

## 岩崎悟氏の第 37 回井上研究奨励賞受賞に寄せて

大阪大学名誉教授

八木 厚志

岩崎悟氏がこの度、第 37 回（2020 年度）井上研究奨励賞を受賞されました。「おめでとうございました。」心よりお祝いを申し上げたいと思います。同氏が 2011 年 4 月大阪大学工学部応用自然科学科に入学して以来、指導教員として研究アドバイザーとして最近では共同研究者としての立場から、同氏の博士課程での研究成果を紹介するとともに研究奨励賞受賞のお祝いの言葉を述べさせていただきます。

岩崎悟君（以下、こう呼ばせてもらいます。）との出会いは、同君が応用自然科学科 2 年次に応用物理学科目に配属され私が担当した数学解析（複素関数論、微分方程式、フーリエ解析、ラプラス変換）の講義を通してでした。「その証明は、どうやってするのですか。」講義が終わるといつも教卓に寄って来てこう質問するのが彼でした。工学部向けの数学の講義ということで、定理の証明のテクニカルな説明は省略せざるを得ないのですが、またほとんどの学生はそれで満足するのですが岩崎君だけは少数の例外でした。3 年次の 2 学期からは独学で数学を学びたいとの相談を受けるようになり、彼の今後の進路の可能性をできるだけ広くするという意味で近代確率論や関数解析学の基盤となるルベーグ積分の修得を勧めました。同君はほぼ独学で私が推薦した Halmos 著、Measure Theory, を読破しました。4 年次になって希望通り私の研究室に配属されたときは Øksendal 著、Stochastic Differential Equations をゼミ本として確率微分方程式について勉学すると共に、私が担当した講義、大学院情報科学研究科情報数理学専攻の情報数理解析学（関数解析学と放物型発展方程式）を 1 年前倒しで受講し関数解析学的手法による拡散方程式の研究方法について勉学しました。2015 年 4 月岩崎君は、大阪大学大学院情報科学研究科情報数理学専攻博士課程に進学し引続き私の研究室（非線形数理解析）で研究を続けることになりました。一方で、同君は数理学を通して実世界の問題へ貢献するという事に強い関心をもっている人物でした。そのこともあって、大阪大学大学院博士課程の特徴的な横断型複合領域教育プログラム、ヒューマンウェアイノベーション博士課程プログラムの履修生に応募し、多数の応募者の中から選抜され履修が認められました。

個々人の専門研究領域を深掘すると同時に併せて周辺の関連研究領域についての知見も育むという教育理念の下に設定された今の大阪大学の様々な教育システムは、岩崎君のような高い向学心をもつ学生にとってとてもフィットしているように思い

ます。大学院重点化後、工学部は大学科制に移行し応用自然科学科は応用物理学科目（旧数理工学講座を含む）、精密科学科目、応用化学科目、応用生物学科目の4科目から構成されています。応用自然科学科では、1年次は全く共通のカリキュラムが提供され2年次に各学科目に分属されるもののそれ以降も他の学科目との共通講義や他学科目の講義履修を推奨するような工夫をしたカリキュラムが組み立てられています。2002年に創設された大学院情報科学研究科は、直下の学部組織をもたないいわゆる独立大学院で理学部、基礎工学部、工学部に所属する教員により構成されており大学院生も主にそれらの学部から進学してきます。全7専攻からなり、そのうち情報基礎数学専攻は理学部数学科の教員により、情報数理学専攻は工学部応用自然科学科応用物理学科目の数理系の教員により構成されています。とり分け特徴的なのはバイオ情報工学専攻で、工学部応用自然科学科応用生物学科目の教員を中心に構成されており、生物学と情報科学との融合を目指してつくられた専攻です。学部組織と大学院組織が一体ではないこと、学部のキャンパスが豊中地区（理学部、基礎工学部）と吹田地区（工学部）に分かれていることなど、大学院研究科として一体化することには教員と学生ともども少々物理的なエネルギーを必要としますが、それぞれの専攻の特徴を生かしつつも一体感をもって情報科学の発展に貢献するために、自専攻の研究をアピールした逆に他専攻でどのような研究が行われているかを知るための様々なイベントが行われています。さらに、大阪大学ヒューマンウェアイノベーション博士課程プログラムは、2012年に文科省の博士課程教育リーディングプログラム「複合領域型」に採択されスタートした博士課程5年一貫性の教育プログラムで、情報科学研究科、基礎工学研究科、生命機能研究科の学生を対象に、情報科学、生命科学、認知・脳科学の諸分野の融合によるパラダイムシフトを創出し将来の複合領域の開拓を牽引するリーダーの育成を目標としています。このプログラムの履修生として選抜された学生は、所属する専攻の正規のカリキュラムにより博士後期課程を修了することを大前提として、ヒューマンウェアイノベーション独自のカリキュラムであるメンター制度、研究室ローテーション、研究キャラバン、海外インターンシップ等々を履修または体験することが義務付けられています。履修生は、応募者の中から書類審査および面接により選抜されます。一方で、履修生には定額の奨学金が毎月支給されるほかプログラム修了が認定された者には各自の専攻修了の学位記とは別にヒューマンウェアイノベーション教育プログラム修了の学位記が授与されます。

岩崎君は情報数理学専攻に進学したと同時にヒューマンウェアイノベーションプログラム履修生選抜審査に合格しました。そこでヒューマンウェアイノベーションプログラムの特任准教授の中野賢先生と偶然ながらある意味で運命的な出会いをす

ることになりました。中野先生は、ナノスケール医療に関する先駆的な研究を行っておられます。生物集団がみせる自律的で結束した行動の規範をヒントに、多数のナノマシンを体内に注入しマシン自身に腫瘍部位を探索させかつ薬剤をピンポイントで患部に伝送するシステムの構築に向けた基礎研究を行っておられます。良く知られているように、走化性をもったバクテリア集団は個としては低次元の情報処理能力しか有しないにもかかわらず高次元の幾何学的コロニーパターンを形成します。その過程は、移流・反応・拡散の 3 つの効果を含む移流・反応・拡散方程式としてモデル化され具体的には Keller-Segel 方程式や Mimura-Tsujikawa 方程式などが提案されています。中野先生の研究グループでは、これらの数理モデルを元にナノマシン集団の体内での行動をイメージするモデルを同じく移流・反応・拡散方程式として提案されていました。一方で、私の研究室では長年に渡り Keller-Segel 方程式と Mimura-Tsujikawa 方程式について数理的な研究を行っていました。放物型発展方程式の理論を使って解析解および力学系を構成しさらにエネルギーの散逸性から有限次元アトラクタの存在を示しました。また、解析解の数値計算にも取組み ADI 法を基礎にこれらの方程式の数値解について実用的な計算アルゴリズムを考案していました。まったく自然な流れとして、岩崎君は「中野先生モデル」の数理学的研究を博士課程での研究課題として選ぶことになりました。

岩崎君の博士学位論文は、二つの内容から構成されています。一つは、今述べた体内でのナノマシンの行動をイメージした移流・反応・拡散方程式の研究です。放物型発展方程式理論が使える形ではありますが、実際に適用するにはいくつかの段階をクリアするの必要があり単純な事ではありません。まずは、方程式を考える領域として血管組織をイメージして単純に線分ではなくネットワーク状の図形を設定します。各辺上では 1 次元の移流・反応・拡散方程式ですが、すべての交差点において物理量の出入りについて保存則が成り立つような境界条件を設定する必要があります。よって、ネットワーク状図形においてこのような境界条件を課したラプラス作用素を考えその自己共役性や分数べきの定義域とかを調べる必要があります。岩崎君はこれらのことをほぼ自力で成し遂げ、解析解と力学系を構成しさらには有限次元アトラクタの存在を示しました。同君の研究は解析的なものにとどまらず数値的な研究にも及びました。いくつかの具体例において、マシン集団がすべての腫瘍部位を探索できるために方程式に含まれるパラメータに必要とされる条件を明らかにしました。すなわち、モデル方程式の定性的な結果のみならず定量的な結果をも明らかにしました。これは、岩崎君が群を抜いた数学の力を有していることの証左であります。同君の博士学位論文のもう一つ内容は、移流・反応・拡散方程式の解の定常解への収束に関わる研究です。一般に移流・反応・拡散方程式に  $C^2$

級の Lyapunov 関数が存在しそれが Łjasiewicz-Simon の勾配不等式をみたすならば、すべての有界な解は必ず方程式の定常解に収束することが証明されています。しかし、ナノマシンの行動モデル方程式においては、Lyapunov 関数が存在する場合でもそれは  $C^1$  級にしかならず既存の理論は適用できません。岩崎君は、Lyapunov 関数の  $C^2$  性がある形の単調性に置換えられることを示すとともにさらに Łjasiewicz-Simon の勾配不等式を使ってすべての解が定常解へ漸近収束することを証明しました。またこれらの研究成果に関連して、ある特別な形の準線形拡散方程式に対して、私との共同研究により多次元ラプラス・反応・拡散方程式に対して、同様に解の定常解への漸近収束を示しました。すべての解が定常解へ漸近収束することは、移流・反応・拡散方程式から生成される力学系のアトラクタが定常解の不安定多様体だけからなる単純な構造であることを意味します。

以上が、井上研究奨励賞の対象となった岩崎君の博士学位論文の概要です。私は 2016 年 3 月に大阪大学を定年退職し、岩崎君の指導教員は非線形数理講座の後任の鈴木秀幸教授に引継がれ、鈴木先生の指導の下に同君の学位論文は書き上げられました。私の方は、同年 4 月より大阪大学数理・データ科学教育研究センターの非常勤講師に任ぜられ微分方程式特論と応用解析学の講義をする任務について現在にいたっています。岩崎君は、博士課程修了時まで私の講義につきあってくれて、講義終了後は毎回、学術雑誌へ投稿する論文の準備や学位論文の進捗状況、我々の共同研究であるラプラス・反応・拡散方程式などについて話し議論する機会に恵まれ以前と変わらぬ楽しく充実した時間をもつことができました。同君の数学に関わる成果は主に単著で数学の専門雑誌に、ナノマシンによる薬剤伝送に関わる成果は中野先生と共著で情報科学の専門誌にそれぞれ発表されました。このように、博士課程の研究としては量的にも質的にも十分な成果を挙げることができました。それにより情報数理学専攻の博士後期課程およびヒューマンウェアイノベーション博士課程プログラムはともに 1 年短縮で修了することが認められ、日本学術振興会の特別研究員にも選ばれました。以上のように振りかえってみると、岩崎君はとても幸運に恵まれて現在にいたっているように感じられます。しかしこれらの幸運を引き寄せてものにすることができた本当の理由は、同君の高い向学心、果敢な行動力、そして何よりも群を抜いた数学の力の賜物だと確信しています。

最後に、同君が将来において、実世界からの新しい数理モデルの研究という複合領域を開拓し牽引するリーダーとして成長してくれることを切に願ってこの拙文を終りたいと思います。「岩崎君、この度は研究奨励賞の受賞、誠におめでとうございました。」