

## (6) 港湾インフラの維持管理における機械学習による点検診断データの活用に関する考察

宮島 正悟<sup>1</sup>

<sup>1</sup>正会員 京都大学経営管理大学院 特定教授 (〒606-8501 京都府京都市左京区吉田本町)

E-mail: miyajima.shogo.6z@kyoto-u.ac.jp

港湾インフラの機能を耐用年数にわたって適切に維持するためには、維持管理段階において、点検診断結果に基づくマネジメントが欠かせない。港湾に限らず、建設分野の技術者不足がますます懸念されており、労働生産性の向上が重要な課題となっている。近年、機械学習技術がめざましい発展を遂げており、各分野での活用も急速に進んできているが、現状では、港湾インフラの維持管理分野における機械学習技術の活用が進んでいるとは言い難い。本稿では、港湾インフラの維持管理における点検診断結果の中から、注意を要するデータの抽出に機械学習を活用する試みを行った。

**Key Words:** port facilities, maintenance, machine learning, inspection data, database

### 1. はじめに

平成 25 (2013) 年の港湾法改正に伴い、港湾インフラに関する点検が義務化され、維持管理計画に基づく点検診断が実施されている<sup>1)</sup>。港湾インフラの維持管理段階においては、点検診断の結果に基づいて施設の劣化度が判定され、算出されたライフサイクルコスト (LCC) を踏まえて、対策の要否やその優先度等について意思決定が行われることになる。定期的な点検診断の定着に加え、BIM/CIM の普及<sup>2)</sup>やドローンの活用等に伴って、現地において得られるデータ量は膨大になっており、意思決定にあたって参照すべき材料が急激に増えつつある。

一方で、港湾に限らず、建設分野の技術者不足がますます懸念されており、労働生産性の向上が重要な課題となっている<sup>3)</sup>。とりわけ、改正労働基準法の下で建設業における業務効率化が喫緊の課題となっており<sup>4)</sup>、港湾管理者等による意思決定や技術者による判断が効率的に進められるよう、環境整備が求められる。

近年、機械学習技術がめざましい発展を遂げており、各分野での活用も急速に進んできている<sup>5)</sup>。しかし、現状では、港湾インフラの維持管理分野において、機械学習技術の活用が進んでいるとは言い難い。

上記の通り、取り扱うデータ量の急激な増加に対して、積極的に省力化・自動化を推進していくことが不可欠である。またそれは、現地で発生するかもしれない重要な変状の予兆の見逃し防止にもつながることになる。

本稿では、港湾インフラの維持管理を例に、点検診断結果の中で注意を要するデータの抽出に機械学習を活用する試みを行う (図-1)。

### 2. 港湾インフラのマネジメントの現状

港湾インフラに限らず、インフラのマネジメントにおいては、LCCの評価に基づく維持管理戦略の決定が重要な課題となる<sup>6)</sup>。維持管理計画において定めるべき項目や点検診断において調査する項目は、マニュアル等に挙げられている。管理対象となる港湾インフラは数多い。全国に港湾管理者は 932 者存在しており<sup>7)</sup>、それに対し

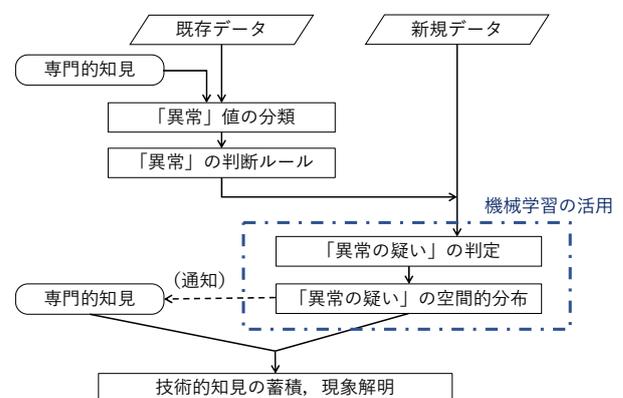


図-1 本研究で対象とする機械学習のイメージ

て、管理の対象となる港湾インフラは全体で約 17 万もの施設数になる<sup>8)</sup>。港湾構造物の点検診断にあたっては、性能低下に及ぼす影響が大きい部材や構造物全体の変状を対象として、効率的な実施が推奨されている<sup>9)</sup>。

港湾構造物を構成する要素の大部分は、アクセスが困難な場所に位置しており、加えて、実際に点検診断を実施する際には、天候や潮汐、波浪、施設の利用状況や周辺の漁業活動等によって、作業時間や適用可能な技術に制約を受けることが多い<sup>10)</sup>。

そのため、点検作業の「目」を補う手段として、近年、電位測定による防食機能の確認<sup>10)</sup>などの実運用のほか、水中ドローン等の UAV<sup>11)</sup>、音響レンズ<sup>12)</sup>などの研究も活発に進められている。また、点検診断で得られた画像等を解析して、床板のひび割れ幅など、施設の劣化状況を分析する研究も進展している<sup>13)</sup>。既存技術に加えてこれらの技術が実用化されて効率的に点検診断が実施されるよう、さらなる研究・開発の進展が期待される。

点検診断において判定された施設の劣化度を基に、マルコフ連鎖モデルやベイズ推定などを用いて将来の劣化度の予測精度を高める研究により、これまでに豊富に知見が蓄積されている<sup>14)16)</sup>。また、予測された劣化度等から、LCCを算出するツールも提供されており、単体のインフラだけでなく、インフラ群を対象として、LCCあるいは純現在価値 (NPV) を指標として補修を行う場合の優先順位づけの方法論も提案されている<sup>17)18)</sup>。

点検診断の手段や結果を用いた予測・解析とともに、点検診断で得られる現地の構造物の変状に関する情報の蓄積も、非常に重要である。加藤ら<sup>19)</sup>は、係留施設に発生する変状を把握して系統的に整理し、変状が施設の機能低下に及ぼす影響の定量的評価手法を構築した。また対策の実施の観点から、高野ら<sup>20)</sup>は、岸壁、栈橋など係留施設の形式ごとに発生している変状を分類し、変状の発生メカニズムと維持管理における留意点を提示した。

これらの港湾インフラに発生する変状の状況やその発生メカニズムは、あくまで研究実施時点までに把握された情報の範囲で整理・分析が行われたものである。

港湾施設は、国際的な生産拠点の再配置や定期航路の寄港地選択を始めとした企業の経営判断などにより、施設利用ニーズが大きく変化する<sup>21)</sup>。そのため、これまで施設に要求される機能向上のスピードが変状に伴う性能低下のスピードを上回り、変状が顕在化する以前に機能向上のために施設の更新が行われることが多かった<sup>22)</sup>。

これまでの研究で把握できていない変状やメカニズムも発生する可能性が高くなることから、継続的に、かつできるだけ範囲を拡げて、現地の構造物の変状を把握していく必要がある。そして、蓄積された膨大な情報から、特徴的な情報を抽出するためには、機械学習に基づく異常検知が必要となる。

### 3. 点検診断データに基づく異常検知

「異常検知」とは、データの中から「ほかと違うもの」を見つけ出す技術、と定義される。人間であれば、目で見えて異常の有無を見つけることは難しくないが、異常検知を行う主体がコンピュータになると、コンピュータに対して、「ある情報に対する判断と解析」を求めることになる<sup>23)</sup>。その手段が機械学習である。

機械学習は、データに潜む規則や構造を抽出することにより、未知の現象に対する予測やそれに基づく判断を行うための計算技術の総称、と説明される<sup>24)</sup>。

機械学習は、教師あり学習と教師なし学習に大別される。ここでいう教師とは、入力に付加された情報で、数学的にある入力に対する望ましい関数の出力値のことを言う。教師あり学習では、与えられた学習用データに含まれる入力とそれに紐づけられた教師が一致するようなモデルを求める。教師なし学習では、学習用データは入力情報のみが与えられ、教師は紐づけされない<sup>25)</sup>。

機械学習におけるモデルとして、対象とするデータに応じて (時系列/非時系列, 画像/非画像など), 線形回帰, 自己回帰, サポートベクターマシン, ニューラルネットワーク等々, 多くのアルゴリズムが使用されている。通常, 港湾インフラの点検診断で得られるデータは, 現状ではその多くが非時系列である。また, 港湾インフラで使用するモデルには, 現地作業員から補修等に関する意思決定者までが理解しうる可読性が求められる。

様々なアルゴリズムの中で, 木構造のモデルは, 簡潔で理解しやすい構造を持つため, 様々な応用で用いられる。分類や回帰に用いられる木構造は「決定木」と呼ばれ, クラスや目的変数の予測のみならず, 属性などを解析するためにも役立つため, 広く利用されている<sup>26)</sup>。そこで, 本研究では決定木モデルを用いることとする。

まず, 分類問題について, 特徴ベクトル  $x = (x_1, x_2, \dots, x_d)^T$  ( $x \in \mathbb{R}$ ) を考える。図-2に示すようなデータを分類する場合, 2次元の特徴ベクトル ( $d=2$ ) となり, 横軸  $x_1$ , 縦軸  $x_2$  で示される。  $\theta_1, \theta_2$  は定数であり, A, B, C の3つのクラスに分けられる。説明変数の全データを, 根ノードから葉ノードへ分類していく 2値分類問題である。

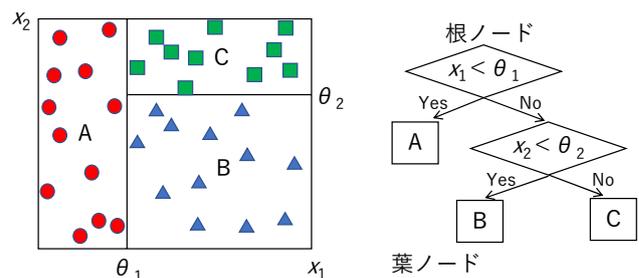


図-2 決定木と対象データの例<sup>26)</sup>を元で作成

#### 4. 機械学習による異常検知の試行

ここでは、過去に観測された現地データを参考事例として活用し、機械学習による異常検知の手順の検証を試みる。使用するデータは、1990年頃に測定された鋼管杭の腐食速度（単位：mm/年）である。図-3に、縦軸に深さを取って分布を示す。2バース分合わせて延長約500mの直杭式栈橋であり、海側第1列の鋼管杭のうち15本において、10段階の深さで測定された値である。以下では、腐食速度を単に「測定値」という。

全体で150点の測定値があり、各測定値は、1点あたり4箇所（鋼管杭の円周上を90度ごとに測定）の平均値で示している。仮に、4箇所の測定値の分散（ $\sigma^2$ ）が大きい点に対して、熟練技術者から「注意を要する」と指摘を受けた場合を想定する。 $\sigma^2$ の値が上位約10%を「異常」値の学習データとした（図-3中の●）。

なお、1999年の港湾の技術基準改訂<sup>27)</sup>時に被覆防食や電気防食などの腐食対策が標準となり<sup>28)</sup>、それらの対策が徹底されたため、現在はここに示すような鋼管杭の腐食の発生は見られない。また、本稿で実施する試行は、必ずしも腐食現象に関する分析と整合するものではない。

測定値（ $q$ ）の度数分布を図-4に示す。例えば、 $q=0.1$ における値は、 $\{0.05 < q \leq 0.1\}$ の範囲の度数を表す。図-2を参考に、測定値と深さそれぞれについて適切な分類基準（ $\theta_1, \theta_2$ ）の設定の検討を試みる。

各測定値に対する識別の結果は、正常値/異常値を、正しく/誤って識別するかによって表-1のように表記される。表中のTP, FN, FP, TNに該当するデータ件数を用いて、識別器の性能や特徴を表す次の指標が算定される。

- ・真陽性率 TPR（True Positive Rate）= TP / (TP + FN)
- ・偽陽性率 FPR（False Positive Rate）= FP / (TN + FP)

横軸にFPR、縦軸にTPRをとると、ROC曲線（図-5）が描ける。曲線の下側の面積が1に近いほど理想的な識別器になる。

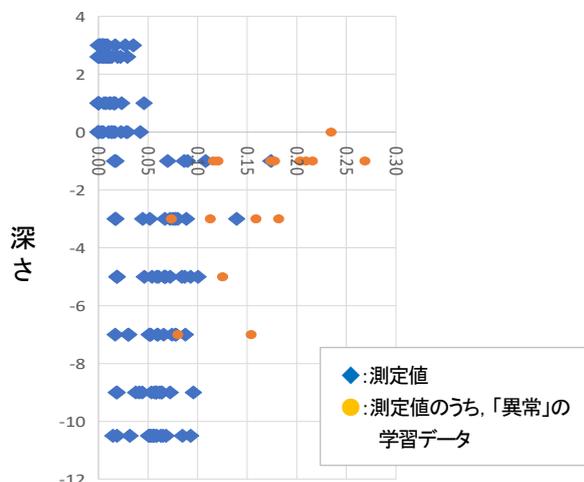


図-3 測定値の深度分布

分割の指標として情報の不純度を表すジニ係数があり、次式で計算される<sup>29)</sup>。値が減少するような分割を探す。

$$E(t) = 1 - \sum_{i=1}^k P_i^2(C_i|t)$$

ここで、 $P_i$ はノード $t$ のクラス $C_i$ の割合を示す。

図-6に分割基準 $\theta_1$ に対するジニ係数 $E(t)$ の変化を示す。 $\theta_1=0.11$ において $E(t)$ が最小値をとっており、この値で分割すると最適と言える。改めて図-4を見ると、0.1と0.15の間で分割すると正常値と異常値を最も効率的に分類できることが推測され、上記結果と適合する。

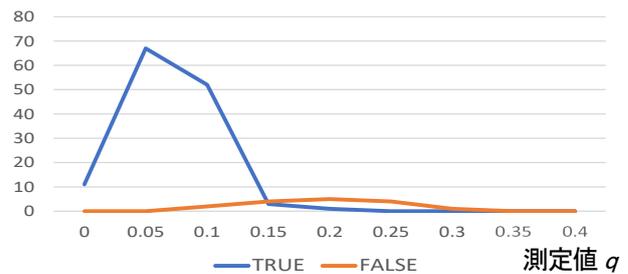


図-4 測定値の度数分布

表-1 異常検知の結果の表記

True Positive (TP)	正常値を正常値と識別した（成功）
False Negative (FN)	正常値を異常値と識別した（失敗）
False Positive (FP)	異常値を正常値と識別した（失敗）
True Negative (TN)	異常値を異常値と識別した（成功）

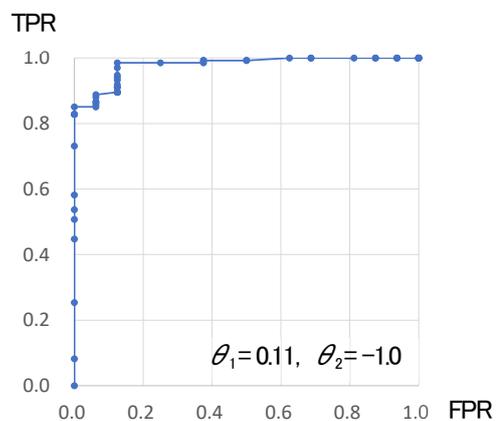


図-5 ROC曲線

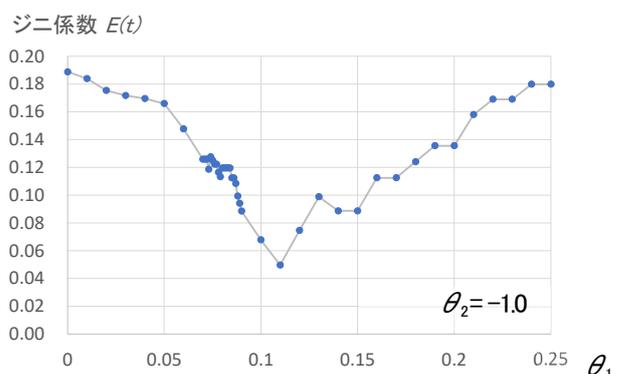


図-6 分割基準  $\theta_1$  に対するジニ係数

$\theta_2$ に関する検討は、図は割愛するが、 $\theta_2 = -1.0\text{m}$ を境に $E(t)$ の傾向が変化 ( $x_2 > -1.0\text{m}$ における「異常」値が少数であることに起因) するものの、いずれの $\theta_2$ の値の場合も、 $\theta_1 = 0.11$ において $E(t)$ が最小値をとった。

以上のようにして設定した識別器 (図-2 に示す決定木) を用いて、新たに得られたデータを識別することで、その測定値が「注意を要する」かどうか判断する上での参考情報が得られる。

## 5. おわりに

本稿では機械学習による異常検知を試行し、「異常」値を含む学習データを用いて簡便な識別器を構築できることを確認した。本研究の目指すところは、意思決定プロセスにおける省力化と形式知化であり、前章における試行等において気づいた事項を以下に列挙する。

- ①CSV形式等での測定値の保存の必要性
- ②港湾管理者等と技術者との測定値共有の仕組み
- ③劣化度とともに変状に関する情報の蓄積
- ④港湾インフラ関連以外の情報を含めた比較分析

港湾は、物流拠点としてだけではなく、人流拠点や産業の場など、時代の要請の変化に応じて機能や役割を変え進化する複合空間である<sup>29)</sup>。技術者不足等に伴って大幅な省力化を求められる中で、港湾インフラに求められる機能を将来にわたって維持していくために、機械学習技術分野の今後のさらなる発展と、港湾インフラにおける活用の進展に期待するものである。

**謝辞：**本研究を進めるに当たり、所属寄附講座における関係者から大変貴重な示唆を得た。また、本稿における異常検知の試行においては、現地での観測データを提供頂いて使用した。ここに深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 国土交通省港湾局：港湾の施設の点検診断ガイドライン，第1部 総論，2020.3.
- 2) 中嶋道雄：港湾工事における CIM の活用，土木学会論文集 B3 (海洋開発)，Vol.75, No.2, pp.1-1-I\_6, 2019.
- 3) 働き方改革実現会議：働き方改革実行計画，2017.3.
- 4) 国土交通省編：国土交通白書 令和2年度版，2020.
- 5) C.M. Bishop (監訳：元田 浩ほか)：パターン認識と機械学習 (上，下)，丸善出版，2012.
- 6) 小林潔司，上田孝行：インフラストラクチャ・マネジメント研究の課題と展望，土木学会論文集，Vol.2003, No.744, pp.15-27, 2003.
- 7) 国土交通省港湾局監修：数字でみる港湾 2020，日本港湾協会，2020.
- 8) 国土交通省港湾局：第2回サイバーポート検討 WG (港湾インフラ分野) 資料，2020.12，[https://www.mlit.go.jp/kowan/kowan\\_fr5\\_000073.html](https://www.mlit.go.jp/kowan/kowan_fr5_000073.html).

- 9) 国土交通省港湾局監修：港湾の施設の維持管理マニュアル(改訂版)，沿岸技術ライブラリー，No.49, 2018.
- 10) 加藤絵万：港湾コンクリート構造物の点検診断技術に関する今後の展望，コンクリート工学，Vol.58, No.1, pp.99-104, 2020.
- 11) 野上周嗣，加藤絵万：水中ドローンを利用した港湾構造物の調査に関する検討，港湾空港技術研究所資料，No.1380, 2020.
- 12) 松本さゆり：港湾工事における海洋音響技術，日本音響学会誌，75巻1号，pp.41-44, 2019.
- 13) 宇野州彦，白可，岩波光保：画像情報を用いた機械学習手法による栈橋の残存耐力評価に関する研究，AI-データサイエンス論文集，1巻J1号，p.132-141, 2020.
- 14) 津田尚胤，貝戸清之，青木一也，小林潔司：橋梁劣化予測のためのマルコフ推移確率の推定，土木学会論文集，Vol.2005, No.801, pp. 801\_69-801\_82, 2005.
- 15) 青木一也，山本浩司，小林潔司：劣化予測のためのハザードモデルの推計，土木学会論文集，No.791/VI-67, pp. 111-124, 2005.
- 16) 高橋宏直，横田 弘，岩波光保：港湾施設のアセットマネジメントに関する研究 一構造性能の低下予測とアセットマネジメントの試行例一，国土技術政策総合研究所研究報告，第29号，2006.
- 17) 小川貴裕，藤森裕二，紅谷昇平，貝戸清之，小林潔司：地震リスクを考慮した港湾矢板構造物群の維持補修シミュレーションモデル，土木学会論文集 F4 (建設マネジメント)，Vol.67, No.1, pp.14-32, 2011.
- 18) 谷 拓歩，横田 弘，橋本勝文，古谷宏一，北里新一郎：複数の係留施設の維持管理における最適な補修優先度と年間予算に関する検討，土木学会論文集 F4 (建設マネジメント)，Vol.70, No.4, pp.1\_73-I\_82, 2014.
- 19) 加藤絵万，川端雄一郎，岩波光保：係留施設の機能低下評価手法に関する研究，港湾空港技術研究所報告，Vol.51, No.1, 2012.
- 20) 高野向後，井山 繁，坂田憲治，藤井 敦，宮田正史，西岡悟史：港湾施設の点検診断結果を踏まえた維持管理における配慮事項に関する検討，国土技術政策総合研究所資料，第921号，2016.
- 21) 加藤 博敏，北里 新一郎，兵頭 武志，横田 弘：経済社会変化による利用ニーズ変動に対応可能な港湾アセットマネジメント手法の一提案，土木学会論文集 F4 (建設マネジメント)，Vol.68, No.4, pp.1\_69-I\_78, 2012.
- 22) 加藤絵万，岩波光保，横田弘：栈橋のライフサイクルマネジメントシステムの構築に関する研究，港湾空港技術研究所報告，Vol.48, No.2, 2009.
- 23) 曾我部東馬：Pythonによる異常検知，オーム社，2021.
- 24) 須山敦志著，杉山将監修：ベイズ推論による機械学習入門，講談社，2017.
- 25) 中島智晴：機械学習における深層学習：基礎と応用例，材料，Vol.69, No.9, pp.633-639, 2020.
- 26) 後藤正幸，小林 学：「入門 パターン認識と機械学習」，コロナ社，2014.
- 27) 運輸省港湾局 監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説，日本港湾協会，1999.
- 28) 山路 徹，田土弘人，川瀬義行，小林厚史，吉田倫夫：海洋鋼構造物の集中腐食および電気防食に関する最近の知見，港湾空港技術研究所資料，No.1369, 2020.
- 29) 坂井啓一：港湾施設の機能と構造，土木学会誌，Vol.104, No.8, pp.16-19, 2019.