

M1b-5 ハンマ鍛造の打撃音解析に基づく鍛造技能評価システムの構築

知能システム制御研究室 原 碧

1. はじめに

金属塑性加工法の一つである鍛造には、熱間鍛造としてハンマ鍛造がある。ハンマ鍛造は、作業者が足踏みペダルの操作を通して金型が装着されたラムを調節し、1000℃～1250℃に熱した金属の素材に金型を打ち付け、圧縮・加工を行っている。

金型は使用に伴い摩耗、変形、割れといった不具合が生じ [1]、特に割れは、金型の寿命を大幅に縮めるだけでなく、修繕にもコストと時間を要する。そのため、割れの原因である金型同士の衝突を減らすことが重要である。一般的に、成形物生成には強い打撃が必要であるが、それ自身が金型同士の強い衝突の原因となる。この相反する二つの状況に対して、熟練度の高い作業者は両立する適切なハンマ打撃を実現しているが、熟練度の低い作業者は成形物の歩留まりを意識するあまり、過度に強い打撃となる傾向がある。

先行研究では、訓練用シミュレータを構築することで、実機を用いることなく、ペダル操作の修練を可能としてしていたが [2]、打撃の強さと金型への負担は考慮されていなかった。先の問題を解決するためには、金型への負担を考慮した定量的な打撃評価の仕組みが必要である。

そこで本研究では、熟練度向上と金型割れ防止のため、ハンマ鍛造作業の打撃評価システムの構築を目指し、その手始めとして鍛造打撃音を用いた鍛造技能定量化手法を提案する。具体的には、鍛造の際の打撃音を周波数解析し、熟練度を推定するための特徴抽出と打撃判定基準の設定を行う。

2. 提案システムのコンセプト

打撃評価システムのコンセプトを Fig. 1 に示す。本システムは、作業者の鍛造作業の打撃評価を行いリアルタイムに作業者にフィードバックするものである。ハンマ鍛造は周辺環境が高温であると同時に [3]、熱した金属の素材に金型を打ち付ける際の

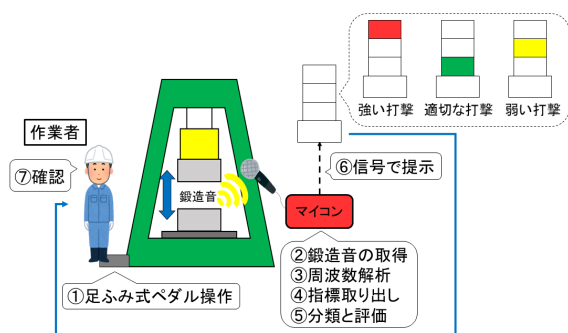


Fig. 1 提案システムのコンセプト

衝撃が大きいため、鍛造機械へセンサ等を取り付けることは安全性の面から好ましくない。そのため、ハンマ鍛造作業の際の鍛造音に含まれる打撃音を対象として評価指標を抽出する。

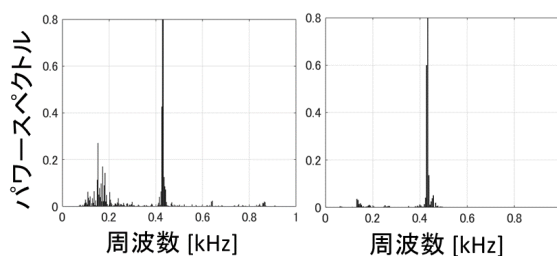
鍛造音の取得には、JVC 製の単一指向性マイクロフォン MV-P62 と TASCAM 製のマルチトラックレコーダ DP-006 を用い、雑音の影響を受けにくいよう鍛造機械正面 6.6m の地点を計測地点とする。

3. 金型の衝突音と成形物の固有音解析

打撃良否の判断指標として、金型同士の衝突音に着目する。上金型と下金型の間金属素材を置いた場合と置かない場合の打撃音データに対して打撃の瞬間から約 0.2s 分 (サンプリング 44.1[kHz]、データ個数 8192) を対象に周波数解析を行い、最大スペクトルピーク値を基準として正規化をし、比較を行う。

両者の比較を Fig. 2 (特徴的な部分を拡大) に示す。(a) は金属素材ありの場合、(b) は金属素材なしの場合であり、各々横軸は周波数、縦軸はパワースペクトルである。両図ともに 0.4～0.5kHz に特徴的なパワーのピークが存在しているため、金型同士の衝突音であると分かる。また、(b) では 0.1～0.2kHz のパワーがほとんど見られないことから、該当周波数帯は金属素材によるものと考えられる。そこで、2つの周波数帯に着目し、経験年数が長く一般的に手本とされる熟練作業者の打撃を「適切な打撃」と想定した上で、両者を判別する指標の選定を行った結果、「0.4～0.5kHz の最大スペクトルピーク値」に両者の違いが最も表れたため、指標として選択する。

また、1つの成形物を生成するための1工程には Fig. 3 に示す6つの打撃があり、6つの打撃各々を新人作業者と熟練作業者と比較した結果、①～③と比較し、④～⑥で新人作業者と熟練作業者の違いが大きかった。一般的に④～⑥は強い打撃を必要とする作業であり、金型にかかる負荷が大きいことから、「④つぶし3」、「⑤荒打ち」、「⑥仕上げ」の3打撃で打撃評価を行うこととする。



(a) 金属素材あり (b) 金属素材なし

Fig. 2 打撃音周波数解析結果の比較

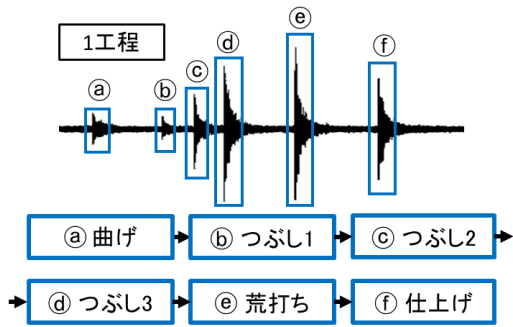


Fig. 3 各打撃の名称

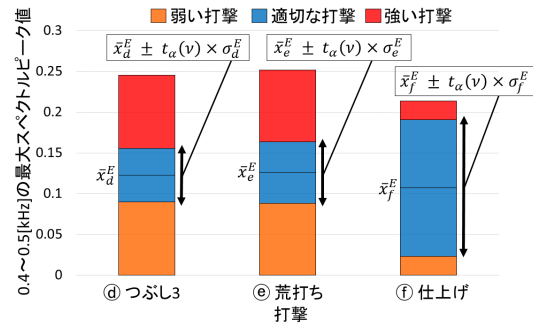


Fig. 4 熟練作業データによる分類マップ

4. 打撃判定基準の設定

選択した指標を用いて熟練作業データに基づき、(d), (e), (f)の各打撃で打撃の良否を判定する打撃判定基準を定める。以下 (i) ~ (iii) に打撃判定基準の導出手順を示す。なお、(1)~(3)式は選択した分類指標に対する打撃 $j (= (d), (e), (f))$ における導出方法である。

- (i) 熟練作業データを用いて、(d), (e), (f)の各打撃における標準偏差を求める。熟練作業の各全データ数を I^E とする

$$\sigma_j^E = \sqrt{\frac{1}{I^E-1} \sum_{i=1}^{I^E} (x_j^{I^E(i)} - \bar{x}_j^E)^2} \quad (j = (d), (e), (f)) \quad (1)$$

- (ii) データの信頼区間を求める。自由度 $v = I^E - 1$ に対する信頼水準 α での t 値の臨界値を $t_\alpha(v)$ とすると、信頼区間は (2) 式となる

$$\bar{x}_j^E \pm t_\alpha(v) \times \sigma_j^E \quad (j = (d), (e), (f)) \quad (2)$$

- (iii) (2) 式で求めた信頼区間をもとに打撃判定基準を (3) 式のように定める。信頼区間を超過した場合、「強い打撃」とし、区間内の場合、「適切な打撃」、区間に満たない場合、「弱い打撃」とする。ただし、 $j = (d), (e), (f)$ とする

$$Det = \begin{cases} Strong & (x_j > \bar{x}_j^E + t_\alpha(v) \times \sigma_j^E) \\ Good & (\bar{x}_j^E - t_\alpha(v) \times \sigma_j^E \leq x_j \leq \bar{x}_j^E + t_\alpha(v) \times \sigma_j^E) \\ Weak & (x_j < \bar{x}_j^E - t_\alpha(v) \times \sigma_j^E) \end{cases} \quad (3)$$

5. 検証と考察

熟練作業データ 20 工程を 10 工程 \times 2 に分割し、各々教師データとテストデータとする。また、新人作業 39 工程分のデータをテストデータとする。ここで、 $t_\alpha(v) = 2.262$ ($\alpha = 0.05, v = 9$) とする。教師データを用いて (i) ~ (iii) の導出手順で定めた打撃判定基準に基づき作成した分類マップを Fig. 4 に示すとともに、分類マップを用いてテスト

Table 1 K 分割交差検証 (K = 2)

Det		工程					
		新人作業			熟練作業		
		(d)	(e)	(f)	(d)	(e)	(f)
強い	1	32	30	1	0	0	
適切	9	7	9	9	10	10	
弱い	29	0	0	0	0	0	

データを分類検証した結果を Table 1 に示す。熟練作業者に着目すると、30 打撃中 29 打撃が「適切な打撃」に分類されている。一方で新人は、117 打撃中 25 打撃が「適切な打撃」に分類されたものの、「(d) つぶし3」では「弱い打撃」に、「(e) 荒打ち」と「(f) 仕上げ」では「強い打撃」に多くが分類されていることが分かる。一般的に、新人作業者は成形物の歩留まりを意識するあまり 1 工程の終わりである「(e) 荒打ち」、「(f) 仕上げ」で過度に強い打撃になることが多く、それに一致した結果といえる。また、これらより新人作業者は熟練作業者に比べ「強い打撃」に分類される割合が約 16.1 倍であることから、新人作業者が金型にかかる負荷は熟練作業者の約 16.1 倍であることが予測される。

6. おわりに

ハンマ鍛造作業における熟練度向上と金型割れ防止のための打撃評価システム構築を目的とし、鍛造技能定量化手法を提案した。鍛造の際の打撃音に着目し、周波数解析結果に基づいて熟練作業者の特徴の抽出を行い、打撃判定基準を定めた。それに基づき分類マップの作成と検証を行った結果、熟練作業者は 96.7% が「適切な打撃」に分類された一方、新人作業者は 53.8% が「強い打撃」、24.8% が「弱い打撃」に分類された。これは、一般的な新人作業者の傾向に一致するため、鍛造技能を定量的に評価可能であることを示唆しており、ハンマ鍛造作業の打撃評価システム構築の実現に寄与するものである。

参考文献

- [1] 辻井：「金型の損傷形態と寿命向上対策」, 山陽特殊製鋼技報, Vol. 7, No. 1, pp. 65-71 (2000)
- [2] 山崎, 榊田, 北村：「ハンマ鍛造機械のモデリングと訓練用シミュレータの開発」, SCI'14 論文集, 346-1 (2014)
- [3] 片岡：「しくみ図解 金型が一番わかる」, 株式会社技術評論社, pp. 34-35, pp. 168-169 (2011)