

壁面振動を利用した超小型モビリティの騒音制御システムの開発 (超磁歪アクチュエータの性能に関する基礎的検討)

Development of Noise Control System for Ultra-compact Mobility by Plate Vibration (Fundamental Consideration on Performance of Giant Magnetostrictive Actuator)

加藤太朗^{a)}・北村拓也^{a)}・前原史弥^{a)}・中山弘也^{a)}
池田圭吾^{a)}・遠藤文人^{a)}・加藤英晃^{a)†}・成田正敬^{a)}
^{a)}東海大学, 神奈川県平塚市北金目 4-1-1 (〒259-1292)

T. Kato^{a)}, T. Kitamura^{a)}, F. Maehara^{a)}, H. Nakayama^{a)},
K. Ikeda^{a)}, A. Endo^{a)}, H. Kato^{a)†}, and T. Narita^{a)}

^{a)} Tokai Univ., 4-1-1 Kitakaname Hiratsuka-shi, Kanagawa 259-1292, Japan

One- or two- seater electric vehicles are categorized as ultra-compact mobility vehicles and, these vehicles have advanced features such as compactness, light body, and low environmental impact. However, the noise input into the vehicles mainly consists of road and wind noise from the tires and wind noise due to using an electric motor as a power source instead of a gasoline engine. To solve the interior sound problem, we focused on a giant magnetostrictive actuator (GMA) that is small and able to generate a high output, and we propose an active noise control (ANC) system using wall vibration generated by the GMA, thereby achieving a silencing effect. The GMA has mechanical properties such as shafts and springs. We consider these properties to affect the control of sound output through the surface vibration of flat surface in ultra-compact mobility vehicles. Therefore, a GMA must be designed that generate sound control by surface vibration accurately. In this paper, we created an analysis model of the GMA and considered magnetostrictive force and the frequency characteristics of the proposed GMA by electromagnetic field analysis.

Keywords: ultra-compact mobility, active noise control, surface vibration, generate sound control, giant magnetostrictive actuator, electromagnetic field analysis, finite element method

1. はじめに

観光地での新たな移動手段やコンビニエンスストアの宅配サービスに、1人から2人乗りの超小型モビリティの普及が広がってきている。この車両の特徴として車体は車幅やドレッドベースが短く小型軽量なため機動性の高い運転が可能である。またこの車両は動力源に電気モータを駆動源としているため、ロードノイズや風切り音が主な車内騒音の主な要因となり、車内の快適性に多大な影響を与えている¹⁾⁴⁾。従来の自動車では車体の壁面に固いフェルトやウレタンフォームのような防音材を全面に設置し、車内に侵入する騒音を低減している⁵⁾。しかしながら超小型モビリティは車重や全幅、全長の規制により車内騒音対策に十分な遮音材や吸音材が設置できないことが問題となっている。このため防音材のような多大なスペースを必要としない防音対策が求められており、騒音に逆位相の制御音波を発生して騒音と重畳して音圧レベルの低減を図るアクティブノイズコントロール（以下ANC）が検討されている。このシステムでは制御音波の出力による車内騒音の低減⁶⁾と車内騒音に対して2次音源による別の音によって車内騒音の最小可聴値が上昇して、騒音が聞き取りにくくなる聴覚上の現象を利用した騒音対策である⁷⁾。車内のスピーカから制御音波を出力するANCシステムは既に高級セダンなど車内スペースに余裕のある車両に搭載され、販売されているが⁸⁾、上述の車内スペースの問題から超小型モビリティでの実用に至っていない。さらに小型なANCシステムとして、圧電素子を壁面に設置し、壁面振動に

より音波を出力する例が存在するが⁹⁾¹⁰⁾、出力できる値が小さいため音圧レベルの点で課題が残る。

一方、変位が大きく応答速度の速い機能性材料として超磁歪材料が注目されている。超磁歪材料は1000 ppm以上の弾性変位があり機械的出力が大きいことが特徴である。また応答性が速く高耐久であるため、低周波から高周波まで出力が可能である¹¹⁾。そのため、超磁歪材料を用いたアクチュエータを利用した海洋音響トモグラフィーの音源に関する研究¹²⁾や構造物のアクティブ制振システムに関する研究¹³⁾など様々な分野で研究が進められている。

この利点に着目し、著者らは超小型モビリティの車内騒音制御システムに超磁歪アクチュエータを使用したANCシステムを提案している。これまでにロードノイズ周波数帯域である100 Hz～500 Hzを検討対象として超小型モビリティを模擬した消音実験用箱の1面をアクリル板として超磁歪アクチュエータを設置し、箱の外部から入力されたロードノイズ周波数帯域の正弦波音波に対する消音実験を行い、約25 dBの消音効果が得られることを確認している¹⁴⁾。また実際の超小型モビリティのフロントガラスや天井部分に超磁歪アクチュエータを設置した検討を行い⁶⁾¹⁵⁾¹⁾の超磁歪アクチュエータを設置して単一周波数の騒音を最大で19 dB程度低減できた。

これらの検討では市販の超磁歪アクチュエータを使用した際、消音のための制御音波を出力した際に高調波が発生しており、幅広い周波数成分を含む実際のロードノイズでは制御性能が劣化する

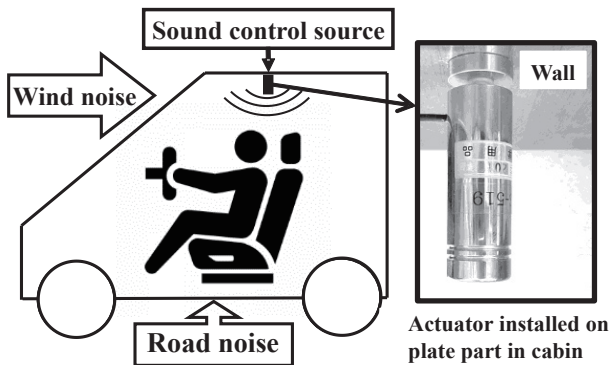


Fig. 1 ANC system for ultra-compact mobility vehicle using giant magnetostrictive actuator.

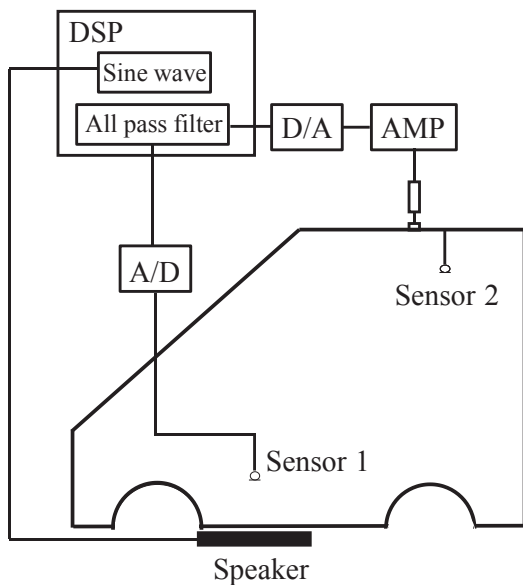


Fig. 2 Schematic of experimental apparatus for the noise reduction.

ることが考えられる。

そこで本研究では超小型モビリティに搭載可能な ANC システムのアクチュエータとなる超磁歪アクチュエータについて、有限要素法を用いて出力性能について検討を行った。検討では、超磁歪アクチュエータの解析モデルを構築し、交流磁場が加わった際の磁歪量を求めた。また制御対象としているロードノイズの周波数帯域に制御音波が正確に出力できることを解析的に検討するために印加電圧を変更したときの磁歪による発生力の変化について検討した。

2. 超磁歪アクチュエータによる壁面振動を利用したアクティブ騒音制御システム

提案する ANC システムの概略図を Fig. 1 に示す。走行によって発生する風切音やロードノイズなどの騒音に対して、天井部に設置した超磁歪アクチュエータにより 2 次音源を発生させ、乗員の耳の付近の音圧レベルの低減を図る。

著者らが超小型モビリティに搭載した ANC システムの構成を Fig. 2 に示す。車体下部にロードノイズを模擬した騒音を出力するためのスピーカを設置し、騒音となる音声を出力する。車体下部

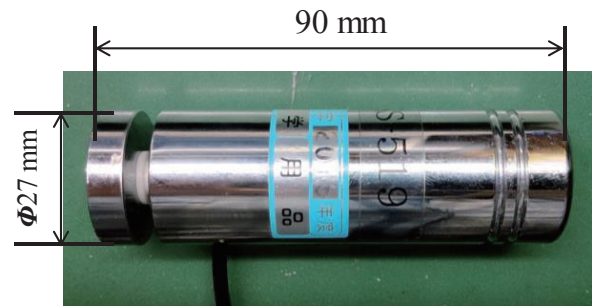
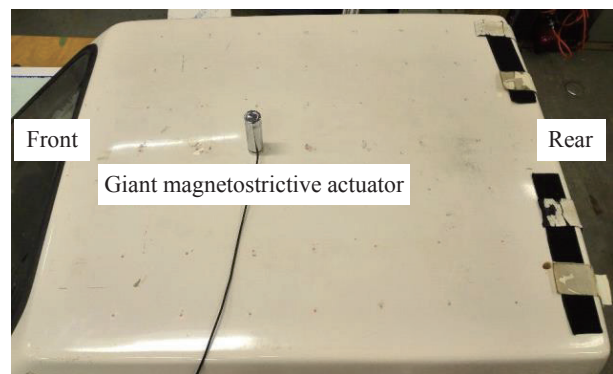


Fig. 3 Giant magnetostrictive actuator.



(a) Cowl of experimental ultra-compact vehicle.



(b) Installation of giant magnetostrictive actuator on plate part.

Fig. 4 Conditions of noise reduction experiment.

に騒音取得用センサとしてコンデンサマイクを設置し（図中 Sensor 1）、マイクが取得した騒音は A/D 変換器を介して、デジタル・シグナル・プロセッサ（DSP）に入力される。測定された騒音はオールパスフィルタによって位相補償を行い、制御信号として D/A 変換器を介して出力される。制御信号はアンプによって増幅され超磁歪アクチュエータに入力される。そして超磁歪アクチュエータが動作して天井部を加振し、制御音波を出力して制御を行う。また車内の消音効果は乗員の耳の位置にマイク（図中 Sensor 2）を設置し、車内の音圧レベルの低減を評価した。なお使用した超磁歪アクチュエータを Fig. 3、実験装置の全景を Fig. 4(a)に、超磁歪アクチュエータを設置した天井部を Fig. 4(b)に示す。

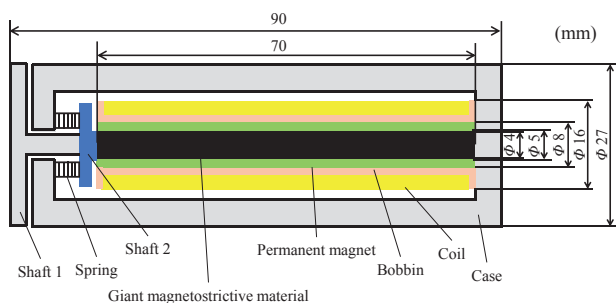


Fig. 5 Internal components of giant magnetostrictive actuator.

Table 1 Details of giant magnetostrictive actuator.

Components	Material
Shaft 1	S45C
Giant magnetostrictive material	Terfenol-D
Permanent magnet	FB5B
Bobbin	Plastic
Coil	Cu
Shaft 2	Plastic
Spring	S45C
Case	S45C

3. 交流電流の印加による超磁歪材料の磁歪量の検討

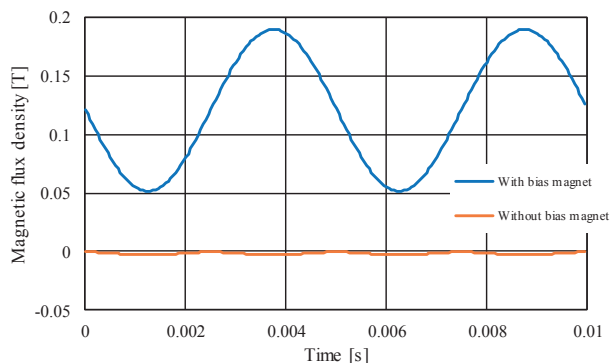
3.1 超磁歪アクチュエータの有限要素法モデル

超小型モビリティ搭載用の超磁歪アクチュエータの出力特性について有限要素法による電磁界解析により検討する。本章では基礎的な検討として Fig. 3 に示す超磁歪アクチュエータについて有限要素モデルを構築し、音波出力のための制御信号として正弦波の信号が加わった時の磁歪量について電磁界解析を行った。解析には電磁界解析ソフト JMAG Designer (JSOL 社製) を使用した。

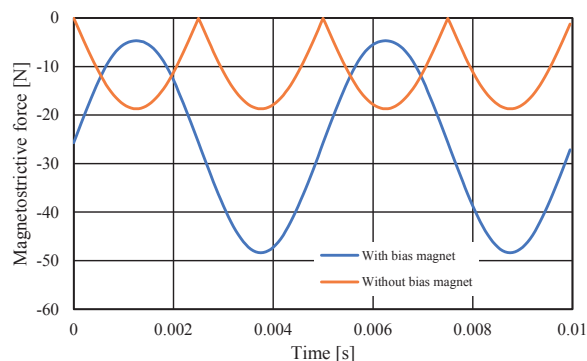
Fig. 5 に超磁歪アクチュエータの構造と各部の寸法を示す。アクチュエータの中心に柱状の超磁歪材料とその周りに永久磁石、ボビン、ソレノイドコイルを設置している。永久磁石はコイルによって発生した磁界を効率よく超磁歪材料に印加するためのバイアスマグネットである¹⁶⁾。永久磁石は磁化方向を超磁歪材料に向かうように軸方向の着磁とした。超磁歪材料と永久磁石の間には 0.5 mm の空気領域を設けている。使用するコイルの銅線径は 0.5 mm、巻き数は 201 回とし、このコイルのインダクタンスは 53.6 μH とした。コイルには交流電流源を接続し、電流を流すことにより磁界を発生させる。その磁界によって超磁歪材料が伸長し、それによってシャフトとスプリングによって壁面に振動を伝達し、制御音波を出力できる¹⁷⁾。その他のアクチュエータを構成する要素とその材質は Table 1 の通りである。また解析に用いる有限要素法モデルを Fig. 7 に示す。3次元解析を行うものとし、分割要素数を 266855、節点数を 45689 とした。なお、本モデルではスプリング部分は一様な S45C の円筒とした。

3.2 永久磁石の有無による出力特性に関する検討

本項ではアクチュエータを構成する要素を変更した際の磁歪に



(a) Time history of magnetic flux density.



(b) Time history of magnetostrictive force.

Fig. 6 Comparison with and without permanent magnets.

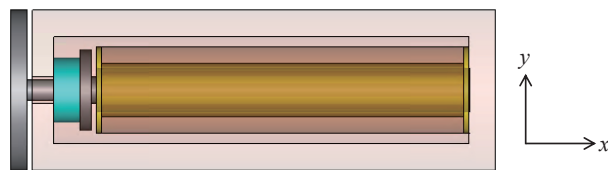


Fig. 7 Finite element model of giant magnetostrictive actuator.

よる発生力と磁束密度を電磁界解析により明らかにし、既存のアクチュエータとの性能を比較検討する。超磁歪材料が発生する磁歪による発生力は電磁界解析により算出された超磁歪材料における磁束密度から算出される磁歪と材料のヤング率、ポアソン比によりフックの法則を用いて算出している。検討では、バイアスマグネットとした永久磁石の有無による磁歪による発生力と磁束密度の比較を行う。永久磁石が無い場合は、有限要素法モデルにおいて永久磁石を絶縁体のプラスチックに変更して過渡解析を行った。

Fig. 6 に印加電流値を 1.0 A としたときのバイアスマグネットの有無の解析結果の比較を示す。同図(a)に磁束密度、(b)に磁歪による発生力の時刻歴を示す。(a)の磁束密度では永久磁石がないことで磁束密度がほとんど発生していないことが分かった。(b)では永久磁石なしの場合、磁歪による発生力は 0 から発生しているが 200 Hz の正弦波状の力が発生していないことが分かった。

3.3 電磁界解析による単一周波数の磁歪量

Fig. 7 に示す有限要素法モデルを用いて超磁歪アクチュエータの出力特性についてアクチュエータ内部の超磁歪材料の伸長による磁歪について検討する。検討ではコイルに印加する交流電流の

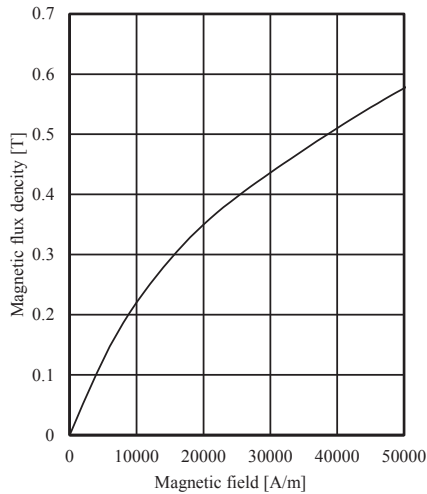


Fig. 8 B-H curve of magnetostrictive material.

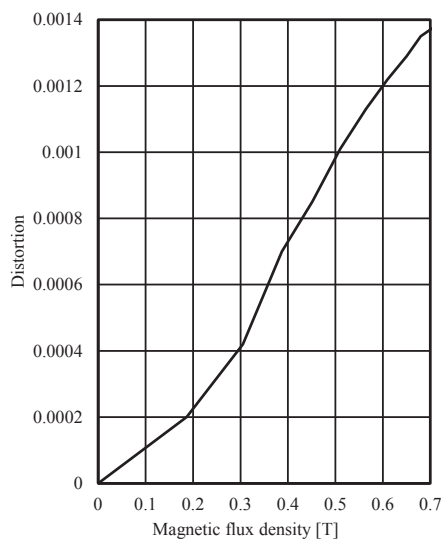


Fig. 9 Relationship between magnetic flux density and distortion.

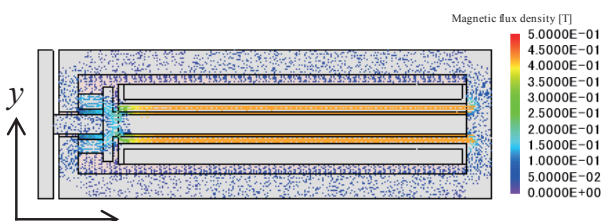
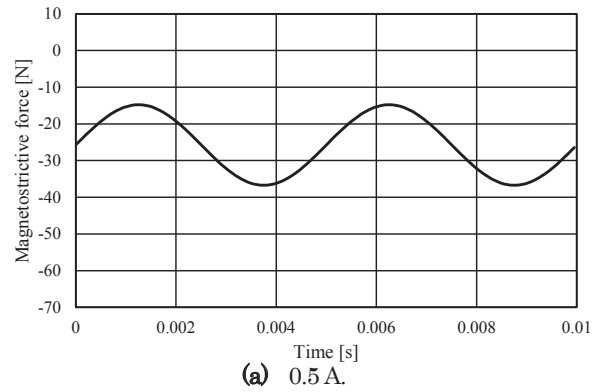


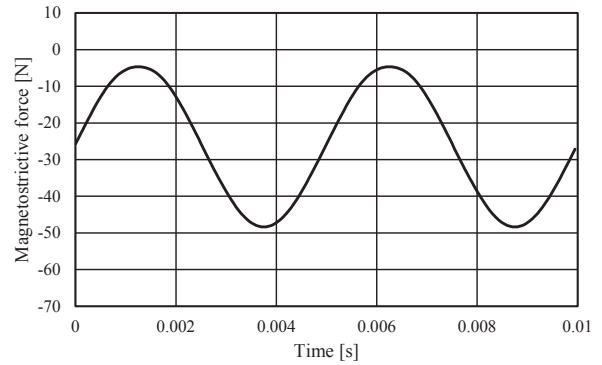
Fig. 10 Vector plot of magnetic flux density.

周波数を 200 Hz とした際の磁束密度と磁歪による発生力について検討する。なお本検討では構築した有限要素法モデルを用いた基礎検討として、交流電流源をコイルに接続し解析を行った。

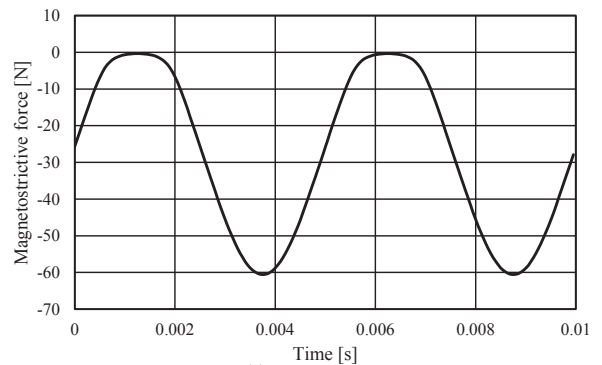
解析の条件はサンプリング周波数を 20 kHz とし電流の振幅は 0.5, 1.0, 1.5 A の 3 条件とした。なお電流値の上限を 1.5 A とした理由は実際に使用している超磁歪アクチュエータにおいて銅線の発熱を考慮したためである。本解析における超磁歪材料の材料特性は、菅原らの検討で用いられた磁界と磁束密度の値¹⁶⁾と森の研究で用いられた正磁歪材料の外部磁界に対する寸法変化¹⁸⁾の結果を使用して材料特性を決定した。超磁歪材料の B-H カーブを



(a) 0.5 A.



(b) 1.0 A.

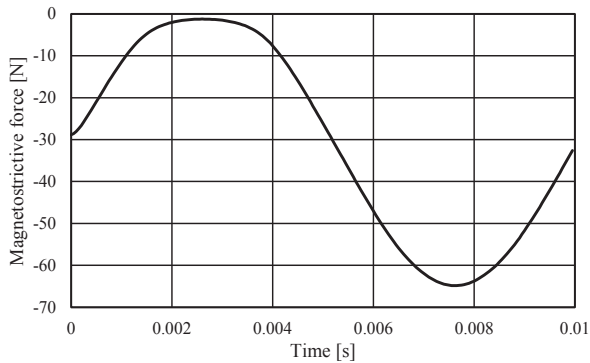


(c) 1.5 A.

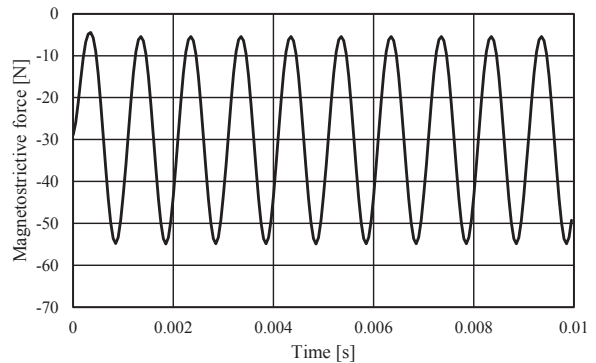
Fig. 11 Result of magnetostrictive power obtained by electromagnetic field analysis (200 Hz sine wave input).

Fig. 8 に、磁束密度と磁歪量の関係を Fig. 9 に示す。なお超磁歪材料のヤング率は 26.5 GPa とした。

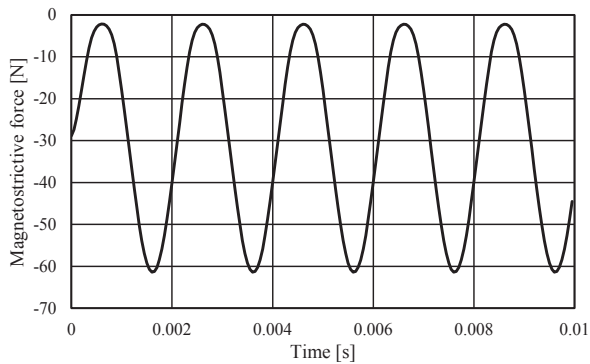
磁歪による発生力の解析結果の一例として、シャフト 2 と接している面の中心における磁束密度のベクトルプロットを Fig. 10 に示す。超磁歪材料におけるシャフト 2 と接する面で発生した磁歪による発生力の時刻歴を Fig. 11 に示す。なお磁歪による発生力の値がマイナスであるが、Fig. 7 で示す通り、本解析における軸方向において x 軸方向はシャフト 1 側を原点として右方向を正とするため超磁歪材料の伸長によってシャフトが押し出される方向はマイナスとなる。このことから超磁歪材料が伸長してシャフトを駆動する磁歪による発生力を発揮していることがわかる。しかし、印加電流 1.5 A の場合では磁歪による発生力が 0 N 程度に減少した際に波形に歪みが見られた。これは磁束密度が低下した際に超



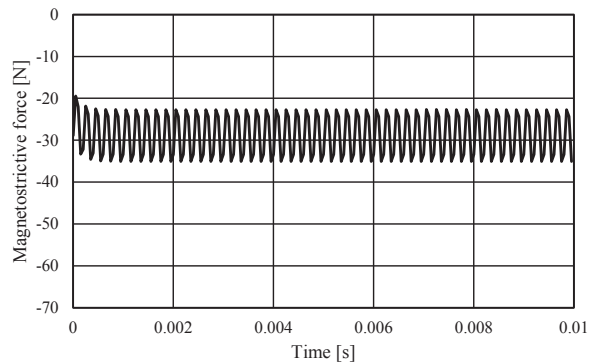
(a) 100 Hz



(c) 1000 Hz



(b) 500 Hz



(d) 5000 Hz

Fig. 12 Time histories of analyzed magnetostriction force.

磁歪材料の非線形な領域で動作したためと考えられる。

4. 超磁歪アクチュエータの周波数特性に関する検討

4.1 解析条件

前章では研究の第一段階として制御出力に電流源を使用し、アクチュエータのインダクタンスを考慮せずに検討を行った。実機での使用を想定する場合、電流制御型のアンプを使用することでインダクタンスによる遅れを補償することができる。しかしながら、電流制御型のアンプは発熱などによってアクチュエータのインピーダンスが増加した際は電圧を増加し、指令された電流を出力するよう動作する。増加した電圧によりさらなるアクチュエータの温度上昇を招き、アクチュエータを破損する恐れがある。このため提案するシステムでは電圧制御型のアンプを使用する予定である。電圧制御型のアンプはインダクタンスの影響を受けるため、周波数特性について検討を行う。解析条件はコイルに交流電圧源を接続し、印加する電圧を 100 Hz から 10000 Hz まで変化させた。また印加電圧は 3 V とし、その他の解析条件は前章の電磁界解析で用いた有限要素法モデルと同様とした。

4.2 解析結果

得られた磁歪による発生力の時刻歴を Fig. 12 に示す。同図(a)は 100 Hz、(b)は 500 Hz、(c)は 1000 Hz、(d)は 5000 Hz の結果である。周波数の増加に伴い、振幅が減少していく傾向が確認できた。同図の(a)のように 100 Hz では磁歪による発生力が -3 N 以上になった際に、波形に歪が見られた。本研究では残留磁束密度 0.42 T の FB5B を使用して検討を行ったが、より残留磁束密度の高い永久磁石を用いることで改善すると考えられる。

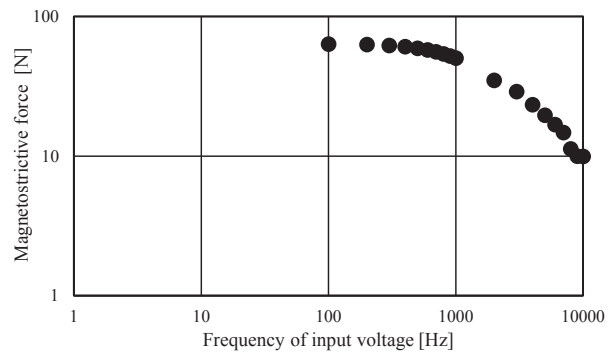


Fig. 13 Magnetostrictive force of each frequency.

各周波数における磁歪による発生力の両振幅値を Fig. 13 に示す。永久磁石を用いることで 100 Hz～500 Hz までは磁歪による発生力の振幅は約 60 N とほぼ一定であるのに対し、1000 Hz 以上では振幅が減少し、10000 Hz で約 9 N まで減少した。

しかしながら本システムで提案する ANC システムは 100 Hz～500 Hz のロードノイズを対象としており、今回検討したモデルは ANC システムのアクチュエータとして十分な性能を持っていることが得られた。

5. まとめ

本報告では超小型モビリティの車内騒音対策として超磁歪アクチュエータによる壁面振動を利用したアクティブ騒音制御システムの構築に向けて有限要素法による電磁界解析から検討を行った。コイルに印加する交流電流の周波数を単一周波数とした際のバースマグネットの有無や電流振幅が出力に与える影響について

検討を行った。検討の結果、バイアスマグネットの設置によって指令電流と同一の波形を出力でき、アクチュエータの動作を確認した。また電流振幅値に関する検討から、制御出力を歪ませずに出力できる電流を得ることができた。

さらに実機を想定した電圧源を用いた検討ではアクチュエータの周波数特性を得、検討したモデルがロードノイズに対するANCシステムのアクチュエータとして有効であることを示した。

一方で、超磁歪アクチュエータの設計も個々の要素の固有振動数が出力特性に影響があると考えられるため、今後はアクチュエータの大きさや重量、形状や構成要素の変更やより透磁率の高い材質に変更しての検討を考えている。また、新たな超磁歪アクチュエータは既存のアクチュエータの磁歪による発生力や磁束密度よりも高い値を目標とするが、電磁界解析と構造解析を連成させ超磁歪アクチュエータの設置位置やより効率よく音波を出力できる壁面の検討も行うことにより、アクチュエータの駆動に必要なエネルギーを減らして大きな音圧レベルの音が出力できると考えている。

謝辞 本研究は競輪の補助を受けて実施しました。

References

- 1) The ministry of land, infrastructure, transport and tourism: *Profits on ultra-compact mobility lead to investigation utilizing experiments*, 63, (2011) (in Japanese).
- 2) N. Yukawa: *Trans. Jpn. Mech. Eng.*, **112**, 426, (2009) (in Japanese).

- 3) J. Namaizawa, O. Ishiyama, and O. Yamada: *Proc. Jt. Symp. Jpn. Soc. Mech. Eng. Acoust. Soc. Jpn.*, **1**, 143 (2001) (in Japanese).
- 4) K. Yamaguchi: *J. Acoust. Soc.*, **73**, 21 (2017) (in Japanese).
- 5) Y. Kurosawa, T. Yamaguchi, and M. Sasajima: *Trans. Soc. Automotive Eng. Jpn.*, **44**, 1233 (2013) (in Japanese).
- 6) T. Kato, R. Suzuki, R. Miyao, H. Kato, and T. Narita: *Actuators*, **7**, 49 (2018).
- 7) R. Suzuki, R. Miyao, T. Kato, H. Kato, and T. Narita: *Proc. Tokai Univ, Ser. E*, **44**, 21 (2017).
- 8) S. Sano, M. Suzuki, and M. Asaoka: *J. Acoust. Soc.*, **49**, 735 (1993) (in Japanese).
- 9) R. Fukuda and N. Tanaka: *Trans. Jpn. Mech. Eng.*, **81**, 1 (2016) (in Japanese).
- 10) A. Sanada, T. Higashiyama, and N. Tanaka: *Trans. Jpn. Mech. Eng.*, **80**, 1 (2014) (in Japanese).
- 11) Y. Matsui: *Trans. Jpn. Mech. Eng.*, **111**, 40 (2008) (in Japanese).
- 12) H. Wakiwaka: *J. Jpn. Soc. Appl. Electromagn. Mech.*, **24**, 81 (2016) (in Japanese).
- 13) T. Fujita, H. Nonaka, C.S. Yang, H. Kondo, Y. Mori, and Y. Amasaka: *Trans. Jpn. Mech. Eng.*, **64**, 82 (1998) (in Japanese).
- 14) T. Kato, R. Suzuki, T. Narita, H. Kato, and Y. Yamamoto: *Int. J. Appl. Electromagn. Mech.*, **25**, 153 (2016).
- 15) K. Ishizuka, T. Kato, H. Kato, T. Narita, A. Kojima, and H. Moriyama: *Trans. Jpn. Mech. Eng.*, **25**, 88 (2017) (in Japanese).
- 16) M. Sugawara and M. Arai: *Trans. Jpn. Soc. Comp. Eng. Sci.*, **7**, 2, 11-080317 (2008) (in Japanese).
- 17) T. Kobayashi and I. Sakai: *J. Jpn. Soc. Prec. Eng.*, **60**, 1695 (1994) (in Japanese).
- 18) T. Mori: *J. Robot. Soc. Jpn.*, **15**, 334 (1997) (in Japanese).

2020年12月31日受理, 2021年2月11日再受理, 2021年3月1日採録