

# 車両振動に対する wavelet 適用の実験的検証

## EXPERIMENTAL STUDY OF APPLYING THE WAVELET TO VEHICLE VIBRATION

井上 潤

Jun INOUE

(指導教員 山本 亨輔)

Abstract – The method of applying Continuous Wavelet Transformation (CWT) to the vehicle vibration running on a bridge is one of the bridge damage detection methods. On the numerical simulation, it was found that the location of the damage can be detected by comparing the CWT results of the intact and the damaged cases. The purpose of this research is experimental verification of the effectiveness of CWT method to extract evaluation index to detect damage existence. Two experiments using a steel bridge and a paper bridge model are carried out. In the steel bridge experiments, the difference in CWT results can be observed after damage, while that is not so clear when using the paper bridge model. To find out differences due to damage, it is necessary to apply an image recognition technology using Convolution Neural Network (CNN). This result also suggests that there are evaluation indicators to evaluate damage severity and damage position.

### 1 まえがき

現在、国内には約 70 万基の道路橋があり、5 年に一度、近接目視による点検が義務化されている。道路橋は公共性の高い土木構造物であるので、日常的な点検により構造安全性を常に把握することが望ましい。しかし、目視点検の精度は技術者の技量に依存しており、人口が減少していく中で技術者一人に対する負担は増大すると予想される。全ての橋梁に対して日常的に人が点検を行うことは困難である。

そこで、大まかに橋梁の状態を把握し、損傷の可能性が高い橋梁に対してのみ順次、詳細点検を行うといったスクリーニング結果に基づく維持管理方法の開発がされている。

このようなスクリーニング技術の一つに移動センシングがある。Yang ら<sup>[1]</sup>は車両の加速度振動から、橋梁の固有振動数を推定する手法を提案している。ただし、橋梁の固有振動数は局所的な損傷に対する感度が低いため、橋梁の健全性評価においては高い推定精度が求められる。しかし、車両振動のパワースペクトルには、移動による影響でピークが分散する上に、路面凹凸による周波数成分なども卓越し、正確に橋梁の固有振動数を見出すことが難しい。Yang と Chang は EMD 法を利用して精度良く高次固有振動数を推定する手法<sup>[2],[3]</sup>の開発を行っているが、損傷による変化と比較して十分な推定精度が保証されるような手法の

開発には至っていない。

このような「周波数分析」の損傷感度の低さを改善するために「時間領域分析」や「時間周波数分析」が適用されてきた。Xiang ら<sup>[4]</sup>は車両振動に短時間フーリエ変換を適用することで、時間周波数領域でのパワースペクトルを算出し、それに基づき損傷検知のための新しい指標を提案している。このとき、車両に加振機を加えることで、コンクリート橋梁のひび割れ検知が可能であることが示されている。しかし、分解能の制約が厳しく、路面凹凸を考慮していないといった課題がある。また Nguyen ら<sup>[5]</sup>はひび割れを複数持つ橋梁に対して、走行車両の振動応答にウェーブレット変換を適用し、ひび割れ深さの推定が可能であることを示した。しかし、損傷位置推定の可能性については検討を行っておらず、路面凹凸も考慮していない。

一方、山本ら<sup>[6]</sup>は、車両振動の連続ウェーブレット変換 (CWT) から局所損傷を検知する手法について提案し、数値計算による検証を行った。この手法によって、高い周波数域に着目することで、橋梁の劣化・損傷の検知や損傷規模推定の可能性があることを示した。しかし、山本ら<sup>[6]</sup>の研究で得られた結果は数値計算によって得られた結果であり、実験によってウェーブレット変換の有効性が確認されたわけではない。そこで、本研究では鋼製橋梁および紙製橋梁模型を使用し、得られた車両振動に CWT を適用することで、局所損傷の検知を可能か検証し、さらにその評価指標

は存在しうるか検証を行う。

## 2 分析手法

本研究では車両振動を分析する際に「連続ウェーブレット変換 (CWT)」を使用し、CWT 結果の分析に「spline 補間」、「画像認識」の 2 つの分析手法を用いる。

### 2.1 連続ウェーブレット変換

本研究における橋梁損傷推定の基本的な考え方は、山本ら<sup>[6]</sup>の研究と同様に、損傷による部材断面の変化により生じた車両-橋梁相互作用の動的応答の変化を車両加速度応答の連続ウェーブレット変換に基づいて推定することである。

今、車両加速度を $\ddot{z}(t)$ とすれば、 $\ddot{z}(t)$ の連続ウェーブレット変換 (CWT) は以下のように与えられる。

$$W_{\psi}z(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} \psi^* \left( \frac{t-b}{a} \right) \ddot{z}(t) dt \quad (1)$$

$$a (\neq 0), b \in \mathbb{R}$$

$a$ は横方向の伸縮パラメータである。 $a$ が大きくなると $\psi(t)$ は横方向に伸びた関数となる。一方 $b$ は位置のパラメータである。 $b$ の値を変化させることで関数を平行移動させることができる。 $\psi(t)$ はマザーウェーブレットと呼ばれる時間関数である。 $(\cdot)^*$ は複素共役を表す。得られた車両加速度データの分析には MATLAB を使用し、マザーウェーブレットには Morse ウェーブレットを用いる。

### 2.2 Spline 補間

Spline 補間とは元のデータ区間をその近傍の値を使い低次の多項式で近似し、この作業を繰り返すことで全体の近似曲線を求める方法である。本研究では 3 次関数で近似を行う。

今補間するデータ数を $N$ 個とし、 $j$ 番目のデータの座標を $(x_j, y_j)$ とし、区間 $[x_j, x_{j+1}]$ で補間に使用する関数を $S_j(x)$ とする。

$$S_j(x) = a_j(x - x_j)^3 + b_j(x - x_j)^2 + c_j(x - x_j) + d_j \quad (2)$$

$$(j = 0, 1, 2, 3, \dots, N-1)$$

Spline 補間を行う条件として境界点の 1 次、2 次導関数はどちらも連続であり、両端での 2 次導関数の値を 0 とする。

$$\dot{S}_0(x_0) = \dot{S}_{N-1}(x_N) = 0 \quad (3)$$

$S_j(x_j)$ の 2 次導関数を $u_j$ とする。

$$u_j = \ddot{S}_j(x_j) = \ddot{S}_{j-1}(x_j) \quad (j = 0, 1, 2, \dots, N) \quad (4)$$

式(2)の各パラメータ $a_j$ ,  $b_j$ ,  $c_j$ ,  $d_j$  は以下式(5)から式(8)で表される。

$$a_j = \frac{u_{j+1} - u_j}{6(x_{j+1} - x_j)} \quad (5)$$

$$b_j = \frac{u_j}{2} \quad (6)$$

$$c_j = \frac{y_{j+1} - y_j}{x_{j+1} - x_j} - \frac{1}{6}(x_{j+1} - x_j)(2u_j + u_{j+1}) \quad (7)$$

$$d_j = y_j \quad (8)$$

$x_j$ と $y_j$ はデータ点なので既知である。 $u_j$ は式(9)で与えられる。

$$[A] \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ \vdots \\ u_j \\ \vdots \\ u_{N-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ \vdots \\ v_j \\ \vdots \\ v_{N-1} \end{bmatrix} \quad (9)$$

なお、 $[A]$ は以下の行列とする。

$$\begin{bmatrix} 2(h_0 + h_1) & h_1 & & & 0 \\ h_1 & 2(h_1 + h_2) & & & \\ & & \ddots & & \\ & 0 & & 2(h_{N-3} + h_{N-2}) & h_{N-2} \\ & & & h_{N-2} & 2(h_{N-2} + h_{N-1}) \end{bmatrix}$$

$$h_j = x_{j+1} - x_j \quad (j = 0, 1, 2, \dots, N-1) \quad (10)$$

$$v_j = 6 \left( \frac{y_{j+1} - y_j}{x_{j+1} - x_j} - \frac{y_j - y_{j-1}}{x_j - x_{j-1}} \right) \quad (11)$$

各データ区間で式(2)の各パラメータを求めることで補間を行う。

### 2.3 画像認識

本研究では画像認識においてよく用いられる深層学習の一つ、CNN (Convolution Neural Network: 畳み込みニューラル・ネットワーク) を使用し結果の考察を行った。CNN は Neural Network の一種で畳み込みという操作を導入したものである。畳み込みとはある格子状(5×5)の数値データと同サイズの部分画像 (ウィンドウ) の数値データについて要素ごとの積の和を計算し、一つの数値データに変換する処理のことである。また、数値データをまとめる方法の一つとしてプーリングという処理がある。プーリングとはウィンドウの数値データの中から最大値を選択するというようなウィンドウから一つの数値データを作り出す処理である。畳み込みやプーリングといった処理を行うことで画像の特徴をあらゆる数値を得ることができる。同じケースの画像を数値化しまとめる処理を繰り返し、画像の特徴をつかむことで画像認識を行う。

本研究では Python で書かれた Keras というニューラルネットワークライブラリを用いて CNN を行った。入力した画像を鋼製橋梁実験では 3 ケース、紙製橋梁

模型実験では5ケースに分類する処理を行う。隠れ層と呼ばれる処理を行う層では、6段階の層で処理を行う。1~4層では畳み込みによる画像の数値データをまとめる作業を繰り返す。次の層に渡す値を整える役割の活性化関数には `relu` 関数を用いる。5,6層では出力するケースの数を決める処理を行った。

### 3 実験概要

鋼製橋梁上と車両（軽自動車）を使用する実験と、紙製橋梁模型と模型車両を使用し、車両の加速度応答を測定する2種類の実験を行った。加速度センサーはどちらの実験も同じものを使用し、サンプリングレートは300[Hz]とした。

#### 3.1 鋼製橋梁実験概要

鋼製橋梁実験では主に損傷の規模による CWT 結果の差はあるのかを検証する。鋼製橋梁の外観図および



図1 鋼製橋梁外観

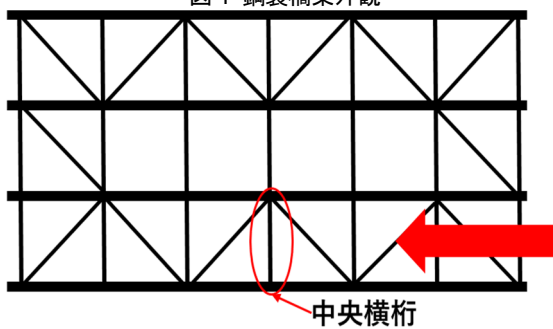


図3 鋼製橋梁イラスト図

表1 鋼製橋梁のパラメータ

鋼材規格	JIS G 3101 : SS400
固有振動数[Hz]	7
スパン長[m]	8.32
橋幅[m]	4.15
主桁本数	4
自重[N/m]	1188.6

実験の様子を図1から図3に示し、図4に鋼製橋梁自由振動のフーリエスペクトルを示す。また鋼製橋梁と車両の各パラメータを表1、表2に記載する。橋梁の固有振動数は一般的な短スパン橋の固有振動数と同程度の10[Hz]となるように設計したが、図4から実際の橋梁の固有振動数は7[Hz]程度と確認される。加速度センサーはバネ下車軸中心付近に設置した。車両の入退出はレーザーセンサーを用いて記録し、車両の車輪が橋梁上に存在する加速度データを用いる。

実験を行う橋梁の状態は健全時 (INTACT)、軽度損傷時 (LIGHT)、重度損傷時 (HEAVY) とした。軽度損傷は車両走行側の中央横桁 (図3) のボルト8本を緩めることで模擬した。重度損傷は上記横桁を除去することで模擬した。計測回数は健全、軽度、重度をそれぞれ31回、24回、26回で行った。実際に橋梁を点検する際は、健全時のデータが多く得られることが考えられる。よって健全時の計測を多く行い、実際の環



図2 走行実験

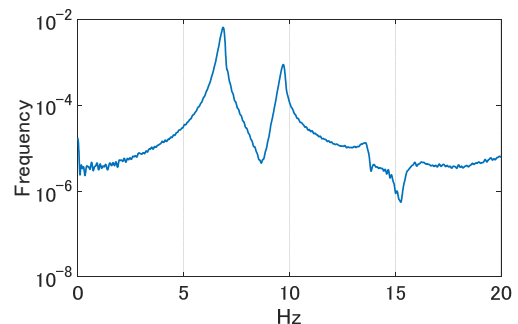


図4 橋梁自由振動のフーリエスペクトル (鋼製)

表2 車両のパラメータ

車両規格	軽自動車
推定固有振動数[Hz]	36
車軸間距離[m]	1.8
タイヤ弾性率[MPa]	3
重量[kg]	950

境を想定して損傷検知を行った。走行は図2のように誘導白線を車輪が通過するように行った。

### 3.2 紙製橋梁模型実験概要

紙製橋梁模型実験では損傷の規模の差に加え、損傷位置による CWT 結果の差について検証を行う。模型実験は阿部ら<sup>7)</sup>が行った実験を参考に行う。橋梁模型の外観図を図5から図9に示す。図10に橋梁の自由振動のフーリエスペクトルを示す。また橋梁模型の各パラメータを表3に記載する。橋梁模型は資料<sup>8)</sup>に基づき制作し、横構、分配横桁などを再現している。鋼部材は厚さ 0.9[mm]のケント紙で制作し、溶接部はグルーガンで接着、ボルト部はM3のネジで接合している。またコンクリート部の床板は厚さ 52[mm]の青色発泡スチロールを用いて制作し、その上にケント紙を重ねることで路面凹凸を再現している。図10より固有振動数は9[Hz]程度となった。図5のように橋梁の両端に感光センサーと光源を設置した。車両がセンサー上を通過することで光が遮断され、光量が一定以

下になった時刻を記録し、そこから車両の前輪と後輪の位置を推定する。また、模型車両の速度が一定になるよう橋梁の侵入口と退出口には助走区間を設けた。

次に模型車両の外観図を図11、図12に示し、各パラメータを表4に記載する。加速度センサーはバネ下の前軸および後軸上に設置した。車両の重量は無載荷時では6[kg]で、これを軽量時とした。軽量時からバネ上に4[kg]の重りを載せることで重量時とし、軽量時と重量時で実験を行った。車両のサスペンションは自由にバネ定数を変更可能なエアサスペンションを模擬するために軽量時と重量時で異なるバネを使用し、固有振動数を同程度にしている。実験を行う橋梁模型の状態は健全時、軽度損傷を2ケース、重度損傷を2ケースの5つとした。それぞれの損傷は図10の①から④の部材を外すことで模擬する。軽度損傷-1は横構①、軽度損傷-2は横構②を外し、重度損傷-1は横桁③、重度損傷-2は横構③、④を2つ外すことで模擬した。各ケース軽量と重量をそれぞれ30回ずつ行うので各ケース60回ずつ測定を行った。車両は現実と同様に橋



図5 紙製橋梁模型全体外観



図6 橋梁模型（床板無し）



図7 横構



図8 横桁

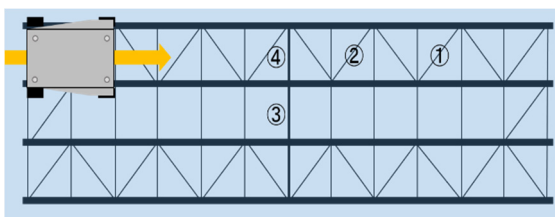


図9 紙製橋梁模型イラスト図

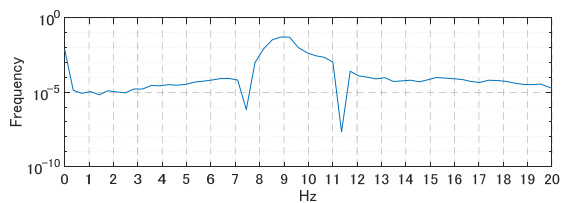


図10 橋梁の自由振動フーリエスペクトル（紙製）

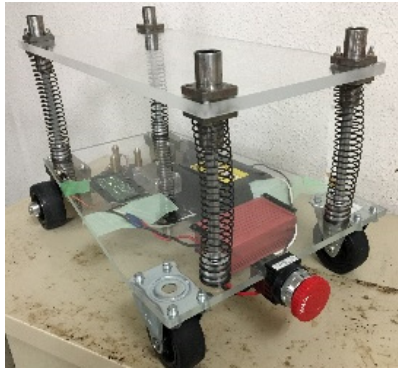


図 11 模型車両 (軽量 6[kg])

表 3 紙製橋梁模型パラメータ

橋長[m]	4.24
橋幅[m]	1.3
厚さ[mm]	52
紙厚さ[mm]	0.9
フランジ幅[mm]	70
ウェブ高さ[mm]	260
固有振動数[Hz]	9

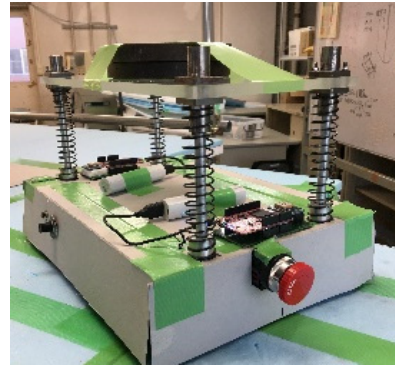


図 12 模型車両 (重量 10[kg])

表 4 車両模型パラメータ

共通パラメータ	車長[mm]	400
	車幅[mm]	280
重量[kg]	軽	6
	重	10
バネ定数[N/m]	軽	124.8
	重	374.9
固有振動数[Hz]	軽	2.77
	重	2.59

梁の左側を走行する。ガイドラインを引き車両の中心がライン上を走行するように行った

## 4 実験結果と考察

得られた車両加速度応答のデータに連続ウェーブレット変換 (CWT) 結果をスカログラムで示す。スカログラムの縦軸は周波数[Hz]、横軸は車輪が橋梁に入った時からの経過時間[s]、カラーバーの色の濃淡で周波数の強さを示す。破線外に表示されている部分は境界の影響を強く受ける領域であり、考察を行うのは破線内の領域とする。

### 4.1 鋼製橋梁実験

図 13 から図 18 に本実験で得られた CWT 結果のスカログラムを示す。前輪と後輪の CWT 結果を比較すると、後輪の結果の方が強い反応を示していることがわかる。これは測定に使用した軽自動車はフロントエンジン・フロントドライブなので前輪の方がより重く、振動しにくいので反応が弱くなったと考えられる。また、64~128[Hz]の間での強い反応はノイズによる影響であると考えられる。前輪の 7[Hz]付近に反応が出てい

るのは橋の固有振動数に近いことから橋の振動が表れていると考えられる。後輪の結果で 18~32[Hz]付近に等間隔で強い反応を示している。橋梁長は表 1 より 8.32[m]、橋梁上に床板は 13 枚あるので床板の横幅は 0.64[m]である。図 18 を見ると 1 秒間に 4 回反応していて車両の速度が約 2.5[m/s]であることから約 0.65[m]間隔で反応が起こっていることがわかる。これは鋼製橋梁上の床板の間隔と同じなので床板間の段差によって生じていると考えられる。

重度、軽度、健全を比較すると健全の CWT 結果が前後輪どちらも反応が低いことがわかる。後輪の重度、軽度を比較するとどちらも床板の段差によって起こされる振動に強く影響を受けるため、特徴的な差を見出すことはできなかった。前輪の結果に注目すると軽度>健全>重度の順に橋の振動と考えられる 7[Hz]付近の反応が強いことがわかる。これらのことから、前輪は重量の重さから車両の振動が抑えられ、より橋梁の振動をとらえやすくなったことが考えられる。しかし、損傷位置である橋梁中央(スカログラムの中央)に特徴的な変化は見られなかった。

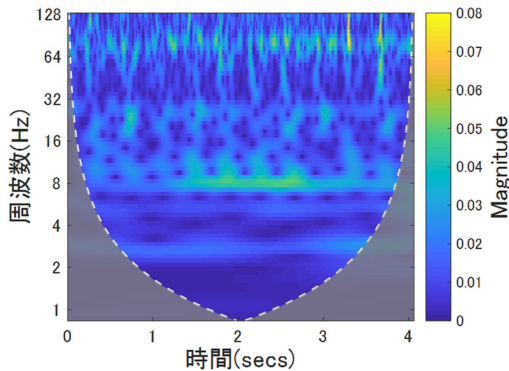


図 13 鋼製橋梁 CWT 結果 (前輪, 健全時)

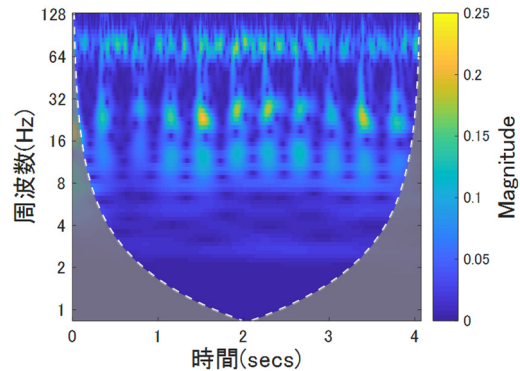


図 14 鋼製橋梁 CWT 結果 (後輪, 健全時)

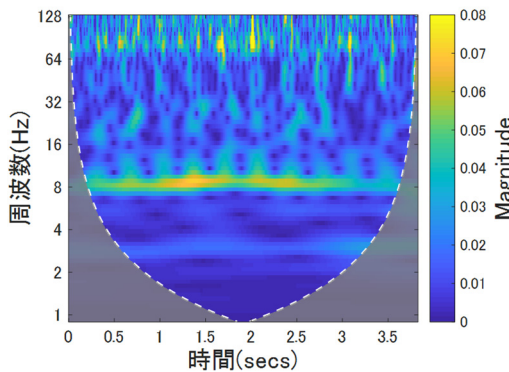


図 15 鋼製橋梁 CWT 結果 (前輪, 軽度損傷)

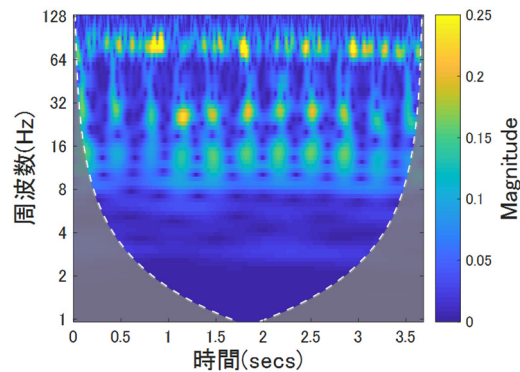


図 16 鋼製橋梁 CWT 結果 (後輪, 軽度損傷)

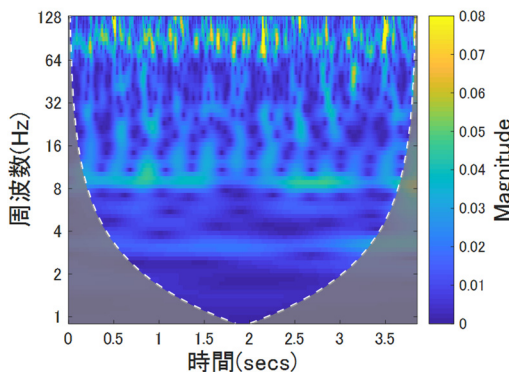


図 17 鋼製橋梁 CWT 結果 (前輪, 重度損傷)

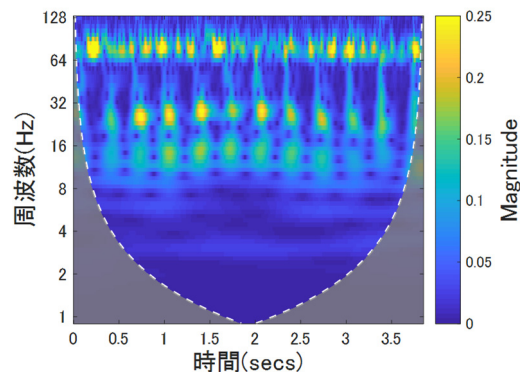


図 18 鋼製橋梁 CWT 結果 (後輪, 重度損傷)

## 4.2 紙製橋梁模型実験

模型実験では前輪の結果のみ図示する。図 19 から図 28 に本実験で得られた前輪の CWT 結果を示す。鋼製橋梁の結果と比べ損傷ケースによる結果の違いを見出すことが困難である。前輪と後輪の CWT 結果を比較すると前輪の結果が後輪より強く反応しているのがわかった。模型車両の部品 (モーターやバッテリーなど) が後輪付近に多く配置されている。そのため重心が後輪により、鋼製橋梁実験と同様に重心に近いほうの車輪の振動が抑えられたと考えられる。以上のことから紙製橋梁模型においては反応の変化が比

較的発見しやすい前輪の CWT 結果に着目する。

すべての損傷ケースに共通して 1 秒付近と 4 秒付近に強い反応が見られる。これは厚紙を重ねることで模擬した路面凹凸の段差が大きく車両の振動が大きくなった場所で車両が大幅に揺れ、結果に表れたと考えられる。次に、重量時 (10[kg]) と軽量時 (6[kg]) の結果を比較する。重量時に比べ軽量時は 32~64[Hz]の反応は弱まり、反対に 16~32[Hz]の反応が強まっていることがわかる。しかし、それぞれの CWT 結果の違いはとてむずかしく明確に損傷ケースを区別することは出来ない。さらに損傷位置 (重度損傷は中央、軽度損傷は後半) による結果の変化は見られなかった。

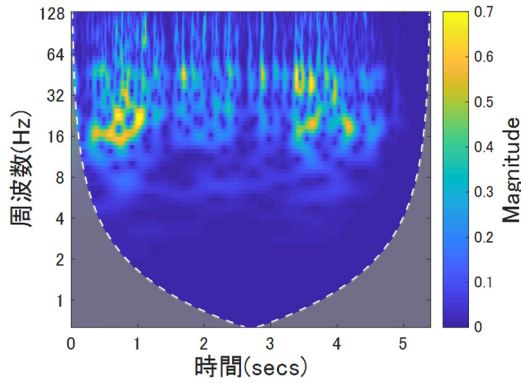


図 19 紙製橋梁 CWT 結果 (重量, 健全)

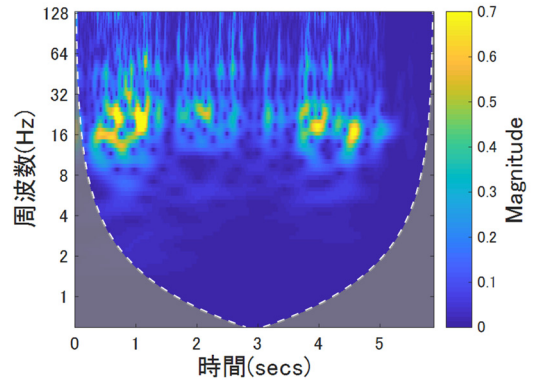


図 20 紙製橋梁 CWT 結果 (軽量, 健全)

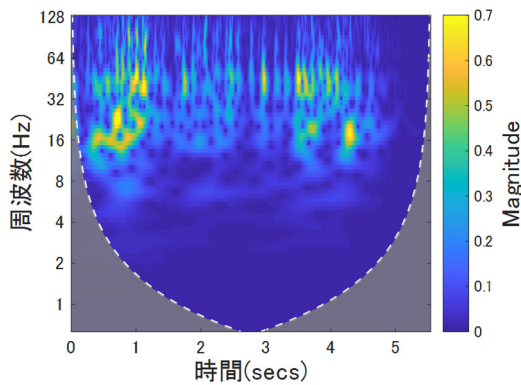


図 21 紙製橋梁 CWT 結果 (重量, 軽度損傷-1)

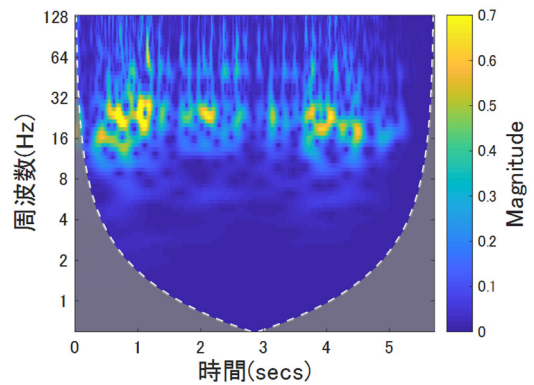


図 22 紙製橋梁 CWT 結果 (軽量, 軽度損傷-1)

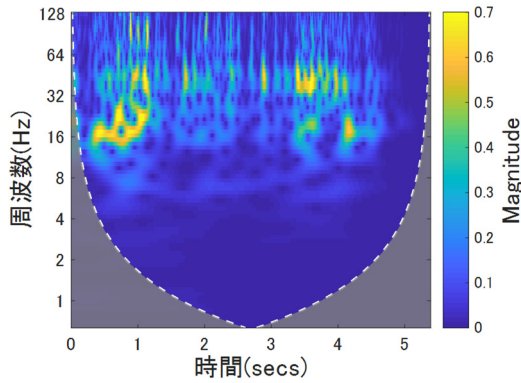


図 23 紙製橋梁 CWT 結果 (重量, 軽度損傷-2)

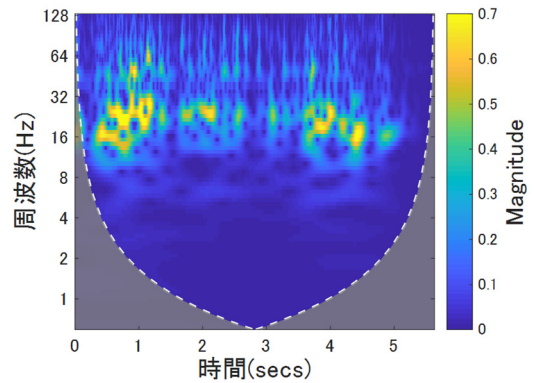


図 24 紙製橋梁 CWT 結果 (軽量, 軽度損傷-2)

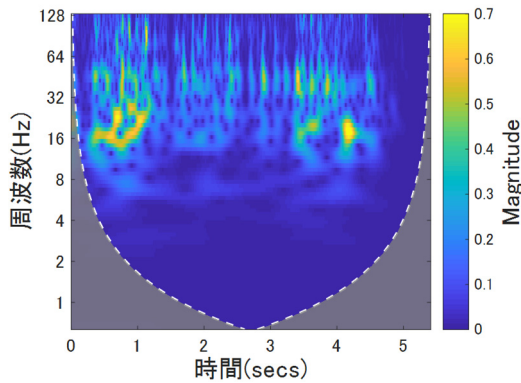


図 25 紙製橋梁 CWT 結果 (重量, 重度損傷-1)

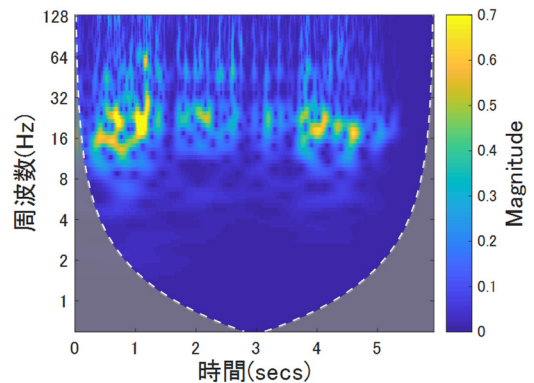


図 26 紙製橋梁 CWT 結果 (軽量, 重度損傷-1)

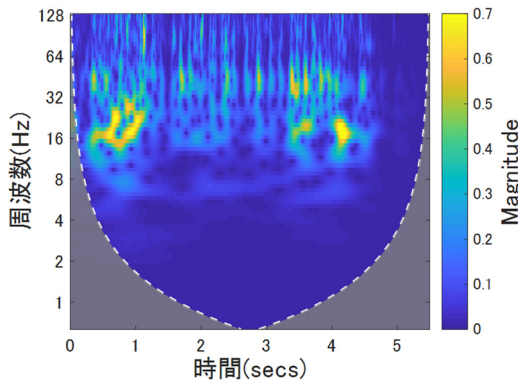


図 27 紙製橋梁 CWT 結果 (重量, 重度損傷-2)

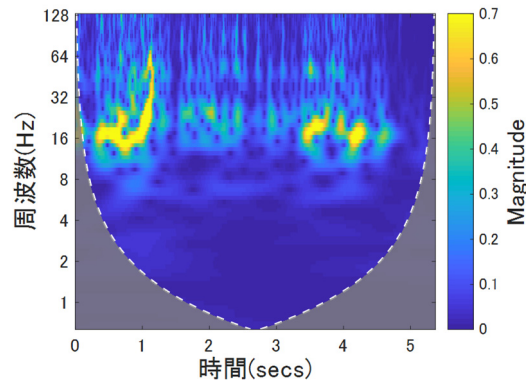


図 28 紙製橋梁 CWT 結果 (軽量, 重度損傷-2)

#### 4.3 データの平均化

図 13 から図 28 に示した鋼製橋梁実験, 紙製橋梁模型実験の CWT 結果はどの結果もそれぞれ行った損傷ケースの実験の 1 回分の結果でしかない。両実験では各損傷ケースで約 30 回測定を行っているので 30 個データが生成される。特に鋼製橋梁実験では実際の車両を人が運転しているため, 毎回の走行で同じ経路を通過することは困難である。そのため, 得られた結果はそれぞれの損傷ケースにおいて似たような傾向を示しているが, まったく同じ結果は得られていない。紙製橋梁模型実験では, あらかじめ車両をまっすぐ走行できるようにし, 走行開始位置を揃えて実験を行っている。よって模型実験ではほぼ同じデータが得られている。

これより一つ一つの結果を比較するのではなく, 走行して得られた加速度データを損傷ケースごとにまとめ 1 つのデータとして比較することを試みる。それぞれの走行によって車両振動の計測時間が異なるのでデータ数も異なる。得られた加速度データのデータ数を揃える作業が必要である。データ数を揃える方法として Spline 補間を用いた。

図 15, 図 16, 図 21, 図 22 の平均化後の CWT 結果を図 29 から図 32 に示す。図 29 を見るとノイズとみなした 64~128[Hz]の反応が減少し, 橋梁の影響の強い 7[Hz]付近の反応が強くなっている。これよりノイズの影響を減らし着目したい橋梁と車両の相互作用の特徴が得られたのではないのかと考える。鋼製橋梁

実験の前輪の結果ではどの損傷状態でも同じように平均化が正しく行われているかのような結果が得られた。しかし, 鋼製橋梁実験での前輪の平均化結果以外は異なる結果となった。

図 30 から図 32 を見るとそれぞれの元の CWT 結果の特徴を示していない。特に紙製橋梁模型実験の平均化後の結果 (図 31, 図 32) では 2 つの強い反応を示していた部分のうち後半の反応がとて弱くなってしまっている。これではそれぞれの CWT 結果の特徴を表しているとは言えない。特徴を表している結果 (図 29) と表していない結果 (図 30, 図 31, 図 32) を比較すると, 連続した反応 (図 29, 7[Hz]付近) は残ることがわかる。一方, 局所的な反応, 特に後半の反応が減少していることがわかる。これは局所的な反応の起こる時間がそれぞれの走行によって変わってしまっていて, 平均化を行う際に局所的な反応がノイズのように消されてしまうことが原因だと考えられる。橋梁上を走行する際には車両の速度を一定としている。しかし, 鋼製橋梁実験では人が運転を行うことでの速度のずれ, 模型実験では模型車両が最大速度に加速する前に橋梁に侵入していることで橋梁上を走行する車両の速度が一定ではなくなることが考えられる。このことは図 29, 図 30 で前半の反応は強まり, 後半の反応のみ弱まっていることから示される。

以上の結果より橋梁上で車両の速度が一定ではない場合 Spline 補間によるデータの平均化は有効でないことが分かった。



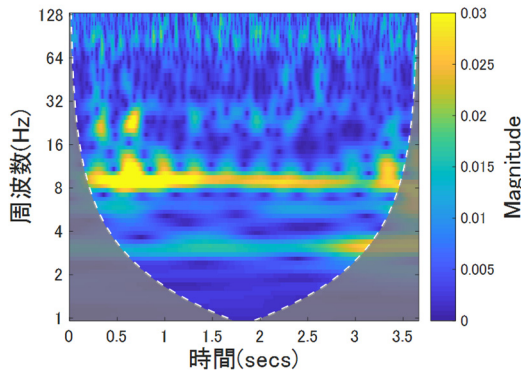


図 29 鋼製橋梁 CWT 結果 (前輪, 軽度損傷)

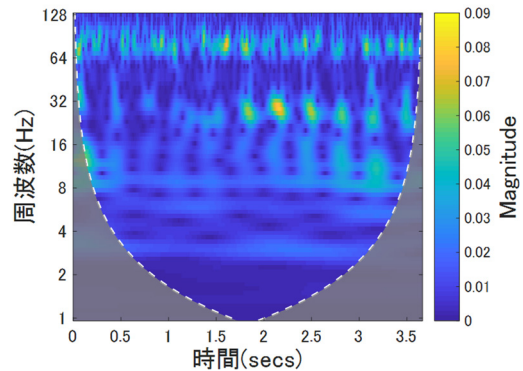


図 30 鋼製橋梁 CWT 結果 (後輪, 軽度損傷)

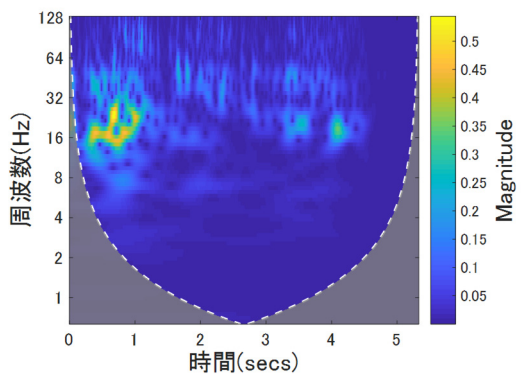


図 31 紙製橋梁 CWT 結果 (重量, 軽度損傷-1)

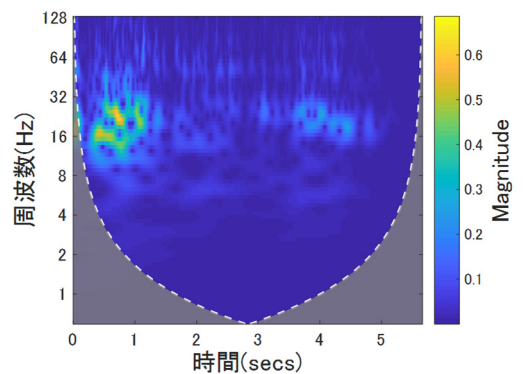


図 32 紙製橋梁 CWT 結果 (軽量, 軽度損傷-1)

#### 4.4 画像認識による結果の考察

4.3 で平均化により CWT 結果をまとめ特徴を発見できないか試行したが, 走行車両の速度が橋梁上で変化する場合において平均化の処理はあまり有効でないことが分かった. 平均化によるノイズの除去や損傷ケースによる CWT 結果の特徴の発見は困難である. 鋼製橋梁実験での CWT 結果の大まかな違いは発見できたが, 紙製橋梁模型実験では各損傷ケースの結果の差は発見することができなかった.

そこで, 画像認識としてよく用いられる深層学習の一つ CNN (Convolution Neural Network: 畳み込みニューラル・ネットワーク) を用いることで, CWT が橋梁の損傷検知可能であるかを考察する. 画像認識で使用する画像は鋼製橋梁実験では前輪, 紙製橋梁模型実験では重量時の前輪の CWT 結果の画像を使用する. 各損傷ケースの CWT 結果の画像を学習に約 7 割の枚数を使用し, 残った約 3 割の画像でテストを行った. 得られた鋼製橋梁実験のテスト結果を表 5 に, 紙製橋梁模型実験のテスト結果を表 6 に示す.

表 5, 表 6 の結果を見ると比較的高い確率で損傷ケースの判別が行えていることが分かった. 今回画像認識に用いた画像の数は鋼製橋梁では健全 31 枚, 軽度損

傷 24 枚, 重度損傷 26 枚, 紙製橋梁模型実験では各損傷ケース 30 枚ずつで行った. 実験の走行回数を増やし画像の枚数を増やせばより高確率に損傷ケースの判別が可能であると期待される.

表 5 に着目すると重度損傷と軽度損傷の判別が行われているのがわかる. これは損傷の規模の差 (重度と軽度) によって CWT 結果に差があることを示している. しかし, 健全の正解率が低い結果となった. 鋼製橋梁実験は健全→軽度損傷→重度損傷の順に実験を行っている. 測定を行うにつれ車両の運転者の技術が上がり速度をほぼ一定に保つことができるようになった. しかし, 最初に測定を行った健全時の各測定では速度のばらつきが多かったことで正解率が低くなったと考えられる. 計測回数を増やし運転者の技術が向上すれば今回のテスト結果よりさらに精度を高める

表 5 鋼製橋梁実験テスト結果

	正解数	正解率
健全	7/10	70%
軽度損傷	5/6	83%
重度損傷	7/7	100%
全体	19/23	83%

表 6 紙製橋梁模型実験テスト結果

	正解数	正解率	間違い先(数)
健全	8/9	89%	重度損傷-1(1)
軽度-1	6/7	86%	軽度損傷-2(1)
軽度-2	7/7	100%	
重度-1	7/9	78%	軽度損傷-1(2)
重度-2	1/9	11%	重度損傷-1(8)
全体	29/41	71%	

ことが可能であると期待できる。

また、表 6 に着目すると各損傷ケースの判別を高い確率で行えていることがわかる。また、不正解だった画像がどの損傷ケースと誤って判断したのかに着目する。重度損傷-1 が軽度損傷-1 と誤ったこと以外は同じ損傷規模と間違えていることがわかる。このことから紙製橋梁模型実験でも、損傷規模による CWT 結果の差があることがわかる。しかし、重度損傷-2 のみ正解率がとても低いことがわかる。そして不正解だった画像はすべて重度損傷-1 と判別されている。これは重度損傷の 2 ケースの CWT 結果に差がないことを示している。この 2 ケースの損傷の差は分配横桁を 1 つ外すか 2 つ外すかの違いである。車両側から橋梁の損傷位置を見ると、どちらも同じ場所が損傷していると判断できる。損傷位置が同じ場合の CWT 結果の差は、損傷程度の差による違い、つまり CWT 結果の色の濃淡でのみ判断すると考えられる。さらに今回 CNN に使用した画像は比較を行うためにカラーバーの上限を揃え、それ以上の数値に関しては同じ色になるように設定している。重度損傷-1 と重度損傷-2 ではカラーバーの上限を超え色が同じになってしまった場所に差が存在する可能性がある。以上のことから重度損傷による結果の差を見出すことができなかった。軽度損傷の結果に着目すると 2 つのケースを区別できていることがわかる。軽度損傷の 2 つのケースは取り外す横構の位置を変えているので同じ損傷規模であっても位置によって CWT 結果に差が生まれることが示された。

以上のことより車両振動に対する連続ウェーブレット変換は損傷規模によって結果に差が生まれ、さらに同じ損傷規模であっても損傷位置によって結果に差が生まれることが分かった。人間の目では CWT 結果の差を発見することはできなかったが、機械学習によって CWT 結果の差を見出すことができた。これより規模や損傷位置によって CWT 結果の差を評価する

評価指標が存在することが示された。

## 5 まとめと今後の課題

本研究では鋼製橋梁と紙製橋梁模型の 2 つの実験を行い、車両振動に対するウェーブレット変換の有用性の実験的検証を行った。以下に本研究についてまとめる。

- 1) 鋼製橋梁実験においては、損傷状態の差によって CWT 結果に差が生まれることが分かった。一方、紙製橋梁模型実験では結果に差を見出すことはできなかった。
- 2) 車両振動のデータ数を揃え平均化を行ったが車両の速度が一定ではないと適切に平均化を行えないことが分かった。
- 3) 画像認識から損傷状態や、損傷位置の違いによって CWT 結果に差が生まれることが分かった。今後の検証によっては山本ら<sup>4)</sup>の研究と同様に CWT は橋梁の損傷検知や損傷位置の特定の可能性があり、評価指標が存在すると考えられる。

今後の課題としては、鋼製橋梁においても損傷位置の違いによる CWT 結果の差が生まれるのか検証を行う。さらに損傷によって結果に変化をもたらしている評価指標の発見を行う。また、車両振動の正しい平均化を行う。そのために模型実験において橋梁上の車両の速度を一定に保つように改良する。さらに橋梁の構造や、材料が CWT 結果にどのような影響をもたらすのか、模型橋梁の種類を増やして実験を行う。

## 参考文献

- [1] Y.B. Yang, K.C. Chang., "Extracting the bridge frequencies indirectly from a passing vehicle," *Parametric study, Engineering Structure*, Vol.31, pp.2448-2459, 2009.
- [2] Y.B. Yang, K.C. Chang., "Extraction of bridge frequencies from the dynamic response of a passing vehicle enhanced by the EMD technique," *Journal of Sound and Vibration*, 322, pp.718-739, 2009.
- [3] Y.B. Yang, K.C. Chang., "Extracting the bridge frequencies indirectly from a passing vehicle," *Parametric study, Engineering Structures*, 31, pp.2448-2459, 2009.
- [4] Zhihai. Xiang, Xiaowei. Dai, Yao Zhang and Quihai Lu., "The Tap-Scan Damage Detection

- Method for Beam Structures,” *Advances Interaction & Multiscale Mechanics*, pp.541-553, 2010.
- [5] Khoa. Viet Nguyen, Hai. Thanh. Tran., “Multi-cracks detection of a beam-like structure based on the on-vehicle vibration signal and wavelet analysis,” *Journal of Sound and Vibration*, 329, pp.4455-4465, 2010.
- [6] 山本亨輔, 大島義信, 金哲佑, 杉浦邦征, ”車両応答の時間周波数解析に基づく橋梁の損傷検知法,” 構造工学論文集 Vol.57A, pp.637-645, 2011
- [7] 阿部智成, ”車重がSSMAベースの車両応答分析結果に与える影響,” 筑波大学理工学群工学システム学類卒業論文, 2018.
- [8] 原隆, 山口隆司, 北原武嗣, 和多田康男, ”鋼構造学,環境・都市システム系教科書シリーズ 15,” コロナ社, pp197-202,2007.

### 謝辞

本研究に際して、丁寧なご指導をいただきました山本亨輔先生と松島亘志先生に深謝いたします。加えて、車両模型製作等に携わってくださった技官の神戸昌幸様、飯高稔様、小島篤志様、加えて実験に関して多大な協力をしてくださった高橋悠太様、二出川真様をはじめとする研究室のみなさんには感謝の念に堪えません。そして生活を支えてくれた家族に心からお礼を申し上げます。