

## 自動車により発生する環境磁気雑音の評価

## Evaluation of Environmental Magnetic Noise Generated by Automobiles

齊藤大介<sup>a)†</sup>・小嵐愛子<sup>b)</sup>・林実<sup>a)</sup>・堺健司<sup>a)</sup>・紀和利彦<sup>a)</sup>・塚田啓二<sup>a)</sup><sup>a)</sup> 岡山大学大学院ヘルスシステム統合科学研究科, 岡山県岡山市北区津島中 3-1-1 (〒700-8530)<sup>b)</sup> 岡山大学工学部, 岡山県岡山市北区津島中 3-1-1 (〒700-8530)T. Saito<sup>a)†</sup>, A. Koarashi<sup>b)</sup>, M. Hayashi<sup>a)</sup>, K. Sakai<sup>a)</sup>, T. Kiwa<sup>a)</sup> and K. Tsukada<sup>a)</sup><sup>a)</sup> Graduate School of Interdisciplinary Science and Engineering in Health Systems, Okayama Univ., 3-1-1, Tsusimanaka, Kita-ku, Okayama city, Okayama 700-8530, Japan<sup>b)</sup> Faculty of engineering, Okayama Univ., 3-1-1, Tsusimanaka, Kita-ku, Okayama city, Okayama 700-8530, Japan

In recent years, magnetic measurement technology has been widely used. However, in magnetic measurement, there is a possibility that the magnetic noise generated by vehicular transportation in an environment will greatly influence the measurement. In this study, to evaluate the characteristics of magnetic noise caused by automobiles, the magnetic field generated by a moving automobile was measured. It was found that the automobile itself was magnetized and constantly generated a magnetic field. It was also found that the frequency characteristics of the magnetic noise generated by a moving automobile changed depending on the moving speed of the automobile. It was confirmed by fast Fourier transform (FFT) analysis that the frequency components of the measured magnetic noise were approximately 3 Hz or less in the range of 5 km/h to 40 km/h. From the results of magnetic noise for various types of vehicles on actual roads, it was found that the characteristics of magnetic noise also differ depending on the type of vehicle. Therefore, the effect of magnetic noise from automobiles should be taken into consideration depending on the application of magnetic measurement.

**Key words:** Automobile, Magnetic Noise, Magnetic measurement, Magnetic sensor, Three-dimension measurement

## 1. 研究背景

現在, 磁気計測技術は幅広い分野で活用されており, 非破壊・非接触な測定技術が確立されている。例えば, 非接触な電流測定や, 牧場などにおける家畜の位置測定, 地面に埋まっている地雷の位置を検出するなどを目的として磁気計測技術が活用されている例がある<sup>1)~3)</sup>。また, 自動運転技術の分野でも磁気計測技術が着目されている。その一つの手法に, 磁気マーカーを道路に設置して, 車両側に設置した磁気センサにより読み取ることで, 車両の誘導を行うという方法がある<sup>4)</sup>。自動車に関連する研究としては, 車両の検出を磁気センサで行うという研究が既に行われている<sup>5)~6)</sup>。さらに, 非破壊検査分野においても磁気計測技術が応用されており, 筆者らも, 磁気センサを活用したインフラ鉄鋼構造物の非破壊検査に関して報告を行った<sup>7)~8)</sup>。

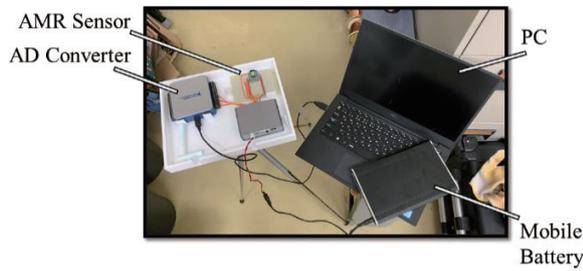
活用事例の多い磁気計測技術において検出精度を高めるためには屋内外問わず使用環境における環境磁気ノイズが測定に与える影響を考慮する必要がある。例えば, 非接触な電流測定の研究では, 測定精度が制限される要素として外部磁場の影響が挙げられている<sup>9)</sup>。また, 遠方にある対象の位置を検知するようなシステムでは, 対象からの信号の強度が非常に小さい場合があり<sup>2)</sup>, 微小な磁気ノイズが測定に多大な影響を及ぼす可能性が高いと考えられる。特に, 磁気を利用した自動運転技術では車体に磁気センサを取り付けるため, 自動車により引き起こされる磁気ノイズが磁気センサに直接印加されてしまう可能性が考えられる。さらに構造物の非破壊検査では屋外で検査を実施することが多く, 様々な外部磁場による影響が懸念される。このような環境磁気ノイズの1つに, 交通機関により引き起こされる磁気ノイズが考えられ, 身近に存在する自動車が磁気計測に影響を及ぼす可能性がある。非破壊検査の対象である社会インフラ構造物は車道付近に存在することも

多く, 停止している自動車だけでなく, 道路を走行する自動車により引き起こされる磁気ノイズが, 非破壊検査の磁気計測結果に影響を与えることも懸念される。既に電気自動車により引き起こされる磁界の人体へのばく露に関する研究なども行われている<sup>9)</sup>。

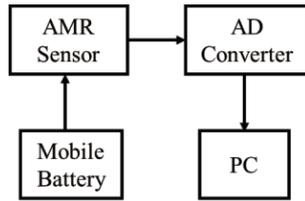
このような磁気ノイズの影響を低減するためには, 磁気ノイズの特性を解明したうえで対策を講じる必要がある。先行研究では走行する自動車の磁束密度を測定することで, 自動車が引き起こす磁界変動に関する基礎研究が行われている<sup>10)</sup>。自動車などの交通機関が磁気測定に与える影響について調べるためには, 路上環境で走行する自動車が引き起こす磁界変動を測定する必要がある。そこで本研究では, 実際に路上を走行する自動車を主な測定対象として, 自動車により引き起こされる磁気ノイズが磁気計測に与える影響について調べた。また自動車による磁気ノイズの周波数特性・強度を測定し, 実際に影響を受ける磁気測定について検討した。

## 2. 測定システム

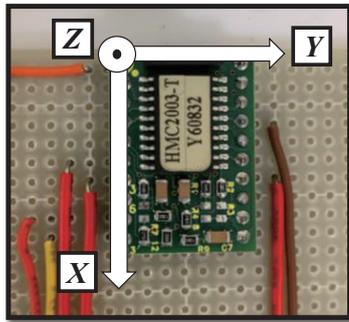
本研究で使用した測定システムを Fig. 1 に示す。装置構成は, モバイルバッテリーで磁気センサを駆動させ, センサが検知した信号を AD コンバーターでデジタル変換し, それを PC で収集し解析した。磁気センサとして磁場分解能  $4 \times 10^{-3} \mu\text{T}$ , ダイナミックレンジ  $-200 \sim 200 \mu\text{T}$  の AMR (Anisotropic Magneto Resistance) センサを用いた。ここで自動車の磁気ノイズの空間的広がりを調べるため磁場ベクトルの 3 軸成分が検出できる磁気センサとして HCM2003 (Honeywell 社製) を用いた。信号収集のサンプリング周波数は 4096 Hz とした。実験では磁気センサの X 軸の負の方向が常に北方向を向くようにセットし, センサの高さが地面から約 1 m となるようにして計測した。また実験は, 測定



(a) Overview



(b) Configuration of measurement system.



(c) AMR sensor

Fig. 1 Measurement system.

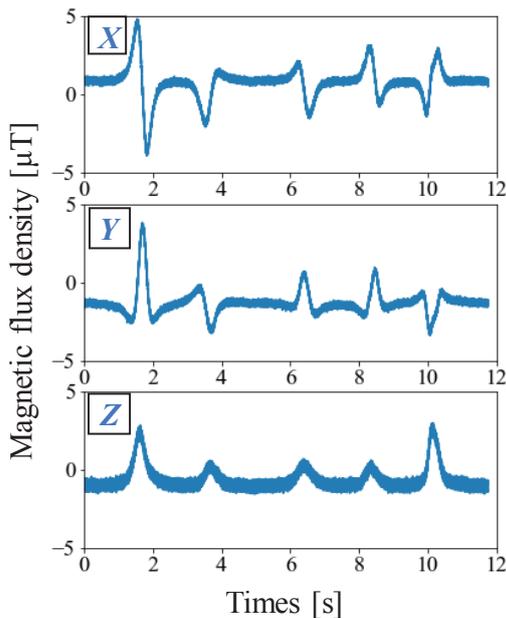


Fig. 2 Magnetic noise of 5 standard-size cars.

対象である自動車以外の磁場発生源が存在しない環境で実施した。なお、今回実施した全ての実験の測定結果から、空気中の磁場の測定結果を差分している。こうすることで、地磁気成分を除去した自動車による磁束密度の変化分のみで表示している。

### 3. 実験結果

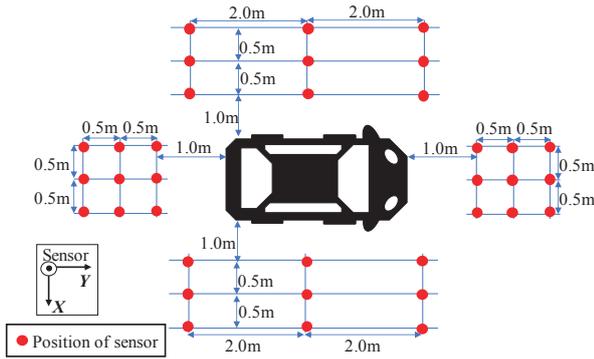
#### 3.1 路上で走行する自動車の磁気ノイズ

自動車により引き起こされる磁気ノイズについて調べるために、路上を走行している自動車の磁気ノイズを観測した。今回、制限速度40 km/hの道路で、道路の端からセンサまでの距離が1.5 m程度となるように測定システムを設置した。実際に観測した結果をFig. 2に示す。普通自動車5台を連続で観測した結果であり、波形のX, Y, ZはFig. 1(c)に示したセンサのX, Y, Z軸に対応している。Fig. 2より、それぞれの感度軸で5つの磁気信号の変化が生じている様子が確認でき、5台の普通自動車と対応していることがわかる。それぞれの車に対する波形に着目すると、波形が自動車ごとに異なっていることから、自動車により引き起こされる磁気ノイズの特性に違いがあることが考えられる。そこで次節では、自動車により引き起こされる磁場について詳しく調べるため、停止した自動車周辺の磁気信号計測について述べる。

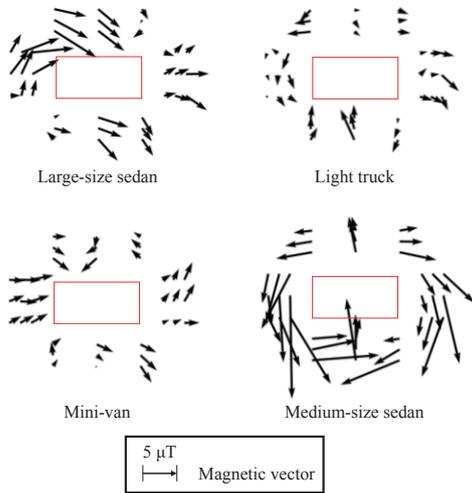
#### 3.2 自動車により引き起こされる磁気ノイズとその発生原因

前節では、個々の自動車により、それぞれが引き起こす磁気ノイズの特性が異なる可能性について考えた。それを調べるために大きさや形状が異なる4種類の自動車(大型セダン, 軽トラック, ミニバン, 中型セダン)の周りの磁場を測定して磁気ノイズの特性を調べた。それぞれの大きさとして、大型セダンは $4.8 \times 1.8 \times 1.4$  [m], 軽トラックは $3.4 \times 1.5 \times 1.8$  [m], ミニバンは $4.6 \times 1.7 \times 1.8$  [m], 中型セダンは $4.4 \times 1.7 \times 1.5$  [m]である。Fig. 3に、測定における自動車とセンサの配置を示す。なお今回はセンサのZ軸は使用していない。

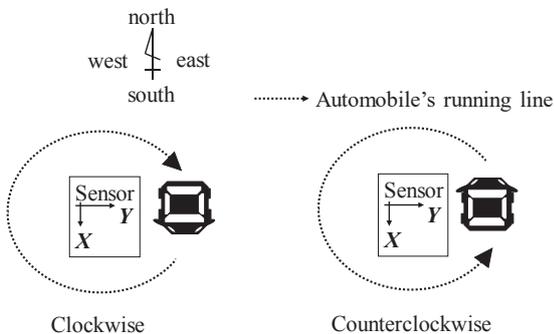
各測定点における測定結果を磁気ベクトルで表したものをFig. 4に示す。Fig. 4より、自動車により引き起こされる磁束密度は数 $\mu\text{T}$ ~数十 $\mu\text{T}$ の範囲であることが分かる。また、ベクトル図より、磁場が自動車に吸い込まれる部分と自動車から吐き出される部分が存在する様子を確認できる。Fig. 4の左上図のLarge-size sedanでは自動車の左後輪から右前輪に向かい、Fig. 4の右上図のLight truckでは右後輪から左側面に向かい、Fig. 4の左下図のMini-vanでは後方から前方に向かい、Fig. 4の右下図のMedium-size sedanでは右側面から左側面に向かっている様子を確認できる。この結果より、自動車の磁化の方向は一定ではないことが分かる。また各車が引き起こす磁束密度の大きさは個々の自動車により異なり、車体の大きさとも無関係であることが分かった。自動車により引き起こされる磁気ノイズの発生原因として、自動車材料に使用される強磁性体による地磁気の歪みによるものが考えられる。しかしFig. 4の結果では個々の自動車により磁気特性が大きく異なっている様子が確認できた。この結果より、自動車により引き起こされる磁気ノイズは、自動車自体の自発磁化によるものである



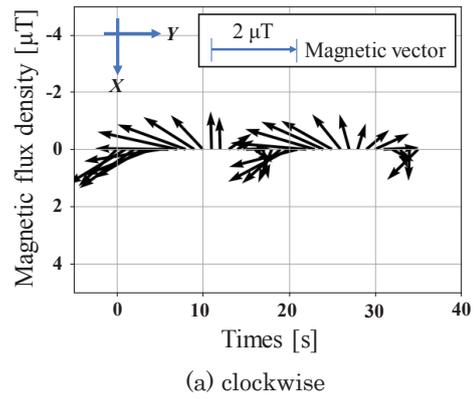
**Fig. 3** Magnetic noise measurement around 4 automobiles.



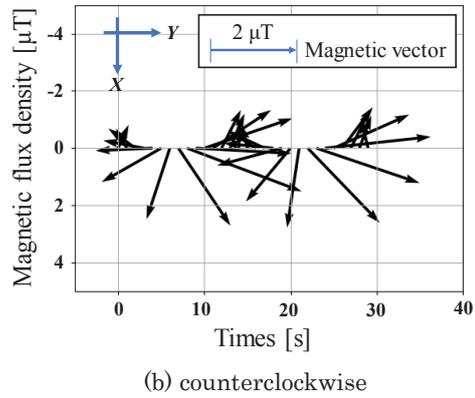
**Fig. 4** Magnetic field vector around 4 automobiles.



**Fig. 5** Magnetic noise measurement of automobile driving around sensor.



(a) clockwise



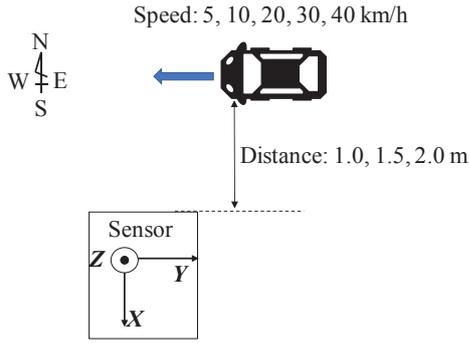
(b) counterclockwise

**Fig. 6** Vector of magnetic noise from automobile driven around sensor.

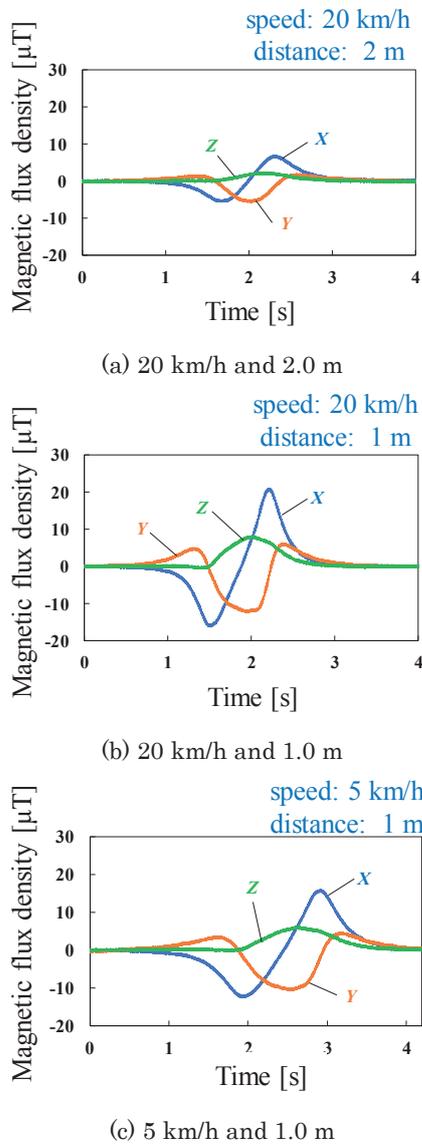
可能性が考えられる。

自動車がどのように磁気ノイズを引き起こすのかを検査するため、Fig. 5 に示すようにセンサの周辺を自動車で走行させて、センサ正面に対する自動車の角度を変化させた場合の磁気ノイズ計測を行った。センサと自動車の距離は約 2.0 m に保ち、時計回りと反時計回りのそれぞれで、自動車を 2 周走行させた。なおセンサの Z 軸は使用していない。なおここで使用した自動車の種類は SUV で、大きさ  $4.7 \times 1.8 \times 1.7$  [m] のものを使用した。

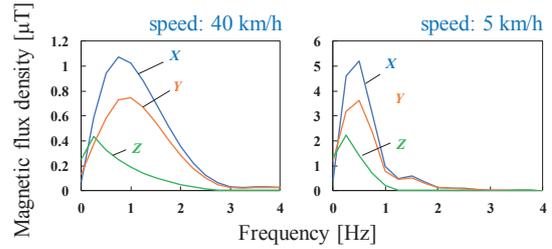
測定結果を磁気ベクトルで表したものを Fig. 6 に示す。縦軸が X 成分、横軸が Y 成分と時間を表している。Fig. 6 (a) のグラフは、Fig. 5 (a) のように自動車を時計回りに周回させたときのグラフであり、ベクトルが時計回りに回転していることが分かる。また、Fig. 6 (b) のグラフは Fig. 5 (b) のように自動車を反時計回りに周回させたときのグラフであり、こちらはベクトルが反時計回りに回転している。自動車の周回を追従して磁気ベクトルが回転していることから、自動車により引き起こされる磁気ノイズは、自動車自体の自発磁化によるものと考えられ、自動車材料の強磁性体による地磁気の歪みではないことが分かった。



**Fig. 7** Measurement of correlation between magnetic noise and speed of automobile, distance between automobile and sensor.



**Fig. 8** Correlation between magnetic noise and automobile speed, and distance from sensor.



**Fig. 9** Frequency spectrum of magnetic noise.

### 3.3 自動車の速度および自動車とセンサ間距離が磁気ノイズに及ぼす影響

次に走行する自動車が発生する磁気ノイズを詳しく調べるため、自動車の速度や自動車とセンサとの距離を変化させた場合の磁気ノイズの特性について詳しく調べた。測定方法を Fig. 7 に示す。自動車の速度は5, 10, 20, 30, 40 km/h とし、距離は1.0, 1.5, 2.0 m として磁気ノイズを観測した。これらの測定結果を Fig. 8 に示す。Fig. 8 (a), (b)のグラフでは、自動車とセンサとの距離だけが異なった条件である。これらと比較すると、距離が大きい Fig. 8 (a) のグラフの方が Fig. 8 (b) よりも磁束密度が小さくなっている。

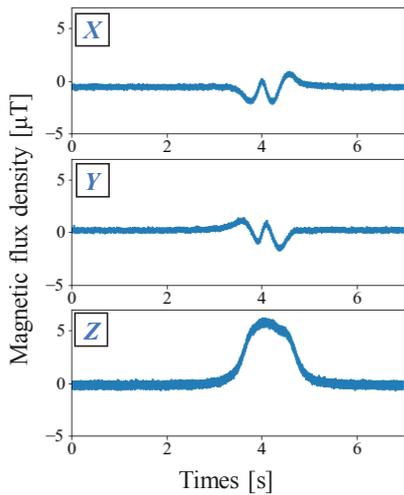
また Fig. 8 (b), (c) のグラフでは、自動車とセンサとの距離は同じで、自動車の速度が異なる。これらと比較すると、それぞれ磁束密度は同程度であるが、Fig. 8 (c) に比べて Fig. 8 (b) のグラフでは短時間で信号変化が生じることが分かる。さらに、自動車の速度が40 km/h の場合、速度20 km/h の場合と比較して、さらに急峻に変化している様子が確認できた。この結果から、自動車の速度に応じて磁気ノイズの周波数特性が変化することが考えられる。

周波数特性を詳しく調べるために、自動車の速度を実験中の最高速度である40 km/h にした場合と最低速度である5 km/h にした場合のそれぞれについて、FFT (Fast Fourier Transform) を適用した結果を Fig. 9 に示す。Fig. 9 の左図は自動車の速度が40 km/h の場合で、周波数スペクトルの変化は3 Hz 程度までの成分を含んでいる。それに対し、Fig. 9 の右図は自動車の速度が5 km/h の場合で、周波数スペクトルは2 Hz 程度までとなっている。この結果より、自動車から発せられる磁気ノイズの周波数特性は自動車自体の速度に応じて変化し、自動車自体の速度が速くなるとより高周波側へ遷移することが分かった。

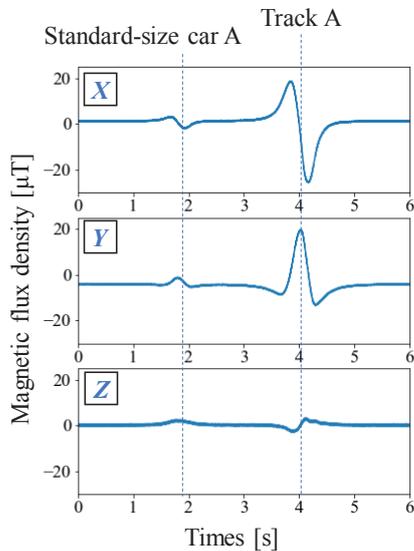
### 3.4 多種多様な自動車の磁気ノイズ

実際の道路で走行する様々な種類の自動車の磁気ノイズを測定した。実験1と同様に、制限速度40 km/h の道路で、磁気センサと道路の端が1.5 m 程度となるように測定システムを設置した。

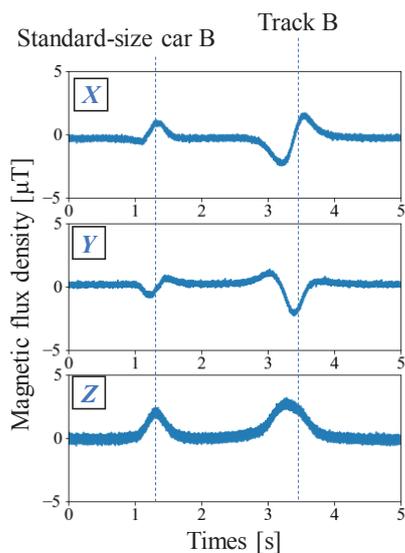
実際に観測した磁気ノイズのグラフを Fig. 10 に示す。Fig. 10 (a) はバスの磁気ノイズである。グラフを見ると信号のピークが2つに分かれていることが分かる。Fig. 10 (a) 以外にいくつかのバスを測定した結果でも同様の波形が観測されており、これはバス特有の現象であると考えられる。磁気ノイズのピークが複数観測される要因として、磁場の発生源が複数存在する可能性が考えられる。バスは通常の



(a) One bus



(b) One standard-size car and one truck



(c) One standard-size car and one truck

Fig. 10 Magnetic noise measured on road.

車両と比較して車体が長く、磁化の分布が分散される可能性が考えられる。それにより複数の磁場発生源が存在したために、Fig. 10 (a)のようなグラフが得られたと考えられる。

Fig. 10 (b)は普通自動車と中型トラックの磁気ノイズである。普通自動車に比べてトラックの磁気ノイズが非常に大きいことが分かる。これ以外にも中型トラックを観測した結果が Fig. 10 (c)であるが、Fig. 10(b)と比較してトラックの磁気ノイズと普通自動車の磁気ノイズの磁束密度の大きさにあまり違いがない。このように全てのトラックで磁気ノイズが非常に強く観測されたわけではなく、測定したトラックの磁気ノイズのいくつかで非常に大きな磁束密度を持つ磁気ノイズが観測された。トラックの場合、積み荷を積んでいる場合もあり、それらが影響を及ぼしている可能性も考えられる。

また、Fig. 10 の測定結果に対して FFT を適用して周波数スペクトルを調べた結果、Fig. 9 と同様に周波数 3 Hz 程度までの帯域を有しており、3 Hz 以上の帯域を有している磁気ノイズはほとんど観測されなかった。これは今回測定した車道の制限速度が 40 km/h で Fig. 9 と同様の速度であることが考えられる。従って、車の速度が速い別の車道で測定を行う場合は、3 Hz 以上の周波数成分が含まれることも予想される。

#### 4. まとめ

本研究では自動車から発せられる磁気ノイズに着目し、その特性を様々な観点から明らかにした。

自動車から発せられる磁気ノイズは、自動車材料に使用されている強磁性体による地磁気の歪みによるものではなく、自動車自体が有する自発磁化によるものであることが分かった。また、停止した自動車の周りの磁場や、実際の道路で走行する多種多様な自動車の磁場を観測した結果、個々の自動車により磁化の方向は異なることが分かった。

今回種々の自動車の磁気ノイズを測定した結果、全体として自動車から発せられる磁気ノイズの磁束密度は数  $\mu\text{T}$  ~ 数十  $\mu\text{T}$  オーダーであった。磁気計測の種類によって扱う磁束密度のオーダーは異なるが、 $\mu\text{T}$  オーダー以下の磁場を扱う磁気計測などは自動車からの磁気ノイズの影響を十分に受けることが分かった。

さらに移動する自動車から発せられる磁気ノイズの周波数特性についても検討を行い、各種磁気計測においてどの周波数帯域に影響を与えるかについても検討を行った。その結果、磁気ノイズの周波数特性は、時速 40 km/h で 3 Hz 程度以下のスペクトルとなることが分かった。また自動車の速度が速くなるにしたがって、磁気ノイズの周波数特性がより高周波側に遷移することが分かった。

以上の結果より、自動車周辺や走行する自動車から発生する磁気ノイズの特性が明らかになり、各種磁気応用で計測する磁束密度や周波数に応じて、自動車による磁気ノイズの影響を考慮する必要があることが分かった。

## References

- 1) H. Yu, Z. Qian, H. Liu, and J. Qu : "Circular Array of Magnetic Sensors for Current Measurement: Analysis for Error Caused by Position of Conductor," *Sensors*, **18**, 2, 578 (2018).
- 2) W. Xu, Z. Guo, Z. Liu, P. Zhang, and Y. Zhou: "Optimization of Magnetic Anomaly Detection with Single-Axis Sensor for Pig Locating in Low Latitude Areas," *Petroleum*, **5**, 4, pp. 417-423 (2019).
- 3) O. Thiabgoh, T. Eggers, V.O. Jimenez, S.D. Jiang, J.F. Sun, and M.H. Phan: "Real-Time Monitoring of Position and Motion of a Non-Stationary Object with a Highly Sensitive Magnetic Impedance Sensor," *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, **3**, 1, pp. 122-128 (2018).
- 4) Y. Byun and Y. Kim: "Heading Estimation Based on Magnetic Markers for Intelligent Vehicles," *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control*, **138**, 7, 071009 (2016).
- 5) Y. Byun, R. Jeong, and S. Kang: "Vehicle Position Estimation Based on Magnetic Markers: Enhanced Accuracy by Compensation of Time Delays", *Sensors*, **15**, 11, pp. 28807-28825 (2015).
- 6) X. Chen, X. Kong, M. Xu, K. Sandrasegaran and J. Zheng, "Road Vehicle Detection and Classification Using Magnetic Field Measurement", *IEEE Access*, **7**, pp. 52622-52633 (2019).
- 7) M. Hayashi, T. Saito, Y. Nakamura, K. Sakai, T. Kiwa, I. Tanikura, and K. Tsukada: "Extraction Method of Crack Signal for Inspection of Complicated Steel Structures Using A Dual-Channel Magnetic Sensor," *Sensors*, **19**, 13, 3001 (2019).
- 8) K. Tsukada, Y. Haga, K. Morita, S. Nannan, K. Sakai, T. Kiwa, and W. Cheng: "Detection of Inner Corrosion of Steel Construction Using Magnetic Resistance Sensor and Magnetic Spectroscopy Analysis," *IEEE Trans. Magn.*, **52**, 7, 6201504 (2016).
- 9) A. Vassilev, A. Ferber, C. Wehrmann, O. Pinaud, M. Schilling and A. R. Ruddle: "Magnetic Field Exposure Assessment in Electric Vehicles," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, **57**, 1, pp.35-43 (2015).
- 10) K. Kamata, K. Yunokuchi, K. Yamazaki, K. Kato, T. Ueda, A. Haga: "Magnetic Field Fluctuation Due to Movement of Automobile," *IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials*, **125**, 2, pp. 92-98 (2005).

2020年12月25日受理, 2021年1月31日再受理, 2021年3月1日採録