

数値シミュレーションデータベースを用いた 知的V曲げ加工制御システム

東京都立大学 工学部 精密機械工学科
助教授 楊 明
(平成7年度研究開発助成 AF-95016)

1. 緒 言

近年、製品の多様化に伴い、より一層の高精度化が曲げ加工に対して要求されている。また、現場においては熟練技術者が加工機械を調整することにより高精度を維持しているが、近年はその熟練技術者が減少し問題となっている。そのためには加工システム自体が材料の様々な特性のばらつきに対応可能であることが不可欠となる。

それに対して、V曲げ加工における実験データをデータベースに蓄積し、オンライン制御に適用した知的V曲げ加工制御システムが開発され、高い加工精度と柔軟性があることが明らかにされたり、特に加工中のブランクと同じロットのデータベースが存在する場合、目標曲げ角度 $\pm 10'$ という高精度を達成した。しかしながら、システムの適用範囲や信頼性などの問題がまた残っており、データベースの充実が不可欠であった。

ところで、近年のコンピューター技術の発達に伴い、高精度な数値シミュレーションの適用が、塑性加工分野でも広まりつつある。しかしながら、解析対象(特に、加工機械の機械特性、環境因子など)の完全なモデリングは非常に困難であるために、その解析結果の定量的な精度には限界が生じる。

そこで、本研究では、V曲げ加工における数値シミュレーションデータに対し、モデリング時に欠如する要素を補完するものとして、形状補完フィルターを開発し、これを用いて、シミュレーションデータから、定量的にもプロセス制御に適用可能なシミュレーションデータベースを構築した。これにより、データベースの充実化を、知的V曲げ加工制御システムにおいて、より一層

の高精度化・高信頼性を達成することを本研究の目的とした。

2. シミュレーションデータベースを用いた高精度V曲げ加工システムの提案

V曲げ加工において、加工で得られるパンチ荷重-ストローク曲線をデータベースに蓄積し、加工の制御に適用する知的制御システムが著者らによって提案された¹⁾。

Fig.1はそのシステムのコンセプトを示す。各種材料のバ

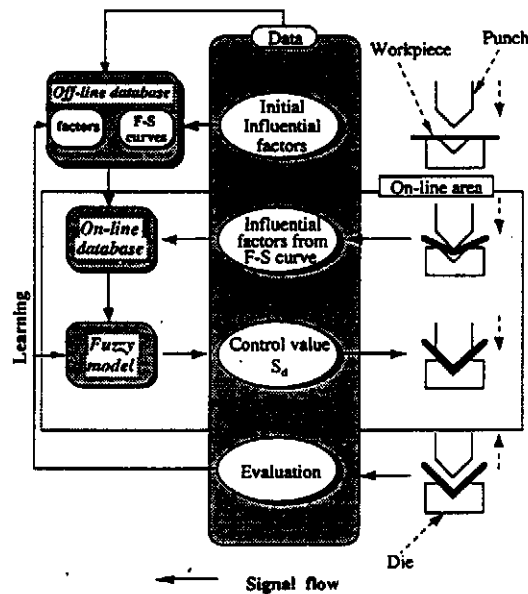


Fig.1 Concept of intelligent V-bending process system with on-line database and fuzzy inference model

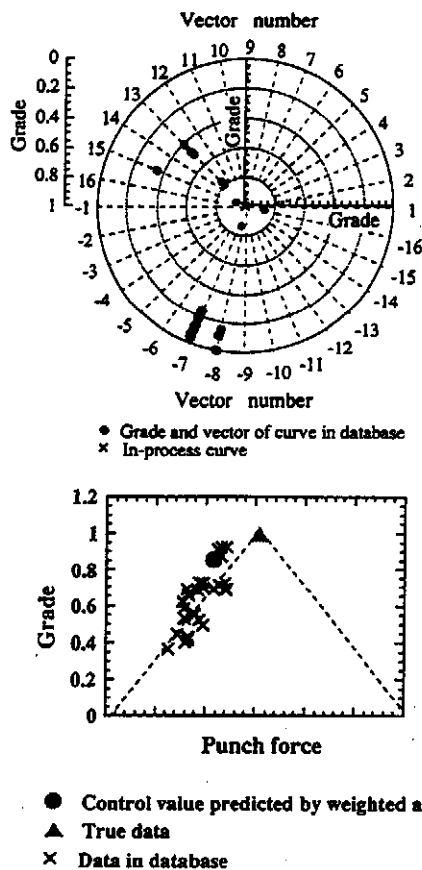


Fig.2 Defects in the control system with experimental database

ンチ荷重-ストローク曲線(以下、F-S曲線)をデータベースに持ち、加工中に曲線を直接比較することによってその違いを同定し、精度の高い加工制御を可能にした。しかし、知識となるデータベースはすべて実験によって得られた。実験データベースの問題点として、データの偏りと莫大なデータ量からその信頼性の評価である。Fig.2(a)はその偏りを示す一例である。Fig.2(a)では、F-S曲線を離散化因子によってグループ化を行い、実加工材料に対する分布度合を表すものである。図から分かるように、データベースから検索したデータは周辺に偏った分布を示す。結果として、Fig.2(b)のように偏ったデータから

実加工材料に対する制御値を算出する場合もある。この場合は、誤った推論結果が得られる。

一方、シミュレーションを用いて、データベースを構築する場合、情報を計画的に分布させることができる。実験データベースの偏りなどの問題点が解消される。しかし、現時点では、実加工に対して、シミュレーションの精度や信頼度にまた問題点が残されており、実験データベースと同様に取り扱うことはできない。

そこで、本研究では、シミュレーションデータベースを高精度V曲げ加工システムに適用できるように、形状補完フィルターを提案し、シミュレーションで得られたF-S曲線を実験結果と同様な形状に補正することによって、疑似実験データベースを構築した。そうすることによって、シミュレーションを意識することなく、

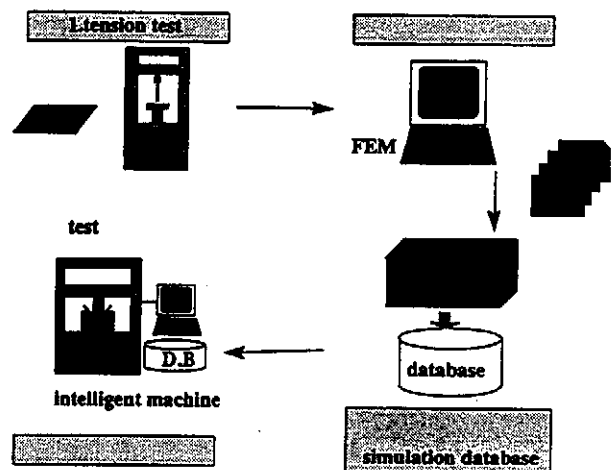


Fig.3 Concept of intelligent V-bending process with simulation database

データベースをオンライン制御システムに適用することができる。シミュレーションデータベースを用いた知的制御システム概念をFig.3に示す。Fig.3に示すように新しい材料に対して、引張試験で基本的な材料変形特性が得られ、FEMシミュレーションによって、曲げにおけるF-S曲線が得られる。そのF-S曲線をフィルターにかけることによって疑似実験のF-S曲線が得られ、それを用いてデータベースを構築する。加工時は、オンラインで知的制御システムによってそのデータベースの検索とファジィモデルの推論で制御値が得られ、高精度のV曲げ加工が行われる。

このシステムの特徴として次の項目が挙げられる。

- シミュレーションでデータベースを構築するため、曲げ試験によるデータの蓄積の必要はない。
- シミュレーションによって、その材料のばらつきに対応して計画的に周辺の曲げデータを作成することができる。
- 材料の変形特性からデータベースの構築までの作業が自動的に行われ、知識が蓄積されるため、作業者に知識やノウハウを必要としない。

3. FEMシミュレーションと形状補完フィルター

3.1 FEMシミュレーション

本研究では、供試材として公称板厚 $t=1.0\text{mm}$ のアルミニウム合金板A5182-Oを用いた。有限要素法解析は、陰解法による二次元弾塑性変形解析コードITAS-2Dを用いて行った。供試材は板厚 1.0mm に対し、板幅 100.0mm と十分に広く、平面ひずみ問題として扱った。供試材のメッシュ作成モデルはFig.4に示す。試験片は8層・612節点・536要素、工具モデルはパンチ $R0.52\text{mm}$ ・ダイ肩 $R1.0\text{mm}$ とし、左右対称であるため、モデルは全て二分の一とした。材料特性に関する入力データは、弾性域については一般的なヤング率を使用し、降伏応力は材料の引張試験結果から得た。具体的にはヤング率 $E=70\text{GPa}$ 、降伏応力 $F_y=100\text{MPa}$ とした。また、塑性域について従来は、材料の引張試験から得られた応力-ひずみ曲線(以下、 $\sigma-\varepsilon$

PUNCH

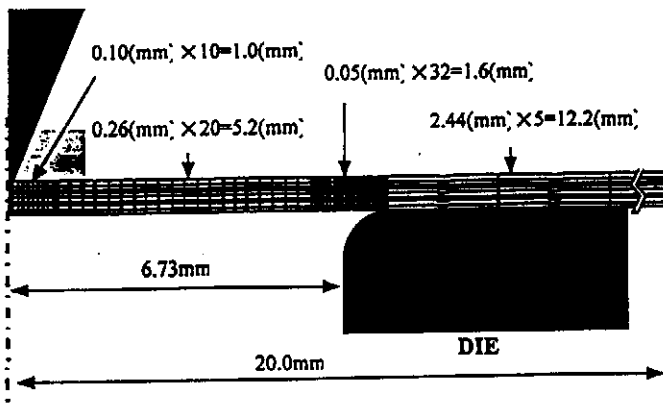


Fig.4 Mesh model of workpiece for FEM simulation

曲線)を n 乗硬化則を示す式により近似し、加工硬化指数 n 値、塑性係数 F 値を算出することにより、入力データとした。しかしながら、この式が全ての材料に同様に適用できるものではなく、材料によってはこの式を使用することにより大きな誤差が生じる。従来は、材料ごとに、算出方法・構成式を適切に選択することにより対応していたが、そのためにはある種の知識・経験が必要とする。今後、シミュレーションが、ツールとしてブラックボックス的に利用されていくには、入力データの作成にも知識・経験を必要としない普遍性が要求される。そこで本研究では、JIS13号B試験片により引張試験試験を行い、得られた σ - ϵ 曲線そのものを、塑性域の材料特性を示す入力データとした。Fig.5に σ - ϵ 曲線を示す。また、今回は供試材と金型との摩擦は考慮しない。こうして得られたシミュレーション結果と実験結果のF-S曲線をFig.6に示す。これより、加工後期の形状および荷重レベルに大きな差異が見られる。本シミュレーションで素材と金型との摩擦がないものと仮定しているが、実加工の後期において、素材と金型との摩擦の垂直成分がパンチ荷重に大きく現れる。また、曲げ変形の後期では、局部的に大変形が伴うため、シミュレーションに使用される構成式の精度にも影響されるものと考えられる。

3.2 形状補完フィルターの設計及びシミュレーションデータの補完

本研究では数値シミュレーションを理想状態での実験

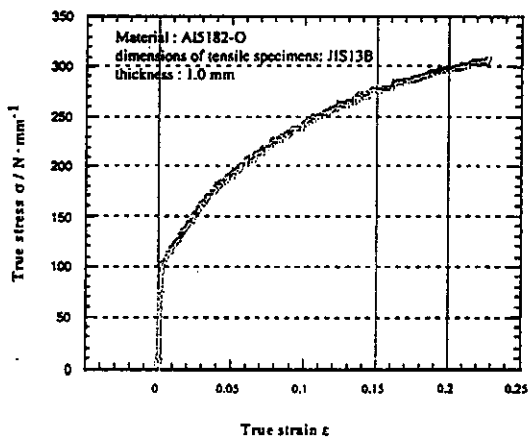


Fig. 5 Stress-strain curve of workpiece by tensile test

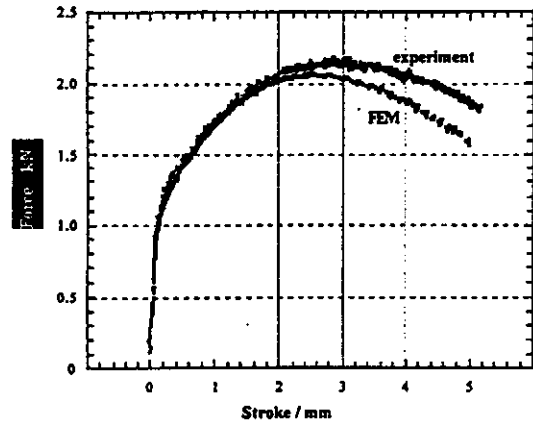


Fig.6 Discrepancy between calculated and experimental punch force-stroke curve

と仮定し、モデリングにおいて欠如された因子を形状補完フィルターによって付加することにより、精度的な補完を行う。ここで提案する形状補完フィルターとは、V曲げ加工におけるF-S曲線の形状を補正するものである。この補完のための係数は、代表的な実験曲線と、引張試験より得られたデータにより行った数値シミュレーションからのF-S曲線の両者をフーリエ解析し、比較することにより得られる。Fig.7に形状補完フィルターの原理と手順を示す。F-S曲線をフーリエ変換し、周波数領域において補正を加えた後、逆フーリエ変換することにより擬似実験データが作成される。補正は各周波数成分のフーリエ係数に対して行う(2)。フーリエ解析から得られたパワースペクトルをFig.8に示す。これより補正の際、パワースペクトルの弱い高周波成分は、F-S曲線形状への影響度が低いため無視した。具体的には実験とシミュレーションのF-S曲線の開始から約75%(パンチストローク(S)=0.0~3.8mm)の差異を定量的に分析し、これを形状補完フィル

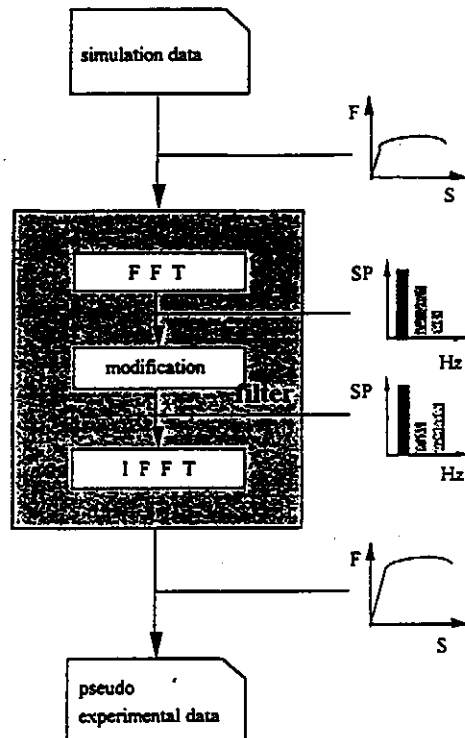


Fig. 7 Flow of shape modify filter

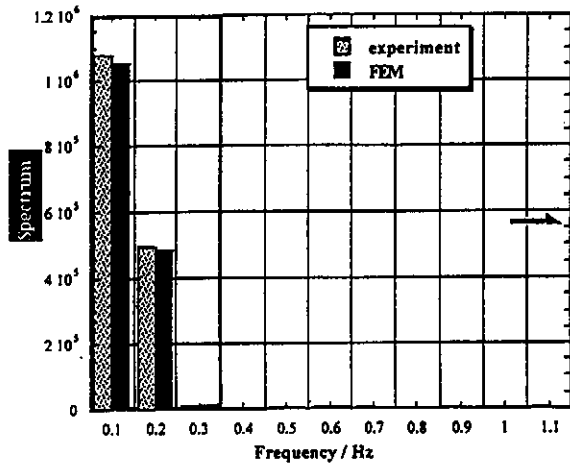


Fig. 8 Spectrum distribution of calculated and experimental F-S curve

ターとして設計した。Fig.9にこの形状補完フィルターを用いて作成した擬似実験データを示す。これより、曲線全般にわたり非常に良く実験データと一致していることが分かる。

シミュレーションと実験のF-S曲線形状に差異が存在する以上、その最終曲げ角度にも誤差が生ずる。Fig.10にパンチ押込み量と曲げ角度の90度からの誤差の関係を示す。これより二直線の切片差を用いて曲げ角度に関する補正を行う。

3.3 シミュレーションデータベースの構築

また、材料特性を計画的にばらつけてシミュレーションを行い、その結果を形状補完フィルターに通すことにより擬似的な実験データを作成し、これをデータベース化する。具体的には、入力データにおいて、降伏応力 F_y および σ - ϵ 曲線にばらつきを持たせ、8パターンのシミュレーションを行った。 σ - ϵ 曲線は塑性域を式(1)で近似し、係数にばらつきを持たせた。

ばらつきの幅は $\pm 3\%$ とした。この結果を形状補完フィルターに通すことにより得られた擬似実験データ群を用い

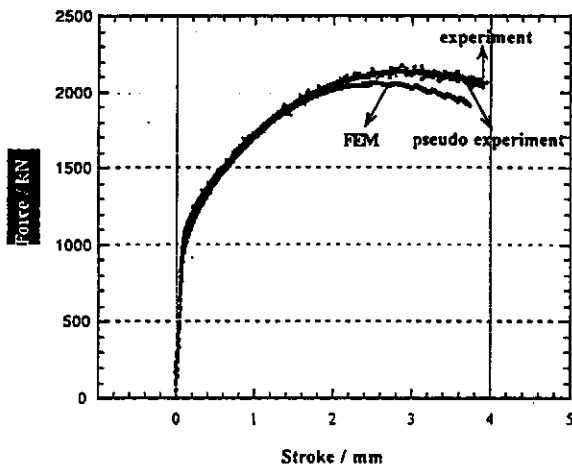


Fig. 9 Modified simulation resultant F-S curve by filter

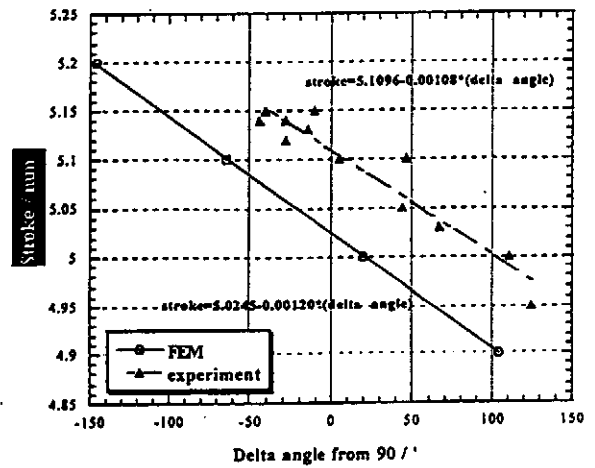


Fig. 10 Modification of calculated bend angle

て、シミュレーションデータベースを構築した。

3.4 F-S曲線の特性評価方法

本加工システムは、F-S曲線の形状類似度を基に板材の変形挙動を予測し、パンチ押込み量を決定する。しかしながら、曲線形状そのものの類似度を求めるのは困難であるため、F-S曲線からその特徴を示す離散化因子を抽出し、これを基に曲線間の類似度を求める。本研究では、F-S曲線全域評価が可能となる新たな離散化因子を選出した。Fig.11に離散化因子およびその抽出方法・範囲を示す。これらの離散化因子はそれぞれ、変形エネルギー(SA)、加工硬化特性(N)、変形抵抗強さ(Fmax)に相当する因子である。それぞれは、曲線の形状特徴を代表させたものであるとともに、V曲げ加工、特にスプリングバック現象に大きな影響を及ぼす因子であるとも言え、これにより曲線形状と加工現象をより密接に関連付けることが可能となった。

また、これらの離散化因子を用いて曲線を評価した際の、形状補完フィルターによる補正の達成度を検討した。Fig.12,13にそれぞれの離散化因子について、実験データ(●)、シミュレーションデータ(△)、擬似実

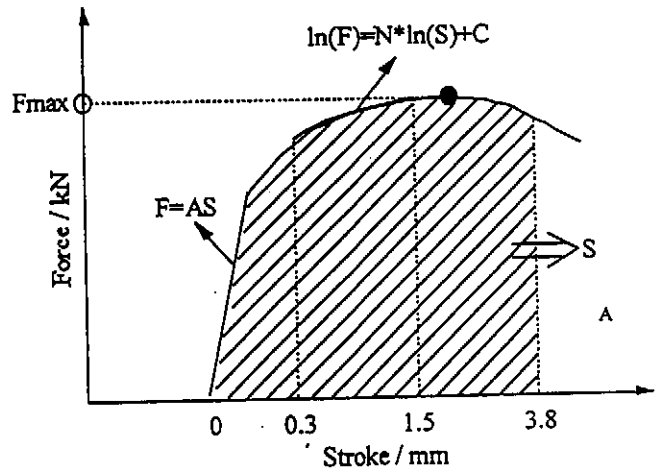


Fig. 11 Extraction of characteristic factors from F-S curve

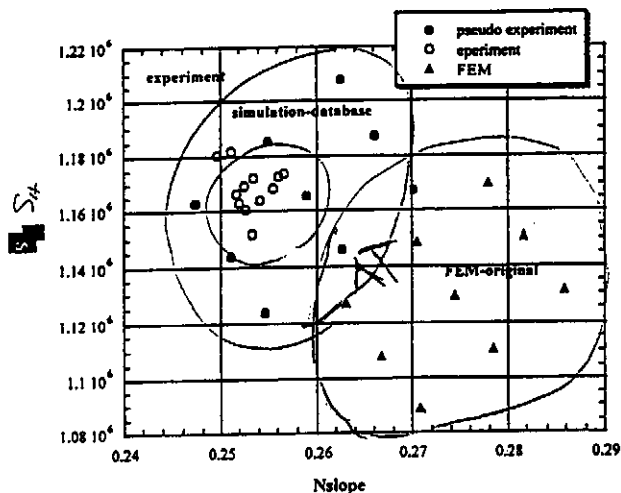


Fig. 12 Discrete factors Nslope and Sa

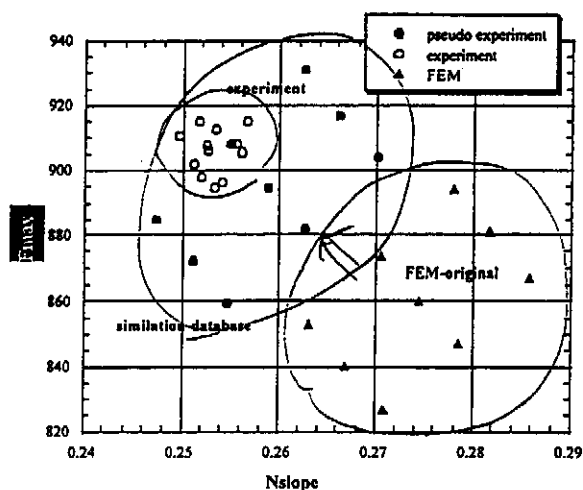


Fig. 13 Discrete factors Nslope and Fmax

験データ (○) から得られたを示す。これらにより、適度なばらつきと形状補完フィルタによる良好な補正が確認された。

4. シミュレーションデータベースのリアルタイム制御への適用

4.1パンチ押込み量決定方法

本加工システムは、著者らによって提案したマルチプロセッサを用いたリアルタイム分散処理制御システム²⁾を用いてV曲げ加工の制御を行った。具体的には加工中にデータベースから必要な情報を検索し、ファジィ推論モデルにより加工中に得られたF-S曲線とデータベースに蓄積されているデータのグレード(適合度)を算出し、各データのSd(目標曲げ角度に曲げるためのパンチ押込み量)とグレードから重み付平均法を用いて最終パンチ押込み量Sdを決定する。

4.2オンライン実験結果および考察

新たに構築したシミュレーションデータベース(データ数8個)を用いて実験を行った。パンチ速度は0.37mm/s、目標曲げ角度は90度とした。1回の曲げ加工は約20秒で終

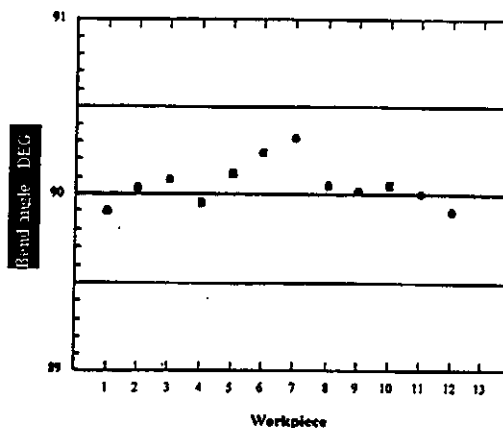


Fig. 14 Accuracy of bend angle by intelligent process control system with intelligent database

了した。Fig.14に得られた最終曲げ角度を示す。これより、 $90^\circ \pm 15'$ の精度に収まる信頼性は約92%、 $90^\circ \pm 10'$ には83%であった。これより実際のV曲げ加工実験データを使用していないにも関わらず、実験データベースを用いた場合と同程度の高精度が達成されたといえる。また、著しく曲げ角度の異なるものも無く、シミュレーションデータベース内のデータのばらつきが良好であったとともに、材料特性のばらつきによる相対的な変化量がFEMシミュレーションにより適切に解析されていることが確認された。

5. 結 言

本研究では、FEMシミュレーションを用いてシミュレーションデータベースを構築し、データベースの充実化を図り、V曲げ加工制御の高精度化・高信頼性を達成できる新しい知的制御システムを提案し、実加工においてその有効性を実証した。具体的にはこのシステムの特徴として以下のように挙げられる。

(1)V曲げ加工のFEMシミュレーションによるF-S曲線をフーリエ解析することにより、実験とシミュレーションの差異を埋める形状補完フィルタを提案し、設計した。

(2)F-S曲線全域より雑散化因子を抽出することにより、より高精度な曲線の同定が可能となった。

(3)形状補完フィルタを用いて擬似実験データを作成することによりシミュレーションデータベースを構築した。また、シミュレーションデータベースを知的V曲げ加工制御システムに適用させることにより、A5182-Oに対して $\pm 15'$ の高精度曲げを達成した。

今後は、他の材料への適応性を調べるとともに、シミュレーション方法、フィルタの設計における普遍性を探ることが課題である。

参考文献

- 1)小島ほか：平7春塑加講論(1995),211
- 2)小畑秀文：CAIデジタル信号処理：コロナ社。