

音と振動で見る機械・インフラの健康診断

～ウェーブレット瞬時相関による異音検知と漏水特定～

造形学部 スマートデザイン学科 章 忠

1. はじめに

ウェーブレット変換は、対象に合わせて「マザーウェーブレット」を自在に設計できる柔軟性を持ち、非定常信号の精密解析を可能にします。本発表では、任意信号から構築する「実信号マザーウェーブレット」と、それをを用いた「ウェーブレット瞬時相関」の定義を解説します。さらに、自動車の異音探査や水道管の漏水特定への応用を通じ、音と振動による次世代の「機械・インフラの健康診断」の可能性を提示します。

2. ウェーブレット瞬時相関の定義とマザーウェーブレットの構築[1]

2.1 ウェーブレット変換の定義と条件

連続ウェーブレット変換は次式で定義されます。

$$w(a, b) = a^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \bar{\psi} \left(\frac{t-b}{a} \right) dt,$$

ここで、 $\psi(t)$ はマザーウェーブレット(MW)、 a は拡大・縮小、 b は時間シフトパラメータを表します。MWは「ゼロ平均」および「二乗ノルム正規」の条件を満たすことで、対象に合わせた自在な設計が可能となります。

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (\text{ゼロ平均の条件})$$
$$\int_{-\infty}^{\infty} |\psi(t)|^2 dt = 1 \quad (\text{二乗ノルム正規の条件})$$

2.2 複素数型実信号マザーウェーブレット(RMW)の構築

解析精度向上を目指し、実信号から複素数型MWを直接構築する手法を提案します。作成フローを図1に示します。

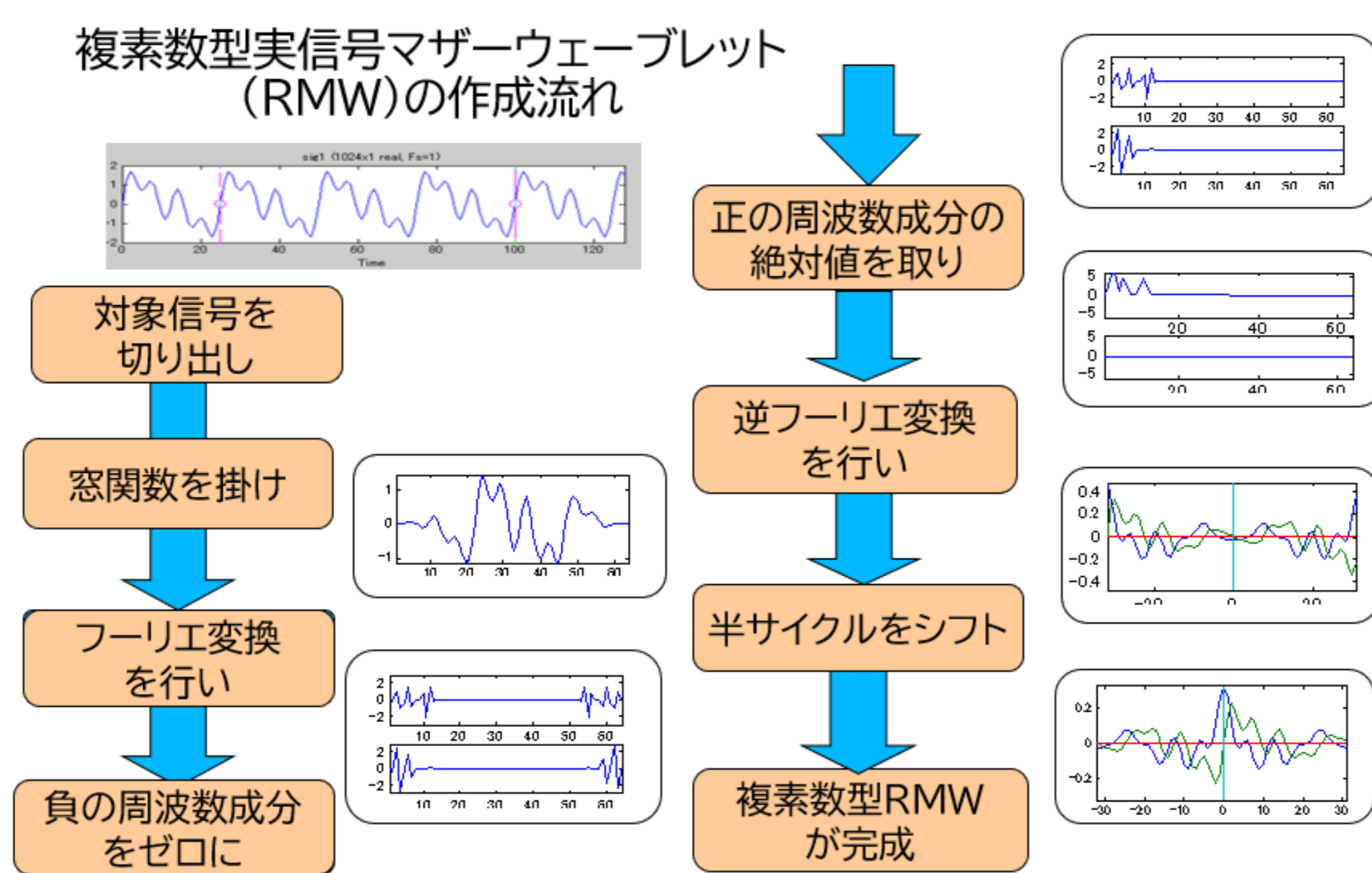


図1: 複素数型MWの作成流れ

手順: 1) 対象信号を切り出し、窓関数を乗じて平均値を削除し「実数型RMW」を構成。2) これをフーリエ変換し、負の成分をゼロ、正の成分を $\sqrt{2}$ 倍した後、逆フーリエ変換により「複素数型RMW」が完成します。 2.3 ウェーブレット瞬時相関(WIC)

ウェーブレット変換は相関解析の一種で、スケール $a=1$ で信号内のRMWと類似する情報をすべて抽出できます。この $W(a=1, b)=R(b)$ がRMWと信号のウェーブレット瞬時相関であり、次式で定義されます。

$$R(b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \overline{\psi(t-b)} dt$$

3. ウェーブレット瞬時相関を用いた自動車の異音探査[2]

3.1 背景と課題

低燃費な電動パワーステアリング(EPS)が普及する一方、静粛なハイブリッド車では路面入力による「ラトル音」が顕在化しています。この突発的な非定常騒音の解析には、時間・周波数解像度に優れたウェーブレット変換(WT)が極めて有効です。

3.2 解析手法: WICの適用

本研究では「ウェーブレット瞬時相関(WIC)」を用いた音源探査を提案します。まず車室内の騒音から実信号マザーウェーブレット(RMW)を構築。このRMWと各部の振動信号とのWICを算出することで、異音の発生タイミングと伝搬経路の相関を詳細に解析しました。

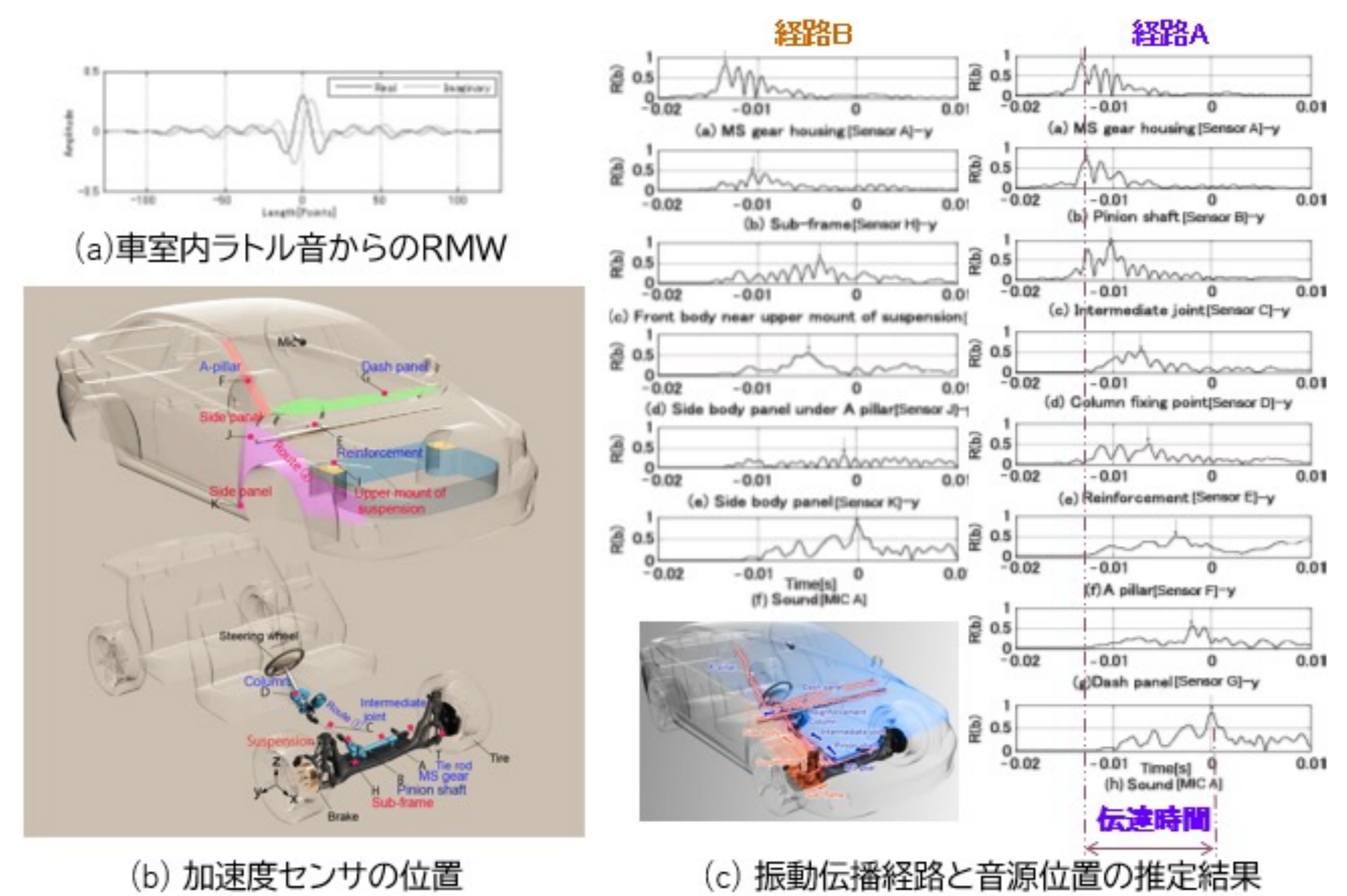


図2: 振動の伝播経路と音源探査の結果

(a) 実信号RMW: 車室内で採集したラトル音から構築したMW波形。(b) 経路とセンサ配置: ステアリング系(経路A)とサスペンション系(経路B)を想定し、加速度センサ(図中■)を配置。(c) 解析結果(伝播経路と音源位置): ステアリング系では経路に沿った時間遅れが確認され、主要な伝搬経路であることを特定。同時に、相関強度の比較により音源位置の推定も実現。

4. ウェーブレット瞬時相関を用いた水道管漏水位置の推定[3]

4.1 背景と課題

水道管の老朽化による漏水は、断水や地盤沈下を招く深刻な社会問題です。従来のフーリエ変換では都市部の環境ノイズに弱く、漏水の判別や位置特定において精度に課題がありました。

4.2 解析手法: WICの適用

本手法では、漏水音から構築したRMWを用います。このWIC解析により、複雑なノイズから微弱な信号を分離・抽出し、漏水の有無判定と発生位置の精密な推定を実現しました。

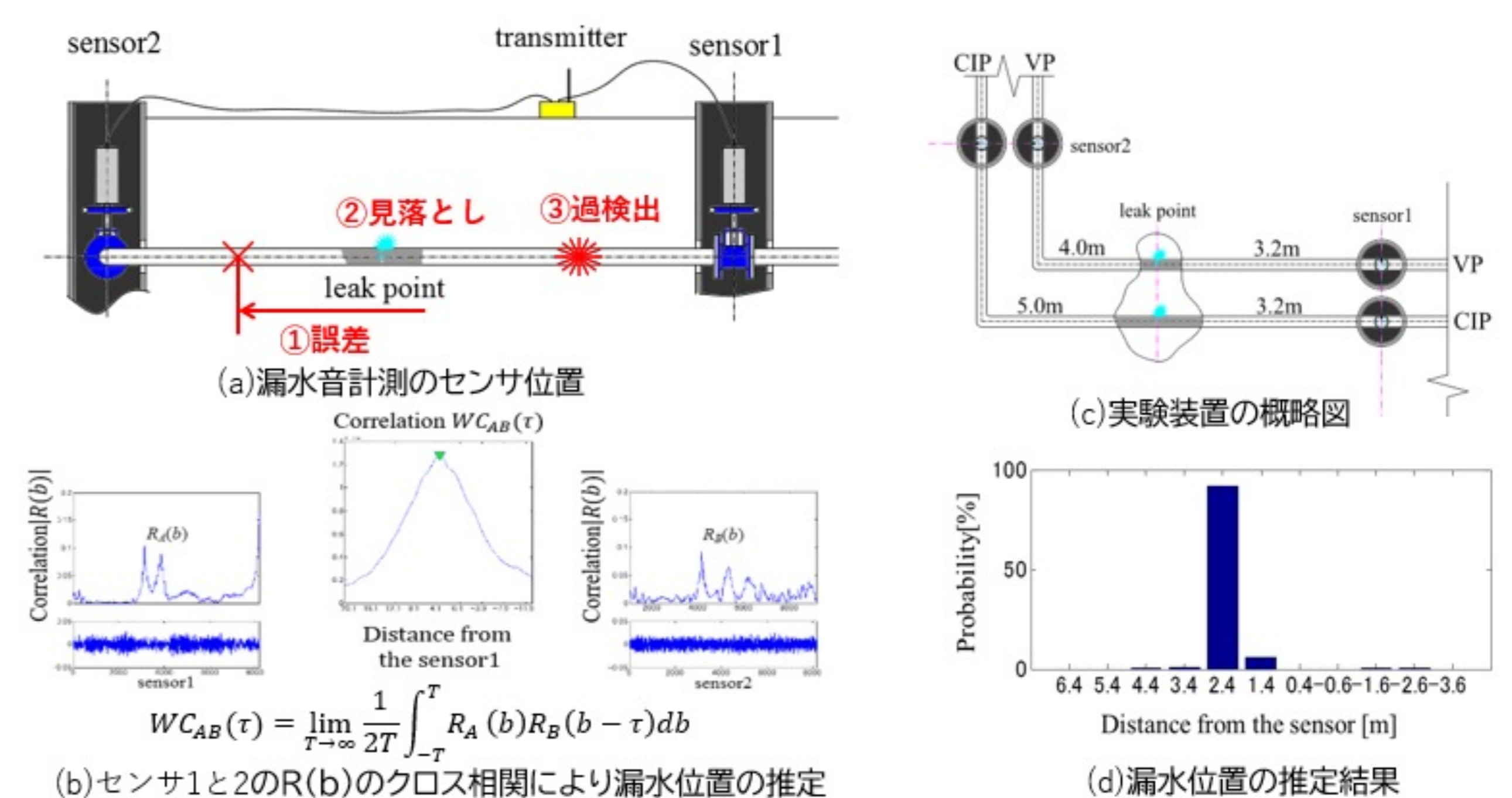


図3: 漏水位置推定の方法と推定結果

4.3 解析プロセスと推定結果

2つのセンサ信号から得た $R(b)$ 同士のクロス相関により、到達時間差 ΔT を特定します。この時間差に管内音速を乗じ、両センサ中央からの「ずれ」を算出することで漏水地点を特定します。実証実験では、鋳鉄管において1.0m以内の高精度な推定を実現しました。

参考文献

- [1] 章 忠, 他5名, 実信号マザーウェーブレットおよびその異常信号検出への応用 (平均的複素数実信号マザーウェーブレットの設計とその応用), 日本機械学会論文集(C編), Vol.73, No.730, pp.1676-1683, 2007.
- [2] 石井秀明, 植村 広, 章 忠, 今村 孝, ステアリングシステムの音源探査技術の開発, 計測自動制御学会産業論文集, Vol.10, No.9, pp.73-80, 2011.
- [3] ZHONG ZHANG, et. al., STUDY ON WATER LEAK DETECTION USING WAVELET INSTANTANEOUS CROSS-CORRELATION, Proc. of the ICWAPR2015, pp.133-13.