

理化学研究所 革新知能統合研究センター（理研 AIP） 数理科学チームにおける研究活動

慶應義塾大学理工学部数理科学科

坂内 健一

理化学研究所 革新知能統合研究センター（理研 AIP）において、特に私が関わっている数理科学チームのいままでの経緯と研究の様子についてご紹介する。理化学研究所は 1917 年に創立された、我が国唯一の自然科学の総合研究所である。物理学や生命科学を含む理学系や、計算機科学などを含む幅広い分野で、世界的にも長年、注目されてきた。初代の所長は、数学者の菊池大麓であったが、彼が在任 1 年目に急逝した後、純粋数学分野は、理研において大きな役割を果たしては来なかった。私自身については、脳神経科学者である妻が学位修了直後から長年、理研に研究員として勤めていたことから、以前より研究機関としての存在感は認識していたが、多くの数学者が研究機関としての理研について認識を始めたのは、ここ数年のことではないかと想像する。数学系分野の重要性が近年強く認識され始めたことから、創立百周年を目前とした 2016 年に、理研は数学系分野の導入に大きく舵をとった。その 2 つの柱のうち、最初の柱は以前から物理学者の初田哲男氏により立ち上げられていた iTHES というプログラムを大幅に拡充した数理創造プログラム（iTHEMS）の始動であり、もう 1 つが、我が国における人工知能・機械学習分野の新しい研究所として立ち上げられた、理化学研究所 革新知能統合研究センター（理研 AIP）である。

私自身、学位を取得後 20 年近く、純粋数学分野の数論幾何を専門として、研究を続けてきた。人工知能や機械学習分野について、興味はもっていたが、研究者としてその様な分野、より正直に言えば、数論幾何以外の分野で、研究の経験は全くと言って無かった。私より若い杉山将さんがセンター長に抜擢されたという日経かなにかの AIP 設立の記事を読んだ時に、とてもすごい人がいることを認識して、自分も人工知能とか研究していればこういう人と関係したのか、など、この人と一緒に仕事をしてみたい、と言う何とも不思議な衝動に駆られたことは強く印象にのこっている。しかしながらその当時、私が人工知能研究に関わることもあるなど、全く想像していなかった。幾日経ってから、新聞に載っていた杉山さん自ら「AIP に関わって欲しい」というメールを直接頂いた時には、心より驚いたものである。

相手を間違えてメールが送られた訳では無いことを確認した後、杉山さんに言われたことは、人工知能・機械学習分野は、統計学や最適化など、新しい数理科学的

技術を導入することに成功するたびに、大きく発展して来た。今後この分野において、革新的な新しいブレイクスルーを引き起こすためには、新しい数学の技術が必要である。競争の激しい分野でもあるので、すでに有望と思われている数学系分野は GAFa など巨大企業もかなり目をつけて投資しているので、期待されていることは、まだ誰にも全く目をつけられていない、応用について未開の分野を発掘することである。ブレイクスルーを目指して、中長期的にしっかりと腰を据えて研究する、数学者の集まりを作って欲しい、と。なるほど、と思った。私自身、数論幾何が人工知能・機械学習分野にどう応用されるか、まったく微塵も想像がつかなかった。そう言う意味で数論幾何は、杉山さんの言っている要件に該当する、とも思った。数学分野にとっても大きな可能性を感じて、AIP 内に純粋数学のチーム（研究室）を立ち上げるというこの話を受けることにした。私の AIP での冒険は、この時から始まった。

私の専門は数論幾何分野の、ポリログと呼ばれる数論幾何的対象にまつわるものである。なので私自身が良く理解していることを前面に出すと、AIP でのチーム名は「ポリログチーム」が一番しっくりと来る。でもそれではあまりにも狭すぎると言うことで、設立当初のチーム名は「数論幾何チーム」で調整し、それで話がついた。非常に優秀な研究者がたくさんいる分野であることから、私が数論幾何の看板を背負って名乗って良いものか、我ながら大きくでたなあ、と心の葛藤もあったが、確かに AIP のチーム名としては適切だと思い、ドキドキとしながら研究所設立を待った。理研内の承認手続きの直前に配られた資料で、チーム名が「数理学チーム」となっていたことには、本当に、本当に、おどろいた。いや、いくらなんでも大きく出すぎているだろう、と。機械学習全体が、数理学分野に入っているとも言えるし。異議を唱えたが時間もあまりなく、最終的には説得され、2016 年の秋に AIP と同時期に、AIP 数理学チームが発足した。当初はとまどったが、後々考えると、チーム名を数理学チームとしたことは、杉山さんによる、とても良い判断だったと感じている。

チーム名が「数理学」となった以上、腹を括って活動を始めた。まずは数学内の研究分野を限定せず、慶應数理の同僚を始めとして相談できる身近な数学者に声をかけていろいろと助言をいただいた。2017 年に入ってからはずぐに大規模の公募を出して、チームの研究員・特別研究員を募集した。走り始めてみて、私自身の今までの研究経験が、とても活かせることに気がついた。

数論における大問題であった Fermat 予想が解かれたのは、私がちょうど学部を卒業するころであった。解決はほぼ Wiles 1 名で行なわれたが、数論の素朴な問題を解くために、代数的整数論のみならず、楕円曲線論、保型形式、変形理論、表現

論，など幅広い数学技術の組み合わせとして解かれた．数学は1つのことを深掘りして行けば解答にたどり着く，という感覚に反しており，実際的な問題を解くために幅広い技術を融合する重要性に目覚めた．私自身がずっと興味をもっている代数多様体の Hasse-Weil L 関数の特殊値にまつわる Bloch-Beilinson 加藤予想も，到底1つの技術で解けるとは思えず，2009年度より科研費・若手研究(S)などの大型予算に応募して，複数の専門家で協力して問題にアプローチする研究組織的手法について考えて来ていた．今回は話題は数論幾何の予想ではなく人工知能・機械学習という，私にとって今まであまり馴染みのない分野であるが，異なる専門家を集めて，いかに活発に研究を進めるかという課題については，いままで私が散々考えて来たことであった．大切なことは，本質的に大事な，面白い課題に取り組むこと．また，研究者それぞれにあったやり方を理解して，お互いの強みを尊重して進めて行くこと，などと認識している．マネジメントで，人を「型」にはめることを重視する思想もある様であるが，研究においてこれは生産性を著しく下げる，破壊的なことであるというのが，個人的な実感である．研究以外の場面でも，同様に破壊的だと疑っている．

数理科学チームの公募には，おどろくほど多くの優秀な応募があり，選考は非常に難しかった．単純な数学の業績でなくて，チーム内でどう活躍できそうか．また，同質的な偏った集団にならない様に，様々な価値基準で多様な人材を選考することを心がけた．活発な研究チームを作り上げるためには，様々な異なる戦略を取る研究者がそれぞれの強みを前面に出してお互いに協力して進めて行くのがとても大切だと考え，それが実現できるチームを目指した．研究者の評価は個人評価になりがちであるが，本当はコミュニティに対する役割としての評価があった方が，コミュニティ全体の活性化につながる面があると思う．同時に複数名の採用をすることで，全体のバランスを考えてチーム編成を行えたことはとても運が良かったと感じている．結果として，2017年度に8名の常勤の研究員・特別研究員を雇用して，大学の常勤の研究者からなる客員研究員10名程度と，パートタイマーと呼ばれる身分で雇用した大学院生とあわせて，20名以上の規模のチームが発足した．現在でも，数論幾何，代数幾何，保形表現，位相幾何，微分幾何，表現論，偏微分方程式，力学系，作用素環論，確率論，最適化理論，統計学，素粒子論，量子多体系など，幅広い分野の専門家が在籍する多様なチームとなっている．

数学の話題でこれだけの分野の数学者が興味をもって集まるとは考え難い．機械学習という，世間でとても話題になっているテーマだからこそ，興味をもって集まっていただけのだと思う．始めてみると，セミナーがとても面白い．まずは機械学習の理論的研究は，本当に数学を使う．色々な概念や証明方法なども，大事になってくる．数学に近いと言われている物理などよりも，数学にとって身近になりう

る分野だと感じた。また、セミナーの内容に対して、多彩な分野の数学者の反応がとても面白い。それぞれの分野の持ち味を出しつつも、数学者として機械学習という共通の話題について議論する。今まで一緒に何かできると、全く想像すらできなかった分野の数学者と一緒に研究の話ができることは、なんともワクワクとする面白い体験である。

普段、本人の専門の話をしている時と違った側面を見ることも多々あり、今まで持ち合わせていると気がつかなかった、研究者としての強みや深みを垣間見る機会もあり、研究者の評価の難しさも改めて感じる機会にもなった。数学分野は研究の評価をきちんと客観的にしている、と認識されている様に思うが、とても狭い専門分野の中での、とても限られた側面からの評価となっている場合も多いと感じる様になり、数学者コミュニティとして研究者の評価について、より柔軟に考える姿勢が必要に感じた。人はそれぞれ持ち味をもっており、特にある側面を切り取って人を不十分と貶めたりすることは、生産的で意味ないことのように思う。

実際の機械学習の研究を始めるにあたって、どの数学的手法が有効か、全く想像つかないことから、機械学習の研究者から大事な課題について、話を皆で何回かじっくりと聞いて、それから貢献できそうな人がだんだんと有機的に参加して行く、という手法をとった。最近 CREST に採択された AIP の河原吉伸さんの作用素論的データ解析にまつわる研究でも、数理科学チームの石川勲さん（整数論）、池田正弘さん（偏微分方程式）、また、開始当時は学生パートタイマーであった橋本悠香さん（計算機科学）などが、最初の話し合いから徐々に参加して行って、いまではこの研究の数学的な要を担っている。この研究は、2018 年に NeurIPS という機械学習分野でのトップ会議に採択され、結果的に論文の筆頭著者であった石川さんは桜舞賞という理研の賞を受賞した。最近では、客員研究員の勝良健史さん、JRA の紅村冬太さん（作用素環論）なども加わって、さらなる発展の様子を見せている。この様な感じで、非常に面白くて有望な研究が、いくつか力強く立ち上がって来ている。

数学者は個人で研究することも多いが、複数の研究者からなっていたという説があるユークリッドの原論ができた過程や、ブルバキなど、新しい時代の要請があると、数学者が一堂に集まって、結集して新しい数学を生み出すという現象がある様に思う。機械学習は、この様な結集のきっかけを与える、とても面白いテーマなのではないかと感じている。今現在、面白い機械学習の研究がいくつか立ち上がって来ている状況であるが、将来的にはより深い、本質的に新しい数学体系を作り上げて行きたいという野望を抱いている。

AIP 内ではその後、大阪大学の太田慎一さんの数理解析チーム、京都大学の平岡裕章さんのトポロジカルデータ解析チームと、現在数学系チームが 3 チームとなった。2017 年春より AIP 数学系 3 チームで合同の合宿を開催しており、第 3 回目の今年も、3 月に開催する予定である。AIP に入った時に、数学者は私 1 名だったが、今年の合宿には AIP 内外から 50 名程度の研究者が参加する予定であり、機械学習分野と関わっている数学者のコミュニティが形成されて来ている。私自身も最近、客員研究員となっていただいている東大数理の佐々田槇子さんと共同研究を始めた。分野をまたいだ共同研究は、深みのある結果を生み出せることを実感している。この機械学習をきっかけとした、数学分野横断のコミュニティを土台とした今後の数学の発展を、とても楽しみにしている。