

# 板金加工機械に対するダイナミクス面からの 高精度・高能率化のためのCAEの研究

京都大学 工学部 精密工学科

助教授 吉村允孝

(平成3年度研究開発助成 AF-91001)

## 1. 緒言

板金加工で使用されるパンチプレスの中で、特に鋼板の打抜きに使用されるCNC制御装置付きC形タレットパンチプレス（以下、C形タレットパンチプレスと略す）では、CNC制御によってタレット内の金型が選択された後、通常、毎分200回を越える高速な打抜きが行われる。そのため打抜き加工時には、衝撃力による振動とそれに伴う大きな騒音が発生し、これが加工製品の精度や機械を移動している工場内の作業環境、さらには工場近隣の環境などに対して大きな問題を引き起こしている。このようなパンチプレスの振動・騒音に関する研究は、古くからおもに実験解析により行われているが、最近では、有限要素法に代表される数値解析を用いた振動・騒音の研究も行われている。

有限要素法で複雑な機械構造物の振動特性を求めると、着目する周波数帯域の中に非常に数多くの固有振動数・固有モードが存在するが、それらのすべてが振動・騒音に対して問題となることはなく、実際にはそれらのうちのいくつかが問題となるため、この問題となる固有モードを的確に評価するための手法が必要になってくる。しかし、そのような評価手法に関する研究はほとんど行われておらず、今までは、有限要素法により得られた固有振動数・固有モードの中から制振対策上重要な固有モードを実験結果と比較

して、技術者が定性的に評価をしていたようである。

本研究では、パンチプレスの中でも特にC形タレットパンチプレスを例にあげて、打抜き加工時の音の放射に影響すると考えられる機械フレーム面の曲げの固有振動に注目し、その振れやすさを表すための新しい評価量である、“点と面のモーダルイナータンス”とそれをを用いた評価手法を提案した。そして、パンチプレスに対するこの評価量の計算結果と実験結果を比較して、本評価手法の有効性を検討した。

また、構造変更モデルへの適用例をあげ、本手法の有効性についても検討した。

## 2. 有限要素法によるパンチプレスの固有値解析

パンチプレスの振動特性を正確に求めるためには、有限要素法などを用いて構造全体をモデル化し、まず固有値解析を行う必要がある。

本研究では、具体例として、図1に示すC形タレットパンチプレスに対して、有限要素法により固有値解析を行った。ここで図2に有限要素法（MSC-NASTRANを使用）によるモデル化（総節点数：1571、総要素数：1720）を示す。おもな機械フレーム各部はシェル要素で、クランクシャフトやストライカなどはビーム要素で、フライホイールやタ

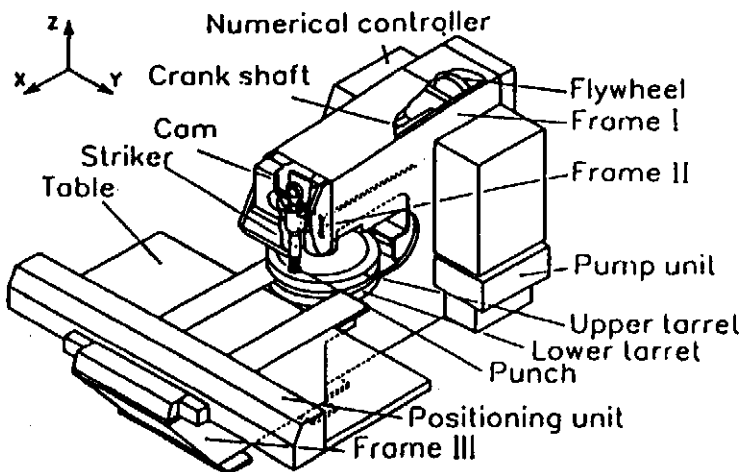


図1 C形タレットパンチプレスの外観図

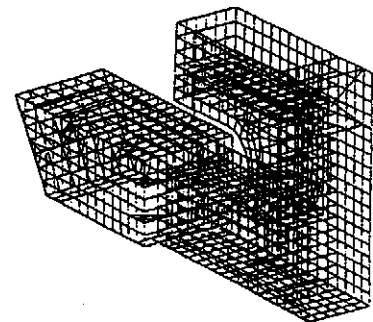


図2 C形タレットパンチプレスの有限要素法によるモデル化

表1 C形タレットパンチプレスの固有振動数の計算例

Mode No.	Natural frequency, $f_n$ (Hz)
1	1.57
2	1.77
3	2.11
:	:
36	270.18
:	:
147	995.48
148	998.38

レットは集中質量要素で、機械フレームのボルト結合部や機械の地盤支持部はばね要素でモデル化している。0~1000Hzの周波数範囲で固有値解析を行い、結果として148個という非常に数多くの固有振動数・固有モードが得られた。表1は各固有モードの固有振動数の計算例を示したものである。

### 3. 振動特性の評価

機械構造物の静的特性を評価しようとする場合には、静的な力が作用したときの機械の応力状態、変位状態、エネルギー分布状態など、作用する力との1対1の関係に着目すればよいから、その解析は比較的容易である。

しかし、この機械に動的な力が加わると、機械が有している固有の振動特性、加わる力の特性などによりさまざまな共振状態を生じうる。したがって解析しなければならないさまざまな多くの状態が存在し、その解析は非常に複雑になる。このような場合、まず最初に、機械が固有にもっている振動特性を解析することが考えられる。

複雑な機械構造物の振動特性を有限要素法により正確に把握するには、一般に有限要素モデルも複雑になる。このような複雑な有限要素モデルは、節点数に比例した大きな自由度をもつため、固有値解析を行うと、2章で示したように非常に数多くの固有振動数・固有モードが得られる。しかし、機械の性能や特性の評価のために、この数多く存在する固有振動数・固有モードをすべて考慮することは非常に困難である。そこで、その機械において問題となる振動特性には、どのような固有振動数・固有モードが支配的なのかを的確に評価することが必要になる。

本研究では、パンチプレスで問題としている騒音をその発生原因である機械フレーム面の曲げの固有振動により近似的に評価するために、騒音が振動体の振動加速度と相関があることを考慮して、面振動の加速度に比例するような評価量を考えた。ここでは、機械の加工点と応答面（機械フレーム面）の間の動的なイナータンス（加速度/力）を

評価する。

ある固有モード  $m$  における点  $i$  と応答面（機械フレーム面）  $R$  の間のモーダルイナータンス  $(f_{i,R})_m$  は、次式で定義される。

$$(f_{i,R})_m = \frac{\omega_m^2 x_{im} \sum_{e=1}^n x_{em} S_e}{2V_{Am}} \quad (1)$$

ここで、 $x_{im}$  は機械構造内の点  $i$  におけるモード変位振幅、 $x_{em}$  は機械フレーム面の領域  $R$  内シェル有限要素  $e$  の、面に対する法線方向の節点平均モード変位でシェル要素の四つの構成節点におけるモード変位の加算平均値を表している。ここでは機械フレーム各部は、すべて4節点からなる四辺形シェル要素でモデル化しているため、 $x_{em}$  は4節点（平面要素）の平均モード変位としているが、例えば、四辺形の頂点と各辺の midpoint に節点を設けた8節点からなる曲面状のシェル要素を用いれば、曲面についても同様に適用することができる。また、 $\omega_m$  は固有モード  $m$  の固有角振動数、 $S_e$  は領域  $R$  内のシェル有限要素  $e$  の面積、 $n$  は領域  $R$  内の有限要素の数、 $V_{Am}$  は機械全体のひずみエネルギーである。なお、式 (1) のモーダルイナータンスの計算に必要な諸量は、有限要素解析用入力データ、固有値解析結果から得ることができる。

このモーダルイナータンスは式 (1) からわかるとおり、加速度で評価した固有モード変位、要素面積などに比例している。これは、音が、振動面の面積と振動加速度に比例するという考えにたって定義したものである。

### 4. 評価法の適用

#### 4.1 C形タレットパンチプレスへの適用

ここでは式 (1) から計算されるモーダルイナータンスの値を機械フレーム面のすべての領域にわたって加算することによって、構造全体のモーダルイナータンスを計算する。そして、その計算結果を実験結果と比較して本評価手法の有効性を検討する。ここで、モーダルイナータンスの計算のための領域分割図を図3に示す。

原設計時（構造変更前）のC形タレットパンチプレスの機械フレームのどの部分のモーダルイナータンスの値が大きいかを図4に示す。ここではC形タレットパンチプレスを図3に示すように12個の領域面に分けて、各部分のモーダルイナータンスの寄与率を計算した。図4において、棒グラフの各棒の長さがC形タレットパンチプレスの構造全体のモーダルイナータンスの値を示しており、ここではその値が大きい上位15モードまでの結果を示している。また棒の内訳は図3の各領域のモーダルイナータンスへの寄与分に対応している。図4から特にフレームⅢおよびフレームⅠの上部のモーダルイナータンスの値が大きくなっているこ

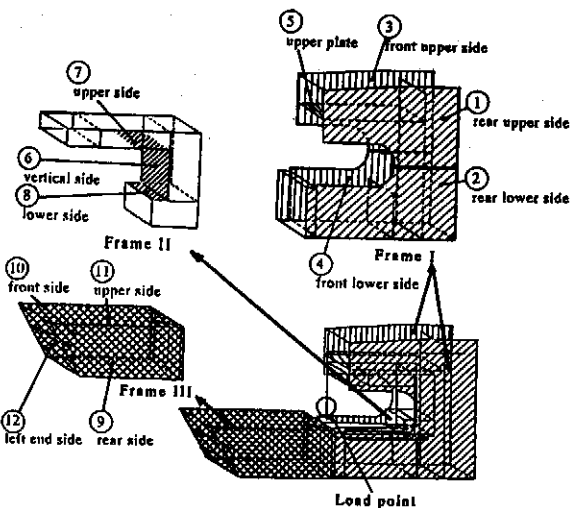


図3 モーダルイナータンス計算のための領域分割図

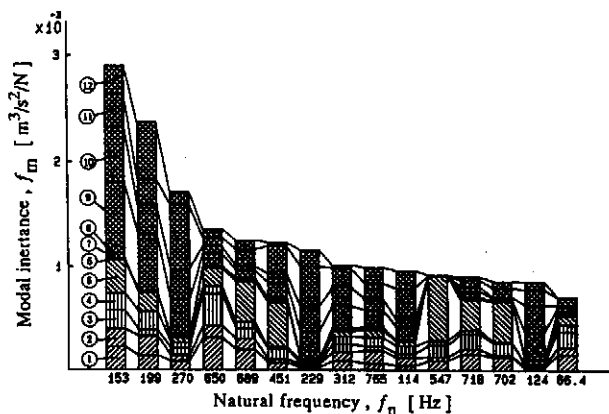


図4 原設計機の各領域における点と面のモーダルイナータンスの分布

とがわかる。これは別途行った実験の結果からいえることである。

#### 4.2 構造変更モデルへの適用

次に、本評価手法をC形タレットパンチプレスの構造変更モデルに適用し、さらにその有用性について検討した。本研究では、構造変更モデルとして、4.1節で最も振動・騒音上問題となると判断されたフレームⅢおよびフレームⅠの上部を設計変更した2種類のモデルを考えた。変更モデル1はフレームⅠとⅢの板厚を増加した。変更モデル2はこの部分にビーム部材をリブとして張り付けたモデルである。

変更モデル1と2に対する主要固有モードでのモーダルイナータンスの結果を図5と図6に示す。これらの図5、6の結果と図4の原設計段階におけるモーダルイナータンスの計算結果を比べてみると、主要固有モードの固有振動数の値は変わっているが、モーダルイナータンスの値は全体的

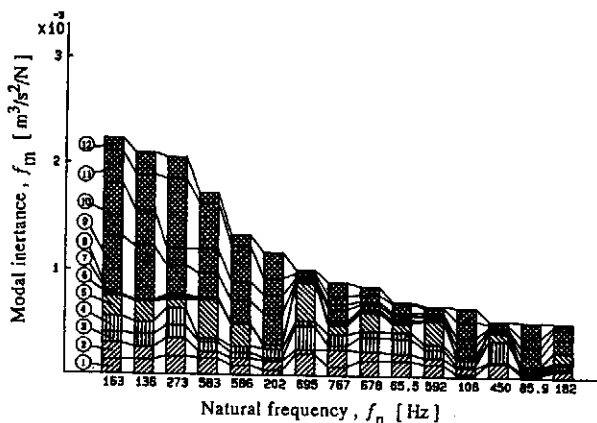


図5 構造変更モデル1の各領域における点と面のモーダルイナータンスの分布

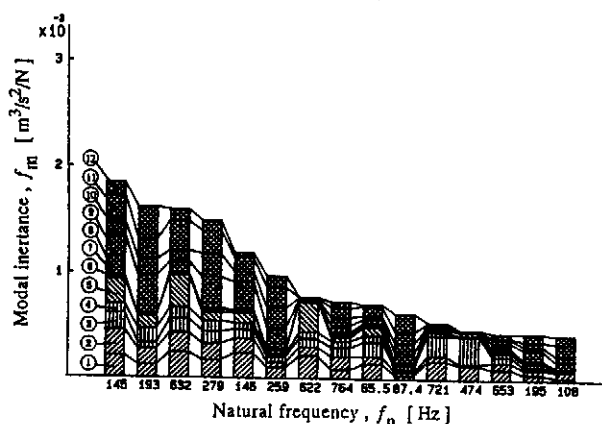


図6 構造変更モデル1の各領域における点と面のモーダルイナータンスの分布

に大幅に減少しているといえる。以上の結果から、本研究で提唱する評価手法の有用性が理解できる。

#### 5. 結 言

パンチプレスの中で特にC形タレットパンチプレスを対象として、そのフレームの振動特性を定量的に評価する方法を提案し、それが振動・騒音の低減に有効であることを示した。

本研究の成果は文献(1)に公表されている。また本研究は、財団法人 天田金属加工機械技術振興財団の助成のもとで行ったものであり、ここに謝意を表す。

#### 参考文献

- (1) 吉村允孝、小林英男、百瀬晶、足立正樹、堤正臣：CAEによるパンチプレスの制振のための評価に関する研究、日本機械学会論文集（C編）59巻、568号（1993年12月）、pp.3954 - 3961