



東北大学大学院工学研究科 土木工学専攻 内藤英樹

専門: 構造工学

機械学習: 素人です。

趣味: 楽器とオーディオ、音楽です。

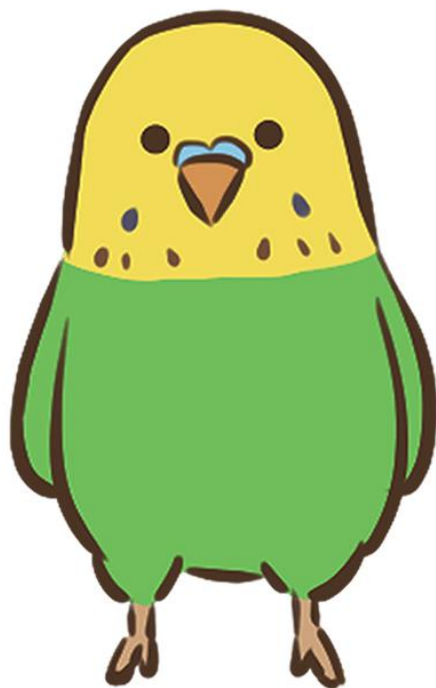
みなさんへのメッセージ:
ご視聴ありがとうございます。
一緒にAIの勉強をしましょう。

音声読み上げは、VOICEVOXを使用しました。

機械学習と振動測定を用いた 社会基盤構造物の健全性診断

東北大学大学院工学研究科土木工学専攻

内藤 英樹



1. 研究の背景と目的
2. 振動測定の概要
3. 機械学習の概要
4. 基礎検討 (試験体)
5. 応用検討 (道路橋)



住み続けられるまちづくり



防災・減災



老朽化対策

社会的ニーズ

強靱で持続可能な
社会インフラの整備が求められている。

課題

質の高いインフラを実現するため、
点検の高度化が急務である。

目的

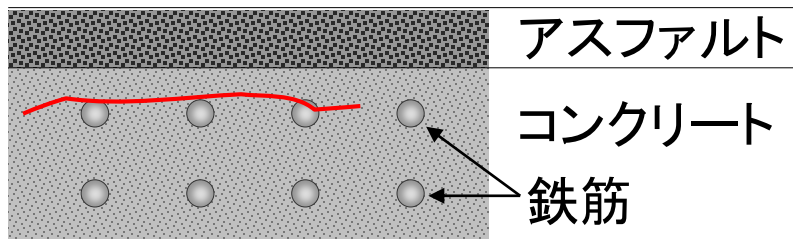
高精度かつ効率的な
インフラ構造物の**点検技術**を開発する。



(坪田、第29回日本道路会議)

疲労によって、道路橋床版が抜け落ちる。

ひび割れ



構造物内部のひび割れは、
目視できない。



下水道管に直径1メートルほどの穴

(NHKニュース、2022)

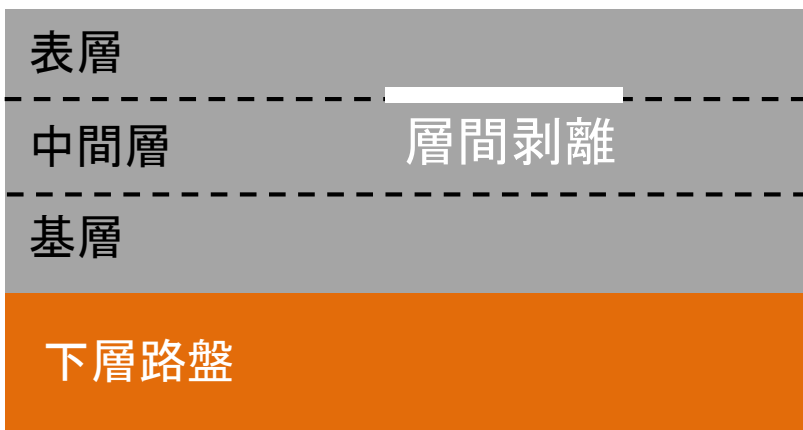


道路の陥没が頻繁に発生している。
(例えば、上下水道の漏水等が土を流出させる)

名古屋空港の劣化事例



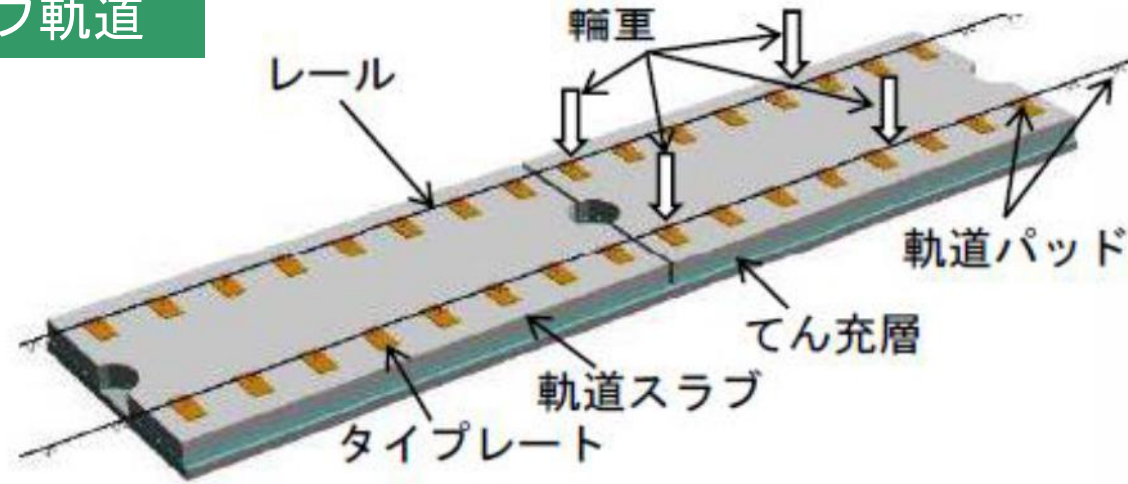
(坪川、2000)



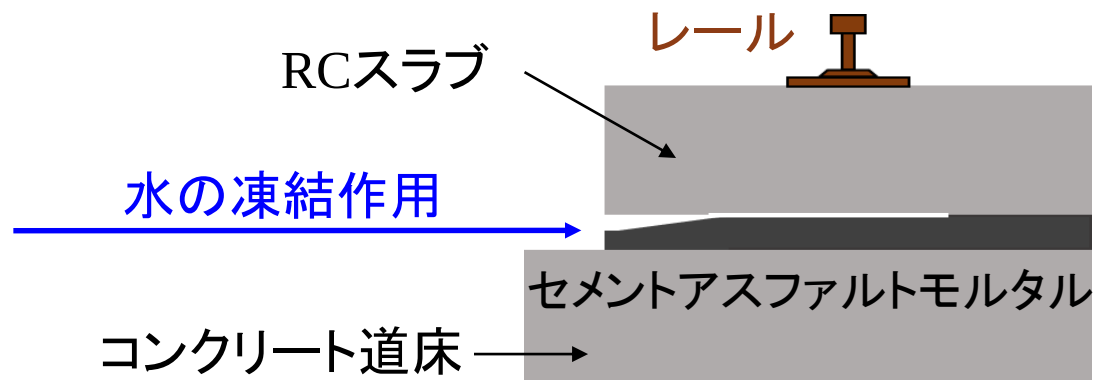
福岡空港や羽田空港でも、同様の劣化が報告されている。

滑走路閉鎖による国際線の遅延・運休は、世界中に大きな影響を与える。

新幹線スラブ軌道



(鉄道総合技術研究所)



寒冷地では、CAモルタルが
広範囲に空洞化している事例がある。

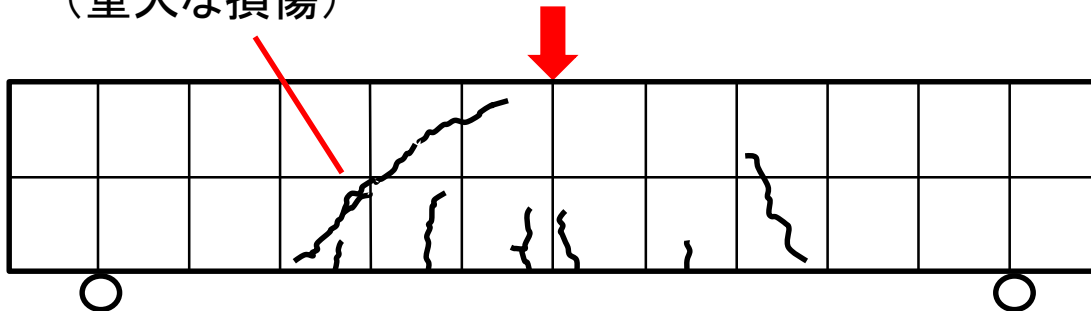


地震後の鉄道高架橋 (撮影者: 内藤)



ボックスカルバート (撮影者: 内藤)

せん断ひび割れ
(重大な損傷)



地震後の調査でも、
目視困難箇所は多く存在する。
(e.g. 補強材で覆われた部材、
土中・水中構造物)



(鉄道総合技術研究所)

目的

構造物内部の劣化・損傷を
高精度かつ高速に見つける。

ハードとソフト開発

- ✓ 高速走行しながら、
構造物の周波数特性を取得する。
- ✓ 機械学習が診断をする。
- ✓ 大量データを使って機械学習を鍛える。

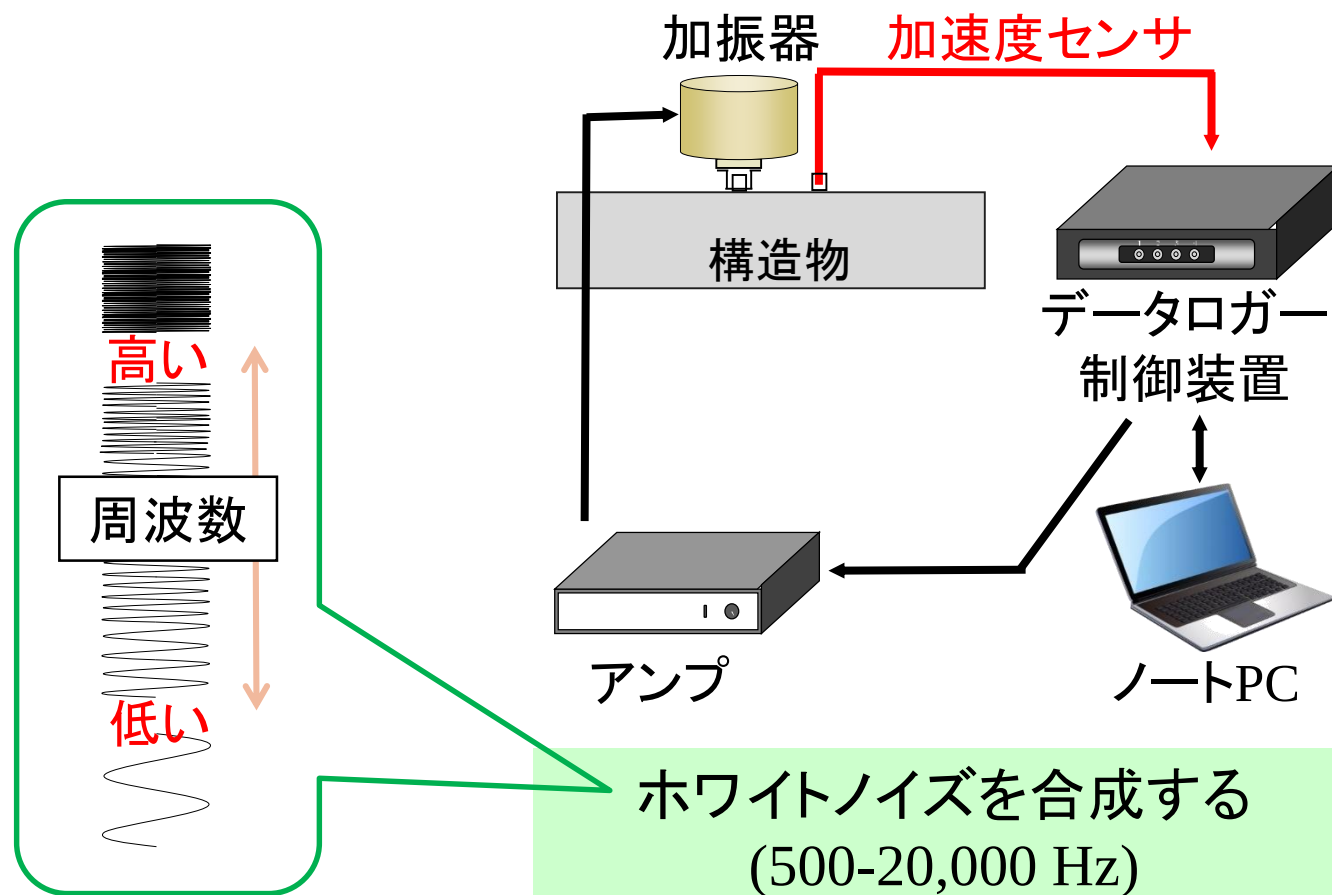


ドクターイエロー
(撮影者: 内藤)

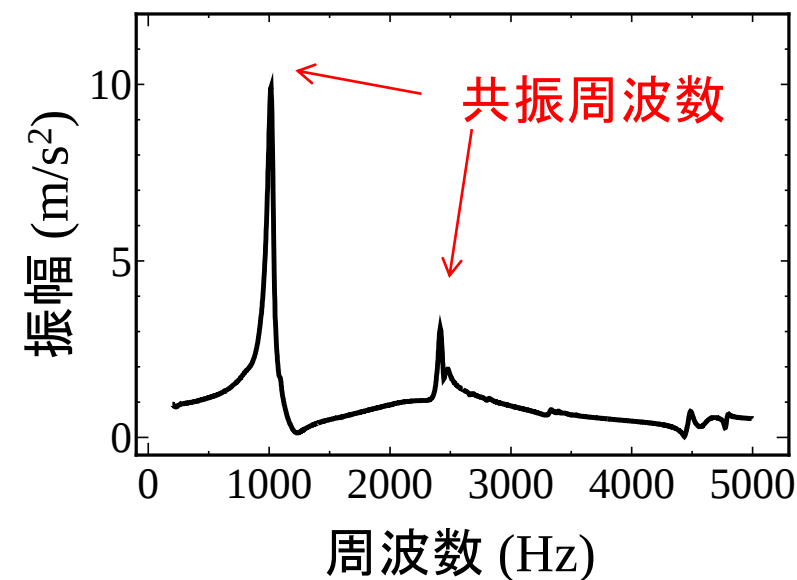


1. 研究の背景と目的
2. 振動測定の概要
3. 機械学習の概要
4. 基礎検討 (試験体)
5. 応用検討 (道路橋)

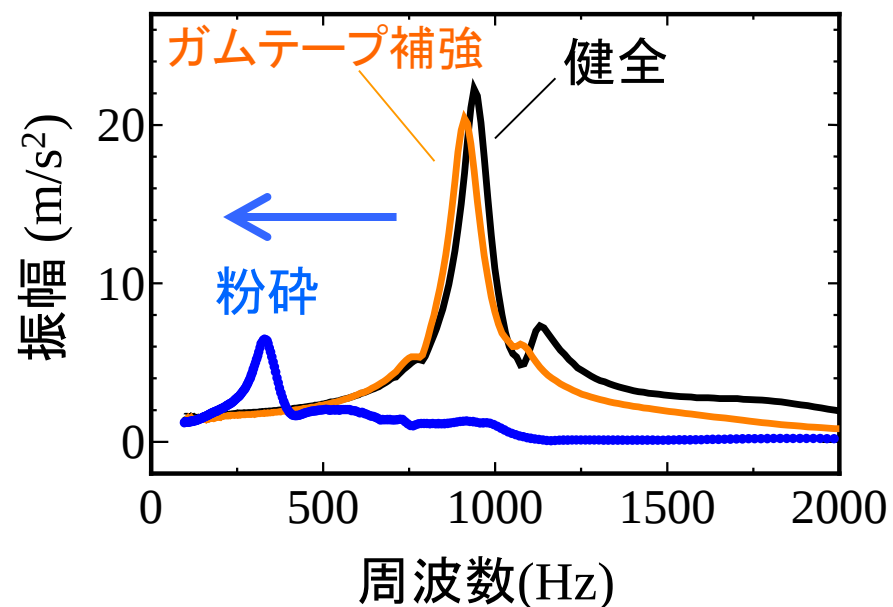
コンクリートの共鳴振動試験と同じです。
スピーカーの原理と同じです。



ガラスの音響測定



グラスを叩き割って、周波数スペクトルを比較した。



健全 : 939 Hz



粉碎 : 333 Hz

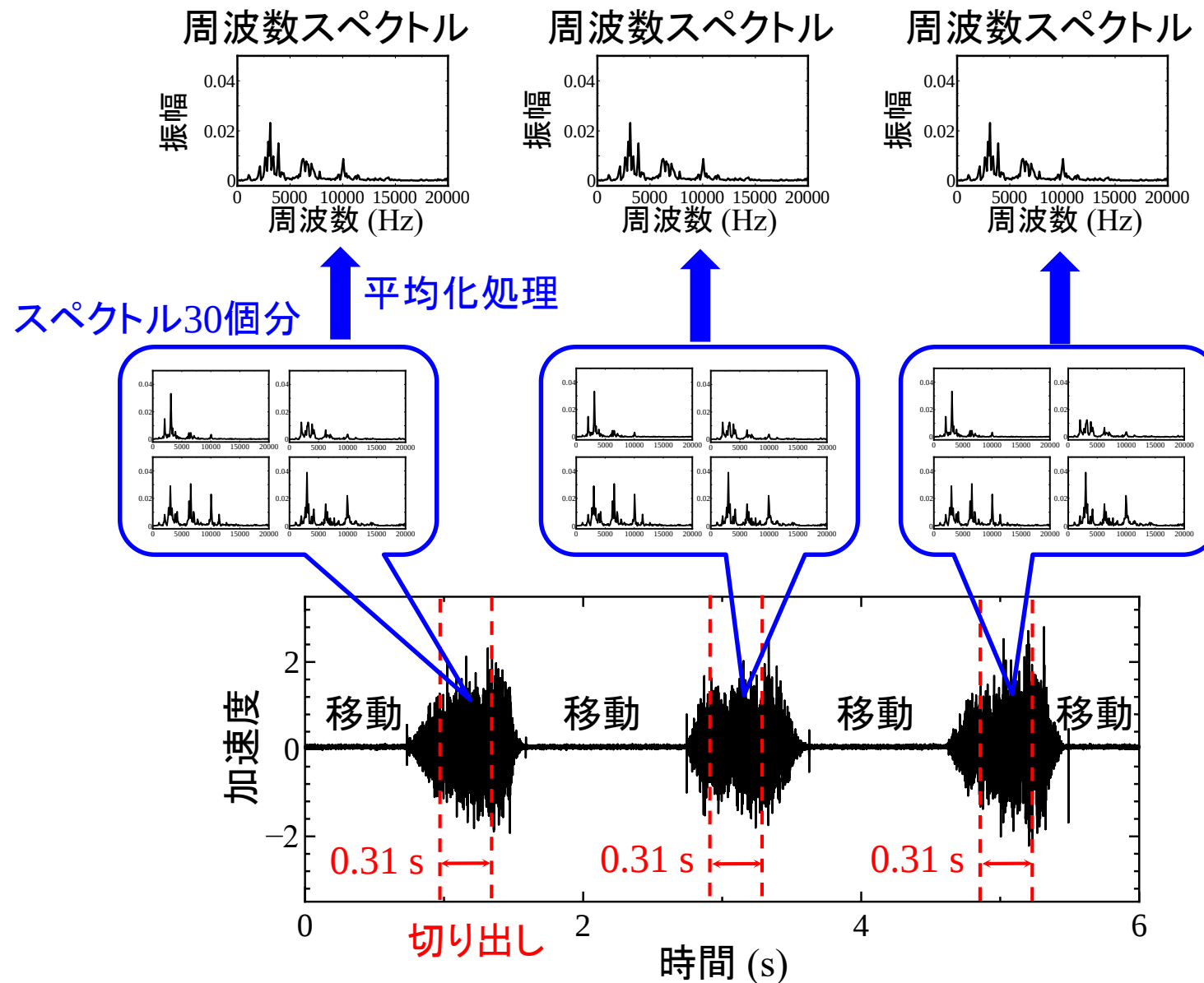
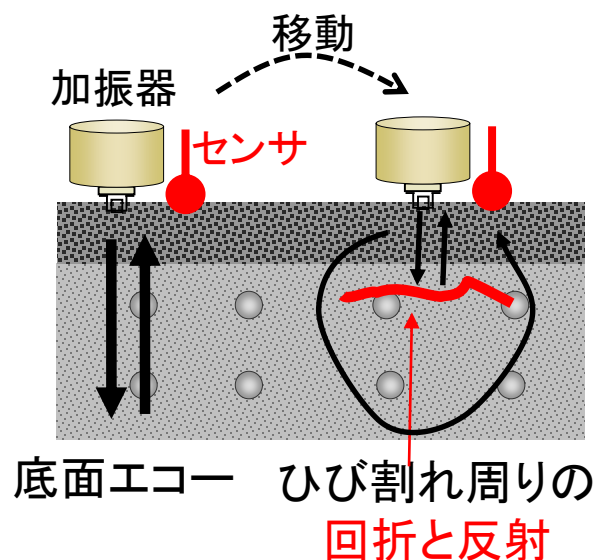


グラスが割れると、

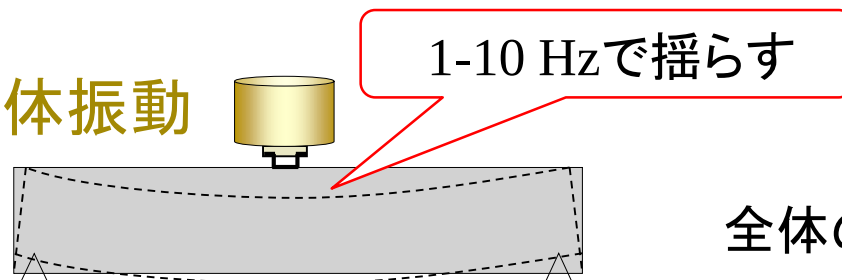
- ✓ 音量が小さくなる。(響かなくなる)
- ✓ 音程が下がる。(剛性が低下する)
- ✓ 音色が濁る。



移動しながら、1測点を
0.3 秒間で測定する。



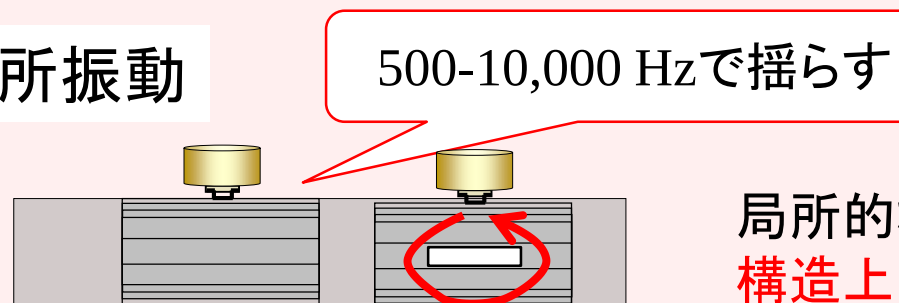
全体振動



全体の平均剛性を調べる。

予防保全にならない

局所振動

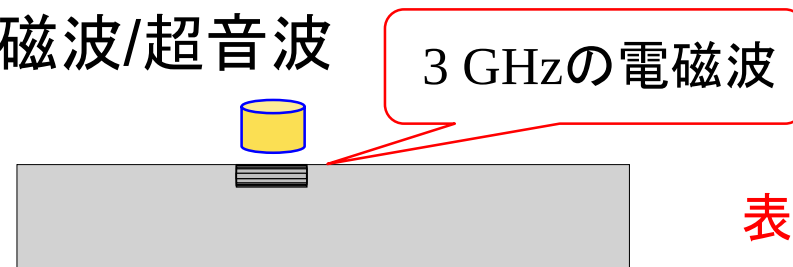


局所的な共振を励起し、
構造上重大な内部損傷を捉える。

目的に合致する

提案手法

電磁波/超音波



表面付近の変状を捉える。

中が視えない
軽微な劣化も拾う



1. 研究の背景と目的
2. 振動測定の概要
3. 機械学習の概要
4. 基礎検討 (試験体)
5. 応用検討 (道路橋)

内藤は、2019-2020年の
情報授業を担当しました。

1年生の必修科目として、
Python縛りでAI教育をします。

宮城のニュース

宮城 社会

ツイート

シェア

＜東北大＞来年度からA I授業必修に 新たな社会と向き合える人材育成

東北大は来年度、新入生全員を対象に人工知能（A I）の基礎を学ぶ授業を必修化する。A Iによるデータ分析などの技術が急速に進む中、文系・理系を問わず、A I活用の技術や倫理などを理解し使いこなす能力を備えた人材の育成を目指す。A I教育の必修化は全国に先駆けた取り組みという。

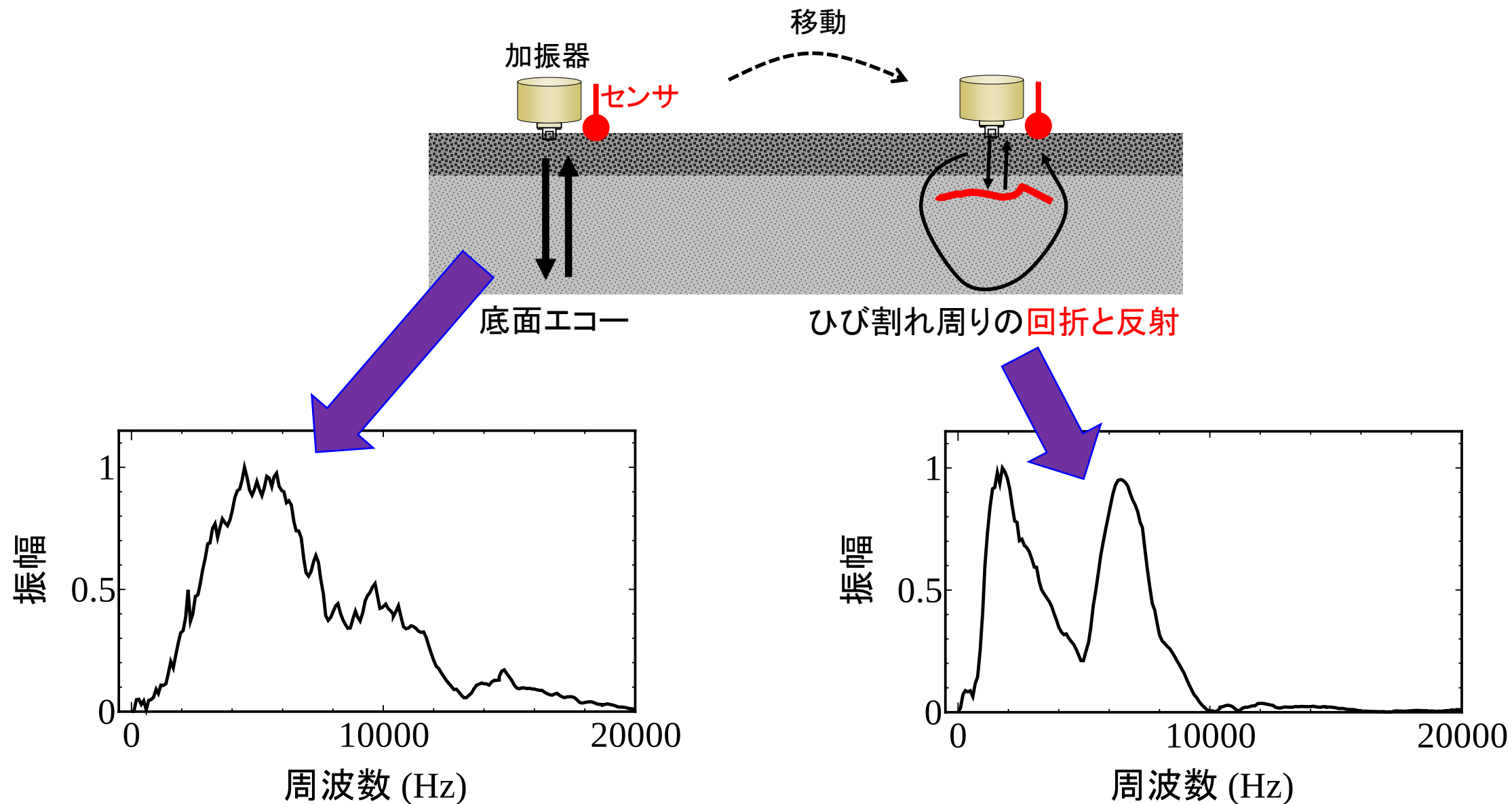
全学部の新入生約2400人が、A Iやデータ利活用の基本を学習する科目「情報基礎」を履修する。現在、理系学部など一部で必修となっている同科目の内容を拡充させるほか、統計関連の基礎を学ぶ「数理統計学」などの授業を全ての学部



情報関連の授業に取り組む学生たち＝6月、仙台市青葉区の東北大川内キャンパス

拡大写真

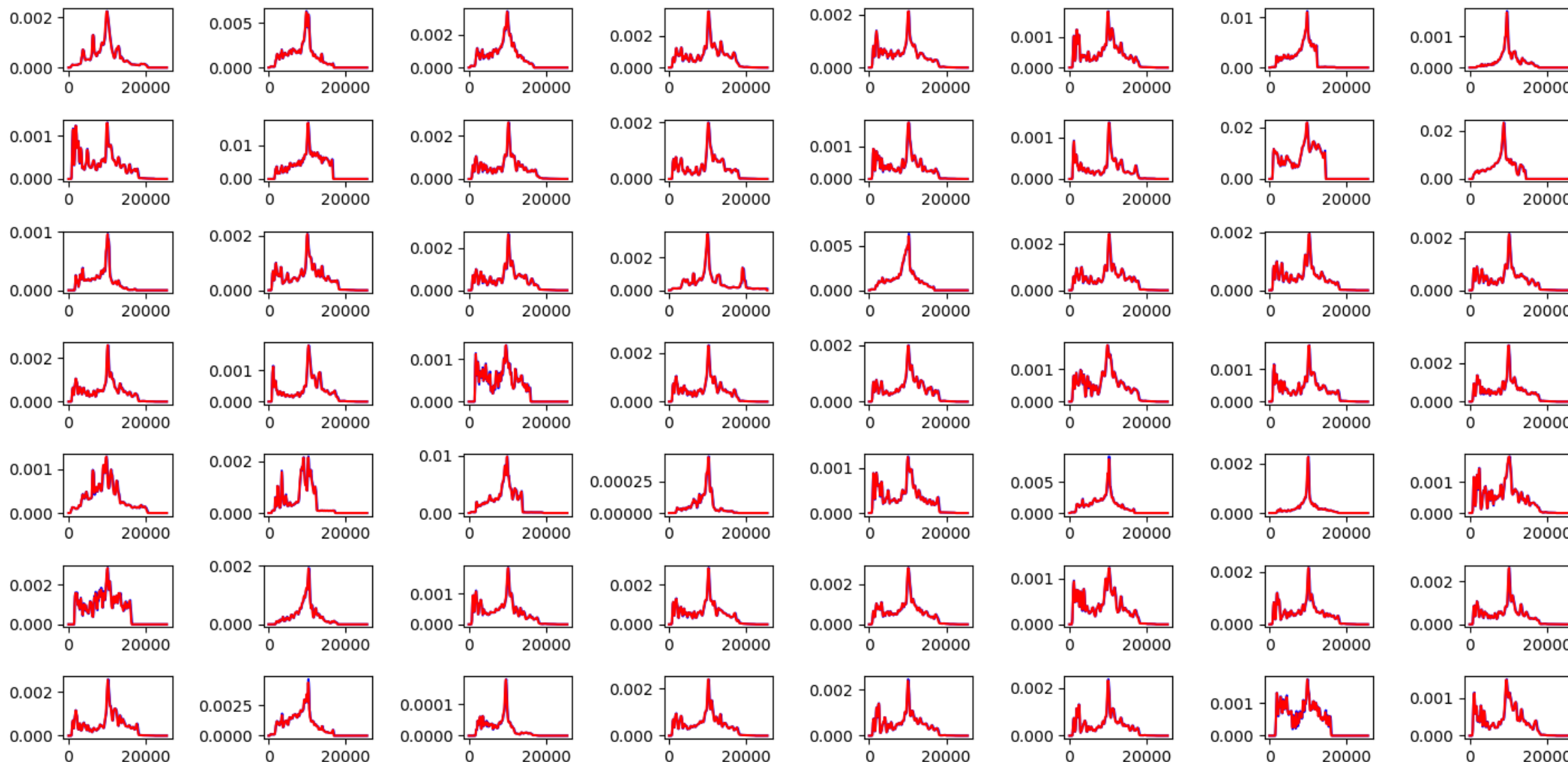
(河北新報オンラインニュース、2019)



Quiz : どれが健全箇所、劣化箇所でしょうか？

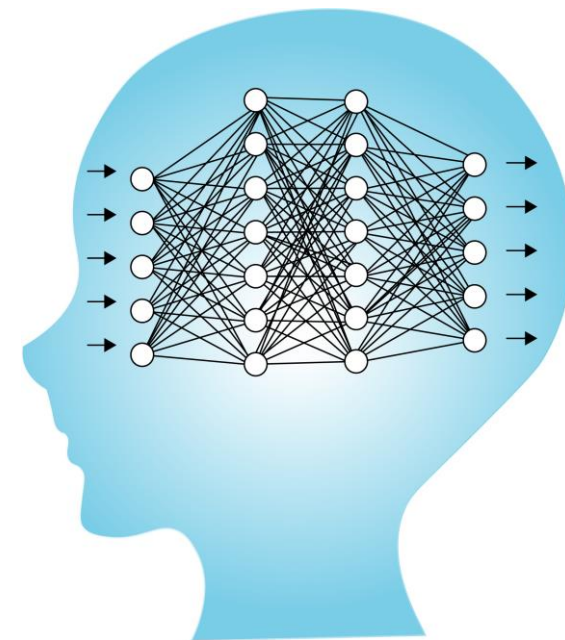
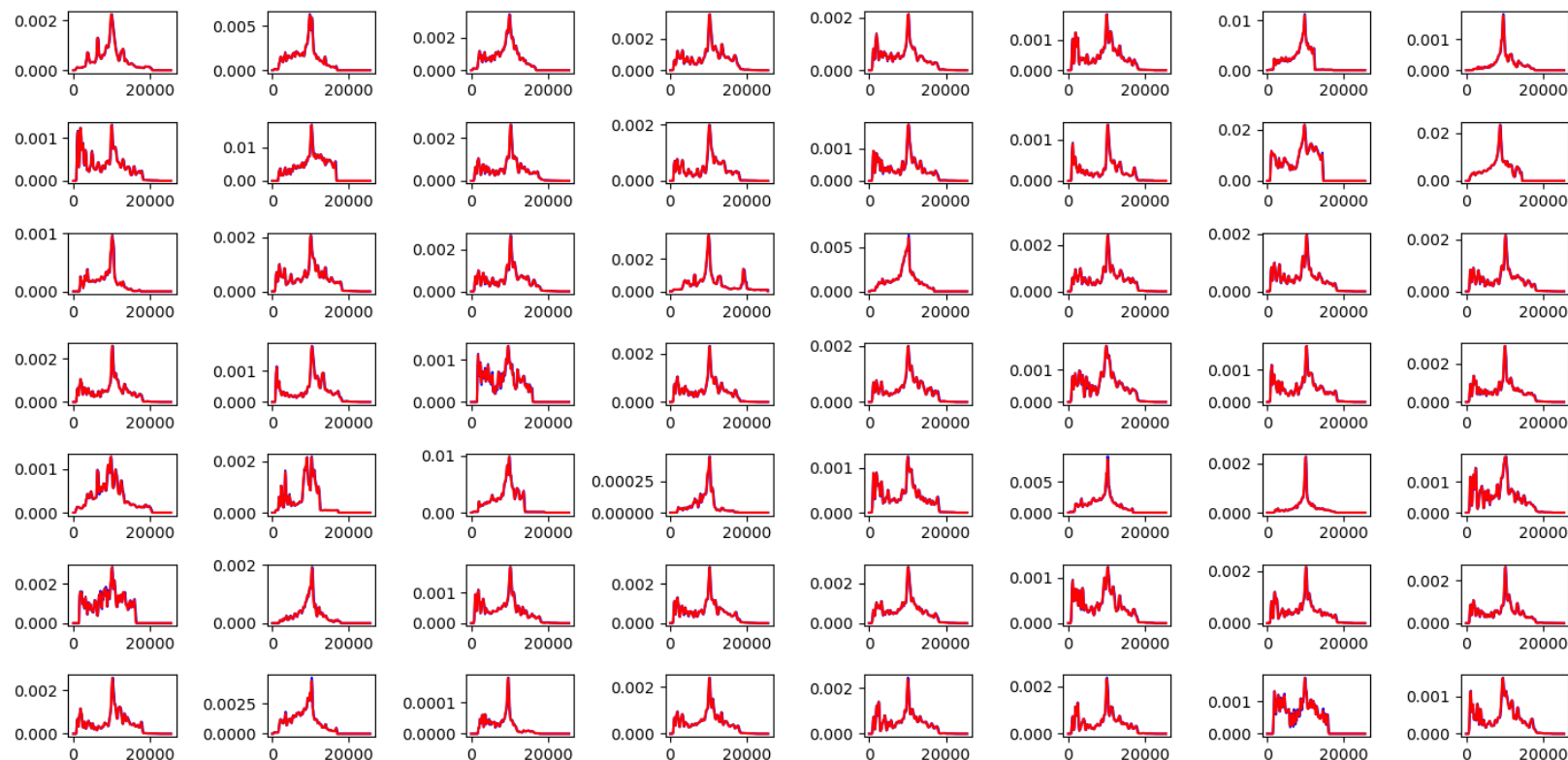
18

TOHOKU UNIVERSITY



答え: すべて健全箇所で取得したデータです。

横軸: 周波数 (Hz)、縦軸: 振幅 (m/s)



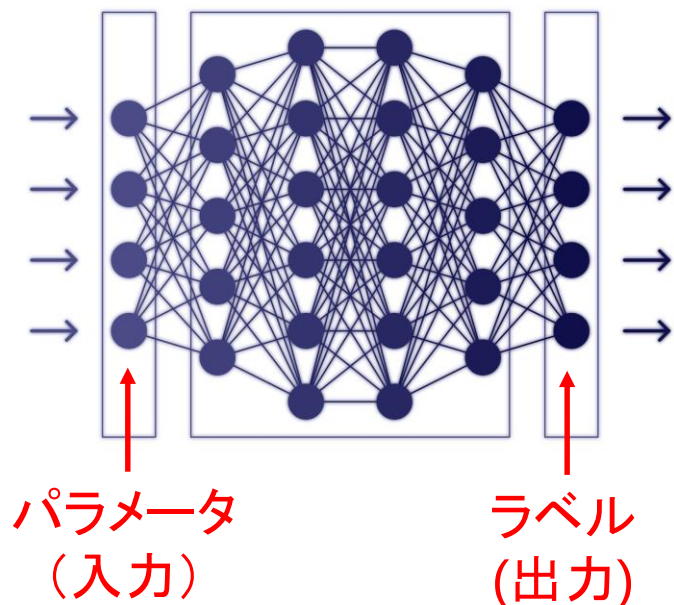
AI に周波数スペクトルを覚えさせて、異常を見つける。
しかし、何から始めればよいのでしょうか？
機械学習をはじめるときに、有名な例題を2つ紹介します。

教師あり学習、多クラス分類

アルコール度数、色彩、成分などをパラメータにして、
ワインの銘柄 (ラベル) を予測する。



手法: ニューラル・ネットワーク



詳しい解説は割愛します。
NN以外でもたくさんフィッティング手法があり、
同じような結果になります。

ラベル (ワインの種類) は3つ、
成分パラメータは13項目です。

パラメータ1: Alcohol (アルコール)
パラメータ2: Malic acid (リンゴ酸)
パラメータ3: Ash (灰)
パラメータ4: Alcalinity of ash (灰のアルカリ性)
パラメータ5: Magnesium (マグネシウム)
パラメータ6: Total phenols (フェノール類全量)
パラメータ7: Flavanoids (フラバノイド)
パラメータ8: Nonflavanoid phenols (非フラバノイドフェノール類)
パラメータ9: Proanthocyanins (プロアントシアニン)
パラメータ10: Color intensity (色彩強度)
パラメータ11: Hue (色調)
パラメータ12: OD280/OD315 of diluted wines
パラメータ13: Proline (プロリン)

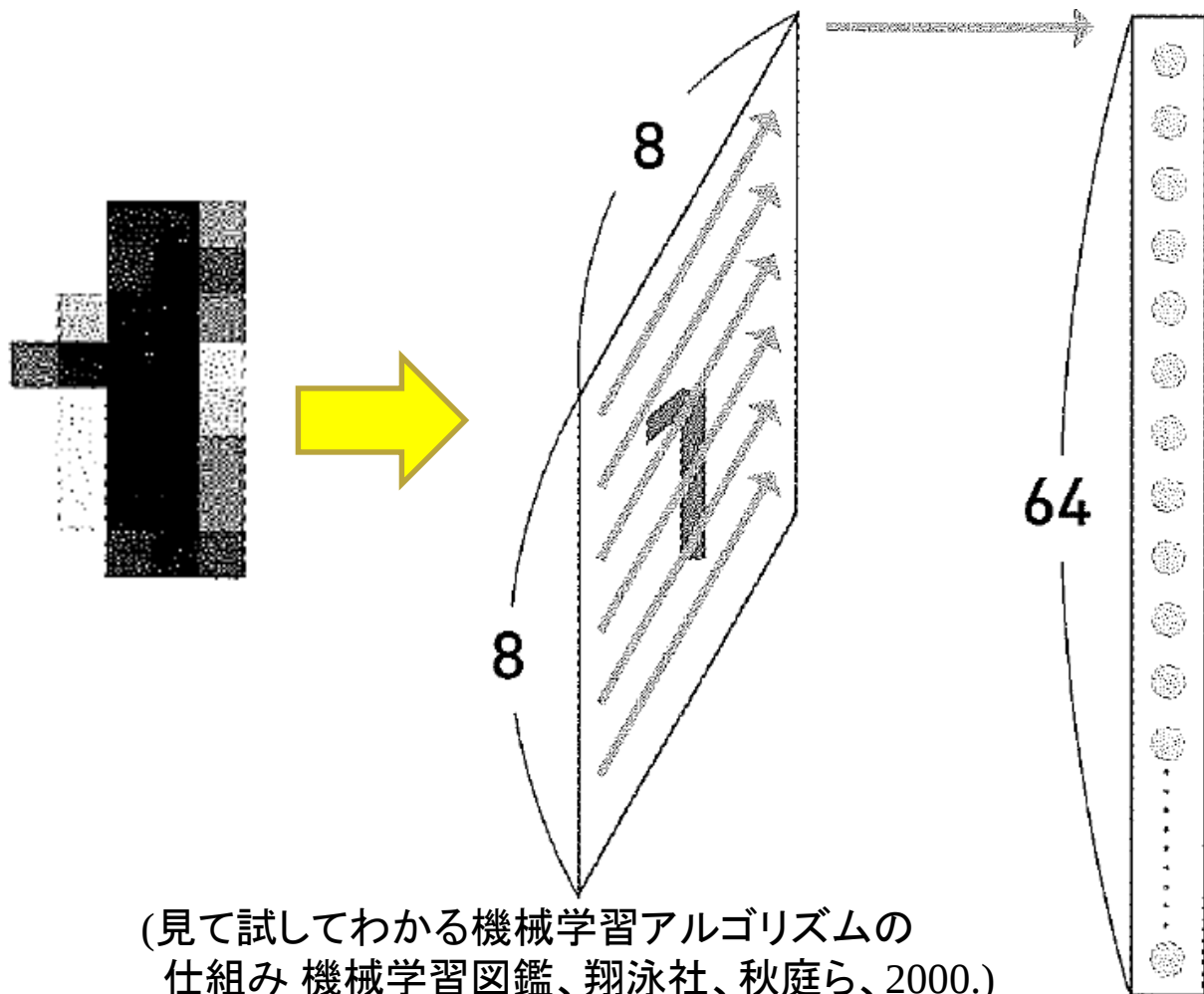
分類

ラベル

ワイン1

ワイン2

ワイン3



手順1:

8 x 8 のグレースケール画像から、
64要素のパラメータを作成する。

文字データの例：

[0, 0, 0, 8, 8, 16, 16, 8, 8, 0, 0, 0...]
0は白、8は灰色、16は黒の塗りつぶし。

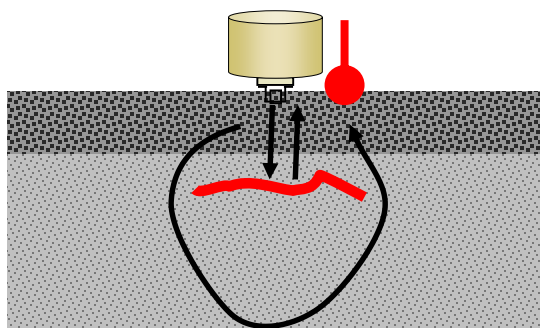
ワインの分類: 13パラメータ、3ラベル
数字の分類: 64パラメータ、10ラベル

手順2:

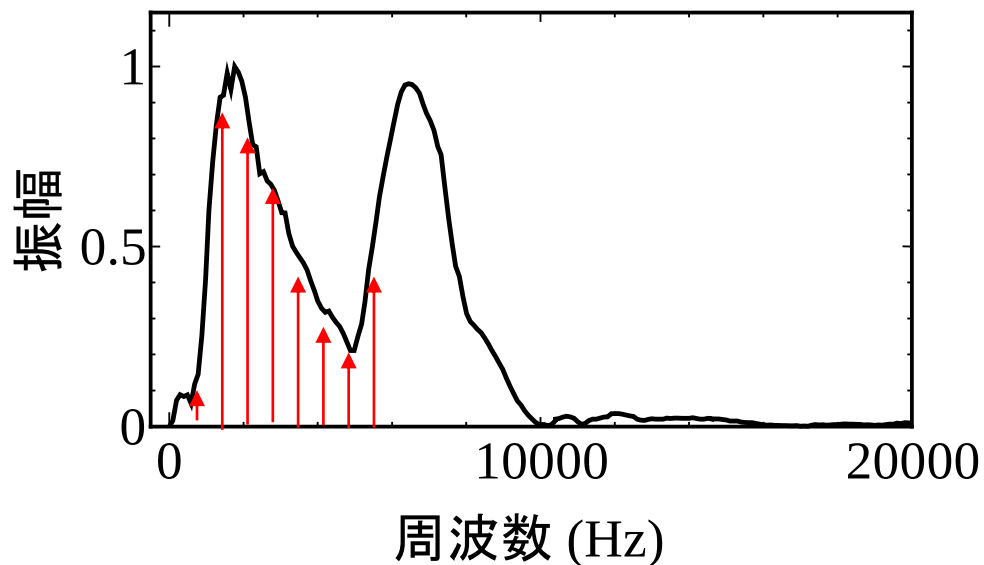
データファイルを変えれば、
ワイン問題と同じコードが使える。

```
import numpy as np
trainP=np.loadtxt("trainP.txt") #パラメータを読み込む
trainL=np.loadtxt("trainL.txt") #ラベルを読み込む
#訓練
from sklearn.neural_network import MLPClassifier #NNを呼び出す
model=MLPClassifier(hidden_layer_sizes=(36,18)) #隠層2, 64->36->18->10
model=model.fit(trainP, trainL)
# テスト
testP=np.loadtxt("testP.txt") #AIに分類して欲しい成分データ
predL=model.predict(testP)
print("AI Prediction",predL) #予測ラベルの出力
```

- ✓ 機械学習ライブラリ Scikit-learn を使いました。10行くらいで出来ます。
- ✓ Google Colaboratoryが手軽です。Web上でプログラミングできます。



ひび割れ周りの回折と反射



ラベル: 健全状態、損傷状態
パラメータは200項目です。

パラメータ1 (100Hz): 0.02
パラメータ2 (200Hz): 0.05
パラメータ3 (300Hz): 0.10
パラメータ4 (400Hz): 0.20
...
...
...
パラメータ199 (19,900Hz): 0.02
パラメータ200 (20,000Hz): 0.01

分類

ラベル

健全

曲げ
ひび割れ

せん断
ひび割れ



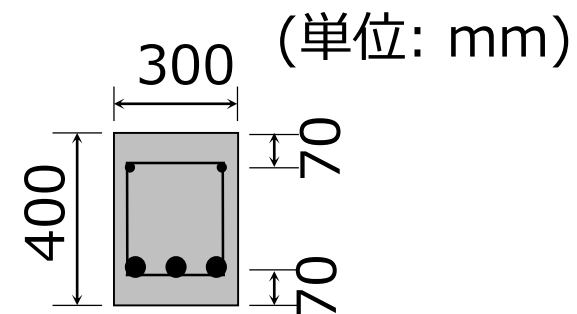
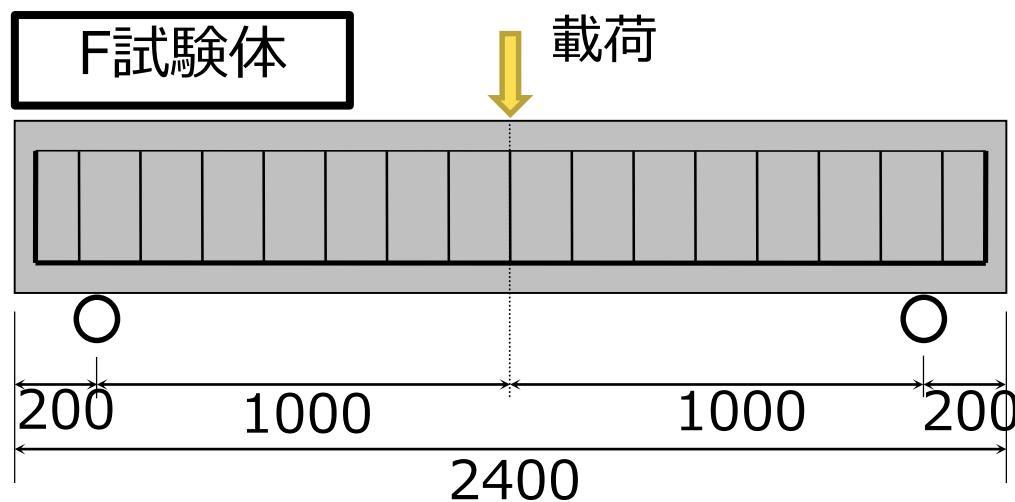
1. 研究の背景と目的
2. 振動測定の概要
3. 機械学習の概要
4. 基礎検討 (試験体)
5. 応用検討 (道路橋)



局所振動試験+機械学習で、何ができるの？

RCはり試験体による基礎検討

1. 教師あり学習：ひび割れ図の作成
2. 教師なし学習：異常検知

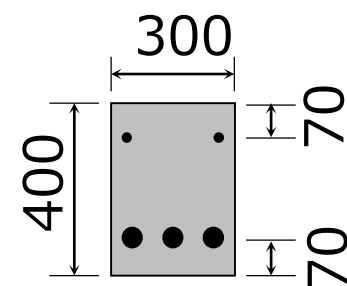
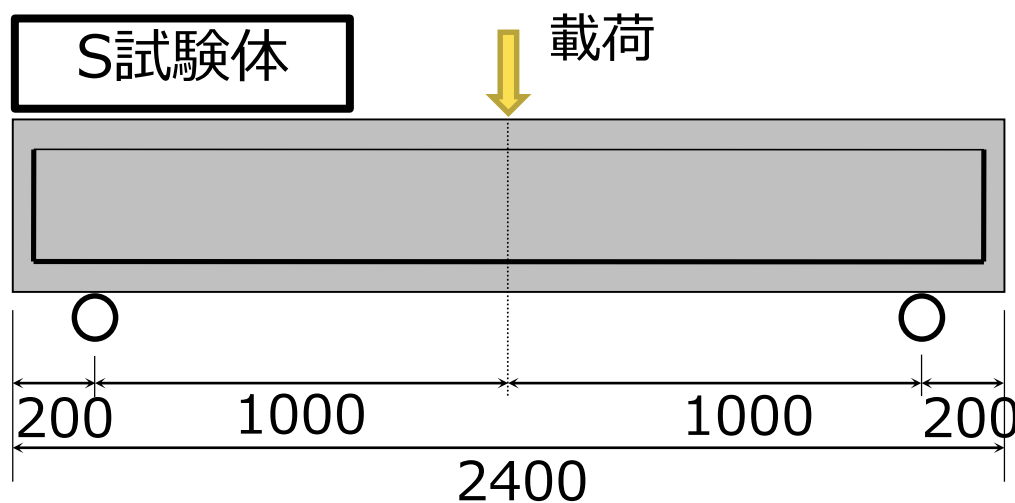


圧縮鉄筋 : D19×3

引張鉄筋 : D6 ×2

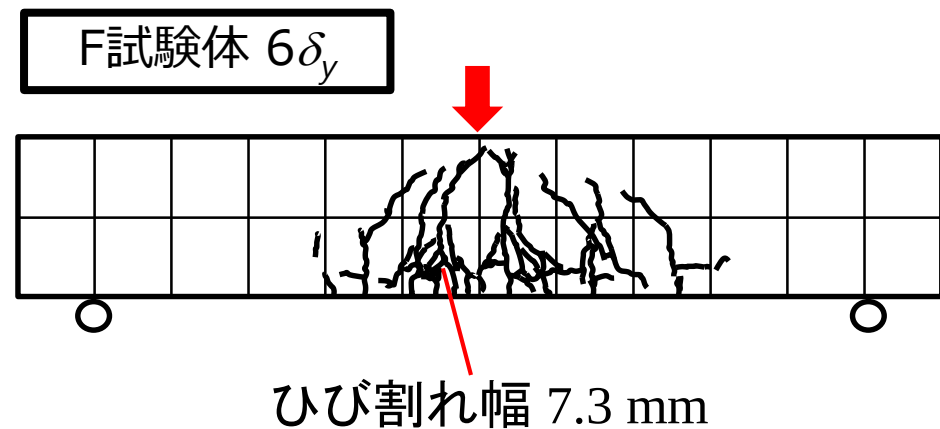
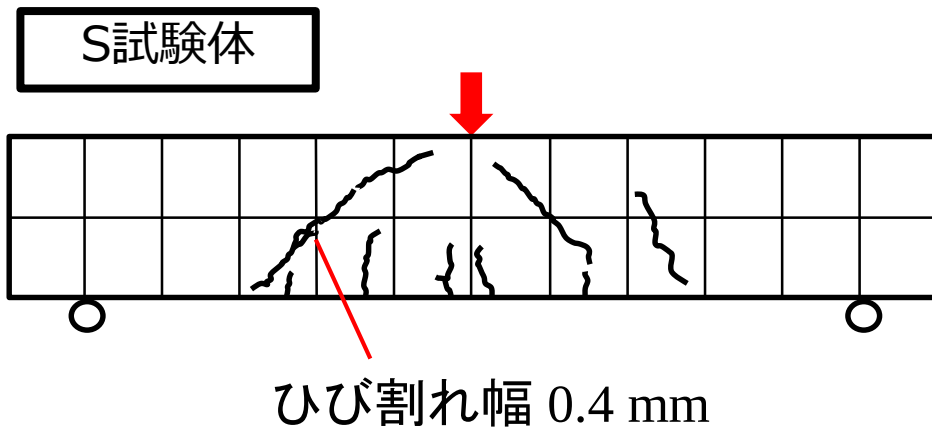
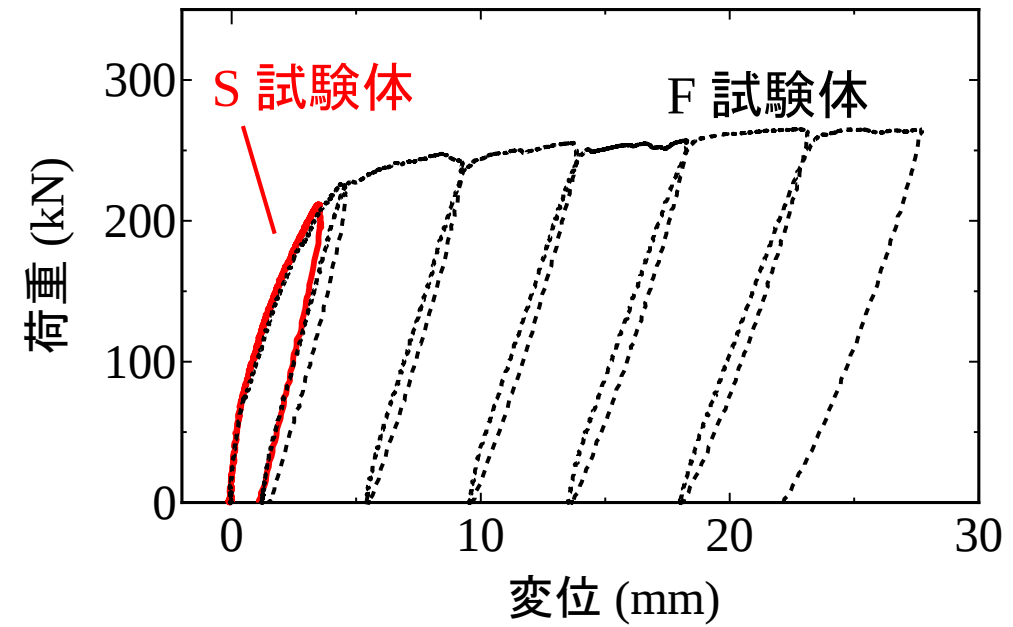
スターラップ : D10

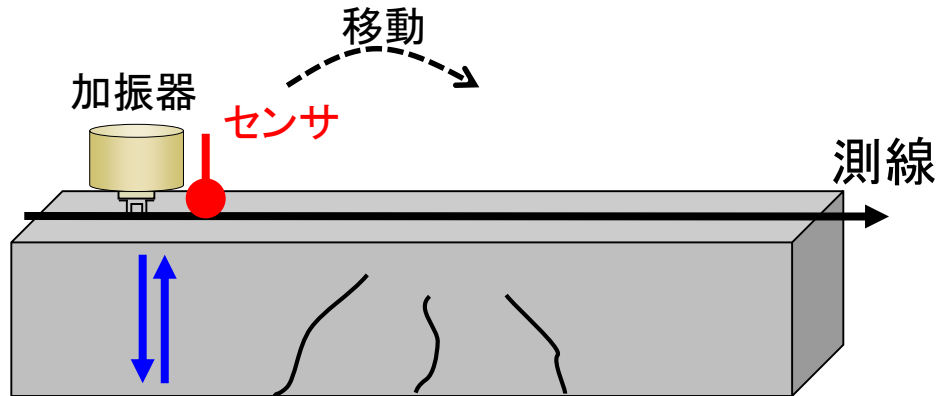
(100mm間隔)



圧縮鉄筋 : D19×3

引張鉄筋 : D6 ×2





- ✓ 1000～20,000 Hz のホワイトノイズを生成した。
- ✓ 測線上を 50 mm 間隔で測定した。(47測点)
- ✓ 载荷前に10回ずつ測った。(訓練データ)
- ✓ 载荷レベル毎に2回ずつ測った。(テストデータ)

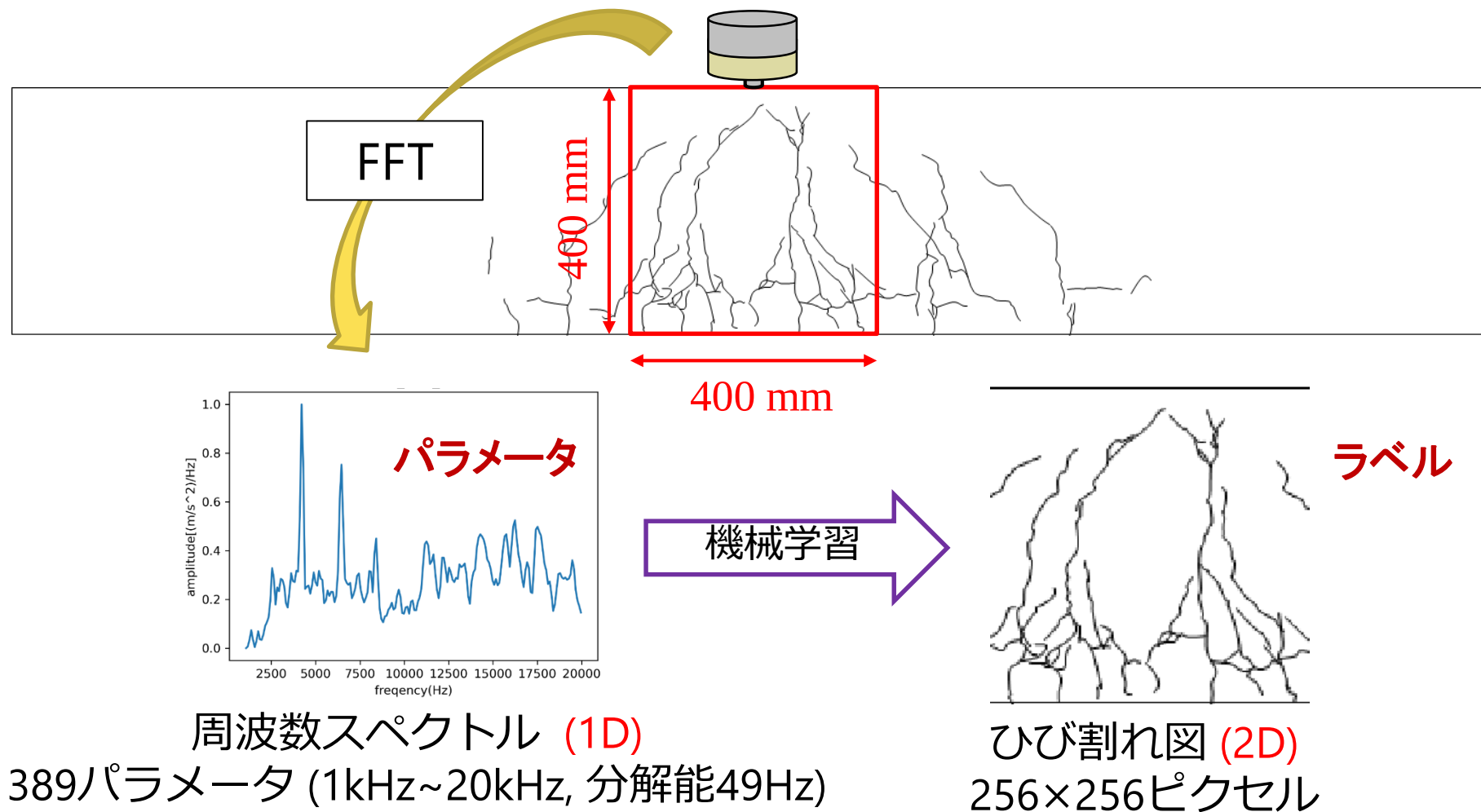


AIを使って、ひび割れ図を描いてみよう。

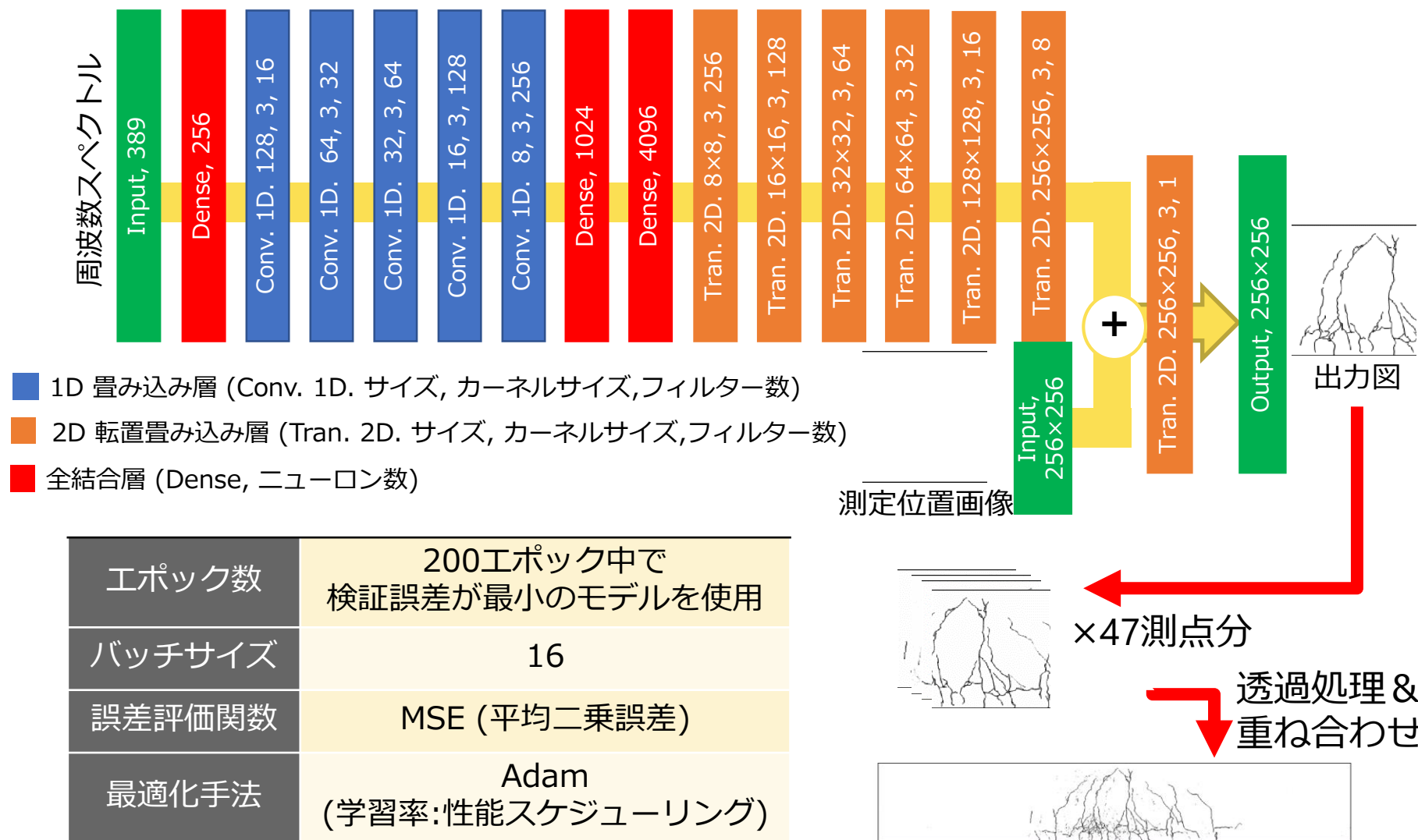
畳み込みニューラルネットワーク

(ライブラリ: TensorFlowとKerasを使いました)

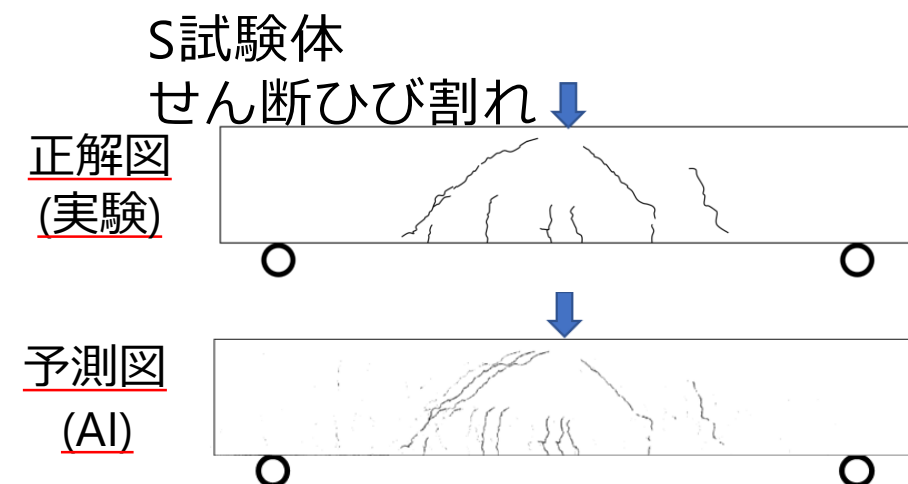
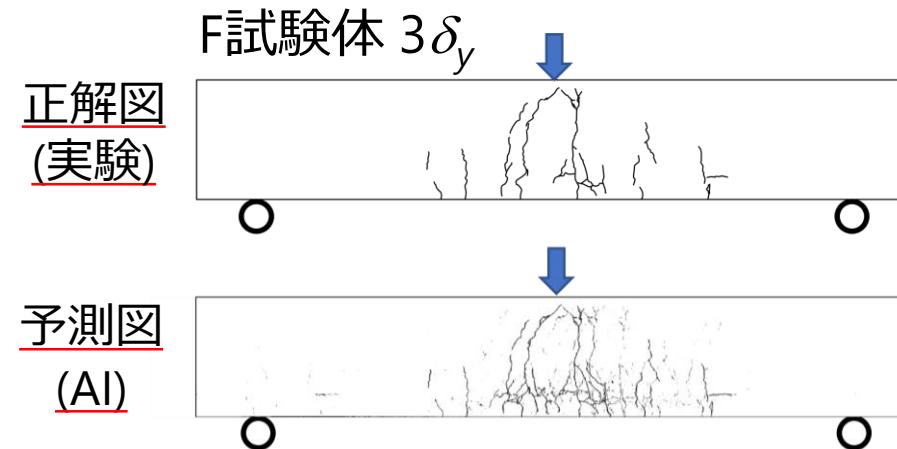
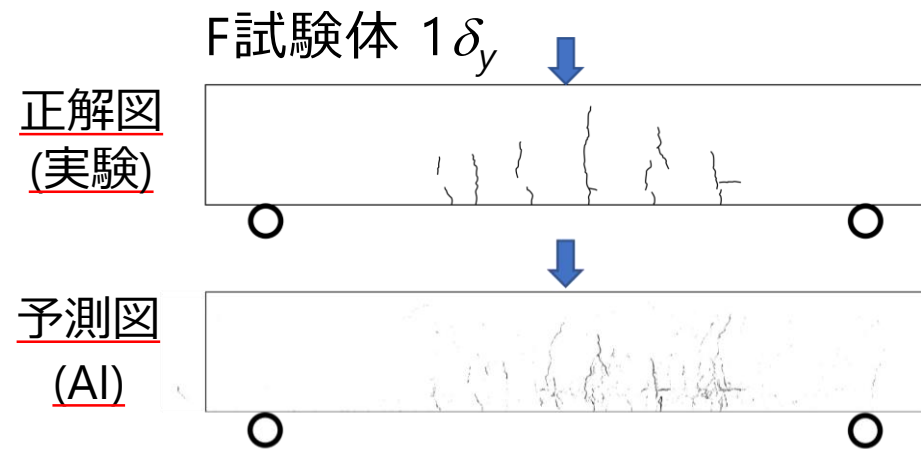




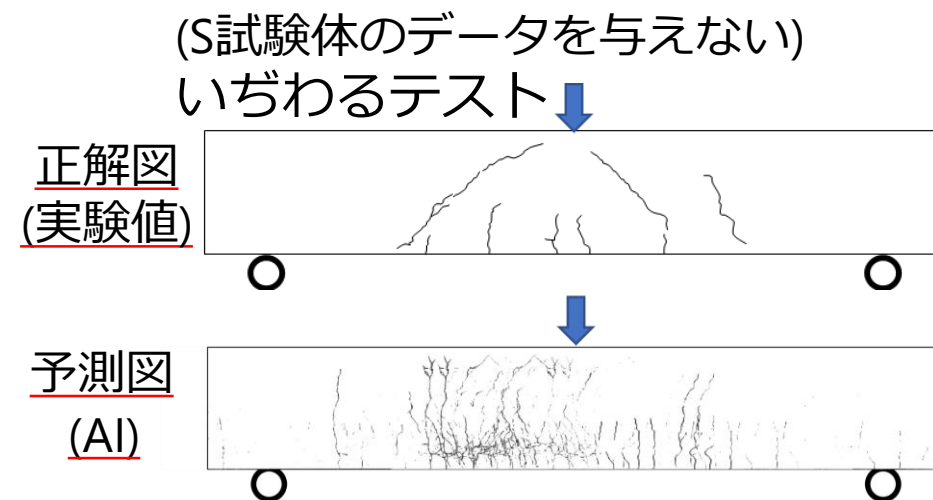
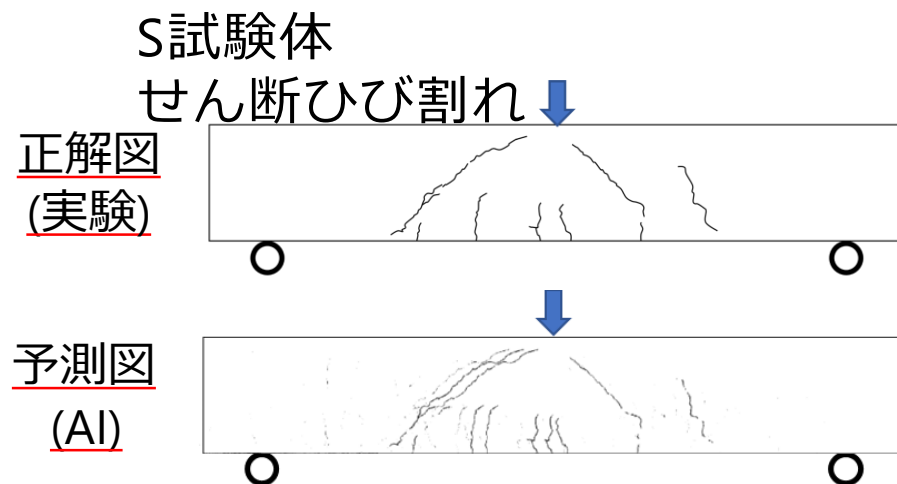
周波数スペクトルを入力、ひび割れ図を出力として訓練する。



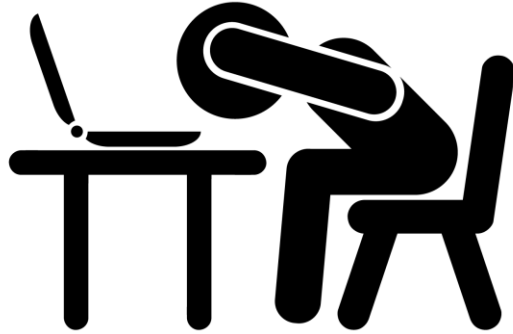
テスト用の载荷ステップを除いたデータで訓練し、交差検証した。



✓ せん断ひび割れと曲げひび割れを識別できた。



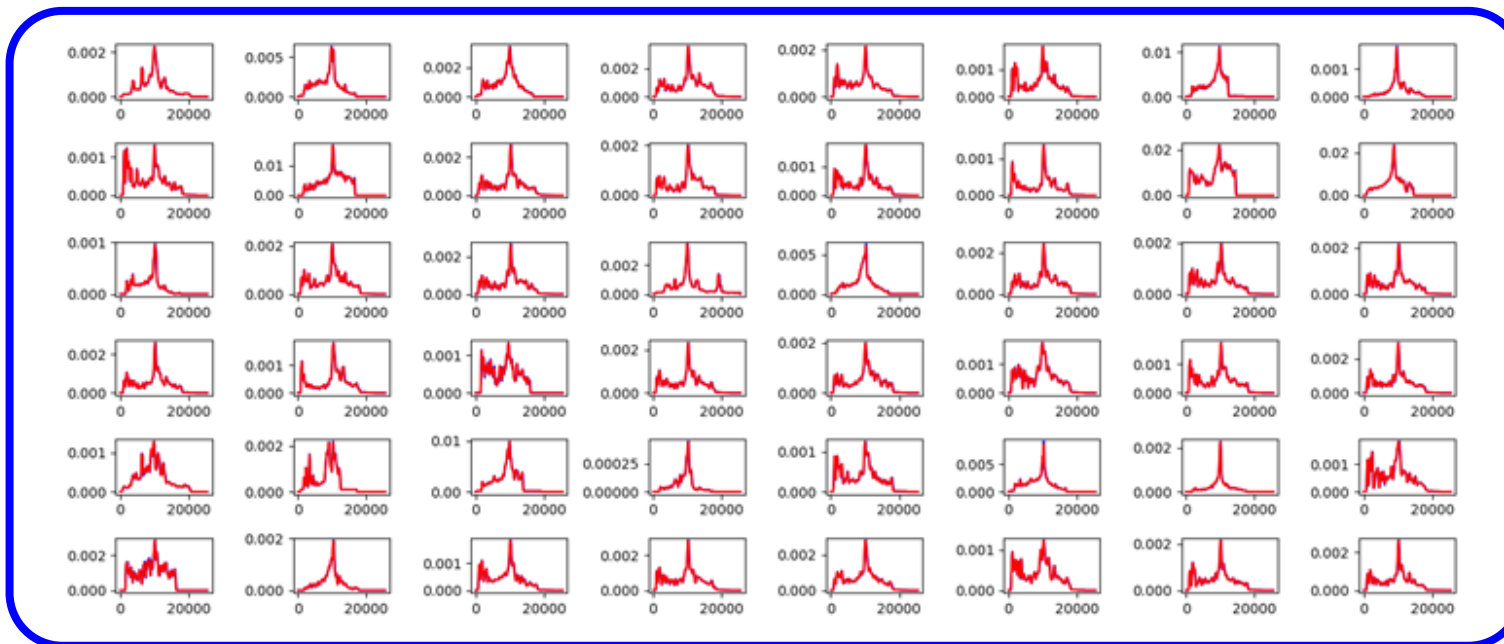
教師あり学習では、未知のひび割れ図を描けない。



教師あり学習の欠点...

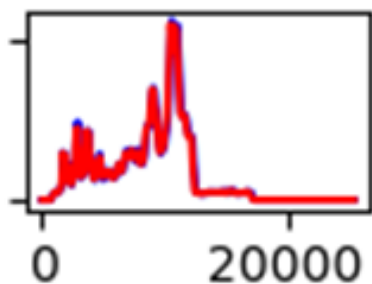
様々な劣化要因、荷重、構造条件に対して、
ひび割れ図と周波数スペクトルを集めることは、
不可能ではないか？

そこで、教師なし学習



すべて良品データ

インフラの良品データは、簡単に取得できる。



テストデータ

圧縮

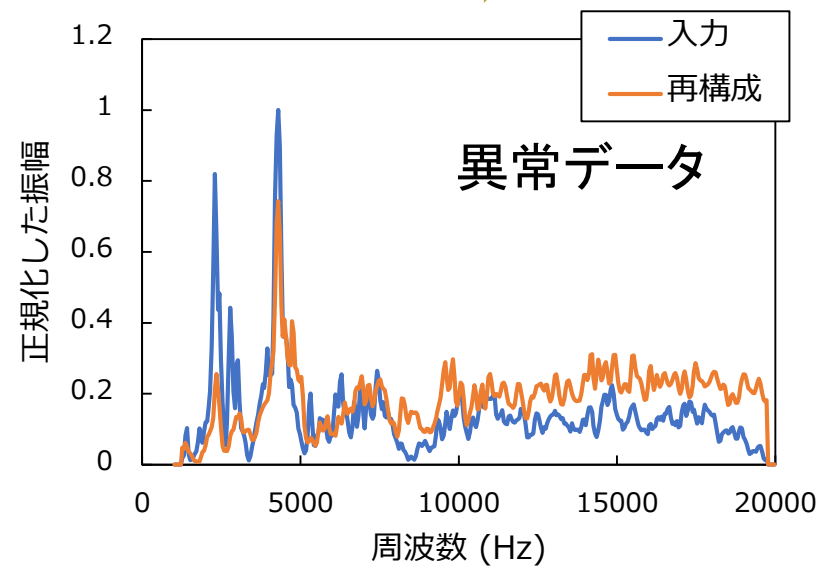
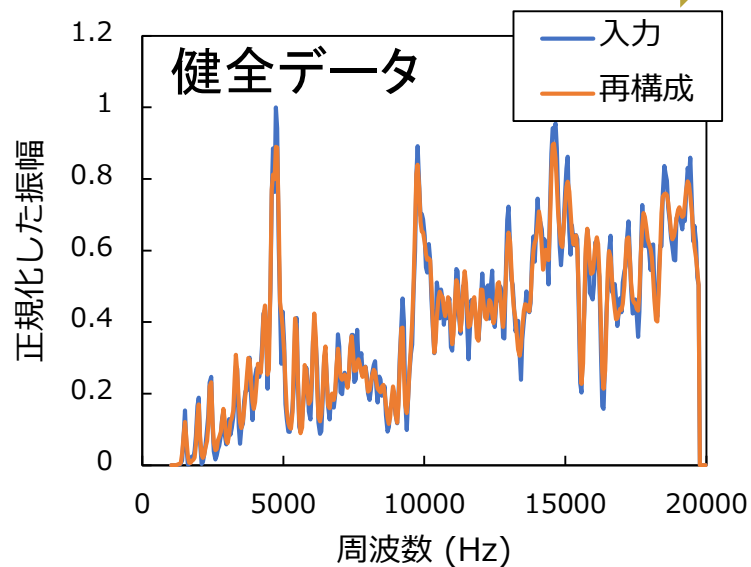
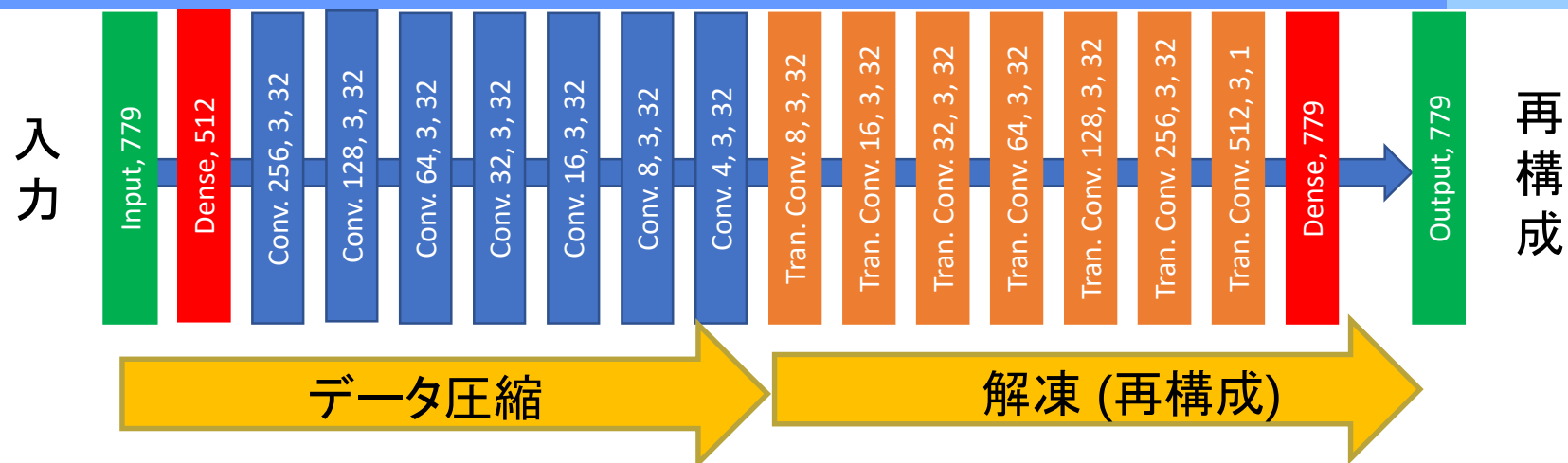


良品データを学習したAI
(オートエンコーダ)

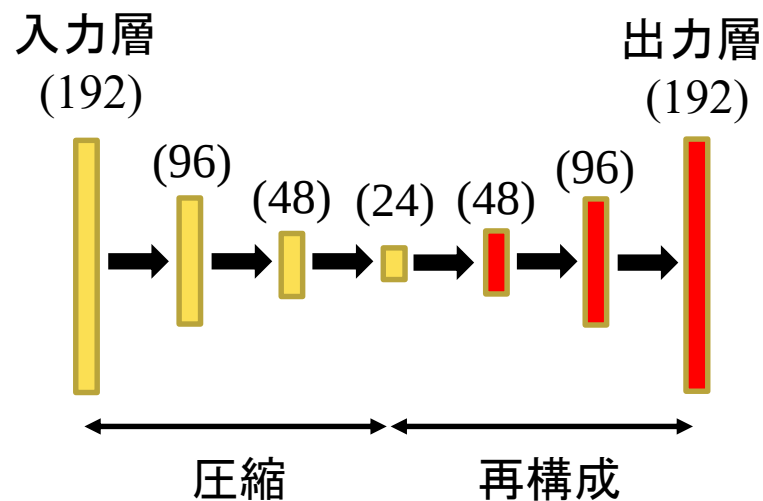
再構成



良品データと比較して、
テストデータの**異常度**を計算する。

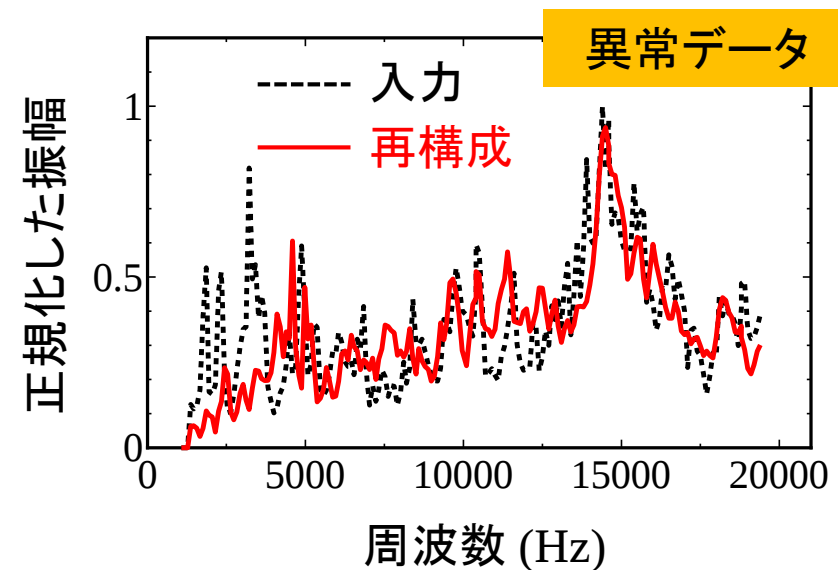
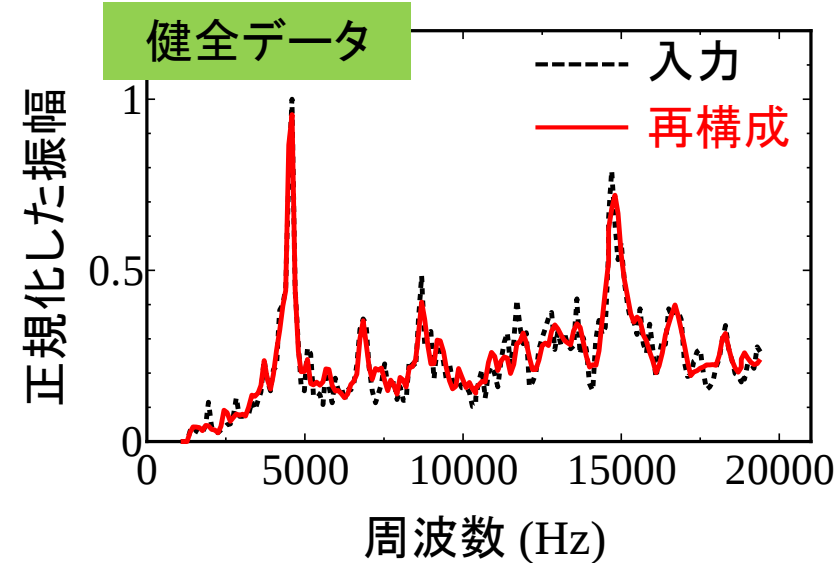


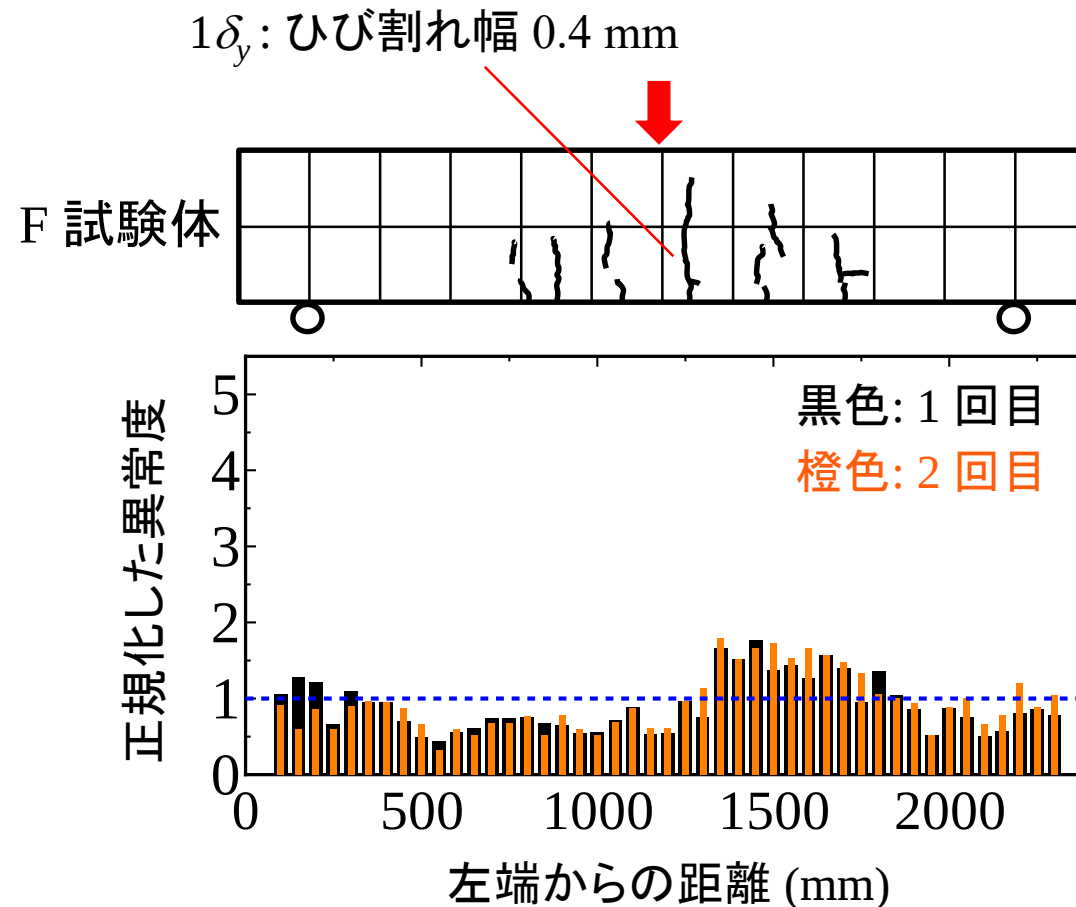
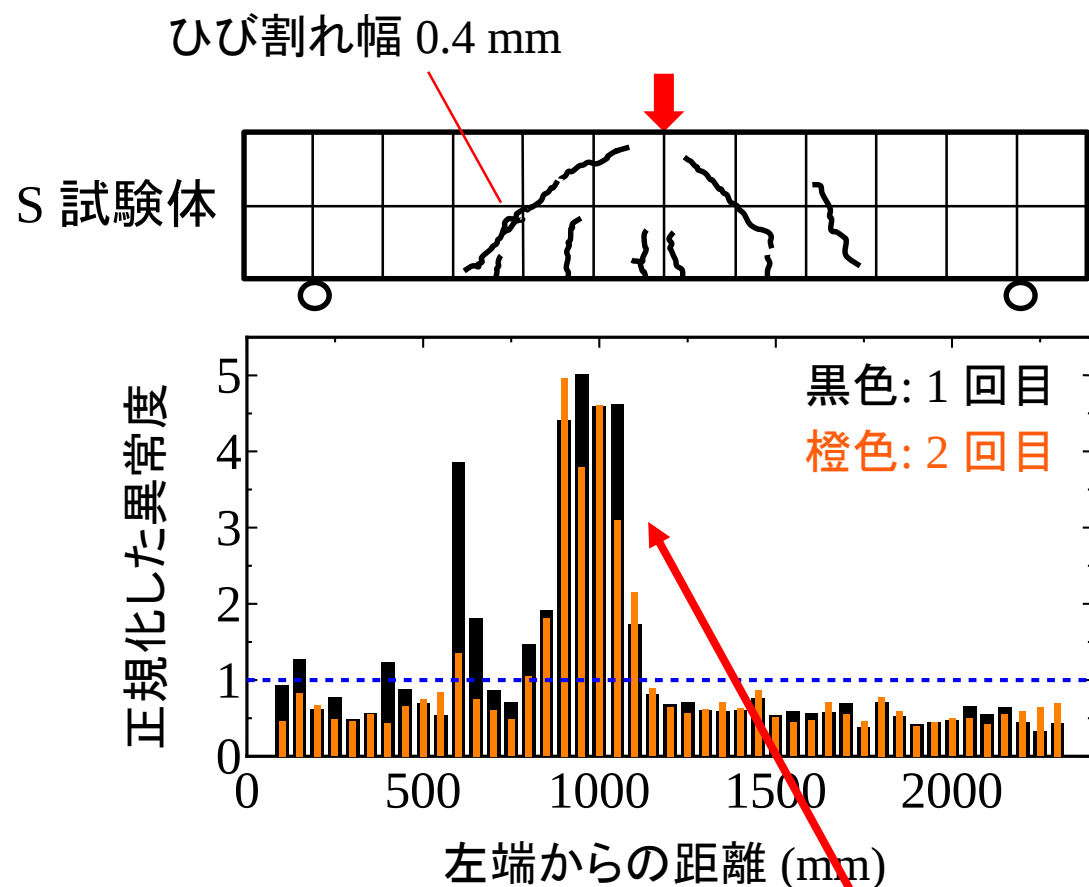
- ✓ 良品データのみを学習させる。(訓練データ数:940個×11倍に拡張)
- ✓ 再構成誤差 (異常度) を計算する。



異常検知

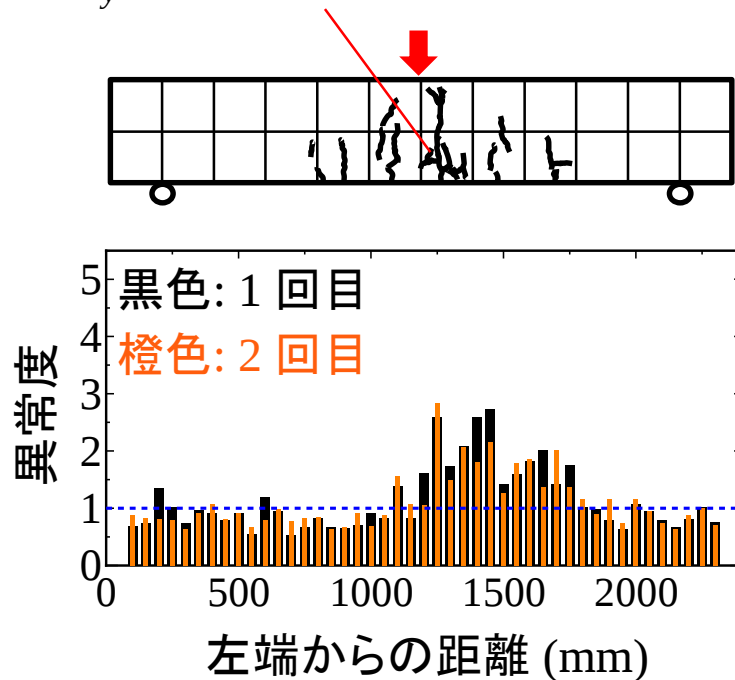
- ✓ 良品データだけを学習させる。
- ✓ 再構成誤差 (異常度) を計算する。



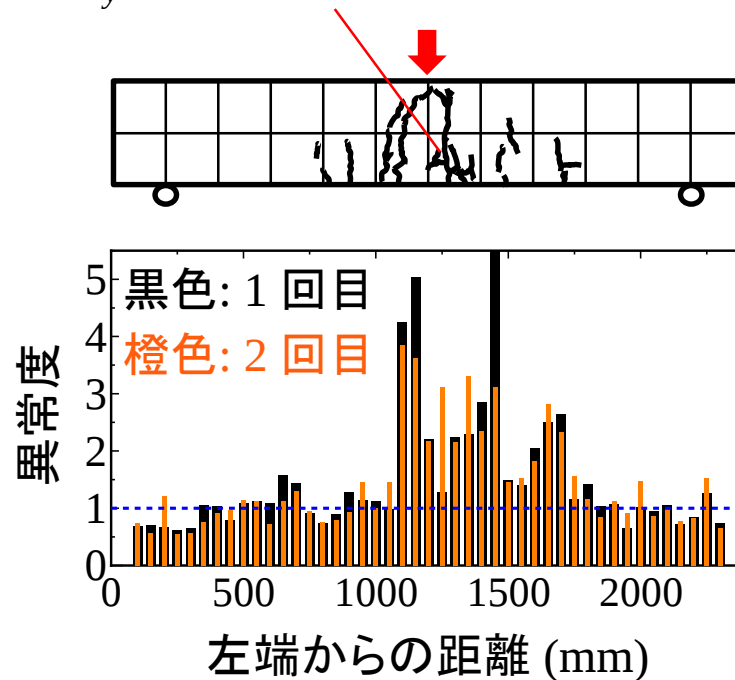


構造上重大なせん断ひび割れが捉えられる。

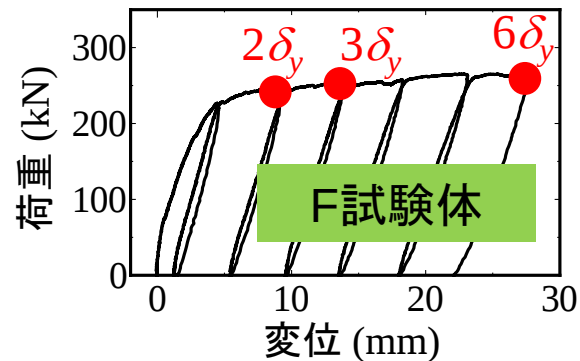
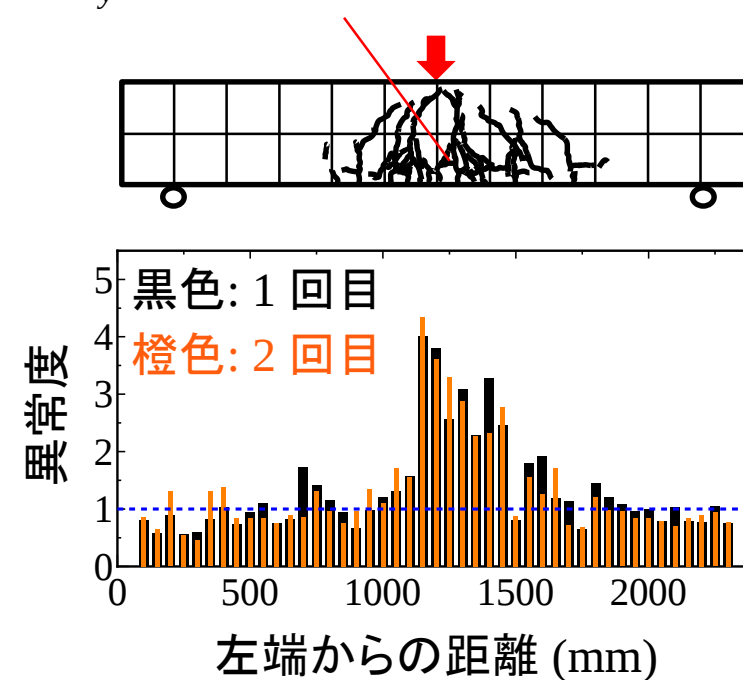
$2\delta_y$: ひび割れ幅 3.1 mm



$3\delta_y$: ひび割れ幅 4.7 mm



$6\delta_y$: ひび割れ幅 7.3 mm



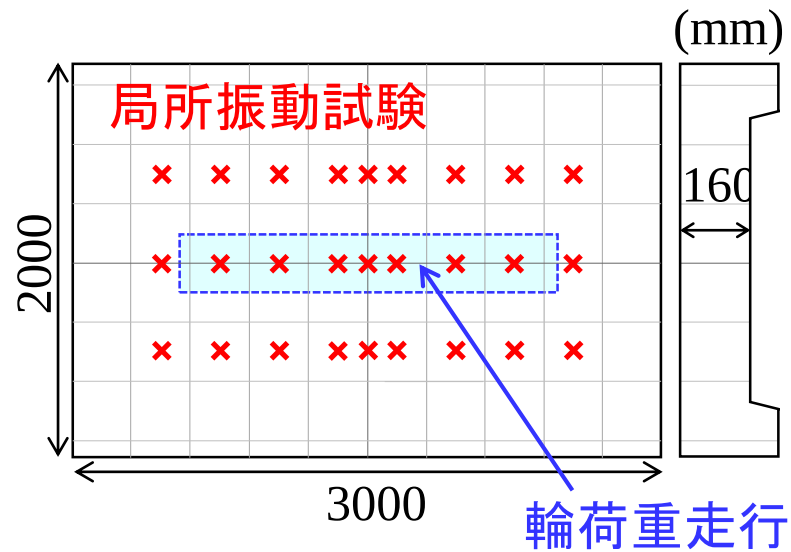
- ✓ 曲げ降伏後の残留ひび割れを捉えている。
- ✓ $3-6\delta_y$ の異常度分布は大きく変わらなかった。



劣化進展をモニタリングできるかな？

RC床版試験体による基礎検討

- ~~1. 教師あり学習：ひび割れ図の作成~~
2. 教師なし学習：異常検知



日本大学との共同研究

大型車両の軸重を想定して、
床版試験体の輪荷重走行試験を行った。

日本大学で過去に実施した輪荷重走行試験

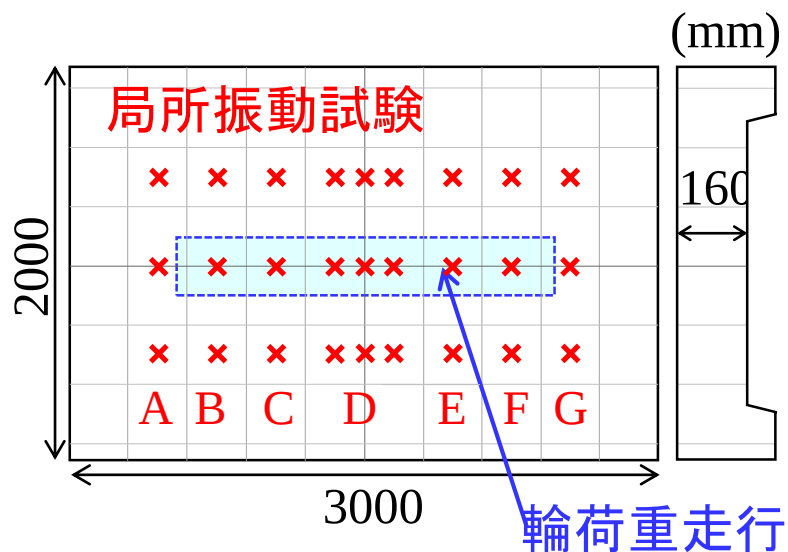
- ✓ H26-R4に実施した。
- ✓ 床版試験体10体 (載荷前状態)
- ✓ 点検者は毎回異なる。
- ✓ 317個の良品データを集めた。



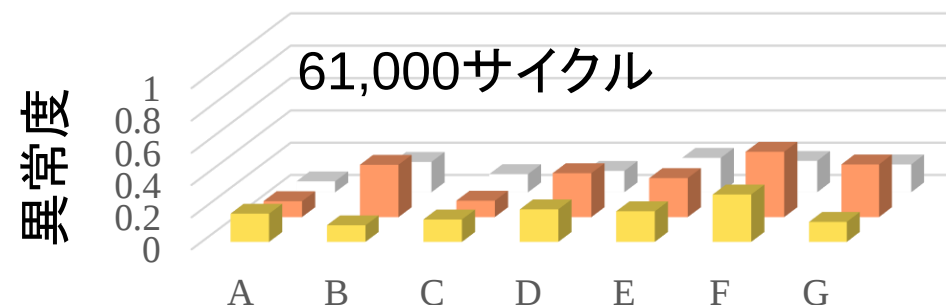
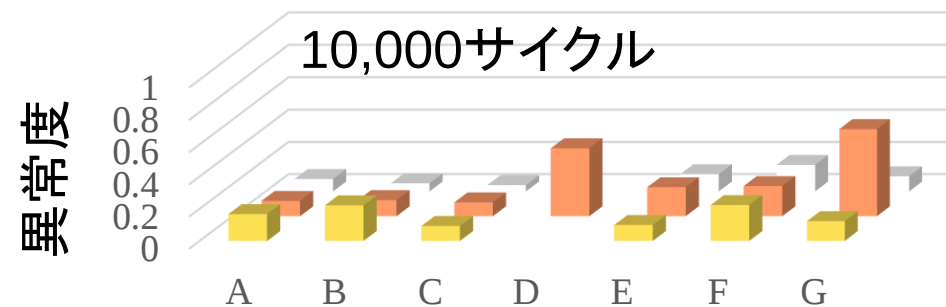
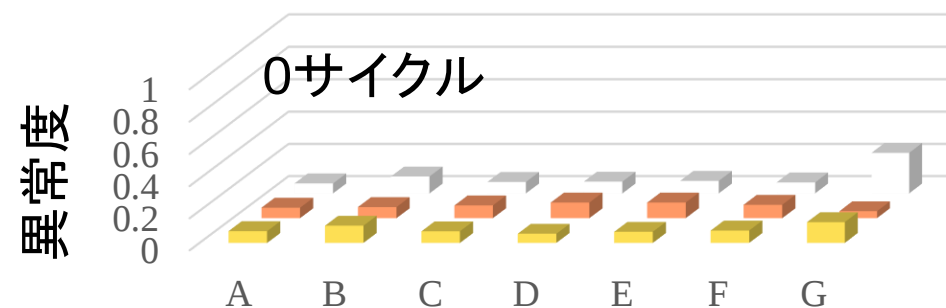
PCポンツーン

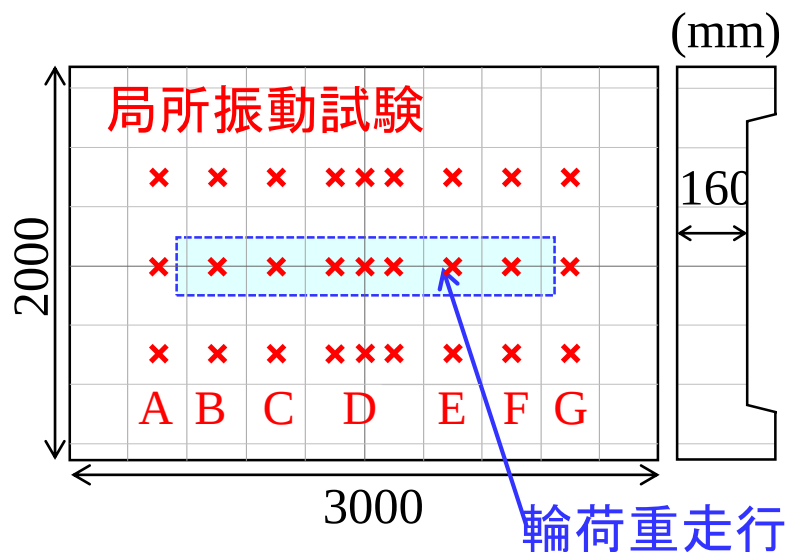
- ✓ PCポンツーン撤去部材
- ✓ 外観変状なし
- ✓ 点検者1名が測定した。
- ✓ 208個の良品データを集めた。





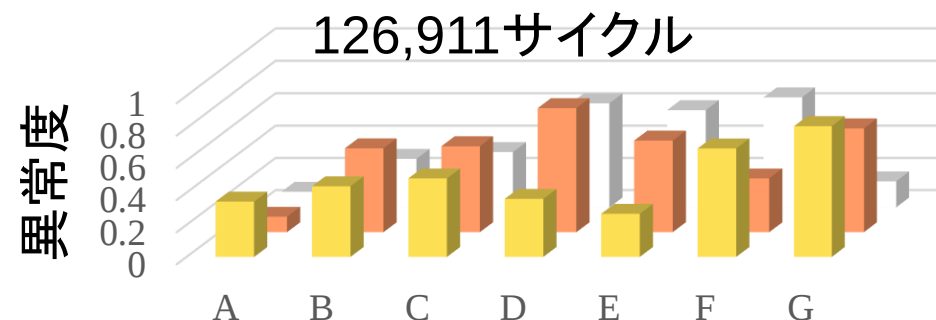
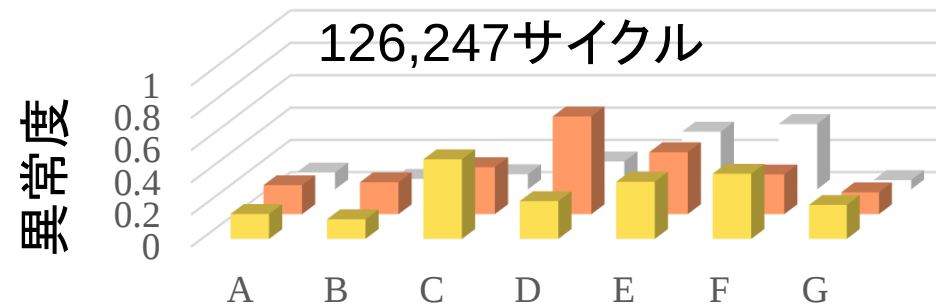
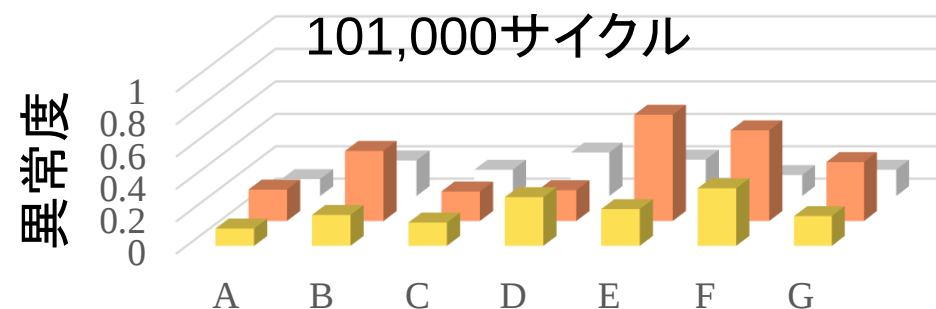
少ない走行回数では、
異常度は大きく変化しない。





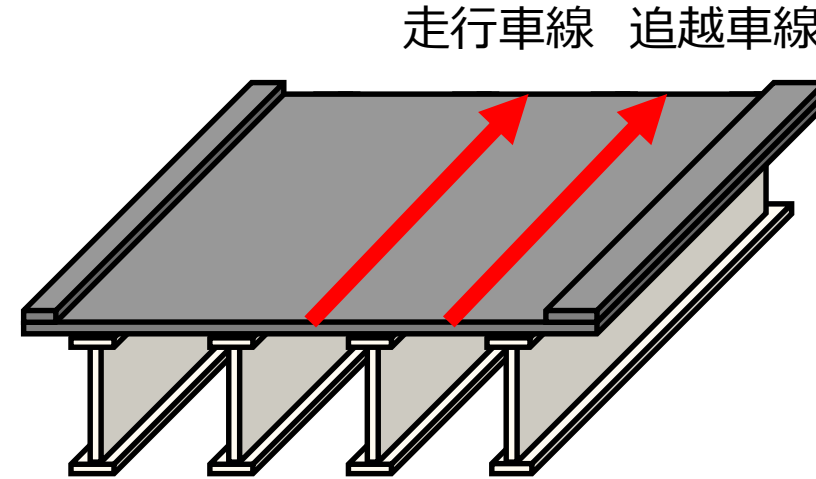
終局走行回数に近づくと、
床版中央軸に沿って、
大きな異常度が示された。

劣化進展をモニタリングできる。



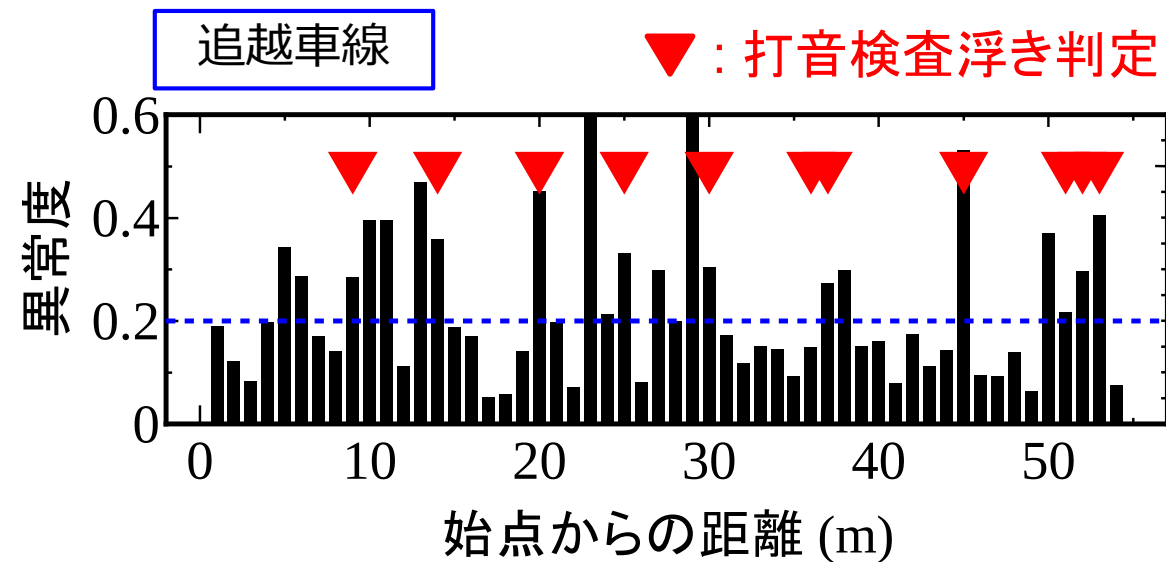
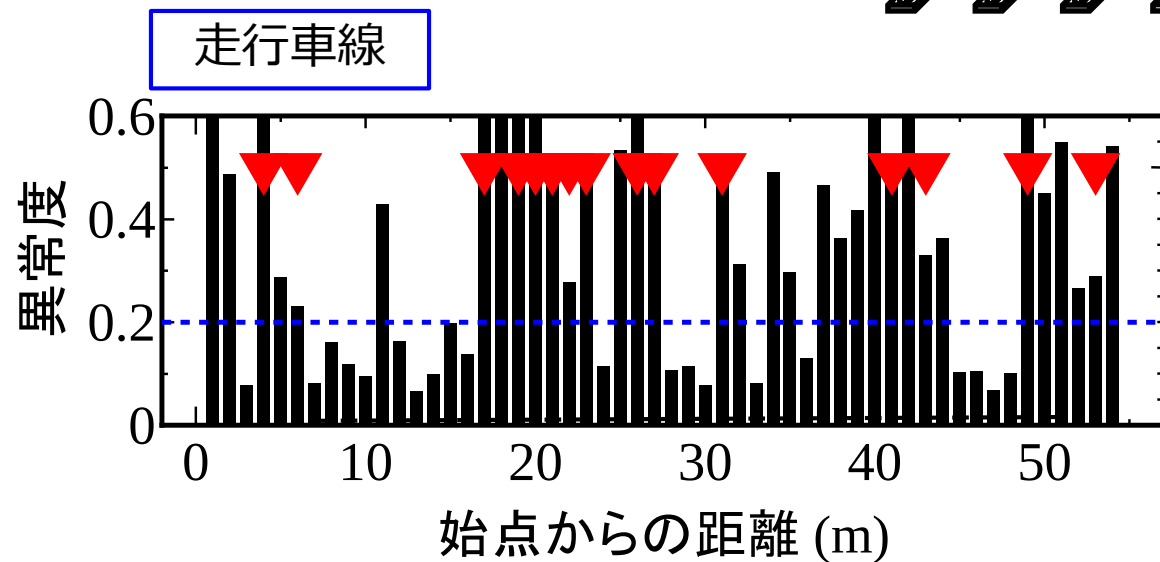
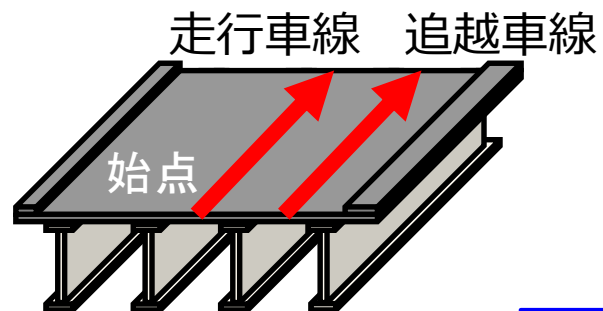


1. 研究の背景と目的
2. 振動測定の概要
3. 機械学習の概要
4. 基礎検討 (試験体)
5. 応用検討 (道路橋)



ネクスコ東日本、ネクスコ・エンジニアリング東北との共同研究

- ✓ 予め健全箇所を選定して、150回の振動試験を行った。(訓練データ)
- ✓ 追越車線と走行車線で、1m間隔の振動試験を行った。(テストデータ)
- ✓ 別途、打音検査により浮きを評価した。(答え合わせ)



- ✓ 振動測定と機械学習によって、劣化箇所が推定できた。
- ✓ 手支持による点検では、ひとつの車線に5分程度を要した。(速度は 0.7 km/h)
- ✓ 構造性能に基づいて、異常度の閾値を定める必要がある。

進捗

- ✓ 振動測定と、教師あり学習・クラス分類の手法により、コンクリート内部のひび割れ図を描くことができた。
- ✓ 振動測定と、教師なし学習・異常検知の手法により、RCはりのせん断ひび割れや、RC床版の疲労損傷を検知できた。
- ✓ 実際の道路橋RC床版への適用可能性を示した。

課題

- ✓ 様々な劣化要因、荷重、構造条件に対して、基礎検討を継続する。
- ✓ データ不足を解消するために、転移学習を取り入れていきたい。
- ✓ 移動点検装置の開発に取り組む。
- ✓ 点検結果と構造性能評価をリンクさせる。

THANK YOU



Thank you for watching the video!

ご質問やお問い合わせは、
下記のメールアドレスにご連絡ください。

東北大学 内藤英樹

hideki.naito.c2@tohoku.ac.jp