

コネクテッドカー搭載センサーを用いた高密度地震観測の提案

名古屋大学大学院 環境学研究科 都市環境学専攻

吉岡優樹

1. はじめに

日本では、地震研究や耐震研究を目的に地震観測が行われ、データの共有と活用が進められている。気象庁や防災科学技術研究所などが整備した高精度観測網に加えて、個別機関等が保有する観測網、将来的にはより簡易かつ高密度な、加速度計を搭載したスマートフォン等の機器による観測網が加わることで²⁾、「階層的な地震観測網」が想定される。そのような中で、コネクテッドカー³⁾の普及が進んでいることに着目し、多数の自動車搭載センサーの活用を考えている。本研究では、地震動観測の媒体としての自動車の振動特性を把握するため、振動計測と加振実験を行った。また、車両で取得された加速度をもとに地上震度を推定する方法を検討した。これらの成果をもとに、自動車搭載の加速度センサーを地震動把握手段の一つとして活用することを提案する。

2. コネクテッドカーによる地震動高密度観測構想

コネクテッドカーは、外部ネットワークとの通信機能を備えた車両のことである⁴⁾。車両の状態や周囲の道路状況などの様々なデータをセンサーにより取得し、ネットワークを介して集積・分析することで、新たな価値を生み出すことが期待されている⁵⁾。

近年、コネクテッドカーの普及が進んでいる。文献⁶⁾によると、乗用車について、2019年、日本におけるコネクテッドカーの販売台数は330万台であり、自動車販売台数に対する比率は75%程度を占め、今後さらに上昇することが予想されている。2030年には国内の自動車保有台数(6600万台予測)に対するコネクテッドカーの比率が50%を超えることが見込まれている。世界的にみても、自動車保有台数、コネクテッドカーのシェアともに増加傾向にあり、グローバルな普及が期待できる。

以上をふまえ、ネットワーク上でリアルタイムに把握されている自動車搭載センサーの情報を防災に活用することを考える。本研究では、その初期段階として、自動車搭載加速度センサーを利用して、地震動を推定、把握することを検討する。加速度計を搭載した身近な機器のなかでも、自動車は常時接地している点、その他のセンサー情報とともに加速度データを取得できる点に優位性がある。ビッグデータを活用することで、「階層的な地震観測網」の形成を目指す。

3. 自動車の振動計測

3.1 計測方法

自動車に搭載されたセンサーを地震動の計測に活用するためには、地動に対する自動車の応答特性を把握する必要がある。まず、停車中の自動車のデータ利用を念頭に、

微動計測と人力加振試験により振動特性を把握した。また、参考として走行時の振動も計測した。

地震動や常時微動の観測に用いられるサーボ加速度計(白山工業製 JU210, JU410)を使用して2種類の乗用自家用車の計測をした。車両Aは7人乗りミニバン型でハイブリッド車、車両Bは5人乗り小型車でエンジン車である。車両の情報を表1、加速度計配置を図1に示す。

表1 車両の情報

	車両A	車両B
自動車種別	普通	小型
長さ/cm	493	394
幅/cm	185	169
高さ/cm	189	150
車両重量/kg	2140	940
前軸重/kg	1150	610
後軸重/kg	990	320

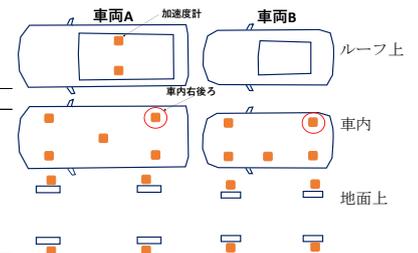


図1 加速度計の配置

3.2 自動車の常時微動

駐車時を想定してエンジンを切った状態で長時間の常時微動計測を行った。両車とも安定して設置できた車内後部右側の記録を示す。図2に10Hzでハイカットした10秒間の時刻歴加速度波形の例を、また、図3に直下の地面との伝達関数を示す。伝達関数からは特定の振動数の振動が増幅していることが読み取れる。全センサーの記録から車両の立体振動を分析すると、前後、左右、上下の並進に加えて、ローリング、ピッチング、ヨーイング動があることが確認された。また、車両Bではエンジンをかけた状態(停車時を想定)も計測した。図4に加速度フーリエスペクトルを示す。エンジン稼働時の振動は数十 cm/s^2 と常時微動に比して大きい。高振動数成分が主であり、地震動で重要な5 Hz程度以下の低振動数ではその影響は比較的小さいという結果が得られた。

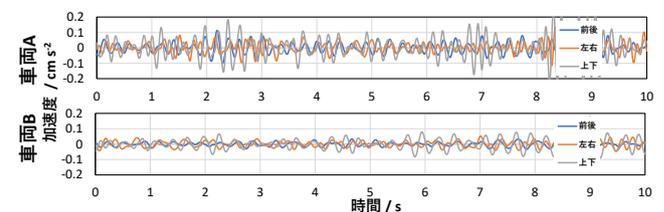


図2 自動車の微動 10秒間の時刻歴加速度波形

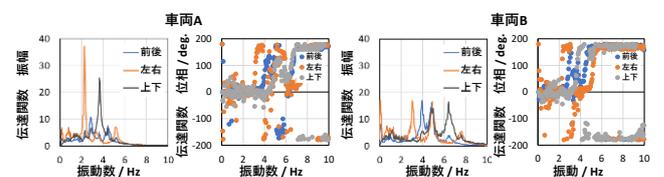


図3 自動車の微動 伝達関数(自動車/地面)

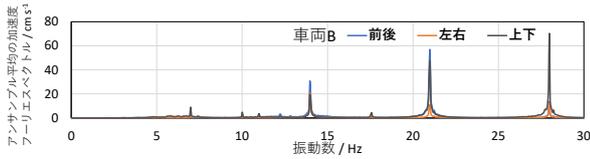


図4 エンジン振動を含めた加速度フーリエスペクトル

3.3 自動車の人力加振試験

自動車のボディを人力で押し、擬似的なインパルス加振を試みた。表2に人力インパルス加振で得られた自由振動波形から固有周期と減衰定数を推定した結果を示す。図3の常時微動と比べてやや低振動数となり、減衰も大きいことから、振幅依存性や応答モードの相違が推測される。また、車両Bでは、条件による違いを調べた。図5に乗車有無とブレーキ状況を変えて計測した減衰定数と固有振動数を示す。前後方向ではフットブレーキを用いた際に固有振動数が大きくなるが、その他は大きな差異は認められない。

表2 固有振動数と減衰定数

	車両A		車両B	
	振動数 / Hz	減衰定数	振動数 / Hz	減衰定数
前後方向	2.05	0.14	1.69	0.30
左右方向	2.03	0.07	2.73	0.10

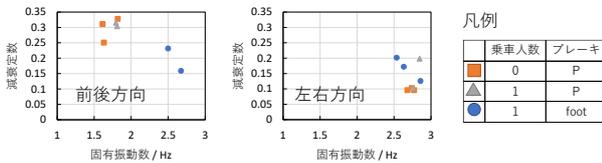


図5 車両Bの状況別の固有振動数と減衰定数

地動入力を想定して、車両Bを大型の車両積載車にのせて加振する試験を行った。入力、応答ともに回転運動が卓越していたため、多点の記録から車両の重心位置の並進成分と回転成分を分離することを試みた。車両を剛体と考え、その重心の動きを6自由度で表す。前後並進を w_x 、左右並進を w_y 、上下並進を w_z 、前後軸を回転軸としたローリング θ_x 、左右軸を回転軸としたピッチングを θ_y 、上下軸を回転軸としたヨーイングを θ_z とすると、車両の動き w は式(1)のベクトルで表すことができる。車体に3個以上設置したセンサー(今回は4個)の動き $u_j (j=1\sim4)$ は、微小変位であれば3行6列の行列 H_j を用いて式(3)のように表すことができる。 $e(t)$ は誤差ベクトルである。すべての成分の誤差は互いに無相関で、同一の正規分布に従って発生するとの仮定のもと最尤法を用いると、重心の動きは式(5)で表される。

$$w(t) = (w_x(t) \ w_y(t) \ w_z(t) \ \theta_x(t) \ \theta_y(t) \ \theta_z(t))^T \quad (1)$$

$$u_j(t) = (u_{x_j}(t) \ u_{y_j}(t) \ u_{z_j}(t))^T \quad (2)$$

$$u(t) = Hw(t) + e(t) \quad (3)$$

$$u(t) = \begin{pmatrix} u_1(t) \\ \vdots \\ u_n(t) \end{pmatrix}, \quad H = \begin{pmatrix} H_1 \\ \vdots \\ H_n \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$w(t) = (H^T H)^{-1} H^T u(t) \quad (5)$$

図6に車両積載車(地面を想定)を左右方向に加振した際の車両Bの応答を示す。

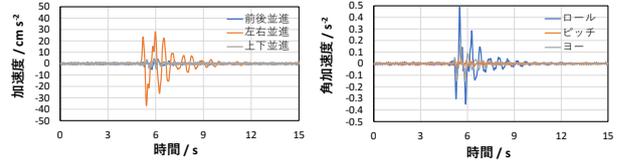


図6 積載車上左右加振時の車両Bの並進, 回転運動

3.4 自動車の走行時の振動

走行時の振動特性は車両や路面の多様な要因の影響を受けることが予想され、地盤震動の把握には厳しい条件と考えられるが、大振幅の振動特性の把握や走行中に地震記録を取得できる可能性をふまえて計測を行った。比較的一定の速度で走行可能な道路を50~60 km/hで走行した。10秒間の加速度波形を図7に、アンサンブル平均の加速度フーリエスペクトルを図8に示す。加速度フーリエスペクトルでは、1 Hz以下の低振動数で前後、左右加速度が卓越しているが、車両による相違がある。図9に車両Aについて300秒間の左右の加速度波形を示す。GPS情報や撮影した映像を用いて車両の位置と道路情報を把握し、時刻歴波形の低振動数成分の変化との関係を確認したところ、道路の曲線状況と振幅、方向とも一致する傾向がみられた。車両速度との関係も含めて、車両応答の低振動数成分は、加速減速、曲線道路に伴う加速度が表れていると考えられる。また、上下方向に関しては、2 Hz程度の振動が数百 cm/s²の振幅で現れており、大きさ、重量ともに異なる2車両の傾向が類似している。

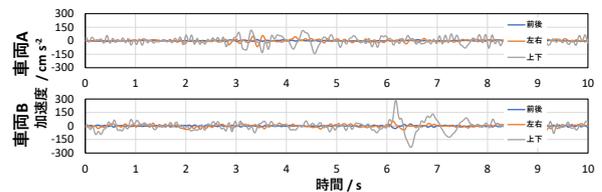


図7 走行時の自動車10秒間の時刻歴加速度波形

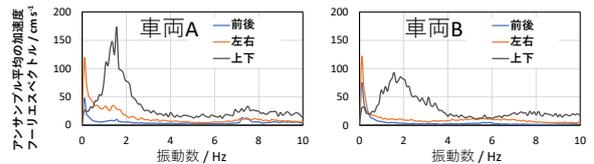


図8 アンサンブル平均の加速度フーリエスペクトル

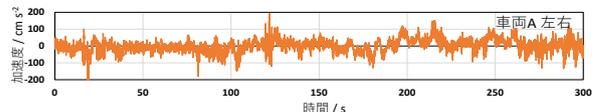


図9 300秒間の時刻歴加速度波形(左右)

4. 加振機を用いた自動車の振動実験

4.1 実験方法

加振機を用いた自動車の振動実験を行った。実験の目的は、地上（振動台）と車上（車体設置のセンサー）の伝達関数をもとめること、自動車搭載加速度計の精度を確認すること、そして車両で観測された加速度から地盤の揺れを推定する方法について検討することである。

実験に用いた自動車は乗用自家用車である。実験に用いた車両 C の情報を表 3 に示す。加振機は、4 つのタイヤ下部をそれぞれ個別に制御できる振動台で支持するものである。計測点としては、加振機側の 4 ヶ所の変位と加速度、車体側の 4 ヶ所の加速度を使用した。計測点配置を図 10 に示す。

表 3 車両 C の情報

車両 C	
自動車種別	普通
長さ	524 cm
幅	190 cm
高さ	145 cm
車両重量	2310 kg
前前軸重	1149 kg
後後軸重	1161 kg

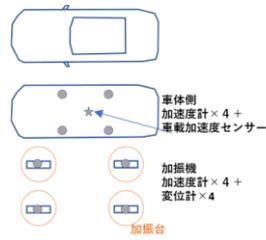


図 10 計測点配置配置

4.2 ホワイトノイズ

ホワイトノイズは、0.5 Hz から 20 Hz に成分を持つ速度振幅一定、ランダム位相とした。加振ケースは、前後方向、左右方向、上下方向それぞれ一方向入力、三方向同時入力とした。二乗平均平方根 2 cm/s 程度のホワイトノイズとその 2 倍、3 倍を入力し、振幅依存性を調べた。実験結果の例として、倍率を 2 倍とした場合を図 11 に示す。車上では入力の高振動数成分はカットされ、全体の加速度振幅としては小さくなっている。また特定の振動数成分が増幅している。左右方向では伝達関数のコヒーレンスが特に高い。

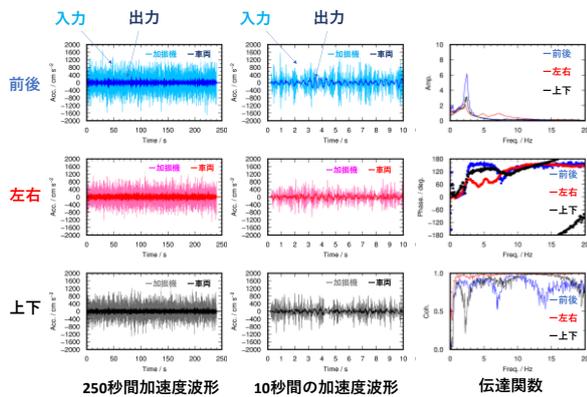


図 11 ホワイトノイズ入力時の入力と応答

入力は前後、左右、上下の並進のみであったが、実験の様子やデータを見ると、応答として、ローリングとピッチが生じることがわかった。3.3 節と同様に車両を剛体とみなし、その重心の動きを算出した。一方向ずつホワイトノイズを入力したときの伝達関数を図 12 に示す。応答

側を 6 成分に分解して、一方向入力の各並進成分に対して算出している。前後入力時には上下の応答が、上下入力時には前後の応答が生じている。また、左右入力時にはローリング動が生じている。

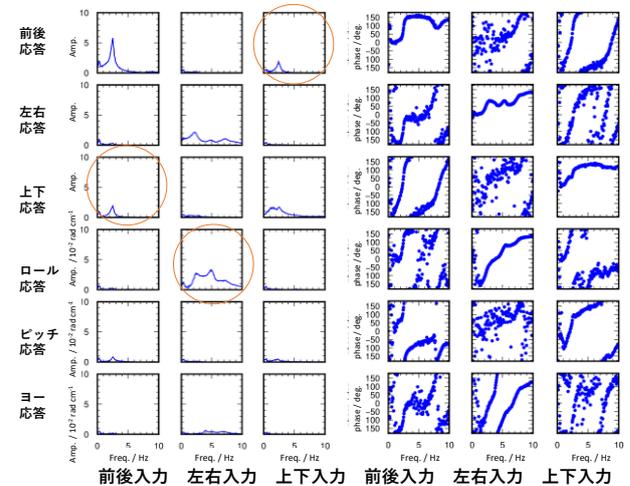


図 12 立体振動の伝達関数

4.3 地震動

2018 年 6 月 18 日の大阪府北部の地震⁵⁾⁶⁾の、①大阪北区茶屋町、②寝屋川市役所、③高槻市桃園町、④茨木市東中条、⑤K-NET OSK002 (高槻市立第二中学校) の 5 つの加速度記録である。振動台の制約により振幅は 0.75 倍または、0.5 倍で入力した。図 13 に②寝屋川市役所の震度観測における加速度記録の 0.75 倍入力時の加振機側の加速度と自動車の応答加速度を示す。短周期成分はカットされ、固有振動数では振動が増幅されている。地震動を受けた自動車がどのように応答するのかを示す資料となる。

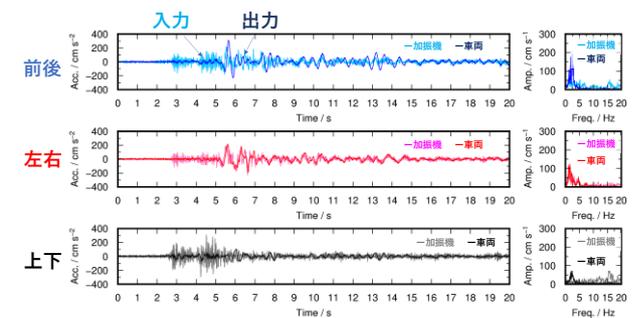


図 13 地震波大阪北部の地震（寝屋川市役所）入力と応答

5. 車上加速度を用いた震度把握

自動車は台数が多いことに加え、すでに多数の車両の加速度データが収集されている。また自動運転車の普及等により、さらなる情報の取得と利用が可能になると考えられる。そこで、コネクテッドカーで取得される加速度データから地上の震度を把握することを考える。まずは、車上の加速度と地上の加速度の差を求め、次に車両の振動特性が把握できていることを前提に、自動車の加振実験で取得した加速度データから地上（加振機）の震度を推定する方法を検討した。

5.1 車両と加振機の震度差

加振実験のデータ（地震波入力時）を用いて、地上（加振機）の加速度から求めた計測震度と車両に設置した加速度計で取得した車上の計測震度を比較した。

震度の算出には、功刀・他（2013）の震度のリアルタイム演算に用いられる近似フィルタ⁷⁾を用いた。フィルタ後の波に対し、過去 60 s の振幅波形を参照して継続時間判定したリアルタイム震度のうち最大きな値を計測震度相当値として採用した。

図 14 に、加振機と車両の震度の関係を示す。前後方向ではすべて車両の震度が加振機の震度を上回っており、左右方向は地震波①と地震波③では車両が加振機の震度を下回った。次に前後、左右、上下の 3 成分または前後と左右の 2 成分で算出した震度とその震度差を計算した。地震波に依存するが、今回入力した地震波では、3 成分に比べ、2 成分で算出した値が 0.1 程度小さくなった。震度の大小関係は変わらなかった。また、前後、左右等各成分で算出した震度の差に比べ、合成した場合の方が震度差のばらつきは小さくなる傾向がある。加振機 3 成分に対する車両 2 成分の震度差の平均は+0.35、標準偏差は 0.21 であった。

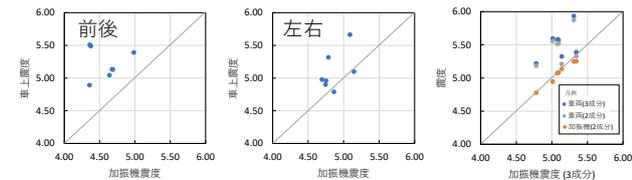


図 14 加振機と車両の計測震度相当値

地震時に多数の車両で震度を観測することができれば、統計的な震度差を差し引くことにより地上の震度を面的に推定できる可能性がある。

5.2 車上加速度データからの地上震度の推定

次に、車上加速度から地上の加速度を推定して地上震度を算出することを試みる。下記の手順により地上の震度を推定した。

- ①車両加速度から地上の加速度を推定する
- ②ハイカットフィルタ（二次バターワース型）
- ③リアルタイム震度計算

①では、車両を一質点系に近似し、伝達関数の逆関数 $G^{-1}(s)$ を用いて、車上の加速度から地上の加速度を算出した。

$$G^{-1}(s) = \frac{s^2 + 2h\omega_e s + \omega_e^2}{2h\omega_e s + \omega_e^2} \quad (5)$$

ここで ω_e は固有角振動数、 h は減衰定数である。図 15 に車上の加速度記録に対して①～③を適用したリアルタイム震度の算出例を示す。ただし、固有振動数と減衰定数は一次モードを採用し、前後方向の固有振動数 2.5 Hz、減衰定数 0.083、左右方向の固有振動数 2.1 Hz、減衰定数 0.23 とした。図 16 に車上と地上の震度の関係を示す。加振機 2

成分に対する車両 2 成分の震度差の平均は-0.06、標準偏差は 0.10 であった。車両の振動特性をあらかじめ把握できれば、精度よく震度が求められることが分かった。

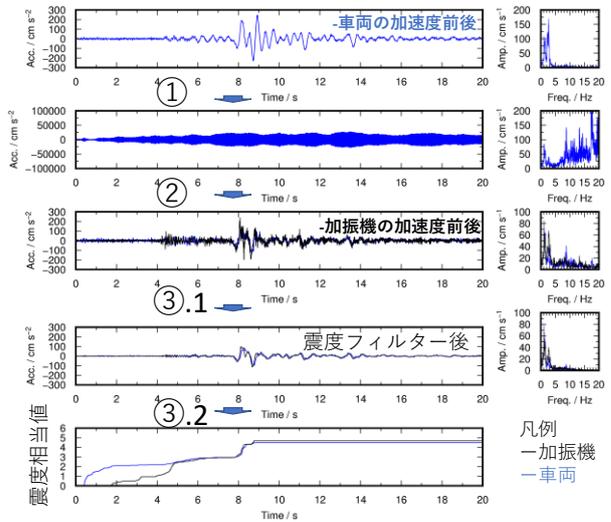


図 15 車上加速度からの地上震度推定例

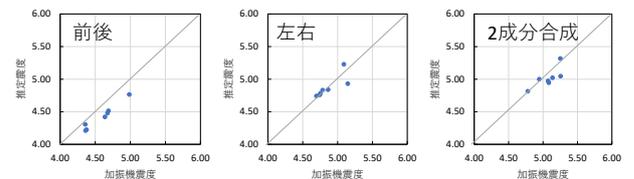


図 16 加振機の震度と

車上加速度から推定した計測震度相当値

6. まとめ

コネクテッドカーの普及に着目し、自動車搭載加速度センサーを高密度地震動観測に用いることを想定して、自動車の振動計測、加振実験を行った。微動計測、加振実験、走行時の振動計測の結果、車両によって振動特性は異なるが、スペクトルピークの形状などに共通点が見られた。また、加振実験により自動車の振動特性と地震時の挙動を把握し、車上加速度から地上震度を推定できる可能性を示した。一方で、車両個々の振動特性を推定する方法等にさらなる検討の必要がある。今後の展望として、コネクテッドカーから収集される加速度以外のデータも組み合わせることが考えられる

参考文献

- 1) 防災科学技術研究所. 報道資料 防災科研の共同研究「計測震度演算のためのノイズ低減手法の開発」の成果を用いたアプリを公開, 2013
- 2) 首都圏レジリエンスプロジェクト. 官民連携による超高密度地震動観測データの収集・整備理学分野「予測力の向上を目指す」https://forr.bosai.go.jp/sub_b/ (参照 2021.4.1)
- 3) “第 2 部 第 4 章 第 1 節 ICT 端末の新形態”. 総務省平成 27 年版情報通信白書. 総務省, 2015, pp183-191
- 4) 富士経済. コネクテッドカー・V2X・自動運転関連市場の将来展望 2020, 2020, 337p
- 5) 気象庁. 強震観測データ (2018/6/18 大阪府北部の地震) https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/jishin/1806180758_osakafu-hokubu/index.html (参照 2021.4.1)
- 6) 防災科研 K-NET, KiK-net (NIED K-NET, KiK-net) <https://www.doi.org/10.17598/NIED.0004>
- 7) 功刀卓, 青井真, 中村洋光, 鈴木亘, 森川信之, 藤原広行. 震度のリアルタイム演算に用いられる近似フィルタの改良, 2013, 地震 第 2 輯, 65, pp.223-230