

## 新しい川づくりの時代

安田 浩保（新潟大学災害・復興科学研究所准教授）

## ■はじめに

気候変動が予想以上の速度で進行している。このため、日本の川づくりは、明治時代に高水方式の治水が開始されて以降、最大の転換点を迎えている。また、その母体となる土木も、人工知能をはじめとした先端科学の恩恵を受け、主観や経験が散見される工学から、客観性や再現性に優れる科学への移行を開始している。本稿では、河川の研究の魅力と、これから川づくりを志す若い仲間たちへ学び方や心構えを伝えたい。

## ■不自由から、自由、そして異分野融合へ

私は学部卒業と同時に大手航空測量会社に就職してコンサルタント部門に配属された。時代は、100MHzほどのCPUの計算機を一人一台ずつ使い始めた頃である。その頃の私の仕事は地理情報システムを河川事業にどのように応用するかを考える事だった。大学で数値解析の基礎を学んでいたため、コンピュータの活用により、河川を理解を促進する方法を考えたり、効率的な河川管理を考える仕事はとても楽しかった。一方で、当時の私には理解が不十分な数学や物理の原理がいくつもあり、仕事を進める中でその疑問を感じて立ち止まることも多くあった。物理学者のファインマンは、少なくとも二つ以上の方法で説明できることが「分かる」ことと言った。しかし、これができないことがしばしばあり、不自由な気分になった。そして、この不自由さにより、計算機の演算能力が年々向上していくにもかかわらず、自由に河川などの数値解析ができず、当時の実務上の悩みとなっていた。

3年間、実務に携わったが、独自の数値解析法の開発と思考力の強化がどうしても諦められず、大学院へ進学した。在学中は、数値計算法とその誤差論の数学、土木工学が対象とする河川や海域などの物理を学んだ。前者では、数値計算法は計算誤差が不可避であること、後者では、河川と海域の物理モデルの第一次近似が同一であることをそれぞれ知り、その瞬間の感動は今でもはっきり覚えている。

大学院時代の学問的な感動は、その後の研究の原動力となった。現在の寒地土木研究所にポスドク（博士研究員）の職を得た半年後、十勝沖地震が発生し、この地震による津波は十勝川を河口から20km以上も遡った。河川と海域を一体に扱う数値解析と模型実験を行い、北海道の太平洋側の河川における津波の影響範囲を研究した。この研究成果は、東日本大震災以後に評価を得た他、新潟県の津波浸水想定にも役立った。新潟大学に着任後の研究のうち、気に入っている研究の一つは、計算者のスキルに依存せずに均質の計算品質が得られる数値解析法の開発だ。自然河川の曲線状の流路形状の幾何学的形状の記述には、光が重力の作用で曲がることを記述するためにアインシュタインが開発した一般化座標が頻用される。しかし、一般化座標を用いた数値解析法では計算者のスキルに依存して計算品質が著しく異なるという問題があったが、その解決に成功した。もう一つは、2011年の新潟・福島豪雨により増水した信濃川と五十嵐川の合流点において大規模な逆流が発生したが、この逆流はむしろ信濃川の下流区間の負担を軽減していたことを明らかにした研究だ。これらの研究成果を通し、実務で要求される自然河川における水理は数値解析により明瞭に説明できるという認識を持ちつつあった。あとでこの認識は奢りであったと気が付くが、流れの数値解析が自由にできるようになり、流体の運動を鮮明に想像できるようになった。この頃から、ランダウとリフシツが書いた文字だらけの流体力学の教科書が面白くなった。いつの間にかに大学院進学前の不自由さはずいぶんと解消していた。

河川などでの土砂輸送の物理は、直感的な推定がほとんど役に立たないほどに複雑な挙動を示す。流水により底面の土砂が活発に輸送される物理では、底面に周期的な起伏形状が自律的に形成され、波動現象のような周期的な美しい振り舞いをする。このような土砂輸送を含む実河川の物理の数値解析を本格的に開始したが、なかなか満足できる結果を得られなかった。

常用される土砂輸送のモデル式は、流水のモデル式と比べて極めて単純なモデル式である。これが実現象の再現を阻む要因なのではと疑うようになった。それなら、流水が土砂を駆動して底面形状と水深が刻々と変化する物理を目前で詳しく観察し、実測しようと考え、研究手法に模型実験を加えた。同研究に着手した当時、流水中の底面形状と水深の各々の測定法はどこにもなかった。そこで、底面形状と水深の各々を測定する手法の開発に着手し、2度の世代交代を重ね、Stream Tomography（以下、ST）という測定法を完成させた。STの最大の特徴は、従来の測定法に比べて数万倍の多量な測定値が取得できることで、後述する研究の礎となった。

北陸地方の直轄河川の管理延長のうち半数程度は、平水時に明瞭な砂州が確認できる、いわゆる砂州河川である。近年、北陸地方に限らず、全国の砂州河川では、洪水時に河岸や堤体の欠損が頻発している。STを用いた模型実験により、土砂輸送の物理に密接に関係する水深や水面勾配を高い分解能で把握できるようになり、河岸欠損の開始条件が複数明らかになってきた。これらの成果を得る以前の私は、高精度な数値解析こそが未解明現象の有力な研究方法と信じて疑わなかった。ワインバーグはノーベル賞受賞後に科学史について著し、この中で観測と計算が科学の発展の両輪と述べた。今ではこの意見に大いに賛成である。砂州河川では直線型の流路形状は維持されず、蛇行型の流路形状へと自発的に移行するが、その物理機構は現在も未解明である。現在もなお観測と計算を両輪として自ら同問題を解明したいと強く願っている。この他、上記の一連の砂州河川の研究において、洪水時の滞筋の流心への誘導と平水時の単調な流れを緩和する拡縮工法の開発も開始した。同工法は五泉市の早出川に実装され、治水と環境の両面での優れた機能が確認されている。

STにより得られる流水中の底面形状と水深の高分解能なデータは、河川物理の研究手法および研究における着眼点の各々にパラダイムシフトをもたらした。STの高分解能なデータは、まず、他の技術分野で革新的な研究成果を挙げているデータサイエンス型の方法を河川の研究でも可能とした。これ以前は河川物理のビッグデータが存在しなかったためにデータサイエ

ンス型の方法をそもそも採用できなかった。STの本格運用と同時期に新潟大学は異分野融合研究の支援制度Ugo グラントを開始した。私は、信号処理（応用数学の一種）と素粒子実験物理学の研究者とでARCEというプロジェクトを発足させた。

ARCEによる最初の成果は、砂州上を流れる流水の水面形状を信号処理すると底面形状を10%内外の精度で推定できるという、驚くべき数理的な手法の開発である。同推定法の開発が優れた研究成果である。しかし、ここで最も強調したいことは、異分野融合型の研究の開始によって着眼や発想の転換がすぐに起き、この転換が優れた研究成果を挙げたことにある。底面の起伏形状が水面に表出することは工学部の2年生頃の水理学で学ぶ。しかし、この50年ほどの間、河川の底面の形状が微小信号として水面に表出することは見逃されてきた。ARCEによる異分野融合型の研究によって、水面形状には微小ながらも有用な情報が含有されていることが初めて示された。この研究成果は、沿川の集落や道路への確度の高い危険情報の発令などの工学的な応用が期待できる。さらに、現在、高分解能な水面形状の信号処理と先述の拡縮工法の組合せにより、砂州河川で顕著となっている河岸欠損のダイナミックな制御技術の開発を構想している。同構想は別報にて詳しく紹介したい。

初めて異分野融合研究と聞いた時、実は、研究の実質的な開始までに年単位の時間がかかるのではと悲観的な感情があった。しかし、実際には円滑に始動し、失うものは何もなく、むしろ異分野の高次元の知性と熱すぎる情熱など多くを得た。20世紀は学問や知の細分化の時代、21世紀は統合化の時代と言われる。知の統合を早期に実感できたことは幸運だと思っている。時代は、iPhone11でさえCPUは2GHz以上のメニーコアとなった。

### ■ 私が通った3つの転換点

土木工学を大学で初めて学び、その後、その研究を職業とするようになる今日までに、不可逆的な考え方の転換点が3回あった。

大学に異動し、現在も毎日たっぷりと充実感を感じている。しかし、正直に告白しよう。学部3年生までの私は土木工学の魅力を心底感じ

られなかった。その理由は、私自身の学力不足もあったが、教授たちの講義での話しぶりから「大概のことは分かっている」と当時の私には聞こえ、本当にそうだとしたら色彩に欠く学問と感じたからだと思う。また、学ぶ事柄の多くが経験則に感じたこともある。ところが、大学院に進学後、河川の流れや海域の波動を、流体力学を通して理解できるようになり、また、地球上には今でも不明の物理現象がたくさんある事を知った。この学びから、土木工学の存在理由は単なる土木構造物の設計・施工ではなく、その真髄は、不明な地球物理を理解し、その理解を人間社会の利便性の向上に応用することと納得した。これが私の土木工学における一つ目の転換点である。学びにおいて気持ちが高揚するのは、分かっていることを学ぶ時よりも、分からないことに直面した時だ。もう一つ正直に言うと、当時の私は学ぶ以前に波動理論を難しいと感じていた。確かに学び始めると沢山分からないことがあったにもかかわらず面白いと感じる気持ちの方が勝った。結局、完全に習得したくなり波動理論の講義を3年間聴いた。波動理論の知識は、その後の河川の研究の難局を何度も打開してくれた。創造はいつも知の総力戦だ。食わず嫌いは可能性を制限する愚行と痛感した。鋭いヒラメキは、学びや経験が生む。アップルのジョブスが言ったコネクティング・ドッツとはこのことだ。

研究所時代は、東南アジア諸国の大学を度々訪れ、現地の大学生たちと対話する機会に恵まれた。彼らの学びへの積極的な姿勢と、途上国ゆえのインフラの整備に自身が貢献しようという明確な意志があることに衝撃を受けた。また、彼の国の中央官庁の技術官僚の多くが博士号を取得していることもとても驚きだった。これに比べ、世界有数の経済大国の確固たる地位にある日本の大学生はどうか。学生時代の自分も含め、モラトリアムやら進路の迷いやらを学生の当然の権利として主張する。一生懸命に勉強する姿勢は、もっと尊敬の対象となるべきだが、むしろ冷やかしの対象となる風潮さえある。また、日本は、技術立国を標榜しているにもかかわらず、博士課程への進学はごく少数だ。実際、土木の現場には学問的な課題が山積しているが、社会人となった後にそれらを研究課題とし

て博士号を取得する技術者の数は限られる。東南アジア各国で現地の学生の向学心を幾度も目の当たりにし、日本でも次世代の研究者と技術者の育成が必要と考え、研究所から大学へと活動の場を移すことにした。これが私の土木工学における二つ目の転換点である。今や欧米諸国と比べ日本の博士号の取得者数は約半分に落ち込んでいる。個人の自己実現と国力維持のために、大学と社会との間に研究をハブとした人材の循環的な機構の整備が急務だ。

私の三つ目の転換点は、わりと最近のことで、先述した観測と計算が科学の両輪というワインバーグの視点を体験したことだ。この分岐点を契機として、これからの土木工学の教育は、数式を解くだけでなく、対象の物理現象を明瞭に想像する訓練の増強が必要だと思う。土木工学の学部教育では様々なモデルとその計算法を中心に学ぶ。一方これらのモデル式の適用限界や、モデル式の導出過程はあまり明示的に語られない。例えば、水理学では等流の流速公式を教えるが、同式を疑う必要性や適用限界を教えない。これらの公式がモデルの一つであることを合わせて教えなければ、モデルと観測とが同等に重要なことを理解できない。また、モデルの数理的な構造が分からなければ新モデルの開発もできない。ファインマンとランダウなど顕著な業績を上げた物理学者に共通する優れた能力は、物理現象を鮮明に想像し、数学という共通言語を用い、物理現象を他者と共有することだ。工学部の学生やその出身者には、計算が得意な者が多い。数式を書き連ねたり、計算するだけとせず、物理現象を鮮明に想像した上での計算を意識し、想像力を鍛錬して欲しい。また、自ら関心を持った問題は、これまでの全ての学びを結集し、粘り強く最後までやり遂げる経験も重ね、何事からも逃げない強さを身につけて欲しい。想像力と粘り強さのペアこそが創造力だ。

## ■ 土木を「科学」にしよう

土木工学の実務の世界では、担い手不足や、自然災害の頻発など、どちらかという悲観的な話題が多い。しかし、楽観的な話題で埋め尽くされた技術分野などあるだろうか。また、同じ土木工学でも他国なら楽観的な状況なのだろうか。日本全体や土木工学の悲観的な話題が多

い状況は、これまでの制度や技術で対応できない問題が増えたからと、私は認識している。土木工学の中でも私の専門分野の河川工学は、古代でも現代でも国造りの要であることに変わりはない。国土の安全と安心がなければ、昔からの第一次産業も先端科学も安定的に発展させられない。これからの河川工学の重要課題は、気候変動に対応できる川づくりである。このような川づくりはIoTや人工知能などの先端技術を駆使するCPS(Cyber Physical System)によって実現できるだろう。若い世代と共に新しくパラダイムを作り出せる時代に生きていることは幸運だ。今、土木工学は、主観や経験が散見される工学から、客観性や再現性に優れる科学への移行期を迎えている。

今後、人工知能の活用がますます加速すると予想される。一方で、人間に備わった想像力だけが問題点や改善点を発見できる。自身の経験から、プログラミングと幅広い分野の読書は、有効性の高い想像力の鍛錬法の一つだ。研究という営為の源泉も想像力だ。大学や大学院での研究経験もまた想像力の鍛錬に大変に有効だ。

学問を修得する簡単な方法はあるのだろうか。ユークリッドはプレオマイオス王に「学問に王道なし」と言ったという。つまり、学問の修得は誰にも公平と言え、本人の継続的な努力が唯一の方法である。学問の修得を意味する学業の「業」は、何本もの刃が並ぶ脱穀機を表す象形文字だから、学業とは鋭い刃物で自身を磨くことと言える。本気の学業は、その過程で境遇に応じて自分を柔軟に調整する力を向上させ、遂には汎用性の高い想像力を修得させる。この想像力は、大規模事業のためにチームプレイを基本とする土木において、自分に何が求められているかの正確な先読みを可能とし、円滑な人間関係の構築にも有効だ。

毎日学生たちと接し、彼らの多くに、優れた能力や熱意を感じる。彼らに私が学ぶことや研究の意義を熱心に伝えると、彼らの中に次第にこれに呼応する姿勢が形成され、突然、別人のように成長する姿を何度も見てきた。ゆとり世代、ジェネレーションギャップと良く言われるが、大人世代のやるべきことは、没頭に値する対象を提示することだと今では確信している。諦めや白けた雰囲気は国を衰退させる。教育

や研究に熱心な国の国力が乏しかったことはない。

## ■ Living with water

台風19号による全国的な被害とその後の対策を話題とするNHKの日曜討論に出演した。この番組の中で、体力が弱い地方都市こそ大規模水害に遭遇すれば復興さえ難しい状況となりかねず、このために事前防災の加速が重要であること。気候変動に対応できる川づくりの一つの方法として氾濫を許容できる都市と一体となった川づくりを提案した。

実は、この番組の放送の翌日に、ハリケーンで深刻な被害となったヒューストンの復興計画に携わったアメリカ在住の方から、Living with water という概念を一緒に研究してみないかというメールをもらった。さらに、後日談があり、つい先日、その方が来日の合間に新潟に立ち寄ってくれた。まさか番組をきっかけに国を跨いだ出会いが得られるとは考えていなかった。Living with water は新潟平野の治水にうってつけの概念である。詳しいことは別の機会に紹介したい。

土木工学は、その技術的な実現のために新たな技術や数学の発明をしてきた経緯があり、自然科学の王様なのだと思師に教えられた。これから土木工学が直面する問題の解決には新たな概念や技術の発明が要求される。そして、自然科学の王様の風格を体感しやすい時代と言えそう。アインシュタインは「失敗したことのない人間というのは、挑戦をしたことのない人間である」と言った。気候変動に対応できる川づくりは従来の延長線上では実現できない。本稿を通し、日本を美しく豊かな国であり続けさせるために、川づくりに挑戦する若い多くの仲間との出会いを楽しみに筆を置く。

### ◆ やすだ ひろやす 安田 浩保氏略歴

1974年栃木県生まれ。2004年 学位取得 工学(中央大学)。土木研究所寒地土木研究所(旧 北海道開発土木研究所) 河川研究室研究員、Clarkson University Research Associate を経て、2009年4月から新潟大学災害復興科学センター准教授、2011年4月から現職。令和元年6月から北陸地方整備局の「信濃川水系流域委員会」委員、同年10月から台風19号による大雨の影響で堤防が決壊した長野県千曲川の被災原因分析・堤防復旧方法を検討する「千曲川堤防調査委員会」委員を務めている。