

入力制御および構造変更による衝撃音の快音設計

Comfortable Sound Design of Impact Sound by the Input Control and the Structure Modification

精密工学専攻 2号 朝日 洋平
Yohei Asahi

1. はじめに

近年、技術の向上に伴い、音への意識が高まりつつあり、快音化のニーズが高まっている。例として、鐘ではピークの倍音成分やうなりの影響により快適性が左右され、またパンチプレスでは打抜き音がストレスや不快感および難聴被害につながる恐れがある。

音色の変更には大きく分けて、入力制御と構造変更の2種類があり、これらにより音色が決まる。そして、入力制御では加振の時間や周波数等、加振の仕方を制御し、構造変更では構造物の形状や材質を変化させることで、音色を変化できる。本論文では入力制御の基礎として鐘に着目し、音色変化の基礎研究を行う。また、パンチプレスに対しては入力制御と構造変更を行い、衝撃音の快音設計を行う。

2. 入力制御による基礎モデルの特性把握

本章では、鐘を用いて加振間隔を制御することにより、応答の特性を把握し、入力制御を行う。

2.1 多重加振による周波数制御

2.1.1 解析による周波数制御

解析において多重加振における加振間隔と周波数についての関係の把握を行う。加振対象として鐘の有限要素モデルを用い、下部を加振し、その90度の位置で振動を測定する。1回加振の入力信号を1-A、2回加振の入力信号の間隔が0.48 msの加振を1-B、0.96 msの加振を1-Cとする。なお、1-Bは1次と3次の固有振動数、1-Cは2次の固有振動数の低減を目的とする。

加振時の時間波形を Fig. 1(a)に示す。ここで、2回加振の間隔を T_s とし、低減周波数のピークの番号を n 番とすると、 n 番目の低減周波数 F_n Hz は式(1)のように表せる。

$$F_n = (n - 1/2)/T \quad (1)$$

加振間隔の違いによる振動レベルの比較を Fig. 1(b)に示す。1-Bは1042 Hz、1-Cは521 Hzと1563 Hzが低減でき、式(1)通りの結果となる。また、1-Bは1次と3次の固有振動数、1-Cは2次の固有振動数の低減ができており、解析上、2回加振による周波数制御ができることがわかる。

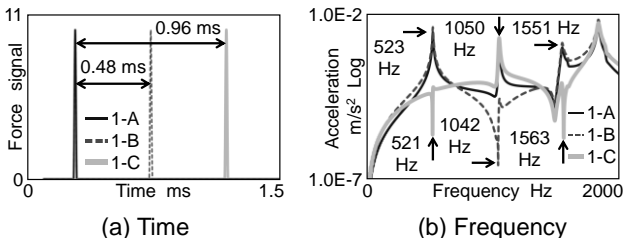


Fig. 1 Comparison of the double excitation with different time interval

2.1.2 実験による周波数制御

駆動装置を用いて2回加振を行い、衝撃音のサウンドデザインを試みる。駆動装置によりガウディベルと呼ぶ鐘の下部を加振し、加振点から0.2 m側方で衝撃音の測定を行い、1回加振(2-A)と2回加振(2-B)を行う。なお、2回加振は、駆

動装置で再現でき、鐘の固有振動数を低減できる間隔が適切であるため、40 msの間隔で加振する。

加振周波数の比較を Fig. 2(a)に、音圧レベルの比較を Fig. 2(b)に示す。1回加振の際、基音の周波数は667 Hzと668 Hzの重根が表れるが、40 msの間隔で2回加振を行うことにより、668 Hzの加振力が低減できる。また、その周波数において音圧レベルも低減しており、うなりをなくすることができる。このことから実機において2回加振をすることにより、周波数制御を行うことができる。

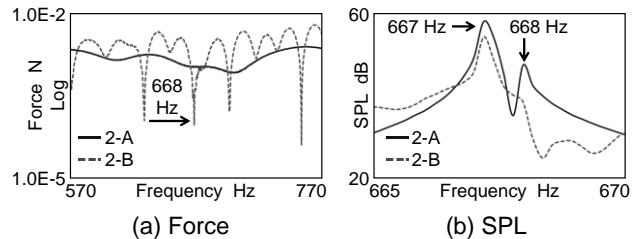


Fig. 2 Comparison of the single and double excitation

3. 入力制御によるプレス機械の快音設計

本章では、実用的なパンチプレスの入力制御を行うことにより打抜き音の快音設計を目指す。

3.1 SD法による音質評価

本節ではパンチプレスの打抜き音の音質評価を行い、打抜き音の傾向を把握し、目標となる音を定める。

3.1.1 パンチプレスの周波数特性の把握

打抜き音の測定位置を Fig. 3に示す。マイクロフォンを前方、側方およびラム軸側方3.0 m、高さ1.5 mに設置する。実験条件として、打抜き速度は500 mm/s、金型はφ30 mm、板厚は6.0 mm、測定位置は前方、測定は工場で行う。なお、打抜き音の周波数特性として、134 Hzにピークがあり、高周波になるにつれて音圧レベルは低下する傾向がある。

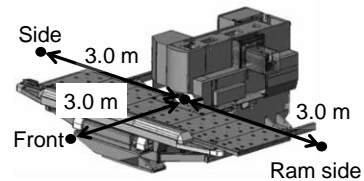


Fig. 3 Measurement points to measure the impact sound

3.1.2 打抜き音の音質評価概要

測定した打抜き音を基に作成した6つの音源により評価を行う。評価音として、基準音3-0を前方で測定した打抜き音とし、3-Aはピークの周波数134 Hzの音圧レベルを19 dB低減した音、3-Bは音圧レベルを3 dB低減した音、3-Cは150 HzにHPF(High Pass Filter)をかけた音、3-Dは減衰をかけた音、3-Eは7000 HzにLPF(Low Pass Filter)をかけた音である。また打抜き音の音色評価のため、3-Bを除き、音圧レベルを統一する。SD法により、基準音と評価音の相対評価を行う。形容詞対は15対、被験者は41名であり、うち21名はパンチプレスの製造関係者である。

3.1.3 打抜き音の音質評価結果

音質評価および因子分析の結果から重厚因子、快適因子、迫力因子の3つの因子を抽出でき、重厚因子と快適因子の因子得点の散布図をFig. 4に示す。これより、3-0と3-Aは快適性に殆ど違いが見られない。これは打抜き音が過渡音であり、特定の周波数が目立たないためだと考えられる。また、今回の評価で3-B、3-D、3-Eの快適性が高いことから、音圧レベルが低く、音の高さが低く、時間減衰の大きい打抜き音を目指す。

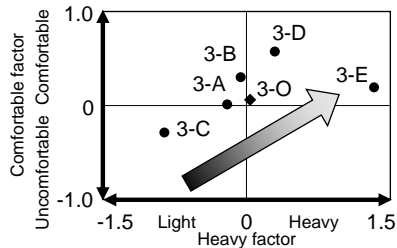


Fig. 4 Relation between heavy factor and comfortable factor

3.2 入力制御による打抜き音の特性把握

本節では打抜き速度の変更による打抜き音の特性を把握し、音質や品質を考慮した設計パラメータを提案する。

3.2.1 打抜き速度の違いによる特性把握

打抜き速度の変化による、打抜き音の特性把握を行う。本項では金型はφ30 mm、板厚は3.2 mmとし、速度のみを変化させる。また打抜き速度は4-A:500 mm/s、4-B:200 mm/s、4-C:100 mm/sとし、比較を行う。ここで、音圧レベルの比較をFig. 5に示す。打抜き速度が遅くなるほど、低周波の音圧レベルが高く、高周波の音圧レベルは低くなり、全体の音圧レベルが低下する。このことから打抜き速度を遅くすることにより、打抜き音が低く、音圧レベルが小さくなるので快適性は向上すると考えられる。

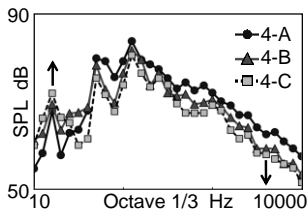


Fig. 5 Comparison of the SPL with different punching speed

3.2.2 可変速度による影響把握

打抜き速度の指令値を段階的に設定し、打抜き音の特性を把握する。打抜きイメージをFig. 6に示す。打抜き速度をV1~V5の5段階に分け、V1は上死点(TDC)から動き出し、V2はワークに衝突する直前まで、V3は衝突前後、V4は破断前後から下死点(BDC)まで、V5は下死点から上死点までに戻る時の速度である。ここでワークに衝突する直前にV2からV3に変化する位置をTP(タッチポイント)とし、ワークの上面からの距離を示す。また、V3からV4に変化する位置をBTP(ブレークスルーポイント)とし、ワークのどの位置で速度が変化するかを百分率で示す。ここで、板厚をt mm、ワークの上面からパンチの先端までの距離をxとおくと、BTPは式(2)と表すことができる。

$$BTP = 100x/t \quad (2)$$

なお、速度の表記は指令値であり、実打抜き速度は指令値より遅くなる傾向がある。

3種類の打抜きパターンを比較する。5-Aは速度400 mm/sの高速パターン、5-BはV3を50 mm/s、V4を400 mm/s、BTPを80%とし、衝突時の速度を遅くした静音パターン、5-Cは

V3を400 mm/s、V4を5 mm/s、BTPを45%とし、破断時の速度を遅くしたパターンである。また、共通の条件として、金型はφ30 mm、板厚は3.2 mm、V1,V2,V5を400 mm/s、TPを5.6 mmとし、測定は側方3.0 mの位置で行う。

打抜き音の時間波形の比較をFig. 7(a), (b)に示す。V3やV4を遅くすることにより、音圧が低下し、5-Cから打抜き音は衝突音と破断音が存在することがわかる。これらのことから音質や品質を考慮すると、衝突時と破断時の速度を遅くし、その間の速度を速くすることが望ましいと考えられる。

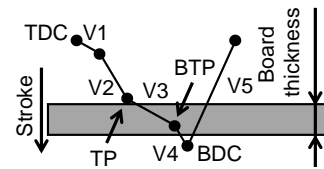
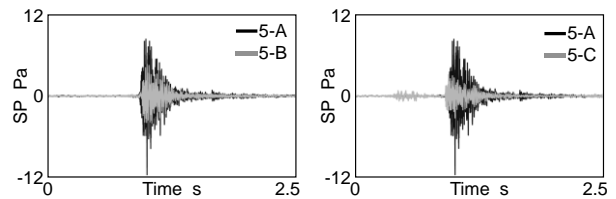


Fig. 6 Conceptual diagram of break-through by the punch pressing

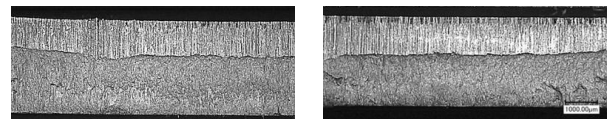


(a) 5-A and 5-B (b) 5-A and 5-C
Fig. 7 Comparison of the impact sound pressure with different punching pattern

3.2.3 ワークの品質への影響把握

速度400 mm/sの高速パターン5-AとV2を50 mm/s、V3を400 mm/s、V4を100 mm/s、BTPを80%、TPを0 mmの音質改善パターン6-Aを比較し、6-Aが実用的な品質かを調査する。ワークの打抜きによる断面はダレ、せん断面、破断面、そしてバリの4層に分かれる。品質の良い断面の場合、せん断面の割合は1/3~1/2となる。一方、品質の悪い断面の場合、2次せん断面の出現や不適切な割合のせん断面となる。

5-A、6-Aで打抜いた際のワークの断面をFig. 8(a), (b)に示し、バリの高さやせん断面の割合をTable 1に示す。6-Aでは破断面が粗くなり、バリ高さが上昇するが、双方ともに2次せん断面はみられない。また、せん断面は概ね適切な割合であり、製品として使用できる品質の許容範囲内である。また打抜き速度低減により、A特性音圧レベルは6.4 dBA低減できる。以上より、6-Aの打抜きにより、極端な品質の劣化もなく、かつ音圧レベルも低減できるため、音質や品質を考慮した打抜きパターンを提案できる。



(a) 5-A (b) 6-A
Fig. 8 Comparison of cutting surface

Table 1 Ratio of burr height and sheared surface length

Name	5-A	6-A
Pattern	Fast	Sound quality improvement
SPL dBA	78.5	71.9
Burr height μm	50	53
Ratio of the burr height %	1.56	1.64
Shear height mm	1.04	1.19
Ratio of the shear %	32.7	37.1

4. 構造変更によるプレス機械の快音設計

本章では、パンチプレスの構造における振動、騒音の原因となる箇所を把握し、対策を行うことで快音設計を目指す。

4.1 分解実験による周波数特性の把握

本節ではパンチプレスの構造を段階的に分解し、打抜き音を測定することにより、騒音の原因となる箇所を把握する。

4.1.1 分解実験の概要

振動、騒音の測定は分解無 7-0、分解 7-A~7-D の 5 段階で行い、7-A~7-D にかけて徐々にパーツを取り除く。各分解モデルを Fig. 9 に示す。分解する箇所は、7-A はセンターテーブルトップとタレット周りテーブルトップ、7-B は移動テーブルトップ、7-C は移動テーブル、7-D は全カバーである。また、実験条件として、打抜き速度は 500 mm/s の高速パターン、金型は $\phi 30$ mm、板厚は 6.0 mm、打抜き音の測定は前方、側方の 2 パターンとし、測定は工場で行う。

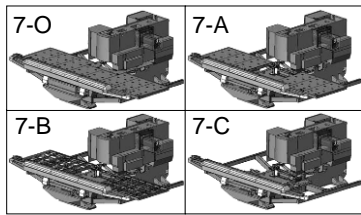


Fig. 9 Removed parts for each decomposition process

4.1.2 分解実験の結果

各分解における A 特性音圧レベルを Table 2 に示す。分解 7-D では全測定点において、A 特性音圧レベルが低減しており、カバーの振動が音に影響しやすいことがわかる。また、前方と側方を比較すると、分解無 7-0 と分解 7-A では側方の A 特性音圧レベルが高いのに対し、分解 7-B 以降では差がない。これは移動テーブルトップの振動が音に影響しており、それを取り外したために、測定点の近い側方の A 特性音圧レベルが低下したと考えられる。

Table 2 SPL at each disassemble step

Decomposition	SPL dBA	
	Front	Side
7-O	88.0	91.9
7-A	88.8	91.8
7-B	87.5	87.5
7-C	88.7	88.8
7-D	86.8	86.3

4.1.3 パーツの違いによる特性把握

テーブルトップの種類変更による打抜き音の変化を把握する。分解実験に使用したテーブルトップはスチール製であり、これを木製のものと比較する。なお、実験条件は分解実験と同様である。音圧レベルの比較を Fig. 10 に示す。木製の場合、スチール製より 200 Hz 以降の音圧レベルが低減している。この結果より木製の方が、快適性が高いと考えられ、以降の実験では木製のテーブルトップを取り付けたパンチプレスで実験を行う。

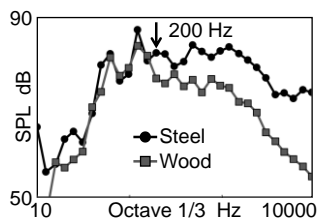


Fig. 10 Comparison of the SPL with the different material on the surface of moving table

4.2 制振材および吸音材の有無による特性把握

本節ではカバーへ制振材と吸音材により対策を施すことで、振動を低減し、打抜き音の音質改善を目指す。

4.2.1 制振材および吸音材付加による実験概要

分解実験の結果から、制振材及び吸音材は両サイドのタレットカバー及びパンチ点の周辺に設置し、冷却ファン周辺には流路確保のため、制振材のみを設置する。また、実験条件として、金型は $\phi 30$ mm、板厚は 3.2 mm、測定位置は側方であり、測定は防音室で行い、以降も同様の場所で行う。騒音対策として 8-0 は対策無、8-A は制振材付加、8-B は制振材と吸音材を付加し、打抜き速度は 400mm/s の高速パターン、また 6-B は対策無、8-C は制振材と吸音材を付加し、3 章で定めた音質改善パターンで打抜きを行う。

4.2.2 制振材および吸音材付加による実験結果

心理音響パラメータを Table 3 に示す。高速パターンの場合、制振材、吸音材付加により A 特性音圧レベルやシャープネスが低減するが、音質改善パターンの場合、A 特性音圧レベルはあまり変化がない。これは、速度の遅い打抜きでは構造体あまり振動せず効果が出にくいためであり、制振材及び吸音材は高速パターンの場合に効果的である。

Table 3 Psychoacoustic parameters

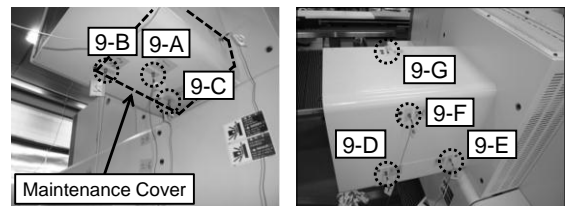
Name	Countermeasure	Processing pattern	SPL dBA	Sharpness acum
8-O	Nothing	Fast	78.4	1.11
8-A	Damping material		76.4	1.07
8-B	Damping material and acoustic absorbent		75.3	1.07
6-B	Nothing	Sound quality improvement	71.9	1.07
8-C	Damping material and acoustic absorbent		71.7	1.03

4.3 TPA(伝達経路解析)による伝達経路の把握

本節では TPA を用いて冷却ファンの振動伝達経路を特定し、対策を行うことで騒音低減を行う。またこれまでの入力制御および構造変更を考慮した最終的な対策を提案する。

4.3.1 TPA による実験概要

TPA を用いた実験の測定箇所を Fig. 11(a), (b) に示す。メンテナンスカバー中心を TPA のターゲット(応答点)9-A とし、9-A に伝達される振動の経路は 9-B~9-E のメンテナンスカバー固定箇所、9-F, 9-G の冷却ファンとカバー締結箇所である。また、加振位置を Fig. 12 に示す。入力加振には Y 軸モータ加振を用い、入力は 5 s のチャープサイン波とし、加振周波数は 0~2000 Hz とする。



(a) Under side of fan (b) Right side of fan

Fig. 11 Measurement points to apply TPA



Fig. 12 The rod transferring the vibration

4.3.2 TPAによる実験結果

TPAの伝達経路解析結果として代表的な波形をFig. 13に示す。MeasureはY軸加振によるターゲットの実測値である。また経路9-B~9-Gの波形は、解析上各経路点からターゲットに伝達される振動であり、Totalはターゲットにおける解析上各経路から伝達された振動レベルの和である。MeasureとTotalを比較すると、315 Hzまでの数値が近く信頼性が高い。また9-B~9-EはTotalへの寄与が大きく、9-Fと9-Gは寄与が小さいため、メンテナンスカバーの振動がターゲットに伝達しやすいことがわかる。そして、ターゲットの63 Hzの振動が大きいので、低周波を中心に対策を行い、騒音低減を図る。

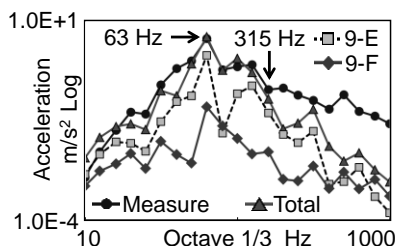


Fig. 13 Predicted vibration level near of the fan by TPA

4.3.3 伝達経路への対策による効果

TPAの結果から、低周波の伝達を軽減させるため、冷却ファンへの対策を行う。対策として、9-B~9-Eへゴムワッシャー付加、9-F、および凸部カバーとフレーム結合部に防振ゴムを付加し、対策前(10-A)と対策後(10-B)の比較を行う。また、冷却ファンと凸部カバー間の固定のためのボルトに防振ゴム、凸部カバーとフレーム結合部に防振ゴムを取り付ける。さらに、移動テーブルトップとそれを支えるアウトリガー締結部間の防振ゴムを1つ追加し、ラム軸側タレットカバーに防振ゴムを付加する。そして、NC側タレットカバーの開閉部の丁番を2つから3つに変更し、同開閉部のラッチをスナップフィット式からマグネット式に変更する。なお、対策前の状態として、制振材および吸音材をつけた状態とする。

打抜き速度は400 mm/sの高速パターン、金型はφ30 mm、板厚は3.2 mm、測定は冷却ファンから1.0 mの位置で行う。対策前後の周波数特性の比較をFig. 14に示す。63 Hzにおいて、音圧レベルが5.5 dB低減していることがわかる。

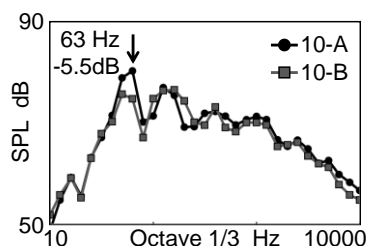


Fig. 14 Change of the SPL after modification

4.3.4 入力制御および構造変更による効果

最後に入力制御と構造変更による音質改善前後の比較を示す。測定の条件として、金型の形状はφ30 mm、板厚は3.2 mm、打抜き音の測定はラム軸側方とする。なお、対策としてテーブルとテーブルトップの間に発泡スチロールを新たに付加する。

比較内容として、11-Aはスチール製のテーブルトップを用い、対策をせず、高速パターンで打抜く。また、11-Bは木製のテーブルトップ、制振材、吸音材、防振ゴム、発泡スチロール等、今まで行った対策を施し、高速パターンで打抜く。そして、11-Cは木製のテーブルトップと今まで行った対策を施し、音質改善パターンで打抜く。

11-Aと11-Cの音圧レベルの比較をFig. 15に示す。構造変更や入力制御を施すことにより、200 Hz以降の音圧レベルが低減できていることがわかる。また、A特性音圧レベルは11-Aは80.5 dBA、11-Bは77.5 dBA、11-Cが73.4 dBAとなり、11-Aから11-Cにかけて、7.1 dBA低減できた。これらことから、対策を含めた構造変更および入力制御により、パンチプレスの快音化ができる。

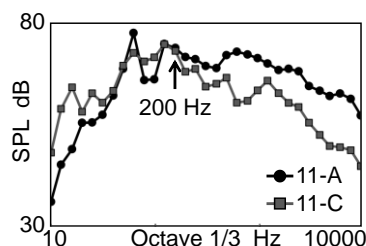


Fig. 15 Change of the SPL after modification in total

5. 研究成果

- (1) 加振間隔を調整した2回加振を行うことにより周期的に振幅が低減するため、固有振動数等、任意の周波数の入力制御が可能であることを示した。
- (2) パンチプレスの打抜き音にはワークへの衝突音と破断音があり、衝突時と破断時の速度を遅くした音質改善パターンでの打抜きにより、音質と品質を考慮した入力制御ができた。
- (3) 分解実験と伝達経路解析(TPA)の結果から、打抜き音に影響の大きい箇所は移動テーブルトップ、タレットカバー等のカバー類、冷却ファン、そしてパンチ点周辺等であることがわかった。
- (4) パンチプレスの構造変更の対策として、カバー類の放射音には制振材や吸音材の付加、振動伝達の軽減として、結合部にゴム材の付加、テーブルトップは材質変更を施すことにより、騒音を低減できた。
- (5) 入力制御と構造変更により、鐘やパンチプレスといった衝撃音の快音設計を行うことができた。

参考文献

- (1) Iva M. Salom, et al., "Aural Determination of the strike note of a bell", Inter-Noise 2010, pp. 275-284, (2010).
- (2) 徳永智彦, 大久保信行, 戸井武司, "音響シミュレーションを用いた形状変化による鐘の音質設計", 日本音響学会講演論文集(春), pp. 819-820, (2003).
- (3) 朝日洋平, Cho Wan-Ho, 深見靖彦, 長江正行, 戸井武司, "入力制御によるタレットパンチプレスの音質改善手法の開発", 日本音響学会講演論文集, pp. 1161-1164, (2012).
- (4) 山本康晴, 堤正臣, 吉村允孝, 小林英男, 遠藤順一, "C形パンチプレスの制振構造に関する研究", 日本機械学会論文集(C編), 社団法人日本機械学会, 第557号, (1992).
- (5) 朝日洋平, 有光哲彦, 戸井武司, "入力制御による衝撃音のサウンドデザイン", 日本音響学会講演論文集(春), 3-3-9, (2013).
- (6) 日本塑性加工学会編, "最新塑性加工要覧", コロナ社, (2000).
- (7) 山本耕三, 漆戸幸雄, 藤橋克己, 田中学, 宮島徹, "ゴムボール衝撃源による床衝撃音遮断性能の測定方法に関する検討", 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 201-204, (2007).