

# 解析雑誌

Vol.55 2025.07

## Topics

- 解析雑誌講演会 開催報告
- 衛星データを活用した 地震被害の可視化
- より良いAI活用のために 気を付けていること
- AIによる力学系の表現と将来予測

## Technical Report

- 圧縮センシング DIC カメラのサンプリングレートを超えた 画像振動計測

## 創刊から25年目の初講演会

解析雑誌 初代編集担当  
(株)構造計画研究所  
エンジニアリング営業2部  
為広 尚起

プログラム開発と解析系の技術職を経て、四十前に初めて営業職となった私は、最初のご挨拶回りを終えたところで、少々悩んでいました。

とは言つても、次にやるべきことは明白でした。新たにお会いするお客様をどうにかして見つけるか、すでにお目にかかったお客様に少し時間をおいて繰り返しお会いするかです。前者に関しては、そのための情報収集、社内外への紹介依頼、セミナーや展示会の企画など、いくつかの方策がイメージ出来ていきましたので、やれやれ大変だと思ってはいても悩んではいませんでした。しかし、後者の方は……ごく小さかった自分の引き出しも、先輩が作ってくれた既存の営業資料も、最初の訪問でほぼ使い切っていましたから、何も相談されていない状態で、どのように次の訪問をお願いして、お会いした時に何から話せばよいのか、さっぱり分からなかつたのです。

その悩みから、同じお客様と繰り返しお会いするためのアイテムとして考案したのが解析雑誌でした。社内に散在している最新の技術情報を、定期的にかき集めて冊子にして配るという案を当時の上司に話したところ、「最初の一号二号はいいかも知れないが、続けられるのか?」と心配されました。実は類似の取り組みはそれ以前にもあったのですが、数号で途絶えていたのです。ごもっともな指摘でしたし、私だって心配でした。しかし、各号に無理にテーマ性を持たせようとせず、相互に関連がなくとも、その時点で集めることができた話題を幅広に掲載するという雑誌的な編集方針であれば、社内にはこれだけ多様な技術者がいるのだから、何とか乗り切れるだろうと楽観的に判断し、創刊に踏み切ったのが2000年9月のことでした。

その後、編集担当が代替わりしながら刊行を続けていく内に、何度か懸念通りの事態に陥りかけたため、「定期的に」はずい分と怪しくなりましたが、おかげ様で創刊から25年が経過した今般もこの55号を皆様にお届け出来ることとなりました。当時の上司が「25年」や「55号」といった数字を聞いたらさぞ驚くことでしょう。しかしその間、刊行し続けることで精一杯だったせいか、各号の記事を元にした講演会を開催しようなどとは、つい最近まで誰も考えたことがありませんでした。

25年にしてようやくそこに思い至り、初めて開催した「解析雑誌講演会(2025年5月)」は、弊社社員の講演プログラムのみであったにも関わらず、大勢の皆様のご参加をいただきました。日頃のご愛読と併せて厚く御礼申し上げます。記事を執筆した本人に「書いてくれた内容をそのまま講演して欲しい」とだけ依頼していたのですが、多くの講演者が既存の掲載内容+ $\alpha$  (未掲載の最新情報)を準備していた点は、身内ながら頼もしく思いました。

解析雑誌55号にはその+ $\alpha$ をいくつかピックアップして掲載しています。講演会に参加された方もそうでない方も是非ご一読ください。そして今後の解析雑誌と解析雑誌講演会にもご期待をいただければ幸甚です。

# 解析雑誌 Vol. 55 2025. 07

---

## 卷頭言 創刊から 25 年目の初講演会

02

エンジニアリング営業2部 為広 尚起

---

### Topic 1

- 解析雑誌講演会 開催報告 04

### Topic 2

- 衛星データを活用した地震被害の可視化 06

### Topic 3

- より良い AI 活用のために気を付けていること 11

### Topic 4

- AI による力学系の表現と将来予測 14
- 

### Technical Report 1

- 圧縮センシング DIC 22

カメラのサンプリングレートを超えた画像振動計測

事業開発部 データ同化エンジニアリング室 綿引 壮真

---

### Kaiseki Portal / From Editors

31

本誌内では私共「構造計画研究所」のことを「KKE」と称している箇所があります。

## 解析雑誌講演会 開催報告

2025年5月22日（木）、当社主催による「解析雑誌講演会」を開催いたしました。本講演会は、技術者同士の知見共有や解析技術の発展を目的として、直近の解析雑誌でご好評をいただいた記事を題材に、創刊以来初めて開催したものです。

当日は、現地とオンラインを併用したハイブリッド形式で行い、全体で289名（現地参加33名／オンライン参加256名）の方にご参加いただきました。

### ● 開催概要と質疑応答の様子

今回の講演では、以下の3セッションを通じて、各分野での最新の取り組みや知見をご紹介しました。

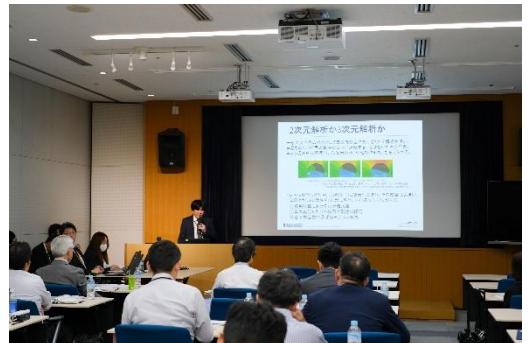
#### 【セッション1：蓄積したデータの高度利活用】

日々の業務の中で蓄積される成果物データや知見に加え、国土交通省をはじめとする自治体・官公庁が整備・公開している大規模なオープンデータなど、さまざまな情報資源の活用に焦点を当てた4つの取り組みが紹介されました。質疑応答では、「実運用への適用における課題」や「今後の発展可能性」といった点について活発な議論が交わされ、参加者の高い関心がうかがえました。



#### 【セッション2：暮らしの安全を検証する解析技術】

地震や土砂災害などの自然災害に対して、インフラ構造物がどのような外力を受け、十分な耐久性を備えているかなど、解析技術に関する5つの取組みが紹介されました。能登半島地震における災害の可視化や衛星データの活用に関する先進的な取り組みも取り上げられ、参加者の関心を集めました。質疑応答では、「実務での適用可能性」や「検討における条件設定の考え方」といった、実践的な観点からの質問が多く寄せられ、解析技術への高い期待が感じられました。



#### 【セッション3：計測と解析でリアルを解き明かす】

センサーヤやカメラによる計測結果と構造解析によるシミュレーションを組み合わせて、構造物の実態を捉える取り組みを中心に5つの取り組みが紹介されました。計測と解析の相互作用によって現状把握や将来予測の精度を高めるアプローチが示され、参加者の関心を引きました。質疑応答では、「計測データの誤差や信用度」や「モデルとの整合性確保の工夫」といった実務的な課題に対する質問が交わされ、活発な意見交換が行われました。



## ● アンケート結果

講演会終了後に実施した参加者アンケートでは、全体の約 97%の方から「期待通りだった」または「期待以上だった」とのご回答をいただきました。内容の充実度や発表のわかりやすさについても、多くの好評の声が寄せられ、以下のようなご意見・ご感想を頂戴しました（一部抜粋）。

- ・ 最新の情報や高度な技術が紹介されており、今後の業務に活かせる多くのヒントを得ることができました。
- ・ 興味深いテーマが多く、大変刺激的な内容でした。最新の取り組みを知る貴重な機会として、今後も継続開催を期待しています。
- ・ 実務では解析結果と実測データの乖離に悩まされることがあります、『データ同化』というアプローチを知ることができ、非常に有意義でした。

また、当日の進行や構成、開催方法に関するご意見につきましても、今後のより良い開催に向けて貴重な参考とさせていただきます。

## ● 企画展示・懇親会の様子

会場では、3D データ計測デバイス「NavVis VLX／MLX」の実機展示による体験コーナーのほか、昼休憩中には「KKE ラボ」のツアー見学を開催しました。KKE ラボでは、3 次元都市モデル「PLATEAU」を活用したシミュレーション結果をジオラマとして可視化しており、来場者の皆様にはその“見える化”的の一例を実際にご体験いただきました。

また、講演会終了後には懇親会も開催され、登壇者や参加者が自由に交流しながら、技術的な意見交換が活発に行われました。

## ● おわりに

ご参加いただいた皆様に心より御礼申し上げます。

今後も解析技術の価値を社会に広げ、実務に貢献する場を提供してまいります。次回開催もどうぞご期待ください。



## 衛星データを活用した地震被害の可視化

先日の解析雑誌講演会において「能登半島地震における災害の可視化」という題目で、解析雑誌 Vol.52 の内容（能登半島地震における土砂災害と地震動の可視化）に加えて、災害時の衛星データの活用可能性をご紹介しました。

本稿は、衛星データの活用可能性に焦点を当て、上記の題目の内容を再編集したものです。なお、ここでは、地震被害として地盤変状/液状化を取り上げます。衛星データの処理・可視化には ENVI SARscape<sup>1)</sup>及び QGIS<sup>2)</sup>を用います。背景地図には国土地理院の地理院タイル<sup>3)</sup>を用います。

### ● 衛星データの特徴

人工衛星には、通信衛星や測位衛星、地球観測衛星などがありますが、本稿では地球観測衛星を扱います。比較的一般的な地球観測衛星としては光学衛星と SAR 衛星があります（図 1）。

光学衛星は、太陽光の反射を光学センサで捉える仕組みです。そのため、雲があると地上の様子が分からず、夜間は観測できないという特徴があります。いわゆる衛星写真が光学衛星で撮影された画像です。

一方、SAR (Synthetic Aperture Radar ; 合成開口レーダー) 衛星は、衛星がマイクロ波を照射し、地表で反射したマイクロ波をセンサで受信するという仕組みです。マイクロ波は雲を透過するため、天候に左右されず撮影可能です。また、衛星自身がマイクロ波を照射しているため、夜間も撮影可能です。

SAR 衛星は上記の特徴から災害時の活用が期待されているため、本稿では SAR 衛星で撮影された画像（SAR 画像）を使った解析の例を紹介します。SAR 画像にはマイクロ波の強度情報と位相情報が含まれます。何らかのイベント（例：地震）によって地表に変化が生じた場合、イベント前後での SAR 画像を比較すると、これらの情報が変化します（図 2）。以降では、このような SAR 画像の特性を利用して、2024 年 1 月 1 日に発生した能登半島地震の被害を可視化することを試みます。

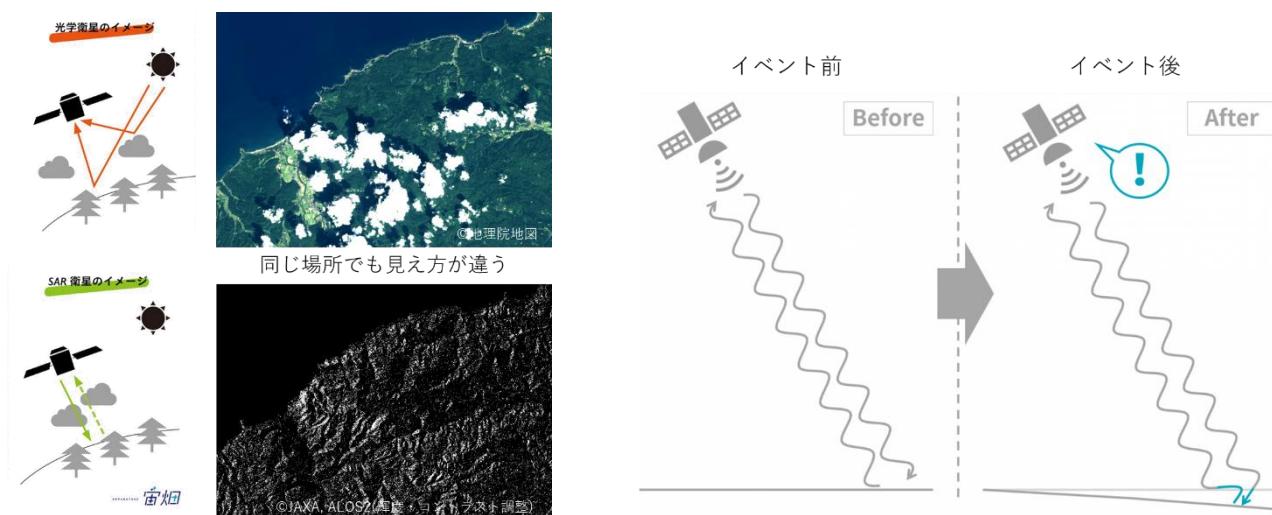


図 1 光学衛星と SAR 衛星の違い  
左図：宙畠の記事の画像を一部編集<sup>4)</sup>。右上図：地理院地図（写真）。右下図：JAXA の ALOS-2 による SAR 画像<sup>5)</sup>

図 2 イベント前後で SAR 画像に含まれる情報の違い  
宙畠の記事の画像を一部編集<sup>6)</sup>

## ● SAR 画像のコヒーレンス処理

地震前後での SAR 画像の差異を定量化するには様々な処理がありますが、ここでは、地震前後の 2 時期の SAR 画像に対してコヒーレンス  $\gamma$  を計算します。

$$\gamma = \frac{|\langle C_1 C_2^* \rangle|}{\sqrt{\langle C_1 C_1^* \rangle \langle C_2 C_2^* \rangle}}, (0 \leq \gamma \leq 1)$$

ここで、 $C_1$ 、 $C_2$  は任意の SAR 画像（振幅・位相情報をもつ複素数）で、\* は複素共役、 $\langle \rangle$  はウィンドウ内の平均処理を意味します。なお、コヒーレンス計算時のウィンドウサイズは  $5 \times 5$  ピクセル（1 ピクセルは 15m）としています。

$\gamma$  は 2 枚の SAR 画像の位相の相関係数であり、位相差の空間的なばらつき（干渉度）を表します。ばらつきが大きいほど値は小さくなります。すなわち、変化があるエリアでは、 $\gamma$  は相対的に小さくなることが期待されます。ただし、 $\gamma$  には、地震以外に起因した変化（例えば、作物の成長、植生変化）も反映されるため、地震前後のコヒーレンス変化を求めるだけでは、液状化などの地震に起因した事象の発生箇所を特定するのは困難です。そこで、下式に従ってコヒーレンス変化  $\Delta\gamma$  を計算します。

$$\Delta\gamma = \gamma_{pre} - \gamma_{co}$$

$\gamma_{pre}$  は地震前の 2 時期の、 $\gamma_{co}$  は地震前後の 2 時期の SAR 画像を参照したコヒーレンスです。つまり、 $\Delta\gamma$  が 0~1 の範囲をとるエリアでは、地震によって変化が生じている可能性があります。

本稿では、SAR 画像として Sentinel-1<sup>7)</sup> のデータを使用します。撮影時期は、地震前が①2023 年 12 月 13 日と②2023 年 12 月 25 日、地震後が③2024 年 1 月 6 日です。①と②から  $\gamma_{pre}$  を、②と③から  $\gamma_{co}$  を計算しています。

## ● コヒーレンス変化から見える被害・現象

以降では地盤変状の例として、鉄道軌道周辺の変状と液状化に着目します。

### 鉄道軌道周辺の変状

能登半島地震の際に被害が報告されている（例えば、金山(2024)<sup>8)</sup>）、のと鉄道沿線の一部エリアのコヒーレンス変化  $\Delta\gamma$  を図 3 に示します。図では、後述する液状化発生箇所におおよそ対応する値として、 $\Delta\gamma$  が 0.2 以上の範囲を示しています。図から、鉄道沿線の一部やいくつかの駅周辺でコヒーレンス変化が比較的大きいことが分かります。これらのコヒーレンス変化は被害箇所に対応している可能性があります。例えば、大津川橋梁付近では周辺に比べて比較的大きいコヒーレンス変化が表れています（図 3 の中央図）、大津川橋梁では軌道沈下が報告されています（図 3 の右図）。



図 3 のと鉄道沿線のコヒーレンス変

化分布と地震後の大津川橋梁

赤線：線路（国土数値情報）<sup>9)</sup>、水色：駅（国土数値情報）<sup>9)</sup>。右の写真は、金山(2024)<sup>8)</sup>より。中央の図は左図の赤破線のエリアを拡大。

## 液状化

コヒーレンス変化からは、液状化発生箇所を特定できる可能性が示唆されています（例えば、劉・他(2019)<sup>10)</sup>）。能登半島地震では石川県、富山県、新潟県、福井県で液状化が報告されており（例えば、先名(2024)<sup>11)</sup>）、特に、石川県内灘町では顕著な液状化（及びそれに伴う側方流動）がありました。図5の左図では帯状にコヒーレンス変化が大きいエリアが表れていますが、このエリアで液状化の発生が確認されています。図で赤破線で示した西荒屋小学校付近では、液状化に伴う側方流動によって道路が隆起していますが、このような変動もコヒーレンス変化から捉えられることが分かります。

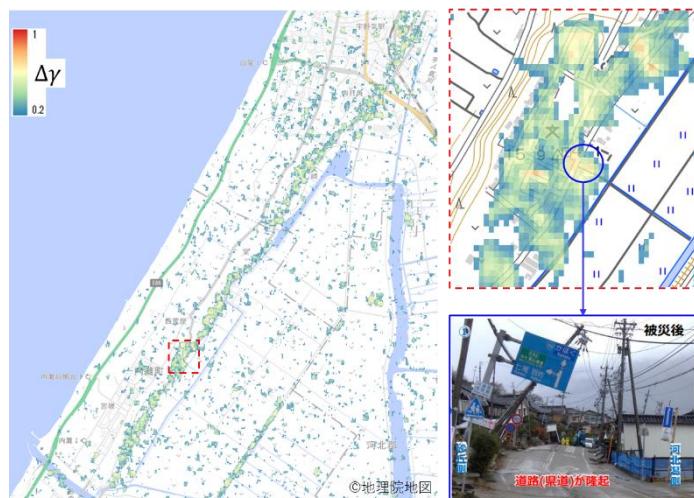


図5 石川県内灘町のコヒーレンス変化と地震後の液状化被害の写真

右上図は左図の赤破線のエリア（西荒屋小学校付近）を拡大。右下は液状化被害の写真（石川県の被害報告資料<sup>12)</sup>より）。

## ● 衛星データを活用した液状化発生箇所予測

衛星データの利点のひとつは、現地に行かずとも広範囲の地表の変化を把握できることです。この変化には、前述したような軌道沈下、液状化が含まれます。しかし、衛星データ（本稿ではコヒーレンス変化）だけでは変化の原因を特定することは困難です。そこで、衛星データと既存の予測モデルを組み合わせて、任意の現象の発生箇所を特定することを試みます。

本稿では、既存の予測モデルとして、液状化発生確率（松岡・他, 2011<sup>13)</sup>）を用いることとします。ここで液状化発生確率は、地形・地盤分類データと計測震度から推定しています。なお、2024年4月以降の地震であれば、弊社のサービス QUIET+<sup>14)</sup>（解析雑誌 Vol.50 でご紹介）にて液状化発生確率のコンターマップが閲覧可能です。

具体的な処理としては、下式のようにベイズの定理に基づいて液状化発生確率の精度向上を図ります。

$$p(x_i|y_i, I_i, A_i) = \frac{p(y_i|x_i, I_i, A_i)p(x_i|I_i, A_i)}{p(y_i|I_i, A_i)} = \frac{p(y_i|x)p(x_i|I_i, A_i)}{p(y_i)}$$

$I_i$  はピクセル  $i$  の計測震度、 $A_i$  はピクセル  $i$  の微地形区分、 $p(x_i|I_i, A_i)$  は液状化発生確率（事前確率）、 $p(y_i|x)$  は液状化発生箇所におけるコヒーレンス変化の頻度分布に基づく尤度関数、 $p(y_i)$  は SAR 画像全域におけるコヒーレンス変化の頻度分布に基づく周辺尤度です。また、 $x_i$  はピクセル  $i$  が液状化している状態を、 $y_i$  はピクセル  $i$  がコヒーレンス変化 0 以上の状態を意味します。なお、尤度関数の設計において、本稿では液状化発生箇所におけるコヒーレンス変化が各ピクセルの計測震度や微地形区分によらず、同様の頻度分布に従うことを仮定しています。

上式に従って既存の液状化発生確率を更新した例（富山県高岡市付近）を図6に示します。図6の左図は既存の液状化発生確率です。図に示したエリアでは、液状化の発生が確認されています（図の水色）、液状化発生確率はほぼ 0% と見逃しが発生しています。一方、図6の中央図にはコヒーレンス変化の空間分布を示していますが、左図の液状化発生箇所とコヒーレンス変化が比較的大きいエリアはおよそ対応しています。これらを組み合わせた結果が図6の右図です。実際に液状化が確認されたエリア

の液状化発生確率は、大きいところで 20~30%程度まで上昇しています。また、コヒーレンス変化は、基本的に地表のあらゆる変状に対応しているため、液状化が発生していないエリアでも比較的大きなコヒーレンス変化が点在していますが（例えば、中央図の北側の山間部）、更新後の確率を見ると、そのようなエリアでも液状化発生確率はほぼ 0%に抑えられていることが分かります。

## ● まとめ



図 6 液状化発生確率の精度向上の例

水色は現地調査で確認された液状化発生地点・エリア（青山（2024)<sup>15</sup> より判読）

本稿では SAR 画像という衛星データを対象に、コヒーレンス変化を計算し、2024 年能登半島地震による被害箇所との対応を確認しました。

建物や鉄道の被害があったエリアや液状化発生箇所は、コヒーレンス変化が比較的大きなエリアとおよそ対応しており、衛星データ（SAR 画像）を使えばこれらの被害エリアを特定できる可能性があります。しかし、衛星データだけでは何が起こっているのか（被害の種類や現象など）までを特定することは困難です。そこで本稿では既存の液状化予測モデルとコヒーレンス変化の情報を組み合わせて、液状化発生確率の精度を向上させる例を示しました。

弊社では、平時～災害時の衛星データの活用可能性について検証・ヒアリングを実施中です。「災害から数日経っても、現地に立ち入れず被害の全体像が掴めない」、「いつも同じ地域で被害が起きていると思うが、定量的な裏付けがなく対策が進まない」などの皆様の悩みを解決する一助として弊社の技術がどのように活用できるのか、一緒に考えさせてください。

## ● 参考文献

- 1) NV5 Geospatial 株式会社 : <https://nv5geospatialsoftware.co.jp/Software-Technology/ENVI>
- 2) QGIS : <https://qgis.org/ja/site/about/index.html>
- 3) 国土地理院、地理院タイル : <https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html>
- 4) <https://sorabatake.jp/662/>
- 5) ALOS-2 / PALSAR-2 観測プロダクト : [https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/jp/dataset/open\\_and\\_free/palsar2\\_l11\\_l22\\_j.htm](https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/jp/dataset/open_and_free/palsar2_l11_l22_j.htm)

- 6) <https://sorabatake.jp/12465/>
- 7) Copernicus Browser : <https://browser.dataspace.copernicus.eu/?zoom=5&lat=50.16282&lng=20.78613&demSource3D=%22MAPZEN%22&cloudCoverage=30&dateMode=SINGLE>
- 8) 金山洋一(2024) : [https://jsce-ip.org/wp-content/uploads/2024/06/notoeq\\_4-1.pdf](https://jsce-ip.org/wp-content/uploads/2024/06/notoeq_4-1.pdf)
- 9) 国土数値情報 鉄道データ : [https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-N02-v3\\_1.html](https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-N02-v3_1.html)
- 10) 劉 ウェン・山崎文雄・丸山喜久・松岡昌志(2019) : [http://ares.tu.chiba-u.jp/yamazaki/pdf/kouen/2019LL9\\_Liu.pdf](http://ares.tu.chiba-u.jp/yamazaki/pdf/kouen/2019LL9_Liu.pdf)
- 11) 先名重樹(2024) : [https://www.bosai.go.jp/sp/introduction/kyoso/kenkyukai/mha4gl00000018mw-att/houkokukai\\_senna.pdf](https://www.bosai.go.jp/sp/introduction/kyoso/kenkyukai/mha4gl00000018mw-att/houkokukai_senna.pdf)
- 12) <https://www.pref.ishikawa.lg.jp/kankyo/suidou/documents/ekijoukakisyahappyo.pdf>
- 13) 松岡昌志・若松 加寿江・橋本光史(2011) : [https://www.jstage.jst.go.jp/article/jaee/11/2/11\\_2\\_2\\_20/\\_pdf/-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jaee/11/2/11_2_2_20/_pdf/-char/ja)
- 14) QUIET+ : <https://site.quietplus.kke.co.jp/>
- 15) 青山雅史(2024) : [https://disaster.ajg.or.jp/files/202401\\_Noto012.pdf](https://disaster.ajg.or.jp/files/202401_Noto012.pdf)

# より良い AI 活用のために気を付けていること

近年の AI 関連技術の発達と普及の速度は著しく、AI サービス等を様々な形で目にしたり利用したりされているのではないでしょか。またオープンソース化の潮流もあり多くの OSS が存在し、気軽に試行することが可能な環境も整っています。そのため既に AI 活用やご自身の業務用の AI システムの検討・開発に取り組まれている方々も多くいらっしゃるかと存じます。

そこで本稿では、これまでに画像認識を中心に取り組んできた AI 活用に関する経験に基づき、弊社がより良い AI 活用のために留意していることについて述べます。画像認識以外にも当てはまることは多いかと存じますので、参考になりましたら幸いです。

## ●教師あり学習と AI システムの開発フロー

AI の学習方法にも色々ありますが、入力と正解(認識結果)の組のデータ(これを教師データと呼びます)を与えて、AI に学習させる手法を教師あり学習と呼びます。教師あり学習では、AI は与えられたデータの特徴やパターンを学習し、未知のデータに対しても認識が出来るようになります(教師データの傾向から大きく逸脱しない場合に限ります)。この学習を終えた AI(具体的には関係式、関数やニューラルネットワークのパラメータ)をモデルとか学習済みモデルと呼びます。以下ではこの教師あり学習について述べます。

教師あり学習では教師データの作成も非常に重要であり、AI システム開発のライフサイクルは図 1 のようになります。ライフサイクルの各フェーズは以下の通りです。

### スコープ定義

AI 活用により解決を図る課題・業務を絞り込む。また業務全体における当該業務の位置付け、AI 導入前後でのワークフローの変更点等を検討・整理する。

### データ収集・整理

AI への入力となる対象データを収集し、認識対象のクラス分け等の整理を行う。また入力データと正解値の紐付け(アノテーション)作業により教師データを作成する。後述の通り教師データの質は重要であるため、正確性、一貫性、被覆性(対象データの全体をカバーできているか)等に注意する。

### モデル学習

採用手法(モデル)を決定し、作成した教師データを用いて AI モデル学習する。ゼロから学習する方法や公開されている学習済みモデル等を起点に自身の目的に合ったモデルを学習する方法(ファインチューニング)等がある。

### 運用

学習したモデルをシステムに展開し(デプロイ)活用する。運用中の AI の認識精度と共に入力データの傾向に学習時から変化がないかモニタリングすることが望ましい。また自動的なデータ収集の仕組みを準備し、AI モデルの精度向上に向けた教師データ増強に備えることが望ましい。

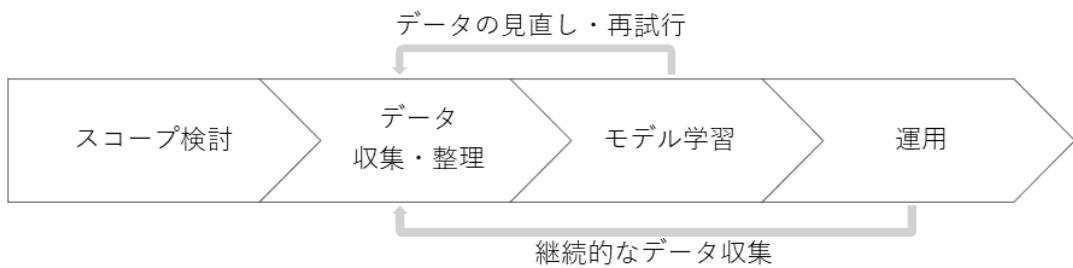


図1 AIシステム開発のライフサイクル

## ●AI活用に関する留意点

AI活用に関するお悩みや問題、過去の苦労譚等をお伺いすることができます。弊社では、そのような事態に陥らないように、留意していることがいくつかあります。

### • PoCによる精度の見極め

最近ではAI活用によりかなり高度なことが実現可能になっています。しかし未だ精度100%のモデルを作成することは非常に困難だと思われます。問題の難易度にもよりますが、弊社の経験ではデータ計測に高い制限(例えば画像認識の場合、常に安定した光源下で十分な解像度の画像が撮影できる環境を設けるなど)を設けることができない限り、70-80%程度の精度に落ち着くことが多いように思われます。もちろんAIモデルの改良やデータ計測手段の工夫等により、より高い精度のモデル構築を目指すことは可能ですが、非常に大変な作業になることもあります。そのため、過度な期待は避け、取り組む課題に対するAIの実現可能な精度を見極め取り組む必要があります。

そのためには、PoC(Proof of Concept:概念検証)が非常に有効です。PoCでは、主に対象となるデータに対し、AIモデルを試行的に作成・精度評価を行うことにより、実現可能な精度の見極めや当該課題の難しい点を明らかにするフェーズです。このPoCの結果を基に、AIを適用する作業範囲の明確化や実現するシステムの設計・開発を進めていきます。PoCの結果に基づくことで、高すぎる目標設定のためにいつまでもAIの検討を続けてしまい、運用に至らないという事態を避けることもできます。

### • 精度の見極めに基づくAI活用方針の検討

「AI活用を始めたが効果が出ずに悩んでいる」と言うことをお伺いすることができますが、その多くは期待と実現したAIモデルの精度の乖離に起因することが多いように思われます。例えば非常に高い精度でAIが認識してくれる想定でシステムを構築したが、思ったよりも精度が低いため結局人間によるダブルチェックを行っているため業務効率が上がらない等です。

これらについては、上述のPoCに基づき正しい目標設定とAIの適用方法を検討することで未然に防ぐことが可能です。例えば認識対象を絞ることでAIの精度を上げるもしくはAIはデータの一次スクリーニングに用いるなどが考えられます。これは実現可能なAIの精度を踏まえAIに任せるデータと人が介在した方が良いデータに分けることで、人の負荷を下げるアプローチです。このようなアプローチをとることで、早急にAIの恩恵を得ることができます。また並行して技術開発(もしくは世の中の技術革新にアンテナを待つ)ことにより、段階的にAI活用を進めることができます。

実現可能なAIの精度の見極めと共に、AI活用の対象となる業務の頻度や量、求められる精度等を総合的に検討し、AI活用の方針を定めることが良いと思います。

### • 教師データの質にこだわる

教師あり学習では、上述の通り AI モデルは教師データの傾向から学習します。そのため、採用する AI モデルの種別だけではなく、教師データの質も非常に重要になります。ここで言うデータの質とは正誤のみならず一貫性も含みます。収集したデータを教師データ化するためにはアノテーションを行いますが、アノテーションの仕方にも注意が必要です。例えば、画像認識用のアノテーションとして検出対象を矩形で囲う作業を行うことがあります。この時、「対象の周囲に余白を含めずに囲う」とか、「複数の個体が重なって写る場合は個体毎に囲む。その際各個体の見えている部分を全て含むように囲う」等、囲い方を統一する必要があります。統一できていない教師データは、精度低下の一因になります。

AI の世界的な研究者である Ng 氏によると、「12%程度のエラーを含む 500 件の教師データについて、そのエラーを正すこと」と「データセットを倍の 1,000 件にすること」は同等の効果があるそうです。多くの場合、教師データを倍増させることは容易ではないと思いますので、データの質の重要性が分かると指摘だと思います。また我々にも教師データの見直し・修正が精度向上につながった経験があります。

### • AI の認識結果の説明に対するニーズの把握

AI の認識結果について、「なぜそうなるのかの回答を求められ困ってしまった」ということをお伺いすることもあります。採用する AI モデルにもありますが、AI はブラックボックスと言われることもありました。しかし AI モデルの説明性を向上させる研究も進められています。例えば GradCAM は入力画像のどの領域を AI モデルが重視して判断したのかをヒートマップ形式で提示します。また SHAP(Shapley Additive exPlanations)は入力データの各項目画どのように AI の判断に寄与したのかを可視化します。このような技術を用いることで、完全ではないものの AI の認識結果を説明することも可能になってきています。その他、一部の機械学習手法には決定木(ある条件を満たす/満たさないの 2 分木を積み重ねたもの)ベースの比較的人間による解釈が容易なものもあります。問題の種類や難易度等も踏まえこれらを活用することが有効であることもあります。

手法によっては、途中からこれらの手法を採用することも可能です。しかし、採用する AI モデルを検討される際に、「AI の認識結果に対する説明を求められる可能性」についても併せて検討し備えておくことが良いと思います。

### ●まとめ

以上、教師あり学習の特徴と弊社なりのより良い AI 活用のための観点を紹介致しました。オープンソース化の潮流もあり、気軽に利用可能な OSS も多くあります。最近の AI の発展・普及の様を見ていると、これから AI 活用は不可避であると思います。少しでも興味を持たれましたら試してみてはいかがでしょうか。もちろん弊社へのご相談等もお気軽にいただければと存じます。

最後に OSS には商用利用が可能なものの不可能なもの、ソース開示が必須なもの等様々な種類があります。ご活用の際には、権利関係にも十分ご注意ください。以上、読んでくださいました方々の何かの参考になれば、幸いです。

## AIによる力学系の表現と将来予測

近年の気候変動や社会インフラの複雑化に伴い、様々な物理現象に対する高精度な将来予測の重要性が増しています。予測に用いられる手法は、物理法則に基づくシミュレーションと、観測データに基づく統計・機械学習的な手法（AI）に大別されます。

物理モデルは、対象現象のメカニズムを微分方程式などで表現し、少ないデータからでも一定の予測を可能にする強力な手法です。しかしその一方、現象のモデル化自体が困難であったり、多くの仮定を置く必要があったり、計算時間や数値安定性の問題からリアルタイムに運用できなかったり等の課題があります。対照的に、AIに代表される機械学習モデルは、特定のモデルを仮定せず、データ間に存在する複雑な関係を巧みに捉えることが出来ます。しかし、高い性能を十分に発揮するには大量の学習データを必要とする点や、学習データに含まれない未知事象（外挿）への対応、予測のブラックボックス化が課題となります。

本稿ではこれらの課題に対し、両者の境界領域に位置し、それぞれの利点を融合するアプローチとして注目を集める、力学系理論を応用したデータ駆動型の予測手法を紹介します（図1）。本手法は経験的動的モデリング（Empirical Dynamic Modeling）とも呼ばれます。その原理と応用事例、そして周辺領域の技術と今後の展望を解説します。

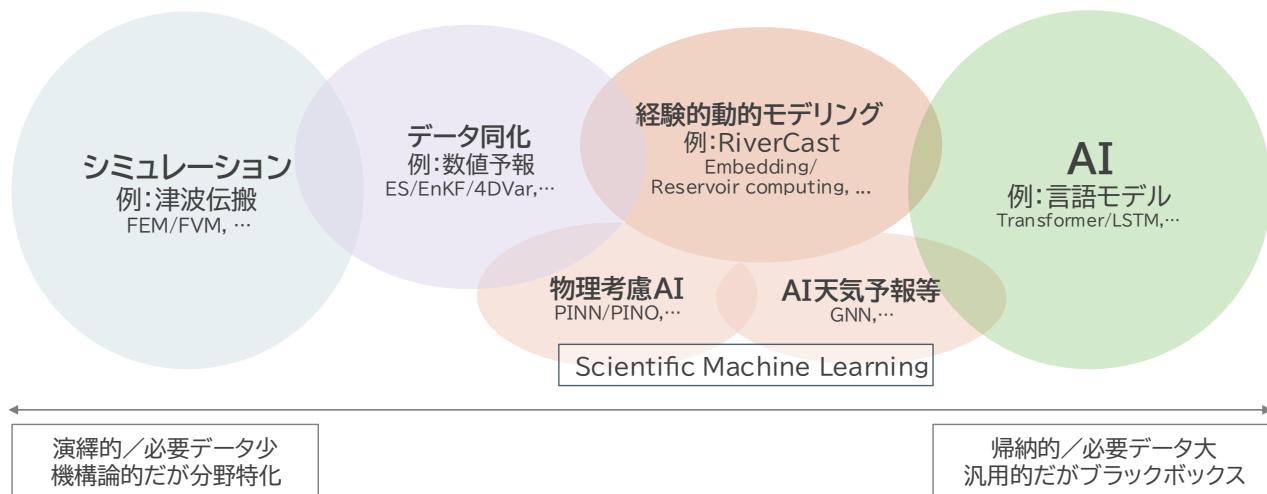


図1：本稿で扱う技術の位置づけ

### ● 経験的動的モデリングの原理

#### ・力学系理論からのアプローチ

経験的動的モデリングは、現象を支配する方程式が不明でも、観測された時系列データには背後の力学系情報が本質的に含まれる、との考えを基礎とします。一見不規則で複雑な時系列データも、決定論的なシステム（力学系）から生じていれば、振る舞いは「アトラクタ」と呼ばれる幾何学的構造として解釈できます（図2）。アトラクタはいわばシステムの「振る舞いの地図」であり、軌跡を追跡して将来の状態を予測します。

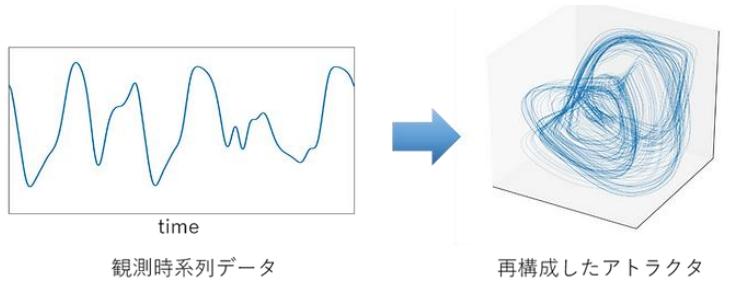
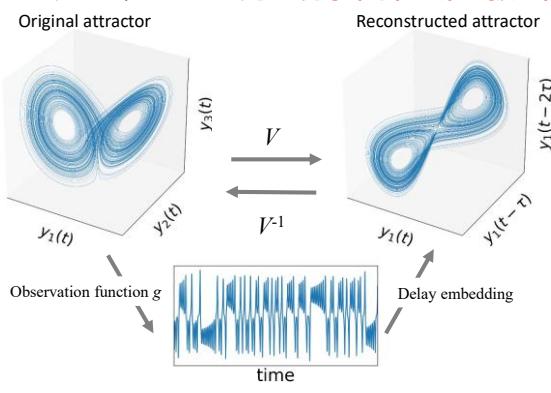


図2：複雑な時系列の背後にある決定論的な構造（アトラクタ）とその変換

本理論の根幹を成すのがTakens'の埋め込み定理 [1] です。本手法では同定理を応用し、システムの一部の変数の時系列データとその遅れ座標を複数組み合わせ、元の多次元システムが持つ力学的特性を保持したまま状態空間を再構成します（図3）。つまり、一つの観測データから、現象全体のダイナミクスを復元します。再構成されたアトラクタ上で、現在の状態に類似した過去の状態点を見つけ出し、時間発展を未来の予測に利用します。

データを変換する（“埋め込む”）ことで、元の現象（方程式）の振る舞いを再現



「埋め込む」ことで、一部の観測変数から元のシステムを再構成できる  
(Takens' embedding theorem)

図3：遅れ座標埋め込みによる状態空間の再構成

#### ・手法の特徴

本アプローチには、従来の物理モデルや機械学習モデルと異なった以下の特徴があります。

- ✓ 物理モデルの仮定が不要: 観測データから直接、現象の振る舞いをモデル化するため、支配方程式を具体的に定義する必要はない。これにより、モデル化が困難な複雑系にも適用できる。
- ✓ 少数データからの学習: 状態空間における近傍点を見つけ出す局所的アプローチのため、必ずしも深層学習のような膨大な学習データを必要とせず、データが限られるケースにも適用できる。
- ✓ 力学特性の保持: 元のシステムの幾何学的軌道を再現するため、学習データに含まれない未経験の規模の事象に対しても周辺のヤコビ行列を推定することで一定の外挿性能が期待できる[2, 3]。この特性は、既知データの範囲内での内挿に留まりがちな多くの機械学習モデルと大きく異なる。
- ✓ 因果関係の推定: 複数の時系列が与えられた際、一方の時系列のアトラクタから他方の値をどの程度うまく推定できるか相互に検証し、単なる相関関係に留まらず、原因と結果を特定する手法（Convergent Cross Mapping）にも応用できる。

## ● 応用事例

### ・洪水予測：リアルタイム洪水予測システム「RiverCast®」

本技術を応用した弊社の代表例が、リアルタイム洪水予測システム「RiverCast®」です。これは、東京大学との共同研究成果を応用し、観測雨量や河川水位データから15時間先までの水位変動を高精度に予測するシステムです [2, 3]。国内の複数河川を対象とした精度検証では、物理モデルの分布型流出モデルや、代表的なAIの深層学習モデルと比較して、より高い予測精度（低いRMSE：二乗平均平方根誤差）を示しました（図4）。本成果[2]は学術的にも評価され、Scientific Reportsにおいて、2020年の物理学分野で最もダウンロードされた論文トップ100に選出されています。

国内外の複数河川において  
既存のAI／物理モデルと比較し  
最も良好な結果

海外のコンペティションデータ(ANNEX 2005/2006 dataset)における予測水位誤差比較(RMSE、小さいほど○)

| Steps [h] | RiverCast    |              |       |       | MVE          | 類似手法  |       | 機械学習          |  |
|-----------|--------------|--------------|-------|-------|--------------|-------|-------|---------------|--|
|           | Proposed     | Conventional | SOE   | RDE   |              | LSTM  | SVR   | Random forest |  |
| 6         | 0.074        | 0.086        | 0.068 | 0.069 | <b>0.060</b> | 0.123 | 0.073 | 0.079         |  |
| 12        | <b>0.153</b> | 0.177        | 0.167 | 0.174 | 0.171        | 0.213 | 0.177 | 0.185         |  |
| 18        | <b>0.223</b> | 0.264        | 0.247 | 0.278 | 0.273        | 0.291 | 0.268 | 0.275         |  |
| 24        | <b>0.317</b> | 0.378        | 0.349 | 0.389 | 0.373        | 0.372 | 0.365 | 0.363         |  |

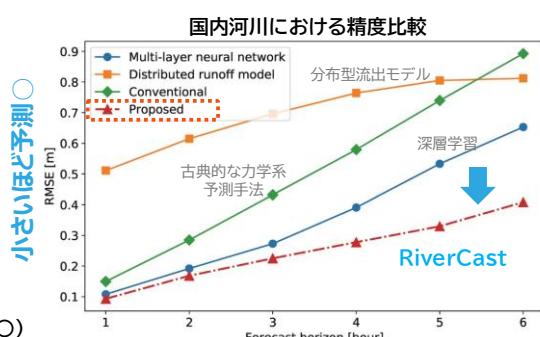


図4：予測手法の精度比較

特筆すべきは、一般的なAIが苦手とする学習データにない規模の洪水（過去最大規模のピーク）に対しても、力学系の性質を反映して良好な予測結果を示した点です（図5） [2]。

ANNEX 2005/2006 dataset (Dawson CW et al., 2005)

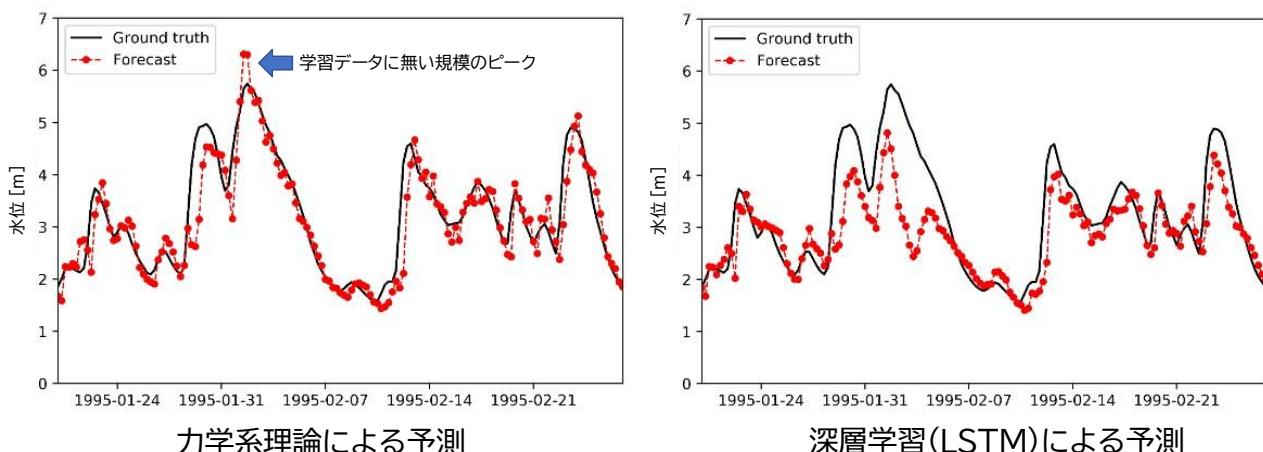


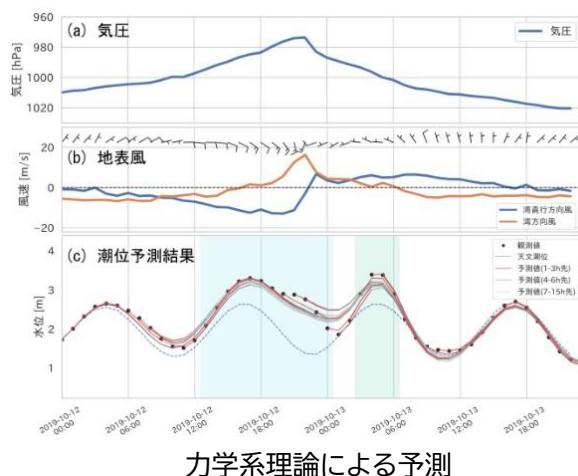
図5：学習データにない規模の洪水に対する予測性能

### ・高潮予測：沿岸域の防災支援

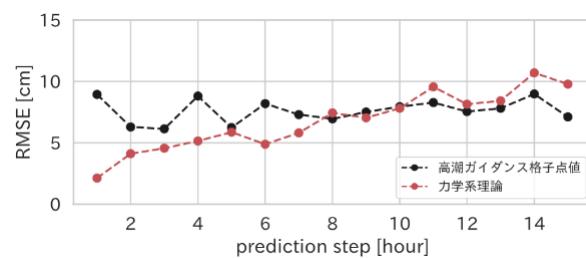
本予測技術は、高潮予測にも応用されています。風、気圧、水位の観測データを入力とし、東京湾における高潮を高精度に予測した事例では、気象庁が提供する数値シミュレーションと統計補正を組み合わせた高潮ガイダンスの予測値と比較しても、より誤差の小さい結果が得られました（図6）[4]。高精度な予測情報は、水門や排水機場など沿岸施設の的確かつ迅速な操作判断の支援に活用され、都民の安全確保に貢献しています。

#### ■風・気圧・水位を入力し、東京湾における高潮を予測

#### ■気象庁の数値シミュレーション+ガイダンス（統計的な補正）より良好な結果



力学系理論による予測



気象庁の予測（高潮ガイダンス）より良好な精度

滝川宏樹, 奥野峻也, 土木学会論文集, Vol.80, No.17, 24-17037, 2024.

図6：高潮予測における精度比較 [4]

### ・ダム流入量・風速予測：水資源管理とエネルギー分野への展開

本技術の適用範囲は洪水や高潮に留まりません。ダム流域の雨量や上流水位データからダムへの流入量を予測し、治水効果の最大化や利水（発電量向上）運用の最適化に貢献します。過去の学習データ最大値を上回る規模の流入量に対しても、変動パターンを捉え、良好な予測を実現します（図7）。

- 吉野川流域池田ダムにおいて、最大15h先までの流入量を予測
- 過去データを上回る出水規模も良好に予測
- 流入量に関しても確率的な予測が可能
  - 気象予報誤差・モデル誤差を考慮した予測幅
  - 15h以内に一定流量を超過する確率、など



流域内の雨量、上流の水位計など計8地点のデータを利用

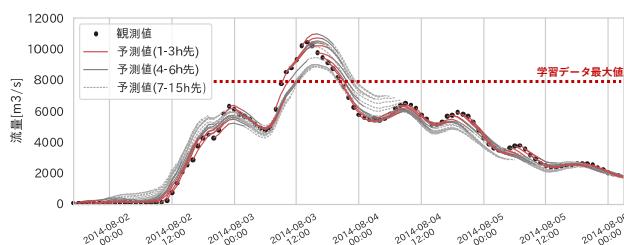
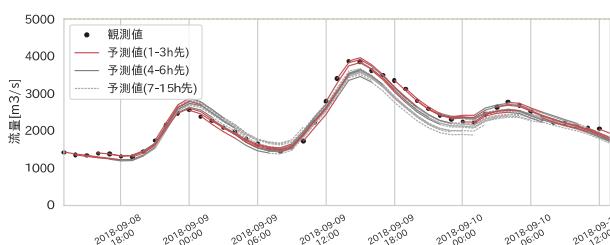


図7：過去データを上回る規模のダム流入量予測事例

さらに、再生可能エネルギー分野でも応用が進んでいます。風力発電量予測への応用を見据えた風速予測の事例では、気象予報の補正值や代表的なAI手法よりも高い精度で局所的な風速を予測できる可能性を示し（図8）、エネルギーの安定供給に資する技術としての展開が期待されています。

- 岩手県におけるアメダス観測所を対象に、6h後までの南北方向の風速を予測
- 気象予報および代表的なAI手法より良好な精度を記録
- 河川水位・ダム流入量と同様に、予測の不確実性も評価可能：期待値に基づく意思決定も

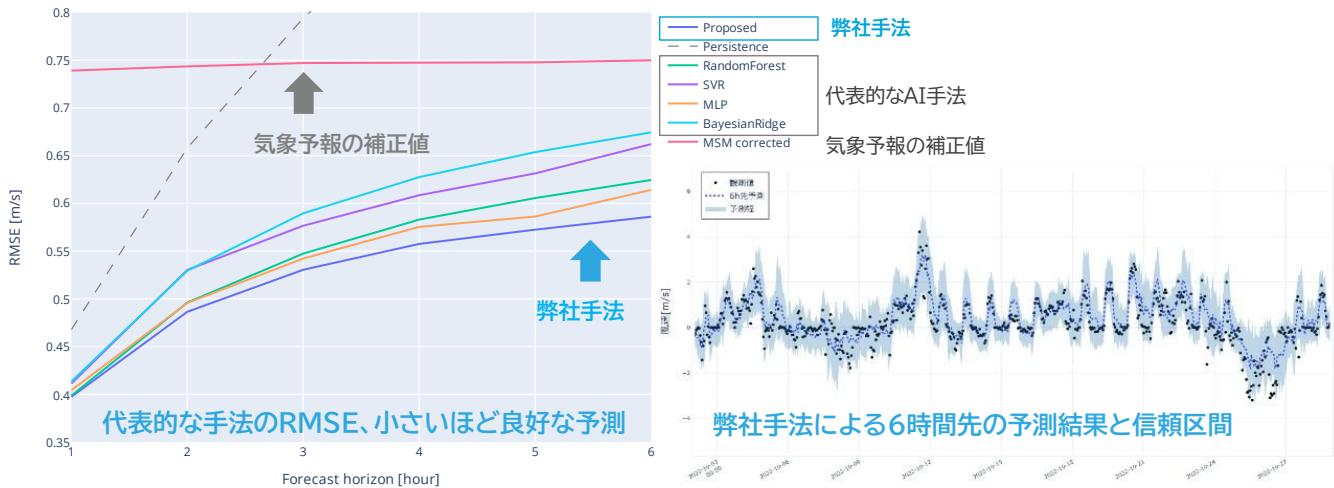


図8：風速予測における精度比較

### ● 予測の「不確実性」の定量化と意思決定への活用

予測は常に何らかの誤差を伴い、特に予測の入力となる気象予報の不確実性は、河川水位や流入量の予測結果に大きな影響を与える共通の課題です（図9） [5]。

特に予報雨量の誤差は流入量予測における「共通課題」

- 特に中小河川では影響が顕著
- 「予報誤差」の不確実性を確率分布で定量化\*

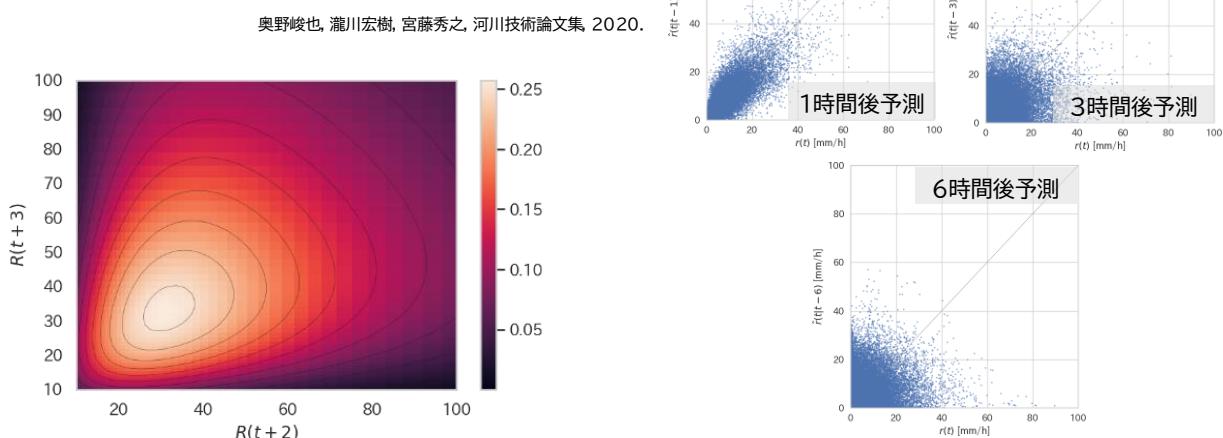


図9：予報雨量の誤差と確率分布でのモデル化

そこで本アプローチでは、予測値を一点で示すだけでなく、気象予報やモデル自体の誤差を考慮した予測の「幅（信頼区間）」や、利用者が設定した基準値（例えば、避難判断水位や作業中止水位）を超過する「確率」を定量的に算出できます（図10）。確率的なアプローチにより、予測の信頼度を客観的に評価することができます。

- 気候変動により激甚化する未経験規模の洪水も高精度に予測
- 天気予報・予測モデルの誤差を同時に考慮し 予測の上ぶれ下ぶれを表示
- 降水確率のように 設定水位を超える確率を提供

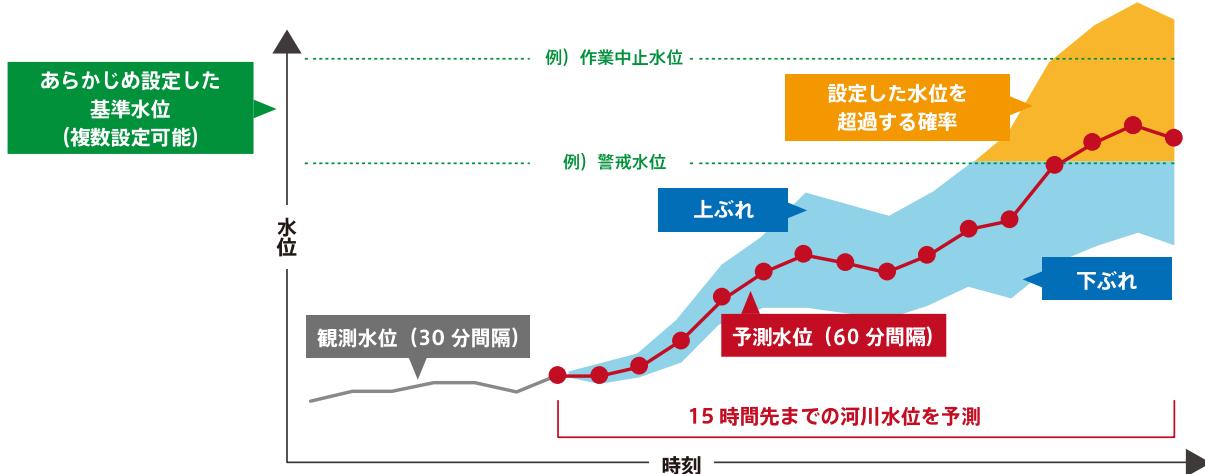
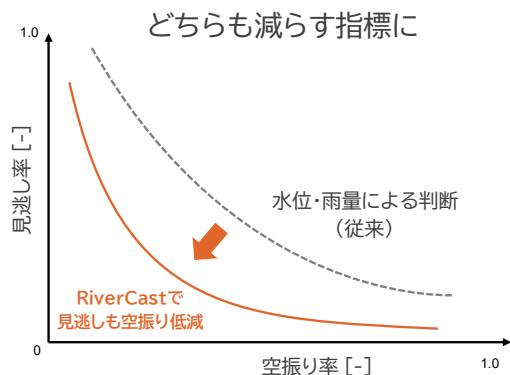


図10：予測の不確実性を考慮した確率的な予測情報の提示例

確率的な予測情報は、防災や事業継続における意思決定の質を大きく向上させます。例えば現場のオペレーションにおいて、「対策を講じたが空振りに終わるコスト（機会損失）」と「対応の遅れ（見逃しリスク）による被害コスト」は常にトレードオフの関係にあります。確率情報を活用すれば、リスクバランスを定量的に評価し、各組織の許容リスクに応じた客観的で合理的な判断基準を予め策定することができます（図11）。

### ①RiverCastが見逃し・空振り

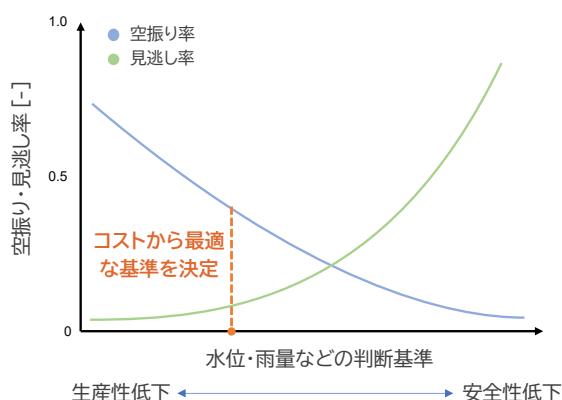


どちらも減らす指標に

水位・雨量による判断（従来）

RiverCastで  
見逃しも空振りも減らす

### ②コストを介した客観的な判断基準の策定も



漏れ率・空振り率 [-]

コストから最適な基準を決定

水位・雨量などの判断基準

生産性低下

安全性低下

安全性と生産性はトレードオフの関係も、判断指標を改善し、コストを介した最適な判断基準を決めることが出来ます

図11：見逃し率と空振り率のトレードオフ関係と最適な判断基準の考え方

## ● 力学を考慮したAIの展開

本稿で紹介した経験的動的モデリングは、力学を考慮したAIのアプローチの一つですが、本分野の研究開発はさらに広がりを見せてています。例えば、Reservoir ComputingやNeural Operatorなどの手法も、同様に力学系の性質を利用した予測技術として注目されており、弊社でも技術開発と応用を進めています。

Reservoir Computingは、ランダムに結合されたニューラルネットワークを用いて入力信号を一旦高次元空間に写し、応答から出力を学習し力学系を再現する仕組みです。学習が高速かつハイパーコンピュータも少なく、本特性を活かして多数の拠点を一括で水位予測する仕組みを提供しています（図12）。

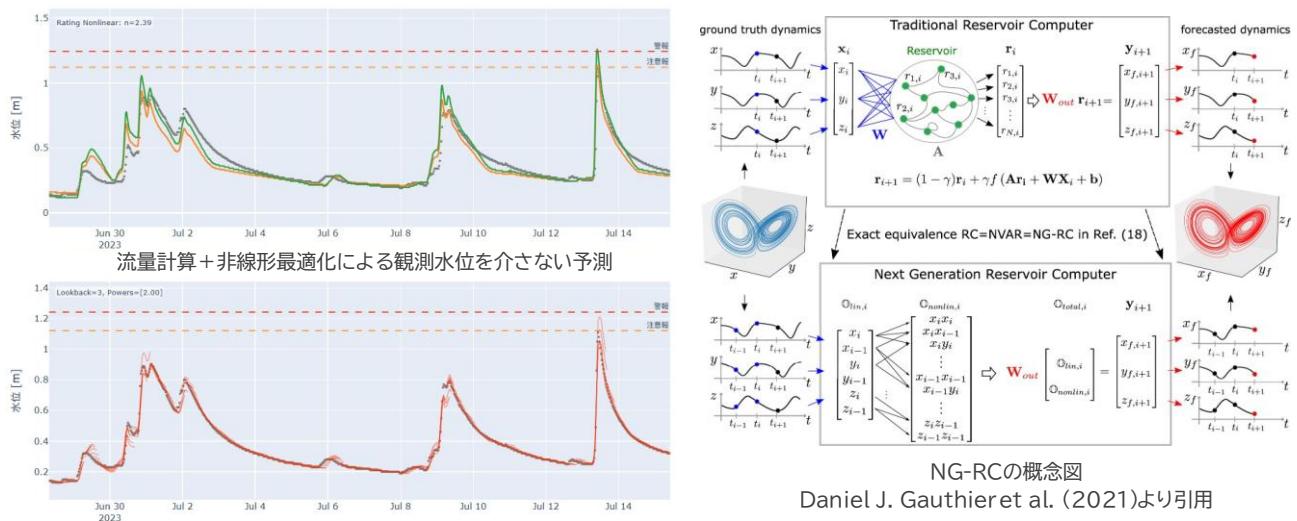


図12：Next Generation Reservoir Computerの概念図と多地点水位予測への応用例

一連の動向は、Scientific Machine Learning (SciML) の潮流の一部と捉えることができます。SciMLにはPhysics-Informed Neural Networks (PINN) やPhysics-Informed Neural Operator ( PINO) [6]などがあります。これらは、観測データに加え、物理法則などの科学的知見を明示的に機械学習モデルに組み込み、データの少ない問題や物理的整合性が重要な問題に対し、より信頼性の高い予測を目指す研究分野であり、弊社では本技術を応用した浸水計算に取り組んでいます。

## ● おわりに

本稿で紹介した経験的動的モデリングは、観測データから直接、対象現象の力学的な振る舞いを捉え、従来の物理モデルと統計・機械学習モデルの間のギャップを埋めるデータ駆動型のアプローチです。予測精度のみならず、不確実性を定量化して合理的な意思決定を支援する仕組みが、応用可能性をさらに広げています。

経験的動的モデリングをはじめとするこれらのアプローチは、「シミュレーションモデルの構築が困難」「学習データが限定的」「メカニズムの理解が重要」などの特性を持つ課題に対し、有効な選択肢を提供します。弊社では、PoC（概念実証）からシステム化、さらには予測情報を活用した運用コンサルティングまで、一気通貫で課題解決を支援するソリューションを提供しています。

## ● 参考文献

- [1] Takens, F. (1981). Detecting strange attractors in turbulence. In: D. Rand, L.S. Young (eds) *Dynamical Systems and Turbulence*, Warwick 1980. Lecture Notes in Mathematics, vol 898. Springer, Berlin, Heidelberg.
- [2] Okuno, S., Ikeuchi, K., & Aihara, K. (2020). Practical data-driven flood forecasting based on dynamical systems theory. *Scientific Reports*, 10(1), 664.
- [3] Okuno, S., Aihara, K., & Hirata, Y. (2021). Forecasting high-dimensional dynamics exploiting suboptimal embeddings. *Water Resources Research*, 57(3), e2020WR028427.
- [4] 瀧川宏樹, 奥野峻也, (2024). 力学系理論に基づく高潮・高波のアンサンブル予測手法の提案. 土木学会論文集B3 (海洋開発) , 80(1), 24-17037.
- [5] 奥野峻也, 瀧川宏樹, 宮藤秀之, (2020). 降雨の時空間的な誤差構造を考慮したアンサンブル流出予測. 河川技術論文集, 26, 323-328.
- [6] Li, Z., Zheng, H., Kovachki, N., Jin, D., Chen, H., Liu, B., Azizzadenesheli, K., & Anandkumar, A. (2024). Physics-Informed Neural Operator for Learning Partial Differential Equations. *ACM/IMS Journal of Data Science*, 1(3), Article 9.

## ● 参考 : RiverCastご利用実績 (敬称略)

公的機関 : 国土交通省 徳島河川国道事務所、山形県鶴岡市、神奈川県川崎市、熊本県大津町、福島県福島市、静岡県藤枝市、また実証試験として大阪府、神奈川県横浜市、神奈川県川崎市、ほか全国13自治体45地点以上でご利用。

民間企業 : 鹿島建設、清水建設、大林組、西松建設、西武建設、前田建設工業、大本組、横河NSエンジニアリング、ほか建設業、遊水池管理施設、インフラ事業者など多数。

HP: <https://www.weather.kke.co.jp/request>

詳細紹介資料はこちら



# 圧縮センシング DIC

## カメラのサンプリングレートを超えた画像振動計測

構造計画研究所 事業開発部 データ同化エンジニアリング室 綿引 壮真

キーワード：画像振動計測 デジタル画像相関法 圧縮センシング アンダーサンプリング

### 1. はじめに

工場設備の異常検知や、橋梁などの社会インフラの維持管理、建築物および部材の性能評価など、様々な分野において構造物の振動・変形挙動を把握することは重要である。これらの振動計測は加速度センサ等の接触式手法が主流であるが、点計測であるため空間的な挙動の把握には多数のセンサ設置が不可欠となり、コストや設置労力が大きな課題であった。

これらの課題に対し、近年はデジタル画像相関法 (Digital Image Correlation, DIC) 等の画像を利用した計測手法が普及してきている。DIC は、対象物の変位やひずみの分布を広範囲に非接触で計測する技術であり、ステレオカメラ構成により 3 次元計測も可能であるため、接触式センサが抱える課題の多くを解決できる。

一方で、DIC にも解決すべき課題は存在する。高速な振動現象を計測するには、高価な高速度カメラが必要となる点がその一つである。高速度カメラは一般に高い撮影速度と引き換えに解像度が低くなる傾向があり、計測可能な変位分解能が不足するため、微小な振幅の高周波振動を捉えるためには視野を狭める必要があった。さらに、高速度撮影によって生成される数万枚もの大容量の画像データは、保存、転送、解析におけるコストの増大を招いていた。

そこで我々の研究グループでは、これらの課題を解決するため、DIC に圧縮センシング (Compressed Sensing) という信号処理の理論を組み合わせた新しい計測手法「圧縮センシング DIC」を開発している。本手法の最大の特長は、低速度・高解像度カメラを用い、その撮影フレームレートを遥かに超える高速な振動現象を計測できる点にある。これまでの研究では、例えば 10 fps の低速度カメラで 3 kHz を超える高周波振動が計測可能であることを実証している。この手法により、データ量を大幅に削減しつつ、これまで両立が困難であった「広範囲」かつ「微細」な振動の「3 次元」計測を安価に実現できる。

本稿では、圧縮センシング DIC の基本原理を概説し、主に製造分野での例を通してその有効性を示すとともに今後の展望について述べる。

### 2. 圧縮センシング DIC

#### 2.1. デジタル画像相関法 (DIC)

デジタル画像相関法 (DIC) は、カメラで撮影した画像から物体の変位やひずみを非接触で計測する画像解析技術である [1]。その代表的なフローを図 1 に示す。まず、対象物表面にスペックルパターンと呼ばれるランダムな模様 (図 1(a)) を施し、変形の様子をステレオカメラで連続撮影する。次に、画像上の仮想メッシュの各節点を追跡し (図 1(b))、最終的に 3 次元の変位・ひずみ分布を算出する (図 1(c))。なお、スペックルパターンについては高い精度が求められる場合は塗料等で塗布するが、塗布が困難な場合は対象物の汚れや対象物の模様を利用することも可能である。

変位算出の原理を図 2 に示す。変形前の画像 (図 2(a)) 内のサブセット (緑枠) の、変形後の画像 (図 2(b)) 中の移動先 (赤枠) を相関係数分布 (図 2(c)) から探索する。その際、相関ピーク周辺を関数で近似し、ピクセル以下の分解能を得るサブピクセル処理 (図 2(d)) により、高精度な位置推定を実現する。

このように強力な計測技術である DIC だが、高速振動を計測するには高速度カメラが必要となる。その際、計測可能な周波数は標本化定理によりカメラの撮影速度の半分 (ナイキスト周波数) までに制限される。この制約が、高価な高速度カメラを必要とする要因となっていた。

#### 2.2. 圧縮センシング

圧縮センシングは、信号が持つ「スパース性」(ごく少數の非ゼロ係数だけで信号が表現できる性質) を利用し、少ない観測データから元の信号を復元する信号処理の理論である [2]。「スパース性」と「ランダムな観測」という条件を組み合わせることで、従来の標本化定理では復元不可能であった、アンダーサンプリングされたデータからでも高周波な信号を正確に復元できる。

この原理は、 $\mathbf{p} = \Phi \Psi \mathbf{q}$  という数式で表現される。ここで、 $\mathbf{p}$  は観測データ、 $\mathbf{s} = \Psi \mathbf{q}$  は既知の基底  $\Psi$  (例: フーリエ底) とスパースな係数ベクトル  $\mathbf{q}$  で表現される原信号、 $\Phi$  はランダムな観測プロセスを表す行列である。この方程式

は、通常解が一意に定まらない劣決定問題であるが、圧縮センシングでは  $q$  がスパースであるという拘束条件を付与することで解を求める。特にノイズを含む現実のデータに対しては、 $\ell_1$  正則化 (Lasso) といった数学的な最適化手法を用いて、安定してスパースな解を推定する。

本技術の利点は、信号を再構成するために最低限必要な

な観測データ数を、信号のスパース性等から理論的に見積もれる点にある。圧縮センシングは MRI など多分野で応用されるが、本手法では、この理論を時間方向の信号に応用し、低速度カメラのデータから高周波振動を復元する点に特徴がある。

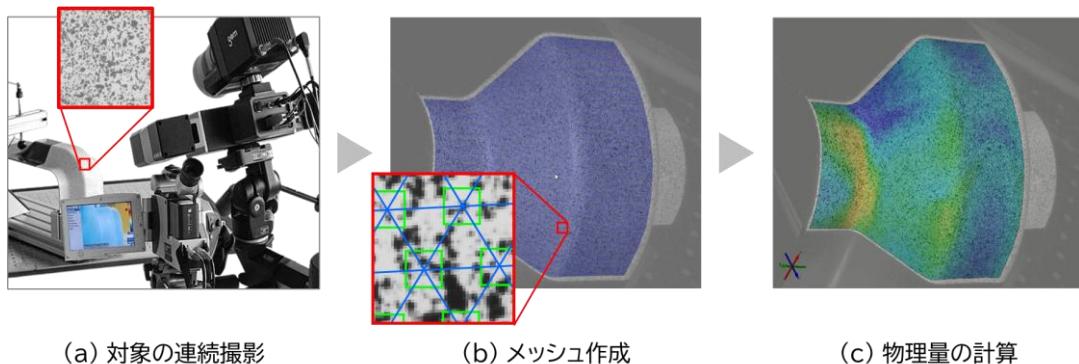


図 1. デジタル画像相関法の実施フロー

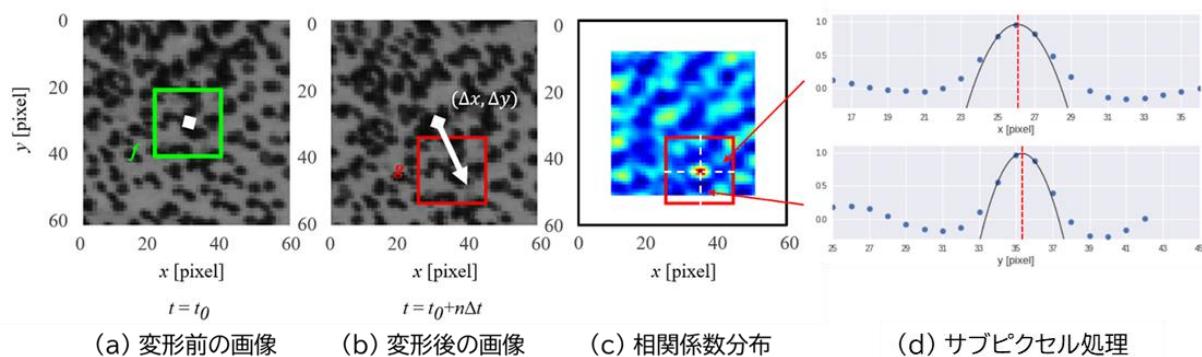


図 2. デジタル画像相関法における変位計算アルゴリズムとサブピクセル処理

### 2.3. 圧縮センシング DIC の仕組み

2.2 節で述べた圧縮センシングを DIC に応用する上で核心となる「ランダムサンプリング」は、発光時間の短いストロボ照明をランダムなタイミングで用いることで解決した。具体的なプロセスを図 3 に示す。まず、低速度カメラのシャッターを長く開放 (露光時間  $T_e$ ) しておき、その間にごく短時間 (閃光時間  $T_f$ ) だけ発光するストロボをランダムなタイミングで一度だけ点灯させる。これにより、カメラは低速で撮影しているにもかかわらず、得られる一連の画像には、それぞれ異なるランダムな瞬間の対象物の状態が記録される。

本技術の最も重要な点は、これにより、計測可能な周波数の理論的な限界であるナイキスト周波数が、カメラの撮影フレームレートではなく、ストロボの発光トリガーの駆動レートにまで引き上げられる点にある。ただし、実際の計測限界はストロボの発光持続時間や、可視光の波長未満は捉えられないという物理的な制約を受ける。

なお、太陽光などの強い光源下では、逆にカメラの撮影トリガーをランダム化することでも、同様のサンプリングが実現できる。

### 2.4. 圧縮センシング DIC の処理フロー

ランダムサンプリングされた画像の撮影から最終的な高速振動の可視化までは、図 4 に示す 4 つのステップで実行される。まず、ランダム撮影した画像から DIC 解析で各時刻の 3 次元変位分布を算出する (ステップ 1)。次に、計算コストの削減とノイズ耐性の向上のため、固有直交分解 (Proper Orthogonal Decomposition, POD) を用い、この時空間データを代表的な「空間モード」と、疎な「時間関数」に分解する (ステップ 2)。このアンダーサンプリングされた時間関数に対し圧縮センシングを適用して高周波情報を含む時間波形を復元し (ステップ 3)、最後に空間モードと掛け合わせることで、時空間的に密な高速振動情報を再構成する (ステップ 4)。

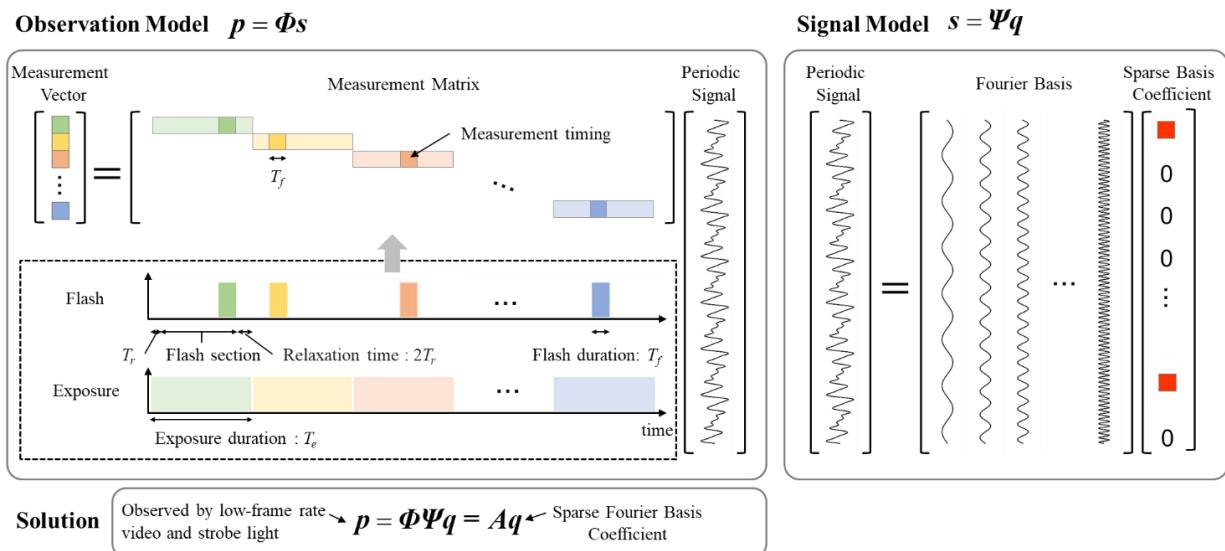


図 3. 圧縮センシング DIC における信号復元モデル [3]

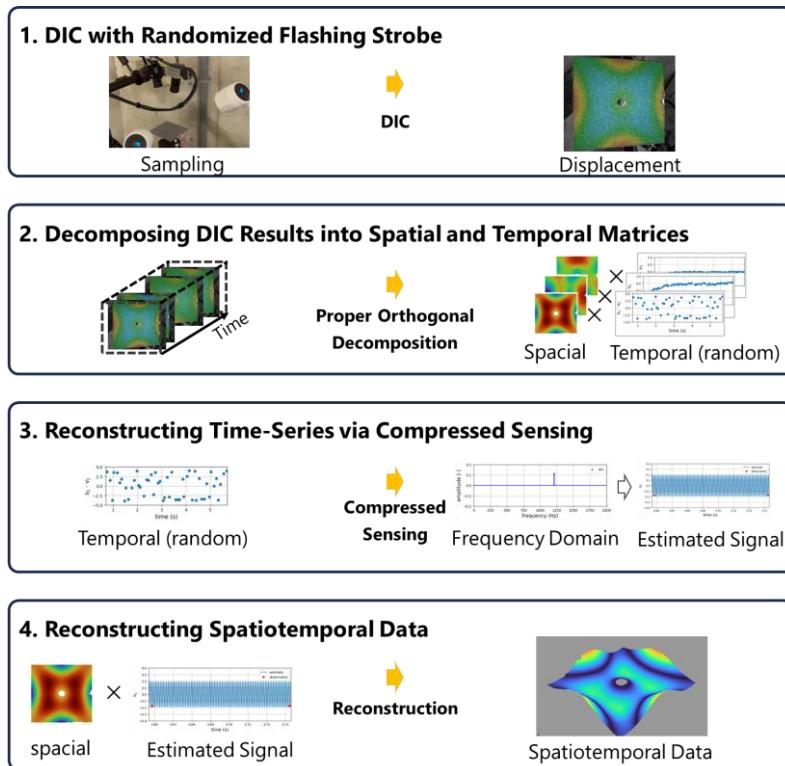


図 4. 圧縮センシング DIC の分析フロー [4]

### 3. 圧縮センシング DIC による振動計測事例

#### 3.1. アルミ板の加振実験による基礎検証

図 5 に示すアルミニウム合金製の平板試験体を用いた検証例を紹介する。試験体中央を加振器で振動させ、その応答を圧縮センシング DIC (1,200 万画素の低速度カメラ、撮影速度 10 fps) で 3 次元計測した。照明は閃光時間が約 2.4  $\mu$ s のキセノンストロボを用い、1 MHz の駆動レートでランダムなタイミングで発光させた。図 6 は、再構

成した振動の様子であり、10 fps の撮影にもかかわらず、サブミリ秒単位の変形が捉えられていることがわかる。

この結果の妥当性を評価するため、2 つの方法で比較を行った。まず、モード形状の妥当性を検証するため、有限要素法 (Finite Element Method, FEM) による固有値解析の結果と比較した。図 7 は、複数の周波数における計測結果 (上段) と解析結果 (下段) を比較したものである。両者の変位を正規化した上で比較した結果、良好

に一致していることがわかる。次に、再構成された時間波形を検証するため、点計測器である LDV の計測結果と比較した。図 8 は、試験体の一点における速度の時系列波形を比較したものであり、本手法で再構成した波形（緑実線）は、LDV の計測結果（赤点線）と位相・振幅ともに良好に一致している。以上の検証から、本手法が低速度カメラを用いて、高周波振動の空間モードと時間波形の両方を、既存の信頼性の高い手法と同等の精度で計測できることが実証された。



図 5. 加振試験の計測セットアップ [4]

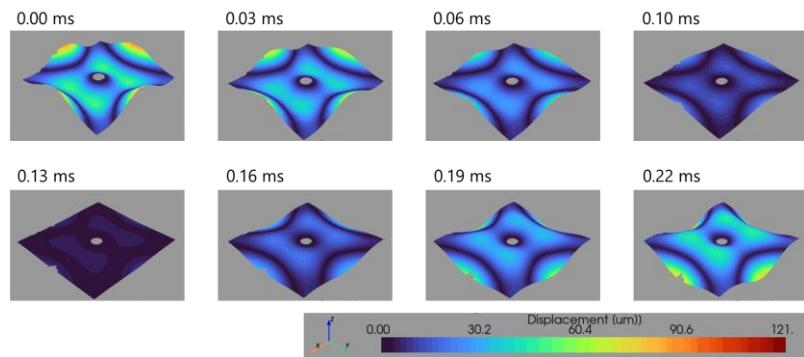


図 6. 圧縮センシング DIC で再構成された振動の時系列変化 (1,210 Hz 加振時) [4]

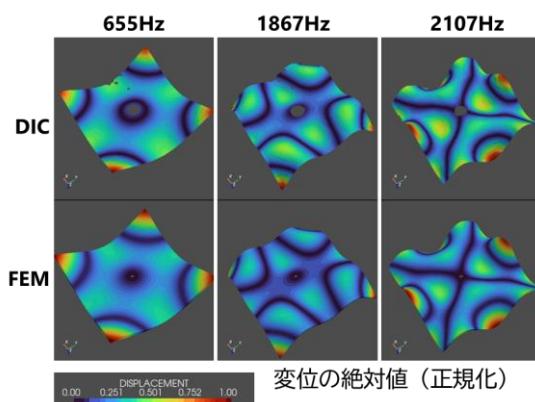


図 7. 振動モード形状の比較：圧縮センシング DIC と FEM 解析 [4]

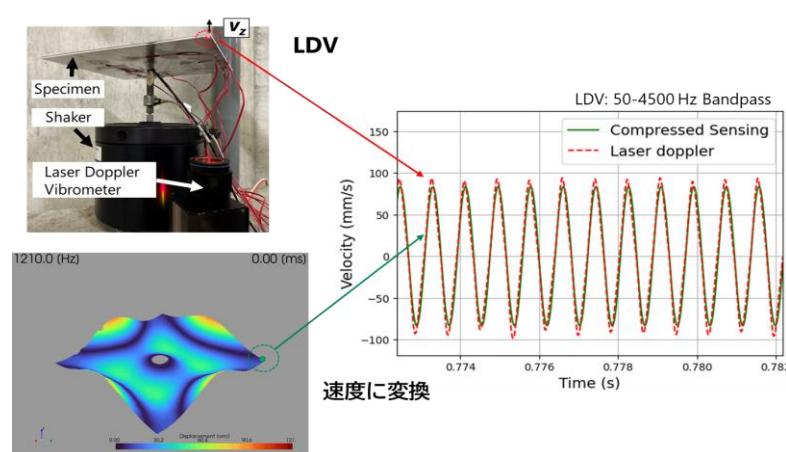


図 8. 速度波形の比較：圧縮センシング DIC とレーザドップラー振動計 (LDV) [4]

### 3.2. 実稼働エンジンの非定常振動計測

本手法のさらなる応用として、より複雑な振動条件下での計測事例を紹介する。実環境下の構造物は、振動状態が常に変動する「非定常性」を有している場合が多い。このような場合、前述のフーリエ基底のような定常性を前提とした基底を用いた圧縮センシングでは信号のスパース性が失われ、正確な復元が困難となる。この課題に対して、カメラの画像に加えて他のセンサ情報を融合（センサフュージョン）するアプローチが有効である。

例えば、自動車のエンジンのような回転数が変動する機械システムの場合には、エンジンの回転数をカメラと同期して計測しておくことで、振動を周波数 (Hz) ではなく、回転体の「回転次数」を基準に分析する次数比解析と圧縮センシングを組み合わせることができる。この次数比解析を用いることで、回転数が変動しても次数比

成分はスパースな信号として捉えることができ、正確な復元が可能になる [5, 6]。

この手法を用いて、図 9 に示す実稼働中の自動車実機のボンネットの振動計測に適用した例を紹介する。図中の各番号は検証用加速度センサ等である [5]。図 10 は圧縮センシング DIC の結果の一例であり、左から 3 次元的な空間モード形状、変位の大きさを示した平面図、各モードに対応するオーダースペクトルを示している。例えば、Mode 4 は、ボンネットが上下にたわむ面外方向の振動であり、そのオーダースペクトル（右端のグラフ）を見ると、エンジン回転数の 2 次オーダー（155 Hz）の成分が支配的であることが同定されている。このように、センサフュージョンを応用することで、複雑な実環境下における詳細な振動挙動の非接触 3 次元計測が可能となる。

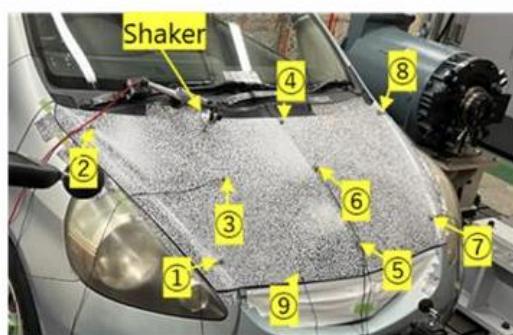


図 9. 自動車のボンネットの計測の様子 [5]

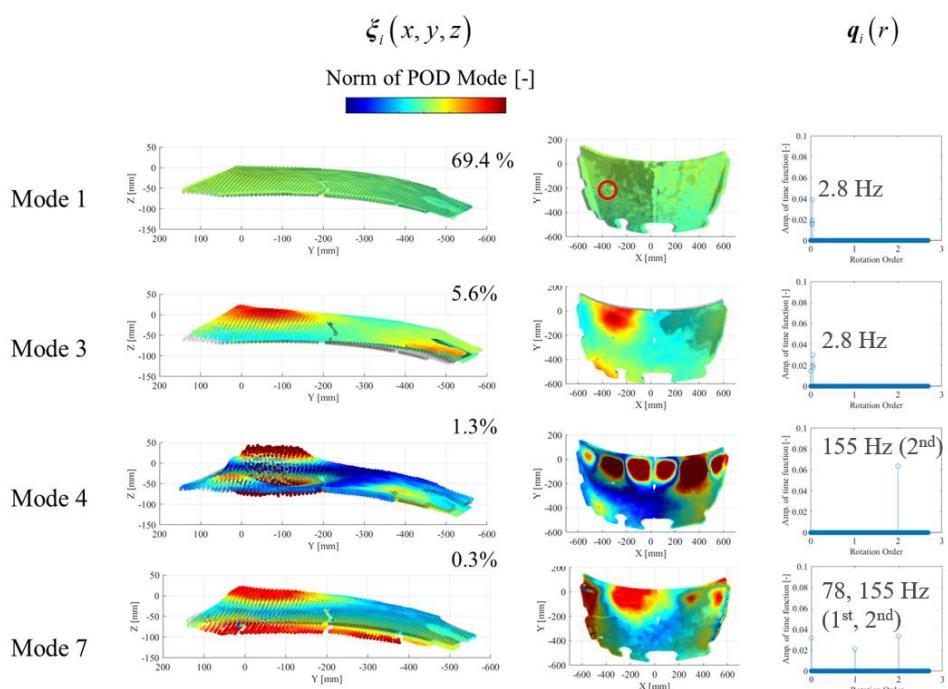


図 10. ボンネットの計測結果：空間モードとオーダースペクトル [5]

#### 4. 今後の展望

本稿で紹介した圧縮センシング DIC は、計測技術に留まらず、シミュレーションとの連携や多様な分野への応用といった、新たな価値創出の可能性を秘めている。DIC で得られる高精細な時空間データは、数値シミュレーション (CAE) の校正や妥当性検証に極めて有効である。我々は、この DIC とシミュレーションをデータ同化技術で融合させる研究開発も進めている [7, 8]。

データ同化とは、実測に基づき、材料特性や境界条件といった不確かなモデルパラメータを推定することで現実を忠実に再現する「デジタルツイン」を構築する技術であり、より高度な設計や運用への貢献が期待される。図 11 にその概念図を示す。また、本技術はすでに製品化に向け開発が進んでいる。その応用範囲は、建築・土木分野における社会インフラの健全性監視から、製造業における設備の予兆保全や NVH 性能評価まで多岐にわたる。

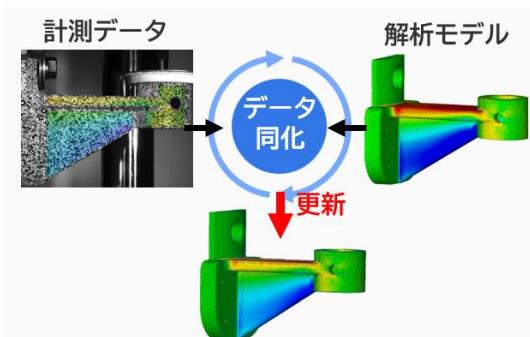


図 11. データ同化技術によるモデルの更新

#### 5. おわりに

本稿では、低速度カメラで高速 3 次元振動を計測する「圧縮センシング DIC」について解説した。本技術の核心は、ランダムトリガーと圧縮センシングを組み合わせ、カメラの撮影フレームレートという制約を乗り越えた点にある。これにより「計測コスト」と「空間解像度」のトレードオフを解消し、従来は困難であった広範囲かつ微細な振動計測を可能とした。

本技術は高知工科大学の加藤由幹講師との共同研究の成果であり、日本機械学会や画像センシングシンポジウムなどで複数の賞を受賞するなど、学術的にも高い評価を得ている。今後は、特許（特許 7697909）を取得した基盤技術をもとに、自動車分野で進めてきた検証を建築・土木分野へも展開し、社会実装を加速させていく。さらに、CAE とのデータ同化を推進し、より高度な製品開発や社会インフラの安全性向上に貢献できるものと期待している。

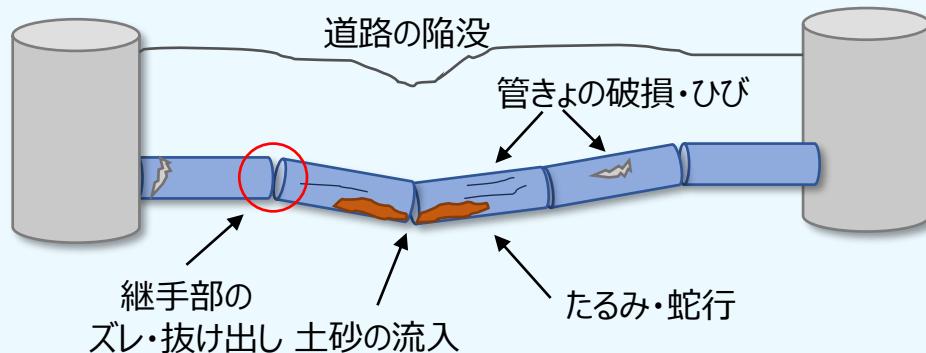
#### 参考文献

- [1] Sutton, M. A., Orteu, J. J., and Schreier, H., "Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements: Basic Concepts, Theory and Applications", Springer, (2009).
- [2] Donoho, D. L., "Compressed sensing," IEEE Transactions on Information Theory, vol. 52, no. 4, pp. 1289-1306, (2006).
- [3] Kato, Y., and Watahiki, S., "Vibration mode identification method for structures using image correlation and compressed sensing", Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 199, 110495, (2023).
- [4] 綿引壮真, 加藤由幹: 圧縮センシングと三次元デジタル画像相関法を用いた振動モード同定手法の開発, Dynamics & Design Conference 2023, (2023).
- [5] 加藤由幹, 綿引壮真, 大高政祥, "圧縮センシングと次数比分析を用いたエンジン・車体振動の高分解能可視化計測手法", 自動車技術会 春季大会 (2024)
- [6] Kato, Y., Watahiki, S., and Otaka, M., "Full-field measurements of high-frequency micro-vibration under operational conditions using sub-Nyquist-rate 3D-DIC and compressed sensing with order analysis", Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 224, 112179, (2025).
- [7] 綿引壮真, 佐々木健吾, "デジタル画像相関法を用いた逐次データ同化による材料パラメータと境界条件推定", 第 32 回計算力学講演会 (CMD2019) , (2019).
- [8] 綿引壮真, 長谷川俊昭, Shanthanu Rajasekharan, "デジタル画像相関法と有限要素解析の逐次データ同化によるコンクリート圧縮試験のモデルパラメータ推定", 令和 2 年度土木学会全国大会第 75 回年次学術講演会, (2020).

# 下水管路の耐震性評価 コンサルティングサービス

## 地震による下水管路被害

令和6年能登半島地震では下水管きよにも多くの被害が発生しました。



- 被災パターンは、「たるみ・蛇行」の箇所数が最多
- 液状化などによる地盤の変動による被害が顕著

## 下水管路の耐震性評価フロー

Step 1

### 地盤応答変位 の算定

Step 2

### 応答変位法による 断面力の算定

Step 3

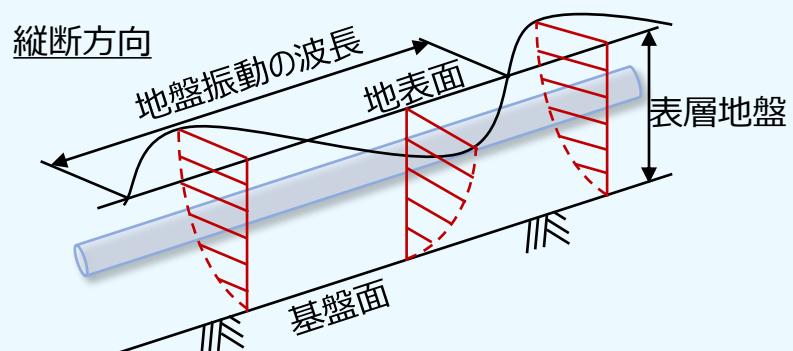
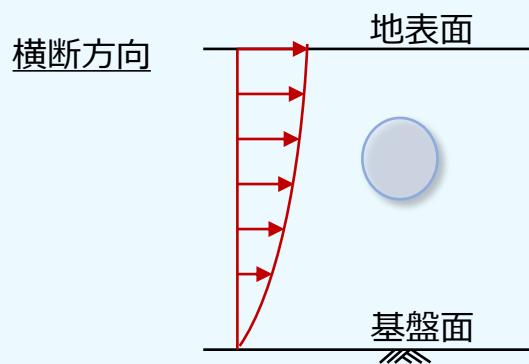
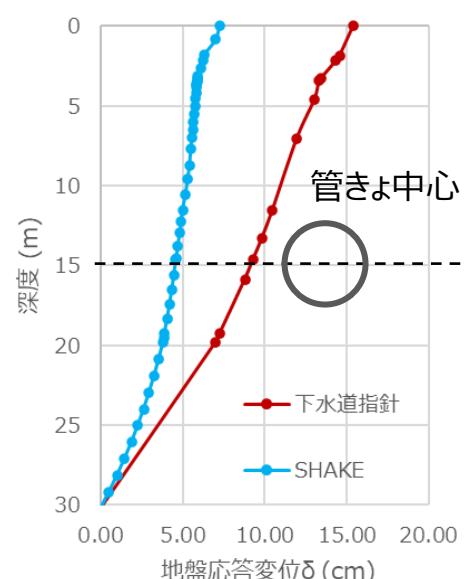
### 部材応力度による 照査

下水道指針(2014)の算定式はせん断波速度Vs、地震時の剛性低下率は深さ方向に一定と仮定



地盤条件にもよりますが、地震応答解析 (SHAKE) を実施することで応答変位が下がり、より現実的な断面力となりました！

### シールド管きよの耐震性評価事例

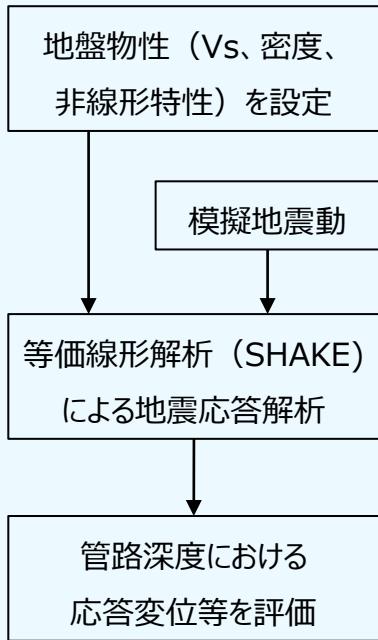


下水管路の耐震性評価では、**地盤の応答変位を如何に精度よく評価できるか**が重要です。

# 対象に応じた最適な解析手法をご提案します。

## 等価線形解析 (SHAKE) を用いた地盤応答変位の評価

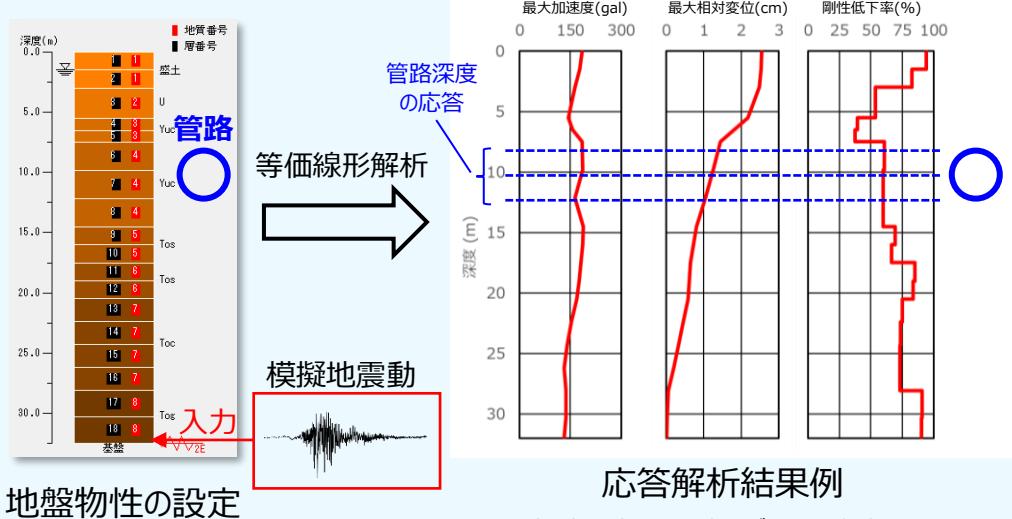
### 評価のフロー



### ○ 等価線形解析 (SHAKE)

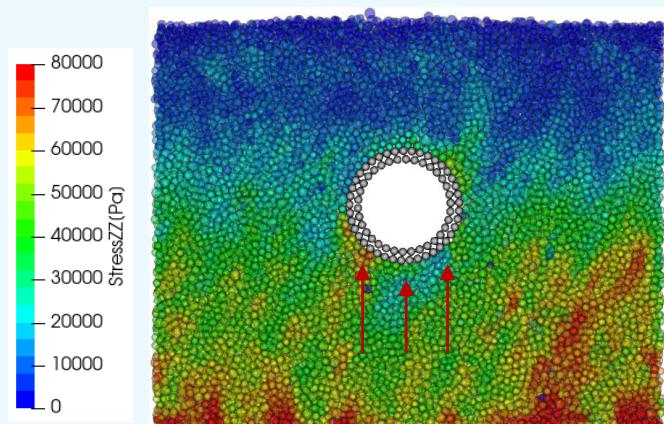
地盤の非線形化を考慮可能な地震応答解析手法の一つ

時刻歴の模擬地震動を入力することで、より詳細に地盤応答を求める



## より詳細な評価が必要な場合

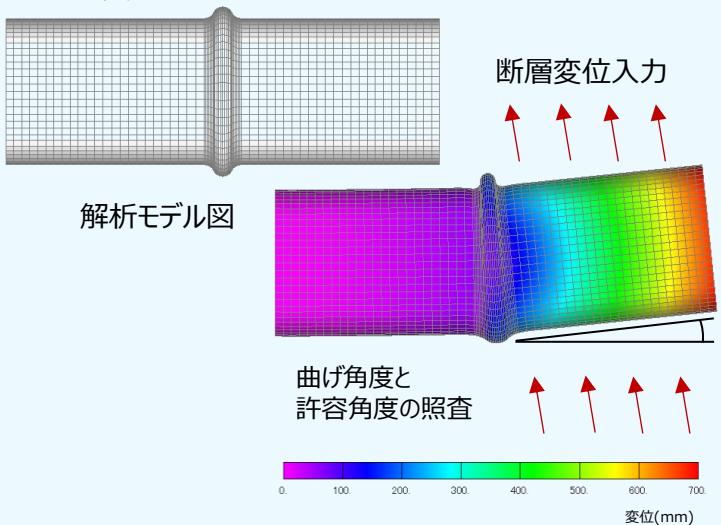
### 液状化を考慮した有効応力解析



粒子法を用いることで埋設管路の浮き上がりまで再現できる

### 断層変位を受ける管路の解析

断層横断部について検討する際は、管路をセル要素でモデル化し、変位を与えて検討する



# 地震動マップ推定システム QUIET+(クワイエットプラス)



## 大規模地震・発生直後の課題と対応策

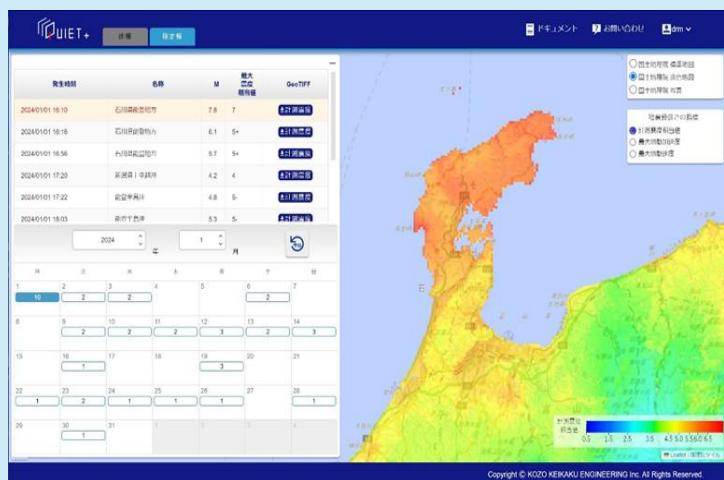
大地震は広域に甚大な被害をもたらす災害であるため、限られた人員・体制で速やかな救援、復旧活動を行うためには、地震発生直後に限られた情報からできるだけ早く**被害の全体像を把握し、被害が大きい地域を特定**するなど、**情報集約と状況把握**が必要不可欠です。市町村名で伝えられる震度の情報だけでなく、面的にどのような揺れが生じたのかを知ることで、**重要な建物に生じる被害や被害の大きいエリアを推定**することができます。



地震動マップ推定システム QUIET+では、地震後に公開される地震記録を用いて日本全国250mメッシュの分解能で**各種地震動強さ指標**※を推定し、WEBブラウザ上でその結果を確認することができます。建物に生じる被害や地域の被害分布の推定に活用可能です。

※計測震度相当値、地表最大加速度、地表最大速度、5%応答加速度、液状化発生確率

## 令和6年能登半島地震での活用事例



QUIET+：能登半島地震の推定例



出典：防災科学技術研究所「防災クロスピュー 令和6年能登半島地震」  
被害量推定 ③災害廃棄物量推定（名古屋大学 平山修久准教授）  
(<https://xview.bosai.go.jp/view/index.html?appid=41a77b3dcf3846029206b86107877780>)  
(2025年7月16日に閲覧)



## Kaiseki Portal

「解析ポータル」サイトでは、災害、環境、維持管理、建築、土木の各分野での解析に関する様々な情報やコンサルティングサービス、構造解析、設計用入力地震動作成システム、地震リスク評価、災害時対策、地盤と構造物の動的相互作用、熱・流体解析に関するソフトウェアについてご紹介しています。

本誌のバックナンバー(PDF 形式)をダウンロードいただけます。ぜひお立ち寄りください。

<https://kaiseki-kke.jp/activity/>



## From Editors

久しぶりに、近所の河原から花火大会を観ました。花火会場は、川の対岸よりさらに陸側で距離はありますが、尺玉が上がる時には大きく華やかな花が美しく現れ、遅れて大きな爆発音が響き、1時間があつという間でした。数日前に（ある程度大画面の）テレビで、有名な花火大会を観ました。部屋を暗くしたりして雰囲気を高めましたが、長くは観ませんでした。遠くても対岸の花火の方が印象に残っています。やはり何事もリアルがいいですね。

猛暑、酷暑、さらに上の表現はないものか、と思うくらい暑い日が続いているが、皆様ご自愛下さい。



本誌掲載記事ならびに弊社の商品・サービスに関するお問い合わせは下記までお願ひいたします。

[kaiseki@kke.co.jp](mailto:kaiseki@kke.co.jp)

(株)構造計画研究所 エンジニアリング営業 1, 2 部

164-0011 東京都中野区中央 1-38-1 住友中野坂上ビル 10F

TEL (03) 5342-1136

(株)構造計画研究所 西日本営業部

〒541-0047 大阪市中央区淡路町 3-6-3 御堂筋 MTR ビル 5F

TEL (06) 6226-1231

解析雑誌

*Journal of Analytical Engineering Vol.55 2025.07*

発行日 2025年7月31日

編集・発行 株式会社構造計画研究所 エンジニアリング営業2部  
西日本営業部

164-0011 東京都中野区中央 1-38-1 住友中野坂上ビル 10F

お問い合わせ 電話 (03) 5342-1136 FAX (03) 3367-1011  
[kaiseki@kke.co.jp](mailto:kaiseki@kke.co.jp)