

遠隔常時微動モニタリングによる鉄道橋の確率論的洗掘検知

社会基盤工学専攻・社会基盤創造工学分野・教授 金 哲佑

はじめに

近年の気候変動の影響もあり、局所的な豪雨が各所で頻繁に観測されています。河川に架かる橋梁では、豪雨による水流が橋脚基礎付近の地盤を侵食し、橋脚の安定性が低下する洗掘の発生が危惧されています。特に鉄道橋においては、洗掘の被害を受けやすい直接基礎形式の橋梁が依然多く運用されており、また代替路線の確保も困難であることから、橋脚の洗掘は安全運行上の大きな脅威として認識されています。鉄道橋梁の橋脚基礎の安定性を評価する方法として、橋脚の橋軸直角方向に重錘を打撃し、その応答振動を解析することで基礎を含む橋脚全体系の固有振動数を同定する衝撃振動試験法が広く用いられています。しかし、計測作業には多くの人的労力を要する上、安全性の観点から増水時には実施が難しいのが現状です。このように河川増水で運転規制した後、水位低下に転じた際の運転再開の判断に時間を要す場合があり、幹線路線などにある重要度の高い橋梁では、運休が長時間に及ぶことによる社会的影響が危惧されています。

確率論的洗掘評価の必要性

衝撃振動試験法の代替手法として、常時微動の活用に着目した洗掘評価が考えられます。ただし、平常時の橋脚上部の常時微動を計測する場合、十分な加振力が得られないため、振動応答のシグナルノイズ比 (Signal Noise Ratio, 以降 SN 比) が小さくなります。図 1 a) にある鉄道橋脚の平常時の常時微動を示します。最大 0.2gal 程度で、列車走行時 (図 1 b)) の振動に比べ極めて微弱な信号であることがわかります。すなわち常時微動の場合、信号ノイズ等の影響が相対的に大きくなり振動特性同定値にばらつきが生じる可能性が高くなります。そのため、常時微動から同定される振動特性を意思決定の判断指標に用いる場合、不確実性の下での意思決定を行う必要があります。特に、構造物の常時微動における振動特性は、信号ノイズだけではなく周辺の環境振動の他、風や外気温の変化などによっても変動することが知られています。これらをすべて把握して同定値を高精度化することは監視システムの肥大化にもつながるため容易ではありません。以上の理由から常時微動モニタリングから安定的に固有振動数を同定する際は、計測期間における振動特性同定値のばらつきも同様に不確実性と認識し、決定論的ではなく確率論的に議論することが合理的であると考えます。

橋脚の常時微動から対象とする振動数の確率分布を推定すること方法として、ベイズ推論が有効であると考えています。

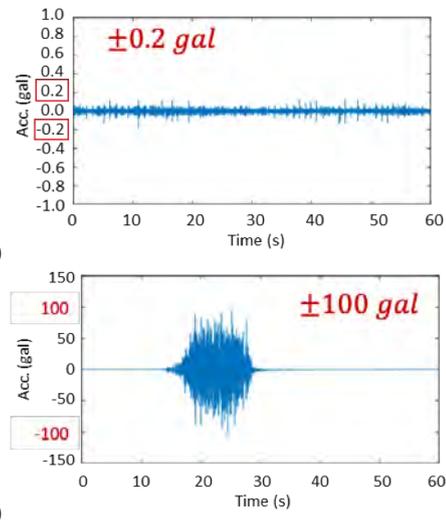


図 1 鉄道橋脚の常時加速度: a) 平常時, b) 列車走行時

ベイズ推論は、観測情報 (尤度関数) から事後確率分布を推定する仕組みであり、ベイズ理論を取り組んだ確率論的な信号処理や構造物のヘルスマニタリングを行っています [1]。ベイズ理論に基づく確率論的な信号処理を行うことで、微弱な常時微動の加速度信号から対象となる振動モードの事後確率分布を同定できます。また、同定した事後確率分布を用いた信頼性解析により、洗掘の発生を確率的に評価することが可能になります。

遠隔洗掘モニタリングシステム

増水時にも橋脚の常時微動を計測する目的で、図 2 に示すような遠隔洗掘モニタリングシステムの開発を行いました。MEMS 型 3 軸加速度センサ (富士電機株式会社, CPUKSNSP-00) を橋脚天端に設置し、データ伝送用の機器は小型ボックスに集約し、橋台付近に設置しています。なお、対象橋脚のセンサまでは LAN ケーブルで接続する仕組みになっています。センサによる常時微動の計測データは Edge Device で収集し、VPN 回線を通じて所属機関のサーバーに伝送するネットワークを構築しています。PoE HUB は LAN ケーブルを通して電力を供給する際のスイッチングハブを表します。計測データは、サーバー上で、後述する確率論的な洗掘評価を行います。

リアルタイム確率論的洗掘評価

常時微動を用いた統計的洗掘評価の可能性を検証するために、供用中の鉄道橋を対象に長期モニタリングを行っていま

す。図3に洗掘モニタリングを行っている橋脚を示します。確率論的な洗掘評価を行うためには、観測振動数の確率分布を事前に把握しておく必要があります。そこで、平常時のロッキングモードの観測振動数の確率分布について検討を行いました。図4に平常時の常時微動計測から同定した共用中の鉄道橋橋脚のロッキング振動数の確率分布を示します。「Normal Dist.」は正規分布近似を、「Levy Flight Dist.」は非正規分布である Levy Flight 分布近似を表します。非正規分布が観測分布、特に裾野を精度良く近似していることがわかります。関連して、衝撃振動実験から得られたロッキング振動数は9.1 Hz であり、常時微動から同定した図4の確率分布の最頻値も、衝撃振動実験のロッキング振動数を再現していることがわかります。

衝撃振動実験で同定する振動数に基づいて洗掘判定を行う、鉄道構造物等維持管理標準・同解説[2]の基準を表1に示します。ただし、表1の Ψ_c は、鉄道構造物等維持管理標準・同解説には定義されていない、本研究で提案する指標であり、「平常時の観測において判定境界の観測値が得られる確率」を表します。また、判定 A1, A2, B, S は鉄道構造物等維持管理標準・同解説[2] に従い、それぞれ「異常時外力に対して危険な変状がある」、「固有振動数の低下など進行性の把握を行う」、「現状では問題は少ない」、「現状では健全と考えられる」と解釈できます。

表1 洗掘に対する健全度判定区分

基準振動数	健全度指標値 κ	判定	SWI (Ψ_c)
$X \leq 6.4\text{Hz}$	$\kappa \leq 0.70$	A1	$\Psi_c \leq 0.0016$
$6.4\text{Hz} < X \leq 7.8\text{Hz}$	$0.70 < \kappa \leq 0.85$	A2	$0.0016 < \Psi_c \leq 0.0053$
$7.8\text{Hz} < X \leq 9.1\text{Hz}$	$0.85 < \kappa \leq 1.00$	B	$0.0053 < \Psi_c \leq 0.46$
$9.1\text{Hz} < X$	$1.00 < \kappa$	S	$0.46 < \Psi_c$

$\kappa = f_t / f_n$; f_n は健全時の振動数 ; f_t は測定値

平常時の確率分布 (図4) に対する、増水時に同定した振動数の周辺確率を表した一例を図5に示します。図5の赤い水平点線は、健全時の基準振動数が9.1 Hz の場合の、表1における B 判定の閾値を示しています。また、RWI は Real time Warning Index の略字で、上記の周辺確率を表します。図5から、増水時の健全性指標は全てB判定の閾値を上回っており、洗掘が発生する可能性が極めて低いことを示しています。観測された振動数の周辺確率を算出することで、同定振動数の推定に伴う不確かさを考慮した指標を提供し、異常検知に活用することが可能となります。このように、確率的な信号処理や信頼性評価を通じて、遠隔で常時微動計測を行い、洗掘検知を実現できると考えています。今後も、実践的な橋梁ヘルスマニタリングの提案ができるよう、引き続き研究を進めていきます。

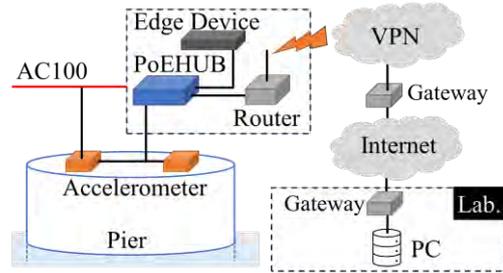


図2 遠隔洗掘モニタリングシステムの概要



図3 洗掘モニタリング対象橋梁

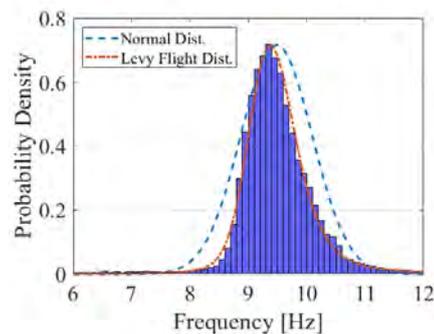


図4 鉄道橋脚のロッキング振動数の確率分布同定結果

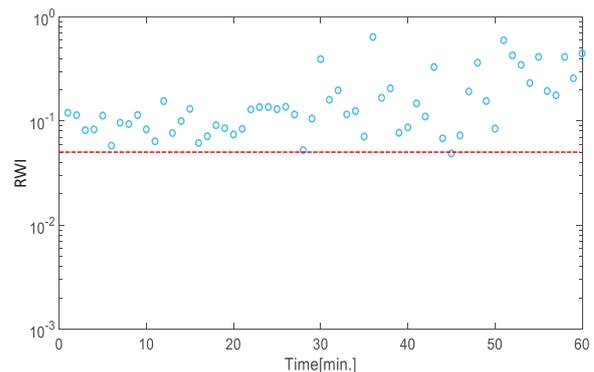


図5 統計的洗掘評価の例

参考文献

[1] Kim ら, Current Perspectives and New Directions in Mechanics, Modelling and Design of Structural Systems, pp. 1735-1740, 2022.
 [2] 鉄道構造技術研究所編: 鉄道構造物等維持管理標準・同解説 (構造物編 基礎構造物・抗土圧構造物), pp. 90-194, 2007.

固有異方性が地盤の力学挙動に及ぼす影響

社会基盤工学・地盤防災工学分野・准教授 上田 恭平

はじめに

自然地盤であれ人工地盤であれ、あらゆる地盤はその構成要素である土粒子形状や堆積構造に依存した異方性を有しています。交通荷重や地震荷重などの荷重以前に土が本来もっているこのような異方性は、固有異方性（もしくは初期構造異方性）と呼ばれています。固有異方性は砂質材料の強度と変形特性を理解するうえで重要な要素であり、静的・単調荷重時の土の力学挙動に及ぼす影響が1970年代より精力的に調べられてきました。これによると、土質力学における最も重要な物性値である N 値や密度と同等かそれ以上に、固有異方性が地盤の剛性や強度に影響を与えることが報告されています。他方、地震時の地盤の液状化に代表される動的・繰返し荷重時の土の力学挙動に関しては、固有異方性の影響について調べた研究事例が限られています。そのため、固有異方性が土の動的・繰返し挙動にどのような影響を及ぼすのか、またその影響をどのようにモデル化すればよいのか、未だ十分に明らかになっていません。

与えて実験を行ったため、プロトタイプスケールでの層厚は15mになります。入力地震動にはテーパ付き正弦波（プロトタイプスケールで加速度振幅2.0 m/s²、振動数1.0 Hz）を用いました。

加振中に計測された地盤の応答加速度と過剰間隙水圧の時刻歴を図3と図4に示します。なお、結果はすべてプロトタイプスケールで示しています。地中（ACC3）における加速度応答（図3）より、 $\alpha = 0^\circ$ と $\alpha = 30^\circ$ のケースでは10～30秒まで振幅がほぼ一定であること、振幅の大きさは後者のケースでやや小さいことがわかります。また、 $\alpha = 45^\circ$ のケースでは12秒付近から振幅が大きく減衰し、液状化の発生が示唆されます。次に、ACC3と同じ位置（PWP3）での過剰間隙水圧の応答を比較すると、 $\alpha = 0^\circ$ のケースでは初期有効上載圧 σ'_{v0} の半分程度しか水圧が上がっておらず、液状化は生じていません。 $\alpha = 30^\circ$ のケースでは σ'_{v0} の7割強まで水圧が上昇するものの、やはり液状化には至っていません。それに対して $\alpha = 45^\circ$ のケースでは20秒付近で過剰間隙

地震時の液状化挙動に及ぼす固有異方性の影響評価¹⁾

このような背景から、液状化の可能性のある砂地盤の地震応答に固有異方性が与える影響を調べるため、遠心場での模型振動実験を実施しました。実験には京都大学防災研究所に設置されている遠心力荷重装置を使用し、図1に示すように内寸が500 mm（幅）×400 mm（奥行き）×400 mm（高さ）の剛土槽を用いました。この土槽の左側壁は脱着が可能であり、図2のような手順で模型地盤を作製することで、異なる堆積角度（ $\alpha = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ など）を実現できます。模型地盤の層厚は300 mmであり、50 gの遠心加速度を

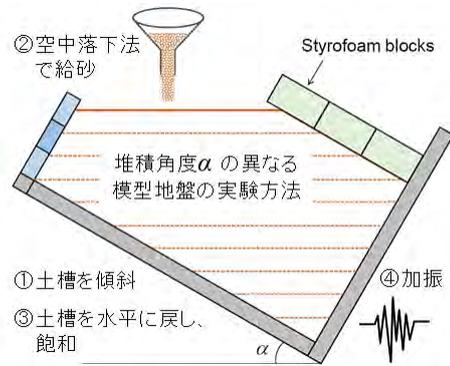


図2 異なる堆積角度を有するモデル作製の概念図

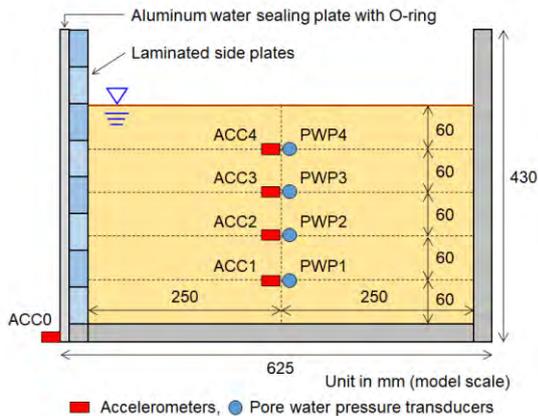


図1 遠心模型実験モデルの断面図

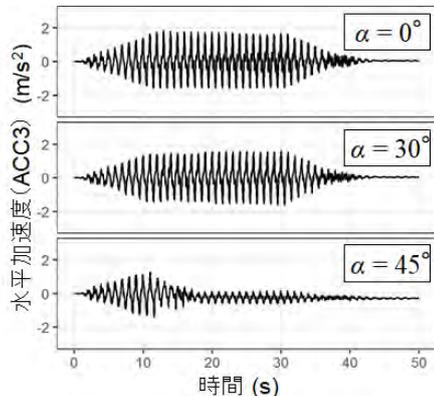


図3 加振中における地盤の水平加速度（ACC3）応答

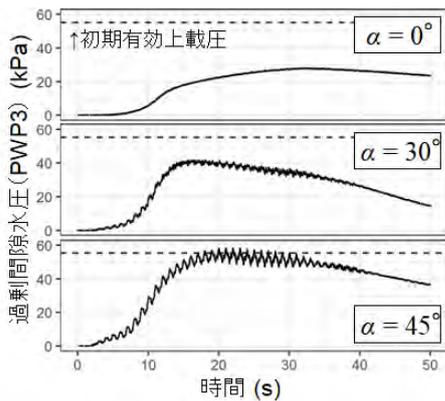


図4 加振中における地盤の過剰間隙水圧 (PWP3) 応答

水圧が σ_{v0} に達しており、液状化が生じています。この結果は図3の加速度応答とも調和的であり、地盤の密度が同じであっても、堆積角度が大きくなるほど液状化に至りやすい傾向にあることがわかりました。

固有異方性の影響を考慮した砂質土の構成モデル²⁾

遠心模型実験で見られた固有異方性を有する地盤の液状化挙動を数値解析でシミュレートするには、固有異方性の影響を考慮できる土の繰返し構成モデルが必要です。このような精緻な構成モデルの開発に関する研究は現在進行中のため、ここでは固有異方性の影響を考慮した構成モデルの概念と砂質土（豊浦標準砂）の静的・単調載荷時の力学挙動に対する妥当性検証の結果について紹介します。

紙面の都合上、数式を示すことはしませんが、ひずみ空間多重せん断モデルと呼ばれる液状化解析でよく用いられる砂質土の構成モデルに固有異方性の影響を組み込みました。提案モデルでは、固有異方性を表現する関数を導入することで、2次のファブリックテンソルが拡張されています。この関数には3つの追加モデルパラメータが存在し、うち2つ (a_1, a_2) は固有異方性の程度を、残りの1つ (θ) は固有異方性の方向（図5に示すように水平軸に対する堆積面の法線ベクトル方向）を表します。図6の上段は、供試体の

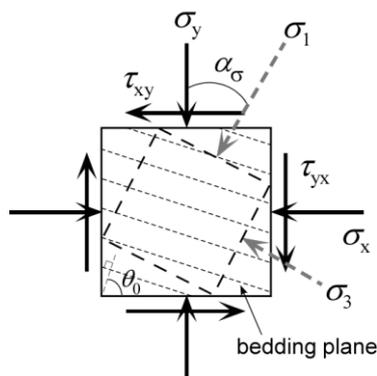


図5 任意方向せん断（主応力方向）と堆積面の関係

堆積角度は一定（水平、すなわち $\theta_0 = 90^\circ$ ）ながら、異なる主応力方向 (α_σ) で単調せん断を行うことで、固有異方性の影響を調べた実験的研究³⁾です。提案モデルにおいて単一のパラメータセット（例えば、異方性パラメータは $a_1 = 0.12, a_2 = 0.20$ で共通）を用いながら、有効応力経路（左列）と応力-ひずみ関係（右列）に及ぼす α_σ の違いによる影響を精度良くシミュレートできていることがわかります。

おわりに

本稿では、遠心場での模型振動実験の結果として、地盤の地震時動的挙動に固有異方性の影響が無視できず、堆積角度が大きくなるほど液状化に至りやすいことを紹介しました。また、単調せん断の条件ですが、固有異方性の影響を考慮した砂質土の構成モデルの有効性を紹介しました。

今後は、固有異方性を有する土の動的・繰返し挙動の精緻な構成モデル化に加えて、マクロな地盤応答に及ぼす固有異方性の影響を土粒子形状・配向などと関連付けてマイクロに解き明かすことなどが研究課題として挙げられます。

参考文献

- 1) Ueda, K., Uratani, K. and Iai, S.: Influence of inherent anisotropy on the seismic behavior of liquefiable sandy level ground, *Soils and Foundations*, Vol. 59(2), pp. 458-473, 2019.
- 2) Ueda, K. and Iai, S.: Constitutive modeling of fabric anisotropy in a strain space multiple mechanism model for granular materials, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 43(3), pp. 708-737, 2019.
- 3) Yoshimine, M., Ishihara, K. and Vargas, W.: Effects of principal stress direction and intermediate principal stress on undrained shear behavior of sand, *Soils and Foundations*, Vol. 38(3), pp. 179-188, 1998.

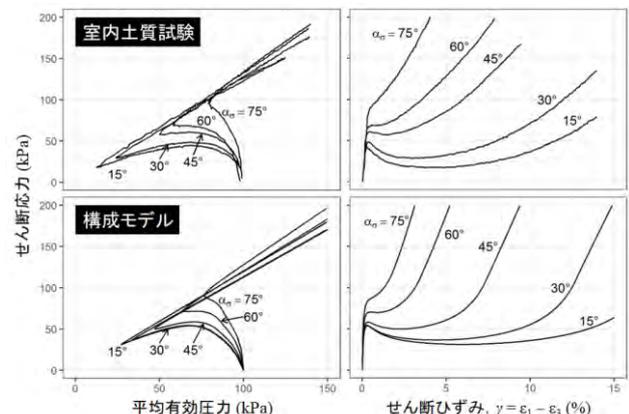


図6 豊浦砂（相対密度 40%）の非排水単調ねじりせん断試験の実験結果³⁾とモデルシミュレーション

人間の相互依存性を前提とした防災施策

防災研究所・災害リスクマネジメント分野・准教授 松田 曜子

「自らの命は自らが守る」を問い直す

日本の避難施策の基本的方針は、内閣府における避難情報の出し方の検討過程で常に議論されてきました。その議論の場で近年、再三にわたり繰り返されているのが『自らの命は自らが守る』意識が重要という文言です。この言葉は、2018年の西日本豪雨（平成30年7月豪雨）を機に設置されたワーキンググループの報告書に記載され、以降2021年の避難情報に関するガイドラインや2022年に公表された検討会報告書でも掲げられました。

こうした国の避難指針においては、自己判断能力を有する者を標準的な避難主体として想定しており、さらに「行政は（住民自らの判断を）全力で支援する」立場であるとの旨を明言しています。そして、判断の決定能力が十分ではなく標準的な避難主体に「至らない」人は「避難行動要支援者」であると定め、早い段階での情報周知（レベル3・高齢者等避難）により避難のための時間的猶予を設けるとともに、事前には個別の計画（個別避難計画）を策定し周囲の支援によって避難させるという対策を用意するという構造になっています。

一見、合理的なこの見立てですが、果たして「社会の標準的な構成員は『自らの命を自ら守る』ことができる人であり、それが叶わない層として『要支援者』がいる」という前提は自明だと言えるでしょうか。「私は自分で自分のことを守れる」という人の「合理的な行為」は、無自覚のうちに他者からの配慮に支えられていたり、制度や慣習によって守られていたりする可能性はないでしょうか。私は、この前提を問い直し、「自らの命を自らのみで守れる人はどこにもいない」、言い換えれば人間は誰しも脆弱で、他者との相互依存のもとにのみ生命を維持できるという前提にたった防災・避難施策を再考することを、京都大学防災研究所における最初の研究テーマに掲げることにしました。

このことを学術的に見ると、防災研究の分野においては、避難行動を個人の主体性（「意思があり行動がある」という性質）が発揮された結果として捉えることへの批判的論文が、近年複数発表されています。例えば矢守¹⁾は、「私が逃げたいから逃げる」といった単純な図式は実際にはほとんど見られないことを指摘し、及川²⁾は、主客未分な「中動的避難」においては、住民との相互作用や葛藤を厭わない専門家の姿勢が求められると主張しました。これらの論文はいずれも、福祉や医療分野の実務家に多く読まれた國分による「中動態の世界」³⁾を参照しており、社会の広範な領

域における現代的課題と同様、災害における避難においても、『能動対受動』の単純な対立様式による思考の行き詰まり⁴⁾が生じており、中動態によって描かれるような、「人と人の相互作用によって逃げられた」という避難行動様式の研究が求められていると言えます。

ケアを巡る議論

一方、私がここで掲げた人間の相互依存性を考える上で依拠するのは、パンデミック以降多くの論者が発表されることになった「ケアの倫理」です（自然災害学会論文集に投稿中）。

本稿にてケアの倫理の詳細に触れることは避けませんが、その概略は、現代が「ケアのない」あるいは「ケアを軽んじた」社会であり、強い個が自立/自律していることや、他者が介入しないことを是とする価値観に支配されているということ、そして、その代わりに、生活の中心にケア、すなわち他者への注視や応答、敬意を据えるならば、いったい何が起こるのかを問うべきだという主張です。

一点補足しておきたいのは、ここでは、「ケア」と聞いて多くの人が想起する介護や子育て、看護といった行為よりもはるかに広範な人間としての活動が想定されているということです。岡野⁵⁾では、ケアされている<わたし>の日常として、「雪国であれば朝早くから除雪車が道路を整備してくれ、公共交通機関では駅の構内から車両に至るまで、わたしたちを不快にさせないよう、そしてなにより安全のために、多くのひとが整備に携わっている」という描写がなされています。人々のよりよき生存を担う土木は、一大「ケア産業」であり、担い手不足などでその境遇が危機に瀕しているという現状は、福祉業界におけるその問題と「ケアの軽視」という文脈において通底すると私は捉えています。

話を元に戻しますと、「ケア宣言」⁶⁾という著作においては、ケアに満ちたコミュニティの核にあるべきものとして、

(1) 相互支援、(2) 誰の所有でもなく共同で維持される公的な空間、(3) 物ばかりでなく情報も含めて共有された資源と、(4) 外部化された事業を地域に取り戻すインソーシングも視野に入れたローカルな民主主義が必要だと述べられています。これを「人間の相互依存性を前提とした防災施策」に応用すると、例えば、最もケアが必要な人がニーズを決める、避難所となる場所を普段から育てておく、地域がLINEでつながっておく、自分たちの地域で小さな実践を行う、といった施策が仮説として想定されるのです。

住民どうしの会話が避難意思にもたらす効果の計測

これらの仮説の検証は、今後数年かけて取り組んでいくこととなりますが、ここでは先行して行った研究から、メッセージアプリ上で交わされる住民どうしの避難に関する会話画面の提示が、通常の避難指示の画面提示より、人々の避難意思 (willingness to evacuate) の促進に寄与するという仮説に関する実証的な研究 (中村・松田ら 土木学会論文集中に投稿中) を紹介します。

この研究では、Web でのアンケート調査を実施し、回答者の属性および複数の情報提示画面に対する避難意思を計測しました。情報提示画面は、LINE のメッセージを想定し、図 1 に示すように、自治体から届く避難指示 (以下、「避難指示」と)、近隣の住民どうしの避難に関する会話 (以下、「住民会話」) を用意しました。避難意思の計測には、回答者が自己の評定結果を連続帯である線分上の長さで自由に回答できる VAS (Visual Analogue Scale) 法を採用しました。具体的には、図 2 のように、「家にとどまる」を 0、「絶対に避難する (命を守る行動をとる)」を 100 とした際、どの程度避難したいかをスライドバーを動かして回答するという設計です。

サンプルサイズは、全国の男女を居住都市の規模別に割り付けた 600 票としましたが、情報提示画面の違いによる避難意思の差異を検討するため、回答者群を両者が提示される group A, 住民会話のみ提示される group B, 避難指示のみ提示される group C に 200 票ずつ等分に分割しました。

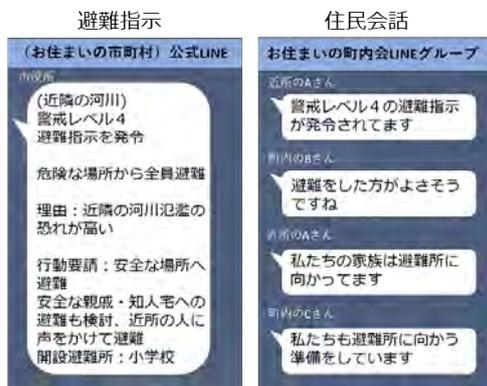


図 1 情報提示画面



図 2 VAS のスライドバー

詳細の結果は論文に譲りますが、単純統計量として避難指示の提示に対する避難意思の中央値は 35.5 (group C, n=200), 住民会話の提示に対する同値は 51.0 (group B, n=200) で、Bonferoni 法により有意な差が認められました ($p=5.6E-09$)。

図 3 は、個人属性のうち「近所との関わり」の有無別に、住民会話の提示に対する避難意思の頻度分布からカーネル密度曲線の推定を行った結果です。両者の中央値は、あり=56 (n=303), なし=49 (n=97) とマンホイットニー-U 検定によって有意な差が認められ、($p=0.01$) 普段から近所との関わりがある人は、関わりがない人に比べ住民会話を見ることで避難意思が高まると言えることがわかりました。

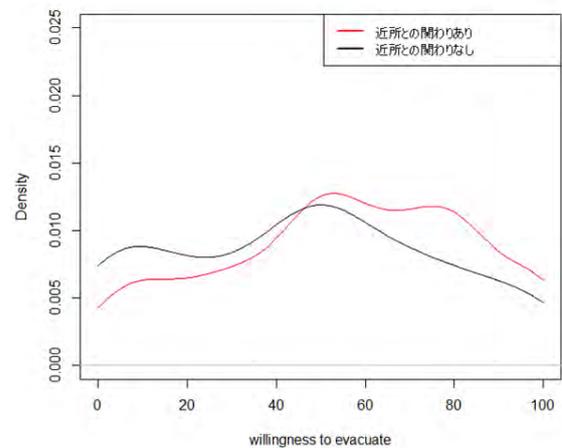


図 3 近所との関わりの有無と避難意思

この結果は、住民どうしが避難に関する会話をする画面の提示が、従来の避難指示に関する情報提示画面よりも避難意思を高める方向に寄与することを限定的な条件のもとで示したものです。しかし、そもそも地域の住民どうしが日常的に LINE の会話ができる状況にあるケースは限られているほか、このような会話は「避難しない」という文脈でなされる場合も当然に考えられます。このような課題は残されているものの、本研究のような分析の積み重ねによって、「人と人の相互作用によって避難が促進される」という仮説の検証を続けていきたいと考えています。

参考文献

- 1) 矢守克也: 能動的・受動的・中動的に逃げる, 災害と共生, Vol. 3, No. 1, pp. 1-10, 2019.
- 2) 及川康: 主体的避難の可能性について, 災害情報, Vol. 18, No. 2, pp. 135-140, 2020.
- 3) 國分功一郎: 中動態の世界 意志と責任の考古学, 医学書院, 2017.
- 4) 岡野八代: ケアの倫理 フェミニズムの政治思想, 岩波書店, 2024.
- 5) ケア・コレクティブ: ケア宣言 相互依存の政治へ (岡野八代・富岡薫・武田宏子訳), 大月書店, 2021.

機械学習による水文モデリングに関して

社会基盤工学・国際環境基盤マネジメント分野・准教授 Kim Sunmin

はじめに

機械学習の代表的なアルゴリズムであるニューラルネットワーク (ANN) は、1986年にBack-Propagationアルゴリズムの数学的な概念が確立されたことにより、1990年代に水文学分野で広く応用されるようになりました。しかし、入力変数やネットワーク構造を決定するための標準化されたプロセスがないこと、モデルが物理的な原理に基づいていないことの問題点がずっと指摘されていました。さらに、当時の技術水準では、ANNは回帰モデルに似た性能しか発揮できず、実際の活用には限界がありました。当時の1990年代にはデジタルデータが十分ではなかったため、そして、コンピュータの計算能力も限られていたため、複雑なANN構造を効率的に学習することが難しかったです。学習プロセスに関する理解もまだ十分ではありませんでした。近年ではADAM, Xavier Initializer, ReLUなどの新しい学習技術が開発されて、これらの問題が解決されています。また、観測データのデジタル化が進み、計算能力も大幅に向上したため、今は高精度のANNモデリングが十分可能になっています。

水文学的予測において、機械学習技術、特にANNへの関心は益々高まっています。ANNは大規模なデータセットから効率的に予測モデルを構築できるため、降雨流出シミュレーション、河川水位予測、降水の統計的ダウンスケーリングなどにおいて、高い予測精度を示しています。しかし、ANNを用いた水文学的予測の精度は、モデルの構造設計とトレーニングデータの質に大きく依存します。その中でも特に重要なのが、適切な入力変数の選定です。ANNのモデル構造は入力変数に強く依存するため、正確な予測を行うには、どのデータを選ぶかが極めて重要な要素となります。ところが、どの変数が最も効果的かを判断するのは難しく、モデラーたちは最適なデータセットを選定する際に多くの課題に直面しています。

入力変数の選定は、モデルが対象とする物理的プロセスを深く理解した上で行われます。例えば、洪水予測モデルにおいては、上流の水位や降雨量といったデータが重要視される一方で、蒸発量のデータは通常無視されます。このような選定プロセスは「専門家の判断」として知られており、モデラーの経験や知識に基づくものです。しかし、必要なデータを適切に選び出すことは容易ではなく、場合によっては入力変数を過剰に追加してしまうことがあります。この結果、過学習のリスクが高まり、モデルの予測精度が

逆に低下する可能性もあります。そのため、効率的で最適な入力データの選定は、依然として未解決の重要な課題として残っています。

多くの研究では、入力変数の選定に相関係数法やステップワイズ選択法、主成分分析などの手法が一般的に使用されています。これらの手法は従来の回帰モデルでも用いられてきましたが、ANNの非線形性を考慮すると、これらの方法では重要な変数を見落とす可能性があります。ANNの場合、変数間の複雑な非線形関係を捉えることが重要であり、誤った入力変数の選定は予測性能を大きく損なうリスクがあるのです。従って、適切な入力変数の選定が、ANNが本来の能力を発揮するための重要なステップであることは明らかです。

入力変数選択がANNの予測に与える影響の分析

ここでは、淀川流域におけるANNを用いた河川水位予測モデルを構築し、入力変数の選定がモデル性能に与える影響を調査した研究を紹介します。特に、ステップワイズ法や相関法を用いて選定した入力変数と、選定を行わずにすべての入力変数を使用した場合の性能を比較しました。また、訓練データが限られた場合におけるANNの挙動も調査し、入力変数選定の効果を詳細に評価しました。

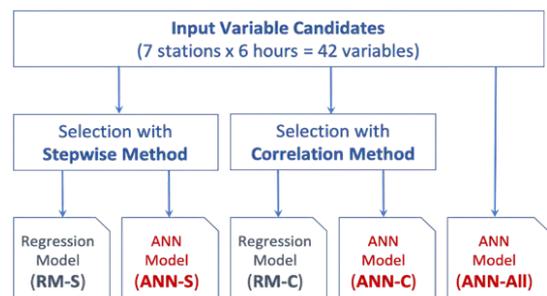


図1 淀川流域における入力変数選択実験の概要

今回の実験では、図1のように淀川流域の枚方観測所を対象に、3つの上流観測所と4つの雨量計のデータを使用しました。予測対象は9時間先の河川水位であり、各観測所からの直近6時間分のデータを入力として使用しました。最初に、専門家の判断に基づき、7つの観測所から得られた42個の入力変数をすべて使用してモデルを構築し、次に相関法およびステップワイズ法で選定された入力変数を用いて別のモデルを構築しました。相関法では、入力変数と予測対象の水位との相関係数を計算し、相関が高い上位31個の変数を選定しました。ステップワイズ法では、回帰モデルに基づいて、入力変数を段階的に追加または削除し、モデル性能が最適化されるような変数の組み合わせを選定しました。これらの選定方法により得られたモデルをANNおよび回帰モデルで構築し、すべての入力変数を使用したモデル(ANN-A11)と比較しました。

対象とした流域は淀川流域で、予測対象は流域下流に位置する枚方観測所です。上流には3つの観測所があり、これらから収集された水位データを使用しました。さらに、園部、京都、京田辺、信楽の4つの雨量観測所から降雨データを収集し、これらのデータを入力変数として活用しました。訓練データには1990年から2010年の21年間のデータを使用し、テスト期間(2011年~2013年)を用いてハイパーパラメータの最適化を行い、検証期間(2014年~2016年)を用いてモデルの評価を行いました。ANNモデルの学習では、学習率、ミニバッチサイズ、エポック数などのハイパーパラメータもさまざまな値でテストし、最適な訓練結果を選定しました。

ANNモデルの構築において、多くの研究者が悩むのは「どの入力変数を選ぶべきか」という点です。今回の実験では、ステップワイズ法と相関法という2つの方法で選定された31の入力変数と、全ての入力データを用いたモデルを比較しました。ステップワイズ法では、降雨データに重きを置き、水位データの一部が排除される一方、相関法では全ての水位データが選定されました。この結果、ステップワイズ法によるモデルも高い予測精度を示しましたが、全入力データを使用した場合と大きな違いは見られませんでした。予測精度の向上を目指して入力変数の選定を行うことも重要ですが、過度に選定プロセスにこだわる必要はないことがわかりました。必要最低限のデータさえ揃っていれば、ANNは自動的にデータの関連性を学習し、図2に示すようにNSC(Nash-Sutcliffe係数)0.929の高い精度を発揮することができます。

今回の研究では、9時間先の予測に加え、18時間先の水位予測も行いました。通常、予測時間が長くなるほど、精度は低下する傾向にありますが、ANNモデルでは、依然として回帰モデルを上回る予測精度を維持しました。特に、全

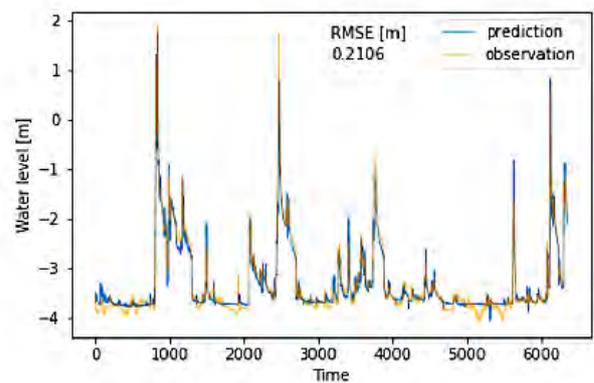


図2 ANN-A11モデルを利用した9時間先の予測結果

ての入力データを使用したANN-A11モデルでは、18時間先でもNSCが0.745の高い数値を示し、安定した予測が行えることが確認されました。

おわりに

今回の研究では、ANNが水文学分野において非常に有効な予測ツールとなり得ることが確認できました。特に、全ての入力データを使用しなくても高い精度で予測が可能であり、入力変数の選定に過度に依存しないという点で、実用的なモデル構築が可能です。また、学習データが限られている場合でも、ANNは安定した予測を行う能力があることが確認されました。今回の研究結果は、ANNが将来的に水資源管理や防災計画において非常に有効なツールとなる可能性を示しています。実用化に向けて、さらなる研究を重ね、現場での利用を目指していきます。参考文献には、一連の関連研究成果をまとめて掲載しました。

今後の展望としては、他の流域や異なる予測モデル(例えば、降雨予測や台風進路予測)にもANNを適用し、その効果をさらに検証する予定です。また、現場でのリアルタイム運用に向けたさらなる最適化や、他の深層学習技術との比較検討も進めていく考えです。

参考文献

- (1) Kim, S. and Tachikawa, Y.: Real-Time River-Stage Prediction with Artificial Neural Network Based on Only Upstream Observation Data, Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, Vol. 74(2), pp. I_1375-I_1380, 2018.
- (2) Kim, S., Takami, K. and Tachikawa, Y.: Effects of Input Variable Selection in Artificial Neural Network for Water Stage Forecasting, Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, Vol. 78(2), pp. I_145-I_150, 2022.
- (3) Kim, S., Tanaka, Y. and Tachikawa, Y.: Hydrological Forecasting Tests on Neural Network Models Considering Input Variable Selection and Data Quality, Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, Vol. 80(2), in Printing, 2024.

水道水源に生息するカビ臭産生藍藻類の監視技術

都市環境工学・環境質管理分野・准教授 浅田 安廣

はじめに

藻類は、独立栄養の植物で、光合成を行い、空中のCO₂ガスを固定・同化して有機物を合成する。そのため、藻類に由来するCOD成分濃度が高まり、その結果、環境基準である湖沼の有機汚濁(COD)の達成率を低下させている。また湖沼での生態系で、藻類は一次生産者として食物連鎖や物質循環の基盤であるが、異常増殖した場合には、生態系の変化による在来種や漁獲量の減少、水道水の異臭味の発生、浄水処理機能の低下などによる生物障害、悪臭の発生や景観の悪化による親水機会の減少など様々な課題が発生している。

水道分野においては、藻類による生物障害（水処理の過程で生物が原因となって生じる障害）が長年問題となっている。世界においては、その中でも藍藻類が産生する毒性物質であるシアノトキシンに着目されており、近年では長年蓄積されてきたシアノトキシンに関する知見に基づき、世界保健機関(WHO)は新たに「Toxic cyanobacteria in water」の第2版¹⁾を出版し、そして「Guidelines for drinking-water quality: Fourth edition incorporating the first and second addenda」²⁾では、シアノトキシンに関する新たなガイドライン値を記載した。

日本においては、カビ臭による水道の異臭味問題が長年、発生しており、その対策が求められている。カビ臭の原因物質としては、ジェオスミン、2-メチルイソボルネオール(2-MIB)が挙げられ、これらの物質は水道水質基準項目となっている。高度浄水処理の導入により異臭味問題への対策ができていたが、近年では気候変動の影響により、生息する藻類の特性が変化してきており、今まで問題とならなかった水源などで藻類によるカビ臭の発生が確認されたり、毎年カビ臭が発生している地域ではあるが処理しきれないレベルでの藻類によるカビ臭発生が確認されたり、今までになかった傾向が確認されつつある。

そしてこれら藻類の異常増殖に関する将来的な変化についても、気候変動による影響を含めた評価が進められており、水温の上昇に伴うアオコが問題となる期間の長期化や、藻類等の発生時期の早期化についても指摘されており、藻類発生に対する監視・対応が求められてきており、様々な目的に応じた監視技術が構築されつつある。そこで、本稿では水道分野において大きな影響を与える藍藻類に着目し、その監視技術に関する研究について紹介する。

藍藻類の監視技術

ここで藍藻類の監視に対する考え方と対応する技術については、以下の2点が視点としては重要と考える。

1. 藻類の異常発生状況に対する監視
2. 個々の藻体に対する監視

藻類の異常発生状況に対する監視については、水道水源での景観や水質悪化に対応するために必要な監視であり、海外を中心としてこれらの監視にリモートセンシングを活用するケースが増えてきている。日本では、ドローンを活用した事例では、「自立型アオコ除去システム」などが挙げられる。また世界でも、衛星データを利用して有害な藍藻類の繁殖(藻類ブルーム)を検出及び定量化し、それを可視化したCyanobacteria Assessment Network モバイルアプリケーション(CyAN アプリ)の開発などが挙げられる。

一方、日本の水道事業においては光学顕微鏡を用いた個々の藻体に対する監視が重要となってくるが、カビ臭産生藍藻類などでは種のレベルで監視を行う場合があり、相当な経験が必要となる。しかし、十分な技術・経験を持った人材を確保することが難しいため、経験を補える新たな監視技術が必要となり、そこで着目した技術がPCR等の遺伝子検査技術である。そこで、以降では日本で問題となっているカビ臭産生藍藻類のPCRによる監視技術に関する研究の一部を紹介する。

カビ臭産生藍藻類の全国調査

カビ臭産生藻類の監視技術に関する研究を進めるにあたり、重要な課題点として挙げられたのが、日本におけるカビ臭産生藍藻類自体のデータベース(形態情報、遺伝子情報など)が

非常に少ないことである。そこで、カビ臭が発生した日本全国の水道水源を訪れ、ダム湖などの閉鎖性水域や河川上流の清流の岩部分などから藻体を採取した(図1)。



図1 藻体採取の様子

全国調査で多くのカビ臭産生藍藻類の藻体が確保できたことから、種の同定、形態情報の収集、カビ

臭原因物質産生関連遺伝子の配列情報の収集を実施した。カビ臭原因物質を産生する藍藻類には、産生に関連する遺伝子(2-MIB 合成酵素遺伝子, *geoA* 遺伝子)を保有していることが明らかとなっている。PCRによりカビ臭産生藍藻類を検出するためには、これらの特異的な遺伝子を対象としたPCR系の構築が必要となる。しかし、先述した通り、日本国内でのカビ臭産生藍藻類の遺伝子情報が非常に少ないことから、情報蓄積が必要不可欠であり、全国調査といった地道な取り組みが非常に重要な役割を担ったと言える。

簡易同定・定量可能なPCR系の構築に向けて

ここでカビ臭産生藍藻類の中で、ジェオスミン産生株については*geoA* 遺伝子の配列情報、2-MIB産生株については2-MIB合成酵素遺伝子の配列情報に基づき、分子系統解析を行った。その結果、*geoA* 遺伝子では属レベルでクラスターを分けることが可能であったことから、遺伝子解析により属レベルでの判定は可能であると考えられた。一方、2-MIB合成酵素遺伝子は詳細な配列情報を比較した場合、特定の箇所を除いてDNA配列が非常に類似していることから、長い配列情報を得ることで属レベルでの判定は可能であると考えられた。PCRによるカビ臭産生株の監視においては、海外で検証が進められており、*geoA* 遺伝子については特定の属に対するPCR系が確認されているが、2-MIB合成酵素遺伝子についてはPCRによる包括的な検出のみであり、特定の属に対するPCR系が構築されていない³⁾。本調査で得られた2-MIB合成酵素遺伝子の配列情報からも特定の属に対するPCR系の構築が厳しいと予想されるが、一方で特定の箇所での配列の違いが確認されていることから、今回得られた多くの配列情報に基づくことで、属に特異的なPCR系の構築が可能であると考えられた。そこで、得られた配列情報に基づき、日本において発生する代表的な2-MIB産生株(*Pseudanabaena*属, *Planktothricoides*属)及びジェオスミン産生株(*Dolichospermum*属, *Aphanizomenon*属)の同定・定量可能な定量PCR系の開発を試みた。そして開発した手法を用いることで、水道水源でのモニタリング試験を4水源の原水に適用した結果、カビ臭原因物質産生藻類を属レベルで簡易同定・遺伝子量定量ができ、さらに同時に異なるカビ臭原因物質が発生した場合でも原因種同定、遺伝子量把握が可能であることから、監視手法としての本手法の有用性が示された。しかし、実際の監視において実用化を目指すためには、作業の簡便さ、試薬の安定的確保、費用面についても考慮する必要がある。そこで現場で活用しやすくするために、現場でPCRによる調査が可能なオンサイトモニタリング手法についても検討が始まっている⁴⁾(図2)。この分野での今後の技術的な発展が期待される。

まとめ

全世界で藍藻類による甚大な影響が生じている中で、様々な対策を行うためには、目的に合った監視技術が必要であり、その技術は発展しつつある。日本国内でも藍藻類の異常発生に関する問題は様々な方面で生じており、監視とその解決策について検討していることから、これらの監視技術が役に立つことを期待している。



図2 現場での簡易モニタリングに使用する機器一式

参考文献

- 1) WHO, 2021. Toxic cyanobacteria in water - Second edition. CRC Press, London, UK.
- 2) WHO, 2022. Guidelines for drinking-water quality: Fourth edition incorporating the first and second addenda. WHO, Geneva, Switzerland.
- 3) Devi, A., Chiu, Y. T., Hsueh, H. T., Lin, T. F., 2021. Quantitative PCR based detection system for cyanobacterial geosmin/2-methylisoborneol (2-MIB) events in drinking water sources: Current status and challenges. Water Research, 116478.
- 4) 三長裕, 吉野泰盛, 古口健太郎, 阿部春太, 浅田安廣, 2023. カビ臭原因藍藻類の監視強化に向けた迅速モニタリング手法の検討. 令和5年度全国会議(水道研究発表会)講演集, 202-203.