2位のIBMの研究グループに大きな差をつけることができました。ただし、2016年になると、さらに計算速度が1桁以上速いスパコンが登場すると予想され、Graph500における競争も新しいステージに入るでしょう」と分析する丸山TLは、次のように展望を語る。「Graph500の課題は、従来、コンピュータが計算していた問題とは異なるタイプの典型例です。Graph500の課題を高速に計算できることは、従来とは異なるほかの問題の計算手法を考える上でも示唆に富む成果です。今後とも私たちは、さまざまな問題をスパコンで効率よく計算するための基礎研究を続けていきます」

（取材・執筆：立山 晃/フォトンクリエイト）

多細胞システム形成研究センター（CDB）染色体分配研究チームの北島智也チームリーダー（TL）は2015年7月、「加齢による卵子の染色体数異常の原因を特定」と題するプレスリリースを行った。その内容は、多数の新聞でも報じられた。「“卵子の老化”という言葉が一般の人が見聞きする機会が増えていることもあり、多くの方に関心を持っていただいたようです」と北島TL。卵子の染色体数に異常があると、流産や先天性疾患を引き起こす。卵子の染色体数異常の頻度は母体の年齢とともに上昇することが知られている。しかし、なぜ加齢に伴って染色体数異常が増えるのか、その原因はよく分かっていなかった。北島TLは、卵母細胞の減数分裂において染色体が分配される様子を4次元のライブイメージングで詳細に観察することによって、染色体分配のメカニズムの一端を明らかにし、加齢による卵子の染色体数異常の原因を特定した。

## 卵母細胞における染色体の分かれ方

### ■ 染色体分配で誤りが発生

北島TLの研究対象は卵母細胞だ。「卵母細胞は、生命にとって特別な細胞なんです」と北島TLは言う。私たちの体を構成するすべての細胞の始まりは、卵子

と精子が受精してできた受精卵である。卵母細胞は、卵子のもととなる細胞だ。「卵母細胞は特別な細胞でありながら、細胞生物学的な研究はあまり進んでいません。特に減数分裂における染色体の

分配は謎に包まれています。私は、そのメカニズムの解明を目指しています」

卵母細胞は、減数分裂を経て卵子になる（図2）。その過程を簡単に説明しよう。ヒトの卵母細胞には、ほかの体細胞と同様に、1番から22番までの常染色体と性染色体の23対46本の染色体がある。対になっている染色体を「相同染色体」と呼び、一方は父由来、もう一方は母由来だ。卵母細胞は生まれたときには卵巣内にすでにあり、減数分裂を開始する。まずDNA複製によって同じ遺伝情報を持つ「姉妹染色分体」が形成される。次に、相同染色体が結合して「二価染色体」となり、相同染色体間で遺伝情報の組み換えが起きる。卵母細胞は、この減数第一分裂の途中で停止したまま排卵を待つ。その期間は、ヒトでは数十年に及ぶ。そして排卵のときに減数第一分裂が再開されると、二価染色体が分離して、一方は卵子に、他方は極体という小さな細胞に分配される。極体は、やがて消失してしまう。卵子は受精とともに減数第二分裂が開始され、姉妹染色分体が分離して受精卵と極体に分配される。こうして精子由来の染色体と合わせて46本の染色体を持つ受精卵ができるのだ。

「卵母細胞の減数分裂では、染色体が正しく分配されなければいけません。しかし非常に困ったことに、減数第一分裂で染色体分配の誤りが起きやすいので

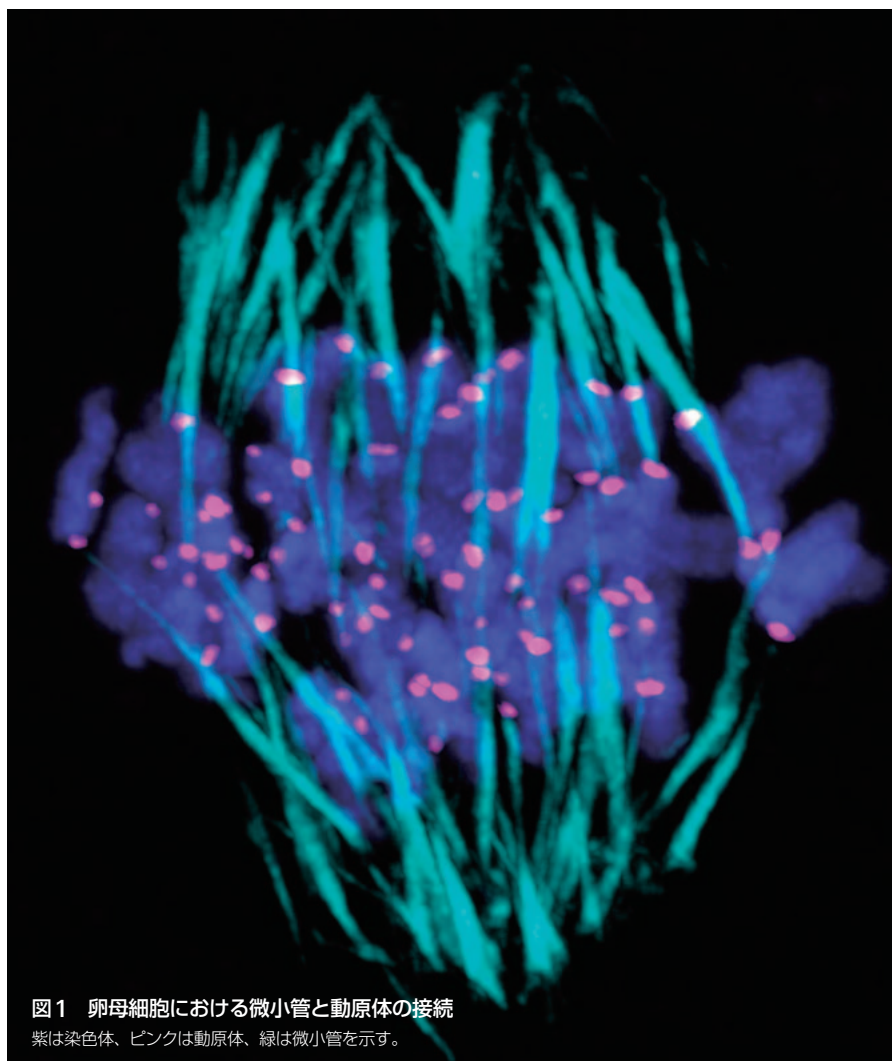
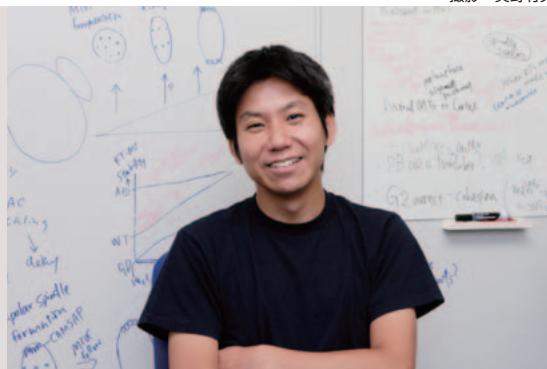


図1 卵母細胞における微小管と動原体の接続  
紫は染色体、ピンクは動原体、緑は微小管を示す。

### 北島智也 (きたじま・ともや)

多細胞システム形成研究センター  
染色体分配研究チーム  
チームリーダー

1978年、福井県生まれ。博士(理学)。東京大学大学院理学系研究科生物化学専攻修了。東京大学分子細胞生物学研究所助手を経て、2007年よりドイツ・欧州分子生物学研究所博士研究員。2012年より現職。



す。分配の誤りが起きると、卵子の染色体の数が正常より多くなったり少なくなったりしてしまいます」

卵子の染色体数に異常があると、受精しても流産してしまう。まれに出産まで至ることもあるが、ダウン症などの先天性疾患となる。卵子の染色体数異常の割合は、10～30%と非常に高いと推定されている。その頻度は母体の年齢とともに上昇することが知られ、妊娠を望む人たちにとって大きな問題になっている。「染色体分配のメカニズムを明らかにすることは、加齢に伴って卵子の染色体数異常が増える原因の解明にもつながります。原因が分かれば、異常を抑制できるようになるかもしれません。そういう展望を持って研究を進めています」

### ■ 染色体1本1本の挙動を見る

卵母細胞の染色体分配についての研究が進んでいなかったのには、いくつかの理由がある。その一つが大きさの問題だ。「マウスやヒトの卵母細胞は約0.1mmで、普通の細胞の3倍ほどあり、肉眼でも見えます。しかし染色体の大きさは、

ほかの細胞と変わりません。大きな細胞の中にある小さい染色体を観察するのが、とても難しいのです」と北島TL。

生きた細胞や組織を観察するための代表的な手法が、共焦点顕微鏡を用いたライブイメージングである。共焦点顕微鏡を用いると、試料の任意の深さの2次元画像を撮影できる。異なる深さの2次元画像を複数組み合わせることで、3次元画像を構築できる。さらにビデオを使えば、4次元画像になる。しかし、大きな卵母細胞を観察するには、広範囲に光を当てなければいけない。また減数第一分裂は、開始から終了まで8時間以上かかる。長時間にわたって広範囲に光を当て続けると細胞が損傷してしまうため、染色体分配の様子をライブイメージングで観察することは困難だったのだ。

その問題を解決する技術を、北島TLはドイツで身に付けてきた。北島TLは2007年から5年間、ドイツにある欧州分子生物学研究所のJan Ellenberg博士の研究室に博士研究員として在籍。「その研究室では、生きた細胞や組織の見たい領域を自動で検出し、その領域だけを

素早く観察し、しかも自動で追跡できる、画期的なライブイメージング技術を開発していました。光は限られた領域に短時間しか当たらないので、損傷を大幅に抑えることができます。私は、そのライブイメージング技術を使って卵母細胞を観察し、減数第一分裂における染色体の挙動を高解像度の4次元画像で捉えることに、世界で初めて成功しました」

そして染色体が分配される前に卵母細胞の中心付近にベルトのように並ぶことを発見。「染色体1本1本の挙動を高解像度の4次元画像で捉えたからこそ、染色体のベルトの存在を明らかにできたのです。私たちの発見と同時に、体細胞分裂でも染色体のベルトが報告されました。染色体がベルトのように並ぶことは正しい染色体分配に重要なステップなのではないかと考え、解析を続けています」

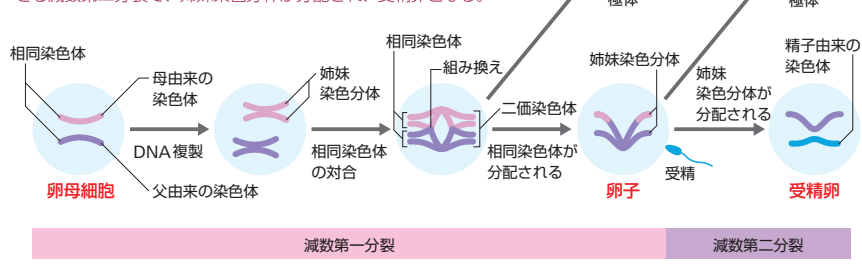
### ■ 微小管と動原体の接続は不安定

ドイツから帰国した北島TLは、2012年にCDB(当時は発生・再生科学総合研究センター)で染色体分配研究チームを立ち上げ、ライブイメージング技術を駆使して卵母細胞の減数第一分裂における染色体分配の謎に挑んでいる。最近の成果を二つ紹介しよう。

一つ目の成果は、微小管と染色体の接続についてだ。細胞分裂によって染色体が正しく分配されるには、分裂の前に染色体が細胞の両極に分かれている必要がある。染色体の移動を担うのが、「微小管」だ。微小管は両極から伸び、染色体上の「動原体」という部位に接続する。そして分配すべき染色体を反対

図2 卵母細胞の減数分裂

卵母細胞は、2段階の減数分裂を行う。減数第一分裂で、父由来と母由来の相同染色体が分配され、卵子となる。受精とともに起きる減数第二分裂で、姉妹染色体が分配され、受精卵となる。



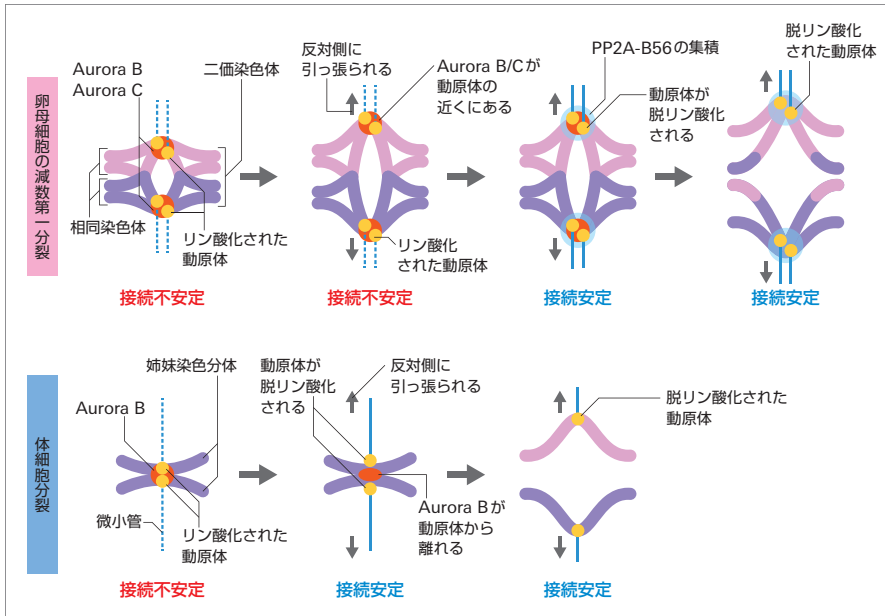


図3 卵母細胞における微小管と動原体の接続の安定化

体細胞分裂では、動原体に微小管が正しく接続し引っ張られると、Aurora Bが動原体から離れてリン酸化レベルが減少し、接続が安定する。卵母細胞の減数第一分裂では、動原体に微小管が正しく接続して引っ張られても、Aurora BとAurora Cは動原体の近傍にあって動原体は高いリン酸化レベルが保たれ、接続は安定しない。このとき、誤った接続が起きやすくなる。その後、徐々にPP2A-B56が動原体を脱リン酸化し、接続は安定する。

方向へ引っ張って分離させ、両極に移動させるのだ。染色体の正しい分配には、微小管と動原体が正しく接続し、その接続が安定する必要がある。

体細胞分裂では、姉妹染色分体が分配される。このとき、姉妹染色分体それぞれの動原体に、微小管が正しく接続して反対方向に引っ張ると、接続はすぐ安定する（図3下）。そのメカニズムは、すでに明らかになっている。姉妹染色分体の動原体の間には、Aurora Bというリン酸化酵素がある。動原体がリン酸化されていると、微小管との接続は不安定になる。二つの動原体が微小管によって反対方向に引っ張られるとAurora Bが離れ、動原体が脱リン酸化して、微小管との接続が安定化するのだ。

一方、卵母細胞の減数第一分裂では、二価染色体を構成する4本の姉妹染色分体の動原体に微小管がそれぞれ接続する（図3上）。「減数第一分裂において微小管と動原体の接続が、いつ、どの

ように安定化するか不明だったため、ライブイメージングで調べてみることにしました。実は、安定化のメカニズムは体細胞分裂と同様だろうと考えていたのですが、そう単純ではありませんでした」

卵母細胞では、微小管が動原体に正しく接続して引っ張っても、すぐには接続が安定しなかったのだ。卵母細胞ではAurora Bに加えてAurora Cも動原体をリン酸化することが知られている。そこでAurora B/Cの分布を調べた。すると、動原体が微小管に引っ張られてもAurora B/Cは動原体の近くに残ることが分かった。だから、微小管と動原体の接続が不安定なままなのだ。さらに数時間にわたって調べたところ、その接続は徐々に安定していくことが分かった。PP2A-B56という脱リン酸化酵素が徐々に動原体の周りに集まり、動原体を脱リン酸化することも明らかになった。

北島TLらは、動原体が微小管によって引っ張られるのと同時にAurora B/C

の活性を阻害してみた。すると、微小管と動原体の正しい接続が安定した。誤った接続も起きにくくなった。卵母細胞の減数第一分裂では、Aurora B/Cの残存によって微小管と動原体の接続が不安定になりやすく、それが誤った接続を起こしやすくしていると考えられる。

「卵母細胞の減数第一分裂における染色体分配は、最も間違っではいけないことです。それなのに、なぜこれほど誤りが起きるのか。とても不思議です」と北島TL。「父由来と母由来の染色体を分配するという非常に特殊なことをするために、卵母細胞は無理をしているように、私には思えるのです。そのために、体細胞では備えている分配の誤りを防ぐ仕組みを捨てざるを得なかったのかもしれない。時間をかけて安定化する仕組みは、苦心の作のようにも思えます。染色体分配のメカニズムを理解するには、さらなる研究が必要です」

■ 染色体分配の誤りの原因を特定

二つ目の成果は、加齢による卵子の染色体数異常の原因についてだ。生後16ヶ月の老化したマウスの卵母細胞275個について減数第一分裂をライブイメー

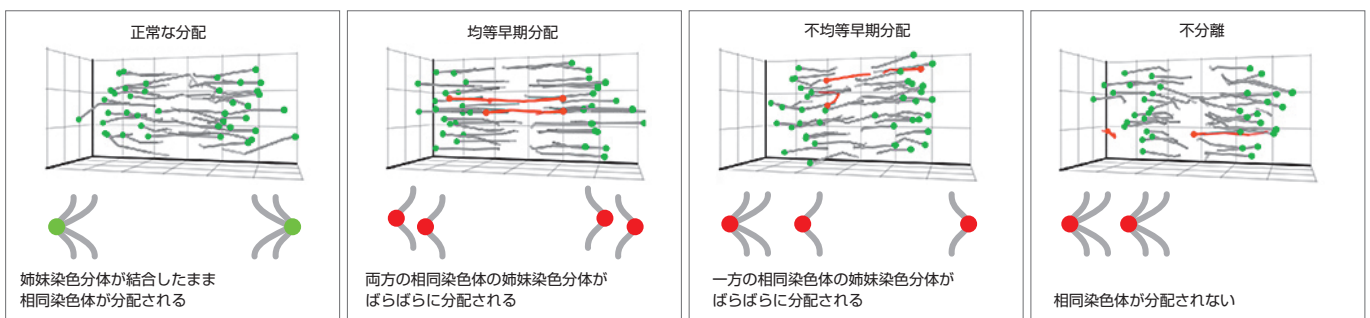


図4 染色体分配の誤りのパターン 正常な分配を示す追跡結果を緑と灰色で、異常な分配を示す追跡結果を赤色で示す。



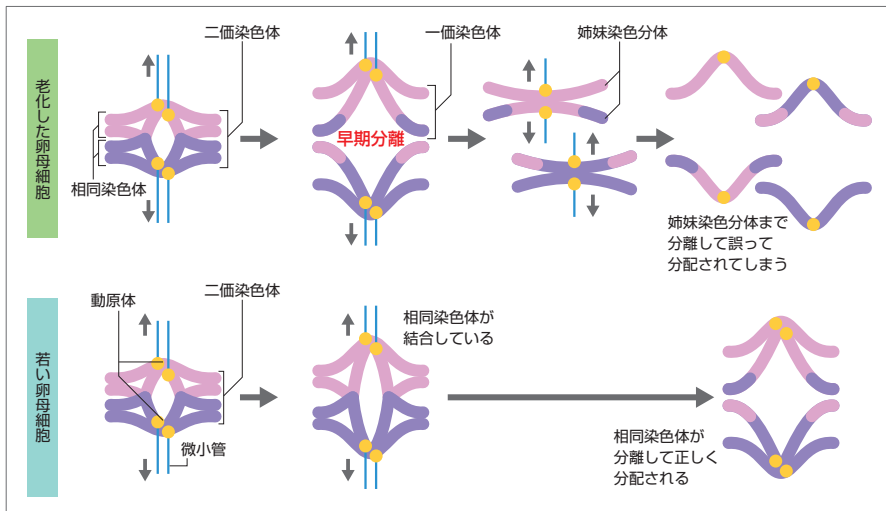


図5 老化した卵母細胞の減数第一分裂において染色体分配の誤りが起こる過程

若い卵母細胞では、相同染色体が結合した二価染色体が染色体分配の直前まで維持されることで、正常な染色体分配が達成される。老化した卵母細胞では、二価染色体が反対方向に引っ張られると、正常より早い時期に分離して一価染色体になってしまう。一価染色体が微小管によって引っ張られて姉妹染色分体が分離すると、誤った染色体分配が起きてしまう。

ジグで観察し、染色体と動原体の動きを追跡した(図1)。すると20個で染色体数異常が起きていた。生後2ヶ月の若いマウスの卵母細胞167個も観察したが、異常は見られなかった。老化したマウスでの染色体数異常は加齢に伴ったものだと考えられる。染色体数異常には、均等早期分配、不均等早期分配、不分離という3パターンがあった(図4)。染色体数異常の45%と一番多かったのは均等早期分配で、相同染色体が分配されるとき、両方の姉妹染色分体が分離してばらばらに分配されてしまうものだ。

「均等早期分配が一番多いという結果を見て、私はとてもすっきりしたんです」と北島TL。ヒトの遺伝学的な解析からは、染色体数異常の多くは減数第一分裂のときの染色体分配の誤りに起因することが分かっていた。しかし染色体数の解析では減数第一分裂後より第二分裂後の方が異常の頻度が多く、二つの解析が矛盾していることが問題になっていた。「均等早期分配では第一分裂後の染色体数は正常で、第二分裂後に異常となることから、従来の矛盾を説明できます。また、染色体分配の誤りはマウスとヒトの卵母細胞で共通しており、マウスで明らかになったことをヒトに適用して考えられることを確認できました」

北島TLは、染色体分配の誤りの原因を明らかにするため、染色体の挙動をよ

り詳しく解析した。正常な染色体分配のためには、分配される直前まで相同染色体が結合した二価染色体の状態であればならない(図5下)。ところが、染色体分配の誤りを起こした卵母細胞の約80%で、まだ二価染色体であるべき時期に相同染色体が分離して一価染色体になってしまうことが分かった(図5上)。一価染色体はその後、微小管によって引っ張られて姉妹染色分体が分離し、誤って分配されてしまう。本来、姉妹染色分体が分配されるのは減数第二分裂だ。

北島TLらは、不妊治療を行っている患者さんの同意を得た上で、治療に使わずに破棄される前の卵母細胞を用いた研究も行った。減数第一分裂を観察したところ、比較的年齢が高い患者さんの卵母細胞で一価染色体が見られた。一価染色体が姉妹染色分体に分離する直前の、微小管によって反対方向に引っ張られている様子も観察された。

一連の研究から、加齢に伴う染色体数異常の主な原因は、二価染色体が早い時期に一価染色体に分離してしまうことであると分かった。では、なぜ二価染色体が早期に分離してしまうのだろうか。「染色体同士がコヒーシという接着因子によってつながれることで、二価染色体は維持されています。二価染色体が早い時期に一価染色体に分離してしまうのは、コヒーシンの減少が原因だ

関連情報

- 2015年7月1日プレスリリース  
加齢による卵子の染色体数異常の原因を特定
- 2015年5月29日プレスリリース  
卵母細胞の分裂では微小管と染色体の接続が不安定

と考えられています。染色体同士の接着が弱くなり、微小管が反対方向に引っ張る力に耐え切れず、すぐに離れてしまうのです。今後の研究によって、なぜ加齢によってコヒーシンが減少するかが分かれば、二価染色体の早期分離を抑制し、染色体数異常を起こさないようにすることも可能になると期待されます」

■ 卵母細胞から卵子、受精卵へ

「卵母細胞は、発生生物学者や繁殖生物学者によって研究されてきました。ライブイメージング技術の発達によって、ようやく私たち細胞生物学者も手が出せるようになりました。これから急速に卵母細胞の研究が進むでしょう」。そう語る北島TLは、ライブイメージングを用いた卵母細胞研究の先駆者であり、追われる立場だ。「卵母細胞のライブイメージング技術では、どこにも負けません」と胸を張る。「私がドイツにいたときは、一度に3個の卵母細胞しか観察できませんでした。現在私たちの研究チームでは、ソフトウェアや装置を改良することで、一度に33個の観察が可能です」

北島TLは、「卵母細胞の減数第二分裂における染色体分配のメカニズムは、第一分裂とは違います。受精卵の卵割もまた違います。卵子、受精卵にまで対象を広げていきたいですね。それらが加齢によってどう変わっていくかも明らかにしたい」と今後を展望する。「受精卵は卵母細胞より損傷に弱いといわれています。イメージング技術を工夫しながら挑戦していきます」

(取材・執筆：鈴木志乃/フォトクリエイト)

がんの診断ができる優れた方法としてPETが注目されている。

しかし、現在主に使われているPET診断薬FDGは、すべてのがんの診断ができるというのではなく、がん組織と炎症部位の判別や脳腫瘍の診断が難しいといった欠点がある。

そこで、非天然型アミノ酸の合成技術を有する長瀬産業(株)と、PETイメージング技術を有する理研がタッグを組み、FDGの欠点を解決できる新規PET診断薬の開発を進めている。現在は、ヒトを対象とした臨床研究を行っているところだ。「産業界との融合的連携研究制度」により設置された新規PET診断薬研究チームの児玉和也チームリーダーと野崎 聡 副チームリーダーに、PET診断薬開発への取り組みを聞いた。

## 新規PET診断薬、臨床研究へ

### ■ 化学品専門商社がPET診断薬開発に挑む

——新規PET診断薬研究チームの目的は。

**児玉：**名前の通り、新しいPET診断薬の開発を目指しています。PETとはPositron Emission Tomography（陽電子放射断層画像撮影法）の略です。放射性核種を付けた化合物を生体に投与し、放射性核種が放出する陽電子が周囲の電子と衝突して放射されるガンマ線を捉えることで、断層画像を撮影します。ガンマ線の強さをカラーで表現したPET画像からは、化合物がどこにどれだけ集積しているかが視覚的に分かります。がんの診断ができる優れた方法として注目されています。

——PETでは、どのようにがんを診断するのでしょうか。

**児玉：**現在、がんの診断では、グルコースに放射性核種であるフッ素18 (<sup>18</sup>F) を付けた[<sup>18</sup>F]FDG（フルオロデオキシグルコース。以下FDG）という化合物が用いられています。がん細胞は、エネルギー源としてグルコースをたくさん取り込む性質があるため、FDGも同じようにたくさん取り込みます。そのためFDGの集積から、がんを発見できるのです。しかし、FDGには欠点があります。炎症部位の細胞もグルコースをたくさん取り込むため、FDGが集積し、がんと同様に区別できないのです。また、脳

もたくさんのグルコースを取り込むため、脳腫瘍の診断には不向きです。私たちは、FDGでは難しい炎症との判別や脳腫瘍の診断を可能にするPET診断薬の開発を目指しています。

——新規PET診断薬研究チームは、「産業界との融合的連携研究制度」に採択され、2012年4月に発足しました。

**児玉：**私が所属する長瀬産業(株)と理研の融合チームです。私がチームリーダー（TL）、理研分子イメージング科学研究センター（CMIS）のウィリアム・ユーワン・ヒューム（William Ewan Hume）さんを副TLとしてスタートしました。2015年4月からは理研ライフサイエンス技術基盤研究センター（CLST）の野崎 聡さんが副TLです。

——長瀬産業は、どのような事業を行っている会社ですか。

**児玉：**化学品の専門商社です。商品を仕入れて販売するというのが商社ですが、長瀬産業は少し特殊で、研究開発機能（ナガセR&Dセンター）を持っています。有用な機能を持つ非天然型アミノ酸の合成、放線菌を用いたタンパク質の大量発現など、特に生命科学分野の研究開発に力を入れています。

——研究チーム発足の経緯を教えてください。

**児玉：**2010年にCMISの橋爪良信さん（現 理研産業連携本部 創薬・医療技術基盤プログラム マネージャー）から、「丸岡触媒<sup>®</sup>を使ってPET診断薬になるアミノ酸をつくれないうるか」と相談されたのが始まりです。丸岡触媒<sup>®</sup>は、さまざまな構造の非天然型アミノ酸を効率よく合成できる触媒として知られています。その特許の実施権を長瀬産業が持っていることから、私たちに声が掛かったのです。長瀬産業も新しいニーズを常に探していたので、共同研究を始めました。そして開発手法にめどが立ったことから、本格的な開発を進めるために「産業界との融合的連携研究制度」に応募したのです。

### ■ 候補アミノ酸合成、細胞実験、動物実験を繰り返す

——なぜアミノ酸に着目したのでしょうか。

**児玉：**細胞の表面にはトランスポーターと呼ばれる通路があり、

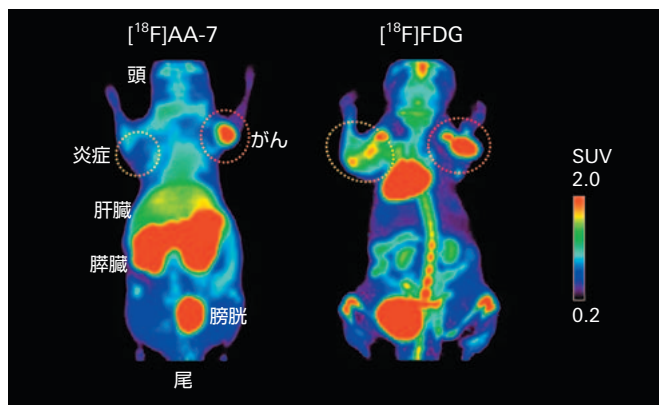


図1 AA-7とFDGを用いたマウスのPET画像  
AA-7は、がん組織に集積し、炎症部位には集積していない。脾臓に高い集積が見られる。FDGは、がん組織だけでなく、炎症部位にも集積している。

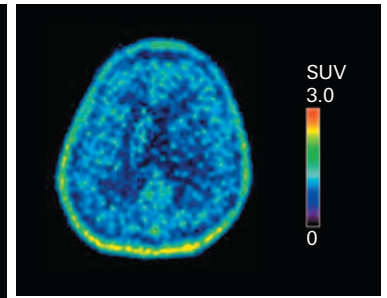
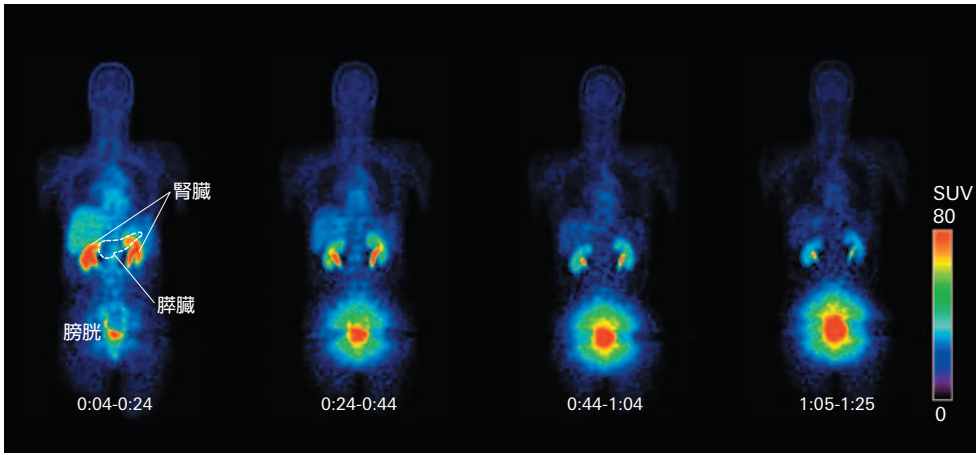


図2 AA-7を用いた健常人のPET画像  
投与直後から1時間25分後までの変化を示している(左)。動物実験(図1)で高い集積が見られた脾臓には集積していない。腎臓に集積が見られるが、時間の経過につれて速やかに膀胱へ排出されている。脳には特異的な集積は見られない(右)。

アミノ酸はそこを通過して細胞内に取り込まれます。がん細胞にはLAT1というトランスポーターが高頻度で発現していることが分かってきました。正常細胞には、LAT1はほとんど発現していません。LAT1から特異的に取り込まれるアミノ酸を開発すれば、脳や炎症部位には集積せず、がん細胞だけに集積するPET診断薬になる可能性があります。今、アミノ酸PET診断薬の開発競争が世界中で繰り広げられています。

——研究チームでは、どのように開発を進めてきたのですか。

**兎玉:** まず、PET診断薬として有用なアミノ酸を見つける必要があります。そのために、丸岡触媒<sup>®</sup>を使ってFの安定同位体を付けたさまざまな構造の非天然型アミノ酸を合成します。そしてLAT1を発現させた細胞を使い、それら候補化合物が細胞内にどれくらい取り込まれるかを調べ、より多く取り込まれた化合物を選別します。次に、選別した化合物のF部分を放射性核種である<sup>18</sup>Fに置き換えたものを合成してマウスに投与し、PETで集積の様子を調べます。腫瘍だけに集積し、炎症や脳への集積が少ない化合物を絞り込むのです。さらに、LAT1からの取り込みをもっと増やすためには構造をどう改変すればよいかを検討します。そして再び、新しい構造のアミノ酸を合成します。このように、アミノ酸合成、細胞実験、動物実験のサイクルを繰り返すことで、化合物を絞り込んでいきました。アミノ酸合成と細胞実験は長瀬産業、アミノ酸に<sup>18</sup>Fを付けるHOT合成と動物実験は理研が担当しています。

——特に苦労した点は。

**兎玉:** 長瀬産業にはPET診断薬開発の経験がありませんでした。私を含め研究チームの合成担当者の専門は有機合成化学なので、HOT合成の条件設定が難しかったですね。理由の一つは質量スケールの違いです。有機合成ではgスケールで実験を行い、合成方法が確立できるとスケールアップし、市販品などはkgスケールで合成される場合が多いです。PET診断薬は $\mu\text{g}$  (100万分の1g) のオーダーなので、反応の状況がまったく違います。もう一つは時間。放射性核種は、ほかの核種に崩壊していきます。半分の量になるまでの時間を半減期といい、<sup>18</sup>Fは約110分です。HOT合成から精製、取り出し、生体への投

与までを2時間以内で終わらせるために、非常に短い時間で目的の反応を進めないといけません。有機合成は数日かかるのが普通です。幸い研究チームにはHOT合成の専門家であるヒュームさんもいましたので、反応の初期条件を長瀬産業で組み、理研で実際のHOT合成を行い、お互い協議していくことでうまく進めることができました。

——野崎 副TLが担当した動物実験で大変だった点は。

**野崎:** 細胞実験で、ほかと比べて取り込まれる量が桁違いに多い候補化合物がありました。動物実験でも桁違いに良いデータが出るだろう、と期待して実験をしました。ところが、まったく駄目でした。実は、体内ですぐに分解されて尿として排出されてしまうなど、細胞実験どおりにならないこともよくあります。アミノ酸合成に戻って、やり直します。

## ■ 脳腫瘍の患者さんに対する臨床研究を実施

——有望な化合物は見つかったのでしょうか。

**兎玉:** 約100種類の候補化合物を合成し、細胞実験で選別した10種類について動物実験を行いました。そして最終的に絞り込んだのが、<sup>[18F]</sup>AA-7という化合物です(以下AA-7)。

**野崎:** 右肩にがん細胞を皮下移植し、左肩に炎症を起こしたマウスにFDGを投与すると、がん組織に集積しますが、炎症部位や脳にも集積します(図1右)。一方、AA-7は、がん組織に強く集積し、炎症部位や脳には集積していません(図1左)。ただしAA-7は脾臓にも集積しています。腫瘍のみに集積して、ほかの臓器にはまったく集積しないのが理想ですが、特定の臓器に集積してしまうのはよくあることです。AA-7ならば、少なくとも炎症部位と脳にも集積してしまうというFDGの問題は解決できそうです。そこで私たちは、AA-7を用いてヒトを対象とした臨床研究を行うことにしました。

**兎玉:** 具体的には、AA-7の毒性試験を行い、大阪市立大学の協力のもと、倫理委員会での承認を受け、まず健常人ボランティアの方々を対象に臨床研究を実施しました。

——臨床研究では、どのような結果が出ているのでしょうか。

**野崎:** 健常人ボランティアにAA-7を投与したところ、動物実

理研産業連携本部イノベーション推進センター 新規PET診断薬研究チームの児玉和也チームリーダー（左、長瀬産業㈱）と野崎 聡 副チームリーダー（理研ライフサイエンス技術基盤研究センター イメージング応用研究グループ 健康・病態科学研究チーム 研究員）。



験で高い集積が見られた膵臓には集積しませんでした（図2左）。細胞実験と動物実験が違うように、マウスとヒトでも異なることはよくあります。膵臓に高集積してしまうと膵臓がんの診断には使えないと考えていたため、むしろ望ましい違いでした。また、脳には特徴的な集積はありませんでした（図2右）。

次に、膠芽腫（グリオブラストーマ）という5年生存率が10%以下の非常に悪性度の高い脳腫瘍の患者さんを対象とした臨床研究を行いました。AA-7を投与すると、正常部分には集積がほとんどなく、腫瘍部分のみに集積しました（図3中）。FDGは、腫瘍以外にも集積しています（図3右）。膠芽腫は、正常な部位との境が非常に分かりにくいので、手術で切除しても再発してしまうことが多いそうです。臨床研究にご協力いただいた脳外科の医師からは、AA-7を用いたPET画像では腫瘍の位置や形がよく分かるので、手術で切除する領域を判別しやすいというコメントを頂きました。

— 今後はどのように研究を進めていく計画ですか。

**野崎**：まずは、悪性度の異なる脳腫瘍の患者さんにご協力いただき、悪性度とAA-7の集積度に関係があるかどうかを明らかにしたいと思います。それは診断の精度向上に役立ちます。

**児玉**：研究チームの期間は3年から5年に延長され、2016年度末までです。あと1年以上あるので、肝臓がんや膵臓がんを対象とした臨床研究も進めていきたいと考えています。

## ■ 治療効果の評価にも期待

— アミノ酸PET診断薬の開発について、世界の状況は。

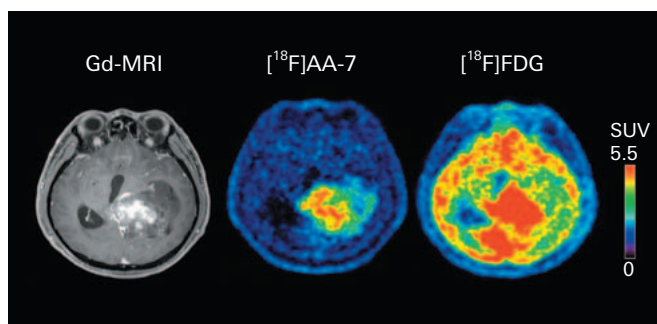


図3 AA-7とFDGを用いた脳腫瘍の患者さんのPET画像  
MRI画像で白っぽい部分が腫瘍である。FDGは脳全体に集積しているため、腫瘍部分を判別しにくい。AA-7は腫瘍部分のみに集積している。

**野崎**：米国でFACBCという化合物が臨床研究に進んでいて、前立腺がんの診断に有効だといわれています。製薬企業からは詳細な情報が出てこないのが、各国での開発状況をきちんと把握することは簡単ではありません。

**児玉**：私たちがAA-7で新規PET診断薬の開発競争に名乗りを上げたいと考えています。

— 研究の着手から臨床研究までの期間が非常に短いですね。

**児玉**：学会で発表すると、皆さん驚かれます。「産業界との融合的連携研究制度」を利用して長瀬産業と理研の融合チームをつくることが最大の要因だと思います。企業研究者が理研に籍を置いて研究できること、理研の最先端の設備を利用できることなどによって、研究の進み方が格段に速くなりました。

**野崎**：この短期間で臨床研究まで進んだことには、私も驚いています。丸岡触媒®でさまざまな構造のアミノ酸を合成し、その中から効率よく絞り込むことができたことが大きいですね。

— 臨床研究の先の展開も考えていますか。

**児玉**：長瀬産業としてのゴールは、新規PET診断薬として市場に出すことです。そのためには、現在の臨床研究の後に治験（臨床試験）を行う必要があります。長瀬産業には治験のノウハウがないので、新しいパートナー探しも今後の課題です。

**野崎**：がんの治療では、抗がん剤の投与前後にCTやMRIで腫瘍の大きさを調べ、治療方針を立てます。しかし、腫瘍が小さくなったことをCTやMRIで確認できるまでには時間がかかります。一方で、LAT1の発現など、がん細胞の生化学的な変化は抗がん剤の投与後すぐに現れるので、AA-7を用いたPET画像で効果を評価することが可能です。また、放射線治療の直後には、がん組織の周りに炎症が起こるため、FDGを用いたPET画像では治療効果を評価できません。AA-7は炎症部位には集積しないため、放射線治療の直後に効果を評価できる可能性があります。いち早くより良い治療方針を立てることができるのは、患者さんにとって大きなメリットです。理研で関与できるのは臨床研究までですが、長瀬産業にはぜひPET診断薬としてAA-7を社会に出していただきたいですね。

（取材・構成：鈴木志乃／フotonクリエイト）

## 新監事に松尾康博氏

2015年10月1日、松尾康博氏が監事に就任しました。当研究所の発展に尽力された伊藤健二氏は2015年9月30日をもって退任しました。



**松尾康博** (まつお・やすひろ)

1950年、佐賀県生まれ。1974年3月、九州大学工学部金属加工科卒業。1974年4月、株式会社小松製作所入社。1980年、コネチカット大学修士号取得。以降、小松製作所商品企画室プロダクトマネージャー、コマツアジアパシフィックマーケティング部長、開発本部業務部長、執行役員品質保証本部長などを歴任。2013年7月より同社顧問。

## 統合生命医科学研究センター長に山本 雅氏

2015年10月1日、山本 雅氏が統合生命医科学研究センター長に就任しました。



**山本 雅** (やまもと・ただし)

1947年、福井県生まれ。大阪大学理学部卒業。理学博士。米国NIH癌研究所研究員、東京大学医科学研究研究所助手、同助教授、同教授を経て、2003年4月より同研究所長。2007年4月より同癌・細胞増殖部門長。この間、東京大学評議員、日本学術会議会員を歴任。2012年4月より沖縄科学技術大学院大学(OIST)教授。

## 理化学研究所計算科学研究機構 2015年度「スパコンを知る集い」開催のお知らせ

スーパーコンピュータ(スパコン)って何だろう? 私たちの暮らしとどうつながっているのかな? 理研計算科学研究機構では、2009年より一般の方々にスパコンを身近に感じ、知っていただく講演会「スパコンを知る集い」を全国各地で開催しております。

「スパコンを知る集い」では、世界トップレベルのスパコン「京」の製作過程を映像にしたメイキング動画の上映、皆さんのスパコンに関する疑問・質問に「京」の開発に携わった研究者が直接お答えする質問コーナー、そして第一線で活躍する研究者2名が実際にスパコンを使って行っている研究やその成果、さらには、「京」の後継機であるポスト「京」を使った研究の将来や可能性についてお話し致します。

2015年度は、富山県富山市(12月19日)、香川県高松市(2月11日)、宮城県仙台市(3月19日)で開催します。会場の外には実物のシステムボードや、「京」の筐体の大きさを実感していただけるスタンド、「京」の成果やポスト「京」の開発についてご紹介するパネルなど、展示コーナーを設けております。さらに講演会終了後は、直接研究者とお話する機会もあります。ぜひ、会場に足を運んでいただき、スパコンが開く未来を実感していただきたいと思っております。

ご家族、ご友人などお誘い合わせの上、お気軽にご参加ください。皆さまのご来場を心よりお待ちしております。

### 開催地：富山県富山市

日程	2015年12月19日(土曜日)
時間	14:35~17:00(受け付け:13:55~)
会場	富山国際会議場・3Fメインホール 富山県富山市大手町1-2

※富山県教育フォーラムとのジョイント開催のためプログラム内容が一部異なります。

### 開催地：香川県高松市

日程	2016年2月11日(祝・木曜日)
時間	13:30~16:00(受け付け:13:00~)
会場	アルファあなぶきホール・多目的大会議室「玉藻」 香川県高松市玉藻町9-10

### 開催地：宮城県仙台市

日程	2016年3月19日(土曜日)
時間	13:30~16:00(受け付け:13:00~)
会場	仙台市情報・産業プラザ・多目的ホール 宮城県仙台市青葉区中央1-3-1

詳細は以下Webページをご覧ください。

<http://www.aics.riken.jp/shirutsudo>

問い合わせ 理化学研究所計算科学研究機構広報国際室

メール: shirutsudo@riken.jp

## 理研の宇宙線研究（後編）

後編では、前編に引き続き、理研の宇宙線研究として、宇宙線世界資料センター、乗鞍岳での観測、南極での観測などについて紹介します。

### 宇宙線世界資料センター

前編で紹介した「国際地球観測年」（1957～58年）は、敗戦国であった日本も国際協力に加わりました。理研は、宇宙線世界資料センターの日本での責任機関となり、世界各地の観測所から集めた資料を時間軸に沿って図化し、1年ごとのデータブックとして多くの研究機関に送りました。このデータブックは、国際会議などで多くの外国人研究者から、「日本のお家芸」などと高く評価されました。観測結果のデジタル資料の処理には、当時日本で最速、最大記憶容量を有する電子計算機（理研板橋分所で稼働）が大いに役立ちました。板橋分所で研究室を主



写真1 乗鞍観測所

乗鞍岳の室堂ヶ原に建設された観測所建屋の前で。山頂にコロナ観測所が見える。前列右から3人目が小玉正弘、後列左から2人目が宮崎友喜雄、3人目が亀田 董、5人目が三浦 功、後列右から2人目が豊田好男。



写真2 常陸宮正仁親王を乗鞍観測所に迎えて

宰していた湯川秀樹（理論物理研究室）が電子計算機を活用した新しい研究に強い関心を示し、予算の獲得などさまざまな困難を乗り越え導入したもので、宇宙線観測データの解析にも活躍しました。

宇宙線世界資料センターは1991年に理研から名古屋大学に移管されましたが、現在も世界資料センターのハブ機関として、その機能は継続され今日に至っています。

### 乗鞍岳での観測

戦後間もなく、朝永振一郎と武谷三男らは、日本の科学研究はまず宇宙線研究に力を注ぐべきである、と提言します。この提言を実りあるものとするため、理研（当時は物科学研究所）の宮崎友喜雄らを代表とする研究者は、「高地における宇宙線観測の重要性」を提案します。これを受け1950年、朝日新聞社の学術奨励金によって、乗鞍岳山頂に宇宙線観測用の実験室（通称：朝日小屋）が建てられました。当時、乗鞍岳には大阪市立大学の観測小屋もありましたが、観測が進むにつれこれら二つの観測小屋ではいかにも手狭となり、大規模な宇宙線観測所を望む声が強くなります。

文部省はそれに応え1953年、二つの観測小屋を一つにまとめ、東京大学の附置観測所として「宇宙線観測所」（通称：乗鞍観測所）を山頂近くの室堂ヶ原に建設します（写真1・写真2）。乗鞍観測所は、わが国初の全国共同利用研究施設でした。全国から多くの研究者がそれぞれの研究のために集まってきたので、若い研究者たちにとっては議論のできる刺激ある場となりました。

理研は、国際地球観測年の一環として国際的に標準化された中性子の観測装置を製作し、乗鞍観測所に設置しました。それまでの乗鞍観測所は冬季閉鎖されていましたが、理研の宇宙線連続観測を機に、1年を通じた観測が可能になり、この装置はその後長く観測に用いられました。当時の観測データ自記装置は、記録媒体を毎朝定時に取り換える必要があったため、休日も誰かが出勤しなければなりません。乗鞍観測所は、研究者1人が3週間前後泊まり込む当番制になっていました。理研の宇宙線研究室（板橋分所）でも、全員が観測要員としてローテーションを組んで任務に当たりました。3人いた女性所員の冬山当番も例外ではありませんでした。乗鞍観測所までの登り下りは時に孤独であり、夏場はともかく冬場の雪中登山では氷壁での滑落などの大けがもあり、危険と隣り合わせでした。

### 南極観測

日本の南極地域観測事業は、国際地球観測年を契機に開始

されました。1956年11月18日、日本南極地域観測隊第1次観測隊員53名を乗せた「宗谷」が東京の晴海埠頭から出航し、1957年1月29日、南極の地（オングル島）に記念すべき第一歩をのしりました（写真3）。その後の第57次南極観測まで、日本の南極観測は、オゾンホールや大量の隕石の発見、オーロラの発生メカニズム、氷床コアによる過去の気象変動の解明など、科学的成果を挙げました。

理研では、宇宙線研究室の小玉正弘が、第1次、第2次および第6次の観測隊員に選ばれました。第1次では、小玉隊員は南極観測船「宗谷」にネアー型宇宙線計（写真4）を搭載し、南・北半球の緯度効果の違いを測定、「中性子成分」と「中間子成分」による違いを明らかにするなど、誠に順調な船出でした。しかし第2次越冬隊では、南極のあまりにも過酷な自然条件のため、接岸も基地への輸送作戦も断念せざるを得ない状況となり、幻の第2次越冬隊となりました。

第4次（1959～61年）では、小玉隊員の後継者として越冬隊に加わった福島 紳隊員（元 宇宙線研究室研究員、写真5）が、樺太犬への給餌のため基地を離れますが、折からのブリザードの中で行方不明となり、南極観測史上最初の殉職者となります。福島隊員は7年後、基地から4kmほど離れた地点で、遭難当時のままの姿で発見されました。福島隊員が行方不明となった地点には、越冬隊関係者らにより「福島ケルン」が建立され、福島隊員の栄誉をたたえとともに、現在も南極観測隊員を見守る役割を担っています（写真6）。

南極観測船の運用は、第6次までは海上保安庁が担っていましたが、第7次から海上自衛隊に代わりました。当時の日本物理学会ではその運用変更に対抗する声が多くあり、研究とその運用という次元の異なる議論のはざままで科学研究を遂行できなかった研究者がいたことも、時代を象徴する一つの出来事でした。

理研が進めていた南極観測の宇宙線部門は、第14次隊（1972～74年）で幕を閉じ、南極での宇宙線研究は終了しました。その後は、宇宙放射線の研究や気球によるオーロラ観測研究へと移行し、最終的には、オーロラを南北両半球で同時観測する研究へと発展しました。

今回、2回にわたり理研の宇宙線研究を紹介しました。理研では現在、宇宙線研究を宇宙物理や宇宙放射線の分野に発展させ、国際宇宙ステーションの日本実験棟「きぼう」を利用した宇宙観測や実験の推進、X線を放射する高エネルギー天体の解明、南極の氷床コアを利用した過去の超新星爆発や太陽活動に伴う宇宙線の痕跡探索などの研究を進め、広く宇宙線分野の研究を継続実施しています。



写真3 南極（オングル島）に接岸した「宗谷」



写真4 ネアー型宇宙線計



写真5 在りし日の福島 紳 隊員



写真6 福島ケルン  
理研板橋分所で準備した銘板とドライフラワーで、福島ケルンを顕彰する小玉隊員。

#### 謝辞

前・後編にわたり専門家の立場からご校閲いただいたグローバル研究クラスタ 宇宙観測実験連携研究グループの牧島一夫グループディレクターと、後編において取材および写真提供にご協力いただいた小玉正弘氏にお礼申し上げます。

（執筆：富田 悟／記念史料室）

## Post-historic doodles on clay

粘土に描いた有史後のいたずら書き

Adam Phillips アダム・フィリップス

外務・研究調整部 研究協力課 課員

小学2～3年生のころの僕は、放課後、教室のすべての机の掃除ばかりしていた。4年生で紙というものを発見し、机に落書きするのをやめた。それから何年かかけて、自称“有史後アート”という落書きのテーマを開発した。有史以前の芸術がその時代の世界を象徴するのと同じように、想像上の生き物や場面は未来を象徴すると考えられるのだ。

5～6年生のころ、母は僕を近所の芸術センターの子ども放課後陶芸教室に入れた。僕らは目を盗んでは、壁に粘土を投げたり、粘土に靴跡をつけたり、磁器に赤粘土を混ぜたり、走ったり、釉薬をこぼしたり（絶対にわざとじゃない、絶対に……）、実際に何もつくらぬことに全力を尽くして、先生を恐怖におびえさせていた。教室の最終日はいつも同じで、作品づくりはせずに、（窯の中で！）クッキーをつくり、ゲームをして遊んだ。

なぜ僕がこんなにすべてを話すのかって？ さぼったり楽しい時間を過ごしたりしている間に（あるいはそうしていたからこそ）、陶芸を本当に楽しむことができるようになったんだ。先生は何かをつくることを強制せず、何ができるかを示してくれ、何がしたいかを決めさせてくれた。そしてお手本を忠実に模倣するのではなく、実験することを勧めた。僕は断続的にだけどその教室に通い続け、高校2年のころは夕方の成人クラスに加わっていた。大学院時代には陶芸を再開し、アパートの近くのより大きな芸術センターのクラスに入った。そこが、僕が初めて“有史後のいたずら書き”を粘土に描き始めた場所だ。

それから3年後、僕は東京のアパートから1分もかからないところに素敵な陶器スタジオを発見した。ほぼ毎土曜にここへ通い、その雰囲気を楽しんでいる。先生は素晴らしい陶芸家で、教えるのもうまく話も面白い。誰もが気さくだし、ほとんどの人が長年通い続けている生徒か弟子で、新しいものを試したり、知っていることをシェアし



たりするのを楽しんでいる。僕はいつも彼らから多くを学び、そして彼らは少なくとも僕の変ったアイデアと落書きが好きようだ。何人かは気持ち悪いと思っているようだが。言うまでもなく、スタイルと哲学はここ日本では異なる。そしてそれがクラスを面白くさせる。5年生のころに戻ったように、僕は同じことを感じる。重要なのは楽しむことなのだ。

僕は、それほど結果を気にかけることなく、プロセスを楽しむ。何かうまくいかなかった、思い出すんだ。これは粘土にすぎないってことを。乾かしている間に素晴らしい作品にひびが入ったら？ 深鉢のデザインが釉薬の層が薄過ぎて台無しになったら？ 皿の絵付けに年月をかけたのに、焼いてみたらゆがんだりたわんだりしていたら？ 粘土にすぎないのさ。一度つくれたものは、もう一度つくれる。実際、僕の限定的な成功は、考えようによっては天の恵みなのだろう。毎回成功していたら、日本の小さな僕のアパートでは収納場所がなく、皿と一緒に眠る羽目になるだろうから。

僕は技術を向上させていくつかの方向性にテーマを広げようとしているが、それは時間がかかるプロセスだ。ろくろを使って皿やほかの陶器をつくる技を磨かなくてはならない。同時に、陶器とグラフィック双方の日本のアイデア・スタイルを僕自身のスタイルに組み入れる方法を見つけた。僕は六角形（自分でも止められない執着）やカラス（お気に入りの動物の一つ）を忘れることができない。以前、伊万里で毎年行われるアマチュア陶芸コンテストに出展し小さな賞を二つ受賞した。いつかはまたそのような何かをしたいと思っている。

（英語で寄稿されたものを翻訳）

### 創立百周年記念事業寄附金へのご支援のお願い

創立百周年（2017年）の記念事業寄附金へのご支援をお願いします。

問合せ先 ● 理研 外部資金室 寄附金担当

Tel : 048-462-4955 Email : kifu-info@riken.jp

理研 寄附金  
Support RIKEN

理化学研究所 創立百周年  
RIKEN 100th Anniversary



http://www.riken.jp/