

愛知工科大学紀要

工学部・愛知工科大学自動車短期大学

第19卷

Bulletin of Aichi University of Technology

AUT

愛知工科大学研究紀要 第19巻

目 次

研究論文

球形充填材の相互作用を考慮した複合材料微視構造の有限要素熱伝導解析

..... 近藤 篤史, 井藤 良温 1

感情音声合成を用いた高齢者向けコミュニケーションツール

..... 山中 裕介, 實廣 貴敏 9

頭部伝達関数におけるノッチ幅と中心周波数の偏移が音色知覚と音像定位に及ぼす影響

..... 山高 正烈, 坂本 修一, 鈴木 陽一 19

BMIに関する基礎的研究(簡易脳波計を用いた被験者と健常者との意思伝達の基礎実験)

..... 磯貝 正弘, 楊 哲 25

研究ノート

振子型動吸振器に適用する磁気ダンパの減衰力に関する考察

..... 村上新 33

NC工作機械における象限突起の加工面への影響を軽減する方法

..... 西口 直浩 41

解説・総説

SDGsに対応したエンジニアリング・デザイン教育の動向

..... 尾関 智恵 47

大型車の車輪脱落事故

..... 服部 幸廣, 甲村 一貴, 巨藤 誠 49

報告

コロナ禍における音楽系課外活動「電音部」の活動継続に向けて

..... 鵜飼 達也 53

業績リスト(2021.1～2021.12)

研究論文

球形充填材の相互作用を考慮した複合材料微視構造の有限要素熱伝導解析

近藤 篤史*, 井藤 良温*

(2021年9月30日受理)

Finite Element Analyses of heat transfer in microstructure of composite materials with consideration of interaction between spherical fillers.

Atsushi KONDO* and Yoshiharu ITO*

(Received September 30, 2021)

Abstract

Thermal properties of composite materials with spherical fillers were numerically analyzed. Cyclic microstructures of the materials with dispersed spherical fillers were modeled as Representative Volume Elements with FCC and BCC material systems. Finite element analyses considering contact conditions between constituents were conducted to study local interaction. Thermal conductivities of the resulted materials were calculated with different volume fraction of the fillers based on the FEA results and compared to theoretical results. The thermal conductivity with low volume fraction were almost coincided with Maxwell's theoretical value where local interaction is not considered. Materials with high volume fraction showed significant improvement of thermal conductivities, which is above Meredith's theoretical value where local interaction is approximately considered. The improvement attributed to heat flux through contact points of fillers judging from field of heat flux obtained from the FEAs.

キーワード: 複合材料, 有限要素解析, 熱伝導率, 分散系, 充填材

Keywords : Composites, Finite Element Analysis, Thermal Conductivity, Dispersion, filler

1. 序論

軽く, 成形加工の容易な高分子材料に, 炭素や金属等の微粒子を添加することにより, 非常に高い熱伝導性を得ることができることが知られており, 様々な工学的応用が行われている. しかしながら, これら材料の特性には, 充填材の形状や含有率, 材料の界面の状態といった多くの因子が関係しており, 目的の特性を実現する材料系の決定には, 多くの実験が必要となる.

このような背景から, 複合材料の熱伝導特性を予測するための多くの理論式が提案されてきた. Maxwellは球状の充填材を中央に含み, 無限遠で均一な温度になることを仮定した熱伝導方程式を解き, 複合材料の熱伝導率を次式のように求めた[1].

$$K_c = \frac{K_f + 2 - 2v_f(1 - K_f)}{K_f + 2 + v_f(1 - K_f)} \quad (1)$$

ここで, K_c は複合材と母材の熱伝導率の比であり, K_f は充填材と母材の熱伝導率の比である. また, v_f は充填材の体積含有率を表す. この理論式では, 充填材の間の熱的な相互作用を考慮していないことから,

充填材の含有率が高い場合に実験結果と大きな相違が生じる. Bruggemanは, Maxwellの式で解いた複合材の中に, 更に充填材を加えるという再帰的な方法で, 充填材間の相互作用を近似的に導入した[2]. Meredithは, 着目する充填材に最も近接する充填材との相互作用を考慮することによってBruggemanの方法を拡張し, 比較的高い含有率における熱伝導率の予測が可能な次式を提案した[3].

$$K_c = \left[\frac{2 + v_f(wK_f - 1)}{2 + v_f(w - 1)} \right] \left[\frac{2(1 - v_f) + v_f w K_f}{2(1 - v_f) + v_f w} \right] \quad (2)$$

本式は形状パラメータ w を用いて, 様々な形状の充填材に適用できる式となっており, 充填材が球状の場合, 次式が用いられる.

$$w = 3/(K_f + 2) \quad (3)$$

充填材の粒径に分布を持たせることにより, 均一な粒径の場合よりもさらに高い含有率を実現することができる. 金成は, 新たなパラメータ x を導入してMeredithの方法を拡張し, 粒径分布を持つ材料系にも適用可能な次式を提案した[4].

* 愛知工科大学工学部機械システム学科, 〒443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乗 50-2

Department of Mechanical Systems Engineering, Aichi University of Technology, 50-2 Manori, amagori 443-0047, Japan

$$1 - v_f = \frac{K_c - K_f}{K_c^{1/(x+1)}(1 - K_f)} \quad (4)$$

これらの理論式により、熱伝導率の予測値と実験結果との良い相関が得られるようになったが、充填材間の相互作用の考慮が近似的に行われていることから、実験結果に基づくパラメータ調整が必要である。

そこで、数値計算によって構成材料間の相互作用をより厳密に考慮する手法が検討されてきた[5-16]。このような数値計算では多くの場合、Fig.1のように、対象となる材料が周期的に連続した微視構造を持つと仮定し、その一単位を代表体積要素として抽出する。本稿では以後、代表体積要素をRVE (Representative Volume Element) と呼称する。このモデルに有限要素法などの数値計算法を適用することにより、実現象をより詳細に解析することができる。

本研究では、球形の充填材が均一に分散した材料系を仮定し、有限要素法を用いて充填材間の接触を含む熱的な相互作用を詳細に解析する。これにより、高含有率の材料系における優れた熱伝導性の発現メカニズムをより深く理解することを目指す。

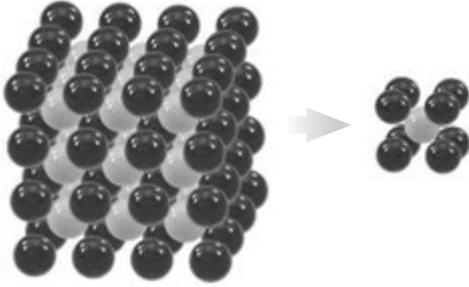


Fig.1 Extraction of a RVE from cyclic microstructures.

2. 材料の熱伝導構成則

2.1 等方性材料の1次元熱伝導

等方性材料のある面を横切る単位面積当たりの熱量 q は次式で表され、フーリエの法則として知られる。

$$q = -\kappa \frac{dT}{dn} \quad (5)$$

ここで、 κ は熱伝導率、 T は温度、 n は面の法線方向の距離である。

2.1 異方性材料の3次元熱伝導

異方性材料に式(5)を適用し、3次元の行列形式で表すと、次式で表される。

$$\mathbf{q} = -\boldsymbol{\kappa} \cdot \nabla T \quad (6)$$

本研究では複合材料の巨視的な熱伝導特性はこの構成則に従うと仮定する。ここで、熱流束 \mathbf{q} は次の成

分で表され、

$$\mathbf{q} = [q_x \quad q_y \quad q_z]^T \quad (7)$$

こう配演算子 ∇ は、行列形式で次のように表される。

$$\nabla = \left[\frac{d}{dx} \quad \frac{d}{dy} \quad \frac{d}{dz} \right]^T \quad (8)$$

また熱伝導率 $\boldsymbol{\kappa}$ は、次の対称行列で表すことができる。

$$\boldsymbol{\kappa} = \begin{bmatrix} \kappa_{11} & \kappa_{12} & \kappa_{31} \\ & \kappa_{22} & \kappa_{23} \\ sym. & & \kappa_{33} \end{bmatrix} \quad (9)$$

熱伝導率 $\boldsymbol{\kappa}$ は2階のテンソルであり、以下の座標変換則に従う。

$$\boldsymbol{\kappa}' = \mathbf{L}\boldsymbol{\kappa}\mathbf{L}^T \quad (10)$$

ここで、 \mathbf{L} は方向余弦行列で、次の成分で表される。

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} l_1 & m_1 & n_1 \\ l_2 & m_2 & n_2 \\ l_3 & m_3 & n_3 \end{bmatrix} \quad (11)$$

3. 代表体積要素 (RVE)

3.1 材料微視構造

本研究では、充填材料が母材内で均一に分散している場合を扱う。この場合の最も基本的な材料微視構造として、分子の構造として知られる面心立方格子、体心立方格子などが考えられる。本稿では以後、面心立方格子をFCC (Face-Centered Cubic)、体心立方格子をBCC (Body-Centered Cubic) と呼ぶ。Fig.2に示すFCCおよびBCCのモデルは、同一の充填材の含有率の下では、隣接する充填材が十分に離れている場合を代表しており、充填剤の間の熱伝導的な相互作用を議論するのに適していると考えられるため、本研究では、これらのモデルを解析の対象とする。

FCCモデルでは、充填剤の含有率 $v_f=74\%$ のとき、最密充填状態となり、最も隣接している充填剤が接触状態になる。BCCモデルでは $v_f=68\%$ のとき、同様の状

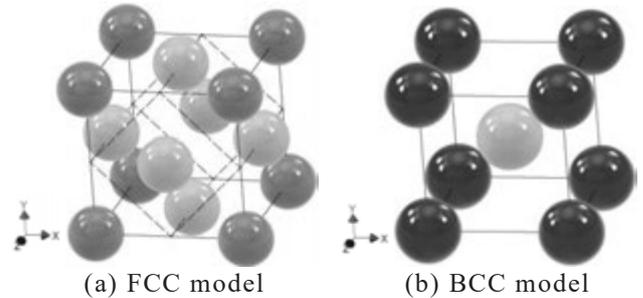


Fig.2 Microstructures of FCC and BCC models.

態となる. 本研究では, 充填剤の接触が発生するこれらの含有率と, 接触が発生しない一般の含有率の双方を解析の対象とする.

本解析では直交座標系を用い, x , y , z 軸の各方向が格子の方向と一致する座標系を基本として用いる. この座標系を基本とし, Fig.3に示すように, xy 平面内の回転角 θ および xz 平面内の回転角 φ を組み合わせた座標変換を行うことにより, 任意の方向の直交座標系を表すことができる.

FCCモデルでは, Fig.2(a)に破線の領域で示すように, $\theta=45^\circ$ とすることにより, 最短距離で隣接する充填剤を変換後の x 軸方向に整列させることができる. 本研究では, この条件を解析対象に含めることとし, 座標変換FCCモデルと呼称する.

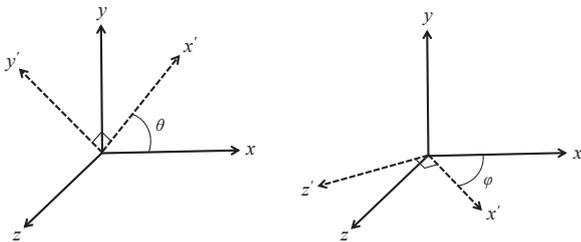


Fig. 3 Transformation of a Cartesian coordinates.

4. 有限要素法による熱伝導解析

4.1 解析モデル

有限要素解析に用いたモデルをFigs.4-6に示す. 明色で示される領域が母材を表し, 暗色で表される領域が充填材を表す. z 軸方向の対称性を考慮した1/2モデルとした. 低次連続体要素を用い, 4面体, 5面体, 6面体を組み合わせた要素分割を行った.

有限要素法のソルバーとして, MSCソフトウェア株式会社のMarc2017を使用し, プリポストソフトウェアとしてMarc Mentat2017を使用した. プラットフォームとして, AMD Ryzen 5 2600XプロセッサとオペレーティングシステムCent OS 7を用いた.

解析に用いた材料特性をTable 1に示す. 充填剤は球状黒鉛, 母材は一般的な樹脂を仮定して熱伝導率を決定した. 充填剤と母材の熱伝導率比は $K_f=1250$ である.

境界条件は以下のように定義した. x 軸方向の熱伝導率を解析するため, 有限要素ソルバーのMPC(Multi Point Constraint)の機能を使用して, x 軸方向の平均的な温度勾配を次式により設定した.

$$T_{left} - T_{right} = T_{fixed} \quad (12)$$

ここで, T_{left} は左側の対称面上の節点の温度を表し, T_{right} は右側の対応する位置にある節点の温度を表す. T_{fixed} は2つの対称面間の温度差を表す. この節点は,

モデル内の要素に属さない独立した節点であり, 式(12)で定義されるMPC群に対して共通の節点である. この条件を定義するために, 左右の対称面は同じメッシュパターンにする必要がある. 今回の解析では, この条件で定義される温度差として $T_{fixed}=1^\circ$ に固定する境界条件を設定した.

同様に, y 軸方向の周期連続条件を定義するため, 以下の関係式を定義した.

$$T_{top} = T_{bottom} \quad (13)$$

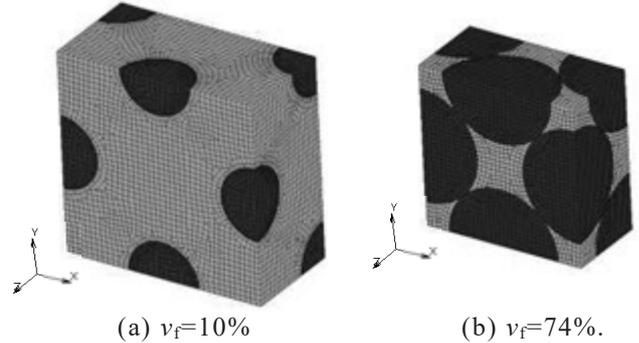


Fig. 4 Numerical models of FCC microstructures.

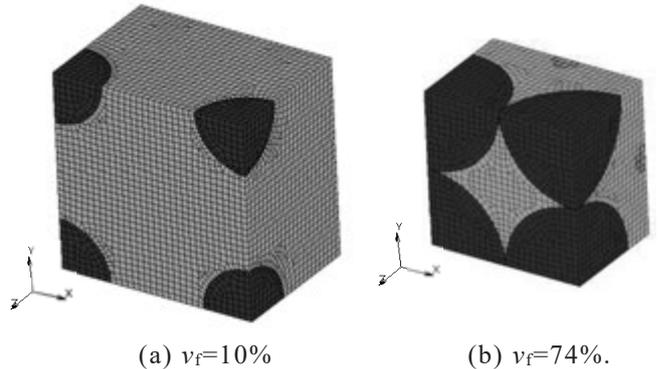


Fig. 5 Numerical models of Transformed FCC.

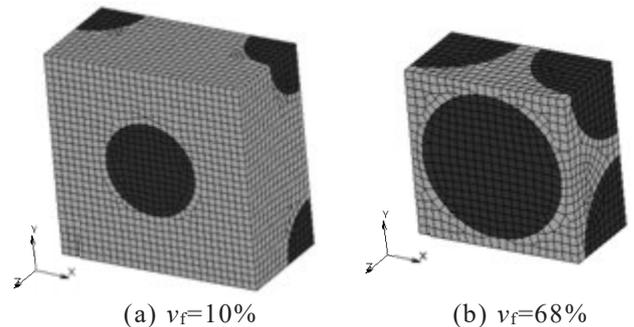


Fig. 6 Numerical models of BCC microstructures.

Table 1 Material properties used for FEA.

	Fillers	Matrix
Thermal conductivity [W/(m·K)]	250	0.2
Diameter [μm]	50	-
Volume fraction [%]	BCC: 10, 40, 60, 68 FCC: 10, 40, 60, 74	-

熱伝導解析では、対称面に境界条件を定義しないことにより、その面を介した熱の移動が生じないことから、面対称の温度分布を得ることができる。今回の解析では、z軸に垂直な面でこの面対称条件を考慮した。

充填材と母材間の熱伝導は、ソルバーの接触解析の機能を用いて解析した。充填材と母材の要素群の接触条件を接着状態に設定することにより、界面で温度が連続になるMPCがソルバー内で自動的に定義される。なお、今回はRVEが直方体であるため、対称面が平面であるが、上記の周期対称条件は、対称面が任意の形状のRVEに対して有効である[14-16]。

4.2 複合材料の熱伝導率の算出

有限要素解析の結果から、次の方法で複合材料の巨視的な熱伝導率を算出した。

有限要素解析の結果として、式(12)の T_{fixed} を設定した節点に、対称面を通過する熱量の合計値が算出される。この熱量を Q_{react} とし、RVEのx, y, zの各軸方向の長さをそれぞれ L_x, L_y, L_z とすると、RVEをx軸方向に通過する単位面積当たりの熱量は $Q_{react}/(L_y L_z)$ である。

また、 T_{fixed} はx軸方向の対称面間の温度差であるため、RVEのx軸方向の平均的な温度勾配は T_{fixed}/L_x である。したがって、式(5)を変形して次式が得られる。

$$\kappa = \frac{Q_{react}}{L_y L_z} \cdot \frac{L_x}{T_{fixed}} \quad (14)$$

5. 結果と考察

Table 2に有限要素解析の結果に基づいて式(14)で算出した熱伝導率を示す。FCCモデルと座標変換FCCモデルの熱伝導率の値は、ほぼ一致した。

Fig. 7に解析結果と理論式を比較した結果を示す。横軸は充填材の含有率を表し、縦軸は複合材の熱伝導率と母材の熱伝導率の比 κ_c/κ_m を表している。縦軸の値は、充填材を加えることによって、元の材料の熱伝導率がどの程度向上するかを表しているといえることができる。金成の式については、今回は粒径分布を考慮していないが参考として示しており、 $x=1.25$ の値を用いた。

含有率 $v_f=10, 40\%$ ではMaxwellの式とほぼ一致している。 $v_f=60\%$ ではMaxwellの式よりは若干高く、Meredithの式よりは低い値となっている。Maxwellの式では充填材間の相互作用を考慮していないため、含有率が低い場合のこのような結果は妥当と考えられる。 $v_f=68\%$ のBCCモデルと $v_f=74\%$ のFCCモデルは、どの理論式よりも高い熱

伝導率となっている。これらのモデルは最密充填状態であるため、充填材間の接触の影響が生じていることが考えられる。

Figs. 8-10にFCCモデル、座標変換FCCモデル、BCCモデルの温度分布をそれぞれ示す。いずれのモデルも、熱伝導率が高い充填材の内部にはほとんど温度勾配が発生しておらず、隣接する充填材の間の母材に連続な温度勾配が発生している。Maxwellの式では、中央に単一の充填材が含まれた材料が無遠慮で一定の温度になることが仮定されているが、今回の $v_f=10\%$ の解析では、この仮定にあった緩やかな温度勾配が生じている。このため、低い含有率の解析で算出された熱伝導率がMaxwellの式と一致したと考えられる。 $v_f=68\%$ のBCCモデルと $v_f=74\%$ のFCCモデルの解析では、狭い領域で激しい温度変化が生じており、前述の仮定を満たしていないと考えられる。

Table 2 Thermal conductivities of composites obtained from the FEA.

Volume fraction of fillers [%]	Calculated thermal conductivity [W/(m·K)]		
	FCC	Transformed FCC	BCC
10	0.266	0.266	0.265
40	0.601	0.599	0.599
60	1.18	1.17	1.16
68	-	-	2.88
74	4.06	4.13	-

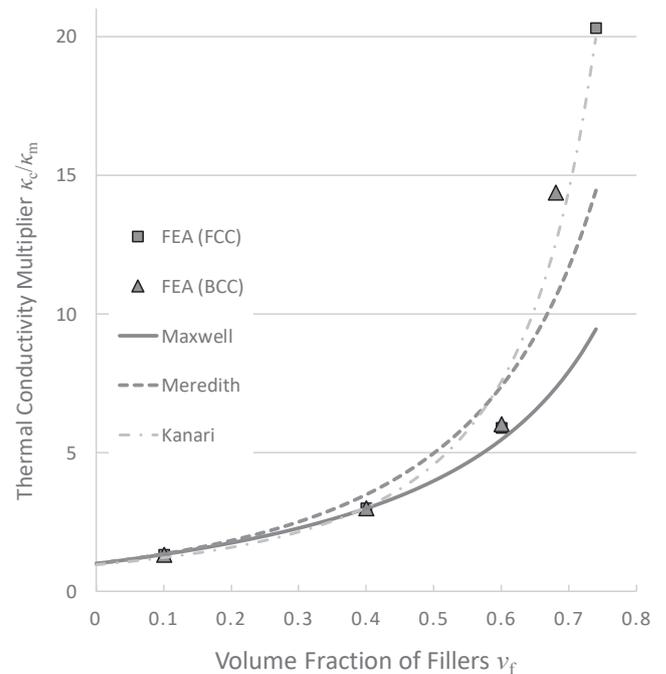


Fig. 7 Comparison between FEA and theoretical results.

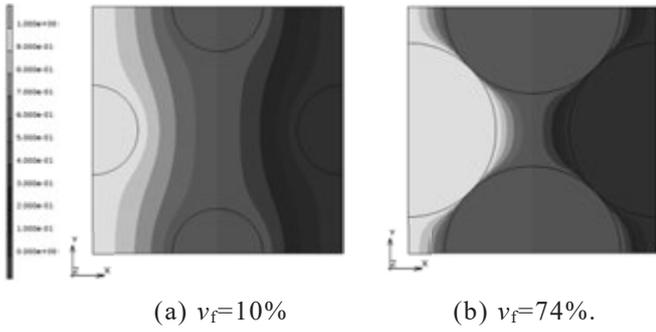


Fig. 8 Temperature distribution of FCC models.

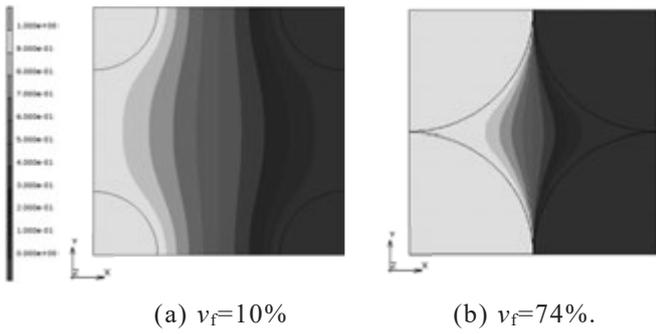


Fig. 9 Temperature distribution of transformed FCC models.

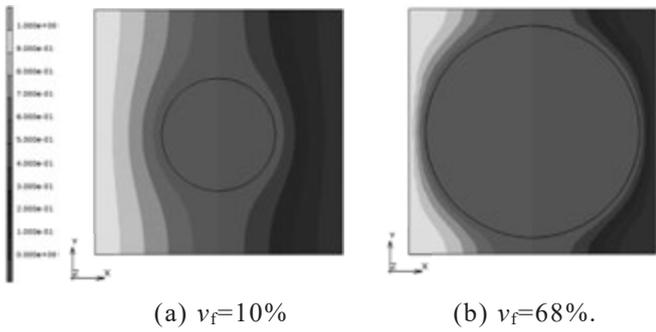


Fig. 10 Temperature distribution of BCC models.

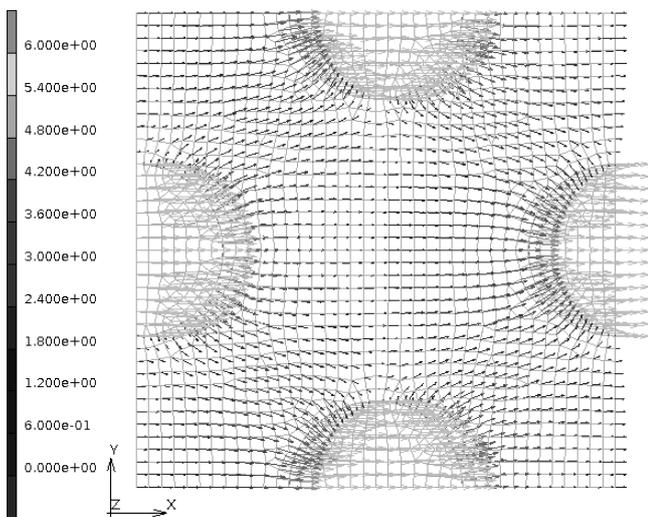


Fig. 11 heat flux field of a FCC model where $v_f = 10\%$.

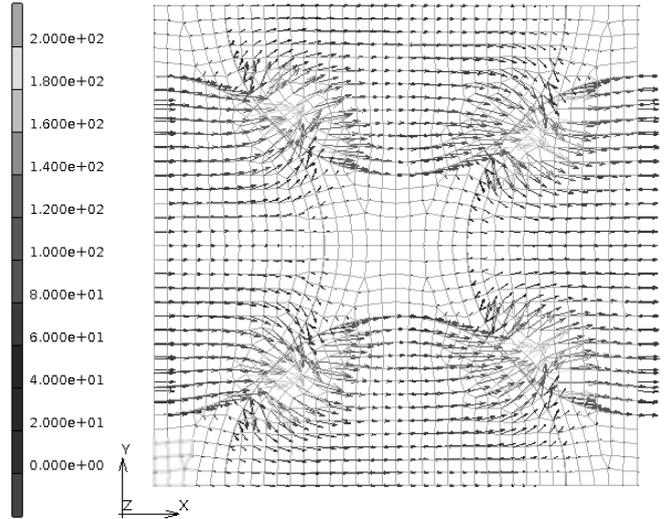


Fig. 12 heat flux field of a FCC model where $v_f = 74\%$.

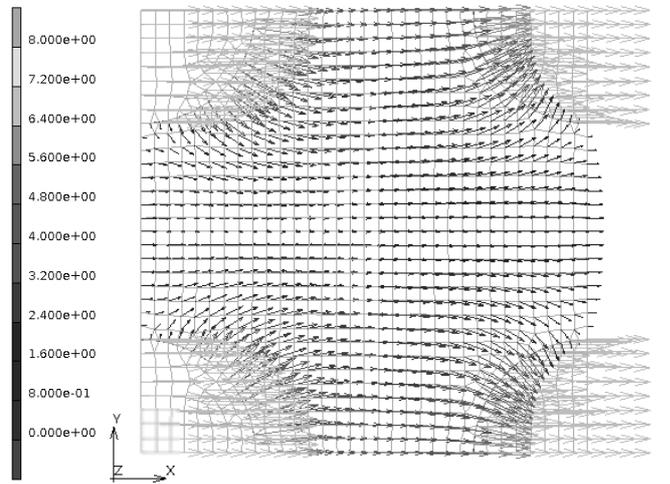


Fig. 13 heat flux field of a Transformed FCC model where $v_f = 10\%$.

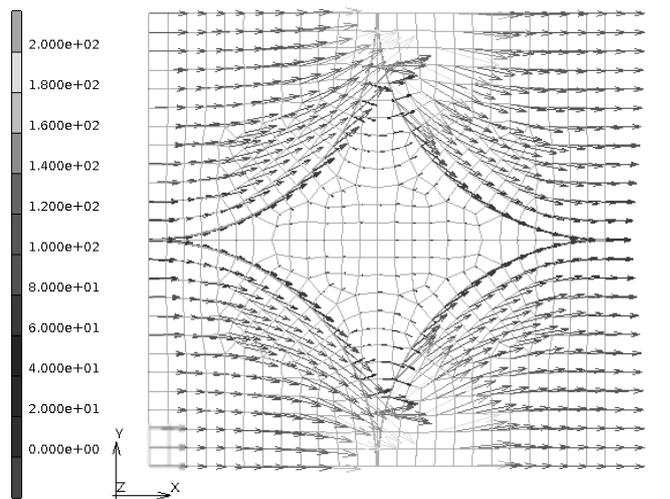


Fig. 14 heat flux field of a Transformed FCC model where $v_f = 74\%$.

Figs. 11-14にFCCモデル, 座標変換FCCモデルの熱流束ベクトル場をそれぞれ示す. z 軸対称面の手前側の分布を示した.

$v_f=10\%$ のFCCモデルでは, 1つの充填材から放射状に流れ出た熱が, 母材を伝わって隣接した充填材に到達している様子が分かる. しかしながら, $v_f=74\%$ のモデルでは, 1つの充填材の熱が, 接触している充填材に直接流れ込んでおり, 母材を流れる熱は僅かである. これより, 最密充填状態の熱伝導率がMaxwellやMeredithの理論式よりも非常に高い値になることは, 充填材間の接触に大きな影響を受けていると考えられる.

Figs. 15, 16にBCCモデルの熱流束ベクトル場を示す. BCCモデルでは, 熱伝導が平面的ではなく, 主に格子の対角線方向に生じている. FCCモデルと同様に, $v_f=10\%$ では母材を伝わる熱の割合が高く, $v_f=68\%$ では接触している充填材間で直接伝わる熱が支配的になっている.

6. 結論

球形の充填材が均一に分散した複合材料について, 有限要素法による熱伝導率の解析を行い, 充填材の含有率の増加に伴って熱伝導率が向上するメカニズムを検討した. 体心立方格子, 面心立方格子の分散系で, 構成材料間の接触を考慮した解析により, 理論式で考慮が困難な充填材間の局所的な相互作用を検討し, 以下の知見を得た.

- $v_f=40\%$ 程度までの低い含有率では, 有限要素法による熱伝導率は, 相互作用の影響を考慮しないMaxwellの理論式とほぼ同じ値となった.
- $v_f=60\%$ の比較的高い含有率においても, 均一な分散を仮定した今回の解析では, 熱伝導率はMaxwellの理論式に近く, 相互作用の影響を考慮したMeredithの理論式より低い結果となった.
- 体心立方格子, 面心立方格子の最密充填状態では, 有限要素法で算出された熱伝導率はいずれの理論式よりも高くなった. 詳細な熱流束分布の結果より, この熱伝導率向上に, 充填材間の接触部に生じる局所的な熱伝熱が影響していることが示唆された.

均一な分散状態を仮定した今回の解析では, 接触の影響を考慮するには最密充填状態まで含有率を高める必要があった. しかし実際の材料では,

充填材の不規則な配置によって, より低い含有率で接触が生じると考えられる. 今後, このような接触が実際の材料の熱伝導率に与える影響を検討することが重要と考えられる.

謝辞

本研究は, 愛知工科大学特別研究推進プロジェクトの支援を受けて実施した. ここに謝意を表します.

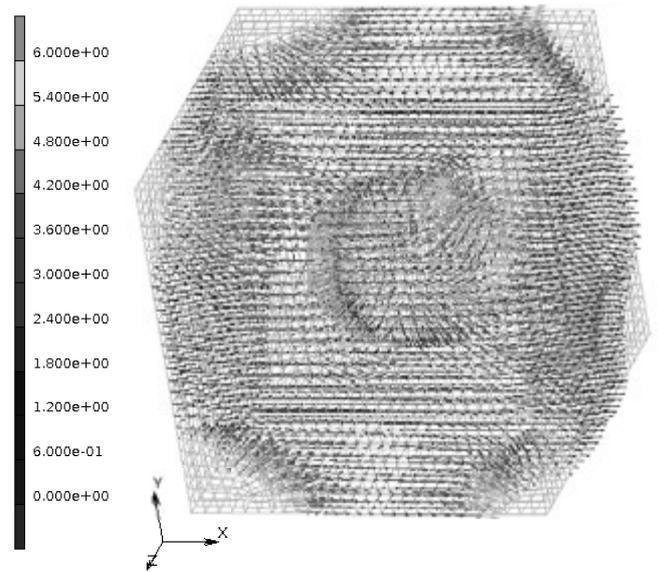


Fig. 15 heat-flux field of a BCC model where $v_f=10\%$.

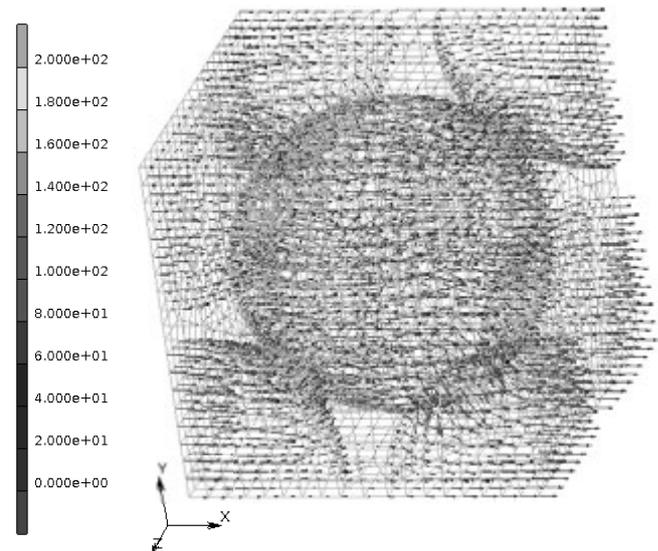


Fig. 16 heat-flux field of a BCC model where $v_f=68\%$.

参考文献

- [1] J.C. Maxwell, "A Treatise on Electricity and Magnetism", vol. 1, ed. Oxford Press: Oxford Press, 1904.
- [2] D.A.G. Bruggeman, "Berechnung verschiedener physikalischer Konstanten von heterogenen Substanzen. I. Dielektrizitätskonstanten und Leitfähigkeiten der Mischkörper aus isotropen Substanzen", *Annalen der Physik*, pp. 636-664, 1935
- [3] R.E. Meredith, "Studies on the conductivities of dispersions," ed: University of California, Lawrence Radiation Laboratory, 1959.
- [4] 金成 克彦, "複合系の熱伝導率", vol. 26, *高分子*, pp.557-561, 1977.
- [5] R. M. Scarisbrick, "Electrically conducting mixtures," vol. 6, *Journal of Physics D: Applied Physics*, p. 2098, 1973.
- [6] R.C. Progelhof, J.L. Throne, and R.R. Ruetsch, "Methods for predicting the thermal conductivity of composite systems: A review", *Polymer engineering and science*, vol. 16, pp. 615-625, 1976.
- [7] H. Hatta and H. Taya, "Thermal conductivity of coated filler composites", *Journal of Applied Physics*, vol. 59, p. 1851, 1986.
- [8] M.T. Kortschot and R.T. Woodhams, "Computer simulation of the electrical conductivity of polymer composites containing metallic fillers", *Polymer composites*, vol. 9, pp. 60-71, 1988.
- [9] K. Ramani and A. Vaidyanathan, "Finite Element Analysis of Effective Thermal Conductivity of Filled Polymeric Composites", vol. 29, pp. 1725-1740, 1995.
- [10] A.H. Muliana and J. S. Kim, "A two-scale homogenization framework for nonlinear effective thermal conductivity of laminated composites", *Acta Mechanica*, vol. 212, pp. 319-347, 2010.
- [11] A.E. Moumen, T. Kanit, A. Imad and H.E. Minor "Computational thermal conductivity in porous materials using homogenization techniques: Numerical and statistical approaches", *Computational Materials Science*, vol. 97, pp. 148-158, 2015.
- [12] S. Giordano, "Nonlinear effective behavior of a dispersion of randomly oriented coated ellipsoids with arbitrary temporal dispersion", *International Journal of Engineering Science*, vol. 98, pp. 14-35, 2016.
- [13] W. Kaddouri, A.E. Moumen, T. Kanit, S. Madani, and A. Imad, "On the effect of inclusion shape on effective thermal conductivity of heterogeneous materials", *Mechanics of Materials*, vol. 92, pp. 28-41, 2016.
- [14] K. Miled and O. Limam, "Effective thermal conductivity of foam concretes: Homogenization schemes vs experimental data and FEM simulations", *Mechanics Research Communications*, vol. 76,, pp. 96-100, 2016.
- [15] H. A. Moghaddam and P. Mertiny, "Stochastic Finite Element Analysis Framework for Modelling Mechanical Properties of Particulate Modified Polymer Composites", *Materials*, vol. 12, 2019.
- [16] Z. Shen and H. Zhou, "Predicting effective thermal and elastic properties of cementitious composites containing polydispersed hollow and core-shell micro-particles", *Cement and Concrete Composites*, vol. 105, 2020.

研究論文

感情音声合成を用いた高齢者向けコミュニケーションツール

山中 裕介*, 實廣 貴敏*

(2021年9月30日受理)

Communication Tool for Elderly Persons Using Emotional Speech Synthesis

Yusuke YAMANAKA*, Takatoshi JITSUHIRO*

(Received September 30, 2021)

Abstract

In this paper, we propose a communication tool for watching over elderly people using speech information processing technology. It is one of messaging tools but it uses speech recognition and speech synthesis for elderly persons to make inputting messages easier. Especially, it can send one of four emotions for one sentence and synthesize emotional speech. This function can give more information than those of usual messaging applications, and it is friendlier to the elderly. In the limited experiments, the results show that the proposed communication tool is effective to watch over elderly persons.

キーワード: 高齢者, コミュニケーションツール, 感情音声合成, 音声認識, IoT

Keywords: Elderly person, Communication tool, Emotional speech synthesis, Speech recognition, IoT

1. はじめに

現在日本では少子高齢化により介護業界の人手不足が問題になっている。さらに団塊の世代が後期高齢者(75歳)の年齢に達し、医療や介護などの社会保障費の急増が懸念される2025年問題も迫ってきている。このような問題を解決する手段としてICTやセンシングシステムを使い遠隔地から高齢者を見守るサービスが増えている。しかしこの見守りサービスの多くは高齢者の安否や健康状態を見守る側に伝えるもので、高齢者の意思を伝えるものではない。

現在では様々な高齢者を見守るサービスが提案されており、例えば、象印マホービン株式会社が2001年3月より提供している「みまもりほっとライン」[1]がある。無線通信を内蔵した電気ポットを使用するだけで離れて暮らす家族の生活を見守ることが出来る。電気ポットの使用状況を、見守る家族の携帯電話やパソコンにEメールで知ることが出来るほかに、ホームページの契約者専用ページで1週間のポット使用状況をグラフで見ることが出来る。株式会社オートバックスセブンが2019年10月より提供している対話型AIサービスを搭載したロボット「ZUKKU」[2]は対話機能を搭載し、AIによる自然な会話を行うことができる。カメラ機能は搭載せずプライバシーにも配慮しており、人感センサ

を搭載することで、人の動きを感知するため離れて暮らす高齢者の見守りを行う。伝言機能では、離れて暮らす家族がテキストでメッセージを送ると、ZUKKUがそれをしゃべって知らせる。受けた側からメッセージを返信することもできる。

本研究の目的は、高齢者を見守ることに寄り添いつつお互いの利便性を向上させることができる、見守る側はテキストで見守られる側は声を使うコミュニケーションツールを提案することである。遠隔地の人物とコミュニケーションをとる方法は、メール、手紙、チャットツールなどのテキストでのコミュニケーションと、電話などの声でのコミュニケーションの2つがある。テキストでのコミュニケーションのメリットは、時間的空間的拘束が少ないことと、および記録に残ること、デメリットは、声や表情からの情報がなく、無機質なやり取りになってしまうことで、誤解が生まれやすいことである。次に、声でのコミュニケーションのメリットは、感情的な情報を伝えられることで、デメリットは時間的空間的拘束があることと記録が残らないことである。高齢者を離れた場所から見守りたい家族を見守る側、高齢者を見守られる側とする。見守る側は、仕事など見守ること以外に時間が取られる場合が多い、よって時間的空間的拘束が少なく、および記録に残すことができるテキストのコミュニケーションが向いている。無機質なやり取りに

* 愛知工科大学工学部情報メディア学科, 〒443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乗 50-2

Department of Media Informatics, Aichi University of Technology, 50-2 Manori, Gamagori 443-0047, Japan

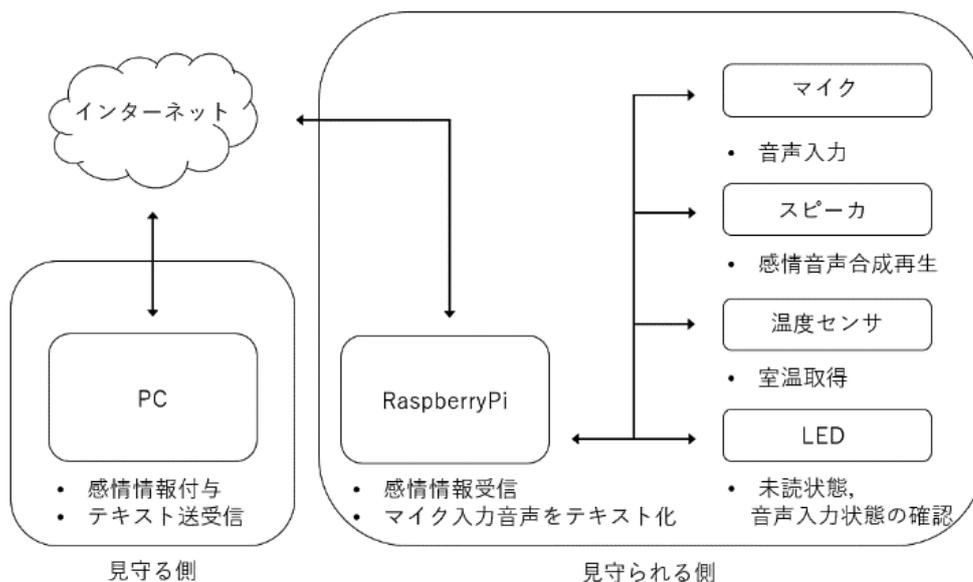


Fig. 1 Proposed communication tool.

なるというデメリットは感情音声合成を用いることで解決する. 見守られる側は, テキストより感情的な情報を受け取れる会話のほうが見守られている安心感があるため声のコミュニケーションが向いている. 感情合成音声聞き, 話したことを音声認識でテキスト化することで会話を再現する. また, 第 1 著者は本学 IoT モノづくりコース第 1 期生ということもあり, そのコースで学んだことも生かし, より良いツールの実装を目指す.

以降の本論文の構成について述べる. 2 節では提案するツールの概要, 実装方法を論じ, 3 節では見守る側のツール, ユーザインタフェースを論じ, 4 節では見守られる側のツール, インターフェイス, 音声認識エンジン, 感情音声合成エンジンを論じ, 5 節では評価実験について述べ, まとめる.

2. 提案するコミュニケーションツール

2.1. 概要

Fig. 1 に提案する見守りコミュニケーションツールのイメージを示す. 見守る側と見守られる側が, より良いコミュニケーションを行うためには, 一方のコミュニケーションツールに合わせるのではなく, それぞれが便利だと思うツールを使用する必要がある. それらの要件を満たすために提案するツールでは, 見守る側はテキストを送信し, 見守られる側は受信したテキストを合成音声で再生し, 音声認識で返信内容を入力する. そのため, 見守る側はキーボードを備えた PC のみだが, 見守られる側はマイクロホンとスピーカを装備する. また, 見守る側において, 送信するテキストに感情を付与できるようにし, 見守られる側では, 付与された感

情に対応する感情合成でテキストを読み上げる仕組みを導入する. これにより, 見守る側は伝えたい内容をより印象深く伝えることができ, 見守られる側は会話に近いコミュニケーションができ, 見守られている安心感が得られる.

LED は高齢者がツールの画面のみではわかりづらいことを考慮し装備した. 未読テキストがある場合に点灯するものと, 音声認識中のみ点灯するものがある. これにより, テキストの受信に気づかず未読の状態が続くことの防止と, 音声認識の言葉を話すタイミングが分かりやすくなる.

温度センサは室内での熱中症など室温に関する事故防止のために装備した. 30℃を超えると警告が出て見守る側へテキストを送信する. これにより, 室内での熱中症対策になるほかに一時間ごとに記録される室温を見守る側が確認することで, 見守られる側の健康を気遣うことができる.

2.2. 実装方法

見守りコミュニケーションツールでは, Android, iOS, Linux, Windows で動作させることができる Python のマルチタッチアプリケーション開発のためのオープンソースライブラリである Kivy[3]を用いて実装した. Kivy は Python のコードとは別に, Kv Language と呼ばれる独自の言語を用いてボタンやラベルなどのウィジェットをデザインすることができる. Table 1 に見守る側の実装環境, バージョン番号を Table 2 に見守られる側の実装環境, バージョン番号を示す.

Table 1 Watching-side devices.

名目	使用物	バージョン
フレームワーク	Kivy	2.0.0
実装言語	Python	3.7.3
クライアント OS	Windows 10	1909

Table 2 Watched-side devices.

名目	使用物	バージョン
フレームワーク	Kivy	2.0.0
実装言語	Python	3.7.3
クライアント OS	Raspbian	10

2.3. Raspberry Pi

見守られる側のデバイスは、Raspberry Pi 2 Model B[4]を使用した。Fig. 2は実際に使用したRaspberry Pi 2 Model Bの外観である。Raspberry Piとはイギリスのラズベリーパイ財団によって開発された、ARM プロセッサを搭載したシングルボードコンピュータである。Raspberry PiはGPIO (GeneralPurposeInputOutput) ピンを備えておりモータやセンサを接続し制御することができる。また、HDMI, USB, LAN ポートなどのインターフェイスも標準搭載されており、拡張性が高いためIoT デバイスや組み込み機器を作成することができる。作成したツールではUSBポート, AV端子, GPIOピンを使用しマイクスピーカ, LED, 温度センサの制御を行った。

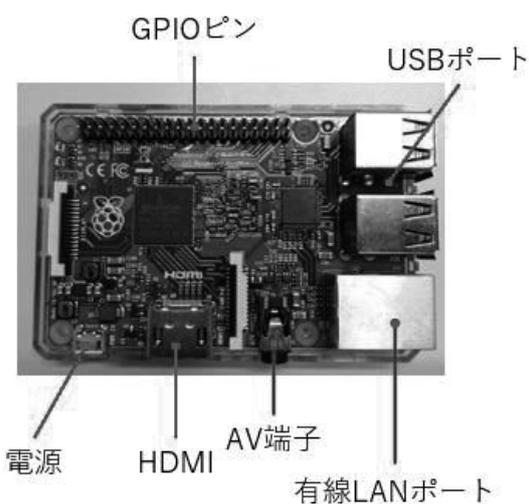


Fig. 2 RaspberryPi 2 Model B

3. 見守る側のツール

この節では、見守る側ツールの説明を行う。3.1 節ではテキストを送受信するシステムを論じ、3.2 節では

見守る側のユーザインタフェースを論じ、3.3 節では見守る側の送信内容を論じ、3.4 節では Google スプレッドシートに記録する機能を論じる。

3.1. テキストを送受信するシステム

テキストの送受信は WebSocket[5]を使用する。WebSocket はコンピュータネットワーク用の通信規格の 1 つである。従来の HTTP を使うクライアントとサーバ間の双方向通信はポーリングや comet という手法を用いることで実現していた。しかし、この手法は、新しくコネクションを行う必要があり、また、HTTP コネクションを長時間占領するため、その間にサーバに接続する他のアプリケーションの動作に影響を与える可能性がある、などの問題があった。

Fig. 3 が WebSocket を使用した通信のイメージである。WebSocket では、サーバとクライアントが最初に HTTP 通信によってコネクションを行った後、必要な通信全てを WebSocket プロトコルにより行う。この手法を使うことで新しくコネクションを行うことがなくなることや、データの送受信が一つのコネクションで行われるので、同じサーバに接続する他のアプリケーションへの影響が少なくなること、さらに HTTP コネクションより軽量なプロトコルを使うことで通信ロスが減る、といったメリットがある。

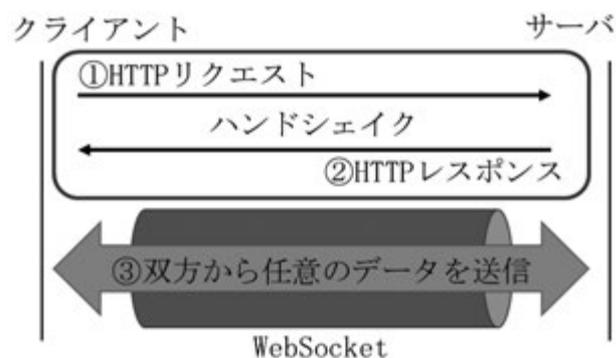


Fig. 3 Communication by WebSocket.

3.2. ユーザインタフェース

Fig. 4 が実際の見守る側ユーザインタフェースのキャプチャ画像である。画像の上半分が見守る側と見守られる側のやり取りになっており、左半分に見守る側、自分が送信したテキストが表示され、右半分に相手とサーバから送信されたテキストが表示される。中央より下にテキストを入力

する箇所があり，右の送信／既読ボタンでテキストを送信する．テキストに何も入力しない状態で送信／既読ボタンを押すと相手のメッセージを既読状態にすることができる．自分が既読状態にした場合は，Fig. 5のように，相手から受信した緑色のテキストが白色に変化する．また，相手が既読状態にした場合は，Fig. 6のように，自分が送信した青色のテキストが白色に変化する．既読の機能を実装することで相手の安否を確認することができる．また，視覚的に理解しやすくなるよう，色の変化で既読の確認ができるようにした．画像下部にテキストに付与する感情を選択する機能があり，左右のボタンを押すことで normal, happy, sad, angry の 4 種類を選ぶことができる．

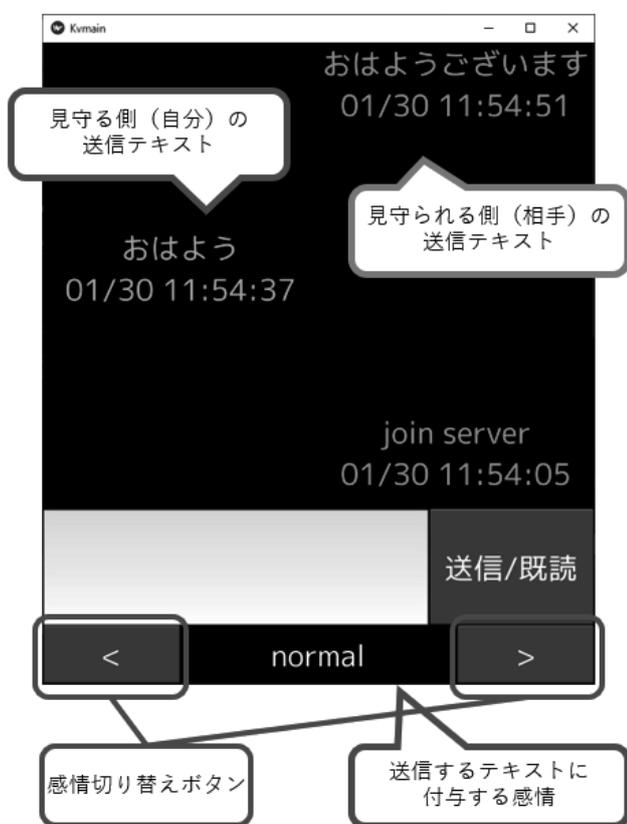


Fig. 4 User interface of the watching side.

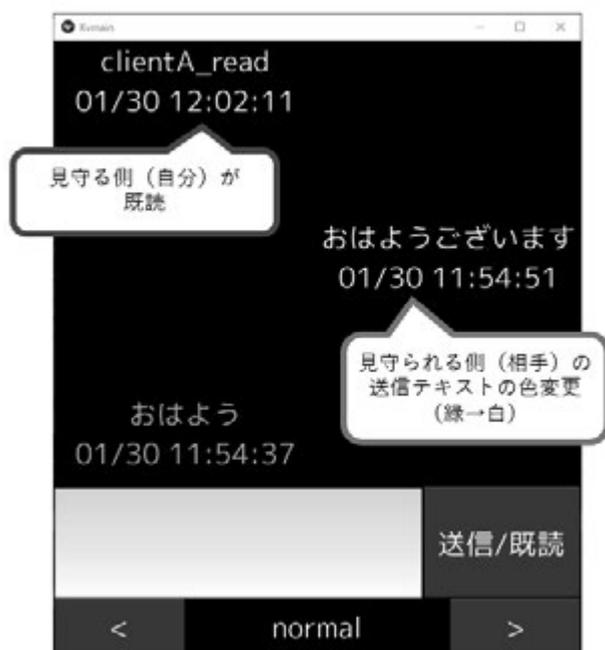


Fig. 5 Screen display after the watching person read the message.



Fig. 6 Screen display after the watched person read the message.

3.3. 送信内容

見守る側からの送信内容は 3 つで，

- テキスト
- IP アドレス
- テキストを再生する時の感情

である．Fig. 7 は実際にサーバに送信された内容

```

pi@raspberrypi:~ $ python3 ws_server2.py
INFO:websocket_server.websocket_server:Listening on port 9001 for clients..
new client connected and was given id 1
new client connected and was given id 2
client(1) said: 送信内容のテキスト@192.168.0.13@normal@
client(1) said: うれしいです@192.168.0.13@happy@
client(1) said: 悲しいです@192.168.0.13@sad@
client(1) said: 怒っています@192.168.0.13@angry@
client(1) said: clientA_read@192.168.0.13@normal@
client(2) said: 音声で入力してください@127.0.1.1@emotion@
client(2) said: 20.74℃@127.0.1.1@emotion@
client(2) said: clientB_read@127.0.1.1@emotion@
INFO:websocket_server.websocket_server:Client closed connection.
client(1) disconnected
WARNING:websocket_server.websocket_server:Client must always be masked.
client(2) disconnected

```

Fig. 7 Messages received by the server.

で、3つの送信内容は@で区切り一度に送信している。Fig. 8に既読機能のイメージを示す。テキストに何も入力しない状態で「送信/既読」ボタンを押したとき「clientA_read」というテキスト内容が送信される。この内容をサーバから受信すると既読機能が使用でき、見守る側では、見守られる側が送信した緑色のテキストが白色に変更され、見守られる側では、見守る側に送信した青色のテキストが白色に変更される。

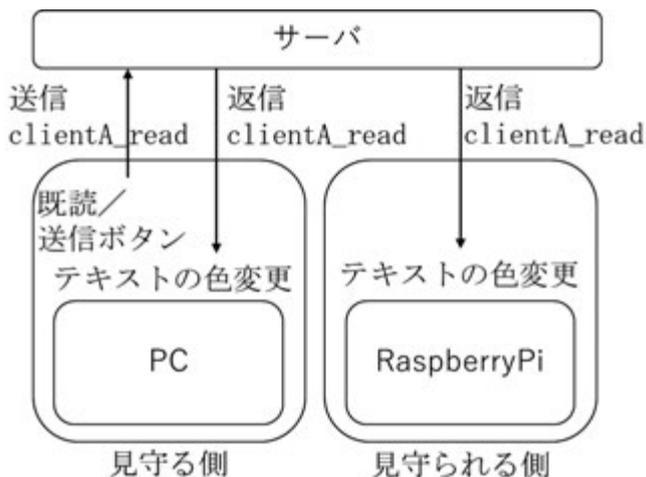


Fig. 8 Flow when the watcher reads a message.

3.4. Google スプレッドシートに記録する機能

さらに、やり取りを Google スプレッドシートに記録す

る機能を実現した。Python で Google スプレッドシートを操作することができる gspread[6]ライブラリを用いた。ツールを起動または、テキストを送受信したタイミングでスプレッドシートに現在の日付のシートがない場合は、現在の日付のシートを作成し、内容が記入される。やり取りを記入した日付と時間、見守る側が送信したテキストと既読した時に送信される clientA_read が記入される。また、見守る側が送信したテキストと既読した時に送信される clientB_read も記録される。見守る側のテキストの送信タイミングと見守られる側の既読タイミングを知ることができ、長時間既読が付かなかった場合に見守られる側の異変に気付くことができる。また、1時間ごとに送られてくる見守られる側の室温も記録され、一日の室温の変化を知ることが出来る。これによって見守る側は、見守られる側の熱中症など室温による事故と健康により気を付けることができる。

4. 見守られる側のツール

この節では、見守られる側ツールの説明を行う。4.1節では音声認識システムを論じ、4.2節では感情音声合成を論じ、4.3節では見守られる側のユーザインタフェースを論じ、4.4節では見守られる側の送信内容を論じる。

4.1. 音声認識 Google Search API

音声認識エンジンには、Google Speech API[7]を用いる。Google Speech APIは録音した音声ファイルをAPIに入力することで音声に対応する自

然文を出力することが出来る．この API を利用するには，GoogleDeveloperConsols[8]での登録とChromium-dev グループ[9]への加入が必要になる．Table 3 に録音条件を示す．

Table 3 Recoding conditions.

種類	値
音声フォーマット	16 ビット
チャンネル数	1
サンプリングレート	44100 Hz
データ点数	512

4.2. 感情音声合成 OpenJTalk

音声合成エンジンには，日本語テキスト音声合成システム OpenJTalk[10]を用いる．OpenJTalkは形態素解析部に MeCab[11]，発話辞書に NAUSRJapaneseDictionary[12]を用いた，音声合成には hts-engineAPI[13]を組み込んでいるシステムで，HTS で学習した音響モデルを扱うことが出来る．HTS には感情音声合成技術が組み込まれており，見守る側でテキストを再生する際に，感情に応じた合成音声を生産することができる．

4.3. ユーザインタフェース

Fig. 9 が実際の見守られる側ユーザインタフェースのキャプチャ画像である．画像の上半分が見守る側と見守られる側のやり取りになっており，左半分に自分が送信したテキストが表示され，右半分に相手とサーバから送信されたテキストが表示される．画像の下部分には時間，室温，音声認識結果が表示されている．その下には再生／既読ボタン，録音ボタン，送信ボタンがある．

再生／既読ボタンを押すと相手とサーバから送信されたテキストの中で最新のテキストが設定された感情で再生され，相手のテキストが既読状態になる．自分が既読状態にした場合は，Fig. 10 のように，相手から受信した緑色のテキストが白色に変化する．また，相手が既読状態にした場合は，Fig. 12 のように，自分が送信した青色のテキストが白色に変化する．録音ボタンを押すと，録音を開始し最終的に音声認識結果が表示される．音声認識に失敗した場合はもう一度ボタンを押すことで音声認識を開始することが出来る．送信ボタンを押すと音声認識結果の欄に表示されているテキストが相手に送信される．



Fig. 9 User interface of the watched side.



Fig. 10 Screen display after the watched person read the message sent by the watching person.

```

pi@raspberrypi:~ $ python3 ws_server2.py
INFO:websocket_server.websocket_server:Listening on port 9001 for clients..
new client connected and was given id 1
new client connected and was given id 2
client(1) said: 送信内容のテキスト@192.168.0.13@normal@
client(1) said: うれしいです@192.168.0.13@happy@
client(1) said: 悲しいです@192.168.0.13@sad@
client(1) said: 怒っています@192.168.0.13@angry@
client(1) said: clientA_read@192.168.0.13@normal@
client(2) said: 音声で入力してください@127.0.1.1@emotion@
client(2) said: 20.74℃@127.0.1.1@emotion@
client(2) said: clientB_read@127.0.1.1@emotion@
INFO:websocket_server.websocket_server:Client closed connection.
client(1) disconnected
WARNING:websocket_server.websocket_server:Client must always be masked.
client(2) disconnected

```

Fig. 11 Messages sent by the watched person received by the server.



Fig. 12 Screen display after the watching person read the message sent by the watched person.

4.4. 送信内容

見守られる側からの送信内容は2つで

- テキストまたは室温
- IPアドレス

である。Fig. 11は実際にサーバに送信された内容で、2つの送信内容は@で区切り一度に送信している。Fig. 13に既読機能のイメージを示す。「再生／既読」ボタンを押したとき「clientB_read」というテキスト内容が送信される。この内容をサーバから受信すると既読機能が使用でき、見守られる側では、見守る側が送信した緑色のテキストが白色に変更され、見守る側では、見守られる側に送信した青色のテキストが白色に変更される。見守られる側から感情を送信する機能はないので、3つ目の内容はemotionで固定する。見守られる側から感情を送信する機能を実装するにあたり、自動で感情を推定し、付与できるものが望ましいと考えられる。例えば、音声感情解析AI「Empath」[14]というものがある。Empathは音声の物理的特徴量を解析し言語に依存せず、「喜び／平常／怒り／悲しみ」の4つの感情と元気を解析するサービスである。このようなものが組み込み可能であれば、実現可能である。今回は使用する要件に合わないため、具体的には検討していない。

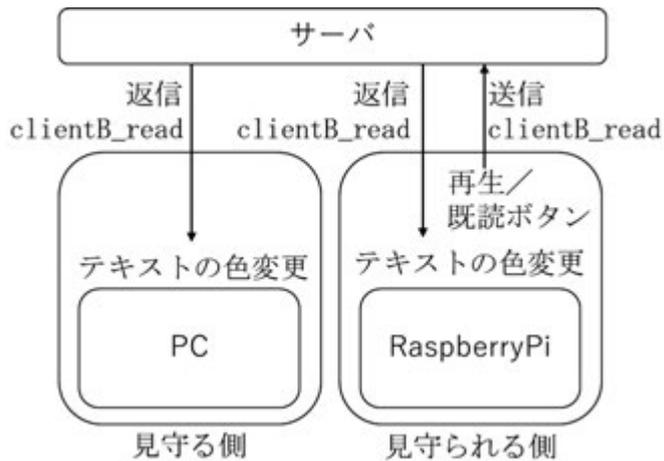


Fig. 13 Flow when the watched person reads a message.

5. 実験

この節では、コミュニケーションツールを評価するために行った実験の説明を行う。評価してもらうことでツールの有用性の確認やプログラムのバグの発見や修正を行うことができる。実験は、見守る側と見守られる側に分かれ、4種類の感情を順に使用したやり取りを行った後、見守る側と見守られる側を交代し、同じように4種類の感情を使用したやり取りを行う。5.1節では実験概要を述べ、5.2節では実験結果を論じる。

5.1. 実験概要

Table 4の(1)～(8)の項目について評価することを目的として、被験者に実際にツールを利用してもらう。Table 5はシステムを実際に使う実験のやり方を簡単にまとめたものである。実験は二人一組で行い、はじめに見守る側、見守られる側、両方のシステムの使い方について説明する。次に、見守る側、見守られる側に分かれてもらい、見守る側は感情 normal を使用してやり取りを行う。その後、感情 happy, sad, angry を順に使用してやり取りを行ってもらい見守る側、見守られる側を交替して同じように感情を使用してやり取りを行う。やり取りを終了した後に、Table 4の(1)～(8)の項目について5段階評価を行ってもらう。今回は10人5組に実験を行ってもらった。

Table 4 Questions for five grade evaluations.

(1) 感情の付与
(2) 音声入力
(3) 音声出力
(4) 感情合成音声
(5) 認識精度
(6) 再生された音声の聞きやすさ
(7) システム全体(総合的)にどうか
(8) 高齢者向けとしてどうか

Table 5 Experimental procedure.

(1) システムの使い方を説明し、見守る側と見守られる側に分かれる
(2) 見守る側は感情 normal を使用してやり取りを行う
(3) 見守る側は感情 happy を使用してやり取りを行う
(4) 見守る側は感情 sad を使用してやり取りを行う
(5) 見守る側は感情 angry を使用してやり取りを行う
(6) 見守る側見守られる側を交替して(2)～(5)を行う

5.2. 実験結果

Fig. 14は見守る側ツールを使用している実験の様子である。ノートパソコンのキーボードでテキストを入力する。Fig. 15は見守られる側ツールを使用している実験の様子である。スピーカから感情合成音声を聞き、マイクに音声を入力する。Fig. 16はTable 4の(1)～(8)の項目をそれぞれ5段階評価してもらった各項目の平均値を表している。

見つかったバグや問題点として、音声認識中に再度、録音ボタンを押すとプログラムがエラーを起こしてツールが停止してしまうというものがあった。要因としてマイクを使用している最中に、もう一度マイクの使用を要求するプログラムになっているためだった。対応として音声認識が開始から終了までの間録音ボタンを押してもマイクの要求をしないようにプログラムを修正した。次に、音声認識にかかる時間が遅いという問題があった。これは音声の録音を10秒に設定していたが、被験者が話し終わるまでにかかる平均的な時間が約4.5秒であったため被験者は認識時間が長いと感じたのだと考えられる。この問題は音声の録音時間を10秒から7秒に短縮することで対

応した。見守る側のツールで、入力中の日本語のテキストが見ることができず使いづらい問題があった。これは、Kivyの文字入力を行う textinput ウィジェットでIMEが表示されていないためである。

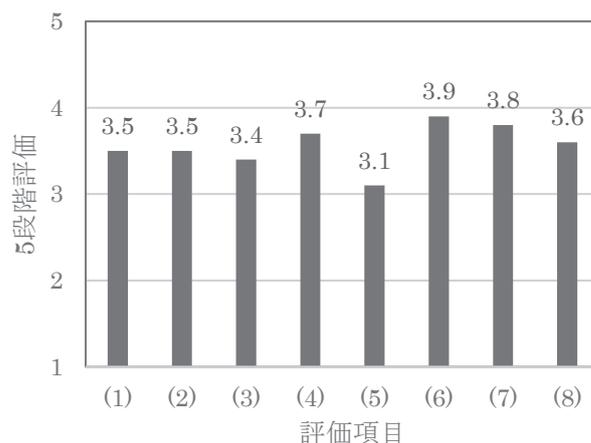
実験後の意見として、音声認識はキーボードより入力が楽で簡単であるため高齢者に向いているという意見があった。音声認識は高齢者向けのツールとして向いていることが分かった。チャットアプリのようなテキストのみのやり取りの方が早くコミュニケーションできて良いという意見もあった。評価実験の被験者は全員 20 代で、キーボード操作に慣れているためこの意見が出たと考えられる。このことから、見守る側の世代はテキストのやり取りの方が向いていることが確認できた。見守る側が感情を付けることができるのは良いが実際に再生される感情合成音声の感情の差が小さいという意見があった。今後の課題として感情により差をつける必要がある。



Fig. 14 A scene of an experiment using the proposed watching tool.



Fig. 15 A scene of an experiment using the proposed watched tool.



(1)	感情の付与
(2)	音声入力
(3)	音声出力
(4)	感情合成音声
(5)	認識精度
(6)	再生された音声の聞きやすさ
(7)	システム全体(総合的)にどうか
(8)	高齢者向けとしてどうか

Fig. 16 Experimental results for the proposed communication tool.

6. おわりに

本研究では、音声認識と感情合成音声を用いた高齢者用の見守りコミュニケーションツールを提案した。従来の見守りサービスは、高齢者側でセンシングした情報を見守る側に伝えるものの、高齢者の意思を伝えることはできないものや、テキストのやり取りは可能だが、感情情報については考慮していないものであった。

そこで、本研究では、高齢者を見守りつつ、お互いの利便性が向上させることができ、見守る側はテキストで、見守られる側は声を使うコミュニケーションツールを提案した。見守る側は、仕事など見守ること以外に時間が取られる場合が多い、よって時間的空間的拘束が少なく、および記録に残すことができるテキストのコミュニケーションが向いている。見守られる側は、テキストより感情的な情報を受け取れる会話のほうが見守られている安心感があるため声のコミュニケーションが向いている。無機質な合成音声による再生ではなく、感情合成音声により、見守り側のメッセージを見守られる側（高齢者側）で再生する。高齢者側からは、話したことを音声認識技術

により、テキスト化して見守り側へメッセージを送る。

見守る側と見守られる側のデータの送受信は WebSocket を使用した。WebSocket を使用することで、HTTP 通信によるハンドシェイク後はサーバとクライアントの双方向通信を低コストで行うことができる。見守られる側の音声認識エンジンは Google Speech API を使用した。この API は録音した音声ファイルを API に入力することで音声に対応する自然文を出力することが出来る。感情音声合成は OpenJTalk を使用した。HTS の感情音声合成技術を利用して作成された、平常(normal)、嬉しい(happy)、悲しい(sad)、怒り(angry)の4種類の感情が見守る側の設定に合わせて再生される。

このコミュニケーションツールの評価実験を10人5組の被験者に対して行った。5段階評価の結果、平均値はすべて3.0以上4.0以下となった。

「再生された音声の聞きやすさ」や「感情合成音声」を導入した点に対する評価が特によく、「システム全体(総合的)にどうか」が高い点数となった。「認識精度」が思いのほか低く、Googleのサービスを使ったのだが、現段階ではよい音声認識精度が得られなかったようである。実験後の意見から、音声認識によるテキスト入力は高齢者に向けており、キーボードによるテキスト入力は見守る側に向けていることが確認できた。

今後の課題としては、より音声認識の精度の向上をあげる必要がある。また、感情音声合成について、今回はオープンソースで公開されている OpenJTalk の機能をそのまま用いたが、見守られる側で再生される音声の感情に差異をもっとつけることができれば、より人間らしい声でのコミュニケーションにすることができる。見守る側のツールは、今回、Windows で動作させたが、Kivy は Android, iOS でも動作させることができるので、利便性を向上できるように、スマートフォン、タブレットで使えるようにしていきたい。

参考文献

- [1] みまもりホットライン,
<https://www.mimamori.net/>(アクセス日:2021年1月30日)
- [2] ZUKKU,
<https://hatapro.co.jp/group/robotics/> (アクセス日:2021年2月4日)
- [3] Kivy, <https://kivy.org/#home> (アクセス日:

2021年1月30日)

- [4] Raspberry Pi 2 Model B,
<https://www.raspberrypi.org/> (アクセス日:2021年1月30日)
- [5] WebSocket,
<https://html.spec.whatwg.org/multipage/web-sockets.html#network> (アクセス日:2021年1月30日)
- [6] gspread,
<https://gspread.readthedocs.io/en/latest/> (アクセス日:2021年1月30日)
- [7] GoogleSpeechAPI,
<https://cloud.google.com/speech-to-text/docs/quickstart-protocol> (アクセス日:2021年1月30日)
- [8] GoogleDeveloperConsoles,
<https://console.developers.google.com/> (アクセス日:2021年1月30日)
- [9] Chromium-dev グループ,
<https://groups.google.com/a/chromium.org/forum/?fromgroups#!forum/chromium-dev> (アクセス日:2021年1月30日)
- [10] OpenJTalk,
<http://open-jtalk.sp.nitech.ac.jp/> (アクセス日:2021年1月30日)
- [11] MeCab,
<http://taku910.github.io/mecab/> (アクセス日:2021年1月30日)
- [12] NAUSRJapaneseDictionary,
<http://naist-jdic.osdn.jp/> (アクセス日:2021年1月30日)
- [13] hts-engineAPI,
<http://hts-engine.sourceforge.net/> (アクセス日:2021年1月30日)
- [14] Empath,
<https://webempath.com/jpn/> (アクセス日:2021年2月5日)

研究論文

頭部伝達関数におけるノッチ幅と中心周波数の偏移が 音色知覚と音像定位に及ぼす影響

山高 正烈*, 坂本 修一**, 鈴木 陽一**

(2021年9月30日受理)

Effect of notch width and center frequency deviation in human head-related transfer function on timbre perception and sound localization

Zhenglie CUI*, Shuichi SAKAMOTO**, Yôiti SUZUKI**

(Received September 30, 2021)

Abstract

The frequency spectrum of the head-related transfer function (HRTF) plays an important role in sound localization, particularly in the median plane. The timbre of sounds is also closely related to their frequency spectra. The perception of the position of sound sources is called sound localization. Interestingly, humans can separately perceive both the timbre and position of sound sources even though their frequency spectra are mixed as they reach the ears. This study, we focus on the spectral notches in the HRTF (N1), the central frequency of which may systematically depend on elevation angle. Our study also investigated the influence of the notches on sound localization and timbre perception when the bandwidth of N1 and center of frequency changed. The results show that the increase in bandwidth of N1 is perceptible as a change in timbre. Yet the influence of the center frequency deviation of N1 on the sound localization is small. It suggests sound localization are affected only when the center frequency deviation of N1 is relatively large.

キーワード: 音空間知覚, 頭部伝達関数, 音像定位, 音色, 知覚手がかり

Keywords : Spatial hearing, HRTF (head-related transfer function), Sound localization, Timbre, Perceptual cue

1. はじめに

我々人間は音を聞く際に、音色と音の到来方向を同時に知覚できる。音色は、音源の周波数スペクトルと密接に関係しており[1-3]、音を聞いた主体が音から受ける印象の総称と定義される[4]。一方、音の到来方向を含む3次元空間位置の知覚を音像定位[5]と呼んでおり、人間が音の空間特性を知覚する能力と定義される。耳に到達する音信号には、音源からの直接音だけでなく反射音や回折音等が含まれており、耳介周りの外耳道や耳甲介腔による共振も生じている[6]。このため、両耳で観測される音の周波数スペクトルは音源の相対方向に応じて変化する。この周波数スペクトルの変化を伝達関数として表現したものを頭部伝達関数(HRTF: head-related transfer

function[7])と呼ぶが、頭部伝達関数は音像定位の重要な手がかりとなっている。特に、両耳に入力される音の時間差や強度差がほとんどない正中面や、その変化があまりない矢状面上(両耳からの距離差が一点の円上, cone of confusion [8])に位置する音源の音像定位については、頭部伝達関数のスペクトル形状が非常に重要な手がかりとされている(以降、スペクトラルキューと称する)。

このように、人間の耳に入力される音信号には、音色の手がかりと音像定位の手がかりが混在した状態であり、両方とも耳入力信号の周波数特性が手がかりであると考えられている。しかし、人間は音色と音像の双方を明確に区別して知覚することが可能であり、音の方向が変わっただけで別の音色に聞こえることを日常生活で経験することはあまりない。即ち、人間は耳入

* 愛知工科大学工学部情報メディア学科, 〒443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乗 50-2

Department of Media Information, Aichi University of Technology, 50-2 Manori, Nishihasama-cho, Gamagori 443-0047, Japan

** 東北大学電気通信研究所, 〒980-8577 仙台市青葉区片平 2-1-1

力信号から音色と音像定位を何らかの仕組みで切り分けており、それぞれの情報を別々に利用していると考えられる。この仕組みの解明は、頭部伝達関数に含まれる音像定位の手がかり、スペクトラルキューを調べる上で極めて有用であると考えられる。

過去の研究では、2 kHz以上の周波数帯域における頭部伝達関数の概形を再現すれば高精度の音像定位が可能であり、そのスペクトラルキューとして、仰角によって系統的に変化する複数帯域のレベル差が示唆された[9]。また、仰角によって系統的に変化する7 kHz付近に現れるノッチ（以下N1）がスペクトラルキューであるという報告もなされている[8]。しかし、聴覚系における周波数分析機構を司る聴覚フィルタの特性を考慮すると、N1 のように鋭いスペクトル上のノッチは、元の形状よりもはるかに緩やかで浅い興奮パターンを示すと考えられる[10]。したがって、音像定位の手がかりはN1 そのものの形状やその変化ではなく、興奮パターンの形状にあると考えるべきである。実際、頭部伝達関数の2 kHz以上の帯域を平滑化しても音像定位が可能であるという報告や[9]、8 kHzを中心とする3/4 オクターブ帯域において、それ以外の帯域とは仰角の変化に伴う帯域のレベルの変化傾向が異なる様相を呈することを示した報告もなされている[11]。

このように、音像定位の工学的制御にN1が重要であることは明らかであるが、それに起因する聴覚興奮パターン上のスペクトラルキューが何なのかについては統一的な理解が得られていない。我々の先行研究[12-14]では、広帯域雑音中に付加したN1ノッチフィルタの帯域幅や中心周波数を系統的に変化させ、それに対応する音色変化の検知限と聴取者自身の頭部伝達関数を比較することで、音色と音像定位のスペクトラルキューについて検討した。その結果、N1の中心周波数の変化は、音色の変化としては知覚されるが、仰角方向の定位方向に充分寄与するとは言えないことが示唆された。

しかし、先行研究[12-14]においては、音色弁別が充分可能なノッチ幅を用いてN1中心周波数の偏移による音色及び音像定位への影響を調べた。そのため、音色と音像定位の弁別閾の区別ができておらず、N1のノッチ幅や中心周波数の偏移が、音色に影響するのかそれとも音像定位に影響し得るのかを示すことができなかつた。先行研究の結果、N1中心周波数が7 kHzの場合の音色弁別閾は1.37 ERBであった。そこで本研究では、これらの先行研究の知見を踏まえ、音色弁別が不可能と考えられるN1帯域幅=0.5 ERBの場合と、音色弁別が充分可能なN1帯域幅=3.0 ERBを実験条件として設定し、N1中心周波数を7～

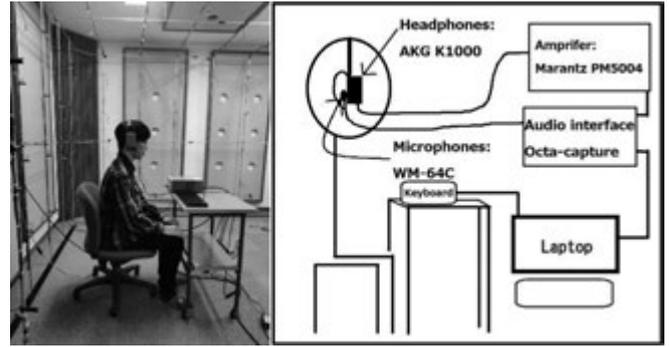


Fig.1 Experimental setup

11 kHzに系統的に変化させた場合の、N1帯域幅と中心周波数の偏移が音色及び音像定位に及ぼす影響を調べた。

2. 実験1(音色知覚実験)

2.1 目的

実験1ではピンクノイズにN1を模擬した反共振形ノッチを付加し、その帯域幅と中心周波数の偏移が音色弁別閾にどのような影響を及ぼすかを検討した。

2.2 聴取者と実験環境

正常な聴力を有する、20代の成人男性4名が聴取実験に参加した。実験環境の概略をFig.1に示す。実験は東北大学電気通信研究所内の防音室で行った。音の提示には耳介開放型ヘッドフォン(SENNHEISER, AKG K1000)を用いた。実験では、先行研究[12-14]に習って、聴取者の耳に測定用小型マイクロフォン(Panasonic, WM-64C)を耳珠の真横に設置した。これは、ヘッドフォンから外耳道入口にかけての伝番特性を打ち消すための逆フィルタ作成に必要なインパルス応答の計測[15]、及び、実験中における提示刺激の観測を行うためであった。

2.3 実験刺激

実験は、2つの音を連続して提示し比較する方法で実施した。以降、先に提示する音を参照音、後に提示する音を比較音と呼ぶ。音刺激は、参照音と比較音ともに、周波数が1オクターブ増加するごとにパワーが半減する特徴を持つピンクノイズにノッチを加えて生成した。ノッチフィルタ[16]の帯域幅と深さは参照音と比較音で共通しており、帯域幅は0.5 ERBと3.0 ERBのいずれかで、深さは20 dBの値を用いた。

中心周波数(f_0)については、参照音と比較音で異

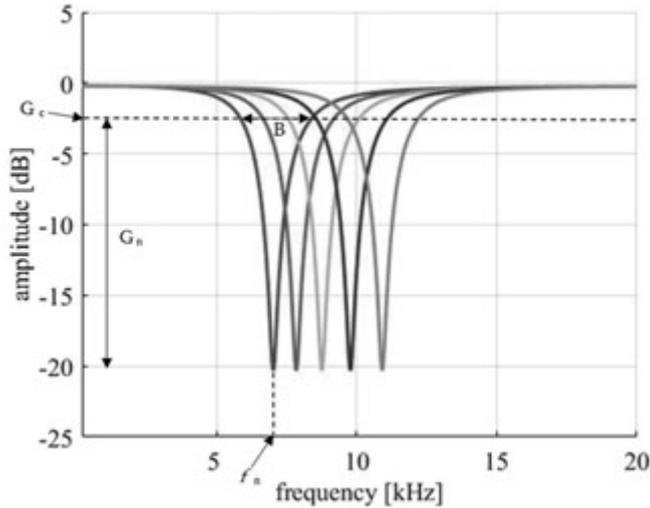


Fig. 2 Shape of N1 notch filter

なる値を用いており、参照音では実験を通じて $f_0 = 7$ kHzで固定した. 比較音には5種類の値を用いた. 1つは参照音と同一の中心周波数 f_0 で, f_0 から1 ERBずつらし, それぞれ $(f_0 + 1)$ ERB, $(f_0 + 2)$ ERB, $(f_0 + 3)$ ERB, $(f_0 + 4)$ ERBの値を用いた. 以下, N1ノッチフィルタを例に, フィルタの設計について説明する. 設計に当たっては, g , r , ω_0 をパラメータとした式(1)で表される2次のIIRフィルタを用いて反共振ノッチフィルタを作成した. ここで f_n , G_c , G_n , B は, それぞれ中心周波数[Hz], 帯域幅を定めるカットオフのレベル[dB], ノッチの深さ[dB], G_c における帯域幅[Hz]を表す. なお, f_s はサンプリング周波数である. 深さ G_n は-20 dB, 帯域幅はノッチ両側の平坦な帯域のレベルから-3 dB低下する周波数間の値であり, +1.5 ERBに固定した. 作成した刺激の形状をFig.2に示す.

$$H(z) = \frac{1-2rcos\omega_0 z^{-1}+r^2 z^{-2}}{1-2\frac{g}{r}cos\omega_0 z^{-1}+\frac{2g-1}{r^2} z^{-2}} \quad (1)$$

$$g = \frac{1}{1+tan\left(\frac{B_0}{2}\right)\frac{\sqrt{1-A_c^2}}{A_c}}$$

$$r = 1 - A_n \frac{B_0}{\pi}, \quad \omega_0 = 2\pi \frac{f_n}{f_s}$$

$$A_c = 10^{\frac{-G_c}{20}}, \quad A_n = \frac{1}{A_c} 10^{\frac{-G_n}{20}}, \quad B_0 = 2\pi \frac{B}{f_s}$$

2.4 実験手続き

実験で使用したピンクノイズは同一試行内では同じものを使用し, 試行ごとに生成しなおした. これは1試行内でノッチが生じられた場合に音色の違いを知覚させるためであった. 実験では参照音と比較音をラン

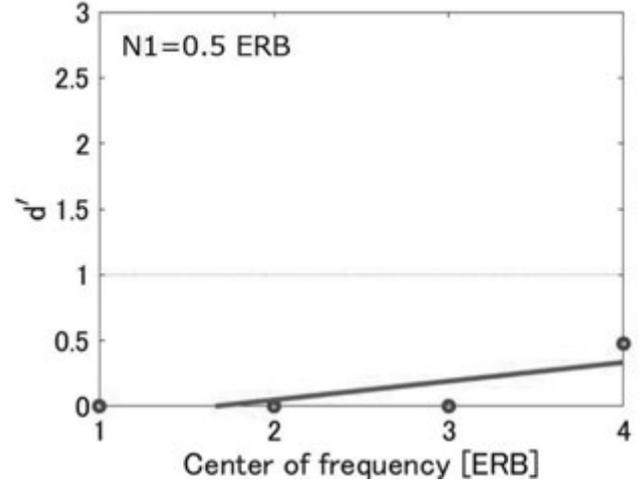


Fig. 4 Timbre discrimination performance (d') for N1=3.0 ERB

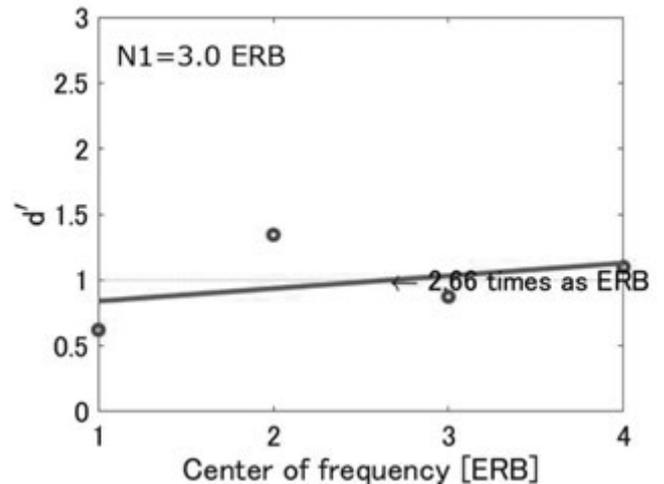


Fig. 3 Timbre discrimination performance (d') for N1=0.5 ERB

ダムな順に 0.5 秒間隔で連続して提示した. これを1試行とし, 1セッションに40回行い計4セッション($40 \times 4 = 160$ 試行)実施した.

4セッション中に参照音と異なる4種類の比較音を各20試行ずつ提示し, 残りの80試行は各セッションで20試行ずつ参照音と同一の比較音を用いた. 被験者には, 最後に提示した音が前の音と比べて音色が同じか異なっていたかを判断させた.

2.5 実験結果と考察

N1帯域幅が0.5 ERB及び3.0 ERB場合の実験結果を, それぞれFig.3とFig.4に示す. 図は, 聴取者4名のN1中心周波数の偏移に対する音色知覚の平均弁別閾を表しており, 弁別閾は $d' = 1$ となる周波数偏

移とした。

d' [17]の算出に当たっては、4セッションの実験結果に対し、N1中心周波数が高くなるにつれてそれぞれの音色弁別の正答率を求めた。グラフの横軸はN1中心周波数の偏移量を $ERB_{Nnumber}$ スケール[14]で示した値であり、単位はCamである。グラフの縦軸は d' である。グラフ中の●点は各中心周波数の偏移パターンにおける実験結果を表しており、実線は最小二乗回帰直線である。

実験結果より、N1帯域幅=0.5 ERBの場合は、中心周波数を偏移しても d' が1を上回らないことが見て取れる(Fig.3参照)。即ち、先行研究[14]と同様に、N1=0.5 ERBは音色の変化を弁別できないほど小さい帯域幅であることが示された。一方、N1帯域幅=3.0 ERBの場合は、 d' が1を上回る結果となった(Fig.4参照)。これから、帯域幅の増加自体が音色知覚に影響を及ぼした可能性が示唆される。中心周波数の影響については、中心周波数の偏移が2.66 kHzのときに d' が1を上回っており、グラフ全体を見ると中心周波数の偏移による音色弁別への影響が限定的であることが分かる。以上の結果より、音色知覚には、中心周波数の偏移よりもノッチ帯域幅の変化による影響が大きいと考えられる。

3. 実験 2(音像定位実験)

3.1 実験目的

実験 2 では、広帯域ピンクノイズに付加したN1の帯域幅と中心周波数の偏移が、仰角方向の音像定位にどのような影響を及ぼすかを検討する。

3.2 実験内容

被験者と実験環境は実験 1 と同様であった。実験においては、音像定位の変化を仰角方向に限定し、音色が異なって知覚した場合であってもそれを無視し、参照音に対して比較音の仰角方向の音像が上方に偏移したか、それとも下方に偏移したかを回答するように求めた(2肢強制選択法)。ノッチの帯域幅は、実験 1 と同様に参照音、比較音ともに 0.5 ERBと 3.0 ERBの 2 条件を用意した。

3.3 実験結果と考察

聴取者 4 人の、比較音が参照音と比べて上方に偏移したと回答した割合を算出し、Fig.5 とFig.6 に示す。グラフの横軸は各中心周波数の偏移量を表しており、縦軸は参照音と比べて比較音が上方に偏移したと回答した割合を表す。なお、ここでは頭部伝達関数の特

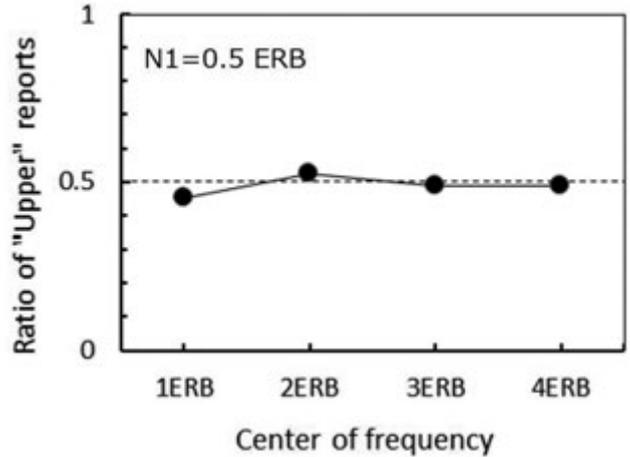


Fig. 5 Sound localization discrimination for N1=0.5 ERB

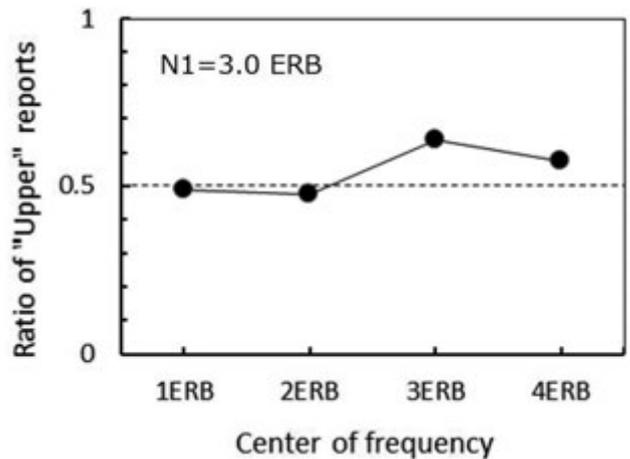


Fig. 6 Sound localization discrimination for N1=3.0 ERB

徴に習って、音像が上方に定位するという仮定の下で正答率を求めた。

実験結果、N1帯域幅=0.5 ERBの場合、参照音に対して比較音が上方に偏移したと回答した正答率が、どの中心周波数偏移条件においても 50% 付近であることが見て取れる(Fig.5 参照)。即ち、N1帯域幅が 0.5 ERBの場合は、仰角方向の音像定位ができていないことが示唆された。一方、N1帯域幅が 3.0 ERBで中心周波数が 3~4 ERBと比較的大きく偏移した場合には正答率が概ね 0.5 を超えており、十分な弁別閾とは言えないものの音像を上方に偏移したと回答した割合が増加傾向にあることが見て取れる(Fig.6 参照)。これらの結果から、N1の帯域幅を 3.0 ERBと固定したまま中心周波数の偏移を更に大きくすれば、仰角方向の音像定位が可能であると考えられる。

4. 総合考察

実験 1 の結果, 音色知覚にはノッチの中心周波数の偏移よりも帯域幅が影響をし得る可能性が示唆された. 一方, 実験 2 からは, N1 の帯域幅を 3.0 ERB に固定し中心周波数を大きく偏移した場合に, 音像を上方に偏移して知覚する可能性が示唆された. 即ち, 音色に充分影響し得るノッチ帯域幅 3.0 ERB を用いて, その中心周波数を 4 ERB 以上と大きく偏移させた場合に, 正中面の音像の変化を知覚できる可能性が考えられる.

これらを確かめるために, 実験 2 の結果を基に最小弁別値(Just Noticeable Difference: JND) を計算しフィッティング曲線を求めた. ここで, JND は「元とは異なる音刺激を提示した際に元の音刺激との変化を知覚できる最小の値」を意味する. 計算結果, JND の値は 5.97 ERB であった. この計算結果から, ノッチの帯域幅 3.0 ERB 条件では, 中心周波数の偏移が約 6.0 ERB 以上であれば音像定位が可能であることが推測される. 即ち, 中心周波数の偏移量が比較的大きい場合のみ, 正中面の音像変化を知覚できると考えられる.

4. まとめ

本研究では, 音色知覚と音像定位知覚のスペクトラルキューの解明を目指して, 頭部伝達関数の周波数スペクトルに典型的に現れるノッチに着目し, N1 を模擬したノッチフィルタを用いてその帯域幅の変化と中心周波数の偏移を様々な値に変化させ, これらの変化が音色知覚と仰角方向の音像定位にどのような影響を及ぼすかを検討した.

実験 1 では, N1 ノッチ幅を 0.5 ERB と 3.0 ERB の 2 条件に設定し, 中心周波数を偏移させながら音色知覚実験を実施した. その結果, 3.0 ERB 条件に限って, 中心周波数を偏移させた場合に音色の違いを弁別できることが分かった. 実験 2 では, 実験 1 と同様のノッチ条件を用いて音像定位実験を実施し, N1 ノッチ幅や中心周波数の偏移が仰角方向の音像定位にどのような影響を及ぼすかを検討した. 実験結果, N1 = 0.5 ERB 条件の場合には, 中心周波数を偏移させても音像定位ができていなかった. しかし, N1 = 3.0 ERB 条件の場合には, 中心周波数を 3~4 ERB と大きく偏移させたときに音像定位が可能であることが示唆された. 実験 2 の結果を基に JND を求めた結果, 中心周波数が約 6.0 ERB 以上であれば仰角方向の音像定位が可能であろうと考えられる.

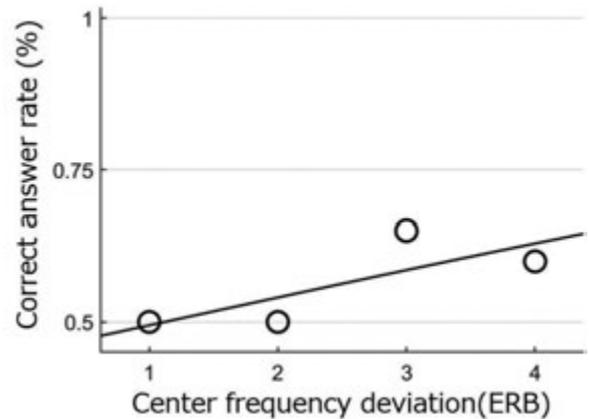


Fig. 6 Regression lines for sound localization (N1=3.0 ERB)

これらの結果から, 中心周波数の偏移による音像定位への影響は小さく, 偏移幅が比較的大きい場合のみ音像定位に影響を及ぼしている可能性が示唆された. しかし, N1 ノッチ幅や中心周波数の偏移による音色知覚への影響については明らかになったものの, 音像定位への寄与は限定的であった. 今後は, N1 の操作のみではなく, 頭部伝達関数に広く現れる P1 や N2 を含めた幅広い特徴量を模擬して同様に検討を行い, 正中面音像定位に及ぼす周波数スペクトラルキューの特定を目指したいと考えている.

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 19H02396 の助成を受けた. 本研究の聴取実験にご協力いただいた愛知工科大学の春日部剛士君に感謝する.

参考文献

- [1] J. R. Miller and E. C. Carterette, "Perceptual space for musical structures," J. Acoust. Soc. Amer., vol.58, no.3, pp.711-720, 1975.
- [2] J. Grey, "Multidimensional perceptual scaling of musical timbres," J. Acoust. Soc. Amer., vol.61, no.5, pp.1270-1277, 1977.
- [3] J. Grey and A. Moorer, "Perceptual evaluations of synthesized musical instrument tones," J. Acoust. Soc. Amer., vol.62, no.2, pp.454-462, 1977.
- [4] 日本音響学会, "音響用語辞典," コロナ社, 2003.
- [5] J. Blauert, "Spatial Hearing- The Psychophysics

of Human Sound Localization,” Revised edition (MIT Press, Cambridge, Mass.), 1996.

[6] E. A. G. Shaw, “Transformation of sound pressure level from the free field to the eardrum in the horizontal plane,” *J. Acoust. Soc. Am*, vol.56, no.6, pp.1848-1861, 1974.

[7] M. Morimoto and Y. Ando, “On the simulation of sound localization,” *J. Acoust. Soc. Jpn. (E)*, vol.1, pp.167-174, 1980.

[8] K. Iida, M. Itoh, A. Itagaki and M. Morimoto, “Median plane localization using a parametric model of the head-related transfer function based on spectral cues,” *Applied Acoustics*, no.68, pp.835-850, 2007.

[9] F. Asano, Y. Suzuki and T. Sone, “Role of spectral cues in median plane localization,” *J. Acoust. Soc. Am.*, no.88, pp.159-168, 1990.

[10] 北島周, 鈴木陽一, 坂本修一, “周波数振幅スペクトル上のノッチによる音色変化の検出限と弁別限,” *日本音響学会講演論文集*, 2-P-9, pp.819-820, 2015.

[11] 曲谷地哲, 岩谷幸雄, 鈴木陽一, “仰角依存性の強い帯域のレベルを模擬した頭部伝達関数による正中面定位,” *聴覚研究会資料*, vol.42, no.1, pp.47-52, 2012.

[12] 齋藤優一, 鈴木陽一, 坂本修一, “ノッチフィルタが広帯域雑音の音色弁別に及ぼす影響,” *日本音響学会聴覚研究会資料*, pp.77-82, 2016.

[13] 日吉啓, 鈴木陽一, 坂本修一, “広帯域ノイズ中のノッチ中心周波数の偏位が音色と音像定位に与える影響,” *電子情報通信学会技術研究報告*, EA2018-44, pp.103-108, 2018.

[14] 山高正烈, 坂本修一, 鈴木陽一, “ノッチフィルタが広帯域雑音の音像定位に及ぼす影響,” *愛知工科大学紀要第18巻*, pp.21-26, 2021.

[15] Y. Suzuki, F. Asano, H. Y. Kim, T. Sone, “An optimum computer-generated pulse signal suitable for the measurement of very long impulse response”, *J. Acoust. Soc. Am.* vol.97, no.2. pp.1119-1123, 1995.

[16] 川浦純一, 鈴木陽一, 曾根敏夫, 相馬次郎, “悪条件の伝達関数の逆特性推定のための新しい方法,” *電子通信学会論文誌*, J69-A, pp.914-917, 1986.

[17] G.A. Gescheider, “Psychophysics: the fundamentals,” Psychology Press, 2013.

BMIに関する基礎的研究 (簡易脳波計を用いた被験者と健常者との意思伝達の基礎実験)

磯貝 正弘*, 楊 哲*

(2021年9月30日受理)

Fundamental Study on BMI(Brain Machine Interface) (Basic Experiments on Communication between Test Subject and Healthy Subject using a Simplified Electroencephalograph)

Masahiro ISOGAI*, Yang ZHE*

(Received September 30, 2021)

Abstract

This paper describes the basic experimental results for communication between the test subjects and the healthy subjects using a simplified electroencephalograph. With software and a simplified electroencephalograph which is non-invasive type, we obtained the attention ratio and meditation ratio as the experimental results. We proposed the method which can estimate what the test subjects think by using the attention and meditation ratio. We found that our proposed method has some problems to estimate what the test subjects think with software and a simplified electroencephalograph through some experiments.

キーワード: 脳波, 非侵襲式, リラックス度, 集中度

Keywords : Brain wave, Non-invasive type, Meditation ratio, Attention ratio

1. はじめに

脳の信号を利用して、ヒトと機械やロボットとのコミュニケーションの補助、生活環境の制御、運動の補助などを行うことをブレイン・マシン・インターフェース(BMI)という。BMIを利用する技術が進歩するにつれて、障がい者だけでなく健常者の生活がますます豊かになっていくことが期待されるようになってきた。

脳波はニューロン細胞間で情報を伝達する際に発生する生体電気信号である。これは、大脳皮質の錐体細胞シナプスが活動する際に発生するイオン交換によって生じる電波信号である。脳細胞が活動すれば相応の生体電気が発生し、これらの電気によって樹状突起を介して他の脳細胞とつながり、思考のネットワークを形成する。科学的応用では、我々が機器で検出できる脳波は一定数のニューロン細胞活動によって発生され、周波数の違いとして、 α 波、 β 波、 θ 波、 γ 波、 δ 波のタイプに分類される。

BMIは脳波などの脳活動を利用して機械やロボットを操作したり、カメラ画像などを脳への直接刺激によって感覚器を介さず入力することを可能とする。脳の思

考活動の信号を直接使って外部と通信し、周囲の環境をコントロールすることも、人類が昔から求めてきた夢である。BMIシステムは、脳から発信された情報を直接に外部装置を駆動するコマンドに変換し、人間の身体や言語に代わって、人と外部との交流や外部環境の制御を行うことができる。電極を直接脳に接触させる方法を侵襲式といい、主なものとして、細胞外記録(SVA,MVA,LFP)や皮質脳波(ECG)などがある。^[1]電極を直接脳に接触させない方法を非侵襲式といい、脳波(EEG)、脳磁図(MEG)などがある。非侵襲式では損傷するリスクが少ないこと、人での研究が比較的容易であることから研究が進んできた。

本研究では、非侵襲式の安価な簡易脳波計を用いて、被験者と健常者との意思伝達が行えるかどうかを調べる基礎的実験を行った。

2. 実験装置

2.1 脳波計

本研究では、脳波を測定する脳波計は NeuroSky

* 愛知工科大学工学部電子ロボット学科, 〒443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乗 50-2

Department of Electyronic Robot Engineering, Aichi University of Technology, 50-2 Manori, Gamagori 443-0047, Japan

社製の Mindwave Mobile2 を使用する。図1は脳波計を示す。脳波測定は専門的な知識が必要だが、その知識を持たない人でも使うことができるように設計されている。Mindwave Mobile2 は、被験者の額に接触されるセンサーと耳に取り付けるイヤークリップで構成され、簡易に測定が可能になっている。Mindwave Mobile2 で測定した脳波を Neuroview というソフトウェアを通すことによって、集中度とリラックス度が得られる。^[2] 図2は Mindwave Mobile2 の使用例を示す。額にセンサのアームとチップを、耳の上には電池ボックスを、耳にはイヤークリップを取り付ける。



Fig.1 Electroencephalograph(Mindwave Mobile2)^[3]



Fig.2 Example of use of Mindwave Mobile 2

2.2 装置の原理

人間の脳は数万の針の先の大きさの神経が錯綜して構成されている。神経が相互作用すると、脳の電波モードは思考状態として現れ、数学を計算する時のひたむきさなどの情緒状態を表す。人の脳は1日平均7万個の考えを持っている。また、毎回神経活動室で軽い放電が発生し、放出される点は脳波技術(医学的には脳波図という)で測定される。

NeuroSky 社製の MindWave Mobile 2 は、bluetooth 低消費電力(BLE)または Bluetooth Classic を使用してパワースペクトル(α 波、 β 波など)データを安全に測定および転送し、コンピュータ iOS と無線通信したり、Android デバイスを使用したりすることができる EEG ヘッドフォンである。このヘッドフォンを滑らせ

るだけで脳波の変化をリアルタイムで見ることができる。MindWave Mobile 2 を使用すると、集中度とリラックス度を測定することができる。^[4]

2.3 装置仕様

表1に MindWave Mobile2 の仕様を示す。

Table 1 Specification of Mindwave Mobile2

本体重量	約 90g
外形寸法	225mm × 155mm × 92mm (アーム格納時)
Bluetoothバージョン	Bluetooth2.1
到達範囲	10m
消費電流	80mA
電池	AAA(単4) × 1
サンプリングレート	512Hz
ADC	12bit
UART Baud レート	57,600Baud
SPP スループット	9,600Baud
S/N 比	70dB 以上

2.4 計測ソフト

Mindwave Mobile2 から計測されたデータの処理には、NeuroSky 社製のソフトウェア NeuroView を用いた。このソフトウェアでは、Mindwave Mobile2 から計測される集中度とリラックス度の他に、脳波の生の信号、脳波のパワースペクトルの4種類のデータの測定記録を取得することができる。記録されたデータは CSV ファイルで出力され、Excel などのプログラムで開くことが可能である。図3に操作画面を示す。^[5]



Fig.3 Operation Screen of NeuroView

3. 実験

3.1 脳波の特徴

人間の脳波の分類には γ (ガンマ)波, β (ベータ)波, α (アルファ)波, θ (シータ)波, δ (デルタ)波の5種類がある. この周波数が大きくなると脳の働きが活発になり, 逆に小さくなると, 脳が活動していない状態となる. この周波数の特徴より, 集中度は主に β 波に基づいており, リラックス度は主に α 波に基づいて評価をしている. 表2に計測できる脳波の特徴についてまとめる. [6], [7]

Table 2 Feature of brain wave

分類	周波数域	脳の状態
γ 波	25~100Hz	予知, 明瞭
β 波	12.5~28Hz	警戒, 集中, 認識力
α 波	8~14Hz	リラックス, 視覚化, 創造力
θ 波	4~7Hz	瞑想, 直感, 記憶力, 潜在意識
δ 波	0.1~3Hz	隔離された認識, ヒーリング, 睡眠

3.2 集中度とリラックス度

集中度は高度に集中しているときや, 意識的精神活動の際に生じる集中, または注意の度合いを示している. 値は 0~100 で表され, 注意散漫, 散漫な思考, 集中力の欠如, 不安などにより数値が低下する. [5]

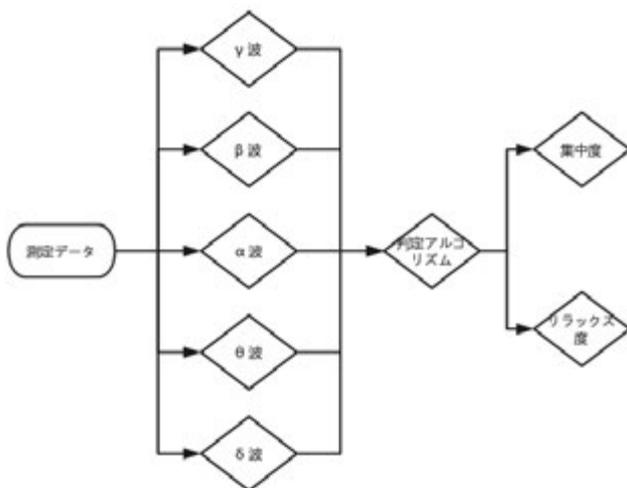


Fig.4 Method of obtaining attention ratio and meditation ratio

リラックス度は心の平穏, またはリラクゼーションの度合いを示している. 値は集中度同様に 0~100 の範囲で表示される. 通常であれば体を動かさなかったり, 目を閉じることにより, 精神的なリラックス状態を生み出すことができる. 不安や動揺, 感覚の刺激などにより数値が低下する. 図4に集中度とリラックス度を判断する手順を示す. [5]

3.3 実験方法

- (1) 他者である健常者が, まず, 質問の書かれたカード(スライド)を脳波測定 of 被験者に見せる.
- (2) さらに, 健常者が質問に対する回答として「はい」と「いいえ」の2つのカードを被験者に見せる.
- (3) 被験者に, 「はい」, 「いいえ」の回答のカードを見せられた時に, 回答する方の「はい」または, 「いいえ」のどちらかを強く念じさせるようにする.
- (4) 健常者は, 被験者が「はい」, 「いいえ」のカードを見た時の NeuroView に表示された集中度とリラックス度の値に基づいて, 被験者が「はい」か「いいえ」のどちらを強く念じたかを調べる. どちらを強く念じたかを調べる方法としては, 集中度とリラックス度のそれぞれの平均値の差を求めて, 集中度の平均値が大きく, リラックス度の平均値が小さい場合に注目して, 被験者が「はい」か「いいえ」を強く念じたかを判断する.

実験方法の手順を図5に示す.

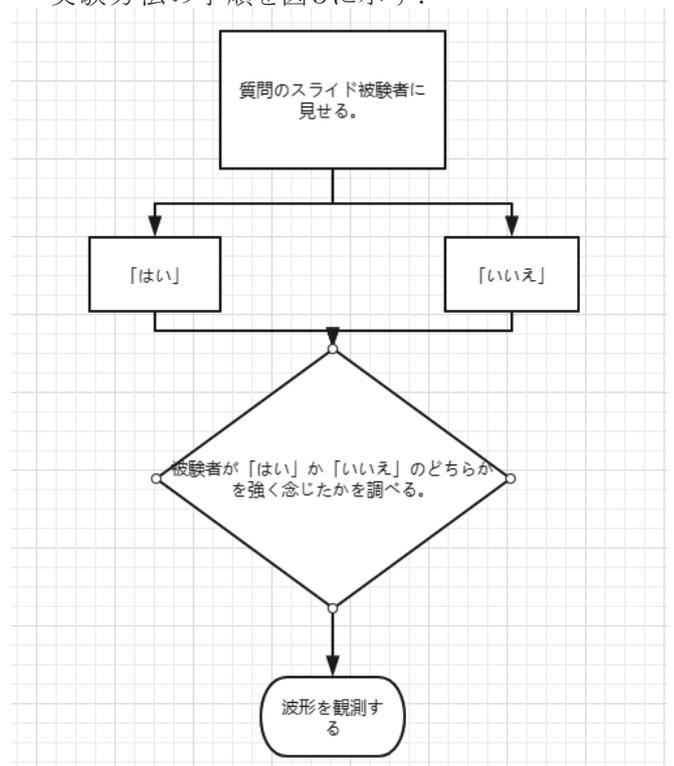


Fig.5 Flow chart of experiments

3.4 実験結果

本研究では、被験者 A と B の 2 名に対して、7 つの質問を行い、「はい」のカードを見せた時と「いいえ」のカードを見せた時の集中度とリラックス度を求める実験を行った。合計して 28 通りの実験を行ったが、本稿では、被験者が強く念じた「はい」または、「いいえ」のカードを見せた時の結果として、14 通りの実験結果を示す。

表 3 に実験番号と質問内容の関係を示す。

また、表 4 に実験番号と実験結果の図番号との対応を示す。図 6 から図 19 に集中度とリラックス度を求めた実験結果を示す。図中の ATT と MED は、それぞれ、集中度とリラックス度を示す。

Table 3 Experiment number and question

実験番号	質問内容
1	暑いですか
2	お腹がすいていますか
3	眠たいですか
4	不安を感じますか
5	頭痛はしますか
6	水を飲みたいですか
7	緊張していますか

Table 4 Experiment numbers and figure numbers of experimental results

実験番号	被験者	実験結果の図番号
1	A	図 6
	B	図 7
2	A	図 8
	B	図 9
3	A	図 10
	B	図 11
4	A	図 12
	B	図 13
5	A	図 14
	B	図 15
6	A	図 16
	B	図 17
7	A	図 18
	B	図 19

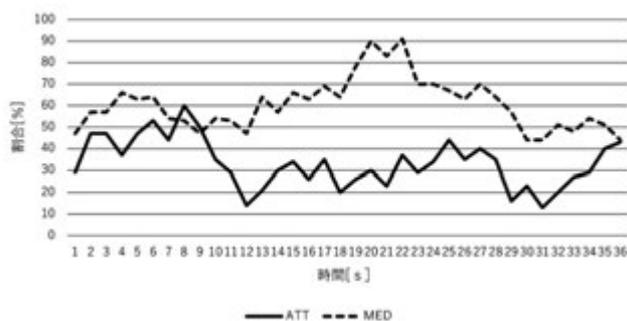


Fig.6 Results for experiment No.1 for subject A

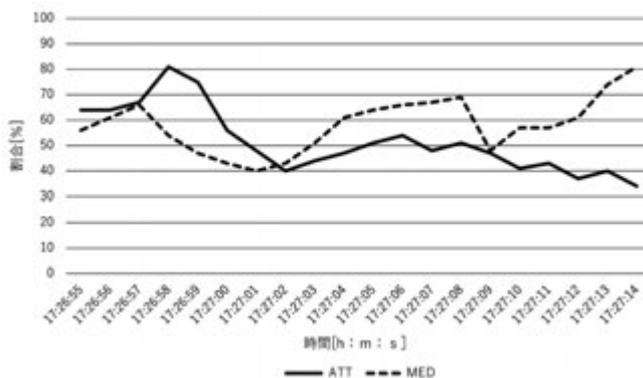


Fig.7 Results for experiment No.1 for subject B

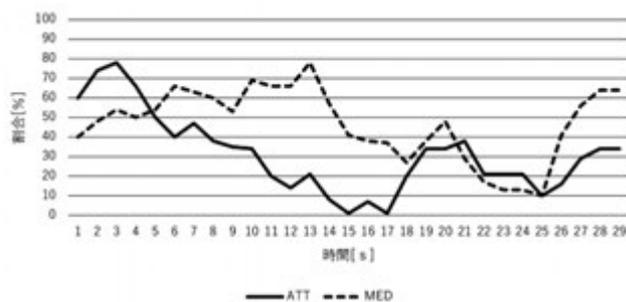


Fig.8 Results for experiment No.2 for subject A

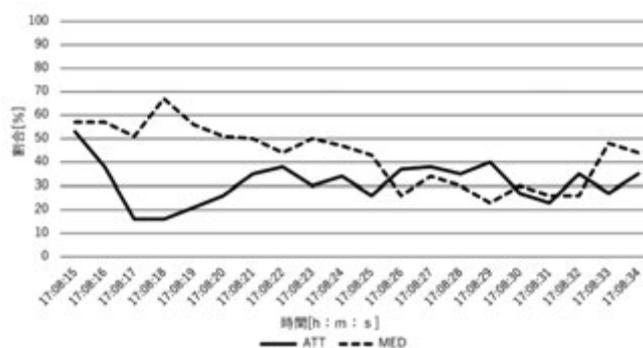


Fig.9 Results for experiment No.2 for subject B

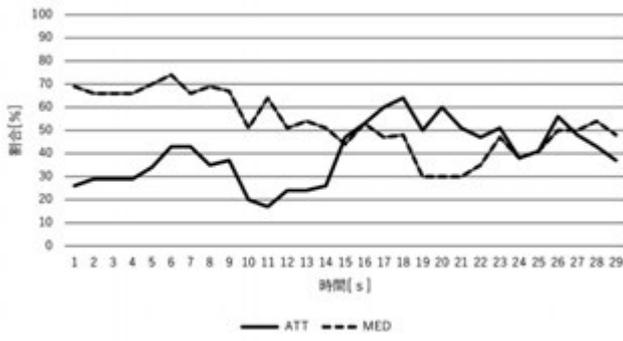


Fig.10 Results for experiment No.3 for subject A

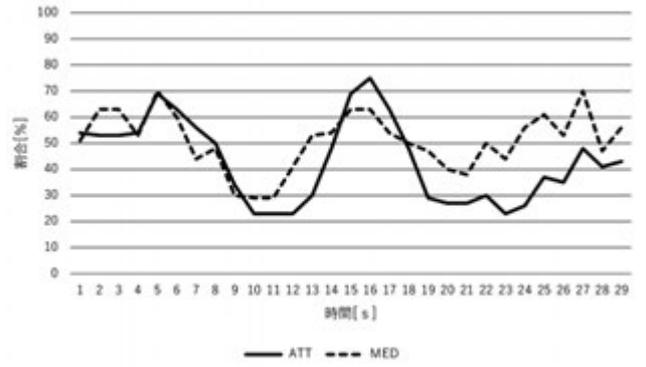


Fig.14 Results for experiment No.5 for subject A

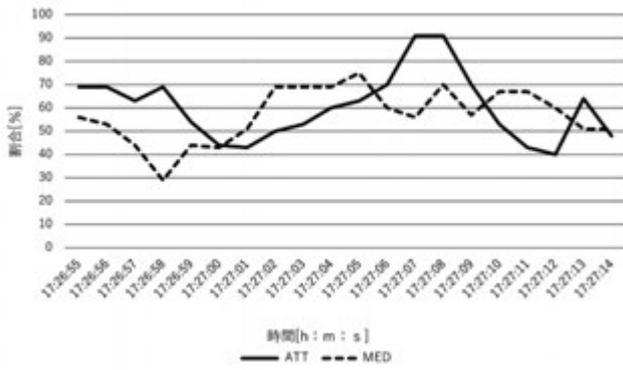


Fig.11 Results for experiment No.3 for subject B

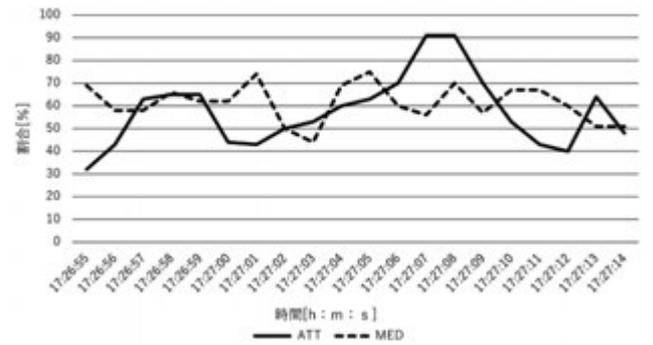


Fig.15 Results for experiment No.5 for subject B

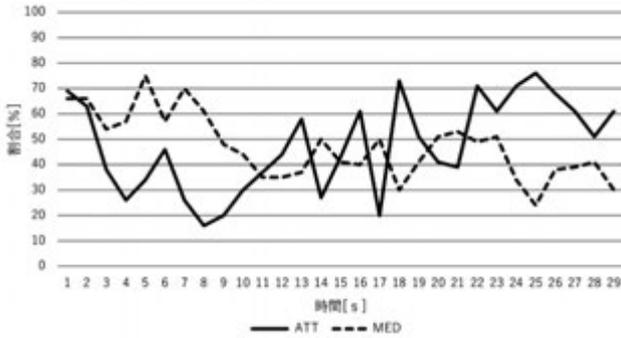


Fig.12 Results for experiment No.4 for subject A

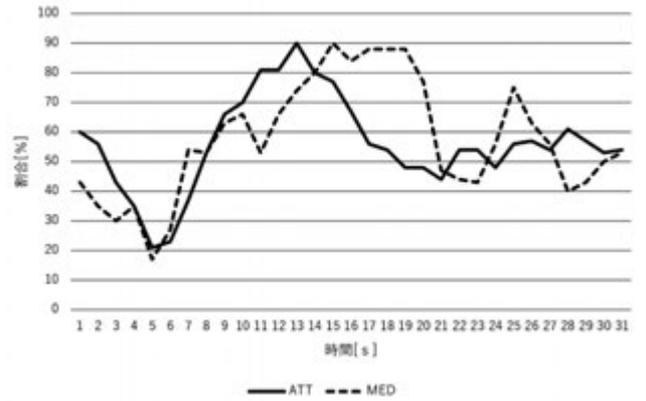


Fig.16 Results for experiment No.6 for subject A

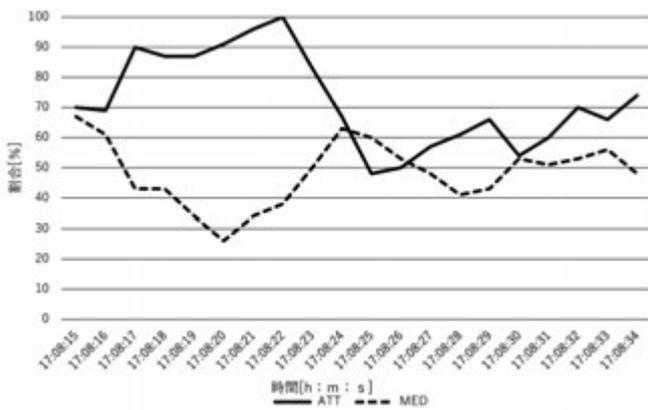


Fig.13 Results for experiment No.4 for subject B

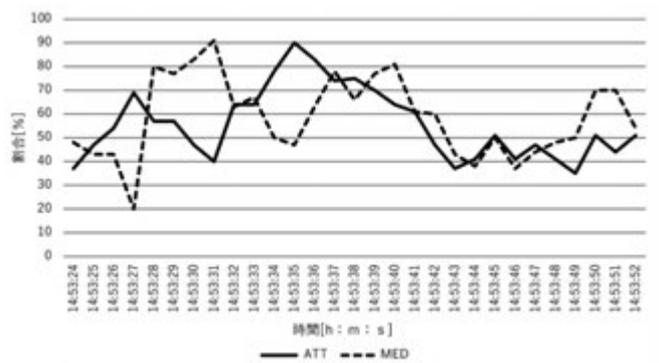


Fig.17 Results for experiment No.6 for subject B

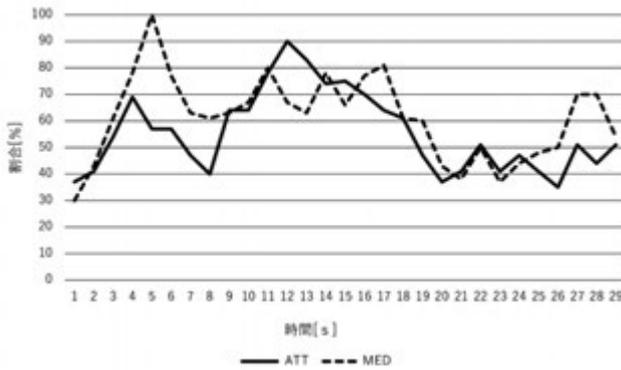


Fig.18 Results for experiment No.7 for subject A

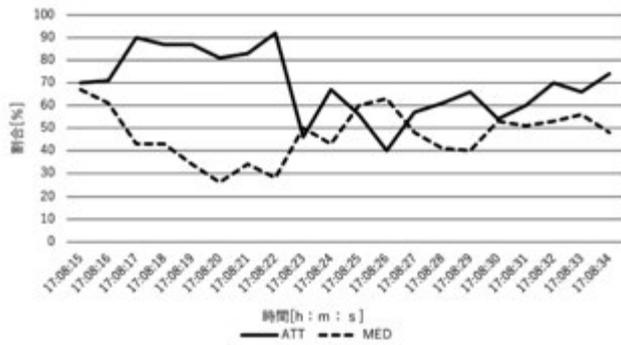


Fig.19 Results for experiment No.7 for subject B

4. 考察

図6から図19までの実験結果をもとにして、脳波による被験者の質問に対する回答の推定を行った。回答の推定を次のようにして行った。各実験結果の集中度とリラックス度の平均値を求める。集中度の平均値からリラックス度の平均値を引く。健常者の示した質問のカードに対する回答の「はい」か、「いいえ」のカードのうち、被験者が強く念じた回答の場合、集中度の平均値がリラックス度の平均値よりも大きく上回っていると考える。

表5に各実験における脳波による回答の推定結果を示す。脳波により回答の推定をする際に、集中度の平均値からリラックス度の平均値を引いたときの差は、回答のカードを強く念じると集中度が高くなると考えると、符号は正になる、あるいは大きくなるのが期待された。差の閾値を設定し、実験結果の差が閾値よりも大きい場合、推定結果が正答であると考えた。ところが、実験結果では、差の符号が正になる、すなわち、集中度の平均値がリラックス度の平均値を上回っていたのは、全14の実験結果のうち、2つのみであった。そのため、まず、集中度の平均値とリラックス度の平均値の差の閾値を、 -10.0 と設定した。その結果、14の実験結果中、正答が10で、誤答が4であり、脳波によ

る推定結果の正答率は、71.4%であった。次に、集中度の平均値とリラックス度の平均値の差の閾値が 0.0 の場合の推定結果は、14の実験結果中、正答が2で、誤答が12であり、脳波による推定結果の正答率は、14.3%となった。表5は、集中度の平均値とリラックス度の平均値の差の閾値を -10.0 にした場合の実験結果をまとめたものである。これらの実験結果から、閾値の設定のしかたにより、推定結果の正答率が大きく変わってしまうことがわかった。また、強く念じることが、集中度だけでなく、リラックス度もいづらか影響を受けることがわかった。

今後の課題として、脳波により回答を推定する際の集中度の平均値とリラックス度の平均値との差の閾値をいくつに取ったらいいのかを明らかにしなければならない。また、集中度の平均値単独で推定したらよいか、または、リラックス度の平均値単独で推定したらよいかについても検討しなければならないと考えている。

Table 5 Results for brain wave estimation

実験番号	被験者	集中度の平均値 ①	リラックス度の平均値 ②	差= ① -②	脳波による推定結果 (○はい, ×いいえ)	実際の被験者の回答 (○はい, ×いいえ)	脳波による推定結果の正誤
1	A	33.4	60.2	-26.8	×	○	誤
	B	47.2	54.0	-6.8	×	×	正
2	A	32.2	46.0	-13.8	×	○	誤
	B	31.0	43.1	-12.1	×	○	誤
3	A	39.7	52.3	-12.6	×	○	誤
	B	57.0	61.2	-4.2	×	×	正
4	A	56.0	62.3	-6.3	×	×	正
	B	69.8	48.5	21.3	○	○	正
5	A	42.6	51.7	-9.1	○	○	正
	B	55.0	61.1	-6.1	×	×	正
6	A	57.2	59.2	-2.0	×	×	正
	B	54.6	61.9	-7.3	×	×	正
7	A	56.0	59.9	-3.9	×	×	正
	B	69.1	47.3	21.8	○	○	正

5. おわりに

本研究では、安価な簡易型の脳波計とソフトウェアを使用することにより、健常者と被験者との意思の伝達が行えるかどうかを実験により調べた。集中度の平均値とリラックス度の平均値の差の閾値を用いて被験者の回答の推定を行う方法を提案した。しかしながら、提案した方法は、考察で述べた通り、検討しなければいけない問題があることがわかった。さらに、脳波による回答の正答率を上げるために以下のことが考えられる。

- (1) 実験条件、実験環境を明確にする。
- (2) 推定の方法として、集中度の平均値とリラックス度の平均値に基づいた方法だけではなく、集中度とリラックス度の2つの波形の形状全体に対してパターン認識を利用して複雑な関係を判別できるようにする。

また、今後の展望として、ヒトの基本動作の計測を行い、脳波の特徴をさらに研究する必要がある。将来的にリハビリテーション分野において使用者に脳波の状態を可視化できるシステムを開発する。脳波を通してエアコンを制御するなど、今後のBMIのさらなる発展を目指して研究を進めていきたい。

参考文献

- [1] 櫻井芳雄ほか3名, "ブレイン-マシン-インターフェイス最前線," 工業調査会, pp.10-15.
- [2] Mindset 取扱説明書, pp.1-20.
- [3] 脳波計 Mindwave Mobile2 , <https://www.neurosky.jp/mindwave-mobile2/> (参照日:2021年1月5日).
- [4] NeuroSky Mindwave Mobile2 取扱説明書, pp.1-8.
- [5] NeuroView User's Guide, pp.1-9.
- [6] 脳波 , Wikipedia , <https://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%84%B3%E6%B3%A2> (参照日:2021年1月5日).
- [7] 奈良純志, "BMIに関する基礎的研究," 平成30年度秋田工業高等専門学校卒業論文, p.6.

研究ノート

振子型動吸振器に適用する磁気ダンパの減衰力に関する考察

村上 新*

(2021年9月30日受理)

Consideration of Damping Force of Magnetic Damper Adapted on a Pendulum Type Dynamic Absorber

Shin MURAKAMI*

(Received September 30, 2021)

Abstract

Recently, magnetic dampers have come to be widely used, however, damping forces of them are difficult to adjust slightly. The precise prediction of eddy current and damping force is too difficult and complex. This report presents a simple method for estimation of damping force of magnetic dampers. The method is simplification of magnetic flux density calculations. To confirm validity of this method, a pendulum type dynamic damper is tested. The variations of damping coefficient due to the distance between magnet and copper conduct plate are calculated and measured by experiments. These results agree well qualitatively.

キーワード: ダイナミックダンパ, 渦電流ダンパ, 磁束分布, 減衰比, 減衰力, シミュレーション

Keywords : Dynamic damper, Eddy current damper, Magnetic flux distribution, Damping ratio, Damping force, Simulation

1. はじめに

ビルやタワーなどの建築構造物, 自動車や電車などの交通機械, 工場で使われる工作機械や搬送システム, 家電や情報機器に至るまで, あらゆる工業製品に振動が付きまとう。振動は居住性や乗り心地, 精度や生産効率などに悪影響を与えるため, できるだけこれを抑えることが望ましい。その一つの解決策として, 動吸振器(ダイナミックダンパ, TMD:Tuned-Mass-Damper とも呼ばれる)が挙げられる。

動吸振器とは, 共振によって振動が増大する構造物に小さな振動系を付加し, その振動によって振動エネルギーを吸収し, 元の振動を抑制するものである^[1]。効率的に振動を吸収するためには, 付加する振動系の固有振動数, 減衰比を最適なものに調整(これを同調と呼ぶ)する必要がある。このうち, 固有振動数は, 質量, ばねの長さ, 振子長さなど, その構造に応じて細かく変更することが比較的容易である。しかし, 減衰比については, 構造上微調整することは難しい。

動吸振器に使用される減衰装置として, 粘性流体を封入したシリンダ, いわゆるダッシュポットが用いられることが多い。しかし, その減衰係数を変更するのは困難であり, 特に比較的小さい構造物では, ピストンの

摺動抵抗が粘性減衰より大きくなり, その非線形性から最適な同調条件が得られなくなる。

その他の減衰装置として磁気ダンパがある。磁気ダンパは永久磁石や電磁石によって磁界を生じさせ, その中を銅などの導体が運動するとき発生する渦電流によるエネルギー損失を利用するものである。非接触で経年劣化がなく, 真空中でも使用可能などの利点があるほか, 近年のネオジム磁石などの強力な希土類磁石の実用化に伴い広く使われつつある。

その減衰力については, 特定の構造をもつ磁気ダンパに関する研究がいくつかあり^{[2]-[4]}, 理論値と実験値との比較が行われている。一方, 筆者は, 振子型動吸振器に対し, それらの報告とは異なる単純な構造の磁気ダンパでも十分な減衰効果を得られることを確かめている。しかし, この構造に対して減衰力の理論解析を厳密に行うためには, 時間とともに変化する磁束分布の解析や, それに伴う導体内の誘導電流によるローレンツ力を多重積分する必要があり, 困難である。

厳密に減衰力を求めることは工学的意味があるが, 特に減衰力については, 構造的な摩擦, 空気抵抗, その他いろいろな要因が関わり, 理論計算通りになることは稀である。その結果, 最適同調条件を得るために何らかの微調整が必要になる。この時, 磁気ダンパ

* 愛知工科大学工学部機械システム工学科, 〒443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乗 50-2
Department of Mechanical Systems Engineering, Aichi University of Technology, 50-2 Manori, Gamagori 443-0047, Japan

のどこをどう変化させれば、どのような変化が現われるかが明確であれば、効率のよいチューニングが可能になると考えられる。

そこで本研究では、多くの単純化を行い、簡略化した計算手法で、磁石の個数、配置、導体との距離などの設計パラメータの減衰力に対する影響を調べ、調整する指針を得ることが可能であることを確認する。具体的には、ダンパに使用する永久磁石を側面電流モデルで表した上で厚さを無視し、垂直方向には長さが無限大であるとして解析を行う。さらに、磁石はダンパの動作により移動するが、平衡点を通過する瞬間のみについて計算し、これをもって減衰力を評価する。これらから得られた磁石-導体板距離と減衰力の関係と実験結果を比較し、この計算手法の妥当性を検討する。

2. 理論解析

2.1 振り型動吸振器

理論解析に先立ち、本研究で調査する振り型動吸振器の構造を説明する。図1(a)に振り型動吸振器の概略を示す。動吸振器の筐体として、15mm×158mm×158mmのアルミ板2枚を、厚さ3mm、30mm×30mm、長さ355mmのアルミLアングルで上下に接続した構造を作成した。この上部に設置した軸受台に軸を渡し、片端にベアリングを配置した15mm×60mm×250mmの直方体状のアルミ製剛体振子を吊り下げる。この振子には先端に5mm×20mm×34.5mmのネオジム磁石がステンレスの皿ネジによって取り付けられている。着磁の方向は正面図を見て手前側がN極、向こう側(振子に接している面)がS極である。図中、破線で示した位置に10mm×100mm×200mmの銅製導体板を振子の動く平面に平行に置く。振子の揺れに伴って導体板に渦電流が発生することにより減衰力が発生する。ここで導体板と振子との距

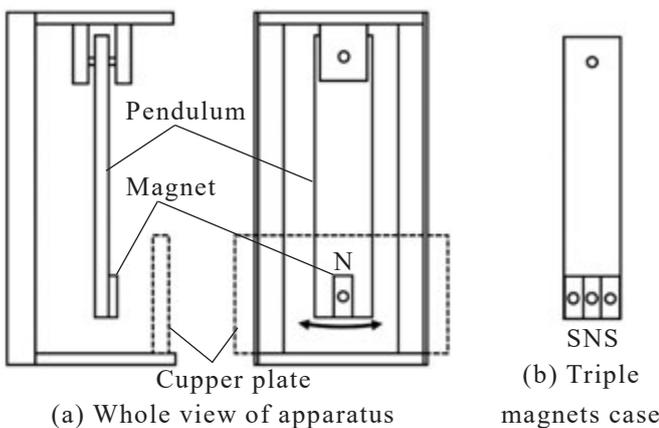


Fig.1 Pendulum type dynamic absorber

離を変えることにより、減衰力を変化させることができ、この距離と減衰力の関係を理論的、実験的に調べる。

なお、解析結果の妥当性を検討するため、上述の振り先端中央に1枚の磁石を付けた場合(図1(a))と、その磁石の両側に同じ磁石を極性が逆になるように並べた磁石3枚の場合(図1(b))について調べる。

2.2 運動方程式

本研究では図1の振り型動吸振器の筐体を固定し、振り部のみを振動を考え、磁気ダンパに発生する減衰力を求める。図2に解析モデルを示す。振子は剛体振子であり、その質量を m 、支点O回りの慣性モーメントを J 、支点Oと重心Gまでの距離を l_G 、支点Oと磁石の中央Mまでの距離を l_M とする。磁気ダンパによる減衰力は、磁石の移動速度に比例した抵抗力がこの磁石の中央に加わるものと考え、その係数を c 、振子の鉛直軸からの傾きを θ とする。磁石中央の速度は $v_M = l_M \dot{\theta}$ であるから、磁石に加わる減衰力は $cl_M \dot{\theta}$ となり、O点回りの減衰モーメントは $-cl_M^2 \dot{\theta}$ となる。傾き角 θ が微小であるとし、重力加速度を g とすると、この系の運動方程式は、

$$J\ddot{\theta} + cl_M^2 \dot{\theta} + mgl_G \theta = 0 \quad (1)$$

となる。これより、この系の固有角振動数は、

$$\omega_n = \sqrt{mgl_G/J} \quad (2)$$

減衰比は、

$$\zeta = cl_M^2 / (2\sqrt{Jmgl_G}) \quad (3)$$

で与えられる。

後述の実験では、実験装置から容易に直接計測できる m 、 l_G 、 l_M などのパラメータに加え、減衰自由振動波形から算出可能な ω_n 、 ζ を利用し、 J および減衰係

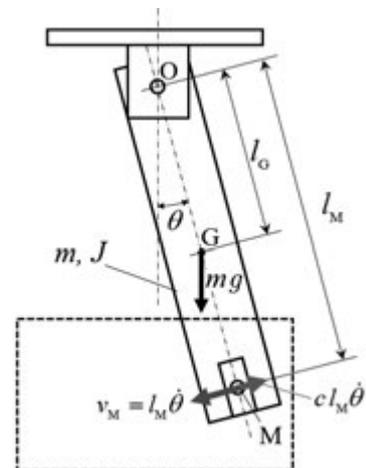


Fig.2 Analytical model

数 c を,

$$J = mgl_G/\omega_n^2 \quad (4)$$

$$c = 2\zeta\sqrt{Jmgl_G/l_M^2} \quad (5)$$

により求めた.

2.2 磁気ダンパの減衰力解析

渦電流による減衰係数を計算する方法として, 木村らは以下のような理論式を提案している^[3].

$$c_1 = \frac{1}{2}\sigma \int_V [B_z(x,y,z)^2 - B_{z0}^2] dV \quad (6)$$

(文献[3]では右辺に符号“-”が付いているが, 本式の積分結果は正となることから, 誤りと考え除いた.)ここに, 積分領域 V は導体板の体積, σ は導体板の電導率である. また, B_{z0} は導体板内の平均磁束密度であり,

$$B_{z0} = \frac{1}{V} \int_V B_z(x,y,z) dV \quad (7)$$

で表される^[3].

木村らはこの解析法を用いて磁石, 導体ともに微小領域に分割し, 導体内の磁束密度を数値的に積分して値を求め, 実験結果との比較を行っている. 本研究

では, 正確な減衰力を求めることを主眼とせず, 磁石個数, 配列, 磁石-導体板距離などが減衰力に与える影響を定性的に調べることを目的としているため, 大胆な単純化を行うことにする. まず, 振子は上部支点を中心に傾き振動し, それに伴って磁界も移動するが, 振子が鉛直下向きとなる平衡点を通る瞬間を考え, このときの磁束密度分布および減衰係数を評価する. 次に, 振子に取り付けられた磁石の中央を通る水平面を考え, 磁石は厚さを無視し, 上下方向に無限長であるとする. 図 3 に, 磁束密度を考慮した水平面, 図 4 にその水平面上の座標系を示す.

図 4 において, 座標原点を磁石の中心に取り, 振子の動く方向を x 軸, そこから導体板に向かう垂直な方向を y 軸とする. 永久磁石による磁束密度分布は, 磁石をその外周側面に電流が流れるコイルとみなす側面電流モデルを用いて計算する. 磁石の z 軸方向の長さは無限大と考えるため, 図 4 の x - y 平面を交互に貫く 2 本の無限長の電流 $\pm I$ のみを考慮する. 実際には磁石の中心に取り付け皿ネジ穴が空けられているが, これも無視する. 2 本の電流にビオ・サバルの法則を適用し, 図 4 中に示す電流と任意の位置の磁束密度との関係式を用いて磁束密度の大きさと向きをベクトル的に合成すると, 磁石 1 枚の場合の導体内の x - y 平面上の任意の点 (x,y) における磁束密度 $\mathbf{B}^s(x,y)$

$$\left(= (B_x^s, B_y^s, B_z^s) \right) \text{は,}$$

$$\mathbf{B}^s(x,y) = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{\mathbf{I} \times \mathbf{r}_+}{|\mathbf{r}_+|^2} - \frac{\mathbf{I} \times \mathbf{r}_-}{|\mathbf{r}_-|^2} \right) \quad (8)$$

となる. ここに, μ_0 は真空の透磁率 ($=4\pi \times 10^{-7}$), $\mathbf{I} = (0,0,I)$, $\mathbf{r}_+ = (x-w/2, y, 0)$, $\mathbf{r}_- = (x+w/2, y, 0)$ (w は磁石の x 軸方向の幅) であり, \times は外積を示す. 磁石 3 枚の場合は, 図 4 下図のような 6 本の電流を考慮して同様な計算を行う. 図では隣り合う磁石間の電流を 2 本で表現しているが, 3 つの磁石はすき間なく並べられており, 計算上は同じ座標上で重なって電流が流れているとして計算した. したがって, 磁石 3 枚の場合の x - y 平面上の任意の点 (x,y) における磁束密度

$\mathbf{B}^t(x,y) \left(= (B_x^t, B_y^t, B_z^t) \right)$ は次式となる.

$$\mathbf{B}^t(x,y) = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{2\mathbf{I} \times \mathbf{r}_+}{|\mathbf{r}_+|^2} - \frac{2\mathbf{I} \times \mathbf{r}_-}{|\mathbf{r}_-|^2} + \frac{\mathbf{I} \times \mathbf{r}'_+}{|\mathbf{r}'_+|^2} - \frac{\mathbf{I} \times \mathbf{r}'_-}{|\mathbf{r}'_-|^2} \right) \quad (9)$$

ここに, $\mathbf{r}'_+ = (x+3w/2, y, 0)$, $\mathbf{r}'_- = (x-3w/2, y, 0)$ である. なお, 前述のとおり, 磁石の z 方向の長さを無限大と仮定したため, これらの値は z の値によらず一定となり, z 成分は零すなわち, $B_z^s = B_z^t = 0$ となる.

本研究の解析モデルと参考文献[3]の座標軸の取

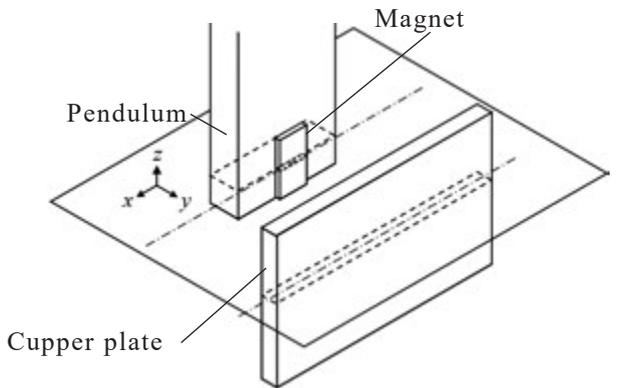


Fig.3 Analytical plate

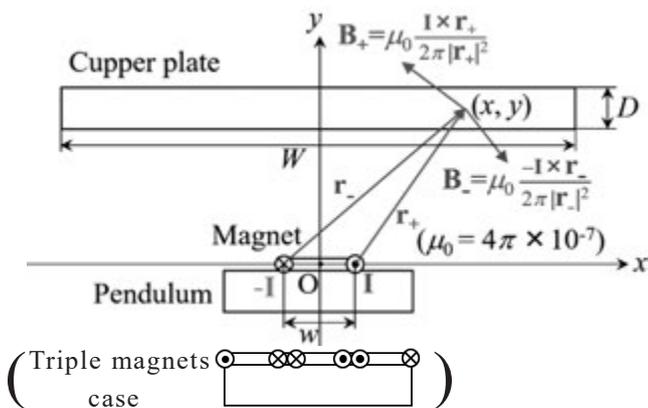


Fig.4 Calculation of magnetic field

り方の違いを考慮して式(6), 式(7)を検討する. 磁束密度は z 軸の変化に対して一定であるので, これらの積分は x, y 2 変数の面積分に導体板の高さ H を掛けたものとなる. したがって, 本研究における減衰係数は,

$$c = \frac{1}{2} \sigma H \int_y^{y+D} \int_{-\frac{W}{2}}^{\frac{W}{2}} [B_y(x, y)^2 - B_{y0}^2] dx dy, \quad (10)$$

ただし,

$$B_{y0} = \frac{1}{DW} \int_y^{y+D} \int_{-\frac{W}{2}}^{\frac{W}{2}} B_y(x, y) dx dy. \quad (11)$$

となる. ここに, 積分範囲中の y は磁石中立軸と導体板表面までの距離, D は導体板の y 軸方向の厚さ, W は導体板の x 軸方向の幅を表す. また, 上式の B_y は, 磁石 1 枚の場合は B_y^s , 3 枚の場合は B_y^t を表す.

2.3 数値計算例

図 5(a)に磁石が 1 枚の場合, 図 5(b)に 3 枚の場合の解析平面における磁束密度の二乗 ($|\mathbf{B}|^2$) の分布を示す. 後述の実験に近いオーダーにするため, 側面電流 $I=1000\text{A}$ とし, 式(8), 式(9)を x 軸方向は磁石の中央から $\pm 100\text{mm}$, y 軸方向は磁石中立軸から $1\text{mm} \sim 100\text{mm}$ の領域で $1\text{mm} \times 1\text{mm}$ のメッシュを切って MATLAB により計算した. 磁石近傍では密度変化が非常に大きいため, 図の等高線は対数目盛で表し, 両図のグレイスケールは同じ値で区切られている.

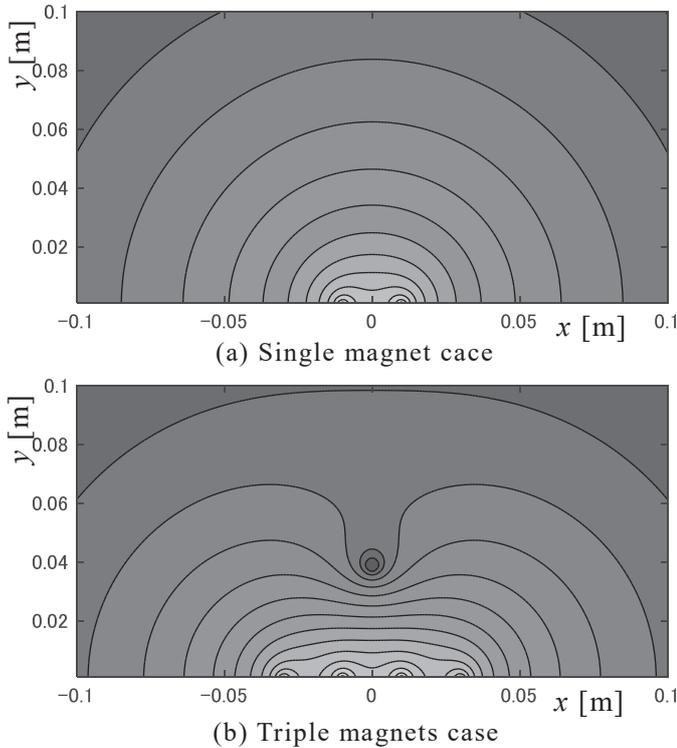


Fig.5 Magnetic flux density ($|\mathbf{B}|^2$) distribution

図 5(a)の磁石 1 枚の場合では, 磁石近傍を除いて少し横長の楕円に近い同心円状に分布しているのに対し, 図 5(b)の磁石 3 枚の場合では, $(x, y) = (0, 0.04)$ 近辺の磁束密度が低い箇所が存在している点が異なっている. これは, 3 枚の磁石の並びで, 中央の磁石と両側の磁石の極性が逆であることから, 上記の位置で

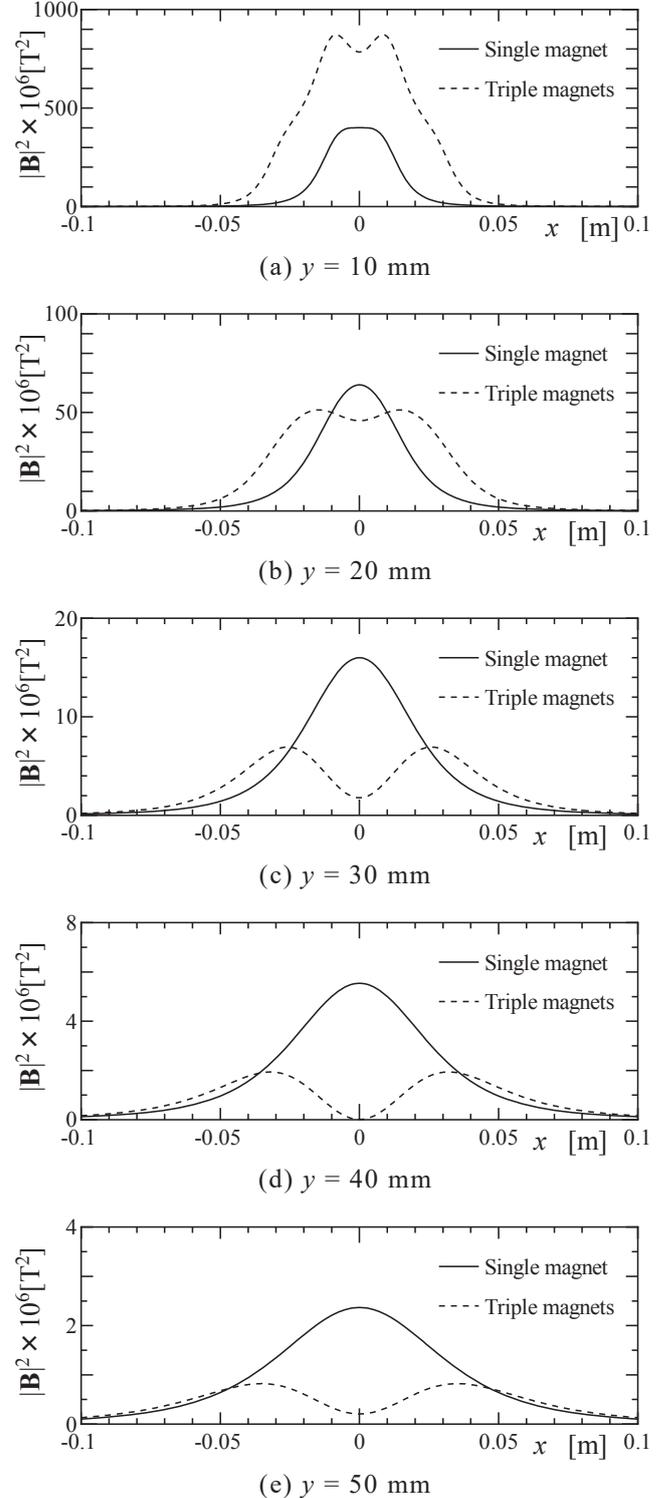


Fig.6 Variation of magnetic flux density ($|\mathbf{B}|^2$)

磁力が打ち消し合い、磁束密度が低くなっていると考えられる。

図 6(a)~(d)に、磁石の中央から y 軸方向にそれぞれ 10mm, 20mm, 30mm, 40mm, 50mm 離れた線上における磁束密度二乗の変化を示す。実線が磁石 1 枚、破線が 3 枚の場合を示している。磁石 1 枚と 3 枚の場合を比較すると、 y 軸方向距離 10mm では、磁石 3 枚の方が全般的に磁束密度が大きい、上述した磁力の打ち消し合いのため、距離が離れるにつれ磁石 3 枚の場合の中央が低くなり、20mm ではほぼ同程度、30mm, 40mm では、磁石 1 枚の場合の方が磁束密度が大きいという結果となった。

次に、図 7(a),(b)に減衰係数の計算に関わる磁束密度 y 成分の二乗(B_y^2)の分布を示す。図 5(a),(b)の磁束密度の二乗($|\mathbf{B}|^2$)の分布に比べより複雑となり、 $1\text{mm} \times 1\text{mm}$ のメッシュでは不十分であったため、 $0.1\text{mm} \times 0.1\text{mm}$ のメッシュを切って再計算した。なお、図 5と同様に対数目盛を採用しているが、色の濃い零に近い領域では等高線が密になるため間引いてある。いずれも色の最も濃い部分は、磁束の向きが x 軸に平行となり、 y 成分がほぼ零となる座標を表している。

図 8(a)~(e)に、磁石の中央から y 軸方向にそれぞれ 10mm, 20mm, 30mm, 40mm, 50mm 離れた線上における磁束密度の y 成分二乗(B_y^2)の変化を示す。

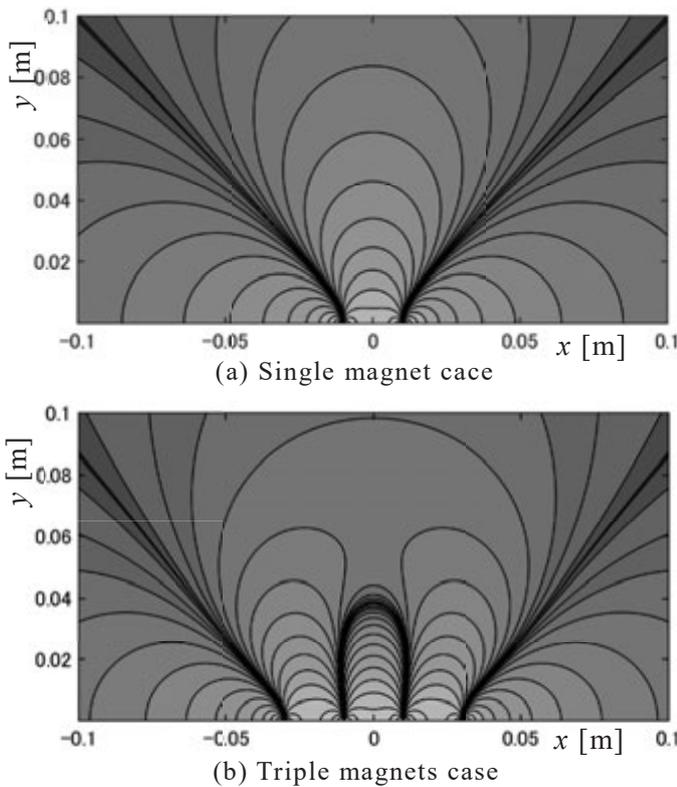


Fig.7 Magnetic flux density (B_y^2) distribution

実線で示された磁石 1 枚の場合は、中央に 1 つの大きなピークが観測され、距離が離れるに従ってその大きさが小さくなる。破線の磁石 3 枚の場合、 $y=10\text{mm}$, 20mm , 30mm までは、3 つのピークが観測されるが、距離が離れるにつれ中央のピークが小さくなり、 $y=40\text{mm}$ ではほとんどなくなっていることが分か

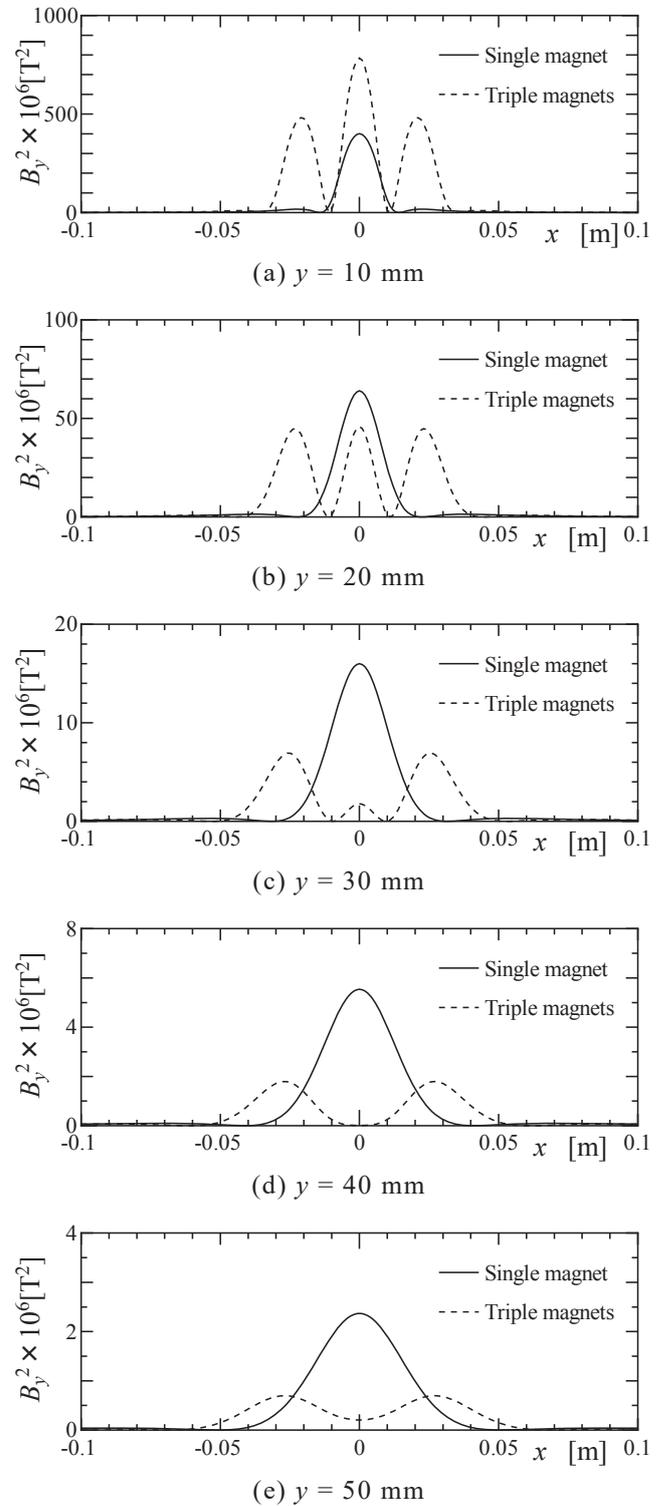


Fig.8 Variation of magnetic flux density (B_y^2)

る。また、これらの面積は磁束密度の二乗(B^2)の場合の変化と類似しており、 $y=20\text{mm}$ と $y=30\text{mm}$ の間を境に距離が離れるにつれ、磁石 3 枚の場合より磁石 1 枚の方が大きくなる結果となった、以上のことから、減衰係数も同様に変化すると予測される。

次に、減衰係数の計算を行う。提案する磁石の単純化により、式(10)、式(11)の積分はある程度解析的に求めることもできるが、本研究では、簡便のため B_y^2 を求める時に用いた $0.1\text{mm} \times 0.1\text{mm}$ メッシュの中心における値とメッシュ面積との積を数値的に合計することで近似的に積分を行った。なお、前述のとおり、数値積分は振子が平衡位置を横切る瞬間について考えることにし、導体板の体積 $10\text{mm} \times 100\text{mm} \times 200\text{mm}$ を積分範囲とした。

図 9 に、磁石-導体板距離による減衰係数の変化の理論計算結果を示す。側面電流は磁束密度を求めた時と同様に $I=1000\text{A}$ とし、導体板の電導率は銅の値である $64.5 \times 10^6 \text{ S/m}$ を採用した。磁石-導体板距離は磁石の y 軸方向の中立面から導体板の磁石側の表面までの距離を示している。減衰係数は、磁石-導体板距離が磁石 1 枚では $y=15\text{mm}$ 近辺、磁石 3 枚では $y=20\text{mm}$ 近辺から減少するに従って急激に増大している。距離が 24mm 以下では 3 枚の磁石の場合の方が減衰係数が大きく、それ以上では磁石 1 枚の方が大きくなる。距離が 24mm の場合、導体板中央と磁石の距離はほぼ 30mm となることから、この位置における磁束密度の y 成分二乗(B_y^2)は図 8(c)に近く、これより距離が離れると磁石 1 枚の方が B_y^2 の値が大きくなるのがこの現象の原因と考えられる。

3. 実験

3.1 実験方法

実験で用いる振子型動吸振器は、2.1 節で示した

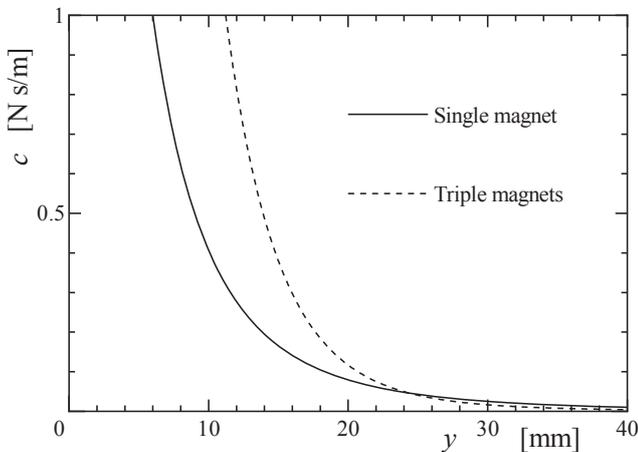
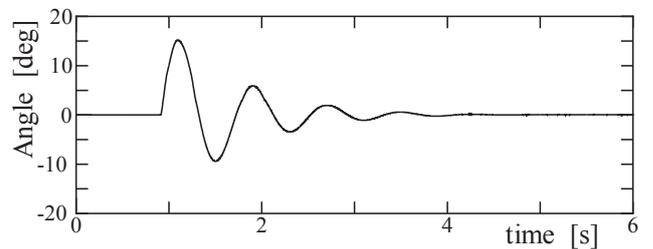


Fig.9 Damping coefficient (calculated value)

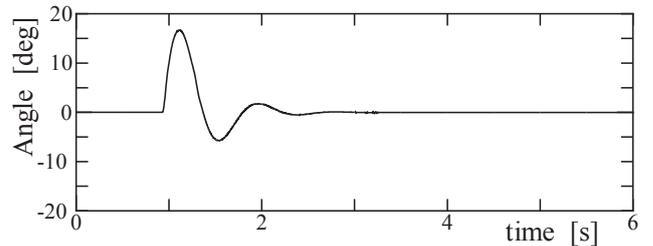
通りである。この振子に適当な衝撃を与えて減衰自由振動を発生させ、その傾きをレーザセンサで計測した。そのアナログ電圧出力を AD 変換器を通じて PC に取り込み、MATLAB によってデータ処理を行った。

3.2 実験結果

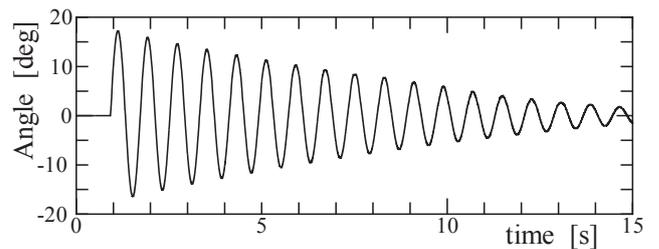
図 10(a)~(d)に実験で得られた減衰自由振動波形の例を示す。図 10(a), (b)はともに磁石と導体板距離が 11.5mm の場合で、(a)が磁石 1 枚、(b)の磁石 3 枚の場合である。波形より、(b)の方が減衰が大きいことがわかる。次に、図 10(c), (d)はともに距離が 34.5mm の場合で、右端の波形の大きさを比較すると、(c)の磁石 1 枚の方がわずかに減衰が大きいことがわかる。こ



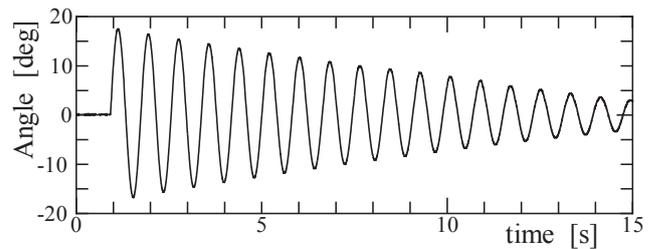
(a) Single magnet, $y = 11.5 \text{ mm}$



(b) Triple magnets, $y = 11.5 \text{ mm}$



(c) Single magnet, $y = 34.5 \text{ mm}$



(d) Triple magnets, $y = 34.5 \text{ mm}$

Fig.10 Damped free vibrations (experiments)

れらは数値計算結果と一致する。

磁石と導体板との距離を様々に変えながら多数の減衰振動波形を計測し、半周期ごとの振幅変化から減衰比を求めた^{[5][6]}。また、振子の固有振動数、質量、重心位置の計測結果から、式(4)により慣性モーメント J を算出し、その結果と実験で得られた減衰比 ζ から、式(5)により減衰係数 c を求めた。表 1 に計測および実験で得られた各パラメータを示す。

図 11 に、実験で得られた磁石-導体板距離と、減衰係数との関係を示す。○が磁石 1 枚の場合、■が磁石 3 枚の場合を示している。図 9 と比較すると、磁石-導体板距離が距離が短くなるにつれ急激に増加する特徴や、距離が 20mm 以下では磁石 3 枚の方が減衰係数が大きいという特徴が一致している。距離が 25mm 以上の範囲で、磁石 3 枚と 1 枚が逆転するところまでは明確に観測できなかったが、図 8 の減衰自由振動波形で述べたように、概ねそのような傾向があると考えられる。

図 11 中の実線は、図 9 で示した計算値を磁石 1 枚の場合になるべく重なるような側面電流 ($I=1300A$) を与えた際の理論曲線である。大胆な近似をしたにもかかわらず、良く一致していることが分かる。図 11 中の破線は上記の電流と同じ大きさの電流を磁石 3 枚の場

合に適用した結果である。この線に対し、■で示された実際の実験結果はかなり小さい。

この理由として磁気飽和の存在が考えられる。すなわち、ネオジム磁石はそれ自体非常に大きい磁化がなされ、単体でも飽和磁束に近い状態であるため、今回のように磁石を組み合わせることにより、磁界が限界を超えて飽和し、それを考慮していない理論計算結果を下回ったとするものである。磁気飽和を表現するため、側面電流を再び調整して磁石 3 枚の測定値に近づけたものを図 11 中の一点鎖線で示す ($I=970A$)。この曲線は $y>20mm$ の範囲を除き実験値とほぼ一致している。減衰係数は磁束を介して電流の 2 乗に比例することから、磁束飽和により 44% 程度の磁束密度の減少があったことになる。ただし、この原因についてはあくまで仮説であり、今後さらなる検証が必要である。

以上の結果から、本研究で提案する簡便な計算モデルを用いることにより、磁気ダンパの磁気減衰力の予測がある程度可能であることが明らかとなった。

4. おわりに

以上、振子型動吸振器の磁気ダンパについて簡便な計算によってその性質が定性的に予測できることを明らかにしてきた。解析および実験結果から、減衰を調整するには振子と導体板の距離を変化させることが最も効果的であるが、その減衰係数変化の特徴から、大きな減衰が得られる近距離において変化が激しく、微妙な調整は困難と予測される。

しかし、複数の磁石の組み合わせと配置方法を新たに考案し、それぞれの磁石の間隔など、調整できるパラメータを増やした上で、本研究で提案する方法で減衰力との関係を調べることにより、減衰力の微調整が可能なダンパを開発することが可能であると考えられる。

今後は、そのような新しい磁気ダンパを考案し、減衰力の調整が容易な動吸振器の開発に役立てたい。

Table 1 Parameters of Pendulum

Number of magnets	1	3
Mass of pendulum M [kg]	0.652	0.700
Distance of bearing and center of gravity l_G [m]	0.097	0.103
Distance of bearing and center of magnet l_M [m]	0.205	0.205
Natural angular frequency ω_n [rad/s]	7.87	7.75
Moment of inertia J [kg m ²]	0.0100	0.0118

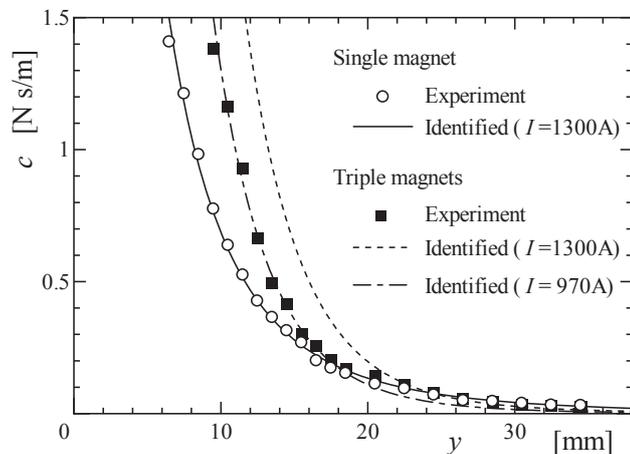


Fig.11 Damping coefficient (experimental value)

参考文献

[1] 背戸一登, 動吸振器とその応用, コロナ社, 東京, 2010.
 [2] 山根甲彰, 高山佳久, 雉本信哉, 石川諭, "表皮効果を考慮した導体円板とリング型磁石から構成された垂直運動型磁気ダンパのモデル化," 日本機械学会論文集 vol.82, no.837(2016), pp.1-16.
 [3] 木村貴裕, 高山佳久, 近藤孝広, 雉本信哉, "組み合わせ磁石を用いた磁気ダンパの研究(基本ハルバッハ配列磁石を用いた磁気ダンパ)," 日本機械学会論文集, C編 vol.078, no.789(2012), pp.387-396.
 [4] 高山佳久, 末岡淳男, 近藤孝広, 中村研介, "円形コイルと円形磁石で構成された磁気ダンパ," 日本

機械学会論文集, C 編 vol.076, no.771 (2010), pp. 209-215.

[5] 岩壺卓三, 松久寛, 振動工学の基礎, p.44, 森北出版, 東京, 2008.

[6] 谷口修, 振動工学, p.46, コロナ社, 東京, 1985.

NC 工作機械における 象限突起の加工面への影響を軽減する方法

西口 直浩*

(2021年9月30日受理)

Method to Reduce the Influence on Machined Surface of Quadrant Glitches in NC Machine Tools

Tadahiro NISHIGUCHI*

(Received September 30, 2021)

Abstract

When a three-dimensional shape is machined by NC machine tool, the quadrant glitch occurs around the motion direction changing point of the translational axes, which has a big influence on the quality of the machined surface. A lot of results of the study to improve the quality of the machined surface with a quadrant glitch by NC machine tool are reported until now. However, the study on the compensation method for machining error with the transcriptional characteristics to a machined surface of the quadrant glitch of the translational axes has not been yet investigated enough. In this report, the method to reduce the influence on machined surface by the quadrant glitches of translational axis is proposed, and the effect is confirmed by the actual machining tests.

キーワード: 工具径, 動作反転, 動特性, オーバル工具, 加工面品位

Keywords : tool diameter, motion direction changes, dynamics, oval end mill, machined surface quality

1. はじめに

数値制御工作機械により製造される加工物のうち、金型といった加工面の面品位が重要視される加工物において、送り駆動系の運動方向反転時の運動誤差により発生する加工誤差は、加工面の面品位に大きな影響を及ぼすことが分かっており、数値制御工作機械の加工精度向上は製品の品質・性能や生産性に対して重要な課題の一つとなっている。

これまで、工作機械による加工面の面品位向上を目的に、送り駆動系の運動方向反転時に発生する運動誤差に関する研究結果が数多く報告されている[1-7]。しかし、報告されている補正方法の多くは、非常に高精度な補正量の算出を必要としており、それらの適用には高度な技術や多大な工数が必要とされる。また、その補正量は機械コンディションに左右されやすく、機械の経年変化や積載物の変更によるコンディションの変化に伴い適正值からずれてしまう。

これらの報告以外にも筆者らはこれまでに、5軸制御マシニングセンタにおける同時5軸運動を用いた回転軸の運動方向反転時に発生する運動誤差と、それにより加工面に発生する加工誤差との関係(以後、転写特性)について調査し、その特性を用いた補正方法に関する研究報告も行っている[8]。また、回転軸の運動方向反転時の運動誤差だけでなく、直進軸の運動方向反転時に発生する象限突起の加工面への転写特性についても調査報告を行っている[9]。その報告内で、直進軸の象限突起においても回転軸の運動方向反転時の運動誤差と同様に、加工面に対し凸形状となる象限突起は加工面に転写されづらい現象が発生することが確認されている。しかし、この実験結果と回転軸の運動方向反転時における運動誤差の転写特性を比較すると、直進軸の象限突起の方が加工面に転写され易い現象が発生している。

そこで本研究では、直進軸の象限突起の加工面への転写特性に対し影響を及ぼす各要素が、象限突起

* 愛知工科大学工学部電子ロボット工学科, 〒443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乗 50-2

Department of Electronic Robot Engineering, Aichi University of Technology, 50-2 Manori, Gamagori 443-0047, Japan

による加工誤差をどの程度軽減できるか調査することで、さらに容易に工作精度を向上させる方法を提案する。また、これまで加工面に対し凸形状に発生する象限突起に対する転写特性や加工誤差の軽減方法について検討してきたが、本研究では加工面に対し凹形状に発生する象限突起による加工誤差の軽減方法についても検討し、実加工実験によりその効果を確認した。

2. 直進軸と回転軸の同期運動による円柱加工

本研究では金型の面品位に注目していることから、金型製造現場において頻繁に用いられている走査線等の Z 軸を含む工具経路による 3 次元形状の加工を調査対象とする。このことから本実験では、Z 軸を含む直進 2 軸による円弧加工を行おうとしたが、Z 軸を含む直進 2 軸だけでは半円しか加工できない。また、加工面に対し凹形状に発生する象限突起による加工誤差についても調査を行うことを本研究では目的にしていることから、本実験では図 1 に示す 5 軸制御マシニングセンタ(株式会社エグロ製 E-32V)を用いて、図 2(a)に示のように回転軸である C 軸と直進軸 Z・X 軸を同期動作させることで円柱加工を行った。その他の加工条件は表 1 に示す。

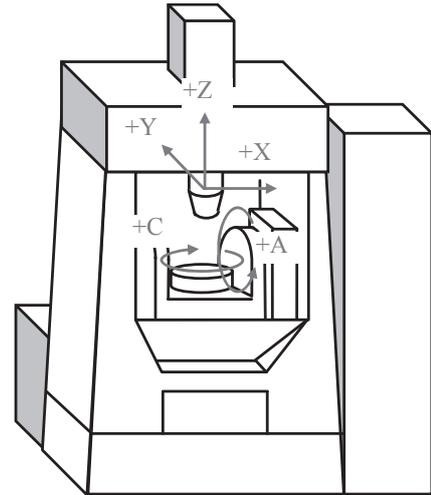


Fig.1 Configuration of the five-axis machining center (EGURO_E-32V).

また、この調査では送り駆動系の象限突起の工具軌跡といった運動特性も調査する必要があることから、上記加工実験と同様の動作で円弧運動の運動特性を測定する測定装置として、レニショー株式会社製のダブルボールバーシステム QC20-W(以後、DBB)を採用し図 2(b)に示す測定実験を行った。そして、この測定実験の結果と、真円度測定装置によって加工結果を測定した結果を比較した。

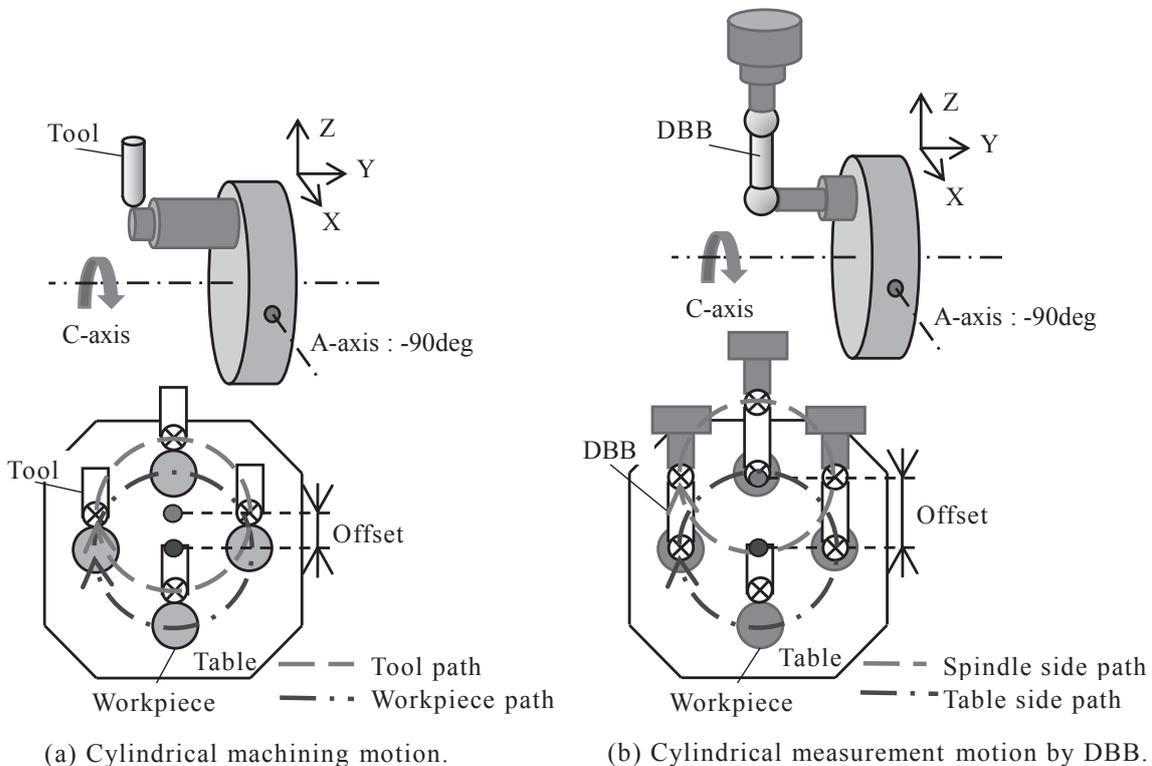


Fig.2 Z·X·C-axes Cylindrical motion.

本実験で用いる5軸制御マシニングセンタは、加工面に対する工具姿勢を任意に選択することができるという特徴を有する。この特徴を利用することにより、送り駆動系の様々な誤差による加工面への影響を軽減させることができる可能性があることから、これにより直進軸の象限突起が加工面に及ぼす影響を軽減できるか確認した。図2に示す今回の実験で採用された送り軸動作では、工具と工作物が接触する機能点[10]における加工面の接線方向とX軸の運動方向が一致することから、X軸の象限突起による加工面への影響が軽減されることが期待できる。これを確認するため、X・Y軸による円弧動作時におけるX軸の象限突起の測定結果と、上記のZ・X・C軸による加工結果におけるX軸の運動方向反転時の加工誤差を比較した。

X・Y軸による円弧動作時におけるDBBによる測定結果と、Z・X・C軸の円弧動作による加工結果およびDBBによる測定結果を図3に示す。これらの結果より、X・Y軸による円弧運動時(図3(a))におけるX軸の象限突起の高さが約 $4\mu\text{m}$ であるのに対し、Z・X・C軸による円弧運動時における測定結果(図3(b))および加工結果(図3(c))には、同様の誤差を確認することはできなかった。

以上のことから、5軸制御マシニングセンタといった回転軸を有する工作機械において、回転軸と直進軸を同期動作させることで加工面に対する工具姿勢を任意に選択することにより、直進軸の象限突起が加工面に及ぼす影響を軽減できることが確認できた。

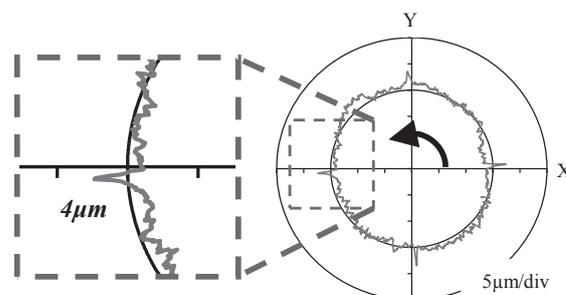
3. 往復運動とクロスフィードの影響

これまでの研究[8]により、加工面に対し最も近い工具軌跡が加工面を生成することが報告されている。これは、送り駆動系の象限突起が加工面に対し凸形状の工具軌跡である場合、往復動作を用いることにより、図4に示すように往路および復路にて発生したそれぞれの象限突起による加工誤差を、それぞれの反対方向からの工具経路である復路および往路が加工面により近い部分を切削することで、加工面への影響を軽減することができると考えられる。このことから本実験では、往復運動とその走査線の間隔(以後、クロスフィード)の影響について調査した。

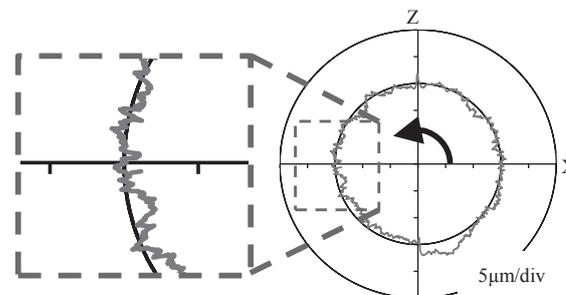
本実験では、2章の加工実験で用いた実験条件のうち、工具軌跡を一方向運動から往復運動に変更した送り軸動作を用いる加工実験を行った。これにより、往路の工具経路上で発生する直進軸の凸形状の象限突起によって発生する加工誤差に対し、隣接する工具経路である復路がこの凸形状の加工誤差を再度加工することで、軽減することができないか確認した。

Table 1 Experimental condition for machining

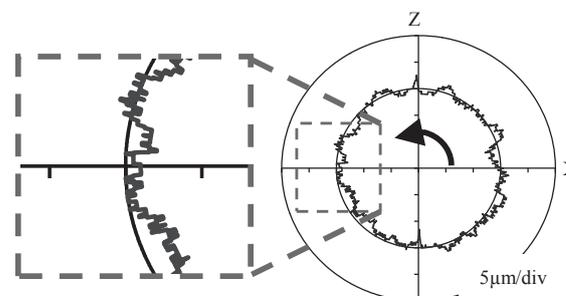
Tool	Type	Ball-end mill
	Number of flutes	2
	Diameter	6 mm
Workpiece	Material	AL2017
	Form	Column
	Diameter	25 mm
Machining	Radius of motion	13 mm
	Cut depth	0.05 mm
	Cross feed	0.1 mm
	Spindle speed	10000 rpm
	Feed rate	200 mm/min



(a) X・Y-Axes Circular Motion Measurement



(b) Z・X・C-Axes Circular Motion Measurement



(c) Z・X・C-Axes Circular Motion Machining

Fig. 3 Circular motion with C-axis.

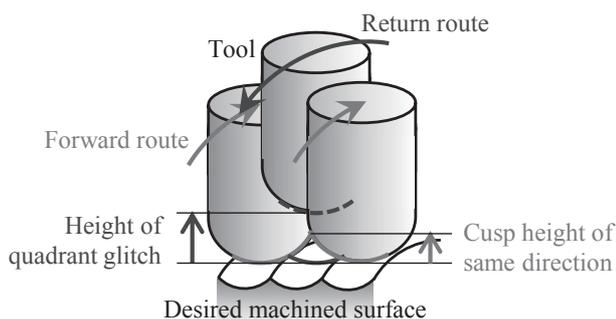


Fig. 4 Cusp height of same direction tool path in reciprocating motion.

その結果を図 5 に示す.

この結果より、象限突起による加工誤差は、ほとんど軽減されていないことが確認された。これは、今回の加工実験ではクロスフィードが 0.1mm であったことから、図 4 に示す往復の工具経路のうち同一方向の隣り合った工具経路による理論ワーク表面粗さ(以後、同一方向カスプ高さ)が計算上約 $6.7\mu\text{m}$ となり、図 5 (a) で確認された約 $3.5\mu\text{m}$ の Z 軸の象限突起による加工誤差を削り取ることができなかつたためであると考えられる。そこで、クロスフィードを 0.1mm から 0.05mm に変更し再度加工実験を行った。この際、工具径 6mm、クロスフィード 0.05mm における同一方向カスプ高さは約 $1.6\mu\text{m}$ となる。その結果を図 6 に示す。この結果より、象限突起による加工誤差は約 $3.5\mu\text{m}$ から約 $1.5\mu\text{m}$ にまで軽減されたことが確認された。

これにより、必要な加工精度に合わせてクロスフィードを小さくした往復運動を用いることにより、同一方向カスプ高さを小さくすることができ、これにより隣り合った別方向の工具経路上の象限突起による凸形状の加工誤差を削り取ることで、加工精度を向上させることが可能であることが確認された。

4. 工具形状の影響

筆者らはこれまで、直進軸である X・Y 軸の象限突起が加工面に対しどのような影響を及ぼすか、その転写特性について調査を行った[9]。その結果、加工面に対し凸形状の工具軌跡となる象限突起により発生する加工誤差の高さは、象限突起の高さだけでなく幅および工具径が影響していることが確認され、工具径を大きくすることにより、象限突起の高さに対し加工誤差の高さが軽減することを報告している。

そこで本実験では、3章で実施した加工実験に対し工具径を 6mm から 12mm に変更することで、象限突起による凸形状の加工誤差を軽減することが可能であることを検証した。またこの際、第 3 章で確認したク

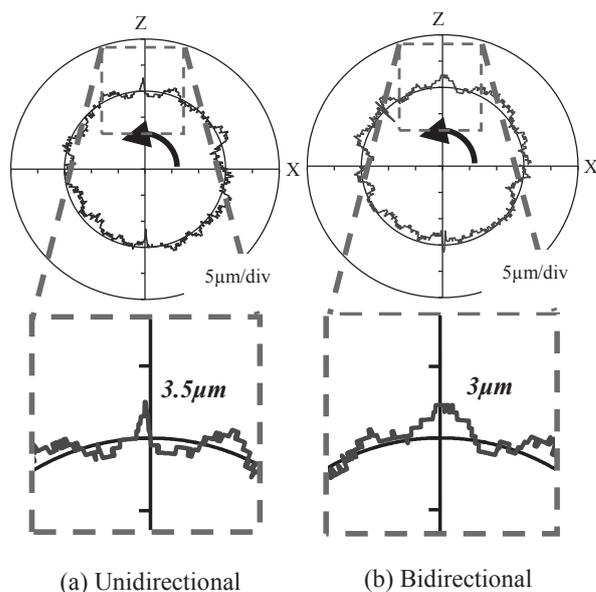


Fig. 5 Cylindrical machining with Bidirectional (Tool diameter 6mm, Cross feed 0.10mm).

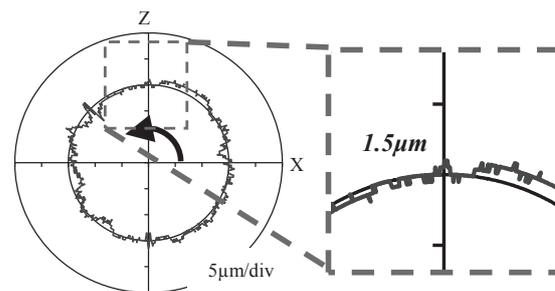
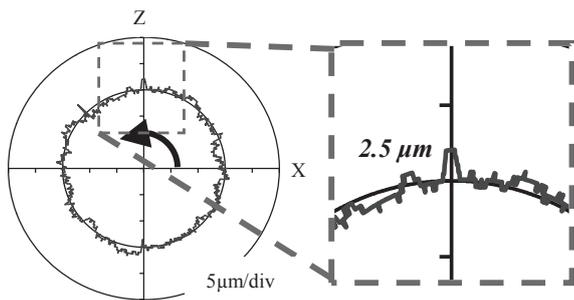


Fig. 6 Cylindrical machining with Bidirectional (Tool diameter 6mm, Cross feed 0.05mm).

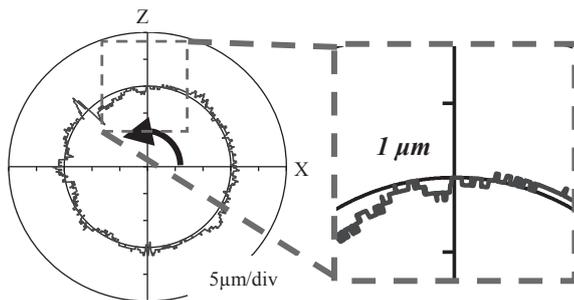
ロスフィードを小さくした往復運動を用いることによる効果も合わせて確認した。

工具径 12mm のボールエンドミルによる往復運動を用いた加工実験において、クロスフィードを 0.1mm と 0.05mm と変化させて実施した結果を図 7 に示す。この結果と工具径 6mm による同条件で加工した結果(図 5, 図 6)と比較したところ、クロスフィード 0.1mm の場合、工具径 6mm の象限突起による加工誤差が約 $3.5\mu\text{m}$ であったのに対し工具径 12mm では約 $2.5\mu\text{m}$ に軽減され、クロスフィード 0.05mm の場合、工具径 6mm の象限突起による加工誤差が約 $1.5\mu\text{m}$ であったものが工具径 12mm では約 $1.0\mu\text{m}$ にまで軽減されたが、その効果は非常に小さいものであった。このことから、象限突起による加工面への影響を軽減させるには、工具径を大きくする方法は十分な効果を示さないことが判明した。

これまでの実験により、直進軸の象限突起の加工への影響を軽減させる方法として、工具径を大きくす



(a) Cross feed 0.1mm



(b) Cross feed 0.05mm

Fig. 7 Cylindrical machining with Bidirectional (Tool diameter 12mm).

る方法に比べクロスフィードを小さくする方法のほうが効果を示すことが確認された。しかし、クロスフィードを小さくする方法も加工時間が延びる原因となることから、実際の加工において採用するには課題となる。そこで工具径を大きくせず、更にクロスフィードも小さくせずに、象限突起による加工面への影響を軽減させる方法として、オーバルミル(榊不二越製) [11]を用いる方法が挙げられる。このオーバルミルは、図 8 に示すように工具径に対し工具先端の曲率を変更されており、この工具を用いて加工した場合、工具径と同径のボールエンドミルで加工した同一方向カスプ高さに比べ、更に大きな工具径で加工したのと同様の同一方向カスプ高さを得られる。

上記 2・3 章で実施した加工実験の際に工具先端を用いて加工していることから、本実験では図 8 に示す 2 種類のオーバルミルの中でも工具先端の曲率が大きい(b)のスプーンと呼ばれる工具を用いることとした。実際の実験に使用したオーバルミルは、工具径 ϕ 12mm で工具先端の曲率が ϕ 25.5mm のボールエンドミルに相当する。このオーバルミルを用いたクロスフィード 0.1mm の往復動作による加工では、同一方向カスプ高さは約 $1.0\mu\text{m}$ となる。このオーバルミルと同径である ϕ 12mm のボールエンドミルによる加工結果である、図 7 (a)上で確認された高さ約 $2.5\mu\text{m}$ の象限突起による加工誤差も、約 $1.0\mu\text{m}$ にまで軽減されることが期待



(a) Egg (E) type (b) Spoon (S) type

Fig. 8 Oval mill (NACHI-FUJIKOSHI Co.).

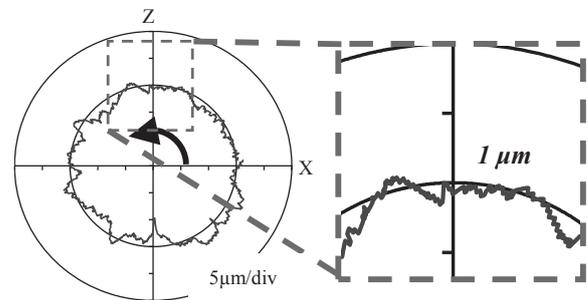


Fig. 9 Cylindrical machining with Oval mill (Cross feed 0.1mm).

できる。ここで工具以外の加工条件は、上記 3 章で実施した加工実験と同じとした。

オーバルミルを用いた加工結果を図 9 に示す。実験で用いたオーバルミルと同径である ϕ 12mm のボールエンドミルによる加工結果図 7 (a)と比較すると、ボールエンドミルを用いた加工における象限突起の加工誤差の高さ約 $2.5\mu\text{m}$ は、オーバルミルを用いることにより想定通り約 $1.0\mu\text{m}$ にまで軽減されることが確認された。

以上のことから、オーバルミルといった工具径以上の曲率を工具先端に有するエンドミルを用いることにより、工具径よりさらに大きな工具径で加工したことと同等の効果を得られることが確認された。

6. おわりに

本研究では、直進軸の象限突起が加工面に及ぼす影響を軽減する方法について、その効果と共に調査を行った。本研究で得られた結果を以下に示す。

- (1) 5 軸制御マシニングセンタといった回転軸を有する工作機械において、回転軸と直進軸を同期動作させることで加工面に対する工具姿勢を任意に選択することにより、直進軸の象限突起が加工面に

- 及ぼす影響を軽減できることが確認できた。
- (2) 必要な加工精度に合わせてクロスフィードを小さくした往復運動を用いることにより、往復動作における同一方向のカスプ高さを小さくすることができ、これにより隣り合った別方向の工具経路上の象限突起による凸形状の加工誤差を削り取ることで、加工精度を向上させることが可能であることが確認された。
 - (3) ボールエンドミルの工具径を大きくする方法による効果は小さく、クロスフィードを小さくした往復運動を用いる方法に比べ限定的であることが確認された。
 - (4) オーバルミルといった工具径以上の曲率を工具先端に有するエンドミルを用いることにより、工具径よりさらに大きな工具径で加工したことと同等の効果を得られることが確認された。

謝辞

本研究は、TAKEUCHI 育成奨学会の研究助成および、長野県工科短期大学の協力により行われた研究の一部であり、関係各位に深く感謝の意を表す。

参考文献

- [1] 垣野義昭, 井原之敏, 篠原章翁, “DBB 法による NC 工作機械の精度評価法,” (株)リアライズ社, 1990.
- [2] 長島一男, 勝木雅英, 河上邦治, “NC 工作機械の象限切替え突起量の理論解析と入力適応系による補正,” 日本機械学会論文集(C 編), vol.66, no.648, pp.2877-2883, 2000.
- [3] 杉江弘, 岩崎隆至, 中川秀夫, 幸田盛堂, “工作機械における漸増型ロストモーションのモデル化と補償,” システム制御情報学会論文誌, vol.14, no.3, pp.117-123, 2001.
- [4] 佐藤隆太, 横堀祐也, 堤正臣, “5 軸制御マシニングセンタにおける直進軸と旋回軸の動的同期精度,” 精密工学会, vol.72, no.1, pp.52-56, 2006.
- [5] 佐藤隆太, 堤正臣, 長島一男, “円運動象限切替え時における送り駆動系の動的挙動,” 精密工学会誌, vol.72, no.2, pp.208-213, 2006.
- [6] 佐藤隆太, 井出裕, 堤正臣, “多軸同期制御精度向上のための送り駆動系の制御系設計方法,” 日本機械学会論文集(C 編), vol.73, no.727, pp.693-700, 2007.
- [7] 佐藤隆太, 寺島義道, 堤正臣, “微小変位領域の摩擦特性を考慮した象限突起補償器,” 精密工学会誌, vol.74, no.6, pp.622-626, 2008.
- [8] 西口直浩, 佐藤隆太, 白瀬敬一, “5 軸制御マシニングセンタにおける回転軸運動方向反転時の動的

- 挙動の評価とその補正,” 精密工学会誌, vol.82, no.10, pp.913-918, 2016.
- [9] 西口直浩, 黒岩郁斗, “NC 工作機械における象限突起の加工面への転写特性に関する研究—工具径と送り駆動系の速度の影響—,” (公)TAKEUCHI 育英奨学会 助成金報告書, 2019.
 - [10] (財)日本規格協会, “工作精度試験方法通則—第 1 部:幾何精度試験 JIS B 6190-1,” JIS ハンドブック⑬工作機械, (財)日本規格協会, pp.955-1101, 2019.
 - [11] 株式会社不二越, “オーバルミル,” 株式会社不二越ホームページ, (2021 年 8 月 9 日参照 <http://www.nachi-fujikoshi.co.jp/>)

解説・総説

SDGs に対応したエンジニアリング・デザイン教育の動向

尾関 智恵*

(2021年9月30日受理)

Engineering Design Education to Promote Understanding the SDGs

Tomoe OZEKI*

(Received September 30, 2021)

Abstract

This paper outlines the SDGs, which are being promoted worldwide, and summarize the requirements for human resource development in the field of engineering which is the mission of our university. And we will discuss the social roles that will be required in the future and the path that will lead to those roles, referring to our educational goals.

キーワード: SDGs, Sustainable Development Goals, ユニバーサルデザイン, エンジニアリング・デザイン教育

Keywords : SDGs, Sustainable Development Goals, Universal Design, Engineering Design Education

1. はじめに

本稿では、世界的に取り組みが推進されているSDGs(持続可能な開発目標)[1]について概要を確認し、本学の使命である工学分野における人材育成で求められている要件について整理する。そして本学の教育目標と照らし合わせながら、これから求められる社会的な役割とそこに至る道筋について考察する。

2. SDGsの概要

SDGs(持続可能な開発目標)[1]は、2015年に国連サミットにて採択された2030年までに持続可能でよりよい世界を目指す国際目標である。「誰一人取り残さない(leave no one behind)」ことを誓い、全世界で取り組んでいる道程の途中である。

内容としては、17のゴール・169のターゲットから成り、各国がそれぞれの強みを以って達成に向けた取り組みを行なっている(図1)。我が国も当然ながら政府・民間企業・教育機関問わず、様々な団体から個人レベルまで対応を表明し、取り組みを推進している[2]。この推進の実質的な旗振り役である自治体の多くは17「パートナーシップで目標を達成しよう」を選んでおり、その推進方法も包括的である[3]。これは自治体の特性からいって当然の選択だが、それ以外の16の目標を具体的に達成していくためには、焦点を当てた取り組みが多様に存在する必要がある、着実に実施していく体制がないことには17の達成は困難である。

本学の領域である工学教育分野では、災害地復興・人口の急激な減少・地域課題など切実な問題と関連させた目標選択と事例が多い[4]。こういった具体性のある課題解決は工学分野の社会的使命であり、今後ますます積極的に取り組むべきテーマであるといえる。その一方で各目標に取り組むこと以上に、学生諸氏にこれからの工学者として専門性や特性を活かした対応方法と倫理観を教育するテーマとして有益で授業デザインにも大いに活用できる。工学者として意欲的に対応する社会課題であり、今まで以上にそういったモチベーションを育てていくことが、世界的にも求められているといえる。



図1 SDGs17のゴール

3. エンジニアリング・デザイン教育の概要

そもそも、SDGs 以前より工学教育分野では工学者に必要なスキルや素養を育てる教育の質向上に取り組み続けている。その一つの枠組みにエンジニアリング・デザイン教育がある。これは一般社団法人日本技術者教育認定機構(以下 JABEE)によって認定される教育プログラムとして知られ[5]、1989 年に創設された国際的な工業専門教育の認証評価を行うワシントン協定に加盟する際、エンジニアリング・デザイン教育が弱いと指摘されたことを機に、改善がなされてきた。現在 JABEE が提示する定義を図2[6]に示す。

数学、基礎科学、エンジニアリング・サイエンス(数学と基礎科学の上に築かれた応用のための科学とテクノロジーの知識体系)および人文社会科学等の学習成果を集約し、経済的、環境的、社会的、倫理的、健康と安全、製造可能性、持続可能性などの現実的な条件の範囲内で、ニーズに合ったシステム、エレメント(コンポーネント)、方法を開発する、創造的、反復的で、オープンエンドなプロセスである。

図2 エンジニアリング・デザインの定義

4. 本学における教育目標との照らし合わせ

国内では JABEE の審査方針に基づいて各教育機関がこれに対応する教育プログラムを策定しているが、別府[7]は本来の定義(図3)の捉え直しと効果的な教育カリキュラムの策定を再検討する必要があると述べている。つまり、クライアントの要求に応えられる高品質な開発プロセス自体を創出する能力のことで、それを養うことに焦点を当てる必要性を提案している。本学の教育目標[8]と照らし合わせると、「社会から喜ばれ歓迎される技術者となる」を実現するために不可欠な能力であると言える。更に、本学のカリキュラムポリシーでは、各能力をバランスよく育成することが明記してあり(図4)[9]、目指すべきエンジニアリング・デザイン教育をある程度は踏襲していると解釈できる。

エンジニアリング・デザインとは、(メーカにおいて)クライアントの要求に適合するシステムやコンポーネント、プロセスを開発するプロセス。

図3 Criteria for accrediting engineering programs

「意欲」「人間性」「能力」をバランス良く向上させて「総合力」を培うとともに、この「総合力」を活かす「実践力」を身に付け、段階的に設定される実践的な課題・実習・実験を通してモノづくりに必須となる「設計力」と「製作力」を修得し、社会から喜ばれ歓迎される人材となるためのカリキュラムと授業内容・方法による学士課程教育を行います。

図4 本学のカリキュラム・ポリシー

5. まとめと今後の展望

SDGs の目標達成に向けて、エンジニアリング・デザインで定義する効果的な開発プロセスを創出するには、設計・生産のみだけでなく、製品のライフサイクルも見据えた想像力や価値の高い設計解を設定できる能力を養う必要がある。このような想像力及び価値の高い設計解を設定するためには、開発工程の理解と並行して未知の問題を想定する練習も必要であろう。

これらは従来から「実践」に重きを置く本学の教育実践で取り入れられてきたと解釈できるが、SDGs のような社会課題と技術高度化に対応できる人材教育への刷新がこれまで以上に求められている。特に「人中心型デザイン」の考え方はアクティブラーニングに代表される次世代の学習手法を用いる必要がある。こういった社会の要請にしっかりと応じつつも、一時しのぎにならないよう「社会から喜ばれ歓迎される人材」育成に拘り、着実にやっていくことが益々重要となるだろう。

参考文献

- [1] 外務省，“SDGs とは？”，<https://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/oda/sdgs/aboab/index.html>，(参照日：2021年9月26日)
- [2] 外務省，“持続可能な開発目標(SDGs)達成に向けて日本が果たす役割”，https://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/oda/sdgs/pdf/sdgs_gaiyou_202108.pdf，(参照日：2021年9月26日)
- [3] 増原直樹，岩見麻子，松井孝典，“地域におけるSDGs 達成に向けた取組みと課題”，環境情報科学論文集 Vol. 33 (2019 年度 環境情報科学研究発表大会)．一般社団法人 環境情報科学センター，2019. p. 43-48.
- [4] 安藤晃，“シンポジウム「持続可能な開発目標(SDGs)に対応した工学教育」”，工学教育，2019, 67.6: 6_25-6_27.
- [5] 日本技術者教育認定機構，<https://jabee.org>，(参照日：2021年9月26日)
- [6] 日本技術者教育認定機構，“JABEE におけるエンジニアリング・デザイン教育への対応 基本方針”，https://jabee.org/doc/engineering_design_100430a.pdf，(参照日：2021年9月26日)
- [7] 別府俊幸，“工学教育におけるエンジニアリング・デザイン教育”，工学教育，2011, 59.4: 4_72-4_79, doi.org/10.4307/jsec.59.4_72
- [8] Criteria for accrediting engineering programs, ABET, 2011-2012, <https://www.abet.org/wp-content/uploads/2015/04/abet-eac-criteria-2011-2012.pdf>，(参照日：2021年9月26日)
- [9] 愛知工科大学，<https://www.aut.ac.jp/outline/>，(参照日：2021年9月27日)

大型車の車輪脱落事故

服部 幸廣*, 甲村 一貴*, 巨藤 誠*

(2021年9月30日受理)

Wheel Separation Accidents of Heavy Vehicles

Yukihiro HATTORI*, Kazuki KOUMURA*, and Makoto KOTO*

(Received September 30, 2021)

Abstract

Recent few years, wheel separation accidents of heavy vehicles are increasing rapidly again. In this report, we introduce the present state of the accidents based on the statistical information that are opening to the public by Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism. Furthermore, we explain its causes and measures in detail by use of the materials obtained by request for disclosure of administrative documents to the same Ministry.

キーワード: 事故, 整備, 大型車, ホイール脱落

Keywords : Accident, Maintenance, Heavy Vehicles, Wheel Separation

1. はじめに

航空輸送や鉄道輸送と並び、物流の大半を担っているトラック輸送は重要な輸送手段である。輸送時間の短縮、輸送量の増大など、輸送の効率化を図るため、道路交通網などのインフラが整備されてきたことや、大型車のドライバー不足に伴い、輸送車両の更なる大型化や輸送距離の長距離化が進んでいる。また、降雪地域までの輸送に対応するため、事前または直前の冬用タイヤへの交換、車両の定期点検時に、タイヤを効率的に使用するためのローテーションでホイールごと脱着する。走行中のホイール脱落事故を防ぐには、このような脱着時に適切な整備作業が必要である。整備不良などで車両からホイールが脱落すると、その車両の安全な走行ができなくなるばかりか、大型車のタイヤ(ホイール)の重量は重いものでは100kg(約980N)程もあるため、脱落したホイールが他の車両や歩行者などに衝突すれば悲惨な二次災害となる。

国土交通省は、大型車両からのホイール脱落を重大事故と位置づけており、当該事業者に対し、一定期間内の速やかな報告を義務付け、各発生事案について詳細に把握するとともに、(一社)日本自動車工業会[1]、(公社)全日本トラック協会、(一社)日本自動車タイヤ協会、全国タイヤ商工協同組合連合会などの関係団体を通して車輪脱落事故防止対策の周知徹底を図っているが、脱落事故は近年大きく増大し

ている。

本稿では、国土交通省が公開している大型車の車輪脱落事故に関する情報、および、研究代表者が国土交通省に対して行った行政文書開示請求により入手した過去7年間の脱落事故に関する情報、関係団体がこれまで取り組んできた活動、著者らがこれまで行ってきた報告などを取りまとめ、ホイール脱落事故の発生状況、事故原因や対策について解説する。

2. 脱落事故件数

2.1 脱落件数の推移およびこれまでの施策

国土交通省が自動車事故報告規則(昭和26年運輸省令第104号)および自動車メーカーからの報告をもとに集計し、公開している車両総重量8トン以上の自動車または乗車定員30人以上の自動車(以下、大型車)であって、車輪を取り付けるホイール・ボルトの折損またはホイール・ナットの脱落により車輪が自動車から脱落した事故件数を図1に示す[2]。事故件数は2002年度の11件から2004年度の87件まで急増しており、これを背景に、2004年4月に「大型車のホイール・ボルト折損による車輪脱落事故に係る調査検討会」が独立行政法人交通安全環境研究所(現:独立行政法人自動車技術総合機構交通安全環境研究所)に設置され、同年12月に検討結果を国土交通省に報告している[3]。また、2004年4月には、大型

* 愛知工科大学自動車短期大学自動車工業学科, 〒443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乗 50-2
Department of Automotive Engineering, Aichi University of Technology Automotive Junior College, 50-2 Manori, Gamagori
443-0047, Japan

車のホイール・ボルト折損による車輪脱落事故防止対策として、貨物車約 74 万台、バス約 10 万台、特殊車約 20 万台の合計約 104 万台の対象車両の緊急点検の実施を関係団体に周知している。その結果、報告のあった約 25.5 万台については、約 4500 台の車両に、ホイール・ボルトの折損、異常(変形、伸び、摩耗)、緩み、ナット欠落およびホイールの亀裂などの不具合(約 1.8%)が確認されている。その後、2005 年度の 61 件から 2011 年度の 11 件に至るまではほぼ毎年減少したが、2012 年度の 15 件以降、再びほぼ毎年増大し、2019 年度には過去最多の 112 件もの脱落事故が発生している。2017 年度には 2004 年度に続き、大型車の車輪脱落事故防止対策の周知徹底が国土交通省より通達されているが、歯止めがかかっていない。その後、国土交通省は 2019 年 11 月に、「大型車の車輪脱落事故防止対策に係る連絡会」の傘下に「大型車の車輪脱落事故防止対策に係る調査検討 WG」を立ち上げ、2014 年度から 2018 年度で発生した脱落事故について分析した結果を、2004 年度の調査検討会での調査結果(1999 年度から 2004 年度)と比較しながら、2020 年 10 月に「同 WG 中間とりまとめ」として公表している[4]。この中で、変化の見られない傾向として、事故発生が冬期(11 月～3 月)に集中していること、脱落箇所は左後輪が多いこと、推定原因として、タイヤ交換時にホイール・ボルトの締め付けトルクの管理に不備が多いことを挙げている。一方、変化の見られた傾向として、近年では、積雪地域での事故が多いことから、融雪剤等によるホイールやホイール・ボルトの腐食が関係している可能性があること、車歴 4～5 年が多い傾向(2004 年度の調査では 8～9 年)、総走行距離では、25 万 km 超～50 万 km 以下が多い傾向(2004 年度の調査では 50 万 km 以上～75 万 km 未満)を挙げている。

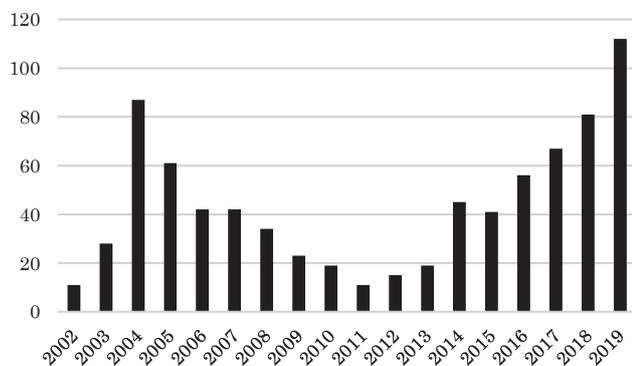


Fig. 1 The number of wheel separation accidents of heavy vehicles.

2.2 ホイールの規格別脱落件数の推移

脱落件数をホイールの規格(JIS 規格, ISO 規格)別に分類して示した結果を図2に示す。日本国内で初めて ISO 規格のホイールが販売されたのが 2010 年 5 月であるため、2002 年から 2009 年までは全てのホイールが JIS 規格であると推定し、2010 年から 2012 年まではデータがないため不明とした。2013 年から 2019 年までは、国土交通省への行政文書開示請求により開示された行政文書[5]に基づいている。ホイール全体に占める ISO 規格の占有率が不明であるため、ISO 規格が JIS 規格より脱落比率が大きいかは断定できないが、ISO 規格ホイールの普及に伴い、脱落事故全体に占める ISO 規格の割合が明らかに増大している。

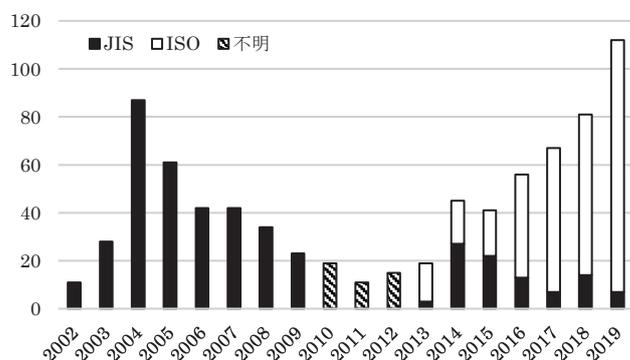


Fig. 2 The number of wheel separation accidents of heavy vehicles of both JIS and ISO standards.

2.3 ホイールの脱落箇所の推移

大型車両は車両総重量が大きいいため、その車軸数は乗用車のような前後ともに 1 軸ではなく、後軸が複数である車両が非常に多い。また、後軸には、1 軸当たり左右両側にホイールが 2 輪ずつ取り付けられている(いわゆるダブルタイヤ)。(公社)全日本トラック協会の公表資料[6]によれば、2015 年～2019 年の 5 年間で発生した事故の 98% で後軸のホイールが脱落、また、全体の 86% で左側の後軸のホイールが脱落している。このように、ホイールの脱落箇所が後軸左側に集中しているが、国土交通省は、その推定原因の一つとして、左旋回時の旋回半径は右旋回時より小さいため、左旋回時はタイヤがあまり回転せず、鉛直軸まわりに大きな曲げモーメントが生じることで、ホイールやホイール・ボルトに大きな負荷がかかることや、右旋回時は車両の速度が左折時より大きいため、大きな遠心力が作用していることなどをあげているが検証はされていない。

また、参考までに、JIS 規格のホイール・ボルトは、右側ホイール用は右ねじで、左側用は左ねじであるの

に対し、ISO 規格では左右のホイール用とも右ねじであるため、同じ左側のホイールであっても、JIS 規格の場合は左ねじで、ISO 規格の場合は右ねじとなる。したがって、ISO 規格のホイールで走行すれば、左側ホイールのナットが緩む方向に力が作用する。このため、作業ミスなどで締め付けトルクが規定トルクを多少でも下回っていると、ISO 規格の左ホイールは脱落することが考えられる。(公社)全日本トラック協会の公表資料[6]によれば、2015年～2019年の5年間で発生した事故では、63%で左側後輪が右ねじ(ISO 規格)のホイールが脱落している。

2.4 車両メーカーごとの脱落件数の推移

車両メーカーごとに集計した発生件数を図3に示す。2013年～2019年までは、国土交通省から入手した行政文書[5]に基づいている。なお、2013年以前はデータがないため不明とした。近年、大手A社およびC社の発生件数が増大傾向にあることがわかる。

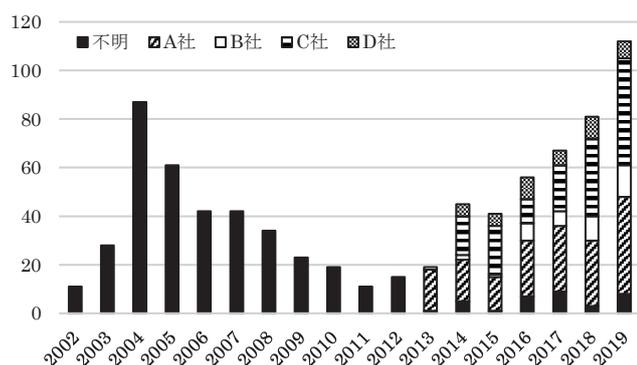


Fig. 3 The number of wheel separation accidents of heavy vehicles of every production company.

3. 脱落原因と検証

3.1 これまでの検証結果

ホイールが脱落する原因には、ホイールを締め付けているホイール・ナットの締め付けトルクが規定値より小さく、走行中にナットが緩んで脱落し、その後、ホイールが脱落する場合や、過積載により、ホイール・ボルトに過剰な荷重が繰り返し掛かり、疲労破壊で折損し、ホイールとともに脱落する場合、また、ナットが規定トルクで締め付けられていても、ホイールとハブの接触面にフレッチング摩耗が発生して、ボルトに非回転緩みが生じた結果、ナットの脱落およびホイール・ボルトの折損が誘発されて脱落する場合などがある。

これらの原因を誘発する直接の原因として、ホイール

を支えているハブなどの車両部品に欠陥がある場合もあるが、そのほとんどはホイール脱着時の整備不良である。具体的にはホイール取り付け時のホイール・ボルトの締め付けトルクが過少あるいは過大な場合や、取り付け用のホイール・ボルトと締め付け用のホイール・ナットの潤滑が不適切な場合、ホイールの規格や材質(スチールホイール、アルミホイール)に適合しないホイール・ボルトとホイール・ナットを使用した場合(いわゆる誤組)である。これらの整備不良によりホイール・ボルトの軸力が過少あるいは過大となり走行中に疲労破壊を起こしてタイヤがホイールごと外れる危険性が高くなる。

このような原因の検証として、ホイール・ボルトとホイール・ナットの潤滑条件がホイール・ボルトに生じる軸力に及ぼす影響についての研究がある。旧独立行政法人交通安全環境研究所(平成28年から独立行政法人自動車技術総合機構交通安全環境研究所)[3]や福岡ら[7,8]が、JIS規格のスチール・ホイールを締め付けているホイール・ボルトの潤滑剤にマシン油を用いた場合の締め付けトルクと軸力の関係を報告している。

また、著者らはこれまでに、このようなJIS規格の大型車(後軸二輪)用スチール・ホイール以外にも、同規格のアルミホイールやISO規格のスチール・ホイールおよびアルミホイールについても、組み付け時の潤滑条件がホイール・ボルトの軸力に及ぼす影響について報告してきた[9,10]。また、JIS規格のスチール・ホイールをアルミホイール用のホイール・ボルトを使用して取り付けした場合(いわゆる誤組)の軸力低下についても明らかにしている[11]。

3.2 これからの検証課題

ダブル・ホイールの取り付け方法は規格により異なる。JIS規格では、一輪ごとに1個のナットで締め付けるため、合計2個のナットを用いるが、ISO規格では、二輪を1個のナットで共締めする。また、ホイールを車軸の中心に取り付けるためのホイールおよびナットの構造が規格により異なる。JIS規格では、ホイールを取り付けるとき、ホイールとナットの接触面がともに球面座であるため、ナットの締め付けの進行に伴いホイールが車軸の中心に案内されるようになっている。しかし、座面の変形などにより、ホイールの球面座に対してナット球面座がずれた状態で締め付けてしまえば、ホイールは車軸の中心に取りつかず、走行時に楕円運動してしまう。

一方、ISO規格では、ホイールとハブの勘合部はインロー(はめあい)となっており、ホイールの中心が車

軸の中心と一致する。しかし、中心が一致していても、ホイール・ボルトを通すためにホイールに空いている 8 個または 10 個の穴の直径が、ホイール・ボルトの直径より大きい場合、回転方向にホイールがずれた位置で取り付けられてしまうことがある。このような状態でナットを締め付けてしまうと、ナットとホイールの接触面に均等な締め付け力が働かない状態で走行することになり、その結果、ハブやホイールに偏摩耗が生じて脱落することが考えられる。そのため、ホイール・ボルトの中心とホイール穴の中心を一致させるための治具（株式会社研製：ホイールセッターなど）を使用することが重要であるが、研究代表者が入手した中古のアルミホイールの場合、ホイール・ナット締め付け時にナット座面がホイールに押し付けられてできる円形の圧迫痕が、ホイール・ボルトの中心からずれており、ホイールが回転方向にずれて取り付けられていたと考えられる。

このように、それぞれの規格のホイールに対する適切な取り付けを怠ると、ホイールやホイール・ボルトに大きな荷重が作用して、ホイール・ボルトの疲労破壊やホイールに偏摩耗（フレッチングなど）を起こすことが考えられる。このような取り付けミスが脱落原因となるかを検証する必要がある。

4. 脱落防止対策

基本的には、脱落防止対策に特別なことは要求されない。ホイール取り外し後、ボルト、ナットおよびホイールの当たり面を清掃して異物を除去し、二硫化モリブデンを含まない適切な潤滑剤（エンジン・オイルなど）を、指定されている箇所だけに塗布し、トルクレンチを用いて規定のトルクで締め付ける。さらに、一定距離（50～100km）走行後に、締め付けられているホイール・ボルトのねじ山、ホイール、ハブ、ホイール・ナットのねじ山に生じる初期なじみにより低下する軸力を回復するための増し締めを行うことである。そして、このような正しい整備作業を如何にして周知し、愚直に実行するかが重要である。

5. おわりに

近年、ISO 規格のホイール脱落事故が急増しており、その多くが左側の後輪ホイールである。冒頭でも述べたように、走行中のホイール脱落は重大事故であり、その原因を工学的に明らかにすることを検討している。

参考文献

[1] (一社)日本自動車工業会, “大型車車輪脱落事故防止のための取組み,” (一社)日本自動車

工業会ホームページ, (2021年9月30日参照, <http://www.jama.or.jp/truck-bus/>)

- [2] 国土交通省, “事故ゼロを目指して！大型車の車輪脱落事故防止キャンペーンを実施～大型車の車輪脱落事故防止対策に係る調査検討WGの検討結果を受けて～,” 国土交通省ホームページ, (2021年9月30日参照, https://www.mlit.go.jp/report/press/jidosha09_h_h_000261.html)
- [3] (独法)交通安全環境研究所, “大型車のホイール・ボルト折損による車輪脱落事故に係る調査検討会報告書,” Dec. 2004.
- [4] 国土交通省, “大型車の車輪脱落事故防止に係る調査検討WG ー車輪脱落事故防止対策の方向性ー 中間とりまとめ,” Oct. 2020.
- [5] 国土交通省, “(平成25年度～令和1年度)大型車のホイール・ボルト折損(ホイールナット脱落を含む)による車輪脱落事故一覧,” Feb.2021.
- [6] (公社)全日本トラック協会, “車輪脱落事故防止リーフレット「大型トラックの車輪脱落事故が急増中!」,” (公社)全日本トラック協会ホームページ, (2021年9月30日参照, https://jta.or.jp/wp-content/themes/jta_theme/pdf/anzen/tire_datsuraku_boushi2020_02.pdf)
- [7] 福岡俊道, 野村昌孝, 木澤正彦, 福万祥教, “有限要素解析における大型車用ホイール・ボルトの締め付け特性の評価,” 日本機械学会論文集, C編, vol.75, no.750, pp.446-453, Feb. 2009.
- [8] 福岡俊道, 野村昌隆, 福万祥教, 上平貴弘, 杉本吉規, “大型車用ホイールボルトの軸力のばらつきと安全性の評価,” 日本機械学会論文集, A編, vol.75, no.759, pp.1577-1584, Nov. 2009.
- [9] 服部幸廣, 甲村一貴, 巨藤誠, “大型車用ホイール・ボルトの締め付けトルクと軸力の関係に及ぼす潤滑状態の影響(二硫化モリブデン入り潤滑剤を用いた場合の特性),” 自動車整備技術に関する研究報告誌, vol.48, pp.42-46, Oct. 2019.
- [10] 服部幸廣, 甲村一貴, 巨藤誠, “ISO スチール・ホイール用ホイール・ボルトの締め付けトルクと軸力の関係に及ぼす潤滑状態の影響,” 愛知工科大学紀要, 第18巻, pp.27-33, March 2021.
- [11] 甲村一貴, 巨藤誠, 服部幸廣, “大型車ホイール誤組時の締め付けトルクとボルト軸力の関係(スチール・ホイールをアルミホイール用のホイール・ボルトで締め付けた場合の特性),” 自動車整備技術に関する研究報告誌, vol.49, pp.23-28, Oct. 2020.

報告

コロナ禍における音楽系課外活動「電音部」の活動継続に向けて

鵜飼 達也*

(2021年9月30日受理)

Report on the continuous operation of the university's music club activities in COVID-19

Tatsuya Ukai*

(Received September 30, 2021)

Abstract

In 2020, college life will be severely restricted due to the new coronavirus infection. We have summarized the introduction of the De N oN Boo !, which is an extracurricular activity of the university's music system, and the state of infection control measures, which made efforts to continue the activity even under this situation. First of all, we will investigate the ventilation condition of the activity place, think concretely to prevent sealing, crowding, and close contact, and report on the efforts of this year when the event was held.

キーワード: COVID-19, 課外活動, 感染防止, イベント

Keywords: COVID-19, Extracurricular activities, infection control, Event

1. はじめに

日本国内で COVID-19 の感染拡大により、2020 年 4 月に日本政府による緊急事態宣言が発出された。本学では、入学式、オリエンテーション及び、実習ガイダンスを実施した後、自宅予習期間が2カ月ほど続いた。それに伴い、学生の課外活動も停止した。同年6月からは通常通りの対面式授業が再開されたため、学生から課外活動も再開したいと希望が出た。特に本年度卒業する学生たちのためにも、活動を再開を検討すべきと筆者は考えた。かつて経験のない事態でもあり、この状況下での課外活動に関するガイドラインは本学には無く、活動再開について課外活動を統括する学務課長に相談した。顧問の判断に委ねるとの結論から、筆者は部員たちと共に、どのように感染対策を行えばよいのか、何を行えば課外活動を再開し、継続可能なかを考えながら活動することにした。当時は新聞やテレビで等の情報と厚生労働省等のホーム・ページなどからの情報が頼りで、全くの手探りの状態であった。基本的には感染防止として「三密(密接, 密着, 密閉)を避ける」、「手洗い(手指消毒)」、「うがい」、「マスクの着用」を中心に感染対策を徹底することである。これを前提としたイベントを計画し、それに向けての練習やイ

イベントの準備を行った。その当時の状況を記録に残し、今後の参考にする必要があると考え、令和2年度に行った「電音部(De N oN Boo !)」の活動の一部を「報告」という形で纏めることにした。本報告は、あくまでも学生が課外活動を続けるための活動報告に過ぎず、高価な実験機器や計測器を用いた実験や研究ではないことをお断りしておく。

2. 電音部とは

電音部とは、筆者が本学に於いて創部した音楽系の課外活動である。2004年、筆者の指導の下でコンテストに出場したいと申し出た4名の学生が進学して来たのが活動の始まりである。同好会として立ち上げたものの、全く予算が無い中、太田博学長(当時)のご配慮から、朝日新聞社主催の管楽器のアンサンブル・コンテストに出場させて頂くことが出来た。2006年には、中日新聞社が主催するアンサンブル・コンテストにも出場し、本大会まで駒を進め優良賞を受賞した。本大会の賞状と盾は、当時の学生課長に結果報告と共に提出した。残念ながら正規の「部」として認められていないサークルの活動であることから、学内での展示は行われず、全て破棄されてしまった。

* 愛知工科大学自動車短期大学自動車工業学科, 〒443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乗 50-2
Department of Automotive Engineering, Aichi University of Technology, 50-2 Manori, Gamagori 443-0047, Japan

僅かに県大会の賞状が現存しており、今でも県大会で優秀賞を頂いたことを知る事が出来る。(Fig.1)



Fig.1 当時の賞状

当時は備品の楽器も部室も無く、部員の私物や筆者の私物を使用しながら練習を行った。音の出る課外活動は業務の妨げになるという理由から深夜遅くに6号館の8階や4号館トレーニング・ルームで練習を行っていたが、それでも苦情が相次いだため、授業後に使用していない4号館3階で練習をすることになった。

その後、音楽や楽器の経験の無い学生の入部希望者が増えたが、音楽スキルの乏しい学生が主体であったため顧問だけでは満足な指導や演奏が出来ず、Disk Top Music を導入することにした。パーソナル・コンピュータに打ち込んだ音源を作成し、演奏可能な部分を学生が演奏することで音楽スキルの低い学生でも合奏を可能にする手法を取り入れた。この電気仕掛けの音楽系クラブという形態になったため、アンサンブル同好会から吹奏楽部を経て「電音部」と改名した。内田高峰学長(当時)からの指示で入学式や卒業式に於いて演奏を行い、参列された保護者の方々からも非常に好評であった。また、本学の大学祭に於いては、軽音部が独占的にメイン・ステージを使用していた関係でイベントに組み入れて貰えず、大学祭では使用していない 4301 講義室にて「電音ライブ」と称して毎年単独イベントを実施して来た。電音部の部員のご家族や友人、知人を中心に、毎年多くの方々の来場があり非常に好評である。更に近隣の中学・高校生を含む吹奏楽愛好家たちとの合同合奏会を行うなどして、幅の広い活動も行ってきた。しかし、学外の者が多く来学するイベントのため本学の施設利用規定の問題や課外活動費大幅削減等により、大変好評であった活動が行えなくなったのは非常に残念である。それでも部員たちの意欲は旺盛で、活動場所である 4301 講義室に於いてサマー・コンサートやクリスマス・コンサートなどの

演奏会や、ライブ・ハウスでのイベント、福祉施設等からの依頼演奏など活発に活動が続いている。

3. 2020 年度の取り組み

2020年6月3日、久しぶりに部員が部室に集った。楽器庫として使用している 4302 室では、部員 21 名と顧問及び外部指導の先生が集まるにはとても狭く、まさに「密」を作ってしまうため、講義終了後に 4301 講義室と 4303 資料調整室を使用して練習を再開することにした。このとき感染対策として示されていたのは「三密を避ける」ということであり、「密閉」を避けるために窓を開けて換気し、換気設備を使用するなど換気には十分注意を払った。活動再開にあたり、「密接」や「密集」を防ぐために 6 月中の全体合奏は避け、個人練習・指導とすることで極力ソーシャル・ディスタンスが取れるように配慮しながら活動を再開した。電子ピアノなどの電気楽器やエレキ・ギターなどの弦楽器については演奏する部員はマスクを着用し、極力窓に近い場所、かつ他の部員と概ね2メートル以上離れた状態で練習を行うことにした。管楽器については息を吹き込むことから、かなりの飛沫が飛ぶものと推測されたので、直ぐできる取り組みとして、楽器に人と同様に「ベルマスク」を装着することにした。(Fig.2)



Fig.2 ベルマスクの装着

当時、楽器専用のマスクは販売されておらず、市販の巾着袋を代用している。トランペットなどの金管楽器やサクソフーンなどの木管楽器にも装着した。木管楽器についてはトーン・ホールからの飛沫も予想されるため、こまめにスワブを通しトーンホールの唾抜きを徹底した。その後、専用のマスクが販売され、ベルマスクの有効性が示されたと考えている。

マイクロ飛沫に関しては、楽器メーカーが実験・検証を行っており、その結果を参考にして活動を再開することにした。(参考ヤマハ | 管楽器・教育楽器の飛沫可視化実験 (yamaha.com))

練習可能時間を授業後 17 時から 20 時 30 分までとし、最終のスクールバスで帰ることを徹底した。全員が一度に練習に参加した場合、帰りのスクールバス内が「密集」になるため、決められた時間に一齐に帰宅するのではなく、この時間内で各自の判断で練習をしてから帰宅するように指示をした。その間、顧問や外部指導の先生が直接各個人の練習に付き合うことが出来たため、学生個々の演奏技術力は全体合奏の練習をしていた時期よりも向上したものと思われる。

4. 活動場所の換気の状況を調査

感染防止のためには、先ず活動場所の換気の状態が大きな問題と考え、普段の活動場所である 4301 講義室に於いて実際にどのくらいの換気能力があるのか、設備の性能表での数値ではなく目で見える形で確認出来ないかを考えた。あくまでも学年や学科の異なる学生達が主体の課外活動での取り組みであるため、実験や検証するための専用機器を購入することが出来ない。そのため現在手元にある機材を活用することにした。イベントの演出で使用している Antari 社製の Smoke Machine (Fig.3)を使用し、作り出した煙がどの程度の時間で消失するかを計測することにした。使用したスモークマシンのスペックを Table.1 に示す。



Fig.3 Antari 社製 Smoke Machine

Model	Z-800 II
Power Supply	AC100, 50/60Hz
Heater	800 W
Exert Oneself	85m ³ /min
Tank Capacity	0.8 Liter
Liquid Consumption Rate	83 min/ Liter
Weight	3.5 Kg
Size W×H×D cm	12.8×16.6×31.5 cm

Table.1 Antari Fog Machine Spec

煙を発生させるためのリキッドは、Antari 社製の純正リキッドを使用した。(Fig.4)これは高純度のプロピレングリコールと水を主成分とするもので、Smoke Machine のヒーターで加熱し気化させることにより煙を作り出しており、同社の説明では人体にはほぼ無害とされている。照明の演出ために使用する長時間煙が消え難い製品である。



Fig.4 Antari 社製純正リキッド

煙を一定時間噴出させた状態で、空調設備を作動させずに窓を締め切った状態と、空調を作動させて窓を開放した状態とで、煙が消えて行く様子を目視で確認しながら時間の計測を行った。目視確認し易いように LED スポットライト(Fig.5)を使用している。



Fig.5 LED スポットライト

5. 4301講義室の換気状況調査

4301 講義室最後列中央席の後ろに学習机を設置し、その上に Smoke Machine を載せ、同じ位置に LED スポットライトを設置した。4301 講義室の全ての窓、及び出入り口を閉鎖した状態で、Smoke Machine を1分間作動させて煙を噴出させた後、1分間の自然拡散時間を設けた。更に再び1分間作動させて煙を噴出させることで4301 講義室に煙を充満させた。Spec 上では概ね 170m³ のスモークが噴射されたことになる。噴射直後の4301 講義室の様子を Fig.6 に示す。



Fig.6 噴射直後の4301講義室の様子

2 回目に煙を噴射し終わった直後からストップウォッチを使用して煙が消えて行く時間の計測を行った。4301 講義室の空調設備を使用せず窓と出入り口を締め切った状態では、計測開始から 30 分経過しても煙は完全に消えず視認できる状態であった。(Fig.7)従って、短時間に消滅する煙ではないこと、及び窓と出入り口が締まっている状態での4301 講義室は、ほとんど換気が出来ないということが確認出来た。



Fig.7 30分後の4301講義室の様子

全ての窓を開放した状態では 30 分以上煙が滞留することは考えられないため、これ以上の計測は打ち切った。次に全ての窓を開け、空調設備稼働させた状態での時間計測を行った。条件を等しくするため、窓を閉めたまま空調は作動させず1分間の煙の噴射と1分間の拡散時間の後、再び1分間の煙の噴射を行った。煙の噴射直後から時間計測を開始し、同時に窓を全て開けて行き空調設備も作動させた。この時の外気温は 26℃快晴で、ほぼ無風の状態であった。計測の結果、8分後にはほぼ視認できないくらいに換気され、10分経過した時点で煙は完全に目視出来ない状態になった。そのときの様子を Fig.8 に示す。



Fig.8 10分後の4301講義室の様子

この結果から4301 講義室に於いては、空調を作動させ、全ての窓と出入り口を開けることで 10 分程度の換気の時間を設ければ十分に換気が出来き、感染対策には有効であることが分かった。検証をもとに普段の活動では練習前にエントランスの窓も含めて4301 講義室の窓と出入り口を完全に開放し、空調設備を併用することで換気による感染対策を行うこととした。

この時点での厚生労働省のホームページでは、1時間に2回程度の換気を推奨していたので、最大 20 分の演奏で 10 分程度の換気に対応可能と考えた。また、こまめな換気を行うことでも対応可能であることも分かった。電音部の演奏は1曲5分程度なので、連続して3曲演奏しても 15 分程度であり、舞台転換と司会者による楽曲の紹介を入れ、10 分程度の換気時間を設けることは可能である。従って、イベント時に於いても完全な換気が可能と判断した。以上の調査・確認により、イベント時には煙を発生させ照明機器を用いた光の演出も可能であると考え、2020 年度も4301 講義室での活動は可能であると判断した。

実際のイベント時に10分の換気時間では間延びしてしまうため、「こまめな換気」という観点から予め全ての窓を開けて置き、電動カーテンを閉めることで「密閉」に近い状態を一時的に作って煙を滞留させ、5分程度の上演の後、電動カーテンを開けて4分程度の楽曲解説・舞台転換とを同時に行うことで確実な換気を行い、当時の指針である「60分で2回以上の換気」を達成し、4301講義室が密閉状態のままにならないように配慮した。これを確実に実行するには、照明担当者（照明イベント同好会）と音響担当者（音響同好会）が完全に連携して行う必要があり、イベント時には進行表を作成し綿密な打ち合わせとリハーサルを行った。作成した進行表のサンプルをTable.2に示す。

Table.2 進行表

令和2年度	月 日	摘 要				個人メモ
場所	4301講義室	MC用マイクの用意				演奏直後にカーテン開
日時	月 日	MC用マイクは使用后				MC直後カーテン閉
演奏時間	時間 分	次のMCに渡す。				MC途中に煙
時間	曲順	楽曲/MC担当	所要時間	出演者	演 出	音響転換
13:00	(開場)					
13:30~13:35	1	楽曲 1	5分		スモークあり	
13:35~13:39	MC	A君	4分			
13:39~13:44	2	楽曲 2	5分		スモークあり	
13:44~13:48	MC	B君	4分			
13:48~13:53	3	楽曲 3	5分		スモークなし	
13:53~13:57	MC	C君	4分			
13:57~14:02	4	楽曲 4	5分		スモークなし	
14:02~13:36	MC	D君	4分			
14:36~14:41	5	楽曲 5	5分		スモークなし	
14:41~14:45	MC	E君	4分			

6. その他の感染対策

座席に関する感染対策は、ソーシャル・ディスタンスを確実に取ることを第一と考え、事前予約制とし30名限定とした。事前告知は、学内に掲示したポスターをはじめ、TwitterなどSNSの活用。部員の家族や友人・知人に行った。事前申し込みの名簿を作成し、氏名、連絡先を記入。イベント当日の来場確認に使用した。万一感染者が発生した場合に、直ちに連絡が取れるようにイベント終了後一か月電音部の部室にファイルして保管した後、個人情報保護の観点から破棄することにした。会場内の座席指定は、エリアを区切り完全座席指定とすることで確実に人と人との距離を取った。当日の受け付け場所にて担当者が前述の名簿で来場者を確認し、来場者にマスク着用のお願いと確認を行った後、一人ずつ非接触型の体温計で検温、手指消毒を徹底する。先着順に作成した座席表から希望の座席を選んで貰い、指定された席に着席出来るように座席番号札を渡す。会場内にも同様の掲示を行い、初めて来学した方にも座席が分かり易いよう配慮した。その時の座席表をFig.9に示す。



Fig.9 座席表

イベント前日までに会場設営を行い、前日の夜には全ての机と椅子、階段の手摺、各階の出入り口扉の手摺に至るまでアルコールによる消毒を行った。イベント自体も2時間以内に終了させ、終了時にはご来場頂いた方全員に紙コップを配布し、うがいと手洗いを徹底して頂くことにした。部員には毎日の検温と部室に入る前の手指消毒を徹底させ、風邪のような症状がある者は、練習及びイベント当日を休んで貰うことにした。6月の時点で考えらる感染を徹底することで、イベント・スケジュールを決めて行った。7月26日(日)に延期となった新入生歓迎イベントを実施。10月10日(土)に本学でのイベント、12月20日(日)にクリスマス・イベントを計画し、実施した。ただし、10月の大学祭は中止となったものの、顧問である筆者が正式に中止を知ったのは直前であったため、予定していた10日のイベントを急遽中止にすることが出来ず、正式な施設利用の許可を得た上で電音部のイベントはそのまま実施した。12月のクリスマス・イベントには学生会がリモート学祭を実施する予定とのことでイベントの収録に訪れた。しかし、実際には令和3年2月に実施された「リモート大学祭」には収録されたものが使用されなかった。理由は顧問にも部員にも全く知らされてはいないが、学祭は、本来大学での活動の成果を学生が発表する場であると考え、活用されなかったのは非常に残念であった。

7. まとめ

2020 度は COVID-19 感染拡大と言う深刻な状況であった。6 月の非常事態宣言が解除された後とは言え、部員たちがこの課外活動を継続させるために、当時、未知の COVID-19 についての情報を集め、ミーティングを開くなどして考えられる対策を話し合い、感染防止の手段を考えて講じることを意欲的に行っている姿を見て、心を打たれた思いであった。顧問としては学生の安全を第一に考え、全ての活動を停止させることは当然である。しかし、ここまで意欲的に前向きな活動をしている部員たちを前に、全ての活動を停止させるには至らなかった。ならば一緒に調べ、考えて彼らと共に活動を続ける努力をしようと考えた。やはり、学生が学生である期間は限られており、卒業年度の学生に来年はない。彼らは課外活動を頑張りたくてこの電音部に所属し、活動を継続させるために本気で頑張っているのである。その結果、この年度も無事に各イベントを成功させ、部員のご家族や彼らの友人・知人に彼らの活動の成果を見せることが出来た。また、来場された他団体の方々に彼らの活動を見て貰うことで、共演の相談、学外でのイベント依頼等を頂き、本学のこの課外活動を知って頂くことにも繋がったと考える。卒業年度の学生 7 名を見送った 2021 年度は、新たに 15 名の入部希望があり、総勢 30 名でのスタートになった。COVID-19 感染対策の精神は新入部員にも受け継がれ、感染対策の情報を纏め、冊子を作り情報を共有することで全部員に周知させている。前期は活動出来たものの、8 月に再び非常事態宣言が発出され課外活動が出来ない状況になっているが、解除後の彼らの活動が無事再開できるように注意深く見守って行きたい。

最後に、活動を続けた学生たち、電音部の活動を支えて下さった教職員の方々、学内で実施された電音部の殆ど全てのイベントに足を運んで下さり、陰で学生たちを支えて下さった安田孝志前学長、並びに中山裕章先生に感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 厚生労働省, “3つの密を防ぐための手引き,” 厚生労働省ホームページ, (参照日:2020年6月2, https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/kenkou_iryuu/dengue_fever_qa_00001.html).
- [2] ヤマハ株式会社, “管楽器・教育楽器の飛沫可視化実験,” ヤマハ株式会社ホームページ, (参照日:2020年6月19, https://jp.yamaha.com/products/contents/winds/visualization_experiment/index.html).
- [3] 株式会社サウンドハウス, “ANTARI のフォグマシン用 Fogリキッド FLG5 と FLR5 について,” 株式会社サウンドハウスホームページ, (参照日:2020年6月19, <https://www.soundhouse.co.jp/contents/staff-blog/index?post=124>).
- [4] 一般社団法人コンサートプロモーターズ協会, “新型コロナウイルス感染症への対応について,” 一般社団法人コンサートプロモーターズ協会ホームページ, (参照日:2020年6月19, http://www.acpc.or.jp/news/news_detail.php?entry_id=692).
- [5] 一般社団法人全日本吹奏楽連盟, “吹奏楽の活動及び演奏会等における新型コロナウイルス感染拡大予防ガイドライン,” 一般社団法人全日本吹奏楽連盟ホームページ, (参照日:2020年10月2, <http://www.ajba.or.jp/index.htm>).

●業績リスト(2021.1～2021.12)

[著書]

田川和義, 田中 弘美: 技術情報協会: VR/AR 技術における感覚の提示、拡張技術と最新応用事例, 担当: 第 9 章 第 2 節 触覚 VR を応用した手術訓練システムの開発, pp.445-450.

長町三生(監修): 感性工学と AI、VR への応用, 海文堂出版株式会社. (第 9 章 「感性工学の介護への展開」を長町三生, 神邊篤史の共著にて執筆)

中島守, 吉田昌央, 小野秀文, 高田富男, 平野博敏, 川村貴裕: 安全のころえ (令和 3 年度版) 学校法人電波学園 愛知工科大学自動車短期大学(2021.3).

中島守, 河合末利, 森勝行, 永田英雄, 服部幸廣, 高田浩充: 新編 工学基礎 (令和 3 年度版) 学校法人電波学園 愛知工科大学自動車短期大学(2021.3).

中島守, 掛布知仁, 高田浩充, 森勝行, 吉田昌央: 基礎数学 (令和 3 年度版) 学校法人電波学園 愛知工科大学自動車短期大学(2021.3).

[論文/国際会議]

阿部己和, 梶谷満信, 瀧山武: リーン限界性能向上のための燃焼変動率の予測に関する基礎検討ー燃焼圧センサーを用いた IMEP 変動率の予測ー, 自動車技術会論文集, 52 巻, 1 号, pp.1-6 (2021) DOI:10.11351/jsaeronbun.52.1.

梶谷満信, 阿部己和: 未知入力オブザーバ適用による電動車椅子の駆動力推定, 愛知工科大学紀要, 第 18 巻, pp.35-40 (2021).

阿部己和, 梶谷満信: 追従制御検討のための電動車いすの SIMULINK モデル, 愛知工科大学紀要, 第 18 巻, pp.41-45 (2021).

YANG Yuting, 梶谷満信, 阿部己和: 電動車椅子のための未知入力オブザーバによる路面外乱の推定, 産業応用工学会全国大会講演論文集 (2021).

C. Taki, T. Toyoshi, N. Shiozawa: THE INVESTIGATION OF CARDIOLOCOMOTOR COUPLING IN THE WATER, 26th Annual European College of Sport Science (ECSS) Congress (2021.9).

近藤篤史, 林寛幸, 豊吉巧也: CAE 構造解析を活用した機械設計の課題解決型学習, 工学教育 (2021.11).

近藤 篤史: 非線形荷重伝達挙動を考慮したリベットの有限要素モデル化, 愛知工科大学紀要, 第 18 巻, pp. 9–14 (2021).

Atsushi Kondo, Toshiyuki Kasahara and Atsushi Kanda: A Simplified Finite Element Model of Riveted Joints for Structural Analyses with Consideration of Nonlinear Load-transfer Characteristics, *Aerospace*, Vol. 8, No. 196 (2021) DOI:10.3390/aerospace8070196.

近藤篤史, 林寛幸, 豊吉巧也: CAE 構造解析を活用した機械設計の課題解決型学習, 工学教育 (2021) (in press).

T. Kondo, M. Yoshida, T. Yanagishita, H. Masuda: Fabrication of Li Nanohole Array by Replication Process Using Anodic Porous Alumina Template, *Journal of The Electrochemical Society*, 168, 032508 (2021).

T. Kondo, T. Tamura, T. Yanagishita, H. Masuda: Formation of Ideally Ordered Porous Anodic Zirconia by Anodization of Vacuum Deposited Zr on Molds, *The Journal of Vacuum of Science and Technology B*, 39, 020601(2021).

T. Yanagishita, H. Takai, T. Kondo, H. Masuda: SnO₂ nanofibers prepared by wet spinning using an ordered porous alumina spinneret, *Nanotechnology*, 32, 145603 (2021).

T. Kondo, H. Miyazaki, T. Yanagishita, H. Masuda: Fabrication of metal nanorod arrays using anodic porous alumina mask with elliptical apertures prepared by lattice conversion process, *Japanese Journal of Applied Physics*, 60, 010907 (2021).

T. Yanagishita, T. Hayakawa, T. Kondo, H. Masuda: Preparation of Ni micropillar arrays with high aspect ratios using anodic porous alumina template and their application to molds for imprinting, *RCS Advances*, 11, 2069 (2021).

Toshiaki Kondo, Atsushi Ono: Fabrication of Highly Ordered Metal Nanostructure Array Using Anodic Porous Alumina Template and its SERS Properties, *ISBE2021*, V2–20(2021).

Toshiaki Kondo: Formation of three-dimensional nanostructure array using anodic porous alumina and its application to functional nanodevices, 4th IWSBN (2021.11). 依頼講演

Toshiaki Kondo, Touko Tamura, Takashi Yanagishita, Hideki Masuda: Formation of Ideally Ordered

Semiconductor Nanohole Array by Anodization Process, Interfinish2020, F-SEP08-002 (2021.9.8)
Nagoya.

堀 弘志, 實廣 貴敏: Convolutional Neural Network を用いた楽曲からのアーティスト識別および類似アーティストの推定”, 愛知工科大学紀要, 第 18 巻, pp.15-20 (2021).

阿部翔太, 山高正烈, 坂本修一, 鈴木陽一, 行場次朗: 音から生成した全身振動の周波数特性が高次感性に与える影響～多感覚情報の高次感性を定める要因の解明を目指して～, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.26, No.1, pp.62-71 (2021).

山高正烈, 坂本修一, 鈴木陽一: ノッチフィルタが広帯域雑音の音像定位に及ぼす影響, 愛知工科大学紀要第 18 巻, pp.21- 26 (2021).

Ryo Teraoka, Shuichi Sakamoto, Zhenglie Cui, Yôiti Suzuki, and Satoshi Shioiri: Effects of listening task characteristics on auditory spatial attention in multi-source environment, Acoustical Science and Technology, Vol.42, No.1, pp.12-21 (2021).

Ozeki, T., Mouri, T., Sugiura, H., Yano, Y., & Miyosawa, K: Impression Survey and Grounded Theory Analysis of the Development of Medication Support Robots for Patients with Schizophrenia. Journal of Robotics and Mechatronics, 33(4), pp.747-755 (2021).

尾関智恵, 尾林史章: オンデマンド型動画資料を用いたオンライン授業における形成的評価の検討, 愛知工科大学紀要第 18 巻, pp.61- 67, 2021. (研究ノート)

田辺稜, 神邊篤史, 上地孝直, 日高啓太, 鈴木桂輔, 榊原清美, 加藤和広: 覚醒水準が低下した自動車ドライバへの香り成分の供給が運転パフォーマンスと生理的特性に与える影響, ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol.23, No.4 (in press).

開發祥眞, 加藤央昌: オンライン学習における人を視認できる学習環境の提案(2次元サイバー教室に必要な機能の検討), 計測自動制御学会中部支部教育工学研究委員会 教育工学論文集, Vol.44, pp.49-52 (2021.12).

磯貝正弘, 奈良純志, 宮脇和人: BMI に関する基礎的研究(簡易脳波計を用いたヒトの日常動作における脳波解析の基礎実験), 計測自動制御学会教育工学研究会論文集, Vol.44, pp.10-12(2021.12).

Masahiro Isogai, Hoshi Kashiwazaki, Kouta Takahashi and Kazuto Miyawaki: Ground Reaction Force Evaluation during a Baseball Practice Swing Movement, Proceedings of the 32nd 2021 International Symposium on Micro–Nano Mechatronics and Human Science (MHS), (2021.12).

Masahiro Nishihori, Takashi Izumi, Yoshitaka Nagano, Masaki Sato, Tetsuya Tsukada: Development and clinical evaluation of a contactless operating interface for three-dimensional image-guided navigation for endovascular neurosurgery, International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery, Vol.16, No.4, pp.663–671, 2021, DOI: 10.1007/s11548–021–02330–3 (2021.3).

Tomotaka Ohshima, Yoshitaka Nagano, Shigeru Miyachi: A Novel Technique of Microcatheter Shaping using Real Image Display for Endovascular Aneurysmal Coil Embolization, Asian Journal of Neurosurgery, Vol.16, No.3, pp.645–647, 2021, DOI: 10.4103/ajns.AJNS_90_21 (2021.9).

Takumi Asai, Yoshitaka Nagano, Tomotaka Ohshima, Shigeru Miyachi: Experimental Study of Coil Compaction: Impact of Pulsatile Stress, Journal of Neuroendovascular Therapy, May 07, 2021, DOI:10.5797/jnet.oa.2021–00 (2021.5).

OTA Chikako: The Educational and Therapeutic Benefits of “Content–focused Accessible E–learning Material” for Visually Impaired University Students, Education Applications & Developments VI in Science Press: pp.278–290, DOI: 10.36315/2021eadVI (2021.6).

小林直美: オリンピックにおけるアスリートの表象と制作者のダイバーシティ, 生活経済政策, No.299, pp.12–17 (2021. 12).

Tohru Tashiro: Power law distributions in a new toy model with interacting N agents, 10th International Conference on Mathematical Modeling in Physical Sciences, online. (2021. 9).

服部幸廣, 甲村一貴, 巨藤誠: ISO スチール・ホイール用ホイール・ボルトの締め付けトルクと軸力の関係に及ぼす潤滑状態の影響, 愛知工科大学紀要, 第 18 巻, pp.27–33 (2021.3).

鵜飼達也: コロナ禍に於ける学習成果の考察, 愛知工科大学紀要, 第 18 巻, pp.81–84 (2021.3).

Kohei NAKASHIMA, Yuito MORI, Masao YOSHIDA, Nobuyuki OKURA: Cooling Characteristics of Air–Cooled Cylinder with Fins with Slits under Forced Convection (2nd Report, Fins with Slits Exhibiting a Phase Difference to Slits Immediately Above), 設計工学, Vol.56, No.5, pp.241–250 (2021.5).

[解説・総説]

近藤敏彰, 柳下崇, 益田秀樹: アノード酸化ポーラスアルミナにもとづいた光機能デバイス形成, 表面技術, 72(4), 206(2021.4).

田川和義, 田中弘美: 画像で見る機械工学 工学および産業界における動画活用事例 ネットワーク型・臓器異形バリエーションに対応した手術シミュレータの研究開発, 日本機械学会誌, Vol.124, No.1234, pp.30-31.

Masahiro YAMATAKA, Shuichi SAKAMOTO, Yôiti SUZUKI, and Toshiaki MURAMOTOR: Changes in the impression of urgency-inducing speech due to added background image, Center for Nation-Wide Cooperative Research on ICT FY 2020 RIEC Annual Meeting on Cooperative Research Projects (2021).

尾関智恵: オンライン教育の捉え方と自律的な学習を支える要因, 愛知工科大学紀要第 18 巻, pp.77- 80 (2021).

小林直美: オリンピックニュースをジェンダー・センシティブに——報道内容と報道される選手の権利——, 「エトセトラ」, Vol.6, pp.44-49 (2021. 9).

[口頭発表]

YANG Yuting, 梶谷満信, 阿部己和: 電動車椅子のための未知入力オブザーバによる路面外乱の推定, 産業応用工学会全国大会 (2021).

石原 裕二, 水沼 博, 岡田 一真, 田中 啓心: Ahmed モデル後部面の形状変化による空気抵抗値への影響(第3報) —プラズマアクチュエータ On/Off 発振による効果—, 自動車技術会 2021 年秋季大会学術講演会予稿集 (2021.10.14).

近藤敏彰, 黒田悠介, 七條友樹, 柳下崇, 益田秀樹: アノード酸化プロセスによる理想配列ポーラス酸化ガリウムの形成, 表面技術協会 第 144 回講演大会, 16B-27 (2021.9.16).

近藤敏彰, 吉田正弥, 柳下崇, 益田秀樹: アノード酸化ポーラスアルミナにもとづいたナノ・マイクロ空間における Li 電析挙動, 表面技術協会 第 143 回講演大会, 04C-04 (2021.3.4).

豊吉巧也, 塩澤成弘: 深層学習による非線形材料のパラメータ導出に関する基礎的検討, 第 26 回計算工学講演会 (2021.5).

豊吉巧也: 深層学習技術を用いた有限要素解析における非線形材料パラメータの取得に関する検討, 第 34 回計算力学講演会 (2021.9).

相野田智也, 村上 新: ロボットアーム位置決め時の残留振動に対するダイナミックダンパの影響, 日本機械学会東海学生会 TOKAI ENGINEERING COMPLEX 2021 (TEC21) 第 52 回学生会卒業研究発表講演会講演前刷集, pp.74-75 (2021.3.13).

宇野新太郎: 近距離無線ならびにセンサーを用いた交差点安全支援システム, 電子情報通信学会センサーネットワークとモバイルインテリジェンス研究会知的センシングとインタラクションシンポジウム 2021 (2021.6).

宇野新太郎, 中戸克彦, 飯尾匠平: マイクロ波センサーを用いた交差点安全支援システムの実証実験, 電子情報通信学会ソサイエティ大会 2021, B-15-42 (2021.9).

宇野新太郎, 中戸克彦, 飯尾匠平: マイクロ波センサーを用いた交差点安全支援システム, 第 19 回 ITS シンポジウム 2021, 1-A-01 (2021.12).

Toshiya Arakawa, Shigeyuki Yamabe, Takahiro Suzuki, Tomiki Itamiya, Fumiaki Obayashi, Kazunobu Kobayashi, Shintaro Uno, Jun Tajima, “Development of a simulator system for tsunami evacuation training and its concept for disaster prevention and mitigation”, 自動車技術会春季大会 (2021.5).

田川和義, 久山愛翔, 山本雅也, 小森優, 来見良誠, 田中弘美: 低侵襲 VR 手術訓練における視覚的注意の誘導法の検討, 第 30 回日本コンピュータ外科学会大会 (2021.11).

田川和義, 和田佳久, 長澤海斗, 広田光一: 指先-凹凸面間(空気中)で発生する Stick-Slip 現象の計測環境の構築, 電気学会 C 部門大会 (2021).

久山愛翔, 田川和義, 山本雅也, 田中弘美: 低侵襲手術における文字または音声呈示を用いた視覚的注意の誘導, 第 26 回日本バーチャルリアリティ学会大会 (2021).

和田佳久, 田川和義: 空気中における凹凸面に対する指先変形の計測システム, 第 26 回日本バーチャルリアリティ学会大会 (2021).

木田昌希, 田川和義: MR 画像に基づくヒト指先のモデリングと物理パラメータ同定, 第 26 回日本バーチャルリアリティ学会大会 (2021).

藤北隆史, 田川和義: 埋め込み変形モデルの実時間多重化処理による効率的な切断表現, 第 26 回日本バーチャルリアリティ学会大会 (2021).

田中俊行, 田川和義, 長谷川進, 加藤修司: IoT 機器を組み込んだ製造現場改善実習用教材の開発と大学教育における活用, 第 170 回教育工学研究会 (2021.12).

名波聖矢, 田川和義: 低侵襲手術における力覚フィードバックを用いた鉗子速度の能動的かつ段階的な教示法の提案, 令和 2 年度 電子情報通信学会 東海支部 卒業研究発表会 (2021).

大野高椰, 田川和義, 山本雅也, 小森優, 来見良誠, 田中弘美: 低侵襲手術における聴覚を用いた視線の教示法と VR 訓練システムへの応用, 令和 2 年度 電子情報通信学会 東海支部 卒業研究発表会 (2021).

小川水規, 田川和義: 指先の固着・滑り制御型触覚ディスプレイの検討, 令和 2 年度 電子情報通信学会 東海支部 卒業研究発表会 (2021).

岩瀬優一郎, 田川和義: 魚を捌く疑似体験のための埋め込み表現された仮想柔軟物の高速な切断表現法, 令和 2 年度 電子情報通信学会 東海支部 卒業研究発表会 (2021).

長澤海斗, 田川和義: 実指先の Stick-Slip 現象の計測環境の構築 -凹凸面への対応化-, 令和 2 年度 電子情報通信学会 東海支部 卒業研究発表会 (2021).

棚瀬隆也, 荒谷隼基, 加藤央昌, 田川和義: 可搬型 2 軸回転式没入環境の設計, バーチャル学会 2021 (2021).

小川航平, 山高正烈, 坂本修一, 鈴木陽一, 邑本俊亮: 背景画像と背景音の付加が避難喚起音声の印象変化に与える影響, 電子情報通信学会技術研究報告 (2021).

山高正烈, 荒川俊也, 早見武人: 運転経験の違いがあおり運転の車間距離知覚に及ぼす影響, 自動車技術会 2021 年秋季大会学術講演会予稿集 (2021).

山高正烈, 坂本修一, 寺本渉: 音刺激の諸特性がベクション知覚時の音像定位に及ぼす影響, 日本バーチャルリアリティ学会第 26 回大会論文集 (2021).

阿部翔太, 山高正烈, 坂本修一, 鈴木陽一, 行場次朗: 多感覚コンテンツに付加する全身振動情報の最適振動レベル決定法に関する検討, 日本バーチャルリアリティ学会第 26 回大会論文集, (2021).

尾関智恵, 寺田和憲: バーチャルアバターのジェンダー表現の違いによる向社会的振る舞いへの影響, HAI シンポジウム 2021, P39 (2021).

尾関智恵, 川瀬真弓, 田川和義, 加藤央昌, 尾林史章: IoT 技術者創出のための SDGs 目標を題材にしたユーザ調査・プロトタイプ活動の実践, 日本教育工学会 2021 年春季全国大会, 6-S061-1 (2021).

尾関智恵, 毛利哲也, 澁谷拓巳: 画像認識によるピッキング作業解析システム, ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2021, 1P1-D01 (2021).

尾関智恵, 白水始, 中山隆弘: 自己管理型学習環境のデザイン指針を求めて ~三省堂高等学校数学教科書電子版を題材に~, 日本認知科学会第 38 回全国大会, pp.1-24 (2021).

尾関智恵: VR 空間のワタシは真の意味で筋肉美に酔いしれることができるのでしょうか, バーチャル学会 2021 (2021).

三宅正樹, 西尾誠人, 神邊篤史, 鈴木桂輔: 生理特性を用いたオフセンタ領域における操舵感の評価, 自動車技術会 2021 年秋季大会.

橋本駿太郎, 神邊篤史, 三宅正樹, 西尾誠人, 鈴木桂輔: 生理特性を用いたオンセンタ領域における操舵感の評価, 自動車技術会 2021 年秋季大会.

斉藤ヒデキ, 加藤央昌: 拡張現実を利用した観光支援アプリケーションの機能検討, 第 27 回地域関連研究会 (2021).

開発祥眞, 加藤央昌: オンライン学習における人を視認できる学習環境の提案 -2 次元サイバ一教室に必要な機能の検討-, 計測自動制御学会中部支部第 170 回教育工学研究会 (2021).

田中俊行, 田川和義, 長谷川進, 加藤修司: IoT 機器を組み込んだ製造現場改善実習用教材の開発と大学教育における活用, 計測自動制御学会中部支部第 170 回教育工学研究会 (2021.9).

永野佳孝, 三好朝輝, 杉森順子: プロジェクションマッピングシステムの統合制作環境の開発, 第 68 回日本デザイン学会春季研究発表大会 (2021.6).

野秋匡平, 永野佳孝, 宮地茂, 泉孝嗣, 大島共貴: 脳血管内治療用カテーテルの形状デザインアプリケーションの開発(第 3 報), 第 68 回日本デザイン学会春季研究発表大会 (2021.6).

忠内洋樹, 永野佳孝, 宮地茂, 大島共貴, 松尾直樹: 脳血管内治療用遠隔操作ロボットの開発 (第 5 報), 第 39 回日本ロボット学会学術講演会 (2021.9).

永野佳孝, 杉森順子: プロジェクションマッピングシステムの統合制作環境の開発(第 2 報), 第 26 回日本バーチャルリアリティ学会大会 (2021.9).

永野佳孝, 忠内洋樹, 宮地茂, 川口礼雄, 大島共貴: 脳血管内治療用テレサージェリーロボットの開発(第 2 報)—LAN と Wi-Fi を使った遠隔操作実験—, 第 30 回日本コンピュータ外科学会大会 (2021.11).

忠内洋樹, 真野竜一, 永野佳孝, 宮地茂, 川口礼雄, 大島共貴: 脳血管内治療用遠隔操作ロボットにおける挿入力センサの開発(第 3 報), 第 30 回日本コンピュータ外科学会大会 (2021.11).

忠内洋樹, 野秋匡平, 永野佳孝, 宮地茂, 大島共貴, 泉孝嗣: カテーテルのシェイピングのための芯金成形ロボットの開発, 第 22 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (2021.12).

谷内口大晴, 永野佳孝, 杉森順子: FPGA ボードを用いたプロジェクションマッピングシステムのフレームレート向上, 第 22 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (2021.12).

廣野敦士, 西尾正則, 田中俊行, 永野佳孝, 西口直浩, 今井一雅: 相乗り衛星 AUTcube-00 の開発, 第 65 回宇宙科学技術連合講演会, 1C05. (2021.10).

北村健太郎, 梶村好宏, 池田光優, 高田拓, 村上幸一, 今井一雅, 平社信人, 西尾正則, 若林誠: 異なるレベルを対象とした包括的な人工衛星技術教育とその評価法の開発, 第 65 回宇宙科学技術連合講演会, 2C03. (2021.10).

今井一雅, 平社信人, 西尾正則, 高田拓, 北村健太郎, 中谷淳, 村上幸一, 徳光政弘, 今井雅文, 深井貫, KOSEN-1 チーム: 高専連携技術実証衛星 KOSEN-1 について(3), 第 65 回宇宙科学技術連合講演会, 3I15. (2021.10).

中谷淳, 土屋華奈, 徳光政弘, 今井一雅, 北村健太郎, 西尾正則: 木星電波観測技術実証衛星 KOSEN-1 の熱真空試験と検証, 第 65 回宇宙科学技術連合講演会, 4H04. (2021.10).

田川和義, 久山愛翔, 山本雅也, 小森優, 来見良誠, 田中弘美: 低侵襲 VR 手術訓練における視覚的注意の誘導法の検討, 第 30 回コンピュータ外科学会大会

山本雅也, 高野太希, 瀬下裕介, 大塚崇史, 泉孝嗣, 小濱剛: 脳血管内治療手技トレーニング中の視線データ解析 2, 第 60 回日本生体医工学会大会 (2021.6).

大塚崇史, 泉孝嗣, 山本雅也, 浅井博誉, 高野太希, 西堀正洋, 塚田哲也, 石川晃司郎, 横山勇人, 今岡永喜, 齋藤竜太: 脳血管内治療における術者の視線動態, 第 30 回脳神経外科手術と機器学会 (CNTT) (2021.4).

佐藤雄大, 森明智, 尾関智恵, 英語を取り入れた工学系授業デザイン: 英語教育と認知科学, 第 4 回 JAAL in JACET(日本応用言語学会) SIG 特別企画, online, 2021.

平井颯太, 中島公平, 吉田昌央, 大藏信之: 強制対流下での切欠きフィン付き空冷シリンダの冷却特性(前方切欠きフィン場合), 日本設計工学会 東海支部令和 2 年度研究発表講演会講演論文集, pp.7-10 (2021.3).

巨藤誠, 甲村一貴, 服部幸廣: 大型車用ホイール・ボルトの締め付けトルクと軸力の関係に及ぼす潤滑状態の影響 (ISO 規格の特性と JIS 規格との比較), 自動車整備技術に関する研究報告誌, 第 50 号, pp.25-30 (2021.10).

[その他(セミナー講師・作品出展など)]

梶谷満信: 「現代制御およびスライディングモード制御のコントローラ設計の基礎と実践」, (株)日本テクノセンター 技術セミナー (2021.3).

梶谷満信: 「現代制御およびスライディングモード制御によるコントローラ設計の基礎と DC モーター制御の実線」, (株)日本テクノセンター 技術セミナー (2021.3).

豊吉巧也: 深層学習技術を組み合わせた画像計測技術と数値シミュレーション技術, イノベーションフェア 2021 in 東三河 (2021.10).

田川和義: 第 30 回日本コンピュータ外科学会大会において VR 手術シミュレータをスリーディー社のブースにて展示 (2021 年 11 月 21~23 日).

尾関智恵: 岐阜の文化(陶芸を中心に), リトアニア ヴィータウタス・マグヌス大学, 日本語クラス
オンラインにて特別講義 (2021.10.12)

館山武史: 深層学習を用いた画像認識による製品検査システム, イノベーションフェア 2021 in 東
三河

OTA Chikako: Evaluator of Ph. D Thesis, Allama Iqbal Open University, Department of Special
Education (2021.6).

OTA Chikako: Journal of Inclusive Education, Reviewer. (2021.9)

橋本容子, 加野章子, 長瀬治之, 三和啓二, 中村美津子, 渡邊素子: 心理士(師)の職業倫理の
理解と倫理的困難に関する実態基礎調査, 日本心理臨床学会・ポスター発表 (2021. 9).

橋本容子, 加野章子, 長瀬治之, 三和啓二, 中村美津子, 渡邊素子: 心理職の専門性が倫理意
識の醸成に与える影響に関する一考察, 日本心理臨床学会・ポスター発表 (2021. 9)

加野章子: 全国大学生サミット分科会 C あなたと一緒にあなたを探す～心理カウンセラーと話し
てみよう～、カウンセラー として協力 (2021.10.18).

加野章子: 名古屋市幼稚園協会巡回協力 (2021 年～)

小林直美: 男らしさに価値「速く高く強く」, 「AERA」, No.33, pp.14-15. (2021.7)

小林直美: Media Times 五輪報道 男女間での偏りは「朝日新聞」(2021.8.12).

小林直美: 山形大学「第 3 回 YU-SDGs カフェ みんなで考えよう! SDGs とダイバーシティ」
(2021.10.25).

小林直美: 春日部市男女共同参画「ハーモニーフェスタ 2021 基調講演 なぜ、あのメディアは
炎上したのか～CM やドラマにおける女性の描かれ方～」(2021.11.27).

小林直美: 岐阜大学「ロボット文化論」(2021.12.13).

加藤寛: バイオ・ディーゼル燃料実用化 14 年間の取り組みと SDGs, 全国自動車短期大学協

会 自動車整備技術に関する研究報告誌 第 50 号, pp.31-34(2021.10).

橋本孝明, 長谷川康和 : 幸田町理科教室 (段ボールで歯車を作ろう), 幸田町立図書館 (2021.8.9).

愛知工科大学紀要

第19巻 令和4年3月25日

編集委員会

委員長 服部幸廣
委員 近藤敏彰 尾関智恵
磯貝正弘 田代 徹
松本吉生 澤根加代子

発行者

学校法人 電波学園 愛知工科大学
愛知工科大学自動車短期大学
〒443-0047
愛知県蒲郡市西迫町馬乗50-2
TEL : 0533-68-1135
FAX : 0533-68-0352
URL : <https://www.aut.ac.jp/>