

衝撃加振法によるガイド波の可視化実験とモード同定

Visualization of Guided Wave Excited with Hammer and Identification of Propagation Mode

愛媛大学大学院	高橋 葉太	Kanta TAKAHASHI
愛媛大学大学院	唐川 和輝	Kazuki KAWARAKWA
愛媛大学大学院	松本 愛	Ai MATSUMOTO
愛媛大学大学院	中畑 和之	Kazuyuki NAKAHATA

Guided wave has been applied to a wide variety of non-destructive testing for a plate, bar and pipe, among others. In this study, we propose a wireless sensing system for the guided wave testing in structural components. The three-dimensional motion of the structural component can be visualized using the measured guided waves at a fixed position, which are individually excited at various positions. This method is based on the elastodynamic reciprocity theorem. Here, the validity of the visualization method of the guided wave is investigated with an I-beam metal specimen. Also, the wave propagation mode extracted from the visualization result is compared with a numerically calculated dispersion curve.

Keywords: Guided Wave Testing, Visualization of Wave Motion, Impact Hammer, Wireless Sensing of Acceleration, Semi Analytical Finite Element Method (SAFE)

1. はじめに

平板やパイプといった長尺材料に対する非破壊検査の手法として、ガイド波を用いた弾性波検査が導入されている。ガイド波は境界で囲まれた部分を長手方向に伝搬するために、振動エネルギーの散逸が少なく、数十メートル以上伝搬することが報告されている[1]。このような利点がある反面、ガイド波は分散性や重畳性を呈するため、ガイド波検査の事例の多くは、形状や大きさにあわせた超音波領域(数十 kHz~数 MHz)の送受信プローブを専用設計し、伝搬モードを予め予測して検査を行っている。しかし、土木構造物を対象とする場合、現場毎に部材形状や大きさが異なるため、専用のプローブを個々に作るのは経済的ではなく、波動の入力(シグナル強度や周波数等)については現場で調整できるようにするのが望ましい。また、広範囲にわたって計測する場合には、装置の配線等が煩雑ではなく、ポータブルかつシンプルな装置構成である必要がある。

大型構造部材に対してガイド波検査を適用するために、インパクトハンマで弾性波を発生し、無線ネットワーク内に配置した加速度センサで多点受信する方法[2]が検討されている。さらに、多点計測の利点を生かして、ガイド

波の伝搬状況を 3 次元的に可視化することも試みられている。ガイド波を可視化するためには、加速度センサで得られた信号を積分して変位に換算し、これを多点で同時に行わなければならない。そのためには、複数のセンサを用意するためにコストが増大すること、多数のセンサの同期精度を保証するためにシステムが複雑化すること等が問題として挙げられる。そこで、本研究では、動弾性問題に対する相反性を利用して、多点で加振したガイド波を 1 つのセンサで受信することを考える。I 型部材に対して衝撃加振を行い、一点加振多点計測によるガイド波の可視化結果と多点加振一点計測による結果を比較する。ここでは、同一の系に対する相反定理を用い、加振点と受信点の仕事量が等しいとする 2 点間の関係式を整理することで、特定の方向の波形が一致することを示す。また、本手法によって計測した波形を 2 次元フーリエ変換することで、I 型部材の分散曲線を求める。実験で求めた分散曲線と、半解析的有限要素法 (Semi-analytical finite element: 以下 SAFE) [3]を用いて数値的に求めた分散曲線とを比較し、本手法によってガイド波の伝搬モードが精度良く得られることを示す。

2. 動弾性問題における相反定理

動弾性問題において、以下の運動方程式を満たす変位 u^1 , u^2 と、表面力 t^1 , t^2 を考える。

連絡先: 中畑和之、〒790-8577 松山市文京町3
愛媛大学大学院理工学研究科生産環境工学専攻
E-mail: nakahata@cee.ehime-u.ac.jp

$$\frac{\partial t_k^1}{x_k} = -\rho\omega^2 u^1 - f^1 \quad (1)$$

$$\frac{\partial t_k^2}{x_k} = -\rho\omega^2 u^2 - f^2 \quad (2)$$

ここで、応力テンソルを τ_{kl} 、基準座標系を示す単位ベクトルを e_l とすると $t_k = \tau_{kl}e_l$ である。また、 ρ は密度、 ω は角周波数、 f は物体力である。上式(1)と(2)に、 u^2 と u^1 をそれぞれ作用させて積分し、ガウスの発散定理を適用すると、

$$\int_V (f^1 \cdot u^2 - f^2 \cdot u^1) dV = \int_S (t_k^1 n_k \cdot u^1 - t_k^2 n_k \cdot u^2) dS \quad (3)$$

を得る。ここで n は単位法線ベクトルである。物体力を無視すれば、式(3)は、

$$t^2(n) \cdot u^1 = t^1(n) \cdot u^2 \quad (4)$$

となり、相反関係が得られる。

3. 多点加振によるガイド波計測

3.1 ワイヤレス計測システム

配線が困難である長尺な構造部材に適用することを考え、無線通信を利用した計測システムを構築した。装置の概要を Fig.1 に示す。このシステムは無線センサノード（センサ、A/D 変換器、GPS モジュール）と基地局（無線 LAN ルータ、ノート PC）から構成される。本研究では、2つの無線センサノードを使用する。1つは、衝撃加振するためのインパクトハンマ（富士セラミックス社製 FHA2KC）であり、ハンマの衝撃力を内部にとりつけたセンサで計測できるようにしたものである。もう1つは、衝撃試験により発生したガイド波を受信するための圧電型3軸加速度センサ（富士セラミックス社製 SA11ZSCA、周波数レンジ：0.5-1.5 kHz、電圧感度：1.0 mV/m/s²、加速度レンジ：±5000 m/s²、質量：4.4 g）を取り付けている。センサから得られたアナログ信号は、データ転送器の AD 変換器（ナショナルインスツルメンツ社製 NI WLS-9215）において、サンプリングレート 10 kHz でデジタル変換され、基地局の無線 LAN ルータを介してノート PC に送信される。ノイズを除去するため、加速度波形に 50 ~ 50000 Hz のバンドパスフィルタを作用させた。この波形を数値積分し、変位に変換した。

3.2 試験体と計測位置

ガイド波の可視化に用いた試験体を Fig.2(a)に示す。材質がアルミニウム（縦波音速：6300 m/s、横波音速：3100

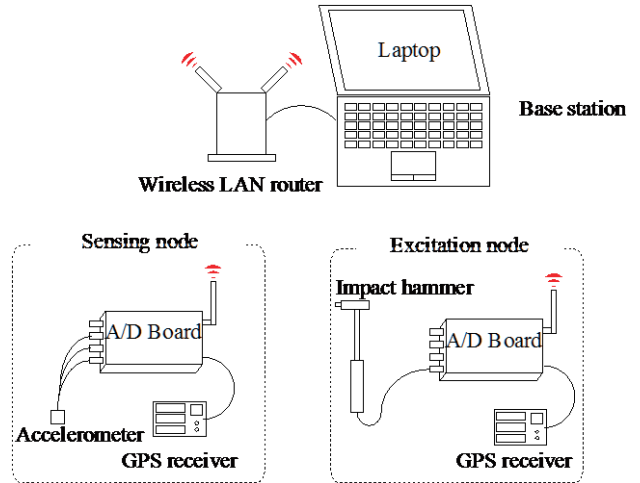
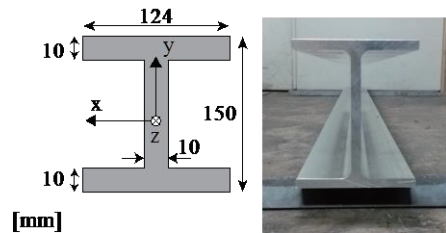


Fig.1 The Guided wave measurement system comprised a hammer sensor node, receiving sensor node, a wireless LAN router and a mobile laptop.

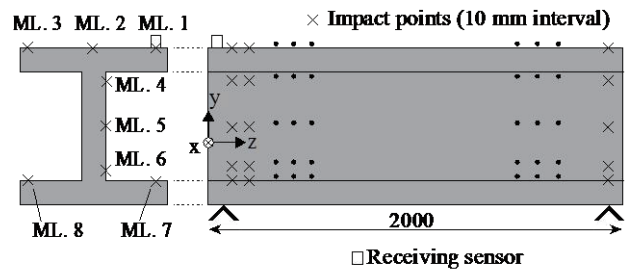
m/s、密度：2700 kg/m³）である I 型の長尺部材である。試験体の両端から 50 mm 内側の箇所に山形鋼を置き、その上に I 型部材を乗せることで、部材を単純支持している。Fig. 2(b)に示すように、1 列あたり長手方向に 10 mm 間隔で計 198 点で加振する。ここでは計測列(ML)1 から 8 までの計 8 列の加振点を設けた。受信点は ML.1 の端部の 1 点である。

4. 計測結果

4.1 相反性の検証



(a)



(b)

Fig.2 (a) Geometry of I-beam aluminum specimen; (b) impact points and sensor location on measuring lines (MLs) 1 to 8.

相反性を検証するために、加振点と受信点を入れ替えた場合の応答変位の波形を比較する。比較した位置は、Fig. 3に示すようにML.2, 5, 7における、それぞれ左から1000mmの計測点にあるB, C, Dである。Fig. 3(a)に示すように、B, C, Dで加振し、Aで受信した波形をFig. 4(a)～(c)に赤の破線で示す。一方、加振点と受信点を逆にした場合、すなわちAで加振し、B, C, Dで受信した場合の波形を青の実線で示す。ここでは、インパクトハンマに付属するセンサで得られた最大の加振力で変位を除し、正規化している。Fig. 4(a)と(c)に示すように、ML.2と7ではy方向の変位がよく近似していることがわかった。また、Fig. 4(b)に示すようにML.5ではx方向の変位がほぼ一致した。これ以外の方向の変位にはあまり相関が見られなかった。

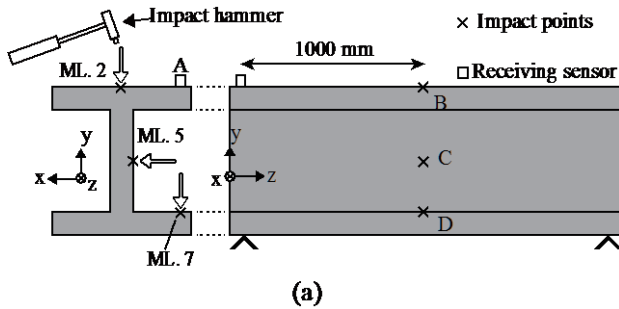
これは次のように考えられる。式(4)の相反関係をインデックス表記すると以下ようになる。

$$t_x^2 u_x^1 + t_y^2 u_y^1 + t_z^2 u_z^1 = t_x^1 u_x^2 + t_y^1 u_y^2 + t_z^1 u_z^2 \quad (6)$$

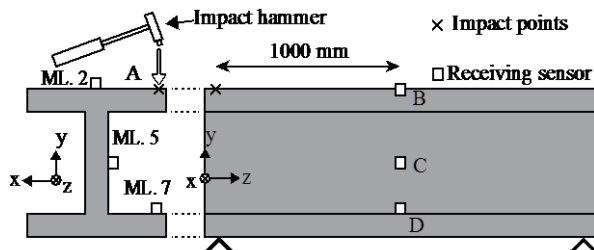
いま、ML.2で加振した場合を考える。ハンマは鉛直方向に振り下ろしているため、加振力は $t_y \gg t_x, t_z$ となる。従って、 $t_x/t_y \ll 1$, $t_z/t_y \ll 1$ となる。また、加振力は一定と仮定すると、 $t^1 = t^2$ となるので、上式は

$$u_y^1 = u_y^2 \quad (7)$$

となる。すなわち、加振点と受信点を反転させた場合、は



(a)



(b)

Fig.3 (a) One point measurement of guided wave excited at positions B, C, and D. (b) Multi-points measurement of guided wave excited at position A.

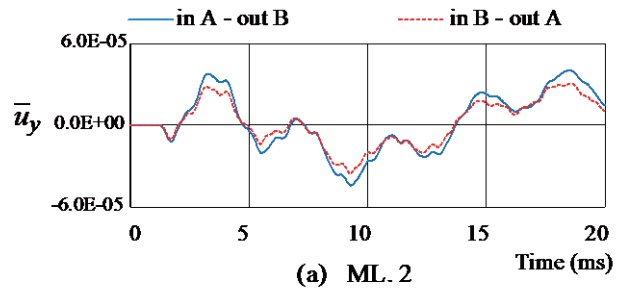
y方向の変位についてのみ等しくなると考えられる。同様に、ML.5で加振したときには、x方向の加振力が卓越するので、

$$u_x^1 = u_x^2 \quad (8)$$

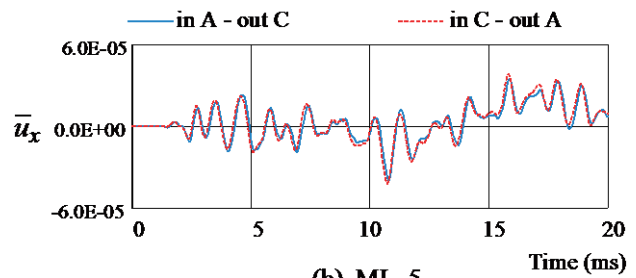
が成立する。従って、加振方向と同方向の変位が等しくなることが相反性から導かれるが、その他の方向の変位の等価性については、この加振方法では保証されない。

4.2 ガイド波の可視化

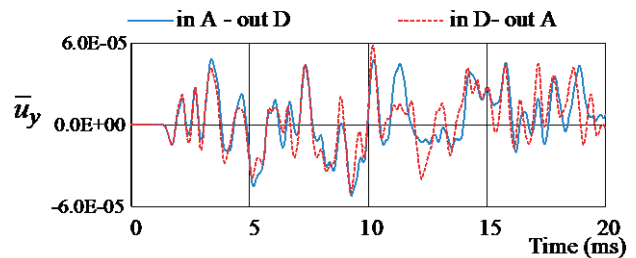
多点加振一点計測 (Fig.2(b)のセンサとハンマの配置) によって得られた全ての加速度波形を変位に換算し、それを3次元的に可視化した結果をFig. 5に示す。Fig. 5のカラーマップは変形量の大きさ $|u|$ を表している。これは、ML.1の端部を加振した場合に、I型部材の各点に配置したセンサによって得られたガイド波の伝搬を表したものに相当する。上フランジを加振しているが、波動は直ちにしたフランジまで伝搬し、さらに長手方向にガイド波と



(a) ML. 2



(b) ML. 5



(c) ML. 7

Fig.4 Comparison of measured signals in the case that the positions of transmission and reception are replaced, (a) ML.2, (b) ML.5, and (c) ML.7.

なって伝搬する。次節では、各点で得られた信号からガイド波の分散曲線を算出する。

4.3 分散曲線

各センサで得られる時間波形は、空間と時間の2次元の離散データである。この2次元データをフーリエ変換することにより、周波数と波数の2次元領域に変換する。Fig. 6(a), (b), (c)に実験で得られた分散曲線をカラーコンターで示す。同図にはSAFEによる数値シミュレーションで得られた結果を黒点で示している。Fig. 6(a)と(c)はML2と7のy方向変位から求めており、Fig. 6(b)はML5のx方向変位から求めている。ここで、 \bar{H} はそれぞれの周波数の最大値で正規化したものを表している。10kHz付近までガイド波の有意な伝搬モードが観測されており、計測列で異なる分散曲線が現れていることがわかる。SAFEは、その周波数に存在しうるすべての伝搬モードを計算・出力する。一方、実験ではその一部しか現れていないが、これは、入力の仕方やセンサ位置によっては、励起されないガイド波のモードが存在することを示唆している。

5. 結言

本研究では、相反性に基づく多点加振一点計測によるガイド波の可視化計測の有効性について検討を行った。一点加振多点計測との比較を行った結果、加振方向と同方向の変位が一致し、その理由について考察を行った。得られた可視化結果から、ガイド波の伝搬モードを抽出した。実験で得られた分散曲線と、SAFEによって求めた分散曲線は良好に一致したことから、本計測法の有効性が確かめられた。

参考文献

- [1] 田昂亮, 岡崎広大, 杉浦壽彦: 電磁超音波探触子を用いたワイヤロープの探傷(ガイド波の伝搬実験及び磁場解析), 日本AEM学会誌, Vol.23, No.1, pp.125-130, 2015.
- [2] K. Nakahata, T. Takamoto, N. Saitoh, Guided wave testing of a structural component by multipoint sensing with wireless accelerometers, Insight, Vol.59, No.2, pp.77-80, 2017.
- [3] T. Hayashi and J. L. Rose, Guided wave simulation and visualization by a semi analytical finite element method, Materials Evaluation, Vol.61, No.1, pp.75-79, 2003.

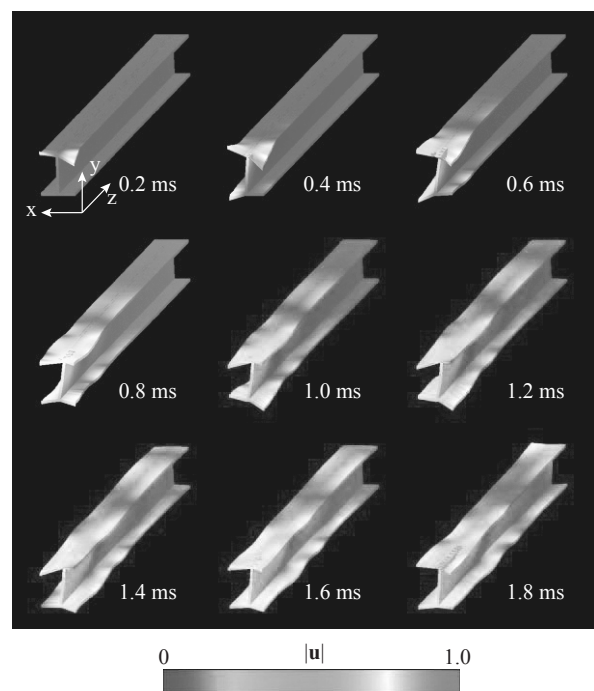


Fig.5 Visualization result of guided wave propagation.

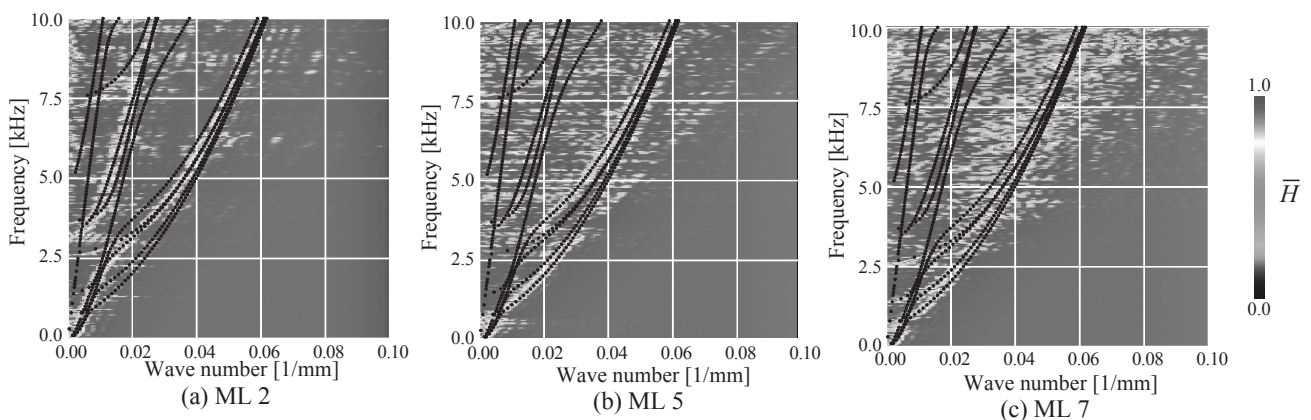


Fig.6 Calculated dispersion curves (black dots) by the SAFE method and experimental dispersion curve (color illustration) using waveforms measured on (a) ML.2, (b) ML.5, and (c) ML.7.