

論文 デジタル打音検査と機械学習によるボルトの締付トルク評価手法の基礎検討

藤吉 宏彰*1・松永 嵩*2・磯部 仁博*3・山田 知典*4

要旨: ボルトのゆるみの効率的な評価を目的として、締付トルクを段階的に変化させた M24 供試体を対象に AE センサを用いたデジタル打音検査を行い、振動波形および周波数分布を機械学習する CNN (畳み込みニューラルネットワーク) モデルを構築した。その結果、周波数分布を機械学習する CNN モデルにおいて、77% の精度で締付トルクレベルを 4 段階で分類可能であることを確認した。

キーワード: ボルト, AE センサ, 打音検査, 機械学習, CNN

1. はじめに

ボルトは橋梁の支承部や、道路標識柱の柱脚部、機械設備等の固定など様々な用途に用いられている。

ボルトを対象とした診断技術の 1 つとして打音検査がある。健全状態および劣化模擬したボルトを対象にマイクروفोनを用いて打音等の特徴を比較した例¹⁾や、締付力を段階的に変化させた供試体を対象に加速度計を用いて固有周波数の変化を検証した例²⁾があり、いずれもスペクトル解析により抽出したボルトの固有周波数を用いて評価している。

筆者らも、測定対象を打撃することで励起された振動をセンサにより計測する検査技術(以下、「デジタル打音検査」という。)で得られる周波数分布からボルトの曲げ振動の固有周波数を抽出し、ボルトの 3 つの劣化要素(腐食減肉、締付トルクのゆるみ、基礎コンクリート部の劣化)を検出可能であることを報告した³⁾。

また、ハンマーで叩いた際に発生する打音の波形データから得られる固有周波数を特徴量として抽出し、機械学習を用いたパターン認識による軸力推定の有効性を検証した例もある⁴⁾。

一方、上記で挙げた先行研究はいずれも評価指標となる複数の固有周波数を個別に抽出しているのが現状であり、多種多様な仕様、設置状態のボルトを対象とした診断・評価には多大な開発コストを要する懸念がある。

近年ではディープラーニングの一種である CNN (畳み込みニューラルネットワーク) を用いたギアの診断、心電図の診断に関する研究⁵⁾も進められており、振動波形等の計測データをそのままインプットすることで異常診断可能な AI モデルの構築が進められている。

このような背景のもと、本検討ではボルト診断の効率化を目的とした基礎検討として、CNN を用いることでデ

ジタル打音検査結果から締付トルクの緩みを分類する CNN モデルを構築し、分類精度を検証した。

2. デジタル打音検査装置及びボルトの振動特性

2.1 デジタル打音検査装置

本研究で用いたデジタル打音検査装置を図-1 に示す。本装置は測定対象を打撃し、励起された振動を広帯域 AE センサで捉える。この振動波形を高速フーリエ変換し、周波数分布を得る(図-2)。なお、評価には図-3 で示す感度特性を有する広帯域 AE センサ(NF 回路設計ブロック社製 AE-900S-WB)を用いた。打撃は打撃部質量が 113 g、打撃面直径が 12 mm の点検ハンマーを用いた。



図-1 デジタル打音検査装置

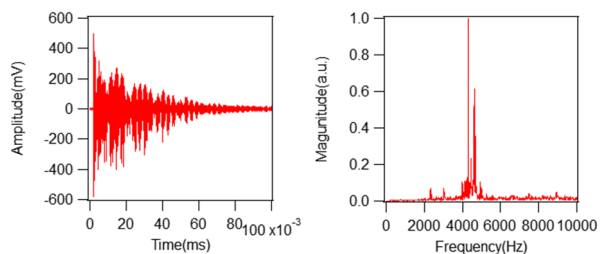


図-2 振動波形及び周波数分布

*1 原子燃料工業 (株) エンジニアリングサービス部 (正会員)

*2 原子燃料工業 (株) エンジニアリングサービス部 (正会員)

*3 原子燃料工業 (株) エンジニアリングサービス部 工学博士

*4 東京大学 工学系研究科システム創成学専攻 准教授 博士 (工学)

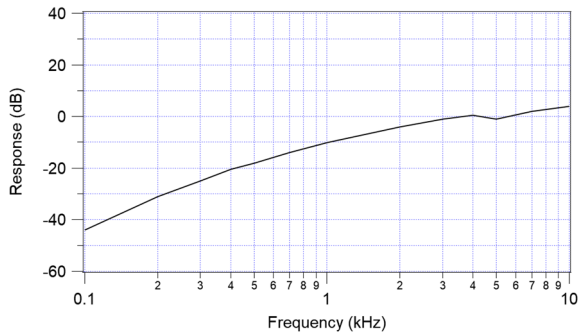


図-3 AE センサの感度特性図

2.2 ボルトの振動特性

ボルトを打撃して得られる振動モードの1つに、ボルトを片持ち梁と見立てた曲げ振動がある。片持ち梁の曲げ振動の理論式を式(1)に示す。

ナットがゆるむことで締付トルクが低下すると、ベースプレート、コンクリート間の接合部界面の剛性が低下し、ボルトの固有周波数は低下する。

$$f = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\lambda^2}{L^2} \cdot \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (1)$$

f ; 固有周波数, λ ; 定数, L ; 梁長さ, E ; 縦弾性係数, I ; 断面二次モーメント, ρ ; 密度, A ; 断面積

3. 実験的検討

実験的検討として、次節に示す供試体を用い、締付トルクとデジタル打音検査結果の関係を調査した。

3.1 供試体の諸元

本検討で用いた供試体を図-4に示す。供試体はコンクリート躯体に先付け工法で打設した M24 ボルト 4 本、およびベースプレートから構成される。コンクリート表面からボルト頭頂部までの長さは 200 mm とした。また、コンクリートの寸法は 600mm×600mm×400mm、ベースプレートの寸法は 400mm×400mm×56mm とし、六角ナット (1 種) で締結した。なお、いずれも材質は SS400 である。

ボルト位置はボルトの中心から隣接するボルトの中心までの距離が 300mm となるように配置した。コンクリートの設計基準強度は 24 N/mm² とし、配合は表-1 とした。

3.2 デジタル打音検査の試験条件

本検討では、トルクレンチを用いて締付トルクを段階的に変化させることで締付トルクのゆるみを模擬した。

試験条件を表-2に示す。締付トルクの最小値は 0 N・m、最大値は T 系列の M24 における締付トルクである 360 N・m を目標に、使用したトルクレンチで安定して締

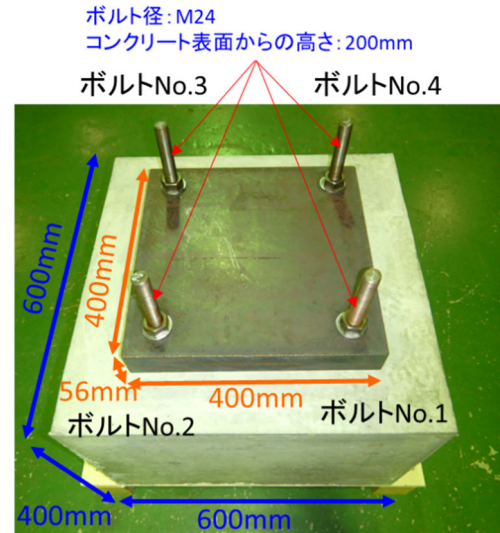


図-4 供試体の外観

表-1 コンクリートの配合

組骨材 の最大 寸法 (mm)	スラ ンプ (cm)	水セ メン ト比 (%)	空気 量 (%)	細骨 材率 (%)	単位数 (kg/m ³)					
					水 <i>W</i>	セメ ント <i>C</i>	細骨材		粗骨 材 <i>G</i>	混和剤 <i>A</i>
							<i>S1</i>	<i>S2</i>		
20	15	57	5.3	47.7	180	316	578	248	925	3.16

付可能な値である 330 N・m とした。

なお、トルクレンチを用いた締付トルクの管理上、高トルク側から低トルク側への調整は困難であることから、低トルク側から段階的に締付トルクを増加させながらデジタル打音検査した。その際、4 本のボルトをいずれも同一締付トルクで締結した状態でデジタル打音検査した。

また、次章で述べる AI モデル構築のため、表-2 で示す 1 巡目の試験終了後、一度ナットを緩め、2 巡目の試験を実施した。

デジタル打音検査は図-5 に示すようにボルト頭頂部に AE センサを押し当て、ボルト側面の 4 方向 (0° , 90° , 180° , 270°) を軽く打撃して振動取得した。

なお、AE センサをボルト頭頂部に押し当てた理由としては、ねじ山のあるボルト側面に対して、ボルト頭頂部は平滑なため AE センサの接触性が良いこと、および AE センサに用いられている圧電素子には、主に利用される縦効果に加え、横効果もあることから、ボルト側面と比較してボルト頭頂部の方が安定した信号取得が可能なためである。

3.3 試験結果

供試体のボルト No.1 において、0° 方向から打撃した各締付トルクにおいて、周波数スペクトルのパワーの最大値で除することで基準化した周波数分布 (以下、「基準化した周波数分布」という。) を図-6 に示す。図-6 より、3500~4500Hz 付近に卓越周波数が見られる。

表-2 試験条件一覧

試験条件	締付トルク(N・m)
1	0
2	30
3	60
4	90
5	120
6	150
7	180
8	210
9	240
10	270
11	300
12	330

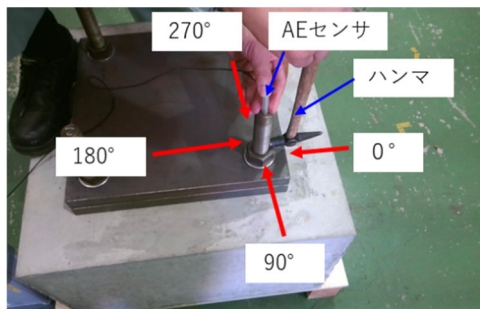


図-5 デジタル打音検査要領

式(1)よりナット上面からのボルト長さ 144mm を片持ち梁の梁長さとして、M24 ボルトの曲げ振動を計算すると、1 次の曲げモードが 827Hz、2 次の曲げモードが 5181Hz となる。そのため、図-6 における卓越周波数は 2 次の曲げモードと考えられるが、実験で得られた卓越周波数と式(1)で得られた 2 次の曲げモードの周波数とは差異がある。これは、式(1)はボルトが完全固定された条件の計算結果であるのに対して、実験ではボルトはナットおよびプレートからなる締結体であり、完全固定ではない。この差異により実験で得られた卓越周波数は式(1)の計算結果と比較して低くなったと考えられる。

次に、図-6 の締付トルクと卓越周波数の関係に着目すると、210N・m までは締付トルクの低下に伴い、卓越周波数は概ね低下傾向にあるが、180 N・m で卓越周波数が上昇する。また、0N・m では 30N・m 以上と比較して卓越周波数のピーク幅が広く、かつ卓越周波数が最も高いが、これは 0N・m ではナットが緩んでおり、ボルトとナットが 30N・m 以上で締結されている場合とは異なる振動モードが現れたためと考えられる。図-6 から、卓越周波数の近傍に複数のピークが現れており、これらのピーク強度はばらつくことが確認される。この理由とし

て、締付トルクの変化に伴い、ナット - プレート間、プレート - コンクリート間の接触状態が変化し、ボルト、ナット、プレートからなるボルト締結体の振動特性が変化するためと考えられる。

また、供試体のボルト No.1 において、締付トルク 330 N・m で締結した際の各打撃方向による周波数分布を図-7に示す。図-7において向かい合う 0° と 180° を赤、90° と 270° を青の周波数分布で示す。向かい合う方向の赤同士、青同士の周波数分布は概ね一致するが、隣り合う方向の 0° と 90°、180° と 270° では周波数分布のピーク強度が異なる。これはボルト或いは周辺の励起されやすい振動モードが打撃方向によって異なるためと考えられる。

本検討のように、周波数分布における特定のピーク周波数のみで締付トルクを評価することには限界があることを実験的検討から確認した。

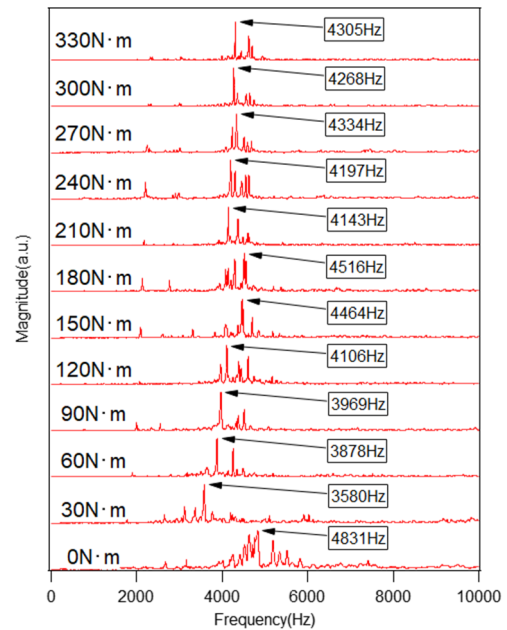


図-6 ボルト No. 1 の各締付トルクの周波数分布

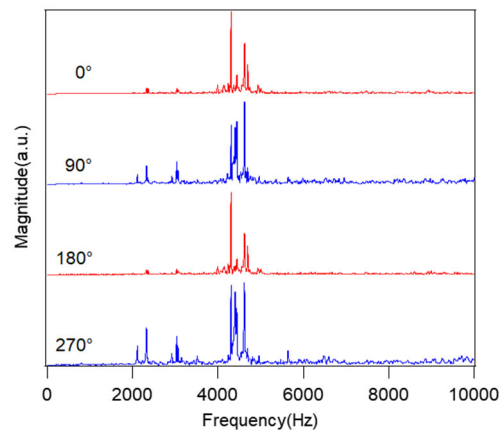


図-7 ボルト No. 1 の各打撃方向の周波数分布

4. AI を用いた締付トルクレベルの分類

4.1 CNN モデルの構築

本検討では以下の A), B), および実験的検討で示した打撃方向によるピーク強度のばらつき影響を考慮し, C) を学習データとして CNN モデルを構築し, 各 CNN モデルにおける締付トルクのカテゴリ精度を確認した。

- A) 振動波形: 処理が不要なため, 高速な学習が可能。
- B) 周波数分布 (4 方向個別): A) の振動波形を高速フーリエ変換し, 基準化した周波数分布。
- C) 周波数分布 (2 方向平均): 打撃方向による周波数分布のばらつきの影響を軽減するため, B) の周波数分布の内, 0° と 90° , および 180° と 270° をそれぞれ平均化した上で再度基準化した周波数分布 (図-8 参照)。

上記を踏まえ, CNN モデルに関する先行研究⁹⁾を参考に, 本検討で構築した CNN モデルを図-9 に示す。図-9 に示す通り, サンプリングレート 4 マイクロ秒で 0.1 秒間のデジタル打音検査で得られる 25000 点の振動波形のデータ, および振動波形を高速フーリエ変換して得られる 0~10kHz の範囲の 25000 点の周波数分布のデータをそれぞれ入力データとした。畳み込み層では, サイズ 4 の 10 種類のフィルタを 25000 点のデータに対して間隔 4 ずつ移動させながら適用しており, サイズは 1 層目で 6250×10 , 2 層目で 1563×10 である。次に Max Pooling は畳み込み 2 層目に対してサイズ 4 のフィルタを 4 ずつ移動させながらフィルタ内の最大値を取得し, 最後に Max Pooling 層を一列に結合するモデルとした。

なお, 振動波形, および周波数分布 (4 方向個別) の入力データセットはボルト 4 本 \times 4 方向 \times 締付トルク 12 条件の 192 個である。また, 周波数分布 (2 方向平均) の入力データセットはボルト 4 本 \times 2 方向 \times 締付トルク 12 条件の 96 個である。

次に, 出力データは表-3 に示す通り, トルクレンチの精度を考慮して締付トルクをレベル 1 からレベル 4 までの 4 分類とした。

なお, 本検討では実験的検討で得られたデータの内, 1 巡目のデータを学習データ, 2 巡目のデータを検証データとした。

4.2 CNN モデルの学習過程

振動波形, 周波数分布 (4 方向個別), および周波数分布 (2 方向平均) の 3 種類の入力データにおける学習過程を図-10~図-12 にそれぞれ示す。図中の青線は学習データ, 赤線は検証データの正解率を示している。

図-10~図-12 から, いずれも epoch 数が概ね 300 回までに検証データの精度は飽和傾向となり, それ以降も低下傾向は見られず, 過学習が生じていないことを確認した。

また, 図-10~図-12 における検証データの分類精度を比較すると, 振動波形は 0.44, 周波数分布 (4 方向個別) は 0.70, 周波数分布 (2 方向平均) は 0.77 となり, 3 種類の入力データの内, 周波数分布 (2 方向平均) を入力データとした場合の分類精度が最も高くなることを確認した。

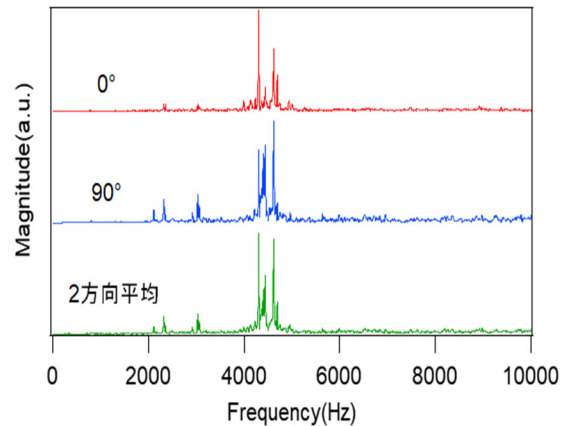


図-8 打撃 2 方向の周波数分布の平均化イメージ

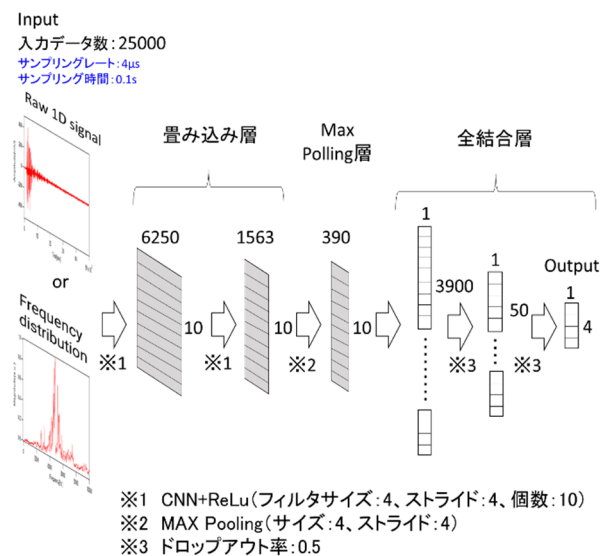


図-9 CNN モデル

表-3 締付トルクレベルの分類

締付トルク(N・m)	分類結果
0 ~ 60	レベル 1
90 ~ 150	レベル 2
180 ~ 240	レベル 3
270 ~ 330	レベル 4

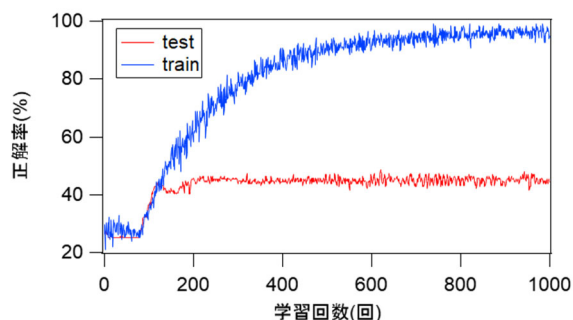


図-10 振動波形の学習過程

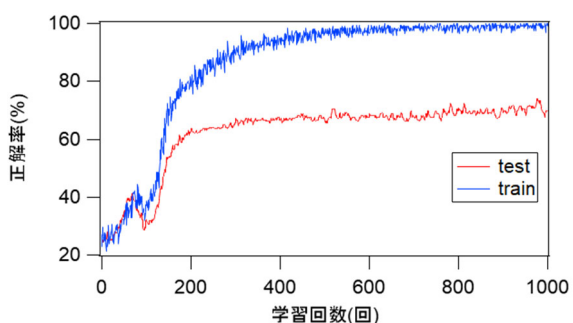


図-11 周波数分布の学習過程 (4方向個別)

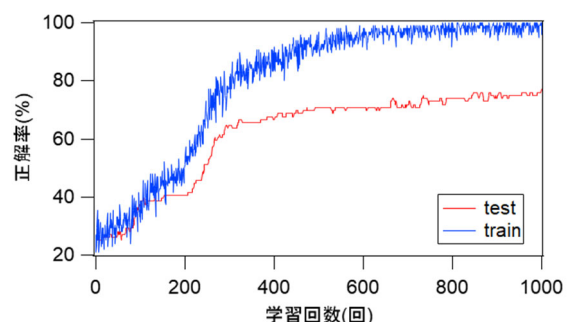


図-12 周波数分布の学習過程 (2方向平均)

4.3 CNNモデルによる分類結果

3種類の入力データにおける分類結果を表-4～表-6に示す。表中の数値はCNNモデルによる分類の件数を示している。左列はCNNモデルの分類結果、太枠内は締付トルクを正しく分類出来た件数を示している。

表-4から、振動波形の分類結果はレベル1では48件中38件すなわち80%程度の分類精度であるが、レベル2,3では40%、レベル4では20%程度となっており、レベル1～4の全体を通しての分類精度は192件中85件すなわち44%に留まった。

次に表-5から、周波数分布(4方向個別)の分類結果はレベル1～2の領域で50%前後、レベル3～4の領域では80%前後の分類精度であり、全体を通しての分類精度は192件中134件すなわち70%となった。表-4の振動波

形の分類結果と比較すると分類精度は向上しており、締付トルクに対応するボルト或いは周囲からの周波数成分の特徴を捉えて分類しているものと考えられる。ただし、締付トルクの分類がレベル1の時にレベル4と誤判定している件数が48件中5件すなわち10%程度あり、分類精度に課題がある。

最後に表-6から、周波数分布(2方向平均)の分類結果はレベル2のみ24件中12件すなわち50%に留まるが、それ以外は75%以上と比較的良好な精度で分類出来た。全体を通しての分類精度は96件中74件すなわち77%となり、分類結果のばらつきも他の入力データと比較して小さく、本検討で採用した3種類の入力データの内、最も精度良く分類できることを確認した。

また、3.3節で述べたとおり、実験的検討において締付トルク210N・mと180N・mを境に卓越周波数がばらつく現象について、表-6における締付トルク分類のレベル3(締付トルク180N・m～240N・m)の分類精度は100%となり、CNNモデルが、卓越周波数以外の特徴量として、卓越周波数よりも強度が低いピーク周波数や、周波数分布の形状等を学習することにより、締付トルクを正確に分類出来ていることを確認した。

一方で、表-6において締付トルクがレベル1の時にレベル3と分類した件数は24件中4件すなわち17%あり、入力データの選定、CNNモデルの改良など、精度向上に更なる改善の余地がある。

また、表-4～表-6の結果から、振動波形よりも周波数分布の分類精度が高い理由として、振動波形と比較して周波数分布の方が締付トルクの緩みに起因する特徴量が事前に抽出され、機械学習が容易になったためと考えられる。更に、表-5と表-6の結果から、2方向の打撃で得られる周波数分布を平均化し、打撃方向に起因する周波数分布のばらつきの影響を軽減することで、分類精度が向上することを確認した。

5. まとめ

ボルトの締付トルク低下の効率的な評価手法の開発を目的として、デジタル打音検査によりM24ボルトを4本施工した供試体を用いた実験的検討を行い、振動波形、および振動波形を高速フーリエ変換して得られる周波数分布をインプット、締付トルクの段階的な4分類をアウトプットとするCNNモデルを構築した。その結果、振動波形では44%、4方向個別の周波数分布では70%の分類精度となった。また分類精度向上を目的として、打撃方向4方向の内、隣り合う2方向を平均化した周波数分布で学習させた場合、分類精度は77%まで向上するとともに、振動波形や4方向個別の周波数分布のモデルと比較して分類結果のばらつきも小さくなることを確認した。

本検討結果から、各試験条件における周波数分布から特徴量を個別に抽出する必要なく、概ね良好な精度で分類可能な CNN モデルを構築することが出来た。

今後は以下の項目に取り組むことで CNN モデルを高度化する計画である。

- ・ 締付トルクが低い領域における分類精度の向上。
- ・ 多種多様なボルト仕様、設置状態の適用に向けた手法の検討。
- ・ 締付トルクの低下以外のボルト劣化事象（ボルトの腐食減肉、基礎コンクリート部の劣化）とそれらの複合事象への適用。

表-4 振動波形の分類結果

CNN の 分類結果	締付トルクによる分類			
	レベル 1	レベル 2	レベル 3	レベル 4
レベル 1	38	9	8	8
レベル 2	7	19	13	20
レベル 3	1	11	19	11
レベル 4	2	9	8	9
合計	48	48	48	48

表-5 周波数分布（4方向個別）の分類結果

CNN の 分類結果	締付トルクによる分類			
	レベル 1	レベル 2	レベル 3	レベル 4
レベル 1	28	6	1	1
レベル 2	9	23	4	1
レベル 3	6	17	43	6
レベル 4	5	2	0	40
合計	48	48	48	48

表-6 周波数分布（2方向平均）の分類結果

CNN の 分類結果	締付トルクによる分類			
	レベル 1	レベル 2	レベル 3	レベル 4
レベル 1	18	2	0	0
レベル 2	2	12	0	0
レベル 3	4	10	24	4
レベル 4	0	0	0	20
合計	24	24	24	24

参考文献

- 1) 古川 伸一：ジェットファンアンカーボルトの点検における打音解析について、評価・診断に関するシンポジウム講演論文集、2016.15 巻、セッション ID 105, p.105-, 2016
- 2) 岸本 喜直, 小林 志好, 大塚 年久, 小室 貴太：接合部界面の剛性を考慮した有限要素法による鋼材とコンクリートからなるボルト締結体の振動シミュレーション、土木学会論文集 A2 (応用力学), 75 巻, 2 号, pp. I_13-I_24, 2019
- 3) 藤吉 宏彰, 松永 嵩, 磯部 仁博, 山田 知典：デジタル打音検査による基礎ボルトの健全性評価の基礎検討、コンクリート工学年次論文集, Vol.44, No.1, 2022
- 4) 広兼 道幸, 中田 弘一, 小西 日出幸, 鈴木 直人：パターン認識を用いた高力ボルトの軸力診断に関する研究、土木学会論文集 F6 (安全問題), 69 巻, 2 号, 2013
- 5) Wei CHEN, Hao WANG, Zhuoxian LI, Zhixin ZHOU : Gear fault diagnosis based on SGMD noise reduction and CNN, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 16 巻, 3 号, p. JAMDSM0031, 2022
- 6) Serkan Kiranyaz, Onur Avci, Osama Abdeljaber, Turker Ince, Moncef Gabbouje, Daniel J. Inman : 1D convolutional neural networks and applications: A survey, Mechanical Systems and Signal Processing 151 (2021) 107398