

河村彰星氏の平成 31 年度文部科学大臣表彰若手科学者賞に寄せて

東京大学情報理工学系研究科コンピュータ科学専攻
今井 浩

河村彰星氏が「計算量理論を離散から連続の世界へ拡張する研究」に関する業績で文部科学大臣表彰若手科学者賞を受賞された。心よりお祝い申し上げる。

河村氏の東大情報科学学生時代からの研究姿勢では、計算可能性理論など計算理論が整数や文字列といった有限個の記号で表せる離散的枠組みで主に対象としていたところに満足せず、それは数学全体の一部を対象としているに過ぎず、実数をはじめとする連続系諸問題へと計算の理論を拡張することが必然であるとする。その際に、計算にかかる時間や空間などの量を尺度として導入すると実数等の連続量を扱う場合には種々の困難さを伴うが、それを数学的に自然な形で連続系へ拡張して連続計算量理論を展開することに成功した。

河村氏の連続計算量理論では、計算量理論の諸概念、その中でも特に重要な多項式時間計算と問題還元の枠組を、従来の離散的対象からより抽象度の高い連続の対象へ、既存の理論に整合する形で拡張することに成功した。実数計算そのものの研究としては、Grzegorzcyk, Lacombe ら以来、数理論理学・計算可能性理論の一つの展開としては始まってはいたが、これに計算量の視点を加えた Ko, Friedman の研究を統合・発展させ、「適切な時間で行える計算」についての分析を可能にした。これにより、連続系アルゴリズムの効率を測ったり、その効率限界を理論的に示したりできる問題の範囲が格段に広がり、その後の多くの研究の基盤をなしている。

常微分方程式を解く計算の困難度がちょうど離散的な計算量理論での PSPACE (多項式空間) に相当することを証明し、Ker-I Ko (河村氏の好む漢字表現では葛可一) による 1983 年の予想を解決した。微分という連続系の本質的な計算の分析では、時間制約のない計算可能性理論では従来結果があったが、それだけでは途方もなく時間がかかることもありえる。これに対して、時間や空間の計算量を解析するとなると統一的な定式化が難しく、連続データの中でも実数そのものなど比較的「単純な」ものの計算しか扱えなかった。そのような状況のところを、多項式時間計算可能でかつリプシッツ連続な関数を与える初期値問題の解が多項式空間完全であることを示した。証明では、まずリプシッツ条件が系に課する制約が、多項式空間計算における記憶の使い方で一種の制限を設けることに対応することを指摘して、その制限が多項式空間完全性を損なわないことを、量化命題論理式

評価からの帰着により示した. 同じ手法によりヴォルテラ積分方程式に関する葛氏が 1991 年に出した二つの予想も解決した.

河村氏は研究で構成された方法論は, 陰計算量での有用な拡張と認識され, 離散的問題の計算量概念を自然に拡張した連続系計算量の標準的枠組として受入れられている. 元々は陰計算量の分野で用いられる二階時間限定の考え方を発展させたもので, それが連続データへの具体的応用をもち, 一方で抽象性ゆえに既存の計算量概念とよく整合することを見い出した. 具体的応用として, この方法論は関数解析や図形情報を扱う演算子を考えるための一般的な空間を扱うことを可能にした. このことから, 上述の微分方程式の諸基地問題の他にも, ランダム性概念と計算の関係, σ コンパクト空間上での計算量の定式化など, かねてから提示されていた幾つかの問題・予想を解決した. それらの成果では, この方法論に基づくことにより, 計算幾何や力学系など様々な分野の数値問題を事例的に分析するもの, そこで得られた困難さの理解を逆に「ではどの場合なら高速に解けるか」の見極めに役立つもの, 更にこれを精度保証つき数値計算ライブラリに実装するものなどがあり, 理論の深化と応用範囲の伸長の双方に研究が進展している. 河村氏は, この分野において, 陰計算量に関する国際会議で招待講演をするとともに, その中心的な会議である **Computability and Complexity in Analysis** の常任委員を務めるなど, 国際研究で主導的役割を果たしている.

振り返って河村氏の学生時代を思い出せば, 東大情報科学での学部・修士学生のとき萩谷昌己先生のところで自ら実数計算の難しさの本質を理論で解明することに取り組みを開始したもので, 実数計算を離散世界の帰納関数理論の閉包の中で捉えた部分クラスの研究, さらに微分再帰を再定義した研究で Shannon のアナログ計算との関係を示すといった研究を行った. その際から, 二階計算可能性の理論に着目した研究を行って単著論文を発表しており, 若くして慧眼を有していたことが理解できる. その後の博士課程においては, 海外での研究に挑戦することを企図し, 非決定性計算完全性 (NP 完全性) の理論で Turing 賞を受賞して計算量理論の画期をなしたトロント大学の Stephen Cook 先生の門戸を叩いた. そこで解析学における高階計算量の研究で学位取得している. 学位論文での高階計算量での方法論も含め, 学生時代の研究が上記成果のベースとなっていることがわかる.

その後, ぜひ東大の学生に好影響を与えてほしいと筆者が無理を言って, 東大助教として着任してもらった. その後, 駒場での講師を経て, 現在九州大学において准教授として活躍されている. ちょっと研究の話にもどって, 河村氏は, 上記以外にも離散幾何・計算幾何の分野で世界をまたにかけた共同研究を行っている. その

中には、連続計算量の思考を通して離散問題に取り組んでいるものもある。共同研究で共著者ネットワークを世界で広げ、国際交流に貢献している。東大でも九大でも、河村氏の周辺には常に海外からの著名教授から若手大学院生までの訪問研究者がおり、日本でも多数の国際研究会を開催している。この点、日本に戻ってくるよう依頼したのもとして、そのまま世界で活躍するのを邪魔したりしていないか気になっていたが、ご本人の交流力のおかげで日本でということが制約になっていないようで、ほっとするとともに感心している。河村氏は教育の面でも優秀で、既に東大でドイツからの留学生が指導のもと学位取得し、九大で助教をしている。また、筆者のところでも、学部生時代から河村氏に大きなテーマで計算量理論に取り組みたいということで研究をスタートさせ、情報科学の分野で重要な国際会議で日本出身者として初の学生論文賞を受賞する者も出ている。今後も、数理学から情報科学、さらにはそのような名前で納まらない分野において世界を土俵にした活躍を期待したい。