

# 入力制御および構造変更によるパンチプレスの快音設計

## Comfortable Sound Design of Punch Press by Input Control and Structure Modification

精密工学専攻 36号 花輪 和人  
Kazuto Hanawa

### 1. はじめに

近年、工場で使用される機械音が、工場内の作業員や周囲の人々に不快感をもたらすことが問題とされている。金属材料のワークを打抜き、成形加工を行うタレットパンチプレス（以下、パンチプレス）はその一つであり、騒音対策が施されている<sup>(1)</sup>。パンチプレスから発生する打抜き音は、加工時に発生する衝撃音と、打抜く衝撃により発生する固体伝播音に大別される。これまで、パンチプレスの構造変更による振動騒音の低減対策が施されてきた<sup>(2)</sup>。しかし、大掛かりな構造変更であるため実用化が難しい。そのため、打抜き音に寄与の高い箇所に対して、適切な構造変更を行う手法が確立できれば、改善コストの削減が可能であり、実用化に有益である。また、打抜き音の快適性には、音の大きさ以外にも音の高さやうらさなど、音の感じ方も影響すると考えられる。そのため、人の感性による主観評価や心理音響パラメータを用いる快音設計に基づき、更なる音質改善が必要である。

そこで本研究では、入力制御および構造変更に着目し、パンチプレスの快音設計を行う。縮尺モデル（以下、テストベンチ）を用いる優位性が確認されている<sup>(3)</sup>ため、本研究では1/3スケールのテストベンチを用いる。第2章では、ワークを打抜く入力制御について音質改善に適切な多段入力制御について検討する。第3章では、テストベンチを用いて音源発生に寄与の高い箇所を特定する。さらに第4章では、特定した箇所に対する構造変更方法を数値解析で検討し、適切な構造変更案（以下、構造案）をテストベンチに適用して、構造変更による効果を検討する。なお、本研究における音質評価において、十分なインフォームド・コンセントを行い、被験者の同意を得ている。

### 2. 入力制御によるパンチプレスの快音設計

本章では、入力制御によるパンチプレスの快音設計手法について述べる<sup>(4)</sup>。

#### 2.1 テストベンチを用いた基礎実験

##### 2.1.1 未入力制御における音響特性把握

Fig. 1に示す3分の1にスケールダウンしたテストベンチを用いて、入力制御を考慮しない（以下、未入力制御）場合の、打抜き音の音響特性およびサイクルタイムより、多段入力制御考案時の目標音の検討を行う。

まず、Fig. 2に未入力制御による打抜き速度域V1～V6の概要を示す。使用する打抜き案として、V1～V6が等速であり使用頻度の高い高速案（Fast）、V3を低速化し音圧低減を目的とする静音案（Quiet）、V2およびV4を低速化し音質向上を目的とする音質改善案（SQ）を用いる。なお、各打抜き音はパンチ部側方0.5 mにてマイクロホンにより計測する。

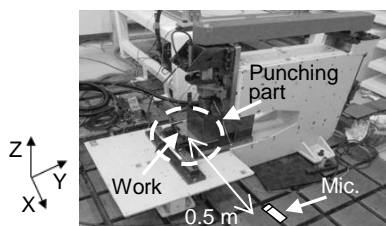


Fig. 1 A test bench using in the experiment

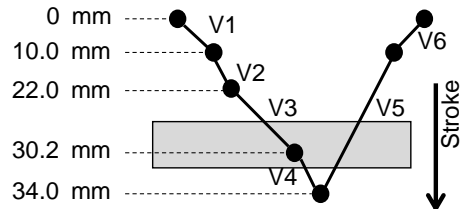


Fig. 2 Conceptual diagram of breakthrough during the punch pressing (Non-control)

Table 1 Sound parameter and cycle time (Non-control)

Name	O/A SPL dB	Loudness sone	Sharpness acum	Cycle time s
Fast	91.0	79.0	1.51	0.030
Quiet	88.3	63.5	1.39	0.173
SQ	90.0	72.1	1.41	0.157

的とする音質改善案（SQ）を用いる。なお、各打抜き音はパンチ部側方0.5 mにてマイクロホンにより計測する。

Table 1に示す各打抜き案のO/A音圧レベルと心理音響パラメータ（以後、これらを評価パラメータ）より、打抜き音の音質について検討する。Table 1より、Quietは評価パラメータがFastより低減し音質の向上が見られる。これより、Quietは人が快適に感じる音となることが推測できる。なお、本研究におけるサイクルタイムは連続動作を考慮して、Fig. 2における22.0 mmから下死点34.0 mmに要する時間とする。

##### 2.1.2 打抜き音評価による目標音検討

主観評価による目標音の設定を行う。シェッフェの対比較法に基づき音の快適性、音のうらさおよび音の鋭さの3項目を評価する。各評価項目は、心理音響パラメータと比較するために選定している。また、被験者は20代10名である。

Fig. 3の左軸に音の快適性評価、右軸にO/A音圧レベルの平均値に対する比率を示す。評価結果より最も快適性が高い打抜き案はQuietであることがわかる。また、O/A音圧レベルの比率の傾向は、主観評価による音の快適性とほぼ一致する（ $R=0.99$ ）。同様に、他の評価項目においても高い相関を確認したため、打抜き音の快適性は評価パラメータに対応し、予測が可能であることが本検討より推測できる。

以上の検討に基づき、多段入力制御を考慮した目標音には、O/A音圧レベルが低く、快適であるQuietとする。

#### 2.2 多段入力制御方法の検討

##### 2.2.1 多段入力制御方法の概要

目標音であるQuietは破断時V3が低速であり、他の打抜

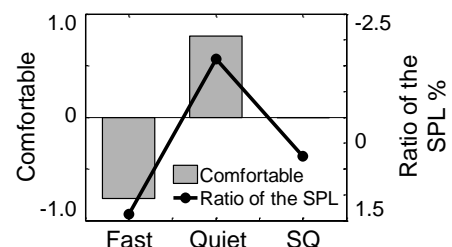


Fig. 3 Result of subjective evaluation (Comfortable)

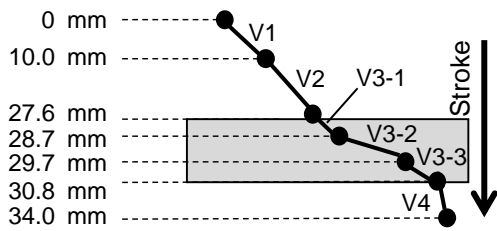


Fig. 4 Conceptual diagram of breakthrough during the punch pressing (Multistage control)

Table 2 Sound parameter and cycle time (Multistage control)

Name	O/A SPL dB	Loudness sone	Sharpness acum	Cycle time s
Plan A	89.5	75.0	1.49	0.168
Plan B	88.2	66.6	1.46	0.160

き案と異なる。本節では、音圧、音質への寄与が高いと予測できる V3 を細分化し、多段入力制御について検討する。

Fig. 4 に多段入力制御による打抜き速度域 V1~V4 の概要を示す。V5 および V6 は未入力制御と同一であるため省略する。Fig. 4 において、ワーク破断時に速度変更点を設ける A 案、A 案に加え破断後に速度変更点を設ける B 案とし、V3-2 の速度を Quiet 同様に低速化する。

### 2.2.2 多段入力制御方法における音響特性把握

2.1 節同様、各打抜き案の評価パラメータより、多段入力制御による打抜き音の音質について検討する。Table 2 に示す各打抜き案の評価パラメータより、B 案は Fast および A 案よりも音質は向上し、目標音である Quiet と同等であることがわかる。これは、破断時の V3-2 を低速化したためと推測できる。また、サイクルタイムにおいて、B 案は目標音である Quiet より高速化を実現している。

以上より、B 案は音質改善と生産性を同時に両立する多段入力制御であることがわかる。しかし、Fast に対する生産性にはまだ劣るため、更に高速化を図る入力制御を検討する。

### 2.2.3 加工品質への影響

多段入力制御により、未入力制御とは異なり細かな速度変化が可能となる。しかし、速度変化により加工断面の品質劣化が生じる可能性がある。そこで、Fig. 5 に示す加工断面のバリ高さやせん断断面から加工品質について検討する。

Fast の加工品質を基準とし、上述した各項目が得る比率で加工品質を検討する。A 案、B 案は Fast と同等の加工品質が得られ、加工品質は維持していることを確認した。以上より、細かな速度変化を行う多段入力制御は、加工品質は劣化せず維持することが確認できる。

## 2.3 適切な多段入力制御の提案

### 2.3.1 適切な多段入力制御の検討における音響特性把握

これまでの結果より、打抜き音の快音設計には V2, V3 および V4 の速度域が重要であることを明らかにした。本節では、さらに音圧低減、音質改善、高速化を図る。2.2 節で定めた B 案に基づき、V2 と V4 の速度を変更することで適切な速度パラメータの把握、および適切な打抜き方法の検討を行う。V4 を高速化する C 案、V2 を低速化する D 案を用いて Fast および B 案との比較を行う。

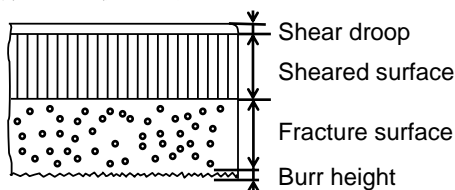


Fig. 5 Conceptual image of cutting surface

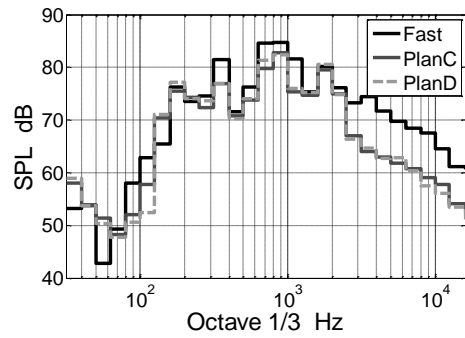


Fig. 6 Result of 1/3 octave analysis

Table 3 Sound parameter and cycle time (Multistage control and Plan D)

Name	O/A SPL dB	Loudness sone	Sharpness acum	Cycle time s
Plan B	88.2	66.6	1.46	0.160
Plan C	88.7	70.2	1.41	0.144
Plan D	88.5	68.2	1.40	0.123

Fig. 6 に示す Fast, C 案および D 案の 1/3 オクターブ分析より、多段入力制御の打抜き案は高周波数域において大きく音圧レベルが低減する。加えて、Table 3 に示す各打抜き案の評価パラメータおよびサイクルタイムより、D 案が音圧、音質、生産性において適切であることがわかる。また、速度変更より V2 の速度域が V3 同様に、音質に寄与が高いことが本検討より確認できる。

### 2.3.2 主観評価に基づくパンチプレスの快音設計

2.1 節同様打抜き音の音質評価を行い、人の感性に適した打抜き音の検討を行う。使用する評価音は 2.1 節の主観評価で用いた Fast, Quiet, SQ に D 案を加える。なお、実験条件は 2.1 節同様であり、被験者は 20 代 16 人とする。

Fig. 7 の左軸に音の快適性評価、右軸に O/A 音圧レベルの平均値に対する比率を示す。評価結果より、Quiet, D 案に高い快適性が確認できる。他の評価項目においても同様に Quiet, D 案は高い評価結果を得ることから、D 案は人が快適に感じる打抜き音であることが確認できる。加えて、サイクルタイムの短縮により D 案は生産性の改善が可能である。また、各主観評価と評価パラメータの相関は、音の快適性と O/A 音圧レベルが  $R=0.89$ 、音のうるささとラウドネス値が  $R=0.86$ 、音の鋭さとシャープネス値が  $R=0.71$  を示す。いずれも高い相関を得ることから、人の感じる音の印象は音響パラメータより推測が可能であることを再度確認した。

以上より、打抜き音の快音設計を行う場合には、評価パラメータを用いる有効性を示せる。なお、サイクルタイムにおいては、D 案は B 案、Quiet より高速化を実現する。

### 2.3.3 適切な多段入力制御に基づくパンチプレス快音設計

本章では多段入力制御における適切な打抜き案の検討を行い、評価パラメータおよびサイクルタイムを改善する打抜き方法の検討を行った。以上の検討に基づき、多段入力制御で衝突時、破断時の速度を低減することで快適性、生産性、および加工品質において適切な入力方法であることが示せる。

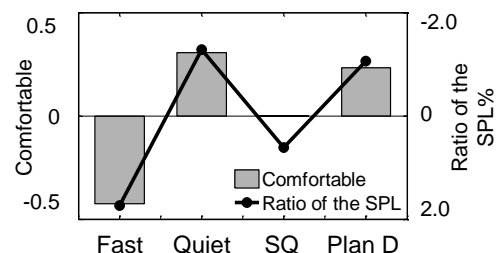


Fig. 7 Result of subjective evaluation (Comfortable)

以上の検討はテストベンチ上であるが、パンチプレスでも同様の傾向が得られることが考えられる。したがって、D案をテストベンチの適切な打抜き方法として提案する。

### 3. プレス機械の構造変更箇所の検討

本章では、構造変更によるパンチプレス打抜き音の快音設計を行うため、パンチプレスの構造変更箇所を検討する。

#### 3.1 テストベンチを用いた基礎実験

テストベンチの加振実験を行い、打抜き音と関連のある周波数および打抜き音発生メカニズムについて検討する。C型上部先端を加振点、応答点として、加速度応答による周波数応答関数(以下、FRF)を計測する。なお、入力、応答は打抜き音計測箇所を考慮して、-X方向とする。

Fig. 8に示すFRFと打抜き音の周波数分析を比較すると、どちらも640 Hzの振幅値が大きくなることが確認できる。これより、FRFと音圧値は640 Hzにおいて相関があることが推測できる。加えて、実験モード解析より、640 HzにおいてC型上部先端にねじり振動モードの発生を確認した。以上に基づき、640 Hzの打抜き音はねじり振動モードで励起されることにより発生すると推測できる。

#### 3.2 音源探査による構造変更箇所の検討

##### 3.2.1 ビームフォーミングによる実験概要

3.1節の結果に基づき、打抜き音の音源探査を行いパンチプレスの構造変更箇所を検討する。音源探査方法は、側方1.5 mに設置した30本のマイクロホンを使用する、スパイラル配置のマイクロホンアレイによるビームフォーミング法とする。空間分解能を0.12 mとし、解析点を400点設け、仮想平面上の音圧分布を算出する。打抜き音は、駆動音、衝突音、破断音、および残留振動による放射音(以下、残留振動音)で構成される。本検討では、ワーク破断時に発生する破断音、および振動モードが励起されて発生する残留振動音を対象とする。なお、打抜き音の計測はFast, Quiet, D案を対象とし、各打抜き案の結果を比較する。

##### 3.2.2 ビームフォーミングによる実験結果

Fig. 9に示す、入力をFastとした際の音源探査により可視化された残留振動音の結果より、640 Hzの残留振動音はC型上部先端(P1)より発生することがわかる。これより、振動モードが励起され、残留振動音は固体伝播音として放射していると推測できる。以上より、C型上部先端を対象にねじり振動を抑制する構造変更の検討が必要である。

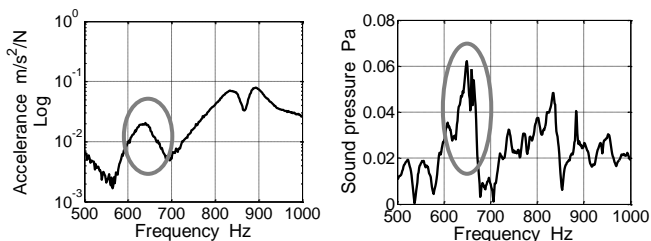


Fig. 8 FRF and sound pressure

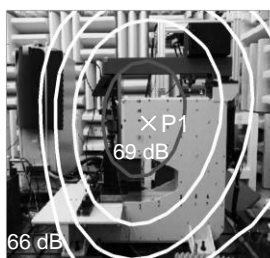


Fig. 9 Sound pressure distribution at 640 Hz

## 4. 構造変更によるパンチプレスの快音設計

本章では、3章の結果に基づく構造変更を行い、構造変更によるパンチプレスの快音設計手法について述べる<sup>(5)</sup>。

### 4.1 数値解析による構造変更方法の検討

#### 4.1.1 有限要素モデルによる構造案の検討

テストベンチは各部位が溶接結合されているため、内部空間に対する構造変更は困難であり、パンチプレス実機でも同様である。そのため、パンチプレス実機にも実現可能な構造とし、外部フレームに対して局所的にリブを設ける構造案を検討する必要がある。そこで本節では、テストベンチの有限要素モデルを用いて静解析、音響解析において効果的な構造案、同時に取り付けるリブ高さを検討する。

考案した構造案は、C型上部先端に対して、リブをクロス状に取り付けるクロスリブ、リブを任意に取り付けるアングルリブである。Fig. 10に検討する構造案と、静解析の荷重入力点を示す。また、いずれの構造案も後方部分に柵リブを取り付ける。以上の構造案の適用により、ねじり振動モードにより励起される放射音の抑制を図る。

#### 4.1.2 有限要素モデルによる構造案の効果検討

Fig. 10に示す荷重入力点の+X方向に1 kNを付与し、15 mmから100 mmのリブ高さ変化によるX軸の変位量変化による静剛性比較を行う。Fig. 11に静剛性比較結果を示す。いずれの構造案においても、元の構造に対して変位量が低減し、アングルリブの低減量が大きいことがわかる。これは、クロスリブに対しアングルリブの方が、C型上部先端における剛性を高めたためと推測できる。また、リブ高さは一定以上で

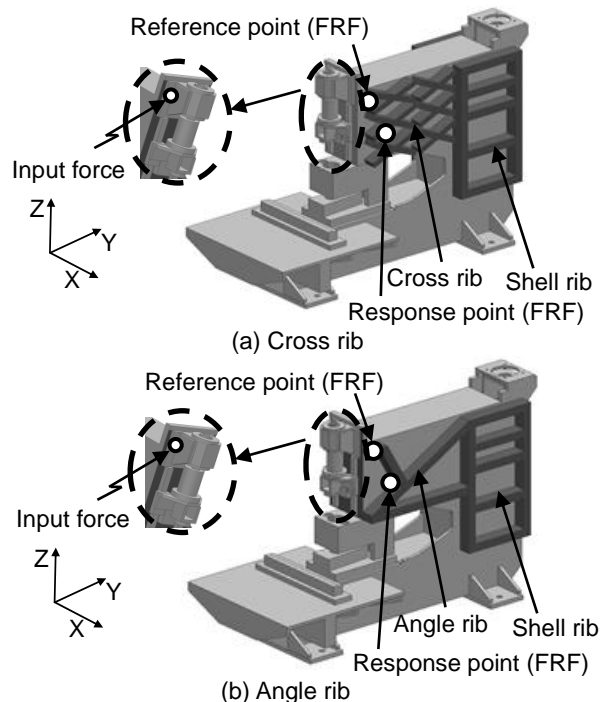


Fig. 10 Each structure modification pattern

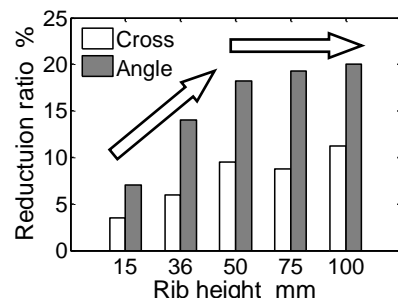


Fig. 11 Comparison of reduction ratio

剛性に変化が生じなくなり、変位量も同様に変化しなくなることが推測できる。以上の結果より、構造変更にはアングルリブが適切であり、軽量化を考慮するとリブ高さは 50 mm が妥当であることがわかる。

続いて、境界要素法による放射音の音圧低減を検討する。検討した構造案の固有振動を仮想音源とし、作成した観測点における音圧値の比較を行う。解析結果より、各構造案の音圧低減を確認し、静剛性比較結果、軽量化を考慮すると、アングルリブが優位であることがわかる。以上より、構造案はアングルリブ、リブ高さは 50 mm とする。

#### 4.2 構造変更適による適切な構造案の検討

##### 4.2.1 各構造変更案について

4.1 節で定めた構造案をテストベンチに適用し、検討した構造案の効果について検討する。構造変更は段階的に行い、各構造案の効果を検討する。元の構造を Str.0、棚リブ適用を Str.1、アングルリブと棚リブ適用を Str.2 とする。

##### 4.2.2 各構造案における効果の検討

振動、音響実験を行い、構造変更の効果を検討する。まず、Fig. 10 に示す残留振動音の発生箇所である C 型上部先端を加振点、応答点とした際の FRF を比較する。Fig. 12 に示す計測した各構造案の FRF より、対象とする 640 Hz で発生するねじり振動モードは Str.1 では抑制できていないが、Str.2 で抑制することが確認できる。加えて、Str.1 の振幅値が増大するのは、剛性向上効果が小さく、主に質量付加の効果を得られたためであり、Str.2 は主に剛性向上の効果を得るため振幅値は低減すると推測できる。

続いて、打抜き音の評価パラメータを比較する。Table 4 に示す Fast を入力とした際の評価パラメータより、Str.1、Str.2 は音圧低減、ラウドネス値、シャープネス値が減少し、音質改善が図れることが確認できる。しかし、剛性向上の効果を得る Str.2 は Str.1 に対して、O/A 音圧レベル、ラウドネス値が低減するため、より音質改善が図れることがわかる。加えて、対象とする 640 Hz の音圧値は Str.2 では低減し、FRF の傾向と一致することを確認した。

次に、FRF 計測の応答点における、入力を Fast とした際の実稼働加速度応答を比較する。Str.1 では FRF 結果と同様に剛性変化が少ないため振幅値は変化しないが、Str.2 ではアングルリブ効果により主に先端の剛性が向上し、振幅値は大きく低減することを確認した。また、FRF と加速度応答結果より、Str.1 は主に質量付加の効果、Str.2 では主に剛性向上の効果を得られることが再度確認できる。

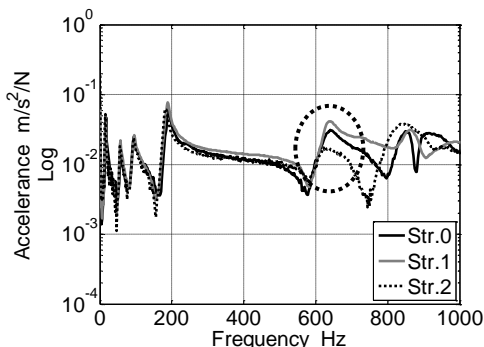


Fig. 12 Comparison of FRF with each structure

Table 4 Sound parameter of each structure modification pattern

Name	O/A SPL dB	Loudness sone	Sharpness acum
Str.0	91.0	79.3	1.51
Str.1	89.3	69.6	1.45
Str.2	88.1	64.9	1.44

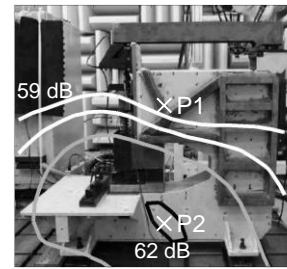


Fig. 13 Sound pressure distribution at 620 Hz (Str.2)

さらに、3.2 節同様に音源探査を行い、音源発生箇所の変化を確認する。Fig. 13 に Str.2 の残留振動音を対象とした音源探査結果を示す。Fig. 9 と Fig. 13 の比較より、音源発生箇所はねじり振動モードが発生する C 型上部先端(P1)から、パンチプレス側面下部(P2)へ変化することが確認できる。これは、アングルリブによる剛性向上の効果であることが推測でき、構造変更の効果を確認できる。これより、励起して発生する残留振動音は改善されることがわかる。

#### 4.3 構造変更によるパンチプレスの快音設計

4.2 節より、構造変更による効果を確認した。これより、快音設計を目的としたパンチプレスの構造変更方法として、音源発生箇所を特定した上で、特定箇所に対する剛性向上を目的とする構造変更を施すことが重要である。そして、検討したアングルリブ、棚リブを適用する構造案である Str.2 を音源発生箇所に設けることで、構造変更によるパンチプレスの快音設計を実現した。

以上より、振動低減、音圧低減、快音設計を目的とするテストベンチにおける適切な構造案は、Str.2 であることが確認できる。また、入力が D 案の場合、各音響特性は入力が Fast の場合より低減することを確認した。これより、入力制御、および構造変更によるパンチプレス打抜き音の快音設計を実現した。

## 5. 研究成果

- (1) 入力制御方法として、打抜き破断音に寄与の高い速度域を細分化する多段入力制御を考案し、音圧、音質、生産性、加工品質を考慮した打抜き方法が提案できた。
- (2) 打抜き音の評価パラメータは、主観評価結果の傾向と一致することから、快音設計方法として用いることが可能である。
- (3) 音源探査より、打抜き音に寄与の高い箇所はねじり振動が発生する C 型上部先端であり、構造変更により発生箇所は変化し、音圧、音質は改善される。
- (4) パンチプレス打抜き音の快音設計は音圧低減のみでなく、心理音響パラメータを用いることが重要であり、入力制御と構造変更を併用することが効果的である。

#### 参考文献

- (1) 花輪 他，“入力制御によるパンチプレスの快音設計”，日本音響学会 騒音・振動研究会，N-2014-58，pp. 1-7 (2014)。
- (2) 山本 他，“タレットをダンパに応用した C 形パンチプレスの低振動・低騒音化”，日本機械学会誌，62-602，pp. 4026-4031，(1996)。
- (3) 山本 他，“縮尺模型による C 形タレットパンチプレスの騒音の推定”，日本機械学会誌，62-602，pp. 4019-4025，(1996)。
- (4) 花輪 他，“衝撃入力を伴うパンチプレス動作音の入力制御による快音設計”，音講論(春)，1-6-1，(2015)。
- (5) 花輪 他，“衝撃入力を伴うパンチプレス動作音の構造変更による快音設計”，音講論(春)，1-6-2，(2015)。