

PC 鋼材破断検出に向けた音響モニタリングシステムの開発

長岡技術科学大学 構造研究室 上原繁輝
指導教員 長井正嗣

1. はじめに

周知の通り、橋梁の老朽化が急速に進行している。研究対象の妙高大橋においても、同一断面で多くのPC鋼材の破断が確認された。そこで、PC鋼材の破断を合理的にモニタリングする方法が求められている。著者らは、これまで、PC橋のPC鋼材破断検出に向けて音響モニタリングシステムの開発を進めている¹⁾。本報では、音源位置同定を目的とした取り組みについて報告する。

2. 音響モニタリングシステム概要

図1に、開発を進めている音響モニタリングシステムを示す。本システムは、弾性体中を伝播する音を収録する入力部、計測プログラムの動作と入力された信号の解析を行う計測・解析部、インターネットに接続する通信システム部から構成される。本システムに改善を加えた点について述べる。

2.1 多チャンネル化

PC 鋼材破断音の音源位置同定を可能とするため、多チャンネル接続可能な NI 製 4 チャンネル A/D コンバータの NI9225 を用いた(図2)。電圧計測タイプ、分解能 16 ビット、サンプリングレートは 100ks/秒である。また、PC とのデータ通信は USB ケーブルで行い、電源供給はバスパワーである。

2.2 計測データの蓄積・リアルタイムでのデータ取得

ネットワーク環境が十分に整備されていない現地で、リアルタイムでのデータ取得に向けて、ネットワーク構成とデータ保存法について検討した。

無線ルータ

本検討では、通信可能エリアとデータ通信速度を総合的に勘案して、モバイル無線ルータを使用することとした(図3)。妙高大橋における

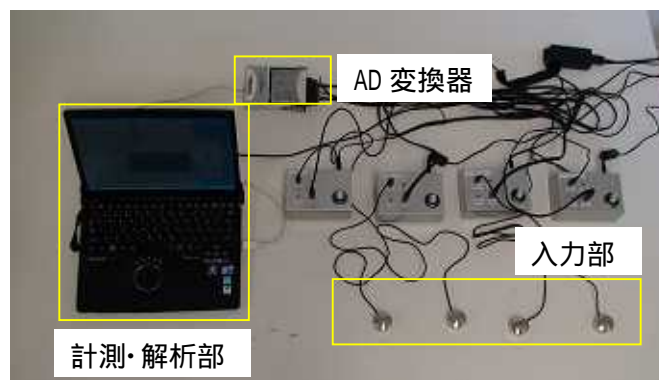


図1 音響モニタリングシステム



図2 A/Dコンバータ

図3 無線ルータ



図4 妙高大橋 通信エリア

通信速度のベストエフォートは、下り(受信時)最大 42Mbps、上り(送信時)最大 5.8Mbps である。通信エリア(2012年12月)を図4に示す。

オンラインストレージ

オンラインストレージとは、クラウドコンピューティングの技術の一つであり、ネットワーク上のサーバにデータを蓄積するサービスである。クライアントソフトを、現場の PC と遠隔地の PC の双方にインストールすることで、ネットワークを介してデータを同期し、ローカルドライブやフォルダに保存されたデータをアップデートまたはダウンロードすることが可能となる。このオンラインストレージにデータを保存することで、遠隔地で現場データの取得が可能となる。本システムでは、データ容量の圧縮のために、計測・解析プログラムから出力され

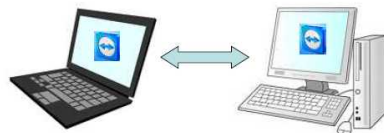
た時刻歴波形を JPEG 形式の画像データとしてオンラインストレージに保存する。

遠隔操作プログラム

ネットワークを通じて、現地に設置した PC を外部から制御するために、フリーの遠隔操作プログラムを利用した。利用した遠隔操作プログラムは、非営利目的の運用に対して無償公開しているソフトウェア“TeamViewer”である。このソフトウェアを現地大容量かつ電源供給がバスパワータイプとし、本システムで採用した外付 HDD の記録容量は 2TB である。これにより遠隔地から現地の PC を直感的に操作することが可能となる。また、データのアップデート、

遠隔操作プログラム

ダウンロード後、操作したい IID とパスワードを入力することで、遠隔的にアクセスが可能となる



現地計測PC側 モニタリング・操作側

遠隔地側と操作側の
両方に事前にダウンロードが必要

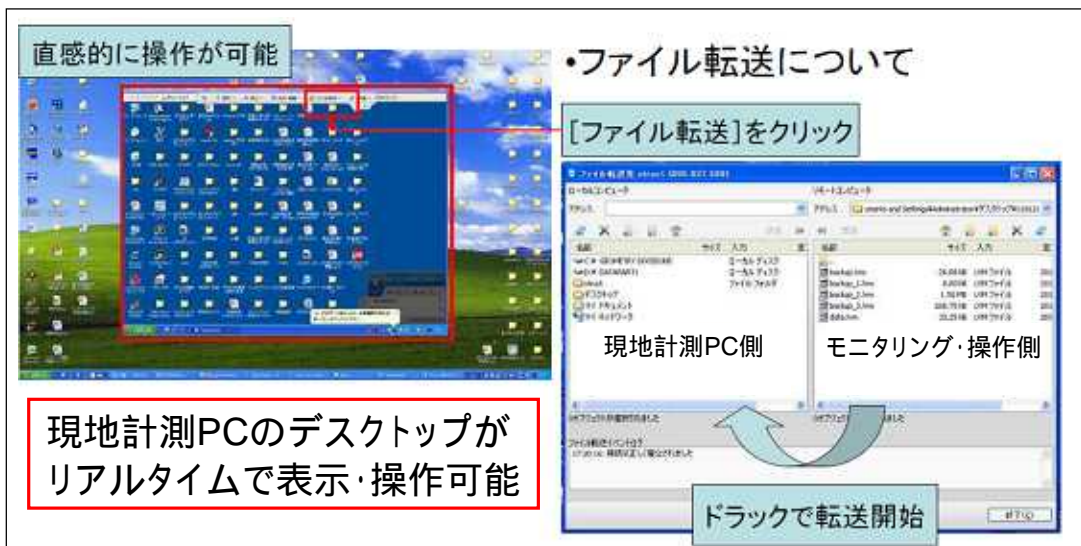


図 5 遠隔モニタリングプログラム

ダウンロードも可能である。(図5)。

計測の手順

- (1) 現地に設置した PC で計測を開始する。
- (2) 指定された時間で計測を実施する。計測データの時刻歴波形とそのフーリエ振幅が表示され、それらの画像データが無線ルータを介してオンラインストレージに JPEG 形式で保存される。計測データは TDMS 形式で、外付け HDD に保存される。
- (3) 計測を終了しない場合は (2)～(4)を繰り返し、継続的にデータが蓄積される。
- (4) 遠隔地の PC で、オンラインストレージに保存された画像データを定期的にチェックし、変状の有無をモニタリングする。
- (5) 変状が発見された場合、遠隔操作プログラムを利用して、外付け HDD に保存された計測データをダウンロードする。データの詳細分析から、状態評価を行う。

3. 音源位置同定手法

3.1 定式化

コンクリートマイクで、コンクリート内部を伝播する音の発生位置を同定するために、3次元の音源位置同定手法の定式化を行う。ここでは、音源と各マイクの距離が、弾性波速度と各マイクにおける音の検出時刻の積に等しいことを利用する。未知数を音源の3次元座標 (x_0, y_0, z_0) と音の発生時刻 t_0 とする。また、既知数を弾性波速度 V 、マイクの3次元座標 (x_i, y_i, z_i) 、マイクにおける音の到着時刻 t_i とする $(i = 1 \sim N)$ 、 N はマイク数である。

いま、マイク i について、音源とマイク間の距離について以下の関係式が成立する。

$$\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2} = V(t_i - t_0) \quad (1)$$

しかし、計測には不確実性があることから、以下の残差は一般に0とはならない。

$$r_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2} - V(t_i - t_0) \quad (2)$$

マイク $i = 1 \sim N$ について上式を計算し、残差の二乗和が最小となるように、未知数 (x_0, y_0, z_0) 、 t_0 を決定する。ただし、上式の残差は未知数について非線形関数であることから、収束計算を伴う非線形最小二乗法を行う必要がある。まず、未知数 (x_0, y_0, z_0) 、 t_0 を仮定し、未知数の補正量 $(\Delta x_0, \Delta y_0, \Delta z_0)$ 、 Δt_0 を次式から求める。

$$\begin{bmatrix} \sum \frac{\partial r_i}{\partial x_0} \frac{\partial r_i}{\partial x_0} & \sum \frac{\partial r_i}{\partial x_0} \frac{\partial r_i}{\partial y_0} & \sum \frac{\partial r_i}{\partial x_0} \frac{\partial r_i}{\partial z_0} & \sum \frac{\partial r_i}{\partial x_0} \frac{\partial r_i}{\partial t_0} \\ \sum \frac{\partial r_i}{\partial y_0} \frac{\partial r_i}{\partial x_0} & \sum \frac{\partial r_i}{\partial y_0} \frac{\partial r_i}{\partial y_0} & \sum \frac{\partial r_i}{\partial y_0} \frac{\partial r_i}{\partial z_0} & \sum \frac{\partial r_i}{\partial y_0} \frac{\partial r_i}{\partial t_0} \\ \sum \frac{\partial r_i}{\partial z_0} \frac{\partial r_i}{\partial x_0} & \sum \frac{\partial r_i}{\partial z_0} \frac{\partial r_i}{\partial y_0} & \sum \frac{\partial r_i}{\partial z_0} \frac{\partial r_i}{\partial z_0} & \sum \frac{\partial r_i}{\partial z_0} \frac{\partial r_i}{\partial t_0} \\ \sum \frac{\partial r_i}{\partial t_0} \frac{\partial r_i}{\partial x_0} & \sum \frac{\partial r_i}{\partial t_0} \frac{\partial r_i}{\partial y_0} & \sum \frac{\partial r_i}{\partial t_0} \frac{\partial r_i}{\partial z_0} & \sum \frac{\partial r_i}{\partial t_0} \frac{\partial r_i}{\partial t_0} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta x_0 \\ \Delta y_0 \\ \Delta z_0 \\ \Delta t_0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sum r_i \frac{\partial r_i}{\partial x_0} \\ \sum r_i \frac{\partial r_i}{\partial y_0} \\ \sum r_i \frac{\partial r_i}{\partial z_0} \\ \sum r_i \frac{\partial r_i}{\partial t_0} \end{Bmatrix}$$

未知数の補正量 $(\Delta x_0, \Delta y_0, \Delta z_0)$ 、 Δt_0 が、収束条件を満足するまで、未知数の更新を行い、上記の計算を繰り返すことで音源位置を得る。

3.2 検証実験

前節で示した音源位置同定手法の妥当性を検証するために室内実験を実施した。本実験では、基礎実験として、2次元の音源位置同定を行う。このため未知数は音源の2次元座標 (x_0, y_0) と音の発生時刻 t_0 となるので、最低3台のコンクリートマイク用いれば未知数の同定が可能となる。図6に示すように180mm厚のコンクリート床の上に、4台のコンクリートマイクを2m×2mの正方形の頂点に設置し、養生テープを用いて固定した。提案する音源位置同定手法では、マイクの座標値は既知でなければならないため、座標の原点をこの正方形の中央と定め、各コンクリートマイクの座標を $(-1, -1)$ 、 $(1, -1)$ 、 $(1, 1)$ 、 $(-1, 1)$ とした。ただし、単位はメートルである。本研究では、この2m×2mの正方形の領域での音源同定を目的とする。また、PC鋼材の破断による音の発生は、インパルス

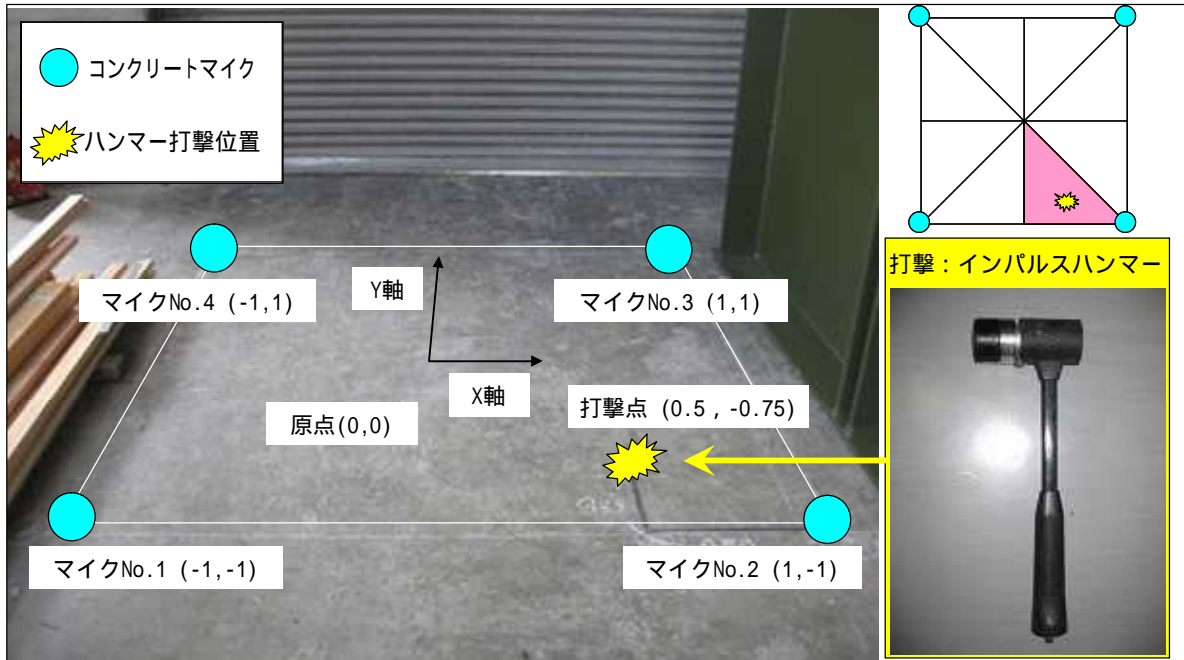


図6 室内実験概要

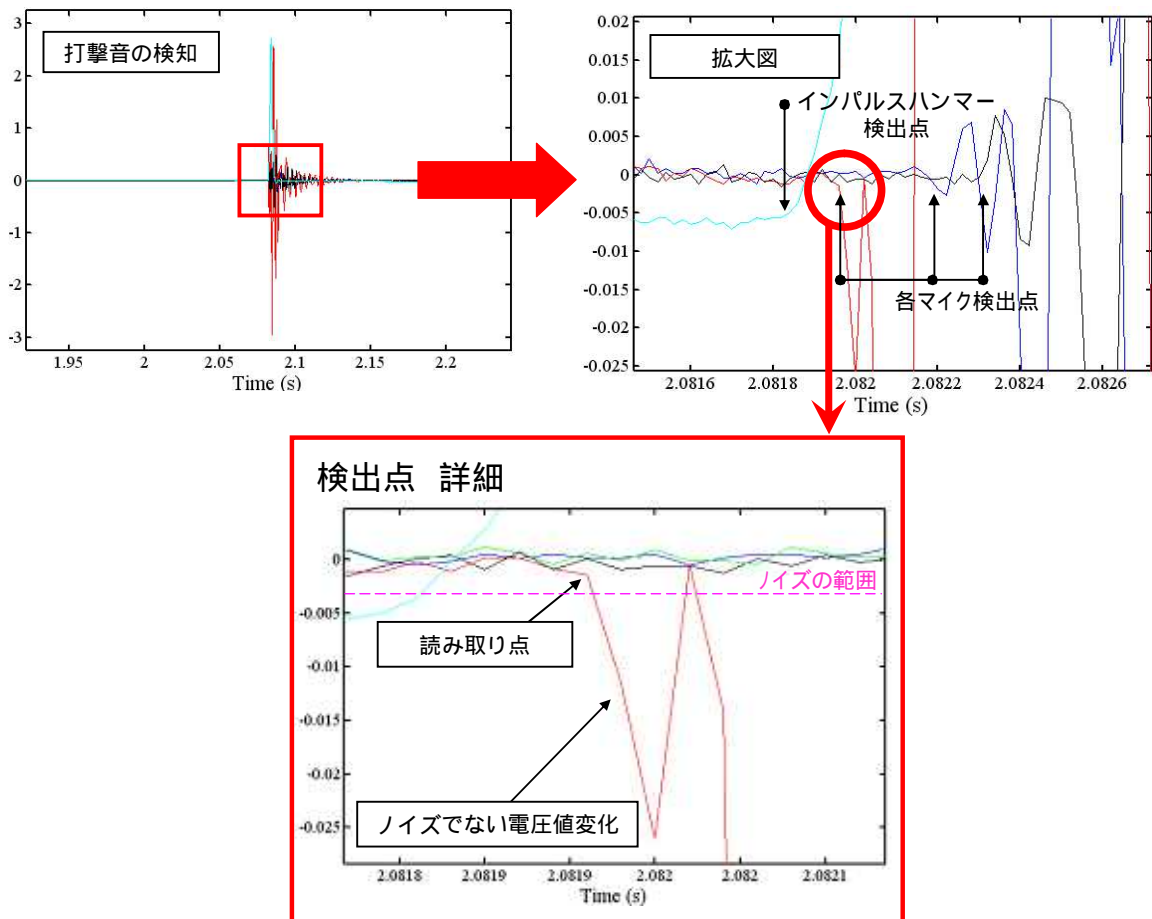


図7 検出点の定義

表 1 弾性波速度

データNo.	マイクNo.	伝播速度[m/s]	平均速度	マイクの座標	打撃位置との距離 [m]
1	1	3802	4257	(-1, -1)	1.521
	2	4658		(1, -1)	0.559
	3	3957		(1, 1)	1.820
	4	4610		(1, -1)	2.305
2	1	4224	4170	(-1, -1)	1.521
	2	4658		(1, -1)	0.559
	3	3957		(1, 1)	1.820
	4	3841		(1, -1)	2.305
3	1	4752	4629	(-1, -1)	1.521
	2	5590		(1, -1)	0.559
	3	4333		(1, 1)	1.820
	4	3841		(1, -1)	2.305

ハンマーによる打撃で模擬することにし、打撃点の座標を(0.5, -0.75)とした。本実験のサンプリング周波数は50,000Hzとし、計測回数を3回とした。計測時の気温は29.2℃、コンクリートの表面温度は27.8℃であった。

3.3 弾性波速度の計測

定式化で示したように、音源位置同定で用いるコンクリート内部を伝播する弾性波速度 V は、既知である必要がある。このため、弾性波速度は事前計測(キャリブレーション計測)から算出することとした。ハンマーの打撃位置と各コンクリートマイクの直線距離を、各コンクリートマイクが音を検出する時刻 t_i とハンマーの打撃時刻の差で除して弾性波速度を算出する。この算出した弾性波速度の平均を用いて位置同定の解析を行う。

本実験の分析では、室内実験で計測された時刻歴波形における立ち下がり点を音の検出時刻 t_i とした。図7に、この立ち下がり点の具体的な読み取り方法を示す。図7における赤、黒、青の波形は各マイクを、水色の波形はインパルスハンマーの時刻歴波形を示している。インパルスハンマーの打撃により、水色の波形が途中で急変化していることがわかる。その後、時間

において赤、青、黒の各マイクの波形が変化をしている。この変化点が、打撃音の各検出点となる。検出点とノイズの区別をするため、以下のようにして検出点を定義した。まず、無音の状態でもマイクが出力するノイズの電圧値の最大値と最小値を事前に調べ、その範囲を超える電圧値を基準とする。この基準となるノイズでない電圧値変化点の1つ前の時刻を読み取り、検出点とする。以上の方法から算出された弾性波速度 V の結果を表1に示す。同定された弾性波速度を比較すると、最大で459m/sの差がある。この原因としてデータの読み取り誤差がある。いま、時刻歴波形の読み取りデータが1つずれた場合を考える。サンプリング周期は50,000Hzであるため、時刻の誤差は20 μ sとなる。打撃位置に最も近いNo.2のコンクリートマイクでは、音源からの伝播時間を平均すると113.3 μ sであった。打撃位置とこのコンクリートマイクの直線距離は0.5590mであることから、弾性波速度は4933m/sである。読み取りデータが1つずれた場合、伝播時間は133.3 μ sとなり、弾性波速度は4194 m/sである。この弾性波速度の差は739m/sである。

3.4 同定結果

前節の事前計測から算出された弾性波速度の平均値 4,352m/s を用いて、音源位置の同定を行うこととする。データの読み取り値を表 2 に示す。収束計算の初期値は音源位置(x_0, y_0)を(0,0)、音の発生時刻 t_0 を 0s とし、収束条件は補正量 ($\Delta x_0, \Delta y_0$), Δt_0 が 10^{-6} 以下となることとした。表 3 に、音源位置の同定結果と正解に対する誤差を示す。また、音源位置と同定結果の位置関係を図 8 に示す。グラフの縦軸、横軸はコンクリート床上の座標を表している。音源位置の正解を○で示し、同定された位置を▲で示している。同定誤差の最大値は、X 軸方向で 120.1mm、Y 軸方向で 155.4mm となった。収束回数は全てのデータで 4 回となった。誤差の原因としては、データの読み取り精度、弾性波速度の同定精度などが挙げられる。

3.5 同定精度の検証

位置同定精度の向上に向けた取り組み前節から、データの読み取り精度が、音源位置同定に影響を与えることが分かった。読み取り誤差が発生する原因として、ノイズと検知点の区別の判断が難しいことが挙げられる。検知点の読み取りを容易とするため、ノイズを除去し、サンプリング点間を円滑化する必要がある。

そこで、バンドパスフィルターを用いた解析検討を行った。バンドパスフィルターにより、解析する周波数帯域を限定することで波形を滑らかにすることが期待できる。周波数通過帯域の設定は、PC ケーブルの破断音の周波数特性から決定することが望ましい。しかし、現段階では破断音の周波数特性の断定に至っていない。このことから、本検討ではインパルスハンマーの打撃音を対象として周波数通過帯域を設定する。打撃音の周波数特性から、低周波数側は 200Hz を下限とし、高周波数側は 1,000Hz を

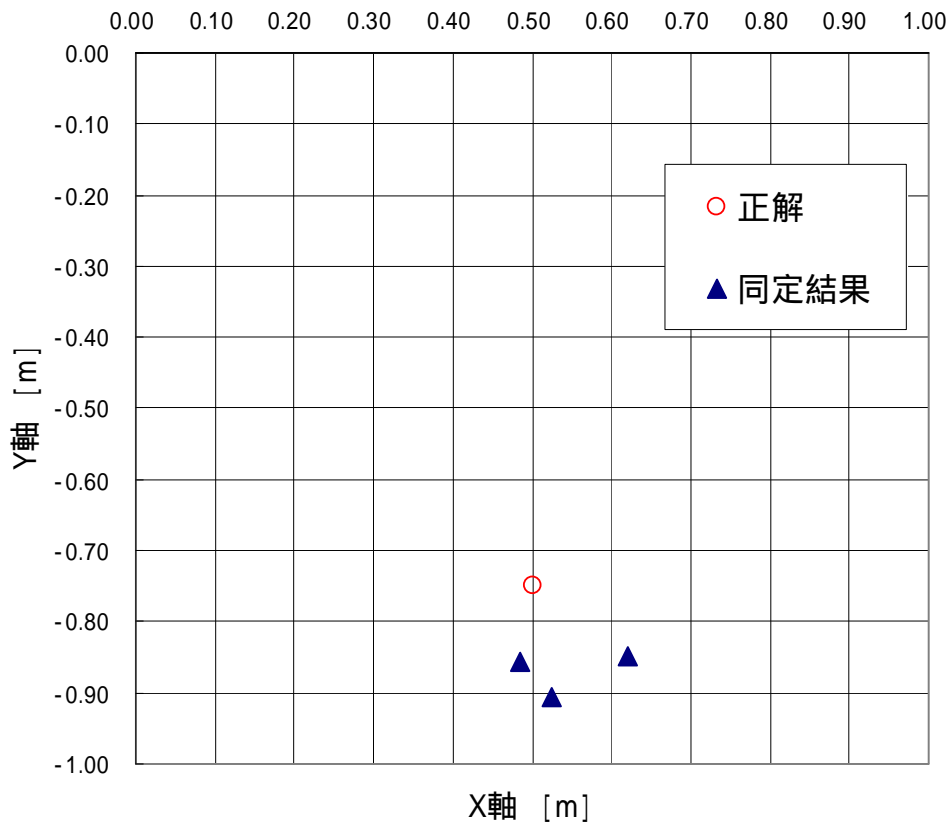


図 8 音源位置同定結果

表 2 データ読み取り値

データNo.	マイクNo.	音の検知時刻 [s]	ハンマーの打撃時刻 [s]	マイクの座標	打撃位置との距離 [m]
1	1	3.81046	3.81006	(-1, -1)	1.521
	2	3.81018		(1, -1)	0.559
	3	3.81052		(1, 1)	1.820
	4	3.81056		(1, -1)	2.305
2	1	5.99006	5.98970	(-1, -1)	1.521
	2	5.98982		(1, -1)	0.559
	3	5.99016		(1, 1)	1.820
	4	5.99030		(1, -1)	2.305
3	1	2.09330	2.09298	(-1, -1)	1.521
	2	2.09308		(1, -1)	0.559
	3	2.09340		(1, 1)	1.820
	4	2.09358		(1, -1)	2.305

表 3 音源位置同定結果

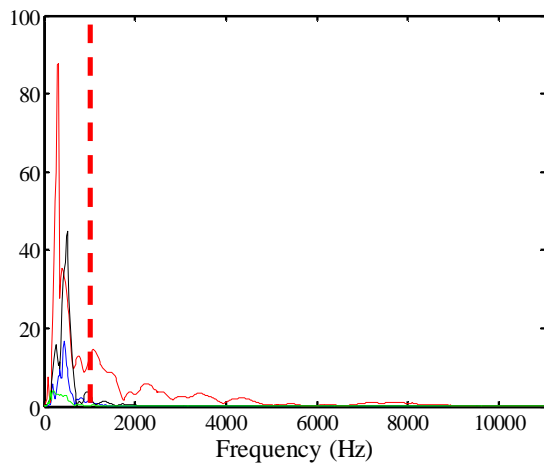
データ No.	X座標	X軸 誤差	Y座標	Y軸 誤差	直線距離
1	0.620	0.120	-0.850	0.100	0.156
2	0.525	0.025	-0.905	0.155	0.157
3	0.485	0.015	-0.857	0.107	0.108

上限とした。図 9 にインパルスハンマーによる打撃音の周波数特性の一例を示す。この周波数特性の再現性は、3 回の計測から確認している。このバンドパスフィルターを適用して、前節の弾性波速度を算出し直したところ、波形の読み取り精度が向上して、表 4 のような結果となった。以下の解析では、表 3 の平均値である 2,883m/s を用いることとする。位置同定精度の再検討として、図 11 (a) に示す 6 個の計測データを用いることとする。これはバンドパスフィルターを適用しなかった場合の同定結果である。バンドパスフィルターの適用による時刻歴波形の変化を図 10 に示す。時刻歴波形の静音部は計測ノイズとなる部分であるが、フィルターの適用前は電圧値で -2.0×10^{-3} から 2.0×10^{-3} の範囲であったものが、フィルターの適用後は -5.0×10^{-4} から 5.0×10^{-4} の範囲に低減された。また、時刻歴波形についても、フィルターの適用により波形が円滑化されていることが分かる。

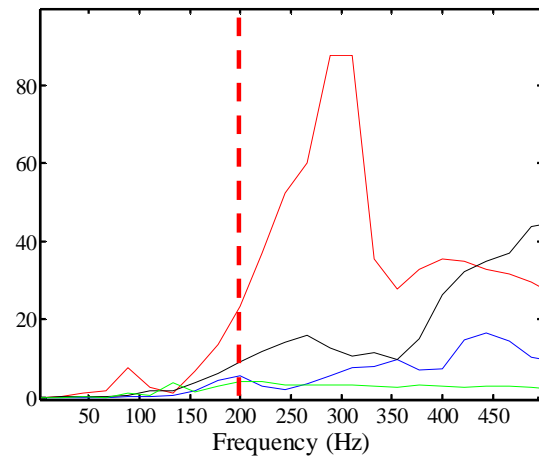
フィルター適用後の時刻歴波形の検知点は、計測ノイズの範囲 ($\pm 5.0 \times 10^{-4}$) を超えたものを変化点とし、その 1 つ前の計測データを読み取ることで決定した。図 11 に、フィルター適用前後の位置同定結果を示す。同図から同定位置のばらつきが改善されていることがわかる。位置同定の詳細を表 5 に示す。同表から、フィルター適用前の標準偏差は、X 座標値が 0.069m、Y 座標値が 0.178m であった。また、フィルター適用後の標準偏差は、X 座標値が 0.026m、Y 座標値が 0.061m となり、同定精度が改善されている。本検討により、音源位置同定の精度向上に向けては、時刻歴波形にバンドパスフィルターを適用して、波形の読み取り精度を向上させることが有効であることを確認した。しかし、ここではバンドパスフィルターの周波数通過帯域を 200 ~ 1,000Hz と仮定したが、本来は、PC 鋼材破断音の周波数特性から決定することが望ましい。これについては、今後の課題としたい。

表4 弾性波速度 (バンドパスフィルター適用後)

データNo.	マイクNo.	伝播速度 [m/s]	平均速度 [m/s]	マイクの座標	打撃位置との距離 [m]
1	1	2579	3002	(-1,-1)	1.521
	2	3082		(1,-1)	0.559
	3	3344		(1,1)	1.820
2	1	2794	3330	(-1,-1)	1.521
	2	4109		(1,-1)	0.559
	3	3087		(1,1)	1.820
3	1	2794	2914	(-1,-1)	1.521
	2	3082		(1,-1)	0.559
	3	2867		(1,1)	1.820
4	1	2395	2794	(-1,-1)	1.521
	2	3082		(1,-1)	0.559
	3	2905		(1,1)	1.820
5	1	2794	3073	(-1,-1)	1.521
	2	3082		(1,-1)	0.559
	3	3344		(1,1)	1.820
6	1	2395	2662	(-1,-1)	1.521
	2	3082		(1,-1)	0.559
	3	2508		(1,1)	1.820

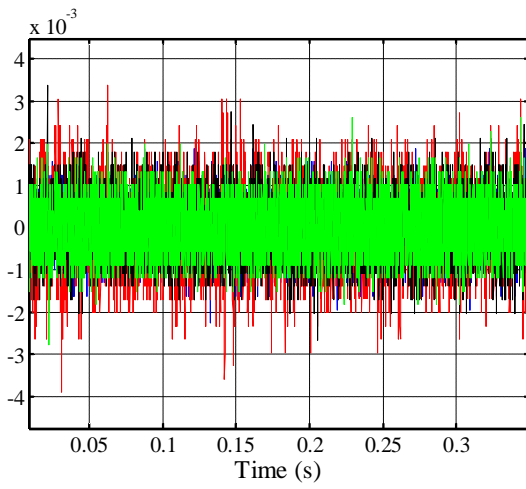


(a) 全体図

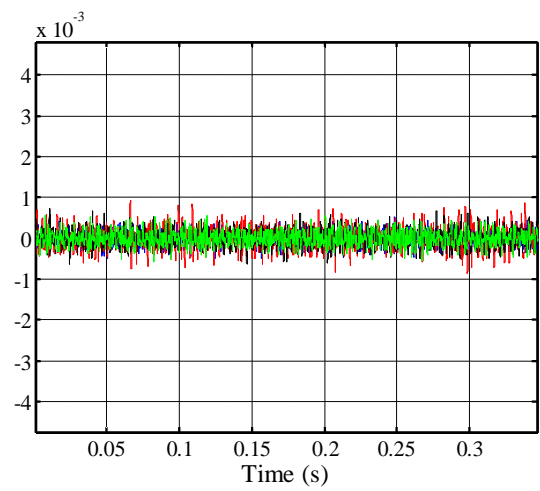


(b) 拡大図

図9 打撃音の周波数特性

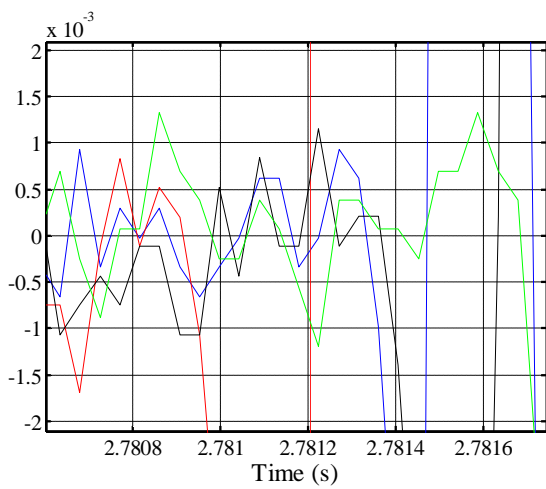


フィルター適用前

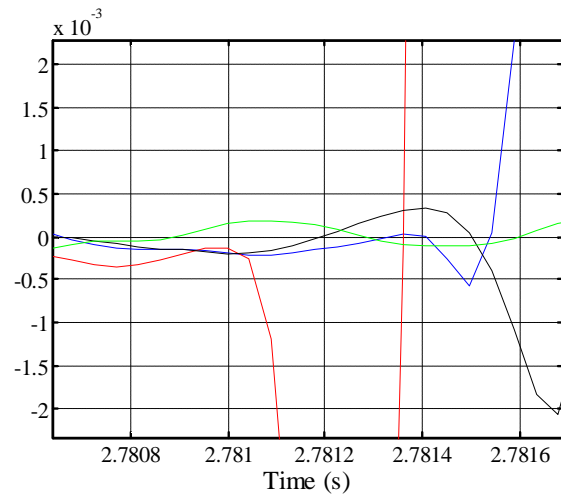


フィルター適用後

(a) 時刻歴波形 (静音部)



フィルター適用前



フィルター適用前

(b) 時刻歴波形 (拡大図)

図 10 バンドパスフィルターの効果

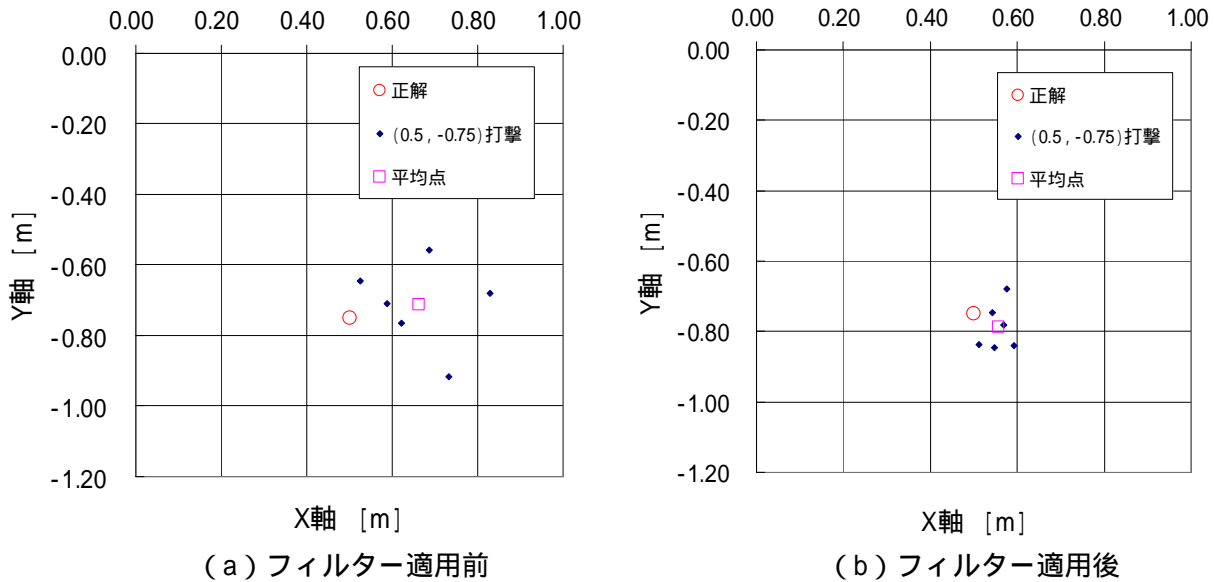


図 11 同定結果の比較

表 5 位置同定結果の詳細

バンドパス	データNo.	同定座標		誤差 [m]			母標準偏差 [m]		分散	
		x	y	x	y	直線距離	x	y	x	y
×	1	0.671	-0.484	0.171	0.266	0.316	0.069	0.178	0.004711	0.031775
	2	0.693	-0.727	0.193	0.023	0.194				
	3	0.609	-0.852	0.109	0.102	0.149				
	4	0.702	-0.585	0.202	0.165	0.261				
	5	0.833	-1.032	0.333	0.282	0.437				
	6	0.741	-0.796	0.241	0.046	0.245				
	1	0.548	-0.847	0.048	0.097	0.109	0.026	0.061	0.000683	0.003696
	2	0.543	-0.746	0.043	0.004	0.043				
	3	0.577	-0.680	0.077	0.070	0.104				
	4	0.511	-0.838	0.011	0.088	0.088				
	5	0.591	-0.840	0.091	0.090	0.128				
	6	0.569	-0.782	0.069	0.032	0.076				

4.まとめ

ここでは、PC ケーブルが破断した際の破断位置を同定するための基礎検討を行った。具体的には、複数台のコンクリートマイクによって、三次元的に音源位置を同定する手法の定式化を行った。提案手法の妥当性を検証するために、厚さ方向の影響を無視して二次元問題とした室内実験を実施した。実験結果から、時刻歴波形の読み取り精度が位置同定の精度に大きく影響することが分かった。このため、バンドパスフィルターを適用して、位置同定精度を向上させる検討を行った。この結果、屋内試験レベルではあるが、PC ケーブルの破断音を模擬し

た衝撃音の発生位置を 0.13m の範囲で同定することができた。今後の課題は、PC 鋼材破断音の周波数特性を反映したバンドパスフィルターの周波数通過帯域の設定と提案手法の三次元問題への適用検討などがあげられる。

参考文献

- 1) 稲葉将吾：橋梁の局所的な損傷検出に向けた振動・波動モニタリングに関する研究，pp4-47，2012.3