



競争と自然淘汰

万代俊之¹

メジャーリーグに移籍したての大谷翔平をアリゾナの春キャンプで拝んだのち、大学院留学先を決めるための最後の訪問校があるカリフォルニアを訪れた。私の指導教員となった Teamrat A. Ghezzehei 教授 (Or, 2022, 土壌の物理性) が空港まで迎えに来てくれた。直接会うのは初めてだったので、身長の高さに驚いた。しかし、温かな雰囲気があり、道中で色々と話題を振ってもらった。内容はほとんど理解できなかったが、不思議と悪い気はしなかったことを覚えている。私が PhD を取得した UC Merced は、カリフォルニア州の中心にある何もない盆地に建てられたカリフォルニア大学の新キャンパスである。私が参加した新入生勧誘ツアーでは、新設校らしいエネルギーを感じた。これまで会った他の大学の教授よりも Teamrat との相性が良さそうだと感じたので、この大学を進学先に決めた。

入学前の Teamrat との打ち合わせで、土壌物理学の分野で機械学習を使って何かをやろうという話になっていた。流行りに乗っておこうと思っての選択だった。大学院生活が始まると、自分が受ける授業と自分が教える授業の合間をぬって機械学習の勉強をした。すると、機械学習の実装自体は簡単だが、そのまま土壌物理に応用したところで面白いものは出てきそうにないと感じた。しかし、ある日の大学の帰りのバス内で Physics-informed neural networks (PINNs) という、ニューラルネットワークで偏微分方程式を解く手法についての論文を見つけた。応用数学者の書いた論文で、内容は良くわからなかったが、土壌水分移動を表現するリチャーズ式にも適用できそうなことだけはわかった。他の人が手を付ける前にやってみよう、ということになった。いざ PINNs を触ってみると、土壌水分データから土壌の水理特性を推定するのに役立つそうだとわかった。当時は理論的なことが何もわかっていなかったため、試行錯誤するしかなかった。あるとき、土壌の水理特性を表すニューラルネットワークが単調増加関数となるように実装すれば、(だいたい) 上手くいくことがわかった。PINNs の原理を良く理解できていなかったため、論文にするのはためらったが、Teamrat には早

く論文にすべきと言われたので、とりあえず結果をまとめて論文にした (Bandai and Ghezzehei, 2021)。今では、PINNs に関する論文があらゆる分野で溢れている。論文にするならこのタイミングしかなかったと思う。

PINNs をいじっている傍ら、学部生向けの偏微分方程式の授業を取った。担当していたのは、後に PhD 論文審査委員に入ってもらえることになる Noemi Petra 教授であった。大学受験以降、まともに数学を勉強したことはなかったが、応用数学は純粋数学と比べると算数みたいなものであり、自分に向いているのがわかった。Noemi に PINNs の話をすると、応用数学科のセミナーで話してみることを勧められた。セミナーでは、色々言われたが、専門用語がわからず何を言われているのかわからなかった。Noemi からは、基本的な数値計算手法でリチャーズ式を解いて、PINNs との比較研究をするべきと助言を受けた。私が有限要素法すらも良くわかっていないのがばれており、Noemi が教える大学院生向けの数値解析の授業で勉強することになった。勉強を進めると、PINNs が有限要素法と非常に良く似ていることがわかってきた。有限要素法では線形な基底関数の係数が線形方程式の解で与えられるのに対し、PINNs ではニューラルネットワークを基底関数として用い、そのパラメータは非線形最適化問題の解として得られる。非線形最適化問題の解は線形方程式の解ほど正確には求まらないので、安定して PINNs を使いこなすのは難しいのである。このような理解が進んだあたりで、PINNs と古典的な数値解手法を比較した結果を論文にまとめた (Bandai and Ghezzehei, 2022)。

PINNs を使って実験データを解析することも試したが、上手くいかなかった。また、このまま PINNs に頼っているのは、今後のキャリアが行き詰まりになるであろうことを何となく感じていた。自分は応用数学者ではなく、あくまで数学を道具として使う側の人間である。上手く動くかどうかかわからない道具を使っている場合ではない。PINNs よりも確実な手法が必要だった。そこで、Noemi が専門としている随伴法を用いた大規模逆解析手法に研究の軸を移した。随伴法は、偏微分方程式で拘束された目的関数の微分を効率よく求める手法であり、気候モデルのデータ同化等で使用されるような古典的な

¹ ローレンスバークレー国立研究所
2023年9月27日受稿 2023年10月17日受理

手法である。最新の手法では、随伴法を用いて目的関数の 2 回微分（正確には Hessian-vector 積）まで求め、最適化問題をニュートン共役勾配法で解く。最初は全くわからなかったが、Noemi の逆解析の授業を聞いているうちに少しずつわかるようになった。それでも、非定常非線形偏微分方程式であるリチャーズ式に対して 2 回微分の導出をするのは骨が折れた。しかし、正しく実装すれば理論通りに良く動いた。この手法を用いて、表面水フラックスを土壌水分から推定し、その不確定性を 2 回微分から計算する研究を行った。また、PINNs との比較研究も行い、その結果を水文学分野の機械学習のシンポジウムに出した。すると、全体公演に選んで頂き、その後の論文執筆にも誘ってもらったことになった (Shen et al., 2023, Nature Reviews Earth & Environment)。卒業論文にする際には、導出をさらに修正する必要がある、最後までひやひやすることとなったが、なんとか卒業することができた。現在は、この手法を簡単に実装する方法を試している。

PhD 課程で得られた教訓について少し述べておく。第一に、研究手法を選択する際には、目新しい手法に飛びつくのではなく、古典的な手法をしっかり身につけ、新しい手法を古典的な手法に上手く加えるのが良い。新しい手法を提案する際には必ず、古典的な手法と比較しなければならない。比較することで手法への理解が深まるし、あなたを評価する査読者や先人からの信頼も得られる。実際、現在の職に着けたのは、現在の雇い主が数値解手法をゼロから実装できる人を探していたからである。

第二に、指導教員には自分と良く似た人を選ぶべきだと思う。技術的な側面は Noemi にお世話になったが、要所では Teamrat に助けられ、可能な限りの時間とお金を投じてもらった。人間は、自分が大事だと思えることが得意な人物を評価する傾向にある。自分と似た指導教員を選べば、自然と研究スタイルも似てくるし、不必要な論争も起こらない。そして、指導教員と学生がお互いを評価し、楽しく仕事ができる。自分と異なる強みを持つ人は共同研究者に加えるので丁度良いのかと思う。PhD 課程の指導教員とは否が応でも 10 年以上の付き合いになる。お互いにとって有益な関係を結べる相手を選ぶべきである。極論を言えば、全人類の脳細胞の繋がりを機械で測定し、その結果をもとに指導教員と学生のマッチングが行われるのが望ましい。現代科学はその域に到達していないので、いわゆる“直感”で判断するしかない。これまで、明らかに合っていない人を指導教員に選ぶようにする学生をちらほら見かけた。こういう学生は概して、その教員の業績や学校名に惹かれすぎている傾向にある。誤解を避けるために述べるが、可能であれば MIT やスタンフォード大学に進学し、ノーベル賞受賞者に師事するのが良い。華麗な学歴と有力な後ろ盾は将来の時間を大幅に節約する。

今こそアメリカの生活に馴染んでいるが、初めのうちはアメリカと日本を比べてしまい、身の回りのあらゆるものに対して不満を持っていた。大麻と人尿の匂いの

する繁華街、簡単には開かない包装、絶妙に間が悪い給仕人。しかし、この国で暮らすうちに良いところも見えてきた。それは、広大な大地と豊かな天然資源であり、それを求めて世界中から国境を渡ってくる人々、そして、そのような多様な人々を束ねる唯一の手段であろう市場原理に基づいた競争である。現在の世界は、競争による自然淘汰の過程と結果であると気付き始めると、自分に都合の悪いことも含めて色々なことが飲み込めるようになった。競争と自然淘汰以上に新しいものを生み出す仕組みは存在しないと思う。アメリカから出てくる革新的なものは、市場原理に基づいて競争する人々による長時間労働の賜物である。毎週の読者アンケートでしごきを削る週刊漫画雑誌から世界で大ヒットする漫画が出てきたのも同じ原理に思われる。日本にいた頃の私は、過去と未来に囚われており、現実と妄想の区別がついていなかった。親族から離れ、日本ほどのセーフティーネットがない中競争に晒される中では、現実の厳しさを学ばざるを得なかった。

アメリカで仕事をしてみたかったという理由だけでここまで来てしまった。色々あったのだけれども、現在はなんとか生活が送れているということを考えると、私は“運”が良かったのだろう。しかし、“運”というものは自分の影響が及ばない要因を指すだけであり、現実世界に因果関係は必ず存在する。アメリカ留学の一番の決め手になったのは、修士課程でのオーストラリア留学 (万代, 2017) であり、この際には大学院から支援を頂いた。留学プログラムの立ち上げ等で動いてくれた人がいたのだと思う。また、当時お世話になった Gabriel Rau 博士と交流を持てたのは、当時研究を指導していただいていた濱本昌一郎教授が国際誌で多数論文を発表している研究者であったからである。西村拓教授と斎藤広隆教授には忙しい中推薦状を書いて頂いた。そして何より、私が海外でぶらぶらできるのは日本にいる家族が健康であるおかげであり、健康は普段の日常生活から作られる。周囲の人の行動の積み重ねに私自身の少しばかりの努力を盛り付けたものが私の現在地を決定する。自分もいつかは、若い人間をサポートする側に回るときが来る。それ



Photo. 1 左から、Teamrat A. Ghezzehei 教授、著者、Noemi Petra 教授。アメリカの大学の卒業式は良いビジネスである。

がどのような形であれ、今の自分には市場原理によって設定された人參を追いかけてできるだけ遠くまで行くこと必要である。

引用文献

- 万代俊之 (2017): UNSW Australia をたずねて. 地盤工学会誌, 65(5): 34–35.
- Bandai, T. and Ghezzehei, T.A. (2021): Physics-informed neural networks with monotonicity constraints for Richardson-Richards equation: Estimation of constitutive relationships and soil water flux density from volumetric water content measurements. *Water Resources Research*, 57: 2020WR02764.
- Bandai, T. and Ghezzehei, T.A. (2022): Forward and inverse modeling of water flow in unsaturated soils with discontinuous hydraulic conductivities using physics-informed neural networks with domain decomposition. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26: 4469–4495.
- Shen, C., Appling, A.P., Gentine, P., Bandai, T., Gupta, H., Tartakovsky, A., Baity-Jesi, M., Fenicia, M., Kifer, D., Li, L., Liu, X., Ren, W., Zheng, Y., Harman, C.J., Clark, M., Farthing, M. Feng, D., Kumar, P., Aboelyazeed, D., Rahmani, F., Beck, H.E., Bindas, T., Dwivedi, D., Fang, K., Höge, M., Rackauckas, C., Roy, T., Xu, C., Lawson, K. (2023): Differentiable modeling to unify machine learning and physical models and advance Geosciences. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4: 552–567.
- Or, D.(2022): Soil structure dynamics — a journey to discovery. 土壌の物理性, 150:11–13.