

## マハラノビス距離を用いた電柱の劣化診断

[研究代表者] 津田紀生 (工学部電気学科)

[共同研究者] 小塚晃透 (工学部電気学科)

岩月栄治 (工学部土木工学科)

荒井翔太 (工学研究科電気電子工学専攻)

古屋直樹 (工学部電気学科電子情報工学専攻)

中根長太郎 (工学部電気学科電子情報工学専攻)

### 研究成果の概要

近年、地震や温暖化に伴う台風の大型化に伴い電柱が倒壊する事例が増加しており、電柱の定期的な検査が必要となるが、国内に約 3600 万本あると言われる電柱を定期的に全て検査する事は困難である。そこで、本研究では、現在人が現地で行っている電柱の劣化診断を自動化する装置を開発することを目的とした。

「データのなかから「ほかと違うもの」を見つけだす技術」や外れ値の検出、変化点検出、異常行動検出を行う技術として認識されている異常検知を欠陥検出に利用するため、今年度は、統計解析のマハラノビス距離を用いた異常検知について研究を行った。

マハラノビス距離を用いた異常検知は、入力信号波形の振幅が小さくなると、異常が検知できなくなるため、実験装置の小型軽量化には向いていないと判断するに至った。

### 研究分野：計測

キーワード：マハラノビス距離、劣化診断、電柱

#### 1. 研究開始当初の背景

コンクリートポール（電柱）は、工場において遠心成形製造するので、現場でコンクリートを打設する土木構造物と比較すると品質が高く、製品ごとのばらつきが少ない。この為、設置後の電柱は、中性化や塩化物イオンの浸透が遅くなると従来は考えられていた。しかし、近年温暖化の影響により日本近海で大型化し、勢力を保ったまま上陸する台風が増加した。その結果、強風により電柱が曲がった際、空隙やひび割れなどの欠損が電柱表面に発生する。しかし、風が弱くなり、電柱が元の状態に戻ると、これらのひびは閉じてしまい外観から欠陥を確認するのが難しい。これは、電柱が高強度の鋼材で圧縮応力（プレストレス）を与えることにより補強したコンクリートで構成された構造物（プレストレスコンクリート構造物）の為である。

しかし、この空隙やひび割れから塩化物イオンが浸透した場合や、二酸化炭素などの影響によりコンクリートの中酸化が進行した場合、電柱内の鋼材を腐食させ、コンクリート内部で欠陥が進行する。

電柱表面に生じた欠陥の検査方法としては、空隙やひび割れの長さや大きさの目視による検査や、ハンマーを用いた打音検査が一般的である。打音検査の場合、音を聞き分ける能力が作業者に求められる為、作業者を急に増やす事は難しい。

近年、異常検知に関する研究が様々な分野で進んでおり、電柱の劣化を自動で定期的に検査出来れば、作業者に依存せず判別する事が可能となる。

#### 2. 研究の目的

電柱は、全国に約 3,592 万本設置されており、年間 7 万本のペースで増え続けている。さらに今後は、電柱に様々なセンサを取り付ける事で自動運転を補助する役割として活躍することなどが期待されている。

コンクリートのひび割れは、コンクリート構造物の劣化と密接に関係しており、適切な維持管理によって長寿命化を図ることが求められている。しかし、少子高齢化、地球温暖化、社会基盤の老朽化等の問題によって適切な維持管理が困難になりつつある。

日本にこれほど電柱が増加した要因として、高度経済成長期に電力需要が急増し、低コストで建てられる電柱が多く設置された。平成 28 年に防災や景観景美の観点から無電柱化に関する法律が成立したが、コストの問題や無電柱化の工事に伴う様々な問題から、現在まで無電柱化は進んでおらず、2019 年度末における国土交通省の調査では、無電柱化率は、東京 23 区で 8%、大阪市で 6%に留まっている。

一方で電柱は、最近では運転支援や自動運転に貢献することも期待されており、路車間通信に関する実証実験が行われ、既存の電柱が安全運転や自動運転に貢献することが実証されている。その為、既存の電柱は耐用年数を超えても大きな劣化がない限り取り壊されることがなく今後も活用されていくことが予想されるため、電柱や ITS スマートポールの補修・保全に対する重要性は今後益々増加すると考えられる。

しかし、電柱の劣化判定は、台風などの外的な要因により電柱が曲がり、電柱表面にひびが生じるが、プレストレス構造による内部鉄筋の引張応力により亀裂が塞がれてしまうため目視による点検では亀裂を見つけることが困難となる点と、現在電柱の検査が、人によって行われており、検査員の数に対して検査対象の電柱の本数が多く、点検・判定の信頼性の確保が難しい点が問題となっている。

現在、電柱に対する点検は、近くからの外観目視と、遠くからの目視が行われている。外観目視は、電柱から 10cm から 30cm の距離からひび割れがあるか確認し、他にも、コンクリートの欠けや剥離等の有無を確認する。遠くからの目視は、電柱がくの字や反って変形がないことを確認する。

電柱表面のひび割れは、方向によって劣化度対応が異なり、横ひびは、台風や地震などの大きな力が加わるときに

発生する。一方、縦ひびは内部の鉄筋の膨張により発生すると考えられている。そこで、今回の研究では、横ひびに注目し実験を行った。

研究の最終目標は、コンクリート内を伝搬する超音波を利用し、電柱の劣化判断が技術者の習熟度や周囲の環境に影響されず、誰でも現場で劣化を判別できる、検査の為の安価な IoT エッジ装置を作成し、電柱の劣化を定期的に自動で判別する装置の開発である。

### 3. 研究の方法

実験当初は、電柱を作成している東海コンクリートさんに伺って研究を進める予定であったが、今回の研究期間がコロナの期間と重なり、県をまたぐ移動に制限が発生した為、長さ約 2m のコンクリート柱を東海コンクリートさんに特別に作成して頂き、このコンクリート柱を学内に設置し研究を行った。図 1 に 2m 柱の外観を、図 2 に 2m 柱表面の横ひびの様子を、図 3 に実験装置の配置図を、図 4 に実験に使用した P 波探触子を示す。超音波は、小さな傷でも反射する為、超音波の指向性により傷の位置を特定する事ができる。そこで今回の研究でも、超音波を P 波探触子に印加して実験を行った。

超音波の伝搬を利用した欠陥検出の研究では、単一の周波数を探触子に入力し、その周波数の伝搬波形を測定し、欠陥検出に利用していたが、今回の研究では、単一の周波数を探触子に入力した時に発生する複数の周波数を使って、欠陥検出の研究を行った。

今回の研究では、欠陥検出に異常検知を利用した。異常検知は、「データのなかから「ほかと違うもの」を見つけ出す技術」や外れ値の検出、変化点検出、異常行動検出を行う技術として認識されている。異常検知では、この「ほかと違うもの」を機械が判定・判断することを目的としているため、操作を行う人による影響はないことがメリットとして考えられる。

異常検出を実現するためには、機械が情報に対して判断・解析を行う必要がある。そこで、統計解析のマハラノビス距離を用いた異常検知について研究を行った。

マハラノビス距離による異常検知には、多次元データが中心からどの程度離れているかを示す距離尺度を利用する。変数間の相関関係を計算し、データとの関係を明らかにする。距離を示す尺度として有名なものに 2 点間の直線

距離を示すユークリッド距離がある。



図1 2m 柱の外観



図2 横ひびの様子 (2m 柱)

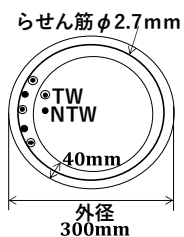
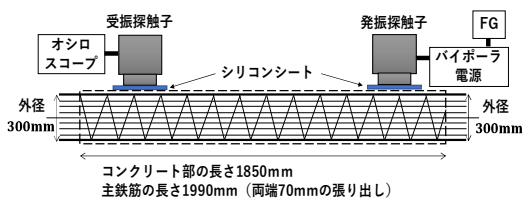


図3 実験装置の配置図



図4 P波探触子

マハラノビス距離とユークリッド距離の違いを図5に示す。図5では、橙線がユークリッド距離、青線がマハラノビス距離、青丸が正常データ、橙丸が異常データを示す。図5におけるX(正常データ)とY(異常データ)における原点からのユークリッド距離は中心から一定の距離で

あるため、異常検知に用いることができないが、マハラノビス距離では、後述する分散・共分散行列により相関関係を考慮した楕円を描くので異常と検知することが可能となる。

今回の研究では、ひびの入っていない供試体を健全管とし、横ひびが入った供試体を劣化管として実験を行った。

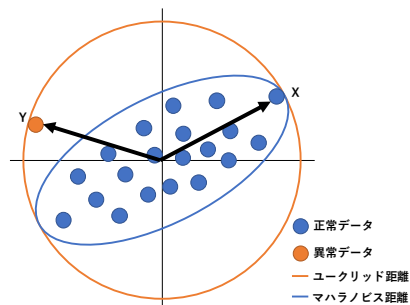


図5 マハラノビス距離とユークリッド距離

マハラノビス距離を用いた異常検知は、健全管・劣化管から得られたデータに対し STFT(short-time Fourier transform)処理した画像から最大ピクセル値に対応する周波数と時間を抽出し、そのデータを2次元配列に格納した後、健全管の配列に対してマハラノビス距離を算出した。

周波数を縦軸、時間を横軸とし、マハラノビス距離を描画し、その中にマハラノビス距離を作成する時に使用しなかった健全管と・劣化管のデータをプロットした。探触子への入力信号の振幅電圧を60Vppにした場合のマハラノビス距離を図6に示す。

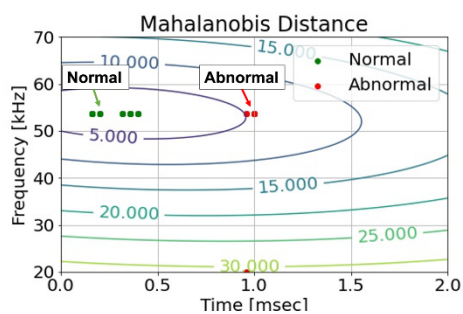


図6 マハラノビス距離 (60Vpp)

図6より、マハラノビス距離の閾値を5に設定することで劣化管を異常データとして検知可能であると分かった。次に探触子への入力電圧の振幅を30Vppにした場合の、マハラノビス距離を図7に示す。図より、円の中心部に正常・異常データが存在しており、探触子への入力電圧の振

幅が小さくなると異常データを検知するのが不可能であることが分かった。

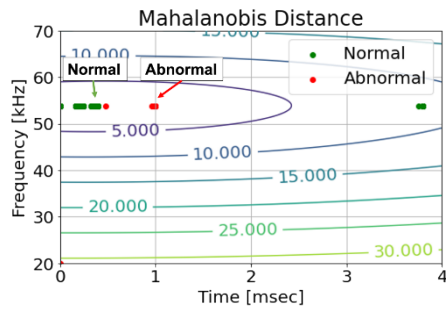


図7 マハラノビス距離 (30Vpp)

#### 4. 研究成果

STFT 画像の最大ピクセル値における周波数と時間から求めるマハラノビス距離は、探触子への入力信号の振幅電圧が 60Vpp では異常検知可能であるが、振幅電圧が 30Vpp と小さくなると異常検知が不可能である事が分かった。よって、マハラノビス距離を用いた異常検知は、入力信号波形の振幅が小さくなると、異常が検知できなくなるので、実験装置の小型軽量化には向いてないと判断した。

今後は、深層学習を利用し、AnoGAN (Anomaly Detection with Generative Adversarial Networks) を使った異常検知の研究を行う予定である。

#### 5. 主な発表論文等

##### 学会発表 5 件

- (1) P 波と S 波スペクトログラム画像の深層学習を利用したヒューム管の劣化診断に関する研究、令和 3 年 3 月 9 日、令和 3 年電気学会全国大会、大阪大学 豊中キャンパス
- (2) 深層学習のパラメータ変化によるヒューム管の劣化判定における基礎研究、令和 3 年 9 月 7 日、電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会、愛知工業大学
- (3) 超音波によるコンクリート内鉄筋の劣化判定に関する研究、令和 4 年 3 月 21 日、令和 4 年電気学会全国大会、岡山大学 津島キャンパス
- (4) コンクリート構造物を対象としたエッジ波の発生と実用に向けた検証、令和 4 年 8 月 30 日、電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会、中部大学 (日本音響学会東海支部学生発表奨励賞受賞)

- (5) 超音波を用いた電柱の劣化判定と異常検知、令和 5 年 3 月 17 日、令和 5 年度電気学会全国大会、名古屋大学 東山キャンパス