

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 14 日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05860

研究課題名(和文) シンバル音に及ぼす局部的塑性加工の影響解明と平板振動放射音の適音化への応用

研究課題名(英文) Effect of locally plastic deformation process on cymbal sounds and its application to sound quality design of plate vibration sound

研究代表者

鞍谷 文保 (KURATANI, FUMIYASU)

福井大学・学術研究院工学系部門・教授

研究者番号：00294265

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：シンバルは薄板円板状の打楽器で、ブロンズの薄板円板をシンバル形状に成形する成形工程と音質を調整する音質調整工程(ハンマリング加工、音溝加工)を経て製品となる。本研究では、シンバルの音質に大きな影響を及ぼす成形加工後のベル(シンバル中央の膨らんだ部分)の形状とハンマリング加工に注目し、それらがシンバル音に及ぼす影響を明らかにする。最初に、音響放射効率を用いてシンバルの振動と放射音の関係を調べ、ベルサイズにより放射音特性が異なる理由を検討する。次に、ハンマリング加工後のシンバルの振動・放射音の変化予測法を提案し、それを用いてハンマリング加工によりシンバルの振動・放射音特性が変化する理由を検討する。

研究成果の概要(英文)：Cymbals are bronze round thin percussion instruments that are made through spin forming, hammering and lathing processes. In this study, we focus on the shape of bell (raised portion of the middle of cymbal) and the hammering process. First, we examine the relation of radiated sound and cymbal vibration based on the sound radiation efficiency and then discuss the reason why the sound radiation characteristics depend on the bell size. Next, we propose a method for predicting the vibration and radiated sound of the hammered cymbals and then discuss the reason why the hammering process changes the vibration and sound radiation characteristics.

研究分野：機械力学・制御，振動解析，音響解析，動的設計

キーワード：振動解析 放射音 シンバル 局部的塑性加工 応力分布 振動モード 音響放射効率

1. 研究開始当初の背景

薄板平板の振動放射音の多くは騒音となるが、シンバルからの放射音は音楽となる。シンバルは薄板円板状の打楽器で、ブロンズの薄板円板をシンバル形状に成形する成形工程と音質を調整するための音質調整工程（ハンマリング加工、音溝加工）を経て製品となる。ハンマリング加工は、成形されたシンバルの表面をハンマーで叩く（図1）ことで浅い円形のくぼみを与える加工（図2）で、シンバル全体に施される。シンバルの基音は成形時の形状で決まり、最終製品としてのシンバル音はハンマリング加工などの音質調整工程で仕上げられる。しかし、形状成形やハンマリング加工は熟練者の経験に依っており、工学的な意味は明らかではない。

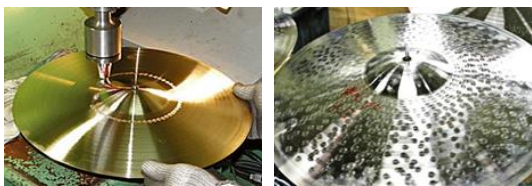


図1 ハンマリング加工 図2 ハンマー痕

2. 研究の目的

本研究では、成形工程で生成されるベル（図3）の形状と音質調整工程のハンマリング加工に注目し、それらがシンバルの振動・放射音特性に及ぼす影響を調べ、工学的意味を明らかにする。

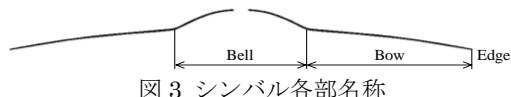


図3 シンバル各部名称

3. 研究の方法

(1) シンバルの振動と放射音の関係

シンバルの形状やハンマリング加工の条件で振動特性が変化し、放射音特性（シンバル音）が変化する。本研究では、音響放射効率（振動から音への変換効率）を基に、シンバルのモード形状、ベルサイズと放射音の関係を探る。有限要素解析（図4）で振動特性を求め、振動特性から放射音特性を算定する。ベルサイズの検討では、外周が同一でベルサイズが異なる2種類のシンバル（図5）を用い、実験（図6）でベルサイズの異なるシンバルの音と振動を測定し、解析で音響インテンシティと音響放射効率を算出し、比較する。

(2) プレス加工を用いたハンマリング加工装置の開発

ハンマリング加工の精度を向上させるために、従来のハンマリング加工法（ハンマーを自由落下させる方法）の代わりに、プレス加工法（半球状のパンチを押付ける方法）で円形のくぼみを生成する装置（図7）を開発する。

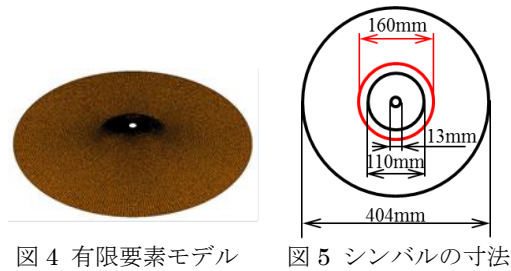


図4 有限要素モデル

図5 シンバルの寸法

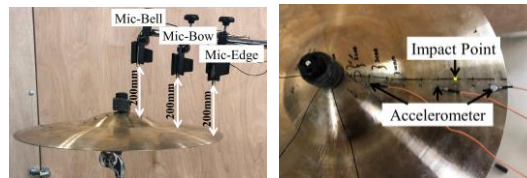


図6 音と振動の測定

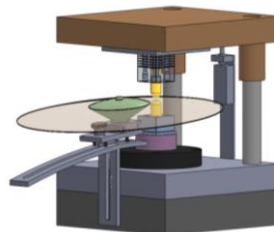


図7 プレス加工を用いたハンマリング加工

(3) ハンマリング加工が振動・放射音に及ぼす影響

ハンマリング加工による振動・放射音の変化予測法を開発し、その予測法を用いて振動・放射音特性の変化を調べ、振動・放射音特性が変化する理由を明らかにする。ハンマリング加工によりシンバルには残留応力が生じ、剛性特性が変化する。その結果、振動特性が変化する。本研究では、残留応力を熱応力解析で再現し、応力を考慮した振動解析を行う。解析結果を実験結果と比較し、解析方法の妥当性を検証する。ハンマリング加工で生じる応力分布と同じ分布を生じさせると想定される熱負荷の温度分布としてガウス分布を用いる。解析例では、半径方向に12箇所、円周方向に50箇所、計600箇所に熱負荷を与える（図8）。ハンマリング加工では板厚も変化するので、板厚変化の影響も調べる。

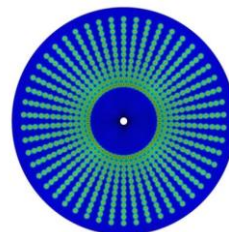
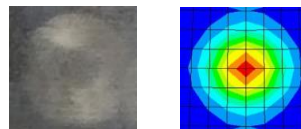


図8 ハンマリング加工痕と熱負荷分布

4. 研究成果

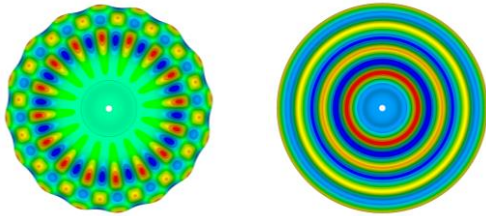
研究の主な成果

(1) シンバルの振動と放射音の関係

① モード形状の違い

シンバルのモード形状を節直径数 n と節円数 m を用いて (n, m) と表す. 例として, 図 9 に, 3000Hz 付近に固有振動数を持つ 2 つのモードのモード形状と音響放射効率 σ を示す.

放射効率は, (16, 2)モードが $2 \times 10^{-7}\%$, (0, 7)モードが 0.05% で, (0, 7)モードの方が高くなっている. (16, 2)モードは節直径数が多いために, 円周方向の隣接する腹 (逆位相) が近く, 放射音のキャンセレーションが起きやすい. その結果, 放射効率が低くなる. 一方, (0, 7)モードは節円数が多いが, 半径方向の隣接する腹の距離が離れており, 円周方向には逆位相の腹がないために, キャンセレーションが起きにくい. その結果, 放射効率が高くなる.



(16, 2)mode: 2993Hz $\sigma = 2 \times 10^{-7}\%$
 (0, 7)mode: 3040Hz $\sigma = 0.05\%$
 図 9 音響放射効率 (モード形状の違い)

② ベルサイズの違い

図 10 にベルサイズが異なるシンバルで測定された振動速度周波数応答を, 図 11 に放射音の音圧周波数応答を示す. 振動速度に関しては, 2 つのベルサイズとも広い周波数範囲に渡って多数のピークが見られ, 特に 2000Hz 以下では大きなピークが複数ある. 音圧に関しては, Small ベルでは 4000Hz 付近に, Large ベルでは 1500Hz, 2000Hz, 3000Hz 付近に大きなピークが見られる. したがって, Small と Large ベルでは, 振動が音に変化する効率が異なる. 表 1 に Small と Large ベルにおいて, モード形状が類似で, 固有振動数が近い (2, 3), (3, 5), (0, 7)モードの放射効率の比較を示す. 振動数が近く, モード形状が類似でもすべてのモードで Large ベルの放射効率が高い. これが, 図 10 の振動速度では Small と Large ベルで大きな違いがないにもかかわらず, 図 11 の音圧では大きな違いが現れた理由である.

Small と Large ベルで放射効率が異なる理由を検討するために, 例として図 12 に示す (3, 5)モードを取り上げ, その音響インテンシティ (音響エネルギーの流れ) を図 13 に示す. モード形状に関しては, Large ベルではベルが大きく振動しているが, Small ベルではベルが振動していない. 音響インテンシティに関しては, Small ベルでは音響エネルギーの流れが法線方向ではなく, 横方向さらにシン

バル面に向かっていているものがある. これは, 振動の腹から放出されたエネルギーが隣の腹に吸い込まれることを意味し, キャンセレーションが起きていることを示す. したがって, Small ベルでは音が遠方へ伝播しにくく, 音響放射効率が低くなる. また, Large ベルでもボウ部の広い範囲でシンバル面に向かうエネルギーの流れが見られるが, ベルが大きく振動することで, ベルから大きなエネルギーが法線方向に放射されている. これが, Large ベルで放射効率が高くなった理由であり, 図 11 においてベル直上で測定した音圧が最も大きくなった理由である.

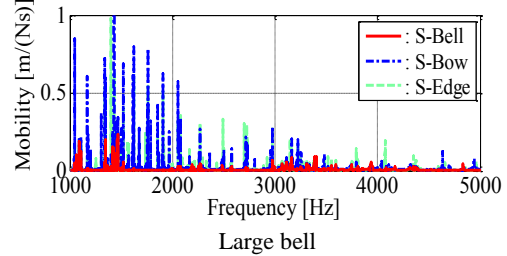
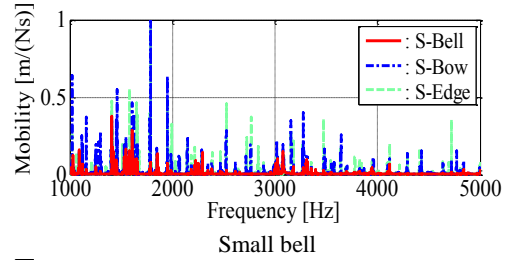


図 10 振動速度の周波数特性

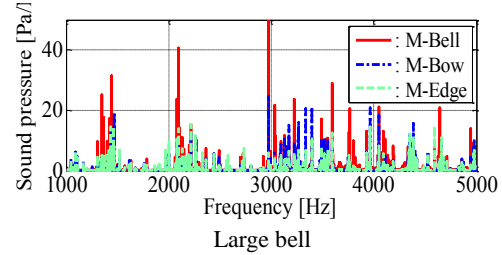
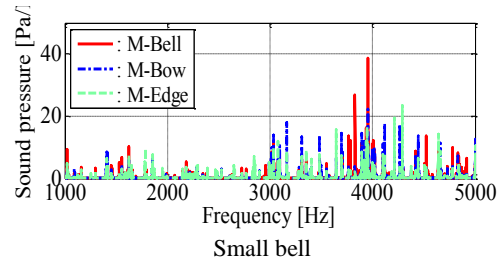
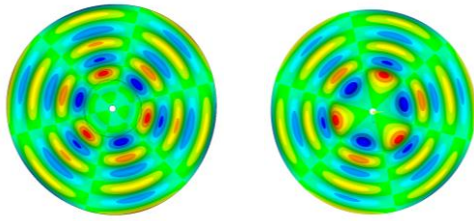


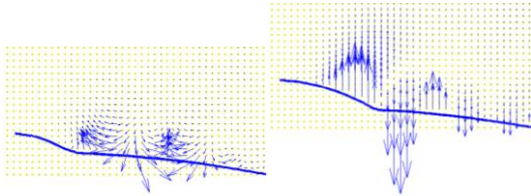
図 11 音圧の周波数特性

表 1 音響放射効率の比較

Mode		(2, 3)	(3, 5)	(0, 7)
Small	Frequency	955Hz	2269Hz	3040Hz
	Efficiency	0.06%	0.03%	0.05%
Large	Frequency	1096Hz	2315Hz	3393Hz
	Efficiency	0.43%	0.34%	1.44%



Small bell Large bell
図 12 モード形状 ((3, 5)モード)



Small bell Large bell
図 13 音響インテンシティ ((3, 5)モード)

(2) プレス加工を用いたハンマリング加工装置の開発

図 14 に、開発したサーボプレスを利用したハンマリング加工装置を示す。

図 1 のハンマリング加工法と図 15 のプレス加工法で生成したくぼみ形状を比較したところ、プレス加工法で生成したくぼみの方が円形に近く、ばらつきも小さくなった。

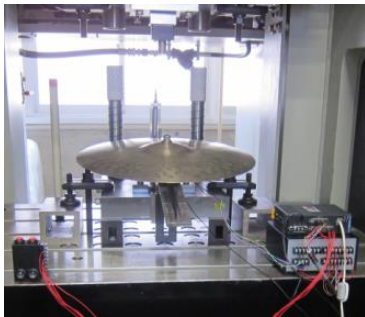


図 14 プレス加工を用いたハンマリング加工装置

(3) ハンマリング加工が振動・放射音に及ぼす影響

① 振動・放射音の変化予測法の検証

開発した装置でシンバルにくぼみを生成し、ハンマリング加工前後の振動速度を測定した。一方、振動の変化予測法を用いて、振動速度の周波数応答を予測した。結果を図 15 に示す。測定結果と予測結果では、加工前後の周波数のピーク位置の変化傾向が良く一致している。したがって、ハンマリング加工による振動特性の変化が予測可能といえる。

② 周波数応答の変化

図 16 に、振動変化予測法で求めた熱負荷・板厚変化なし、熱負荷のみ、熱負荷・板厚変化両方の場合の振動速度周波数応答を示す。

3 条件を比較すると周波数特性が異なることがわかる。熱負荷のみでは 3500Hz, 3800Hz,

4600Hz 付近に大きなピークが現れている。板厚の変化を加えると 3800Hz 付近のピークが大きくなり、新たに 2700Hz 付近に大きなピークが現れている。このことから、熱負荷で周波数特性が変化し、さらに板厚変化を加えると変化が大きくなる。これがハンマリング加工の効果で、成形加工時のシンバル音の音質を変化させる。

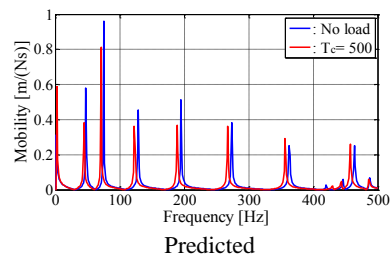
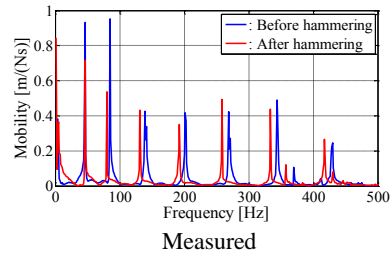
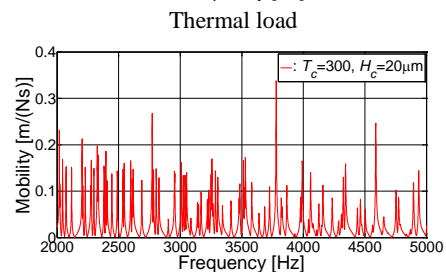
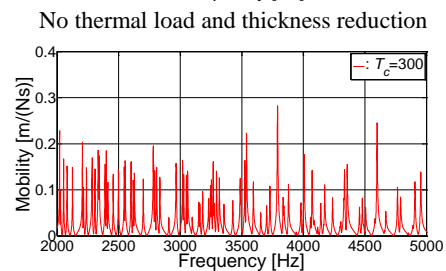
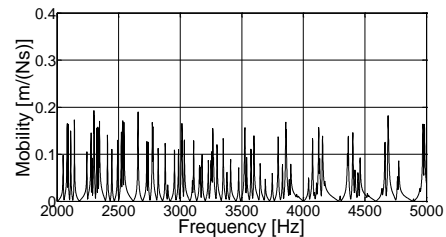


図 15 振動速度周波数応答



Both thermal load and thickness reduction
図 16 振動速度周波数応答

周波数応答が変化する理由は、ハンマリング加工（熱負荷・板厚変化）により固有振動数が変化するためである。例として図 17 に 3800Hz 付近の拡大図を示す。熱負荷なしでは同程度の大きさのピークが複数存在する

が、熱負荷 $T_c=300^\circ\text{C}$ では1つの大きなピークになり、 $T_c=500^\circ\text{C}$ で再び同程度の複数のピークになっている。これは、熱負荷を与えることで、(29, 0)モードの固有振動数は上昇、(24, 1)モードの固有振動数は低下、(20, 2)モードの固有振動数は変化小となる。その結果、 $T_c=300^\circ\text{C}$ では(20, 2)と(24, 1)モードの固有振動数が近くなり、2つのモードのピークが重なることで大きなピークが現れ、 $T_c=500^\circ\text{C}$ では固有振動数の変化が大きくなり、 $T_c=300^\circ\text{C}$ で重なっていたピークが分離することで複数のピークになったからである。板厚の減少は固有振動数の低下を引き起し、その結果、熱負荷のみの場合より(20, 2)と(24, 1)モードの固有振動数が近くなり、図16のようにピークの値が大きくなった。

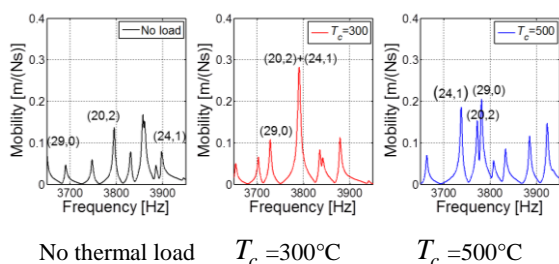


図17 振動速度周波数応答

③音響放射効率の変化

周波数応答のシンバルの変形形状は、振動モードの重ね合わせで表されるので、周波数応答が変化すれば変形形状も変化する。その結果、音響放射効率も変わる。図18に3800Hz付近の変形形状および主となるモード形状単独で振動したときの音響放射効率を示す。

振動モード単独では、(20, 2)モードの放射効率が $1.4 \times 10^{-7}\%$ 、(24, 1)モードが $2.4 \times 10^{-10}\%$ であったが、熱負荷による変形形状では $8.7 \times 10^{-5}\%$ に、板厚変化まで考慮した場合は $1.29 \times 10^{-4}\%$ になっている。したがって、ハンマリング加工により固有振動数が近くなり、周波数応答の変形形状が変化することで、音響放射効率も高くなる場合が現れる。

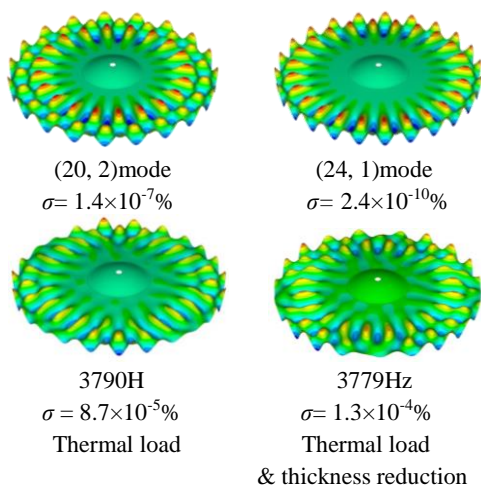


図18 周波数応答での変形形状

④振動・放射音特性が変化する理由

熱負荷では、固有振動数が上昇するモードと低下するモード、変化が小さいモードが現れた。この理由は、熱負荷により生成される応力分布から説明できる。熱負荷が決まれば応力分布が決まり、応力が引張であれば面外方向の剛性が高くなる。一方、モード形状はモードごとに異なるので、応力分布が同じでも応力による剛性変化の影響はモードごとに異なる。その結果、モードごとに固有振動数の変化が異なる。例えば、(24,1)モードは円周方向に多数の振動の腹が並ぶモード形状である。この場合、円周方向では相対変位の大きい変形が並ぶことになり、面外方向の剛性変化の影響を受けやすい。図8の熱負荷分布の場合、(24,1)モードで相対変位が大きい半径位置の円周方向の応力分布は、図19に示すように負となっている。その結果、(24,1)モードの固有振動数が低下する。他のモードに関しても同様に説明できる。

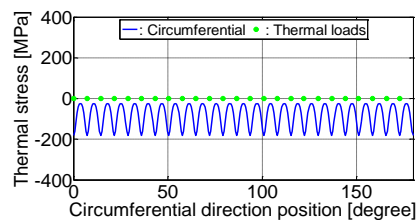


図19 円周方向の応力分布

得られた成果の国内外における位置づけとインパクト

ハンマリング加工を行うとシンバルの振動・放射音の周波数特性が変化することは知られているが、その理由は明確ではなかった。本研究では、ハンマリング加工により生じる応力分布と板厚変化を再現することで、シンバルの振動・放射音の変化を予測する方法を提案した。その変化予測法を用いて、ハンマリング加工によるシンバルの固有振動数の変化、振動速度周波数応答の変化さらに放射音の変化を検討することで、ハンマリング加工の工学的な意味を明らかにした。さらに、振動と音との関係をモード形状とベルサイズに関して調べ、ベルサイズによりモード形状が変化し、その結果、音響放射効率が大きく変化することを明らかにした。これらは新たに得られた知見であり、薄板平板を適音化(騒音を音楽に変える)する上で有用である。

今後の展望

本研究で得られたシンバルの形状および音質調整加工が放射音に及ぼす知見を薄板平板の適音化に応用するためには、形状と音質調整加工の条件を適切に決定する必要があり、その方法が今後の検討課題である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① 鞍谷 文保, 北林 研人, 小川 涉, 吉田 達哉, 長村 光造, 小出 俊雄, 文株 義之, 水田 泰次, シンバルの振動特性に及ぼすハンマリング加工の効果, 日本機械学会論文集, 査読有, Vol.83 No.851, 2017, p.17-00110 (12 頁)
DOI: 10.1299/transjsme.17-00110
- ② F.Kuratani, T.Yoshida, T.Koide, T.Mizuta, K.Osamura, Understanding the effect of hammering process on the vibration characteristic of cymbals, Journal of Physics: Conference Series, 査読有, Vol.744, 2016, p.012110 (12 頁)
DOI: 10.1088/1742-6596/744/1/012110

[学会発表] (計 10 件)

- ① 小川 涉, 鞍谷 文保, 吉田 達哉, シンバルのベルサイズが音響特性に及ぼす影響, 日本設計工学会北陸支部平成 30 年度研究発表講演会, 2018.6.30, 富山県立大学 (富山県)
- ② 劉 銘松, 北林 研人, ザイナルファイルダウス, 鞍谷 文保, 吉田 達哉, 小川 涉, 音質調整加工がシンバルの振動・放射音特性に及ぼす影響, 日本機械学会北陸信越支部第 55 期総会・講演会, 2018.3.25, 福井工業大学 (福井県)
- ③ K.Kitabayashi, F.Kuratani, T.Yoshida, M.Tao, T.Koide, Effect of sound quality adjustment process on the vibration characteristics of cymbals, 17th Asia Pacific Vibration Conference, 2017.11.28, Nanjing (China)
- ④ T.Ishihara, K.Kitabayashi, F.Kuratani, T.Yoshida, Effect of hammering process on the vibration characteristics of cymbals, International Symposium on Advanced Mechanical and Power Engineering, 2016.10.28, Fukui (Japan)
- ⑤ 北林 研人, 石原 匡, 鞍谷 文保, 吉田 達哉, 小出 俊雄, 水田 泰次, 長村 光造, 調音加工がシンバルの振動挙動に及ぼす影響, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2016, 2016.8.25, 山口大学 (山口県)
- ⑥ F.Kuratani, T.Yoshida, T.Koide, T.Mizuta, K.Osamura, How the sound adjustment process of cymbals affects their vibration and sound radiation characteristics, The 5th Joint Meeting of the Acoustical Society of America and Acoustical Society of Japan, 2016.11.30, Honolulu (USA)
- ⑦ 石原 匡, 北林 研人, 吉田 達哉, 鞍谷 文保, 調音加工がシンバルの振動・放射音特性に及ぼす影響, 日本設計工学会北陸支部平成 28 年度研究発表講演会, 2016.6.25, 福井大学 (福井県)
- ⑧ F.Kuratani, T.Yoshida, T.Koide, T.Mizuta, K.Osamura, Understanding the effect of

hammering process on the vibration characteristics of cymbals, Motion and Vibration Control & Recent Advances in Structural Dynamics 2016, 2016.7.5, Southampton (United Kingdom)

- ⑨ 川井 徹平, 鞍谷 文保, 吉田 達哉, 石原 匡, ハンマリング加工がシンバルの振動特性に及ぼす影響, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2015, 2015.8.26, 弘前大学 (青森県)
- ⑩ 石原 匡, 鞍谷 文保, 吉田 達哉, 川井 徹平, シンバルの振動モードとその音響放射効率, 日本設計工学会北陸支部平成 27 年度研究発表講演会, 2015.6.27, 富山県立大学 (富山県)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鞍谷 文保 (KURATANI, Fumiyasu)
福井大学・学術研究院工学系部門・教授
研究者番号: 00294265

(2) 研究分担者

吉田 達哉 (YOSHIDA, Tatsuya)
福井大学・学術研究院工学系部門・講師
研究者番号: 20734544